

제1차년도  
연차보고서

BSPE 97603-00-1042-1

동중국해 중·서부해역의 해양순환 연구  
(1차년도)

Ocean Circulation in the Western and  
Middle Part of East China Sea  
(First Year)

1998. 2.

한국해양연구소

# 提 出 文

## 韓國海洋研究所長 貴下

本 報告書를 “동중국해 중·서부해역의 해양순환 연구”의 1次年度 報告書로 提出합니다.

1998년 2월 일

연구 책임자 : 이 홍 재 (해양물리연구부)

해류 및 순환 :	이 홍 재 · 방 인 권	수괴 및 혼합 :	이 재 학 · 이 하 응
	조 철 호 · 이 석		이 대 하 · 안 병 응
	황 상 철 · 강 석 구		
	김 철 호 · 황 근 춘		
친생물순환 :	정 창 수 · 홍 기 훈	생태계 역학 :	유 신 재 · 신 경 순
	김 석 현 · 박 선 규		박 지 수 · 신 경 숙
	이 상 한 · 도 가 영		
	박 준 건	제주도 해황 :	노 홍 길 · 방 의 찬

# 要 約 文

## I. 제목

동중국해 중·서부해역의 해양순환 (1차년도)

## II. 연구의 필요성과 목적

### 1. 필요성

- 우리나라 동중국해의 배타적 경제수역의 관리 및 이용을 위한 해양정책자료 제공
- 동중국해의 해양환경보전, 수산 및 해양자원개발에 필요한 해류구조와 해양순환 자료획득 및 연구
- 황해, 우리나라 남해 해양순환에 지대한 영향을 미치는 동중국해에서 주요 해양과정의 규명

### 2. 연구개발의 2단계 목표 (1997-2000)

동중국해 중서부해역의 해양순환과 주요해양과정의 규명

중점 세부연구 목표

- 황해난류의 기원과 경로
- 양자강 하천수의 거동과 확장범위 및 물질수송
- 황해 남부와 동중국해 북서부의 해수 및 물질교환
- 해양전선과 생물, 화학물질분포와의 관련성

### 3. 1차년도 주요목표

- 동중국해 중·서부역에서 동계 학제적 해양관측 실시
- 양자강 하천수의 확장과 영향을 파악하기 위한 춘·하계 지역 해양조사

## III. 연구개발의 전체적 범위

### 1. 동계 학제적 해양조사 실시

조사해역: 동중국해 중·서부역

조사항목: CTD, 해류(위성추적부이, ADCP), 친생물물질, 일차생산력,

플랑크톤.

조사일정: 1997. 3. 1.-10.

조사선박: 한국해양연구소 연구선 은누리호 (1400톤급)

조사팀구성: 해양물리, 화학, 생물 3개팀

2. 하계 양자강 하천수 거동을 위한 지역해양조사

조사해역: 양자강 하구와 제주도 사이 동중국해 북서부해역

조사항목: CTD, 해류 (위성추적부이, ADCP)

조사일정: 1997. 6. 7.-13.

조사선박: 한국해양연구소 연구선 이어도호 (350톤급)

조사팀구성: 해양물리분야 1개팀

3. 제주도 주변 해양조사 실시

조사해역: 제주해협, 제주도 동부 및 서부역

조사항목: CTD 및 해류 (TGPS)

조사일정:

제주해협- 1997. 1. -10. 월별관측

제주서부- 1997. 7. 21.-22.

제주동부- 1997. 2. 22.-23.

조사선박: 제주대 실습선 한라호 (200톤급) 등 3척

조사팀: 제주대학교 해양물리연구팀

4. 자료의 일차처리 및 분석

분야별로 기초자료의 질 검토

관측 자료 및 시료의 기본처리

분야별 자료분석

5. 학술워크숍 공동개최

명칭: Circulation and air-sea interaction in the East China Sea

주최: 한국해양연구소, 중국국가해양국 제2해양연구소

장소: 중국 항주 Huajiashan Hotel

일시: 1997. 10. 3. - 5.

참가자: 25 명 (한국 9, 중국 15, 대만 1)

6. 국제공동연구 참여 및 지역국가 협력

○ 국제공동연구 참여

세계해양대순환실험 (WOCE) 표층류 프로그램 참여 및 학술활동

○ 지역국가협력

- 중국국가해양국 제2해양연구소: 연구활동 현황 및 공동연구 협의 (소장인 J. Su 교수와 Y. Yuan 교수)
- 일본 Kagoshima 대학: 일본과 공동 해류관측 실시 (연구책임자: Hiroshi Ichikawa 교수)

#### IV. 연구개발의 결과

##### 1. 늦겨울, 초봄 해류조사 및 해류구조

###### (1) 위성추적부이에 의한 해류실험

- 늦겨울 동중국해 중·서부역의 상층 해류장을 추적하기 위하여 1997년 3월 초순 동계 종합해양조사시 13대의 위성추적부이 투하
- 초여름 제주도-양자강 사이의 흐름을 파악하기 위하여 8대의 위성추적부이 투하.

###### (2) 부이실험에 의한 주요결과

###### 가. 제주도 주변해역에서의 흐름

- 제주도 서쪽에서 북상하는 흐름은 제주도 북서 해역에서 방향전환을 하여 제주해협으로 진입함
- 황해 내부로 유입하는 황해난류의 흐름을 뒷받침하는 관측결과는 없었음
- 양자강퇴 북동쪽 사면을 따라 남하하는 흐름이 존재함

###### 나. 양자강 하구역에서의 흐름

- 양자강퇴 상부에는 늦겨울에는 뚜렷한 흐름이 없었으나 초여름에는 동쪽으로 흐르는 흐름이 존재함
- 양자강 하구 남쪽의 골에는 북상하는 흐름이 존재함

###### 다. 대만난류역에서의 흐름

- 수심 78-86 m에 투하한 부이는 북동진하다 북위 29.5° 이남에서 동쪽으로 이동함
- 100 m 등수심선을 따라 북동진 하는 흐름이 존재함

###### 라. 대륙붕단역에서의 흐름

- 전선파동역에서 약 25 cm/s의 동향류 존재

###### (3) ADCP에 의한 해류 관측

- 동중국해 중·서부해역에서 1997년 3월 조사선 온누리호에 장착된 ADCP에 의한 유속장 조사
- 양자강 하구역과 제주도 사이에서 1997년 6월 조사선 이어도호에 장착된 ADCP에 의한 유속장 조사
- 3월에는 수직적으로 매 8 m 마다, 6월에는 매 4 m 간격으로 자료 획득

- 조석 모델결과를 이용 조류성분을 제거함
- (4) 해류계 계류
  - 일본 가고시마대학 조사선을 이용 대마난류 분기역에 RCM 3대를 계류함
  - 이 계류 장비는 1998년 3월에 회수할 예정임

## 2. 양자강 하천수 plume의 역학 연구

### (1) 필요성

- 여름철 양자강 하천수 plume의 북동향으로의 전향은 황해, 남해, 심지어는 동해에까지 많은 영향을 미치는 현상으로 이의 역학적 규명이 필요함

### (2) 목표

- 수치모델링을 이용하여 하천수 유입에 따른 연안 해수순환의 역학 규명

### (3) 연구개발의 범위

- 단순화된 모델영역을 구성하여 다양한 물리적 조건하에서의 해양의 반응을 연구

### (4) 결과 및 제언

저염의 하천수 유입에 의한 연안 순환의 형성을 수치모델을 통하여 살펴보았다. 하구 남쪽연안을 따라 흐르는 연안류와 하구부근의 고기압형 순환이 잘 재현되었으며, 조건을 변화시켜가며 그에 따른 반응의 변화로부터 역학적 요인을 살펴보았다. 표준실험을 포함한 대부분의 실험에서 하구로부터 저염수의 유출각도는 초기에는 동향이나 시간이 지남에 따라 북동향으로 변하는 흥미로운 결과가 나왔다. 해저면의 경사를 준 경우에는 유출각도가 더욱 북쪽으로 향하여져 하구의 북쪽연안의 상당한 부분에까지 북향하는 흐름이 형성되었다. 유량이 적은 경우에도 많은 경우에 비하여 유출각도가 더 북쪽으로 향하였다. 이외에도 초기 해양의 성층, 하천수의 염분 등을 바꾸어가며 실험을 하였다.

