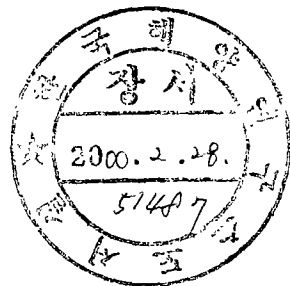


BSPE99725-00-1235-4

남해 물질순환과 생지화학 환경연구

Transport and Biogeochemical Processes  
in the Cheju Strait

한국해양연구소



# 제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “남해 대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구사업”의 연차 보고서로 제출합니다.

1999. 12. 31.

총괄연구책임자 : 홍 기 훈

참여연구원 :

- 해류 및 해수순환 : 장경일 (분야책임자)  
석문식, 전동철, 남수용, 황상철,  
이하웅, 장영석, 김도연, 김운배,  
박성혜, 장유순
- 협기성 내만환경 : 양동범 (분야책임자)  
김경태, 유 준, 진용현, 이강만, 이상미
- 대륙붕화학물질수지 및 순환 : 정창수 (분야책임자)  
김석현, 김영일, 문덕수, 박준건, 서승모  
박수용, 이현미, 최준선, 이혜순, 김찬미  
최영업, 최승민, 도가영, 양성렬(광주대)
- 저서생물 생화학 특성 : 조기웅 (분야책임자)  
신종헌, 서영완, 노정래, 이희승, 정경화  
모근수
- 남해의 퇴적환경 : 이희준 (분야책임자)  
우한준, 추용식, 박은순, 권수재, 라진열,  
김광산, 이연규(여수대)
- 치자어와 어류군집 : 유재명 (분야책임자)  
김성, 이은경, 이태원(충남대)





# 요 약 문

## I. 제 목

남해 대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 필요성

- 남해 대륙붕은 황해, 양자강 등 중국 연안수와 남방 열대 쿠로시오수가 혼합되어 궁극적으로 동해로 유입되는 길목에 위치한 해류 지배 역으로 우리나라 경제적으로 주요한 해역이나 해양생산력과 환경질을 결정하는 해양 생지화학 과정 연구 전무
- 남해 동방해류가 뚜렷이 존재하나 그 변동역학 연구 전무
- 남해는 해류 특성으로 한대성과 아열대성 생물종 혼재 특이해역으로 유용생물 물질자원 개발 가능성이 높은 해역임
- 항만 및 해안산업지대, 수산업의 지속가능 경제 성장을 위하여 인위적 물질순환 변동방식 규명 필요
- 남해는 양식 어장과 대규모 산업항만 밀집 지역으로 적조 및 해상 독성 물질 유출 사고 다발지역으로 그간 분지규모의 종합환경연구 전무
- 남해 연안은 현생벨의 활발한 퇴적지로서, 직접적인 원인이 되는 육상기원 부유물질의 거동규명 필요
- 남해의 해황과 해수순환을 이해하고 정확히 재현하며 나아가 해양변동을 예측하기 위해 남해의 개방경계에 해당되는 제주해협, 대한해협, 제주도-대마도 사이를 통해 남해로 유출입 되는 해수 및 화학물질 특성과 해류분포에 대한 정량적 규명 필요.

### 2. 연구개발 (3년) 최종 목표

- 지속가능한 남해 이용과 개발을 위한 환경보전 종합 시스템 구축을 위한 기반 해양 생지화학과정 규명을 최종목표로 함
- 제주해협을 통한 해수교환의 중·장기 변동성 파악
- 남해 친생물원소 계절 변동성 규명
- 제주해협 통과 화학물질 플럭스 산정
- 남해대륙붕 화학물질 수지 및 순환 정량
- 해수순환모델을 이용한 남해의 평균적인 해수순환 재현
- 저서생물의 생화학특성 규명
- 남해 연안역의 부유물질 퇴적작용 파악

- 제주도 주변해역의 자치어 종 조성 파악
- 난류성 종의 지리분포 조사

### 3. 3차년도 연구 목표

- 기존 자료 분석을 통한 남해의 계절별 해황, 해양기상 및 제주해류의 계절변동 파악
- 제주해류의 시·공간적 분포와 해수수송량의 정량화
- 초음파 해류계 계류에 의한 제주해류 장기 변동성 파악
- 해양순환모델을 이용한 남해의 여름철 3차원 해수순환 재현
- 혐기성 환경에서의 영양염 및 산소수지 연구
- 내만의 중금속원소 거동 연구
- 남해 친생물원소 계절별 분포특성 및 변동성 규명
- 제주해협 통과 연간 화학물질 플럭스 산정
- 남해로의 대기오염물질 기여도 규명
- 남해해수 기원 및 연안수 기여율 규명
- 남해 해수에 포함된 지방성분의 분석을 통한 물질의 흐름 추정
- 남해 서식 저서 생물의 생화학적 유용성분 확인
- 부유퇴적물의 출입량 계산 및 만 내의 퇴적작용 규명
- 제주도 주변해역의 자치어 종 조성 파악
- 수심이 얕은 연안역에 적합한 새로운 자치어 채집기기의 개발
- 새로운 자치어 채집기기의 특성 연구
- 난류성 종의 지리분포 조사

### III. 연구개발의 내용

1. 한국 남해 백서 발간 준비완료(초고 완성) : 총 16편 논문 게재

#### 2. 해양조사 실시

○ 동계 조사

조사해역 : 제주해협

조사일정 : 1999년 2월 22일 ~ 2월23일

조사선박 : 한국해양연구소 연구선 이어도호

주요 조사항목 : 용존무기영양염류, 해수 유기물 (유기탄소, 유기 질소),  
일차생산력, 라듐 동위체, <sup>210</sup>Po, 대기분진, 지방 성분 (해수)  
용존산소, 수온 및 염분, 해류(조석 및 조류)

○ 춘계 조사

조사해역 : 대한해협

조사일정 : 1999년 5월 3일 ~ 5월15일

조사선박 : 미국 스크립스 해양연구소 연구선 Roger Rovellet호 (미국해군연구소 공동)

주요 조사항목 : 용존무기영양염류, 해수 유기물 (유기탄소, 유기질소), 수은 및 염분, 해류 (조석 및 조류)

○ 하계 조사

조사해역 : 제주해협

조사일정 : 1999년 8월 4일 ~ 8월 6일

조사선박 : 이어도호

주요 조사항목 : 용존무기영양염류, 용존산소, 해수 유기물(유기탄소, 질소), 일차생산력, 라듐동위체,  $^{210}\text{Po}$ , 대기분진, 해수 지방성분, CTD, 해류 (조석과 조류)

○ 추계 조사

조사해역 : 제주해협

조사일정 : 1999년 10월 9일 ~ 10월23일

조사선박 : 미국 스크립스 해양연구소 연구선 Roger Rovellet호 (미국 해군연구소 공동)

주요 조사항목 : 용존무기영양염류, 해수 유기물 (유기탄소, 유기질소),  $^{210}\text{Po}$ , 수은 및 염분, 해류 (조석 및 조류)

### 3. 해류 및 해수순환

#### 1) 기존 연구결과 분석

남해의 해수와 해류분포에 관한 국내외 논문 검토

#### 2) 기존자료 분석

- 격월별 남해의 평균적인 해황 파악
- 남해 연안역의 강수량 장기 변동성 및 남해 해상풍 월별 평균적 분포 파악
- 제주-추자간 해수면 변동을 이용한 제주해류의 계절 변동 파악
- 제주해협 내 장기 해류관측 자료의 분석

#### 3) 해양조사

- 음향도플러 유속단면 관측계 (ADCP)와 CTD를 이용한 제주해협 해류 및 해수분포 조사

1997년 3월 21일~3월 25일 (제주도-진도)

1997년 9월 29일~9월 30일 (제주도-보길도)

1998년 9월 25일~9월 26일 (제주도-보길도)

1998년 11월 24일~11월 25일 (제주도-보길도)

1999년 2월 23일~2월 25일 (제주도-보길도)

1999년 8월 4일~8월 5일 (제주도-보길도)

- 음향도플러 유속단면 관측계 (ADCP)와 CTD를 이용한 대한해협 해류 및 해수분포 조사

- 1997년 3월 25일~3월 26일 (국립해양조사원)
- 1997년 7월 14일~7월 15일 (국립해양조사원)
- 1997년 10월 2일~10월 3일 (국립해양조사원)
- 1997년 11월 27일~11월 28일 (국립해양조사원)
- 1998년 4월 26일~4월 28일 (국립해양조사원)
- 1998년 7월 6일~7월 7일 (국립해양조사원)
- 1998년 9월 8일~9월 9일 (국립해양조사원)
- 1998년 11월 26일~11월 27일 (국립해양조사원)
- 1998년 11월 28일~11월 29일 (한국해양연구소, 연화도-대마도)
- 음향도플러 유속단면 관측계 (ADCP)와 CTD를 이용한 남해 해류 및 해수 분포 조사
  - 1997년 3월 19일~3월 26일 (제주도 동부 ADCP 관측)
  - 1997년 9월 1일~9월 2일
  - 1998년 4월 5일~4월 11일
  - 1998년 9월 20일~9월 24일
  - 1998년 11월 25일~11월 28일 (금오도 남부 ADCP 관측)
- 한·미 공동조사
  - 1999년 5월 5일~5월 15일: 대마도 북동쪽 N-line 6개 위치, 대마도 남서쪽 S-line 6개 위치 ADCP 계류  
CTD 관측 (N: 5월 6일~5월 7일, S: 5월 8일~5월 10일)
  - 1999년 10월 9일~10월 22일: ADCP 회수 (N1 회수 실패) 및 재계류, 대마도 북동쪽 N-line 6개 위치, 대마도 남서쪽 S-line 6개 위치 및 대한해협 서수도 1개 위치 (C1) ADCP 계류  
CTD 관측 (N: 10월 11일~10월 12일, S: 10월 15일~10월 17일)
- TRBM (Trawl-Resistant Bottom Mount)-ADCP를 이용한 제주해협 장기 해류관측
  - 1999년 3월 4일~12월 23일 (15 m~118 m 까지 4 m 간격, 30분 간격)
- 4) 3차원 수치모델과 관측자료를 이용한 남해 1997년 8월~10월 3차원순환 재현  
조석 강제력, 개방경계를 통한 해수 유·출입, 해표면 열·염플럭스에 의해 강제된 3차원 해수순환 재현

#### 4. 혐기성 내만환경

- 마산만 및 서부진해만 해역에서 하계 현장조사 실시
- 혐기성환경 발생에 따른 영양염 및 용존산소 분포변화 연구
- 용존성, 입자성 중금속 및 퇴적물중 중금속의 내만해역내 거동

#### 5. 대륙붕 화학물질 수지 및 순환

- 계절별 친생물 원소 분포 특성 및 변동성 파악
- 라듐 동위원소비 이용 해수기원 규명
- 계절별 제주해협통과 화학물질 플럭스 정량

- 건상낙하 미량금속 및 산성강하물 플럭스 정량
- 남해 대기분진 천연 침적물 연속채취 관측소 설치운영  
한국해양연구소 거제도 장목분소 옥상 (1997년 10월~현재)
- 수계 및 해저퇴적물에 함유된 유기물 분포특성 규명
- 해저퇴적물 축적율과 초기속성 과정 평가

#### 6. 저서생물 생화학 특성

- o 제주도 연안의 자치어 종 조성에 관한 연구
  - 조사해역 : 제주도 연안역
  - 현장조사 : 1999년 9월, 10월
  - 차치어 채집기기 : bongo net, 소형표층트롤네트
  - 자치어 균집, 소형표층트롤네트 개발
- o *Laemonema nana* Taki 자치어의 지리적인 분포와 형태 발달에 관한 연구
  - 조사해역 : 제주도 연안역
  - 현장조사 : 1998년 5월, 8월, 11월, 1999년 5월, 9월, 10월, 12월
  - 차치어 채집기기 : bongo net, 소형표층트롤네트

#### 7. 남해의 퇴적환경

- 홀로세 해침작용 및 퇴적체 분포 파악
- 박스코아 분석을 통한 남해 및 서남해의 각 소퇴적환경 구분
- 가막양과 여자만의 퇴적환경에 대한 기존 자료를 체계적으로 정리
- 진해, 마산만과 여자만에서 정선관측을 통한 부유물질 출입량 계산
- 이러한 결과를 토대로 남해 연안 퇴적환경의 특징을 구체적으로 제시

#### 8. 차치어와 어류균집

- o 제주도 연안의 자치어 종 조성에 관한 연구
  - 조사해역 : 제주도 연안역
  - 현장조사 : 1999년 9월, 10월
  - 차치어 채집기기 : bongo net, 소형표층트롤네트
  - 자치어 균집, 소형표층트롤네트 개발

### IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

#### 1. 해류 및 해수순환

##### 1) 기존자료의 분석

- 남해의 격월별 평균 해황 분석

겨울과 봄철 남해의 수층은 수직적으로 균질하며, 해수특성은 제주해협 서편에 쿠로시오 기원 제주난류수와 황해냉수간에 형성된 전선역 남쪽에 분포하는 제주난

류수가 대부분 제주해협을 통해 남해로 유입되어 고온, 고염의 특성을 보인다. 천해인 남해의 연안역 해수는 제주해협을 통해 남해로 유입된 고염의 해수가 국지적인 기상의 영향으로 냉각으로 저온, 고염의 특성을 보인다. 여름과 가을에는 계절적 수온약층이 형성되어 수층이 2층구조를 보이며, 수온약층의 상부에는 양자강 회석수를 포함한 연안수가 출현하여 표층해수가 저염화 한다. 수온약층 하부에는 연안수와 혼합으로 저염화한 제주난류수와 변질된 황해냉수가 제주해협을 통해 남해로 유입된다.

- 해수면 자료의 분석

제주와 추자도에서의 해수면과 두 관측점간의 해수면 차이는 연변화가 우세하여 7월~11월에 해수면 차이가 높게 나타나고 12월~3월 사이에는 낮게 나타나고 있어 제주해협에서 동향하는 제주해류가 여름과 가을에 강하고 겨울에 약화됨을 암시한다. 스펙트럼 분석에 의하면 해수면 차이는 연변화보다 덜 뚜렷하나 3개월, 4개월, 8개월 및 2년 주기에서도 spectral peak 가 나타난다.

- 남해안 강수량 자료의 분석

남해안 지역의 강수량은 여름철에 집중되어 나타나며 월평균 강수량의 시계열 자료는 엘니뇨와 관련된 2~7년 사이의 경년변동과 10년 이상의 장기 변동성을 나타낸다. 남해안에서의 강수량은 선형적으로 증가하는 경향을 보이며 증가율은 7 mm/10 yrs~80 mm/10 yrs에 달한다. 강수량의 변동에 영향을 미치는 요인은 태풍과 아열대 폭풍의 빈도수이며 엘니뇨 기간 중 태풍의 빈도수가 감소하는 경향이 있지만 높은 상관관계를 나타내지는 않는다.

- 남해의 월평균 해상풍 분포

남해에는 9~3월까지 북풍계열의 바람이 우세하며 최대 풍속은 8 m/s에 달한다. 9월과 10월에는 상대적으로 미약한 북동풍이 불었다가 11~1월에는 강한 북서풍이 그리고 2월에는 북풍이 우세하다. 북풍은 3월경부터 미약해지기 시작하여 4~6월에는 바람이 미약하고 7월부터는 남서풍이 불기 시작하여 8월까지 지속된다.

- 제주해협 장기 해류관측 결과 분석

제주해협 남부와 횡간수도에서 관측된 15일 이상의 해류관측 자료에 의하면 제주해협에서는 동서-남북방향의 왕복성 반일주조류 (M2)가 가장 우세하며 폭이 좁은 횡간수도에서의 M2의 진폭은 제주해협 남부에 비해 2배 이상 크게 나타난다. 두 군데 모두 평균해류는 동향이며 전 관측기간에 걸친 평균 유속은 10 cm/s를 보이며, 3~7일 주기의 저주파 변동성이 우세하다.

2) 해양 관측 결과

- 제주해협과 대한해협의 계절별 해수특성, 해류분포 및 해수 수송량

제주해협내 해수의 수층은 3월과 4월에는 수직적으로 균질하며 수온과 염분은 남해 연안쪽에서 제주도쪽으로 증가한다. 3월과 4월의 염분분포에 의하면 이 시기의 제주해협내 해수는 대부분 쿠로시오로부터 기인한 해수로 꼭 차있음을 알 수 있다. 9월에는 계절적 수온약층이 형성되는데 1997년과 9월과 1998년 9월에 획득한 자료에 의하면 제주해협 내 해수의 수온, 염분분포가 연변동 함을 시사한다. 9월에는 수온약층 상부에 염분 동중국해나 황해에서 기원한 염분 32.0 미만의 해수가 나타나며, 쿠로시오로부터 기원한 상대적으로 염분이 높은 해수는 수온약층 하부의 제주

도에 인접한 제주해협 골에 나타난다. 계절적 수온약층은 11월에는 소멸한다.

제주해협 내 해류의 주된 방향은 동향류이며 3월과 4월에는 15 cm/s 이상의 강한 동향류가 제주도 인접한 곳에 나타나는 반면에 8월, 9월 및 11월에는 20 cm/s 이상인 강한 동향류의 핵이 3월이나 4월에 비해 북쪽에 나타난다. 동향류의 수직적인 유속 차이는 여름과 가을에 크고 겨울과 봄철에는 상대적으로 약하다. 남해 연안역 부근의 연안류는 세기가 약하며 서쪽으로 흐르는 경우가 종종 나타난다. 1997년 9월에는 연안류가 20 cm/s 이상으로 강했는데 이는 연안역에서의 등온선들이 연안쪽으로 가면서 표층으로 부상한 것과 연관이 있는 것으로 사료된다. 1998년 9월 연안류가 미약했을 경우에는 등온선이 다소 저층으로 향하였다.

제주해협에서 관측된 해류분포에 의해 계산된 해수 수송량은 기존에 알려진 대한해협에서의 대마난류의 수송량 변화와 유사하게 8월에 최대치 (0.66 Sv) 를 보이고 4월에 최소치 (0.37 Sv) 를 보이며, 최대 수송량은 최소 수송량에 비해 약 1.8배 정도 크다. 대한해협에서와 마찬가지로 제주해협에서의 수송량 변화는 제주해협에서의 남북방향의 해수면 차이의 연변화와 유사하며, 대한해협 서수도에서의 해수 수송량의 30-40%는 제주해협에서 기인한다. 역학적 방법에 의해 계산한 해수 수송량은 실측된 수송량의 50% 미만으로 나타나고 있어 전체 수송량에서 순압성분이 크게 기여함을 알 수 있고 제주해협에서의 수송량의 변화는 주로 순압성분 변화에 의해 일어나는 것으로 사료된다.

#### - 제주해협에서의 장기 해류관측 결과

1999년 3월 4일~12월 23일 기간의 약 9개월 20일에 걸쳐 제주해협 남부 수심 124 m인 지점에서 TRBM-ADCP에 의한 해류관측을 실시하였다. 전 관측기간의 평균 해류는 50 m에서 71.2° 방향으로 15.45 cm/s이며, 118 m에서 62.4° 방향으로 3.89 cm/s로서 두 수심간의 유속차이는 약 12 cm/s이고 수심이 깊어질수록 유향이 반시계 방향으로 바뀌는 경향이 있다. 50 m에서 최대 동서방향 유속은 110 cm/s에 달하고, 118 m에서는 75 cm/s에 달한다. 전 관측기간 동안 저층 부근에서의 수온 변동 범위는 12.08~18.52℃를 보였다.

#### 3) 순환모델 결과

해양순환모델 (POM)을 이용하여 199년 여름철과 가을철 (8월~10월) 남해의 평균적인 3차원 순환을 재현하였다. 해수순환은 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입과 열·염 플럭스, 해표면을 통한 열·염 플럭스 및 바람 강제력에 의해 유도되도록 설정하였다. 모델에 사용된 입력자료는 국립수산진흥원에 의해 1997년 8월과 10월에 남해에서 관측된 자료와 한국해양연구소와 국립해양조사원에 의해 제주해협과 대한해협에서 1997년 9월에 관측된 일평균 해류분포 자료이다.

순환모델 결과는 전체적으로 제주해협에서 유입되는 해류, 남해 중앙부에서 등수심선을 따라 흐르는 해류 및 대한해협에서 강한 해류의 양상을 잘 재현한다. 계산된 수온, 염분분포는 연안역에서 관측값에 비해 수온과 염분이 높게 나타나고 있으나, 전반적으로 관측된 분포를 잘 재현하고 있다. 3차원 모델 결과는 표층과 저층에서의 유속 및 유향이 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 표층에서의 유속분포는 약 5~20 cm/s의 크기로 남해 연안역에서 외해역으로 유출되는 연안역의 해수흐름

과 약 25~85 cm/s의 크기로 북동향하는 외양역의 해류가 80 m 등수심선을 경계로 구별되고 있음을 보인다. 저층에서 유속분포는 서쪽경계와 남쪽경계에서 유입되는 대부분의 해수가 5~15 cm/s의 크기로 연안을 향해 북향하는 흐름을 나타낸다. 표층수온의 분포는 해안선을 따라 평행하게 분포하고 대한해협에서 강한 수온구배가 나타나고 있으며, 저층에서는 고온의 대마난류수가 대부분 차지하고 있다. 남해 연안역에 나타나는 고염의 해수는 제주도-대마도간에 분포하는 고염의 해수가 저층을 통해 공급되는 것으로 사료된다. 순압모델과의 비교 분석 결과는 열·염 강제력이 북동향하는 표층해류의 폭을 감소시키고, 유속의 크기를 강화시키는 역할을 하는 것으로 나타난다. 조석 잔차류의 크기는 평균적인 해류의 크기에 비해 대단히 작아 조석강제력이 평균 순환에 미치는 영향은 작지만, 해류의 크기와 비슷한 강한 조류의 영향은 바닥의 마찰을 강화시켜 평균 유속을 약화시키는 역할을 한다.

## 2. 혐기성 내만환경

1999년 8월 마산수로의 표층수에서 염분은 23.72~26.31psu였으며 저층수에서는 대체로 31psu 이상이였다. 서부 진해만해역에서는 표층수의 염분이 27psu 정도였으며 저층에서는 32psu 내외였다. 질산염은 내만안쪽에서 육수유입의 영향으로 141.5  $\mu$ M로 매우 높았으며 마산수로에서는 표층수에서 1  $\mu$ M 이하였다. 마산내만 돌섬주변 정점의 저층수는 탈질소반응에 따라 1  $\mu$ M 이하의 낮은 질산염 농도를 보였다. 인산염은 부도부근의 정점들에서 마산내만 보다 훨씬 높게 나타나 공급원이 다양함을 시사한다. 조사해역에서는 저층수중 용존산소 농도가 낮고 pH가 낮아 퇴적물로부터의 인산염 용출이 일어나는 것으로 보인다.

용존산소는 표층으로부터 저층으로 급격히 감소하는 수직분포를 보였다. 모든 정점에서 저층수중 빈산소현상이 나타났으며 두 정점에서 무산소 현상을 나타냈다. 돌섬주변의 정점에서는 수온약층 위로부터 아래로의 용존산소 확산량이 648ml O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day로 추정할 수 있고 저층수의 무산소환경이 계속 유지되기 위해서는 이 보다 높은 산소소비율이 필요할 것이다. 1998년의 기존자료로 부터 이 정점의 저층수중 산소소비율은 155ml O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day로 추정할 수 있으나 표층으로부터의 용존산소 확산과 수평적인 이동·확산을 고려하면 실제 산소소비율은 이보다 훨씬 클 것으로 보인다.

마산수로에서 표층수의 용존성 Cd, Zn은 마산만 안쪽에서 바깥쪽으로 가며 점차 감소하였고 Pb의 경우 안쪽에서부터 바깥쪽으로 가며 증가하는 경향을 보였다. 저층수중 Cd, Cu, Pb, Zn의 농도는 마산수로의 경우 표층수보다 대체로 낮은 농도를 보였고 Co는 저층수에서 높은 값을 보였다. 서부진해만 해역에서 용존성 Cd는 표층에서 높았고 용존성 Cu, Co는 표층보다 저층이 훨씬 높은 값을 보였다. 표층수중 입자성(acid-leachable fraction) Cu, Cd, Pb는 마산내만 쪽에서 높고 바깥쪽으로 가며 점차 감소하는 경향을 보였다. 입자성 Cd, Cu, Pb, Zn은 표층보다 저층에서 대체로 높은 함량을 나타냈다. 마산수로의 표층에서 Cu, Cd의 분배계수 K<sub>d</sub> 값은 마산내만으로부터 멀어짐에 따라 감소세를 보였다. 이 두 금속은 도시하수로부터 기인한 부유물질에 잘 흡착하는 특성이 있어 마산내만으로부터의 하수유입에 영



향을 받는 듯하다. 본 조사에서는 저층수의 DO 포화율이 낮을수록 Cd, Cu, Pb, Zn의  $K_d$  값이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이들 원소들의 용존성 형태 감소원인은 명확하지 않은데 저층수가 혐기성 상태가 아닌 곳이 많으며 환원 상태의 퇴적물로부터 발생한  $HS^-$ 나  $S^{2-}$ 의 존재 여부가 확인되지 않았기 때문이다. 마산수로에서는 Al, Zn, Cu, Cd, Pb의 퇴적물중 농도가 내만으로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보였고 As, Cr, Ni 등은 마산수로 중앙부에서 높은 값을 나타냈다.

### 3. 대륙붕 화학물질 순환 및 수지

#### ● 친생물원소 분포특성

1997년부터 1999년까지 친생물원소들에 대한 계절변화를 이해하기 위해 제주해협 동일한 관측선상에서 해양조사를 실시하였다.

일반적으로 친생물원소들은 계절변화에 따라 뚜렷한 특징을 갖는다.

겨울 (1999년 2월)에는 활발한 표·저층수간의 수직혼합으로 인해 제주부근 해역의 고온고염수 ( $T > 14^\circ\text{C}$ ,  $S > 34.2$  psu)와 보길도 인접해역의 저온저염수 ( $T < 9^\circ\text{C}$ ,  $S < 33.2$  psu)로 저온저층수를 보이는 다른 계절과는 달리 크게 두단으로 나누어진다. 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 표층 수온저하로 인한 활발한 수직혼합으로 전 계절에 걸쳐 가장 높다.

아직까지 겨울특성을 보이는 이른 봄 (1998년 4월)에는 수심이 얕은 연안역에서는 표, 저층수간의 수직혼합으로 인한 저층수로부터의 공급과 또한 육상으로부터의 공급으로 인해 친생물원소들의 농도가 높지만 고염의 대마난류 영향을 보이는 제주근해 해역은 상대적으로 낮다. 그러나 제주근해 해역 저온 저층수 ( $T < 15^\circ\text{C}$ ,  $34.2 < S < 34.5$ )에서 이들 농도들이 급격히 증가하였다. 해저퇴적층의 구성이 실트와 점토로 구성되어 있는 연안역에서 입자성부유물질 농도는  $5\text{ mg l}^{-1}$  이상으로 높고, 서쪽에서 동쪽으로, 연안에서 제주도쪽으로 갈수록 감소하여 남해로 유입되는 퇴적물중 상당량이 한반도 서남해역의 연안역에서 기원되고 있음을 암시한다.

여름 (1999년 8)에는 장마로 인한 상당량의 육상수의 유입으로 인해 연안역 뿐만 아니라 제주근해 해역의 표층수 염분도 32.6 psu 이하이다. 따라서 수심 10~30 m에 형성된 강한 성층에 의한 저층으로부터의 영양염 공급제한에도 불구하고 표층수에서의 영양염류 농도는 춘계 (4월)보다 높다. 특히 N/P 비가 16.8로서 Redfield 비와 유사한 4월과는 달리 8월 표층수의 N/P비는 30 이상으로서 인산이온에 비해 상대적으로 질산이온이 풍부하다.

가을 (1998년 9월 및 11월)에도 육상수의 영향으로 제주근해 해역의 표층수 염분은 34 psu 이하이고, 영양염류 농도 또한 춘계보다 높다. 저온 저층수 ( $17 < T < 15^\circ\text{C}$ ,  $34 < S < 33.5$ )에서의 용존산소 함량은 전계절중 가장 낮으나, 영양염류 농도는 가장 높다. 이는 저층에 가라앉은 유기물의 분해로 무기화 (reminalization)되고, 강하게 형성된 밀도약층이 생물활동이 활발한 표층으로의 공급을 제한하여 저층에서 축적되기 때문이다.

● 유기물 분포 특성 및 퇴적물의 유기탄소 함량분포 및 분해

제주해협에서 계절별 입자성 유기탄소 (POC) 함량 범위는 동계 (1999년 2월), 춘계 (1998년 4월), 하계 (1999년 8월 및 1998년 9월), 추계 (1998년 11월)에 각각 29~373, 50~2576, 48(68)~122(347), 37~112  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 춘계에 가장 높고 연안역에서 제주도쪽으로 갈수록 급격히 감소한다. 유기질소 (PON) 함량의 계절별 분포는 각각 5~57(동계), 춘계 9~992(춘계), 8~21(하계), 6~19(추계)  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 유기탄소 함량분포와 유사하여 춘계에 가장 높다.

수직적으로는 겨울특성을 보이는 2월과 4월에 수심이 낮은 연안역에서는 표, 저층수의 활발한 수직혼합으로 인하여 이들 유기탄소 및 유기질소 함량 또한 수직적으로 균일하다.

지역별 함량 분포는 전계절에 걸쳐 3 구역으로 구분되어 진다. 즉 입자성 부유물질 농도 ( $>5\text{mg}/\ell$ )는 높으나 부유물질내 유기탄소 함량 비율이 낮은 연안해역, 입자성부유물질 농도는 낮으나 입자성유기탄소 함량 비율이 높은 전선 경계역, 그리고 낮은 입자성 부유물질 농도 ( $<1\text{mg}/\ell$ )와 낮은 입자성유기탄소 함량비율을 가진 고염 ( $>34.5$  psu)의 외해역으로 나눌 수 있다. 높은 입자성부유물질 함량을 보이는 연안역에서의 유기탄소 함량비율은 2% 미만이나, 충분한 광조건과 수층의 안정성으로 식물플랑크톤의 생장이 활발한 전선경계역에서는 10% 이상으로 높다. 클로로필 대 유기탄소 함량 비율 또한 연안역에서는 낮지만 전선역에서는 높다. 이것은 연안역에서는 입자성부유물질 중 상당량이 광물질로 구성되어 있지만, 전선경계역에서는 식물플랑크톤의 생체량에 따라 입자성 유기탄소 함량이 조절된다는 것을 의미한다.

$^{210}\text{Pb}$ 법에 근거한 해저퇴적물의 축적율은  $10\sim 284 \text{ mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 범위이고, 일부 정점에서는 퇴적물의 교란으로 정상상태의 입자대 입자이 침적이 일어나지 않고 있다.

해저퇴적물 유기탄소 함량은 표층해저퇴적물에서는 0.1~2.5%이고 최대값은 흑산니대 (정점 A9)에서 출현하였다. 대체적으로 한반도의 해안선에 인접한 북부 해역에서 외양의 남부 해역에서 보다 유기물 함량이 높다.

해저퇴적물의 질소함량은 표층퇴적물에서는 0.04~0.24%이다. 공간적인 분포 형태는 해저퇴적물의 유기탄소 함량의 경우와 비슷하다.

해저 퇴적물 축적율과 표층 퇴적물의 유기물 함량자료를 이용하여 남해 대륙붕 해저에 도달하는 유기물 플럭스는  $0.48 \text{ mg C cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이다. 이를 남해 대륙붕 전체의 면적 ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ )와 곱하면  $2.19 \times 10^{11} \text{ gC yr}^{-1}$ 의 유기탄소가 남해 해저에 매년 입력된다. 입자성 질소의 해저 입력율은 평균  $0.08 \text{ mg N cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고, 남해 대륙붕 전체의 면적 ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ )와 곱하면  $0.36 \times 10^{11} \text{ gN yr}^{-1}$ 의 유기탄소가 남해 해저에 매년 입력된다. 초기속성동안 분해되는 유기물은 남해 대륙붕 전체에 대하여 유기탄소의 경우  $0.84 \times 10^{11} \text{ g C yr}^{-1}$  이고, 질소의 경우는  $0.13 \times 10^{11} \text{ g N yr}^{-1}$  이다. 이를 퇴적물에서 상층 수층으로 용출되어 나오는 산화된 질소성분으로 모두 가정 할 수 있다면 이는 낙동강의 연 유출량 ( $\text{NO}_3 = \text{약 } 50 \text{ mol l}^{-1}$ , 유량  $9.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ )의 5 배 이상이다. 여기서 분석한 부분은 매우 기초적인 분석으로서 향후 정밀한 분석과 공극수의 채취, 초기속성과과정의 수치모형의 개발 등이 필요하다.

### ● 기초생산력

남해는 고염빈영양의 대마난류(쿠로시오의 지류)와 저염고영양의 한국연안수가 각각 남북으로 대치하고 있기 때문에 이들 2 수괴가 만나는 전선역 부근에서 연중 높은 기초생산력을 보인다. 동계에는 해수의 탁도의 증가로 인한 광투과와 저해, 춘.하계에는 물기둥의 밀도의 수직적 분리로 인한 표층 유광층에서의 영양염의 결핍에 의하여 식물플랑크톤의 기초생산력은 제한적이다. 연평균 기초생산력은 약  $270 \text{ gC m}^{-2}$  이다. 이는 황해에 비하여서는 2 배 가량 높은 값이다. 남해의 기초생산력은 황해에 비하여 해수중 부유물의 함량이 크게 낮고 또 해수중 영양염류 함량이 높기 때문인 것으로 판단되나 이에 대한 정밀한 조사 연구가 필요하다.

### ● 대기유입 오염물질 특성

에어로졸 시료는 1997년 11월, 1998년 4월에 황사기와 비 황사기간 중에, 9월, 11월, 그리고 1999년 2월과 5월 동안 선상의 해양-대기 경계층에서 채집되었다. 1998년 4월 시료채취 시기의 일부분이 연구지역에서 발생한 황사시기와 일치하여서, 황사시료를 현장에서 채집할 수 있었다. 본 연구에서 도출한 주요 결과들은 다음과 같다.

- 1) 제주-대한해협 해상의 에어로졸에서 지각과 해수에서 평균 농도를 이용하여 구한 농축계수에 따라 각 원소들을 구분했다. Na, Mg, K 과 Ca은 거의 해수로부터 기원하였으며, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Zr, La, Ce 과 Nd 원소들은 지각물질로부터 기원하였고, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd 과 Pb은 인간 산업활동으로 배출되었으며 화석연료 연소로 인한 대기유입은 천연기원 보다 상당히 많은 양을 차지하고 있다. 그러나, Ca과 Sr은 기상학적 자료를 근거로 확인한 황사기간 동안에 대부분 중국 황토로부터 기원했다.
- 2) 황사기간 동안, 에어로졸 Al과 금속 원소들의 농도는 비 황사기간보다 상당히 높았으며, 황사에 기인한 침전량은 1998년 동안 연중 황사기간이 단 10일이었음에도 불구하고 전 침전량의 39 %을 차지할 정도로 크다. 해양에어로졸 주성분 원소의 조성은 황사기와 비황사기 사이에 큰 차이를 보인다. 인류기원 원소와 화합물의 에어로졸 농축은 황사시기보다는 비황사시기에 크게 나타난다.
- 3) S/Ca 과 Al/ $^{210}\text{Pb}$ 자료를 근거로 하여, 비황사기의 대기-해양 경계층에 존재하는 에어로졸 입자는 황사기의 입자들보다 오래된 대기분진이다
- 4) 에어로졸 nss sulfate, nitrate 그리고 다른 미량금속의 농도와  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^7\text{Be}$  농도의 상관관계로부터 중국대륙과 근접하고 있음에도 불구하고, 대기분진 입자들이 육지로부터 방출된 후, 높은 고도를 통과해서 남해의 해양-대기 경계층으로 강하하는 것이 밝혀졌다.
- 5) 연간 대기분진 플럭스는 습식침전을 통해 41 %, 황사로 39 % 그리고 건식침전으로 20 % 해양에 유입된다. 연구지역에서 황사발생의 연간변동성은 대기분진 플럭스의 연간 변동성을 크게 영향을 미칠 것이다.

### ● 해수중 $^{210}\text{Po}$ 분포특성 및 제거과정

1999년 5월 및 8월에 대한해협과 제주해협에서 해수 및 현탁물질 중의  $^{210}\text{Po}$  농도를 측정된 결과

1) 1999년 5월 대한해협 해수 중 용존태  $^{210}\text{Po}$  농도는 4.88~12.74 dpm/100 l의 범위로 표층에서 낮고, 저층에서 높은 농도를 나타내었다. 그리고 영양염류의 농도가 증가함에 따라 용존태  $^{210}\text{Po}$ 은 증가하고, 클로로필 a의 양과는 음의 상관관계를 보였다.

2) 1998년 8월의 제주해협 해수 중 용존태 및 입자태  $^{210}\text{Po}$  농도는 표층에서 낮고 저층에서 높은 농도를 나타내고, 용존태 및 입자태  $^{210}\text{Po}$ 은 보길도쪽 사면의 저층에서 높고, 입자중의  $^{210}\text{Po}$  농도 및 현탁입자의 농도는 제주도쪽 사면에서 높은 농도를 나타내었다.

3)  $^{210}\text{Po}$ 의 제거는 현탁물질의 양에 의존하고 있고, 표층수에서는 식물플랑크톤에 의한 생물학적 uptake가 중요한 인자로 작용하고, 아표층에서 유기물분해에 의해  $^{210}\text{Po}$ 이 해수 중으로 재생된다.

#### ● 해수 기원 및 연안수 기여율

우리나라 남해는 동아시아 몬순기후에 속하여 남해에 유입하는 담수와 대마난류수의 계절적 변화는 매우 클것으로 예상되므로 남해 해수의 특성 변동을 규명하기 위하여 1996년부터 1999년까지 3년간 계절별로 표층수에 대한 라듐동위원소의 함량을 측정하였다. 표층수중  $^{228}\text{Ra}$  방사능 세기는 고염 ( $S > 34.6$  psu)의 쿠로시오 영향을 많이 받는 외해에서는 0.1 dpm/l 이하의 낮은 농도를 보인 반면에 저염 ( $S < 33$  psu)의 특성을 지닌 연안에서는 0.2 dpm/l 이상으로 높다.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 염분과 역의 상관관계를 보이고 있고, 연안에서 1.0 이상이나, 외해에서는 0.5 이하이다.

남해에서의 산소안정동위원소 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 값은 -0.13~-0.77 ‰로서 고염의 쿠로시오수와 저염의 황하 및 양자강수의 산소안정동위원소값간의 직선상에 위치하여 한국 남해수는 쿠로시오수와 양자강 및 황하로부터 유입된 담수와의 혼합수임을 제시한다.

남해 표층수가 양자강희석수와 쿠로시오수간 두단성분에 의한 혼합으로 가정하면 제주해협 표층수중 양자강 희석수의 기여율을 추정된 결과 갈수기인 2월 - 4월에는 평균 13.5 - 19.7%이나, 풍수기인 9월에는 평균 약 27%로서 높다.

#### ● 제주해협 통과 화학물질 수송

한국 남해대륙붕에서의 물질순환을 이해하기 위해 남해연안의 보길도와 제주도를 잇는 제주해협에서 1997년부터 1999년까지 3년간 화학물질 플럭스에 대한 조사를 실시하였다. 제주해협의 입자성부유물질 및 용존무기영양염류는 전계절에 걸쳐 90% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 제주해협을 통해 남해로 유입된다.

제주해협을 통해 남해로 유입되는 연간 화학물질들의 플럭스는 부유물질이  $22.9 \times 10^6$  ton  $\text{yr}^{-1}$ , 암모늄이온은  $0.52 \times 10^{10}$  mol  $\text{yr}^{-1}$ , 질산이온은  $6.05 \times 10^{10}$  mol  $\text{yr}^{-1}$ , 인산이온은  $0.36 \times 10^{10}$  mol  $\text{yr}^{-1}$ , 규산은  $10.27 \times 10^{10}$  mol  $\text{yr}^{-1}$ 이다. 타 해역의 단위수송량 당 비화학물질 플럭스 (volume specific chemical material flux)를 제주해협의 해수 수송량으로 표준화하여 비교하면, 제주해협을 통해 남해로 유입되는 비입자성 부유물질 연간 플럭스 (specific suspended sediment flux)는 대마난류 (제주-큐슈;

$7.25 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ ) 및 대만동부에서 쿠로시오에 의한 수송량 ( $7.25 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ ; Chen et al., 1994) 보다도 약 3배 크다.

비질산이온 및 인산이온 플럭스는 대마난류 (제주-큐슈;  $5.05 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ), 쿠로시오 ( $9.65 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )에 의한 수송량과 유사하나, 양자강 ( $3.0 \times 10^{10}$ ,  $0.06 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ) 및 황하강 ( $0.5 \times 10^{10}$ ,  $0.002 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )을 통한 연간 방출량보다 질산이온은 약 2-12배, 인산이온은 약 6-180배 정도 높다. 또한 지중해 동부에 위치한 오란토 해협을 통해 아드리아해로 빠져나가는 질산이온 ( $2.9 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ) 및 인산이온 ( $0.095 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )에 비해서는 각각 약 2배 및 3.7배 높아 제주해협을 통한 물질 유입이 상당함을 알 수 있다.

결론적으로 풍부한 화학물질들을 함유한 제주해류가 남해 및 동해의 생지화학적 과정들에 있어 상당히 중요함을 시사한다.

#### 4. 저서생물 생화학 특성

남해 해수로부터 기질 분해 세균 확보하였으며 이들의 기후 환경의 변화와 더불어 남해에서의 생태계의 변화에 미치는 역할을 조사하였다. 또 해수 중 부유 물질과 해수 중 용존 지방성분의 분석을 통하여 육상 유입 물질의 영향을 파악하고 종속 영양 생물에 미치는 환경의 영양 정도를 추정하는 지침을 마련하였다. 탄화수소의 분석을 통하여 유류 오염 등 인간의 경제 활동이 해양생태계에 미치는 영향의 정도를 규명하고자 하였으며 남해안에 대량으로 서식하는 해조류의 유용지방산 분석을 통하여 유용 지방산 생산 후보 5 종을 발견하였다

#### 5. 남해의 퇴적환경

##### ● 홀로세 해침 퇴적작용

홀로세 해수면 상승에 의해 남해 대륙붕에서 연안까지 다양한 퇴적체가 형성되었다. 남해 중앙 깊은 곳에는 과거의 조립질 퇴적물이 그대로 해저면에 노출되어 있으며, 연안에는 현생 니질퇴적물이 두껍게 쌓여 있다. 이 둘 사이에는 서로가 혼합되어 니질사 또는 사질니의 퇴적상이 존재한다. 탄성과 탐사상에서 이 둘 퇴적체는 다양한 형태로 나타나는데, 델타, 사주 또는 고수로 등이 발견된다.

##### ● 표층퇴적물의 분포 및 지질공학적 성질

표층퇴적물의 분포는 전반적으로 홀로세 퇴적체 분포를 따르고 있다. 낙동강 입구 동쪽으로는 연안을 따라 니질퇴적물이 벨트상으로 분포하지만, 고힌반도와 거제도 근방에서는 사질 함량이 상당히 증가하여 사질니 또는 니질사가 우세해진다. 그러나 수심이 깊어질수록 조개껍질이 풍부한 과거의 사질퇴적물로 대체되어진다. 니질퇴적물의 함수율은 점토가 우세할 경우 150%를 넘으나 사질과 실트가 상당량 존재할 때는 60% 이하로 낮아진다. 동쪽으로 갈수록 탄산염과 총유기물 함량이 서서히 증가한다. 전단응력은 하부로 갈수록 서서히 증가하는 정상적인 압밀현상을 보여준다. 소성과 액성은 니질 함량이 동쪽으로 갈수록 증가함에 따라 역시 증가한다.

### ● 박스코아 분석에 의한 퇴적환경 구분

박스코아를 분석한 결과 서남해 흑산나대, 제주도 서부, 남해 연안 그리고 남해 중앙부로 소단위의 퇴적환경을 나눌 수 있었다. 흑산나대의 퇴적물은 실트와 점토로 구성된 미세층리가 특징적이다. 이 층은 계절적인 퇴적환경 변화에 의한 결과이며 우리나라 서해안이 기원이 된다. 제주도 서부 해역은 황하 기원의 부유퇴적물이 쌓이는 곳으로 생물교란 작용이 활발한 곳이다. 남해연안은 크게 3 해역으로 다시 세분되는데, 낙동강 부근, 섬진강 부근 그리고 고흥반도 서측 해역이 그 것이다. 각각의 해역은 서로 다른 공급원을 갖는 것으로 보여진다. 남해 중앙부는 해침 초기의 사질퇴적물이 단연 우세한 해역으로 조개껍질, 자갈, 모래가 주종이다. 별다른 퇴적구조를 보이지는 않는다.

### ● 만의 퇴적작용

가막양에서의 홀로세 퇴적층은 중앙부가 가장 두꺼우며 가스를 함유하고 있는 것으로 보여진다. 탄소동위원소 연대측정에 의하면 최상부층 6 m가 쌓이는데 약 4,500 yr B.P.가 소요되었다. 여자만에는 가막양과는 달리 조간대가 비교적 잘 발달되어 있다. 퇴적물 이동모델에 의하면 퇴적물들이 수로를 통해 만 안으로 이동되어 들어오며, 주로 서쪽 조간대에 이동, 퇴적되는 것으로 사료된다. 유공충 연구 또한 의해 영향을 잘 지시하는 4 개의 종이 우점종임을 가리킨다.

### ● 부유물질 출입량 계산

12.5시간 연속정선관측을 진해, 마산만과 여자만에서 실시한 결과, 2개 만 모두에서 부유물질이 여름철에 만 안으로 순수하게 유입되는 것이 밝혀졌다. 즉 진해, 마산만의 경우 주변의 낙동강에서 그리고 여자만의 경우 섬진강에서 기원한 부유물질이 주 공급원인 것으로 보여진다. 그러나 부유물질 농도가 표층에서 10 mg/l 이하로서 이들의 공급량은 크지 않은 것으로 사료된다.

## 6. 제주도 연안의 치치어 종조성

### 1) 제주도 연안의 자치어 종 조성

제주도 연안의 자치어 종 조성 조사는 1999년 9월과 10월에 실시되었다. 자치어 시료 채집은 bongo net와 소형표층트롤네트를 이용하여 수집하였다. 자치어는 bongo net에 17종, 소형표층트롤네트에 28종 등 총 31종이 채집되었다. 두 가지 종류의 채집기기로 수집된 자치어의 종 수에는 유의한 차이가 있었다( $p < 0.05$ ). Bongo net로 수집된 자치어는 소형표층트롤네트로 채집된 것보다 대부분 체장이 작았으며, 이러한 네트의 특성에 따라 bongo net에는 자리돔(*Chromis notatus*)이, 소형표층트롤네트에는 셋줄멸(*Spratelloides gracilis*)과 멸치(*Engraulis japonicus*)가 우점종으로 나타났다.

### 2) *Laemonema nana* Taki 자치어의 지리적인 분포와 형태 발달에 관한 연구

1998~1999년 제주도 연안에서 봉고네트와 소형표층트롤네트로 체장 1.4~10.5mm의 *Laemonema nana*가 총 28개체 채집되었다.

*L. nana* 자치어의 성장에 따른 체형변화는 다음과 같다.

- 지느러미의 여린줄기는 약 4.5mm부터 나타나기 시작하며 약 6.8mm에서 정수

에 달한다.

- 약 4mm 이하에서는 머리에 큰 흑색소포가 2개 있다.
- 약 4mm 이하에서는 꼬리 중앙에 있는 1개의 큰 흑색소포는 약 9mm에서는 꼬리자루 부근까지 확산된다.
- 약 2mm에서는 뒷지느러미 기부에 커다란 하나의 흑색소포가 있지만 약 9mm에서는 꼬리자루쪽으로 2/3정도까지 확산된다.
- 제주도 주변해역에서 산란기는 가을과 겨울로 추정된다.

## V. 결론 및 제언

본 연구는 10년간 장기과제 계획 중 제 1단계(3개년)로서 제주해류 변동성을 포함하는 남해 대륙붕과 한반도간의 물질이동 기구를 규명하고 저서생물 화학특성 및 거대물질을 규명 개발하여 지속가능한 남해 이용과 개발을 위한 환경보전 종합 시스템을 구축하는 것을 목표로 하였다.

남해에서는 계절적인 해양변화에 따라 영양염류의 역학적 변동이 뚜렷하게 나타나며, 일차생산력의 구조에 크게 영향을 미친다. 특히 양자강등 주요하천을 통해 상당량의 입자성 및 용존성 친생물원소가 남해로 유입되면서 이들 성분의 분배, 퇴적 등의 주요과정이 진행된다. 제주해협에서의 해수특성과 해류 자료의 분석에 의하면 제주해협에서 동향하는 제주해류는 쿠로시오 기원의 제주난류수, 황·동중국해에서 기원되는 저염의 황·동중국해 연안수 및 저온의 황해냉수를 제주해협을 통해 남해로 수송하는 역할을 한다. 제주해류(제주해협)에 의해 남해로 유입되는 단위수송량 별 화학물질 플럭스는 대마난류에 의한 유입량보다 2~3배 크고, 쿠로시오 수송량과 유사한 양으로 비교적 규모가 작은 남해해양환경에서 매우 중요하다.

해저 퇴적물 축적율과 표층 퇴적물의 유기물 함량자료를 이용하여 남해 대륙붕 해저에 도달하는 유기물 플럭스는  $0.48 \text{ mg C cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이다. 이를 남해 대륙붕에서의 유기탄소 및 유기질소는 각각  $2.19 \times 10^{11} \text{ gC yr}^{-1}$ ,  $0.36 \times 10^{11} \text{ gN yr}^{-1}$ 가 남해 해저에 매년 입력된다. 초기속성동안 분해되는 유기물은 남해 대륙붕 전체에 대하여 유기탄소의 경우  $0.84 \times 10^{11} \text{ g C yr}^{-1}$  이고, 질소의 경우는  $0.13 \times 10^{11} \text{ g N yr}^{-1}$  이다. 이를 퇴적물에서 상층 수층으로 용출되어 나오는 산화된 질소성분으로 모두 가정 할 수 있다면 이는 낙동강의 연 유출량 ( $\text{NO}_3 = \text{약 } 50 \text{ mol l}^{-1}$ , 유량  $9.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ )의 5 배 이상이다. 여기서 분석한 부분은 매우 기초적인 분석으로서 향후 정밀한 분석과 공극수의 채취, 수치모형의 개발 등이 필요하다.

남해는 일반적으로 저염수에 크게 영향을 받으며 쿠로시오에서 분리된 고염의 해수가 혼합되며 라뎀동위원소비를 측정된 결과 제주해협 표층수중 양자강 희석수의 기여율은 갈수기인 2월 - 4월에는 평균 13.5 - 19.7%이나, 풍수기인 9월에는 평균 약 27%로서 높다. 남해로 유입되는 담수 및 원양수의 남해해수성분에 대한 영향을 체계적으로 밝히기 위해서는 앞으로 라뎀, 산소 동위원소비에 대한 더욱 체계적인 연구가 필요하리라 본다.

대기를 통해 분진형태로 남해로 유입되는 오염물질 양은 상당한 것으로 밝혀졌다. 특히 황사기간 동안, 에어로졸 AI과 금속 원소들의 농도는 비 황사기간보다 상당히 높았으며, 황사에 기인한 침전량은 1998년 동안 연중 황사기간이 단 10일이었음에도 불구하고 전 침전량의 39 % 이상을 차지하여 남해 물질수지 산정에 있어서 대기로 부터의 유입물질은 중요성이 매우 큰 것으로 나타났다. 앞으로 남해전역의 물질수지에는 대기에 의한 각종 유입물질이 정량적으로 제시되어질 수 있어야 하며 전체 물질수지에서 각 기원별 기여도가 산정되어야 한다고 본다.

본 연구사업에서는 현재까지 잘 알려져 있지 않은 제주해협, 제주해류의 공간적 구조와 시간적 변동성을 파악하고, 남해의 3차원 해수순환을 재현하는 수치모델의 개발에 주된 초점이 맞추어졌다. 연구사업을 통해 제주해협 내 해류분포와 해수 수송량이 보다 명확히 밝혀졌다. 3차원 수치모델은 그 결과가 남해에서 관측된 많은 현상을 잘 설명하고 있으므로 예측을 위한 도구로 활용되어 질 수 있다. 남해의 해수순환은 해수 수송량을 포함한 제주해류에 의해 주로 영향을 받기 때문에 국가조위 관측망을 통해 정기적으로 생산되는 해수면 자료가 모델의 경계면을 통한 플럭스로 환산되어 모델에 동화 될 경우 남해의 해류분포와 물질수송을 예측하는데 크게 기여할 것이다.

남해 대륙붕의 퇴적상은 홀로세 해침 영향으로 매우 다양하다는 것이 밝혀졌다. 현재 육상기원 니질퇴적물은 주로 수심 약 60 m 이내에 국한되어 이동, 퇴적되며 특히 만 내에 지속적으로 쌓인다. 여름철에는 주변 강에서 배출된 부유물질이 이들 만 내로 유입된다는 것이 밝혀졌다. 그러나 겨울철에 부유물질이 더욱 활발하게 운동할 것으로 보여지기 때문에, 남해의 하천기원 부유물질은 물론 서해의 재부유물질의 이동을 추적하기 위해 정량적인 부유물질 거동연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

수심이 얇은 우리 나라 연안역에서 자치어의 종 조성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 망목에 의한 자치어의 선택성과 자치어의 체장에 따른 유영능력을 고려하여 bongo net 뿐 아니라 망구의 면적이나 폭이 넓은 네트가 동시에 사용되어야 할 것으로 판단된다.

남해 대륙붕 서식 생물중 산업물질을 다량 함유하고 있는 2개 해조류를 또한 양식할 수 있는 생물이 발견된 바 향후 서식 저서 생물을 집중적으로 조사하여 산업물질 생산 후보 생물을 발굴하여야 한다.



# SUMMARY

## I. Title

Transport and biogeochemical processes in the Cheju Strait

## II. Necessity and objective of the study

### 1. Necessity

- Korean South Sea Shelf (hereafter Cheju-Korea Strait region) waters consists of the Yellow Sea, Yangtz River and East China Sea, and Kuroshio waters, and it enters to the East Sea. Therefore, the Cheju- Korea Straits Region is dominated by the eastward flowing current, Cheju Current. However, shelf processes of material transport and biogeochemical processes have never been studied yet.
- The dynamics of the Cheju Current has not received a full scientific investigation.
- The Cheju-Korea Strait region is enriched with benthic animals of structurely unique and/or biologically active metabolites being located in a transition zone from the subtropics to the temperate region in terms of water masses.
- The region is concentrated with commercial and fishing harbors, coastal industrial belt, and fisheries including fin- and shellfish farming, therefore, it is necessary to support the sustainable development with the understanding the important material fluxes.
- The region is also subject to the frequent occurrence of red tides and oil spill accident due to the concentration of commercial harbors and wastes discharge from the land. In order to provide a basic scientific background for environmental protection, the understanding of the oceanic processes occurring in the region and modeling them are pivotal.
- Suspended sediments need to be continuously monitored with respect to the hydrodynamic behavior because the coastal region of the South Sea is governed by active sedimentary processes of fine-grained material from the southwestern offshore of the West Sea as well as from the rivers emptying into the South Sea.
- Quantitative understanding of water characteristics and current distribution along inflow (the Cheju Strait, an area between Cheju-Do and Tsushima Island) and outflow (the Korea Strait) is essential to understand, to simulate

accurately, and to predict the oceanographic condition, circulation and chemical materials transport of the South Sea.

## 2. Objectives (for 3 years)

- to understand the material fluxes and water dynamics in the Cheju-Korea Strait Region.
- to develop a three-dimensional ocean circulation model in the region
- to determine and understand on a regional scale the time-varying fluxes of carbon and associated biogenic elements in the region, and to evaluate the related exchange with the atmosphere, the seafloor and the continental boundaries.
- to determine biochemical characters of benthic organisms.
- to provide scientific background for developing a sustainable and environmentally sound management for the region.
- to provide a general model for the suspended-sediment behavior (source, passway, and depositional site) in the whole coastal region of the South Sea
- to study on the fish larvae assemblage in the coastal area of Cheju Island.
- to develop a new sampling gear for fish larvae in the coastal area.
- to study on the distribution of the warm water species.

## 3. Goal of the third year study

- To investigate an annual variation of the Cheju Current and the marine meteorology of the South Sea based on the analysis of historical data
- To determine seasonal variation in water properties and currents along open boundaries of the South Sea
- Long-term current measurement in the Cheju Strait to quantify the low-frequency variability of the Cheju Current
- Modeling the summertime three-dimensional circulation of the South sea using an ocean general circulation model and observed data
- Oxygen and nutrient budget in anoxic bottom waters
- Behaviour of heavy metals in the enclosed bays
- To understand the characteristics and seasonal variation of biogenic materials in the South Sea.
- To estimate chemical material fluxes across the Cheju Strait.
- To describe the origin and contribution of seawater of the South Sea
- To describe the time-series observation of aerosol input
- To isolate marine bacterial strains and measurement of their degradation rates of organic materials.



- To establish analytical methods for biomarkers from marine environment.
- To apply lipid-derived biomarkers to environmental samples.
- To review modern sediment distribution in the shelf and nearshore area of the South Sea.
- To make an excerpt for the distribution of surficial sediments on the seabottom of the South Sea in relation to the Holocene transgression.
- To estimate the flux of suspended sediments through the specific bays in the South Sea by taking 12.5-hour hydrodynamic measurements aboard a vessel anchored.
- To study on the fish larvae assemblage in the coastal area of Cheju Island.
- To develop a new sampling gear for fish larvae in the coastal area.
- To study on the characteristics of the new sampling gear.
- To study on the distribution of the warm water species.

### III. General scope of the study

#### 1. Book publication (draft) : Transport and Biogeochemical Process in the South Sea of Korea

#### 2. Interdisciplinary ocean survey

##### o Winter

Survey area : The Cheju Strait

Observation period : 5~11 April 1998

Vessel : R/V Eardo of KORDI (546 ton class)

Major items : CTD, DO, major inorganic nutrients, Organic matter in seawater and sediment, primary production, Radioisotope ( $^{228}\text{Ra}$  &  $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{210}\text{Po}$ , Aerosol

##### o Spring

Survey area : The Korea Strait

Observation period : 3~15 May 1998

Vessel : R/V Roger Revelle (U.S.A. Scripps Institute of oceanography)

Major items : CTD, major inorganic nutrients, Organic matter in seawater, Aerosol

##### o Summer

Survey area : The Cheju Strait

Observation period : 22~23 February 1999

Vessel : R/V Eardo of KORDI (546 ton class)

Major items : DO, Inorganic Organic nutrients,  $^{210}\text{Po}$ , Primary production



Radioisotope ( $^{228}\text{Ra}$  &  $^{226}\text{Ra}$ ), Aerosol, CTD, Current, Tidal and tidal current

o Autumn

Survey area : The Korea Strait

Observation period : 9~23 October 1999

Vessel : R/V Roger Revelle (U.S.A. Scripps Institute)

Major items : Inorganic Organic nutrients, Organic matter,  $^{210}\text{Po}$ , Aerosol, CTD, Current, Tidal and tidal current

### 3. Current and circulation

1) Reference studies

Review of previous studies on water masses and currents in the South Sea

2) Retrospective study

- Climatological seasonal hydrography of the South Sea
- Long-term variability of precipitation and monthly sea surface wind in the South Sea
- Seasonal variability of the Cheju Current by use of the cross-strait sea level difference in the Cheju Strait
- Analysis of historical long-term current data in the Cheju Strait

3) Observations

- Hydrography and current in the Cheju Strait by use of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) and CTD  
March 21~March 25, 1997 (Cheju-Do—Chin-Do)  
September 29~September 30, 1997 (Cheju-Do—Pogil-Do)  
September 25~September 26, 1998 (Cheju-Do—Pogil-Do)  
November 24~November 25, 1998 (Cheju-Do—Pogil-Do)  
February 23~February 25, 1999 (Cheju-Do—Pogil-Do)  
August 4~August 5, 1999 (Cheju-Do—Pogil-Do)
- Hydrography and current in the Cheju Strait by use of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) and CTD  
March 25~March 26, 1997 (National Ocean Research Institute)  
July 14~July 15, 1997 (National Ocean Research Institute)  
October 2~October 3, 1997 (National Ocean Research Institute)  
November 27~November 28, 1997 (National Ocean Research Institute)  
April 26~April 28, 1998 (National Ocean Research Institute)  
July 6~July 7, 1998 (National Ocean Research Institute)  
September 8~September 9, 1998 (National Ocean Research Institute)  
November 26~November 27, 1998 (National Ocean Research Institute)  
November 28~November 29, 1998 (KORDI, Yonhwa-Do—Tsushima Is.)

- Hydrography and current in the South Sea by use of ADCP
    - March 19~March 26, 1997 (ADCP traverse survey east of Cheju-Do)
    - September 1~September 2, 1997
    - April 5~April 11, 1998
    - September 20~September 24 1998
    - November 25~November 28, 1998 (ADCP traverse survey north of Kumo-Do)
  - KORDI-NRL (Naval Research Laboratory, USA) cooperative observation
    - May 5~May 15, 1998: Deployment of 6 ADCPs along N-line northeast of Tsushima Is., and 6 ADCPs along S-line southwest of Tsushima Is. along with CTD observation on the both lines
    - October 9~October 22, 1998: Recovery of 11 ADCPs with one failure, and redeploy 13 ADCPs at the same position as in May with an extra deployment at the western channel of the Korea Strait along with CTD observation on the both lines
  - Long-term current measurement in the Cheju Strait by use of TRBM (Trawl-Resistant Bottom Mount)-ADCP
    - March 4~December 23, 1999 (every 4 m between 15 m~118 m with the sampling interval of 30 minutes)
- 4) Simulation of three-dimensional circulation of the South Sea induced by tides, inflow/outflow through open boundaries, and surface heat and salt fluxes during August~October, 1997 using a numerical model and data from the observation.

#### 4. Anaerobic coastal inlets

- Oxygen budget and nutrients variation during stratified season in anoxic bottom waters of Masan Bay and western Chinhae Bay.
- The behavior of heavy metals in Masan Bay and western Chinhae Bay.

#### 5. Shelf biogeochemistry

- Distribution of biologically important elements in the shelf.
- Determination of transport fluxes of biologically important element across the Cheju Strait.
- Time-series observation of oceanic processes affecting biogeochemistry of shelf.
- Time-series observation of aerosol inputs.
- Determination of organic carbon fixations by phytoplankton.
- Burial and early diagenesis of biogenic elements in the sea floor

#### 6. Biochemical characters of benthic organisms

- Distribution of hydrocarbon and fatty acids in the water column (dissolved

and particulate phases) and bottom sediments.

- Development of analytical methods of steroid compounds in marine samples.
- Determine toxicity of lipophilic compounds extracted from South Sea water using a cancer cell line (human myeloma leukemia K-462).
- Determine lipid composition in economically prospective benthic organisms and develop purification methods for beneficial lipid compounds.

#### **7. Holocene sedimentary processes of suspended matter**

- to gather and summarize preexisting results from the literature on the Holocene sedimentary processes
- to analyze sedimentary characteristics of a number box cores to divide the region of South Sea and its vicinity into several sub-environments
- to make an estimation of the flux of suspended matter through some specific bays based on 12.5-hour hydrodynamic measurements aboard a vessel anchored.

#### **8. Larval fish community**

##### **1) On the larval fish assemblage in the coastal of Cheju Island**

- Survey area : Coastal area of Cheju Island
- Observation period : September and October 1999
- Major items : Fish larvae, developing a new small surface trawl net
- Sampling gear : Bongo net, Small Surface Trawl Net.

##### **2) Larval morphology and distribution of *Laemonema nana* Taki (Moridae)**

- Survey area : Coastal area of Cheju Island
- Observation period : May, August and November 1998,  
May, September, October and December 1999
- Sampling gear : Bongo net, Small Surface Trawl Net.

### **IV. Results and recommendation**

#### **1. Current and circulation**

##### **1) Retrospective study**

##### **● Bimonthly climatology of the oceanographic condition in the South Sea**

Water column is vertically homogeneous in winter and spring, and water in the South Sea shows high salinity even near the coastal area due to the intrusion of the Cheju Warm Current Water (CWCW) from the Cheju Strait and the Tsushima Current from the south. The CWCW originating from the Kuroshio and characterized by high temperature and salinity forms the strong thermohaline fronts west of the Cheju Strait together with the Yellow Sea Cold

Water (YSCW). Cold and saline water is found in the shallow coastal area, which appears to be modified warm and saline water from the Cheju Strait due to local cooling. Seasonal thermocline is formed during summer and fall, and water column becomes vertically stratified and exhibits mostly two-layer structure. Freshening of surface water occurs due to the appearance of Coastal waters originating from the Yellow Sea and the East China Sea including the Chengjiang River Diluted Water. Modified CWCW and the YSCW occupy the lower layer below the seasonal thermocline in the Cheju Strait, which are thought to enter the strait after turning around the western coast of Cheju-Do.

● Analysis of historical sea level data

An annual cycle, high during July and November and low during December and March, is dominant in sea level difference between Cheju and Chuja-Do, suggesting that the eastward current in the Cheju Strait strengthens in summer and fall, and weakens in winter. Spectral analysis of the sea level difference also shows significant peaks at periods of 3 months, 4 months, eight months and two years although they are less energetic than a peak at an annual period.

● Wavelet analysis of monthly mean precipitation at the southern coastal stations

The annual cycle of precipitation in the southern coastal region is all intensively precipitable in summer as well as in the other areas of Korea. The seasonal amount of precipitation is more than half of the total annual amount in summer and less than 10% of it in winter. Typhoons and (extra)tropical storms may also affect the annual and interannual variability of precipitation by way of pouring heavy rains primarily along their paths. The number of typhoons attacking Korea Peninsula and the precipitation over the southern coastal area seem to be reduced during El-Niño years, but not so highly correlated with El-Niño. The time series of monthly mean precipitation shows the interannual variability with quasi-period of 2 to 7 years relative to El-Niño period and a longer time-scale (interdecadal) fluctuation, especially in Cheju. The linear increasing trend of precipitation is about +7mm/10yrs in Pusan and Mokpo, +16mm/10yrs in Cheju, and much steeper in Yosu (+40mm/10yrs) and in Sogipo (+80mm/10yrs) where the total annual precipitation is the largest in Korea.

● Monthly mean sea surface wind over the South Sea

Northerly wind is predominant over the South Sea during September~March with the maximum wind speed of about 8 m/s. Northeasterly wind begins in September which is relatively weak till October, and strong northwesterly wind prevails during November~January. The wind blows from the north in February. The northerly wind weakens in March and the surface wind is feeble from April to June. Southwesterly wind starts to blow in July and persists until August.

● Analysis of moored current-meter data

According to the moored current-meter data longer than 15 days taken in the

southern Cheju Strait and the Hoenggan Channel, the semidiurnal tidal current (M2) in the east-west direction is the predominant component among the tidal constituents and the amplitude of M2 is twice as large as in the narrow Hoenggan Channel than in the southern Cheju Strait. Mean flow in both locations is directed to the north with a mean speed of about 10 cm/s. Low-frequency fluctuations with a period of about 3~7 days are predominant in the observed currents.

## 2) Results of observation

### ● Hydrography, currents, and volume transport in the Cheju and the Korea Straits

Understanding and quantifying an inflow/outflow system through open boundaries of the South Sea, the Cheju Strait, the Korea Strait, and the region between Cheju-Do and Tsushima Island, are one of the most important factors affecting the oceanographic condition and circulation of the South Sea. There have been numerous studies on currents and volume transport along with their, mostly seasonal, variability in the Korea Strait. On the other hand, currents and volume transport in the Cheju Strait have been poorly understood. We believe that the flux and physiochemical composition of water coming into the South Sea via the Cheju Strait is as important as the Tsushima Current Water entering the South Sea via the southern boundary in determining the circulation, material fluxes, and self-flushing of many coastal embayments in the southern coast of Korea. The present research, thus, had focused on the composition of water masses, the spatial structure of currents, and their flux in the Cheju Strait, culminating in an development of three-dimensional circulation of the South Sea using the results of observation.

Water masses in the South Sea can be divided into two, warm and saline water, the Cheju Warm Current Water (CWCW), originating from the Kuroshio and fresh coastal waters including the Changjiang River Diluted Water. The former occupies nearly the entire section across the Cheju Strait during winter and spring, and appears also during stratified seasons below the seasonal thermocline in the Cheju-Do vicinity. Relatively cold and fresh water mass appears north of the CWCW below the seasonal thermocline, which is thought to be a modified Yellow Sea Cold Water and to originate from west of Cheju-Do together with the CWCW. Mean eastward currents, the Cheju Current (CC) in the Cheju Strait tends to be strengthened in summer and fall as compared that in winter and spring. The maximum speed of the along-strait (east-west) component of the CC is about 15 cm/s in winter and about 25 cm/s in summer based on the diurnally-averaged ADCP data obtained 5 times in the strait. The tendency is consistent with the annual variation of both the



cross-strait sea level difference. The strong core of the along-strait flow occurs close to the northern coast of Cheju-Do in winter and spring, while the stratification shifts the strong core of the CC to the north of the deep trough in the Cheju Strait. The volume transport of the CC based on the diurnally-averaged ADCP data ranges from 0.37 Sv in March to 0.66 Sv in August with an annual difference of 0.3 Sv. The annual variation of the transport is in phase with the cross-strait sea level difference. The baroclinic transport calculated by the dynamic method accounts for less than half of the observed transport, which is indicative of the contribution from the barotropic flow and/or the ageostrophic component. Low-frequency current fluctuations with periods of several days were noted from the 15- to 30-day moored current observations in the Cheju Strait.

#### ● Results of long-term current measurement

Long-term current measurement conducted in the southern Cheju Strait for 9 months and 20 days during March 4~December 23, 1999 using the TRBM-ADCP shows that the mean currents are 12.33 cm/s at 72.7° (measured clockwise from the north) for the 66 m depth, and 3.89 cm/s at 62.4° for the 118 m depth. Vertical shear of the mean currents between two depths is about 8.5 cm/s, and the current direction tends to veer cyclonically with depth. The maximum speed of the east-west component of currents was about 105 cm/s at 66 m depth and 75 cm/s at 118 m depth. Temperature fluctuation near the seabed ranged from 12.08°C to 18.52°C.

#### 3) Circulation model results

Numerical experiments are carried out with a three-dimensional ocean circulation model, POM, to investigate the circulation of the southern sea of Korea, the South Sea, from August to October, 1997. The model is driven by tides, observed inflow/outflow through open boundaries, and observed temperature and salinity both at open boundaries and the sea surface.

The tidal forcing is considered by specifying harmonic constants for four major tidal current components,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ , which is calculated using results from a three-dimensional barotropic tide model. Model-generated tides and mean circulation pattern generally agree with the observation. According to the 15-day averaged model results, the inflow through the Cheju Strait carried by Cheju Current shifts to the south and it forms strong eastward currents in areas deeper than 80 m depth together with the Tsushima Current, that enters the South Sea from the south between Cheju-Do and Tsushima Island. The speed of the eastward currents ranges from 25 cm/s to 85 cm/s. The offshore shift of the eastward currents is most pronounced at the surface, and southward currents of about 5 cm/s ~ 20 cm/s dominate over shallow areas and coastal embayments

at the surface. The Tsushima Current entering the model domain through the southern open boundary reaches over shallow areas and coastal area near the seabed, and the bottom intrusion contributes to the supply of salt to the coastal area. Many of the coastal embayments along the South Sea exhibit an estuary-type circulation that is characterized by a surface outflow and an inflow near the seabed.

Effects of thermohaline and tidal forcing on the three-dimensional circulation of the South Sea are also examined. Comparison between the barotropic and baroclinic models indicates that the baroclinicity acts to intensify the eastward flow by narrowing the flow along isopycnals. Tidal forcing in the baroclinic three-dimensional calculation plays the role of reducing the depth-averaged flow due to increase the bottom friction.

## **2. Anaerobic coastal inlets**

Chinhae Bay System is characterized by strong seasonal stratification which separates bottom waters from well-oxygenated surface waters. Below steep seasonal pycnocline intense oxygen consumption by microbial degradation of organic matter leads to a redox environment. In August 1999, nitrate contents in the bottom waters of inner Masan Bay was below  $1\ \mu\text{M}$  due to denitrification following the oxygen depletion. Phosphate contents in the bottom waters were high in the bottom waters with low pH and low DO condition. Dissolved oxygen in the bottom waters were completely depleted at two stations. From existing data respiratory oxygen consumption rate in the bottom waters of inner Masan Bay was calculated to be  $155\text{m}\ell\text{O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ . However oxygen consumption rate might be much higher than above rate taking vertical and horizontal supply of DO into account.

In the Masan Waterway dissolved Cd, Cu, Pb, Zn contents in the surface waters were higher than those in the bottom waters. Particulate Cu, Cd, Pb (acid-leachable fraction) in the surface waters of Masan Bay decreased with increasing distance from the inner Bay. Particulate Cd, Cu, Pb, Zn contents were relatively high in the bottom waters than in surface waters. Distribution coefficient between dissolved and particulate phase ( $K_d$ ) of Cu and Cd decreased with increasing distance from the shore possibly due to reaction of these elements with sewage-derived particulate matter. During this study  $K_d$  of Cd, Cu, Pb, Zn was inversely correlated with saturation percentage of DO in the bottom waters. Al, Zn, Cu, Cd, Pb in the surface sediment showed relatively high concentration in the inner Masan Bay.

### 3. Shelf biogeochemistry

#### ● The distributional characteristics of biogeochemical properties.

A comprehensive data for seasonal cycle on the biogenic components was obtained by repeating the same cruise track in the Cheju Strait from 1997 to 1999.

In general, the chemical components in the South Sea are characterized evidently with seasonal change.

In winter (Feb. 1999), water masses has two end-member of high saline water ( $S > 34.2$  psu) in the adjacent sea of the Cheju Island and low saline wter ( $S < 33.2$  psu) in near coastline due to the actively vertical mixing.

The concentrations of dissolved oxygen and nutrients occurred the highest throughout the year and vertically homogenous throughout the water column.

In early spring (Apr. 1998), the concentrations of the chemical components decrease from the coast to the open sea. The spatial concentration of SS are more  $5 \text{ mg l}^{-1}$  in the coastal area where the bottom sediments are consisted of silt and clay and decrease from west to east and from inner coast to outer coast.

In summer (Aug. 1999), salinity in the surface water of the adjacent sea of the Cheju Island were less than 32.6 psu due to the input of fresh water. The concentrations of nutrients in the surface water, therefore, were higher than those in April. N/P ratios are more than 30 unlike in April with N/P ratio of 16.6.

In fall (Sep. and Nov. 1998), salinity in the surface water of the adjacent sea of the Cheju Island were 34 psu. The concentration of nutrients were higher than those in April. The contents of dissolved oxygen in the bottom cold water ( $17 < T < 15$ ,  $34 < S < 33.5$ ) were lowest throughout the year, but the concentration of nutrients were highest. It is caused by the reminalization of the sinking organic materials in the depth below surface mixing layer.

#### ● Particulate organic matter in the water column

Particulate organic carbon (POC) contents in the surface waters varied 29~373, 50~2576, 48(68)~122(347), 37~112  $\mu\text{g C/ l}$  in winter (February 1999), spring (April 1998), summer (September 1998 and August 1999), and autumn (November 1998), respectively. POC concentration peaked in spring. POC concentration decreased from the northern coastal region to the souther region toward the Cheju Island. The Cheju-Korea Straits region may be divided into three domains in terms of suspended particulate matter (SPM) concentrations and POC concentrations: high SPM concentration ( $>5\text{mg/l}$ ) and low POC in the

coastal turbid domain, low SPM concentration (<1mg/l) and low POC in the offshore domain, and moderate SPM concentration and high POC concentration in the frontal domain.

Particulate nitrogen contents in the surface waters varied 5~57, 9~992, 8~21, 6~19  $\mu\text{g N}/\ell$  in winter (February 1999), spring (April 1998), summer (September 1998 and August 1999), and autumn (November 1998), respectively. Distribution patterns in time and space were similar to those of POC.

● Burial and early diagenesis of particulate organic matter in the bottom sediments

Bulk sediment accumulation rates in the continental shelf of the Cheju-Korea Straits region were generally varied from 10 to 284  $\text{mg cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$  and its average of 89  $\text{mg cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ , and some of the stations did not show a steady-state particle accumulation pattern based on the excess  $^{210}\text{Pb}$  profiles. Sediment organic carbon concentrations in the superficial sediments varied 0.1-2.5% with maximum in Huksan Mud Belt and it generally high in the northern region than the southern region. Sediment nitrogen concentration varied from 0.04 to 0.24% and its spatial distribution pattern is similar to that of sediment organic carbon.

POC arrival flux to the sediment/water interface was estimated to be 0.48  $\text{mg C cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$  in average based on the  $^{210}\text{Pb}$ -derived sediment accumulation rate and superficial sediment organic carbon concentration in the Cheju-Korea Strait shelf. If this value can be extended to the entire shelf ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ), then total areal arrival flux would be  $2.19 \times 10^{11} \text{ gC yr}^{-1}$ . Similarly, PON arrival flux to the sediment/water interface was estimated to be 0.08  $\text{mg N cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$  in average based on the  $^{210}\text{Pb}$ -derived sediment accumulation rate and superficial sediment organic carbon concentration in the Cheju-Korea Strait shelf. If this value can be extended to the entire shelf ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ), then total areal arrival flux would be  $0.36 \times 10^{11} \text{ gN yr}^{-1}$ . Organic matter once arrived in the sediment/water interface is subjected to the subsequent burial and continuation of decomposition or dissolution (early diagenesis). A magnitude of early diagenesis of organic matter was estimated preliminary using a sediment organic matter concentration at depth of sediment column (here 20-30 cm below the surface) and sediment accumulation rate, assuming steady-state conditions. Annual organic carbon and nitrogen is estimated to be decomposed an order of  $0.84 \times 10^{11} \text{ g C yr}^{-1}$  and  $0.13 \times 10^{11} \text{ g N yr}^{-1}$ , respectively. If the regenerated nitrogen can be assumed to be oxidized nitrogen, then this benthic flux would be 5 times more than annual flux ( $\text{NO}_3 = \text{ca. } 50 \text{ mol l}^{-1}$ , water discharge  $9.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ ) nitrate discharge from the Nakdong River. However, this initial budgetary approach has to be rigorously sampled and analyzed in the near future.

### ● Primary production

The Cheju-Korea Strait region is divided in north-south direction in terms of prevailing water masses: a low nutrient and high salinity water in the south and a high nutrient and low salinity water in the north. Therefore, the frontal region where the two water masses collide exhibits a high primary productivity. The annual primary productivity was estimated to be ca.  $270 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ .

### ● The distributional characteristics of $^{210}\text{Po}$ in sea water

We have measured the dissolved and particulate concentration of  $^{210}\text{Po}$  and SPM(suspended particulate matter) concentration in the South Sea during May and August 1999. From the present investigation, the following result can be drawn:

1) Dissolved  $^{210}\text{Po}$  activity ranged between 4.88~12.74 dpm/100  $\ell$  with values high in surface layer and low values in bottom layer at Korea Strait during May,1999. The dissolved  $^{210}\text{Po}$  activity increased with nutrients concentration and it has negative correlation with chlorophyll-a concentration.

2) The vertical distribution of dissolved and particulate  $^{210}\text{Po}$  activity were low in surface layer and high in bottom layer. And the temporal distribution of those activity were high in slope of side of Bogildo and specific activity of  $^{210}\text{Po}$  in suspended matter and SPM concentration were high in slop of side of Chejudo.

3) The removal of  $^{210}\text{Po}$  depend on amount of suspended matter and the important factor in surface layer is biological uptake by phytoplanktons. The  $^{210}\text{Po}$  was regenerated by decomposition of organic matter.

### ● Origin of water mass

The seawaters in the Cheju-Korea Strait region is under the strongly influence of Northeast Asian Monsoon. That is, the region may be characterized by the cool, windy and dry winter and warm, calm and wet summer. In order to elucidate a temporal variation of characteristics of source functions of water masses in the region, radium isotopes were measured seasonally for the period of 1996 to 1999. The activity of  $^{228}\text{Ra}$  in the surface waters was higher ( $>0.2$  dpm/l) in the coastal waters with low salinity ( $S < 33$  psu) than those ( $<0.1$  dpm/l) in the open ocean with high salinity ( $>34.6$  psu). There was an inverse relationship between the  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio and salinity.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio was higher ( $>1.0$ ) in the coastal water than those ( $<0.5$ ) in the open ocean.

The linear relationship between oxygen isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) values ( $-0.13 \sim -0.77\text{‰}$ ) and salinity in the South Sea of Korea implies that sea waters in the area are a mixture of Kuroshio water and river discharge from the adjacent lands, such as the Huanghe and Yangtze Rivers. Assuming that the surface water of the Cheju

Strait is formed by mixing of the Shelf Water (Changjiang Dilute Water, delete) and Kuroshio, the contribution of the Shelf Water (Changjiang Dilute Water?) during the dry season (February to April) was averaged 13.5 - 19.7 %, but 27 % during the wet season (September).

● Characteristic of contaminant materials through atmospheric input

Aerosol samples in the marine boundary layer was collected in November 1997, April (both Yellow Dust Storm and low dust periods), September, November 1998, February and May in 1999. The major findings are:

1. Provenance of chemical elements in the aerosols in the marine boundary layer was elucidated calculating enrichment factors based on the average chemical elemental composition of the Earth crust and seawater. Na, Mg, K and Ca were largely originated from seawater, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Zr, La, Ce and Nd elements were derived from the Earth crust, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd and Pb were largely derived from the anthropogenic activity. However, Ca and Sr in the Yellow Dust Storm were mainly derived from the Loess soil. Satellite images (SeaWiFs, NASA-TOMS) and air-mass back trajectory analysis confirms the origin of dust during the Yellow Dust Storm period.
2. The Yellow Dust collected over the Cheju-Korea Strait region contained much higher Al and other metal concentrations than in the low dust period. Therefore, contribution of the Yellow Dust Storm to the annual depositional flux would be substantial (about 39%) if the Yellow Dust Storm period is 10 days a year in average as observed in the western coast of Japanese Islands. However, enrichment factors of anthropogenic chemical elements was lower in the Yellow Dust than in the low dust periods.
3. The age of particles in the low dust period estimated to be longer than those in the Yellow Dust based on the elemental ratio of S/Ca and Al/<sup>210</sup>Pb in particles.
4. Property-property relationship between nss-sulfate and nitrate versus trace elements, and <sup>210</sup>Pb versus <sup>7</sup>Be suggest that aerosol particles appear to travel to the high altitude after they were ejected in the ground level and then descend to the sea surface.
5. Annual dust flux to the sea surface would constitute of 41% in wet deposition, 39 % in the Yellow Dust Storms and 20% in the low dust dry deposition. Therefore, the annual variation of Yellow Dust Storms would significantly cause a variation in the annual depositional flux in the region.

#### ● Transport of chemical materials in the South Sea

The estimated total material transports in the Cheju Strait using all data which investigated in 1997 and 1999 are as follows;

A large amount of suspended sediments and dissolved inorganic nutrients are carried to the South Sea through the Cheju Strait by a persistent eastward flow (Cheju Current) from the Yellow Sea and the East China Sea. The annual material transports by the Cheju Current are as follows;  $22.9 \times 10^6$  ton yr<sup>-1</sup> (SS),  $0.52 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),  $6.05 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup> (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>),  $0.36 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup> (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>),  $10.27 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup> (Si(OH)<sub>4</sub>).

The water transport specific suspended sediment flux is about three times larger than those by Tsushima Current ( $7.25 \times 10^6$  ton yr<sup>-1</sup>) and Kuroshio in the eastern part of the Taiwan ( $7.25 \times 10^6$  ton yr<sup>-1</sup>; Chen et al., 1994).

The water transport specific nitrate and phosphate fluxes are similar to those by Tsushima Current ( $5.05 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup>) and Kuroshio ( $9.65 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup>) but 2-12 (nitrate) and 6-180 (phosphate) larger than those by the Huanghe and the Changjiang River. It suggests that chemical rich Cheju Current will play a significant role in the biogeochemical processes in the South Sea where the huge land-based waste are introduced.

#### 4. Biochemical characteristics of the benthic biota and environment

Heterotrophic bacteria which produce substrate (lipid, protein, and polysaccharide) digesting enzyme were screened and isolated. Their role in the environmental change of ecosystem in South Sea were discussed. The analysis of marine particulated and dissolved lipid (total lipid composition, hydrocarbon, and fatty acid) lead to the interpretation of effect of terrestrial input and marine material flux as well as the effect on the heterotrophic organism in nutritional concepts. 5 sea weeds were found to produce very high level of available fatty acid (eicosapentaenoic acid, EPA) leading to a mass production of such fatty acid.

#### 5. Holocene sedimentary processes of suspended matter

##### ● Holocene transgressive sedimentary processes

The Holocene transgression has formed various depositional units over the shelf of the South Sea. In the deepest central part, coarse-grained, relict deposits are exposed on the seafloor, whereas in the coastal area are thick accumulations of muds. Between these two end members, there is a mixture of them, sandy mud and muddy sand. The Holocene sediments occur on the seismic profiles as a diversity of depositional forms including deltas and sand ridges.

### ● Distribution and geotechnical properties of surface sediments

The distribution of surface sediments well mirror that of the Holocene sedimentary units. Silt-clay sediments are distributed in a belt along the coast east of the Nakdong River, whereas the sand amount increases around Gohung Peninsula and Gojedo resulting in the dominance of sandy mud and muddy sand. However, sand markedly increases with water depth toward the central part of the sea where relict deposits are prevalent. The water content exceeds 150% in clayey sediments, but it decreases rapidly below 60% in muds including increased amounts of sand and silt. Toward the east, most of the geotechnical properties, carbonate and total organic matter amounts and plastic and liquid limits, tend to increase as clay amounts increase. The shear-strength profile of the mud deposit shows a gradually increasing trend with core depth, indicating a normal consolidation state.

### ● Classification of sub-environments according to box-core analysis

The analysis of a number of box cores allows the South Sea and its vicinity to be further divided with respect to the depositional environments, such areas as Huksan Mud Belt, west of Cheju Island, and the coastal region and central part of the South Sea. The mud of the Huksan Mud Belt characteristically contains silt-clay laminae as a result of seasonal changes of hydraulic energy. Its origin is considered to be the terrigenous material from the west coast of Korea. The area west of Cheju Island predominantly receives Huanghe-derived suspended matter with the resultant clayey mud where bioturbation is highly active. The coastal region of the South Sea can be divided into 3 sub-areas, i.e., west of Gohung Peninsula, around Somjin River and around Nakdong River. These three environments appear to have different sediment sources.

### ● Bay sedimentation

In Gamakyang Bay, the Holocene muds are thickest in the center and is likely to involve biogenic gases. Radiometric age dating indicates that the uppermost 6-m sediment sequence has accumulated during about 4,500 years. By contrast, there are well-developed tidal flats in Yoja Bay, especially on the western side of the bay. The transport model suggests that the offshore suspended matter enters the bay through several bay inlets and mostly accumulates on the western tidal flats. The bay muds are represented by 4 major foraminiferal groups strongly indicative of the offshore-water effect.

### ● Flux evaluation of suspended matter

The 12.5-hour time-series measurements of suspended matter and basic hydrodynamic parameters from the bays of Jinhae-Masan and Yoja indicate that the net influx of suspended matter occurred in both of the two bays during the summer season. The major sources of the suspended matter are thought to be Nakdong River and Somjin River, respectively. However, the magnitude of the



influx during the summer except for the flooding season is unlikely to be high with surface concentrations of suspended matter less than 10 mg/l.

## 6. On the larval fish assemblage in the coastal of Cheju Island

### 1) On the larval fish assemblage in the coastal of Cheju Island

Total 31 species of fish larvae were captured in this study area. Among them 17 species of fish larvae were captured with bongo net and 28 species with small surface trawl net. The number of species captured with two types of net were found a significant difference ( $p < 0.05$ ). The fish larvae were captured smaller one with bongo net than the small surface trawl net. The dominant species were *Chromis notatus* in the bongo net and *Spratelloides gracilis* and *Engraulis japonicus* in the small surface trawl net.

### 2) Larval morphology and distribution of *Laemonema nana* Taki (Moridae)

A total of 28 *Laemonema nana* larvae, 1.4~10.5mm in body length, were collected by bongo net and small surface trawl net in the coastal area of Cheju Island during 1998~1999.

This paper describes morphological features of these specimen throughout their development.

- The soft ray of fin appeared at about 4.5mm (Body Length, BL) and attained to a fixed number at about 6.8mm (BL).
- There were two large pigments in the head of larvae less then about 4mm (BL).
- There was a large pigment in the middle of tail which were spread to the caudal penducle at about 9 mm(BL).
- There was a large pigment in the base of anal fin at about 2mm(BL) which were spread to the 1/2 of tail at about 9 mm(BL).
- Their spawning season would be fall and winter season around sea of Cheju Island.

## V. Conclusions and Suggestions

This is a third year of the 10-year multidisciplinary project to understand and qunatify the transport, biogeochemical formation and transformation of biologically important chemical elements in the current-dominated coastal shelf in Cheju-Korea Straits region, and to explore the existence and extent of commercially valuable biochemicals from the regional biota. The Cheju-Korea Straits region is the only warm water feeding area adjacent to Korean Peninsula. The ultimate aim of this study to develop a national strategy for development and environmetal conservation in a sustainable manner based on the sound

understanding of the governing forces upon ocean biogeochemical processes in the region.

The fluxes and distribution of nutrients are derived by strong seasonal variation of wind and precipitation since the region is under the influence of the Northeast Asian Monsoon. Hence, the plankton primary productivity is also show a strong seasonal variation. Especially heavy rainfall during the wet monsoon period each year, a significant amount of freshwater and nutrients and other land-derived material from the Chinese continent, notably, the Changjiang River, and minor contribution from the Korean Peninsula discharges to the western part of Cheju Island and entrained by the Cheju Current (0.37 to 0.58 sv with maximum speed of 15 to 20 cm s<sup>-1</sup>) and passes to the Cheju-Korea Straits, thus forms the strong nutrient stream in the Northeast Asian Marginal seas, which eventually feeds the East Sea. Nutrients fluxes through the Cheju Strait is a factor of 2-3 higher than those of Tushima Current between Cheju and Kyushu Islands, and a comparable to that of the Kuroshio off Taiwan.

POC arrival flux to the sediment/water interface was estimated to be 0.48 mg C cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> in average based on the <sup>210</sup>Pb-derived sediment accumulation rate and superficial sediment organic carbon concentration in the Cheju-Korea Strait shelf. If this value can be extended to the entire shelf (4.59 × 10<sup>10</sup> m<sup>2</sup>), then total areal arrival flux would be 2.19 × 10<sup>11</sup> gC yr<sup>-1</sup>. Similarly, PON arrival flux to the sediment/water interface was estimated to be 0.08 mg N cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> in average based on the <sup>210</sup>Pb-derived sediment accumulation rate and superficial sediment organic carbon concentration in the Cheju-Korea Strait shelf. If this value can be extended to the entire shelf (4.59 × 10<sup>10</sup> m<sup>2</sup>), then total areal arrival flux would be 0.36 × 10<sup>11</sup> gN yr<sup>-1</sup>. Organic matter once arrived in the sediment/water interface is subjected to the subsequent burial and continuation of decomposition or dissolution (early diagenesis). A magnitude of early diagenesis of organic matter was estimated preliminary using a sediment organic matter concentration at depth of sediment column (here 20-30 cm below the surface) and sediment accumulation rate, assuming steady-state conditions. Annual organic carbon and nitrogen is estimated to be decomposed an order of 0.84 × 10<sup>11</sup> g C yr<sup>-1</sup> and 0.13 × 10<sup>11</sup> g N yr<sup>-1</sup>, respectively. If the regenerated nitrogen can be assumed to be oxidized nitrogen, then this benthic flux would be 5 times more than annual flux (NO<sub>3</sub> = 50 mol l<sup>-1</sup>, water discharge 9.2 km<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>) nitrate discharge from the Nakdong River. However, this initial budgetary approach has to be rigorously sampled and analyzed in the near future.

Current analysis of water mass origin based on the radium isotopic compositions in the region revealed that the regional water is composed of shelf water (38% at maximum) and Kuroshio water (62% at minimum). However, current two end-member mixing model suffers from the true representation of

Korean river water and river waters in the northern China such as Yellow River waters. Therefore, a more detailed study on the radium and oxygen isotopes for indentify the provenance of water in the region.

Atmospheric pathways in the region is proved to be significant among the allochthonous material input, especially during the Yellow Dust Storm period. Atmospheric Al and other metal concentrations in the Yellow Dust Storm period was an order of magnitude higher than the low dust period. Therefore, study on the atmospheric pathways of various chemical material should be an important part of this project in order to quantitatively assess the relative contribution of various pathways introducing chemical elements in the Cheju-Korea Straits.

Two more biological organisms were found to contain a significant amount of bioactive compounds which potentially contribute the regional economy in addition to the two commercially viable organisms we have found in the first year. In the future, a more close examination of the fatty acids and steroid compounds in the regional biota.

Throughout the research project, we focused on quantifying the spatial structure and temporal variability of the Cheju Current in the Cheju Strait, and the development of a three-dimensional numerical model for the simulation of the circulation of the South Sea because they are poorly understood. Sectional distribution of the flow field in the Cheju Strait and the volume transport becomes more clarified, and the 9-month long current data was obtained in the Cheju Strait for the first time. The temporal variability needs to be more carefully examined in the future.

The sedimentary facies of the South Sea is highly variable as a result of the Holocene sea level rise. The present-day suspended matter moves around along the coastal area restricted in water depth shallower than about 60 m, and are deposited ultimately in bays and the nearshore. Although during summer river-derived materials are major constituents in the suspended matter, the hydrodynamic behavior of suspended matter becomes greatly activated and thus quite different during the winter compared to the summer season. In this regard, further extensive studies should be continued to yield the practical framework of the suspended matter seasonal sedimentation from the multi-year data base.

There is a need to collect the fish larvae with a small net and a big mouth net at the same time for selectivity of nets and swimming speed of fish larvae in the shallow coastal area.



# Contents

Summary -----	3
Contents -----	39
List of Figures -----	47
List of Tables -----	61
<b>Chapter I. Introduction -----</b>	<b>67</b>
1. The background of the study-----	67
2. The objective of the study -----	68
<b>Chapter II. Research status -----</b>	<b>73</b>
1. Abroad research status -----	73
2. Domestic research status -----	75
<b>Chapter III. Contents and results of the study -----</b>	<b>79</b>
1. Current and circulation -----	81
1). Introduction -----	81
2). Data and methods -----	83
2.1. Retrospective study -----	83
2.2. Analysis of observational data -----	83
2.3. Circulation modeling -----	87
3). Results-----	88
3.1. Previous studies -----	88
3.2. Analysis of historical data -----	94
3.3. Analysis of observational data-----	99
3.4. Circulation modeling -----	108
3.5. Conclusion and discussion-----	128
2. Anaerobic coastal inlets -----	183
1). Materials and methods-----	183
2). The distribution of general chemical components and anaerobic environment in the Masan-Chinhae Bay-----	185
3). The behavior of heavy metals in the Masan-Chinhae Bay-----	195
4). Discussion and conclusions-----	205
3. Shelf Biogeochemistry -----	208
1). Introduction -----	209
2). Study area and investigation period -----	210
3). The characteristics of the biogeochemical properties in the South Sea	

-----	213
3.1. Introduction -----	213
3.2. Materials and methods -----	214
3.3. Results -----	217
3.4. Discussion -----	237
4). The distributional characteristics of organic matter in the water column and sediments of the South Sea -----	241
4.1. Introduction -----	241
4.2. Material and methods -----	241
4.3. Results -----	242
4.4. Discussions-----	253
5). Primary production -----	258
5.1. Introduction -----	258
5.2. Material and methods -----	258
5.3. Results -----	259
5.4. Discussions -----	262
6). The origin of the water mass of the South Sea-----	265
6.1. Introduction -----	265
6.2. Materials and methods -----	266
6.3. Results -----	269
6.4. Discussion -----	273
7). The distributional characteristics of <sup>210</sup> Po and sediment accumulation rate -----	279
7.1. Introduction -----	279
7.2. Material and methods -----	280
7.3. Results and discusstion -----	281
7.4. Conclusions -----	289
8). Chemical composition of marine aerosol particles -----	290
8.1. Introduction -----	290
8.2. Materials and methods -----	291
8.3. Results and discussion-----	293
8.4. Conclusions -----	309
9). The fluxes of chemical materials passing the Cheju Strait -----	310
9.1. Introduction -----	310
9.2. Materials and methods -----	310
9.3. Results -----	312
9.4. Discussion -----	320
9.5. Conclusions-----	322
4. Biochemical characters of benthic organisms -----	323
1). Introduction -----	323

2).	materials and methods -----	324
2.1.	Isolation of bacterial strains from sea water and sediment-----	324
2.2.	Isolation of lipids from sea water and sediment-----	325
2.3.	Analysis of marine organisms for production of industrially available fatty acids -----	329
3).	Results -----	331
3.1.	Isolation and storage of bacteria -----	331
3.2.	Extraction and initial analysis of lipid from sea water -----	332
3.3.	Analysis of total lipid from winter sample (9902) -----	333
3.4.	Analysis of hydrocarbon and fatty acid of winter sample (9902)-----	334
3.5.	Analysis of total lipid from summer sample (9908) -----	340
3.6.	Analysis of hydrocarbon and fatty acid of summer sample (9908) -----	342
3.7.	Analysis of toxicity of lipid in sea water -----	346
3.8.	Analysis of fatty acid composition of benthic organisms.-----	347
5.	Holocene sedimentary processes of suspended matter -----	399
1).	Introduction -----	399
2).	Holocene transgressive sedimentary processes -----	399
3).	Surface sediments -----	401
3.1.	Distribution -----	401
3.2.	Geotechnical properties -----	401
4).	Present-day sedimentary processes -----	402
5).	Sedimentary structure of box cores -----	403
5.1.	Huksan Mud Belt -----	403
5.2.	West of Cheju Island -----	404
5.3.	Coastal area of South Sea -----	405
5.4.	Central part of South Sea -----	405
6).	Bay sedimentation I: Gamakyang -----	406
7).	Bay sedimentation II: Yoja Bay -----	406
7.1.	Geologic setting -----	406
7.2.	Materials and methods-----	407
7.3.	Results -----	409
7.4.	Discussion -----	412
7.5.	Summary -----	414
8).	Hydrodynamic measurements I: Jinhae-Masan Bay -----	415
8.1.	Geologic setting -----	415
8.2.	Currents -----	416

8.3. Temperature -----	416
8.4. Salinity-----	416
8.5. Suspended matter concentrations -----	417
9). Hydrodynamic measurements II: Yoja Bay -----	417
9.1. Geologic setting -----	417
9.2. Materials and methods -----	418
9.3. Results -----	420
9.4. Summary -----	425
10). Conclusions -----	426
6. Fish larvae -----	507
<b>1) On the larval fish assemblage in the coastal of Cheju Island -----</b>	<b>507</b>
1.1. Introduction -----	507
1.2. Materials and methods -----	507
1.3. Results and discussion -----	509
<b>2) Larval morphology and distribution of <i>Laemonema nana</i> Taki (Moridae)</b>	
-----	515
2.1. Introduction -----	515
2.2. Materials and methods -----	515
2.3. Results and discussion -----	516
 <b>Chapter IV. Achievement of the study goal -----</b>	 <b>523</b>
 <b>Chapter V. Application of research outputs -----</b>	 <b>527</b>
1. Necessity of supplementary study -----	527
2. Application to other fields -----	528
 <b>Chapter VI. Reference -----</b>	 <b>535</b>
 <b>Appendices -----</b>	 <b>563</b>
1. Log sheet of investigation in February and August 1999 -----	565
2. The workshop of transport and biogeochemical process in the Cheju Strait (TRAB-C) -----	567



# 목 차

제 출 문 -----	2
요 약 문 -----	3
목 차 -----	39
그림 목차 -----	47
표 목차 -----	61
제 1 장 서 론 -----	67
제 1 절 연구사업 배경 -----	67
제 2 절 연구개발 목표와 주요사업 내용 -----	68
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	73
제 1 절 국외 연구개발 현황 -----	73
제 2 절 국내 연구개발 현황 -----	75
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 -----	79
제 1 절 해류 및 해수순환 -----	81
1. 서 론 -----	81
2. 재료 및 방법 -----	83
2-1. 기존 연구결과 정리 및 기존자료의 분석 -----	83
2-2. 현장 관측자료의 분석 -----	83
2-3. 해수순환 모델링 -----	87
3. 결과 -----	88
3-1. 기존 연구결과 -----	88
3-2. 기존 자료분석 -----	94
3-2-1. 남해의 평균적 계절별 해황 -----	94
3-2-2. 장기 해류관측 결과 분석 -----	96
3-2-3. 남해의 월평균 해상풍 -----	99
3-3. 해양관측 자료의 분석 -----	99
3-3-1. 제주해협에서의 해수와 해류분포 -----	99
3-3-2. 제주해협에서의 해수수송량 -----	103
3-3-3. 한·미 공동조사 결과 -----	105
3-3-4. 제주해협 장기 해류관측 결과 -----	106
3-4. 해수순환 모델링 -----	108
3-4-1. 서론 -----	108
3-4-2. 수치모델 -----	109
3-4-3. 모델의 적용 -----	115
3-4-4. 모델 구성 -----	119

3-4-5. 모델결과 -----	123
4. 결론 및 토의 -----	128
제 2 절 혐기성 내만환경 -----	183
1. 재료 및 방법 -----	183
2. 마산-진해만의 일반환경지수 분포와 혐기성 환경 -----	185
3. 마산-진해만의 중금속 원소 거동 -----	195
4. 토의 및 결론 -----	205
제 3 절 대륙붕 화학물질 순환 및 수지 -----	209
1. 서 론 -----	209
2. 조사해역 및 관측시기 -----	210
3. 대륙붕 해양화학성분 분포 특성 -----	213
3.1. 서 론 -----	213
3.2. 재료 및 방법 -----	214
3.3. 결과 -----	217
3.4. 토의 -----	237
4. 유기물 분포 특성 -----	241
4.1. 서 론 -----	241
4.2. 재료 및 방법 -----	241
4.3. 결 과 -----	242
4.4. 토 의 -----	253
5. 기초 생산력 -----	258
7.1. 서 론 -----	258
7.2. 재료 및 방법 -----	258
7.3. 결 과 -----	259
7.4. 토 의 -----	262
6. 남해해수 기원 -----	265
5.1. 서 론 -----	265
5.2. 재료 및 방법 -----	266
5.3. 결과 -----	269
5.4. 토의 -----	273
7. <sup>210</sup> Po 분포특성 및 제거과정 -----	279
6.1. 서 론 -----	279
6.2. 재료 및 방법 -----	280
6.3. 결과 및 고찰 -----	281
6.4. 결 론 -----	289
8. 대기유입 화학물질 특성 -----	290
8.1. 서 론 -----	290
8.2. 재료 및 방법 -----	291
8.3. 결과 및 토의 -----	293
8.4. 결 론 -----	309

9. 제주해협 통과 화학물질플럭스 -----	310
9.1. 서 론 -----	310
9.2. 재료 및 방법 -----	310
9.3. 결과 -----	312
9.4. 토의 -----	320
9.5. 결 론-----	322
제 4 절 저서생물 생화학 특성 -----	323
1. 서 론 -----	323
2. 재료 및 방법 -----	324
2.1. 해수 및 해저 퇴적물에서 균주의 분리 -----	324
2.2. 해수 및 해저퇴적물로부터 지방 성분의 분리 -----	325
2.3. 유용물질 생산 후보 생물의 분석 -----	329
3. 연구결과 -----	331
3.1. 일반 세균의 분리 및 균주 보존 -----	331
3.2. 해수 시료에서 지방성분의 추출 및 초기 분석 -----	332
3.3. 겨울시료의 지방 성분의 분석 (99년 2월 시료) -----	333
3.4. 탄화수소와 지방산의 조성 및 분포 조사 (99년 2월 시료) -----	334
3.5. 여름시료의 지방 성분 분석 (99년 8월 시료) -----	340
3.6. 여름시료의 탄화수소와 지방산의 조성 및 분포 조사 (99년 8월 시료) -----	342
3.7. 해수중 지방 성분의 독성 조사 -----	346
3.8. 저서생물의 지방산 조성 및 유용성분 정제 -----	347
제 5 절 남해의 퇴적환경 -----	399
1. 서 론 -----	399
2. 홀로세 해침 퇴적작용 -----	399
3. 표층퇴적물 -----	401
3.1. 표층퇴적물의 공간분포 -----	401
3.2. 퇴적물의 지질공학적 성질 -----	401
4. 현생퇴적작용 -----	402
5. 박스코아의 퇴적구조 -----	403
5.1. 서남해 흑산나대 -----	403
5.2. 제주도 서부해역 -----	404
5.3. 남해 연안해역 -----	405
5.4. 남해 중앙부해역 -----	405
6. 만의 퇴적작용 I: 가막양 -----	406
7. 만의 퇴적작용 II: 여자만 -----	406
7.1. 연구지역 개관 -----	406
7.2. 조사 및 분석방법 -----	407
7.3. 연구결과 -----	409

7.4. 토 의	412
7.5. 요약	414
8. 퇴적역학적 정선관측 I: 진해, 마산만 입구	415
8.1. 개요	415
8.2. 해 류	416
8.3. 수 온	416
8.4. 염 분	416
8.5. 부유물질의 농도	417
9. 퇴적역학적 정선관측 II: 여자만	417
9.1. 개요	417
9.2. 조사 및 분석방법	418
9.3. 연구결과	420
9.4. 요약	425
10. 결 론	426
제 6 절 제주도 연안의 치차어	507
1) 제주도 연안의 자치어 종 조성	507
1.1. 서 론	507
1.2. 재료 및 방법	507
1.3. 결과 및 고찰	509
2) <i>Laemonema nana</i> Taki 자치어의 지리적인 분포와 형태 발달에 관한 연구	515
2.1. 서 론	515
2.2. 재료 및 방법	515
2.3. 결과 및 고찰	516
제 4 장 연구개발 달성도 및 기여도	523
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	527
제 1 절 추가연구의 필요성	527
제 2 절 타연구에의 활용 및 연구결과 활용	528
제 6 장 참고문헌	535
부록 :	563
1. 1999년 2월과 8월 해양조사 일지	565
2. 한국남해의 해양수송과 과정연구 논문집	567

## List of Figures

- Fig. 1-1. Coastline, bottom topography, and the inflow/outflow system of the South Sea. Isobaths given in meters are contoured every 20 meters, and topography of the east Asian marginal seas are also shown in an inset in the upper left corner with 50 m, 100 m, 200 m, and 500 m isobaths. The rectangular area enclosed by long-dash lines is the model domain in which an ocean circulation model is applied. Diurnally-averaged mean currents, which are used for the specification of the inflow/outflow, were obtained on the two ADCP traverse lines denoted by dashed lines in the Cheju and the Korea Straits. A thick meridional line in the middle of the model domain denotes the line where the vertical structure of model-generated flow field is examined. Coastal tide stations used for the model/data comparison are shown with closed circles. Geographic locations referred to in the text are also shown with open circles with their names in an inset in the lower left corner. -----133
- Fig. 1-2. CTD stations and ADCP traverse lines occupied during 1997~1999.----- 134
- Fig. 1-3. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in March 1997.----- 134
- Fig. 1-4. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in September 1997. ----- 135
- Fig. 1-5. CTD stations occupied in April 1998. -----135
- Fig. 1-6. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in September 1998. ----- 136
- Fig. 1-7. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in November 1998. ----- 136
- Fig. 1-8. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in February 1998. ----- 137
- Fig. 1-9. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in August 1998.----- 137
- Fig. 1-10. CTD stations and TRBM-ADCP mooring locations occupied jointly by KORDI and NRL (Naval Research Laboratory, USA) in May 1999. ----- 138
- Fig. 1-11. CTD stations and TRBM-ADCP mooring locations occupied jointly by KORDI and NRL (Naval Research Laboratory, USA) in October 1999. ----- 138
- Fig. 1-12. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea

- in February based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. -----139
- Fig. 1-13. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in April based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. -----140
- Fig. 1-14. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in June based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. ----- 141
- Fig. 1-15. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in August based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. -----142
- Fig. 1-16. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in October based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. ----- 143
- Fig. 1-17. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in December based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987. ----- 144
- Fig. 1-18. Progressive vector diagrams for current data taken by the National Ocean Research Institute at 5 m depth in the Hoenggan Channel for 15 days in June 1980 (left panel) and for 32 days in September 1998 (right panel). Sampling intervals were 1 hour in June 1980 and 10 minutes in September 1998, and the diagrams are based on hourly data. ----- 145
- Fig. 1-19. Vector plot, and east-west and north-south components of low-pass filtered, subsampled every 12 hours, currents based on current data taken in June 1980. Doodson's  $X_0$  filter was used for the elimination of tidal components of currents. ----- 146
- Fig. 1-20. Vector plot, and east-west and north-south components of low-pass filtered, subsampled every 12 hours, currents based on current data taken in September 1998. Doodson's  $X_0$  filter was used for the elimination of tidal components of currents. Repeated vessel-mounted ADCP surveys were conducted in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do during the stippled period. ----- 147
- Fig. 1-21. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from January to June with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea

surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998). ----- 148

Fig. 1-22. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from July to December with a spatial resolution of  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998). ----- 149

Fig. 1-23. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in February 1999. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 150

Fig. 1-24. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Chin-Do in March 1997. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 151

Fig. 1-25. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Chin-Do in April 1995 (Suk et al., 1996). Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 152

Fig. 1-26. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in August 1999. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 153

Fig. 1-27. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the

Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in September 1997. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 154

Fig. 1-28. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in September 1998. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 155

Fig. 1-29. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in November 1998. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component. ----- 156

Fig. 1-30. Vertical sections of temperature, salinity and water density ( $\sigma_t$ ) off Ulsan northeast of the Korea Strait (left panel) and off Sori-Do southwest of the Korea Strait (right panel) taken during a joint Korea-US survey in May 1999. CTD locations are shown with tick marks, and labeled locations denote TRBM-ADCP mooring sites. --- 157

Fig. 1-31. Vertical sections of temperature, salinity and water density ( $\sigma_t$ ) off Ulsan northeast of the Korea Strait (left panel) and off Sori-Do southwest of the Korea Strait (right panel) taken during a joint Korea-US survey in October 1999. CTD locations are shown with tick marks, and labeled locations denote TRBM-ADCP mooring sites. --- 158

Fig. 1-32. Time series of low-pass filtered east-west (upper panel), north-south (middle panel) components of currents at 66 m depth, and temperature (lower panel) near the seabed.----- 159

Fig. 1-33. Time series of low-pass filtered east-west (upper panel), north-south (middle panel) components of currents at 118 m depth, and temperature (lower panel) near the seabed.----- 160

Fig. 1-34. Spatial structure of the volume transport (solid lines) and depth-averaged velocity (dotted lines) specified across three open boundaries based on the observed diurnally-averaged flow in the Cheju Strait in the Korea Strait in fall, 1997. The volume transport specified



across the southern boundary is the difference between eastern and western boundaries, and the spatial pattern of the transport and the velocity is arbitrary. Bottom topography across open boundaries is also shown.-----161

Fig. 1-35. Horizontal distribution of observed surface temperature and salinity in the South Sea in August 8-16 (left panel) and October 8-29 (right panel), 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.----- 162

Fig. 1-36. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in August 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data. ----- 163

Fig. 1-37. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in October 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.-----164

Fig. 1-38. Spatial arrangements of model variables on an Arakawa C-grid near the western boundary. The western open boundary coincides with the line denoted by the subscript B.----- 165

Fig. 1-39. Total kinetic energy as a function of time for (a) Case 4, and (b) Case 5 in Table 1-9. Solid line shown in (b) denotes the variation of 15-day moving-averaged total kinetic energy.----- 166

Fig. 1-40. A schematic illustration of model run for Case 5 in Table 1-9. The model is forced by a specification of time-varying tidal currents and steady inflow/outflows observed in fall 1997 across open boundaries, and time-varying temperature and salinity based on the observation in August and October both at the sea surface and across open boundaries. The tidal currents are pre-determined by a three-dimensional barotropic tide model, where five major constituents of tidal currents are computed by specifying free surface elevation across open boundaries. The model was initially quiescent with  $\eta=0$  inside the model domain, and diagnostic calculation was performed for 10 days with fixed three-dimensional temperature and salinity fields observed in August, and with time-varying tidal currents and inflow/outflows across open boundaries. The prognostic calculation was then followed with the specification of observed temperature and salinity at the sea surface and across open boundaries for 82 days. Linearly interpolated, time-varying temperature and salinity are specified from August 15 to October 15 based on the observations in August and October, and the surface and boundary forcing applied

before August 15 and after October 15 is fixed with those values in August and October, respectively. Also shown are periods of averaging the model results for 15 days in order to examine the subtidal circulation in August, September, and October. ----- 167

Fig. 1-41. Model (Cal)/data (Obs) inter-comparison for the amplitude and phase of four dominant tidal constituents. ME and ARE denote the mean and the absolute relative errors, respectively, as defined in the text. ----- 168

Fig. 1-42. Tidally-induced residual currents at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers computed using the three-dimensional barotropic tide model (Case 1 in Table 1-9). ----- 169

Fig. 1-43. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of ebb tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 5 in Table 1-9). ----- 170

Fig. 1-44. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of flood tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 5 in Table 1-9).----- 171

Fig. 1-45. Computed 15-day averaged flow field at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 5 in Table 1-9. ----- 172

Fig. 1-46. Subtidal surface currents in the South Sea based on the observation by (a) Lie and Cho (1997), and (b) Mitta and Ogawa (1984). ----- 173

Fig. 1-47. Vertical section of the computed 15-day averaged horizontal velocity vector on a meridional line south of Namhae-Do (thick solid line in Fig. 1-1) in September for Case 5 in Table 1-9. ----- 174

Fig. 1-48. Computed 15-day averaged density distribution at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 5 in Table 1-9. ----- 175

Fig. 1-49. Horizontal distribution of observed temperature and salinity (top panel), and computed 15-day averaged temperature and salinity (bottom panel) at 50 m depth in August for Case 5 in Table 1-9. ----- 176

Fig. 1-50. Horizontal distribution of computed 15-day averaged temperature at surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 5 in Table 1-9. ----- 177

Fig. 1-51. Horizontal distribution of computed 15-day averaged salinity surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 5 in Table 1-9. ----- 178

Fig. 1-52. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom

$\sigma$ -layers (from top to bottom) for Case 2 in Table 1-9. -----	179
Fig. 1-53. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom $\sigma$ -layers (from top to bottom) for Case 3. -----	180
Fig. 1-54. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom $\sigma$ -layers (from top to bottom) in September for Case 4. -----	181
Fig. 1-55. Streamfunction field for (a) Case 5, and differences in the stream- function field between (b) Case 5 and Case 3 and (c) Case 5 and Case 4 in Table 1-9. -----	182
Fig. 2-1. Sampling stations of Chinhae Bay in August 1999. -----	183
Fig. 2-2. Vertical profile of temperature and dissolved oxygen in Masan-Chinhae Bay. -----	190
Fig. 2-3. Dissolved Cd and Zn in Masan Bay. -----	196
Fig. 2-4. Acid-leachable particulate heavy metals in Masan Bay. -----	198
Fig. 2-5. Relationship between acid-leachable particulate heavy metals and sat- uration percentage of dissolved oxygen in the bottom waters of Masan-Chinhae Bay. -----	202
Fig. 2-6. Distribution of heavy metals in sediments of Masan Bay. -----	204
Fig. 2-7. Relationship between heavy metals in sediments of Masan-Chinhae Bay. -----	205
Fig. 3-3-1. Maps of sampling stations in 1999. in the South Sea. -----	214
Fig. 3-3-2. Vertical distributions of DO, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Cheju Strait in February 1999. -----	220
Fig. 3-3-3. Vertical distributions of DO, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Cheju Strait in August 1999. -----	223
Fig. 3-3-4. Vertical distributions of NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Section N of the Korean Strait in May 1999. -----	227
Fig. 3-3-5. Vertical distributions of NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Section S of the Korean Strait in May 1999.-----	229
Fig. 3-3-6. Vertical distributions of NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Section N of the Korean Strait in October 1999. -----	233
Fig. 3-3-7. Vertical distributions of NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>4</sub> , Chl-a in the Section S of the Korean Strait in October 1999.-----	235
Fig. 3-3-8. T-S diagram (a) and S-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in February 1999. -----	238
Fig. 3-3-9. T-S diagram (a) and S-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in April 1998. -----	238
Fig. 3-3-10. T-S diagram (a) and S-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in August 1999. -----	239

Fig. 3-3-11. T-S diagram (a) and S-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in November 1998. -----	240
Fig. 3-4-1. Vertical distributions of POC, PON in the Cheju Strait in February 1999. -----	242
Fig. 3-4-2. Vertical distributions of POC, PON in the Cheju Strait in August 1999. -----	243
Fig. 3-4-3. Vertical distributions of POC, PON in the Korea Strait in May 1999. -----	244
Fig. 3-4-4. Vertical distributions of POC, PON in the Korea Strait in October 1999. -----	244
Fig. 3-4-5. Spatial distribution of sediment accumulation rate in the Cheju-Korea Straits.-----	254
Fig. 3-4-6. Spatial distribution of sediment organic carbon contents in the Cheju-Korea Straits.-----	255
Fig. 3-4-7. Spatial distribution of sediment nitrogen contents in the Cheju-Korea Straits.-----	255
Fig. 3-4-8. Spatial distribution of sediment organic carbon burial rate in the Cheju-Korea Straits.-----	256
Fig. 3-4-9. Spatial distribution of sediment organic nitrogen burial rate in the Cheju-Korea Straits.-----	257
Fig. 3-5-1. Vertical profiles primary production in the Cheju Strait in February and August, 1999.-----	261
Fig. 3-5-2. Surface irradiance during the August, 1999 cruise in the Cheju Strait. -----	261
Fig. 3-6-1. Map of Ra sampling stations in 1999 in the South Sea. -----	267
Fig. 3-6-2. The correlation of salinity with <sup>228</sup> Ra and <sup>226</sup> Ra activity in the surface water of the Cheju Strait from 1996 to 1999. -----	272
Fig. 3-6-3. The correlation of salinity with <sup>228</sup> Ra and <sup>226</sup> Ra activity in the surface water of the shelf area of the South Sea from 1996 to 1999. -----	272
Fig. 3-6-4. The relationship of salinity with <sup>228</sup> Ra/ <sup>226</sup> Ra ratio in the surface water of the South Sea from 1996 to 1999. -----	274
Fig. 3-6-5. The correlation diagram between salinity (psu) and δ <sup>18</sup> O in the East China Sea and the South Sea of Korea. -----	276
Fig. 3-6-6. A δ <sup>18</sup> O - S diagram of surface waters in the Huanghe, Yangtze River, East China Sea, Kuroshio and the South Sea of Korea. -----	277
Fig. 3-7-1. Location of sampling station in the South Sea (May and August, 1999). -----	280

Fig. 3-7-2. Vertical profiles of dissolved $^{210}\text{Po}$ in the Korean Strait during August, 1999. -----	284
Fig. 3-7-3. Plot of dissolved $^{210}\text{Po}$ concentration versus total N and Chl-a. ----	285
Fig. 3-7-4. Depth distribution of dissolved $^{210}\text{Pb}$ , specific activity for particulate $^{210}\text{Po}$ , and SS in the Cheju Strait during August, 1999. -----	286
Fig. 3-7-5. Plot of Log $K_d$ versus Log SPM for $^{210}\text{Po}$ . -----	288
Fig. 3-8-1. Sampling locations in the Cheju-Korean Straits. -----	291
Fig. 3-8-2. Relationship between nss sulfate and ammonia concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits.-----	300
Fig. 3-8-3. Relationship between nss sulfate and nitrate concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	301
Fig. 3-8-4. Relationship between nitrate and Al concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	302
Fig. 3-8-5. Relationship between nss sulfate and Al concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	303
Fig. 3-8-6. Relationship between $^{210}\text{Pb}$ and nss sulfate concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	304
Fig. 3-8-7. Relationship between $^{210}\text{Pb}$ and Al concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	304
Fig. 3-8-8. Relationship between $^7\text{Be}$ and nitrate concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	305
Fig. 3-8-9. Relationship between $^{210}\text{Pb}$ and $^7\text{Be}$ concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Straits -----	306
Fig. 3-9-1. Study section in the Cheju Strait. -----	311
Fig. 3-9-2. Annual average velocity, temperature and salinity in the Cheju Strait. -----	312
Fig. 3-9-3. Annual average DO, Chl-a, $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{Si(OH)}_4$ in the Cheju Strait. -----	313
Fig. 3-9-4. Annual average suspended sediments (SS), particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) in the Cheju Strait. -----	314
Fig. 3-9-5. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{Si(OH)}_4$ in the Cheju Strait. -----	316
Fig. 3-9-6. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of SS, POC, PON in the Cheju Strait. -----	317

Fig. 4-1. General Scheme for Lipid Analysis from sea water and sediment. -----	329
Fig. 4-2. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from particulated material in sea water collected at Feb. 1999. -----	351
Fig. 4-3. GC chromatogram of fatty acid extracted from particulated material in sea water collected at Feb. 1999. -----	356
Fig. 4-4. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from sea water collected at Feb. 1999. -----	361
Fig. 4-5. GC chromatogram of fatty acid extracted from sea water collected at Feb. 1999. -----	366
Fig. 4-6. TLC-FID chromatogram of total lipid extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999. -----	372
Fig. 4-7. TLC-FID chromatogram of total lipid extracted from sea water collected at Aug. 1999. -----	375
Fig. 4-8. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999. -----	378
Fig. 4-9. GC chromatogram of fatty acid extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999. -----	383
Fig. 4-10. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from sea water collected at Aug. 1999. -----	388
Fig. 4-11. GC chromatogram of fatty acid extracted from sea water collected at Aug. 1999. -----	389
Fig. 5-1. Map showing bathymetry (contours in meters) and core sample locations (dots) in South Sea. GB, Gamagyang Bay; KB, Kangyang Bay. After Chough et al. (1991). -----	428
Fig. 5-2. Areal distribution of a variety of transgressive deposits and recent mud in the eastern South Sea. RMD = recent mud deposits; TSR = transgressive sand ridge; TSD = transgressive deposits; BSC = beach-shoreface complex; ICF = incised channel fill; LSD = lowstand deposits. Modified after Yoo (1997). -----	429
Fig. 5-3. Surface sediment distribution in the South Sea. Sediment classi- fication according to Folk's (1954) scheme. After Chough et al. (1991). -----	430
Fig. 5-4. A: Relationships of silt content versus water depth. Each point with	

	core number represents silt contents averaged throughout the core (for core location, see Fig. 5-1). B: Relationships of organic matter versus CaCO <sub>3</sub> contents. After Chough et al. (1991). -----	431
Fig. 5-5.	Geotechnical properties of selected sediment cores (for core location, see Fig. 5-1). W, water content; PL, plastic limit; LL, liquid limit; SS, shear strength; OM, organic matter. After Chough et al. (1991). -----	432
Fig. 5-6.	Averaged vertical profiles of shear strength (SS) and water content (W) for each core series (for location, see Fig. 5-1). After Chough et al. (1991). -----	434
Fig. 5-7.	Index map showing locations of box cores (dots) -----	435
Fig. 5-8.	Map showing bathymetry and box cores (dots) in the South Sea and adjacent area. -----	436
Fig. 5-9.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from the Heuksan mud belt. -----	437
Fig. 5-10.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from west of Cheju Island. -----	441
Fig. 5-11.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from the coastal region, west of the Kohung Peninsula, South Sea. -----	447
Fig. 5-12.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from off the Somjin River. -----	449
Fig. 5-13.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from off the mouth of the Nakdong River. -----	452
Fig. 5-14.	X-radiographs and textural characteristics of box cores from the central trough of the South Sea. -----	454
Fig. 5-15.	Index map of Gamagyang Bay. D.B., Deunyang Bay; J.B., Jinhae Bay; G.B., Gwangyang Bay; G.I., Geoje Island; N.I., Namhae Island. After Chough (1983). -----	464
Fig. 5-16.	Map showing locations of a variety of samplings; dots, surface sediment; reversed heavy triangles, 12.5-hr anchoring survey stations. Open-circled dots denote surface-sediment sites for foraminiferal analyses. Note the distribution of tidal flats occupied above 0 m line. Contours in meters. -----	465
Fig. 5-17.	Flow chart for calculation of transport vectors. -----	466
Fig. 5-18.	Textural classification of surface sediments from Yoja Bay following Folk' (1968) scheme. For location, see Fig. 5-16. -----	467
Fig. 5-19.	Textural characteristics of surface sediments in Yoja Bay. For sampling locations, see Fig. 5-16. -----	468
Fig. 5-20.	Calculated transport vectors on the basis of textural parameters of the surface sediments in Yoja Bay. -----	469

- Fig. 5-21. Dendrogram resulting from cluster analysis of foraminiferal assemblage data. A, station; B, biofacies. -----470
- Fig. 5-22. Map of four biofacies characterized by different total assemblage ----- 471
- Fig. 5-23. Relative abundance (%) of *Ammonia becarrii*, *Ammobaculites exiguus* and *Elphidium advenum* in total assemblages in four biofacies groups. ---472
- Fig. 5-24. Map showing the anchored, hydrographic site for 12-hour measure----- 473
- Fig. 5-25. Time-series of currents measured at surface, mid-depth and nearbottom bottom, and winds obtained from a nearby meteorological station during 7 am-7 pm, May 10, 1998. ----- 474
- Fig. 5-26. Time-series of currents, temperature, salinity and suspended matter concentrations from 12-hour hydrodynamic measurements at an anchored station (see Fig. 5-24 for location) during 7 am-7 pm, May 10, 1998. -----475
- Fig. 5-27. Measurements from station YJ-1, West Inlet, mouth of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 12-13, 1999; a, temperature; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration. -----476
- Fig. 5-28. Measurements from station YJ-2, Chobal Inlet, mouth of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 13, 1999; a, temperature; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration. ----- 477
- Fig. 5-29. Measurements from station YJ-3, middle part of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 14, 1999; a, temperature; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration. ----- 478
- Fig. 5-30. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-1; a, surface layer; b, middle layer; and c, bottom layer. ----- 479
- Fig. 5-31. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-2; a, surface layer; b, middle layer; and c, bottom layer. ----- 480
- Fig. 5-32. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-3; a, surface layer; b, bottom layer.----- 481
- Fig. 5-33. Rates of depth-integrated suspended sediment transport together with water level change at three measurement stations. Negative value in the rate indicates outward transport, whereas positive value inward transport. -----482



- Fig. 5-34. Residual flow distributions for whole water columns during the measurement periods (one tidal cycle for each station). -----483
- Fig. 5-35. Distribution of time-averaged net sediment flux for whole water column during the measurement periods (one tidal cycle for each station). ----- 484
- Plate 5-1. 1a-c, *Pseudorotalia gaimardii* (d'Orbigny); ST-66, ×55. 2a-c, *Pararotalia nipponica* (Asano); a, c, ST-97, ×70, b, ST-97, ×80. 3a-c, *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1; ST-53, ×100. 4a-c, *Ammonia beccarii* (Linne) forma 2; ST-10, ×120. ----- 485
- Plate 5-2. 1a-c, *Buccella frigida* (Cushman); ST-80, ×150, 2a-c, *Proeponides cribrorepandus* Asano and Uchino; a, b, ST-97, ×70, c, ST-97, ×80. 3a-b, *Elphidium crispum* (Linne); a, ST-97, ×70, b, ST-97, ×80. 4, *Elphidium advenum* (Cushman); ST-76, ×80. 5a-b, *Elphidium subincertum* Asano; St-15, ×100. 6a-b, *Elphidium clavatum* (Cushman); ST-90, ×170. ----- 486
- Plate 5-3. 1a-c, *Quinqueloculina vulgaris* d'Orbigny; a,c, ST-97, ×40, b, ST-97, ×50. 2a-c, *Quinqueloculina lamarckiana* d'Orbigny; a,c, ST-83, ×35, b, ST-83, ×45. 3a-b, *Quinqueloculina polygona* d'Orbigny; ST-97, ×55. 4, *Ammoscalaria tenuimargo* (Brady); ST-67, ×70.5, *Ammobaculites exiguus* Chushman and Bronnimann; ST-67, ×80. 6a-c, *Trochammina hadai* Uchino; a, b, ST-10, ×100, c, ST-15, ×105. -----487
- Fig. 6-1. A schematic diagram of small surface trawl net. ----- 508
- Fig. 6-2. Map showing the sampling stations. ----- 509
- Fig. 6-3. The comparison of bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) on the number of larval fish species captured in the study area.---- 511
- Fig. 6-4. Frequency of body length of *Engraulis japonicus* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area. ----- 512
- Fig. 6-5. Frequency of body length of *Spratelloides gracilis* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area. ----- 513
- Fig. 6-6. Frequency of body length of *Chromis notatus* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area. ----- 514
- Fig. 6-7. Map showing the sampling stations.----- 516
- Fig. 6-8. Frequency of body length of *Laemonema nana* larvae captured in the coastal area of Cheju Island.----- 518
- Fig. 6-9. The ratio between pre-anal length (PAL) and body length (BL) of *Laemonema nana* larvae captured in the coastal area of Cheju

Island.-----	518
Fig. 6-10. External features of larvae of <i>Laemonema nana</i> Taki.-----	519
Fig. 6-11. Geographical distribution of <i>Laemonema nana</i> around sea of Korea.-	520

## List of Tables

Table 1-1. Outline of CTD and vessel-mounted ADCP surveys conducted in the South Sea during 1997~1999. -----	85
Table 1-2. Manufacturer's specification of SBE 911plus CTD. -----	86
Table 1-3. Standard data processing for SBE 911plus CTD recommended by SeaBird Electronics. -----	86
Table 1-4. Previous studies on surface heat flux and wind stress in the surrounding seas of Korea including the South Sea. -----	93
Table 1-5. Amplitude of five major tidal constituents based on 20-day long current data taken at 30 m and 60 m depths in the southern Cheju Strait in April 1983 (Chang and Kim, 1995). TASK 2000 package provided by the Proudman Oceanographic Laboratory, UK is used for the harmonic analysis of the data. -----	97
Table 1-6. Amplitude of five major tidal constituents based on 32-day long current data taken at 5 m depth in the Hoenggan Channel in September 1998 by the National Oceanographic Research Institute. TASK 2000 package provided by the Proudman Oceanographic Laboratory, UK is used for the harmonic analysis of the current data. -----	98
Table 1-7. Outline of repeated ADCP traverse surveys conducted in the Cheju Strait during 1997~1999 in order to investigate the spatial and temporal structure of the diurnally-averaged flow in the strait. -----	100
Table 1-8. Volume transport in the Cheju Strait and the Korea Strait based on the diurnally-averaged flow observed by vessel-mounted ADCPs. Volume transport based on geostrophic currents is also shown for the comparison. -----	104
Table 1-9. Outline, and basic statistics and range of velocity components and temperature at 66 m and 118 m depths for raw (Unfiltered) and low-pass filtered (Filtered) data taken in the southern Cheju Strait during March 4~December 23, 1999 using TRBM-ADCP. -----	107
Table 1-10. Summary of initial and boundary conditions for 5 model cases. -----	116
Table 1-11. Vertical grid system in $\sigma$ -coordinate. $\sigma$ , $\sigma'$ , $Z$ , and $\Delta\sigma$ denote the position of the boundary of each $\sigma$ -layer, position of the center of each $\sigma$ -layer, depth of the center of each $\sigma$ -layer when total depth is 100m, and the distance between two consecutive $\sigma$ -layers, respectively. -----	117

Table 2-1. General water quality parameters in Masan-Chinhae Bay in August 1999. -----	186
Table 2-2. Nutrients in Masan-Chinhae Bay in August 1999. -----	188
Table 2-3. Dissolved heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999 ( $\mu\text{g}/\ell$ ). -----	195
Table 2-4. Acid-leachable particulate heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999.-----	197
Table 2-5. Refractory particulate heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999. -----	200
Table 2-6. Distribution coefficient (Kd) between dissolved and particulate phase of heavy metals in Masan-Chinhae Bay. -----	201
Table 2-7. Heavy metal contents in sediments of Masan-Chinhae Bay in August 1999. -----	203
Table 3-1-1. Outline of the cruise from 1997 to 1999. -----	210
Table 3-3-1. Location of sampling stations in the Cheju Strait in February 22~23, 1999. -----	215
Table 3-3-2. Location of stations in the Korean Strait in May 5~15, 1999. -----	215
Table 3-3-3. Location of stations in the Cheju Strait in August 4~8, 1999. -----	215
Table 3-3-4. Location of stations in the Korean Strait in May 5~15, 1999. -----	216
Table 3-3-5. Water column of biogeochemistry in the Cheju Strait during February 22-24, 1999.-----	218
Table 3-3-6. Water column of biogeochemistry in the Cheju Strait during August 4-8, 1999.-----	219
Table 3-3-7. Water column of biogeochemistry in the Korea Strait during May 5-15, 1999.-----	225
Table 3-3-8. Water column of biogeochemistry in the Korea Strait during October 9-12, 1999.-----	231
Table 3-3-9. Ranges of T, S, SS, DO and Nutrients concentrations at each water masses in the Cheju Strait based on T-S diagram. -----	237
Table 3-4-1. The chemical composition of organic matter in the water column in the Cheju Strait during February 22-24, 1999. -----	245
Table 3-4-2. The chemical composition of organic matter in the water column in the Cheju Strait during August 3-8, 1999. -----	245
Table 3-4-3. The chemical composition of organic matter in the water column in the Korea Strait during October, 1999. -----	246

Table 3-4-4. The chemical composition of organic matter in the sediment of the South Sea (April, 1998). -----	248
Table 3-5-1. Primary production in the South Sea in February, 1999. -----	260
Table 3-5-2. Primary production in the South Sea in August, 1999. -----	260
Table 3-6-1. Ra isotopes activities in the South Sea of Korea. -----	270
Table 3-6-2. $\delta^{18}\text{O}$ values in the surface water of the East China Sea and the South Sea of Korea in October, 1996. -----	275
Table 3-7-1. Location of sampling stations in Korea Strait in May 5-15, 1999. -----	280
Table 3-7-2. Location of sampling stations in Korea Strait in August 4-8, 1999. -----	281
Table 3-7-3. Dissolved $^{210}\text{Po}$ concentration of the Korea Strait during May, 1999 (NH9905).-----	282
Table 3-7-4. $^{210}\text{Po}$ and SPM concentration of the Korean Strait during August, 1999 (NH9908). -----	283
Table 3-8-1. Sampling positions, period and air volume for the analysis of aerosol particles in the marine boundary layer in the Cheju-Korean Strait -----	292
Table 3-8-2. Aerosol chemical composition over the Cheju-Korean Straits.-----	293
Table 3-8-3. Enrichment factors calculated relative to average crustal material for marine aerosol particle samples in the Cheju-Korean Strait. -----	294
Table 3-8-4. Enrichment factors calculated relative to average seawater for marine aerosol particle samples over the Cheju-Korean Straits -----	295
Table 3-8-5. Elemental ratios of some major elements in the Chinese Loess and average earth crust. -----	296
Table 3-8-6. Non-sea salt corrected chemical composition over the Cheju-Korean Strait. -----	297
Table 3-8-7. Concentration ratios of nss sulfate to certain enriched elements over the Cheju-Korean Strait. -----	299
Table 3-8-8. Depositional flux of non-sea salt atmospheric chemical elements and compounds in the Cheju-Korean Straits. -----	308
Table 3-9-1. Along-strait material fluxes in the Cheju Strait.-----	319
Table 3-9-2. The comparison of chemical material transport in the Cheju-Korea Strait region.-----	320
Table 4-1. Isolation of organic compounds digesting bacteria. -----	331
Table 4-2. Amount of extractable lipid from sea water and particulated materials collected at Feb. 1999. -----	335
Table 4-3. Amount and composition of hydrocarbon extracted from particulated materials in sea water collected at Feb. 1999. -----	336

Table 4-4. Amount and composition of hydrocarbon extracted from sea water collected at Feb. 1999. -----	338
Table 4-5. Amount of extractable lipid from sea water and particulated materials collected at Aug. 1999. -----	341
Table 4-6. Amount of and composition hydrocarbon extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999. -----	343
Table 4-7. Amount of and composition hydrocarbon extracted from sea water collected at Aug. 1999. -----	345
Table 4-8. Fatty acid composition of some sea weeds collected in south sea. -----	347
Table 4-9. Fatty acid composition of antithamnion nipnicun and glacialaria verucosa.-----	350
Table 5-1. Summary of location and textural characteristics of box cores from the South Sea and its vicinity. -----	488
Table 5-2. Averaged composition and textural parameters of surface sediments in the study area. -----	491
Table 5-3. Mean values of foraminiferal diversity characteristics in four biofacies (H(S) = species diversity, E=equitability, S=number of species, N = number of individuals per 7 ml). -----	492
Table 5-4. Summary of 12-hour hydrodynamic measurements at the entrance of Jinhae-Masan Bay during 7 am-7 pm, May 10, 1998.-----	493
Table 5-5. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-1, West Inlet, mouth of Yoja Bay collected July 12-13, 1999. -----	495
Table 5-6. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-2, Chobal Inlet, mouth of Yoja Bay collected July 13, 1999. -----	498
Table 5-7. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-3, middle part of Yoja Bay collected July 14, 1999. -----	501
Table 5-8. Time-averaged flood and ebb flow speed, direction, temperature, and suspended sediment concentration, together with calculated residual flow and net sediment flux at each station. -----	503
Appendix 5-1. Relative abundance (%) for total assemblages in surface sediments from 36 stations in Yoja Bay. -----	504
Table 6-1. Abundance of fish larvae captured in the study area (ind./1,000m <sup>3</sup> ). -----	510
Table 6-2. Number of fish larvae species captured with two types of net at each stations in the study area. -----	511
Table 6-3. The result of T-test on the difference of number of fish larvae species captured with two types of net at each station in the study area. -----	511

제 1 장

서 론





# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구사업의 배경

진도와 제주사이의 제주해협과 부산과 일본 대마도 사이의 대한해협을 망라하는 제주도 이북의 남해 대륙붕 해역은 황해와 동중국해수가 제주해협과 대한해협을 거쳐 동해로 연결되는 길목에 위치한 동향해류 지배해역이다. 또한 한반도로부터 육상기원 물질 및 폐기물을 수용하고 있다. 남해대륙붕에는 냉수와 난수가 남북으로 대치하여 전선을 이루고 있다. 따라서 이해역에서는 해류 지배해역에서 나타나는 해양특성과 물질유입 지배해역에서 나타나는 해양특성이 복합적으로 발생하고 있다. 결과로서 남해는 생물의 생산력이 높고, 냉대성과 아열대성의 생물종이 혼재하는 해역으로서 생물·화학특성자원의 개발 가능성이 높은 해역이다. 남해대륙붕은 남해안의 긴 리아스식 해안선과 수많은 도서가 존재하여 양식어장, 대규모 항만, 대단위 공업단지등이 밀집되어 우리나라 경제에서 차지하는 비중이 높고, 유기물의 유입량 및 저장량이 많아 대륙-해양 교환과정을 이해하는데 있어 매우 중요한 곳이다. 반면에 연안주변에 대규모 공업단지 및 인구밀집지역이 위치하여 대기 및 하천을 통해 다량의 오염물질이 유입되고 있다. 특히 최근 중국 창장 (양자강) 수자원보호국의 조사에 의하면 양자강 주변의 50개 대도시와 16만개의 공장에서 배출되는 생활하수 및 공장폐수중 83%가 정화처리없이 배출되어 상당량의 오염물질이 황해로 배출되어지고 있고, 이러한 폐수배출량은 매년 2~3%씩 증가하고 있다고 보고하였다. 남해는 동향해류가 지배적으로서 (Kim and Lee, 1982) 황해 및 동중국해 대륙붕상으로 배출된 상당량의 오염물질들이 제주해협을 통해 남해로 유입될 수 있고 (Suk et al., 1996) 또한 겨울철에는 황해 남동부의 해저퇴적물과 오염물질들이 재부유되어 남해 연안까지 이동될 수 있다. 따라서 남해에서의 물질 흐름은 한반도 주변해역 전체의 물질 흐름을 이해하는데 매우 중요하다.

그러나 남해 대륙붕의 기초적인 물질순환과 생지화학적 환경연구는 거의 수행되어지지 않았다. 지금까지 남해에 대한 연구는 주로 만 및 연안등 한정된 범위의 특정해역에 치우쳐 왔고, 남해 대륙붕의 환경보전을 위해 필수적인 해수순환과 생지화학적 과정 그리고 부유물질의 이동 및 퇴적에 대한 연구는 초보적인 단계이다.

이에따라 본 연구는 남해의 생지화학적 과정과 해수 및 화학물질 순환, 어류자원, 현생 퇴적작용 규명을 위한 학제적 사업으로서 1단계 (1997-1999년) 3년간 수행된 사업 성과를 해류 및 해수순환, 혐기성 내만환경, 대륙붕 화학물질 수지 및 순환, 저서생물 생화학 특성, 세립퇴적물 이동과 치자어 군집으로 구분하여 정리하였다.

## 제 2 절 연구개발 목표와 주요 사업 내용

### 1. 연구개발 목표

- 남해 제주 해류 및 해수순환 변동 연구
- 남해 혐기성 내만환경 발달과정의 규명
- 남해 대륙붕 해역 생지화학 플럭스 결정 주요과정 규명
- 남해 저서생물 생화학 특성 파악
- 세립질 퇴적물 이동양상 규명 및 모델화
- 치차어 군집 구조 연구

### 2. 주요 사업내용

본 과제는 분지규모의 물리, 화학, 생물 및 지질등의 전문가들이 참여한 종합적이고 체계적인 연구로서 각각의 세부분야들에 대한 주요 사업내용은 다음과 같다.

#### ● 해류 및 해수순환

##### 1) 기존 연구결과와 기존자료의 수집 및 분석

- . 남해의 해황과 순환에 관한 기존 연구자료 수집 및 분석
- . 남해의 역사적 해류자료, 해수면자료 및 기상자료의 수집 및 분석
- . 기존자료를 이용한 남해의 수괴분석 및 계절별 해황 분석

##### 2) 해양관측

- . 제주해협을 포함한 남해의 개방경계에서의 해류분포와 해수수송량을 정량화 하기 위한 CTD 및 ADCP 반복 관측
- . 제주해협과 대한해협 내 해류의 변동성을 규명하기 위한 장기 해류관측
- . 기존의 영구 조위관측망에서의 관측결과와 해류관측 결과를 이용한 제주해협을 통한 해수교환의 매개변수화 시도
- . 해협내 해류역학 연구

##### 3) 순환모델링

- . 3차원 수치모델과 관측자료를 이용한 남해의 3차원 해수순환 재현

#### ● 혐기성 내만환경

- 혐기성 환경발생의 물리, 화학, 생물학적 원인 파악
- 혐기성 환경에서의 중금속 원소 거동 규명

#### ● 대륙붕 화학물질 수지 및 순환

- 친생물원소 분포 특성 및 계절별 변동성 규명
- 다중 해수추적자 (라듐동위원소, 산소안정동위원소) 이용 해수기원 및 연안 수 기여율 규명
- 대륙붕 화학물질 수지 및 순환 정량

##### 1) 제주해협 통과 화학물질 플럭스

- 2) 대기유입 오염물질 플럭스
- 저서생물 생화학 특성
  - 저서 생물 (공생 미생물 포함)의 생화학적 특성 연구
    - 분해자로서의 저서 생물
      - 1) 저서 생물에 의한 분해
      - 2) 저서 생물 공생 세균에 의한 분해
      - 3) 분해에 관련되는 효소 활성 연구
  - 유기 및 생화학적 이용 가능 물질 규명
    - 1) 저서 생물 장내 유용 미생물 자원 확보
    - 2) 순수 분리 및 동정
  - 환경 변화 추적 (유기 물질 변천)
    - 1) 난분해성 물질의 분석법 및 추적 방법 개발
    - 2) 저서 생물의 지방성분의 분석
    - 3) 영양 상대 분석 지표 물질로서의 지방질  
(중성지방 대 인지질 비율)
  - 유용지방산 생산 해조류 조사
- 세립퇴적물 이동
  - 수리역학적 조사를 통해 대표적인 만으로의 부유물질 이동량 계측
  - 박스코아상의 퇴적구조 분석 및 퇴적환경 해석
  - 기존 문헌 및 자료수집 (남해안 니질퇴적물의 기원과 물성, 해수면 변동에 따른 퇴적물 분포)
  - 대표적인 만의 현생퇴적작용 파악
- 치차어 군집
  - 난류성 종의 지리분포 조사
  - 수심이 얕은 연안역에 적합한 새로운 자치어 채집기기의 개발
  - 새로운 자치어 채집기기의 특성 연구



## 제 2 장

# 국내외 기술개발 현황



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국외 기술 개발 현황

여러 국가들이 접하여 있는 세계 여러 국가군에서는 공유하는 해역의 오염물질 확산 및 전파와 이에따른 환경 영향을 피하기 위해 오래전부터 공동의 노력을 취하고 있다. 지난 10년간 국제학계는 대양의 물질순환에 초점을 맞추고 연구를 수행하여 IGBP, WCRP의 예하 연구계획의 수행으로 물질순환연구에 필요한 과학적 도구(예: 이산화탄소 측정기법, 안정동위원소 질량분석기, 퇴적표층 대사측정기 등)가 개발되고 개량되었다.

지역해의 환경보전연구로 대표적인 것은 북해 남부해역을 대상으로 한 영국 NERC의 North Sea Project (1987~1992) 이다. 이 프로젝트에서는 북해의 환경변화가 어떠한 위험을 갖고 있으며 앞으로 적절한 관리대책을 세우기 위해 무엇이 필요한가에 대한 연구노력이 결집되어 있다. 북해연구의 목표는 1) 보존성 오염물질의 확산을 설명하고 또한 예측까지 할 수 있는 적절한 수송모델의 작성 및 검증 2) 오염물질과 생물체, 퇴적물의 상호작용등을 포함하는 주요한 비보존성 물질의 과정에 대한 파악 및 정량화 3) 계절적 변화에 대한 데이터베이스등이다. 북해는 특히 황해를 연구함에 있어 좋은 모델이 되는데 이는 북해가 산업화된 하천 배수역 및 도버 해협으로부터 물질이 유입되고, 북쪽에서는 대서양과 외해역 경계면을 이루기 때문이다.

북해와 더불어 지역해에 대한 연구는 정세가 안정된 지중해, 카리브해등에서 활발하였으며 발트해 (Helsinki Commission, HELCOM) 계획은 독자적인 오염분석 지침서를 발간하는 등 매우 활발하다. 발트해는 북해보다 훨씬 폐쇄적인 지형을 갖고 있어 해수의 체류시간이 30년 이상으로 평가되고 있으며 여러 중금속 미량 유기오염물질등에 대해 작성한 수지모델을 개선하고 있다. 특히 최근 대기유입오염원의 중요성이 부각되며 중금속 수지등도 대기유입원을 포함하여 재정립하고 있다. 발트해는 폐쇄성이 큰 해역인 만큼 부영양화 모델, 저층수의 무산소화과정 모델들이 많이 개발되었다. 그리고 연안해역으로부터의 유입물질들을 종합관리할 수 있는 시스템 구축도 중요한 노력의 하나이다.

유럽연합 12개국으로부터 27개 연구소가 참여하는 유럽 EROS 2000 (하천-해양 상호작용연구; 1988~2000년)의 연구목표는 유럽연안 환경에서의 천연 및 인위적 영양염류, 그외 유기 및 무기화합물의 근원과 유입경로 규명, 이들 물질들의 육지-해양-대기 상호간 교환과 내부순환 및 유동량(플럭스)을 조절하는 메카니즘을 규명하고 각각 과정의 율(속)을 조사하고, 인간이 초래한 변화의 장기적 결과를 예측하는 특정과정(예; 부영양화)에 대한, 그리고 각 지역해별 생지화학적 모형을 개발하는 것이다.

아시아에서는 양자강 하구에 대해 육상기인 오염원등 상당한 연구가 미국, 프랑스의 지원하에 이루어 졌다. 이는 중국대륙으로부터의 물질수송이라는 흥미로운 주제에 대해 선진국들의 학자들이 많은 관심을 가졌기 때문이며 이에대한 기술적 축

적도 상당하다.

일본은 1992년부터 1998년까지 7년간 동북아시아 주변부해역 물질플럭스 연구(MASFLEX)를 수행해오면서 동중국해 대륙붕 해역에서의 탄소 및 다른 친생물원소의 물질순환과 그 변화가 태평양에 미치는 영향을 규명하고, 과정별 율(속도)을 정량화하고 있다.

대만은 쿠로시오 연변부해역 물질플럭스연구(KEEP)로서 동중국해(대만부근)의 탄소순환에 대한 쿠로시오해류의 영향 규명을 목표로 1단계로서 1989년부터 5개년 사업을 시작하였고, 2단계는 1997년까지 수행하였다.

특정 해역의 해수내에 포함되어 있는 유기물질은 그 해역에 서식하고 있는 생물들로부터 생산, 배출 혹은 분해에 의하여 유래되거나 다른 해역에서 생성된 것들이 해수의 유동에 의하여 유입되거나 또는 육상으로부터 하천 혹은 대기중의 이동에 의하여 유입되는 것으로 여겨지고 있다. 이들은 크게 용존 유기물과 부유성 유기물로 나눌수 있는데 이들의 상호 전환이나 물질의 조성등은 해역에서 물리 화학적 제반 과정을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공해주고 있다. 이에 따라 선진국에서는 해수내 유기물의 농도 및 조성에 대한 연구가 매우 활발하여 지난 60년대부터 이에 대한 연구가 수행되기 시작하였으며 현재 미국의 Florida Institute of Technology의 Sohn 교수 group, 호주의 CSIRO의 Volkman 박사 group, 영국의 Bristol 대학의 Eglinton 교수 group등을 중심으로 연구가 수행되고 있다. 연구내용은 hydrocarbon과 지방산 등 가장 기본적인 지방족 화합물 이외에도 steroid 화합물, alkyl alcohol, long chain alkenone 그리고 pigment 등 여러 부분에서 생물 유래 물질의 추적자로서의 활용기술이 발달하고 있다. 나아가서는 aminoacid과 당류 등 여타 생물 유래 물질의 추적자로서의 활용이 기대되고 있다.

남해에 대한 해황 및 해류관측은 외국 기관에 의해 이루어진 바가 없으나, 미국의 NRL (Naval Research Laboratory)에서는 대한해협을 포함한 남해의 동쪽 해역에서 한국해양연구소와 공동으로 1999년 5월~2000년 3월까지 TRBM-ADCP (Trawl Resistant Bottom Mount-Acoustic Doppler Current Profiler) 12대를 계류하여 남해해류의 계절변동과 대한해협에서의 수송량 변동을 연구 중이다. 대한해협에서 조사선 장착 ADCP를 이용한 해협 내 해수유동의 연구는 Kaneko et al. (1991), Egawa et al. (1993), Isobe et al. (1994)등의 연구가 있으며, 이 중에서 Kaneko et al. (1991)의 연구는 한국해양연구소와 공동으로 수행한 결과이다.

부유물질에 대한 정량적인 연구는 국외에서는 매우 활발하게 진행되고 있다. 콜로라도대학의 J.P.M. Syvitski 팀은 자동계측장비에 현장카메라(Floc Camera)를 부착하여 캐나다 빙하계곡의 하구 및 대서양으로 유입되는 부유물질의 현장입도를 촬영 분석하여 부유물질의 이동과 퇴적상황을 이차원모델화를 시도하고 있다. 오스트레일리아 서부와 남동부에서는 현장 자료와 위성사진을 획득하여 바람에 의한 밀도구조변화, 강수의 유입, 연안해류의 사행등을 분석, 해수의 수직혼합과 니질퇴적물의 운반등 제현상을 밝힌바 있다. 이를 토대로 오스트레일리아 남부에 있는 스펜서



걸프에서 일어난 오일유출에 대해 oil slick model을 개발하였다. 미국 노스 캐롤라이나주 덕(Duck)시의 앞바다에서는 11개의 대학과 6개의 연방에이전시 그리고 3개의 일반회사에서 후원하여 미국, 영국, 캐나다에서 과학자들이 참가하여 사상최대의 연안역퇴적물이동 연구를 수행하고 있다. 이 연구사업에는 모든 타입의 광학과 음파센서와 해저면고도계 등이 이용된다. 또한 500개 이상의 단위장비가 투입되며, 항공기, NASA 우주선, 공중과 지상 레이더가 동원된다. 연구결과는 곧 국제저널을 통해 발표될 예정이다. 중국 양자강 하구에서 중국과 미국 해양지질학자들이 1984년 대규모 해양연구사업을 벌여 부유물질 농도와 해류를 측정하여, 여름에 주로 하구에 퇴적물이 쌓이고 겨울에 이들이 재부유되어 양자강 남쪽으로 연안을 따라 이동된다는 것을 밝혔다. 모든 연구결과는 1985년 Continental Shelf Research 특집호에 자세히 발표되어 있다. 또한 중국 황하강 하구 삼각주에서 막대한 양의 실트가 유입되면서 밀도류가 빈번히 발생된다는 사실이 해저면 조사와 부유물질 모니터링을 통하여 중국과 미국 과학자들의 합동연구로 밝혀졌다. 이들은 더 나아가 부유물질이동 연구를 통해 황하기원의 니질퇴적물이 대부분 발해만내에 쌓인다고 결론지었다.

우리 나라의 연근해에서 자치어 채집은 주로 표준네트(망구직경 100 cm, 망목 0.35 mm, 유, 1988), 붕고네트(망구직경 60 cm, 망목 0.33mm, 유 등, 1988, 유 등, 1993), 개폐식 채집망(망구직경 50 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33mm, 김과 강, 1995), 구경 130 cm, 길이 600 cm 망목 0.58 mm인 네트(임과 옥, 1977), NORPAC 채집망(구경 45 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33 mm, 김과 김, 1991) 등 다양한 종류의 네트가 이용되었다. 채집목적에 따라 이들 네트는 수평, 수직, 경사채집 등에 사용되었다. 채집 속도는 2 knot 전후였으며, 네트의 예망시간은 7~10분 정도였다(임과 옥, 1977, 유 등, 1993, 유, 1988, 유 등, 1998, 김과 김, 1991). 이러한 종류의 채집기기는 수심이 얕은 연안역에서는 경사채집이나 수직채집으로는 분석에 필요한 충분한 양의 자치어 시료를 확보하기가 어렵기 때문에 주로 표층채집에 사용되었다(차, 1986, 유 등, 1993, 차와 허, 1988, 유 등, 1992, 차와 박, 1991, 차 등, 1991).

## 제 2 절 국내 기술 개발 현황

남해의 해양과학 연구로는 국립해양조사원과 국립수산진흥원의 정기적인 조사가 1960년 이후 2개월마다 수온, 염분 및 용존산소 위주로 행해오고 있고, 물리·화학·생물·지질등 종합과학적인 연구로서 한국해양연구소의 한국해역 종합해양자원도 작성연구(1987~1991)가 있었으나 Atlas 목적의 분포위주에 국한되었다.

남해 분지규모에서의 해양화학분야 연구로는 기초생산과 관련 화학성분들의 분포특성 (Yang and Kim, 1990; Chung and Yang, 1991, Kim et al., 1998)과 퇴적물 중금속 (Cho et al., 1994), 부유물질 이동 (Wells and Huh, 1984; Wells, 1988) 정도만 있을 뿐 거의 대부분의 연구는 제주도 부근 해역 (Park, 1982) 및 부영양화 현상

이 심각한 마산만등 특정 하구역에 치중되어 있다 (박, 1975; Lee et al., 1981, 1983, 1994; Hong et al., 1983, 1988, 1991; Yang et al., 1986, 1988; Yang, 1992). 특히 현재까지 남해에서의 생지화학적 과정 및 물질 순환에 대한 연구는 거의 전무하다.

또한 아직 해양에서 유기물 특히 지방성분을 추적자 등으로 활용하려는 시도나 실적 역시 미미한 편이다. 주로 lipid biochemistry를 전공하는 연구자들은 단일 종의 생체내의 지방에 관한 연구를 주로 수행하고 있으며 해수나 퇴적물 등과 같은 혼합물의 지방 분석 등에는 거의 연구를 수행하지 않았으며 해양학 전공자들은 지방 분석에 관한 기술적인 측면을 소홀히 해온 것이 사실이다. 그러나 PCB (polychlorinated biphenyl)이나 PAH (polyaromatic hydrocarbon)등 환경 오염 지수와 관련된 특정 계열의 화합물의 분석이 환경 오염과 관련하여 주로 수행되어왔다. 단 한국해양연구소에서는 1996년도 연구지원과제로 해양환경 변화 해석을 위한 생물기원 물질 추적자 기술 개발 연구를 시작으로 이에 관련된 연구를 수행하기 시작하였다 (홍 등, 1997). 본 연구에서도 1차 및 2 차 연도의 연구를 통하여 이러한 지방 성분 중에서 특히 hydrocarbon과 지방산을 중심으로 추출, 분석하는 방법의 개발이 완료되었으며 이들 지방 성분 이외에 주된 biomarker로 활용될 수 있는 steroid 화합물과 long chain alkenone 성분에 대한 분석작업을 추진하고 있다.

남해의 해황 및 해류관측으로는 국립수산진흥원의 정기 정선관측 외에 해류병에 의한 남해의 표층 해류분포를 파악한 바 있으며 (이, 1968; 이 와 봉, 1969; 이, 1974a; 김, 1980b), 1970년과 1974년에 대한해협 서수도에서 25시간 해류관측을 실시한 바 있고 (이, 1970; 이, 1974b), 제주해협의 세 군데 관측점에서 여름과 겨울철 25시간 해류관측을 수행한 바 있다 (김, 1979). 국립해양조사원은 남해에서 정기적인 정선관측자료와 해류계 계류 및 해류병 실험 (동, 1970)에 의한 해·조류관측자료를 제공하고 있으며, 1997년부터 대한해협 (부산-대마도)에서 ADCP 왕복관측을 실시하여 해수수송량 및 해류자료를 제공하고 있다 (심문보, 1998, 1999). 서울대학교 해양학과에서는 1974년, 1980년, 1983년에 제주해협에서 부표추적과 해류계 계류를 통해 해류관측을 실시하였다 (장, 1984; Chang et al., 1995; Chang and Kim, 1995). 해류관측은 1981년 4월~5월에 최초로 20일간 수심 30 m, 60 m에서 실시되었다. 이 후에는 장기적인 해류관측이 이루어진 바가 없다. 부경대학교 해양과학 공동연구소에서는 1997년부터 남해의 해양학적 특성에 관한 연구를 수행하기 시작하였으며, 1996년에는 대한해협에 ADCP를 계류하여 해류관측을 실시한 바 있다 (Lee et al., 1998; Park et al., 1999). 한국해양연구소는 1986년부터 1991년까지 계절별 남해 전해역의 해황을 조사한 바 있으며 (한국해양연구소, 1987, 1988b, 1989b), 1986년과 1989년도에는 남해의 거문도 연안역과 삼천포에서 해류관측도 실시된 바 있다. 1988년부터 1990년 사이에는 일본측과 공동으로 ADCP를 이용하여 대한해협에서 해류관측을 수행하였고 (해양연구소, 1988a, 1989a, 1990), 1995년에는 제주해협에서 최초로 ADCP 반복 관측을 실시하여 일평균 해류분포와 해수 수송량을 파악하였다 (Suk et al., 1996). 제주대학교는 1986년~1987년 사이에 제주해협 일원에서 해류계 계류에 의해 25시간~118시간에 걸친 해류관측을 수행하였다 (김, 1987; 김 과 노, 1997).

남해의 해수순환 모델링을 위해 수치모델을 이용한 해수순환 연구는 대부분 남

해의 내만에 국한된 모델로서 성층을 고려하지 않은 순압 해양에서 조류 및 조석 잔차류에 관한 연구가 많았다 (예, 최, 1996; 박, 1997). 최 등 (1994) 은 수치모델을 이용하여 대한해협 조류에 관해 연구한 바가 있고, 김 (1994) 은 조석 강제력, 바람, 개방경계를 통한 해수의 유·출입의 효과를 개별적으로 고려하여 남해의 순압 순환을 살펴보았다. Chang et al. (1997)과 김 (1998)은 조석강제력과 개방경계에서의 해류분포를 같이 고려하여 남해의 2차원 순환을 재현하였다.

부유물질에 대한 본격적인 해양지질학적 연구는 1970년대 말과 1980년대 초에 주로 연안해저표층퇴적물의 점토광물과 지화학분석을 통하여 금강기원 니질퇴적물이 연안을 따라 남쪽으로 이동될 것이라는 연구결과를 넘으로써 시작되었다. 이러한 모델은 1990년도에 들어와서 J.T. Wells, Y.A. Park 등에 의해 실지로 해수채취와 정점관측을 통해 입증되었다. 1990년대에 들어와서 충남 대호방조제 건설후에 나타난 연안부유물질의 이동변화를 보기 위해 한국해양연구소 지질실에서 2년간에 걸쳐 계절별로 정선관측과 해수채취를 실시하고 방조제 전면의 조간대퇴적상과 퇴적물변화를 모니터링하여, 여름철퇴적, 겨울철침식의 퇴적작용이 일어남을 밝혔으며 부유물질이 방조제를 지나쳐 남쪽으로 이동되기 때문에 조간대가 점차 깎여 나간다는 것을 또한 밝혀내었다 (Marine Geology에 게재). 또한 전남 함평만에서는 기존의 연구된 서해 만 들에 비해 홀로세퇴적물이 매우 빈약하기 때문에 전남대 해양학과에서 만내의 조간대퇴적작용과 부유물질조사를 수 년 동안 정기적으로 실시해 오고 있다. 현재 여름철에 깎이고 겨울철에 퇴적되는 양상을 보이기 때문에 만 바깥쪽 부유물질흐름과 관련지워 그 원인을 규명하고자 노력하고 있는 상황이다 (지구과학지에 2편 발표). 최근에는 해저면에 장기간 Mooring할 수 있는 종합자동관측기기(SeTMonS)를 한국해양연구소 퇴적역학팀이 개발하여, 서해 여러 해역에서 연속관측 자료를 얻는 중이다.

우리 나라의 연근해에서 자치어 채집은 주로 표준네트(망구직경 100 cm, 망목 0.35 mm, 유, 1988), 봉고네트(망구직경 60 cm, 망목 0.33mm, 유 등, 1988, 유 등, 1993), 개폐식 채집망(망구직경 50 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33mm, 김과 강, 1995), 구경 130 cm, 길이 600 cm 망목 0.58 mm인 네트(임과 옥, 1977), NORPAC 채집망(구경 45 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33 mm, 김과 김, 1991) 등 다양한 종류의 네트가 이용되었다. 채집목적에 따라 이들 네트는 수평, 수직, 경사채집 등에 사용되었다. 채집 속도는 2 knot 전후였으며, 네트의 예망시간은 7~10분 정도였다(임과 옥, 1977, 유 등, 1993, 유, 1988, 유 등, 1998, 김과 김, 1991). 이러한 종류의 채집기기들은 수심이 얇은 연안역에서는 경사채집이나 수직채집으로는 분석에 필요한 충분한 양의 자치어 시료를 확보하기가 어렵기 때문에 주로 표층채집에 사용되었다(차, 1986, 유 등, 1993, 차와 허, 1988, 유 등, 1992, 차와 박, 1991, 차 등, 1991).

*Laemonema nana* Taki 자치어의 지리적인 분포와 형태 발달에 관한 연구로서 대구목(Gdiformes) 수염대구과(Moridae) 어류는 전 세계적으로 18속에 약 98 종이 알려져 있다(Nelson, 1994). 수염대구과 어류의 하나인 *Laemonema* 속 어류는 대부분이 수심 500m 이상의 심해에 서식하는 어류로 오츠크해, 큐우슈와 팔라오 사이의 해령 등지에 분포하는 것으로 알려져 있지만 *Laemonema nana*는 수심 50m 정도의 사니질

천해에 분포하는 저어류이다(Masuda *et al.*, 1984; Nakabo, 1993). *L. nana* 자치어는 제주도 주변해역(유, 1991), 대한해협(Kim, 1984; 이, 1996, 김, 1999), 동해(冲山宗熊, 1981; Kim, 1984; 변 등, 1997) 등지에서 출현한다. *L. nana*의 자치어 형태에 관한 단편적인 보고(冲山宗熊, 1981)는 있지만 체형변화가 심한 자치어기에는 정확한 종의 동정을 위해 다양한 크기의 개체에 관한 정보가 필요하다.

## 제 3 장

# 연구개발 수행내용 및 결과



# 제 1 절 해류 및 해수순환

## 1. 서론

한국 남해는 서쪽으로는 제주해협을 통해 황해와 연결되고 동쪽으로는 대한해협을 통해 동해와 연결되며 남쪽으로는 동중국해와 연결된다. 남해의 해저지형은 한국측 연안을 따라서는 50 m 이하의 수심으로 완만한 경사를 가지며 제주도연안과 대마도연안에서는 100 m 까지 다소 급한 수심변화를 보인다. 부산과 대마도 사이의 대한해협 서수도에는 수심 200 m 이상의 깊은 골 (trough)이 대마도 쪽으로 해협과 평행하게 발달되어 있으며 제주해협의 제주도 인접한 해역에도 수심 120 m 이상 되는 골이 존재한다. 이러한 골을 중심으로 한국 연안측은 경사가 완만하며 대마도 쪽으로는 경사가 비교적 급하다 (Fig. 1-1). 천해인 남해는 기상의 영향을 받기 쉬운 해역이어서 겨울철에는 강한 북풍계열의 바람과 표층냉각으로 인하여 전반적으로 수층이 수직적으로 균질해지며, 여름철에는 표면가열, 강우 및 주변대륙으로부터의 담수유입 등으로 수층은 2층구조를 보인다 (김, 1981).

남해는 그 지리적인 특성으로 인하여 기원을 달리하는 성질이 다른 해수가 존재하며 이러한 상이한 해수의 분포는 계절에 따른 큰 변동을 보인다. 남해에 출현하는 수괴 (water mass)로는 쿠로시오 (Kuroshio)로부터 분지된 후 제주도 동쪽을 통해 남해로 유입되는 고염, 고온의 대마난류수 (Tsushima Warm Current Water; Lim, 1971; Nitani, 1972; Byun and Chang, 1988; Lie and Cho, 1994), 제주도 남쪽에서 대마난류로부터 갈라진 후 제주도 서쪽을 통해 황해로 유입되는 것으로 알려진 황해난류수 (Yellow Sea Warm Current Water, Uda, 1934; Nakao, 1977; Zheng and Klemas, 1982), 역시 쿠로시오로부터 기원되어 제주도 서쪽을 우회한 후 제주해협으로 유입되는 제주난류수 (김, 1980; Lie, 1986; Park, 1986; 김 등, 1991; Chang et al., 1995; Chang and Kim, 1995), 남해연안역에서 겨울철 형성되어 여름철 계절적 수온약층 하부에 분포하는 남해연안수 (South Korean Coastal Water; Lim, 1976), 황해에서 기원되어 남해에 영향을 미치는 황해연안수 및 황해냉수 (Yellow Sea Coastal/Cold Water; 김 등, 1991; 조 와 김, 1994; Chang et al., 1995), 양자강 하구역의 표층수와 담수의 혼합으로 형성되어 여름철 남해안에 영향을 미치는 양자강 희석수 (김 등, 1991; 김 과 노, 1994) 및 동해에서 기원되는 대한해협 저층냉수 (Isobe, 1995; Lim and Chang, 1969) 등이 있다. 수층이 수직적으로 성층화되는 여름철에는 양자강퇴에서 담수유입에 의해 형성된 저염의 양자강 희석수가 표층에 깔려 제주해협까지 나타나며, 수온약층 하부에는 쿠로시오에서 기원된 고온, 고염의 대마난류수가 나타난다 (김 등, 1991).

제주해협에서 대한해협에 이르는 남해에서 해수유동은 왕복성 조류에 중첩되어 동향이나 북동향의 평균해류가 나타나며, 조류와 해류의 크기는 해역에 따라 다르지만 조류가 우세한 황해나 해류가 우세한 동해와 달리 조류와 해류의 크기가 유사한 해역이 많다. 남해의 평균적인 해수순환은 제주해협과 제주도 동쪽을 통해 제주해류 (Suk et al., 1996)와 대마난류가 유입되어 남해에서 합쳐진 후 동류하여 대한

해협을 통해 동해로 유출된다. 남해의 서쪽입구에 해당하는 제주해협과 동쪽 출구에 해당하는 대한해협에서의 평균 해류의 세기는 각각 약 12.5 cm/sec (Chang and Kim, 1995), 약 50 cm/sec로서 (Mitta and Ogawa, 1984; Lie and Cho, 1997) 제주해협보다 대한해협에서 해류가 강하며, 남해 중앙부에서의 평균 해류의 크기는 대략 10.0 cm/s 내외이다.

대부분 정성적인 자료를 근간으로 한 남해의 수괴분포에 관한 기존의 제반 연구는 수괴분포와 연관된 남해의 해수순환을 이해하는데 많은 기여를 하였으나 해류분포 및 해수순환에 관하여 아직 해결되어야 할 문제가 많이 남아있다. 최근에 들어 해상사고 시 유출유 및 적조등으로 인한 연안역 오염이 청청해역으로 알려진 남해에서 심각한 문제로 대두되고 있으며 이러한 제반 해양오염에 대처하고 피해를 최소화 하기 위해서는 오염물질 이동, 확산에 관한 실시간 예측이 절대적으로 필요시되고 있다. 최근 들어 국가경제의 성장으로 선박의 대형화가 유출유 사고의 대형화를 유발시키며, 내만보다는 외해역에서 주로 발생하여 유출유로 인한 오염범위가 점차 확대되는 추세이다. 이러한 유출유 사고와 더불어 매년 남해안에 적조가 발생하여 수산자원 및 양식업의 피해가 점차 증가하고 있다. 이러한 오염물질의 이동·확산을 예측하기 위해서는 남해전체를 모델 영역으로 하는 수치모델에 의해 해수순환이 우선 정량적으로 정확히 재현되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 남해는 폐쇄된 해역이 아니라 남해안을 제외하고는 전 경계가 개방되어 인접해역과의 해수교환이 활발히 일어나므로 이러한 순환모델의 개발시 개방경계를 통한 해수의 유입과 유출 및 그 시간변동에 관한 정확한 정보는 정량적으로 정확한 해수순환을 재현하는데 필수 불가결하다. 남해는 천해이므로 바람등에 의한 기상요인 및 불규칙적인 해저지형과 조류의 상호작용으로 유발되는 조석잔차류에 의한 평균해류의 유발 가능성도 있으나 남해의 순환을 좌우하는 일차적인 요인은 개방경계를 통한 제반 수괴의 유·출입 과정이다 (Chang et al., 1997). 기존의 제한적인 연구결과는 남해의 해류가 시·공간적으로 변화가 심함을 암시하고 있으며 (Chang and Kim, 1995; Suk et al., 1996), 이러한 해류의 변화는 그 물리적 요인을 규명하기 이전에 우선 충분히 그 변화 양상이 기술되어야 한다.

본 연구는 남해의 지리적인 경계에 해당되는 제주해협, 대한해협 및 제주도-대마도간 선상을 통한 해수의 유·출입 및 그 시간 변동을 정량적으로 규명하고, 이를 기반으로 남해의 해수순환 모델을 개발하는데 있다. 이를 위해 3개년도에 걸쳐 기존자료 분석과 해양관측이 이루어졌으며, 관측자료를 근간으로 한 3차원 해수순환 모델의 개발이 이루어졌다. 해양관측은 CTD (Conductivity-Temperature-Depth)와 ADCP (초음파유속계: Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 남해의 해황과 해협을 통한 인접해역간의 물질 및 해수교환의 변동성을 파악하는데 초점을 맞추어 제주해협을 포함한 남해의 일원에서 계절별 관측을 실시하였고, 해수순환 모델링은 남해 전체를 대상으로 하는 모델 영역에 관측 결과를 입력 자료로 하는 3차원 해수순환모델을 적용하여 남해의 여름철 평균적인 3차원 해수순환을 재현하였다.



## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 기존 연구결과 정리 및 기존자료의 분석

남해의 제반 해양물리학적 현상에 관해 국내외 논문집 및 보고서 등에 수록된 기존 연구결과를 수집, 정리하였다. 기존 연구결과 중 특히 남해와 남해로의 해수 및 물질의 유입통로인 제주해협에서의 해수 및 해류분포, 남해의 순환과 연계된 연구 내용 및 남해의 해수순환 모델링 분야에 초점을 맞추어 기존문헌을 검토하였다.

기존자료는 남해의 누년 평균된 계절별 해황의 파악에 초점을 맞추어 국립수산진흥원 (1997, 1998)에 근거한 30년 평균된 남해의 격월별, 수층별 해수분포를 파악하였고, 국립해양조사원을 비롯한 국내 연구기관에 의한 남해에서의 장기 해조류관측 자료를 수집, 분석하였다. 장기 해조류관측 자료는 자료의 질검증 후 영국의 POL (Proudman Oceanographic Laboratory)에서 제공하는 TASK package를 이용하여 조화분해를 실시하여 관측점 별 주요 조류 분조에 대한 동서, 남북방향의 진폭과 위상을 계산하였고, 비조석 성분인 해류의 변동을 파악하기 위하여 Doodson의 Xo 필터 (Doodson and Warburg, 1941)를 이용하여 관측된 해조류로부터 조류성분을 제거하였다. Xo 필터는 39개의 weight를 갖고 half power point가 0.456 cpd (cycle per day)로서 일주조류와 반일주조류를 포함한 조석성분을 완벽하게 제거하는 것으로 알려져 있다 (Prandle, 1987). 해수 및 해류분포 자료 외에 제주해협 내 해류의 계절변동을 파악하기 위하여 국립해양조사원에 의해 제주와 추자도에서 1988~1995년의 8년 동안 관측된 해수면 관측자료를 분석하여 제주해협을 가로지르는 방향의 월평균 해수면의 시간적인 변동을 파악하였다. 해수면 자료는 매 시간간격의 자료로부터 8년간의 평균값을 제거하고 각 연도별 월평균을 구한 다음 다시 8년간의 평균 월별 해수면을 계산하였다.

천해인 남해는 기상에 의한 영향을 많이 받으며, 평균적인 바람의 분포는 겨울철의 강한 북풍과 여름철 미약한 남풍에 의해 특징 지워진다. 남해를 포함한 한국근해의 해상풍에 관해서는 기존의 연구가 비교적 많이 이루어진 반면에 (강 등, 1994; 나 등, 1992; 한국해양연구소, 1994, 1995), 해양의 물질플럭스를 고찰하는데 중요한 인자의 하나인 강수량에 관한 연구는 미흡하다. 본 연구에서는 1900~1995년에 걸쳐 한국 남해안에 위치한 제주도, 목포, 부산, 서귀포, 여수 측후소에서 관측된 강수량의 변동성을 저주파 영역 통과 필터링 기법, 교차 상관관계수 (cross-correlation) 분석, Fourier 변환을 이용한 스펙트럼 분석, 파엽변환법 (Wavelet transform)을 이용한 스펙트럼 분석 등의 통계적인 도구를 이용하여 분석하였다.

### 2-2. 현장 관측자료의 분석

현장관측은 남해의 지리적 개방경계인 제주해협과 대한해협 서수도를 통해 유·출입되는 해수특성과 제주해류와 대마난류의 시·공간적인 분포 파악을 목적으로, CTD와 ADCP를 이용한 관측이 제주해협에서 6회 대한해협 서수도에서 8회에 걸쳐

수행되었으며 대한해협에서의 관측은 국립해양조사원에 의해 주로 수행되었다 (Table 1-1). 한·미공동조사를 포함하여 3개년 동안 실시된 CTD와 ADCP 관측위치와 각 월별 관측위치는 Figures 1-2~1-11에 나타내었다. 대한해협에서의 관측개요 및 결과는 심문보 (1998, 1999)에 수록되어 있으므로 본 보고서에서는 대한해협을 제외하고 제주해협을 포함한 남해에서 관측된 자료에 관해 주로 기술하였다.

CTD 관측은 수평적으로 3~5 mile 간격으로, 수직적으로는 수심이 허락하는 깊이까지 관측을 실시하였다. 해수특성 분포 파악을 위하여 사용된 CTD는 SeaBird사 제품의 SBE 911plus 및 SBE 25로서 SBE 911plus CTD의 일반사양은 Table 1-2와 같다.

일반적으로 관측된 CTD 자료는 몇가지 문제점을 갖고 있기 때문에 좋은 자료를 얻기 위해선 세심한 처리과정이 필요하다 (Morison et al., 1994). 첫 번째 문제는 각 센서들간의 단주기성 불일치 (short-term mismatch)로써 이중 수온센서와 전기전도도 센서간의 불일치는 염분스파이크 (salinity spike)로 잘 알려져 있다. 두 번째 문제는 수압의 요동문제로 수압센서의 정밀도나 수압센서 주위 동압력 (dynamic pressure)의 변동에 기인하는 것이다. 세 번째 문제는 하강 관측과 상승관측간에 차이가 생기는 것인데, 앞의 문제들이 비교적 잘알려져 왔던 것에 비해 최근에는 그 원인과 처리방법에 대한 연구들이 발표되고 있는 것으로, 전기전도도 센서의 열관성(thermal inertia)에 의해 발생한다고 보고되고 있다. 이외에도 예기치 않은 잘못된 자료가 나타날 수 있는데 이러한 것들은 통계적인 방법으로 제거하며, 각 자료 처리 단계는 SeaBird사에서 제공하는 Seasoft프로그램을 이용하였다 (Sea-Bird Electronics, 1996). Seasoft 프로그램에 의한 전체적인 자료처리 과정은 Table 1-3과 같으며, 염분스파이크를 제거하기 위한 sensor 사이의 alignment는 0.073초 간격으로 자동으로 conductivity를 setting 시키므로 과정에서 빠져있다.

CTD가 더운곳에서 찬 곳으로 이동하면 conductivity sensor에 저장된 열이 sample된 물로 확산되어 채취한 물이 주위의 물보다 조금 높은 온도를 가지게 되어 전도도를 상승시킨다. 이러한 thermal-lag error를 CELLM 프로그램을 사용하여 보정한다.

정밀도 때문에 계단식으로 기록된 수압은 FILTER 프로그램에서 0.15 시간계수를 갖는 저주파 필터를 이용하여 재배열하였고, 동압력 (dynamic pressure)의 영향을 제거하기 위해서 LOOPEDIT 프로그램에서 CTD가 일정속도 이하로 움직일 때 관측된 자료를 제외하는 방법을 택하였다.

열관성 (thermal inertia)에 의해 하강관측과 상승관측의 염분차이가 생긴다는 것이 알려진 것은 극히 최근의 일이다 (Lueck, 1990; Lueck and Picklo, 1990; Morison et al., 1994). 이에 대한 보정은 recursive filter를 이용하여 하강과 상승 수온, 염분구조를 일치시키는 것으로써 CELLM 프로그램에서  $\alpha$ 와  $1/\beta$  값을 조정함으로써 이루어진다. SeaBird 사에서는  $\alpha=0.03$ ,  $1/\beta = 9$ 를 추천하고 있으나 최근에 Kim (1996)에 의해 911plus CTD의 경우에는  $\alpha=0.018$ ,  $1/\beta = 9$ 이 가장 적절한 값임이 밝혀졌으므로 이 값을 이용하여 보정하였다. 기타 부적절한 자료들은 WILDEDIT, WFILTER등의 프로그램을 이용하여 통계적인 방법으로 제거하였으며 표층의 자료는 수작업으로 부적절한 부분을 제외시켰다.

Table 1-1. Outline of CTD and vessel-mounted ADCP surveys conducted in the South Sea during 1997~1999.

년	월	위치	CTD			ADCP						
			관측일	SBE Model		관측일	RDI Model	#R/TT	Bin depth	Ping time	조사선	
1997	03	남해도 남부	○	19~20	911	×						
		제주도 동부	○	20	911	○	25~26	150 kHz				
		제주도-진도	○	21	911	○	22~23	150 kHz	9/25.87	8 m	1초	이어도 (NB <sup>***</sup> )
	24~25						150 kHz	9/24.70	8 m	1초	이어도 (NB <sup>***</sup> )	
	04	대한해협	○	25	25	○	25~26	150 kHz	9/24.68	4 m	30초	부산 802 (6kts) (10분 횡단관측 <sup>**</sup> )
	07	대한해협	○	14	25	○	14~15	150 kHz	8/24.68	4 m	30초	부산 802 (6kts) (10분 횡단관측 <sup>**</sup> )
	09	제주도-보길도	○	29	911	○	29~30	75 kHz	8/24.82	8 m	30초	● 해양2000
		제주도 동부	○	1	911	×						
		남해도 동부	○	1~2	911	×						
	10	대한해협	○	2	25	○	2~3	75 kHz	12/24.92	8 m	30초	해양2000 (10kts)
	11	대한해협	○	27	25	○	27~28	75 kHz	12/24.95	8 m	30초	해양2000 (10kts)
1998	04	부산 남부	○	5, 11		×						
		남해도 남부	○	6, 11		×						
		평일도 남부	○	7~8		×						
		우이도 남부	○	8, 10		×						
		소흑산도 남부	○	8~9		×						
	04	대한해협	○	26	25	○	26~28	150 kHz	9/44.57	4 m	30초	부산 802 (6kts) (10분 횡단관측), ● 25시간 피항 후 재관측
	07	대한해협	○	6	25	○	6~7	150 kHz	6/16.75	4 m	30초	부산 802 (6kts) (10분 횡단관측), ● 6회관측
	09	대한해협	○	8	25	○	8~9	75 kHz	12/24.72	8 m	30초	해양2000 (10kts)
	09	부산-대마도	○	20		×						
		거제도-대마도	○	20		×						
		제주도-보길도	○	21		×						
		거제도 동부	○	23		×						
		금오도 남부	○	24		×						
		제주도-보길도	○	25		○	25~26	150 kHz	8/24.48	8 m	30초	이어도 (BB <sup>***</sup> )
	11	대한해협	○	26		○	26~27	150 kHz	8/20.85	4 m	30초	부산 802 (6kts) (10분 횡단관측), ● 20.85시간 관측
		제주도-보길도	○	24		○	24~25	150 kHz	8/24.8	8 m	30초	이어도 (BB <sup>***</sup> )
		금오도 남부	○	27~28		○	25~26	150 kHz	8/24.76	8 m	30초	이어도 (BB <sup>***</sup> )
연화도-대마도		×			○	28~29	150 kHz	8/24.76	8 m	30초	이어도 (BB <sup>***</sup> )	
02		제주도-보길도	○	23		○	24~25	150 kHz	8/24.91	4 m	1분	이어도 (BB <sup>***</sup> )
08	제주도-보길도	○	5		○	4~5	150 kHz	8/24.8	4 m	1분	이어도 (BB <sup>***</sup> )	

\* #R/TT: 반복관측횟수/전체 관측소요시간, \*\* 9개 정점에서 조사선 정지 후 10분 관측,  
\*\*\* NB: Narrow Band, BB: Broad Band

Table 1-2. Manufacturer's specification of SBE 911plus CTD.

	압력	수온	전기전도도
관측범위	0~10,000 psia (0~6885 db)	-5.0℃~35.0℃	0~7 S/m (about 0~40 psu)
정확도	0.015% of full scale	0.002℃	0.0003 S/m (about 0.003 psu)
월별 안정도	0.0015% of full scale	0.0003℃	0.0002 S/m (about 0.002 psu)
24Hz에서의 해상도	0.001% of full scale	0.0002℃	0.00004 S/m (about 0.0004 psu)
반응시간	0.001 초	0.060 초	0.040 초
* Depth capability (CTD and sensor housing) : 6,800 meters			

Table 1-3. Standard data processing for SBE 911plus CTD recommended by SeaBird Electronics.

1. SEASAVE                    acquire data at 24Hz
2. DATCNV                    convert raw data
3. WILDEDIT                 check wild point data
4. CELLTM                    thermal mass correction  $\alpha = 0.018$ ,  $1/\beta = 9$
5. FILTER                    filter pressure  $T_c = 0.15$  sec
6. LOOPEDIT                exclude scans with  $v < 0.25$  db/sec
7. BINAVG                    Average data into the desired pressure r depth bins
8. DERIVE                    calculate salinity, density, and other parameters
9. ASCIIOUT                 convert to ascii data

제주해협과 대한해협에서의 해류관측은 조류가 제거된 평균해류의 해협 전체에 걸친 공간적인 분포를 계절적으로 파악하는데 목적을 두고 조사선에 장착된 ADCP를 이용한 관측이 실시되었다. 조류와 해류의 세기가 유사하거나 조류가 우세한 해역에서 ADCP에 의해 관측된 해·조류 자료로부터 조류성분을 제거하는 방법으로는 1회 관측자료로부터 조류 조화분해 방법을 적용하는 경우와 (Isobe et al., 1994), 고정 단면을 반복 관측하는 방법이 있다 (Katoh, 1988; Katoh et al., 1996a, 1996b; Suk et al., 1996). 본 연구에서는 남해에서 우세한 반일주조류와 일주조류 (김, 1979; 이, 1974b)를 제거하기 위해 후자의 방법을 이용하여, 고정된 단면을 약 25시간에 걸쳐 8~12회 반복 관측함으로써 조류가 제거된 일평균 해류의 시·공간적인 분포를 파악하였다. 국립해양조사원에 의한 대한해협에서의 해류관측은 동 연구기관의

조사선 부산 802호와 해양 2000호에 각각 장착된 RDI사의 150 kHz 및 75 kHz ADCP를 이용하여 이루어졌다. 부산 802호를 이용한 관측에서는 대한해협 9개 정점에서 10분간 정점관측 형태로 관측이 이루어졌고, 해양 2000호를 이용한 관측에서는 조사선의 속도를 10 kts 정도로 유지하면서 연속 횡단관측을 실시하였다. 모든 제주해협에서의 해류관측은 조사선의 속도를 8~10 kts 정도로 유지하면서 연속 횡단관측을 실시하였고 이때 사용된 ADCP는 1997년 9월에 해양 2000호의 75 kHz ADCP를 제외하곤 모두 이어도호의 조사선에 장착된 150 kHz ADCP를 사용하였다. 이어도호의 ADCP는 1998년 9월 관측 이전에는 Narrow band 모델을 사용하였으나, 1998년 9월부터는 Broad band 모델로 교체되었다.

ADCP에 의한 유속관측은 1초, 30초 혹은 1분 간격으로 평균된 값이 기록되도록 하였으며 이때 조사선 속도가 10 knots인 경우 수평적으로 약 150 m 혹은 300 m 사이의 평균된 유속이 기록된다. 수직적인 sampling은 bin depth를 4~8 m로 정하여 매 4~8 m 간격으로 유속이 관측되도록 하였다. ADCP에 의해 획득된 자료는 우선 제주해협에 평행한 동서방향과 해협에 수직인 남북방향으로 나누었고 이때 percent-good이 90% 미만인 자료는 분석에서 제외하였다. ADCP에 의한 유속자료는 ADCP transducer의 수면 하 위치와 선체에 의한 해류의 왜곡으로 인하여 표층으로부터 수심 15 m까지 자료의 손실이 생기며, 해저면 근처에서도 음파측면돌출부(sidelobe)의 해저면 반사에 의한 간섭으로 인해 통상 전체 수심의 15% 정도까지(Simpson et al., 1990) 자료의 손실이 생긴다. 표층에서 손실되는 자료는 CTD 자료를 이용하여 계산한 지형류의 수직적인 유속차이를 표층으로부터 15 m까지 적용하여 채워 넣었고, 저층 근처에서는 ADCP에 의해 관측된 최저층 유속과 해저면을 무류면으로 간주하여 그 사이의 유속을 내삽에 의해 채워 넣었다. 매 회의 유속자료는 CTD 관측점의 간격과 동일하게 3~5 mile 간격으로 수평적으로 평균하였고 다시 시간에 대해 평균을 취하여 전 단면, 전 층에 걸친 일평균 해류분포를 계산하였다.

### 2-3. 해수순환 모델링

남해는 제주해협, 대한해협, 제주도과 대마도 사이 등 세 군데의 개방경계를 포함하는 해역으로 남해의 해수순환은 이러한 개방경계를 통한 해수의 유출입과 열·염 플럭스, 해표면을 통한 열·염 플럭스와 바람응력, 조석 강제력 및 해수의 공간적인 밀도분포에 의해 해수순환이 좌우된다. 남해는 세 군데의 개방경계를 포함하는 관계로 개방경계에서의 수온, 염분 및 해류분포를 정확히 부과하지 않고는 남해의 해수순환을 정확히 재현할 수 없다. 기존의 남해 전체를 대상으로 한 수치모델을 이용한 해수순환 연구는 해수의 밀도분포를 고려치 않은 순압모델이 대부분이었다(예, 김, 1994; Chang et al., 1997; 김, 1998). 김(1994)은 조석 강제력, 개방경계를 통한 해수의 유출입 등을 개별적으로 고려하였고, Chang et al. (1997)과 김(1998)은 관측자료를 바탕으로 조석 강제력과 개방경계에서의 해류분포를 동시에 고려하였다. 남해의 해수는 여름철과 가을철에 걸쳐 계절적 수온약층이 나타나므로 순압 모델에서와 같이 수직적으로 유속이 일정하지 않으리라 사료되며, 또한 남해에는

연안역과 외해역간에 전선이 존재하며 (예, Lee, 1983) 이러한 전선은 수평적인 밀도구배를 증가시켜 강한 해류를 유발할 수 있기 때문에 순압모델을 이용해서는 남해의 3차원적인 해류분포를 정확히 재현할 수 없다.

본 연구에서는 3차원 순환모델과 남해에서 1997년에 관측된 수온, 염분자료 및 제주해협과 대한해협에서 관측된 해류분포를 이용하여 개방경계에서의 해류분포와 조석강제력, 개방경계 및 해표면에서의 열·염 플럭스에 의해 유도되는 남해의 9월 달 평균적인 3차원 해수순환을 재현하였다. 모델의 수평적인 격자 간격은 3 km이고 각 격자내의 수층은 수직적으로 8개의 층으로 나누었다. 연구해역에 적용한 3차원 해양순환모델은 POM (Princeton Ocean Model, Mellor, 1996)이다. POM은 유한차분법을 이용하여 자유해면을 포함하는 원시운동방정식과 열·염분 보존방정식의 해를 구하는 모델이며 수직적으로  $\sigma$ -좌표계를 사용함으로써 복잡한 해저지형의 표현을 용이하게 하도록 하였다. POM에서는 자유해면의 시·공간적인 변동이 고려되므로 조석 강제력의 고려 및 인공위성에 의한 해면고도 자료의 동화가 가능하고 표면 혼합층 (surface mixed layer) 역학을 포함하는 장점을 갖고 있다.

### 3. 결과

#### 3-1. 기존 연구결과

기존의 연구결과는 남해와 연관된 주요 연구내용을 몇 개의 그룹으로 나누어 각 그룹별 기존 연구결과를 정리하였다.

##### ● 남해의 수괴와 수괴의 분포 특성

강 (1974)은 국립수산진흥원에 의해 1969~1972년에 격월 간격으로 관측된 자료를 평균하여 남해에 출현하는 수괴를 분류하고 각 수괴의 격월별 변동을 해수순환과 연계하여 설명하였다. 강 (1974)에 의하면 남해에 출현하는 해수는 대마난류수, 황해난류수, 남해연안수, 황해연안수, 황해냉수, 대한해협 저층냉수 등이다. 김 (1981)은 1961~1975년간의 국립수산진흥원과 1971~1979년 사이에 일본측에서 관측된 자료를 평균하여 소리도와 오도열도 (Goto-Retto)간 단면상에서의 격월별 해수특성 변화와 지형류에 의한 해수수송량을 보고하였고, 김 (1982b)은 1968~1980년간의 국립수산진흥원 자료를 이용하여 남해의 격월별 수온, 염분 변동을 분석하였다. 노 와 김 (1983)은 제주해협을 가로지르는 여객선을 통해 획득한 자료를 토대로 제주해협에서 표면수온의 시간적 변화를 고찰하였고, 양 등 (1984)은 1980년 동계 이상 기상에 기인한 1981년 하계 황해냉수 및 남해 해수의 이상 저수온 현상을 보고하였다. 홍 (1998)은 제주해협에서 월 간격으로 관측된 자료를 이용하여 제주해협내 해수의 월별 분포특성을 고찰하였다. 김 (2000)은 제주도 주변을 포함한 황해 남동부해역에서 획득한 해수특성 자료에 Chen et al. (1995)의 방법을 도입하여, 겨울철과 여름철 수괴를 분류하고 해역별 각 수괴의 혼합율을 계산하였다. 이 (1999)는 남해의 영양염 분포특성과 해수의 물리적 특성간 관계를 고찰하였다.

Kim et al. (1991)은 남해를 포함한 황·동중국해에서 1986년 1월과 6월에 수집된

자료를 이용하여 cluster 분석을 통해 수괴를 11개의 그룹으로 분류하였다. Kim et al. (1991)에 의하면 동중국해 해수 (East China Sea Water)라 명명한 해수가 겨울철 남해의 대부분 해역에 나타나는데, 동중국해 해수는 그 특성으로 미루어 (T: 11.3~17.0°C, S: 33.53~34.80 psu) 쿠로시오 기원 해수로 간주된다. 동중국해 해수는 여름철에도 제주해협 남부와 남해 연안의 수온약층 하부 수심 50 m에 분포하고 있어 남해는 연중 쿠로시오의 영향을 받는 것으로 사료된다. 겨울철 남해 연안역에는 여름철에는 전혀 나타나지 않는 저온, 고염의 해수가 분포하는데 이는 강 (1974)이 언급한 남해연안수로서 Kim et al. (1991)은 이를 천해에서의 국지적인 냉각에 의해 변형된 동중국해 해수로 간주하였다. 여름철 표층에 출현하는 해수는 염분이 32.0 psu 이하이며 쿠로시오의 영향을 받은 수온이 높은 해수와 황·동중국해에 분포하는 해수와 유사한 수온이 상대적으로 낮은 해수가 분포한다.

Hur et al. (1999)은 40년간의 역사적 수온, 염분자료를 이용, 수심을 이용한 cluster 분석을 통해 남해를 포함한 황·동중국해 출현하는 수괴를 9가지로 분류하고, 각 수괴의 월별 특성과 계절적 분포특성을 제시하였다. Hur et al. (1999)에 의하면 Kim et al. (1991)과 유사하게 겨울철에는 쿠로시오 기원 해수 (Kuroshio-ECS Water)가 남해에 광범위하게 분포하며, 남해 연안역 일부에는 1~4월과 11~12월에 만 나타나는 쿠로시오 해수와 황해해수의 혼합수 (Mixed Water)가 분포한다. 여름철에는 쿠로시오 기원 해수 외에 양자강 희석수 (Yangtze River Diluted Water) 및 제주도 남서쪽과 북서쪽에 분포하는 표층수 (Yellow Sea Surface Water)가 남해에 출현한다.

여름철 제주해협에는 계절적 수온약층 상부에 양자강 희석수를 비롯한 저염의 연안수가 분포하고 약층 하부에는 제주도 인접한 곳에 쿠로시오 기원의 고염의 해수가 나타나며 고염의 해수 북쪽에는 상대적으로 수온이 낮은 냉수가 분포한다 (김 등, 1991; Lie et al., 1999). 김 등 (1991)과 조 와 김 (1994)은 제주해협의 냉수가 여름철 남쪽으로 확장하는 (Nakao, 1977; Park, 1985) 황해냉수의 일부가 해협 북쪽을 통해 남해로 유입될 가능성을 제시하였지만, 여름철 해수분포와 인공위성 추적부이에 의한 해류분포는 해협에 출현하는 냉수가 쿠로시오 기원의 고염수와 함께 제주도 서쪽으로부터 제주해협으로 유입됨을 보인다 (Lie et al., 1999).

제주도 동쪽을 통해 남해로 유입되는 대마난류수와 남해안 사이에는 대마난류수에 비해 저온, 저염이며 계절적으로 특성치 변화가 큰 남해연안수가 연중 분포한다 (Gong, 1971; 강, 1974). Gong (1971)은 겨울철에 형성된 냉수가 여름까지 중·저층에 잔류한다고 하였으며, Lim (1976)은 겨울철에 남해에서 형성된 저온의 남해연안수가 침강하여 여름철까지 존재하며 남해의 중앙 해역에 냉수성 소용돌이를 형성하고 있다 하였다. 반면에 조 와 김 (1994)은 여름철 남해 중앙부 저층에 분포하는 냉수가 제주해협 서편해역에서 남해로 유입된 것으로 추정하였다.

#### ● 남해에 영향을 미치는 양자강 희석수

여름철 제주도 주변을 포함한 남해와 동해의 표층 염분은 감소하며 (강, 1971; Moriyasu, 1972; Lim, 1976) 이는 양자강 희석수에 주로 기인하는 것으로 알려졌다 (Lie, 1986; 김 등, 1991; 김 과 노, 1994). 김 과 노 (1994)는 여름철 제주도 주변해역

의 가장 염분이 낮은 해수를 중국대륙연안수라 명명하였으나 그 기원이 양자강 입구임을 의미하였으므로 양자강 회석수로 보아도 무방하다. 양자강 하구를 통해 동중국해로 유출되는 담수와 해수의 혼합수인 양자강 회석수는 유출량이 적은 겨울철에는 중국연안을 따라 남쪽으로 이동하며, 유출량이 증가하는 여름철에는 중국연안을 따라 남쪽으로 이동하는 것 외에 북동쪽으로 확장되면서 제주도 인근까지 영향을 미친다 (Beardsley et al, 1985). 양자강 회석수의 염분범위는 양자강 입구로부터 하류쪽으로 염분이 증가하여 양자강 하구에서는 26.0 psu 미만으로 정의하였고 (Mao et al., 1963), 한국 주변해에서는 32.2 psu 미만의 해수로 정의하였다 (김 과 노, 1994). 양자강 회석수의 염분범위를 32.2 psu 미만으로 정의할 때 양자강 회석수는 7월초에 제주해협에 나타나고 10월에 소멸된다 (김 과 노, 1994). Beardsley et al. (1985)은 양자강 외해역의 저염수가 직접적인 양자강 유출에 의한 것과 양자강 북쪽 중국대륙에서 기원된 육수에 의한 것으로 제시하였다.

● 제주해협을 포함한 제주도 주변의 해류분포

제주해협 내 해류의 시·공간적인 변동성, 해수수송량 및 역학에 관해서는 장기적인 해류관측 자료가 부족한 관계로 잘 알려져 있지 않다. 기존의 1~3일간 해류계 계류에 의한 관측 결과는 제주해협에 동향 혹은 북동향의 평균 해류가 있음을 보였다 (김, 1979; 김 과 노, 1997; 노 등, 1997). Chang and Kim (1995)은 제주해협 남부 한 지점의 수심 30 m와 60 m에서 약 20일간 관측된 해류의 평균상과 변동성을 기술하였다. 해류계 계류에 의한 해류 관측 외에 표류병이나 (이, 1968; 이 와 봉, 1969; 동, 1970; 이, 1974; 김, 1980b), 부표 및 TGPS (Telemetry Global Positioning System) 부이 (김 과 노, 1997; 노 등, 1997), 인공위성 추적 뜰개 (Beardsley et al., 1992; Lie and Cho, 1997; Lie et al., 1998; Lie et al., 1999)를 이용한 해류관측이 역시 제주도 주변해역에서 실시된 바 있다. Lagrangian 측류 결과는 제주도 서쪽의 북향류와 제주해협 내의 동향류 혹은 북동향류의 존재를 보여주었고, 특히 인공위성 추적 뜰개자료는 제주도 남쪽으로부터 제주도 서쪽을 지나 제주해협으로 유입되는 해류분포를 뚜렷이 보여주었다. 제주해류의 유속은 제주도 서쪽에서 5 cm/s 미만으로 미약하지만 제주해협에서는 10 cm/s 이상으로 강화되는데 Chang et al. (1995)은 제주도 서쪽에서 큰 폭을 갖는 제주해류가 좁은 제주해협으로 유입되면서 해류의 세기가 강해지는 것으로 설명하였다.

제주해협에서 기존의 해류계 계류에 의한 장기적인 해류관측은 활발한 어로활동에 의해 많은 제약이 따르며, 최근에는 저인망 어로작업에 비교적 방해받지 않고 수직적인 해류분포를 장기적으로 관측할 수 있는 해저면 안착 프레임 (한국해양연구소, 1999)에 ADCP를 장착하여 (TRBM-ADCP) 천해에서 장기적으로 해류를 관측하려는 시도가 이루어지고 있다 (Teague et al., 1998). 제주도 북서쪽에서 TRBM-ADCP에 의해 장기적으로 관측된 해류자료는 제주도 서쪽에서 시계방향으로 turning 후 제주해협으로 향하는 해류의 존재를 정량적으로 제시하였다 (Teague et al., 1998). ADCP는 계류에 의한 해류관측 외에 조사선에 장착하여 항해 중 연속 관측이 가능하므로 특히 제주해협과 같은 해협에서의 해수유동과 물질수송을 연구하는데 매우 유용하다 (예, Katoh, 1988; Simpson et al., 1990; Kaneko et al., 1991;



Isobe et al., 1994; Hoshika, 1999). 해류계 계류에 의한 해류 관측은 장기적으로 관측이 이루어 질 경우 고정점에서의 해류 변동에 관한 유용한 자료를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 해류의 공간적인 구조를 파악하기 힘든 단점이 있으며, 조사선 장착 ADCP를 이용한 해류관측은 해류의 저주파 변동성보다는 해류의 공간적인 구조를 파악하는데 유용하다. 제주해협과 같이 수심이 얕은 천해에서 조사선 장착 ADCP에 의해 관측된 자료로부터 조류성분을 제거하기 위해서는 1회 관측자료로부터 조류 조화분해 방법을 적용하는 경우와 (Isobe et al., 1994), 대상 해역의 우세한 조류성분을 제거할 수 있도록 고정 단면을 반복 관측하는 방법이 있다 (Katoh, 1988; Suk et al., 1996). 제주해협에서 최초로 후자의 방법을 이용하여 해협 내 해류의 공간적 분포를 파악한 시도가 Suk et al. (1996)에 의해 이루어졌다. 봄철에 실시된 이 관측 결과는 강한 해류 (~10.0 cm/s)가 제주도쪽에 치우쳐 나타남을 보였고, 일평균 해류분포에 근거한 제주해협에서의 해수수송량은 약 0.3 Sv로 나타났다.

#### ● 제주난류와 제주해류

한국주변의 해류분포 및 해수순환은 Uda (1934)가 최초 제안한 이래 동중국해 대륙사면을 따라 북동향 하는 쿠로시오로부터 분지된 대마난류와 황해난류가 주요 2대 해류로 간주되었다. 두 해류는 태평양 기원의 고온, 고염의 해수를 황해와 동해로 수송함으로써 한반도 주변해역으로의 열 및 염의 공급원이 됨과 동시에 주변해역의 해수순환과 해황 및 한반도 기상에 큰 영향을 미친다. Uda (1934)에 의하면 황해난류는 제주도 서쪽을 통과 후 주로 한국측 연안을 따라 북상하는 해류로 알려져 왔다. Uda (1934)의 해류모식도에 의한 황해난류의 북상은 1980년 이전까지 수용되어 왔으며 (예, Nakao, 1977; Nino and Emery, 1961), 최근까지도 Uda의 해류모식도가 일부 문헌에서 인용되고 있다 (Tomczak and Godfrey, 1994). 1980년대 들어 황해난류에 대한 Uda (1934)의 해류모식도가 재평가되기 시작되었고 이 후 최근까지 황해난류의 경로와 기원 및 황해난류와 관련된 황해의 해수순환에 관한 연구가 계속되고 있다.

강 (1974)에 의하면 연중 황해냉수나 서해연안수와 혼합된 난류수가 제주도 서방을 통과 후 제주해협으로 유입됨을 보고하였으며, 이는 연중 황해로 유입되는 황해난류 (강, 1971)의 일부가 제주해협으로 유입되는 것으로 간주하였다. 김 (1980, 1982), Kim and Lee (1982)는 제주해협을 포함한 한국 남서해에서 조밀한 간격으로 획득한 수온, 염분, 용존산소 자료를 분석하여 여름철 고온, 고염의 황해난류가 황해 내부로 깊숙히 북상하는 것에 관해 의문을 제기하였으며, 제주도 서쪽의 계절적 수온약층 하부에 나타나는 고온, 고염의 해수가 황해로 북상하지 않고 제주해협으로 유입됨을 제시하였다. Lie (1986)와 Park (1986)등이 타 연도의 여름철 자료를 분석한 결과도 김 (1980, 1982)이 제시한 것과 같이 동중국해의 쿠로시오로부터 기원된 고온, 고염의 해수가 제주도 서쪽을 우회한 후 제주해협으로 유입됨을 보였다. 김 등 (1991)은 김 (1980, 1982)의 여름철 자료와 미국과 중국간 공동연구에 의해 양자강퇴에서 획득한 자료를 이용하여 양자강퇴 기원되는 저염의 해수가 북동쪽으로 확장하여 제주도 주변해역에 표층 저염분 골을 형성하고, 이 저염분 골에 의해 제주도 주변에 분포하는 고온, 고염의 해수는 황해 표층수와 분리되며, 저층에서는 고

온, 고염의 해수가 황해냉수와 전선을 이루고 있음을 보고하였다. 김 (1980) 이래로 Uda (1934)에 의한 여름철 황해난류의 존재에 관한 재검토가 활발하게 이루어지고 있는 한편 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협으로 유입 후 동향하는 해류의 존재가 뚜렷이 밝혀졌다. 황해내부로 북상하는 황해난류의 존재에 관해서는 현재까지 논쟁의 대상이 되고 있는 반면에, 제주도 서단을 우회한 후 제주해협으로 유입되는 난류수는 여름철뿐 아니라 다른 계절에도 존재함이 여러 연구 결과로부터 뚜렷하다 (강, 1974; 노 와 김, 1983; Lee, 1983; Byun and Chang, 1988; Kim, 1988).

해류병에 의한 한국 주변해역 표층해류 분포에 의하면 제주도 북쪽에는 연중 북향류가 그리고 제주해협에는 연중 동향류가 존재함이 보고된 바가 있으며 (이, 1968, 1974), 정성적 자료나 해류병에 의한 결과뿐 아니라 부표나 인공위성 추적 뜰개에 의한 해류 분포도 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협으로 유입되는 난류의 존재를 정량적으로 보여주고 있다 (Chang et al., 1995; Lie et al., 1999). Chang et al. (1995)은 제주도 주변에서 4월에 획득한 해류자료와 해수특성 자료를 이용하여 쿠로시오로부터 분지된 고온, 고염의 해수가 제주도 서단을 우회한 후 제주해협에서 동향함을 보였으며 이러한 해류분포를 제주난류라 최초로 명명하였고, 후에 Lie et al. (1999)도 이를 제주난류라 정의하였다.

2월과 4월등 겨울철과 봄철에는 제주해협 북쪽의 연안역을 제외하곤 고온, 고염의 제주난류수가 제주해협의 거의 전체에 분포하지만 (이, 1968; Chang et al., 1995), 여름철과 가을철에는 제주난류수 외에 황·동중국해나 양자강퇴에서 기원하는 황해냉수, 황해연안수 및 양자강 희석수 등 다양한 종류의 수괴가 제주해협에 나타나는 것으로 보고되었다 (Lee, 1983; 김 등, 1991; Kim et al., 1991; 김 과 노, 1994; 조 와 김, 1994; Hur et al., 1999). 제주해협에서 기존의 해류계 계류에 의해 관측된 자료에 의하면 (김, 1979; Chang and Kim, 1995; 김 과 노, 1997, 노 등, 1997) 이러한 다양한 수괴가 동향함을 유추할 수 있다. Suk et al. (1996)은 최초로 ADCP 반복 관측을 통해 제주해협 전 단면에서의 일평균 해류가 동향 함을 보였고 이러한 동향의 해류를 제주해류라 명명하였다.

제주해류의 형성 기작에 관해서 Seung and Shin (1996)은 북풍이 우세한 동계 쿠로시오로부터 분지된 대마난류의 서측 경계에 해당하는 부분이 해저지형을 따라 대부분 제주해협으로 유입되고 일부는 황해로 유입되는 것으로 설명하였다. 제주도 주변의 해저지형적 특성은 동중국해에서 뻗어져 나온 100 m의 등수심선이 제주도 서편을 돌아 제주해협으로 연결되며, 이러한 지형적 특성은 Seung and Shin (1996)이 언급하였듯이 제주해류를 형성하는 중요한 요인으로 생각된다. Pang et al (1993) 및 방 과 오 (1995)도 지형류 균형을 이룬 쿠로시오의 서측 경계가 등수심선을 따라 북상하면서 대마난류를 형성한다 하였으며, Katoh et al (1996b)은 ADCP 관측 결과를 이용하여 동중국해 대륙붕상 100 m 등수심선을 따라 북상하는 흐름이 존재함을 보고하고 있어 제주해류는 해저지형에 의해 유도될 가능성이 높다. 제주해협에서의 3~7일 주기의 해류 변동은 제주시와 추자도간의 해협을 가로지르는 방향의 해수면 차이와 연관되어 제주해류가 제주해협에서 지형류 균형을 이룸을 제시하며, 제주해류의 저주파 변동은 제주시에서 관측된 국지적인 바람과 상관관계가 적었다 (Chang and Kim, 1995).

● 해양기상

해표면을 통한 열·염 플럭스 및 해상풍은 수치모델의 표면 경계조건으로 사용되는 강제력으로, 해수순환을 정확히 재현하고 예측하기 위해서는 정확도 높은 해표면 플럭스 자료가 입력되어야 한다. 또한 남해에서의 대기-해양 상호작용을 이해하고, 남해의 해황과 순환의 역학과정을 규명하는데 있어서도 해표면 플럭스에 관한 정보는 매우 유용하다. 남해를 포함한 한국 주변해양에서의 해상풍과 열 플럭스를 포함한 해양기상에 관해서는 강 등 (1994), 나 등 (1992), 한국해양연구소 (1994, 1995), Han et al. (1995), Na et al. (1999) 등의 연구가 있다 (Table 1-4).

Table 1-4. Previous studies on surface heat flux and wind stress in the surroundings seas of Korea including the South Sea.

자료	공간적 해상도	시간변동	기상요소	참고문헌
1978~1987, 12시간 간격자료, 기압도, SST를 이용 Cardon model 적용 Na 바람 계산	127 km	연평균, 월평균	바람응력 및 curl	나 등 (1992)
1984~1987, 1월, 4월, 7월, 12월 월평균 자료 ECMWF, NMC (SST), NASA (단파복사량)	2° × 2°	월평균	Surface heat budget, 바람응력 및 curl	강 등 (1994)
1978~1987, 12시간 간격 자료, Na 바람	127 km	연평균, 월평균, 스펙트럼 분석	바람응력 및 curl	한국해양연구소 (1994)
1978~1987, 12시간 간격 자료, Na 바람, 이동평균 후 10일 간격 자료 분석	127 km	EOF 및 스펙트럼 분석	대기압, 동서-남북 성분의 바람응력	한국해양연구소 (1994)
1978~1987, 12시간 간격 자료, Na 바람	127 km	연평균, 월평균, 스펙트럼 분석에 의한 단주기 특성	바람응력 및 curl	Han et al. (1995)
1978~1995, 12시간 간격 자료, Na 바람	0.5° × 0.5°	연평균, 월평균	바람응력, curl, 열 플럭스	Na and Seo (1998) * CD-Rom (V. 3.1)
1978~1995, 12시간 간격 자료, Na 바람	0.5° × 0.5°	연평균, 월평균	열 플럭스	Na et al. (1999)

기존의 연구는 한국 주변해역의 광역을 대상으로 한 관계로 공간적인 해상도가 0.5° 혹은 127 km로서 남해의 해상기상을 파악하는데 제한이 있다. 나 등 (1992)에 의하면 남해에서는 6~8월 사이에는 남풍계열의 바람이 우세하여 8월에 최대가 되며, 9월에는 북동풍으로 바람방향이 바뀌기 시작하여 이후 3월까지 북풍계열의 바람이 우세하다. 최대 북풍계열의 바람응력은 1월에 약 1 dyne/cm<sup>2</sup>에 달하여 여름철 남풍에 비해 강하다. Na et al. (1999)에 의하면 9~3월까지의 남해에서 대기열을 빼앗기며 4~8월까지의 해양에서 대기열이 방출된다.

#### ● 황해 남동부 해역의 조석전선

인공위성에 의한 해표면 수온분포 (Lie, 1989), LANDSAT 영상사진 (KORDI, 1987, 1993) 및 CZCS (Coastal Zone Color Scanner) 영상자료 (Lee et al., 1998)에 의하면 황해 남동부의 진도와 흑산도 주변해역은 여름철 표층수온이 외해역에 비해 낮아 표층에서 외해역과 수온전선을 형성하고 연중 탁도가 높은 해역이다. 수심이 얇고 조류가 강한 동 해역은 활발한 조석혼합에 의해 수층이 수직적으로 균질하며 (한국해양연구소, 1986), stratification parameter ( $H/U^3$ , H: 전체수심, U: 수심평균된 조류, Simpson and Hunter, 1974) 및 potential energy anomaly가 작은 해역이다 (Lie, 1989). 인공위성에 의한 해표면 수온분포 (Lie, 1989)에 의하면 진도와 흑산도 주변의 표층냉수는 제주해협 북쪽으로 연결되는 모습을 보이고 있어 조석혼합에 의한 표층냉수가 제주해류와 함께 남해 연안역으로 유입됨을 암시한다. 제주해협 북쪽에서의 부유퇴적물의 농도는 최대 4.0 mg/l를 나타내며, 고농도의 부유퇴적물은 보길도 남방 10 mile까지로 국한된다 (Suk et al., 1996). 이러한 고농도의 부유퇴적물은 국지적으로 생긴 것이라기보다 제주해류에 의해 조석혼합역에서 제주해협으로 유입된 것으로 간주된다.

### 3-2. 기존 자료분석

분석된 기존 자료 중 남해 연안역의 강수량의 장주기 변동과 제주와 추자도간 해수면 변화는 1, 2차년도 보고서에 수록하였으므로 본 보고서에서는 제외하였다.

#### 3-2-1. 남해의 평균적 계절별 해황

Figures 1-12~1-17은 남해의 표층과 50 m층에서의 격월별 평균적 수온, 염분, 해수밀도 분포를 나타낸다 (국립수산진흥원, 1997, 1998). 2월, 4월, 12월달 표층과 50 m층에서의 해수특성 분포는 유사한 형태를 보이고 있어 겨울과 봄철에는 수층이 수직적으로 균질함을 알 수 있다. 수평적으로는 34° N 북쪽의 저온, 저염의 황해냉수와 33° N 남쪽의 고온, 고염인 해수가 만나 동서방향의 강한 열·염전선이 전층에 걸쳐 제주해협 서쪽에 형성된다 (Lie, 1985). 제주해협 서쪽의 열·염전선은 강도가 약화된 채로 제주해협을 거쳐 남해로 연장된다. 제주해협 내 해수는 북쪽으로 갈수록 수온과 염분이 다소 감소하지만 대부분 염분 33.6 이상, 수온 12.0°C 이상을

보이고 있어 겨울철 제주해류에 의해 제주해협으로 유입되는 해수는 대부분 고온·고염인 쿠로시오에서 기원된 해수임을 알 수 있다. 천해인 남해 연안역에는 겨울철 저온 ( $< 10.0^{\circ}\text{C}$ ), 고염 ( $> 34.2$ )인 남해안 연안수 (강, 1974; Lim, 1976)가 나타난다. 제주해협 내 국립수산진흥원 정기 관측점은 3개에 불과하므로 겨울철 남해 연안역에 출현하는 저온수가 남해 연안에서 형성된 독립적인 저온수인지 제주해협 서쪽의 저온수의 이류에 의한 것인지 확실치 않다. 저온수의 염분은 34.0 이상을 보이며 연안역에서 이와 같은 고염을 유지하기 위해서는 고염수의 이류에 의한 염의 공급이 이루어지거나, 대기-해양 상호작용에 의해 증발량이 강수량보다 많을 경우에 가능하다. 제주, 여수, 부산 측후소에서 관측된 10년 평균된 월별 강수량과 증발량 자료에 의하면 11월~3월까지의 증발량이 많고 나머지 계절에는 강수량이 많으며 증발량과 강수량 차이의 최대값은 11월~1월에 약 8 cm로 나타난다 (조, 1988). 10월달 남해 연안역의 평균적인 표층 염분은 약 32.7이므로, 10월부터 2월 사이에 증발에 의해 염분이 1.5 정도 증가하여 Fig. 1-12 에서 보는 바와 같이 2월달 표층염분이 34.2가 되기 위해서는 남해 연안역 수심을 약 50 m로 간주했을 때 순 증발량 (증발량-강수량)이 약 220 cm가 되어야 한다. 이와 같은 증발량은 실제 관측된 10월부터 2월까지의 누적 순 증발량 (약 30 cm)에 비해 7배 이상 큰 값이므로 동계 남해안 연안수 표층 염분의 증가는 증발에 의한 것만으로 설명이 어렵다. 유사한 성질을 갖는 해수가 제주해협 서쪽에 분포하고 제주해협에서 해수는 정체되어 있는 것이 아니라 대부분 연속적으로 동향하고 있으므로 남해안 연안수는 제주해협 서쪽의 전선역에서 제주해류에 의해 수송된 해수로 간주하는 것이 타당하다. 연안역으로 운반된 고염의 해수는 천해역에서의 대기-해양 상호작용에 의한 냉각과 (Kim et al., 1991) 강한 조류 등의 영향으로 그 성질이 변하여 저온, 고염의 특성을 보이는 것으로 사료된다. 고염수의 공급은 제주도과 대마도간에 분포하는 대마난류수에 의해서도 가능하지만 해수특성 분포는 표층과 저층에서 모두 남북방향으로 수온, 염분, 밀도구배를 보이고 있어 등밀도선을 가로지르는 방향으로의 이류에 의한 염의 공급은 어려울 것으로 사료된다. 제주해협 서쪽 열·염전선이 나타나는 해역에서는 수온과 염분이 해수밀도에 미치는 영향을 상쇄함으로써 해수밀도가 균질하며, cabbeling 기작 (Horne et al., 1978)에 의해 전선역의 해수밀도는 전선 북쪽과 남쪽에 비해 다소 높게 나타난다. Cabbeling 기작은 수온과 염분은 상이하나 밀도가 같은 두 해수가 혼합될 경우 혼합수는 본래의 해수에 비해 밀도가 높아지는 현상으로 상태방정식의 비선형성에 기인한다.

여름철로 접어들면서 표층해수의 가열과 주변대륙으로부터의 육수유입 및 강수 등으로 남해 해수의 표층 수온과 염분은 겨울철에 비해 고온, 고염화 되었으며, 수층이 균질한 동계와는 달리 표층과 50 m층의 해수특성 분포가 차이를 보인다. 8월의 경우 표층에 출현하는 해수는 제주해협 북서쪽 황해 남동해역의 상대적으로 수온이 낮고 ( $< 24.0^{\circ}\text{C}$ ) 염분이 높은 ( $> 32.2$ ) 해수, 제주도 남서쪽 해역의 염분이 가장 낮은 ( $< 31.0$ ) 해수 및 제주도와 대마도를 잇는 선의 남쪽에 분포하는 고온 ( $> 27.0^{\circ}\text{C}$ )의 해수 등 3개로 구분된다. 황해 남동해역인 대흑산도 주변의 표층 냉수는 강한 조석혼합에 의해 하계와 추계에 형성되는 연안 냉수로서 (한국해양연구소, 1986; Lie, 1989), 조석혼합으로 인해 수직적인 수온차이가 외해역에 비해 작아 저층

에서는 외해역에 비해 높은 수온을 보인다. 제주해협 북동쪽 남해안 연안역에도 외해역에 비해 상대적으로 수온이 낮고 염분이 높은 해수가 분포한다. Fig. 1-15에 의하면 황해 남동부의 냉수와 남해 연안의 냉수는 서로 연결되지 않고 있지만 이는 제주해협에서의 정점이 연안역까지 조밀하게 설정되지 못했기 때문인 것으로 사료되며, 인공위성 사진에 의하면 하계나 추계 황해역 냉수와 남해 연안역 냉수가 서로 연결된 분포를 보인다 (Lie, 1989). 남해 연안의 냉수도 황해 남동해역 표층 냉수와 마찬가지로 강한 조석혼합에 의해 국지적으로 형성될 가능성과 함께 제주해협에서의 평균 해류가 열, a과 가을철에도 동향하는 것으로 미루어 제주해류에 의한 황해 남동해역 냉수의 남해 연안역으로의 이류에도 기인하는 것으로 사료된다. 제주도 남서방의 저염수는 양자강 유출수에 의해 변질된 양자강 희석수 (Lie, 1986; 김 등, 1991; 김 과 노, 1994)로서 여름철 제주해협을 포함한 남해에서 가장 낮은 염분으로 대표된다. 양자강 희석수는 유출량이 적은 겨울철에는 중국연안을 따라 남쪽으로 이동하며, 유출량이 증가하는 여름철에는 중국연안을 따라 남쪽으로 이동하는 것 외에 북동쪽으로 확장되면서 제주도 인근까지 영향을 미친다 (Beardsley et al, 1985). 양자강 희석수의 염분범위는 양자강 하구언에서는 26.0 미만으로 (Mao et al., 1963), 한반도 주변해양에서는 32.2 미만의 해수로 정의되었다 (김 과 노, 1994). Beardsley et al. (1985)은 양자강 외해역의 저염수가 직접적인 양자강 유출에 의한 것과 양자강 북쪽 중국대륙에서 기원된 육수에 의한 것으로 조심스럽게 제시하였다. 제주해협의 표층 해수는 1월부터 5월 중순경까지 34.0 이상의 높은 염분값을 유지하는 반면 5월 이후 양자강 희석수를 포함한 중국대륙 연안수의 영향으로 염분이 점차 감소하여 7월 초순경 염분이 32.2 미만으로 떨어지고 10월경부터는 다시 표층 염분이 상승한다 (김 과 노, 1994). 양자강 희석수는 제주해협을 통해 남해로 유입된 후 (김 등, 1991; 김 과 노, 1994) 남해를 동향하여 대한해협을 통해 동해로 유출된다 (Lim, 1976). 제주해협 서쪽 표층에는 동계 및 춘계와 유사하게 하계에도 동서방향의 열·염전선이 형성된다. 동계와 춘계에 비해 하계의 수온전선은 남북방향의 수온구배가 약화하는 반면 황해 연안수와 양자강 희석수간에 형성되는 염분전선은 비교적 강하게 발달하고, 동계 및 춘계와 달리 동서방향의 밀도전선이 형성된다. 제주해협 서쪽의 밀도전선은 제주해협 및 남해로 연결되며 제주해협 동편 남해의 밀도전선은 연안역과 외해역의 수온차이에 의해 주로 기인한다. 50 m층의 해수특성분포는 제주해협 서쪽에서 등온선이 남북방향으로 분포하는 반면 등염분선은 동서방향으로 분포하는 특징을 보이고, 제주해협으로는 수온 16.0℃ 미만, 염분 33.6 미만의 해수가 128° E 서쪽의 남해 연안으로 유입되는 형상을 보인다. 제주도와 대마도를 잇는 선의 남쪽에는 고온 (> 17.0℃), 고염 (> 33.8)의 해수가 분포하며, 제주도-대마도를 잇는 선 남쪽의 고염의 해수가 남해안으로 공급되는 분포특성을 보인다.

### 3-2-2. 장기 해류관측 결과 분석

#### 제주해협 남부

제주해협 내 해수유동은 왕복성 조류에 동향의 평균적인 해류가 중첩되어 나타난

다. 제주해협에서의 조류특징은 제주항 조석을 기준으로 고조시에 남서향이나 서향의 최강유속이 나타나고 저조시에 북동향이나 동향의 최강유속이 나타나고 있어 (김, 1979; 한국해양연구소, 1996b) 전형적인 진행과의 특성을 보인다. 동향의 평균해류로 인하여 동향류의 세기는 서향류에 비해 강하고 동향류가 지속되는 시간 역시 서향류 지속시간 보다 길게 나타난다. 1983년 봄철 제주해협 남부 (33° 40' 48" N, 126° 29' 48" E) 수심 100 m에서 약 20일간에 걸쳐 30 m층과 60 m층에서 관측된 자료를 이용하여 (Chang and Kim, 1995) 조화분해 방법에 의해 계산한 5개 주요 분조에 대한 조류의 진폭은 Table 1-5와 같다. 진폭이 큰 분조는  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ 의 순서이며 반일주조인  $M_2$  분조가 가장 큰 진폭을 보인다. 동서방향의 진폭이 남북방향의 진폭에 비해 크게 나타나고 있어 조류의 주된 방향이 동서방향임을 알 수 있으며, 수심에 따른 진폭의 차이는 크지 않다. 전 기간동안의 평균유속은 30 m층 동서방향의 경우 10.9 cm/s로서 5대 분조 전체 진폭의 약 12%에 불과하므로 제주해협의 해수유동은 왕복성 조류가 탁월하다. 그러나 장기적인 해수 유동과 물질 이동에 있어서는 왕복성 조류보다 미약하지만 평균적인 해류가 더욱 중요하다.

Table 1-5. Amplitude of five major tidal constituents based on 20-day long current data taken at 30 m and 60 m depths in the southern Cheju Strait in April 1983 (Chang and Kim, 1995). TASK 2000 package provided by the Proudman Oceanographic Laboratory, UK is used for the harmonic analysis of the data.

분조 (주기/시간)	$U_{30m}$ (cm/s)	$V_{30m}$ (cm/s)	$U_{60m}$ (cm/s)	$V_{60m}$ (cm/s)
$M_2$ (12.42)	42.9	2.9	43.8	3.1
$S_2$ (12.00)	16.3	1.6	16.0	0.4
$N_2$ (12.66)	6.5	1.8	6.6	1.1
$K_1$ (23.93)	11.2	1.5	10.2	0.7
$O_1$ (25.82)	8.5	2.7	7.0	2.1
$U_{30m}$ , $U_{60m}$ 각각 30 m층, 60 m층의 동서방향 유속 $V_{30m}$ , $V_{60m}$ 각각 30 m층, 60 m층의 남북방향 유속				

20일간 관측된 전 기간의 평균해류는 30 m층에서 북동쪽 (61.1°)으로 12.5 cm/s, 60 m층에서는 북동쪽 (50.9°)으로 9.5 cm/s로서 수직적으로 약 3 cm/s의 유속 차이를 보인다 (Chang and Kim, 1995). 평균해류는 수심이 깊어질수록 반시계 방향으로 회전하는데 Chang and Kim (1995)은 이를 thermal wind 관계에 의한 유향의 회전으로 설명하였으며 해류계에 의해 관측된 수직적인 유속의 차이와 지형류에 의한 수직적인 유속의 차이가 거의 일치함을 보였다. 평균해류 외에 관측된 해류는 순압적인 저주파 변동성을 보이며, 이러한 저주파 변동성은 동서방향의 유속성분에

서 특히 우세하다.

### 횡간수도

횡간수는 보길도와 남해안 사이에 위치한 폭 5 km 정도의 협수로이며 제주해협과 함께 황해와 남해사이의 해수 및 물질교환이 일어나는 또 하나의 통로로 간주된다. Figure 1-18은 국립해양조사원에 의해 횡간수의 전체수심 약 37 m인 위치의 5 m층에서 1980년 6월과 1998년 9월에 각각 15일과 30일간 관측된 해류의 벡터진행도이다. 북서-남동방향의 왕복성 조류에 중첩되어 북동방향의 평균 해류가 존재함을 알 수 있다. Table 1-6은 횡간수에서 1998년 9월 수심 5 m층에서 한 달간 관측된 자료를 이용하여 조화분해 방법에 의해 계산한 5개 주요 분조에 대한 조류의 진폭을 나타낸다.

Table 1-6. Amplitude of five major tidal constituents based on 32-day long current data taken at 5 m depth in the Hoenggan Channel in September 1998 by the National Oceanographic Research Institute. TASK 2000 package provided by the Proudman Oceanographic Laboratory, UK is used for the harmonic analysis of the current data.

분조 (주기/시간)	$U_{5m}$ (cm/s)	$V_{5m}$ (cm/s)
$M_2$ (12.42)	111.5	25.0
$S_2$ (12.00)	45.5	9.5
$N_2$ (12.66)	22.8	1.8
$K_1$ (23.93)	19.4	4.0
$O_1$ (25.82)	13.9	4.3
$U_{5m}$ . 5 m층의 동서방향 유속 $V_{5m}$ 5 m층의 남북방향 유속		

제주해협 남부에서와 마찬가지로 진폭이 큰 분조는  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ 의 순서이며 반일주조인  $M_2$  분조가 가장 큰 진폭을 보이고, 동서방향의 진폭이 남북방향의 진폭에 비해 크게 나타나고 있어 조류의 주된 방향이 동서방향임을 알 수 있다. 그러나 협수로인 횡간수에서의 진폭은 보길도 남부에서의 진폭보다 크게 나타나고 있어  $M_2$  분조의 경우 횡간수에서의 진폭은 제주해협 남부에서의 진폭에 비해 약 2.5배 정도 크게 나타난다.

횡간수에서의 왕복성 반일주조류의 진폭은 제주해협 남부에 비해 2배 이상 크게 나타나지만, 1980년과 1998년 하계에 관측된 전 기간의 평균해류의 유향과 유속은 각각  $29.59^\circ$  (북쪽으로부터 시계방향)와 12.92 cm/s,  $20.62^\circ$  와 10.24 cm/s로서



제주해협 남부에서 춘계에 관측된 평균해류의 크기와 유사하다. Figures 1-19, 1-20은 Doodson의  $X_0$  필터를 사용하여 조류성분을 제거한 12시간 간격의 비조석성분 해류의 동서, 남북방향 성분의 유속과 1998년 9월의 경우 해류성분 및 비조석성분 수온을 나타낸다. 저주파 해류는 전 관측기간에 걸쳐 북동향류가 우세하여 보길도 남부해역뿐 아니라 보길도 북부 협수로를 통해서도 제주해협 서쪽에서 해수가 남해로 유입됨을 알 수 있다. 관측된 해류는 약 3~7일 주기의 저주파 변동을 보이고 있어 역시 제주해협 남부에서 봄철에 20일간 관측된 해류 변동의 시간 규모와 유사하다. 1998년 하계 관측자료에 의하면 9월 29일~10월 2일에 걸쳐 북서향류가 우세하게 나타났으며, 이때 서향류의 최대 유속은 30 cm/s에 달했다. 1998년 하계 해류와 함께 관측된 수온자료에 의하면 관측을 개시한 9월 8일부터 9월 20일까지 21.2°C의 수온을 유지하다가 그 이후에 약 3일에 걸쳐 수온이 2.0°C 가량 증가하여 관측 종료 시까지 유지되었다. 해류관측 위치와 가장 인접한 완도에서의 기온변화는 수온이 증가하는 9월 하순에 도리어 기온이 감소하고 있어 수온의 증가는 난류수의 수로로의 유입 때문이었던 것으로 사료된다.

### 3-2-3. 남해의 월평균 해상풍

Figures 1-21, 1-22는 Na and Seo (1998)에 의한 남해의 월평균 해상풍 분포를 나타낸다. 자료의 공간적인 해상도는  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  이며, 1978~1995년간의 12시간 간격의 천기도를 이용하여 계산한 해상풍이다. 남해에는 9~3월까지 북풍계열의 바람이 우세하며 최대 풍속은 8 m/s에 달한다. 북풍은 3월경부터 미약해지기 시작하여 4~6월에는 바람이 미약하고 7월부터는 남서풍이 불기 시작하여 8월까지 지속된다. 9월과 10월에는 상대적으로 미약한 북동풍이 불었다가 11~1월에는 강한 북서풍이 그리고 2월에는 북풍이 우세하다.

### 3-3. 해양관측 자료의 분석

본 보고서에서는 3년에 걸쳐 실시된 현장관측 자료 중 제주해협에서 CTD와 ADCP에 의해 관측된 계절별 해수특성 분포와 일평균 해류분포 및 한·미 공동연구의 일환으로 남해의 2개 단면에서 1999년 2회에 걸쳐 관측된 CTD 자료 분석 결과를 기술하였다. 기타 계절에 관측된 CTD 자료는 1, 2차년도 보고서에 수록하였다.

#### 3-3-1. 제주해협에서의 해수와 해류분포

제주해협 내 제주해류의 공간적인 구조를 파악하기 위하여 1995~1999년에 걸쳐 조사선 장착 ADCP를 이용한 해류관측을 실시하였다 (Suk et al., 1996; 한국해양연구소, 1997; 한국해양연구소, 1998). 해류관측은 약 25시간에 걸쳐 제주도-보길도간 그리고 제주도-진도간 동일한 남북단면을 반복 관측하여 반일주조와 일주조가 제거된 일평균 해류분포를 계산하였다. Table 1-7은 ADCP에 의한 7회에 걸친 해류관측

개요를 나타낸다. 1997년 3월의 제주도-진도간 단면을 제외하고 나머지 해류관측은 제주도-보길도간 남북방향으로 약 30 mile 거리의 단면에서 실시되었으며, 조류를 제거하기 위하여 24.5시간~25.9시간동안 동일 단면을 8회~9회 반복 관측하였다. 1997년 3월 제주도-진도간 관측은 단면의 거리가 60 mile에 달하는 관계로 전 단면을 둘로 나누어 30 mile 거리의 각 단면에서 9회 반복 관측을 실시하였다. 해류분포와 함께 해수특성 분포를 파악하기 위한 CTD 관측은 약 3-5 mile 간격으로 ADCP 관측 이전에 실시하였다.

Table 1-7. Outline of repeated ADCP traverse surveys conducted in the Cheju Strait during 1997~1999 in order to investigate the spatial and temporal structure of the diurnally-averaged flow in the strait.

관측시기	관측단면	반복관측 횟수	전체 관측 소요시간
95/04/26~04/27	제주도-보길도	8	24.72 시간
97/03/22~03/23	제주도-진도	9	25.87 시간
97/03/24~03/25		9	24.70 시간
97/09/29~09/30	제주도-보길도	8	24.82 시간
98/09/25~09/26	제주도-보길도	8	24.48 시간
98/11/25~11/26	제주도-보길도	8	24.80 시간
98/02/24~02/25	제주도-보길도	8	24.91 시간
99/08/05~08/06	제주도-보길도	8	24.80 시간

Figures 1-23~1-29는 7회에 걸친 ADCP 관측결과로부터 계산한 일평균 해류분포와 ADCP 관측과 병행하여 실시한 CTD 관측 결과를 나타낸다. 제주해류의 공간적 구조는 수층이 수직적으로 균질한 2~4월의 겨울과 봄철 및 수층이 성층화하는 8~11월의 여름과 가을철로 나누어 살펴보았다.

#### 겨울과 봄철

2~4월에 수층은 수직적으로 균질하며 수온과 염분은 제주도쪽으로 갈수록 증가한다 (Figs. 1-23~1-25). 1999년 2월의 경우 보길도 남방 관측점 C10~C12 사이에서는 열·염전선이 뚜렷하여 전선역의 북쪽 보길도 인접한 해역에는 수온 9.0°C 미만, 염분 33.2 미만인 저온, 저염의 해수가 나타난다. 수온과 염분의 밀도에 대한 상쇄 효과로 인하여 밀도분포에서는 전선이 나타나지 않는다. 1999년 2월 ADCP 자료 중

상층 자료의 질이 좋지 않아 전 단면에서의 해류분포를 명확히 파악할 수 없지만 제주도 연안역과 전선역에서 동향류가 강한 것을 알 수 있다. 3월과 4월에는 염분 34.0 이상의 고염수가 1997년 3월 진도 연안역을 제외하고 거의 전 단면을 채우고 있어 앞서 언급한 바와 같이 춘계 제주해류에 의해 제주해협으로 수송되는 해수는 대부분 여름이나 가을철에 비해 덜 희석된 쿠로시오의 영향을 많이 받은 것으로 사료된다. 1997년 3월의 경우 수온 10.0°C 미만, 염분 34.0 미만인 저온, 저염의 해수가 진도 남쪽 천해역에 분포하여 남쪽의 고온, 고염의 해수와 미약하지만 열·염전선을 형성하며, 제주해협 수심이 깊은 골의 북쪽 사면에도 상대적으로 저온, 저염인 해수가 수심 50 m 보다 깊은 곳에 분포한다.

제주해협에 평행한 동서방향의 일평균 유속분포는 3월 진도 연안역과 4월 제주해협 골에서 미약한 서향류가 나타나는 것을 제외하곤 모두 동향을 보인다. 제주도 인접한 곳에서 동향류의 유속이 가장 세고 남해안쪽으로 갈수록 유속이 감소하며, 최대 동향류의 유속은 약 17~20 cm/s로 나타난다. 동향류의 수직적인 유속의 차이는 3월에 최대 약 6 cm/s, 4월에 약 20 cm/s로 나타나는데 4월에 수직적인 유속 차이가 가장 크게 나타나는 해역은 제주해협 골 부근으로서 표층에서는 최대 동향류가 나타났고 저층에서는 미약하지만 서향류가 나타난 곳이다. ADCP에 의한 해류관측과 병행하여 골 부근에서 해류계 계류에 의해 관측된 일평균 해류도 수심 120 m 되는 곳에서 서향류를 보였다 (한국해양연구소, 1996b). 제주해협 골에서의 서향류는 1998년 11월에 다시 한 번 관측되었고 (Fig. 1-27), 그 외의 관측기간에는 관측되지 않았다. 1997년 3월 제주도-진도 단면에서는 수심이 깊은 골의 북쪽 사면으로부터 진도 근해까지 동향류와 서향류가 번갈아 나타나며 가장 강한 서향류는 진도에 가장 인접한 열·염전선 북쪽 냉수역에서 약 2~4 cm/s로 나타났다. 3월에 남해 연안역에 나타난 서향류가 전선역에서의 해류의 사행에 의한 것인지 평균적인 서향의 남해연안류에 의한 것인지 뚜렷치 않다. 표류병 시험 결과를 근거로 이 (1968)와 Lee (1983)는 여름과 가을철 남해 연안역에 서향류가 존재함을 보고한 바 있고, 격월 간격으로 관측된 누년 평균 해수특성 분포로부터 해저면을 기준면으로 계산한 지형류 분포에 의하면 남해의 소리도 인접 해역에 6~10월 서향류가 나타났지만 (김, 1981) 다른 계절에는 보고된 바가 없다.

남북방향의 유속성분은 동서성분에 비해 약하며 남향류에 비해 북향류가 우세하게 나타난다. 최대 북향류 유속은 약 5 cm/s로서 최대 동향류 유속의 1/3 정도이다. 춘계 남북방향의 유속분포는 제주 인접해역과 남해 연안역에 비교적 강한 북향류가 나타나고 해협의 중앙부에는 미약한 남향류가 나타나는 것이 특징이다.

### 여름과 가을철

8월과 9월에 수심 30~50 m에 형성된 강한 계절적 수온약층이 11월 24일 경에는 소멸되었고, 8월과 9월에 형성되는 수온약층은 제주해협 중앙부에서 제주도쪽으로 가면서 수직적으로 넓어지는 경향을 보인다 (Figs. 1-26~1-29). 1999년 8월의 경우 표층 수온이 9월에 비해 1.0~2.0°C 낮고 저층수 수온은 9월에 비해 약 1.0°C 높게 나타나고 있어 수직적인 수온차이가 9월에 비해 작다. 누년 평균자료에 의하면 8

월달 제주해협 표층수의 평균수온과 표준편차는  $25.8^{\circ}\text{C} \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ 로서 (국립수산진흥원, 1997) 1999년 8월의 경우 표층수의 수온이 평년에 비해  $3.0^{\circ}\text{C}$  이상 낮았다. 1999년 8월 제주도-보길도 단면에서의 초음파 유속계에 의한 해류 관측은 8월 5일에 실시되었고 관측 직전인 8월 3일에는 강한 바람을 동반한 제7호 태풍 올가 (OLGA)가 남해를 통과하면서 남해안 지방에 많은 비를 내렸다 (기상청, 1999). 태풍 통과 직후인 1999년 8월 5일 제주해협에서 관측된 상대적으로 저온의 표층수와 성층의 약화는 태풍의 영향인 것으로 사료된다.

수온약층 상부에는 고온, 저염의 해수가 분포하는데, 1998년 9월에는 전 관측기간 중 가장 염분이 낮은 염분 31.0 미만의 저염수가 보길도쪽에 치우쳐 표층으로부터 수심 약 10 m에 걸쳐 분포하는 것이 특징이다. 저염수 하부에는 강한 염분약층이 형성되고 염분약층은 제주도쪽으로 오면서 알아지는 경향을 보여 수온약층의 경사와 반대로 나타난다. 1997년 9월과 1998년 9월의 보길도 근해 연안역의 해수특성 분포를 살펴보면 저염의 해수가 나타났던 1998년 9월의 경우 등치선이 제주해협 골의 북쪽사면으로부터 연안역으로 오면서 저층을 향하는 반면에 염분약층이 상대적으로 약했던 1997년 9월에는 등온선과 등밀도 연안역으로 오면서 표층으로 부상하는 경향을 보인다. 제주해협 내로 유입되는 해수특성의 이러한 변화는 해협 내 해류분포에 영향을 미쳐 연안역을 포함한 제주해협 전 단면에 걸쳐 유속과 유향의 변화를 수반한다.

9월의 경우 수온약층 하부에는 제주도에 인접한 곳에 상대적으로 고염의 해수가 ( $> 33.6$ ) 분포하고 제주해협 골의 북쪽 사면에는 냉수가 ( $< 14.0^{\circ}\text{C}$ ) 분포한다. 1999년 8월의 경우에는 염분 34.0 이상의 고염의 해수가 수온약층 하부에 폭 넓게 분포하며 가장 염분이 높은 저층수는 수심이 가장 깊은 곳에서 발견되었다. 1999년 8월달 수온약층 하부의 냉수는 골의 북쪽사면에 나타나지만 수온이 9월에 비해  $1.0^{\circ}\text{C}$  가량 높고 바닥에 깔려 얇게 분포한다.

1998년 11월의 수직적인 해수특성 분포는 계절적 수온약층 소멸되었음을 보여준다. 수온은 제주도에 남해안으로 갈수록 감소하며 수온  $18.0^{\circ}\text{C}$  이상의 고온수가 제주도에 인접한 관측점의 중층에 나타나며 이 고온수의 염분범위는 대략 33.2~33.8 이다. 수온  $15.0^{\circ}\text{C}$  미만의 냉수는 제주해협 골의 북쪽 사면부터 보길도에 인접한 연안역까지 연결되어 나타나지만 염분분포는 골의 북쪽 사면에 나타나는 냉수의 염분이 연안역의 저온수의 염분에 비해 높게 나타나고 있어 염분분포에서는 연결이 되지 않는다. 표층염분은 1998년 9월에 비해 1.5 정도 증가하였으며, 염분 32.8 미만의 단면에서 가장 염분이 낮은 해수가 골의 북쪽 사면에 나타나는 냉수의 상층부에 사발모양으로 분포한다 수심이 가장 깊은 제주도에 인접한 관측점의 수심 100 m 보다 깊은 곳에 나타나는 해수의 염분은 34.0 이상으로 1998년 9월에 비해 염분이 증가하였다.

여름과 가을철 일평균 동향류의 유속과 수직적인 유속의 차이는 봄철에 비해 증가하여, 최대 동향류의 유속은 1998년 9월의 경우  $30\text{ cm/s}$ 에 달한다 (Figs. 1-26~1-29). 최대 동향류가 나타나는 위치도 겨울과 봄철에는 제주도 인접 해역이었던 반면에 여름과 가을철에는 제주해협 골의 북쪽사면에 나타난다. 1999년 8월에는 제주도에 인접하여 최대 약  $15.0\text{ cm/s}$ 의 서향류가 관측된 것이 특징이다. 보길도 인접

한 연안역에서는 표층 저염수의 출현과 함께 염분약층이 강하게 발달했던 1998년 9월의 약층 상부에서는 4.0 cm/s 정도의 서향류가 나타난 반면 1997년 9월에는 동향류가 강하게 나타나고 있어 연안역의 해수유동은 해황에 따라 큰 연변동을 보인다. 1998년 9월 보길도 남쪽 천해역에서는 서향류가 나타났으나, ADCP 관측기간과 같은 시기에 횡간수도에서 관측된 (Fig. 1-20 참조) 일평균 해류는 17.82 cm/s의 북동향류를 보였다. ADCP 관측 후 약 2일 후 횡간수도를 통한 해류는 유향이 서향으로 바뀌면서 3일 동안 서향류가 지속되었고 최대유속은 30 cm/s에 달했는데, 보길도 남쪽 연안의 서향류와 이틀 후 횡간수도에서 동향류에서 서향류로의 전류가 어떤 연관을 갖는지는 명확치 않다. 1998년 11월에도 같은 해 9월과 마찬가지로 미약하나 서향류가 나타난 반면 1999년 8월에는 연안역에서 강한 동향류가 관측되었다.

남북방향의 유속성분도 겨울과 봄철에 비해 강화되었으며, 특히 1997년 9월에는 최대 20.0 cm/s의 북향류가 관측되었다. 남북방향의 유속성분은 9월의 경우 수심이 깊은 해협 중앙부에서 제주도쪽으로는 북향류가 우세하고 보길도쪽의 연안역의 수온약층 상부에서는 미약한 남향류가 우세한 반면, 1999년 8월에는 전 단면에 걸쳐 남향류가 관측되었고 남향류의 세기는 보길도 부근 연안역에서 12.0 cm/s 이상으로 강하게 나타난다. 1997년 9월과 1998년 9월의 제주해협 내 해류분포는 수심 50 m 이상인 해협 중앙부와 제주도쪽으로는 북동향류가 우세한 것이 공통적이며, 수심이 얕은 연안역에서는 1997년 9월의 경우 강한 남동향의 해류가 우세한 반면 저염수의 영향을 많이 받은 1998년 9월의 약층 상부에서는 남서향의 해류가 상대적으로 미약하게 나타난다.

### 3-3-2. 제주해협에서의 해수수송량

제주해류의 해수수송량과 그 변동은 황해와 남해의 해수, 물질교환 및 남해의 순환을 이해하는데 중요하다. 제주해협에서의 기존의 해수수송량 산정은 Miita and Ogawa (1984), 조 (1988), Pang and Oh (1994), 김 과 노 (1997), 노 등 (1997)에 의해 제시된 바 있다. Miita and Ogawa (1984)는 1920~1974년에 걸쳐 1일 이상 관측된 해류자료를 이용하여 여름철 제주해협에서의 동향의 수송량이 0.5 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )임을 제시하였고 이때 동일한 자료를 이용하여 계산한 대한해협 서수도를 통한 수송량은 1.8 Sv으로서 제주해협을 통한 수송량은 대한해협 서수도에서의 수송량의 약 30% 정도 된다. 조 (1988)는 염보존과 질량보존 원리를 이용한 box 모델을 남해에 적용하여 제주해협에서의 4~6월, 6~8월의 수송량을 대한해협 서수도를 통한 수송량의 함수로 계산하였으며, 이때 대한해협 서수도를 통한 수송량이 1.4~2.0 Sv일 경우 제주해협의 수송량은 대한해협 통과 수송량의 약 30%인 0.5~0.6 Sv이었다. 조 (1988)의 결과는 Miita and Ogawa (1984)의 결과와 유사하며 4~6월, 6~8월의 수송량차이는 뚜렷치 않다. Pang and Oh (1994)는 제주와 목포간 해수면 차이의 계절변화를 분석하여 제주해협에서의 수송량의 계절변동은 약 0.3 Sv라 하였다. 김 과 노 (1997)가 1986년 8월 제주해협 서쪽 입구의 남북 방향으로 5군데에서 해류계 계류에 의해 관측된 일평균 자료를 이용하여 계산한 제주해협에서의 수송량은 0.38 Sv이었다. 노 등 (1997)은 제주해협을 가로지르는 단면상에서 월별 관

측된 수온, 염분자료를 이용하여 지형류에 의한 수송량을 산정하였는데, 이때 동향의 수송량은 동계에 0.05~0.2 Sv에서 하계로 갈수록 수송량이 증가하고 10월에 0.5 Sv 내외로 최대 수송량을 나타내었으며 동계와 하계의 수송량 차이는 0.3~0.35 Sv 정도를 보여 Pang and Oh (1994)가 해수면 차이로부터 유추한 수송량의 계절 변화 폭과 유사하다.

Table 1-8은 1995~1999년에 걸쳐 ADCP 반복 관측에 의한 일평균 해류분포와 지형류로부터 계산한 제주해협에서의 제주해류의 해수수송량을 나타낸다. 해수수송량의 최대, 최소값은 각각 1999년 8월에 0.66 Sv, 1995년 4월에 0.37 Sv으로 나타났다. 해수수송량은 3, 4월에 작은 값을 보이고 8, 9월에 큰 값을 보이고 있어 제주와 추자도간 해수면 차이의 계절변동으로부터 유추한 제주해류의 계절변동과 유사한 경향을 보인다. 계절변동 폭은 약 0.3 Sv으로서 Pang and Oh (1994)가 제주, 목포간 해수면 차이로부터 계산한 연변동 폭과 일치한다. 지형류에 의한 해수수송량은 관측된 수송량의 25~55%에 불과하며, 8월에 최대치를 보이지만 관측된 수송량과 달리 9월에도 3, 4월과 마찬가지로 작은 값을 보이고 있어 계절변동이 뚜렷치 않다.

Table 1-8. Volume transport in the Cheju Strait and the Korea Strait based on the diurnally-averaged flow observed by vessel-mounted ADCPs. Volume transport based on geostrophic currents is also shown for the comparison.

관측시기	관측된 수송량 (Sv)	지형류 수송량 (Sv)	대한해협	
			관측시기	수송량 (Sv)
95/04/26~04/27	0.37	0.16		
97/03/22~03/25	0.45	0.15	97/04/25~04/26	1.09
97/09/29~09/30	0.58	0.17	97/10/02~10/03	1.73
98/09/25~09/26	0.51	0.15	98/09/08~09/09	1.37
98/11/25~11/26	0.46	0.26	98/11/26~11/27	1.25
99/08/05~08/06	0.66	0.29		

Table 1-8에 나타낸 제주해협에서의 수송량은 보길도 남쪽에서의 수송량이다. 앞서 언급한 1998년 9월 보길도 북쪽 횡간수도에서 관측된 한달 간의 약 10.0 cm/s의 북동향 평균해류에 근거하여 횡간수도를 통한 수송량을 계산해보면 수도의 폭을 약 5 km, 평균수심을 30 m로 간주했을 때 수송량은 0.015 Sv으로서 보길도 남쪽의 제주해협에서 관측된 수송량에 비해 무시할 정도로 작다.

Table 1-8의 마지막 두 칸에는 제주해협에서와 동일한 방법을 이용하여 유사한

시기에 대한해협 서수도에서 관측된 일평균 해류분포에 근거하여 계산한 대마난류의 해수수송량을 나타낸다 (심문보, 1998; 심문보, 1999). 대마난류도 제주해류와 마찬가지로 추계인 10월에 최대수송량을 보였고 4월에 최소수송량을 보이고 있어 대마난류 수송량에 대한 기존의 연구결과와 유사하다 (Isobe et al., 1994; Yi, 1996). 대마난류의 계절변동 폭은 0.64 Sv으로서 제주해류의 계절변동 폭의 두배 가량 되고, 제주해류의 해수수송량은 대마난류 수송량의 약 30~40% 정도이다.

### 3-3-3. 한·미 공동조사 결과

1999년 5월 미국 해군연구소 (NRL, Naval Research Laboratory)와 공동으로 대한해협의 두 단면상의 12군데에 TRBM-ADCP를 계류하였다. 1999년 10월에는 12군데 위치에 계류된 ADCP 중 울산에 인접한 한 군데를 제외한 11군데의 ADCP를 성공적으로 회수하였고, 회수된 ADCP는 자료 회수 및 일부 수리를 거친 후 동일한 위치에 재계류 되었다. 회수에 실패한 울산 근해에는 5월 계류위치 인접한 곳에 새로히 ADCP를 계류하였고, 추가로 대한해협 서수도의 한 위치에 ADCP를 계류하였다. 현재 5개월간에 걸쳐 기록된 해류자료는 분석중에 있으며 본 보고서에서는 ADCP 계류위치에서 실시한 CTD 관측 결과를 기술코져 한다.

Figure 1-30은 5월 울산, 소리도 두 단면에서의 수온, 염분, 밀도의 수직분포를 나타낸다. 소리도 단면에서는 일본연안으로부터 관측점 S3까지 미약하지만 수직적으로 수온의 변화가 있는 반면에 S3부터 수심이 얇은 소리도쪽으로는 수평적인 수온의 변화가 보다 두드러진다. 일본 연안역에서는 염분이 34.6이상인 단면상에서 가장 염분이 높은 해수가 분포하며, 일본연안으로부터 소리도쪽으로 수온과 염분이 완만하게 감소하다가 소리도 남동쪽의 관측점 S3부터 소리도까지의 표층으로부터 수심 30 m까지는 염분이 급격히 감소하여 소리도에 가장 인접한 관측점 S1에서의 표층 염분은 33.5 미만으로 나타난다. 북쪽의 울산 단면에서는 이와 같은 저염의 해수가 나타나지 않는다. 소리도 단면에 출현한 저염수는 남해 서쪽해역에서 제주해협을 통해 소리도 해역까지 다다른 수괴로 간주되며, 이 저염수는 울산단면 남쪽까지만 그 영향이 나타나는 반면에 울산단면은 대마도 남쪽에서 대한해협 서수도를 통과하여 동해로 유입되는 대마난류수의 영향을 받은 것으로 간주된다. 울산단면에서도 가장 염분이 높은 해수는 일본연안의 관측점 N6에서 34.6 이상으로 나타나고, 울산 연안에서는 수온과 염분이 다소 급격히 감소하지만 염분값은 34.2 이상의 고염의 특성을 보이고 있어 소리도 연안역의 저염수와는 확연히 구분된다. 울산에 가장 인접한 관측점 N1의 저층에서는 수온이 10.0°C 미만의 냉수가 나타난다.

가을철인 10월에는 해역에 따라 다소 차이를 보이지만 계절적인 수온, 염분, 밀도 약층이 수심 30~80 m 사이에 형성된다 (Fig. 1-31). 소리도 단면에서 일본 연안측으로는 수온약층이 나타나는 수심이 깊고 소리도쪽으로 오면서 수온약층이 나타나는 수심이 얇아진다. 수온약층 상부의 해수는 일본측으로는 고온, 고염의 특성을 보이는 반면 한국 연안측으로는 상대적으로 저온, 저염의 특성을 보이며, 표층에서 가장 염분이 낮은 해수는 소리도 연안에 인접한 관측점 S1과 S2에서 32.0 미만으로 나타난다. 염분약층 하부에 분포하는 해수의 염분은 전 단면에 걸쳐 34.4 이상으로

나타난다. 울산 단면에서도 수온약층이 나타나는 수심이 울산으로부터 외해역으로 가면서 다소 깊어지며 관측점 N4의 남쪽으로는 등치선들이 다소 급격하게 해저면을 향한다. 울산에 인접한 관측점 N1의 저층에는 5월과 마찬가지로 저층냉수가 나타나고 있어 관측점 N1은 수직적으로 3층의 구조를 보인다. 10월에 출현한 냉수는 5월에 비해 그 분포범위가 넓고 냉수의 수온이 낮아졌다. 울산 부근의 표층수는 소리도 부근의 표층수에 비해 고온, 고염의 특성을 보인다.

#### 3-3-4. 제주해협 장기 해류관측 결과

1999년 3월 4일~12월 23일 기간의 약 9개월 20일에 걸쳐 제주해협 남부 수심 124 m인 지점에서 TRBM-ADCP에 의한 해류관측을 실시하였다. 해류관측의 개요 및 수심 50 m와 118 m에서 관측된 결과의 통계분석 결과는 Table 1-9와 같다. 전 관측기간의 평균 해류는 66 m에서 72° 방향으로 12.3 cm/s이며, 118 m에서 62° 방향으로 3.8 cm/s로서 두 수심간의 유속차이는 8.5 cm/s이고 수심이 깊어질수록 유향이 반시계 방향으로 바뀌는 경향이 있다. 저층에서 약 6 m 상부인 수심 118 m에서의 유속도 약 4 cm/s를 보이며, 66 m에서의 평균 유속은 Chang and Kim (1995) 이 보고한 비슷한 위치의 60 m에서 1983년 봄철 20일간에 걸쳐 관측된 유속에 비해 3 cm/s 정도 크게 나타난다. 50 m에서 최대 유속은 105 cm/s에 달하고, 118 m에서는 75 cm/s에 달한다. 전 관측기간 동안 저층 부근에서의 수온 변동 범위는 12.08~18.52°C를 보였다. Doodson의  $X_0$  필터를 사용하여 저주파 필터된 해류는 66 m에서는 동서, 남북방향 모두 평균값이 표준편차에 비해 크게 나타나며, 118 m에서는 표준편차가 평균값에 비해 다소 크게 나타난다. 저주파 필터된 해류의 성분별 시계열 자료에 의하면 66 m의 경우 서향으로의 전류가 11회 나타난 것을 제외하곤 동향을 보였으며, 남향으로의 전류도 수회 기록되었으나 북향이 우세하였다 (Figs. 1-32, 1-33). 66 m에서 동향류와 북향류는 여름철인 7~8월에 강화되는 경향을 보이며, 동서방향의 유속의 경우 11월에도 강화되는 경향을 보였다. 118 m에서는 계절에 따른 해류의 강화가 뚜렷치 않으며, 저층에서의 수온은 12월이 가장 높게 기록되었다.



Table 1-9. Outline, basic statistics, and range of velocity components and temperature for the long term current measurement in the southern Cheju Strait during March 4~December 23, 1999 using TRBM-ADCP.

관측지점				WHS-300 ADCP의 pre-setting				관측기간
위도	경도		수심	No. of bins	Bin size	Pings per ensemble	Ensemble interval	
33° 38.148'	126° 30.233'		124 m	30	4 m	60	30 min.	3/4/17:00~ 12/23/18:30
Mean ± standard deviation				Vector mean		Energy (cm <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> )		
	Depth (m)	U (cm/s ± cm/s)	V (cm/s ± cm/s)	T (°C)	Speed	Direction (°)	MKE	EKE
Un-filtered	66	11.78 ± 36.89	3.66 ± 7.58		12.33	72.7	76.06	709.26
	118	3.44 ± 29.92	1.80 ± 5.84	14.86	3.89	62.4	7.55	464.78
Filtered	66	11.81 ± 7.59	3.67 ± 3.43		12.37	72.7	76.53	34.64
	118	3.42 ± 5.24	1.78 ± 2.58	14.85	3.85	62.5	7.42	17.08
Range								
	Depth (m)	U (cm/s)	V (cm/s)	T (°C)	Max. Speed (cm/s)			
Un-filtered	66	-95.10 ~ 101.89	-29.39 ~ 53.17		105.2			
	118	-75.08 ~ 74.90	-25.79 ~ 26.61	12.08 ~ 18.52	75.80			
Filtered	66	-21.52 ~ 35.60	-9.08 ~ 19.69		35.87			
	118	-16.45 ~ 16.50	-7.81 ~ 11.07	12.31 ~ 18.11	18.54			
East-west component of currents,      North-south component of currents								
*** Temperature near the seabed,      ***** Measured clockwise from the north								
***** Mean kinetic energy,      ***** Eddy kinetic energy								

### 3-4. 해수순환 모델링

#### 3-4-1. 서론

한국 남해는 서쪽으로는 제주해협을 통해 황해와 연결되고 동쪽으로 대한해협을 통해 동해와 연결되며 남쪽으로는 동중국해와 연결된다. 남해의 해저지형은 100m 이하의 수심으로 연안에서 외해역으로 완만한 경사를 이루고 있으며, 대한해협 서수도와 제주해협에는 각각 200 m, 120 m 이상의 골 (trough)이 존재한다 (Fig. 1-1). 천해인 남해는 기상의 영향을 받기 쉬운 해역으로 겨울철에는 강한 북풍계열의 바람과 표층냉각으로 인하여 성층이 약화되며, 여름철에는 표면가열, 강우 및 담수의 유입 등으로 성층이 강화된다 (김, 1981; 한국해양연구소, 1998).

남해의 해수유동은 왕복성 조류 외에 북동향이나 동향의 평균적인 해류가 존재한다 (Mitta and Ogawa, 1984; Fig. 1-18 참조). 쿠로시오 지류에 의한 고염의 해수 (Chang et al., 1995), 저염의 동중국해 해수 (김 과 노, 1994), 저온의 황해냉수 (김 등, 1991; 조 와 김, 1994) 등이 제주해협을 통하여 남해로 유입되며, 제주해협내 해류의 평균유속은 약 12.5 cm/s 이다 (Chang and Kim, 1995). 앞서 언급하였듯이 최근의 ADCP 관측결과는 제주해협 전 단면에 걸쳐 동향류가 나타남을 보였고, Suk et al. (1996)은 제주해협 내 동향류를 제주해류 (the Cheju Current)라 명명하였다. 쿠로시오로부터 분지된 대마난류는 북상하여 제주도 동쪽을 통해 남해로 유입된 후 대한해협을 통해 동해로 유출되며, 대한해협 서수도에서 유속의 크기는 약 50 cm/s 이상을 나타낸다 (Lie and Cho, 1997). 남해의 조석은 반일주조가 우세하고 (Ogura, 1933), 반일주조류의 경우 최고 75 cm/s 정도로 해류와 비슷하거나 해류보다 강하다 (Odamaki, 1989).

남해를 포함한 해역에서 수치모델을 이용한 연구는 많은 연구자에 의해 수행되어 왔다. Fang (1986)은 연안 조석 관측자료와 수치모델을 이용하여  $M_2$ ,  $K_1$  분조에 대한 조석도를 작성하였고, 대한해협 중앙부에 무조점이 존재함을 보였다. 최 등 (1994)은 대한해협에서  $1/12^\circ \times 1/12^\circ$  격자 구성을 갖는 3차원 조석 수치모형을 이용하여 8개의 분조 ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ )를 모의하였다. 최 등 (1994)의 결과는 Odamaki (1989)의 조석도와 비교하여  $K_1$  분조에 대한 무조점의 위치가 조금 남쪽에 위치하고 있으나, 전반적으로 Odamaki (1989)의 결과와 유사한 양상을 보인다. 최 등 (1995)은 순압 3차원모델을 이용하여 조석강제력, 개방경계를 통한 유·출입 및 바람 강제력을 개별적으로 적용하여 각각의 경우에 대한 대한해협 주변의 조류순환과 해류분포를 계산하였다. 최 등 (1995)의 결과에 의하면 각각의 모델결과로는 관측된 인공위성 추적부표의 궤적을 재현할 수 없었고, 조류, 해류 및 취송류를 선형적으로 합성한 경우에 비교적 좋은 일치를 보였으며, 관측된 부표의 궤적은 해류와 취송류의 영향을 많이 받고 있음을 보였다. 위의 연구들은 조석과 해류를 동시에 고려하지 않아 관측된 해수순환을 재현하는데 제한점이 있었고 (최 등, 1994, 1995), 특히 최 등 (1995)은 조류, 해류 및 취송류를 동시에 모의하는 것의 중요성을 지적하였다. 김 (1998)은 남해전체를 모델영역으로 하여 조석과 해류를 동시에 고려하는 2차원 수치모델을 수립하여 조석과 해류에 의한 남해의 순환과 물질

이동을 모의하였다. 김 (1998)의 결과에 의하면 조석 잔차류만으로는 남해의 순환을 재현할 수 없고, 개방경계를 통한 유·출입 (즉, 해류의 영향)과 조석강제력이 동시에 고려되어야 함을 보여주었다. 김 (1998)은 해양의 밀도분포는 고려하지 않았으나 남해 일부 내만에서 외해역과 열·염의 상호교환작용이 중요하다는 것을 제시하였다.

외해역과 연안역을 포함하는 남해 전 영역에서의 해수순환과 물질이동을 연구하는 데 있어 조류, 해류 및 밀도류를 동시에 고려하는 모델의 개발이 요구되고, 이러한 모델의 결과는 내만의 연구를 위한 협역모델의 개방경계조건 뿐만 아니라 연안역과 외해역사이의 상호작용에 관한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입과 밀도분포의 영향을 동시에 고려한 3차원 수치모델을 구성하여 여름철 남해의 해수순환을 모의하고, 제반 강제력이 남해의 해수순환에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

### 3-4-2. 수치모델

#### 지배 방정식

본 연구에 사용된 Princeton Ocean Model (POM)의 지배방정식은 해면고도 (surface elevation)와 수평 및 수직 방향 유속장의 시·공간적인 변화를 계산하는 연속방정식과 운동방정식을 포함하고, 수온과 염분의 시·공간적 변화를 계산하는 열·염 보존방정식으로 구성되어 있다. 비압축성 근사 (incompressible approximation)와 유체정력학적 근사 (hydrostatic approximation) 그리고 Boussinesq 근사를 사용할 때, 아래의 관계식을 이용하여  $\sigma$ -좌표계 (Phillips, 1957)로 표현되는 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$x = x^*, y = y^*, \sigma = \frac{z^* - \eta}{H + \eta}, t = t^*$$

여기서,  $(x^*, y^*, z^*, t^*)$  : cartesian 오른손 좌표계  
 $(x, y, \sigma, t)$  :  $\sigma$ -좌표계

비압축성 유체의 연속방정식은

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1-1)$$

$x, y$  방향의 운동방정식은

$$\frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$= -\frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &= -\frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (1-3)$$

수직 방향으로의 운동방정식은

$$\rho g = -\frac{1}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (1-4)$$

열·염보존 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \phi D}{\partial t} + \frac{\partial \phi u D}{\partial x} + \frac{\partial \phi v D}{\partial y} + \frac{\partial \phi \omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right] + E_{\phi} + S_e \end{aligned} \quad (1-5)$$

여기서

- t : 시간
- $\eta(x,y,t)$ : 해수면 위치
- $H(x,y)$  : 평균 해수면하 깊이
- $D(x,y,t)$ : 총 수심 =  $H + \eta$
- $u,v(x,y,\sigma,t)$  : 수평 속도 성분
- $\omega$  : 수직 속도 성분
- p : 압력
- g : 중력가속도
- $\rho_0$  : 평균 해수 밀도
- f : 코리올리 계수 =  $2\Omega \sin \theta$
- $\phi$  : 수온, 염분
- $F_x, F_y$  : 수평 난류 점성항
- $F_{\phi}$  : 수평 난류 확산항
- $K_M$  : 수직 난류 점성계수
- $K_H$  : 수직 난류 확산계수
- $S_e$  : external source or sink 항

식 (1-2) 와 식 (1-3)에서 모델 격자보다 작은 규모에 의한 운동을 묘사하는 수평 난류 점성항 ( $F_x, F_y$ )과 수평 난류 확산항 ( $F_{\phi}$ ) 은 다음과 같이 쓸 수 있다. 수평 난류 점성항들은 좌표계의 변환에 무관하게 사용하였다 (Mellor and Blumberg, 1985).

$$E_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2A_M D \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M D \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$E_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2A_M D \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M D \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$E_\phi = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_H D \frac{\partial \phi}{\partial y} \right]$$

$A_M$  : 수평 난류 점성 계수

$A_H$  : 수평 난류 확산 계수

수평 난류 점성 계수는 많은 수치모델 적용에서 상수값을 사용하나, 본 연구에서의 수평 난류 점성계수는 격자크기와 속도의 수평적인 shear에 비례한다는 다음과 같은 Smagorinsky (1963)의 비선형공식으로 계산하였다.

$$A_M = A_B + K \cdot \Delta x \Delta y \frac{1}{2} |\nabla v + (\nabla v)^T| \quad (1-6)$$

$$\frac{|\nabla v + (\nabla v)^T|}{2} = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 / 2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

여기서

$\Delta x, \Delta y$  : x, y 방향의 격자크기

$A_B$  : 기본값

$K$  : Smagorinsky 상수

사용된 Smagorinsky 상수  $K$ 는 0.1에서 0.2사이의 값을 사용할 것을 Mellor (1996)는 권장하고 있으며 본 연구에서는 0.2를 사용하였다.  $A_B$  값의 결정은 보통 격자 크기에 따라 결정되는 값으로 Kantha (1995)는 격자크기가  $1/5^\circ$  (약 22.2 km)인 경우에  $200 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 사용하였고, 한국해양연구소 (1996b)는 한국주변해역의 조석모델에서  $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 본 연구에서  $A_B$ 값은 격자크기 3 km에 적합한  $20 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다.

Mellor and Yamada (1974)는 평균 난류모델을 비등방성의 정도에 따라 4개의 level (level 2,  $2\frac{1}{2}$ , 3 그리고 4)로 분류하였다. 본 연구에서는  $2\frac{1}{2}$  level 모델을 이용하여 수직난류점성계수와 수직난류확산계수를 계산하였다 (Mellor and Yamada, 1982). 성층에 따른 수직 난류 혼합 계수를 추정하기 위하여 Richardson number (Ri)에 따라 변하는 수직 안정도 함수 (vertical stability function)를 사용하였다.

$$K_M = q \ell S_M, K_H = q \ell S_H$$

$$S_H [1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H] = A_2 [1 - 6A_1 / B_1]$$

$$S_M [1 - 9A_2 A_2 G_H] - S_H [(18A_1^2 + 9A_1 A_2) G_H] = A_1 [1 - 3C_1 - 6A_1 / B_1]$$

$$G_H = - \frac{\ell^2 g}{q^2 \rho_0} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right]$$

여기서

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 16.6, 0.74, 10.1, 0.08)$$

- $q$  : turbulence kinetic energy  
 $l$  : turbulence length scale  
 $S_M, S_H$  : 수직안정도 함수  
 $G_H$  : Richardson number  
 $c_s$  : 음속

$q$  와  $l$  은 다음의 방정식을 풀어서 결정한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + E_q \\ \\ & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 l u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 l v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_l l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{E_{3g}}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} \tilde{W} \\ & - \frac{Dq^3}{B_1} + E_l \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= 1 + E_2 (l / \kappa L) && : \kappa = 0.4 \text{ von Karman 상수} \\ L^{-1} &= (\eta - z)^{-1} + (H - z)^{-1} \\ \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} &\equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - c_s^{-2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \end{aligned}$$

연근해의 순환역학을 지배하는 방정식은 빠르게 움직이는 외부중력파와 천천히 움직이는 내부중력파의 전파특성을 포함하고 있다. 계산과정에서 수직적으로 적분된 방정식(외부모드)과 수직적 구조를 갖는 방정식(내부모드)으로 구분하여 계산하는 것이 효율적이다. 수직 적분된 연속방정식과 운동방정식은 아래와 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (DU) + \frac{\partial}{\partial y} (DV) = 0 \quad (1-7)$$

운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(UD)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2D)}{\partial x} + \frac{\partial(UVD)}{\partial y} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tilde{F}_x \\ & = \frac{1}{\rho_0} \tau_x^w - \frac{1}{\rho_0} \tau_x^b + G_x - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(VD)}{\partial t} + \frac{\partial(UVD)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2D)}{\partial y} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tilde{F}_y \\ & = \frac{1}{\rho_0} \tau_y^w - \frac{1}{\rho_0} \tau_y^b + G_y - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (1-9)$$

여기서, 수직적분된 속도는 아래와 같이 정의 된다.

$$(U, V) \equiv \int_{-1}^0 (u, v) d\sigma$$

$\tilde{F}_x$  and  $\tilde{F}_y$  : 수평점성항

$$\tilde{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2 \overline{A_M} \frac{\partial UD}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \overline{A_M} \left( \frac{\partial UD}{\partial y} + \frac{\partial VD}{\partial x} \right) \right]$$

$$\tilde{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2 \overline{A_M} \frac{\partial VD}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \overline{A_M} \left( \frac{\partial UD}{\partial y} + \frac{\partial VD}{\partial x} \right) \right]$$

$$\overline{A_M} \equiv \int_{-1}^0 A_M d\sigma$$

Dispersion term으로 불리는 항은 다음과 같이 정의된다.

$$G_x = \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} - \tilde{F}_x - \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{uv}D}{\partial y} + \overline{F}_x$$

$$G_y = \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} - \tilde{F}_y - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v^2}D}{\partial y} + \overline{F}_y$$

수치해석방법

본 연구에 사용된 격자는 해수면 위치를 계산하는 격자와 유속을 계산하는 격자가 구분되는 staggered grid 의 일종인 Arakawa C-grid를 사용하였다. 수면경사는 반음해법으로, 이류항과 수평확산항을 centered-space, 그리고 시간에 대해서는 leapfrog scheme을 사용하였다. 이는 시·공간적으로 2차의 정확도를 가진다. Leap-frog scheme을 사용하여 시간 미분항을 차분하게 되면 Coriolis 항을 처리하는데 유리하지만 홀수번째의 해와 짝수번째의 해가 점점 달라지는 time-step splitting을 초래한다 (Roache, 1972). Time step splitting으로 인한 불안정성을 제거하기 위해 해를 매시간 간격마다 아래와 같은 Asselin (1972)의 filter를 사용하여 평활화(smoothing) 시켜 주었다.

$$T_s^n = T^n + \frac{\alpha}{2} (T^{n+1} - 2T^n + T^{n-1})$$

여기서

$$\alpha = 0.05$$

$T_s$  : smoothed solution

$n$  : time step

해수유동을 지배하는 방정식들은 빠르게 움직이는 외부중력파와 느리게 움직이는 내부중력파의 전파특성을 포함하고 있다. 본 연구에서 수직적분된 방정식 (식 1-7, 1-8, 1-9)은 외부중력파의 속도를 고려하여 짧은 시간간격마다 자유해면과 수심 평균 유속을 계산하고 (외부모드), 3차원 방정식 (식 1-1, 1-2, 1-3, 1-5)은 내부중력파에 속도를 고려하여 긴 시간간격마다 계산하는 (내부모드) mode splitting scheme을 사용하여 계산의 효율성을 갖게 하였다. 먼저 외부모드를 짧은 시간간격으로 계산하여 자유해면을 구한 후, 보다 긴 시간간격으로 내부모드를 계산하여 3차원 유속을 구한다.

수직적분된 방정식 (external mode)에서 Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 수치 안정조건은 다음과 같다 (Blumberg and Mellor, 1987).

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_{tE}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2}$$

여기서

$$C_{tE} = 2(gH)^{1/2} + U_{\max}$$

$U_{\max}$  : 수직적분된 최대이류속도

$\Delta t_E$  : 외부모드의 시간간격

3차원 방정식 (internal mode)에서 내부중력파의 속도를 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta t_I \leq \frac{1}{C_{tI}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2}$$

여기서,

$$C_{tI} = 2(g'\Delta z)^{1/2} + u_{\max}$$

$u_{\max}$  : 최대 이류속도

$\Delta x, \Delta y$  : x, y 방향의 격자간격

$\Delta t_I$  : 내부모드의 시간간격

$\Delta z$  : 각 수층의 두께

수평방향의 격자간격이 3 km( $\Delta x, \Delta y$ )이고, 수직평균된 최대이류속도가 1 m/s 일 때, 평균수심을 70 m 로 가정하면 외부모드의 시간간격은 약 39초이고, 최대이류속도를 1 m/s, 수층의 두께를 10 m로 가정하면 내부모드의 시간간격은 약 1200초이



다. 본 연구에서 사용된 시간간격은 외부모드의 경우 20초를, 내부모드의 경우 200초를 사용하여 CFL 조건을 충분히 만족시켜주었다.

### 3-4-3. 모델의 적용

한국의 남해는 왕복성 조류 외에 북동향이나 동향의 평균적인 해류가 존재하고, 지리적 특성으로 인하여 기원을 달리하는 해수가 존재하며 그 분포는 계절에 따라 큰 변동을 보인다. 이와 같은 요인을 고려하여 남해의 3차원 해수순환을 모의하는 수치모델을 구성할 경우 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입, 밀도분포의 영향, 표층과 개방경계를 통한 열·염 플럭스, 해표면 바람응력, 육지로부터의 담수 유입 등을 동시에 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 조류, 해류 및 밀도류를 고려하였고, 바람응력과 담수유입에 의한 강제력은 고려하지 않았다. 개방경계에서 조류와 해류분포 및 관측된 수온과 염분을 부과하여 개방경계를 통한 유·출입을 고려하였으며, 관측된 표층 수온과 염분을 강제하고, 표층 하 7개 층에서는 열·염 보존방정식을 풀어 밀도류의 영향을 고려하였다. 개방경계에서의 해류와 모델영역 내 밀도분포가 남해 해수순환에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 5가지 case에 대하여 모델을 수행하였다. 밀도분포를 고려하지 않은 Case 1, Case 2, Case 3은 공간적으로 균일한 밀도분포를 부과한 순압모델이고, 밀도분포를 고려한 Case 4, Case 5는 열·염보존방정식을 푸는 경압모델이다 (Table 1-10).

#### 모델영역 및 격자구성

본 연구에서 적용된 모델영역은 진도와 제주도를 잇는 선, 제주도와 대마도를 잇는 선과 울산과 대마도를 잇는 선을 각각 서쪽, 남쪽, 동쪽 개방 경계로 설정하였다 (Fig. 1-1). 여기서 사용된 좌표축은 x축으로는 제주도에서 대마도로 증가하는, y축은 제주도에서 진도방향으로 증가하는 직교 좌표계를 사용하였다. 수평방향의 격자간격 ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ )은 약 3 km를 사용하여 111×46 개의 격자로 구성하였으며, 수직방향으로는 8개의 층으로 구성하였다 (Table 1-11).

#### 자료구성

개방경계에서 조류와 해류의 유출입을 동시에 고려한 모델을 구성할 때, 해류와 조류에 의한 자유해면 분포를 부과하는 방법 (Chang et al., 1997)과 해류와 조류 분포를 직접적으로 부과하는 방법 (Oey and Chen, 1992)이 있다. 자유해면을 부과할 경우 개방경계에서 매 시간마다 변하는 밀도와 해류에 의한 해면변화와 조위변화를 모두 고려해야한다. 본 연구에서는 개방경계에서 해면변화를 관측한 자료의 부족으로 자유해면을 부과하는데 어려움이 있어, 해류와 조류분포를 직접 부과하는 방법을 사용하였다. 개방경계에서 강제력으로 부과되는 해류분포는 관측자료를 이용하였으며, 조류분포는 조위를 부과하여 계산한 조석모델 결과를 이용하였다. 해수면 경계와 개방경계에서의 수온과 염분분포는 국립수산진흥원의 8월과 10월 관측자료

를 이용하였다.

Table 1-10. Summary of initial and boundary conditions for 5 model cases.

Case		Initial Condition	Open Boundary Condition	
			External Forcing	Specification <sup>1</sup>
1	3-D Barotropic model	cold start <sup>2</sup>	Tidal Current	$\eta (B-1,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_T (B,j,t)^3$ $V (B-1,j,t) = V_T (B,j,t)^3$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B-1,j,k,t) = v (B,j,k,t)$
2		cold start	Mean Current	$\eta (B-1,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_M (B,j,t)^4$ $V (B-1,j,t) = 0$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B-1,j,k,t) = v (B,j,k,t)$
3		cold start	Tidal Current + Mean Current	$\eta (B-1,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U(B,j,t) = U_M (B,j,t) + U_T (B,j,t)$ $V (B-1,j,t) = V_T (B,j,t)$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B-1,j,k,t) = v (B,j,k,t)$
4	3-D Baroclinic model	cold start + observed T, S	Mean Current + Heat/Salt Flux	$\eta (B-1,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_M (B,j,t)$ $V (B-1,j,t) = 0$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B-1,j,k,t) = v (B,j,k,t)$ T,S = upstream advection
5		cold start + observed T, S	Tidal Current + Mean Current + Heat/Salt Flux	$\eta (B-1,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_M (B,j,t) + U_T (B,j,t)$ $V (B-1,j,t) = V_T (B,j,t)$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B-1,j,k,t) = v (B,j,k,t)$ T,S = upstream advection

<sup>1</sup> Specification of open boundary conditions at the western boundary ( $i = B$ ).