여름철 양자강 하천수의 북동향으로의 방향전환의 역학적 요인을 규명하기 위한 연구로서, 수치모델을 이용하여 간단한 조건하에서의 저염수 유입에 따른 해양의 반응을 살펴보았다. 앞으로 추가적으로 수직 와도계수, 하구의 폭, 바람, 평균해류, 조석, 유량의 시간적 변화, 실제 지형 및 해저지형 등을 추가하여 실험을 계속할 예정이다. 이와 더불어 인공위성 자료를 포함한 관측자료의 수집 및 분석이 필요하다.

## 3. 동중국해 동부역의 상층해수순환

1991년도부터 1996년까지 6년간 동중국해 동부역에서 조사한 총 56대의 위성 추적부이의 이동궤적을 분석하여 상층해류장을 작성하여 국내 관련학계에 배포하였다. 전체 부이의 이동궤적과 20'×20' 상자 평균해류벡타는 동중국해의 기본해류구조가 다음과 같은 세 가지로 구성되어 있음을 보인다.

- 1) 동중국해 대륙사면을 따라 북동진하는 Kuroshio가 Kyushu서방에서 Tokara해

협쪽으로 방향을 전환한다.

- 2) Kuroshio 방향전환점에서 분기되어 북상하는 지류는 대한해협으로 유입한다. 이 지류와 대한해협의 '대만난류'를 구분하기 위하여 'Kuroshio Branch Current (KBC)'라고 정의하였다.
- 3) Kyushu서방 깊은 골에는 시계방향의 순환이 존재하나, 연구결과는 황해난류가 KBC로부터 분기된다는 기존학설을 뒷받침하지는 않는다.

#### 4. 해수의 물리적 특성

제2단계 연구사업에서는 목적은 양자강유출수의 유동과 황해난류, 제주난류 및 황해저층냉수의 흐름 또는 확장, 그리고 소위 대만난류의 북향한계 등과 관련된 해수의 특성과 이들 수괴 사이의 혼합을 지배하는 물리적 과정을 밝히는 데 두었다. 이를 위하여 황해와 지리적 경계가 되는 제주도와 양자강 사이 해역은 중점적인 조사 해역으로 설정하였다. 1차년도에는 겨울철의 해양물리 특성을 위한 광역 관측을 1997년 3월 1 - 10일에 연구선 은누리호를 이용하여 실시하였고, 1997년 6월 7 - 13일에는 제주도와 양자강 하구 사이의 해역에서 연구선 이어도호를 이용하여 집중관측을 수행하였다. 이들 자료는 제주도와 양자강 사이 해역의 늦겨울철과 초여름 해황에 대한 여러 수괴들의 분포와 저염수괴의 연변화 해석에 대한 실마리를 제공해 주었다. 여름철에 양자강과 황해북부에서 공급된 담수의 영향을 받은 저염수는 제주도쪽을 지나 동쪽으로 빠져나가는데 상당 부분은 제주도와 양자강 사이의 해역에서 월동을 한후 다음해 여름이 시작되면서 제주도 인접해역을 통과하는 것으로 나타났다. 이는 일부 저염수의 황해남부 체류기간이 6 - 10개월임을 뜻하는 것으로 대륙기원의 물질이 동중국해나 동해로 이동하는데 걸리는 시간 상한선을 제시하는 중요한 결과라 할 수 있다. 6월에 조사에서는 약층에서 소규모 변화들이 강함이 관측되어 저염수의 혼합과정과 혼합해역에 대한 중요한 단서를 주었다. 두 수괴사이에 혼합에서 국지적 난류혼합에 의한 혼합층 형성 과정보다는 관입의 효과가 더 많은 것으로 보이며 이는 앞으로 혼합과 관련된 과정연구의 방향을 제시해준다.

#### 5. 양자강 연안수의 유입과 제주도 주변해역의 해양순환

양자강 연안수의 이동양상과 이 연안수가 제주도 주변해역에 미치는 영향 및 최저 염분수 축의 이동경로와 출현시기, 제주해협내의 유속변화 등을 파악하기 위해 염분분포, Argos Buoy 및 TGPS Buoy 추적결과, 해류계에 의한 정점측류자료 등을 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 양자강 연안수의 최저염분 축은 양자강 하구역으로부터 하계에는 북동방향으로 이동하여 제주도 서쪽해역과 제주해협을 경유하여 와(渦)의 형태로 한국남해로 이동한다.
- 2) 이 저염분수가 제주도 주변해역에 영향을 미쳐 표층수가 저염화되는 시기는 6

월부터 11월까지 이지만 32.20 % 이하의 저염분수가 출현하는 시기는 7월부터 10월까지이며 이때 이 저염분수가 연직적으로 분포하는 깊이는 표층부터 수심 30m 정도이다.

- 3) 제주해협내의 표층유속은 양자강 연안수의 영향을 받지 않은 2~4월의 경우 해협의 중앙부에는 5.3(2월)~11.9(4월) cm/s로 느린 항류성분이 나타나는 것과는 대조적으로 양자강 연안수가 직접 영향을 미치는 6월~10월에는 19.8~56.2 cm/s의 강한 항류가 나타나 동계보다 대체로 2~5배 정도 유속이 강해진다. 동내지 북동향의 흐름이 지배적이다. 또 제주도 북부연안으로부터 북쪽 6마일 이내에 투하한 부이는 제주해협 동쪽입구에 출현하는 설상의 대마난류수 때문에 동쪽으로 빠져나가지 못하는 것으로 생각된다. 우도에서 제주시 사이의 제주도 북부연안역 10마일 이내의 좁은 해역에서는 해류구조가 대단히 복잡하며 변화가 심하다. 동계에는 제주해협의 중앙부 보다 여서도 주변인 해협 북부해역에 강한 항류가 나타난다.

## 6. 천생물원소의 분포 특성

동중국해 중서부역의 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 저온저염의 제주 서남해역에서 높고 고온고염인 쿠로시오 해류에서 낮다. 대륙붕역에서의 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 수직적으로 균일하다.

수온 및 염분은 용존산소와 용존무기영양염류 농도와 음의 상관관계를 보인다. 암모니아이온을 제외하고는 고산소고염영양염의 저온저염수와 저산소 저염영양염의 고온고염수, 그리고 이 두 해수의 수온과 염분 특성이 교차되는 혼합수층 3개의 단성분(end-member)의 혼합 및 생물과정에 의해 동중국해 중서부해역의 용존산소 및 용존무기영양염류의 분포특성이 결정된다.

표층수층  $^{228}\text{Ra}$  방사능세기는 쿠로시오 영향을 받는 동중국해 대륙붕단역과 대한해협의 동수도에서 0.2 dpm/l 이하의 낮은 농도를 보인 반면에 한국 및 중국 연안역에서 0.3 dpm/l 이상으로 높다.  $^{226}\text{Ra}$  농도는  $^{228}\text{Ra}$  농도분포와 유사하다.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  농도비는 염분과 역의 상관관계를 보이고 있고, 한국 남해 및 중국 연안에서 1.61 ~ 2.12 로서 쿠로시오의 영향을 많이 받는 동중국해 대륙붕단역의 0.8 ~ 1.01 의 약 2배이다.  $^{228}\text{Ra}$ 의 방사 붕괴가 해수의 이동과 혼합시 무시된다고 가정하면 한국남해의 해수중 황해와 동중국해 기원의 대륙붕 해수는 약 11 ~ 41 %를 점유하는 것으로 추정된다.

## 7. 엽록소분포 및 생물광특성

113 개의 정점에서 엽록소의 수직분포가 측정되었다. 또한  $\alpha$ ,  $P_m^B$ ,  $I_k$ 와 같은 광합성 매개변수를 측정하기 위하여 38개의 P-I 실험을 시행하였다.

$\alpha$  값의 범위는 0.0042~0.169 mgC/mgChl-a/( $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ )/h 였고  $P_m^B$ 은 1.817 ~ 24.6 mgC/mgChl-a/h의 범위를 보였다.  $I_k$  값의 범위는 89.8~306.4  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$



로 광합성 변수들은 대체적으로 1995년 봄과 유사한 특성을 보였으나  $P_m^B$  은 전반적으로 높았다.

시기적으로 추계 대변성이 일어나기 전이나 이미 국지적인 식물플랑크톤의 번성이 일어나고 있는 것은 흥미롭다. 전선역에서 활발한 식물 성장이 관측되나 이는 일사량 증가에 의한 성층 효과가 아니고 수괴가 만나는 곳의 표층에서 저염수가 고염수 상부를 타고 들어가며 수직구조가 형성된 결과로 보인다. 이러한 현상의 시기 및 지속기간 등은 생태학적 에너지 흐름 측면에서 중요하다.

처음 실시된 수중 분광 측정에서 추정된 소광계수(diffuse attenuation coefficient)의 형태는 이 해역이 광학적으로 case 2 해역임을 보여주며 적절한 알고리즘의 개발/적용이 해석자료의 해석에 있어 필수적임을 의미한다. 본 조사에서 측정된 광학 프로파일은 총 6개에 불과하며 그중 쿠로시오 인근 해역에서 측정된 2 개는 측정 수심이 너무 작아 충분한 자료가 나오지 않았다. 추후 조사에서는 수중 알고리즘의 개발/검증을 위하여 가급적 많은 양의 측정이 바람직하며 특히 CDOM 과 부유사의 흡광계수 측정이 필요하다.

## V. 결론 및 제안

본 보고서는 동중국해 해양순환 2단계사업의 1차년도 연차보고서이다. 2단계사업의 연구대상해역은 동중국해의 중·서부역으로 본 보고서에 1997년 1년간 수행한 해양조사결과를 수록하였다. 연구는 해류관측, 해양학적 특성 (물리, 화학, 생물), 양자강수 확장 모델, 제주도 주변해역 해수순환 등 다분야 학제적 연구팀에 의해 수행되었으며, 국제공동프로그램인 WOCE의 한국계획으로 참여하였다. 1차년도에는 종합해양조사를 1997년 3월에 1회 실시하였으며, 양자강수의 제주도 쪽으로의 확장을 위한 지역해양조사를 1997년 6월에 1회 실시하였다.

연구는 주요 해양과정 위주로 수행되었으며, 동중국해 중·서부역의 해양순환의 근간이 되는 Kuroshio Branch Current, 황해난류, 양자강수의 확장에 초점을 맞추어 조사를 하였다. 한편, 1단계 사업기간중 획득한 위성부이 자료를 정리하여 동중국해 동부역의 해류도를 제시하여 배포하였으며, 양자강수 확장 역학구조를 위한 수치모델실험을 착수하였다. 2단계 사업기간중 위의 주요 해양과정 규명을 위한 정교한 해양조사를 실시할 예정이며, 세심한 자료분석과 정교한 모델연구를 수행하여 동중국해 중·서부역의 해양순환을 규명할 계획이다.



# SUMMARY

## I. Title

**Study on the Ocean Circulation in the Western and Middle area of the East China Sea (first year)**

## II. Necessity and objective of the study

### 1. Necessity

- a. Providing ocean policy data for management and utilization of the economic exclusive zone of the East China Sea (ECS),
- b. Investigating ocean current and circulation for environmental prevention, fisheries, and exploitation of marine resources in the ECS,
- c. Clarifying major ocean processes of the ECS related to ocean circulation of the Yellow and South Seas.

### 2. Goal of the second phase study (1997-2000)

Study on major coastal ocean processes related to the ocean circulation in the western and middle ECS.

#### Major items

- Origin and route of the Yellow Sea Warm Current,
- Eastward extension of the Changjiang freshwater plume and its dynamical processes,
- Exchange of seawater and materials between the southern Yellow Sea and the northwestern ECS,
- Relation between oceanic fronts and material transports.

### 3. Main purpose of the first year study

- Interdisciplinary oceanographic survey in winter in the western and middle ECS.
- Local survey in summer for extension and impact of the Changjiang freshwater plume.

### III. General scope of the study

#### 1. Interdisciplinary survey in winter

- Survey area: the western and middle ECS
- Major items: CTD, current (satellite-tracked drifters and ADCP), dissolved plant major inorganic nutrients, primary production, plankton
- Observation periods: March 1 to 10, 1997
- Vessel: R/V Onnuri of KORDI (1400 ton class)
- Survey group: four teams (physics, chemistry, biology)

#### 2. Local survey in summer for Changjiang plume

- Survey area: northwestern ECS between the Changjiang estuary and Chejudo
- Major items: CTD, current
- Observation period: June 7 to 13, 1997
- Vessel: R/V Eardo of KORDI (350 ton class)
- Survey group: one team (physics)

#### 3. Local surveys around Chejudo

- Survey area: Cheju Strait, western and eastern area of Chejudo
- Survey items: CTD, current
- Observation periods:  
in the Cheju Strait: monthly surveys from January to October, 1997  
western Cheju area: July 21-22  
eastern Cheju area: February 22-23
- Vessel: Training ship, Hanla (200 ton class), of Cheju National Univ. and two other boats
- Survey team: physical oceanography team of Cheju National Univ.

#### 4. Processing and analysis of oceanographic data

- Quality-control of data
- Basic processing of data collected in 1997
- Analysis of oceanographic data

#### 5. Holding a workshops

- Name: Circulation and air-sea interaction in the East China Sea

- Host institutions: KORDI and Second Institute of Oceanography, SOA
- Purpose: Hujiashan Hotel, Hanzhou, China
- Period: October 3 to 5, 1997
- Participants: 25 scientists from Korea (9), China (15), Taiwan (1)

#### 6. Participation in international programs and regional cooperation

- International cooperation: the World Ocean Circulation Experiment /Surface Velocity Programme (WOCE/SVP)
- Regional cooperation with China and Japan
  - Second Institute of Oceanography, SOA, China : Information exchange of research activities (Professors J. Su and Y. Yuan)
  - Kagoshima University, Japan : joint deployment of current meters (Professor H. Ichikawa)

### IV. Results of the study

#### 1. Current measurements and structure in late winter and early summer

##### (1) Experiment of satellite-tracked surface drifters

- Release of 13 WOCE standard surface drifters in early March, 1997 for the wintertime current field in the western and middle East China Sea,
- Release of 8 surface drifters in June, 1997 to examine surface current field between the Changjiang River mouth and Cheju-do,

##### (2) Major results of the drifter experiment

###### a. Flow around Cheju-do

- Northward flow in the western area of Cheju-do turns to the northeast off the northwestern coast of Cheju-do,
- There is no direct evidence of the Yellow Sea Warm Current flowing into the Yellow Sea,
- A southeastward flow was observed along the northeast slope of Changjiang bank.