<sup>2</sup> Cold start with respect to surface elevation and velocity field.

<sup>3</sup>  $U_T, V_T$ ; Tidal currents computed from a barotropic tide model driven by specified tidal elevation for five constituents across the open boundary.

<sup>4</sup>  $U_M$ ; Mean current component perpendicular to the open boundary based on the ADCP measurements.

Table 1-11. Vertical grid system in  $\sigma$ -coordinate.  $\sigma$ ,  $\sigma'$ ,  $Z$ , and  $\Delta\sigma$  denote the position of the boundary of each  $\sigma$ -layer, position of the center of each  $\sigma$ -layer, depth of the center of each  $\sigma$ -layer when total depth is 100m, and the distance between two consecutive  $\sigma$ -layers, respectively.

Layer	$\sigma$	$\sigma'$	Z(m)	$\Delta\sigma$
1	0.0000			
2	-0.0417	-0.0208	-2.08	0.0417
3	-0.0833	-0.0589	-5.89	0.0417
4	-0.1667	-0.1179	-11.79	0.0833
5	-0.3333	-0.2500	-25.00	0.1667
6	-0.5000	-0.4167	-41.67	0.1667
7	-0.6667	-0.5833	-58.33	0.1667
8	-0.8333	-0.7500	-75.00	0.1667
9	-1.0000	-0.9167	-91.67	0.1667

o 조류

한반도 주변 조석 조화상수 자료집 (한국해양연구소, 1996a)과 Odamaki (1989)의 조석도를 사용하여 각 개방경계격자에서 조위에 대한  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  그리고  $O_1$  분조의 반조차 (amplitude)와 지각 (phase)을 구하였다. 조위를 부여한 조석모델결과로부터 개방경계에서 30일간 수심평균된 유속을 구한 후, 조화분해하여 4개 분조에 대하여 수심평균된 유속에 관한 반조차와 지각을 구하였다.

o 해류

개방경계에서 해류에 대한 유속을 부과하기 위해서 제주해협과 대한해협에서 1997년 9월 29~30일 (한국해양연구소, 1997)과 10월 2~3일 (심문보, 1998) 동안 ADCP를 이용하여 수직적으로 8 m 간격으로 25시간동안 4회 왕복 관측된 자료를 이용하였다. ADCP 자료는 ADCP 관측시기에 병행하여 실시한 CTD 관측점 간격 (약 3 mile)마다 공간적으로 평균하고, 다시 25시간동안 시간 평균하여 각 수층 (8 m 간격)에서 유속 및 유향을 계산하였다. 시·공간적으로 평균된 각 층의 유속을 수심 평균하여 제주해협과 대한해협의 단면에서 전체 수송량과 CTD 관측점 마다 수심 평균된 수송량의 분포를 구하였다. ADCP 관측위치와 모델 개방경계는 일치하지 않기 때문에 개방경계를 통해 유·출입되는 총수송량과 수송량의 분포는 관측된 전체 수송량과 수송량 분포가 관측된 결과와 유사한 분포를 갖도록 개방경계에 부여하였다. 각 관측자료에서 서쪽과 동쪽경계에서의 수송량을 결정하였고, 관측자료가 없는 남쪽경계에서의 수송량은 동쪽경계와 서쪽경계에서의 수송량의 차이를 부과하였다. 부과된 수송량은 서쪽, 남쪽에서 각각 0.665 Sv, 1.043 Sv의 총 수송량의 유입이 있고, 동쪽에서 1.708 Sv의 총 수송량이 유출되도록 하였다. Mitta and

Ogawa (1984)의 결과는 제주해협과 대한해협에서 각각 0.5, 1.8 Sv을 나타내고 있어 본 연구에 사용된 수송량과 유사한 값을 보인다. 서쪽과 동쪽의 각 개방격자에서는 관측자료를 재현하도록 수송량의 분포를 결정하였고, 관측자료가 없는 남쪽경계에서 각 격자에서의 수송량은 Fig. 1-34와 같이 임의로 설정하였다. 관측자료에 의한 개방경계의 각 격자에 고정된 수송량과 평균해수면 일 때 각 격자에서 수심 평균된 유속을 Fig. 1-34에 나타내었다.

#### o 수온과 염분

식 1-5 의 열·염 보존 방정식을 풀기 위해서는 1) 모델내의 모든 격자에 부여되는 초기조건, 2) 개방경계의 전 층에서 시간에 따라 변화하는 경계조건, 3) 해양-대기 경계인 표층에서 시간에 따라 변하는 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 KODC (Korea Oceanography Data Center, <http://www.nfrda.re.kr>)에서 제공하는 1997년 8, 10월 수온, 염분관측자료를 사용하였다. 관측된 수온, 염분자료를 모델 격자로 투영시키기 위해 수평적으로 spline 방법을, 수직적으로 선형내삽방법을 이용하였다.

초기조건으로 부여되는 수온, 염분값은 8월의 관측값을 사용하여 같은 방법으로 내삽한 후 모든 격자에 부여하였다. 해수면을 통한 해양-대기간 열교환에 의한 수온 변화와 증발과 강우에 의한 염분변화는 관측된 수온과 염분자료를 해표면에 직접 부여하는 방법으로 고려하였다. 해표면과 개방경계격자의 전 층에서 시간변화하는 경계조건은 8월부터 10월까지 매 시간간격마다 선형적으로 변화하도록 하였다.

해수면에서 모델에 부과되는 수온과 염분을 Fig. 1-35에 나타내었다. 8월의 표층 수온의 분포는 연안역에서 약 23°C이고 외해역에서 약 25°C를 보여 외해역으로 갈수록 높은 수온을 보인다. 수온전선은 동서방향으로 분포하며 대한해협에서는 수온의 수평구배가 비교적 강하게 나타난다. 표층염분의 분포는 수온과 반대로 연안역에서 약 32 psu로 외해역 (31 psu)보다 높은 염분을 보이고, 수온분포와 마찬가지로 대한해협에서 염분의 수평구배가 강하게 나타나고 있다. 10월의 표층수온분포는 외해역과 연안에서 약 22°C를 보이고, 여수반도 부근의 해역에서 19°C를 나타내고 있으며, 8월보다 수평적인 수온 구배가 강화되었음을 보인다. 표층염분분포는 남쪽경계에서 고염 (33.4 psu)이 나타나고 있으며, 연안 (약 32.8 psu)보다 외해역이 높은 염분값을 보인다. 개방경계에서의 수직적인 수온과 염분분포에 의하면 (Figs. 1-36, 1-37)에 의하면 8월의 수온의 수직분포는 서쪽경계의 저층에서 14°C이하의 저온의 해수와, 동쪽경계의 저층에 10°C이하의 냉수를 나타내고 있으며, 서쪽과 남쪽경계에서 50 m이하에서 수온약층이 나타나고 있다. 염분의 수직분포는 각 개방경계의 50 m이하에서 염분약층이 나타나고 있으며, 남쪽경계의 저층과 대마도 부근 동쪽경계의 저층에서 34.5 psu이상의 고염을 보이고 있다. 10월의 경우 각 개방경계에서 수온약층과 염분약층이 나타나는 수심이 깊어지고 수직적인 수온, 염분구배는 8월에 비해 약화된다.

### 3-4-4. 모델 구성

#### 초기조건

식 1-1~1-5의 지배방정식을 풀기 위한 초기조건으로 유속과 자유해면에 대해서 해수의 운동은 없다고 가정하였고, 수온 및 염분의 초기조건은 밀도분포가 고려된 경우 8월의 관측자료를 초기조건으로 부여하였다.

$$\begin{aligned} \vec{v}(x, y, \sigma, 0) &= 0 \\ \eta(x, y, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

#### 개방경계조건

##### o 조석모델

본 연구에서 조석모델은 개방경계에서 조위를 부여한 경우와 조류를 부여한 경우 (Case 1)에 해수의 밀도를 균질하다고 가정한 3차원 순압모델을 말하며, 조위를 부여한 조석모델은 개방경계에서의 조류를 구하기 위해 사용된 모델이다.

##### · 조위를 부과한 경우

조위를 부과한 경우에 조석모델은 개방경계에서 조위, 수심 평균된 유속과 각 층에서의 유속에 대한 개방경계조건을 필요로 한다. 개방경계에서 조위는 다음과 같이 부과하였다.

$$\eta_T = \sum_{nc} AM_{nc} \cos(\sigma_{nc}t - \delta_{nc}) \quad (1-11)$$

여기서

- $AM_{nc}$  : 각 분조에 대한 반조차
- $\sigma_{nc}$  : 각 분조의 각속도
- $\delta_{nc}$  : 각 분조의 지각

경계에 수직한 방향의 수심평균된 유속 ( $U_B$ )은 운동방정식에서 비선형항과 수평확산항을 제외하고 계산하였고, 개방경계와 평행한 방향의 수심평균된 유속 ( $V_B$ )에 대해서는 다음과 같은 경사조건 (gradient)을 사용하였다.

$$V_B = V_{B+1} \quad (1-12)$$

$V_B$  : 개방경계에서 개방경계와 평행한 방향의 유속

Subscript B+1 : 경계에서 한 격자 안쪽

각 층별 유속에 대하여 경계면에 수직한 속도성분은 다음과 같은 Orlanski (1976) radiation 조건을 사용하였고, 접선방향의 속도성분은 경사조건을 사용하였다.

$$u_B^{n+1} = [u_B^{n-1}(1-\mu) + 2\mu u_{B+1}^n] / (1+\mu) \quad (1-13)$$

$$v_B^{n+1} = v_{B+1}^{n+1} \quad (1-14)$$

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{if } C_L \geq 1 \\ C_L & \text{if } 0 < C_L < 1 \\ 0 & \text{if } C_L \leq 0 \end{cases} \quad C_L = u_{B+1}^{n-2} - u_{B+1}^n$$

n, n+1, n-1 : 현재, 미래, 과거 time step

조류를 부여한 조석모델에서 계산된 개방경계에서의 유속을 조화분해하여 조류에 대한  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조의 반조차와 지각을 구하였다.

· 조류를 부과한 경우 (Case 1)

개방경계에 조류를 부과한 경우, 해수면 위치에 대한 개방경계조건은 다음과 같은 경사조건을 사용하였다.

$$\eta_B^{n+1} = \eta_{B+1}^{n+1} \quad (1-15)$$

$\eta_B^{n+1}$  : 개방경계의 반격자 바깥쪽에서 미래 time step의 해수면 위치

조류를 부과한 경우에, 개방경계에서 부과된 수심 평균된 유속은 조류를 부과한 조석모델에서 계산된 조류를 사용하였다.

$$U_T = \sum_{nc} AM_{U_{T_{nc}}} \cos(\sigma_{nc}t - \delta_{U_{T_{nc}}}) \quad (1-16)$$

$$V_T = \sum_{nc} AM_{V_{T_{nc}}} \cos(\sigma_{nc}t - \delta_{V_{T_{nc}}}) \quad (1-17)$$

여기서

$AM_{nc}$  : 조류에 대한 각 분조의 반조차

$\sigma_{nc}$  : 조류에 대한 각 분조의 각속도

$\delta_{nc}$  : 조류에 대한 각 분조의 지각

$U_T$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 직각 방향의 수심평균 조류

$V_T$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 접선 방향의 수심평균 조류

각 층별 유속에 대한 경계조건은 식 1-13과 식 1-14를 사용하였다.

○ 순환모델

본 연구에서 순환모델은 개방경계에서 해류와 조류에 의한 해수의 유입/유출, 해수면과 개방경계에서의 열·염 플럭스를 모두 고려한 3차원 경압모델 (Case 5)을 말한다. 순환모델은 조류, 해류 및 밀도분포를 동시에 고려하므로 개방경계에서 유속 (순압성분과 3차원 유속성분)과 수온 및 염분, 그리고 자유해면에 대한 개방경계 조건을 필요로 한다.

각 개방경계에서 해수면의 위치는 경사조건 (식 1-15)으로 구하였으며, 경계에 수직인 3차원 유속성분은 Orlandi radiation 조건 (식 1-13)을, 경계에 평행한 3차원 유속성분은 경사조건 (식 1-14)으로 구하였다.

· 순압성분

개방경계를 통한 유속의 순압성분은 해류와 조류성분으로 나눌 수 있다. 해류성분은 관측된 해수수송량 자료를 이용하여 시간변동 없이 모델 수행기간 동안 일정하게 부과하였고, 조류성분은 개방경계에서 조위를 부과한 3차원 순압 조석모델로부터 구하였다. 해류성분은 각 개방격자에 주어진 관측된 수송량을 고정시킨 후, 매 시간간격마다 부과된 수송량이 유지되도록 면적과 조위를 제거한 수심 (총수심-조위)으로 나누어 구하였다. 개방격자에 부여한 경계에 직각방향의 수심 평균된 유속은 해류와 조류를 더하였고, 접선방향의 수심 평균된 유속은 조류만 부과하였다.

$$U_B = U_T + U_M, \quad V_B = V_T, \quad V_M = 0 \quad (1-18)$$

여기서

$$U_M = Vol / [\Delta d \times (H + \eta - \eta_T)] \quad (1-19)$$

$U_B$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 직각 방향의 수심평균 유속

$V_B$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 접선 방향의 수심평균 유속

$Vol$  : 각 개방격자에서의 수송량 (Sv)

$\Delta d$  :  $\Delta x$  혹은  $\Delta y$

Subscript T : 조류성분

M : 해류성분

조류를 고려하지 않은 Case 2와 Case 4에서는  $(U_T, V_T) = 0$  으로 부과하였다.

· 수온과 염분

수온과 염분에 대한 개방경계에서 각 층에 부과되는 수온과 염분은 3차원 유속이 모델 내부로 유입되는 방향일 때는 관측값을, 유출되는 방향일 때는 모델 내부에서 계산된 값을 사용하여 경계에서 수온과 염분을 계산하는 다음과 같은 upstream advection scheme을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_n \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (1-20)$$

여기서

- $\phi$  : 수온, 염분
- $u_n$  : 각 개방경계에 수직인 3차원 유속성분

기타경계조건

폐경계조건으로 육지경계면을 가로지르는 해수는 없다고 하였으며, 해표면에서 ( $\sigma=0$ ) 유속의 수직 성분과 바람응력은 없고, 열·염 플럭스는 관측된 표층수온, 염분값을 직접 부과하는 방법으로 고려하였다.

$$\frac{K_M}{D} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^w, \tau_y^w) = 0 \quad (1-21)$$

$$\omega(0) = 0 \quad (1-22)$$

여기서

$\tau_x^w(x, y, t), \tau_y^w(x, y, t)$  : 해표면에서 ( $\sigma=0$ ) 바람응력

해저면에서 ( $\sigma=-1$ ) 유속의 수직 성분은 없고, 해저경계에서 마찰항은 유속의 제곱에 비례한다는 quadratic law를 사용하였다.

$$\frac{K_M}{D} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^b, \tau_y^b) = C_D [u^2 + v^2]^{1/2} (u, v) \quad (1-23)$$

$$\frac{K_H}{D} \left( \frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = (0, 0) \quad (1-24)$$

$$\omega(-1) = 0 \quad (1-25)$$

여기서

$u, v$  : 해저경계층 ( $\sigma'=-0.9167$ )에서의 유속

$C_D = \left[ \frac{k^2}{[\ln((1 + \sigma_{kb-1})H/z_0)^2]} \right]$ : 바닥마찰계수

$k$  = von Karman 상수 = 0.4

$z_0$  = bottom roughness height

해저면 마찰계수 ( $C_D$ )는 bottom roughness height를 이용해서 표현하였고,  $z_0$  가 증가하면 바닥에서 느끼는 마찰의 세기는 증가하고 감소를 하면 바닥에서 느끼는 마찰의 세기도 감소하게 된다. 본 연구에서는  $z_0$  값을 0.05 cm를 사용하였고, 이때 해저면마찰계수는 약 0.002~0.005의 값을 가진다.

본 연구에서 실험한 5가지의 경우에 대한 경계조건 및 초기조건은 Table 1-10에



정리하였고, 개방경계에서 중요 변수의 위치를 Fig. 1-38에 나타내었다.

### 모델수행

밀도분포가 고려되지 않은 3차원 순압모델은 40일간 수행되었으며, 밀도분포가 고려된 3차원 경압모델 (Case 4, Case 5)은 92일간 수행하였다. 모델수행 시 초기 10일은 1997년 8월에 관측된 수온과 염분을 모델영역내 전 격자에 초기조건으로 부여하고 조류와 해류를 개방경계에 부과하여 열·염보존방정식을 풀지 않는 진단모델(diagnostic model)을 수행하였다. 초기유속이 0인 모델내부영역에서 초기조건으로 주어진 수온, 염분에 적용된 유속장을 형성하기 위하여 진단모델을 수행하였으며, 열·염보존방정식을 푸는 예단모델 (prognostic model)은 10일 이후부터 수행하였다. 조석강제력을 고려하지 않은 Case 4의 경우 총 운동에너지의 시간에 대한 변화는 약 9일이 지나면 진단모델이 평형상태 (equilibrium state)에 이르게 됨을 나타낸다 (Fig. 1-39a), 총운동에너지는 다음과 같이 구하였다.

$$TKE = \sum \frac{1}{2} \rho_0 (u^2 + v^2) \Delta x \Delta y \Delta z$$

- u, v : 3차원 유속
- $\rho_0$  : 평균밀도
- $\Delta z$  : 수층의 두께
- TKE : 총 운동에너지

순환모델의 경우 총 운동에너지의 15일 이동평균값은 약 15일이 지난 후에 평형상태에 이르는 것을 나타낸다 (Fig. 1-39b). 따라서 모델결과는 15일 후의 결과를 사용하였다. 경압모델의 경우 9월에 해당하는 기간 중 15일 동안 유속, 수온 및 염분 결과를 평균하였으며, 순압모델의 경우 모델수행 마지막 15일 동안 유속을 평균하여 잔차류를 나타내었다. Case 5의 경우의 모델 수행과정을 Fig. 1-40에 나타내었다.

### 3-4-5. 모델결과

#### 순환모델결과

본 연구에서 순환모델은 개방경계에서 해류와 조류에 의한 해수의 유입/유출, 해수면과 개방경계에서의 열·염 플럭스를 모두 고려한 Case 5를 말하고, 앞으로 설명되어지는 표층, 중층 및 저층은 각각 layer1, layer5, layer8을 나타낸다. 순환모델 결과를 통해 남해의 여름철 해수순환을 살펴보고, 각각의 실험 (Case 1~ Case4)과 비교하여 조석강제력과 해류 및 밀도분포가 남해 해수순환에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

○ 조석

모델영역 내 37개 지점 (Fig. 1-1)에서 관측된 조위에 대한 조화상수와 순환 모델결과를 조화분해하여 얻어진 조화상수를 비교하였다 (Fig. 1-41). 모델 결과의 정확도를 정량적으로 살펴보기 위하여 절대 상대오차 (Absolute relative error: ARE)와 평균오차 (Mean error: ME)를 계산하였다.

$$ARE(\%) = \frac{|O_i - C_i|}{O_i} \times 100$$

$$ME = C_i - O_i$$

여기서

$O_i$  : 관측자료

$C_i$  : 모델결과

ARE는 모델결과의 절대적 크기가 관측자료에 비하여 얼마나 어긋났는지에 대한 척도를 백분율로 표현한 것이므로, 그 값이 작을수록 모델 결과가 관측 자료를 절대적인 크기면에서 잘 재현한다는 것을 의미한다. ME는 모델결과의 방향성이 관측 자료와 얼마나 어긋났는지에 대한 척도로써, 양 (+)의 값은 모델결과가 관측자료보다 크게 계산된 것이고 (overpredict), 음 (-)의 값은 모델이 관측자료를 작게 재현한 것이다 (underpredict).  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조의 반조차에 대한 절대상대오차의 평균은 각각 8.9%, 7.9%, 19.1%, 13.6% 이고, 평균오차는 각각 3.2 cm, 1.7 cm, 2.4 cm, -1.59 cm 이다. 지각에 대한 평균오차는 각각 3.4°, 6.2°, 3.0°, -11.9° 이다.  $M_2$ 와  $S_2$  분조의 경우 반조차와 지각이 관측치를 잘 재현하고 있다.  $K_1$ 분조의 경우 지각은 잘 일치하나 반조차는 다소 크게 계산되었고,  $O_1$ 분조의 경우 반조차와 지각이 다소 작게 계산되었다.  $K_1$ 과  $O_1$ 의 오차는 대부분 동쪽해역에서 크게 나타나고 있다. 모델경계 부근에 존재하는  $K_1$ 과  $O_1$ 의 무조점 (Odamaki, 1989)으로 인하여 개방경계에서 조위에 대한 경계값을 구하는데 어려움이 있고, 이 과정에서 생기는 오차로 인해  $K_1$ ,  $O_1$ 이 다소 큰 오차를 보이고 있는 것으로 사료된다.  $K_1$ ,  $O_1$ 의 반조차가 조석의 4개분조에서 차지하고 있는 역할이 각각 약 11%와 9%로 조석의 진폭과 전파양상에 크게 영향을 끼치지 않으므로, 모델결과는 모델영역 전반에 걸쳐 조석의 진폭과 전파양상을 잘 재현하고 있음을 나타낸다. 조석의 비선형성에 의한 조석잔차류를 살펴보기 위하여 조석강제력만 고려한 3차원 순압모델 (Case 1)을 수행한 후 마지막 15일동안의 유속을 평균하였다. 방향성이 일정하지 않은 조석잔차류는 5 cm/s 이하의 크기를 보이고 있어 남해의 해수순환을 재현하지 못하는 것으로 나타난다 (Fig. 1-42).

Figures 1-43, 1-44는 부산을 기준으로 최강낙조시와 최강창조시에 순환모델에 의한 순간적인 흐름장을 나타낸다. 유속의 분포의 양상은 제주해협부근, 남해 중앙부, 대한해협부근으로 구분되어짐을 볼 수 있다. 낙조시 표층유속분포는 외해역의 경우 거문도를 경계로 동쪽해역에서는 북동향류가 우세하고, 제주해협에서 반시계방향의

흐름이 나타난다. 거문도 남쪽에서 남동향류가 우세하며, 여수반도 서쪽해역에서는 서향류를 보인다. 중층에서는 제주해협에서 나타나는 서향류를 제외하고 대부분 북동향류가 나타나며, 거문도 남쪽에서 표층과 같은 남동류가 나타나고 있다. 저층에서는 제주해협부근의 해역에서 북서향류가 나타나고, 남해 중앙부와 대한해협부근 해역에서 대부분의 해수는 북동향류를 나타낸다 (Fig. 1-43). 창조시 외해역의 표층 유속분포를 살펴보면, 제주해협에서 비교적 강한 남동향류가 제주도 연안을 따라 남향한다. 남해 중앙부에서는 남쪽경계에서 유입된 북향류가 연안까지는 미치지 못하고 수심 80 m 부근에서 북동향하며, 대한해협부근의 연안역에서 남서향류가, 대한해협 골 부근에서는 북동향류가 나타난다. 연안역의 표층유속분포의 경우, 제주해협부근 해역에서 동향류가, 남해 중앙부와 대한해협부근 해역에서 대부분 서향류가 나타나고 있다. 중층에서는 표층흐름과 비슷한 양상을 보이고, 저층에서는 제주해협부근에서 비교적 강하게 동향류가, 대한해협부근에서 서향류가 나타나며, 남해 중앙부에서는 연안역으로 향하는 흐름이 나타난다 (Fig. 1-44).

#### ○ 해류

순환모델 결과 중 9월의 결과를 15일 동안 평균하여 표층, 중층 및 저층에서의 유속분포를 살펴보았다 (Fig. 1-45). 모델결과는 표층과 저층에서의 유속 및 유향이 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 표층 유속분포 (Fig. 1-45a)는 약 5~20 cm/s의 크기로 주로 외해역으로 유출되는 연안역의 해수흐름과 약 25~85 cm/s의 크기로 북동향하는 외양역의 해류가 80 m 등수심선을 따라 구별되고 있음을 보인다. 서쪽 경계에서 유입되는 해수는 대부분 제주해협의 골에 치우치고, 남쪽경계를 통해 유입되는 해수와 함께 강한 흐름을 형성한다. 80 m 보다 깊은 수심의 해역에서 북동향하는 해류는 대마도 서쪽 해안을 따라 대한해협 골에 집중되어 동해로 유출되는 양상을 보인다. 연안역이 외해역보다 높은 밀도를 보이는 표층밀도분포 (Fig. 1-48)는 수심 80 m인 해역에서 수평적으로 밀도구배가 크게 나타나고 있어 연안역과 외해역의 해류가 구별되고 있음을 나타낸다. 비교적 강한 해류는 밀도전선의 남쪽에 위치하고 있으며, 수평적인 밀도구배가 가장 크게 나타나는 대한해협에서 강한 표층유속을 나타내고 있다. 순환모델의 결과와 관측된 표층해류분포를 비교한 결과 남해 중앙부에서 등수심선을 따라 흐르는 흐름과 대한해협에서 강한 흐름이 형성되는 양상은 인공위성 추적부위 자료로부터 계산된 표층유속분포 (Lie and Cho, 1997, Fig. 1-46a)와 잘 일치하고 있다. 서쪽에서 유입되는 해수가 제주해협의 골에 치우치는 양상과 여수반도 동쪽해역에서 나타나는 서향류의 위치 및 제주도 동쪽연안의 남향류는 해류계를 사용한 관측자료 (Mitta and Ogawa, 1984, Fig. 1-46b)와 잘 일치하고 있다. 관측자료는 대마도 남쪽을 통과하여 대한해협 동수도로 유출되는 흐름을 나타내고 있으나, 모델결과에서는 이러한 양상이 나타나지 않는다. 이와 같은 결과는 모델영역에서 관측자료의 기여로 인하여 남쪽경계에 유입량만 부여한 결과로 사료된다. 전반적으로 순환모델의 결과는 남해의 해수순환 형태를 잘 나타내고 있다.

중층의 유속분포 (Fig. 1-45b)는 표층의 유속분포와 유사한 양상을 보이고 있으나,

연안역과 외해역에서 유속의 차이는 크지 않고, 연안역에서 외해역으로 유출되는 표층의 분포와는 달리 전반적으로 북동향류를 보인다. 유속의 크기는 연안역에서 10 cm/s 이하이고, 외해역에서 약 20~50 cm/s 의 크기를 보여 표층보다 약 40% 작게 나타난다.

저층에서 유속분포 (Fig. 1-45c)는 전반적으로 연안을 향하는 북향류가 나타나고 있어 표층 및 중층의 유속분포와는 상이한 양상을 보이고 있다. 서쪽경계에서 유입되는 해수는 제주해협을 통과한 후 연안역으로 향하는 북향류를 보이고, 남쪽경계에서 유입되는 대부분의 해수는 5~15 cm/s의 크기로 연안을 향한다. 급격한 수심을 갖는 대한해협 끝에서는 남해로 유입되는 저층수가 나타나고 있다. 저층에서 밀도의 분포 (Fig. 1-48c)는 저층 유속의 분포양상과 일치함을 보이고, 대부분의 해역에 고밀도( $\sigma_t > 25$ )의 저층수가 나타나고 있으며, 연안역에서 밀도구배가 크게 나타나고 있다. 저층순환의 양상은 외나로도 서쪽해역에서는 제주해협을 통한 제주해류의 영향을 받고, 동쪽해역에서는 제주도-대마도 사이를 통과하는 대마난류의 영향을 받고 있음을 나타낸다.

남해도 남쪽 (Fig. 1-1)에서 수직적인 유속의 분포는 수심의 경사가 큰 곳을 경계로 유속의 방향과 크기가 달라짐을 보인다 (Fig. 1-47). 15일 평균한 유속의 경우 외해역에서는 바닥층을 제외하고 전 층이 같은 유속과 유향을 보이는 반면, 연안역에서는 수층에 따라 유속과 유향이 달라지고 있다. 연안역에서는 저층으로 갈수록 반시계방향으로 유향이 변하고 있다. 외해역에서는 최강낙조시 (부산을 기준으로)와 최강창조시의 유속이 크게 다르지 않으나, 80 m 보다 낮은 수심의 연안역에서 낙조시 표층 및 중층은 동향류를 나타내고, 창조시 표층은 남향류, 중층은 남동향류를 나타내고 있다. 저층에서 연안역을 향하는 외해역의 해수는 창조시보다 낙조시에 강한 유속을 보인다.

#### ○ 수온 및 염분

KODC의 1997년 8월에 관측된 수온/염분자료와 모델수행기간 중 8월에 해당하는 기간에 15일 평균한 모델결과를 50 m층에서 비교하였다 (Fig. 1-49). 수온의 경우 80 m보다 낮은 수심의 해역에서 모델결과는 관측값보다 다소 높게 나타나고, 80 m 보다 깊은 수심의 해역에서는 모델결과가 관측값에 비해 다소 낮게 나타나고 있다. 관측된 염분분포는 제주해협에서 34.0 psu 미만으로 가장 저염을 보이며 남해 중앙부를 따라 저염분 ( $34.0 < S < 34.2$ )의 belt가 나타난다. 저염분 belt의 북쪽인 남해 연안역과 남쪽에 분포하는 해수는 상대적으로 염분이 높다. 모델결과 역시 제주해협을 통해 유입되는 저염수에 의한 저염의 belt 구조를 보이고 있으며, 관측결과에서 대마도 서쪽에 나타나는 34.0 psu 미만의 저염수의 존재도 모델에서 잘 나타나고 있다. 남해 연안역의 고염의 해수 ( $> 34.2$ )는 관측된 분포에 비해 큰 영역에 걸쳐 나타난다. 순환모델 결과에 의하면 남해연안역 50 m 층에서 나타나는 고염의 해수는 제주도-대마도간에 분포하는 고염의 해수가 저층을 통해 공급되는 것으로 사료된다 (Fig. 1-51).

수온과 염분에 대한 모델결과는 수온의 경우 9월의 표층수온은 8월보다 약 2℃

낮고, 9월로 갈수록 수온에 대한 남북변화가 크게 나타난다. 수온의 분포는 해안선을 따라 평행하게 분포하고 대한해협에서 강한 수온구배가 나타나고 있다. 저층에서는 고온의 대마난류수가 대부분은 차지하고 있으며 연안과 대한해협에서 수온의 변화가 크게 나타나고 있다 (Fig. 1-50). 염분의 경우 9월의 표층염분이 8월보다 약 0.5 psu 증가하고 있다. 저층에서는 34.5 psu 이상의 고염이 남쪽을 통해 남해 연안역까지 유입되고 있으며, 9월로 갈수록 남쪽의 고염수의 염분이 증가한다 (Fig. 1-51).

순환모델로부터 재현된 남해의 해수순환은 저층에서 연안역으로 유입되는 해수가 표층에서 외해쪽으로 유출되고, 외해역인 80 m이하의 수심에서 북동향류가 나타나며, 대한해협에서 유속이 강화되어 동해로 유출되는 양상을 보인다.

### 조류, 해류 및 밀도분포가 남해의 해수순환에 미치는 영향

남해에서 해수순환에 영향을 주는 요인은 i)조석강제력, ii)개방경계를 통해 유입되는 수괴의 수온·염분 특성, iii)개방경계에서 수괴의 유출입량, iv)대기로 부터의 열·염 플럭스, v)바람, vi)육지로부터의 담수 유입 등이며, 앞절에 기술한 순환 모델은 i), ii), iii), iv)의 효과를 동시에 고려한 결과이다. 본 절에서는 각각의 요인이 개별적으로 고려되었을 때 해수순환을 살펴보고, 순환모델 결과와 비교하여 각각의 요인이 남해의 해수순환에 미치는 영향을 고찰하였다. 각 경우 (Table 1-9)의 결과와 순환모델의 결과는 15일동안 평균한 결과를 사용하였다.

개방경계에서 조석강제력만을 고려한 경우 (Case 1), 15일동안 평균한 조석잔차류는 5 cm/s 이하의 작은 유속을 나타내고 있어 조석잔차류 만으로는 전반적인 남해의 해수순환을 설명할 수 없다 (Fig. 1-42). 균질한 해양에 요인 iii)만을 고려한 경우 (Case 2)는 유속과 유향이 수직적으로 변화하지 않으며, 전반적으로 폭이 넓은 북동향류를 보인다 (Fig. 1-52). 균질한 해양에 요인 i)과 iii)를 동시에 고려한 경우 (Case 3)는 여수반도를 기준으로 서쪽해역의 연안역에서 유속의 크기가 iii)만을 고려한 경우 (Case 2)보다 약화되었으며, 내만에서는 조석잔차류의 영향이 나타나고 있다 (Fig. 1-53). 이와 같은 결과는 기존의 2차원 모델의 수행결과 (김, 1998)와 유사하다.

조석강제력을 제외한 요인 ii), iii), iv)를 고려한 경우 (Case 4) 수직적인 유속의 분포의 차이가 뚜렷이 나타나고 있으며 (Fig. 1-54), 순환모델의 유속분포와 유사한 양상을 나타낸다. 요인 iii)를 고려한 순환모델결과와 비교하면 표층에서 북동향류가 외해역으로 치우치며 폭이 좁아지고 유속이 강화되며, 대한해협에서 유출되는 흐름은 대마도쪽으로 치우쳐 강하게 나타난다. 밀도분포에 의한 영향으로 저층에서 연안역으로 해수가 유입되고, 연안역에 유입된 해수는 표층에서 외해역으로 유출된다.

식 1-7에서 첫 번째 항의 크기는 15일 평균할 경우 대략 0에 가깝게 되므로 다음과 같이 유선함수를 정의하였다.

$$UD = \frac{\partial \Psi}{\partial x} , \quad VD = \frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

U, V : 동서, 남북방향의 수심평균 유속

요인 ii)와 iv)에 의한 영향과 i)에 의한 영향을 유선함수의 차이를 계산하여 조석 강제력과 밀도분포가 수심 평균된 해류분포에 미치는 영향을 살펴보았다. Figure 1-55a에 순환모델결과의 유선함수 분포를 나타내었다. Figure 1-55b는 개방경계와 해표면을 통한 열·염 플럭스가 해수순환에 미치는 영향을 나타내는 것으로 순환모델의 결과 (Case 5)에서 요인 i)과 iii)만 고려한 순압모델결과 (Case 3)를 뺀 유선함수의 분포이다. Figure 1-55c는 조석강제력이 3차원 해수순환에 미치는 영향을 나타내는 것으로 순환모델의 결과 (Case 5)에서 요인 ii), iii), iv)을 고려한 모델결과 (Case 4)를 뺀 유선함수의 분포이다. Figure 1-53b, 1-53c에서 음 (-)의 값은 유속의 약화를 의미하고 양 (+)의 값은 유속이 강화되었음을 의미한다.

요인 ii)와 iv)의 영향은 남해 중앙부에서 해류의 크기를 약화시키는 반면 제주도 동부와 대한해협에서 해류의 크기를 강화시키며 특히 대한해협 끝에서 그 영향이 뚜렷이 나타나고 있다 (Fig. 1-55b). 요인 i)의 영향은 내만을 제외한 남해 외해역에서 해류의 크기를 약화시키는 반면 연안역에서 미약하게 해류를 강화시키는 역할을 하는 것으로 나타난다. 해류와 비슷한 크기를 갖는 조류는 해저면 마찰을 증가시켜 해류의 크기를 약화시키며, 같은 유속이라도 수심이 증가할수록 유선함수에 미치는 영향이 증가하여 수심이 깊은 해역에서 유선함수의 차이가 크게 나타난다 (Fig. 1-55c).

본 연구의 결과는 남해의 해수순환은 공간적으로 많은 차이를 보이고 있어 기존의 제한적인 2차원 모델로는 그 현상을 충분히 설명할 수 없으며, 조석강제력, 개방경계를 통한 유출입 및 밀도분포를 고려한 3차원 모델을 통한 접근이 보다 타당한 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

#### 4. 결론 및 토의

제주해류에 의해 황·동중국해로부터 남해로 수송되는 해수특성과, 제주해류의 시·공간적 분포 및 해수수송량을 제주해협을 포함한 제주도 주변에서 관측된 자료를 이용하여 파악하였다.

수층이 수직적으로 균질한 겨울과 봄철 동중국해로부터 북상하는 난류수와 황해의 한국 연안역을 따라 남하하는 황해냉수는 제주해협의 서쪽에서 전 층에 걸친 열·염전선을 형성하며 이 전선은 남북방향의 해수특성 구배가 약화된 채 제주해협 북쪽의 보길도 부근과 남해의 연안역 인접한 곳으로 연장되므로 동 시기에 제주해류가 수송하는 해수는 대부분 전선역 남쪽의 고염의 쿠로시오 기원 해수이다. 겨울철 남해안에는 저온, 고염의 특성을 갖는 남해안 연안수가 분포한다. 남해안 연안수의 고염의 특성은 겨울철 증발만에 의해서는 설명하기 어려우며, 남해안에 동서방향으로 놓여 있는 전 층에 걸친 밀도전선으로 인해 제주도 동쪽 대마난류에 의한 남해 연안역으로의 염의 공급은 어려울 것으로 사료된다. 제주해협에서는 연중 동향류가 우세하고 고염의 공급이 가능한 해수가 제주도 서쪽에도 분포하므로 동계

남해안 연안수는 제주해협 서편 열·염전선역의 황해냉수에 의해 다소 저염화 되기는 하였지만 고염의 특징을 보이는 혼합수가 제주해류에 의해 남해로 유입된 것으로 해석하는 것이 타당하다.

겨울과 봄철 동향하는 제주해류는 제주도 부근에서 약 17.0 cm/s 정도의 일평균 최대 유속을 보이고 북쪽인 남해 연안역으로 갈수록 해류의 세기가 약화되며, 일평균 해류분포에 의해 추정된 해수수송량은 0.37~0.45 Sv 범위를 갖는다. 봄철 제주해협 남부 해역 수심 30 m, 60 m층에서 20일간 관측된 평균해류는 북동쪽으로 각각 12.5 cm/s, 9.5 cm/s로서 수직적으로 약 3 cm/s의 유속차이를 보인다. 평균해류 외에 3~7일의 순압적인 저주파 변동성을 보이며, 저주파 변동성은 동서방향에서 우세하다. Chang and Kim (1995)은 이러한 저주파 변동성이 국지적인 바람의 변동과 무관함을 보였으나, 이러한 변동을 유발하는 기작은 아직 밝혀지지 않았다.

여름과 가을철에는 제주해협 내 수층이 2층 구조를 보이며 수심 약 20~40 m에 계절적 수온약층 및 염분약층이 형성된다. 수온약층 상부를 통해서는 저염의 양자강 희석수를 포함한 황·동중국해의 연안수가 제주해협으로 유입된다. 수온약층 하부에는 제주도 인접한 곳에 동중국해 대륙붕수와 혼합에 의해 다소 희석되기는 하였지만 쿠로시오 기원의 가장 염분이 높은 해수가 분포하여 연중 제주도쪽으로는 쿠로시오 기원의 해수가 공급된다. 고염수와 인접하여 제주해협 수심이 깊은 골의 북쪽 사면에는 계절적 수온약층 하부에 냉수가 출현한다. 기존자료나 연구결과에 의하면 제주해협에 출현한 냉수의 특성은 제주도 서쪽 외해역에서 남쪽으로 확장하는 저염의 황해냉수와 북상하는 쿠로시오 기원 고염수의 혼합수와 유사하여, 제주해협 냉수가 제주도 서쪽 제주도 인접한 곳에 분포하는 쿠로시오 기원 고염수의 서쪽 경계에 해당하는 부분이 고염수와 함께 제주해협으로 유입된 것으로 해석된다. 이와 같은 해석은 Lie et al. (1999)의 관측 결과와 Pang and Hyun (1998)이 혼합물에 근거한 수괴분석에 의해 제시한 황해남부 해류분포와 일치한다. 그러나 양 등 (1984)과 김 등 (1991)의 결과에서와 같이 황해냉수가 이상적으로 발달한 해에는 황해냉수의 일부가 제주해협으로 유입될 수 있는 가능성도 배제할 수 없다.

인공위성 영상자료에 의하면 여름과 가을철 대흑산도를 중심으로 한 황해 남동부 연안역에 조석혼합에 의해 표층 냉수가 나타나는 것이 특징이다. 인공위성 영상자료는 이러한 표층 냉수가 제주해협 북쪽을 지나 남해도 서쪽의 남해 연안역까지 연결되어 있으며 이는 동향하는 제주해류에 의해 냉수가 제주해협 북쪽과 남해 연안역으로 유입되기 때문인 것으로 사료된다.

여름과 가을철 동향하는 제주해류의 세기와 수직적인 유속차이는 동계나 춘계에 비해 증가하여 최대유속이 30 cm/s 에 달하고, 최대유속이 나타나는 위치는 동계나 춘계에 비해 북쪽인 제주해협 골의 북쪽사면에 나타난다. 8월, 9월의 해수수송량은 3월, 4월에 비해 약 1.5배 증가한 0.51~0.66 Sv의 범위를 갖으며, 계절변동 폭은 약 0.3 Sv이다. 보길도 북부 횡간수도에서 하계 15~30일에 걸쳐 관측된 해류자료에 의하면 평균해류는 북동 방향으로 약 10.0~13.0 cm/s이며 3~7일의 저주파 변동을 보여준다. 여름철 횡간수도에서 관측된 평균해류에 근거하여 산정된 해수수송량은 보길도 남부 수송량에 비해 무시할 정도로 작아 대부분의 해수 및 물질수송은 제주해협 남부를 통해 일어난다.

ADCP에 의한 일평균 해류에 근거하여 산출한 제주해류의 해수수송량은 제주해협 양안간의 해수면 차이로부터 유추한 계절변동 및 대한해협 서수도를 통한 대마난류 수송량의 계절변동과 유사한 경향을 보이며, 대한해협 서수도를 통한 대마난류 수송량의 30~40%는 제주해협에서 기원된다.

본 보고서에서 제주해류는 Suk et al. (1996)이 최초 제안한 대로 제주해협 전 단면에 걸쳐 동향하는 해류로 정의하였다. 제주해류에 의해 수송되는 해수 중 겨울과 봄철의 전 층 그리고 여름과 가을철에 계절적 수온약층 하부에 분포하는 고온, 고염의 해수는 그 기원이 대마난류수 및 황해난류수와 마찬가지로 동중국해 대륙사면을 따라 북동향하는 쿠로시오로부터 분지된 해수이다. Chang et al. (1995)은 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협으로 유입되는 난류를 제주난류라 명명하였고 이후에 Lie et al. (1998) 역시 이 해류를 제주난류라 정의하였으며, Lie et al. (1999)은 이러한 제주난류가 연중 존재함을 보였다. Uda (1934)에 의해 최초 제안되고 이후에도 받아들여졌던 (예, Koizumi, 1957; Guan and Mao, 1982) 해류분포에 의하면 쿠로시오로부터 분지된 난류를 대마난류라 하였고, 쿠로시오로부터 분지된 후 북상하는 대마난류는 일본 구주섬 서쪽에서 다시 둘로 갈라져 대부분은 대한해협을 통해 동해로 유입되고 일부가 황해로 북상하여 황해난류를 이룬다. 최근의 ADCP자료에 의하면 북상하는 대마난류의 일부가 제주도 남쪽에서 둘로 갈라지는 것이 관측되었고 (Katoh et al., 1996a), 제주도 남쪽에 투하한 인공위성 추적부이가 제주도 서쪽을 돌아 제주해협으로 유입되는 것이 보고되었다 (Lie and Cho, 1997; Lie et al., 1998, 1999). 황해난류의 존재는 아직도 논란의 대상이 되고 있지만 (예, 김 등, 1991과 Pang and Hyun, 1998), 기존의 자료는 제주난류 (Chang et al., 1995; Lie et al., 1998)를 포함한 제주해협 전체에서 동향하는 제주해류가 연중 존재함을 제시한다. 이상의 결과로부터 서쪽 경계는 뚜렷치 않지만 대략 124° E 동쪽에서는 계절에 관계없이 대마난류를 포함하여 북향하는 해류가 존재하고 북향류 중 일부는 제주도 남쪽에서 대마난류로부터 분지된 후 대부분 제주해협으로 유입되어 제주해류를 이루고 일부가 황해로 북상하는 순환을 제시할 수 있다. 여름과 겨울철 수온약층 상부에 분포하는 저염수의 기원은 양자강 희석수와 황동중국해의 연안수라 생각되지만 이러한 연안수가 어떤 경로를 거쳐 제주해협에 도달하는지는 제한된 해역에서의 자료만으로는 해석이 어렵다. 그러나 위에서 언급한 순환형태를 고려할 때 여름과 가을철 제주해협 내 표층 저염수도 수온약층 하부의 해수와 함께 제주도 남쪽에서 제주도 서쪽을 우회 후 제주해협으로 유입된 것으로 해석하는 것이 자연스럽다.

제주해류의 형성 기작에 관해서 Seung and Shin (1996)은 북풍이 우세한 동계 쿠로시오로부터 분지된 대마난류의 서측 경계에 해당하는 부분이 해저지형을 따라 대부분 제주해협으로 유입되고 일부는 황해로 유입되는 것으로 설명하였다. 제주도 주변의 해저지형적 특성은 앞서서도 언급하였듯이 동중국해에서 뻗어져 나온 100 m의 등수심선이 제주도 서편을 돌아 제주해협으로 연결되며, 이러한 지형적 특성은 Seung and Shin (1996)이 언급하였듯이 제주해류를 형성하는 중요한 요인으로 생각된다. Pang et al (1993)도 지형류 균형을 이룬 쿠로시오의 서측 경계가 등수심선을 따라 북상하면서 대마난류를 형성한다 하였으며, Katoh et al. (1996b)은 ADCP 관



측 결과를 이용하여 동중국해 대륙붕상 100 m 등수심선을 따라 북상하는 흐름이 존재함을 보고하였다.

제주해류는 제주해협을 통과한 후 남해에서 동향하며 제주도 동쪽을 통해 남해로 유입되는 대마난류와 함께 대한해협을 통해 동해로 유출된다. 제주해류의 해수수송량은 제주도 동쪽을 통해 남해로 유입되는 대마난류에 비해 작지만, 대마난류는 대부분 수심에 의한 속박 등에 의해 제주도 동쪽을 통과 후 북동쪽으로 방향을 바꾸어 대한해협을 통해 동해로 유출되므로 (Kato et al., 1996a; Lie et al., 1999), 남해 연안역의 해황에 주로 영향을 미치는 해류는 제주해류이다. 남해의 물질수송과 남해의 내만을 포함한 연안역과 외해역의 물질교환 과정 및 남해의 환경보존을 위해서는 남해의 주요 해류인 제주해류에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다. 통상 해류는 다양한 규모의 시간적 변동을 수반하는 반면 제주해류의 장기 변동성에 관해서는 알려진 바가 적다. 제주해류의 장기 변동성 관측은 제주해류의 역학을 이해하고, 기존의 조위관측망을 이용한 해류의 변동성을 모니터링 하는 동시에 남해의 해황변동을 예측하는 기술을 개발하는데 필수적이다. 본 연구사업을 통해 최초로 제주해협 남부에서 약 9개월 20일에 걸쳐 TRBM-ADCP에 의한 상층으로부터 저층까지 4 m 간격으로 해류관측이 실시되었다. 제주해협에서의 관측자료는 한·미공동연구를 통해 획득되는 대한해협에서의 장기 해류관측 자료와 함께 추후 보다 자세히 분석되어 질 예정이며, 분석 결과는 남해의 주요한 두 통로인 제주해협과 대한해협을 통한 해수 및 물질수송을 이해하고 예측하는데 중요한 자료로 활용될 예정이다.

남해의 순환과 물질수송을 이해하고 오염물질을 포함한 물질의 이동과 확산을 예측하기 위하여 3차원 수치모델을 이용하여 조석강제력, 개방경계를 통한 유·출입, 해표면에서의 열·염 플럭스에 의해 유발되는 남해의 여름철 3차원 해수순환을 재현하였다. 조류에 대한 경계조건은 개방경계에서 조위를 설정하여 구성한 조석모델로부터 조류를 계산한 후 개방경계에서 조류에 대한 조화상수 값을 부과하였다. 조류와 함께 제주해협과 대한해협에서 관측된 1997년 9월의 일평균 해류분포를 이용하여 개방경계를 통해 유·출입되는 해수의 수송량을 개방경계에 부과하였고, 관측된 자료를 근간으로 해표면과 개방경계에서 열·염 플럭스를 부과하여 바람응력과 육수유입을 제외한 제반 강제력에 의해 유도되는 순환모델을 구성하였다.

순환모델의 결과 중 계산된 조석 조화상수를 연안 37개 정점에서 관측된 조화상수와 비교한 결과,  $M_2$ 와  $S_2$  분조의 경우 반조차와 지각은 관측치를 잘 재현하고 있다.  $K_1$ 분조의 경우 지각은 잘 일치하나 반조차는 다소 크게 계산되었고,  $O_1$ 분조의 경우 반조차와 지각이 다소 작게 계산되었다. 순환모델 결과는 전체적으로 제주해협에서 유입되는 해류, 남해 중앙부에서 등수심선을 따라 흐르는 해류 및 대한해협에서 강한 해류의 양상을 잘 재현한다. 계산된 수온, 염분분포는 연안역에서 관측값에 비해 수온과 염분이 높게 나타나고 있으나, 전반적으로 관측된 분포를 잘 재현하고 있다. 3차원 모델 결과는 표층과 저층에서의 유속 및 유향이 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 표층에서의 유속분포는 약 5~20 cm/s의 크기로 남해 연안역에서 외해역으로 유출되는 연안역의 해수흐름과 약

25~85 cm/s의 크기로 북동향하는 외양역의 해류가 80 m 등수심선을 경계로 구별되고 있음을 보인다. 저층에서 유속분포는 서쪽경계와 남쪽경계에서 유입되는 대부분의 해수가 5~15 cm/s의 크기로 연안을 향해 북향하는 흐름을 나타낸다. 표층수온의 분포는 해안선을 따라 평행하게 분포하고 대한해협에서 강한 수온구배가 나타나고 있으며, 저층에서는 고온의 대마난류수가 대부분은 차지하고 있다. 남해 연안역에 나타나는 고염의 해수는 제주도-대마도간에 분포하는 고염의 해수가 저층을 통해 공급되는 것으로 사료된다.

조석, 개방경계를 통한 유·출입 및 밀도분포의 각각의 강제력이 남해의 해수순환에 미치는 영향을 살펴보았다. 밀도분포에 의해 저층에서 연안역으로 해수가 유입되고, 연안역에 유입된 해수는 표층에서 외해역으로 유출된다. 순압모델과의 비교 분석 결과는 열·염 강제력이 북동향하는 표층해류의 폭을 감소시키고, 유속의 크기를 강화시키는 역할을 하는 것으로 나타난다. 조석 잔차류의 크기는 평균적인 해류의 크기에 비해 대단히 작아 조석강제력이 평균 순환에 미치는 영향은 작지만, 해류의 크기와 비슷한 강한 조류의 영향은 바닥의 마찰을 강화시켜 평균 유속을 약화시키는 역할을 한다. 조석강제력과 밀도분포가 해수순환에 미치는 영향에 대해 유선함수를 사용하여 계산한 결과 수심 평균된 해류의 유속을 약 10% 감소시키는 것으로 나타났다.

시·공간적으로 해황 변화가 큰 남해의 해수순환을 보다 정확히 재현하여 유용한 정보를 제공하기 위해서는 시·공간적인 수송량의 변화와 더불어 보다 정밀한 시·공간적인 수온, 염분, 기상자료의 모델로의 입력이 필요하다. 또한 본 연구에서 고려하지 못한 바람의 영향은 천해역인 남해의 해수순환에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되며, 내만을 포함하는 연안역과 전선역에서의 현상을 파악하기 위해 보다 세밀한 격자 구성이 요구된다.

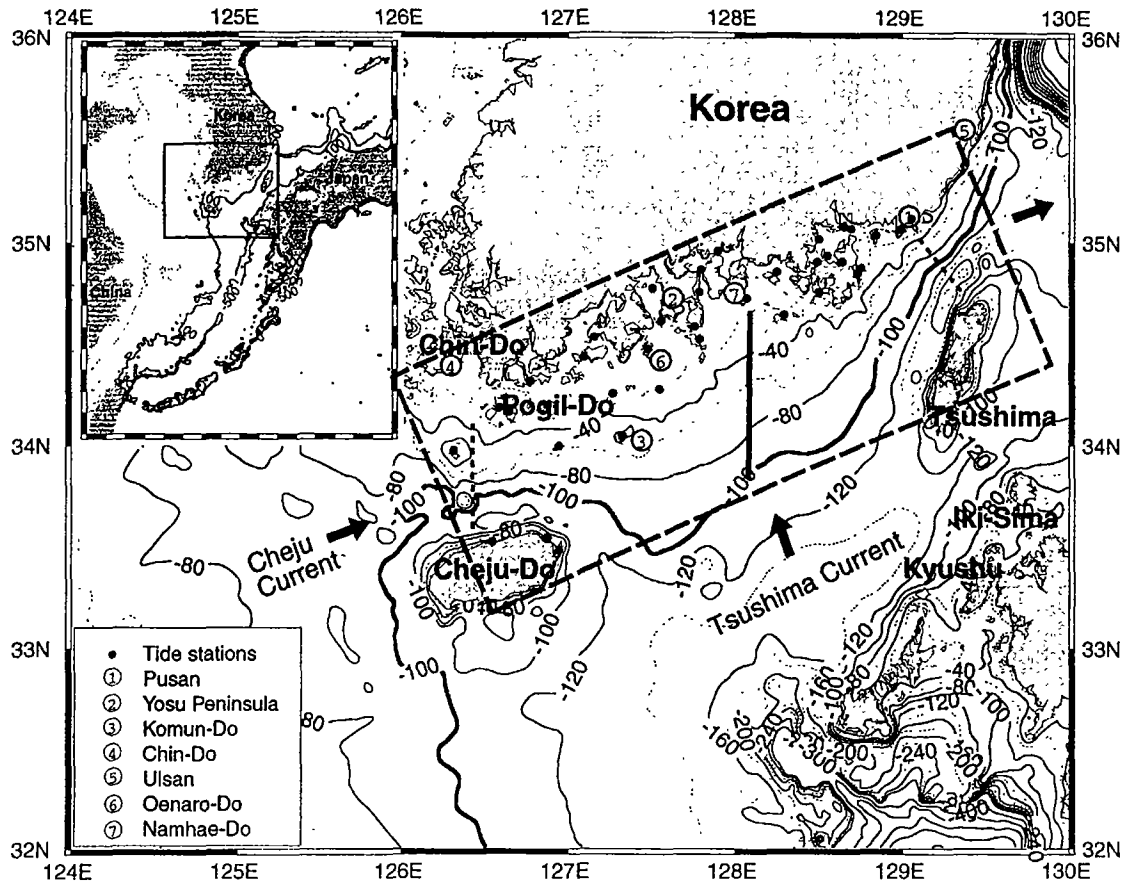


Fig. 1-1. Coastline, bottom topography, and the inflow/outflow system of the South Sea. Isobaths given in meters are contoured every 20 meters, and topography of the east Asian marginal seas are also shown in an inset in the upper left corner with 50 m, 100 m, 200 m, and 500 m isobaths. The rectangular area enclosed by long-dash lines is the model domain in which an ocean circulation model is applied. Diurnally-averaged mean currents, which are used for the specification of the inflow/outflow, were obtained on the two ADCP traverse lines denoted by dashed lines in the Cheju and the Korea Straits. A thick meridional line in the middle of the model domain denotes the line where the vertical structure of model-generated flow field is examined. Coastal tide stations used for the model/data comparison are shown with closed circles. Geographic locations referred to in the text are also shown with open circles with their names in an inset in the lower left

corner.

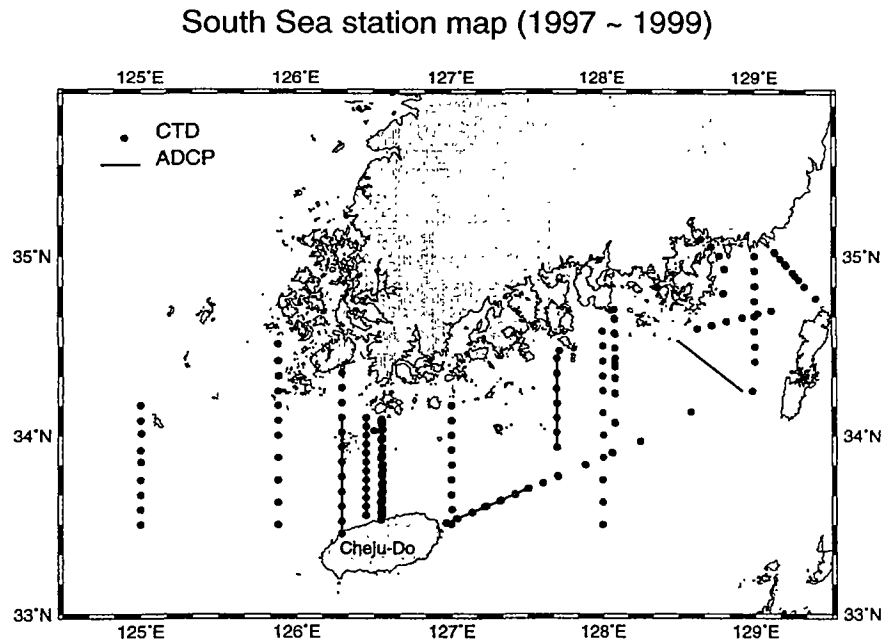


Fig. 1-2. CTD stations and ADCP traverse lines occupied during 1997~1999

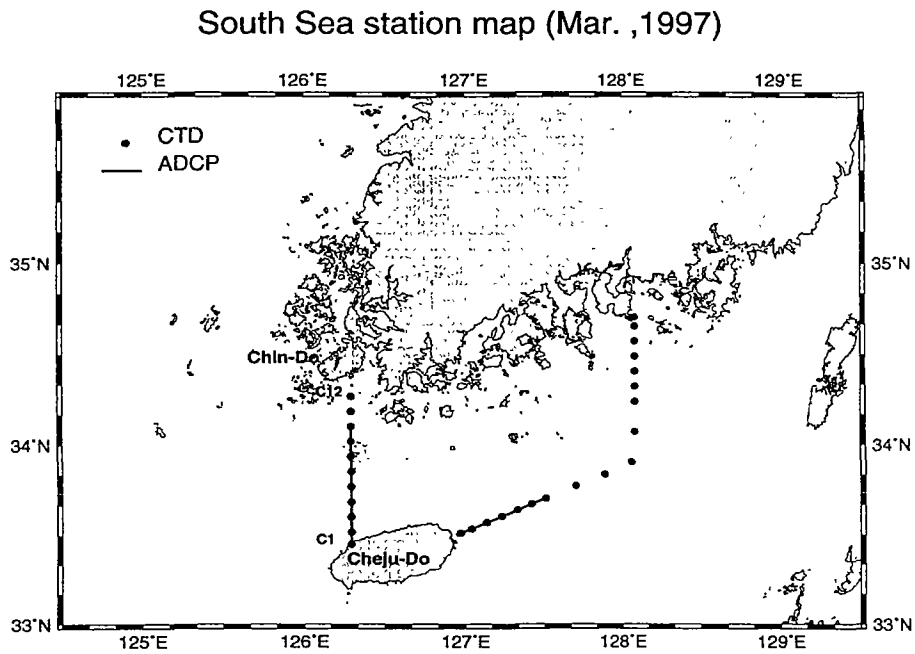


Fig. 1-3. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in March 1997.

South Sea station map (Sep. ,1997)

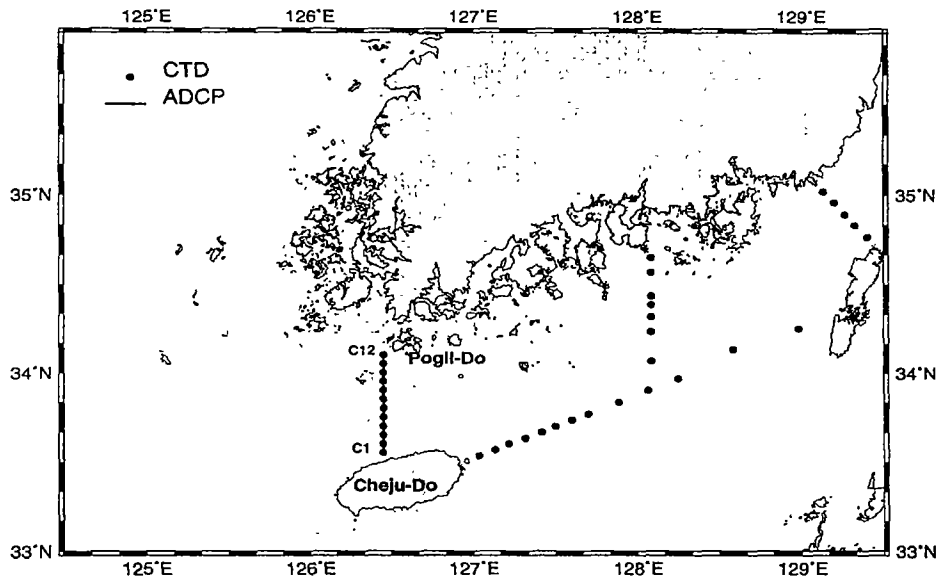


Fig. 1-4. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in September 1997

South Sea station map (Apr. ,1998)

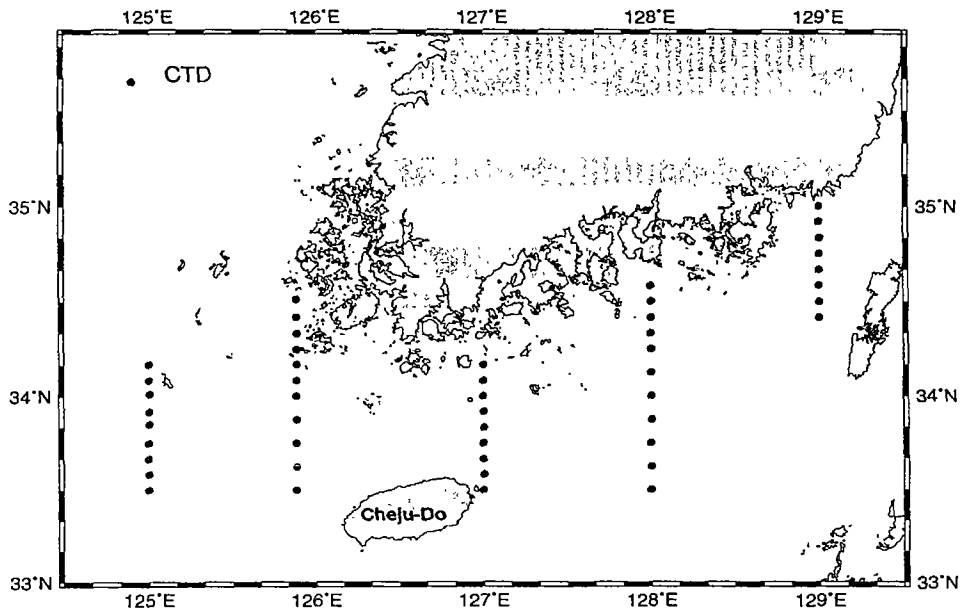


Fig. 1-5. CTD stations occupied in April 1998.

South Sea station map (Sep. ,1998)

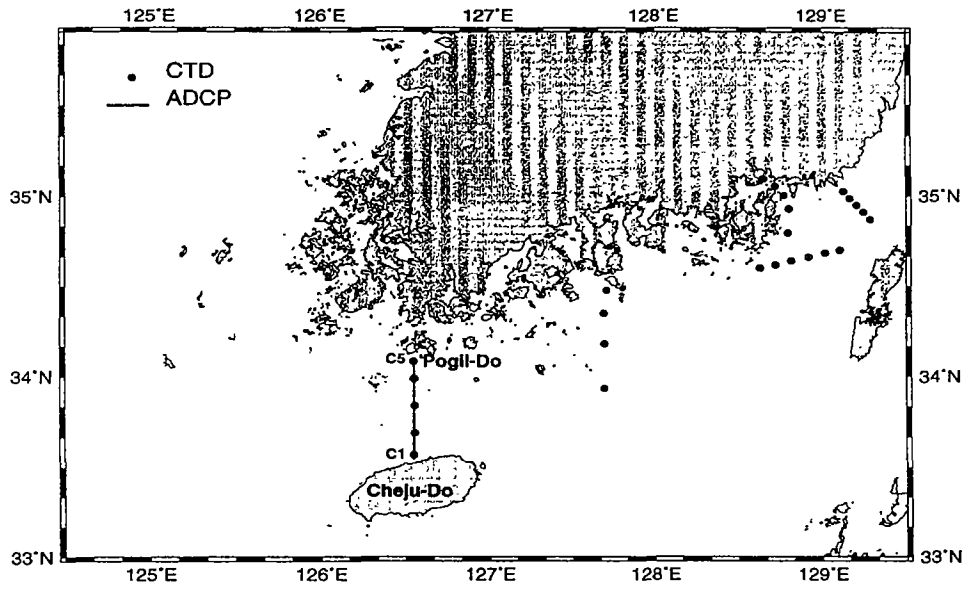


Fig. 1-6. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in September 1998.

South Sea station map (Nov. ,1998)

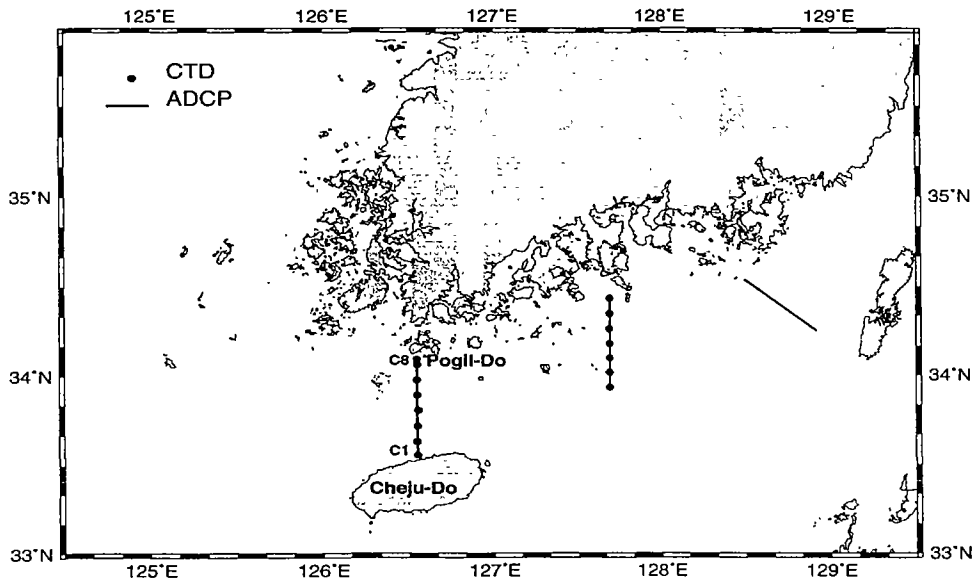


Fig. 1-7. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in November 1998

South Sea station map (Feb. ,1999)

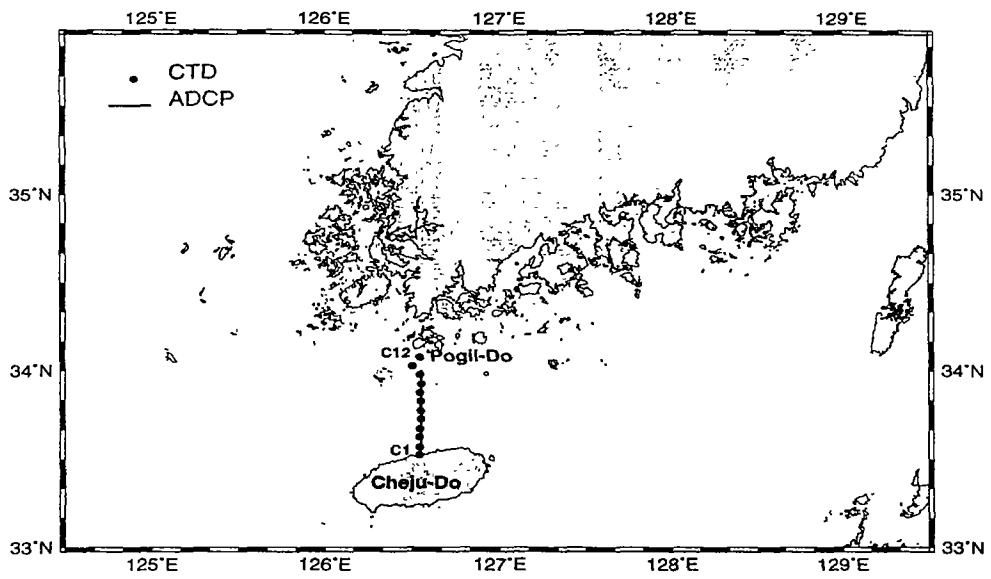


Fig. 1-8. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in February 1998.

South Sea station map (Aug. ,1999)

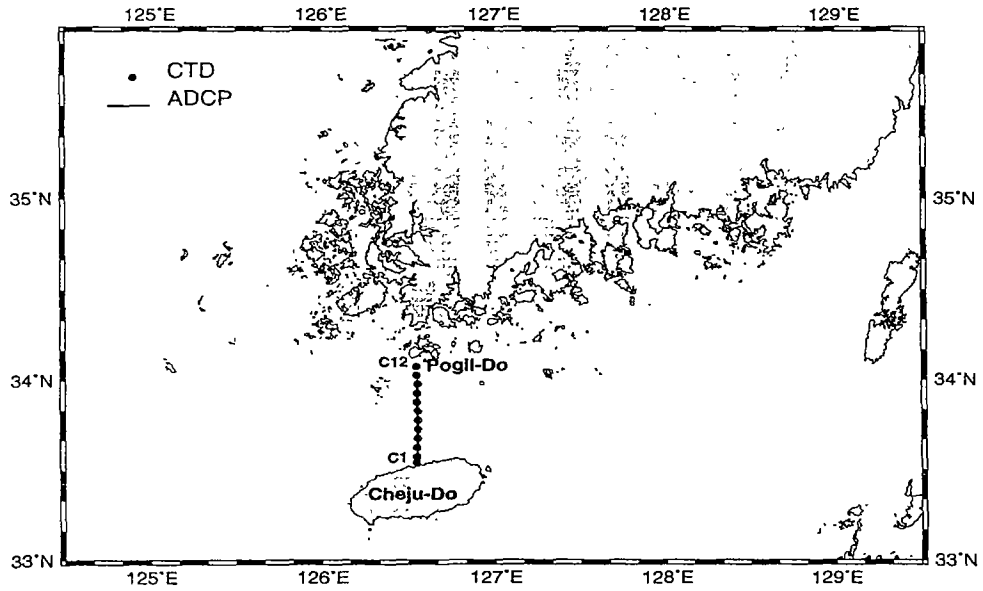


Fig. 1-9. CTD stations and ADCP traverse lines occupied in August 1998.

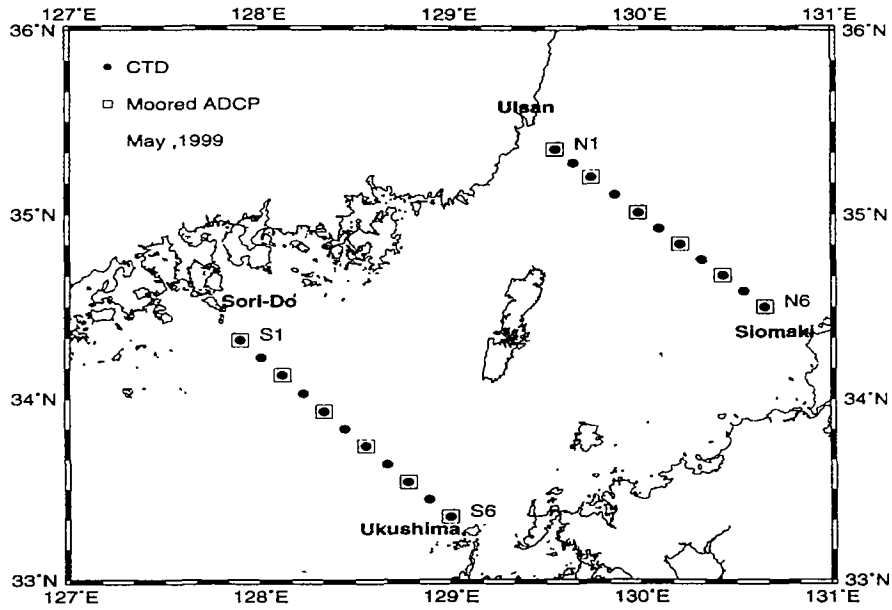


Fig. 1-10. CTD stations and TRBM-ADCP mooring locations occupied jointly by KORDI and NRL (Naval Research Laboratory, USA) in May 1999.

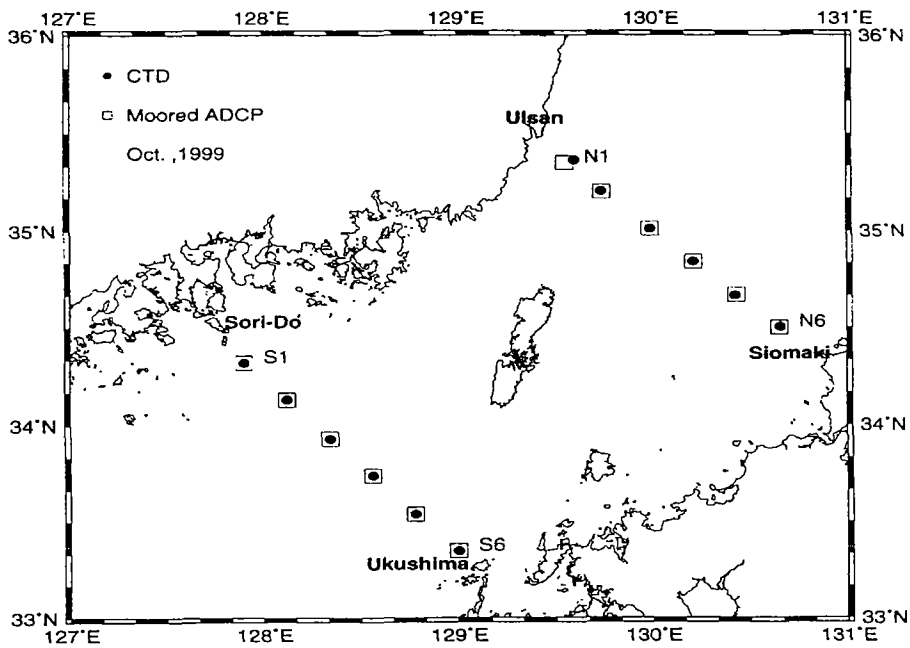


Fig. 1-11. CTD stations and TRBM-ADCP mooring locations occupied jointly by KORDI and NRL (Naval Research Laboratory, USA) in October 1999.



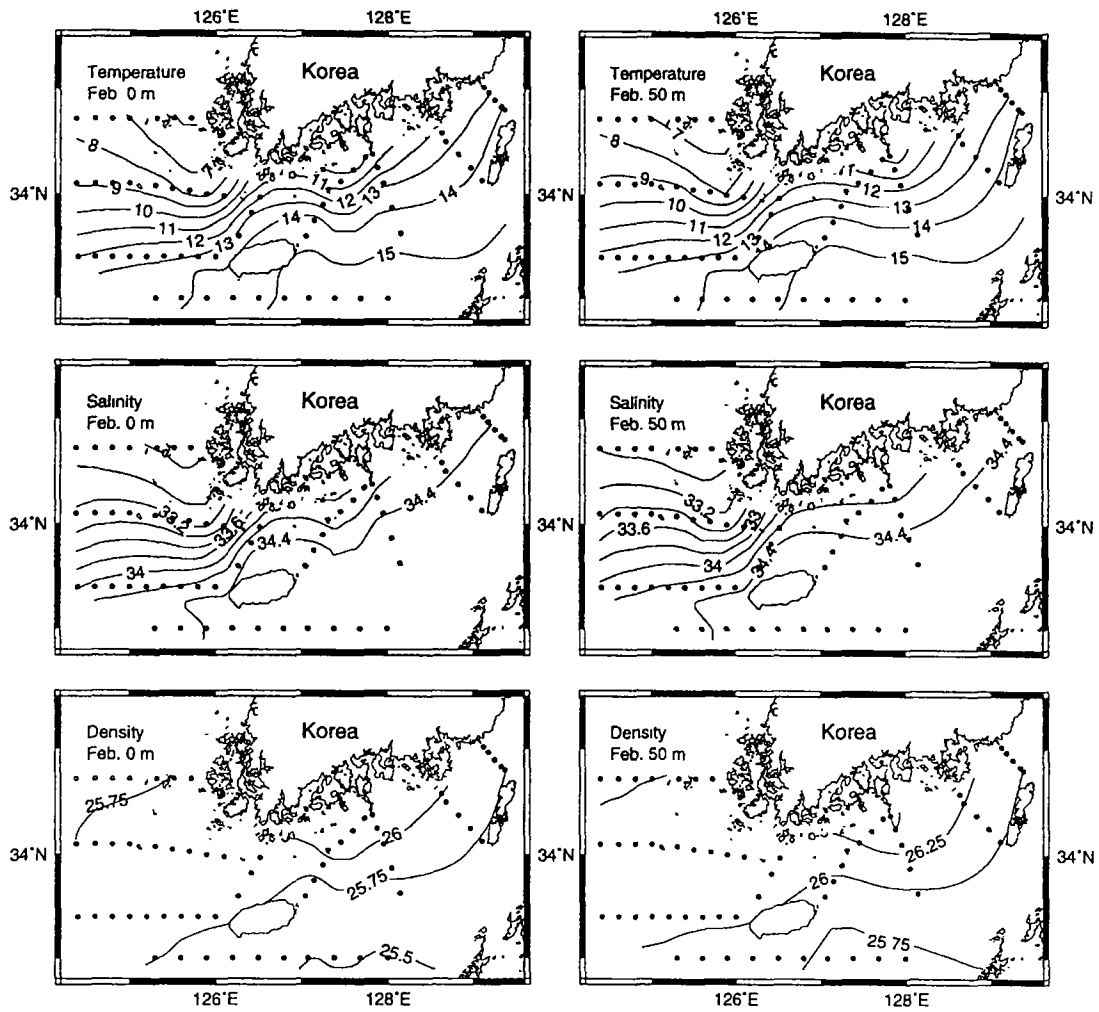


Fig. 1-12. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in February based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

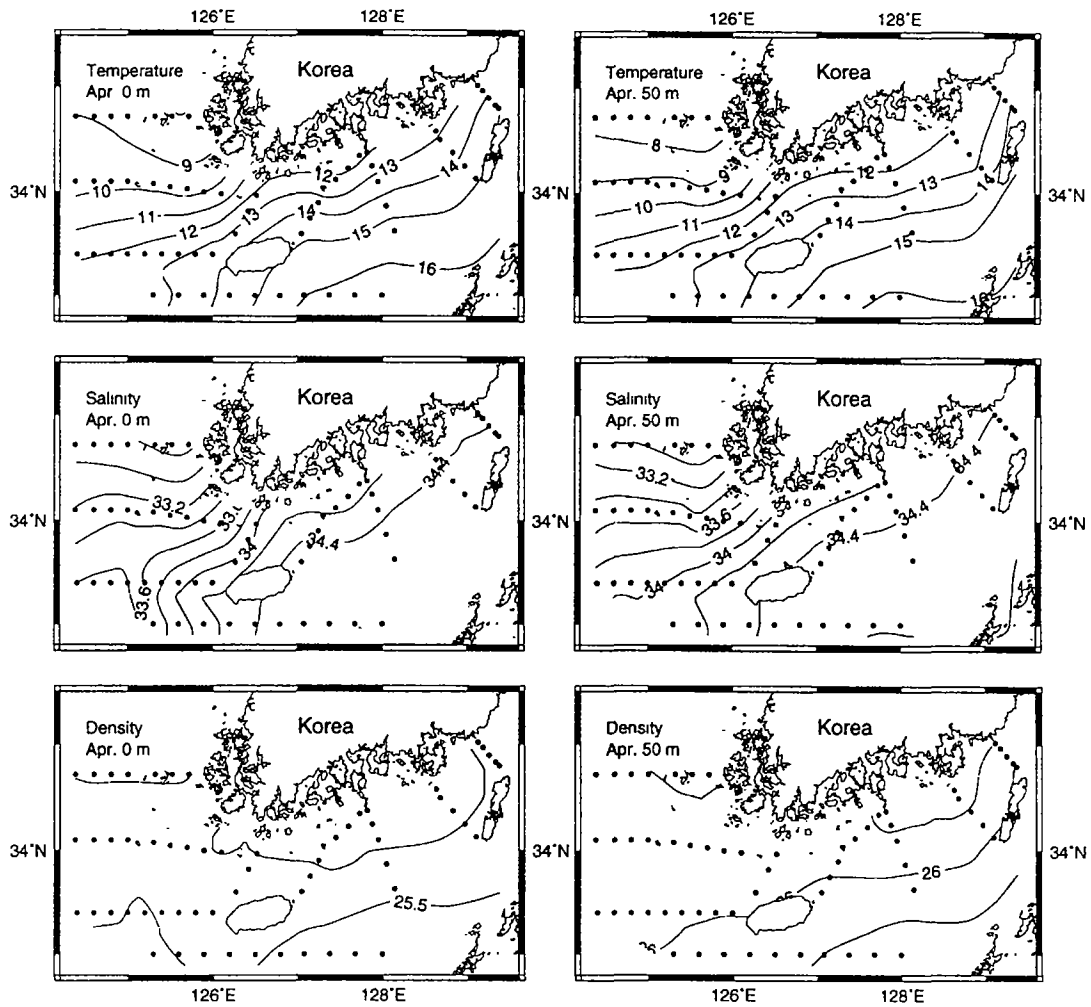


Fig. 1-13. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in April based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

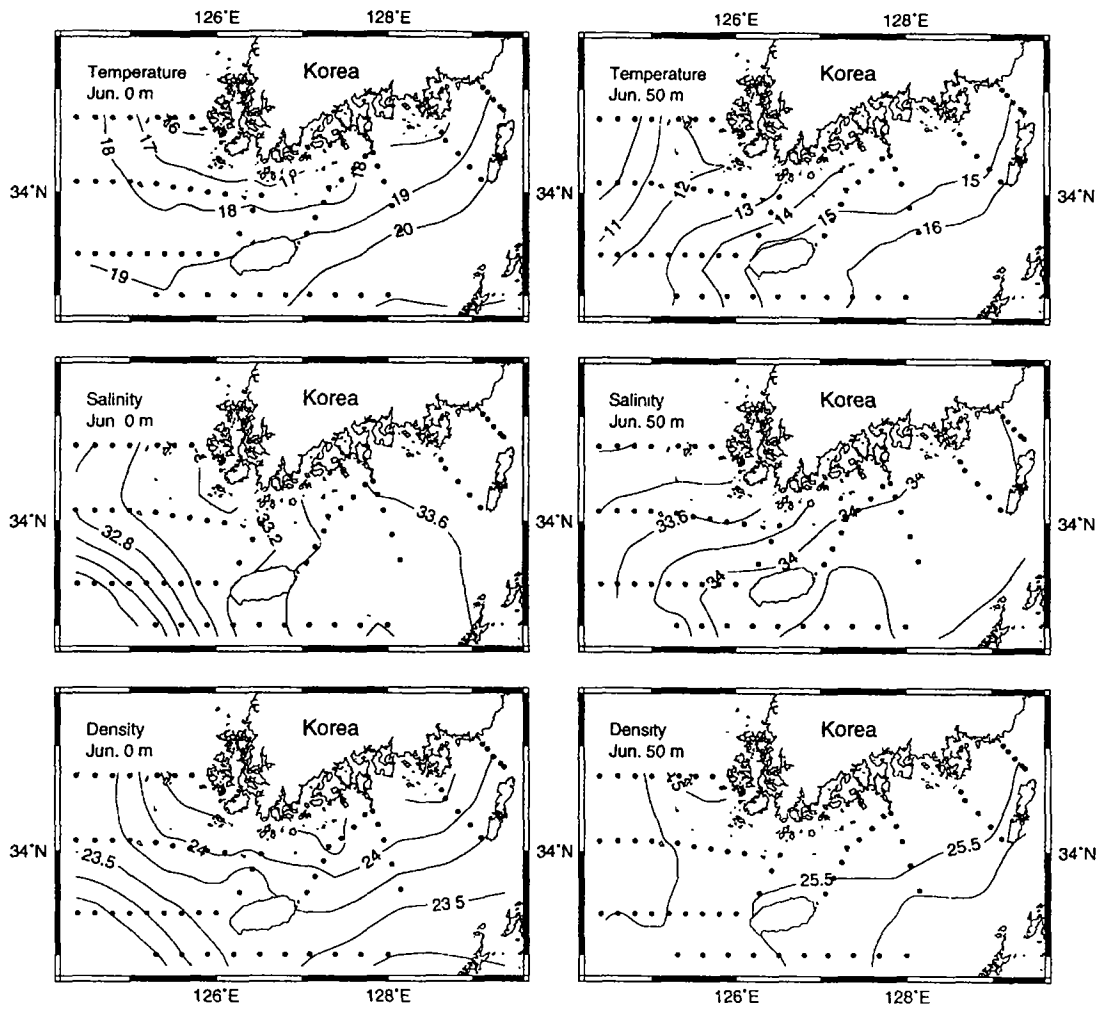


Fig. 1-14. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in June based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

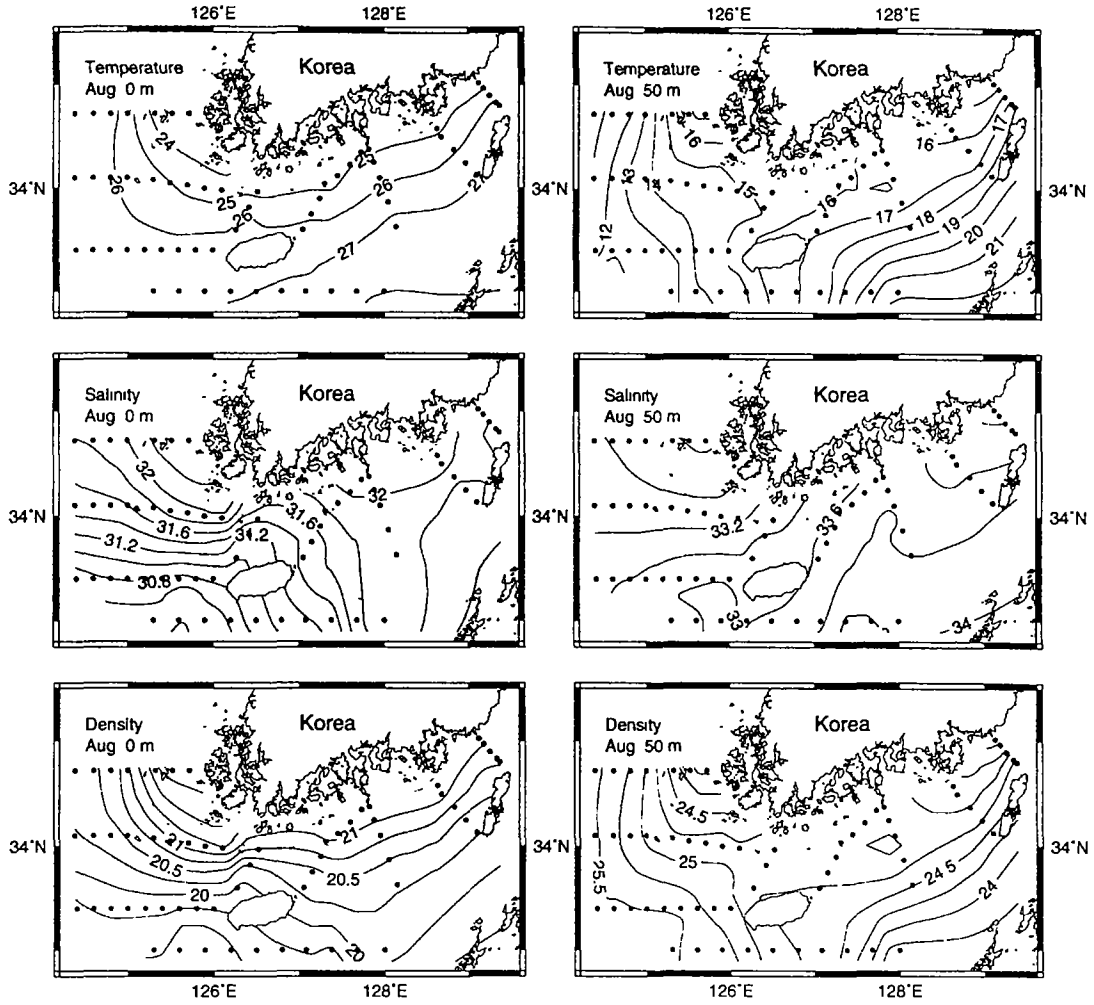


Fig. 1-15. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in August based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

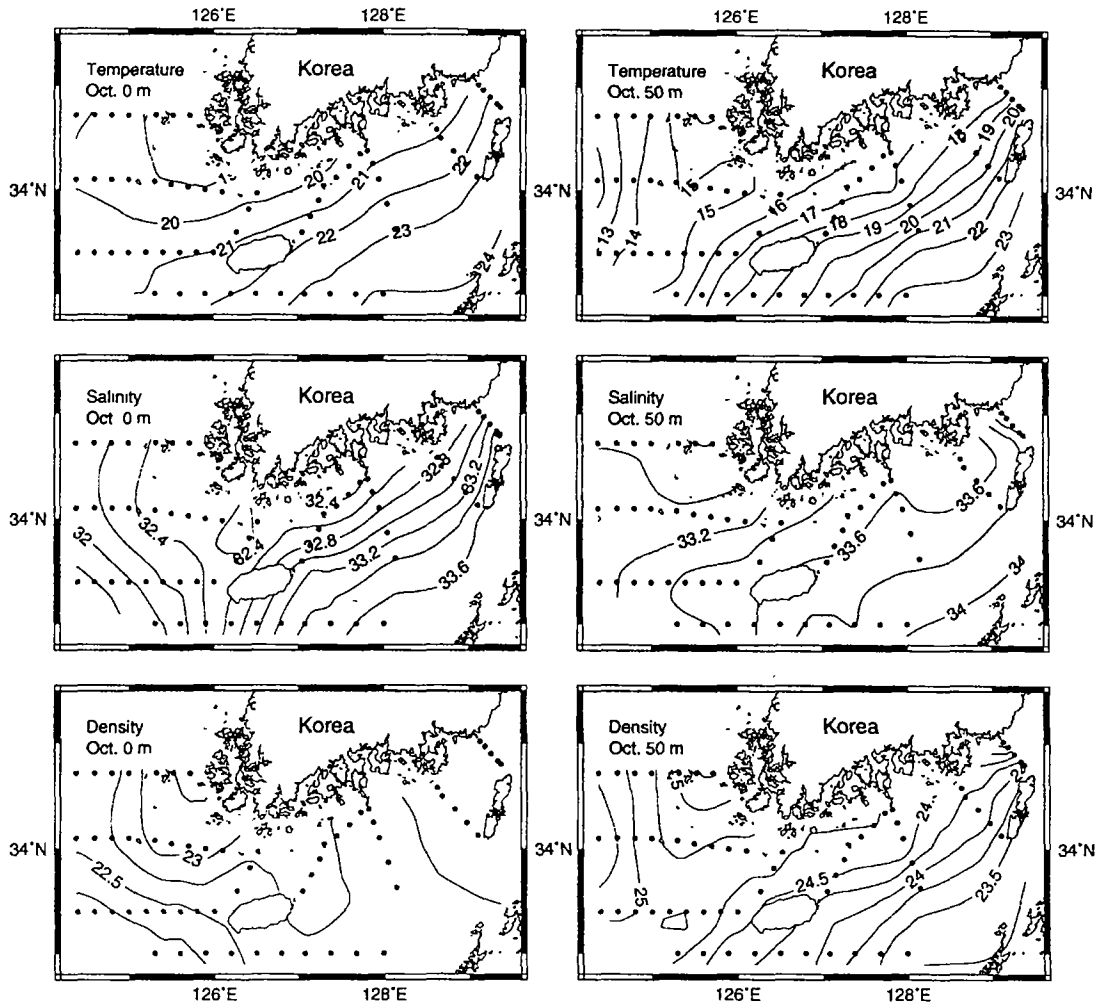


Fig. 1-16. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in October based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

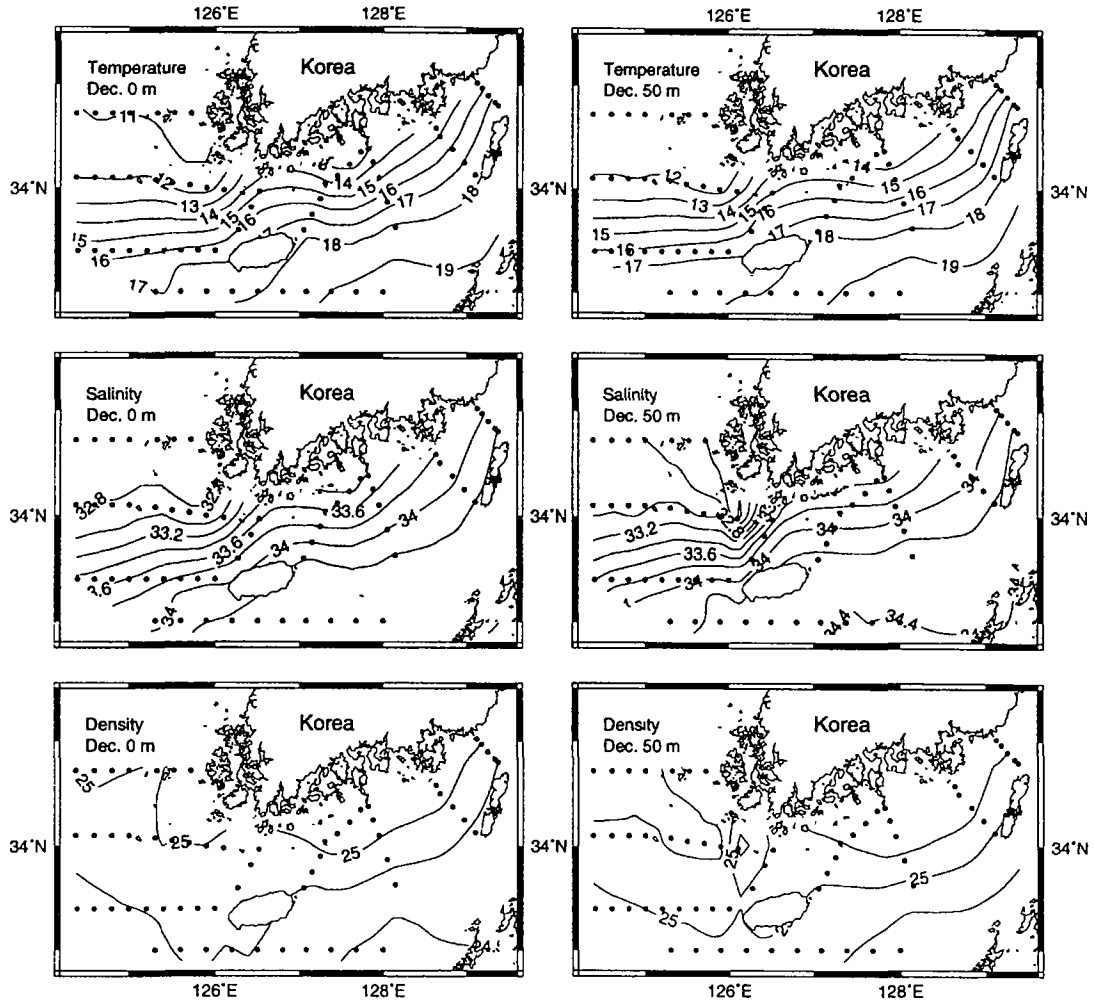


Fig. 1-17. Mean temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) distribution at the surface (left panel) and at 50 m depth (right panel) in the South Sea in December based on bimonthly data taken by the National Fisheries Research and Development Agency during 1967-1987.

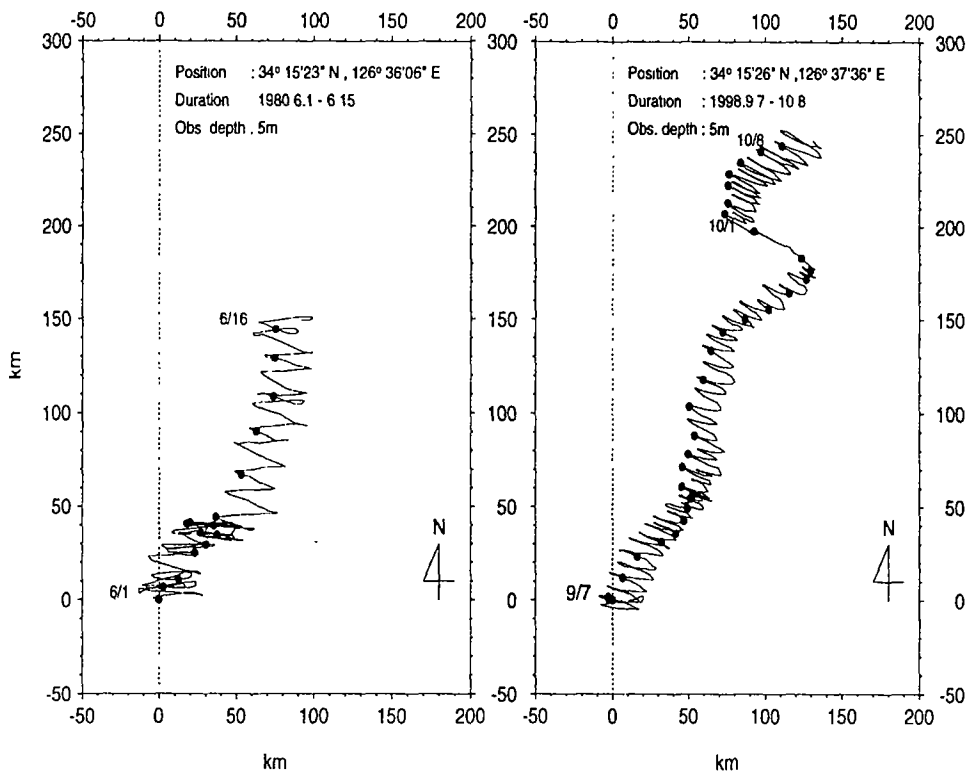


Fig. 1-18. Progressive vector diagrams for current data taken by the National Ocean Research Institute at 5 m depth in the Hoenggan Channel for 15 days in June 1980 (left panel) and for 32 days in September 1998 (right panel). Sampling intervals were 1 hour in June 1980 and 10 minutes in September 1998, and the diagrams are based on hourly data.

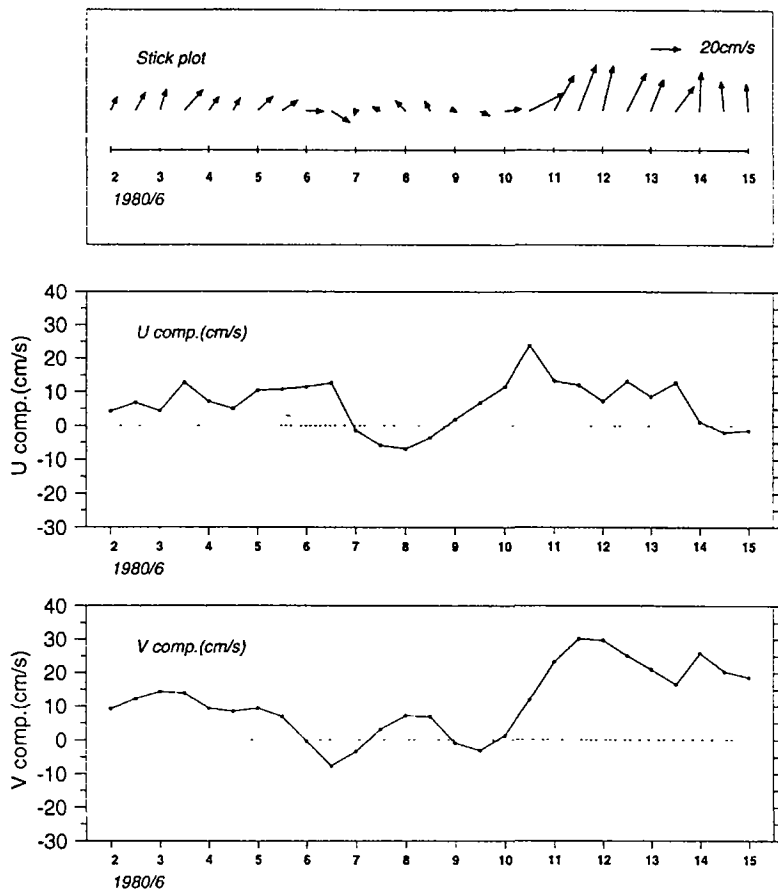
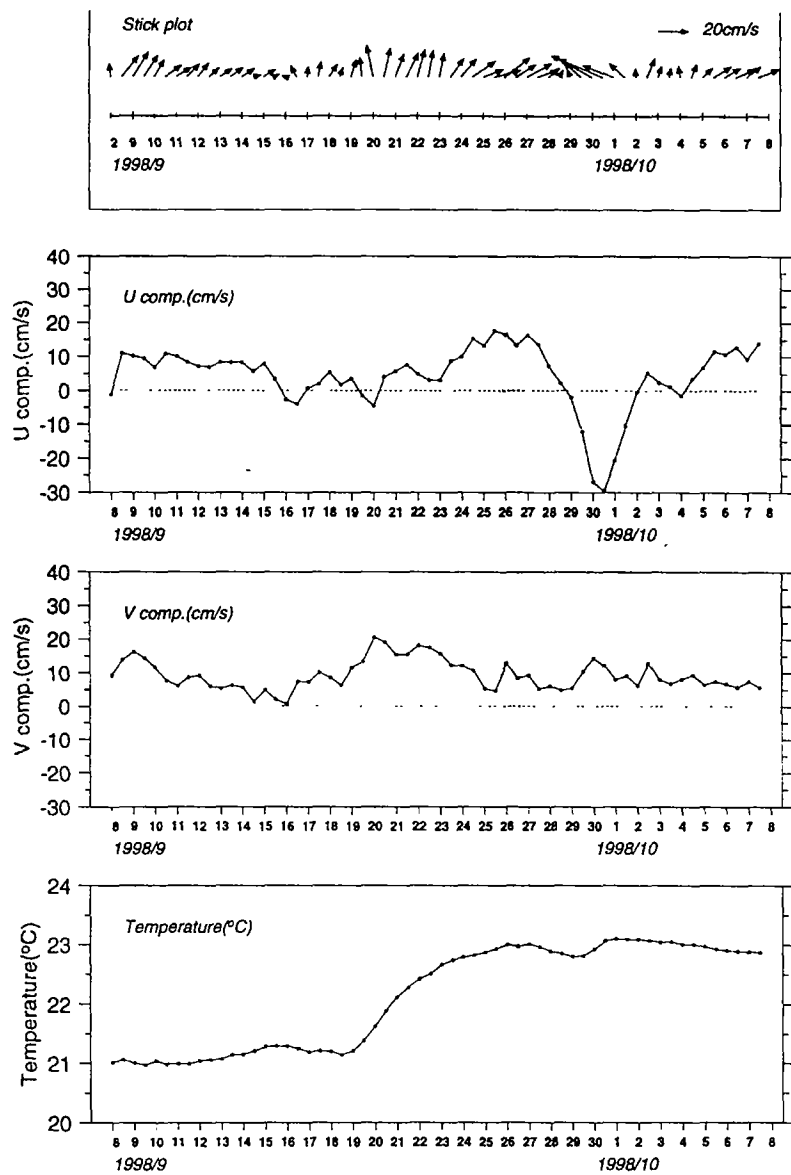


Fig. 1-19. Vector plot, and east-west and north-south components of low-pass filtered, subsampled every 12 hours, currents based on current data taken in June 1980. Doodson's  $X_0$  filter was used for the elimination of tidal components of currents.





**Fig. 1-20.** Vector plot, and east-west and north-south components of low-pass filtered, subsampled every 12 hours, currents based on current data taken in September 1998. Doodson's  $X_0$  filter was used for the elimination of tidal components of currents. Repeated vessel-mounted ADCP surveys were conducted in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do during the stippled period.

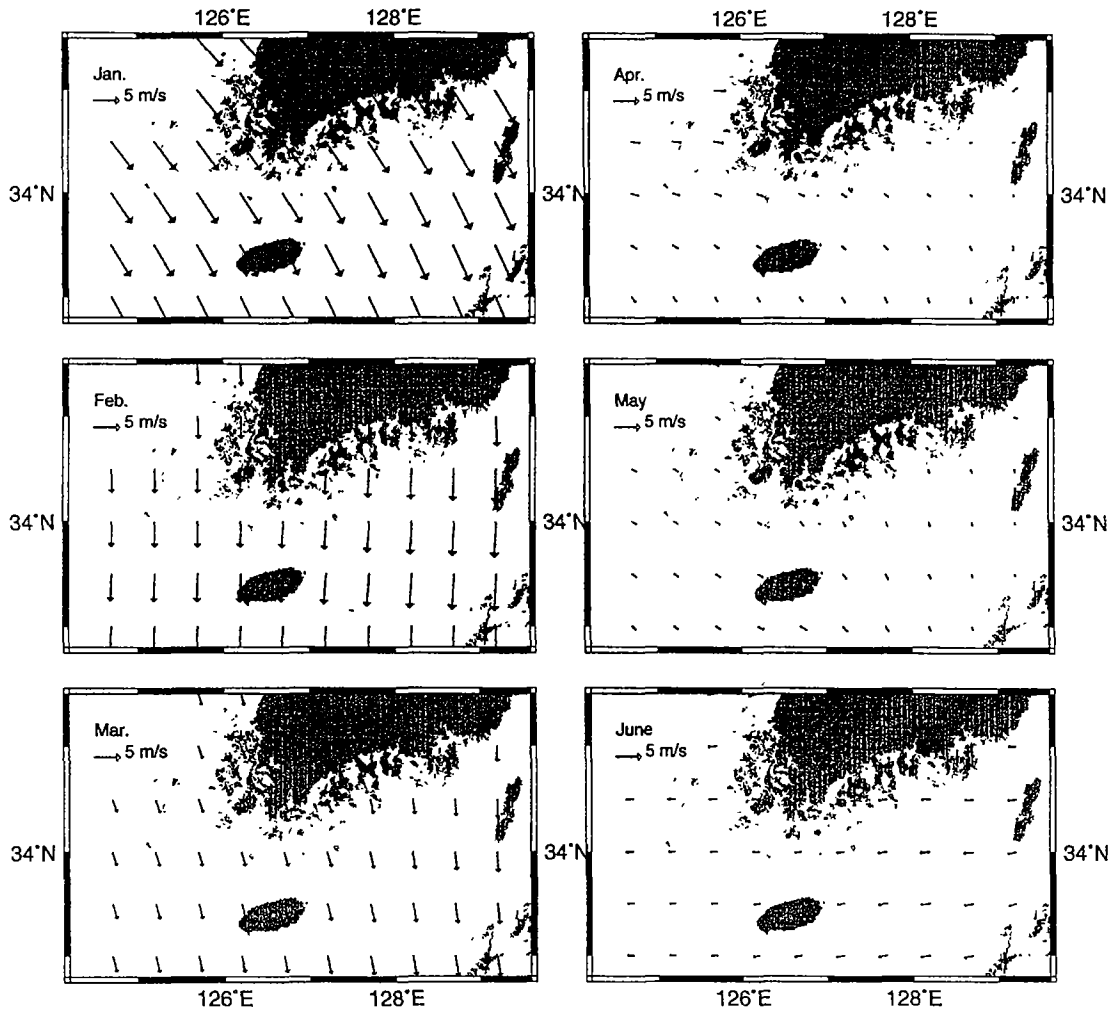


Fig. 1-21. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from January to June with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998).

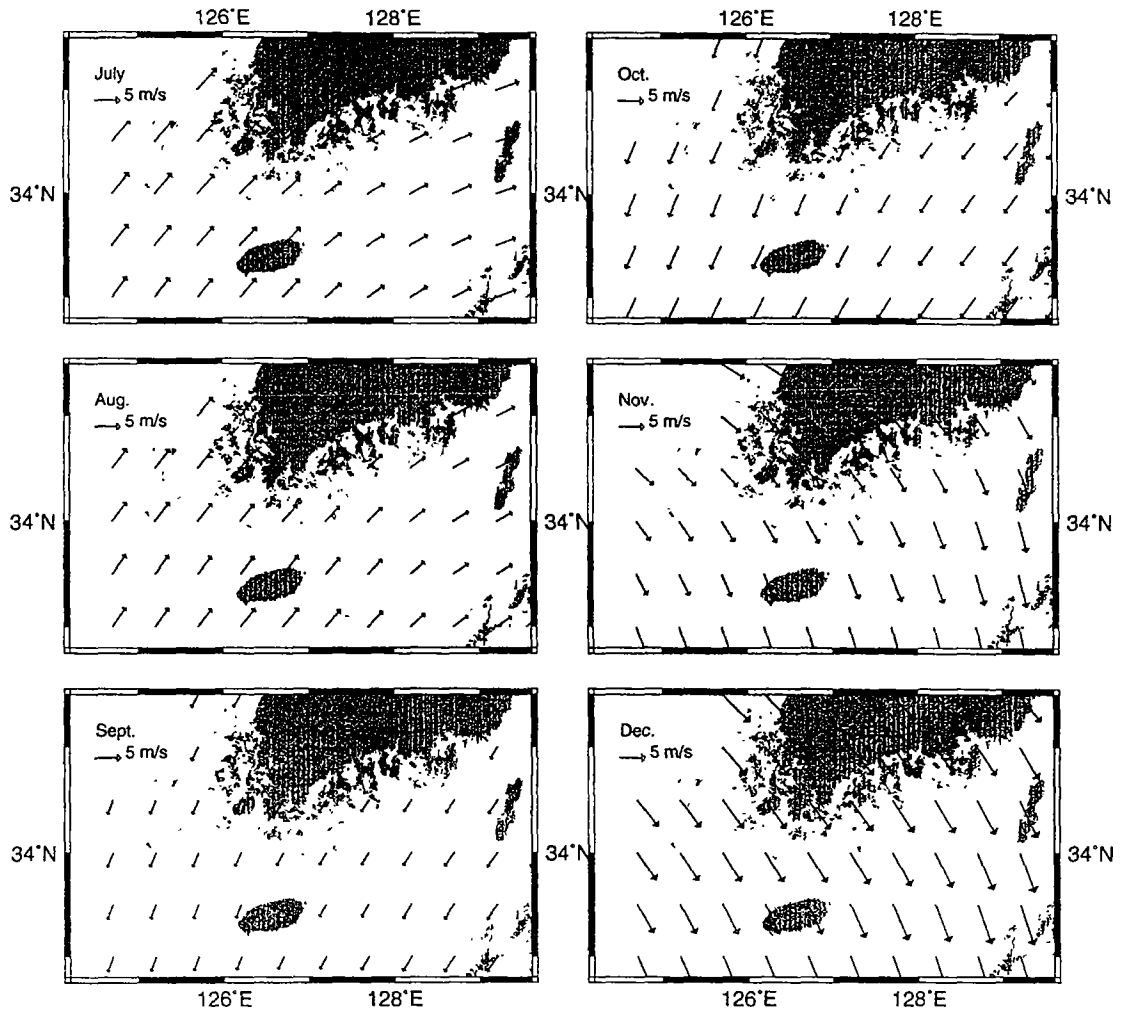


Fig. 1-22. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from July to December with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998).

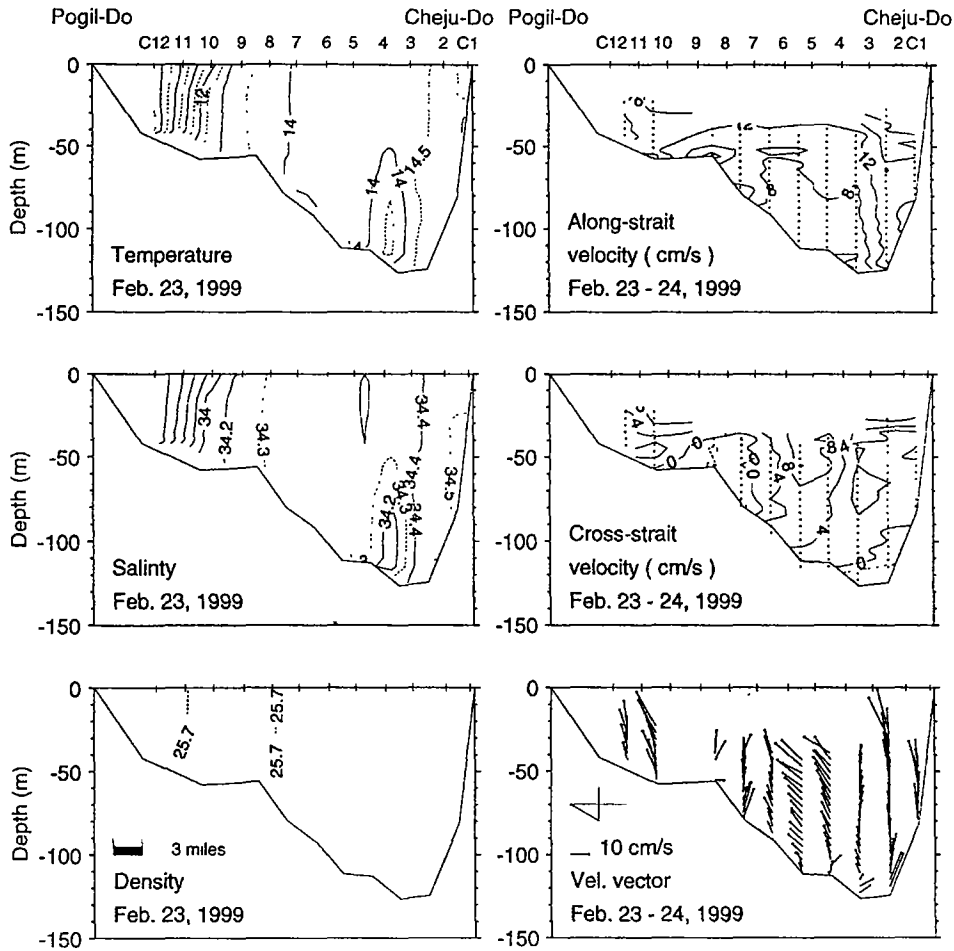


Fig. 1-23. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in February 1999. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

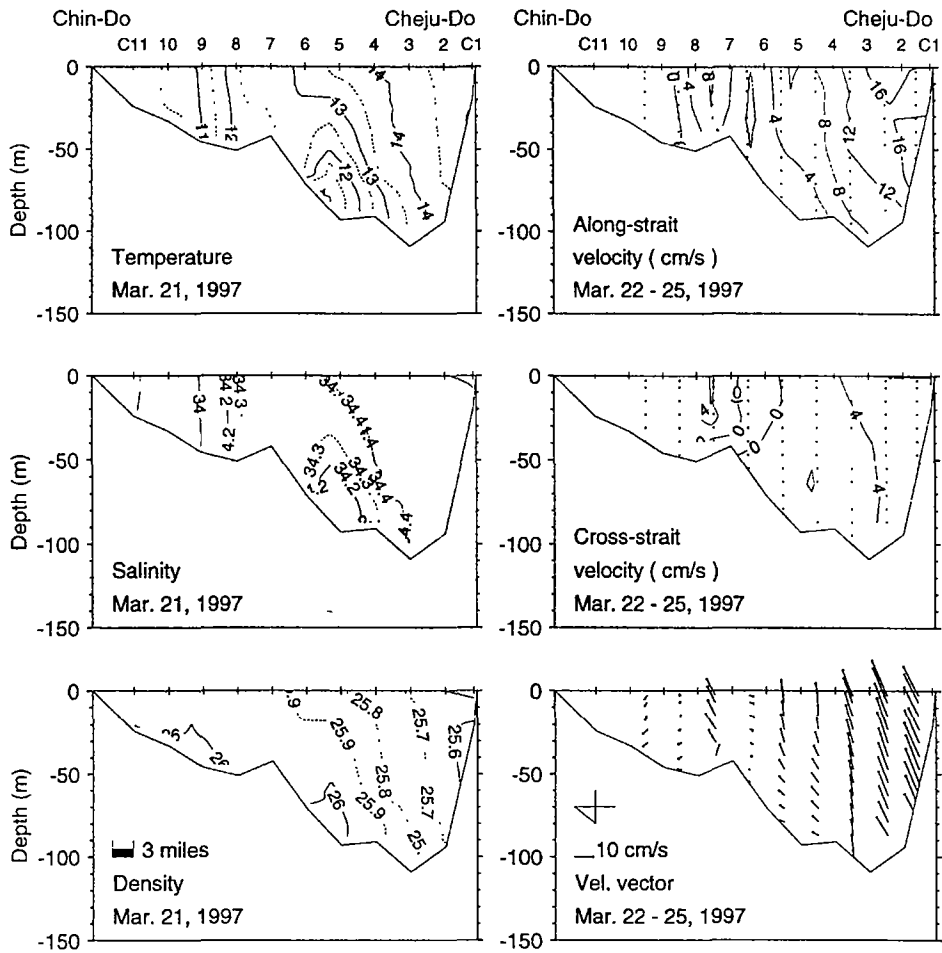


Fig. 1-24. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Chin-Do in March 1997. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

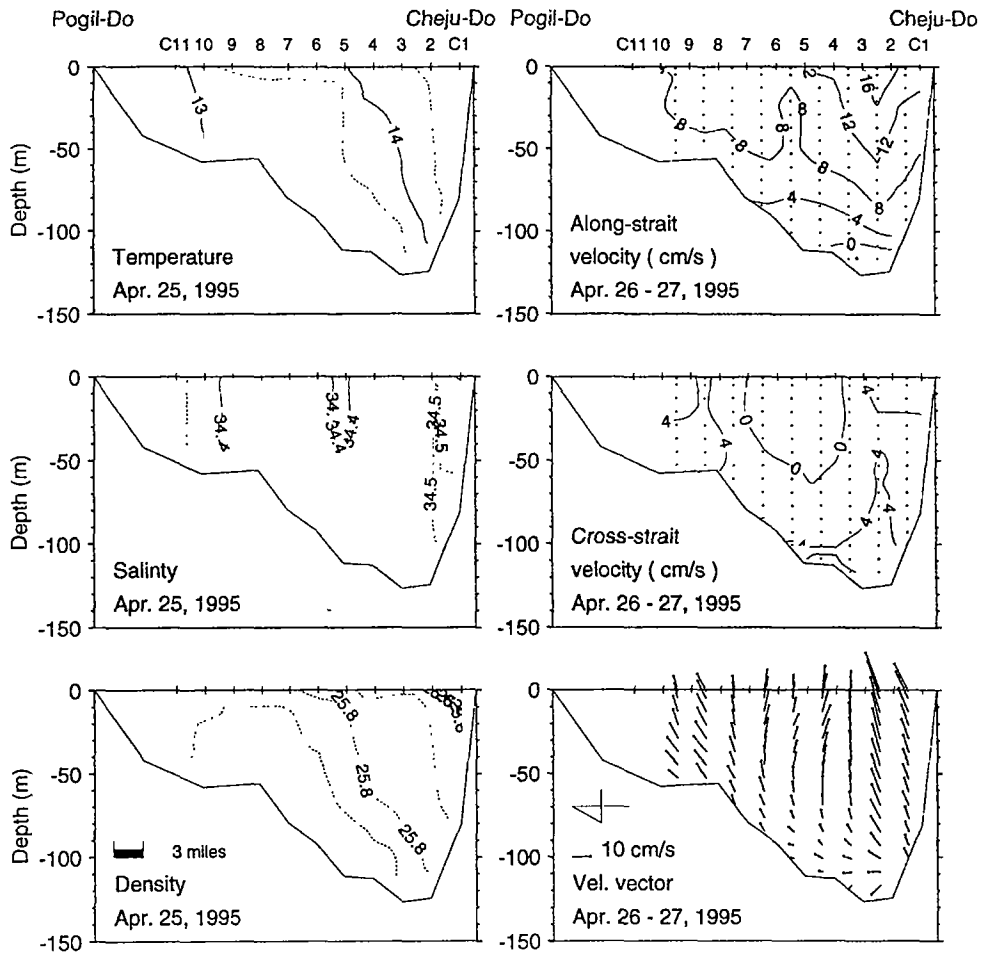


Fig. 1-25. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Chin-Do in April 1995 (Suk et al., 1996). Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

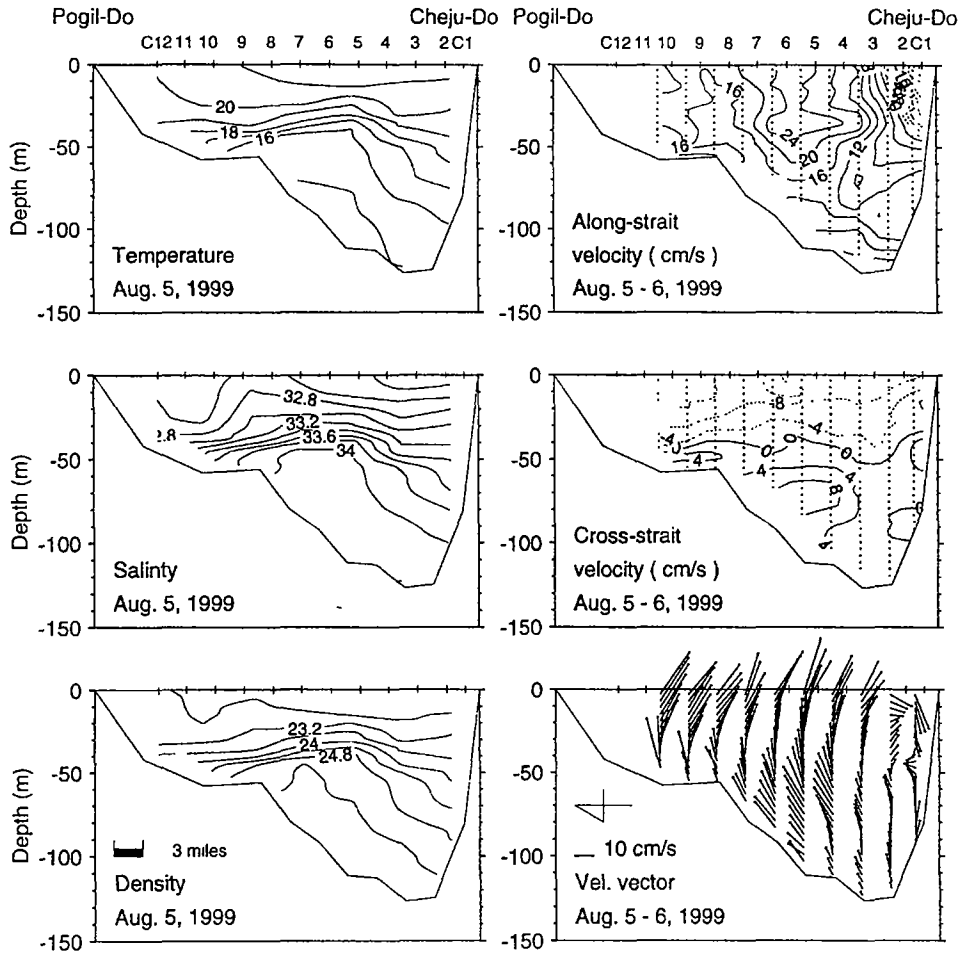


Fig. 1-26. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in August 1999. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

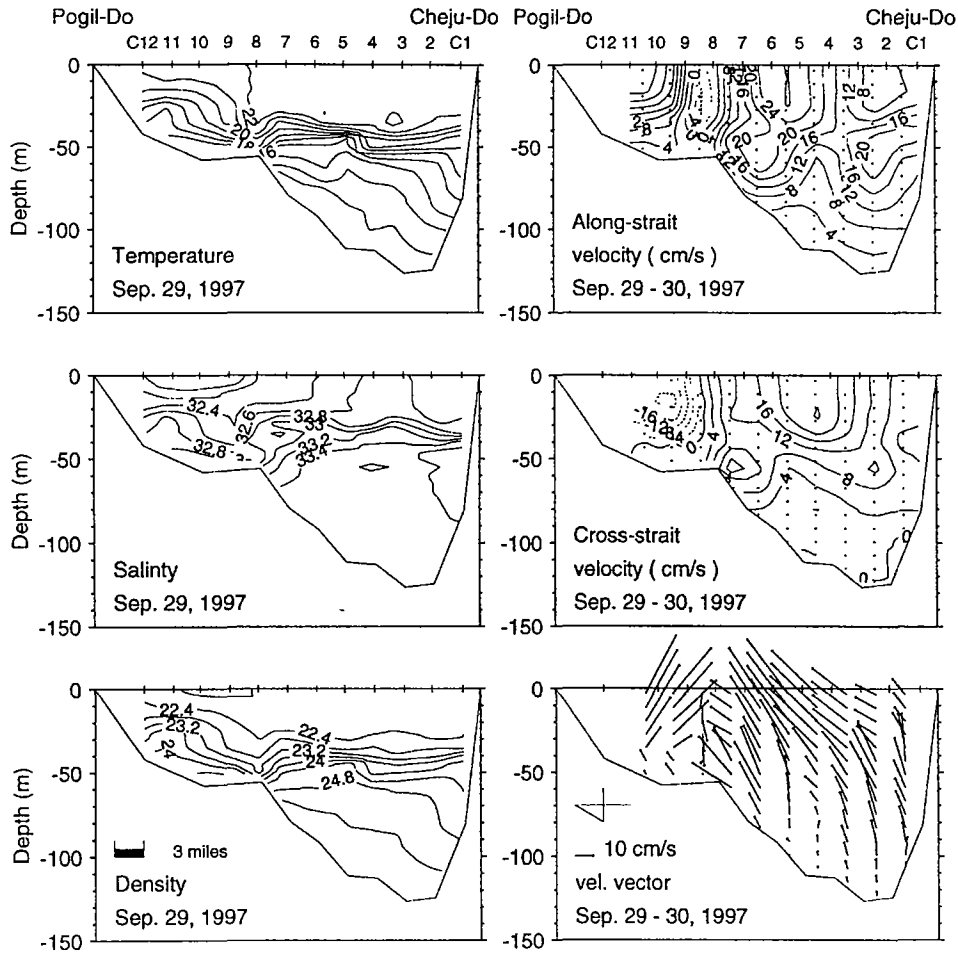
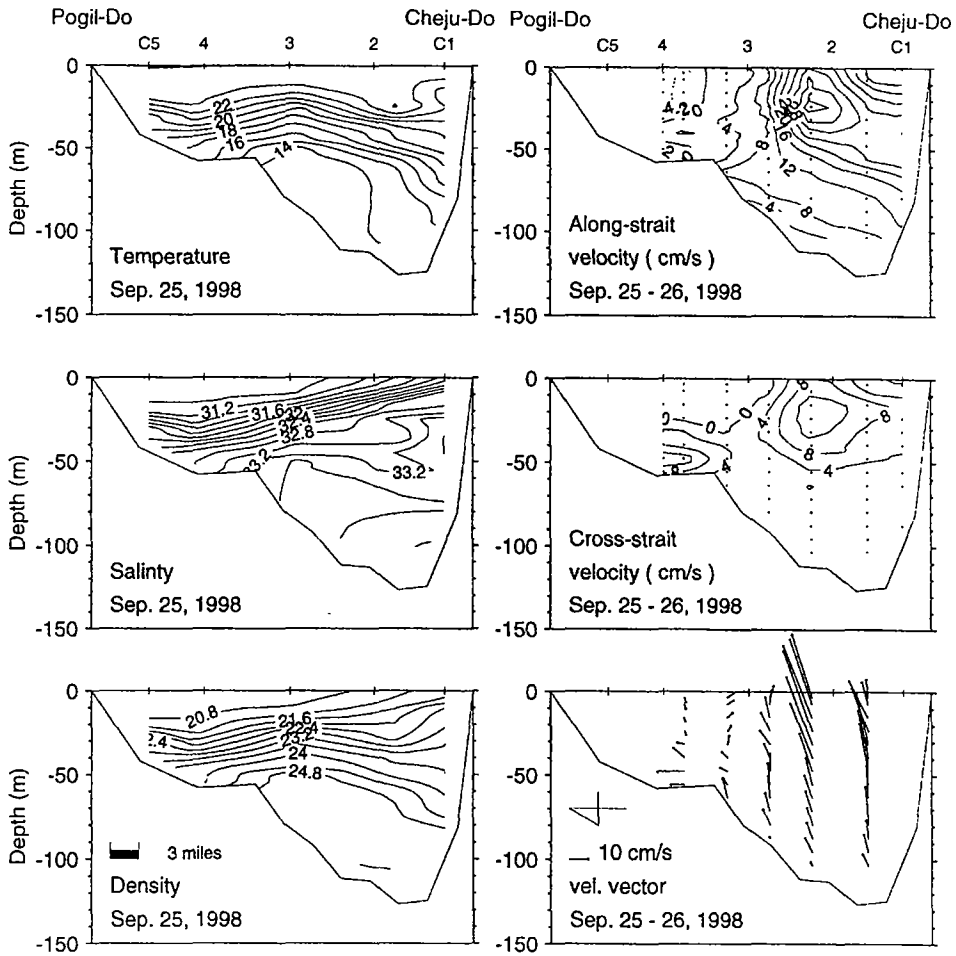


Fig. 1-27. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in September 1997. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.





**Fig. 1-28.** Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in September 1998. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

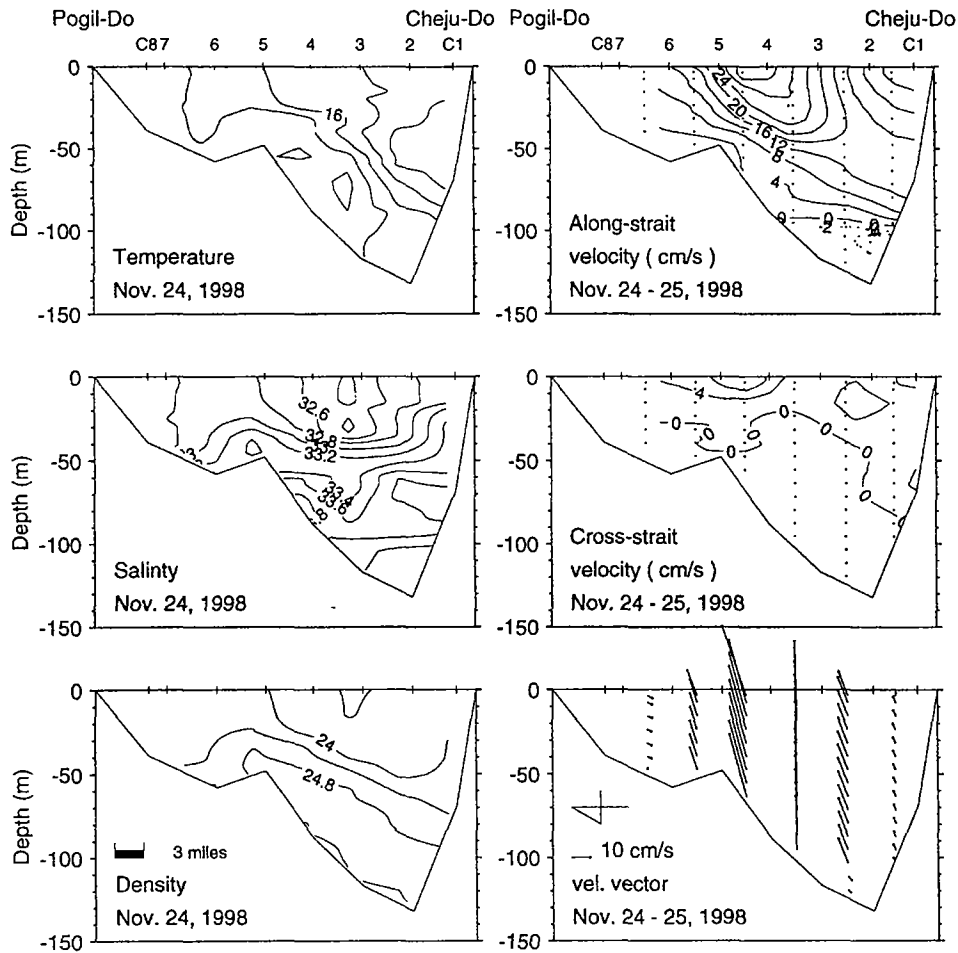


Fig. 1-29. Vertical sections of (left panel) temperature, salinity and water density, and (right panel) east-west (upper right), north-south (middle right) components and vector plot (lower right) of diurnally-averaged currents based on repeated vessel-mounted ADCP measurements made in the Cheju Strait between Cheju-Do and Pogil-Do in November 1998. Positive (negative) values in the current components denote the eastward (westward) flow in the east-west component, and the northward (southward) flow in the north-south component.

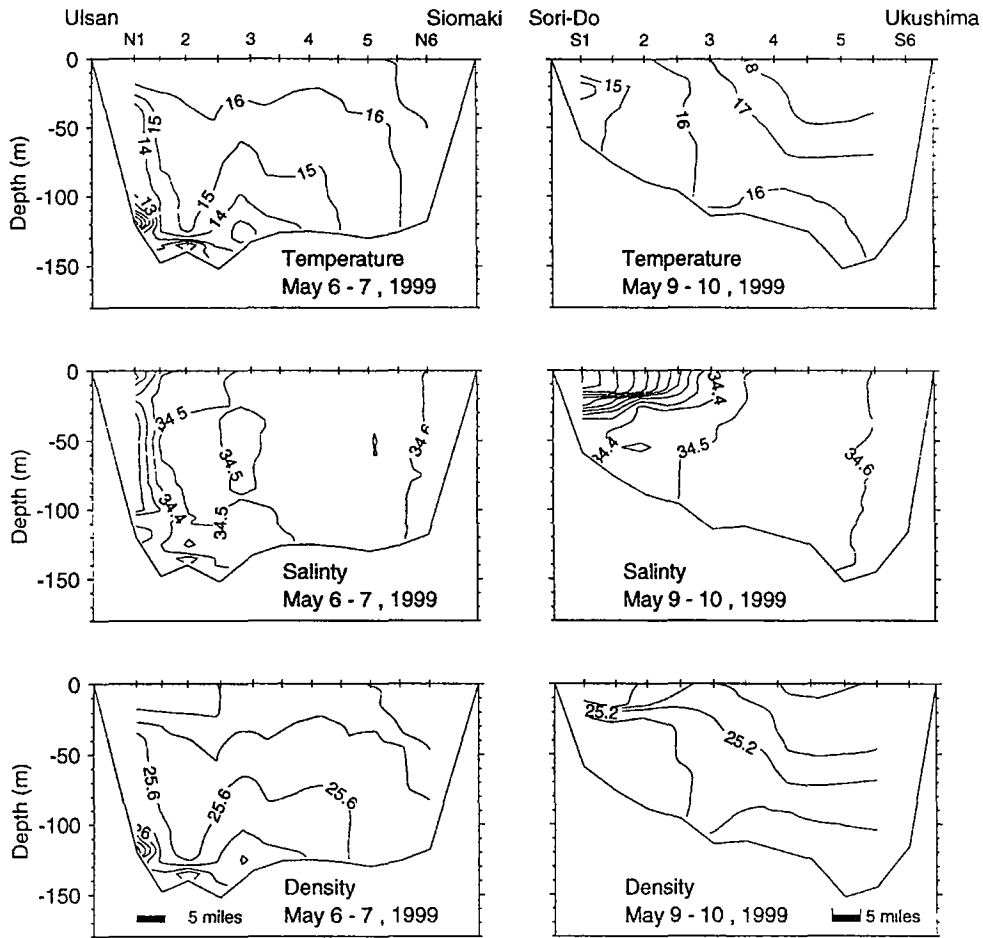


Fig. 1-30. Vertical sections of temperature, salinity and water density ( $\sigma_t$ ) off Ulsan northeast of the Korea Strait (left panel) and off Sori-Do southwest of the Korea Strait (right panel) taken during a joint Korea-US survey in May 1999. CTD locations are shown with tick marks, and labeled locations denote TRBM-ADCP mooring sites.

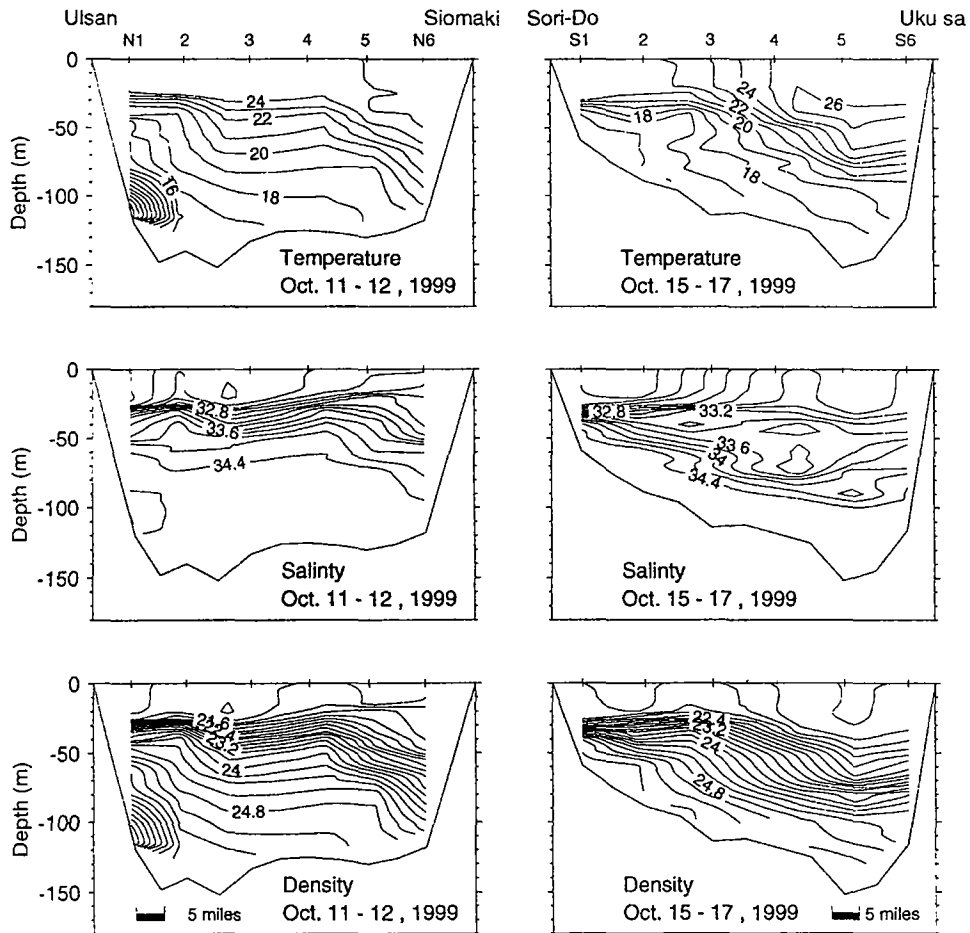
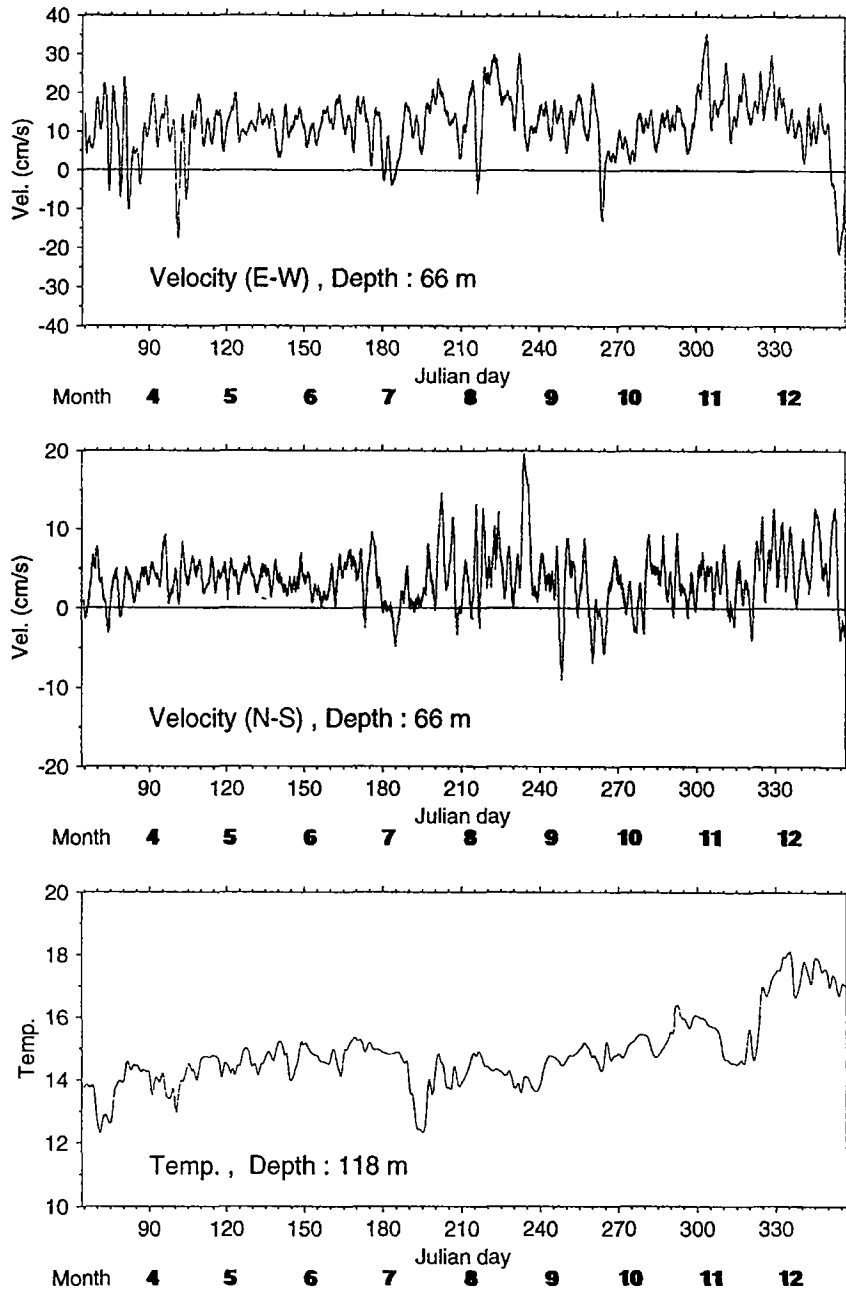


Fig. 1-31. Vertical sections of temperature, salinity and water density ( $\sigma_t$ ) off Ulsan northeast of the Korea Strait (left panel) and off Sori-Do southwest of the Korea Strait (right panel) taken during a joint Korea-US survey in October 1999. CTD locations are shown with tick marks, and labeled locations denote TRBM-ADCP mooring sites.



**Fig. 1-32.** Time series of low-pass filtered east-west (upper panel), north-south (middle panel) components of currents at 66 m depth, and temperature (lower panel) near the seabed.

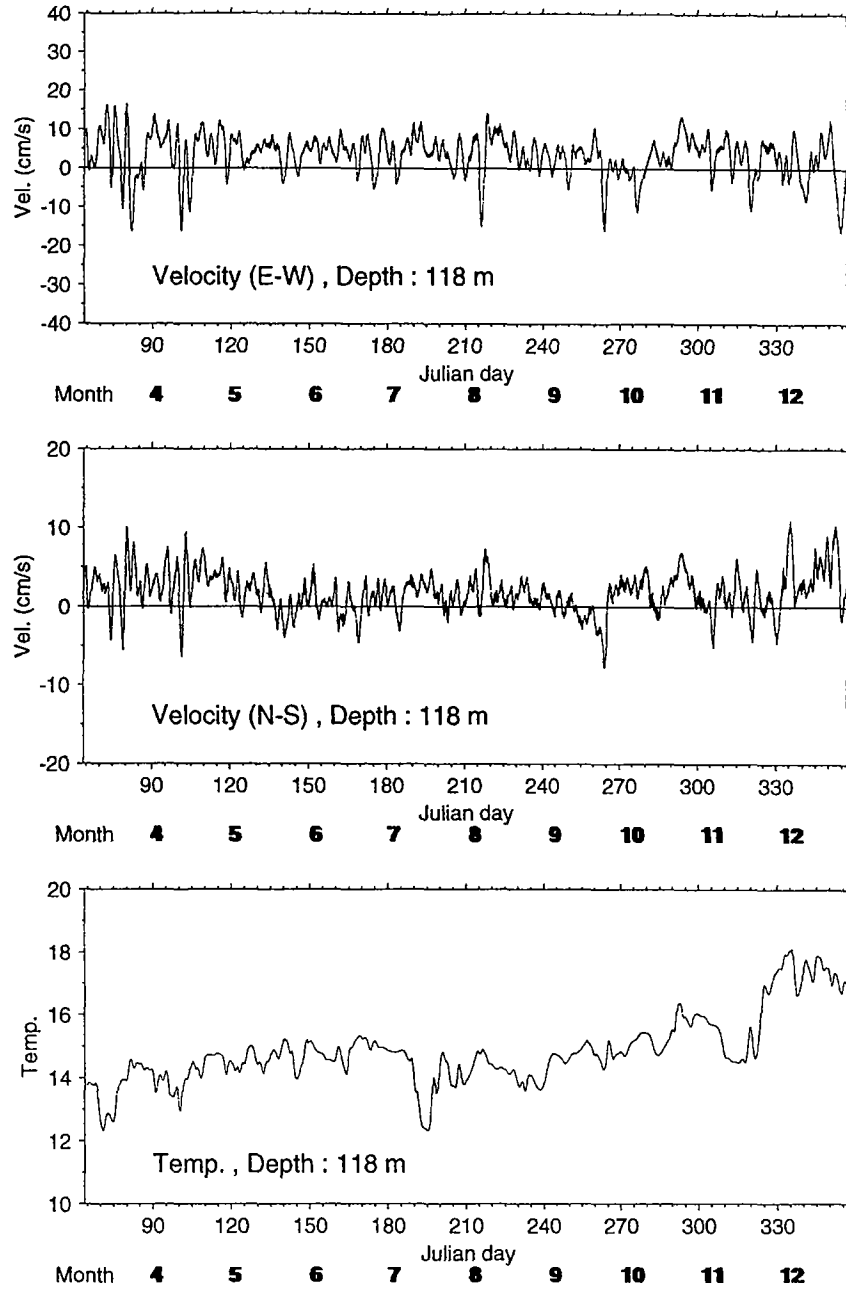


Fig. 1-33. Time series of low-pass filtered east-west (upper panel), north-south (middle panel) components of currents at 118 m depth, and temperature (lower panel) near the seabed.

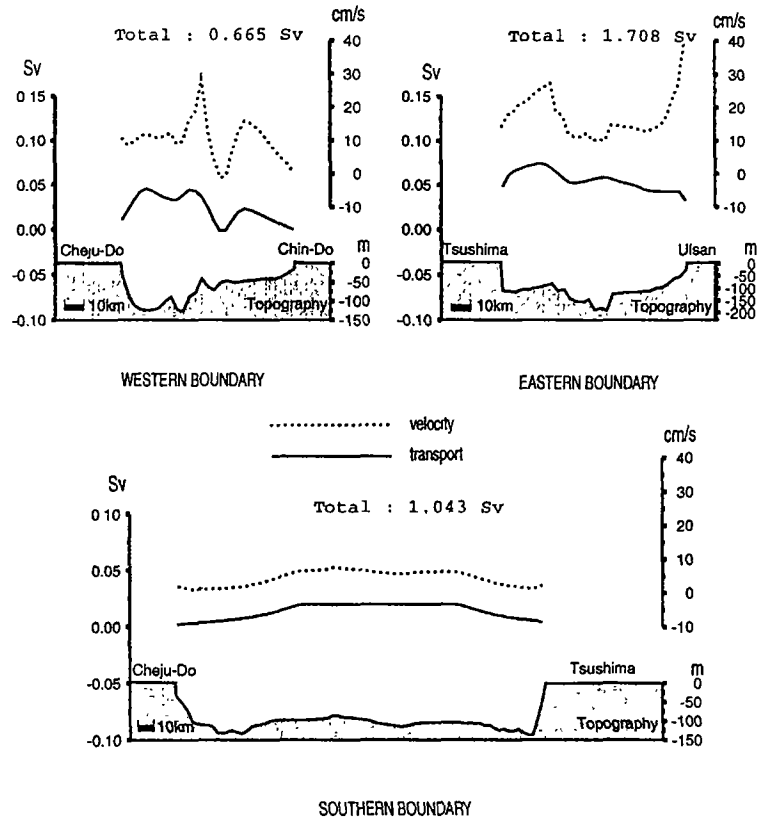


Fig. 1-34. Spatial structure of the volume transport (solid lines) and depth-averaged velocity (dotted lines) specified across three open boundaries based on the observed diurnally-averaged flow in the Cheju Strait in the Korea Strait in fall, 1997. The volume transport specified across the southern boundary is the difference between eastern and western boundaries, and the spatial pattern of the transport and the velocity is arbitrary. Bottom topography across open boundaries is also shown.

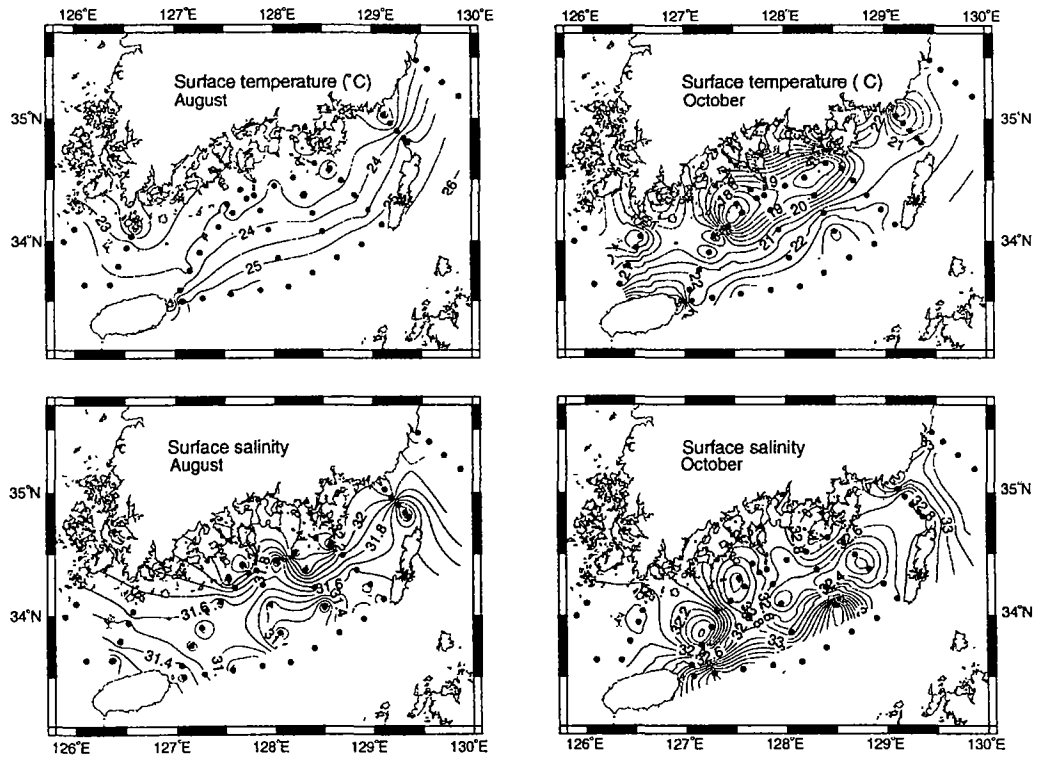


Fig. 1-35. Horizontal distribution of observed surface temperature and salinity in the South Sea in August 8-16 (left panel) and October 8-29 (right panel), 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.



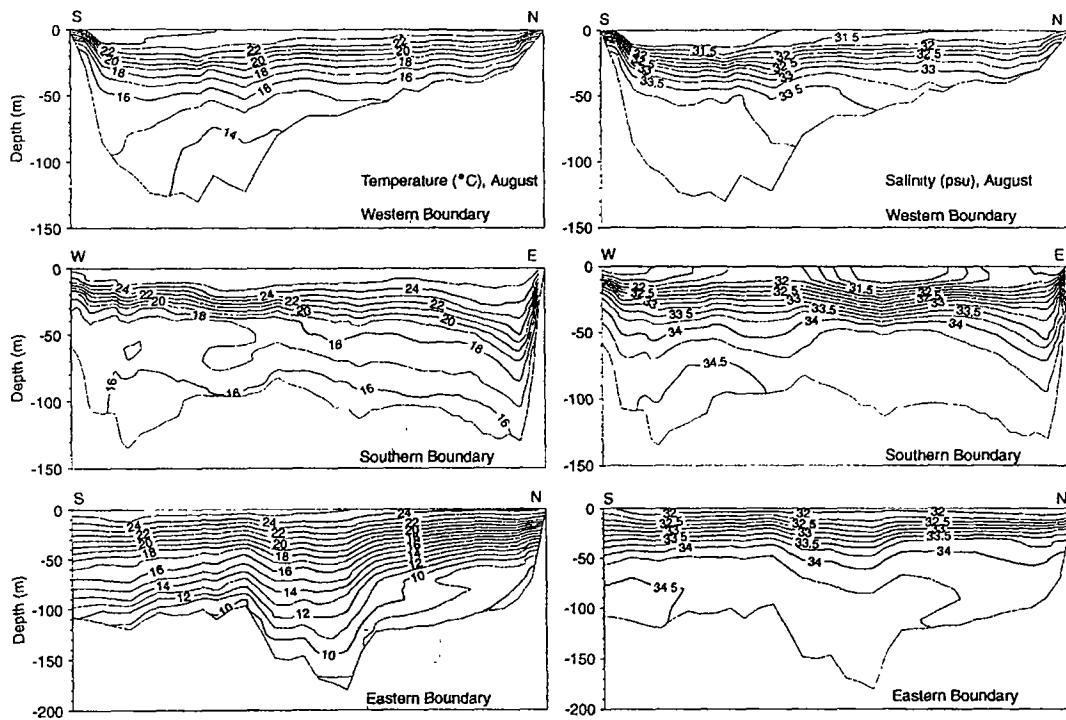


Fig. 1-36. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in August 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

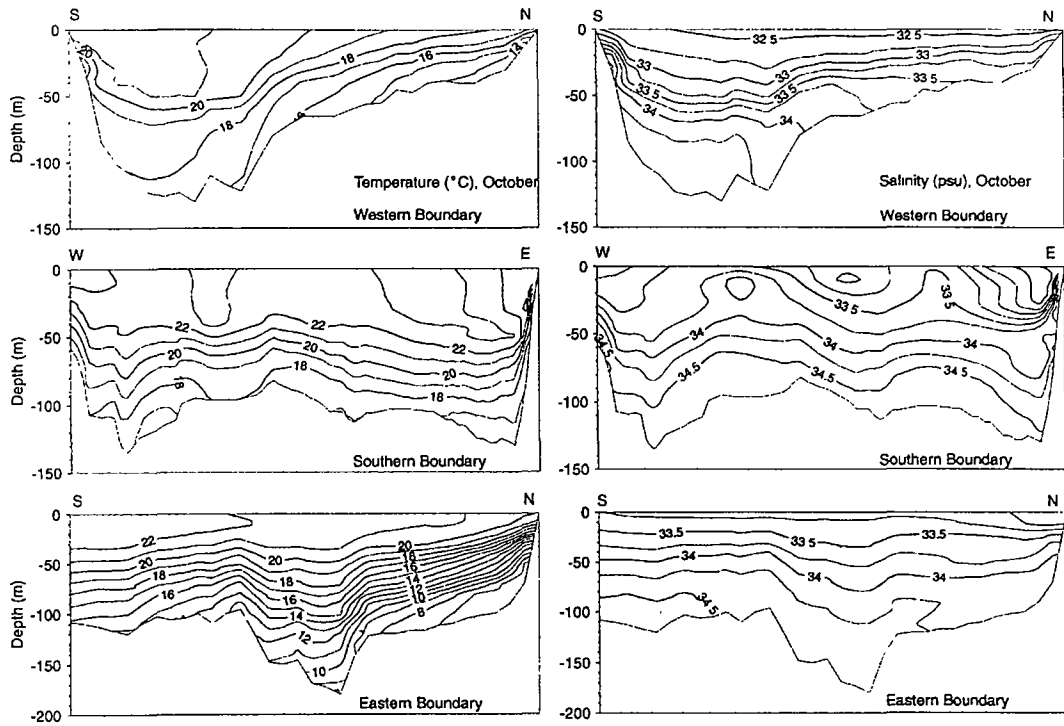


Fig. 1-37. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in October 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

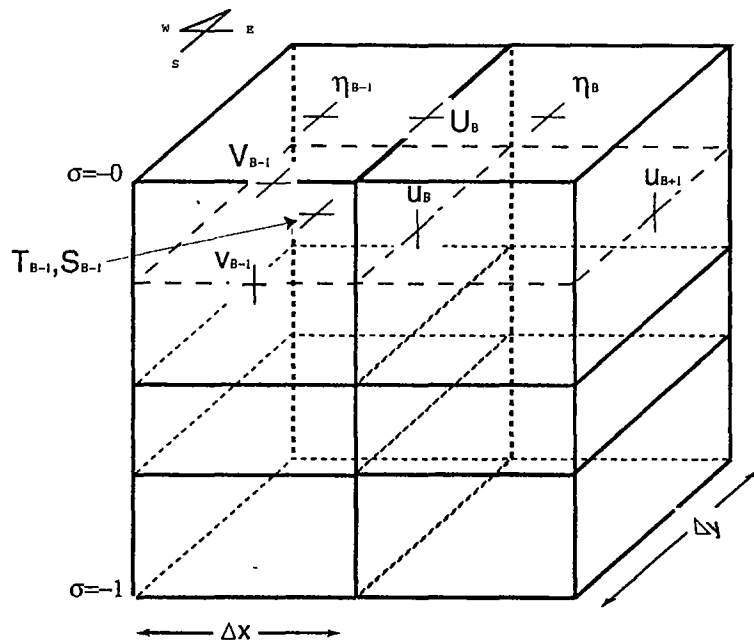


Fig. 1-38. Spatial arrangements of model variables on an Arakawa C-grid near the western boundary. The western open boundary coincides with the line denoted by the subscript B.

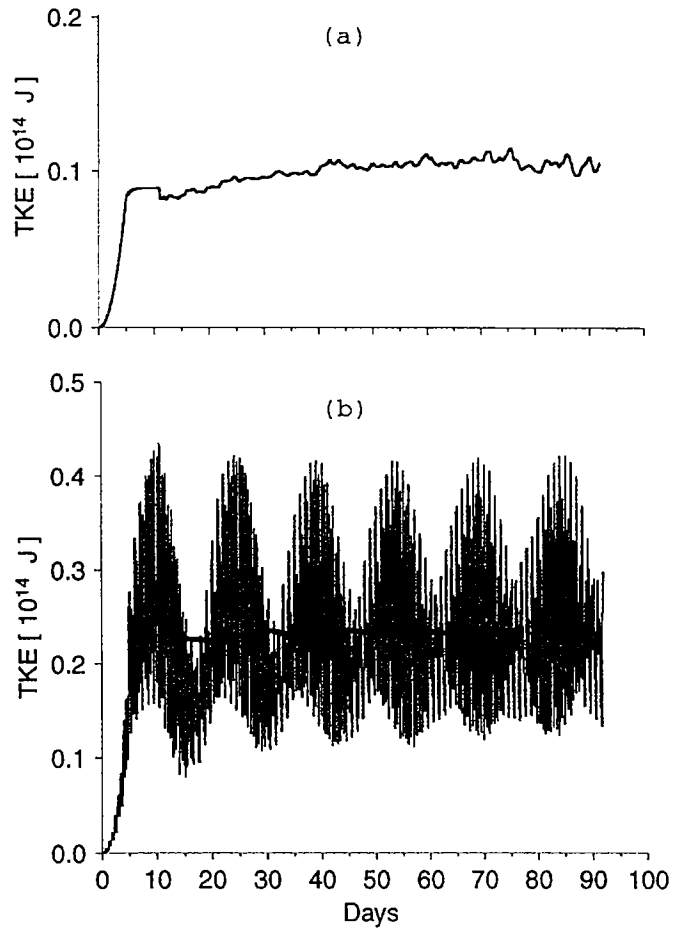


Fig. 1-39. Total kinetic energy as a function of time for (a) Case 4, and (b) Case 5 in Table 1-9. Solid line shown in (b) denotes the variation of 15-day moving-averaged total kinetic energy.

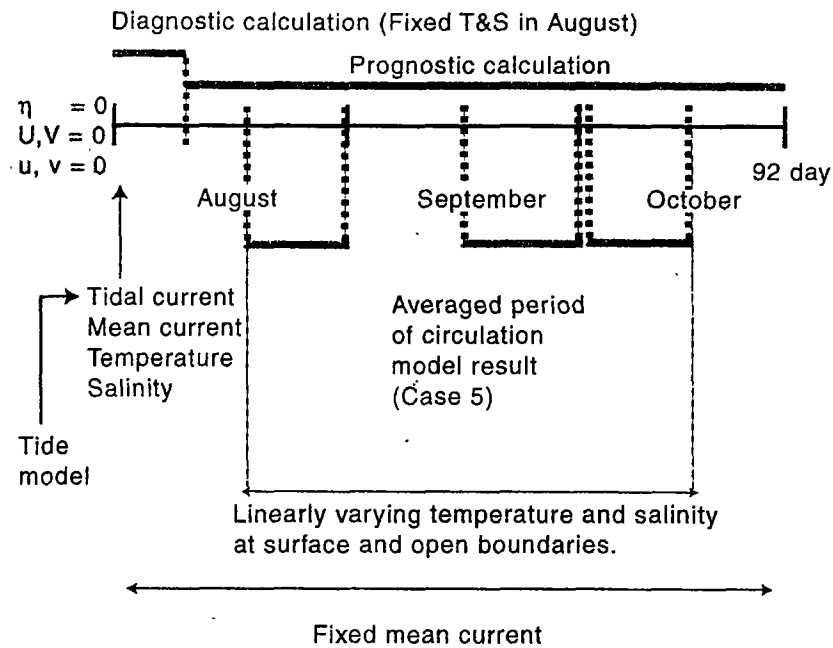


Fig. 1-40. A schematic illustration of model run for Case 5 in Table 1-9. The model is forced by a specification of time-varying tidal currents and steady inflow/outflows observed in fall 1997 across open boundaries, and time-varying temperature and salinity based on the observation in August and October both at the sea surface and across open boundaries. The tidal currents are pre-determined by a three-dimensional barotropic tide model, where five major constituents of tidal currents are computed by specifying free surface elevation across open boundaries. The model was initially quiescent with  $\eta = 0$  inside the model domain, and diagnostic calculation was performed for 10 days with fixed three-dimensional temperature and salinity fields observed in August, and with time-varying tidal currents and inflow/outflows across open boundaries. The prognostic calculation was then followed with the specification of observed temperature and salinity at the sea surface and across open boundaries for 82 days. Linearly interpolated, time-varying temperature and salinity are specified from August 15 to October 15 based on the observations in August and October, and the surface and boundary forcing applied before August 15 and after October 15 is fixed with those values in August and October, respectively. Also shown are periods of averaging the model results for 15 days in order to examine the subtidal circulation in August, September, and October.

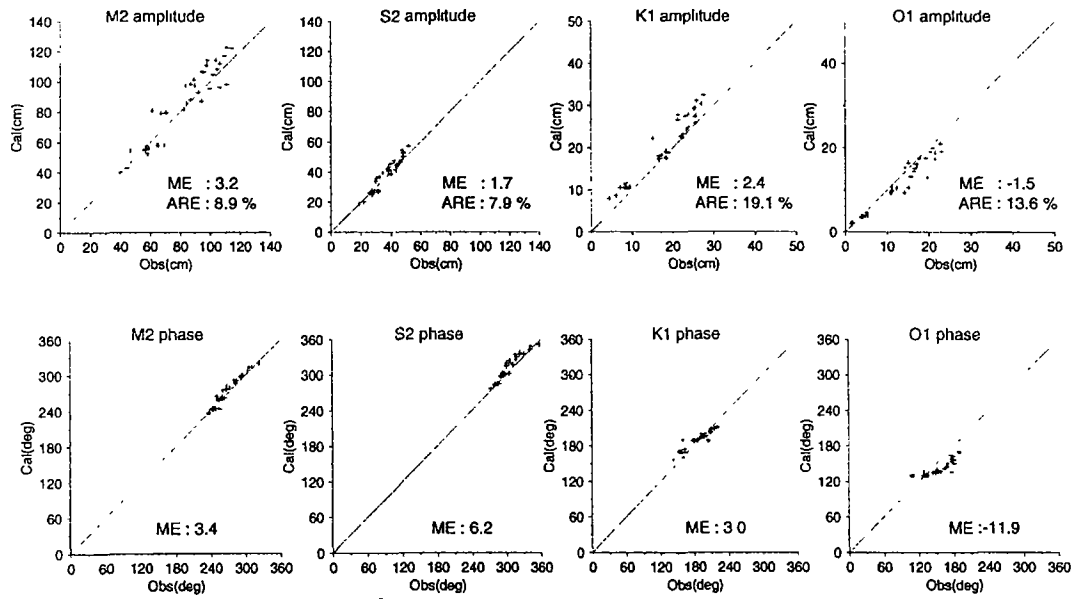


Fig. 1-41. Model (Cal)/data (Obs) inter-comparison for the amplitude and phase of four dominant tidal constituents. ME and ARE denote the mean and the absolute relative errors, respectively, as defined in the text.

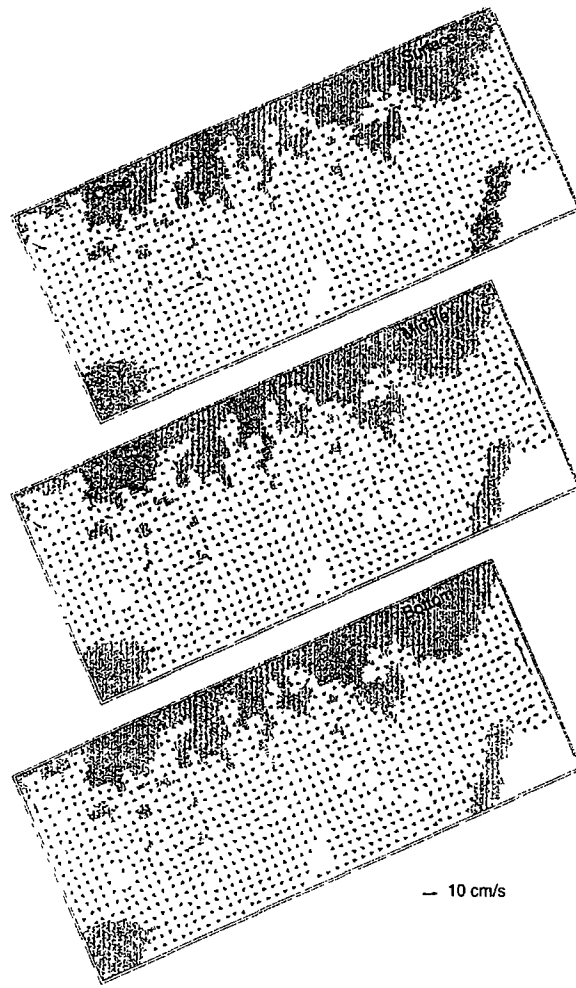
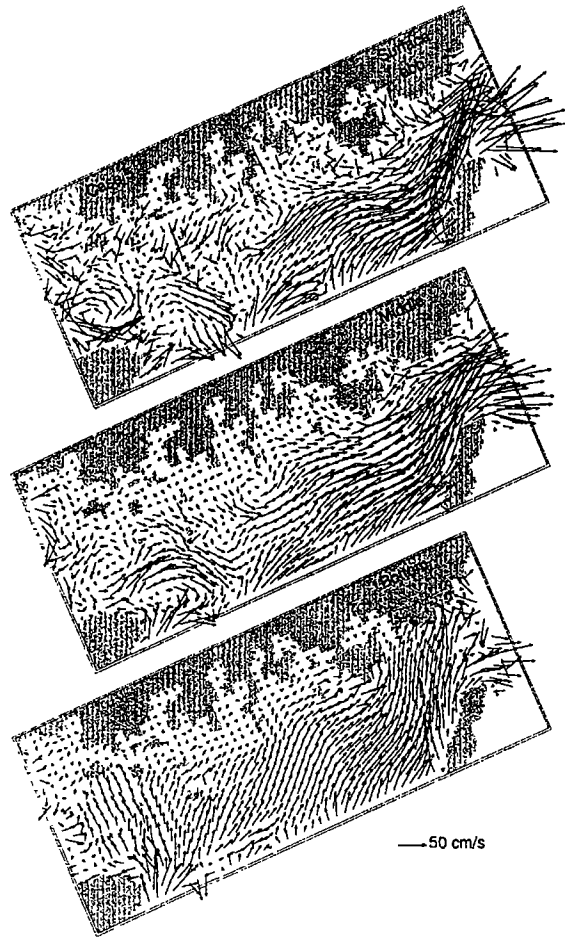


Fig. 1-42. Tidally-induced residual currents at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers computed using the three-dimensional barotropic tide model (Case 1 in Table 1-9).



**Fig. 1-43.** Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of ebb tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 5 in Table 1-9).



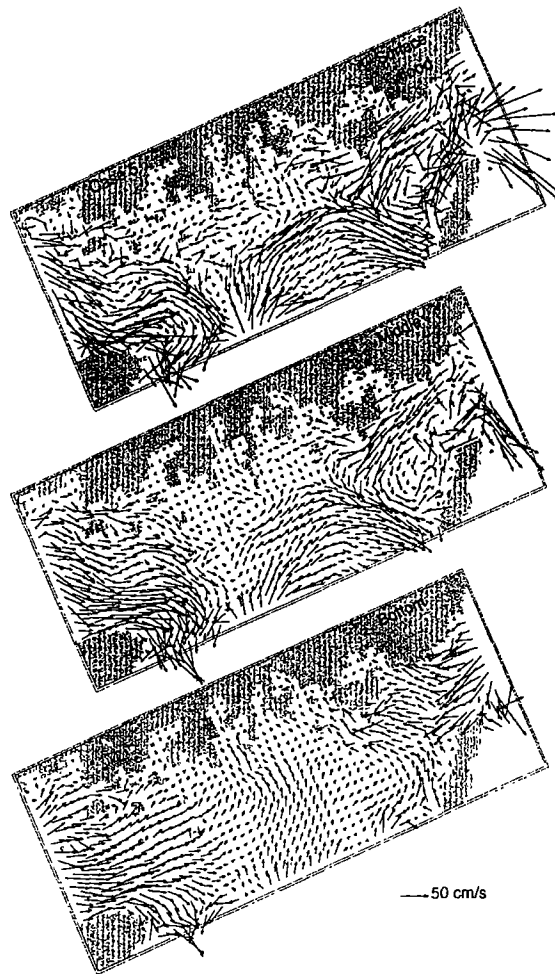


Fig. 1-44. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of flood tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 5 in Table 1-9).

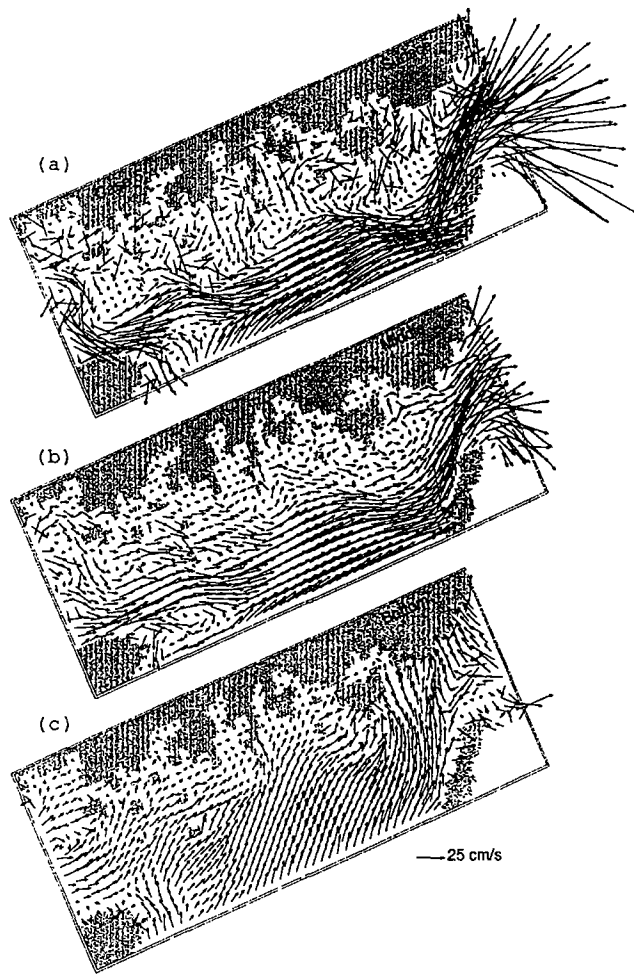
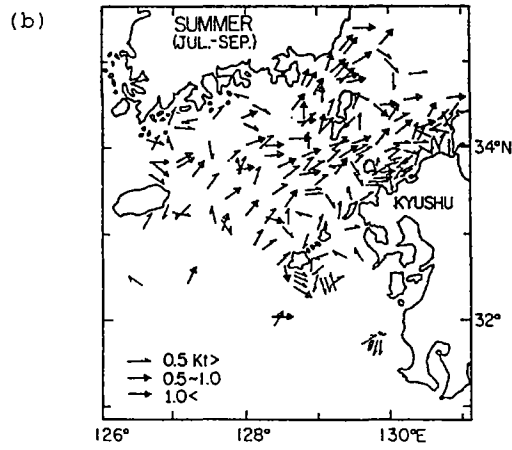
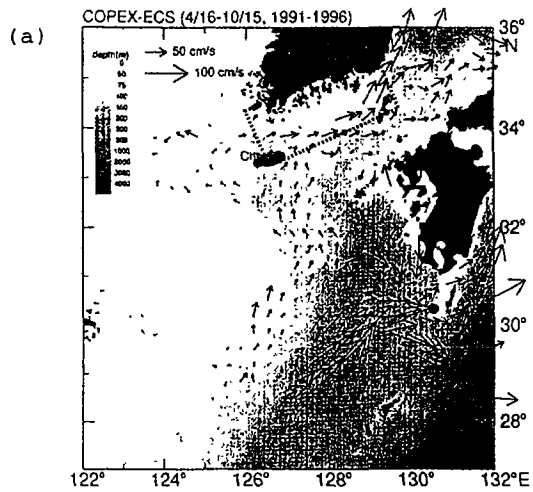


Fig. 1-45. Computed 15-day averaged flow field at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 5 in Table 1-9.



**Fig. 1-46.** Subtidal surface currents in the South Sea based on the observation by (a) Lie and Cho (1997), and (b) Mitta and Ogawa (1984).

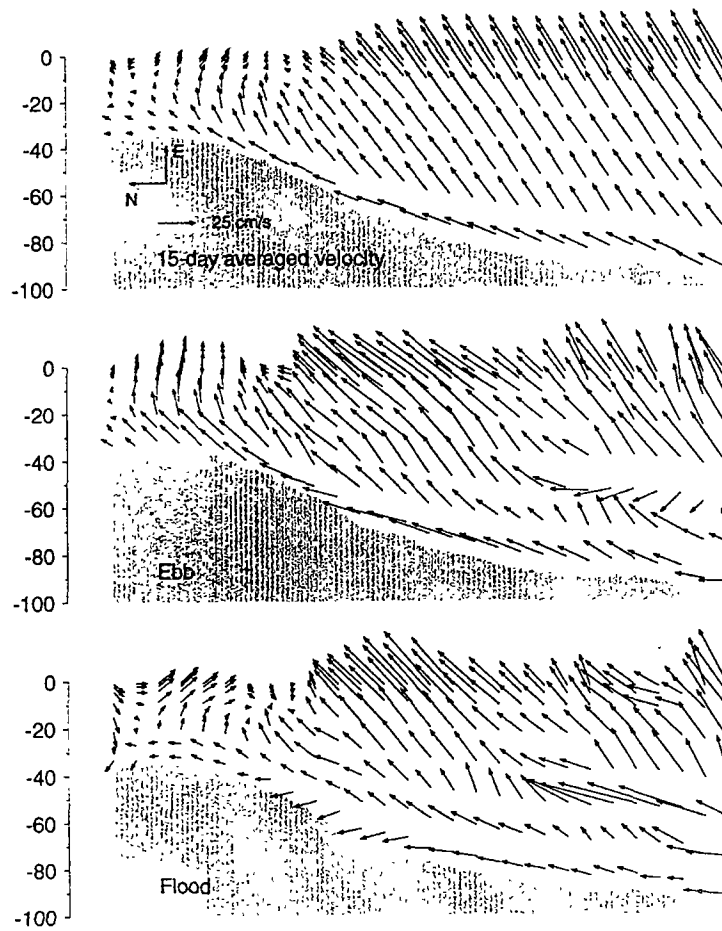


Fig. 1-47. Vertical section of the computed 15-day averaged horizontal velocity vector on a meridional line south of Namhae-Do (thick solid line in Fig. 1-1) in September for Case 5 in Table 1-9.

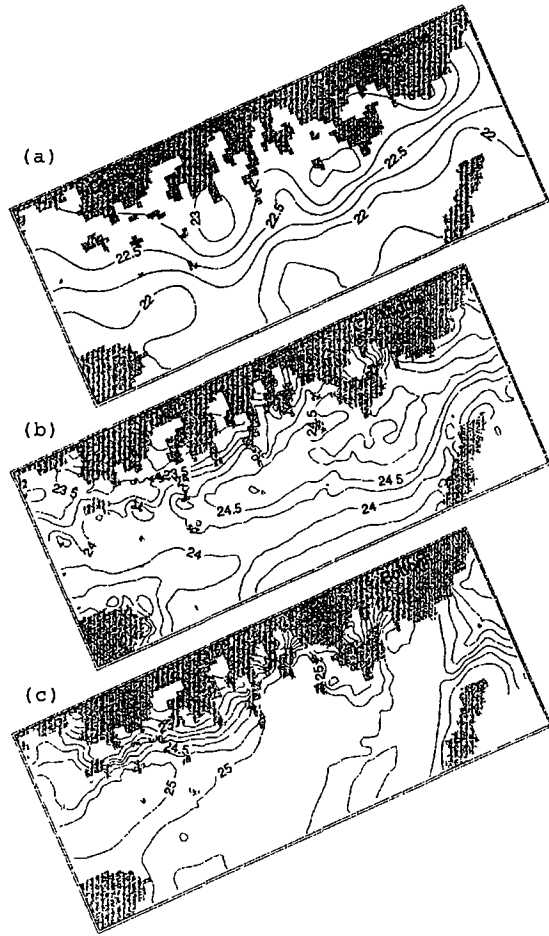


Fig. 1-48. Computed 15-day averaged density distribution at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 5 in Table 1-9.

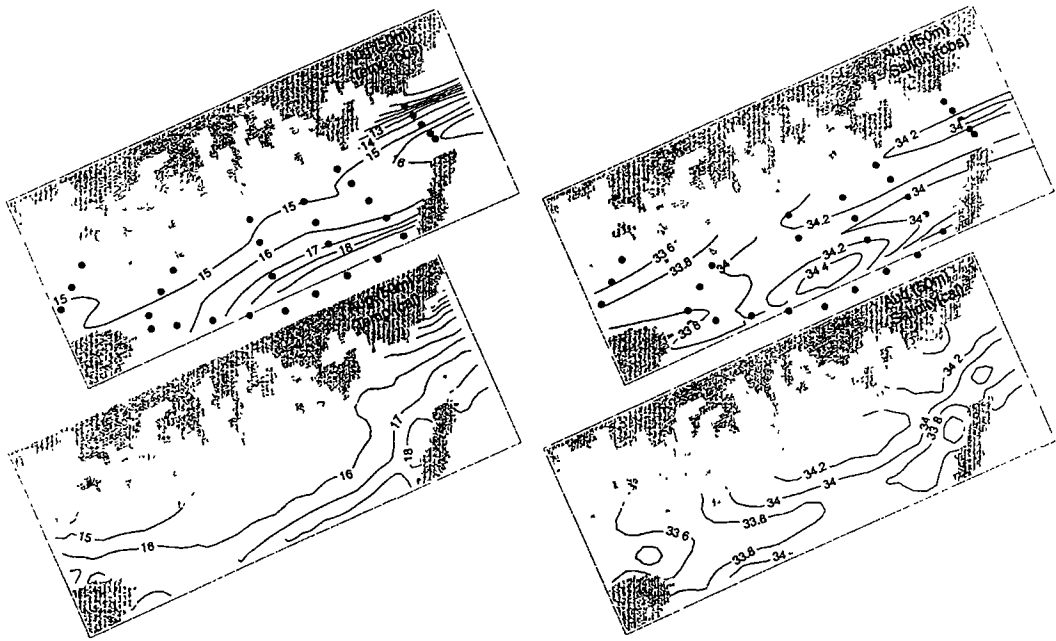


Fig. 1-49. Horizontal distribution of observed temperature and salinity (top panel), and computed 15-day averaged temperature and salinity (bottom panel) at 50 m depth in August for Case 5 in Table 1-9.

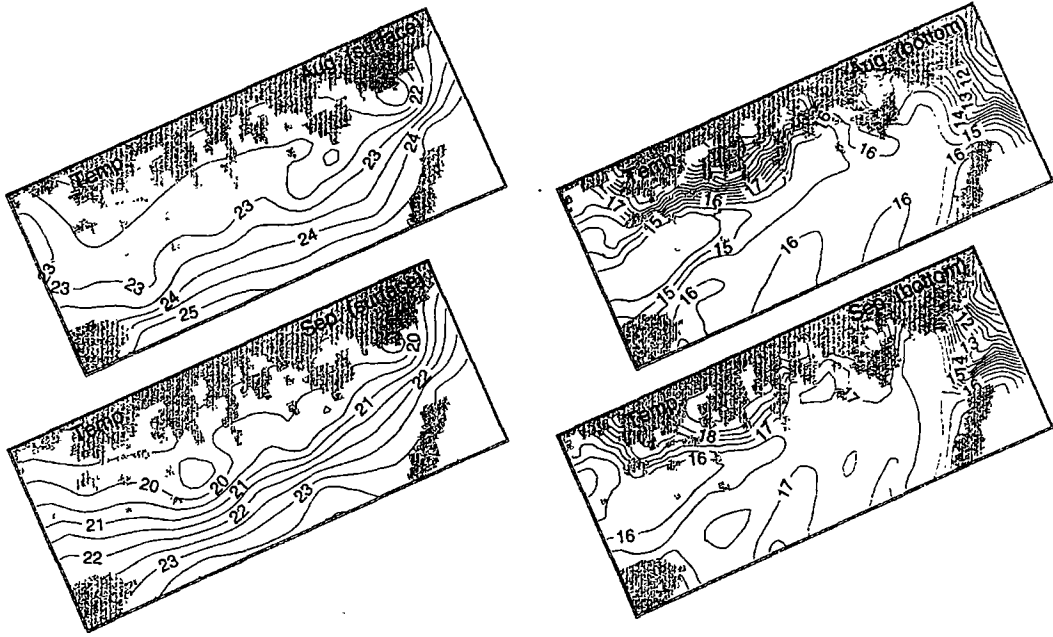


Fig. 1-50. Horizontal distribution of computed 15-day averaged temperature at surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 5 in Table 1-9.

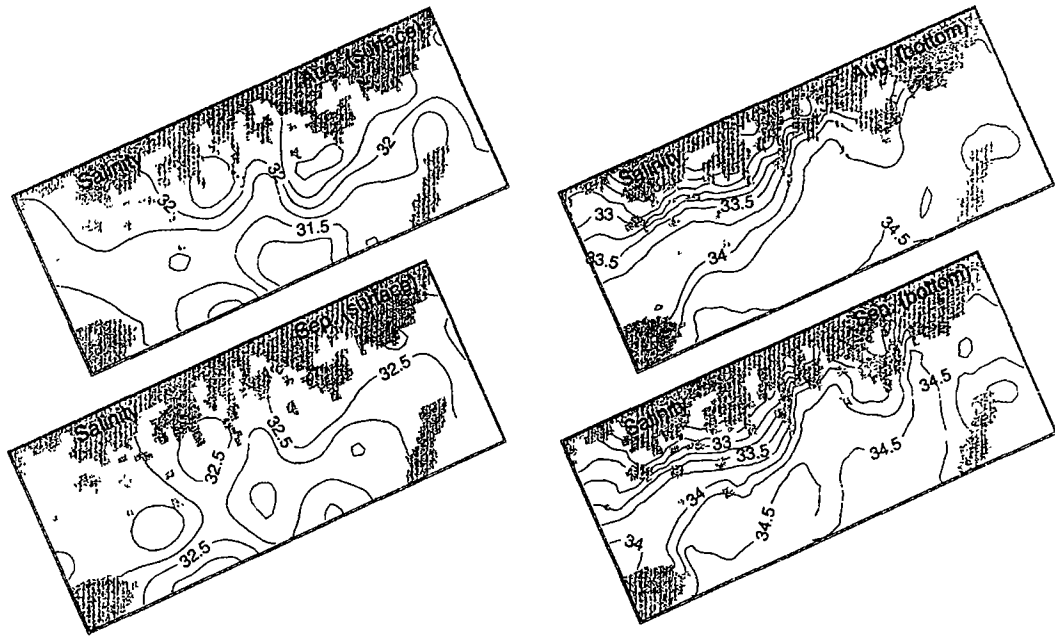


Fig. 1-51. Horizontal distribution of computed 15-day averaged salinity surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 5 in Table 1-9.



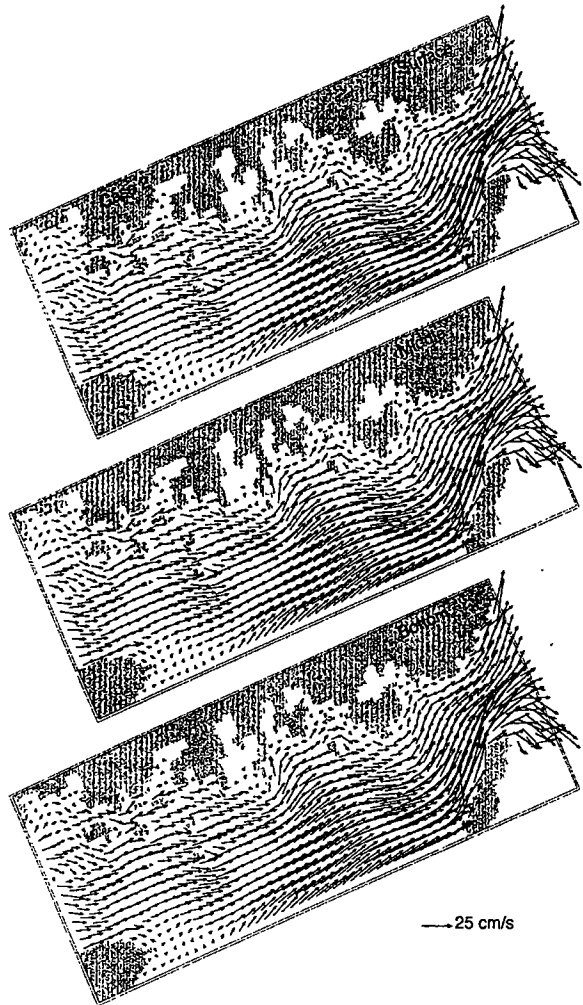


Fig. 1-52. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers (from top to bottom) for Case 2 in Table 1-9.

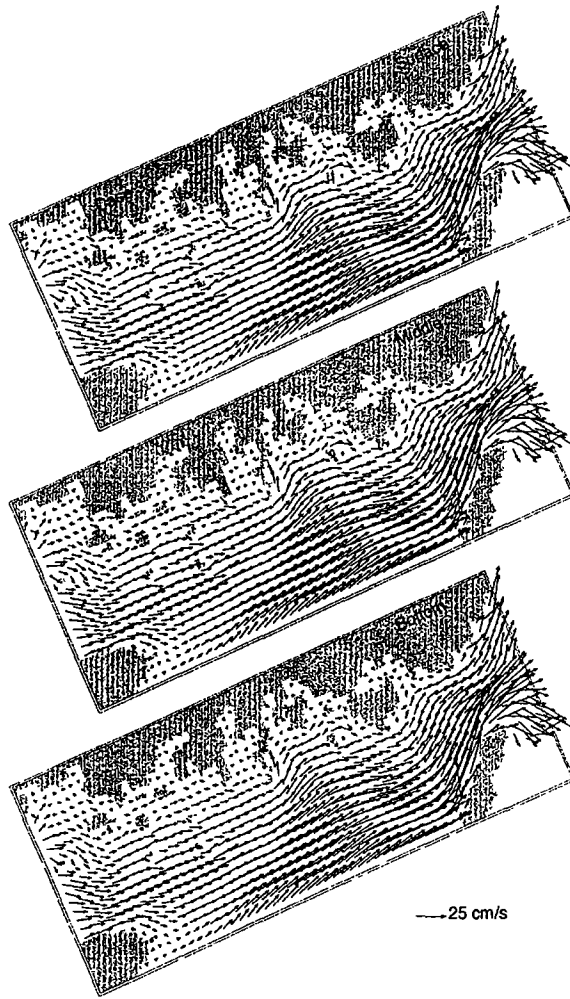


Fig. 1-53. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers (from top to bottom) for Case 3.

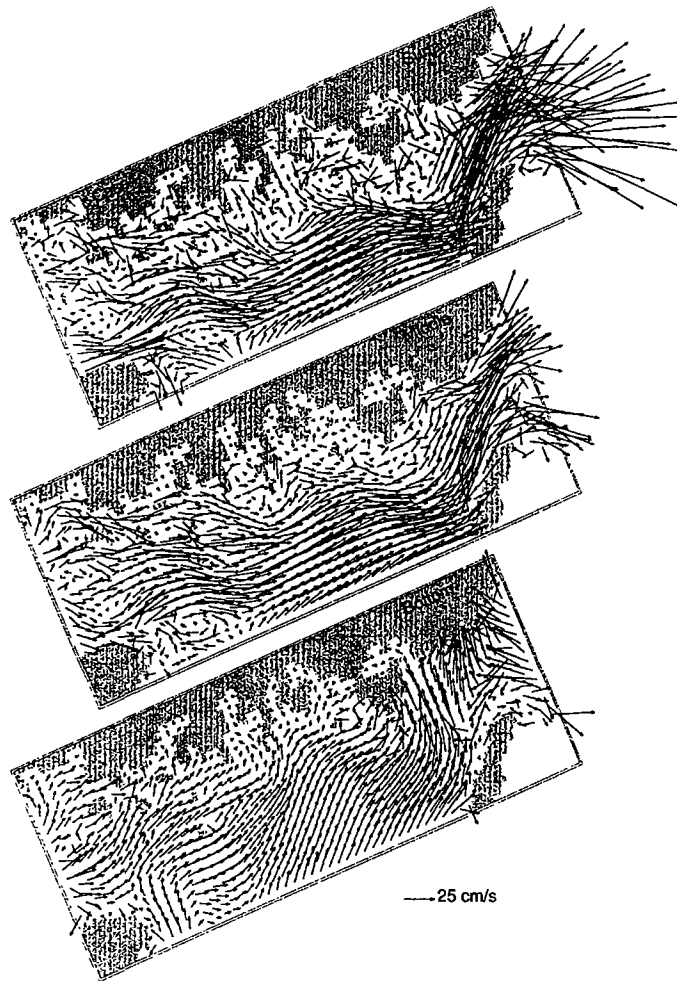


Fig. 1-54. Computed 15-day averaged currents at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers (from top to bottom) in September for Case 4.

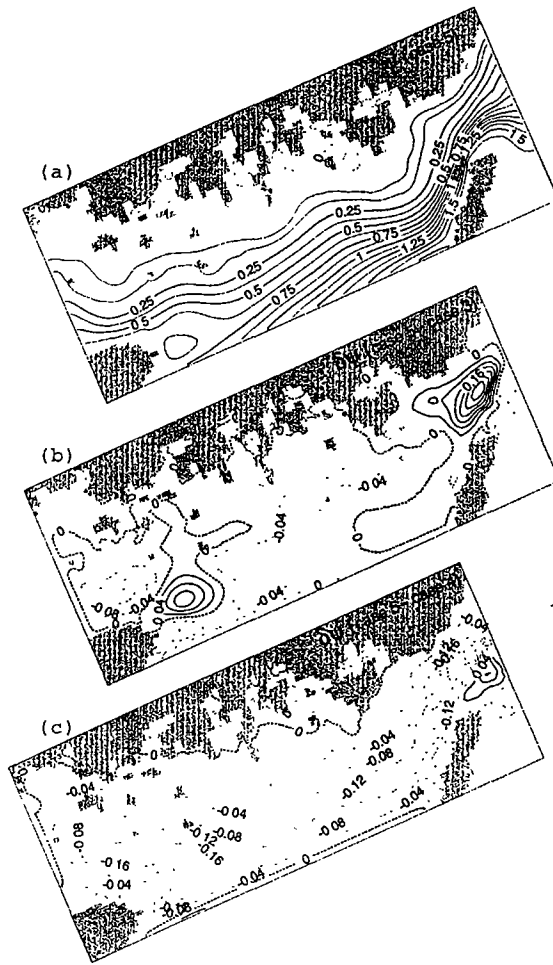


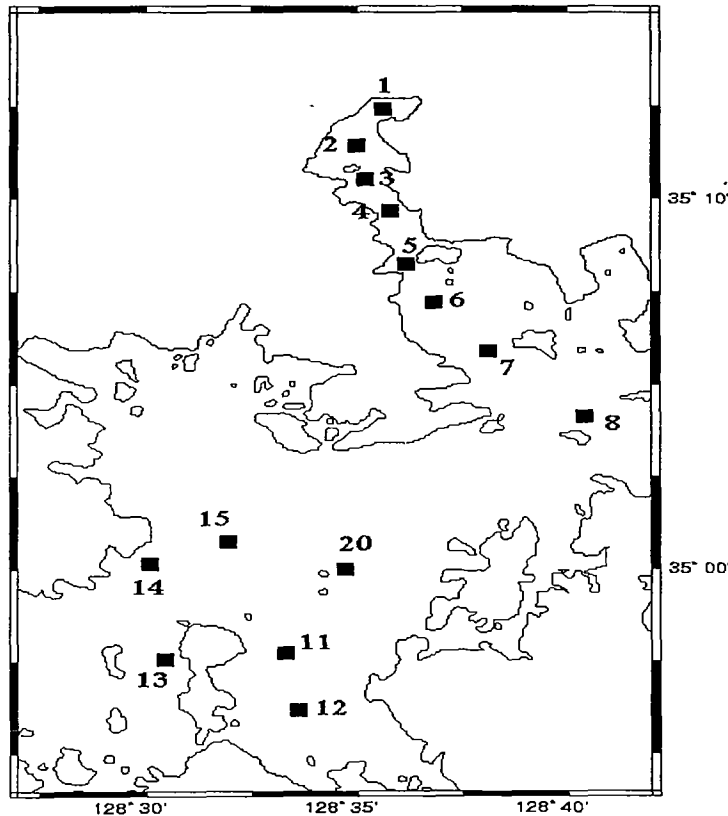
Fig. 1-55. Streamfunction field for (a) Case 5, and differences in the streamfunction field between (b) Case 5 and Case 3 and (c) Case 5 and Case 4 in Table 1-9.

## 제 2 절 혐기성 내만환경

### 1. 재료 및 방법

#### 1.1. 현장조사

현장조사는 1999년 8월 26~27일에 실시하였다. 1999년 8월의 현장조사는 Fig. 2-1에 나타낸 정점들에서 이루어졌다. 마산공단의 영향을 받는 곳에 St. 1, 마산내만의 중앙에 St. 2를 설정하였고 마산내만의 돌섬 남쪽에 St. 3을 정하였다. 마산내만에서 외만으로 가며 St. 4부터 St. 8까지를 조사하였는데 St. 5는 모개도 옆이고 St. 7은 부도 옆이었으며 St. 8은 마산수로 입구로 육수유입원으로부터 가장 멀리 떨어진 곳이었다.



진해만 서부해역에서는 가조도 동쪽에 St. 11, 12를 설정하였고 가조도 서쪽 양식장 밀집지역 가운데 St. 13을 정하였다. 또한 서부진해만 중앙부해역에 St. 14, 15, 20을 정하였다. 현장조사는 1999년 8월 26일에 마산내만에서 조사를 수행하였으며 8월 27일에 서부진해만 해역의 조사를 수행하였다. 현장조사는 한국해양연구소의 올림픽 5호를 사용하였으며

Fig. 2-1. Sampling stations of Chinhae Bay in August 1999.

화학분석을 위한 해수 시료채취는 5ℓ 니스킨 채수기를 이용하였고 해저퇴적물은 라퐁그랩을 사용하여 채취하였다.

## 1.2. 일반환경지수 및 영양염 분석

부유물질 측정을 위해서는 현장에서 해수 시료 500ml를 미리 건조기 속에서 건조시켜 무게를 측정한 유리섬유 여과지(Whatman GF/F)로 여과한 다음 여과지를 냉동시켜 실험실로 옮겼다. 염분은 시료를 실험실로 가져와 YEO-KAL 601MK Inductive Salinometer로 전도도를 측정한 후 다시 염분으로 환산하였다. 수소는 농도 (pH)는 Orion 720A pH meter를 사용하여 현장에서 측정하였다.

용존산소는 YSI model 59 DO meter를 사용하여 수직분포를 측정하였고, 표층, 중층, 저층의 용존산소량 측정을 위한 시료는 Niskin Sampler로 채수하여 고정시킨 후 실험실에서 Winkler법의 아지드화나트륨변법을 사용하여 측정하였다.

용존성 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염이온 등 영양염 분석은 Flow Injection Analyzer (Lachat)를 사용하여 측정하였다. 분석에 사용한 원리는 다음과 같다. 아질산염( $\text{NO}_2^-$ )은 시료에 sulfanilamide 용액과 (N-naphtyl) - ethylenediamine dihydrochloride를 더하여 발색시켰다. 질산염( $\text{NO}_3^-$ )은 시료를 카드뮴 컬럼에 통과시켜서 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염 분석방법과 같은 방법으로 발색시켰다. 인산염( $\text{PO}_4^{3-}$ )은 시료에 ammonium molybdate, potassium antimonyl tartrate와 황산의 혼합시약을 더하고 ascorbic acid로 환원시켜 발색시켰다. 규산염( $\text{Si(OH)}_4$ )은 시료에 ammonium molybdate를 더하여 silico-molybdate complex를 만든 다음 oxalic acid와 ascorbic acid를 더하여 발색시켰다(Parsons et al. 1984).

해저퇴적물중의 유기탄소(organic carbon) 및 유기질소(organic nitrogen)는 Byers et al.(1978)의 방법에 의거하여 Carlo Erba Eager 2000 Elemental Analyzer를 사용하여 측정하였다.

## 1.3. 중금속 분석

표층수는 미리 산으로 세척한 1 l 들이 폴리에틸렌 병을 Tygon tubing을 사용하여 PVC 막대에 매달아 채수하였다(Boyle et al., 1981). 저층수는 미리 산으로 세척한 Go-Flo 채수기를 이용하여 채취하였으며, 채취된 시료는 실험실로 옮겨서 미리 산으로 세척한 구경 0.4 $\mu\text{m}$ (직경 47mm)의 폴리카보네이트 막여과지로 여과하였다. 여과액에는 Teflon distilled HCl을 가하여 pH 2이하로 처리하였으며, 여과지는 건조하여 부유물질량을 측정한 후 분석 때까지 Petridish에 보관하였다.

용존성 중금속은 Danielsson et al.(1978)에 기초하여 DDDC-APDC-Freon 용매추출법으로 50배 농축한 후, 비블꽃 원자흡광분광기(Perkin Elmer 1100B with HGA700 & ASD70)를 이용하여 측정하였다.

입자성 중금속은 Labile과 Detrital metal로 분리하여 측정하였으며, 실험 방법은 다음과 같다. 먼저 Labile metal 분리를 위하여 부유물질이 포함된 여과지에 0.5M HCl 5ml를 가하여 약 3주 동안 둔 후 3000rpm으로 15분간 원심분리하여 상등액을 취하였다(Brügmann et al., 1992). Detrital metal 측정을 위하여 원심분리 후의 잔

류물을 60ml Teflon bomb(Savillex Co.)에 옮기고 Teflon distilled HNO<sub>3</sub> 2.5ml와 Ultrapure(Merck) HF 0.2ml를 가하여 뚜껑을 닫고, Hot plate위에서 120℃로 가열·분해하여(Windom and Smith, 1991), 산을 증발시킨 다음 1% HNO<sub>3</sub> 6ml를 가해 중금속을 녹였다. 이렇게 분리한 용액의 중금속은 ICP-MS(VG PQ II+)로 측정하였다. 실험에 사용한 모든 시약은 고순도의 것이거나 정제 후의 것을 사용하였다. 측정을 제외한 이상의 모든 전처리과정은 Class 100 수준의 Clean bench내에서 실시하였다. 그리고 중금속 분석자료의 정확도를 검증하기 위하여 표준물질도 함께 분석하였는데, 용존성 중금속은 NRC의 연안수 표준물질인 CASS-3, 입자성 중금속은 NRC의 해양퇴적물 표준물질인 MESS-2를 사용하였다.

해저퇴적물중의 중금속 분석은 퇴적물중의 중금속은 퇴적물을 동결 건조시킨 후 퇴적물에 섞여있는 패각들을 제거한 다음 200mesh 나일론체를 통과하도록 Agate mortar로 분쇄하였다. 분쇄된 시료 0.2g을 100ml PFA 테프론 비커에 넣고 Teflon distilled HF 6ml, Teflon distilled HNO<sub>3</sub> 3ml를 각각 가하여 2시간이상 실온에 둔 다음 Suprapur HClO<sub>4</sub> 2ml를 가한 후 테프론 뚜껑을 덮고 가열판에서 160℃로 가열하여 완전히 증발·건조시켰다. 이때 시료는 흰색 또는 옅은 노란색을 나타내게 되며, 그렇지 않은 시료에 대해서는 위과정을 한번 더 반복하여 시료를 완전히 용해시켰다. 여기에 1% HNO<sub>3</sub>를 가해 비커내의 잔사를 녹여 10ml로 맞추었다. 한편 퇴적물의 중금속분석 정확도를 검증하기 위하여 NRC의 Marine sediment 표준물질 MESS-2도 함께 처리 분석하였다. 이상과 같이 처리된 시료 용액은 1% HNO<sub>3</sub>를 가하여 총 희석배수 1,000으로 하여 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 등 8개 원소를 ICP-MS(VG Element, PQ II+)로 측정하였다.

## 2. 마산-진해만의 일반환경지수 분포와 혐기성환경

### 2.1. 일반환경지수 분포

조사기간중 표층수의 수온분포는 마산내만에서 25.0~25.7℃ 정도로 나타났고 진해만 서부해역에서는 이보다 낮은 23.7~24.4℃의 분포를 보였다(Table 2-1).

염분은 1999년 8월에 마산수로의 표층수에서 23.72~26.31psu로 낮았고 내만에서 외만으로 가며 점차 증가하는 경향이 나타났다. 육수유입의 영향을 크게 받는 St. 1의 표층수에서는 17.8psu 였고 St. 2에서는 표층, 3m층, 6m 층이 각각 24.0, 25.48, 27.15psu 였다. 수온약층이 나타나는 중층에서의 염분은 표층에 비해 2psu 정도 높았다. 저층수에서는 St. 3의 10m 층에서 30.05psu를 보였고 St. 5, 6, 7, 8 등에서 저층수의 염분이 31psu 이상이였다. 이 시기에는 혼합층에서 육수의 영향이 강하게 나타나는 것이 매년 기록되고 있는 현상이다. 서부 진해만해역에서는 가조도 동쪽의 St. 11과 12의 표층수중 염분이 각각 27.87, 27.49psu 였으며 저층에서는 각각 32.12, 31.67psu를 보였다.

Table 2-1. General water quality parameters in Masan-Chinhae Bay in August 1999.

	Depth (m)	Temp ℃	SAL psu	DO ml/ℓ	DO%	pH	SS mg/ℓ
1	0	25.3	17.80	3.49	67.4		11.55
2	0	25.0	24.05	5.02	99.8		8.40
2	3	24.3	25.48	2.54	50.3	8.90	
2	6	22.7	27.15	0.16	3.2	8.31	6.20
3	0	25.7	23.72	4.99	100.2	8.97	13.60
3	4	23.7	26.48	0.87	17.1	8.46	4.60
3	10	21.4	30.05	0.01	0.14	7.80	
4	0	25.2	24.93	10.54			13.30
4	4	23.7	26.65	3.06	60.3	8.67	10.20
4	9	21.3	29.51	0.48	9.3	7.93	6.50
5	0	25.5	25.01	12.50		9.07	6.80
5	6	23.1	27.95	1.82	35.7	8.17	2.70
5	15	21.5	31.45	2.38	46.3	7.92	10.60
6	0	25.6	25.95	11.06		8.90	3.80
6	14	21.4	31.73	1.73	33.8	7.99	19.00
7	0	25.4	26.69	10.79		8.76	10.90
7	12	21.5	31.52	1.74	33.9	7.96	1.70
8	0	25.1	26.31	11.07		8.74	3.00
8	19	20.4	32.00	4.02	77.1	8.00	
11	0	24	27.87	97.7	4.89	8.57	
11	4	23.6	27.90	48.5	2.45	8.44	2.2
11	20	19.5	32.12	1.4	0.07	7.78	1.1
12	0	24.2	27.49	99	4.95	8.56	3.57
12	4	23.1	28.07	30	1.52	8.38	2.8
12	19	19.7	31.67	2	0.11	7.78	6.33
13	0	24.3	26.29	96.1	4.83	8.56	2.4
13	4	24.4	27.31	72.2	3.60	8.36	1.5
13	13	20.7	31.06	2.2	0.11	7.83	2.37
14	0	24.4	27.23	165.3	8.25	8.63	
14	4	23.6	27.90	57.2	2.88	8.41	0.27
14	20	19.6	32.19	2.4	0.13	7.77	
15	0	24.1	26.90	170.9	8.59	8.71	0.65
15	6	23	28.263	45.9	2.33	8.33	
15	21	20.2	32.08	11.7	0.61	7.8	0.4
20	0	23.7	27.49	176.1	8.89	8.56	4.35
20	6	22.4	28.80	42.7	2.19	8.18	2.8
20	22	19.7	32.41		0.29	7.75	0.73

서부 진해만해역의 pH는 표층수에서는 식물성플랑크톤의 광합성작용이 활발하여 8.56~8.71의 높은 값을 보였으며 저층에서는 유기물질의 분해에 의해 7.75~7.83의 낮은 값을 보였다(Table 2-1). 마산내만의 총부유물질은 마산내만 가장안쪽의 St. 1



에서 표층수중 11.55mg/ℓ 였고 St. 3, 4의 표층수에서 각각 13.60, 13.30mg/ℓ 로 비교적 높은 값을 보였다. St. 5에서는 표층수의 총부유물질이 6.80mg/ℓ, 6m층이 2.70mg/ℓ 인데 비해 15m층이 10.60mg/ℓ로 높게 나타났다. St. 6의 19m 층에서도 총부유물질이 19.00mg/ℓ의 높은 값을 보였다. 서부진해만 해역의 경우 총부유물질은 St. 12, 20의 표층에서 각각 3.57, 4.35mg/ℓ 였다.

질산염은 St. 1의 표층수에서 육수유입의 영향으로 141.5 $\mu$ M로 매우 높았으며 그 영향이 St. 2, 3까지 크게 미쳐 표층수중의 질산염이 각각 30.9, 14.6 $\mu$ M 였다(Table 2-2). 그러나 돌섬 바깥쪽 마산수로에서는 질산염의 농도가 상대적으로 낮아 St. 4의 표층에서 1.39 $\mu$ M이었고 그 바깥쪽 정점들의 표층수에서는 1 $\mu$ M 이하에 불과하였다. St. 2의 3m 층, 6m 층에서는 질산염이 각각 12.83, 11.88 $\mu$ M로 높은 편이었으나 St. 3에서는 4m, 10m 층이 각각 9.25, 0.94 $\mu$ M 였다. St. 3의 저층수는 용존산소가 소모된 혐기성환경을 나타내었고 이에 따라 denitrification에 의한 미생물의 유기물 산화가 일어난다고 보여진다.

10m층의 해수에 중층처럼 9.25 $\mu$ M의 질산염이 초기에 있었다고 가정하고 표층으로 부터의 질산염확산이 없었다면 소모된 질산염은 8.3 $\mu$ M이다. 1986년의 마산내만 조사에서 ETS 활동도에 의해 추정된 돌섬 주변해역 저층수의 denitrification rate은 3.32 $\mu$ gN/ℓ/day 였다(해양연구소 1987). 금번 조사에서는 ETS 활동도를 측정하지 않았지만 이 비율을 그대로 St. 3의 저층수에 적용하면 탈질소반응이 조사일로부터 약 40일 전부터 시작되었다고 추정할 수 있다. 그러나 수평적인 질소원 교환, 상부 혼합층으로 부터의 질산염 확산 등이 있기 때문에 실제로는 40일전보다 훨씬 이전인 5~6월부터 탈질소반응이 시작되었을 것이다.

St. 5, 6, 7, 8등 바깥쪽 해역에서는 저층수중의 질산염이 3.78~7.75 $\mu$ M로 표층수에 비해 높았다. 서부진해만 해역에서는 St. 20을 제외한 정점들의 표층수중 질산염 농도가 0.37~0.47 $\mu$ M로 매우 낮은 편이었다. 저층수중의 질산염은 St. 11, 12, 13에서 각각 2.92, 9.49, 3.25 $\mu$ M 였다. St. 14, 15의 저층수에서는 질산염이 1.14, 0.50 $\mu$ M 으로 낮은 편이었다.

아질산염은 마산내만 St. 1의 표층에서 10.58 $\mu$ M 로 육수유입의 강한 영향을 나타내었다. 아질산염은 St. 2, 3의 표층에서도 4.94, 3.84 $\mu$ M 였고 St. 5에서 바깥쪽으로는 0.55~0.63 $\mu$ M 이었다. St. 3의 저층수에서는 아질산염이 0.68 $\mu$ M로 중층이나 주변 정점에서 보다 훨씬 낮아 역시 denitrification에 의한 질산염의 제거가 나타나는 것이라고 볼 수 있다.

인산염은 조사해역의 표층수중에서 비교적 낮은 농도를 나타내 육수유입의 영향이 뚜렷이 나타나지 않았다. 마산내만 안쪽의 St. 1, 2에서는 표층수중 인산염의 농도가 0.52, 0.25 $\mu$ M에 불과하였다. 그 바깥쪽의 St. 3, 4에서는 표층수중 인산염이 각각 0.27, 0.26 $\mu$ M 이었다. 부도부근에 위치한 St. 6, 7의 표층수중 인산염은 마산내만 보다 훨씬 높은 1.59, 2.71 $\mu$ M 로 인산염의 공급원이 다양함을 시사한다. 저층수에서는 인산염이 높아 St. 3, 4에서 4.89, 3.53 $\mu$ M을 나타냈다. 이 같은 높은 인산염 농도는 용존산소가 매우 낮고 pH가 낮은 저층수에서는 퇴적물로부터 인산

염이 용출되기 때문이라고 알려져 있다.

Table 2-2. Nutrients in Masan-Chinhae Bay in August 1999.

St.	depth (m)	PO <sub>4</sub> ( $\mu$ M)	NO <sub>2</sub> ( $\mu$ M)	NO <sub>3</sub> ( $\mu$ M)	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu$ M)
1	0	0.52	10.58	141.51	29.19
2	0	0.25	4.94	30.90	8.87
2	3	1.01	2.46	12.83	13.54
2	6	1.68	2.14	11.88	16.34
3	0	0.27	3.84	14.63	7.67
3	4	1.56	2.38	9.25	14.10
3	10	4.89	0.68	0.94	37.95
4	0	0.26	1.64	1.39	7.61
4	4	1.26	1.37	2.41	9.32
4	9	3.53	1.36	2.54	28.55
5	0	0.49	0.63	0.43	8.54
5	6	2.38	2.01	5.12	16.31
5	15	1.62	1.77	3.78	16.90
6	0	1.59	0.55	0.37	7.56
6	14	1.95	3.31	7.54	23.25
7	0	2.71	0.56	0.38	7.92
7	12	1.99	3.34	7.75	24.91
8	0	0.40	0.58	0.53	13.21
8	19	1.09	2.33	6.21	15.72
11	0	0.37	0.62	0.44	9.13
11	4	0.38	0.59	0.38	9.40
11	20	3.12	1.95	2.92	42.83
12	0	0.46	0.56	0.43	9.41
12	4	0.36	0.57	0.39	9.93
12	19	2.21	1.20	9.49	30.21
13	0	0.33	0.58	0.47	10.75
13	4	0.33	0.55	0.46	10.93
13	13	3.47	1.54	3.25	41.06
14	0	0.39	0.56	0.40	9.40
14	4	0.47	0.64	0.51	10.27
14	20	4.09	0.75	1.14	57.44
15	0	0.40	0.58	0.37	9.62
15	6	0.64	0.67	0.64	10.17
15	21	3.30	0.69	0.5	48.14
20	0	0.52	1.08	2.25	13.12
20	6	0.59	1.28	3.69	12.22
20	22	3.07	1.15	2.45	48.26

서부 진해만 해역에서는 표층수주의 인산염이  $0.33 \sim 0.52 \mu\text{M}$  로 마산내만 해역과 비슷하였다. 저층수에서는 빈산소 현상으로 인산염의 농도가 매우 높게 나타나는데 St. 11의 20m층, St. 13의 13m 층에서 각각  $3.12, 3.47 \mu\text{M}$  이었다. St. 14, 15, 20은 깊이가 20m를 넘는 곳으로 모두 저층수에서 빈산소 현상이 나타났는데 인산염의 농도는 각각  $4.09, 3.30, 3.07 \mu\text{M}$  이었다. 저층수중의 이러한 풍부한 인산염은 수층의 교란이 일어날시 표층수에 공급되어 식물성플랑크톤의 활발한 증식을 초래하기도 한다.

규산염은 마산내만의 St. 1에서  $29.19 \mu\text{M}$  였으며 St. 2, 3에서 각각  $8.87, 7.67 \mu\text{M}$  이었다. St. 3의 저층수에서는  $37.95 \mu\text{M}$ 의 높은 농도가 나타났으며 St. 4의 저층수에서도  $28.55 \mu\text{M}$  였다. 진해만 서부에서는 표층수중의 규산염이  $9.13 \sim 13.13 \mu\text{M}$  의 분포를 보였다. 저층수중의 규산염 농도는 매우 높아 St. 14의 20m층에서  $57.44 \mu\text{M}$  였으며 St. 11, 13, 15, 20에서도  $40 \mu\text{M}$  이상이였다.

## 2.2. 용존산소의 수직분포

용존산소의 주요정점에서의 수직분포는 Fig. 2-2에 나타내었다.

St. 2에서는 용존산소의 양이 표층의  $4.73\text{ml}/\ell$  에서부터 5m층의  $0.29\text{ml}/\ell$  에 이르기 까지 깊이에 따라 가파르게 감소하였다. 수온약층은 3-4m 층에 분포하며 그 아래에서 낮은 용존산소의 분포를 보였다. 6m층에서는 Winkler 방법으로 측정된 DO가 각각  $0.16\text{ml}/\ell$  이었으며 7m층에서는 DO meter에 의해  $0.08\text{ml}/\ell$  가 측정되었다. 이 정점에서는 질산염 농도가 3m 층에서  $12.83 \mu\text{M}$ , 6m층에서  $11.88 \mu\text{M}$  로 나타나 탈질소 반응은 시작되지 않은 것으로 보인다. St. 3에서는 표층, 2m층, 4m층의 DO가 각각  $4.99, 2.33, 0.87\text{ml}/\ell$  로 깊이에 따라 급격한 감소를 보였다. 6m층에서는 Winkler 방법에 의한 DO 농도가 검출한계로 무산소 현상을 나타냈다. 본 조사기간중 마산내만에서 완전한 무산소환경을 나타낸 곳은 St. 3 뿐이었다. 앞에서 언급하였듯이 이 정점에서는 탈질소반응이 많이 진행되었다.

St. 4에서 St. 8까지는 표층의 DO가  $10\text{ml}/\ell$  이상으로 식물성플랑크톤의 활발한 광합성에 의한 용존산소의 과포화 현상이 나타났다. St. 5에서는 8, 10m층의 DO가 각각  $0.61, 0.42\text{ml}/\ell$  로 빈산소층을 보였으나 12m 아래쪽으로는  $2\text{ml}/\ell$  내외의 용존산소 분포를 보였다. St. 6에서도 8m층에서  $0.80\text{ml}/\ell$  로 oxygen minimum을 보이며 10m층 아래는  $2\text{ml}/\ell$  내외의 용존산소를 포함하였다. St. 8에서는 DO가 8m에서 10m층으로 가며  $3.16$ 에서  $2.56\text{ml}/\ell$  로 감소하는데 이는 수온이  $0.5^\circ\text{C}$  로 감소하는 수온약층과 일치하였다.

서부 진해만 해역에서는 St. 11의 경우 표층, 2m층의 DO가 각각  $4.73, 4.32\text{ml}/\ell$  였으며 18m층에서는 검출한계 값으로 무산소 현상을 나타냈다. St. 13에서는 10m층에서 12m층으로 가며 수온이  $1.3^\circ\text{C}$  감소하고 DO는  $1.42$ 에서  $0.13\text{ml}/\ell$  로 감소하였다. St. 14의 18m층, St. 20의 20m층은 DO가 각각  $0.13, 0.29\text{ml}/\ell$  로 서부 진해만 해역의 경우 해저층 가까이에서 용존산소가 거의 소비되었음을 나타냈는데 탈질소반응이 시작된 증거는 없었다.

해수중의 용존산소는 비보전성 성분중 가장 널리 연구된 것이며 그 분포는 생물의 호흡에 의한 소비, 광합성에 의한 생산, 해수-대기면의 교환, 물리적인 작용에 의한 교환 등에 의해 변화한다. 생물의 호흡에 의한 산소소비는 매우 낮은 비율로 진행되고 측정이 힘들지만 이는 해양생태계에서 유기물질의 합성 및 분해과정을 이해하기 위해 필수적으로 알아야 할 요소이다.

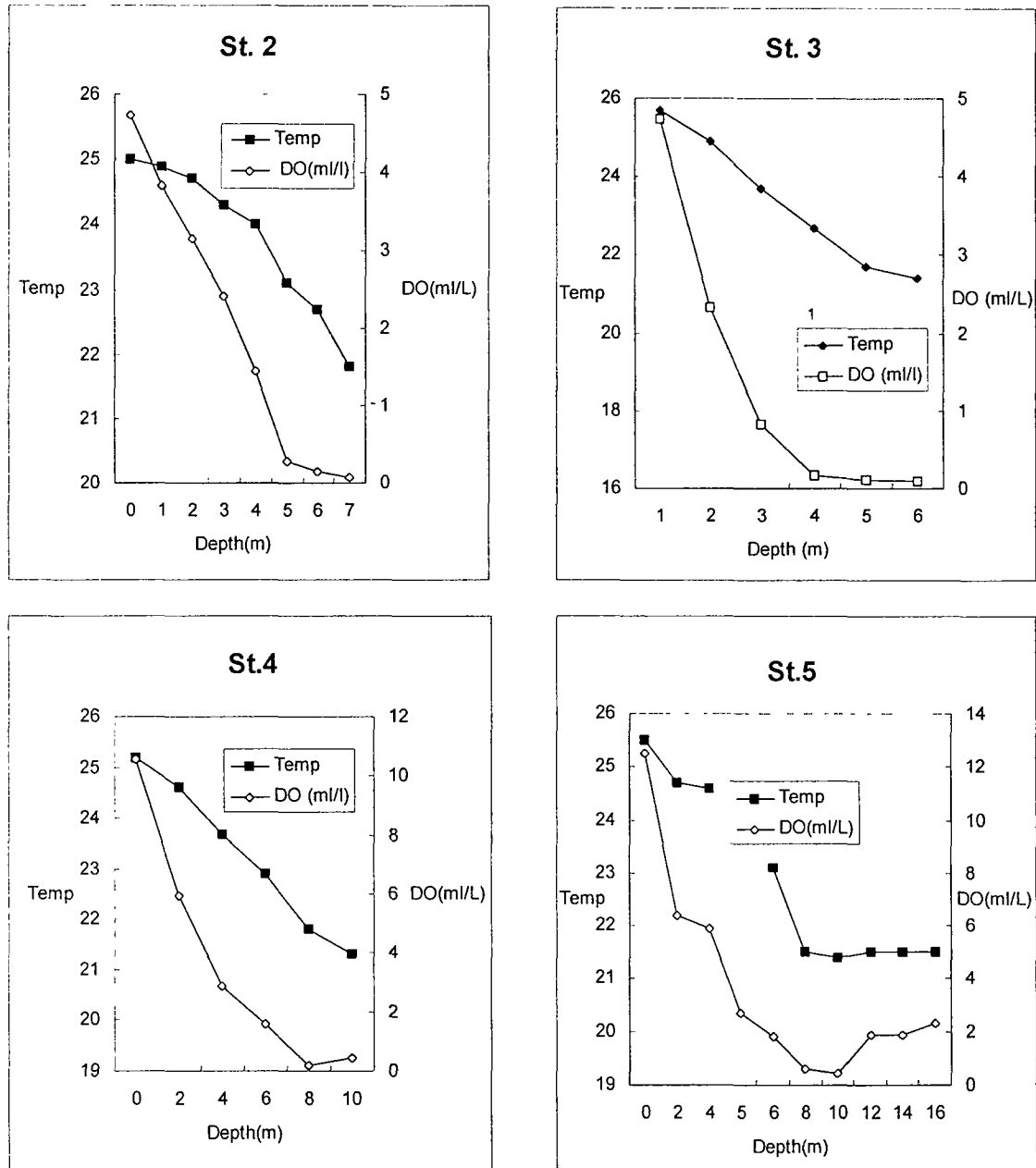


Fig. 2-2. Vertical profile of temperature and dissolved oxygen in Masan-Chinhae Bay.

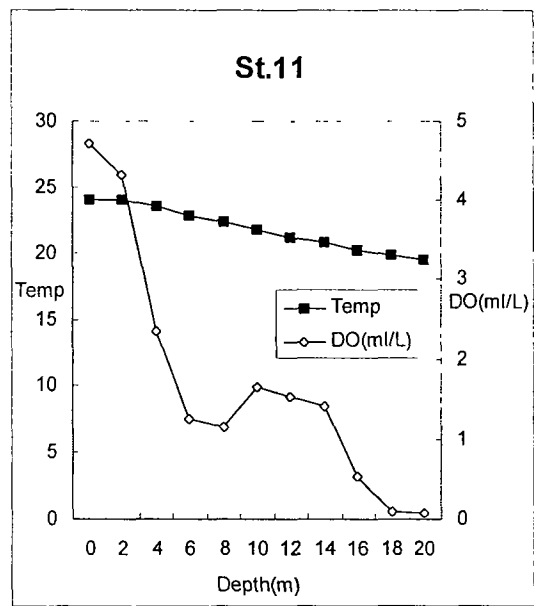
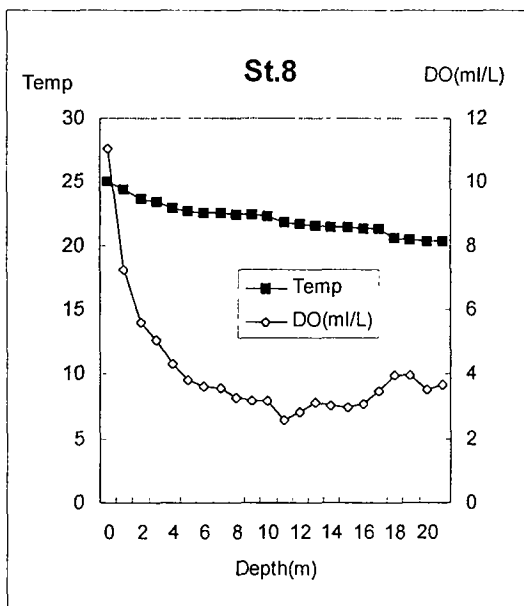
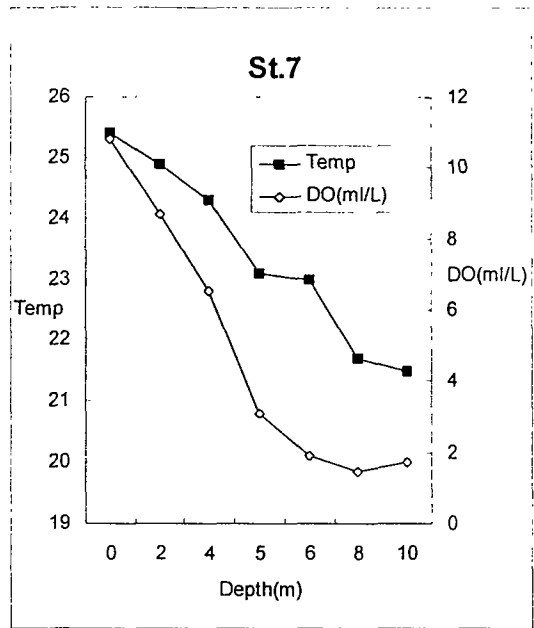
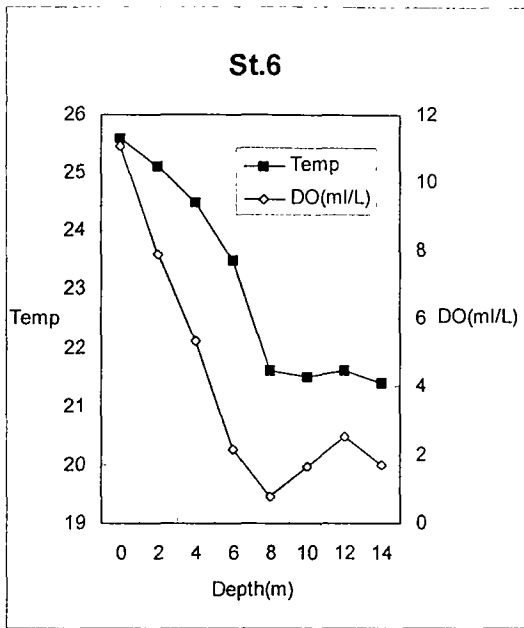


Fig. 2-2. (continued).

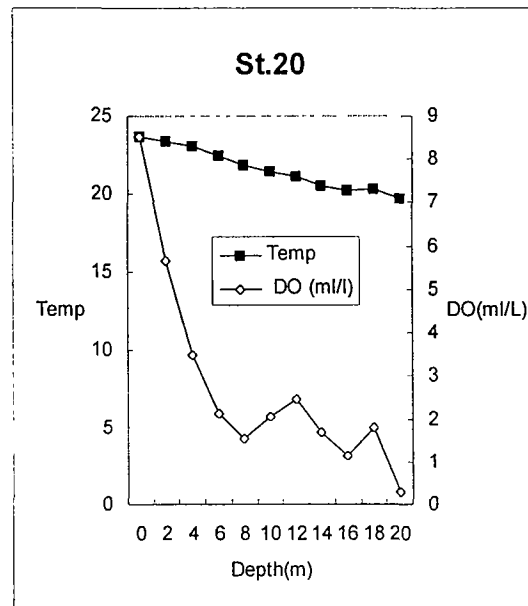
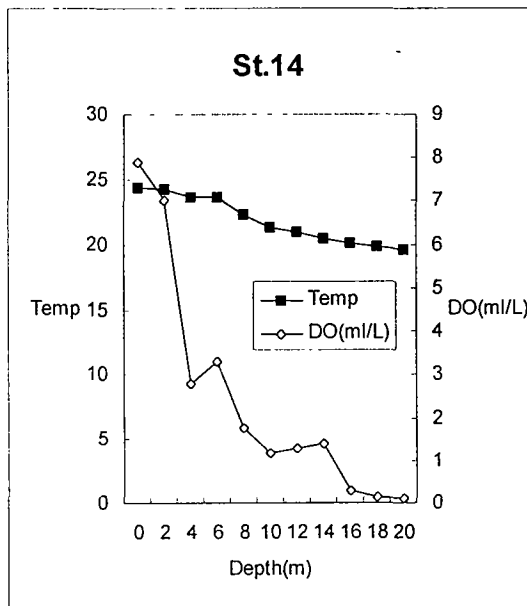
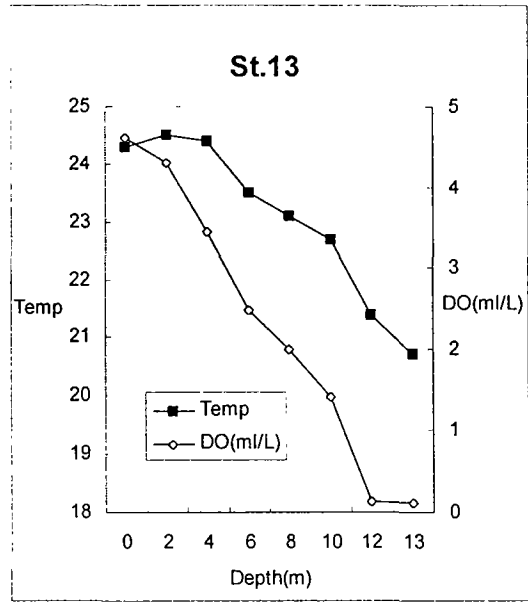
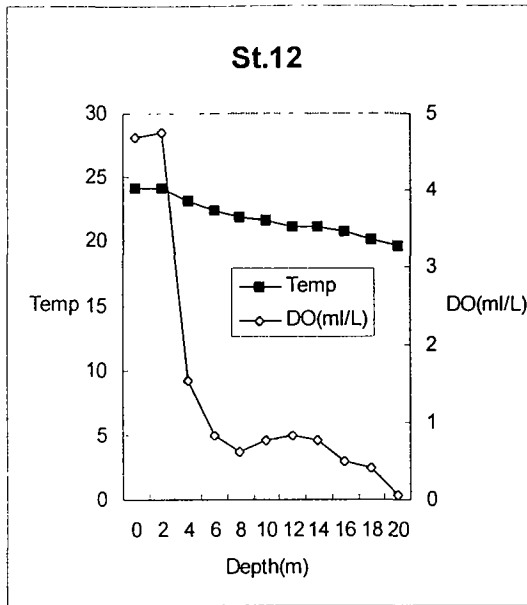


Fig. 2-2. (continued).

진해만은 남북방향의 길이가 약 25km 동서방향의 폭이 약 25km정도로 매우 복잡한 지형의 형태를 이루고 있는 내만이며 작은 여러 내만을 모두 포함하는 명칭이다. 지형적 조건에 크게 영향을 받는 곳은 마산수로 중앙부분의 깊은 골짜기를 이룬 곳으로 해수의 순환이 원활하지 못하여 무산소층이 매년 발생한다. 무산소층이 형성되는 진해만에서는 하계에 질산염의 농도가 0에 가깝다 (해양연구소 1983). 이는 유기물들을 분해시키는 미생물들이 산화를 위해 질산염의 산소를 소비하기 때문에 일어나는 denitrification의 결과이다. 질산염이 거의 소모되면 황산염에서 산소를 소비하는 sulphate reduction이 일어나며 H<sub>2</sub>S를 발생시키고 이는 금속과 반응하여 표층퇴적물에 까지 검은 황화합물의 침전이 나타난다.

어느 환경내로의 산소 공급이 산소의 소비를 따라가지 못하면 산소이외의 것을 사용하는 생물에 의해 유기물이 분해되는데 이를 혐기성환경 또는 환원환경이라고 한다. 이 환경은 퇴적물뿐 아니라 유기물의 분해가 많고 산소의 공급이 잘 이루어지지 않는 저층수에서도 일어난다. 쉽게 환원되고 유기물을 쉽게 산화시키는 것은 pE가 큰 것부터 순서대로 인데 대체로 질산염, 망간산화물, 3가의 철, 황산, 탄산의 순서대로 환원된다. +4가의 이산화망간(MnO<sub>2</sub>)은 질산과 같은 정도로 쉽게 환원되는데 철, 망간 등의 환원은 비생물적 반응으로 진행된다. 해양의 환원환경을 대표하는 것은 황화수소의 발생이다.

1983년 마산만, 진해만 서부해역중 용존산소량이 2ml/ℓ 이하로 hypoxic 조건이었던 해역은 266km<sup>2</sup>으로 연구대상해역 총 497 km<sup>2</sup>중 반 이상을 차지했다(Yang and Hong 1988). 해저퇴적물중의 organic carbon은 1983년 마산내만에서 평균 25mg/g 이었고 진해만 서부해역에서는 평균 20mg/g 정도이나 고현성만, 원문만 등에서 30mg/g을 초과하였으며 이 곳은 용존산소가 저층에서 아주 낮았던 해역과 일치하였다.

1979~1983년 사이의 조사결과를 보면 마산만의 돌섬주변과 마산수로에서 매년 무산소층이 발생한다(해양연구소 1981, 1982, 1983). 대개의 경우 4월부터 저층의 산소가 부족해지기 시작하지만 완전한 용존산소의 고갈은 6-8월에 나타난다(해양연구소 1983). 1981년 마산수로의 정점에서 월별 저층수의 용존산소농도 변화로부터 산소소비율을 계산해보면 0.068 mlO<sub>2</sub>/ℓ/day였다(해양연구소 1981). 그러나 표층수 중의 용존산소가 계속 수은약층 아래로 공급되기 때문에 실제 유기물의 분해에 의한 산소소비율은 이보다 더 클 것이다.

지금까지 호흡에 의한 산소소비율(respiratory oxygen consumption rate)은 여러 가지 방법에 의해 측정되었다. 60년대부터는 호흡에 사용되는 효소의 활동도를 측정함으로써 간접적으로 산소소비율을 측정하는 방법이 시작되었고(Curl and Sandberg, 1961) 퇴적물의 산소소비율을 측정하기 위해 Rowe et al.(1975), Christensen(1983) 등 많은 연구가 있어왔다. 산소소비율의 직접측정에는 많은 어려움이 따르기 때문에 생물의 Electron Transport System (ETS) 활동도의 측정에 의해 호흡에 의한 산소소비율 (respiratory oxygen consumption)을 간접적으

로 계산하는 방법이 널리 사용되었다(Christensen and Packard. 1976 ; Kenner and Ahmed 1975 ; Packard 1985). ETS 활동도로 산소소비율을 측정하는 연구는 국내에서도 마산만등 폐쇄성 내만해역에서 시도된바 있다(해양연구소 1987, 1990).

저층수의 용존산소 농도는 식물성,동물성플랑크톤 및 어류의 호흡에 의한 산소소비, 박테리아의 유기물 분해에 사용되는 산소소비, 저서생물의 물질대사에 의한 산소소비, 표층수로 부터의 공급 등에 의하여 변하게 된다. 표층수에서 저층수로의 용존산소확산은 다음과 같은 Fick의 확산법칙을 사용 하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Z} (K_z \frac{\partial O_2}{\partial Z})$$

$K_z$ 의 값은 주어진 물리조건에 따라 변하며 측정하기 어려운데 King and Devol(1979)은 0.05 ~ 1.10 cm<sup>2</sup>/sec를 보고한 바 있다.

본 조사에서 St. 3의 경우  $K_z$ 를 0.1cm<sup>2</sup>/sec 로 잡고 용존산소량의 수직분포로부터 저층수(두께 5m 일때)로의 용존산소 확산량을 계산해보면 648mlO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day가 된다. 이 정점에서 저층수의 무산소환경이 계속 유지되기 위해서는 이 보다 높은 저층수, 퇴적물중의 산소소비율이 필요하다. 이러한 계산은 저층수괴간의 수평적인 이동·확산을 감안하지 않은 것으로 실제로는 더 높은 산소소비율이 필요할 것이다. 참고로 1986년의 경우를보면 마산내만 돌섬옆의 정점에서 ETS활동도를 이용하여 측정한 저층수에서의 생물 호흡에 의한 용존산소 소비율이 442mlO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day였고 퇴적물에 의한 산소소비율은 138~197mlO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day였다(해양연구소 1987).

국립수산진흥원의 해양오염측정망 자료에 의하면 마산내만 돌섬 주변의 저층수중 용존산소량은 1998년 5월과 8월 사이에 3.0에서 0.18ml/ℓ 로 감소하였다(국립수산진흥원 1999). 이로부터 저층수중 산소소비율을 계산하면 0.031mlO<sub>2</sub>/ℓ/day 정도이다. 이는 앞에 언급한 1981년 같은 지점의 산소소비율에 비해 낮은 값이다. 1998년의 산소소비율을 두께 5m의 저층수에 대해 계산하면 155mlO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day이다. 그러나 표층으로 부터의 용존산소 확산과 수평적인 이동·확산을 고려하면 실제 산소소비율은 이보다 훨씬 클 것으로 보인다. 1989년에는 돌섬 인근 한 지점에서 저층수중 1320mlO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/day의 산소소비율이 측정되기도 하였다(해양연구소 1990).

국립수산진흥원의 해양오염측정망 자료에서 1998년 5월과 8월 사이 저층수중용존산소 농도의 급격한 감소를 보인 곳은 여자만, 통영, 행암만의 정점들이었다(국립수산진흥원 1999). 이들 저층의 저층수중 용존산소 소비율은 높게는 0.03mlO<sub>2</sub>/ℓ/day로 추산할 수 있어 마산내만과 비슷하였으나 이들 해역에서는 1998년 하계에 무산소층이 발견되지 않았다.



### 3. 마산-진해만의 중금속 원소 거동

#### 3.1. 용존성 중금속

용존성 중금속의 농도는 Table 2-3 에 정리하였다. 표층수의 경우 St. 2, 3, 4, 5 에서 Cd는 각각 0.030, 0.020, 0.019, 0.013 $\mu\text{g}/\ell$  로 마산만 안쪽에서 바깥쪽으로 가며 점차 감소하였다. Zn은 이들 정점에서 3.48, 1.58, 0.84, 1.47 $\mu\text{g}/\ell$  의 분포를 보여 마산내만으로 유입되는 중금속 오염원의 영향이 만 바깥쪽으로 가며 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나 Pb의 경우 안쪽에서부터 0.018, 0.020, 0.044, 0.069 $\mu\text{g}/\ell$  로 바깥쪽으로 가며 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2-3).

Table 2-3. Dissolved heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999 ( $\mu\text{g}/\ell$ ).

St.	Depth (m)	Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
2	0	0.030	0.003	0.78	1.22	0.018	3.48
2	6	0.012	0.011	0.71	0.55	0.080	1.55
3	0	0.020	0.032	0.80	0.84	0.020	1.58
3	10	0.005	0.019	0.10	0.30	0.010	0.42
4	0	0.019	0.005	0.60	0.54	0.044	0.84
4	9	0.006	0.017	0.22	0.37	0.036	1.37
5	0	0.013	0.006	0.68	0.61	0.069	1.47
5	15	0.007	0.013	0.16	0.27	0.030	0.71
11	0	0.006	0.003	0.38	0.27	0.038	0.21
11	20	0.005	0.042	0.21	0.39	0.029	0.16
12	0	0.013	0.008	0.35	0.22	0.012	0.22
12	19	0.009	0.033	0.26	0.38	0.008	0.43
13	0	0.008	0.007	0.60	0.34	0.042	0.20
13	13	0.006	0.043	0.26	0.27	0.033	0.26
20	0	0.017	0.014	0.35	0.34	0.016	0.80
20	22	0.006	0.157	0.98	0.40	0.005	1.03

저층수층의 농도는 마산내만의 경우 표층수보다 대체로 낮은 농도를 보였다. 용존산소량이 극히 적은 St. 3의 저층에서 Cd가 0.005 $\mu\text{g}/\ell$ , Cu가 0.10 $\mu\text{g}/\ell$ , Ni가 0.30 $\mu\text{g}/\ell$ , Pb가 0.010 $\mu\text{g}/\ell$ , Zn이 0.42 $\mu\text{g}/\ell$  등으로 주변 정점들의 저층수에서 보다 현저히 낮은 값을 보였다. 그러나 Co는 저층수에서 표층보다 높은 값을 보였다.

표층과 저층간의 용존성 중금속농도를 보면 표층보다 용존산소가 매우 낮은 저층

에서 Co는 높고, Cd, Cu(St. 2제외), Pb(St. 1제외)는 낮았으며, Zn은 일부 정점에서 낮게 나타났다. 그러나 본 연구에서는 저층에 적은 양이지만 용존산소가 존재하고 있으며, HS<sup>-</sup>나 S<sup>2-</sup>의 존재 여부가 파악되지 않아서 이들 금속이 황화물 형태로 입자화 하였는지는 명확하지 않다.

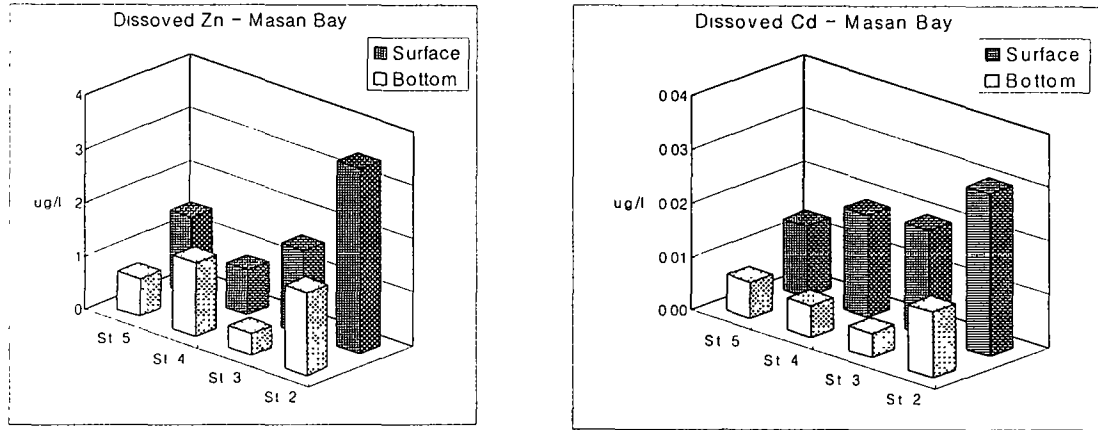


Fig. 2-3. Dissolved Cd and Zn in Masan Bay.

지금까지 알려진 바로는 Cd, Cu, Ni 처럼 영양염과 같은 거동을 보이는 중금속은 저층수에 산소가 풍부할때는 퇴적물로부터 용출되고 혐기성인 경우는 퇴적물에 달라붙는다고 한다(Bruland and Franks 1983, Westerlund et al. 1986). Kremling et al. (1997)은 발트해의 Kiel Bight와 Mecklenburg Bight에서 중금속 원소의 거동을 조사하여 하계에는 저층수중의 일부 용존성 중금속이 동계에 비해 증가하는 것이 관측되었는데 이는 용존산소가 낮거나 혐기성인 환경에서 퇴적물로부터 저층수로 용출된 중금속이 많은 Co, Fe, Mn의 경우가 해당된다고 한다. Balzer(1982), Kremling(1983) 등도 Co, Fe, Mn 등은 상층 1cm층의 퇴적물이 환원환경일 때 퇴적물로부터 해수중으로 유리됨을 보고한바 있다.

발트해의 anoxic 수층에서 용존성 Zn, Cd, Cu, Ni은 oxic 수층 보다 낮으며, 이것은 bisulfide 혹은 polysulfide의 형성이 이들 금속의 용해도에 영향을 크게 미치기 때문이고, Co의 경우는 anoxic 환경에서 Co<sup>2+</sup>가 증가하였는데 sulfide화합물의 영향이 미미하기 때문이라고 보고되었다(Kremling, 1983).

서부진해만 해역에서 용존성 Cd는 표층이 0.006~0.017 $\mu\text{g}/\text{l}$ , 저층에서 0.005~0.009 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 표층이 높았다. 용존성 Pb는 표층에서 0.012~0.042 $\mu\text{g}/\text{l}$ 였고 저층에서 0.005~0.033 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 표저층이 비슷한 분포였다. 용존성 Cu는 표층에서 0.35~0.60 $\mu\text{g}/\text{l}$ 였고 저층에서는 0.21~0.98 $\mu\text{g}/\text{l}$  이었다. Co는 표층이 0.003~0.014 $\mu\text{g}/\text{l}$ , 저층에서 0.033~0.157 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 저층이 훨씬 높은 값을 보였다.

한편 우리 나라 서해연안에서 조사된 용존성 중금속 자료를 보면, 시화방조제 연안에서는 Cu 0.42~0.79 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.61 $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Zn 0.37~1.66 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.70 $\mu\text{g}/\text{l}$ )

l), Pb 0.024~0.086 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.046 $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Cd 0.018~0.028 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.022 $\mu\text{g}/\text{l}$ )의 분포를 보였다(한국해양연구소, 1997). 아산만에서는 Cu 0.23~1.15 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균: 0.61 $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Zn 0.06~0.99 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.25 $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Pb 0.011~0.169 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.034 $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Cd 0.018~0.050 $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.030 $\mu\text{g}/\text{l}$ ) 였다 (한국해양연구소 1993).

### 3.2. 입자성 중금속

본 조사에서 입자성 중금속은 여과지를 산처리하여 acid-leachable fraction과 refractory fraction을 각각 측정하였다. 이는 부유사중의 금속원소의 비율이 거의 일정하므로 연안환경에서 각종 중금속의 입자에 대한 흡/탈착과 물질수지를 파악하기 위해서는 acid-leachable fraction에 대한 정량적 이해가 필요하기 때문이다.

조사기간중 입자성 중금속의 acid-leachable fraction 농도는 Table 2-4에 나타내었다.

Table 2-4. Acid-leachable particulate heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999.

St.	Depth	Al	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb
	m	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{g}$
2	0	9968	16860	32	28	40	666	9.1	1.50	1.70	0.40	26
2	6	17336	24305	17	26	95	451	3.9	0.78	0.38	0.10	168
3	0	5365	4493	6.1	12	27	259	3.5	0.60	1.40	0.06	15
3	10	29093	23467	13	17	51	271	1.4	1.3	0.44	0.08	1.8
4	0	3433	2046	2.2	8.8	6.5	133	4.4	0.33	0.90	0.08	5.0
4	9	5571	41285	11	9.0	5.4	110	9.5	0.56	2.30	0.61	11
5	0	2542	1598	1.7	8.5	4.3	137	2.9	0.51	0.67	0.05	4.8
5	15	15282	72100	16	24	18	148	9.1	0.80	3.00	0.79	25
11	0	1899	495	0.44	8.3	3.0	61	2.9	0.91	2.40	0.18	2.4
11	20	3177	30423	6.6	4.9	59	36	1.6	0.51	0.73	0.03	2.1
12	0	6128	193	0.54	3.2	1.8	26	1.7	0.13	0.62	0.04	1.5
12	19	7208	53170	14	14	12	123	9.3	0.84	4.70	1.14	43
13	0	4047	1603	1.4	7.4	4.4	100	5.9	0.64	0.30	0.32	9.5
13	13	5967	48772	6.4	4.6	14	56	9.7	0.77	2.4	0.75	7.6
20	0	975	681	0.56	4.7	1.7	80	3.4	0.38	0.37	0.06	2.8
20	22	6016	38279	7.1	13	12	43	10	1.07	2.20	1.29	4.6

마산해역에서 내만으로 부터의 거리에 따른 acid-leachable fraction의 분포는 Fig. 2-4에 나타내었다. 표층수중 입자성 Cu의 acid-leachable fraction은 St. 2, 3, 4, 5에서 각각 40, 27, 6.5, 4.3 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 마산내만 쪽에서 높고 바깥쪽으로 가며 점차 감소하는 경향을 보였다. Cd의 경우 이 정점들에서 1.5, 0.60, 0.33, 0.51 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로

같은 경향을 보였다. Pb는 26, 15, 5, 4.8  $\mu\text{g/g}$ 으로 감소세를 보여 용존성 Pb가 만 바깥쪽으로 가며 감소하는 것과 반대되는 경향을 보였다.

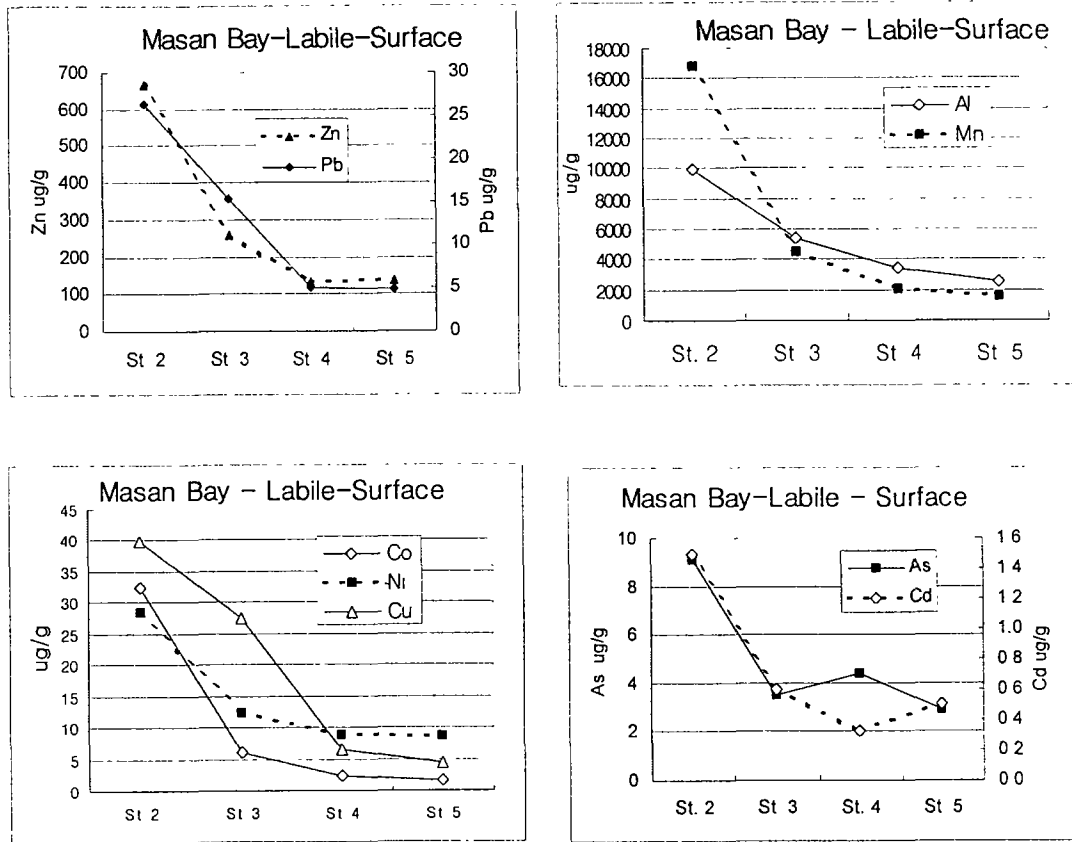


Fig. 2-4. Acid-leachable particulate heavy metals in Masan Bay.

위의 같이 표층수중 입자성 중금속의 acid-leachable fraction 농도가 마산만 안쪽에서 높은 것은 만 안쪽에 중금속의 유입원이 많고(김 등, 1994), 각종 유기물과 부유입자에 대한 용존 중금속의 친화도 등의 영향에 의한 것으로 추정된다. 본 연구의 부유입자 중의 acid-leachable 중금속에 있어서 Mn은 St. 2의 표층과 모든 정점의 저층에서 Mn이 높은 함량을 나타내고 있으며, Al과의 상관성에 있어서도 이들 자료는 특이성을 보였다.

일반적으로 Mn은 redox-sensitive 금속으로 알려져 있으며, Turner *et al.*(1991)의 연구에 의하면 북해지역의 주요 하구에서 저층의 무산소 환경에서 용해된  $\text{Mn}^{2+}$ 은 하류에서 pH증가 및 용존산소와의 반응에 의해서 산화상태가 높고, 낮은 용해도를 갖는  $\text{MnOOH}$ 나  $\text{MnO}_2$  형태의 침전물(Mn-rich particle)로 된다고 하였다. 그러나 발트해에 대한 연구에서는 퇴적물이나 그 상층수가 강한 환원환경일 경우 산환환경에서의  $\text{MnO}_2$  대신 Rhodochrosite( $\text{MnCO}_3$ )가 생성된다고 하였다(Brügmann *et al.*, 1992).

서부진해만 해역에서 acid-leachable Cu는 표층이 1.8~4.4 $\mu\text{g/g}$  이었고 저층에서 12~59 $\mu\text{g/g}$  으로 저층에서 훨씬 높은 값을 보였다. Zn은 표층에서 26~100 $\mu\text{g/g}$ 이었고 저층수에서 36~123 $\mu\text{g/g}$  으로 저층이 높았다. Pb는 표층에서 1.5~9.5 $\mu\text{g/g}$  저층에서 2.1~43.0 $\mu\text{g/g}$ 으로 같은 경향을 보였다. Cd는 표층에서 0.13~0.91 $\mu\text{g/g}$  이었고 저층에서 0.51~1.07 $\mu\text{g/g}$  이었으며 Co는 표층에서 0.44~1.4 $\mu\text{g/g}$  였고 저층에서 6.4~14 $\mu\text{g/g}$  였다. As는 표층에서 1.7~5.9 $\mu\text{g/g}$ 였으며 저층에서 1.6~10.0 $\mu\text{g/g}$  이었다.

입자성중금속의 Al에 대한 농축계수 (Enrichment Factor, EF)는 acid-leachable fraction의 경우 Cu가 St. 12의 표층에서 0.4, St. 11의 저층에서 28.0 이었으나 다른 곳에서는 1.4~8.2 정도의 분포를 보였다. Zn은 5~96으로 높은 농축계수를 보였고 Cd은 마산내만의 경우 19~82의 분포를 보였다.

본 조사에서 원소 및 정점에 따라 다소 차이가 있지만 입자성 Cd, Cu, Pb, Zn은 표층보다 저층에서 대체로 높은 함량을 나타내고 있으며, 위에서 언급하였듯이 상대적으로 용존성 중금속은 낮게 나타났다.

이러한 현상에 대한 연구는 지중해에서도 나타난 바 있는데 지중해의 Tyro와 Bannock basin은 저층에 anoxic 환경이 발달되어 있으며, 수심 약 3300m에서 나타나는 해수와 anoxic brine의 경계면에서는 Co, Cu, Zn이 부유물질에 매우 높은 함량으로 존재하였으며, 이것은 anoxic 환경하에서 생성된 metal sulfide 침전물에 의한 것이라 하였고(Van der Sloot *et al.* 1990), 흑해에서도 anoxic 환경의 저층수에서 Cd, Cu, Pb, Zn은 황화물형성으로 입자상태로 축적된다고 하였다(Lewis and Landing 1992).

입자성 중금속의 Refractory fraction은 Table 2-5에 정리하였다.

Mn은 acid-leachable fraction이 압도적으로 많음을 알 수 있었다. 각 금속별 acid-leachable/refractory의 평균비율은 Mn의 경우 24.5로 acid-leachable이 압도적이었다. 이 비율은 Co의 경우 12.1, Cu는 5.7, Pb가 3.8, Zn이 4.3, Cd가 8.5 등 생물과 친화력이 있는 금속에서 acid-leachable이 많았다. Al은 0.36으로 refractory fraction이 많음을 알 수 있었고 Sn이 0.65로 그 다음이었다.

본 조사에서 입자성 중금속과 용존성 중금속 사이의 분배계수 ( $K_d$ )는 Table 2-6에 나타내었다.

$$\text{분배계수 } K_d = \frac{\text{Me part}}{\text{Me diss}}$$

로 주어진다. 분배계수 계산을 위해 입자성 중금속은 acid-leachable fraction만을 대상으로 하였는데 부유사중의 금속원소는 거의 변하지 않는다고 할 때 용존성 금속과 acid-leachable fraction 와의 상관관계만이 의미가 있기 때문이다.

Table 2-5. Refractory particulate heavy metals in Masan-Chinhae Bay in August 1999.

St.	Depth	Al	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb
	m	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2	0	24145	327	1.1	12	5.9	54	2.1	0.13	4.4	0.28	2.5
2	6	39043	2477	2.1	33	26	111	4.2	0.48	5.3	0.81	41
3	0	7554	163	0.34	6.7	3.4	35	2.2	0.06	1.6	0.19	0.99
3	10	35164	4371	1.6	21	7.1	50	3.9	0.06	1.7	0.52	4.6
4	0	8610	33	0.33	6.1	2.7	18	1.8	0.02	0.92	0.07	1.7
4	9	26926	1536	0.42	9.0	7.1	59	2.0	0.06	1.1	0.13	5.1
5	0	14405	39	0.18	2.6	3.6	27	1.3	0.05	1.6	0.18	2.0
5	15	41402	1988	0.69	4.8	15	16	2.2	0.10	3.8	0.27	4.8
11	0	17658	83	0.03	8.7	4.6	58	1.9	0.15	3.1	0.11	1.5
11	20	14924	4032	0.52	7.4	1.0	11	1.7	0.03	0.47	0.26	0.81
12	0	10370	117	1.5	6.8	13	27	2.8	0.21	7.2	0.54	6.3
12	19	35429	800	0.97	27	30	37	3.3	0.25	5.8	0.77	5.1
13	0	27549	70	0.12	15	27	33	2.4	0.21	4.8	0.33	3.1
13	13	38336	2870	1.73	36	24	37	3.6	0.18	4.3	0.52	6.8
20	0	4359	113	0.20	16	15	38	3.7	0.28	1.6	0.53	5.2
20	22	11065	8342	2.2	16	14	35	3.6	0.21	4.0	0.73	9.0

$K_d$  값은 마산만의 표층수의 경우 만 안쪽의 St. 2에서 3, 4, 5로 가며 Cu는 51, 34, 11, 6 으로 점차 감소하며 Zn은 191, 164, 159, 94 의 경향을 보였다.  $K_d$  값은 Cd, Pb의 경우에도 마산내만으로부터 멀어짐에 따라 감소세를 확실히 보였다.

영국의 Mersey Estuary에서는 담수/해수 경계면에서 용존성 Cu, Cd의 제거가 일어나  $K_d$  값이 높아진다고 한다(Comber et al. 1995). 이 두 금속은 도시하수로부터 기인한 부유물질에 흡착을 잘하는 특성이 있다고 하는데 마산만의 경우에도 육상기인 부유물질이 많기 때문에 같은 현상이 나타난다고 할 수 있다.

Fig. 2-5에서 볼 수 있는 것처럼 본 조사에서는 저층에서 DO 포화율이 낮을수록 Cd, Cu, Pb, Zn의  $K_d$  값이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이러한 현상이 저층수의 산소 결핍 정도에 따라서 용존 금속이 화합물 형성 정도의 차이인지 명확하지 않다. 왜냐하면 저층수가 혐기성 상태가 아닌 곳이 많으며 혹시 환원 상태의 퇴적물로부터 발생한  $HS^-$ 나  $S^{2-}$ 의 존재 여부가 확인되지 않았기 때문이다.

Table 2-6. Distribution coefficient ( $K_d$ ) between dissolved and particulate phase of heavy metals in Masan-Chinhae Bay

St.	Depth (m)	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
2	0	11362	23	51	191	49	1466
2	6	1611	47	135	291	64	2107
3	0	189	15	34	164	30	766
3	10	672	58	487	649	290	178
4	0	472	16	11	159	17	112
4	9	635	25	24	80	93	323
5	0	300	14	6	94	38	69
5	15	1258	90	115	209	122	840
11	0	140	30	8	295	142	64
11	20	157	13	284	223	102	71
12	0	70	14	5	118	10	132
12	19	432	35	45	289	96	5490
13	0	198	22	7	508	78	227
13	13	149	17	56	219	129	229
20	0	39	14	5	100	22	180
20	22	45	33	12	42	167	889

용존성과 입자성 중금속 사이의 분배계수  $K_d$  값은 각 금속원소에 따라 차이가 있는데 발트해 (Kiel) 에서 이값은 Fe-Pb-Mn-Co-Zn-Cd-Cu-Ni의 순이었다 (Kremling et al. 1997). 본 조사의 마산-진해만에서 측정된 중금속 원소에 대해 살펴보면 Pb-Co-Zn-Cd-Cu-Ni의 순서로 발트해와 같은 경향을 보였다. 광양만에서는  $K_d$  값이 Fe-Pb-Co-Zn-Ni-Cu-Cd의 순으로 나타남바 있다(진 1999). Fe와 Pb의 경우  $K_d$  증가 요인은 유기적으로 결합해 있는 리간드의 산화작용, 콜로이드의 형성 및 침전 등 용액으로부터 입자로 빠르게 이동하는 현상(Sholkovitz and Compland, 1981)으로 설명될 수 있다. 입자와의 반응이 약한 원소들 중 Zn과 Cd는 식물성플랑크톤에 의한 섭식이나 배설 등도 그 함량에 영향을 미치는 원소들이다(Brügmann, 1986). Cd의 경우 염분이 높은 외해로 갈수록 이온 강도의 증가로 Cd의 탈착이 이루어지는데 해수 시료 대부분은 높은 염분을 지니고 있어  $K_d$  값은 낮은 경향을 보인다고 한다.

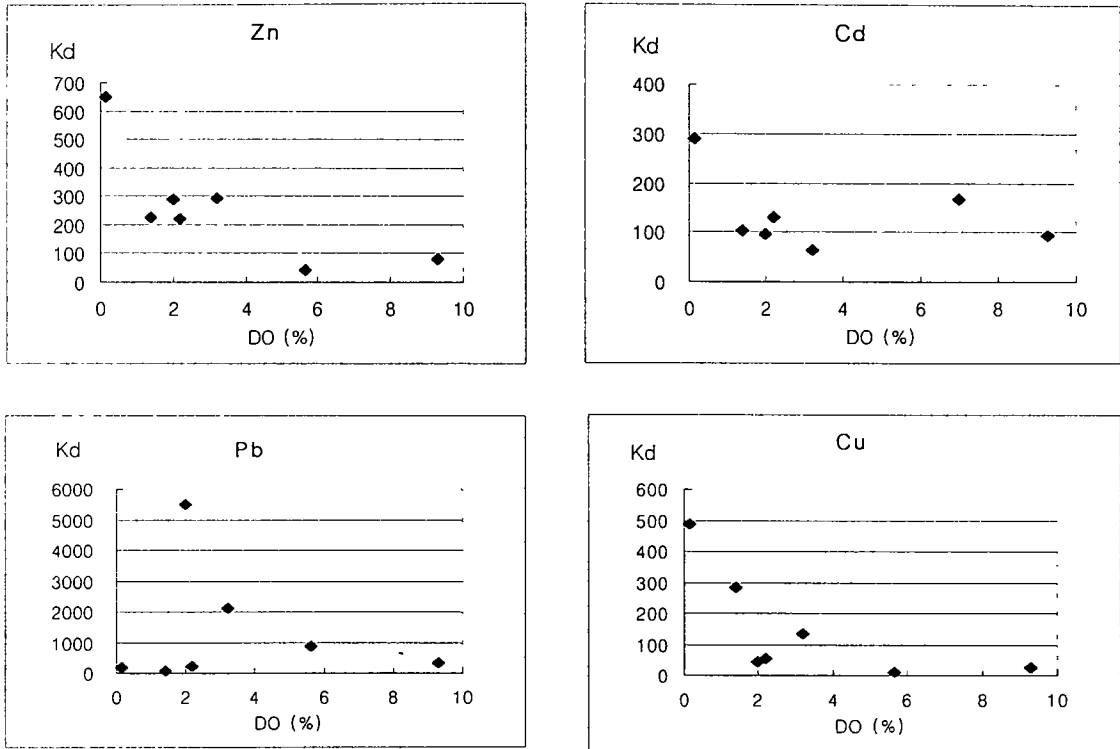


Fig. 2-5. Relationship between acid-leachable particulate heavy metals and saturation percentage of dissolved oxygen in the bottom waters of Masan-Chinhae Bay.

### 3.3. 해저퇴적물중의 중금속

1999년 8월 마산만 및 서부진해만에서 측정한 퇴적물중 중금속 농도는 Table 2-7에 정리하였다. 마산만에서는 일부 중금속의 경우 내만의 육수유입원으로부터 멀어질수록 퇴적물중의 농도가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2-6).

Al은 St. 1, 2에서 10% 이상이었고 St. 3, 4에서 각각 9.29, 8.81% 였다. Fe는 마산내만에서 4.02~4.19%로 육수유입원으로 부터의 거리와 상관없는 지리적 분포를 보였다. Zn은 St. 1에서 392ppm 이었고 외해쪽으로 가며 점차 감소하는 경향이 뚜렷하여 St. 2, 3에서 각각 311, 316 ppm 이었고 St. 4에서는 283 ppm을 나타냈다. 소모도 옆의 St. 6에서는 246 ppm 이었으며 부도 옆의 St. 7에서는 183 ppm 이었고 가장 바깥쪽의 St. 8에서 145 ppm을 보였다.

Cu는 St. 1에서 84.7 ppm 이었고 바깥쪽해역으로 가며 점차 감소하는 경향을 보여 St. 2에서 72.5 ppm이었고 St. 3, 4에서 각각 67.1, 59.6 ppm 이었다. Cd의 경우에도 내만에서 외만으로 가며 퇴적물중 농도가 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 마



산내만 가장 안쪽의 St. 1에서는 Cd이 퇴적물중 1.13 ppm으로 가장 높았으며 St. 2, 3에서 0.9ppm을 넘었고 St. 4, 6에서는 각각 0.8ppm 내외였으며 St. 7, 8에서는 0.5 ppm을 약간 넘는 정도였다. Pb는 St. 1에서 85.3ppm으로 가장 높았고 St. 2에서 47.4ppm 이었으며 외만으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다.

Table 2-7. Heavy metal contents in sediments of Masan-Chinhae Bay in August 1999.

St.	Al	Fe	Mn	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Sn	Sb
	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	10.2	4.07	703	70.4	14.8	31.6	84.7	392	15.7	1.13	85.3	7.38	2.10
2	10.0	4.17	617	72.9	15.3	35.4	72.5	311	17.9	0.99	47.4	5.96	1.58
3	9.29	4.07	596	79.6	14.3	36.0	67.1	316	17.2	0.93	34.2	5.30	1.39
4	8.81	4.14	664	82.9	15.1	38.4	59.6	283	16.7	0.89	23.9	5.00	1.39
6	7.97	4.03	546	86.7	14.6	37.8	48.4	246	15.5	0.75	39.0	4.25	1.26
7	8.76	4.19	709	81.5	15.1	37.0	37.9	183	13.8	0.52	41.1	3.79	1.13
8	8.48	4.02	1074	78.6	15.5	35.8	30.8	145	15.7	0.54	34.0	3.70	1.11
12	8.81	3.97	586	72.7	15.4	36.2	37.4	142	16.1	0.69	30.9	3.09	1.28
13	9.67	4.20	607	81.7	16.3	37.9	31.8	142	15.7	0.61	34.7	3.61	1.35
14	8.53	4.00	675	77.0	15.8	37.5	33.6	143	15.4	0.51	36.3	3.37	1.24

As는 St. 2에서 17.9ppm이었고 St. 4, 6에서는 각각 16.7, 15.5ppm 이었다. Cr은 St. 6에서 86.7ppm으로 가장 높은 값을 보였고 그 주변의 St. 4, 7에서도 80ppm 이상으로 마산수로의 중앙부에서 높은 값을 나타냈다. Ni도 St. 4, 6, 7 등 바깥쪽에서 37ppm 이상의 농도를 보였다.

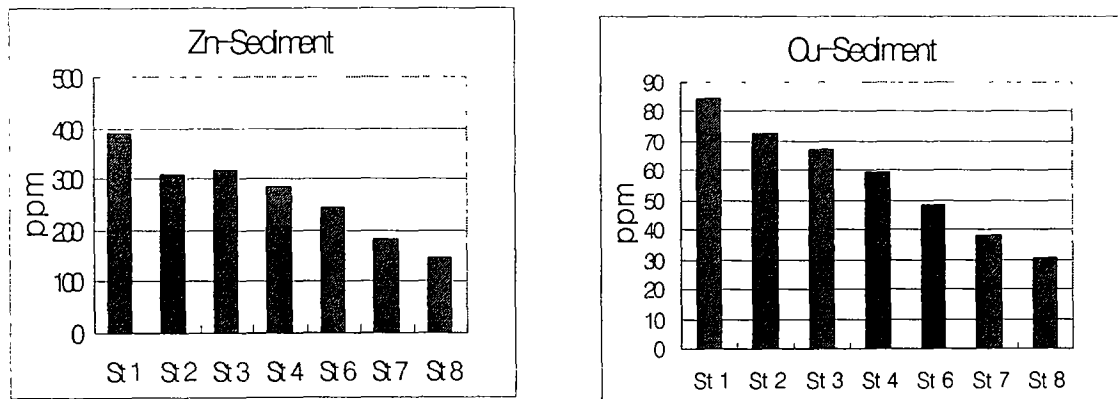


Fig. 2-6. Distribution of heavy metals in sediments of Masan Bay.

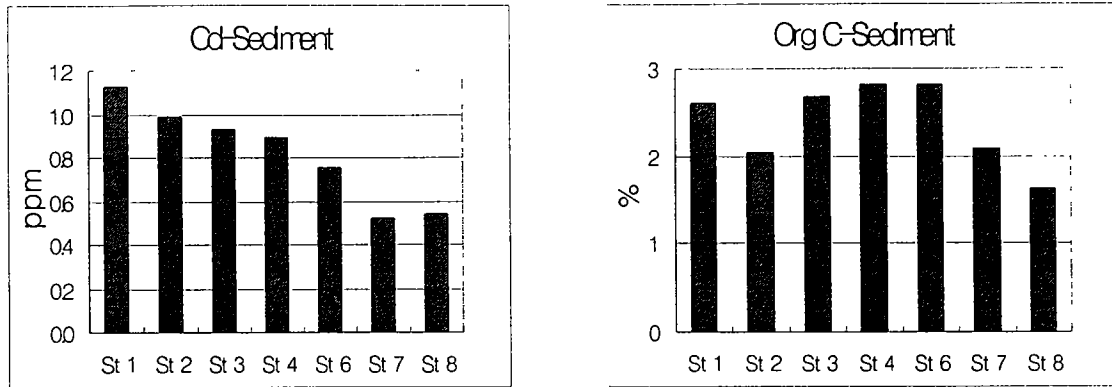


Fig. 2-6. (continued).

진해만 서부해역에서는 Zn의 경우 142~143ppm으로 정점간 농도차이가 없었으며 마산내만해역에 비해 반 이하의 농도를 보였다. Cu는 가조도 동쪽의 St. 12에서 37.4ppm이었고 가조도 서쪽 양식장 밀집해역에서 31.8ppm이었으며 St 14에서 33.6ppm으로 역시 마산내만에 비해 반 이하의 농도를 보였다. Cr은 72.7~81.7ppm으로 마산내만과 비슷한 농도를 보였고 Ni도 36.2~37.9ppm으로 마산내만과 비슷하였다. Co, As의 경우도 진해만 서부해역의 퇴적물중 농도가 마산내만과 비슷하였다.

퇴적물중 일부 중금속원소는 상호간에 좋은 상관관계를 갖는다고 알려졌는데 Fig. 2-7 에 Cd와 Zn, Cu와 Zn의 예를 도시하였다.

조사해역의 퇴적물중 중금속 농도를 환경영향 파악을 목적으로 하는 Sediment Quality Guidelines (SQGs)과 비교하였다. 이는 화학자료와 생물자료의 비교에 의한 경험적 분석 수치이며(Long and MacDonald 1998) 비공식적인 것으로 규제를 위한 것이 아니라 화학자료의 해석을 위한 것일 뿐이다. NOAA(1990)의 가이드라인에서는 생물영향이 일어나는 농도가 처음 10%일때를 ER-L (Effects Range-Low)로 하고 50%일때를 ER-M (Effects Range-Median) 으로 하고 있는데 낮은 기준 (ER-L)은 이 농도에서 퇴적물에 서식하는 생물들이 다만 가끔 오염물질 영향을 받기 때문에 제시한 값이다.

Pb의 경우 NOAA의 ER-M은 110ppm 인데 비해 미국의 연안해역 조사에서 Oakland estuary의 206.7ppm, Long Island Sound의 172.2 ppm 등 높은 농도가 측정되기도 하였다(NOAA 1990). Pb의 ER-L은 35ppm으로 마산내만의 4개정점에서 이를 초과하였다. NOAA(1990)가 제시한 Cu의 ER-L은 70ppm인데 마산내만 두 정점에서 이를 초과하였다.

Cr은 주로 금속공업, 화학공업 등에 많이 쓰이며 NOAA(1990)가 제안한 ER-L은 80ppm인데 마산수로 중앙부의 세정점에서 이를 초과하였다. Zn의 경우 NOAA(1990)의 제안에서 ER-M이 270ppm인데 St. 1에서 St. 4까지 이 보다 높은

농도가 측정되었다.

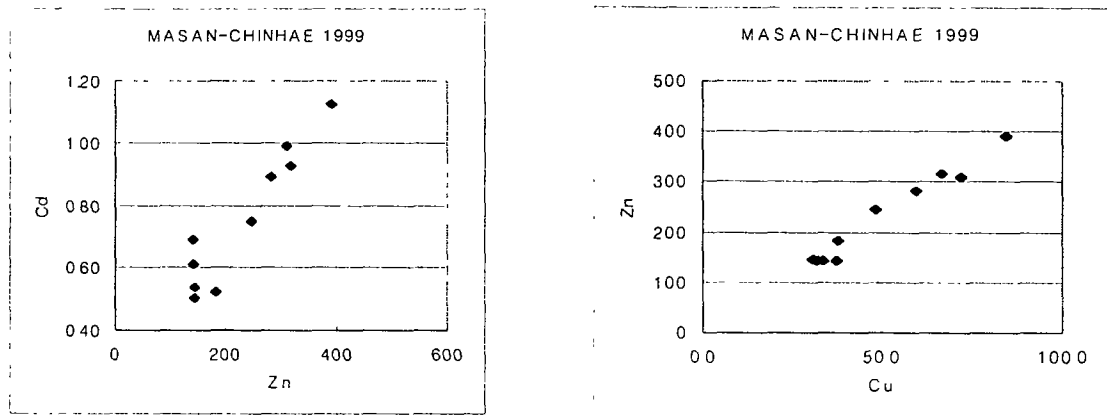


Fig. 2-7. Relationship between heavy metals in sediments of Masan-Chinhae Bay.

한편 우리 나라 연안 퇴적물의 중금속 함량을 보면, 광양만에서는 Mn 618ppm, Co 12ppm, Ni 24ppm, Cu 21ppm, Zn 122ppm, Pb 36ppm, Cr 55ppm이었으며(진 1999), 마산만에서는 Mn 601ppm, Co 13ppm, Ni 31ppm, Cu 84ppm, Zn 370ppm, Pb 68ppm, Cd 2.03ppm, Cr 81ppm이었다. 인천 북항의 가장 오염된 퇴적물은 Cd 을 제외하면 마산만과 비슷하거나 높은 수준이었으며, 그 외 지역의 중금속 함량은 광양만과 비슷하거나 낮은 수준이었다.

#### 4. 토의 및 결론

남해의 환경연구에 있어 해양-연안해역의 상호작용은 매우 중요한 의미를 갖는다. 연안해역은 높은 물리적에너지와 생물생산력을 가진 지역으로 집약적으로 이용되고 있는 곳이다. 해양-육지의 상호작용에서 육지로 부터의 작용을 집중적으로 받아 그 변화를 외해역으로 전달하는 내만해역의 중요성은 생지화학적으로 매우 큰 의미를 갖는다.

남해안의 내만들은 내부에서는 육상으로 부터의 담수와 해수가 혼합되며 외양과의 해수교환이 일어나는 에스취리로 반폐쇄성 해역의 특징을 가진다

진해만의 경우 넓은 해역이 seasonally stratified estuary의 형태로 하계에 강한 성층이 형성되며 대표적인 혐기성내만으로 남해의 ocean margin과정을 이해하는데 매우 중요한 곳이다. 광양만은 permanently well-mixed estuary로서 중금속의 경우 이온강도가 높은 해수환경에서 부유물입자에 흡착되어 퇴적되거나 외해역으로 운송되어진다. 광양만은 여수해만을 통해 남해외해역과 연결되며 물질의 교환에 중요한 역할을 한다. 가막만은 도서들 사이의 여러 좁은 수로를 통해 외해역과 연

결되며 생물생산력이 높아 유기물이 외해역으로 공급될 수 있는 곳이다. 본 연구에서 무산소 환경은 마산만 및 진해만해역에서 쉽게 관찰되었으며 광양, 가막만에서는 하계에 성층이 발달한 시기에도 나타나지 않았다.

1999년 8월 질산염은 마산내만 안쪽에서 육수유입의 영향으로 매우 높았으며 마산수로에서는 표층수에서  $1\mu\text{M}$  이하였다. 마산내만 돌섬주변 정점의 저층수는 탈질소반응에 따라  $1\mu\text{M}$  이하의 낮은 질산염 농도를 보였다. 인산염은 부도부근의 정점들에서 마산내만 보다 훨씬 높게 나타나 공급원이 다양함을 시사한다. 조사해역에서는 저층수중 용존산소 농도가 낮고 pH가 낮아 퇴적물로부터의 인산염 용출이 일어나는 것으로 보인다. 조사기간중 용존산소는 표층수로부터 저층수로 급격히 감소하는 수직분포를 보였다. 모든 정점에서 저층수중 빈산소현상이 나타났으며 두 정점에서 무산소 현상을 나타냈다. 돌섬주변의 정점에서는 수온약층 위로부터 아래로의 용존산소 확산량이  $648\text{mlO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 로 추정할 수 있고 저층수의 무산소 환경이 계속 유지되기 위해서는 이 보다 높은 산소소비율이 필요할 것이다. 기존 자료로부터 이 정점의 저층수중 산소소비율은  $155\text{mlO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 로 추정할 수 있으나 표층수로부터의 용존산소 확산과 수평적인 이동·확산을 고려하면 실제 산소소비율은 이보다 훨씬 클 것으로 보인다.

본 연구에서는 광양만의 용존성 및 입자성 미량금속의 거동과 분포양상을 규명하기 위하여 AAS 및 ICP-MS를 이용하여 1997년 8월, 11월과 1998년 2월, 5월의 4차례에 걸쳐 채취한 시료를 분석한바 있다. 광양만의 표층수중 용존성 Co, Fe 등은 섬진강을 통한 담수로부터의 유입이 많았고 용존성 Zn과 Cd는 모든 계절에 여천공단 주변해역에서 뚜렷이 높은 농도를 보였다. 해수중 입자성 미량금속은 대체적으로 여천공단과 인접한 지역과 수어천 입구에서 뚜렷하게 높은 농도를 보였다. 광양만의 각 정점별 연평균 입자성 미량금속의 농도는 대체로 묘도 주변에서 높은 경향을 보였다. 광양만에서 측정된 각 입자성 미량금속의 농도를 해수 1리터중 농도( $\mu\text{g}/\text{L}$ )로 계산하면 용존성 미량금속의 해수 1리터중 농도와 비슷한 수준인데 Cd는 입자성이 적어 용존성 Cd의 1/10정도 였다. Cd는 다른 미량금속과 상관관계가 아주 낮았는데 이는 Cd가 해수중에서 주로 용존상태로 존재하기 때문으로 보인다.