###### b. Flow in Changjiang estuary

- There was no dominant flow in late winter, but eastward flow in early summer over the Changjiang bank,
- A northward flow was observed in the valley off the Changjiang River mouth.

c. Flow in the region of Taiwan Warm Current

- Drifters, released in the outer shelf of 78-86 m, moved northeastward on the shelf and then eastward south of 29.5° N,
- A northeastward flow was observed along the 100 m isobath.

d. Flow over the shelf edge

- An eastward flow at about 25 cm/s was observed in the Kuroshio frontal area.

(3) Current observations by ADCP

- Observing current field in the western East China Sea in early March 1997 by ship-mounted ADCP
- Observing current field between the Changjiang estuary and Cheju-do in June 1997 by ship mounted ADCP
- Collecting data at 8 m intervals for the survey March, and at 4 m intervals for the survey June,
- Detiding tidal currents in observed ADCP data by five major tidal constituents.

(4) Deployment of current meters

- Three current meters were deployed in the branching area of the Tsushima Warm Current on board of R/V Keitenmaru of Kagoshima University, Japan
- The mooring system will be recovered in March 1998.

## 2. Dynamics of the Yangtze River Diluted Water

(1) Necessities

- It is necessary to investigate dynamics of the northeastward turning of the Yangtze River Diluted Water in summertime because a profound influences are exerted on the ocean environments in the Yellow Sea, South Sea of Korea and the East Sea.

(2) Objectives

- Numerical modeling investigation of the dynamics of the oceanic circulation induced by the fresh water input in the coastal ocean.

(3) Scopes of the study

- Investigate the ocean responses to various conditions in an idealized model basin

#### (4) Results and Suggestions

We have performed a numerical modeling study of the development of the oceanic circulation induced by the low-salinity river outflow. A coastal current along the coast south of the river mouth and an anticyclonic circulation just off the river mouth are all well reproduced. To investigate the dynamics various conditions are applied and changes in the oceanic responses are studied. In most experiments including the control experiment the angle at which the river outflow leaves the river mouth was east in the early stage but later it has changed to northeast. The outflow angle changed to further northward when the bottom has an slope and a northward flowing current has developed over a considerable length of the northern coast. There was also a little shift to the north in the outflow angle when the river discharge was small in contrast to large river discharge case. Other experiments were also performed with different conditions like with stratification in the ocean and higher salinity of the river water, etc..

To investigate dynamics of the northeastward turning of the Yangtze River Diluted Water in summertime we have performed a numerical modeling study of the oceanic responses to the low-salinity water input in the simplified conditions. As a next step, other conditions such as vertical eddy coefficients, width of the river mouth, wind, mean current, tide, temporal change in the river discharge, realistic geometry and bottom, etc. will be included. Also, observation data including the satellite images will be needed to be collected and analysed.

### 3. Surface circulation of the eastern East China Sea.

Surface current pattern of the eastern East China Sea (ECS) was constructed by analyzing trajectories of 58 satellite-tracked drifters released during 1991-1996. Composite trajectories and 20'-by-20' box-averaged current vectors show that the surface circulation composes of three basic currents such as

- 1) The Kuroshio, flowing northeastward along the ECS, turns eastward toward the Tokara Strait west of Kyushu.
- 2) A northward branch current is separated from the Kuroshio in the neighborhood of the Kuroshio turning point and enters the Korea Strait. This branch current is suggested to be named the Kuroshio Branch Current (KBC) rather than the Tsushima Warm Current in the Korea Strait.

- 3) An anticyclonic circulation exists in the deep trough west of Kyushu. The experiment does not support the theory that the Yellow Sea Warm Current is branched from the KBC.

#### **4. Physical properties of sea waters**

The study of the second stage has purposes of investigating properties of sea waters in relation to the movement of the Yangtz River diluted waters, the flow of the Cheju Warm Current, the extension of the Yellow Sea Bottom Cold Water, and the northern limit of the Taiwan Warm Current and understanding physical phenomena which govern mixing processes between various water masses. For this, the region between Chejudo and the Yangtz River which is a geographic boundary between the Yellow and East China Seas is selected as the intensive survey area. In the first year of the project, two cruises were carried out: to observe the synoptic distributions of physical properties of sea waters in the northwestern East China Sea and to make an intensive survey in the region between Chejudo and the Yangtz River by using the R/V Onnuri in March 1-10, 1997 and by using R/V Eardo in June 7-13, 1997, respectively. The obtained data reveal the distributions of the various water masses which govern sea conditions in the late winter and in the early summer, and it provides a key to describe the annual variation of the low salinity waters. The low salinity waters originated from the Yangtz River and the northern Yellow Sea in summer flow generally toward Chejudo, but parts of waters remain in the region between Chejudo and the Yangtz River through the winter time and move to the eastward in the warm season of the next year. This implies that the length of stay of low salinity waters, i. e., the turn over time, is six to ten months, and suggests the upper limit of the time for the movement of land originated materials from the Yellow Sea to the East China Sea or the East Sea. Small scale structures appeared in the data observed in June provide an important clue for the mixing process and for the mixing zone. It seems that mixing between the two water masses depends more on intrusive processes than processes along with small scale mixed layers due to localized turbulent mixing, and this suggests the direction of future works in relation to mixing dynamics.

#### **5. Inflow of Changjiang Coastal Water and the circulation in the adjacent seas of Cheju Island**

The route of the Changjiang Coastal Water and its influences on



oceanographical conditions in the adjacent seas of Cheju Island, the path and appearance time of low-salinity waters and the seasonal variations of the currents in the Straits of Cheju are studied by analyzing salinity distributions, tracks of Argos and TGPS buoys, and moored current data. The results are summarized as follows.

- 1) Lowest salinity core of the Changjiang Coastal Water, started from the mouth of the Changjiang River, continues to the South Sea of Korea via the western sea of Cheju Island and the Straits of Cheju.
- 2) Low-salinity waters influence on the surface layer in the adjacent seas of Cheju Island from June to November. Waters with salinity 32.20‰ appear in the sea during July - October, and occupy the surface layer 30m thick.
- 3) Surface currents in the Cheju Strait were very weak with speed of 5.3-11.9 cm/s in February and April, while the currents in June and August were 2-5 times stronger. Dominant current direction was eastward and north eastward.

Surface buoys, released within 6 miles away from Cheju coast, did not move out of the Cheju Strait, possibly blocked by the existence of a tongue-like distribution of saline water in the eastern entrance of the Cheju Strait. In a narrow coastal area between U-do and Cheju-do where the tongue-like pattern appears, current structure is very variable and complicated. In winter, current is stronger near Yeoseo-do in the northern Cheju Strait than in the central strait.

## **6. Distribution of biogeochemical properties**

The concentrations of dissolved inorganic nutrients and dissolved oxygen in the southwestern parts of Cheju Island are obviously higher than those in the Kuroshio region. The concentrations of dissolved oxygen and nutrients in the shelf are vertically homogeneous.

Temperature and salinity of water are negatively correlated with the concentrations of dissolved oxygen and dissolved inorganic nutrients. In general, the Kuroshio water contains low dissolved oxygen and dissolved inorganic nutrients contents, while coastal waters including the Changjiang Diluted Water contains high dissolved oxygen and high dissolved inorganic nutrients. Therefore, the mixing among the three end members, the nutrient-poor Kuroshio, the nutrient-rich coastal water, and the mixed water between the Kuroshio and coastal waters, controls the distribution patterns of dissolved oxygen and dissolved inorganic nutrients in the East China Sea in

March 1997. Also, photosynthesis and respiration processes slightly modifies the characteristics of the water chemistry in the East China Sea.

The activity of  $^{228}\text{Ra}$  in the surface waters was higher in the coastal waters adjacent to the Korea peninsula and Chinese continent ( $>0.3$  dpm/l) than those in the shelf break of the East China Sea and in the eastern channel of the Korea Strait ( $<0.2$  dpm/l). The distribution pattern of  $^{226}\text{Ra}$  activity was similar to those of  $^{228}\text{Ra}$ . There was an inverse relationship between  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  activity and salinity. The  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  activity was about twice higher in the Korean and Chinese coastal area (1.61 ~ 2.12) than those in the shelf break of East China Sea. Assuming that the decay of  $^{228}\text{Ra}$  is negligible during mixing and transport of sea water, about 11~41% of the South Sea Water of Korea was originated from the shelf water of the East China Sea and the Yellow seas.

## 7. Chlorophyll distribution and photosynthetic properties.

Vertical structure of chlorophyll-a was investigated at 113 stations in March, 1997. In addition, 38 P-I experiments were made to measure primary photosynthesis parameters such as  $\alpha$ ,  $P_m^B$ , and  $I_k$ .

The value of  $\alpha$  ranged 0.0041~0.169 mgC/mgChl-a/( $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ )/h and that of  $P_m^B$  ranged 1.817~24.6 mgC/mgChl-a/h. The value of  $I_k$  ranged 89.8~306.4  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . These photosynthetic parameters, in general, showed similar values with the spring of 1995 results except that  $P_m^B$  values were slightly higher.

The observation period was earlier than the typical timing of usual spring blooms. It is, however, interesting to observe there were local blooms already going on. These early local blooms occurred at three frontal zones where two different water masses met and where the low-salinity continental shelf water mass spreaded over the high salinity water at the surface. The frequency and duration of such local blooms are of interest.

The measurement of the in-water optics was attempted for the first time. However, only 4 profiles were obtained due to the instrument malfunction and shiptime limitation. The calculated spectral downwelling diffuse coefficients showed the stations were case 2 waters. Further studies are necessary for absorption of CDOM and SS to develop appropriate algorithms.

## V. Conclusion and suggestions

This report is the first-year report of the first phase study on the ocean circulation of the western East China Sea (ECS). The report includes research activities and results conducted during 1997 in the study area of the second phase. The study was conducted by an interdisciplinary study group composing of various teams in ocean current, oceanographic properties (physics, chemistry, biology), numerical model for the extension of the Changjiang fresh water, and in circulation around Cheju-do. The project has been part of the Korean program of an international WOCE program. One time Interdisciplinary survey was done in March 1997 in the study area of the western ECS and one time local survey was done in June 1997 for the northeastward extension of the Changjiang fresh water toward Cheju-do.

The study was focused on understanding of major oceanic processes, especially for the Kuroshio Branch Current as a principal current of the western ECS, the Yellow Sea Warm Current, and the extension of the Changjiang fresh water. On the other hand, we constructed a surface circulation of the eastern ECS by synthesizing all drifter data collected during the first-phase 1993-1996 and distributed the circulation map to Korean oceanographic community. Also, a simple model experiment was launched to investigate the extension of the Changjiang fresh water. During the second-phase, major oceanographic processes, necessary for the circulation dynamics of the western ECS, will be investigated by conducting comprehensive field surveys and applying sophisticated analysis and performing elaborate models.



# 차 례

요약문 (국문)	3
요약문 (영문)	11
표차례	29
그림차례	33
제 1 장 서론	47
제 1 절 연구동기 및 필요성	47
제 2 절 연구추진과정	49
제 3 절 연구개발 목표 및 주요사업 내용	50
가. 연구방향	50
나. 연구개발 목표	50
다. 연차별 연구개발목표 및 범위	51
라. 1차년도 주요 연구내용	52
마. 추진전략 및 방법	53
바. 역할분담 및 추진체계	55
사. 기대성과	56
참고문헌	57
제 2 장 동중국해 중·서부 해역에서 1997년 늦겨울 및 초여름 해류조사	61
제 1 절 서론	61
제 2 절 조사 개요	62
제 3 절 ARGOS 표류부이에 의한 해류조사	63
가. 조사방법	63
나. 늦겨울 상층해류 관측성과	65
(1) 제주도 남서해역에서의 흐름	65
(2) 양자강 하구역에서의 흐름	66
(3) 대마난류역에서의 흐름	66
(4) 대륙붕단역에서의 흐름	67
다. 초여름 상층해류 관측성과	68
(1) 제주도 주변해역에서의 흐름	68
(2) 양자강 하구역과 제주도 남서해역 사이에서의 흐름	69
제 4 절 ADCP에 의한 유속관측	70

가. 자료획득 및 처리방법	70
나. 늦겨울 해류관측	71
다. 초여름 해류관측	71
제 5 절  큐슈 남서방 해류계 계류	72
참고문헌	73
제 3 장  양자강 하천수 plume의 역학 연구	91
제 1 절  서론	91
가. 국내·외 연구동향	91
나. 양자강 하천수 plume의 계절적 변화	92
제 2 절  수치모델	93
제 3 절  결과	94
가. 표준실험	94
나. 하천유량의 변화 (EXP3-MBw)	98
다. 해저면의 경사 (SLP)	98
라. 유입수의 염분 (SRO)	99
마. 연안수의 성층 (STR)	99
제 4 절  논의 및 결론	100
참고문헌	103
제 4 장  동중국해 동부역의 상층해수순환	125
제 1 절  요약문	126
제 2 절  서론	126
제 3 절  부이실험	126
제 4 절  상층해류장	128
제 5 절  해류장의 계절변화	131
제 6 절  'Kuroshio Branch Current' 새로운 용어 정의	131
제 7 절  결론	132
참고문헌	132
제 5 장  해수의 물리적 특성	133
제 1 절  서론	133
제 2 절  관측개요	133
제 3 절  1997년 3월 관측 결과	134
가. 수온-염분도 분석	134
나. 수직분포	134

다. 수평분포 .....	136
제 4 절 1997년 6월 관측 결과 .....	137
가. 수온-염분도 분석 .....	137
나. 수직분포 .....	137
다. 수평분포 .....	138
제 5 절 해황 분석 .....	139
가. 동중국해 서부해역의 저염수 분포 변화 .....	139
나. 제주도 서쪽 해역의 약층구조 .....	141
제 6 절 맺음말 .....	141
참고문헌 .....	142
제 6 장 양자강 연안수의 유입과 제주도 주변해역의 해양순환 .....	181
제 1 절 서론 .....	181
제 2 절 자료 및 방법 .....	182
가. 제주도 서쪽해역 및 제주해협내의 염분자료 .....	182
나. 해수유동조사 .....	182
제 3 절 결과 .....	184
가. 양자강연안수가 제주도 주변해역에 접근하는 양상 .....	184
나. 제주도 주변해역에서 양자강 연안수의 연직적 영향범위 및 출현시기 .....	185
다. 제주해협의 유황 (流況)과 양자강연안수와의 관계 .....	187
(1) TGPS Buoy 추적결과 .....	187
(2) 정점측류 (定點測流) 결과 .....	191
참고문헌 .....	192
제 7 장 동중국해 중·서부역에서의 친생물원소의 동계분포 특성 .....	209
제 1 절 서론 .....	209
제 2 절 재료 및 방법 .....	210
가. 조사해역 및 관측시기 .....	210
나. 시료채취, 보존 및 분석방법 .....	210
(1) 시료채수 및 보존 .....	210
(2) 용존산소 .....	211
(3) 용존무기영양염류 .....	211
(4) Ra 동위체 분석 .....	211
제 3 절 결과 .....	212