용존성과 입자성 미량금속사이의 분배계수( $K_d$ )는 용존성으로 교환될 수 있는 입자성 원소량의 비율을 계산하는데 이용될 수 있는데 광양만에서의  $K_d$  값은 Fe-Pb-Co-Zn-Ni-Cu-Cd의 순으로 나타났다. 광양만에서의 Fe에 대한  $K_d$ 는 매우 높은 값(167,396)을 보여주었는데 이는 입자로의 활발한 원소 이동과 재부유, 그리고 인근 산업 지역에서의 유입에 기인했다고 생각된다. Cd의 경우 염분이 높은 외해로 갈수록 이온 강도의 증가로 Cd의 탈착이 이루어지는데 광양만 해수 시료 대부분은 높은 염분을 지니고 있어  $K_d$  값은 원소들 중 제일 낮은 18을 보였다.

남해의 여러 내만 환경에서 미량금속의 거동을 파악하기 위해서는 물질 유입등 정량적 분석외에도 각 내만에서의 미량금속 원소들의 상호 관련성을 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 용존성 미량금속 분석자료로 광양만, 가막만, 사천만, 당항포

해역, 진동만 등 남해안의 5개 해역을 대상으로 판별분석(Discriminant Analysis)을 행하였다. 분석 결과 Dis-1은 54.3 %, Dis-2는 33.7 %의 편차를 설명하여 두 성분에 의해 미량금속 분포특성이 대부분 설명될 수 있었고 5개 해역이 미량금속 분포특성상 뚜렷이 구분됨을 알 수 있었다. 이는 해역별로 각 미량금속들간의 상호관련성에 차이가 뚜렷함을 나타내는 것이며, 일차적으로는 육상기인 미량금속원이 해역에 따라 다름을 시사한다. 남해안의 각 내만은 연안역 이용현황의 차이가 크기 때문에 유입되는 미량금속원도 차이를 보일 수 있다고 생각된다.

1999년 8월에 현장조사를 통해 마산만과 서부진해만 해역의 중금속 원소거동을 연구하였다. 마산수로에서 표층수의 용존성 Cd, Zn은 마산만 안쪽에서 바깥쪽으로 가며 점차 감소하였고 Pb의 경우 안쪽에서부터 바깥쪽으로 가며 증가하는 경향을 보였다. 저층수중 Cd, Cu, Pb, Zn의 농도는 마산수로의 경우 표층수보다 대체로 낮은 농도를 보였고 Co는 저층수에서 높은 값을 보였다. 서부진해만 해역에서 용존성 Cd는 표층에서 높았고 용존성 Cu, Co는 표층보다 저층이 훨씬 높은 값을 보였다. 표층수중 입자성(acid-leachable fraction) Cu, Cd, Pb는 마산내만 쪽에서 높고 바깥쪽으로 가며 점차 감소하는 경향을 보였다. 입자성 Cd, Cu, Pb, Zn은 표층보다 저층에서 대체로 높은 함량을 나타냈다. Cu, Cd의 분배계수  $K_d$  값은 표층에서 마산내만으로부터 멀어짐에 따라 감소세를 보였다. 이 두 금속은 도시하수로부터 기인한 부유물질에 잘 흡착하는 특성이 있어 마산내만으로 부터의 하수유입에 영향을 받는 듯하다. 본 조사에서는 저층수의 DO 포화율이 낮을수록 Cd, Cu, Pb, Zn의  $K_d$  값이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이들 원소들의 용존성 형태 감소원인은 명확하지 않았다. 마산수로에서는 Al, Zn, Cu, Cd, Pb의 퇴적물중 농도가 내만으로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보였고 As, Cr, Ni 등은 마산수로 중앙부에서 높은 값을 나타냈다.

미량금속 원소들은 점오염원 (하천)과 비점오염원 (대기등..)에 의해 해양으로 유입되며, 해양에서 여러 가지 변화 경로를 갖는다. 대표적인 것으로 생물에 의한 축적이나 퇴적물에의 흡착 등을 들 수 있다. 금속의 해양에서의 순환은 아직 알려지지 않은 과정들이 많아 연구가 비교적 많이 진행된 유럽의 내만해역에서도 전체적인 수지를 파악하기 어렵다. 실제 대기/해양 상호작용, 연안해역/외해역 교환, 해수/퇴적물 교환 등에 대해서는 알려지지 않은 인자들이 많다. 따라서 향후 연구에 있어 용존성 미량금속의 거동을 파악하기 위해서는 이러한 경계면에서의 상호작용에 대한 집중적인 연구가 있어야 할 것으로 본다.

영양염, 유기물, 중금속의 육상으로부터의 유입은 연안해역에 대한 인간의 개입중 가장 큰 것이며 이러한 과정을 평가하기 위해 자연계로의 물질유입, 그 안에서의 변화, 그리고 밖으로의 이송에 대해 적절한 모델이 구성되어야 한다. 우리나라 남해 내만해역은 육지로부터 심한 환경영향을 받는 곳이며 향후 물질수지 모델개발을 위한 체계적 연구가 수행되어야 할 것이다.



# 제 3 절 대륙붕 화학물질 순환 및 수치

## 1. 서론

제주도 이북의 남해 대륙붕 해역은 황해와 동중국해수가 제주해협을 거쳐 동해로 연결되는 길목에 위치한다. 또한 남해연안에는 많은 하천들이 연결되어 있고, 해안 일대는 대규모의 항만과 임해 공업단지등이 밀집되어 하천 및 대기를 통해 많은 양의 영양염류를 포함한 화학물질들의 유입이 지속적으로 이루어 진다.

황해의 연안을 따라 제주해협으로 들어오는 서한연안류 (West Korea Coastal Current)와 동중국해로부터 유입되는 대마난류를 통해 남해대륙붕으로 퇴적물을 포함한 다양한 화학물질들이 유입되어 (Suk et al., 1996) 해양화학적 특성이 매우 독특하다. 또한 남해는 연간  $270 \text{ gC m}^{-2}$ 의 높은 일차생산력을 보이고 있어 (Chung and Yang, 1991) 생산된 유기물질들은 해저에 쌓인다. 대양해역에서는 일차생산량의 거의 전부가 물기둥내에서 재분해되어 겨우 1% 미만의 극소량이 해저에 쌓이나 남해와 같은 천해역에서는 일차생산량의 50% 정도가 쌓인다 (Suess, 1980). 해저에 가라앉은 유기물들은 퇴적물내에 저장되거나 재부유 및 분해과정을 거쳐 무기물 형태로 다시 수주내로 공급되어 높은 일차생산을 지지한다.

따라서 남해에서 하천, 대기 및 해류를 통한 유입과 해저퇴적물의 유기물 분해과정을 거쳐 해수중으로 재생된 친생물원소들은 생지화학적 순환에 있어서 중요하며, 이들에 대한 정량적인 플럭스 변동성 규명은 남해의 화학물질 순환과 수지를 추정하는데 있어 필수적이다.

그러나 현재까지 남해에서의 해양생지화학 특성에 대한 연구는 거의 대부분이 육지에 가까운 연안에 국한되거나 제주도 주변해역에 치우쳐 있다. 분지 규모의 조사로는 국립수산진흥원에서 매년 실시하는 정선관측 항목중 용존산소 함량조사와 한국해양연구소에서 해양자원도 작성을 위해 1988년부터 1990년까지 3년간 영양염과 용존산소 분포위주로 조사된 바 있고, 일차생산력과 전선구조와의 관계 (Chung and Yang, 1991), 표층 퇴적물중 중금속 분포 (Cho et al., 1994), 춘계 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스 (Suk et al., 1996)등이 연구되었다. 그러나 이들 연구는 일부 분야에 국한된 단편적인 것으로서 남해에서의 에너지 흐름을 파악하기위한 화학 물질 순환과 생지화학적 과정 연구는 전무한 실정이다.

이에따라 본 연구는 3년 (1997~1999년)에 걸친 연구결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 서론
2. 조사해역 및 관측시기
3. 대륙붕 해양화학성분 분포특성
4. 남해 해수의 유기물 분포특성 및 퇴적물의 유기탄소 함량분포 및 분해
5. 일차생산력
6. 남해해수 기원 및 연안수 기여율
7.  $^{210}\text{Po}$ 의 분포특성 및 제거과정
8. 대기유입 화학물질 특성

## 9. 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스

### 2. 조사해역 및 관측시기

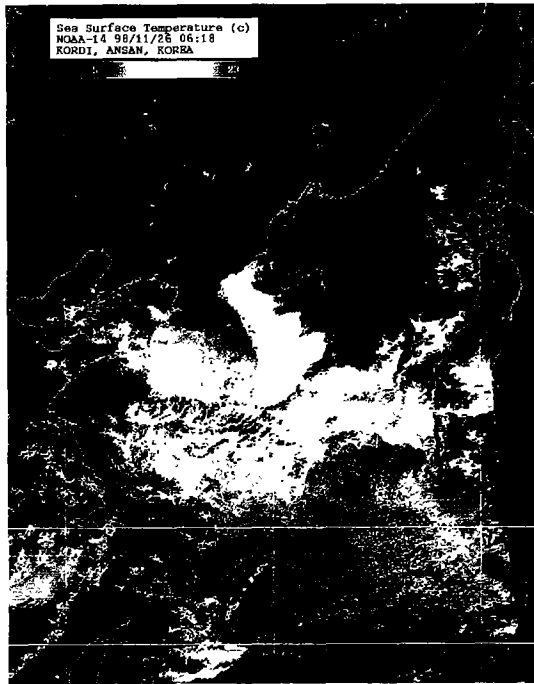
남해에 대한 생지화학적 특성조사를 위해 1997년부터 1999년까지 3년간 총 9회에 걸쳐 한국해양연구소 연구선 이어도호와 미국 스크립스 연구소 연구선 Roger Revelle호를 이용하여 제주해협 및 대한해협사이의 남해 대륙붕역에 대한 해수 및 해저퇴적물 시료를 채집하였다 (Table 3-2-1).

대기를 통해 남해로 유입되는 입자중 화학물질 유입량을 추정하기 위해 경상남도 거제소재의 한국해양연구소 남해분소에 대기분진 천연낙하물 채집기 (면적: 1.13 m<sup>2</sup>)를 설치하여 대기분진을 정기적으로 채집하고 있고, 현장조사시마다 선상에 대기분진 채집기를 설치하여 시료를 채집하였다. 해양관측 기간중 표층수온에 대한 인공위성 자료를 다음 페이지에 나타내었다 (한국해양연구소 홈페이지 인용).

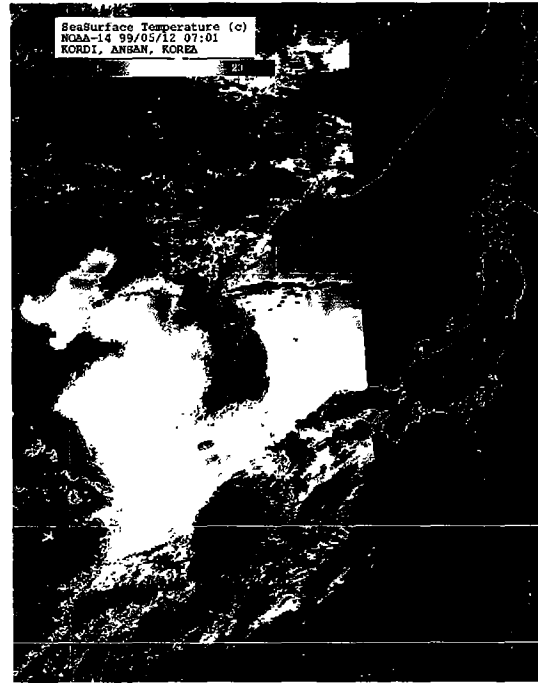
Table 3-2-1. Outline of the cruise from 1997 to 1999.

조사 항해명	연구선명	조사기간	조사해역	분석항목
NH9703	이어도호 (한국해양연구소)	1997. 3.19~3.21	대륙붕역	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수, 해저퇴적물), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수, 해저퇴적물), Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH9709	해양2000호 (국립해양조사원)	1997. 9.27~10.1	대륙붕역	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수), Aerosol, primary production, DO, Nutrients
NH9804	이어도호 (한국해양연구소)	1998. 4.5~4.11	대륙붕역	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수, 해저퇴적물), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수, 해저퇴적물), Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH0909	이어도호 (한국해양연구소)	1998. 9.23~9.25	제주해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수) Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH9811	이어도호 (한국해양연구소)	1998. 11.24~11.27	제주해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수) Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH9902	이어도호 (한국해양연구소)	1999. 2.22~2.23	제주해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수, 해저퇴적물), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수, 해저퇴적물), Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH9905	Roger Revelle호 (스크립스연구소)	1999. 5.5~5.15	대한해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수) Aerosol, Nutrients
NH9908	이어도호 (한국해양연구소)	1999. 8.4~8.8	제주해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수) Aerosol, primary production, pH, DO, Nutrients
NH9910	Roger Revelle호 (스크립스연구소)	1999. 10.9~10.22	대한해협	Chl <i>a</i> , POC, PON (해수), <sup>228,226</sup> Ra, <sup>210</sup> Pb (해수) Aerosol, Nutrients

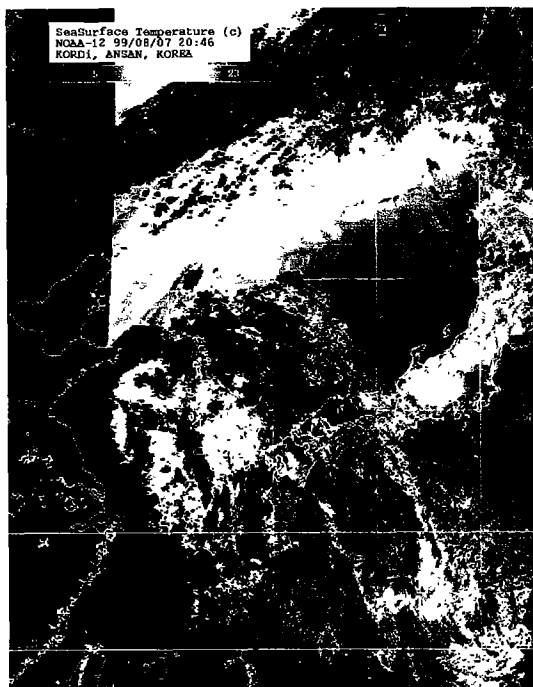




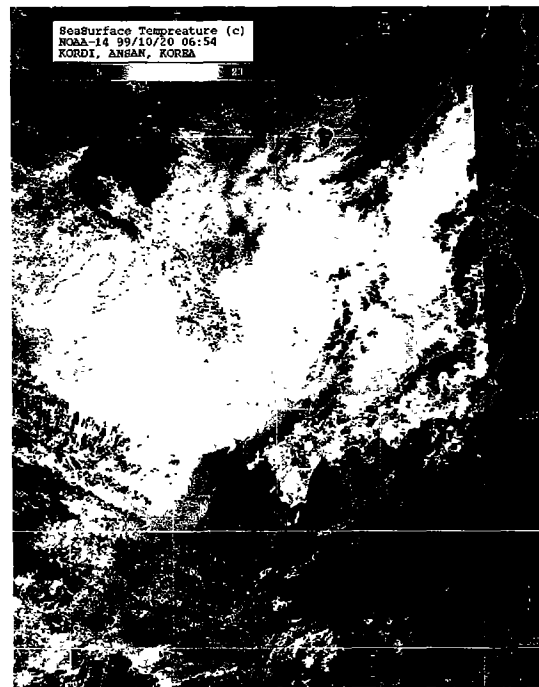
1998년 11월 26일 06:18



1999년 5월 12일 06:05

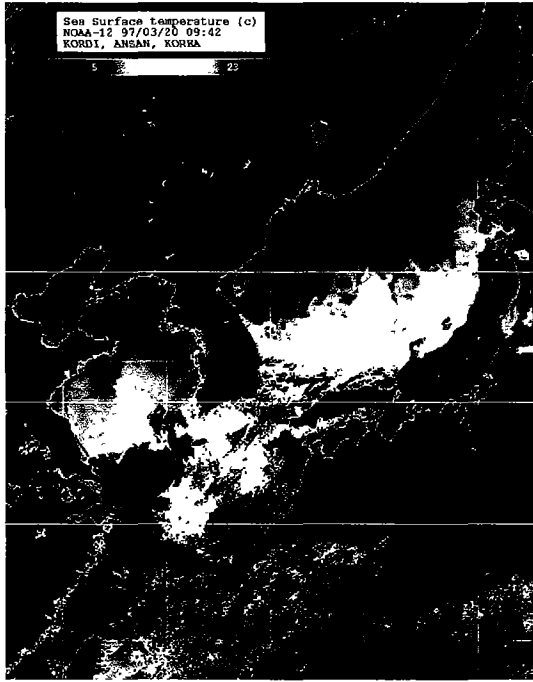


1999년 8월 7일 20:46

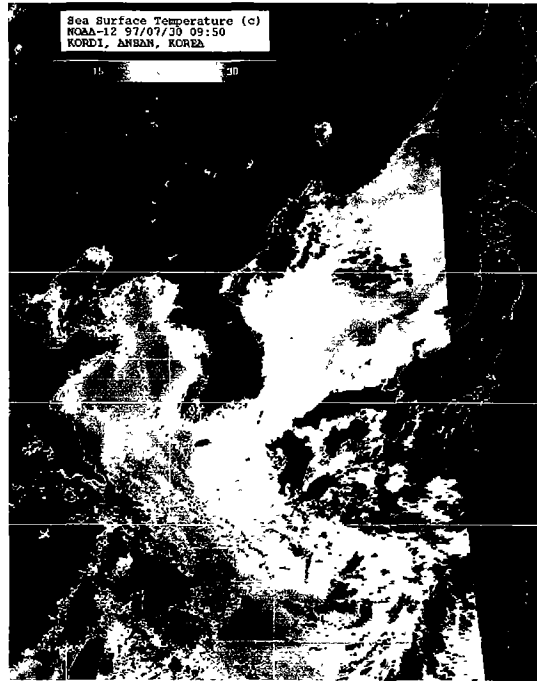


1999년 10월 20일 06:54

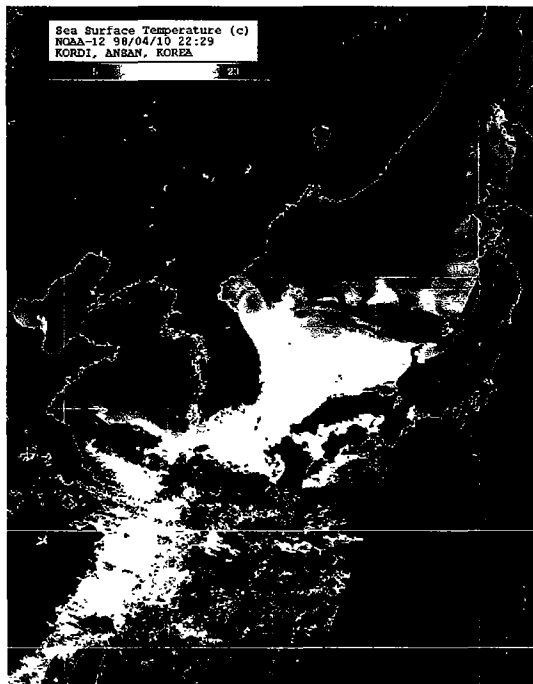




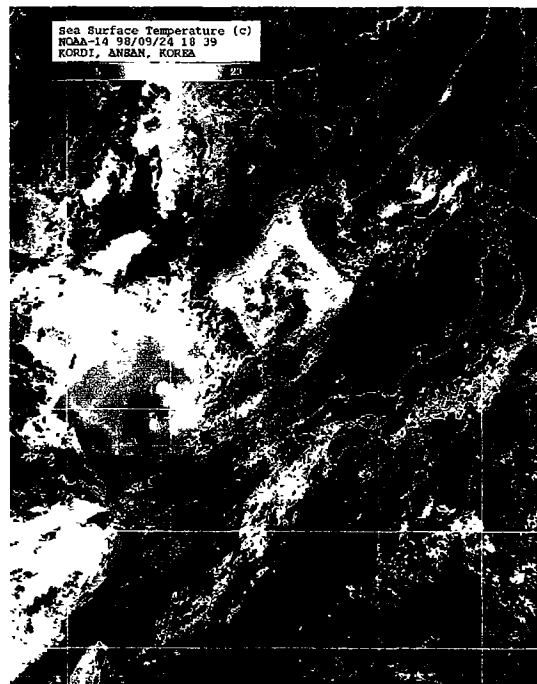
1997년 3월 20일 09:42



1997년 7월 30일 09:50



1998년 4월 10일 22:29



1998년 9월 24일 10:39



### 3. 대륙붕 해양화학성분 분포 특성

#### 3.1. 서론

남해는 대마난류수 (Tsushima Warm Current), 황해난류수 (Yellow Sea Warm Current), 남해연안수 (South Korean Coastal Water), 황해저층냉수 (Yellow Sea Bottom Cold Water), 그리고 황해연안수 (Yellow Sea Coastal Water) 등 아직은 그 일체가 완벽하게 규명되지 않은 다양한 연안 환경과 외해역의 서로 상이한 특성을 갖는 해수가 남해로 유입되어 (Nakao, 1977; Kim and Lee, 1982; Yu *et al.*, 1983; Park, 1986; 김 등, 1991; 김과 노, 1994; Chang *et al.*, 1995; Suk *et al.*, 1996) 그 주변해역의 해황은 매우 복잡하고, 주변 대륙으로부터 방출된 담수의 영향으로 영양염류를 비롯한 화학성분들의 시공간적 변화가 심하다 (강, 1974; Lim, 1976). 우리나라 서남해안을 따라서는 제주해협으로 들어오는 서한연안류 (West Korea Coastal current)를 통해 황해 및 북동중국해로부터 남해대륙붕으로 퇴적물을 포함한 다양한 화학물질들이 유입되어 남해의 퇴적물 수급 및 화학물질 농도 분포에 상당한 영향을 미친다 (Wells and Huh, 1984; Chough, 1983; Lee *et al.*, 1990; Suk *et al.*, 1996).

또한 남해의 해안일대에는 낙동강, 섬진강등 중소규모 하천들과 대규모의 항만과 입해 공업단지등이 밀집되어 많은 양의 영양염류를 포함하는 다량의 화학물질들이 방출되어 남해로 유입된다.

특히 최근 중국 창장 (양자강) 수자원보호국의 조사에 의하면 양자강 주변의 50개 대도시와 16만개의 공장에서 배출되는 생활하수 및 공장폐수중 83%가 정화처리 없이 배출되어 상당량의 오염물질이 제주도 서부 북동중국해 황해로 배출되어지고 있고, 이러한 폐수배출량은 매년 2-3%씩 증가하고 있다고 보고한 바 있다. 양자강수는 동중국해를 거쳐 우리나라 남해 뿐 아니라 동해까지도 영향을 미치고 (강, 1974; Guan and Mao, 1982; 김 등, 1991; 김과 노, 1994; 이 등, 1996; 김 등, 1998; 이 등, 1998; 이, 1999), 특히 양자강수의 남해 유입 길목인 제주해협은 지형적으로 제주도 인근 남부해역에서는 고염고온빈영양의 대마난류수가 위치하며, 한반도 해안부근 북부해역에서는 저염저온고영양의 연안수가 위치하고, 이러한 남북간의 수괴특성의 상이로 인한 전선은 제주해협에서 대한해협까지 뚜렷하게 연중 존재한다. 따라서 화학물질들의 시공간적 변화 및 분포특성에 대한 연구는 남해의 생태계 carrying capacity와 기후관련 원소인 탄소등의 생지화학 과정 및 순환과정을 이해하는데 있어 상당히 중요하다. 그러나 현재까지 남해에 대한 생지화학 과정 및 순환에 대한 연구는 연안역에 일부 수행되어 있고, 남해 대륙붕역에서의 해양 환경과 생물의 기초 생산력을 결정짓는 무기 영양염류를 포함한 화학종의 거동과 해양 환경에 미치는 영향은 연구가 매우 미흡하다 (이, 1999).

이에따라 본 연구에서는 영양염을 포함한 친생물원소의 계절별, 수괴구분별 분포 특성을 이해하는데 목적을 두었다.

### 3.2. 방법 및 재료

본 연구의 현장 조사는 1999년 2월과 8월에 보길도와 제주도를 잇는 제주해협 (관측선 A), 그리고 1999년 5월과 10월에 대한해협 북단 (관측선 N)과 남단 (관측선 S)에 대한 조사를 실시하였다. 연구해역의 조사정점과 정점 좌표는 Fig. 3-3-1. 과 Table 3-3-1~3-3-4에 나타내었다.

2월과 8월 조사는 한국해양연구소 연구선 이어도호를 사용하였고, 5월과 10월의 대한해협 조사는 미국 스크립스 해양연구소의 R/V Roger Revelle을 사용하여 수행하였다. 용존산소 및 용존 무기영양염류 분석용 해수시료 채취는 표준수심 (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m)을 기본으로 하여 Rosette 에 부착된 5리터 용량의 Niskin 해수 채수기를 이용하여 채수하였다.

용존 무기영양염류를 위한 시료는 현장에서 구경 0.45 $\mu$ m Millipore 막 여과지로 여과한 후 10% 염산으로 미리 세척한 20ml 고밀도 폴리에틸렌 병에 담아 -20 $^{\circ}$ C이하로 즉시 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

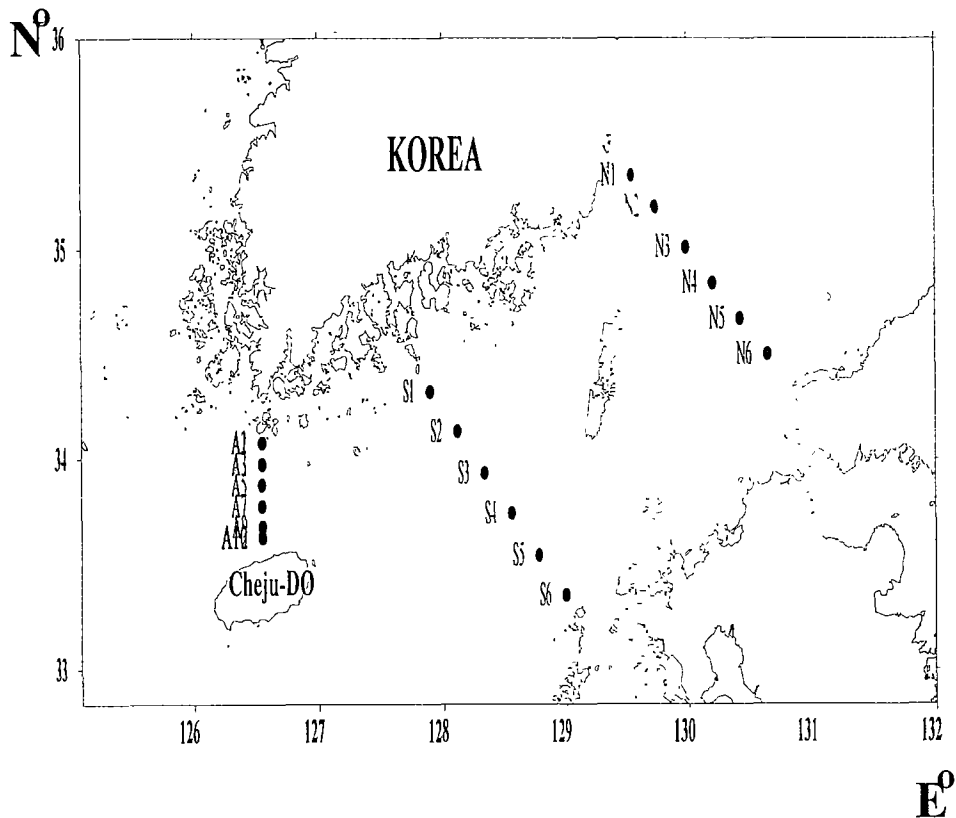


Fig. 3-3-1. Maps of sampling stations in 1999 in the Cheju-Korea Strait.

Table 3-3-1. Location of sampling stations in the Cheju Strait  
in February 22~23, 1999.

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
A1	34° 4.6'	126° 33.1'	38
A3	33° 58.4'	126° 33.04'	56
A7	33° 46.4'	126° 33.05'	97
A10	33° 37.6'	126° 32.85'	125

Table 3-3-2. Location of stations in the Korea Strait  
in May 5~15, 1999.

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
N1	35° 21'	129° 33'	120
N2	35° 12'	129° 44.4'	140
N3	35° 00.6'	129° 59.4'	133
N4	34° 50.4'	130° 12.6'	125
N5	34° 40.2'	130° 25.8'	126
N6	34° 30'	130° 39'	118
S1	34° 19.2'	127° 54'	128
S2	34° 7.8'	128° 7.2'	89
S3	33° 55.8'	128° 20.4'	114
S4	33° 44.4'	128° 33.6'	108
S5	33° 32.4'	128° 46.8'	152
S6	33° 21'	129° 00'	116

Table 3-3-3. Location of stations in the Cheju Strait  
in August 4~8, 1999.

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
A2	34° 01.52'	126° 32.97'	44
A5	33° 52.48'	126° 32.95'	67
A9	33° 40.58'	126° 33.03'	123
A11	33° 34.46'	126° 32.92'	109

Table 3-3-4. Location of stations in the Korea Strait  
in May 5~15, 1999.

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
N1	35° 21.93'	129° 36.02'	119
N2	35° 12.14'	129° 44.4'	132
N3	35° 00.6'	129° 59.4'	126
N4	34° 50.4'	130° 12.6'	118
N5	34° 41.5'	130° 25.6'	118
N6	34° 30'	130° 39'	110
S1	34° 31.9'	127° 89.9'	54
S2	34° 7.8'	128° 7.2'	82
S3	33° 93.1'	128° 34.1'	108
S4	33° 44.4'	128° 33.6'	102
S5	33° 32.5'	128° 46.8'	143
S6	33° 21'	129° 00'	100

### 3.2.1. 입자성 부유물질 (Suspended particulate matter; SPM)

건조기를 이용 100℃에서 1시간 동안 건조시킨 후 데시게이터에 넣어 방냉한 후 전자저울(Ohaus, AP250D)을 이용하여 무게를 측정된 Nuclepore (PC membrane, 0.4μm) 여과지로 해수시료를 여과한 다음 증류수로 5-6회 세척하여 염분을 제거한 후 냉동 보관하여 실험실로 옮겨 다시 100℃에서 건조하여 여과하기 전의 여과지 무게를 감하여 입자성 부유물질의 무게를 얻었다 (precision : ±0.02mg/ℓ).

### 3.2.2. 용존산소 (Dissolved Oxygen; DO)

용존산소 함량을 구하기 위해 기존의 Winkler 방법에서 오는 실험상의 오차를 줄이기 위해 현장에서 직접 spectrophotometer를 이용한 비색측정법 (Pai *et al.*, 1993)을 사용하였다. 표준시료로는 일련의 해수시료 (주로 표층해수)에 potassium iodate standard solution (5mM KIO<sub>3</sub>)을 각각 0, 1, 2, 3 ml 넣고 각각의 흡광도를 측정하여 용존산소 함량을 계산하였다.

### 3.2.3. 용존 무기 영양염류 (Dissolved inorganic nutrients)

용존성 암모니움 이온, 질산이온, 인산이온은 Grasshoff *et al.* (1983)에 의거 자동 분석기 (Alliance Autoanalyzer)를 사용하여 측정하였으며 분석방법은 다음과 같다.  
-암모니움 이온 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) : 시료에 phenol과 sodium nitroprusiate 혼합용액 및 sodium citrate와 sodium dichloroiosocyanuete 혼합용액을 가하여 발색시켰다 (precision : ±4.8% at 1 μM).

-질산이온 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) : 시료를 Cu-Cd column에 통과시켜서 아질산이온으로 환원시킨 후 아질산이온 분석방법과 같은 방법으로 발색시켰다 (precision : ±0.5% at 10 μM).

-인산이온 (HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) : 시료에 ammonium molybdate, potassium antimonyl tartarate



와 황산의 혼합시약을 가하고 ascorbic acid로 환원시켜 발색시켰다 (precision :  $\pm 0.1\%$  at  $1 \mu\text{M}$ ).

-규산 ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) : 시료에 ammonium molybdate를 가하여 silicomolybdate complex를 만든 후 oxalic acid와 ascorbic acid를 가하여 발색시켰다 (Parson *et al.*, 1984. precision :  $\pm 0.5\%$  at  $10 \mu\text{M}$ ).

#### 3.2.4. 클로로필 a

해수시료 1 l를 GF/F (Whatman) 여과지로 여과하여 냉동한 후 실험실로 옮겼다. 90% 아세톤을 5ml 가하여 24시간 동안 플라스크를 색소를 추출한 후 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 흡광도를 측정하였다 (Parson *et al.*, 1984).

### 3.3. 결과 및 고찰

1999년 2월과 8월 두차례에 걸친 제주해협 부근 (관측선 A) 에 대한 관측 자료는 Table 3-3-5~6에 수록하였다.

#### 3.3.1. 관측선 A (제주해협) 화학물질 분포 특성

##### 3.3.1.1. 1999년 2월

용존산소 함량은  $260\sim 323 \mu\text{M}$ 의 범위로서 수심이 얇은 보길도 근해 정점 A1에서  $323 \mu\text{M}$ 이상의 높은 용존산소 함량을 보이거나, 제주도 근해로 갈수록 점차 감소하여 제주도 근해 정점 A10 표층에서 최소값을 보였다 (Fig. 3-3-2). 수직적으로는 거의 균일하여, 표, 저층수간 수직 혼합이 활발히 이루어 졌음을 시사한다. 용존 산소 포화도는 전 수층에 걸쳐  $100\sim 109\%$  사이의 범위를 보였다.

질산 이온, 인산 이온 및 규산의 농도 분포는 각각  $1.6\sim 8.7$ ,  $<0.1\sim 0.6$ ,  $3.8\sim 13.5 \mu\text{M}$  로서, 수심이 얇은 연안역에서는 저층수의 혼합으로 인해 표층 농도가 비교적 높고, 수직적으로 균일하다.

그러나 제주도쪽으로 갈수록 이들 농도는 감소하여 고염 ( $>34 \text{psu}$ )의 특성을 보이는 제주근해에서 질산이온, 인산이온 및 규산 농도는 각각  $<4$ ,  $<0.3$ ,  $<6 \mu\text{M}$  이다 (Fig. 3-3-2).

엽록소 a는  $0.03\sim 0.20 \mu\text{g}/\text{l}$  범위로서 높은 탁도를 보이는 연안역보다는 비교적 수심이 깊고 저층으로부터 영양염을 공급받을 수 있는 정점 A3과 A7의 표층에서 다소 높다 (Fig. 3-3-2).

Table 3-3-5. Water column of biogeochemistry in the Cheju Strait during February 22-24, 1999.

Station	Depth (m)	Temp (°C)	Sal (psu)	$\sigma-t$	DO ( $\mu$ M)	DO-S (%)	NO <sub>2</sub> ( $\mu$ M)	NO <sub>3</sub> ( $\mu$ M)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu$ M)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu$ M)	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu$ M)	Chl-a ( $\mu$ g/l)
A1	0	8.57	33.0	25.41	309.3	104.9	0.15	8.68	0.22	0.54	13.53	0.12
	10	8.56	33.0	25.42	317.2	107.5	0.17	5.70	0.26	0.30	8.89	0.11
	20	8.56	33.0	25.42	317.5	107.6	0.23	4.76		0.25	7.01	
	35	8.41	33.0	25.45	323.5	109.3	0.21	5.81	0.30	0.33	8.13	0.11
A3	0	11.68	33.9	25.55	280.1	102.2	0.08	5.62	0.28	0.38	7.95	0.18
	10	12.33	34.0	25.54	273.5	101.3	0.24	4.40	0.62	0.43	6.52	0.11
	20	12.70	34.1	25.55	270.3	101.0	0.33	4.30	0.28	0.18	6.03	0.07
	30	12.76	34.1	25.55	269.8	100.9	0.20	3.44	0.30	0.38	4.96	0.04
	50	12.78	34.2	25.55	271.8	101.7	0.22	6.84	0.14	0.37	9.38	
A7	0	14.11	34.4	25.44	262.4	101.1	0.04	2.51	0.49	0.08	5.90	
	10	14.11	34.4	25.43	264.1	101.8	0.06	2.37	0.06	0.11	5.27	0.19
	20	14.11	34.4	25.43	264.1	101.7	0.05	2.90	0.06		6.03	0.16
	30	14.11	34.4	25.43	262.6	101.1	0.03	3.36	0.30	0.23	5.41	0.07
	50	14.07	34.3	25.43	264.5	101.8		2.68	0.06	0.20	5.76	0.12
	75	14.07	34.3	25.43	264.7	101.9	0.02	3.57	0.06		4.78	0.07
A10	92	14.08	34.3	25.43	264.2	101.7	0.00	4.15		0.59	5.72	
	0	14.17	34.4	25.42	261.2	100.7	0.25	2.48	0.56		7.50	0.03
	10	14.21	34.4	25.42	261.5	100.9	0.08	2.06	0.28	0.14	5.58	0.07
	20	14.21	34.4	25.42	260.6	100.6	0.17	3.39	0.06	0.38	5.72	0.07
	30	14.23	34.4	25.42	262.9	101.5	0.14	2.12		0.33	4.83	
	50	14.32	34.4	25.41			0.08	2.18	0.06	0.18	4.11	
	75	14.43	34.4	25.41	260.9	101.2	0.09	1.65	0.06	0.46	3.84	0.04
120	14.43	34.4	25.41	267.4	103.7	0.05	1.84		0.46	4.11		

Table 3-3-6. Water column of biogeochemistry in the Cheju Strait during August 4-8, 1999.

Station	Depth (m)	Temp (°C)	Sal (psu)	$\sigma$ -t	DO ( $\mu$ M)	DO-S (%)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu$ M)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu$ M)	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu$ M)	Chl.-a ( $\mu$ g/l)	S.S (mg/l)
A2	0	20.61	32.42	22.45	236.50	102.15	0.18	2.21	0.21	0.06	6.38	0.09	0.28
	10	20.31	32.46	22.56	235.73	101.28	0.22	2.57	0.20	0.09	5.52	0.15	0.77
	20	19.86			232.41	92.02						0.28	2.56
	30	18.39	32.93	23.40	218.17	90.68	0.14	5.81	0.13	0.31	10.00	0.02	2.27
A5	0	21.20	32.67	22.48	238.85	104.44	0.03	1.25	0.17	0.02	7.52	0.15	0.29
	10	20.69	32.87	22.76	222.23	96.38	0.09	2.27	0.21	0.03	8.00	0.18	0.25
	20	19.65	33.10	23.21	221.53	94.38	0.14	3.87	0.19	0.13	8.57	0.10	0.33
	30	19.36	33.17	23.33	228.08	96.69	0.18	4.60	0.19	0.18	9.05	0.10	0.22
	56	15.26	33.97	24.90	212.31	83.51	0.07	6.59	0.19	0.36	10.48	0.10	1.61
A9	0	21.17	32.36	22.26	248.68	108.48	0.01	0.47	0.19	0.01	8.86	0.22	0.26
	10	21.07	32.43	22.34	243.07	105.88	0.01	0.55	0.14	0.01	8.76	0.49	0.63
	20	20.55	32.72	22.69	237.00	102.44	0.07	1.69	0.14		8.86	0.10	0.35
	30	20.08	32.91	22.95	227.96	97.79	0.11	2.90	0.15	0.08	8.86	0.10	0.35
	50	16.58	33.56	24.29	220.54	88.83	0.16	5.31	0.13	0.26	10.00	0.10	0.52
	75	16.18	33.97	24.69	207.17	83.00	0.05	6.73	0.15	0.34	10.48	0.10	0.70
	120	14.98	34.19	25.12	197.54	77.38	0.01	9.59	0.15	0.55	14.38	0.10	2.39
A12	0	20.91	32.49	22.43	235.83	102.48	0.14	3.23	0.26	0.03	10.67	0.15	0.54
	10	20.81	32.59	22.52	231.18	100.32	0.09	2.45	0.29	0.03	9.62	0.08	0.52
	20	20.23	32.84	22.86	231.72	99.64	0.09	2.94	0.21	0.09	9.24	0.14	2.51
	30	19.62	33.05	23.18	219.99	93.64	0.16	4.52	0.21	0.19	9.81	0.10	2.84
	50	17.37	33.61	24.15	215.32	88.10	0.09	5.78	0.20	0.29	10.67	0.10	2.90
	65	17.08	33.69	24.27	214.88	87.47	0.09	6.07	0.21	0.31	10.86	0.10	3.16

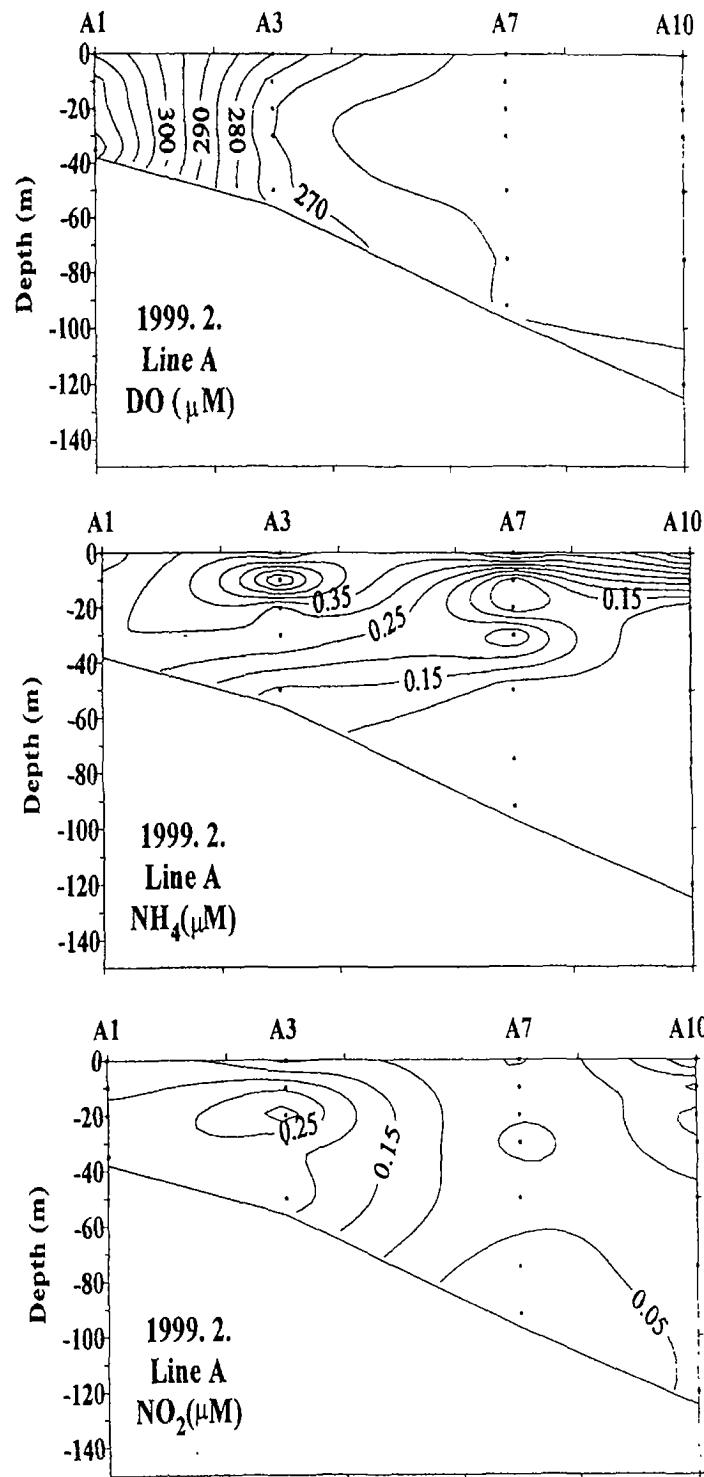


Fig. 3-3-2. Vertical distributions of DO,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , and Chl-a in the Cheju Strait in February 1999.

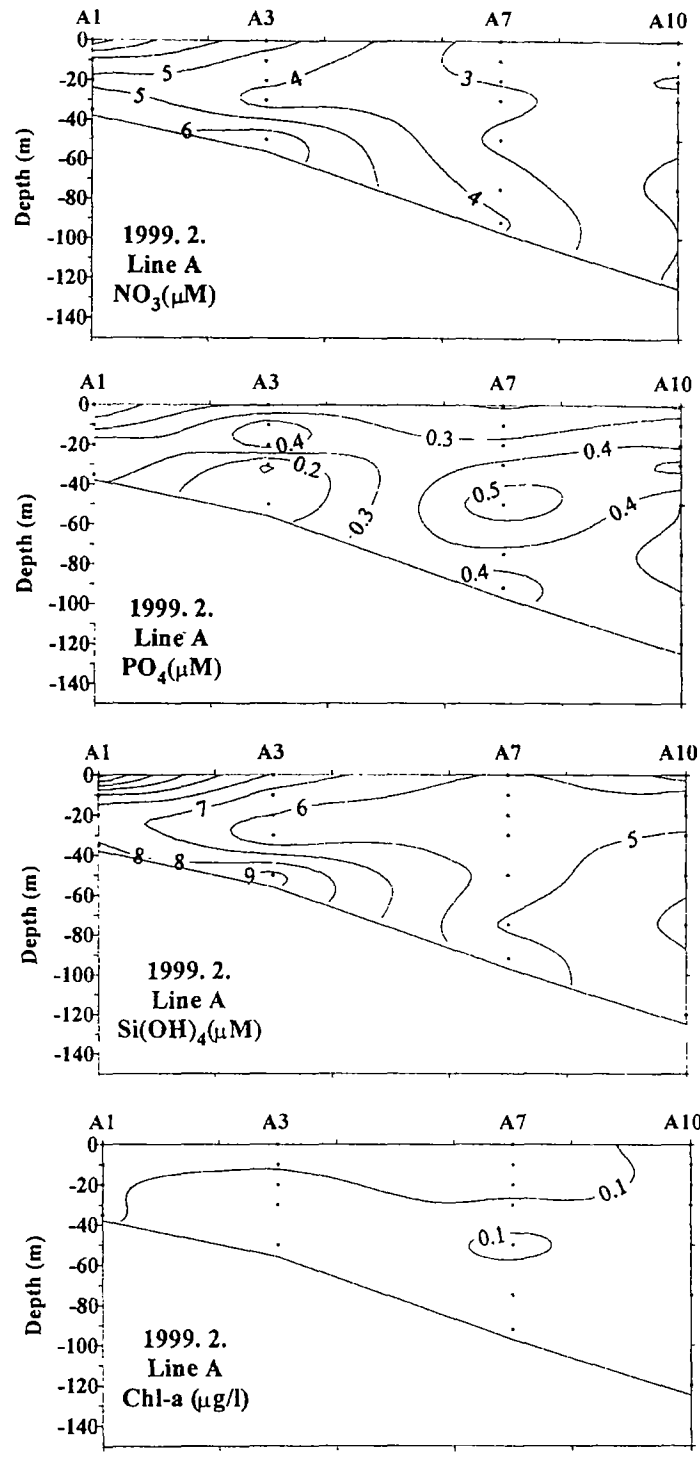


Fig. 3-3-2. (continued).

### 3.3.1.2. 1999년 8월

용존산소 함량은 198~249  $\mu\text{M}$  범위로서 표, 저층수간의 수직혼합이 활발히 이루어진 2월보다는 낮다. 수직적으로도 수심 증가에 따라 용존산소 함량은 급격히 감소하고, 수심이 가장 깊은 제주근해 정점 A9의 저층에서 최저값을 보였다 (Fig. 3-3-3).

용존산소 포화도는 77~108% 범위로서 밀도약층이 존재하는 20m 수심을 경계로 표층혼합층에서는 100% 이상이나, 이하 수심에서는 90% 이하로 불포화되어있다.

입자성 부유물질 농도는 0.2~3.2 mg/ℓ 범위로서 표층에서는 0.5 mg/ℓ 이하이다. 그러나 수심 증가에 따라 입자성부유물질 농도는 급격히 증가하여 밀도약층 (20m 수심) 이하수심에서는 1.0 mg/ℓ 이상으로 높고, 제주근해 정점 A12의 저층에서 최대값을 보였다.

질산이온, 인산이온 및 규산 농도분포는 각각 0.5~9.6, <0.1~0.6, 5.5~14.4  $\mu\text{M}$ 로서 표층혼합층에서의 질산이온, 인산이온 농도는 각각 <2, <0.1  $\mu\text{M}$ 로 낮다. 그러나 수심이 증가할수록 이들 영양염 농도는 급격히 증가하여, 최소값의 용존산소 함량 및 포화도를 보인 제주근해 정점 A7의 저층에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-3-3).

엽록소 a의 농도분포는 <0.1~0.5  $\mu\text{g}/\ell$ 의 범위로서 용존산소함량 및 포화도가 최대인 정점 A5와 A9의 표층에서 가장 높으나 고온고염 (14.2°C, 34.4psu) 특성을 갖는 제주근해 정점 A10 에서는 0.1  $\mu\text{g}/\ell$  이하로 낮다 (Fig. 3-3-4).

### 3.3.2. 대한해협 화학물질 분포 특성

1999년 5월과 10월 두차례에 걸친 대한해협 (관측선 N과 S) 에 대한 자료는 Table 3-3-7~8에 수록하였다.

#### 3.3.2.1. 1999년 5월

관측선 N (대한해협 대마도 북부)의 용존 무기영양염류 농도 분포는 질산 이온이 0.1~10.7  $\mu\text{M}$ , 암모니움 이온이 <0.1~0.6  $\mu\text{M}$ , 인산 이온이 <0.1~1.3  $\mu\text{M}$ , 규산이 <0.1~18.5  $\mu\text{M}$ 의 범위이다. 표층혼합층에서 질산이온, 인산이온 및 규산 농도는 각각 <0.5, <0.1, <2  $\mu\text{M}$  이하로 낮다. 그러나 밀도약층이 형성되어 있는 수심 30~50 m를 경계로 이들 농도는 급격히 증가하여 한국연안 정점 N2의 저층에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-3-5).

엽록소 a 농도는 <0.1~0.8  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서, 정점 N3의 표층에서 가장 높다. 수직적으로는 표층보다는 적당한 광도와 영양염 공급이 비교적 수월한 수심 10~30 m에서 높은 엽록소 a 농도를 보였다 (Fig. 3-3-5).

관측선 S (대한해협 남부)에서는 질산 이온이 0.6~8.9  $\mu\text{M}$ , 암모니움 이온이 <0.1~0.7  $\mu\text{M}$ , 인산 이온이 <0.1~0.5  $\mu\text{M}$ , 규산이 <0.1~14.4  $\mu\text{M}$ 의 농도범위로서 규산을 제외하고 대한해협 북단 (관측선 N)보다 최대값에서 낮다. 이들 농도는 수심 증가에 따라 증가하여 정점 S3의 저층에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-3-5).

엽록소 a 함량은 <0.1~0.4  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 대한해협 북단의 경우와 같이 수심 20

m 부근에서 높다 (Fig. 3-3-5).

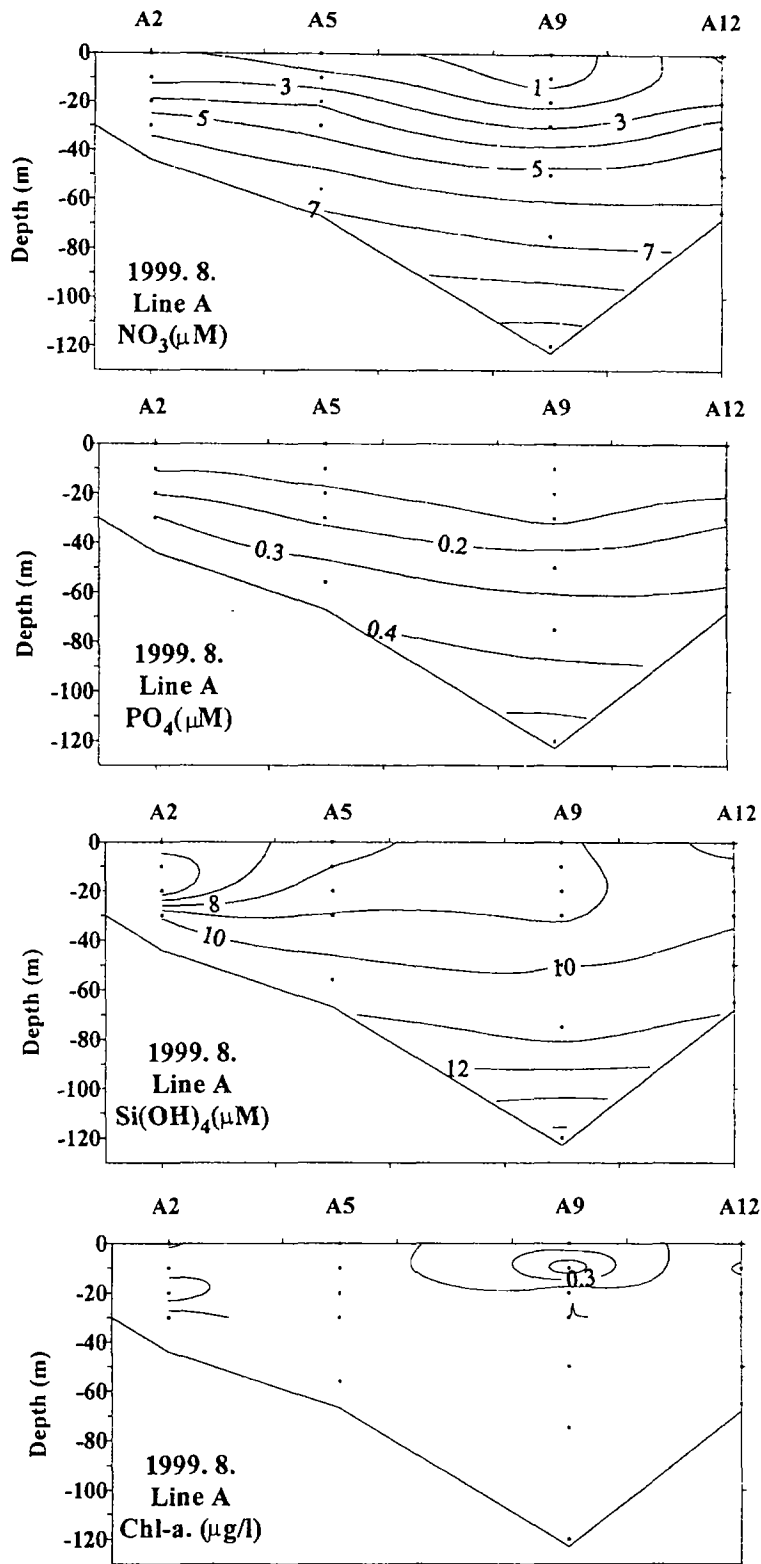


Fig. 3-3-3. Vertical distributions of DO,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{Si(OH)}_4$ , Chl-a in the Cheju Strait in August 1999.

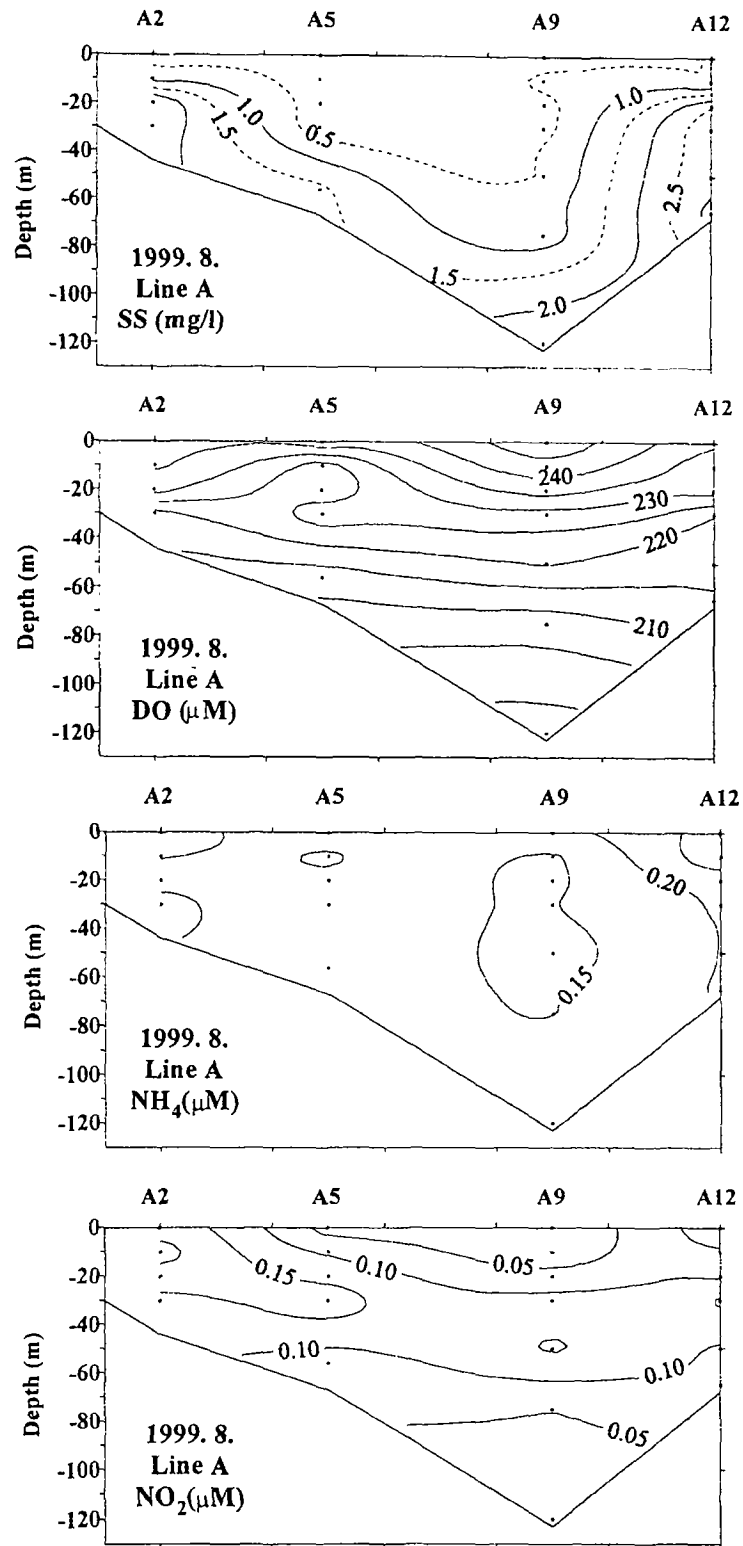


Fig. 3-3-3. (continued).



Table 3-3-7. Water column of biogeochemistry in the Korea Strait during May 5-15, 1999.

Station	Depth (m)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μM)	Si(OH) <sub>4</sub> (μM)	Chl-a. (μg/l)
N 1	0	0.01	0.87				0.05
	10	0.23	0.36		0.04		0.39
	20	0.23	0.27	0.03	0.06	2.02	0.43
	30	0.25	0.26	0.09	0.07	0.43	0.09
	50	0.64	2.69	0.17	0.26	4.76	
	75	0.88	4.55	0.11	0.44	8.61	0.06
	113	0.53	8.53	0.27	0.76	18.46	
N2	0	0.12	0.55	0.13	0.04	1.63	0.10
	10	0.10	0.55	0.08	0.03	1.44	0.22
	20	0.12	0.85	0.15	0.06	2.45	0.51
	30	0.17	3.88	0.06	0.25	6.83	0.43
	50	0.10	5.93	0.06	0.41	10.77	0.06
	75	0.06	5.87	0.17	0.42	9.71	
	130	0.12	10.73		1.27	15.87	
N3	0	< 0.10	0.53	0.18	0.03	0.14	0.82
	10	< 0.10	0.83			0.53	0.57
	20	< 0.10	0.60	0.24	0.12	0.19	0.60
	30	< 0.10	0.56	0.20	0.12	0.53	0.29
	50	< 0.10	0.60	0.19	0.08	0.34	0.20
	75	< 0.10	0.74	0.24	0.09	0.77	
	100	0.60	1.16	0.46	0.14	2.79	
133	0.53	6.73	0.14	0.58	14.13		
N4	0	0.19	0.38				0.04
	10	0.36	1.27	0.02	0.07	2.40	0.58
	20	0.45	3.14	0.04	0.22	5.29	0.12
	30	0.73	4.62	0.17	0.51	7.60	
	50	1.25	3.31	0.10	0.33	7.36	
	75	0.84	4.38	0.11	0.37	9.57	
	125	0.25	5.02		0.43	10.34	
N5	0	0.10	0.46	0.36	0.04	1.20	0.20
	15	0.10	0.57		0.01	2.45	0.27
	30	0.25	3.14	0.29	0.19	7.26	0.36
	50	0.19	3.60	0.15	0.23	8.08	0.10
	130	0.60	3.22	0.47	0.33	8.75	0.02
N6	0		0.51	0.14	0.06	2.02	0.26
	15	0.36	0.11	0.15	0.05	1.59	0.14
	30	0.34	0.25	0.20	0.05	1.83	0.18
	60	0.49	0.86	0.60	0.16	2.98	0.14
	118	0.95	2.09	0.23	0.21	5.14	0.06

Table 3-3-7. (continued).

Station	Depth (m)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μM)	Si(OH) <sub>4</sub> (μM)	Chl-a. (μg/l)
S1	0	0.23	0.55	0.01		2.79	0.09
	10	0.30	0.56	0.01	0.02	3.65	0.06
	20	0.79	2.69	0.09	0.22	5.91	0.44
	30	0.71	3.21		0.21	6.20	0.23
	54	0.77	3.32	0.13	0.19	5.96	
S2	0		0.88	0.01	0.02	0.01	0.01
	10	0.01	0.81	0.07	0.06	0.01	0.01
	20	0.10	1.96	0.13	0.07	3.12	0.27
	30		4.30	0.04	0.15	5.72	0.06
	52	0.21	3.95	0.13	0.15	4.57	
	85	0.14	4.70	0.09	0.22	6.06	
S3	0		1.47	0.10	0.03	1.20	
	35	0.17	1.87	0.08		3.85	0.34
	45	0.08	2.55	0.24	0.04	4.04	0.26
	75	0.10	7.87	0.22	0.37	11.92	
	107	0.08	8.91	0.11	0.42	13.17	
S4	0		1.60	0.15	0.06	2.60	0.01
	15	0.32	1.32	0.13	0.09	2.88	0.14
	30	0.32	1.20	0.14	0.12	2.36	
	50	0.66	2.04		0.36	3.85	0.17
	75					8.46	
	103	0.51	6.24	0.22	0.48	14.42	
S5	0	0.25	1.43	0.01	0.03	1.63	0.01
	15	0.01	1.42	0.01	0.03	1.11	
	30	0.19	1.21	0.08	0.05	1.11	
	50	0.06	1.44	0.15	0.03	1.49	
	90	0.32	1.91	0.52	0.10	3.46	
	145	0.62	4.63	0.48	0.17	9.90	
S6	0	0.32	0.90	0.08	0.03	1.73	0.01
	15	0.08	0.97	0.66		0.72	0.01
	30	0.17	1.39	0.31	0.13	1.35	0.01
	50	0.14	1.19	0.14		3.80	
	75	0.51	3.74	0.25	0.14	5.14	
	110	0.82	3.64	0.23	0.15	6.49	

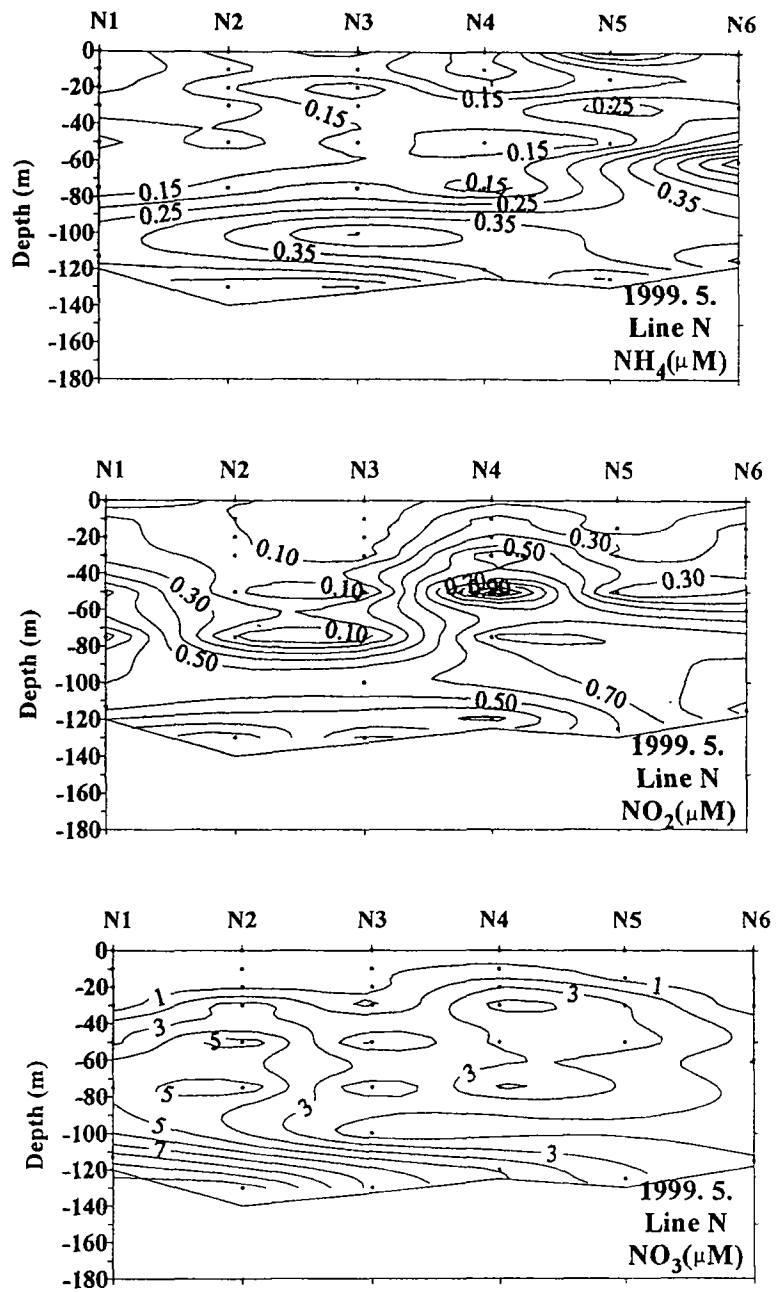


Fig. 3-3-4. Vertical distributions of  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , and Chl-a in the Section S of the Korea Strait in May 1999.

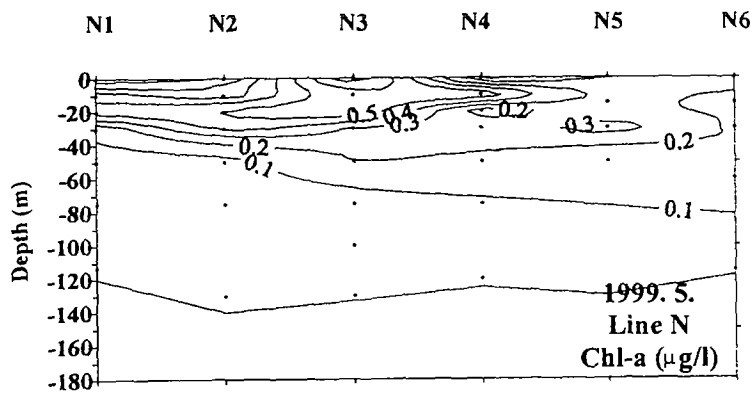
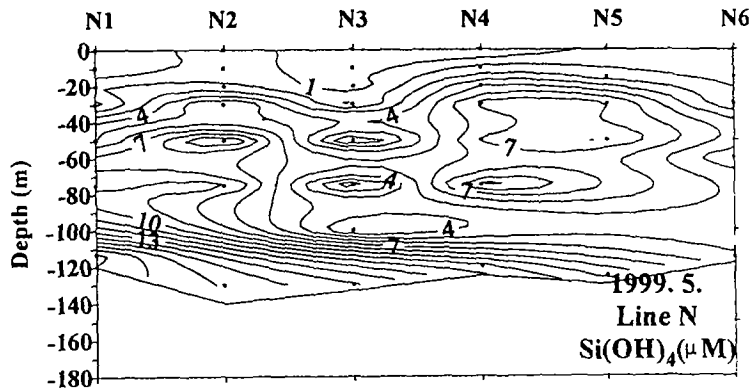
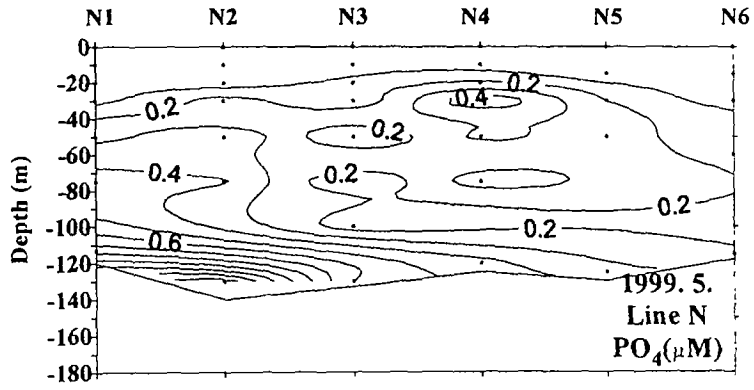


Fig. 3-3-4. (continued).

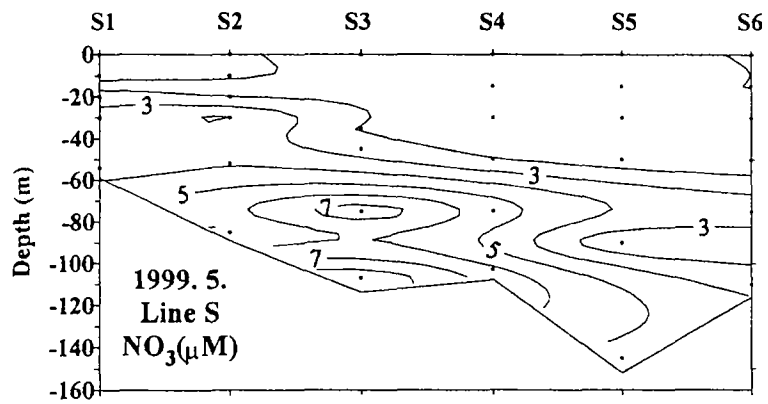
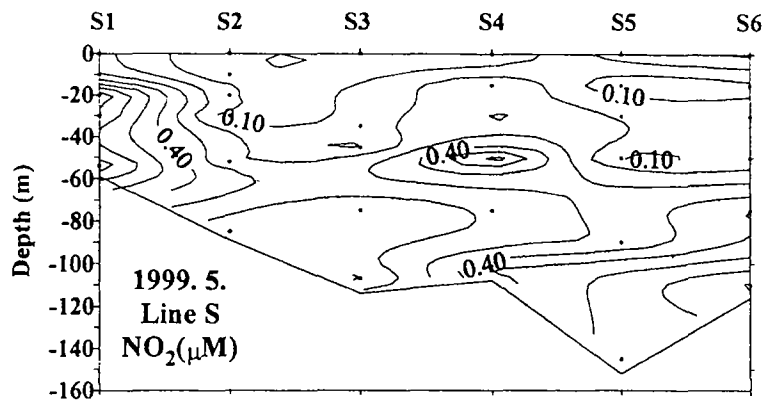
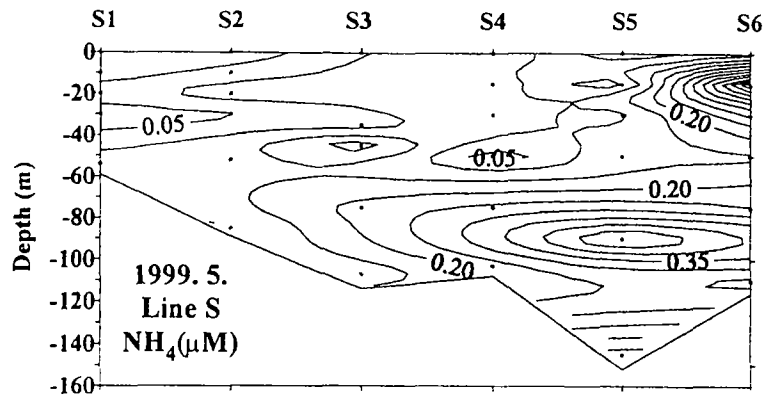


Fig. 3-3-5. Vertical distributions of NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, Si(OH)<sub>4</sub>, and Chl-a in the Section S of the Korea Strait in October 1999.

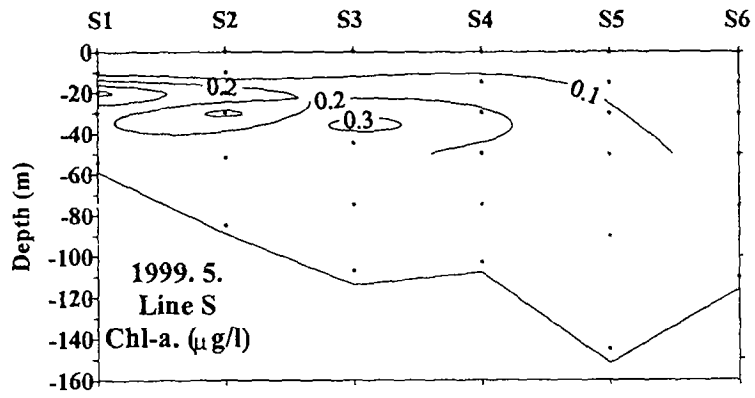
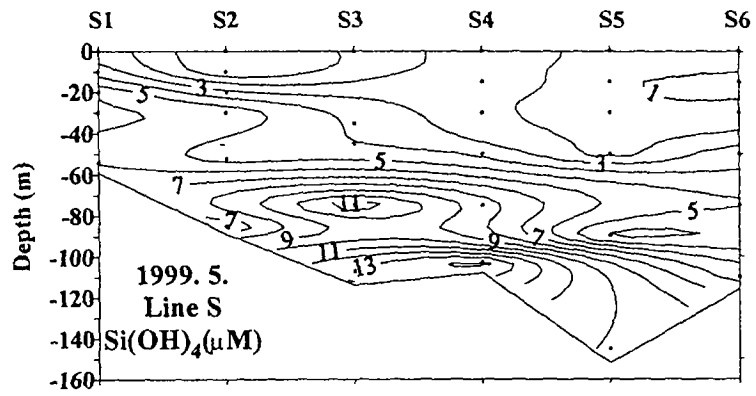
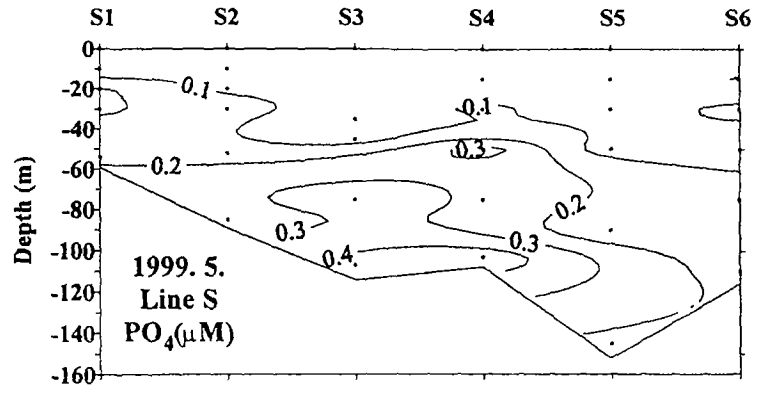


Fig. 3-3-5. (continued).

3.3.2.2. 1999년 10월

관측선 N (대한해협 대마도 북부)에서 질산이온 농도는 0.4~21.9  $\mu\text{M}$ , 암모늄이온이 <0.1~0.3  $\mu\text{M}$ , 인산 이온이 <0.1~1.4  $\mu\text{M}$ , 규산이 0.9~31.8  $\mu\text{M}$ 의 범위로서 한국연안에서 일본쪽으로 갈수록 감소하는 양상을 보였다. 이들 농도는 또한 수심이 증가함에 따라 급격히 증가하여 한국연안 정점 N1에서 최대값을 보였고, 이는 5월의 질산 이온 및 규산의 최대값보다 2배정도 높다 (Table 3-3-8, Fig. 3-3-6).

Table 3-3-8. Water column of biogeochemistry in the Korea Strait during October 9-22, 1999.

Station	Depth (m)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{M}$ )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{M}$ )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu\text{M}$ )	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu\text{M}$ )	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu\text{M}$ )	Chl-a. ( $\mu\text{g/l}$ )
N1	0	0.21	1.23	0.26		3.09	0.25
	10	0.17	1.27	0.28	0.05	3.28	0.21
	20	0.19	1.37	0.30	0.08	3.56	0.21
	30	0.16	5.80	0.23	0.19	8.09	0.12
	50	0.02	12.24	0.27	0.61	15.18	
	75		14.83	0.27	0.77	19.11	
	115	0.05	21.96	0.32	1.40	31.84	
N2	0	0.09	2.97	0.17		3.19	0.19
	10	0.11	2.66	0.16	0.09	3.19	0.42
	30	0.15	9.24	0.09	0.25	9.39	0.39
	50	0.05	10.41	0.12	0.43	11.47	0.08
	75	0.01	10.79	0.13	0.44	10.92	0.04
	132	0.07	10.87	0.15	0.43	13.28	
N3	0	0.05	0.44	0.16		2.44	0.16
	10	0.05	0.43	0.18	0.02	2.40	0.26
	20	0.05	0.48	0.09	0.03	2.40	0.38
	30	0.45	1.20	0.03	0.10	2.77	0.39
	50	0.23	4.98	0.04	0.33	6.24	0.18
	75	0.05	7.99	0.08	0.52	9.85	
	122	0.05	10.86	0.09	0.76	18.56	
N4	0	0.04	0.70	0.15	0.04	1.33	0.57
	10	0.09	0.92	0.17	0.06	2.07	0.46
	20	0.38	3.12	0.19	0.18	4.30	0.35
	30	0.47	2.75	0.19	0.16	4.02	0.50
	50	0.06	7.20	0.20	0.44	8.14	0.13
	75	0.02	8.27	0.24	0.51	10.55	
	114	0.02	9.83	0.22		10.78	
N5	0		1.09	0.18	0.03	1.80	0.26
	20	0.04	1.18	0.21	0.05	1.24	0.45
	50	0.09	6.81	0.22	0.35	7.95	0.18
	75	0.02	8.80	0.14	0.52	9.48	0.04
	100	0.02	10.07	0.17	0.61	11.89	
	118	0.05	10.28	0.19	0.63	12.31	
N6	0	< 0.10	1.32	0.25	0.04	1.19	0.25
	10	< 0.10	1.57	0.26	0.04	1.01	0.31
	20	< 0.10	1.37	0.32	0.05	0.92	0.08
	30	< 0.10	1.44	0.31	0.10	0.92	0.29
	50	0.18	3.20	0.32	0.20	2.12	0.09
	75	0.05	6.32	0.25	0.31	6.24	0.04
	106	0.04	8.46	0.33	0.45	8.28	

Table 3-3-8. (continued).

Station	Depth (m)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu$ M)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu$ M)	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu$ M)	Chl-a. ( $\mu$ g/l)
S1	0	0.06	1.54	0.19	0.02	3.51	0.28
	10	0.07	1.49	0.16	0.02	3.19	0.59
	25	0.22	2.53	0.28	0.08	4.39	0.11
	38	0.09	13.14	0.10	0.78	20.69	0.36
	49	0.12	13.98	0.13	0.82	20.69	0.08
S2	0	0.11	1.80	0.07	0.02	4.16	0.38
	10	0.09	1.90	0.06		4.20	0.60
	20	0.05	1.97	0.07		4.25	0.62
	35	0.25	7.66	0.02	0.39	10.31	0.37
	57	0.05	12.77	0.03	0.72	17.72	0.04
	78	0.05	13.06	0.04	0.74	18.42	0.05
S3	0	0.05	1.59	0.16		4.16	0.04
	15	0.05	1.56	0.14		3.74	0.42
	30	0.01	12.52	0.08	0.63	19.11	0.19
	64	0.01	11.89	0.09	0.65	18.09	
	75		12.12	0.10	0.68	17.86	
	104	0.04	13.17	0.13	0.74	18.00	
S4	0		1.28	< 0.10		1.47	0.22
	10		1.30	< 0.10	0.03	1.29	0.18
	20		1.33	< 0.10	0.02	1.33	0.08
	38	0.23	1.53	< 0.10		1.66	0.16
	50	0.07	4.37	< 0.10	0.11	4.57	0.04
	75	0.04	11.38	< 0.10	0.50	16.66	0.03
	78		11.36	0.04	0.56	13.93	
S5	0	0.01	0.22	< 0.10	0.01	1.84	0.07
	10	0.01	0.23	< 0.10	0.02	1.80	0.12
	20		0.32	< 0.10	0.03	1.66	0.22
	35	0.13	0.39	< 0.10	0.05	1.56	0.35
	50	0.45	1.36	< 0.10		2.17	0.10
	75	0.10	4.54	0.04	0.20	5.41	
	90	0.05	9.13	0.13	0.53	14.44	
	130	0.02	10.70	0.11	0.61	15.08	
S6	0		0.64	0.10		1.06	0.26
	15	0.01	0.63	0.14	0.03	1.06	0.15
	30	0.05	0.68	0.13	0.04	1.19	0.21
	45	0.05	0.57	0.22	0.05	1.15	0.15
	75	0.04	6.24	0.19	0.28	6.19	0.05
	105	0.04	6.42	0.21	0.28	6.66	

엽록소 a의 분포는 <0.1~0.6 $\mu$ g/l의 범위로서 5월의 경우와 같이 표층보다는 수심 10~20 m에서 높은 농도를 보였다 (Fig. 3-3-6).

관측선 S (대한해협 남부)의 용존 무기영양염류 분포는 질산 이온이 0.2~14.0 $\mu$ M, 암모니움 이온이 <0.1~0.3 $\mu$ M, 인산 이온이 <0.1~0.8 $\mu$ M, 규산이 1.1~20.7 $\mu$ M의 분포로서 암모니움 이온을 제외하고 5월의 관측값보다 약 1.5~2배 정도 높다. 수직적으로는 대한해협 북단 (관측선 N)과 마찬가지로 수심증가에 따라 이들 농도들은 급격히 증가하며, 한국연안 저층에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-3-7).

엽록소 a 함량은 <0.1~0.6 $\mu$ g/l 범위로서, 한국연안에서 0.4 $\mu$ g/l 이상으로 높고, 수심 10~20 m에서 높은 함량을 보였다 (Fig. 3-3-7).



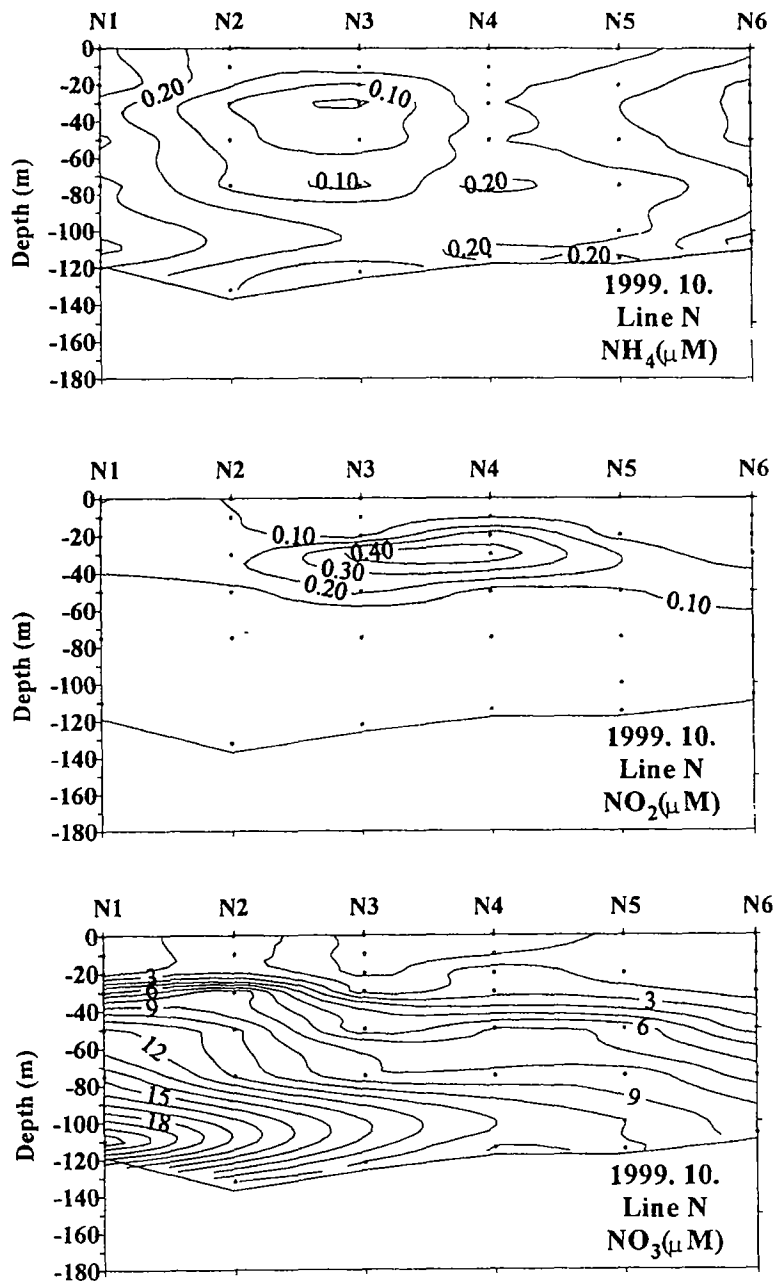


Fig. 3-3-6. Vertical distributions of  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , and Chl-a in the Section N of the Korea Strait in October 1999.

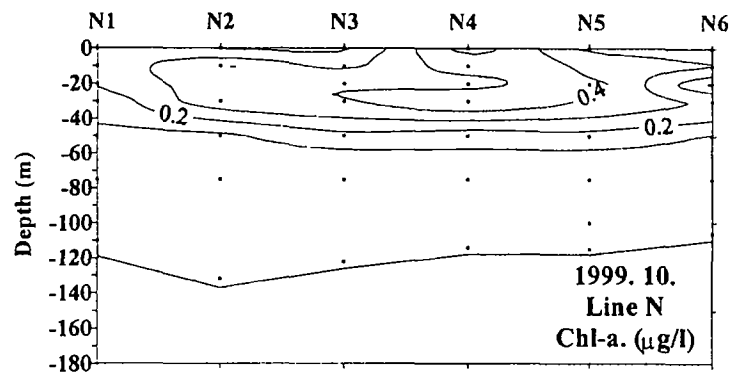
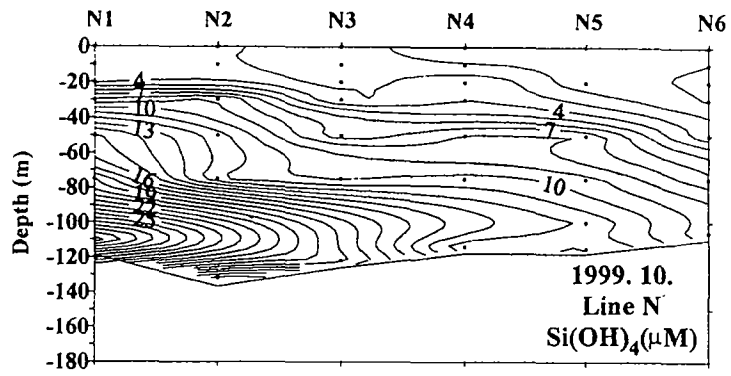
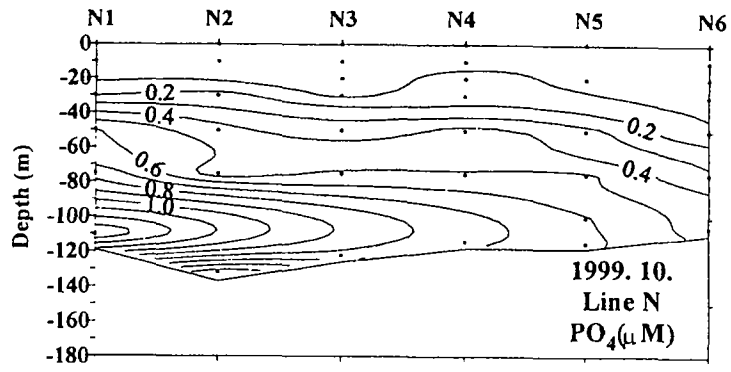


Fig. 3-3-6. (continued).

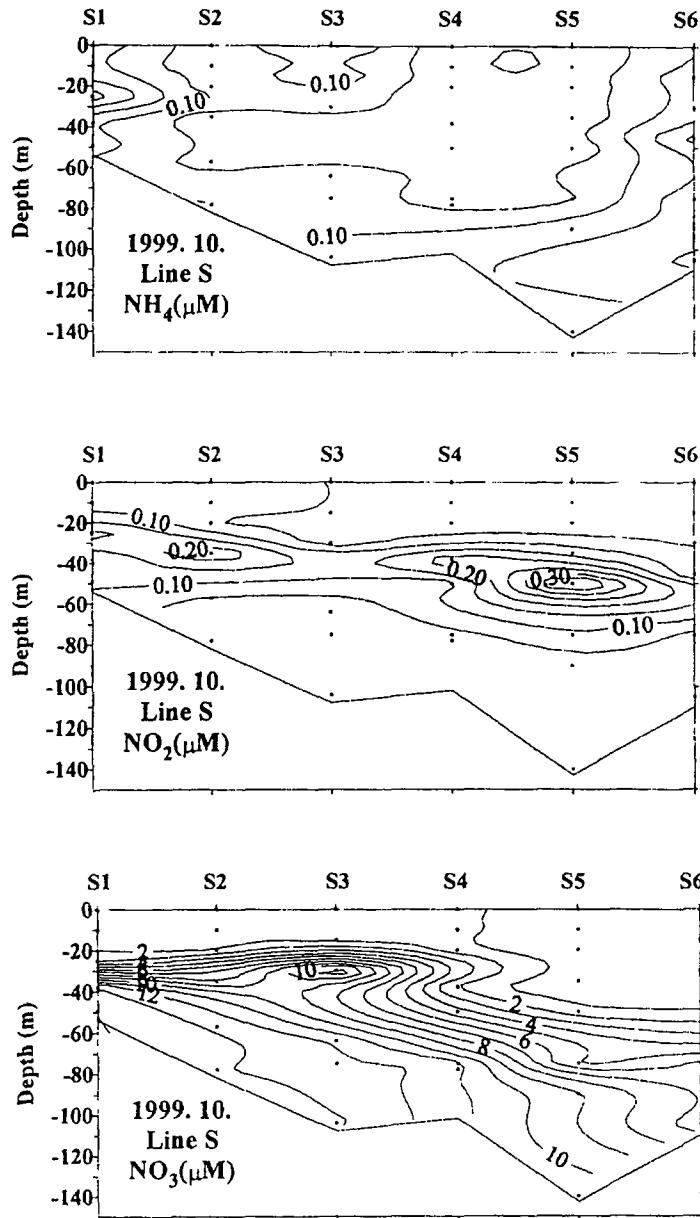


Fig. 3-3-7. Vertical distributions of NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, Si(OH)<sub>4</sub>, Chl-a in the Section S of the Korea Strait in October 1999.

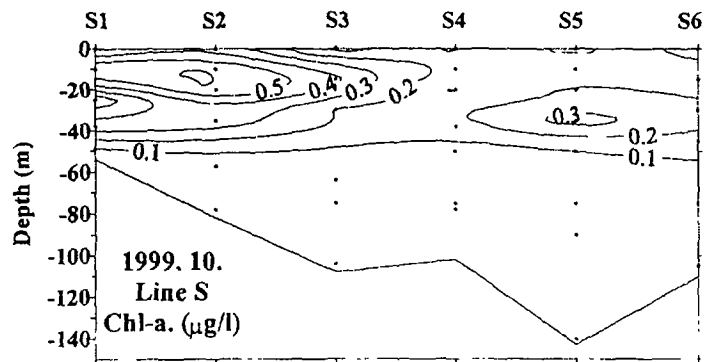
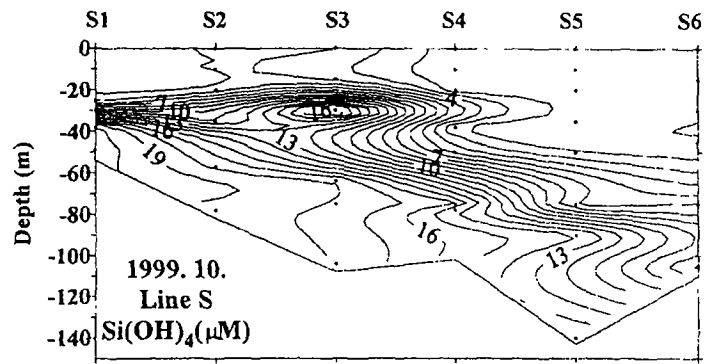
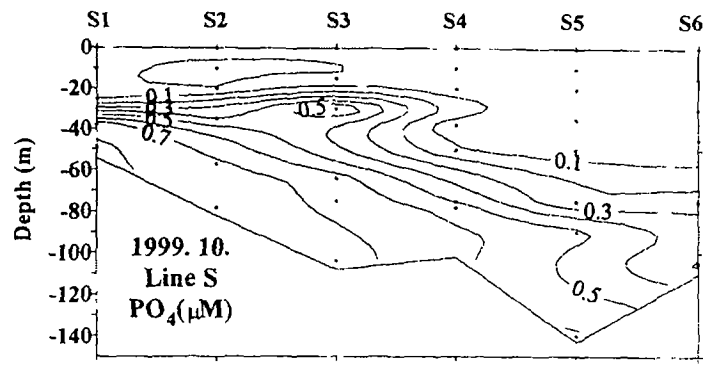


Fig. 3-3-7. (continued).

### 3.4. 고찰

#### 3.4.1. 제주해협의 계절별 화학성분 분포 특성

남해는 저염의 황해 및 남해연안수와 양자강희석수와 고염의 쿠로시오로부터 분지되어 남해로 유입되는 대마난류수, 그리고 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협을 통해 유입되는 제주난류수, 황해에서 남하하여 제주해협을 통해 유입되는 황해저층 냉수등 서로 기원을 달리하는 다양한 해수가 출현하여 시·공간적으로 복잡한 해황을 보이며, 각각의 수괴별로 고유의 화학특성을 갖는다. 따라서 계절변동성이 큰 남해에서의 생지화학적 특성을 이해하기 위해서는 용존산소 및 용존무기영양염류 농도에 대한 계절 변화를 관측하는 것이 필수적이다. 이에따라 수온-염분도표를 기초로하여 1998년 4월, 9월, 11월 및 1999년 2월, 8월 제주해협에 출현하는 고온고염 표층수 (제주도 인접해역), 저염의 연안 표층수 (보길도 인접) 및 저온저염의 저층수로 구분하여 이들 수괴에 따른 친생물원소들의 분포특성을 Table 3-3-9 및 Fig. 3-3-8~11에 정리하였다 (1997, 1998년 자료는 1, 2차년도 보고서 참조).

Table 3-3-9. Ranges of T, S, SS, DO and Nutrients concentrations at each water masses in the Cheju Strait based on T-S diagram.

Water mass	1998. 4.	1998. 9.	1998. 11	1999. 2	1999. 8
남해연안 표층수 (보길도인접해역)	T<11.5, S<33.4 S.S : 2~3 NO <sub>3</sub> : 1.5~2.2 PO <sub>4</sub> : 0.3~0.5 Si(OH) <sub>4</sub> : 2~6	T>23, S<31 S.S : 0.2~2.8 DO: 212~230 NO <sub>3</sub> : 0.1~0.7 PO <sub>4</sub> : <0.1 Si(OH) <sub>4</sub> : 3.5~6.2	T>14, S<32.6 S.S : 1.0~3.2 DO: NO <sub>3</sub> : 5.0~6.4 PO <sub>4</sub> : 0.4~0.6 Si(OH) <sub>4</sub> : 10~14	T<9, S<33.2 DO: 309~323 NO <sub>3</sub> : 4.7~8.7 PO <sub>4</sub> : 0.2~0.3 Si(OH) <sub>4</sub> : 7.0~13.5	T<21, S<32.5 S.S: 0.3~0.8 DO: 235~237 NO <sub>3</sub> : 2.2~8.7 PO <sub>4</sub> : <0.1 Si(OH) <sub>4</sub> : 5~7
외해역 표층수 (제주인근해역)	T<17, S>34.5 S.S : 0.1~0.4 NO <sub>3</sub> : 0.4~0.9 PO <sub>4</sub> : 0.3 Si(OH) <sub>4</sub> : 1~3	T<20 32.5<S<33.5 S.S : 0.3~1.2 DO: 200~224 NO <sub>3</sub> : 0.3~1.5 PO <sub>4</sub> : <0.1 Si(OH) <sub>4</sub> : 2.9~5.9	T>17, 32.6<S<33.9 S.S : 0.4~2.5 DO: 226~240 NO <sub>3</sub> : 1.5~2.5 PO <sub>4</sub> : <0.1 Si(OH) <sub>4</sub> : 4.2~6.5	T>14, S>34.2 DO: 260~264 NO <sub>3</sub> : 2.0~2.9 PO <sub>4</sub> : 0.1~0.5 Si(OH) <sub>4</sub> : 4.1~7.5	T<21, S<32.6 S.S: 0.5~0.6 DO: 231~236 NO <sub>3</sub> : 2.4~3.3 PO <sub>4</sub> : <0.1 Si(OH) <sub>4</sub> : 9~10
저온저층수	T<15, 33.7<S<34.2 S.S : 0.2~0.8 NO <sub>3</sub> : 0.3~1.5 PO <sub>4</sub> : 0.1~0.3 Si(OH) <sub>4</sub> : 2~6	T<15, 33.5<S<34.2 S.S : 1.0~5.5 DO: 163~188 NO <sub>3</sub> : 8.4~10.5 PO <sub>4</sub> : 0.6~0.8 Si(OH) <sub>4</sub> : 12~15	T>17, 32.6<S<34 S.S : 1.0~3.5 DO: <160 NO <sub>3</sub> : 10~13 PO <sub>4</sub> : 0.5~0.8 Si(OH) <sub>4</sub> : 17~21		17<T<15, 33.5<S<34 S.S: 0.7~2.4 DO: 197~212 NO <sub>3</sub> : 6~10 PO <sub>4</sub> : 0.3~0.5 Si(OH) <sub>4</sub> : 10~15

Unit : T: °C, S: psu. S.S.: mg l<sup>-1</sup>, DO, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, Si(OH)<sub>4</sub>: μM

일반적으로 남해 친생물원소들은 계절변화에 따라 뚜렷한 특징을 갖는다.

겨울 (1999년 2월) 제주해협 수괴특성은 활발한 표·저층수간의 수직혼합으로 인해 제주부근 해역의 고온고염수 ( $T > 14^\circ\text{C}$ ,  $S > 34.2$  psu)와 보길도 인접해역의 저온저염수 ( $T < 9^\circ\text{C}$ ,  $S < 33.2$  psu)로 크게 두단으로 나누어 진다 (Fig. 3-8-8a). 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 표층 수온저하로 인한 활발한 수직혼합으로 전 계절에 걸쳐 가장 높고, 연안에서 외해쪽으로 갈수록 감소한다. 그러나 수심이 얇은 (<40m) 보길도 인접해역에서 용존무기영양염류 농도들은 활발한 표·저층수간의 수직혼합에도 불구하고 저층보다 표층에서 높아 한반도 부근 황해 및 주변 육상으로부터 유입이 있음을 암시한다 (Fig. 3-8-8b).

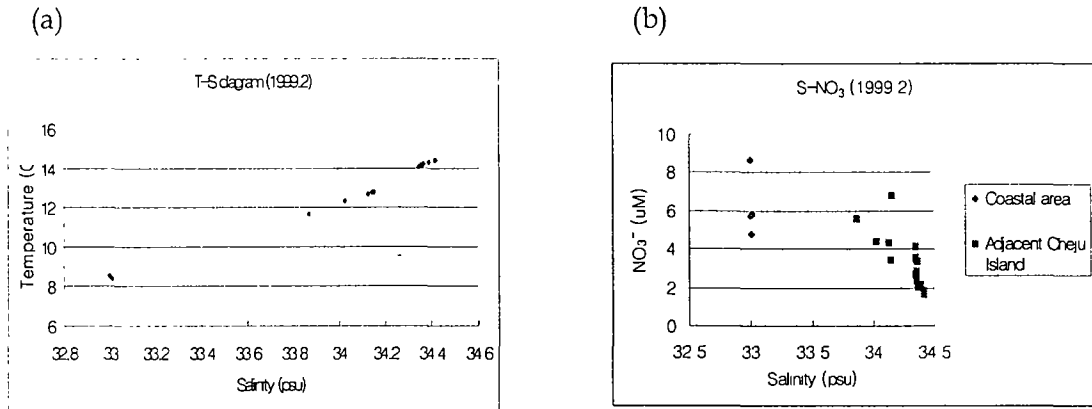


Fig. 3-3-8. T-S diagram (a) and S-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in February 1999.

아직까지 겨울특성을 보이는 이른 봄 (1998년 4월) 수괴특성은 대체로 2월과 유사한 양상을 보여 저염 (<33.5psu)의 연안수, 고염 (>34.5psu)의 외해수 및 미약한 저온저염의 저층수로 구분된다 (Fig. 3-8-9a). 수심이 얇은 연안역에서는 표, 저층수간의 수직혼합으로 인한 저층수로부터의 공급과 또한 육상으로부터의 공급으로 인해 표층수중 친생물원소들의 농도가 높다 (Fig. 3-8-9b). 반면에 고염빈영양의 대마난류 영향과 미약한 성층이 형성되어있는 제주근해 해역은 상대적으로 낮다. 제주근해 해역 저온 저층수 ( $T < 15^\circ\text{C}$ ,  $33.8 < S < 34.2$ )에서의 이들 농도들은 2월보다 낮다.

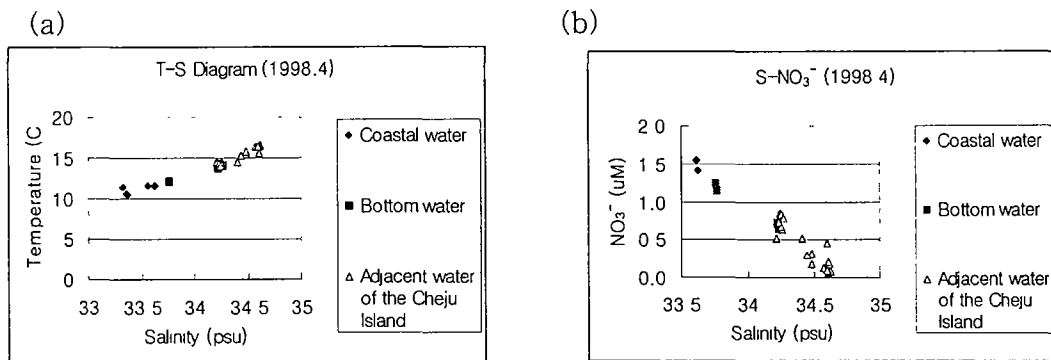


Fig. 3-3-9. T-S diagram (a) and S-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in April 1998.

해저퇴적층의 구성이 실트와 점토로 구성되어 있는 연안역에서 입자성부유물질 농도는  $2 \text{ mg l}^{-1}$  이상으로 높고, 서쪽에서 동쪽으로, 연안에서 제주도쪽으로 갈수록 감소하여 남해로 유입되는 퇴적물중 상당량이 한반도 서남해역의 연안역에서 기원되고 있음을 암시한다. 일반적으로 한반도 서남해역 연안역에서 겨울에 강한 바람의 영향으로 인한 표,저층수의 혼합으로 해저의 퇴적물들이 재부유되어 일부가 남해로 유입되는 것으로 알려져 있다 (Wells, 1988).

여름 (1999년 8)에는 장마로 인한 상당량의 육상수의 유입으로 인해 연안역 뿐만 아니라 제주근해 해역의 표층수 염분도 32.6 psu 이하이다. 따라서 연안 및 외해역 표층수가 두단을 이루는 2월과 4월과는 달리 8월은 연안 및 외해역의 표층 저염수와 저층 고염수간의 혼합수로 이루어 진다 (Fig. 3-8-10a). 이에따라 외해역 표층수의 용존무기영양염류는 수심 10~30 m에 형성된 강한 성층에 의한 저층으로부터의 영양염 공급제한에도 불구하고 춘계 (4월)보다 높다 (Fig. 3-8-10b).

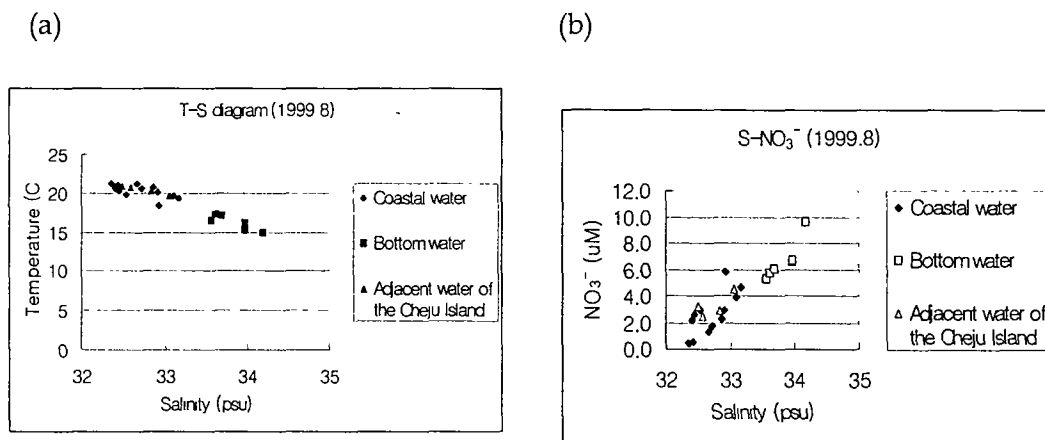


Fig. 3-3-10. T-S diagram (a) and S-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in August 1999.

특히 N/P 비가 4월에는 16.8로서 Redfield 비 (16; Redfield *et al.*, 1974)와 유사하나 8월 표층수의 N/P비는 30 이상으로서 인산이온에 비해 상대적으로 질산이온이 풍부하다. 이것은 양자강 희석수의 영향때문인 것으로 사료되는데, 일반적으로 농업 지역을 집수역으로 하는 중국 하천수는 질소비료의 사용으로 인해 인산염에 비해 상대적으로 풍부하여 황하구에는 N/P 비가 493, 양자강은 58 (Zhang *et al.*, 1985; Hong *et al.*, 1997).. 또한 인산염은 수화철에 의한 제거, 현탁물질에 의한 흡착 및 탈착등 질소계 영양염류와는 다른 물질순환 과정을 겪는 것으로 알려져 있어 양자강 희석수 중 상당량의 인산이온이 운송과정중 제거된다 (Edmond *et al.*, 1985). Kim등 (1998) 또한 1996년 제주 서쪽 및 남쪽해역에서 출현하는 저염의 표층중 인산이온 농도는 주변해역과 유사하나, 질산이온은 상대적으로 풍부하였고, 이를 양자강 희석수에 의한 영향인 것으로 추정하였다. 밀도약층 하부의 저온 저층수 ( $T < 7^{\circ}\text{C}$ ,  $34 < S < 33.5$  psu)에서의 영양염류 농도는 유광대에서 가라앉은 유기물의 지속적 인 분해로 인해 춘계보다 용존산소는 감소하는 반면에 용존무기영양염류 농도는 증가한다.

가을 (1998년 11월)에도 육상수의 영향으로 제주근해 해역의 표층수 염분은 34 psu 이하이고, 영양염류 농도 또한 춘계보다 높다 (Fig. 3-8-11).

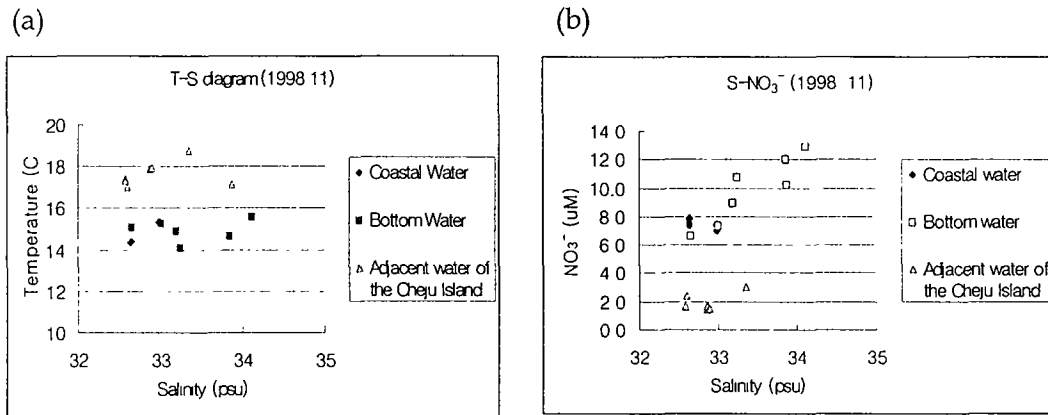


Fig. 3-3-11. T-S diagram (a) and S-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> diagram in the Cheju Strait in November 1998.

저층수에서의 용존산소 함량은 전계절중 가장 낮으나, 영양염류 농도는 가장 높다. 이는 저층에 가라앉은 유기물의 분해로 무기화 (reminalization)되고, 강하게 형성된 밀도약층이 생물활동이 활발한 표층으로의 공급을 제한하여 저층에서 축적되기 때문이다. 남해에서 저온의 특성을 갖는 저층수는 황해냉수계가 기원으로서 제주해협을 북쪽단면을 통해 남해로 유입된 것으로 알려져 있다 (Rho, 1985; Cho and Kim, 1994). 이러한 저온저층수에서의 입자성부유물질 농도 또한 2 mg l<sup>-1</sup> 이상으로 높다. 따라서 이러한 저온저층수를 통해서도 상당량의 부유물질들이 남해로 유입될 수 있다. 조와 김 (1994)은 제주해협을 북쪽을 통해 남해로 유입되는 14°C 이하의 저온수를 통해서 세립퇴적물이 운반되어 유속이 작은 남해 중앙부해역에 퇴적될 가능성을 시사한 바 있다.



## 4. 남해 해수의 유기물 분포 특성 및 해저퇴적물의 유기탄소 함량분포 및 분해

### 4.1. 서론

해수중의 유기물은 용존 (Dissolved Organic Matter; DOM) 및 고형형태 (Particulate Organic Matter; POM)로 존재한다. 이들중 고형유기탄소는 총 유기탄소중 약 11%에 지나지 않으나 (Cauwet, 1978), 동물플랑크톤이나 어류 및 저서동물들에게 먹이로서 제공되어지기 때문에 중요한 역할을 한다. 특히 남해는 연간  $270 \text{ g C m}^{-2}$ 의 높은 일차생산력을 갖고있어 (Chung and Yang, 1991), 생산된 유기물질중 상당량이 해저에 쌓일 것으로 예상된다. Suess (1980)는 대양해역에서는 일차생산량의 거의 전부가 물기둥내에서 재분해되어 겨우 1% 미만의 극소량이 해저에 쌓이게 되지만 수심이 얇은 천해역에서는 일차생산량의 50% 정도가 해저에 쌓인다고 보고하였다. 해저에 가라앉은 유기물들은 퇴적물내에 저장되거나 재부유 및 분해과정을 거쳐 무기물형태로 다시 수주내로 공급되어 높은 일차생산을 지지한다 (Roman and Tenore, 1978).

본 연구지역인 남해는 황해 및 동중국해등 주변해역으로부터 대마난류, 한국연안수 및 황해 저층냉수등이 유입되고, 수심이 얇은 연안해역에서는 강한 조류가 바닥에 퇴적된 부유물질과 고형유기물을 재부유시켜 남해의 유기물 순환에 큰 영향을 미칠것으로 예상된다. 이에따라 수계 및 퇴적물의 유기물 분포특성과 퇴적물등을 이해하는 것이 중요하다.

본 연구는 해수 및 해저퇴적물에서의 계절별 유기물 특성분포 및 퇴적과정을 추적하여 퇴적환경의 변화를 파악하는데 주안점을 두었다.

### 4.2. 재료 및 방법

본 연구의 현장 조사는 1999년 2월과 8월에 보길도와 제주도를 잇는 제주해협 (관측선 A), 그리고 1999년 5월과 10월에 대한해협 북단 (관측선 N)과 남단 (관측선 S)에 대한 조사를 실시하였다. 연구해역의 조사정점과 정점 좌표는 Fig. 3-3-1.과 Table 3-3-1~3-3-4과 동일하다. 2월과 8월 조사는 한국해양연구소 연구선 이어도호를 사용하였고, 5월과 10월의 대한해협 조사 (관측선 N, S)는 미국 스크립스 해양연구소의 R/V Roger Revelle을 사용하여 수행하였다.

해수시료 채취는 표준수심 (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m)을 기본으로 하여 Rosette 에 부착된 5리터 용량의 Niskin 해수 채수기를 이용하여 채수하였다. 용존 무기영양염류를 위한 시료는 현장에서 구경  $0.45 \mu\text{m}$  Millipore 막 여과지로 여과한 후 10% 염산으로 미리 세척한 20ml 고밀도 폴리에틸렌 병에 담아  $-20^\circ\text{C}$ 이하로 즉시 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

#### 4.2.1. 해수 중 입자성 유기탄소, 질소 (POC and PON)

GF/F glass fiber 여과지 (Whatman)를 Furnace를 이용하여 550°C에서 3시간 정도 태운 후 무게를 측정한 여과지로 해수시료를 여과한 다음 증류수로 5-6회 세척하여 염분을 제거한 후 냉동 보관한 후 실험실로 옮겨 와 건조기에 넣어 105°C상태에서 2시간 건조하고, 데시게이터 내에서 방냉한 후 무게를 측정하였다.

무게를 측정한 여과지를 진한 염산(12N HCl)을 이용하여 acid fuming 하여 무기탄산염상의 탄소를 제거한 후 원소분석기 (Carlo Erba, CNS analyzer)로 유기탄소, 질소 및 황을 정량 측정하였다 (precision :  $\pm 0.3\%$  이하).

#### 4.2.2. 퇴적물 입자성 유기탄소, 질소

퇴적물은 단면적이 50×50 cm인 박스코어러를 이용하여 채집한 후 내경 7.0cm인 PVC pipe를 손으로 삽입하여 입자성 유기탄소 및 유기질소 분석용 부시료를 얻었다. 부시료는 절개하여 수분함량, 염함량을 각각 보정하여 순수 퇴적물 함량을 정량하였다.

퇴적물 시료는 묽은 산 (1N HCl)으로 탄산염 (carbonate) 상의 탄소를 제거하고 난 후 원소분석기 (Carlo Erba CNS)로 유기탄소, 질소 및 황을 정량 측정하였다 (precision :  $\pm 0.3\%$  이하).

### 4.3. 결 과

1999년 제주해협과 대한해협 해수에서의 유기탄소 및 유기질소 자료를 Table 3-4-1~3에 나타내었다.

#### 4.3.1. 제주해협 해수중 입자성 유기탄소 및 질소 분포 특성

1999년 2월 입자성 유기탄소 (POC) 및 유기질소 (PON) 함량은 각각 29~373, 5~57  $\mu\text{g/l}$  범위로서, 일반적으로 연안역에서 높고 제주도 근방의 외해로 갈수록 감소하였다. 수직적으로는 연안역에서는 표·저층수간 활발한 수직혼합으로 인해 표,저층간에 입자성 유기탄소 및 질소 함량은 균질하나, 외해역에서는 저층에서 표층의 약 2배 정도 높은 함량을 갖는다 (Fig. 3-4-1).

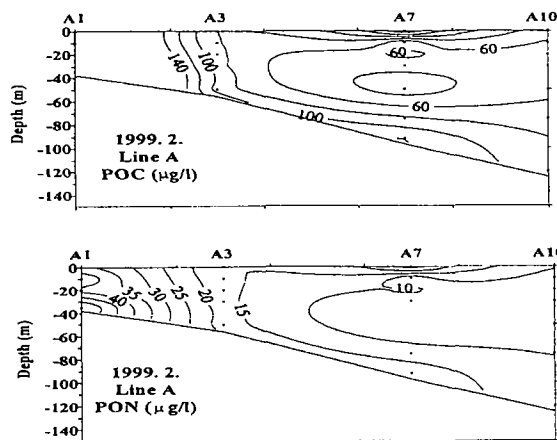


Fig. 3-4-1. The vertical distribution of organic carbon and nitrogen in the Cheju Strait in February 1999.

1999년 8월 입자성 유기탄소 및 질소의 함량은 각각 48~122, 8~21 $\mu\text{g}/\ell$  범위로 서 1999년 2월 보다 최대값에서 약 1/3 정도의 수준이다. 용존무기영양염류 농도 분포와는 달리 입자성유기탄소 및 질소 함량은 연안에서 외해로 갈수록 증가하여 정점 A9에서 표층 최대치를 보였다 (Fig. 3-4-2).

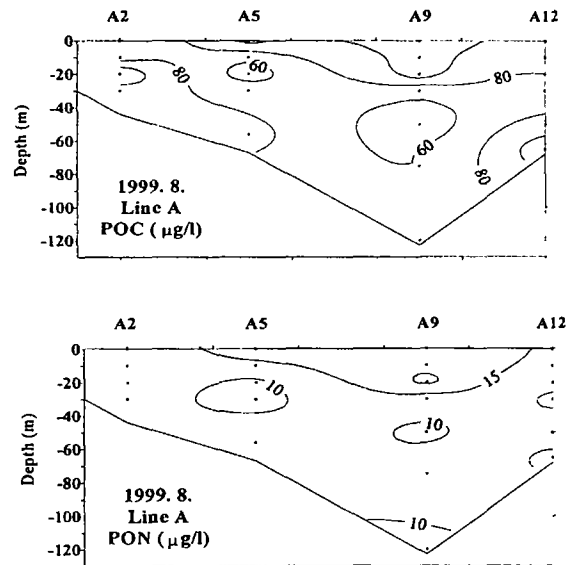


Fig. 3-4-2. The vertical distribution of organic carbon and nitrogen in the Cheju Strait in February 1999.

#### 4.3.2. 대한해협 해수중 입자성 유기탄소 및 질소 분포 특성

1999년 10월 관측선 N (대한해협 북단)의 입자성 유기탄소 및 유기질소 함량은 각각 10~133, 4~48  $\mu\text{g}/\ell$ 의 범위로서 엽록소 a가 최대값 (0.5  $\mu\text{g}/\ell$ )을 보인 정점 N4의 표층에서 입자성유기탄소는 120  $\mu\text{g}/\ell$  이상의 높은 함량을 보였다 (Fig. 3-4-3).

관측선 S (대한해협 남단)에서의 입자성 유기탄소 및 유기질소 함량은 각각 6~135, 4~30  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 관측선 N와 유사하여 엽록소 a 최대값 (0.6  $\mu\text{g}/\ell$ )을 보인 한국연안 정점 S2의 수심 10 m에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-4-4).

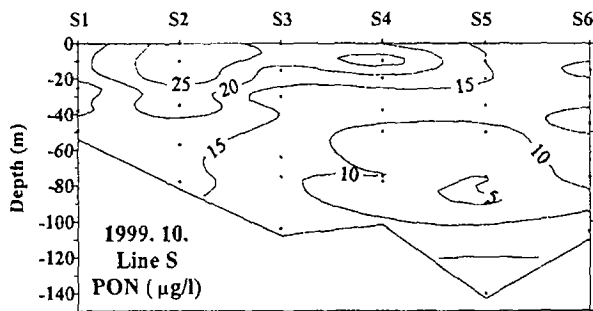
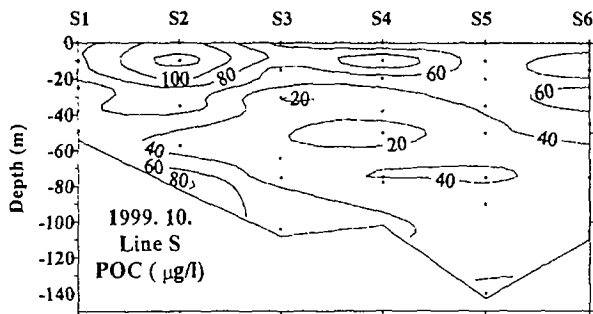
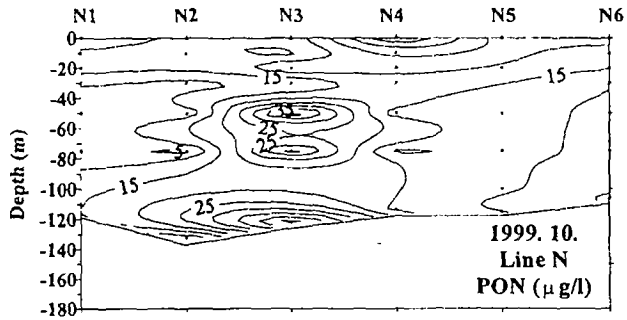
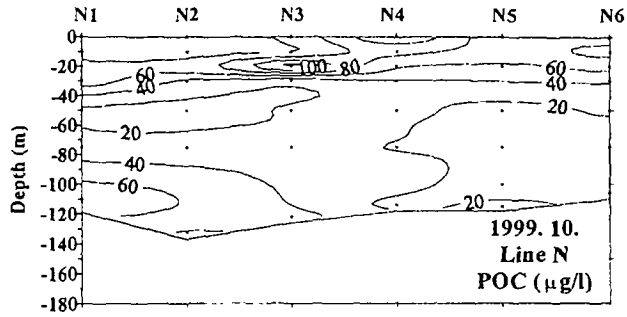


Fig. 3-4-3. The vertical distribution of organic carbon and nitrogen in the section N of the Cheju Strait in February 1999.

Fig. 3-4-4. The vertical distribution of organic carbon and nitrogen in the section S of the Cheju Strait in February 1999.

Table 3-4-1. The chemical composition of organic matter in the water column of the Cheju Strait during February 22-24, 1999.

Station	Depth (m)	org Carbon (%)	Nitrogen (%)	Sulphur (%)	Carbon ( $\mu\text{g/l}$ )	Nitrogen ( $\mu\text{g/l}$ )	Sulphur ( $\mu\text{g/l}$ )	C/N
A1	0	2.268	0.338		241.39	35.99	0.16	7.82
	10	2.637	0.443	1.058	269.50	45.25	108.14	6.95
	20	1.535	0.249	0.004	235.62	38.18	0.65	7.20
	35	1.428	0.218		373.26	56.87	0.16	7.66
A3	0	0.802	0.156	1.148	78.11	15.16	111.81	6.01
	10	0.753	0.153	0.849	81.94	16.68	92.39	5.73
	20	0.815	0.158	1.151	86.97	16.90	122.84	6.00
	30	0.859	0.163	0.941	87.79	16.65	96.18	6.15
	50	0.827	0.156	0.867	91.71	17.31	96.18	6.18
A7	0	4.653	0.803		164.10	28.31	0.19	6.76
	10	4.412	0.668		40.86	6.19	0.05	7.70
	20	2.911	0.474	0.107	67.86	11.05	2.49	7.16
	30	3.847	0.639	0.003	47.09	7.82	0.04	7.02
	50	1.198	0.203	0.619	28.90	4.90	14.94	6.88
	75							
	92	2.951	19.824	15.209	119.74	17.83	91.86	7.84
A10	0	4.226	0.626	0.091	69.65	10.32	1.51	7.87
	10	3.969	0.575		58.28	8.45	0.04	8.05
	20							
	30							
	50	4.429	0.636	0.001	58.65	8.42	0.01	8.12
	75							
	120	2.763	0.378	1.124	88.72	12.15	36.08	8.52

Table 3-4-2. The chemical composition of organic matter in the water column in the water column of the Cheju Strait during August 3-8, 1999.

Station	Depth (m)	org C (%)	N (%)	S (%)	C ( $\mu\text{g/l}$ )	N ( $\mu\text{g/l}$ )	S ( $\mu\text{g/l}$ )	C/N
A2	0	9.266	1.713	0.134	61.11	11.30	0.88	6.31
	10	5.747	0.876	0.156	69.80	10.64	1.90	7.65
	20	3.561	0.365	0.160	122.38	12.54	5.49	11.39
	30	3.073	0.380	0.065	88.14	10.89	1.86	9.45
A5	0	17.172	3.118	0.749	106.95	19.42	4.67	6.43
	10	14.020	2.832	0.262	64.21	12.97	1.20	5.78
	20	9.785	1.802	0.225	49.45	9.11	1.14	6.33
	30	12.147	1.416	0.115	72.62	8.46	0.69	10.01
	56	3.850	0.593	0.102	87.46	13.48	2.32	7.57
A9	0	5.762	1.018	1.281	106.30	18.78	23.64	6.60
	10	31.270	5.799	0.933	100.83	18.70	3.01	6.29
	20	35.323	6.750	0.253	112.48	21.49	0.81	6.10
	30	11.796	2.251	0.145	64.79	12.36	0.79	6.11
	50	2.063	0.396	0.946	48.23	9.26	22.12	6.08
	75	5.687	1.045	0.270	60.38	11.10	2.86	6.35
	120	11.805	1.642	0.738	62.93	8.75	3.93	8.39
A12	0	6.129	0.919	0.459	94.42	14.16	7.07	7.78
	10	8.456	1.363	0.323	85.19	13.73	3.25	7.24
	20	6.087	0.838	0.354	80.15	11.03	4.65	8.48
	30	4.441	0.652	0.060	62.53	9.18	0.85	7.95
	50	2.766	0.378	0.086	90.04	12.31	2.79	8.53
	65	3.485	0.503	0.023	114.13	16.49	0.75	8.07

Table 3-4-3. The chemical composition of organic matter in the water column in the Korea Strait during October, 1999.

Station	Depth (m)	org C (%)	N (%)	S (%)	C ( $\mu\text{g/l}$ )	N ( $\mu\text{g/l}$ )	S ( $\mu\text{g/l}$ )	C/N
N1	0	12.87	5.58		56.18	24.34		2.69
	10	11.78	3.85		57.75	18.85		3.57
	20	13.77	3.90		62.22	17.63		4.12
	30	15.39	2.21	0.03	74.79	10.74	0.16	8.12
	50	2.50	1.40	0.07	15.78	8.85	0.44	2.08
	75	2.30	0.63		26.72	7.36		4.23
	115	2.38	0.44		79.22	14.70		6.29
N2	0	11.33	3.80	0.31	55.54	18.64	1.50	3.48
	10	12.78	4.93		44.32	17.08		3.03
	30	5.94	1.44		34.69	8.43		4.80
	50	2.24	1.12		10.45	5.24		2.33
	75	4.41	0.62	0.08	25.57	3.58	0.47	8.33
	132	6.01	0.99		38.39	6.31		7.10
N3	0	2.59	0.67	2.02	63.78	16.56	49.72	4.49
	10	12.77	3.15		54.65	13.46		4.74
	20	9.69	1.80		133.18	24.73		6.28
	30	5.45	2.29		23.26	9.75		2.78
	50	3.60	7.18		22.49	44.93		0.58
	75	9.30	8.88		39.45	37.67		1.22
	122	2.45	2.48		47.75	48.29		1.15
N4	0	22.67	7.40		125.51	40.98		3.57
	10	8.64	2.67	0.01	85.87	26.53	0.10	3.78
	20	12.45	4.49		60.36	21.78		3.23
	30	8.92	4.20		38.61	18.19		2.48
	50	5.05	2.13	0.10	26.57	11.21	0.55	2.76
	75	3.62	1.79		17.12	8.44		2.37
	114	1.36	1.35	0.04	13.44	13.38	0.35	1.17
N5	0	12.80	4.76		60.36	22.44		3.14
	20	10.48	3.56		56.62	19.24		3.43
	50	2.50	3.20		10.58	13.53		0.91
	75	4.79	3.09	0.05	19.88	12.81	0.21	1.81
	100	2.64	1.85	0.05	16.04	11.22	0.28	1.67
	118	2.68	1.01		26.12	9.86		3.09
N6	0	13.46	4.99		65.76	24.37		3.15
	10	12.23	3.34		55.83	15.25		4.27
	20	12.39	2.79		68.16	15.35		5.18
	30	8.50	2.10		41.67	10.27		4.73
	50	5.77	1.99		23.59	8.12		3.39
	75	2.85	2.01		11.07	7.81		1.65
	106	2.67	1.07		10.34	4.14		2.91

Table 3-4-3. (continued).

Station	Depth (m)	org C (%)	N (%)	S (%)	C ( $\mu\text{g/l}$ )	N ( $\mu\text{g/l}$ )	S ( $\mu\text{g/l}$ )	C/N
S1	0	13.95	3.17		71.35	16.22		5.13
	10	17.23	4.29		73.66	18.34		4.69
	25	3.87	1.01		42.33	11.07		4.46
	38	2.02	0.46		57.24	13.08		5.11
	49	1.05	0.39	0.02	52.09	19.43	1.13	3.13
S2	0	21.42	5.42		110.59	27.98		4.61
	10	21.27	4.61		135.08	29.29		5.38
	20	16.37	4.53		108.08	29.94		4.21
	35	9.33	3.22		74.75	25.77		3.38
	57	2.48	1.34		30.16	16.34		2.15
	78	4.53	0.88	0.01	90.07	17.44	0.14	6.03
S3	0	17.10	7.77		50.57	22.96		2.57
	15	7.68	2.69	0.02	47.64	16.72	0.15	3.32
	30	2.62	1.55		15.32	9.07		1.97
	64	4.96	2.07	0.02	28.91	12.05	0.11	2.80
	75	4.38	2.01		22.88	10.49		2.55
	104	2.35	0.62		56.52	14.83		4.45
S4	0	4.40	2.11		40.34	19.33		2.44
	10	16.87	4.62		105.37	28.87		4.26
	20	10.16	3.63		51.98	18.56		3.27
	38	6.24	3.19		28.25	14.46		2.28
	50	1.02	1.23		6.04	7.28		0.97
	75	6.24	1.39	0.02	46.95	10.45	0.14	5.24
	78	4.25	1.13		22.71	6.04		4.39
S5	0	3.43	0.97	0.33	48.25	13.69	4.64	4.11
	10	9.72	2.91	0.03	49.04	14.67	0.16	3.90
	20	12.93	3.98	0.12	50.44	15.53	0.49	3.79
	35	11.09	3.23	0.05	42.68	12.44	0.20	4.00
	50	10.02	1.73	0.03	37.81	6.53	0.10	6.76
	75	10.20	1.00		45.09	4.44		11.84
	90	6.87	0.95		31.03	4.29		8.44
	130	2.03	0.69		12.65	4.32		3.42
S6	0	13.69	3.96		47.38	13.72		4.03
	15	4.67	1.62		23.35	8.10		3.36
	30	10.50	1.66	0.03	80.44	12.70	0.26	7.39
	45	13.77	5.73	0.07	46.60	19.38	0.23	2.80
	75	6.43	2.85	0.03	29.01	12.87	0.12	2.63
	105	9.01	3.70		32.88	13.49		2.84

#### 4.3.3. 해저퇴적물중 입자성 유기탄소 및 질소함량 분포 특성

1998년 4월 남해 대륙붕에서 채집된 퇴적물중 유기탄소, 질소 및 황에 대한 함량 분포를 Table 3-4-4에 나타내었다.

표층 퇴적물내 유기탄소 함량은 제주인접 정점인 A9에서의 최대값 (2.2%)을 제외하고는 0.1 ~ 0.8 % 범위이다.

표층 유기질소 함량은 유기탄소 함량 분포와 마찬가지로 정점 A9에서의 최대값 (0.2%)를 제외하고는 0.02~0.12 % 범위로서 모래 함량이 50% 이내인 정점들에서 0.08 % 이상이다.

유기탄소 및 유기질소에 대한 수직분포는 표층에서 높고, 깊이가 증가할수록 대체로 감소하는 양상을 보인다.

Table 3-4-4. The chemical composition in the sediment of the South Sea (April, 1998).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
A1	0-0.5	0.053	0.265	0.099	5.80
A1	1-2	0.062	0.345	0.107	6.50
A1	3-4	0.028	0.143	0.051	5.88
A1	6-7	0.041	0.193	0.073	5.45
A1	9-10	0.068	0.375	0.116	6.42
A1	12-13	0.076	0.415	0.105	6.37
A1	15-16	0.081	0.448	0.145	6.48
A1	19-20	0.095	0.510	0.147	6.26
A1	26-28	0.025	0.093	0.073	4.43
A1	34-36	0.034	0.149	0.092	5.18
A3	0-0.5	0.039	0.248	0.128	7.45
A3	1-2	0.038	0.224	0.092	6.98
A3	3-4	0.048	0.291	0.116	7.03
A3	6-7	0.054	0.328	0.110	7.06
A3	9-10	0.052	0.294	0.149	6.64
A3	12-13	0.045	0.267	0.151	6.86
A3	15-16	0.038	0.202	0.137	6.15
A3	19-20	0.051	0.284	0.136	6.44
A3	26-28	0.040	0.228	0.111	6.73
A3	34-36	0.041	0.253	0.101	7.16
A5	0-0.5	0.032	0.120	0.065	4.36
A5	1-2	0.026	0.082	0.040	3.73
A5	3-4	0.041	0.180	0.054	5.09
A5	6-7	0.038	0.147	0.053	4.56
A5	9-10	0.039	0.166	0.075	4.94
A5	12-13	0.038	0.124	0.043	3.77
A5	15-16	0.031	0.088	0.056	3.32
A5	19-20	0.026	0.067	0.046	3.01
A5	26-28	0.024	0.079	0.065	3.79
A5	32-34	0.044	0.114	0.100	2.99



Table 3-4-4. (continued).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org. Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
A7	0-0.5	0.065	0.402	0.125	7.27
A7	1-2	0.070	0.433	0.138	7.21
A7	3-4	0.079	0.493	0.137	7.29
A7	6-7	0.083	0.511	0.150	7.18
A7	9-10	0.085	0.528	0.123	7.25
A7	12-13	0.064	0.390	0.136	7.16
A7	15-16	0.068	0.414	0.142	7.10
A7	19-20	0.061	0.363	0.137	6.93
A7	26-28	0.047	0.260	0.118	6.49
A7	34-36	0.066	0.381	0.147	6.74
A9	0-0.5	0.236	2.523	0.442	12.45
A9	1-2	0.059	0.254	0.072	5.01
A9	3-4	0.037	0.272	0.028	8.62
A9	6-7	0.043	0.239	0.085	6.45
A9	9-10	0.019	0.097	0.619	6.01
A9	12-13	0.027	0.132	0.065	5.66
A9	15-16	0.027	0.136	0.060	5.90
A9	19-20	0.022	0.110	0.058	5.80
A9	26-28	0.027	0.146	0.076	6.41
A9	34-36	0.025	0.167	0.122	7.85
B1	0-0.5	0.082	0.561	0.195	7.96
B1	1-2	0.078	0.512	0.234	7.70
B1	3-4	0.087	0.592	0.281	7.93
B1	6-7	0.052	0.352	0.160	7.87
B1	9-10	0.092	0.608	0.274	7.75
B1	12-13	0.082	0.552	0.238	7.90
B1	16-17	0.139	0.676	0.277	5.66
B1	19-20	0.110	0.730	0.328	7.75
B1	26-28	0.084	0.559	0.245	7.78
B1	34-36	0.106	0.674	0.263	7.45
B3	0-0.5	0.062	0.393	0.163	7.44
B3	1-2	0.128	0.728	0.276	6.63
B3	3-4	0.113	0.733	0.226	7.59
B3	6-7	0.109	0.686	0.272	7.34
B3	9-10	0.107	0.563	0.234	6.12
B3	12-13	0.129	0.687	0.253	6.23
B3	16-17	0.120	0.728	0.222	7.10
B3	19-20	0.143	0.741	0.225	6.05
B3	26-28	0.135	0.665	0.215	5.73
B7	0-0.5	0.048	0.286	0.192	7.00
B7	1-2	0.042	0.220	0.265	6.17
B7	3-4	0.050	0.320	0.251	7.51
B7	6-7	0.083	0.550	0.341	7.77
B7	9-10	0.060	0.371	0.245	7.26
B7	12-13	0.067	0.435	0.232	7.58
B7	15-16	0.080	0.772	0.261	11.20

Table 3-4-4. (continued).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
C5	0-0.5	0.074	0.394	0.185	6.18
C5	1-2	0.092	0.492	0.086	6.24
C5	3-4	0.081	0.431	0.168	6.17
C5	6-7	0.091	0.458	0.217	5.87
C5	9-10	0.093	0.491	0.135	6.15
C5	12-13	0.112	0.606	0.132	6.31
C5	15-16	0.081	0.408	0.111	5.88
C5	19-20	0.113	0.537	0.125	5.56
C7	0-0.5	0.059	0.316	0.116	6.24
C7	1-2	0.057	0.326	0.165	6.62
C7	3-4	0.058	0.327	0.126	6.61
C7	6-7	0.065	0.386	0.128	6.92
C7	9-10	0.053	0.291	0.084	6.47
C7	12-13	0.061	0.355	0.134	6.79
C7	15-16	0.071	0.431	0.083	7.12
C7	19-20	0.072	0.414	0.155	6.75
D1	0-0.5	0.159	1.049	0.190	7.70
D1	1-2	0.098	0.663	0.181	7.88
D1	3-4	0.138	0.954	0.281	8.07
D1	6-7	0.123	0.900	0.296	8.56
D1	9-10	0.124	0.900	0.280	8.48
D1	12-13	0.086	0.589	0.220	8.00
D1	15-16	0.111	0.781	0.261	8.18
D1	19-20	0.090	0.640	0.283	8.26
D1	26-28	0.110	0.787	0.306	8.36
D1	34-36	0.083	0.551	0.257	7.72
D3	0-0.5	0.078	1.155	0.333	17.36
D3	1-2	0.083	0.685	0.194	9.61
D3	3-4	0.093	1.087	0.324	13.61
D3	6-7	0.096	1.004	0.310	12.19
D3	9-10	0.100	0.674	0.243	7.88
D3	12-13	0.075	0.926	0.363	14.41
D3	15-16	0.081	0.936	0.378	13.41
D3	19-20	0.072	0.863	0.297	14.06
D3	26-28	0.056	0.919	0.365	19.25
D3	34-36	0.078	0.623	0.284	9.34

Table 3-4-4. (continued).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
D5	0-0.5	0.189	1.257	0.310	7.76
D5	1-2	0.179	1.131	0.334	7.37
D5	3-4	0.163	1.030	0.288	7.35
D5	6-7	0.157	1.059	0.282	7.84
D5	9-10	0.183	1.136	0.293	7.24
D5	12-13	0.172	1.070	0.290	7.27
D5	15-16	0.139	0.865	0.208	7.25
D5	19-20	0.196	1.084	0.321	6.45
D5	26-28	0.148	0.959	0.280	7.58
D5	34-36	0.153	0.966	0.282	7.37
D7	0-0.5	0.164	1.077	0.436	7.68
D7	1-2	0.145	0.971	0.316	7.81
D7	3-4	0.124	0.896	0.225	8.43
D7	6-7	0.110	0.718	0.290	7.63
D7	9-10	0.099	0.660	0.245	7.77
D7	12-13	0.112	0.752	0.574	7.80
D7	15-16	0.090	0.646	0.198	8.37
D7	19-20	0.077	0.560	0.765	8.52
D7	26-28	0.899	0.575	0.200	0.75
D7	32-34	0.076	0.513	0.306	7.92
D9	0-0.5	0.077	0.389	0.149	5.91
D9	1-2	0.092	0.464	0.167	5.88
D9	3-4	0.067	0.303	0.407	5.27
D9	6-7	0.058	0.212	0.537	4.28
D9	9-10	0.058	0.221	0.373	4.47
D9	12-13	0.078	0.472	0.247	7.07
D9	15-16	0.068	0.334	0.057	5.71
D11	0-0.5	0.058	0.301	0.279	6.01
D11	1-2	0.054	0.283	0.203	6.08
D11	3-4	0.065	0.345	0.203	6.24
D11	6-7	0.064	0.335	0.298	6.11
D11	9-10	0.060	0.323	0.294	6.28
D11	12-13	0.052	0.255	0.194	5.74
E1	0-0.5	0.224	1.739	0.337	9.06
E1	1-2	0.205	1.698	0.250	9.67
E1	3-4	0.256	2.119	0.307	9.65
E1	6-7	0.113	0.901	0.187	9.32
E1	9-10	0.212	1.519	0.248	8.37
E1	12-13	0.098	0.742	0.194	8.82

Table 3-4-4. (continued).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
E1	16-17	0.178	1.257	0.323	8.24
E1	19-20	0.168	1.336	0.275	9.31
E1	26-28	0.146	1.187	0.361	9.51
E1	34-36	0.054	0.486	0.187	10.53
E2	0-0.5	0.276	1.802	0.331	7.63
E2	1-2	0.229	1.569	0.301	8.00
E2	3-4	0.224	1.509	0.287	7.85
E2	6-7	0.201	1.356	0.339	7.85
E2	9-10	0.189	1.251	0.385	7.73
E2	12-13	0.190	1.280	0.335	7.87
E2	16-17	0.156	1.040	0.374	7.79
E2	19-20	0.173	1.131	0.443	7.61
E2	26-28	0.162	1.046	0.405	7.53
E2	34-36	0.152	0.949	0.388	7.27
E3	0-0.5	0.068	0.264	0.171	4.52
E3	1-2	0.067	0.289	0.174	5.04
E3	3-4	0.063	0.306	0.145	5.65
E3	6-7	0.072	0.352	0.126	5.71
E3	9-10	0.064	0.305	0.177	5.56
E3	12-13	0.053	0.244	0.121	5.40
E3	15-16	0.066	0.325	0.222	5.76
E3	19-20	0.050	0.221	0.194	5.14
E4	0-0.5	0.141	0.686	0.322	5.69
E4	1-2	0.015	0.074	0.030	5.95
E4	3-4	0.162	0.659	0.252	4.74
E4	6-7	0.144	0.903	0.283	7.30
E4	9-10	0.068	0.411	0.166	7.08
E4	12-13	0.075	0.398	0.164	6.17
E4	15-16	0.051	0.307	0.159	7.02
E4	19-20	0.086	0.519	0.205	7.07
E4	26-28	0.638	0.356	0.233	0.65
E5	0-0.5	0.065	0.470	0.108	8.45
E5	1-2	0.087	0.530	0.179	7.06
E5	3-4	0.063	0.393	0.143	7.22
E5	6-7	0.062	0.399	0.134	7.50
E5	9-10	0.023	0.142	0.089	7.23
E5	12-13	0.046	0.301	0.118	7.57
E5	15-16	0.055	0.388	0.141	8.19
E5	19-20	0.087	0.591	0.277	7.92

Table 3-4-4. (continued).

Sample	Depth (m)	org. Nitrogen (%)	org Carbon (%)	org. Sulphur (%)	C/N
E6	0-0.5	0.082	0.490	0.147	7.01
E6	1-2	0.115	0.706	0.202	7.18
E6	3-4	0.072	0.376	0.136	6.10
E6	6-7	0.082	0.474	0.066	6.72
E6	9-10	0.045	0.246	0.107	6.31
E6	12-13	0.110	0.511	0.157	5.41
E6	15-16	0.077	0.472	0.173	7.15
E6	19-20	0.093	0.589	0.202	7.36

#### 4.4. 토의

##### 4.4.1 해수중 유기탄소 및 유기질소 함량의 계절별 분포 특성

제주해협에서 계절별 입자성 유기탄소 (POC) 함량 범위는 동계 (1999년 2월), 춘계 (1998년 4월), 하계 (1999년 8월 및 1998년 9월), 추계 (1998년 11월)에 각각 29~373, 50~2576, 48(68)~122(347), 37~112  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 춘계에 가장 높고 연안역에서 제주도쪽으로 갈수록 급격히 감소한다 (한국해양연구소, 1997, 1998). 유기질소 (PON) 함량의 계절별 분포는 각각 5~57(동계), 춘계 9~992(춘계), 8~21(하계), 6~19(추계)  $\mu\text{g}/\ell$  범위로서 유기탄소 함량분포와 유사하여 춘계에 가장 높다.

수직적으로는 겨울특성을 보이는 2월과 4월에 수심이 낮은 연안역에서는 표, 저층수의 활발한 수직혼합으로 인하여 이들 유기탄소 및 유기질소 함량 또한 수직적으로 균일하다.

지역별 함량 분포는 전계절에 걸쳐 3 구역으로 구분되어 진다. 즉 입자성 부유물질 농도 ( $>5\text{mg}/\ell$ )는 높으나 부유물질내 유기탄소 함량 비율이 낮은 연안해역, 입자성부유물질 농도는 낮으나 입자성유기탄소 함량 비율이 높은 전선 경계역, 그리고 낮은 입자성 부유물질 농도 ( $<1\text{mg}/\ell$ )와 낮은 입자성유기탄소 함량비율을 가진 고염 ( $>34.5$  psu)의 외해역으로 나눌 수 있다. 높은 입자성부유물질 함량을 보이는 연안역에서의 유기탄소 함량비율은 2% 미만이나, 충분한 광조건과 수층의 안정성으로 식물플랑크톤의 생장이 활발한 전선경계역에서는 10% 이상으로 높다. 클로로필 대 유기탄소 함량 비율 또한 연안역에서는 낮지만 전선역에서는 높다. 이것은 연안역에서는 입자성부유물질 중 상당량이 광물질로 구성되어 있지만, 전선경계역에서는 식물플랑크톤의 생체량에 따라 입자성 유기탄소 함량이 조절된다는 것을 의미한다. 일반적으로 전선역에서는 측면 혼합 및 용승과정이 일어나 높은 농도의 영양염들을 전선 경계역으로 운송시켜 식물플랑크톤 성장을 촉진시켜 높은 생산성을 보인다 (Pingree and Mardell, 1981). 특히 남해는 전선역이 연중 잘 발달되어 있어 높은 일차생산력을 보인다 (Chung and Yang, 1991).

#### 4.4.2. 퇴적물의 유기탄소 함량분초 및 분해

제 2 차년도 NH9804 조사항해시 채취한 주상 퇴적물 시료에 대하여 제 2 차년도에 이어 제 3차 연도에서도 계속적으로  $^{210}\text{Pb}$ 법에 근거한 해저퇴적물의 축적율과 유기탄소, 질소의 함량을 분석하였다. 그 결과를 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

$^{210}\text{Pb}$ 법에 근거한 해저퇴적물의 축적율은  $10\text{-}284 \text{ mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 범위이고 (Fig 3-4-5), B7, E1 정점에서는 퇴적물의 교란으로 정상상태의 입자대 입자이 침적이 일어나지 않고 있다. 남해 대륙붕 해역의 해저 퇴적율은 산술 평균적으로  $89 \text{ mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이다.

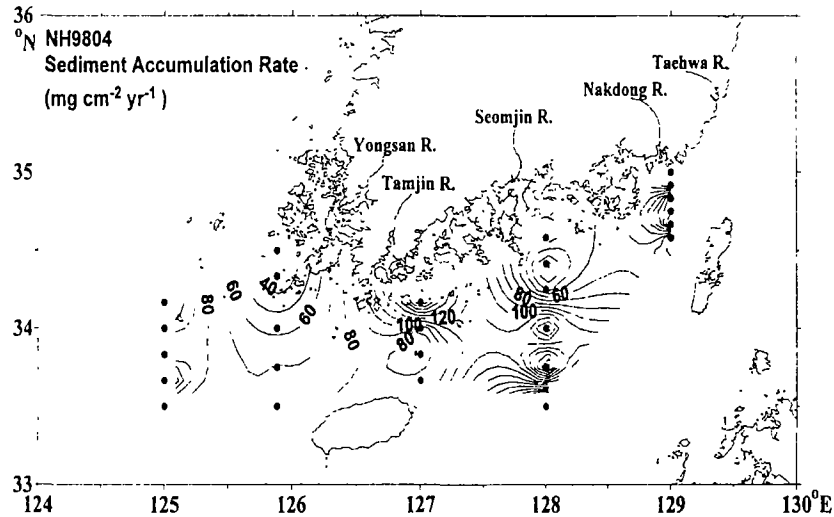


Fig. 3-4-5. Spatial distribution of sediment accumulation rate in the Cheju-Korea Straits.

해저퇴적물 유기탄소 함량은 표층해저퇴적물에서는 0.1-2.5%이고 최대값은 흑산나대 (정점 A9)에서 출현하였다. 대체적으로 한반도의 해안선에 입접한 북부 해역에서 외양의 남부 해역에서 보다 유기물 함량이 높다 (Fig. 3-4-6).

해저퇴적물의 질소함량은 표층퇴적물에서는 0.04-0.24%이다 (Fig. 3-4-7). 공간적인 분포 형태는 해저퇴적물의 유기탄소 함량의 경우와 비슷하다.

앞에서 구한 해저 퇴적물 축적율과 표층 퇴적물의 유기물 함량자료를 이용하여 남해 대륙붕 해저에 도달하는 유기물 플럭스를 다음과 같이 산정하였다.

$$F_i = \omega \times C \quad (1)$$

여기서  $F_i$  는 해저 표면 입력 플럭스,  $\omega$ 는 해저퇴적율 ( $\text{mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ),  $C$ 는 유기물 함량 (%) 이다. 또한  $C$ 는 초기속성과정동안 분해되는 부분,  $C_d$ ,와 분해되지않는 부분  $C_i$ 로 두가지로 이루어져 있다고 가정하였다. 즉  $C = C_i + C_d$  이다.

그러면  $F_i = \omega \times C = F_i = \omega \times ( C_i + C_d )$  이 된다.

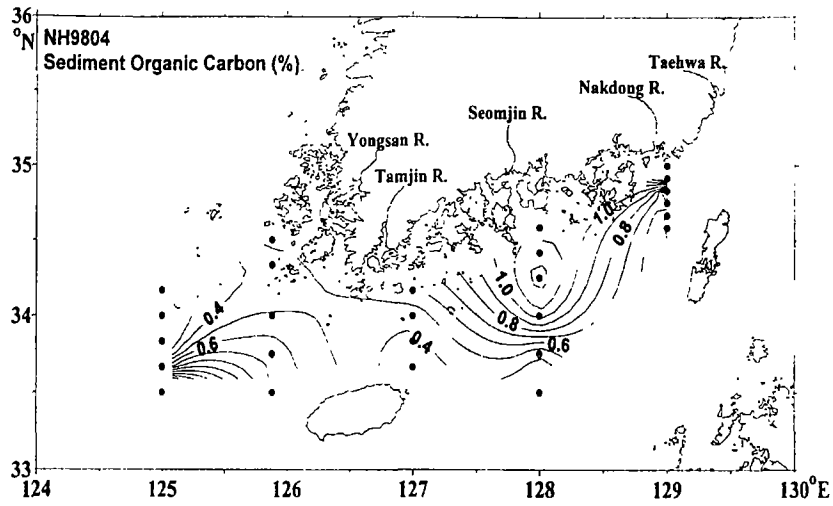


Fig. 3-4-6. Spatial distribution of sediment organic carbon contents in the Cheju-Korea Straits.

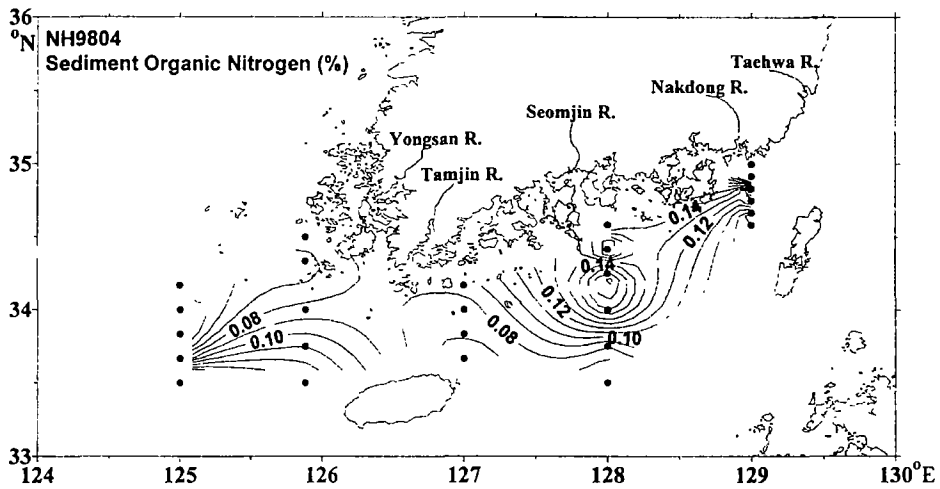


Fig. 3-4-7. Spatial distribution of sediment nitrogen contents in the Cheju-Korea Straits.

그리고 여기서  $\omega \times C_i$  는 실제 남해 대륙붕에 매장되는 플럭스이다.

각 정점별로를  $F_i$  계산하고 산술 평균을 취하면  $0.48 \text{ mg C cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이다 (Fig. 3-4-8). 이를 남해 대륙붕 전체의 면적 ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ )와 곱하면  $2.19 \times 10^{11} \text{ gC yr}^{-1}$  의 유기탄소가 남해 해저에 매년 입력된다.

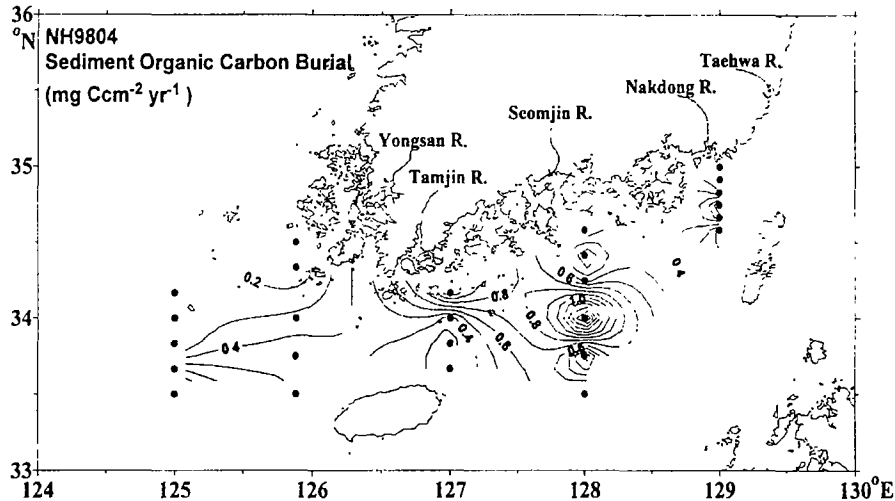


Fig. 3-4-8. Spatial distribution of sediment organic carbon burial rate in the Cheju-Korea Straits.

마찬가지 방법으로 입자성 질소의 해저 입력율은 평균  $0.08 \text{ mg N cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고 (Fig. 3-4-9), 남해 대륙붕 전체의 면적 ( $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ )와 곱하면  $0.36 \times 10^{11} \text{ gN yr}^{-1}$ 의 유기질소가 남해 해저에 매년 입력된다. 이렇게 해저에 입력된 유기물은 미생물과 전자 수용체의 도움으로 분해하게 된다. 초기속성동안 분해되는 유기물은 남해 대륙붕 전체에 대하여 유기탄소의 경우  $0.84 \times 10^{11} \text{ g C yr}^{-1}$  이고, 질소의 경우는  $0.13 \times 10^{11} \text{ g N yr}^{-1}$  이다. 이를 퇴적물에서 상층 수층으로 용출되어 나오는 산화된 질소성분으로 모두 가정 할 수 있다면 이는 낙동강의 연 유출량 ( $\text{NO}_3 = \text{약 } 50 \text{ mol l}^{-1}$ , 유량  $9.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ , 정 창수 자료, 수자원 공사 자료)의 5 배 이상이다. 여기서 분석한 부분은 매우 기초적인 분석으로서 향후 정밀한 분석과 공극수의 채취, 수치모형의 개발 등이 필요하다.



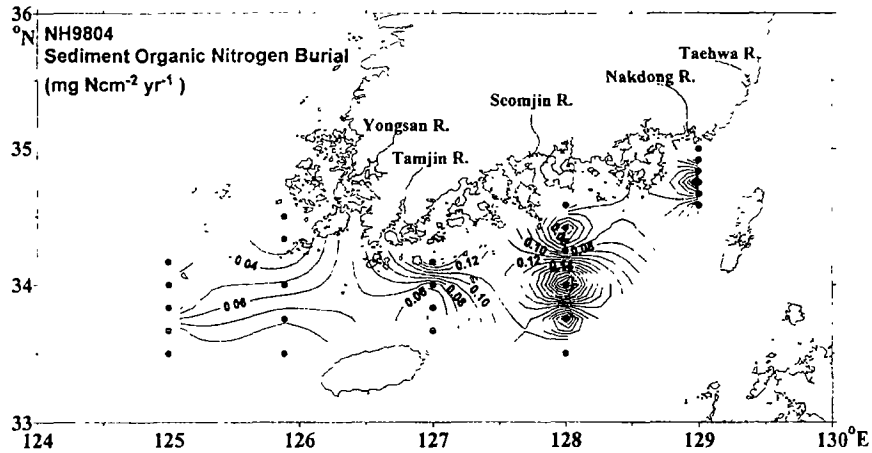


Fig. 3-4-9. Spatial distribution of sediment nitrogen burial rate in the Cheju-Korea Straits.

#### 4.5. 결론

1. 지역별 수층 유기물 함량 분포는 전계절에 걸쳐 3 구역으로 구분되어 진다. 즉 입자성 부유물질 농도 ( $>5\text{mg/l}$ )는 높으나 부유물질내 유기탄소 함량 비율이 낮은 연안해역, 입자성부유물질 농도는 낮으나 입자성유기탄소 함량 비율이 높은 전선 경계역, 그리고 낮은 입자성 부유물질 농도 ( $<1\text{mg/l}$ )와 낮은 입자성유기탄소 함량비율을 가진 고염 ( $>34.5$  psu)의 외해역으로 나눌 수 있다. 높은 입자성 부유물질 함량을 보이는 연안역에서의 유기탄소 함량비율은 2% 미만이나, 충분한 광조건과 수층의 안정성으로 식물플랑크톤의 생장이 활발한 전선경계역에서는 10% 이상으로 높다. 클로로필 대 유기탄소 함량 비율 또한 연안역에서는 낮지만 전선역에서는 높다. 이것은 연안역에서는 입자성부유물질 중 상당량이 광물 질로 구성되어 있지만, 전선경계역에서는 식물플랑크톤의 생체량에 따라 입자성 유기탄소 함량이 조절된다.
2. 남해 대륙붕역 해저에 매년 입력되는 유기탄소 및 유기질소는 각각  $2.19 \times 10^{11} \text{ gC yr}^{-1}$ ,  $0.36 \times 10^{11} \text{ gN yr}^{-1}$ 이다. 이렇게 해저에 입력된 유기물은 미생물과 전자 수용체의 도움으로 분해하게 된다. 초기속성동안 분해되는 유기물은 남해 대륙붕 전체에 대하여 유기탄소의 경우  $0.84 \times 10^{11} \text{ g C yr}^{-1}$  이고, 질소의 경우는  $0.13 \times 10^{11} \text{ g N yr}^{-1}$  이다. 이를 퇴적물에서 상층 수층으로 용출되어 나오는 산화된 질소성분으로 모두 가정 할 수 있다면 이는 낙동강의 연 유출량 ( $\text{NO}_3 = \text{약 } 50 \text{ mol l}^{-1}$ , 유량  $9.2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ )의 5 배 이상이다.

## 5. 남해의 기초생산력

### 5.1. 서론

해양에서 식물플랑크톤에 의한 기초생산 (primary production)은 기본적으로 식물플랑크톤이 빛 에너지를 흡수하여 무기탄소를 유기물로 전환시키는 과정이라 할 수 있다 (Falkowski and Raven, 1997). 광합성 과정을 통해 생산된 단백질, 지방, 탄수화물은 해양 생태계의 먹이망 (food web)과 물질순환 (material flux)에서 있어서 중심적인 역할을 담당하여 이를 먹이로 하는 상위영양 단계의 생물들을 유지시킬 뿐만 아니라 미생물환 (microbial loop)의 근원이 되기도 한다. 또한 식물플랑크톤에 의한 광합성과 호흡은 최근 기후 변화에 중요한 영향을 주는 탄소의 순환에 있어서 주된 역할을 하기 때문에 식물플랑크톤에 의한 기초생산력에 대한 정보는 해양생태계 및 먹이사슬에 의한 생물자원 평가 뿐만 아니라 탄소 및 산소와 같은 생지화학적 순환을 이해하기 위해서도 상당히 중요하다 (Malone, 1977).

이처럼 해양환경에서 기초생산의 중요성에도 불구하고, 현재 동해 및 서해와 비교 시 남해에서의 기초생산성에 대한 연구는 미진한 상태이다. 특히 제주도 이북의 남해 대륙붕 해역은 연안에 많은 하천들이 연결되어 있고, 해안일대는 대규모의 항만과 임해 공업단지등이 밀집되어 하천 및 대기를 통해 많은 양의 영양염류를 포함한 화학물질들의 유입이 지속적으로 이루어 진다. 황해의 연안을 따라 제주해협으로 들어오는 서한연안류 (West Korea Coastal Current)와 동중국해로부터 유입되는 대마난류를 통해 남해대륙붕으로 퇴적물을 포함한 다양한 화학물질들이 유입되어 (Suk et al., 1996) 남해는 연간  $270 \text{ gC m}^{-2}$ 의 높은 일차생산력을 보이는 것으로 보고되어 있다 (Chung and Yang, 1991). 특히 광합성을 통해 생산된 유기물질들은 해저에 쌓이는데, 대양해역에서는 일차생산량의 거의 전부가 물기둥내에서 재분해되어 겨우 1% 미만의 극소량이 해저에 쌓이나 남해와 같은 천해역에서는 일차생산량의 50% 정도가 쌓인다 (Suess, 1980). 해저에 가라앉은 유기물들은 퇴적물내에 저장되거나 재부유 및 분해과정을 거쳐 무기물 형태로 다시 수주내로 공급되어 높은 일차생산을 지지하기 때문에 남해에서 계절에 따른 일차생산력 연구는 친생물원소들의 생지화학적 순환 규명에 있어서 중요하다.

### 5.2. 재료 및 방법

제주해협의 기초생산성 (primary productivity) 연구는 1999년 2월, 8월 총 2회에 걸쳐 한국해양연구소 탐사선인 이어도호를 이용하여 수행되었다. 조사 정점은 Fig. 3-3-1과 같다.

표면광량은 Li-S305A quantum sensor를 부착한 Li-1000 Data logger (Li-Cor)를 사용하여 하루의 광량을 1분단위로 기록하였다. 일차생산 배양은 Secchi disc를 이

용하여 투명도를 측정 한 후 광투과수심(100%, 49%, 30%, 14.5%, 3.5%, 1%)별로 5 l Niskin 채수기를 이용하여 채수하였다.

Secchi depth로부터 유광층의 깊이를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$D_z = -(\ln 0.01) / k$$

$D_z$ 는 빛이 투과되는 깊이를 나타내고,  $k$ 는 소광계수이며 Pool and Atkins(1929)에 의해 제시된  $k = 1.7/D_s$  ( $D_s =$  Secchi depth; 단위 m)를 사용하였다. Steemann-Nielson(1951)에 의해 제시된 방사성 동위원소를 이용한 방법에 기초하여 Parsons *et al.*(1984)의 실험절차에 따라 실시하였다. 100%, 49%, 30%, 14.5%, 3.5%, 1%, 0%의 빛이 투과할 수 있도록 각각 nickel screen(Stork Veco, Bedford, MA, U.S.A.)으로 감싼 250 ml polycarbonate bottle에 해수를 담은 후 최종농도가  $4 \mu\text{Ci}$ 가 되도록  $^{14}\text{C-NaHCO}_3$ 를 주입하여 현장온도의 자연광 하에서 3시간동안 배양하였다. 배양이 끝난 후에는 25 mm 유리섬유여과지(Whatmann GF/F filter)로 여과한 다음 12 N HCl로 산훈증(acid fuming)을 시켜 남아있는 무기탄소를 제거하였으며, 여기에 섬광액(scintillation cocktail: Lumagel Safe) 10 ml을 가하여 액체 섬광계수기(Liquid scintillation counter, Wallac Model #1405)를 이용하여 입자에 동화된  $^{14}\text{C}$ 방사성 동위원소의 양을 측정하였다. 일차 생산력의 계산은 액체 섬광 계수기에서 측정된 dpm값과 총 이산화탄소량 및 배양시간을 계산하여 단위부피당 단위시간당 탄소동화율( $\text{mg C m}^{-3} \text{ hr}^{-1}$ )로 전환시킨 후, 이를 다시 하루 중 총 광량에 대하여 적분하여  $\text{mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ 으로 환산하였고, 깊이적분을 실시하여  $\text{mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 환산하였다. 2월은 quantum meter의 작동불량으로 인하여 광량을 측정하지 못하였다.

### 5.3. 결 과

남해의 계절별 일차생산력 변동성을 이해하기 위해 1, 2차년도 연구 결과 (한국해양연구소, 1997, 1998)와 1999년 2월과 8월 제주해협의 조사 결과를 토대로 정리하였다. 1999년 2월과 8월 제주해협의 단위시간당 일차생산력에 대한 자료는 Table 3-5-1와 3-5-2에 나타내었다.

#### 8.3.1. 동계

1999년 2월 제주해협의 단위시간당 일차생산은 연안 정점 A1과 A3에서 각각 12.89, 35.08  $\text{mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로서 다른 계절에 비해 가장 낮은 일차생산력을 보였다. 수직적으로는 표층에서 높고, 수심증가에 따라 급격히 감소하는 양상을 보였다 (Table 3-5-1; Fig. 3-5-1). 이는 활발한 수직혼합으로 인해 영양염은 풍부하나, 수층 불안정과 저층으로부터 재부유된 입자성부유물질로 인한 열악한 광조건 (유광층 수심: 약 10 m)이 생산성을 낮게 나타내는 주요인으로 작용하기 때문으로 사료된다.

### 8.3.2. 춘계

아직 겨울특성을 보이는 3월 (1997년) 표층 (100%와 49% LPD)의 기초생산력은 1.96~5.16 (mean: 3.16)  $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$  범위로서 정점간에 변화가 매우 크다. 단위면적당 수층 적분한 생산성은 28.56~86.79 (mean: 60.99)  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로서 2월보다 높다. 일일 단위면적당 생산력은 285.8~867.9  $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$  범위 (한국해양연구소, 1997)이다.

4월 (1998년) 표층의 기초생산력은 0.3~2.9  $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$  (평균: 1.41)이고, 단위면적당 수층적분한 기초생산력은 3.44~37.19  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$  범위로서 3월보다는 낮다 (한국해양연구소, 1989). 일일 단위면적당 기초생산력은 19.6~212.0 (평균 78.8)  $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로서 정점간 12 배 이상의 큰 차이를 나타내었고, 춘계 대변식이 4월에 일어남을 고려할 때 매우 낮은 값으로 사료된다. 동일 해역에서 Chung and Yang (1991)에 의해 1989년 4월에 측정된 평균값 (1,727  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )과 비교할 때 매우 낮은 값이다. 4월 조사에서 이처럼 기초생산력이 매우 낮았던 것은 본 조사기간 내내 대부분 열악한 광조건 (대부분 300  $\mu \text{Ein m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이하)으로 인하여 광합성이 활발하지 못했기 때문으로 사료된다. 이에따라 기초생산력의 수직분포 또한 표층에서 가장 높고, 수심 증가에 따라 감소하여 표층광의 약 50% 수심에서 가장 높은 생산성을 보인 3월과 비교된다.

### 8.3.2. 하계

1999년 8월에는 정점 A2에서 25.79  $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 으로 2월과 비슷한 낮은 값을 보였으나, 제주근해 정점 A9와 A12에서는 각각 162.46, 75.31  $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로 높다. 일일 단위면적당 기초생산력은 201.13 - 1266.98  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로서 최대치는 Chung과 Yang(1991)의 보고와 유사하다. 이는 주로 수온과 일조량의 증가에 기인한 것으로 보인다. 수직적으로는 정점 A9를 제외하고는 표층 광량의 약 10% 부근 수심에서 최대값을 보였다 (Fig. 3-5-1).

### 8.3.3. 추계 (한국해양연구소, 1997)

9월 (1997년) 단위면적당 수층 적분한 생산성은 9월에 43.44~102.99 (mean: 112.11)  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (한국해양연구소, 1997)로서 동일 조사년도인 1997년 3월에 비해 약 84% 증가하였다. 일일 단위면적당 생산력은 377.6~1964.5  $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이다.

11월 (1998년) 단위면적당 수층적분된 일차생산력은 30.09~48.53  $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 일일 단위면적당 기초생산력은 160.4~526.5 (평균 344.6)  $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$  범위 (한국해양연구소, 1998)로서 1989년 11월 동일해역에서의 평균값 (517  $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; Chung and Yang, 1991)보다는 다소 낮다.

Table 3-5-1. Primary production in the South Sea in February, 1999.

Strn.	%Light	Depth(m)	mgC m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup>	mgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
A1	100	0	1.27	12.89
	49	4	0.86	
secchi	30	7	0.67	
10 m	15	11	0.04	
	3.5	20	0.53	
	1	27	0.11	
	0			
A3	100	0	4.40	35.08
	49	4	1.85	
secchi	30	7	1.25	
10 m	15	11	1.15	
	3.5	20	0.96	
	1	27	0.02	
	0			

Table 3-5-2. Primary production in the South Sea in August, 1999

Strn.	%Light	Depth(m)	mgC m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup>	mgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	mgC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
A2	100	0	0.11	25.79	201.13
	49	5	0.44		
secchi	30	8	3.20		
11 m	15	12	1.52		
	3.5	22	0.07		
	1	30	0.09		
	0				
A9	100	0	11.03	162.46	1266.98
	49	7	9.23		
secchi	30	12	6.93		
16.4 m	15	18	2.86		
	3.5	32	0.12		
	1	44	0.03		
	0				
A12	100	0	3.81	75.31	688.26
	49	6	4.42		
secchi	30	10	5.02		
14.5 m	15	16	1.58		
	3.5	29	0.08		
	1	39	0.04		
	0				

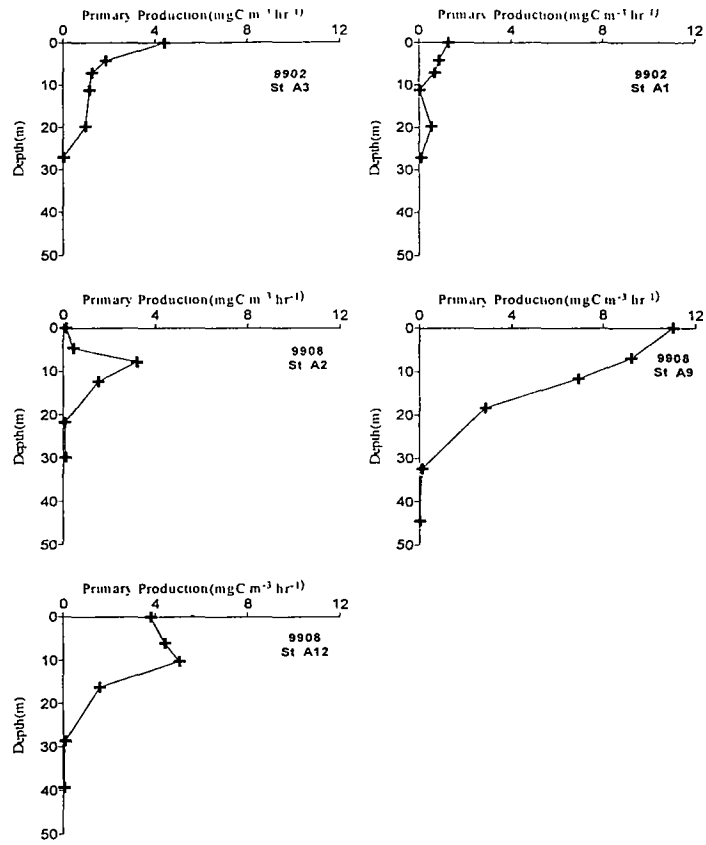


Fig. 3-5-1. Vertical profiles primary production in the Cheju Strait in February and August, 1999.

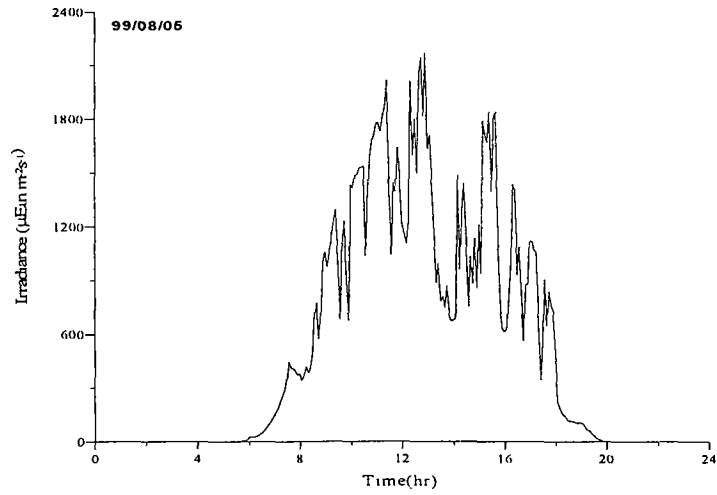


Fig. 3-5-2. Surface irradiance during the August, 1999 cruise in the Cheju Strait

## 5.4. 고 찰

### 5.4.1. 계절변화에 따른 기초생산력 변동성

남해는 고염빈영양의 대마난류와 저염고영양의 한국연안수의 영향을 크게 받기 때문에 이들 두 수괴가 만나는 전선역 부근에서 연중 높은 기초생산력을 보인다 (Chung and Yang, 1991).

계절별로는 동계에 표, 저층수간의 활발한 혼합으로 인한 낮은 광도, 수층 불안정과 저층으로부터 재부유된 입자성부유물질로 인한 탁도 증가로 인해 가장 낮은 일차생산력을 보였다. Chung과 Yang (1991) 또한 남해에서 겨울철 높은 탁도로 인한 투과광량의 감소가 일차생산력을 감소시킨다고 보고하였다.

그러나 춘계에서 하계로 접어들면서 유광대내에서 빛은 충분하나 영양염이 상당히 제한된 표층부근과 빛은 다소 제한되어 있지만 영양염이 풍부한 수온약층 부근으로 나뉘어 진다. 이러한 양상은 이미 여러 연구자들에 의해서 밝혀진 바 있다 (Dugdale, 1967; Eppley et al., 1973; Chung et al., 1989, 1991). 대부분의 정점들에서 표층광의 50~30% 수심 부근에서 최대를 보였는데 (Fig. 3-5-1), 이는 빛은 충분하나, 수온약층의 존재로 인해 저층으로부터의 영양염 유입이 차단되기 때문에 표층의 영양염 감소로 표층 식물플랑크톤이 수온약층 부근에 가라앉거나 겨울철 수괴의 혼합으로 아래로 내려온 식물플랑크톤 세포들이 표층 수괴의 안정으로 인해 수온약층 부근에 머무르는데 기인할 수 있다 (Goering et al., 1970; Pingree et al., 1976). 엽록소 a 및 용존산소 함량의 수직분포 또한 표층아래에서 최대값을 보여 위의 추론을 뒷받침한다 (한국해양연구소, 1997, 1998).

### 5.4.2. 기초생산력과 질소계 영양염 동적관계

제주해협외의 식물플랑크톤에 의한 표층 단위시간당 기초생산력은 동계 (2월)에 1.2~4.4 춘계 (4월)에 1.1~2.7, 하계 (8월)에 0.1~11.0, 추계 (11월)에 5.0~5.6 mg C m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> 범위로서 표층 질산이온 농도 (2월: 5.6~8.6, 4월: 2.8~3.1, 8월: 0.5~3.2, 11월: 1.5~7.7 μM)와 C/N 비율을 약 6으로 가정하여 제주해협에서의 계절별 식물플랑크톤에 의한 질소요구량을 계산해 보면 동계 (2월)에 14.3~52.4 춘계 (4월)에 13.1~32.1, 하계 (8월)에 1.2~131.0, 추계 (11월)에 59.5~66.7 μg at-N m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> 이다. 이것을 각 계절별 표층 질산이온 농도로 나누어서 turnover time을 구하면 2월에 6.8~16.3 일, 4월에 4.0~8.9일, 8월에 1.0~17.3일, 11월에 1.1~4.8일로서 1986년 10월 동해 서남해역 (0.8일; Chung et al., 1989) 및 1991년 7월 황해 중앙부 해역 (1.5~5.8일; Chung et al., 1991)보다 다소 높다. 이는 다음과 같이 가정할 수 있다. 첫째로 남해가 동해 서남해역 및 황해 중앙부해역에 비해 기초생산력이 낮을 경우, 둘째는 남해가 타해역에 비해 상대적으로 외부로부터 풍부한 질소계 영양염이 공급될 경우를 들 수 있다. 남해는 연간 기초생산력이 약 270 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>로서 황해 (165 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>; Chung et al., 1991; Hong et al., 1995) 및 동해 북부 냉수역 (>180 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>; Koblenz-Mishke et al., 1970)에 비해 높고, 동해 동남해역 (23

0~470 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>; Shim et al., 1985)과 유사하다. 따라서 남해에서 turnover time 이 타해역에 비해 큰 이유는 외부로부터 풍부한 질소계 영양염이 공급되기 때문으로 볼 수 있다. 제주도 이북의 남해 대륙붕 해역은 연안에 많은 하천들이 연결되어 있고, 해안일대는 대규모의 항만과 임해 공업단지등이 밀집되어 하천 및 대기를 통해 많은 양의 영양염류를 포함한 화학물질들의 유입이 지속적으로 이루어 진다. 특히 본 연구 (9. 제주해협통과 화학물질 플럭스 참조)에서는 제주해협을 통과하여 남해로 들어오는 연간 질산이온 및 인산이온 플럭스가 각각  $6.05 \times 10^{10}$ ,  $0.36 \times 10^{10}$  mol yr<sup>-1</sup>로서 제주해류에 의해 남해로 유입되는 질산이온 및 인산이온 플럭스는 양자강 및 황하강을 통한 연간 방출량보다 질산이온은 약 2-12배, 인산이온은 약 6-180 배 높아 풍부한 화학물질들을 함유한 제주해류가 남해의 생지화학적 과정들에 있어서 상당히 중요한 역할을 하고있음을 밝혔다.



## 6. 해수의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 과 산소안정동위원소비 ( $\delta^{18}\text{O}$ )를 이용한 한국 남해의 해수 기원별 기여율 산정

### 6.1. 서론

제주해협부근에서 대한해협까지 동서로 그리고 한반도 해안선에서 제주도 사이의 남해는 황해연안수, 황해 저층냉수 남해연안수, 대마난류수등으로 매우 다양한 수괴가 존재하는 것으로 알려져 있다. 이는 대부분 수온과 염분등 해수의 물리적 특성에 기인한 구분이다. 남해와 같은 천해에서는 인접 육지의 영향을 많이 받으므로 수온은 해수기원 추적자로서 보전적 기능이 약화된다. 그리고 이전에 황해의 저층냉수는 표층수가 겨울에 냉각되고 수직적으로 잘 혼합된 상태에서 봄철에 표층수의 태양에 의한 가열과 담수 공급의 증가로 인하여 밀도 약층의 발달로 표층과 저층이 단순히 수직적으로 분리된 것이라는 사실은 해수의 산소동위원소 조성으로 규명하였다 (Kang et al. 1994). 남해는 서쪽으로는 제주해협, 동쪽으로는 대한해협을 포함하며, 수심이 100 m 미만의 천해성 해역이다. 제주해협의 정밀 해류구조 관측에 의하면 (Suk et al, 1996) 제주해협에는 2개의 해류 핵이 존재하며 북쪽의 핵은 황해연안류와 한반도 연안의 저염고탁도 및 고영양해수로 이루어져 있다 (제주한류, Cheju Cold Current). 그리고 하계에는 증가된 양자강 유출수가 제주도 서남부에 양자강 홍수 발생후 1 개월 후에 도달하고 이는 다시 제주해류에 인트레인 (entrain)되어 제주해협으로 유입되고 (이등, 2000). 이로 인한 저염화는 생물 피해를 발생시키기도 한다. 남쪽의 핵은 쿠로시오로부터 분지된 고온고염의 대마난류수는 제주도 서쪽을 우회 (제주난류, Cheju Cold Current)하여 제주해협을 통한 유입이 있다. 그리고 제주 동쪽의 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 유입된다. 남해로 유입된 해수는 대부분 동향으로 흘러서 대한해협을 통해 동해로 빠져 나간다 (Lie and Cho, 1994). 따라서 남해는 고염저영양의 대마난류와 저염고영양의 한국 및 중국 연안수가 서로 접하면서 동해로 동진하는 연중 복잡한 해수특성을 보인다. 특히 하계에는 풍부한 영양염류등 화학물질들을 함유한 양자강 희석수가 제주해협을 통해 유입되어 대한해협을 통해 동해로 빠져나감으로서 (Chang et al., 1995; Suk et al., 1996) 남해의 화학물질 농도분포에 상당한 영향을 미친다. 따라서 풍부한 화학물질들을 함유한 저염수가 남해에서 차지하는 비중에 대한 이해는 남해에서의 화학물질 순환 및 생지화학 과정을 연구하는 데 있어 필수적으로 조사되어야 한다.

일반적으로 해양의 수괴를 분류하는 추적자로서 수온과 염분을 이용하지만 연안 및 대륙중해역에서는 수온의 변화로 인하여 수온을 보존성 추적자로 보기는 어렵다 (Torgensen, 1979). 일반적으로 해양에서 수괴를 구분하는 추적자로서 라듐 (Ra) 동위체와 산소안정동위원소를 많이 사용한다.

해양에서  $^{228}\text{Ra}$  (반감기 5.7년)과  $^{226}\text{Ra}$  (반감기 1,620년)은 천연 U/Th 계열 방사능 핵종으로서 주로 저층퇴적물로부터 공급되거나 강물기원의 입자들로부터 탈착 (desorption)되어 연안역에 공급한다 (Elsinger and Moore, 1984; Reid et al., 1979;

Okubo, 1980). 해양에서 육상기원의 중금속과 다른 오염물질들은 연안역과 대륙붕에서 체류시간이 수개월 미만으로 짧아 대부분이 연안과 대륙붕역의 퇴적물에서 침적되는 반면에 이들 Ra 동위체들은 해수중에서 용해성 및 방사붕괴를 제외한 비반응성으로 혼합과 순환에 의해 확산되고 운반되면서 외양역까지 영향을 미쳐 연안으로부터 멀어짐에 따라 뚜렷한 농도구배를 나타낸다. 특히  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 오직 반감기가 짧은  $^{228}\text{Ra}$ 의 붕괴에 의해 변화하기 때문에 해역 및 수심에 따라 현저히 다른 특징을 보인다. 따라서 이들 Ra 동위체들은 다양한 해양환경에서의 성질이 서로 다른 수괴들의 특성을 이해하고, 연안수와 외양수간의 혼합의 정도를 연구하는 추적자로서 유용하다 (Moore et al., 1986; Okubo, 1980; Nozaki, 1989). 물론 남해와 같은 좁은 해역에 적용하기 위하여서는 대하천인 양자강과 해저와 소하천으로부터의  $^{228}\text{Ra}$ 과  $^{226}\text{Ra}$ 의 공급율을 파악하여야 한다. 그러나 한반도 근해 해역에서 현재까지 이들 라듐 동위체들에 대한 연구는 동해 (Okubo, 1980; Harada and Tsunogai, 1986)와 대한해협 (Lee & Kim, 1998). 그리고 동중국해 및 남중국해의 하계, 동중국해 및 남해 (양 과 이, 1999; 양 등, 2000),에 대해 연구된 바 있으나, 남해로의 황해 및 동중국해 대륙붕수의 주요 유입 통로인 제주해협에 대해서는 미비하다.

해수의 산소동위원소비 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )는 증발과 강수에 의하여만 주로 변한다. 따라서 천해의 연안 및 대륙붕 해양에서는 주변 환경의 열변화에 민감한 수온을 대신하여 보전성 해수 추적자로 널리 사용되어왔다. 특히 하천수의 부유물에 흡착된 Ra 이 해수를 만나면서 탈착되고 또한 해저 퇴적물로 부터 해수로 공급되는 특성으로 인하여 하천수 자체보다는 하구 인접해역에서 높은 방사능세기를 갖고있는  $^{228}\text{Ra}$ 과는 달리 해수의 산소동위원소는 하천수와 해수간의 혼합에 의해 동위원소값이 결정되기 때문에 담수의 기여율을 산정하고, 또 강수의 산소동위 원소는 위도와 고도에 따라서 분별 (fractionation)되기 때문에 해수기원에 대한 직접적인 추정이 가능하다.

이에따라 본 연구는 첫째, 수괴추적자로서 유용하게 사용될 수 있는 라듐동위체 농도를 측정하여 남해에서의 라듐동위체에 대한 수평 농도분포 특성을 파악하고, 둘째, 라듐동위체와 산소동위원소를 염분과의 상관관계를 이용하여 제주해협에서의 해수기원을 추적하며, 셋째, 혼합확산 과정의 추적자로서 남해에서의 양자강희석수와 쿠로시오 표층수간의 물리적 혼합정도를 밝히는데 중점을 두었다.

## 6.2. 방법 및 재료

남해의 해수 분포 특성과 그 기원을 규명하기 위하여 제주해협 및 대한해협을 포함한 남해 전해역에서 분포특성을 이해하기 위하여 1996년 10월부터 1999년 2월까지 6 차례에 걸친 해수의 라듐동위체와 안정산소동위원소비를 측정하기 위한 시료 채취 및 현장 관측을 실시하였다. 시료 채집 정점들은 Fig. 3-6-1에 나타내었다.

해수중 라듐동위체는 카트리지형 추적자 추출기를 사용하였다 (Baskaran et al. 1993). 표면하 2 m 수심의 표층수를 선박에 설치된 해수펌프를 이용하여 선상으로 끌어 올려 유량계를 통과한 후 3 개의 여과 카트리지를 직렬로 연결한 여과-추출 조립체를 통과시켰다. 해수의 펌핑 속도는  $30 \text{ L min}^{-1}$  이고 1000 L이상을 여과하였다.

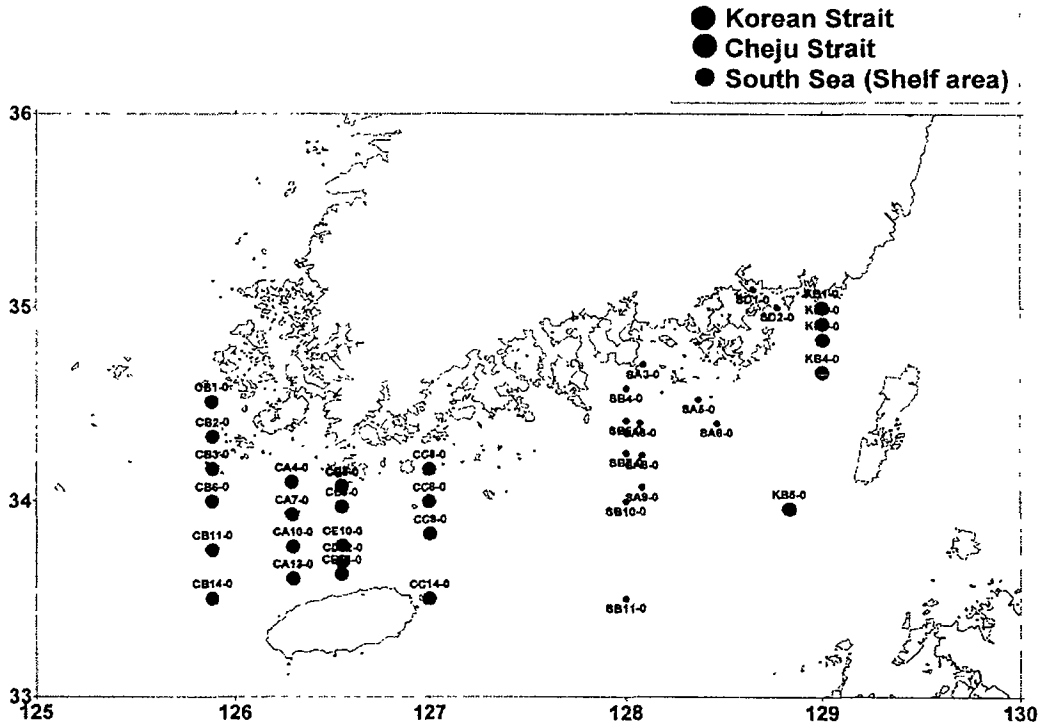


Fig. 3-6-1. Maps of sampling stations in 1999. in the South Sea.

첫 번째 카트리지가 조립체는 부유 입자를 수거하기 위한 것으로 명목상 구경은  $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 두 번째와 세 번째 카트리지는 추출용 카트리지가이다. Sachs et al. (1989)의 권고대로, 길이 25 cm, 직경 6 cm의 여과 카트리지는 구멍을 여러 개 뚫은 폴리프로필렌 핵심 실린더에 폴리프로필렌 섬유를 감은 것(주 레인보우)을 사용하였다. 구매한 여과카트리지는 20-리터들이 플라스틱 통에 함빡 적시는 방법으로 세척하였다. 세척의 순서는 (i) 비누물, (ii) 0.1N NaOH 용액, (iii) 0.1M HCl 용액에 각각  $50^\circ\text{C}$ 로 8시간 담그어 두었다. 여과필터는 세척용액에 담그기 전과 세척액에 담긴 후에 증류수로 세척하였다. 세척된 여과카트리지는 포화  $\text{KMnO}_4$  용액 (250 g  $\text{KMnO}_4$ / liter)에  $50^\circ\text{C}$ 에서 12시간 담그므로서  $\text{MnO}_2$ 를 주입시켰다. 이렇게 형성한 추출카트리지는 무게로 5-10%의  $\text{MnO}_2$ 를 함유한다.  $\text{KMnO}_4$  배치 (batch) 이후 각각의 카트리지는 증류수로 깨끗이 세척하여 플라스틱 봉투에 보관하였다.

시료채취 후 Mn 필터를 회수하여 증류수로 씻어 염분을 제거한 다음 실험실로 운반하였다. 실험실에서 Mn 필터를 절개하여 전기로에서  $550^\circ\text{C}$ 의 온도에서 6시간 이상 연소시켰다. 연소되고 남은 재의 무게를 측정후 감마 계수 튜브 (10 ml)에 넣었다.

감마 검출기 (Canberra<sup>(R)</sup> GCW2523)는 HPGe으로 59mm 깊이, 57.5 mm 직경의 closed-end coaxial well crystal이고 결정의 활성 부피 (active volume)은  $138.6 \text{ cm}^3$  인 가로형과 세로형 2종류를 사용하였다. 분해능은  $^{57}\text{Co}$ 에 대하여 122keV에서 1.37 keV (FWHM) 이고,  $^{60}\text{Co}$ 에 대하여서는 1332 keV에서 2.07keV(FWHM)이고

peak/compton비는 45.8이며, 상대효율은 1332 keV에서 26.8%이다. 감마선을 정량적으로 측정하기 위해 미국 IPL사에서 구입한  $\gamma$  표준선원 (341-30 시리즈)를 사용하여 각 채널당 에너지를 할당하고, 각 에너지당 검색효율은 Knee high 값의 왼쪽부분에는 적당한 표준선원이 없기 때문에 에너지당 검색효율식을 구하지 못하였고, 단지 100keV 이상의 부분에서만 보정식을 구하였다. IPL사의 7개 점표준선원을 well 중심에서 6 cm 높이에 두고 계측하여 상대적인 검색효율곡선을 구한 후 Natural U 표준용액 (미국 EPM 표준시료 1843-1) 시료로부터 영속평형을 이루고 있는 딸핵종  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ 의 피크로부터 절대 검색효율을 구하였다. 이들의 상대검색효율과 절대검색효율을 비교하여 인자를 구한 후 영속평형에 도달되었다고 믿어지는 저어콘에 포함된  $^{238}\text{U}$ 의 딸핵종들의 감마를 측정하여 보정결과를 검증하였다. 그리고 이 값들을 사용하여 회기곡선을 구한 후 직접 측정하지 못한 에너지에서 검색효율을 내삽법에의거 산출하였다. 이 에너지-검색효율의 관계식은 시료 높이가 20mm 일 때  $\log(\epsilon) = -1.00817 \times (\log E)^2 + 3.793754 \times \log E - 3.7071$ 이고, 여기서  $\epsilon$ 는 검색효율, E는 에너지이다. 시료의 well 내의 높이 효과보정은 2000 dpm의 Uranyl actate 용액을 희석하여 7~35mm의 시료높이에 대한 단위시간당 누적계수를 측정하였다. 이렇게 하여 구한 높이 효과 인자  $F = -0.0005 \times H^2 + 0.01542 \times H + 0.8916$ 이었다. 이렇게 하여 계산한  $^{228}\text{Ra}$ 의 검색효율은 0.249 이었고, intensity는 0.124이다. 이 값을 이용하여  $^{228}\text{Ra}$ 의 계수값을 보정하여 농도로 환산하였다. 다중 채널분석기를 포함한 감마 계수시스템은 계수기는  $^{226}\text{Ra}$ 은 액체 및 해저 퇴적물 표준물질 (Standard Reference Material) 및 보증물질 (Certified Reference Material)로 여러 가지 geometry 별로 검정하였다 (IAEA/RGU-1, Isotope Products Laboratory 제공  $^{226}\text{Ra}$  용액).  $^{226}\text{Ra}$ 의 경우는별개의 고체와 액체의 표준물질로 분석하여 본 결과, low energy level에서도 (46keV와 63keV) self-absorption 보정은 필요하지 않았다. 그리고 표준시료의  $^{226}\text{Ra}$ 에 대한 dpm/cpm비는 세로형에서 18.54, 가로형에서는 15.31이었다. 계수 오차 (1 표준편차)는  $^{228}\text{Ra}$ 과  $^{226}\text{Ra}$ 에 대하여서는 1-30%이고, 최종 1-시그마-전파-오차 (1 시그마 오차, background 보정오차, 표준화, 보정시의 오차등 모든 오차)는 일차 여과카트리지의 경우는 약 80% 이내이고 두 번째의 방사능이 낮은 여과 필터의 경우는 약 15%에 달하였다.

$^{228}\text{Ra}$ 과  $^{226}\text{Ra}$  측정을 위하여 재를 밀봉후 20일 경과시 계수하였다.  $^{228}\text{Ra}$  (반감기; 5.75년) 측정을 위하여  $^{228}\text{Ra}$ 과 영년평형 (secular equilibrium)을 이룬 딸 핵종인  $^{228}\text{Ac}$  (338과 911 keV, 반감기; 6.13시간)을 측정하였고,  $^{226}\text{Ra}$  측정은 영년평형을 이룬 딸 핵종인  $^{214}\text{Pb}$  (352 keV, 반감기; 26.8분)을 측정하였다. 검출기에서의 338, 352, 911 keV에서는 바탕값이 출현하지 않았다.

해수로부터의 추출 효율은 2 개의 동일한 추출기를 직렬로 연결하여 상대적인 효율로부터 계산하였다. 이 경우 효율은 사용한 2개의 추출기의 완벽한 동질성이 요구된다. 2개의 추출기가 동일하다고 가정하는 경우 추출효율 Ra 동위체의 경우  $\eta = 1 - F2/F1$ 이다. 여기서 F1과 F2는 첫 번째와 두 번째 추출기에 함유된 추적자 (라디움동위체)의 량이다. 해수중에 Ra 동위체들은 매우 낮은 농도로 존재하기 때문에 여과필터의 흡착 점(site)들이 103-104리터를 통과하여도 포화되지는 않는다. 추

출효율에 관한 제한요인에 대하여서는 Baskaran et al. (1993)에 자세하게 기술되어 있다.

수온, 염분자료는 한국해양연구소 (1997, 1998, 1999) 자료를 인용하였다.

해수의 산소동위원소비 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )는 해수 1ml을 플라스크에 넣고 이산화탄소를 주입한 후 25°C에서 6시간, 미약하게 교반을 반복하는 자동  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$  평형기 (Isoprep 18<sup>(R)</sup>)를 이용하여 해수의 산소동위원소비와 이산화탄소의 산소동위원소비를 평형에 도달시킨 후 (Epstein and Mayeda, 1953) 이산화탄소 기체를 동위원소비 질량분석기 (Isotope Ratio Mass Spectrometer, VG Isotech SIRA II<sup>(R)</sup>)에 입력하여 산소동위원소비를 정량하였다. 해수의 산소 동위원소비는 표준해수 (Standard Mean Ocean Water, SMOW) 에 대한 상대적인 비로서 아래와 같이  $\delta$  표기방법을 사용하였다 (Craig, 1961).

$$\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000 (\text{‰}).$$

한 배취 (batch)에 20개의 시료를 분석하였고, 이중 2-4개는 실험실 표준해수를 삽입하여 측정의 품질을 보증하였다. 본실험에서 사용한 실험실 표준해수의  $\delta^{18}\text{O}$  값은  $-0.12 \pm 0.08\text{‰}$  이고, 측정 정밀도는  $\pm 0.13\text{‰}$ 이다 (Kang et al. 1994)..

### 6.3. 결과

#### 6.3.1. 라듐동위체 분포

1996년부터 1999년까지 각 조사항해별 남해에서의 라듐 동위체 분석 결과를 Table 3-6-1에 나타내었다.

##### 6.3.1.1. 춘계 (98년 4월)

표층수중  $^{228}\text{Ra}$  농도는 제주해협 및 대륙붕역에서 각각 0.071-0.294, 0.067-0.263 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서 한국연안에서 외해쪽으로 갈수록 감소하며, 또한 염분증가에 따라 감소하여 34.5 psu 이상에서 0.10 dpm l<sup>-1</sup> 이하로 낮다. 반면에 대한해협에서는 0.251-0.417 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서 제주해협 및 대륙붕역에 비해서 상대적으로 높고, 염분 34 psu 이상의 고염수에서도 0.25 dpm l<sup>-1</sup> 이상이다.

$^{226}\text{Ra}$  농도는 제주해협, 대륙붕역 및 대한해협에서 각각 0.147~0.178, 0.135-0.227, 0.136-0.297 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서  $^{228}\text{Ra}$  농도 분포와 마찬가지로 염분 34.6 psu 이상의 고염수에서 0.15 dpm l<sup>-1</sup> 이하이다.

##### 6.3.1.2. 추계 (1996년 10월, 1998년 9월)

표층수중  $^{228}\text{Ra}$  농도는 제주해협 (98년 9월)에서 0.189-0.335 dpm l<sup>-1</sup>, 대한해협 (96년 10월)에서 0.075-0.334 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서 저염수 (<32psu)에서 0.20 dpm l<sup>-1</sup> 이상으로 높으나, 고염수 (>34psu)에서는 0.10 dpm l<sup>-1</sup> 이하이다.

수심별로 측정된 제주해협에서  $^{228}\text{Ra}$  농도는 연안역 (정점 CD5)에서는 저층보다 표층이 높아  $^{226}\text{Ra}$ 이 해저 퇴적물로부터 보다는 고농도의  $^{228}\text{Ra}$ 수의 공급이 더 클것으로 사료된다. 그러나 수심이 깊은 제주근해 정점 CD12에서는 표층보다 저층이

1.5배 높아 저층 퇴적물이 그 공급의 주요인 일 것으로 사료된다.  $^{226}\text{Ra}$  농도는 제주 해협 및 대한해협에서 각각 0.091~0.161, 0.093-0.178 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서  $^{228}\text{Ra}$  농도에 비해서는 범위폭이 작다.

Table 3-6-1. Ra isotopes activities in the South Sea of Korea.

St.	Latitude	Longitude	Temp. (°C)	Sal. (psu)	$^{226}\text{Ra}$ (dpm/l)	$^{228}\text{Ra}$ (dpm/l)	$\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$
Korean Strait							
1998.4.5-11							
KB1-0	35° 00.00'	129° 00.00'	12.356	32.775	0.215	0.136	1.586
KB2-0	34° 55.00'	129° 00.04'	12.756	33.915	0.417	0.297	1.405
KB3-0	34° 50.07'	129° 00.07'	13.619	34.187	0.352	0.255	1.379
KB4-0	34° 40.00'	129° 00.01'	15.985	34.553	0.251	0.143	1.762
Cheju Strait							
1997.3.17-27							
CA4-0	34° 05.99'	126° 17.40'	10.037	33.778	0.354	0.175	2.03
CA7-0	33° 55.96'	126° 17.50'	10.994	33.990	0.246	0.114	2.16
CA10-0	33° 46.02'	126° 17.72'	12.718	34.330	0.161	0.126	1.28
CA13-0	33° 36.09'	126° 17.75'	14.249	34.432	0.09	0.120	0.75
1998.4.5-11							
CB1-0	34° 30.82'	125° 52.78'	10.349	33.259	0.375	0.317	1.184
CB2-0	34° 20.00'	125° 53.13'	10.051	33.204	0.382	0.291	1.314
CB3-0	34° 10.10'	125° 53.04'	10.089	33.088	0.347	0.274	1.266
CB6-0	34° 00.01'	125° 52.98'	10.237	32.879	0.393	0.234	1.684
CB11-0	33° 44.97'	125° 52.94'	12.525	33.611	0.278	0.301	0.925
CB14-0	33° 29.99'	125° 52.98'	14.805	34.330	0.146	0.234	0.621
CC3-0	34° 10.04'	127° 00.01'	10.635	33.354	0.294	0.260	1.132
CC6-0	33° 59.99'	126° 59.93'	11.526	33.325	0.271	0.147	1.843
CC9-0	33° 49.99'	127° 00.06'	16.635	34.617	0.071	0.156	0.459
CC14-0	33° 29.99'	126° 59.96'	14.553	34.219	0.157	0.188	0.836
1998.9.24-26							
CD5-0	34° 04.89'	126° 32.94'	23.900	30.945	0.335	0.161	2.072
CD5-20	34° 04.89'	126° 32.94'	23.171	31.130	0.241	0.115	2.097
CD5-50	34° 04.89'	126° 32.94'	16.732	32.837	0.259	0.125	2.072
CD12-0	33° 41.29'	126° 33.20'	23.276	31.323	0.189	0.091	2.072
CD12-25	33° 41.29'	126° 33.20'	24.098	32.627	0.154	0.070	2.216
CD12-33	33° 41.29'	126° 33.20'	23.030	32.827	0.250	0.120	2.072
CD12-50	33° 41.29'	126° 33.20'	17.255	33.051	0.197	0.089	2.216
CD12-75	33° 41.29'	126° 33.20'	13.660	33.466	0.232	0.112	2.072
CD12-110	33° 41.29'	126° 33.20'	14.024	33.720	0.274	0.130	2.102
1999.2.22-3.3							
CE5-0	34° 04.60'	126° 33.10'	8.5728	33.001	0.279	0.214	1.31
CE5-30	34° 04.60'	126° 33.10'	8.409	33.012	0.776	0.450	1.72
CE7-0	33° 58.40'	126° 33.04'	11.6824	33.8673	0.245	0.168	1.46

Table 3-6-1. (continued).

St.	Latitude	Longitude	Temp. (°C)	Sal. (psu)	<sup>228</sup> Ra (dpm/l)	<sup>226</sup> Ra (dpm/l)	$\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$
South Sea (Shelf area)							
1996 10.2-13							
SA5-0	34° 31.63'	128° 22.37'	22.14	31.954	0.334	0.178	1.88
SA6-0	34° 24.26'	128° 27.95'	22.96	32.856	0.226	0.140	1.61
SA11-0	33° 57.76'	128° 50.13'	24.98	34.013	0.075	0.093	0.83
1997 3 17-27							
SB3-0	34° 42.36'	128° 05.13'	9.722	33.908	0.262	0.185	1.42
SB6-0	34° 24.29'	128° 04.29'	12.632	34.418	0.193	0.194	0.99
SB8-0	34° 14.33'	128° 04.86'	13.926	34.466	0.078	0.100	0.77
SAB-0	34° 04.35'	128° 04.85'	14.667	34.489	0.080	0.063	1.28
1998.4.5-11							
SC4-0	34° 35.02'	128° 00.04'	11.511	33.839	0.207	0.188	1.102
SC5-0	34° 25.02'	127° 59.96'	12.421	34.031	0.232	0.227	1.021
SC7-0	34° 15.00'	128° 00.00'	12.371	33.830	0.263	0.211	1.247
SC10-0	34° 00.00'	128° 00.00'	17.090	34.640	0.067	0.135	0.500
SC11-0	33° 30.00'	127° 59.93'			0.993	0.271	3.666
1998.9.24-26							
SD1-0	35° 05.55'	128° 39.04'	23.658	29.926	0.253	0.114	2.216
SD2-0	35° 00.10'	128° 46.33'	23.703	30.264	0.263	0.119	2.216

### 6.3.1.3. 동계 (1999년 2월)

제주해협 표층수중 <sup>228</sup>Ra 농도는 0.105-0.279 dpm l<sup>-1</sup>로서 한국연안에서 제주도쪽으로 갈수록 감소하여 제주근해 고염수 (34.3psu)에서 0.10 dpm l<sup>-1</sup>로서 낮으나 연안역 저염수 (<33psu)에서는 0.20 dpm l<sup>-1</sup> 이상이다. 특히 연안역 저층 (정점 CE5)에서는 0.776 dpm l<sup>-1</sup>로서 표층수의 약 2.8배 높아 추계와 마찬가지로 <sup>228</sup>Ra의 주요 공급원이 저층 퇴적물로부터임을 알 수 있다.

<sup>226</sup>Ra 농도는 0.035~0.214 dpm l<sup>-1</sup> 범위로서 <sup>228</sup>Ra 농도분포와 마찬가지로 제주근해 고염수 (>34 psu)에서 0.05 dpm l<sup>-1</sup> 이하이나, 연안역 저염수 (33 psu)에서는 15 dpm l<sup>-1</sup> 이상으로 높고, 특히 저층에서 0.45 dpm l<sup>-1</sup>으로 표층수의 약 2.1배이다.

### 6.3.2. 염분과 라듐 동위체와의 관계

천연 U/Th 계열 방사성 핵종인 <sup>226</sup>Ra과 <sup>228</sup>Ra은 주로 해저 퇴적물로부터 확산에 의해 공급되거나 강물기원의 입자들로부터 탈착 (desorption)되어 연안역에 공급된다. 그러나 육상기원의 중금속과 다른 오염물들은 연안역과 대륙붕에서 체류시간이 수개월 미만으로 짧아 대부분이 연안과 대륙붕 지역의 퇴적물로 침적도는 반면에 이들 Ra 동위체들은 해수중에서 용해성으로 해수의 물리적 혼합과 순환에 의해 표층해수로 확산되고 운반되면서 방사붕괴 (radio-decay)하여 외양역까지 영향을 미쳐

연안으로 멀어짐에 따라 뚜렷한 방사능세기 구배를 나타낸다. 계절별에 따른 해수 혼합과 순환에 의한 Ra 동위체 추적자로서의 유용성을 이해하기 위해 구한 제주해협 및 남해 대륙붕역에서의 표층수중 염분과 라듐 동위체들간의 상관관계는 다음과 같다 (Figs. 3-6-2~3).

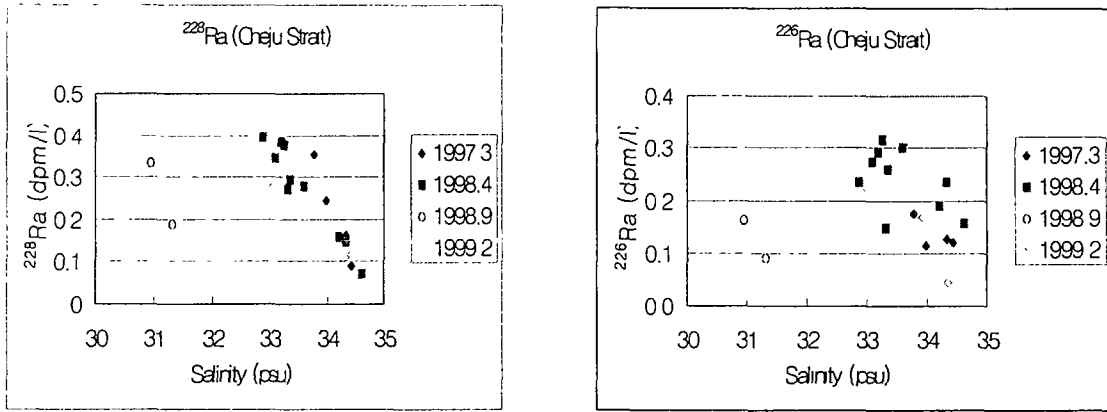


Fig. 3-6-2. The correlation of salinity with  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{226}\text{Ra}$  activity in the surface water of the Cheju Strait from 1996 to 1999.

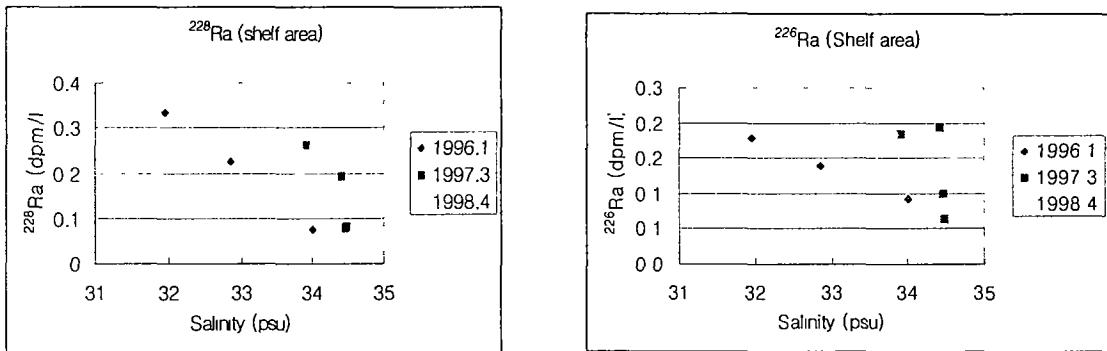


Fig. 3-6-3. The correlation of salinity with  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{226}\text{Ra}$  activity in the surface water of the shelf area of the South Sea from 1996 to 1999.

제주해협 (Cheju Strait)

1997년 3월:  $^{228}\text{Ra} = 12.86 - 0.37 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.97)$

$^{226}\text{Ra} = 2.30 - 0.06 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.47)$

1998년 4월:  $^{228}\text{Ra} = 6.44 - 0.18 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.94)$

$^{226}\text{Ra} = 1.95 - 0.05 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.25)$

1999년 2월:  $^{228}\text{Ra} = 4.43 - 0.13 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.83)$

$^{226}\text{Ra} = 4.39 - 0.13 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.86)$

남해 대륙붕역 (Shelf area)

1996년 10월:  $^{228}\text{Ra} = 4.36 - 0.13 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.99)$



$$\begin{aligned}
&^{226}\text{Ra} = 1.49 - 0.04 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.99) \\
1997\text{년 } 3\text{월}: &^{228}\text{Ra} = 9.77 - 0.28 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.74) \\
&^{226}\text{Ra} = 4.94 - 0.14 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.36) \\
1998\text{년 } 4\text{월}: &^{228}\text{Ra} = 7.48 - 0.21 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.89) \\
&^{226}\text{Ra} = 3.10 - 0.09 \times \text{Salinity} \quad (r^2 = 0.66)
\end{aligned}$$

염분 33.2 psu에서  $^{226}\text{Ra}$  농도는 최대값 (0.393 dpm/l)을 가지나 염분 증가에 따라 급격히 감소하여 조사시기중 염분 최대값인 34.6 psu에서 최소값 (0.07 dpm/l)을 갖는다.

$^{226}\text{Ra}$  농도는  $^{228}\text{Ra}$ 과 유사하여 염분 33.2 psu에서 최대값 (0.32 dpm/l)을 갖고 염분증가에 따라 감소하여 고염 (>34.4 psu)에서 0.1 dpm/l 이하로 낮다.

그러나  $^{226}\text{Ra}$ 에 비해  $^{228}\text{Ra}$ 은 33 psu 이상에서는 염분과 상당히 양호한 역의 상관관계 ( $r^2 > 0.74$ )를 보임으로서  $^{228}\text{Ra}$  농도는 저염수에 의해 크게 조절된다는 것을 알 수 있다.

## 6.4. 토의

### 6.4.1. 라듐 동위체 분포 특성

일반적으로  $^{228}\text{Ra}$  및  $^{226}\text{Ra}$  농도는 수심이 얇고, 저염의 특징을 보이는 연안역에서 높다. 또한 연안역에서  $^{226}\text{Ra}$  농도는  $^{228}\text{Ra}$  농도보다 낮으나 고염 (>34.5psu) 해역에서는 상대적으로 높고,  $^{226}\text{Ra}$ 의 최대값과 최소값의 차이는  $^{228}\text{Ra}$ 의 차이보다는 약 절반수준이다. 이것은  $^{228}\text{Ra}$ 과  $^{226}\text{Ra}$ 은 화학적으로는 같은 거동을 하지만 각각의 반감기에서 차이 ( $^{226}\text{Ra}$ :1,622년,  $^{228}\text{Ra}$ : 5.75년)로 인해 어미 핵종으로부터의 생성율에 영향을 받는다. 즉  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ra}$ 의 어미핵종 농도가 같을 경우 이들 라듐동위체의 붕괴상수비는  $^{226}\text{Ra}$ 보다  $^{228}\text{Ra}$ 이 약 283배 빨라 퇴적물로부터 생성되는  $^{228}\text{Ra}$ 은  $^{226}\text{Ra}$ 보다 10-100 배 정도 더 크다. 따라서 수심이 낮은 연안역의 해수는 수심이 깊은 외해역 해수보다 상대적으로 많은  $^{228}\text{Ra}$ 을 함유한다 (Yamada and Nozaki, 1986). 이와 같은 특징으로 인해 Ra 동위체들은 해역에 따라 현저히 다르기 때문에 각 수괴의 특성과 혼합과정을 이해하는데 유용한 추적자로 사용될 수 있다 (Moore et al., 1986).

$^{228}\text{Ra}$  농도는 염분이 증가할수록 감소하여 34 psu 이상에서  $^{228}\text{Ra}$  농도는 0.1 dpm l<sup>-1</sup> 이하이다. 특히 본 조사 중 최대 고염 (34.62psu) 특성을 갖는 98년 4월 정점 CC9의 표층값은 Nozaki등 (1991)에 의해 쿠로시오 본역에서 측정된 값 (0.07 dpm l<sup>-1</sup>)과 같아 남해로 유입된 후에도 고염의 쿠로시오 특성을 유지하는 것으로 사료된다.

$^{226}\text{Ra}$ 의 기원:  $^{226}\text{Ra}$ 은  $^{230}\text{Th}$ 의 붕괴로부터 생성된다. 심해에서의  $^{226}\text{Ra}$ 의 함량은 지역적으로 큰 변이를 보이는 데 이는 해저로부터 배출 플럭스와 심해수 순환에 따라 다르다 (Chochran, 1980). 그리고 Ra의 생물재순환이 해저로부터의  $^{226}\text{Ra}$  플럭스를 증가하는 경우도 있다. 즉  $^{226}\text{Ra}$ 함량의 증가는  $^{226}\text{Ra}$ 이 결합된 입자의 침강과

용해에 주로 의존하게 된다.  $^{226}\text{Ra}$ 과 비슷한 경우로 Ba을 들수 있다. 이는 대부분 Si 골격의 구조류의 번성과 소멸에 따른다. 대륙붕해역에서의  $^{226}\text{Ra}$ 의 함량과 용존Si의 함량의 양의 상관 관계는 Bering Shelf에서도 관측이 되었다 (Glover and Reeburgh, 1987). 대양 심해저에서의 해저퇴적물로부터 상층 해수로의  $^{226}\text{Ra}$  플럭스는  $<0.0015$  에서  $0.21 \text{ dpm cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 로 매우 다양하고 주로 퇴적물의 화학조성보다는 퇴적물에 반비례하는 것으로 나타났다 (Chochran, 1980).

#### 6.4.2. 라듐동위체비 ( $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ )

외양 표층에서의  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ra}$ 은 염분과 같이 강우 및 증발에 의해, 영양염류와 같이 생물 섭취에 의해 농도가 변할 수 있다. 그러나  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비율은 오직 혼합과 반감기가 짧은  $^{228}\text{Ra}$ 의 붕괴에 의해서만 변화한다 (Moore et al., 1986; Key et al., 1985). 따라서 보존성인 Ra 동위체와 염분과의 관계를 이용하여 해수의 물리적 혼합, 확산과정을 이해하기 위한 추적자로서 이용할 수 있다. 또한 이들 Ra 동위체의 농도분포는 해역 및 수심에 따라 현저히 다르기 때문에 다양한 해양환경의 성질이 서로 다른 수괴들의 특성과 혼합정도를 이해하는 추적자로서도 유용하다 (Moore et al., 1986; Okubo, 1980; Nozaki, 1989).

Fig. 3-6-4는 그간 남해 표층수에서 측정된  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비와 염분간의 상관관계이다.

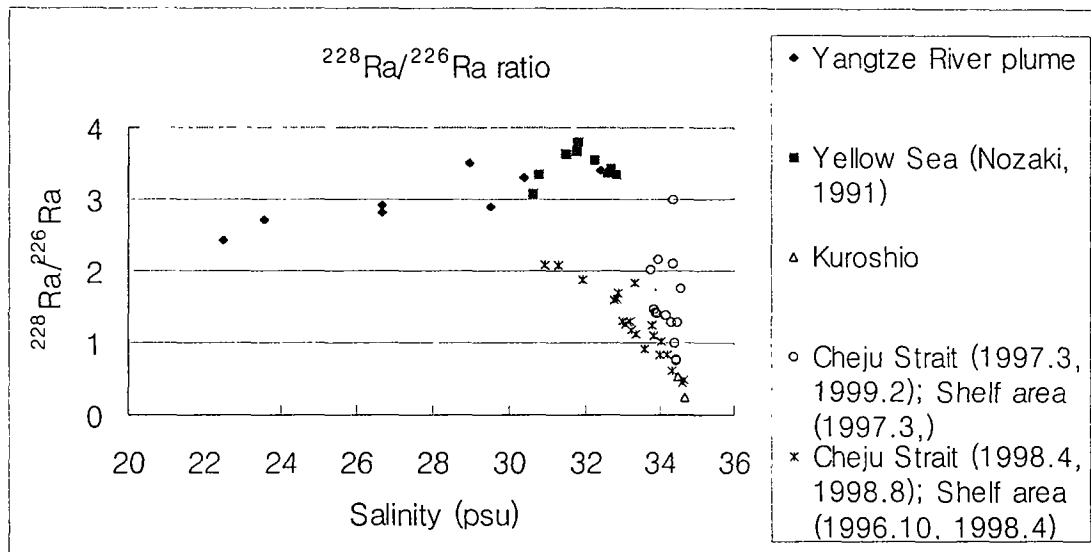


Fig. 3-6-4. The relationship of salinity with  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio in the surface water of the South Sea from 1996 to 1999.

$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비는 0.5~3.0 범위로서 쿠로시오 영향을 많이 받는 동중국해 대륙붕단역에서의 최대값 (1.01; 한국해양연구소, 1998)보다 높다.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 방사능비 또한 염분과 상당히 양호한 역의 상관관계를 보여 남해는 일반적으로 저염수에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 쿠로시오 표층수에

서의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비는 0.5 이하로 낮고, 상대적으로 수심이 얇은 황해 및 양자강하구 부근 해역은 3~4 정도 범위이다 (Elsinger and Moore, 1984; Nozaki, 1989).

4월부터 10월 남해 표층수  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비는 양단성분인 저염 (30<Salinity<32 psu)의 양자강 하구 인접해역과 고염 (>34.6 psu)의 쿠로시오  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  방사능비와 직선상에 놓여있다. 이러한 직선 경향은 일반적으로 두단 (two end-member) 성분간의 혼합 (mixing)으로 형성되기 때문에, 남해 표층수의 기원은 이들 양단성분간의 혼합수임을 알 수 있다. 따라서 다음과 같이 추정할 수 있다.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 방사능비가 3 이상으로서 높은 황해와 양자강하구 부근해역의 해수 (대륙붕수)가 제주해협을 통해 남해로 유입이 되고, 또한  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 방사능비가 0.5 이하로 낮은 쿠로시오가 유입되면서 서로 혼합되어 남해의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 방사능비가 결정되는 것이다. 그러나 겨울 (2-3월) 남해연안 일부 표층수에서 저염의 단성분은 4월부터 10월까지의 남해 표층수의 저염 단성분 (양자강 하구역)과는 달리 황해 표층수에 더 가까운 기울기를 보여 차후 이에 대한 세밀한 연구가 필요하다. 또한 저층수의 경우 라듐동위원소비와 염분과의 관계는 표층수와는 다른 특징을 보여준다. 1998년 9월 저온저염수 ( $T<17^\circ\text{C}$ ,  $32.5<S<33.5\text{psu}$ )의 특성을 가진 저층수는 저염의 단성분으로서 양자강 희석수보다는 황해 표층수에 더 가까운 기울기를 갖는다. Cho와 Kim (1994)은 여름철 남해 중앙해역 저층에 존재하는 저온저염수 ( $T<14^\circ\text{C}$ ,  $33.4<S<34.0\text{psu}$ )의 기원은 황해 저층냉수일 것이라고 추측하였다. 따라서 표층수와는 다른 단성분을 가진 저층수는 황해 저층냉수로부터 유래된 것으로 판단된다.

#### 6.4.3. 산소동위원소를 이용한 남해 해수 기원

산소안정동위원소 분석을 위한 시료는 1996년 10월 2일부터 12일까지 채취하였고 정점 위치 및 분석된 결과는 Fig. 3-6-5와 Table 3-6-2에 나타내었다.

Table 3-6-2.  $\delta^{18}\text{O}$  values in the surface water of the East China Sea and the South Sea of Korea in the period of 2-13 October 1996.

Region	St.	Location		Temp ( $^\circ\text{C}$ )	Sal. (psu)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
		Latitute	Longitute			
Korea Strait	A4	34° 24.26'	128° 27.95'	22.96	32.856	-0.42
	A6	33° 57.76'	128° 50.13'	24.98	34.013	-0.13
South Sea	C1	34° 09.77'	127° 37.81'	22.15	32.143	-0.57
	C3	33° 50.03'	127° 53.98'	20.61	32.450	-0.51
	G1	34° 04.91'	126° 49.90'	21.59	31.702	-0.72
	D2	34° 00.07'	126° 00.18'	22.43	31.806	-0.64
	D4	33° 30.03'	126° 00.09'	22.75	32.404	-0.49
	E6	33° 43.98'	124° 50.18'	20.83	31.342	-0.77
East China Sea	E8	34° 00.02'	125° 30.06'	20.15	31.929	-0.60
	B5	31° 29.89'	127° 00.09'	26.06	33.913	-0.24
	D8	32° 30.04'	125° 59.88'	24.65	33.739	-0.28

조사된 정점들에서의  $\delta^{18}\text{O}$  값은  $-0.13 \sim -0.77 \text{‰}$ 로서 염분과의 관계는 다음과 같은 직선의 상관관계를 갖는다 (Fig. 3-6-5).

$$\delta^{18}\text{O} = 0.25 \times \text{salinity} - 8.52 \quad (r=0.98)$$

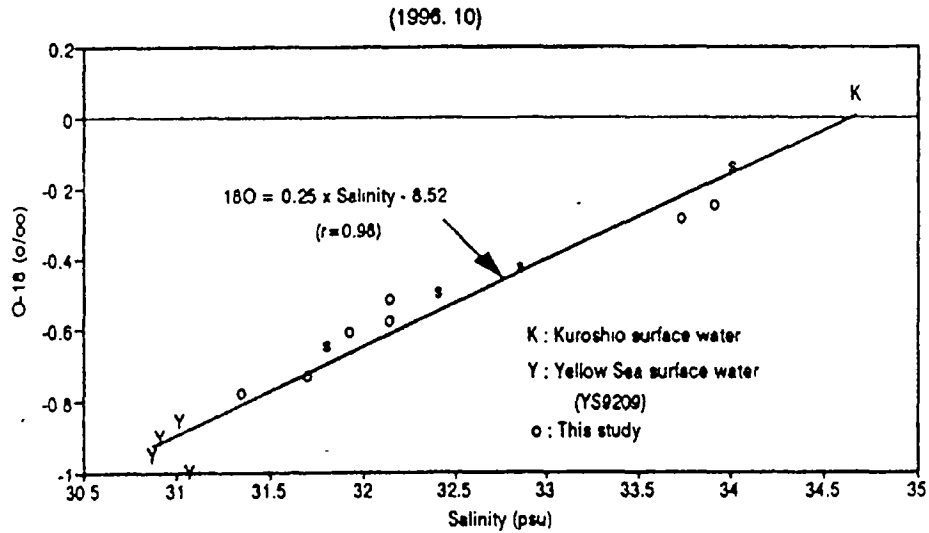


Fig. 3-6-5. The correlation diagram between salinity (psu) and  $\delta^{18}\text{O}$  in the East China Sea and the South Sea of Korea.

이러한 직선의 상관관계는 표층수의  $\delta^{18}\text{O}$ 을 변화시키는 과정이 또한 표층 염분을 변화시키기 때문에 놀랄만한 사실은 아니다 (Schmidt, 1998), 본 연구지역인 한국남해는 고염의 end-member와 저염의 end-member간의 혼합수로서 생각할 수 있다. 고염의 end-member (K)는 쿠로시오를 대표할 지역 ( $4^\circ \text{N}$ ,  $125^\circ \text{E}$ )에서의  $\delta^{18}\text{O}$  ( $34.675\text{psu}$ ,  $0.07\text{‰}$ , 한국해양연구소, 1993)이고, 저염의 end-member (Y)는 황해에서의  $\delta^{18}\text{O}$  값이다 (한국해양연구소, 1993). 만일 직선 방정식에서 염분을 0로 할 경우에는  $\delta^{18}\text{O}$ 은  $-8.5\text{‰}$ 이다. 이값은 Zhang et al. (1990)에 의해 양자강 ( $-7.1 \sim -8.7\text{‰}$ ) 및 황하 ( $-7.9 \sim -8.8\text{‰}$ )에서 측정된  $\delta^{18}\text{O}$  값과 유사하다 (Fig. 3-6-6). 그리고 서해로 유입되는 한강 및 금강의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 각각  $-11.1 \sim -8.2\text{‰}$ ,  $-11.0 \sim -5.3\text{‰}$ , 그리고 남해로 직접 유입되는 섬진강은  $-7.8 \sim -5.3$  이고 평균값은  $-7.8\text{‰}$  이다 (이와이, 1999).

$\delta^{18}\text{O}$  값으로는 양자강과는 특별히 구분이 되지 않는다. 따라서 남해의 해수는 쿠로시오와 양자강동 중국 및 한국의 주요강들간의 혼합수로 판단된다. 이러한  $\delta^{18}\text{O}$  과 염분의 높은 직선의 상관관계는 남해의 해수가 동북아 대륙의 하천수와 쿠로시오 대양수로 구성되어 있다는 증거로서 채택하면  $\delta^{18}\text{O}$  값의 변화범위 ( $-8 \sim 0\text{‰}$ ) 보다는 염분의 변화 폭 ( $0\text{‰}$ , 하천수  $\sim 34.5\text{‰}$ , 쿠로시오수)이 더 크므로 염분을 이용하여 담수의 기여율 ( $f_{\text{sample}}$ ) 을 구하면,  $f_{\text{sample}} = 1 - (S_{\text{sample}} / S_{\text{Kuroshio}})$ , 대한해협 (정점 A4, A6)에서  $1.4 \sim 4.8\%$ , 남해(정점 C1, C3, G1, D2, D4, E6, E8) 에서  $5.9 \sim 8.1\%$ , 그리고 동중국해(B5, D8)에서  $1.7 \sim 2.2\%$ 로서 남해에서 담수의 점유율이 가장높다.

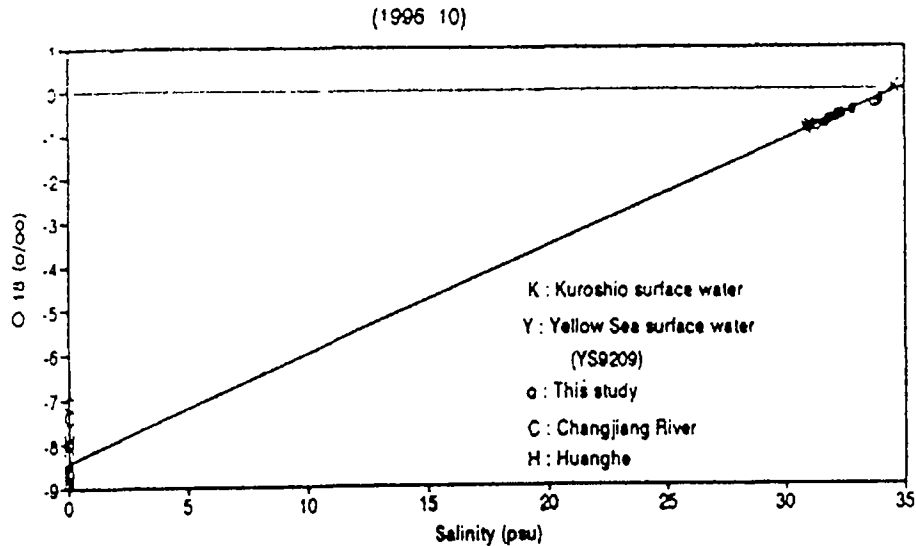


Fig. 3-6-6. A  $\delta^{18}\text{O}$  - S diagram of surface waters in the Huanghe, Yangtze River, East China Sea, Kuroshio and the South Sea of Korea.  
 The value  $\delta^{18}$  of surface water of Kuroshio (0.07‰, 34.67psu)  
 The value  $\delta^{18}$  of surface water of Huanghe River (-7.9~-8.8‰, 0 psu)  
 The value  $\delta^{18}$  of surface water of Yangtze River (-7.1~-8.7‰, 0 psu)

#### 6.4.4. 제주해협에서의 황해 및 동중국해 대륙붕수의 기여율

제주해협 표층수에서의 평균  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 황해 및 양자강하구 부근해역에서의 비와 쿠로시오역에서의 비간의 직선상에 위치한다. 이것은  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비가 높은 황해와 동중국해수 (여기서는 대륙붕수로 명명) ( $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} \geq 3$ )와  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비가 낮은 쿠로시오 해류 ( $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} \leq 1$ )가 유입되어 남해대륙붕에서 서로 혼합됨으로서 남해의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비가 결정된다는 것을 의미한다. 만약  $^{228}\text{Ra}$  붕괴가 이동과 혼합 (mixing)하는 동안 무시되고, 염분과 라듐동위체로부터 양단성분은 양자강희석수와 쿠로시오 표층수라 가정하면 아래식을 통하여 제주해협 표층수중 양자강희석수 및 황해수에 대한 기여율을 구할 수 있다.

$$[^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}]_{\text{SSK}} = [f^{228}\text{Ra}_S + (1-f)^{228}\text{Ra}_K] / [f^{226}\text{Ra}_S + (1-f)^{226}\text{Ra}_K]$$

f에 대하여 방정식을 정리하면

$$f = \frac{[(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_K]}{\{(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_K + ^{226}\text{Ra}_S / ^{226}\text{Ra}_K [(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_S - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}}]\}}$$

- f = a fraction of the Shelf water component in the South Sea of Korea.
- SSK = South Sea of Korea (제주해협)
- S = The Shelf water
- K = The Kuroshio water

본 조사 결과와 Nozaki (1989)의 결과를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\begin{aligned}
 ({}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} &= 1997\text{년 } 3\text{월}: 0.75 \sim 2.16 \text{ (평균; } 1.55) \\
 &1998\text{년 } 4\text{월}: 0.62 \sim 1.84 \text{ (평균: } 1.13) \\
 &1998\text{년 } 9\text{월}: 2.07 \text{ (평균; } 2.07) \\
 &1999\text{년 } 2\text{월}: 1.31 \sim 1.46 \text{ (평균: } 1.46) \\
 ({}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra})_{\text{S}} &= 3.5 \\
 ({}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra})_{\text{K}} &= 0.2 \\
 {}^{226}\text{Ra}_{\text{S}} &= 131 \text{ dpm } 10^3 \text{ l}^{-1} \\
 {}^{226}\text{Ra}_{\text{K}} &= 65 \text{ dpm } 10^3 \text{ l}^{-1} \\
 f &= 1997\text{년 } 3\text{월}: 8.0 \sim 28.6\% \text{ (평균: } 19.7\%) \\
 &1998\text{년 } 4\text{월}: 6.1 \sim 24.0\% \text{ (13.5\%)} \\
 &1998\text{년 } 9\text{월}: 27\% \text{ (평균: } 27\%) \\
 &1999\text{년 } 2\text{월}: 16.2 \sim 18.4\% \text{ (평균: } 17\%)
 \end{aligned}$$

위 결과는 갈수기에 해당하는 1997년 3월, 1998년 4월, 1999년 2월에 연안수의 평균 기여는 각각 19.7, 13.5, 17%이다. 반면에 1998년 9월의 경우에는 약 27%로서 타 계절에 비해 1.4~2.0배정도 크다. 이는 9월은 장마기 이후로서, 특히 98년 여름에 양자강유역의 대홍수로 인해 상당량의 저염수가 제주해협에 유입된 영향으로 사료된다.

## 6.5. 결론

1. 남해에서의 산소안정동위원소 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 값은 -0.13~-0.77 ‰로서 고염의 쿠로시오수와 저염의 황해 및 양자강수의 산소안정동위원소값간의 직선상에 위치하여 한국 남해수는 쿠로시오수와 양자강 및 황해로부터 유입된 담수와의 혼합수로 추정된다. 염분을 이용하여 담수의 기여율 ( $f_{\text{sample}}=1-(S_{\text{sample}}/S_{\text{Kuroshio})}$ )은 대한해협 (1.4-4.8%) 및 동중국해 (1.7-2.2%)보다 남해 (5.9-8.1%)가 더 높다.

2.  ${}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra}$  의 방사능비가 3 이상으로서 높은 황해와 양자강하구 부근해역의 해수 (대륙붕수)가 제주해협을 통해 남해로 유입이 되고, 또한  ${}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra}$  의 방사능비가 0.5 이하로 낮은 쿠로시오가 유입되면서 서로 혼합되어 남해의  ${}^{228}\text{Ra} / {}^{226}\text{Ra}$  의 방사능비가 결정된다. 그러나 겨울 (2-3월) 남해연안 일부 표층수에서 저염의 단성분은 4월부터 10월까지의 남해 표층수의 저염 단성분 (양자강 하구역?)과는 달리 황해 표층수에 더 가까운 기울기를 보여 차후 이에 대한 세밀한 연구가 필요하다.

3. 갈수기에 해당하는 1997년 3월, 1998년 4월, 1999년 2월에 연안수의 평균 기여는 각각 19.7, 13.5, 17%이다. 반면에 1998년 9월의 경우에는 약 27%로서 타 계절에 비해 1.4~2.0배정도 크다. 이는 9월은 장마기 이후로서, 특히 98년 여름에 양자강유역의 대홍수로 인해 상당량의 저염수가 제주해협에 유입된 영향으로 사료된다.

## 7. $^{210}\text{Po}$ 의 분포특성 및 제거과정

### 7.1. 서론

$^{210}\text{Po}$ 은 반감기가 138일로 비교적 짧고, 해수 중에서 반응성이 크기 때문에 해수 중 평균체류시간이 비교적 짧은 원소의 그룹에 속한다. 이러한  $^{210}\text{Po}$ 의 화학적 성질을 이용하여 기초생산력, 동물플랑크톤의 grazing, 입자의 분해 등과 같은 해양에서 일어나는 생지화학적 과정 중 수개월에서 수년에 걸친 시간 스케일의 추적자로 사용되어 왔다 (Shannon et al., 1970; Nozaki et al., 1990).  $^{210}\text{Po}$ 의 해양으로의 공급은 주로 대기와 해수 중의 어미핵종인  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사붕괴에 의해 이루어진다. 그러나 대기로부터 공급되는 양은 적어 어미핵종의 약 10% 이하로 알려져 있다 (Lambert et al., 1979; Moore et al., 1973; Peirson et al., 1966; Gavini et al., 1974; Tokieda et al., 1996). 지금까지  $^{210}\text{Po}$ 의 연구결과로는 영양염과 비슷한 거동을 한다고 알려져 있다 (Kharkar et al., 1976; Fisher et al., 1983). 이를테면 북대서양에서 표층수 중  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 어미핵종인  $^{210}\text{Pb}$ 에 비해 부족량을 나타내지만, 수온약층 부근인 100~300m 사이에서는 오히려 과잉으로 존재하며, 이는 표층의 생물기원 입자에 의해 효과적으로 제거된 후 침강하는 도중 유기물의 산화분해에 의해 수층으로 재생되기 때문이라 한다 (Bacon et al., 1976; 1988). 이와 같은 아표층 부근에서  $^{210}\text{Po}$ 의 과잉량은 외양뿐만 아니라 내만 및 대륙붕과 같은 연안에서도 종종 나타난다 (Santschi et al., 1979; Li et al., 1981; Bacon et al., 1988). 즉 대서양 동부해역 대륙붕의 경우  $^{210}\text{Po}$ 이 플랑크톤에 의해 제거되어 수중에서 재생되어 순환하기 때문에 다른 반응성 핵종 ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ )에 비해 제거속도가 느리고, 훈카만에서는 전 계절에 걸쳐 어미핵종에 비해 부족량을 나타내는데 비해 Narragansett만의 경우 겨울철에는 과잉량을 나타내지만, 여름철에는 어미핵종보다 높은 농도를 나타내고 있다 (Li et al., 1981; Santschi et al., 1979; Tanaka et al., 1983). 이와 같이  $^{210}\text{Po}$ 은 내만역이라도 지역에 따라 제거속도 및 제거과정이 서로 다르다. 또한 Shannon 등 (1970)과 Kharkar 등 (1976)은 플랑크톤 중의 반응성 동위원소의 농도를 측정된 결과  $^{210}\text{Po}$ 이  $^{210}\text{Pb}$ 와  $^{234}\text{Th}$ 에 비해 높고, 식물플랑크톤 중의 농도가 동물플랑크톤중의 농도에 비해 15배나 높다고 보고했다.

한편, 우리 나라 주변해역에서  $^{210}\text{Po}$ 의 연구로는 Nozaki 등 (1991)이 춘계 황해 및 동중국해의 표층수 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 체류시간을 계산 한 것과, Hong 등 (1999)이 동계 황해의 입구에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 분포와 체류시간을 계산한 것, 그리고 서 등 (1995)이 보고한 영일만 생물체내의  $^{210}\text{Po}$ 의 축적, 양 등 (1995, 1996)과 이 등 (1996)이 동해 해수중의  $^{210}\text{Po}$  농도분포와 체류시간 및 제거과정 등을 보고한 것이 있지만, 남해에서 연구된 예는 거의 없다.

따라서, 본 연구는 우리 나라 남해의 해수 및 현탁입자 중  $^{210}\text{Po}$ 의 농도를 측정하여, 농도분포 특성을 밝히고, 농도분포를 결정하는 요인에 대해 고찰하여 반응성 금속원소의 해양에서 지구화학적 순환에 대한 정보를 얻는 것을 그 목적으로 한다.

## 7.2. 재료 및 방법

본 연구의 현장관측은 춘계와 하계 2회에 걸쳐 수행되어, 춘계는 1999년 5월 5일에서 15일 까지 미국 스크립스 해양연구소 R/V Roger Revelle을 사용하여 대한해협 북단 (관측선 N)의 2개 정점 및 대한해협 남단 (관측선 S)의 1개 정점, 하계는 한국해양연구소 연구선 이어도호를 이용하여 8월 4일에서 8일 까지 보길도와 제주도를 잇는 제주해협 (관측선 A)의 4개 정점에서 수심별로 해수를 채수하였다. 연구해역의 관측점 및 위치는 Fig. 3-7-1과 Table 3-7-1 및 3-7-2에 나타내었다.

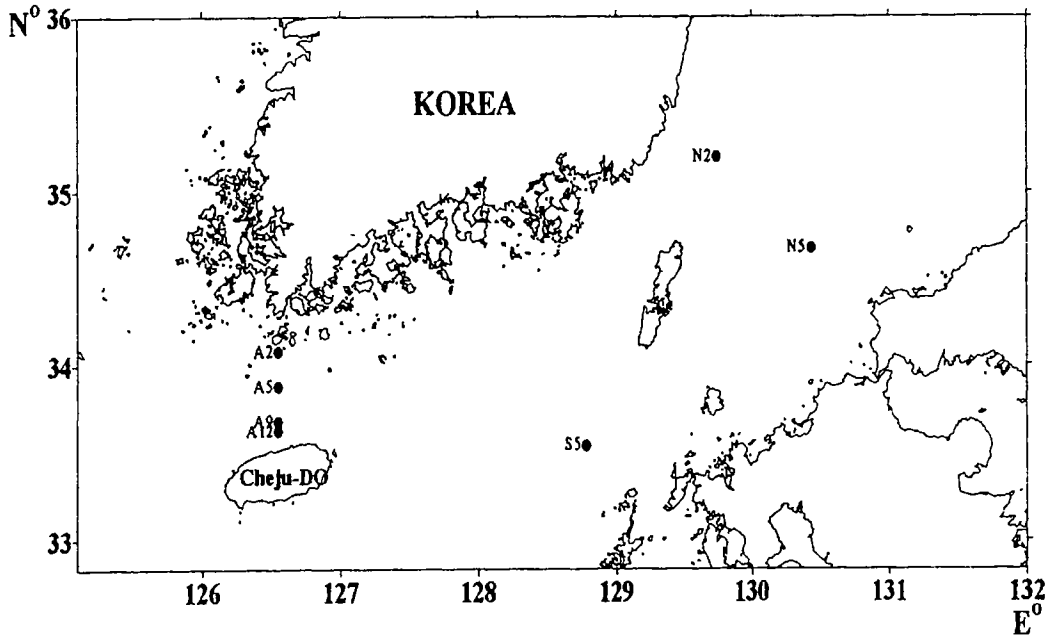


Fig. 3-7-1. Location of sampling station in the South Sea (May and August 1999; NH9905, NH9908).

Table 3-7-1. Location of sampling stations in the Korean Strait in May 5~15, 1999.

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
N2	35° 12.1'	129° 44.4'	132
N5	34° 41.5'	130° 25.6'	118
S5	33° 32.5'	128° 46.8'	143



Table 3-7-2. Location of sampling stations in the Korean Strait in August 4~8, 1999 (NH9908).

Station	Location		Depth (m)
	Latitude	Longitude	
A2	34° 04.4'	126° 32.9'	44
A5	33° 52.5'	126° 32.9'	67
A9	33° 40.6'	126° 33.0'	123
A12	33° 37.5'	126° 33.0'	75

분석에 사용한 시료는 CTD에 장착된 10 l 로켓 채수기를 사용하여 채수한 후, 그 중 약 4kg을 선상에서 GF/F여과지를 사용하여 여과하여, 해수시료와 현탁입자로 분리하였다. 해수시료는 선상에서 6N HCl로 pH 2 이하로 조절하고, 현탁입자는 냉동 보관하여 실험실로 가져와서 분석하였다. 해수시료는 화학적 회수율을 계산하기 위해  $^{209}\text{Po}$ 과 Fe carrier 100 mg을 첨가하여 암모니아수로 pH 7~9로 조절하여 수산화철 공침을 만들어 Po 동위체를 분리하였다. 수산화철 침전은 6N HCl을 사용하여 녹인 후 최종적으로 0.5 N HCl 용액으로 농도를 조절한 후 은판에 Po 동위체를 전착시켜 Multi Channel Analyzer가 장착된  $\alpha$ -spectrometry 사용하여 Po 동위체의  $\alpha$ 선을 측정하였다. 현탁입자는 건조하여  $^{209}\text{Po}$  tracer를 첨가한 후  $\text{HNO}_3$ 과  $\text{HClO}_4$ 를 사용하여 leaching 하여 여과한 후 그 여액을 해수시료와 동일하게 처리하여 측정하였다.

### 7.3. 결과 및 고찰

1999년 5월과 8월의 해수 및 현탁물질 중의  $^{210}\text{Po}$ 과 SPM의 자료를 Table 3-7-3과 3-7-4에 나타내었다. 오차는 계수오차의  $1\sigma$ 로 나타내었다.

#### 7.3.1. 1999년 춘계 $^{210}\text{Po}$ 의 연직분포 특성

1999년 춘계의 용존태  $^{210}\text{Po}$ 의 연직분포를 Fig. 3-7-2에 나타내었다. 모든 정점 및 수심에서의 용존태  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 4.88~12.74 dpm/100 l의 범위로, Hong 등 (1999)이 동계 황해에 입구에서 측정한 값 (0.3~11.1 dpm/100 l)과 같은 농도범위 내에 있었다. 모든 정점의 표층 부근에서는 오차범위 내에서 일정한 농도 (4.88~6.99 dpm/100 l)를 보이고, 정점 N2의 경우는 수심 50m까지 증가한 후 다시 저층으로 갈수록 감소하지만, N5와 S5는 수심에 따라 점차로 증가하는 경향을 나타내었다. 정점 N2의 135m를 제외하고, total N에 대한 용존태  $^{210}\text{Po}$ 을 plot하면, 상관계수 0.70의 높은 양의 상관관계에 있는 반면에 chl-a에 대해서는 다소 분산이 심하지만 음의 상관관계를 보이고 있다 (Fig 3-7-3). 일반적으로  $^{210}\text{Po}$ 은 영양염과 비슷한 거동을 한다고 알려져 있다 (Kharkar et al., 1976; Fisher et al., 1983). 즉 표층의 높은 생물생산에 의해 영양염류가 소비되고  $^{210}\text{Po}$ 도 생물기원 입자에 의해 제거되어 표층

부근에서 낮은 농도를 보이고, 수심이 깊어짐에 따라 입자의 분해에 의해 영양염과 함께  $^{210}\text{Po}$ 도 재생되어 높은 농도를 나타내게 된다.

Table 3-7-3. Dissolved  $^{210}\text{Po}$  concentration of the Korean Strait during May, 1999 (NH9905).

Station	Depth (m)	Dissolved $^{210}\text{Po}$ concentration (dpm/100 l)
N2	0	4.88 ± 0.36
	10	5.37 ± 0.37
	20	6.70 ± 0.54
	30	6.98 ± 0.48
	50	12.74 ± 0.78
	75	8.18 ± 0.62
	135	5.43 ± 0.40
N5	0	4.75 ± 0.35
	15	4.83 ± 0.33
	30	8.03 ± 0.55
	60	8.43 ± 0.51
	130	10.92 ± 0.59
S5	0	6.99 ± 0.43
	15	8.02 ± 0.52
	30	8.08 ± 0.50
	50	9.33 ± 0.43
	90	11.56 ± 0.46
	145	12.58 ± 0.61

### 7.3.2 1999년 하계 $^{210}\text{Po}$ 의 연직분포 특성

1999년 하계의  $^{210}\text{Po}$  연직분포를 Fig. 3-7-4에 나타내었다. 용존태  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 4.58~46.59 dpm/100 l의 범위로 지역과 수심에 따라 1자릿수 이상 변동하고 있다. 농도분포는 표층부근에서 비교적 낮고, 저층부근에서 높은 농도를 보이지만 특히 정점 A5의 저층과 A12의 20m 부근에서 가장 높은 값 (> 45 dpm/100 l)을 나타내고 있다. 지역적으로는 표층수 중의 농도는 보길도에서 제주도로 향해 감소하고 있고, 특히 저층에서 육지에 인접한 보길도쪽의 사면이 20 dpm/100 l 이상의 높은 농도를 나타내고, 제주도쪽의 사면은 상대적으로 낮은 농도를 나타내고 있다. 이에 비해 입자태의  $^{210}\text{Po}$  농도는 2.31~8.48 dpm/100 l의 범위로 표층에서 낮고 저층에서 높은 값을 나타내고 있다. 표층에서는 제주도로 향하여 증가하는데 비해 저층부근에서는 정점 A5와 A12에서 8 dpm/100 l 이상의 높은 농도를 나타내었다. 현

탁물질 중의  $^{210}\text{Po}$ 의 농도 역시 표층에서 낮고, 저층부근에서 높은 경향을 나타내고, 입자태의  $^{210}\text{Po}$ 과 마찬가지로 표층수 중의 농도는 제주도쪽으로 향해 점차로 증가하고 있다. 또한 A2와 A9의 20m 부근에서 6 dpm/100 l 이상의 높은 값을 보이고, 저층부근에서는 보길도쪽의 사면에 비해 제주도쪽의 사면이 상대적으로 높은 농도를 나타내고 있다.

Table 3-7-4.  $^{210}\text{Po}$  and SPM concentration of the Korean Strait during August, 1999 (NH9908).

Station	Depth (m)	$^{210}\text{Po}$ concentration (dpm/100 l)		Particulate (dpm/SPMg)	SPM (mg/ l)	$K_d^{Po}$ ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )
		Dissolved	Particulate			
A2	0	20.17 ± 0.63	2.31 ± 0.27	4.60 ± 0.54	0.28	4.2E+05
	10	19.89 ± 0.89	2.84 ± 0.32	6.06 ± 0.68	0.77	1.8E+05
	20	12.70 ± 0.26	3.92 ± 0.62	7.11 ± 1.12	2.56	1.2E+05
	30	8.48 ± 0.42	3.26 ± 0.59	6.05 ± 1.09	2.27	1.7E+05
A5	0	11.29 ± 0.55	2.58 ± 0.35	4.74 ± 0.64	0.29	7.8E+05
	10	14.64 ± 0.86	2.92 ± 0.39	5.47 ± 0.73	0.25	7.9E+05
	20	31.16 ± 2.49	3.04 ± 0.33	6.11 ± 0.66	0.33	3.0E+05
	30	9.75 ± 0.45	2.68 ± 0.36	5.10 ± 0.68	0.22	1.3E+06
	56	44.50 ± 2.16	8.36 ± 1.31	3.36 ± 0.52	1.61	1.2E+05
A9	0	3.98 ± 0.31	3.85 ± 0.37	6.71 ± 0.65	0.26	3.7E+06
	10	13.32 ± 0.57	2.53 ± 0.31	4.50 ± 0.55	0.63	3.0E+05
	20	8.31 ± 0.42	4.97 ± 0.49	10.96 ± 1.08	0.35	1.7E+06
	30	4.58 ± 0.26	3.30 ± 0.36	7.32 ± 0.80	0.35	2.1E+06
	50	20.02 ± 0.85	2.55 ± 0.30	4.88 ± 0.57	0.52	2.4E+05
	75	20.47 ± 0.79	2.74 ± 0.41	4.71 ± 0.71	0.70	1.9E+05
	120	13.28 ± 0.55	5.99 ± 0.72	9.58 ± 1.15	2.39	1.9E+05
A12	0	5.77 ± 0.37	4.14 ± 0.36	7.78 ± 0.68	0.54	1.3E+06
	10	6.61 ± 0.46	3.18 ± 0.32	6.78 ± 0.67	0.52	9.4E+05
	20	46.59 ± 1.80	6.13 ± 0.80	6.08 ± 0.80	2.51	5.2E+04
	30	4.63 ± 0.37	5.31 ± 0.45	10.02 ± 0.84	2.84	4.0E+05
	50	5.84 ± 0.89	8.48 ± 0.68	15.67 ± 1.25	2.90	5.0E+05

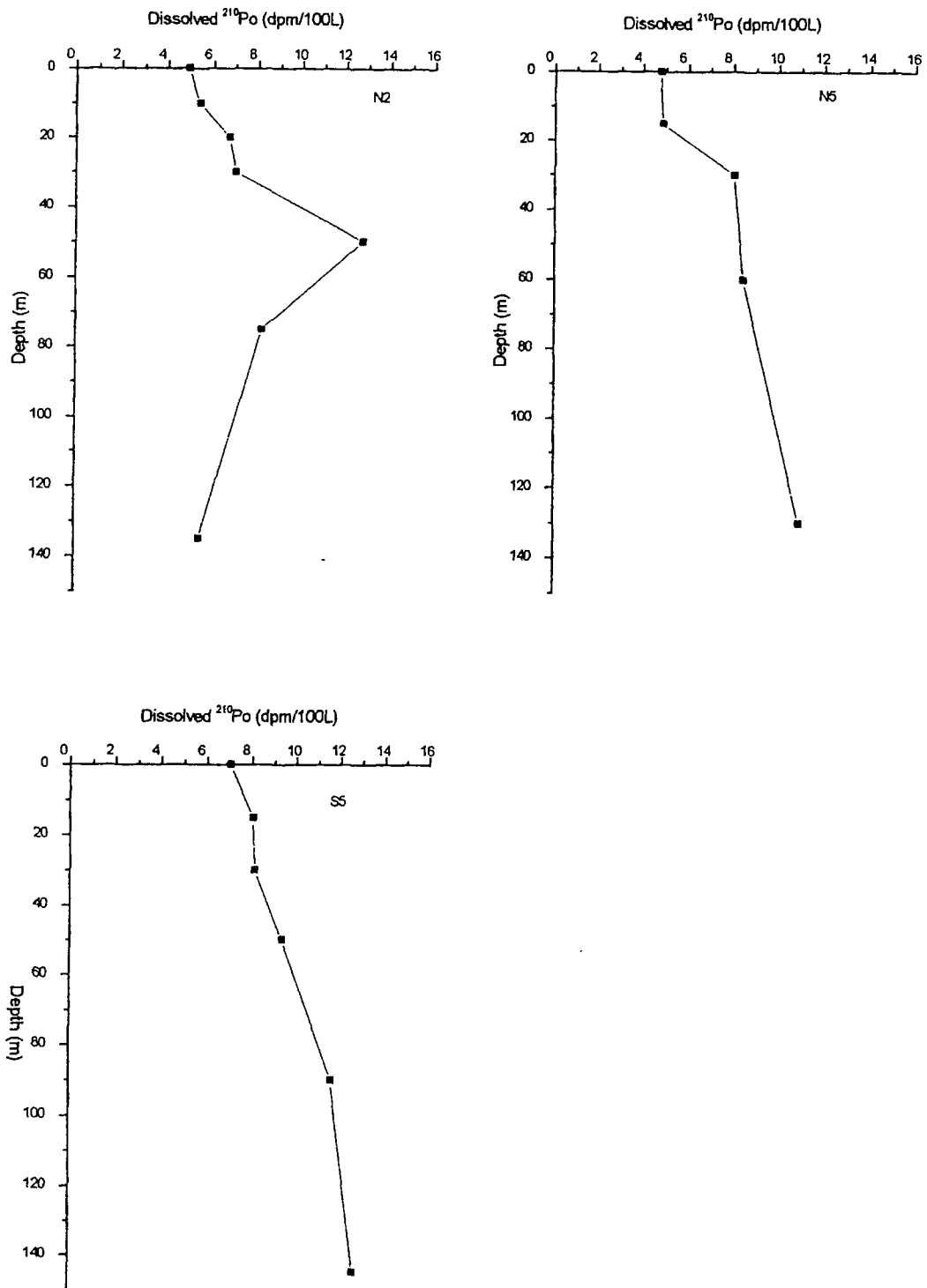


Fig. 3-7-2. Vertical profiles of dissolved  $^{210}\text{Po}$  in the Korean Strait during August, 1999.

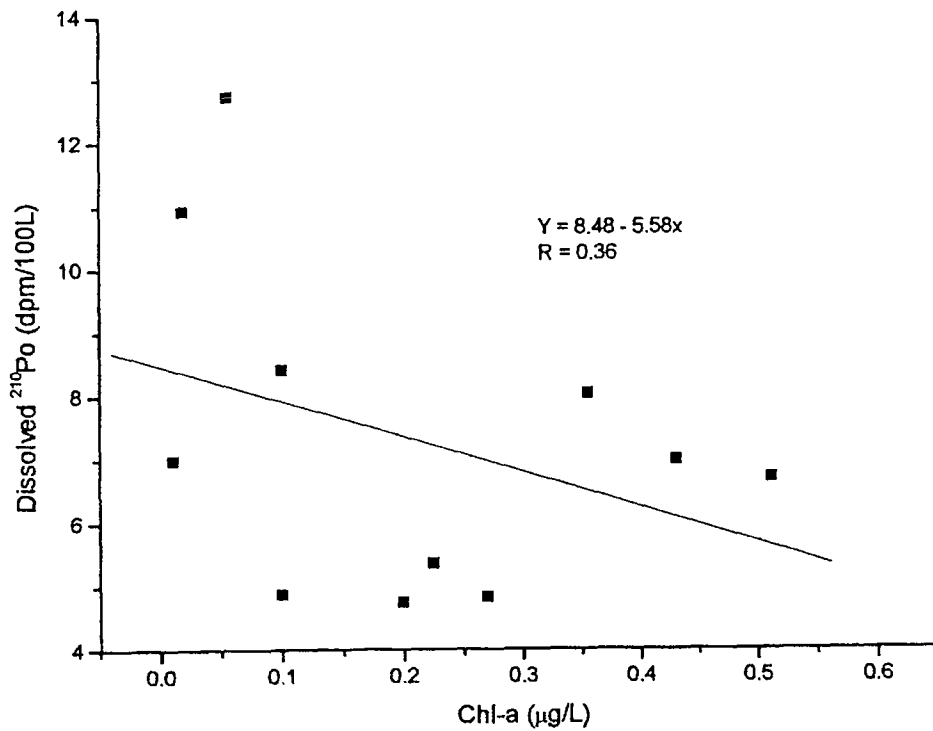
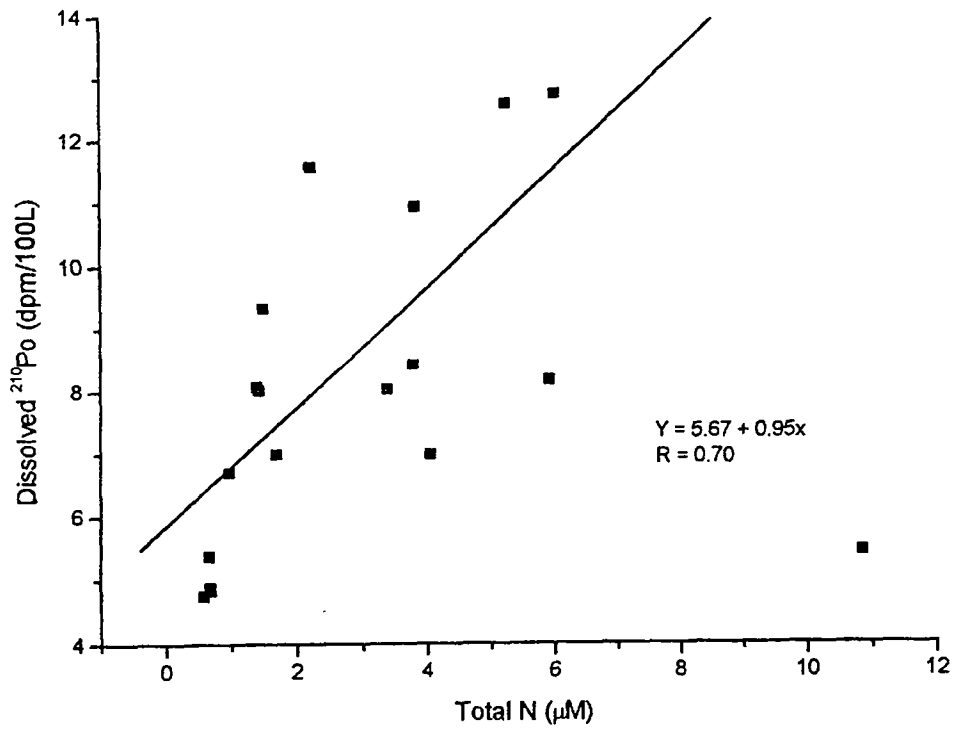


Fig. 3-7-3. Plot of dissolved  $^{210}\text{Po}$  concentration versus total N (above) and Chl-a (below)

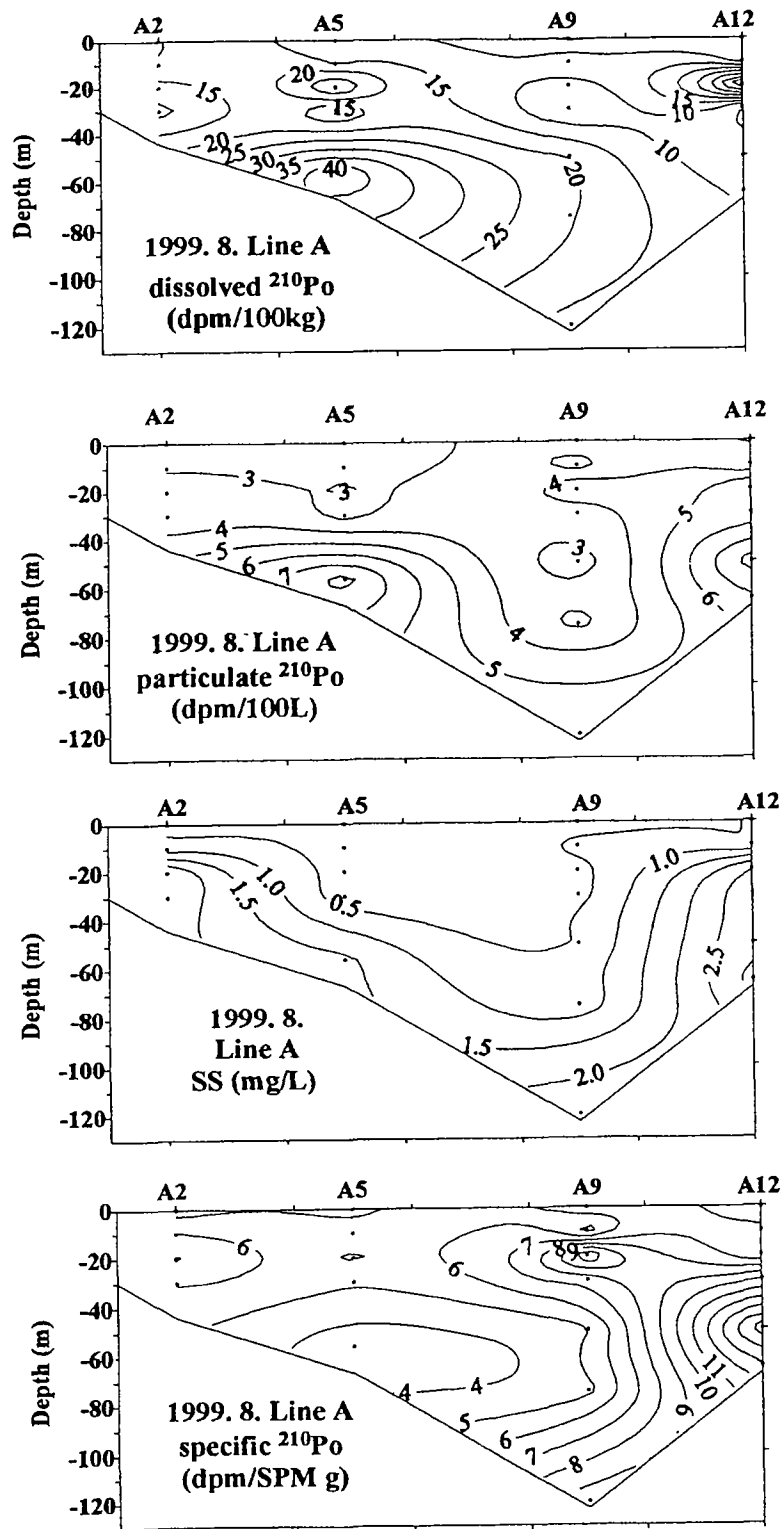


Fig. 3-7-4. Depth distribution of dissolved  $^{210}\text{Po}$ , particulate  $^{210}\text{Po}$  and SS, specific activity of particulate  $^{210}\text{Po}$ , in the Cheju Strait during August, 1999.

이러한 분포는 앞의 3-4절에 제시된 같은 수심에서 측정된 SS 농도와 영양염의 분포와 비교하면 잘 설명할 수 있다. SS의 농도분포를 보면 표층에서 0.5 mg/ℓ 이하로 낮고, 수심이 깊어짐에 따라 증가하여 저층부근에서 1.5 mg/ℓ 이상의 높은 농도를 나타낸다. 또한 보길도쪽 사면에 비해 제주도쪽 사면이 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다. 그리고 입자태  $^{210}\text{Po}$  농도에 대해 SS를 plot 하면 상관관계수 0.79의 높은 양의 상관관계를 나타내고 있다 (Fig. 3-7-5). 영양염류의 경우도 모두 표층에서 낮고 수심에 따라 증가한다. 따라서 표층에서 용존태  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 낮은 것은 표층의 생물생산에 의해 생성된 입자에 의해 해수 중  $^{210}\text{Po}$ 이 효과적으로 제거되고, 20m 부근에서 높은 농도를 보이는 것은 유기물 분해에 의해  $^{210}\text{Po}$ 도 함께 재생되기 때문으로 생각된다.

### 7.3.3. $^{210}\text{Po}$ 의 제거에 있어서 현탁물질의 역할

일반적으로  $^{210}\text{Po}$ 의 제거는 현탁물질로의 무기적인 흡착보다는 생물에 의한 uptake가 보다 효과적으로 알려져 있다 (Fisher et al., 1983; Kadko, 1993). 이러한 것은  $^{210}\text{Po}$ 의 분배계수로부터 잘 알 수 있다. 분배계수  $K_d^{\text{Po}}$ 은 아래와 같은 식으로부터 계산할 수 있다.

$$K_d^{\text{Po}} = C_p / (C_d \times \text{TSPM})$$

여기서  $C_p$ 는 입자태,  $C_d$ 는 용존태의  $^{210}\text{Po}$  농도를 나타내고, TSPM은 현탁물질의 농도를 나타낸다. 1999년 하계의  $K_d^{\text{Po}}$ 의 값은  $5.2 \times 10^4 \sim 3.7 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{g}$ 의 범위로 지역과 수심에 따라 2자리수의 차이를 나타내고 있다. 모든 정점의 표층에서 높은 값을 보이고, 이것은 표층에서  $^{210}\text{Po}$ 이 식물플랑크톤에 우선적으로 uptake되는 것을 시사한다 (Shannon et al., 1970). 또한 가장 낮은 값은 주로 저층 부근에서 나타난다. 이러한 경향은 황해의 경우에도 보이고 (Hong et al., 1999), Wei and Murray (1994)가 관측한 Black Sea의 표층수에서도 역시 높은  $^{210}\text{Po}$ 의  $K_d^{\text{Po}}$ 값을 보인다.

연안역과 같이 현탁입자의 농도가 높은 지역 ( $>10 \text{ mg}/\ell$ )에서 입자반응성이 큰 핵종들은 주로 입자태로 존재한다 (Baskaran and Santschi, 1993). Honeyman and Santschi (1989)는 Th과 같은 반응성 핵종의 분배계수는 현탁입자의 농도와 상관관계가 있고, Balls (1988)도 연안역에서 입자태와 용존태 사이의 금속원소의 농도 분포는 현탁입자의 농도에 의존한다고 했다. Hong 등 (1999)은 황해의 입구에서 높은 현탁입자에 의해  $^{210}\text{Po}$ 의 대부분이 입자태로 존재한다고 했다. 그러나 본 연구해역에서는 현탁입자의 농도가 0.22~2.90 mg/ℓ의 범위로 황해에 비해 낮고, 입자태  $^{210}\text{Po}$ 의 비율도 8~59%의 범위로 황해에 비해 낮다.  $^{210}\text{Po}$ 의  $K_d$ 와 현탁물질 농도를 plot 하면 상관관계수 0.70의 높은 음의 상관성을 가진다 (Fig 3-7-6). 이러한 현상은  $^7\text{Be}$ 이나  $^{234}\text{Th}$ 과 같은 다른 반응성 핵종에서도 나타나는데 이것을 입자에 의한 희석 효과라고 한다 (McKee, 1986; Honeyman et al., 1988). 그러나 본 연구해역은 현탁입자 농도도 낮고, 입자태  $^{210}\text{Po}$ 의 비율이 낮기 때문에 이러한 입자에 의한 희석 효과는 없이 입자량에 의존하여  $^{210}\text{Po}$ 이 제거되는 것으로 생각된다.

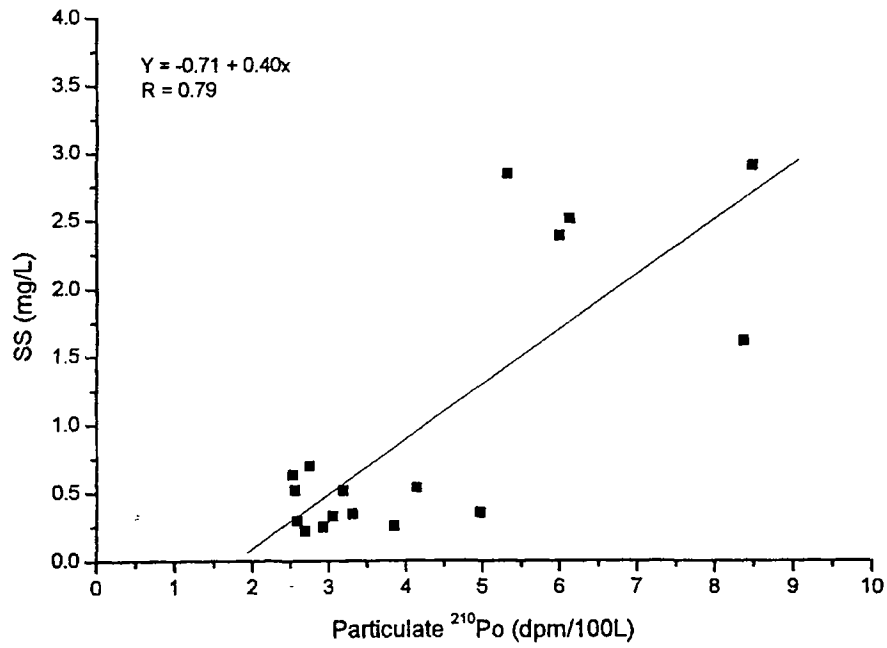


Fig. 3-7-5. Plot of SS concentration versus particulate <sup>210</sup>Po concentration

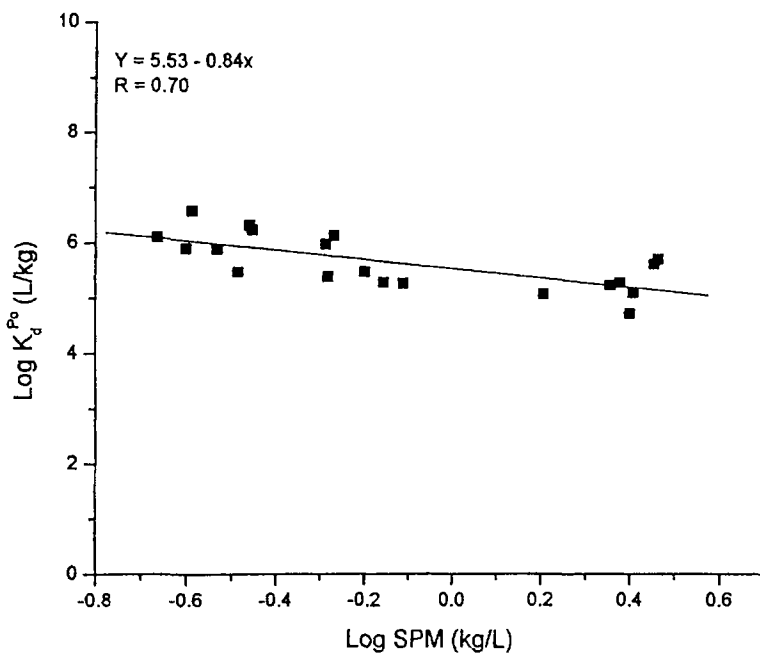


Fig. 3-7-6. Plot of Log K<sub>d</sub> versus Log SPM for <sup>210</sup>Po.



#### 7.4. 결론

- 1) 1999년 5월 대한해협 해수 중 용존태  $^{210}\text{Po}$  농도는 4.88~12.74 dpm/100 l의 범위로 표층에서 낮고, 저층에서 높은 농도를 나타내었다. 그리고 영양염류의 농도가 증가함에 따라 용존태  $^{210}\text{Po}$ 은 증가하고, 클로로필 a의 양과는 음의 상관관계를 보였다.
- 2) 1998년 8월의 제주해협 해수 중 용존태 및 입자태  $^{210}\text{Po}$  농도는 표층에서 낮고 저층에서 높은 농도를 나타내고, 용존태 및 입자태  $^{210}\text{Po}$ 은 보길도쪽 사면의 저층에서 높고, 입자중의  $^{210}\text{Po}$  농도 및 현탁입자의 농도는 제주도쪽 사면에서 높은 농도를 나타내었다.
- 3)  $^{210}\text{Po}$ 의 제거는 현탁물질의 양에 의존하고 있고, 표층수에서는 식물플랑크톤에 의한 생물학적 uptake가 중요한 인자로 작용하고, 아표층에서 유기물분해에 의해  $^{210}\text{Po}$ 이 해수 중으로 재생된다.

## 8. 북서태평양 제주-대한해협 해상에서 해양 에어로졸의 화학적 조성

### 8.1. 서론

해양-대기 경계면사이의 오염물질과 다른 물질의 플럭스에 대한 기초연구는 현장 해양에어로졸의 화학적 조성에 대한 자료의 부족으로 인하여 제한 받았다. 원양의 에어로졸 입자에서 미량금속원소의 바탕농도에 대한 자료는 특히 제한적이다. 이러한 자료들은 대기에서 미량 원소들의 기원을 규명하는데 필요하며, 전지구적인 물질수지 모델을 정립하는데 필요하다 (Duce *et al.*, 1983; Prospero *et al.*, 1985). 에어로졸 형태로서의 광물운반 과정과 이들 물질에 포함된 Fe, 질산염과 Pb 과 같은 성분들은 비정상상태로 해양에 유입되며 (Broecker and Peng, 1982), 생물학적 일차생산력을 크게 증가시키는 것으로 알려졌다 (Zhang, 1994). 또한 에어로졸은 대기에서 빛을 산란시키거나 구름의 형성에 중요한 역할을 하므로 기후에 큰 영향을 미친다. 최근에 에어로졸에 포함된 Pb, Cu, Zn와 Cd 같은 독성 중금속에 대한 생지화학적 순환에 대한 관심이 증대하고 있다. 따라서, 대기중의 미량원소의 기원과 화학적 조성에 대한 분포특성의 규명은 기후조건의 변화와 이들 중금속의 생지화학적 순환과정을 이해하는데 중요하다 (Schneider *et al.*, 1990; Uematsu *et al.*, 1983)

북동 아시아 해역과 같은 지역 해는 지속적인 편서풍과 중국의 큰 사막으로 인하여 세계에서 가장 분진량이 많은 지역중의 하나이다 (GESAMP, 1989). 이 지역에서 가장 뚜렷한 기상-지질학적 사건은 봄철에 발생하는 황사라고 알려진 먼지태풍이다. NASA의 TOMS 인공위성이 촬영한 1998년 3월 28일과 4월 13일 사이의 에어로졸 영상에 의하면, 이 황사는 동부태평양 해안까지 도달하는 것으로 밝혀졌다. 중국 전면적의 11.4%는 사막지역이다 (Gao, 1998). Gao에 의하면, 중국 북동부와 북부 지역에서의 건조한 기상상태의 형성은 신생대 4기말 이후 티벳고원의 급격한 상승에 기인한다. 티벳고원은 남동쪽의 해양에서 불어오는 습한 공기의 영향으로부터 북서부 중국지역을 막아주는 방패역할을 한다. 보통 일년에 10일 이상 중국의 북동부에서는 황사를 유발하는 강풍이 발생한다. 기록상으로 중국에서 황사는 200년 이상 4월에 가장 빈번하게 발생했다 (Gao *et al.*, 1992). 고비사막을 포함한 중국의 사막지역은 전체면적 중 약 6십만 km<sup>2</sup>가 많은 양의 황토를 포함하고 있으며, 이들 황토는 황화와 북중국 평야지대까지 도달한다. 황토는 진노랑색의 다공성 탄산광물이 포함된 대기기원 퇴적물이다. 중요한 황사현상은 일본에서 과거 62년 동안 일년 중 0~18일 동안 나타났으며 평균적으로 5.3일 동안 관측되었다 (Uematsu *et al.*, 1984). 일본에서의 관측결과는 중국의 결과와 잘 일치하고 있다. 중국 황사의 지화학적 중요성에 대한 관심이 증대하고 있지만, 해상 황사의 화학적 조성을 포함한 대기분진 플럭스의 여러 측면에서 아직도 이해가 부족하다. 이에 따라 본 연구에서는 제주-대한해협 해상의 해양 경계면으로 부터 포집한 에어로졸의 분석결과를 토대로 (1) 황사기간과 비황사 기간동안의 해양 에어로졸 입자에서 화학적 금속원소와 성분의 농도 조사 (2) 해양 대기에서 이들 원소의 기원 구명 (3) 에어로졸 입자에서 미량 원소 조성의 시간적인 변동성 기술 (4) 대기분진과 화학적 원소성분의 지역해로 전

집적량과 플럭스 추정하는데 주안점을 두었다.

## 8.2. 재료 및 방법

시료채취는 1997년 11월, 1998년 4월 중 황사기간과 비 황사기간, 9월과 11월 그리고 1999년 2월과 5월에 걸쳐 제주-대한해협 해상에서 행해졌다. 선박 굴뚝에 의한 영향을 제거하기 위해 채집기를 연구선 상갑판 (해상 5~8m)에 설치하여 정점간 이동 중에서만 시료를 채집하였다 (Table 3-8-1, Fig. 3-8-1).

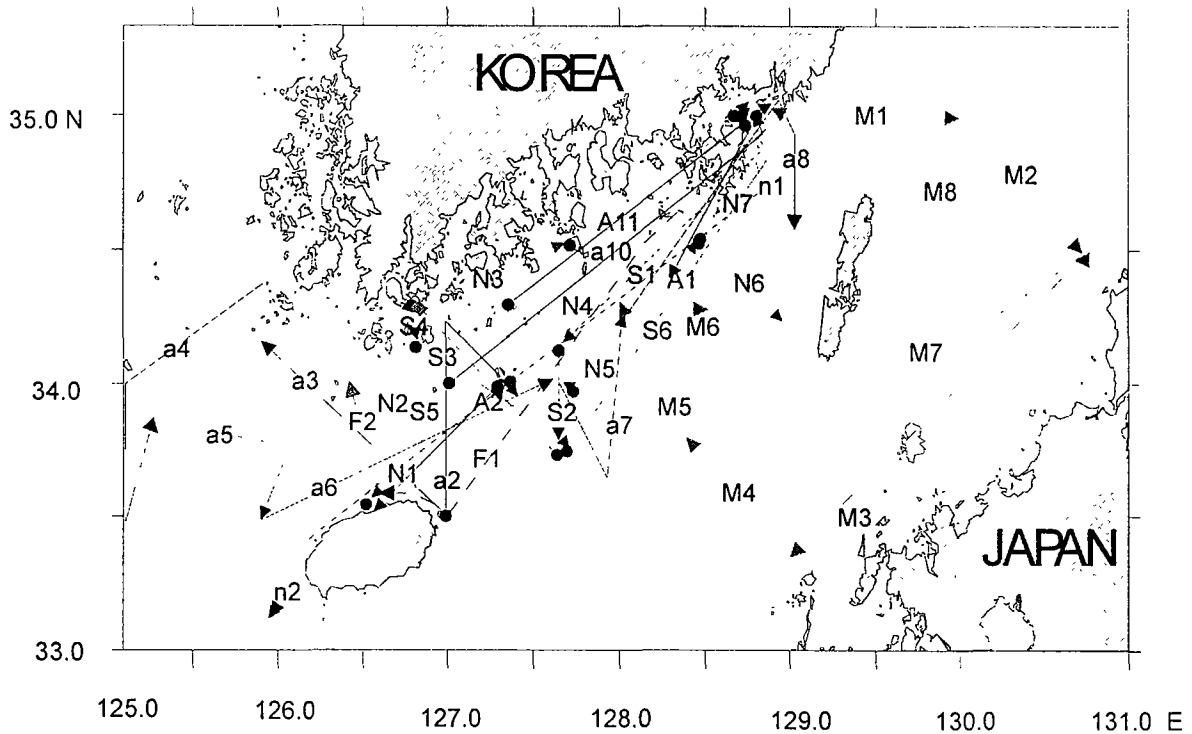


Fig. 3-8-1. Sampling locations in the Cheju-Korean Straits.