가. 용존산소 및 용존무기영양염류 수평분포 특성	212
나. 용존산소 및 용존무기영양염류 수직분포 특성	213
제 4 절 고찰	215
가. 동중국해 중·서부역 표층수의 해수기원 예비평가	215
나. 표층수중 $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ 방사능 분포	217
(1) 염분과 Ra 동위체와의 관계	218
(2) $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 농도비	219
(3) 한국 남해역에서의 황해 및 동중국해 대륙붕수 기여율	219
제 5 절 결론	220
참고문헌	222
제 8 장 엽록소 분포와 일차생산력	253
제 1 절 재료 및 방법	253
가. 엽록소	253
나. P-I 특성	253
다. 수중광 측정	255
제 2 절 결과	255
가. 엽록소의 분포	255
나. P-I 특성	256
다. 수중광 특성	256
제 3 절 토의	258
참고문헌	259
부록 1. 동중국해 Workshop 프로그램.	
Circulation and air-sea interaction in the East China Sea	273



# CONTENTS

Summary (Korean) .....	3
Summary (English) .....	11
List of Tables .....	29
List of Figures .....	33
Chapter I. Introduction .....	47
1. Motive and necessity of the study .....	47
2. Promotion procedure of the study .....	49
3. Objectives and major items of the study .....	50
a. Goal .....	50
b. Objectives .....	50
c. Annual objectives and scope .....	51
d. Major contents of 1st year study .....	52
e. Strategy and method .....	53
f. Responsibility and organization .....	55
f. Expected output .....	56
References .....	57
Chapter II. Current observations in the western East China Sea in late winter and early summer of 1997 .....	61
1. Introduction .....	61
2. Outline of the survey .....	62
3. Current observations by ARGOS surface drifters .....	63
a. Method .....	63
b. Surface flow pattern observed in late .....	65
(1) Flow in the southwestern area of Cheju-do .....	65
(2) Flow in the Changjiang estuary .....	66
(3) Flow in the Taiwan Warm Current region .....	66
(4) Flow over the shelf edge .....	67
c. Surface flow pattern in early summer .....	68
(1) Flow around Cheju-do .....	68
(2) Flow between the Changjiang estuary and southwestern sea of	

Cheju-do .....	69
4. Current measurements by a vessel-mounted ADCP .....	70
a. Data acquisition and processing .....	70
b. Measurements in late winter 1997 .....	71
c. Measurements in early summer 1997 .....	71
5. Deployment of current meters southwest of Kyushu .....	72
References .....	73
Chapter III. Dynamics of the Yangtze River Diluted Water .....	91
1. Introduction .....	91
a. Previous works .....	91
b. Seasonal changes in the Yangtze River Diluted Water .....	92
2. Numerical Mode .....	93
3. Results .....	94
a. Control experiment .....	94
b. Change in the river discharge (EXP3-MBw) .....	98
c. Bottom slope (SLP) .....	98
d. Salinity of river water (SRO) .....	99
e. Stratification in the ocean (STR) .....	99
4. Discussion and Conclusions .....	100
References .....	103
Chapter IV. Surface Circulation of the Eastern East China Sea .....	125
1. Abstract .....	126
2. Introduction .....	126
3. Drifter experiment .....	126
4. Surface current field .....	128
5. Seasonal variation of surface currents .....	131
6. New terminology of Kuroshio Branch Current .....	131
7. Conclusions .....	132
References .....	132
Chapter V. Physical Properties of Sea Waters .....	133
1. Background of the study .....	133
2. Field observations .....	133

3. Analysis of the data observed in March 1997	134
a. Analysis of T-S diagram	134
b. Vertical distributions	134
c. Horizontal distributions	136
4. Analysis of the data observed in June 1997	137
a. Analysis of T-S diagram	137
b. Vertical distributions	137
c. Horizontal distributions	138
5. Analysis of physical properties of sea waters	139
a. Variation of low saline waters in the northwestern East China Sea	139
b. Structure of thermo- and halocline in the region west of Chejudo	141
6. Remarks	141
References	142

Chapter VI. Inflow of Changjiang Coastal Water and the circulation in the adjacent seas of Cheju Island	181
1. Introductions	181
2. Data and methods	182
a. CTD observations	182
b. Currents measurements	182
3. Results	184
a. Approach of the Changjiang Coastal Water to the adjacent seas of Cheju	184
b. Vertical influences and appearance time of the Changjiang Coastal Water in the adjacent seas of Cheju	185
c. Relation between currents in the Straits of Cheju and the Changjiang Coastal Water	187
(1) TGPS buoys	187
(2) Current meters	191
4. Conclusions	191
References	192

Chapter VII. Distribution of biogeochemical properties in the mid-western part of the East China Sea in winter	209
---	-----

1. Introduction .....	209
2. Material and methods .....	210
a. Survey area and time .....	210
b. Water sampling and chemical analysis .....	210
3. Results .....	212
a. Spatial distribution of dissolved oxygen and dissolved inorganic nutrients .....	212
b. Vertical distribution of dissolved oxygen and dissolved inorganic nutrients .....	212
4. Discussion .....	215
a. Preliminary study on the origin of the surface water in the East China Sea .....	215
b. The distribution of $^{226}\text{Ra}$ and $^{228}\text{Ra}$ activity in the surface water .....	217
5. Conclusion .....	220
Reference .....	222
Chapter VII. Chlorophyll distribution and photosynthetic properties. ....	253
1. Materials and methods .....	253
a. Chlorophyll-a .....	253
b. P-I properties .....	253
c. Underwater optical measurement .....	255
2. Results .....	255
a. Chlorophyll-a distribution .....	255
b. P-I properties .....	256
c. Underwater optical properties .....	256
3. Discussion .....	258
References .....	259
Appendix 1. Agenda of Workshops on Circulation and Air-Sea Interaction in the East China Seas. ....	273

## 표 차례

표 2-1. 1997년 3월과 6월 위성추적부이 실험에 대한 정보 .....	64
표 3-1. 각 실험에 적용된 조건들 .....	97
표 4-1. 1991-1996년 실시한 위성추적부이 실험에 대한 정보. ....	127
표 6-1. 1996년과 1997년에 제주해협에 투하한 TGPS Buoy의 투하 및 회수 위치와 시기 (이 논문에서는 동경 126° 57.0' 을 제주해협의 동쪽 경계로 했음) .....	183
표 6-2. TGPS Buoy 추적결과로부터 계산한 제주해협내의 표층 유향, 유속 ( + : 동 또는 북쪽 방향, - : 남 또는 서쪽 방향). ....	188
표 6-3. 1997년에 제주해협 동쪽 경계에 설치한 해류계의 위치와 시기별, 층별 평균해류(+ : 동 또는 북쪽 방향, - : 남 또는 서쪽 방향) .....	190
표 7-1. 동중국해에서의 단성분 (end-members)에 대한 특성 .....	216
표 7-2. 1996년 10월 한국남해 및 동중국해 표층수에서의 라듐동위체 방사능세기 .....	218
표 8-1. 광합성 매개변수와 엽록소 밀도 .....	257