사용된 시료채취 장비는 high-volume bulk aerosol sampler (flow rate ;  $1.6 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , Kimoto Inc., Tokyo, Japan) 이며, Whatman® 41 (20~25 cm) 여과지를 사용하여 대기분진을 채집하였다 (Kitto and Anderson, 1988). 시료채집 후 여과지를 비닐 백에 넣어 분석 전 까지 냉동보관 하여 실험실로 운반하고 청정 실험실에서 금속원소 및 양이온 음이온의 분석을 하였다. 채집된 여과지를 세라믹 가위를 이용하여 절단하여 금속원소과 양이온, 음이온 및 천연방사능 원소 ( $^{210}\text{Pb}$ 과  $^7\text{Be}$ )등 여러 화학성분을 분석하였다.

금속원소 분석을 위하여 여과지의 일부분을 Ultrapure  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HClO}_4$ 와 Suprapure HF로 테프론 분해용기를 이용하여 산-용해시켰다. 완전히 분해된 시료를 1%  $\text{HNO}_3$  30 ml로 희석하여 금속원소 분석을 위해 전처리 했다. 주성분 원소와 미량금속 원소분석은 유도결합 플라즈마 원자발광 분석기 (ICP-AES; Perkin Elmer

Optima 3300 DV)와 유도결합 플라즈마 질량분석기 (ICP-MS; VG Elemental PQII<sup>+</sup>)을 이용했다.

Table 3-8-1. Samping positions, period, and air volume for the analysis of aerosol particles in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

Sampling Year/month	Cruise	Sample ID	Sampling period		Sampling track				Sampling Volume (m3)
			Start	End	Start		End		
					Lat. (N)	Long. (E)	Lat.(N)	Long. (E)	
1997/11	YS9711	n1	Nov.18, 11:12H	Nov.18, 18:12H	34° 58'	128° 40'	34° 00'	127° 19.5'	692
					34° 30'	128° 45'			
1998/04	NH9804	n2	Nov. 18, 18:16H	Nov. 19, 02:34H	34° 00'	127° 19.5'	33° 10'	126° 00'	819
		a2	Apr 07, 08:00H	Apr 08, 22:40H	34° 00'	127° 20'	33° 30'	127° 00'	731
		a3	Apr. 08, 03:50H	Apr. 08, 11:27H	34° 11'	127° 00'			817
					33° 30'	127° 00'	34° 10.1'	125° 53.04'	
		a4	Apr. 10		34° 30'	125° 53.04'	33° 30'	125° 00'	1458
					34° 10'	125° 00'	34° 03.5'	125° 00'	
		a5	Apr. 09, 16:00H	Apr.10, 02:12H	34° 00'	125° 00'			757
					34° 03.5'	125° 07'	33° 30'	125° 53'	
		a6	Apr. 10, 02:40H	Apr. 10, 15:20H	34° 00'	125° 54'			1101
					33° 30'	125° 53'	34° 03'	127° 36'	
		a7	Apr. 10, 19:09H	Apr 11, 06:00H	34° 03'	127° 36'	34° 15'	128° 00'	1302
					33° 30'	128° 00'	34° 33.5'	128° 43'	
		a8	Apr. 11, 15:30H	Apr. 11, 21:41H	34° 35'	129° 00'	34° 58'	128° 10'	636
					33	34° 50'	129° 00'		
	YH9804	A1	Apr. 16, 20:15H	Apr. 16, 23:25H	34° 47.7'	128° 45.5'	34° 24.5'	128° 18.0'	313
		A2	Apr. 17, 14:00H	Apr. 17, 19:05H	33° 58.9'	127° 17.2'	33° 32.4'	126° 34.6'	454
		a10	Apr. 23, 08:50H	Apr. 23, 20:00H	34° 04.6'	127° 00.8'	34° 49.0'	128° 45.8'	1209
					A11	Apr. 23	34° 17'	127° 23'	
1998/09	NH9809	S1	Sep. 23, 12:30H	Sep 24, 02:40H	34° 48'	128° 46'	34° 10.7'	127° 41.7'	940
		S2	Sep. 24, 02:50H	Sep. 24, 17:58H	34° 10.7'	127° 41.7'	33° 44.8'	127° 39.9'	1340
		S3	Sep. 24, 18:00H	Sep 25, 10:53H	33° 44.8'	127° 39.9'	34° 18.3'	126° 47.4'	1507
					S4	Sep. 25, 10:55H	Sep 26, 07:45H	34° 18.3'	126° 47.4'
		S5	Sep. 26, 08:00H	Sep. 27, 15:21H	34° 11'	126° 51'	33° 44.8'	127° 39.9'	1068
					S6	Sep. 27, 15:30H	Sep. 28, 09:40H	33° 44.8'	127° 39.9'
1998/11	NH9811	N1	Nov. 23, 15:30H	Nov. 24, 06:55H	34° 59'	128° 41'	33° 33'	126° 33'	1167
		N2	Nov. 24, 06:55H	Nov 24, 19:00H	33° 33'	126° 33'	34° 18.3'	126° 47.4'	1220
		N3	Nov. 26, 14:35H	Nov. 26, 20:50H	34° 18.3'	126° 47.4'	34° 31'	127° 41.5'	585
					N4	Nov. 26, 20:50H	Nov. 27, 08:11H	34° 31'	127° 41.5'
		N5	Nov. 28, 02:30H	Nov. 28, 09:10H	33° 55.9'	127° 41.5'	34° 33'	128° 28'	679
					N6	Nov. 28, 09:10H	Nov. 29, 01:00H	34° 33'	128° 28'
		N7	Nov. 29, 13:00H	Nov. 29, 17:15H	34° 15'	128° 57'	34° 59'	128° 41'	375
					F1	Feb 22, 10:34H	Feb. 23, 20:48H	34° 59'	128° 41'
1999/02	NH9902	F2	Feb. 23, 20:58H	Feb. 25, 13:23H	34° 00'	126° 25'	33° 35'	126° 35'	1606
1999/05	NH9905	M1	May 05, 16:10H	May 07, 09:25H	35° 03'	128° 52'	35° 00'	130° 00'	1660
		M2	May 07, 09:30H	May 08, 08:00H	35° 00'	130° 00'	34° 30'	130° 42'	2003
		M3	May 08, 08:10H	May 09, 06:15H	34° 30'	130° 42'	33° 21'	129° 00'	2240
					M4	May 08, 10:30H	May 10, 08:00H	33° 21'	129° 00'
		M5	May 10, 11:50H	May 11, 09:05H	33° 48'	128° 22'	34° 20'	127° 59'	2213
					M6	May 11, 13:30H	May 12, 09:45H	34° 20'	127° 59'
		M7	May 12, 09:50H	May 12, 21:00H	34° 17'	128° 31'	34° 30'	130° 42'	1161
					M8	May 12, 21:10H	May 13, 12:40H	34° 30'	130° 42'

In과 Ir 원소가 ICP-MS분석시 Internal standard로 이용했으며 정확도는 표준물질인 NBS 1648 (Urban particulate)로 검정하였다.  $Cl^{-1}$ ,  $NO_3$ , sulfate와 ammonia 이온들은 여과지 일부에서 초정제된 증류수 (Double deionized water) 50 ml로 초음파 세척기를 이용하여 30분 동안 진탕하여 추출했다. 이들 양이온과 음이온들은 이온 크로마토그래프 (Dionex DX-100)을 이용하여 분석했다.

각 성분들의 분석한계치는 공여과지, 포집효율 (Collection Efficiency) 그리고 대기시료의 불확실성들을 기초로 하여 추정했다.  $^{210}Pb$ 과  $^7Be$  방사능 값은 회분된 여과지를 고순도 저마니움 검색기를 장착한 감마선 스펙트로 분석기를 이용하여 47.4 keV와 477.6 keV 에너지 대에서  $^{210}Pb$ 과  $^7Be$ 의 감마선을 측정했다.

### 8.3. 결과 및 토의

제주-대한해협 해상의 총 35개 정점에서 25개 원소의 농도를 조사하였다. 1997년 11월에는 2개, 1998년 4월의 황사기에 2개, 비황사기에 8개 시료가, 9월에는 6개 시료, 1999년 2월에는 2개 시료 그리고 5월에는 8개 시료가 각각 채집되었다. 이들 시료들에 대한 산술적 평균값과 기하평균값 그리고 표준편차와 같은 통계 값은 Table 3-8-2에 제시되어 있다.

Table 3-8-2. Aerosol chemical composition over the Cheju-Korea Straits ( $ng/m^3$ ).

Elements	Date																	
	Nov 1997		Low Dust Apr 1998			Dust Strom Apr 1998			Sep 1998			Nov 1998		Feb 1999		May, 1999		
	Avg	Std	Avg	±	Std	Avg	±	Std	Avg	±	Std	Avg	±	Std	Avg	±	Std	
Na	9076 ± 641	2737 ± 1873	6573 ± 2184	5979 ± 3072	4917 ± 3182	2838 ± 1245	3963 ± 3145											
Mg	2164 ± 47	490 ± 274	7233 ± 3538	773 ± 403	802 ± 441	659 ± 37	669 ± 462											
Al	747 ± 379	468 ± 426	25672 ± 14036	262 ± 259	980 ± 1068	2209 ± 1054	911 ± 569											
K	228 ± 15	257 ± 129	8626 ± 5062	559 ± 374	816 ± 456	1233 ± 183	836 ± 459											
Ca	252 ± 45	419 ± 384	20372 ± 9607	359 ± 304	952 ± 961	1501 ± 337	667 ± 467											
Ti	1694 ± 9.16	2941 ± 24.16	1407 ± 719	12.2 ± 13.1	73.6 ± 59.6	118 ± 53	53.6 ± 33.1											
Cr	2.04 ± 0.05	1.07 ± 0.74	27.6 ± 13.2	2.38 ± 1.80	3.05 ± 1.27	6.61 ± 4.94	2.31 ± 1.62											
Mn	33.83 ± 15.03	12.07 ± 8.26	350 ± 186.3	-	19.1 ± 17.3	13.33 ± 1.36	15.01 ± 13.54											
Fe	122.5 ± 69.2	333 ± 287	14150 ± 7625	267 ± 183	709 ± 589	1364 ± 755	633 ± 378											
Co	0.12 ± 0.04	0.22 ± 0.14	6.99 ± 3.81	-	-	-	-											
Ni	2.27 ± 1.16	4.21 ± 1.88	20.67 ± 8.36	15.7 ± 19.0	5.26 ± 3.23	-	2.64 ± 3.66											
Cu	55.2 ± 19.1	191 ± 53	112 ± 8	138 ± 149	79.3 ± 19.1	505 ± 148	101 ± 80											
Zn	21.8 ± 10.1	35.17 ± 18.56	147.8 ± 66.8	-	-	-	-											
As	9.27 ± 2.24	1.55 ± 0.81	19.8 ± 6.98	-	-	-	-											
Sr	6.65 ± 0.06	4.57 ± 2.98	105.34 ± 47.22	-	-	-	-											
Zr	0.66 ± 0.22	0.69 ± 0.61	39.78 ± 18.21	-	-	-	-											
Mo	0.29 ± 0.02	0.83 ± 0.26	2.86 ± 1.28	-	-	-	-											
Cd	0.37 ± 0.02	0.49 ± 0.25	0.56 ± 0.16	-	-	0.30	0.22											
La	0.21 ± 0.08	0.22 ± 0.23	13.86 ± 7.19	-	-	-	-											
Ce	0.41 ± 0.16	0.56 ± 0.44	27.56 ± 14.15	-	-	-	-											
Nd	0.17 ± 0.1	0.41 ± 0.18	11.54 ± 5.92	-	-	-	-											
Pb	48.8 ± 1.0	19.53 ± 8.13	92.65 ± 51.35	17.4 ± 20.1	39.2 ± 10.7	27.3 ± 15.6	35.6 ± 22.6											
Ba	-	-	-	-	8.84 ± 10.52	36.3 ± 29.9	9.44 ± 6.54											
V	-	-	-	-	1.08 ± 1.14	2.01 ± 1.74	4.68 ± 2.82											
Cl	18667 ± 2076	4396 ± 3610	5261 ± 396	9347 ± 4841	7877 ± 4996	8361 ± 1259	5314 ± 4376											
NO <sub>x</sub>	1323 ± 197	5826 ± 2869	8653 ± 1364	5101 ± 2604	6257 ± 1629	5967 ± 295	5599 ± 1772											
SO <sub>x</sub>	5025 ± 50	8056 ± 2119	17285 ± 2430	5391 ± 2751	6764 ± 2782	8328 ± 372	8561 ± 4569											
NH <sub>4</sub>	1515 ± 259	1425 ± 1432	3790 ± 3	2313 ± 1350	2312 ± 409	3126 ± 976	2146 ± 854											

이들 시료들은 각 원소들의 농도에서 시간적인 변동성을 보여주기 위하여 각 계절별로 분류했다. 지역에 따라서는 시간적 변동성이 크게 나타나는 지역이 존재한다. 따라서 각 원소들의 시공간적인 변동성에 대하여 기술 할 것이다. 11월에 채집된 에어로졸에서 Al 농도는 비황사기인 4월에 비해 2~3배 정도 높게 관측되나, 1998년 4월에 발생한 황사기간 중 채집된 에어로졸에서의 Al 농도는 비황사기인 1998년 4월의 Al농도에 비해 100배 정도 높은 값이 관측되었다.

### 8.3.1. 농축계수 (Enrichment factor)

대부분의 대기 원소들의 기원은 해양과 대륙지각 물질이다. 다음과 같이 정의된 농축계수 (Enrichment factors)는 에어로졸에서 많은 원소들이 평균적인 지각 또는 해수의 원소의 농도 비와 유사한 값들을 보여주고 있다. 여기서, Al과 Na 원소는 지각과 해수의 농축계수를 계산하는데 비교원소로 사용했다. 제주-대한해협에서 지각성 또는 해양성 에어로졸의 평균 농축계수는 다음의 식에서 계산되었으며, 그 값들은 Table 3-8-3과 3-8-4에 제시하였다.

Table 3-8-3. Enrichment factors calculated relative to average crustal material for Marine aerosol particle samples over the Cheju-Korea Straits.

Elements	Date						
	Nov 1997	Apr. 1998 Low Dust	Apr. 1998 Dust storm	Sep 1998	Nov. 1998	Feb 1999	May, 1999
Na	34	16	0.7	64	14	4	12
Mg	18	6	2	18	5	2	4
Al	1	1	1	1	1	1	1
K	1	2	1	6	2	2	3
Ca	1	24	2.1	3.7	2.6	1.8	2.0
Ti	0.6	1.7	1.5	1.3	2.0	1.4	1.6
Cr	6.3	5.2	2.5	20.9	7.2	6.9	5.8
Mn	6.1	3.5	1.8	-	2.6	0.8	2.2
Fe	0.4	1.6	1.3	2.3	1.7	1.4	1.6
Co	1.3	3.7	2.2	-	-	-	-
Ni	12.2	36.1	3.2	24.2	2.2	-	1.2
Cu	2.38	13.10	14.0	16.91	2.60	7.35	3.55
Zn	33.0	85.1	6.5	-	-	-	-
As	66.5	1.77	41.3	-	-	-	-
Sr	2.0	2.2	0.9	-	-	-	-
Zr	0.4	0.6	0.7	-	-	-	-
Mo	20.8	94.6	6.0	-	-	-	-
Cd	40.6	8.67	1.8	-	251.96	-	11.07
La	0.8	2.3	2.7	-	-	-	-
Ce	0.7	2.9	2.6	-	-	-	-
Nd	0.7	4.5	2.3	-	-	-	-
Pb	2.63	4.19	3.6	2.67	1.61	5.0	1.57
Ba	-	-	-	-	1	2	2
V	-	-	-	6	3	-	7

Table. 3-8-4 Enrichment factors calculated relative to average seawater for marine aerosol particle samples over the Cheju-Korea Straits.

Elements	Date	Low Dust	Dust Strom	Sep. 1998	Nov. 1998	Feb. 1999	May, 1999
	Nov. 1997	Apr. 1998	Apr. 1998				
Na	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
Mg	1.98E+00	1.49E+00	9.15E+00	1.08E+00	1.36E+00	1.93E+00	1.40E+00
Al	1.64E+06	3.41E+06	7.79E+07	8.73E+05	3.97E+06	1.55E+07	4.58E+06
K	6.78E-01	2.53E+00	3.54E+01	2.52E+00	4.48E+00	1.17E+01	5.69E+00
Ca	7.24E-01	3.99E+00	8.08E+01	1.56E+00	5.05E+00	1.38E+01	4.39E+00
Ti	2.10E+04	1.21E+05	2.40E+06	2.30E+04	1.68E+05	4.67E+05	1.52E+05
Cr	1.16E+04	2.02E+04	2.17E+05	2.06E+04	3.21E+04	1.20E+05	3.02E+04
Mn	1.46E+06	1.73E+06	2.09E+07	-	1.52E+06	1.84E+06	1.48E+06
Fe	2.60E+06	2.34E+07	4.15E+08	8.60E+06	2.78E+07	9.26E+07	3.08E+07
Co	1.21E+05	7.34E+05	9.71E+06	-	-	-	-
Ni	5.73E+03	3.52E+04	7.20E+04	6.02E+04	2.45E+04	-	1.53E+04
Cu	2.57E+05	2.95E+06	7.21E+05	9.74E+05	6.82E+05	7.53E+06	1.07E+06
Zn	6.59E+04	3.52E+05	6.17E+05	-	-	-	-
As	6.38E+03	3.54E+03	1.88E+04	-	-	-	-
Sr	1.00E+00	2.28E+00	2.19E+01	-	-	-	-
Zr	2.86E+04	9.91E+04	2.38E+06	-	-	-	-
Mo	3.26E+01	3.09E+02	4.44E+02	-	-	-	-
Cd	5.57E+03	2.45E+04	1.17E+04	-	8.37E+03	-	4.24E+04
La	5.97E+04	2.08E+05	5.44E+06	-	-	-	-
Ce	1.73E+05	7.86E+05	1.61E+07	-	-	-	-
Nd	6.99E+04	5.59E+05	6.55E+06	-	-	-	-
Pb	2.79E+07	3.71E+07	7.32E+07	1.51E+07	4.14E+07	5.00E+07	4.66E+07
Ba	-	-	-	-	1.41E+03	1.00E+04	1.87E+03
V	-	-	-	1.27E+03	2.87E+03	-	8.32E+03

$$EF_{\text{crust}} = ([X]/[Al])_{\text{sample}} / ([X]/[Al])_{\text{crust}} \quad (1)$$

해양성 농축계수 (EFs)는 지각성 농축계수와 유사하게 계산된다. 그러나 Bowen의 해수에서 평균적인 Na농도가 Al 대신 비교원소로 사용되었다.

$$EFs = ([X]/[Na])_{\text{sample}} / ([X]/[Na])_{\text{seawater}} \quad (2)$$

Taylor and McLennan (1995)의 평균 지각에서의 원소의 농도가 참고자료로 사용하였으며, 이때의 Al 농도는 지각성분의 추적원소로 사용했다. 해수에 대해서는 Bruland (1983)의 평균해수 농도를 참고자료로 사용하였으며, Na를 해양성 기원의 추적원소로 이용했다. 예측한 대로, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Co, Sr, Zr, La, Ce, Nd, Ba, V 원소들이 농축계수 1에 가까운 값을 가지는 것으로 지각 또는 해양기원 물질

과 깊은 관련이 있는 것으로 추론 된다.

보통, 3~5 이하의 농축계수 (EF<sub>crust</sub> or EF<sub>s</sub>)을 가지는 원소들은 평균 지각물질 (또는 해수)에서와 같이 대기의 에어로졸에서도 유사한 원소 상호간 농도비를 가지는 것으로 사료된다 (Duce *et al.*, 1983).

연구지역의 해양에어로졸에서 Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Zr, La, Ce 과 Nd 와 같은 원소들은 평균 지각물질의 농축계수와 유사한 비율 보였다. Duce *et al.*(1983) 등이 지적한 바와 같이, 화석연료의 연소, 도로건설, 농업 활동과 같은 여러 가지 인간의 산업활동 때문에, 지각 농축계수만으로는 그들의 궁극적인 기원이 지각인지를 명확하게 구명하기는 어렵다. 또한, Gao *et al.* (1997) 등은 석탄 등의 연소로 인하여 대기중으로 Al이 유입되는 것을 지적하였다.

Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd 그리고 Pb과 같은 원소들은 지각과 해수 기원에 비해 상대적으로 에어로졸에 농축된 것으로 관측되었다 (Table 3-8-3과 3-8-4). 북동아시아 대륙에서 이런 원소들의 대기 유입은 천연기원 보다는 화석연료의 연소와 같은 인간 산업활동에 의한 대기유입이 심각한 것으로 사료된다.

### 8.3.2 황사에 대한 비해양 보정

Zieman *et al.* (1995) 등이 지적한대로, 하와이 Mauna Loa섬에서 관측한 황사에서 Taylor의 지각평균 Na/Al 비와 일치하지 않았다. 그러므로, 해수면 근처에서 채집된 에어로졸에서 Na에 대한 해양의 기여도를 결정할 때는 세심한 주의가 필요하다. Taylor의 Na/Al 비는 지각에서 0.36이었으나, 황토에서는 평균 Na/Al 비는 0.15~0.17로 측정되었다 (Table 3-8-5).

Table 3-8-5. Elemental ratios of some major elements in the Chinese Loess and average earth crust.

	Loess		Minquin		Earth crust	Loess	Japan Kosa
	fine	coarse	Spring	Summer	average	average	Coase particle
Na/Al	0.1458	0.2353	0.2265	0.1502	0.3595	0.18	0.25
K/Ca	0.2578	0.3116	0.3270	0.3517	0.1654	0.29	0.25
Ca/Al	0.5241	0.4595	0.8794	1.0551	0.3731	0.66	0.82
Mg/Al	0.1627	0.1463	0.3237	0.3572	0.1654	0.20	0.46
Sr/Al	0.0026	0.0033	0.0065	0.0061	0.0044		
Cl/Al					0.0016		
Reference	1	1	2	2	3	4	5

1: Li and Chen (1996), 2: Liu *et al.* (1998), 3: Taylor (1964) and Cl from Emsley (1989), 4:Liu (1988), 5: Homes and Zollar (1996)



Holmes and Zoller (1996)가 언급한 Tanaka의 자료는 조립질 황토 (32-63 mm)의 값과 일치한다 (Li and Chen, 1996). 해양성 에어로졸의 대부분 입자크기는 황해와 동지나해에서 2~20 mm이므로 (Li and Chen, 1996), 우리는 황사시기에 Na/Al 원소비를 0.15로 선택했다. 그리고, 이 지역으로 유입되는 대기 광물질은 주변 대륙으로부터 기원하기 때문에 비황사시기에는 평균 대륙지각의 원소 비를 사용했다 (Mukai and Suzuki, 1996; Hong *et al.*, 1998). 해양성 Na은 다음의 식에 의하여 지각에 기원하지 않은 Na으로 계산된다 (Zieman *et al.*, 1995)

$$[Na]_{\text{marine}} = [Na]_{\text{total}} \left( \frac{[Na]_{\text{crust}}}{[Al]_{\text{crust}}} [Al]_{\text{total}} \right) \quad (3)$$

비해염 sulfate (nss sulfate)의 농도는 전 sulfate 농도에서 해염 sulfate의 농도를 빼줌으로서 계산된다. 해염 sulfate는  $[Na]_{\text{marine}} \cdot 0.252$  (Bowen의 해수에서 sulfate/Na 농도비) 식으로부터 추정할 수 있다.

$$[nss \text{SO}_4^{-2}] = [\text{SO}_4^{-2}]_{\text{total}} \left( \frac{[\text{SO}_4^{-2}]_{\text{total}}}{[Na]_{\text{total}}} [Na]_{\text{marine}} \right) \quad (4)$$

시료에 대한 각 원소의 비해염 평균농도에 대한 통계치는 Table 3-8-6에 제시되었다.

Table 3-8-6. Non-sea salt corrected chemical composition of aerosols over the Cheju-Korea Straits.

Sampling period	Nov 1997		Apr 1998		Apr 1998		Sep 1998		Nov 1998		Feb 1999		May, 1999	
	Low dust		Low dust		High Yellow Dust									
Number of samples	2		7		2		6		7		2		8	
Elements (ng/m <sup>3</sup> )	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std
Na	269 ± 160	168 ± 125	3743 ± 2184	941 ± 512	352 ± 455	794 ± 623	327 ± 393							
Mg	1105 ± 47	181 ± 54.8	6893 ± 3538	65.4 ± 67.2	253 ± 63.0	414 ± 18.3	232 ± 57.7							
Al	747 ± 379	468 ± 85.2	25672 ± 14036	262 ± 43.1	980 ± 153	2209 ± 527	911 ± 71.2							
K		162 ± 25.8	8521 ± 5062	341 ± 62.4	647 ± 65.1	1158 ± 91.7	701 ± 57.3							
Ca		320 ± 76.8	20263 ± 9607	133 ± 50.7	777 ± 137	1423 ± 169	527 ± 58.4							
Ti	16.9 ± 9.16	29.4 ± 4.83	1407 ± 71.9	12.2 ± 2.18	73.6 ± 8.52	118 ± 26.7	54 ± 4.14							
Cr	2.04 ± 0.05	1.07 ± 0.15	27.6 ± 13.2	2.38 ± 0.30	3.05 ± 0.18	6.61 ± 2.47	2.31 ± 0.20							
Mn	33.8 ± 15.0	12.1 ± 1.7	350 ± 186	-	19.1 ± 2.47	13.3 ± 0.68	15.0 ± 1.69							
Fe	122 ± 69.2	333 ± 57.4	14150 ± 7625	267 ± 30.5	709 ± 84.1	1364 ± 378	633 ± 47.2							
Co	0.12 ± 0.04	0.22 ± 0.03	6.99 ± 3.81	-	-	-	nd							
Ni	2.27 ± 1.16	4.21 ± 0.38	20.7 ± 8.36	15.7 ± 3.17	5.26 ± 0.46	-	2.64 ± 0.46							
Cu	55.2 ± 19.1	191 ± 10.6	112 ± 8.00	138 ± 24.8	79.3 ± 2.73	505 ± 73.8	101 ± 9.95							
Zn	21.8 ± 10.1	35.2 ± 3.71	148 ± 66.8	-	-	-	-							
As	9.27 ± 2.24	1.55 ± 0.16	19.8 ± 6.98	-	-	-	-							
Sr	0.19 ± 0.06	2.69 ± 0.60	103 ± 47.2	-	-	-	-							
Zr	0.66 ± 0.22	0.69 ± 0.12	39.8 ± 18.2	-	-	-	-							
Mo	0.28 ± 0.02	0.83 ± 0.05	2.86 ± 1.28	-	-	-	-							
Cd	0.37 ± 0.02	0.49 ± 0.05	0.56 ± 0.16	-	0.30 ± 0.03	-	1.23 ± 0.17							
La	0.21 ± 0.08	0.22 ± 0.05	13.9 ± 7.19	-	-	-	-							
Ce	0.41 ± 0.16	0.56 ± 0.09	27.6 ± 14.2	-	-	-	-							
Nd	0.17 ± 0.10	0.41 ± 0.04	11.5 ± 5.92	-	-	-	-							
Pb	48.8 ± 1.00	19.5 ± 1.63	92.6 ± 51.4	17.4 ± 3.36	39.2 ± 1.53	27.3 ± 7.78	35.6 ± 2.83							
Ba	-	-	-	-	8.84 ± 1.50	36.3 ± 14.9	9.44 ± 0.82							
V	-	-	-	1.08 ± 0.19	2.01 ± 0.25	-	4.68 ± 0.35							
Cl	2823 ± 2076	0	170 ± 396	-	-	4683 ± 629	-							
NO <sub>x</sub>	1321 ± 197	5826 ± 574	8653 ± 1364	5100 ± 434	6256 ± 233	5966 ± 148	5598 ± 221							
SO <sub>4</sub>	2808 ± 50.0	7409 ± 424	16572 ± 2430	3910 ± 458	5615 ± 397	7813 ± 186	7646 ± 571							
NH <sub>4</sub>	1515 ± 259	1425 ± 286	3790 ± 3.00	2313 ± 225	2312 ± 58.5	3126 ± 488	2146 ± 107							
<sup>210</sup> Pb	0.55 ± 0.28	0.75 ± 0.21	7.15 ± 0.4	2.38 ± 0.34	3.48 ± 0.15	3.24 ± 0.06	1.40 ± 0.06							
<sup>7</sup> Be	19.38 ± 9.46	38.45 ± 2.52	38.8 ± 7.59	31.6 ± 2.93	-	28.0 ± 2.45	22.4 ± 0.46							

이와 같은 값들은 해수조성에 의하여 영향을 받지 않은 실질 대기 원소의 농도를 나타낸다. 전체 에어로졸 Na 농도 중 해양기원 비율은 각각 1998년 9월에 97 %, 1998년 11월에 95 %, 99년 4월 40 %, 99년 8월에 90 % 이다. 대륙으로부터 기원한 대기분진이 실질적으로 봄철의 해양기원 Na의 비율을 낮추는 것으로 사료된다. 또한 대기분진의 농도가 높을 때 전체 에어로졸의 Na 함량이 전적으로 해양에서 기원되었다고 가정 할 수 없는 점에 주목해야 한다. 에어로졸의 해양기원 sulfate 비율은 황사기에 2.7 %, 비황사기에 44 % 정도로 관측되었다.

#### 8.3.4. 대기중 금속원소 농도

##### 8.3.4.1. 주성분 원소와 미량원소

에어로졸 Al의 농도는 황사기인 1998년 4월에  $25672 \pm 14036 \text{ ng m}^{-3}$ , 비황사기인 1998년 4월에  $468 \pm 426$ , 9월에  $262 \pm 259$ , 11월에  $980 \pm 1068$ , 그리고 1999년 2월과 5월에는 각각  $2209 \pm 1054$ 와  $911 \pm 569 \text{ ng m}^{-3}$ 으로 관측되었다. 황사기 Al 농도는 황해에서 관측한 값 중에서 가장 높은 농도를 보였다 (Gao *et al.*, 1992). 황사기간에 대기에어로졸의 Na, Mg, K, Ca과 Al 농도는 비황사기의 농도들보다 100배 정도 높은 값이다. 또한 황사기간 동안의 Ti, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Sr, Mo, Cl의 농도도 역시 비황사기의 대기에어로졸 농도보다는 10배정도 높게 관측되었다. Pb, nitrate와 nss sulfate의 농도는 비황사기에 비해 2 배 높은 값을 보이고 있다. 단지 에어로졸 Cd 만이 비황사기의 농도와 유사한 값이다 (Table 3-8-2).

##### 8.3.4.2. Nitrate

Nitrate의 평균농도는 1998년 4월의 황사기간 동안에  $8.6 \pm 1.4 \text{ mg m}^{-3}$ 이었고 비황사기간에  $1.3 \pm 6.2 \text{ mg m}^{-3}$ 로 관측되었다. 황사기간의 에어로졸이 비황사기의 에어로졸보다 많은 nitrate을 운반했다는 사실은 흥미롭다. 중국 청도에서 평균 nitrate 농도는  $7.7 \text{ mg m}^{-3}$ 이었고 (1992년, 2월-6월), 동지나해에서는  $1.9 \pm 1.2 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 (1992년 4월) 관측되었으며 (Gao *et al.*, 1996), 북태평양 원양에서는  $0.75 \pm 0.64 \text{ mg m}^{-3}$ 이었다 (Uematsu *et al.*, 1995). 황사기에 에어로졸 nitrate 함량이 중국연안인 청도에서 관측된 값과 유사하다는 사실은 흥미롭다.

##### 8.3.4.3. NSS sulfate

Nss sulfate의 평균농도는 황사 기간인 1998년 4월에는  $16.1 \pm 2.4 \text{ mg m}^{-3}$ 이었으며 비황사 기간인 1997년 11월, 1998년 4월, 9월, 11월 그리고 99년 2월과 5월에 각각,  $2.8 \pm 0.05$ ,  $7.4 \pm 0.4$ ,  $3.9 \pm 0.46$ ,  $5.62 \pm 0.15$ ,  $7.81 \pm 0.19$ ,  $7.65 \pm 0.57 \text{ mg m}^{-3}$ 로 관측되었다. 각 기간별 nss sulfate 평균농도는 2~5월에  $7.4 \text{ mg m}^{-3}$  이상으로 높으나, 9~11월에는  $3.9 \pm 5.6 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 낮다. 황해의 다른 지역과 비교하면, 중국 청도의 sulfate 평균 농도는  $12 \pm 11 \text{ mg m}^{-3}$ 이며, 동중국해는  $4.0 \pm 1.30 \text{ mg m}^{-3}$ 이다. 봄철 제주-대한해협 지역의 nss sulfate 농도는 황해 중국연안지역인 청도와 매우 유사하였다. 북태평양에서는 sulfate 값이  $1.7 \pm 2.0 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 관측되었다 (Uematsu *et al.*, 1995). Gao *et al.* (1996)은 중국해에서 높은 nss sulfate 농도는 methanosulfonate의

분해로 인하여 비 생물기원의 nss sulfate의 유입이 많기 때문에 기인된 것이라 하였다.

#### 8.3.4.4. Ammonia

연구지역의 에어로졸에서 암모니아의 평균농도는 황사기간인 98년 4월에  $3.79 \pm 0.3 \text{ mg m}^{-3}$ 이며, 비황사기인 97년 11월에  $1.5 \pm 0.3$ , 98년 4월에  $1.4 \pm 0.29$ , 9월에  $2.3 \pm 0.23$ , 11월에  $2.3 \pm 0.05$ , 그리고 99년 2월과 5월에 각각  $3.13 \pm 0.49$ ,  $2.15 \pm 0.11 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 관측되었다. 대체적으로, 2~5월에 평균 암모니아의 농도가  $2.15 \pm 3.79 \text{ mg m}^{-3}$ 로 높게 관측된 반면, 9~11월 평균 암모니아의 농도는  $1.5 \pm 2.3 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 낮게 관측되었다. 평균 암모니아 농도가  $0.4 \pm 1.2 \text{ mg m}^{-3}$ 인 북대서양 연안지역 (GESAMP, 1989) 과  $0.08 \text{ mg m}^{-3}$ 인 북서태평양 (Quinn *et al.*, 1988)과 비교하면 상당히 높은 농도이다. 유기물질의 분해와 휘발과정에서 대기중으로 여러 가지 환원된 질소화합물 (ammonia, amines, amino acid)들이 유입된다. 대기에서 이러한 화합물들은 수화, 산화 또는 침전과정을 통해 제거된다. Quinn *et al.* (1988)은 어떤 해양환경은 암모니아의 공급원이 될 수 있음을 지적했으며, GESAMP (1989)은 암모니아 플럭스 자료는 해양에서 육지 유입의 영향을 추정한다는 점은 무의미하다는 것을 밝혔다.

#### 8.3.4.5. Nss sulfate와 미량원소의 농도비

Nss Sulfate 와 nitrate, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd 과 Pb의 농도비는 Table 3-8-7에 있다.

Table 3-8-7. Concentration ratios of nss sulfate to certain enriched elements over the Cheju-Korea Straits.

Date	Nov. 1997		Apr 1998 Low Dust		Apr. 1998 Dust Storm		Sep. 1998		Nov. 1998		Feb 1999		May, 1999	
	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.
SO <sub>4</sub> /nitrate	2.12 ±	0.32	1.27 ±	0.14	1.92 ±	0.41	0.77 ±	0.11	0.90 ±	0.07	1.31 ±	0.04	1.37 ±	0.12
SO <sub>4</sub> /Ni	1237 ±	633	1760 ±	187	802 ±	345	249 ±	58.0	1067 ±	120	-	-	2896 ±	546
SO <sub>4</sub> /Cu	50.9 ±	17.6	38.8 ±	3.09	148 ±	24.1	28.4 ±	6.10	70.8 ±	5.57	15.5 ±	2.30	76.0 ±	9.42
SO <sub>4</sub> /Zn	129 ±	59.7	211 ±	25.3	112 ±	53.3	-	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> /As	303 ±	73.4	4781 ±	570	837 ±	320	-	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> /Mo	9978 ±	731	8954 ±	761	5800 ±	2734	-	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> /Cd	7589 ±	432	15122 ±	1769	29595 ±	9504	-	-	18657 ±	2344	-	-	6222 ±	986
SO <sub>4</sub> /Pb	57.5 ±	1.56	379 ±	38.3	179 ±	103	225 ±	50.9	143 ±	11.6	286 ±	81.6	215 ±	23.5
S/Ca	468 ±	234	23.1 ±	5.70	0.82 ±	0.41	29.4 ±	11.7	7.23 ±	1.38	5.49 ±	0.66	14.5 ±	1.94
NH <sub>4</sub> /SO <sub>4</sub>	0.54 ±	0.09	0.19 ±	0.04	0.23 ±	0.03	0.59 ±	0.09	0.41 ±	0.03	0.40 ±	0.06	0.28 ±	0.03

에어로졸 nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/As 비는 연구지역에서 300~4700 범위 내에 있으며, 이 값들은 실제로 중국 연안쪽 정점인 Qindao와 Xiamen의 4월에 관측한 값들보다 높았다 (Gao *et al.*, 1996). 그러므로 미량금속보다 nss sulfate가 해양에어로졸에 농축되는

어떤 기작이 존재 할 것이다.

### 8.3.5. 제주-대한해협 해양 에어로졸의 화학적 특성

#### 8.3.5.1. nss sulfate와 ammonium의 상관관계

에어로졸  $\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$ 의 mole 비와 상관관계는 1998년 4월의 황사기에는 0.51, 1997년 11월에는 1.26, 비황사기인 1998년 4월에는 0.44, 9월에는 0.59, 11월에 0.41, 그리고 99년 2월과 5월에는 각각 0.40 과 0.28로 관측되었다 (Fig. 3-8-2, Table 3-8-7).

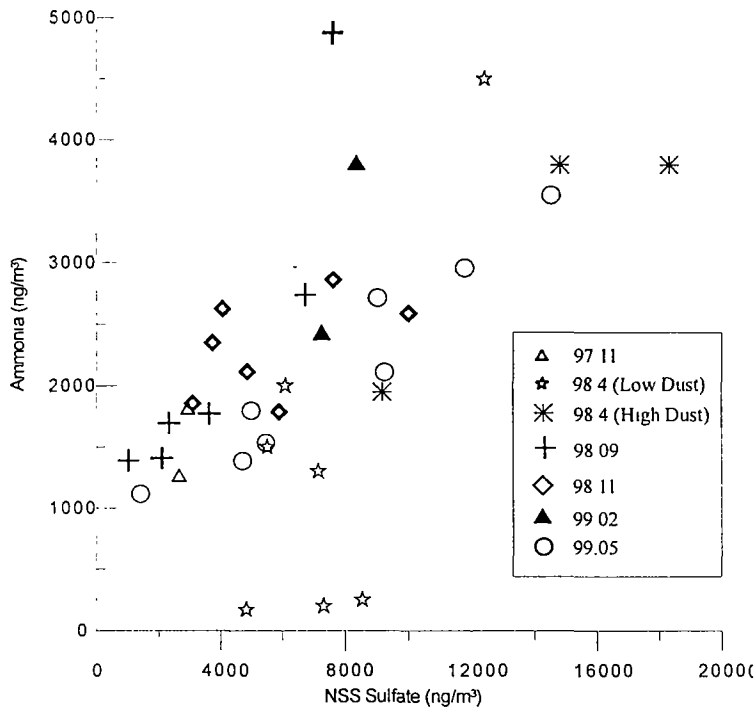


Fig. 3-8-2. Relationship between nss sulfate and ammonia concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits

대체적으로 2월과 5월 사이에는 0.19 ~0.40의 낮은 값이 나타난 반면에 9월 11 월 사이에는 0.41~0.59의 높은 값이 관측되었다. 이런 값들은 Carmichael *et al.* (1997) 등이 제주도에서 보고한 값 (~1.0) 보다 작았지만, 경향은 본 연구의 값들과 비슷했다. 최저값은 봄철 황사기간과 여름철에 나타났다. 최근에, 아시아 지역의 암모니아 배출 현존량을 근거로 하여 인류기원 암모니아 (N) 와 이산화황 (S) 비는 중국 동부에서 1~2, 일본에서 2, 그리고 한반도 남부에서 0.25 이다 (Carmichael *et al.*, 1997). Carmichael 등은 이러한 경향을 남쪽에서 불어오는 바람에는 인류기원 sulfur을 적게 포함된 것으로 해석하고 있다.

#### 8.3.5.2. nss sulfate와 nitrate의 상관관계

대기중 질산염의 공급원은 sulfate 보다는 상당히 다양하지만, NOx의 가장 큰

공급원은 화석연료의 연소이며 (Logan, 1983; Arimoto *et al.*, 1996) 매년 아시아 지역에서 지속적으로 증가 할 것으로 기대된다 (Galloway *et al.*, 1994). 또한 다른 NOx의 공급원은 생물연소, 토양미생물의 활동과 번개작용으로부터 대기로 공급 될 수 있으며, 성층과 대류권의 교환도 중요한 NO의 공급원이 된다.

Nss sulfate와 nitrate의 산포도에서 이들 두 성분들 사이에는 양의 상관관계를 보이는데, 이는 이들 성분들의 공급원과 제거원이 비슷하다는 것을 의미한다 (n=35,  $r^2=0.69$ ; Fig. 3-8-3).

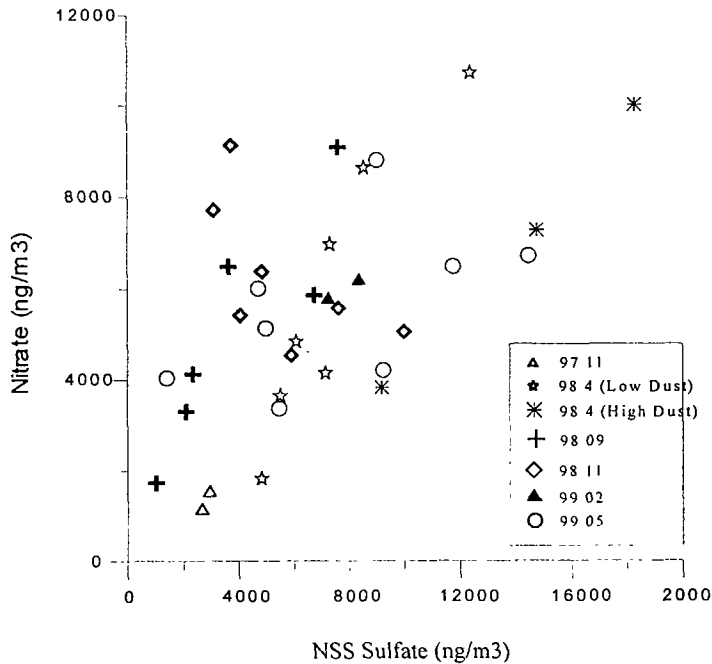


Fig. 3-8-3. Relationship between nss sulfate and nitrate concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

이러한 유사한 경향은 에어로졸 nss sulfate와 ammonia 사이의 관계에서 볼 수 있다 (Fig. 3-8-2). Nss sulfate와 ammonia 의 1차 회귀직선의 기울기는 1.3~2.1로 Arimoto *et al.*, (1996) 등이 제주에서 측정한 값 1.7~1.8과 유사했다. 계절에 따라 nss sulfate 와 nitrate의 1차 회귀직선 기울기가 다른 것은 시간에 따라 기원이 다른 기단이 존재함을 의미한다. 중국은 북동 태평양연해의 인류기원 황과 질소의 중요 공급원이다. 아시아 국가들의 연소 방출량에서 sulfate와 nitrate의 비는 중국에서 3.01, 일본에서 0.57 (Arimoto *et al.*, 1996) 그리고 한국에서 1.7(1990)~1.3(1994) 범위에서 실질적으로 변화한다. 한국의 SOx 의 방출량은 1990년 이후 일정하지만, NOx 의 방출량은 매년 꾸준히 증가하는 추세이다 (Korea Ministry of Environment). 그러므로 비행사 기간인 1998년 4월과 11월의 기단은 한반도 북부에 기원한 반면, 여름철인 9월의 기단은 한반도 남부에 기원 된 것이다. 한편, 황사기인 1998년 4월의 기단은 중국으로부터 기원한 것으로 추정된다. 에어로졸 sulfate와 nitrate 의 농도는 강우의 산-염기 화학과 깊이 관련되어 있다. 강한 산성우에 노출된 에어로졸은 독성금속과 해양생태계에 이용될 수 있는 미량 영양금속과 같은 미

량 금속들을 용해 시킨다.

### 8.3.5.3. 에어로졸 광물과 질산염

양적으로 에어로졸 광물은 해양에어로졸의 대부분을 차지하는 천연기원 물질이다. 본 연구는 에어로졸 광물의 추적자로서 사용된 Al과 질산염의 관계를 구명하려 한다. 평균 nitrate/Al 비는 1997년 11월에 1.77, 비황사기 1998년 4월에 12.45 그리고 황사기 1998년 4월에 0.41로 관측되었다 (Fig. 3-8-4, Table 3-8-6).

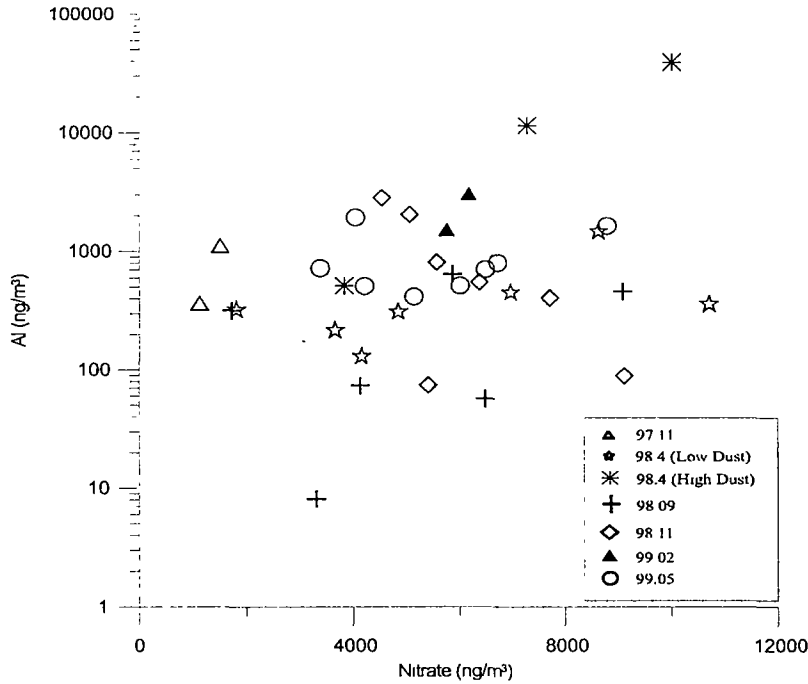


Fig. 3-8-4. Relationship between nitrate and Al concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

비황사기 1998년 4월의 12.45 값은 Arimoto *et al.* (1996)에 의해 제주도에서 보고된 값과 유사하다. Gao *et al.*(1996)은 nitrate/Al 비가 칭다오에서 3.1 그리고 동중국해에서 1.0으로 보고했다. 황사시기에 nitrate/Al의 비가 최저값을 보이는 것은 중국의 광물분진과 NO<sub>x</sub>에 대한 공급지역이 다르기 때문이라 사료된다. 주로 도시지역으로부터 공급되는 NO<sub>x</sub>와는 다르게, 황사는 중국 서부와 북서부의 광대한 모래사막과 북동쪽에 위치한 고비사막과 같은 지역으로부터 유입되는 대기분진이다 (Gao *et al.*, 1992). Akimoto *et al.* (1994) 은 중국 대기분진의 주요 공급원인 Shannzi 와 Xinjiang 지역은 중국 단지 NO<sub>x</sub> 방출량의 1.4 %와 2.7 % 만을 설명하고 있다. 따라서 NO<sub>x</sub>의 방출강도를 근거로 하여, 아시아 대기분진의 공급지역에서 nitrate/Al 비는 낮을 것으로 기대된다. 평균 nitrate/Al 비는 일본 Kato 지역에서 3.9부터 오키나와에서 15 (Table 3-8-3 in Arimoto *et al.*, 1996) 까지 약 3배 정도의 범위에 있다. 비황사기 1998년 4월에 nitrate/Al 비가 높게 관측된 것은 한반도 북부에 기원한 기단으로부터 nitrate이 공급되었기 때문이다.

#### 8.3.5.4. 에어로졸 광물과 황산염

에어로졸 광물입자는 대기중  $\text{SO}_2$ 를 흡착할 뿐만 아니라, 대기분진 입자와 반응하여 신성우를 중화 시키는 작용도 한다 (Arimoto *et al.*, 1996). 대기분진에서 S/Ca 질량 비는 황사기간 중에 0.3~11 이고, 비황사기에는 100~200 이다. 황사기에 낮은 S/Ca 질량 비는 타칼마칸 사막의 토양입자에서 측정된 비 (0.1~0.2)와 유사하다 (Tanaka *et al.*, 1986). Nagoya에서 채집된 에어로졸에서는 0.6~0.7의 높은 값을 보였는데 이는  $\text{CaCO}_3$ 와 Sulfuric Oxide 또는 sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )가 반응하여 Anhydrate ( $\text{CaSO}_4$ )와 gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )을 형성했기 때문이라 사료된다. Arimoto *et al.* (1996)와 Carmichael *et al.* (1997) 은 제주도에서 에어로졸 S/Ca 비를 5.0으로 보고하고 있다. 비 황사기에 관측된 높은 S/Ca 비는 해발 72 m인 제주도 고산 관측정점에 도달하는 기단과는 다르게 대기-해양 경계 대기층에서 nss Ca의 상당한 결손 때문이라 사료되며 이는 토양분진에 존재하는  $\text{CaCO}_3$ 이 gypsum이나 anhydrite으로 전환했을 때의 기대값보다 (S/Ca 비: 0.8) S가 에어로졸에 과잉으로 존재하는 것을 의미한다. S/Ca 질량비는 시간에 관계되는 화학적 변화의 지시자라고 제시한 Winchester and Wang (1989) 에 의하면, 비황사기 봄철과 11월의 에어로졸은 오래된 연령을 가지는 반면에 봄철 황사기간의 에어로졸은 신선한 것으로 추정된다. 이러한 설명은 본 논문의 뒷부분에 설명 될 에어로졸  $\text{Al}/^{210}\text{Pb}$ 의 원소 농도비 자료에 의해서도 규명 될 것이다.

연구지역 에어로졸에서 nss  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}$  비는 1997년 11월에 3.8, 비황사기 1998년 4월에 15.8이 관측되었으며, 황사기인 1998년 4월에는 0.8로 상당히 낮은 농도비가 측정되었다 (Fig. 3-8-5). Gao *et al.* (1996) 가 관측한  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}$ 비는 중국 청도에서 4.0, 동중국해에서 2.1이다. 비황사 기간의 에어로졸은 같은 기원을 가지고 있으나, 황사기간의 에어로졸의 특성은 비황사기의 에어로졸과 다른 특성을 지니고 있다.

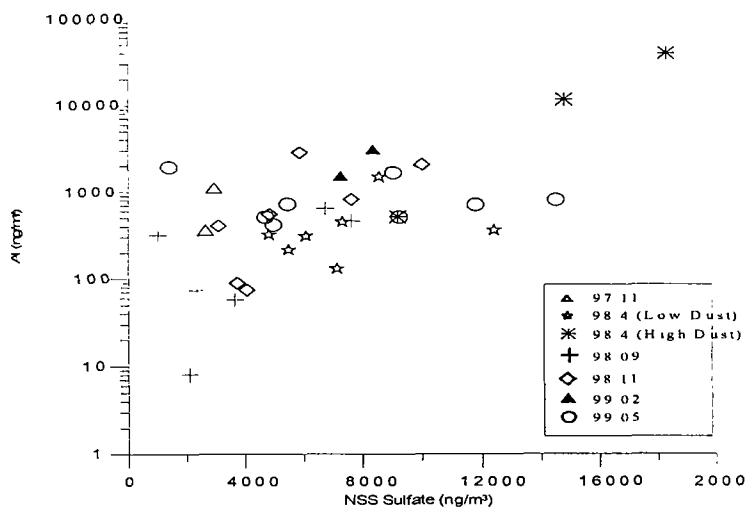


Fig. 3-8-5. Relationship between nss sulfate and Al concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

### 8.3.5.5. $^{210}\text{Pb}$ 과 $^7\text{Be}$ 와 에어로졸 sulfate 농도비

Tsunogai *et al.* (1985)은 대기에서 황 화합물의 거동을 구명하는데  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  과 함께 sulfure dioxide, sulfate을 함께 사용할 것을 제안했다. 대기중 이들 화합물의 거동은 반응성에 따라 대기에서 residence time과 대기농도가 결정된다. 이산화황과  $^{222}\text{Rn}$ 은 대기에서 유사한 체류시간을 가지는 불완전 기체이다. Sulfate와  $^{210}\text{Pb}$ 은 불완전 기체인 이산화황과  $^{222}\text{Rn}$ 에서 생성되며, 생성된 후 바로 에어로졸 입자로 흡착된다. 에어로졸에서  $\text{nss SO}_4^{2-}/^{210}\text{Pb}$  ( $\times 10^4$  g/dpm)비는 1997년 11월에 6.9~15.6 이며, 비황사기인 1998년 4월에는 3.8~310.4로 관측되었다 (Fig. 3-8-6).

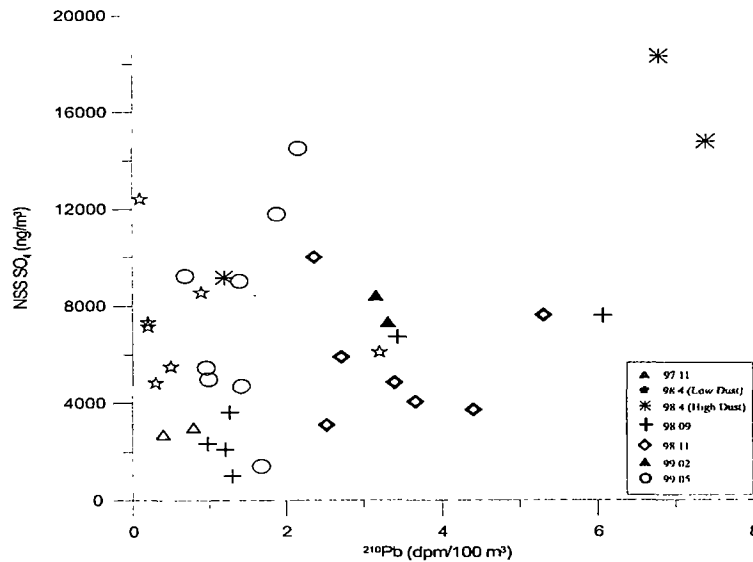


Fig. 3-8-6. Relationship between  $^{210}\text{Pb}$  and nss sulfate concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

특히, 황사기간중  $^{210}\text{Pb}$ 과 Al 농도는 강한 상관관계를 보인다 (Fig. 3-8-7).

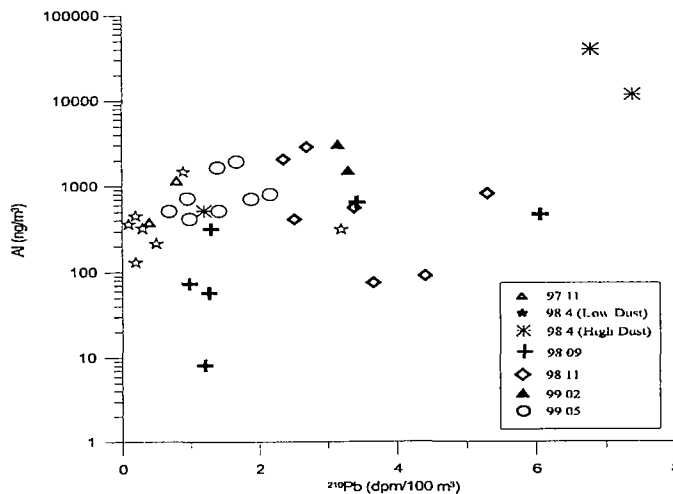


Fig. 3-8-7. Relationship between  $^{210}\text{Pb}$  and Al concentrations in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits



봄철 에어로졸 특히 황사기간 중 채집된 에어로졸은 가을철의 에어로졸 보다  $^{210}\text{Pb}$  농도가 높았다 .

$^7\text{Be}$  (반감기 53.3 일)은 대기 상부층에서 우주선에 의해 생성된 천연기원 핵종이다.  $^7\text{Be}$ 은 대기에서 에어로졸 입자에 빠르게 흡착되기 때문에 에어로졸의 거동과 상부 대류권과 성층권 하부로부터 성층권으로 운반된 물질들 (방사능 낙진, 성층권으로 유입된 화산분출물, 오존과 질소화합물)을 구별하기 위한 유용한 추적자로 사용된다 (Uematsu *et al.*, 1994; Graustein and Turekian, 1996). 제주해협 및 대한해협에서, 질산염과  $^7\text{Be}$  농도 사이의 상관관계가 황사기간 중에 높게 나타났다 (Fig. 3-8-8).

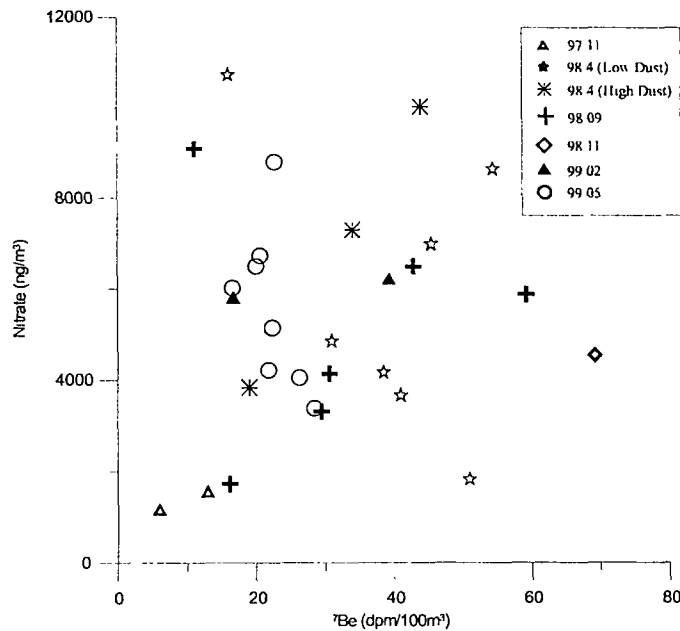


Fig. 3-8-8. Relationship between  $^7\text{Be}$  and Nitrate concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

유사한 관계가 북태평양 중앙에서도 관측되었는데 (Uematsu *et al.*, 1994; Uematsu *et al.*, 1995), 이는 질산염의 기원이 성층권이라는 의미는 아니다. 그와 같은 높은 상관관계는 남태평양에서는 관측되지 않기 때문에 (Uematsu *et al.*, 1994), 북태평양의 에어로졸에서 높은 질산염 농도는 인류기원의 오염으로 추정된다. 이러한 경향은 아시아 대륙으로부터 북태평양 중앙해역으로 육지기원 물질의 운반과정을 반영한 것이다 (Uematsu *et al.*, 1983). 황사기간에 아시아 대륙 상공의 기단은 전선이나 수렴과정에 의해 높은 고도 (400~500 hPa) 로 상승한 후, 편서풍에 의해 동쪽으로 이동하여 북태평양 중앙부의 고기압권을 통과하면서 점진적으로 하강한다 (Liu, 1988; Merrill *et al.*, 1989). 북동태평양 지역의 비행관측에 의하면 (Andreae *et al.*, 1988), 질산염과 nss sulfate의 농도는 아시아 대륙으로부터 이동한 기단이 주류를 이루는 대류권에서 높게 관측되었다. 이때의 질산염의 농도가 함께 변화하지 않기 때문에 남태평양의 특정 정점에서  $^7\text{Be}$ 이 높게 관측되는 것은 전적으로 성층권의 대류권 유입과 깊은 관련이 있다. 그러므로, Uematsu *et al.*은  $^7\text{Be}$ 이 성층권보다는

대류권으로부터 해양 경계면으로 하강하는 기단의 추적자로서 유용하게 사용될 수 있다는 것을 제시했다. 이런 사실은 제주-대한해협 지역의 해양 에어로졸에서  $^{210}\text{Pb}$  과  $^7\text{Be}$  농도사이의 양의 상관관계에 의하여 검증되었다 (Fig. 3-8-9).

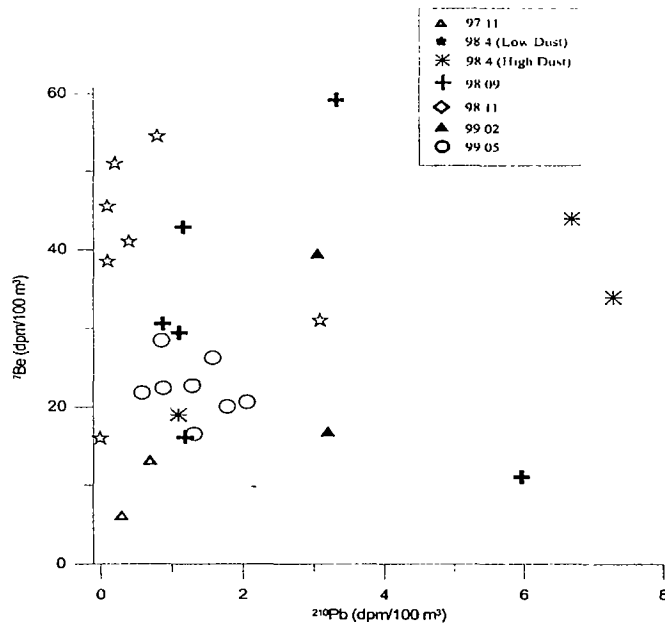


Fig. 3-8-9. Relationship between  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  concentration in the marine boundary layer in the Cheju-Korea Straits.

### 8.3.6. 제주-대한해협 해상의 대기 침적량

#### 8.3.6.1. 건식 침적량

해수면으로 침적되는 대기침전은 강의 유입보다 더 넓은 지역에 영향을 미친다. 제주-대한해협 대기를 통해 운반되는 물질의 유동량은 지속적인 시료채취 전략의 부재로 인하여 정량화 되지 못했다. 연구지역으로 광물입자의 대기유입율은 평균 대기분진 농도를 사용해서 추정할 수 있다. 조립광물 입자 (>10 mm) 의 대부분은 높은 침전속도로 인하여 중국연안 근처에 퇴적될 것이다. 에어로졸 입자의 건식침적은 대기분진 입자의 농도 ( $C_{air}$ )와 건식 침적속도 ( $V_d$ )의 곱으로 계산된다.

$$F_d = C_{air} V_d \quad (5)$$

여기서  $F_d$ 은 건식침적에 의해 에어로졸 입자의 유동량 ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 이며,  $C_{air}$ 는 대기에서 어느 물질의 농도 ( $\text{mg m}^{-3}$ ) 이고,  $V_d$ 는 건식침적 속도 ( $\text{cm s}^{-1}$ )를 나타낸다. 건식 침적량에 있어서 입자크기에 관한 자세한 사항은 Gao *et al.* (1997)의 논문에서 논의되었다. 건식 침적과정은 건식침적 속도에 관련되며 건식침적 속도는 입자크기, 입자밀도, 풍속 그리고 상대습도의 함수이다. 그러므로, 건식 침적속도를 정확하게 추정하는 것은 어렵다. 침적과정을 주의 깊게 고려한 후 GESAMP (1989)은 건식침적 속도에 대한 최적 값은 3가지 요소의 불확실성에 관계된다고 제시했다.

본 연구는 에어로졸의 입자분포에 관한 정보가 없기 때문에 우리는 지각 원소 (1~6 범위)에서 대해서는 2 값을 인용했으며, 농축원소 (0.19~1.70 범위)에 대해서는 0.55 값을, 그리고 sulfate, nitrate와 ammonia (0.3~1.0범위)에 대해서는 1.0의 값을 사용했다.

#### 8.3.3.6.2. 황사

중요 황사는 중국, 한국, 일본에서 봄철에 관찰된다 (Liu, 1988; Chung, 1992; Uematsu *et al.*; 1983). 남부 일본의 나가사키에서 관측한 것을 근거로 지난 60년 동안 관측된 황사 중 85 %는 3월과 6월 사이에 발생했다. 황사는 연간 0~18일 동안 발생하였으며 평균적으로 연간 3.5일이 발생했다 (Uematsu *et al.*, 1983; Liu, 1988).

1998년에는 황사는 연구지역에서 10일 동안 발생했으며, 그때의 침적량이 계산되었다. 이 황사기간 중에 평균 건식침적 속도는  $4.8 \text{ cm s}^{-1}$ 로 가정하여 사용하였다 (X.Y. Zhang *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1997).

#### 8.3.6.3. 습식 침적량

직접 강우에 대한 화학적 측정이 불가능 할 때, 강우를 통한 대기분진의 제거 추정은 스캐벤징 비를 사용해서 연구한다. 대기에서 물질의 농도는 일반적으로 빗물에서 그 물질의 농도와 관계 있다 (Duce *et al.*, 1991). 그 관계는 스캐벤징 비로 다음과 같이 기술 될 수 있다.

$$S = \rho C_r / C_a \quad (6)$$

여기서, S 는 어느 물질에 대한 스캐벤징 비이고,  $C_r$ 은 강우 중 그 물질의 농도 ( $\text{mg g}^{-1}$ )이며  $C_a$  는 대기 중 농도 ( $\text{mg m}^{-3}$ )이고 r는 공기의 밀도 ( $1200 \text{ g m}^{-3}$ ) 이다. 습식침적 ( $F_w$ )을 통한 대기유입량은 다음과 같이 표현되며

$$F_w = C_r \cdot P \quad (7)$$

여기서 P는 강우량 ( $\text{m s}^{-1}$ )을 나타낸다. 만약  $C_r$ 이 식 (6)에 따라 치환하면, 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_w = P \cdot S \cdot C_a / \rho \quad (8)$$

식 (8)을 사용해서, 대기중 물질농도와 침적속도 그리고 스캐벤징 비를 근거로 하여 습식침적을 통한 물질의 대기유입량을 추정할 수 있다. S는 입자크기, 입자형태 그리고 대기농도의 수직적 분포, 비와 비구름의 수직적 정도를 포함하는 여러 요소의 함수이고 정확하게 그 값을 추정하기 어렵다. GESAMP (1989)은 에어로졸 광물에 대해 100~200의 스캐벤징 비를 보고했으며, 연안해역에 대해 500~2000의 값이 가장 적당하다고 제시했다. Uematsu *et al.* (1985)은 태평양 자료에서 직접 스캐벤징 비를 측정했으며 그 값의 범위는 500~2000 이고 평균값은 1000이었다.

본 연구에서 태평양에서 GESAMP과 Uematsu 등이 제시한 결과를 선택했으며 Gao *et al.* (1997)등이 제시한 대로 아시아 연안을 따라 에어로졸 광물을 추정하기 위한 가장 적합한 스카벤징 비 추정 치로 범위는 500~2000 이고 평균값은 1000을 가정하였다.

제주-대한해협에 대기분진 플럭스의 평균값은  $22 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이며, 이 값은 Gao *et al.* (1997) 등이 이 지역에서 보고한 값과 유사하다. 연간 대기분진 플럭스는 습식침적으로 41 %, 황사로 39 %, 건식침적으로 20 %로 각각 추정된다 (Table 3-8-8).

Table 3-8-8. Depositional flux of non-sea salt corrected atmospheric chemical elements and compounds in the Cheju-Korea Straits.

Elements	Annual total flux (ng/m <sup>2</sup> /yr)			Relative contribution		Total aeal flux (g/yr)
	min	max	avg	% wet	% yellow dust	
Na	4.88E+08	8.33E+08	5.54E+08	48	28	2.50E+10
Mg	3.27E+08	4.85E+08	3.57E+08	34	49	1.64E+10
Al	1.99E+09	2.95E+09	2.17E+09	34	49	9.97E+10
K	4.86E+08	6.44E+08	5.16E+08	24	64	2.37E+10
Ca	5.71E+08	5.85E+08	5.74E+08	2	97	2.63E+10
Ti	9.37E+07	1.30E+08	1.01E+08	28	58	4.62E+09
Cr	3.52E+06	5.96E+06	3.98E+06	47	29	1.83E+08
Mn	4.95E+07	8.57E+07	5.64E+07	49	26	2.59E+09
Fe	9.34E+08	1.29E+09	1.00E+09	28	59	4.60E+10
Co	5.48E+05	8.15E+05	5.99E+05	34	48	2.75E+07
Ni	1.84E+06	3.38E+06	2.19E+06	36	39	1.00E+08
Cu	4.18E+07	1.00E+08	5.51E+07	54	8	2.53E+09
Zn	1.47E+07	2.83E+07	1.78E+07	39	34	8.19E+08
As	2.46E+06	5.03E+06	3.04E+06	43	27	1.40E+08
Sr	3.56E+06	4.82E+06	5.03E+06	13	55	2.31E+08
Zr	1.85E+06	2.18E+06	2.23E+06	7	74	1.02E+08
Mo	2.87E+05	5.52E+05	3.47E+05	39	34	1.59E+07
Cd	1.54E+05	3.59E+05	2.01E+05	52	12	9.21E+06
La	8.98E+05	1.23E+06	9.62E+05	27	60	4.41E+07
Ce	1.88E+06	2.64E+06	2.02E+06	29	56	9.29E+07
Nd	9.23E+05	1.38E+06	1.01E+06	35	47	4.63E+07
Pb	1.42E+07	3.04E+07	1.79E+07	46	22	8.21E+08
Cl	3.11E+06	4.61E+06	3.40E+06	34	49	1.56E+08
NO <sub>3</sub>	2.86E+09	3.65E+09	3.62E+09	60	10	1.66E+11
SO <sub>4</sub>	1.87E+09	2.33E+09	2.32E+09	55	17	1.06E+11
NH <sub>4</sub>	8.58E+08	1.02E+09	1.01E+09	43	36	4.63E+10
210Pb	7.27E+05	1.04E+06	7.98E+05	49	37	3.66E+07
7Be	2.55E+07	3.10E+07	3.06E+07	57	5	1.41E+09

그러므로, 황사현상은 전체 대기분진 플럭스에 중요한 부분을 차지하며 전체 대기분진의 연간변동은 황사의 강도와 발생빈도에 좌우된다. 에어로졸의 다른 원소들과 화합물은 1998년 황사시기에 전체 플럭스 중 8~66 %를 차지했다. 황사에 의한 공급은 nitrate가 최소이고 Zr이 최대이다. 건식침적은 전적으로 대기 중 원소들이

한다. 제주-대한해협 해상 (표면적;  $4.59 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ) 의 전체적인 광물분진 플럭스는 연간  $1 \sim 2 \times 10^6 \text{ ton}$ 으로 추정되었으며, 이는 연구지역으로 유입되는 중요 하천인 낙동강에 의해 유입되는 연간 퇴적물 유입량의 약 10 %을 차지한다.

#### 8.4. 결 론

에어로졸 시료는 1997년 11월, 1998년 4월에 황사기와 비 황사기간 중에, 9월, 11월, 그리고 1999년 2월과 5월 동안 선상의 해양-대기 경계층에서 채집되었다. 1998년 4월 시료채취 시기의 일부분이 연구지역에서 발생한 황사시기와 일치하여서, 황사시료를 현장에서 채집할 수 있었다. 본 연구에서 도출한 주요 결과들은 다음과 같다.

1. 제주-대한해협 해상의 에어로졸에서 지각과 해수에서 평균 농도를 이용하여 구한 농축계수에 따라 각 원소들을 구분했다. Na, Mg, K 과 Ca은 거의 해수로부터 기원하였으며, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Zr, La, Ce 과 Nd 원소들은 지각물질로부터 기원하였고, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd 과 Pb은 인간 산업활동으로 배출되었으며 화석연료 연소로 인한 대기유입은 천연기원 보다 상당히 많은 양을 차지하고 있다. 그러나, Ca과 Sr은 기상학적 자료를 근거로 확인한 황사기간 동안에 대부분 중국 황토로부터 기원했다.
2. 황사기간 동안, 에어로졸 Al 과 금속 원소들의 농도는 비 황사기간보다 상당히 높았으며, 황사에 기인한 침적량은 1998년 동안 연중 황사기간이 단 10일이었음에도 불구하고 전 침적량의 39 %을 차지할 정도로 크다. 해양에어로졸 주성분 원소의 조성은 황사기와 비황사기 사이에 큰 차이를 보인다. 인류기원 원소와 화합물의 에어로졸 농축은 황사시기보다는 비황사시기에 크게 나타난다.
3. S/Ca 과 Al/ $^{210}\text{Pb}$ 자료를 근거로 하여, 비황사기의 대기-해양 경계층에 존재하는 에어로졸 입자는 황사기의 입자들보다 오래된 대기분진이다
4. 에어로졸 nss sulfate, nitrate 그리고 다른 미량금속의 농도와  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^7\text{Be}$  농도의 상관관계로부터 중국대륙과 근접하고 있음에도 불구하고, 대기분진 입자들이 육지로부터 방출된 후, 높은 고도를 통과해서 연구지역의 해양-대기 경계층으로 강하하는 것이 밝혀졌다.
5. 연간 대기분진 플럭스는 습식침적을 통해 41 %, 황사로 38 % 그리고 건식침적으로 20 % 해양에 유입된다. 연구지역에서 황사발생의 연간변동성은 대기분진 플럭스의 연간 변동성을 크게 영향을 미칠 것이다.

## 9. 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스

### 9.1. 서론

동-서 길이가 약 70km 인 제주해협은 황해 및 동중국해와 남해를 연결시키는 길목에 위치하여 이곳을 통과하는 해수 및 화학물질 수송량의 변화는 남해 해황 및 생태환경에 큰 영향을 준다. 제주해협중 제주도 서쪽해안을 따라서는 동중국해로부터 확장하는 고염빈영양염의 대마난류가 유입이 되며, 하계에는 저염고영양염의 양자강 희석수가 제주해협을 통해 유입되어 대한해협을 통해 동해로 빠져나간다 (Chang et al., 1995; Suk et al., 1996). 보길도의 한반도 연안을 따라서는 황해 및 한반도 연안 및 하천으로부터 고부유물고영양염 연안수가 유입되어 (Suk et al., 1996), 남해의 퇴적물 수급 및 화학물질 농도분포에 상당한 영향을 미친다 (Wells and Huh, 1984; Chough, 1983; Lee et al., 1990). 또한 저온저염고영양염의 황해 저층 냉수는 계절에 따라 남하 확장하여 제주해협을 통과하여 남해에 영향을 미친다 (Cho and Kim, 1994).

이와같이 제주해협을 통해 남해로 유입되는 화학물질은 총량적으로도 중요하고 시공간적인 변이 또한 크기 때문에 제주해협을 통해 이동되는 화학물질 플럭스에 대한 연구는 남해에서의 화학물질 순환 및 생지화학 과정을 이해하는데 있어서 선행적으로 이해되어야 한다.

일반적으로 해양에서 물질의 이동은 이류와 와류확산에 의하고 이중 이류에 의하여 장거리를 이동하게 된다. 대륙붕 해양을 포함하는 표층해양에서는 표층해류에 의한 물질이동이 중요하다. 동북아 해역에서 쿠로시오, 대마난류가 전통적으로 중요한 해류로 여겨져 왔다. 이러한 중요성 때문에 인접국인 중국 및 일본에서는 쿠로시오로부터 운송되는 화학물질 (Chen et al., 1994, 1995; Wunsch et al., 1983; Kan et al., 1994)에 대한 연구가 1990년 이후부터 활발히 진행되어 오고 있다.

그러나 제주해협에서 제주난류 (Cheju Warm Current)와 제주한류 (Cheju Cold Current)의 존재가 ADCP 관측을 통하여 밝혀진 이래 (Suk et al., 1996), 제주해류의 화학물질 수송 플럭스가 동북아 해역에서 차지하는 비중은 비교적 클것으로 사료되었다. 따라서 본 연구는 단 1계절 (춘계)의 측정 결과만을 토대로 한 Suk et al. (1996)의 연구에 대한 후속 보완으로 3년간 5회에 걸친 조사결과를 토대로 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스의 시간적 변이와 연간 수송량을 추정하는데 중점을 두었다.

### 9.2. 방법 및 재료

본 연구지역은 제주도와 남해연안의 보길도를 잇는 제주해협 (126° 32'E)으로서 (Fig. 3-9-1), 제주해협 통과 화학물질 플럭스를 산정하기위한 해양조사는 한국해양연구소 이어도호를 이용하여 3년간 5회에 걸쳐 수행되었다 (1997년 3월과 9월; 1998년 9월과 11월; 1999년 8월).

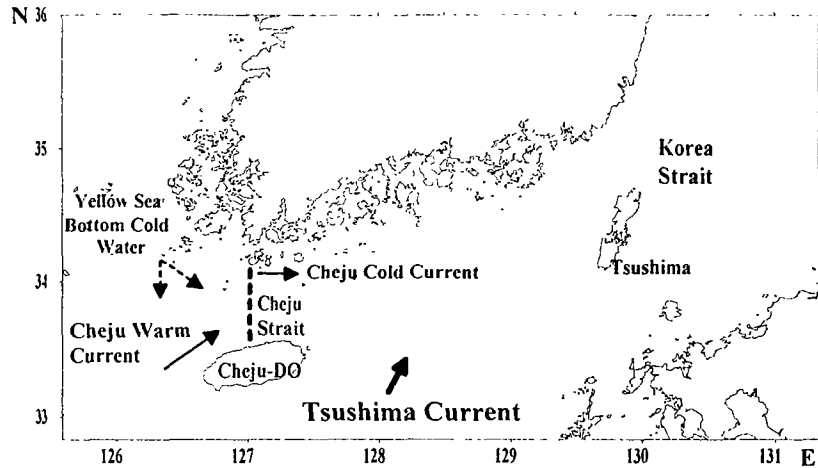


Fig. 3-9-1. Study section in the Cheju Strait.

해수시료는 표준수심 (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 저층)에서 니스킨 해수 채수기를 이용하여 채수하였다. 화학물질 측정 항목으로는 용존산소, 입자성부유물질, 용존 무기영양염류 및 입자성 유기탄소와 질소이다.

용존산소는 Winkler 적정법 (Carpenter, 1965)으로 선상에서 측정하였다 (정확도;  $250 \text{ mmol kg}^{-1}$ 에서  $\pm 0.5\% \text{ mg l}^{-1}$ ). 입자성부유물질은 사전에 무게 측정된 Nucleopore 여과지로 해수시료를 여과한 후, 증류수로 5-6회 세척하여 염분을 제거한 후 냉동보관하여 실험실로 운반, Parsons et al. (1984)에 의거하여 측정하였다 (정확도;  $\pm 0.02 \text{ mg l}^{-1}$ ). 질산염을 포함한 용존무기영양염류는 선상에서 해수시료를 유리섬유여과지 (GF/F)로 여과한 후 사전에 10% 염산으로 미리 세척한 20ml 고밀도 폴리에틸렌 병에 담아  $-20^\circ\text{C}$  이하의 저온에서 냉동보관 후 실험실에서 영양염 자동분석기 (Aliance)를 이용하여 Grassoff (1983) 방법에 따라 측정하였다. 해수 중 입자성 유기탄소 및 유기질소는  $550^\circ\text{C}$ 에서 3시간 태운 후 무게 측정된 유리섬유 여과지 (GF/F; 공극구경,  $0.45 \mu\text{m}$ )를 이용하여 해수시료를 여과한 다음 증류수로 5-6회 세척하여 염분을 제거하였다. 여과된 시료를 냉동보관한 후 실험실로 운반하여 산증기로 무기 탄산염을 제거한 다음 원소분석기 (Carlo Erba CNS)로 정량측정하였다 (정확도;  $\pm 0.3\%$  이하).

해류 자료는 연구선에 부착된 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 획득하였다. 제주해협에서는 왕복성 조류가 우세하기 때문에 조류성분이 제거된 해류분포를 측정하는 것이 필수적이다. 따라서 ADCP 조사시 연구선의 속도를 8-9 노트로 유지하여 조류성분을 제거하기위해 조석 1주기 (25시간)에 걸쳐 8회 반복관측하였다. ADCP 자료는 시간적으로 매 1분마다 수평적인 거리상으로는 약 300 m 간격으로, 그리고 수직적으로는 8 m 간격으로 자료를 획득하였다.

### 9.3. 결과

제주해협을 연평균 수온, 염분 및 화학성분들에 대한 수직분포를 Figs. 3-5-2에 나타내었다. 산정된 연평균은 춘계 (3-5월), 하계 (6-8월), 추계 (9-11월)로 계절별로 구분하여 같은 정점 및 수심별로 평균된 값이다. 동계는 비교적 수직혼합이 활발하고 강수, 수온이 동계 특성을 나타내는 3월초 자료로 대체하였다.

입자성 유기탄소 및 질소는 자료부족으로 인해 하계 (8월) 및 추계 (11월) 자료를 평균한 값으로 사용하였다.

#### 9.3.1. 해수 및 생지화학 특성

연평균 수온 분포는 제주도쪽으로 갈수록 고온의 제주난류로 인해 점차 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수심이 증가할수록 수온은 급격히 감소하여 보길도 남쪽 15 km 정점의 30 m 수심 이하에서는 15°C 이하로 낮다 (Fig. 3-9-2). 연평균 염분 분포는 수온과 비슷하여 제주도쪽으로 갈수록 증가하였다. 그러나 수온 최소값을 보인 보길도 남쪽 15km 정점의 저층에서는 수심 증가에 따라 평균 염분은 증가하여 저층에서 약 33.3 psu로서 전형적인 황해냉수 특성을 보였다 (Fig. 3-9-2).

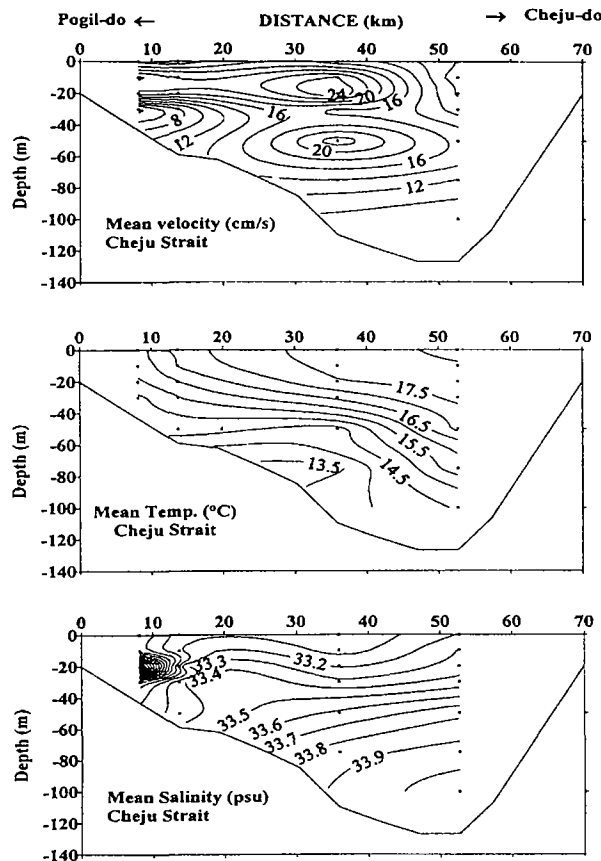


Fig. 3-9-2. Annual average velocity, temperature and salinity in the Cheju Strait.



연평균 유속분포는 전정점에 걸쳐 동향류가 우세하며, 보길도 남쪽 40 km 부근 해역 (33° 40'N)에서 20 cm s<sup>-1</sup> 이상의 최대값을 보였다. 해류속은 수심이 증가할수록 감소하여 75 m 이상의 수심에서는 10 cm s<sup>-1</sup> 이하이다 (Fig. 3-9-2).

연평균 용존산소함량 분포는 표층부근에서 230 μM 이상으로 높다. 수심이 증가할수록 평균 용존산소 함량은 급격히 감소하여 황해 냉수특성 보인 보길도 남쪽 15 km 정점의 저층에서 180 μM 이하이다 (Fig. 3-9-3). 연평균 입자성부유물질 함량분포는 수심이 40 m 이하인 보길도 인접 해역에서 2 mg l<sup>-1</sup> 이상으로 높고 수직적으로는 균질하다. 그러나 제주도쪽으로 갈수록 점차 감소하여 고온 고염의 특성을 보이는 제주도 부근 해역의 표층에서는 0.5 mg l<sup>-1</sup> 이하이다 (Fig. 3-9-4). 연평균 암모니아이온 함량 분포는 고염의 해수가 우세한 제주도 부근해역에서 0.5 μM 이상으로 높고 한반도 해안쪽으로 올수록 점차 감소한다 (Fig. 3-9-3).

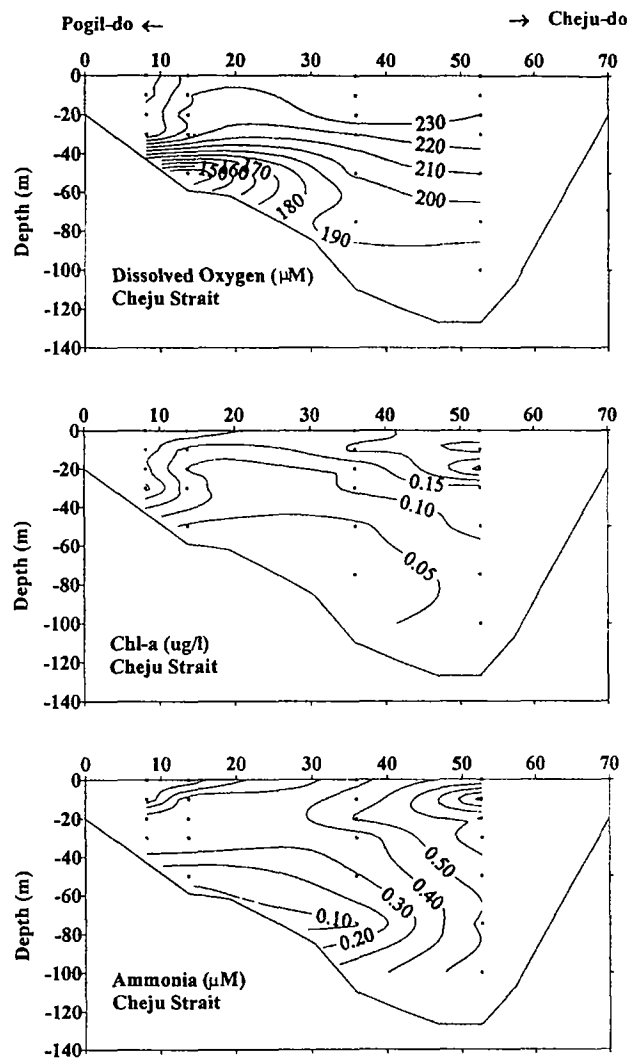


Fig. 3-9-3. Annual average DO, Chl-a, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Si(OH)<sub>4</sub>, in the Cheju Strait.

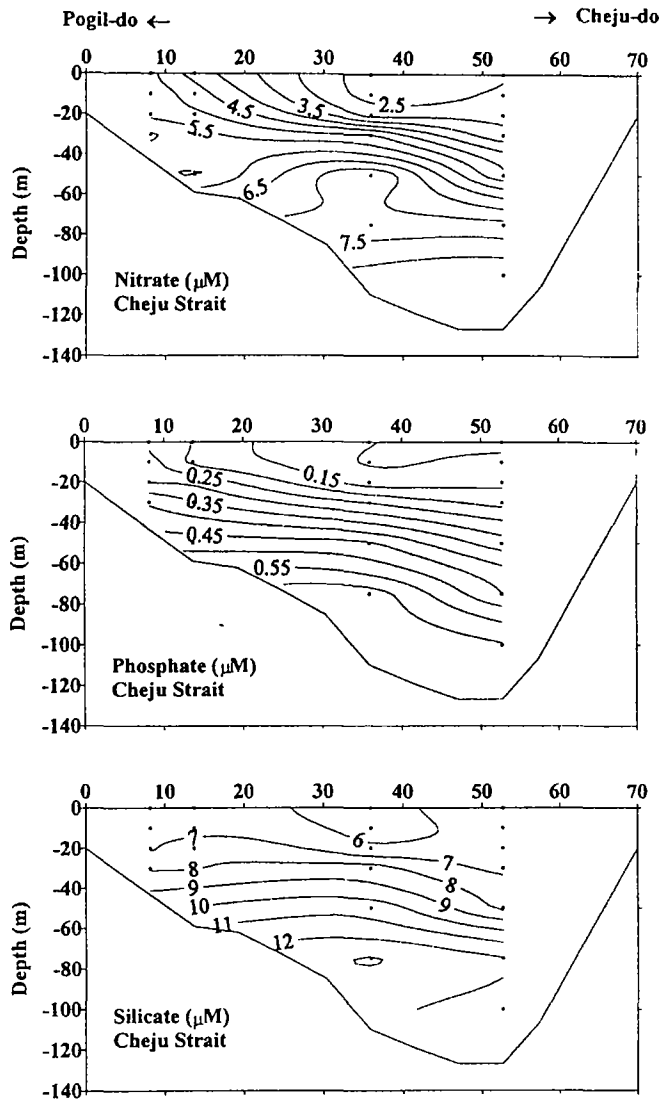


Fig. 3-9-3. (continued).

연평균 질산이온 함량 분포는 전반적으로 표층에서 낮고 제주도쪽으로 갈수록 급격히 감소한다. 수직적으로는 수심증가에 따라 급격히 증가하여 수심이 깊은 제주도 북쪽 사면골의 80 m 수심이하에서는  $7 \mu\text{M}$  이상이다 (Fig. 3-9-3). 연평균 인산이온 함량분포는 질산이온과 유사하여 제주도쪽으로 갈수록 감소하여 제주도 부근 표층에서는  $0.1 \mu\text{M}$  이하이다. 그러나 수심증가에 따라 급격히 증가하여 수심 80 m 이하에서는  $0.5 \mu\text{M}$  이상으로 높다 (Fig. 3-9-3). 연평균 규산함량 분포 또한 질산 및 인산이온 분포와 유사하여 표층에서는 낮다. 수심증가에 따라 급격히 증가하여 질산 및 인산이온이 최대값을 보인 제주도 사면골에서  $12 \mu\text{M}$  이상으로 높다 (Fig. 3-9-3). 연평균 엽록소 a 함량은 표층에서 높으나 유광대 수심 이하 (>20m)에서는  $0.1 \mu\text{g l}^{-1}$  이하이다 (Fig. 3-9-3). 연평균 입자성 유기탄소 및 질소함량 분포는

표층에서 각각 70, 17  $\mu\text{g l}^{-1}$  이상으로 높으나 수심 20-30m를 경계로 급격히 감소하였다 (Fig. 3-9-4).

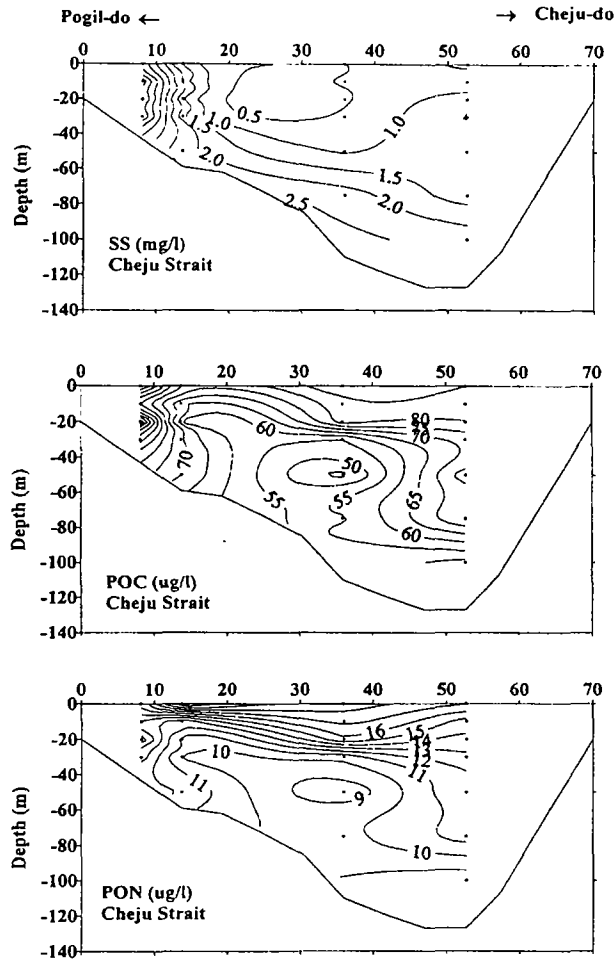


Fig. 3-9-4. Annual average suspended sediments (SS), particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) in the Cheju Strait.

### 9.3.2. 제주해협 통과 평균 단위면적당 화학물질 플럭스

제주해협을 통해 남해로 들어오는 연간 해수 순 수송량은 1997년 3월 및 9월에 각각 0.45, 0.58 Sv, 1998년 9월과 11월에 각각 0.51, 0.46 Sv, 그리고 1999년 8월에 0.66 Sv로서 계절 변동이 심해 하계(평균 0.58 Sv)가 춘계 (0.37 Sv; Suk et al., 1996) 및 추계 (0.46 Sv)에 비해 해수 순 수송량이 크다. 이는 일본 큐슈 서쪽 쿠로시오역에서의 수송량에 대한 연구에서 하계가 가장 크다는 Kan et al. (1994)의 결과와도 일치한다.

연평균 해류속에 평균 화학성분 농도를 곱한 단위면적당 물질플럭스 수직분포를 Fig. 3-9-5~6에 나타내었다.

연평균 단위면적당 암모니아이온 플럭스 범위는 5~91  $\mu\text{M m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서 입자성 부유물질 분포와 유사하여 보길도 인접해역에서 높고, 제주도 북쪽 사면골 저층에서 최소값을 보였다 (Fig. 3-9-5).

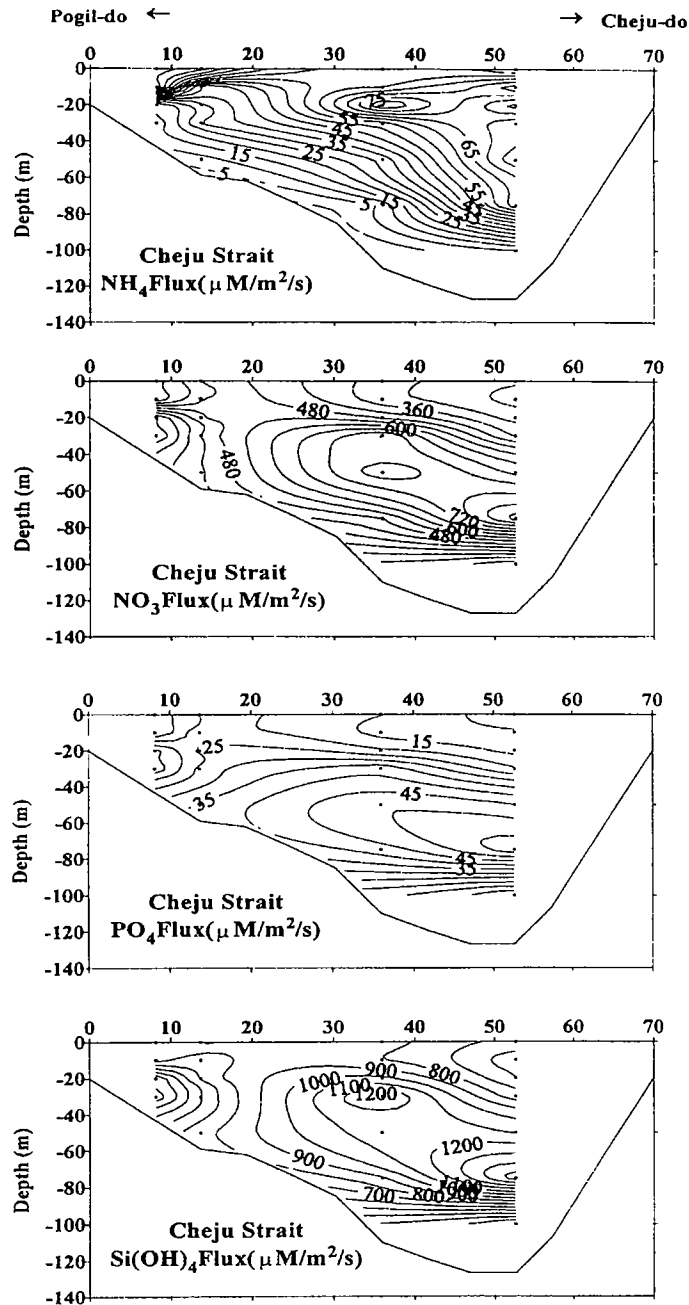


Fig. 3-9-5. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si(OH)}_4$ , in the Cheju Strait.

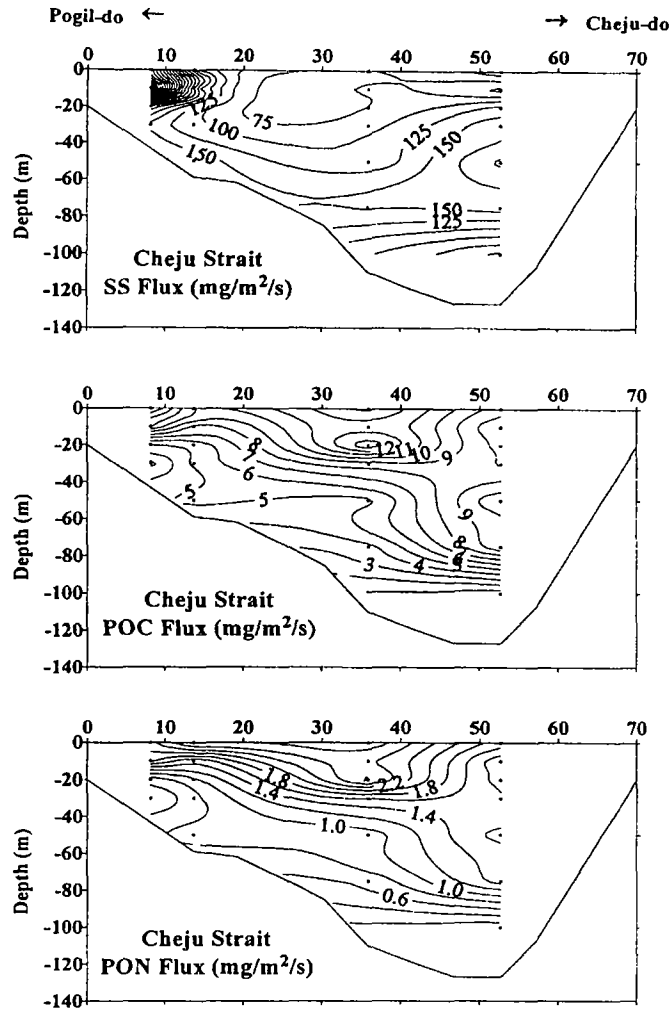


Fig. 3-9-6. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of suspended sediments (SS), POC and PON in the Cheju Strait.

연평균 단위면적당 질산이온, 이산이온 및 규산 플럭스는 각각 69~935, 5~58, 93~1572  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  범위로서 입자성부유물질 및 암모니아 이온 분포와는 달리 이들 농도가 높은 제주도 북쪽사면골 30-75 m 수심에서 최대값을 보였으나, 수심증가에 따라 감소하여 최소의 유속 ( $0.8 \text{ cm s}^{-1}$ )을 보인 저층 (>75m)에서 최소값을 보였다 (Fig. 3-9-5).

연평균 단위면적당 입자성부유물질 플럭스 범위는 18~712  $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서 입자성부유물질 농도 및 유속이 높은 보길도 인접 표층에서 최대값을 보였으나, 제주도 쪽으로 갈수록, 또한 수심증가에 따라 감소하여, 제주도 북쪽 사면골의 저층에서 최소값을 보였다 (Fig. 3-9-6).

연평균 단위면적당 입자성 유기탄소 및 질소 플럭스 범위는 각각 0.4~14, 0.07~2.7  $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서 대체로 표층에서 높고, 수심증가에 따라 감소하였다 (Fig. 3-9-6).

이러한 계절별 해수 순 수송량 및 화학물질 농도의 차이로 인해 해수순수송량에 화학성분 농도를 곱한 각 화학성분별 플럭스 또한 계절에 따른 차이를 보여준다. 이러한 계절변동에 따라 하계 및 추계에 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스는 춘계에 비해 부유물질은 약 2배, 규산은 약 4배 크다.

연평균 해류속과 단위면적당 화학물질 플럭스간의 관계를 Fig. 3-9-7에 나타내었다.

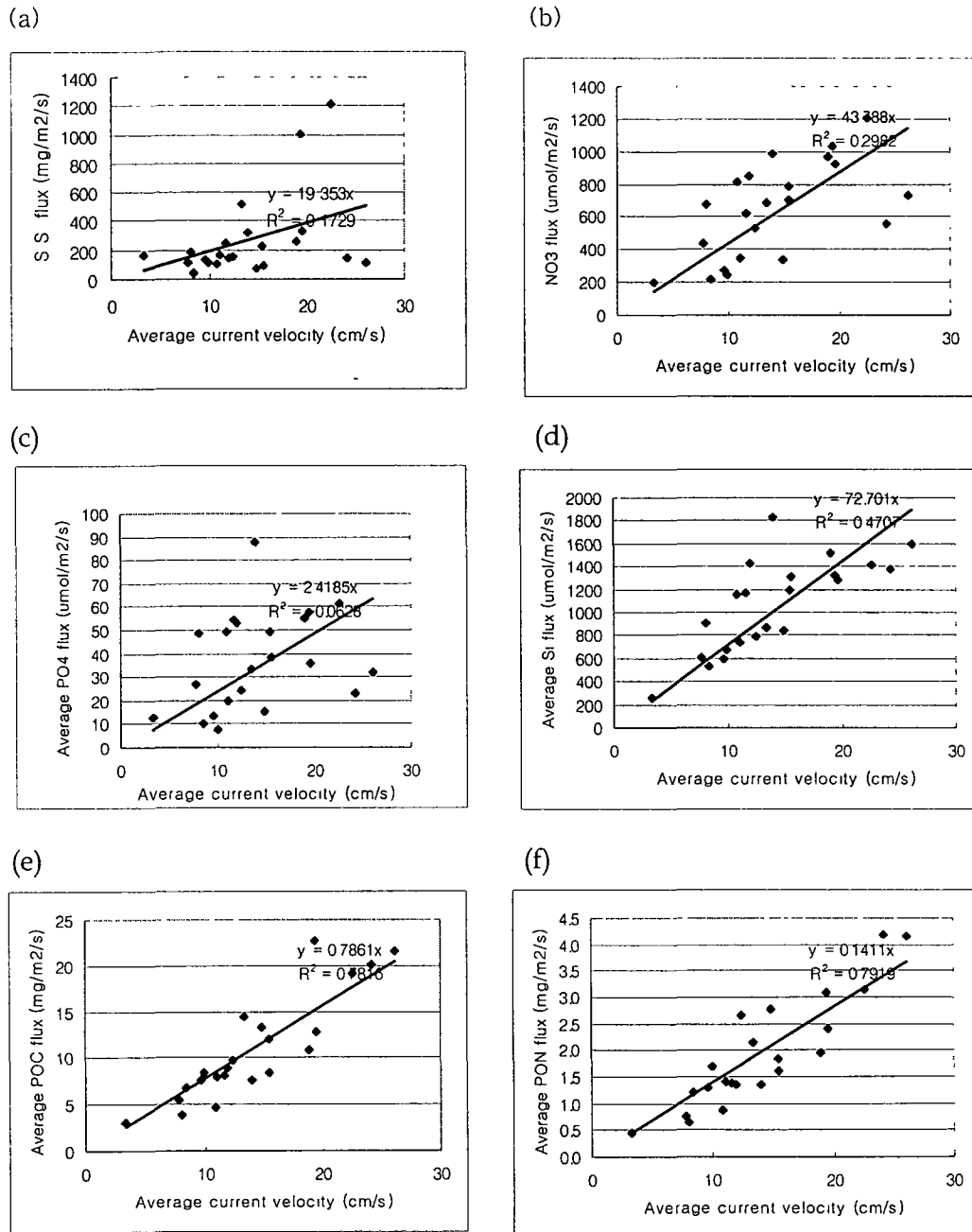


Fig. 3-9-7. The relationships between average current velocity and average SS(a), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(b), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>(c), Si(OH)<sub>4</sub>(d), POC(e), PON(f) fluxes per unit area in the Cheju Strait.

연평균 입자성부유물질, 질산이온 및 인산이온 플럭스는 해류속간에는 상관관계 ( $R^2$ )가 0.3 이하로서 뚜렷한 상관관계는 보이지 않았다. 이는 이들 물질들의 플럭스는 해류속보다는 물질농도 분포에 의존한다는 것을 의미한다. 그러나 규산 특히 입자성유기탄소 및 질소 플럭스는 해류속과의 상관관계 ( $R^2$ )이 0.7 이상으로서 입자성유기탄소 및 질소 플럭스는 해류속에 따라 좌우된다. 제주해협을 통한 화학물질 이동량을 Table 3-9-1에 나타내었다.

Table 3-9-1. Along-strait material fluxes in the Cheju Strait.

	S.S	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>
	( $\times 10^8 \text{ mg s}^{-1}$ )	( $\times 10^8 \mu \text{ mol s}^{-1}$ )			
Mar. 1997					
Eastward	3.79	1.80	13.63	31.24	15.71
Westward	-0.56	-0.07	-0.78	-0.08	-1.16
Net	3.23	1.73	12.85	1.16	14.55
Sep. 1997					
Eastward	4.28	2.91	25.06	1.61	36.19
Westward	-0.11	-0.09	-0.64	-0.04	-0.77
Net	4.17	2.82	24.42	1.57	35.42
Sep. 1998					
Eastward	6.97	1.55	37.02	2.36	57.02
Westward	-1.92	-0.44	-2.14	-0.19	-5.17
Net	5.05	1.11	34.88	2.17	51.85
Nov. 1998					
Eastward	17.8	2.10	30.0	1.60	53.40
Westward	-1.20	-0.10	-1.60	-0.10	-2.60
Net	16.60	2.00	28.40	1.50	50.80
Aug. 1998					
Eastward	9.28	1.16	27.1	1.1	58.20
Westward	-0.30	-0.05	-0.60	-0.01	-1.86
Net	8.98	0.56	27.50	1.09	56.34

제주해협을 통해 교환되는 총 입자성부유물질 플럭스중 9월 (78%)을 제외하고는 90% 이상, 질산이온을 포함한 용존무기영양염류는 전계절에 걸쳐 93% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 남해로 유입된다. 즉 서향류에 의해 제주해협을 통해 남해에서 황해 및 동중국해로 빠져나가는 화학물질의 양은 동향류에 의해 황해에서 남해로 들어오는 화학물질의 양의 1% 미만으로 무시할 만 하다.

## 9.4. 토의

### 9.4.1. 남해분지규모의 화학물질 플럭스

남해로 유입되는 주요 해류로는 제주해협을 통해 유입되는 제주해류와 제주-큐슈사이를 통해 유입되는 대마난류를 들 수 있다.

현재까지 조사된 국내의 해류 및 화학물질 농도자료들을 인용하여 남해분지규모의 화학물질 플럭스를 추정하였다 (Table 3-9-2).

Table 3-9-2. The comparison of chemical material transport in the Cheju-Korea Strait region.

Current	Cheju Current	Tushima Current	Cheju+Tushima	Kuroshio (Chen et al 1994)
Area	Cheju Strait	Cheju-Kushiu	Korean Strait	East of Taiwan
Area width (km)	100	200	166.2	300
Water depth(m)	100	150	101	1000
Water transport(Sv)	0.52	2.97	3.49	29.5
Average NO <sub>3</sub> (uM)	4.91	2.68	3.08	5.88
Average PO <sub>4</sub> (uM)	0.31	0.2	0.29	0.40
Average Si (uM)	9.41	5.88	6.94	13.43
Average S.S. (mg/l)	0.75	0.3	0.44	-
Total material flux				
NO <sub>3</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	1.92	7.96	10.75	173.5
PO <sub>4</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	0.12	0.59	1.01	11.8
Si (x10 <sup>9</sup> umol/s)	3.26	17.46	24.22	396.3
S.S (x10 <sup>9</sup> mg/s)	0.73	0.89	1.54	-
Normalized with width and depth				
NO <sub>3</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	1.92	3.70	6.40	5.78
PO <sub>4</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	0.12	0.28	0.60	0.39
Si (x10 <sup>9</sup> umol/s)	3.26	8.12	14.43	13.21
S.S (x10 <sup>9</sup> mg/s)	0.73	0.41	0.91	-
Normalized with water transport				
NO <sub>3</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	1.92	1.39	1.60	3.06
PO <sub>4</sub> (x10 <sup>9</sup> umol/s)	0.12	0.10	0.15	0.21
Si (x10 <sup>9</sup> umol/s)	3.26	3.06	3.61	6.99
S.S (x10 <sup>9</sup> mg/s)	0.73	0.16	0.23	-

여기서 하천 및 강우에 의해 남해로 유입되는 담수 및 화학물질 유입량은 자료 부족으로 인해 제외되었으나, 남해 해수 총부피중 강우 및 하천으로부터 유입되는 담수량은 미미할 것으로 사료된다.

제주-큐슈간 해협을 통한 해수수송량 자료는 전무하여 대한해협 (동, 서수도 포함) 수송량에서 제주해협을 통한 수송량을 뺀 나머지를 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 들어오는 해수수송량으로 산정하였고, 화학물질 농도들은 본 연구결과와 동중국해 자료 (한국해양연구소, 1997)를 인용하였다.

제주해협 (제주해류)을 통해 남해로 들어오는 평균 입자성부유물질, 질산이온, 인



산이온 및 규산 플럭스는 각각  $0.73 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$ ,  $1.92 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $0.12 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $3.26 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$  이다.

반면에 대한해협을 통해 동해로 나가는 입자성부유물질, 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각  $1.5 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$ ,  $10.7 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $24.2 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$  이다. 제주-큐슈간 해협을 통해 들어오는 입자성부유물질, 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각  $0.9 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$ ,  $8.0 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $0.59 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ,  $17.4 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$  이다.

따라서 대마난류에 의해 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 들어오는 화학물질들의 총 플럭스는 제주해협을 통한 유입량보다 약 3~4배 크다. 제주해협과 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 유입되는 질산이온 플럭스는 약  $10.6 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ 로서 대한해협을 통해 동해로 빠져나가는 양 ( $10.7 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ )과 거의 같다. 그러나 인산이온 ( $0.75 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ ) 및 규산 ( $22.3 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ )의 경우에는 대한해협을 통해 나가는 인산이온 ( $1.0 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ )과 규산 ( $24.2 \times 10^9 \mu \text{ mol s}^{-1}$ )의 양보다 약간 작다.

그러나 이러한 플럭스는 해수수송량의 차이에 따라 달라질수 있기 때문에 이들 해류에 의한 화학물질 수송량의 상대적인 기여도를 추정하기 위해 대마난류 (평균  $0.297 \text{ Sv}$ )와 제주해류 (평균  $0.52 \text{ Sv}$ )의 해수수송량 (volume transport)간의 차이에 따른 비율로 화학물질 수송량을 표준화 (normalize)를 통해 타해역과 비교하였다.

해수 순 수송량에 계절별 화학물질 평균농도를 곱하여 구한 제주해협 통과 연간 화학물질 플럭스는 부유물질이  $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ , 암모늄이온은  $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 질산이온은  $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 인산이온은  $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 규산은  $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ 이다.

타 해역의 비화학물질 플럭스 (specific chemical material flux)를 제주해류의 해수수송량으로 표준화하여 비교하면, 제주해류를 통해 남해로 유입되는 비입자성부유물질 연간 플럭스 (specific suspended sediment flux)는 대마난류 (제주-큐슈;  $7.25 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ ) 및 대만동부에서 쿠로시오에 의한 수송량 ( $7.25 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ ; Chen et al., 1994) 보다도 약 3배 크다.

비질산이온 및 인산이온 플럭스는 대마난류 (제주-큐슈;  $5.05 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ), 쿠로시오 ( $9.65 \times 10^{10}$ ,  $0.47 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )에 의한 수송량과 유사하나, 양자강 ( $3.0 \times 10^{10}$ ,  $0.06 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ) 및 황하강 ( $0.5 \times 10^{10}$ ,  $0.002 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )을 통한 연간 방출량보다 질산이온은 약 2-12배, 인산이온은 약 6-180배 정도 높다 (Zhang, 1996; Chung et al., 1999). 또한 지중해 동부에 위치한 오란토 해협을 통해 아드리아해로 빠져나가는 질산이온 ( $2.9 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ) 및 인산이온 ( $0.095 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ )에 비해서는 각각 약 2배 및 3.7배 높아 제주해협을 통한 물질 유입이 상당함을 알 수 있다 (Civitarese et al., 1998).

결론적으로 풍부한 화학물질들을 함유한 제주해류가 남해의 생지화학적 과정들에 있어서 상당히 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다. 또한 나아가서 동해의 생지화학 과정에 상당히 중요한 역할을 한다.

## 9.5. 결론

1. 입자성부유물질, 질산이온 및 인산이온 플럭스는 해류속보다는 농도에 의존하지 만, 규산 특히 입자성유기탄소 및 질소 플럭스는 해류속에 따라 좌우된다.
2. 제주해협을 통해 교환되는 총 입자성부유물질 플럭스중 9월 (78%)을 제외하고는 90% 이상, 질산이온을 포함한 용존무기영양염류는 전계절에 걸쳐 93% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 남해로 유입됨으로서 황해 및 동중국해 의 환경변화에 따라 남해에 상당한 영향을 미칠 수 있다.
3. 제주해협을 통과하여 남해로 들어오는 연간 화학물질들의 플럭스 (gross flux)는 부유물질이  $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ , 암모니움이온은  $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 질산이온은  $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 인산이온은  $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ , 규산은  $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$  이다.
4. 제주해류에 의해 남해로 유입되는 연간 입자성부유물질 플럭스는 대마난류 (제주-큐슈) 및 대만동부의 쿠로시오에 의한 수송량보다 약 3배 크다. 비질산이온 및 인산이온 플럭스는 대마난류 (제주-큐슈) 및 대만동부의 쿠로시오에 의한 수 송량과 유사하나, 양자강 및 황하강을 통한 연간 방출량보다 질산이온은 약 2-12 배, 인산이온은 약 6-180 배 높다. 또한 지중해 동부에 위치한 오란토 해협을 통 해 아드리아해로 빠져나가는 질산이온 및 인산이온에 비해서도 각각 약 2배 및 3.7배 높다. 이는 풍부한 화학물질들을 함유한 제주해류가 남해의 생지화학적 과 정들에 있어서 상당히 중요한 역할을 하고있음을 시사한다.

## 제 4 절 저서생물 생화학 특성

### 1. 서론

우리나라 남해안과 서해안을 중심으로 널리 벌려져 있는 대륙붕은 대양과 육지의 경계면에 해당되는 해역으로 양쪽 모두의 특성을 고루 가지고 있는 매우 특이한 해역이다. 대륙붕을 물이 찬 육지로 볼 수도 있는 반면 일부 육지를 물 빠진 대륙붕으로 보아도 된다는 견해도 있다. 특히 복잡한 해안선을 갖고 있는 남해안은 대륙붕이 잘 발달되어 있고 여기에는 많은 하천들이 연결되어 있어 육지로부터의 육수 유출에 따른 육상 물질의 유입, 그리고 공간적으로 육지에 인접하고 있어 바람 등의 영향에 의한 육상 물질의 유입이 지속적으로 이루어지고 있는 곳이다. 또 육지에 인접한 대륙붕의 경우 육상에서의 공업화가 진행됨에 따라 항만, 임해 공단의 조성에 의한 여러 가지 산업 부산물들과 폐수들의 유입 또한 심각한 수준에 달하고 있다. 또한 육지 지역의 강우에 의한 담수 유입의 영향도 가장 직접적으로 나타나는 해역이기도하다. 또 한반도 남단과 제주도 사이의 제주해협은 대륙붕의 특성과 함께 서해와 남동해를 연결하는 길목으로서의 중요성도 가지고 있다. 이 해역에서 물질의 흐름은 한반도 주변 해역 전체의 물질의 흐름을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 기대되고 있다.

지구과학자들의 견해를 빌지 않더라도 대륙붕은 육지의 성격을 다분히 가지고 있는 해양환경으로서 그 동안 수심이 얕은 탓도 있어 많은 조사가 이루어져 왔다. 특히 대륙붕으로는 앞에서 언급한 바와 같이 육지로부터의 많은 물질의 유입이 있고 이들 중 질소화합물이나 인산염등은 미세조류들의 영양원으로 이용되어 적조등 미세조류의 대번식의 원인중의 하나로 지목되고 있기도 하다. 이러한 영향은 먹이사슬에 따라서 분해자인 세균이나 저서동물의 번식에도 영향을 주게되어 대륙붕은 육상 유래 혹은 해양유래 미생물들이 혼재되어 있고 동시에 수많은 저서 생물들의 서식처가 되고 있다. 이들 중 전 해양에 존재하는 동물 종의 약 90%를 이루고 있는 저서 동물은 비록 그 절대 수에 있어서는 어류 등을 따르지 못하지만 그 종의 다양함에 있어서는 바다의 실질적인 주인이라는 주장도 제기되고 있다. 육상으로부터 유입되는 이러한 유기 혹은 무기 물질들 이외에도 생물학적 유입 역시 중요한 문제가 될 수있다. 특히 유기물질들의 유입에는 필연적으로 이들에 혼재되어 있는 세균이나 곰팡이등의 육상 유래 미소 생물들이 포함되어있고 이들의 영향은 이들이 물질로서는 적은 양이라하더라도 생명체이므로 이들의 생리의 결과에 의한 전체 물질의 운명은 크게 영향 받을 수도 있다.

대륙붕 해역은 대개의 경우 낮은 수심으로 육상 물질의 유입뿐만 아니라 생물활동이 왕성하며 특히 연안지역의 대형 해조류나 연중 생활사에 따라 특히 하절기에는 해조류의 계절적 소멸에 따른 다량의 유기물질이 용해되는가하면 지속적인 광합성으로 무기물의 흡수 동화가 이루어지는 해역이기도하다. 인간 경제활동의 결과 생성되는 이산화탄소의 흡수도 대형 해조류의 탄소동화작용으로 높을 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 남해 대륙붕의 물질 순환에 관한 생지화학적 연구의 일환으로 생물 유래 물질로서 소위 Biomarker의 가치를 갖는 지방 성분의 물질들 중 특히 일반 탄화수소와 지방산의 종류 및 조성을 각 해역 별로 조사하고 이와 동시에 남해 대륙붕에 서식하는 몇몇 주요 저서 생물들의 생화학 물질의 조성을 밝히고 생물 공학적으로 유용한 성분의 존재 여부를 밝힘으로써 이들의 존재가 새로운 부존자원으로서의 가능성도 타진하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 해수 및 해저 퇴적물에서 균주의 분리

#### 2.1.1. 균주 분리용 배지 및 조성

균주 분리는 일반 eubacteria와 방선균을 대상으로 하였으며 주로 사용된 배지는 eubacteria의 경우 ZoBell 배지를 사용하였고 방선균의 경우는 Bennet 배지와 M3-I 배지를 사용하였다. Bacto-peptone, Bacto-yeast extract 등 배지 성분은 주로 Difco 제품을 사용하였고 배지에 사용된 해수는 냉암소에서 숙성시킨 해수를 솜을 채운 filter로 여과하여 고형 물질을 제거하고 사용하였다. 기타 배지성분에 들어가는 시약은 Sigma 제품을 사용하였으며 배지의 조성은 아래와 같다.

#### ZoBell medium

Bacto-peptone	5 g
Bacto-yeast extract	1 g
FePO <sub>4</sub>	10 mg
Aged sea water	750 ml
Distilled water	250 ml
(Bacto agar)	20 g : 고체 배지의 경우

#### M3-I medium

Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.732 g
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.466 g
NaCl	0.29 g
Na-Propionate	0.2 g
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.1 g
CaCO <sub>3</sub>	0.02 g
KNO <sub>3</sub>	0.01 g
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.2 mg
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.18 mg
MnSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.002 mg
Cyclohexamide stock solution	10 ml

Thiamine-HCl solution	10 ml
Aged sea water	750 ml
Distilled water	250 ml

(Bacto agar 20 g, 고체 배지의 경우)

Bennet ' s medium

Glucose	2 g
peptone	2 g
Malto extract	1 g
Yeast extract	1 g

Aged sea water	750 ml
Distilled water	250 ml

(Bacto agar 20 g, 고체 배지의 경우)  
PH 7.2

### 2.1.2. 시료 채취 및 접종 방법

시료 채취는 1999년 2 월과 1999년 8월 2 회 실시되었다. 주된 해양 시료는 주로 해수로서 각 정점에서 깊이별로 1 liter의 해수를 취하여 현장에서 GF/F glass fiber filter로 여과하고 여과지는 냉동보관하여 실험실로 운반하였다. 해수 시료는 70 % Ethanol로 멸균된 1 liter 들이 Nalgene bottle에 담아 실험실로 운반하여 처리하였는데 Eubacteria는 10 ml, 50 ml의 해수를 0.22 um membrane filter로 여과하여 이 filter를 ZoBell plate에 올려 25 °C에서 3 일 간 관찰하며 배양하여 형성된 colony를 다시 새로운 ZoBell plate에 3 차 streaking하여 순수 분리하였다. 방선균은 일정량의 해수 (100 ml, 500 ml)를 0.22 um membrane filter로 여과한 후 젖은 상태의 여과지를 유리 petridish에 넣어 60 °C의 oven에서 1 시간동안 건조시켜 포자를 형성하지 않는 대부분의 일반 세균을 제거한 후 이를 M-3I 혹은 Benette 배지 위에 올려놓고 7 일간 배양하여 형성되는 colony를 분리하였다..

남은 해수는 solid phase extraction을 위하여 ODS-cartridge (Spe-pak ODS, 600 mg, Milipore Co.)에 흡착시켰다.

### 2.1.3. 균주 분리 및 장기보존

각 정점에서 채집된 시료로부터 분리된 균주들은 고체배지에서 순수 배양한 후 30 % glycerol을 함유하는 멸균된 해수에 현탁하여 -70 °C에서 장기 보존하였다.

## 2.2. 해수 및 해저퇴적물로부터 지방 성분의 분리

### 2.2.1. 해수로부터 지방 성분의 분리

C-18 Sep-pak cartridge 흡착방법.

채수된 1 liter의 해수는 GF/F filter paper (pore size 0.45 um)로 여과하여 미생물을 포함한 particulated material을 제거한 후 C-18 (ODS) Sep-pak cartridge (Packing volume 5 ml)를 통과하여 유기성분을 흡착시키고 이를 20 ml의 증류수로 세척하여 염분과 약하게 흡착된 비지방성 유기 물질을 제거하고 나서 20 ml의 MeOH을 사용하여 지방 성분을 elution하였다. 강하게 흡착된 성분의 제거를 위하여 n-hexane으로 추가 용출할 경우도 있었으나 이 경우 용출되는 양이 미미하여 정성적인 분석에서는 생략하였다. 용출된 분획은 Rotavaor로 solvent를 제거한 후 Folch solution 5 ml를 가하여 시료를 녹인 후 여기에 녹지 않는 비지방성 물질들을 filtration하여 제거하였다. ODS cartridge에 흡착되는 용존 유기물에는 amino acid, sugar, 일부 nucleic acid 등이 있으나 이들은 Folch solution의 주성분인 chloroform에 용해되지 않으므로 이러한 방식으로 제거할 수 있다. Folch solution에 용해된 지방 성분을 다시 농축한 후 조성을 알기 위하여 TLC 분석을 수행하였다. TLC plate는 Merck 사에서 구입한 silica gel F254 plate를 사용하였다.

전개 용매 : 중성지방 : n-hexane : diethyl ether : formic acid (80:20:0.2)  
인지질 : CHCl<sub>3</sub> : MeOH : DW (65:35:5)  
전체 지방 : n-Hexane : Diethyl ether (1 : 1)

이와는 별도로 Pyrex 재질의 cap-tube에 옮겨진 총 지방성분에 5 % Methanolic HCl 0.4 ml를 가하고 80 °C에서 1 시간 반응 시켜 complex lipid 상태로 존재하는 지방산 들을 지방산 메틸 에스테르로 transmethylation을 완결하였다. 반응이 종결된 후 이 시료에 0.5 ml의 증류수를 가하고 다시 1 ml의 n-hexane으로 3 회 추출한 후 n-hexane 층을 모두 취하여 이를 silica column (packing volume: 1 ml)에 흘려 fatty acid methyl ester 성분을 흡착 시킨 후 추가로 3 ml의 n-hexane으로 column을 세척하여 흡착되지 않은 hydrocarbon 성분을 완전히 용출시켰다. Hydrocarbon 성분을 따로 모으고 column을 다시 n-hexane:EtOAc (1:1, V/V)으로 흘려 fatty acid methyl ester 성분을 분리한 후 각각을 speed-vac으로 농축하여 GC로 분석하였다.

TLC-FID를 이용한 전체 지방 조성 조사

Speed-Vac evaporator (Vision Co, Korea)를 사용하여 감압 증류로 용매를 제거하여 얻어진 총 지방성분을 무게를 달아 양을 결정하였다. 이를 다시 10 mg/ml에 해당되는 농도로 chloroform에 녹인 후 ChromaRod III (Iatron laboratory, Kapan)에 microsyringe를 이용하여 각 1 ul 씩 loading 하였다. Hair dryer로 용매를 완전히 제거하고 이를 우선 인지질 전개용매를 이용하여 전체 길이의 절반 까지 전개하고 다시 용매를 제거한 후 중성지방 전개용매에서 전체길이까지 전개하였다. 이러한 방법으로 1 개의 ChromaRod에 전체 지방을 극성의 종류별로 전개시킬 수 있다. 이를 TLC-FID (Iatro-scanner, Iatron laboratory, Kapan)에서 scan speed 30 초로 검출하였다. 검출된 각 peak는 HP3395 integrator (Hewlett-Packard Co.,

USA)를 이용하여 정량하였다.

비누화 및 메칠에스테르화:

각 분획을 0.5 M KOH/MeOH 1 ml를 가한 후 80 °C에서 1 시간동안 반응시켜 saponification (비누화)를 완결하고 여기에 5 ml의 증류수를 가하고 Hexane/dichloromethane (10:1) 5 ml로 3 회 추출하여 aliphatic alkane과 aliphatic alcohol등이 포함된 중성 지방성분을 얻었다. 이를 rotary evaporator로 1 차 농축한 후 다시 Speed-Vac (Vision Co., Korea)로 50 ul까지 농축하였다. 이를 Gas chromatograph로 분석하였다.

남은 액을 5 N HCl로 pH를 2 정도로 낮춘 후 동일 용매 5 ml로 3 회 추출하여 지방산이 포함된 acidic lipid를 얻었다. 이를 농축하여 0.3 ml의 5 % Methanolic HCl을 가하여 70 oC에서 1 시간동안 반응시켜 Fatty acid methyl ester로 methylation 시켰다. 반응 액에 증류수 0.4 ml를 가하고 n-Hexane 1 ml로 3 회 추출한 후 n-hexane 층을 speed-vac으로 50 ul 까지 농축하여 GC로 분석하였다.

## 2.2.2. Gas chromatography 분석

전처리;

분석은 주로 fatty acid와 hydrocarbon을 대상으로 하였다. 시료전체를 transmethylation 시킨 후 이를 silica column에 loading한 후 hexane으로 hydrocarbon을 elution 시키고 다시 50 % EtOAC in hexane solvent로 elution 시켜 fatty acid methyl ester를 얻어 speed-vac으로 농축하여 각각 GC로 분석하였다.

분석 조건:

Gas chromatograph는 Hewlett-Packard HP5890II plus를 사용했으며 detector는 FID를 사용하였다. HP automatic sampler (100 sample capacity)와 splitless injector를 사용하였으며 injection은 hexane에 녹인 시료 1 ul를 주입하였다. Column temperature gradient를 사용하였고 (조건은 table에 명시) 사용한 column은 fatty acid methyl ester의 경우는 omegawax-320 capillary column (Supelco, USA, 30 m X 0.32 mm inner diameter)을 사용하였으며 hydrocarbon의 경우는 EC-1 capillary column (Allech Co., USA, 30 m X 0.25 mm inner diameter)을 사용하였다. Fatty acid methyl ester와 hydrocarbon의 동정은 standard sample의 retention time의 비교와 ECL (equivalent chain length)값을 계산하여 결정하였다. GC 분석에서 standard로 사용된 n-alkane과 Eicosapentaenoic acid (EPA)나 Docosahexaenoic acid (DHA) 등의 지방산은 Sigma 제품을 사용하였다. 각 peak는 Chromate data aquisition S/W (Interface Co., Korea)나 Chemstation S/W (Hewlett-Packard Co)를 이용하여 internal standard인 nonadecanoic acid methyl ester (C19:0-ME)나 tricosane (C23HC)와의 면적비교로 정량하였다.

- Condition for Gas chromatography analysis for fatty acid methyl ester and hydrocarbon.

		FAME	HC
사용 column		Omegawax-320 (0.32 cm X 30 m)	EC-1 (0.25 cm X 30 m)
Injector temp (°C)		300	300
Detector Temp (°C)		300	300
Oven temp	Ti (°C)	150	180
	Tf (°C)	260	300
	rate (°C/min)	6	6
Column head pressure (psi)		9	20

해수 및 퇴적물에서 분리된 지방 성분의 정성적인 성격확인을 위하여 H-NMR spectrum을 찍어 확인하였다. 이 방법으로는 분리된 지방 성분 중 fatty acid, aromatic 화합물, hydroxyl group의 존재, steroid 화합물의 존재 등을 확인할 수 있으며 특히 aliphatic compound의 존재가 확인될 수 있다. 그러나 본 방법은 시료의 양이 적어도 수 mg 이상을 필요로 하므로 sediment에서 추출된 지방 성분을 분석하는데는 유용한 수단이 될 수 있으나 해수나 부유물질에서의 지방 성분에는 본 연구의 경우처럼 1 liter 정도가 아니라 그 보다 훨씬 많은 양의 해수 시료를 필요로 할 것이다.

NMR 측정은 Varian Unity-500을 이용하였다. Proton NMR은 500 MHz에서 측정하였으며 chemical shift는 internal standard 인 TMS (tetramethyl silane)나 CDCl<sub>3</sub>를 이용하여 측정하였다. 모든 NMR 실험은 Varian사에서 공급한 Vnmr software를 이용하였다.



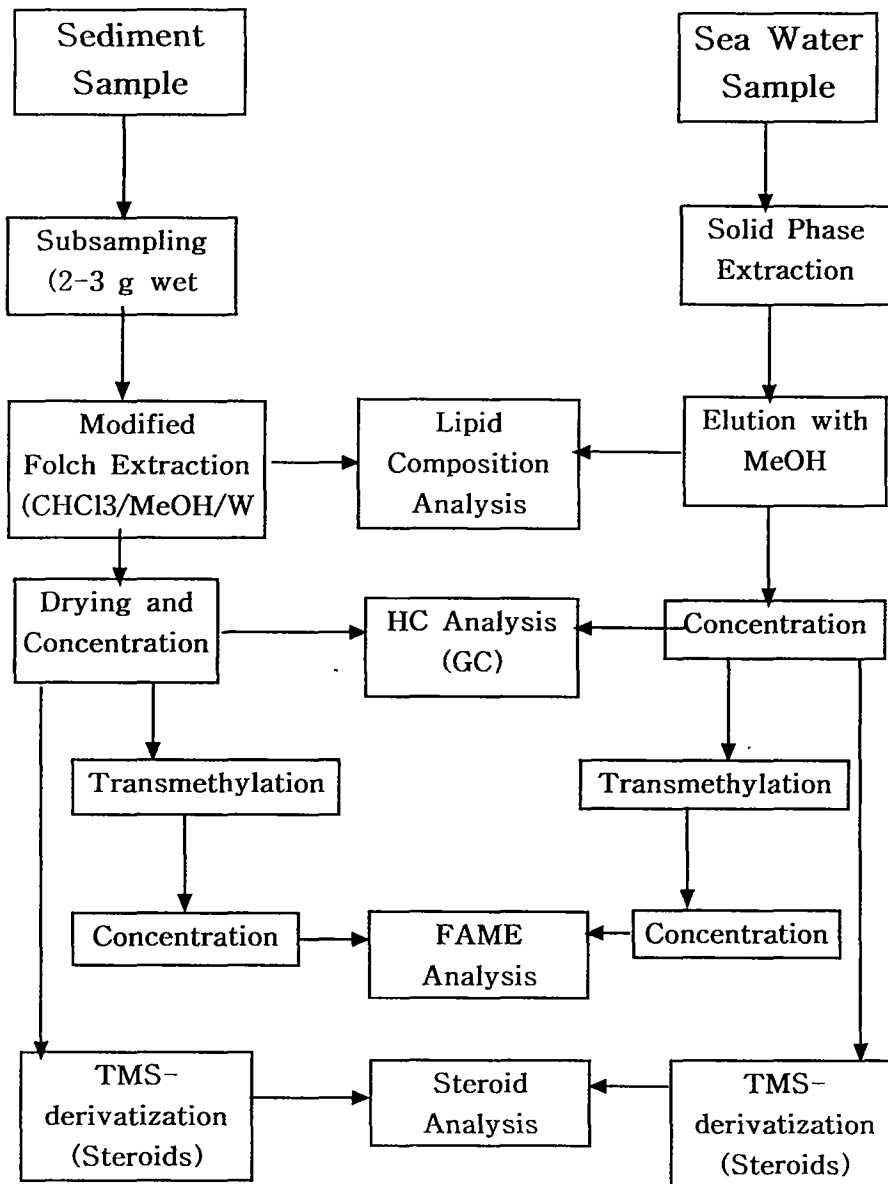


Figure 4-1. General Scheme for Lipid Analysis from sea water and sediment

### 2.3. 유용물질 생산 후보 생물의 분석

#### 2.3.1. 생물 시료의 추출 및 분석

##### 2.3.1.1. 추출 및 분획

시료 무게 1 g 당 20 ml의 MeOH를 사용하여 2 회 추출하고 유기 용매층을 제거하고 남은 고형 물질에 다시 methylene chloride (MC: Kg 당 1 liter)를 가하여 2 회 추출하였다. 다시 남아있는 시료를 잘게 갈아서 MC:MeOH (1:1) solution (Kg 당 1 liter)으로 최종 추출하였다. 추출된 유기 용매층을 모두 합한 뒤 rotavapor

를 이용하여 유기 용매를 제거하고 여기에 n-BuOH와 물의 혼합 용액 (1:1 (V/V), 2 liter)을 가하여 시료중의 salt를 n-BuOH와 물 사이의 partition을 통하여 제거한다. 여기서 n-BuOH 층을 취하여 solvent를 rotavapor를 이용하여 제거하고 silica flash column chromatography로 각 성분을 분리해낸다. Elution은 100 % n-hexane부터 5 % 씩 EtOAc의 함량을 70 % 까지 증가시켜 가면서 수행하였고 이후에는 100 % EtOAc와 acetone 그리고 최종적으로 methanol (MeOH)로 용출하였다. 각 과정은 vacuum을 걸어서 수행하였으며 elution 시키는 solvent의 양은 각 fraction 별로 500 ml 정도를 사용하였다.

#### 2.3.1.2. TLC 분석

각 분획의 유기 용매를 제거한 후 TLC로 지방 성분의 분석을 수행하였다. 전개 용매로는 n-hexane:diethyl ether (1:1) 용액을 사용하여 전개한 후 plate를 건조시켜 발색 시약 (anisaldehyde-sulfuric acid: anisaldehyde 6 ml, ethanol 108 ml, sulfuric acid 6 ml, glacial acetic acid 1.2 ml의 혼합액)을 뿌린 후 hot plate에서 10 분간 가열하여 나타나는 반점을 관찰하였다. 이 전개 용매 조건에서는 중성 지질만 이동하고 인지질의 경우 원래의 origin에서 이동하지 않으므로 중성 지질과 인지질의 대략적인 조성비를 추정할 수 있다.

#### 2.3.1.3. 분리 정제

EPA 및 arachidonic acid (AA, 20:4)의 최종 분리 정제는 HPLC로 수행하였다. Flash chromatography를 수행하여 NMR spectrum 분석 결과 polyunsaturated fatty acid의 함량이 높은 분획들을 모아 농축한 후 Maxi-clean silica cartridge (0.3 g 함유)로 filtration하여 녹지 않는 물질들을 제거하고 30 % EtOAc in n-Hexane을 solvent로 하여 3 ml/min 정도의 flow rate로 HPLC 수행하였다. 사용된 HPLC는 Spectra-Physics P-1000 mono pump (USA)를 장착하고 detector는 Reflective Index (Shodex RI-71, Japan) detector를 사용하였다. 사용된 column은 YMC-ODS semi-preparative column (1.0 X 30 cm)을 사용하였고 나오는 peak를 분취하여 농축하였다.

#### 2.4. Biomarker로서의 steroid 화합물의 분석 기법 구축

Steroid 화합물에 공통적으로 붙어있는 3-OH group은 물질의 polarity를 높이고 이에 따라 boiling point가 상승하므로 그 상태로는 GC analysis가 불가능하거나 매우 어렵다. 이러한 free OH group은 적당한 nonpolar group으로 protection하여 nonpolar 유도체로 전환시킨 후 GC로 분석이 가능한데 이러한 유도체전환에는 trimethyl silyl ether로의 전환 등 여러 종류가 있다. Pyridine, hexamethyl disilazane, trimethylchlorosilane, Bis(trimethylsilyl)acetamide, t-butyltrimethylsilyl chloride, imidazole, N,N-dimethyl formamide는 Aldrich (USA) 제품을 사용하였다.

#### -TMS-derivatization

약 10 mg의 hydroxyl 화합물을 0.5 ml의 pyridine에 녹인 후 0.15 ml의

hexamethyl disilazane과 0.05 ml의 trimethylchlorosilane을 가한다. 이 혼합물을 vortex로 30초간 섞어준 후 5 분간 방치하여 반응을 종료한다. 여기서 이 반응 액의 일부 (1 ul)를 직접 GC에 injection하여 분석할 수 있다. 또는 반응 후 rotavapor로 solvent를 제거하고 반응물을 5 ml의 n-hexane으로 추출한 후 다시 1 ml의 물로 washing한 후 무수 sodium sulfate로 건조시켜 새로운 hexane에 녹여 차후 분석을 위하여 영하 20 oC에 보존한다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 일반 세균의 분리 및 균주 보존

분리된 균주들은 각각 기질 분해능에 대한 검사를 거쳤으며 -70 °C의 초저온 냉동고에 보존하였다. 균주 분리 현황은 Table 4-1에 명시하였다.

Table 4-1. Isolation of bacterial strains with substrate digestion activities.

기질	분해효소	분리된 세균 수
단백질	- Protease	14
	- peptidase	32
지질	- Lipase	25
	- phospholipase	17
당	- Agarase	38
	- alginate lyase	4

여기서 전체 분리 균주 수 600여종 중에서 기질 분해능을 갖는 것의 함량은 비교적 낮았다. 기질 분해능력은 대개의 경우 일정 농도 이상의 기질의 존재 하에서 유도되는 특성을 갖고 있어 해당 해역에 단백질 등의 기질의 농도가 그리 높지 않음을 시사한다고 볼 수 있다. 이 결과 중 특이한 것은 해양의 대형 해조류의 주요 구성 성분인 한천 (agar)를 분해하는 효소인 agarase를 생산하는 균주가 연안 해역에서 집중적으로 분리되었다는 점이다. 이와 함께 갈조류의 주요 구성 성분인 algin 산을 분해하는 alginate lyase 활성을 보이는 몇몇 균주도 분리되었다. 본 균주는 대형 해조류에 기생하여 번식하고 해조류의 구조 성분인 agarose나 alginic acid를 분해함으로써 그 구조를 약화시켜 궁극적으로는 해조류의 사멸 과정에도 기여하는 것으로 의심받고 있다.

### 3.2. 해수 시료에서 지방성분의 추출 및 초기 분석

일반적으로 해수에 부유물질의 형태나 용해되어 있는 지방의 양은 매우 적어 이를 분석하기 위하여 회수 (추출)하는 방법에는 많은 제한이 따른다. 일반적으로 흔히 사용하는 liquid-liquid extraction 방법은 추출시료와 추출 용매의 부피비율이 1:1일 때 가장 효과적인 거으로 알려져 있다. 그런데 해수에서 이러한 방법의 사용은 작업하기에는 너무나 많은 부피의 시료와 용매를 필요로 하기 때문에 비효율적이며 그 추출 효과 역시 여러번 반복하여 수행하지 않는다면 낮은 편이다. 이러한 문제의 극복을 위하여 본 연구에서는 hydrophobic interaction adsorption을 이용한 solid phase extraction (SPE)방법을 사용하였다. 이 방법은 일종의 hydrophobic interaction chromatography로서 hydrophobic ligand를 갖는 resin에 시료를 강제이송하여 hydrophobic 물질만을 선택적으로 흡착시킨 후 이를 적당한 소량의 용매로 추출해 내는 방법이다. 본 연구에서는 HP-20 resin, XAD resin, 그리고 ODS (C18, Octadecyl silane) resin을 사용하였는데 ODS resin의 경우 cartridge의 형태로 시판되고 있어 다수 시료의 동시처리에 유용하다. 다른 resin은 실험실에서 각각 packing을 하여야하므로 실험 오차나 batch 간의 차이가 클 수 있다. ODS resin이 packing 된 cartridge의 경우는 hydrophobicity가 커서 흡착은 매우 강하게 일어나지만 미세 분말 형태이므로 flow rate를 빠르게 하는데 어려움이 있다. 이 경우 적용하는 시료의 양은 대략 200 ml- 1 liter이상도 가능하나 본 연구에서는 1 liter로 표준 조건을 설정하였다. Hydrocarbon이나 fatty acid 등의 GC 분석을 위하여서는 최소 1 mg의 지방 시료를 필요로 하는데 본 연구에서 사용한 ODS-SPE cartridge는 약 3 mg 까지의 lipid를 흡착할 수 있으므로 이 cartridge에 완전히 포화될 때까지 해수를 흘려주는 방식을 취하였다. 용존 유기물이 적은 시료의 경우는 해수에 녹아있는 nonpolar aminoacids, pigment 등 lipid 이외의 유기물들도 어느 정도까지는 ODS column에 흡착되는데 MeOH로 elution 시킨 후 solvent를 제거하고 이를 다시 Folch solution에 용해시키는 방법으로 lipid가 아닌 amino acid등의 유기물질의 제거가 가능하다. 본 연구와 같이 시료의분석이 주 목적인 경우는 작업의표준화와 함께 분석의동시성이 매우 중요하므로 가급적이면 다수 시료를 동일한 조건에서 처리하는 것이 바람직하다. 보 sdusrn에서 고안된 96-manifolder 흡착 system은 이러한 ODS cartridge와 시료병을 진공을 이용하여 동시에 96 개까지의 해수 시료를 흡착시킬 수 있다.

추출된 지방 성분을 TLC-FID로 분석한 결과는 origin에서 이동하지 않는 phospholipid와 Rf : 0.7 근처의 triacyl glycerol이 주성분임을 보여주고 있으며 이 phospholipid의 TLC 분석 결과는 대부분의 phospholipid가 choline이나 ethanol amine, serine 등의 head group이 제거된 형태로 나타나는 점도 특이한 데 이는 이러한 phospholipid들이 분해 과정에 있다는 것을 시사하고 있다. 여기서 TLC-FID 분석의 의미는 추출된 전체 지방 성분의 조성을 알기 위한 것인데 본 방법은 일단은 전체 함유 물질에 대한 정보를 얻을 수 있다는 점이다. 즉, 추출된 전체 지방 성분이 그 극성에 따라 ChromaRod 상에 배열되므로 그 물질들에 대한 대략적인 정보를 얻을 수 있다. 그러나 극성을 중심으로한 이러한 방법은 그 분석의 정확

도에서 많은 한계를 보이는데 이를 극복하기 위한 방법은 감도와 분별성이 높은 spectroscopic 방법이 권장된다. 그러나 현재 가동되는 UV-spectrophotometry나 fluorometry는 물질을 검출하는데 선택성이 높아 chromophore나 fluorophore가 없는 물질의 경우 검출이 되지 않는 단점이 있어 이 용도로는 적합하지 않다. 존재하는 모든 물질에 대한 정보를 줄 수 있는 방법으로는 NMR이 있는데 이의활용은 본 연구 분야에서 앞으로 늘어날 것으로 사료된다. 그러나 현단계에서는 NMR의 검출한계가 너무 높아 환경 시료의 경우 적용하는데 무리가 있다. 그러나 기기의 측정 민감도가 지금의 1/10까지만 높아져도 활용 도는 많이 높아질 것이다.

추출된 각 지방 성분을 transmethylation 시켜 fatty acid methyl ester와 조성에 있어서는 전반적으로 평이한 지방산 및 hydrocarbon의 조성을 보였다. 특히 지방산 조성의 경우 tetradecanoic acid (14:0), palmitic acid (C16:0)와 stearic acid (C18:0) 그리고 약간의 oleic acid (C18:1)가 주종을 이루는 전형적인 지방산 조성의 특징을 보이고 있으며 이는 앞서의 NMR 결과와 잘 일치하고 있다. 일반 적인 해양 시료의 경우 palmitic acid와 stearic acid의 비율이 1.5 : 1 정도로 나타나는데 본 시료의 경우도 대부분의 시료에서 이 범주를 벗어나지 않았다. 육상 토양의 경우는 이와는 달리 이 비율이 0.8 : 1 정도의 경향을 보이고 있으며 이에 더불어 oleic acid(18:1)의 함량이 stearic acid의 0.5 정도에 달하는 경향을 보인다. 해양 시료의 경우 여기에 해양생물 특유의 eicosanoic acid (C20:0) 계열과 docosanoic acid (C22:0) 계열의 지방산 족이 상당량 포함되어 육상 생물체의 유입과 함께 해양생물의 활동이 매우 활발함을 보여준다. 일부 site의 경우 iso-pentadecanoic acid (i-15:0)의 함량이 여타지역에 비해 높게 나타났는데 본 지방산은 육상 유래 대장균의 특이 물질로 알려져 있다는 사실을 참고할 만하다.

### 3.3. 겨울시료의 지방 성분의 분석 (99년 2월 시료)

남해 1999년도 겨울 sampling은 주로 해수를 대상으로 4 정점에서 각 깊이별로 해수를 채취하여 총 23개의 시료를 얻었다. 본 해수 시료를 일차로 GF/F filter로 여과하여 부유물질과 용해물질로 구별하고 용해물질의 지방 성분은 ODS-cartridge를 이용하여 solid phase extraction으로 회수하였다. 각 시료별로 추출된 지방 성분의 양은 용해지질의 경우 정점 S16-35m에서 0.7 mg/l로 최저값을 보이고 S14-0m에서 4.6 mg/l로 최대값을 보였다. 전반적으로는 1 mg/l 정도의 값을 보이고 있었다. 반면에 부유물질에서 추출된 지방의 양은 S10-10m에서 0.1 mg/l의 최소값부터 S7-10m에서의 4.2 mg/l의 최대값을 보였으며 전반적으로는 0.6 mg/l 정도의 값을 보이는 것으로 나타났다. 지방성분은 당이나 aminoacid와는 달리 전반적으로 부유물질에 흡착되는 경향을 보이고 있으며 용해되어 있는 지방성분도 해수와 같이 ionic strength가 높은 환경에서는 강화된 hydrophobic interaction에 의하여 결집하는 경향이 있으므로 pore size 0.7 um인 GF/F filter에 의한 여과를 기준으로 할 때 용해 지방 성분과 부유물질의 지방 성분의 비율은 해당 해역에서의 분해 활성을 나타내는 지표로 개발할 여지가 있다고 사료된다. 그 비율(Dissolved lipid/particulated lipid: D/P ratio)은 해역에 따라서 특이한 경향을 보이고 있는데

정점 S14에서 최소 1.9 (10m)에서 많게는 15.3 (0m)로 비교적 높게 나타나고 있으며 정점S10에서도 1.4 (bottom sea water)부터 10.0 (10m)의 값을 보인다. 그러나 정점 S7에서는 이 값이 비교적 낮아 bottom sea water에서 3.3으로 최대이고 10m에서는 0.3으로 전반적으로 낮은 값을 보이고 있다. 정점 S16의 경우는 0.8 - 2.1 수준의 D/P ratio를 보이고 있다 (Table 4-1).

추출된 지방 성분의 조성을 TLC-FID로 분석한 결과는 origin에서 이동하지 않는 phospholipid와 Rf : 0.7 근처의 triacyl glycerol이 주성분임을 보여주고 있으며 이 phospholipid의 TLC 분석 결과는 대부분의 phospholipid가 choline이나 ethanol amine, serine 등의 head group이 제거된 형태로 나타나는 점도 특이한 데 이는 이러한 phospholipid들이 분해 과정에 있다는 것을 시사하고 있다. 특히 몇몇 정점에서는 Rf:0.95 에 나타나는 일반 hydrocarbon이 비교적 높게 나타나는 점도 주목할 만하다. TLC-FID 분석에서 hydrocarbon이 검출되는 것은 비교적 일반 유류에 의한 오염이 다년간 지속된 sediment에서 일반적으로 나타나는 것으로 알려져 있다.

### 3.4. 탄화수소와 지방산의 조성 및 분포 조사 (99년 2월 시료)

Particulated material에서의 Hydrocarbon 분석 (Table 4-2, Figure 4-2)

정점 S7, S10, S14, 그리고 S16에서 해수 1 liter에 함유된 hydrocarbon의 조성을 조사하였다. 전반적으로 hexadecane (C16)부터 C31까지의 hydrocarbon이 검출되었으며 그 분포는 C17에서와 C26에서 2 개의 최대치를 보이는 bimodal 형태로 나타나고 있다. 이러한 경향은 98년도 4월 시료에서도 나타나고 있는 현상이다. S7의 경우 다른 정점과는 다소 다른 양상을 보이고 있는데 우선 총 hydrocarbon의 양이 다른 정점의 평균치에 비해 최대 10 배까지 높은 값을 보이고 있다. 최대값은 20 m 깊이의 시료에서 나타나고 있으며 (2642.7 ng/l) 저층 해수의 hydrocarbon 값이 가장 낮았다 (1306.9 ng/l). C17이 short chain hydrocarbon의 최대치를 보이고 있으며 pristane의 값이 C17의 약 80-90 % 정도를 나타내고 있다. C18과 phytane의 경우도 깊이 30 m에서만 20.8 ng/l의 phytane이 검출되었고 이외의 깊이에서는 검출되지 않았다 (below 0.5 ng/l). 또 모든 깊이에서 retention time 14 분 근처에서 나타나는 확인되지 않은 peak가 매우 높은 농도(247.1 at bt - 350.1 at 20 m ng/l)로 나타난다, 위치로 본 본 peak의 동정은 C22 계열의 polyunsaturated hydrocarbon으로 추정되며 chlorophyll의 side chain의 분해 결과 생기는 isoprenoid chain으로 여겨진다. 이러한 계열의 peak는 retention time 20.1 분에서 나타나는 또 다른 peak와 유사하다. Squalene으로 추정되는 본 peak는 각 깊이에서 312.8 (bt) - 1170.9 ng/l (30m)의 분포를 보이고 있다. Long chain hydrocarbon의 분포는 전반적으로 모든 깊이에서 C29를 최대로 하고 있다.

정점 S7의 또 다른 특징은 탄소수 20 개 이상의 normal hydrocarbon의 odd chain HC와 even chain Hc의 비율에서도 나타난다. 즉, 계산된 이 비율이 S7(75m)에서 0.78로 최소값을 보이고 S7(0m)에서 1.14로 최대값을 보이는 등 전반적으로 1 근처의 값을 보이고 있는데 이것은 hydrocarbon의 분포에서 최대치가 C29 임에도 불구하고 나타나는 현상으로 여기서 나타나는 대부분의 hydrocarbon이 생

물 유래가 아니고 petroleum 유래임을 보여준다. 일반적으로 생물체에 의하여 생성되는 hydrocarbon은 1 개의 탄소가 더 긴 fatty acid로 부터 decarboxylating 반응에 의하여 생산되며 생체내의 대부분의 fatty acid가 even chain이므로 결과적으로 생산되는 hydrocarbon은 odd chain이 주로 생산되게 된다.

Table 4-2. Amount of extractable lipid from sea water and particulated materials collected at Feb. 1999 (4 sites, 23 samples).

Sites	depth (m)	Amount of lipid extracted (mg/l)		D/P ratio
		DOC	POC	
S7 (7)	0	1.4	2.0	0.7
	10	1.4	4.2	0.3
	20	1.1	2.5	0.4
	30	1.4	0.3	4.7
	50	1.3	1.1	1.2
	75	1.0	1.1	0.9
	BT	1.3	0.4	3.3
S10 (7)	0	1.4	0.4	3.5
	10	1.0	0.1	10.0
	20	1.2	0.5	2.4
	30	1.5	0.6	2.5
	50	1.3	0.8	1.6
	75	1.4	0.4	3.5
	BT	1.0	0.7	1.4
S14 (5)	0*	4.6	0.3	15.3
	10	1.5	0.8	1.9
	20	1.2	0.3	4.0
	30*	1.3	0.2	6.5
	50	1.4	0.4	3.5
S16 (4)	0	1.0	0.7	1.4
	10	1.5	0.7	2.1
	20	1.4	1.7	0.8
	35	0.7	0.8	0.9

Table 4-3. Amount and compositional hydrocarbon extracted from particulated material collected at Feb 1999

Namhae 9902-SS-HC (ng/l)		s7-0	s7-10	s7-20	s7-30	s7-50	s7-75	s7-bt	s10-0	s10-10	s10-20	s10-30	s10-50	s10-75	s10-bt	s14-0	s14-10	s14-20	s14-30	s14-50	s16-0	s16-10	s16-20	s16-35
16		11.6	11.0	11.1	48.8	9.1	21.0	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	Pristane	27.3	27.0	27.5	88.2	28.0	40.3	56.1	1.5	1.5	1.0	1.0	2.7	2.7	2.5	2.3	2.7	3.2	2.6	2.8	2.4	3.8	4.4	3.3
		25.7	25.3	26.3	78.6	26.9	34.6	49.0	1.4	1.4	0.9	0.9	2.6	2.5	2.1	1.7	2.3	2.4	2.4	1.6	1.3	3.0	3.5	1.6
	NI	6.4	6.9	10.2	20.8	8.1	9.0	13.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.6	3.4	3.5	3.3	3.9	5.8	9.1	12.8	5.8
18	phytane	4.4	5.4	8.2	29.1	15.9	46.8	13.7	1.1	0.6	0.8	0.5	8.7	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	20.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	8.2	0.0	4.9	5.7	5.4	5.6	6.0	8.9	11.2	11.8	0.0
	NI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	5.3	6.7	6.4
19	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	11.4	0.0	0.0	1.4	1.7	1.6	1.5	2.3	6.6	5.4	25.0	4.8
		5.3	3.9	6.3	15.3	7.1	22.9	10.1	29.1	22.4	20.9	17.0	60.5	59.8	26.8	45.0	52.7	5.1	53.0	40.8	66.0	83.2	78.3	77.7
	NI	0.0	0.0	0.0	51.4	14.2	0.0	16.6	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	0.0	2.8	2.2	2.5	2.2	2.3	3.7	4.0	3.7	0.0	6.4
20:2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.4	0.7	1.3	3.1	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20		0.0	0.0	0.0	0.0	18.4	12.2	0.0	3.1	2.3	2.3	2.1	7.4	3.8	3.4	3.9	4.3	4.8	4.3	3.3	5.9	4.6	9.2	7.8
21:6		25.9	22.5	10.1	10.7	0.0	9.3	0.0	2.0	1.3	1.1	1.3	0.0	2.5	2.0	1.7	2.2	1.9	1.9	0.0	0.0	3.8	0.0	4.0
21		22.9	21.3	0.0	56.3	21.3	9.4	15.2	12.3	11.3	1.8	1.9	8.4	0.0	12.0	7.4	8.3	8.2	7.6	10.3	10.9	5.7	13.6	10.9
NI		330.5	335.4	350.1	275.6	317.9	238.9	247.1	39.1	28.4	26.0	25.2	35.3	40.3	31.6	21.9	32.6	33.3	36.9	31.1	44.5	53.1	41.9	53.2
22		25.8	24.6	25.4	20.6	16.7	27.3	24.7	4.5	3.5	3.6	3.8	0.0	4.5	3.9	3.4	4.4	4.3	4.4	5.5	4.7	5.3	4.1	5.2
23:1		53.1	57.2	60.1	80.9	53.1	26.8	0.0	3.4	4.0	2.4	3.3	4.7	5.1	4.5	4.4	4.3	3.6	4.0	4.1	4.2	4.9	5.5	4.9
23		57.3	52.8	45.6	54.5	39.3	43.9	35.8	3.7	3.4	3.5	3.6	1.7	4.4	4.2	4.1	4.4	4.5	4.3	4.5	4.2	6.2	4.0	4.1
24:1		28.1	40.4	65.0	67.4	67.2	43.9	27.6	3.9	2.4	1.6	2.1	3.3	4.2	2.3	3.4	3.5	3.7	3.2	4.8	3.1	14.3	4.7	2.9
24		88.7	80.9	65.8	88.4	61.8	60.5	46.8	2.9	3.3	3.5	3.3	3.4	4.3	4.6	4.8	4.4	4.8	4.2	3.6	3.7	7.1	3.9	3.0
25:1		40.0	24.9	13.6	0.0	14.9	10.6	0.0	0.8	1.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	4.2	1.5
25		46.2	41.3	13.5	0.0	29.5	10.6	14.0	2.7	7.8	5.1	0.0	5.2	0.0	2.8	1.9	2.2	2.4	2.0	2.2	2.2	9.9	0.0	2.7
SQ(?)		638.7	665.6	756.3	1170.9	998.9	801.0	312.8	51.2	59.0	58.0	44.5	50.3	44.2	62.2	49.5	56.4	50.4	49.8	44.6	40.9	70.9	75.7	34.0
26		102.9	105.2	115.2	107.4	94.9	65.6	82.3	4.6	6.1	7.6	7.1	5.9	8.4	7.1	5.8	6.5	6.2	5.9	5.2	5.4	12.1	6.8	4.0
27:1		21.8	28.9	36.3	35.8	23.3	19.8	34.5	2.1	3.0	2.3	1.4	0.0	1.6	1.8	1.5	1.7	1.6	1.5	3.2	4.9	5.0	5.3	1.9
27		98.9	93.6	91.1	132.9	76.1	71.9	85.2	3.4	4.2	4.9	4.3	4.4	5.4	5.2	5.5	6.0	5.5	5.5	4.9	4.5	11.6	5.4	3.0
28:2		0.0	0.0	61.1	0.0	0.0	0.0	67.0	0.0	0.9	1.4	0.7	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	3.7	14.0	0.0	1.8
28		69.5	71.6	75.9	72.6	58.5	76.1	58.2	5.0	3.6	4.2	3.6	3.4	4.7	4.1	4.1	4.7	4.6	4.4	4.7	0.0	0.0	4.2	2.4
29		179.5	146.1	61.8	90.0	51.4	53.0	41.3	2.5	2.8	3.1	2.4	2.5	3.4	3.2	4.9	5.5	5.8	4.9	11.6	3.3	10.0	3.8	2.7
30		83.4	61.6	28.0	33.0	26.8	39.0	0.0	0.9	1.3	1.5	1.5	1.3	1.9	1.7	2.3	2.3	2.7	2.3	2.4	1.8	8.5	1.4	0.0
31:1		0.0	0.0	54.3	65.6	0.0	68.1	65.2	0.7	0.8	1.3	2.1	0.0	2.6	2.1	3.9	3.7	3.6	3.9	5.1	2.7	0.0	0.0	0.0
31		15.9	20.4	36.6	20.6	11.9	31.0	23.9	1.4	0.0	2.2	1.8	0.0	0.0	3.6	2.0	2.2	2.4	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sum		2009.6	1973.8	2055.2	2736.5	2091.1	1893.6	1366.1	186.7	177.7	162.5	136.6	246.9	231.1	199.0	196.7	230.7	177.5	223.1	214.3	263.7	376.8	345.9	267.6
odd		420.7	375.5	248.5	354.4	229.5	219.7	215.4	26.1	29.4	20.7	14.0	22.2	13.2	31.0	25.9	28.6	28.8	26.2	33.5	32.9	40.9	36.8	23.3
even		370.2	343.9	310.3	322.1	277.1	280.8	212.1	21.2	20.1	22.8	21.4	21.5	27.6	24.9	24.4	26.7	27.2	25.4	24.8	21.5	37.4	29.7	22.3
O/E ratio		1.1	1.1	0.8	1.1	0.8	0.8	1.0	1.2	1.5	0.9	0.7	1.0	0.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.3	1.5	1.1	1.2	1.0



또 본 해역이 대륙붕 해역으로 저서 생물의 활동이 왕성한 지역이기는 하나 인간의 활동이 점차 이를 압도하는 경향을 보이는 해역이므로 이들 hydrocarbon은 인간 활동의 결과 유입된 것으로 사료된다. 정점 S10의 경우는 이와는 조금 다른데 우선 짧은 사슬 HC의 경우 최대값이 S7의 경우처럼 C17이 아니라 C19에서 나타나고 있으며 long chain HC의 경우도 C29 대신 C26이나 C28에서 나타나고 있다. 또 전반적으로 추출된 hydrocarbon의 양이 S7정점에 비하여 매우 낮게 나타나 거의 10 % 수준을 보이고 있다. 정점 S14와 S16의 특징은 short chain HC에서 C18이 거의 검출되지 않는다는 점이다. 그러나 C18에 함께 나타나는 phytane의 peak는 거의 모든 정점에서 4.9 - 11.8 ng/l의 값으로 나타나고 있다. 이것은 이 해역이 과거 oil spill 등의 사고가 있었을 가능성을 제시하고 있다. 즉 oil spill이 있었을 경우 이러한 oil 성분중의 normal chain HC는 해양에 급격히 번식한 해양 세균에 의하여 급속히 분해되고 phytane이나 pristane과 같이 petroleum 성분에 존재하나 상대적으로 분해가 늦은 성분이 남아 있게 되는 경우이다. Pristane의 경우가 해역에서는 1.7 - 3.5 ng/l 정도의 분포를 보이고 있어 S10과 유사한 농도를 보이고 있다.

Hydrocarbon의 GC chromatogram에서 얻어지는 또 다른 요인이 unresolved complex material (UCM)인데 본 시료들에서는 전범위에 걸쳐지는 UCM 보다는 주로 short chain HC 특히 C17근처에서 group으로 나타나는 UCM이 발견된다. 대표적인 것이 시료 S10(50m)인데 retention time 8 분부터 14분에 걸쳐 작은 peak들이 밀집되어 나타나는 현상이다. 이들은 탄소수로 미루어 benzen ring에 alkyl group이 붙어있는 alkyl benzen 계열로 추정된다. 이러한 경향은 정도의 차이는 있으나 정점 S14와 S16에서는 거의 모든 깊이의 해수 시료에서 발견되고 있다. 그 양은 그리 높지 않아 전체 resolved HC의 약 10-14 % 정도를 보이고 있다.

#### Dissolved hydrocarbon 분석 (Table 4-4, Figure 4-4)

9902 dissolved Hc는 particulated Hc에 비하여 매우 다른 여러 특징을 보이고 있다. 우선 동일조건에서 C19-C23에 이르는 부분인 retention time 12분부터 20분까지 뚜렷한 peak가 보이지 않는다. 그 대신 크기는 작으나 매우 넓은 범위에 걸쳐 나타나는 UCM의 몇 개 group이 관찰된다. 특히 15분 과 16분 근처 즉 C20과 C21근처의 UCM은 작기는 하나 매우 뚜렷하고 거의 모든 시료에서 나타나고 있다. 이들은 C14-C15 길이의 HC가 부분적으로 산화되어 생겨난 물질들로 추정되나 구체적인 증거는 없다. 또 다른 특징은 long chain HC의 농도가 비교적 낮게 나타나는 것으로 이는 이들 HC가 물에의 용해도가 낮아 dissolved form으로는 거의 존재하지 않는다는 점으로 이해할 수 있다. 이들 Hc는 수중 특히 해수에서 대부분 존재하는 particle들의 hydrophobic surface에 흡착되는 것으로 이해된다. Dissolved Hc의 가장 큰 특징은 C25 근처의 매우 복잡한 peak 군이다. UCM이라고 부르기에는 각 peak 들이 구별이 가능하나 뺄뺄하게 밀집되어 있는 10여개의 매우 큰 peak가 retention time 3 분의 범위 안에 나타난다. 이들은 C24와 C25의 unsaturated HC들과 branched Hc로 동정되고 있으며 그 농도는 매우 높아 전체 HC의 90 % 정도를 점하고 있다. Retention time 23.3 분의 가장 큰 peak는 squalene

Table 4-4 Amount and composition of hydrocarbon extracted from sea water collected at Feb 1999

Namhae9902-SW-HC (ng/l)		s7-0	s7-10	s7-20	s7-30	s7-50	s7-75	s7-bt	s10-10	s10-20	s10-30	s10-50	s10-75	s10-bt	s14-0	s14-10	s14-20	s14-30	s14-50	s16-0	s16-10	s16-20	s16-35
16	72	52	69	112	8.3	166	78	226	244	137	150	148	116	157	108	83	64	68	68	144	67	46	
17	69	67	87	130	98	221	95	137	163	93	122	111	10.5	144	105	92	60	63	64	140	67	57	
18	39	31	53	59	61	133	52	60	78	73	61	0.0	6.0	90	64	47	0.0	35	41	94	29	28	
19	00	00	00	00	00	00	00	34	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	21	
20	00	00	00	00	00	00	00	156	00	00	00	13.5	00	00	00	77	65	00	00	00	00	40	
21	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	04	
22	00	31	35	00	00	00	00	32	00	38	00	00	00	00	39	35	30	33	33	00	31	28	
23	79	78	79	117	13.3	93	86	106	106	111	9.2	5.3	8.3	127	111	65	75	75	75	74	61	14	
23-br	36	28	42	63	68	66	38	34	51	47	4.4	19.2	3.9	3.9	50	34	39	29	30	39	45	15	
NI	26	1.7	2.1	4.0	3.4	4.7	2.3	2.3	3.1	4.1	2.5	0.0	2.3	3.8	29	30	34	23	20	28	33	00	
24:1	148	11.9	150	216	24.3	170	150	100	21.9	163	180	12.8	15.6	25.9	189	111	13.5	116	116	11.3	136	138	00
24	158	12.5	122	23.4	265	185	171	180	21.2	184	185	10.7	16.6	25.5	183	96	11.9	117	115	12.2	118	00	
NI	44	3.3	00	00	5.5	00	00	82	59	45	50	81	00	56	44	3.3	40	41	41	55	00	34	00
NI	93	5.7	61	11.4	9.2	60	65	33	11.5	9.6	16.8	7.5	11.6	86	86	54	85	65	55	76	63	00	
NI	208	13.4	160	26.9	255	197	163	10.9	26.9	22.2	22.0	9.7	18.2	29.8	221	137	19.0	144	137	181	162	00	
25:1	71	54.6	68.5	102.5	111.2	77.2	65.7	46.6	100.8	77.2	85.2	60.9	73.3	117.9	85.9	51.8	63.9	55.8	53.0	64.3	64.5	00	
NI	168.5	146.2	184.3	227.1	302.7	171.1	172.0	112.1	289.0	163.0	241.1	63.7	219.8	301.3	228.3	144.5	145.8	154.6	126.7	126.1	147.0	2.3	
NI	388	290	354	54.9	55.1	38.1	34.2	23.8	53.7	41.8	43.3	40.1	37.3	63.6	44.0	27.1	34.0	28.2	28.6	34.2	33.8	00	
NI	14.3	11.8	15.0	21.0	23.1	16.6	13.3	9.7	21.5	15.7	17.3	10.7	15.8	24.9	17.9	10.8	12.9	11.6	10.9	12.6	13.2	00	
25	30.6	23.7	29.7	43.6	46.7	29.7	28.6	26.4	43.8	34.6	37.6	30.5	31.3	52.1	37.0	25.8	28.1	32.0	25.0	25.4	30.2	7.0	
Sq	954.5	500.1	529.4	1058.9	728.2	449.8	596.9	241.1	1083.8	931.0	897.7	2235.2	701.7	1043.9	767.9	508.7	860.5	635.8	500.4	722.3	565.3	39.4	
NI	23.4	18.5	23.4	34.8	37.0	25.4	21.0	15.9	33.5	24.8	28.6	16.6	24.1	40.0	28.1	17.2	21.0	17.9	17.3	20.2	21.8	00	
NI	6237.5	4919.9	6220.7	9175.3	9801.3	7174.8	5592.2	4230.7	8824.5	6589.5	7458.2	4603.8	6412.2	10499.2	7382.4	4581.1	5511.8	4743.7	4633.0	5518.5	5733.5	4.3	
26	23.0	16.4	16.5	35.8	22.2	21.9	14.2	20.5	65.8	43.3	43.0	79.2	26.9	45.5	31.9	21.6	28.6	18.8	20.1	30.7	19.0	1.0	
27	20.2	16.5	20.6	31.4	31.6	27.8	17.4	13.7	27.8	20.3	23.8	13.7	20.8	34.3	22.7	14.8	17.7	15.3	15.0	17.0	18.7	28	
28:1	47	40	00	00	78	00	00	00	65	47	54	57	00	76	58	00	39	49	00	00	00	00	
28	90	48	59	100	105	47.8	67	00	113	104	98	127	90	104	93	70	89	75	59	72	62	00	
28-br	50	00	00	129	59	00	67	47	63	59	52	77	00	59	52	36	50	42	00	00	52	139	
29	60.0	39.8	56.5	84.5	93.9	63.0	52.7	33.9	84.2	73.2	69.2	38.8	64.3	89.3	72.8	44.0	56.2	48.3	47.3	59.2	51.7	00	
30	101.8	20.9	41.7	87	00	00	106.9	199	00	00	151.3	128.8	84.7	155.2	101.3	27.1	79.9	45.3	64.0	177.3	50.4	25.6	
31	00	00	00	17.1	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	29.7	21.0	
32	00	00	00	00	00	00	00	7.4	00	8.3	00	11.6	00	43.9	7.8	7.4	6.5	00	00	00	00	29	
Sum	7859.7	5883.5	7335.6	11054.0	11415.8	8284.4	6820.5	4937.7	10806.8	8177.4	9238.8	7482.0	7821.6	12695.3	8971.3	5581.9	6978.4	5904.9	5625.7	6917.1	6876.5	145.6	
Odd	118.7	87.8	114.8	188.3	185.5	129.8	107.2	100.2	166.4	139.2	139.9	88.4	124.7	188.4	143.7	91.2	109.5	103.1	94.6	107.8	137.8	32.5	
Even	107.8	76.5	94.7	170.8	153.1	151.2	90.7	75.6	182.5	149.1	140.4	141.4	116.7	170.6	136.2	85.8	108.7	89.6	88.1	109.4	121.6	24.8	
O/E	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	0.9	1.2	1.3	0.9	0.9	1.0	0.6	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1	1.0	1.1	1.3	

에 해당되는 retention time을 보이고 있으나 그 함량이 internal standard를 뺀 총 HC 값의 95 %에 달하는 경우도 있으므로 이렇게 많은 squalene이 해수중에 존재한다는 사실은 설명하기 어렵다. 또 이 peak가 모든 시료에서 나오는 것이 아니라 정점 S16의 2 시료에서는 매우 낮은 농도로 검출되므로 분석 방법에 따른 systematic contamination의 가능성도 배제된다. 이 peak는 저서 퇴적물 시료의 추출물에서도 자주 검출되는 것이며 GC/MSD를 이용한 identification 시도에서 molecular ion 은 나타나지 않았으나 그 fragment pattern으로부터 다수의 이중 결합을 갖는 사슬형 화합물로 밝혀졌으며 carotenoid 계열의 화합물로 추정된다.

### 지방산 조성 및 분포 조사

해수에 부유물질이나 용존되어 있는 지방 종류 중 지방산을 포함하고 있는 종류는 triacyl glycerol 등의 glyceride 종류와 phospholipid가 주종을 이루는 것으로 여겨지고 있다. 여기에 다소간의 wax ester나 steroid ester가 포함될 수 있는데 이들은 모두 생물체에서 세포막의 주요 구성 성분이거나 저장성 지방의 형태로 생물에 포함된 것으로서 이러한 화합물로부터 지방산의 분석은 생물 유래 물질의 이동 및 분포를 확인할 수 있는 자료로 이용된다. 또한 이들 지방 성분의 화합물은 물에 대한 용해도가 낮아 수중에서 완전한 용해보다는 자체 분자들끼리 엉겨있는 양상을 보이고 있고 또 다른 종류의 수용성 생체 유래 물질들 (DNA 나 RNA 등 nucleic acid, cell wall의 주성분인 sugar 종류, 단백질이나 아미노산 등)과는 달리 단순한 확산보다는 실질적인 해수의 이동에 따른 물질의 이동을 보여줄 수 있다고 여겨진다. 여기에는 GF/F filter의 pore size인 0.45 um보다 작은 형태로 particle을 이루고 있는 경우도 존재할 수 있다.

#### Particulated Fatty acid 분석

부유물질의 지방산 조성은 매우 단순하게 나타나고 있다. 주로 palmitic acid와 stearic acid가 주종을 이루고 있으며 여기에 eicosanoic acid가 약간 적게 나타나는 형태를 이루고 있다 (Fig. 4-3). 소량의 myristic acid, heptadecanoic acid, oleic acid가 함께 나타나고 있는데 가장 큰 특징은 eicosapentaenoic acid (20:5) peak가 거의 모든 시료에서 매우 높게 나타나고 있는 현상이다. 이 지방산은 해양 생물 특유의 지방산으로서 주로 해조류나 microalgae 등의 세포막 주성분으로 알려져 있다. 본 시료가 주로 표층수와 20 m 깊이의 중층수를 중심으로 분석이 이루어졌으므로 여기서 particulated material의 주성분은 이와 같은 phytoplankton이나 이들을 먹이로 하는 zooplankton이므로 이 particulated material의 주 지방산이 EPA임은 당연할 수 있다. 그러나 EPA와 같은 polyunsaturated fatty acid는 매우 쉽게 분해되는 것으로 알려져 있어 본 해역의 particulated material은 비교적 신선한 상태임을 알 수 있다. 그러나 EPA와 함께 해양성 지방산의 주요성분인 docosahexaenoic acid (DHA, 22:6)은 거의 검출되지 않고 있다.

#### Dissolved Fatty acid 분석

해수의 용존 지방산은 특이한 사실은 발견되지 않고 주로 palmitic acid와 stearic acid가 주종을 이루는 전형적인 모습을 보이고 있다 (Fig. 4-5). 그러나 거의 모든 시료에서 retention time 16.5 분 정도의 tetracosanoic acid가 나타나고 있으며 일부 i-17:0의 함량이 palmitic acid와 비슷한 수준으로 나타나고 있어 이 시기에 본 해역에서 세균의 활동이 왕성함을 시사하고 있다. 이외에도 petadecanoic acid 등의 odd chain 지방산의 검출도 이러한 견해를 뒷받침하고 있다.

### 3.5. 여름시료의 지방 성분 분석 (99년 8월 시료)

남해 1999년도 여름 sampling은 주로 해수를 대상으로 4 정점에서 각 깊이별로 해수를 채취하여 총 22개의 시료를 얻었다. 본 해수 시료(1 liter)를 일차로 GF/F filter로 여과하여 부유물질과 용해물질로 구별하고 부유 물질은 Folch extraction 방법으로 지방성분을 추출하고 (Folch, 1957) 용해물질의 지방 성분은 ODS-cartridge를 이용하여 solid phase extraction으로 회수하였다. 각 시료별로 추출된 지방 성분의 양은 용해지질의 경우 정점 A2-0m, A2-10m 등에서 0.3 mg/l로 최저값을 보이고 A12-30m에서 1.2 mg/l로 최대값을 보였다. 전반적으로는 0.5 mg/l 정도의 값을 보이고 있었다. 반면에 부유물질에서 추출된 지방의 양은 A4-0m, A4-Bt 등에서 0.1 mg/l의 최소값부터 역시 A12-30m에서의 0.9 mg/l의 최대값을 보였으며 전반적으로는 0.6 mg/l 정도의 값을 보이는 것으로 나타났다. 용해 지방 성분과 부유물질의 지방 성분의 비율(Dissolved lipid/particulated lipid: D/P ratio)은 해역에 따라서 특이한 경향을 보이고 있는데 정점 A5에서 최소 0.6(30m)에서 많게는 7.0 (bottom)로 비교적 높게 나타나고 있으며 정점 A2에서도 1.0 (10m)부터 4.0 (20m)의 값을 보인다. 그러나 정점 A12에서는 이 값이 전반적으로 bottom sea water에서 1.3에서 0m의 2.0으로 비교적 고른 값을 보이고 있다 (Table 4-5).

추출된 지방성분의 대략적인 조성을 알기 위하여 TLC-FID를 이용하여 분석하였다. 전반적으로 TLC origin에서 전개 용매에 의하여 이동하지 않는 매우 polar한 지방성분 (phospholipid 혹은 sulfolipid)이 대부분을 점하고 있으며 이들은 일반적으로 세포막의 주성분인 phosphatidyl ethanolamine이나 phosphatidyl choline이 아니고 이들의 분해 산물인 head group이 제거된 phosphatidic acid나 지방산 1 개가 가수분해된 lysophospholipid로 생각된다. 부유물질의 지방성분의 TLC-FID chromatogram (Figure 4-6)에서 정점 A2 시료는 40m 시료를 제외하고는 hydrocarbon, triglyceride, pigment, phospholipid 등이 고르게 나타나고 있다. 그러나 40 m 해수시료의 경우 hydrocarbon 또는 wax ester에 해당되는 peak가 비교적 높게 나타나는 것을 볼수 있으며 membrane phospholipid (Rf: 0.35)의 함량도 비교적 높게 나타나고 있다. 정점 A5의 10m에서도 이러한 경향이 보이고 있으며 A5(65m) 시료의 경우 phospholipid의 조성이 매우 복잡하여 저서 퇴적물의 재부유 영향이 있는 것으로 사료된다. 정점 A9은 10m 시료에서 높은 HC의 영향이 관찰되고 있으며 0m에서는 phospholipid의 조성이 매우 복잡하게 나타나고 있다. HC와 wax ester의 영향은 100m 해수에서도 나타난다. 정점 A12의 부유물질은 대부분 살아있거나 분해가 덜 일어난 생물체 특유의 양상을 보인다. 즉, 분해과정의

phospholipid의 양이 상대적으로 적고 그 대신에 phosphatidyl ethanolamine으로 동정되는 인지질군이 가장 높은 함량을 보이고 있다. 시료 A12(20m)와 A12(30m)에서는 비교적 높은 HC의 함량이 나타나고 있으며 50m 시료에서도 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Table 4-5. Amount of extractable lipid from sea water and particulated materials collected at Aug. 1999 (22 sites).

Site	Depth (m)	Total extracted lipid (mg)		D/P ratio
		Particulated	Dissolved	
A2 (4)	0	0.2	0.3	1.5
	10	0.3	0.3	1.0
	20	0.1	0.4	4.0
	BT	0.2	0.3	1.5
A5 (5)	0	0.1	0.5	5.0
	10	0.5	0.6	1.2
	20	0.1	0.4	4.0
	30	0.5	0.3	0.6
	BT	0.1	0.7	7.0
A9 (7)	0	0.4	0.4	1.0
	10	0.1	0.5	5.0
	20	0.1	0.4	4.0
	30	0.4	0.3	0.8
	50	0.3	0.8	2.6
	75	0.4	0.3	0.8
	BT	0.2	0.7	3.5
A12 (6)	0	0.3	0.6	2.0
	10	0.5	0.8	1.6
	20	0.3	0.5	1.6
	30	0.9	1.2	1.3
	50	0.3	0.5	1.6
	BT	0.4	0.5	1.3

용존 지방성분이 부유물질에서 추출된 지방성분과 가장 큰 차이를 보이는 것은 pigment의 존재이다. 이들 pigment의 존재는 추출된 지방성분의 absorbance spectrum에서도 잘 나타나고 있는데 주로 chlorophyll 유래의 ring system이거나

carotenoid 계열로 추정된다. 이들은 주로 수용성 단백질에 결합된 형태를 취하고 있고 이들이 외부로 유출되면 GF/F filter에는 걸리지 않는 크기이므로 ODS-cartridge를 이용한 solid phase extraction에서 추출된 것으로 보인다. 거의 모든 시료에서 rf: 0.5 정도의 위치에 이 pigment 군이 나타나고 있는데 깊이나 위치에 따른 특별한 경향은 보이지 않는다. A2(10m)와 A2(40m)에서는 이러한 경향이 약화된 것으로 보이며 A5(20m)와 A5(30m)에서도 그러하다. 그러나 A2(20m)나 A5(50m)의 경우 이 pigment가 전체 추출된 지방 성분의 거의 70 %이상의 매우 높은 농도로 나타나고 있다. Hydrocarbon의 영향은 전시료에서 낮게 나타나고 있으나 A9(20m)나 A9(50m), A9(60m) 등의 시료에서는 비교적 높게 나타나고 있다. 정점 A9의 경우 비교적 지속적인 hydrocarbon의 유입이 있는 것으로 사료된다.

### 3.6 여름시료의 탄화수소와 지방산의 조성 및 분포 조사 (99년 8월 시료)

#### 9908 particulated material HC 분석 (Table 4-6, Figure 4-8)

본 시료의 HC 분포에서 나타나는 가장 큰 특징은 C22와 C23 사이에서 나타나는 큰 peak이 보인다는 점이다. 본 peak은 HC23:1로 동정되었는데 이는 C24:1 fatty acid에서 decarboxylation 반응의 결과 생산되는 생물 유래 HC로 보인다. 본 물질의 농도는 대단히 고른 분포를 보이고 있는데 A5(10m)에서 140.9 ng/l에서 A12(30m)의 198 ng/l의 수준으로 정점에 따라 거의 변화가 없는 값을 나타내고 있다. HC의 분포는 일반적인 형태 즉 C17에서와 C25에서 2 개의 최대값을 보이는 bimodal 형태이다. 또 A12(50m)에서는 56.1 ng/l인 C17보다 C16의 함량이 70.2 ng/l으로 높아지는 결과가 나타났다. 또 normal chain HC의 분포에서 C21이 A5(0m), A9(20m), A9(100m), 그리고 A12(50m)에서 거의 검출되지 않고 있으며 C26의 경우는 정점 A12의 모든 깊이의 해수에서 나타나지 않았다.

정점 A2에서는 표층수에서 1017.0 ng/l의 총 HC 값을 보이고 점차 깊이에 따라 감소하다가 저층 (40m)에서는 다시 2049.5 ng/l으로 증가하는 경향을 보인다. 특히 저층 수에서는 C26, C29, C31, C32가 거의 검출되지 않고 있다. 그러나 A2(40m)에서는 C25보다 C24 HC가 매우 높게 나타나고 있다. 본 시료에서는 C25가 불과 22.6 ng/l인데 반하여 C24는 무려 660 ng/l이며 또 C24:1 역시 135.8 ng/l의 값을 보여 A12(10m)와 A12(30m)와 함께 다른 정점과 다른 양상을 보이고 있다. 탄소수 20 개 이상의 Hc에서 odd chain HC와 even chain HC의 비율은 대략 1.2 - 1.2의 값을 보이고 있으나 저층수에서만 0.3으로 감소한다. 이는 C24의 높은 농도에 기인하는 것이며 이를 고려하지 않을 경우 다른 깊이와 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

정점 A5는 비교적 깊이에 따른 변화가 적게 나타나고 있다. C21의 경우 표층수에서 검출되지 않은 반면 C27의 경우 표층수에서만 검출되는 점이 특이하다. C26의 경우 20 m이하에서는 검출되지 않고 있다. O/E ratio는 A5(30m)의 2.3을 제외하고는 모든 깊이에서 0.9 - 1.0으로 특별한 dominance를 나타내지 않는다. A5(30m)의 경우 다른 깊이에서 비교적 높은 농도로 검출 (72.9 - 86.8 ng/l)되는 C24가 9.5

Table 4-6. Amount and composition of hydrocarbon extracted from particulated material collected at Aug. 1999

Namhae 9908-SS-HC (ng/f)	A2-0	A2-10	A2-20	A2-40	A5-0	A5-10	A5-20	A5-30	A5-65	A9-0	A9-10	A9-20	A9-30	A9-50	A9-75	A9-100	A12-10	A12-30	A12-50	A12-65
16	67.7	42.7	42.5	65.0	47.4	44.1	45.0	42.4	36.7	45.3	40.8	34.1	42.1	29.2	35.3	27.2	33.7	35.5	70.2	34.7
17	64.0	48.6	48.2	69.4	58.2	50.0	49.7	45.4	42.8	49.2	48.7	40.3	46.3	35.0	34.4	30.4	42.1	42.1	56.1	37.9
Pr	18.8	0.0	0.0	0.0	12.5	6.6	0.0	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.5	0.0
18	49.7	23.1	20.3	33.7	30.4	24.1	22.1	23.7	19.7	26.9	39.2	21.5	22.4	24.1	19.4	18.9	21.9	0.0	171.5	22.4
19	24.5	14.3	14.6	18.0	15.5	17.3	14.4	15.6	13.4	19.8	43.0	13.6	16.1	15.3	13.7	13.4	17.1	0.0	183.7	13.9
20	24.8	22.5	23.8	30.5	21.6	17.4	23.7	21.2	14.8	11.3	31.1	25.0	0.0	16.3	0.0	30.7	18.0	33.9	144.8	22.9
21	15.2	0.0	10.8	68.1	0.0	9.0	11.7	14.5	10.5	15.4	54.3	0.0	18.1	13.8	9.7	0.0	24.8	110.4	0.0	10.0
22:1	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	10.8	9.9	12.1	50.3	0.0	14.4	0.0	0.0	0.0	20.0	28.0	91.8	11.1
22	26.7	26.8	27.1	76.9	26.5	27.4	27.6	28.4	27.1	28.7	38.4	29.4	28.2	33.2	26.6	28.5	38.1	64.8	44.9	28.9
23:1	172.3	160.2	156.7	146.7	175.7	140.9	171.7	177.9	169.8	151.5	195.6	178.4	172.5	150.6	163.0	164.6	174.3	198.0	176.3	188.2
23	57.1	58.1	55.5	45.4	55.3	54.8	61.9	62.7	52.1	45.0	210.4	57.1	66.0	58.4	51.1	80.1	97.9	108.7	54.4	60.2
24:1	0.0	0.0	0.0	135.8	0.0	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	46.3	0.0	0.0	13.9	0.0	12.5	46.9	108.7	54.4	0.0
24	78.1	87.1	77.9	660.7	82.9	77.7	9.5	86.8	72.9	59.8	159.5	85.6	90.0	39.1	71.8	120.1	192.9	413.7	107.7	85.3
25:1	15.1	9.4	0.0	334.3	0.0	7.0	17.3	10.9	11.6	12.0	143.9	0.0	21.3	34.0	9.0	12.5	105.9	212.4	0.0	0.0
25	99.1	116.2	100.3	22.6	110.6	100.6	112.0	110.9	93.6	74.6	366.6	114.1	113.9	103.1	92.6	160.2	170.9	39.3	143.6	110.4
sq	18.9	0.0	0.0	115.9	14.7	0.0	0.0	0.0	9.2	9.0	52.6	0.0	0.0	21.1	0.0	21.1	45.9	83.8	0.0	0.0
26	14.8	9.3	10.1	0.0	0.0	0.0	12.3	8.6	12.0	10.5	72.3	0.0	16.3	0.0	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27:1	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3	8.4	0.0	0.0	40.1	0.0	0.0	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	22.5	11.3	0.0	91.1	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	42.1	14.0	0.0	0.0	8.7	26.2	40.9	54.6	0.0	0.0
28:1	17.6	11.4	0.0	0.0	0.0	6.8	13.7	11.2	10.4	12.0	83.2	0.0	19.9	0.0	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	15.2	9.7	16.1	53.9	14.5	0.0	8.5	24.7	9.1	11.9	49.0	11.7	17.0	0.0	11.4	12.9	21.3	0.0	46.3	11.5
29:1	16.8	14.3	11.1	32.4	12.5	10.1	0.0	10.9	8.3	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.6	0.0	0.0	0.0	14.7
29	20.4	14.3	12.2	0.0	0.0	7.9	19.3	10.2	15.0	15.3	75.9	14.4	22.3	18.2	18.5	0.0	18.3	32.2	0.0	0.0
29-br	0.0	10.6	0.0	29.1	0.0	0.0	8.9	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0
30	23.4	17.2	14.3	19.9	13.0	13.4	20.2	11.0	16.5	15.5	81.4	16.3	24.9	26.7	24.6	11.8	22.7	61.7	0.0	10.4
NI	26.6	24.5	20.8	0.0	14.7	18.8	27.1	16.1	19.2	27.6	89.7	25.8	29.6	40.4	42.6	22.7	29.3	91.6	0.0	18.4
31	21.1	21.7	16.3	0.0	15.7	15.9	21.8	15.5	14.4	21.9	75.6	24.9	30.6	35.3	42.7	15.9	28.2	103.0	42.4	19.5
32:2	24.8	21.6	15.5	0.0	14.7	16.3	22.8	0.0	14.9	30.3	68.1	29.5	26.7	37.2	45.3	15.3	30.4	140.9	0.0	15.7
32	44.4	43.5	40.2	0.0	38.8	65.2	22.1	74.9	41.5	0.0	50.1	82.4	15.8	44.1	0.0	104.6	29.4	47.6	1059.3	23.5
32-br	23.6	36.3	16.9	0.0	0.0	17.2	23.4	11.4	19.9	56.6	65.3	39.5	28.3	48.3	49.0	0.0	36.9	113.9	42.1	28.0
sum	1017.0	865.7	751.1	2049.5	796.2	748.5	795.8	871.2	765.3	784.3	2313.5	857.6	882.7	851.4	794.6	982.4	1307.9	2091.0	2570.7	767.5
odd	235.4	221.5	195.1	227.3	202.7	188.2	226.7	213.8	185.6	183.6	824.8	224.5	251.0	228.8	223.3	282.3	381.0	414.4	257.8	200.1
even	202.6	193.5	185.7	811.4	175.7	183.8	100.2	234.4	179.0	126.5	450.7	225.3	192.3	143.2	144.3	277.9	304.4	587.8	1258.3	159.6
O/E	1.2	1.1	1.1	0.3	1.2	1.0	2.3	0.9	1.0	1.5	1.8	1.0	1.3	1.6	1.5	1.0	1.3	0.7	0.2	1.3

ng/l로 낮은 값을 보이는데 기인한다. 정점 A9에서는 역시 C26이 표층과 10 m 깊이에서만 나타나고 있으며 C27의 경우도 이와 비슷한 경향을 보인다. O/E ratio는 1.0에서 1.8의 분포를 보여 약한 odd dominance가 나타나고 있다. A12 정점은 다소 다른 정점과 다른 점을 보이는데 우선 A12(50m)에서 C16이 70.2 ng/l로 C17의 56.1 ng/l보다 높은 값을 보인다. 그리고 A12(0m)와 A12(10m)에서는 long chain HC의 일반적인 최대값인 C25 대신 C24에서 최대값을 보이고 있다. C26의 경우 모든 깊이에서 나타나지 않고 있으며 또 A12(50m)에서는 very long chain Hc인 C32가 1059.4 ng/l의 높은 값을 보여 O/E ratio를 0.2로 나타나게 한다.

#### 9908 dissolved HC 분석 (Table 4-7, Figure 4-10)

1999년 여름 남해 해수의 용존 HC의 Gc chromatogram에서 나타나는 가장 큰 특징은 retention time 23.4 분 근처 (HC25와 HC26 사이)에서 나타나는 보편적인 UCM과 이 UCM의 중심부의 매우 큰 peak이다. 이 peak은 9902 시료의 HC chromatogram에서도 정점 S7의 모든 깊이의 해수에서 나타났는데 retention time으로는 squalene에 해당되는 위치이며 GC/MSD 결과도 여러 개의 branched isoprenoid unit을 가진 것으로 나타나고 있다. 이들의 함량은 매우 높아 전체 HC의 약 80 % 이상을 점하고 있으며 시료 A2(20m)와 A12(20m)에서만 적게 나타나고 모든 시료에서 공통적으로 관찰된다.

정점 A2에서는 표층의 경우 dissolved HC의 양이 33094 ng/l의 높은 값을 보이고 있고 A2(20m)에서 484 ng/l의 최소 값을 보인다. 최대농도를 보이는 n-HC는 C30에서 나타나고 있으며 유류 오염 등에 의한 정규분포 형태의 HC 조성은 나타나지 않는다. Short chain Hc는 C19에서 최대 값을 보이고 있으나 이 역시 정규분포 형태는 나타나지 않고 있다. 정점 A5의 경우 표층 수에서 전형적인 UCM이 나타나고 있는데 그 분포는 retention time 12 분에서 33 분에 걸친 거의 전 구간에서 뚜렷이 보이고 있다. 이 UCM은 bimodal 형태로 나타나는데 UCM-1은 C20 근처에서 최대값이 나타나고 UCM-2는 C30 근처에서 최대값을 보인다. HC의 분포는 C28을 최대로 하는 정규분포 형태를 나타내고 있으며 short chain HC의 영향은 미미하여 주로 C20 이상의 HC 만으로 구성되어 있다. 이러한 정규분포 형태는 중간 깊이의 해수에서는 나타나지 않고 있다가 A5(65m)에서 다시 나타난다. 즉, A5(0m)와 A5(65m)의 HC 분포는 그 양상이 매우 유사하며 C28에서 최대값을 보이는 점도 동일하다. 반면에 중간 깊이의 해수 (10m, 20m, 30m)의 경우 최대 HC가 C30이며 squalene의 영향이 상대적으로 높고 long HC의 정규 분포가 나타나지 않는다는 점에서 차이를 보인다.

#### 지방산 조성 분석

해수에서의 지방산 조성은 hydrocarbon의 분석에서 나타났듯이 육상 유래 생체 물질의 유입을 보여주는데 모든 정점에서 dodecanoic acid가 검출되고 있으며 odd chain fatty acid인 tridecanoic acid와 pentadecanoic acid등이 검출되고 있다. 이와 동시에 eicosanoic acid 계열과 EPA의 검출은 해양 생물의 활동의 결과인데 상대적으로 낮게 나타나고 있고 육상 유래 물질 유입의 추적자로 흔히 이용되는



Table 4-7. Amount and composition of hydrocarbon extracted from sea water collected at Aug. 1999

Namhae 9908-SW-HC (ng/l)		A2-0	A2-10	A2-20	A2-40	A5-0	A5-10	A5-20	A5-30	A5-65	A9-0	A9-10	A9-20	A9-30	A9-50	A9-75	A9-100	A12-10	A12-30	A12-50
17	50.2	20.2	0.0	22.3	0.0	24.8	26.7	22.6	0.0	60.2	0.0	26.8	20.4	27.6	0.0	9.3	28.5	23.0	21.8	
pr	85.9	0.0	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.6	0.0	0.0	0.0	64.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9
18	54.9	11.5	0.0	15.5	0.0	47.3	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	27.6	12.9	0.0	10.6	23.9	16.4	0.0	0.0
py	149.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.9	0.0	62.3	0.0	0.0	0.0	62.2	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	11.5
19	235.8	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.8	21.7	15.4	13.6	18.4	85.8	0.0	0.0	0.0	0.0
20	31.4	15.3	0.0	17.2	0.0	26.3	19.9	21.5	0.0	41.2	30.5	31.3	0.0	42.4	12.6	0.0	0.0	0.0	18.8	13.7
21	68.0	10.5	15.5	15.7	18.8	0.0	19.6	43.0	0.0	0.0	23.2	22.8	8.3	0.0	13.9	0.0	17.1	20.3	11.7	11.7
22:1	0.0	26.1	15.4	22.4	25.8	24.4	19.0	59.8	32.9	32.4	14.4	41.2	28.3	35.0	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	139.2	11.4	33.0	28.4	82.4	33.4	63.0	117.1	39.8	42.1	45.2	0.0	39.6	0.0	23.6	21.2	27.1	27.5	27.5	27.5
23:1	107.2	136.7	104.9	118.5	33.7	123.3	140.7	152.0	31.7	145.0	139.8	145.1	167.5	130.6	140.8	136.7	137.9	175.0	184.8	184.8
23	273.5	34.3	38.6	876.6	16.6	37.7	69.0	123.6	73.2	55.0	46.0	8.6	27.7	7.7	63.0	27.7	39.6	1.0	0.0	0.0
NI	76.8	45.0	0.0	56.6	0.0	74.1	47.9	69.5	0.0	49.0	87.1	81.2	10.6	106.3	30.3	66.9	61.7	71.2	26.8	26.8
24:1	225.7	113.7	0.0	221.8	91.1	257.7	131.3	255.8	46.3	171.8	261.9	256.8	31.6	312.8	54.1	108.1	127.3	228.7	73.5	73.5
24	225.7	113.7	38.1	47.1	442.2	55.6	42.7	47.7	437.2	36.1	56.6	51.5	13.0	50.0	23.5	36.6	38.8	50.4	31.5	31.5
25:1	224.0	56.2	5.3	213.7	37.0	199.4	34.2	88.0	613.6	43.3	143.4	168.4	66.1	214.7	118.0	150.5	169.8	158.5	50.9	50.9
25	217.6	113.7	82.9	142.2	690.4	107.5	134.0	96.1	551.6	196.5	38.9	64.3	33.9	104.2	69.8	91.9	32.6	230.1	112.6	112.6
sq	30080.0	16247.3	5.3	5188.8	7923.2	24452.5	18702.1	24226.6	5038.4	4245.8	25781.0	55.5	5847.3	27092.5	10071.6	16850.4	17617.9	22391.1	13494.4	13494.4
26	0.0	11.5	10.4	14.9	676.3	0.0	22.5	71.0	628.8	0.0	16.7	32.4	20.0	0.0	0.0	34.1	0.0	0.0	0.0	11.5
27:1	67.3	26.8	0.0	50.9	36.9	74.3	86.4	68.6	31.1	19890.4	63.7	74.1	17.3	82.4	44.8	82.2	24.7	15.9	66.3	66.3
27	58.9	33.0	0.0	42.7	31.2	50.1	37.9	50.7	661.1	55.9	55.4	54.5	11.3	60.7	19.0	36.0	35.7	47.3	26.5	26.5
28	187.1	102.9	0.0	138.8	732.4	148.2	102.7	153.4	0.0	43.8	155.3	136.0	36.9	167.5	65.0	94.1	104.4	142.5	76.4	76.4
29:1	0.0	0.0	96.7	0.0	0.0	0.0	0.0	34.6	630.9	0.0	20.2	20.2	0.0	0.0	0.0	44.4	20.1	21.7	14.0	14.0
29	82.9	52.0	3.8	65.0	39.1	76.1	52.8	74.0	36.1	44.9	91.6	77.6	14.8	108.4	33.2	55.7	61.1	77.3	32.2	32.2
29-br	34.5	23.6	0.0	29.5	580.0	32.5	22.6	40.0	503.5	55.2	38.9	31.7	0.0	53.0	13.3	21.9	26.5	33.7	12.4	12.4
30	358.2	191.1	0.0	251.4	85.7	293.0	218.2	310.9	97.2	0.0	318.5	300.1	66.0	337.2	114.3	207.8	215.6	282.8	160.9	160.9
30-br	0.0	0.0	3.6	0.0	266.3	269.3	215.6	0.0	0.0	0.0	0.0	85.8	318.5	66.6	0.0	287.4	0.0	17.1	490.6	490.6
31	28.2	0.0	0.0	0.0	83.5	0.0	0.0	0.0	71.7	307.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	31.3	27.6	26.5	27.1	44.0	34.0	41.0	37.7	36.5	477.3	45.6	32.8	28.2	496.2	37.4	121.0	38.9	40.3	24.3	24.3
Sum	33094.1	17453.2	484.7	7607.2	12209.1	26461.6	20232.6	26094.8	9708.8	26129.3	27533.4	1889.1	6800.9	29691.9	10957.3	18630.0	18871.6	24125.2	15003.3	15003.3
Odd	729.2	243.4	140.9	1142.3	1075.3	290.1	293.7	364.0	1436.7	659.7	255.1	227.8	96.1	281.0	198.8	211.3	186.0	375.9	183.0	183.0
Even	910.2	430.6	81.4	480.5	2019.0	530.2	421.5	646.0	1280.3	119.6	589.2	565.2	135.9	594.3	202.8	396.3	380.0	502.7	307.8	307.8
O/E	0.8	0.6	1.7	2.4	0.5	0.5	0.7	0.6	1.1	5.5	0.4	0.4	0.7	0.5	1.0	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6

tetracosanoic acid (24:0)도 고르게 검출되고 있으며 특히 A-2 정점에서 강하게 나타나고 있다 (Fig. 4-9). Hydrocarbon의 경우는 공업 활동의 결과 나오는 불완전 연소 연기 등 aerosol이 바람을 따라 이동하여 강우시 해수로 유입될 수 있으나 지방산의 경우는 하천 및 해류의 운동 결과 유입되는 것이 주된 경로로 생각된다. 해수는 각 정점에서 깊이별로 채수 분석하였는데 A2 정점의 경우 표층수와 저층수(40 m)에서 매우 특이하게 다량의 tetradecanoic acid와 iso-pentadecanoic acid (i-15:0)가 검출되어 해수 중 세균의 활동이 매우 활발함을 보여주고 있다.

정점 A5의 경우는 특이한 경향을 보이고 있지 않으며 거의 모든 깊이의 해수에서 매우 유사한 지방산 분포를 보이고 있는 등 지방산의 조성이 안정된 형태를 보이고 있으며 깊이가 깊어짐에 따라 단순화하는 경향 등 전형적인 해수 중 지방산 조성의 특징을 잘 보여주고 있다. 높은 palmitic acid의 함량은 이 해역에 과거 bloom이 있었음을 추정하게 해준다. 이 시료에서는 또 oleic acid의 함량도 매우 높게 나타나고 있고 odd chain fatty acid도 고르게 검출되고 있어 퇴적물 근처에서 미생물의 활동이 활발한 해역으로 여겨진다. 표층 해수에서 linolenic acid (18:3)의 함량이 매우 높는데 이 지방산은 일부 육상 식물의 주요 지방산일 뿐 아니라 식물성 plankton의 엽록체에 다량 함유되어 있는 것으로서 식물성 plankton의 bloom 후 침전된 형태가 아닌가 추정된다.

A9 역시 깊이별로 해수를 분석하였다. 10 m 깊이에서 매우 복잡한 지방산 조성을 보이고 있는데 이들 중 상당수는 동정이 불가능한 형태였다 (Figure 4-9). 그러나 20 m부터 저층 100m까지는 비교적 단순한 지방산 분포를 보이고 있다. 모든 깊이에서 tetracosanoic acid가 검출되는 등 육상 물질 유입의 흔적을 보여주고 있으며 eicosadienoic acid (20:2)가 나타나고 있다. 본 지방산은 해양 생물 특유의 지방산으로 일부 패류나 동물성 plankton 그리고 해조류 등에서 주로 발견되는 것으로 알려져 있다.

### 3.7. 해수중 지방 성분의 독성 조사

남해 대륙붕 해역의 해수 중에 함유된 지방 성 물질들이 저서 생물에 미치는 영향은 그동안 환경 홀몬 등으로 여러 차례 논의되어왔다. 본 연구에서는 이러한 영향이 인체 등에 미치는 독성에 대한 고찰을 위하여 본 연구실에 구축되어있는 cancer cell line (human myeloma leukemia K-462)을 이용하여 독성 실험을 수행하였다. 주로 분석된 시료는 남해의 겨울 해수 시료로서 주로 독성은 particulated material에서 추출된 지방 성분에 의하여 나타나고 있음을 알 수 있다 (Table 4-8).

특히 정점 S16의 경우 모든 깊이의 해수 시료에서 20  $\mu$ g에 의하여 전체 세포의 절반이 죽는 독성을 보였다. 또 정점 S14의 10m 해수와 30 m 해수에서도 더 높은 독성이 검출되었는데 S14(30m)시료의 경우는 dissolved lipid에서 이러한 독성이 나타났음은 주목할 만하다. 이는 인간 활동의 결과 유입된 지방성분, 특히 석유 유래 화합물의 독성일 수도 있으나 마비성 독소를 생산하는 phytoplankton에 의한 것일 가능성도 있다. 물론 본 시료의 채집 시기가 겨울로서 그러한 phytoplankton의 대량 번식이 일어나는 시기와는 시간적으로 큰 차이가 있으므로 이 독성은 수용성 유

기화합물로서 그 분해가 어려운 물질로 사료된다.

Table 4-8. Toxicity of lipophilic compounds extracted from South sea water (9902).

Sites	Viability	
	DOC	POC
S7-BT	0.420	0.417
S7-0	0.558	0.405
S7-10	0.471	0.760
S7-20	0.437	0.618
S7-30	0.422	0.662
S7-50	0.445	0.664
S7-75	0.464	0.465
S10-BT	0.784	0.492
S10-0	0.866	0.420
S10-10	0.476	0.306
S10-20	0.631	0.422
S10-30	0.530	0.442
S10-50	0.736	0.314
S10-75	0.582	0.910
S14-0	0.477	0.564
S14-10	0.508	0.163
S14-20	0.511	0.512
S14-30	0.195	0.474
S14-50	0.939	0.681
S16-0	0.735	0.302
S16-10	0.647	0.313
S16-20	0.824	0.345
S16-35	0.581	0.319
Control (+)	0.546	
Control (-)	0.129	

### 3.8. 저서생물의 지방산 조성 및 유용성분 정제

남해안에 서식하는 저서 생물 중 해조류 10 종류를 선택하여 그 주요 지방산 성분을 분석하였다. 대상 생물 선정은 주로 남해안 전 지역에 걸쳐 보편적으로 분

포하는 것으로서 그 개체수가 많아 그 유용 성분이 확인되었을 경우 실제 이용가능성이 높은 것을 택하였다. 고려 대상에는 식용으로 이미 많이 사용하고 있는 대형 해조류도 포함되었으며 주안점을 두고 관찰된 대상 물질로서는 지방 종류중에서 비교적 그 약리학 적 유용도가 높은 것으로 인정되고 있는 linolenic acid (18:3), arachidonic acid (20:4), eicosapentaenoic acid (20:5), 그리고 docosahexaenoic acid (22:6) 등의 고도불포화 지방산의 생산 여부에 두었으며 대형 해조류를 중심으로 툯 (*Hizikia fusiformis*), 참도박 (*Pachymeniopsis elliptica*), 진두발 (*Chondrus ocellatus*), 그리고 비단풀 (*Ceramium kondoi*) 등 4 종류의 해양 저서 식물에서 이 지방산의 함유가 발견되었다.

### 3.8.1. 툯 (*Hizikia fusiformis*)의 지방산 조성

툯은 갈조식물 모자반과의 바닷말로서 조간대 하부에서 큰 군락을 이루며 한반도 남해안을 중심으로 매우 널리 분포하고 있으며 쉽게 대량으로 채집할 수 있고 양식이 추진된 바 있는 경제성도 가지고 있는 종류이다. 식물체는 섬유상의 뿌리를 가지고 직립하며 줄기는 원주상이고 1회 우상으로 가지가 갈라진다. 보통 10~60 cm로 크지만 제주에서 나는 것은 1 m 이상 자란다. 잎은 하부에서만 볼 수 있고 다육질이며 작고 가장자리에 톱니가 있다. 잎은 곧 떨어지는데, 가지 중 작은 것은 곧봉모양을 하며 얼핏 보아 잎과 같이 느껴진다. 늦여름부터 초가을에 발아하여 가을의 중순경에는 육안으로 볼 수 있는 크기에 이르고 12월 말까지는 20 cm 내외로 자라며 이듬해 3~4월에는 급격히 성장하며 기포도 생긴다. 4~5월에 생식기관이 형성되고 기부만 남긴 후 유실(流失)된다. 이 식물은 칼슘·요오드·철 등의 무기염류가 많이 포함되어 있어, 혈관경화를 막아 주고, 상용으로 먹으면 치아가 건강해지며 머리털이 윤택해지고, 임신부인 경우에는 태아의 뼈를 튼튼하게 해 주는 등 예로부터 기호식품의 하나로서 특히 일본 사람들이 잘 먹는다. 최근 한국의 남해안에서 자연산을 채취하여 이식양식(移植養殖)을 시도하고 있는데, 그것은 아직도 포자에 의한 양식법이 개발되지 못하고 있기 때문이다. 한국에서는 주문진 이남에서 서해안 장산곶까지 생육하고 남해안과 제주에서 잘 자란다.

SCUBA로 채집된 시료를 Folch 용액으로 추출한 후 추출된 지방성분을 TLC로 분석하였다. 전개 용매는 n-hexane과 diethyl ether (1:1) 혼합 용매를 사용하였는데 이 경우 triacyl glycerol (TAG), diacyl glycerol (DAG)등 중성지질 (neutral lipid)은 용매를 따라 각각의 성질대로 이동하지만 생체막의 주성분인 phospholipid는 origin에 남게된다. 전체 지방 성분을 silica column에 흡착하고 polarity에 따라 100% hexane부터 에틸아세테이트 (EtOAc) 함량을 5 % 씩 증가시켜 가며 용출시킨 flash chromatography 결과 얻어진 분획을 농축하여 TLC를 수행한 결과를 보면 10 % EtOAc in hexane까지는 주로 triacyl glycerol이 주종을 이루고 있고 15 %부터 45 %까지는 유리 지방산과 diacyl glycerol등이 나타나고 있으며 phospholipid의 함량이 점차 증가하는 것으로 나타나고 있다. 전체 지방산의 조성을 보면 palmitic acid (16:0)가 12.2 %로 주종을 이루고 있으나 stearic acid(18:0)와 oleic acid(18:1)는 함량이 매우 낮아 각각 3.2 %와 2.4 %를 점하고 있고 arachidonic acid (20:4)와 eicosapentaenoic acid (EPA, 20:5)가 각각 6.9 %와 13.4 %를 점하고 있다 (Table

4-8). 이외에 linolenic acid (18:3)과 octadecatetraenoic acid (18:4)의 함량이 매우 높아 각각 9.6 %와 18.3 %를 보이는 고도불포화 지방산 다량 함유 해조류이다.

### 3.8.2. 참도박 (*Pachymeniopsis elliptica*)의 지방산 조성

홍조식물 지누아리과의 바닷말로서 식용으로는 그리사용하지 않는다. 식물체는 엽상(葉狀)이고 질기며, 흔히 상부가 여러 조각으로 열개(裂開)하여 기부는 줄기 모양이 된다. 생육 장소에 따라서 체형의 변화가 심하고, 빛깔도 암홍색·갈홍색 또는 흑자색 등으로 다양하게 변한다. 호료(糊料)로 이용된다. 경북·남해안 일대에서 흔히 생육한다. 도박풀을 만들 때 사용한다.

시료의 추출 및 정제는 톳의 경우와 동일하며 지방산의 조성은 EPA가 27.5 %로 가장 높게 나타나고 있고 arachidonic acid가 7.0 %로 나타나고 있다. 이외에 여타 지방산으로는 palmitic acid가 19.4 %, tetradecanoic acid (14:0)이 10.7 %이며 oleic acid가 1.6 % 정도로 EPA의 함유가 높았다 (Table 4-15). 또 특이한 것은 매우 흔한 지방산인 stearic acid의 함량이 1.6 %로서 매우 낮게 나타나고 있고 tridecanoic acid (13:0)의 함량이 4.8 %로 비교적 높게 나타나 해양 공생 미생물의 존재를 시사하고 있다.

### 3.8.3. 진두발 (*Chondrus ocellatus*)의 지방산 조성

홍조식물 돌가사리과의 바닷말. 조간대 중부 이하에서 흔히 자란다. 식물체는 편평한 엽상(葉狀)이고, 각상근(殼狀根)에서 모여난다. 가느다란 췌기꼴의 짧은 줄기와 그 상부로 여러 번 차상(叉狀)으로 갈라지는 가지가 있어서 전체적으로 부채꼴을 한다. 체형의 변화가 심하며, 빛깔은 홍자색·녹자색·홍황색 등 다양하다. 7~8종이 생육하는데 호료(糊料)의 원료로서 이용도가 높아 다량 채취되는 종이다 그러나 식용으로는 별로 사용하지 않는다. 한국의 전연안 및 일본에 분포한다. 유럽에서 'irish moss' 라고 부르는 것은 이 속에 속하는 'C. crispus' 이며, 한국에는 생육하지 않는다.

시료의 추출 및 정제는 위와 동일하며 지방산의 조성은 참도박과 유사하여 arachidonic acid가 4.5 %이고 EPA가 가장 높게 나타나고 있어 (21.1 %) 산업용 원료의 가능성이 있다. 여타 지방산으로는 palmitic acid가 17.4 %, stearic acid가 3.6 %, oleic acid가 3.5 % 정도이고 tetradecanoic acid (14:0)이 12.3 %이며 tridecanoic acid (13:0)의 함량이 11.9 %로 매우 높게 나타나 해양 공생 미생물의 존재를 시사하고 있다 (Table 4-8).

### 3.8.4. 비단풀 (*Ceramium kondoi*)의 지방산 조성

홍조식물 비단풀과의 바닷말. 조간대 바위 위 또는 다른 해조류에 착생한다. 식물체는 5~50 cm이고 홍자색을 띠며 원주상의 가느다란 사상체(絲狀體)를 이룬다. 차상(叉狀) 또는 3~4차상으로 분지(分枝)하고, 작은 돌기 모양의 가지를 내거나 내지 않는 것, 가지 끝이 똑바르거나 편셋 모양으로 휘는 것 등 여러 가지가 있다. 이른 여름에 번식하며, 채집하여 한천(寒天) 제조의 부원료로 이용된다. 한국·일본·사할린 등지에 분포한다. 비단풀속은 비단풀 외에 단박(C. boydenii)·깃꼴비단풀(C.

japonicum) · 털비단풀(*C. tenerrimum*) 등 10여 종이 한국에서 발견되고 있다.

시료의 추출 및 정제는 위와 동일하며 지방산의 조성은 참도박과 유사하여 arachidonic acid가 4.5 %이고 EPA가 가장 높게 나타나고 있어 (21.1 %) 산업용 원료의 가능성이 있다. 여타 지방산으로는 palmitic acid가 17.4 %, stearic acid가 3.6 %, oleic acid가 3.5 % 정도이고 tetradecanoic acid (14:0)이 12.3 %이며 tridecanoic acid (13:0)의 함량이 11.9 %로 매우 높게 나타나 해양 공생 미생물의 존재를 시사하고 있다 (Table 4-9).

Table 4-9. Fatty acid composition of *Antithamnion nipnicum* and *Glacilaria verucosa*.

Fatty acid	<i>Hizikia fusiformis</i>	<i>Pachymeniopsis elliptica</i>	<i>Chondrus ocellatus</i>	<i>Ceramium kondoii</i>
13:0	0.2	4.8	11.9	19.7
14:0	8.2	10.7	12.3	6.7
15:0	1.0	1.2	0.5	0.6
16:0	12.2	19.4	17.4	11.0
16:1 (n-7)	8.7	15.2	4.8	7.9
18:0	3.2	1.7	3.6	4.7
18:1 (n-9)	2.4	1.7	3.6	1.1
18:2 (n-6)	3.4	2.3	4.5	1.5
18:3 (n-3)	9.6	0.9	5.8	1.4
20:0	1.2	2.6	2.2	2.7
20:4 (n-6)	6.9	7.0	4.5	1.3
20:5 (n-3)	13.4	27.5	21.1	26.5
other FA	29.6	5.0	7.8	14.9
total	100	100	100	100

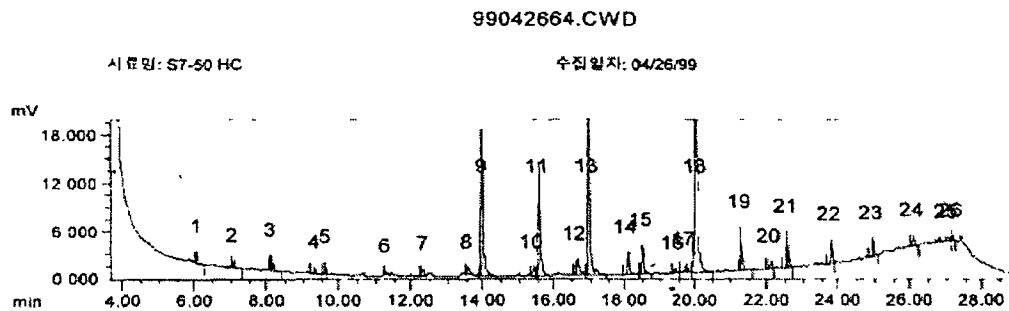
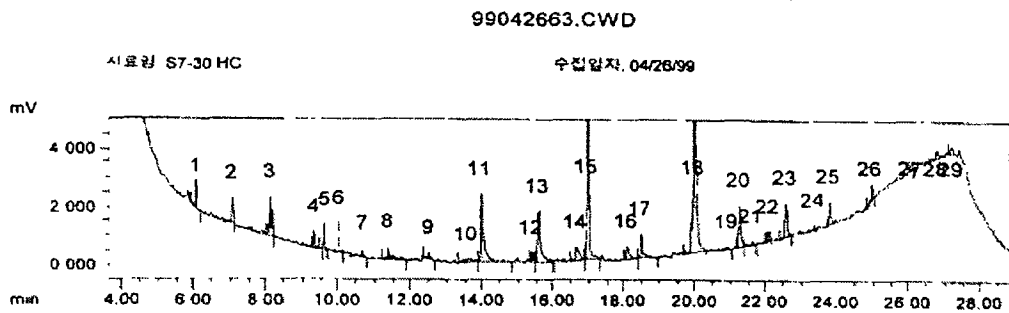
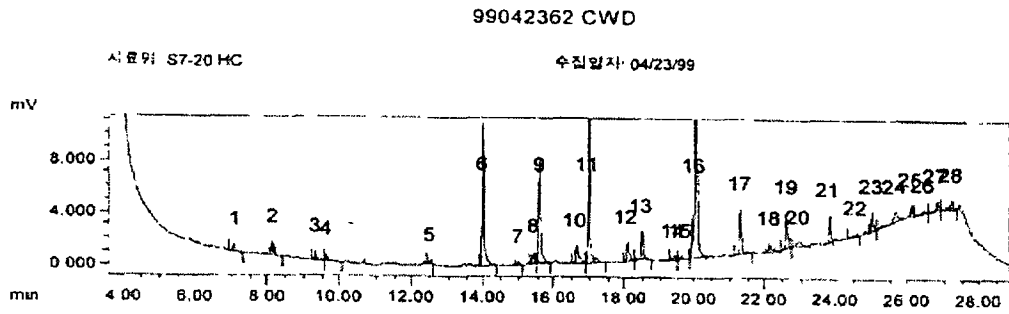
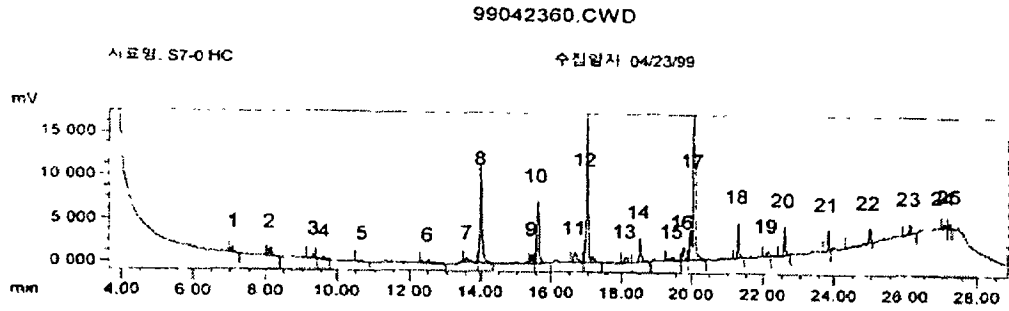
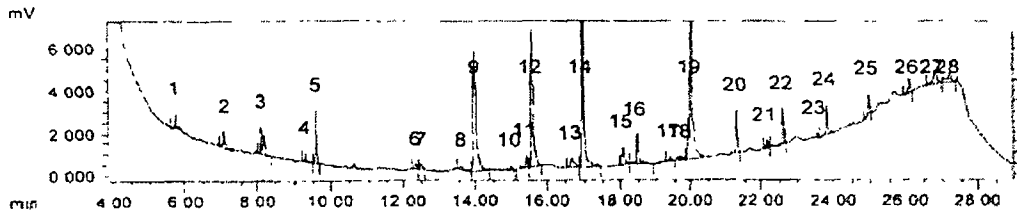


Figure 4-2. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from particulated material in sea water collected at Feb. 1999

99042665.CWD

시료명 S7-75 HC

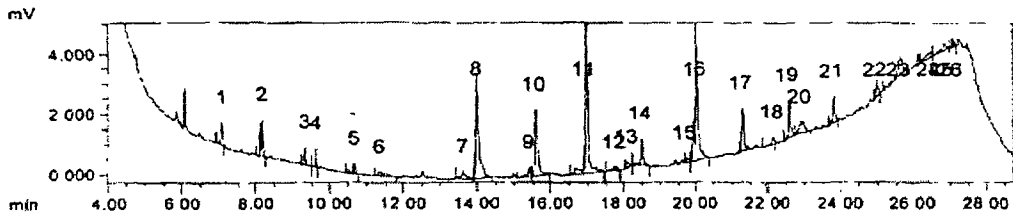
수집일자 04/26/99



99042359.CWD

시료명 S7-8T HC

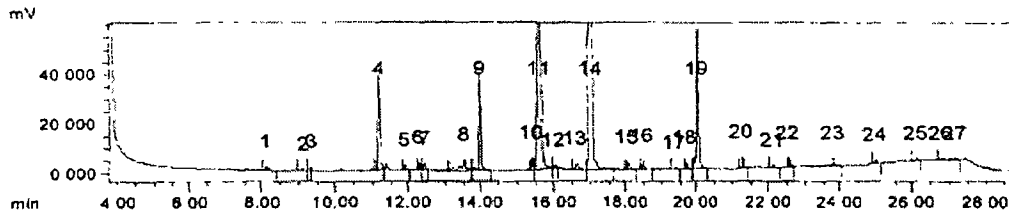
수집일자 04/23/99



99042667.CWD

시료명 S10-0 HC

수집일자 04/26/99



99042668.CWD

시료명 S10-10 HC

수집일자 04/26/99

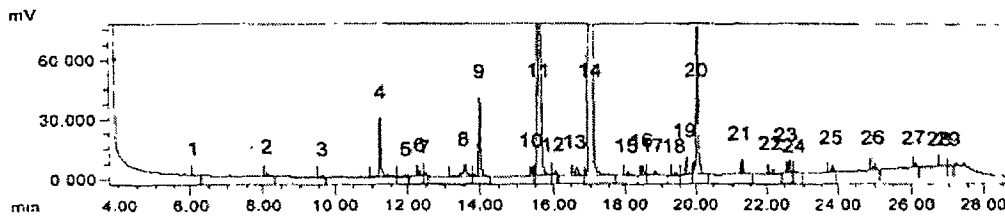


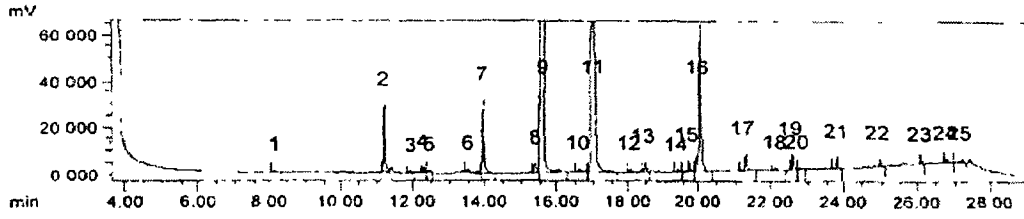
Figure 4-2. continued.



99042669 CWD

시료명: S10-20 HC

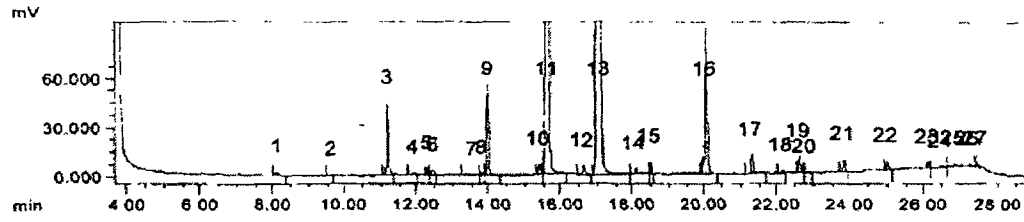
수집일자: 04/26/99



99042670.CWD

시료명: S10-30 HC

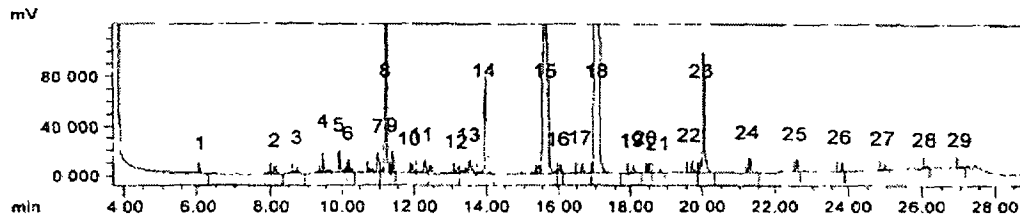
수집일자: 04/26/99



99042671.CWD

시료명: S10-50 HC

수집일자: 04/26/99



99042672.CWD

시료명: S10-75 HC

수집일자: 04/26/99

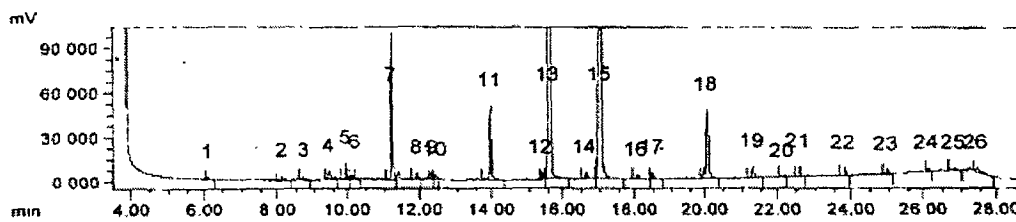
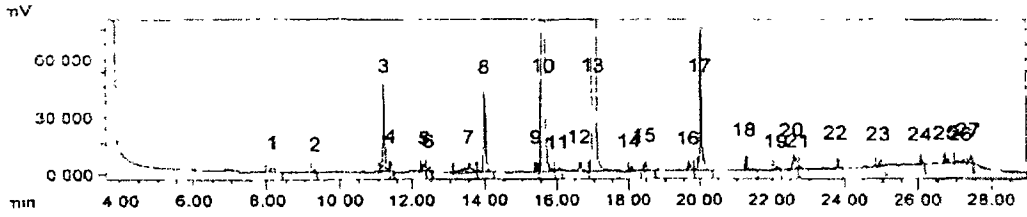


Figure 4-2. continued.

99042666.CWD

시료명 S10-BT HC

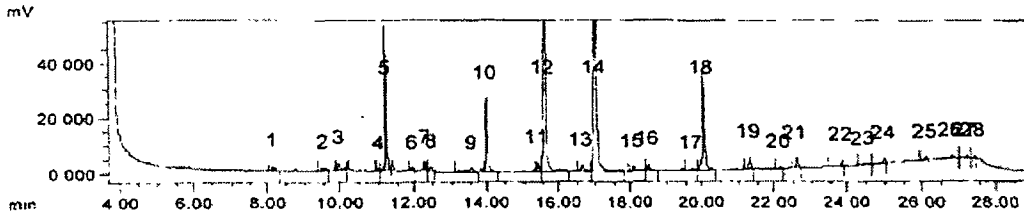
수집일자 04/26/99



99042776.CWD

시료명 S14-30 HC

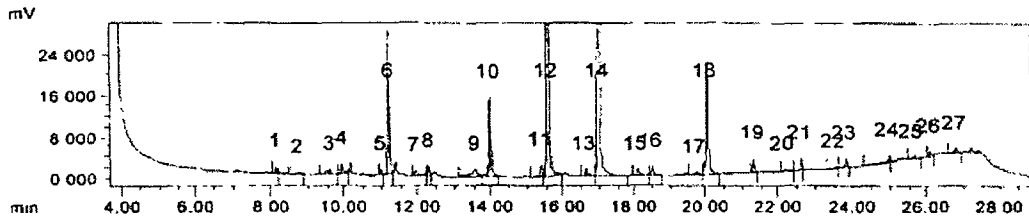
수집일자 04/27/99



99042777.CWD

시료명 S14-50 HC

수집일자 04/27/99



99042778.CWD

시료명 S16-0 HC

수집일자 04/27/99

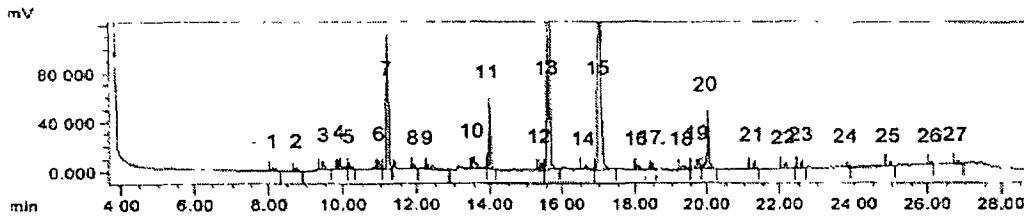


Figure 4-2. continued.

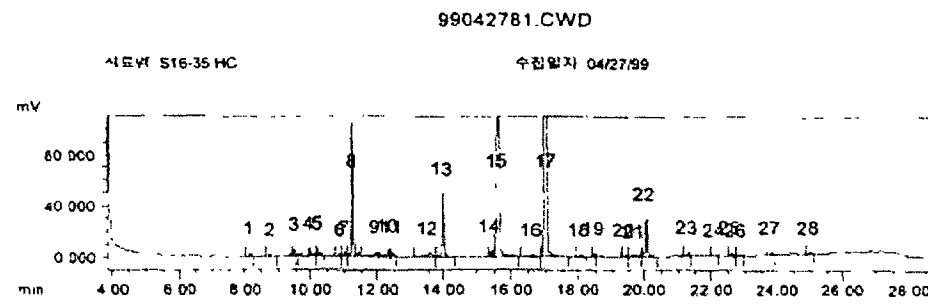
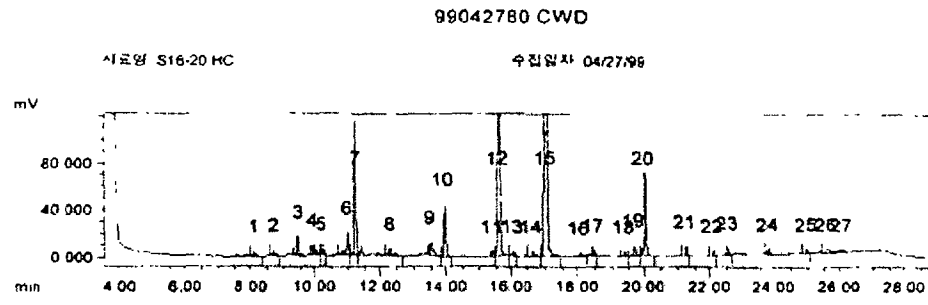
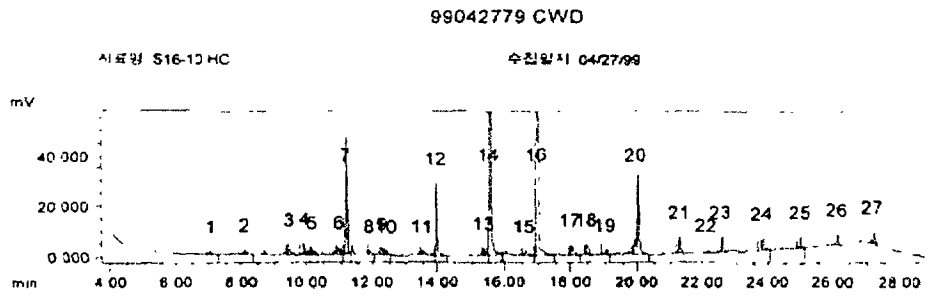


Figure 4-2. continued.

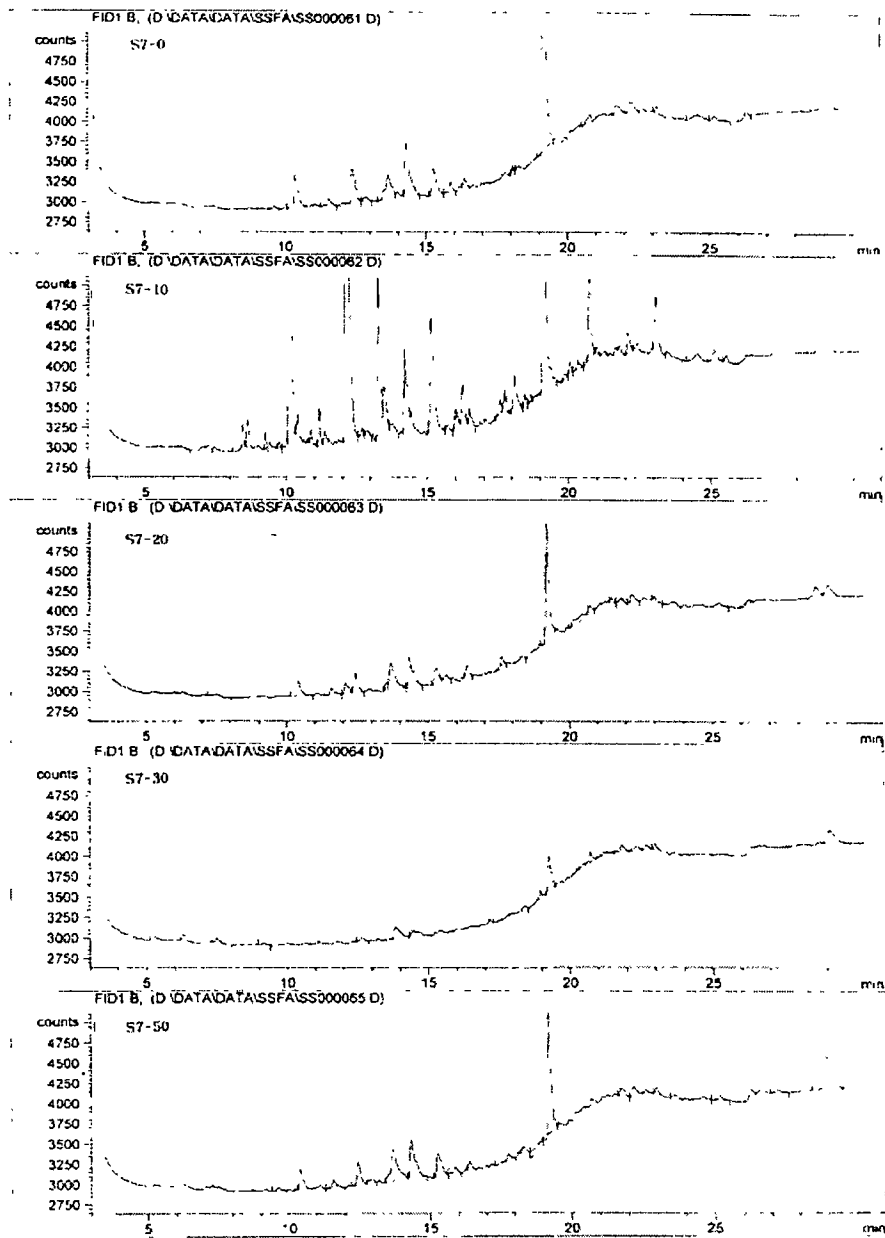


Figure 4-3. GC chromatogram of fatty acid extracted from particulated material in sea water collected at Feb. 1999

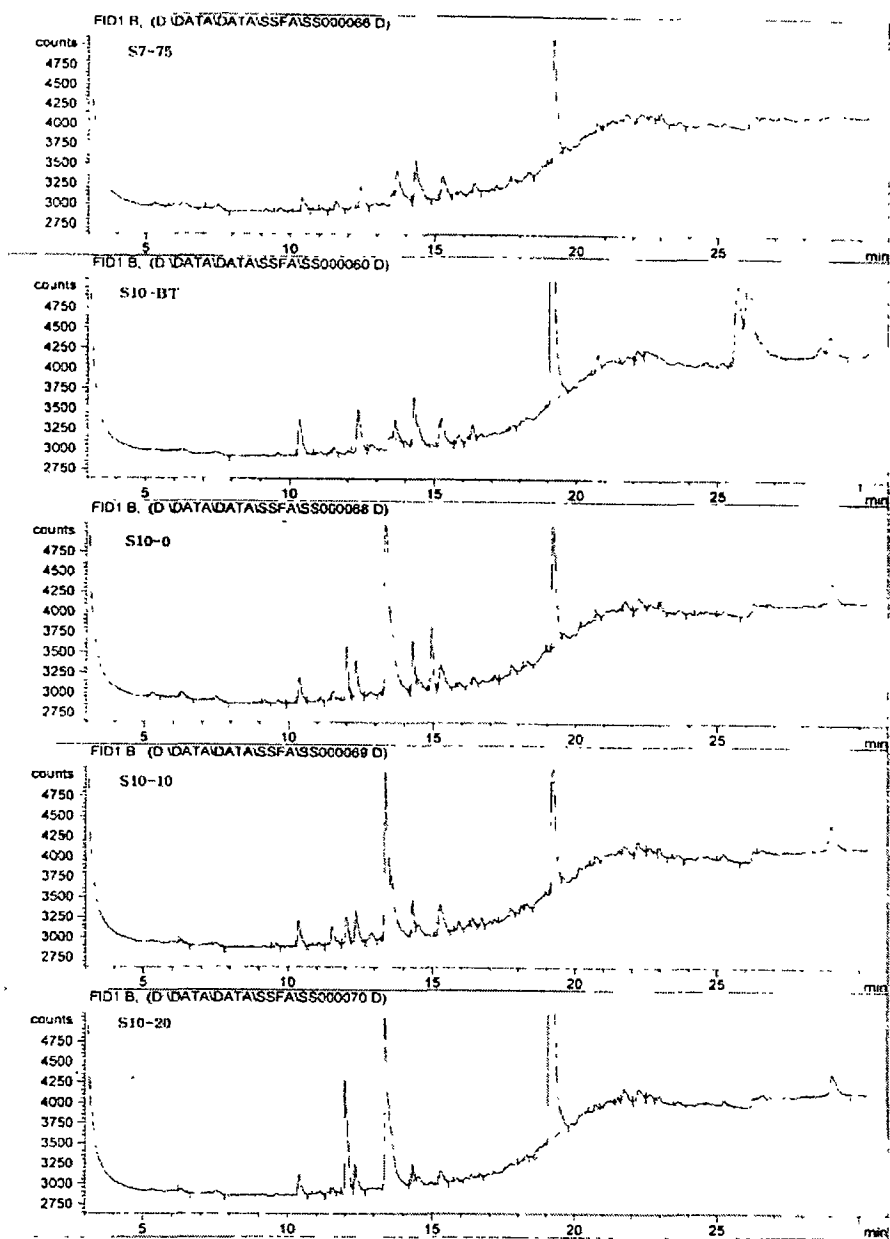


Figure 4-3. continued.

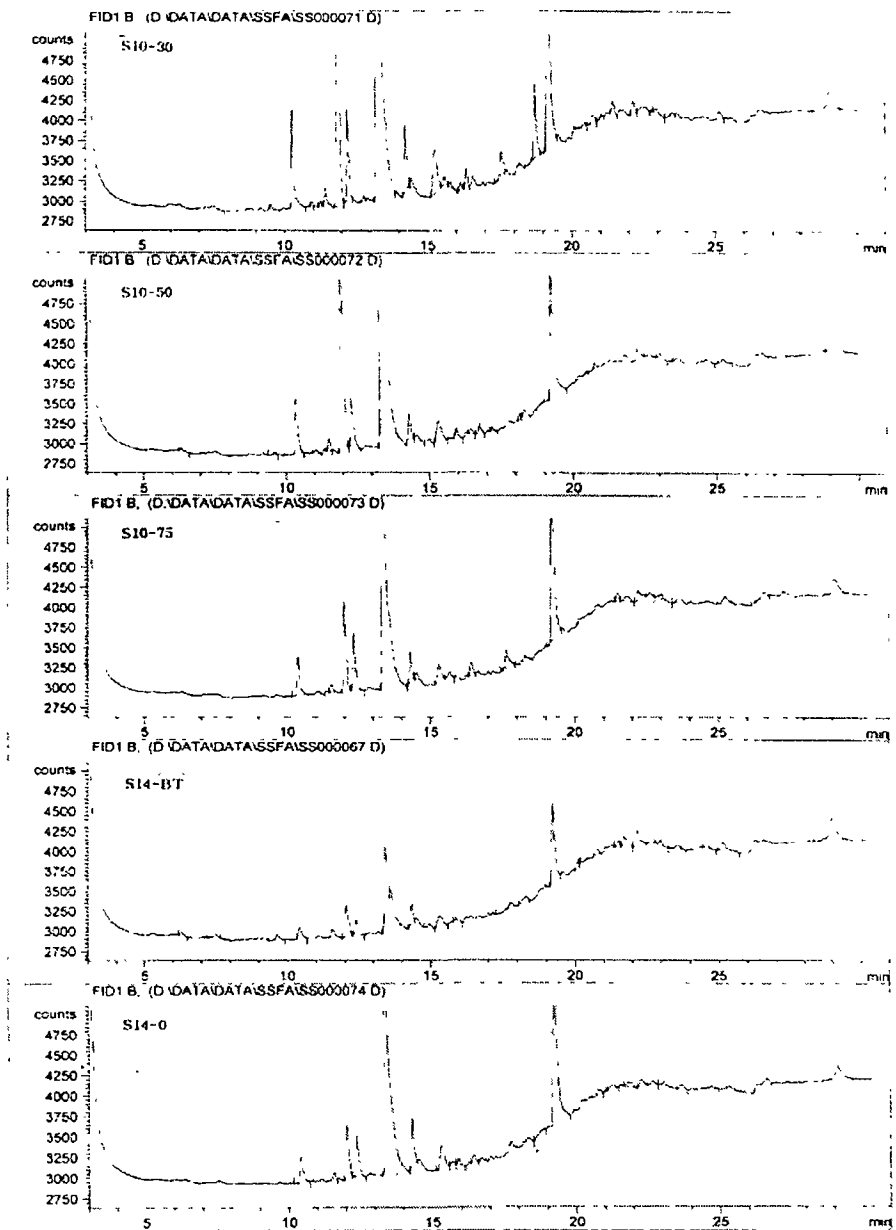


Figure 4-3. continued.

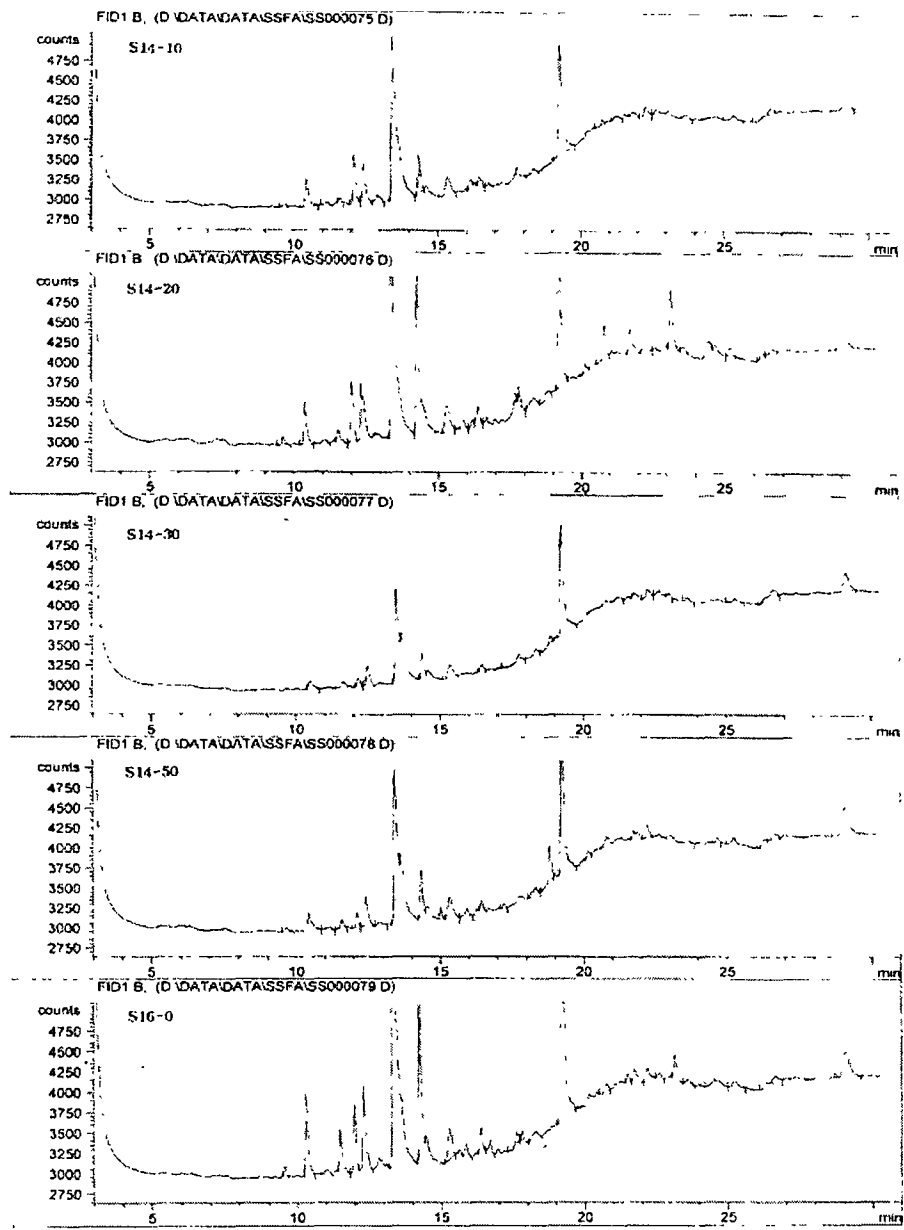


Figure 4-3. continued.

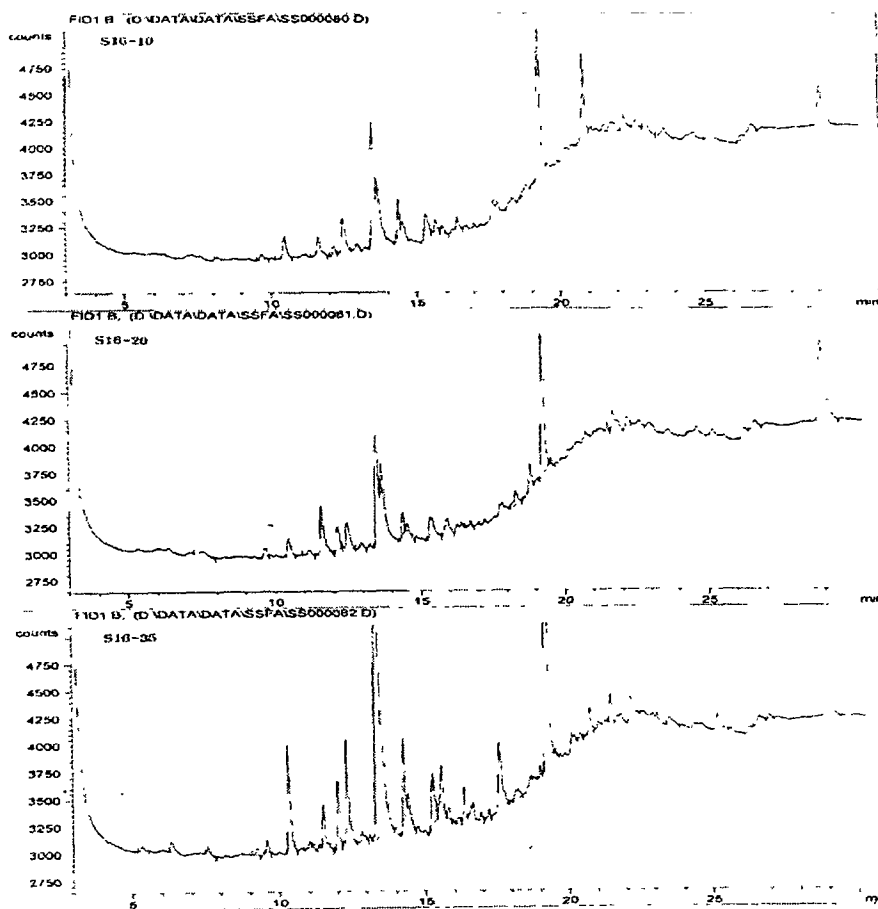


Figure 4-3. continued.



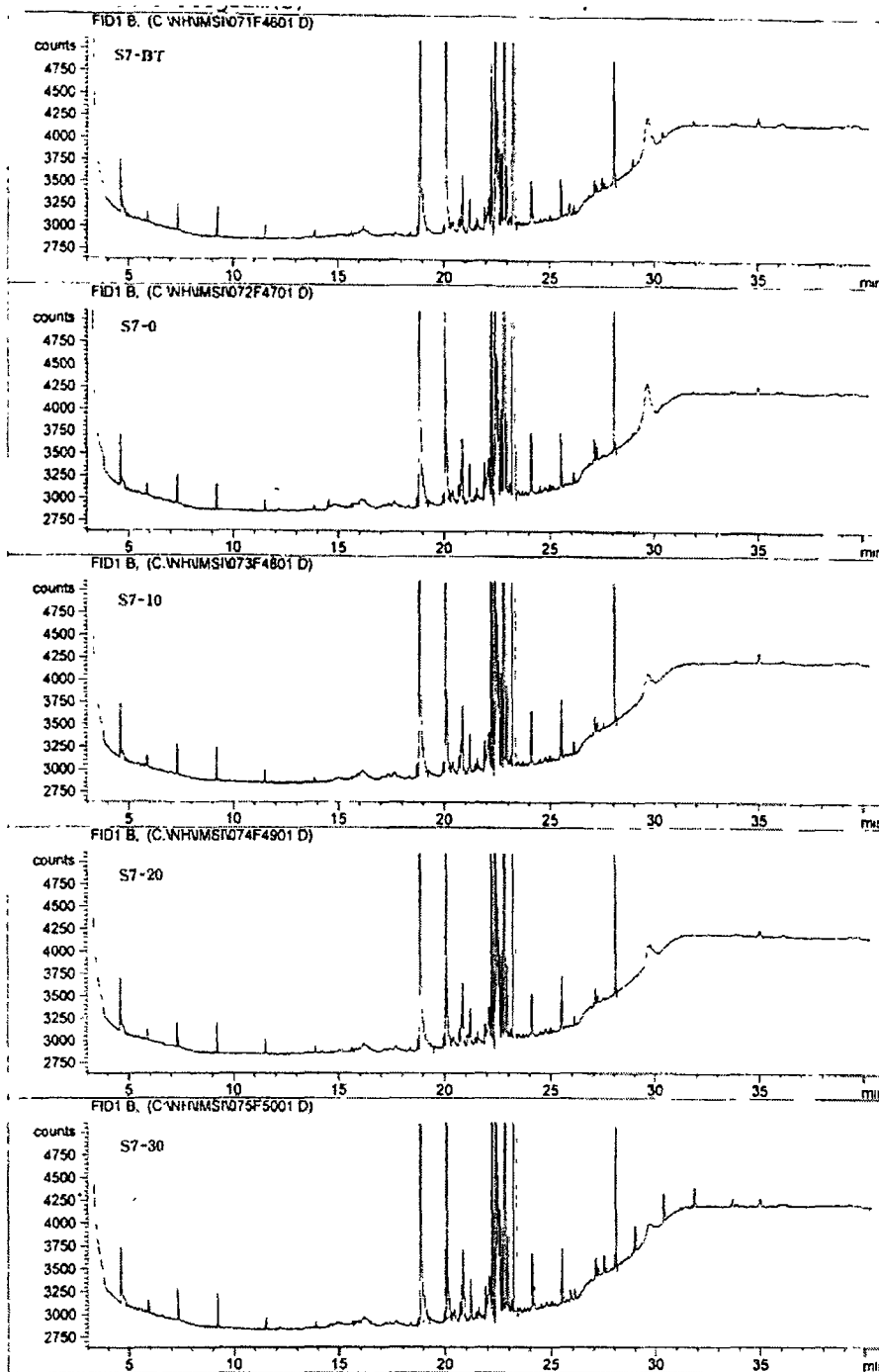


Figure 4-4. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from sea water collected at Feb 1999

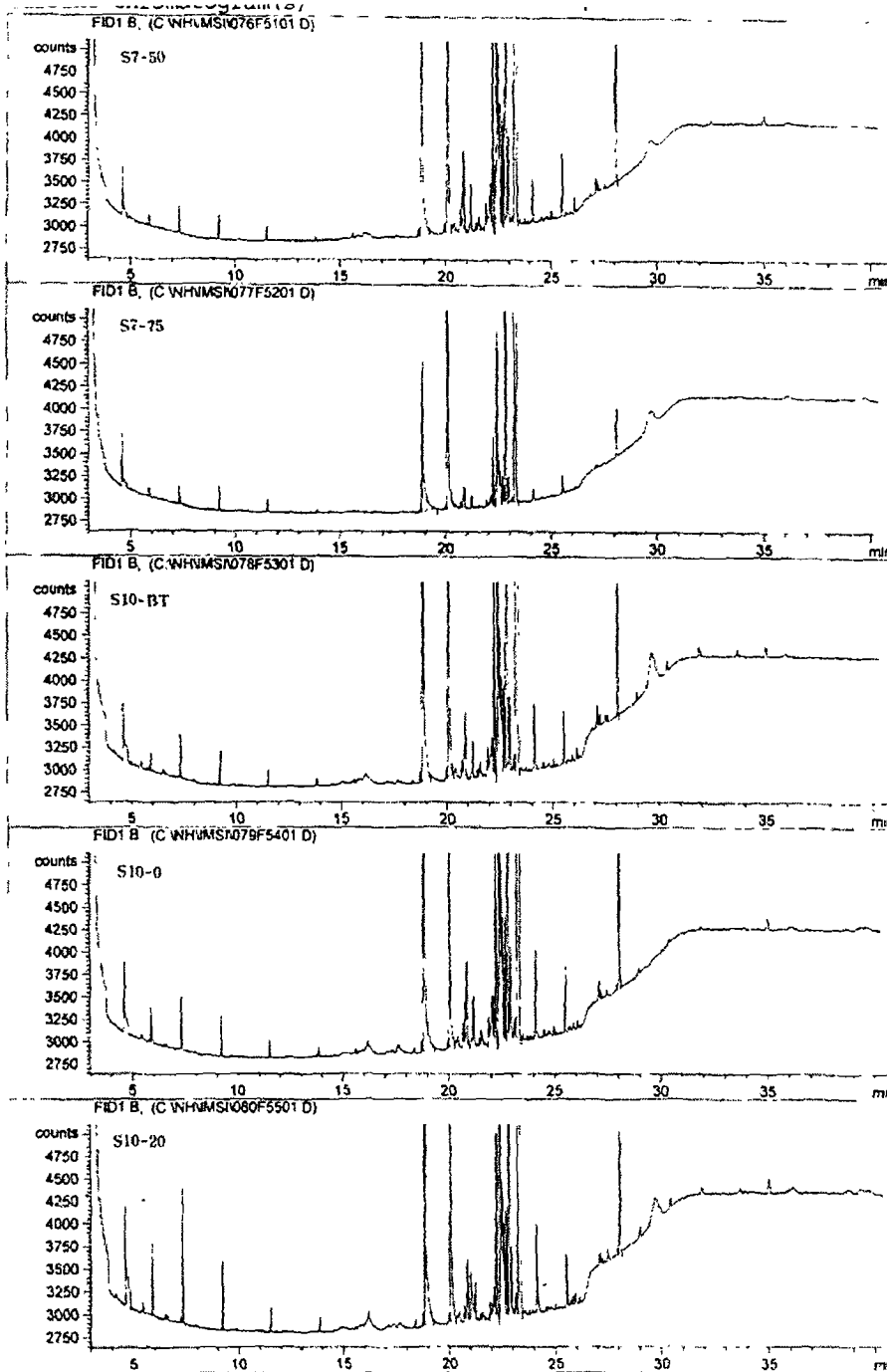


Figure 4-4. continued.

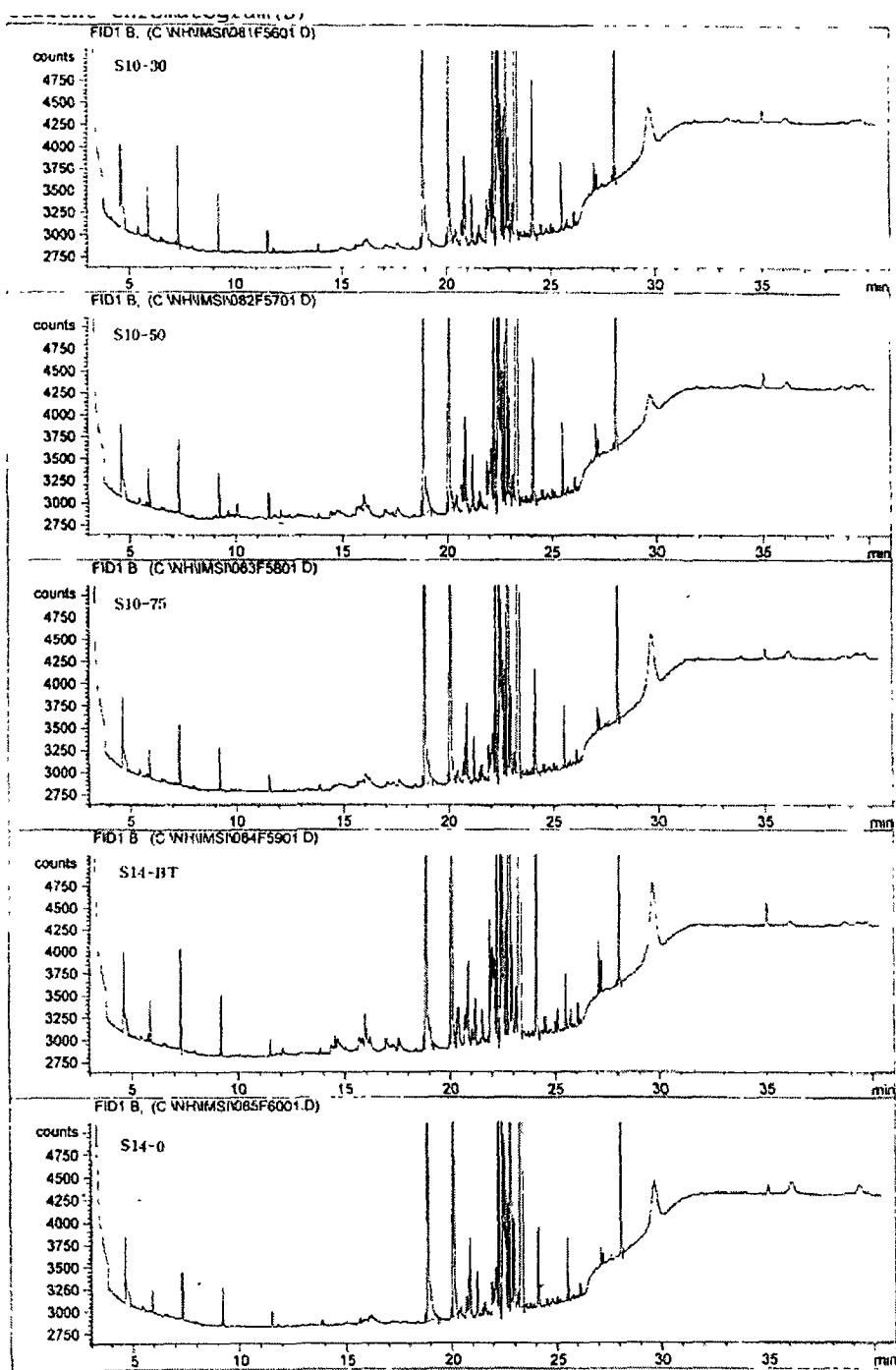


Figure 4-4. continued.

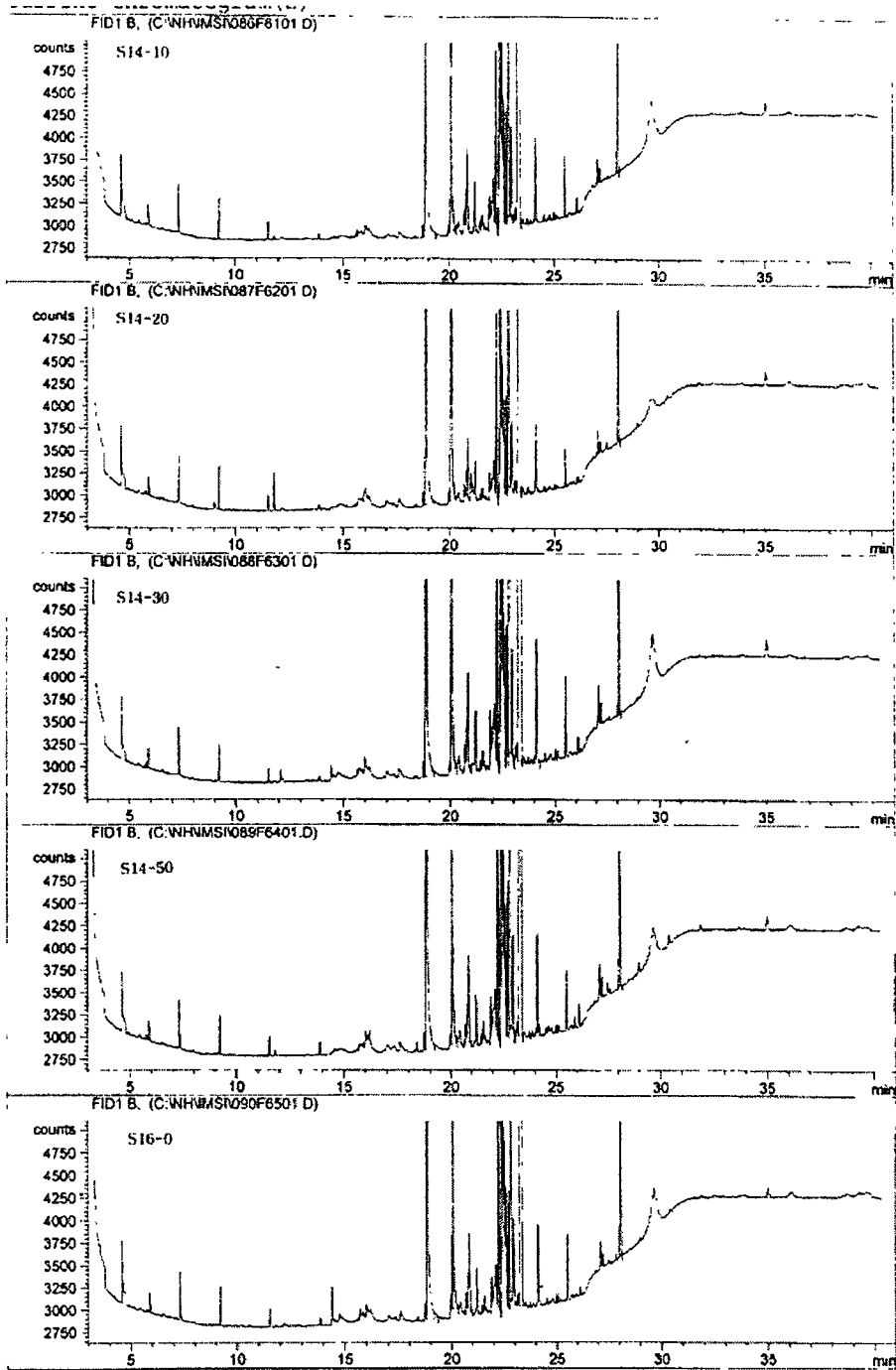


Figure 4-4. continued.

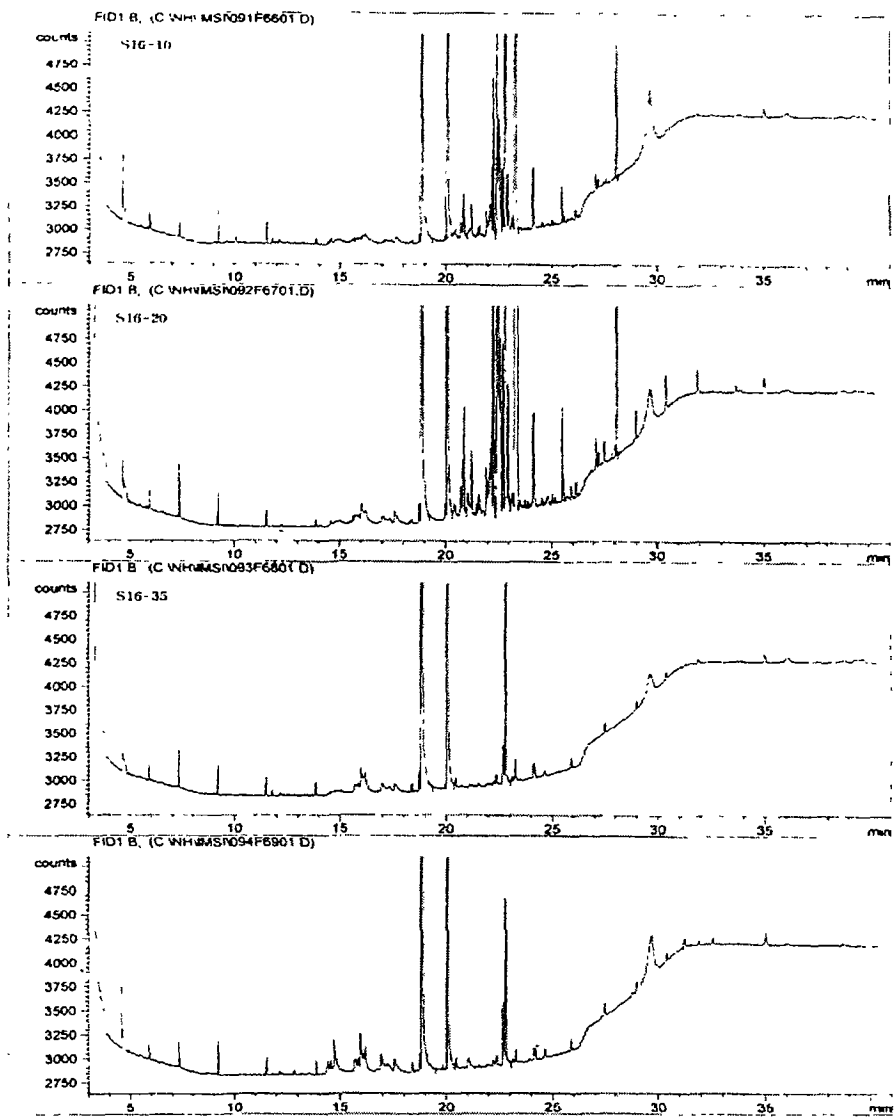


Figure 4-4. continued.

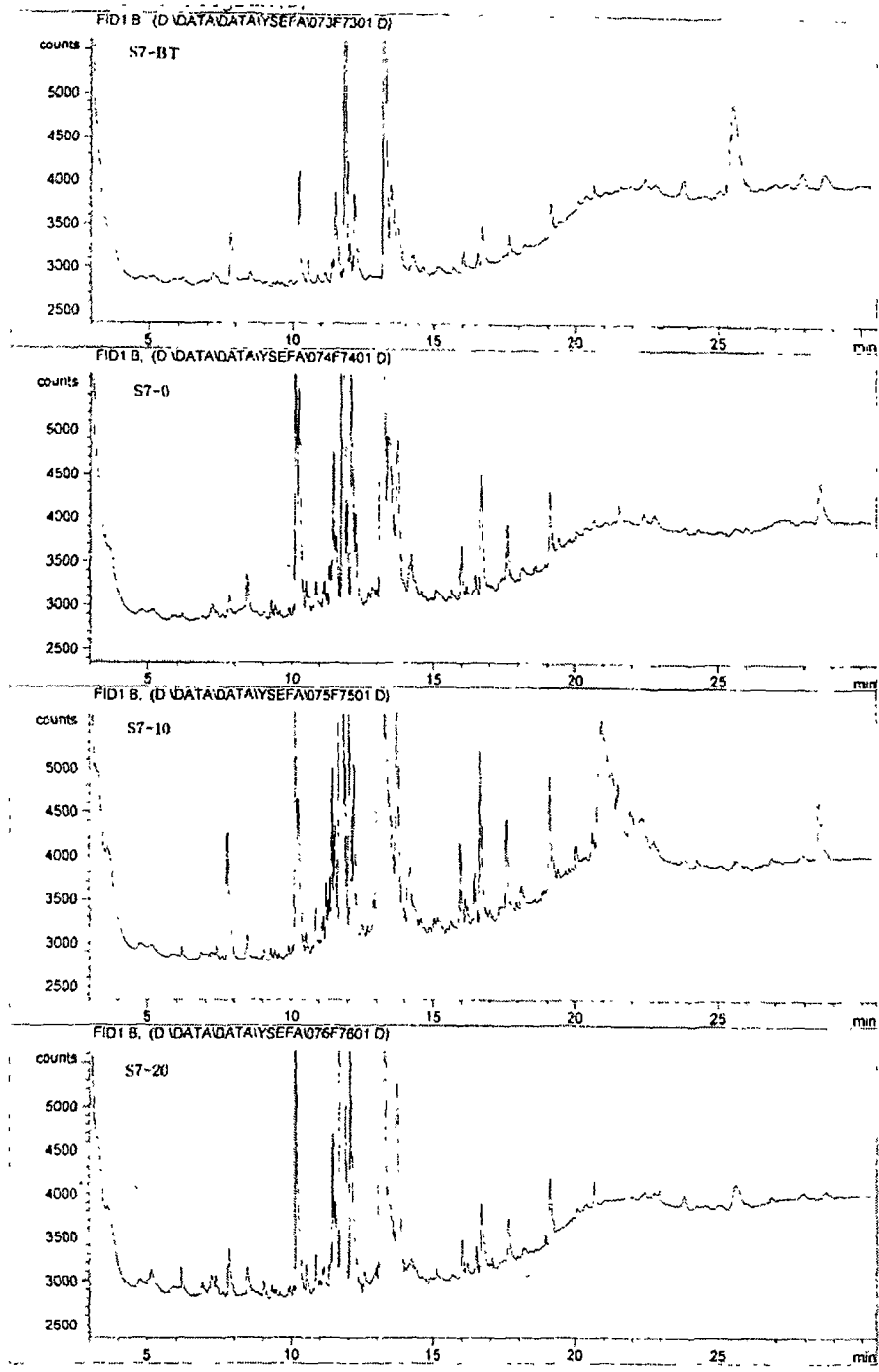


Figure 4-5. GC chromatogram of fatty acid extracted from sea water collected at Feb 1999

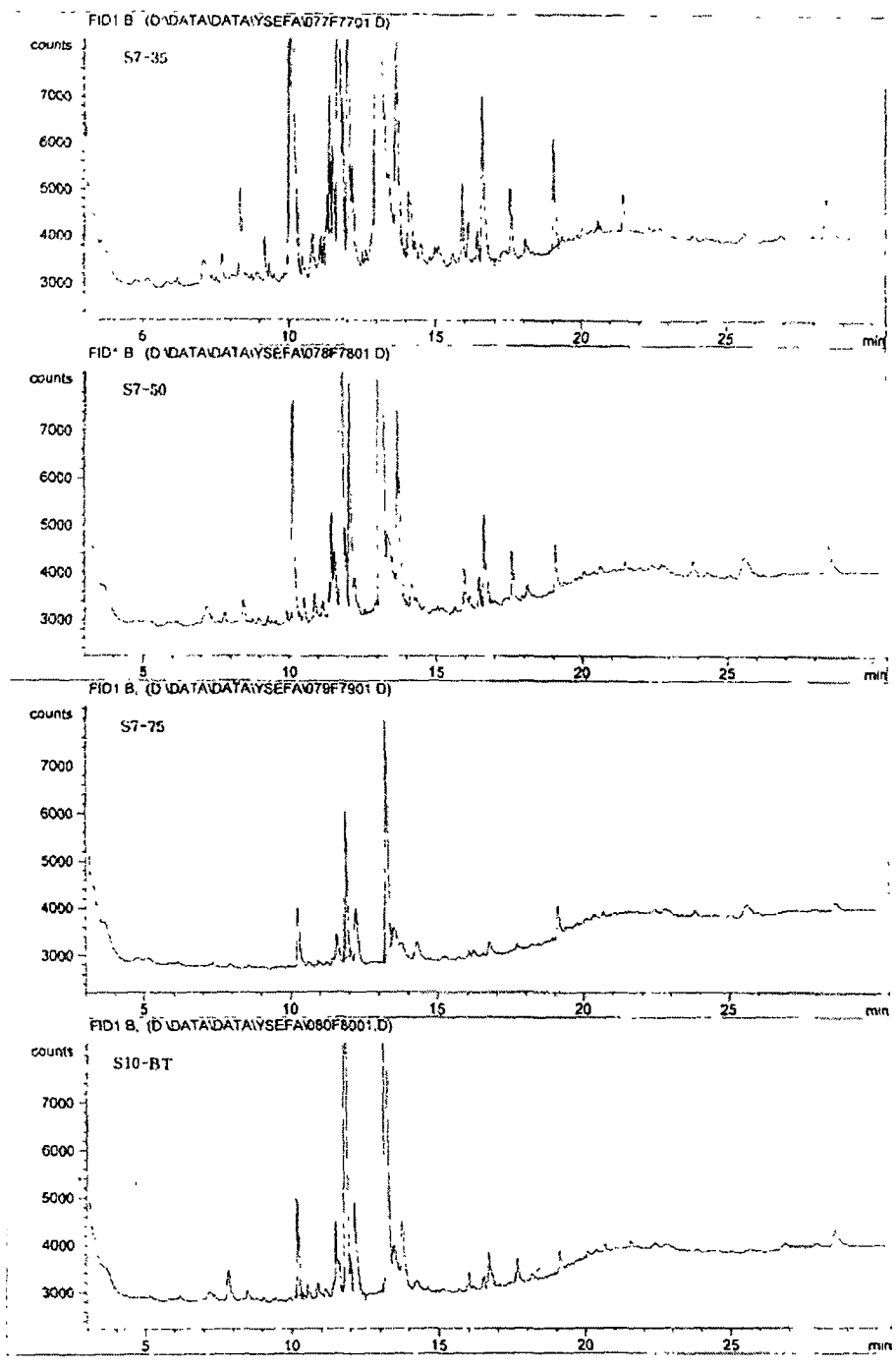


Figure 4-5. continued.

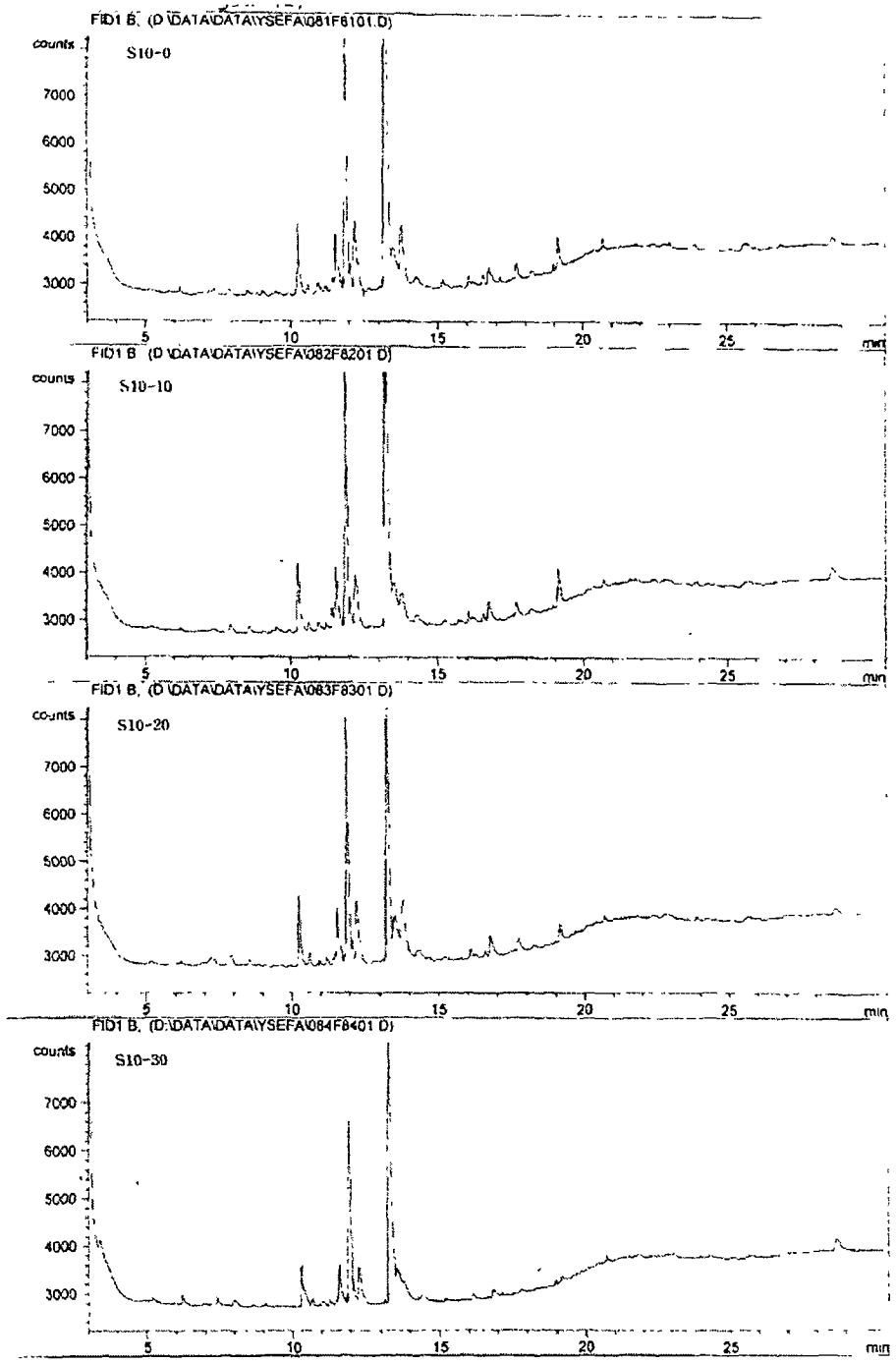


Figure 4-5. continued.