## List of Tables

Table 2-1. Information on the satellite-tracked surface drifter experiment in March and June 1997. ....	64
Table 3-1. Given conditions for each experiment .....	97
Table 4-1. Information on satellite-tracked drifter experiments for 1991~1996. ....	127
Table 6-1. Positions and time of release and collection of TGPS buoys in the Cheju Straits in 1997 except Case No. 2 in 1996. Meridional line of 126° 57.0' E is taken as the east boundary line of the Cheju Straits .....	183
Table 6-2. Current speed calculated from the surface float tracks in the Cheju Strait in 1997 except Case No. 2 in 1996. Tracks out of the strait (east of the meridional line of 126° 57.0' E) are excluded. (+: eastward or northward, -: southward or westward) .....	188
Table 6-3. Current meter mooring positions and mean currents in the Cheju-Strait in 1997 (+: eastward or northward, -: southward or westward) .....	190
Table 7-1. Characteristics of end-members in the Northwestern East China Sea .....	216
Table 7-2. Ra isotopes activities in the surface water of the East China Sea and the South Sea of Korea in October 1996 .....	218
Table 8-1. Primary photosynthesis parameters and derived parameters. Also included is chlorophyll-a concentration ( $\text{mg m}^{-3}$ ) .....	257





# 그림 차례

그림 1-1.	1997년 3월 동계 해양조사해역과 관측점. '+'는 CTD 관측점, '△'는 해수채취 및 플랑크톤 채집점, '◇'는 위성추적부이 투하점이며 수심은 m이다. ....	58
그림 1-2.	1997년 6월 상순, 양자강 하천수 확장을 위한 지역조사해역과 관측점. '+'는 CTD 관측점, '◇'는 위성추적부이 투하점이며 수심은 m이다. ....	59
그림 2-1.	1997년도 위성추적부이 투하지점. '◇'는 3월에 투하한 지점이며 '+'는 6월에 투하한 지점임. ....	75
그림 2-2.	1997년 3월 제주도 남서해역에 투하한 위성추적부이 4대의 궤적(28703, 27512, 28702, 28707). ....	76
그림 2-3.	1997년 3월 양자강 하구역 동쪽에 투하한 위성추적부이 3대의 궤적(28697, 28712, 28698). ....	77
그림 2-4.	1997년 3월 대만난류역에 투하한 위성추적부이 4대의 궤적(28699, 28700, 28701, 28706). ....	78
그림 2-5.	1997년 3월 오키나와 골 서쪽 대륙붕단역에 투하한 위성추적부이 2대의 궤적 (28711, 27511). ....	79
그림 2-6.	1997년 6월 제주도 서쪽에 투하한 위성추적부이 4대의 궤적(28718, 28715, 28714, 28716). ....	80
그림 2-7.	1997년 6월 양자강퇴 상부에 투하한 위성추적부이 4대의 궤적(28719, 28721, 28713, 28720). ....	81
그림 2-8.	1997년 3월 ADCP의 관측선 (조사선 온누리호). ....	82
그림 2-9.	1997년 6월 ADCP의 관측선 (조사선 이어도호). ....	83
그림 2-10.	1997년 3월 ADCP로 관측한 층별 유속의 수평분포. (a) 25m; (b) 65m. ....	84
그림 2-11.	1997년 3월 조류성분이 제거된 잔차류의 수평분포. ....	86
그림 2-12.	1997년 6월 ADCP로 관측한 층별 유속의 수평분포. (a) 9m; (b) 25m; (c) 49 m. ....	87
그림 2-13.	1997년 6월 조류성분이 제거된 잔차류의 수평분포. ....	90
그림 3-1.	1975년 a) 2월과, b) 7월의 표층염분 분포도 (Hu (1994)에서) ...	106
그림 3-2.	모델 디자인 .....	107

그림 3-3. 모델 영역과 지형 .....	108
그림 3-4. 36년 (1950-1985) 월평균 양자강 유량 (Sheng <i>et al.</i> (1997)에서) .....	109
그림 3-5. EXP3-MB의 시간에 따른 유량의 변화 .....	109
그림 3-6. EXP3-MB의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu. 양 축의 숫자는 격자번호이므로 거리는 5 km를 곱하여야 한다.) .....	110
그림 3-7. EXP3-MB의 제 7층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu). .....	111
그림 3-8. EXP3-MB의 제 1층과 8층의 100일의 유속 분포도 .....	112
그림 3-9. EXP3-MB의 강 증앙을 통과하는 동서방향 단면의 10일 간격 염분 수직분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	113
그림 3-10. 수직순환의 모식도 .....	114
그림 3-11. EXP3-MBw의 시간에 따른 유량의 변화 .....	115
그림 3-12. EXP3-MBw의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	116
그림 3-13. SLP1의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	117
그림 3-14. SLP2의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	118
그림 3-15. SLP3의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	119
그림 3-16. SRO의 시간에 따른 유량의 변화 .....	120
그림 3-17. SRO의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	121
그림 3-18. STR1의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	122
그림 3-19. STR2의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	123
그림 3-20. STR3의 제 1층의 10일 간격 염분 분포도 (굵은 선은 30 psu) .....	124
그림 4-1. 1991년부터 1996년까지 한국해양연구소에서 동중국해에 투하한 위성추적부이의 이동궤적. '◇'는 투하한 지점이며 붉은 색은 끝개의 수심이 15 m, 푸른색은 끝개 수심이 30 m나 50 m인 부이의 궤적임. .....	128
그림 4-2. 1991년부터 1996년까지 한국해양연구소에서 투하한 위성추적부이가 20' X 20'의 작은 상자를 통과한 자료수. 작은 상자 좌측 상단의 숫자는 통과한 부이의 수이며 우측 하단의 숫자는 부이가 머문 시간임(일) .....	129
그림 4-3. 그림 3-1의 부이의 이동궤적으로부터 작성한 20' X 20' 상자평균한 상층해류장. 그림 좌상단에 벡터 크기를 표시. ....	129
그림 4-4. 1991년부터 1996년까지 한국해양연구소에서 동중국해에 투하한 위성	

	추적부이의 하계 (4월 중순부터 10월 중순까지) 이동궤적. '◇'는 투하 지점 혹은 출발점임. ....	130
그림 4-5.	1991년부터 1996년까지 한국해양연구소에서 동중국해에 투하한 위성 추적부이의 동계 (10월 중순부터 4월 중순까지) 이동궤적. '◇'투하 지점 혹은 출발점임. ....	130
그림 4-6.	그림 3-4의 부이의 이동궤적을 이용하여 20' X 20' 상자평균한 하계 상층해류장. ....	130
그림 4-7.	그림 3-5의 부이의 이동궤적을 이용하여 20' X 20' 상자평균한 동계 상층해류장. ....	130
그림 4-8.	1997년 2월 22일, NOAA-14의 적외선 영상으로부터 계산한 해수면 수온분포. ....	131
그림 5-1.	1997년 3월의 CTD 관측점. ....	143
그림 5-2.	1997년 6월의 관측점. ....	144
그림 5-3.	1997년 3월 관측 자료를 표시한 수온-염분도(T-S diagram). ....	145
그림 5-4.	1997년 3월 단면 A의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	146
그림 5-5.	1997년 3월 단면 C의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	147
그림 5-6.	1997년 3월 단면 G의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	148
그림 5-7.	1997년 3월 단면 D의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	149
그림 5-8.	1997년 3월 단면 F의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	150
그림 5-9.	1997년 3월 단면 S의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	151
그림 5-10.	1997년 3월 단면 O의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	153
그림 5-11.	1997년 3월 단면 P의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	154
그림 5-12.	1997년 3월 단면 Q의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	155
그림 5-13.	1997년 3월 단면 L의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	156
그림 5-14.	1997년 3월 단면 M의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	157
그림 5-15.	1997년 3월 5 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	158
그림 5-16.	1997년 3월 30 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	159
그림 5-17.	1997년 3월 해저면층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	160
그림 5-18.	1997년 6월 관측 자료를 표시한 수온-염분도. ....	161
그림 5-19.	1997년 6월 단면 A의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	162
그림 5-20.	1997년 6월 단면 B의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	163
그림 5-21.	1997년 6월 단면 C의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	164
그림 5-22.	1997년 6월 단면 D의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	165
그림 5-23.	1997년 6월 단면 E의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	166