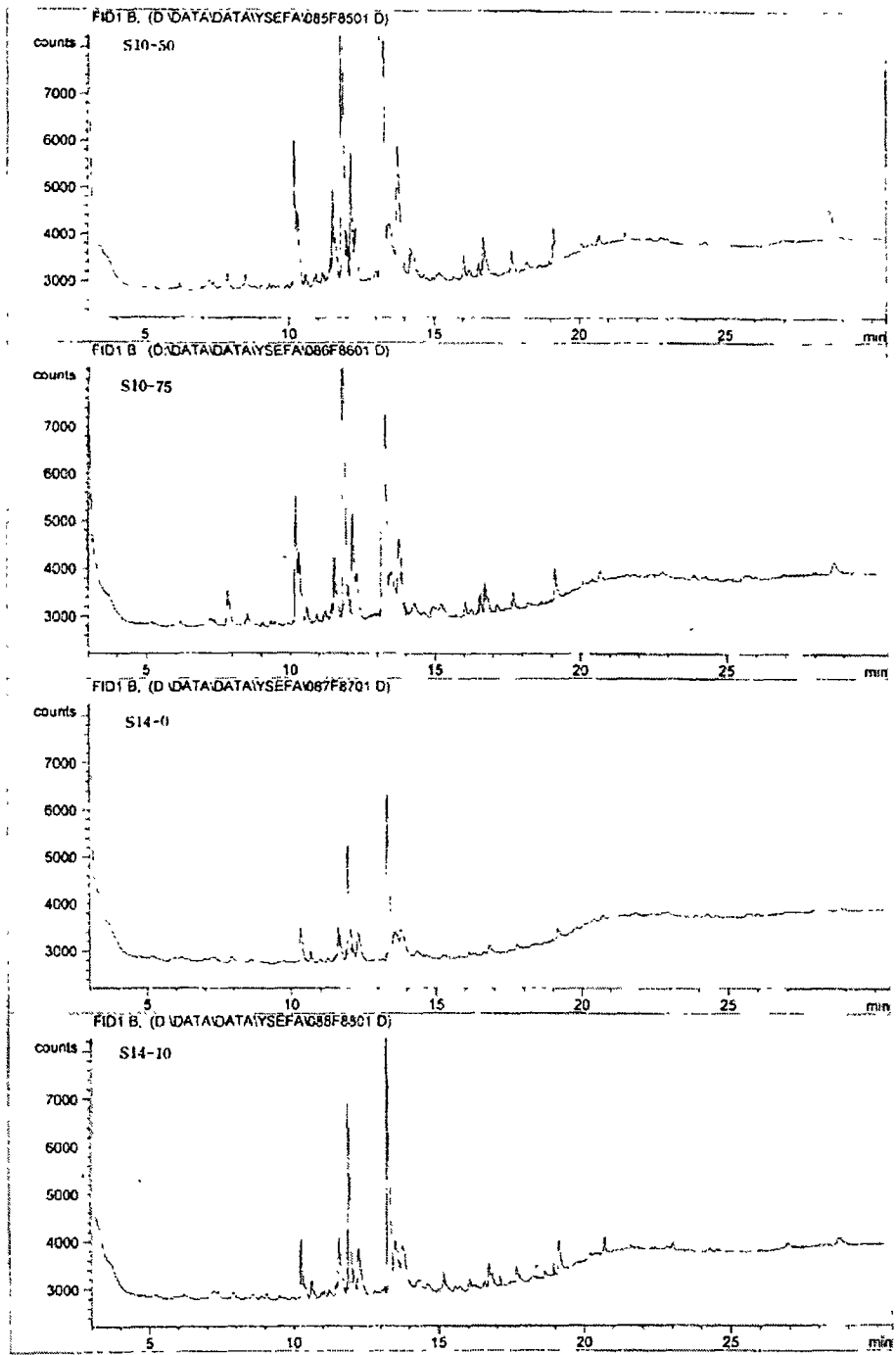


Figure 4-5. continued.

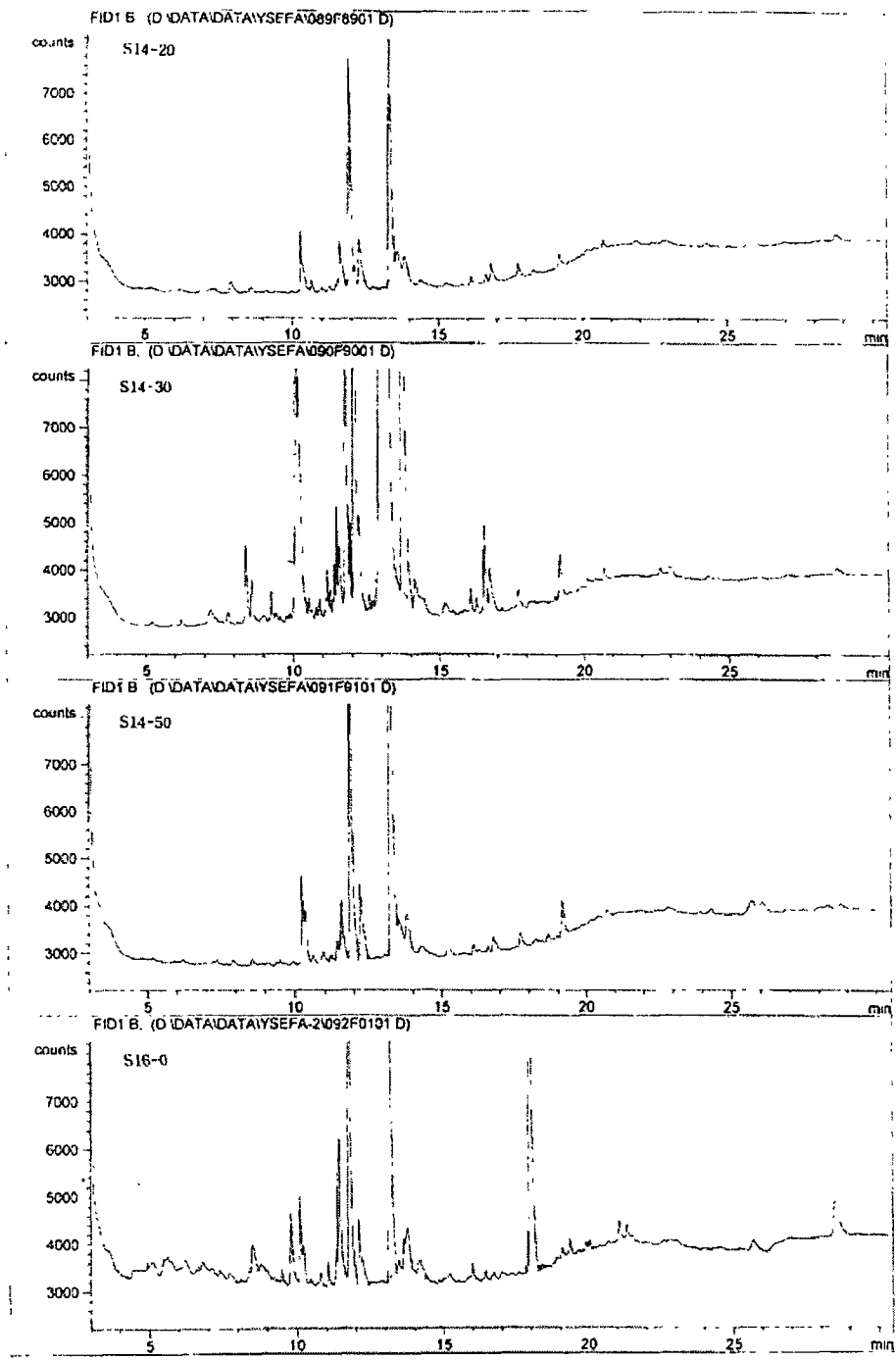


Figure 4-5. continued.

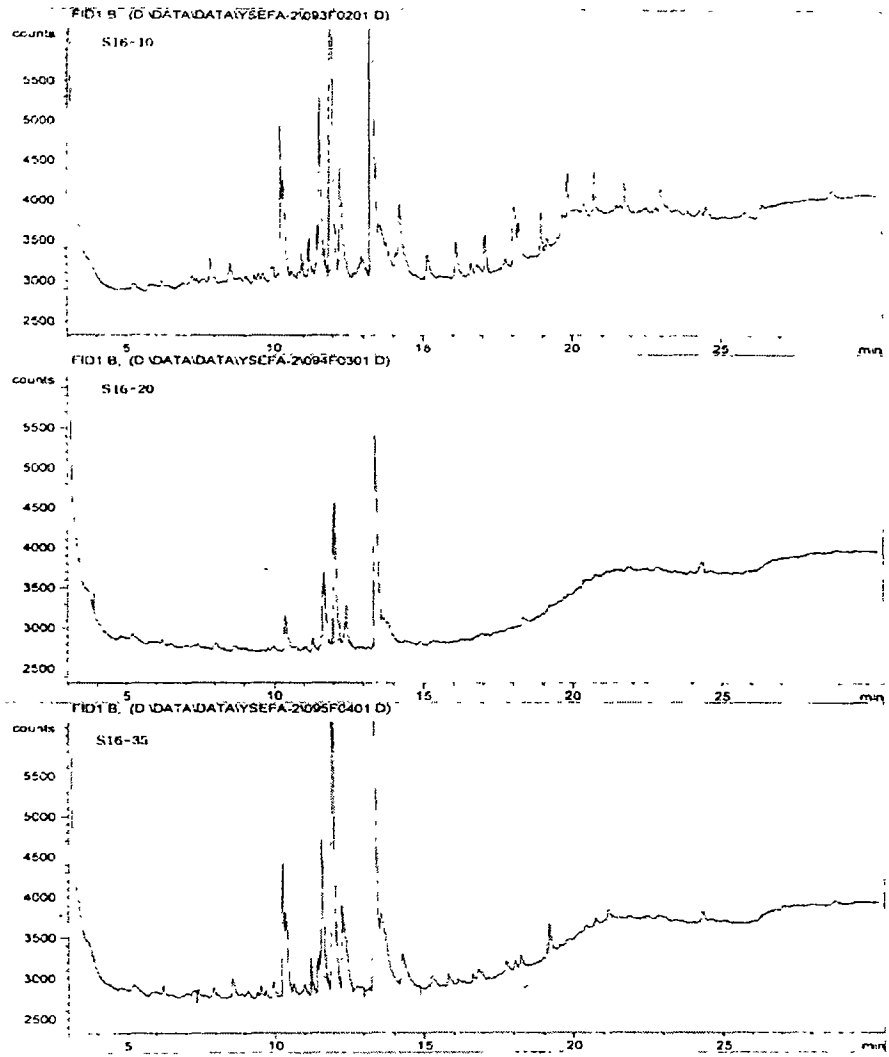


Figure 4-5. continued.

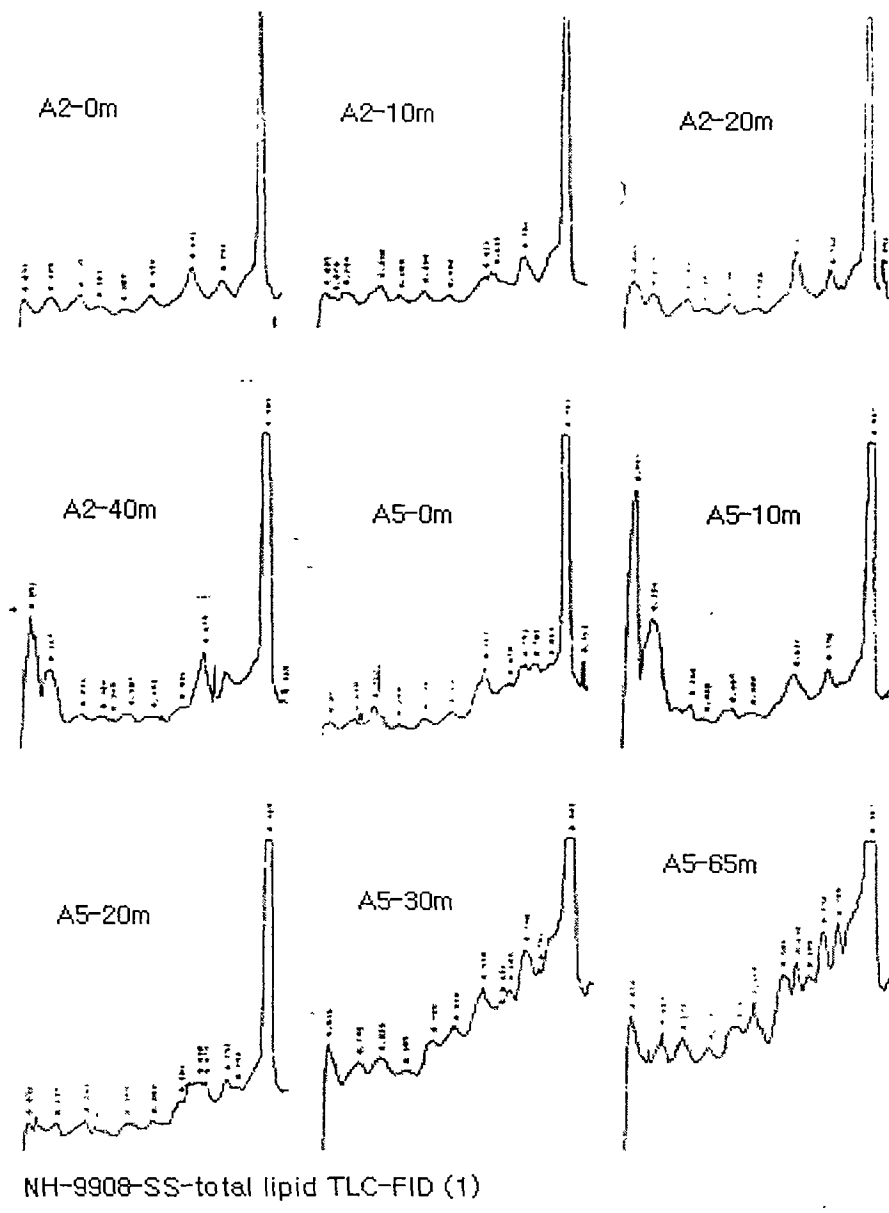
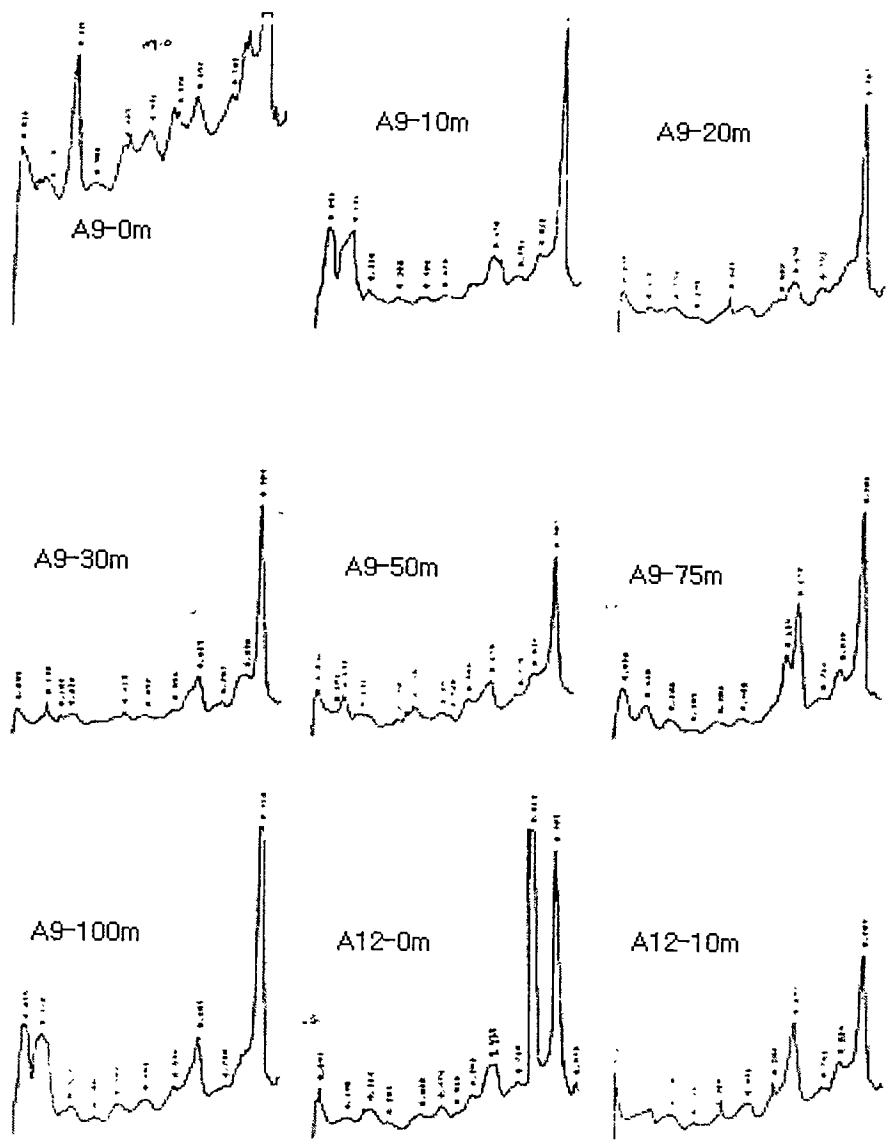
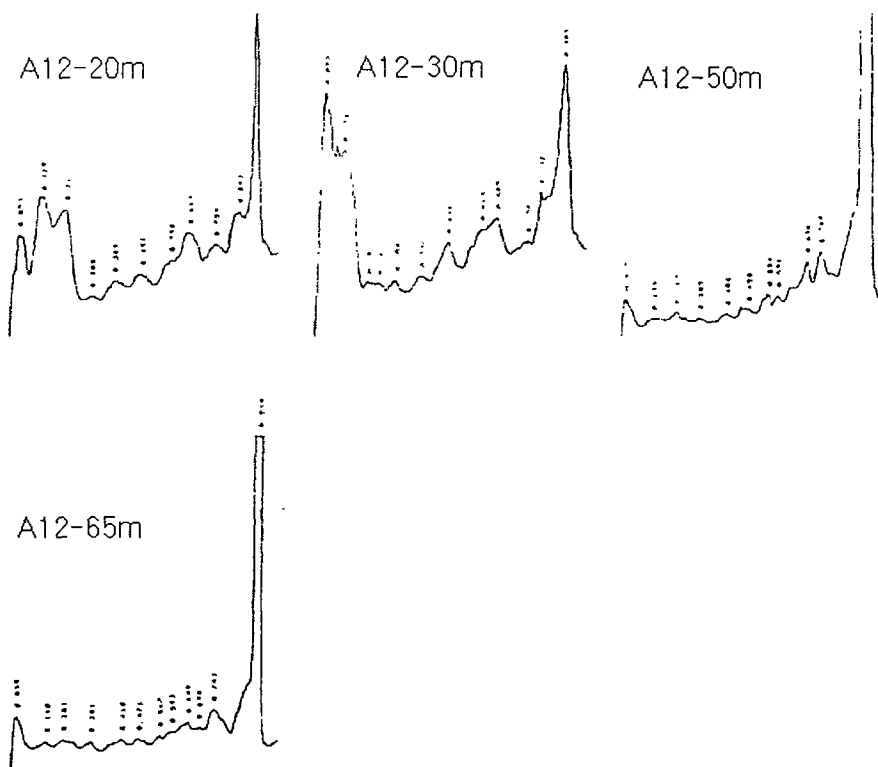


Figure 4-6. TLC-FID chromatogram of total lipid extracted from suspended materials in sea water collected at Aug. 1999



Namhae-9908-SS-total lipid TLC-FID (2)

Figure 4-6. continued.



NH9908-SS-total lipid TLC-FID (3)

Figure 4-6. continued

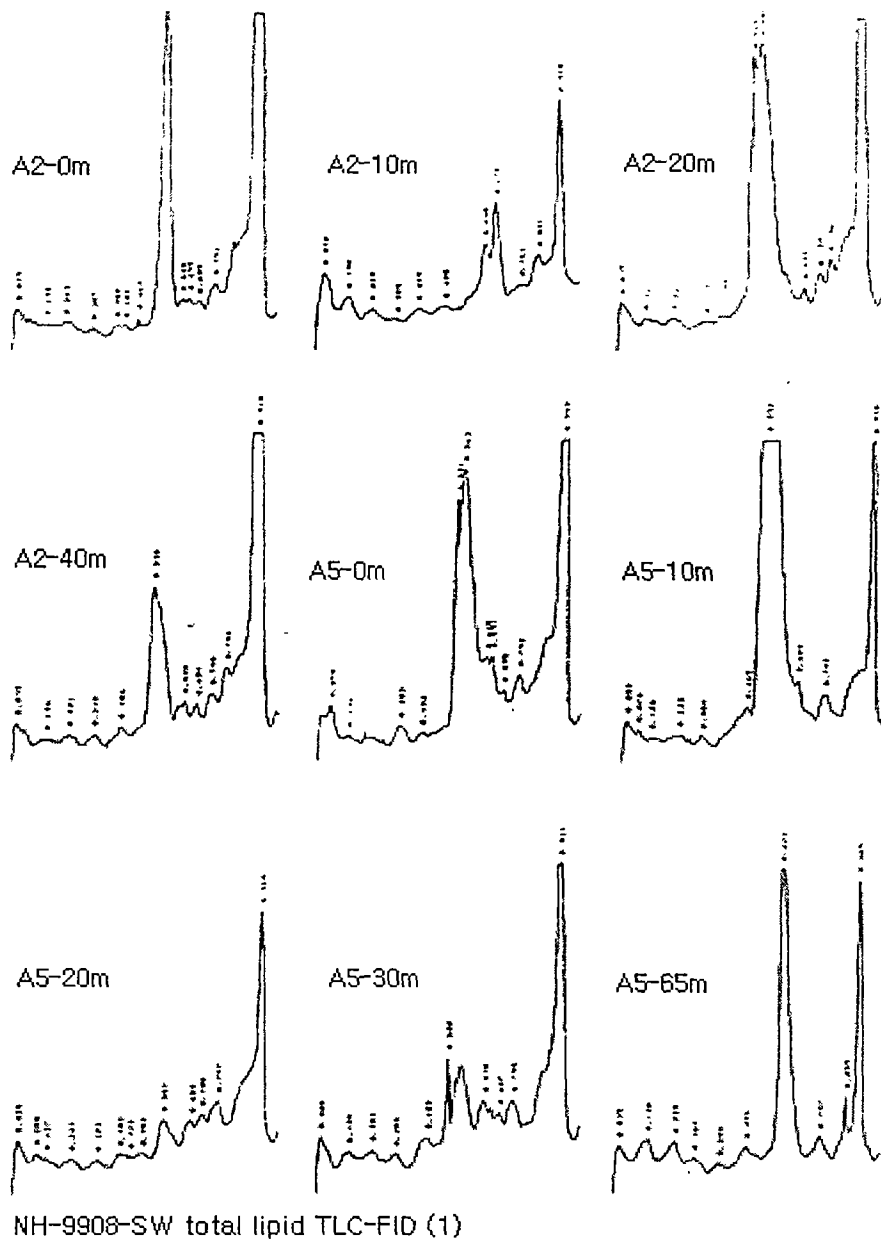


Figure 4-7. TLC-FID chromatogram of total lipid extracted from sea water collected at Aug. 1999

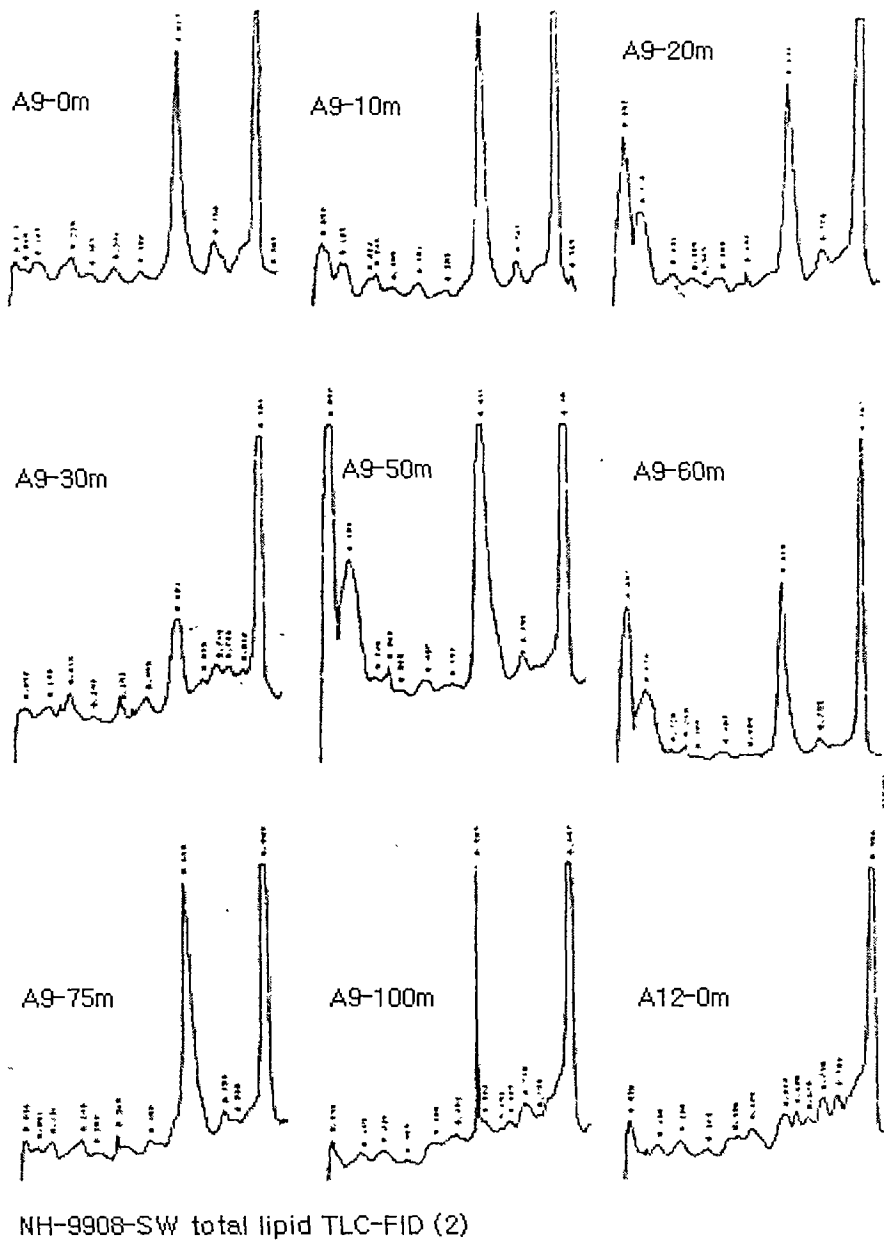


Figure 4-7. continued.



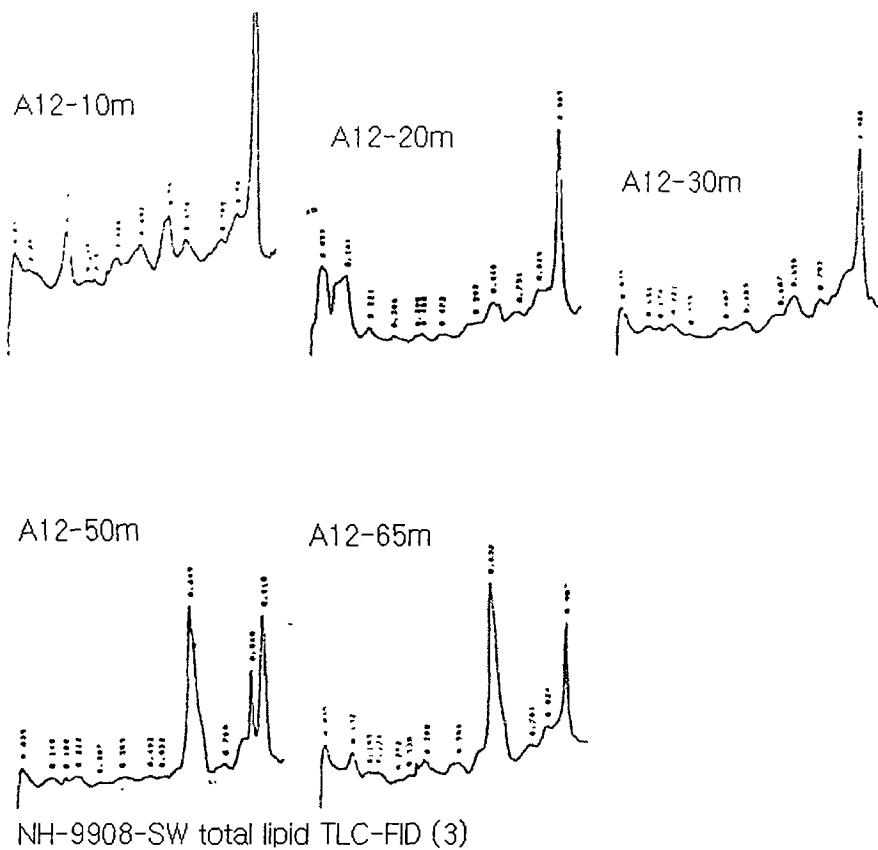


Figure 4-7. continued.

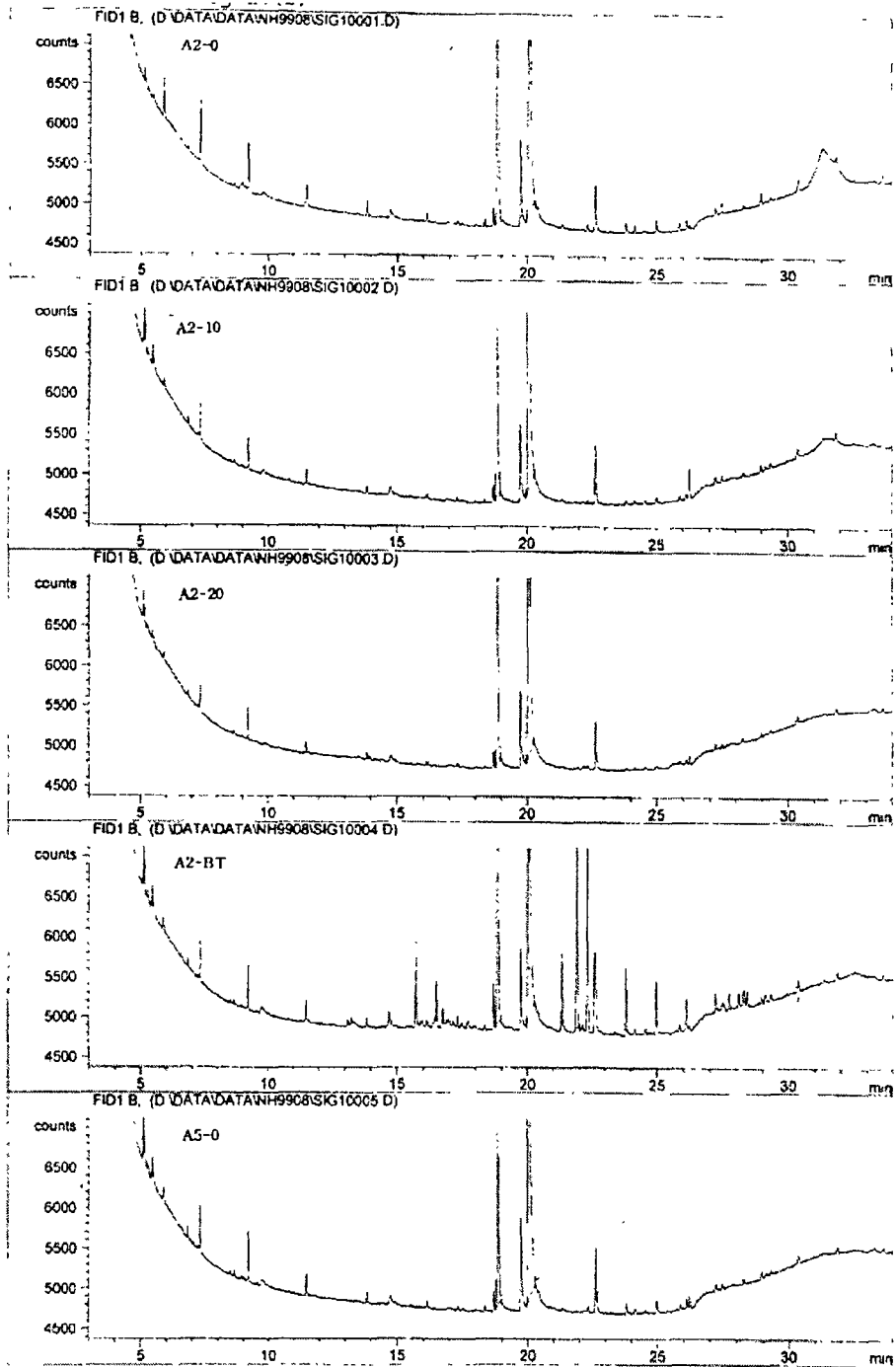


Figure 4-8. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999

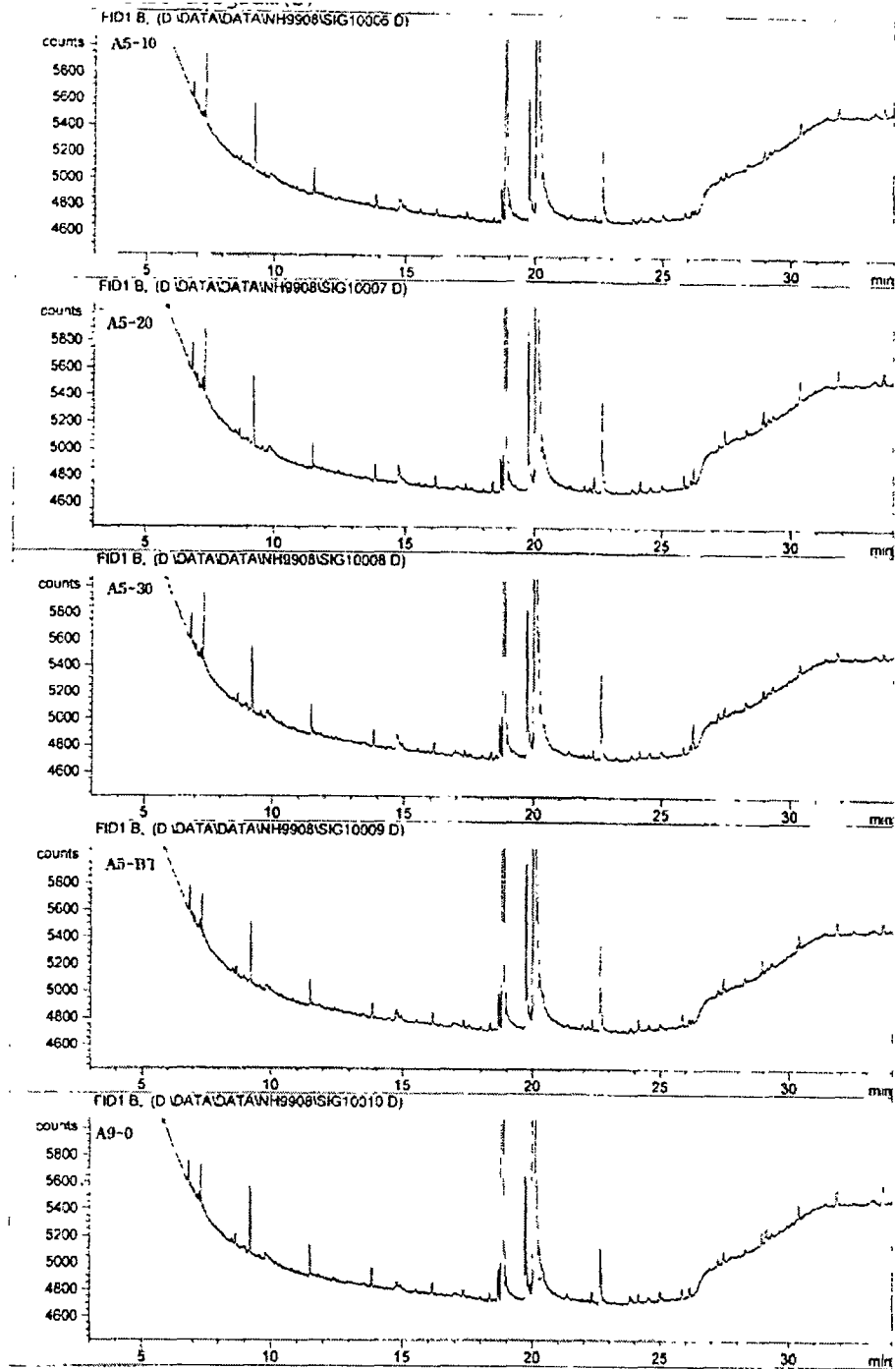


Figure 4-8. continued.

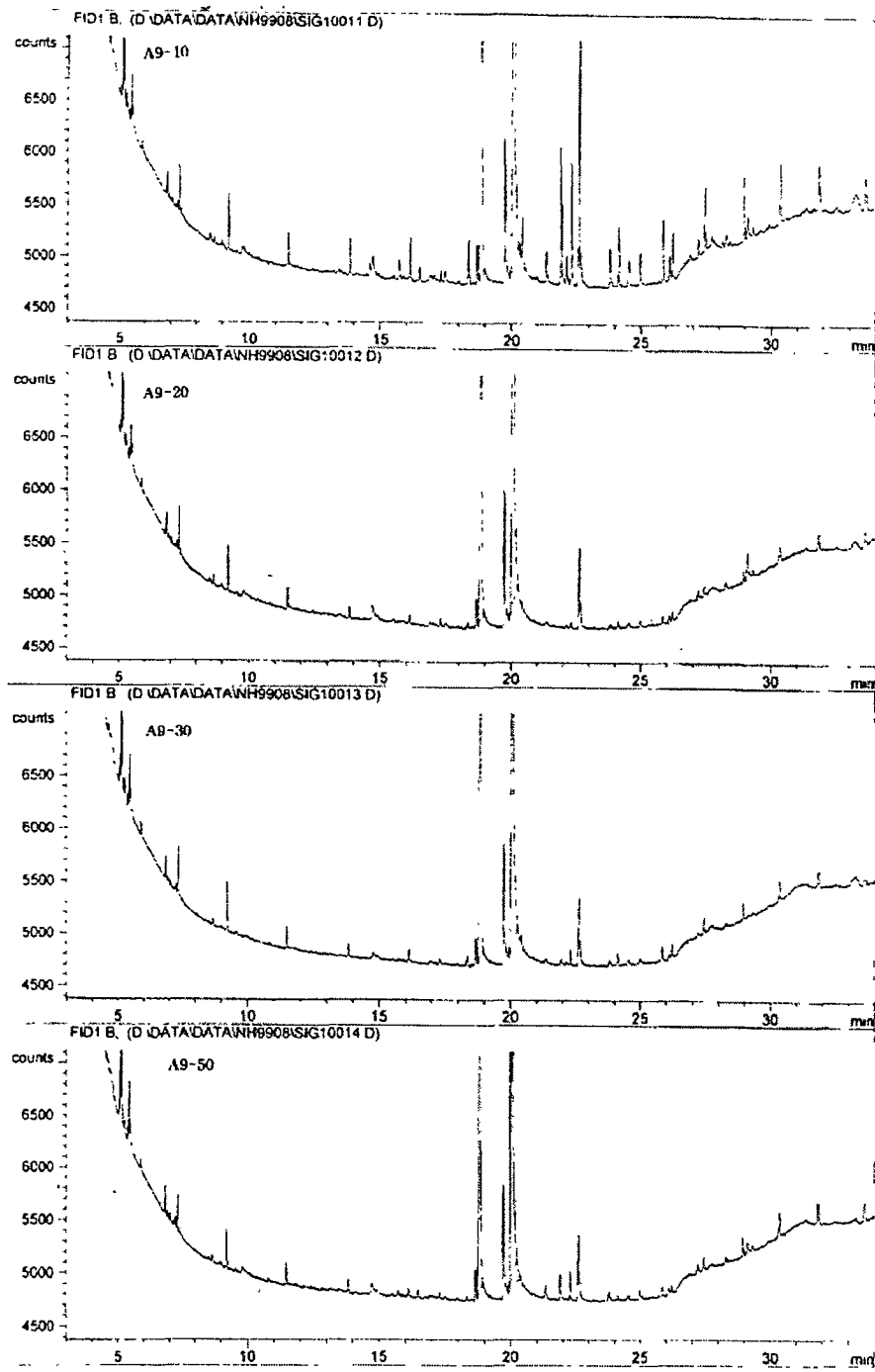


Figure 4-8. continued.

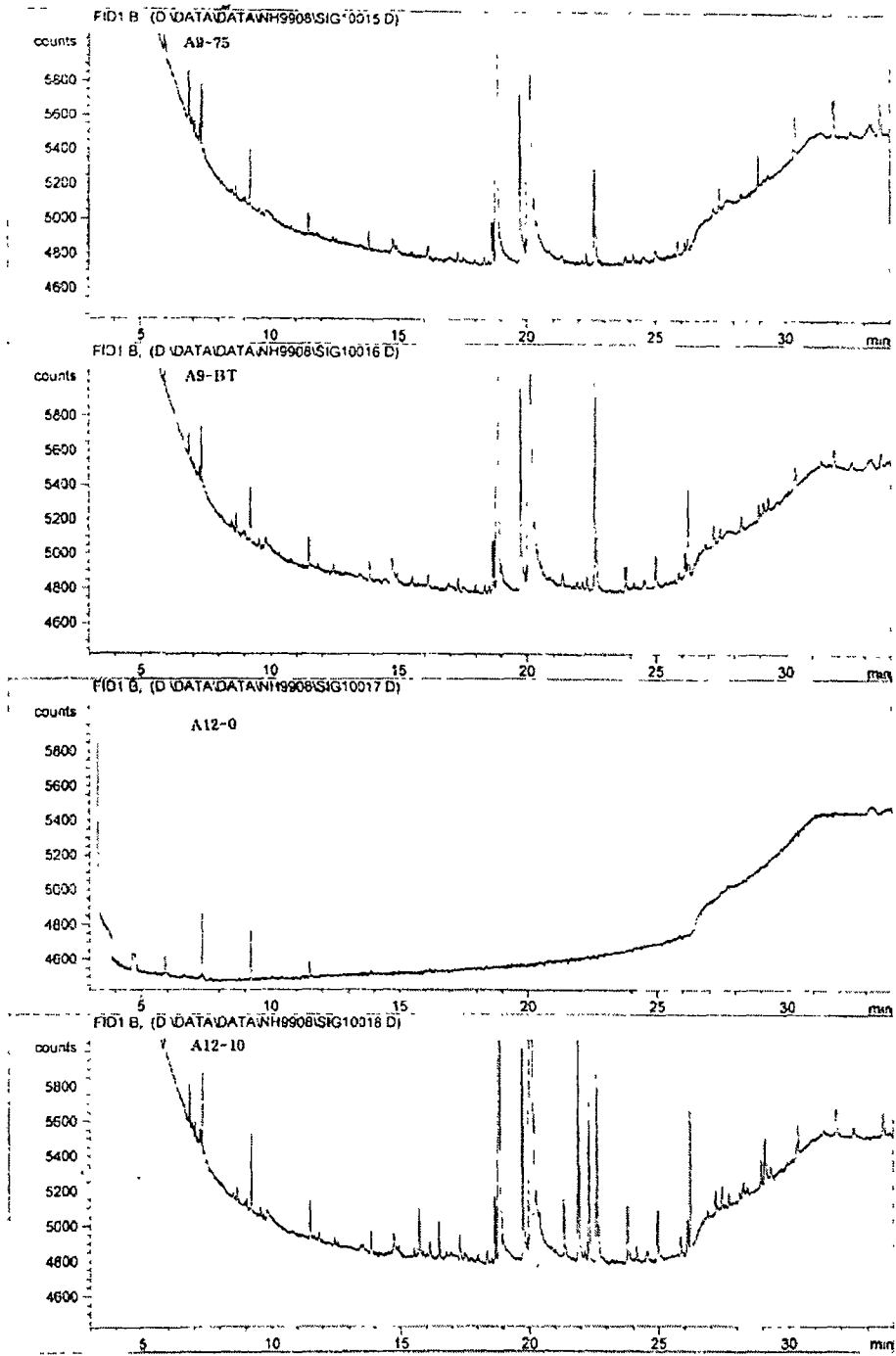


Figure 4-8. continued.

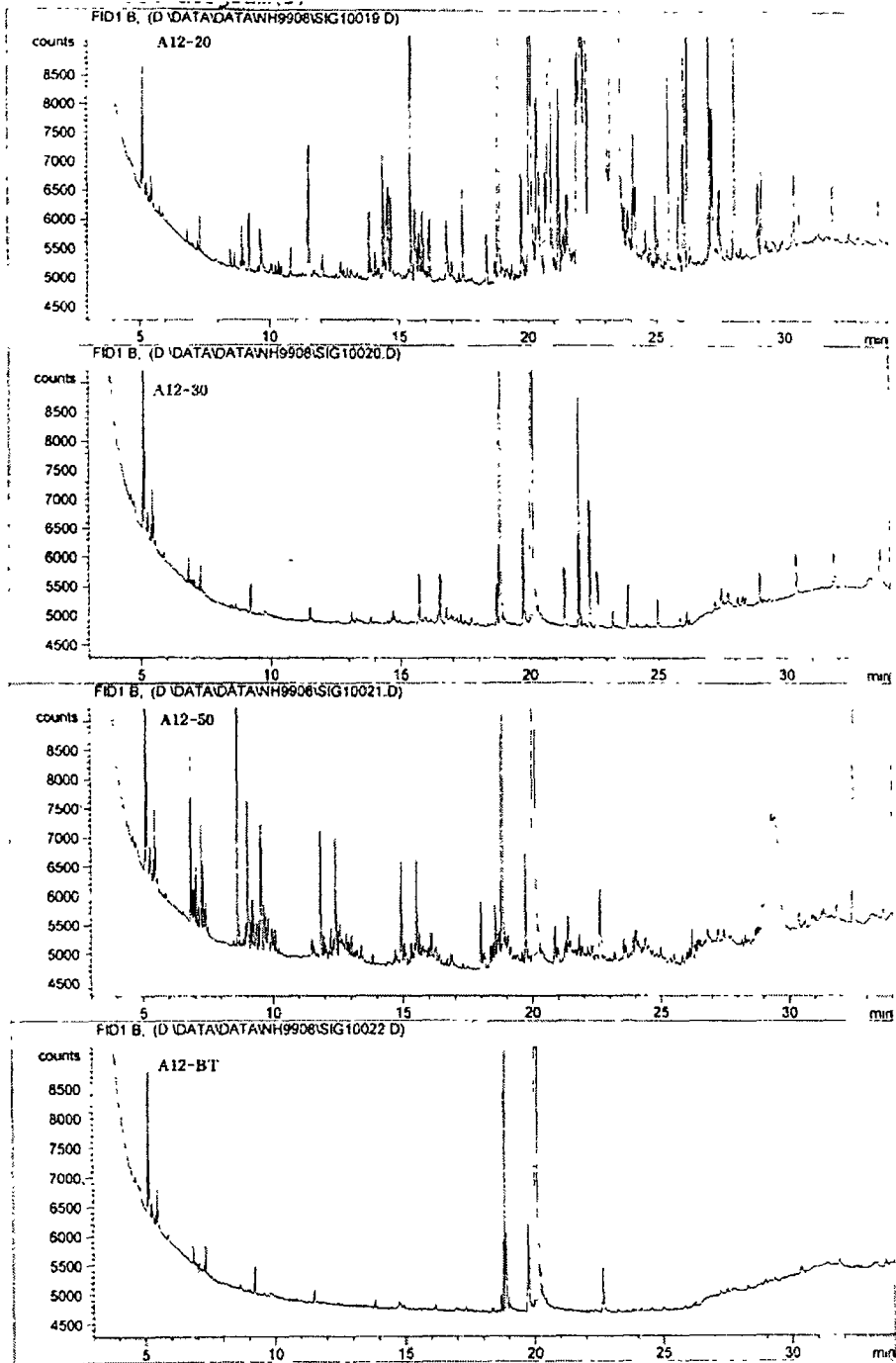


Figure 4-8. continued.

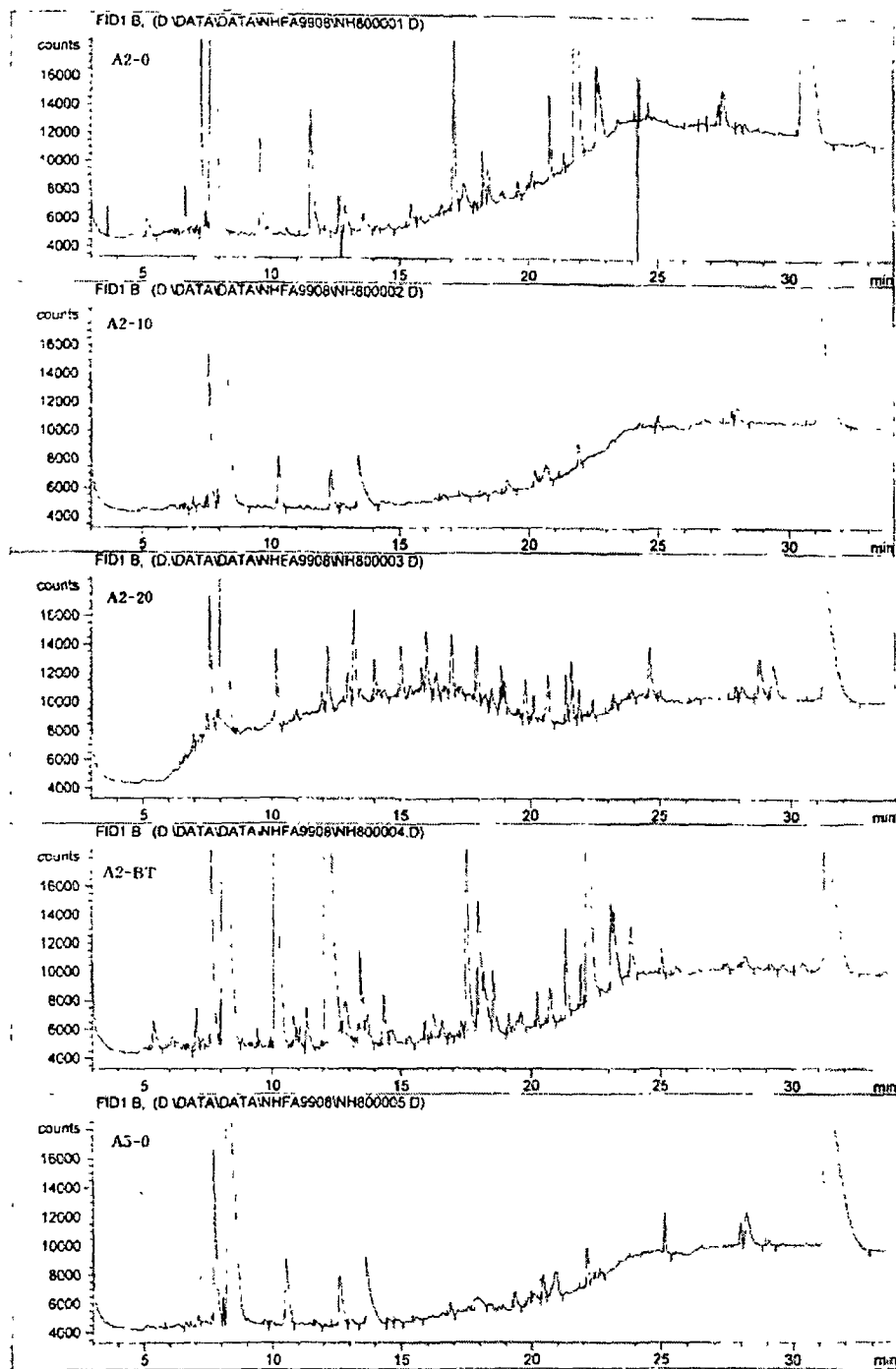


Figure 4-9. GC chromatogram of fatty acid extracted from particulated materials in sea water collected at Aug. 1999

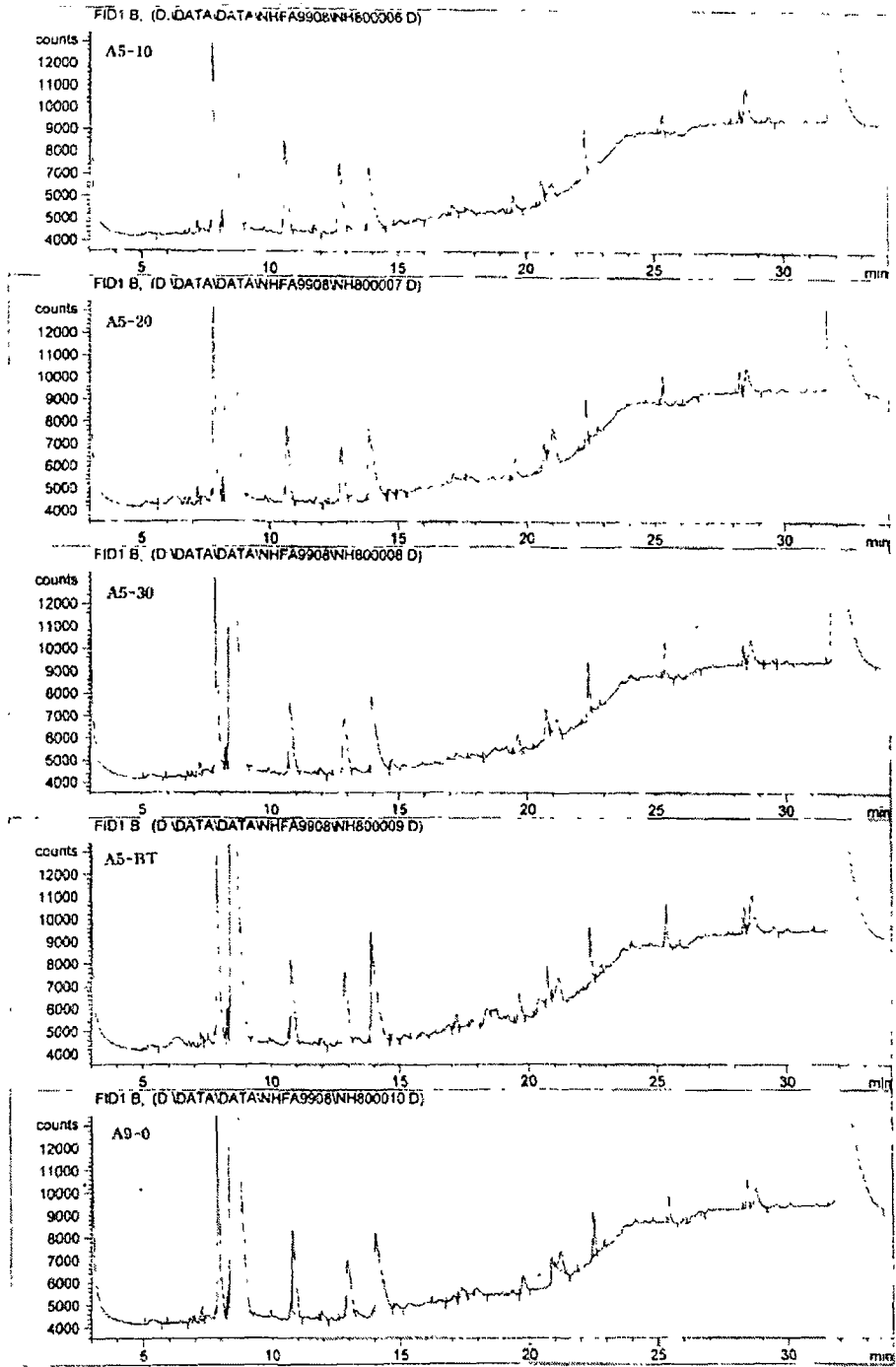


Figure 4-9. continued



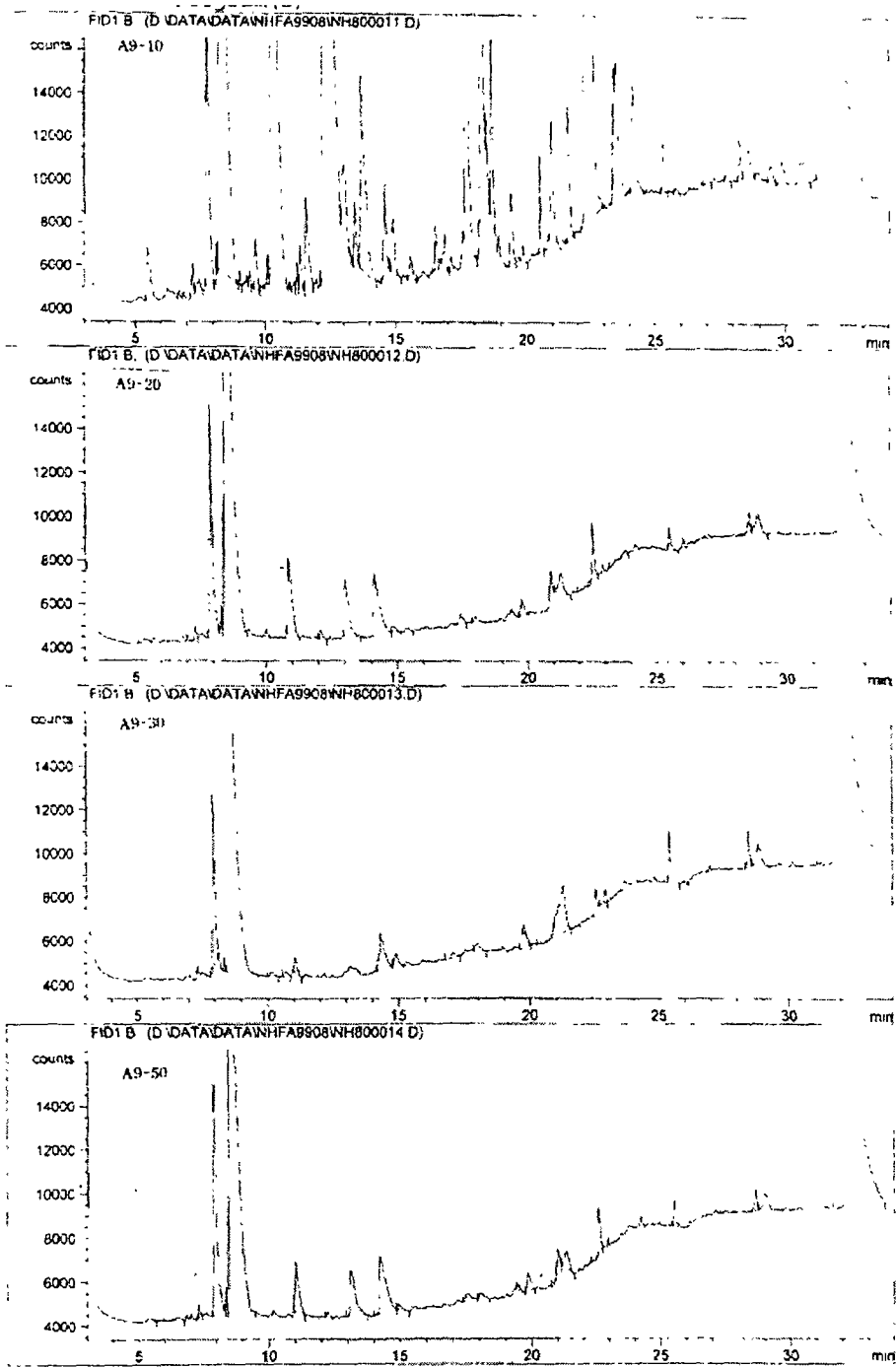


Figure 4-9. continued

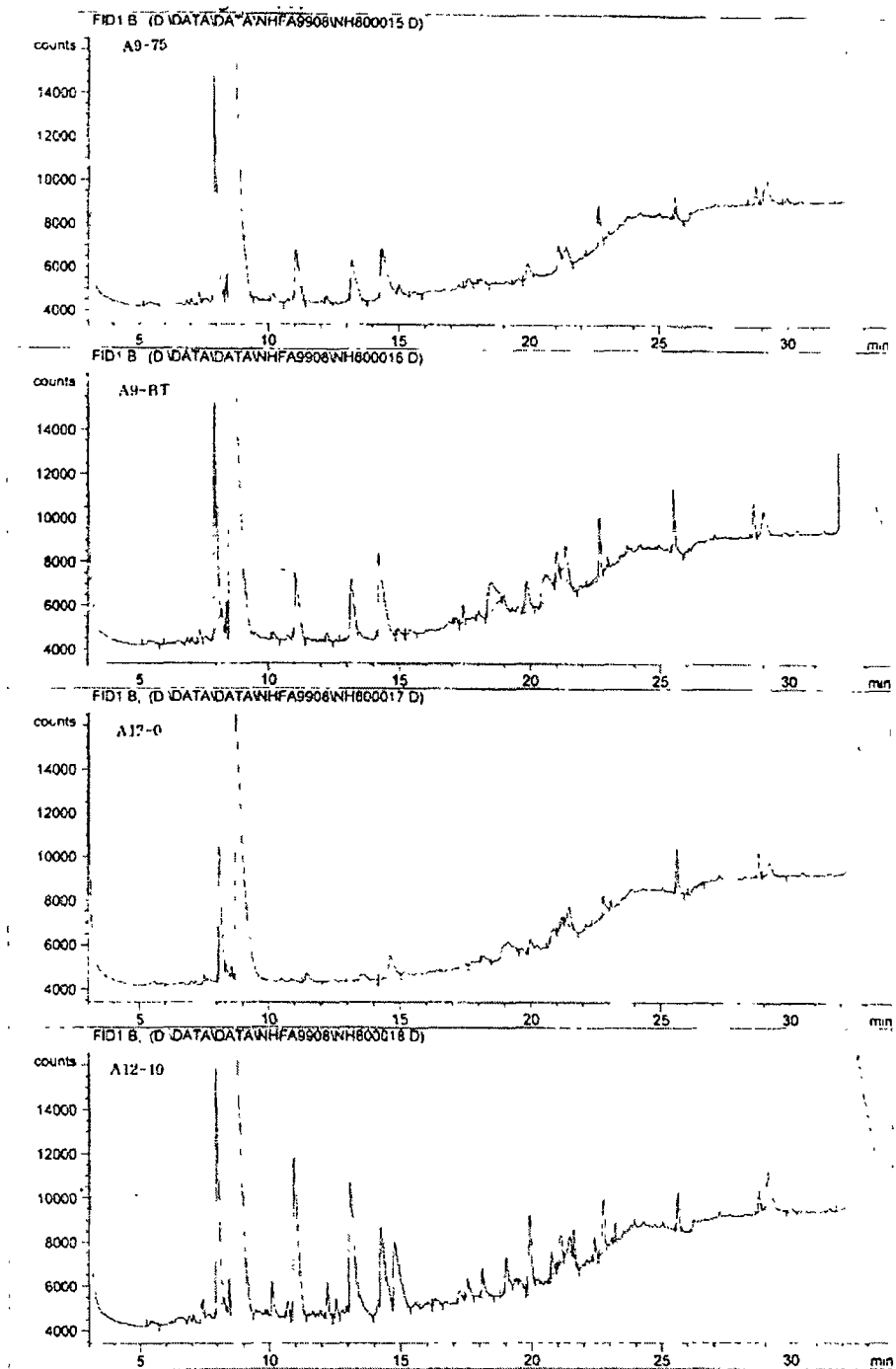


Figure 4-9. continued

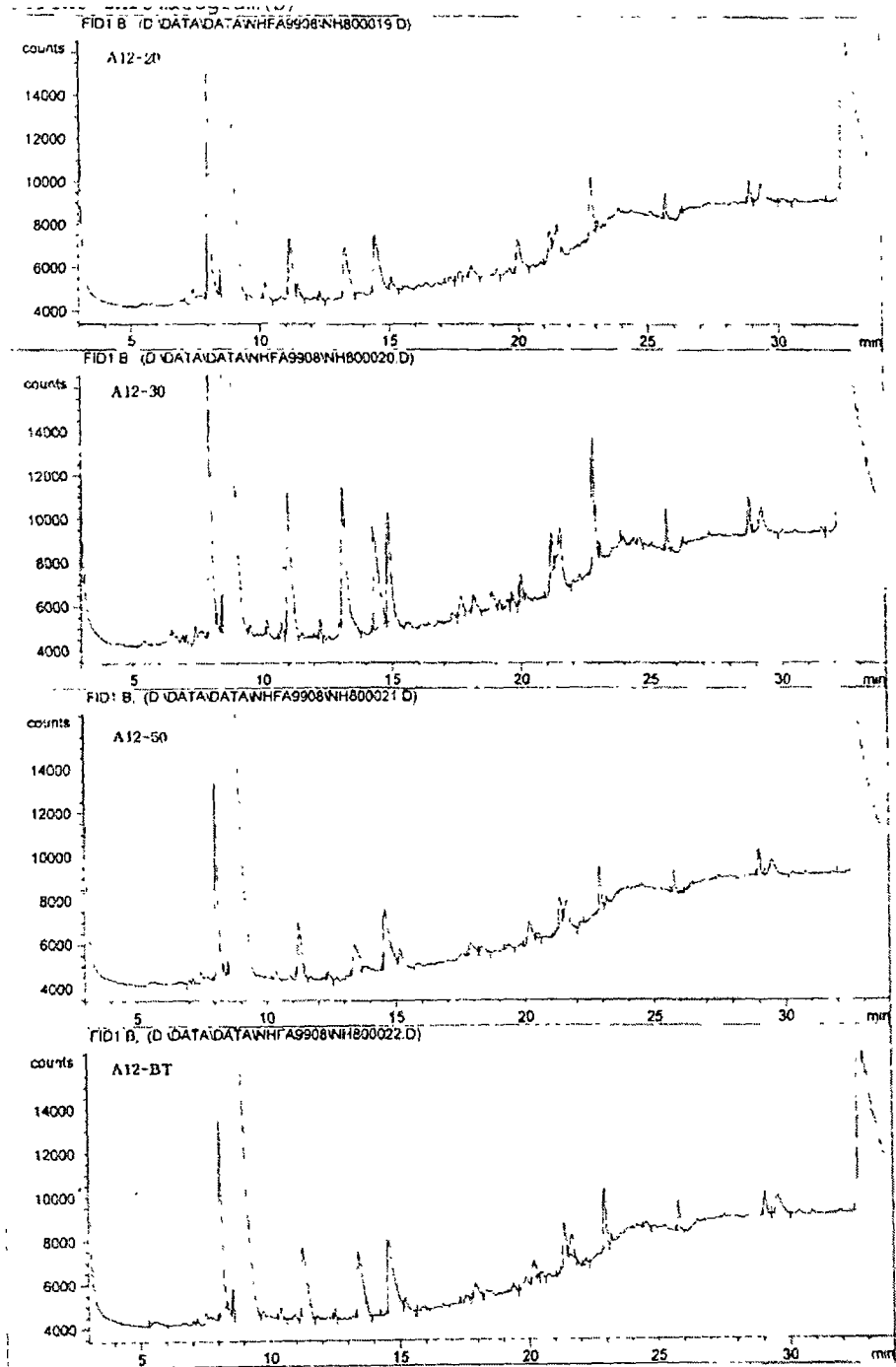


Figure 4-9. continued

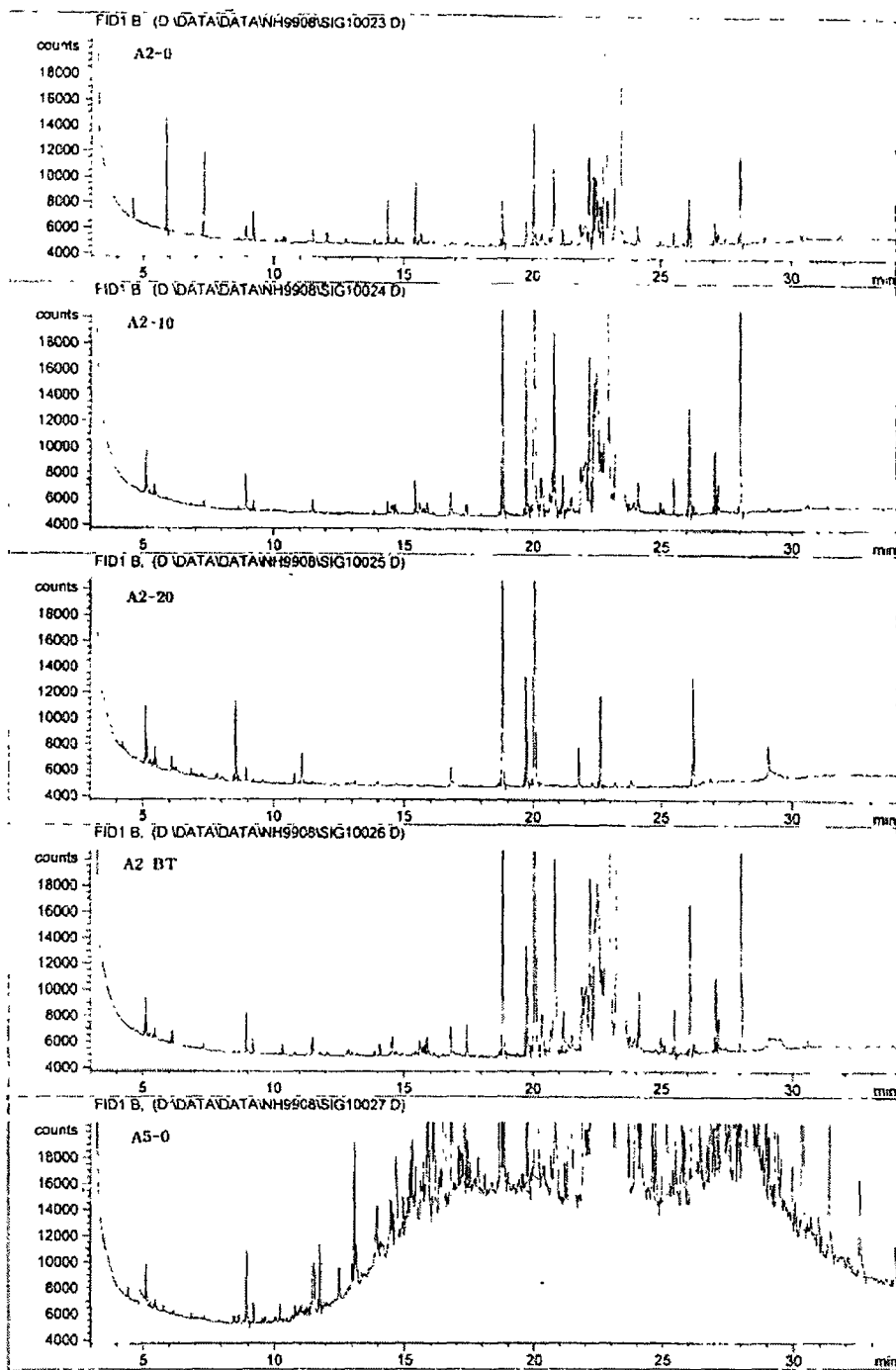


Figure 4-10. GC chromatogram of hydrocarbon extracted from sea water collected at Aug. 1999

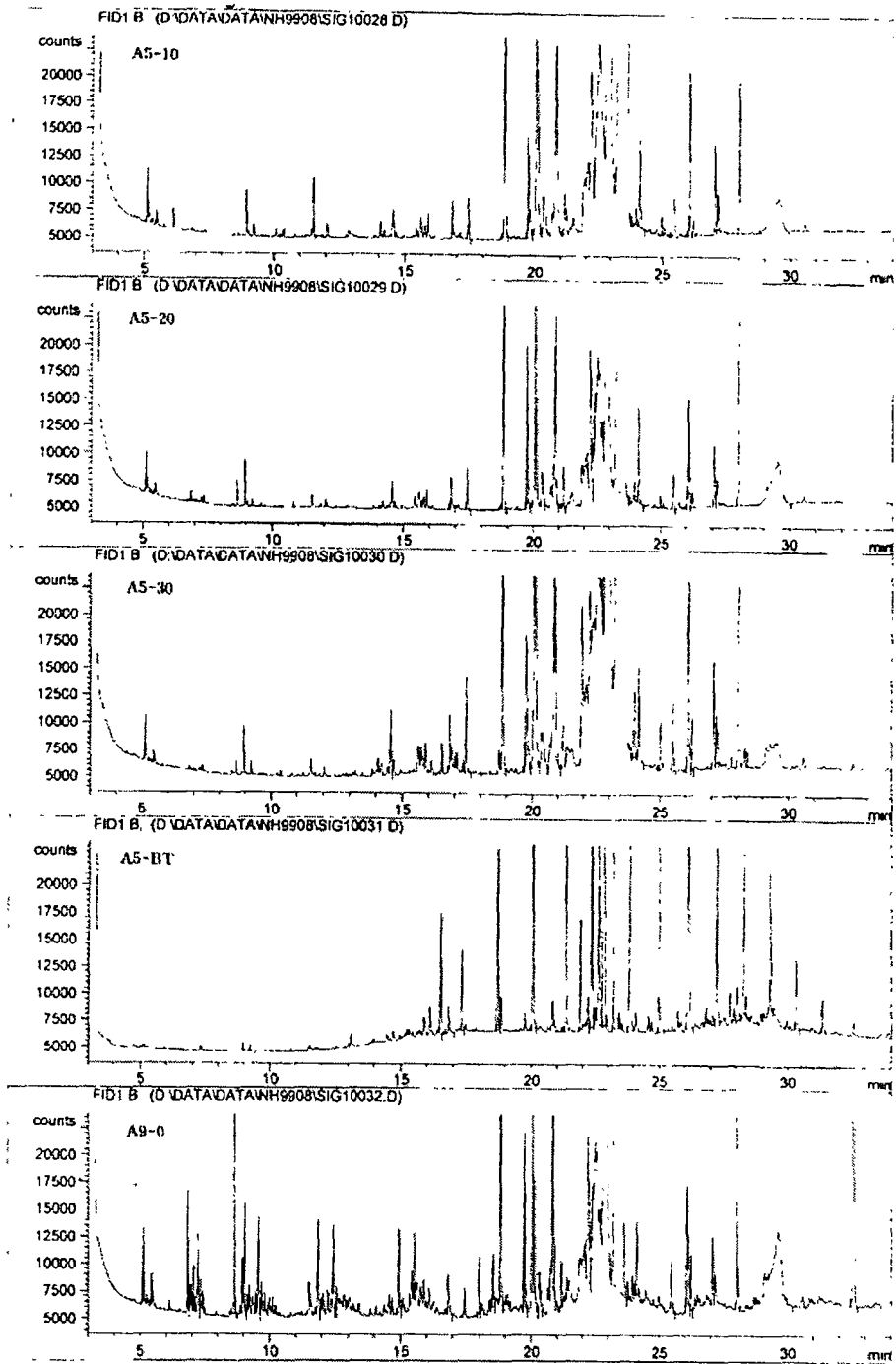


Figure 4-10. continued

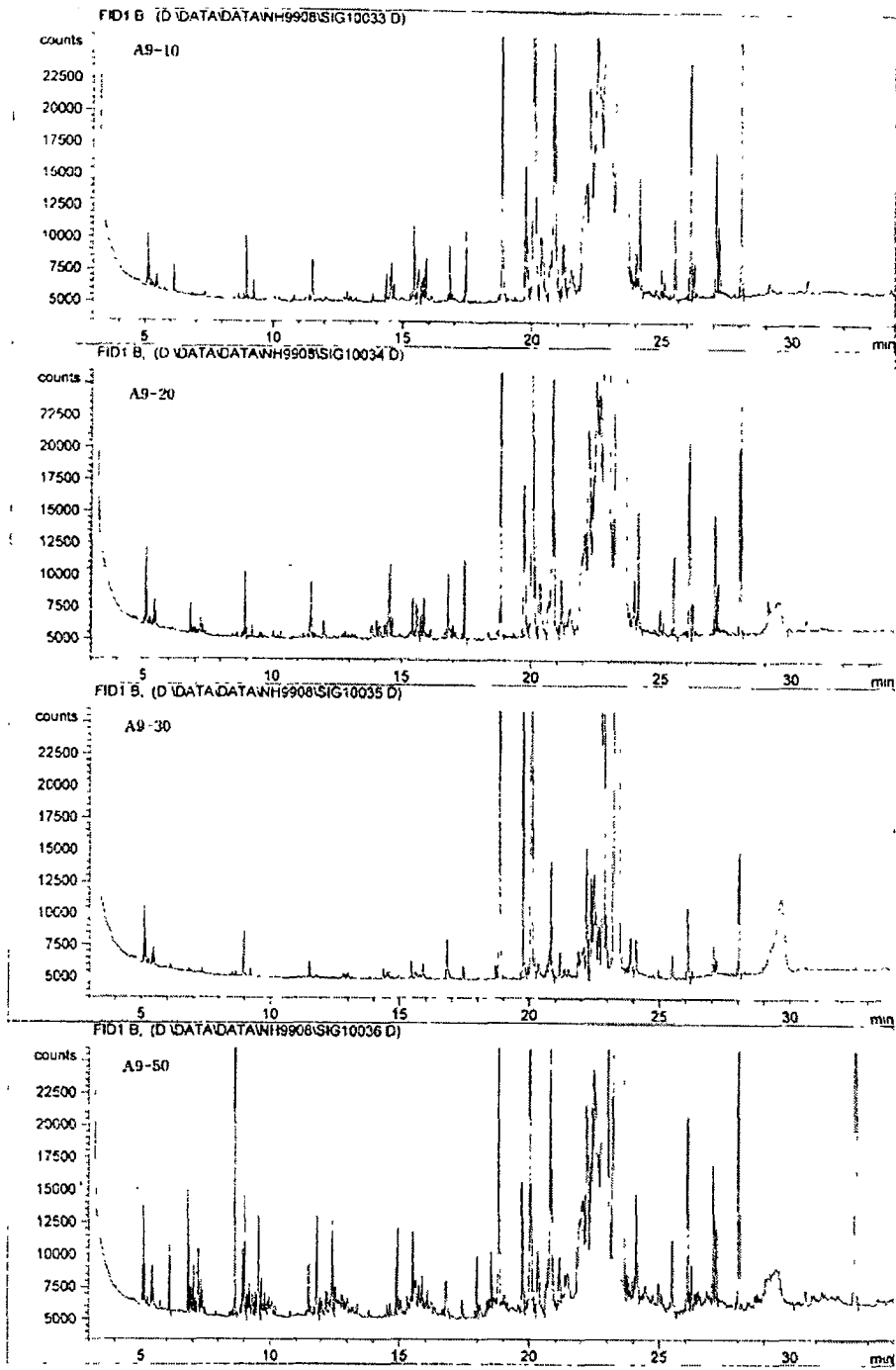


Figure 4-10. continued

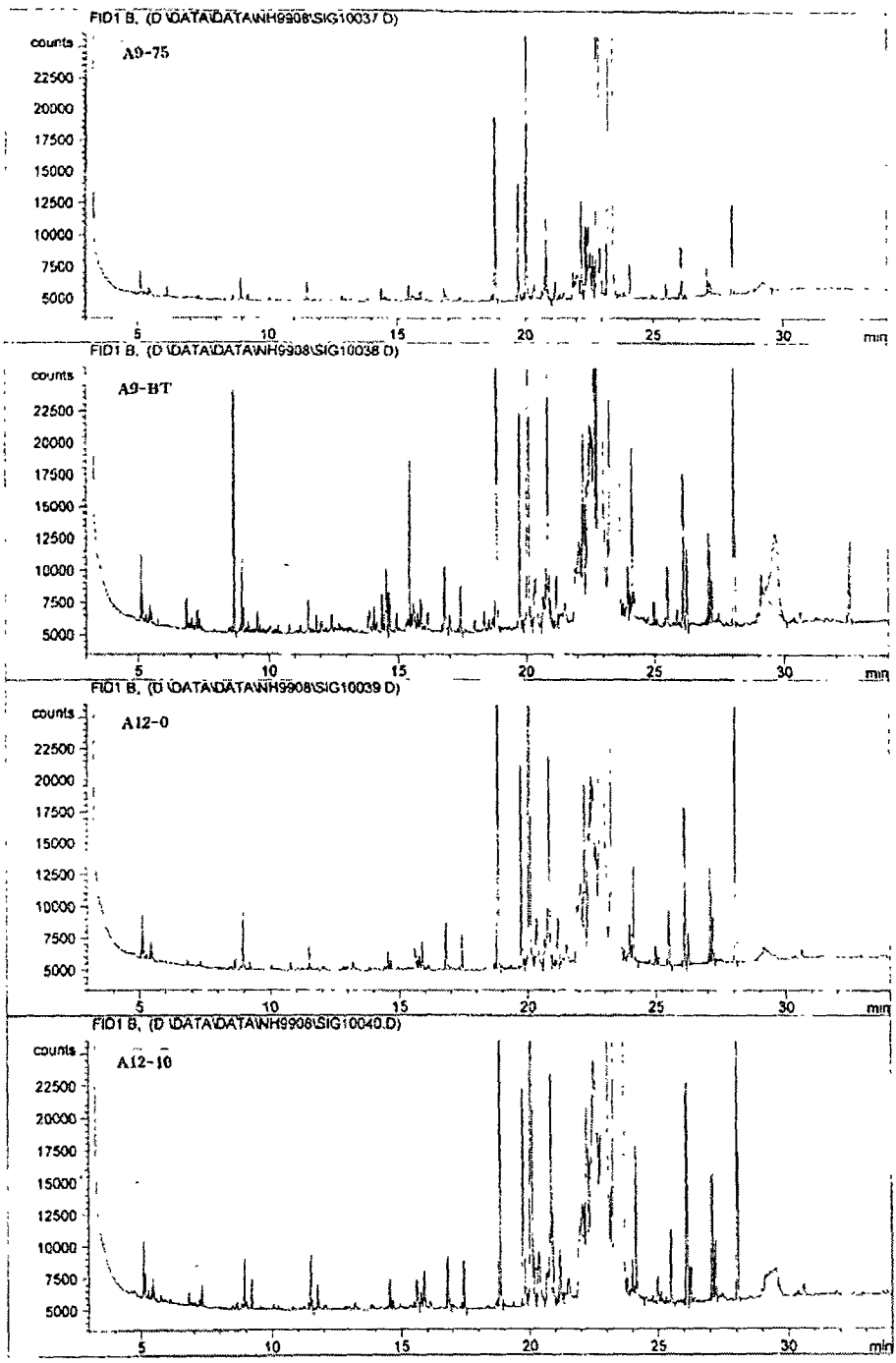


Figure 4-10. continued

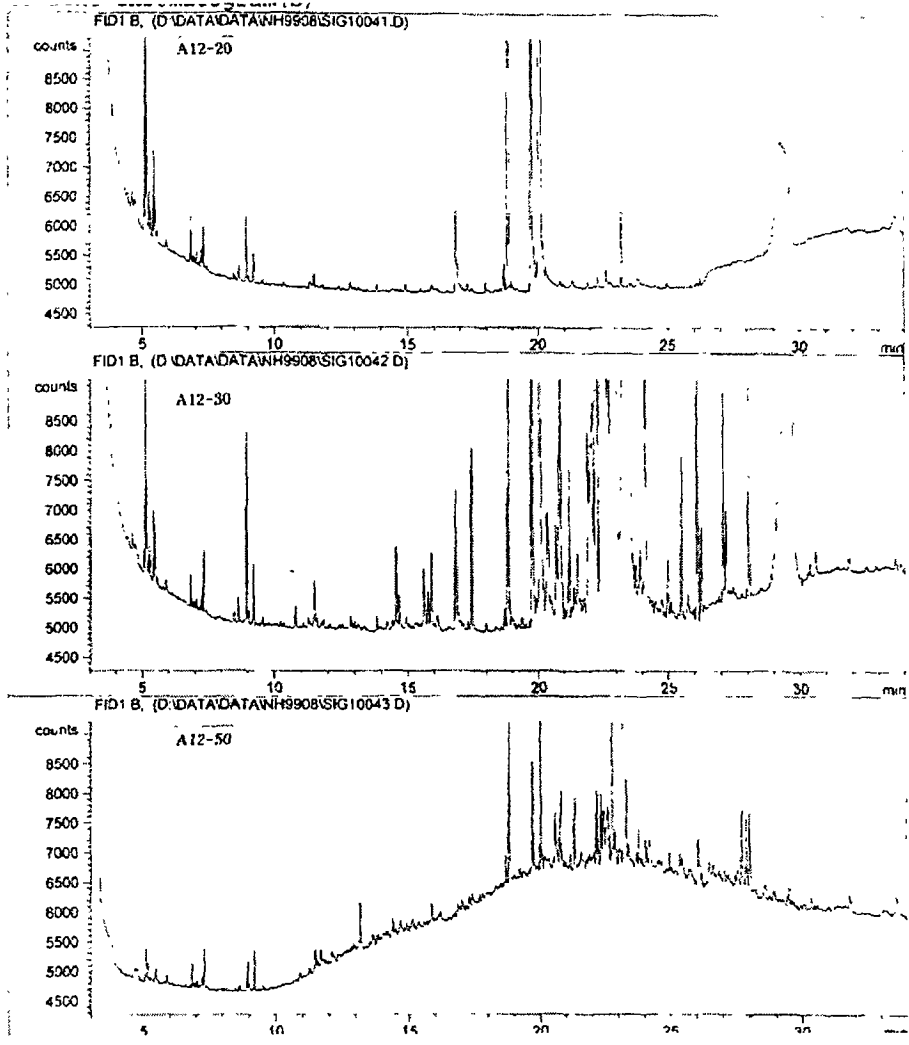


Figure 4-10. continued



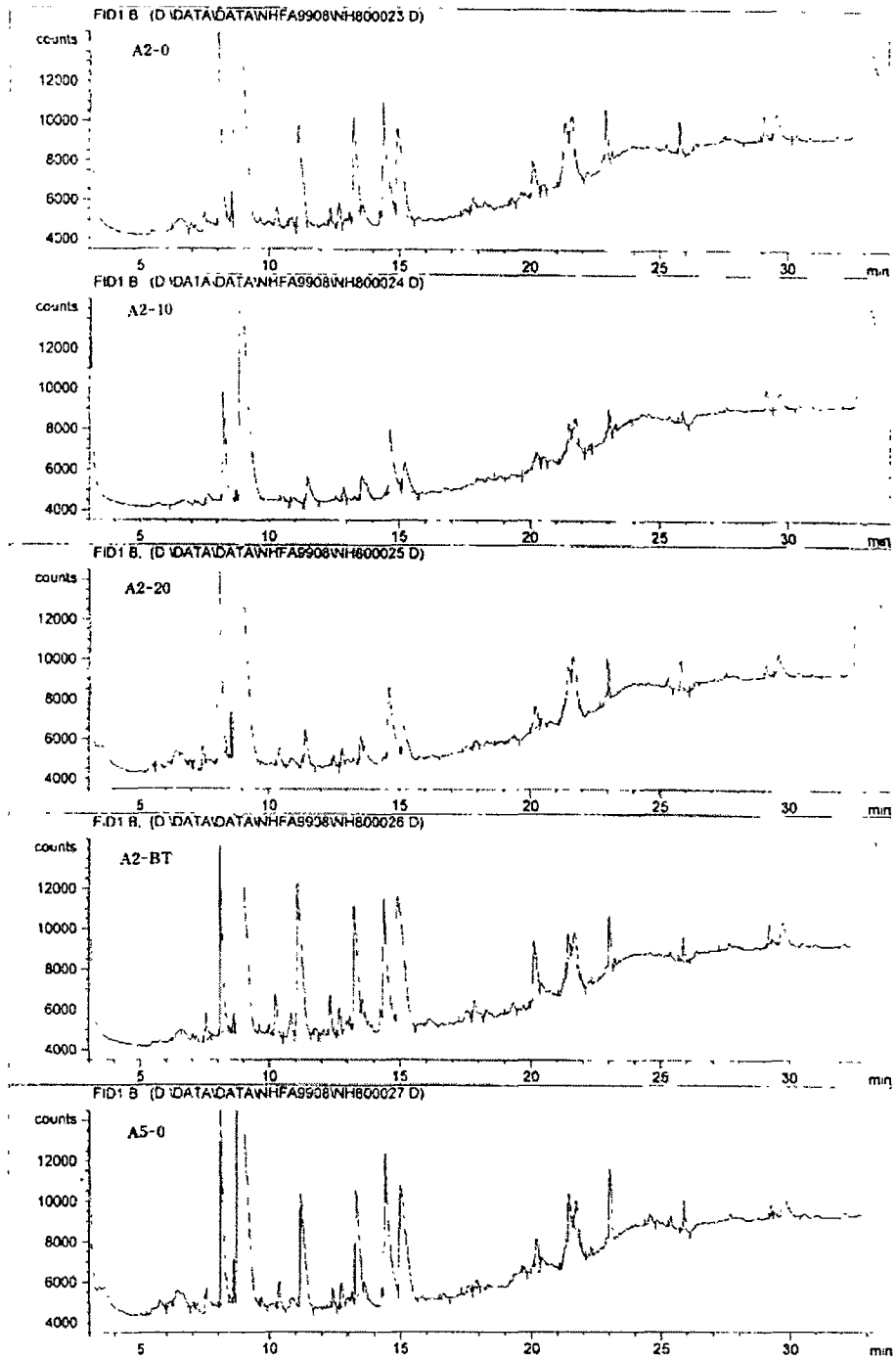


Figure 4-11. GC chromatogram of fatty acid extracted from sea water collected at Aug 1999

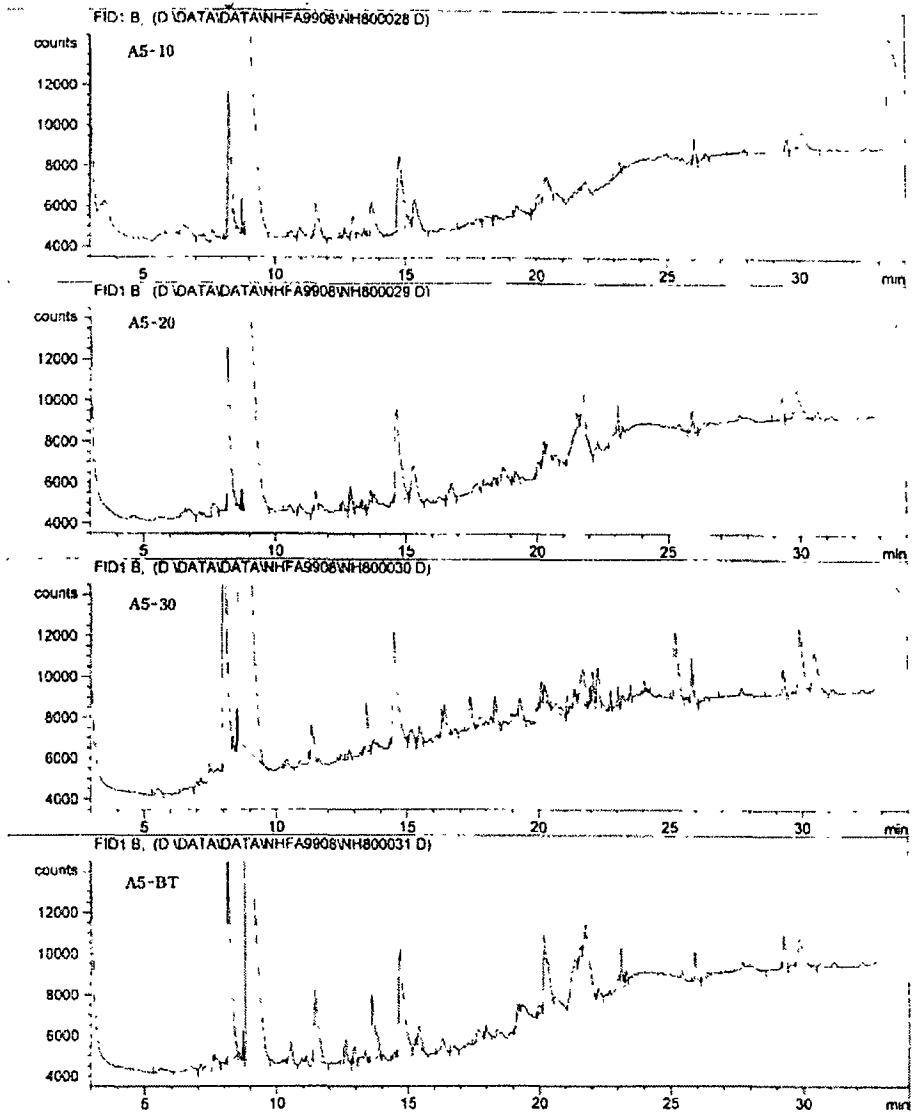


Figure 4-11. continued.

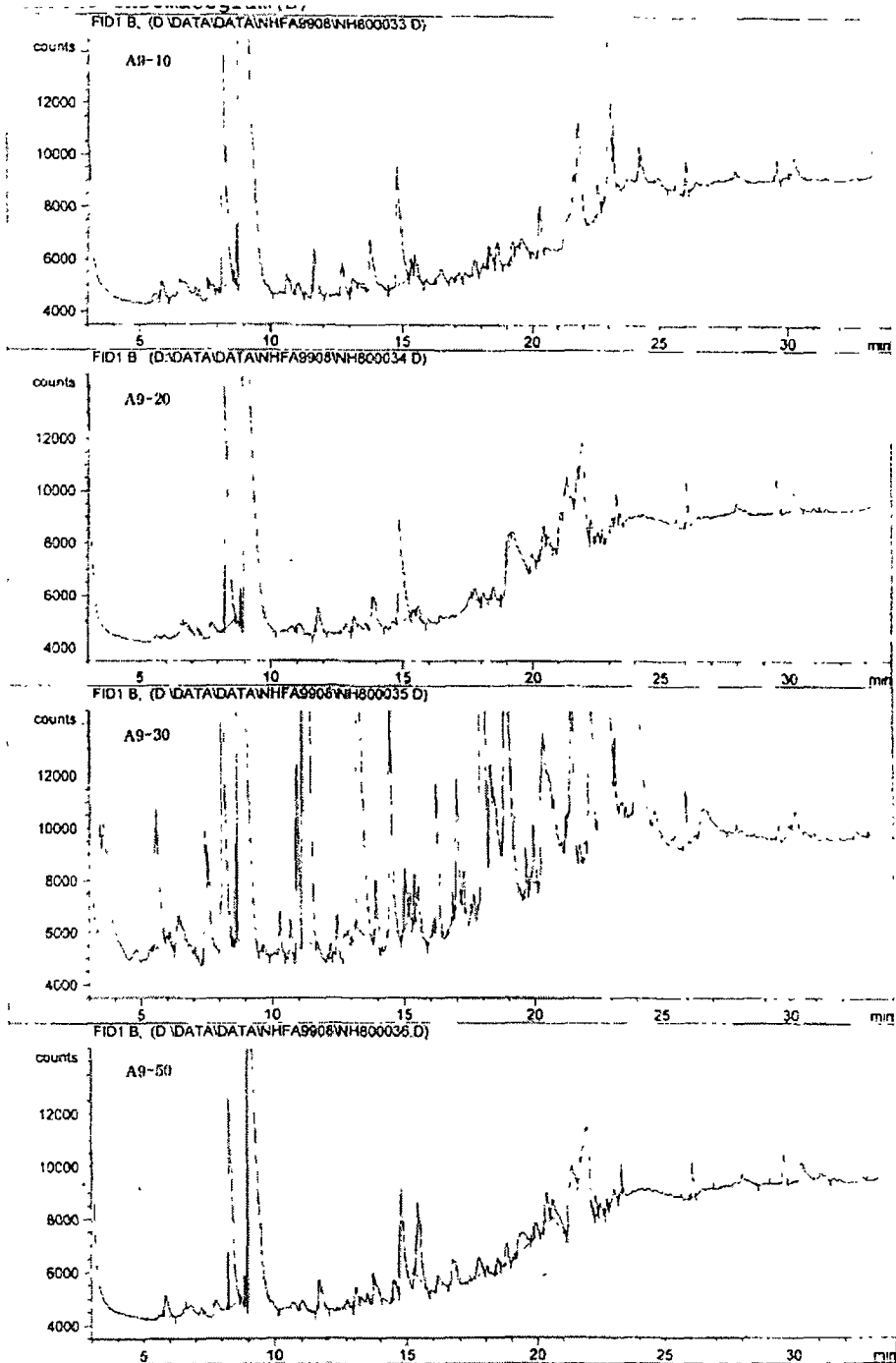


Figure 4-11. continued.

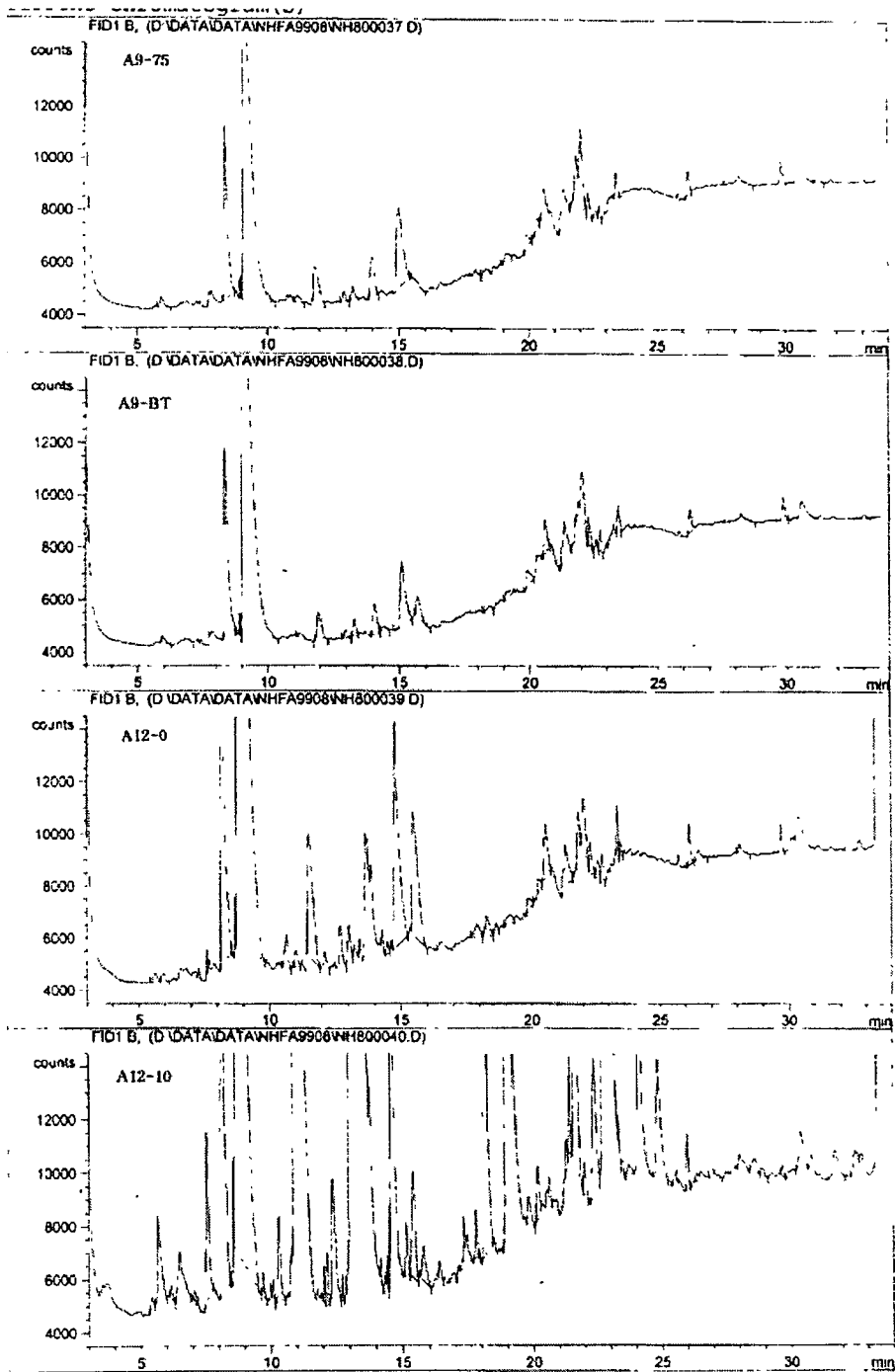


Figure 4-11. continued.

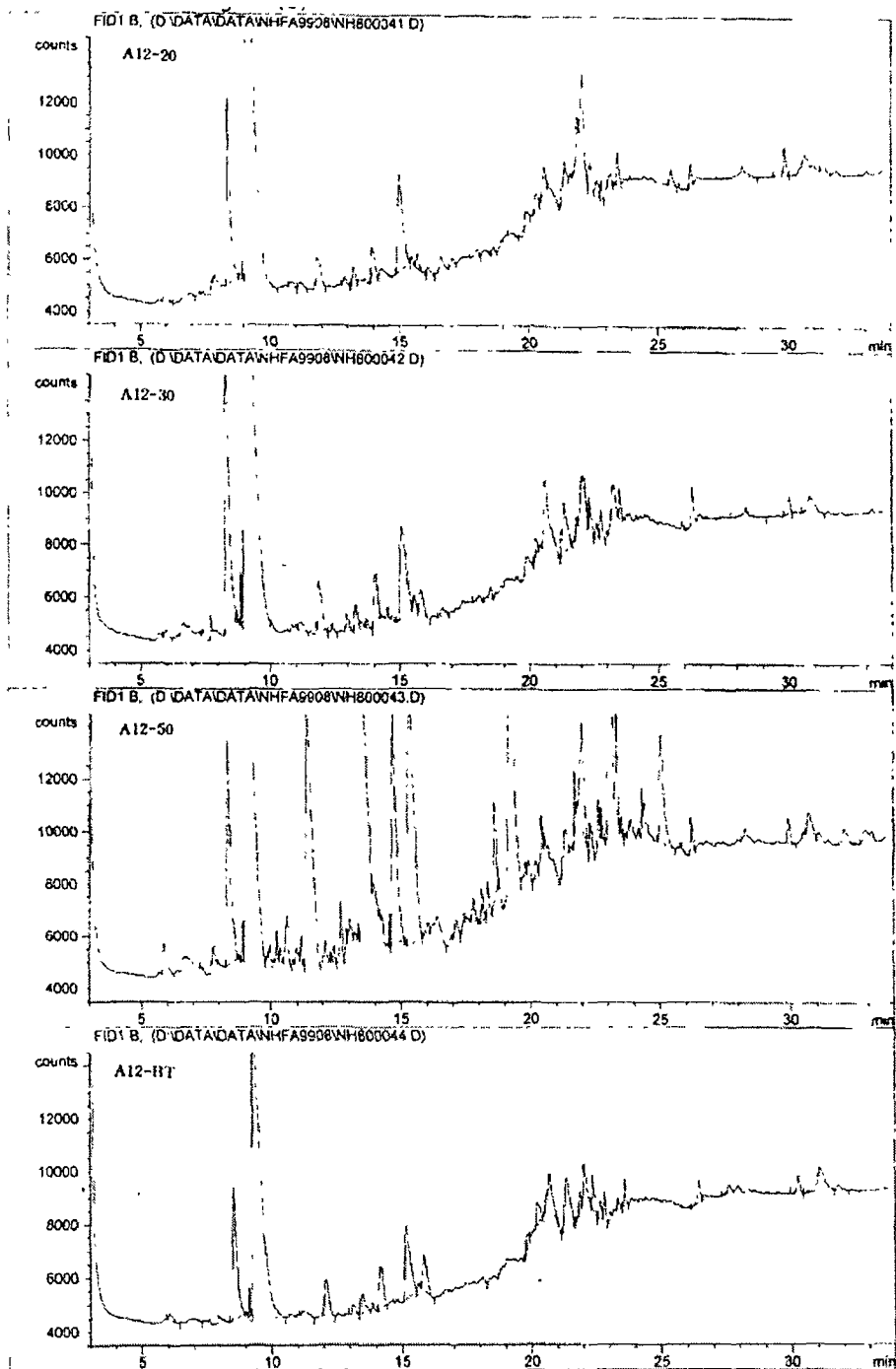


Figure 4-11. continued.



## 제 5 절 남해의 퇴적환경

### 1. 서론

남해는 현재 제주도와 쓰시마섬을 잇는 선 이북의 한국측 바다로서, 홀로세 이전(15,000-1,8000 yr BP)에는 육상환경이었으나 점진적인 해침에 의해 현재의 해양환경으로 변한 비교적 좁은(60-100 km) 해협이다(Fig. 5-1). 이와 같은 해침작용에 의해 남해연안에는 무수히 많은 만들이 존재하는데(리아스식 해안), 이들 대부분은 매우 두꺼운(최대 30 m 이상) 홀로세(Holocene)층을 가지고 있다. 남해 해저의 표층퇴적물의 분포는 이러한 홀로세 해침의 영향을 가장 잘 보여주고 있다. 즉 남해의 중앙부 가장 깊은 곳은 홀로세 초기의 해안환경을 나타내는 조립사(coarse sand) 퇴적물과 조개껍질로 이루어진 조립질 퇴적물이 수심 200 m 이하의 해저에 그대로 노출되어 있다. 그러나 연안쪽으로 가면서 이러한 조립질 퇴적물은 현생세립질 퇴적물의 점진적인 유입에 의해 이들과 혼합된 상태로 변하며, 연안의 만에서는 남해안의 강들에서 또 주변 해역에서 유출된 세립질 퇴적물들로 두껍게 쌓이게 되어 조립질 퇴적체는 강입구를 제외하고는 보기가 힘들어진다. 따라서 남해의 홀로세퇴적물에 대한 지질학적인 연구는 물론 생물학적, 지화학적인 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는, 이와같은 홀로세 해침작용과 이에 따른 퇴적작용을 잘 이해하여, 이러한 지식을 각각의 연구분야에서 얻은 결과를 해석하는데 신중히 고려해야 할 것이다.

본 연구에서는 남해에서 일어난 홀로세 해침작용에 대해 지금까지 발표된 지질학적 연구결과 중 일부를 발췌하여 정리해 보았다. 이를 위하여 한국자원연구소의 탄성파자료를 바탕으로 연구된 결과를 간략히 기술하고, 연안 바깥의 해저표층퇴적물의 특징을 한국해양연구소의 기존자료를 토대로 기술하였다. 그 다음에는 남해를 대표하는 만의 지질학적인 특징을, 여수의 가막양과 순천의 여자만에 대한 결과를 예를 들어 설명하였다. 특히 여자만의 경우, 다양한 퇴적학적인 연구가 실시되어 이에 대한 자세한 기술이 이루어졌다. 이와같이 기존의 연구결과를 요약한 후에, 본 연구 사업에서 획득한 총 27개의 박스코아에 대해 기술하고, 마지막으로 1998년 5월에 진해만 입구와 1999년 7월에 여자만에서 획득한 수리역학적 자료를 제시하고 지질학적인 의미와 향후 연구방향을 제안하고자 한다.

### 2. 홀로세 해침 퇴적작용

한국자원연구소는 남해의 제 4기에 대한 탄성파층서를 연구하기 위하여 총 6,000 km가 넘는 고해상(3.5 kHz, 스파커, 유니붐) 탄성파탐사를 섬진강입구에서 포항앞까지 10년간(1986-1995)에 걸쳐 실시하였다. 또한 탄성파탐사축선을 따라 주요한 지점에서 수많은 피스톤코아(길이, 0.5-4 m)를 획득하여 층서와 층들의 지질해석에 이

용하였다. 이에 대한 연구결과는 Min (1994)과 Yoo (1997)에서 볼 수 있다.

해수면이 최대로 낮았을 때, 홀로세 초기 퇴적물은 남해 중앙부에 있는 골에 100 m 이상의 두께로 쌓였다(Fig. 5-2). 이 퇴적체는 전체적으로 썩기모양으로, 골의 중앙선으로 향하는 일종의 클리노포움(Clinoform)양상을 보인다. 해저에 노출된 이 퇴적체의 하단부층준에서 얻은 조개껍질의 탄소동위원소 연대측정에 의하면, 이 층의 연대가 40,000-50,000 yr BP (Yoo, 1997)로 홀로세 이전의 퇴적물임을 알 수 있다. 그러나 상부층준에서의 연대측정값도 15,000-15,500 yr BP로서, 남해 중앙부 골에 분포하고 있는 퇴적체는 전체가 마지막 빙하기때 가장 낮은 해수면하에서 퇴적되었음을 지시한다(Yoo, 1997). 피스톤코아에서 본 실제의 퇴적물은 사질과 니질퇴적물의 혼합물로서 다짐작용을 받은 니질 또는 니질사 퇴적물이다. 전체적으로 조개껍질이 산재해 있는 괴상(Massive)의 니질사 퇴적물이지만 층상의 니질, 사질 또는 자갈이 많은 니질사 퇴적물도 존재한다.

홀로세 해수면상승에 의해 형성된 해침퇴적층(transgressive sequence)은 다양한 퇴적체를 보이고 있다(Fig. 5-2). 즉 해변과 수로퇴적물, 해침의 사질퇴적층 그리고 델타등이 탄성파자료에서 나타난다(Min, 1994; Yoo, 1997). 해변퇴적물은 중앙골 주변부에 현재의 120-150 m 수심선과 평행하게 국부적으로 나타난다(Fig. 5-2). 이 퇴적체를 가로지르는 탄성파자료에서, 중앙골의 깊은 쪽으로 향하는 경사진 반사면들이 잘 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 수로퇴적물은 탄성파자료에서 썩기모양의 침식면에 퇴적물이 쌓여 있는 형태로 쉽게 구별할 수 있다. 대부분의 수로퇴적물들은 수평적으로 잘 발달된 내부반사면을 가지고 있다. 이 퇴적체는 섬진강과 낙동강의 연장선으로 추적이 가능하다(Fig. 5-2). 델타퇴적체는 거제도 동쪽과 남해도 근처인 내대륙붕 이내에서 발견된다(Fig. 5-2). 이들의 내부반사면은 바다쪽으로 전진하는 양상을 가리키고 있다. 해침의 사질퇴적층은 수 m 이내로 매우 얇으며, 남해의 해저 대부분을 덮고 있다. 이들은 거제도와 남해도 근처에서, 바다쪽으로 향하는 내부반사면을 갖는 큰 규모의 사주들로 발달되어 나타나기도 한다. 해침의 사질퇴적층은 주로 분급도가 보통인 중립 또는 세립의 사질퇴적물(90%)과 조개껍질 그리고 자갈들로 구성되어 있으며, 특히 사질퇴적물은 보통 갈색 또는 붉은 색의 산화된 석영 입자로 이루어져 있다.

이들 모두의 해침퇴적물위로는 니질퇴적물이 덮고 있는데, 이 현생퇴적물의 내부반사면의 발달정도는 매우 다양하다. 즉 강 입구에서는 내부반사면이 연속적이고 층 발달이 좋으나 바다쪽으로 가면서 불연속적이고 점차 층 발달이 불량해진다. 일부 내대륙붕에서는 탄성파적으로 거의 투명한 음파특성이 나타나기도 한다. 이들 니질퇴적물은 사질성분이 5%이하로 평균입도가 7-9  $\phi$ 로 분급도가 불량하다. 피스톤코아에서는, 현생 니질퇴적물이 생물교란을 받아 균질하거나 실트와 점토층이 교호하는 층들로 이루어져 있다.



### 3. 표층퇴적물

#### 3.1. 표층퇴적물의 공간분포

남해의 표층퇴적물의 분포와 입도특성을 밝히기 위하여 무수히 많은 퇴적물채취가 행해졌으며 이에 대한 결과는 여러 곳에서 볼 수 있다(Chang et al., 1978; Chough, 1983; Kim et al., 1986, 1987, 1988). 또한 이들 자료를 합성하여 남해의 표층퇴적물 분포도가 Chough et al. (1991)에 의해 제시되었다(Fig. 5-3).

세립질 퇴적물(Silty clay, clayey silt)은 수심 60 m 이내의 연안에서 나타난다(Fig. 5-3). 특히 낙동강입구 동쪽으로는 수심 110 m 이내에서 연안을 따라 벨트상으로 나타나는 것이 특징이다(Fig. 5-3). 그러나 고흥반도와 거제도 근처에서는 사질함량이 상당히 증가하여 사질니 또는 니질사 퇴적물이 우세하다. 반면, 깊어질수록 이들 니질퇴적물은 니질과 사질의 혼합물(Sandy mud, muddy sand)로 바뀌고 결국은 앞서 설명되었듯이 자갈과 조개껍질이 풍부한 과거의 사질퇴적물로 대체되어진다(Fig. 5-3). 각각의 특징적인 퇴적체에서 얻은 피스톤코아의 주상시료(Fig. 5-1)는 이들의 표층퇴적물분포와 잘 일치하고 있다. 니질 주상시료는 전체적으로 생물교란작용을 심하게 받았으며, 일부는 커다란 조개껍질을 함유하고 다짐작용을 받기도 하였다. 이들 니질퇴적물은 바다쪽으로 갈수록 미세하나마 입도가 작아지는 경향을 보인다(Fig. 5-4). 사질과 니질의 혼합질 퇴적물에서 획득한 주상시료는(J-102 코아, Fig. 5-5) 상부로 갈수록 사질함량이 급속히 감소하는 경향을 보인다. 이는 홀로세해침을 단적으로 보여주는 예라고 할 수 있다. 과거 사질퇴적물층에서 얻은 주상시료는 퇴적물이 조립하고 단단하기 때문에 깊게 투과되지 못하였다. 따라서 짧은 주상시료는 표층퇴적상과 같이 자갈, 조개껍질 그리고 사질퇴적물로 구성된 혼합물이 수직적으로 변함이 없음을 보여주고 있다.

#### 3.2. 퇴적물의 지질공학적 성질

니질퇴적물의 함수율은 연안을 따라 입도에 의해 변한다(Fig. 5-6). 그러나 피스톤코아에서 함수율과 입도는 수직적으로 거의 변화가 없다. 전반적으로 함수율은 바다쪽으로 가면서 증가하는데 이는 입도가 세립해지는 경향과 잘 일치하고 있다. 이러한 경향하에서도, 고흥반도 앞의 실트질퇴적물(K-series 코아)은 함수율이 55-65%로 상당히 낮지만, 울산앞의 점토우세의 니질퇴적물은 150%이상의 높은 함수율을 갖는다(Fig. 5-6). 반면 사질이 우세한 퇴적물은 대체적으로 50%이하의 함수율을 보인다. 따라서 상부로 가면서 입도가 세립해지는 주상시료는 변화가 매우 큰 함수율을 보인다. 연안의 니질퇴적물은 동쪽으로 가면서 탄산염과 총유기물함량이 서서히 증가하는 경향을 보인다(Fig. 5-4). 울산 앞에서 이들 함량이 최대가 되어, 탄산염은 20-25%, 총 유기물함량은 7-12%가 된다. 수심 70 m 이하에서 획득한 사질

퇴적물은 30%이상의 극히 높은 탄산염함량을 가지나 반대로 대개 1% 미만의 극히 낮은 총 유기물함량을 가지고 있다. 니질퇴적물의 전단응력은 표층에서도 3-5 kPa로 상당히 높으며, 퇴적층 하부로 갈수록 서서히 증가하여 약 3 m 깊이에서 12-15 kPa 값을 가진다(Fig. 5-5). 전단응력 측정에 의해 얻은 전단민감도(Sensitivity)는 Skempton and Northey's (1952) scheme에 따르면 1-3 값으로, 낮거나 중간 정도의 전단민감도를 갖는 점토로 구분된다. 아테버그 한계값(Atterberg limits)은 탄산염과 총유기물함량과 마찬가지로 동쪽으로 갈수록 증가하여 소성과 액성이 울산쪽으로 갈수록 증가함을 알려준다.

#### 4. 현생퇴적작용

피스톤코아의 주상시료가 보여주었듯이 실트함량이 바다쪽으로 갈수록 감소하는 것은 이들이 먼 바다에서 기원한 것이 아니라 남해 연안 주변의 육상에서 유입되었음을 의미한다. 일부 점토광물연구에 의하면(Aoki et al., 1974; Park et al., 1976; Park and Han, 1985), 일라이트가 우세한 니질퇴적물은 그 기원을 동지나해에서 찾아야 한다고 주장하지만, 염분이 높은 쓰시마난류가 상대적으로 차갑고 염분이 낮은 연안수와 수온전선을 뚫고 연안으로 침입하리라고 보기는 어렵다(Huh, 1982; Zheng and Klemas, 1982). 여수와 울산 사이에서 얻은 표층퇴적물에 대한 미고생물학적(Ostracoda) 연구에 의하면(Kim et al., 1987), 연안에서는 *Bicornucythere bisanensis*로 대표되는 연안종이 우세하나 외해의 사질퇴적물에서는 *Bradleya nuda*와 *Bradleya japonica*로 대표되는 난류성 종들이 우세함을 밝혀, 지역에 따른 수괴의 구분이 뚜렷하다는 것을 보여주었다. Park et al. (1987)에 의하면, 여수와 부산사이에서 봄철 부유물질함량이 외해보다 연안이 더 높고 해저층으로 갈수록 또한 농도가 증가하여 이는 육상으로부터 퇴적물이 공급되고 해저에서는 저층퇴적물의 재부유가 빈번히 일어나고 있다는 것을 의미한다고 해석하였다.

인공위성사진에 의하면(Kim et al., 1987), 장마시기에 낙동강에서 유입된 부유물질이 연안을 따라 북동쪽으로 이동되는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 일반적인 해양물리조사(Chu, 1975)에 의해서도 밝혀지고 있다. 따라서, 울산 앞의 니질퇴적체는 낙동강에서 기원하였을 것으로 사료된다. 반면, 고흥반도 서쪽에서는 다른 기원이 작용하는 것으로 보여진다. 즉 늦가을철 인공위성사진은 한국의 서남해안과 남해안에 매우 잘 발달된 부유물질 흐름띠가 존재하는 것을 보여주는데, 이는 서해연안에서 부유된 물질중 일부가 남해안으로까지 이동됨을 의미한다(Wells and Huh, 1984; Yoo, 1986; Wells, 1988). 하지만 고흥반도와 거제도사이의 니질퇴적물은 섬진강에서 기원한 것으로 보여진다. Park and Yoo(1988) 또한 제 4기 후기의 연차층서학적인 연구(sequence stratigraphy)를 통해 이들에 대한 퇴적물 공급원으로서 가장 가능성이 큰 대상을 섬진강으로 보고 있다.

남해의 니질퇴적물은 점토의 함량이 대부분 50%를 넘으며, 이에 따라 함수율이

극히 높고(200%에 육박) 탄산염과 유기물의 보존이 상당히 잘 되어 있다. 해저면에서의 전단응력이 어느정도 높은 것은 일종의 가성과압밀(Apparant overconsolidation)상태를 나타내는 것으로, 퇴적율이 낮은 수중환경하의 니질퇴적물에서 많이 보고되고 있다(Almagor, 1982). 주상시료에서 보듯이 함수율이 수직적으로 변화가 거의 없는 것은 불량한 투수율, 심한 생물교란작용 그리고 퇴적물자체의 낮은 하중이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다. 울산 앞바다의 니질퇴적물이 상대적으로 높은 탄산염과 유기물 함량을 갖는 것은, 동해의 심층수가 연안으로 용승(upwelling)함에 따라 생물의 기초생산성이 크게 증가하기 때문으로 사료된다. 이러한 높은 유기물함량은 울산 앞 해역 주상시료들이 가장 높은 소성과 액성을 지니게 된 원인으로 작용하는 것으로 보여진다.

## 5. 박스코아의 퇴적구조

1998년 탐사를 통해 총 27개의 박스코아(길이, 30 cm 내외)를 남해역 전반에 걸쳐 채취하였다(Fig. 5-7; Table 5-1). 서로의 비교연구를 위해 서남해의 남쪽과 제주도 서쪽해역에서도 시료를 채취하였다. 기존의 피스톤코아 시료에 비해 박스코아는 교란을 전혀 받지 않은 해저층 최상부시료를 얻을 수 있기 때문에 현생퇴적작용을 수 년에서 수 십년 단위로 연구하는데 가장 적합하다. 이들이 채취된 지역으로 분류하여 서남해 흑산니대, 제주도 서부, 남해연안, 그리고 남해 중앙부로 각각의 퇴적특성을 순차적으로 기술하고자 한다.

### 5.1. 서남해 흑산니대

흑산니대내에서 채취된 박스코아는 B1, B2, B7, B9이다(Fig. 5-8). 이 지역의 특징은 실트와 점토로 구성된 미세층들이 잘 발달되어 있는 것이 특징이다(Fig. 5-9). 사질함량은 B2코아의 경우 20%가 넘으나 대부분의 코아에서는 10%미만이고 거의 같은 양의 실트와 점토로 되어 있다(Table 5-1). 따라서 평균입도는  $8\phi$  이하로 극히 미세하다(Fig. 5-9). 그러나 흑산니대의 가장자리에서 채취된 B9코아는 사질함량이 20%를 넘을 뿐만 아니라 완전히 생물교란을 받아 미세층들이 보이지 않는다(Fig. 5-9). 이는 오히려 제주도 서부의 박스코아에서 볼 수 있는 퇴적특성에 더 가깝다.

Lee (1986)의 연구에 의하면, 이러한 미세층들은 겨울철에 강한 파랑에 의해 서해연안 및 흑산니대의 표층퇴적물이 재부유되고 체질당하여 주로 실트입자( $4-6\phi$ )들로 구성된 층이 형성되는 반면, 여름철에는 점토성분이 상대적으로 증가하여 점토우세층이 이루어진 결과로 보고 있다. 이 이론과 기존의 Wells (1988) 이론을 따른다면, 겨울철에 이와 같이 재부유된 부유물질들은 일부가 남해안으로 이동되는 것으로 예측할 수 있다. 흑산니대의 기원에 대해서는 아직 명확히 정립되어 있지 못한 실정이지만, 많은 해양지질학자들은 우리나라 기원, 특히 금강기원을 선호하고

있다(Chough, 1983; Lee and Chough, 1989). 최근에 해양연구소 해양지질부의 퇴적역학팀이 최신 수리역학적 장비(EMCM, OBS, altimeter, T-S sensors, LISST-100)를 사용하여 흑산니대로 공급되는 부유물질의 기원을 설명할 수 있는 신뢰성 있는 자료를 얻었다(한국해양연구소, 1998). 이 결과에 의하면, 여름철에는 흑산니대위로 순수부유물질이동은 거의 없으나 겨울철에는 여름철에 비해 수 배 높은 부유물질농도를 유지하고 이들은 뚜렷이 남쪽으로 이동한다는 것을 볼 수 있었다.

## 5.2. 제주도 서부해역

이 지역에서 채취된 박스코아는 A1, A3, A5, A7, A9, B11이다(Fig. 5-8). 이 지역은 해수면이 낮았을 때 퇴적된 과거 사질퇴적층이 현생 니질퇴적물과 혼합되어 가는 과정에 있는 곳이다. 따라서 코아퇴적물은 사질함량이 50-70%로 약간 우세한 가운데 점토함량이 약 30%로 점토질사(clayey sand) 퇴적물로 분류된다(Fig. 5-10; Table 5-1). 퇴적구조는 박스코아 전체에 걸쳐 생물교란작용을 심하게 받아 물리적 구조는 보이지 않으며 생물의 활동흔적이 간혹 나타나고 코아 A9의 경우 조개껍질들이 산재해 있다(Fig. 5-10). 이 지역의 평균입도는 5-6 $\phi$ 의 범위를 갖는다.

이 해역은 우리나라의 강들은 물론 중국의 황하와 양자강으로부터 멀리 떨어져 있는 곳이다(Fig. 5-7). 우리나라 강에서 기원한 부유물질은 흑산니대까지는 영향을 미치지만 그 바깥쪽으로 이곳까지 영향을 주지는 못하는 것으로 보여진다. 양자강은 이 지역에서 상대적으로 가장 가까이 위치하기 때문에 가능한 기원으로 보기가 쉬우나 지금까지 연구된 결과로는 양자강에서 유출되는 부유물질은 대부분 연안에 치우쳐서 남쪽으로 동지나해로 이동, 퇴적되는 것으로 알려져 있다(McKee et al., 1983; Milliman et al., 1985). 하지만 여름철 홍수기에 양자강에서 나온 담수가 제주도 서쪽 근방까지 접근할 것이라는 예측(Sternberg et al., 1985)이 있는 것으로 보아 이 지역에 양자강 기원의 부유물질이 공급될 가능성을 전혀 배제할 수는 없다. 그러나 무엇보다도 현재의 황하 또는 예전의 황하기원 델타에서 부유물질이 공급된다는 설(Lee and Chough, 1989)이 가장 설득력이 있다. 즉 황해 중앙부에 놓여 있는 거대한 황하기원 니질퇴적물의 바로 주변부에 이 지역이 위치하기 때문에 현재의 황하기원 부유물질이 쌓일 것으로 볼 수 있다. 또 한편으로는 1855년 이전에 황하가 산둥반도 이남으로 흘렀을 때 생성된 강입구의 델타를 구성하는 니질퇴적물이 현재는 강한 조류에 의해 침식, 재부유되어 제주도 서부와 남서부로 이동되는데 그 경로에 이 지역이 위치하기 때문에 니질의 델타퇴적체로부터 재부유된 물질이 쌓일 확률이 또한 높을 것이다(Nittrouer et al., 1984; Butenko et al., 1985; DeMaster et al., 1985). 지금까지 제시된 두 가지 이론 모두 이 해역에 분포하고 있는 퇴적물이 황하기원이라는 것이며, 만약 이 추론이 옳다면 이 해역의 퇴적물은 황하기원 퇴적물의 특징인 스멕타이트와 CaO를 다량 함유하고 있을 것이다.

### 5.3. 남해 연안해역

남해연안의 박스코아들은 크게 3가지 지역으로 나눌 수 있다(Fig. 5-8). 즉 고흥반도 서쪽(C1, C3), 섬진강 근처(D1, D3, D5), 그리고 낙동강 입구(E1, E2). 고흥반도 서쪽의 코아들은 사질함량이 50%정도 되며 실트와 점토함량이 각각 25%정도로서 평균입도는  $5.5-6.0\phi$ 이다(Fig. 5-11; Table 5.1). 코아 전체에 걸쳐 별다른 물리적 구조가 없고 조개껍질이 산재해 있는 것이 특징이다(Fig. 5-11). 섬진강 근처의 코아들은 남해연안에서 나타나는 전형적인 니질퇴적물의 물성을 나타내고 있다(Fig. 5-12; Table 5-1). 실트와 점토가 각각 50%정도로서 사질은 거의 없다. 이에 따라 평균입도는  $9\phi$  이상이고 코아 전체에 걸쳐 생물교란을 심하게 받아 물리적 퇴적구조는 보이지 않는다(Fig. 5-12). 낙동강입구의 E1 코아는 실트와 점토가 합쳐서 80%이상으로 니질퇴적물이지만 실트우세와 점토우세의 층들이 교호하는 물리적 구조를 보인다(Fig. 5-13; Table 5-1). 평균입도는  $6-8\phi$ 의 범위를 갖는다. 그러나 E1 정점으로부터 남쪽으로 수 킬로미터 정도 떨어진 정점의 E2 코아는 점토의 양이 70%이상으로 크게 증가하고(평균입도는  $9\phi$  이상), 층리는 매우 얇아지고 거의 대부분 생물에 의해 교란되어 있다(Fig. 5-13).

고흥반도 서쪽은 앞서 기술한 바와 같이 섬진강이나 낙동강으로부터 직접 육상기원의 퇴적물을 받는 곳이 아니고 겨울철에 서해연안에서 재부유된 퇴적물이 이동되어 와 쌓이는 곳으로 보고 있다. 따라서 고흥반도 동쪽보다 니질퇴적물의 공급이 적을 것이며 이에 따라 사질함량이 높은 것으로 사료된다. 반면 섬진강과 낙동강 입구에서는 부유물질의 공급이 활발하므로 니질퇴적물이 상대적으로 두껍게 쌓인다고 본다. 특히 낙동강 바로 입구에서는 E1 코아에서 보듯이 막대한 양의 부유물질 공급으로 인하여 퇴적율이 높고 따라서 생물의 활동이 위축되어 물리적 퇴적구조가 잘 보존되어 있음을 알 수 있다. 여기서 층리의 발달은 홍수기와 갈수기(Dry season) 또는 여름과 겨울의 부유물질 유입량의 변화를 지시한다고 할 수 있다.

### 5.4. 남해 중앙부해역

남해의 가장 깊은 곳에서 채취된 박스코아는 비교적 풍부하여 C5, C7, D7, D9, D10, D11, E3, E4, E5, E6등이 이에 속한다(Fig. 5-8). 이 지역의 퇴적물은 자갈 또는 조개껍질을 풍부하게 함유하고 있으며 니질함량은 30%이하이다. 전체적으로  $3.5-4.0\phi$  입도의 사질퇴적물로서 해류에 의해 형성된 일차적인 퇴적구조는 보이지 않는다(Fig. 5-14; Table 5-1).

이 지역은 홀로세 초기 해수면이 낮았을 때 퇴적된 층들이 대부분 그대로 노출되어 있기 때문에, 박스코아 내에는 그 당시 살았던 패류들의 잔재가 그대로 함유되어 있고 또한 당시의 해안가에 널려있던 자갈들도 포함되어 있다. 이러한 노출은 홀로세 해침시기 초반에 해수면이 상대적으로 급속히 상승했음을 의미한다. 홀로세

해침에 대한 보다 자세한 내용은 앞서의 '홀로세해침 퇴적작용'에서 볼 수 있다.

## 6. 만의 퇴적작용 I: 가막양

가막양은 여수반도와 돌산도로 둘러싸여 있는 남해의 전형적인 만으로서, 남쪽으로는 여러 조수로(Tidal inlet)를 통해 남해와 연결되어 있으며 북동쪽으로는 좁은 수로를 통해 광양만과 연결되어 있다(Fig. 5-15). 가막양으로 흘러들어 오는 큰 강은 없으며, 작은 하천이 몇 개 유입될 뿐이다. 따라서 육상으로부터 유입되는 퇴적물의 공급량은 미미하다. 가막양의 평균수심은 9 m로 상당히 얕으며 왕복성 조류의 주된 방향은 남북방향이다. 최대 대조차는 350 cm이며 평균조차는 195 cm이다(National Hydrographic Office of Korea, 1973). 남쪽의 조수로에서의 최대유속은 1 m/sec에 이른다(National Hydrographic Office of Korea, 1973). 이 곳에서는 커다란 파형의 퇴적체가 존재하는데, 이들의 평균입도는 7.5  $\phi$ 로서 주변의 실트질 점토에 비해 조립한 편이다. 만내의 조그만 섬주변에는 조류침식에 의한 모우트(Moat)들이 흔히 나타난다(Chough, 1983).

탄성과자료상에서 보이는 음파기저부(Acoustic basement)는 남쪽으로 가면서 깊어진다. 이 기저부위에 놓여있는 홀로세 퇴적층은 그 두께가 수 m에서 30m이상으로 만 중앙부가 가장 두껍다. 특히 중앙부의 두꺼운 퇴적층은 가스를 함유하기 때문에 탄성과 자료상에서 음파의 전달이 불량하게 나타난다(Chough, 1983). 이들 가스는 퇴적물내의 유기물이 분해되어 발생하는  $CH_4$ ,  $CO_2$  또는  $H_2S$ 로 보여진다. 만내의 모우트근처에서 얻은 피스톤코아 퇴적물의 탄소동위원소 연대측정에 의하면, 최상부층 6 m가 쌓이는데 약 4,500 yr BP가 소요되었음이 밝혀졌다(Chough, 1983).

만 내의 평균입도는 북쪽으로 갈수록 미세해지는데, 이는 부유물질의 유입이 남쪽의 조수를 통하여 이루어짐을 의미한다. 그러나 두드러진 해저면 퇴적형(Bed form)이나 물리적인 퇴적구조가 보이지 않는 것은 구성물질이 극히 미세하고 이에 따라 해저에 서식하는 유기체에 의해 이 구조들이 파괴되기 때문으로 여겨진다. 피스톤코아에 의한 주사시료상에 나타나는 사질 또는 실트의 미세층은 간헐적으로 발생하는 폭풍에 의해 상대적으로 조립한 퇴적물이 공급되어 형성된 것으로 보여진다.

## 7. 만의 퇴적작용 II: 여자만

### 7.1. 연구지역 개관

빙하기 이후에 형성된 여자만은 한반도 리아스식 남해안 중앙부에 위치해 있으며, 660 km<sup>2</sup>의 전체면적을 가지고 있다. 동쪽으로는 고돌산반도 그리고 서쪽으로는 고흥반도로 둘러싸여 있으며, 만의 남쪽에 두 개의 조수로(Tidal inlet)에 남해와 연

결되는 반폐쇄된 만(Semi-enclosed bay) 형태를 보이고 있다(Fig. 5.16). 주변 육상지질은 대부분 백악기 후기에 형성된 응회암들로 구성되어 있으며(Chough, 1983), 이들은 400 m 이상 높이의 산들과 주변의 섬들로 연결되고 여자만의 기반암을 구성하고 있는 것으로 사료된다.

만 내 해저면의 지형은 남쪽 입구의 수로를 제외하고는 비교적 수심이 낮고(평균수심: 5.4 m), 단순한 형태를 보이고 있다. 남쪽의 입구에서 남도에 의해 서수도와 조발수도로 분리되어 있는 조수로들은 외해와 내만과의 물질의 유출입 통로 역할을 한다. 한편, 만내에는 해안을 따라 넓은 니질조간대가 최대 4 km의 폭을 가지고 발달되어 있다.

여자만의 북쪽에 위치한 소규모의 하천들(별교천, 이사천, 동천)은 담수와 육원성 퇴적물을 만내로 유입시키는 유일한 공급원 역할을 한다. 별교천, 이사천 그리고 동천의 배수면적은 각각 72.1 km<sup>2</sup>, 195.2 km<sup>2</sup> 그리고 139.1 km<sup>2</sup>으로서 이사천으로부터의 물질공급이 가장 우세할 것으로 판단된다. 이들의 연간 담수의 공급율은 각각 0.07 km<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>, 0.19 km<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup> 그리고 0.14 km<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>이다(한국해양연구소, 1990). 계절별 공급량은 대부분(약 60%) 여름철(6-9월) 홍수시에 일어난다.

여자만의 조석은 M<sub>2</sub>와 S<sub>2</sub>분조가 우세한 반일주조이며, 일조부등현상이 아주 극심하게 나타난다(한국해양연구소, 1990). 최대 대조차는 만입구에서 내만으로 향하면서 점차증가하는 경향을 보여, 만입구에서는 381 cm 그리고 내만의 가장 북쪽에서는 422 cm의 대조차를 가진다(한국해양연구소, 1990). 조류의 흐름방향은 남-북방향이며, 만의 중앙부에 위치한 여자도 근처에서 관측한 결과(Lim et al., 1991)에 의하면, 조석별 최대유속이 낙조시에는 63 cm s<sup>-1</sup> 그리고 창조시에는 54 cm s<sup>-1</sup> 정도로 낙조유속이 보다 우세한 조류비대칭성(Tidal asymmetry)을 갖는다. 하지만, 만입구의 조발수도와 서수도에서는 오히려 창조류가 우세한 비대칭성을 보인다(National Hydrographic Office, 1973).

## 7.2. 조사 및 분석방법

### 7.2.1. 표층퇴적물 채취 및 입도분석

홍수시 하천으로부터 배수량이 많은 1995년 8월과 10월에 여자만 조간대를 포함하여 만 전체에 걸쳐 76개의 표층샘플을 van Veen 그래프샘플러를 이용하여 실시하였다(Fig. 5-16). 현장에서 채취한 샘플은 실험실로 옮겨진 후, 일차적으로 약 5g을 1,000 ml 비이커에 덜어내서 10% 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 24시간 이상 반응시켜 퇴적물내 쇄설성 입자들을 응집시키고 있는 유기물을 완전히 제거하였다. 또한 조개껍질 등의 탄산염에 의한 오차를 없애기 위하여 0.1N 염산(HCl)으로 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 이렇게 준비된 시료는 4 $\phi$  (0.625mm) 체를 이용한 습식체질(wet sieving)에 의해 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 조립질시료는 0.25  $\phi$  간격의

체가 단계별로 장착된 Ro-tap sieve shaker로 약 15분간 충분히 체질한 후 입도등급별로 무게 백분율을 구하였다. 세립질 시료의 경우 약 2 g을 취해 0.1% 칼콘용액을 300 ml 정도 넣은 후 초음파분쇄기와 자기 진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후, X-선 자동입도분석기인 Sedigraph 5100으로 분석하여 입도의 무게백분율을 구하였다. 조립질과 세립질퇴적물의 모든 입도 등급별의 무게백분율을 이용하여 그래픽방법(Folk and Ward, 1957)에 따라 퇴적물의 평균입도, 분급도, 왜도, 그리고 첨도 등의 통계학적 변수값을 구하였다.

### 7.2.2. 퇴적물의 이동경로 계산

표층퇴적물의 통계변수인 평균값, 분급도 그리고 첨도를 이용하여 퇴적물의 이동경로를 계산하였다. 한 정점(A)과 다른 정점(B)간의 퇴적물의 통계변수들을 비교하여 볼 때, A에서 B로 퇴적물의 이동이 일어났다는 것을 지시하는 경우는 다음과 같이 두가지 경우에 해당된다(McLaren and Bowles, 1985; Gao and Collins, 1992; 한국해양연구소, 1998). 따라서 이 두가지 경우를 이용하여 퇴적물의 이동벡터를 계산하였다.

$$\text{경우 1: } \sigma_B \leq \sigma_A, Mz_B > Mz_A \text{ and } Sk_B \leq Sk_A$$

$$\text{경우 2: } \sigma_B \leq \sigma_A, Mz_B < Mz_A \text{ and } Sk_B \geq Sk_A$$

여기서,  $\sigma$ 는 퇴적물의 분급도이며,  $Mz$ 는 평균입도 그리고  $Sk$ 는 왜도를 말한다. 그리고 아래첨자 A와 B는 각각의 샘플링 지점을 의미한다.

이와 같이 McLaren and Bowles (1985)에 의해 규명된 두가지 경우들은 퇴적물의 이동방향을 파악하는데 있어 일차적으로 "경향벡터(Trend vector)"를 계산하는데 사용되었다. 이 경향벡터를 그리기 위해서는 계산시 대표적인 거리(Characteristic distance,  $D_{cr}$ )를 조정함으로써 서로 비교되어야 할 이웃정점(Neighbouring site)들이 결정되어야 한다. 만약 두 정점간의 거리가  $D_{cr}$ 보다 짧을 경우 이 샘플링 정점은 이웃정점으로 규정되어 서로간의 퇴적물 통계변수들을 비교하고 앞에 제시된 두가지 경우에 해당되는지를 파악한다. 이 경우에 해당될 경우는 하나의 경향벡터가 형성된다. 한 정점에서  $D_{cr}$  내에 위치한 여러개의 이웃정점들과의 비교를 통해 만들어진 이 경향벡터들은 합산과정을 거친 후 고유길이(Unit length)를 가지는 하나의 벡터를 형성하게 된다. 벡터들의 합산과정에서 형성되는 잡음(Noise)은  $D_{cr}$ 내에 들어있는 중심점과 이웃정점들간의 벡터평균을 통해 필터링과정을 거친다(예, Gao and Collins, 1992). 이와 같은 필터링과정 후에, 결과적으로 "이동벡터(Transport vector)"가 형성된다. 이동벡터를 계산하는 과정은 Fig. 5-17에 순서도를 이용하여 도시하였다.



### 7.2.3. 유공충 분석

여자만의 저서성 유공충 분포 특성을 파악하기 위하여 채취된 표충퇴적물 중 36개 정점에서 유공충분석용 시료를 준비하였다(Fig. 5-16). 유공충 분석용 표충퇴적물 시료는 상부 1cm 에서 7 ml를 떠내어 플라스틱병에 담고 헥사민(Hexamine)으로 중화(pH 8~9)시킨 포르말린(Formaline) 용액(5%)을 현장에서 즉시 넣어 고정시켰다.

현장에서 포르말린 용액으로 고정시킨 유공충 분석용 시료는 0.063 mm 체를 이용하여 세립질 퇴적물을 제거하였다. 모래 크기의 시료는 증발접시에 모은 후에 비누거품을 넣어 가볍게 저어주면 비누성분에 흡착된 유공충은 석영입자 보다 가벼우므로 위로 뜨게 된다. 이때 이 비눗물을 0.063 mm 체위에 부어서 걸러 주었다. 이 작업을 통해 석영 입자들 사이에서 유공충을 응집시킬 수 있다(Howe, 1941). 0.063 mm 체에 모아진 유공충은 체위에서 흐르는 물로 비눗물을 씻어낸 후, 비이커에 모아서 45~60°C의 온도로 오븐에서 건조시켰다. 건조된 시료는 실체현미경하에서 5/0의 세필을 이용하여 유공충을 골라 뽑아낸 후, 이들 유공충을 같은 종끼리 분류하고 참고문헌과 비교하여 종을 확인하였다. 현장에서 포르말린 용액으로 고정시킨 유공충 분석용 시료는 밀봉이 불완전하여 살아있는 개체의 보존이 어려웠기 때문에 로즈 벵갈(Rose Bengal) 착색에 의한 죽은 개체와의 구분을 하지 못했다. 따라서 동정된 유공충은 전체(living + dead) 균집으로 사용되었다. 동정된 유공충은 각 종으로 분류된 후 상대적인 풍부성(%)이 구해졌으며, 저서성 유공충 균집 특성을 분석하기 위하여 종다양도(Species diversity)(MacArther and MacArther, 1961)와 균등도(Equitability)(Buzas and Gibson, 1969)를 구하였다.

연구지역의 유공충균집 분포의 특성을 분석하기 위하여 집괴분석을 실시하였다. 긴 기간의 환경을 지시하는 전체 균집 분석의 경우는 유공충의 지역적인 분포를 구분하고자 할 때 희귀종까지 포함시킨 결과보다는 보편적으로 나타나는 종들만을 대상으로 할 때 더 좋은 결과가 나타나는 것으로 알려져 있다(Culver and Buzas, 1981). 먼저 연구지역의 각 정점에서 젖은 시료 10 ml당 70개체수 이상이 출현하는 23정점과 어느 정점에서나 전체 유공충 균집의 2% 이상을 차지하는 47종들을 대상으로 집괴분석을 실시하였다. 피어슨 상관계수(Pearson product moment correlation coefficient)를 이용하여 정점간의 유사도를 파악한 후, 비가중 평균결합법(Unweighted centroid method)을 이용하여 집괴분석을 실시하였다.

## 7.3. 연구결과

### 7.3.1. 표충퇴적물의 물성

만 내의 표충퇴적물 대부분은 분급도가 아주불량한 세립질 퇴적물로 구성되어

있다. 평균적으로 실트의 함량이 61.8%로 가장 우세하고, 점토가 35.1% 그리고 사질 퇴적물이 3%를 차지하고 있다(Table 5-2). Folk (1968)의 분류방법에 따르면, 표층 퇴적물의 퇴적상은 니질퇴적상이 가장 우세하게 나타나며, 추가적으로 다양한 형태의 세립한 퇴적상을 보이는 실트, 사질니 그리고 사질실트로 구성되어 있다(Fig. 5-18). 이와 같이 세립한 니질퇴적상은 여자만에 인접해 있는 만 들에서도 보고되었다(Kang and Chough, 1982; Lee et al., 1995). 하지만, 만 입구의 조수로에서는 조립한 퇴적상 또는 기반암이 해저면에 노출되어 있는 상태로 나타나기도 한다. 퇴적물 내 유기물의 평균함량은 7.8-8.8%를 보이는 가운데, 만의 상부보다 하부쪽에서 약간 높은 값을 갖는다(Table 5-2).

표층퇴적물의 통계변수들에 대한 공간분포를 Fig. 5-19에 나타내었다. 평균입도는 6.0-8.7  $\phi$ 의 범위를 보이는 가운데, 각각 만의 상부와 하부에서 중앙부를 향하여 점차적으로 세립해지는 경향을 갖는다(Fig. 5-19a). 이러한 입도분포의 경향은 점토크기 퇴적물의 빠른 침전과 집적으로 형성되는 비교적 높은 농도의 최대혼탁수(Turbidity maximum)의 존재 가능성을 시사한다. 퇴적물의 분급도(Fig. 5-19b)는 아주 불량한 값의 1.9-3.0  $\phi$  범위를 보인다(Folk and Ward, 1957). 특히 북동쪽의 하천들(이사천, 동천) 가까이에서는 보다 불량한 값의 분급도를 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 이 지역 퇴적물의 입도분포 형태는 보다 양의 값으로 치우치는 왜도를 가진다(Fig. 5-19c). 이상과 같은 퇴적물의 모든 통계학적 변수들로 판단해 볼 때, 이 여자만은 수리에너지가 비교적 약한 환경에 속한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 만에서의 퇴적작용은 대부분 세립질 퇴적물의 뜬짐이동에 의해 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

### 7.3.2. 퇴적물의 이동경로

평균된 “이동벡터”는 입도경향 분석에 근거한 잔류경향, 즉 퇴적물의 이동경향을 나타낸다. 어떠한 경향성의 정도를 결정하기 위하여 신뢰도 검정(Significance test)을 실시하였다. 이웃정점을 결정하기 위한  $D_{cr}$ 은 만 내 퇴적물의 이동경향을 가장 설명할 수 있는 0.05°로 선택되었다. 결과적으로 계산된 퇴적물의 이동벡터는 두가지 뚜렷한 이동경로를 보여주고 있다. 즉, 하나는 육지쪽 하천에서 만으로 향하는 경향이고, 또 다른 것은 외해로부터 만 내로 유입되는 경향으로서 서로 상반된 방향성을 가지고 있다(Fig. 5-20).

육지쪽에서 남쪽으로 향하는 퇴적물의 이동경향은 특히, 이사천과 동천 근방에서 두드러지게 나타나며, 여자도 바로 위에서 사라지게 된다(Fig. 5-20). 이러한 벡터들은 육원성의 퇴적물이 하천으로부터 여자도까지 직접적으로 도달할 수 있음을 시사하고 있다. 하지만, 별교천의 입구에서는 이동벡터들의 방향성이 오히려 하천쪽으로 올라가고 있다. 이는 조류의 영향이 미미한 배수량( $0.07 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ ; 한국해양연구소, 1990)을 가지는 하천수의 영향보다 크다는 것을 말한다. 별교천의 하류지역에서 굴

과 고막껍질이 상당량 관찰되는 사실 역시 조류의 영향이 강하다는 것을 의미한다. 결과적으로 만 내에서 퇴적작용을 조절하는 하천수의 영향은 각각의 배수량의 차이에서 예상할 수 있듯이 별교천보다는 상대적으로 이사천과 동천에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다.

한편, 만의 중앙부와 하부에서는 외해로부터의 이동을 지시하는 북쪽방향의 이동 벡터들이 우세해진다. 소수의 벡터들이 만의 동쪽 해안을 향하는 가운데, 대부분은 만의 서쪽 해안을 향하여 진행되어 가는 방향을 취하고 있다(Fig. 5-20). 장도와 여자도 사이 지역에서는 이동벡터의 크기가 거의 미미해지거나 사라지는데, 이는 하천수로부터의 이동과 외해로부터의 이동성분이 상충되어 어느 한쪽 방향으로의 순이동이 나타나지 않기 때문으로 사료된다. 전반적으로 퇴적물의 이동경향과 만 내에 발달하고 있는 조간대의 분포양상과 잘 일치하고 있다. 즉, 외해로부터의 벡터이동이 활발하게 진행되는 서쪽해안에서는 조간대가 넓게 잘 발달되고 있는 반면, 상대적으로 활발하지 않은 동쪽해안에서는 조간대의 발달 폭이 작게 나타나고 있다(Figs. 5-16 and 5-20). 퇴적물의 이동경로로서 만 내에 전체적으로 분포하고 있는 세립질 퇴적물의 기원을 판단해보면, 북쪽에 위치하고 있는 하천들의 영향보다는 외해로부터 이동되어 온 양이 훨씬 크다고 할 수 있다.

### 7.3.3. 저서성 유공충의 공간분포

36개의 표층퇴적물 정점(Fig. 5-16)에서 36개의 종이 출현하였다. 전체 군집에 대한 유공충의 비율은 부록에 나타내었다. 7 ml의 퇴적물내 포함되어 있는 전체 개체수는 43개에서 6304개까지 다양하게 나타난다. 일반적으로 낮은 종수(Specimen number)는 만의 상부에서 나타나는 반면, 만의 입구에서는 높게 분포하고 있다. 교착성 유공충 종들이 이사천과 동천 가까이 발달하고 있는 조간대에서 우세하게 나타나고 있다. 전반적으로 여자만에서 우세한(전체 군집들 중에서 5% 이상 차지하는 종) 유공충 종들은 *Ammonia beccarii* (Linne), *Buccella frigida* (Cushman), *Elphidium advenum* (Cushman), *Elphidium clavatum* Cushman, *Elphidium subincertum* Asano, *Pseudorotalia gaimardii* d'Orbigny, *Quinqueloculina vulgaris* d'Orbigny, *Ammobaculites exiguus* Cushman and Bronnimann, *Ammoscalaria tenuimargo* (Brady) 그리고 *Trochammia hadai* Uchio 등으로 이루어져 있다.

종 다양성 분석결과(H(S), S, E, N)는 Appendix에 나타내어져 있다. 7 ml의 퇴적물에 포함되어 있는 개체수는 43개(St. 8; Fig. 5-16)에서 6304개(St. 83)의 범위에서 나타나고 있다. 일반적으로 낮은 종 수는 해안선 가까이에서 나타나는 반면, 높은 종 수는 만의 중앙부에서 나타나고 있다. 본 연구지역에서의 H(S) 값은 1.35(St. 8)에서 2.44(St. 83)의 범위로 분포하고 있다. 종 다양성(H(S))은 일반적으로 만의 상부(Bay head)에서 하부(Bay mouth)로 향하면서 점차 증가해 가는 경향을 갖는다. 만의 입구에서 가장 높게 나타나는 H(S)는 이 곳에서 우세한 종들(예, *Ammonia*

*beccarii*, *Elphidium advenum*, *Pseudortalia gaimardii*, *Quinqueloculina vulgaris*)이 고르게 분포하고 있다는 것을 의미한다. 하지만, 만의 상부(St. 8)에서는 아주 우세하게 분포하는 특정 종(*Ammonia beccarii*)으로 인해 낮은 H(S) 값을 보이고 있다. Buzas and Gibson (1969)은 천해 환경에서의 낮은 종 다양성은 극도의 환경적인 스트레스에 기인한다고 보고한 바 있다. 일정 지역(Sts. 8, 10, 27, 32, 45)들에서 H(S)가 낮은 것은 하천으로부터의 담수가 유입되고 있기 때문으로 사료된다.

종수(Number of species), S는 7-20의 범위로 나타난다. 일반적으로 만의 입구에서는 비교적 높은 S와 H(S) 값을 가진다. 이러한 이유는 내만에 살고 있는 종과 외해에 살고 있는 종의 혼합작용에 기인하기 때문으로 사료된다. 종의 형평성(Species equitability) 값(E)은 만의 중앙부에서 가장 높은 값을 나타낸다. 해안선 근처의 정점들(Sts. 8, 10, 27, 28, 53)에서 E값이 비교적 낮게 나타나는 이유는 하나 또는 두 가지 종(*Ammobaculites exiguss*, *Ammonia beccarii*)이 워낙 우세하게 나타나고 있기 때문이다.

## 7.4. 토 의

### 7.4.1. 퇴적물의 입도경향 분석

여자만과 같이 퇴적물의 공급원이 명확하게 존재한 퇴적환경에서는 입도경향 분석방법은 퇴적물의 이동과 퇴적경향을 파악하는데 있어 유용한 방법이 될 수 있다(한국해양연구소, 1998). 하지만, 이 분석방법으로부터 합리적이고 좋은 결과를 얻기 위해서는 입도경향 분석과정에 있어 다음과 같이 몇 가지 신중을 기울여야 한다. 우선적으로 퇴적물의 채취간격이 적절히 선택되어야 한다. 만약 채취되는 퇴적물의 정점간격이 너무 밀집되어 선택될 경우 이웃정점들간의 입도 통계변수들의 차이가 나타나지 않을 정도로 어떠한 경향성을 찾아내기가 힘들다. Gao and Collins (1992, 1994) 역시 퇴적물의 채취과정에 있어 이러한 주의점을 중요하게 언급하였다. 반대로, 너무나 먼 거리의 간격을 두고 샘플링을 실시할 경우 완전히 서로 다른 환경에 위치한 정점들의 통계변수들을 비교함으로써 데이터의 오류(Noise)가 발생할 수 있을 것이다. 결과적으로 퇴적물의 채취 정점간격은 입도분석 과정에서 나타날 수 있는 에러범위를 극복할 수 있을 정도로 멀어야 할 뿐만 아니라, 퇴적환경의 규모를 고려하여 적절하게 가까이 선택되어야 한다. 이와 같이 훌륭한 입도경향 분석 결과를 얻어내기 위해서는 적절한 샘플링 간격이 우선적으로 선택되어야 한다. 만약 가능하다면, 정점마다 일정한 거리를 가지는 격자간격으로 샘플링된 통계변수자료가 입도경향 분석에 이용되어야 한다(le Roux, 1994; Gao and Collins, 1994). 여자만의 경우, 퇴적환경의 규모와 단순한 퇴적상을 고려하여 퇴적물의 샘플링 간격이 약 0.025°로 결정되었다(Fig. 5-16).

다음으로 입도경향 분석과정에 있어 중요한 것은 이웃정점을 규정하는 대표거리

( $D_{cr}$ )를 결정하는 문제이다. 이 대표거리는 분석과정에 있어 몇번의 시행착오를 거치면서 결정될 수 밖에 없다. 만약 퇴적물의 샘플링 간격보다 짧은 거리가 선택될 경우, 퇴적물의 통계변수들을 비교해야 할 이웃정점을 전혀 가질 수 없게 된다. 반대로 너무나 큰 대표거리가 선택될 경우, 너무 많은 경향벡터가 계산적으로만 나타나게 되고, 결과적으로 합산된 이동벡터는 신뢰성을 가지지 못하게 된다. 마지막으로, 만 내에 분포하고 있는 섬, 사주 등과 같은 지형적인 장애물은 계산된 퇴적물의 실질적인 이동경향을 왜곡시킬 수 있다. 이러한 지형들은 경향 및 이동벡터를 계산되는 과정에서 고려되지 않기 때문에, 결과적으로 섬 주위에 나타난 이동벡터들은 완전히 신뢰하기 힘들다. 예를 들면, Fig. 5-20에서 역시 여자도, 장도 등 몇 개의 섬을 통과하는 벡터들이 나타나는데, 이들은 섬 주위에서의 방향성만 나타낼 뿐 실제로 섬을 통과하여 퇴적물이 이동되는 것은 아니다.

지금까지 언급된 퇴적물의 이동벡터를 계산하는 과정에서 가지고 있는 고유한 문제점들에도 불구하고, 만 내에서 이루어지고 있는 전체적인 퇴적작용을 이해하는데 있어 효과적으로 사용될 수 있다. 여자만의 경우 퇴적물의 이동경향과 조간대의 발달상황 그리고 저서성 유공충의 공간분포 특성과 좋은 상관성을 보이고 있다. 특히, 만의 서쪽 해안에서 넓게 발달되어 있는 조간대는 외해로부터 만내로 유입되어 서쪽으로 편향되어 이동되는 벡터들로서 설명될 수 있다.

#### 7.4.2. 저서성 유공충 군집의 분류

15개의 우세한 종에 대한 집괴분석을 통해 4개의 주요 유공충 군집을 분류하였다(Fig. 5-21). 생물상(Biofacies) I은 만 상부의 조간대 지역과 수심이 5 m보다 낮은 조하대에 분포하고 있다(Fig. 5-22). 이 해역들은 담수의 영향이 뚜렷한 곳으로 환경적인 스트레스를 받고 있는 것으로 사료된다. 시료들은 전반적으로 낮은 종 다양성(Species diversity)을 보이고 있다(평균 종 다양성: 1.80; 평균 형평성: 0.59). *Ammobaculites exiguus*와 *Ammonia beccarii*가 높은 비율로 넓게 분포하고 있다. 생물상 II는 만의 상부와 하부간의 접이지역에 분포하고 있다. 이 곳의 유공충 군집 역시 비교적 낮은 종 다양성과 밀집도를 보이고 있다(Table 5-3). 이 해역 역시 여전히 하천수로부터의 영향을 받고 있어 생태적인 스트레스를 받고 있는 지역이다. 유공충의 군집 또한 *Ammobaculites exiguus*와 *Ammonia beccarii*가 여전히 우세하게 나타나고 있으며, *Elphidium* 종이 특징적으로 증가한다. 이러한 군집들은 일반적인 해양 환경으로의 변이를 지시한다. 생물상 III는 만의 하부 10-20 m 수심 범위에서 나타난다. 이 그룹을 차지하고 있는 유공충 군집은 비교적 높은 종 다양성(평균 종 다양성: 2.18)을 보이고 있다. 이 군집에서는 *Ammobaculites exiguus*, *Ammonia beccarii*, *Elphidium advenum* 그리고 *Elphidium clavatum* 종이 우세하게 나타난다. 이 군집의 특성은 *Ammobaculites exiguus*와 *Ammonia beccarii* 종이 두드러지게 감소하며, *Elphidium advenum*이 상당한 증가를 보인다는 것이다(Fig. 5-23). 이 지역은 외해로

부터의 해수의 영향을 많이 받는 곳이다. 생물상 IV는 만의 입구에서 나타나고 있다. 높은 종 다양성(H(S): 2.44; N: 6304)을 보이는 유공충 군집은 *Ammonia beccarii*, *Elphidium advenum*, *Pseudorotalia gaimardii* 그리고 *Quinqueloculina* 종이 우세하게 나타나고 있다. 이러한 종들은 전형적인 해양환경을 지시하는 것들로서 대륙주변부 또는 외해의 환경에서 서식하고 있다(Murray, 1991).

#### 7.4.3. 하구환경의 순환과 퇴적작용

하천으로부터의 배수량에 비해 상대적으로 조류의 세기가 아주 강할 경우 수직적인 염분성층(Salinity stratification)을 깨뜨릴 수 있는 힘이 존재하게 되며, 결과적으로 균질의 수층을 이루게 된다(Nichols and Biggs, 1985; Dyer, 1994). 이러한 형태의 하구는 '혼합이 활발한 하구(Well-mixed estuary)'로 분류(Pritchard, 1955)되며, 염분과 유속의 수평적의 변화가 이루어지면서 수직적인 순환보다는 수평적인 순환작용(Horizontal circulation)이 활발하게 된다. 여자만 역시 유체의 밀도, 수층내 화학적 성분 그리고 생물학적 요인들에 있어 강한 수평적 변화를 보이고 있다(한국해양연구소, 1990). 이로써 나타나게 되는 잔류흐름(Residual flow)은 수평적으로 해저면의 저서성 유공충의 군집변화에 영향을 미칠 수 있게 된다. 저서성 유공충의 군집분포(Fig. 5-22)에 근거하여 판단해 볼 때, 만 내에 존재하는 잔류흐름은 서쪽에서는 만 안쪽으로 향하게 되고 동쪽에서는 외해쪽으로 향하게 되는 특성을 보이고 있다. 저서성 유공충의 군집분포에 근거한 잔류흐름의 분포양상은 여자만 내에 반폐쇄된 만에서의 조류의 순환뿐만 아니라 하천의 유입으로 인해 형성되는 순환작용이 존재한다는 것을 시사한다. 퇴적물의 이동벡터 경향 역시 수평적인 순환작용에 영향을 받는 퇴적작용을 나타내고 있다. 특히, 여자도 주변에 분포하고 있는 8 $\phi$ 보다 세립한 점토크기의 퇴적물은 중조차 또는 대조차 하구환경에서 가장 명확하게 일어나는 퇴적작용(Officer, 1981; Nichols and Biggs, 1985; Dyer, 1988; Gao *et al.*, 1990)인 최대혼탁수의 역할을 의미한다. 하지만, 홍수시가 아닌 건조기(Dry season)에는 여자만의 퇴적물은 조류를 따라 부유된 상태로 대부분 외해로부터 공급되어 오는 것으로 사료된다. 하지만, 여자만에서 계절에 따라 변화를 보이는 전반적인 순환작용에 대한 보다 세부적인 현상을 알아보기 위해서는 수리역학적 연구와 부유물질의 이동 플럭스 관측에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 7.5. 요약

여자만은 반폐쇄성 형태를 가지고 있는 내만으로 최대 4 km의 폭을 갖는 넓은 조간대가 발달되어 있다. 만내의 대부분의 퇴적물은 분급이 불량한 니질과 실트퇴적물로 구성되어 있으며, 평균입도는 6.0-8.7 $\phi$  범위로서 만의 중앙부로 향하면서 세립해지는 경향을 갖는다. 입도의 통계변수들을 이용하여 계산된 퇴적물의 이동벡터

는 외해로부터 이동되어 오는 경향과 이사천과 동천으로부터 이동되어 오는 두가지 경향성을 명확히 보이고 있다. 비교적 우세한 경향을 보이는 외해로부터 만내로 이동되는 벡터들은 만내에서 서쪽으로 점차 편향되는 특성을 가지는 한편, 이사천과 동천으로부터 남쪽으로 이동되는 벡터성분들은 여자도까지 미친다.

36개의 표층퇴적물 정점에서 36개의 유공충 종이 발견되었다. 일반적으로 만의 상부(Bay head)에서는 교착성 종(Agglutinated taxa)이 우세하게 나타나지만, 만의 하부(Bay mouth)로 향하면서 점차적으로 감소해가는 경향을 보인다. 종 다양성의 경우 만의 입구쪽에서 외해와 만의 혼합으로 인해 큰 값으로 나타난다. 집괴분석에 의해 4개의 유공충 군집이 분류되었다. 생물상 I과 II는 종 다양성이 비교적 낮으며, *Ammobaculites exiguus*와 *Ammonia beccarii*가 우세하게 나타난다. 생물상 III와 IV는 비교적 높은 종 다양성을 보이고 있으며, 석회질 종인 *Elphidium*과 *Quinqueloculina*가 풍부하게 나타난다. 이러한 생물상으로 대표되는 지역들은 외해로부터의 해수의 영향을 강하게 받고 있는 것으로 사료된다.

퇴적물 이동벡터와 유공충 군집의 일반적인 양상은 여자만이 여름철 홍수시에 혼합이 활발한 하구환경에서 전형적으로 나타나는 시계방향의 순환과정을 거친다는 것을 말해주고 있다. 결과적으로, 이사천과 동천으로부터의 퇴적물의 공급은 북쪽 만의 상부에, 그리고 외해로부터의 세립질 퇴적물의 공급은 만의 서쪽에 퇴적됨으로써 넓은 조건대를 형성하고 있는 것으로 사료된다.

## 8. 퇴적역학적 정선관측 I: 진해, 마산만 입구

### 8.1. 개 요

진해, 마산만 입구인 거제도과 가덕도 사이의 가덕수로에서 1998년 5월 10일에 오전 7시부터 오후 7시까지 12시간동안 1시간간격으로 정선관측을 실시하였다(Fig. 5-24). 수온, 염분계가 장착된 유속계(Valeport, Model MKIII 108)와 탁도계(OBS: D&A, Model OBS-3)를 이용하여 해류, 수온, 염분 그리고 부유물질 농도를 측정하였다. 매 시간마다 해수면 근처에서 해저바닥 근처까지 전 수층을 통해 거의 등간격으로 5개 수심에서 이들을 관측하였다. 관측을 실시하는 동안 표층, 중층, 저층에서는 광학탁도계에 의한 부유물질 농도 관측치를 보정하고 입도특성 변화를 파악하기 위하여 수중펌프를 이용하여 1-2리터 정도의 해수를 채취하였다. 또한 관측동안의 조석변화를 파악하기 위해 디지털측심기(Raytheon, Model DE719D-MK2)로 매 회 수심변화를 기록하였다. 채수된 샘플은 필터링을 통해 실제 농도를 구하고 이들을 이용하여 OBS 측정치를 실제농도로 변환하였다. 또한 수층별 조류속과 부유물질 농도를 구하여 전 수층과 시간에 대해 적분을 함으로써 부유물질의 순수출입량(Flux)을 구하였다.

## 8.2. 해 류

표층의 해류는 오전 7시 창조 후반부에  $9 \text{ cm s}^{-1}$ 로 아주 미약하게 만 입구를 향하고 있다(Fig. 5-25; Table 5-4). 그러나 중층과 저층에서는 표층보다는 유속이 강하여  $20 \text{ cm s}^{-1}$ 에 이르고 있다. 8시에 정조를 지나 9시에 낙조가 시작되면서 해류는 표층에서  $20 \text{ cm s}^{-1}$ 로 강해지면서 만 바깥으로 향한다(Fig. 5-25; Table 5-4). 이 후에 최강의 낙조유속은 10시에서 11시 사이에  $37 \text{ cm s}^{-1}$  이상으로 증가하였다가 감소하기 시작한다. 이 때 중층의 최강유속은  $26 \text{ cm s}^{-1}$ 이고 해저면에서 약 1m위인 저층의 유속은  $15 \text{ cm s}^{-1}$ 에 이른다. 오후 1시 정조에 달했을 때는 창조시와 마찬가지로 표층에서  $7 \text{ cm s}^{-1}$ 이하로 감소한다(Fig. 5-25; Table 5-4). 곧 이어 다시 창조가 이어질 때 표층에서의 최강유속은 오후 2시에서 3시 사이에  $35 \text{ cm s}^{-1}$ 에 달한다. 그러나 이 때 중층과 저층에서는  $7 \text{ cm s}^{-1}$ 이하로 아주 약하게 측정되었다. 오히려 중층과 저층의 최강유속은 이 시간 이후에 크게 증가하여  $30 \text{ cm s}^{-1}$ 이상으로 커지는 기현상을 보인다(Fig. 5-25; Table 5-4). 표층의 유속도 오후 5시까지 감소하다가 그 이후에 급속히 증가하고 있다. 이와 같이 오후 5시 이후에 유속이 증가하는 이유는, 이 때가 창조 후반부에 해당되나 해풍이 만 안쪽으로 지속적으로 불면서 창조류를 더욱 증가시켰기 때문으로 보여진다. 이러한 12시간 정선관측 결과는 Fig. 5-26에 요약되어 있다.

## 8.3. 수온

전 관측기간을 통해 수온의 성층현상이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5-26; Table 5-4). 표층의 수온은  $16.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서  $17.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 으로 창조와 낙조의 변화가 거의 없다. 중층 이하에서도 시간에 따른 별 다른 변화를 보이지 않는다. 이는 여름철에 연안수가 데워진 다음 낙조시에 외해로 나가는 현상이 아직까지는 보이지 않는 것을 알 수 있다. 전체적으로 수온은 수심이 깊어질수록 서서히 감소하여 저층에서  $14.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 된다(Fig. 5-26). 결국 5월 경에는 진해. 마산만 주변해역이 이미 수온 성층이 이루어져서 수괴가 안정되어 있음을 알 수 있다.

## 8.4. 염분

염분도 수온과 마찬가지로 시간에 따른 변화가 거의 없이 수층별로 안정된 값을 보이고 있다(Fig. 5-26; Table 5-4). 표층에서는 31.0-31.5 PSU로 저층의 33.5 PSU에 비해 낮기 때문에 결국 깊어질수록 염분이 서서히 증가하는 경향을 보인다. 그러나 33.5 PSU보다 높은 염분을 갖는 저층수의 두께가 낙조시에 감소하다가 창조시에 증가하는 것으로 보아(Fig. 5-26), 창조시 외해의 좀 더 염분이 높은 수괴가 만으로 진



입하고 낙조시에는 육상수의 희석으로 염분이 낮아진 연안수가 외해쪽으로 빠져나가는 것으로 사료된다.

### 8.5. 부유물질 농도

부유물질 농도는 저층에서 5 m이내에서 25 mg l<sup>-1</sup>이상으로 낙조의 정조시(13시 근방, Fig. 5-26)를 제외하고는 이 곳이 항상 가장 높은 농도를 보인다. 측정된 최대 값은 38 mg l<sup>-1</sup>로서 낙조와 창조 모두에서 비슷하지만(Table 5-4), 정선관측 후반부인 창조시에 대체적으로 저층에서의 농도가 34 mg l<sup>-1</sup>로 낙조시의 30 mg l<sup>-1</sup>에 비해 약간 더 높다(Fig. 5-26). 이와 같은 저층지역을 제외한 전 수층에서의 부유물질 농도변화는 어떠한 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있다(Fig. 5-26). 즉 일부 시간대에 18mg l<sup>-1</sup>보다 높은 값이 중층에 나타나기는 하나 전체적으로 14-18 mg l<sup>-1</sup>의 값을 가진다(Fig. 5-26; Table 5-4). 이러한 현상은 해저의 니질퇴적물이 10-20 cm s<sup>-1</sup>의 저층 조류에 의해 재부유된다는 것을 의미한다. 그러나 표층과 중층에서는 연안에서 또는 외해에서 확연히 부유물질이 이동된다는 현상을 볼 수는 없다. 따라서 이 지역에서는 강에 의한 부유물질의 흐름이 존재하거나 반대로 외해로부터 고농도수가 유입되는 현상을 적어도 봄철에서는 볼 수 없다는 것을 알 수 있다.

## 9. 퇴적역학적 정선관측 II: 여자만

### 9.1. 개요

반폐쇄성의 형태를 가지고 조류가 우세한 환경인 여자만은 육지쪽 하천들로부터의 홍수시 소량의 퇴적물이 공급되며, 현재의 조간대 및 조하대를 덮고 있는 퇴적물은 홀로세 해수면 상승기 동안에 약 5,000-6,000 B.P.(Lee et al., 1998; Kim et al., 1999)부터 대부분 외해로부터 부유상태의 뜬짐으로 이동되어 쌓여온 것으로 판단된다. 따라서 만 입구에서의 부유퇴적물의 유출입량을 파악하는 것은 여자만 내에 발달되어 있는 조간대 퇴적작용을 파악하는데 있어 절대적인 과정이라 할 수 있다. 특히 세립한 니질퇴적물로 구성된 조간대에서의 퇴적물의 집적/침식을 조절하는 요소들은 조류, 파랑, 기상조건, 그리고 생물학적 요인(Mucus, diatom, algae etc.) 등의 복합작용으로 아주 복잡한 계절변화를 보이기 때문에 조간대에서의 국부적인 퇴적 또는 침식현상을 가지고 전체적인 퇴적작용에 대한 해석을 할 경우 심각한 오류를 범할 수 있다. 즉, 여자만 조간대의 대부분을 차지하고 있는 세립질 퇴적물의 공급은 외해로부터 이루어지기 때문에, 만 입구에서 세립질 부유퇴적물의 순이동량을 파악함으로써 궁극적으로 조간대의 퇴적작용과 지형변화에 대한 예측을 할 수 있을 것이다.

조류가 우세한 해양환경에서 부유퇴적물의 이동률은 유속의 n제곱(n>3)에 비례

한다는 것이 밝혀졌다(예, Owen and Thorn, 1978; Dyer, 1980). 하지만,  $n$ 값은 창조와 낙조시에 있어 모두 일정한 값으로 적용되는 것은 아니다. 이러한 사실은 부유 퇴적물을 이동시키는 기작이 평균유속 외에 또 다른 기작이 존재함을 말한다(Officer, 1981). 또한 부유퇴적물의 순이동방향이 조류의 주방향과 일치하지 않을 수도 있다. 특히 여자만과 같이 만의 주변에 니질조간대가 잘 발달되어 있을 경우 국부적인 요소들에 의해 재부유되어 이동되는 퇴적물의 농도가 달라질 수 있다. 또한 조류의 순환특성으로 인해 만 입구의 서수도와 조발수도에서 각각 서로 다른 부유퇴적물의 순이동 방향과 출입량을 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 만 입구에 발달되어 있는 두개의 수로에서 각각 한 개씩의 정점(YJ-1, YJ-2)을 선택하여 한 조석주기동안 수층별 유속, 유향 그리고 부유퇴적물의 농도변화에 대한 시계열 관측을 실시하였다. 또한 하천수의 유입이 만 내의 물질 순환과정에 미치는 영향을 파악하고자 여자도 근처의 만 중앙부에 추가적인 정점(YJ-3)을 설정하여 정선관측을 실시하였다.

## 9.2. 조사 및 분석방법

### 9.2.1. 정선관측 및 부유물질 분석

여자만 입구의 두 개의 조수로를 통하여 유·출입되는 부유퇴적물의 양과 거동 특성을 알아보기 위하여, 1999년 7월 대조기(11-12일)에 조수로에서 각각 1개씩의 정점과 만 중앙부에 위치한 정점에서 각 한 조석주기(12.5시간)동안 정선관측을 실시하였다(Fig. 5-16). 각 정점에서 전 수층에 대하여 유속, 유향, 수온, 수심 그리고 부유퇴적물의 농도변화를 30분 간격으로 관측함으로써, 이에 대한 각각의 시계열 자료는 한 조석주기동안 26개의 자료군을 가진다. 모든 관측은 표층(수면하 약 1.0 m)에서 저층까지(해저면으로부터 1.0 m) 약 5m 간격으로 수직 프로파일링을 실시하였다. 유속, 유향, 수온, 염분 그리고 부유퇴적물의 농도관측은 프로펠러 유속계 시스템(Aanderaa Co., model RCM7)을 이용하였고, 시간에 따른 수심의 변화는 정밀측심기(KAIJO Co., PSR-20)를 사용하였다.

매 관측시 각 수층에서의 부유물질을 포함한 해수의 채취는 각각 2ℓ씩 수중펌프(Jabsco Co., model Mini200)로 해수를 채취하였다. 채취된 해수중 1ℓ는 현장에서 GFC 필터페이퍼(공극크기, 0.45  $\mu\text{m}$ )에 걸러서 실험실로 옮긴 후 약 60℃로 건조된 무게를 측정함으로써 부유퇴적물의 농도를 결정하였고, 다음으로 건조된 GFC 필터페이퍼는 전기로에서 550 ℃로 1시간 30분동안 가열한 후 무게의 유실량(Loss of ignition)을 환산함으로써 유기물의 함량을 측정하였다.

### 9.2.2. 부유물질의 플럭스 계산

각 정점에서 모든 수층에서 얻어진 유속, 유향, 수심 그리고 부유퇴적물의 농도 값을 이용하여 각 정점들에서의 세립질 부유퇴적물의 유출입량을 구하기 위하여 각 층에서의 시간평균된(Time-averaged) 퇴적물 유출입을 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$f_s = (1/T) \int_T CV dt$$

$$= (1/25) \left[ \sum_{i=2}^{25} C_i V_i + (1/2) (C_1 V_1 + C_{26} V_{26}) \right] \quad (\text{Eq. 5-1})$$

여기서,  $f_s$ 는 각층에서의 net sediment flux ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), C는 부유퇴적물의 농도 ( $\text{kg m}^{-3}$ ), V는 유속( $\text{m s}^{-1}$ ), T는 관측기간(Time span; 12.5시간동안 관측을 실시하였지만, 30분 간격을 가지는 25회의 대표 시간치에 대해 관측을 실시하였으므로 25로 설정), 그리고 각각의 아래첨자는 시계열자료를 나타낸다.

한 조석주기동안 순퇴적물이동(Net suspended sediment transport:  $Q_s$ ,  $10^3 \text{ kg m}^{-1}$ )은 다음식에 의해 계산되었다.

$$Q_s = (Q_1^2 + Q_2^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

여기서,  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는  $Q_s$ 중에서 각각 동-서 방향과 남-북 방향의 성분을 말한다:

$$Q_1 = \int_T \int_H CV \sin \alpha \, dh dt$$

$$= \left[ \sum_{i=2}^{25} H_i \langle C_i V_i \sin \alpha_i \rangle + (1/2) (H_1 \langle C_1 V_1 \sin \alpha_1 \rangle + H_{26} \langle C_{26} V_{26} \sin \alpha_{26} \rangle) \right] * 12.5 * 3600 \quad (\text{Eq. 5-3})$$

$$Q_2 = \int_T \int_H CV \cos \alpha \, dh dt$$

$$= \left[ \sum_{i=2}^{25} H_i \langle C_i V_i \cos \alpha_i \rangle + (1/2) (H_1 \langle C_1 V_1 \cos \alpha_1 \rangle + H_{26} \langle C_{26} V_{26} \cos \alpha_{26} \rangle) \right] * 12.5 * 3600 \quad (\text{Eq. 5-4})$$

여기서,  $\alpha$ 는 진북에 대한 유향, H는 수심, 그리고  $\langle \rangle$ 는 수심평균값을 의미한다. 즉, 수심평균은 다음과 같이 정의된다:

$$\begin{aligned} \langle C_i V_i \sin \alpha_i \rangle = (1/H_i) [ & \sum_{j=1}^{n-1} D_j (C_{i,j} V_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + \\ & C_{i,j+1} V_{i,j+1} \sin \alpha_{i,j+1}) + 0.5 * C_{i,1} V_{i,1} \sin \alpha_{i,1} \\ & + 1.5 * C_{i,n} V_{i,n} \sin \alpha_{i,n} ] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5-5})$$

그리고,

$$\begin{aligned} \langle C_i V_i \cos \alpha_i \rangle = (1/H_i) [ & \sum_{j=1}^{n-1} D_j (C_{i,j} V_{i,j} \cos \alpha_{i,j} + \\ & C_{i,j+1} V_{i,j+1} \cos \alpha_{i,j+1}) + 0.5 * C_{i,1} V_{i,1} \cos \alpha_{i,1} \\ & + .15 * C_{i,n} V_{i,n} \cos \alpha_{i,n} ] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5-6})$$

여기서,  $D_j$ 는 수직프로파일링에 있어 인접한 수층간의 수심차이이며,  $n$ 은 관측된 수층의 전체수이다.  $Q_s$ 의 최종적인 방향은  $Q_1$ 과  $Q_2$ 로부터 결정되었다.  $Q_s$ 와  $f_s$ 간의 상호관계는 다음과 같다.

$$Q_s \sin \theta = T \int_H f_s dh \quad (\text{Eq. 5-7})$$

위 식에서  $\theta$ 는  $Q_s$  방향과 관측정점들이 위치한 측선 방향간의 각도이다.

### 9.3. 연구결과

#### 9.3.1. 수리역학적 변수와 부유물질 농도의 시계열 변화

##### 9.3.1.1. 정점 YJ-1(서수도)

YJ-1은 여자만 서쪽 입구 서수도(West Inlet)에서 만 안쪽으로 위치한 정점으로 1999년 7월 12일 15:00부터 7월 13일 03:30까지 한 조석주기동안 수층별 수온, 염분, 유속, 유향 그리고 부유물질의 농도에 대한 관측이 실시되었다(Fig. 5-16). 관측시간 동안 조차는 373 cm로서 대조기(Spring tide)에 속한다. 이 정점에서의 수리역학적 에너지와 부유물질 농도의 조석에 따른 시계열 변화특성을 Fig. 5-27과 Table 5-5에 도시하였다. 수온은 22.32-23.37 °C로 좁은 범위의 분포를 가지며, 7월 12일 21:00 만조(High water)시를 제외하고는 상층에서 하층으로 가면서 점차 수온이 낮아지는 성층현상(Stratification)이 미약하게 나타나고 있다(Fig. 5-27a). 창조시와 낙조시의 수온분포를 비교해볼 때, 창조시 표층에서 23.3 °C 내외로 낙조시 22.8 °C 내외보다 약 0.5 °C 정도 높은 값을 나타내고 있다(Table 5-5). 일반적으로 연안에서의 조석에 따른 수온변화는 이와는 반대되는 경향을 가져, 창조시 외해로부터 이동되어 온 낮

은 수온의 수괴의 영향을 창조시 오히려 낮은 수온분포를 가진다(한국해양연구소, 1998). 하지만, 남해의 경우 일반적으로 따뜻한 연안수와 차가운 외해수가 혼합되는 양상과 달리 오히려 따뜻한 대마난류가 외해쪽에 지나가고 있기 때문에 반대되는 양상이 나타날 수 있는 것으로 보인다.

유속의 시계열 변화특성은 5.7-78.0 cm s<sup>-1</sup> 범위로 분포하는 가운데 창조시와 낙조시 유속의 분포가 서로 다른 양상으로 나타난다. 낙조시는 상층에서 하층으로 가면서 해저 마찰력으로 인한 유속의 감소(Dyer, 1986)가 뚜렷하게 나타나는 반면, 창조시는 오히려 이와는 반대로 표층에서 30 cm s<sup>-1</sup> 내외의 유속을 가지지만, 하층에서는 60 cm s<sup>-1</sup> 내외의 유속으로 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 5-27b). 이러한 유속의 분포특성을 보이는 이유는 각 조시의 유향의 분포와 연관지어 생각해 볼 수 있다. 낙조시의 유향은 160-180° 내외로 북쪽에서 남쪽으로 향하는 일관성 있는 흐름을 보이지만, 창조시의 경우는 수층별 유향의 분포가 다양하게 나타난다(Fig. 5-27c). 창조시 이렇게 복잡한 유향을 가지는 흐름이 존재하는 것은 조류가 유입되면서 서수도를 통해서 들어올 뿐만 아니라, 서로 다른 방향을 가지고 있는 수로들(조발도-낭도, 적금도-낭도, 적금도-낭도)이 존재함으로써 창조류가 여자만으로 진입해 오는 과정에서 지형적인 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다.

부유물질의 농도는 3.6-23.5 mg l<sup>-1</sup>의 범위로 서해 연안역에 비해 상대적으로 낮은 농도분포를 보인다(Fig. 5-27d). 특히, 표층에서는 관측기간동안 조석에 관계없이 10 mg l<sup>-1</sup> 이하의 낮은 농도분포를 갖는다. 조석에 따른 농도분포의 변화를 살펴보면, 낙조시 중반 표층류가 70 cm s<sup>-1</sup> 이상으로 강해질 때 저층에서 해저면 퇴적물의 재부유로 인한 농도의 증가(> 20 mg l<sup>-1</sup>)가 일어난다. 하지만, 창조시 중반의 경우 저층에서 50-60 cm s<sup>-1</sup> 범위로 유속이 증가함에도 불구하고 부유물질의 농도는 전 수층에 걸쳐 10 mg l<sup>-1</sup> 이하로 낮게 나타나고 있다. 이러한 특징은 서수도의 해저퇴적물의 구성이 패각 또는 역질의 잔류퇴적물로 구성되어 있는 것을 감안하면, 설령 최강창조시 유속이 강해졌다 할지라도 재부유될 세립질 퇴적물이 존재하지 않기 때문으로 판단된다. 따라서, 창조시 전 수층에 걸쳐 분포하고 있는 대부분의 부유물질은 만입구 근처에서 재부유(Resuspension)되어 이동되어 온 것으로 보기 보다는 외해로부터 뜬짐(Suspended load)상태로 이동되어 온 것이라 볼 수 있다.

#### 9.3.1.2. 정점 YJ-2(조발수도)

정점 YJ-2는 여자만의 수로 중에서 동쪽 조발수도의 만 안쪽에 위치해 있으며, 수심은 28 m 내외에서 조석에 따라 약간의 차이를 보인다. 이 곳에서는 7월 13일 09:00부터 21:00까지 정선관측을 실시하였으며, 관측시간동안의 조차는 328 cm이었다. 수온은 22.07-23.27 °C의 범위를 가지며 수층에 따른 수온성층이 아주 미약하게 발달되어 있다(Fig. 5.28a). 창조시와 낙조시 수온분포의 큰 변화는 보이질 않지만, 낙조시 12:00-13:00 시간에 표층에서 22.8 °C 내외로 창조시 표층수온에 비해 약 0.3

℃ 높은 값을 보인다(Table 5-6). 이러한 차이는 외해수와 연안수의 수온차이 보다는 낮(정오)시간에 태양의 복사열에 의해 표층수온이 상승되었기 때문으로 사료된다.

한 조석주기 동안 유속은  $11.4\text{-}106.8\text{ cm s}^{-1}$ 의 범위로 정점 YJ-1에 비해 강한 유속분포를 보이고 있다(Fig. 5-28b). 낙조와 창조에 있어 최강류가 나타나는 시간에는 상층에서 저층으로 향하면서 유속이 감소되어 가는 경향을 보이며, 최강유속은 낙조시  $60\text{ cm s}^{-1}$  내외에 비해 창조시에  $80\text{-}106\text{ cm s}^{-1}$  범위로서 보다 우세하게 나타나는 비대칭성을 보인다. 낙조시 유향은  $160^\circ$  내외로 남남동으로 진행되고, 창조시 유향은 전반에는  $340^\circ$  내외로 북북서로 향하지만 중반을 지나서 유속이 강해지고 시간이 지남에 따라 점차 북서쪽으로 편향되어 가는 경향을 가진다(Fig. 5-28c).

부유물질의 농도는  $1.7\text{-}30.3\text{ mg l}^{-1}$  범위로서 서수도에 비해 높은 농도 분포를 가진다(Fig. 5-28d). 또한 조석에 따른 농도의 분포특성 역시 서수도와는 완전히 반대되는 양상을 가진다. 낙조시에는 전 수층에 걸쳐  $5\text{ mg l}^{-1}$  이하의 낮은 농도분포를 보이지만, 창조시에는 표층에서  $10\text{ mg l}^{-1}$  이상의 농도분포를 가지며, 특히 저층에서는  $25\text{ mg l}^{-1}$  이상의 높은 농도를 가진다. 서수도와 조발수도에서의 부유물질의 조석에 따른 시계열 변화특성을 살펴 보았을 때, 외해로부터 유입되어 오는 부유물질은 서수도에 비해서 동쪽의 조발수도를 통해 많은 양이 유입되고 있음을 알 수 있다. 하지만, 연간 순 유입량의 변화를 파악하기 위해서는 각 계절에 따른 그리고 조시의 변화에 따른 유입량의 변화에 대하여 장기적인 모니터링을 추가적으로 실시할 필요가 있다.

### 9.3.1.3. 정점 YJ-3(여자도)

정점 YJ-3는 만의 중앙부에 위치한 여자도 아래에 위치한 정점으로  $5\text{ m}$  내외의 수심을 보이고 있다(Fig. 5-16). 이 정점에서의 관측은 1999년 7월 14일 06:30부터 19:00까지 관측되었으며, 조차는  $334\text{ cm}$ 로 역시 대조기에 해당된다. 이 정점에서의 수심은  $5\text{ m}$  내외로 얕은 수심을 보이기 때문에 상층과 저층, 두 개의 수층에 대해서만 관측을 실시하였다. 수온은  $22.9\text{-}25.18\text{ }^\circ\text{C}$  범위의 분포를 보이며(Table 5-7) 수온성층이 거의 이루어져 있질 않지만, 간조시의 경우 복사열에 의해 데워진 수층이 표층을 차지하면서 표층에서  $24.3\text{ }^\circ\text{C}$  보다 높고 저층에서는  $23.8\text{ }^\circ\text{C}$  보다 낮은 수온을 가짐으로서 수온 성층을 이루고 있다(Fig. 5-29a).

유속은  $9.0\text{-}65.0\text{ cm s}^{-1}$ 의 범위로 조석에 따른 최강유속 세기의 비대칭성은 거의 나타나질 않고 있으며, 만의 입구 수로들에서 관측된 최강유속에 비해 25-40% 정도 감소한 값을 갖는다(Fig. 5-29b; Table 5-7). 유속이 강해지는 최강창조와 낙조시 수층별 유속의 분포는 표층에서  $60\text{ cm s}^{-1}$  내외로 가장 강하게 나타나고 저층에서는  $40\text{ cm s}^{-1}$  내외로 해저면 마찰력에 의해 30% 이상 감소하는 전형적인 대수함수적 수직분포 특성을 보인다. 각 조석별 시간에 대한 평균유속은 창조류에 비해 낙조류가 우세하게 나타나고 있다. 창조시 유향은  $20\text{-}40^\circ$  범위로 북북동 방향으로 진행되

고 있으며, 낙조시 유향은 140-160° 범위로 남동방향으로 진행되는 특성을 보이고 있다(Fig. 5-29c).

부유물질의 농도는 2.8-35 mg l<sup>-1</sup> 범위의 분포를 보이며(Table 5-7), 최대농도는 다른 정점들과 유사한 값을 가지지만, 최강유속의 세기가 가장 약한 것을 감안하면 해저면으로 재부유된 퇴적물의 양보다 상대적으로 다른 곳으로부터 이동되어 온 부유물질의 양이 많이 차지하고 있음을 알 수 있다. 표층에서는 유속의 세기 변화와 상관없이 5 mg l<sup>-1</sup> 내외의 아주 낮은 농도를 보인다. 저층에서는 낙조 후반에 20 mg l<sup>-1</sup> 이상의 농도를 가지는 한편, 창조시는 25-30 mg l<sup>-1</sup> 이상의 높은 농도가 보다 오랜 시간동안 지속된다(Fig. 5-29d). 이상으로 판단해볼 때, 홍수시가 아닌 경우에는 하천으로부터의 부유퇴적물의 유입이 미약하며, 상대적으로 외해쪽에서 지속적으로 유입되어 오는 부유물질이 점차 퇴적되어 가는 것으로 사료된다.

### 9.3.2. 부유물질내 유기물의 함량

YJ-1 정점에서 부유물질내 함유되어 있는 유기물질의 함량은 수층에 따라 큰 변화를 보이지 않는 가운데, 조석의 조건에 관계없이 4% 내외의 값을 가진다. 표층에서 플랑크톤 등과 같은 생물들의 밀집을 지시하는 상대적으로 높은 값의 함량도 나타나지 않을뿐더러, 오히려 저층에서 약간 더 높은 함량의 유기물이 함유되어 있다(Fig. 5-30). 전 수층에서 조석에 따른 부유물질 농도의 변화와도 큰 상관관계를 가지지 않고 일정한 값을 갖는다. 특히, 저층에서 7월 13일 00:00-01:00에 저층으로부터의 재부유에 의해 부유물질의 농도가 증가하지만, 유기물의 함량은 큰 변화를 보이지 않고 있다. YJ-2 정점의 경우, 중층에서 4% 내외의 값을 가지지만 표층에서는 2-3% 내외의 낮은 값을 가지며 저층에서 역시 3% 정도로 정점 YJ-1에 비해 상대적으로 낮은 값을 보인다(Fig. 5-31). 특히 전 수층에서 7월 13일 창조시 후반(19:00-20:00)에 유속의 강화로 부유물질의 농도가 상당량 증가하지만, 유기물의 함량은 별다른 변화를 보이지 않고 일정한 값을 갖는다. 정점 YJ-3 역시 다른 정점들과 유사한 값의 분포를 보이고 있다(Fig. 5-32).

### 9.3.3. 잔여유속의 분포와 부유물질의 플럭스

각 정점에서의 수심적분된(Depth-integrated) 부유퇴적물의 이동률에 대한 시계열 변화를 Fig. 5-33에 도시하였다. 정점별로 부유퇴적물의 이동률은 뚜렷한 차이점을 보이고 있다. 서수도에 위치한 정점 YJ-1에서는 창조와 낙조시 각각 최대 0.024, -0.025 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>로 거의 대칭성을 가지고 변화되는 특징을 보이고 있다(Fig. 5-33a). 하지만, 동쪽의 조발수도에 위치한 정점 YJ-2에서는 낙조시(최대: -0.013 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)에 비해 창조시에는 최대 0.034 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> 이상으로 상대적으로 높은 값을 보이고 있다(Fig. 5-33b). 즉, 낙조시 부유상태로 외해로 빠져나가는 퇴적물의 양보다 창조

시 외해로부터 조발수도를 통해 유입되는 양이 훨씬 많다는 것을 알 수 있다. 만의 중앙부 여자도 부근에 위치한 정점 YJ-3에서는 수로에 비해 유속의 세기가 현저하게 줄어든 지역이다(Table 5-8). 수심적분된 부유퇴적물의 이동률 역시  $\pm 0.004 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  내외로 만 입구의 정점들에 비해 거의 미미할 정도로 줄어든 양상을 보이고 있다(Fig. 5-33c). 시계열 분포변화를 살펴볼 때 비대칭성을 두드러지게 나타내고 있지 않지만, 약간의 창조류 방향이 우세한 값으로 외해로부터 유입되어 온 부유퇴적물이 점차 육지쪽으로 이동되고 있음을 말해주고 있다.

각 정점에서의 수층별 잔여유속의 분포는 해양에서 부유퇴적물의 이동률이 유속의 n제곱에 비례한다(Owen and Thorn, 1978; Dyer, 1980)는 사실을 고려할 때 일차적으로 부유물질의 순이동량 및 방향을 파악할 수 있게 한다. 정별별로 약간의 상이한 양상을 띠고 있다(Fig. 5-34). YJ-1 정점의 경우, 표층에서는  $-0.19 \text{ m s}^{-1}$ 로 외해쪽으로 잔여흐름이 존재하고 중층에서는  $-0.02 \text{ m s}^{-1}$  정도로 거의 평형상태를 이루지만, 저층에서는  $0.07 \text{ m s}^{-1}$ 로 약하기는 하지만 표·중층과 달리 오히려 내만으로 향하는 잔여흐름이 존재한다(Fig. 5-34a). 정점 YJ-2의 경우 전 수층에 걸쳐 일관되게 내만으로 향하는 잔여흐름이 나타나며(Fig. 5-34b), 중층에서  $0.15 \text{ m s}^{-1}$ 로 가장 큰 값의 흐름을 가진다. 만의 중앙부에 위치한 YJ-3의 잔여유속의 크기는 수로에 위치한 다른 정점들에 비해서 상대적으로 아주 작게 나타나는 가운데, 표층에서는  $-0.04 \text{ m s}^{-1}$ 로 외해쪽으로 흐르는 흐름이 가장 크게 존재하며, 저층에서는  $0.01 \text{ m s}^{-1}$ 로 아주 미약하게 육지쪽 내만으로 향하는 흐름이 유지된다(Fig. 5-34c).

시간평균된 부유퇴적물의 순이동률(Net sediment flux,  $f_s$  in  $10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )은 정점 YJ-3를 제외하고는 잔여유속의 분포와 거의 유사한 양상을 보이고 있다(Fig. 5-35). 정점 YJ-1에서 표층은  $-0.8 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 부유퇴적물이 외해쪽으로 빠져나가고 있다. 하지만, 중층과 저층에서는 각각  $0.3$ 과  $0.2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 미약하지만 퇴적물의 이동률이 내만쪽으로 향하고 있다(Fig. 5-35a). 조발수도의 안쪽 정점 YJ-2에서는 잔여유속의 분포와 마찬가지로 전 수층에 걸쳐 일관되게 내만쪽으로 향하는 퇴적물의 이동률을 가지며, 표층, 중층 그리고 저층에서 각각  $4.0$ ,  $4.7$  그리고  $3.1 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 이동률을 보이고 있다(Fig. 5-35b). 정점 YJ-3에서는 잔여유속의 경우 표층에서 외해쪽으로 향하는 흐름이 크고 저층에서는 내만쪽으로 향하는 잔여흐름이 미약하게 나타났지만, 부유퇴적물의 이동률은 표층에서  $-0.2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 아주 느린 속도로 외해쪽으로 향하고 있는 반면, 저층에서는  $1.8 \times 10^3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  값을 가지며 상대적으로 아주 빠른 속도로 육지쪽으로 향하는 퇴적물의 이동률을 가진다(Fig. 5-35c). 이는 관측 당시 육지쪽에 위치하는 하천들로부터의 부유퇴적물의 공급량에 비해 외해쪽에서 만 중앙부까지 공급되어 오는 양이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 하지만, 만 내로 유입되는 부유퇴적물의 절대량이 적은 것은 한국해양연구소(1990)에 의해  $^{210}\text{Pb}$  분석결과로 산정된  $0.4 \text{ cm yr}^{-1}$  내외의 낮은 퇴적률을 잘 설명해 주고 있다.



#### 9.4. 요약

세립질 퇴적물이 전체적으로 분포하고 있는 반폐쇄형 여자만에서 퇴적물의 공급원을 파악하기 위하여 만의 입구 2개의 수로와 만 중앙부에 위치한 정점들에서 수리역학적 에너지와 부유물질의 거동 특성에 대해 1999년 7월 12-14일까지 정선관측을 실시하였다. 관측기간동안 수층별 수온의 분포특성은 외해에서의 난류의 유입과 태양열에 의한 가열효과로 인해 수온 성층현상이 미약하게 나타난다.

서수도에 위치한 정점 YJ-1에서는 유속이  $5.7-78.0 \text{ cm s}^{-1}$  범위로 분포하는 가운데, 표층에서 낙조시 평균유속이  $60.8 \text{ cm s}^{-1}$  그리고 창조시 평균유속이  $23.8 \text{ cm s}^{-1}$ 로서 낙조가 우세한 비대칭성을 보인다. 부유퇴적물의 농도는  $3.6-23.5 \text{ mg l}^{-1}$ 로 서해 연안역에 비해 상대적으로 낮은 농도분포를 보이며, 특히 표층에서는 유속의 세기에 관계 없이  $10 \text{ mg l}^{-1}$  이하의 낮은 농도를 갖는다. 한 조석주기동안에 대하여 계산된 잔여유속의 분포는 표층에서  $-18.6 \text{ cm s}^{-1}$ , 중층에서  $-1.5 \text{ cm s}^{-1}$  그리고 저층에서  $7.4 \text{ cm s}^{-1}$ 로서 수층별로 다르게 나타난다. 시간평균된 부유퇴적물의 순이동률은 표층에서  $-0.8$ , 중층에서  $0.3$  그리고 저층에서  $0.2 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로서 전체적으로 미약하게 외해쪽으로 빠져 나가고 있음을 알 수 있다.

동쪽의 조발수도에 위치한 YJ-2 정점에서는 한 조석주기동안 창조시와 낙조시의 평균유속이 표층에서  $69.2, 46.6 \text{ cm s}^{-1}$ , 중층에서  $67.6, 35.6 \text{ cm s}^{-1}$  그리고 저층에서는  $57.0, 36.7 \text{ cm s}^{-1}$ 로 전 수층에서 창조류가 낙조류에 비해 48-89 % 정도 우세한 비대칭성을 갖는다. 부유퇴적물의 농도는  $1.7-30.3 \text{ mg l}^{-1}$  범위로 서수도 정점에 비해 높은 값을 가지며, 특히 창조시 높은 농도를 가지는 것으로 보아 외해로부터 조발수도를 통해 많은 양의 부유퇴적물이 유입되고 있음을 알 수 있다. 잔여유속은 YJ-1 정점과 달리 전 수층에서  $15 \text{ cm s}^{-1}$  내외로 일관되게 내만쪽으로 향하는 흐름을 가지고 있다. 결과적으로 대조기 부유퇴적물의 순이동률은 수층에 따라  $3.1-4.0 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 속도로 내만쪽으로 이동, 유입되고 있음을 알 수 있다.

만의 중앙부에 위치한 정점 YJ-3에서는 만 입구의 정점들에 비해 낮은 유속의 분포를 가진다. 창조시와 낙조시의 평균유속이 표층에서는 각각  $37.7, 43.9 \text{ cm s}^{-1}$ 로서 낙조가 약간 우세하지만 저층에서는  $32.6, 27.8 \text{ cm s}^{-1}$ 로서 창조가 약간 우세한 특성을 갖는다. 부유퇴적물의 평균농도는 표층에서  $11.7, 11.3 \text{ mg l}^{-1}$ 로 거의 대칭적인 분포를 가지지만, 저층에서는  $23.5, 16.2 \text{ mg l}^{-1}$ 로 창조시에 보다 높은 농도를 갖는다. 잔여유속 역시 아주 낮은 값으로 표층에서는  $-4.0 \text{ cm s}^{-1}$ 로 남쪽으로 향하는 흐름이 존재하지만, 저층에서는  $1.0 \text{ cm s}^{-1}$ 로 북쪽으로 향하는 흐름이 미약하게 발달하고 있다. 부유퇴적물의 농도와 잔여유속을 고려한 부유퇴적물의 순이동률은 표층에서  $-0.2 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  그리고 저층에서는  $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 속도로서 전체적으로 육지쪽으로 부유퇴적물이 이동되어 퇴적되고 있는 것으로 나타난다.

하지만, 외해로부터 만 내로 유입, 이동되고 있는 부유퇴적물의 절대량은 아주 적은 값으로서 기존에 보고된  $0.4 \text{ cm yr}^{-1}$  내외의 낮은 퇴적률(한국해양연구소, 1990)을 잘 설명해주고 있다. 부유퇴적물내 함유되어 있는 유기물의 함량은 수층에 따라 큰 변화를 보이지 않으며 3-4% 범위로 분포한다. 특징적으로 수온, 유속, 유향 그리고 부유퇴적물의 농도 등과 같은 수리역학적 특성변화와 아무런 상관관계를 가지지 않고 일정한 값을 가지는 경향을 보인다.

## 10. 결 론

남해의 니질퇴적물은 외해보다는 우리나라 연안 또는 육상으로부터 기원한 것으로 보여진다. 고흥반도 동쪽에서는 섬진강과 낙동강이 직접적인 공급처이며, 고흥반도 서쪽에서는 서해안에서 재부유되어 이동되어 온 부유물질이 주 공급원으로 사료된다. 따라서 남해와 서해의 경계부인 제주도와 목포사이에는 거대한 흑산니대의 일부분이 놓여 있는데 이 곳의 니질퇴적물은 겨울철의 재부유-퇴적현상을 지시하는 층리의 발달을 특징적으로 보이고 있다. 전반적으로 남해연안의 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 유기물과 탄산염함량이 서서히 증가한다. 그러나 수심 70 m이하의 남해중앙부에는 과거 해수면이 낮았을 때 쌓인 조립질 퇴적물이 해저에 그대로 노출되어 있다. 이 과거의 퇴적물과 연안의 현생 니질퇴적물 사이에는 홀로세 해침작용에 의해 이들이 서로 혼합되어 사질니 또는 니질사 퇴적물이 퇴적되어 있다.

진해, 마산만 입구에서의 12시간 정선관측에 의하면, 5월경에 이 곳의 해수는 수온이  $14-17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 염분은 31.0-31.5 PSU로서 수괴의 성층화를 보여 상당히 안정되어 있음을 알 수 있다. 해류의 최강유속값은  $35-37 \text{ cm s}^{-1}$ 로 창조와 낙조의 구별이 거의 없으나 전반적으로 전 수층에 걸쳐 창조시에 유속이 더욱 강한 경향을 보여 이 지역에서는 창조류가 우세한 비대칭조류구조를 갖는다. 해저의 니질퇴적물은 대부분의 조석주기동안에 재부유되어 저층의 탁도가 상대적으로 매우 높게 유지되지만 그 위의 수층에서는 부유물질이 뚜렷한 분포경향을 보이지 않기 때문에 만 안팎으로 확연히 흐르는 부유물질흐름은 감지되지 않는다. 그러나 해류와 부유물질농도를 가지고 출입량을 계산했을 때 한 조석주기동안에  $0.13 \text{ kg m}^{-1}$ 가 순수하게 만안으로 유입되었음이 밝혀졌다. 즉 이미 이 시기에 진해, 마산만은 세립한 니질퇴적물이 쌓이고 있다고 볼 수 있다.

여자만은 니질과 실트로 구성된 퇴적물( $6.0-8.7 \phi$ )이 우세하며, 최대 4 km의 폭을 갖는 조간대가 특히 만 서쪽에 비교적 잘 발달되어 있다. 유공층 연구에 의하면, 여자만은 외해의 해수 영향을 강하게 나타내는 4 개의 유공층 군집으로 대표된다. 퇴적물 이동모델은 외해에서 유입된 니질퇴적물이 주로 만 서쪽의 조간대에 쌓이는 것을 보여준다. 부유물질 출입량을 관측한 결과, 만 입구에서 수로에 따라 변화가 크지만 동쪽 수로를 통해 뚜렷이 부유물질이 만 안으로 유입되는 것을 알 수 있었다. 따라서 진해, 마산만과 여자만 모두 여름 기간에는 부유물질이 만으로 유입, 퇴

적되는데, 이러한 현상은 남해의 다른 만들에서도 공통적으로 일어나는 일반적인 퇴적작용으로 보여진다. 현재로서는 진해, 마산만은 낙동강과, 여자만은 섬진강과 관련이 클 것으로 추측할 수 있다.

남해 연안의 퇴적작용은 계절적인 변화를 겪을 것이 확실하기 때문에, 물론 현재의 단 한차례의 정선관측 자료만으로 어떠한 확정적인 결론을 내릴 수는 없다. 이러한 관측이 적어도 4계절에 걸쳐서 이루어져야 하며 단발성이기는 하나 지대한 영향을 주는 폭풍이나 태풍시기에도 관측이 필요할 것이다. 이와같은 악천후에서는 사실상 선상관측이 불가능하므로 자동관측시스템(예를 들면 SeTMonS) 투입하여 정밀한 자료를 획득하여야 할 것이다. 또한 진해, 마산만과 여자만에 국한할 것이 아니라 낙동강 입구, 울산앞 연안, 섬진강 입구, 여수 돌산도 근방, 제주도과 목포 사이의 연안, 그리고 고흥반도 서쪽의 몇 개 만을 선정하여 본 연구에서와 같은 퇴적역학적 조사를 되풀이하여 실시해야 할 것이다. 여기서 얻어진 조사결과는 남해의 전연안에서의 부유물질의 거동을 정량적으로 보여줄 것이며, 나아가 예기치 않은 오염물질의 확산이나 적조의 발생시 이들의 이동경로와 침전지역을 정확히 예보할 수 있는 발판이 될 것으로 기대된다.

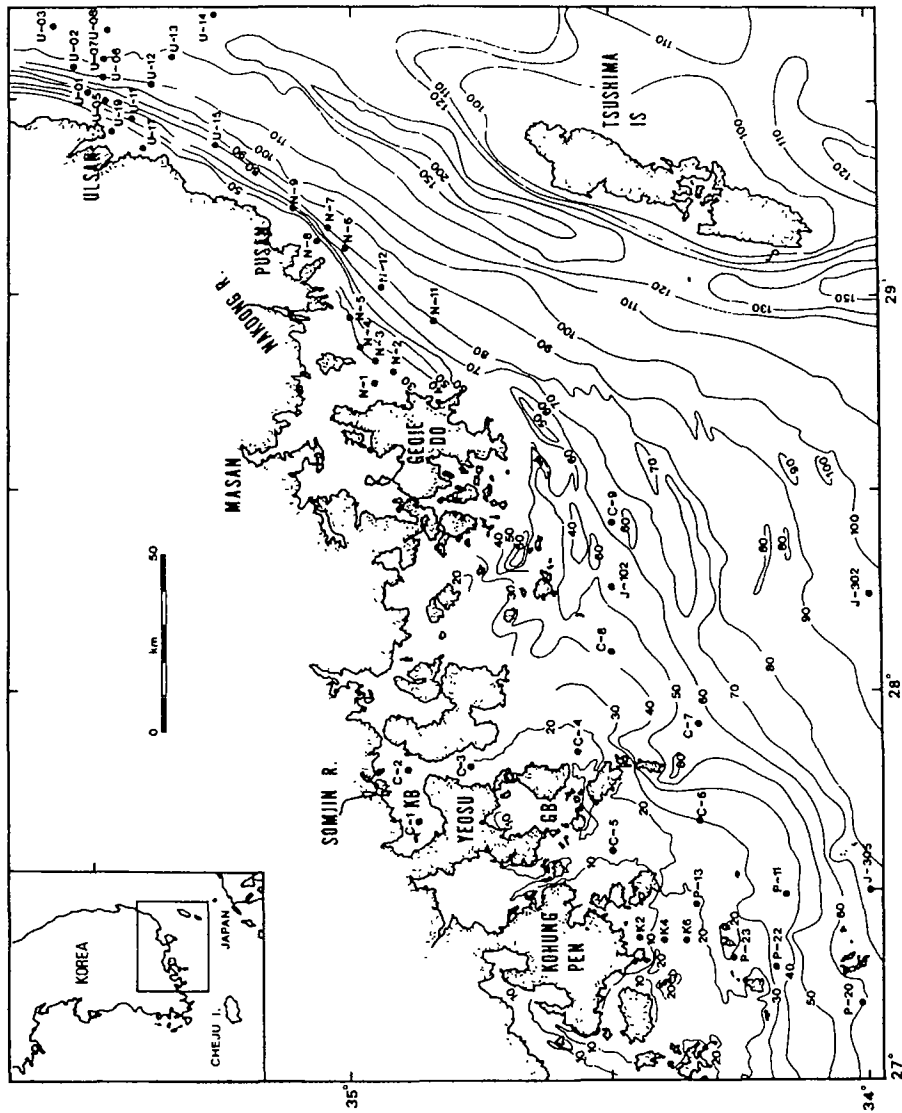


Fig. 5-1. Map showing bathymetry (contours in meters) and core sample locations (dots) in South Sea. GB, Gamagyang Bay; KB, Kwangyang Bay. After Chough et al. (1991).

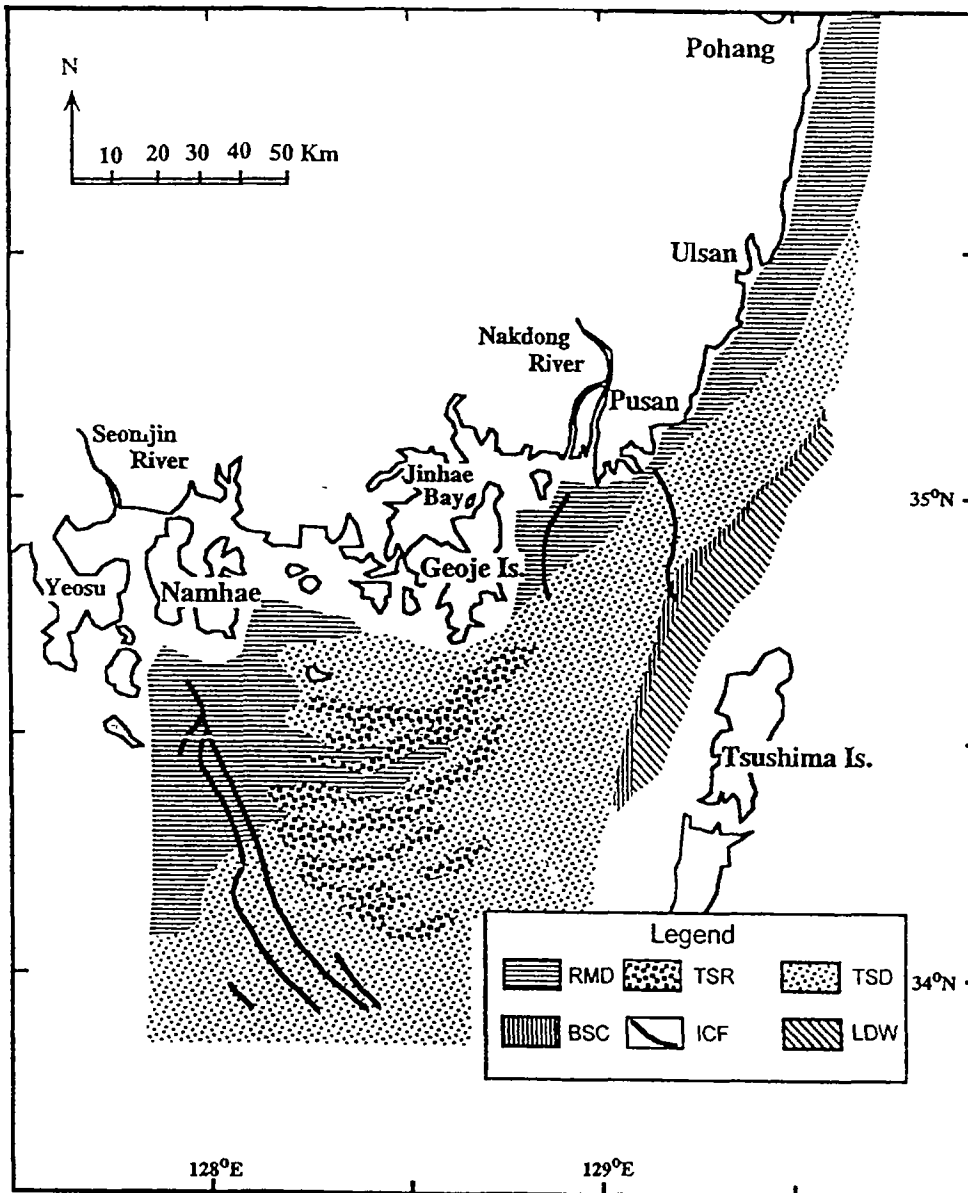


Fig. 5-2. Areal distribution of a variety of transgressive deposits and recent mud in the eastern South Sea. RMD = recent mud deposits; TSR = transgressive sand ridge; TSD = transgressive deposits; BSC = beach-shoreface complex; ICF = incised channel fill; LSD = lowstand deposits. Modified after Yoo (1997).

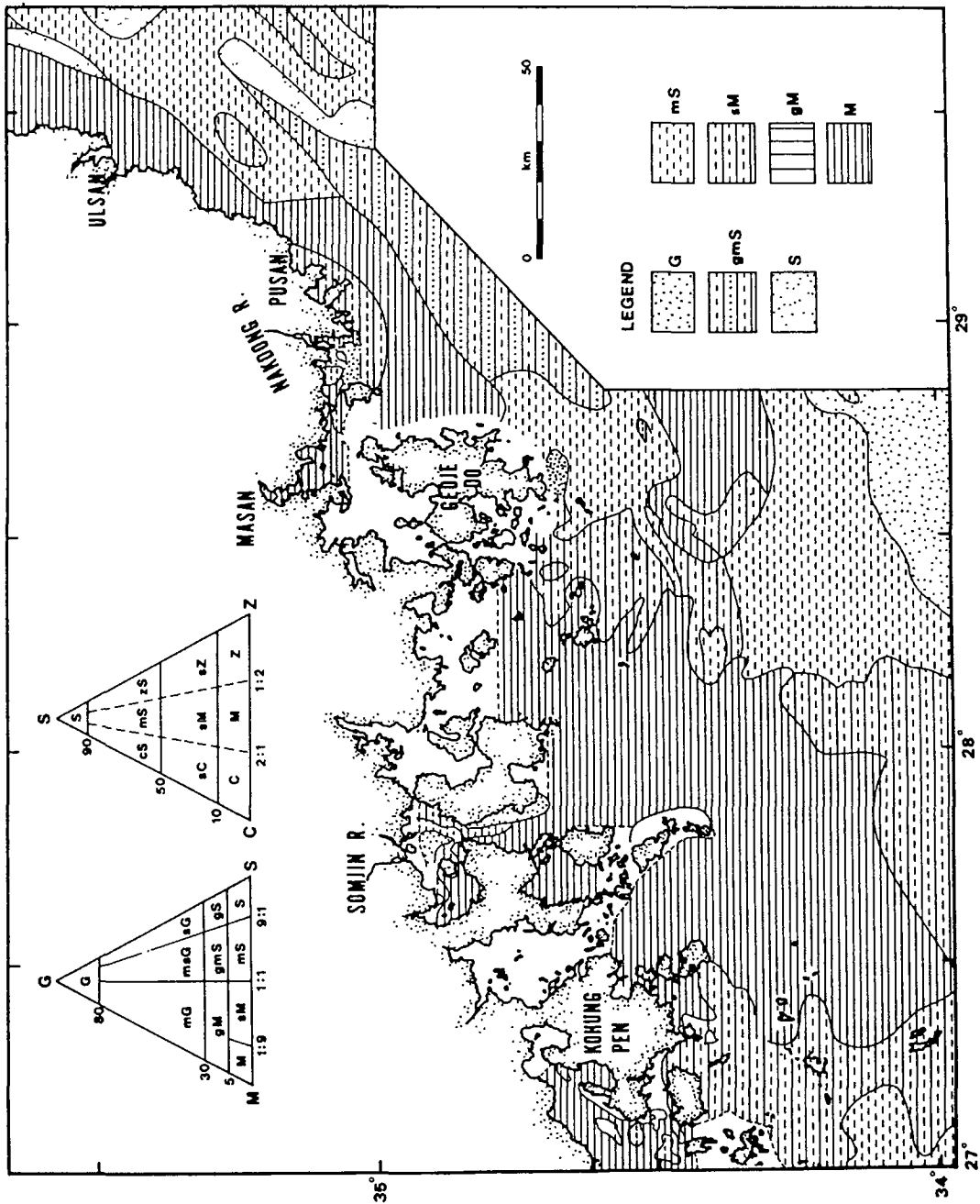


Fig. 5-3. Surface sediment distribution in the South Sea. Sediment classification according to Folk's (1954) scheme. After Chough et al. (1991).

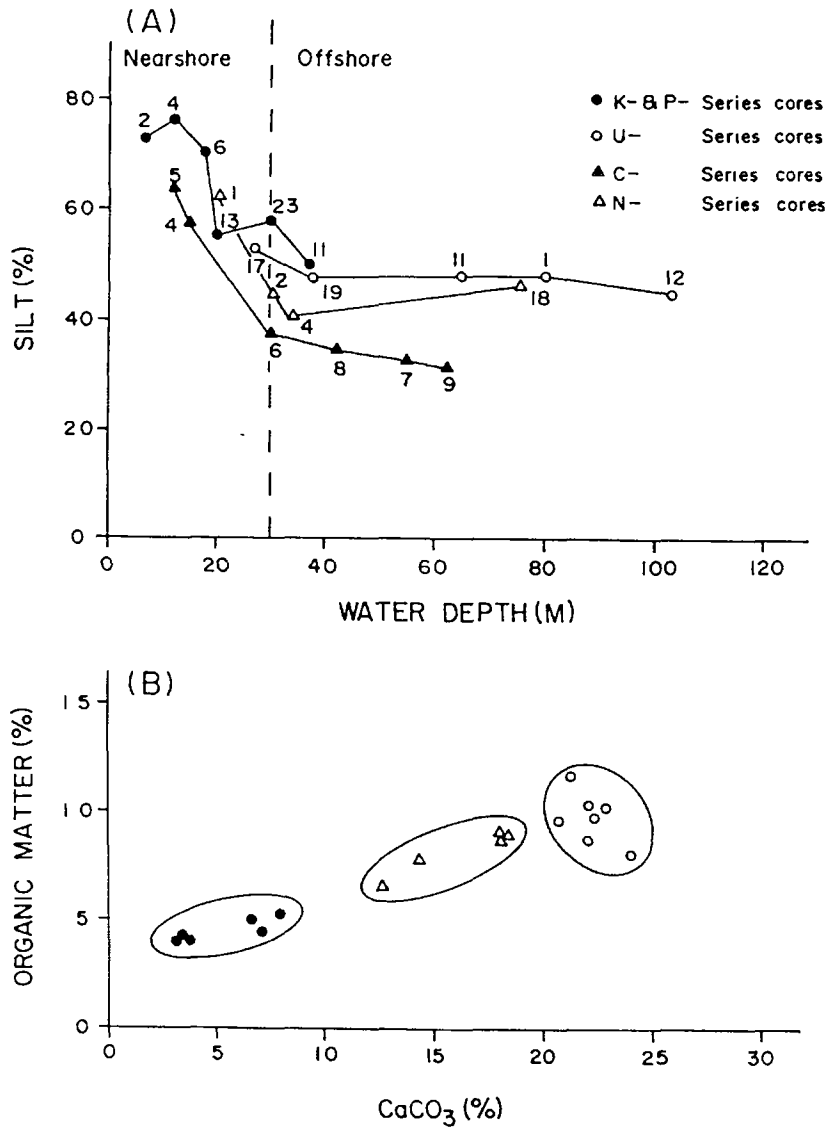


Fig. 5-4. A: Relationships of silt content versus water depth. Each point with core number represents silt contents averaged throughout the core (for core location, see Fig. 5-1). B: Relationships of organic matter versus CaCO<sub>3</sub> contents. After Chough et al. (1991).

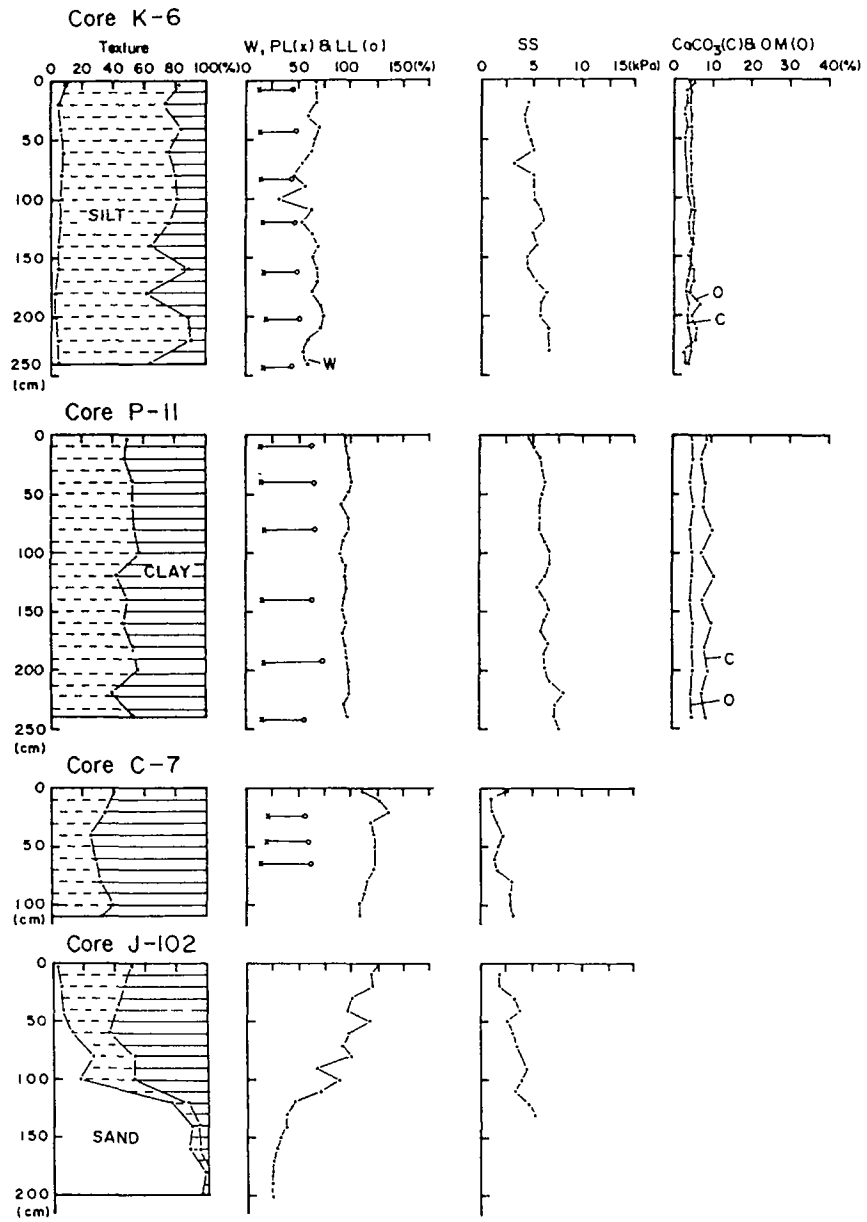


Fig. 5-5. Geotechnical properties of selected sediment cores (for core location see Fig. 5-1). W, water content; PL, plastic limit; LL, liquid limit; SS, shear strength; OM, organic matter. After Chough et al (1991).



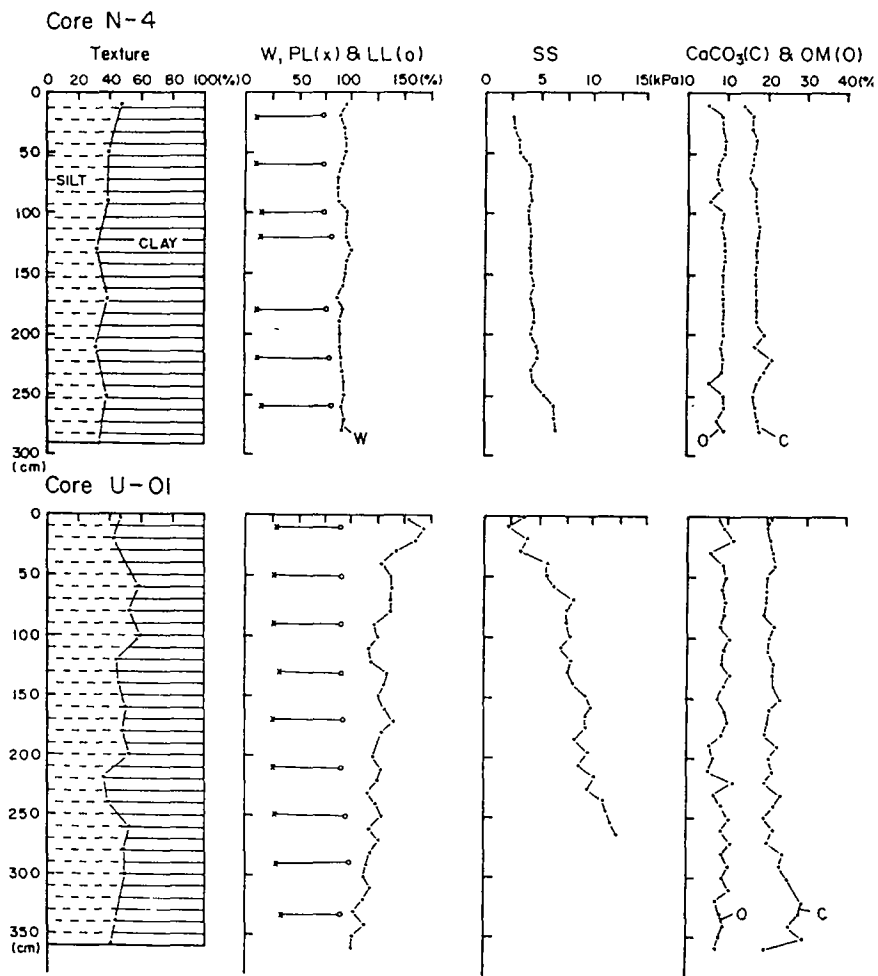


Fig. 5-5. Continued

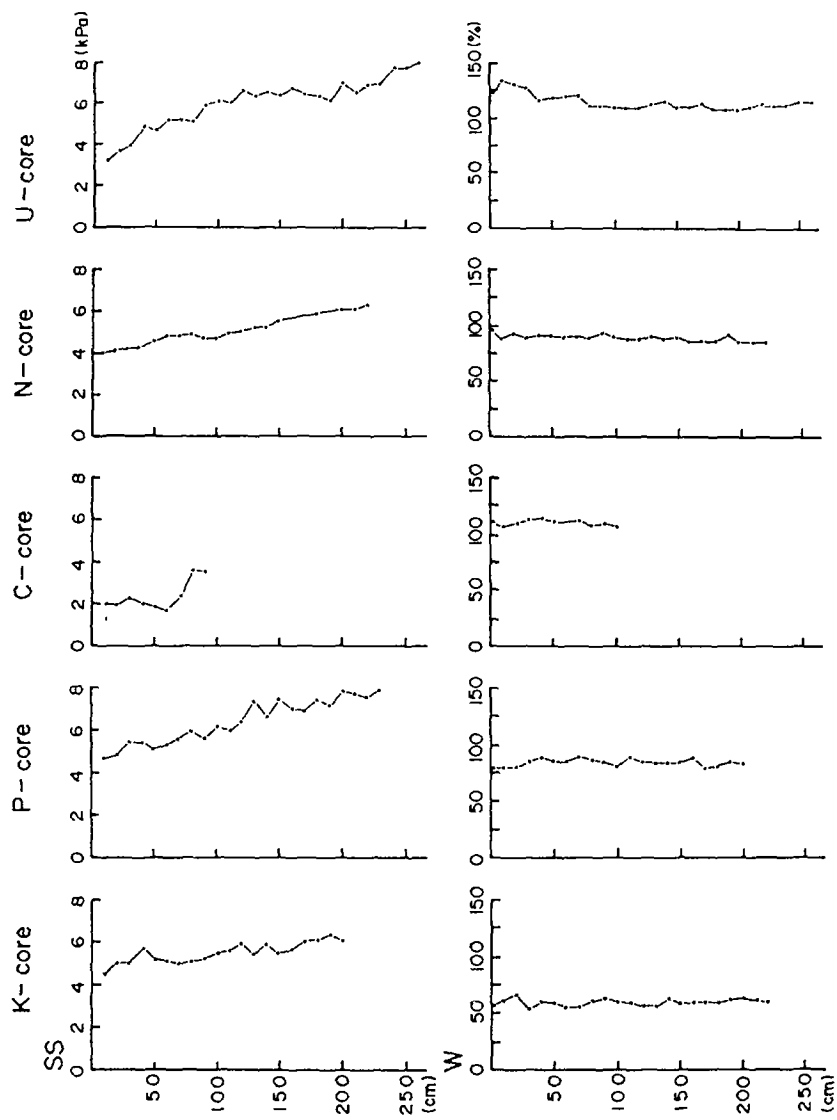


Fig. 5-6. Averaged vertical profiles of shear strength (SS) and water content (W) for each core series (for core location, see Fig. 5-1). After Chough et al. (1991).

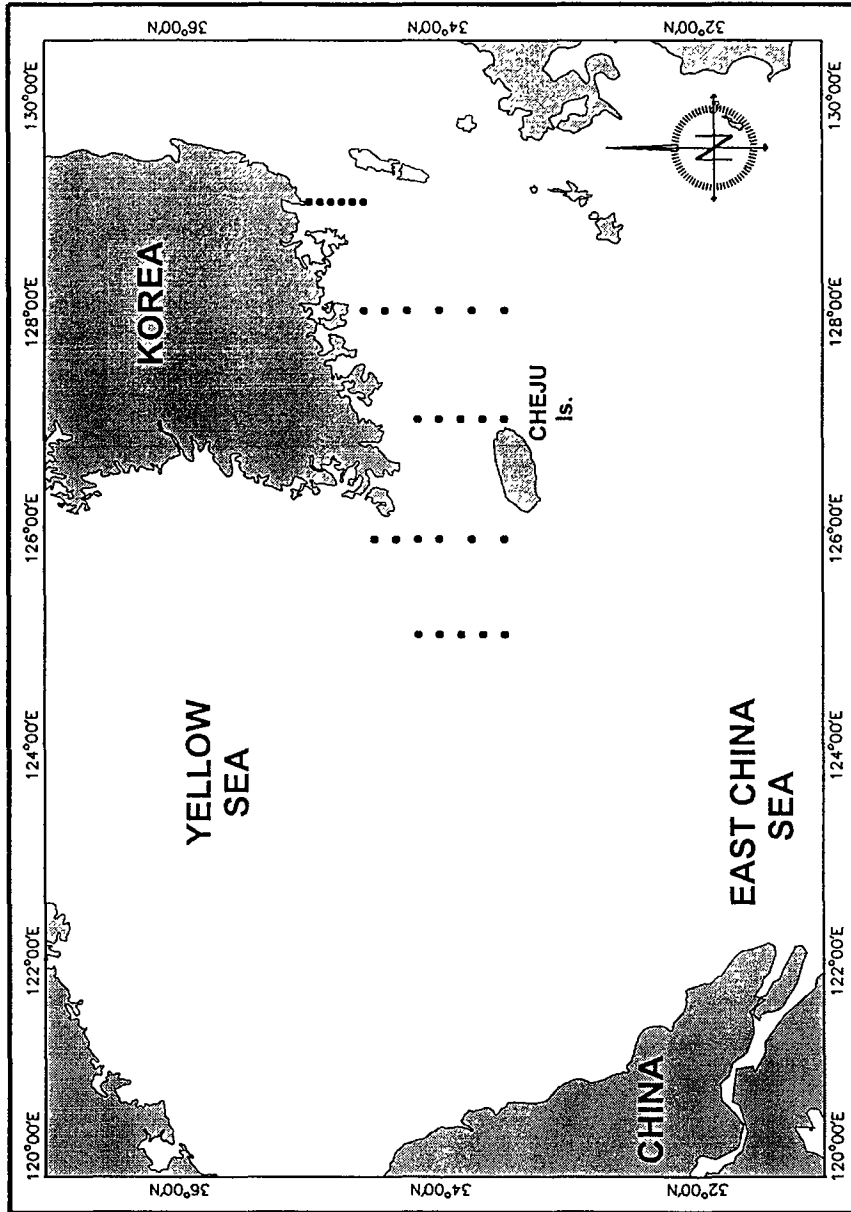


Fig. 5-7. Index map showing locations of box cores (dots).

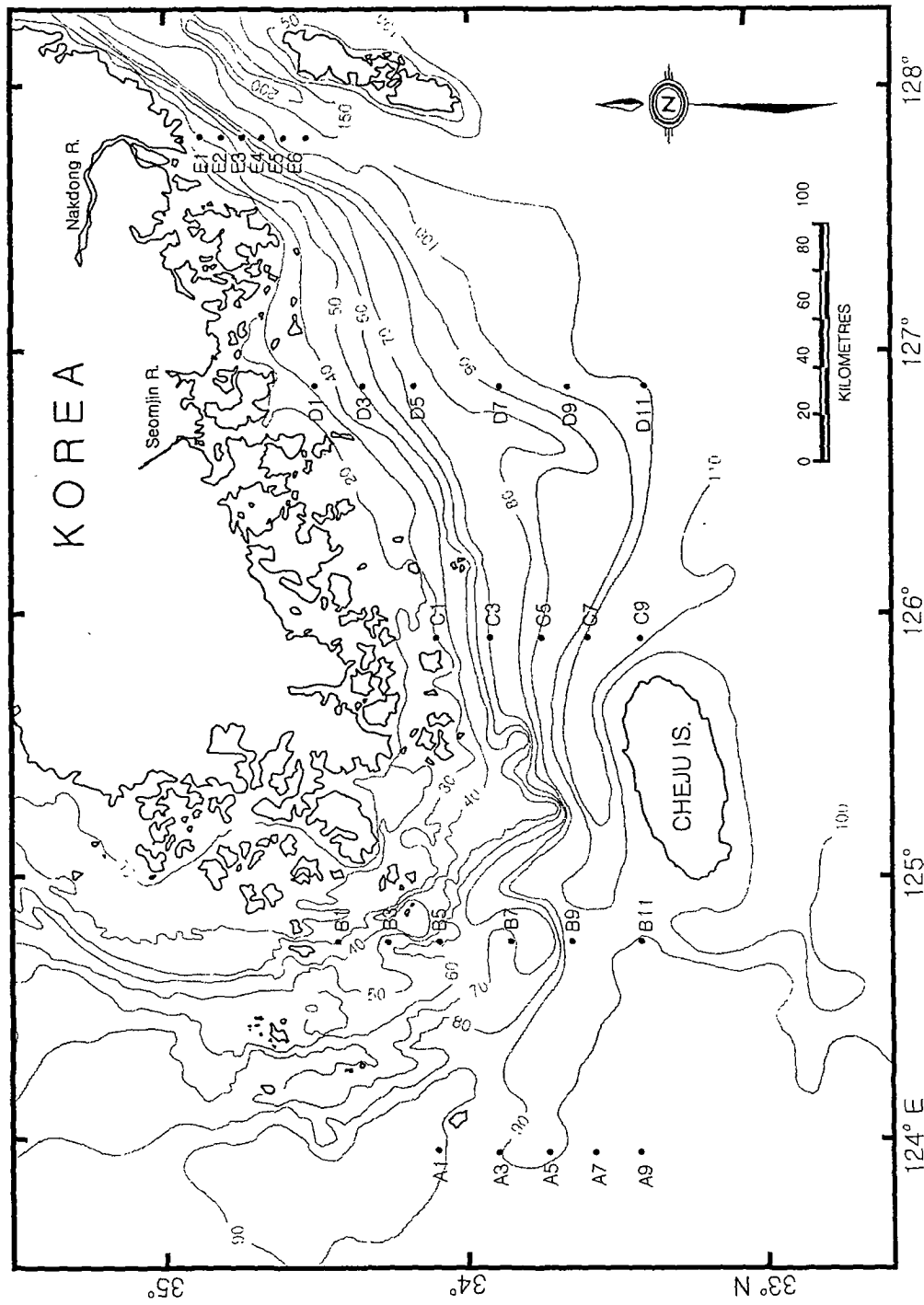


Fig. 5-8. Map showing bathymetry and box cores (dots) in the South Sea and adjacent area.

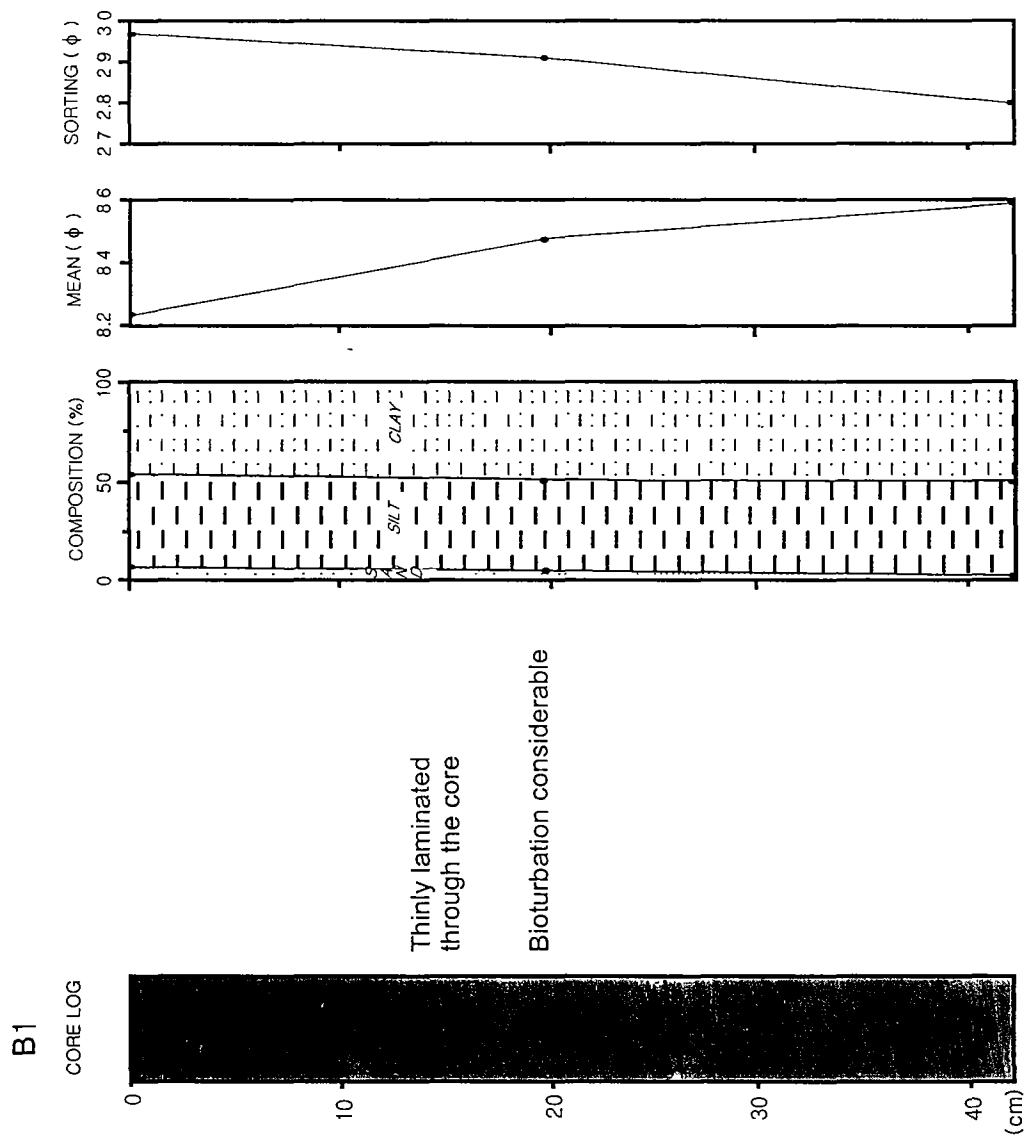


Fig. 5-9. X-radiographs and textural characteristics of box cores from the Heuksan mud belt

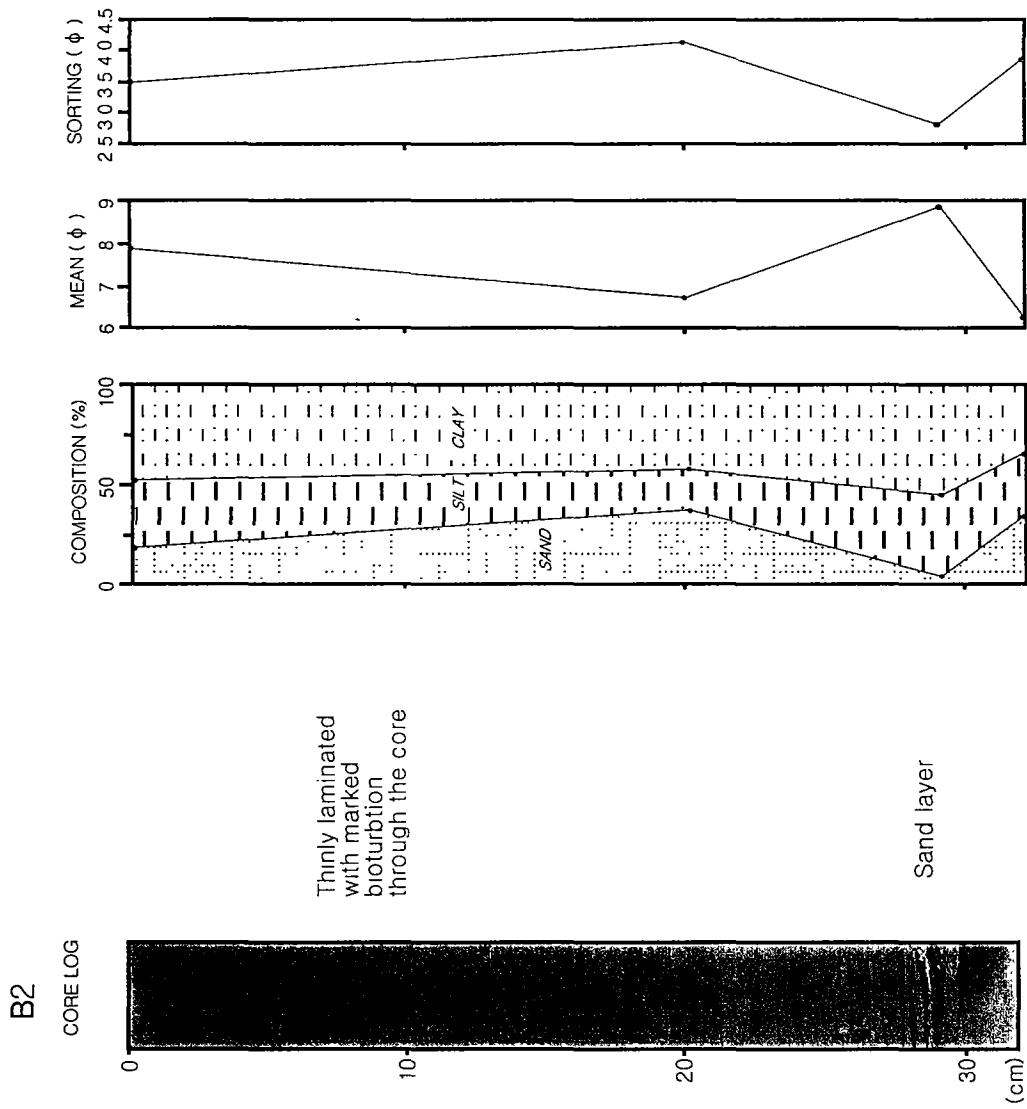


Fig. 5-9. Continued

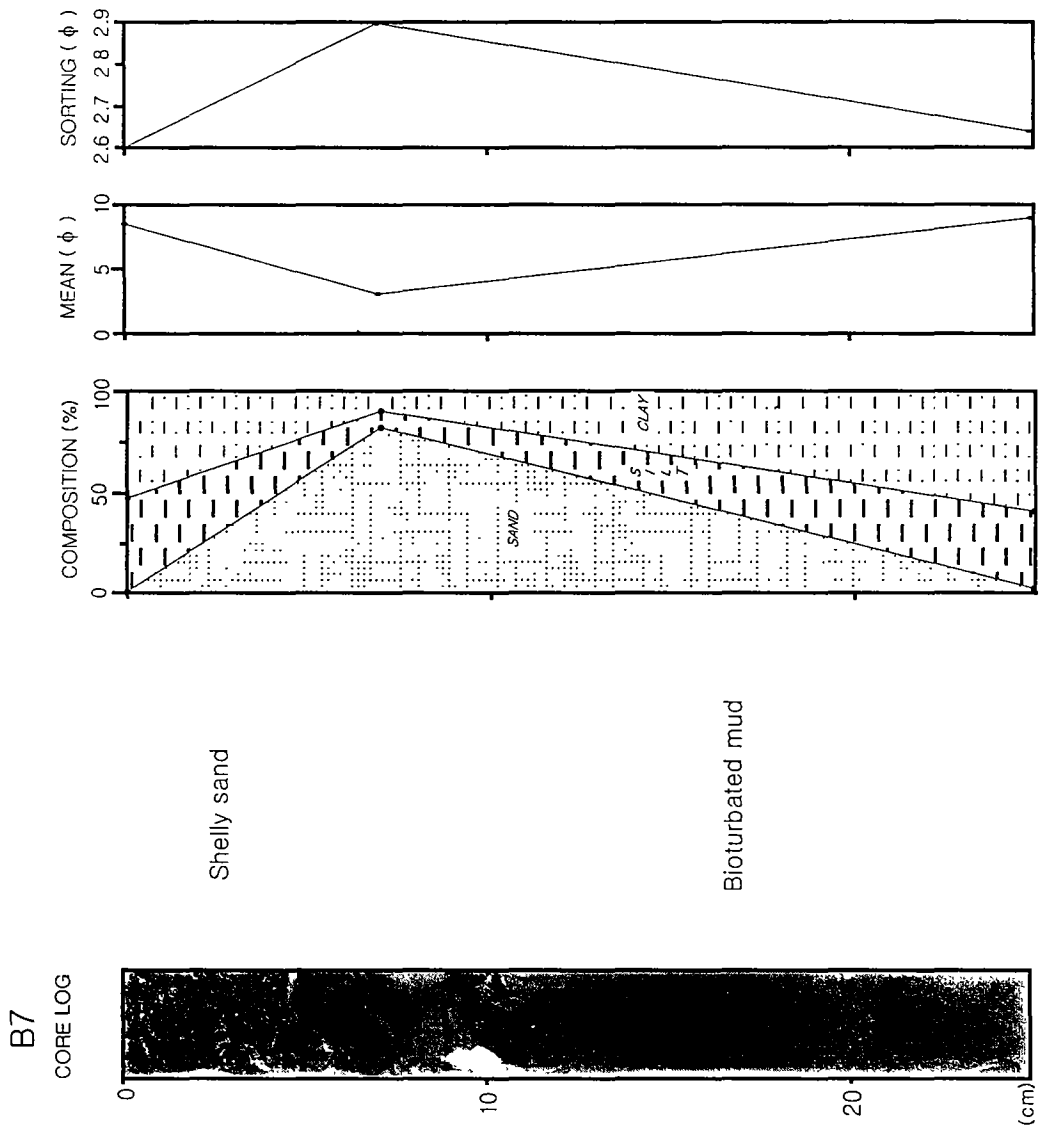


Fig. 5-9. Continued

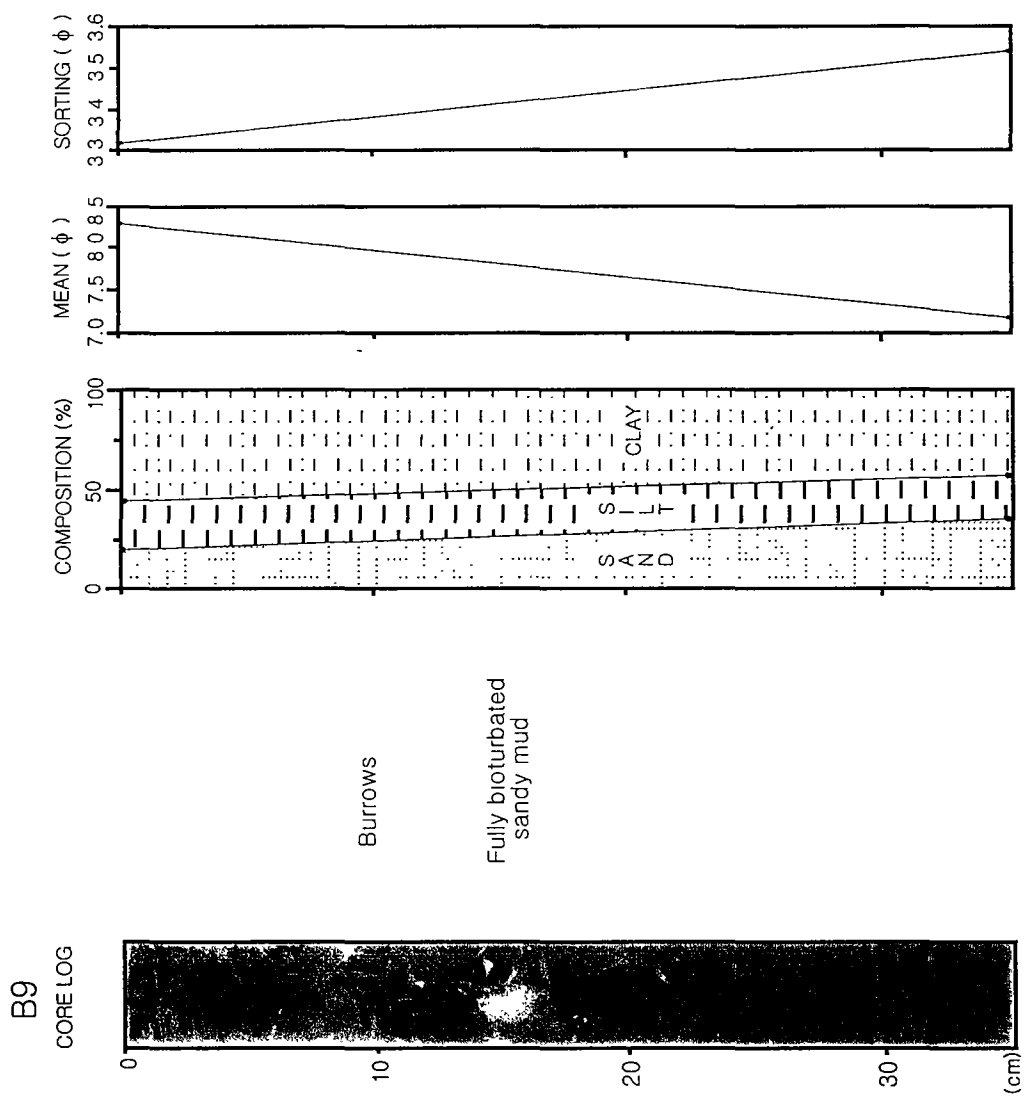


Fig. 5-9. Continued



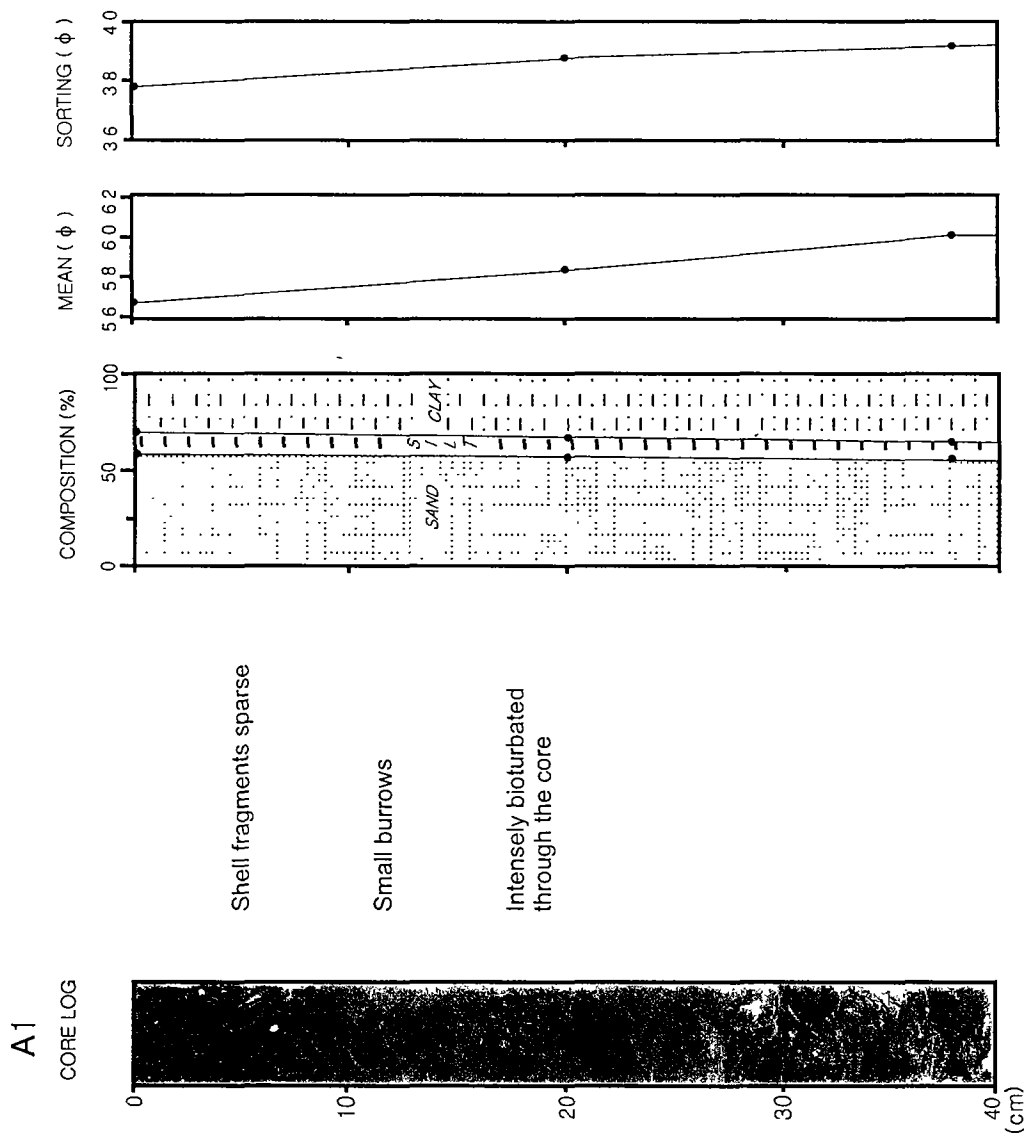


Fig. 5-10. X-radiographs and textural characteristics of box cores from west of Cheju Island.

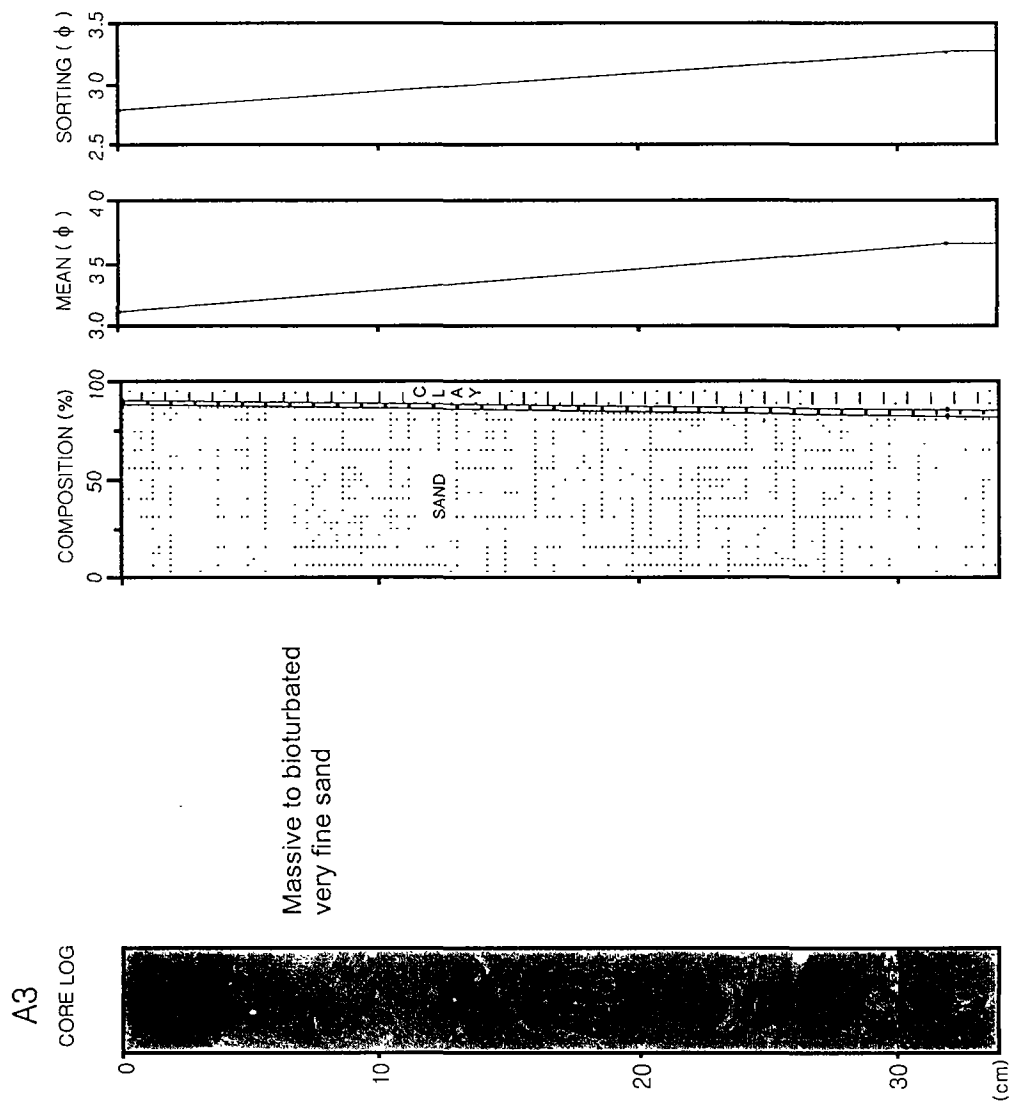


Fig. 5-10. Continued

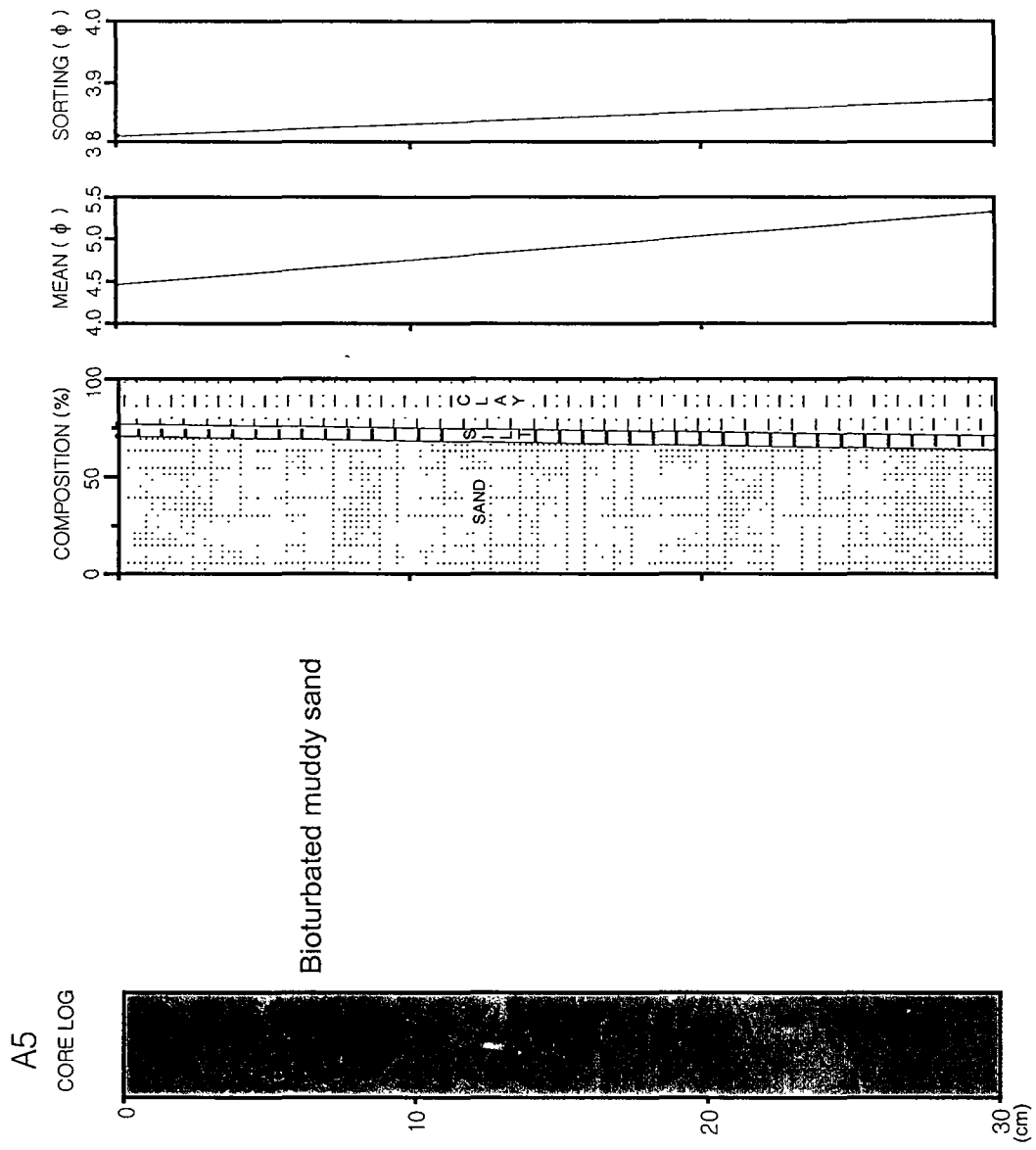


Fig. 5-10. Continued

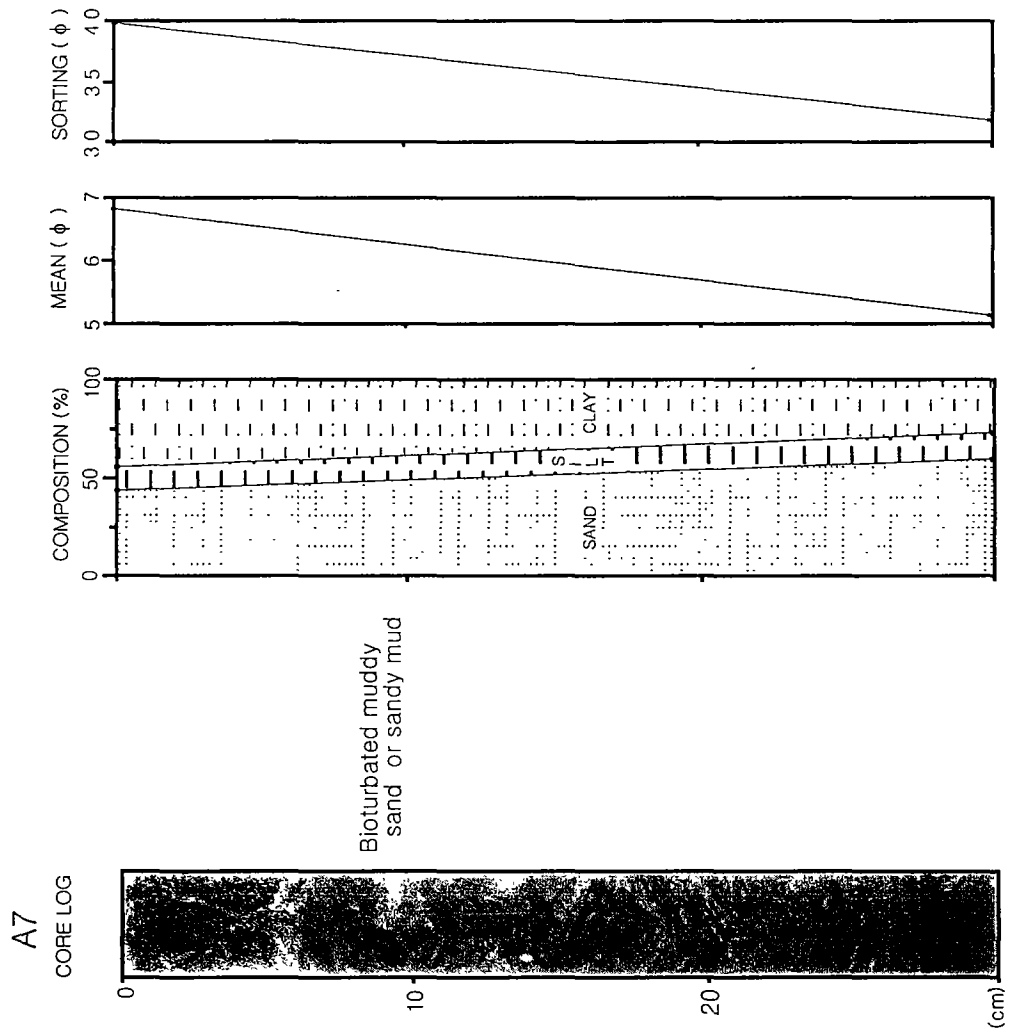


Fig. 5-10. Continued

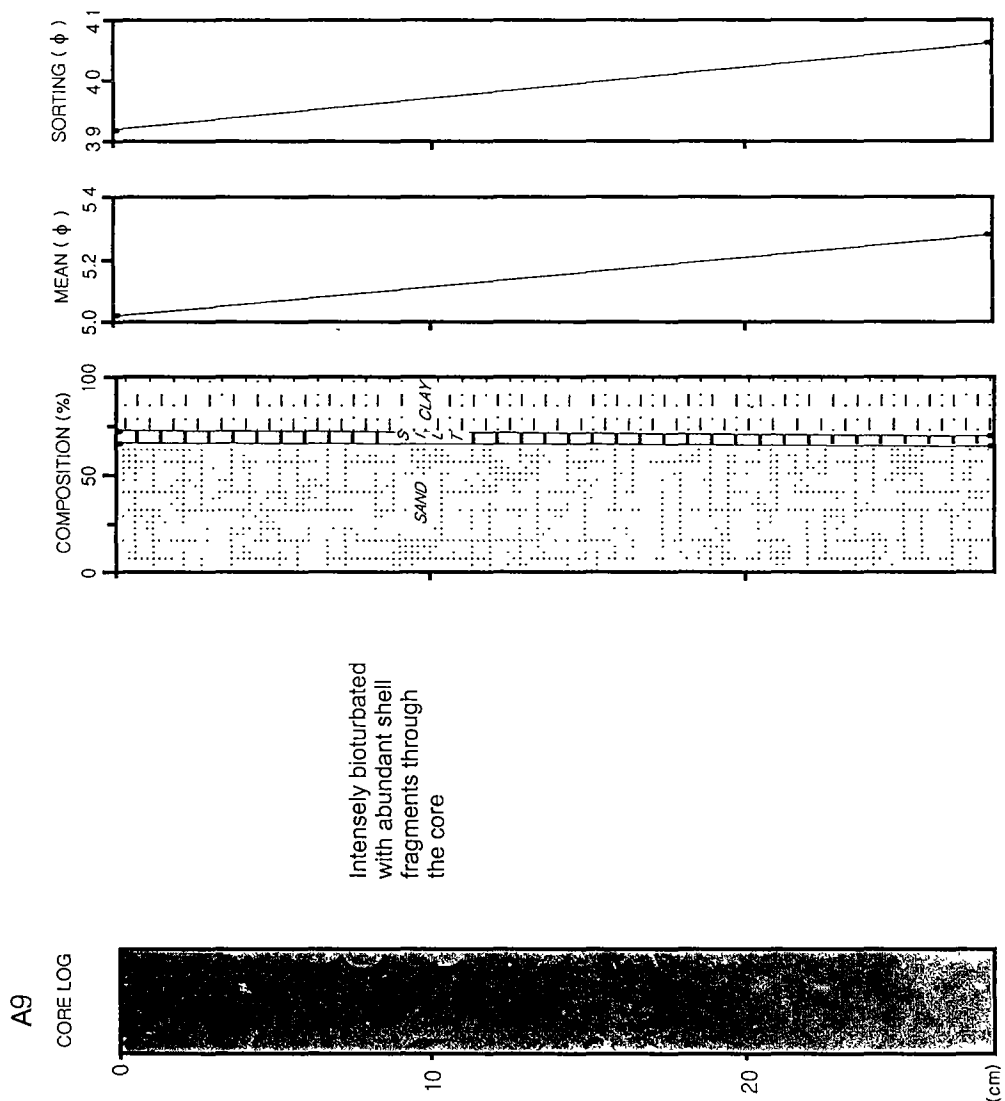


Fig. 5-10. Continued

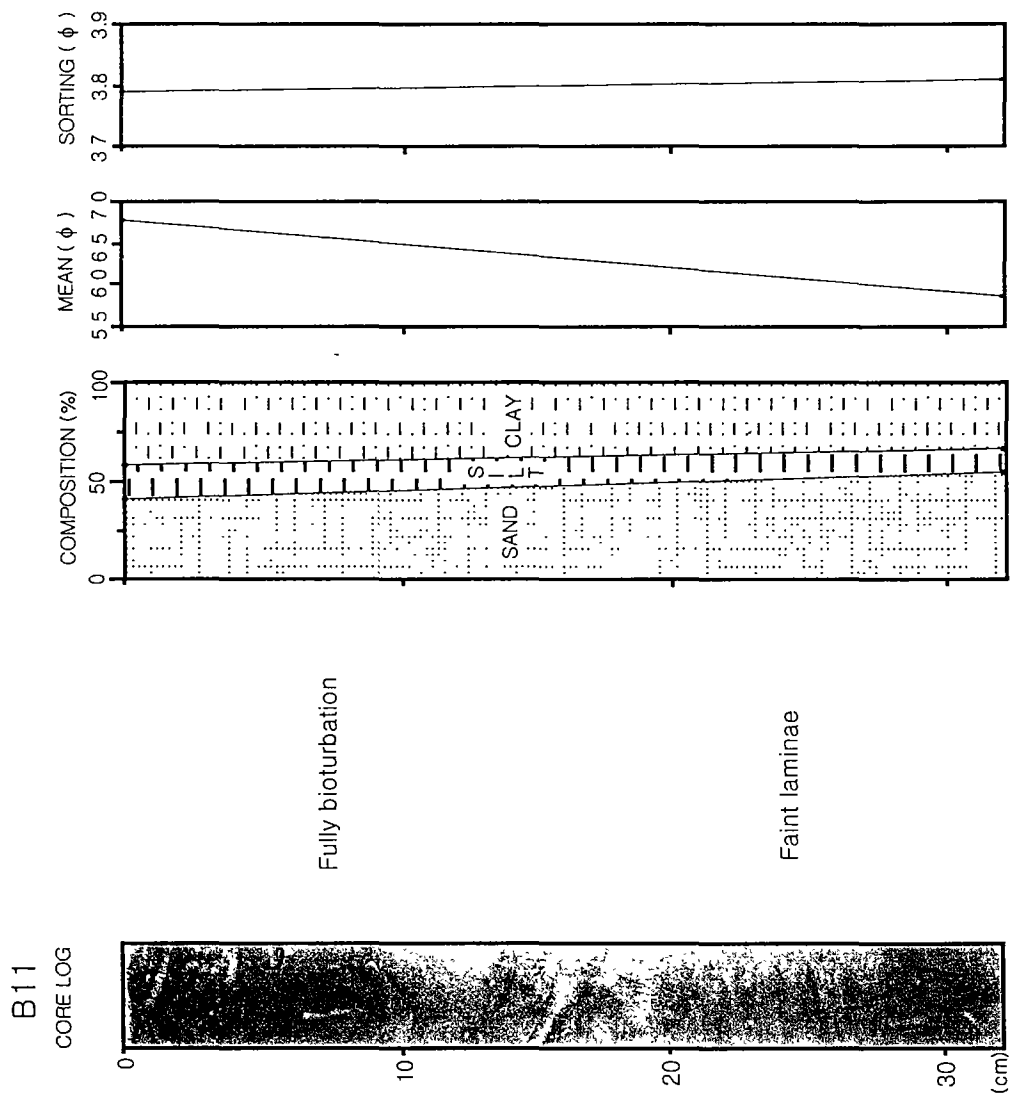


Fig. 5-10. Continued

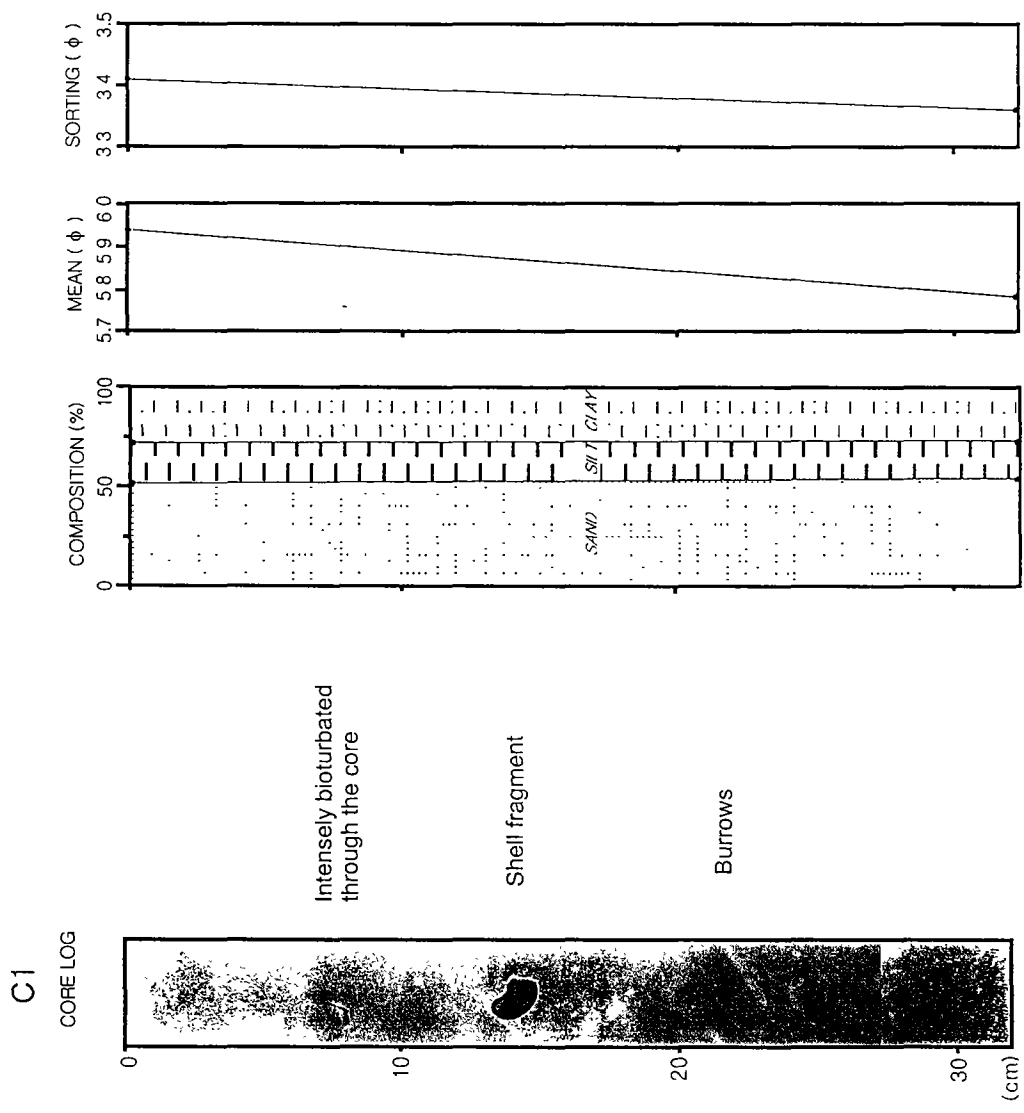


Fig. 5-11. X-radiographs and textural characteristics of box cores from the coastal region west of the Kohung Peninsula, South Sea.

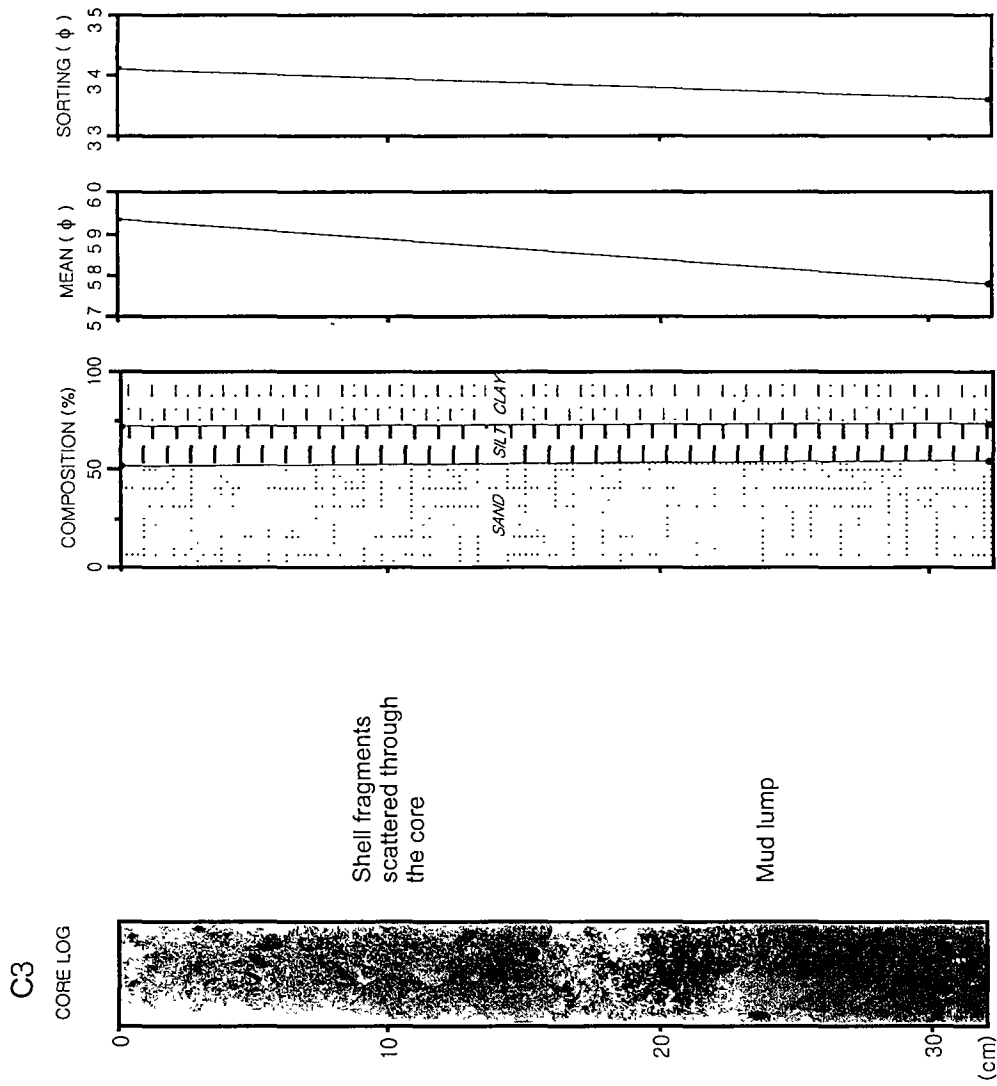


Fig. 5-11. Continued



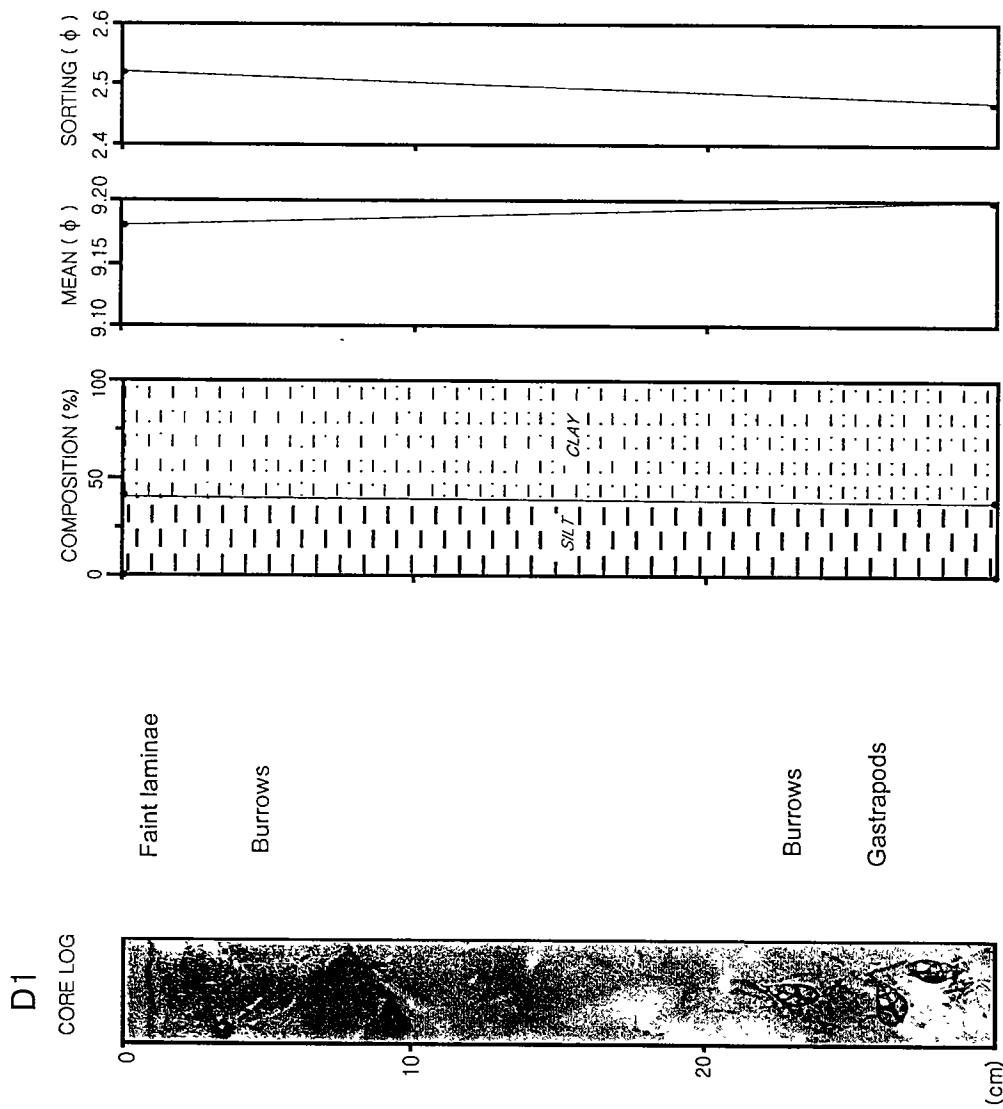


Fig. 5-12. X-radiographs and textural characteristics of box cores from off the Somjin River.

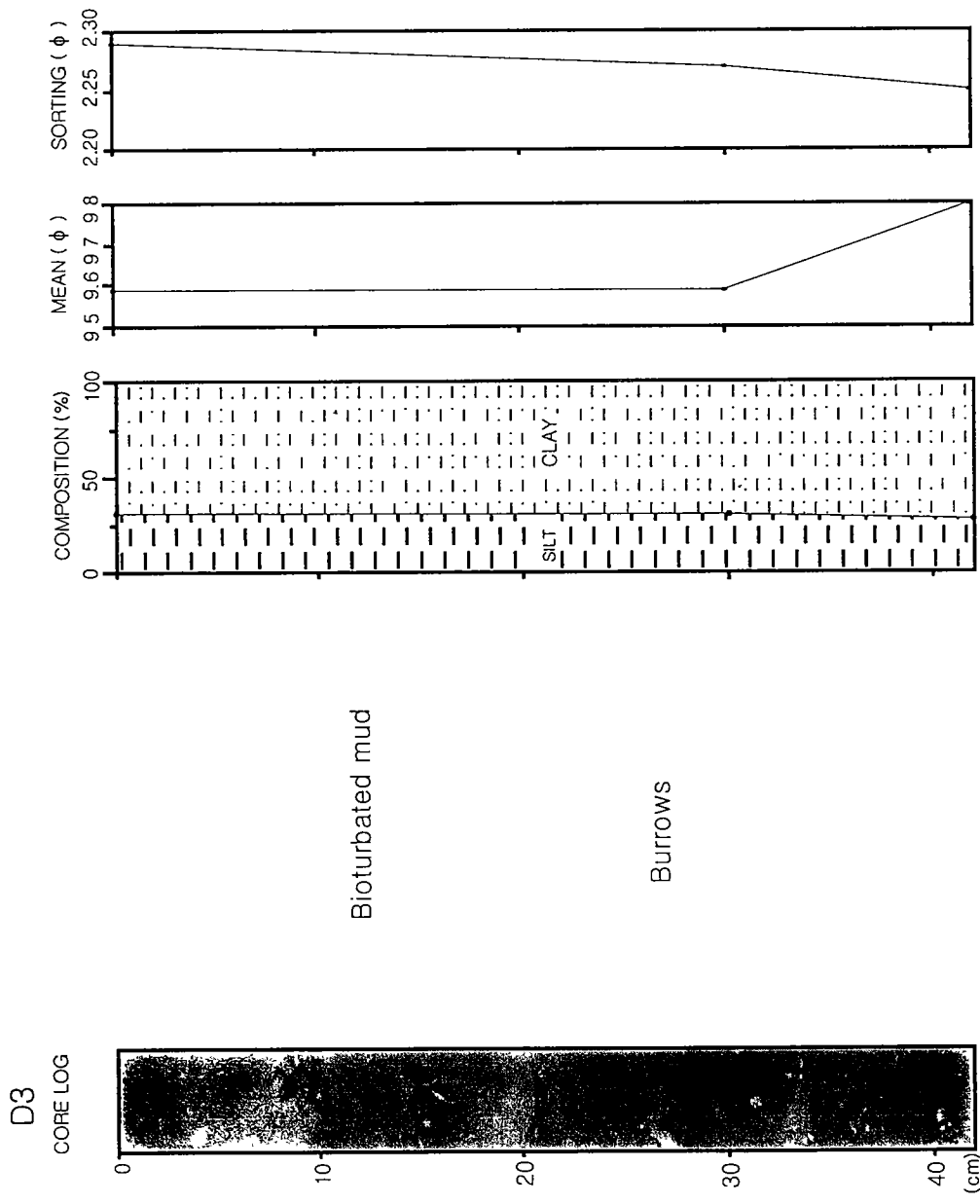


Fig. 5-12. Continued

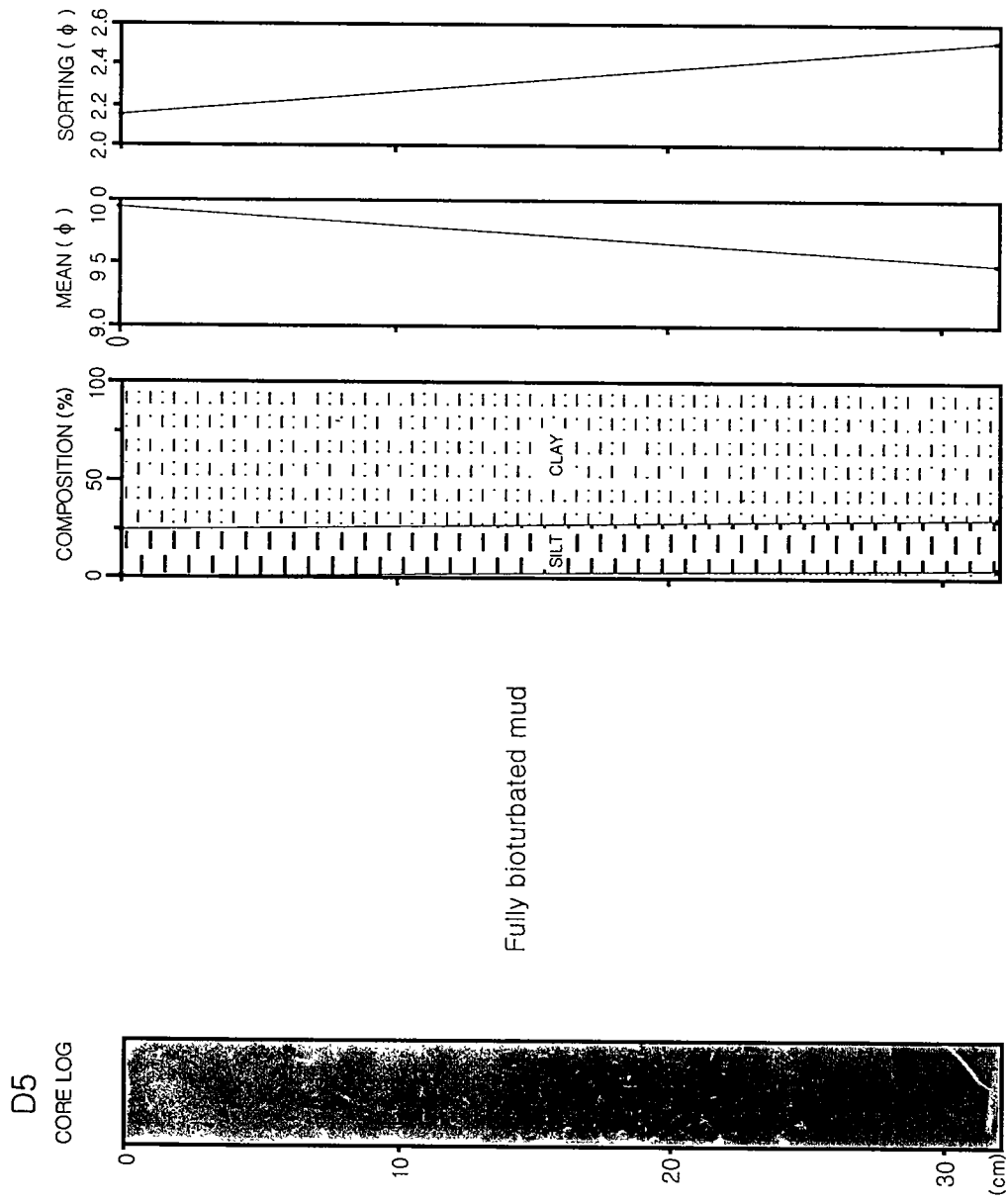


Fig. 5-12. Continued

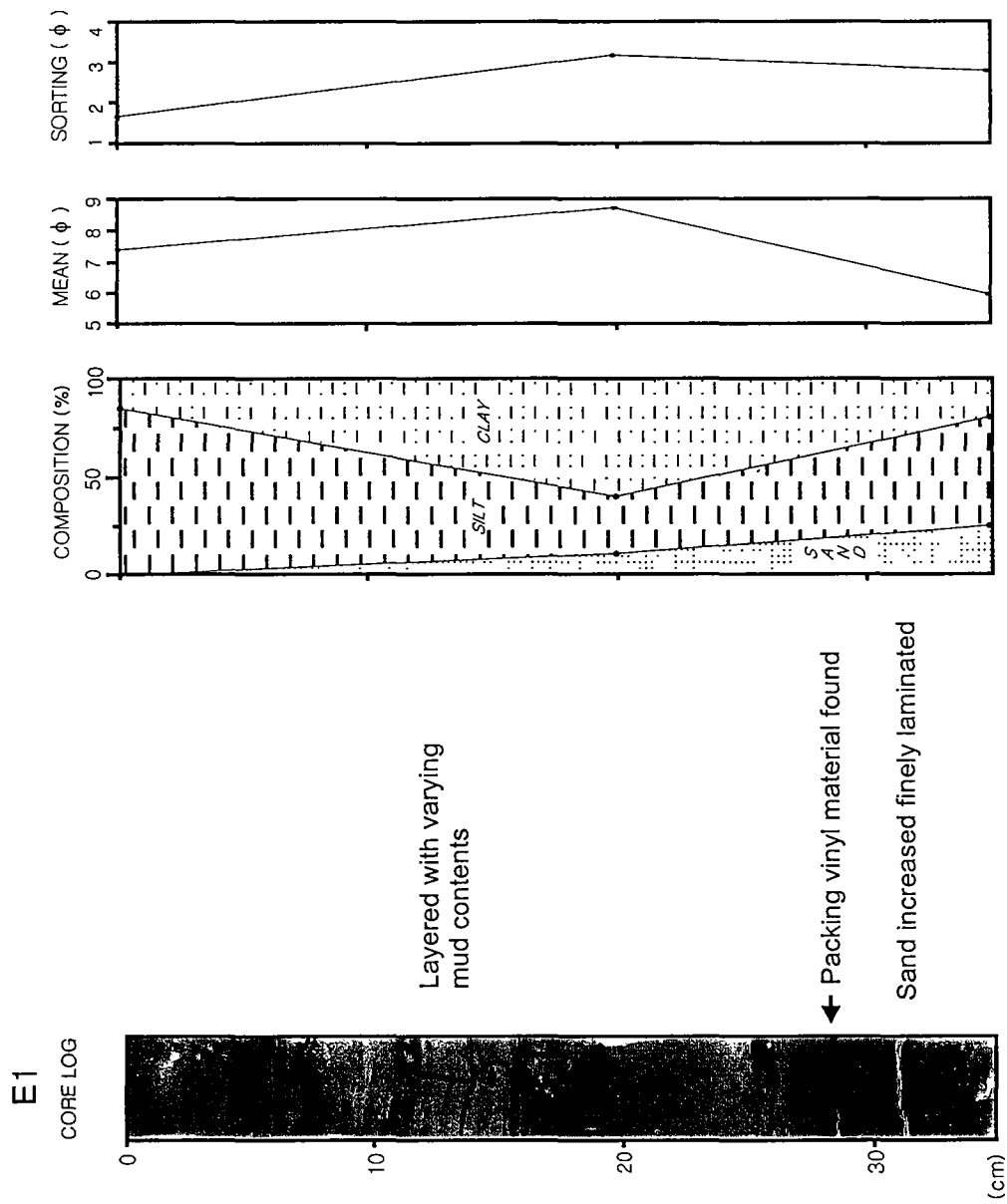


Fig. 5-13. X-radiographs and textural characteristics of box cores from off the mouth of the Nagdong River.

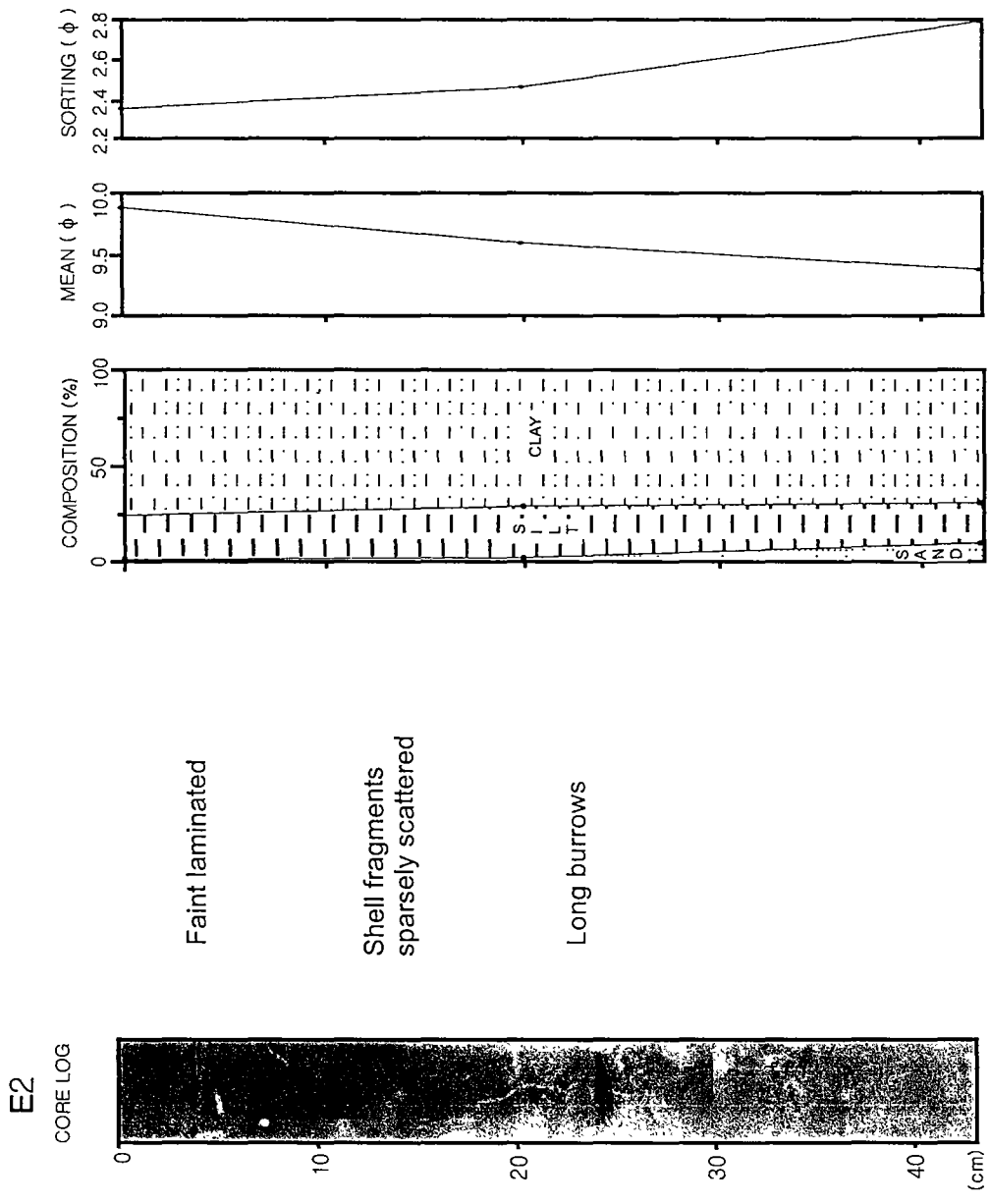


Fig. 5-13. Continued

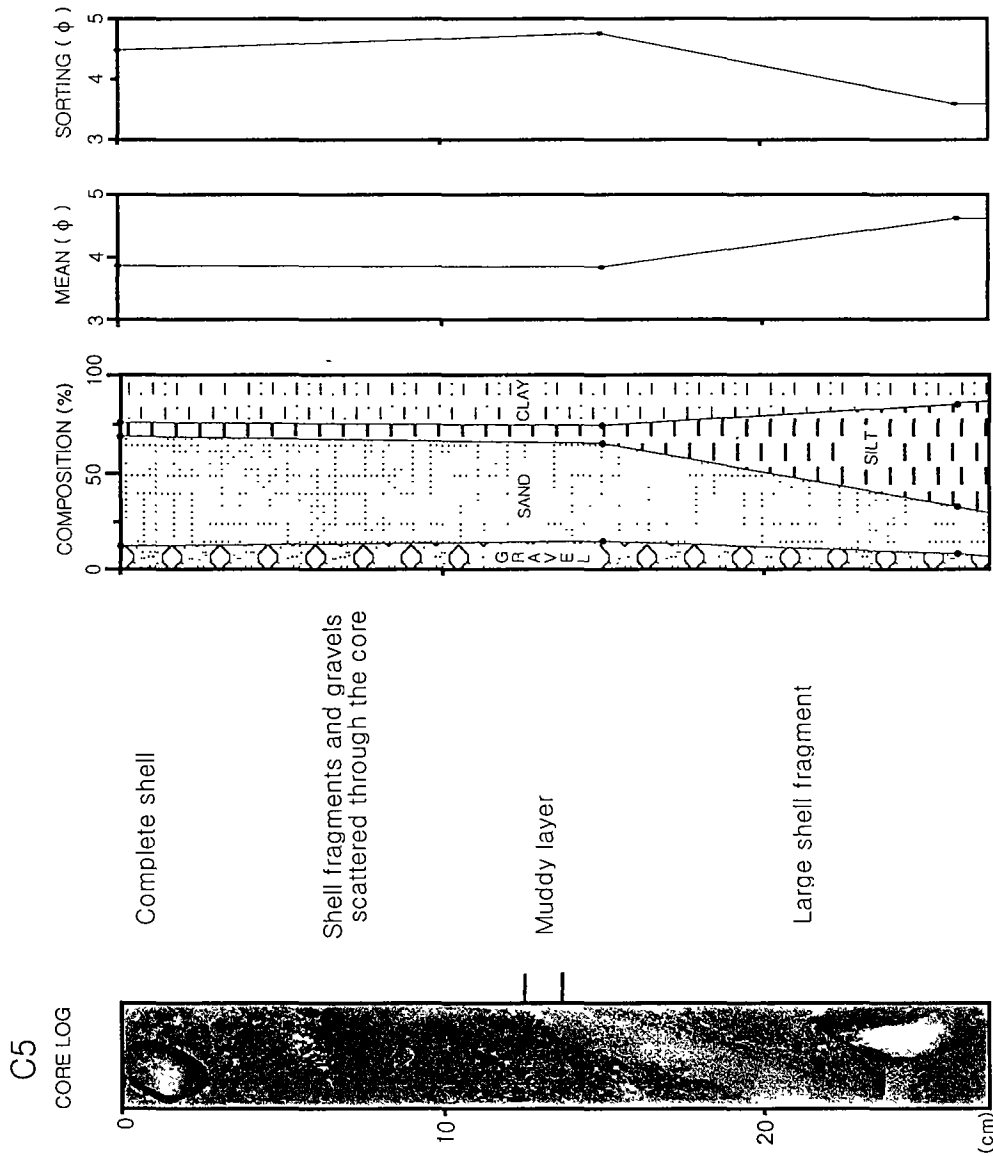


Fig. 5-14. X-radiographs and textural characteristics of box cores from the central trough of the South Sea

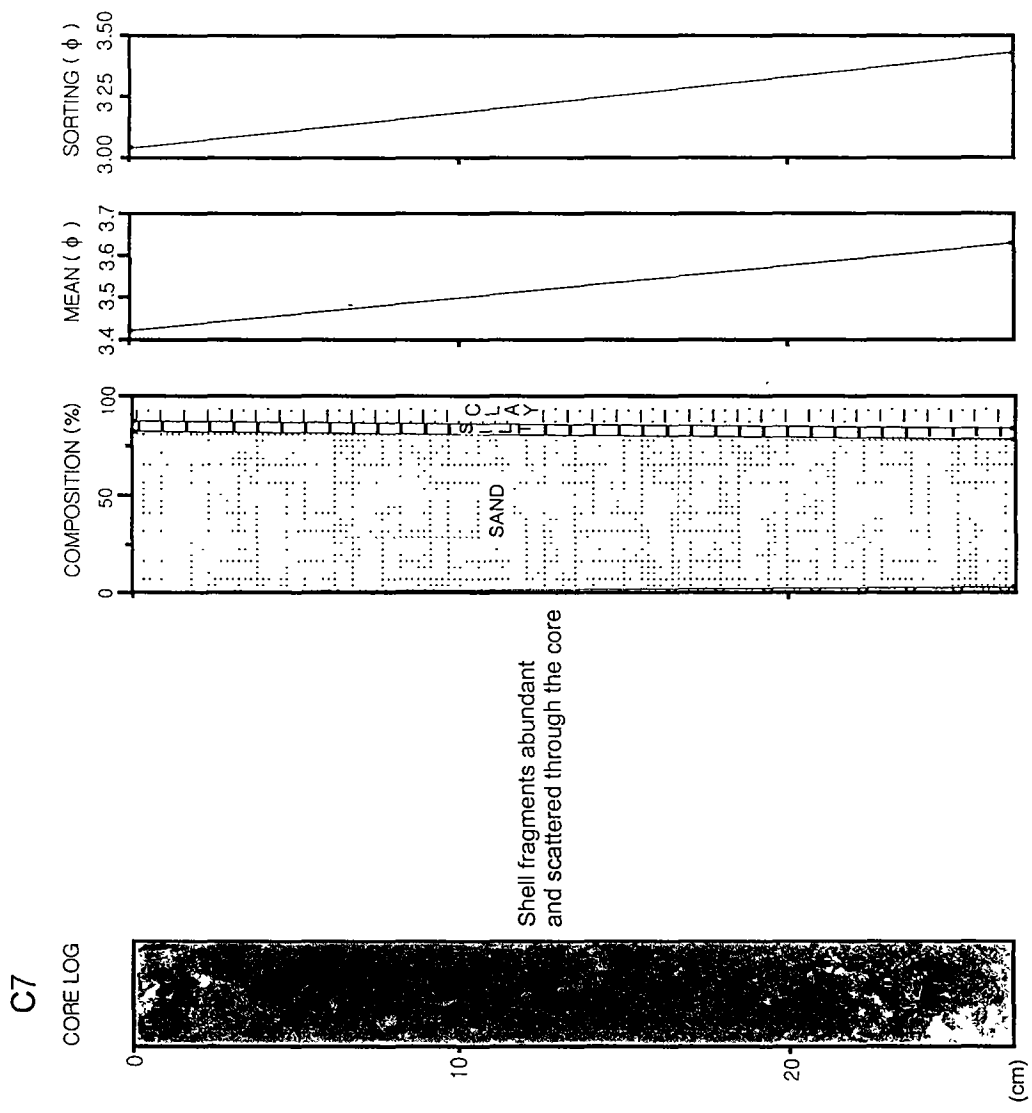


Fig. 5-14. Continued

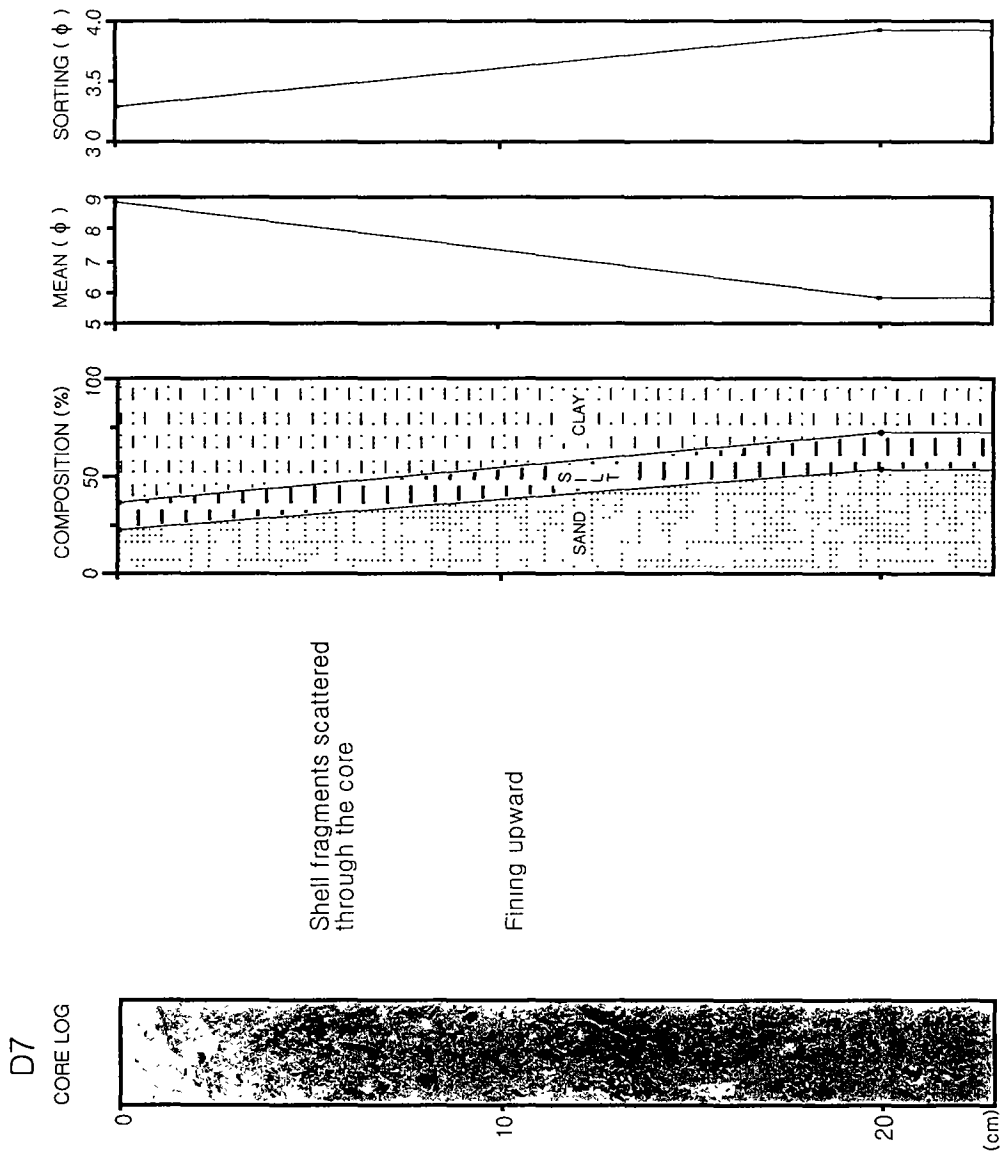


Fig. 5-14. Continued



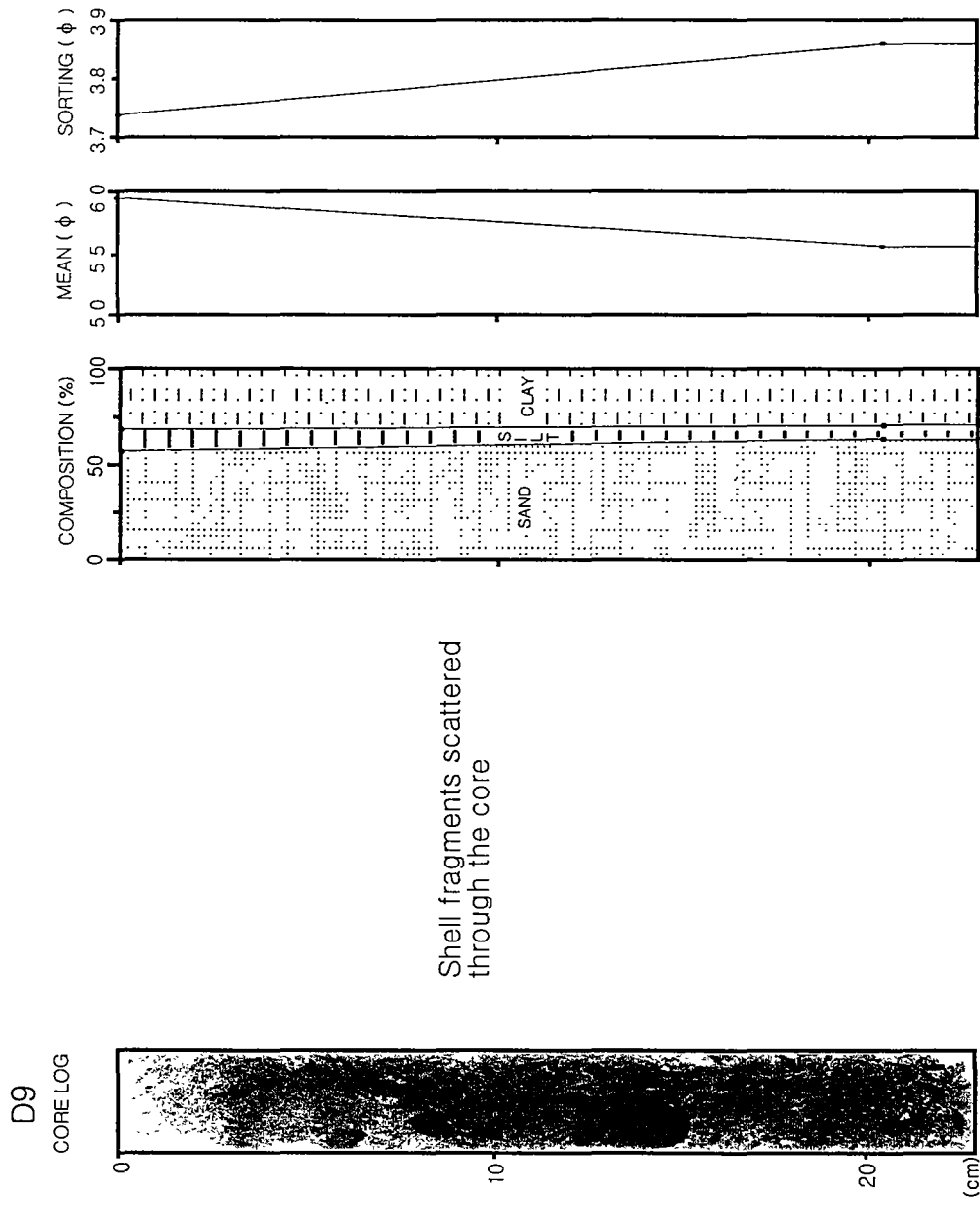


Fig. 5-14. Continued

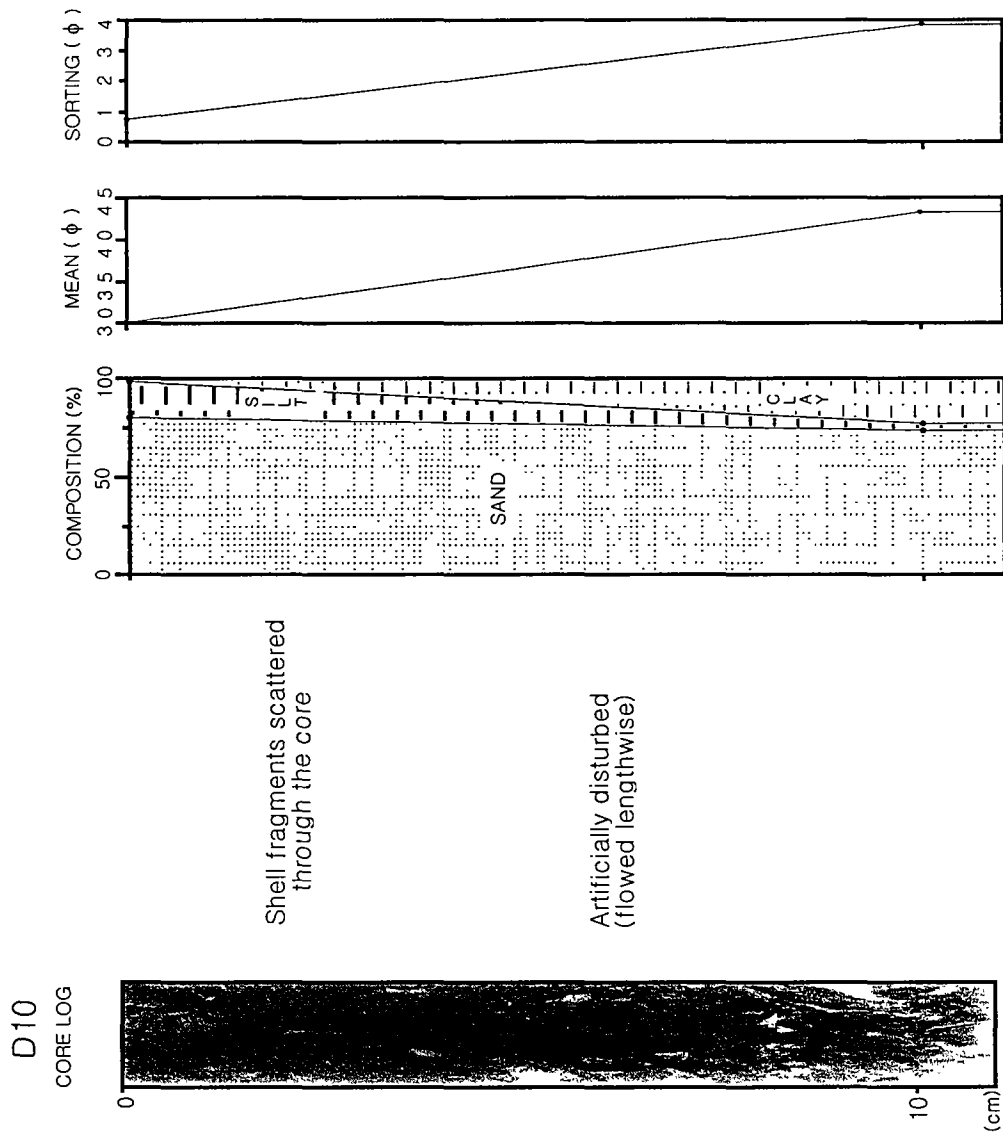


Fig. 5-14. Continued

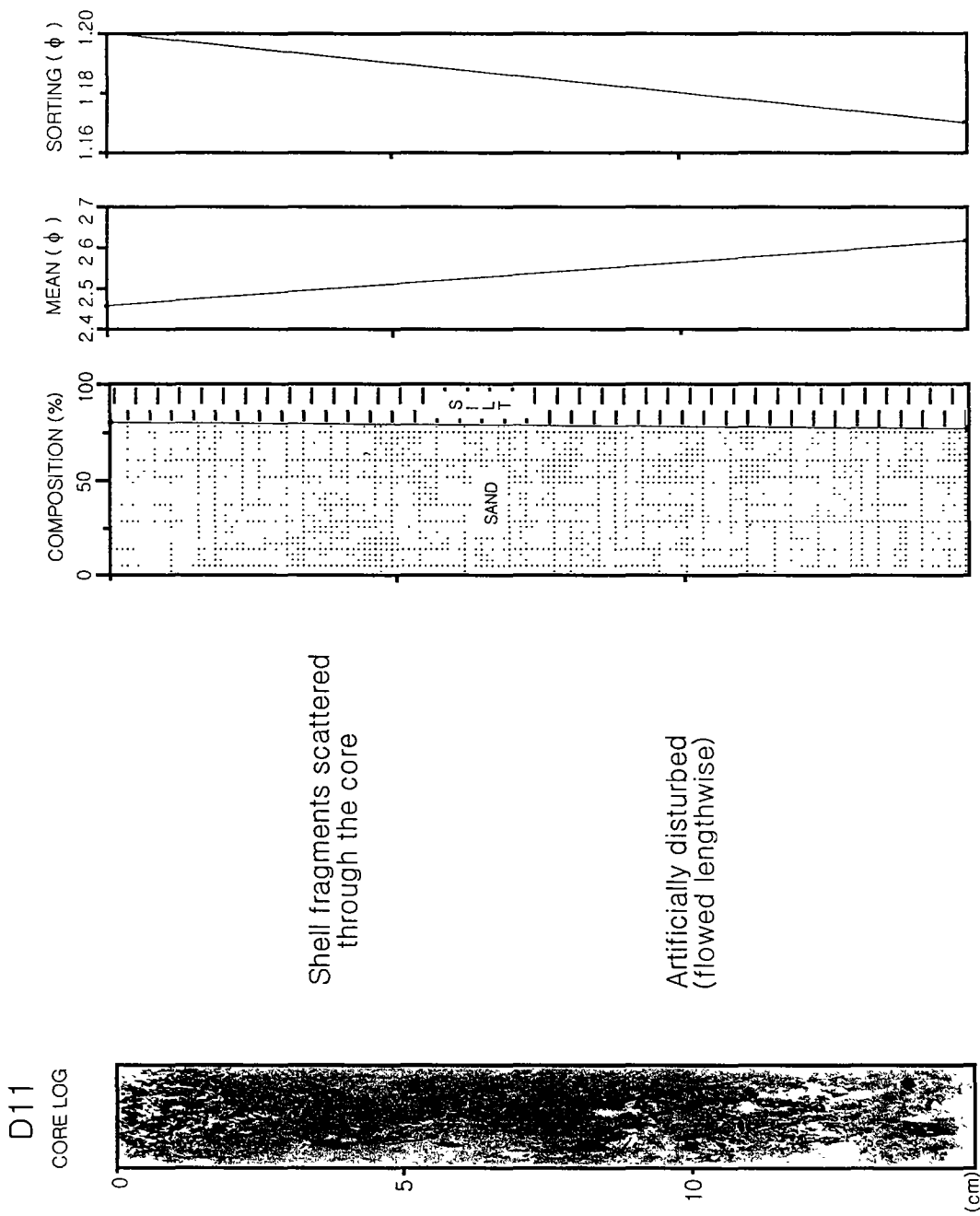


Fig. 5-14. Continued

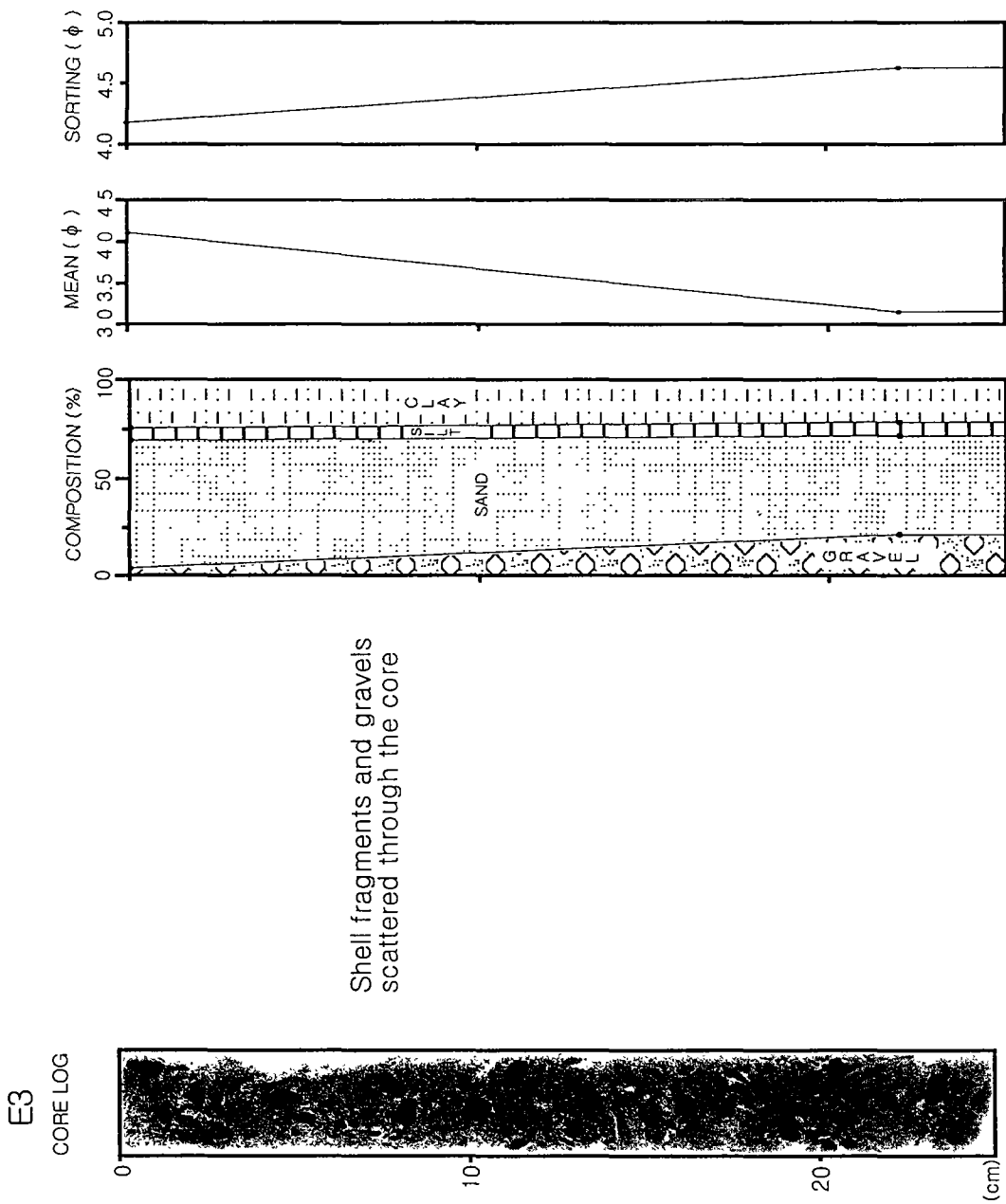


Fig. 5-14. Continued

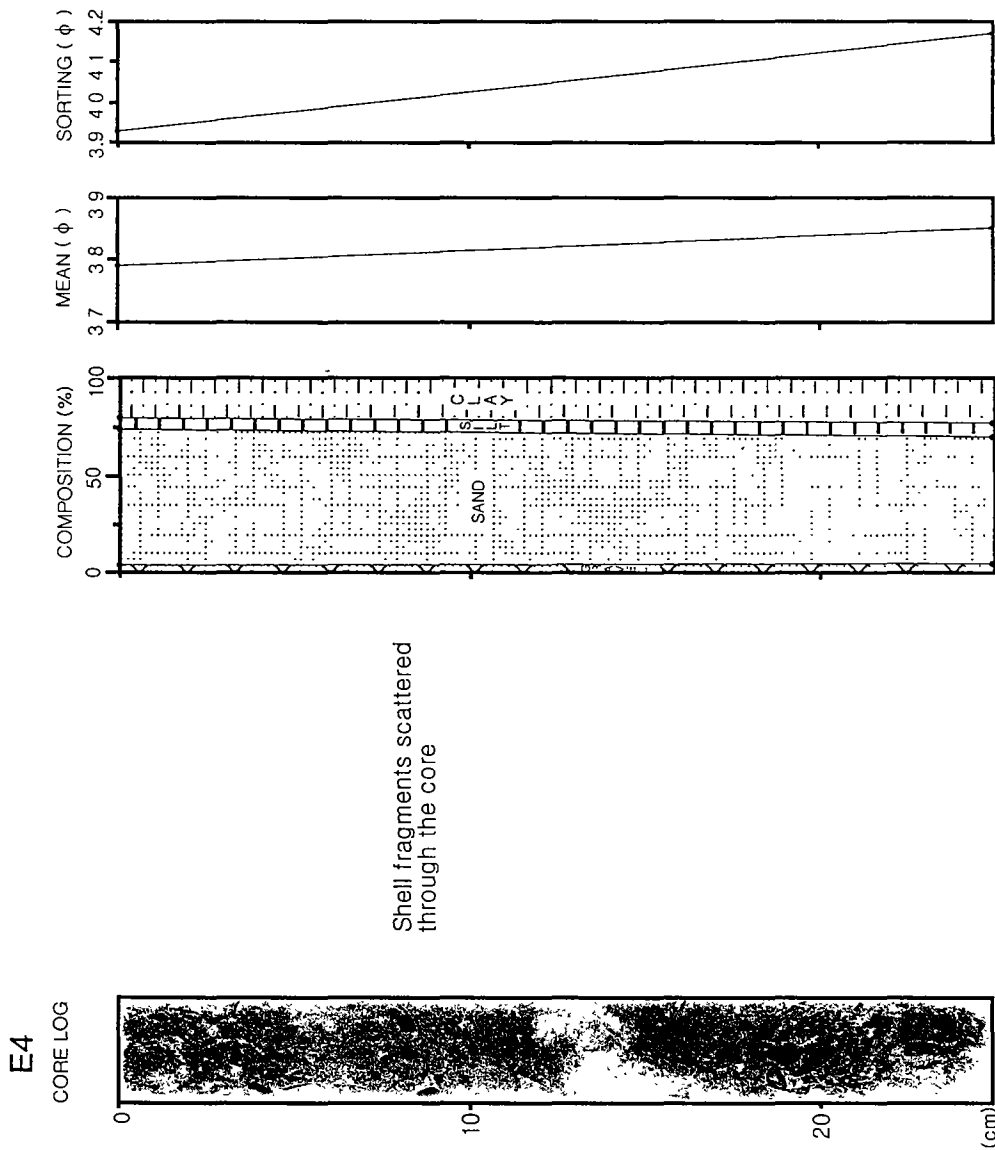


Fig. 5-14. Continued

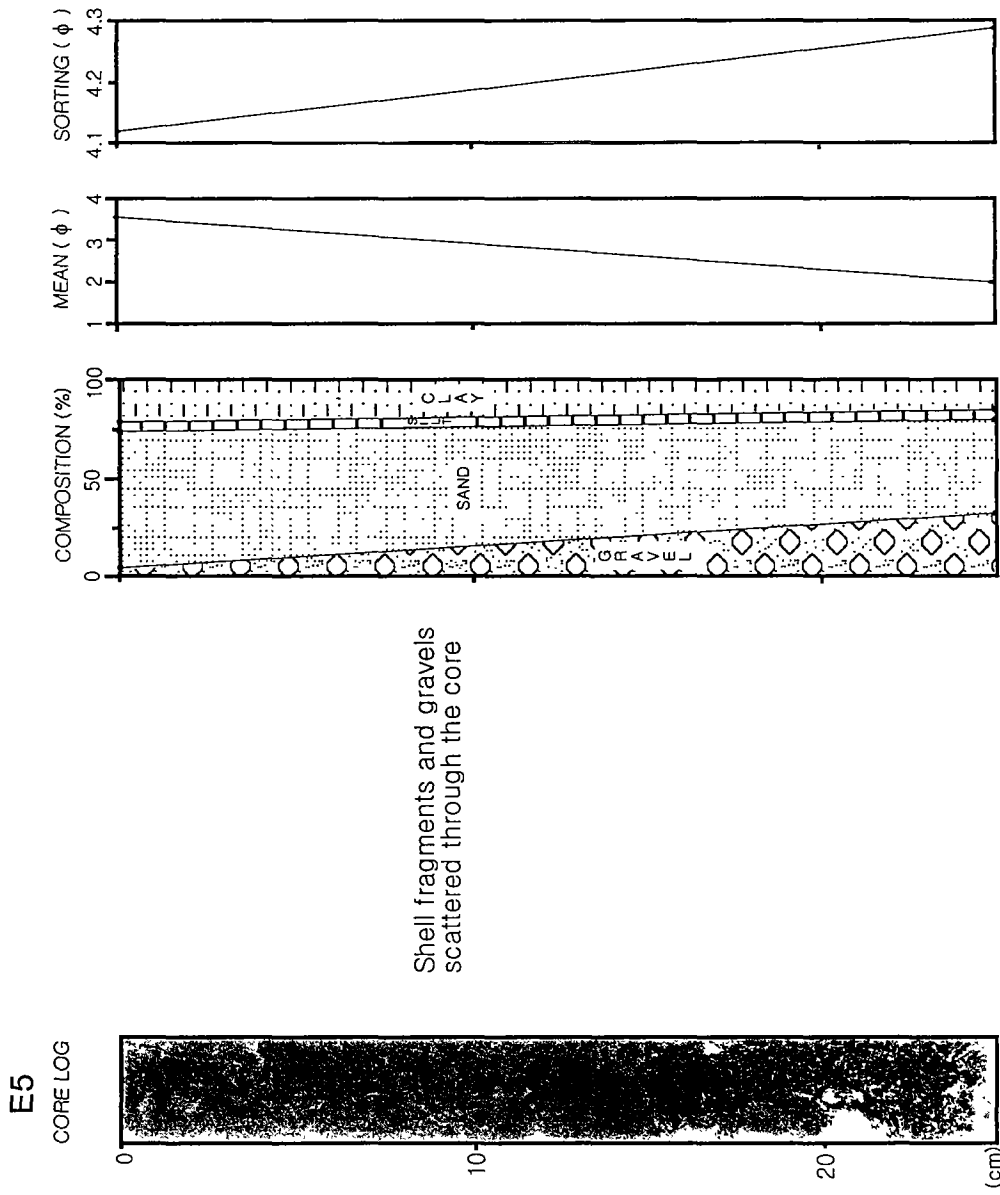


Fig. 5-14. Continued

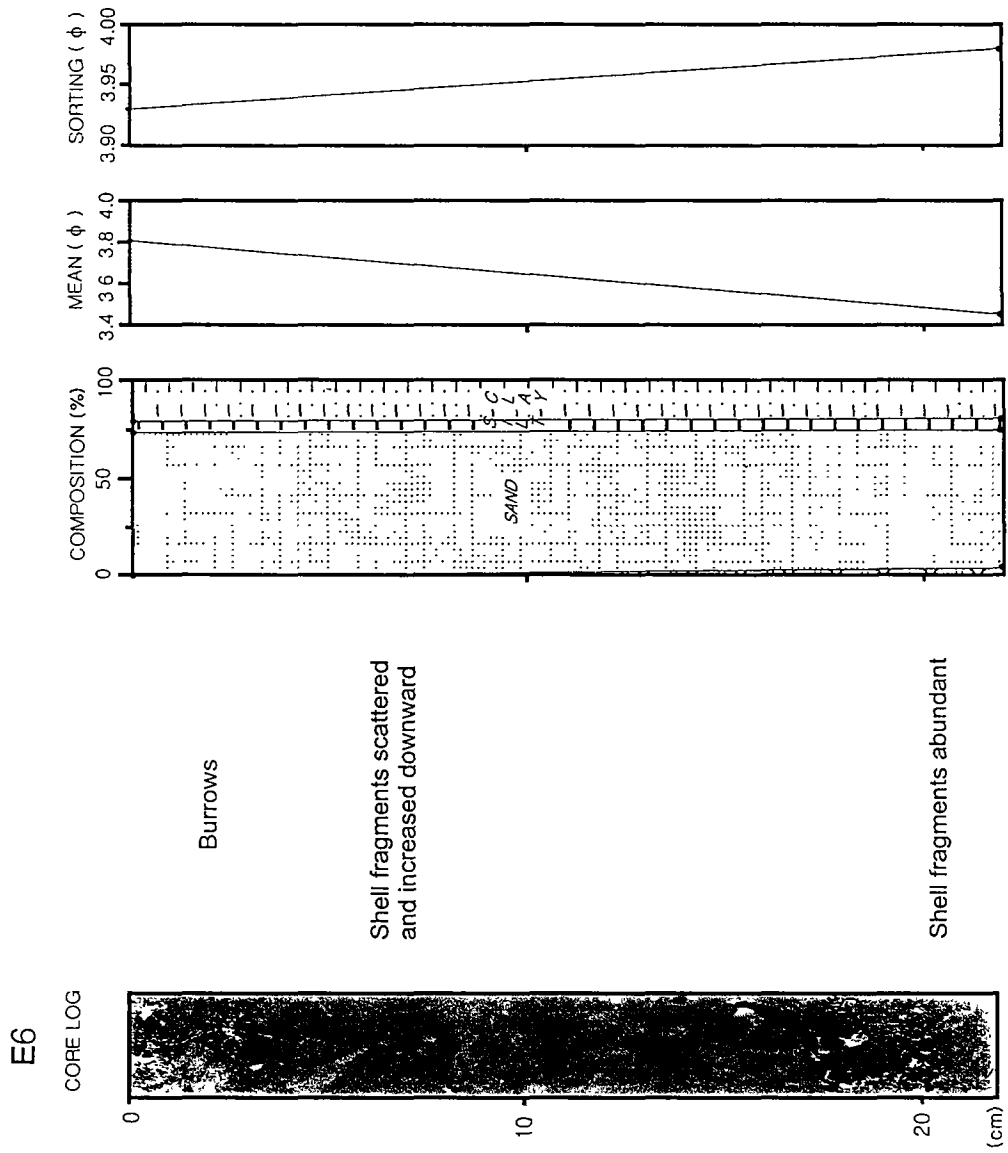


Fig. 5-14. Continued

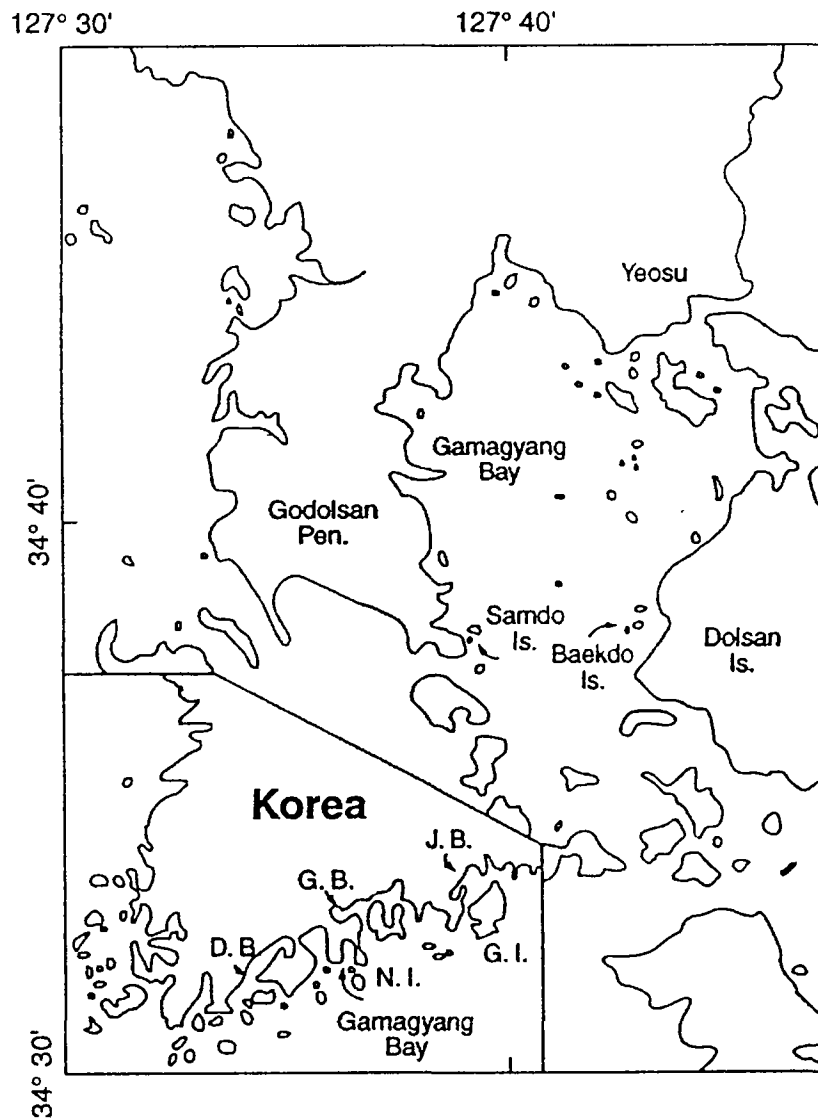


Fig. 5-15. Index map of Gamagyang Bay. D.B., Deugyang Bay; J.B., Jinhae Bay; G.B., Gwangyang Bay; G.I., Geoje Island; N.I., Namhae Island. After Chough (1983).



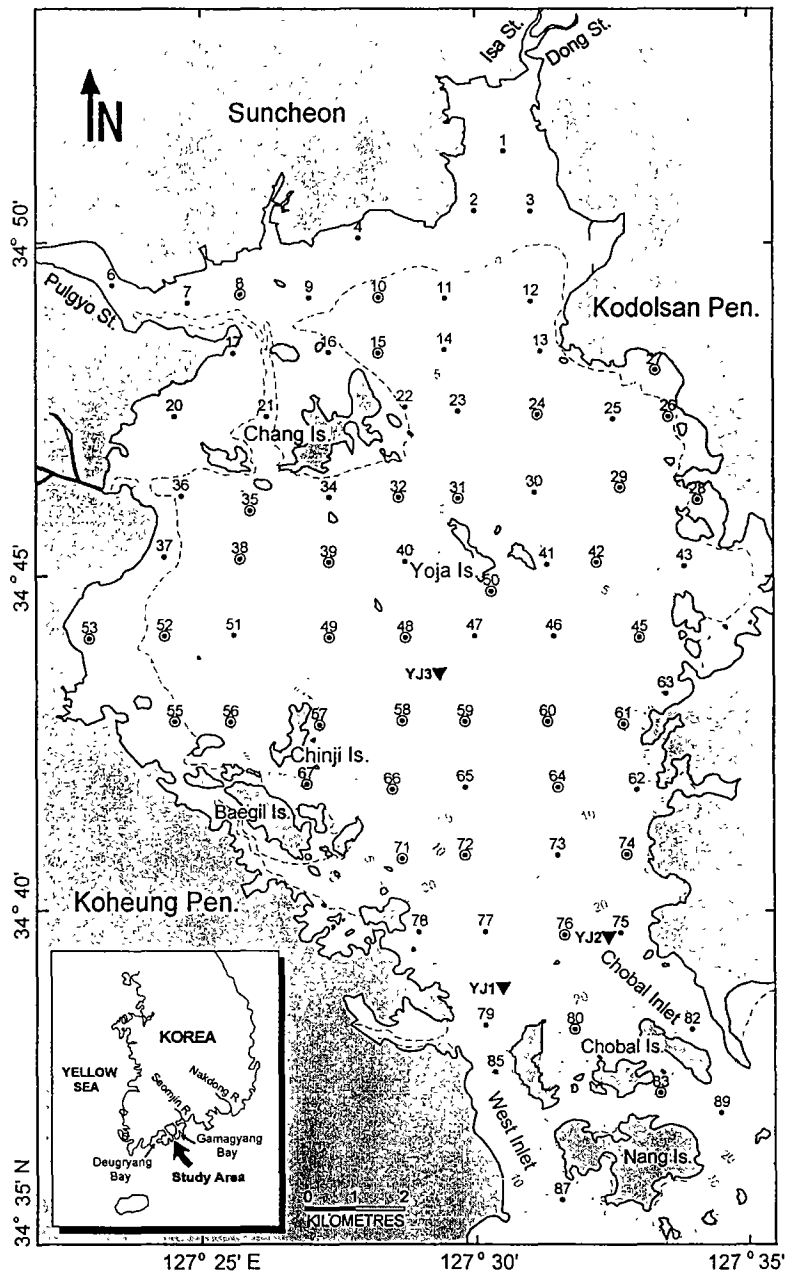


Fig. 5-16. Map showing locations of a variety of samplings; dots, surface sediments; reversed heavy triangles, 12.5-hr anchoring survey stations. Open-circled dots denote surface-sediment sites for foramifera analyses. Note the distribution of tidal flats occupied above 0m line. Contours in meters.

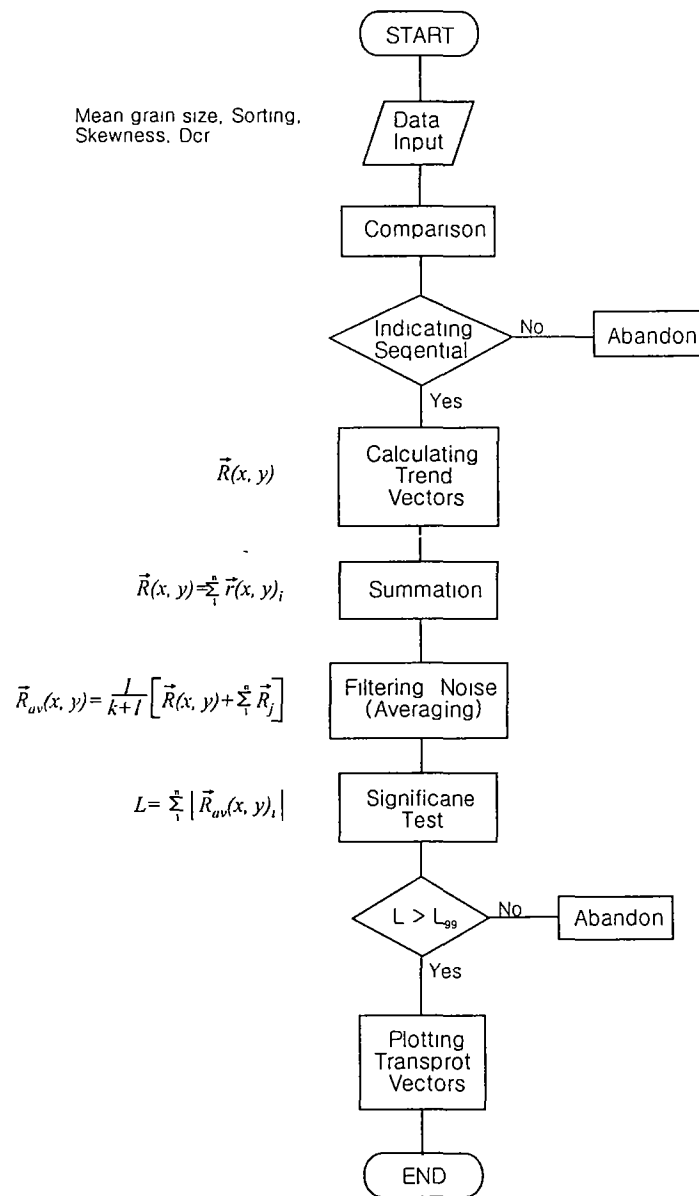


Fig. 5-17. Flow chart for calculation of transport vectors.

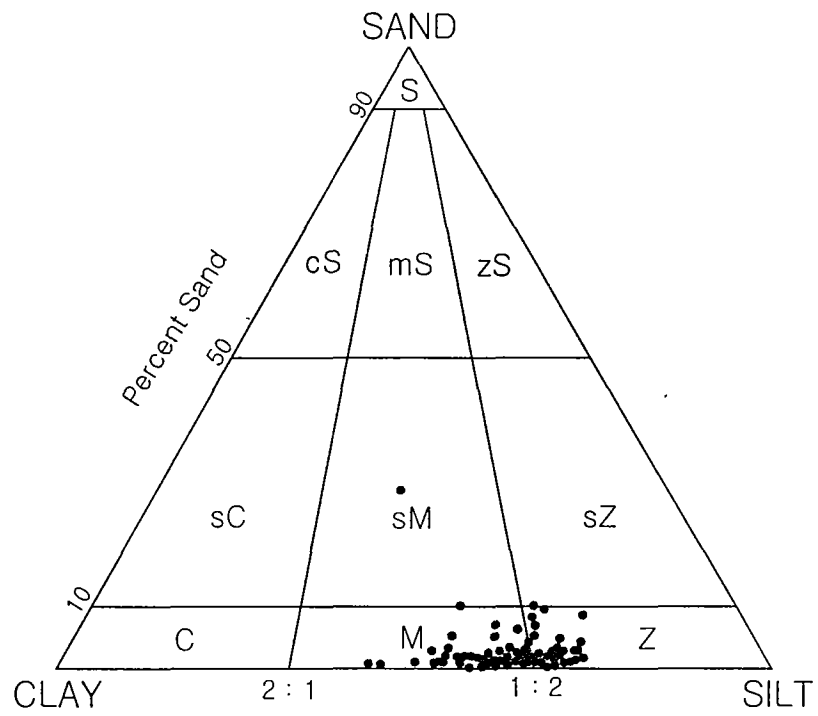


Fig. 5-18. Textural classification of surface sediments from Yoja Bay following Folk' (1968) scheme. For location, see Fig. 5-16.

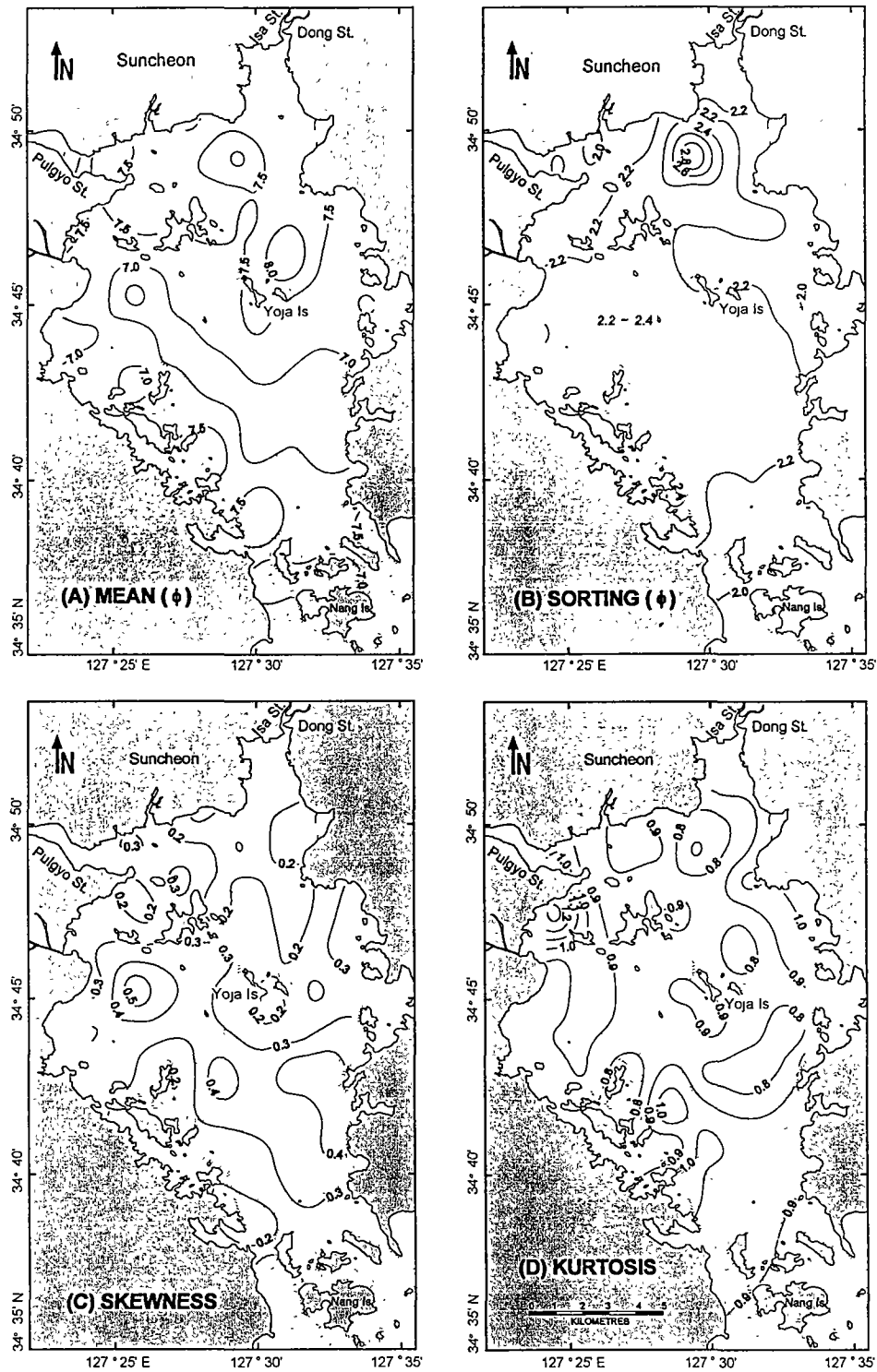


Fig. 5-19. Textural characteristics of surface sediments in Yoja Bay. For sampling locations, see Fig. 5-16.

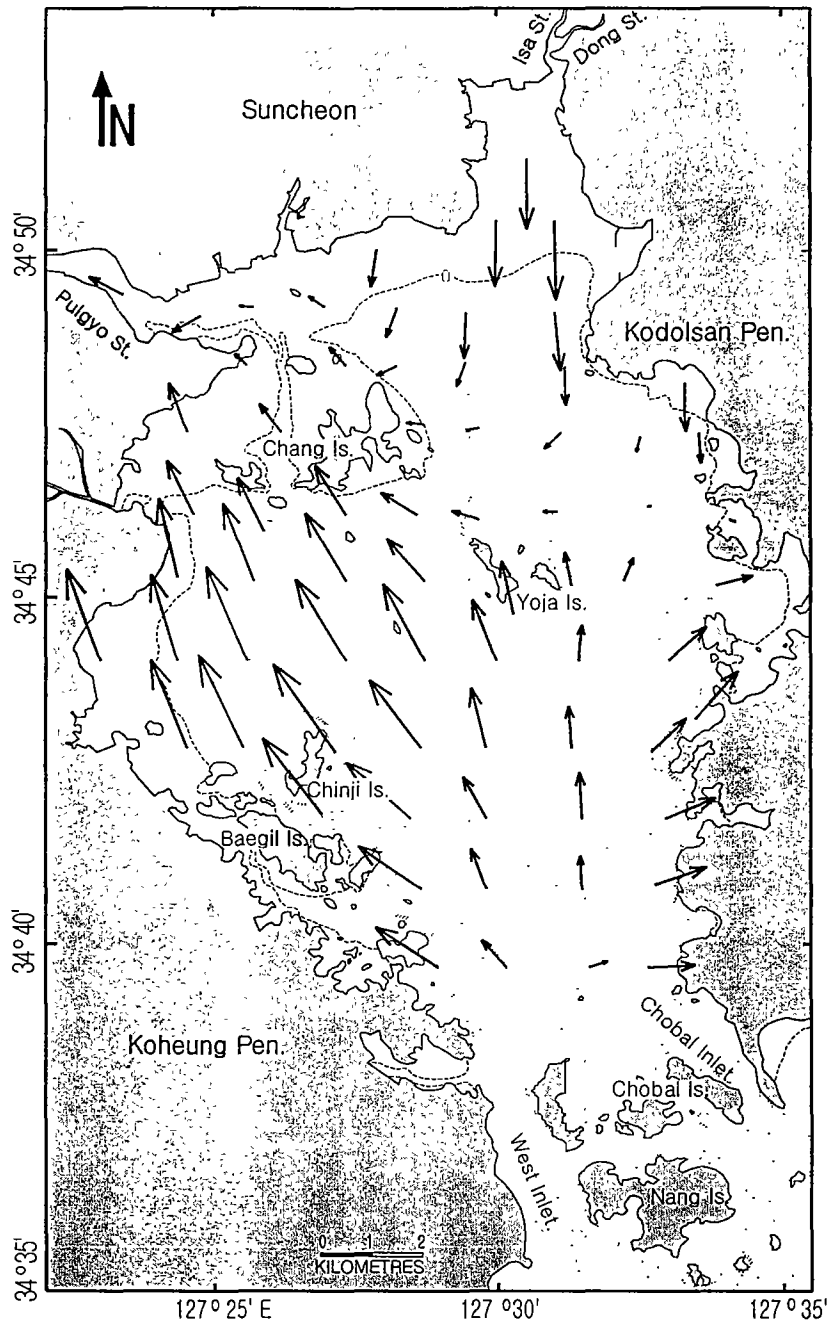


Fig. 5-20. Calculated transport vectors on the basis of textural parameters of the surface sediments in Yoja Bay.

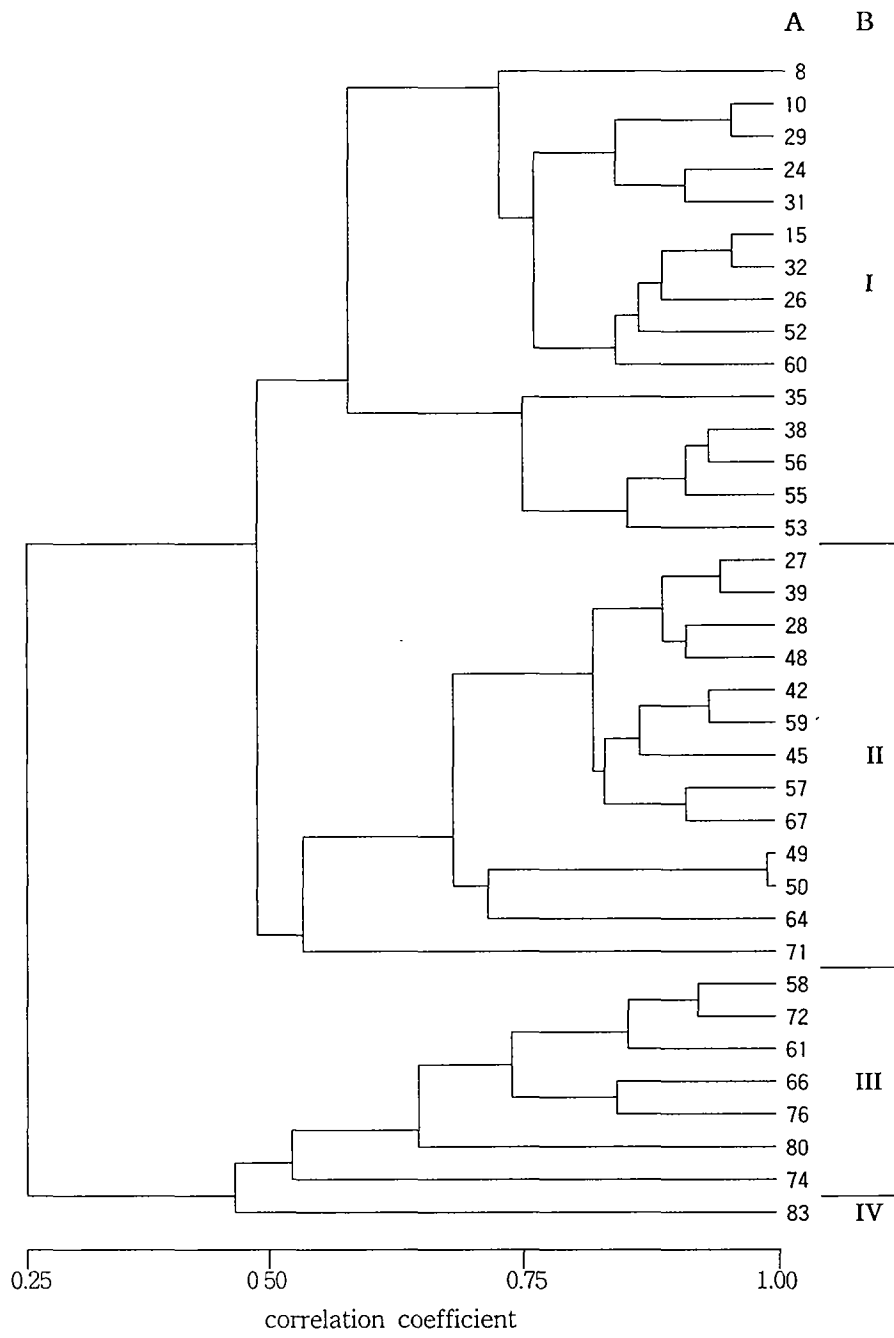


Fig. 5-21. Dendrogram resulting from cluster analysis of foraminiferal assemblage data. A, station; B, biofacies.

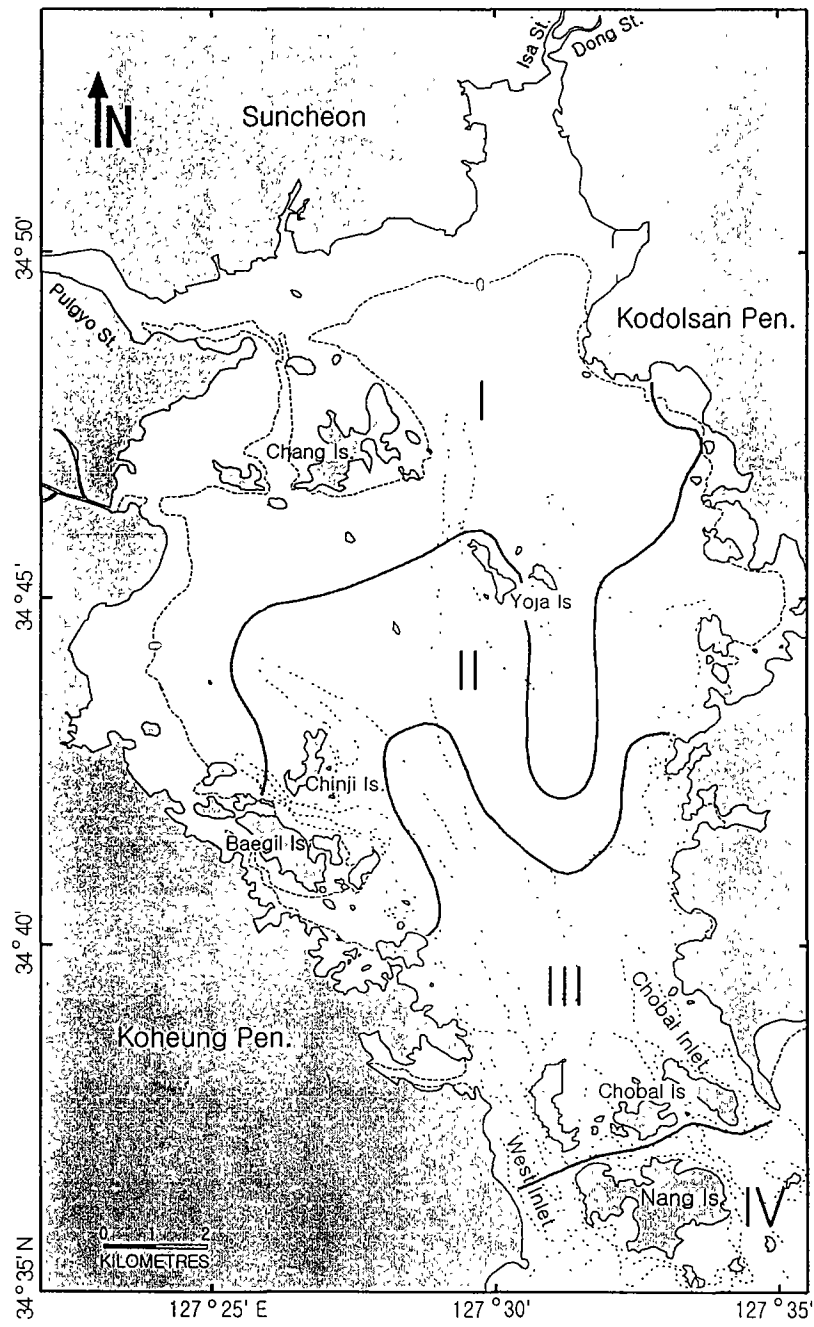


Fig. 5-22. Map of four biofacies characterized by different total assemblage

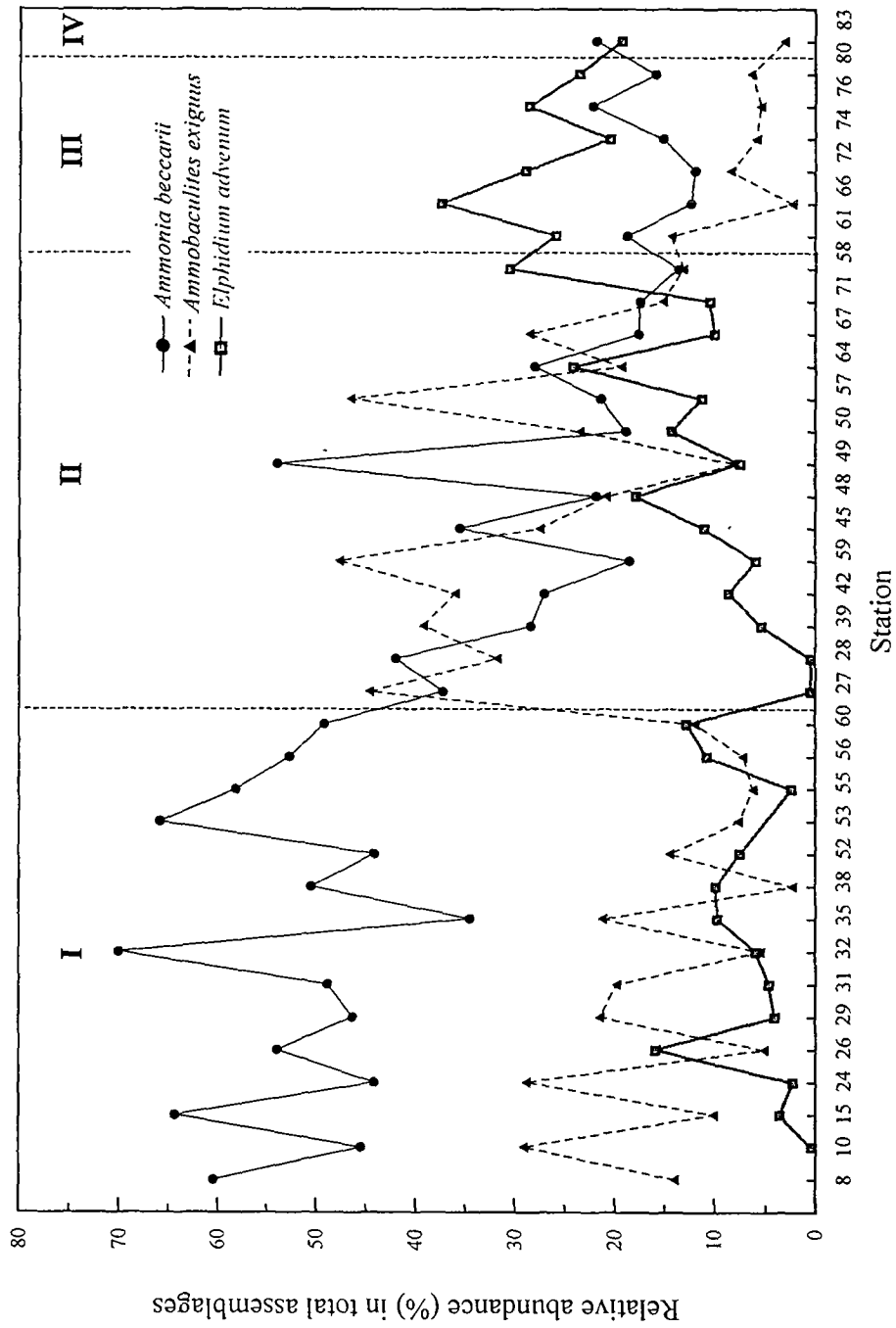


Fig. 5-23. Relative abundance (%) of *Ammonia beccarii*, *Ammobaculites exiguus* and *Elphidium advenum* in total assemblages in four biofacies groups.



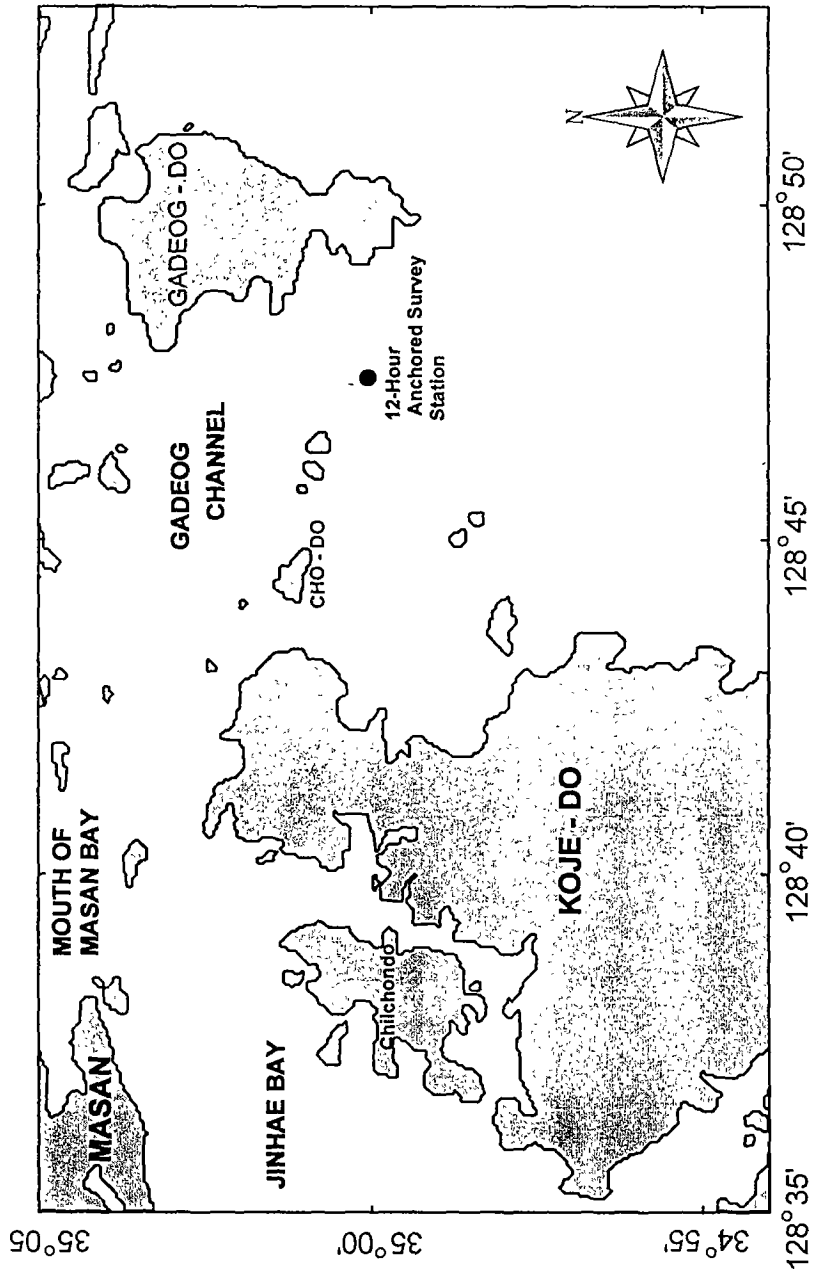


Fig. 5-24. Map showing the anchored, hydrographic site for 12-hour measurements.

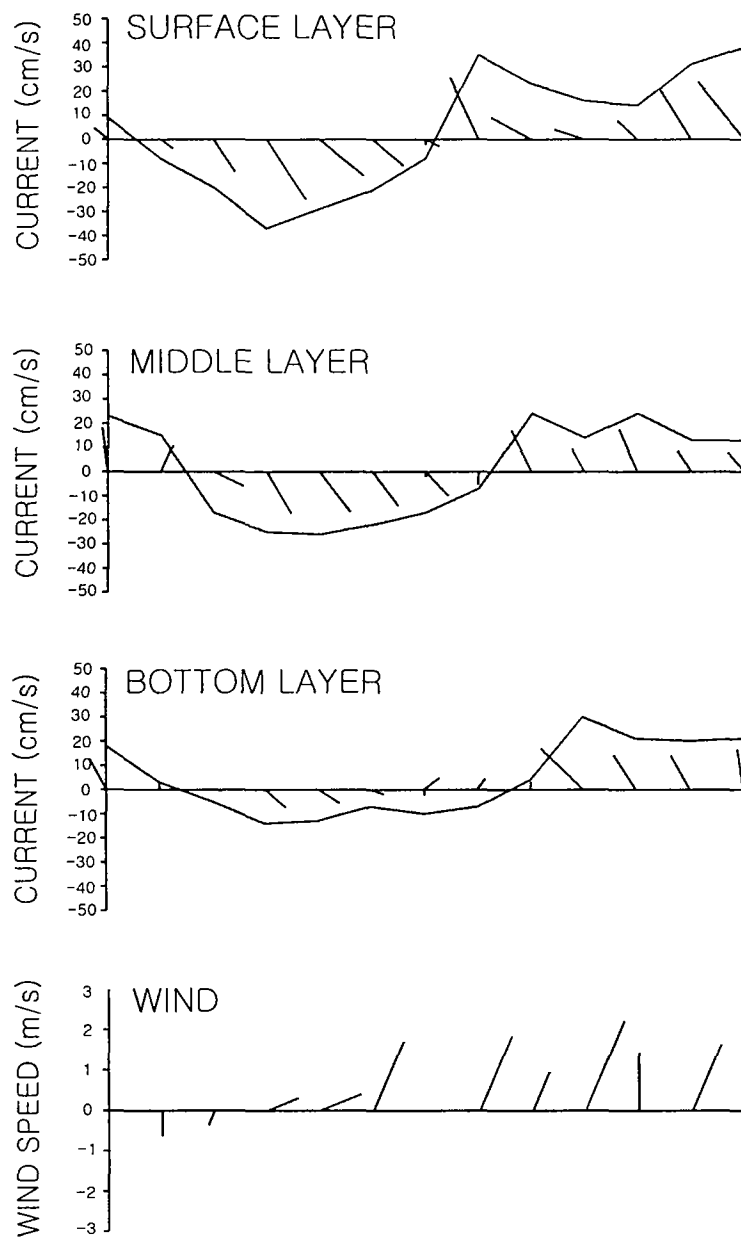


Fig. 5-25. Time-series of currents measured at surface, mid-depth and near-bottom, and winds obtained from a nearby meteorological station during 7 am - 7 pm, May 10, 1998.

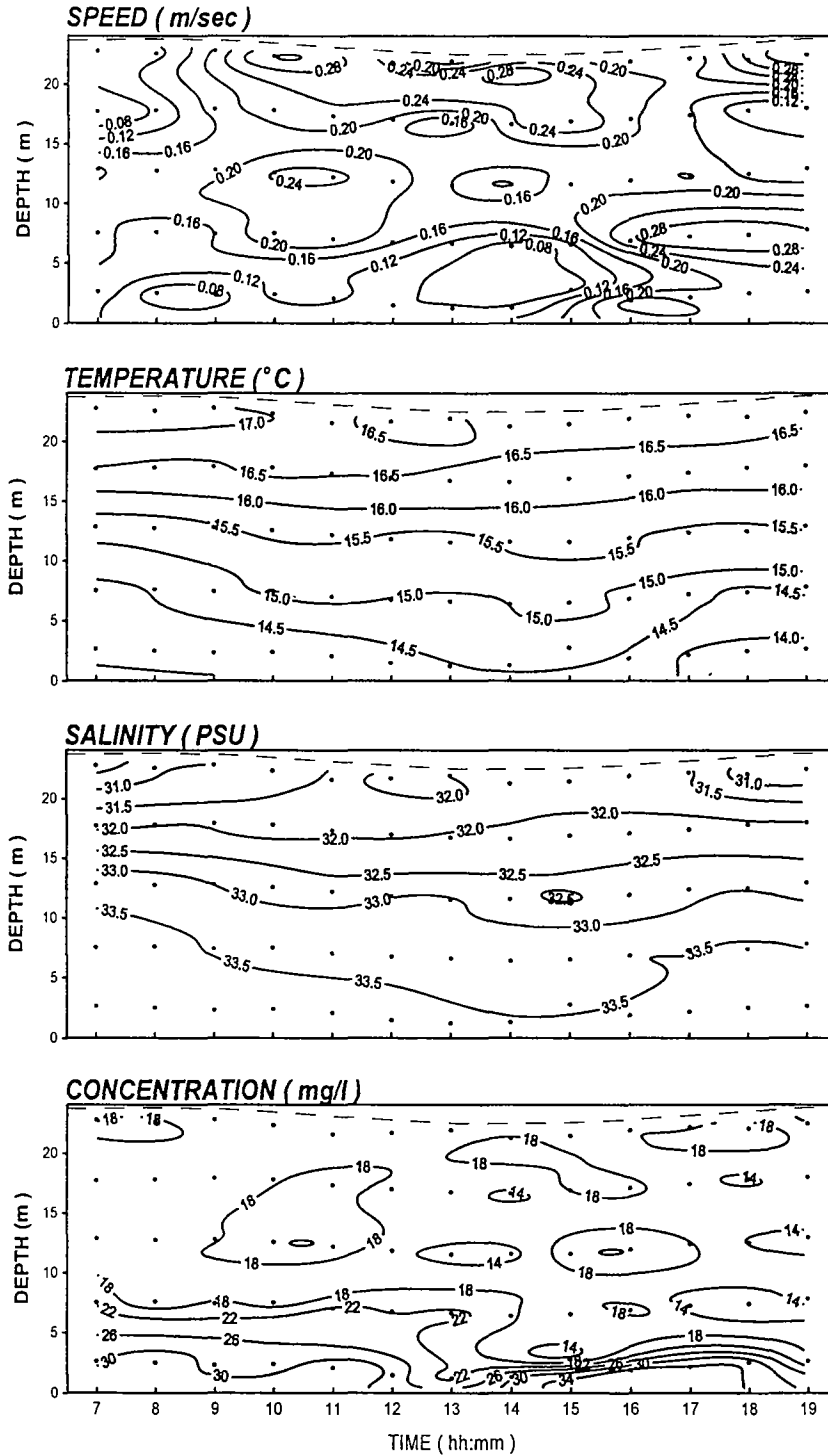


Fig. 5-26. Time-series of currents, temperature, salinity and suspended matter concentrations from 12-hour hydrodynamic measurements at an anchored station (see Fig. 5-24 for location) during 7 am-7 pm, May 10, 1998.

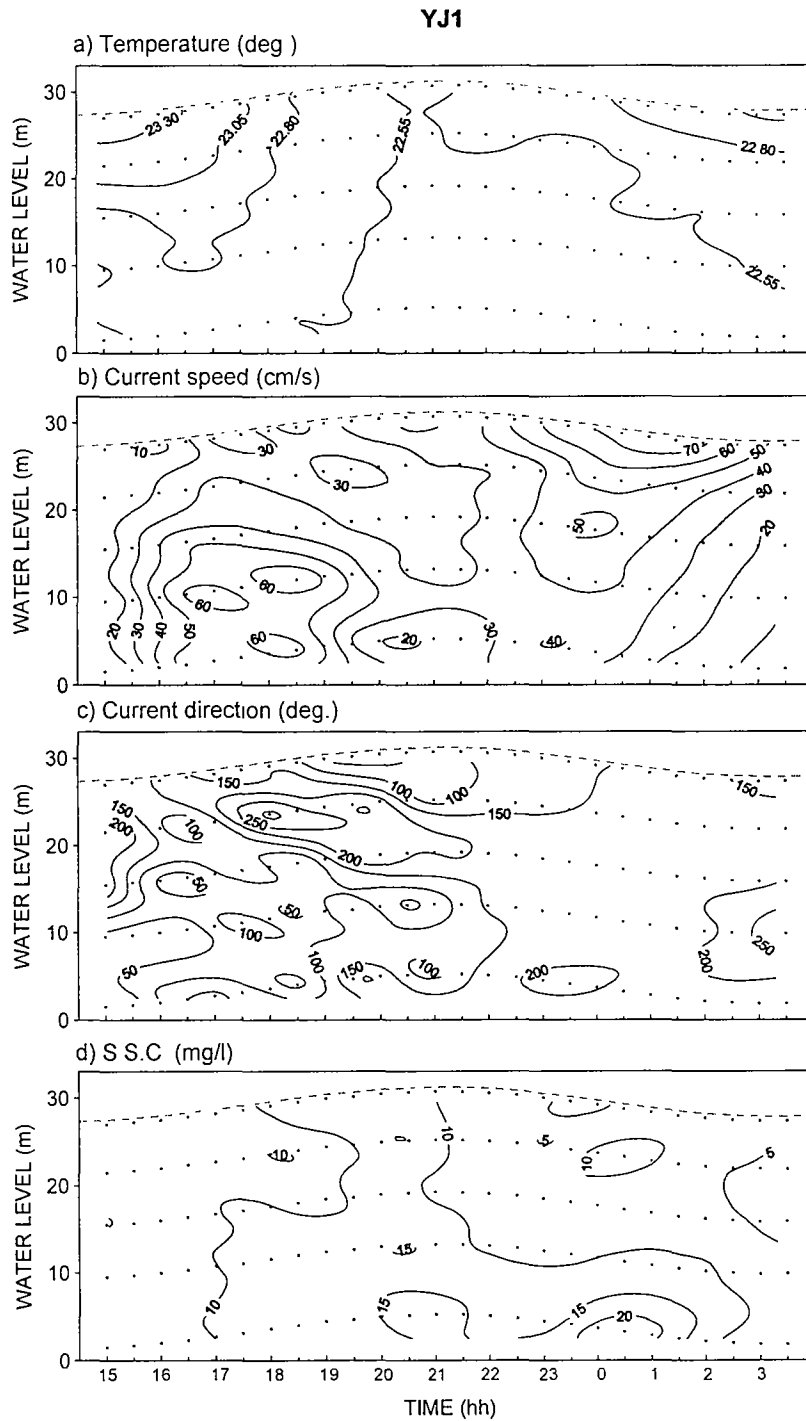


Fig. 5-27. Measurement from station YJ-1, West Inlet, mouth of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 12-13, 1999; a, temperature ; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration.

YJ2

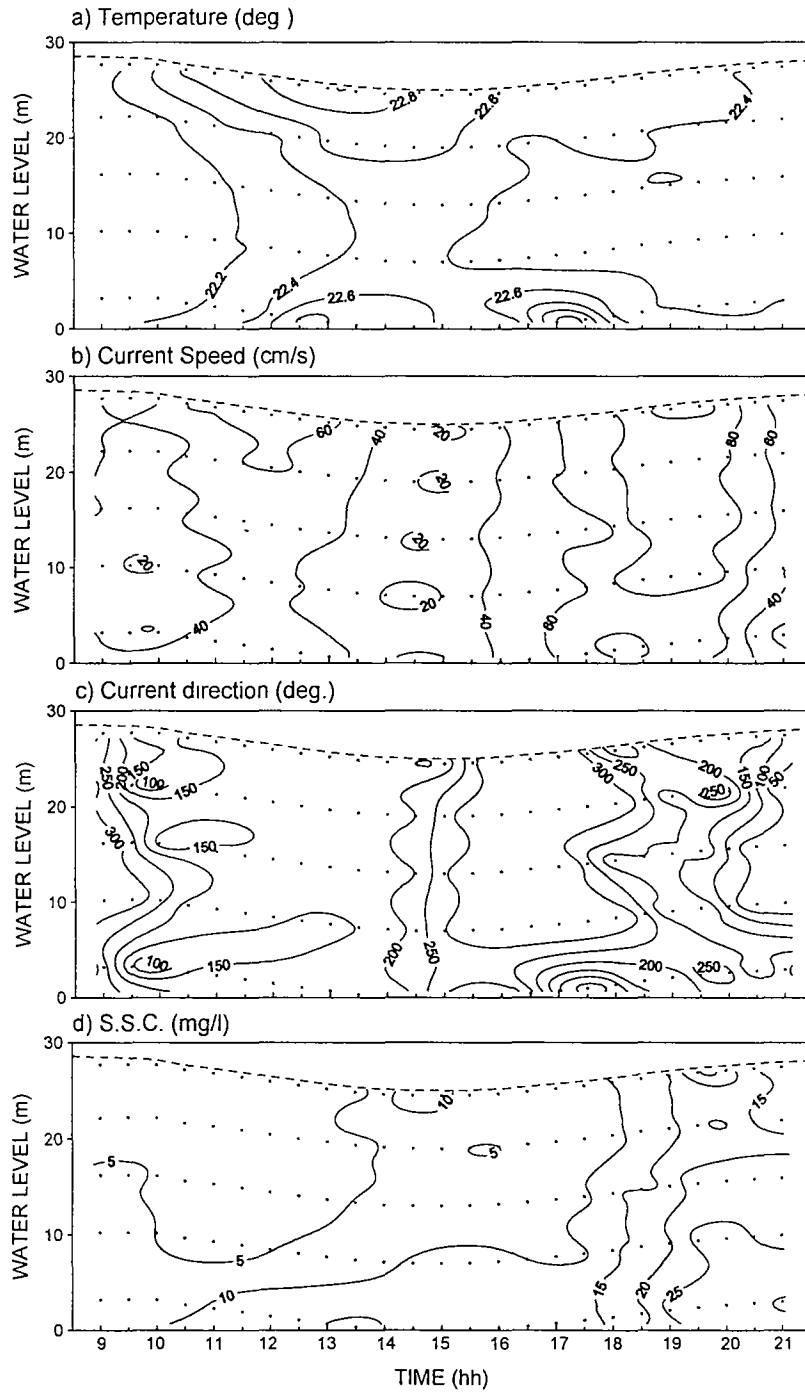


Fig. 5-28. Measurement from station YJ-2, Chobal Inlet, mouth of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 13, 1999; a, temperature; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration.

YJ3

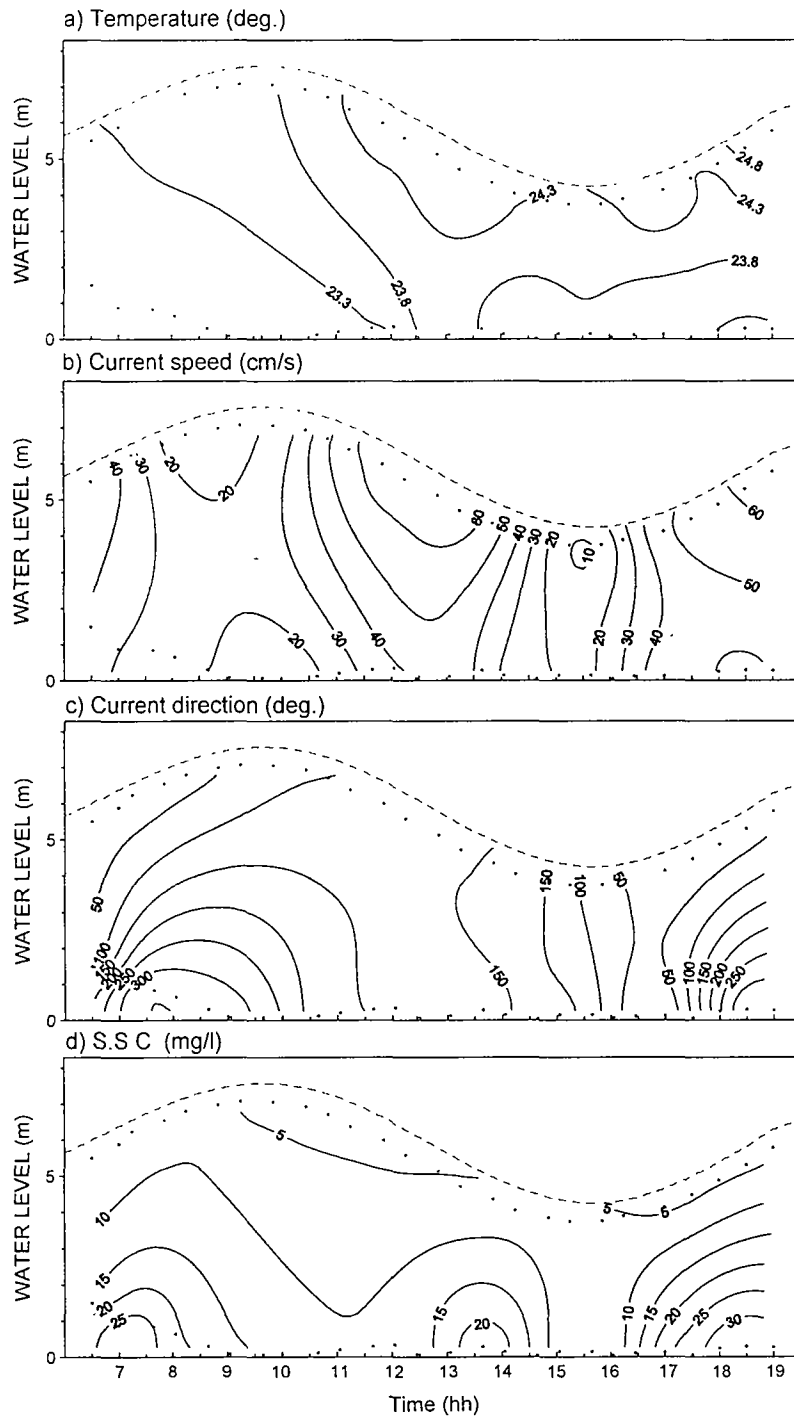


Fig. 5-29. Measurement from station YJ-3, middle part of Yoja Bay (see Fig 5-16 for location) collected July 14, 1999; a, temperature; b, current speed; c, current direction; and d, suspended sediment concentration.

YJ1

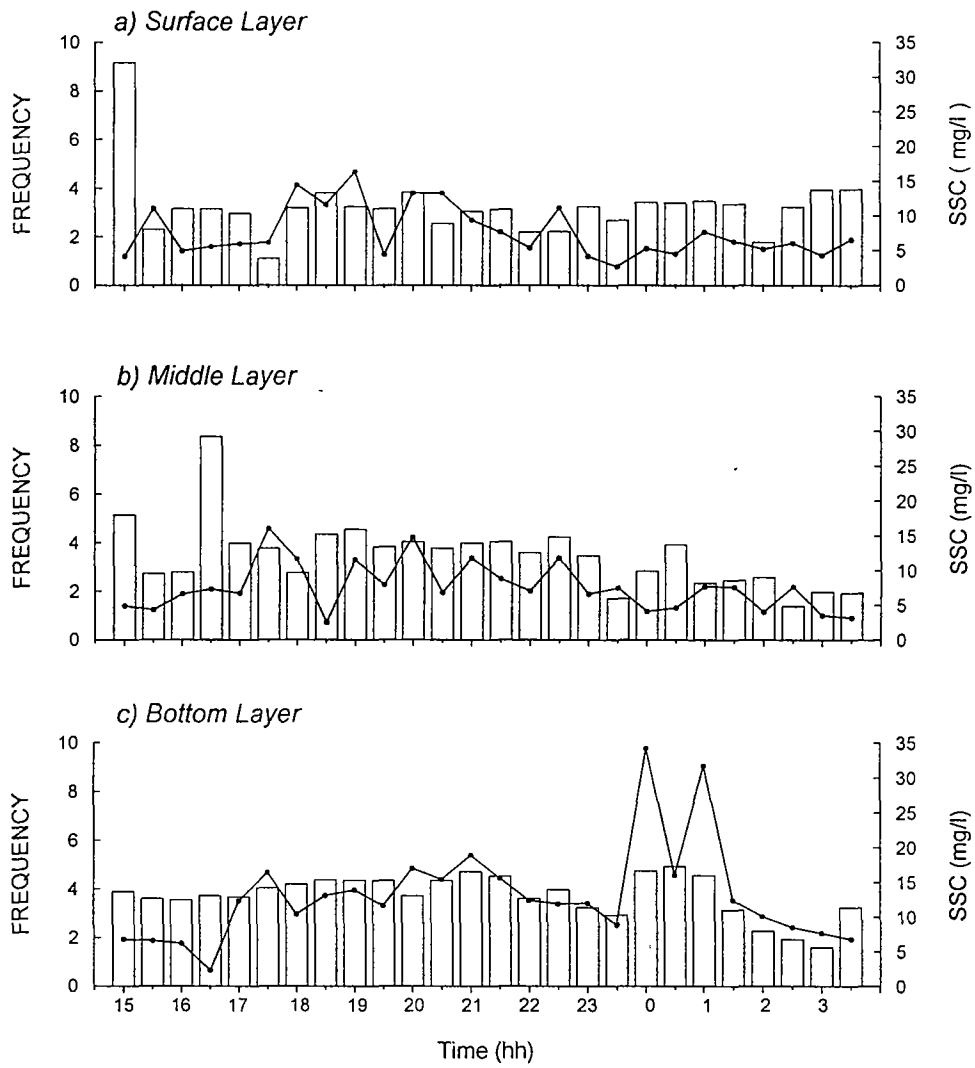


Fig. 5-30. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-1; a, surface layer; b, middle layer; and c, bottom layer

# YJ2

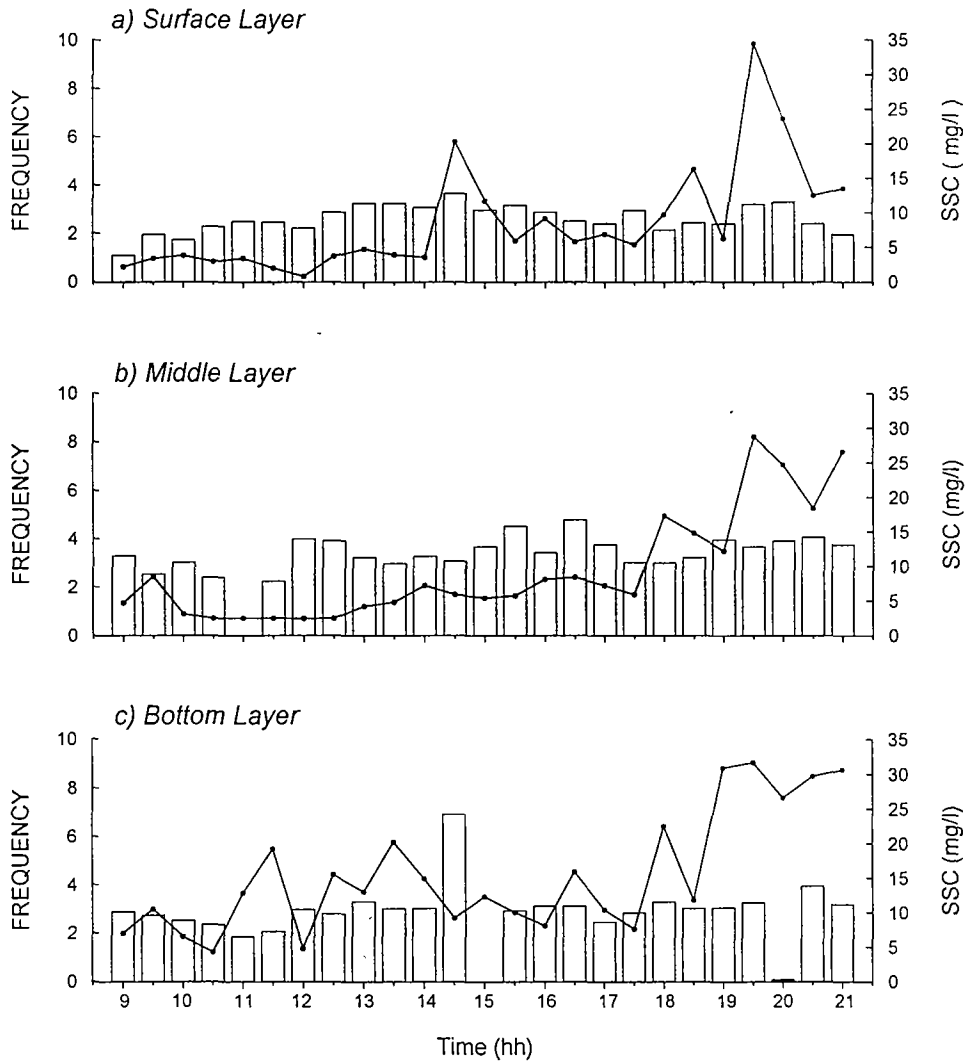


Fig. 5-31. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-2; a, surface layer; b, middle layer; and c, bottom layer.



### YJ3

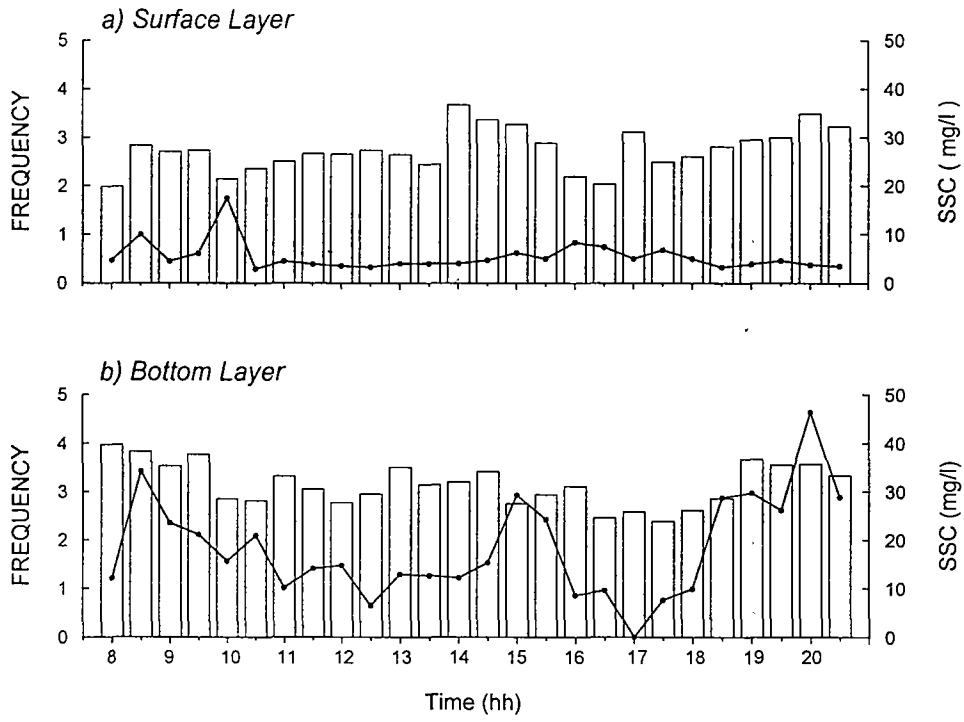


Fig. 5-32. Time-series of organic matter content and suspended sediment concentration at station YJ-3; a, surface layer; b, bottom layer.

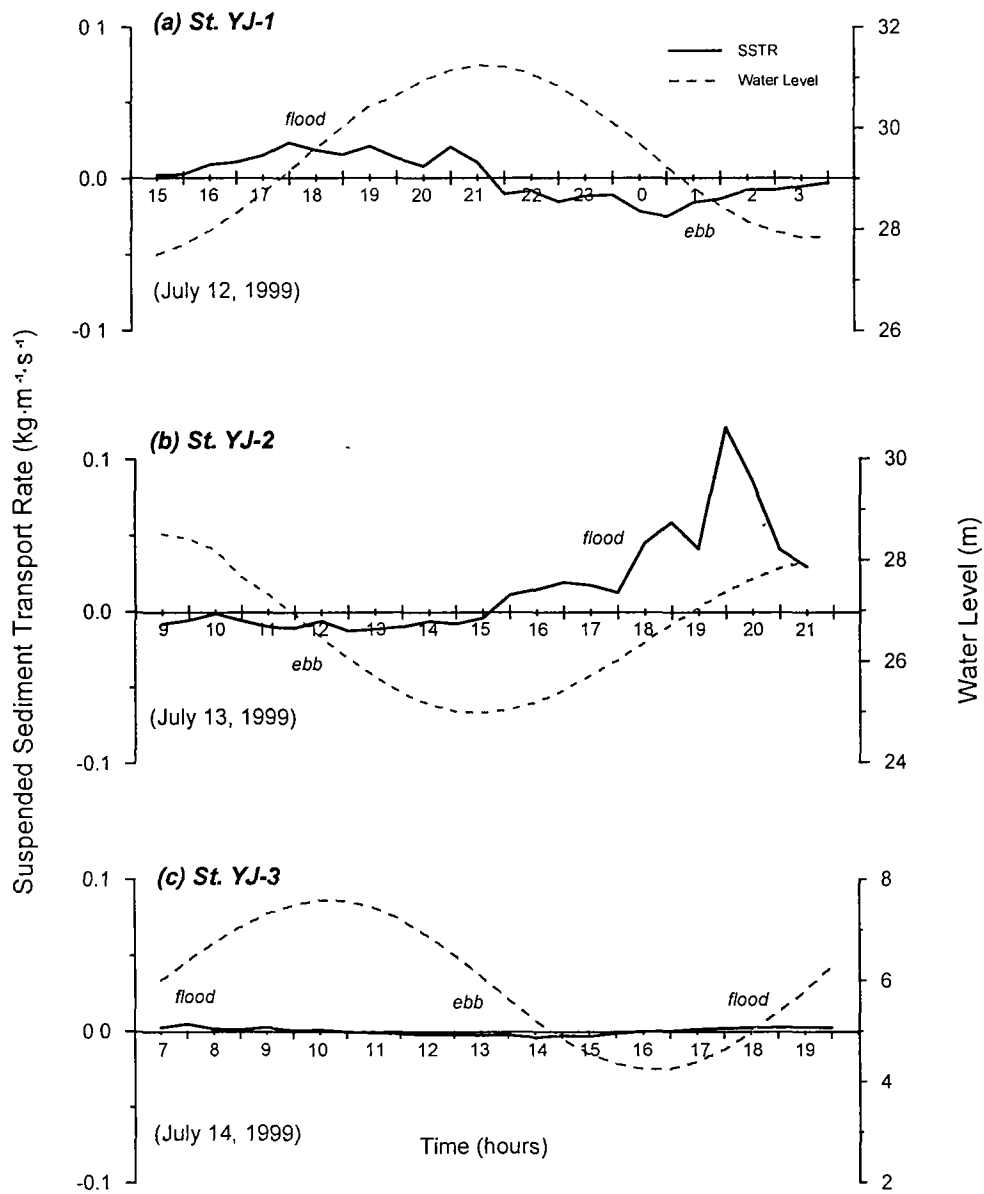


Fig. 5-33. Rates of depth-integrated suspended sediment transport together with water level change at three measurement stations. Negative value in the rate indicates outward transport, whereas positive value inward transport.

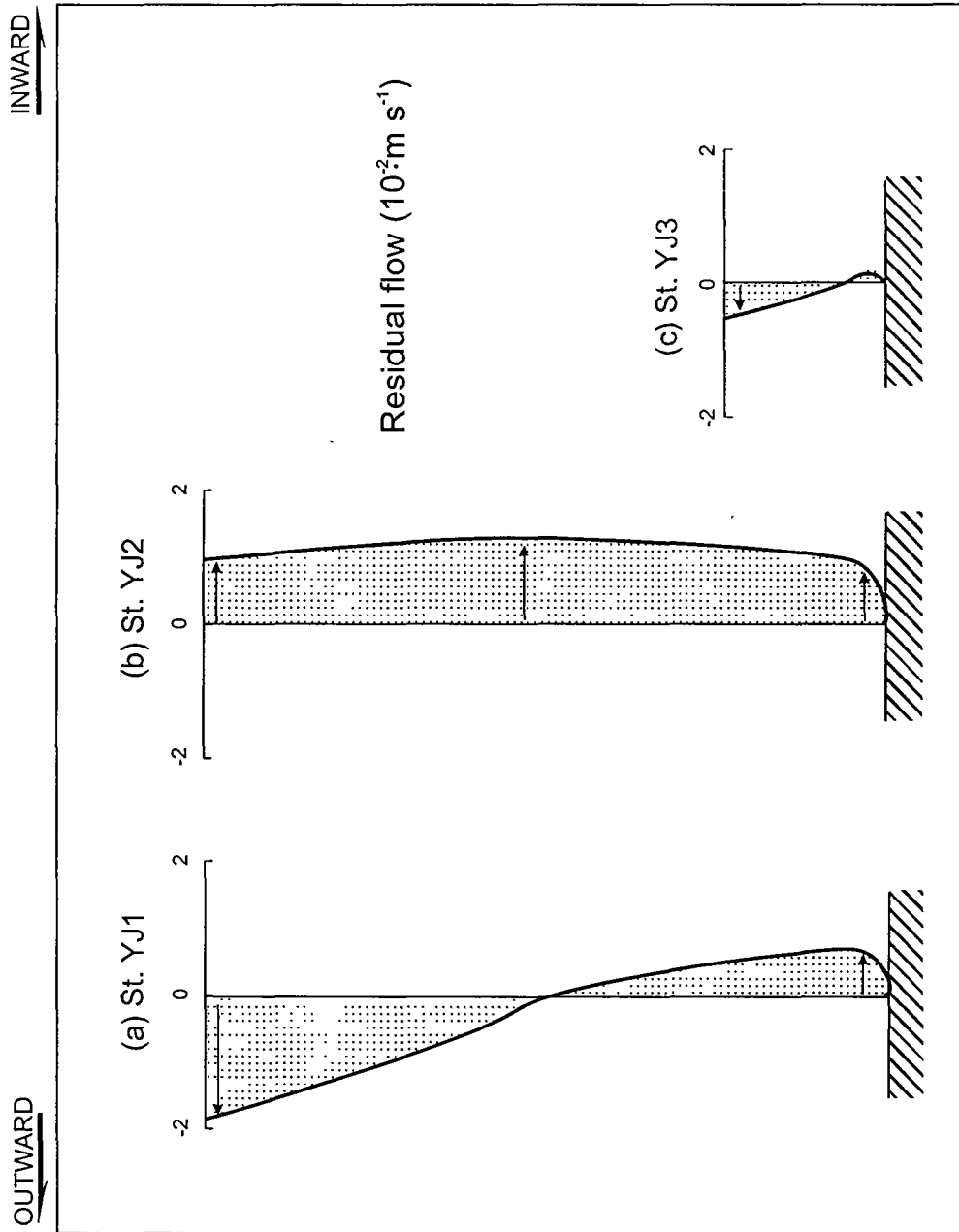


Fig. 5-34. Residual flow distributions for whole water columns during the measurement periods (one tidal cycle for each station).

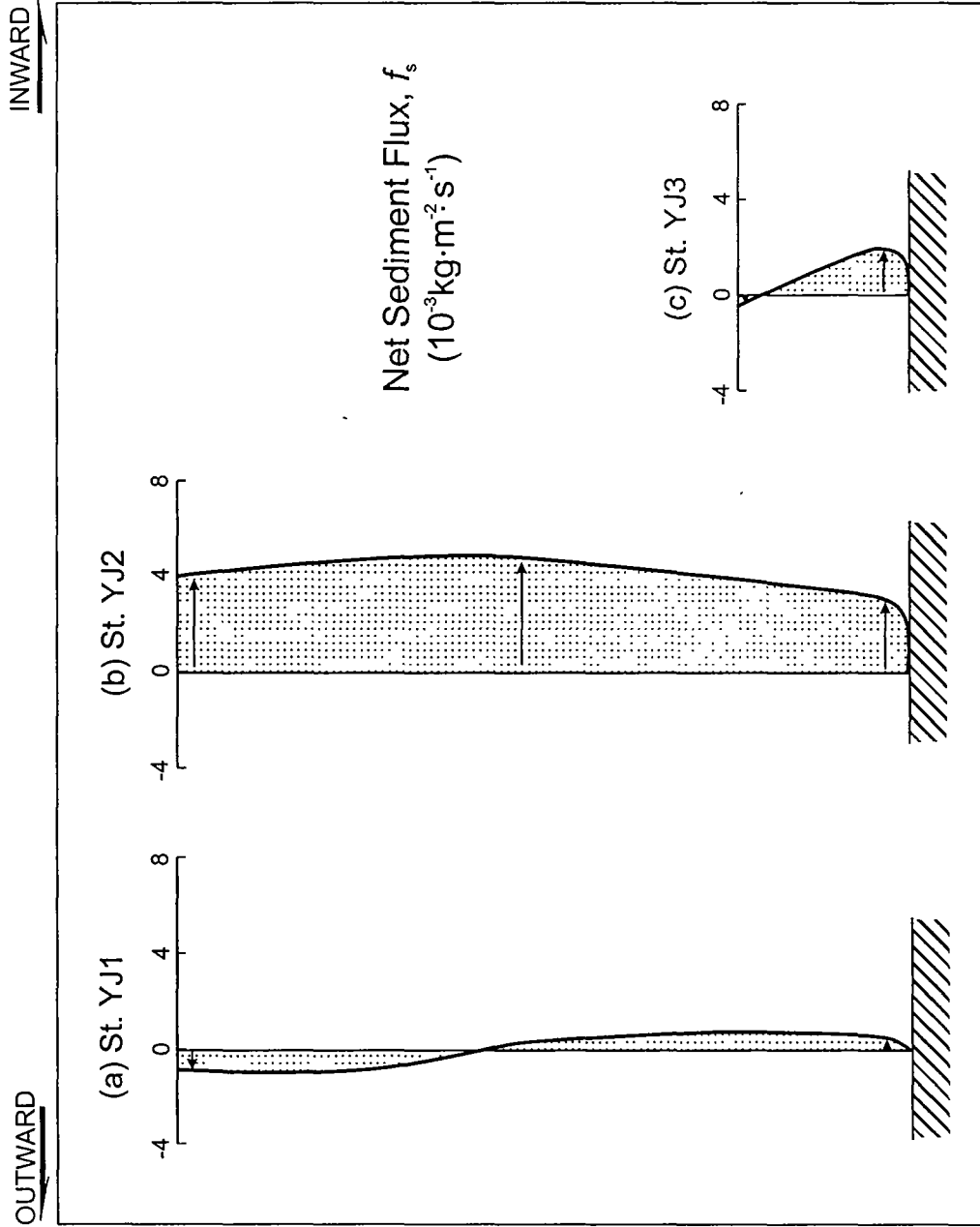


Fig. 5-35. Distribution of time-averaged net sediment flux for whole water column during the measurement periods (one tidal cycle for each station).

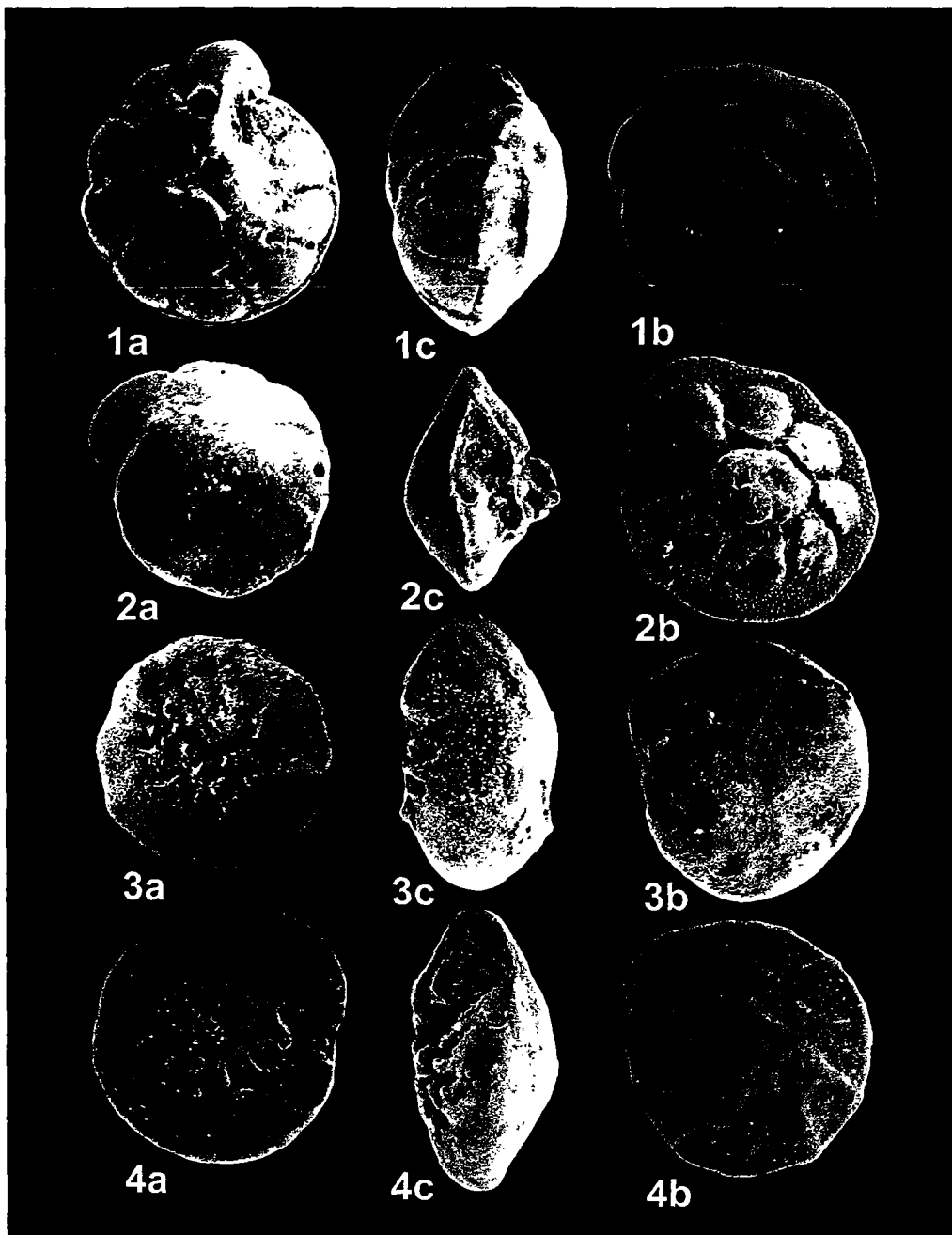


Plate 5-1. 1a-c, *Pseudorotalia gaimardii* (d'Orbigny); ST-66, x55. 2a-c, *Pararotalia nipponica* (Asano); a, c, ST-97, x70, b, ST-97, x80. 3a-c, *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1; ST-53, x100. 4a-c, *Ammonia beccarii* (Linne) forma 2; ST-10, x120.

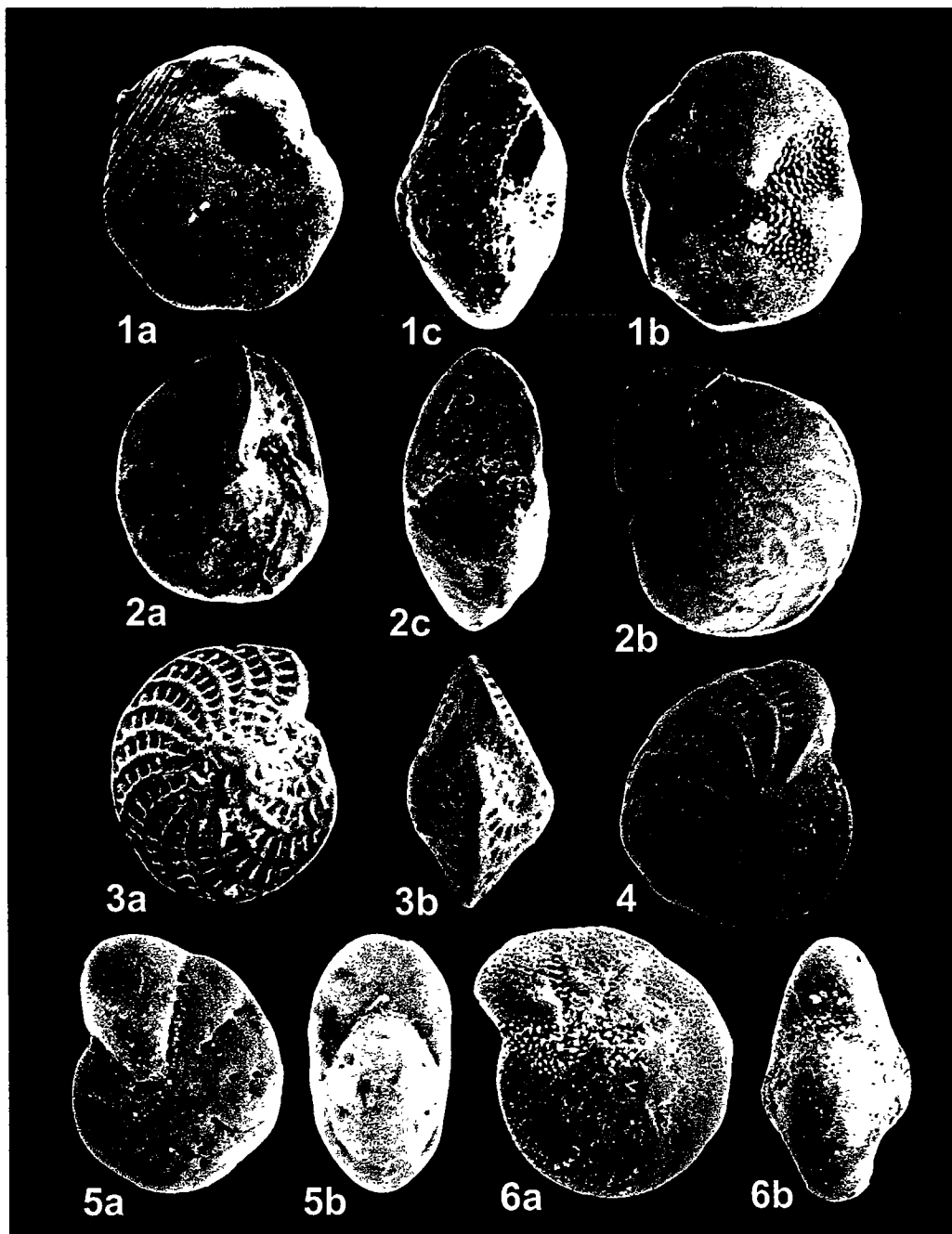


Plate 5-2. 1a-c, *Buccella frigida* (Cushman); ST-80, x150, 2a-c, *Proeponides cribrorepandus* Asano and Uchio; a, b, ST-97, x70, c, ST-97, x80. 3a-b, 3a-b, *Elphidium crispum* (Linne) a, ST-97, x70, b, ST-97, x80. 4, *Elphidium advenum* (Cushman); ST -76, x80. 5a-b, *Elphidium subincertum* Asano; St-15, x100. 6a-b, *Elphidium clavatum* (Cushman); ST-90, x170.

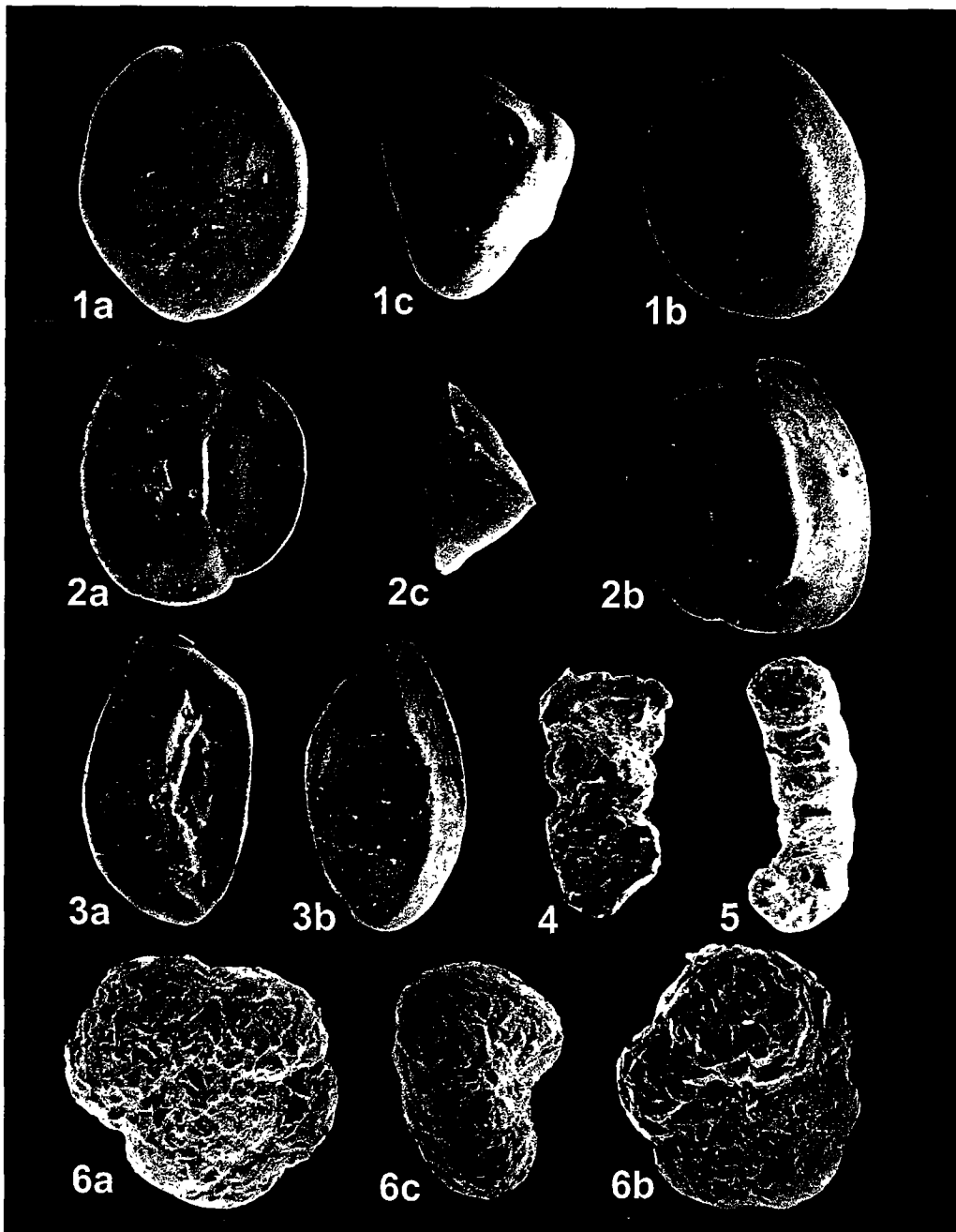


Plate 5-3. 1a-c, *Quinqueloculina vulgaris* d'Orbigny; a,c, ST-97, x40, b, ST-97, x50. 2a-c, *Quinqueloculina lamarckiana* d'Orbigny; a,c, ST-83, x35, b, ST-83, x45. 3a-b, *Quinqueloculina polygona* d'Orbigny; ST-97, x55. 4, *Ammoscalaria tenuimargo* (Brady); ST-67, x70.5. 5, *Ammobaculites exiguus* Chushman and Bronnimann; ST-67, x80. 6a-c, *Trochammina hadai* Uchino; a, b, ST-10, x100, c, ST-15, x105.

Table 5-1. Summary of location and textural characteristics of box cores from the South Sea and its vicinity

Sample No.	Location (in degree)		Depth (m)	Core L. (cm)	Composition					Sed. Type	Textural Parameters*			
	Long.	Lat.			Gravel	Sand	Silt	Clay	Mz		$\sigma_t$	Sk	K <sub>g</sub>	
A1	124.999	34.168	91	0	0	58.6	11.35	30.05	cS	5.67	3.78	0.71	1.85	
				20	0	57.29	10.07	32.64	cS	5.84	3.88	0.62	1.68	
				38	0	55.21	9.63	35.16	cS	6.03	3.92	0.5	1.53	
A3	125.004	34.011	85	0	0	88.12	2.23	9.65	cS	3.13	2.79	2.52	7.88	
				32	0	81.63	3.27	15.1	cS	3.7	3.3	1.79	4.56	
A5	125.001	33.849	94	0	0	71.29	6.21	22.5	cS	4.46	3.81	1.16	2.65	
				30	0	64.4	7.18	28.42	cS	5.32	3.87	0.85	1.98	
A7	125.000	33.666	90	0	0	43.98	12.17	43.86	sC	6.83	3.98	0.14	1.34	
				30	0	60.22	13.69	26.09	mS	5.14	3.18	0.73	2	
A9	125.000	33.500	74	0	0	65.83	7.14	27.03	cS	5.02	3.92	0.91	2.08	
				28	0	64.17	5.12	30.71	cS	5.29	4.06	0.76	1.79	
B1	125.880	34.514	21	0	0	6.83	45.91	47.26	M	8.23	2.97	0.08	1.53	
				20	0	4.58	45.55	49.87	M	8.48	2.91	0.03	1.48	
				42	0	2.19	47.46	50.35	M	8.59	2.8	0.05	1.47	
B2	125.884	34.417	31	0	0	17.7	34.7	47.6	sM	7.89	3.48	-0.2	1.72	
				20	1.91	35.17	20.95	41.96	(g)sM	6.75	4.13	-0.13	1.7	
				29	0	2.78	42.05	55.17	M	8.86	2.81	-0.13	1.5	
				32	0	34.53	32.24	33.23	sM	6.29	3.85	0.14	1.73	
B7	125.883	34.000	83	0	0	0	47.1	52.9	M	8.62	2.6	0.08	1.55	
				7	0.86	81.37	8.21	9.56	(g)mS	3.12	2.9	1.97	6.03	
				25	0	1.71	38.79	59.49	M	9.06	2.64	-0.19	1.58	
B9	125.882	33.750	78	0	0	19.8	24.67	55.53	sC	8.3	3.32	-0.3	1.67	
				35	0	35.37	22.01	42.62	sM	7.18	3.54	0.16	1.47	
B11	125.883	33.500	95	0	0	40.97	17.39	41.64	sC	6.78	3.79	0.18	1.42	
				32	0	54.8	11.99	33.2	cS	5.86	3.81	0.6	1.67	
C1	127.000	34.167	32	0	0	51.42	20.53	28.04	mS	5.94	3.41	0.78	2.02	
				32	0	54.31	19.18	26.5	mS	5.78	3.36	0.85	2.16	
C3	126.999	34.000	60	0	3.17	73.85	5.77	17.22	(g)mS	3.62	3.68	1.22	3.37	
				30	3.6	48.05	12.45	35.9	(g)sM	5.45	4.52	0.25	1.54	



Table 5-1. Continued

Sample No.	Location (in degree)		Depth (m)	Core L. (cm)	Composition				Sed Type	Textural Parameters*				
	Long.	Lat.			Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz	$\sigma_1$	Sk	Kg	
C5	127.000	33.833	87	0	13.25	55.37	7.06	24.32	gmS	3.86	4.49	0.67	2.14	
					15	15.7	49.36	9.09	25.85	gmS	3.84	4.77	0.44	2.01
					26	9.41	23.76	51.51	15.32	gM	4.61	3.6	0.16	2.87
C7	127.000	33.667	117	0	0.87	81.67	5.4	12.06	(g)mS	3.42	3.04	1.84	5.43	
				27	2.99	75.59	5.6	15.83	(g)mS	3.63	3.43	1.4	3.85	
D1	128.000	34.584	27	0	0	0.82	39.12	60.05	M	9.18	2.52	-0.16	1.57	
D3	127.999	34.417	43	0	0	0.18	37.32	62.49	M	9.2	2.47	-0.2	1.61	
				30	0	0	31.18	68.82	C	9.59	2.29	-0.28	1.64	
D5	128.000	34.250	69	0	0	0	24.03	75.97	C	9.94	2.15	-0.53	1.94	
				32	0	4.42	25.85	69.73	C	9.49	2.51	-0.58	2.24	
D7	128.002	34.000	86	0	0	21.28	14.24	64.48	sC	8.87	3.29	-0.54	1.69	
				20	1.68	51.2	19.04	28.08	(g)mS	5.83	3.92	0.31	1.78	
D9	127.999	33.750	104	0	0	56.28	11.47	32.25	cS	5.95	3.74	0.69	1.74	
				16	0	62.81	7.16	30.03	cS	5.56	3.86	0.8	1.87	
D10	128.000	33.626	117	0	0	81.37	18.63	0	zS	3.01	0.77	0.5	1.8	
				10	0	74.64	3.73	21.62	cS	4.33	3.85	1.2	2.83	
D11	127.999	33.500	114	0	0	80.51	19.49	0	zS	2.46	1.2	0.01	2.2	
				15	0	77.22	22.78	0	zS	2.62	1.17	-0.09	2.24	
E1	129.000	35.000	44	0	0	0.64	83.99	15.37	Z	7.39	1.67	2.04	6.03	
				20	0	11.24	28.86	59.91	sC	8.71	3.16	-0.46	1.9	
E2	129.000	34.917	73	0	0	1.63	22.61	75.76	C	9.89	2.35	-0.74	2.37	
				20	0	2.34	26.75	70.91	C	9.6	2.46	-0.56	2.15	
E3	129.001	34.835	86	43	0	9.98	20.84	69.19	C	9.38	2.8	-0.7	2.26	
				0	4.72	65.07	6.3	23.9	(g)mS	4.11	4.19	0.92	2.33	
E4	129.000	34.750	97	22	22.08	50.22	6.9	20.81	gmS	3.15	4.64	0.71	2.38	
				0	3.38	70.81	5.92	19.88	(g)mS	3.79	3.93	1.08	2.91	

Table 5-1. Continued

Sample No.	Location (in degree)		Depth Core L (m)	Composition			Sed. Type	Textural Parameters*				
	Long.	Lat.		Gravel	Sand	Silt		Clay	Mz	$\sigma_1$	Sk	$K_G$
E5	129 000	34 667	102	4.49	65.84	7.11	22.56	(g/mS)	3.85	4.17	0.94	2.52
			0	4.74	69.71	4.89	20.66	(g/mS)	3.56	4.12	1.13	2.82
E6	129.000	34.584	109	32.45	47.98	5.03	14.53	msG	1.98	4.29	1.24	3.42
			0	0	73.67	5.8	20.53	cS	3.81	3.93	1.25	2.89
			22	4.23	71.03	5.89	18.86	(g/mS)	3.46	3.98	1.28	3.13

\* Mz: Mean;  $\sigma_1$ : Sorting; Sk: Skewness;  $K_G$ : Kurtosis

Table 5-2. Averaged composition and textural parameters of surface sediments in the study area

Bay Location	Composition (%)			Grain Size Parameters				Organic Matter (%)
	Sand	Silt	Clay	$Mz$ ( $\phi$ )	$\sigma$ ( $\phi$ )	$Sk$	$Kt$	
Inner	3.5	56.9	39.5	7.1	2.2	0.2	0.8	7.8
Central	2.4	65.2	32.3	7.6	2.2	0.3	0.8	7.2
Outer	3.1	63.2	33.4	7.3	2.1	0.2	0.9	8.8
Avg.	3.0	61.8	35.1	7.3	2.2	0.2	0.8	7.9

Table 5-3. Mean values of foraminiferal diversity characteristics in four biofacies (H(S)=species diversity, E=equitability, S=number of species, N=number of individuals per 7ml)

Biofacies	Station No.	H(S)	E	S	N
I	8, 10, 15, 24, 26,	1.80	0.59	10	1655
	29, 31, 32, 35, 38,				
	52, 53, 55, 56, 60				
II	27, 28, 39, 42, 59,	1.92	0.63	11	798
	45, 48, 49, 50, 57,				
	64, 67, 71				
III	58, 61, 66, 72, 74, 76, 80	2.18	0.63	14	1479
IV	83	2.44	0.57	20	6304

Table 5-4. Summary of 12-hour hydrodynamic measurements at the entrance of Jinhae-Masan Bay during 7 am - 7 pm, May 10, 1998

Time (hh mm)	depth (m)	Current		Temp. (deg.)	Salinity (o/oo)	Suspended sediments		Wind	
		speed(m/sec)	dir.(deg)			Conc.(mg/l)	speed(m/sec)	dir (deg)	
7 00	0.93	0.09	310.21	17.35	30.04	17.58	0.7	360	
7:00	5.98	0.02	20.36	16.52	31.88	14.94			
7 00	10.84	0.23	352.72	15.23	33.34	16.26			
7 00	16.17	0.20	347.94	14.30	33.82	24.20			
7 00	21.05	0.18	333.00	14.06	33.90	26.85			
8 00	1.22	0.08	128.39	17.18	31.06	20.23	0.8	180	
8 00	6.01	0.07	35.41	16.37	31.98	18.91			
8 00	11.03	0.14	24.21	15.15	33.38	17.58			
8:00	16.18	0.08	17.43	14.50	33.75	9.64			
8:00	21.26	0.03	4.84	14.11	33.90	38.76			
9:00	0.87	0.20	147.81	16.97	31.03	13.61	0.5	202.5	
9 00	5.76	0.19	111.60	16.36	31.99	14.94			
9 00	10.86	0.17	116.78	15.46	32.98	16.26			
9:00	16.25	0.16	114.69	14.94	33.40	22.88			
9 00	21.34	0.05	96.95	14.15	33.88	25.52			
10:00	1.08	0.37	150.10	17.03	31.07	17.58	1	67.5	
10 00	5.59	0.22	136.87	16.92	31.38	17.58			
10:00	10.85	0.26	151.64	15.63	32.73	22.88			
10:00	15.97	0.24	134.38	15.05	33.28	12.29			
10:00	21.02	0.15	131.86	14.15	33.88	25.52			
11:00	1.50	0.29	131.12	16.92	31.50	16.26	1.3	67.5	
11:00	5.73	0.24	149.81	16.44	31.98	20.23			
11:00	10.83	0.25	142.55	15.88	32.48	22.88			
11 00	16.09	0.24	131.53	15.15	33.17	25.52			
11 00	20.95	0.14	120.09	14.13	33.88	36.11			
12:00	1.07	0.25	139.85	16.62	31.81	16.26	2.3	22.5	
12 00	5.73	0.21	113.29	16.56	31.90	16.26			
12:00	10.91	0.22	144.44	15.24	33.07	13.61			
12:00	15.99	0.16	127.67	14.96	33.36	20.23			
12 00	21.24	0.07	105.41	14.25	33.86	30.82			
13 00	0.64	0.07	144.42	16.47	31.93	13.61	0.7	90	
13 00	5.77	0.08	337.95	16.35	32.06	18.91			
13:00	10.96	0.17	137.99	15.12	33.13	13.61			
13:00	15.88	0.12	87.95	14.82	33.39	24.20			
13:00	21.25	0.10	51.93	14.45	33.77	14.94			
14 00	1.17	0.35	336.34	16.66	31.83	20.23	2.5	22.5	
14:00	5.79	0.25	341.70	16.33	32.09	9.64			
14:00	10.84	0.07	184.55	15.63	32.70	9.64			
14:00	16.01	0.05	48.72	14.89	33.33	20.23			
14:00	21.11	0.07	35.35	14.68	33.55	33.46			

Table 5-4. Continued

Time (hh mm)	depth (m)	Current		Temp (deg )	Salinity (o/oo)	Suspended sediments		Wind	
		speed(m/sec)	dir.(deg )			Conc (mg/l)	speed(m/sec)	dir.(deg )	
15:00	1 09	0 23	299.61	16.57	31 94	14 94	1 3	22 5	
15:00	5 63	0.31	319.68	16 43	32 04	20 23			
15:00	10 94	0 23	334.42	16.18	32 25	22 88			
15:00	16 00	0 08	48 46	15 64	32 71	9 64			
15:00	19 75	0 04	5.98	15.04	33 20	9 64			
16:00	0 90	0 16	288.84	16 86	31.72	18 91	3	22 5	
16:00	5 70	0 19	323 49	16 18	32 25	18 91			
16:00	10 86	0.14	331.71	15.44	32 88	22 88			
16:00	15 93	0 32	310 92	14.55	33 68	24 20			
16:00	20 92	0.31	315.42	14 37	33 79	38 76			
17:00	0.98	0.14	314 78	16 63	31 89	16 26	1 8	360	
17:00	5.73	0 18	330.82	16.04	32.37	16 26			
17:00	10 76	0.24	336 86	15 44	32 90	18 91			
17:00	15 90	0.30	317.21	14.96	33.29	9 64			
17:00	20.97	0.21	327.95	13.88	33.92	33 46			
18:00	1.44	0.31	329 69	16.64	30.37	22 88	2 2	22 5	
18:00	5.68	0 07	177.02	16.44	32 03	10 97			
18:00	10 99	0.13	327.87	15 22	33 07	12 29			
18:00	16 10	0.33	332 04	14 01	33 85	9 64			
18:00	20 99	0.20	332.00	13.68	33 94	37 43			
19:00	1.32	0.38	322.40	16 53	30 85	12 29	2.5	360	
19:00	5.78	0.09	336.06	16.23	32 04	18 91			
19:00	10 83	0 13	320.29	15.66	32 71	13 61			
19:00	15 94	0.28	324.49	14.92	33.33	16 26			
19:00	21 12	0.21	352.14	13.91	33 90	14 94			

Table 5-5. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-1, West Inlet, mouth of Yoja Bay collected July 12-13, 1999.

Time (hh:mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
15 00	0.5	4.2	9.17	23.4	108.4	19.7
	6	7.0		23.2	235.1	11.9
	12	4.9	5.16	22.7	358.4	11.0
	18	8.1		22.5	17.8	4.9
	26	6.8	3.90	22.5	17.4	2.6
15 30	0.5	11.1	2.31	23.3	141.3	2.6
	6	4.2		23.2	344.4	10.1
	12	4.3	2.74	22.7	26.5	19.7
	18	4.5		22.6	39.5	19.7
	26	6.6	3.61	22.5	4.5	14.8
16 00	0.5	5.0	3.16	23.4	99.0	4.3
	6	5.7		23.2	12.2	24.3
	12	6.6	2.80	22.9	12.6	49.0
	18	7.6		22.8	6.6	42.1
	26	6.2	3.56	22.7	11.1	36.6
16 30	0.5	5.6	3.17	23.3	305.9	5.7
	6	6.9		23.2	1.7	26.7
	12	7.3	8.36	23.1	9.4	49.9
	18	5.3		22.9	5.5	83.3
	26	2.3	3.73	22.8	358.0	70.8
17 00	0.5	6.0	2.98	23.2	27.9	42.1
	6	4.1		23.1	59.1	31.3
	12	6.7	4.00	23.0	3.5	51.4
	18	8.5		22.8	2.8	63.0
	26	12.3	3.67	22.8	1.7	60.7
17 30	0.5	6.2	1.12	23.2	4.8	58.3
	6	8.9		22.9	349.9	46.4
	12	16.1	3.79	22.8	335.6	40.3
	18	16.3		22.8	311.1	46.7
	26	16.4	4.04	22.6	280.6	42.1
18 00	0.5	14.5	3.21	22.8	343.6	11.9
	6	12.4		22.8	334.9	10.4
	12	11.7	2.78	22.7	1.0	44.4
	18	12.1		22.6	4.5	65.3
	26	10.4	4.20	22.6	6.6	65.3
18 30	0.5	11.7	3.83	22.8	16.4	7.5
	6	10.2		22.7	357.3	22.9
	12	2.5	4.36	22.7	13.2	27.3
	18	10.2		22.6	9.8	70.3
	26	13.1	4.38	22.5	8.7	75.5
19 00	0.5	16.4	3.26	22.7	49.0	18.8
	6	6.5		22.7	36.0	27.0
	12	11.6	4.56	22.7	57.7	38.9
	18	13.5		22.6	24.8	70.6

Table 5-5. Continued

Time (hh mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem.(deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
	26	13.9	4.36	22.6	7.3	54.6
19 30	0.5	4.4	3.18	22.8	10.4	55.2
	6	6.4		22.7	358.7	60.1
	12	7.9	3.84	22.7	333.1	30.5
	18	12.0		22.6	312.5	38.9
	26	11.6	4.34	22.6	317.8	23.5
20 00	0.5	13.3	3.85	22.5	1.4	22.0
	6	16.7		22.5	319.9	4.0
	12	14.8	4.05	22.5	316.4	5.7
	18	15.7		22.5	5.5	28.7
	26	17.0	3.72	22.4	284.1	4.9
20.30	0.5	13.3	2.56	22.5	70.3	25.2
	6	20.4		22.5	43.3	37.4
	12	6.8	3.79	22.5	14.3	42.9
	18	17.2		22.5	12.6	37.4
	26	15.4	4.35	22.5	7.3	28.1
21 00	0.5	9.4	3.06	22.5	26.2	36.0
	6	10.7		22.5	10.4	32.2
	12	11.8	3.99	22.5	352.4	16.2
	18	14.4		22.5	18.5	14.2
	26	18.9	4.72	22.5	32.5	14.2
21 30	0.5	7.7	3.14	22.5	138.6	14.2
	6	6.2		22.6	140.3	23.5
	12	8.8	4.06	22.5	164.8	32.8
	18	11.2		22.5	156.8	31.3
	26	15.6	4.54	22.5	163.4	22.3
22 00	0.5	5.4	2.20	22.7	110.9	46.7
	6	5.6		22.7	146.6	36.0
	12	7.0	3.60	22.6	181.6	28.1
	18	4.8		22.5	157.1	28.1
	26	12.4	3.61	22.5	174.6	25.2
22 30	0.5	11.2	2.23	22.9	109.8	54.6
	6	5.8		22.6	131.6	28.1
	12	11.8	4.25	22.5	178.4	32.2
	18	11.9		22.4	185.8	39.2
	26	11.9	3.97	22.2	213.8	34.2
23 00	0.5	4.2	3.26	22.8	129.4	59.8
	6	4.7		22.5	138.2	30.5
	12	6.6	3.48	22.5	196.3	46.7
	18	6.0		22.4	158.5	42.1
	26	12.0	3.24	22.4	208.6	52.2
23 30	0.5	2.7	2.70	22.5	131.6	68.5
	6	2.6		22.5	146.2	52.2
	12	7.5	1.70	22.4	168.3	55.4
	18	7.5		22.4	177.1	39.2
	26	8.9	2.91	22.3	217.3	33.6



Table 5-5. Continued

Time (hh:mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
0:00	0.5	5.3	3.43	22.8	146.9	76.1
	6	11.6		22.5	154.6	60.1
	12	4.1	2.85	22.5	185.8	56.0
	18	8.4		22.4	174.6	43.5
	26	34.2	4.74	22.4	205.1	38.3
0:30	0.5	4.5	3.41	22.8	160.9	65.3
	6	24.8		22.6	183.3	48.5
	12	4.6	3.92	22.6	173.6	49.0
	18	16.0		22.5	181.6	42.9
	26	16.0	4.93	22.5	188.6	31.3
1:00	0.5	7.7	3.48	22.9	154.3	83.3
	6	6.7		22.6	175.6	55.4
	12	7.7	2.35	22.6	189.3	39.2
	18	8.7		22.5	188.6	32.8
	26	31.7	4.56	22.5	176.3	18.2
1:30	0.5	6.3	3.35	23.0	177.1	82.5
	6	6.0		22.6	181.6	45.3
	12	7.6	2.46	22.6	196.6	34.5
	18	16.1		22.5	178.8	26.7
	26	12.4	3.13	22.4	184.1	18.2
2:00	0.5	5.2	1.78	23.0	157.4	76.4
	6	3.7		22.6	178.4	42.9
	12	4.0	2.58	22.5	193.8	28.1
	18	8.8		22.5	176.3	25.2
	26	10.1	2.27	22.4	173.9	11.9
2:30	0.5	6.1	3.24	23.0	155.0	58.3
	6	6.5		22.7	171.1	35.1
	12	7.6	1.38	22.6	197.7	23.5
	18	10.3		22.5	195.9	12.7
	26	8.5	1.93	22.4	190.7	8.1
3:00	0.5	4.3	3.95	23.1	131.2	57.5
	6	4.3		22.8	172.1	32.2
	12	3.5	1.98	22.7	162.0	31.3
	18	4.0		22.6	259.3	22.0
	26	7.7	1.59	22.4	255.8	12.4
3:30	0.5	6.6	3.97	23.1	135.8	40.6
	6	3.9		22.7	166.9	22.0
	12	3.2	1.93	22.7	210.3	4.3
	18	6.0		22.6	349.9	6.6
	26	6.8	3.23	22.5	97.9	2.6

Table 5-6. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-2, Chobal Inlet, mouth of Yoja Bay collected July 13, 1999.

Time (hh:mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
9:00	0.5	2.2	1.10	22.1	352.8	47.6
	6	2.5		22.1	352.4	46.1
	12	4.7	3.28	22.1	349.9	45.3
	18	9.2		22.1	339.1	29.9
	26	7.0	2.87	22.1	352.4	43.8
9:30	0.5	3.4	1.96	22.2	33.9	12.7
	6	3.5		22.1	2.0	25.8
	12	8.5	2.53	22.1	354.9	25.8
	18	7.6		22.1	355.9	16.5
	26	10.5	2.73	22.1	6.6	18.8
10:00	0.5	3.8	1.75	22.3	129.4	23.5
	6	2.6		22.2	69.6	10.7
	12	3.1	3.02	22.1	6.2	9.5
	18	4.5		22.1	273.3	2.0
	26	6.5	2.51	22.1	35.6	10.4
11:00	0.5	2.9	2.29	22.8	169.0	78.7
	6	2.3		22.2	166.6	49.6
	12	2.5	2.39	22.1	183.3	46.7
	18	2.8		22.1	148.0	44.4
	26	4.3	2.35	22.1	184.8	49.0
11:30	0.5	3.4	2.51	22.6	159.2	53.1
	6	5.0		22.4	194.6	57.8
	12	2.5		22.2	160.9	52.8
	18	2.5		22.2	184.4	41.5
	26	12.8	1.84	22.3	177.4	59.8
12:00	0.5	2.0	2.47	22.8	153.9	67.6
	6	3.4		22.4	189.6	60.7
	12	2.5	2.24	22.2	154.3	49.9
	18	1.7		22.2	176.7	47.6
	26	19.2	2.07	22.3	175.6	60.7
12:30	0.5	0.8	2.23	22.8	188.9	70.8
	6	3.2		22.4	164.8	61.5
	12	2.4	3.98	22.3	183.7	49.9
	18	3.0		22.2	169.0	39.2
	26	4.8	2.97	22.3	157.8	58.3
13:00	0.5	3.7	2.90	22.9	163.1	56.9
	6	4.4		22.4	194.9	60.7
	12	2.5	3.92	22.3	152.2	49.9
	18	10.5		22.3	136.1	42.9
	26	15.5	2.80	23.1	175.3	40.0
13:30	0.5	4.7	3.25	23.0	179.5	66.2
	6	4.4		22.7	194.6	53.1
	12	4.2	3.21	22.4	155.0	43.5
	18	6.1		22.4	139.6	36.6
	26	13.0	3.30	22.7	199.8	54.6
14:00	0.5	3.9	3.25	23.1	181.9	57.5

Table 5-6. Continued

Time (hh mm)	Depth (m)	Conc. (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
	6	3.8		22.8	191.4	43.8
	12	4.8	2.97	22.4	143.4	37.4
	18	6.4		22.4	149.8	27.3
	26	20.2	3.00	22.8	178.4	35.7
14:30	0.5	3.5	3.08	22.7	173.2	35.1
	6	3.5		22.6	170.1	27.5
	12	7.2	3.27	22.5	198.4	28.1
	18	8.0		22.5	162.7	18.2
	26	14.9	3.02	22.7	145.2	16.5
15:00	0.5	20.3	3.66	22.9	158.1	27.5
	6	11.9		22.7	159.9	25.8
	12	5.9	3.07	22.6	132.9	11.3
	18	11.7		22.6	200.1	7.2
	26	9.2	6.91	22.6	185.8	15.0
15:30	0.5	11.7	2.98	22.7	79.4	8.1
	6	5.4		22.6	304.4	3.4
	12	5.4	3.67	22.6	337.7	12.7
	18	11.4		22.4	321.9	17.4
	26	12.3		22.6	345.0	15.0
16:00	0.5	5.9	3.18	22.7	352.0	20.6
	6	4.5		22.6	338.4	22.6
	12	5.7	4.51	22.4	348.2	40.6
	18	15.0		22.3	354.1	39.2
	26	10.0	2.92	22.6	320.5	23.8
16:30	0.5	9.1	2.88	22.6	356.2	36.8
	6	4.7		22.4	347.5	43.8
	12	8.1	3.42	22.4	335.6	49.9
	18	10.6		22.4	338.8	46.1
	26	8.1	3.11	22.4	344.4	51.4
17:00	0.5	5.8	2.52	22.5	355.9	55.4
	6	5.8		22.3	349.9	60.7
	12	8.4	4.78	22.3	353.8	62.4
	18	10.5		22.3	349.2	52.8
	26	15.9	3.11	22.4	349.2	43.2
17:30	0.5	6.9	2.42	22.5	357.3	61.5
	6	4.8		22.4	343.6	58.3
	12	7.2	3.76	22.4	342.6	61.5
	18	8.1		22.3	348.5	56.9
	26	10.4	2.45	23.6	27.6	67.6
18:00	0.5	5.4	2.96	22.4	354.1	60.1
	6	6.1		22.5	348.5	63.0
	12	5.9	3.02	22.3	350.3	29.9
	18	6.3		22.3	355.9	46.1
	26	7.6	2.83	23.3	20.9	65.3
18:30	0.5	9.7	2.14	22.4	30.0	68.2
	6	6.8		22.4	344.4	70.8
	12	17.3	2.99	22.4	12.9	61.5

Table 5-6. Continued

Time (hh mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem.(deg )	Dir.(deg )	Speed(cm/s)
	18	17.0		22.4	347.5	89.4
	26	22.5	3.28	22.4	1.4	97.0
19 00	0.5	16.3	2.45	22.4	351.7	115.0
	6	14.0		22.4	330.0	112.7
	12	14.8	3.21	22.4	346.4	100.2
	18	15.0		22.4	336.6	89.4
	26	11.8	3.02	22.4	332.1	90.9
19 30	0.5	6.3	2.41	22.5	25.1	89.4
	6	10.8		22.4	14.6	70.6
	12	12.2	3.96	22.4	18.1	82.5
	18	17.4		22.4	1.4	75.2
	26	30.9	3.05	22.4	15.0	49.9
20:00	0.5	34.4	3.22	22.4	356.6	128.1
	6	19.4		22.4	358.4	92.9
	12	28.8	3.67	22.4	342.9	115.9
	18	27.8		22.3	347.9	111.2
	26	31.7	3.26	22.4	339.4	106.3
20 30	0.5	23.6	3.31	22.4	8.7	81.6
	6	24.4		22.4	348.5	83.9
	12	24.7	3.91	22.4	3.1	83.9
	18	35.1		22.3	6.2	79.3
	26	26.6	0.08	22.3	349.9	51.1
21:00	0.5	12.5	2.41	22.4	358.7	72.3
	6	12.6		22.4	22.4	67.6
	12	18.4	4.06	22.3	27.9	75.5
	18	20.8		22.3	9.8	44.4
	26	29.7	3.95	22.4	15.0	31.3
21 30	0.5	13.5	1.96	22.4	9.4	41.5
	6	9.6		22.4	3.8	46.1
	12	26.6	3.74	22.4	10.1	47.6
	18	21.9		22.4	11.1	40.6
	26	30.6	3.17	22.4	314.6	6.6

Table 5-7. Summary of 12.5-hour hydrodynamic measurements at station YJ-3, middle part of Yoja Bay collected July 14, 1999.

Time (hh mm)	Depth (m)	Conc. (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir.(deg )	Speed(cm/s)
7 00	0.5	4.7	1.99	23.2	22.4	47.6
	4.5	12.1	3.98	23.1	1.7	40.6
7 30	0.5	10.0	2.84	23.3	11.1	46.7
	5.5	34.2	3.83	23.0	357.6	28.1
8:00	0.5	4.5	2.71	23.5	14.6	31.3
	5.9	23.5	3.53	23.0	340.9	25.8
8 30	0.5	6.1	2.74	23.6	28.3	15.9
	7.5	21.1	3.77	22.9	340.5	23.5
9 00	0.5	17.5	2.15	23.7	25.9	13.6
	7	15.6	2.85	22.9	336.3	23.5
9 30	0.5	2.9	2.36	23.5	43.3	14.2
	7.4	20.9	2.81	22.9	320.9	13.6
10 00	0.5	4.5	2.51	23.3	63.3	18.8
	7.5	10.1	3.32	22.9	320.2	13.6
10:30	0.5	3.9	2.67	24.1	86.4	19.7
	7.6	14.1	3.05	22.9	223.6	5.7
11 00	0.5	3.5	2.66	23.7	90.2	30.5
	7.3	14.7	2.77	22.9	174.6	22.0
11:30	0.5	3.3	2.74	24.3	105.7	53.1
	7	6.5	2.95	23.3	144.5	23.8
12 00	0.5	4.0	2.65	24.4	106.0	63.0
	6.9	12.9	3.51	23.0	163.8	32.2
12:30	0.5	4.0	2.45	24.5	110.9	60.7
	6.5	12.6	3.14	23.6	125.2	45.6
13 00	0.5	4.0	3.68	24.6	142.8	72.9
	6	12.2	3.20	23.1	152.2	30.5
13:30	0.5	4.7	3.37	24.2	155.3	55.2
	5.5	15.3	3.41	25.1	110.9	59.2
14:00	0.5	6.2	3.27	24.9	145.9	69.7
	5.5	29.2	2.75	23.2	127.7	32.2
14:30	0.5	5.0	2.89	24.7	129.4	59.2
	5	24.2	2.94	23.3	165.8	24.9
15 00	0.5	8.4	2.20	24.5	216.6	43.5
	4.5	8.6	3.11	23.3	146.9	25.2
15 30	0.5	7.4	2.04	23.9	206.1	21.2
	4.5	9.6	2.46	23.4	152.9	17.4
16 00	0.5	5.0	3.12	24.7	9.4	4.0
	4.3	0.0	2.58	24.2	198.1	15.6
16 30	0.5	6.8	2.50	23.7	153.9	2.6
	4.2	7.6	2.39	23.3	1.0	18.8
17 00	0.5	5.0	2.61	24.5	5.2	28.1
	4.4	9.9	2.61	23.2	1.4	41.5
17 30	0.5	3.3	2.82	25.3	1.4	53.7
	4.5	28.8	2.86	23.2	3.8	49.0
18:00	0.5	3.9	2.96	23.7	15.0	52.2
	5	29.7	3.67	23.5	1.0	47.3

Table 5-7. Continued

Time (hh:mm)	Depth (m)	Conc (mg/l)	Organic (%)	Current		
				Tem (deg )	Dir (deg )	Speed(cm/s)
18 30	0.5	4.6	3.00	24.4	14.6	52.2
	5.4	26.1	3.55	23.2	355.5	36.0
19 00	0.5	3.8	3.49	25.2	21.3	67.1
	5.5	46.4	3.57	23.2	348.2	35.1
19 30	0.5	3.5	3.23	25.2	23.0	65.3
	6	28.9	3.33	23.2	350.6	41.5

TABLE 5-8. Time-averaged flood and ebb flow speed, direction, temperature and suspended sediment concentration, together with calculated residual flow and net sediment flux at each station

Station	Layer	Cur. Vel. (cm s <sup>-1</sup> )		Cur. Dir. (deg.)		Temp. (°C)		SSC (mg l <sup>-1</sup> )		Residual flow (cm s <sup>-1</sup> )	Net sediment flux (x10 <sup>-3</sup> kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
		flood	ebb	flood	ebb	flood	ebb	flood	ebb		
YJ-1	Surface	23.8	60.8	92.7	141.5	23.0	22.9	9.3	5.9	-18.6	-0.8
	Middle	32.9	35.5	141.1	184.5	22.7	22.6	8.7	6.5	-1.5	0.3
	Bottom	38.0	23.7	102.9	188.5	22.6	22.4	11.6	14.5	7.4	0.2
YJ-2	Surface	69.2	46.6	243.0	163.3	22.5	22.7	12.5	5.1	10.0	4.0
	Middle	67.6	35.6	207.7	193.3	22.4	22.3	14.8	4.3	14.9	4.7
	Bottom	57.0	36.7	202.5	178.4	22.6	22.4	19.7	11.6	9.1	3.1
YJ-3	Surface	37.7	43.9	29.2	120.6	24.0	24.3	11.7	11.3	-4.2	-0.2
	Bottom	32.6	27.8	212.3	169.7	23.1	23.4	23.5	16.2	1.0	1.8

Appendix 5-1. Relative abundance (%) for total assemblages in surface sediments from 36 stations in Yoja Bay

Biofácies	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I												
Station No.	8	10	15	24	26	29	31	31	32	35	38	52	53	55	60	60	27	28	39																					
No. of species	7	11	9	10	10	10	10	9	9	14	10	13	9	12	11	10	9	10	9																					
Species diversity	1.35	1.68	1.71	1.88	1.78	1.92	1.92	1.59	2.02	1.87	1.96	1.47	1.90	1.90	1.94	1.95	1.55	1.75	1.84																					
Equitability	0.55	0.49	0.61	0.65	0.59	0.68	0.68	0.55	0.54	0.65	0.55	0.48	0.56	0.56	0.63	0.7	0.53	0.58	0.7																					
No. of individuals per fraction picked	43	244	477	222	391	471	389	220	217	224	374	237	210	224	228	231	236	204	204																					
No. of individuals per 7ml	43	488	3816	666	488.8	942	484.5	3520	868	3584	1122	948	3360	3584	912	462	708	408	408																					
<i>Amnobaucalites exiguus</i>	13.95	29.10	10.06	28.83	5.12	21.44	19.79	5.45	21.20	2.23	14.44	7.59	6.19	7.14	11.84	44.59	31.78	39.22																						
<i>Ammonia beccarii</i> forma 1	2.33	7.38	26.83	23.87	24.30	14.65	23.91	25.00	29.49	33.48	13.64	57.38	32.86	34.82	22.37	19.05	21.61	14.22																						
<i>Ammonia beccarii</i> forma 2	58.14	38.11	37.53	20.27	29.67	31.63	24.94	45.00	5.07	16.96	30.48	8.44	25.24	17.86	26.75	18.18	20.34	14.22																						
<i>Ammonia</i> sp. A	9.30	4.10	1.47	5.41		4.88	1.80	0.91	3.23	1.34			1.27	1.90	2.68	9.65	5.19	3.81	7.35																					
<i>Ammoscalaria tenuimargo</i>																																								
<i>Bolivina robusta</i> Brady																																								
<i>Bolivina</i> sp. aff. <i>B. durandii</i> Millett																																								
<i>Bolivina striatula</i> Cushman																																								
<i>Buccella frigida</i>																																								
<i>Eggerella scabra</i>																																								
<i>Elphidium</i> sp. A																																								
<i>Elphidium advenum</i>																																								
<i>Elphidium clavatum</i>	4.65	4.51	4.61	1.80	14.07	6.37	4.63	6.82	9.22	16.07	16.31	10.55	11.43	8.93	3.51	7.36	13.98	6.37																						
<i>Elphidium crispum</i>																																								
<i>Elphidium jensei</i>																																								
<i>Elphidium subincertum</i>	9.30	1.64	10.27	5.86	7.42	2.12	3.86	5.45	11.52	6.70	6.95	7.17	9.52	8.93	2.19																									
<i>Fissurina cucurbitesea</i>																																								
<i>Haplophragmoides</i> spp.																																								
<i>Massilina inaequaris</i>																																								
<i>Massilina secana</i>																																								
<i>Milionella circularis</i>																																								
<i>Nantonella globosa</i> Ishiwada																																								
<i>Pararotalia nipponica</i>																																								
<i>Poroeponides cribrorapanotus</i>																																								
<i>Poroeponides lateralis</i>																																								
<i>Pseudorotalia gaimardii</i>																																								
<i>Quinqueloculina lamackiana</i>																																								
<i>Quinqueloculina polygona</i>																																								
<i>Quinqueloculina seminulum</i>																																								
<i>Quinqueloculina</i> spp.																																								
<i>Quinqueloculina vulgaris</i>																																								
<i>Reophax gracilis</i>																																								
<i>Reophax nana</i>																																								
<i>Reophax scottii</i>																																								
<i>Rosalina bradyi</i>																																								
<i>Spiroloculina communis</i>																																								
<i>Textularia earlandi</i>	0.41	2.33	10.66	3.56	5.41	1.02	9.77	10.80	0.46	1.38	0.27	2.67	0.84	3.33	0.89	7.89	0.43	2.12	1.47																					
<i>Trochammina hadai</i>																																								



## Appendix 5-1. Continued

	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III	IV
Biofacies																		
Station No	42	45	48	49	50	57	59	64	67	71	58	61	66	72	74	76	80	83
No. of species	13	9	10	10	10	14	10	13	14	13	11	15	13	13	16	15	16	20
Species diversity	1.92	1.54	1.95	2.03	1.88	2.29	1.70	2.13	2.18	2.23	2.03	2.16	2.08	2.23	2.23	2.32	2.21	2.44
Equitability	0.52	0.52	0.7	0.77	0.66	0.7	0.55	0.65	0.63	0.71	0.69	0.58	0.61	0.72	0.58	0.68	0.57	0.57
No. of individuals per fraction picked	211	151	273	201	228	217	346	207	210	86	206	224	219	228	205	203	221	197
No. of individuals per 7ml	844	227	546	402	201	3472	518.5	1656	840	86	1236	448	3504	3648	410	812	295	6304
<i>Ammobaculites exiguus</i>	3602	47.68	27.47	20.90	7.89	23.50	46.53	19.32	28.57	15.12	13.11	14.29	2.28	8.33	5.85	5.42	6.33	3.05
<i>Ammonia beccarii</i> forma 1	10.43	5.96	14.29	11.44	26.32	9.68	6.36	10.14	6.67	12.79	7.28	14.29	8.22	7.46	5.37	9.85	11.31	17.77
<i>Ammonia beccarii</i> forma 2	16.59	12.58	21.25	10.45	27.63	9.22	15.03	17.87	10.95	4.65	6.31	4.46	4.11	4.39	9.76	12.32	4.52	4.06
<i>Ammonia</i> sp. A																		
<i>Ammoscalaria tenuimargo</i>	5.21	21.19	2.56	9.95	2.19	7.37	2.60	6.28	9.52	18.60	18.45	9.38	2.28	14.47	2.93	4.93	0.90	0.51
<i>Bolivina robusta</i> Brady															1.46			
<i>Bolivina</i> sp. aff. <i>B. diarrandii</i> Millett						1.84		0.48										
<i>Bolivina striatula</i> Cushman	2.37	1.32	2.20	5.97	7.02	5.07	0.58	2.90	6.67	13.95	5.83	10.71	4.11	7.46	0.49	6.40	19.46	8.63
<i>Buccella frigida</i>	0.47					0.92		0.48		1.16	0.49				1.46		0.90	
<i>Eggerella scabra</i>																		
<i>Elphidium</i> sp. A																		
<i>Elphidium advenum</i>	8.53	5.96	10.99	17.91	7.46	14.29	11.27	24.15	10.00	10.47	30.58	25.89	37.44	28.95	20.49	28.57	23.53	19.29
<i>Elphidium clavatum</i>	1.90	1.99	11.72	5.97	12.28	10.14	2.31	5.31	12.38	12.79	4.37	10.71	3.65	8.77	27.32	4.93	16.74	2.54
<i>Elphidium crispum</i>					0.44			0.97										0.51
<i>Elphidium jenseni</i>						0.46												
<i>Elphidium subincertum</i>	1.90	0.66	5.13	16.42	8.33	9.22	6.65	1.45	3.33	2.33	8.74	3.13	10.05	5.70	8.29	4.43	1.36	2.03
<i>Fissurina cucurbitesea</i>								0.97								4.93		2.03
<i>Haplophragmoides</i> spp.																		
<i>Massilina inaequaris</i>																		
<i>Massilina secana</i>																		
<i>Miltonella circularis</i>																		
<i>Nonionella globosa</i> Ishiwada																		
<i>Pararotalia nipponica</i>																		
<i>Poroeponides cribrorapantus</i>																		
<i>Poroeponides lateralis</i>									1.16									
<i>Pseudorotalia gaimardii</i>	0.47			0.50		3.23		2.90	1.90			0.45	1.37		1.46	1.48	0.90	4.57
<i>Quinqueloculina lamackiana</i>																		
<i>Quinqueloculina polygona</i>																		
<i>Quinqueloculina semimilium</i>																		
<i>Quinqueloculina</i> spp.																		
<i>Quinqueloculina vulgaris</i>	1.42		1.47	0.50		0.92	1.16	1.93	0.48	2.33	1.94	0.89	8.22	3.07	1.95	0.49	2.71	10.66
<i>Reophax gracilis</i>															0.98			
<i>Reophax nana</i>																		
<i>Reophax scottii</i>	0.47																	
<i>Rosalina bradyi</i>																		
<i>Spiroloculina communis</i>																		
<i>Textularia earlandi</i>																		
<i>Trochammina hadai</i>	14.22	2.65	2.93		0.44	4.15	7.51	5.80	7.62	3.49	2.23	2.28	2.19	4.39	6.90	4.07	0.51	



## 제 6 절 제주도 연안의 치자어 종조성

### 1. 제주도 연안의 치자어 종조성

#### 1.1. 서 론

우리 나라의 연근해에서 자치어 채집은 주로 표준네트(망구직경 100 cm, 망목 0.35 mm, 유, 1988), 봉고네트(망구직경 60 cm, 망목 0.33mm, 유 등, 1988, 유 등, 1993), 개폐식 채집망(망구직경 50 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33mm, 김과 강, 1995), 구경 130 cm, 길이 600 cm 망목 0.58 mm인 네트(임과 옥, 1977), NORPAC 채집망(구경 45 cm, 길이 180 cm, 망목 0.33 mm, 김과 김, 1991) 등 다양한 종류의 네트가 이용되었다. 채집목적에 따라 이들 네트는 수평, 수직, 경사채집 등에 사용되었다. 채집 속도는 2 knot 전후였으며, 네트의 예망시간은 7~10분 정도였다(임과 옥, 1977, 유 등, 1993, 유, 1988, 유 등, 1998, 김과 김, 1991). 이러한 종류의 채집기기는 수심이 얇은 연안역에서는 경사채집이나 수직채집으로는 분석에 필요한 충분한 양의 자치어 시료를 확보하기가 어렵기 때문에 주로 표층채집에 사용되었다(차, 1986, 유 등, 1993, 차와 허, 1988, 유 등, 1992, 차와 박, 1991, 차 등, 1991).

자치어 채장은 동일한 종류의 채집기기라도 채집시기, 채집방법, 예망속도 등과 종에 따라 차이는 있지만 난황을 갖고 있는 전기자어를 포함해서 체장이 10 mm 이내의 개체가 주로 채집이 된다. 흰배도라치와 같은 종은 40 mm 정도의 것도 겨울철에 다수 채집되는 것으로 보고되었지만(차, 1986), 체장이 작은 자어만 채집될 경우 발생단계에 따른 체형변화가 심한 종은 동정이 매우 어려울 뿐 아니라 미래의 자원량 추정을 위한 사망률 계산이 자어기에 치중이 될 수 있기 때문에 정확한 계산을 위해서는 전기자어 뿐 아니라 후기자어와 치어기의 시료 채집이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 수심이 얇은 우리 나라의 연안역에 적합한 새로운 채집기기를 개발하고, 이를 이용하여 채집된 자치어의 종 조성과 체장 조성을 연구하였다.

#### 1.2. 재료 및 방법

소형표층트롤네트의 모식도는 Fig. 6-1과 같다. 소형표층트롤네트는 크게 2개의 전개판과 1개의 그물로 구성이 된다. 전개판은 소형 어선에서 2500 cm 길이의 줄에 연결되고, 그물은 전개판(길이 100 cm, 폭 50 cm)에서 200 cm 길의 줄에 연결된다. 그물은 망목이 1.0 mm, 가로길이가 250 cm, 세로 길이가 100 cm인 직사각형으로 길이는 물이 통과할 수 없는 천 부분(길이 50 cm)을 포함해서 550 cm이다. 네트의 입구 면적에 대한 물이 통과할 수 있도록 열려진 망목의 총 면적비인 개구비는 폴랑크톤의 밀도가 매우 높은 곳에서도 사용할 수 있도록(심과 김, 1996) 6.2로 하였다. 소형표층트롤네트 입구 위쪽에 부위를 설치하였고, 바닥쪽에 추를 설치하여 물

속에 네트를 넣은 즉시 네트입구가 수직으로 설 수 있도록 하였으며 네트는 중성 부력을 유지할 수 있도록 추와 부위를 이용하여 조절하였다.

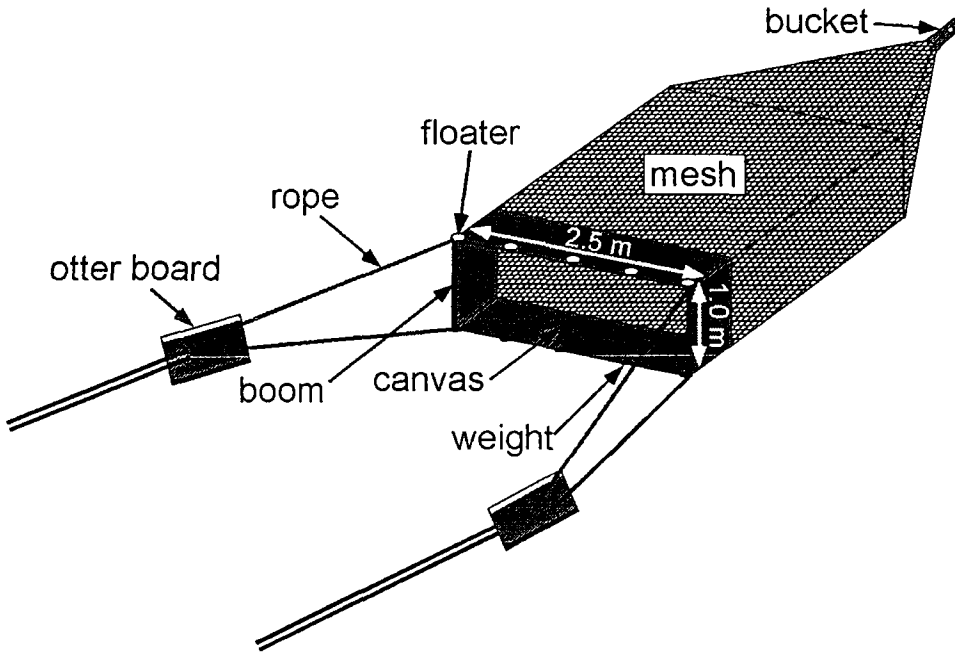


Fig. 6-1. A schematic diagram of small surface trawl net.

시료는 제주도 연안을 대상으로 선정된 4개의 정점(Fig. 2)에서 1999년 9월과 10월에 소형표층트롤과 봉고네트(망구직경 60 cm, 망목 0.33 mm)를 이용하여 표층에서 채집하였다. 정량분석을 위하여 봉고네트 입구에 유량계를 부착하였다. 네트의 예망시간은 소형표층트롤네트는 약 20분, 봉고네트는 약 7분이었다. 네트의 예망속도는 약 1.5 knot로 유지하였다. 네트를 통과한 물의 양을 추정하기 위하여 bongo net 입구에 유량계를 부착하였다. 소형표층트롤네트는 네트 입구 좌우에 소형 부위가 물 밖으로 나올 수 있도록 소형 부위를 부착한 후 측각기를 이용하여 네트의 벌어진 정도를 측정한 후 평균 예망속도와 예망시간을 이용하여 네트를 통과한 물의 양을 추정하였다.

채집된 표본은 현장에서 해수중성포르말린(최종 농도 7 %)으로 고정하였다. 고정된 시료는 실험실로 운반하여 해부현미경으로 자치어를 골라내어 동정하였다. 자치어 동정은 정(1977), 이 등(1981), 김 등(1986), Okiyama(1988) 등을 참고하였다. 동정된 자치어 채장은 현미경에 부착된 ocular micrometer를 이용하여 0.1 mm 단위까지 측정하였다.

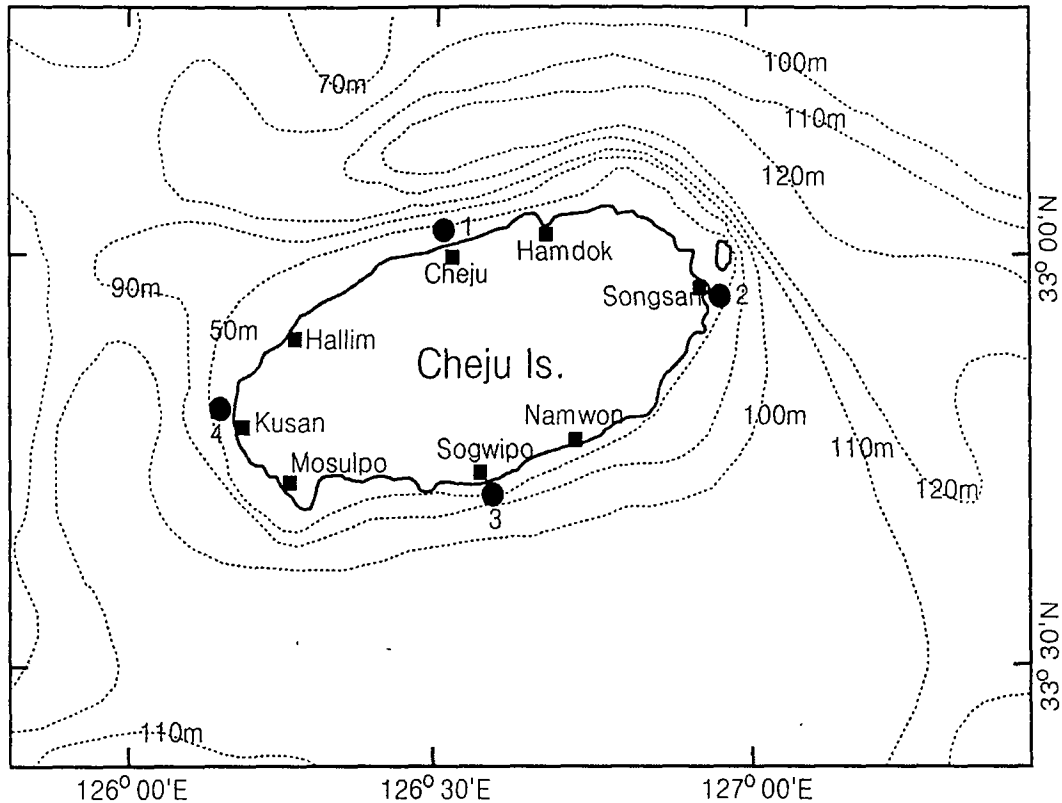


Fig. 6-2. Map showing the sampling stations.

### 1.3. 결과 및 고찰

조사기간동안 자치어는 미동정분류군을 포함해서 총 31종이 출현하였다. 월별 자치어의 출현종수는 9월과 10월에 각각 21종씩 출현하였다(Table 6-1).

9월의 경우 bongo net로 총 8종의 자치어가 채집되었다. 이 중에서 출현량이 가장 많은 종은 자리돔(*Chromis notatus*)이었고, 다음은 멸치(*Engraulis japonicus*)였다. 반면, 소형표층트롤네트에 채집된 자치어는 총 19종이었고, 이 중에서 출현량이 가장 많은 종은 샛줄멸(*Spratelloides gracilis*)이었고, 다음은 만새기(*Coryphaena hippurus*), 돛양태과(*Callionymidae*) 순이었다. Bongo net로 채집된 자치어 중 대부분은 소형표층트롤네트로 채집이 되었지만 소형표층트롤네트에서 출현량이 많은 샛줄멸, 돛양태과, 두줄베도라치(*Petroscirtes breviceps*), 만새기 등은 bongo net로는 채집되지 않았거나 매우 적은 양이 채집되었다. 뿐만 아니라 두 채집기간 자치어 우점종에 많은 차이가 있었다(Table 6-1).

10월의 경우 bongo net으로 12종의 자치어가 채집되었다. 이 중에서 출현량이 가장 많은 종은 황학치(*Aspamichthys ciconiae*)였고, 다음은 자리돔, 가막베도라치, *Laemonema nana* 순이었다. 반면, 소형표층트롤네트에 채집된 자치어는 19종이었고, 이 중에서 출현량이 가장 많은 종은 멸치였고, 다음은 푸렁통구멍(*Gnathagnus elongatus*), 가막베도라치 순이었다. Bongo net로 채집된 자치어는 대부분이 소형표

층트롤네트로 채집이 되었지만, 멸치, 푸령통구멍, 샛줄멸, *Apogon notatus* 등은 bongo net로는 채집이 되지 않았거나 매우 적은 양이 채집이 되었다. 뿐만 아니라 두 채집기간 자치어의 우점종에 많은 차이가 있었다(Table 6-1).

Table 6-1. Abundance of fish larvae captured in the study area (ind./1,000m<sup>3</sup>)

Species / Months Type of net	September		October	
	BN	SSTN	BN	SSTN
<i>Apogon lineatus</i>		0.5		
<i>Apogon notatus</i>			0.1	0.5
<i>Apogon</i> sp.	5.0	0.4		
<i>Aspamichthys ciconiae</i>		0.3	6.3	0.4
<i>Aspasma minima</i>			1.8	0.3
<i>Aulopus japonicus</i>			1.5	
<i>Bregmaceros</i> sp.			1.5	0.1
Callionymidae		1.6		
<i>Chromis notatus</i>	362.3	0.3	4.5	0.4
<i>Coryphaena hippurus</i>	5.0	2.0		0.1
<i>Cypselurus</i> sp.		0.3		
<i>Dysomma anguillare</i>		0.2		
<i>Engraulis japonicus</i>	50.7	0.5		3.5
<i>Enneapterygius etheostomus</i>	8.3	0.3	3.3	0.5
<i>Gnathagnus elongatus</i>		0.2	1.5	0.7
Gobiidae	5.0			
<i>Gymnapogon</i> sp.				0.1
<i>Helicolenus hilgendorf</i>				0.1
<i>Laemonema nana</i>			3.3	
<i>Monocentrus japonica</i>		0.2		
Myctophidae				0.3
Ophichthidae	5.0			0.1
<i>Parapercis</i> sp.				0.1
<i>Petrocistis breviceps</i>		0.7		
<i>Pictiblennius yatabei</i>		0.4		
<i>Rudarius ercodes</i>		0.2		
<i>Sebastiscus marmoratus</i>			8.0	0.1
<i>Spratelloides gracilis</i>		9.4		0.3
<i>Synganthus schlegel</i>		0.2	1.8	0.3
<i>Trichiurus lepturus</i>		0.7		0.3
Unidentified spp.	155.3	2.7	28.0	1.6
Total	596.6	21.1	61.6	9.8
Number of species	8	19	12	19

두 가지 종류의 채집기 중에서 자치어의 종수는 Fig. 6-3과 같이 봉고네트보다 소형표층트롤네트에서 많은 종이 채집되었다. 이들 두 채집기기로 채집된 자치어의 종수에 차이가 있는가를 검정하기 위하여 정점별 출현종 수(Table 6-2)를 이용한 T-검정을 실시하였다. 그 결과 Table 6-3과 같이 두 채집기기로 채집된 자치어의 종수는 5 % 유의 수준에서 차이가 있는 것으로 나타났다.

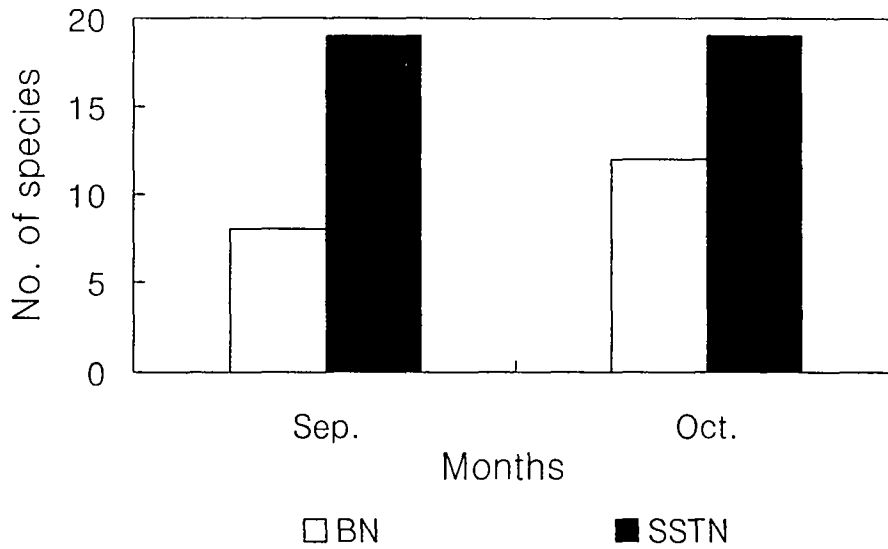


Fig. 6-3. The comparison of bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) on the number of larval fish species captured in the study area.

Table 6-2. Number of fish larvae species captured with two types of net at each stations in the study area

Month	September			October			
	1	3	4	1	2	3	4
Bongo net	3	8	2	3	4	4	5
Small surface trawl net	10	10	14	6	5	7	6

Table 6-3. The result of T-test on the difference of number of fish larvae species captured with two types of net at each station in the study area

Type of net	N	Mean	Std Dev	Std Error	Minimum	Maximum
BN	7	4.14	1.95	0.74	2	8
SSTN	7	8.29	3.20	1.21	5	14

Variances	T	Method	DF	Prob> T
Unequal	-2.9245	Satterthwaite	9.9	0.0153
		Cochran	6.0	0.0265
Equal	-2.9245		12.0	0.0127

For H0: Variances are equal, F' = 2.69    DF = (6,6)    Prob>F' = 0.2542

BN: bongo net, SSTN: small surface trawl net  
 두 채집기로 채집된 자치어의 우점종의 차이를 파악하기 위하여 출현량이 많은

멸치, 새출멸, 자리돔 3종을 대상으로 체장조성을 비교하였다.

먼저 멸치(*Engraulis japonicus*)는 bongo net와 소형표층트롤네트에서 모두 채집되었다. 이 종은 9월에 bongo net로 11마리가 채집되었고, 체장범위는 1.7~2.7 mm였다. 소형표층트롤네트로 3마리가 채집되었고, 체장범위는 2.3~2.9 mm였다. 두 채집기기로 채집된 자치어 체장 조성은 비슷한 것으로 나타났다. 10월에는 소형표층트롤네트에만 멸치 자치어가 26개체 채집되었다. 체장 범위는 11.9~20.7 mm였고, 체장빈도는 16.0~17.0 mm에서 가장 높았다(Fig. 6-4).

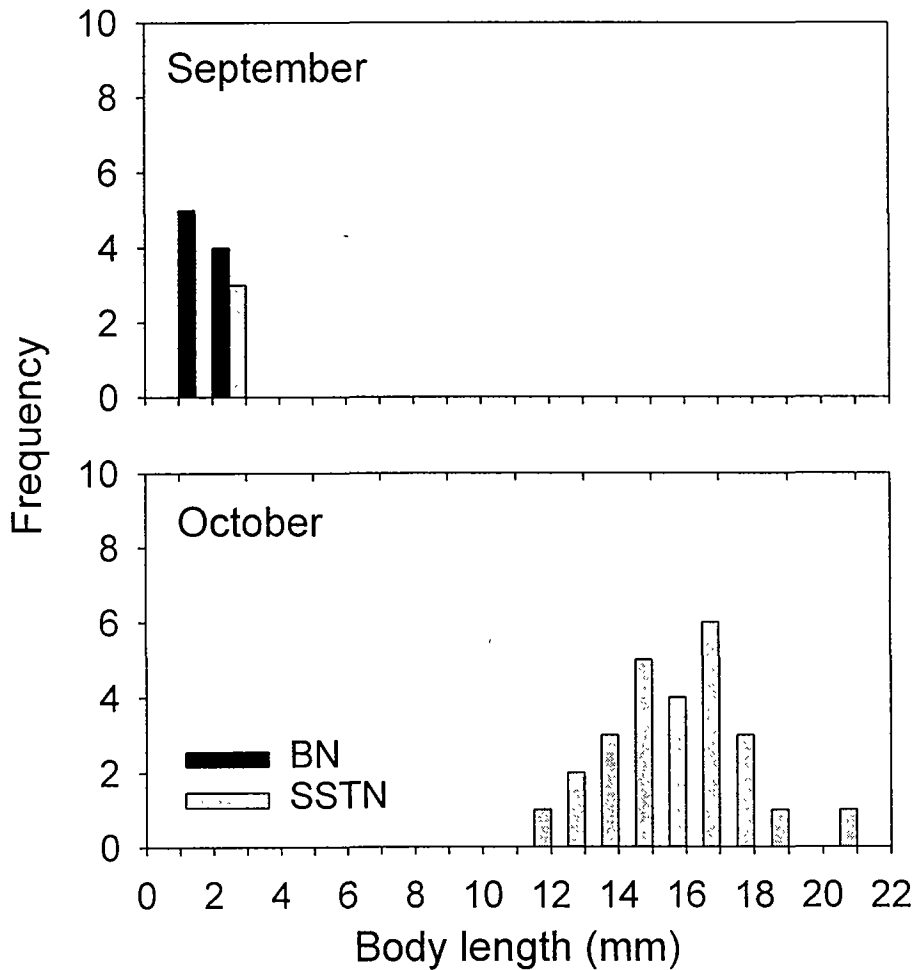


Fig. 6-4. Frequency of body length of *Engraulis japonicus* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area.

새출멸(*Spratelloides gracilis*)은 9월에 소형표층트롤네트에서만 52 개체가 채집되



었다. 이 종의 체장범위는 1.9~10.7 mm였고, 체장 빈도는 5.0~6.0 mm의 개체가 가장 높았다(Fig. 6-5).

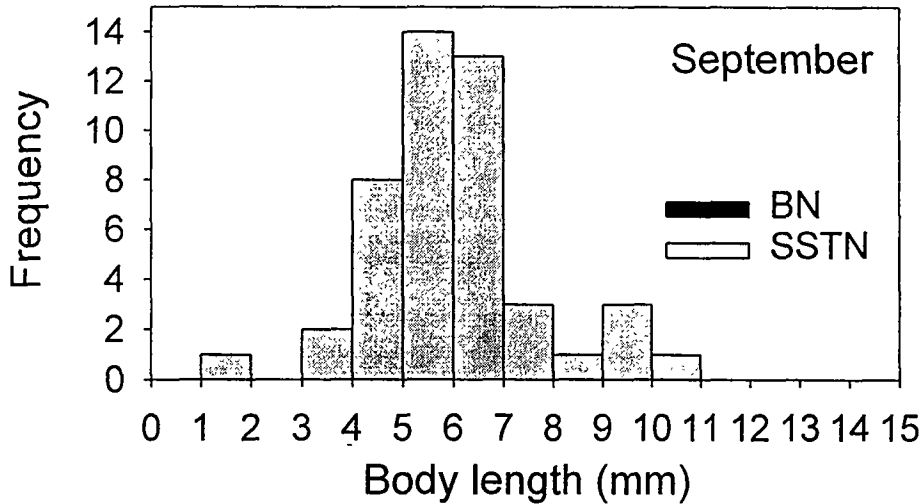


Fig. 6-5. Frequency of body length of *Spratelloides gracilis* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area.

자리돔(*Chromis notatus*)는 9월과 10월에 bongo net와 소형표층트롤네트에서 모두 채집되었다. 이 종은 9월에 bongo net로 76마리가 채집되었고, 체장범위는 1.2~2.0 mm였다. 소형표층트롤네트에서는 체장이 3.1 mm와 5.1 mm인 개체가 각각 1마리씩 채집되었다. 10월에는 bongo net으로 3마리가 채집되었고 체장범위는 1.9~8.4 mm였다. 소형표층트롤네트로 3마리가 채집되었으며 체장범위는 2.7~5.1 mm였다 (Fig. 6-6).

지금까지의 연구결과로 보아 두 채집기기로 채집된 자치어의 종 수의 차이 뿐 아니라 우점종 순위에 차이가 나타났다. 첫 번째 이유는 망목의 차이에 의한 채집기기의 선택성으로 자리돔의 경우 9월 조사에서 체장이 1.2~2.0 mm인 다수의 개체가 bongo net(망목 0.3 mm)로 다수 채집이 되었지만(Fig. 6-6) 소형표층트롤네트(망목 1.0 mm)에서는 대부분이 네트의 망목을 통과했기 때문에 거의 채집이 되지 않은 것으로 판단된다.

두 번째 이유는 자치어의 체장 증가에 따른 자치어의 유연능력 증가로 판단된다. 즉, 셋줄멸은 9월에 주로 체장이 4.0 mm 이상인 것들이 채집되었고, 멸치는 10월에 11.0 mm 이상인 개체들이 소형표층트롤네트에 채집이 되었지만 bongo net에서는 전혀 채집이 되지 않았다(Fig. 6-4, 6-5). 이러한 것은 유연능력이 큰 개체들은 망구의 면적이나 폭이 적은 bongo net에서는 채집이 잘 되지 않지만 상대적으로 망구의 면적이나 폭이 상대적으로 넓은 네트에서 비교적 채집이 잘 되는 것으로 판단된다.

마지막으로 두 가지 종류의 채집기기로 채집된 자치어의 종 수의 차이는 네트의 입구면적이나 채집시간 차이도 한 요인이 되는 것으로 판단된다.

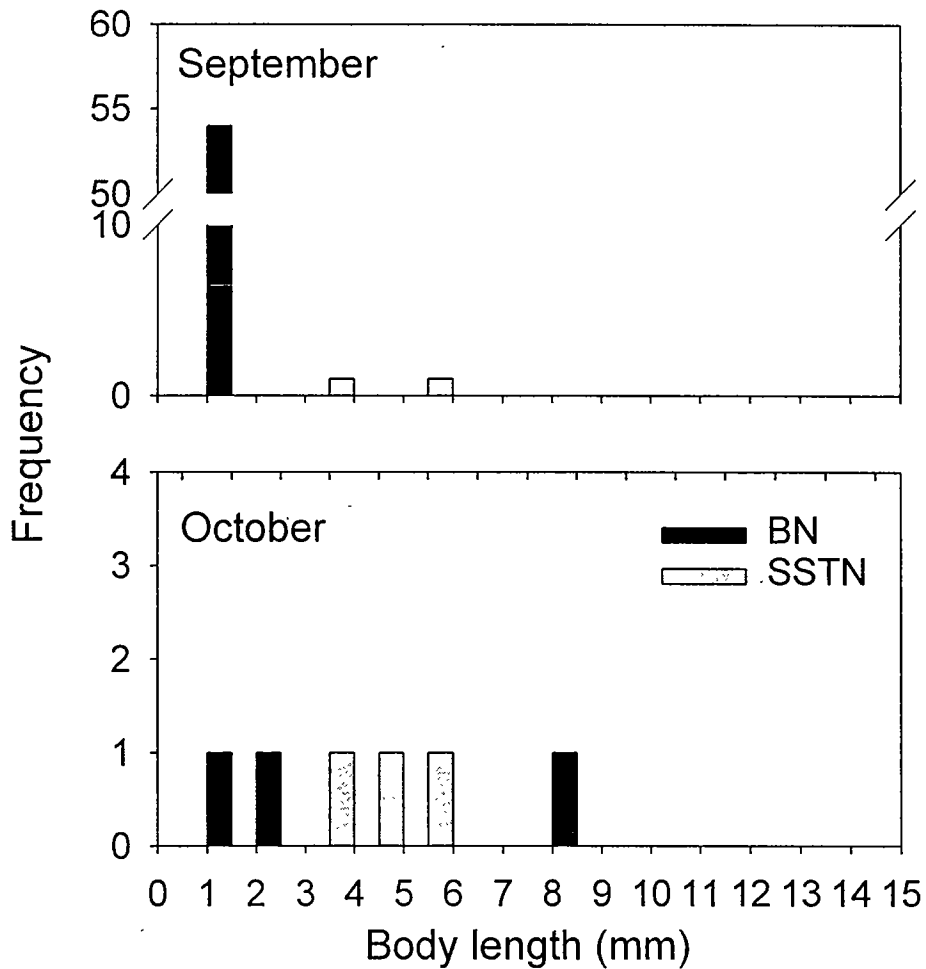


Fig. 6-6. Frequency of body length of *Chromis notatus* larvae captured with bongo net (BN) and small surface trawl net (SSTN) in the study area.

따라서 수심이 얇은 우리 나라 연안역에서 자치어의 종 조성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 망목에 의한 자치어의 선택성과 자치어의 체장 증가에 따른 유영 능력을 고려하여 bongo net 뿐 아니라 망구의 면적이나 폭이 넓은 네트가 동시에 사용되어야 할 것으로 판단된다.

## 2 *Laemonema nana* Taki 자치어의 지리적 분포와 형태발달에 관한 연구

### 2.1. 서론

대구목(Gdiformes) 수염대구과(Moridae) 어류는 전 세계적으로 18속에 약 98 종이 알려져 있다(Nelson, 1994). 수염대구과 어류의 하나인 *Laemonema* 속 어류는 대부분이 수심 500m 이상의 심해에 서식하는 어류로 오츠크해, 큐우슈와 팔라오 사이의 해령 등지에 분포하는 것으로 알려져 있지만 *Laemonema nana*는 수심 50m 정도의 사니질 천해에 분포하는 저어류이다(Masuda *et al.*, 1984; Nakabo, 1993). *L. nana* 자치어는 제주도 주변해역(유, 1991), 대한해협(Kim, 1984; 이, 1996, 김, 1999), 동해(冲山宗熊, 1981; Kim, 1984; 변 등, 1997) 등지에서 출현한다. *L. nana*의 자치어 형태에 관한 단편적인 보고(冲山宗熊, 1981)는 있지만 체형변화가 심한 자치어기에는 정확한 종의 동정을 위해 다양한 크기의 개체에 관한 정보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 *L. nana*의 지리적인 분포와 자치어기에 성장에 따른 체형변화와 흑색소포의 분포경향을 중심으로 연구하였다.

### 2.2. 재료 및 방법

조사는 1998년 5월, 8월, 11월, 1999년 5월, 9월, 10월, 12월에 제주도 주변해역 8개 조사 정점에서 실시되었다. 시료 채집은 봉고네트를 이용하였다. 단, 1999년 9월, 10월, 12월에 제주항, 성산, 서귀포, 차귀도의 4개 정점에서는 봉고네트 이외에도 소형표층트롤네트를 이용하여 시료를 수집하였다(Fig. 6-7). 봉고네트는 표층에서 7분간, 소형표층트롤네트는 표층에서 20분간 예망되었다. 봉고네트는 망구직경이 60cm, 망목 0.3mm이고 소형표층트롤네트(Fig. 6-1)는 네트 입구폭이 250cm, 망목 1.0mm이다. 채집된 표본은 현장에서 해수중성포르말린(최종 농도 7%)으로 고정하였다. 고정된 시료는 실험실로 운반하여 해부현미경으로 자치어를 골라내어 동정하였다. 자치어 동정은 Masuda *et al.*(1984), Okiyama(1988), Nakabo(1993)를 참고하였다. 동정된 자치어 체장(Body length, BL)과 항문전 체장(Pre-anal length, PAL)은 현미경에 부착된 ocular micrometer를 이용하여 0.1 mm 단위까지 측정하였다. 자치어 사진은 시료를 Alcian Blue로 염색한 후 해부현미경에 부착된 디지털카메라를 이용하여 촬영하였다.

*Laemonema nana* 자치어의 지리적인 분포 자료는 동해남서부(한국해양연구소, 1995, 1997, 1998), 대한해협(이, 1996; 김, 1999), 남해를 포함한 제주도 주변해역(유, 1991) 등의 광역 조사자료를 이용하였다.

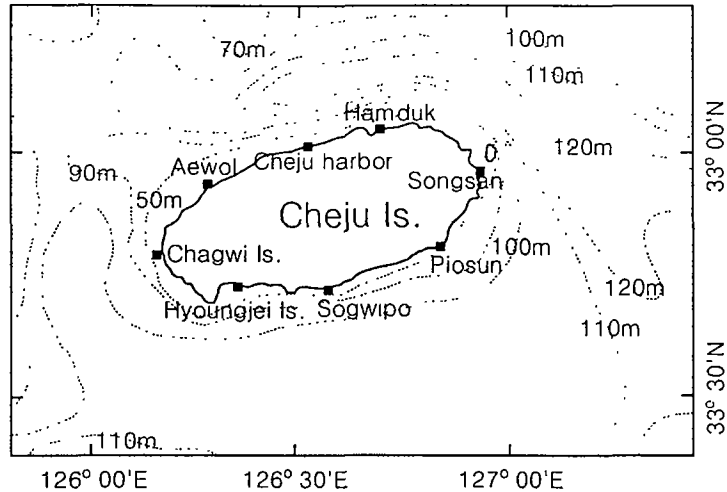


Fig. 6-7. Map showing the sampling stations.

### 2.3. 결과 및 고찰

조사기간동안 채집된 *Laemonema nana* 자치어는 총 28개체이며, 체장 범위는 1.4~10.5mm였다. 체장빈도는 Fig. 6-8와 같이 체장이 3~4mm와 6~7mm인 개체가 가장 많이 채집되었다. 각 조사 정점에서 채집된 자치어의 개체수와 체장을 보면 1998년 11월 성산에서 2.5mm 1개체, 1999년 10월에 표선에서 3.1mm 1개체, 형제섬에서 1.8mm 1개체, 차귀도에서 1.9mm 1개체가 채집되었다. 1999년 12월 서귀포 10.5mm 1개체, 차귀도에서 1.4mm 1개체, 성산에서 2.9~9.4mm 22개체였다.

체장(BL)에 대한 항문전장(PAL)의 비율은 Fig. 6-9과 같이 0.36~0.48이었다. 그 비율은 성장함에 따라 점점 증가하여 체장 4~5mm의 개체에서 가장 큰 값을 보였다. 그러나 미부봉상골이 굽어지기 시작하는 6mm 정도의 개체부터는 체장이 증가함에 따라 그 비율은 점점 감소하였다.

지느러미는 체장 4.0mm 이하의 개체는 모든 지느러미가 막지느러미 상태이다. 체장 4.5mm에서부터 등지느러미와 뒷지느러미에 여린줄기가 나타나기 시작하며 체장 6.8mm에서는 모든 지느러미의 여린줄기수가 정수(D 5-48; A 48; P<sub>1</sub> 20; P<sub>2</sub> 2)에 달한다(Fig. 6-8).

흑색소포는 대부분이 커다란 수지상의 모양으로 전자어기에는 체장에 대한 비율이 매우 크지만 성장함에 따라 그 크기는 점점 감소한다. 각 부위별 흑색소포의 특징은 다음과 같다.

먼저 두정부를 보면 체장이 1.8mm와 2.5mm의 개체는 커다란 수지상 흑색소포가 2개 있다. 체장 4.0mm에서부터 두 개의 흑색소포 이외에도 코 뒤쪽 이마에 흑색소

포가 나타나기 시작하며 체장이 점점 증가할수록 그 수가 늘어난다(Fig. 6-10).

아가미 뚜껑에는 체장이 1.8 mm와 2.5mm의 개체는 흑색소포가 없으나 체장이 4.0 mm에서부터 커다란 수지상 흑색소포 1개 이외에도 작은 흑색소포가 나타난다. 체장이 증가함에 따라 그 수가 점점 증가하여 체장 10.0mm에서는 9개 정도 되지만 흑색소포의 크기는 서로 비슷하여진다(Fig. 6-10).

가슴지느러미의 아래쪽에 있는 하나의 수지상의 흑색소포는 체장인 1.8mm와 2.5mm에서는 가슴지느러미의 기부를 전부 덮지만 성장함에 따라 그 크기는 상대적으로 작아진다(Fig. 6-10).

복강 위쪽의 흑색소포는 수지상으로 체장이 1.8mm에서는 질게 분포하지만 체장이 증가함에 따라 점점 피부에 파묻혀 점점 열어진다. 복강의 아래쪽 흑색소포는 체장 1.8mm에서는 커다란 나무뿌리 모양이지만 성장함에 따라 점점 크기가 작아지고 그 수는 4~5개 정도가 된다(Fig. 6-10).

꼬리의 흑색소포를 보면 체장 1.8mm에는 항문 뒤쪽의 지느러미 기부와 몸통 중앙에 각각 1개의 커다란 수지상 흑색소포가 있다. 뒷지느러미 기부 있는 흑색소포는 체장이 증가함에 따라 체내에 파묻히지만 체장 4.5mm에서부터는 그 수가 증가하며 꼬리자루쪽으로 체장의  $\frac{2}{3}$  정도까지 확산된다. 꼬리 중앙에 있는 흑색소포는 체장 1.8mm에서는 등지느러미와 뒷지느러미의 기부를 모두 덮지만 체장이 4.0mm 이상의 개체는 중앙부분만을 덮는다. 체장 4.5mm에서는 흑색소포가 체내로 파묻힘과 동시에 그 길이가 점점 길어지며 그 수도 점점 증가한다. 체장 9.0mm 이상에서는 꼬리자루 부근의 정중선을 따라 흑색소포가 나타난다(Fig. 6-10).

종의 동정은 4mm와 10mm 전후의 개체는 몸의 형태, 흑색소포의 분포 형태(두정부, 아가미, 아가미뚜껑, 가슴지느러미의 아래부분, 꼬리)가 Okiyama(1988)가 보고한 *Laemonema nana*의 결과와 일치하였고, 10mm 전후의 개체는 체형과 흑색소포의 분포 경향 이외에도 등지느러미, 뒷지느러미, 배지느러미, 가슴지느러미 등의 여린줄기수가 성어의 자료(Masuda et al. 1984; Nakabo, 1993)의 결과와 일치하였기 때문에 *Laemonema nana*로 분류하였다. 그리고 4mm 이하의 개체와 4~10mm 사이의 개체는 성장단계에 따른 체형과 흑색소포의 모양과 분포 경향의 점진적인 변화(Fig. 6-10)를 이용하여 동정하였다.

*Laemonema nana* 자치어는 제주도 연안을 포함한 주변해역, 대한해협, 동해남서부해역까지 광범위하게 분포하였다. 출현시기는 2월, 4월, 5월, 8월, 10~12월로 해역에 따라 차이는 있지만 출현 빈도는 제주도 주변해역이 대한해협과 동해남서부해역보다 높았다(Fig. 6-11). 대마난류수의 영향을 지속적으로 받는 대한해협을 포함한 동해의 일본연근해역 가을철 조사에서는 가을철에 지속적으로 출현하는 것으로 보고되었다(Kim, 1984). 본 조사해역을 포함한 제주도 주변해역에서 *L. nana*는 10~2월에 출현하였고, 본 조사에서 이 종은 체장이 2mm의 전후의 개체가 채집되는 것으로 보아 제주도 주변해역에서 여름철 출현은 불명확하지만 주 서식 수심이 50m 정도의 낮은 수심에 사는 저서어류 (Nakabo, 1993)인 것을 고려한다면 본 종은 제주도 주변해역에서 가을과 겨울에 걸쳐 비교적 장기간에 걸쳐 산란하는 것으로 추정된다.

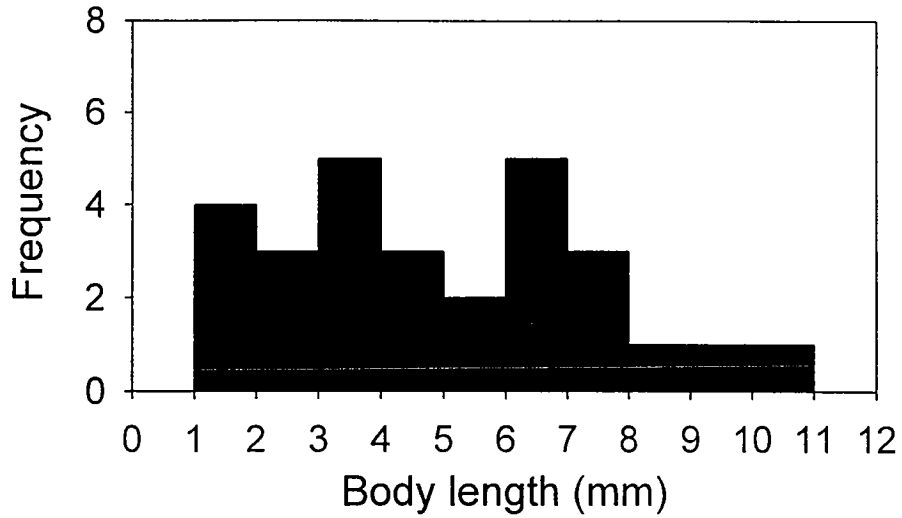


Fig. 6-8. Frequency of body length of *Laemonema nana* larvae captured in the coastal area of Cheju Island.

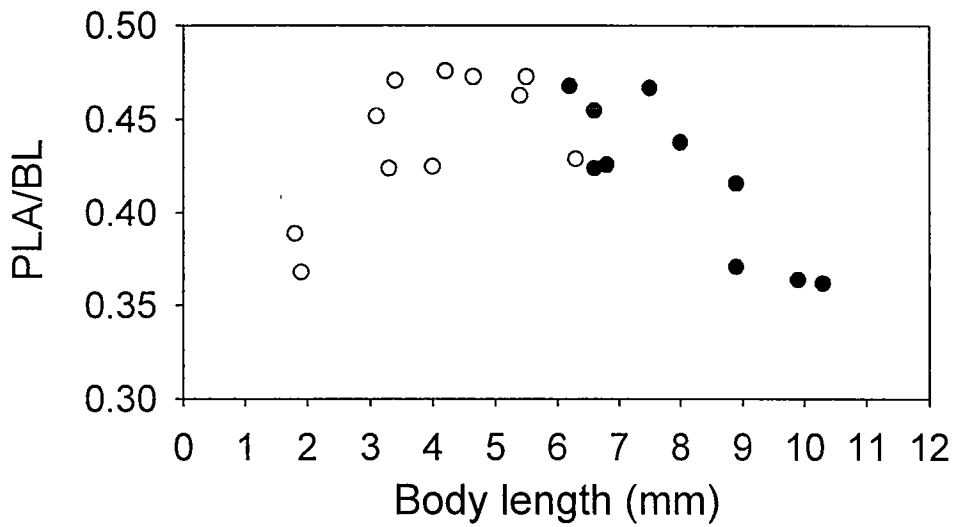


Fig. 6-9. The ratio between pre-anal length (PAL) and body length (BL) of *Laemonema nana* larvae captured in the coastal area of Cheju Island. Open circles (○) are before the bending stage of urostyle. Dark circles (●) are the bending stage of urostyle.

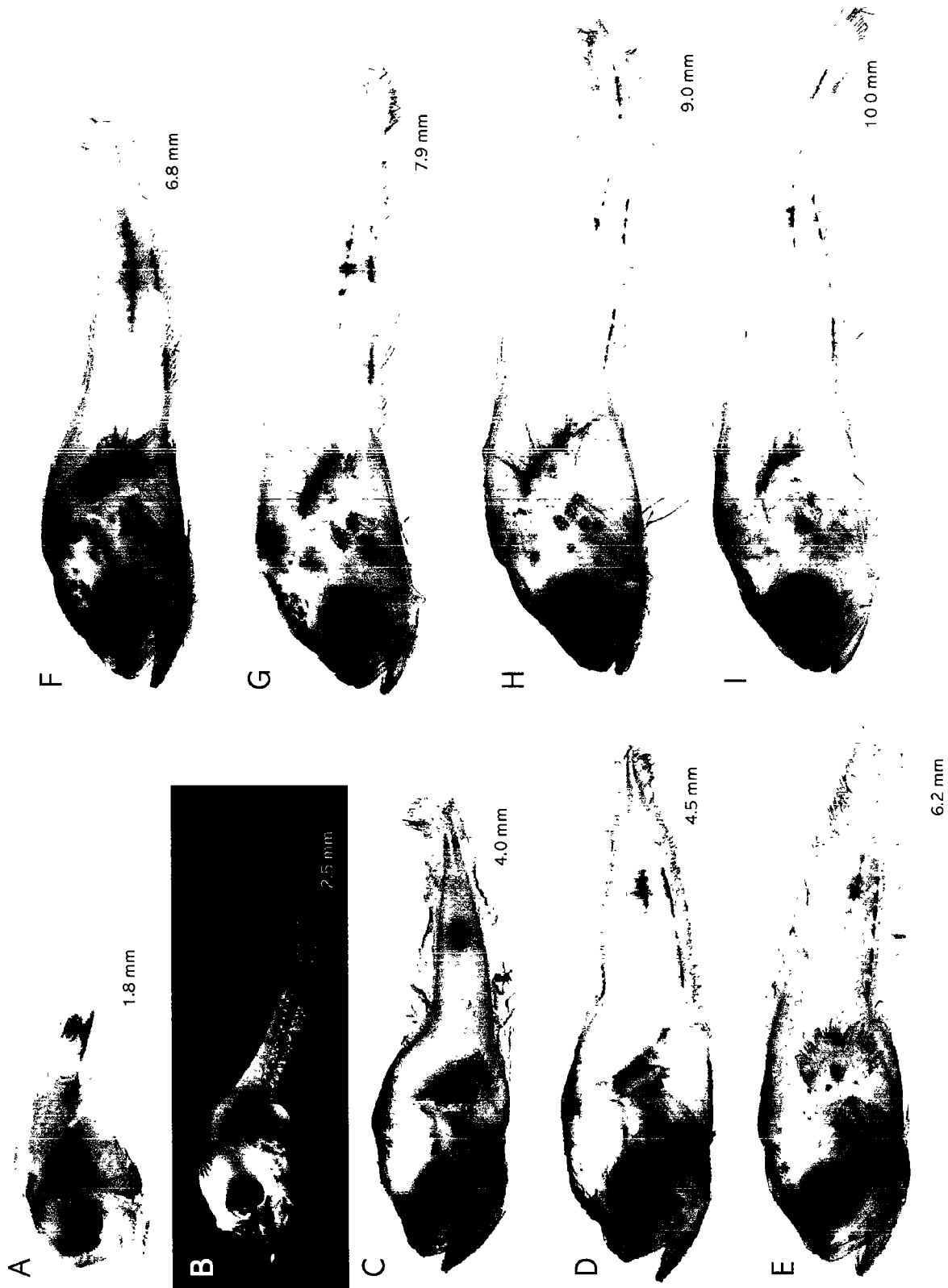
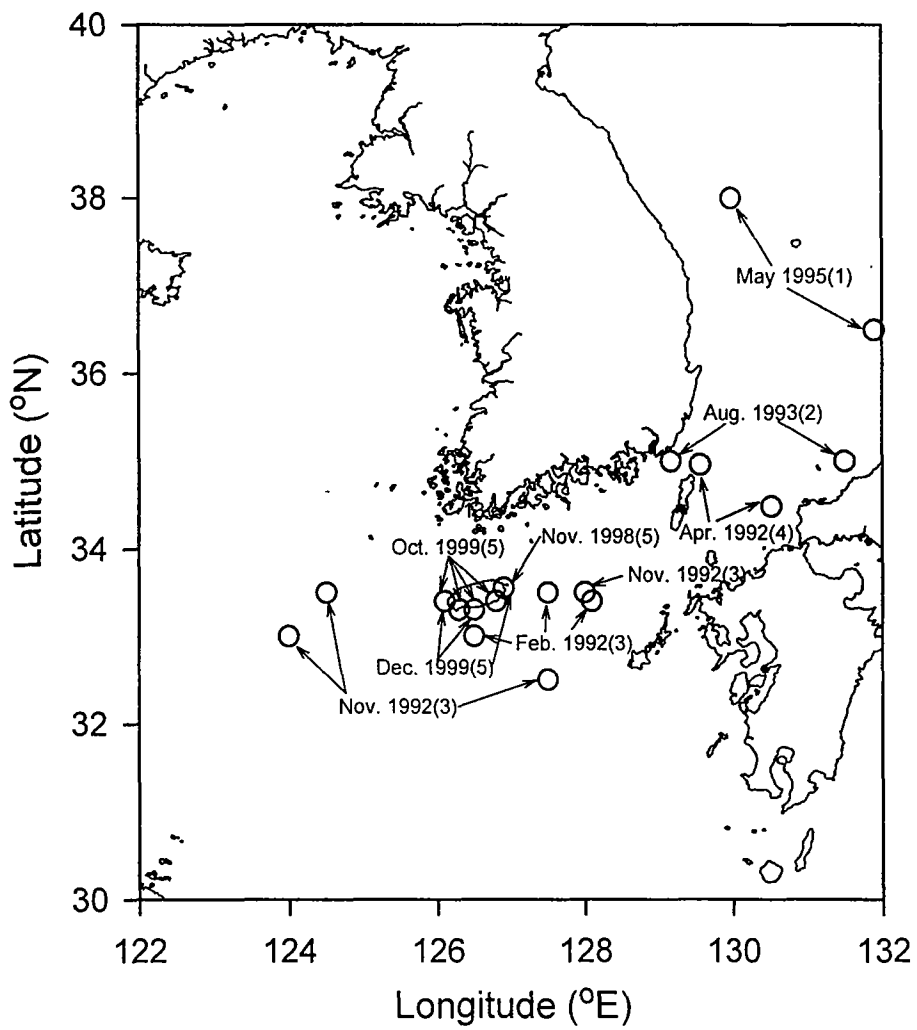


Fig. 6-10. External features of larvae of *Laemonema nana* Taki.



1: KORDI, 1997; 2: Kim, 1999; 3: Yoo, 1991; 4: Lee, 1996; 5: This study

Fig. 6-11. Geographical distribution of *Laemonema nana* around sea of Korea



## 제 4 장

# 연구개발 목표 달성도 및 기여도



## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 기여도

본 연구는 10년간의 장기과제로서 제주해류변동성을 포함하는 남해 대륙붕과 한반도간의 물질이동기구를 규명하고 저서생물화학특성 및 거대물질을 규명개발하여 지속가능한 남해 이용과 개발을 위한 환경보전 종합시스템을 구축하는 것을 최종목표로 하였다. 주요 분야별 연구목표는 다음과 같다. (1)제주해류 및 남해 해수순환변동연구, (2) 혐기성 내만환경 발달과정규명연구, (3) 대륙붕역 생지화학 플럭스 결정 주요과정연구, (4) 저서생물 생화학 특성규명, (5) 세립퇴적물이동, (6) (6)치차어 군집구조 및 자치어 시료 방법의 개선에 관한 연구이다.

당해년도 (1999년)는 1단계 최종년도 (제 3차년도)로서 조사연구가 수행되었고 분야별 주요 연구개발 목표의 달성도 및 기여도는 다음과 같다.

### 연구개발목표의 달성도

분 야	개발 목표 및 내용	달성도	기여도
○ 남해 자료 수집	기존 해양관측자료 수집	100	-남해 연구에 활용
○ 해양조사	1999년 2, 5, 8, 10 월 (4회실시)	100	-미국 스크립스연구소 및 대학과의 조사선 공동활용을 통해 협동연구 발판을 마련하고 연구비 절감에 기여
○ 남해백서 발간 (준비완료)	대학, 산업계, 연구소 참여 (총 27편 논문 발표)	100	-국내 남해연구 활성화
○ 해류 및 해수순환	- 1999년 2월과 8월 제주해협 ADCP, CTD 관측 - 1999년 5월, 10월 한·미공동 조사 실시 - 장기 해류관측 실시 (3월~12월) - 조석강제력을 포함한 여름철 3차원 해수순환 재현	100	- 제주해협내 해류분포와 제주해류 수송량 정량적 규명 - 제주해협과 대한해협에서의 전 층에 걸친 장기 해류관측 최초 달성 - 해황과 물질수송 예측을 위한 기술력 확보

분야	개발 목표 및 내용	달성도	기여도
○ 혐기성 내만환경	- 혐기성 환경에서의 영양염 및 산소수지 연구 - 내만의 중금속원소 거동 연구	100	-다른 내만해역의 물질수지 연구에 기여 -폐쇄성 내만해역의 용존 산소 수지 및 혐기성 환경 발생 예측에 기여
○ 대륙붕 물질수지 및 생지화학적 순환	-계절별 친생물원소 및 유기물 분포특성 -퇴적물의 해저 축적율과 퇴적 역학 -계절별 일차생산력 -대기유입 화학물질 특성 -남해 해수기원과 연안수기여울 -제주해협 통과 화학물질플럭스	100	-대기기원 오염물질 수지 예측 -수괴추적을 위한 기반구축 -기후변화 해양영향 연구기반구축 -남해환경관리정책 입안을 위한 기초자료 제공 -수산자원 관리의 기초자료 -생지화학과정 규명을 위한 기초자료 제공 -수산자원의 합리적 이용
생화학특성	-기질분해 세균 조사 -해수중 부유물질의 지방 조사 -해수중 용존 지방 조사 -저서 해조류 유용 지방산 조사	100	-유용 생물 자원 개발 -해양 변화 조사에 활용 -해양 물질이동 자료 -유용해조류 개발 자료
세립질퇴적물 이동	-기존자료 수집, 정리 -부유물질의 수리역학적 자료 획득	100	-새로운 수리역학적 연구 방법 도입 -현재까지 연구된 남해 퇴적환경 요약
치치어 군집	-치치어 군집 조사, -난류성 종의 지리분포 조사 -새로운 채집기기의 개발	100	-치치어 군집 조사 -새로운 치치어 채집기기의 개발 -난류성 종의 지리분포 및 형태발달 연구 -새로운 치치어 채집기기의 특성 연구

## 제 5 장

# 연구개발결과의 활용계획



## 제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

### 제 1 절 추가연구의 필요성

남해는 생물의 생산력이 높고 유기물의 유입량 및 저장량이 많아 재래어업, 양식어업, 해양 관광 및 레저산업이 밀집되어 있고, 또한 풍부한 담수자원과 안정적인 항만입지로 산업기지가 집중되어 있는 우리나라의 해양자원의 보고이다. 남해는 지리적 위치상 중국 대륙의 토지이용, 비료사용, 폐기물의 해양처분, 하천담 축조로 인한 하천유출수의 특성변화를 극명하게 받는 곳이며 이러한 수질변화는 동해로까지 전달해 주는 중간 매체의 역할을 하므로 동북아주변 해양의 수질해황을 결정하는 주요해역이다. 또한 인위적인 오염원에 노출된 취약한 해역이다. 남해는 연안주변에 대규모 공업단지 및 인구밀집지역이 위치하고 있어 대기 및 하천을 통한 잠재적인 오염원에 노출되어 있다. 특히 최근 장강 창장 (양자강) 수자원 보호국의 조사에 의하면 양자강 주변의 50개 대도시와 16만개의 공장에서 배출되는 생활하수 및 공장폐수중 83%가 정화처리 없이 배출되어 상당량의 오염물질이 해양으로 배출되어지고 있고, 이러한 폐수 배출량은 매년 2~3% 씩 증가하고 있다고 보고되어져 있다. 따라서 양자강의 영향을 많이 받는 남해에서의 이들의 시공간적인 변화가 남해환경에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 자세히 검토되어야 할 것이다. 대륙-해양 교환과정을 이해하는데 매우 중요한 곳으로서 향후 내만해역에서 일어나는 각종 해양과정의 이해를 위해 더욱 심도 있는 연구와 한반도 연안역과 외해역간의 물질교환 특성에 대한 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

남해의 해양을 지속성장 가능한 환경으로 보전 이용하기 위하여서는 남해를 구성하는 생지화학 환경에 관한 정밀 지식이 필요하며 이러한 과학적 지식에 근거한 이용과 보전방안이 강구되어야 한다. 이를 위하여서는 남해 유기물의 생산과 분해, 저장기작과 이를 지배하는 해양생지화학과정에 영향을 미치는 물리과정 (제주해류, 대마난류)과의 상호 연관성등이 집중 조사연구되어야 한다. 이러한 자연적 현상을 근간으로 하여 이를 교란하는 인위적 과정 (해양이용과 오염)을 평가하는 지식기반의 구축은 매우 시급하다.

남해 연안 (열.염전선 이북)의 육성기성물질의 다량유입과 높은 박테리아활동등은 heterotroph화 또는 혐기성으로 환경이 변하고 있음으로 이의 원인과 향후 변화를 예측하는 기본 기구의 규명이 추가적으로 연구되어야 한다.

남해 대륙붕해역의 탄소, 질소, 인, 규소의 정밀 화학 존재 형태와 운반물질의 생성과 변천에 관한 정밀 연구가 분자수준의 조사와 병행하여 필요하다.

비교적 교란이 덜된 연대가 수립된 해저퇴적물 기둥에서의 화학물질의 시간에 따른 조성변화를 구축하여 향후 백년이내의 환경변화를 예측하는 노력이 필요하다. 이는 육상인간활동과 이에 따른 해양의 반응을 조사연구하는 기술을 개발하는 것으로 지구환경변화연구의 주요 사업중의 하나이다.

남해 대륙붕서식 생물중 1차년도의 해산갯지렁이와 목산호의 유용화학물질의 다량함유 발견에 이어 2차년도에서도 산업물질을 다량 함유하고 있는2개 해조류를 또

한 양식할수 있는 생물이 발견된바 향후 서식 저서 생물을 집중적으로 조사하여 산업물질 생산 후보 생물을 발굴하여야 한다.

또한 본 연구에서는 현재까지 잘 알려져 있지 않은 제주해협외의 제주해류의 공간적 구조와 시간적 변동성을 파악하고, 남해의 3차원 해수순환을 재현하는 수치모델의 개발에 주된 초점이 맞추어졌다. 연구사업을 통해 제주해협 내 해류분포와 해수 수송량이 보다 명확히 밝혀졌으며, 제주해협에서 최초로 9개월에 걸친 장기 해류관측이 이루어졌다. 향후 장기 해류자료의 보다 상세한 분석과 제주해협 양안의 해수면 차이와 해류의 상관관계가 보다 상세히 분석되어야 할 것이다. 해수면 차이와 해류의 상관관계가 분석되면 남해의 3차원 순환과 물질수송을 모니터링하고 예측하는 수치모델의 개선이 이루어 질 수 있다. 본 사업을 통해 개발된 3차원 수치모델은 그 결과가 남해에서 관측된 많은 현상을 잘 설명하고 있으므로 예측을 위한 도구로 활용되어 질 수 있다. 남해의 해수순환은 해수 수송량을 포함한 제주해류에 의해 주로 영향을 받기 때문에 국가 조위 관측망을 통해 정기적으로 생산되는 해수면 자료가 모델의 경계면을 통한 플럭스로 환산되어 모델에 동화 될 경우 남해의 해류분포와 물질수송을 예측하는데 크게 기여할 것이다. 수치모델 결과에 의하면 남해 연안의 많은 내만의 순환과 열·염교환은 남해의 전체 순환에 영향을 받는 것으로 나타났다. 현재 개발된 모델의 공간적인 해상도는 3 km로서 환경적, 그리고 경제적으로 중요한 많은 내만의 순환 및 내만과 외해역의 상호작용을 상세히 파악하기에는 해상도가 거칠다. 향후 모델 해상도의 개선과 함께 내만과 외해역의 상호작용을 규명하는 관측에 노력이 기울여져야 할 것이다.

겨울철에 황해에서 유입되는 부유물질의 존재에 대해 지금까지 뚜렷한 증거없이 추측만을 해왔을 뿐이다. 이러한 유입의 자세한 경로와 퇴적지를 밝히는 것은 남해 연안의 퇴적환경 뿐만 아니라 생물, 화학적 환경을 이해하는 데에도 필수적이다. 따라서 중요한 지점들에서 퇴적역학적으로 지속적인 부유물질 거동조사를 수행함과 동시에 광역적인 해수이동과 부유물질 분포 양상을 인공위성과 종합해류관측을 통해 병행되어야 할 것이다.

## 제 2 절 타 연구에의 응용 및 연구결과 활용

### 1. 타연구에의 응용

본 연구에서 개발된 기술들은 여러 인접분야에 많은 기술파급효과를 가져올수 있는데 특히 황해 및 동해의 환경변화 중 대륙-해양 상호작용역물과정 연구에 즉, 인구, 비료, 댐 건설 등 인위적인 요소와 지구 온난화로 인한 강수벨트의 북상에 의한 강수량 증가 등이 해양영향분석 조사연구 사업에 직접적으로 활용될 것이다. 다양한 유입원에 의해 연안해역으로 유입되는 많은 물질들이 어떠한 과정을



거쳐 연안해역에 잔류, 침강하며 외해역에 어느정도 영향을 줄 것인가에 대한 연구는 다른 지역해 연구에도 그대로 응용될 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 획득된 남해 개방경계인 제주해협과 대한해협에서의 해수특성 자료와 해류분포 자료는 남해의 3차원 순환을 재현하고 예측하기 위한 해양순환모델의 가장 중요한 입력자료이며 확보된 자료 및 순환모델 결과는 남해의 수질모델이나 생태계 모델의 입력자료로 활용될 수 있다. 남해의 주요 유입구인 제주해협을 통해 황해와 동중국해로부터 유입되는 성질이 다른 해수의 정량적인 수송을 파악함으로써 유입조건의 변화에 의한 남해의 해황 변동 연구에 활용되고, 남해의 개방경계에서의 획득된 자료의 분석을 통해 남해와 인접해와의 해수와 물질교환 과정 연구에 활용될 것이다. 남해의 주요 해류인 제주해류와 대마난류의 형성 기작을 역학적으로 규명하기 위한 기반자료로 제공되며, 영구 조위관측망을 이용한 남해 해수 수송의 모니터링을 위한 자료로 활용될 수 있다.

협기성내만환경의 발생원인에 대한 연구는 적조 및 부영양화 문제가 심각한 다른 해역에서 화학물질의 순환 및 그 영향을 예측하는데 활용될 것이다.

친생물 원소와 유기물 분포 및 일차생산력에 대한 연구 결과는 남해의 환경진단 및 합리적인 수산자원 관리의 기초적인 과학적 자료로서 제공되어질 수 있다. 특히 방사성 동위원소 (라듐 동위체)를 이용한 수괴 파악 및 기원 규명은 최근 국제적인 추세로서 이 분야에 대한 개발은 남해 해양과정 연구에 있어 크게 기여할 것으로 판단된다. 또한 남해에서의 물질수송 과정 연구는 동중국해 및 황해등에서 유입되는 오염물질 유입 변화가 남해 환경에 미치는 영향을 체계적으로 예측할 수 있어 남해 환경관리 및 개발 정책 결정에 있어 과학적인 근거자료로서 활용되어질 수 있다.

또한 분지규모의 해양생지화학 연구는 지구환경변화 연구에 크게 기여할 수 있다. 특히 남해는 황해와 동중국해의 환경변화를 동해에 전달하는 길목에 있으며 또한 대륙의 풍화산물이 동해로 이동되는 주요 경로이다. 따라서 동해의 환경연구에 필수적인 정보를 제공하게 된다. 제주해류의 화학물질 수송량은 동해의 탄소, 산소, 화학물질의 침강플럭스에 큰 영향을 미친다. 특히 탄소 고정량, 입자성 탄소, 질소의 수중 및 해저퇴적물에서의 분포를 종합적으로 해석하여 수지 모델을 구축하는 기술은 해양환경산업에 응용이 가능하다.

해양환경학적으로나 경제적으로 매우 중요한 남해 대륙붕 해역의 지방산과 hydrocarbon의 조성과 함량의 조사를 통한 data의 구축은 향후 동일 정점들에서 동일한 조사를 monitoring의 개념으로 수행하거나 할 때 해양환경내 유기물의 변천과 순환관계를 이해하는데 유용한 지표로 사용될 수 있으며 남해에서 빈번히 일어나고 있는 대규모 oil spill 등의 사고시 유출된 유기물들이 당 해역에 어느 정도까지 영향을 미치고 있는지를 확인하는 reference로 활용될 수 있다. 또한 분리된 200 여 균주의 heterotrophic bacteria는 단백질 및 지방 성분의 분해자로서의 역할이 중요시될 뿐 아니라 이들이 생산하는 효소체계를 이용한 생물공학적인 방법론의 개발에 기여할 것으로 생각된다. 특히 지질 분해효소(lipase)의 경우 이미 산업적인 lipid transformation이나 지방산의 제조에 사용되고 있어 이들 중 고역가 균주의 경우 매우 유용한 생물 산업 소재로 활용될 수 있다. Arachidonic acid는 인체내 필수 지

방산의 하나로서 성장기의 아동에게 필수적인데 현재의 생산은 전적으로 달걀 노른자의 기름에서 추출하여 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서 확인된 바와 같이 높은 arachidonic acid (총 지방산의 30-40 %)를 갖는 해조류를 원료로 이용할 경우 새로운 arachidonic acid의 원료로 개발될 수 있다고 여겨진다.

부유물질의 이동경로와 퇴적지에 대한 전반적인 이해는 곧바로 오염물질의 기원과 경로를 제대로 추적할 수 있는 발판이 된다. 또한 주 부유물질의 흐름을 파악함으로써 적조발생지와 이동 예측등이 크게 개선될 수 있을 것이다.

자치어 연구에서 얻어진 결과는 교육자료, 생물다양성에 관한 연구의 기본자료, 생태계 조사의 기초연구자료 그리고 새로운 채집기기의 개발(특히 출원 준비 중)은 수심이 얇은 연안역에서 효율적인 자치어 채집에 이용될 것이다. 특히, 국내 미기록 어종인 *Laemonema nana* 자치어의 외부형태와 지리적인 분포(논문 투고 준비 중)는 종 동정과 생물지리에 이용될 것이다.

## 2. 연구 결과

1단계 (3년) 기간중 본 연구과제를 통해 2명의 석사를 배출하였다.

국제공동연구의 일환으로 미국 스크립스연구소 (Roger Revelle호)에 동승하여 대한해협에서 미국 연구팀과 해류 및 친생물원소에 대한 조사를 실시하여 얻은 자료를 공동 활용할 계획이다.

3년간 본 과제를 통해 획득된 결과들은 국·내외 유명 학회지 및 학회에서 총 61편이 게재, 발표 및 게재예정이다. 또한 1998년 한국해양연구소 주관으로 국내 대학 및 타연구소를 총 망라한 남해관련 워크샵을 개최하였고, 연구결과들을 정리한 남해백서 출판(남해대륙붕 해양환경과 물질이동)이 진행중이다. 그리고 2000년 5월 대학 공동해양과학연구소와 공동 주관으로 연구사업성과를 확산과 향후 과제도출을 위한 워크샵을 개최할 예정이다.

- 학·연 관계 (석사 2명 배출) -

(1) 진용현, 1999년 석사학위 취득, 한양대 지구해양학과

논문제목: 광양만의 해수와 퇴적물중 미량금속의 거동

(2) 김도연, 1999년 석사학위 취득, 인하대 해양학과

논문제목: 3차원 수치모델을 이용한 남해의 여름철 해수순환 연구

- 국제 공동 연구 -

미국 스크립스 연구소와 공동으로 남해 조사 및 연구 결과 활용

- 논문 발표 (1단계 3년간) -

(1) 남해해수순환에 관한 수치실험 연구, 1997. '97 추계한국해양학회

(2) Barotropic circulation of the South Sea driven by tide, wind, and offshore forcing. The 1st International Symposium on Phytoplankton Blooms,

- (3) "해황예측시스템 (남해유출유 예측시스템)" - '97 해양수산EXPO 출품, 서울 여의도 중기업전시장
- (4) On the seasonal variability of the Tsushima Current. Proceedings of the 10th PAMS/JECSS Workshop, Taiwan, 1997. 6-6-6-8.
- (5) Diagnostic modeling of the Yellow and East China Seas. Proceedings of the CREAMS'97 International Symposium, 145-148.
- (6) The larval fish community structure in the southern part of the east Korean sea, in summer. 1997. 5 th Indo-Pacific Fish Conference at Nouméa New Caledonia.
- (7) Shipboard results over the Yellow and East (Japan) Sea and East China Seas. IOC/WESTPAC-Sida/SAREC Workshop on atmospheric inputs of pollutants to the Marine Environment. Qingdao, China, June, 1998.
- (9) Inflow of warm waters into the Yellow Sea observed by coastal zone color scanner. In: Remote Sensing of the Pacific Ocean by Satellites, edited by R.A. Brown, Earth Ocean & Space, Australia, 1998. 251-254.
- (10) On the distribution and persistence of organophosphorus pesticides in coastal areas of Korea. 1998. Estuaries (Submitted)
- (11) 제주도 주변 해역의 치자어 군집에 관한 연구-가을철, 한국해양학회지 바다 1998, May, 3(2): 71-79.
- (12) Down core distribution of silicon bearing phytoplankton species abundance during the past 70 years in Chinhae Bay, Korea. 1998. (한국해양학회 투고)
- (13) On the distribution and persistence of organophosphorus pesticides in coastal area of Korea. 1998. Estuaries (Submitted).
- (14) Volume transport measurements in the southern sea of Korea. 1998. The third CREAMS International Symposium
- (15) 한국남해안의 유기인제 분포에 관하여. 한국해양학회 춘계학술발표회 1998. 4. 30. 충남대
- (16) 한국 남해안에서의 강수량 변동성에 관한 연구, 1998. 한국해양학회 추계 학술 발표회
- (17) 제주도주변해역의 치자어 군집에 관한 연구. 한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (18) 남해 연안역 낙동강 하구, 통영, 광양만에서의 자연형광을 이용한 기초생산력 추정, 한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (19) Recent sedimentary processes in the South Sea. 한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (20) The variability of precipitation at the southern coastal area of Korea. 한국 남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (21) The nutrient stream in the Northeast Asian marginal seas: Cheju Current. 한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (22) Chemical composition of marine aerosol particles in the Yellow Dust storm

- and low dust periods over the Cheju-Korea Straits, the northwest Pacific.  
한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (23) 조석강제력과 개방경계를 통한 유출입에 의한 남해의 2차원 해수순환, 한국남해의 해양수송과 과정 연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (24) On the variations and the balance of volume transports between straits in the South Sea of Korea, 한국남해의 해양수송과 과정연구 워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월
- (25) On the Cheju current, 한국남해의 해양수송과 과정연구워크샵, 한국해양연구소, 1998년 9월.
- (26) Preliminary results of suspension flux on the northern part of the Heuksan Mud Belt, southwestern coast of Korea, 해양·수산관련학회 공동 심포지움 및 학술대회 발표, 1998년 10월
- (27) Depositional processes of fine-grained sediments and foraminiferal imprint of estuarine circulation by summer floods in Yoja Bay, southern coast of Korea, 1998. 한국해양학회지 투고
- (28) 마산만에서의 광합성 색소 유도체분석에 의한 부영양화 진행과정에 대한 연구 한국해양학회지, 1998. 4(2); 101-106.
- (29) On the seasonal variation of volume transport between the straits in the South Sea of Korea. Proceedings of the 10th PAMS/JECSS Workshop, October 7-9, Kagoshima, Japan, 1999. 5-1-5-4.
- (30) Volume transport measurements in the southern sea of Korea. Proceedings of the CREAMS'99 International Symposium, Fukuoka, Japan, 1999. 44-47.
- (31) Observations of the Cheju Current (해양학회지 투고 예정)
- (32) 한국 남해의 해수순환: 2차원 순압모델 (해양학회지 투고, 심사 중)
- (33) Currents in Korea-Tsushima Strait during summer 1999 (Geophysical Research Letters, 투고 예정)
- (34) 남해에서 여름철 해수순환에 관한 3차원 수치실험 (추계해양학회 포스터 발표)
- (35) 제주-대한해협을 해수 및 해저퇴적물의 탄화수소, 1999. 해양학회지 투고
- (36) 조석강제력과 개방경계를 통한 유출입에 의한 남해의 2차원 해수순환, 1999. 해양학회지 투고 1차심사 후 수정 중
- (37) Control of the surface water circulation over the Keumdong oil spill in Kwangyang Bay, Korea. 1999. Environmental Engineering 투고 심사 중.
- (38) Volume transport measurements in the southern sea of Korea. Proceedings of the CREAMS'99 International Symposium, Fukuoka, Japan, 44-47.
- (39) 남해에서 여름철 해수순환에 관한 3차원 수치실험. 1999. 추계 해양학회 발표
- (40) On the conditions and fate of HAB (Harmful Algal Blooms) outbreaks: Preliminary result of an IBM (Individual-Based Model). 1999. 춘계 해양학회 발표
- (41) Barotropic circulation of the South Sea - Preliminary model results. Ocean Research, 19, 1999. 139-152.

- (42) Depositional processes of fine-grained sediments and foraminiferal imprint of estuarine circulation by summer floods in Yoja Bay, southern coast of Korea, 1999. 한국해양학회지 투고
- (43) 치차어 채집기기 특허 신청, 1999.
- (44) 제주-대한해협의 해수 및 해저퇴적물의 탄화수소, 2000. 한국해양학회 투고.
- (45) 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스, 2000. 한국해양학회 투고.
- (46) 남해해수 기원 및 연안수 기여율, 2000. 해양연구 투고
- (48) 한국남해해수의 기원 및 대륙붕수의 기여율. 2000. 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (49) 제주해류에 관하여, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질이동 (2000. 6월 출판예정)
- (50) 제주해협 영양염 분포, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (51) 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (52) 제주대한해협의 해수 및 해저퇴적물의 탄화수소, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (53) 제주-대한 해협의 해수 및 지방산, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (54) 제주-대한해협의 해상 에어로졸의 화학적조성과 해상침적, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (55) 광양만의 용존성 및 입자성 미량금속의 분포특성, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (56) 남해 대륙붕해역에서의  $^{210}\text{Po}$  분포역학, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (57) 서남해 흑산나대의 기원, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (58)  $^{210}\text{Pb}$ -법에 의한 현생 퇴적물과 입자 혼합율, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (59) 남해 대륙붕 해역에서의 유기물의 초기속성과정, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (60) 식물 플랑크톤의 생물.광학적 특성을 이용한 한국남해에서의 일차생산성 추정, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)
- (61) 제주도 주변해역의 치차어 군집, 2000, 남해대륙붕 해양환경과 물질 이동 (2000. 6월 출판예정)



## 제 6 장

### 참고 문헌





## 제 6 장 참고 문헌

### 1. 해류 및 해수순환

- 강인식, 김맹기, 심태보, 1994. 한반도주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화. 한국해양학회지, 29, 325-337.
- 강철중, 1971. 한국 서해 해수의 계절적 변동에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, 8, 9-29.
- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 12: 107-121.
- 국립수산진흥원, 1997. 한국근해 30년 평균수온 및 변동범위 (1996~1995). 한상복 등 공저, 국립수산진흥원, 291pp.
- 국립수산진흥원, 1998. 한국근해 30년평균 수온, 염분, 용존산소 수평분포도(1966~1995). 한상복 등 공저, 국립수산진흥원, 268pp.
- 국립해양조사원, 1998. 수로기술연보, 1997년, 기상청, 1999. 기상월보.(1999년 8월). 기상청, 49pp.
- 김경환, 1994. 대한해협 해류예측에 관한 연구. 성균관대학교 토목공학과 석사학위 논문, 113 pp.
- 김 구, 1980. 한국 남서해의 해류분포와 그 영향에 관한 연구. 서울대학교 연구보고서. 89pp.
- 김 구, 1982. 한국 남서해의 해류분포와 그 영향에 관한 연구. 서울대학교 연구보고서. 29pp.
- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26, 262-277.
- 김복기, 1979. 제주해협 해류와 조류에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, 제21호, 7-21.
- 김복기, 1980b. 남해 제주도와 대마도 사이에서의 해류형 시험 조사. 국립수산진흥원 연구보고, 제25호, 7-16.
- 김복기, 1981. 소리도-오도열도간 해역 단면의 해황변동과 해수수송량에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, 27, 25-39.
- 김복기, 1982b. 한국 남해의 수온과 염분의 변동계수. 한국해양학회지, 17(2), 74-82.
- 김현철, 2000. 제주도 인근 해역의 수계 분석과 여기서 추론한 인산염의 거동에 관한 연구. 부산대학교 일반대학원 해양과학과 석사논문, 102pp.
- 김상현, 1987. 제주해협내의 해수유동에 관한 연구. 제주대학교 대학원 어업학과 석사학위 논문, 63pp.
- 김상현, 노홍길, 1997. 제주해협 해수유동특성에 관한 연구. 한국수산학회지, 30, 759-770.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27, 515-528.

- 김충기, 1998. 남해에서 조석과 해류에 의한 해수순환 및 물질이동의 수치모델 연구. 인하대학교 해양학과 이학석사 논문, 66 pp.
- 나정열, 서장원, 한상규, 1992. 한국근해의 월평균 해상풍. 한국해양학회지, 27(1), 1-10.
- 노홍길, 김 구, 1983. 제주와 목포, 제주와 완도간의 표면수온 변화. 한국해양학회지, 18, 64-72.
- 노홍길, 방익찬, 김상현, 현경훈, 김준택, 양영진, 홍창수, 1997. 제주해협 의 해류와 월별 유량변화. 제주대학교 해양연구소 연구논문집 제21권, 75-84.
- 동형일, 1970. 한국해협에서의 해류병에 의한 해류조사. 교통부 수로국 수로연보, 1101, 85-97.
- 박성은 (1997) 바람이 가막만의 조류에 미치는 영향. 부경대학교 해양학과 이학석사 학위 논문, 39 pp.
- 방익찬, 오임상, 1995. 해수면변화와 해저지형에 의한 난류수의 순환과 그 기원. 한국수산학회지, 28, 677-697.
- 심문보, 1998. 직접측류에 의한 대한해협 서수도의 해수수송량. 1997년 수로기술 연보, 국립해양조사원, 316-321.
- 심문보, 1999. 대한해협 서수도의 해수수송량. 1998년 수로기술연보, 국립해양 조사원, 9-16.
- 양성기, 조규대, 홍철훈, 1984. 1981년 하계 황해저층냉수의 이상저온현상. 한국해양 학회지, 19, 125-132.
- 이동섭, 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지 바다, 4(4), 371-382.
- 이창기, 1968. 한국 서해에 있어서의 해류병 시험조사. 국립수산진흥원 연구보고, 제 3호, 27-41.
- 이창기, 1970. 대한해협 서수도의 해류에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 제6 호, 175-232.
- 이창기, 1974a. 한국 남해역에 있어서의 해류병 시험조사. 국립수산진흥원 연구보고, 제12호, 7-26.
- 이창기, 1974b. 대한해협 서수도의 해류 및 조류에 관하여. 국립수산진흥원 연구 보고, 제12호, 37-105.
- 이창기, 봉종현, 1969. 해류병 시험에 의한 한국 남해 해류에 관하여. 국립수산 진흥원 연구보고, 제4호, 37-106.
- 장경일, 1984. 제주해협 내 해류의 구조와 역학. 서울대학교 해양학과 석사학위 논문, 62pp.
- 조양기, 1988. 남해의 저층수와 유량에 관한 연구. 서울대학교 해양학과 박사학위 논문, 55pp.
- 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저온수의 특성과 기원. 한국해양학회지, 29, 414-421.
- 최병호, 방인권, 김경환, 1994. 대한해협조류의 3차원분포. 한국해안·해양공학회지, 6(4), 421-438.

- 최병호, 김경환, 김영규, 방인권, 1995. 대한해협 의 부표표류 시뮬레이션. 한국해안·해양공학회지, 7(4), 379-392.
- 최양호 (1996) 아산만의 해수순환 수치 모델링. 충남대학교 해양학과 이학석사 논문, 61 pp.
- 한국해양연구소, 1986. 한국 서남해역에서 조석전선. 한국해양연구소 보고서, BSPE 00058-93-1, 106pp.
- 한국해양연구소, 1987. 한국해역 종합해양자원도 작성 연구-남해 (예비조사). 한국해양연구소 보고서, BSPG 00046-163-7.
- 한국해양연구소, 1988a. 한국해협에서의 해류구조 연구 - 1차년도. 한국해양연구소 보고서, BSPG 00063-201-1.
- 한국해양연구소, 1988b. 한국해역 종합해양자원도 작성 연구-남해 (2차년도). 한국해양연구소 보고서, BSPG 00062-200-7.
- 한국해양연구소, 1989a. 한국해협에서의 해류구조 연구 - 2차년도. 한국해양연구소 보고서, BSPG 00090-253-1.
- 한국해양연구소, 1989b. 한국해역 종합해양자원도 작성 연구-남해 (3차년도). 한국해양연구소 보고서, BSPG 00091-251-7.
- 한국해양연구소, 1990. 한국해협에서의 해류구조 연구 - 3차년도. 한국해양연구소 보고서, BSPG 00115-320-1.
- 한국해양연구소, 1993. 해양환경 관리기술: 오염물질 이동·확산 예측기술 개발. 한국해양연구소 보고서, BSPN 00216-653-1.
- 한국해양연구소, 1994. 동중국해의 월평균 해상풍 계산. 한국해양연구소 보고서, BSPE 00367-683-1, 91pp.
- 한국해양연구소, 1995. 한국주변해역의 해상풍의 시·공간 변동. 한국해양연구소 보고서, BSPE 00444-788-1, 53pp.
- 한국해양연구소, 1996a. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집. 한국해양연구소, 282 pp.
- 한국해양연구소, 1996b. 오염물질 이동·확산기술 개발. 한국해양연구소 보고서, BSPN 00271-2-861-1, 220pp.
- 한국해양연구소, 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구. 한국해양연구소 보고서, BSPE 97612, 442pp.
- 한국해양연구소, 1998. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구. 한국해양연구소 보고서, BSPE 98706-00-1139-4, 647pp.
- 한국해양연구소, 1999. 트롤피해방지용 해류계 계류장치 개발. 한국해양연구소 보고서, BSPE 98719-00-1156-1, 95pp.
- 홍창수, 1998. 제주해협 의 계절별 해류변화. 제주대학교 해양과학대학 학사학위 논문, 49pp.
- Asselin, R., 1972. Frequency filter for time integrations. Monthly Weather Review, 100(6), 487-490.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu, and G.A. Cannon., 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East Chin Sea. Cont. Shelf Res., 4,

(1/2), 57-76.

- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observation in the East China, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, 30, 279-314.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three Dimensional Coastal Models*. edited by N.S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1-16.
- Byun, S.-K. and K.-I. Chang (1988) Tsushima Current water at the entrance of the Korea Strait in summer. *Progress in Oceanography*, 21, 295-306.
- Chang, K.I., K. Kim, S. W. Lee, and T. B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in Spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30, 203-215.
- Chang, K.I., and K. Kim, 1995. Sub-tidal flow in the Cheju Strait. *The Yellow Sea*, 1, 93-103.
- Chang, K.I., C.-K. Kim, M.-S. Suk, S.-Y. nam and L.H. Kantha (1997) Barotropic circulation of the South Sea - Preliminary model results. *Ocean Research*, 19(2), 139-152.
- Chen, C.T.A., R. Ruo, S.C. Pai, C.T. Liu, and G.T.F. Wong, 1995. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan, *Cont. Shelf Res.*, 15(1), 19-39.
- Doodson, A.T., and H.D. Warburg, 1941. *Admiralty manual of tides*. Hydrographic Dept. Admiralty, London, 270pp.
- Egawa, T., Y. Nagata, and S. Sato, 1993. Seasonal variation of the current in the Tsushima Strait deduced from ADCP data of ship-of-opportunity. *J. Oceanogr.*, 49, 39-50.
- Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chinese J. Oceanol. and Limnol.*, 4(1), 1-16.
- Gong, Y., 1971. A study of the south Korean coastal front. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 6(1), 25-36.
- Guan, B., and H. Mao, 1982. A note on circulation of the East China Sea. *Chin. J. Ocean. Limn.*, 1, 5-16.
- Han, S.K., H.J. Lie, and J.Y. Na, 1995. Temporal and spatial characteristics of surface winds over the adjacent seas of the Korean Peninsula. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 30, 550-564.
- Horne, E.P.W., M.J. Bowman and A. Okubo, 1978. Crossfrontal mixing and cabbeling. In: *Oceanic Fronts in Coastal Processes*, edited by M.J. Bowman et al., Springer-Verlag, Berlin, 105-113.
- Hoshika, A., T. Tanimoto, and Y. Mishima, 1999. Current and material transport at Tomogashima Strait, Japan. *J. Oceanogr.* 55, 427-437.

- Hur, H.B., G.A. Jacobs, and W.J. Teague, 1999. Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas. *J. Oceanogr.*, 55, 171-184.
- Isobe, S. 1995. The influence of the bottom cold water on the seasonal variability of the Tsushima Warm Current. *Cont. Shelf Res.*, 15(7), 763-777.
- Isobe, A., S. Tawara, A. Kaneko, and M. Kawano, 1994. Seasonal variability in the Tsushima Warm Current, Tsushima-Korea Strait. *Cont. Shelf Res.*, 14(10), 23-35.
- Kaneko, A., S.-K. Byun, S.-D. Chang, and M. Takahashi, 1991. An observation of sectional velocity structures and transport of the Tsushima Current across the Korea Strait. In: *Oceanography of Asian Marginal Seas*, edited by K. Takano, Elsevier, Amsterdam, 179-195.
- Kantha, L.H., 1995. Barotropic tides in the global ocean from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides. *J. Geophys. Res.*, 100 (C12), 25283-25308.
- Katoh, 1988. Measurement of residual current using Doppler sonar. *Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab.*, 66, 59-67 (in Japanese with English abstract).
- Katoh, O., K. Teshima, K. Kubota, and K. Tsukiyama, 1996a. Downstream transition of the Tsushima Current west of Kyushu in summer. *J. Oceanogr.*, 52, 93-108.
- Katoh, O., K. Teshima, O. Abe, H. Fujita, K. Miyaji, K. Morinaga, and N. Nakagawa, 1996b. Process of the Tsushima Current formation revealed by ADCP measurements in summer. *J. Oceanogr.*, 52, 491-507.
- Kim, K., 1988. Hydrography and currents in the Yellow Sea and the northern East China Sea. In: *Proceedings of Symposium on Development of Marine Resources and International Cooperation in the Yellow Sea and the East China Sea*, edited by Y.-B. Go, Marine Research Institute of Cheju National University, Cheju, 19-30.
- Kim, K., K.-R. Kim, T.S. Rhee, H.K. Rho, R. Limeburner, and R.C. Beardsley, 1991. Identification of water masses in the Yellow Sea and the East China Sea by cluster analysis. In: *Oceanography of Asian Marginal Seas*, edited by K. Takano, Elsevier, Amsterdam, 253-267.
- Kim, K., and S.H. Lee, 1982. Vertically homogeneous water along the west coast of Jeju Island. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17(2), 59-68.
- Kim, Y.G., 1996. A study on the water characteristics and the circulation of the intermediate and deep layer of the East Sea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 113pp.
- Koizumi, M., 1957. On the forecast of oceanographic conditions in the seas west of Japan. *Oceanogr. Mag.*, 9(1), 42-49.
- KORDI, 1987. *Oceanographic Atlas of Korean Waters*. Vol. 1. Yellow Sea.

- KORDI, 147pp.
- KORDI, 1993. Oceanographic Atlas of Korean Waters. Vol. 1. South Sea. KORDI, 147pp. 157pp.
- Lee, J.C., 1983. Characteristics of front near the Cheju Strait in early winter. Bull. Korean Fish. Soc., 16, 51-58.
- Lee, J.C., S.R. Lee, S.K. Byun, M.J. Park, J.C. Kim, and H.J. Yoon, 1998. Variability of current and sea level difference in the western channel of the Korea Strait in winter 1995~1996. J. Fish. Sci. Tech., 1(2), 276-182.
- Lee, J. H., S. Yoo and K.-I Chang, 1998. Inflow of warm waters into the Yellow Sea observed by coastal zone color scanner. In: Remote Sensing of the Pacific Ocean by Satellites. Ed. R.A. Brown, 251-254, 418.
- Lie, H.J., 1985. Wintertime temperature-salinity characteristics in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea). J. Oceanol. Soc. Japan, 41, 291-298.
- Lie, H. J., 1986. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. Prog. Oceanogr., 17, 229-242.
- Lie, H.J., 1989. Tidal fronts in the southern Hwanghae (Yellow Sea). Cont. Shelf Res., 9, 527-546.
- Lie, H.J., and C.H. Cho, 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. J. Geophys. Res., 99, 25081-25091.
- Lie, H.J., and C.H. Cho, 1997. Surface current fields in the eastern East China Sea. J. Korean Soc. Oceanogr., 32, 1-7.
- Lie, H.J., C.H. Cho, J.H. Lee, P. Niiler, and J.H. Hu, 1998. Separation of the Kuroshio water and its penetration onto the continental shelf west of Kyushu. J. Geophys. Res., 103, 2963-2976.
- Lie, H.J., C.H. Cho, J.H. Lee, S. Lee, and Y. Tang, 1999. Seasonal variation of the Cheju Warm Current in the northern East China Sea. J. Oceanogr. (in press)
- Lim, D. B. 1971. On the origin of the Tsushima Current Water. J. Oceanogr. Soc. Korea, 6, 85-91.
- Lim, D.B., 1976. The movements of the waters off the south coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 11, 77-88.
- Lim, D.B. and S.-D. Chang 1969. On the cold water mass in the Korea Strait. J. Oceanogr. Soc. Korea, 4, 71-82.
- Lueck, R.G., 1990. Thermal inertia of conductivity cells: Theory. J. Atmos. Oceanic. Technol., 7, 741-755.
- Lueck, R.G., and J.J. Picklo, 1990. Thermal inertia of conductivity cells: Observations with a Sea-Bird cell. J. Atmos. Oceanic. Technol., 7, 756-768.
- Mao, H., Z. Gan, and S. Lan, 1963. A preliminary study of the Yangtze Diluted Water and its mixing process. Oceanologia et Limnologia sinica, 5,

183-206.

- Mellor, G. L., 1996. Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University. Princeton. NJ, 40 pp.
- Mellor, G. L., A.F. Blumberg, 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities and the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, 113, 1379-1383.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1896.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20(4), 851-875.
- Miita, T. and Y. Ogawa, 1984. Tsushima Currents measured with current meters and drifters. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. edited by T. Ichiye, Elsevier Oceanography series 39, 67-76.
- Morison, J., R. Anderson, N. Larson, E. D'Asaro, and T. Boyd, 1994. The correction for thermal-lag effects in Sea-Bird CTD data. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 11, 1151-1164.
- Moriyasu, S., 1972. The Tsushima Current. In: *Kuroshio - Physical Aspects of the Japan Current*, edited by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. of Washington Press, 353-369.
- Na, J.Y., and J. W. Seo, 1998. The sea surface winds and heat flux in the east Asian marginal seas. Dept. Earth and Marine Sciences, Hanyang Univ., 52 pp.
- Na, J.Y., J. W. Seo, and H.J. Lie, 1999. Annual and seasonal variations of the sea surface heat fluxes in the east Asian marginal seas. *J. Oceanogr.*, 55, 257-270.
- Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Tech. Sp. No.*, 199-367.
- Nino, H. and K.O. Emery, 1961. Sediments of shallow portion of East China Sea and South China Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 731-762.
- Nitani, H. 1972. Beginning of the Kuroshio. In: *Kuroshio*, ed. H. Stommel and K. Yoshida, University of Tokyo Press, Tokyo.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tusima Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 45: 65-82.
- Ogura, S., 1933. The tides in the seas adjacent to Japan. *Bull. Hydrogr. Dept.*, 7, 1-189.
- Oey, L-Y., and P. Chen, 1992. A model simulation of circulation in the Northeast Atlantic Shelves and Seas. *J. Geophys. Res.*, 97(C12), 20087-20115.
- Orlanski, I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comput. Phys.*, 21, 251-269.
- Phillips, N.A., 1957. A coordinate system having some special advantages for

- numerical forecasting. *J. Meteorol.*, 14, 184-185.
- Roache, P.J., 1972. *Computational fluid dynamics*. Hermosa Publishers, 434 pp.
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Pang, I.C., T.H. Kim, T. Matsuno, and H.K. Rho, 1993. On the origin of the Tsushima Current (I) : Barotropic Case. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 26, 580-593.
- Pang, I.C., and I.S. Oh, 1994. Long-period sea level variations around Korea, Japan, and Russia. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27, 733-753.
- Pang, I.C., and K.H. Hyun, 1998. Seasonal variation of water mass distributions in the eastern Yellow Sea and the Yellow Sea Warm Current. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 33, 41-52.
- Park, M.J., S.R. Lee, J.C. Lee, and S.K. Byun, 1999. Tidal and nontidal fluctuations of currents in the western channel of the Korea Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 34(3), 133-143.
- Park, Y.H., 1985. Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20, 12-21.
- Park, Y. H., 1986. Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in Summer. *Prog. Oceanogr.*, 17, 243-254.
- Park, Y.S., and S.U. Park, 1991. Observational features of local weather in the coastal regions over South Korea in spring. *J. Korean Meteorol. Soc.*, 27, 67-86.
- Prandle, D., 1987. The fine-structure of nearshore tidal and residual circulations revealed by H.F. radar surface measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 231-245.
- Seung, Y.H. and S.-I. Shin, 1996. A simple model of the formation of thermo-haline front in the southeastern Yellow Sea in winter. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31, 23-31.
- Simpson, J.H., E.G. Mitchelson-Jacob, and A.E. Hill, 1990. Flow structure in a channel from an acoustic Doppler current profiler. *Cont. Shelf Res.*, 10(6), 589-603
- Simpson, J.H., and J.R. Hunter, 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404-406..
- Suk, M.S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.I. Chang, and D.J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31, 55-63.
- Teague, W., H. Perkins, Z. Hallock, and G. Jacobs, 1998. Current and tide observations in the southern Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, 103, 27783-27794.



- Tomczak, M., and J.S. Godfrey, 1994. Regional Oceanography: An introduction. Pergamon, 422pp.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. Japan Imp. Fish. Exp. Stations, 5, 57-190.
- Yi, S.U., 1966. Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait. J. Oceanol. Soc. Korea, 1, 7-13.
- Zheng, Q.A. and V. Klemas, 1982. Determination of winter temperature patterns, fronts, and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery. Remote Sensing of Environ., 12, 201-218.

## 2. 혐기성 내만환경

- 국립수산진흥원. 1999. 한국해양환경조사연보 1998. 151pp.
- 김경태, 홍기훈, 이수형, 이동수, 김석현, 김은수. 1994. 진해만 표층해수중의 중금속 농도 분포(1987-88). 해양연구, 16, 19-27.
- 진용현 1999. 광양만의 해수와 퇴적물중 미량금속의 거동. 석사학위논문, 한양대학교 82pp.
- 해양연구소. 1981. 진해만의 적조 및 오염모니터링시스템 개발을 위한 연구, 해양연구소보고서 BSPE-00031-56-7.
- 해양연구소. 1982. 진해만의 적조 및 오염모니터링시스템 개발을 위한 연구, 해양연구소보고서 BSPE-00044-66-7.
- 해양연구소. 1983. 적조 및 오염모니터링연구. 해양연구소보고서 BSPE-00048-80-7.
- 해양연구소. 1987. 진해만의 질소화합물 순환에 대한 연구. 해양연구소보고서, BSPE 00086-145-4.
- 해양연구소. 1990. 마산만의 질소화합물 순환에 대한 연구 BSPG: 00057-184-4.
- 한국해양연구소 1993. 화옹지구 간척매립에 따른 어업피해 조사연구. 한국해양연구소 보고서 BSPI 00140-523-7.
- 한국해양연구소. 1997. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구 (1차년도). 한국해양연구소 보고서 BSPN 96325-985-4.
- Balzer, W. 1982. On the distribution of iron and manganese at the sediment-water interface : thermodynamics versus kinetic control. Geochimica Cosmochim Acta 46, 1153-1162.
- Boyle, E.A., S.S. Husted and S.P. Jones. 1981. On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean. J. Geophys. Res. 86, 8048-8066.
- Brügmann, L. 1986. The influence of coastal zone processes on mass balances for trace metals in the Baltic Sea. Rapp. P. V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. 186, 329-342.

- Brügmann, L., P.C. Bernard and R. van Grieken. 1992. Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea. 2. Results of bulk trace metal analysis by AAS. *Mar. Chem.* 38, 303-323.
- Bruland, K.W. and R.P. Franks. 1983. Mn, Ni, Cu, Zn, and Cd in the western North Atlantic. In: *Trace metals in sea water*, eds. by C.S. Wong, E. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg, Plenum Press, New York, pp. 395-414.
- Byers, S.C., E.L. Mills and P.L. Stewart. 1978. A comparison of method for determining organic carbon in marine sediments with suggestions for a standard method. *Hydrobiology* 58, 43-47.
- Chester, R. and G.F. Bradshaw. 1991. Source control on the distribution of particular trace metals in the North Sea atmosphere. *Mar. Poll. Bull.* 22, 30-36.
- Christensen, J.P. 1983. Electron transport system activity and oxygen consumption in marine sediments. *Deep-Sea Res.* 30, 183-194.
- Christensen, J.P. and T.T. Packard. 1976. Oxygen utilization and plankton metabolism in the Washington fjord. *Estuarine Coastal Mar. Sci.* 4, 339-347.
- Curl, H. Jr., and J. Sandberg 1961. The measurement of dehydrogenase activity in marine organisms. *J. Mar. Res.* 19, 123-138.
- Comber, S.D.W., A.M. Gunn and C. Whalley. 1995. Comparison of the partitioning of trace metals in the Humber and Mersey estuaries. *Mar. Poll. Bull.* 30, 851-860.
- Danielsson, L.G., B. Magnusson and S. Westerlund, 1978. An improved metal extraction procedure for the determination of trace metals in sea water by atomic absorption spectrometry with electro-thermal atomization. *Anal. Chim. Acta* 98, 47-57.
- Hart, B.T. 1982. Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates. *Hydrobiologia* 91, 299-313.
- Kenner, R.A. and S.I. Ahmed. 1975. Measurements of electron transport activities in marine phytoplankton. *Mar. Biol.* 33, 119-128.
- Kersten, M. M. Dicke, M. Kriews, K. Naumann, D. Schmidt, M. Schultz M. Schwikowski and M. Steiger. 1988. Distribution and fate of heavy metals in the North Sea. pp 300-347, In W. Salomns et al (eds) *Pollution of the North Sea*, Springer Verlag, Berlin.
- King, F.D. and A.H. Devol. 1975. Estimates of vertical eddy diffusion through the thermocline from phytoplankton nitrate uptake rate in the mixed layer of eastern Tropical Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 24, 645-651.
- Kremling, K. 1983. The behavior of Zn, Cd, Cu, Ni, Co, Fe, and Mn in anoxic Baltic waters. *Mar. Chem.* 13, 87-108.

- Kremling, K., J.J. Stokos, L. Brugman and H.P. Hansen. 1997. Variability of dissolved and particulate trace metals in the Kiel and Mecklenburg Bights of the Baltic Sea, 1990-1992. *Mar. Poll. Bull.* 34, 112-122.
- Lewis, B.L. and W.M. Landing, 1992. The investigation of dissolved and suspended-particulate trace metal fractionation in the Black Sea. *Mar. Chem.*, 40, 105-141.
- Long, E.R. and D.D. MacDonald. 1998. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Human and Ecological Risk Assessment* 4, 119-1039.
- Mart, L. and H.W. Nurnberg. 1986. Cd, Pb, Cu, Ni and Co distribution in the German Bight. *Mar. Chem.* 18, 197-213.
- N.O.A.A. 1990. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52.
- Packard, T.T. 1985. Oxygen consumption in the ocean: Measuring and mapping with enzyme analysis. In: *Mapping strategies in Chemical Oceanography*, ed. by A. Zirino, American Chemical Society, P. 177-209.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, U.K.
- Rowe, G.T., C.H. Clifford and K.L. Smith. 1975. Benthic nutrient regeneration and its coupling to primary productivity in coastal waters. *Nature*. 255, 215-217.
- Sholkovitz, E. R. and D. Compland. 1981. The coagulation solubility and adsorption properties of Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Co and humic acids in a river water. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 181-189.
- Turner, A., G.E. Millward and A.W. Morris. 1991. Particulate metals in five major North sea estuaries. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 32:325-346.
- Westerlund, S.F.G., L.G. Anderson, P.O.J. Iverfeldt, M.M. Rutgers van der Loeff and B. Sundby. 1986. Benthic fluxes of cadmium, copper, nickel, zinc and lead in the coastal environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50: 1289-1296.
- Windom, H. L. and R. G. Smith. Jr. 1991. Suspended particulate sampling and analysis for trace elements. *Marine particles: Analysis and Characterization*. American Geophysical Union.
- Yang, D. B. and Hong, J.S. 1988. On the biogeochemical characteristics of surface sediments in Chinhae Bay in September 1983. *J. Fish. Soc. Korea* 21, 195-205.

### 3. 대륙붕 물질수지 및 생지화학적 순환

- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절 변동에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 12: 107-121.
- 김구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26: 262-277.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포특성. 한국해양학회지 바다, 3: 165-169.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27: 515-528.
- 김현철, 2000. 제주도 인근 해역의 수계 분석과 여기서 추론한 인산염의 거동에 관한 연구. 부산대학교 이학 석사 학위 논문, 102pp.
- 서해립, 김성수, 고유봉, 남기완, 윤성규, 윤양호, 조수근, 홍재상, 1995. 영일만 표영군집 내의  $^{210}\text{Po}$  축적. 한국수산학회지. 28권 2호, 219-226.
- 양한섭, 김성수, 이재철, 1995. 동해 중부해역에서  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{234}\text{Th}$ 의 순환에 대한 소용돌이의 영향. 한국해양학회지, 30권, 4호, 279-287.
- 양한섭, 김성수, 이재철, 1996. 봄철 동해에서 해수 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도분포 특성. 한국수산학회지, 29권, 2호, 238-245.
- 양한섭, 이동섭, 1999. 여름철 동중국해 및 남중국해 표층수의 Ra 동위원소를 이용한 수계분석. 한국해양학회지 바다, 4:305-311.
- 양한섭, 이동섭, 이행필, 2000. 라듐 (Ra) 동위원소를 이용한 동중국해 및 남해에서 표층수의 특성파악. 남해과학백서, xxx-xxx. 한국해양연구소 간행예정
- 이동섭, 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지 바다, 4: 371-382.
- 이동섭, 김기현, 1998.  $^{228}\text{Ra}$ 를 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구. 한국해양학회지 바다, 3: 174-182.
- 이재학, 이상룡, 안병웅, 이홍재, 2000. 여름철 제주도 주변해역 해황특성, 남해과학백서,1-22, 한국해양연구소 간행예정
- 이행필, 양한섭, 김기현, 1996. 춘계 동해남부 연안해역에서 해수 중  $^{210}\text{Po}$ 와  $^{234}\text{Th}$ 의 제거. 한국수산학회지, 29권 3호. 332-344.
- 정경호, 박용철, 1988. 서해 경기만의 기초생산력 및 질소계 영양염의 재생산에 관한 연구. The Journal of the Oceanological Society of Korea, 23(4): 194-206.
- 조영길, 이창복, 최만식, 1994. 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포 특성. J. Korean Soc. Oceanogr., 29: 338-356.
- 한국해양연구소, 1993. 한반도 주변해역의 화학물질 수치 및 순환연구 (서남해역) BSPN 00203-614-4, pp321.
- 한국해양연구소, 1993. 한반도 주변해역의 화학물질 수치 및 순환연구 (서남해역) BSPN 00203-614-4, pp321.
- 한국해양연구소, 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구 (1차년도), BSPE97612, 441pp.
- 한국해양연구소, 1998. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구 (2차년도), BSPE98706, 647pp.

- 한국해양연구소, 1999. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구 (2차년도), BSPE99725, 980pp.
- Andreae, M.O., H. Berresheim, T.W. Andreae, M.A. Kritz, T.S. Bates, J.T. Merrill, Vertical distribution of dimethylsulfide, sulfur dioxide, aerosol ions and radon over the Northeast Pacific Ocean. *J. Atmos. Chem.* 6, 149-173
- Arimoto, R., R.A. Duce, D.L. Savoie, J.M. Prospero, R. Talbot, J.D. Cullen, U. Tomza, N.F. Lewis and B.J. Ray, 1996, Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A, *J. Geophysical Research*, 101, 2011-2023.
- Bacon M. P. Belostock R. A., Tecotzky M., Turekian K. K. and Spencer D. W., 1988. Lead-210 and polonium-210 in ocean water profiles of the continental shelf and slope south of New England. *Continental Shelf Research*, 8, 841-853.
- Bacon M. P., Spencer D. W. and Brewer P. G., 1976.  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  disequilibrium in seawater and suspended particulate matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 277-296.
- Balls P. W., 1988. The control of trace metal concentrations in coastal seawater through partitioning onto suspended particulate matter *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 277-296.
- Baskaran M, Murray DJ, Santschi PH, Orr JC, and Schink DR. 1993. A method for rapid in situ extraction and laboratory determination of Th, Pb, and Ra isotopes from large volumes of seawater. *Deep-Sea Research* 40, 849-865.
- Baskaran M. and Santschi P. H., 1993. The role of particles and colloids in the transport of radionuclides in coastal environments of Texas. *Marine Chemistry*, 43, 95-114.
- Capenter, J.M., 1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 141-143.
- Chang, K-I, K. Kim, S.W. Lee, and T.B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju strait in spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30: 203-215.
- Chen, C.T.A., C.T. Liu, and S.C. Pai, 1994. Transport of oxygen, nutrients and carbonates by the Kuroshio Current. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 12(3): 220-227.
- Chen, C.T.A., C.T. Liu, and S.C. Pai, 1995. Variation in oxygen, nutrient and carbonate fluxes of the Kuroshio Current. *La mer*, 33: 161-176.
- Cho, Y.K., and K. Kim, 1994. Characteristics and origin of the cold water in the South Sea of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29: 414-421.
- Chough, S.K., 1983. Marine Geology of Korean Seas. *IHRDC Publ. Boston*, 156pp.

- Chun, J.K., S.W. Yeh, M.H. Kwon, 1998, Classification of atmospheric circulation patterns associated with long-range transport of yellow sands. Fall Meeting of Korean Meteorological Society [October 29-30, Seoul, Korea], 85-88.
- Chung, C.S., and D.B. Yang, 1991. On the primary productivity in the southern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 26: 242-254.
- Chung C.S., G.H. Hong, S.H. Kim, J.K. Park, Y.I. Kim, D.S. Moon, I.K. Bang, B.D. Wang, G.Y. Wang and D.B. Yang, 1999. The distributional characteristics and budget of dissolved inorganic nutrients in the Yellow Sea. In: Biogeochemical processes in the Bohai and Yellow Sea, edited by G.H. Hong, J. Zhang, and C.S. Chung, the Dongjin Publication Ass., 274pp.
- Civitaresse, G., M. Gacic, A. Vetrano, A. Boldrin, D. Bregant, S. Rabitti, and E. Souvermezoglou, 1998. Biogeochemical fluxes through the Strait of Otranto (Eastern Mediterranean). *Cont. Shelf Res.*, 18: 773-789.
- Cochran JK. 1980. The flux of  $^{226}\text{Ra}$  from deep-sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 49, 381-392.
- Duce B.A., R. Arimoto, B.J. Ray, C.K. Unni and P.J. Harder, 1983, Atmospheric trace elements at Enewetak Atoll: 1. Concentrations, Sources and temporary variability. *J. Geophysical Research*. 88 (C9), 5321-5342.
- Elsinger, R.J., and W.S. Moore, 1984.  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  in the mixing zones of the Pee Dee River-Winyah Bay, Yangtze River and Delaware Bay Estuaries. *Est. coast. Shelf Sci.*, 18: 601-613.
- Fisher N. S., Burns K. A., Cherry R. D. and Heyraud M., 1983. Accumulation and cellular distribution of  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in two marine algae. *Marine Ecology Progress Series*, 11, 233-237.
- Galloway JN, Levy II H., and P.S. Kashiba, 1994, Year 2020: Consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen. *Ambio* 23, 120-123.
- Gao, Y., 1998, Atmospheric chemistry and transport of Asian dust. In *Health of the Yellow Sea*, G.H. Hong, J.Zhang and B.K. Park (eds.). The Earth Love Publication Association, Seoul, 251-280.
- Gao, Y., Arimoto, R.A., Duce, L.Q., M.Y. Zhou and D.Y. Gu, 1996, Atmospheric non-sea salt sulfate, nitrate and methanesulfate over the China Sea, *J. Geophysical Research* 101. 12,601-12611.
- Gao, Y., R. Arimoto, M.Y. Zhou, J.T. Merrill and R.A. Duce, 1992, Relationship between the dust concentrations over eastern Asia and the remote North Pacific. *J. Geophysical Research*, 97, 9867-9872.
- Gavini M. B., Beck J. N. and Kuroda P. K., 1974. Mean residence time of the long-lived radon daughters in the Atmosphere. *Journal of Geophysical*

- Research, 79, 4447-4452.
- GESAMP-IMO/FAO/UNESCO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution, 1989, The atmospheric input of trace species to the world ocean, Reports and Studies. GESAMP (38).
- Glover DM and Reeburgh, 1987. Raon-222 and radium-226 in southeastern Bering Sea shelf waters and sediment. *Continental Shelf Research* 7, 433-456.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt, K. Kremling, 1983. *Methods of Seawater analysis*, edited by Grasshoff, K., M. Ehrhardt, K. Kremling, Verlag chemie. 125-188pp.
- Guan, B. and Mao, 1982. A note on circulation of the East China Sea. *Chinese J. Oceanogr. Limnol.*, 5: 5-16.
- Harada, K, and S. Tsunogai, 1986.  $^{226}\text{Ra}$  in the Japan Sea and the residence time of the Japan Sea water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77: 236-244.
- Honeyman B. D., Balistrieri L. S. and Murray L. S., 1988. Oceanic trace metal scavenging; the importance of particle concentration, *Deep-Sea Research*, 35, 227-246.
- Hong G. H., Park S. K., Baskaran M., Kim S. K., Chung C. S. and Lee S. H., 1999. Lead-210 and polonium-210 in the winter well-mixed turbid waters in the mouth of the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 19, 1049-1064.
- Hong G.H., S.H. Kim, D.B. Yang and G.H. Lim, 1998, The atmospheric input of trace metals over the Yellow Sea: Ship board Results, April 1995, In *Health of the Yellow Sea*, G.H. Hong, J.Zhang and B.K. Park (eds.). The Earth Love Publication Association, Seoul. pp211-236.
- Kadko D., 1993. Excess  $^{210}\text{Po}$  and nutrient cycling within the California coastal transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 98, 857-864.
- Kan O., S. Takeshi, and Y. Yaochu, 1994. Volume and nutrient transports of the Kuroshio South of Japan. *Proceeding of Chinese-Japan JSCRK*.
- Kang DJ, Chung CS, Kim SH, Hong GH. Kim KR, 1994. Oxygen isotope characteristics of seawaters in the Yellow Sea. *La Mer* 32:279-284.
- Key, R.M., R.F. Stallard, W.S. Moore and J. Sarmiento, 1985. Distribution and flux of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  in the Amazon River estuary. *J. Geophys. Res.* 90: 6995-7004.
- Kharkar D. P., Thomson J., Turekian K. K. and Forster W. O., 1976. Uranium and Thorium decay series nuclides in plankton from the Caribbean. *Limnology and Oceanography*, 21, 294-299.
- Kim, K. and S.H. Lee, 1982. Vertical homogeneous water along the west coast of Jeju Island. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17: 59-68.
- Lambert G. A., Martin H. and Buland K. W., 1979. Modification of the atmospheric polonium 210 to lead 210 ratio by volcanic emissions. *Journal of Geophysical Research*, 84, 6980-6986.

- Lee, C.B., Y.A. Park, J.Y. Choi and G.B. Kim, 1989. Surface sediments of the continental shelf and slope off the southeastern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24: 39-51.
- Lee, H.J., S.K. Chough, and S.J. Han, 1990. Recent sedimentation in the South Sea, Korea. Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology, Shanghai, September 7-10, 1998. *China Ocean Press, Beijing*, 367-386.
- Lee, J.H., S. Yoo and K.I. Chang, 1998. Inflow of warm waters into the Yellow Sea observed by coastal zone color scanner. *Remote Sensing of the Pacific Ocean by Satellites*, edited by R.A. Brown. 251-254pp.
- Lee, T.S., and K.H. Kim, 1998. A study on the origin of anomalously low saline Tsushima Current Water using  $^{228}\text{Ra}$ . 3(4): 175-182.
- Li Y. H., Santschi P. H., Kaufman A., Benninger L. K., and Feely H. W., 1981. Natural radionuclides in waters of the New York Bight. *Earth and Planetary Science Letters*, 55, 217-228.
- Lie H.H., and C.H. Cho, 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. *J. Geophys. Res.*, 99: 25,081-25,091.
- Lim, D.B. 1976. The movement of the waters of the South Coast of Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 11: 77-88.
- Liu C., J. Zhang, Z. Yu and Z. Shen, 1998, Atmospheric transport of heavy metals to the Yellow Sea, In *Health of the Yellow Sea*, G.H. Hong, J. Zhang and B.K. Park (eds.). The Earth Love Publication Association, Seoul. pp193-209.
- Liu T., 1988, *Loess in China* (2ed.). China Ocean Press Beijing and Springer-Verlag Berlin. 224p
- Malone, T.C., 1977. Environmental regulation of phytoplankton productivity in the lower Hudson Estuary. *Est. and Coastal Mar. Sci.*, 5: 157-171.
- McKee B. A., 1986. The fate of particle-reactive radionuclides in the Amazon and Yangtze Continental shelves. Ph. D. Dissertation, North Carolina State University.
- Merrill J.T., M. Uematsu, R. Bleck, Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific. *J. Geophys. Res.* 94, 8584-8589
- Moore H. E., Poet S. E. and Martell E. A., 1973.  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  profiles and aerosol residence times versus altitude. *Journal of Geophysical Research*, 78, 7065-7075.
- Moore, W.S., J.L. Sarmiento and R.M. Key, 1986. Tracing the Amazon component of surface Atlantic water using  $^{228}\text{Ra}$ , salinity and silica. *J. Geophys. Res.*, 91: 2574-2580.
- Mukai H. and M. Suzuki, 1996, Using air trajectories to analyze the seasonal variation of aerosols transported to the Oki Islands. *Atmospheric Environment* 30, 3917-3934.



- Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Tech.*(Tokai University), November, pp. 190-367.
- Nozaki Y., Ikuta N. and Yashima M., 1990. Unusually large  $^{210}\text{Po}$  deficiencies relative to  $^{210}\text{Pb}$  in the Kuroshio Current of the East China and Philippine Seas. *Journal of Geophysical Research*, 95, 5321-5329.
- Nozaki, Y. 1989. Mean residence time of the shelf water in the East China and the Yellow Seas determined by  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  measurements. *Geophys. Res. Lett.* 16(11): 1297-1300.
- Nozaki, Y., H. Tsubota, V. Kasemsupaya, M. Yashima and N. Ikuta, 1991. Residence times of surface water and particle-reactive  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the East China and Yellow Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 55:1265-1272.
- Okubo, T., 1980.  $^{228}\text{Ra}$  in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 36: 263-268.
- Pai, S.-C., G.-C. Gong and K.-K. Liu, 1993. Determination of dissolved oxygen in seawater by direct spectrophotometry of total iodine. *Mar. Chem.* 41: 343-351.
- Park S.C. and K.S. Chu, 1991, Dispersal Pattern of river-derived fine-grained sediments on the inner shelf of Korea Straits. In T. Ichie (ed.). *Oceanography of Asian Marginal Sea*. Pp231-240. Elsevier
- Park, Y.H., 1986. Water characteristics and movement of the Yellow Sea Warm Current in summer. *Prog. Oceanogr.*, 17: 243-254.
- Parson, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamom Press. 3-28 pp.
- Peirson D. H., Cambray R. S. and Spicer G. S., 1966. Lead-210 and polonium-210 in the atmosphere. *Tellus*, 18, 427-433.
- Pool, H.H., and W.R.G. Atkins, 1929. Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 16: 297-324.
- Prospero J.M., D.L. Savoie, R.T. Nees, R.A. Duce and J. Merrill, 1985, Particulate sulfate and nitrate in the boundary layer over the North Pacific Ocean. *J. Geophysical Research* 90 (10), 10586-
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards, 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The sea*, vol. 2, edited by M.N. Hill, Wiley-Interscience, New York, 26-76pp.
- Reid, D.F., W.S. Moore and W.M. Sackett, 1979. Temporal variation of  $^{228}\text{Ra}$  in the near-surface Gulf of Mexico. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 43: 227-236.
- Santschi N. R., Li Y. H. and Bell J., 1979. Natural radionuclides in the water of Narragansett Bay. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 201-213.
- Schmidt GA. 1998. Oxygen-18 variations in a global ocean model. *Geophysical Research Letters* 25,1201-1204.

- Shannon L. V., Cherry R. D. and Orren M. J., 1970. Polonium-210 and lead-210 in the marine environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 701-711.
- Stemann-Nielsen, E., 1951. Measurement of the productivity of organic matter in the sea by means of carbon-14. *Nature*, 167: 684.
- Suk M.S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.I. Chang, and D.J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31(2): 55-63.
- Tanaka N., Takeda Y. and Tsunogai S., 1983. Biological effect on removal of  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Po}$  from surface water in Funka Bay. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 1783-1790.
- Tokieda T., Yamanaka K., Harada K., and Tsunogai S, 1996. Seasonal variations of residence time and upper atmospheric contribution of aerosols studied with Pb-210, Po-210 and Be-7. *Tellus*, 48B, 690-702.
- Torgensen, T. 1979. Isotopic composition of river runoff on the U.S. east coast: evaluation of stable isotope versus salinity plots for coastal water mass identification. *J. Geophys. Res.*, 84:3773-3775.
- Uematsu M., Kawamura K., Ibusuki T., and T. Kimoto, 1995, Chemical composition of marine aerosols over the Central North Pacific. Results from the 1991 cruise of Hakurei Maru No.2, In *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*, Sakai H. and Y. Nozaki (eds.). 3-14, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1995
- Uematsu, M., R.A. Duce and J.M. Prospero, 1994, Atmospheric beryllium-7 concentrations over the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 21, 561-564.
- Uematsu, M., R.A. Duce, J.M. Prospero, L. Chen, J.T. Merrill and R.L. MacDonald. 1983, Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J. Geophysical Research*, 88, 5343-5352
- Wei C. L. and Murray J. W., 1994. The behavior of scavenged isotopes in marine environments:  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the water column of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1795-1811.
- Wells J.T., and O.K. Huh, 1984. Fall-season patterns of turbidity and sediment transport in the Korea Strait and southwestern Yellow Sea. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, edited by T. Ichiye, *Elsevier Oceanography Series*, 39, 387-397.
- Wunsch C., D. Hu and B. Grant, 1983. Mass, heat and nutrient fluxes in the South Pacific Ocean. *J. Physic. Oceanogr.*, 13:725-753.
- Yamada, M., and Y. Nozaki, 1986. Radium isotopes in coastal and open ocean surface waters of the western North Pacific. *Mar. Chem.* 19: 379-389.

- Yu, H., D. Zheng and J. Jiang, 1983. Basic hydrographic characteristics of the studied area. Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea. Hangzhou, April, pp. 270-279.
- Zhang J., 1996. Nutrients elements in large Chinese estuaries. *Cont. Shelf Res.*, 16: 1023-1045.
- Zhang, J., R. Letolle, J.M. Martin, C. Jusserand and J.M. Mouchel, 1990. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine system. *Cont. Shelf Res.*, 10:369-384.
- Zhang, J., J. Yan, Z.F. Zhang, 1995. Nationwide river chemistry trends in China: Hwanghe and Changjiang. *Ambio*, 24: 275-279.
- Zieman J.J., J.L. Hlms, D. Connor, C.R. Jensen, W.H. Zoller, D.M Hermann, J.R. Parrington and G.E. Gordon, 1995, Atmospheric aerosol trace element chemistry at Mauna Loa Observatory 1. 1979-1985, *J. Geophysical Research*, 100, 25979-25994.

#### 4. 생화학특성

- Brassell S.C. and Eglinton, G. (1985) "Molecular Geochemical indicators in Sediments" in *Organic Marine geochemistry* (ED by M.L.Sohn), American Chemical Society.
- Christie, W. W. (1982) *Lipid analysis* (2nd ED), pp17-23, Pergamon Press
- Christie, W. W. (1987) *HPLC and Lipids*, pp71-86, Pergamon Press
- Christie, W. W. (1989) *Gas Chromatography and Lipids*, pp85-128, Oily Press Ltd
- Findlay, R. H. and F. C. Dobbs (1993) "Quantitative Description of Microbial communities Using Lipid Analysis" pp271-284. in *Handbook of methods in Aquatic Microbial Ecology*, (ED. by P. F. Kemp, B. F. Sherr, E. B. Sherr, and J. J. Cole), Lewis.
- Folch, J. M. Lee, and G.H.Stanley (1957) *J. Biol. Chem.* 226, 497-499.
- Gurr M. I. and J. L. Harwood (1992) *Lipid Biochemistry* (4th ED), pp23-118, Chapman and Hall.
- Hamilton R.J. and S. Hamilton (1992) *Lipid Analysis, a Practical Approach*, pp113-151, Oxford University Press.
- Parsons, T. R, Takahashi, M., and Hargrave, B. (1979) *Biological Oceanographic Process* (2nd ed.) Pergamon Press.
- Wakeham S.G. and J.K. Volkman (1991) "Sampling and analysis of lipids in marine POM", pp181-180, in *Marine Particles: Analysis and Characterization*, (ED. by D.C. Hurd and D.W. Spencer)

## 5. 세립질퇴적물 이동

- 한국해양연구소, 1990. 순천만 어장(양식물) 피해원인 조사연구. 해양연구소 보고서, BSPI 00096-293-3, 474 pp.
- 한국해양연구소, 1998. 해저층 퇴적물 이동 관측 및 예측 기술. 해양연구소 보고서, BSPN 96338-00-1000-5, 308 pp.
- 한국해양연구소, 1999. 황해 오염감시 및 개선기술. 해양연구소 보고서, 365 pp.
- Almagor, G., 1982. Marine geotechnical studies at continental margins. A review-part II. *Applied Ocean Research*, v. 4, p. 130-150.
- Aoki, S., Oinuma, K. and Sude, T., 1974. The distribution of clay minerals in the recent sediments of the Japan Sea. *Deep-Sea research*, v. 21, p. 299-310.
- Butenko, J., Milliman, J.D. and Ye, Y.C., 1985. Geomorphology, shallow structure, and geological hazards in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, v. 4, p. 121-142.
- Buzas, M.A. and Gibson, T.G., 1969. Species diversity: Benthic foraminifera in Western North Atlantic. *Science*, **163**: 72-75.
- Chang, J.H., Kim, S.W. and Park, Y.A., 1978. Sedimentologic natures of the bottom sediments between Mokpo and Cheongsan Island off the southern coast of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 14, p. 17-23.
- Chough, S.K., 1983. *Marine Geology of Korean Seas*. IHRDC, Boston, 157 pp.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Han, S.J., 1991. Sedimentological and geotechnical properties of fine-grained sediments in part of the South Sea, Korea. *Cont. Shelf Res.*, **11**: 183-195.
- Chu, K.S., 1975. The effect of fresh water flowing from Nagdong River to the Korea Strait in flood season. Hydrographic Office, Technical reports, No. 1101, p. 75-78.
- Culver, S.J. and Buzas, M.A., 1981. Recent benthic foraminiferal provinces on the Atlantic continental Margin of North America. *J. Foram. Res.* **11**: 217-240.
- DeMaster, D.J., McKee, B.A., Nittrouer, C.A., Qian, J.C. and Chen, G.D., 1985. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, v. 4, p. 143-158.
- Dyer, K.R., 1980. Velocity profiles over a rippled bed and the threshold of movement of sand. *Estuarine and Coastal Marine Science*, **10**: 181-199.
- Dyer, K.R., 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: *Physical Processes in Estuaries*, edited by Dronkers, J. and W. van Leussen, Springer, Berlin.
- Dyer, K.R., 1994. Estuarine sediment transport and deposition. In: *Sediment*

- Transport and Depositional Processes, edited by Pye, K., Blackwell Scientific Publications, London.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, **27**: 3-26.
- Folk, R.L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphills, Univ. Texas, USA, 170 pp.
- Gao, S., Xie, Q.C. and Feng, Y.J., 1990. Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China. *Est., Coast. and Shelf Sci.*, **31**: 397-409.
- Gao, S. and Collins, M.B., 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of transport vectors. *Sediment. Geol.*, **81**: 47-60.
- Gao, S. and Collins, M.B., 1994. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environment. *J. Coast. Res.*, **10**: 70-78.
- Howe, H.V., 1941. The use of soap in the preparation of samples for micropaleontological study. *J. Paleontol.*, **15**: 691.
- Huh, O.K., 1982. Spring season flow of the Tsushima Current and its separation from the Kuroshio: satellite evidence. *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 9687-9693.
- Kang, H.J. and Chough, S.K., 1982. Gamagyang Bay, southern coast of Korea: sedimentation on a tide-dominated rocky embayment. *Mar. Geol.*, **48**: 197-214.
- Kim, M.S., Chu, K.S. and Kim, O.S., 1987. Investigation of some influence of the Nagdong River water on marine environment in the estuarine area using Landsat imagery. Hydraulic Office, Annual Report, p. 93-147.
- Kim, S.W., Kim, C.S., Lee, Y.O., Kong, Y.S., Lee, C.W., Min, G.H., Park, Y.S. and Choe, K.L., 1986. Marine geological study on the continental shelf off southern Korea. Korea Institute of Energy and Resources, Report KR-86-20, p. 7-49.
- Kim, S.W., Min, G.H., Lee, C.W., Choe, K.L., Kong, Y.S., Lee, Y.O., and Park, Y.S., 1987. Marine geological study on the continental shelf off southern Korea. Korea Institute of Energy and Resources, Report KR-86-2-20, p. 7-66.
- Kim, S.W., Lee, Y.O., Kong, Y.S., Park, Y.S., Lee, C.W. and Min, G.H., 1988. Marine geological study on the continental shelf off southern Korea. Korea Institute of Energy and Resources, Report KR-87-26, p. 1-64.
- Kim, Y.H., Lee, H.J., S.S. Chun, S.J. Han, and S.K. Chough, 1999. Holocene transgressive stratigraphy of a macrotidal flat in the southeastern Yellow Sea: Gomso Bay, Korea. *J. Sed. Res.*, **69**: 328-337.

- Krumbein, W.C., 1938. Size-frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *J. Sediment. Petrol.*, 8: 84-90.
- Lee, H.J., 1986. Some Geotechnical Properties of Selected Sediment Cores from the Korean Seas. Unpublished M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, 142pp.
- Lee, H.J. and Chough, S.K., 1989. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 87: 195-205.
- Lee, H.J., Kim, Y.H. and Chu, Y.S., 1998. Sedimentology of tidal flats on the west coast of Korea. *Ocean Research*, 20(2): 153-165.
- Lee, Y.G., Hwang, J.Y. and Jung, K.K., 1995. Surface sediment characteristics and clay minerals in Kamag Bay. *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, 16: 477-488 (in Korean with English abstract).
- le Roux, J.P., 1994. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of transport vectors-comment. *Sediment. Geol.*, 90: 153-156.
- Lim, H.S., Je, J.G., Choi, J.W. and Lee, J.H., 1991. Distribution pattern of the macrozoobenthos at Yoja Bay in summer. *Ocean Res.*, 13: 31-46.
- MacArther, R. H. and MacArther, J. W., 1961. On bird species diversity, *Ecology*, 42: 544-598.
- McKee, B.A., Nittrouer, C.A. and DeMaster, D.J., 1983. Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River. *Geology*, v. 11, p. 631-633.
- McLaren, P. and Bowles, D., 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *J. Sediment. Petrol.*, 55: 457-470.
- Milliman, J.D., Shen, H.T., Yang, Z.S. and Meade, R.H., 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. *Continental Shelf Research*, v. 4, p. 37-46.
- Min, G.H., 1994. Seismic Stratigraphy and Depositional History of Pliocene-Holocene Deposits in the Southeastern Shelf, Korean Peninsula. Unpublished Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, 196pp.
- Ministry of Construction, 1974. Report on the Nakdong Estuary: Industrial Site Investigation. Ministry of Construction, Seoul, 56 pp. (in Korean)
- Ministry of Construction, 1978. Report on the Seomjin River investigation. Ministry of Construction, Seoul, 203 pp. (in Korean)
- Murray, J.W., 1991. Ecology and Paleoecology of benthic foraminifera. John Wiley & Sons, New York, 397 pp.
- National Hydrographic Office of Korea, 1973. Maritime chart no. 240, Approaches to Gamagyang and Yeojaman, Korea.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J. and McKee, B.A., 1984. Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment disposal systems in the East

- China Sea. *Marine Geology*, v. 61, p. 13-24.
- Nichols, M.M. and Biggs, R.B., 1985. Estuaries. In: *Coastal Sedimentary Environments*, edited by Davies, R.A. Jr, Springer, Berlin.
- Officer, C.B., 1981. Physical dynamics of estuarine suspended sediments. *Mar. Geol.*, 40: 1-14.
- Owen, M.W. and Thorn, M.F., 1978. Effects of waves on sand transport by currents. *Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference*, 1675-1687.
- Park, B.K. and Han, S.J., 1985. The distribution of clay minerals in recent sediments of the Korea Strait. *Sedimentary Geology*, v. 41, p. 173-184.
- Park, B.K., Han, S.J. and Lee, J.W., 1976. Clay mineralogy of bottom sediments in the Jinhae Bay, Korea. *J. Ocean. Soc. Japan*, 32: 219-227.
- Park, S.C. and Yoo, D.G., 1988. Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait). *Marine Geology*, v.79, p. 65-75.
- Park, S.C., Yoo, D.G., Lee, K.W. and Lee, H.H., 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait). *Cont. Shelf Res.*, 19: 589-608.
- Park, Y.A. and Choi, J.Y., 1986. Factor analysis of the continental shelf sediments off the southeast coast of Korea-further evidence of relict sediments. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 21: 34-45.
- Park, Y.A., Kim, K.R., Park, S.C. and Bak, S.J., 1987. Characteristics of the bottom sediments from the continental shelf of the Korea Strait and some geochemical aspects of the shelf fine-grained sediments. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v. 22, p. 43-56.
- Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, 1: 148-190.
- Pritchard, P.W., 1955. Estuarine circulation patterns. *Proc. Amer. Soc. Civil Engr.*, 81: 717-1-717-11.
- Skempton, A.W. and Northey, R.D., 1952. The sensitivity of clays. *Geotechnique*, V. 3, p. 30-53.
- Sternberg, R.W., Larsen, L.H. and Miao, Y.T., 1985. Tidally driven sediment transport on the East China Sea continental shelf. *Continental Shelf Research*, v. 4, p. 105-120.
- Wells, J.T., 1988. Distribution of suspended sediment in the Korea Strait and southern Yellow Sea: onset of winter monsoons. *Marine Geology*, v. 83, p. 273-284.
- Wells, J.T. and Huh, O.K., 1984. Fall-season patterns of turbidity and sediment transport in the Korea Strait and southern Yellow Sea. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea* (Ed. by T. Ichiye).

Elsevier, Amsterdam, p. 387-397.

- Yoo, D.G., 1997. Sequence Stratigraphy, Depositional History and Environment of the Plio-Quaternary Deposits on the Korea Strai Shelf. Unpublished Ph.D. Thesis, Chungnam National University, Taejon, 212pp.
- Yoo, H.R., 1986. Remotely sensed water turbidity pattern on the Korean side of the Yellow Sea. *Ocean Research*, v. 8, p. 49-55.
- Zheng, Q.A. and Klemas, V., 1982. Determination of winter temperature patterns, fronts, and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery. *Remote Sensing Environments*, v. 12, p. 201-208.

## 6. 치자어 군집

- 김성, 1999. 대한해협 수괴 구조에 따른 자치어의 분포 특성. 인하대학교 이학박사학위 논문, 128pp.
- 김종만, 유재명, 명정구, 임주열, 1986. 한국연근해 어란 치어도감. 한국해양연구소보고서, BSPE 00060-98-3, 369 pp.
- 김진영, 강영실, 1995. 한국 동해남부해역 엘통이 난·자치어의 연직분포, 한국어류학회지 7(1): 64-70.
- 심재형, 김용서, 1996. 동물플랑크톤 생태연구법. 동화기술, 503pp.
- 유재명, 1991. 한국 남해 치자어에 관한 생태학적 연구. 부산수산대학교 이학박사학위 논문, 238pp.
- 유재명, 김성, 이은경, 1993. 여자만에서 장마에 의한 담수유입이 어란 및 치자어의 출현량에 미치는 영향. *해양연구*, 15(1) : 37-42.
- 유재명, 김성, 이은경, 이종수, 1992. 진해만 부유성 어란과 치자어 분포. *해양연구*, 14(2): 77-87.
- 유재명, 차성식, 1988. 광양만 부유성 난·자치어의 출현량 변동. *해양연구*, 10(1): 79-84.
- 이은경, 1996. 대한해협 치자어의 수직분포. 인하대학교 이학석사학위 논문, 100pp.
- 이택열, 김용익, 진평, 강용주, 1981. 한국근해 난치자 도감. 부산수대 해양연구소, 109pp.
- 임주열, 옥인숙, 1977. 한국근해에 있어서 멸치 안 치자어의 출현분포에 관한 연구. 국립수산진흥원연구보고, 14: 73-85.
- 정문기, 1977. 한국어도보. 일지사, 727 pp.
- 차성식, 1986. 황해 중동부 연안역의 부유성 난 자치어 군집에 관한 연구. 서울대학교 이학박사학위 논문, 144pp.
- 차성식, 박광재, 1991. 만경 동진강 하구의 부유성 난 자치어의 분포 양상. *한국해양학회지*, 26(1): 47-58.
- 차성식, 박광재, 유재명, 김용익, 1991. 월성 주변 해역의 부유성 난과 자치어의 분포. *한국어류학회지*, 3(1) : 11-23.



- 차성식, 허성희, 1988. 낙동강 하구부근의 부유성 난 자치어의 출현량 변동. 한국어업기술학회지, 24(4): 135-143.
- 冲山宗熊, 1981. 稚魚分類學入門⑦ タラ目幼期と分布型. 海洋と生物, 3(2): 94-99p.
- 한국해양연구소, 1995. 한국근해 해양환경도 작성연구 - 동해 남서부(1차년도). 한국해양연구소 보고서, 336pp.
- 한국해양연구소, 1997. 한국근해 해양환경도 작성연구 - 동해 남서부(2,3차년도). 한국해양연구소 보고서, 601pp.
- 한국해양연구소, 1998. 한국근해 해양환경도 작성연구 - 동해 남서부(4차년도). 한국해양연구소 보고서, 320pp.
- Kim, J.M., 1984. Studies on the distribution of the ichthyoplankton in the Tsushima Current regions during the autumn seasons. Phd. D. Thesis Univ. of Tokyou, 258pp.
- Masuda, H., K. Amaoka, C. Araga, T. Uyeno, T. Yoshino, and K. M. Muzik. 1984. The fishes of the Japanese archipelago. Tokai Univ. Press, 456pp. + 378pl.
- Nakabo, T., 1993. Fishes of Japan with pictorial keys to the species. Tokai Univ. Press, 1474pp.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world (3rd edition). John Wiley and Sons Inc., 600pp.
- Okiyama, M., 1988. An atlas of the early stage fishes in Japan. Tokai Univ. Press. 1154 pp.
- Okiyama, M., 1988. An atlas of the early stage fishes in Japan. Tokai Univ. Press. 1154 pp.



## 부록 I

1999년 2월 및 8월 해양조사 일지



STATEMENT OF WORKS

DATE: 2017

9-2-22

PROJECT NAME	함안 해역 수중
CLIENT	
PROJECT NO.	함안 & 함안
CONTRACT NO. (중도 계약서)	함안 17년
START DATE	

ST. #	POSITION	TIME		WEATHER				SARNO-TCP	TEMP.		DEPTH (M)	OTHERS.
		START	FINISH	SWL	DIR	WIND	WAVE		AIR	SEA		
S1	35-08.4 128-36.1	1205	1215	Bc	N	3	0.5	1024	6	31		
S2	34-35.0 128-39.5	1550	1600	Bc	W	1	1.0	1022	8	56		
S3	34-24.9 128-00	1830	1918	Bc	WNW	11	1.5	1024	8	46	TRAWLING CTD. 244.	
S4	33-31.82 126-32.95	0210	0215	Bc	S	4	0	1026	9	20	CTD	
S6	33-34.65 126-32.85	0240	0247	Bc	SW	2	0.5	1026	9	110	CTD	
S7	33-39.60 126-32.85	0305	0345	Bc	W	2	0.5	1026	9	125	CTD	
S8	33-40.86 126-32.97	0410	0430	Bc	NW	4	0.5	1025	9	121		
9	33-43.45 126-32.95	0440	0455	Bc	NW	3	0.5	1025	8	115		
10	33-46.40 126-33.05	0520	0540	Bc	W	2	0.5	1025	8	97		
11	33-49.4 126-33.06	0604	0612	Bc	NW	3	0.5	1025	8	82		
12	33-52.7 126-32.80	0636	0642	Bc	NW	4	0.5	1025	08	67		
13	33-55.4 126-33.10	0703	0710	Bc	NW	4	0.5	1025	08	59		
14	33-58.4 126-33.04	0730	0755	C	N	4	0.5	1025	08	58		
15	34-01.5N 126-33.05	0820	0825	C	NNE	4	0.5	1025	08	45		
S16	34-04.6N 126-33.18	0850	0922	C	NNE	4	0.5	1025	08	38		
E2	33-59.99N 126-00.01	1430	1640	C	NW	3	0.5	1019	08	81	CTD, Multi. 244, 245, 246	
E3	34-00.11 126-30.10	1845	1856	C	N	3	0.5	1019	07	67		



제 3 차 년도  
연 차 보 고 서

BSPP99005-00-1237-3

## 적조 확산 경로 예측 모델 및 방제 기술 개발 연구

A study on the coupled physics-biology model for  
predicting propagation and new methods for the  
suppression of Red Tide

한 국 해 양 연 구 소





## 제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “적조확산경로예측모델 및 방제기술개발연구”과제의 년차보고서로 제출합니다.

1999. 12

총괄책임자 : 장 만

분야책임자 : 유신재,

연구참여자 : 최진우, 신경순, 이택건,  
이종수, 정민철, 박명환,  
이우진, 곽승국, 조진하,  
황청희, 장경일, 석문식,  
남수용, 김현철, 김도연  
신경숙, 박지수, 이정아



# 요 약 문

## I. 제 목

적조 확산 경로 예측 모델 및 방제 기술 개발 연구

## II. 연구 개발의 목적의 중요성

### 1. 목 적

본 연구는 적조예보를 위한 확산 경로 예측 모델 개발이나 첨단 방제 기술 개발을 통하여 적조 피해를 최소화하는데 있다.

### 2. 중요성

- 우리나라 연안에서 적조 발생에 따른 피해는 대단히 크고 특히 연안 양식장에 주는 피해는 매우 파괴적이다. 그러나 아직까지도 이에 대한 방제 대책은 매우 미흡한 실정이다. 따라서 적조 피해를 최대한 줄일 수 있는 획기적이며 또한 효과적인 새로운 기술 개발이 매우 시급한 시점이다.

- 남해는 황해와 동중국해에서 기원되는 연안수와 외양수인 쿠로시오수가 유입, 혼합되어 궁극적으로 동해로 유입되는 길목에 위치한 해류 지배역이며, 양식 어장과 대규모 산업항만 밀집 지역으로 경제적으로 중요한 해역이나 여름철과 가을철에 걸쳐 빈발하는 적조로 인하여 경제적 손실이 막대하여 적조 이동, 확산 예보 체계의 구축이 시급함.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. Trophodynamics를 이용한 적조생물조절 연구

- 적조생물은행 구축 및 배양 연구
- 적조생물 환경생리연구
- 적조생물 휴면포자 연구
- 적조생물 제어 연구

#### 2. 모델입력 자료의 생성

- 1997년 가을철 관측된 제주해협과 대한해협에서의 일평균 해류분포 자료
- 국립수산진흥원에서 관측한 1997년 8월과 10월 수온, 염분 자료
- 남해의 여름철과 가을철 평균 해상풍 자료

3. 모델 입력자료와 해양순환모델을 이용하여 조석 강제력, 개방경계를 통한 해수 유·출입, 해표면 열·염플럭스 및 바람에 의해 강제된 남해의 1997년 8~10월 남해의 3차원 순환 재현

#### 4. 적조생물의 포자의 침강과 상승에 대한 모의실험

포자의 침강과 발아된 세포의 상승이 해류장에 의해 지역적으로 결정되는 과정을 5 가지 바람장 시나리오에 대해 IBM (개체위주모형)을 써서 모의실험하였음.

#### 5. 모델된 해류장에서의 적조생물의 증식과 확산에 대한 모의 실험

표층에 올라온 세포가 증식을 계속할 경우에 초기위치와 해류장에 의해 공간적으로 퍼져나가는 형태를 IBM (개체위주모형)을 써서 모의실험하였음

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

- 현재 보유중인 배양종은 모두 22속 38 종 47 strain으로 와편모조류 9속 17종 25 strain, 규조류 6속 14종 14 strain, 침편모조류 2속 2종 3 strain, 녹조류 2속 2종 2 strain, 유글레나류 1속 1종 1 strain, 남조류 1속 1종 1 strain 기타 편모조류 1 strain을 보유하고 있다. 현재 각 배양종에 대한 성장곡선 관찰 연구가 수행중에 있으며, 자연해수 뿐만 아니라 인공해수에서의 성장유형을 관찰하고 있다. 자연해수와 인공해수에서의 성장곡선이 차이를 보이고 있는데 이에 관한 심도있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

적조생물의 환경생리학적 연구는 크게 3부분으로 나누어진다. 1) 적조원인종의 질소원 및 인산원에 대한 반응, 2) 적조원인종의 온도변화에 대한 반응, 3) 적조원인종의 glucose 흡수.

질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 식물플랑크톤의 세포반응을 연구했다. *Gymnodinium sanguineum*, *Prorocentrum micans*, and *Skeletonema costatum*을 실험재료로 사용하였다. 연구목적은 고농도 및 저농도의 질소원 및 인산원에 대한 식물플랑크톤의 반응 비교, 인공해수와 자연해수에서의 비교, 와편모조류와 규조류간의 비교에 초점을 맞추었다. 자연해수에서 배양된 *G. sanguineum*은 고농도의 질소원 및 인산원 (N=46.64 mg/L, P=3.8 mg/L)에서 성장이 저해되었고, 인공해수에서 배양된 *P. micans*의 경우 질소원과 인산원이 고갈된 경우에도 성장이 저해되지 않았다. 와편모조류인 *G. sanguineum*의 성장과 세포활성도는 질소원 및 인산원이 저농도(below N=0.467 mg/L, P=0.019 mg/L)로 존재할 때 저해되었으나, 규조류인 *S. costatum*은 질소원과 인산원이 고갈된 배지에서 활발하게 성장을 하였다.

해양미세조류의 에너지원과 탄소원으로 glucose가 중요함에도 불구하고 이제까지 해양미세조류의 glucose 흡수에 관해서는 거의 연구된 바 없다. 본 연구팀은 7종의 적조원인종의 glucose 흡수와 그기작에 관하여 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 종 중에서 3종 (*Prorocentrum minimum*, *Gymnodinium sanguineum*, and *Cochlodinium polykrikoides*)의 glucose 흡수는 나머지 종 (*Prorocentrum micans*, *Scipsiella trichoidea*, and *Heterosigma akashiwo*)에 비해서 상대적으로 glucose 흡수가 활발하였다. Glucose 흡수에 대한 proton-dependence를 확인하기 위해서 protonophore인 CCCP를 사용하였을 때 glucose uptake는 5배정도 크게 감소하였

다. 반대로 fungal elicitor인 fusicoccin을 처리하였을 때 glucose 흡수가 크게 증가하였다. 6종의 glucose uptake는 pH 8에서 가장 높았지만 *H. akashiwo*는 pH7에서 가장 높은 결과를 나타내었다.

*G. sanguineum*과 *C. polykrikoides*를 각각 15°C, 20°C, 28°C로 설정하여 배양하였을 때 두 종간의 성장의 차이가 관찰되었다. *G. sanguineum*은 *C. polykrikoides*에 비해 배양 온도에 매우 민감하게 반응하였다. 각 온도에서 성장하고 있는 세포를 모아 세포내 구성성분의 양을 분석하였는데 *G. sanguineum*이 *C. polykrikoides*에 비해 탄수화물과 당지질 및 중성지질의 양의 변화가 크게 나타났다. 따라서 이러한 결과는 *C. polykrikoides*가 국내연안에서 적조를 오랜동안 유지하는데 관여하는 것으로 판단된다.

장승포 해역에서 조사한 휴면포자는 *Scrippsiella trochoidea*와 *Alexandrium tamarense* 휴면포자가 우점을 하였다. 발아실험을 한 결과, 접종 후 2일째부터 *Scrippsiella trochoidea*를 비롯한 각각의 종들이 발아를 하기 시작하였고, 이후 8일째까지 발아가 지속되었다. 휴면포자를 접종하고 발아하여 증식한 다음 다시 휴면포자가 형성되기까지는 약 3주정도 걸렸다. *Scrippsiella trochoidea*은 배양 2일째부터 운동성을 상실한 세포가 눈에 두드러졌으며, 20°C 온도보다는 5°C에서 훨씬 많은 양을 보였다. *Gymnodinium sanguineum*은 5°C의 조건에서 약 2배 가량 많았음이 관찰되었다.

대형해조류로부터 적조살상물질을 추출하여 그 특성을 분석하고 작용기작을 연구하였다. 다시마로부터 고분자 알긴산을 추출하고 고분자 알긴산으로부터 알긴산 유도체를 분리하여 적조생물에 처리하여 살상효과를 연구하였다. 이물질의 활용범위를 증가시키기 위하여 어류기생충인 스키테카와 고등식물, 고등동물의 세포에 처리하여 사멸효과를 관찰하였다. 특히 알긴산 유도체의 작용기작을 확인하기 위하여 삼투압, 세포내 신호전달과정 교란 등이 연구되었다.

향후의 연구는 적조생물은행 보유종의 증가와 이들의 성장곡선 및 세포내 구성성분의 분석을 통한 database 구축을 할 것이다. 적조생물의 환경스트레스에 관한 연구로는 질소원, 인산원, 탄소원의 흡수와 세포내 물질대사, 즉 광합성, 호흡 등과의 연관관계가 연구될 것이다. 휴면포자 연구는 휴면포자의 형성과 발아 동안의 생리학적 연구에 초점을 두고 연구를 수행할 것이며, 대형해조류로부터의 적조생물 제어 연구가 병행될 것이다.

- 해양순환모델 (POM)을 남해를 대상으로 한  $3\text{ km} \times 3\text{ km} \times 8$ 개층의 공간적 격자체계에 적용하여, 1997년 여름철과 가을철 (8~10월) 남해의 3차원 순환을 최초로 성공적으로 재현하였다. 해수순환은 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입과 열·염 플럭스, 해표면을 통한 열·염 플럭스 및 바람 강제력에 의해 유도되도록 설정하였다. 모델에 사용된 입력자료는 국립수산진흥원에 의해 1997년 8월과 10월에 남해에서 관측된 자료와 한국해양연구소와 국립해양조사원에 의해 제주해협과 대한해협에서 1997년 9월에 관측된 일평균 해류분포 자료이다. 본 사업을 통해 개발된 3차원 수치모델은 그 결과가 남해에서 관측된 많은 현상을 잘 설명하고 있으므로 적조 이동의 예측을 위한 도구로 활용되어 질 수 있다. 특히 개방경계조건을 포함한 3차원 모델의 구동을 위한 관측자료가 실시간으로 제공 될 경우 예측 결과는 준 실시간으로 제공될 수 있을 것이다. 개발된 모델은 적조의 이동 뿐 아니라 남해에 투기된 제반 오염물질 및 유출유의 이동·확산을 예측하는데 활용될 수 있다.

조석이 제거된 15일 평균된 해양순환모델 결과에 의하면 제주해협을 통해 유입되는 제주해류는 제주해협 통과 후 주축이 남쪽으로 편향되어 제주도과 대마도 사이를 통해 남해로 유입되는 대마난류와 함께 수심 80 m보다 깊은 해역에서 강한 동향류를 형성한다. 이때 동향류의 유속은 해역에 따라 25~85 cm/s의 범위를 보인다. 동향류의 외해역으로 편향은 표층에서 가장 두드러지며, 천해역과 연안역에서는 표층에 5~20 cm/s의 남향류가 주로 나타난다. 남쪽의 개방경계를 통해 남해로 유입되는 대마난류는 저층 부근에서는 천해역과 연안역까지 그 영향이 미치고 있어, 저층을 통한 대마난류의 유입이 연안역으로의 염 수송에 기여를 하는 것으로 나타났다. 남해의 연안역은 표층에서는 해수가 외해로 유출되고 저층을 통해서는 외해수가 유입되는 하구식 순환형태를 보인다. 공간적으로 일정한 북동풍이 남해의 3차원 순환에 미치는 영향은 평균적인 풍속 3 m/s의 북동풍을 부과할 경우 연안역에서 향류가 발달하며, 연안역으로부터 30 km 떨어진 외해역까지 표층에 국한되어 영향이 나타난다. 풍속을 10 m/s로 증가시키면 천해인 연안역에 20 cm/s 이상의 강한 서향류가 발달하고, 수직적으로는 표층으로부터 수심 약 20 m까지 그 영향이 나타난다. 현재 개발된 모델의 공간적인 해상도는 3 km로서 환경적, 그리고 경제적으로 중요한 많은 내만의 순환 및 내만과 외해역의 상호작용을 상세히 파악하기에

는 해상도가 거칠다. 향후 모델 해상도의 개선과 함께 내만과 외해역의 상호작용을 규명하는 관측에 노력이 기울여져야 할 것이다.

순환모델에서 예측된 해류장이 적조 형성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 두 가지의 모델로 나누어 접근하였다. 표층에서 형성된 포자가 가라앉아 일정한 시간이 경과한 후에 발아하고 발아한 세포가 표층으로 상승하는 과정을 Model I으로 설정하였다. 또한 상승한 세포가 증식을 계속할 때 확산되는 경로를 추적한 것이 Model II이다.

Model I에서 포자가 침강하고 나중에 표층으로 상승하는 확율을 계산한 결과 주로 연안역에 국한되는 것으로 나타났다. 침강과 상승은 해류의 수직 속도에 크게 좌우되며 바람이 지속될수록 침강이 많이 되었다. 포자의 상승이나 침강이 적조 발생의 충분조건은 아니겠지만 필요조건이라고 가정할 때 Model I의 결과는 연안역에서 적조가 빈발하는 이유를 잘 설명 하고있다.

포자에서 발아한 세포가 표층에 올라와 증식을 시작하는 위치가 연안역에 국한되고 이러한 초기 위치가 적조가 확산되는 유형을 결정짓게 되는데 Model II의 결과에 의하면 9월경의 바람장을 고려할 때 남해안에서 발생하는 적조는 고흥반도, 소리도, 옥지도 등의 적조 다발지역에서 형성되기 쉽다. 또한 Model II는 1995년과 1998년의 적조 확산 과정을 잘 재현하고 있다. 따라서 이러한 순환-생물 모델이 적조확산 경로 예측에 실제적으로 활용될 수 있음을 보여준다.



## SUMMARY

### I. Title

A study on the coupled physics-biology model for predicting propagation and new methods for the suppression of Red tide

### II. Objective and Significance

#### 1. Objective

The objective of this study is to develop a coupled physics-biology model and new methods for suppression, and to reduce the damage of HAB.

#### 2. Significance

- Harmful algal blooms have caused detrimental effects on aquaculture industry in the coastal waters of Korea. But good methods for the suppression is not enough until now. Therefore, the development of new methods to reduce the damage of HAB must be settled without delay.

- Intrusion of coastal waters from the Yellow and East China Seas and oceanic water originating from the Kuroshio, and mixing of those water masses occur in the South Sea, which then channel those water masses eventually into the East Sea. Oceanographic condition and current structure of the South Sea, thus, are mainly affected by this inflow/outflow system. The region is concentrated with commercial and fishing harbors, coastal industrial belt, and fisheries including fin- and shellfish farming, therefore, it is economically important area. The region is also subject to the frequent occurrence of HABs during summer and fall, which causes great economic losses to regional communities. Hence, it is urgently required to develop a prediction system for

the monitoring and coping with the movement and dispersion of the HAB.

### **III. Contents and Scope**

1. Research on tropodynamic control of HAB
  - Establishment of seed bank and culture study
  - Physiological research on HAB organisms
  - Encystment and excystment of HAB organisms
  - Top-down control of HAB
2. Creation of model input data
  - Distribution of diurnally-averaged currents in the Cheju and Korea Straits taken in fall 1997.
  - Temperature and salinity data taken by the National Fisheries research and Development Institute in August and October 1997.
  - Surface wind stress over the South Sea in summer and fall.
3. Simulation of three-dimensional circulation of the South Sea during August~October 1997 driven by tide, inflow/outflows across open boundaries, and surface heat and salt fluxes using the ocean circulation model and input data.
4. How the sinking of spores and ascending of germinated cells are spatially affected by the current field was simulated using an IBM (Individual-Based Model) on the modelled current fields with the five wind field scenarios.
5. The spatial pattern of HAB outbreaks determined by the initial position of the reproducing cells and current field was simulated using an IBM.

### **IV. Results and Suggestion for application**

- We have 22 genus, 38 species, 47 strains of HAB organisms. It was included Dinophyceae (9 genus, 17 species, 25 strain), Bacillariophyceae (6 genus,

14 species, 14 strain), Raphidophyceae (2 genus, 2 species, 3 strains), Chlorophyceae (2 genus, 2 species, 2 strains), Euglenophyceae (1 genus, 1 species, 1 strain), Cyanophyceae (1 genus, 1 species, 1 strain), and other (1 strain). Growth curve of each phytoplankton were performed in natural sea water and artificial sea water.

Research goals in environmental physiology were placed the focus on three points; 1) Response of phytoplankton on the various nitrogen and phosphate sources, 2) Response of phytoplankton on temperature, 3) Glucose uptake of phytoplankton.

We were investigated on cellular response of phytoplankton in various nitrogen and phosphate sources. Experimental target phytoplanktons were *Gymnodinium sanguineum*, *Prorocentrum micans*, and *Skeletonema costatum*. Research goals were placed the focus on three points; contrast high with low concentration of nitrogen and phosphate sources, contrast natural sea water with artificial sea water, and contrast dinoflagellates with diatoms. Growth of *G. sanguineum* was suppressed in natural sea water contained high concentration (N=46.64 mg/L, P=3.8 mg/L) of nitrogen and phosphate sources. *P. micans* in artificial sea water was not suppressed in the condition of nitrogen and phosphate starvation. Growth and cellular activity of *G. sanguineum*, dinoflagellate, was suppressed in low concentration (below N=0.467 mg/L, P=0.019 mg/L) of nitrogen and phosphate sources. Growth of *S. costatum*, diatom, was active in low concentration of nitrogen and phosphate sources.

Despite the relative importance of glucose as an energy and carbon source in marine phytoplankton, relatively few investigations have been conducted on the biochemical aspects of the hexose carrier on the plasma membrane. We were studied on glucose uptake and its properties using seven species of bloom-causing phytoplankton in Korean coastal ocean. In the species used for experiments, glucose uptake of three species (*Prorocentrum minimum*, *Gymnodinium sanguineum*, and *Cochlodinium polykrikoides*) were relatively active contrast with other species (*Prorocentrum micans*, *Scripsiella trichoidea*,

and *Heterosigma akashiwo*). To confirm the probable proton-dependence of glucose uptake, protonophore CCCP was used to monitor changes in glucose uptake. In the presence of this compounds, uptake efficiency decreased by about 5 fold. In contrast, the fungal elicitor fusicoccin, which binds to plasma membrane proton-ATPase to stimulate proton-extrusion into the medium, enhanced glucose uptake. Glucose uptake of five species was higher at pH 8, but uptake of *H. akashiwo* was active at pH 7. When CCCP, one of the energy uncoupler, were treated, uptake rate was largely decreased.

When *G. sanguineum* and *C. polykrikoides* were incubated in various temperatures (15°C, 20°C, 28°C), growth curve of one species were different from others. *G. sanguineum* was more sensitive than *C. polykrikoides*. In the assay of intracellular biochemical composition, carbohydrate, galactolipid, and neutral lipid in *G. sanguineum* cells were changed in various temperature.

We performed excystment experiment of *S. trochoidea* and *A. tamarensis* collected in Changsungpo. Cyst of *S. trochoidea* were germinated at 2 days, then continued at 8 days. Life cycle of cyst was 3 weeks. Germinated *S. trochoidea* cell was not move at 2 days and this phenomenon was shown in cells grown at 5°C more than cells grown at 20°C.

Anti-phytoplanktonic materials were extracted from macroalgae, its properties was characterized. And we studied its action mechanisms. Alginic acid polymer was extracted from *Laminaria* spp. and alginic acid derivatives were isolated from the polymer. When alginic acid derivatives were treated on HAB organisms, phytoplanktons were died. We applied this materials to Scutica, higher plant cells, and animal cells. Cells treated with alginic acid derivatives were reduced cell volume and then died. For the delineation of action mechanism, we performed osmotic effect and disruption of signal transduction by alginic acid derivatives.

In the future study, database for HAB organism will be established through determination of growth curve and assay of intracellular biochemical composition. It will be investigated the relationship between nutrient uptake and

photosynthesis and/or intracellular metabolism. Physiological studies in encystment and excystment will be performed.

- Three-dimensional circulation of the South Sea in summer and fall, August through October, 1997 has been successfully simulated for the first time applying the ocean circulation model (POM) to a spatial grid system having 3 km $\times$ 3 km resolution in the horizontal and 8 layers in the vertical. The circulation was set to be driven by tide, inflow/outflows across open boundaries, and surface thermohaline fluxes. Model input data consist of hydrographic data taken in August and October 1997 by the National Fisheries Research and Development Institute, and diurnally-averaged currents in the Cheju and the Korea Straits taken by the Korea Ocean Research and Development Institute. The circulation model developed in this project turns out to be applicable to the prediction of HABs since it reproduced many observed features in the South Sea. Especially, quasi-real-time model results would be available provided observational data including the open boundary conditions could be put into the model on a real-time basis. The model can also be utilized for the prediction of the movement and dispersion of other dumped wastes and spilled oil.

According to the 15-day averaged model results, the inflow through the Cheju Strait carried by Cheju Current shifts to the south and it forms strong eastward currents in areas deeper than 80 m depth together with the Tsushima Current, that enters the South Sea from the south between Cheju-Do and Tsushima Island. The speed of the eastward currents ranges from 25 cm/s to 85 cm/s. The offshore shift of the eastward currents is most pronounced at the surface, and southward currents of about 5 cm/s ~ 20 cm/s dominate over shallow areas and coastal embayments at the surface. The Tsushima Current entering the model domain through the southern open boundary reaches over shallow areas and coastal area near the seabed, and the bottom intrusion contributes to the supply of salt to the coastal area. Many of the coastal embayments along the South Sea exhibit an estuary-type circulation that is

characterized by a surface outflow and an inflow near the seabed. Westward currents are developed in the coastal area in response to the spatially-uniform monthly mean climatological northeasterly wind of 3 m/s. The wind effects are realized in an area 60 km off the coast confined to the sea surface. An increase in wind speed by 10 m/s results in strong westward coastal currents with a speed stronger than 20 cm/s, and the wind effect penetrates into 20 m depth in the vertical.

The present 3 km spatial resolution, however, is not enough to resolve the circulation, in detail, of many environmentally and economically important coastal embayments and their interaction with offshore area. The model resolution needs to be more refined with the linkage of observational efforts focused on the interaction between the inner shelf and middle or outer shelf areas

To analyze the effects of the predicted current field on the formation of HAB, two models were developed. The Model I was for the sinking process of spores formed at the surface and ascending process of the germinated cells from the settled spores at the bottom. Model II was for the spatial development of HAB from the germinated cells that surfaced and began active reproduction.

The success of spore sinking and ascending afterwards calculated from the Model I was limited to nearshore area. Sinking and ascending were dependant upon the vertical velocity of the current field. The longer the wind blowed, the more the spores settled to the bottom. The sinking and ascending of spores may not be sufficient condition of HAB outbreaks, but if we assume that they are necessary condition of outbreaks, the results of the Model I explains why HAB outbreaks are usually initiated in nearshore area in the South Sea.

Since sinking of spores and ascending of germinated cells are restricted to nearshore area and as a consequence, this initial position of the cells might determine the spatial pattern of outbreaks once they are developed. According to the results of the Model II, the HAB outbreaks in the South Sea might tend

to occur in the so-called HAB frequented-areas such as Go-Heung Peninsula, Sori-Do, and Yogji-Do. Also, the Model II reproduced the spatial development of the HAB events in 1995 and 1998, which suggests that physics-biology model such as the one used in this study can be practically utilized in predicting the spatial development of HAB outbreaks.

# Contents

Summary .....	I
Contents .....	XIV
List of figures .....	XXIV
list of tables .....	XLII
Chap. 1. Trophodynamic controls HAB	
I. Seed bank .....	1
1. Introduction .....	1
2. Instruments for establishment and operation of seed bank .....	3
3. Culture of phytoplankton .....	3
A. Collection and isolation of phytoplankton .....	3
B. Culture .....	4
4. Kinds and characteristics of phytoplankton in seed bank .....	4
A. Dinophyceae .....	5
① <i>Prorocentrum</i> genus .....	5
② <i>Gymnodinium</i> genus .....	6
③ <i>Gyrodinium</i> genus .....	6
④ <i>Cochlodinium</i> genus .....	7
⑤ <i>Alexandrium</i> genus .....	7
⑥ <i>Ceratium</i> genus .....	7
⑦ <i>Heterocapsa</i> genus .....	8
⑧ <i>Scrippsiella</i> genus .....	8
B. Bacillariophyceae .....	9
① <i>Chaetoceros</i> genus .....	9
② <i>Nitzschia</i> and <i>Pseudonitzschia</i> genus .....	9
③ <i>Rhizosolenia</i> genus .....	9
④ <i>Skeletonema</i> genus .....	10
⑤ <i>Thalassiosira</i> genus .....	10
C. Raphidophyceae .....	10
① <i>Heterosigma</i> genus .....	10
② <i>Chattonella</i> genus .....	11
D. Eugleophyceae .....	11



E. Others .....	11
5. Culture of phytoplankton in artificial sea water .....	11
6. Growth curve of phytoplankton in natural sea water and artificial sea water .....	12
A. Determination of growth of phytoplankton .....	12
B. Growth curve of phytoplankton in natural sea water and artificial sea water .....	12
7. Future study .....	13
II. Physiological experiments of HAB organisms .....	14
1. Introduction .....	14
2. Changes of growth and intracellular biochemical composition of phytoplankton on the changes of N-and P-sources .....	15
A. Materials and methos .....	15
(1) Materials .....	15
(2) Culture and growth of phytoplankton .....	15
① Culture and growth of phytoplankton in natural sea water .....	15
② Culture of phytoplankton in artificial sea water .....	15
(3) Determination of nitrogen and phosphate concentration in culture medium .....	16
(4) Assay of intracellular biochemical composition .....	17
① Extraction of lipid .....	17
② Quantification of phospholipid, galactolipid, and neutral lipid .....	17
③ Protein assay .....	17
④ Carbohydrate assay .....	17
B. Results and discussions .....	17
(1) Growth of <i>G. sanguineum</i> grown in natural sea water on the various nitrogen and phosphate concentration .....	18
(2) Growth of <i>P. micans</i> grown in artificial sea water on the various nitrogen and phosphate concentration .....	19
(3) Growth of <i>G. sanguineum</i> and <i>S. costatum</i> grown in natural sea water on the various nitrogen and phosphate concentration .....	20
(4) Biochemical composition of <i>G. sanguineum</i> and <i>S. costatum</i> grown in natural sea water on the various nitrogen and phosphate concentration .....	21
3. Biochemical composition of <i>G. sanguineum</i> and <i>C. polykrikoides</i> on the various temperatures .....	23
A. Materials and methods .....	23
(1) Materials .....	23
(2) Culture, growth and Biochemical composition of <i>P. minimum</i> .....	23

B. Results and discussions .....	23
4. Glucose uptake of phytoplankton .....	26
A. Materials and methods .....	26
(1) Materials and culture of phytoplankton .....	26
(2) [ <sup>14</sup> C]glucose uptake of phytoplankton .....	26
B. Results and discussions .....	26
5. Future .....	28
III. Encystment and excystment of HAB organisms .....	29
1. Introduction .....	29
2. Materials and methods .....	30
A. Field survey .....	30
B. Excystment of the cyst harvested in the field .....	30
C. Encystment in the lab. ....	31
(1) Encystment on physical environment .....	31
(2) Encystment by proliferation of vegetative cells .....	31
3. Results .....	31
A. Distribution of cysts in Changsungpo and excystment .....	31
(1) Species composition of cysts .....	31
(2) Encystment and excystment .....	32
B. Encystment in the lab. ....	32
(1) <i>Scrippsiella trochoidea</i> .....	32
(2) <i>Gymnodinium sanguineum</i> .....	32
4. Discussion .....	33
IV. Research and development of anti-phytoplanktonic materials from macroalgae	
1. Introduction .....	35
2. Materials and methods .....	36
A. Materials .....	36
B. Production of CNY218 .....	36
(1) Extraction of alginic acid polymer .....	36
(2) Production of alginic acid oligo-derivatives .....	36
3. Results .....	37

A. Characteristics of CNY218 .....	37
B. Death of HAB organisms by CNY218 .....	37
C. Death of Scutica, higher plant cells and animal cell .....	38
D. Putative action mechanisms of CNY218 .....	38
4. Conclusion .....	39
References .....	41
Chap. 2. A coupled physics-biology model of HAB	
I. Introduction .....	103
1. Circulation characteristics of the South Sea .....	103
2. HAB model .....	105
II. Physical circulation model .....	106
1, Governing equations for the three-dimensional model .....	106
2. Depth-integrated equations .....	110
3. Numerical methods .....	111
4. Modeling procedure .....	113
A. Model domain and grid configuration .....	114
B. Input data .....	115
C. Initial and boundary conditions .....	118
(1) Initial conditions .....	118
(2) Horizontal boundary conditions .....	118
(3) Vertical boundary conditions .....	120
5. Application of the model .....	121
III. HAB model .....	123
1. Statement of the problems .....	123
2. Basic hypothesis .....	123
3. Assumptions .....	124
4. Movement of spores and cells .....	124
5. Model run .....	125
A. Current field scenarios .....	125
B. Model I .....	125
(1) Spore sinking simulations .....	125

(2) Simulations on ascending of the germinated cells .....	126
(3) Spatial development of HAB .....	126
6. Population model and parameters .....	127
IV. Results of the circulation model .....	128
1. No wind case .....	128
2. Wind effects .....	131
A. Case for the climatological mean wind .....	132
B. Case for a strong wind .....	133
	134
V. Results of the HAB model .....	134
1. Model I .....	134
2. Model II .....	136
VI. Discussions and conclusions .....	136
1. Circulation model .....	136
2. HAB model .....	137
Cited literature .....	139

# 목 차

요약 .....	I
목차 .....	XIV
그림 목차 .....	XXIV
표 목차 .....	XLII
제 1 장 Trophodynamics를 이용한 적조원인생물 조절연구	
제 1 절 적조생물은행 .....	1
1. 서 론 .....	1
2. 장목분소 적조생물은행 구축 및 운영을 위한 장비 및 기기 .....	3
3. 식물플랑크톤의 배양 .....	3
가. 미세조류의 채집 및 분리 .....	3
나. 배 양 .....	4
4. 배양종의 종류 및 특징 .....	4
가. 와편모조(Dinophyceae) .....	5
① <i>Prorocentrum</i> 속 조류 .....	5
② <i>Gymnodinium</i> 속 조류 .....	6
③ <i>Gyrodinium</i> 속 조류 .....	6
④ <i>Cochlodinium</i> 속 조류 .....	7
⑤ <i>Alexandrium</i> 속 조류 .....	7
⑥ <i>Ceratium</i> 속 조류 .....	7
⑦ <i>Heterocapsa</i> 속 조류 .....	8
⑧ <i>Scrippsiella</i> 속 조류 .....	8
나. 규조 (Bacillariophyceae) .....	9
① <i>Chaetoceros</i> 속 조류 .....	9
② <i>Nitzschia</i> and <i>Pseudonitzschia</i> 속 조류 .....	9
③ <i>Rhizosolenia</i> 속 조류 .....	9
④ <i>Skeletonema</i> 속 조류 .....	10
⑤ <i>Thalassiosira</i> 속 조류 .....	10
다. 침편모조 (Raphidophyceae) .....	10
① <i>Heterosigma</i> 속 조류.....	10
② <i>Chattonella</i> 속 조류 .....	11
라. 유글레나조 (Eugleophyceae) .....	11

마. 기타 조류 .....	11
5. 적조원인종의 인공해수 배양 .....	11
6. 자연해수 및 인공해수에서의 적조원인종의 성장곡선 .....	12
가. 적조원인종의 성장측정 .....	12
나. 자연해수 및 인공해수에서의 적조원인종의 성장곡선 .....	12
7. 향후계획 .....	13
제 2 절 적조생물 생리연구 .....	14
1. 서 론 .....	14
2. 질소원 및 인산원의 변화에 대한 식물플랑크톤의 성장 및 세포구성성분 변화	
가. 재료 및 방법 .....	15
(1) 실험재료 .....	15
(2) 식물플랑크톤의 배양 및 성장측정 .....	15
① 자연해수에서의 식물플랑크톤의 배양 및 성장측정 .....	15
② 인공해수에서의 식물플랑크톤의 배양 .....	15
(3) 배지내 질소원 및 인산원 농도 측정 .....	16
(4) 식물플랑크톤 세포내 생화학적 구성성분 분석 .....	17
① 지질의 추출 .....	17
② 중성지질, 당지질, 인지질의 정량 .....	17
③ 단백질 정량 .....	17
④ 탄수화물 정량 .....	17
나. 결과 및 고찰 .....	17
(1) 자연해수에서 성장하는 <i>G. sanguineum</i> 의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화 .....	18
(2) 인공해수에서 성장하는 <i>P. micans</i> 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화 .....	19
(3) 인공해수에서 성장하는 <i>G. sanguineum</i> 과 <i>S. costatum</i> 의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화 .....	20
(4) 인공해수에서 성장하는 <i>G. sanguineum</i> 과 <i>S. costatum</i> 의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 세포구성성분의 변화 .....	21
3. <i>G. sanguineum</i> 과 <i>C. polykrikoides</i> 의 온도 변화에 따른 생화학적 구성성분 분석 .....	23
가. 실험재료 및 방법 .....	23
(1) 실험재료 .....	23
(2) <i>P. minimum</i> 의 배양, 성장측정 및 생화학적 구성성분 분석 .....	23

나. 결과 및 고찰 .....	23
4. 적조원인종의 glucose 흡수 .....	26
가. 실험재료 및 방법 .....	26
(1) 실험재료 및 배양 .....	26
(2) 식물플랑크톤의 [ <sup>14</sup> C]glucose 흡수 .....	26
나. 결과 및 고찰 .....	26
5. 향후계획 .....	28
제 3 절 적조원인 생물의 휴면포자 형성과 발아 .....	29
1. 서 론 .....	29
2. 재료 및 방법 .....	30
가. 현장조사 .....	30
나. 현장 휴면포자의 발아 .....	30
다. 실험실내 휴면포자 형성의 실험 기간 .....	31
(1) 물리적 환경요인에 의한 Encystment .....	31
(2) 영양세포 증식에 의한 Encystment .....	31
3. 결 과 .....	31
가. 장승포 연안해역의 휴면포자 분포 및 발아실험 .....	31
(1) 휴면포자의 증조성 .....	31
(2) 휴면포자의 발아 및 형성 .....	32
나. 실험실내에서의 휴면포자 형성 .....	32
(1) <i>Scrippsiella trochoidea</i> .....	32
(2) <i>Gymnodinium sanguineum</i> .....	32
4. 고 찰 .....	33
제 4 절 대형 해조류로부터 적조생물 제어물질 개발연구	
1. 서 론 .....	35
2. 재료 및 방법 .....	36
가. 연구재료 .....	36
나. CNY218 제조 .....	36
(1) 고분자 알긴산 추출 .....	36
(2) 알긴산 올리고 유도체의 제조 .....	36
3. 결 과 .....	37

가. CNY218의 특성 .....	37
나. CNY218에 의한 적조생물의 사멸 .....	37
다. CNY218에 의한 어류기생충, 고등식물 및 동물세포의 사멸 .....	38
라. CNY218의 예상작용기작 .....	38
4. 결    론 .....	39
참 고 문 헌 .....	41
제 2 장 적조확산경로예측을 위한 물리-생물 모델 개발	
제 1 절 서    론 .....	103
1. 남해의 해양 순환적 특성 .....	103
2. 적조생물 모델 .....	105
제 2 절 물리 순환모델 .....	106
1, 3차원 모델 지배방정식 .....	106
2. 수직 적분된 방정식 .....	110
3. 수치해석방법 .....	111
4. 수치모델의 구성 .....	113
가. 모델영역 및 격자구성 .....	114
나. 모델 입력자료 .....	115
다. 초기조건 및 경계조건 .....	118
(1) 초기조건 .....	118
(2) 수평경계조건 .....	118
(3) 수직경계조건 .....	120
5. 모델의 적용 .....	121
제 3 절 적조모델 .....	123
1. 문제의 제기 .....	123
2. 기본 가설 .....	123
3. 가    정.....	124
4. 포자나 세포의 이동 .....	124
5. 모델 시행 .....	125
가. 해류장 시나리오 .....	125
나. Model I .....	125
(1) 포자 침강 경로 모의 실험 .....	125



(2) 포자 발아후 경로 실험 .....	126
(3) 적조의 확산의 이동 .....	126
6. 개체군 모델과 매개변수 .....	127
제 4 절 순환모델결과 .....	128
1. 바람응력을 고려하지 않은 경우 .....	128
2. 바람의 영향 .....	131
가. 평균 바람장을 부과한 경우 .....	132
나. 강한 바람을 부과한 경우 .....	133
제 5 절 적조모델 결과 .....	134
1. 포자의 침강과 상승 .....	134
2. 적조의 확산과정 .....	136
제 6 절 고찰 및 결론 .....	136
1. 순환모델 .....	136
2. 적조모델 .....	137
참 고 문 헌 .....	139

## List of Figures

- Fig. 1-1. Seed bank and Mass culture set in Changmok
- Fig. 1-2. Diagram on collection, isolation, and culture of HAB organisms
- Fig. 1-3. *Prorocentrum triestinum*.
- Fig. 1-4. *Prorocentrum minimum*.
- Fig. 1-5. *Prorocentrum micans*.
- Fig. 1-6. *Prorocentrum dentatum*
- Fig. 1-7. *Gymnodinium sanguineum*.
- Fig. 1-8. *Gymnodinium mikimotoi*.
- Fig. 1-9. *Gyrodinium imputicum*.
- Fig. 1-10. *Gyrodinium aureolum*.
- Fig. 1-11. *Cochlodinium polykrikoides*
- Fig. 1-12. *Alexandrium tarmarensense*.
- Fig. 1-13. *Alexandrium catenella*
- Fig. 1-14. *Ceratium tripos*
- Fig. 1-15. *Heterocapsa triquetra*
- Fig. 1-16. *Scrippsiella trochoidea*
- Fig. 1-17. *Chaetoceros* sp.
- Fig. 1-18. *Rhizosolenia* sp.
- Fig. 1-19. *Skeletonema costatum*.
- Fig. 1-20. *Thalassiosira* sp.
- Fig. 1-21A and B. Growth curve of dinoflagellate in natural sea water
- Fig. 1-22. Growth curve of diatoms in natural sea water
- Fig. 1-23. Growth curve of flagellates in natural sea water
- Fig. 1-24A and B. Growth curve of dinoflagellate in artificial sea water
- Fig. 1-25. Growth curve of diatoms in artificial sea water
- Fig. 1-26. Growth curve of flagellates in artificial sea water
- Fig. 1-27. Growth curve of *G. sanguineum* in F/2 media contained various concentration of NaNO<sub>3</sub> as nitrogen source

- Fig. 1-28. Growth curve of *G. sanguineum* in F/2 media contained various concentration of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  as phosphate source
- Fig. 1-29. Changes of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and  $\text{NaNO}_3$  concentration in F/2 media
- Fig. 1-30. Changes of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and  $\text{NaNO}_3$  concentration in F/2 media
- Fig. 1-31. Growth curve of *P. micans* in artificial sea water contained various concentration of  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  as nitrogen source
- Fig. 1-32. Growth curve of *G. sanguineum* in artificial sea water contained various concentration of  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  as nitrogen source
- Fig. 1-33. Growth curve of *S. costatum* in artificial sea water contained various concentration of  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  as nitrogen source
- Fig. 1-34. Changes of intracellular protein concentration in *G. sanguineum* and *S. costatum* grown in artificial sea water contained various nitrogen and phosphate sources
- Fig. 1-35. Changes of intracellular soluble and storage carbohydrate concentration in *G. sanguineum* and *S. costatum* grown in artificial sea water contained various nitrogen and phosphate sources.
- Fig. 1-36. Changes of intracellular phospholipid, galactolipid and neutral lipid concentration in *G. sanguineum* grown in artificial sea water contained various nitrogen and phosphate sources
- Fig. 1-37. Changes of intracellular phospholipid, galactolipid and neutral lipid concentration in *S. costatum* grown in artificial sea water contained various nitrogen and phosphate sources
- Fig. 1-38. Intracellular biochemical composition of *G. sanguineum* and *C. polykrikoides* collected coastal water
- Fig. 1-39. Growth curve of *G. sanguineum* and *C. polykrikoides* in various temperatures
- Fig. 1-40. Intracellular protein and carbohydrate profiles of *G. sanguineum* and *C. polykrikoides* in various temperatures.
- Fig. 1-41. Intracellular lipid profiles of *G. sanguineum* and *C. polykrikoides* in various temperatures.

- Fig. 1-42. Glucose uptake of seven species of phytoplankton
- Fig. 1-43. Effect of glucose concentration on glucose uptake
- Fig. 1-44. Effect of CCCP and FC on glucose uptake
- Fig. 1-45. Effect of pH on glucose uptake
- Fig. 1-46. Life cycle of dinoflagellates during encystment
- Fig. 1-47. Collective station of cysts in Changsungpo
- Fig. 1-48. Hand core used in collection of cysts.
- Fig. 1-49. Panning method for concentration of living cysts
- Fig. 1-50. Archeopyle of cysts
- Fig. 1-51. Morphology of *S. trochoidea* cyst
- Fig. 1-52. Cysts of *S. trochoidea* and *G. sanguineum* formed in lab.
- Fig. 1-53. Relationship between encystment and temperature
- Fig. 1-54. Red eyespot of cyst
- Fig. 1-55. Chemical composition of CNY218.
- Fig. 1-56. Death of *C. polykrikoides* by treatment of CNY218
- Fig. 1-57. Death of *G. sanguineum* by treatment of CNY218
- Fig. 1-58. Effect of CNY218 concentration on phytoplankton death
- Fig. 1-59. Death of *Scutica* by treatment of CNY218
- Fig. 1-60. Death of carrot (*Daucus carota* L.) suspension cells by treatment of CNY218
- Fig. 1-61. Death of animal cells (hybridoma) treatment of CNY218
- Fig. 2-1. Coastline, bottom topography, and the inflow/outflow system of the South Sea. Isobaths given in meters are contoured every 20 meters, and topography of the east Asian marginal seas are also shown in an inset in the upper left corner with 50 m, 100 m, 200 m, and 500 m isobaths. The rectangular area enclosed by long-dash lines is the model domain in which an ocean circulation model is applied. Diurnally-averaged mean currents, which are used for the specification of the inflow/outflow, were obtained on the two ADCP traverse lines denoted by dashed lines in the Cheju and the Korea

Straits. A thick meridional line in the middle of the model domain denotes the line where the vertical structure of model-generated flow field is examined. Coastal tide stations used for the model/data comparison are shown with closed circles. Geographic locations referred to in the text are also shown with open circles with their names in an inset in the lower left corner.

Fig. 2-2. Spatial structure of the volume transport (solid lines) and depth-averaged velocity (dotted lines) specified across three open boundaries based on the observed diurnally-averaged flow in the Cheju Strait in the Korea Strait in fall, 1997. The volume transport specified across the southern boundary is the difference between eastern and western boundaries, and the spatial pattern of the transport and the velocity is arbitrary. Bottom topography across open boundaries is also shown.

Fig. 2-3. Horizontal distribution of observed surface temperature and salinity in the South Sea in August 8-16 (left panel) and October 8-29 (right panel), 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

Fig. 2-4. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in August 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

Fig. 2-5. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in October 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

Fig. 2-6. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from January to June with a spatial resolution of  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998).

Fig. 2-7. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from July to

December with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998)..

Fig. 2-8. Spatial arrangements of model variables on an Arakawa C-grid near the western boundary. The western open boundary coincides with the line denoted by the subscript B.

Fig. 2-9. A schematic illustration of model run for Case 1 in Table 1. The model is forced by a specification of time-varying tidal currents and steady inflow/outflows observed in fall 1997 across open boundaries, and time-varying temperature and salinity based on the observation in August and October both at the sea surface and across open boundaries. The tidal currents are pre-determined by a three-dimensional barotropic tide model, where five major constituents of tidal currents are computed by specifying free surface elevation across open boundaries. The model was initially quiescent with  $\eta = 0$  inside the model domain, and diagnostic calculation was performed for 10 days with fixed three-dimensional temperature and salinity fields observed in August, and with time-varying tidal currents and inflow/outflows across open boundaries. The prognostic calculation was then followed with the specification of observed temperature and salinity at the sea surface and across open boundaries for 82 days. Linearly interpolated, time-varying temperature and salinity are specified from August 15 to October 15 based on the observations in August and October, and the surface and boundary forcing applied before August 15 and after October 15 is fixed with those values in August and October, respectively. Also shown are periods of averaging the model results for 15 days in order to examine the subtidal circulation in August, September, and October.

Fig. 2-10. Total kinetic energy as a function of time for Case 1 in Table 1. Solid line denotes the variation of 15-day moving-averaged total

kinetic energy.

- Fig. 2-11. Outline of numerical experiments considering the wind forcing. The wind is applied in September during which the wind speed is increased linearly for the first five days, and the constant maximum speed is maintained for 10 days followed by a linear decrease in the speed until the speed is zero.
- Fig. 2-12. Schematic diagram of modelled processes. The model consists of two parts; Model I is for vertical movement of spores, and Model II is for spatial development of HAB due to currents and reproduction of organisms.
- Fig. 2-13. Five scenarios of current field from the five stages of wind forcing of Fig. 2-11 were used. Case I is with no wind forcing, Case II is with increasing wind forcing, Case III is with continuous maximum wind forcing, Case IV is with decreasing wind forcing, and Case V is with no wind.
- Fig. 2-14. Example of Lagrangian ensemble model. a) 5 cells moving in a current field with strong advection, b) 5 cells moving in a current field with weak advection.
- Fig. 2-15. Example of vertical movement of spores in a three-dimensional current field. This correspond with Model I.
- Fig. 2-16. Growth of *Cochlodinium polykrikoides*. a) in 5 salinity condition at 15 °C, b) an example of deriving growth rate.
- Fig. 2-17. Model (Cal)/data (Obs) inter-comparison for the amplitude and phase of four dominant tidal constituents. ME and ARE denote the mean and the absolute relative errors, respectively, as defined in the text.
- Fig. 2-18. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of ebb tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 1 in Table 1).
- Fig. 2-19. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of flood tides at Pusan computed using the

three-dimensional baroclinic circulation model (Case 1 in Table 1).

Fig. 2-20. Computed 15-day averaged flow field at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-21. Subtidal surface currents in the South Sea based on the observation by (a) Lie and Cho (1997), and (b) Mitta and Ogawa (1984).

Fig. 2-22. Vertical section of the computed 15-day averaged horizontal velocity vector on a meridional line south of Namhae-Do (thick solid line in Fig. 1) in September for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-23. Computed 15-day averaged density distribution at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-24. Horizontal distribution of observed temperature and salinity in August (top panel), and computed 15-day averaged temperature and salinity at 50 m depth in August (bottom panel) for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-25. Horizontal distribution of computed 15-day averaged temperature at surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-26. Horizontal distribution of computed 15-day averaged salinity surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 1 in Table 1.

Fig. 2-27. Time-space plots for the diurnally-averaged east-west component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

Fig. 2-28. Time-space plots for the diurnally-averaged north-south component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig.



1) at selected depths when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

Fig. 2-29. Evolution of diurnally-averaged surface currents in time when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied.

Fig. 2-30. Time-space plots for the diurnally-averaged east-west component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

Fig. 2-31. Time-space plots for the diurnally-averaged north-south component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

Fig. 2-32. Evolution of diurnally-averaged surface currents in time when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied.

Fig. 2-33. The positions of spores settled at the bottom after 30 days in the current field are indicated. a) The spores were evenly distributed initially on a  $100 \times 45$  grid, b) the result of the case I, c) the result of the case II, d) the result of the case III, e) the result of the case IV, and f) result of using case V.

Fig. 2-34. Ascending of the germinated cells from the settled spores in the sinking experiment (Fig. 2-33). The position of the cells surfaced after 3 days are indicated vertical swimming velocity from Jung *et*

*al.* (1998) was used. a) model domain, b) the result of the case I, c) the result of the case II, d) the result of the case III, e) the result of the case IV, and f) result of using case V.

Fig. 2-35. Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.3 /day and growth rate was 0.35/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-36. Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.65/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-37. Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-38. Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.3 /day and growth rate was 0.35/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-39. Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.65/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-40. Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-41. Hindcast of the 98 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 06. Mortality was 0.55/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The

distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-42. Hindcast of the 95 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 09. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.50/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

Fig. 2-43. Hindcast of the 98 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 70. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.55/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).

## 그림 목차

- 그림 1-1. 장목분소에 위치한 적조생물은행 및 대량배양용 배양기
- 그림 1-2. 적조원인종의 채집, 분리 및 배양과정에 관한 모식도
- 그림 1-3. *Prorocentrum triestinum*.
- 그림 1-4. *Prorocentrum minimum*.
- 그림 1-5. *Prorocentrum micans*.
- 그림 1-6. *Prorocentrum dentatum*
- 그림 1-7. *Gymnodinium sanguineum*.
- 그림 1-8. *Gymnodinium mikimotoi*.
- 그림 1-9. *Gyrodinium imputicum*.
- 그림 1-10. *Gyrodinium aureolum*.
- 그림 1-11. *Cochlodinium polykrikoides*
- 그림 1-12. *Alexandrium tarmarensense*.
- 그림 1-13. *Alexandrium catenella*
- 그림 1-14. *Ceratium tripos*
- 그림 1-15. *Heterocapsa triquetra*
- 그림 1-16. *Scrippsiella trochoidea*
- 그림 1-17. *Chaetoceros* sp.
- 그림 1-18. *Rhizosolenia* sp.
- 그림 1-19. *Skeletonema costatum*.
- 그림 1-20. *Thalassiosira* sp.
- 그림. 1-21A and B. 자연해수에서의 와편모조류의 성장곡선
- 그림. 1-22. 자연해수에서의 규조류의 성장곡선
- 그림. 1-23. 자연해수에서의 기타 편모조류의 성장곡선
- 그림. 1-24A and B. 인공해수에서의 와편모조류의 성장곡선
- 그림. 1-25. 인공해수에서의 규조류의 성장곡선
- 그림. 1-26. 인공해수에서의 기타 편모조류의 성장곡선
- 그림 1-27. 자연해수에서 질소원으로  $\text{NaNO}_3$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선

- 그림 1-28. 자연해수에서 인산원으로  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선
- 그림 1-29. 자연해수에서 질소원 및 인산원을 변화시켰을 때 배지내  $\text{NaNO}_3$  및  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  농도변화
- 그림 1-30. 자연해수에서 질소원 및 인산원을 변화시켰을 때 배지내  $\text{NaNO}_3$  및  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  농도변화
- 그림 1-31. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *P. micans*의 성장곡선
- 그림 1-32. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선
- 그림 1-33. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *S. costatum*의 성장곡선
- 그림 1-34. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 및 *S. costatum* 세포내의 단백질의 변화
- 그림 1-35. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 및 *S. costatum* 세포내의 저장성 탄수화물 및 수용성 탄수화물의 변화
- 그림 1-36. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 세포내의 지질의 변화.
- 그림 1-37. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *S. costatum* 세포내의 지질의 변화.
- 그림 1-38. 적조발생 당시의 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 생화학적 구성성분 조성
- 그림 1-39. 온도 변화에 대한 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 성장곡선
- 그림 1-40. 온도 변화에 대한 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 단백질 및 탄수화물 양의 변화.
- 그림 1-41. 온도변화에 대한 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 지질량의 변화.
- 그림 1-42. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수
- 그림 1-43. 해양미세조류 7종의 glucose 농도에 따른 흡수

- 그림 1-44. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수에 대한 CCCP, FC의 영향
- 그림 1-45. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수에 대한 pH의 영향
- 그림 1-46. 휴면포자를 형성하는 와편모조류의 생활사
- 그림 1-47. 장승포 연안의 휴면포자 채집정점
- 그림 1-48. 휴면포자 채집에 사용된 Hand core.
- 그림 1-49. 살아있는 휴면포자를 농축시키기 위한 panning method.
- 그림 1-50. 휴면포자들의 발아공
- 그림 1-51. *Scrippsiella trochoidea*의 휴면포자 형태
- 그림 1-52. 실험실에서 형성된 *S. trochoidea*와 *G. sanguineum*의 휴면포자
- 그림 1-53. 휴면포자 형성과 온도의 관계
- 그림 1-54. 휴면포자의 붉은 안점
- 그림 1-55. 알긴산의 화학적 조성.
- 그림 1-56. CNY218에 의한 *C. polykrikoides*의 사멸과정
- 그림 1-57. CNY218에 의한 *G. sanguineum*의 사멸과정
- 그림 1-58. 적조생물 사멸에 대한 CNY218 농도의 영향
- 그림 1-59. 스쿠티카 섬모충의 사멸에 대한 CNY218의 영향.
- 그림 1-60. 당근 (*Daucus carota* L.) 조직배양세포에 대한 CNY218의 영향
- 그림 1-61. 동물세포 (hybridoma)에 대한 CNY218의 영향
- 그림 2-1. 남해의 연안선과 해저지형 및 제주해류와 대마난류에 의한 남해의 유·출입 시스템. 수심은 20 m 간격으로 표시하였고, 황·동중국해를 포함한 광역에서의 개괄적인 해저지형을 50 m, 100 m, 200 m, 500 m 등심선을 나타내어 표시하였다. 그림의 긴 점선으로 표시된 부분은 3차원 수치모델 영역을 나타내며, 제주해협과 대한해협의 점선으로 표시된 단면은 수치모델의 입력자료로 사용된 해류관측이 실시된 위치를 나타내고, 남해도 남쪽의 굵은 선은 모델결과를 분석한 단면이다. 모델결과와 관측자료의 비교를 위한 연안 조위관측소의 위치 (●) 및 본문에 인용되는 지명의 위치 (○)와 지명을 표시하였다.
- 그림 2-2. 1997년 가을 제주해협과 대한해협에서의 관측된 일평균 해류자료를 토대로 3군데의 개방경계에 부과된 해수수송량 (실선)과 수심 평균된 유속분포. 남쪽 개방경계에 부과된 수송량은 대한해협과

제주해협에서의 수송량 차이이며, 유속분포는 임의적이다. 각 개방경계에서의 해저지형을 그림에 함께 표시하였다.

그림 2-3. 한국해양자료센터의 자료에 의한 1997년 8월 8~16일 (왼편)과 10월 8~29 (오른편)에 남해에서 관측된 표층 수온과 염분분포.

그림 2-4. 한국해양자료센터의 자료에 의한 서쪽 개방경계 (위), 남쪽경계 (중간) 및 동쪽경계 (아래)에서의 1997년 8월 수온 (왼편)과 염분 (오른편)의 수직분포

그림 2-5. 한국해양자료센터의 자료에 의한 서쪽 개방경계 (위), 남쪽경계 (중간) 및 동쪽경계 (아래)에서의 1997년 10월 수온 (왼편)과 염분 (오른편)의 수직분포

그림 2-6. 1978~1995년간의 12시간 간격의 바람자료로부터 계산된 남해의 1~6월의 월평균 해상풍 분포 (Na and Seo, 1998). 해상풍이 계산된 공간적인 격자 크기는  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  이다.

그림 2-7. 1978~1995년간의 12시간 간격의 바람자료로부터 계산된 남해의 7~12월의 월평균 해상풍 분포 (Na and Seo, 1998). 해상풍이 계산된 공간적인 격자 크기는  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  이다.

그림 2-8. 서쪽 개방경계 부근 Arakawa C-격자상의 모델변수 위치. 개방경계는 첨자 B로 표시된 선과 일치한다.

그림 2-9. Table 1의 Case 1에 대한 모델구동의 개괄도. 수치모델은 시간에 따라 변하는 조류와 1997년 가을철에 관측된 고정된 해수의 유·출입을 개방경계에 부과하고, 8월과 10월의 관측자료에 근거한 시간에 따라 변하는 수온과 염분을 해표면과 개방경계에 부과하여 강제하였다. 개방경계에서 필요로 하는 조류는 5개 주요 분조의 조위와 지각을 개방경계에 부과하는 3차원 순압조석모델을 이용하여 계산된 결과를 이용하였다. 모델내부는 초기상태에 운동이 없고 자유해면을 0으로 가정하였으며, 모델 구동 후 10일간은 8월에 관측된 3차원 수온, 염분 분포와 개방경계에서의 조류와 해수 유·출입을 부과하여 진단적 계산을 수행하였다. 진단적 계산 후 82일간은 8월과 10월에 관측된 표층과 개방경계에서의 수온, 염분분포를 부과하여 예단모델을 수행하였다. 8월과 10월의 관측결과를 토대로 8월 15일부터 10월

15일까지는 선형적으로 내삽된 시간에 따라 변하는 수온, 염분분포를 해표면과 개방경계에 부과하였고, 8월 15일 이전과 10월 15일 이후의 예단모델 구동에서는 8월과 10월의 관측된 값으로 고정하였다. 조석이 제거된 남해의 8월과 9월의 순환을 파악하기 위하여 모델 결과를 15일간 평균한 기간을 역시 표시하였다.

그림 2-10. Table 1의 Case 1에 대한 전체운동에너지의 시간에 따른 변화. 실선은 15일 이동 평균된 운동에너지를 보여준다.

그림 2-11. 바람 강제력을 고려한 경우 수치실험 개요. 바람은 9월부터 적용하였으며 5일간에 걸쳐 풍속을 선형적으로 증가시킨 후 10일간 일정한 풍속의 바람을 지속시켰고, 이 후 5일간은 풍속이 0이 될 때까지 선형적으로 풍속을 감소시켰다.

그림 2-12. 적조 이동-확산 모델 구성도이며 Model I 과 Model II 의 두 부분으로 구성되어 있다. Model I 은 포자의 수직 이동을 추적하는 부분이며, model II 는 적조생물의 수평 이동과 증식에 따른 확산에 대한 것이다.

그림 2-13. 물리모델의 5가지 바람상태 (그림 2- 11) 의 각 단계에서 얻어진 해류장에 대하여 각각 모의 실험 하였다. case I 은 바람이 전혀 없는 경우, case II 는 바람이 점진적으로 증가하는 경우, case III 는 증가한 바람이 지속되는 경우, case IV 는 바람이 점진적으로 감소하는 경우, 그리고 case V는 바람이 감소한 후 바람이 없는 상태로 지속되는 경우이다.

그림 2-14. 각 포자의 이동에 사용된 Langrangian ensemble model 의 예. a) 해류장에 강한 대류가 있을 때 5 가지 서로 다른 포자의 이동을 나타내고 있으며, b) 해류장에 강한 대류가 없을 때 5 가지 서로 다른 포자의 이동을 나타내고 있다.

그림 2-15. 저층에 있던 포자가 3차원 해류장내에서 연직으로 표층까지 올라오는 모습의 예. Model I 에 해당되는 부분.

그림 2-16. *Cochlodinium polykrikoides* 의 성장률. a) 5 가지 염분에 따른 배양 실험 (수온 15 °C)에서 얻어진 성장 곡선 (수진원, 1998), b) 성장률 계산의 예 (수온 25°C, 염분 21‰).

그림 2-17. 4개 주요 분조의 진폭과 위상에 대한 모델결과 (Cal)와 관측값 (Obs)의



비교. ME와 ARE는 평균오차 (Mean Error)와 절대 상대오차 (Absolute Relative Error)를 나타내며, 본문에 정의하였다.

그림 2-18. 3차원 경압모델을 이용하여 계산된 부산에서의 간조 시 표층, 중간층, 그리고 저층  $\sigma$ -layer에서의 해수유동 (Table 1의 Case 1).

그림 2-19. 3차원 경압모델을 이용하여 계산된 부산에서의 만조 시 표층, 중간층, 그리고 저층  $\sigma$ -layer에서의 해수유동 (Table 1의 Case 1).

그림 2-20. Table 1의 Case 1에 대하여 (a) 표층, (b) 중간층, 그리고 (c) 저층  $\sigma$ -layer에서의 9월달 15일 평균된 해류장.

그림 2-21. (a) Lie and Cho (1997) 와 (b) Mitta and Ogawa (1984)에 의한 관측자료에 근거한 남해의 비조석 성분 표층 해류분포.

그림 2-22. Table 1의 Case 1에 대하여 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 1의 굵은 실선)에서의 9월달 15일 평균된 수평해류벡터 분포.

그림 2-23. Table 1의 Case 1에 대하여 9월달 15일 평균된 (a) 표층, (b) 중간층, 그리고 (c) 저층  $\sigma$ -layer에서의 계산된 해수밀도 분포.

그림 2-24. 수심 50 m층에서의 8월에 관측된 수온, 염분분포 (위)와 Table 1의 Case 1에 의해 계산된 8월달 15일 평균된 수온, 염분분포 (아래).

그림 2-25. Table 1의 Case 1에 대하여 표층 (왼편)과 저층  $\sigma$ -layer (오른편)에서의 8월 (위)과 9월 (아래)의 15일 평균된 수온 분포.

그림 2-26. Table 1의 Case 1에 대하여 표층 (왼편)과 저층  $\sigma$ -layer (오른편)에서의 8월 (위)과 9월 (아래)의 15일 평균된 염분 분포.

그림 2-27. 남해의 9월달 평균바람인 3 m/s의 북동풍을 부과한 경우 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 1 참조)에서의 일평균 동서성분 유속의 수층별 시간변화. 그림에서 가로축과 세로축은 일단위의 시간과 남쪽 (1)부터 북쪽 (30)까지의 격자점을 각각 나타낸다.

그림 2-28. 남해의 9월달 평균바람인 3 m/s의 북동풍을 부과한 경우 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 1 참조)에서의 일평균 남북성분 유속의 수층별 시간변화. 그림에서 가로축과 세로축은 일단위의 시간과 남쪽 (1)부터 북쪽 (30)까지의 격자점을 각각 나타낸다.

그림 2-29. 남해의 9월달 평균바람인 3 m/s의 북동풍을 부과한 경우 표층에서의 일평균 해류분포의 시간에 따른 변화.

- 그림 2-30. 임의로 강한 10 m/s의 북동풍을 부과한 경우 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 1 참조)에서의 일평균 동서성분 유속의 수층별 시간변화. 그림에서 가로축과 세로축은 일단위의 시간과 남쪽 (1)부터 북쪽 (30)까지의 격자점을 각각 나타낸다.
- 그림 2-31. 임의로 강한 10 m/s의 북동풍을 부과한 경우 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 1 참조)에서의 일평균 남북성분 유속의 수층별 시간변화. 그림에서 가로축과 세로축은 일단위의 시간과 남쪽 (1)부터 북쪽 (30)까지의 격자점을 각각 나타낸다.
- 그림 2-32. 임의로 강한 10 m/s의 북동풍을 부과한 경우 표층에서의 일평균 해류분포의 시간에 따른 변화.
- 그림 2-33. 5 가지의 시나리오의 해류장에서 30일 동안 Lagrangian ensemble model 로 추적한 후 바닥에 가라앉은 포자의 위치를 나타내었다. a) 표층에서 일정한 간격으로 분포한 포자 (110×45), b) Case I 의 해류장을 사용한 결과, c) Case II 의 해류장을 사용한 결과, d) Case III 의 해류장을 사용한 결과, e) Case IV 의 해류장을 사용한 결과, f) Case V 의 해류장을 사용한 결과.
- 그림 2-34. 5 가지의 시나리오를 이용하여 그림 2-33 의 바닥에 가라앉아 있던 포자를 추적하였다. 저층에 가라앉아 있던 포자 (그림 2-33)에 대해 정 등(1998)의 연직 상승 속도를 주어 3일 이내에 표층으로 올라온 포자를 나타내었다. a) 모의 실험 해역, b) Case I 의 해류장 사용한 결과, c) Case II 의 해류장을 사용한 결과, d) Case III 의 해류장을 사용한 결과, e) Case IV 의 해류장을 사용한 결과, f) Case V 의 해류장을 사용한 결과.
- 그림 2-35. 초기 위치 01에서 사망률이 0.3, 성장률이 0.35 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).
- 그림 2-36. 초기 위치 01에서 사망률이 0.35, 성장률이 0.65 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).
- 그림 2-37. 초기 위치 01에서 사망률이 0.40, 성장률이 0.60 인 조건에서 이동-확산

경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-38. 초기 위치 03에서 사망률이 0.30, 성장률이 0.35 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-39. 초기 위치 03에서 사망률이 0.35, 성장률이 0.65 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-40. 초기 위치 03에서 사망률이 0.40, 성장률이 0.60 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-41. 98년 적조의 재현. 초기 위치 06에서 사망률이 0.55, 성장률이 0.60 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 표층에서 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-42. 95년 적조의 재현 I. 초기 위치 09에서 사망률이 0.40, 성장률이 0.50 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case V의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

그림 2-43. 95년 적조의 재현 II. 초기 위치 70에서 사망률이 0.35, 성장률이 0.55 인 조건에서 이동-확산 경로를 추적하였다. 5 일 간격으로 결과를 표시했으며 case I의 해류장을 사용하였다. (O : 초기 위치, • : 이동 위치).

## List of tables

- Table 1-1. HAB organisms in Korean coastal sea in 1981-1998
- Table 1-2. Instruments using in seed bank
- Table 1-3. List of HAB organisms in seed bank
- Table 1-4. Chemical composition of F/2 media
- Table 1-5. Chemical composition of artificial sea water
- Table 1-6. Average concentration of nitrogen and phosphate in Masan bay (1990-1998)
- Table 1-7. Species composition of dinoflagellates surveyed in Changsungpo
- Table 2-1. Summary of initial and boundary conditions for 5 model cases.
- Table 2-2. Vertical grid system in  $\sigma$ -coordinate.  $\sigma$ ,  $\sigma'$ ,  $Z$ , and  $\Delta\sigma$  denote the position of the boundary of each  $\sigma$ -layer, position of the center of each  $\sigma$ -layer, depth of the center of each  $\sigma$ -layer when total depth is 100m, and the distance between two consecutive  $\sigma$ -layers, respectively.
- Table 2-3. The growth rates of *Cochlodinium polykrikoides* estimated from the growth curves obtained under various condition of temperature and salinity (NFRDI).
- Table 2-4. Growth rates of dinoflagellates (NFRDA, 1995; Smayda, 1996)
- Table 2-5. The values of growth rates (G) and mortality (M) used. T is the generation time. The combinations shadowed with gray were used.

## 표 목 차

- 표 1-1. 1981-1998 년도 우리나라 근해의 적조유발 식물플랑크톤
- 표 1-2. 적조생물은행에서 보유중인 장비 및 장치
- 표 1-3. 한국해양연구소 장목분소 Seed bank에서 보유중인 미세조류
- 표 1-4. F/2 조성표
- 표 1-5. 인공해수 조성표
- 표 1-6. 마산만의 연도별 평균 인산원 및 질소원 농도변화 (1990-1998)
- 표 1-7. 장승포에서 조사한 와편모조류 휴면포자의 종 조성
- 표 2-1. 2개의 모델 run에 이용된 초기조건과 개방경계조건.
- 표 2-2.  $\sigma$ -좌표계에서의 수직적인 격자체계.  $\sigma$ ,  $\sigma'$ , Z, 및  $\Delta\sigma$ 는 각  $\sigma$ -층의 경계 위치, 각  $\sigma$ -층 중간의 위치, 전체수심이 100 m일 경우 각  $\sigma$ -층 중간의 수심, 및 인접한 두  $\sigma$ -층간의 거리를 각각 나타낸다.
- 표 2-3. 여러 가지 수온 (T) 과 염분 (S) 조건의 *Cochlodinium polykrikoides* 배양 실험 결과에서 계산된 성장률 (수진원, 1998).
- 표 2-4. *Dinoflagellates* 의 성장률 (수진원;1995, Smayda;1996).
- 표 2-5. 적조 이동-확산 모델에 사용된 성장률 (G) 과 사망률 (M) 의 조합; T 는 세포분열 단위 시간을 나타내며 모의 실험은 T = 1 day 인 열은색 상자 안쪽의 성장률과 사망률을 이용하여 수행하였다.



## 제 1 장 Trophodynamics를 이용한 적조원인생물 조절연구





# 제 1 절 적조생물은행

## 1. 서론

국내 연안에서 적조를 유발한 적조원인생물은 남조류, 규조류, 녹색편모류, 유글레나류, 섬모충류, 황금색조류, 와편모조류 등 종류가 밝혀진 것만도 약 45 종에 이르며 분류가 명확하지 않은 경우를 포함하면 국내 연안에 존재하는 적조 유발종은 훨씬 더 증가할 것으로 판단된다 (표 1-1). 이 중 대부분은 규조류와 와편모조류에 의한 적조 발생이었으며, 특히 *Nitzschia pungens*, *N. seriata*, *Skeletonema costatum* 등의 규조류 뿐만 아니라, *Alexandrium tamarense*, *Ceratium furca*, *Gymnodinium sanguineum*, *Notiluca scintillans*, *Prorocentrum dentatum*, *P. micans*, *P. minimum*, *P. triestinum*, *Cochlodinium polykrikoides* 등의 와편모조류가 최근에 급격히 적조유발 빈도를 증가시키고 있는 것으로 알려져 있다 (수산진흥원 적조 자료 참조).

적조발생기작과 적조 방제 연구를 위해서는 현장 중심의 연구뿐만 아니라 실험실내에서의 생리학, 생화학 및 분자생물학 연구 필요성이 제기되어 왔고, 이를 위하여 적조생물 은행의 구축이 요구되었다. 그러나 국내의 여러 대학 및 기관에서 해양미세조류를 배양하고, 몇몇 기관에서 해양미세조류은행을 구축하여 운영하고 있으나 분류 및 배양 유지에 국한되어 있고, 일부 생리·생태학적 연구가 수행되고 있을 뿐 본격적인 적조생물에 대한 연구는 거의 초보적인 수준에 머물고 있다.

또한 적조생물은행의 구축 및 운용은 다양한 분야에로의 적용 및 활용이 가능해질 것으로 기대되고 있다. 적조생물은행을 통한 적조생물의 분류학적 연구뿐만 아니라 적조생물의 생리·생화학적 연구는 물론 분자생물학 및 유전공학적 연구에 이르기까지 적조생물에 대한 다양한 연구를 위해서는 적조생물은행이 필수적인 것으로 판단된다. 특히 여러 문헌에서 강조되고 있는 적조생물의 증식 및 환경생리 연구, 유해 편모조류의 독성, 휴면포자의 발생 및 발아에 관한 연구뿐만 아니라 적조생물로부터 유용한 물질의 추출, 의약분야에 적용가능한 물질의 획득이라는 biotechnology 측면의 산업적, 의약적 연구를 수행하는데 있어서 적조생물은행은 반드시 구축·운영되고 활용되어야 할 것이다

특히 1992년 체결된 생물다양성협약 (Convention on biological Diversity)에 따라 각 선진국들은 자국의 유용자원 확보 및 그 연구에 총력을 기울이고 있는 시점에서 우리나라도 해양미세조류를 이용한 무한한 잠재력을 갖고 있는 생물산업을 발전시키기 위해 국내의 유전자원 확보 및 이용을 위해 총력을 기울여야 하며 특히 적조의 집중적인 연구를 위해 국가적인 차원에서 적조생물은행을 구축하고 운영하며 다양한 연구를 수행하는데 총력을 기울여야 할 것이다.

적조생물은행을 구축하고 운영하는데 있어서 가장 대표적인 문제점은 해양미세조류를 배양하고 있는 국내 여러 기관 및 대학들이 공통적으로 안고 있는 문제점인 적조생물의 정확한 동정과 배양기술의 확보 및 예산의 미확보를 들 수 있으며, 적조생물은행을 이용한 생리학, 분자생물학, 재활용 연구가 거의 고려가 되지 않고 있다는 점이다. 이는 부분적으로는 해양미세조류의 분류 및 생리적 연구를 수행할 인력의 부족 및 연구 예산의 부족을 들 수 있지만 더 큰 문제는 적조의 예보 및 방제를 통한 경제적 손실을 최소화 하기 위한 면에 적조연구의 초점이 맞추어져 있다는 사실이다. 따라서 적조연구는 적조방제라는 단기간내에 그 효과를 얻을 수 있는 연구도 수행되어야 하지만, 장기간의 투자를 통한 적조원인 생물의 분류, 생리, 분자생물학적 연구가 수행되어야 근본적인 적조대책 수립을 통한 경제적 손실의 방지와 학문적인 발달을 동시에 이룰 수 있을 것이다.

배양을 위해서는 순수분리된 종의 분류학적 위치를 정확히 파악하여야 한다. 그러나 국내에는 해양미세조류 분류를 할 수 있는 인력이 크게 부족한 실정이다. 따라서 매년 적조가 발생하여도 흔히 알려진 종을 제외하고는 정확한 동정을 기대하기 어려운 실정이며, 이러한 것은 대학이나 연구기관간의 상호교류를 활발히 함으로써 어느정도 개선이 가능할 것으로 판단된다. 또한 각 종을 분류하는데는 전자현미경을 이용한 형태학적 연구가 수반되어야 하며, 생화학적 특성이나 유전자 분석을 통한 분류가 시도되어야 하지만, 각 대학 및 연구기관마다 충분한 연구시설을 갖추고 있지 못한 실정이다. 따라서 체계적이고 다양한 적조생물은행의 구축 및 운영을 위하여는 분류 및 배양 전문인력이 요구되며 배양기술의 개발이 필요한데 대학 및 타기관과의 연계를 위하여 지불되어야 할 최소한의 재료비와 인건비 뿐만 아니라 외국에 의뢰하여야 할 경우의 예산 등이 확보되어야 한다.

적조생물은행이 구축되면 적조생물의 특성을 이해하고 적조생물체내의 생리학적 연구를 통하여 적조발생기작을 연구해야 하며, 적조생물은행의 가치를 증가시키기

위해서는 적조생물의 활용방안 연구가 동시에 고려되어야 한다. 적조생물의 특성 및 활용방안 연구는 적조생물의 대량배양이 이루어진 후 가능하기 때문에 적조생물 은행의 구축 및 배양기술의 발달이 요구되었지만 국내에서는 간헐적으로 대량배양 기술이 보고되고 있을 뿐 본격적이고 다양한 종에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 적조발생기작의 연구를 통한 적조방제대책 수립을 위해서는 생태학적 연구뿐만 아니라 다양한 생리학, 생화학, 분자생물학적 연구를 수행하기 위한 연구재료 및 기초자료를 제공해 줄 수 있는 적조생물은행의 구축이 필수적인 것으로 판단된다

## 2. 장목분소 적조생물은행 구축 및 운영을 위한 장비 및 기기

적조생물은행의 구축 및 효율적인 운영을 위한 필수적인 장비는 크게 3 부분으로 나눌 수 있다. 채집 및 분리를 위한 netting apparatus, 배양을 위한 incubator, 동정을 위한 현미경 등의 장비가 요구된다. 장목 분소에는 적조원인종을 분류하고, 기타 형태학적 연구를 위한 현미경이 갖추어져 있으며, 이를 통한 적조원인종의 사진촬영, 휴면포자 연구 등을 수행하고 있다 (표 1-2).

특히 3차년도에는 적조생물의 대량배양을 위해 80 L 와 240 L 대용량의 용기가 설치되어 일부 종을 대상으로 대량배양 연구가 시도되었고 향후 대량배양기술의 확보를 위해 다양한 종에 적용할 계획이다.(그림 1-1)

## 3. 식물플랑크톤의 채집 및 분리

적조원인종의 채집, 분리 및 배양 과정은 그림 1-2 에 요약되어 있다.

### 가. 미세조류의 채집 및 분리

미세조류의 채집은 주로 진해만 등 남해안에서 이루어졌으며 일반적으로는 플

랑크톤 넷 (망목 20 $\mu$ m, 60 $\mu$ m)를 사용하였으며, 환경변화에 민감한 종들은 직접 채수하여 채집하였다. 채집 종들의 서식환경을 알기 위해 채집장소의 수온, 염분 등의 현장정보를 기록하였다. 또한 채집종의 환경변화에 의한 피해를 최소화하기 위해 이동시간을 최소화하였으며 빠른 시간내에 분리 배양하였다.

미세조류의 분리는 Pasteur-pipette 법으로 분리하였다. 독립현미경 ( $\times 50$ ,  $\times 100$ ) 하에서 직경 30-60 $\mu$ m Pasteur-pipette을 이용하여 단세포를 분리하고 멸균된 hole slide에서 멸균해수로 6-7 회 세척하여 cap tube에 넣어 배양하였다. 각 종별 채집지와 분리 시기는 표 1-3과 같다.

#### 나. 배 양

배양에 사용한 배지는 enriched f/2 media을 사용하였으며 배지 조성표는 표 1-4와 같다. 해수는 본 연구소가 위치한 경남 거제시 장목에서 채수한 후 GF/C 여과지와 막 여과지 (Whatman cellulose nitrate, 0.45 $\mu$ m)로 여과하여 사용하였다. 와편모조류와 라피도조류는 Si가 첨가되지 않은 f/2 media를 사용하였으며 규조류는 Si가 첨가된 f/2 media를 사용하였다.

본 실험에서 증 보전시 광원은 형광등 (3파장)을 사용하여 광원과의 거리를 조절하여 광도의 구배를 주었으며, 온도는 조류의 bloom시기와 당시의 수온을 고려하여 15 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C 또는 25 $^{\circ}$ C에서 배양하였다. 또한 염분도는 25 $\pm$ 3‰를 유지하였다. 배지의 교환은 각 조류의 성장상태를 파악하여 지수성장기 후반에 새로운 배지로 교환해 주었다. 배지 교환 간격은 1-4 주였다. 또한 성장상태를 향상시키기 위해 하루에 1회 hand shaking하였다.

#### 4. 배양종의 종류 및 특징

본 연구소에서 보유하고 있는 배양종은 총 22 속, 38 종, 47 strain으로 와편모조류 9 속, 17 종, 25 strain, 규조류 6 속, 14 종, 14 strain, 침편모조류 2 속, 2 종, 3 strain, 녹조류 2 속, 2 종, 2 strain, 유글레나조류 1 속, 1 종, 1 strain, 남조류 1 속,

1 종, 1 strain, 기타편모조류 1 strain을 보유하고 있다. 이 중 해산종이 37 종, 담수종이 1 종이다. 현재 배양중인 식물플랑크톤의 대부분은 진해, 거제지역에서 분리된 종들이며 일부는 고흥, 군산, 안산 등 여러 지역에서 분리되었다.

다음은 이미 분리되어 배양되고 있거나 현재 아직 동정이 되지 않았으나 그 종으로 의심되는 종에 대하여 특징을 서술하였다.

## 가. 와편모조(Dinophyceae)

### ① *Prorocentrum* 속 조류

*Prorocentrum* 속 조류는 남해안에서 보편적으로 나타나는 종으로써 주로 4~8월에 발생한다. 남해안에서 발생하는 주요 *Prorocentrum* 속 조류는 *P. triestinum*, *P. minimum*, *P. micans*, *P. dentatum*, *P. balticum* 등이다. *Prorocentrum* 속 조류 중에서 주요 종들은 단독 bloom을 일으키는 경우가 있었지만 2~4 종이 동시에 bloom을 일으키는 혼합적조를 일으키기도 한다. *Prorocentrum* 속 조류는 이러한 혼합적조 발생빈도가 매우 높았다. 장목분소의 적조생물은행에는 *P. triestinum*, *P. minimum*, *P. micans*, *P. dentatum*을 보유하고 있다. 이 속의 종들은 전반적으로 성장률이 높으며, 배양액은 황갈색을 띤다.

*P. triestinum* (그림 1-3)은 길이 18~27  $\mu\text{m}$ , 폭 9~13  $\mu\text{m}$ 로 긴 타원형이며 전단에 가시모양의 돌출물이 있으며 후단이 뾰족한 고추 모양의 형태이다. *P. triestinum*가 외만 내만 모두 발생하나 내만에서 높은 밀도로 발생하는 종이다. *P. minimum*과 함께 출현하는 경우가 많았으며 두 종이 혼합 적조를 일으키기도 한다.

*P. minimum* (그림 1-4)은 길이 5~20  $\mu\text{m}$ , 폭 15~20  $\mu\text{m}$ 로 전단이 약간 납작한 원형이다. 발생 당시의 수온을 기준 할 때 수온은 4~27°C 범위로서 광온성이었으며 수온이 23°C 내외에서 최대 bloom을 일으켰다. 주요 적조원인종으로써 4~7월에 집중적으로 나타나며, 주로 내만에서 높은 밀도로 번무하며 10,000 cells/ml 이상 고밀도 적조를 일으키기도 한다. 1998년 4월 30일 진해만에서는 *P. minimum*이 65,000 cells/ml의 고밀도 bloom을 일으키기도 하였다.

*P. micans* (그림 1-5)는 길이 35~50  $\mu\text{m}$ , 폭 20~40  $\mu\text{m}$ 로써 좌우 비대칭의 나뭇잎 형태이며 진해만에서 출현하는 *Prorocentrum* 속 중에서 가장 큰 대형 조류이

다. *P. micans*가 나타나는 시기는 7~8월로써 고수온기(21~27 °C)이다. *P. minimum*과 함께 혼합 적조를 일으키기도 한다.

*P. dentatum* (그림1-6)은 길이 15~30  $\mu\text{m}$ , 폭 6~10  $\mu\text{m}$ 로 길쭉한 당근형태이다. 이 종은 1999년 5월~8월에 진해만에서 10,000 cells/ml 이상 고밀도 적조를 일으켰다. 이 종은 배양시 *Prorocentrum* 속 중 *P. minimum*과 함께 가장 생장률이 높았다. *P. dentatum*은 군체를 형성하기도 한다.

## ② *Gymnodinium* 속

남해안에서 출현하는 *Gymnodinium* 속은 *G. sanguineum*, *G. mikimotoi* 및 *G. breve* 등이 관찰되었다. *G. mikimotoi*는 국내에서도 어류를 패사시키는 종으로 알려져 있다.

*G. sanguineum* (그림 1-7)은 길이 30~60  $\mu\text{m}$ , 폭 25~40  $\mu\text{m}$ 로 등근 오각형의 형태이다. 이 종은 국내에서 관찰되는 *Gymnodinium* 속 중에서 대형에 속한다. 이 종은 다른 와편모조류와 비교하면 비교적 수온이 낮은 시기에 bloom을 일으킨다. 출현시기는 10월부터 이듬해 2월까지였으며 수온에 대한 내성 범위도 4~22°C로서 광온성이었다. 현장에서는 저수온기에서 bloom을 일으켰으나 배양시에는 20°C에서 가장 높은 생장률을 보였다.

*G. mikimotoi* (그림 1-8)는 길이 18~25  $\mu\text{m}$ , 폭 12~24  $\mu\text{m}$ 로 둥글며 납작한 형태이다. 횡구는 세포의 중앙 적도를 달리며 횡구의 양끝은 배부분에서 서로 어긋난다. 이 종은 3~9월에 주로 발생하였으며 이때 수온은 8~25°C 범위였다. 그러나 1981년 여름에는 진해만에서 고밀도 적조를 일으켜 그 당시 수산생물에 막대한 피해를 입힌 종이다. 이 종은 *Gyrodinium aureolum*과 크기나 형태가 매우 비슷한 종이다.

## ③ *Gyrodinium* 속 조류

*G. imputicum* (그림 1-9)은 *C. polykrikoides*와 혼합적조로 발생하였으며 고정시 형태도 유사하여 자주 오동정되는 종이다. 이종도 2~8 세포로 된 군체를 형성한다. 크기는 *C. polykrikoides*보다는 작다.

*G. aureolum* (그림 1-10)은 길이 15~30  $\mu\text{m}$ , 폭 12~30  $\mu\text{m}$ 로 둥글며 납작한 형태이다. 이종은 1999년 진해만, 거제도일대에서 bloom이 일어났다. 이 종의 배양액은 황갈색을 띤다.

#### ④ *Cochlodinium* 속 조류

*C. polykrikoides* (그림 1-11)는 길이 40~50  $\mu\text{m}$ , 폭 20~45  $\mu\text{m}$ 로 원통형을 하고 있으며 횡구가 몸체를 1.5~2.0 바퀴 나선형으로 감싼다. 단독 또는 2~8 세포로 된 군체를 형성한다. 1995년 이후 남해안에서 대량 발생하여 고밀도 직조를 일으켰으나 주로 외해쪽에 발생함으로써 내만에서는 그 밀도와 빈도가 낮다. 이 종은 주로 8월 말에서 10월초까지 나타나며 이때 수온은 21~26°C 범위였다. 본 연구소에서 분리 배양종 중 가장 strain이 많은 종으로 전남 고흥 나로도 (1997), 전북 군산 하제 (1998), 경남 거제 장목 (1999)에서 분리 배양되었다.

이 종은 지수성장기에는 4~8 개의 군체가 관찰되나 지수성장기 후반부로 갈수록 단체나 2 세포 군체가 대부분을 차지한다. 성장률도 낮아 1 life cycle이 한달 가량 소요된다.

#### ⑤ *Alexandrium* 속 조류

진해, 거제 지역에서 *A. tamarense* (그림 1-12), *A. catenella* (그림 1-13), *A. fraterculus*, *A. affine*가 관찰되었다. 이들을 정확히 분류하는 데에는 apical pore의 형태와 각판의 형태 및 배열 상태를 확인해야 하는 등 어려움이 많은 종이다. *A. tamarense*와 *A. catenella*는 낮은 밀도에서도 진주담치 등 패류를 독화시키는 맹독성 조류로써 주요 모니터링 대상이 되고 있다 (한 등, 1993; 전과 한, 1998).

본 적조생물은행에서 보유하고 있는 종은 *A. tamarense*, *A. catenella*로 적갈색을 띤다. *A. tamarense*는 단체나 2 세포 군체를 형성하며, *A. catenella*는 단체 또는 2~4 세포의 군체를 형성하기도 한다.

#### ⑥ *Ceratium* 속 조류

*Ceratium* 속 조류는 *C. furca*, *C. fusus*, *C. tripos* 등이 남해안 일대에서 관찰되었다. *Ceratium* 속 조류는 무해성 종이나 매년 적조를 일으키고 있다.

*C. fusus*는 길이 260~280  $\mu\text{m}$ , 폭이 20~30  $\mu\text{m}$ 로 상각과 하각의 길이가 비슷하며 폭이 좁고 중심부에서 양쪽 끝으로 갈수록 좁아지는 형태를 하고 있으며 대형 편모 조류에 속한다. 하각은 갑자기 좁아져서 폭보다 길이가 길다. 왼쪽 후단뿔은 등쪽으로 일정하게 좁아지는데 드물게 반듯할 때도 있다. 오른쪽 후단뿔은 거의 발달하지

않거나 발달되지 않았다. 4~25 °C의 비교적 넓은 수온에서 관찰되며 주로 13°C 부근에서 bloom을 일으킨다. 이 종은 겨울과 봄에 주로 발생은 저온성 조류이나 여름에도 관찰된다. 이 종은 분리 시 환경의 변화 (특히 염분도)에 민감하여 배양이 어려운 종이다.

*C. furca*의 길이는 약 130~150  $\mu\text{m}$ 이며, 폭은 약 30~40  $\mu\text{m}$ , 상각은 일정하게 좁혀지며 길거나 짧은 정단뿔이 나와 있다. 후단뿔은 평행하게 벌어져 있고 왼쪽편은 단단하게 오른쪽 뿔보다 대략 두 배 정도의 길이이다. 남해안 일대에서 출현빈도가 높은 종으로 외만에서 빈번히 발생하였다. 4~27°C의 넓은 수온 분포를 가지며 주로 19°C 부근에서 번무한다. 이 종은 연중 나타나나 6~8월에 주로 높은 밀도로 발생하며 1997년 7월 29일에 진해만에서는 최대 1,445 cells/ml 높은 밀도로 발생하였다. 특히 이종은 대형 편모조류로서 낮은 밀도에서도 수색을 변화 시켜 적조를 일으킨다.

*C. tripos* (그림 1-14)는 길이 60~100  $\mu\text{m}$ , 폭이 40~80  $\mu\text{m}$ 의 크기로 상각의 각뿔이 휘어져 있는 것이 특징이다. 이 종은 남해안 일대에서 여름과 가을에 발생하고 있다.

*Ceratium* 속 조류들은 성장속도가 느리며 세대가 반복 될수록 성장율이 낮아진다. .

#### ⑦ *Heterocapsa* 속 조류

*H. triquetra* (그림 1-15)는 길이 약 20~30  $\mu\text{m}$ , 폭 약 15~25  $\mu\text{m}$ 로 좌우 대칭이며 상하 대칭이다. 상부, 하부 각각 삼각형이다. 진해만에서 4~18°C의 비교적 낮은 수온에서 자주 출현한다. 이 종은 1~4월에 주로 발생하며 주로 내만에서 높은 밀도로 관찰된다.

이 종은 배양시 갈색을 띄며 성장시기 중 정지기 후반부에는 형태의 변이가 심하다.

#### ⑧ *Scrippsiella* 속 조류

*S. trochoidea* (그림 1-16)는 길이 15~40  $\mu\text{m}$ , 폭 15~30  $\mu\text{m}$ 의 풍선모양이다. 이 종은 4~8월에 주로 발생한다. 배양시 각 개체간의 크기의 차이가 심하다. 이종은 배양시 적갈색을 나타내며 성장률이 매우 높다. 이 종은 환경의 변화에 민감하여



배양환경이 나쁠 때에는 cyst 형성이 잘 일어나는 종으로 성장시기 후반부에 자주 cyst가 관찰된다.

## 나. 규조(Bacillariophyceae)

### ① *Chaetoceros* 속 조류

*C. compressum* (그림 1-17)은 세포의 폭이 7~24  $\mu\text{m}$ 이며 넓은 환각면에서 보았을 때 4각형이다. 둥근 모서리는 인접한 세포에 닿지 않으며 개각면은 조금 볼록하거나 평평하다. 사슬이 똑바르며 사슬의 축에서 조금 꼬여져 있다. 강모는 섬세하며 일부는 대개 사슬의 가운데에서 예외적으로 짝지어 세분화되어 있다. 엽록체는 작고 각 세포에 4-20개 정도이다. 남해안 일대에서 적조를 발생시키는 종이다.

*C. danicus*는 개각면의 직경이 16~20  $\mu\text{m}$ 이며 통상 단독성이다. 개각면은 평평하고 타원형이다 개각외투는 깊고 강모는 가늘며 곧게 뻗는데 약간 파상을 나타낸다. 강모는 주변 가까이에서 나오는데 관각축에 직각을 이룬다. 연안종으로 염분이 낮은 내만 해역에서 적조를 발생시킨다.

### ② *Nitzschia* 및 *Pseudonitzschia* 속 조류

*N. pungens* 개각면의 길이는 71~162  $\mu\text{m}$ 이며 폭은 2~5  $\mu\text{m}$ 이다. 개각면은 직선상의 피침형이고 뾰족하다. 세포 끝이 겹침으로써 연쇄체를 형성하며, 연쇄체는 운동성이 있다. *N. seriata*와 비슷하지만 세포가 더 뾰족하고 개각면은 좁으며 세포 끝이 심하게 겹친다. 연안성, 온대종이며 널리 분포하는 종이다.

이 두 속의 형태는 매우 유사하여 광학 현미경상으로 구분이 안 되는 종이 많다. 이러한 종의 동정에는 산처리법이나 SEM 등을 이용하여 개각면의 형태 관찰해양한다.

### ③ *Rhizosolenia* 속 조류

*R. setigera* (그림 1-18) 세포의 직경이 8~25  $\mu\text{m}$ 이며 길이는 300  $\mu\text{m}$ 에 이른다. 세

포는 원통상, 관상으로 곧으며, 통상 단독성이다. 개각면은 길게 원추형을 이루고, 길게 늘어나서 침상돌기를 만든다. 이 침상돌기는 대개 전 세포 길이의 2/3 정도가 있고, 측면에서는 지그재그 모양으로 나타난다. 엽록체는 둥글고 수가 많다. 남해안 일대에서 연중 발생하나 봄과 가을에 높은 밀도로 적조를 일으키고 있다.

#### ④ *Skeletonema* 속 조류

*S. costatum* (그림 1-19)의 크기는 직경이 8~15 $\mu\text{m}$ 이며 관각축은 4~12 $\mu\text{m}$  돌기의 길이는 6~10 $\mu\text{m}$ 이다. 세포는 원반상, 원통상 또는 거의 구형으로, 굽고 기다란 주변 돌기환으로 세포들이 연결되어 사상군체를 이룬다. 가장 흔한 부유성 규조류로 해양과 기수역에 널리 분포하는 세계적인 보편종이다. 남해안 일대에서 봄과 가을에 높은 밀도로 적조를 일으키고 있다.

#### ⑤ *Thalassiosira* 속 조류

*T. condensata* (그림 1-20)의 각면 직경이 28~35 $\mu\text{m}$ 이며 짧은 원통상이며 환각면은 장방형이다. 개각은 원형으로 중심에서 짧은 점액질사가 나와 세포들을 밀접하게 연결하여 군체를 이룬다. 엽록체는 엽상이며 다수이다. 온대 연안성으로 일본 해역, 북해 등에 분포한다.

### 다. 침편모조(Raphidophyceae)

#### ① *Heterosigma* 속 조류

*H. akashiwo*는 길이 12~4 $\mu\text{m}$ , 폭 8~10 $\mu\text{m}$ 로 울퉁불퉁한 부정형으로 감자형이며 2개의 편모를 가지며 움직임이 매우 빠르다. 비교적 높은 수온 (18~26 $^{\circ}\text{C}$ )에서 분포한다. 이 종은 4~6 월에 출현하며 비교적 높은 밀도로 관찰되었다. 적조를 일으킬 때는 1,000 cells/ml 이상으로 번무하였다. 일본에서는 이 종이 어류치사를 일으킨 적이 있으나 아직까지 우리나라에서는 치사를 일으킨 기록은 없으며 남해안 일대 특히 진해만에서 매년 고밀도 적조를 일으킨다

## ② *Chattonella* 속 조류

*Chattonella* 속 조류는 일본 근해에서 매년 적조를 일으켜 수산물에 막대한 피해를 입히고 있는 종으로서 최근 국내에서도 발생빈도가 증가하고 있어 주의를 요하는 종이다. *Chattonella* sp. 생장율이 높으며 배양액은 짙은 적갈색을 나타낸다.

## 라. 유글레나조 (Eugleophyceae)

*Eutreptiella gymnastica*는 부정형의 길쭉한 형태로 유영시 형태를 바꾼다. 10~22 °C의 수온에서 분포한다. 이 종은 봄에서 여름에 걸쳐 발생하는 조류로써 10,000 cells/ml 이상의 고밀도 적조를 일으켜 수색을 짙은 청록색으로 바꾼다. 이 종은 생장율이 높으며 배양액은 밝은 녹색을 띤다.

## 마. 기타 조류

녹조류인 *Chlamydomonas* sp.는 진해만에서 5월~6월 발생하는 종으로서 생장율이 높으며 배양액은 밝은 녹색을 띤다.

남조류인 *Microcystis aeruginosa*는 우리나라의 주요하천에서 여름에 만성적으로 번무를 하는 담수 미세조류로 우점도 및 밀도가 매우 높은 종이다. 이 종은 생장율이 높으며 배양액은 밝은 녹색을 띤다.

미동정 편모조류 (UF: Unidentified Flagellate)는 안산 시화호에서 분리 배양한 종으로 생장율이 높다. 배양액의 색은 황갈색을 띤다.

## 5. 적조원인종의 인공해수 배양

적조생물의 인공해수 적응 및 배양은 적조생물을 이용한 다양한 생리학적 연구를 위해 필수적이다. 일반적으로 식물플랑크톤의 배양을 위해 사용되는 자연해수는

알지 못하는 다양한 종류의 유기물 및 무기물이 존재하므로 생리학적 연구를 위한 실험재료로는 적당하지 않다.

인공해수는 NaCl을 첨가하여 염도를 조정하였으며, nutrient는 ASP12 (Provasoli, 1963; Iwasaki, 1967)와 F/2 배지 (Guillard and Ryther, 1962) 중 metal 이온을 추가하여 제조하였다. 식물플랑크톤의 성장에 필요한 것으로 알려진 vitamin 은 Cyanocobalamine, Biotin, Thiamine-HCl을 첨가하여 주었다. 최종 인공해수의 pH는 7.8-8.0으로 맞추어 사용하였다 (표 1-5).

## 6. 자연해수 및 인공해수에서의 적조원인종의 성장곡선

### 가. 적조원인종의 성장측정

식물플랑크톤의 성장 측정을 위하여 계대배양한 후, 표시된 날짜 간격으로 형광 측정기 (fluorometer, TD 700, Turner Design Co.)를 사용하여 적조원인종의 성장을 측정하였다. 측정은 상대적인 형광값을 기준으로 하였다.

### 나. 자연해수 및 인공해수에서의 적조원인종의 성장 곡선

본 연구소의 장목분소에서 배양하고 있는 적조원인종을 중심으로 성장곡선을 관찰하였다. 각 각 자연해수와 인공해수에서 배양된 적조원인종을 fluorometer를 이용하여 성장 유형을 측정하였다 (그림 1-21-26). 자연해수에서 와편모조류 9 종 (그림 1-21A and B), 규조류 3 종 (그림 1-22), 기타 편모조류 3 종 (그림 1-23)의 성장 유형을 관찰하였고, 인공해수에서 와편모조류 11 종 (그림 1-24A and B), 규조류 2 종 (그림 1-25), 기타 편모조류 3 종 (그림 1-26)의 성장유형을 관찰하였다. 특히 자연해수와 인공해수에서 공통으로 조사된 *P. minimum*, *P. micans*, *P. dentatum*, *G. sanguineum*, *G. mikimotoi*, *G. imputicum*, *C. polykrikoides*, *Chaetocerus sp.* 등은 자연해수와 인공해수에서 각각 성장이 차이를 보였는데, 이들의 성장 차이와 배지

와의 연관관계를 밝힌다면, 인공해수와 자연해수에서의 특징 및 적응도를 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 향후계획

본 연구소의 장목 분소에 구축되어 있는 적조생물은행의 운영 및 활용을 위하여 배양종의 성장곡선을 조사하고 성장과정 동안의 세포내 생화학적 구성성분 즉 세포내 단백질, 탄수화물, 지질의 함유량의 변화를 측정 분석한다. 특히 지질의 경우 당지질, 인지질, 중성지질의 양의 변화를 측정하고 각 지질내의 지방산의 함유량 분포를 조사하여 각 적조 원인종에 대한 database를 구축한다. 이러한 자료들은 적조생물의 발생기작과 방제 연구에 활용될 것이며 기타 생리적인 연구의 기초자료로 활용될 것이다. 또한 적조발생시기 및 수시 채집 및 배양을 통해 적조생물은행의 보유종을 확대할 것이며, 생리, 생화학, 분자생물학적 연구에 이용될 수 있도록 대형수조를 이용한 대량배양기술을 확립하는 연구가 수행될 것이다.

또한 여러 가지 항생제를 이용한 무균배양체제를 수립하여 적조생물은행의 효율적인 관리 및 이용뿐만 아니라 기타 여러 연구기관으로의 분양 등을 통한 적조생물은행의 활성화를 꾀할 예정이다.

## 제 2 절 적조생물 생리연구

### 1. 서론

적조생물의 발생기작을 연구하기 위해서는 기존의 생태학적 연구뿐만 아니라 생리학, 분자행물학적 연구가 병행되어야 함에도 불구하고 국내에서의 적조 연구는 적조생물의 분류 및 피해상황 관찰, 적조방제 기술 개발 등에 국한되어 연구되어 왔다. 본 연구팀에서는 적조과제를 수행하면서 매년 적조생물의 생태학적 연구뿐만 아니라 생리학적 연구를 수행하여 왔는데, 과거 2년간 적조원인종의 온도 및 광도, 염도, 영양염에 대한 세포반응 등을 연구하였다. 특히 *P. minimum*, *P. micans*, *G. sanguineum*, *C. polykrikoides*, *S. trichoidea*, *H. akashiwo*, *A. catenella*, *S. costatum* 등 국내 연안에서 최근에 빈번하게 적조를 유발하였고, 어민에 피해가 컸던 적조원인종을 중심으로 연구를 수행하였다.

*P. minimum*을 온도, 광도, 염도를 변화시키면서 배양하였을 때의 세포내 생화학적 조성의 변화를 관찰하였으며, *P. minimum*을 암배양하였을 때 세포내 지질의 함량변화를 연구하였다. 특히 *P. minimum*을 광도와 온도를 복합적으로 변화시켰을 때 세포 성장을 관찰함으로써 적조유발원인의 복합적인 작용에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한 적조발생시기에 채집한 *G. sanguineum*과 *C. polykrikoides*의 세포내 생화학적 구성성분을 분석함으로써 *G. sanguineum*과 *C. polykrikoides*의 적조유발 패턴과의 연관관계를 유추하였고, 이를 국내 학술회의에서 발표하거나 국내외 논문에 게재하는 소기의 성과도 있었다.

여러 보고에서 적조발생의 방제와 적조발생기작의 이해를 위하여 적조원인종의 생화학 및 세포생리학적 연구의 필요성이 제기되어 왔다 (D. Grzebyk & B. Berland., 1996; Kim *et al.*, 1998). 이를 위해 본 연구과제에서 이미 수행되었고 계속 수행되고 있는 광도 및 온도에 관한 연구결과를 토대로 하여 적조생물과 영양염과의 연관관계에 대한 연구를 수행하고자 했다. 이를 위해 해양에서 가장 중요한 영양염으로 알려진 질소와 인의 흡수 및 이용에 관한 연구가 수행되었으며, 근래 들어 다량이 유입되고 있는 포도당 등 탄수화물에 의한 적조생물의 반응 및 포도당과 광합성과의 연관관계 규명은 적조발생기작을 이해하는데 필요한 것으로 판단하여 3차년도에 이들을 중심으로 연구를 수행하였다.

## 2. 질소원 및 인산원의 변화에 대한 식물플랑크톤의 성장 및 세포구성성분 변화

### 가. 재료 및 방법

적조원인종의 배양, 성장측정 및 세포내 생화학적 구성성분의 분석은 Cho et al. (1998), Chang et al. (1998)의 방법을 기초로 하여 수행하였다.

#### (1) 실험재료

본 연구의 재료는 국내 연안에서 빈번하게 적조를 유발하는 식물플랑크톤 중 와편모조류인 *Gymnodinium sanguineum*, *Prorocentrum micans*와 규조류인 *Skeletonema costatum*을 마산만 및 장목 연안에서 채집하여 순수배양하여 실험에 사용하였다.

#### (2) 식물플랑크톤의 배양 및 성장측정

##### ① 자연해수에서의 식물플랑크톤의 배양 및 성장측정

순수 분리한 식물플랑크톤을 F/2 배지 (Guillard and Ryther, 1962), 30.9‰, 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 20°C에서 배양하였으며, light: dark 시간은 14 h:10 h로 설정하였다. 식물플랑크톤의 성장 측정을 위하여 계대배양한 후, 표시된 날짜 간격으로 1 ml의 시료를 취하여 Lugol 용액으로 고정한 후 희석하여 광학현미경 (Zeiss, Axiophot and color monitor SAM-14P) 하에서 hemocytometer를 사용하여 세포를 5 회 반복 계수하였다.

##### ② 인공해수에서의 식물플랑크톤의 배양

배지내의 질소원 및 인산원의 농도를 조절하기 위하여 증류수에 nutrients를 첨가하여 인공해수를 제조하였다. 인공해수의 염도는 NaCl을 첨가하여 조정하였으며, 첨가된 nutrients는 ASP12 (Provasoli, 1963; Iwasaki, 1967)와 F/2 배지 중 금속이온을 추가하여 제조하였다. 식물플랑크톤의 성장에 필요한 vitamin은

cyanocobalamine, biotin, thiamine-HCl을 첨가하여 주었다. 최종 인공해수의 pH는 7.8-8.0으로 맞추어 사용하였다 (표 1-5).

질소원 및 인산원의 농도 변화에 관한 실험을 위해서 세포를 500 rpm, 5분간 원심분리하여 세포를 농축한 후 각 실험구에 적당한 농도의 세포를 넣어 실험하였고, 인공해수에서의 배양조건 및 성장측정은 자연해수에서와 동일한 방법을 사용하였다.

## (2) 배지내 질소원 및 인산원 농도 측정

식물플랑크톤의 성장과정 동안 배양액 내의  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 의 농도 변화 측정을 위하여 지정된 날짜에 배양액을 취하고 여과한 후 분석을 할 때까지  $-20^\circ\text{C}$ 에 보관하였다. 보관된 배양액은 희석한 후 영양염 분석기(LACHAT)를 이용하여 분석하였다.

## (3) 식물플랑크톤 세포내 생화학적 구성성분 분석

각 실험 조건에서 성장하는 식물플랑크톤을 활발한 성장기에 세포를 취해  $4^\circ\text{C}$ 에서 30 분간 3,200 rpm으로 원심분리 (Sorvall RC 5C)하여 모았다. 모인 세포에 0.2 N perchloric acid를 10 ml 첨가하여 세포내에 존재하는 수용성 탄수화물을 추출하여 탄수화물 정량에 사용하였고, 침전물은 지질, 저장성 탄수화물, 단백질 분석에 사용하였다.

### ① 지질의 추출

지질의 추출은 Bligh and Dyer (1959) 방법을 이용하여 수행하였다. 수용성 탄수화물이 제거된 시료에 chloroform:methanol (2:1, v/v)를 첨가한 후 약 30 분간 방치하여 지질을 추출하고, 동량의 증류수를 첨가한 다음, 원심분리 (2,000 rpm, 10 분)하여 하층의 chloroform 층을 취하였다. 추출된 지질은 질소가스 하에서 말린 후 다음 실험이 수행될 때까지  $-20^\circ\text{C}$ 에서 저장하였다. 추출된 지질은 chloroform:acetic acid (100:1, v/v) 2 ml에 녹인 후 Sep-Pak cartridge(Waters)를 이용하여 중성지방, 당지질, 인지질로 분리하였다 (Norman and St. John, 1986). 중성지방의 분리를



위하여 10 ml의 chloroform:acetic acid (100:1, v/v)와 5 ml의 chloroform : acetone (80:20, v/v)을 연속하여 추출하였고, 당지질의 분리를 위하여 8 ml의 acetone과 8 ml의 acetone:acetic acid (100:1, v/v)를 연속 처리하였다. 인지질의 분리에는 5 ml의 methanol:chloroform:water (100:50:40, v/v/v)를 처리하였다.

### ② 중성지질, 당지질, 인지질의 정량

중성지질, 당지질, 인지질의 정량은 Dittmer and Wells (1969)의 방법에 따라 수행하였다. 지질시료에 2 ml의 dichromate solution (2.5 g  $K_2Cr_2O_7$ , 1 L  $H_2SO_4$ )을 넣은 후 45 분 동안 증탕한다. 실온에서 식힌 후 10 ml의 증류수를 첨가하여 발색 되도록 하여 350 nm에서 흡광도를 측정하였고, 기준으로는 1 mg/ml 의 palmitic acid를 사용하였다.

### ③ 단백질 정량

단백질의 정량은 Bio-Rad microassay kit를 사용하여 정량하였고, BSA (bovine serum albumin)을 기준으로 사용하였다.

### ④ 탄수화물 정량

탄수화물 정량은 phenol-sulfuric acid 방법 (Dubois *et al.*, 1956)을 이용하였다. 10  $\mu$ l의 시료에 50  $\mu$ l의 90% phenol 용액을 첨가하여 섞어준 후, 5 ml의 황산용액을 첨가하여 30 분간 실온에서 반응시키고 spectrophotometer (485 nm)를 이용하여 정량하였다. 기준으로는 0.05%의 glucose를 사용하였다.

## 나. 결과 및 고찰

다양한 농도의 질소원 및 인산원에 해양 식물플랑크톤이 노출되었을 때 식물플랑크톤의 성장 및 세포 구성성분의 변화를 관찰하기 위하여 선정한 질소원 및 인산원의 농도는 국내에서 가장 연구가 많이 수행되었고, 매년 질소원 및 인산원의 농도가 monitoring되고 있는 마산만을 기준으로 하여 연구를 수행하였다 (표 1-6).

본 연구에서는 질소원 및 인산원이 과량으로 존재하였을 경우를 먼저 관찰하였

으며 점차 질소원 및 인산원의 농도를 낮추어 실험을 실시하였다. 특히 자연해수에서의 질소원 및 인산원의 농도변화 실험을 비교 분석함으로써 질소원 및 인산원 실험을 위한 최적의 실험조건을 찾고자 하였다. 또한 세포이동이 활발한 와편모조류와 활발하지 않은 규조류를 비교함으로써 질소원 및 인산원 농도 변화에 대한 종간의 특성을 관찰하여 보고자 했다.

(1) 자연해수에서 성장하는 *G. sanguineum*의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화

해수 중의 질소원 및 인산원이 *G. sanguineum*의 성장에 미치는 영향을 관찰하여 보고자 우리나라 연안에서 가장 오염이 심한 곳 중의 하나로 알려진 마산만의 질소원 및 인산원 농도를 기준으로 하여 실험을 실시하였다. 마산만의 질소원 농도에 비해 약 1/5, 5, 25, 50, 100 배 높은 질소원 농도에서 *G. sanguineum*을 배양하였을 때 1/5 수준의 질소원 및 인산원의 농도인 0.187 mg/L, 0.076 mg/L의 NaNO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 첨가한 배지에서는 성장이 크게 둔화되었다 (그림 1-27 and 28). 마산만 질소원 농도의 약 5-25 배까지는 *G. sanguineum*의 성장이 증가하였으나, 50 배 이상의 질소원 농도인 46.65 mg/L 이상의 NaNO<sub>3</sub>를 첨가한 배지에서는 성장이 저해됨을 관찰할 수 있었다 (그림 1-27). 질소원의 실험과 동일한 방법으로 인산원에 대하여 실험하였을 때에는 마산만 인산원 농도의 약 100 배인 3.80 mg/L 정도를 배지에 첨가하였을 때 *G. sanguineum*의 성장이 둔화되는 것으로 나타났다 (그림 1-28).

배지내의 질소원 및 인산원의 농도에 대한 *G. sanguineum*의 성장변화와 배지에서의 질소원 및 인산원 농도 감소와의 관계를 규명하기 위하여, 성장과정 동안 배지를 취하여 배지내에서의 NaNO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 농도의 변화를 영양염 분석기 (LACHAT)를 이용하여 측정하였다 (그림 1-29 and 30). 배지내에 인산원의 양을 고정시키고 질소원을 변화시켰을 때 인산원의 상대적인 농도변화와 질소원을 고정시키고 인산원을 변화시켰을 때 상대적인 질소원의 농도를 측정하였는데, 질소원과 인산원을 마산만의 약 1/5 수준인 N=0.187 mg/L, P=0.076 mg/L를 배지에 공급하였을 때 급격한 NaNO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 감소를 관찰할 수 있었다 (그림 1-29). 특히 인산원이 충분할 때 질소원의 감소가 크게 증가하는 것으로 보아 *G. sanguineum*의

경우 인산원보다는 질소원의 요구가 더 큰 것으로 판단된다.

위와 같이 질소원 및 인산원의 농도가 낮은 경우 *G. sanguineum*의 성장이 억제되는 것으로 보아 *G. sanguineum*에 의한 적조발생에 있어서 질소원 및 인산원은 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 실제로 경기만 등 적조유발이 활발하지 않은 지역에서는 질소원의 농도가 약 5-15  $\mu\text{g/L}$ , 인산원의 농도가 약 0.5-1  $\mu\text{g/L}$ 인 것으로 조사된 것으로 보아, 질소원 및 인산원의 농도가 적조억제에 중요한 요인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용한 질소원 및 인산원의 농도가 매우 높은 N=46.65 mg/L, P=1.9 mg/L 이상에서는 성장이 억제되는 것으로 보아, *G. sanguineum*에 의한 적조 유발을 위한 임계농도가 있을 것으로 판단되며, *G. sanguineum*의 적조유발에 영향을 미칠 수 있는 질소원 및 인산원의 임계농도를 결정하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

## (2) 인공해수에서 성장하는 *P. micans* 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화

해수 중의 질소원 및 인산원이 *P. micans*의 성장에 미치는 영향을 관찰하여 보고자 우리나라 연안에서 가장 오염이 심한 곳 중의 하나로 알려진 마산만의 질소원 및 인산원 농도를 기준으로 하여 실험을 실시하였다. 실험에 적용한 질소원 및 인산원의 농도 비율은 마산만의 질소원 농도를 기준으로 하였으며, N:P=0:0 mg/L, N:P=0.467:0.019 mg/L, N:P=0.993: 0.038 mg/L, N:P=9.33:0.038 mg/L, N:P=0.933:0.38 mg/L의 비율로 배지에 첨가하여 주고 성장을 관찰하였다 (그림 1-31). 질소원 및 인산원의 양을 증가시켰을 때 각각 성장이 촉진됨을 관찰할 수 있었고, 질소원 및 인산원의 농도가 낮았을 때 *P. micans*의 성장이 둔화되었다. 그러나 예상과는 달리 마산만의 1/2 수준의 질소원과 인산원을 첨가한 실험구와 질소원 및 인산원을 전혀 공급하지 않은 실험구에서도 어느 정도는 *P. micans*가 성장을 하였는데, 이는 *P. micans*를 질소원 및 인산원이 없는 배지로 옮길 때 배지와 함께 약간의 질소원 및 인산원이 섞여 들어갔거나, *P. micans*의 경우 질소원 및 인산원의 고갈에 대해 적응력이 *G. sanguineum*에 비해 강한 것으로 추측된다.

따라서 *P. micans*를 질소원 및 인산원이 배제된 배지로 옮기는 과정에서 세포의 세척과정이 추가되어야 할 것으로 판단되며, *P. micans* 세포내의 질소원 및 인산원

의 저장물질 존재 여부도 조사하여 *P. micans*가 *G. sanguineum*에 비해 낮은 질소 원 및 인산원에 적응하는 기작을 연구하여야 할 것으로 판단된다.

(3) 인공해수에서 성장하는 *G. sanguineum*과 *S. costatum*의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 성장 변화

배지내의 질소원 및 인산원의 농도 변화에 대한 식물플랑크톤의 영향 중 와편모조류와 규조류의 반응을 비교하고, 각 질소원 및 인산원의 농도에서의 식물플랑크톤 세포내의 구성성분을 분석하여 세포내 물질대사 변화 과정을 예측해 보고자 했다. 와편모조류인 *G. sanguineum*의 경우 배지에 질소원 및 인산원이 없을 때와 질소원 및 인산원의 농도가 각각 마산만 농도의 1/4 수준인 0.233 mg/L, 0.0095 mg/L를 배지에 첨가하여 주었을 경우 성장이 억제되는 것을 관찰하였다 (그림 1-32 and 33). 이러한 결과는 *G. sanguineum*의 성장에 있어서 질소원 및 인산원이 필수적임을 의미한다. 질소원 및 인산원의 농도가 마산만의 1/2 수준인 0.467 mg/L, 0.019 mg/L를 배지에 공급하여 주었을 경우 *G. sanguineum*은 약 4일 간 성장을 한 후 감소하는 경향을 나타내었다. 질소원 및 인산원의 농도를 마산만의 3/4 수준인 0.700 mg/L, 0.0285 mg /L, 마산만 평균 농도인 0.933 mg /L, 0.038 mg/L의 질소원 및 인산원을 배지에 첨가하여 주었을 경우 활발한 성장이 이루어지고 있음을 관찰하였다. 따라서 실험 결과에 따르면 *G. sanguineum*은 성장을 위하여 질소원 및 인산원의 농도를 각각 0.383 mg/L, 0.066 mg/L 정도 이상을 요구하는 것으로 나타났다(그림 1-32).

반면 규조류인 *S. costatum*은 *G. sanguineum*에서와 동일한 질소원 및 인산원이 공급된 배지에서 배양하였을 때 *G. sanguineum*과는 다른 성장 양상을 나타내었다. 배지에 질소원과 인산원이 없는 경우에도 활발한 성장을 보였는데(그림 1-33), 이와 같은 결과는 *G. sanguineum*의 경우 *S. costatum*에 비해 질소원 및 인산원의 농도 변화에 매우 민감한 반응을 나타내고 있음을 보여주며, 질소원 및 인산원이 없거나 거의 없는 배지에서는 *S. costatum* 세포내에 질소원 및 인산원의 저장물질이 존재하고 있음을 보여주는 결과로 해석할 수 있으며, *S. costatum* 세포내의 저장물질에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 인공해수에서 성장하는 *G. sanguineum*과 *S. costatum*의 배지내 질소원 및 인산원의 농도에 따른 세포구성성분의 변화

위와 같이 *G. sanguineum*과 *S. costatum*의 경우 질소원 및 인산원의 농도가 변화하였을 때 다른 성장 곡선을 보이는 것은 세포활성도의 차이에 기인하는 것으로 추정되며, 세포활성도 비교를 위하여 *G. sanguineum*과 *S. costatum* 세포를 모아 세포내 구성성분을 분석하였다 (그림 1-34-37).

*S. costatum* 세포내 단백질 양의 변화는 질소원 및 인산원의 농도가 변화하여도 거의 변화를 보이지 않았다 (그림 1-34A). 그러나 *G. sanguineum*의 경우 세포내 단백질 양이 배지내 질소원 및 인산원 농도에 따라 크게 변화하고 있음을 관찰할 수 있었다 (그림 1-34B). 세포내 단백질의 양의 변화는 일반적으로 생존해 있는 세포의 경우 거의 유사하게 나타나는 것으로 알려져 있는데, *G. sanguineum*의 경우 단백질 양이 변화한 것은 질소원 및 인산원의 농도가 낮았을 때 성장이 억제되고, 관찰된 살아있는 세포도 세포 활성이 크게 떨어지고 있는 과정에 있는 세포인 것으로 판단된다.

배지내에서 질소원 및 인산원 농도가 변화하였을 때 세포내 구성성분 중 수용성 탄수화물과 저장성 탄수화물의 양의 변화를 측정하였는데, 수용성 탄수화물의 경우 *G. sanguineum*과 *S. costatum* 두 종 모두 거의 변화를 보이지 않았다 (그림 1-35B and D). 이는 살아있는 세포의 경우 여러 가지 예측 가능한 세포내 물질대사 (즉, 광합성, 탄수화물 분해, 지방산 등으로부터의 탄수화물 합성)를 통해서 세포의 생존에 요구되는 탄소원의 보충이 이루어지고 있는 것으로 판단되며, 질소원 및 인산원 공급이 중단되었을 때 세포내 물질대사의 변화 과정에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 세포내 저장성 탄수화물의 양은 질소원 및 인산원의 농도 변화에 따라 크게 변화하였는데 (그림 1-35A and C), *G. sanguineum*의 경우 질소원 및 인산원의 농도가 마산만 농도의 0.5 배 정도인  $N=0.467 \text{ mg/L}$ ,  $P=0.019 \text{ mg/L}$  정도까지 저장성 탄수화물의 양이 감소함을 나타내었다. 이는 질소원 및 인산원의 농도에 따라 *G. sanguineum*의 광합성능이나 세포 활성이 감소되어 세포내에서 생존을 위해 요구하는 탄수화물의 공급을 위해 저장성 탄수화물을 사용하고 있음을 보여 준다. 그러나 *S. costatum*의 경우 오히려 질소원 및 인산원의 농도가 낮을 때 세포내에 저장성 탄수화물이 많이 관찰되었는데, 공급되는 질소원 및 인산원이 부

족하기 때문에 단백질 및 인지질 합성과정에 참여하는 탄소원의 공급을 최소한으로 하고 잉여 탄수화물을 저장을 하는 것으로 판단된다.

세포내 지질 중 인지질, 당지질, 저장성 중성지질의 양의 변화는 *G. sanguineum* 과 *S. costatum* 두 종에서 종간의 차이를 보였다 (그림 1-36 and 37). 인지질의 경우 세포막이나 세포내 기관의 막을 구성하는 지질이며 일반적으로 살아있는 세포에서는 거의 양의 변화가 없는 것으로 추정되고 있다. 그러나 *S. costatum*의 경우 질소원 및 인산원의 농도 변화에 따라 인지질의 양이 변화하였는데 (그림 1-37A), 이 결과에 관하여는 인지질 분해 과정에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 당지질은 세포막을 구성하는 지질로써 엽록체 틸라코이드 막에 존재하여 광합성 활성을 나타내는 지질이며, 중성지질은 저장성 지질로 알려져 있는데, *G. sanguineum* 의 경우 저농도의 질소원 및 인산원에서 당지질 및 중성지질의 양이 크게 감소하고 있는 것으로 보아 세포가 사멸기에 들어가 있는 것으로 판단되며 중성지질과 당지질을 분해하여 질소원 및 인산원의 고갈뿐만 아니라 광합성능 감소에 따른 적응과정을 보여 주고 있다. 즉, 중성지질과 당지질을 분해하여 양분결핍에 다른 대체 탄소원 (alternative carbon sources)으로 사용하고 있는 것으로 판단된다. 반면 *S. costatum*은 당지질 및 인지질의 변화를 보이지 않고 있는데 질소원 및 인산원의 농도변화에 거의 영향을 받지 않고 정상적인 광합성 및 세포활성을 보이는 것으로 추정된다.

### 3. *G. sanguineum*과 *C. polykrikoides*의 온도 변화에 따른 생화학적 구성성분 분석

#### 가. 실험재료 및 방법

##### (1) 실험재료

진해만에서 순수분리한 *P. minimum*을 실험의 재료로 사용하였다

##### (2) *P. minimum*의 배양, 성장측정 및 생화학적 구성성분 분석

*P. minimum*의 배양, 성장측정 및 세포내 생화학적 구성성분의 분석은 Cho et al. (1998), Chang et al. (1998)의 방법을 기초로 하여 수행하였고, 배양온도는 각각 해양에서의 가장 낮은 온도범위와 높은 온도범위인 15°C, 20°C, 28°C로 설정하여 실험을 하였다.

#### 나. 결과 및 고찰

본 연구팀은 본 연구의 2 차년도에 1998년도에 적조를 유발한 적조생물을 채집하여 세포내 구성성분을 분석, 비교한 바 있다 (적조확산경로예측 모델 및 방제기술 개발연구, 1998. 12). 성분분석을 통하여 본 연구팀은 *G. sanguineum*과 *C. polykrikoides* 두 종의 적조원인종 간에 세포구성성분이 차이하고 이러한 결과가 두 종간의 적조발생빈도 및 발생기간에 밀접한 관련이 있을 것을 예측한 바 있다 (그림 1-38). 따라서 두 종의 적조원인종을 실험실에서 배양하면서 구성성분의 변화를 관찰하는 것이 요구되었으며, 이를 통하여 실제 해양에서의 구성성분과 실험실내에서의 배양과정 중의 구성성분간의 차이를 관찰하여 비교하여 보고자 했으며, 특히 온도변화에 대한 두 종간의 차이를 관찰하여 보고자 했다.

실제 적조발생시 두 종에서 세포내 전체 단백질의 양은 거의 유사하였으며 (그림 1-38A), 수용성 및 저장 탄수화물의 양은 *G. sanguineum*이 *C. polykrikoides*에

비해 더 많은 양을 함유하고 있었다 (그림 1-38B). 당지질 및 인지질의 경우 두 종에서 거의 유사하지만 저장성 중성지질의 경우 *C. polykrikoides*가 더 많이 함유하고 있는 것으로 나타났다 (그림 1-38C). 이상과 같은 결과는 *C. polykrikoides* 세포보다 *G. sanguineum* 세포내에 탄수화물의 양이 더 많은 것으로 보아 *G. sanguineum* 세포가 광합성율이 높을 것으로 예상되며, 광합성 결과 생성된 탄수화물을 빠른 시간 내에 사용 가능한 저장성 탄수화물 형태로 저장하고 있는 것으로 판단되었다. 위와 같은 결과로 미루어 *G. sanguineum*의 경우 저장탄수화물을 합성하는 기작이 활성화되어 있거나, 탄수화물에서 지질로의 물질대사가 원활하지 않을 것으로 예상되었다.

*G. sanguineum*과 *C. polykrikoides*를 각각 15°C, 20°C, 28°C로 설정하여 배양하였을 때 두 종간의 성장의 차이가 관찰되었다 (그림 1-39). *G. sanguineum*은 우리나라 연안 해수의 최저 온도와 최고온도 수준인 15°C와 28°C에서 성장을 하지 않았으며 20°C에서 활발한 성장을 보였다 (그림 1-39A). 반면 *C. polykrikoides*의 경우 15°C와 28°C에서 성장이 저해되었지만 시간이 지나면서 성장을 하는 것으로 나타났다 (그림 1-39B). 따라서 이와 같은 결과는 *G. sanguineum*에 비해 *C. polykrikoides*가 온도변화에 덜 민감한 것을 보여준다.

각 온도에서 성장하고 있는 식물플랑크톤을 성장대수기에 모아 세포내 구성성분 즉 단백질, 탄수화물, 지질(인지질, 당지질, 중성지질)의 양을 측정하였다. 단백질의 경우 온도 변화에 따라 큰 변화는 관찰되지 않았으나 (그림 1-40A), 탄수화물은 큰 차이를 보였다 (그림 1-40B), 전체적인 탄수화물의 양은 *C. polykrikoides*에 비해 *G. sanguineum*에서 많은 것으로 나타났으나 온도변화에 대한 세포내 탄수화물의 양의 변화는 두 종에서 다른 경향을 나타내었다. 즉, *G. sanguineum*은 20°C에서 탄수화물의 양이 가장 많았으며, 이는 광합성을 통해 합성된 탄수화물을 세포내에 저장하는 것으로 판단된다. 그러나 *C. polykrikoides*의 경우 15°C에서 세포내 탄수화물의 농도가 가장 낮았으며, 20°C와 28°C에서 세포내 탄수화물의 양이 거의 유사하였는데 *C. polykrikoides*는 고온에서도 적응하는 능력이 *G. sanguineum*에 비해 강한 것으로 판단된다.

세포내 지질량의 변화는 두 종간에 더욱 크게 나타나고 있다 (그림 1-41). 세포내 인지질의 경우 저온인 15°C에서 가장 많이 검출되었는데 저온에 대한 신호전달 물질로서 인지질이 생성되었을 가능성이 매우 큰 것으로 알려져 있다 (Cho et al.,



1998). 당지질의 경우 저온에서 가장 낮은 것으로 나타나 저온에서의 광합성 저해작용이 있는 것으로 생각되며, 자세한 기작은 연구 중에 있다. 중성지질은 온도에 따라 커다란 차이는 없으나 두 종 모두 고온에서 중성지질의 양이 가장 적은 것으로 나타났으며, *G. sanguineum*에 비해 *C. polykrikoides*에서 중성지질의 양이 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 *C. polykrikoides*가 세포내에 탄소원 및 에너지 원으로 중성지질을 오랫동안 저장을 위한 것으로 생각되며, 실제 적조발생시 *C. polykrikoides*와 *G. sanguineum*의 세포내 구성성분 분석과 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 적조원인종의 glucose 흡수

##### 가. 실험재료 및 방법

###### (1) 실험재료 및 배양

장목 분소에 구축되어 있는 적조생물은행 보유종 중 7 종 즉 *P. minimum*, *G. sanguineum*, *P. micans*, *C. polykrikoides*, *S. trichoidea*, *H. akashiwo*, *A. catenella* 을 실험재료로 사용하였다.

###### (2) 식물플랑크톤의 [<sup>14</sup>C]glucose 흡수

식물플랑크톤의 glucose 흡수는 Lee and Lee (1996)의 방법에 따라 수행하였고, glucose 흡수에 대한 carbonylcyanide *m*-chlorophenyl- hydrazone (CCCP), fusicoccin (FC)의 영향은 Lee et al (1999)의 방법에 따라 수행하였다.

##### 나. 결과 및 고찰

광합성생물의 원형질막을 통한 sugar의 전달은 성장에 필요한 탄소원 및 에너지를 공급해준다. 살아있는 세포로의 glucose 흡수에 관한 많은 연구에 따르면 glucose 흡수는 carrier-mediated인 것으로 알려져 있지만 아직까지 그 기작은 거의 이해가 되지 않고 있는 실정이다. Glucose 흡수는 Chlorella로 연구가 시작되었으며 주로 고등식물에서 연구가 수행되었다. 특히 glucose 흡수와 광합성간에는 연관관계가 있을 것으로 받아들여지고 있다.

우리나라 연안에서 빈번하게 적조를 유발하는 편모조류를 중심으로 glucose 흡수를 측정하고 glucose 흡수기작을 비교하였다. 7 종의 편모조류를 glucose 흡수 관찰을 위한 실험의 재료로 사용하여 해양으로 유입되는 오염물 중 탄수화물과 적조와의 연관관계를 분석해 보고자 했다.

실험에 사용된 식물플랑크톤의 glucose 흡수는 종에 따라 포화시간이 달랐으며, 특히 *P. micans*, *G. sanguineum*은 약 10 분 정도에 포화되는 경향을 나타내었다 (그림 1-42). 배양액에 첨가된 glucose 농도에 따른 glucose 흡수 역시 종에 따라 다양한 결과를 관찰할 수 있었다 (그림 1-43). Glucose 흡수는 에너지를 사용하는 능동수송이거나 에너지를 사용하지 않는 simple 또는 facilitated diffusion 방식을 사용한다. 식물플랑크톤의 glucose 흡수 기작을 살펴보기 위해서 세포내 ATP 생성을 억제하는 metabolic uncoupler인 CCCP과  $H^+$ -ATPase를 활성화시키는 FC를 처리한 후, glucose 흡수를 조사하였다. 실험결과 모든 종에서 CCCP는 glucose 흡수를 억제하였으며, FC는 glucose 흡수를 증가시켰다 (그림 1-44). 그러나 알려진 FC의 효과에 비해서는 매우 낮은 증가를 보였다. glucose 흡수에 있어서 pH의 영향은 매우 중요한데, 모든 종에서 pH 7과 8에서 가장 glucose 흡수가 활발하였으며, 특히 *P. minimum*, *A. catenella*, *H. akashiwo*는 pH 7에서 가장 glucose 흡수가 높은 것으로 나타났다 (그림 1-45). 본 연구팀은 위와 같은 결과를 토대로 하여 식물플랑크톤의 glucose 흡수 기작 및 특성을 비교하는 조사를 수행 중에 있다.

해양미세조류의 glucose 흡수와 흡수기작 실험이 반복될 것이며, 해양미세조류 종간의 glucose 흡수 특성이 비교될 것이다. 최종적으로 glucose 흡수 따른 광합성율의 저하와 식물플랑크톤 색소 합성과의 연관관계가 연구될 것이다. 식물플랑크톤의 glucose 흡수와 광합성과의 연관관계는 규명을 통하여 육상으로부터 해양으로의 오염물질의 유입을 통한 적조 발생기작을 이해하고 오염물의 차단을 통한 적조발생 빈도 감소를 위한 연구의 자료로 이용하게 될 것이다.

## 5. 향후계획

적조생물과 환경과의 상호작용에 관한 연구는 적조생물에 의한 유기물의 흡수 및 이용에 초점이 맞추어질 것이다. 이를 위해 하루동안의 질소 및 인산원의 흡수도 측정을 통한 circadian rhythm의 존재여부에 관한 연구가 수행될 것이며 이를 통해 적조생물의 daily migration과의 연관성에 관해 연구될 것이다. 또한 과량의 질소원 및 인산원의 존재시 적조생물의 성장 및 흡수도를 측정하여 적조발생시기의 해수내의 영양염의 농도와 적조발생과의 연관성에 관한 자료를 이용하여 적조발생기작을 예측하고자 하며, 영양염 흡수의 수치적 자료를 작성하게 된다. 유상으로부터 해양으로 유입되는 다른 유기물 특히 탄수화물의 적조발생과의 관련성이 연구되는데 이를 위해 적조생물에 의한 포도당의 흡수도 측정 및 광합성과 포도당 흡수와 의 경쟁관계 연구가 수행된다.

### 제 3 절 적조원인 생물의 휴면포자 형성과 발아

#### 1. 서론

적조현상을 일으키는 원인종들 중에 와편모조류에 속하는 식물성 플랑크톤은 그들의 생활사 중에서 휴면포자를 형성하여 저층으로 가라앉는다. 휴면포자의 형성은 환경변화에 대한 적조원인 생물의 적응수단으로 생존전략 측면에서 매우 중요한 과정이다. 와편모조류에는 수중 영양세포 (vegetative cell)가 유성생식을 통해 휴면포자 (resting cyst or hypnozygote)로 되어 해저로 침강한 후, 다시 환경조건이 적합해지면 발아하여 수중 영양세포로 되 돌아오는 생존전략 (그림 1-46)을 지니는 종류가 많이 보고되어 있다 (Fryxell, 1983; Steidinger and Walker, 1984). 특히, 적조원인생물로 주목받는 유독성 와편모조류 중 *Alexandrium tamarense*는 수중 영양세포에 대한 연구와 아울러 수중 대변식의 씨앗으로서 중요한 역할을 하는 휴면포자의 형성과 발아 (encystment and excystment)에 대한 연구가 이미 미국과 일본을 비롯한 여러 선진국에서 활발히 수행되어왔다. *Alexandrium tamarense*에 대해서 연구했던 Anderson and Wall (1978), Anderson and Morel (1979), Anderson et al. (1983)은 휴면포자가 수중 영양세포 발생의 근원으로서의 중요성을 강조했으며, 또한 적조의 발생과 확산도 휴면포자 군집과 밀접한 관계를 갖는 것으로 보고하였다.

앞으로 휴면포자의 형성과 발아에 미치는 주요한 수중 환경요인을 파악하고, 더 나아가서는 휴면포자의 형성과 발아에 간여하는 생리적인 기작을 규명할 필요가 있다. 본 연구는 거제도 장승포 연안에서 해저니를 채집하여 현장 휴면포자의 발아와 형성에 대한 일련의 과정을 살펴보고, 또한 장목만에서 손쉽게 채집할 수 있는 *Gymnodinium sanguineum*과 *Scrippsiella trochoidea*를 대상으로 하여 실험실에서 휴면포자를 인위적으로 형성시켜 보고, 차후에는 이같이 형성한 휴면포자가 발아하기까지 생리적으로 어떠한 변화를 하는가를 해명하고, 다른 적조 원인종인 와편모조류들에도 적용하여 적조 발생과정에 어떠한 생리, 생태학적인 변화가 있는지를 추정해보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 현장조사

시료채집은 장승포 연안해역 내의 일부 정점에서 1999년 8월 20일 실시하였으며 (그림 1-47), 시료의 채취와 분석은 다음과 같은 항목과 방법으로 하였다. 해저니는 Hand Core 채니기 (TFO식: 그림 1-48)를 사용하여 acryl tube (직경 1.1 cm, 길이 30 cm) 3개씩 채취한 후 시료를 냉, 암소에 보관하여 실험실로 운반하였다.

실험실에서 보관된 acryl tube에 담긴 상층부 2 cm의 해저니를 취하여 플라스틱 용기 속에 넣어 잘 섞은 후, 용기 속의 해저니 1 g (wet weight)을 취하고, 여기에 냉장 보관한 여과해수 (10°C 이하)를 넣어 고르게 섞은 뒤, 초음파기 (SHARP UT-53N)를 사용하여 30초간 초음파처리하여 현탁액을 분쇄시켰다. 그후 현탁액은 100  $\mu\text{m}$ 와 20  $\mu\text{m}$  mesh를 사용해 각각 여과 시켜 20-100  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 분리하였고, petri-dish를 사용하여 panning method (Matsuoka *et al.*, 1989)에 의해 바닥에 가라앉는 무거운 모래입자로부터 상층에 부유하는 비교적 가벼운 입자를 무게별로 분리하였다 (그림 1-49). 휴면포자를 포함하고 있는 가벼운 입자는 여과해수와 함께 부피를 총 20 ml로 농축하여 20 ml의 병에 넣어 냉장보관하고, 이 중 1 ml 씩을 취해 Sedgwick Rafter 계수판에 놓고 광학현미경 (ZEISS Axioskop)하에서 계수한 후, 휴면포자의 현존량 ( $\text{cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ )으로 환산하였다. 휴면포자의 분리과정 시 요구되는 해수는 GF/F로 여과한 후 냉장 보관하여 사용하였다.

### 나. 현장 휴면포자의 발아

해저니로부터 일부를 분리하여 냉장 보관한 시료를 petri-dish 위에 1 ml을 취하여 놓고, inverted microscope (ZEISS Axiovert 135M) 하에서 microcapillary를 사용하여 휴면포자만을 분리하였다. 분리한 휴면포자는 0.2  $\mu\text{m}$  막 여과지로 여과하여 멸균한 해수가 들어있는 1.5 ml 용 micro tube에 보관하였고, 이것을 다시 여과멸균 해수로 2-3회 세척한 다음 여과멸균해수가 들어있는 tissue culture plates (Coatar 3596)내의 well 속에 1개체씩 휴면포자를 접종하였다. 접종된 well plate는 투명한

sealing 테이프로 밀봉한 후, 20°C의 수온, 50  $\mu\text{mol}$ 의 광도, 14hL-10hD의 광 주기 조건에서 배양하였다. 실험과정에서 온도변화에 의한 휴면포자의 발아와 변성을 막기 위해 저온 보관된 여과멸균해수를 사용하였다. 배양 시작 후 일주일 동안은 매일 발아여부를 관찰 기록하였으며, 그 후에는 2-3일 간격으로 발아여부를 관찰하였다.

#### 다. 실험실내 휴면포자 형성의 실험 기간

실험실 조건에서 휴면포자 형성실험은 *G. sanguineum*과 *S. trochoidea*를 택하여 1999년 8월 9일부터 8월 27일까지 약 3주 동안 실시하였다.

##### (1) 물리적 환경요인에 의한 Encystment

*G. sanguineum*과 *S. trochoidea* 영양세포를 휴면포자로 유도시키기 위해 저온(5°C)과 실온(20°C)에서 암조건을 주어 인위적으로 휴면포자 형성을 유도하였으며, 배양액은 f/2 medium을 사용하였다.

##### (2) 영양세포 증식에 의한 Encystment

f/2 medium을 사용하여 20°C 온도와 50  $\mu\text{mol}$ 의 광도조건 하에서 *S. trochoidea* 영양세포의 휴면포자 형성을 조사하였다.

### 3. 결과

#### 가. 장승포 연안해역의 휴면포자 분포 및 발아실험

##### (1) 휴면포자의 종조성

장승포 해역에서 조사한 휴면포자는 정점 1과 2에서 각각 17종과 18종 (미 동정된 종 포함) 출현하였고 (표 1-7), *S. trochoidea*와 *A. tamarense* 휴면포자가 우점을 하였다.

## (2) 휴면포자의 발아 및 형성

정점1의 휴면포자를 분리하여 발아실험을 한 결과, 접종 후 2일째부터 *S. trochoidea*를 비롯한 각각의 종들이 발아를 하기 시작하였고, 이후 8일째까지 발아가 지속되었으며, *S. trochoidea*와 *Protoperdinium* spp. 등에서 발아공 (archeopyle)이 뚜렷이 관찰되었다 (그림 1-50). 발아 후 *S. trochoidea*와 3개의 미 동정된 종의 영양세포가 빠른 성장을 나타내었으며, 또한 *S. trochoidea*는 영양세포의 급속한 증가와 함께 휴면포자가 형성이 되었다. 이와 같이 휴면포자를 접종하고 발아하여 증식한 다음 다시 휴면포자가 형성되기까지는 약 3주정도 걸렸다. 그 형태는 휴면접합자의 모양, 돌기가 없는 휴면포자와 돌기가 있는 휴면포자가 각각의 well에서 공존하였다 (그림 1-51).

## 나. 실험실 내에서의 휴면포자 형성

### (1) *Scrippsiella trochoidea*

배양 2일째부터 운동성을 상실한 세포가 눈에 두드러졌으며, 20℃ 온도보다는 5℃에서 훨씬 많은 양을 보였다. 배양시작 후 7일이 경과되었을 때부터 20℃에서 배양되고 있는 세포가 점점 죽어갔으며, 5℃의 조건에서는 배양 11일째에 휴면포자를 포함한 운동성을 상실한 세포가 가장 증가하였고, 그후 약간 감소하였다 (그림 1-52 and 53).

### (2) *Gymnodinium sanguineum*

접종 후 배양 초기에 운동성을 상실한 세포가 well 바닥에 가라앉아 있는 양은



두 가지의 온도조건에서 서로 비슷하였지만, 배양 7일째 이후에는 차이가 보였고, 그 때 5°C의 조건에서 약 2배 가량 많았음이 관찰되었다 (그림 1-52 and 53).

#### 4. 고찰

본 실험에 사용된 종들 중, *S. trochoidea* 휴면포자의 형태적 특징은 난형 또는 타원형으로서 그 크기는 길이가 26-40  $\mu\text{m}$ , 너비는 23-35  $\mu\text{m}$ 이며, 휴면포자의 표면에 극상의 돌기 (spine)가 밤송이처럼 돌아있으며, 또한 휴면포자 내부는 붉은 안점 (red spot)이 선명하게 보인다 (그림 1-54). 표면의 돌기는 그 구성성분이 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ )이라고 보고되어 있으며 (Wall *et al.*, 1970), 현장의 채집 시료에는 이러한 돌기를 갖고 있으나, 배양실험에서는 돌기를 갖고 있지 않은 것도 관찰되었다 (그림 1-51). Kim and Iwasaki (1987)의 보고에 따르면 *S. trochoidea* 휴면포자의 돌기 형성은 탄산염의 농도와 비례한다고 언급하였다. *S. trochoidea*는 연안역에 흔히 분포하는 종으로 적조원인생물로도 널리 알려져 있으며 (Wall *et al.*, 1970; Bolch and Hallegraeff, 1990), 휴면포자가 주로 형성되는 시기는 영양세포의 현존량이 최대를 이루거나 최대 현존량에서 감소되기 시작하는 시기에 주로 형성된다고 보고되어 있다 (Bibby and Dodge, 1972; Tyer *et al.*, 1982; Heaney *et al.*, 1983; Heiskanen, 1993). 본 실험에서 배양할 때 *S. trochoidea*가 휴면포자를 형성하는 것 역시 영양세포의 급속한 증가와 함께 휴면포자의 형성이 이루어졌는데, 휴면포자를 접종하여 발아 한 후 영양세포로 되어 3주정도 증식을 하였고, 이시기에 휴면포자 형성이 관찰되었다. *S. trochoidea*는 수온 15-20°C 범위가 발아 적온이며 이 범위에서 증식률이 높다고 보고되어 있으며 (Ishikawa and Taniguchi, 1996), 본 실험에 적용된 온도 (20°C) 역시 발아의 적온과 증식률이 좋은 온도조건으로서, 이러한 호조건 하에서 발아 (excystment)와 영양세포 (vegetative cell)의 번성, 휴면포자의 형성 (encystment)과 같은 일련의 전반적인 생활사 과정이 일어났다고 판단된다. *S. trochoidea* 휴면포자는 형성된 후 한 달 정도의 휴면기를 거쳐야 발아할 수 있다고 보고되어 있다 (Binder and Anderson, 1987). 그러나 본 실험에서 현장의 *S. trochoidea* 휴면포자 채집시료를 발아시켜 재형성된 휴면포자가 1개월 이상의 휴면기간을 거쳤음에도 불구하고 다시 발아되는 것을 관찰하지 못하였으며, *S.*

*trochoidea* 영양세포를 20℃ 온도와 50  $\mu\text{mol}$ 의 광도 조건에서 실내배양을 통해 얻어진 휴면포자의 경우에도 3개월 이상의 휴면기간을 거쳤지만 접종한 54개체 중 오직 1개체만이 발아하여, 실내배양을 하여 형성된 *S. trochoidea* 휴면포자는 현장시료에 비해 발아능력이 현저히 떨어지는 결과를 보였다. 현장에서 형성된 휴면포자와 실험실 배양에 의해 형성된 휴면포자는 유성생식과정을 통해 휴면기에 들어가는 휴면포자 (resting cyst or hypnozygote)를 형성했다고 사료되지만, 충분한 휴면기간을 거쳤음에도 영양세포로서 발아가 되지 않아 이에 대한 원인은 앞으로 규명해야 할 것으로 판단된다. 또한 수중의 환경조건이 부적합할 때 수중에 존재하는 영양세포가 일시적인 휴면상태의 휴면포자 (temporary cyst)를 형성하며, 이들 휴면포자는 편모가 없어 운동성을 상실하기 때문에 해저로 침전한 후 다시 환경조건이 적합해지면 휴면포자로부터 발아하여 영양세포로서 수중에 존재하게 되는데 (Fryxell, 1983; Steidinger and Walker, 1984), 5℃와 20℃의 암 조건에서 형성된 *Gymnodinium sanguineum*과 *Scrippsiella trochoidea* 휴면포자는 일시적인 휴면상태의 휴면포자 (temporary cyst)로 사료되며, 이들 또한 20℃ 온도와 50  $\mu\text{mol}$ 의 광도 조건에서의 실내배양을 통해서 영양세포로 발아를 하지 않았다. 본 연구는 온도와 휴면포자의 관계에 대해서만 기초적인 실험을 수행하였다. 앞으로 휴면포자의 형성과 발아와 관련된 환경요인 (수온, 염분, 용존산소 등)에 대한 실험 및 휴면포자 세포내의 구성성분 분석을 통해 좀 더 자세한 휴면포자의 형성과 발아과정을 규명하고자 한다.

## 제 4 절 대형 해조류로부터 적조생물 제어물질 개발연구

### 1. 서론

1980년대 이후 변화된 환경요인으로 인하여 발생빈도가 날로 증가하고 있는 적조현상은 국내·외 연구기관에서 많은 연구가 수행되어 왔으며, 적조생물이 대량 번식하여 독성물질을 분비하고 해수내의 용존산소를 고갈시켜 어패류 등에 피해를 초래해 왔던 것은 이미 잘 알려져 있다.

적조생물의 제거를 위해서 현재 사용되고 있는 대표적인 방법은 황토 살포방법이다. 그러나 황토 살포방법을 계속 사용할 경우 육상에서의 황토개발에 따른 환경 파괴 문제와 바다로의 지속적인 황토 유입은 바다의 저질상을 변화시켜 저서생물의 천이 등 생태계의 변화를 유발할 가능성을 가지고 있다. 적조생물 방제를 위해 황토 이외에 화학처리제, 박테리아 또는 바이러스에 의한 제거 등이 연구되어 왔지만, 2차 환경 오염 및 그 실효성에 있어서 의문이 제기되고 있는 실정이다. 따라서 적조생물의 제거를 위해 환경오염의 피해를 최소화할 수 있고, 살상효과가 탁월한 물질에 대한 연구의 필요성은 오랫동안 제기되어 왔다.

해조류의 추출물을 이용한 연구는 과거 약 40 여 년 간 연구되었으며 추출물을 이용한 biotechnology는 최근에 들어 선진국들을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 추출물 중 대표적인 것은 다당류이며, 특히 agar, agarose, carrageenan, alginate, fucan, xylan 등이 홍조류, 갈조류 및 녹조류에서 얻어지고 있다 (Renn, 1990; Radmer, 1996). 해조류 추출물 또는 그 유도체는 항바이러스, 항박테리아 기능 외에 cholesterol 농도를 낮추고, 면역학적 반응 안정화시키는 등의 기능이 알려지면서 (Renn, 1993) 전세계적으로 생물자원으로서 뿐만 아니라 의약품의 원료로서 연구되고 있다.

갈조류에서 추출되는 알긴산 (alginate)은 세포벽에 존재하는 다당류이다. 알긴산은 D-mannuronic acid와 L-guluronic acid monomer로 구성되어 있으며 배열순서와 조성은 추출종 및 추출부위에 따라 다르고 기능도 다양하게 나타난다 (Ertesvag and Valla, 1998). 알긴산의 생체내 합성은 주로 *Pseudomonas aeruginosa.*, *Azotobacter vinelandii* 등 박테리아에서 연구되었으며 세포내에서

fructose-6-phosphate로부터 합성되어 GDP-mannuronic acid가 형성된다. GDP-mannuronic acid는 세포바깥으로 분비되면서 epimerization, polymerization, acetylation 등의 과정을 거쳐 알긴산을 형성하고 이는 세포벽 바깥을 감싸는 형태로 존재하게 된다 (Rehm and Valla, 1997). 알긴산은 gel 형성, 수분함유능, 상처보호, 건조조절 등의 기능을 이용하여 직물, 식품산업, 의약품산업 등의 원료로 사용되고 있다. 알긴산의 항생기능에 관한 연구는 1980년대 갈조류 추출물 중에 항바이러스, 항박테리아, 항균, 항종양 기능 등이 있음을 확인하였지만 이들의 산업적 이용 및 세포에 대한 작용기작에 관하여는 거의 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다.

이에 따라 본 연구소의 적조연구팀에서는 적조생물의 사멸에 탁월한 작용을 하며 환경오염을 최소화 할 수 있는 물질에 대해 연구하고자 했고, 해조류에서 추출한 추출물에 의한 적조생물의 사멸에 관한 연구를 수행하고 이를 실용화시키며, 적용범위를 넓히려는 연구를 하였다. 또한 해조류 추출물의 작용기작을 연구함으로써 적조방제에 관한 연구뿐만 아니라 해양생태학 및 생리학적인 연구를 수행하고자 했다.

## 2. 재료 및 방법

가. 연구재료 : 다시마 (*Laminaria* spp.)

나. CNY218 제조

(1) 고분자 알긴산 추출

자연건조한 다시마를 미세하게 분쇄한 후  $\text{NaHCO}_3$  용액으로 다시마에 함유되어 있는 알긴산을 분리하였다. 이를 메탄올을 이용하여 분말결정화 한 후 동결건조하여 고분자 알긴산 분말을 얻었다.

(2) 알긴산 올리고 유도체의 제조

0.5 L 삼구 플라스크에 고분자 알긴산 10 g을 첨가하고 2 N HCl 및 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 이용하여 70-100°C에서 가수분해시켰다. 가수분해된 저분자 알긴산은 시간별로 채취하여 pH를 7~9로 조절하고 이를 생물체에 처리하여 항생기능의 존재 유무를 확인하였다.

분리된 알긴산의 분자량 분포 조사를 위하여 Brookfield 점도계를 사용하여 100 rpm으로 측정하였고, 최초 사용된 알긴산의 순도를 확인하기 위한 총 uronic acid 함량 측정은 Haug와 Larsen (1962)의 표준 가수 분해 방법에 의해 실시하였다. 분자량 분포도 분석은 gel permeation chromatography 분석시스템 (JASCO, Model LC-90, Jasco Co., 일본)을 이용하였다.

### 3. 결과

#### 가. CNY218의 특성

본 연구팀은 다시마로부터 추출한 알긴산 올리고당 유도체를 CNY218로 명명하였으며, 그 특성은 다음과 같다. CNY218은 polygalactouronite이며, 갈조류 건조분으로부터 약 14-40%를 얻을 수 있다. 주요 구성성분은 mannuronic acid와 guluronic acid이며 (그림. 1-55) CNY218의 decarboxylation 정도는 약 60-99%이며, 분자량 분포는 1-16 당체이다. 분리된 CNY218은 pH 7-9 범위로 조정하여 적조생물, 어류 기생충, 고등식물세포 및 동물세포 등의 사멸 실험에 사용하였다.

#### 나. CNY218에 의한 적조생물의 사멸

최근 몇 년 동안 우리나라 남해 연안일대의 적조를 유발하고 있는 *Cochlodinium polykrikoides*와 적조생물의 하나인 *Gymnodinium sanguineum*에 CNY218을 처리하여 적조생물의 사멸 효과를 확인하였다 (그림 1-56 and 57). 0.05-0.1%의 CNY218을 처리하였을 때 *C. polykrikoides*와 *G. sanguineum*의 운동성이 급격히 저하되었으며 세포가 파괴되는 과정이 관찰되었다. 저농도의 CNY218

에서 *C. polykrikoides*의 반응이 *G. sanguineum*에 비해 지연된 것은 *C. polykrikoides*의 경우 단세포로 분리된 후 세포가 파괴되는 시간이 요구된 것으로 판단된다 (그림 1-58).

#### 다. CNY218에 의한 어류기생충, 고등식물 및 동물세포의 사멸

본 연구팀에서는 추출된 CNY218의 적조생물에 대한 사멸효과 연구와 더불어 CNY218의 연구영역을 넓히고자 어류기생충, 조직배양된 고등식물 세포 및 동물세포에 적용하여 그 효과를 살펴보았다 (그림 1-59-61). 적조생물의 사멸에 적용하였던 처리농도인 0.05-0.1%의 CNY218을 처리하였을 때 어류기생충인 스쿠티카 섬모충(*Scuticociliatids*)은 활발했던 운동성이 급격히 저하되었으며, 시간이 경과됨에 따라 수축포가 확장되면서 유선형체에서 원형체로 변화되는 과정이 관찰되었고, 전체적으로 2 시간이상 경과 후에는 이 기생충이 완전히 파괴되었다 (그림 1-59).

동일한 농도의 CNY218을 고등식물인 당근 조직배양세포에 처리하였을 때 세포벽과 세포막이 분리되는 원형질 분리 현상이 나타났고 (그림 1-60), 동물배양세포인 hybridoma에 처리하였을 때 처리와 동시에 급격히 세포가 수축하면서 사멸하는 것이 관찰되었다 (그림 1-61).

#### 라. CNY218의 예상작용기작

본 연구팀에서는 CNY218이 보유하고 있는 항생기능에 대한 작용기작을 설명하기 위하여 1) CNY218에 의한 세포내외의 삼투압변화 및 이를 통한 세포의 팽창 및 수축, 2) CNY218에 의한 세포내 신호전달체계 (signal transduction pathway)의 교란에 의한 탈수 및 사멸, 3) CNY218에 의한 세포벽연화 과정 유도 등 3가지 작용기작을 예상하였다. CNY218에 의한 삼투압 변화를 확인하기 위해, 일반적으로 세포배양시에 삼투압조절제로 사용되는 mannitol을 대조구로 하여 실험하였다 (자료 미제시). CNY218 처리농도의 약 10배인 0.5-1.0%의 mannitol을 처리하였을 때 적조생물의 사멸에는 전혀 영향을 미치지 않는 것이 관찰되어 CNY218 처리시 단순한 삼투압 변화를 유도하여 사멸하는 것은 아닌 것으로 추정된다.

동물세포에 작용하여 탈수를 일으키고 세포를 죽이는 cholera toxin의 경우 세포

막에 존재하는 G protein의  $\alpha$  subunit를 활성화시켜 세포내 물의 수송에 관여하는 신호전달체계를 교란하고 이를 통하여 탈수를 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 고등식물의 사멸을 유도하는 elicitor는 식물세포내의 pH를 감소시키고  $Ca^{++}$ ,  $K^+$  등의 농도를 낮추어 세포내 신호전달체계를 교란시켜 사멸시키는 과정은 잘 알려져 있다 (Kuchitsu et al., 1997). 본 연구팀에서는 적조생물 중의 하나인 *Prorocentrum minimum*에 CNY218을 처리하고 세포내 pH 변화를 조사하였는데 세포내 pH가 약 1 unit 정도 감소하는 것이 관찰되었고 (자료 미제시), 이러한 변화가 세포내 신호전달체계를 변화시켜 적조생물이 사멸하는 것으로 추정하고 있으며 연구 중에 있다.

알긴산은  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  등 금속이온을 chelating 하는 특징을 가지고 있다 (Fourest and Volesky, 1997). 일반적으로 세포벽은 cellulose나 peptidoglycan으로 구성되어 있으며 금속이온 등에 의해 안정화되어 있는데, 처리한 CNY218이 세포벽을 안정화시키는 금속이온을 chelating함으로써 세포벽이 연화되어 세포파괴가 진행되는 것으로 추정되며 연구가 진행 중에 있다.

#### 4. 결론

본 연구팀에서 추출한 CNY218은 천연 해조류인 다시마로부터 추출한 알긴산 올리고당 유도체로서, 적조생물의 사멸에 대한 실험 결과는 이제까지 보고된 어떠한 적조사멸제에 비해 뒤떨어지지 않는 효과를 보이는 것이며, 기존의 화학적 적조사멸방법은 이차적인 환경오염의 유발가능성으로 인하여 실제 사용하기에 문제점이 있으나, CNY218은 천연해조류로부터 추출한 물질이고 그 구성성분이 올리고당이므로 거의 환경오염을 일으키지 않을 것으로 기대된다.

적조연구팀에서는 CNY218에 대한 집중적인 연구를 통해 CNY218의 제조단가를 낮추고 살상효과를 증진시키고자 하며, 1) 식물플랑크톤의 분포, 생물량 및 생산량 변동 조사, 2) 다양한 적조원인종에 대한 사멸효과 및 생리적 변화 조사, 3) 동물플랑크톤에 대한 영향 실험, 4) 저서생물에 대한 영향 조사, 5) 어류 치어 및 성어에 대한 영향 조사 등을 통하여 CNY218 사용에 따른 해양 생태계 건강성 조사를 수행하고 있다. 또한 CNY218에 의한 적조생물 사멸제로서의 작용기작을 규명하기 위

한 세포생리, 생화학 및 분자생물학적 연구를 진행하고 있다.

본 연구팀에서는 CNY218이 적조방제를 위한 황토대체물질로서 활용이 가능하며, 적조방제물질의 살포에 따른 환경오염을 경감시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한 CNY218을 어병치료제로 개발하고 박테리아, 바이러스, 균류 및 암세포에 처리하여 항박테리아, 항바이러스, 항균 및 항암 효과 가능성 및 실용화 여부를 타진하는 연구를 수행하고 있으며, 이를 통한 의약품 원료로서의 가능성을 연구하고 있다. CNY218의 추출 및 작용기작에 관한 연구는 천연해조류로부터의 유용자원을 추출하고, 기능성 보유에 관한 연구를 확대시킬 수 있는 기초자료로서의 가치뿐만 아니라 국내 경제, 산업, 사회적 파급효과가 클 것으로 기대되고 있다.



## 참 고 문 헌

- Anderson, D. M. (1984) Shellfish toxicity and dormant cysts in toxic dinoflagellate blooms. American Chemistry Society Symposium. Series 262:125-138.
- Anderson, D. M. and D. Wall (1978) Potential importance of benthic cysts of *Gonyaulax tamarensis* and *G. excavata* in initiating toxic dinoflagellate blooms. J. Phycol. 14(2):224-234.
- Anderson, D. M. and F. M. M. Morel (1979) The Seeding of two red tide blooms by the germination of benthic *Gonyaulax tamarensis* Hypnocysts. Estuarine and Coastal Marine Science. 8:279-293.
- Anderson, D. M., D. M. Kulis and B. J. Binder (1984) Sexuality and cyst formation in the dinoflagellate *Gonyaulax tamarensis* : cyst yield in batch cultures. J. Phycol. 20:418-425.
- Anderson, D. M., S. W. Chisholm and C. J. Watras (1983) Importance of life cycle events in the population dynamics of *Gonyaulax tamarensis*. Marine Biology. 76:179-189.
- Bibby B. T. and J. D. Dodge (1972) The encystment of a freshwater dinoflagellate: a light and electron-microscopical study. Br. Phycol. J. 7:85-100.
- Binder, B. J. and D. M. Anderson (1987) Physiological and environmental control of germination in *Scripsiella trochoidea* (Dinophyceae) resting cysts. J. Phycol. 23:99-107.
- Bligh, E. G. and W. J. Dyer (1959) A rapid method for total lipid extraction and purification. Can. J. Biochem. Physiol. 37: 911-7
- Bolch, C. J. and G. M. Hallegraeff (1990) Dinoflagellate cysts in recent marine sediments from Tasmania, Australia. Botanica Marina. 3:173-192.
- Dittmer J. C. and M. A. Wells (1969) Quantitative and qualitative analysis of lipids and lipid components. *Method Enzymol* 14 : 482-531

- Dubois M., K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem* 28 : 350-356
- Ertesvag, H. and S. Valla (1998) Biosynthesis and application of alginates. *Polymer Degradation and solubility* 59: 85-91
- Fourest, E. and B. Volesky (1997) Alginate properties and heavy metal biosorption by marine algae. *App. Biochem. Biotechnol.* 67: 215-226
- Fryxell, G. A. (1983) survival strategies of the algae. Cambridge University Press. 144 pp.
- Grzebyk D. and B. Berland (1996) Influences of temperature, salinity and irradiance on growth of *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) from the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research* vol 18, 10 : 1837-1849
- Guillard R. R. L. and J. H. Ryther (1962) Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve.) Gran. *Can. J. Microbiol* 8 : 229-239
- Haug, A. and B. Larsen (1962) Quantitative determination of the uronic acid composition of alginate. *Acta. Chem. Scand.* 16: 1908-1918
- Heaney, S. I., D. V. Chapman and H. R. Morison (1983) The role of the cyst stage in the seasonal growth of the dinoflagellate *Ceratium hirundinella* within a small productive lake. *Br. Phycol. J.* 18:47-59.
- Heiskanen, A. S. (1993) Mass encystment and sinking of dinoflagellates during a spring bloom. *Mar. Biol.* 116:161-167.
- Ishikawa, A. and A. Taniguchi (1996) Contribution of benthic cysts to the population dynamics of *Scrippsiella* spp. (Dinophyceae) in Onagawa Bay, northeast Japan. *Marine Ecology Progress Series.* 140:169-178.
- Iwasaki, H. (1967) Nutritional studies of the edible seaweed *Porphyra tenera*. II. Nutrition of concholis. *J. Phycol.* 3: 30-34
- J. H. Cho, T. K. Lee, K. Shin, W. S. Lee, and M. Chang (1998) Changes of biochemical composition of *Prorocentrum minimum* causing red tide in different light intensities. *한국환경생물학회지*, 16: 391-396

- Kim H. G., S. G. Lee, K. H. An, S. H. Youn, P. Y. Lee, C. K. Lee, E. S. Cho, J. B. Kim, S. G. Choi, and P. J. Kim (1997) Recent Red tides in Korea Coastal Waters. *National Fisheries & Development Institute* pp. 71-79
- Kuchitsu, K., Y. Yazaki, K. sakano, and N. Shibuya (1997) Transient cytoplasmic pH change and ion fluxes through the plasma membrane in suspension-cultured rice cells triggered by N-acetylchitoooligosaccharide elicitor. *Plant Cell Phosiol.* 38: 1012-1018
- Lee, T.K. and W. S. Lee (1996) Observation of diauxic growth of rice suspension cells grown on mixed carbon sources of acetate and glucose. *Plant Physiology.* 110. 465-470
- M. Chang, J. H. Cho, K. Shin, W. S. Lee, and T. K. Lee (1998) Changes of biochemical composition of *Prorocentrum minimum* causing red tide in different temperatures. *한국환경생물학회지*, 16: 397-406
- Normann H. A. and J. B. S. John (1986) Metabolism of unsaturated monogalactosyl diacylglycerol molecular species in *Arabidopsis thaliana* reveals different sites and substrate for linolenic acid synthesis. *Plant Physiol* 81 : 731-736
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. 173 pp.
- Provasoli, L. (1963) Growing marine seaweeds. In Devirville, D. and Feldmann, J., eds., Proc. Int. Seaweed Symp. 4: 9-17. Pergamon Press, Oxford
- Radmer, R. J. (1996) Algal diversity and commercial algal products. *Bioscience* 46: 263-270
- Rehm, B. H. A. and S. Valla (1997) Bacterial alginates: biosynthesis and application. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48: 281-288
- Renn, D. W. (1990) Seaweeds and biotechnology-inseparable companions. *Hydrobiologia* 204/205: 7-13
- Renn, D. W. (1993) Medical and biotechnological applications of marine macroalgal polysaccharides. *Marine Biotechnology* vol. 1: Pharmaceutical and bioactive natural products, ed. D.H. Attaway and O.R. Zaborsky. Plenum

Press, New York. pp181-196

Steidinger, K. A. and L. M. Walker (1984) Marine plankton life cycle strategies. CRC Press. 158 pp.

T. K. Lee, S. M. Lee, and W. S. Lee (1999) Preferential use of acetate over glucose involves acetate-mediated inhibition of glucose uptake during diauxic growth of carrot cells. *Plant and Cell Physiology*, 40: 1046-1052

Turpin, D. H., P. E. R. Dobell and F. J. R. Taylor (1978) Sexuality and cyst formation in pacific strains of the toxic dinoflagellate *Gonyaulax tamarensis*. *J. Phycol.* 14(2):235-238.

Tyer, M. A., D. W. Coats and D. M. Anderson (1982) Encystment in a dynamic environment: deposition of dinoflagellate cysts by a frontal convergence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 7:163-178.

Wall, D., R. R. L. Guillard,, B. Dale, E. Swift and N. Watabe (1970) Calcitic resting cysts in *Peridinium trochoideum* (Stein) Lemmerman, an autotrophic marine dinoflagellate. *Phyco.* 9(2):151-156.

김창훈, 岩崎 英雄 (1987) 해산 와편모조 *Scrippsiella trochoidea*의 cyst형성 및 발아에 대하여., 한국 조류학회지., Vol. 2(2): 211-221.

표 1-1. 1981-1998 년도 우리나라 근해의 적조유발 식물플랑크톤

남조류 Cyanophyceae	<i>Anabaina affinis</i> , <i>A. spiroides</i>
규조류 Bacillariophyceae	<i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>C. pseudocurvisetus</i> , <i>C. affine</i> <i>Coscinodiscus gigas</i> , <i>Eucampia zodiacus</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i> <i>Nitzschia longissima</i> , <i>N. pungens</i> , <i>N. seriata</i> <i>Rhizosolenia fragilissima</i> , <i>Skeletonema costatum</i> <i>Thalassiosira decipiens</i> , <i>T. mala</i> , <i>T. nordenskioldii</i> <i>T. rotula</i> , <i>T. frauenfeldii</i>
녹색편모류 Raphidophyceae	<i>Fibrocapsa japonica</i> <i>Heterosigma akashiwo</i>
유글레나류 Euglenophyceae	<i>Eutreptiella gymnastica</i>
섬모충류 Ciliophora	<i>Mesodinium rubrum</i>
황금색조류 Chrysophyceae	<i>Dictyocha fibula</i>
와편모조류 Dinophyceae	<i>Alexandrium affine</i> , <i>A. fratercula</i> , <i>A. tamarense</i> <i>Ceratium furca</i> , <i>C. fusus</i> <i>Cochlodinium polykrikoides</i> , <i>Exuviaella compressa</i> <i>Gonyaulax fratercula</i> , <i>G. polygramma</i> <i>Gymnodinium mikimotoi</i> , <i>G. nagasakiense</i> , <i>G. sanguineum</i> <i>Heterocapsa triquetra</i> , <i>Noctiluca miliaris</i> , <i>N. scintillans</i> <i>Polykrikos hartmannii</i> , <i>Prorocentrum dentatum</i> , <i>P. micans</i> , <i>P. minimum</i> <i>Prorocentrum triestinum</i> , <i>Protogonyaulax fratercula</i> , <i>Scrippsiella trochoidea</i>

표 1-2. 적조생물은행에서 보유중인 장비 및 장치

장비명	제조처	보유대수	용도	비고
광학현미경	ZEISS	1	분리, 보관 중인 종을 동정하고, 배양상태를 확인	
도립광학현미경	ZEISS	1	미세조류의 분리 및 확인, 휴면포자의 형성 및 발아과정 관찰 및 동정	
형광현미경	ZEISS	1	분리, 보관 중인 종을 동정하고 배양상태를 확인, 미생물 관찰	
해부현미경	ZEISS	1	미세조류의 분리	
현미경장착 카메라 및 영상저장 비디오		1	미세조류의 외부 형태 저장	
고압멸균기	명성	1	배양시 사용되는 초자의 살균	
건조기	Jisico	1	배양시 사용되는 초자의 건조	
자외선 살균기		1	멸균된 초자의 보관	
Clean bench		1	미세조류의 계대배양 및 관리	
배양기 (대)	Vision	1	미세조류의 증보존	
배양기 (소)	Vision	3	미세조류의 증보존 및 생리실험	
광원 set	자체제작	4	미세조류의 대량배양 및 생리실험	
아크릴 용기	자체제작	80 L: 3 240 L: 3	미세조류의 대량배양	
PC 용기	Nalgene	10 L: 10	미세조류의 대량배양	
유리용기	Pyrex	10 L: 2 20 L: 1	미세조류의 대량배양	
pH meter	Istek	1	배지제조 및 생리실험	
Conductivity meter	Istek	1	배지제조 및 생리실험	
Plankton net			미세조류 채집	
냉온방기			배양실 온도조절	

표 1-3. 한국해양연구소 장목분소 Seed bank에서 보유중인 미세조류

NO.	종명	Strain	채집지	채집년월	분리자
<b>Bacillariophyceae (규조)</b>					
1	<i>Chaetoceros</i> sp. 1	Ctsp_K01	거제 장목만	98	Lee C.W.
2	<i>C.</i> sp. 2	Ctsp_K02	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
3	<i>Nitzschia</i> sp.1	Nzsp_K01	거제 장목만	98	Lee C.W.
4	<i>N.</i> sp.2	Nzsp_K02	거제 장목만	98	Lee C.W.
5	<i>N.</i> sp.3	Nzsp_K03	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
6	<i>N.</i> sp.4	Nzsp_K04	거제 장목만	99.7	Kwak S.K.
7	<i>Skeletonema costatum</i>	SiCs_K01	거제 장목만	99.3	Lee C.W.
8	<i>Rhizosolenia</i> sp.	Rzsp_K01	거제 장목만	98	Lee C.W.
9	<i>Thalassiosira</i> sp.1	Tlsp_K01	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
10	<i>T.</i> sp.2	Tlsp_K02	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
11	미동정 1	-	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
12	미동정 2	-	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
13	미동정 3	-	거제 장목만	99.10	Park M.H.
14	미동정 4	-	거제 장목만	99.10	Park M.H.
<b>Dinophyceae (와편모조)</b>					
15	<i>Katodinium</i> sp.	Ktsp_K01	거제 장목만	99.3	Lee C.W.
16	<i>Cochodinium polykrikoides</i>	CcPk_K01	군산 하계	98	Lee C.W.
17	<i>C. polykrikoides</i>	CcPk_K02	통영	99.8	Kwak S.K.
18	<i>C. polykrikoides</i>	CcPk_K03	고흥 나로도	97.8	Kwak S.K.
19	<i>C. polykrikoides</i>	CcPk_K04	거제 장목만	99.9	Park M.H.
20	<i>Gymnodinium sanguineum</i>	GnSg_K01	거제 장목만	99.8	Kwak S.K.
21	<i>G. sanguineum</i>	GnSg_K02	거제 장목만	99.9	Kwak S.K.
22	<i>G. sanguineum</i>	GnSg_K03	거제 장목만	99.10	Park M.H.
23	<i>G. sanguineum</i>	GnSg_K04	진해 난포	97.10	Kwak S.K.
24	<i>G.</i> sp.	Gnsp_K01	거제 장목만	98	Lee C.W.
25	<i>G.</i> sp.	Gnsp_K02	거제 장목만	99.11	Kwak S.K.
26	<i>Gyrodinium imputicum</i>	GyIp_K01	고흥 나로도	97.9	Park J.G.
27	<i>G. aureolum</i>	GyAr_K01	거제 칠천도	99.9	Kwak S.K.
28	<i>Alexandrium tamarense</i>	AtTm_K01	진해	97.5	Park M.H.
29	<i>A. catenella</i>	AtCt_K01	진해 난포	97.4	Park J.G.
30	<i>Heterocapsa triquetra</i>	HtTq_K01	거제 장목만	99.3	Lee C.W.
31	<i>Prorocentrum minimum</i>	PrMn_K01	군산 하계	98	Lee C.W.
32	<i>P. minimum</i>	PrMn_K02	진해 난포	97.5	Kwak S.K.
33	<i>P. micans</i>	PrMc_K01	군산 하계	98	Lee C.W.
34	<i>P. micans</i>	PrMc_K02	진해 난포	97.7	Kwak S.K.
35	<i>P. dentatum</i>	PrDt_K01	거제 장목만	99.7	Kwak S.K.
36	<i>P. triestium</i>	PrTe_K02	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
37	<i>Scrippsiella trochoidea</i>	SpTc_K01	군산 하계	98	Lee C.W.
38	<i>Ceratium tripos</i>	CrTp_K01	거제 장목만	99.8	Park M.H.
39	<i>C. tripos</i>	CrTp_K02	거제 장목만	99.9	Kwak S.K.
<b>Raphidopeaceae(침편모조)</b>					
40	<i>Heterosigma akashiwo</i>	HeAk_K01	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
41	<i>H. akashiwo</i>	HeAk_K02	진해 난포	97.5	Kwak S.K.
42	<i>Chattonella</i> sp.	Ctsp_K01	거제 장목만	99.9	Kwak S.K.
<b>Chlorophyceae(녹조)</b>					
43	<i>Chlamydomonas</i> sp.	Clsp_K01	-	97.6	Kwak S.K.
44	Chlorophyta UF	-	거제 장목만	99.6	Kwak S.K.
<b>Cyanophyceae(남조)</b>					
45	<i>Microcystis aeruginosa</i>	McAr_K01	김해 서낙동강	96.8	Shin J.K.
<b>Euglophyceae(유글레나조)</b>					
46	<i>Eutripiella gymnastica</i>	EtGn_K01	진해 난포	99.4	Kwak S.K.
<b>Other (기타)</b>					
47	UF(Unidentified Flagellate)	-	안산 시화호	98	-

표 1-4. F/2 조성표 (Guillard and Ryther, 1962)

Element		Concentration	Concentration (weight/ℓ)
Major nutrient	NaNO <sub>3</sub>	0.88 mM	75.00mg
	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	36.3 μM	4.35mg
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0.054~0.107mM	11.45~22.70mg
Trace metal	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.08 μM	0.023mg
	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.9 μM	0.178mg
	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.03 μM	0.072mg
	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.05 μM	0.012mg
	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.04 μM	0.010mg
	FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	11.7 μM	3.163mg
EDTA	Na <sub>2</sub> -EDTA · 2H <sub>2</sub> O	11.7 μM	4.35mg
Vitamin	Cyanocobalamin(Vt. <sub>12</sub> )	·	0.5μg
	Biotin	·	0.5μg
	Thiamin HCl	·	100μg



표 1-5. 인공해수 조성표

Nutrients		첨가량	비고
Macronutrients	NaCl	28 g	
	KCl	0.7 g	
	MgSO <sub>4</sub>	3.4 g	
	MgCl <sub>2</sub>	1.9 g	
	CaCl <sub>2</sub>	1.11 g	
	NaNO <sub>3</sub>	0.1 g	
	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	10 mg	
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	65 mg	
Micronutrients	Na <sub>2</sub> EDTA	4.36 mg	
	FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	3.15 mg	
	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0.01 mg	
	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.022 mg	
	CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0.01 mg	
	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0.18 mg	
	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0.006 mg	
Vitamins	Cyanocobalamine	0.2 ug	
	Biotin	1 ug	
	Thiamine.HCl	100 ug	
	pH	7.8-8.0	
	H <sub>2</sub> O to	1000 ml	

표 1-6. 마산만의 연도별 평균 인산원 및 질소원 농도변화 (1990-1998)

(unit: mg/L)

영양염	연 도									평균
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	
PO4	0.055	0.047	0.025	0.031	0.032	0.034	0.029	0.047	0.042	0.038
TIN	0.967	1.162	0.901	1.001	0.955	1.069	0.805	0.670	0.870	0.933

표 1-7. 장승포에서 조사한 와편모조류 휴면포자의 종 조성

Species	Stn.1	Stn.2
	cells cm <sup>-3</sup>	cells cm <sup>-3</sup>
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	92	64
<i>Alexandrium tamarense</i>	60	64
<i>Alexandrium</i> spp.	58	57
<i>Gonyaulax</i> sp.	19	7
<i>Protoperidinium</i> sp.	23	
<i>Protoperidinium oblongum</i>	16	7
<i>Protoperidinium pentagonu</i>	23	32
<i>Polykrikos</i> sp.	10	
Unidentified species	141	158
Total	442	389

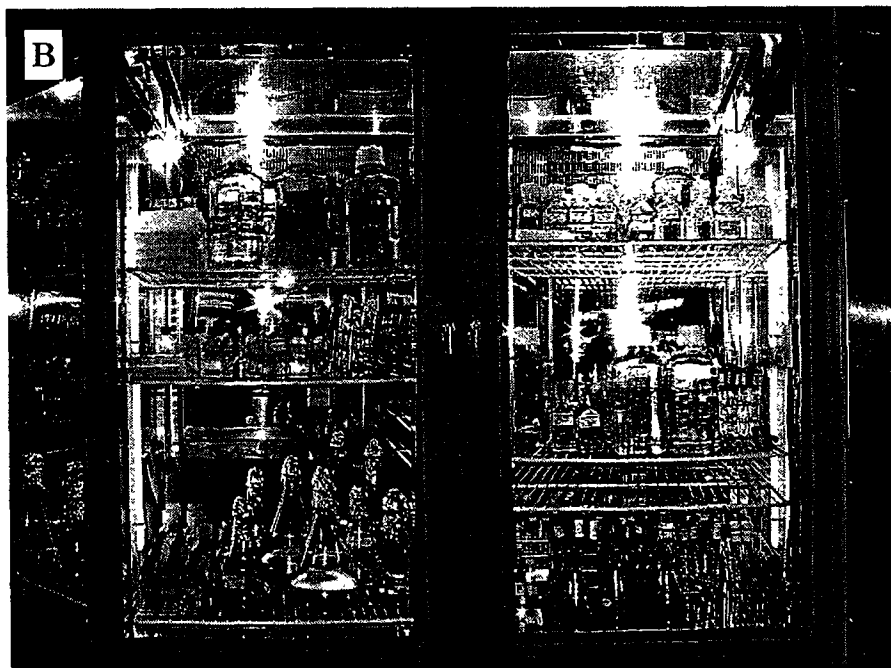
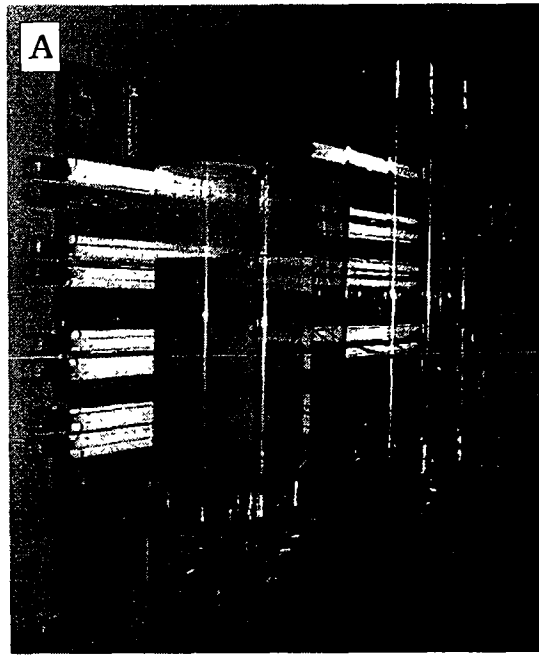


그림 1-1. 장목분소에 위치한 적조생물은행 및 대량배양용 배양기

A, 대량배양용 배양기; B, 적조생물은행

## Phytoplankton Strain 보유과정

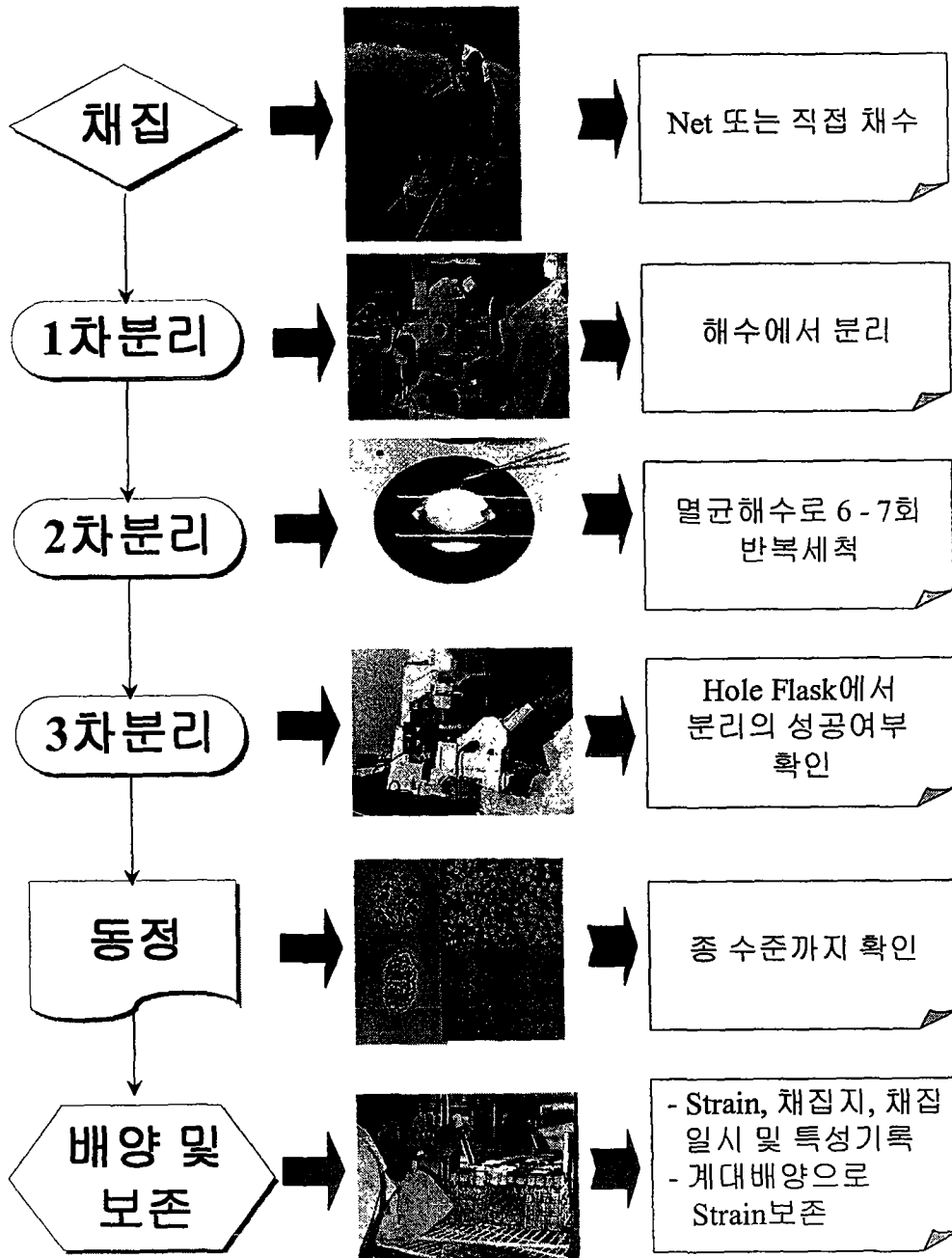


그림 1-2. 적조원인종의 채집, 분리 및 배양과정에 관한 모식도

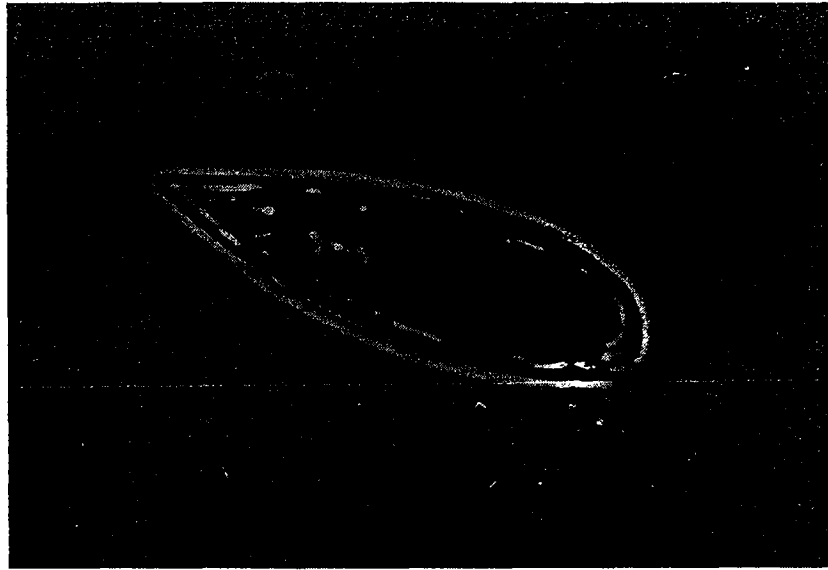


그림 1-3. *Prorocentrum triestinum*.

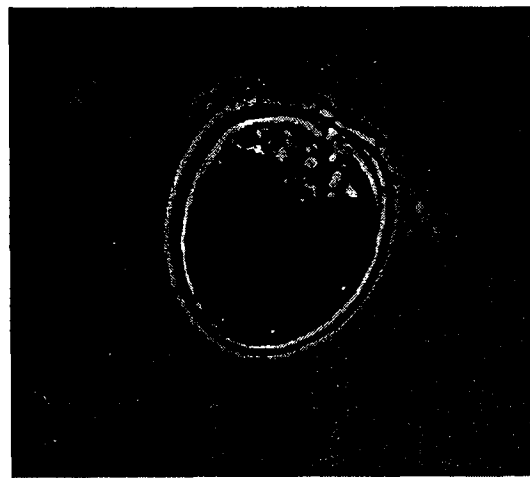
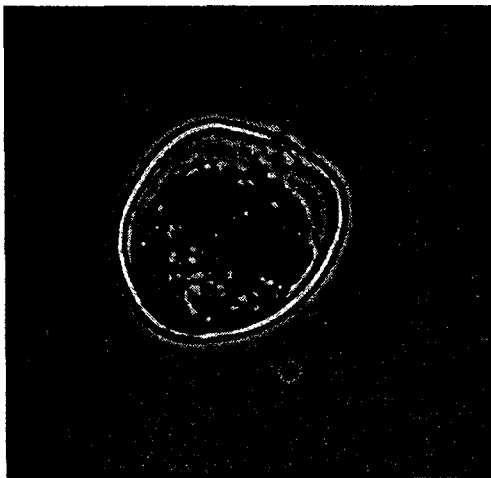


그림 1-4. *Prorocentrum minimum*.

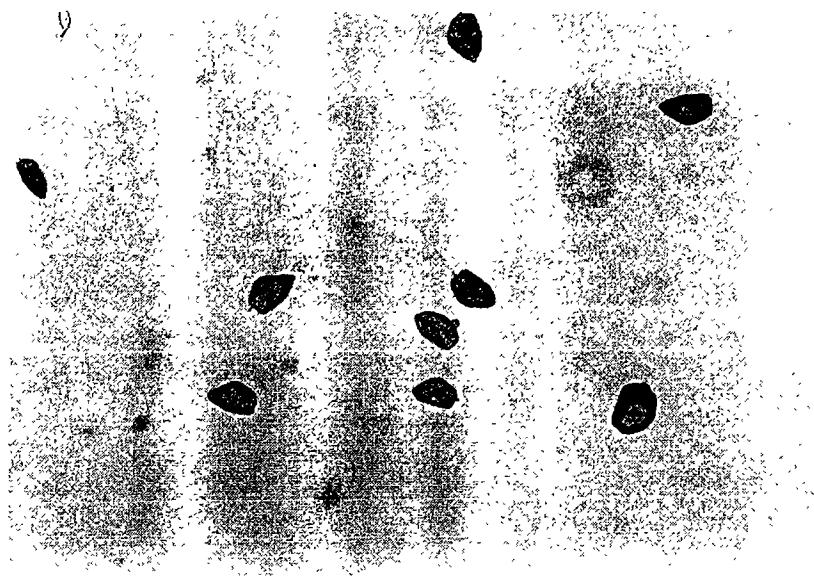


그림 1-5. *Prorocentrum micans*.

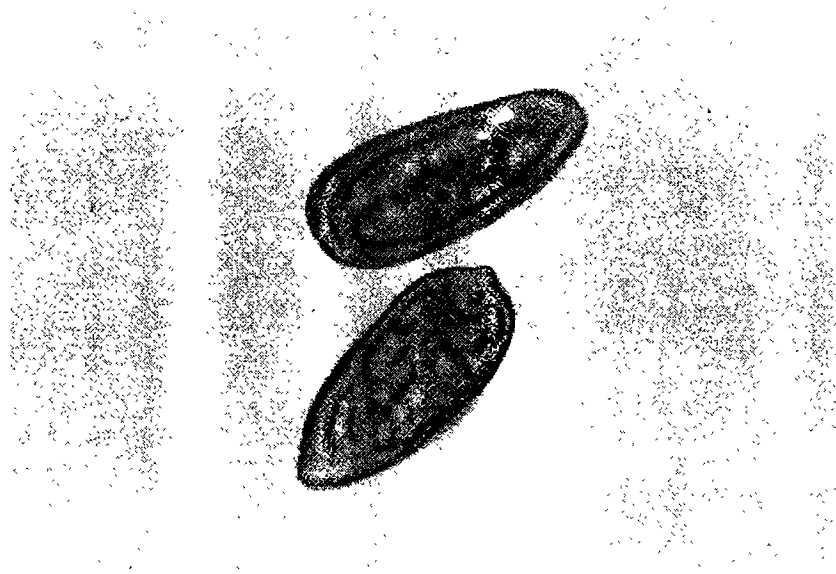


그림 1-6. *Prorocentrum dentatum*

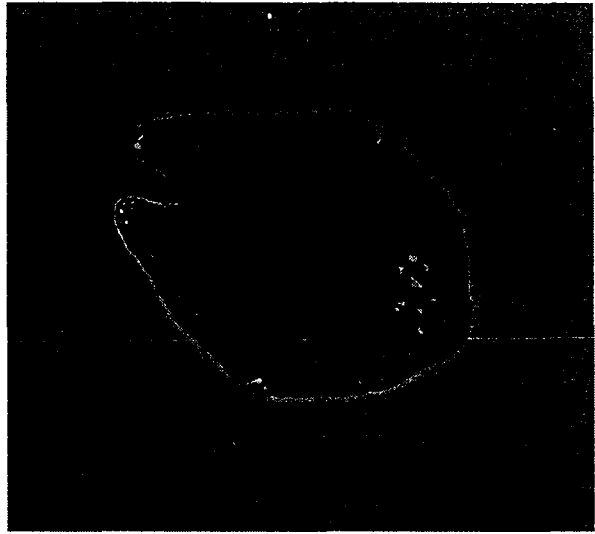


그림 1-7. *Gymnodinium sanguineum*.

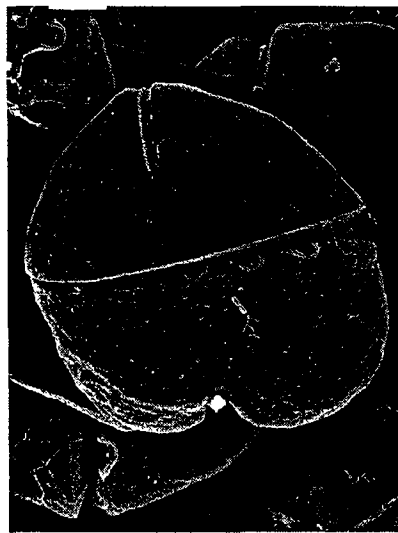
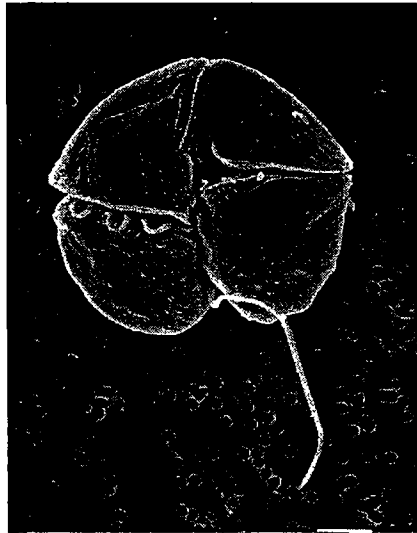


그림 1-8. *Gymnodinium mikimotoi*.





그림 1-9. *Gyrodinium imputicum*.



그림 1-10. *Gyrodinium aureolum*.

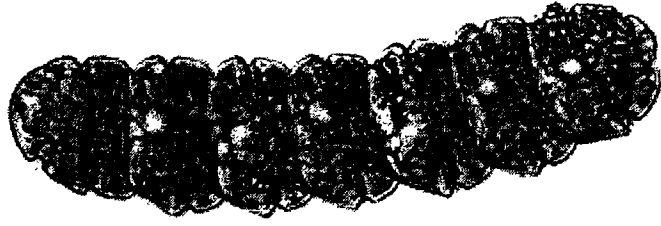


그림 1-11. *Cochlodinium polykrikoides*

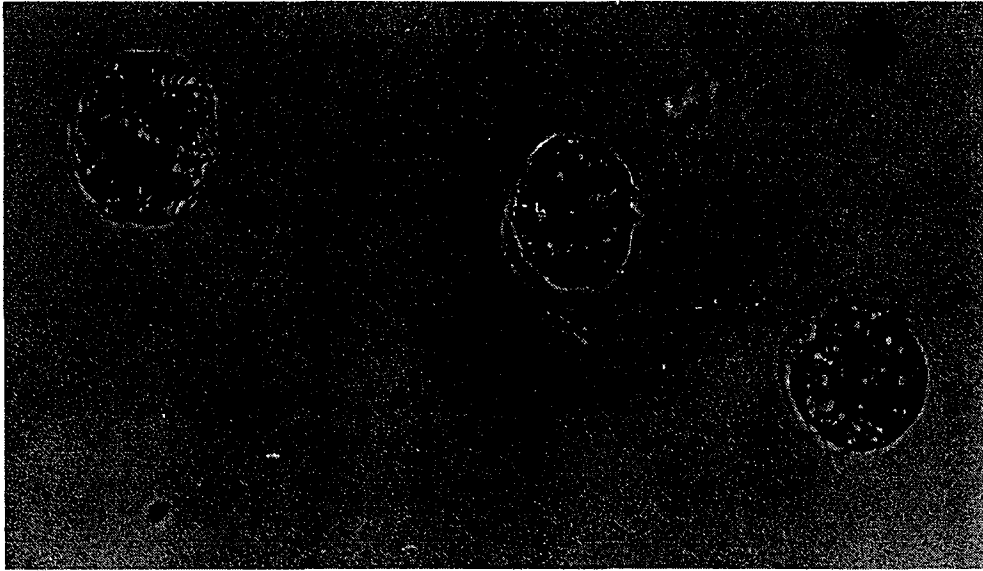


그림 1-12. *Alexandrium tarmareense*.



그림 1-13. *Alexandrium catenella*

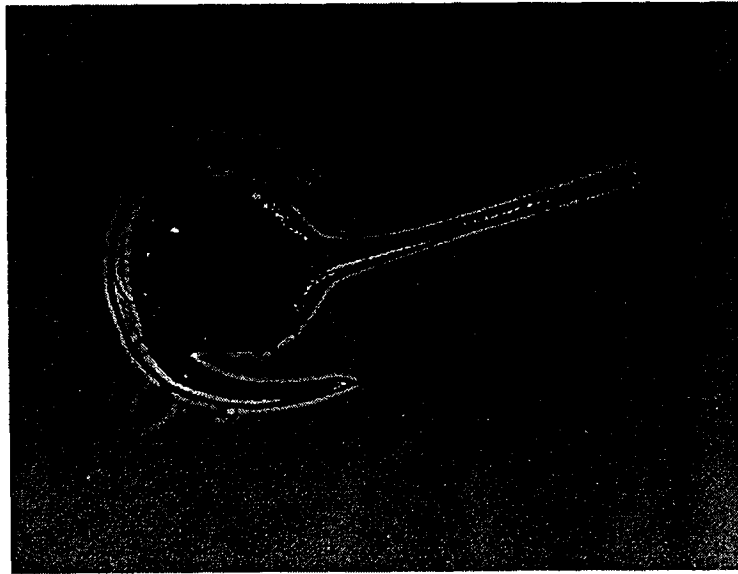


그림 1-14. *Ceratium tripos*

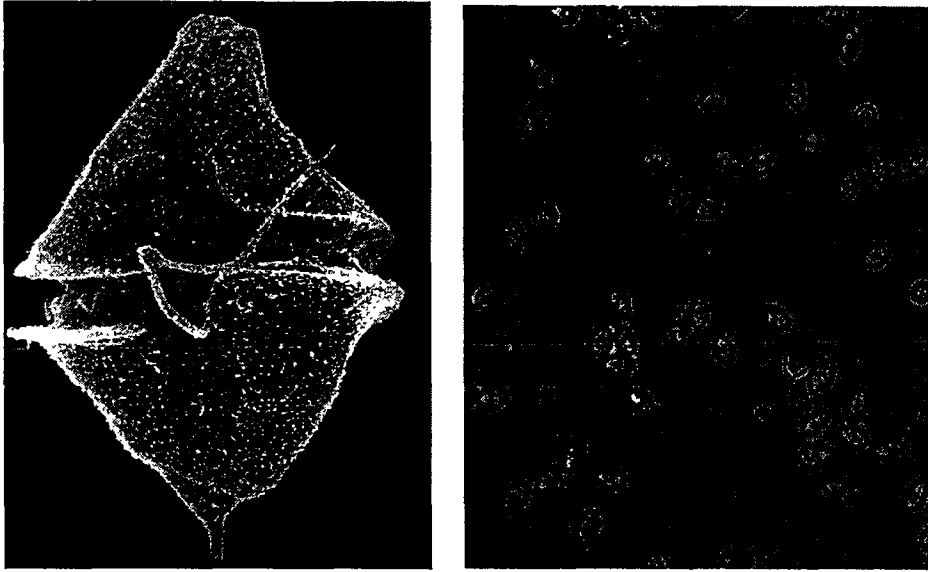


그림 1-15. *Heterocapsa triquetra*

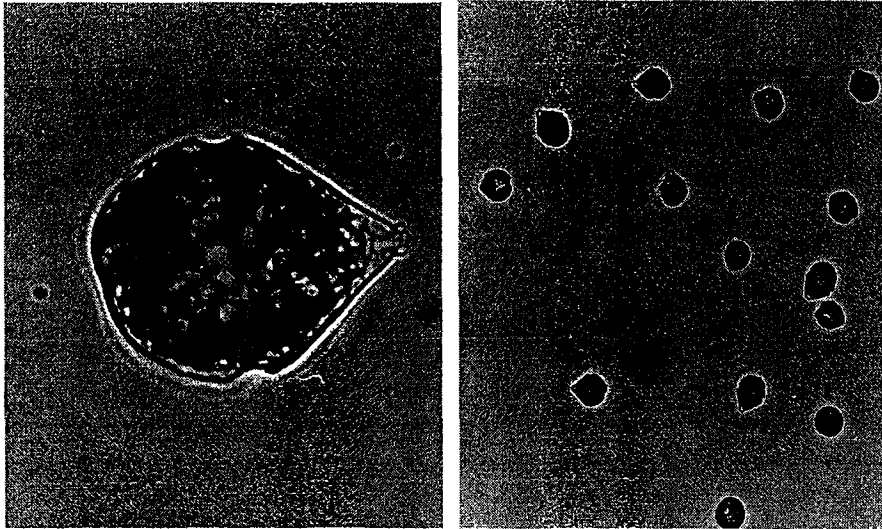


그림 1-16. *Scrippsiella trochoidea*

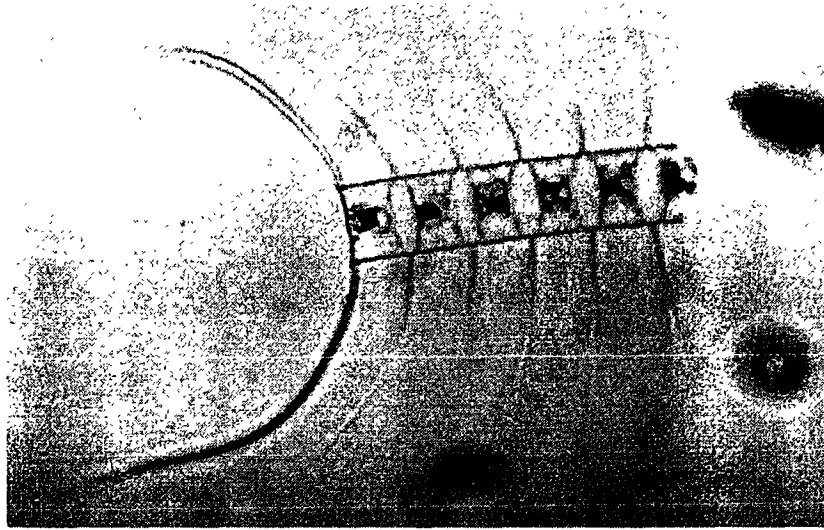


그림 1-17. *Chaetoceros* sp.

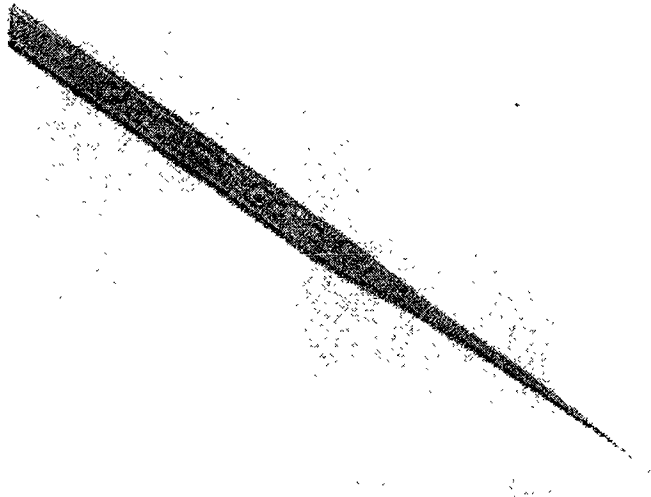


그림 1-18. *Rhizosolenia* sp.

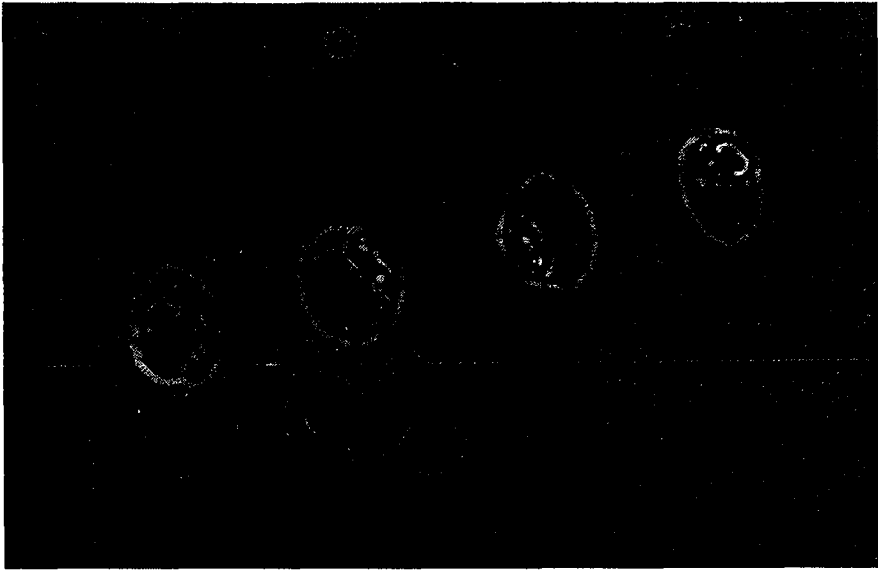


그림 1-19. *Skeletonema costatum*.

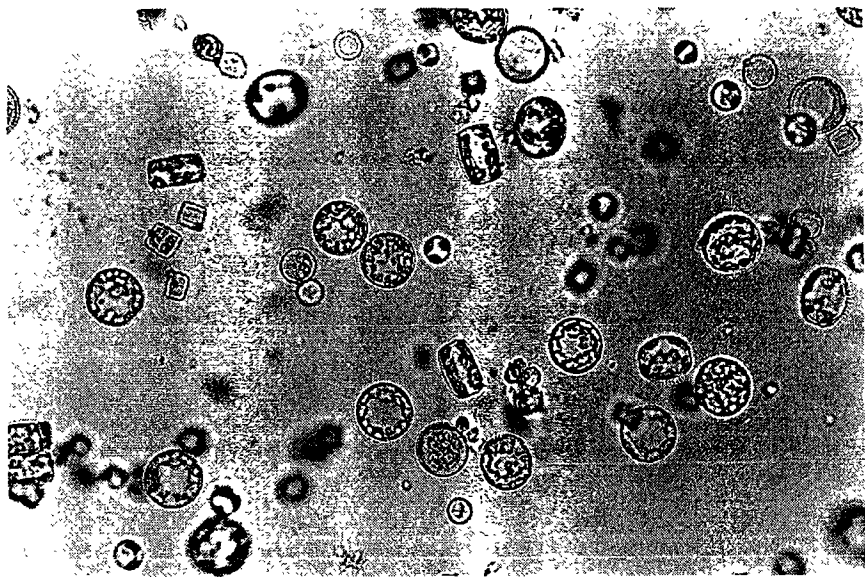


그림 1-20. *Thalassiosira* sp.

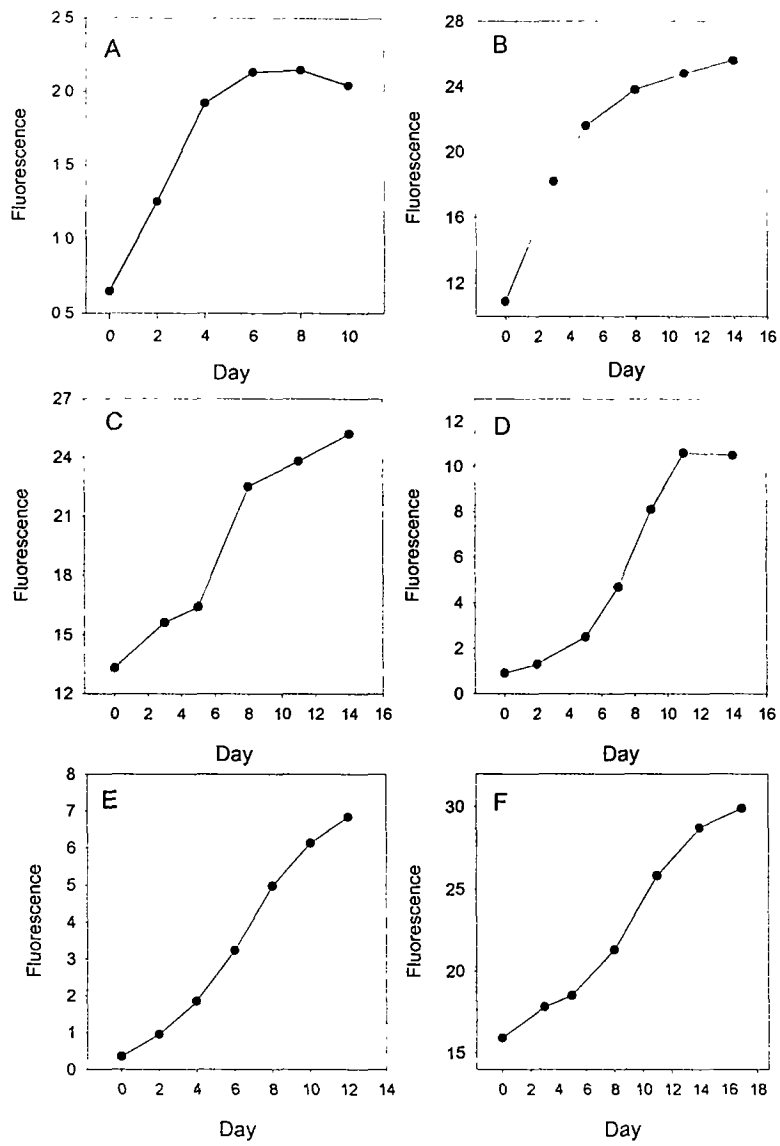


그림. 1-21A. 자연해수에서의 와편모조류의 성장곡선  
 A, *Prorocentrum minimum*; B, *Prorocentrum micans*;  
 C, *Prorocentrum dentatum*; D, *Alexandrium catenella*;  
 E, *Gymnodinium sanguineum*; F, *Gymnodinium mikimotoi*

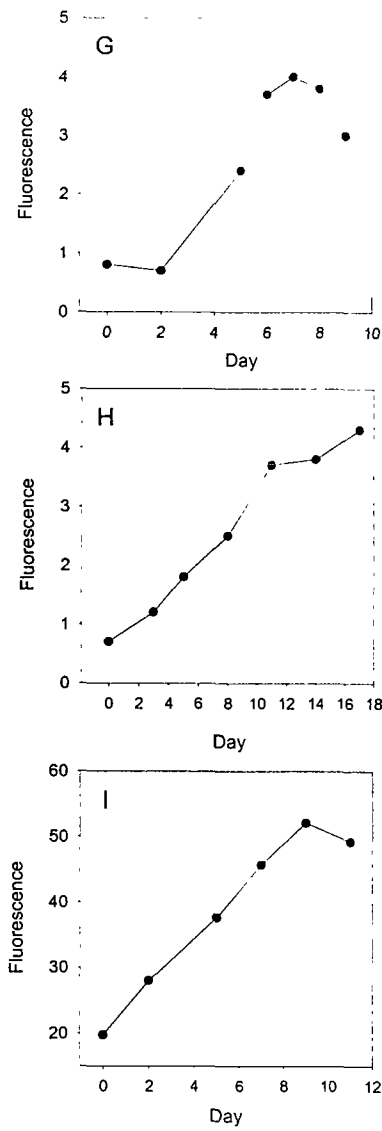


그림. 1-21B. 자연해수에서의 와편모조류의 성장곡선  
 G, *Gyrodinium imputicum*; H, *Cochlodinium polykrikoides*  
 I, *Scrippsiella trochoidea*



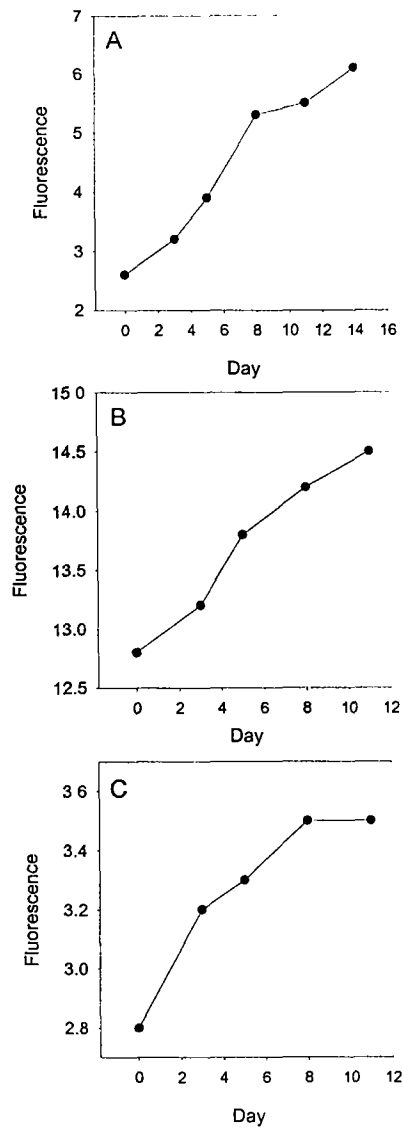


그림. 1-22. 자연해수에서의 규조류의 성장곡선  
 A, *Chaetocerus* sp.; B, *Rhizosolenia* sp.; C, *Thalassiosira* sp

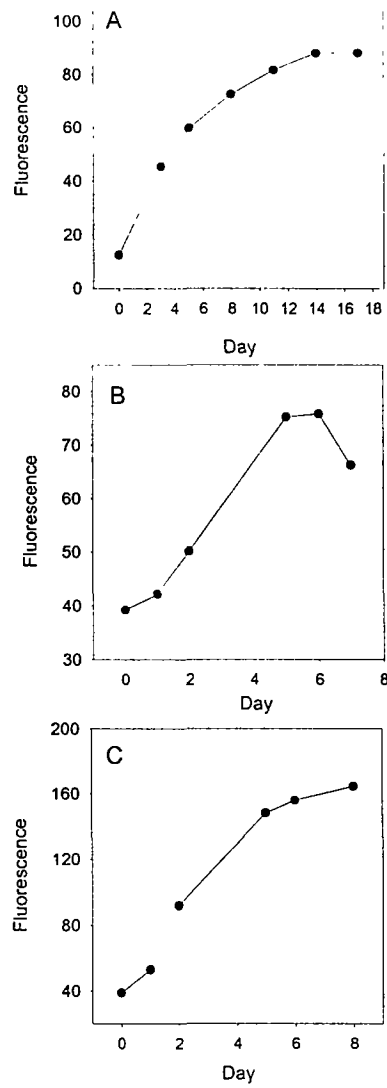


그림. 1-23. 자연해수에서의 기타 편모조류의 성장곡선  
 A, *Chlamydomonas* sp.; B, *Heterosigma akashiwo*;  
 C, Unidentified flagellate

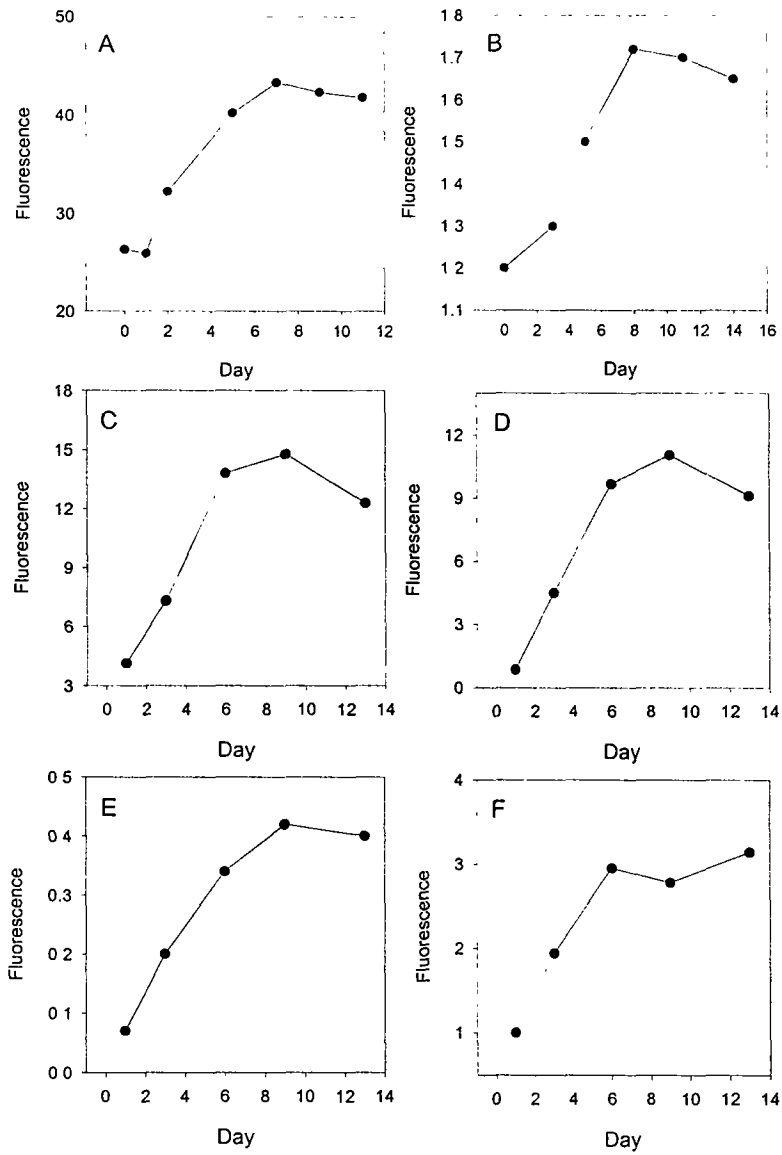


그림. 1-24A. 인공해수에서의 와편모조류의 성장곡선  
 A, *Prorocentrum minimum*; B, *Prorocentrum micans*;  
 C, *Prorocentrum dentatum*; D, *Prorocentrum triestium*;  
 E, *Gymnodinium sanguineum*; F, *Gymnodinium mikimotoi*

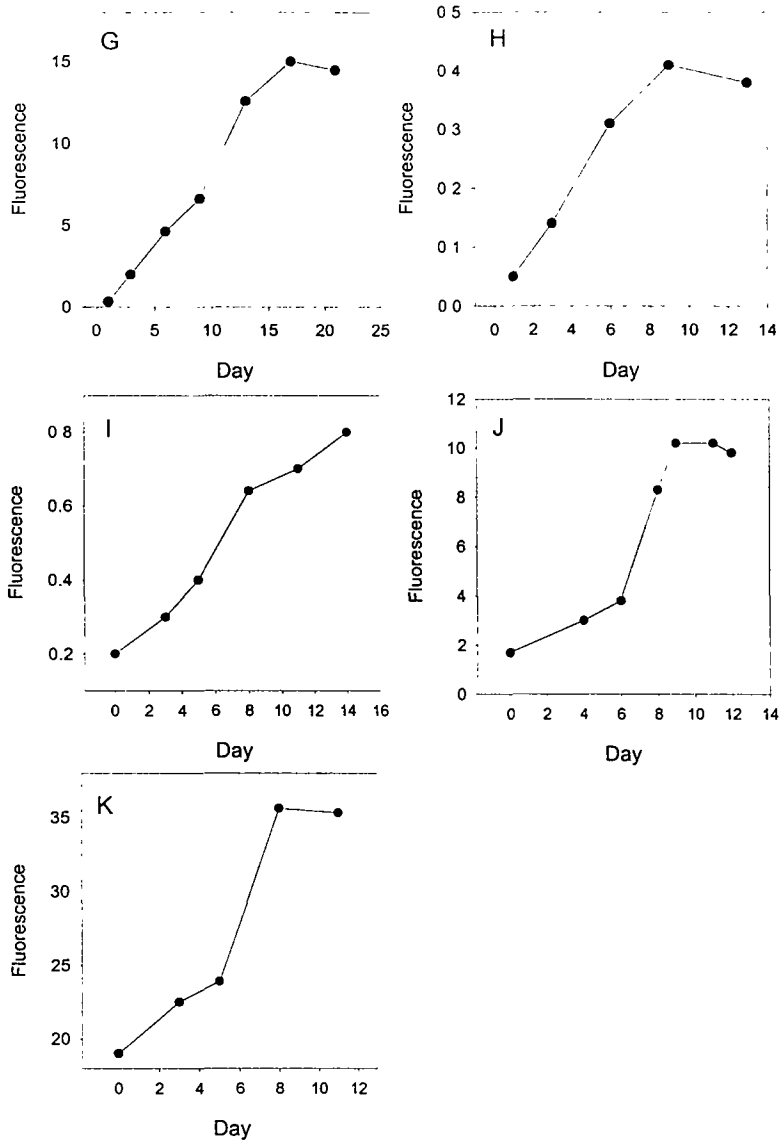


그림. 1-24B. 인공해수에서의 와편모조류의 성장곡선  
A, *Gyrodinium imputicum*; B, *Cochlodinium polykrikoides*  
C, *Scrippsiella trochoidea*; D, *Heterocapsa triquetra*;  
E, *Katochnium* sp.

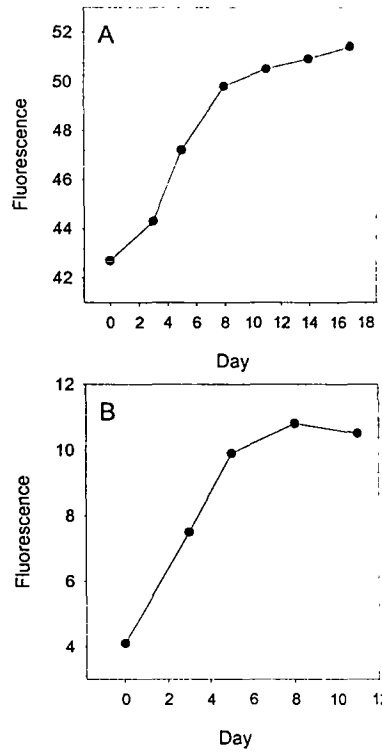


그림. 1-25. 인공해수에서의 규조류의 성장곡선  
 A, *Chaetoceros* sp.; B, *Skeletonema costatum*

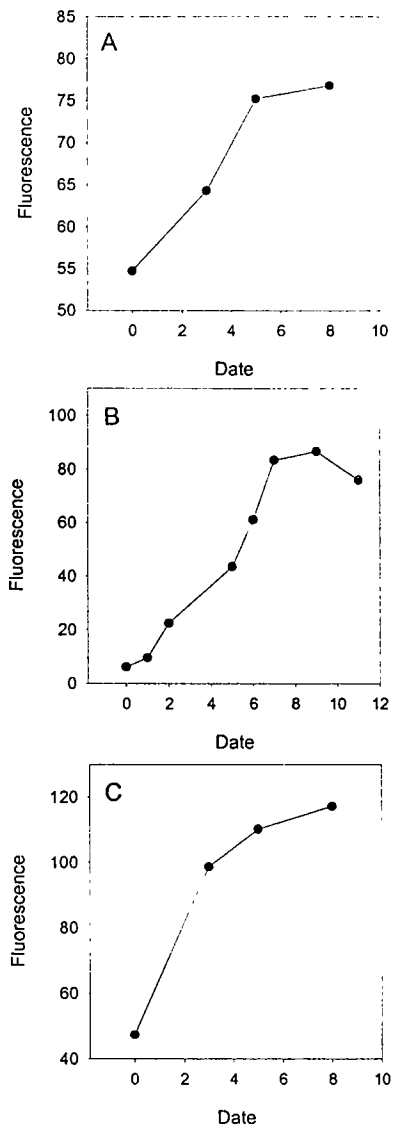


그림. 1-26. 인공해수에서의 기타 편모조류의 성장곡선

A, *Chlamydomonas* sp.; B, Unidentified flagellate; C, Unidentified flagellate

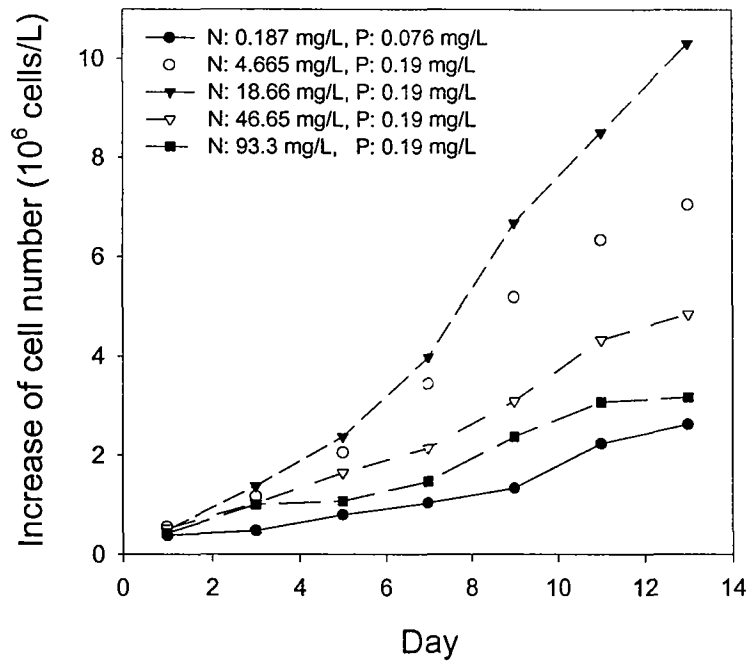


그림 1-27. 자연해수에서 질소원으로  $\text{NaNO}_3$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선의 성장곡선

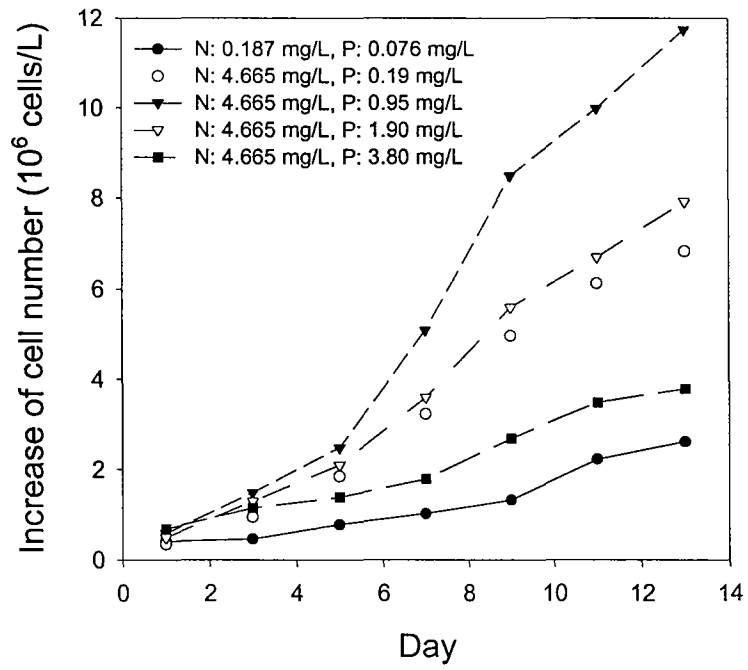


그림 1-28. 자연해수에서 인산원으로  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선



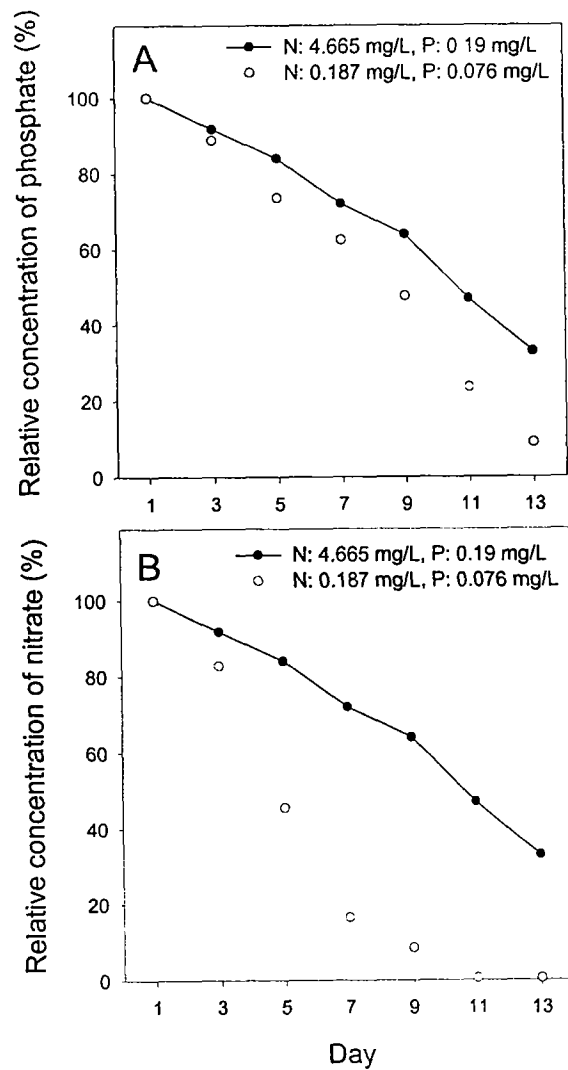


그림 1-29. 자연해수에서 질소원 및 인산원을 변화시켰을 때 배지내  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  및  $\text{NaNO}_3$  농도 변화

A, 인산원의 농도를 고정하고 질소원의 농도를 변화시켰을 때 배지내  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  농도 변화

B, 질소원의 농도를 고정하고 인산원의 농도를 변화시켰을 때 배지내  $\text{NaNO}_3$  농도 변화

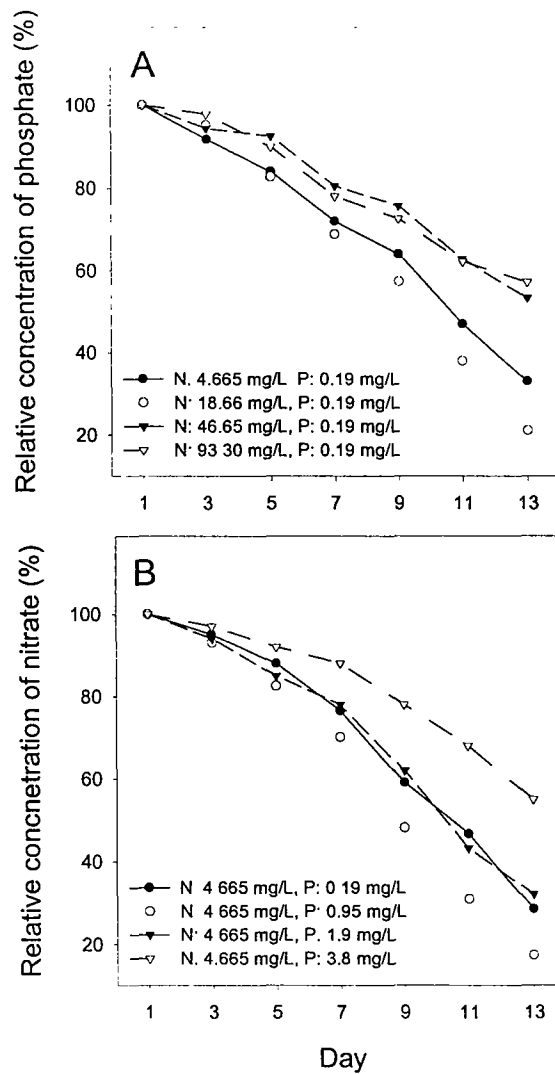


그림 1-30. 자연해수에서 질소원 및 인산원을 변화시켰을 때 배지내  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  및  $\text{NaNO}_3$  농도 변화

A, 인산원의 농도를 고정하고 질소원의 농도를 변화시켰을 때 배지내  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  농도 변화

B, 질소원의 농도를 고정하고 인산원의 농도를 변화시켰을 때 배지내  $\text{NaNO}_3$  농도 변화

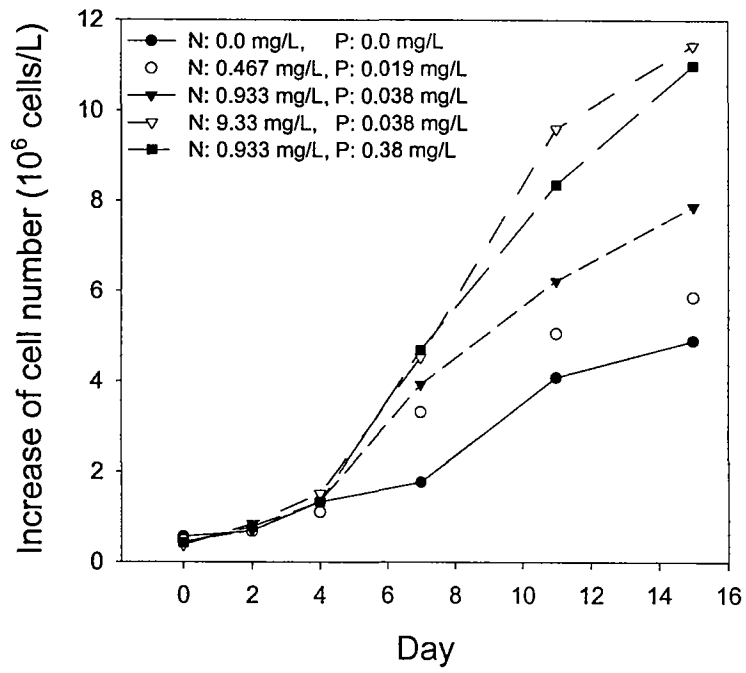


그림 1-31. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *P. micans*의 성장곡선

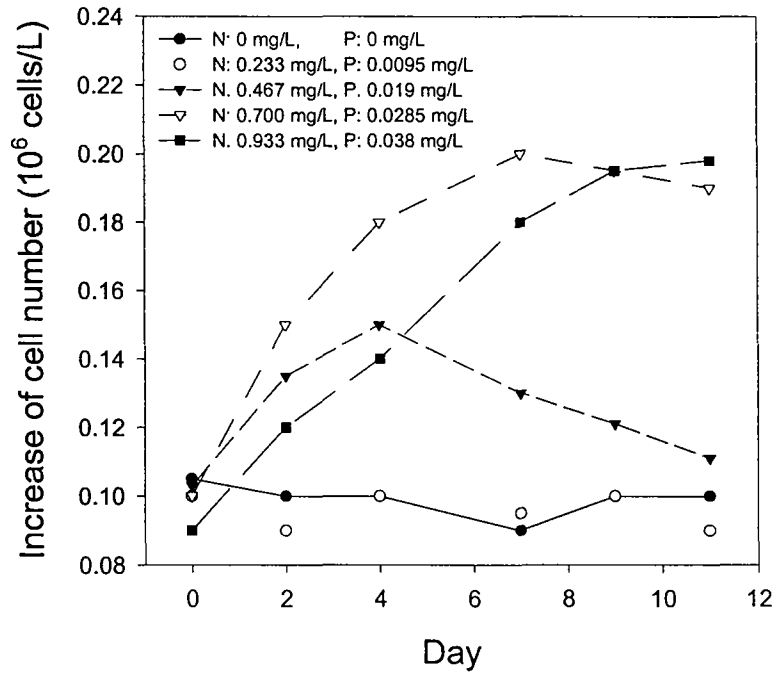


그림 1-32. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *G. sanguineum*의 성장곡선

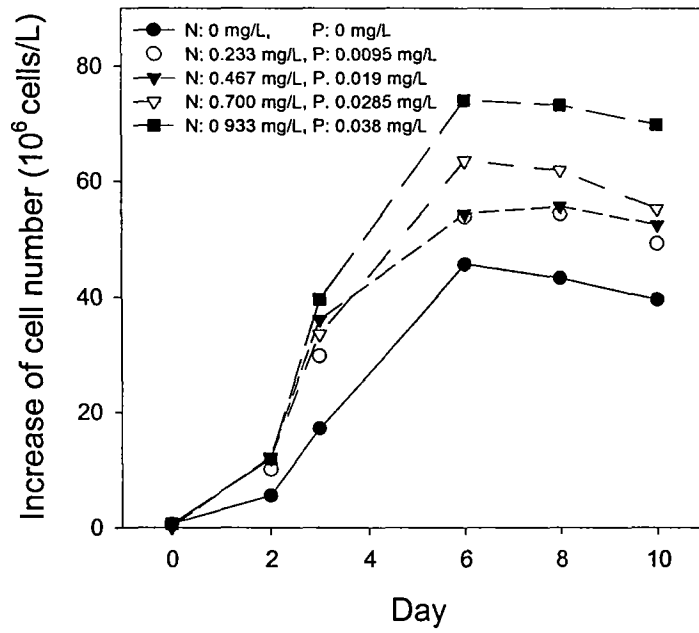


그림 1-33. 인공해수에서 질소원 및 인산원으로  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 를 증가시켰을 때 *S. costatum*의 성장곡선

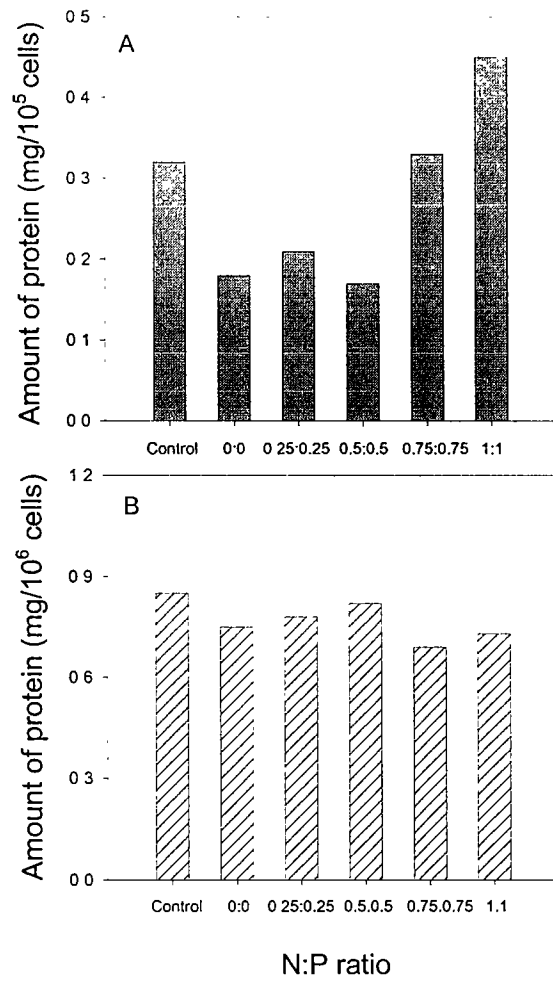


그림 1-34. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 및 *S. costatum* 세포내의 단백질의 변화.

A, *G. sanguineum*; B, *S. costatum*

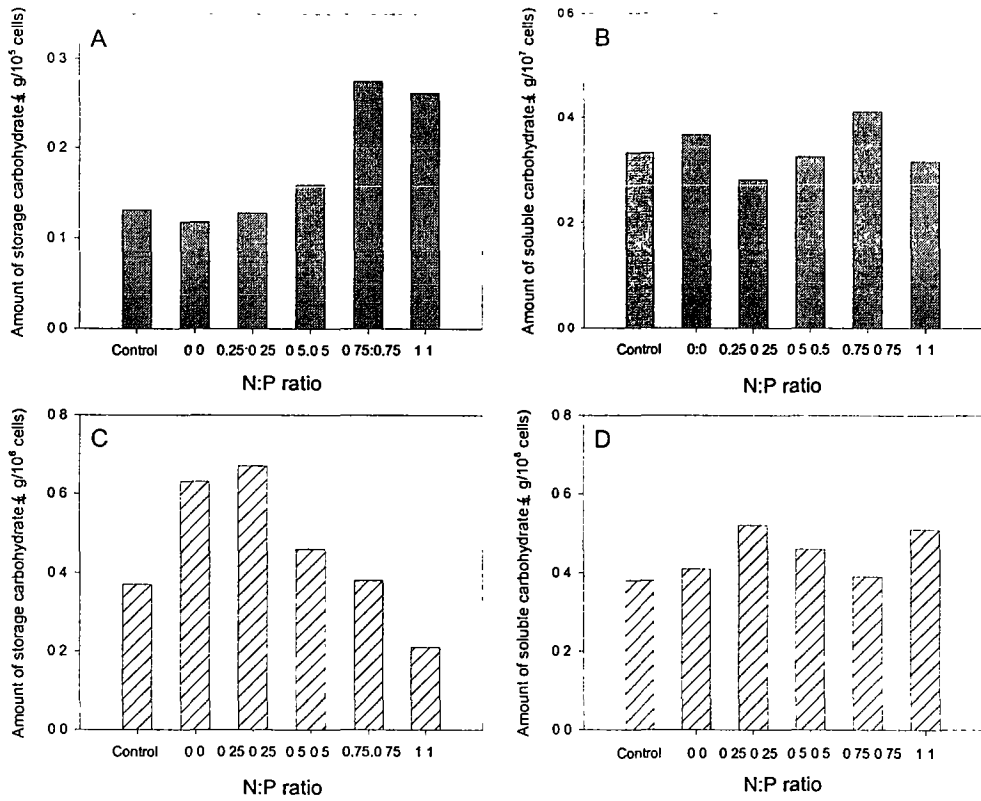


그림 1-35. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 및 *S. costatum* 세포내의 저장성 탄수화물 및 수용성 탄수화물의 변화.

A, storage carbohydrate in *G. sanguineum*

B, soluble carbohydrate in *G. sanguineum*

C, storage carbohydrate in *S. costatum*

D, soluble carbohydrate in *S. costatum*

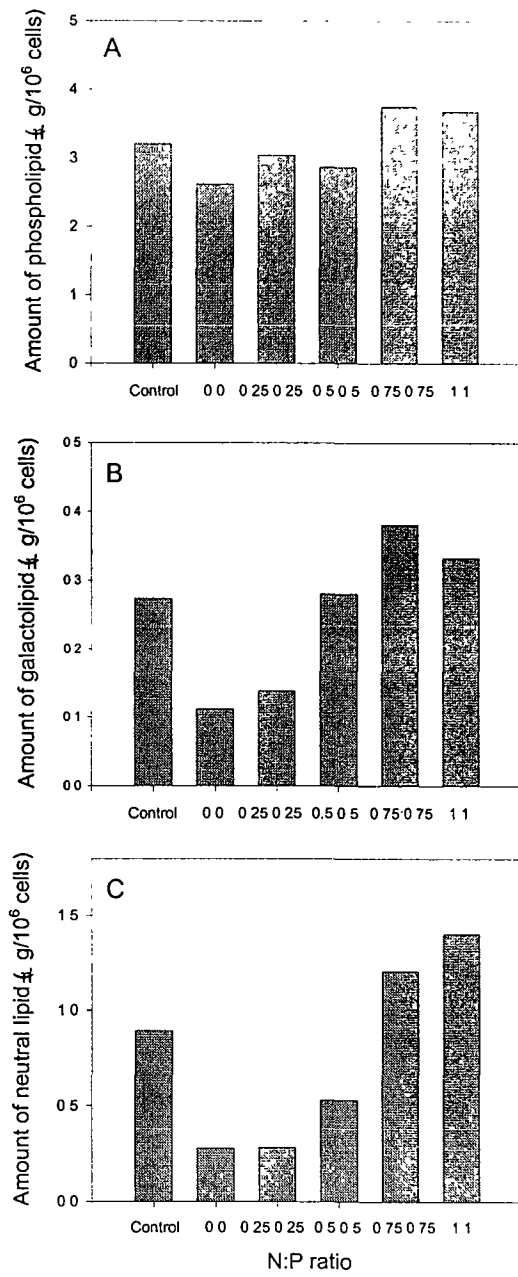


그림 1-36. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *G. sanguineum* 세포내의 지질의 변화.

A, phospholipid; B, galactolipid; C, neutral lipid



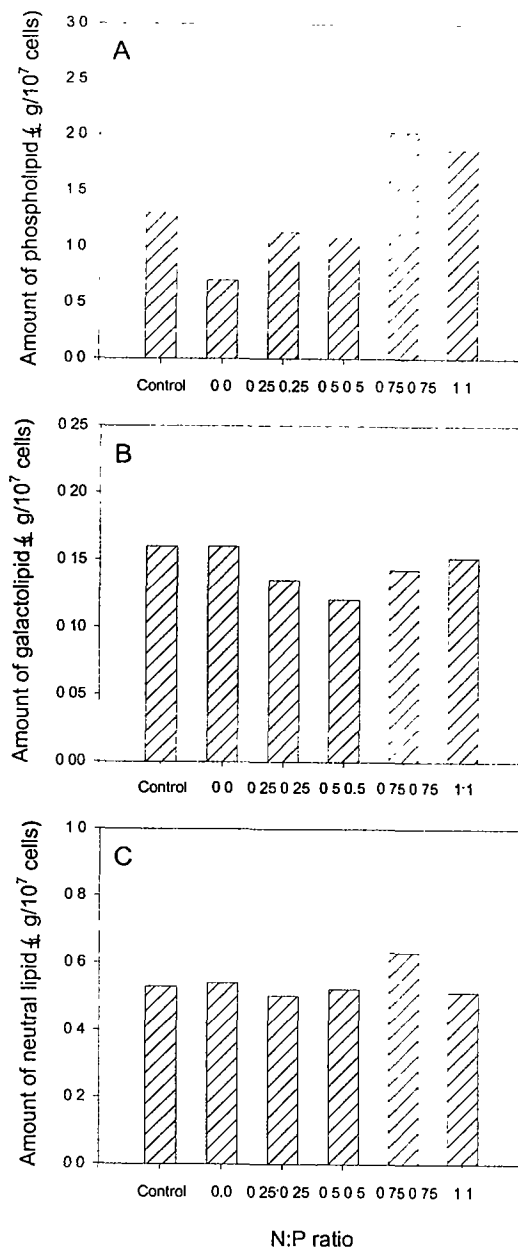


그림 1-37. 인공해수에서 질소원 및 인산원의 농도를 변화시켰을 때 *S. costatum* 세포내의 지질의 변화.

A, phospholipid; B, galactolipid; C, neutral lipid

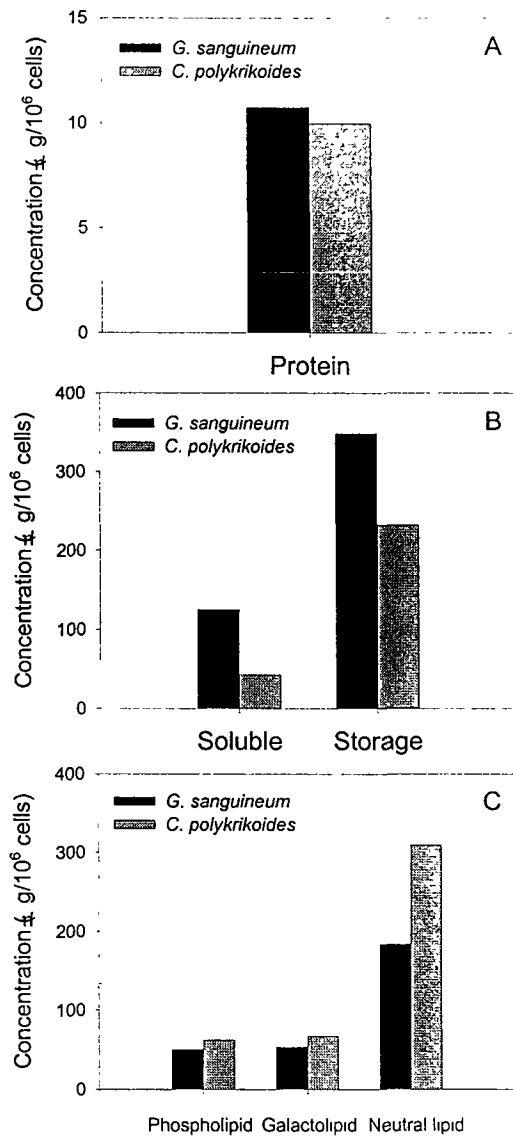


그림 1-38. 적조발생 당시의 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 생화학적 구성성분 조성

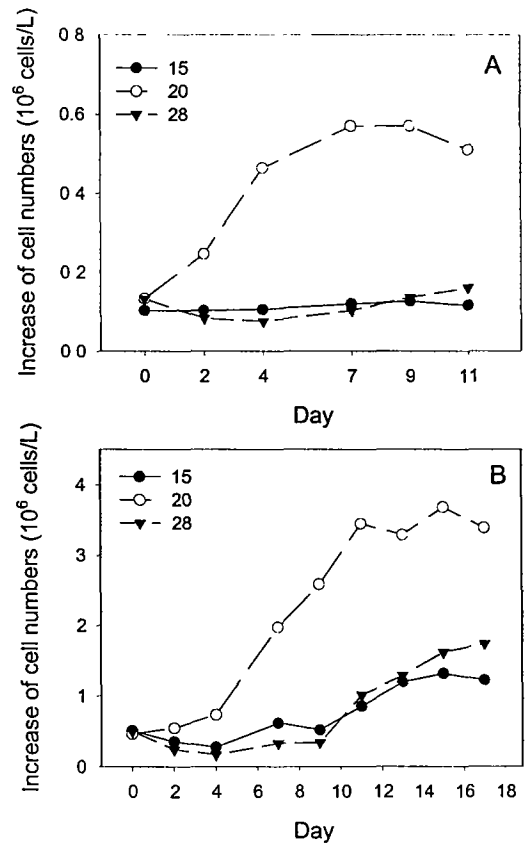


그림 1-39. 온도 변화에 대한 *G. sanguineum* (A) 및 *C. polykrikoides* (B)의 성장곡선

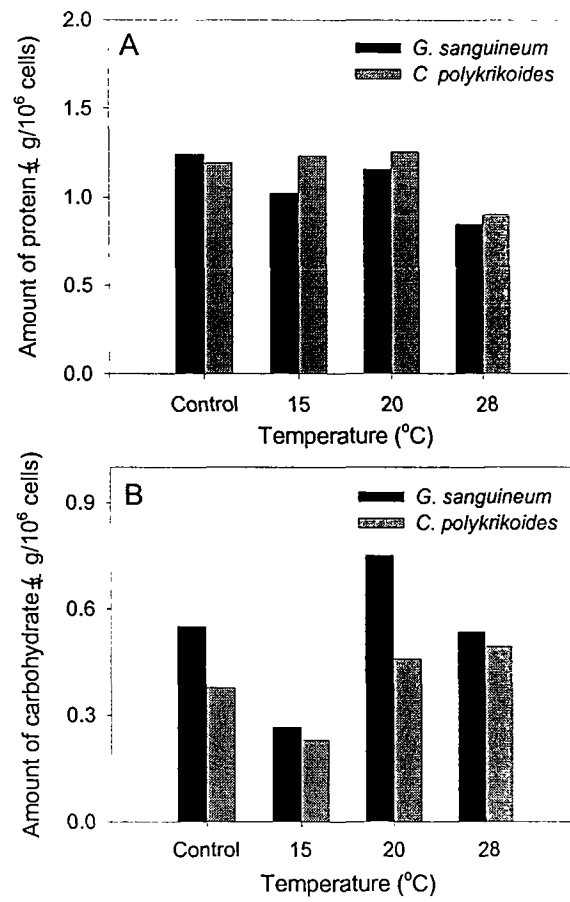


그림 1-40. 온도 변화에 대한 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 단백질 및 탄수화물 양의 변화. A, protein; B, carbohydrate

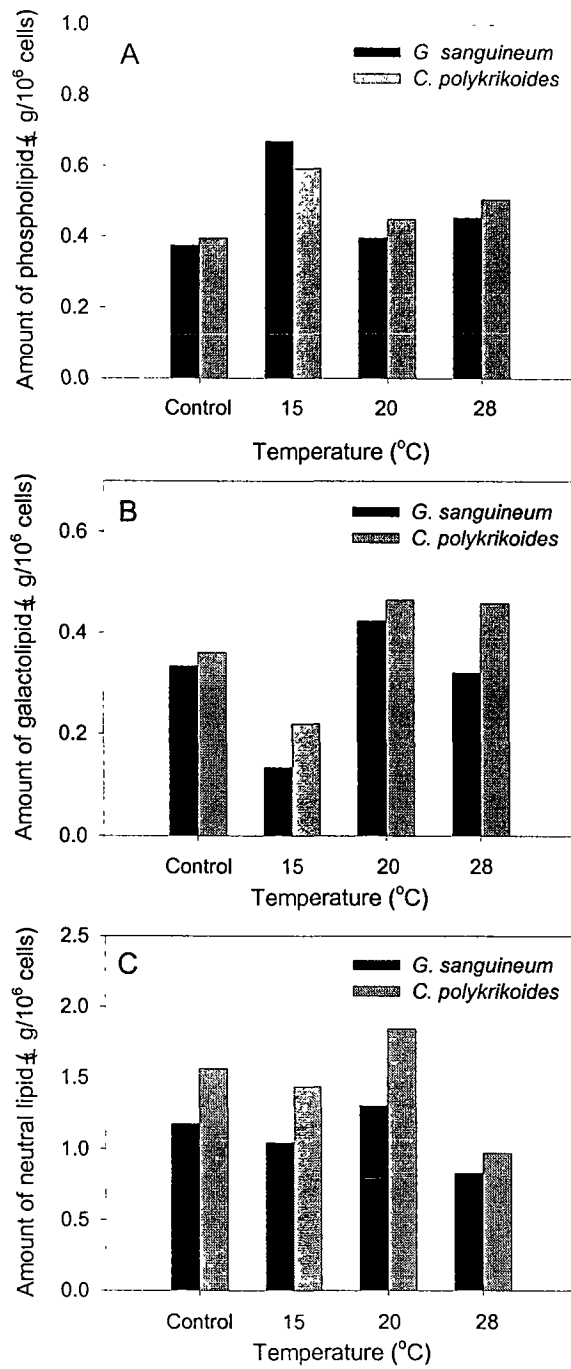


그림 1-41. 온도변화에 대한 *G. sanguineum* 및 *C. polykrikoides*의 세포내 지질량의 변화. A, phospholipid; B, galactolipid; C, neutral lipid

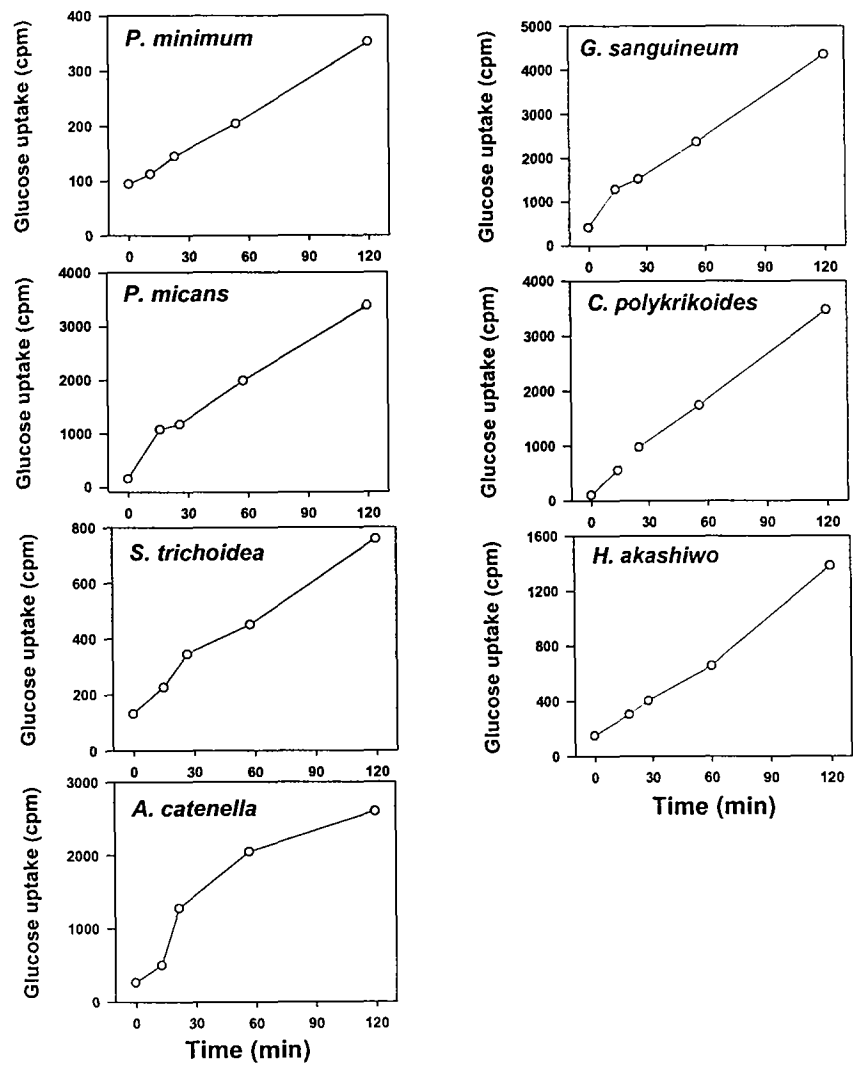


그림 1-42. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수

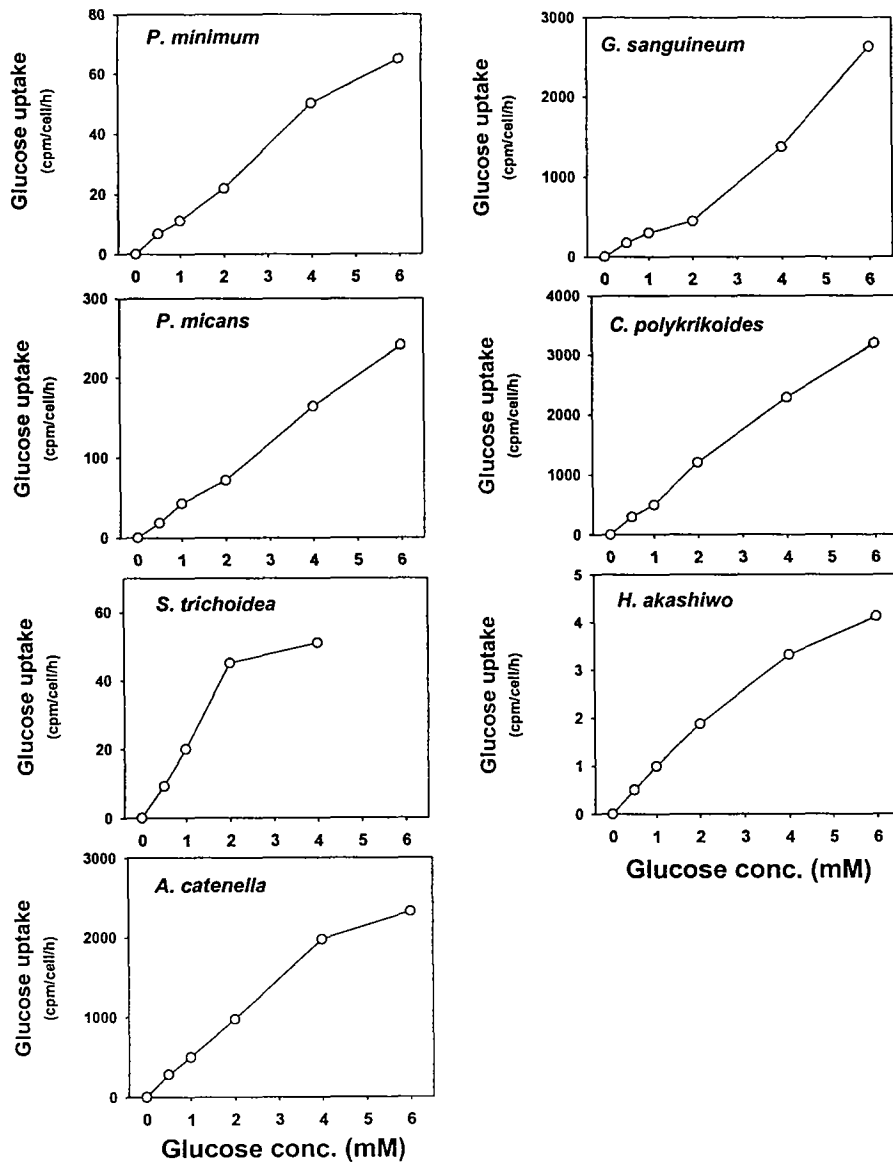


그림 1-43. 해양미세조류 7종의 glucose 농도에 따른 흡수

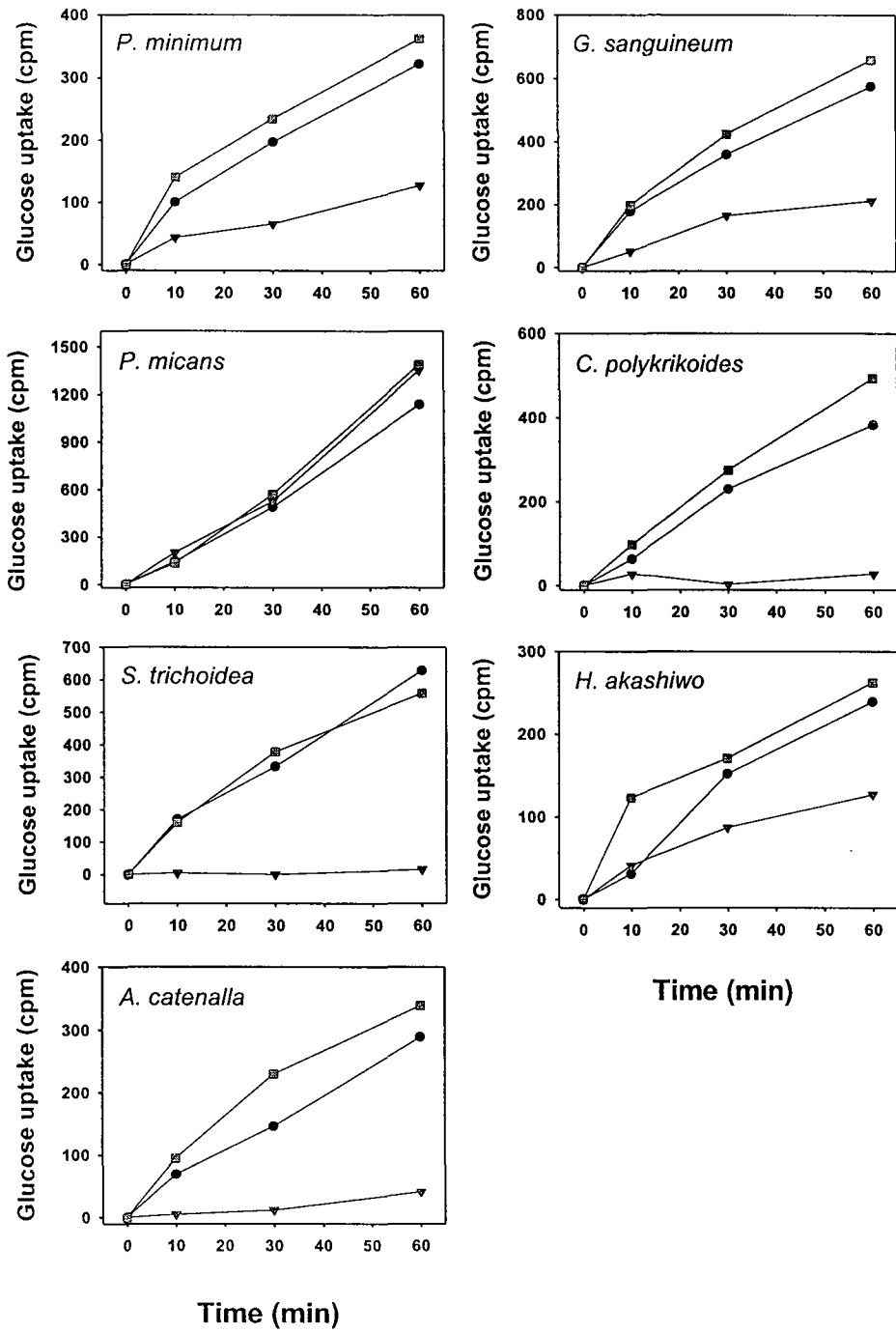


그림 1-44. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수에 대한 CCCP(▼), FC(■)의 영향



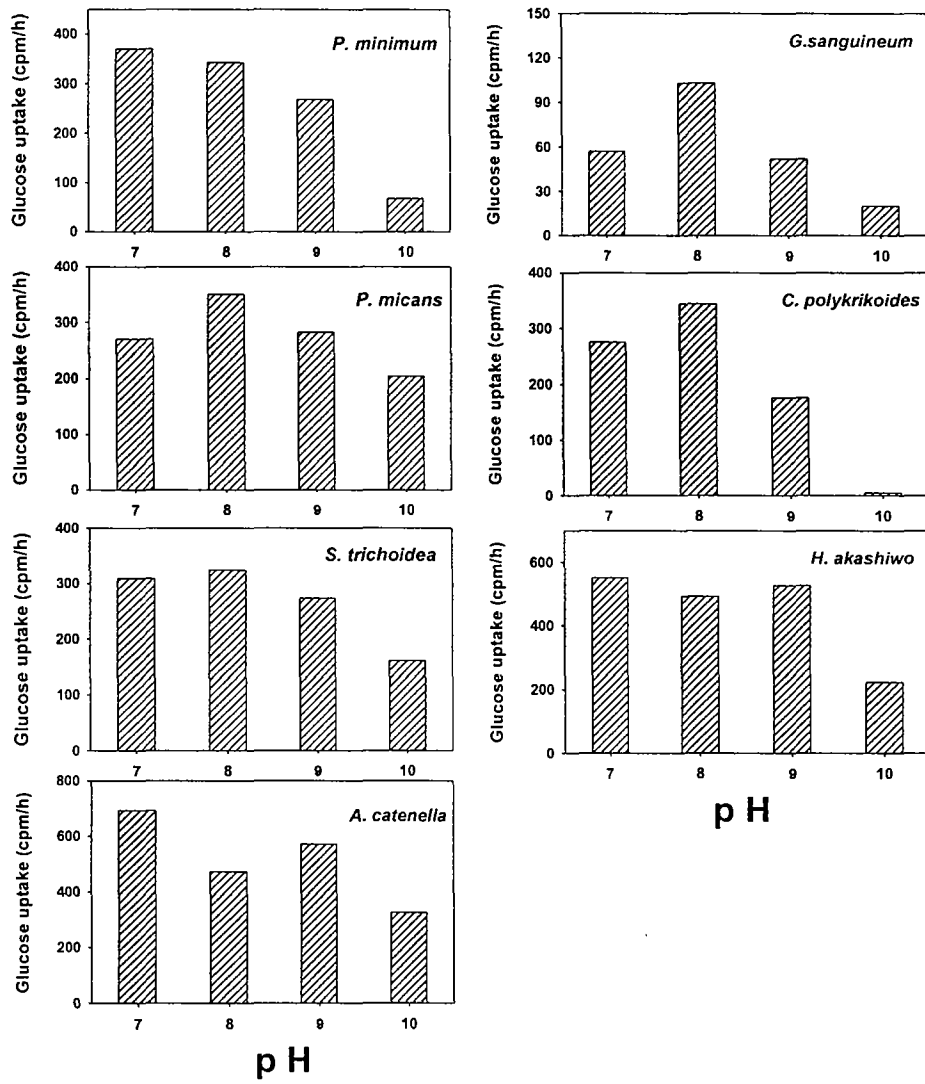


그림 1-45. 해양미세조류 7종의 glucose 흡수에 대한 pH의 영향

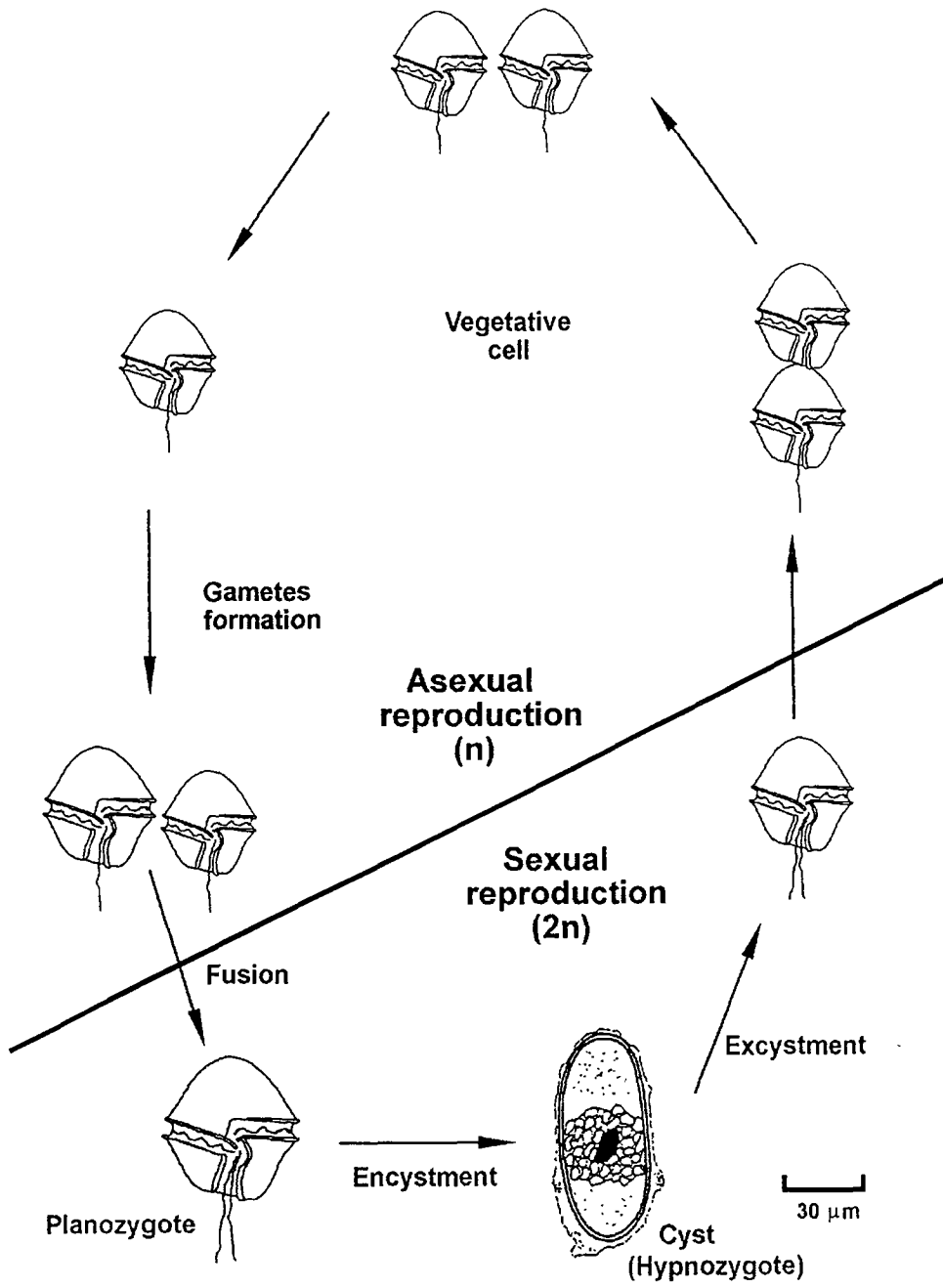


그림 1-46. 휴면포자를 형성하는 와편모조류의 생활사

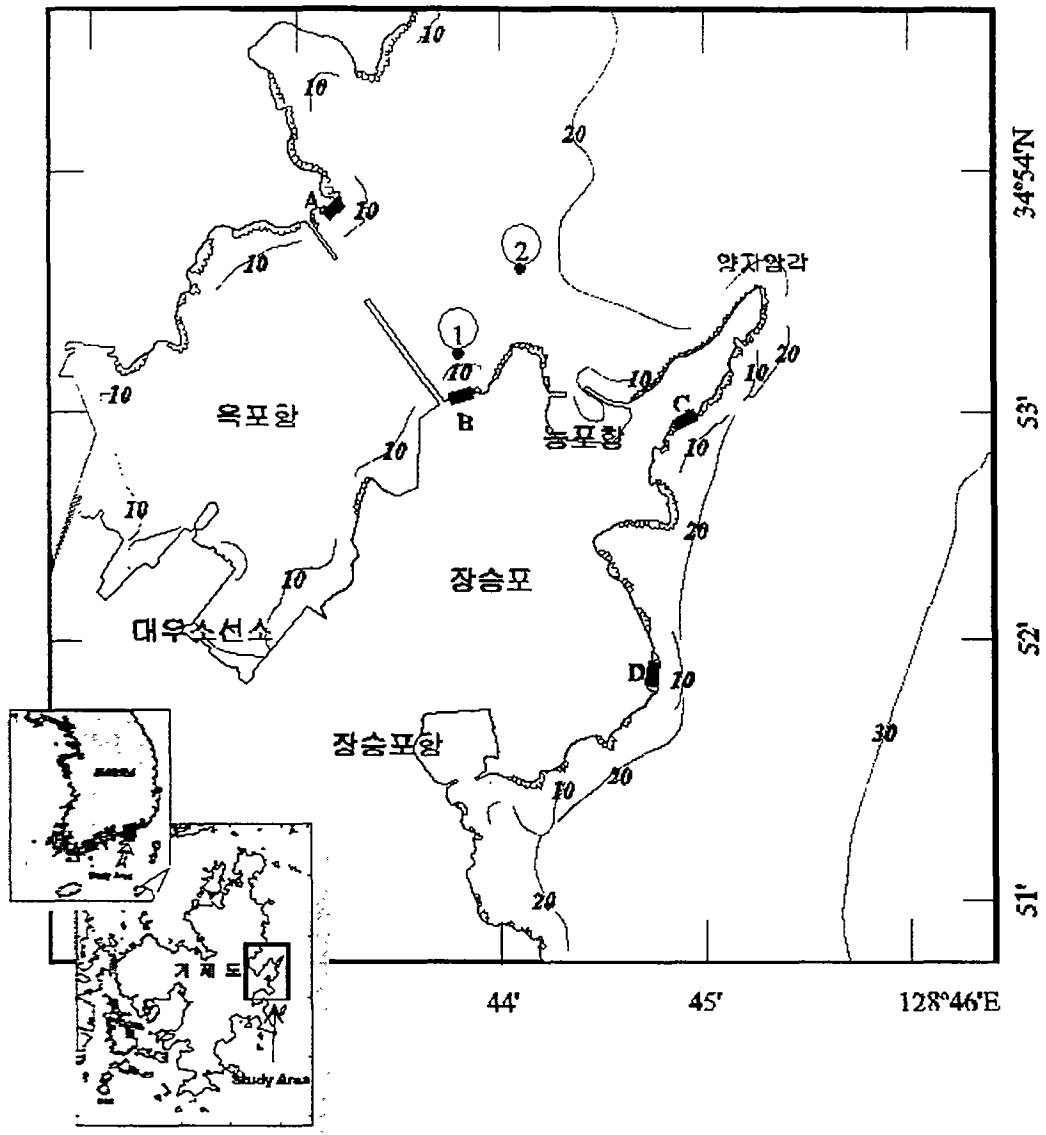


그림 1-47. 장승포 연안의 휴면포자 채집정점

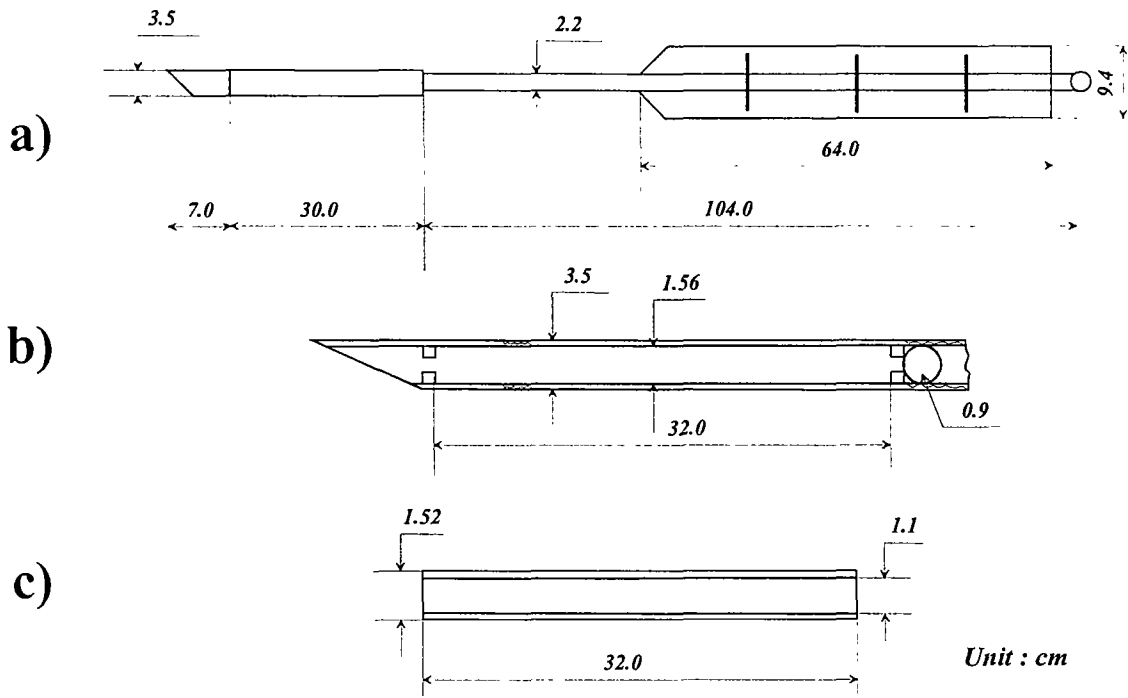


그림 1-48. 휴면포자 채집에 사용된 Hand core.

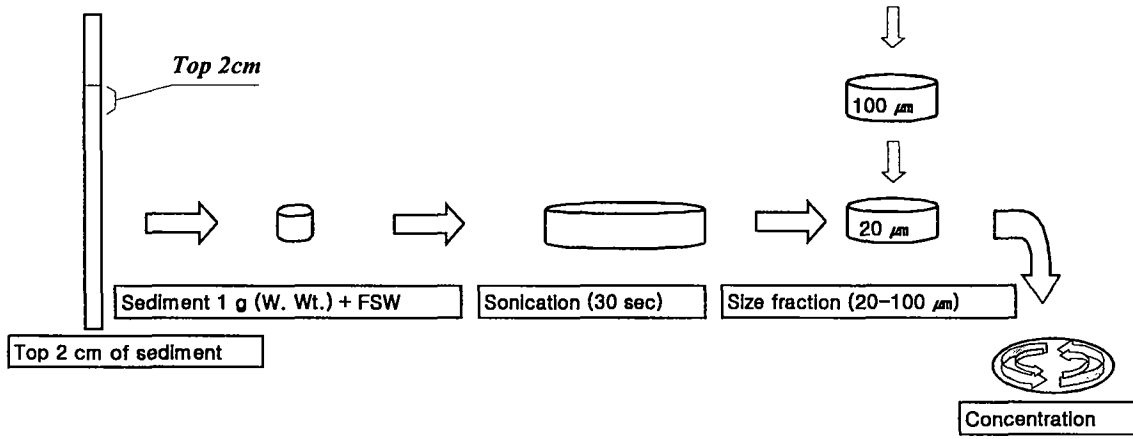
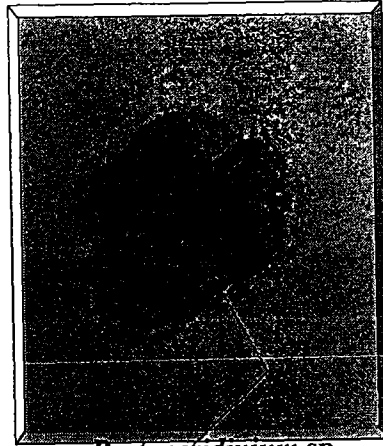


그림 1-49. 살아있는 휴면포자를 농축시키기 위한 panning method.

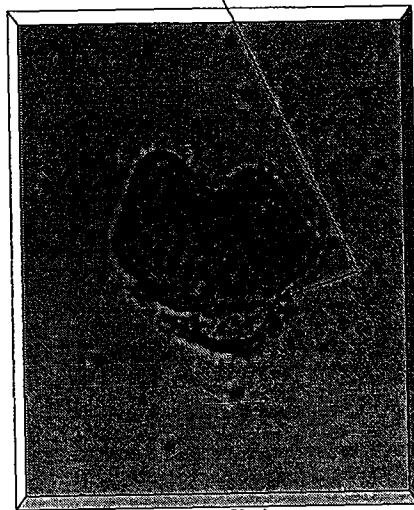


*Scrippsiella trochoidea*  
Excysted cell(Empty cyst)



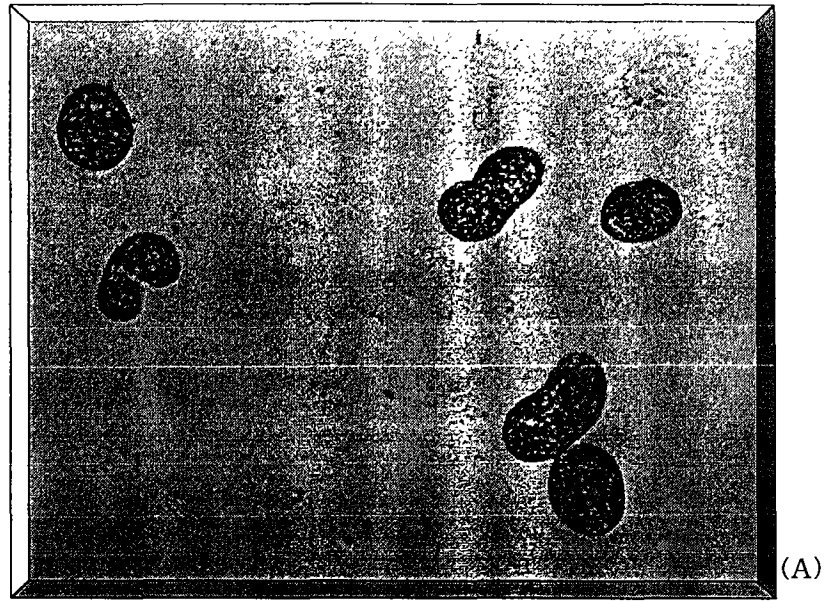
*Protoperidinium* sp.  
Excysted cell

발아공

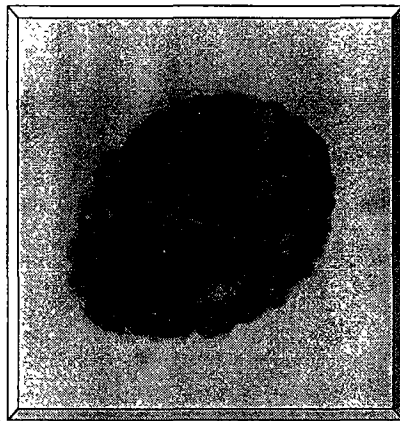


*Protoperidinium* sp.  
Excysted cell

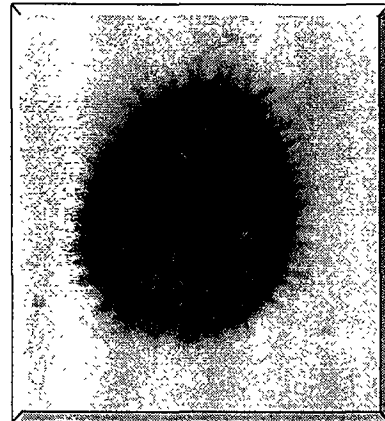
그림 1-50. 휴면포자들의 발아공



*Scripsiella trochoidea*  
Excysted → Encystment



(B)



(C)

*Scripsiella trochoidea*  
Excysted → Encystment

그림 1-51. *Scripsiella trochoidea*의 휴면포자 형태 (A:휴면접합자, B:돌기 없는 휴면포자, C:돌기를 가진 휴면포자)

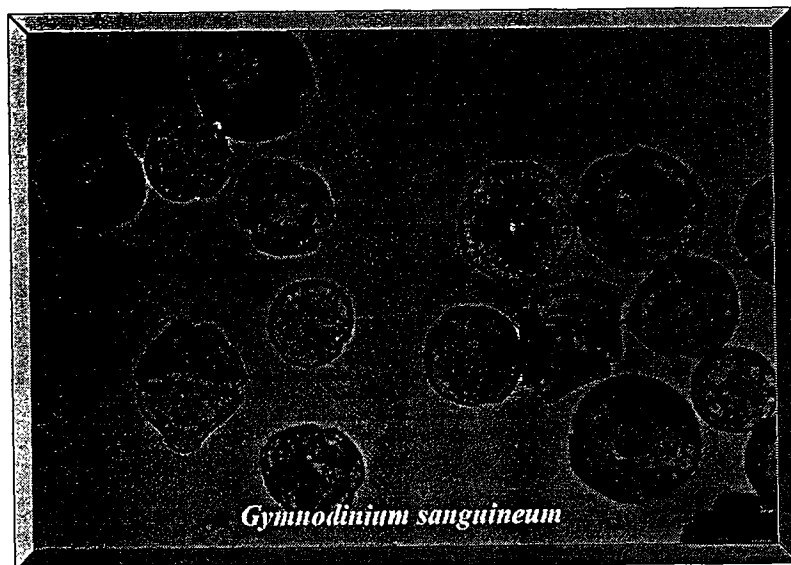
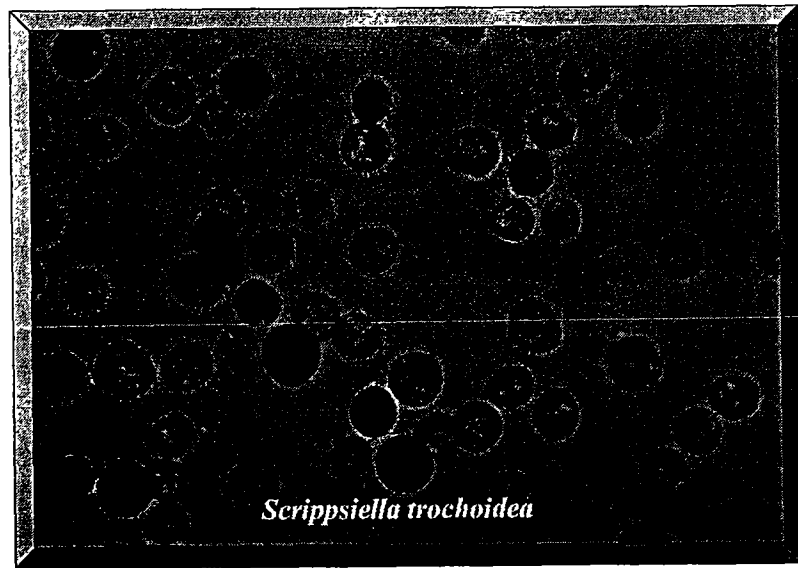


그림 1-52. 실험실에서 형성된 *Scripsiella trochoidea*와 *Gymnodinium sanguineum*의 휴면포자



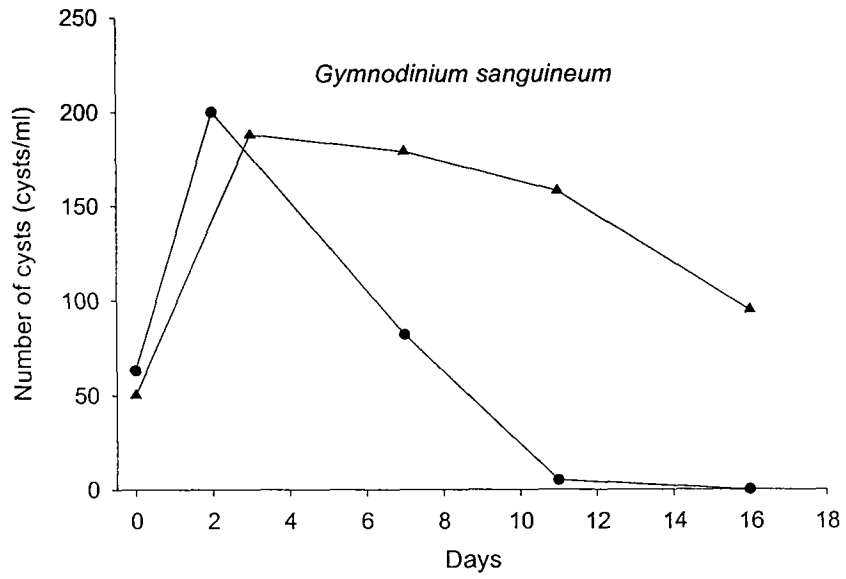
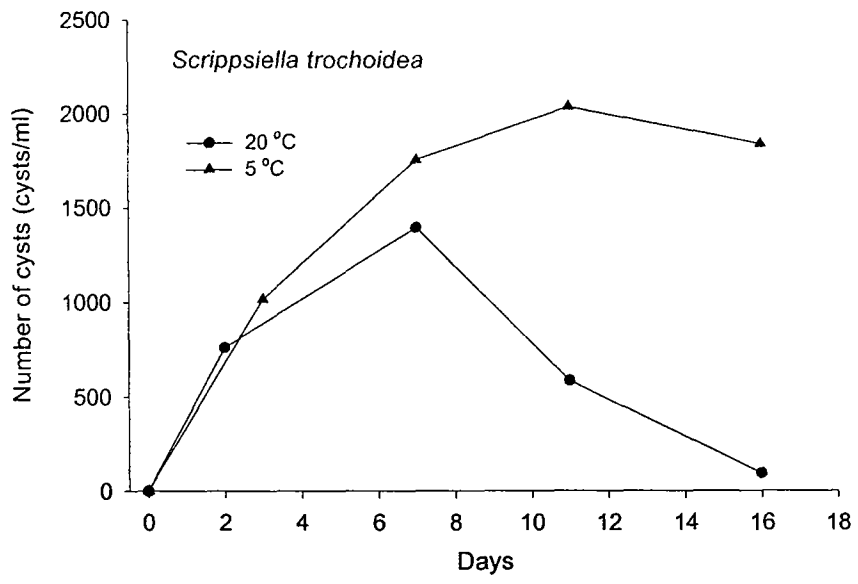


그림 1-53. 휴면포자 형성과 온도의 관계

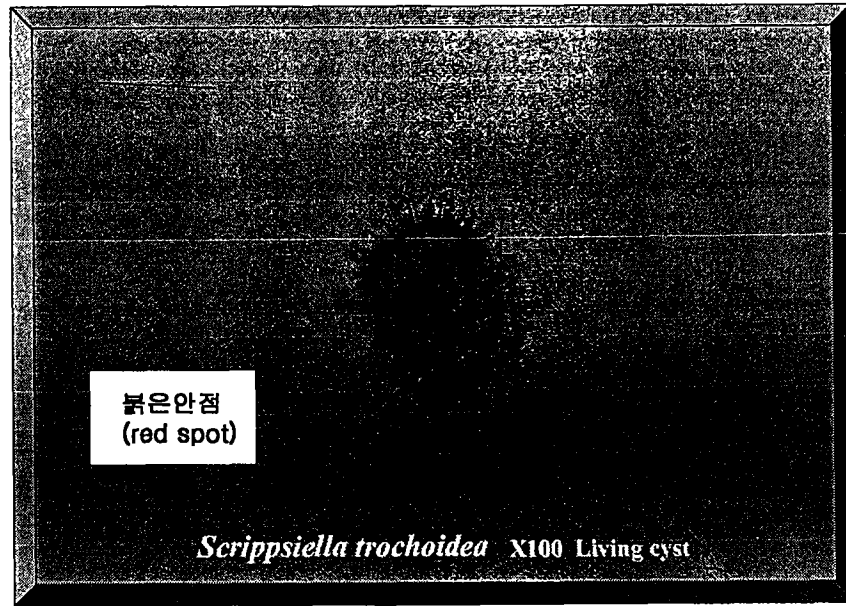


그림 1-54. 휴면포자의 붉은 안점

## 제 2 장 적조확산경로 예측을 위한 물리-생물모델 개발



## 제 1 절 서론 (Introduction)

우리 나라에서 적조는 1960-70년대까지는 주로 진해만 일원에서 국부적으로 발생하였으나 1980년대 이후로는 유해성 적조가 전 연안에 걸쳐 장기간 발생하기 시작하여 막대한 수산피해를 야기시키고 있다 (국립수산진흥원, 1997). 적조의 발생에 대한 아직도 잘 알려져 있지 않으나, 적조생물이 해양에서 이동·확산되는 과정은 일차적으로 해수의 움직임에 의해 좌우되기 때문에 적조생물의 이동방향과 이동속도를 예측하기 위해서는 우선 해수의 움직임이 예측될 수 있어야 하며 이는 해수순환 유체역학 모델에 의해 가능하다. 본 연구에서는 순환 모델에 의해 해류장을 예측하고 이를 적조 생물 모델에 적용하여 남해안에서의 적조발생 조건과 발생 시에 공간적으로 어떻게 퍼져 나가는지를 예측하고자 하였다.

### 1. 남해의 해양 순환적 특성

한국 남해는 서쪽으로는 제주해협을 통해 황해와 연결되고 동쪽으로 대한해협을 통해 동해와 연결되며 남쪽으로는 동중국해와 연결된다. 남해의 해저지형은 100m 이하의 수심으로 연안에서 외해역으로 완만한 경사를 이루고 있으며, 대한해협 서수도와 제주해협에는 각각 200 m, 120 m 이상의 골 (trough)이 존재한다 (Fig. 1). 천해인 남해는 기상의 영향을 받기 쉬운 해역으로 겨울철에는 강한 북풍계열의 바람과 표층냉각으로 인하여 성층이 약화되며, 여름철에는 표면가열, 강우 및 담수의 유입 등으로 성층이 강화된다 (김, 1981; 한국해양연구소, 1998).

남해의 해수유동은 왕복성 조류 외에 북동향이나 동향의 평균적인 해류가 존재한다 (Mitta and Ogawa, 1984; Fig. 16 참조). 쿠로시오 지류에 의한 고염의 해수 (Chang et al., 1995), 저염의 동중국해 해수 (김 과 노, 1994), 저온의 황해냉수 (김 등, 1991; 조 와 김, 1994) 등이 제주해협을 통하여 남해로 유입되며, 제주해협내 해류의 평균유속은 약 12.5 cm/s 이다 (Chang and Kim, 1995). 앞서 언급하였듯이 최근의 ADCP 관측결과는 제주해협 전 단면에 걸쳐 동향류가 나타남을 보였고, Suk et al. (1996)은 제주해협 내 동향류를 제주해류 (the Cheju Current)라 명명하였다. 쿠로시오로부터 분지된 대마난류는 북상하여 제주도 동쪽을 통해 남해로 유

입된 후 대한해협을 통해 동해로 유출되며, 대한해협 서수도에서 유속의 크기는 약 50 cm/s 이상을 나타낸다 (Lie and Cho, 1997). 남해의 조석은 반일주조가 우세하고 (Ogura, 1933), 반일주조류의 경우 최고 75 cm/s 정도로 해류와 비슷하거나 해류보다 강하다 (Odamaki, 1989).

남해를 포함한 해역에서 수치모델을 이용한 연구는 많은 연구자에 의해 수행되어왔다. Fang (1986)은 연안 조석 관측자료와 수치모델을 이용하여 M2, K1 분조에 대한 조석도를 작성하였고, 대한해협 중앙부에 무조점이 존재함을 보였다. 최 등 (1994)은 대한해협에서  $1/12^\circ \times 1/12^\circ$  격자 구성을 갖는 3차원 조석 수치모형을 이용하여 8개의 분조 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1)를 모의하였다. 최 등 (1994)의 결과는 Odamaki (1989)의 조석도와 비교하여 K1 분조에 대한 무조점의 위치가 조금 남쪽에 위치하고 있으나, 전반적으로 Odamaki (1989)의 결과와 유사한 양상을 보인다. 최 등 (1995)은 순압 3차원모델을 이용하여 조석강제력, 개방경계를 통한 유·출입 및 바람 강제력을 개별적으로 적용하여 각각의 경우에 대한 대한해협 주변의 조류순환과 해류분포를 계산하였다. 최 등 (1995)의 결과에 의하면 각각의 모델결과로는 관측된 인공위성 추적부표의 궤적을 재현할 수 없었고, 조류, 해류 및 취송류를 선형적으로 합성한 경우에 비교적 좋은 일치를 보였으며, 관측된 부표의 궤적은 해류와 취송류의 영향을 많이 받고 있음을 보였다. 위의 연구들은 조석과 해류를 동시에 고려하지 않아 관측된 해수순환을 재현하는데 제한점이 있었고 (최 등, 1994, 1995), 특히 최 등 (1995)은 조류, 해류 및 취송류를 동시에 모의하는 것의 중요성을 지적하였다. 김 (1998)은 남해전체를 모델영역으로 하여 조석과 해류를 동시에 고려하는 2차원 수치모델을 수립하여 조석과 해류에 의한 남해의 순환과 물질이동을 모의하였다. 김 (1998)의 결과에 의하면 조석 잔차류만으로는 남해의 순환을 재현할 수 없고, 개방경계를 통한 유·출입 (즉, 해류의 영향)과 조석강제력이 동시에 고려되어야 함을 보여주었다. 김 (1998)은 해양의 밀도분포는 고려하지 않았으나 남해 일부 내만에서 외해역과 열·염의 상호교환작용이 중요하다는 것을 제시하였다.

외해역과 연안역을 포함하는 남해 전 영역에서의 해수순환과 물질이동을 연구하는데 있어 조류, 해류 및 밀도류를 동시에 고려하는 모델의 개발이 요구되고, 이러한 모델의 결과는 내만의 연구를 위한 협역모델의 개방경계조건 뿐만 아니라 연안역과 외해역사이의 상호작용에 관한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 본

연구에서는 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입과 밀도분포의 영향을 동시에 고려한 3차원 수치모형을 구성하여 여름철 남해의 해수순환을 모의하였다.

## 2. 적조생물 모델

주어진 해류장에서 적조생물의 이동·확산을 취급하기 위해서는 부영양화 모델은 적합하지 않다. 부영양화 모델은 생물양을 모델의 통화 (model currency)로 하므로 mass-balance 접근 방식은 HAB (harmful algal bloom) 역학 연구에는 적합하지 않다. 즉, 부영양화 모델에서는 엽록소의 밀도 변화를 추적하게 되나 적조는 단순한 엽록소의 증가 현상은 아니다. 생물량의 변화는 종에 따라 지역적, 계절적으로 다른 특성을 가지기 때문이다 (Smayda, 1977). 예를 들어서 *Aureococcus anophagefferens* (< 2 $\mu$ m) brown tide를 일으킬 때는 엽록소 밀도는 정상적 춘계 번성시 밀도이나 그 수는 109 cells/liter에 이른다. 수산진흥원의 기준 (1,000 cells ml<sup>-1</sup>)을 적용할 경우에 식물 플랑크톤 중 전체의 65%가 적조 생물이 되는 모순이 생긴다 (Smayda, 1977).

더욱 문제가 되는 것은 종에 따라 증식율을 결정하는 요인이 다르다는 것이다. 대개의 규조류는 증식율을 영양염에 대한 Michealis-Menten 함수로 표시할 수 있다. 그러나 HAB을 일으키는 종의 75%에 해당하는 (Smayda, 1997) 와편모류에 있어서는 영양염 결핍이 유성생식과 급격한 증식을 촉발하는 것이 보고되고 있다. 따라서 적조의 확산과 이동을 모델하기 위해서는 단일 종에 대한 개체위주 모델이 (IBM: individual-based model) 더 효과적일 것으로 판단된다.

IBM model에서는 개체 하나 하나의 행동과 운명을 추적한 다음, 모든 개체의 총체적 특성에서 개체군적 특성을 도출한다. 해양학에서는 Lagrangian ensemble model이라고도 한다. 본 연구에서는 해류장 모델 결과에 이러한 IBM을 적용하여 적조생물의 포자와 개체의 이동을 추적하여 적조의 형성 조건과 확산 특성을 연구하였다.

## 제 2 절 물리 순환모델

### 1. 3차원 모델 지배방정식 (Governing equations for the three-dimensional model)

본 연구에 사용된 Princeton Ocean Model (POM)의 지배방정식은 해면고도 (surface elevation)와 수평 및 수직 방향 유속장의 시·공간적인 변화를 계산하는 연속방정식과 운동방정식을 포함하고, 수온과 염분의 시·공간적 변화를 계산하는 열·염 보존방정식으로 구성되어 있다. 비압축성 근사 (incompressible approximation)와 유체정력학적 근사 (hydrostatic approximation) 그리고 Boussinesq 근사를 사용할 때, 아래의 관계식을 이용하여  $\sigma$ -좌표계 (Phillips, 1957)로 표현되는 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$x = x^*, y = y^*, \sigma = \frac{z^* - \eta}{H + \eta}, t = t^*$$

여기서,  $(x^*, y^*, z^*, t^*)$  : cartesian 오른손 좌표계

$(x, y, \sigma, t)$  :  $\sigma$ -좌표계

비압축성 유체의 연속방정식은

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

(1-1)

$x, y$  방향의 운동방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = -\frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned}$$

(1-2)



$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = -\frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (1-3)$$

수직 방향으로의 운동방정식은

$$\rho g = -\frac{1}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (1-4)$$

열·염보존 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \phi D}{\partial t} + \frac{\partial \phi u D}{\partial x} + \frac{\partial \phi v D}{\partial y} + \frac{\partial \phi \omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right] + F_{\phi} + S_e \end{aligned} \quad (1-5)$$

여기서

- t : 시간
- $\eta(x,y,t)$  : 해수면 위치
- $H(x,y)$  : 평균 해수면하 깊이
- $D(x,y,t)$  : 총 수심 =  $H + \eta$
- $u,v(x,y,\sigma,t)$  : 수평 속도 성분
- $\omega$  : 수직 속도 성분
- p : 압력
- g : 중력가속도
- $\rho_0$  : 평균 해수 밀도
- f : 코리올리 계수 =  $2\Omega \sin \theta$
- $\phi$  : 수온, 염분
- $F_x, F_y$  : 수평 난류 점성항
- $F_{\phi}$  : 수평 난류 확산항
- $K_M$  : 수직 난류 점성계수
- $K_H$  : 수직 난류 확산계수
- $S_e$  : external source or sink 항

식 (1-2) 와 식 (1-3)에서 모델 격자보다 작은 규모에 의한 운동을 묘사하는 수평 난류 점성항 ( $F_x, F_y$ )과 수평 난류 확산항 ( $F_{\phi}$ ) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

수평 난류 점성항들은 좌표계의 변환에 무관하게 사용하였다 (Mellor and Blumberg, 1985).

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2A_M D \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M D \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2A_M D \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M D \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$F_\phi = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_H D \frac{\partial \phi}{\partial y} \right]$$

$A_M$  : 수평 난류 점성 계수

$A_H$  : 수평 난류 확산 계수

수평 난류 점성 계수는 많은 수치모델 적용에서 상수값을 사용하나, 본 연구에서의 수평 난류 점성계수는 격자크기와 속도의 수평적인 shear에 비례한다는 다음과 같은 Smagorinsky (1963)의 비선형공식으로 계산하였다.

$$A_M = A_B + K \cdot \Delta x \Delta y \frac{1}{2} |\nabla v + (\nabla v)^T| \quad (1-6)$$

$$\frac{|\nabla v + (\nabla v)^T|}{2} = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 / 2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

여기서

$\Delta x, \Delta y$  : x, y 방향의 격자크기

$A_B$  : 기본값

$K$  : Smagorinsky 상수

사용된 Smagorinsky 상수  $K$ 는 0.1에서 0.2사이의 값을 사용할 것을 Mellor (1996)는 권장하고 있으며 본 연구에서는 0.2를 사용하였다.  $A_B$  값의 결정은 보통 격자크기에 따라 결정되는 값으로 Kantha (1995)는 격자크기가  $1/5^\circ$  (약 22.2 km)인 경우에  $200 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 사용하였고, 한국해양연구소 (1996b)는 한국주변해역의 조석 모델에서  $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 본 연구에서  $A_B$ 값은 격자크기 3 km에 적합한  $20 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다.

Mellor and Yamada (1974)는 평균 난류모델을 비등방성의 정도에 따라 4개의 level (level 2,  $2\frac{1}{2}$ , 3 그리고 4)로 분류하였다. 본 연구에서는  $2\frac{1}{2}$  level 모델을 이용하여 수직난류점성계수와 수직난류확산계수를 계산하였다 (Mellor and

Yamada, 1982). 성층에 따른 수직 난류 혼합 계수를 추정하기 위하여 Richardson number (Ri)에 따라 변하는 수직 안정도 함수 (vertical stability function)를 사용하였다.

$$K_M = q \ell S_M, \quad K_H = q \ell S_H$$

$$S_H[1 - (3A_2B_2 + 18A_1A_2)G_H] = A_2[1 - 6A_1/B_1]$$

$$S_M[1 - 9A_2A_2G_H] - S_H[(18A_1A_2 + 9A_1A_2)G_H] = A_1[1 - 3C_1 - 6A_1/B_1]$$

$$G_H = -\frac{\ell^2 g}{q^2 \rho_0} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right]$$

여기서

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 16.6, 0.74, 10.1, 0.08)$$

q : turbulence kinetic energy

ℓ : turbulence length scale

S<sub>M</sub>, S<sub>H</sub> : 수직안정도 함수

G<sub>H</sub> : Richardson number

c<sub>s</sub> : 음속

q 와 ℓ 은 다음의 방정식을 풀어서 결정한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 \ell} + F_q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 \ell D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 \ell u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 \ell v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \ell \omega}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 \ell}{\partial \sigma} \right] + E_1 \ell \left\{ \frac{K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{E_3 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} \tilde{W} \\ & - \frac{Dq^3}{B_1} + F_\ell \end{aligned}$$

여기서

$$\tilde{W} = 1 + E_2(\ell/xL) \quad : \quad \kappa = 0.4 \text{ von Karman 상수}$$

$$L^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - c_s^{-2} \frac{\partial p}{\partial \sigma}$$

## 2. 수직 적분된 방정식 (Depth-integrated equations)

연근해의 순환역학을 지배하는 방정식은 빠르게 움직이는 외부중력파와 천천히 움직이는 내부중력파의 전파특성을 포함하고 있다. 계산과정에서 수직적으로 적분된 방정식(외부모드)과 수직적 구조를 갖는 방정식(내부모드)으로 구분하여 계산하는 것이 효율적이다. 수직 적분된 연속방정식과 운동방정식은 아래와 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(DU) + \frac{\partial}{\partial y}(DV) = 0 \quad (1-7)$$

운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(U D)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2 D)}{\partial x} + \frac{\partial(U V D)}{\partial y} - f V D + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tilde{F}_x \\ & = \frac{1}{\rho_0} \tau_x^w - \frac{1}{\rho_0} \tau_x^b + G_x - \frac{g D}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(V D)}{\partial t} + \frac{\partial(U V D)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2 D)}{\partial y} + f U D + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} - \tilde{F}_y \\ & = \frac{1}{\rho_0} \tau_y^w - \frac{1}{\rho_0} \tau_y^b + G_y - \frac{g D}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (1-9)$$

여기서, 수직적분된 속도는 아래와 같이 정의 된다.

$$(U, V) \equiv \int_{-1}^0 (u, v) d\sigma$$

$\tilde{F}_x$  and  $\tilde{F}_y$  : 수평점성항

$$\hat{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2 \bar{A}_M \frac{\partial UD}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \bar{A}_M \left( \frac{\partial UD}{\partial y} + \frac{\partial VD}{\partial x} \right) \right]$$

$$\hat{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2 \bar{A}_M \frac{\partial VD}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \bar{A}_M \left( \frac{\partial UD}{\partial y} + \frac{\partial VD}{\partial x} \right) \right]$$

$$\bar{A}_M \equiv \int_{-1}^0 A_M d\sigma$$

Dispersion term으로 불리는 항은 다음과 같이 정의된다.

$$G_x = \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} - \hat{F}_x - \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}v D}{\partial y} + \bar{F}_x$$

$$G_y = \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} - \hat{F}_y - \frac{\partial \bar{u}v}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}^2 D}{\partial y} + \bar{F}_y$$

### 3. 수치해석방법 (Numerical methods)

본 연구에 사용된 격자는 해수면 위치를 계산하는 격자와 유속을 계산하는 격자가 구분되는 staggered grid 의 일종인 Arakawa C-grid를 사용하였다. 수면경사는 반음해법으로, 이류항과 수평확산항을 centered-space, 그리고 시간에 대해서는 leapfrog scheme을 사용하였다. 이는 시·공간적으로 2차의 정확도를 가진다. Leap-frog scheme을 사용하여 시간 미분항을 차분하게 되면 Coriolis 항을 처리하는데 유리하지만 홀수번째의 해와 짝수번째의 해가 점점 달라지는 time-step splitting을 초래한다 (Roache, 1972). Time step splitting으로 인한 불안정성을 제거하기 위해 해를 매시간 간격마다 아래와 같은 Asselin (1972)의 filter를 사용하여 평활화(smoothing) 시켜 주었다.

$$T_s^n = T^n + \frac{\alpha}{2} (T^{n+1} - 2T^n + T_s^{n-1})$$

여기서

$$\alpha = 0.05$$

$T_s$  : smoothed solution

$n$  : time step

해수유동을 지배하는 방정식들은 빠르게 움직이는 외부중력파와 느리게 움직이는 내부중력파의 전파특성을 포함하고 있다. 본 연구에서 수직적분된 방정식 (식 1-7, 1-8, 1-9)은 외부중력파의 속도를 고려하여 짧은 시간간격마다 자유해면과

수심 평균 유속을 계산하고 (외부모드), 3차원 방정식 (식 1-1, 1-2, 1-3, 1-5)은 내부중력파에 속도를 고려하여 긴 시간간격마다 계산하는 (내부모드) mode splitting scheme을 사용하여 계산의 효율성을 갖게 하였다. 먼저 외부모드를 짧은 시간간격으로 계산하여 자유해면을 구한 후, 보다 긴 시간간격으로 내부모드를 계산하여 3차원 유속을 구한다.

수직적분된 방정식 (external mode)에서 Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 수치 안정조건은 다음과 같다 (Blumberg and Mellor, 1987).

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_{te}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2}$$

여기서

$$C_{te} = 2(gH)^{1/2} + U_{max}$$

$U_{max}$  : 수직적분된 최대이류속도

$\Delta t_E$  : 외부모드의 시간간격

3차원 방정식 (internal mode)에서 내부중력파의 속도를 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta t_I \leq \frac{1}{C_{ti}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2}$$

여기서,

$$C_{ti} = 2(g'\Delta z)^{1/2} + u_{max}$$

$u_{max}$  : 최대 이류속도

$\Delta x, \Delta y$  : x, y 방향의 격자간격

$\Delta t_I$  : 내부모드의 시간간격

$\Delta z$  : 각 수층의 두께

수평방향의 격자간격이  $\Delta x = \Delta y = 3$  km이고, 수직 평균된 최대 이류속도가 1 m/s 일 때, 평균수심을 70 m 에 대하여 외부모드의 시간간격은 약 39초이고, 최대 이류속도를 1 m/s, 첫 번째 경압모드의 두께를 10 m로 가정하면 내부모드의 시간간격은 약 1200초이다. 본 연구에서 사용된 시간간격은 외부모드의 경우 20초를, 내부모드의 경우 200초를 사용하여 CFL 조건을 충분히 만족시켜주었다.

#### 4. 수치모델의 구성 (Modeling procedure)

한국의 남해는 왕복성 조류 외에 북동향이나 동향의 평균적인 해류가 존재하고, 지리적 특성으로 인하여 기원을 달리하는 해수가 존재하며 그 분포는 계절에 따라 큰 변동을 보인다. 이와 같은 요인을 고려하여 남해의 3차원 해수순환을 모의하는 수치모델을 구성할 경우 조석강제력, 개방경계를 통한 해수의 유·출입, 밀도분포의 영향, 표층과 개방경계를 통한 열·염 플럭스, 해표면 바람응력, 육지로부터의 담수유입 등을 동시에 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 조류, 해류, 밀도류 및 바람응력에 의한 취송류를 고려하였고, 담수유입에 의한 강제력은 고려하지 않았다. 개방경계에서 조류와 해류분포 및 관측된 수온과 염분을 부과하여 개방경계를 통한 유·출입을 고려하였으며, 관측된 표층 수온과 염분을 강제하고, 표층 하 7개 층에서는 열·염 보존방정식을 풀어 밀도류의 영향을 고려하였다. 모델 실험은 바람응력을 고려하지 않은 경우 (Table 1의 Case 1)와, 바람응력을 고려한 경우 (Table 1의 Case 2)로 나누어 수행함으로써 바람의 영향을 개별적으로 고찰하였다. 바람응력을 고려한 실험의 초기조건 및 경계조건은 바람을 고려치 않은 경우와 동일하다.

Table 2-1. Summary of initial and boundary conditions for two cases with (Case 1) and without (Case 2) the wind forcing.

Case	Initial Condition	Open Boundary Condition	
		External Forcing	Specification <sup>1</sup>
1	<sup>2</sup> cold start + observed T, S	Tidal Current + Mean Current + Heat/Salt Flux	$\eta (B,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_M (B,j,t)^4 + U_T (B,j,t)^3$ $V (B,j,t) = V_T (B,j,t)$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B,j,k,t) = v (B+1,j,k,t)$ T,S = upstream advection
2	<sup>2</sup> cold start + observed T, S	Tidal Current + Mean Current + Heat/Salt Flux + Wind	$\eta (B,j,t) = \eta (B,j,t)$ $U (B,j,t) = U_M (B,j,t)^4 + U_T (B,j,t)^3$ $V (B,j,t) = V_T (B,j,t)$ $u (B,j,k,t) = \text{Orlanski radiation}$ $v (B,j,k,t) = v (B+1,j,k,t)$ T,S = upstream advection

<sup>1</sup> Specification of open boundary conditions at the western boundary ( $i = B$ ).

<sup>2</sup> Cold start with respect to surface elevation and velocity field.

<sup>3</sup>  $U_T, V_T$  ; Tidal current computed from a barotropic tide model driven by the specified tidal elevation for five tidal constituents across the open boundary.

<sup>4</sup>  $U_M$  ; Mean current component perpendicular to the open boundary based on the ADCP observation.

### 가. 모델영역 및 격자구성 (Model domain and grid configuration)

본 연구에서 적용된 모델영역은 진도와 제주도를 잇는 선, 제주도와 대마도를 잇는 선과 울산과 대마도를 잇는 선을 각각 서쪽, 남쪽, 동쪽 개방 경계로 설정하였다 (Fig. 2-1). 여기서 사용된 좌표축은 x축으로는 제주도에서 대마도로 증가하는, y축은 제주도에서 진도방향으로 증가하는 직교 좌표계를 사용하였다. 수평방향의 격자간격 ( $\Delta x, \Delta y$ )은 약 3 km를 사용하여 111×46 개의 격자로 구성하였으며, 수직방향으로는 8개의 층으로 구성하였다 (Table 2).



## 나. 모델 입력자료 (Input data)

개방경계에서 조류와 해류의 유출입을 동시에 고려한 모델을 구성할 때, 해류와 조류에 의한 자유해면 분포를 부과하는 방법 (Chang et al., 1997)과 해류와 조류 분포를 직접적으로 부과하는 방법 (Oey and Chen, 1992)이 있다. 자유해면을 부과할 경우 개방경계에서 매 시간마다 변하는 밀도와 해류에 의한 해면변화와 조위변화를 모두 고려해야한다. 본 연구에서는 개방경계에서 해면변화를 관측한 자료의 부족으로 자유해면을 부과하는데 어려움이 있어, 해류와 조류분포를 직접 부과하는 방법을 사용하였다. 개방경계에서 강제력으로 부과되는 해류분포는 관측자료를 이용하였으며, 조류분포는 조위를 부과하여 계산한 조석모델 결과를 이용하였다. 해수면 경계와 개방경계에서의 수온과 염분분포는 국립수산진흥원의 8월과 10월 관측자료를 이용하였다.

Table 2-2. Vertical grid system in sigma coordinate. ( $\sigma$ : position of boundary of each layer;  $Z$ : position of boundary layer when depth is 100m ;  $\sigma'$ : position of the center of layer;  $\Delta \sigma$ : distance between  $\sigma$ )

Layer	$\sigma$	$\sigma'$	Z(m)	$\Delta \sigma$
1	0.0000			
2	-0.0417	-0.0208	-2.08	0.0417
3	-0.0833	-0.0589	-5.89	0.0417
4	-0.1667	-0.1179	-11.79	0.0833
5	-0.3333	-0.2500	-25.00	0.1667
6	-0.5000	-0.4167	-41.67	0.1667
7	-0.6667	-0.5833	-58.33	0.1667
8	-0.8333	-0.7500	-75.00	0.1667
9	-1.0000	-0.9167	-91.67	0.1667

### o 조류

한반도 주변 조석 조화상수 자료집 (한국해양연구소, 1996a)과 Odamaki (1989)의 조석도를 사용하여 각 개방경계격자에서 조위에 대한 M2, S2, K1 그리고 O1 분조의 반조차 (amplitude)와 지각 (phase)을 구하였다. 조위를 부여한 조석모델

결과로부터 개방경계에서 30일간 수심평균된 유속을 구한 후, 조화분해하여 4개 분조에 대하여 수심평균된 유속에 관한 반조차와 지각을 구하였다.

#### o 해류

개방경계에서 해류에 대한 유속을 부과하기 위해서 제주해협과 대한해협에서 1997년 9월 29~30일 (한국해양연구소, 1997)과 10월 2~3일 (심문보, 1998) 동안 ADCP를 이용하여 수직적으로 8 m 간격으로 25시간동안 4회 왕복 관측된 자료를 이용하였다. ADCP 자료는 ADCP 관측시기에 병행하여 실시한 CTD 관측점 간격 (약 3 mile)마다 공간적으로 평균하고, 다시 25시간동안 시간 평균하여 각 수층 (8 m 간격)에서 유속 및 유향을 계산하였다. 시·공간적으로 평균된 각 층의 유속을 수심 평균하여 제주해협과 대한해협의 단면에서 전체 수송량과 CTD 관측점 마다 수심 평균된 수송량의 분포를 구하였다. ADCP 관측위치와 모델 개방경계는 일치하지 않기 때문에 개방경계를 통해 유·출입되는 총수송량과 수송량의 분포는 관측된 전체 수송량과 수송량 분포가 관측된 결과와 유사한 분포를 갖도록 개방경계에 부여하였다. 각 관측자료에서 서쪽과 동쪽경계에서의 수송량을 결정하였고, 관측자료가 없는 남쪽경계에서의 수송량은 동쪽경계와 서쪽경계에서의 수송량의 차이를 부과하였다. 부과된 수송량은 서쪽, 남쪽에서 각각 0.665 Sv, 1.043 Sv의 총 수송량의 유입이 있고, 동쪽에서 1.708 Sv의 총 수송량이 유출되도록 하였다. Mitta and Ogawa (1984)의 결과는 제주해협과 대한해협에서 각각 0.5, 1.8 Sv을 나타내고 있어 본 연구에 사용된 수송량과 유사한 값을 보인다. 서쪽과 동쪽의 각 개방격자에서는 관측자료를 재현하도록 수송량의 분포를 결정하였으며, 관측자료가 없는 남쪽경계에서 유입되는 총 수송량은 동쪽과 서쪽에서의 수송량 차이를 부과하였고 이때 각 격자에서의 수송량은 Fig. 2-2와 같이 임의로 설정하였다. 부과된 수송량 분포에 대하여 각 격자에서 수심 평균된 유속도 Fig. 2-2에 함께 나타내었다.

#### o 수온과 염분

식 1-5 의 열·염 보존 방정식을 풀기 위해서는 1) 모델내의 모든 격자에 부여되는 초기조건, 2) 개방경계의 전 층에서 시간에 따라 변화하는 경계조건, 3) 해양-대기 경계인 표층에서 시간에 따라 변하는 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 개방경계에서의 해류분포 관측이 실시된 1977년 여름철 남해의 해수순환 재현을 목적으로, KODC (Korea Oceanography Data Center, <http://www.nfrda.re.kr>)에서 제공하는 1997년 8, 10월 수온, 염분관측자료를 사용하였다. 관측된 수온, 염분자료를 모델 격자로 투영시키기 위해 수평적으로 spline 방법을, 수직적으로 선형 내삽

방법을 이용하였다. 초기조건으로 부여되는 모델 영역내 3차원 수온, 염분분포는 8월의 관측값을 사용하여 동일한 방법으로 모델 격자에 투영하였다. 해수면을 통한 해양-대기간 열교환에 의한 수온변화와 증발과 강우에 의한 염분변화는 관측된 수온과 염분자료를 해표면에 직접 부여하는 방법으로 고려하였다. 해표면과 개방경계의 전 층에서 시간 변화하는 수온과 염분분포는 8월부터 10월의 관측자료를 이용하여 매 시간간격마다 선형적으로 변화하도록 하였다.

해수면에서 모델에 부과되는 수온과 염분을 Fig. 2-3에 나타내었다. 8월의 표층수온의 분포는 연안역에서 약 23°C이고 외해역에서 약 25°C를 보여 외해역으로 갈수록 높은 수온을 보인다. 수온전선은 동서방향으로 분포하며 대한해협에서는 수온의 수평구배가 비교적 강하게 나타난다. 표층염분의 분포는 수온과 반대로 연안역에서 약 32 psu로 외해역 (31 psu)보다 높은 염분을 보이고, 수온분포와 마찬가지로 대한해협에서 염분의 수평구배가 강하게 나타나고 있다. 10월의 표층수온분포는 외해역과 연안에서 약 22°C를 보이고, 여수반도 부근의 해역에서 19°C를 나타내고 있으며, 8월보다 수평적인 수온 구배가 강화되었음을 보인다. 표층염분분포는 남쪽경계에서 고염 (33.4 psu)이 나타나고 있으며, 연안 (약 32.8 psu)보다 외해역이 높은 염분값을 보인다. Figures 2-4, 2-5에 개방경계에서 수직적인 수온과 염분분포를 나타내었다. 8월의 수온의 수직분포는 서쪽경계의 저층에서 14°C이하의 저온의 해수와, 동쪽경계의 저층에 10°C이하의 냉수를 나타내고 있으며, 서쪽과 남쪽경계에서 50 m이하에서 수온약층이 나타나고 있다. 염분의 수직분포는 각 개방경계의 50 m이하에서 염분약층이 나타나고 있으며, 남쪽경계의 저층과 대마도 부근 동쪽경계의 저층에서 34.5 psu이상의 고염을 보이고 있다. 10월의 경우 각 개방경계에서 수온약층과 염분약층이 나타나는 수심이 깊어지고 수직적인 수온, 염분구배는 8월에 비해 약화된다.

#### ○ 해상풍

Figures 2-6, 2-7은 Na and Seo (1998)에 의한 남해의 월평균 해상풍 분포를 나타낸다. 자료의 공간적인 해상도는 0.5° × 0.5° 이며, 1978~1995년간의 12시간 간격의 천기도를 이용하여 계산한 해상풍이다. 남해에는 9~3월까지 북풍계열의 바람이 우세하며 최대 풍속은 8 m/s에 달한다. 북풍은 3월경부터 미약해지기 시작하여 4~6월에는 바람이 미약하고 7월부터는 남서풍이 불기 시작하여 8월까지 지속된다. 9월과 10월에는 상대적으로 미약한 북동풍이 불었다가 11~1월에는 강한 북서풍이 그리고 2월에는 북풍이 우세하다. 바람응력을 고려한 실험에서는 Fig. 2-7의 분포를 토대로 남해의 9~10월의 평균적인 바람인 3 m/s의 북동풍을 모델 영역 전

체에 동일하게 부과하였다.

#### 다. 초기조건 및 경계조건 (Initial and boundary conditions)

##### (1) 초기조건

식 1-1~1-5의 지배방정식을 풀기 위한 초기조건으로 유속과 자유해면에 대해서 해수의 운동은 없다고 가정하였고, 수온 및 염분의 초기조건은 밀도분포가 고려된 경우 8월의 관측자료를 초기조건으로 부여하였다.

$$\vec{v}(x, y, \sigma, 0) = 0$$

(1-10)

$$\eta(x, y, 0) = 0$$

##### (2) 수평경계조건

본 연구의 대상 모델영역은 제주해협, 대한해협 및 제주도 동쪽 등 3군데의 개방경계와 남해안의 육지 경계로 이루어져 있다. 육지 경계에서는 육지 경계를 가로지르는 해수 및 열·염플럭스는 없다고 하였으며, no-slip 조건을 이용하였다. 본 연구에 사용된 3차원 모델은 조류, 해류 및 밀도분포를 동시에 고려하므로, 개방경계에서 유속 (순압성분과 3차원 유속성분)과 수온 및 염분, 그리고 자유해면에 대한 개방경계조건을 필요로 한다. 각 변수의 개방경계조건은 다음과 같다.

##### ● 자유해면

자유해면 대한 개방경계조건은 다음과 같은 경사조건을 사용하였다.

$$\eta_B^{n+1} = \eta_{B+1}^{n+1}$$

(1-11)

$\eta_B^{n+1}$  : 개방경계의 반격자 바깥쪽에서 미래 time step의 해수면 위치

##### ● 유속

개방경계를 통한 유속의 순압성분은 해류와 조류성분으로 나눌 수 있다. 해

류성분은 관측된 해수수송량 자료를 이용하여 시간변동 없이 모델 수행기간 동안 일정하게 부과하였고, 조류성분은 개방경계에서 조위를 부과한 3차원 순압 조석모델로부터 구하였다. 해류성분은 각 개방격자에 주어진 관측된 수송량을 고정시킨 후, 매 시간간격마다 부과된 수송량이 유지되도록 면적과 조위를 제거한 수심 (총수심-조위)으로 나누어 구하였다. 개방격자에 부여한 경계에 직각방향의 수심 평균된 유속은 해류와 조류를 더하였고, 접선방향의 수심 평균된 유속은 조류만 부과하였다.

$$U_B = U_T + U_M, \quad V_B = V_T, \quad V_M = 0 \quad (1-12)$$

여기서

$$U_M = \text{Vol} / [\Delta d \times (H + \eta - \eta_T)] \quad (1-13)$$

$$U_T = \sum_{nc} AM_{U_{T_{nc}}} \cos(\sigma_{nc}t - \delta_{U_{T_{nc}}}) \quad (1-14)$$

$$V_T = \sum_{nc} AM_{V_{T_{nc}}} \cos(\sigma_{nc}t - \delta_{V_{T_{nc}}}) \quad (1-15)$$

$U_B$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 직각 방향의 수심평균 유속

$V_B$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 접선 방향의 수심평균 유속

Vol : 각 개방격자에서의 수송량 (Sv)

$\Delta d$  :  $\Delta x$  혹은  $\Delta y$

AMnc : 조류에 대한 각 분조의 반조차

$\sigma_{nc}$  : 조류에 대한 각 분조의 각속도

$\delta_{nc}$  : 조류에 대한 각 분조의 지각

$U_T$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 직각 방향의 수심평균 조류

$V_T$  : 각 경계격자에 부과되는 경계에 접선 방향의 수심평균 조류

Subscript T : 조류성분

M : 해류성분

경계에 수직인 3차원 유속성분은 다음과 같은 Orlanski (1976) 방사조건을 사용하였고, 접선방향의 속도성분은 경사조건을 사용하였다.

$$u_B^{n+1} = [u_B^{n-1}(1 - \mu) + 2\mu u_B^n] / (1 + \mu)$$

(1-16)

$$v_{B+1}^{n+1} = v_{B+1}^{n+1}$$

(1-17)

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{if } C_L \geq 1 \\ C_L & \text{if } 0 < C_L < 1 \\ 0 & \text{if } C_L \leq 0 \end{cases} \quad C_L = u_{B+1}^{n-2} - u_{B+1}^n$$

n, n+1, n-1 : 현재, 미래, 과거 time step

● 수온과 염분

수온과 염분에 대한 개방경계에서 각 층에 부과되는 수온과 염분은 3차원 유속이 모델 내부로 유입되는 방향일 때는 관측값을, 유출되는 방향일 때는 모델 내부에서 계산된 값을 사용하여 경계에서 수온과 염분을 계산하는 다음과 같은 upstream advection scheme을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_n \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

(1-19)

여기서

$\phi$  : 수온, 염분

$u_n$  : 각 개방경계에 수직한 3차원 유속성분

(3) 수직경계조건

● 해표면 경계조건

해표면에서 ( $\sigma=0$ ) 유속의 수직 성분과 바람응력은 없고, 열·염 플럭스는 관측된 표층수온, 염분값을 직접 부과하는 방법으로 고려하였다.

$$\rho_0 \frac{K_M}{D} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^w, \tau_y^w)$$

(1-20)

$$\frac{K_H}{D} \left( \frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = (T_{ob}, S_{ob})$$

(1-21)

$$\omega(0) = 0$$

(1-22)

여기서  $\tau_x^w(x, y, t)$ ,  $\tau_y^w(x, y, t)$ 은 해표면에서의 바람응력을,  $T_{ob}$  및  $S_{ob}$ 는 표층 수온과 염분을 나타낸다.

● 해저면 경계조건

해저면에서 ( $\sigma = -1$ ) 유속의 수직 성분은 없고, 해저경계에서 마찰항은 유속의 제곱에 비례한다는 quadratic law를 사용하였다.

$$\frac{K_M}{D} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x^b, \tau_y^b) = C_D [u^2 + v^2]^{1/2} (u, v)$$

(1-23)

$$\frac{K_H}{D} \left( \frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = (0, 0) \tag{1-24}$$

$$\omega(-1) = 0 \tag{1-25}$$

여기서

$u, v$  : 해저경계층 ( $\sigma' = -0.9167$ )에서의 유속

$$C_D = \left[ \frac{k^2}{[\ln((1 + \sigma_{kb-1})H/z_0)^2]} \right]: \text{바닥마찰계수}$$

$k$  = von Karman 상수 = 0.4

$z_0$  = bottom roughness height

해저면 마찰계수 (CD)는 bottom roughness height를 이용해서 표현하였고,  $z_0$ 가 증가하면 바닥에서 느끼는 마찰의 세기는 증가하고 감소를 하면 바닥에서 느끼는 마찰의 세기도 감소하게 된다. 본 연구에서는  $z_0$  값을 0.05 cm를 사용하였고, 이때 해저면 마찰계수는 약 0.002~0.005의 범위를 갖는다. 서쪽 개방경계에서의 경계조건과 초기조건을 Table 2-1에 정리하였고, 개방경계 부근에서의 중요 변수의 위치는 Fig. 2-8에 나타내었다.

### 5. 모델의 적용 (Application of the model)

수치모델은 시간에 따라 변하는 조류와 1997년 가을철에 관측된 고정된 해

수의 유·출입을 개방경계에 부과하고, 8월과 10월의 관측자료에 근거한 시간에 따라 변하는 수온과 염분을 해표면과 개방경계에 부과하여 강제하여, 총 92일 동안 모델을 구동하였다 (Fig. 2-9). 개방경계에서 필요로 하는 조류는 5개 주요 분조의 조위와 지각을 개방경계에 부과하는 3차원 순압조석모델을 이용하여 계산된 결과를 이용하였다. 모델내부는 초기상태에 운동이 없고 자유해면을 0으로 가정하였으며, 모델 구동 후 10일간은 8월에 관측된 3차원 수온, 염분 분포와 개방경계에서의 조류와 해수 유·출입을 부과하여 진단적 계산을 수행하였다. 진단적 계산 후 82일간은 8월과 10월에 관측된 표층과 개방경계에서의 수온, 염분분포를 부과하여 예단모델을 수행하였다. 8월과 10월의 관측결과를 토대로 8월 15일부터 10월 15일까지는 선형적으로 내삽된 시간에 따라 변하는 수온, 염분분포를 해표면과 개방경계에 부과하였고, 8월 15일 이전과 10월 15일 이후의 예단모델 구동에서는 8월과 10월의 관측된 값으로 고정하였다. 조석이 제거된 남해의 8~10월의 순환을 분석하기 위하여 모델 결과는 각 월에 계산된 결과를 15일간 평균하였으며, 평균한 기간은 Fig. 2-9에 표시하였다. 식 (1-26)으로 정의한 총 운동에너지의 15일 이동평균값은 약 15일이 지난 후에 모델영역 내 운동이 평형상태에 이르는 것을 보여준다 (Fig. 2-10).

$$TKE = \sum \frac{1}{2} \rho_0 (u^2 + v^2) \Delta x \Delta y \Delta z$$

(1-26)

u, v : 3차원 유속

$\rho_0$  : 평균밀도

$\Delta z$  : 수층의 두께

TKE : 총 운동에너지

바람은 전체 모델 구동 기간동안 연속적으로 부과하지 않고, 바람에 의한 spin-up, spin-down 함께 바람이 없는 기간과 바람이 있는 기간 중 평형상태의 순환을 비교하기 위하여 바람이 없는 상태에서 모델 구동을 시작하여 특정 기간에 바람을 부과하였다가 다시 바람의 효과를 없애는 형태로 부과하였다 (Fig. 2-11).



## 제 3 절 적조모델

### 1. 문제의 제기

적조모델에서는 특히 다음과 같은 문제를 다루고자 하였다.

- 포자에서 발아된 개체가 표층으로 올라 오는 과정에 있어 해류장이 어떠한 영향을 미치는가?
- 적조생물의 성장율이 양이라고 할 때 남해의 해양 물리적 환경 하에서 적조가 형성될 수 있는 조건은 무엇인가?
- 적조의 공간적 발달에 있어 해류장은 어떠한 영향을 미치는가?
- 적조 사건의 확산과정의 재현이 가능한가?

### 2. 기본 가설

본 연구에서는 와편모 조류와 같은 생활사를 가지는 적조 생물을 주 대상으로 삼았으며 이러한 생물에 의해 적조가 발생하는 과정을 크게 2 가지로 보았다. 적조생물이 유성생식 후 포자를 형성하고 가라앉았다가 일정한 시간 후에 발아하여 표층으로 떠 올라 오는 과정과 그 후에 증식하는 과정이 그것이다. 다시 말하면 적조가 발생하기 위해서는,

- 1) 저질에 가라 앉아 있던 포자가 표층으로 올라 올수 있어야 하고,
- 2) 개체군의 성장율이 양을 유지 하여야 하고,
- 3) 대류나 수직 확산과 같은 매질의 움직임에 반하여 대상 해역의 표층에 머물러 있어야 한다.

본 연구에서는 이러한 과정을 2 개의 모델로 다루었다 (그림 2-12). 포자의 상승은

model I에서 다루고 표층에서의 적조생물의 확산과 이동은 model II에서 다루었다. Model I에서는 포자가 상승하는 과정을 다루기 위하여 각각 9 개의 해류장 층에서의 이동을 계산하였다. Model II에서는 표층에서의 수평적 이동을 다루었고 여기에는 증식도 포함되었다.

### 3. 가정

모델의 구성에 있어 다음과 같은 가정을 하였다.

- 적조생물 (와편모류)의 성장률은 표층의 영양염 농도에 의해 제한되지 않는다. 암흡수 (dark consumption)을 가정한다.
- 한 적조 사건의 초기 발생기간 동안 사망률은 일정하다
- 세포의 분열은 동기화 (synchronization) 되어 일어난다.

### 4. 포자 나 세포의 이동

물리 모델에서 계산된 해류장을 사용하여 적조생물 개체나 포자의 이동이나 증식을 Lagrangian ensemble model을 써서 추적하였다. 각 세포의 위치를 매 30분마다 계산하였다. 각 세포는 일정 시간 후에 분열 증식하고 새 세포도 개체군에 포함되어 위치추적에 포함되었다. 세포의 움직임은 다음 식에 의하였다.

$$X_{n+1} = X_n + U \nabla t + \gamma \sqrt{2 \nabla t D}$$

$X_n$ : Position of a cell ( $x_n, y_n$ )

$U_n$ : Current field ( $u_n, v_n$ )

$T$ : random normal deviate

$D$ : Diffusivity

즉, 각 세포의 다음 단위시간 스텝의 위치는 유속과 확산에 의한 random walk에 의해 결정된다.

## 5. 모델 시행

### 가. 해류장 시나리오

표층의 바람 조건에 따라 5가지의 3차원 해류장을 구성하고 각 해류장에서의 세포의 이동과 확산에 대해 실험하였다 (Fig. 2-13). 각각의 해류장 시나리오는 다음과 같다.

- 시나리오 1. 표층 바람장이 없는 경우의 해류장
- 시나리오 2. 바람이 점진적으로 강해지는 경우의 해류장
- 시나리오 3. 강해진 바람이 지속적으로 작용하는 경우의 해류장
- 시나리오 4. 바람이 점진적으로 감소하는 경우의 해류장
- 시나리오 5. 생성되었던 바람이 모두 없어진 후의 해류장.

위의 다섯 가지 해류장에서 각 포자의 증식 및 이동을 추적하였다. 포자의 이동 추적 원리는 Fig. 2-14에 나타 나있으며, 주변 해류장이 일정한 방향으로 형성되어 있을 때와 여러 방향으로 형성되어 있을 때 서로 다른 양상으로 이동한다. 이러한 추적 원리는 수직이동을 포함한 3차원 공간에서도 같은 방법으로 적용된다. Fig. 2-15는 수심에 따라 나누어진 8개의 층으로 이루어진 해류장에서의 포자의 이동 추적 원리이다. 이러한 원리와 시나리오를 이용해서 포자의 이동을 추적하였다.

### 나. Model I

#### (1) 포자 침강 경로 모의 실험

포자는 유영능력이 없으므로 해류에 의해서 이동하게 된다. 포자가 가라앉지 않은 상태에서는 포식될 확율이 높다. 특히 *Cochlodinium*과 같은 종은 번성 후 다음 해에 다시 증식을 하기까지 상당한 시간이 걸리므로 포자가 침강하여 일정기간 동안 저질에서 동면하는 것으로 알려져 있다. 표층에서 형성된 포자는 초기 위치에 따라 바닥까지 가라앉던지 해류를 타고 외해로 밀려나게 된다. 밀려나지 않은 포자 중 일부는 중층에 떠 있을 수도 있으나 장기간 생존하기는 어려울 것이다.

포자 침강 위치를 모의 실험 하기 위해 대상 해역의 표층에 일정한 간격으로 총 3640 포자를 준비하였다. 준비된 포자를 앞에서 제시한 다섯 가지 시나리오의 해류장에서 각각 Lagrangian ensemble model 을 사용하여 모의 시간 30일 동안 포자의 위치를 추적하였다.

## (2) 포자 발아 후 경로 실험

앞에서 각 시나리오에서 바닥에 가라앉은 포자를 상승속도 mean 1063 ( $\pm 84$ ), max 1449  $\mu\text{m/s}$  (정 등, 1998) 을 주어 표층으로 상승하게 하였다. 역시 해류장이나 발아 위치에 따라 표층으로 올라올 수도 있고 올라오지 못한 채 외해로 떠내려갈 수도 있으므로 발아 위치는 적조 발생에 있어 중요한 요인이라고 생각된다. 모의 발아 후에 표층에 올라올 때까지 세포분열은 하지 않는 것으로 보았으며, 모의 시간은 3일 이내로 하였다.

## (3) 적조의 확산과 이동 (표층에서의 증식)

(1), (2) 과정을 거쳐 성공적으로 표층으로 올라온 개체가 증식을 하고 개체군 성장률이 양일 때 해류장과 초기위치에 따라 해역 내에서의 적조 형성 여부와 확산 경로가 달라지게 된다. (1)-(2) 의 모의 실험 결과 발아한 개체가 올라온 위치에서 이러한 확산 경로를 추적하였다. 이 때 각 실험마다 한 쌍의 성장률과 사망률이 선정되었으며 전부 12 개의 조합에 대해 실험이 실행되었다. 각각의 위치에서 하루나 더 작은 시간 간격으로 주어진 사망율에 의해 세포를 제거하고 살아남은 세포에 대해 성장률에 따라 증식을 시켰다.

세포 분열에 의한 증식은 Monte Carlo법을 써서 계산하였다. 성장률을 다음의 식을 이용하여 하루의 분열 확율로 치환한 다음, 살아남은 세포 들 중 난수에 의해

분열할 개체를 선택하여 복제하였다.

$$p = e^r - 1.0 \quad (r = \text{exponential growth rate per day})$$

소멸 역시 하루 단위로 Monte Carlo법을 써서 계산하였다. 주어진 사망률에 대해 난수를 선택하여 소멸할 개체를 선정하여 제거하였다.

많은 수의 개체가 새로 만들어 지지만 (30일 동안  $10^7$  개 이상), 많은 수가 소멸되기 때문에 한 시점에서 살아있는 세포의 수는  $10^4$  order에 불과하다. 따라서 array를 쓰는 것은 계산상 비효율적이므로 linked list를 써서 시뮬레이션을 시행하였다.

## 6. 개체군 모델과 매개변수

개체군 변동은 증식률과 소멸율, 두 개의 매개변수를 포함하는 discrete model로 기술하였다.

$$N_{t+1} = N_t (1+p)(1-m)$$

여기서 p는 증가한 비율 (즉 개체군 중에서 2분법에 의해 분열한 비율)이고 m은 사망율이다.

증식율은 최근에 들어 발생 빈도가 증가하고 있는 적조생물인 *Cochlodinium polykroides*에 대한 배양실험의 결과로 발표된 자료 (수산진흥원, 1998)에서 계산되었다. 15, 20, 25, 30 의 수온과 18, 21, 24, 27, 30 psu의 염분에 각각 측정된 성장 곡선에 (Fig. 2-16) 대해 지수성장계수를 적합화하여 성장계수를 구하였다 (표 2-3).

와편모조류는 영양생식과 유성생식의 세대교번을 포함하는 복잡한 생활사를 가진다. 영양번식은 일일 광주기와 관련이 있는 경우가 많다. 많은 종에서 세포분열은 밤에 일어나는 것으로 알려져 있다 (Lipps, 1993). 본 실험에서는 세포분열이 광주기에 동기화 (synchronized) 되어 하루에 한번 분열하는 것으로 하였다. 그러나 모든 세포가 분열하는 것은 아니며 성장률의 증가에 따라 분열을 일으키는 세포의 비율이 증가하는 것으로 하였다.

## 제 4 절 순환모델결과

### 1. 바람응력을 고려하지 않은 경우 (No wind case)

바람응력을 고려하지 않았을 경우의 모델결과를 분석하였다. 모델결과의 분석을 위하여 표층, 중층 및 저층에서의 해류장과 해수특성을 도시화하였는데, 표층, 중층 및 저층은 각각 layer 1, layer 5, layer 8을 나타낸다.

#### o 조석

모델영역 내 37개 지점 (Fig. 2-1 참조)에서 관측된 해수면 자료를 조화분해하여 얻어진 조화상수와 모델결과를 조화분해 하여 얻어진 조화상수를 비교하였다 (Fig. 2-17). 모델 결과의 정확도를 정량적으로 살펴보기 위하여 절대 상대오차 (absolute relative error : ARE)와 평균오차 (mean error :ME)를 계산하였다.

$$ARE(\%) = \frac{|O_i - C_i|}{O_i} \times 100$$

$$ME = C_i - O_i$$

여기서

$O_i$  : 관측자료

$C_i$  : 모델결과

ARE는 모델결과의 절대적 크기가 관측자료에 비하여 얼마나 어긋났는지에 대한 척도를 백분율로 표현한 것이므로, 그 값이 작을수록 모델 결과가 관측 자료를 절대적인 크기면에서 잘 재현한다는 것을 의미한다. ME는 모델결과의 방향성이 관측자료와 얼마나 어긋났는지에 대한 척도로써, 양 (+)의 값은 모델결과가 관측자료보다 크게 계산된 것이고 (overpredict), 음 (-)의 값은 모델이 관측자료를 작게 재현한 것이다 (underpredict).  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조의 반조차에 대한 절대상대오차의 평균은 각각 8.9%, 7.9%, 19.1%, 13.6% 이고, 평균오차는 각각 3.2 cm, 1.7 cm, 2.4 cm, -1.59 cm 이다. 지각에 대한 평균오차는 각각  $3.4^\circ$ ,  $6.2^\circ$ ,  $3.0^\circ$ ,  $-11.9^\circ$  이다.  $M_2$ 와  $S_2$  분조의 경우 반조차와 지각이 관측치를 잘 재현하고 있다.  $K_1$ 분조의 경우 지각은 잘 일치하나 반조차는 다소 크게 계산되었고,  $O_1$ 분조의 경우 반조차와 지각이 다소 작게 계산되었다.  $K_1$ 과  $O_1$ 의 오차는 대부분 동쪽해역에서 크게 나타나고 있다.

모델경계 부근에 존재하는  $K_1$ 과  $O_1$ 의 무조점 (Odamaki, 1989)으로 인하여 개방경계에서 조위에 대한 경계값을 구하는데 어려움이 있고, 이 과정에서 생기는 오차로 인해  $K_1$ ,  $O_1$ 이 다소 큰 오차를 보이고 있는 것으로 사료된다.  $K_1$ ,  $O_1$ 의 반조차가 조석의 4개분조에서 차지하고 있는 역할이 각각 약 11%와 9%로 조석의 진폭과 전파양상에 크게 영향을 끼치지 않으므로, 모델결과는 모델영역 전반에 걸쳐 조석의 진폭과 전파양상을 잘 재현하고 있음을 나타낸다.

Figures 2-18, 2-19는 부산을 기준으로 최강 낙조시와 최강 창조시의 조류와 해류가 모두 포함된 순간적인 흐름장을 나타내며, 해역별로 제주해협부근, 남해 중앙부, 대한해협부근으로 구분되어 창, 낙조시의 해수유동이 다른 것을 알 수 있다. 낙조시 표층 유속분포는 외해역의 경우 거문도를 경계로 동쪽해역에서는 북동향류가 우세하고, 제주해협에서 반시계 방향의 흐름이 나타난다. 거문도 남쪽에서 남동향류가 우세하며, 여수반도 서쪽해역에서는 서향류를 보인다. 중층에서는 제주해협에서 나타나는 서향류를 제외하고 대부분 북동향류가 나타나며, 거문도 남쪽에서 표층과 같은 남동류가 나타나고 있다. 저층에서는 제주해협부근의 해역에서 북서향류가 나타나고, 남해 중앙부와 대한해협부근 해역에서 대부분의 해수는 북동향류를 나타낸다 (Fig. 2-18). 창조시 외해역의 표층 유속분포를 살펴보면, 제주해협에서 비교적 강한 남동향류가 제주도 연안을 따라 남향한다. 남해 중앙부에서는 남쪽 경계에서 유입된 북향류가 연안까지는 미치지 못하고 수심 80 m 부근에서 북동향하며, 대한해협부근의 연안역에서 남서향류가, 대한해협 끝 부근에서는 북동향류가 나타난다. 연안역의 표층유속분포의 경우, 제주해협부근 해역에서 동향류가, 남해 중앙부와 대한해협부근 해역에서 대부분 서향류가 나타나고 있다. 중층에서는 표층 흐름과 비슷한 양상을 보이고, 저층에서는 제주해협부근에서 비교적 강하게 동향류가, 대한해협부근에서 서향류가 나타나며, 남해 중앙부에서는 연안역으로 향하는 흐름이 나타난다 (Fig. 2-19).

#### o 해류

9월의 모델결과를 15일 동안 평균하여 표층, 중층 및 저층에서의 조석이 제거된 해류분포를 살펴보았다 (Fig. 2-20). 3차원 모델결과는 표층과 저층에서의 해류분포가 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 표층에서의 해류분포 (Fig. 2-20a)는 약 5~20 cm/s의 크기로 주로 외해역으로 유출되는 연안역의 해류와 약 25~85 cm/s의 크기로 북동향하는 외양역의 해류가 80 m 등수심선을 따라 구별되고 있음을 보인다. 서쪽경계에서 유입되는 해수는 대부분 제주해협의 끝에 치우치고, 남쪽 경계를 통해 유입되는 해수와 함께 강한 흐름을 형성한다. 수심이 80 m 보다 깊은

해역에서 북동향하는 해류는 대마도 서쪽 해안을 따라 대한해협 골에 집중되어 동해로 유출되는 양상을 보인다. 계산된 표층에서의 밀도분포 (Fig. 2-23a)에 의하면 연안역이 외해역보다 높은 밀도를 보이고 수심 80 m인 해역에서 수평적인 밀도 구배가 크게 나타나고 있어, 강한 표층의 해류가 등밀도선을 따라 형성됨을 알 수 있다. 비교적 강한 해류는 밀도전선의 남쪽에 위치하고 있으며, 수평적인 밀도 구배가 가장 크게 나타나는 대한해협에서 가장 강한 표층 유속을 나타내고 있다. 모델에 의해 계산된 남해 중앙부에서의 흐름과 대한해협에서 강한 흐름이 형성되는 양상은 인공위성추적 뜰개 자료로부터 계산된 표층 유속분포 (Lie and Cho, 1997, Fig. 2-21a)와 유사하며, 제주해협을 통해 유입되는 해수가 제주해협의 골에 치우치는 양상과 여수반도 동쪽해역에서 나타나는 서향류의 위치 및 제주도 동쪽연안의 남향류는 해류계를 사용한 관측자료 (Mitta and Ogawa, 1984, Fig. 2-21b)와 일치하고 있어 전반적으로 모델결과는 남해의 해수순환 형태를 잘 표현하고 있다.

중층의 유속분포 (Fig. 2-20b)는 표층의 유속분포와 유사한 양상을 보이고 있으나, 연안역과 외해역에서 유속의 차이는 크지 않고, 연안역에서 외해역으로 유출되는 표층의 분포와는 달리 전반적으로 북동향류를 보인다. 유속의 크기는 연안역에서 10 cm/s 이하이고, 외해역에서 약 20~50 cm/s 의 크기를 보여 표층보다 약 40% 작게 나타난다.

저층에서 유속분포 (Fig. 2-20c)는 전반적으로 연안을 향하는 북향류가 나타나고 있어 표층 및 중층의 유속분포와는 상이한 양상을 보이고 있다. 서쪽경계에서 유입되는 해수는 제주해협을 통과한 후 연안역으로 향하는 북향류를 보이고, 남쪽경계에서 유입되는 대부분의 해수는 5~15 cm/s의 크기로 연안을 향한다. 급격한 수심을 갖는 대한해협의 골에서는 남해로 유입되는 저층수가 나타나고 있다. 저층에서 밀도의 분포 (Fig. 2-23c)는 저층 유속의 분포양상과 일치함을 보이고, 대부분의 해역에 고밀도( $> 25\sigma_t$ )의 저층수가 나타나고 있으며, 연안역에서 밀도구배가 크게 나타나고 있다. 저층 순환의 양상은 외나로도 서쪽해역에서는 제주해협을 통한 제주해류의 영향을 받고, 동쪽해역에서는 제주도-대마도 사이를 통과하는 대마난류의 영향을 받고 있음을 나타낸다.

남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 2-1참조)에서의 수평 해류벡터의 수직적인 분포는 수심의 경사가 큰 곳을 경계로 유속의 방향과 크기가 달라짐을 보인다 (Fig. 2-22). 15일 평균한 유속의 경우 외해역에서는 바닥층을 제외하고 전 층이 같은 유속과 유향을 보이는 반면, 수심이 얇은 연안역에서는 저층으로 갈수록 반시계 방향으로 유향이 바뀐다. 외해역에서는 최강 낙조시 (부산을 기준으로)와 최강 창조시의 유속이 큰 차이를 보이지 않지만, 수심이 80 m 보다 얇은 연안역에서는 낙조시 표



층 및 중층은 동향류를 나타내고, 창조시 표층은 남향류, 중층은 남동향류를 나타내고 있다. 저층에서 연안역을 향하는 외해역의 해수는 창조시보다 낙조시에 강한 유속을 보인다.

#### o 수온 및 염분

KODC의 1997년 8월에 관측된 수온, 염분자료와 모델 결과 중 8월에 해당하는 기간에 15일 평균한 모델 결과를 50 m층에서 비교하였다 (Fig. 2-24). 수온의 경우 수심이 80 m보다 얇은 해역에서의 모델 결과는 관측값 보다 다소 높게 나타나고, 수심이 80 m보다 깊은 해역에서는 모델결과가 관측값에 비해 다소 낮게 나타난다. 관측된 염분분포에 의하면 제주해협에서 34.0 psu 미만으로 가장 저염을 보이며, 남해 중앙부를 따라 저염분 ( $34.0 < S < 34.2$ )의 belt가 나타나고 저염분 belt의 북쪽인 남해 연안역과 남쪽에 분포하는 해수는 상대적으로 염분이 높다. 모델결과 역시 제주해협을 통해 유입되는 저염수에 의한 저염의 belt 구조를 보이고 있으며, 관측결과에서 대마도 서쪽에 나타나는 34.0 psu 미만의 저염수의 존재도 모델에서 잘 나타나고 있다. 남해 연안역의 고염의 해수 ( $S > 34.2$ )는 관측된 분포에 비해 큰 영역에 걸쳐 나타난다. 순환모델 결과에 의하면 남해 연안역 50 m 층에서 나타나는 고염의 해수는 제주도-대마도간에 분포하는 고염의 해수가 저층을 통해 공급되는 것으로 사료된다 (Fig. 2-26).

모델에 의해 계산된 수온의 분포에 의하면 등온선이 해안선을 따라 평행하게 분포하고, 대한해협에서는 수온의 수평적인 구배가 강하게 나타난다 (Fig. 2-25). 9월의 표층 수온은 8월보다 약 2°C 낮고, 9월로 갈수록 남쪽해역과 북쪽해역의 수온 차이가 크게 나타난다. 저층에서는 고온의 대마난류수가 대부분은 차지하고 있으며 연안과 대한해협에서 수온의 변화가 크게 나타나고 있다. 염분의 경우 9월의 표층염분이 8월보다 약 0.5 psu 증가하고 있다. 저층에서는 34.5 psu 이상의 고염이 남쪽을 통해 남해 연안역까지 유입되고 있으며, 9월로 갈수록 남쪽의 고염수의 염분이 증가한다 (Fig. 2-26).

3차원 모델로부터 재현된 남해의 해수순환은 저층에서 연안역으로 유입되는 해수가 표층에서 외해쪽으로 유출되고, 외해역인 80 m이하의 수심에서 북동향류가 나타나며, 대한해협에서 유속이 강화되어 동해로 유출되는 양상을 보인다.

## 2. 바람의 영향 (Wind effects)

해표면 바람응력이 남해의 3차원 순환에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공간적으로 일정한 바람응력을 부과할 경우 해수순환을 모의하였다. 바람응력을 고려한 실험에서 (Table 2-1의 Case 2) 초기조건과 경계조건은 바람을 고려치 않았을 경우와 (Table 2-1의 Case 1) 동일하며, 순환의 바람응력에 대한 반응을 살펴보기 위하여 바람은 전체 모델 구동 기간 중 적조가 빈발하는 9월에 적용하였다 (Fig. 2-11). 초기조건으로부터 35일간은 바람을 고려하지 않고 모델을 구동하였으며, 바람응력은 35~40일 사이의 5일간에 최대 진폭에 이르도록 하여 이후 10일간은 일정한 바람을 지속시켰으며 다시 5일간에 걸쳐 진폭을 선형적으로 감소시켜 55일 이후에는 바람응력이 없어지도록 하였다. 모델 구동 중 표층과 개방경계에서의 수온, 염분은 Table 2-1의 Case 1과 동일하게 관측된 값에 따라 변화하며, 개방경계에서의 수송량은 일정하게 유지되도록 하였다. 바람응력을 고려한 수치실험은 두 경우를 살펴보았는데, 첫 번째 실험에서는 남해 누년 평균된 9월의 해상풍 분포를 근거로 (Fig. 2-7) 3 m/s의 북동풍을 전 모델 영역에 걸쳐 일정하게 부과하였고, 9월에 빈발하는 태풍의 영향을 살펴보기 위하여 두 번째 실험에서는 최대 풍속을 임의로 10 m/s로 증가시켜 그 영향을 고찰하였다. 조석 강제력이 포함된 모델 결과는 조석효과를 제거하기 위하여 25시간 평균한 후 모델 영역 내 남해도 남쪽의 남북단면 (Fig. 2-1 참조)에서의 시간에 따른 층별 일평균 유속분포 (Figures. 2-27, 28, 30, 31) 및 표층에서의 일평균 해류분포 (Figures. 2-29, 32)를 살펴보았다.

#### 가. 평균 바람장을 부과한 경우 (Case for the climatological mean wind)

Figures 2-27, 2-28은 3 m/s의 북동풍을 고려한 경우 남해도 남쪽 단면에서의 층별 일평균 유속분포의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 북동풍은 북서쪽에서의 Ekman 수송을 유발하므로 동서방향의 유속은 감소시키고 남북방향의 유속은 증가시킬 것으로 사료된다. 그림에서 바람을 부과하기 시작한 5일째부터 최대 진폭에 이르는 10일까지 연안역으로부터 (Y=30) 남쪽으로 약 30 km (Y=20)까지 표층에서 서향의 흐름이 나타남을 알 수 있고 10 cm/s보다 강한 서향류는 바람이 최대 진폭으로 일정하게 유지되는 기간 중 (10~20일) 연안역에 국한되어 나타난다. 남북 방향의 유속분포는 10~18일에 걸쳐 연안역 근처에서 북향류 대신 유속이 10 cm/s 이상인 남향류가 나타나는데 이는 해안선 및 해저지형의 영향 때문인 것으로 사료된다 (Fig. 2-29 참조). 바람이 약해지기 시작하는 20~25일 사이에는 표층에서의 서향류가 나타나는 범위가 줄어든다. 평균적인 바람장을 부과한 경우 바람의 효과는 표층에 국한되어 나타나며 10 m층보다 깊은 곳에서는 바람의 영향이 거의 나타

나지 않는다. 수평적으로는 수심이 얇은 (< 40 m) 연안역에서 가장 영향이 크며 연안으로부터 약 30 km 떨어진 수심 60 m 미만인 해역의 표층까지 그 영향이 나타난다. 표층에서의 일평균 해류분포는 바람이 최대 진폭에 달했을 때 연안역에 발달하는 서향류의 분포를 잘 보여준다 (Fig. 2-29).

#### 나. 강한 바람을 부과한 경우 (Case for a strong wind)

Figures 2-30, 31은 인위적으로 10 m/s의 강한 북동풍을 부과하였을 경우 남해도 남쪽 단면에서의 층별 일평균 유속분포의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 강한 바람을 부과한 경우 표층에서 최대 서향류는 연안역에서 약 10 km 떨어진 곳에 나타나고, 바람이 불기 시작한 초기 5~15일 사이에는 평균 바람을 부과했을 때 보다 표층에서 보다 외해역까지 바람의 영향이 나타난다. 수직적으로는 수심 20 m까지 그 영향이 나타나고, 수심이 깊어질수록 바람의 영향이 다소 지연되는 경향을 보인다. 표층에서의 해류분포는 연안역에 형성되는 강한 서향류의 분포 및 남해 중앙부 해류의 주축이 바람이 없을 때에 비해 북동향으로 바뀌는 것을 보여 준다 (Fig. 2-32).

## 제 5 절 적조모델 결과

### 1. 포자의 침강과 상승 (Model I)

Model I 중 침강 과정의 시행 결과는 Fig. 2-33과 같다. 포자가 침강되는 지역은 바람장 시나리오에 상관없이 대체로 일치한다. 그러나 Case III의 경우는 표층에서 바람이 지속적으로 불고 있는 상태로 다른 4가지에 경우에 비해 많은 양의 포자가 형성되었다. Case I (Fig. 2-33b)의 경우는 초기 표층에 준비된 포자의 6% 정도가 바닥에 가라 앉았으며, Case II (Fig. 2-33c)의 경우는 12%, Case III (Fig. 2-33d)의 경우는 16%, Case IV (Fig. 2-33e)의 경우는 12% 그리고 Case V (Fig. 2-33f)의 경우는 11%가 바닥에 가라 앉았다. Case I과 V는 둘 다 바람이 없는 상태이나 바람 생성 이전과 이후의 차이를 보이고 있다.

침강된 포자가 발아하여 상승하는 과정에 대한 결과는 Fig. 2-34와 같으며 여기서 일정하게 분포된 작은 점은 침강과정 모의실험에서의 초기 위치를 (Fig. 2-33) 표시하기 위한 것이다. 발아된 포자가 표층으로 올라올 수 있는 해역도 바람장 시나리오에 상관없이 대체로 유사하다. 즉, 유속이 줄어드는 해안 가까이에 밀집하게 된다. 포자가 침강하거나 상승의 확률이 높은 해역은 바람의 유무에 상관 없이 일정하다는 것은 본 모델의 결과가 강건함 (robust)을 보여준다.

이 결과들은 침강이나 상승은 지형 영향을 받은 해류장의 수직 속도 성분으로 설명이 됨을 보여주고 있다. 결과적으로 포자가 가라 앉고 다시 상승하는 확률은 연안역에서 특히 높다. 포자의 상승이나 침강이 적조 발생의 충분조건은 아니겠지만 필요조건이라고 가정할 때 Model I의 결과는 연안역에서 적조가 빈발하는 이유를 잘 설명 하고 있다.

### 2. 적조의 확산 과정 (Model II)

Model II에서는 포자에서 발아하여 표층으로 올라온 세포가 증식을 할 때 확산의 추이를 추적하였다. 이 실험의 결과는 성장률, 사망률, 초기위치에 의해 달라지게 된다. 이 실험에서는 여러 지점의 초기위치에서 다양한 성장률-사망률 조합에 대하여 확산 실험을 하였다. 초기위치는 Model I에서 얻어진 위치, 즉, 포자가 침강이 잘되고 바닥에서 표층까지 올라올 확률이 가장 높은 위치들을 택하였다. 아래에서는 이 실험들 중 특징적인 몇가지 결과 만 실었다. 30일 동안의 경과에서 5

일 간격마다의 분포를 그림으로 나타내었다.

Fig. 2-35는 보길도 서쪽에서 증식을 시작한 경우이다. 사망률-성장율이 [0.300, 0.350]이다. Fig. 2-36은 같은 위치에서 한 실험이지만 사망률-성장율이 [0.350, 0.650]으로 성장률이 높은 경우이다. 외나로도 부근과 해남반도-고흥반도 사이의 해역에 크게 확산된다. Fig. 2-35와 특히 다른 것은 해남-고흥 해역에도 퍼진다는 것이다. Fig. 2-37은 사망률-성장율이 [0.400, 0.600]으로 앞의 경우보다 사망률이 높은 상황이다. 확산 형태는 Fig. 2-36과 유사하나 확산속도가 더 낮다. 그림 2-36에서는 확산속도가 커서 15일 까지의 결과만 실었으나 Fig. 2-37에서는 30일 까지의 확산 형태를 실었다. 15일이 지난 후에는 소리도에서 동진하여 거제도 남단 해역까지 확산되고 있다.

Fig. 2-38은 보길도 동쪽에서 시작한 경우이다. Fig. 2-35와 근접한 해역이고 사망률-성장율도 동일하여 확산 유형도 거의 같으나 확산 속도가 약간 빠르다. 고흥반도 남쪽으로 퍼지고 15일 후에는 소리도-욕지도 해역에 확산되어 계속 확대되고 있다. 이 유형은 1998년 8월 말에 있었던 *Cochlodinium* 적조사건과 매우 유사하다.

Fig. 2-39는 위와 동일한 위치에서 시작하였으나 성장률을  $0.650 \text{ day}^{-1}$ 로 높인 경우이다. 같은 사망률-성장율 값으로 시행한 그림 2-36과 달리 해남-고흥 해역보다는 외나로도-소리도-욕지도 해역에 집중적으로 발달한다.

Fig. 2-40에서는 Fig. 2-39에 비하여 사망률이 높으며 그 결과 적조가 소리도-욕지도-거제도 남단해역에 집중적으로 확산됨을 보여준다. Fig. 2-41은 거문도에서 시작한 경우로 처음부터 소리도-욕지도 해역에서 번성하여 거제도 남단과 동쪽으로 확산한다.

Fig. 2-42는 욕지도 동쪽해역에서 시작하여 거제도에서 부산 앞까지 확산하고 있다. 또한 서쪽으로도 일부 확산하여 소리도 쪽으로 퍼진다. Fig. 2-43은 사량도 해역에서 시작한 경우로 사량도 해역에서 시작한 경우로 사량도-거제도-부산 해역으로 확산하고 있으며 95년 적조 사건과 유사한 양상을 보이고 있다.

## 제 6 절 고찰 및 결론

### 1. 순환모델

적조가 빈발하는 남해의 여름철과 가을철 해수순환을 이해하고 적조생물의 이동과 확산 예측을 위한 물리-생물 접합모델 개발의 일환으로 조석강제력, 개방경계를 통한 유·출입, 해표면에서의 열·염 플럭스 및 바람에 의해 유발되는 남해의 여름철 3차원 해수순환을 재현하였다. 조류에 대한 경계조건은 개방경계에서 조위를 설정하여 구성한 조석모델로부터 조류를 계산한 후 개방경계에서 조류에 대한 조화상수 값을 부과하였다. 조류와 함께 제주해협과 대한해협에서 관측된 1997년 9월의 일평균 해류분포를 이용하여 개방경계를 통해 유·출입되는 해수의 수송량을 개방경계에 부과하였고, 관측된 자료를 근간으로 해표면과 개방경계에서 열·염 플럭스 및 가을철 평균 바람용력을 부과하여 제반 강제력에 의해 유도되는 순환모델을 구성하였다.

순환모델의 결과 중 계산된 조석 조화상수를 연안 37개 정점에서 관측된 조화상수와 비교한 결과,  $M_2$ 와  $S_2$  분조의 경우 반조차와 지각은 관측치를 잘 재현하고 있다.  $K_1$  분조의 경우 지각은 잘 일치하나 반조차는 다소 크게 계산되었고,  $O_1$  분조의 경우 반조차와 지각이 다소 작게 계산되었다. 순환모델 결과는 전체적으로 제주해협에서 유입되는 해류, 남해 중앙부에서 등수심선을 따라 흐르는 해류 및 대한해협에서 강한 해류의 양상을 잘 재현한다. 계산된 수온, 염분분포는 연안역에서 관측값에 비해 수온과 염분이 높게 나타나고 있으나, 전반적으로 관측된 분포를 잘 재현하고 있다. 3차원 모델 결과는 표층과 저층에서의 유속 및 유향이 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다. 표층에서의 유속분포는 약 5~20 cm/s의 크기로 남해 연안역에서 외해역으로 유출되는 연안역의 해수흐름과 약 25~85 cm/s의 크기로 북동향하는 외양역의 해류가 80 m 등수심선을 경계로 구별되고 있음을 보인다. 저층에서 유속분포는 서쪽경계와 남쪽경계에서 유입되는 대부분의 해수가 5~15 cm/s의 크기로 연안을 향해 북향하는 흐름을 나타낸다. 표층수온의 분포는 해안선을 따라 평행하게 분포하고 대한해협에서 강한 수온구배가 나타나고 있으며, 저층에서는 고온의 대마난류수가 대부분 차지하고 있다. 남해 연안역에 나타나는 고염의 해수는 제주도-대마도간에 분포하는 고염의 해수가 저층을 통해 공급되는 것으로 사료된다.

공간적으로 일정한 북동풍이 남해의 3차원 순환에 미치는 영향은 평균적인 풍속 3 m/s의 북동풍을 부과할 경우 연안역에 서향류가 발달하며, 연안역으로부터

30 km 떨어진 외해역까지 표층에 국한되어 영향이 나타난다. 풍속을 10 m/s로 증가시키면 천해인 연안역에 20 cm/s 이상의 강한 서향류가 발달하고, 수직적으로는 표층으로부터 수심 약 20 m까지 그 영향이 나타난다.

시·공간적으로 해황 변화가 큰 남해의 해수순환을 보다 정확히 재현하여 유용한 정보를 제공하기 위해서는 시·공간적인 수송량의 변화와 더불어 보다 정밀한 시·공간적인 수온, 염분, 기상자료의 모델로의 입력이 필요하다. 또한 본 연구에서 고려하지 못한 바람의 영향은 천해역인 남해의 해수순환에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되며, 내만을 포함하는 연안역과 전선역에서의 현상을 파악하기 위해 보다 세밀한 격자 구성이 요구된다.

## 2. 적조모델

본 연구결과를 보면 남해안의 해류장 특성에 의해 포자가 침강하고 상승할 수 있는 해역이 주로 연안역에 국한된다. 또한 세포가 표층에 올라와서 증식을 시작하는 초기위치와 해류장에 따라 적조가 확산되는 해역이 달라진다. 해류장은 특히 계절에 따라 달라지는 바람장에 크게 영향을 받는다. 적조모델의 결과에 의하면 적조가 큰 규모로 발생하게 되는 지역은 고흥반도, 소리도, 옥지도, 거제도 남단 등의 해역이 될 가능성이 크다. 실제로 이 해역은 적조가 빈발하는 해역이다. 기존의 설명은 영양염 등을 주요요인으로 들고 있으나, 이러한 설명은 남해안 연안 전역의 영양염 농도가 상당히 높다는 것과 주요 적조 원인 생물인 와편모 조류의 경우 영양염의 결핍이 대증식을 촉발하는 것을 고려할 때 설득력이 약하다.

오히려 본 연구에서 보여준 것 처럼 포자에서 발아한 세포들이 표층까지 올라와 증식을 계속하는 과정이 해류장에 의해 좌우되는 것으로 설명하는 것이 타당한 것으로 생각된다. 이러한 가설은 포자의 분포와 유영상태의 세포의 분포를 조사하면 검증이 가능하다.

본 모의실험 결과에서는 성장률-사망률 공간에서 적조가 발생할 수 있는 조건이 제한되어 있음을 보여 준다. *Cochlodinium polykroides*의 배양실험에 의하면 성장률이 수온이나 염분에 따라 큰 범위를 가진다. 적조발생은 성장률-사망률 공간에서의 변동으로 설명될 수 있다. 즉, 성장률과 사망률이 낮은 상태에서 수온, 염분 등의 환경 변화에 의해 성장률이 증가하여 조건이 만족되면 적조가 발생하고 적조가 진행되어 사망률이 증가하면 적조가 소멸된다. 이때 사망률의 변화가 전체 과정을 좌우하게 된다.

적조모델 결과는 적조의 발생조건에 있어 사망률이 성장률보다 더 큰 영향을 준다는 것을 보여 준다. 본 실험에서 사용된 성장률은 실제 배양실험에 의한 값으로 일반적으로 알려진 와편모류의 성장률 범위와 잘 일치한다. 남해연안에서 채취된 시료의 배양실험에 의하면 *Prorocentrum dentatum*은 증식율이 0.30 ~ 0.42 (배가시간: 1일), *Scrippsiella trochoidea*는 증식율이 0.53 (배가시간: 1.5일), *Alexandrium tamarense*는 증식율이 0.6 (배가시간: 1.2일)이었다 (국립수산진흥원, 1995). *Prorocentrum minimum* 은 증식율이 0.31이었다 (국립수산진흥원, 1990). 이렇게 볼 때 대개의 적조 생물은 성장률에 있어 언제나 증식이 가능한 잠재력을 가지고 있다.

Smayda (1996)은 14개의 와편모류의 strain에서 0.86-3.54/day의 분열율을 보고하고 와편모류는 느리게 상장한다는 전통적인 견해에 의문을 제기하고 있다. 결과적으로 와편모류의 번성은 물리적 집적이나 grazing의 감소에 의한 것이라는 견해에도 의문을 제기하고 와편모류의 적조발생 초기에도 증식율이 물리적인 요인 또는 포식압의 영향을 받지 않을 정도로 높을수 있음을 주장하였다.

반면에 앞서 본바와 같이 사망률의 민감성은 성장률보다 훨씬 크다. 그러나 사망률에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. Smayda (1997)는 적조생물의 증식율이 초기의 지수적 성장에서 정체기로 들어가는 요인에 대해 자가분해, 포식, 자가광저해, 영양염제한, 감염 등의 가능성을 검토하고 특히 감염의 중요성을 강조하였다. 이러한 개체군의 감소요인에 대한 추후 연구가 적조 개체군의 동태를 이해하고 모델하는데 중요한 방향이 될 것이다. 적조를 일으키는 편모조류는 운동성을 소유함으로써 생리적 적응에 있어 유연성을 가진다 (Kamykowski et al., 1992). 적조나 HAB을 일으키는 종의 상당부분을 차지하는 편모조류의 복잡한 생활사적 전략을 어떻게 모델화하는가도 주요한 숙제라고 볼수 있다.

본 연구에서는 초점을 적조 나 HAB의 발생초기 단계에 맞추고 이 기간 동안의 증식율을 일정하다고 보고 엽록소가 아닌 세포 수를 모델 통화 (model currency)로 잡았으며 이 세포들의 이동과 증식을 Lagrangian 모델로 추적하였다. 이 모델은 남해안에서 빈발하는 적조 유형을 잘 재현하고 있다.

1998년의 적조는 발생한 뒤 약 2 주간 외나로도 근해에 정체해 있다가 동진한 특이한 형태를 보이고 있다. 앞에서 본 것처럼 이 적조사건은 모델에 의해 잘 재현되었으며 이는 이러한 모델이 실제 적조의 확산 경로 예측에 실용적으로 사용될 수 있음을 의미하는 것이다.



## 참고문헌

- 국립수산진흥원 (1997) 한국 연안의 적조(최근 적조의 발생원인과 대책). 국립수산진흥원.
- 국립수산진흥원 (1998) 한국연안의 적조. 국립수산진흥원.
- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26, 262-277.
- 김복기, 1981. 소리도-오도열도간 해역 단면의 해황변동과 해수수송량에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, 27, 25-39.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27, 515-528.
- 김충기, 1998. 남해에서 조석과 해류에 의한 해수순환 및 물질이동의 수치모델 연구. 인하대학교 해양학과 이학석사 논문, 66 pp.
- 심문보, 1998. 직접측류에 의한 대한해협 서수도의 해수수송량. 1997년 수로기술연보, 국립해양조사원, 316-321.
- 정해진, 심재형, 이창원, 김재성, 1999. 적조유발 및 독성 와편모조류에 대한 섬모충류 *Strombidinopsis* sp. 의 성장과 포식률.
- 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저온수의 특성과 기원. 한국해양학회지, 29, 414-421.
- 최병호, 방인권, 김경환, 1994. 대한해협조류의 3차원분포. 한국해안·해양공학회지, 6(4), 421-438.
- 최병호, 김경환, 김영규, 방인권, 1995. 대한해협의 부표표류 시뮬레이션. 한국해안·해양공학회지, 7(4), 379-392.
- 한국해양연구소, 1996a. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집. 한국해양연구소, 282 pp.
- 한국해양연구소, 1996b. 오염물질 이동·확산기술 개발. 해양연구소 보고서, BSPN 00271-2-861-1, 220pp.
- 한국해양연구소, 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구. 해양연구소 보고서, BSPE 97612, 442pp.
- 한국해양연구소, 1998. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구. 해양연구소 보고서, BSPE 98706-00-1139-4, 647pp.
- Agusti, S., C. M. Duarte, and J. Kalff. 1987. Algal cell size and the maximum density and biomass of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 32 : 983-986.
- Asselin, R., 1972. Frequency filter for time integrations. *Monthly Weather Review*, 100(6), 487-490.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three Dimensional Coastal Models*.

- edited by N. S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1-16.
- Chang, K.I., K. Kim, S. W. Lee, and T. B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in Spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30, 203-215.
- Chang, K.I., and K. Kim, 1995. Sub-tidal flow in the Cheju Strait. *The Yellow Sea*, 1, 93-103.
- Chang, K.I., C.-K. Kim, M.-S. Suk, S.-Y. nam and L.H. Kantha (1997) Barotropic circulation of the South Sea - Preliminary model results. *Ocean Research*, 19(2), 139-152.
- Cullen, J. J., and S. G. Horrigan. 1981. Effects of nitrate on the diurnal vertical migration, carbon to nitrogen ratio, and the photosynthetic capacity of dinoflagellate *Gymnodinium splendens*. *Mar. Biol.* 62 : 81-89.
- Droop, M. R. 1973. Some thoughts on nutrient limitation in algae. *J. Phycol.* 9 : 264-272.
- Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chinese J. Oceanol. and Limnol.*, 4(1), 1-16.
- Franks, P. J. S. 1997. Models of harmful algal blooms. *Limnol. Oceanogr.* 42 : 1273-1282.
- Jung, H. J., & Latz, M. I. 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellate, *Proto-peridinium*, on red tide dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106, 173-185.
- Kamykoski, D., R. E. Reed, and G. J. Kirkpatrick. 1992. Comparison of sinking velocity, swimming velocity, rotation and path characteristics among six marine dinoflagellate species. *Mar. Biol.* 113 : 319-328.
- Kantha, L.H., 1995. Barotropic tides in the global ocean from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides. *J. Geophys. Res.*, 100 (C12), 25283-25308.
- Kim, S.H., 1995. Studies on the assembling mechanism of Hairtail, *Trichiurus lepturus*, at the fishing ground of the Cheju Strait. Ph. D. Thesis, Cheju National Univ., pp. 168.
- KORDI, 1997. A study for the Marine Ranching Program in Korea - Ecosystem management model and stocking technique, KORDI Report BSPE 97602-00-1073-3, pp. 361.
- KORDI, 1997. Transport and biochemical processes in the Cheju Strait. KORDI Report BSPE 97612, pp. 442.
- Lie, H.J., and C.H. Cho, 1997. Surface current fields in the eastern East China

- Sea. J. Korean Soc. Oceanogr., 32, 1-7.
- Margalef, R. 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives on and unstable environment. *Oceanol. Acta* 1 : 493-509.
- Matsuda, A., T. Nishijima, and K. Fukami, Effects of nitrogen deficiency on the PSP production by *Alexandrium catenella* under axenic cultures., 1996. ; IN Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*.
- Mellor, G. L., 1996. Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University. Princeton. NJ, 40 pp.
- Mellor, G. L., A.F. Blumberg, 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities and the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, 113, 1379-1383.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1896.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20(4), 851-875.
- Miita, T. and Y. Ogawa, 1984. Tsushima Currents measured with current meters and drifters. In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. edited by T. Ichiye, Elsevier Oceanography series 39, 67-76.
- Na, J.Y., and J. W. Seo, 1998. The sea surface winds and heat flux in the east Asian marginal seas. Dept. Earth and Marine Sciences, Hanyang Univ., 52 pp.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tusima Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 45: 65-82.
- Ogura, S., 1933. The tides in the seas adjacent to Japan. *Bull. Hydrogr. Dept.*, 7, 1-189.
- Oey, L-Y., and P. Chen, 1992. A model simulation of circulation in the Northeast Atlantic Shelves and Seas. *J. Geophys. Res.*, 97(C12), 20087-20115.
- Orlanski, I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comput. Phys.*, 21, 251-269.
- Phillips, N.A., 1957. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteorol.*, 14, 184-185.
- Prezelin, B. B. 1987. Photosynthetic physiology of dinoflagellates, p. 174-223. In F. J. R. Taylor [ed.], *The biology of dinoflagellates*. Blackwell.

- Raven, J., and K. Richardson. 1984. Dinophyte flagella : A costbenefit analysis. *New Phytol.* 98 : 259-276.
- Reguera, B., I. Bravo, H. McCall, and M. I. Reyero, Phased cell division and other biological observations in field populations of *Dinophysis SPP* During cell cycles studies., 1996. ; IN Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*.
- Roache, P.J., 1972. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers, 434 pp.
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Smayda, T. J. 1997. What is a bloom? A commentary. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1132-1136.
- Smayda, T. J. 1997.. Harmful phytoplankton blooms : Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1137-1153.
- Smayda, T. J., Dinoflagellate bloom cycles : What is the role of cellular growth rate and bacteria?., 1996. ; IN Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*.
- Sournia, a. 1995. Red-tide and toxic marine phytoplankton of the world ocean: An inquiry into biodiversity, p. 103-112. IN Harmful marine algal blooms. Proc. 1st Int. Symp. on Red Tides. Elsevier.
- Sperr, A. E., and G. J. Doucette, Variation in growth rate and ciguatera toxin production among geographically distinct isolates of *Gambierdiscus Toxicus*., 1996.; IN Harmful and Toxic Algal Blooms, Yasumoto, T., Oshima, Y and Fukuyo, Y. (Eds), *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*.
- Suk, M.S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.I. Chang, and D.J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31, 55-63.

Table 2-3. The growth rates of *Cochlodinium polykrikoides* estimated from the growth curves obtained under various condition of temperature and salinity (NFRDI).

S \ T	15	20	25	30
18	0.2014	0.2622	0.3744	0.5484
21	0.2593	0.3539	0.4352	0.3051
24	0.2668	0.1758	0.4216	0.4532
27	0.2850	0.3368	0.2909	0.4962
30	0.2885	0.3214	0.5247	0.2705

Table 2-4. Growth rates of dinoflagellates (NFRDA, 1995; Smayda, 1996)

---

수신원 1995

---

*Prorocentrum dentatum* : 0.3 – 0.42 /day

*Scrippisella trochoidea* : 0.53 /1.5 day

*Alexandrium tamarense* : 0.6 /1.2 day

---

---

Smayda 1996 ; Smayda Karentz in prep.

---

Maximum daily growth rates: 0.86 – 3.54 /day

*Prorocentrum minimum* : 3.54 (0.21) /day

*Lingulodinium polyedra* : 0.86 /day

---

Table 2-5. The values of growth rates (G) and mortality (M) used. T is the generation time. The combinations shadowed with gray were used.

M \ G	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
0.35						
0.40						
0.45						
0.50						
0.55						
0.60						
0.65						
0.70						
0.75						
0.80						
0.85						
0.90						

T = 1 day

T = 1/2 day

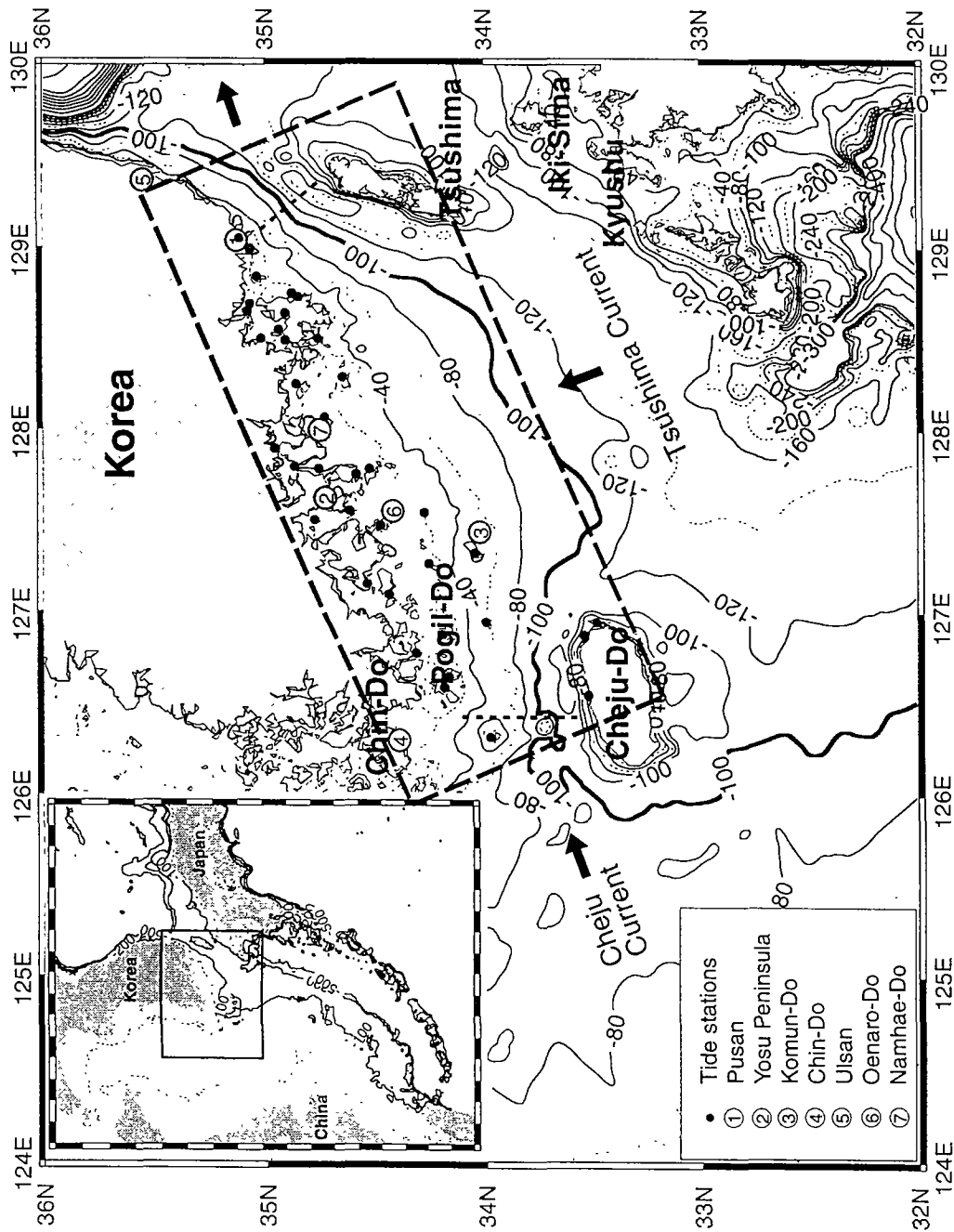
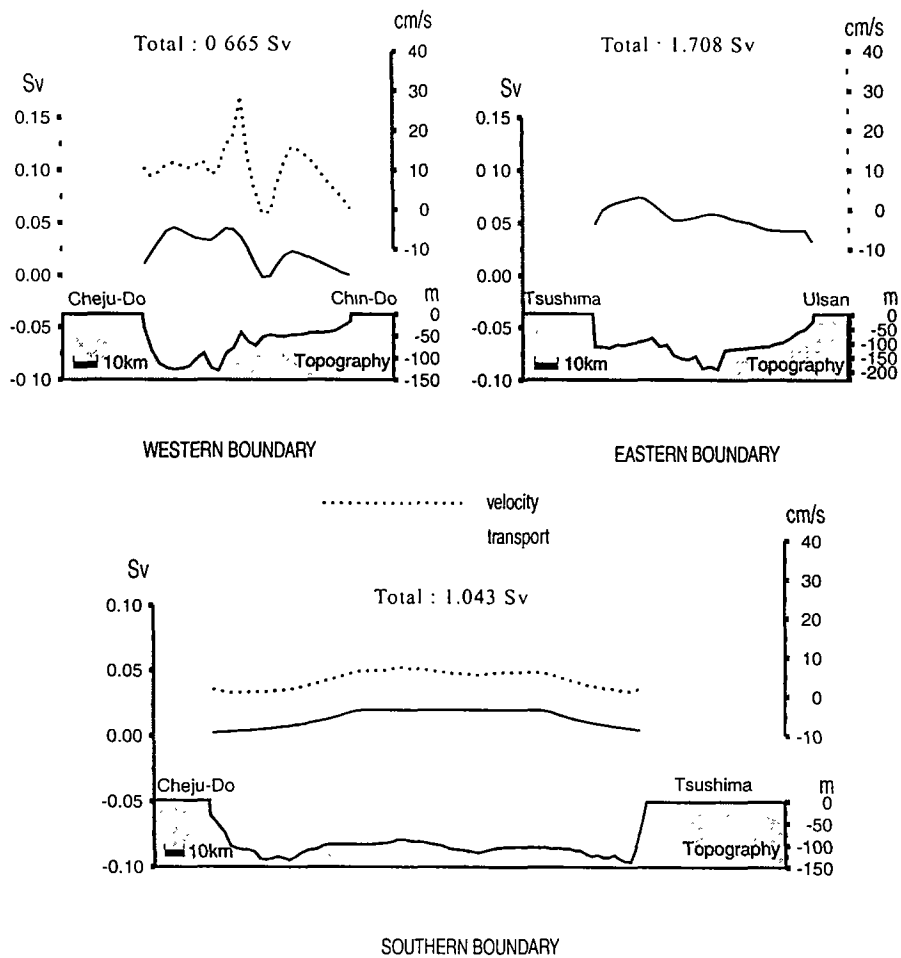
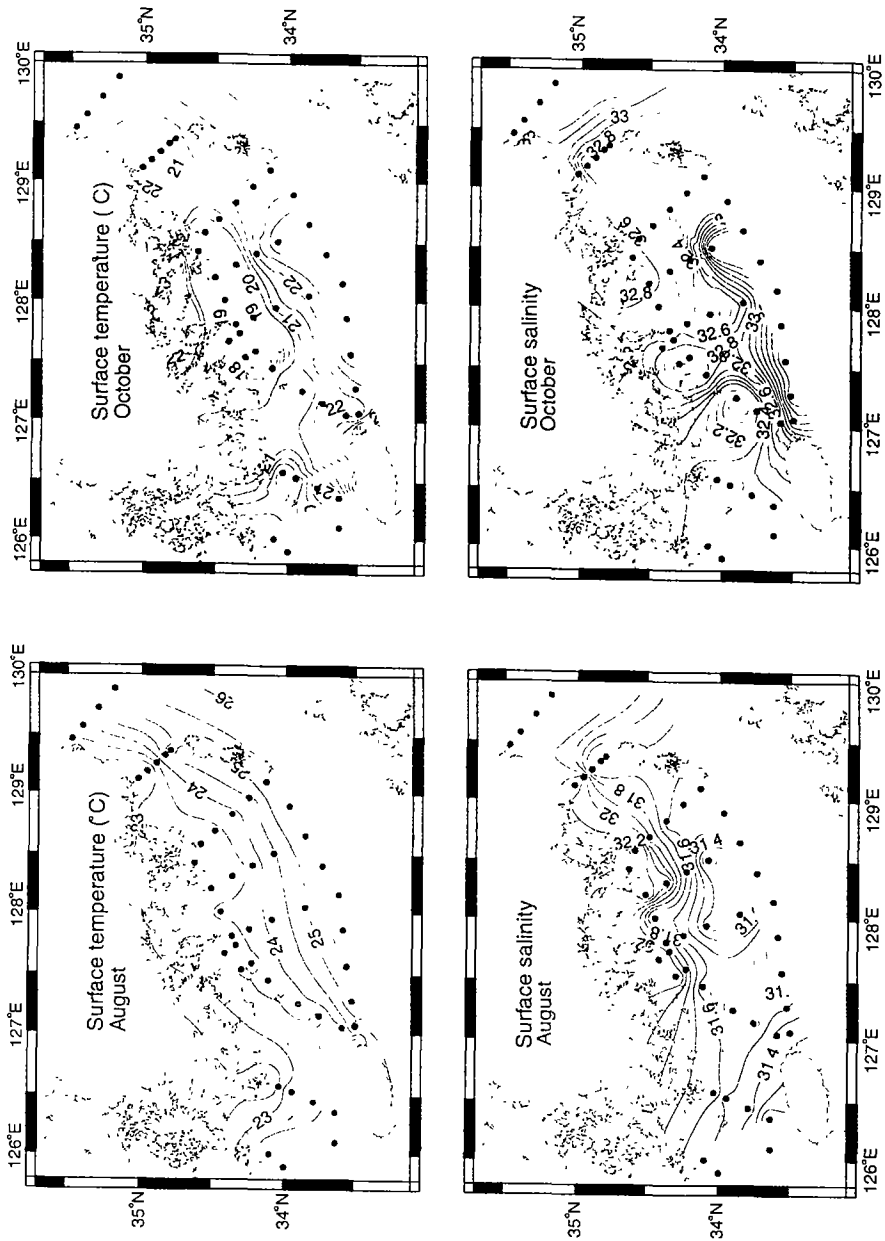


Fig. 2-1. Coastline, bottom topography and the inflow/outflow system of the South Sea. Isobaths given in meters are contoured every 20 meters, and topography of the east Asian marginal seas are also shown in an inset in the upper left corner with 50 m, 100 m, 200 m, and 500 m isobaths. The rectangular area enclosed by long-dash lines is the model domain in which an ocean circulation model is applied. Diurnally-averaged mean currents, which are used for the specification of the inflow/outflow, were obtained on the two ADCP traverse lines denoted by dashed lines in the Cheju and the Korea Straits. A thick meridional line in the middle of the model domain denotes the line where the vertical structure of model-generated flow field is examined. Coastal tide stations used for the model/data comparison are shown with closed circles. Geographic locations referred to in the text are also shown with open circles with their names in an inset in the lower left corner.





**Fig. 2-2.** Spatial structure of the volume transport (solid lines) and depth-averaged velocity (dotted lines) specified across three open boundaries based on the observed diurnally-averaged flow in the Cheju Strait in the Korea strait in fall, 1997. The volume transport specified across the southern boundary is the difference between eastern and western boundaries, and the spatial pattern of the transport and the velocity is arbitrary. Bottom topography across open boundaries is also shown.



**Fig. 2-3.** Horizontal distribution of observed surface temperature and salinity in the South Sea in August 8-16 (left panel) and October 8-29 (right panel), 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

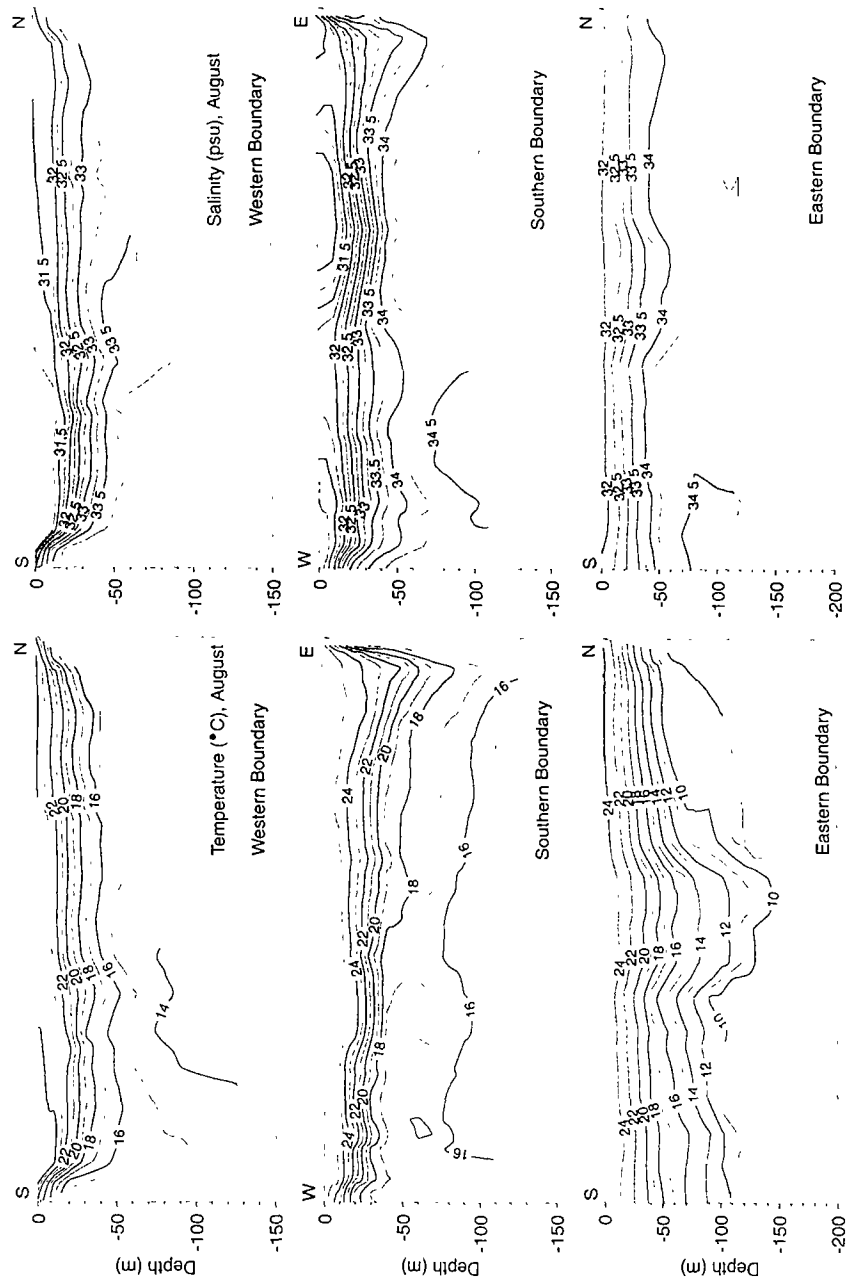


Fig. 2-4. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in August 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

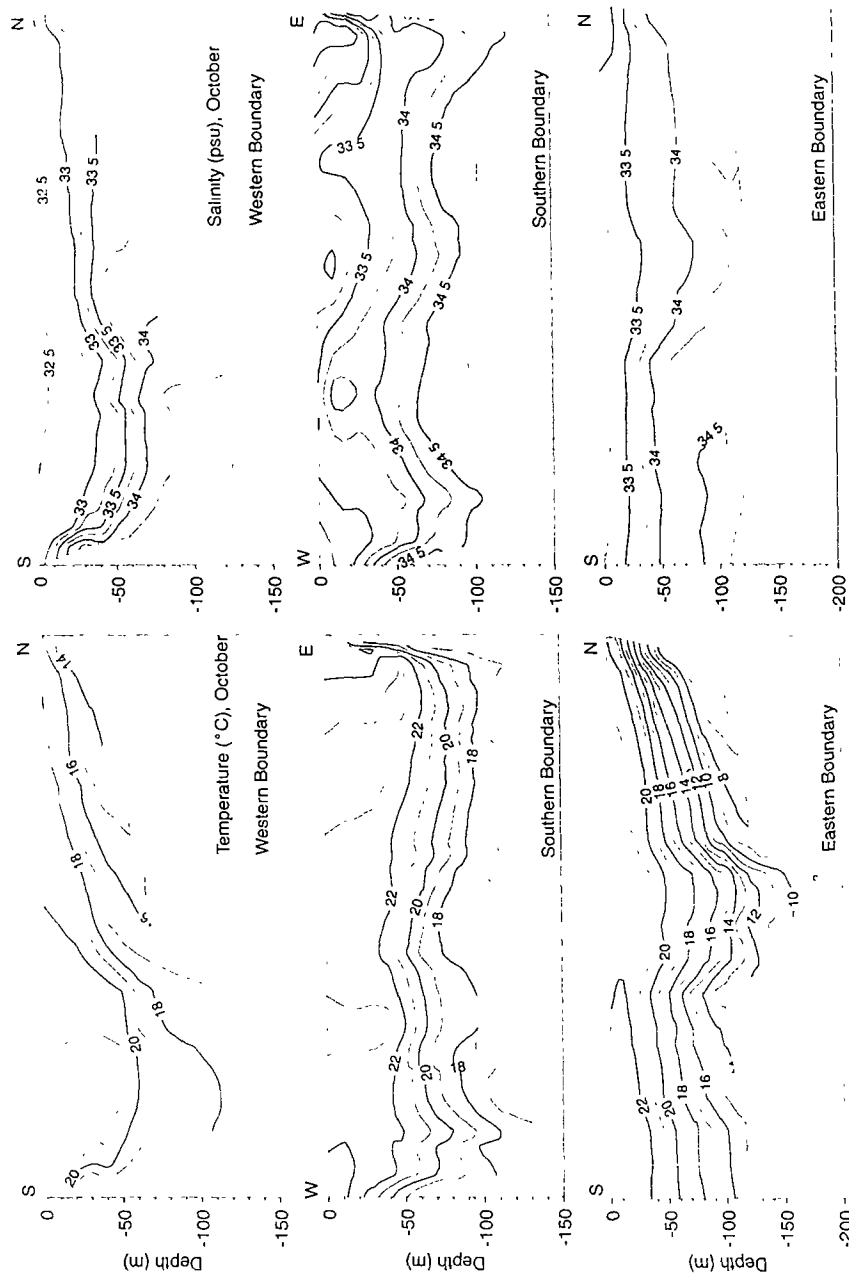


Fig. 2-5. Vertical sections of temperature (left panel) and salinity (right panel) at western (upper panel), southern (middle panel) and eastern (lower panel) open boundaries in October 1997 based on the KODC (Korea Oceanographic Data Center) data.

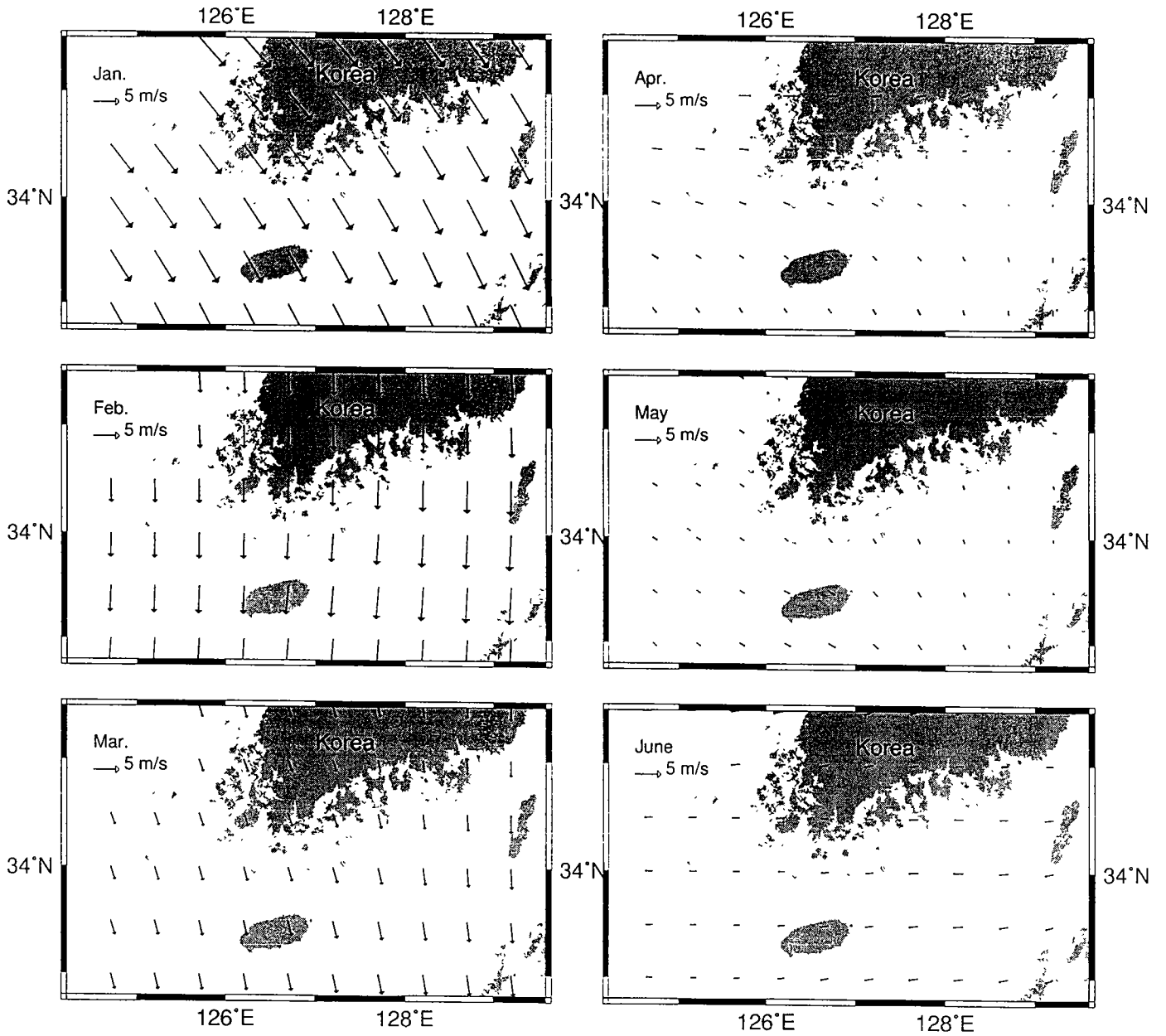


Fig. 2-6. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from January to June with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998).

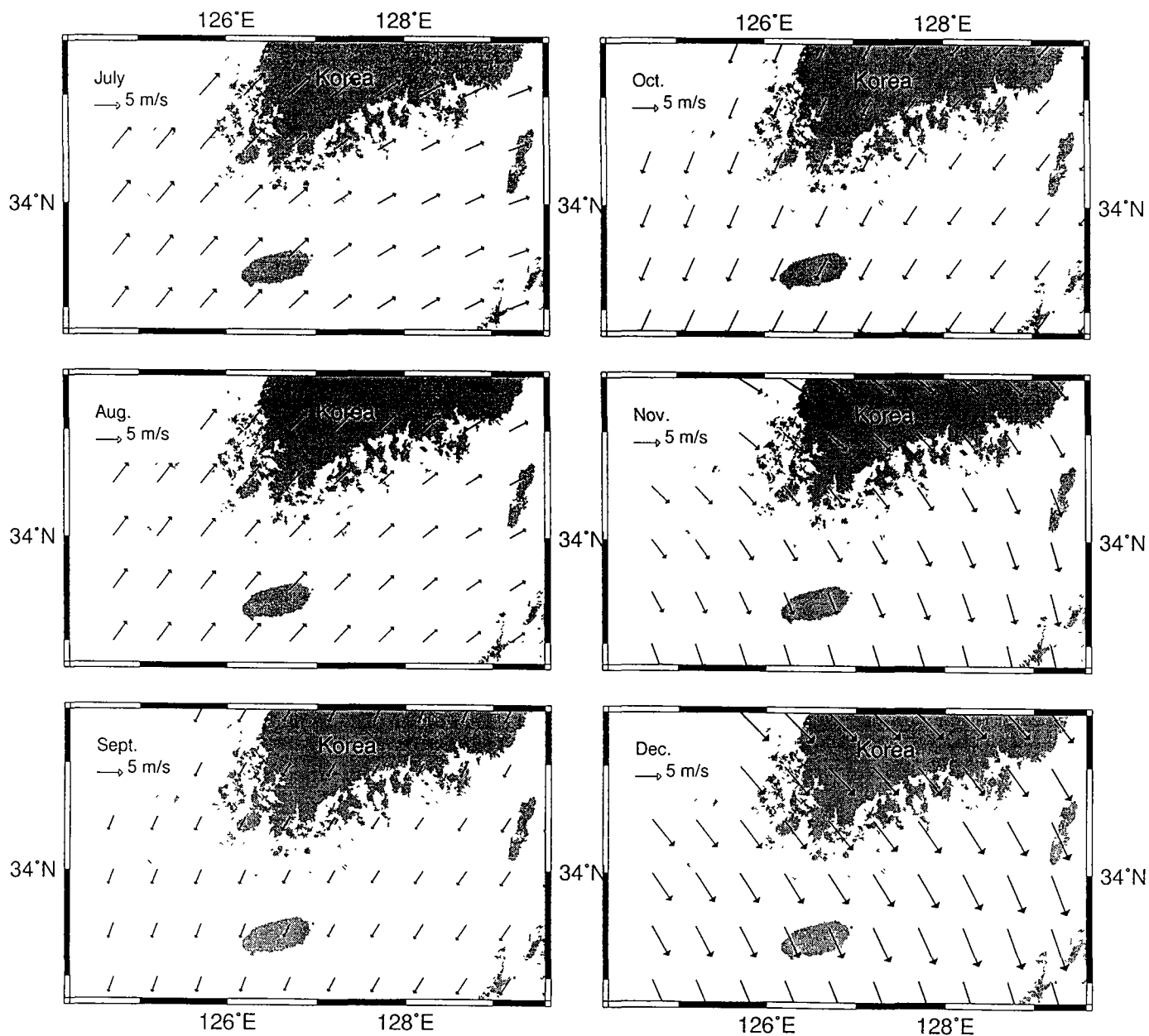


Fig. 2-7. Monthly mean sea surface winds in the South Sea from July to December with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  based on 12-hourly sea surface winds during 1978~1995 (Na and Seo, 1998)..

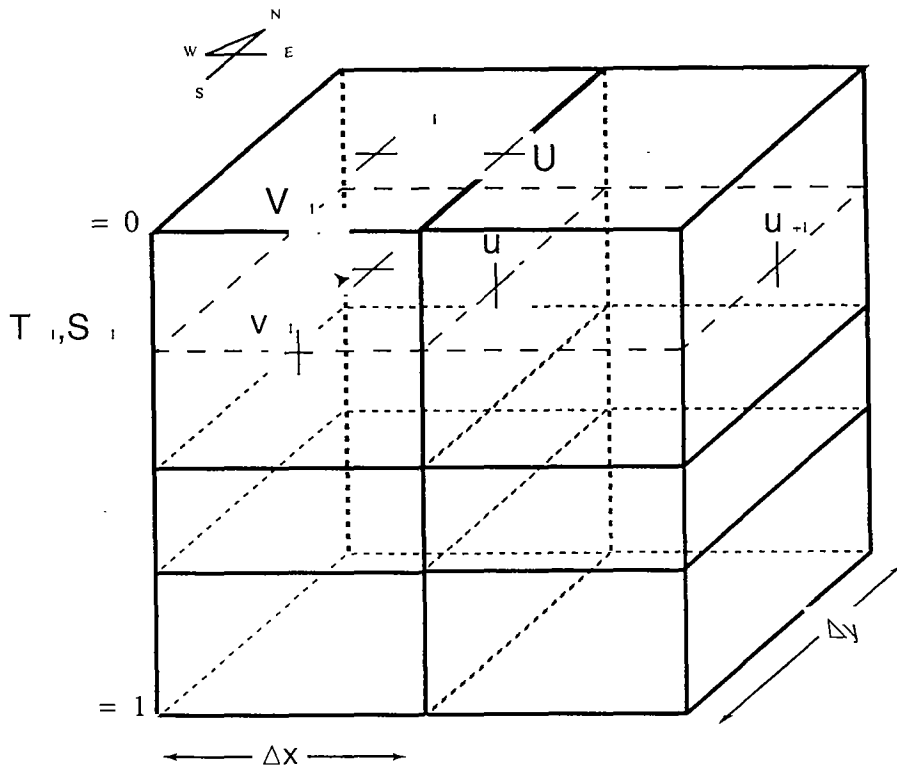


Fig. 2-8. Spatial arrangements of model variables on an Arakawa C-grid near the western boundary. The western open boundary coincides with the line denoted by the subscript B.

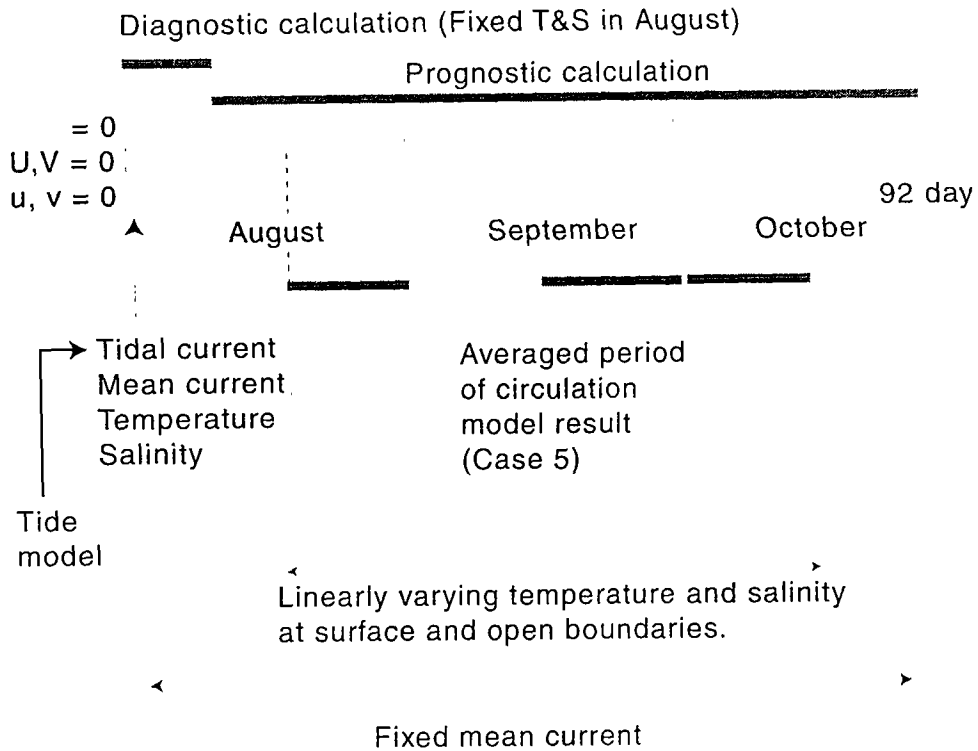


Fig. 2-9 A schematic illustration of model run for Case 1 in Table 1. The model is forced by a specification of time-varying tidal currents and steady inflow/outflows observed in fall 1997 across open boundaries, and time-varying temperature and salinity based on the observation in August and October both at the sea surface and across open boundaries. The tidal currents are pre-determined by a three-dimensional barotropic tide model, where five major constituents of tidal currents are computed by specifying free surface elevation across open boundaries. The model was initially quiescent with  $\eta = 0$  inside the model domain, and diagnostic calculation was performed for 10 days with fixed three-dimensional temperature and salinity fields observed in August, and with time-varying tidal currents and inflow/outflows across open boundaries. The prognostic calculation was then followed with the specification of observed temperature and salinity at the sea surface and across open boundaries for 82 days. Linearly interpolated, time-varying temperature and salinity are specified from August 15 to October 15 based on the observations in August and October, and the surface and boundary forcing applied before August 15 and after October 15 is fixed with those values in August and October, respectively. Also shown are periods of averaging the model results for 15 days in order to examine the subtidal circulation in August, September, and October.



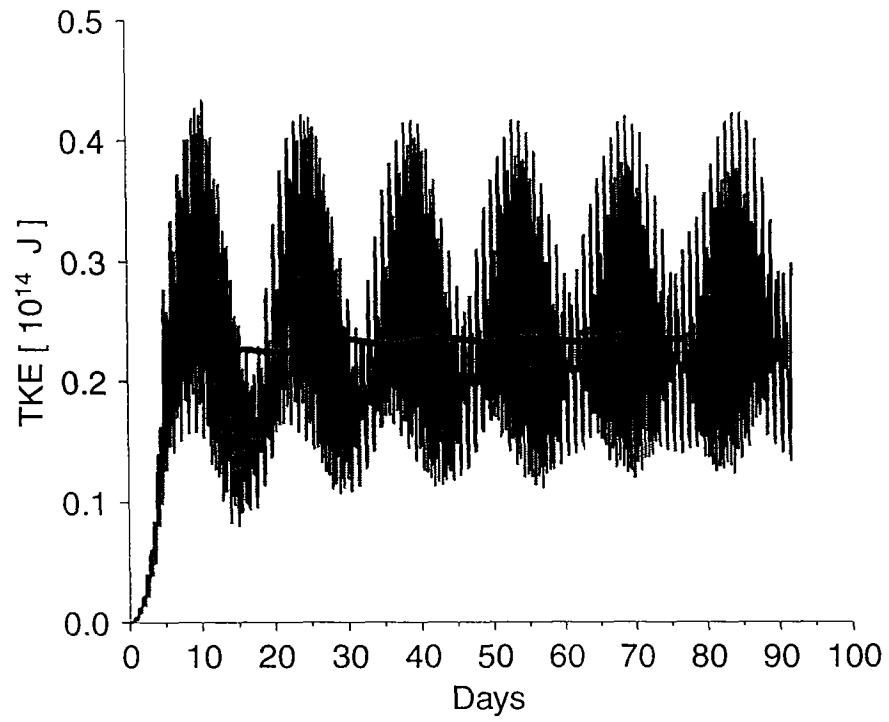


Fig. 2-10. Total kinetic energy as a function of time for Case 1 in Table 1  
Solid line denotes the variation of 15-day moving-averaged total kinetic energy.

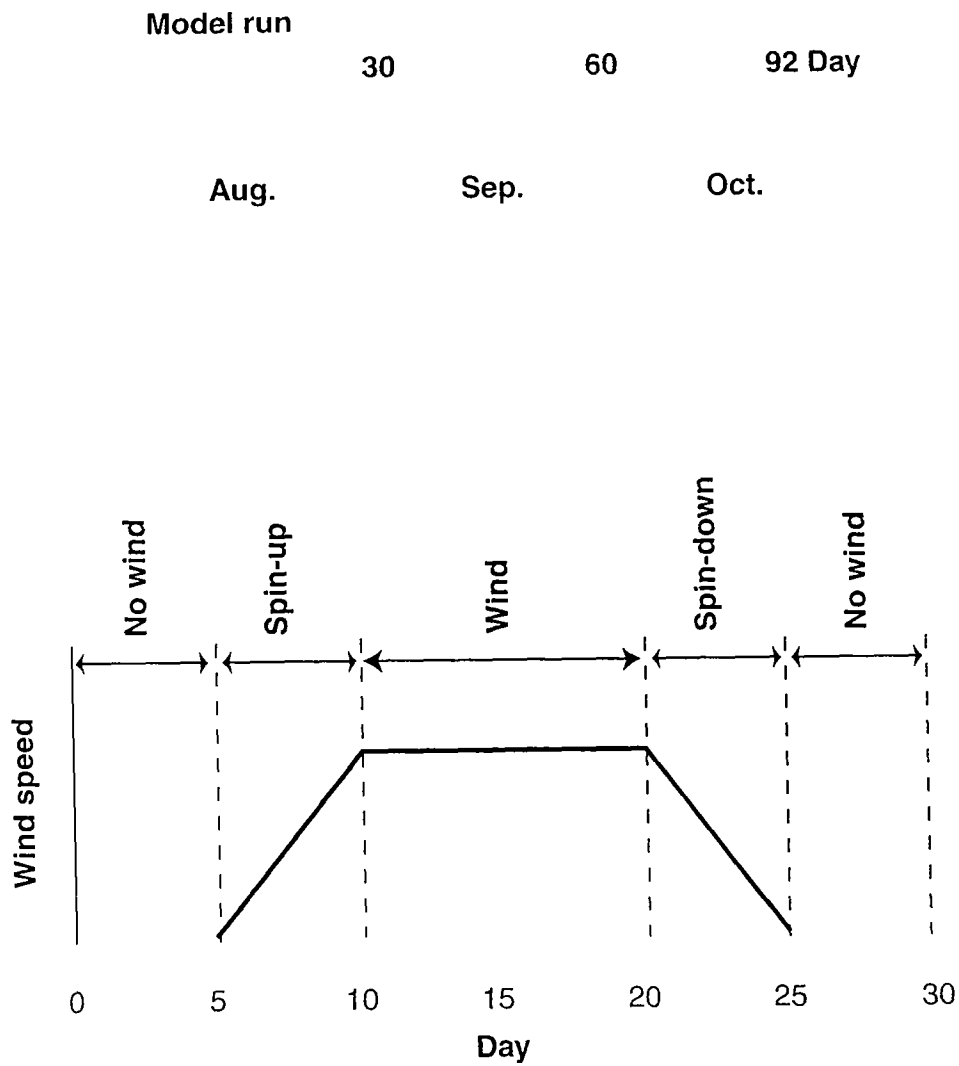


Fig. 2-11. Outline of numerical experiments considering the wind forcing. The wind is applied in September during which the wind speed is increased linearly for the first five days, and the constant maximum speed is maintained for 10 days followed by a linear decrease in the speed until the speed is zero.

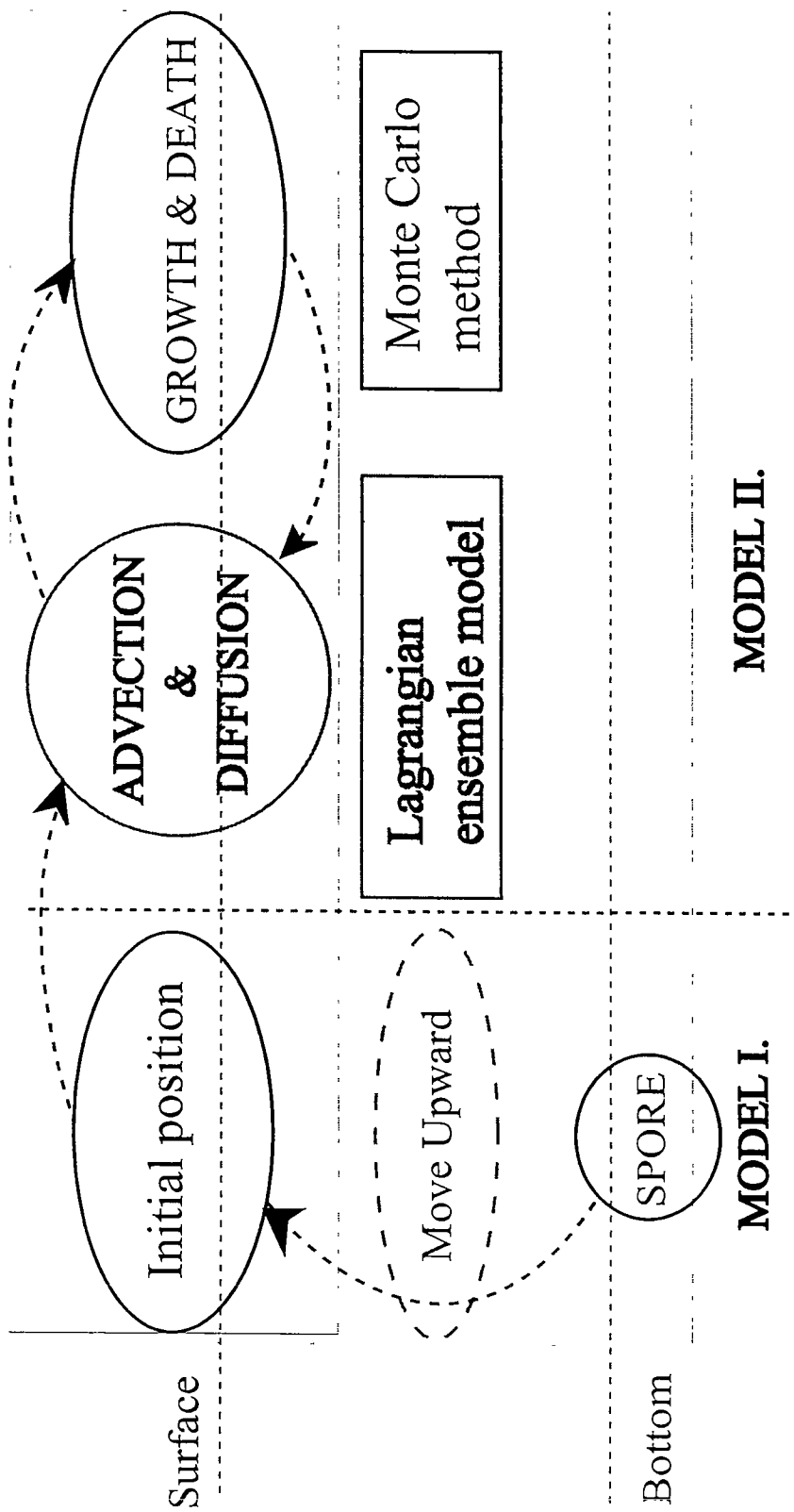
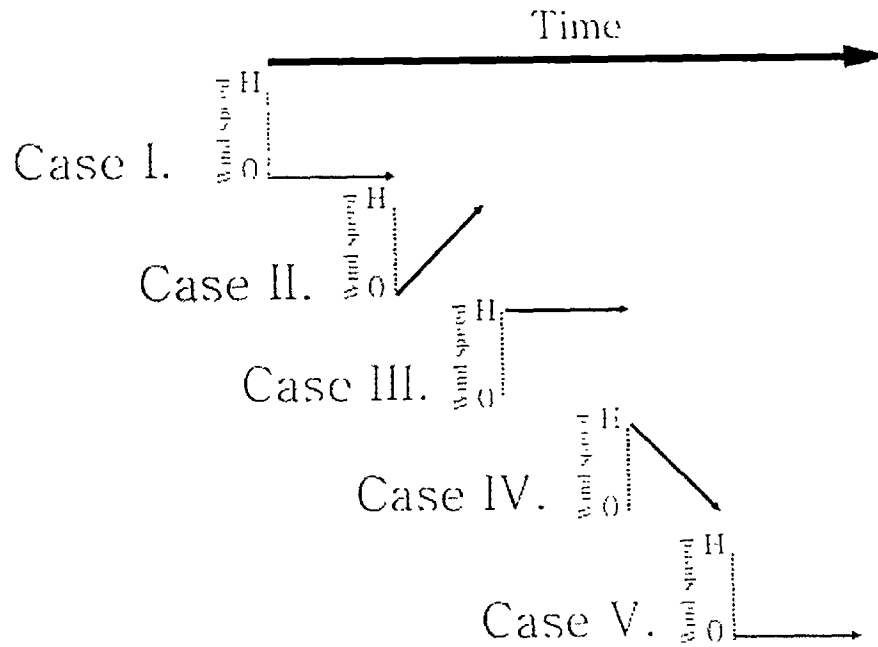
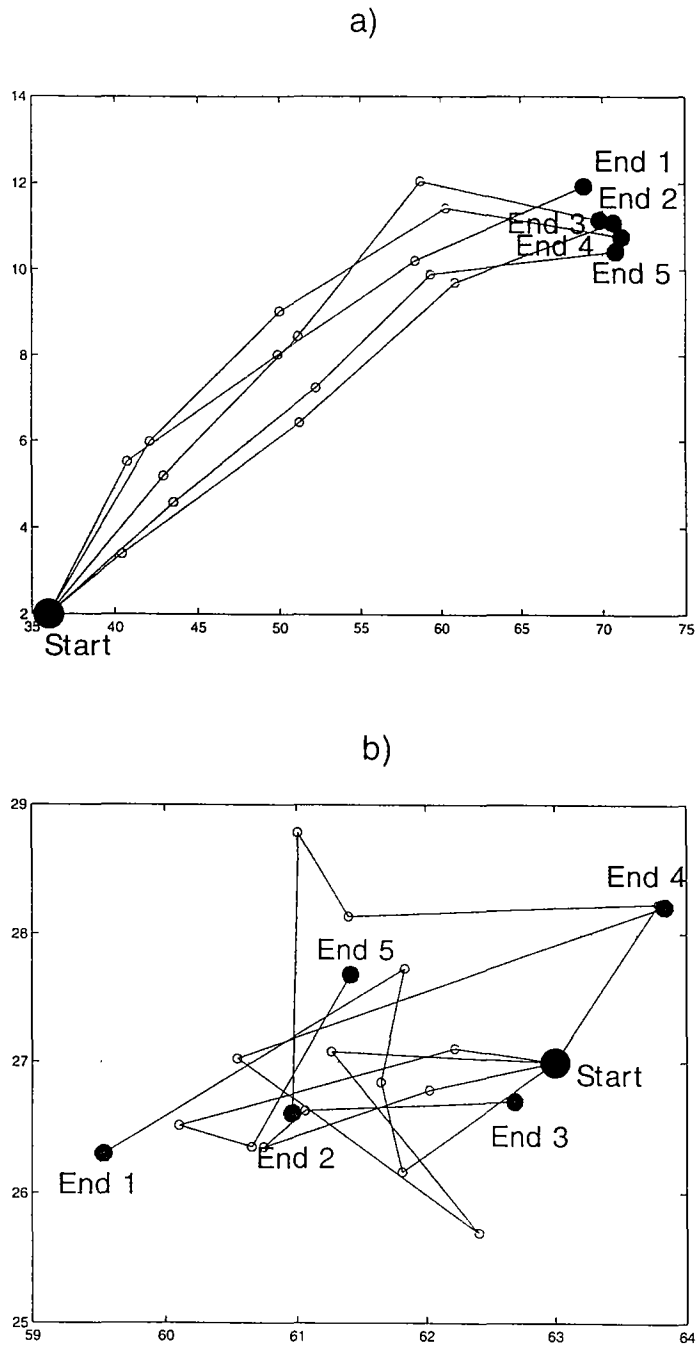


Fig. 2-12. Schematic diagram of modelled processes. The model consists of two parts; Model I is for vertical movement of spores, and Model II is for spatial development of HAB due to currents and reproduction of organisms.



**Fig. 2-13.** Five scenarios of current field from the five stages of wind forcing of Fig. 2-11 were used. Case I is with no wind forcing, Case II is with increasing wind forcing, Case III is with continuous maximum wind forcing, Case IV is with decreasing wind forcing, and Case V is with no wind.



**Fig. 2-14.** Example of Lagrangian ensemble model. a) 5 cells moving in a current field with strong advection, b) 5 cells moving in a current field with weak advection.

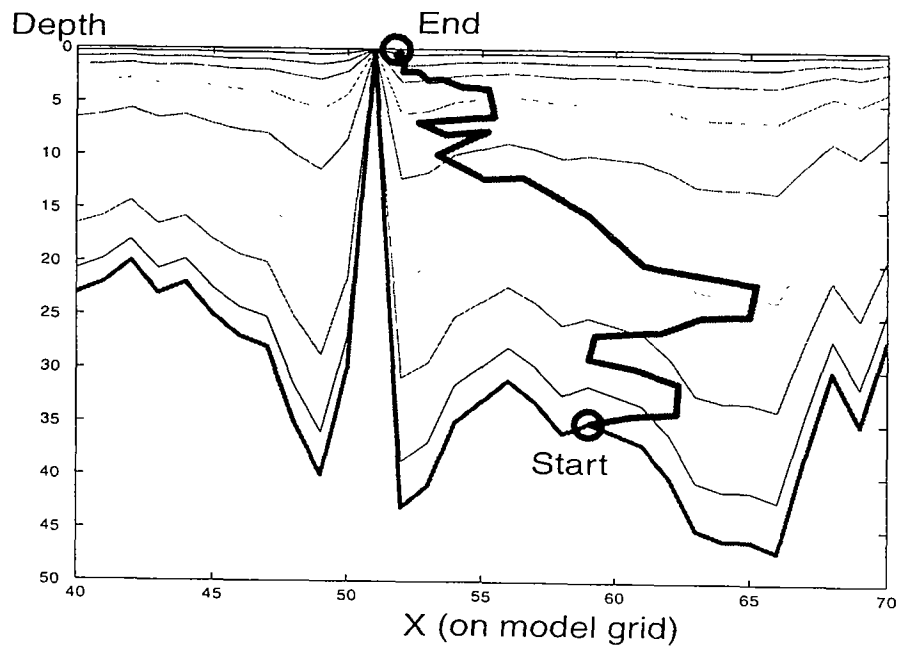


Fig. 2-15. Example of vertical movement of spores in a three-dimensional current field. This correspond with Model I.

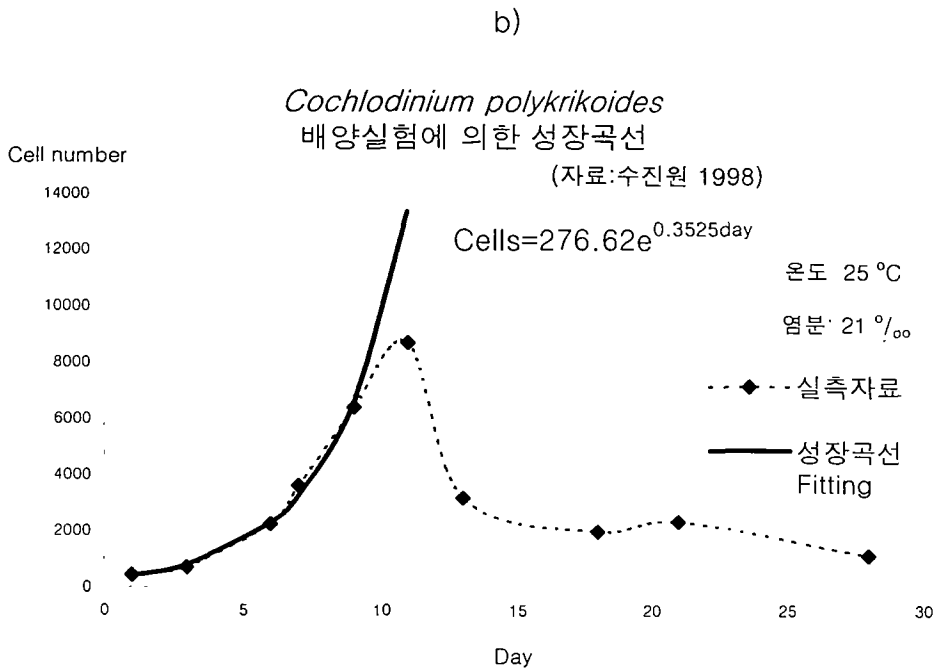
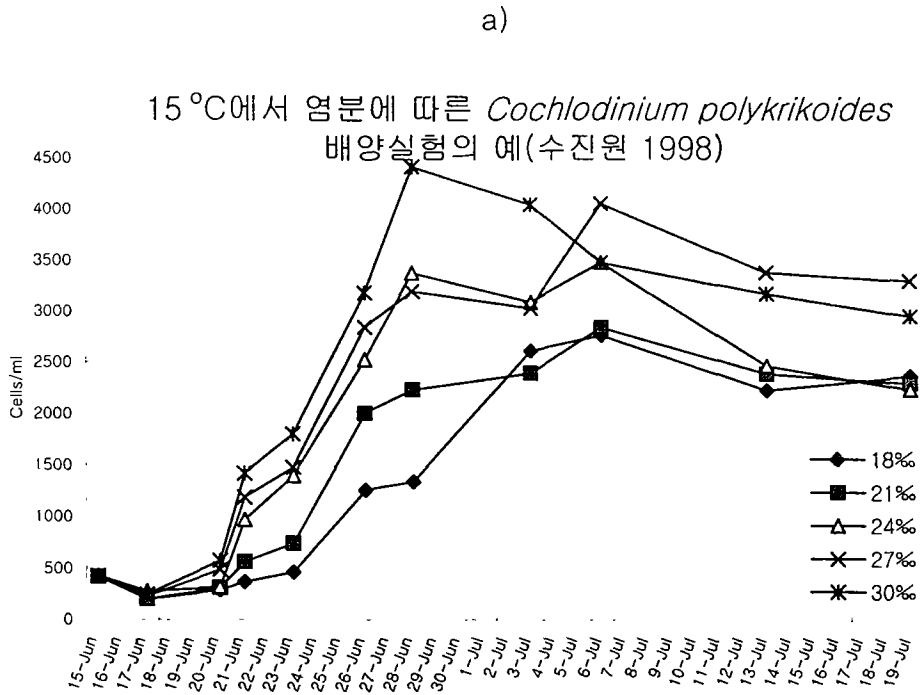
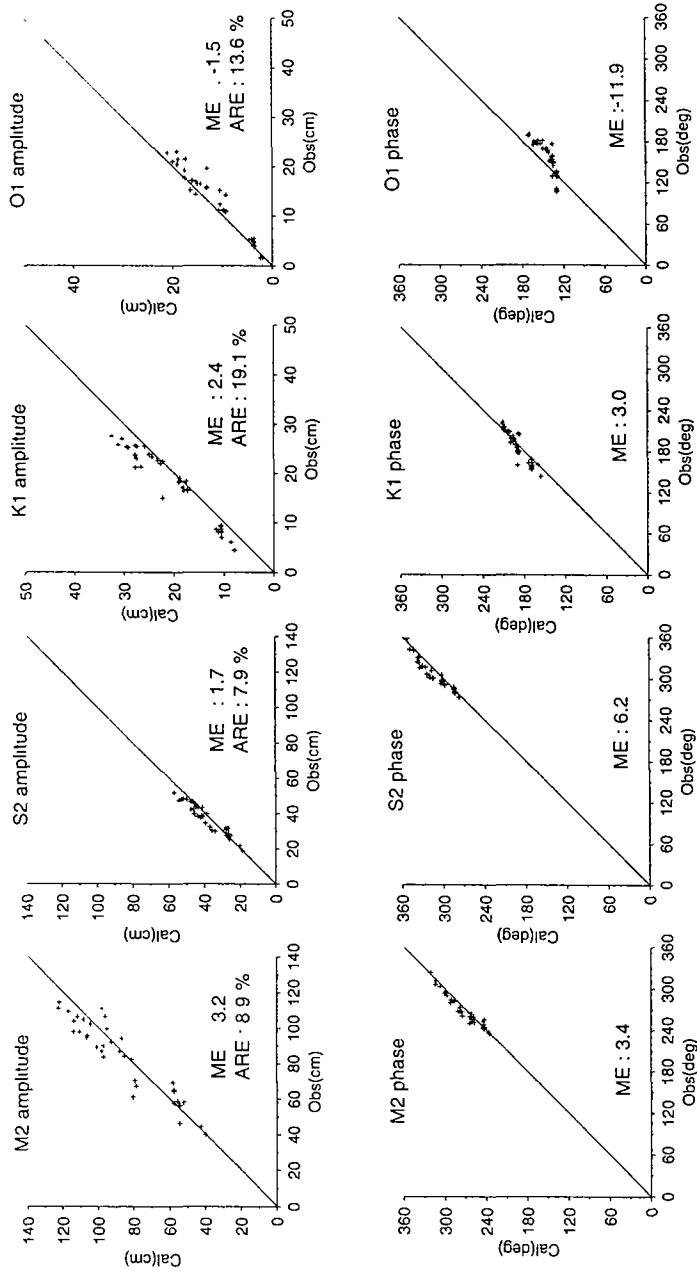


Fig. 2-16. Growth of *Cochlodinium polykrikoides*. a) in 5 salinity condition at 15 °C, b) an example of deriving growth rate.



**Fig. 2-17.** Model (Cal)/data (Obs) inter-comparison for the amplitude and phase of four dominant tidal constituents. ME and ARE denote the mean and the absolute relative errors, respectively, as defined in the text.



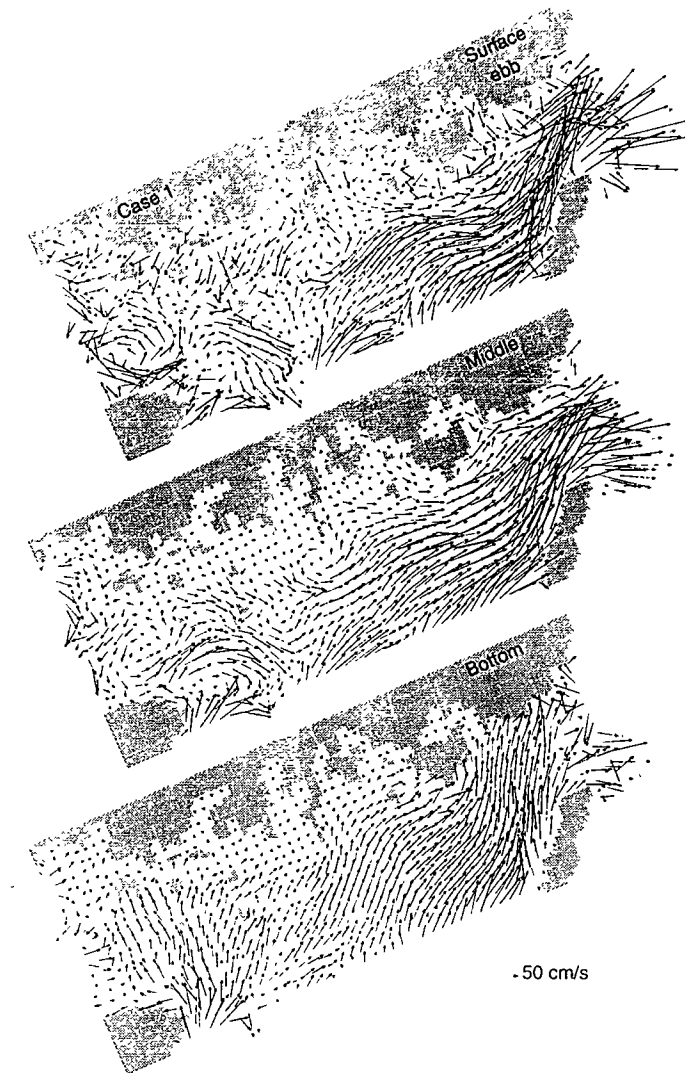
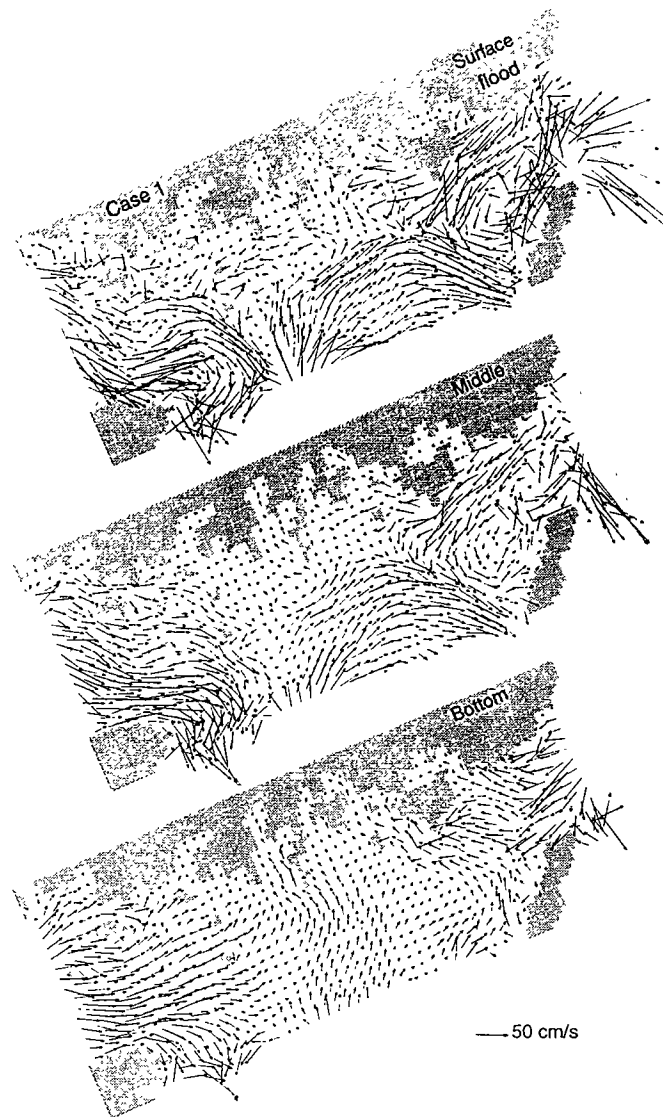
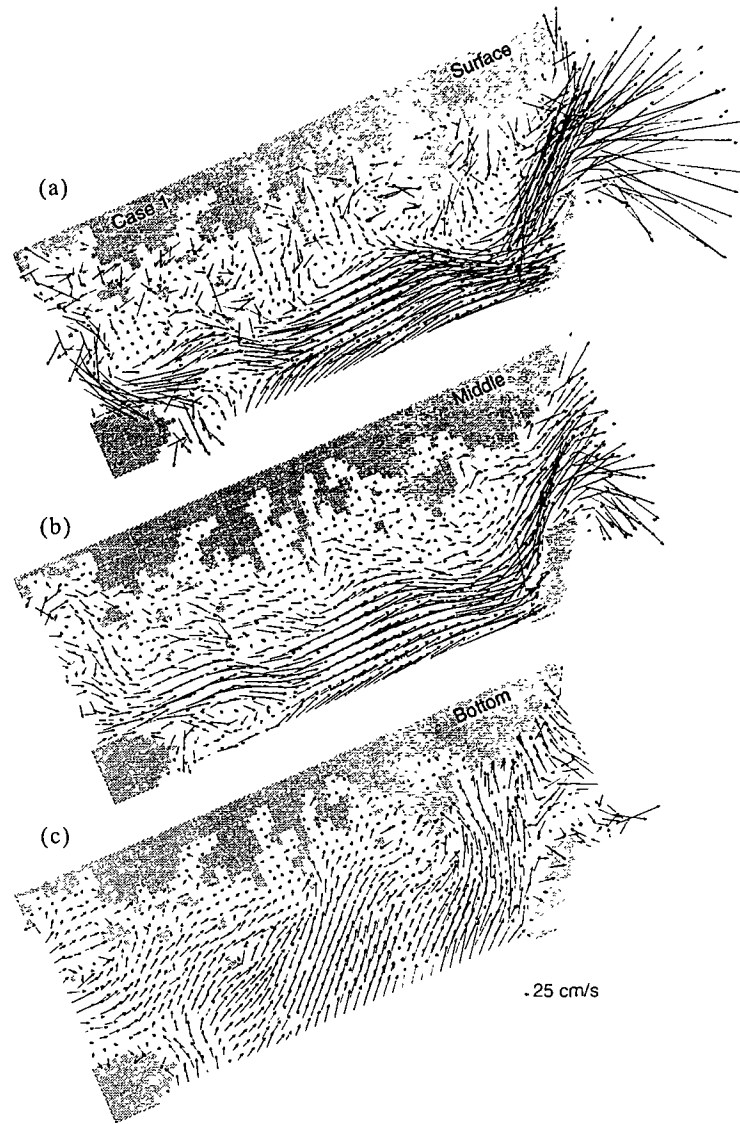


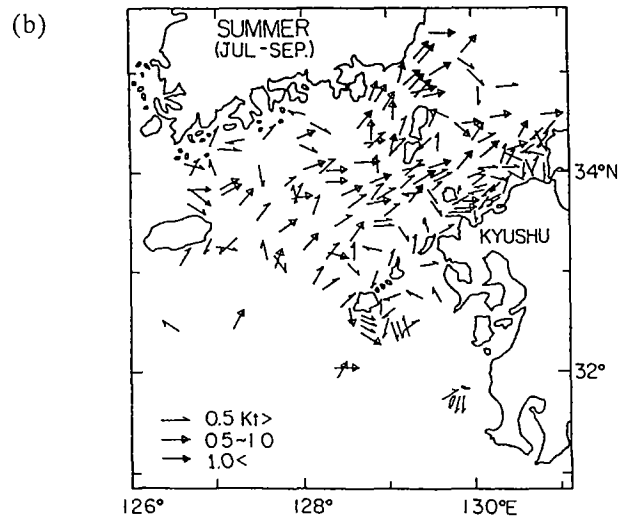
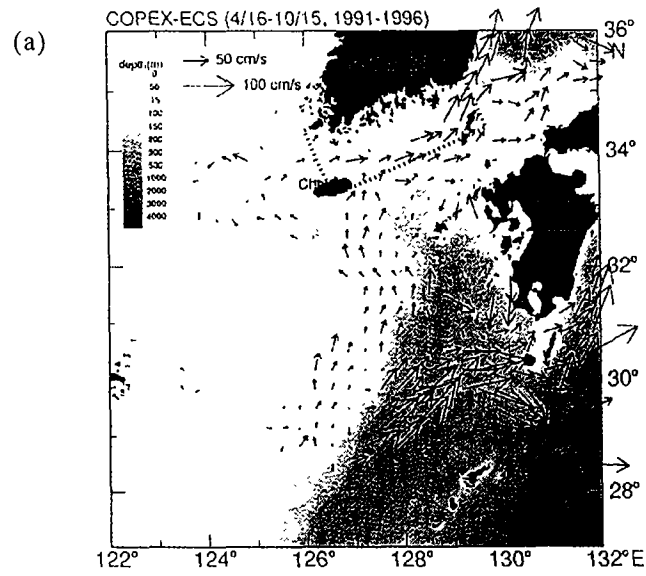
Fig. 2-18. Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of ebb tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 1 in Table 1).



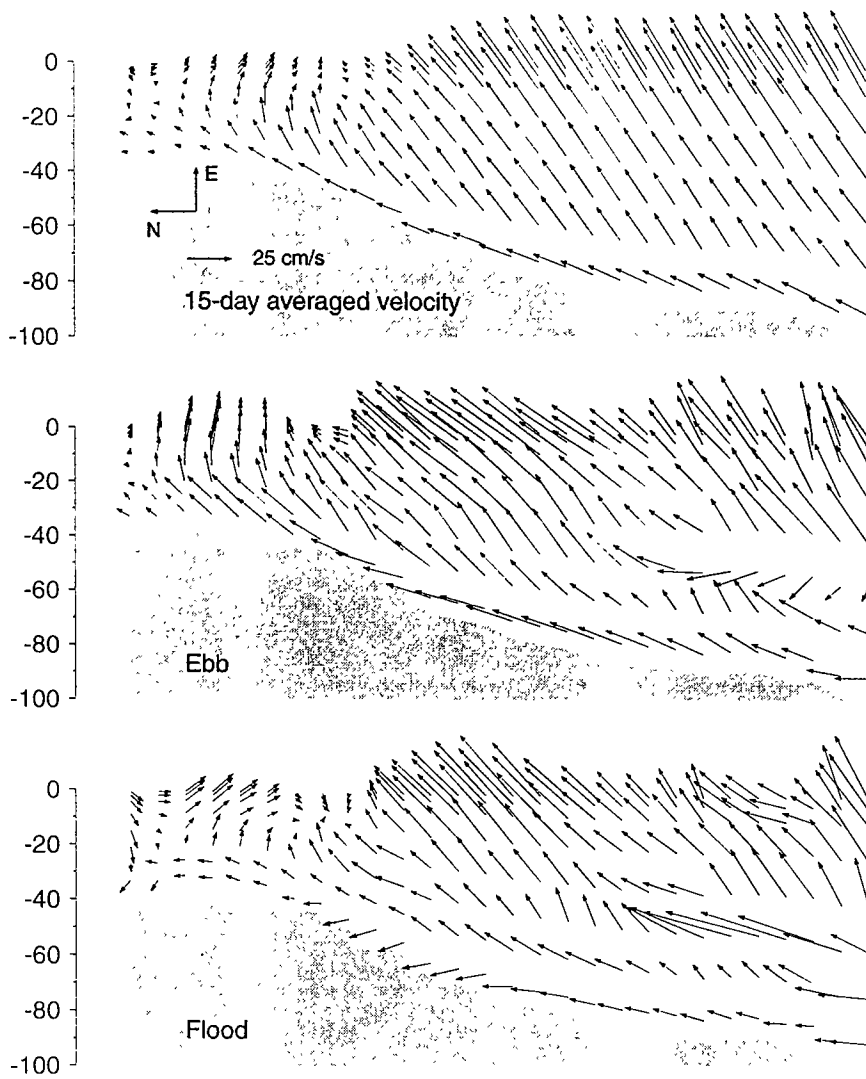
**Fig. 2-19.** Instantaneous flow fields at surface, middle, and bottom  $\sigma$ -layers at the time of flood tides at Pusan computed using the three-dimensional baroclinic circulation model (Case 1 in Table 1).



**Fig. 2-20.** Computed 15-day averaged flow field at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 1 in Table 1.



**Fig. 2-21.** Subtidal surface currents in the South Sea based on the observation by (a) Lie and Cho (1997), and (b) Mitta and Ogawa (1984).



**Fig. 2-22.** Vertical section of the computed 15-day averaged horizontal velocity vector on a meridional line south of Namhae-Do (thick solid line in Fig. 1) in September for Case 1 in Table 1.

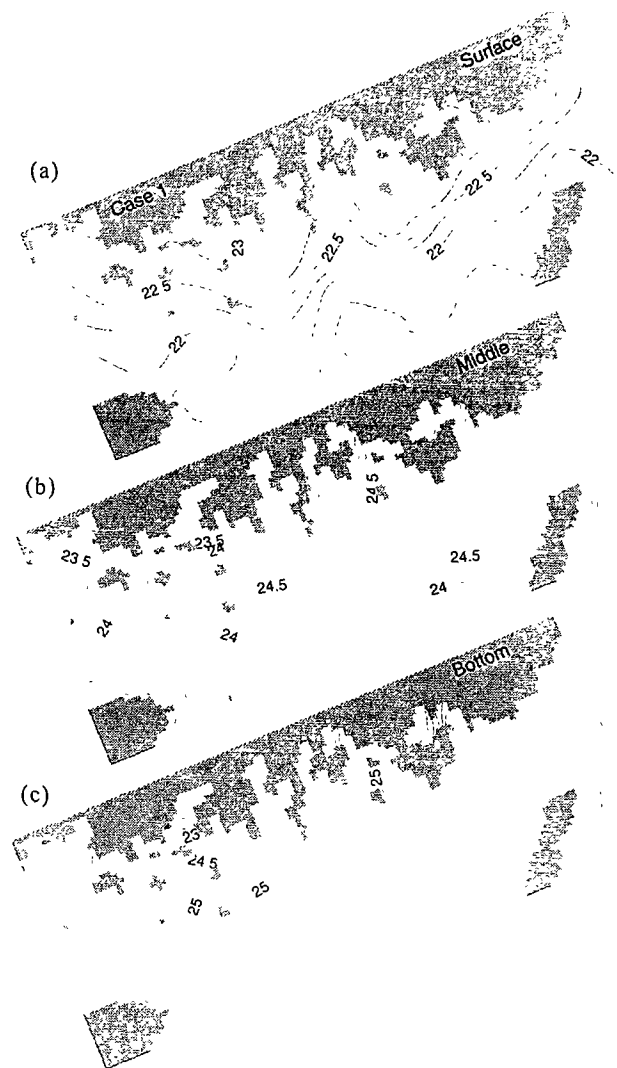
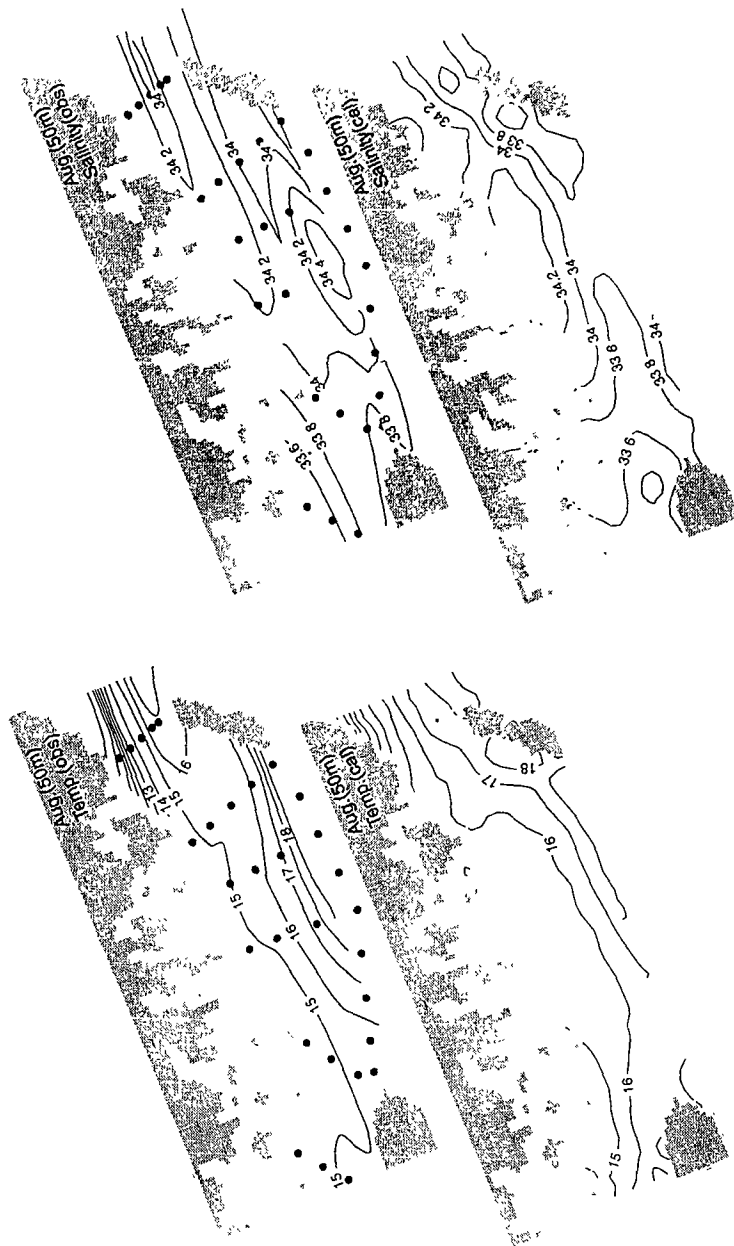


Fig. 2-23. Computed 15-day averaged density distribution at (a) surface, (b) middle, and (c) bottom  $\sigma$ -layers in September for Case 1 in Table 1.



**Fig. 2-24.** Horizontal distribution of observed temperature and salinity in August (top panel), and computed 15-day averaged temperature and salinity at 50 m depth in August (bottom panel) for Case 1 in Table 1.

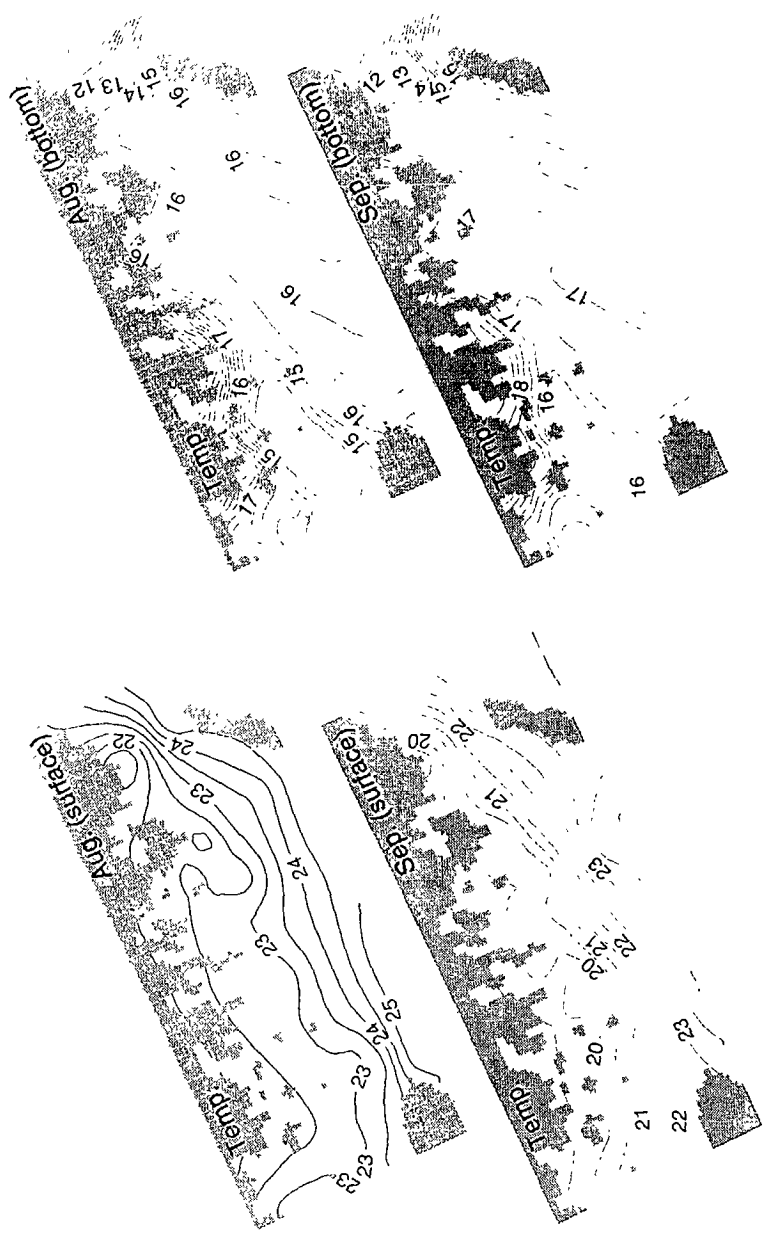
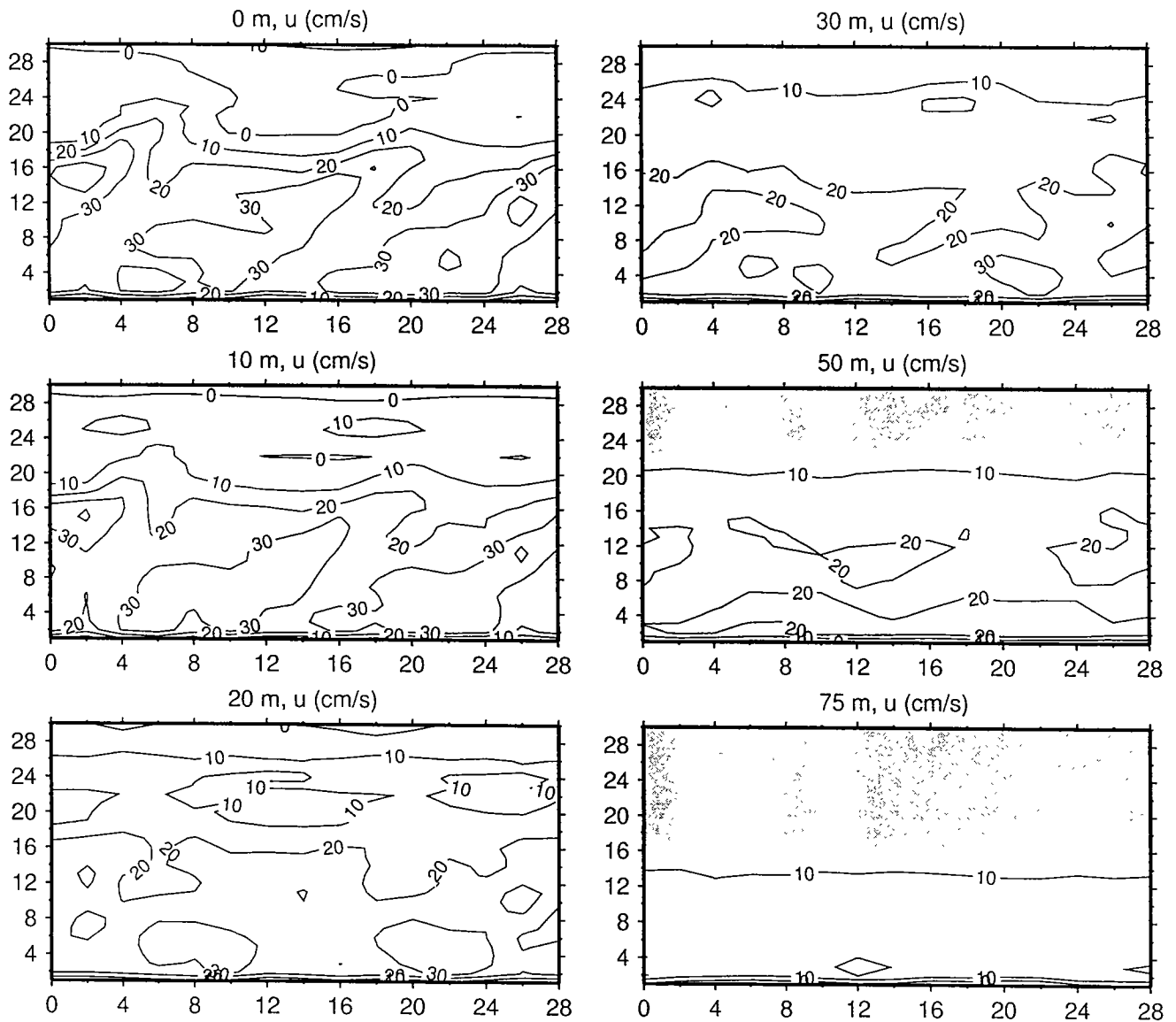


Fig. 2-25. Horizontal distribution of computed 15-day averaged temperature at surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 1 in Table 1.

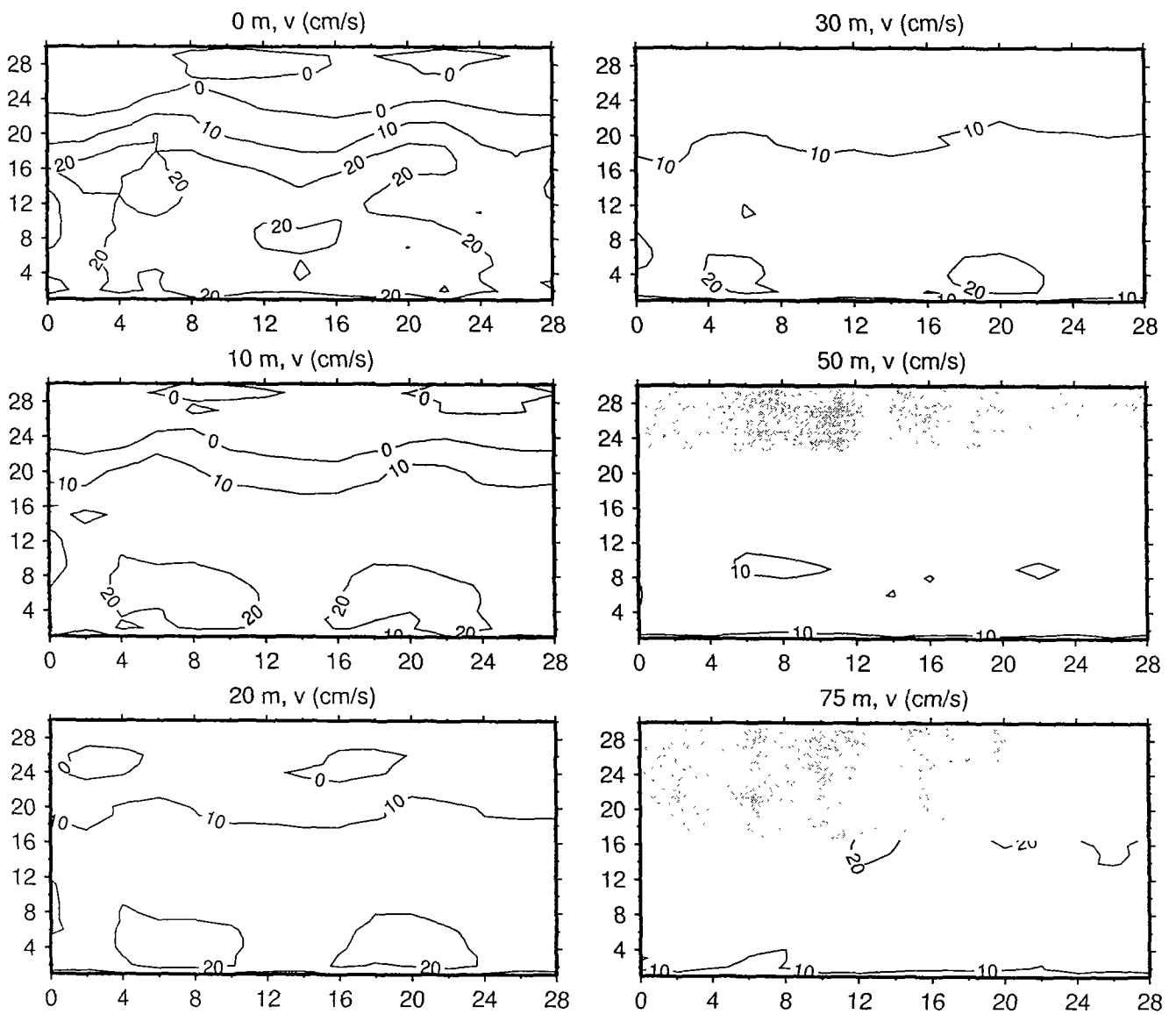




**Fig. 2-26.** Horizontal distribution of computed 15-day averaged salinity surface in August (upper left panel) and September (lower left panel), and bottom  $\sigma$ -layers in August (upper right panel) and in September (lower right panel) for Case 1 in Table 1.



**Fig. 2-27.** Time-space plots for the diurnally-averaged east-west component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.



**Fig. 2-28.** Time-space plots for the diurnally-averaged north-south component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

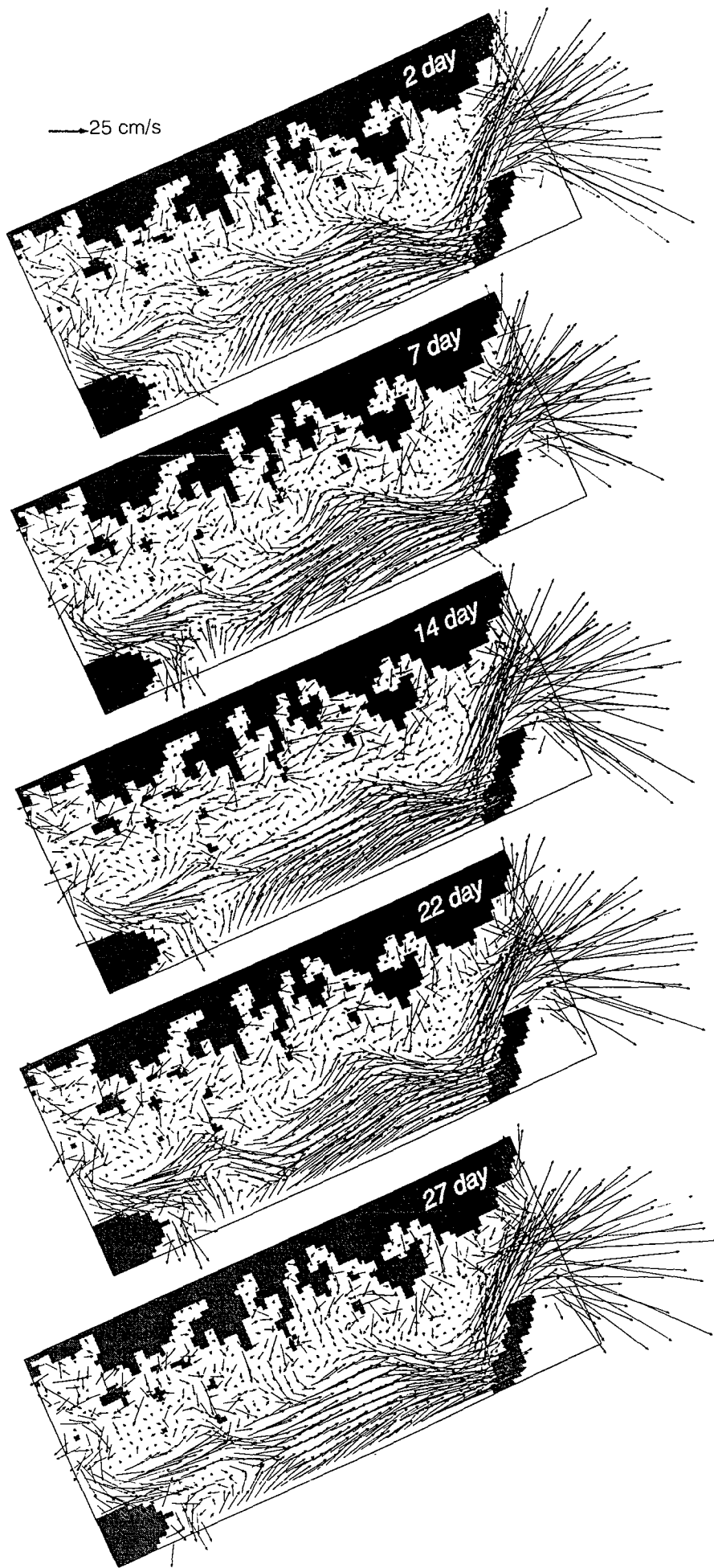
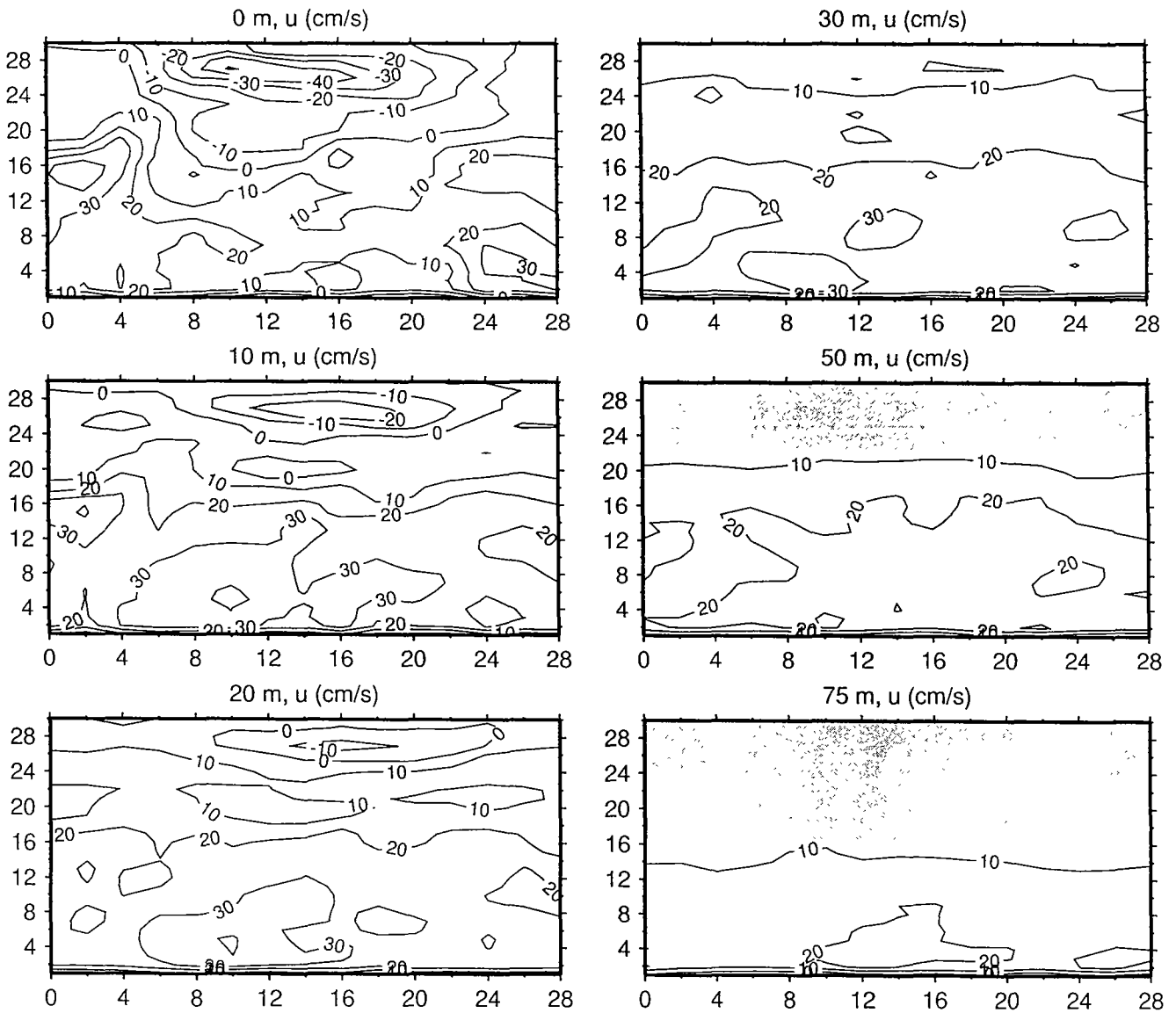
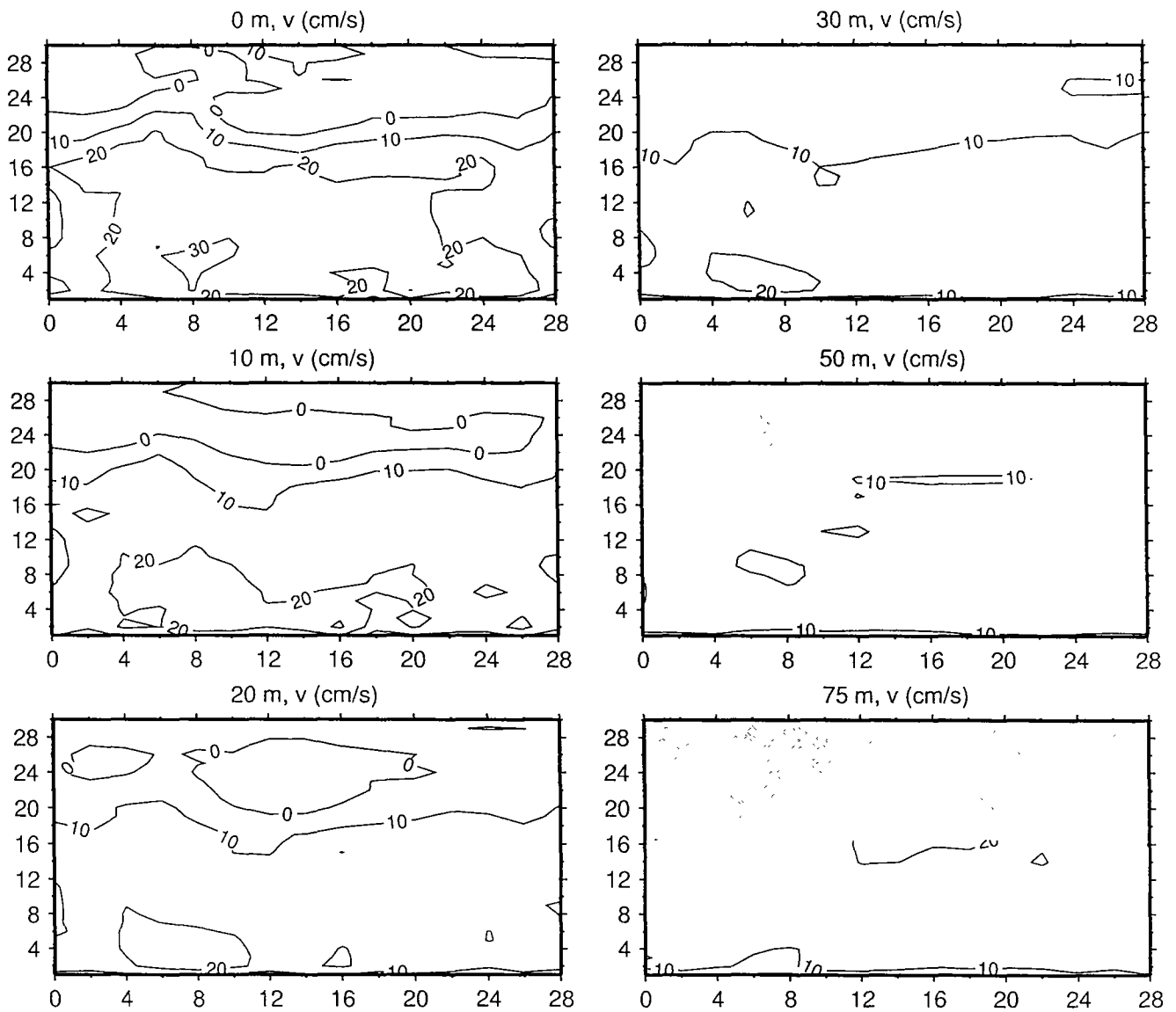


Fig. 2-29. Evolution of diurnally-averaged surface currents in time when the climatological mean wind in September, northeasterly wind with a speed of 3 m/s, is applied.



**Fig. 2-30.** Time-space plots for the diurnally-averaged east-west component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.



**Fig. 2-31.** Time-space plots for the diurnally-averaged north-south component of currents along a meridional section south of Namhae-Do (see Fig. 1) at selected depths when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied. The horizontal and vertical axes denote the time in day and position of grid points from south (1) to north (30), respectively.

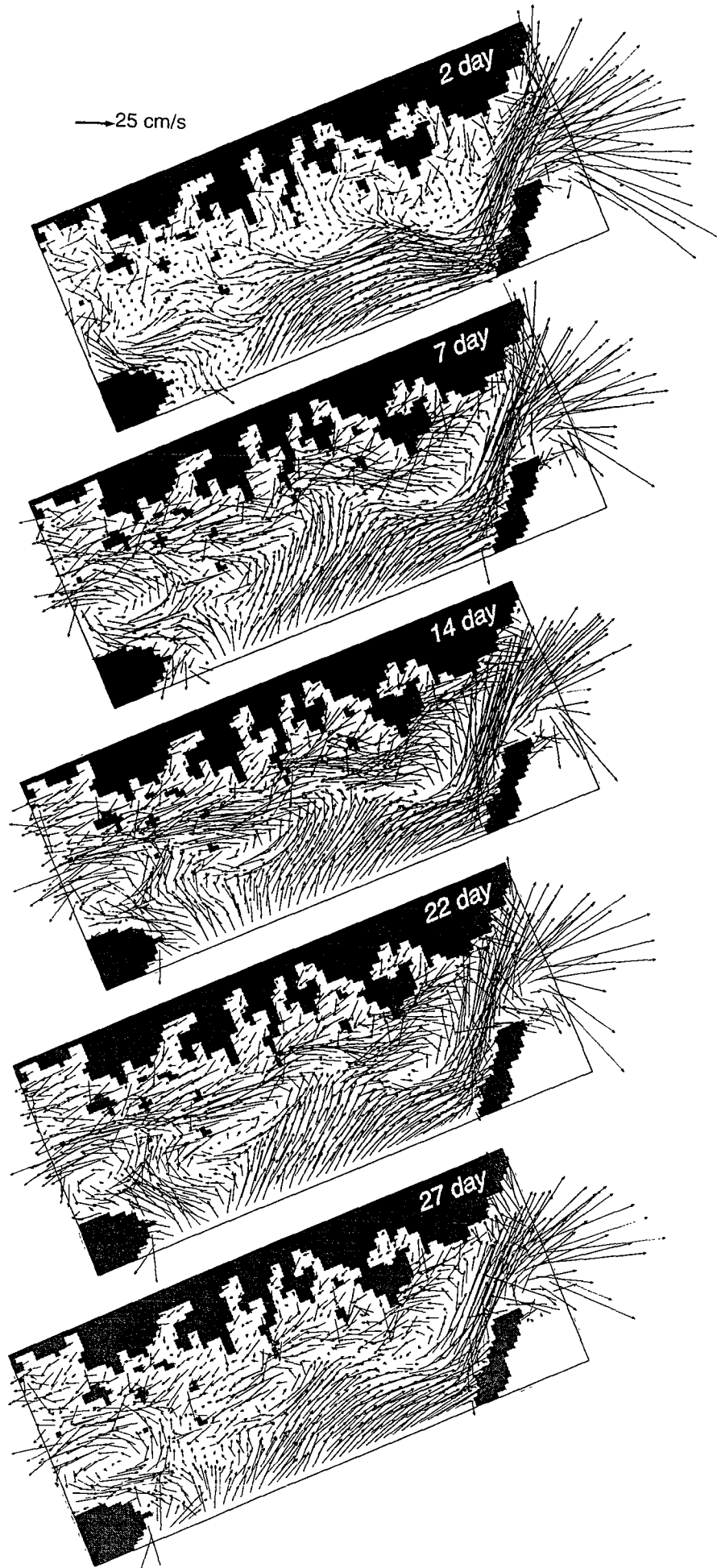


Fig. 2-32. Evolution of diurnally-averaged surface currents in time when an artificially strong northeasterly wind with a speed of 10 m/s is applied.

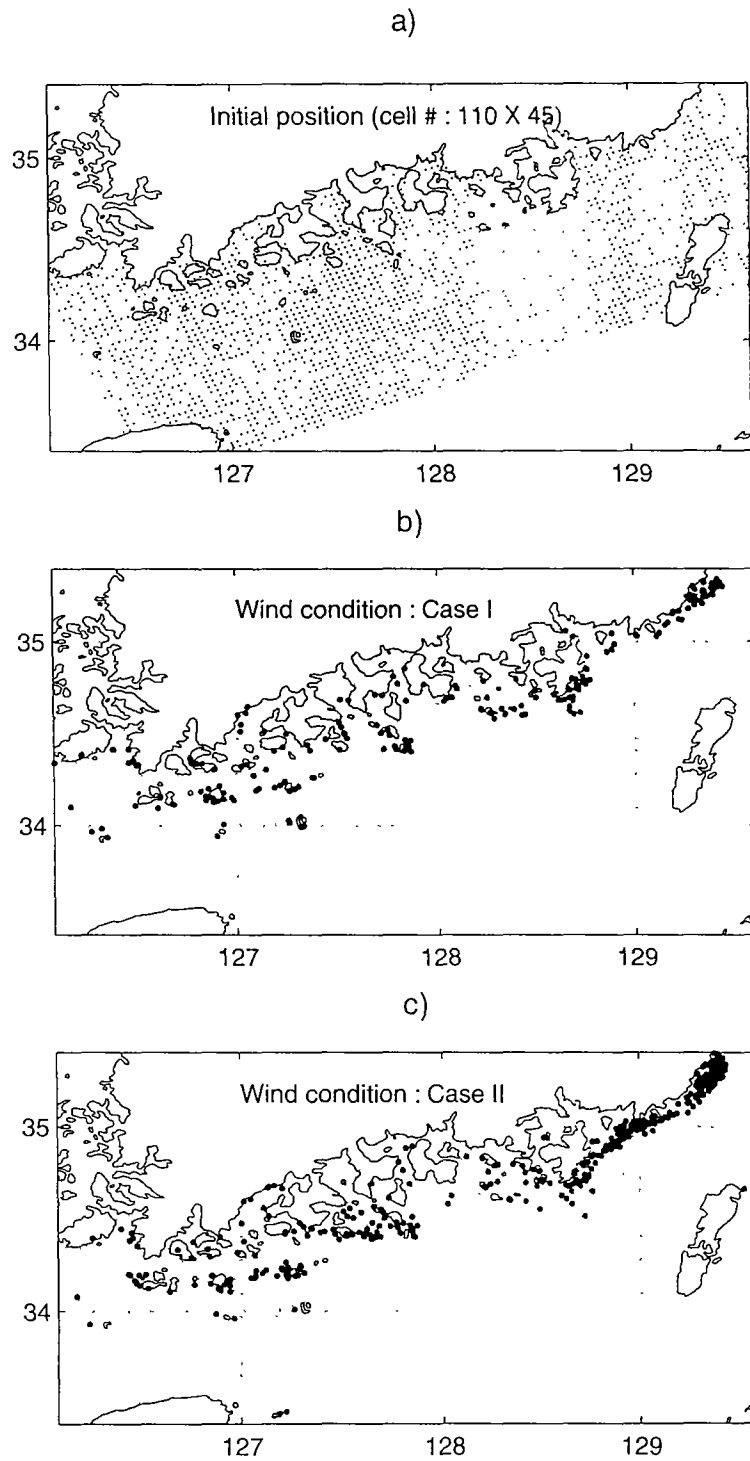
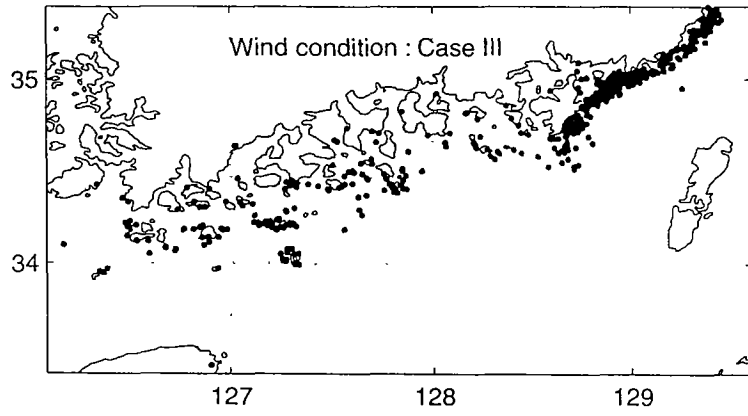


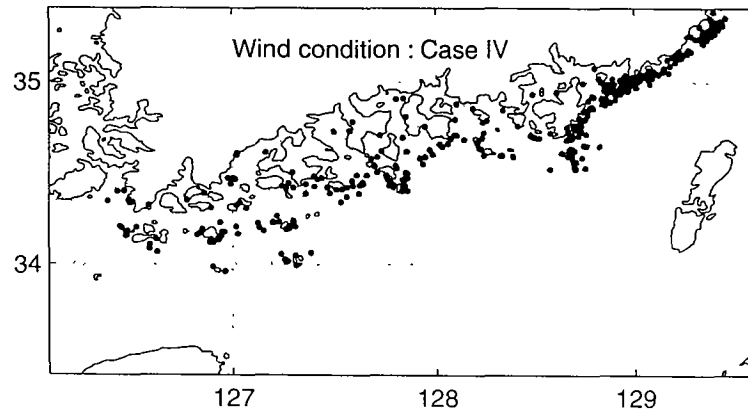
Fig. 2-33. The positions of spores settled at the bottom after 30 days in the current field are indicated. a) The spores were evenly distributed initially on a  $100 \times 45$  grid, b) the result of the case I, c) the result of the case II, d) the result of the case III, e) the result of the case IV. and f) result of using case V.



d)



e)



f)

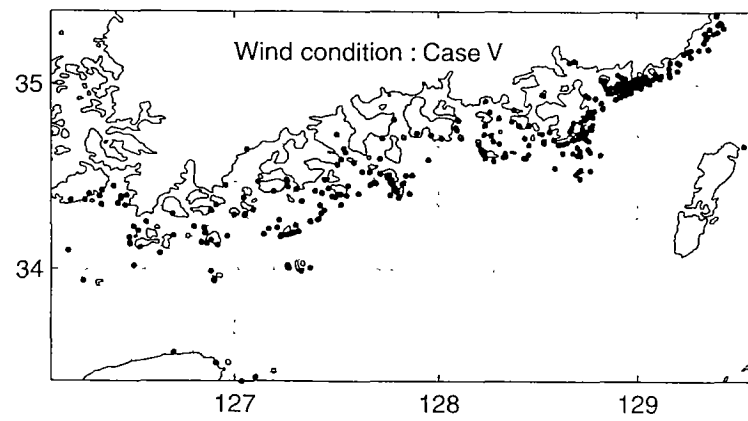
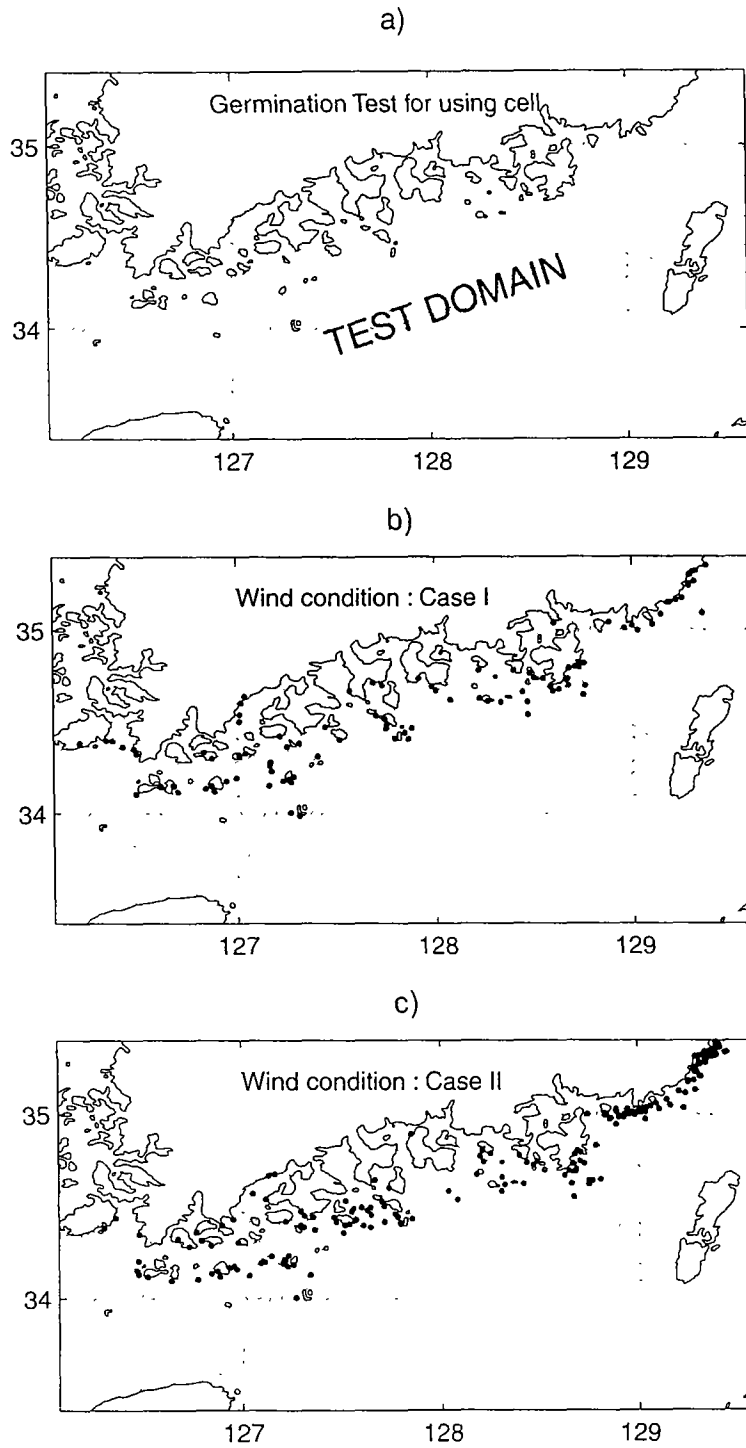
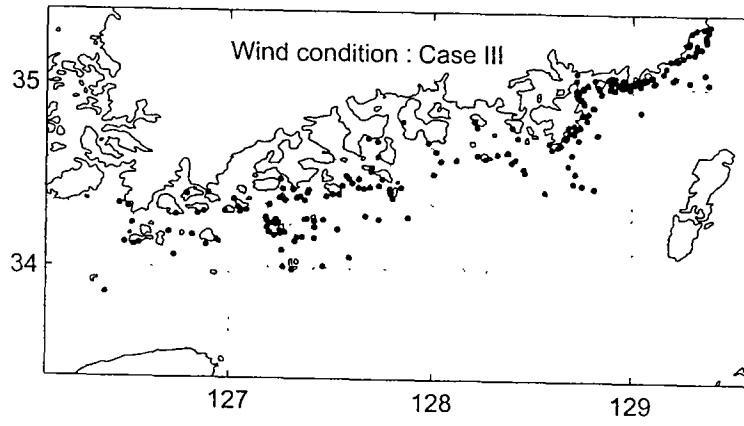


Fig. 2-33 continued

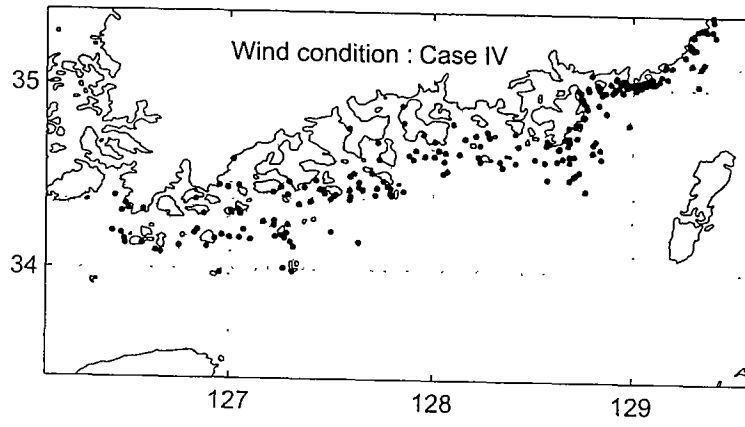


**Fig. 2-34.** Ascending of the germinated cells from the settled spores in the sinking experiment (Fig. 2-33). The position of the cells surfaced after 3 days are indicated vertical swimming velocity from Jung *et al.* (1998) was used. a) model domain, b) the result of the case I, c) the result of the case II, d) the result of the case III, e) the result of the case IV, and f) result of using case V.

d)



e)



f)

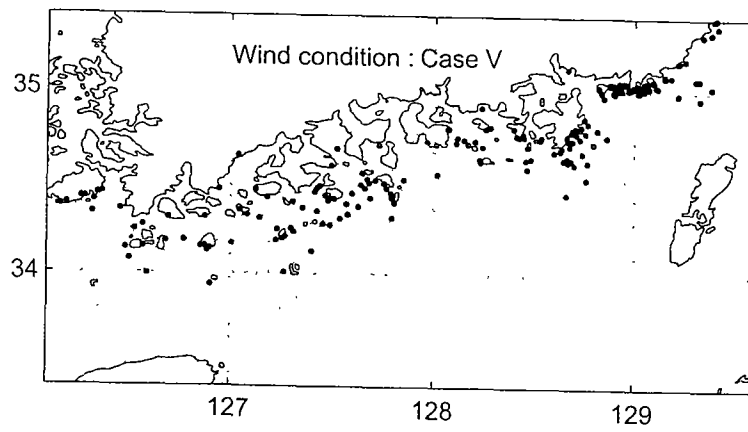
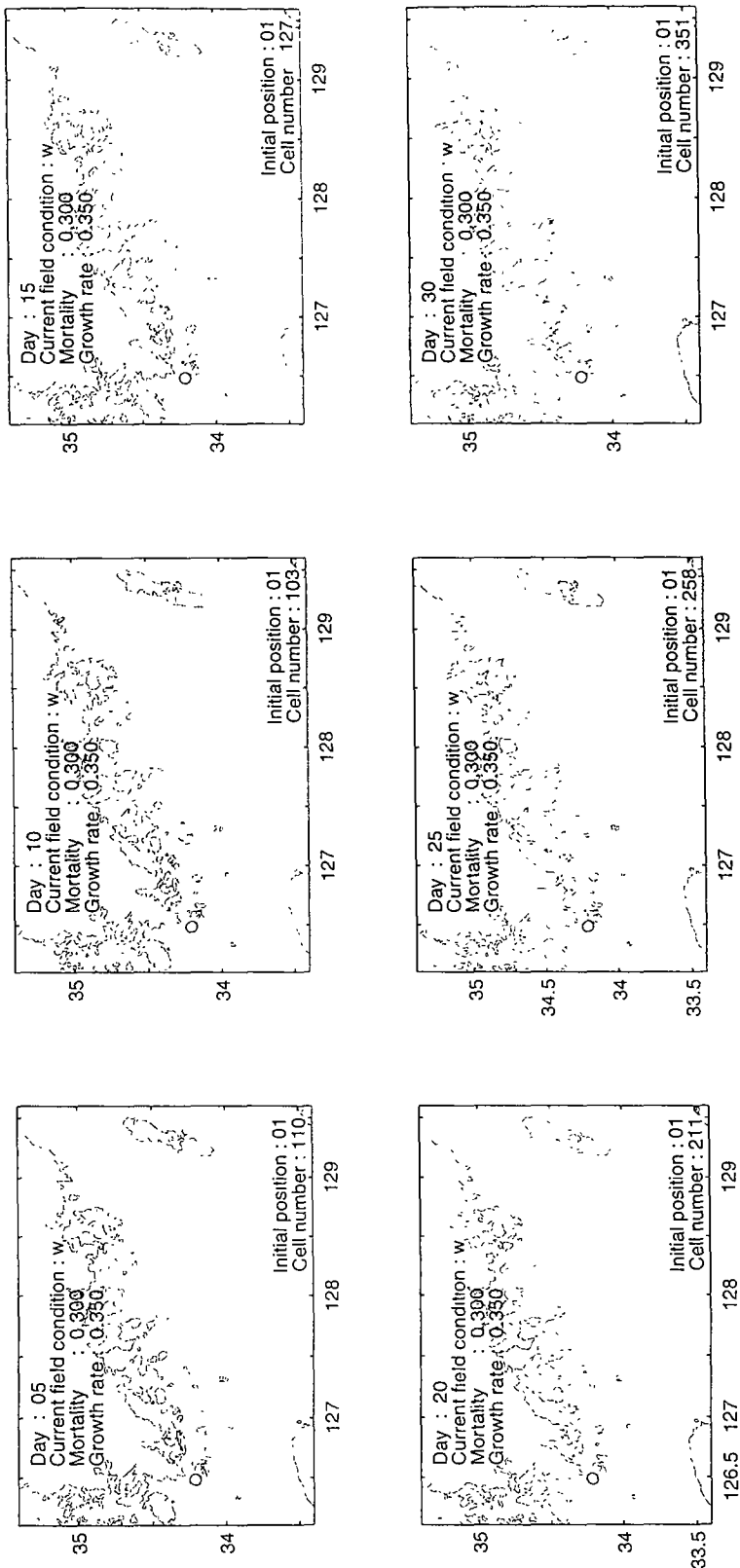
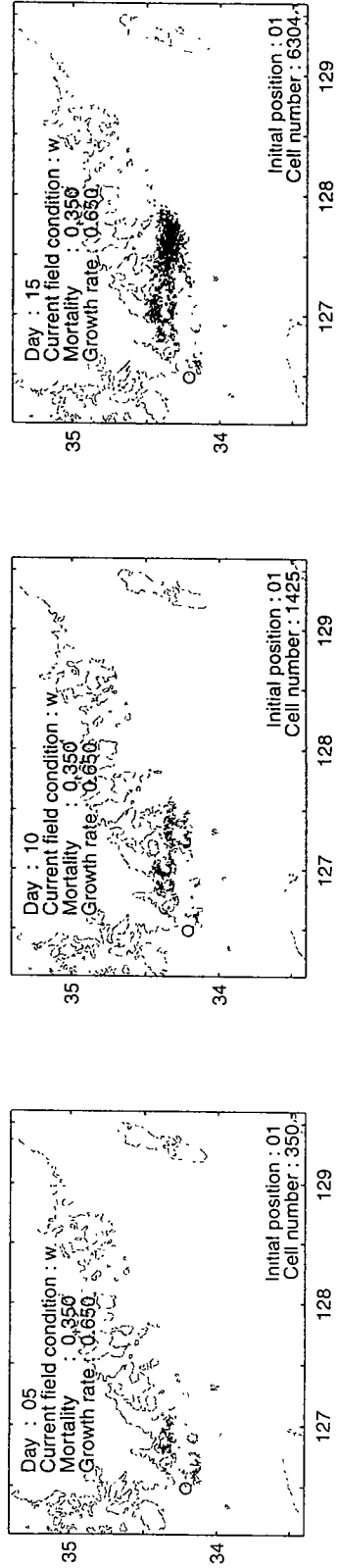


Fig. 2-34 continued



**Fig. 2-35.** Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.3 /day and growth rate was 0.35/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).



**Fig. 2 36.** Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.65/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).

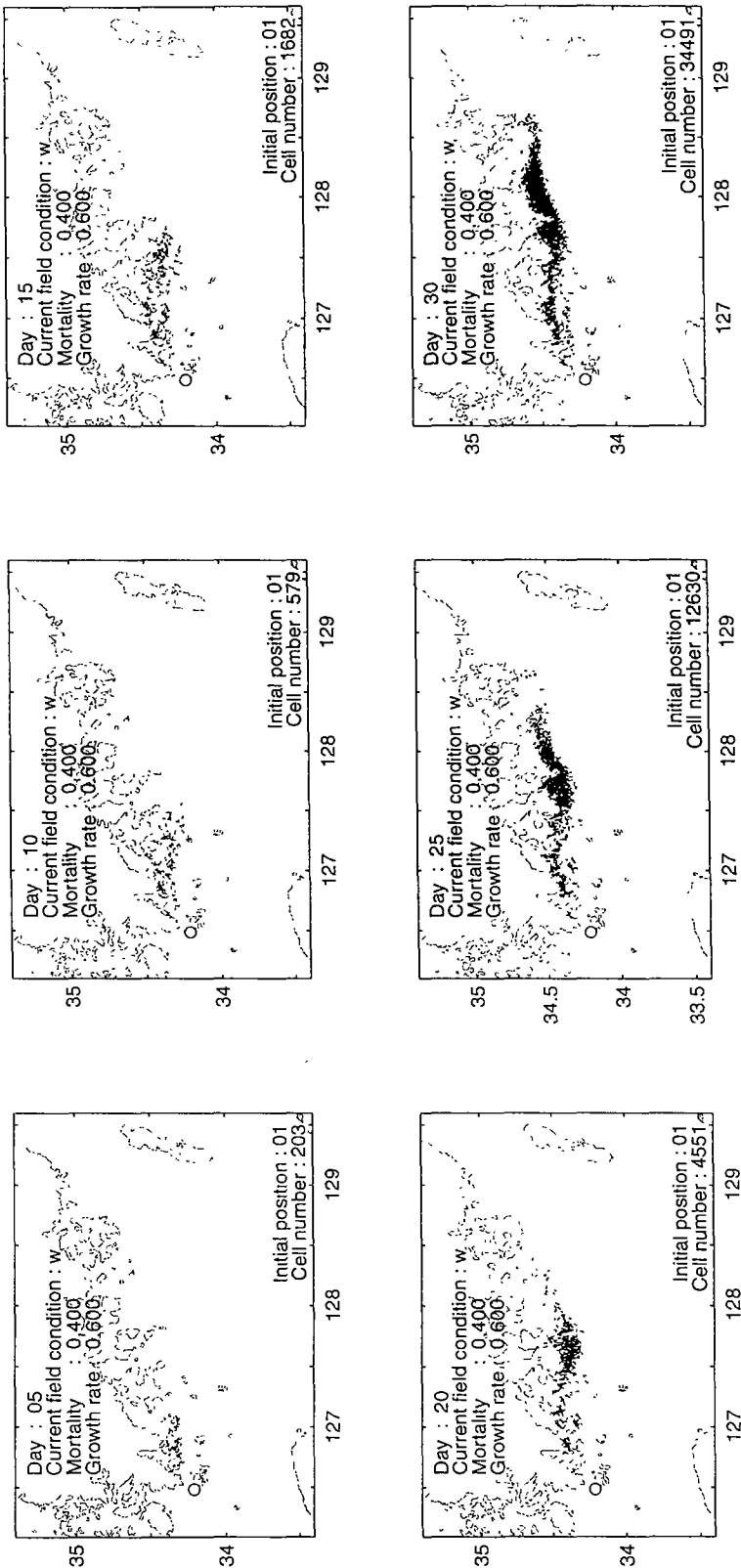
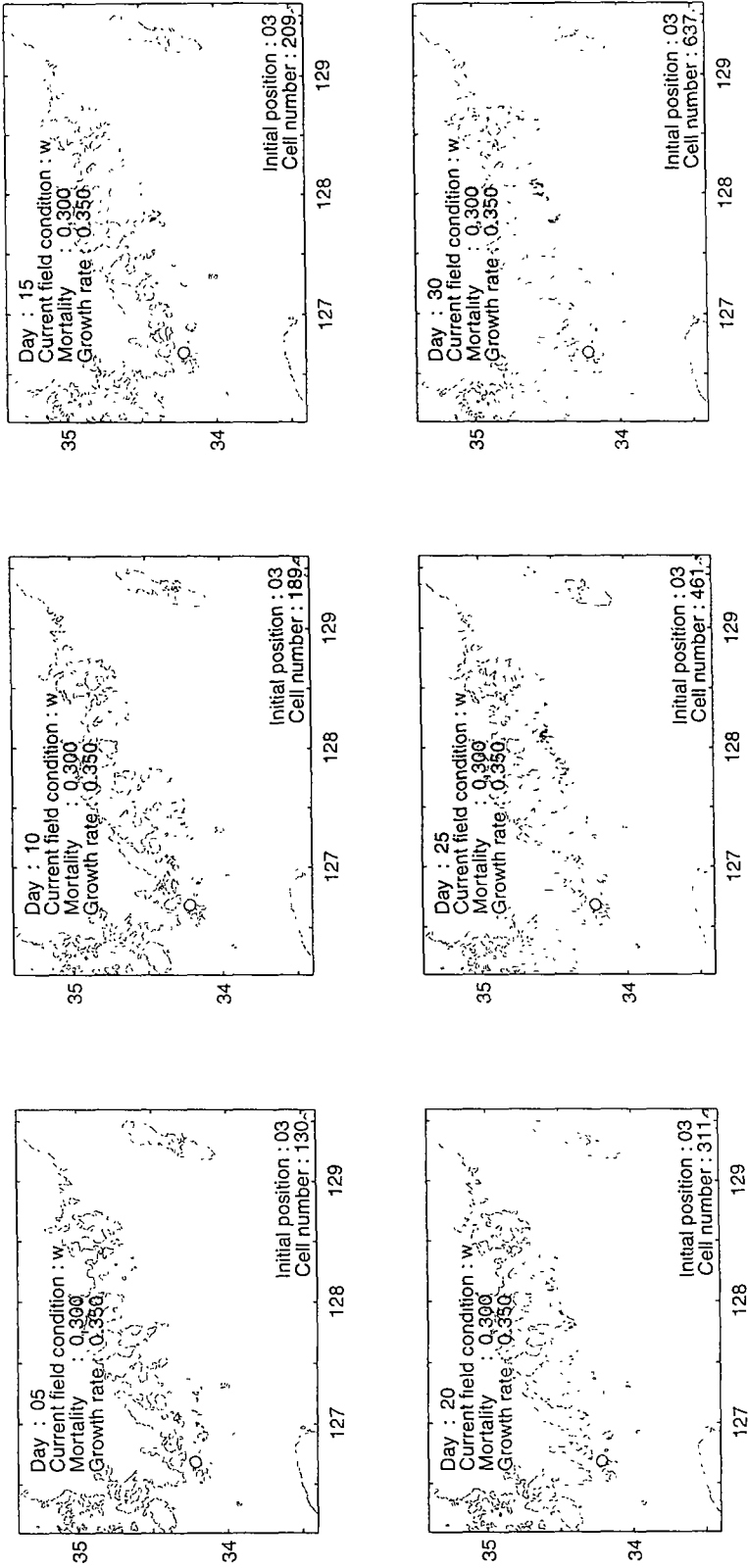
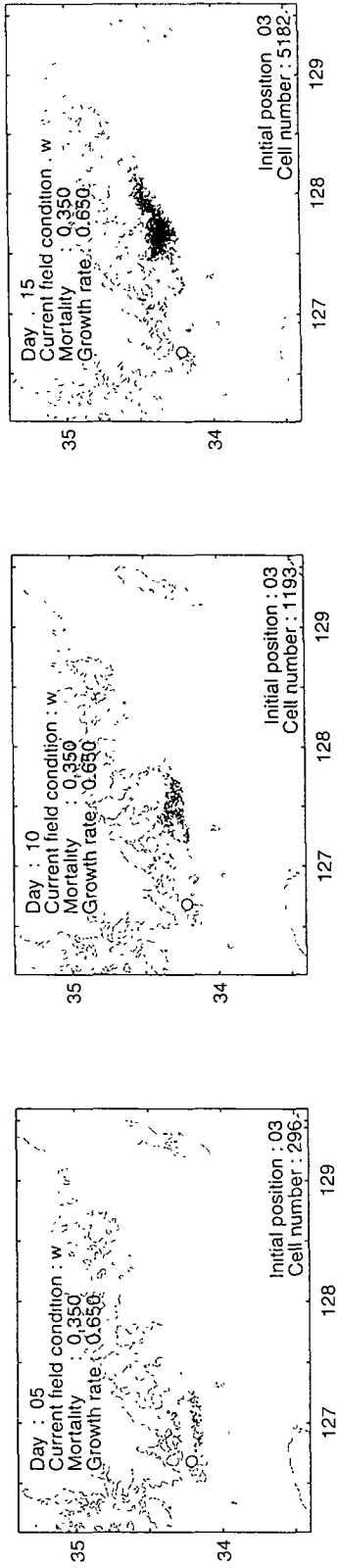


Fig. 2-37. Evolution of a HAB event with initial position was 01. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).

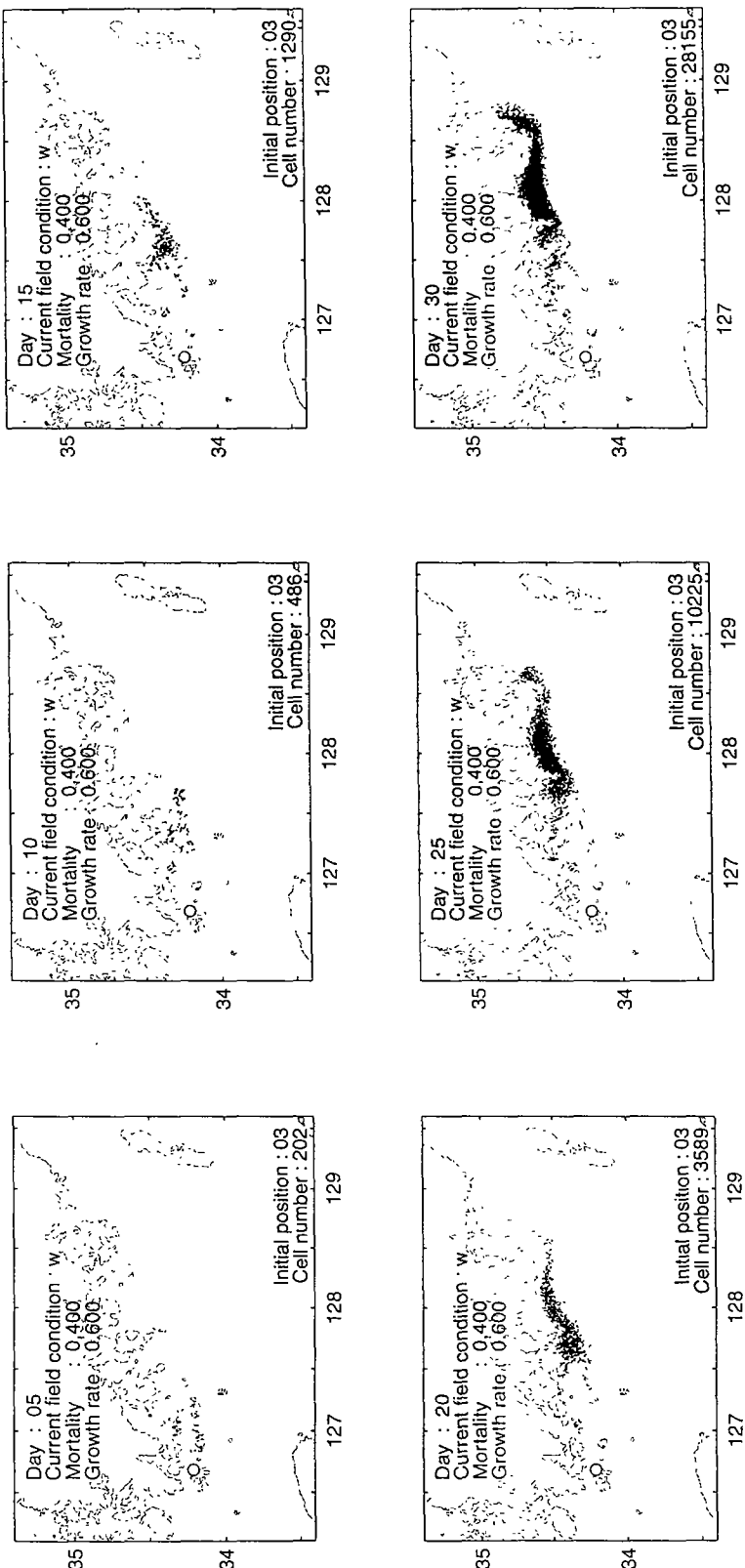


**Fig. 2-38.** Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.3 /day and growth rate was 0.35/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).

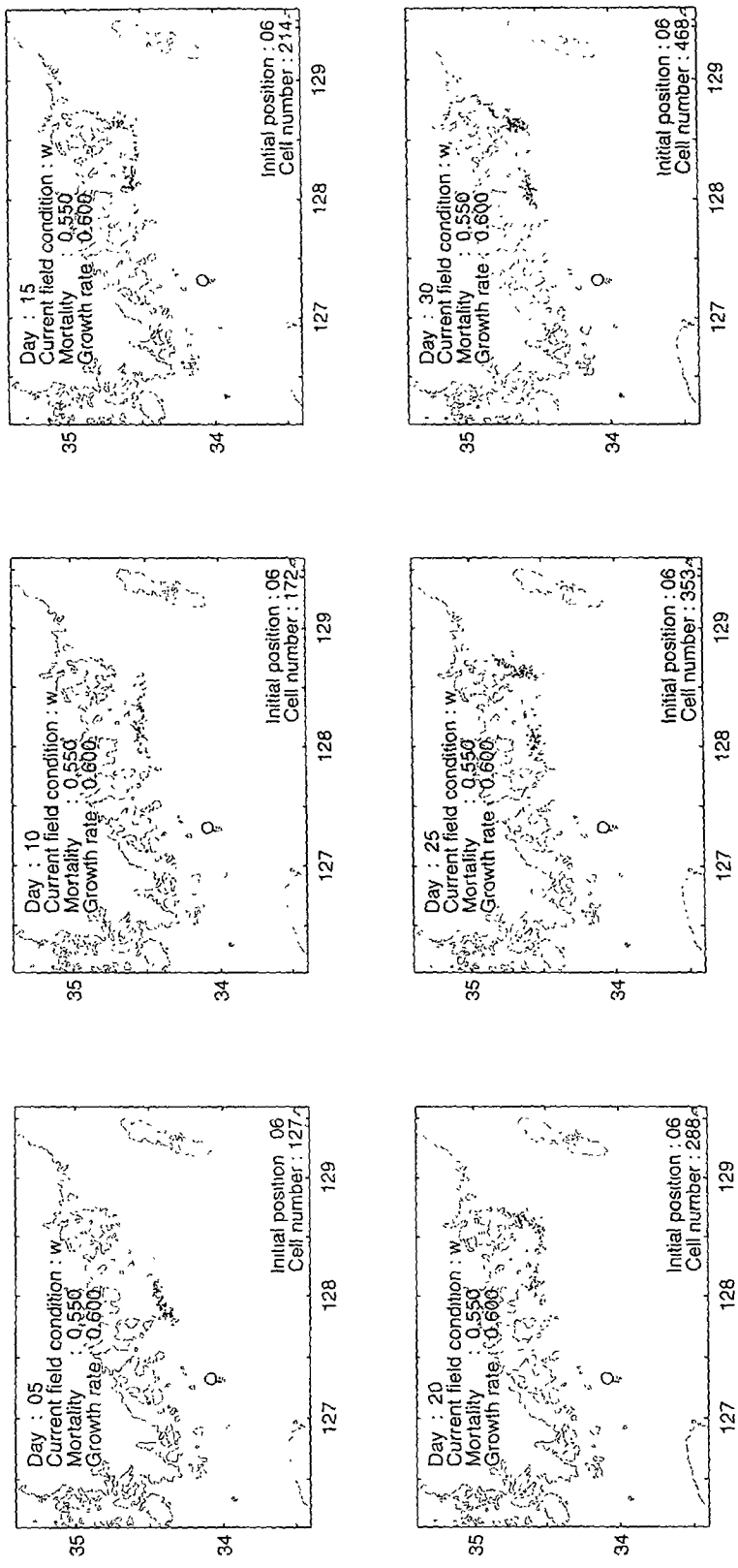


**Fig. 2-39.** Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.65/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).

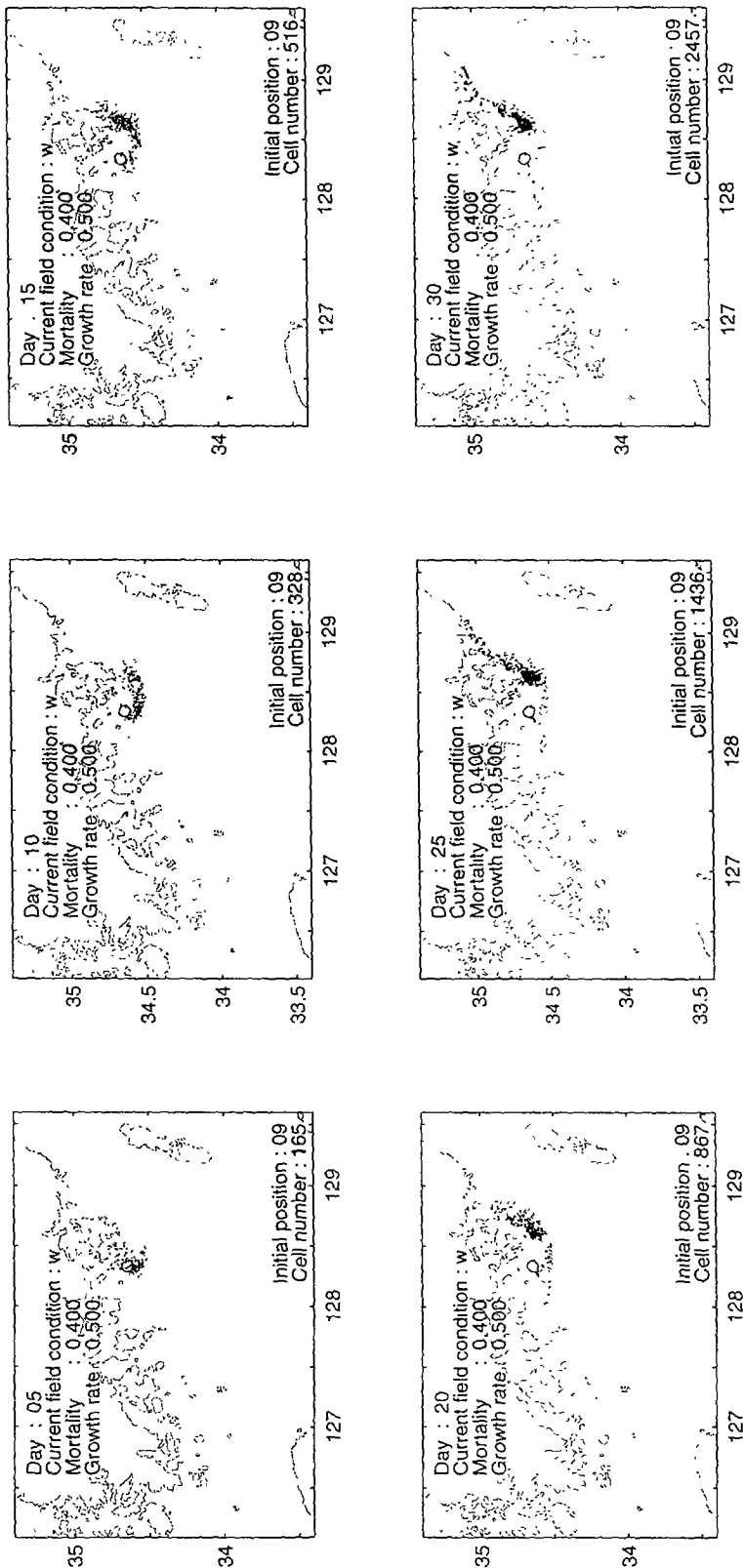




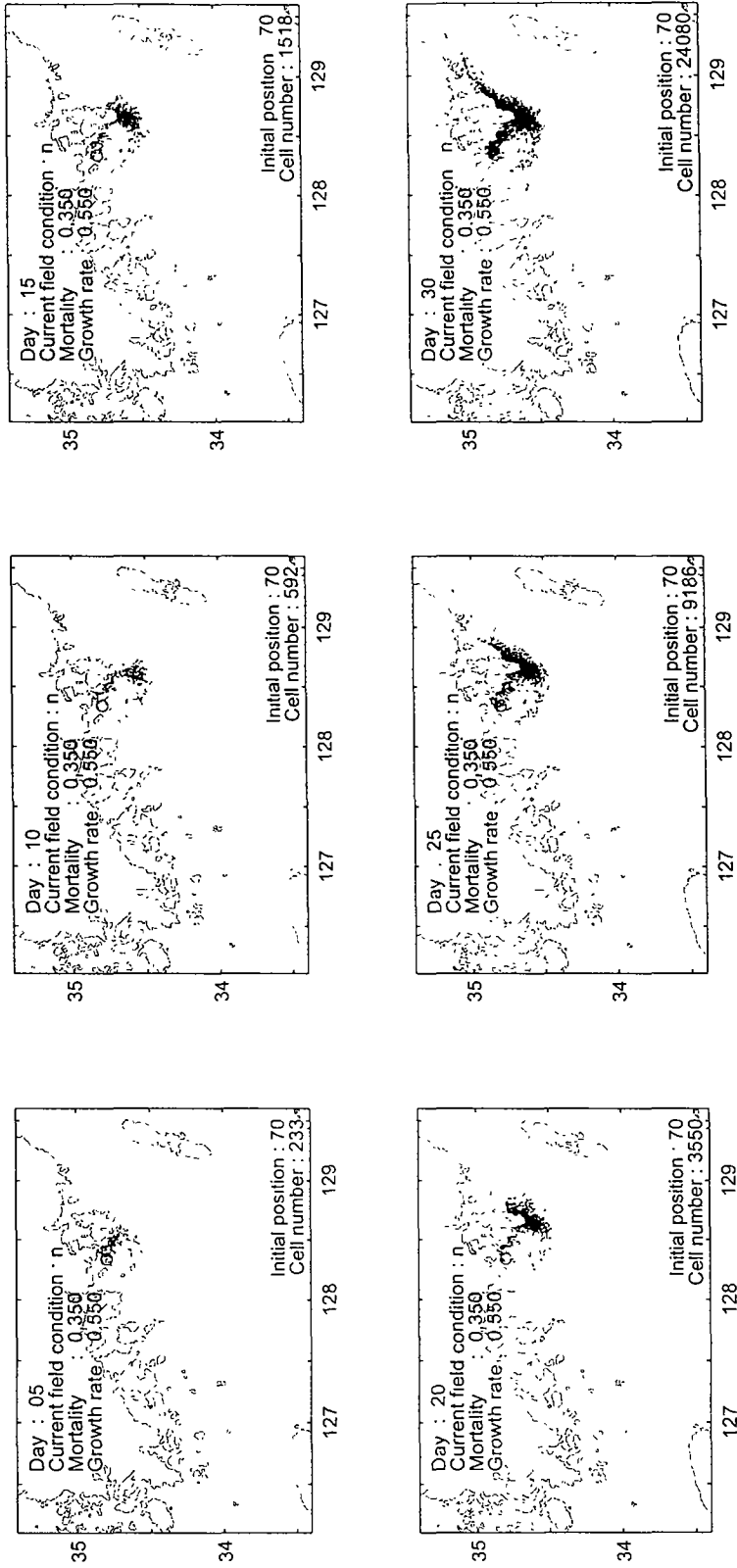
**Fig. 2-40.** Evolution of a HAB event with initial position was 03. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).



**Fig. 2-41.** Hindcast of the 98 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 06. Mortality was 0.55/day and growth rate was 0.60/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).



**Fig. 2-42.** Hindcast of the 95 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 09. Mortality was 0.40/day and growth rate was 0.50/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, ● : cell position).



**Fig. 2-43.** Hindcast of the 98 cochlodinium HAB event. Evolution of a HAB event with initial position was 70. Mortality was 0.35 /day and growth rate was 0.55/day. The case V current field was used. The distributions at every fifth day are shown (○ : initial position, • : cell position).