그림 5-24. 1997년 6월 단면 F의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	167
그림 5-25. 1997년 6월 단면 G의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	168
그림 5-26. 1997년 6월 단면 H의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	169
그림 5-27. 1997년 6월 단면 GH1-B1의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	170
그림 5-28. 1997년 6월 단면 H2-B3의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	171
그림 5-29. 1997년 6월 단면 H3-B5의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	172
그림 5-30. 1997년 6월 단면 E4-B7의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	173
그림 5-31. 1997년 6월 단면 H5-B9의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	174
그림 5-32. 1997년 6월 5 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	175
그림 5-33. 1997년 6월 15 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	176
그림 5-34. 1997년 6월 30 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	177
그림 5-35. 1997년 6월 50 m 층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	178
그림 5-36. 1997년 6월 해저면층의 수온, 염분 및 밀도 분포. ....	179
그림 6-1. 제주해협 의 해양관측점 위치. ....	193
그림 6-2. 1981년 8월의 표층 염분수평분포(Yu 등의 자료, 1983). ....	194
그림 6-3. 1981년 7월의 표층 염분수평분포. ....	194
그림 6-4. 1976년 6월의 10m 층 염분수평분포. ....	195
그림 6-5. 1986년 8월의 표층 염분수평분포. ....	195
그림 6-6. 1986년 7월 24일부터 제주도 서쪽해역에 투하한 Argos Buoy의 이동궤적(김의 자료, 1991). ....	196
그림 6-7. 203-03 점에 최저염분이 출현하는 시기의 염분 연직변화(수직점선은 염분 32.20‰를 표시함). ....	197
그림 6-8. 그림 6-7에서 염분 32.20‰가 나타나는 수심의 년별 변화. ....	198
그림 6-9. 관측정점 E(제주항에서 북쪽 약 5마일 지점)의 1985년부터 1986년까지의 월별 염분 변화(점선은 염분 32.20‰를 나타냄). ...	198
그림 6-10. 그림 6-1에서 표시한 단면 4의 염분 연직분포. ....	199
그림 6-11. 1996년과 1997년에 제주해협에서 투하한 TGPS Buoy의 이동궤적. .....	201
그림 6-12. 제주해협 동쪽경계선에 설치한 해류계에 의해 관측된 각 정점의 흐름 벡터. ....	203
그림 7-1. 1997년 3월 동중국해 조사정점 .....224	
그림 7-2. 1997년 3월 용존산소함량 ( $\mu M$ )에 대한 수평분포도 (a) 표층, (b) 20m, (c) 50m .....225	

그림 7-3. 1997년 3월 암모늄이온 농도 ( $\mu M$ )에 대한 수평분포도 (a) 표층, (b) 20m, and (c) 50m .....	226
그림 7-4. 1997년 3월 질산이온 농도( $\mu M$ )에대한 수평분포도 (a) 표층, (b) 20m, and (c) 50m .....	227
그림 7-5. 1997년 3월 인산이온 농도( $\mu M$ )에대한 수평분포도 (a) 표층, (b) 20m, and (c) 50m .....	228
그림 7-6. 1997년 3월 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수평분포도 (a) 표층, (b) 20m, and (c) 50m .....	229
그림 7-7. 1997년 3월 관측선 A에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	230
그림 7-8. 1997년 3월 관측선 D에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	232
그림 7-9. 1997년 3월 관측선 F에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	234
그림 7-10. 1997년 3월 관측선 L에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	236
그림 7-11. 1997년 3월 관측선 M에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	238
그림 7-12. 1997년 3월 관측선 O에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	240
그림 7-13. 1997년 3월 관측선 P에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	242
그림 7-14. 1997년 3월 관측선 Q에서의 용존산소, 암모늄이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도 ( $\mu M$ )에 대한 수직분포도 .....	244
그림 7-15. 1997년 3월 표층수에서의 용존산소와 수온간의 상관관계 .....	246
그림 7-16. 1997년 3월 표층수에서의 암모늄이온과 수온간의 상관관계 .....	246
그림 7-17. 1997년 3월 표층수에서의 질산이온과 수온간의 상관관계 .....	247
그림 7-18. 1997년 3월 표층수에서의 인산이온과 수온간의 상관관계 .....	247
그림 7-19. 1997년 3월 표층수에서의 규산과 수온간의 상관관계 .....	248
그림 7-20. 1997년 3월 표층수에서의 수온-염분도 .....	248
그림 7-21. 1997년 3월 NO와 수온간의 상관관계 .....	249
그림 7-22. 1996년 10월 라듐동위체 (226Ra, 228Ra)에대한 조사정점 .....	250
그림 7-23. 표층수에서의 226Ra 방사능세기와 염분간의 상관관계 .....	251
그림 7-24. 표층수에서의 228Ra 방사능세기와 염분간의 상관관계 .....	251

그림 7-25. 조사해역, 쿠로시오수역과 황해에서의 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 방사능세기 비와 염분간의 상관관계 .....	252
그림 8-1. 엽록소의 표층 수평분포. ....	261
그림 8-2. 관측선 C에서의 엽록소의 수직단면. ....	262
그림 8-3. 관측선 D에서의 엽록소의 수직단면. ....	263
그림 8-4. 관측선 F에서의 엽록소의 수직단면. ....	264
그림 8-5. 관측선 L에서의 엽록소의 수직단면. ....	265
그림 8-6. 관측선 M에서의 엽록소의 수직단면. ....	266
그림 8-7. 관측선 O에서의 엽록소의 수직단면. ....	267
그림 8-8. 관측선 P에서의 엽록소의 수직단면. ....	268
그림 8-9. 정점 D07의 하강 분광계수. ....	269
그림 8-10. 정점 D08의 하강 분광계수. ....	270
그림 8-11. 정점 D09의 하강 분광계수. ....	271
그림 8-12. 정점 O11의 하강 분광계수. ....	272

## List of Figures

Fig. 1-1.	Study area showing observation stations in March 1997. Symbol '+' denotes for CTD stations, 'Δ' for water and plankton sampling, '◇' for releasing points of satellite-tracked surface drifters. Bottom topography is expressed in meters. ....	58
Fig. 1-2.	Study area showing observation stations in early June 1997. Symbol '+' for CTD stations, 'Δ' for water and plankton sampling, '◇' for releasing points of satellite-tracked surface drifters). Bottom topography is expressed in meters. ....	59
Fig. 2-1.	Release point of satellite-tracked drifters deployed in 1997. Symbols '◇' and '+' denote respectively release points in March and June. ....	75
Fig. 2-2.	Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the southwestern sea of Cheju-do in March 1997 (28703, 27512, 28702, 28707). ....	76
Fig. 2-3.	Trajectories of three satellite-tracked surface drifters released in the east of the mouth of the Changjiang river in March 1997 (28697, 28712, 28698). ....	77
Fig. 2-4.	Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the Taiwan warm current region in March 1997 (28699, 28700, 28701, 28706). ....	78
Fig. 2-5.	Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released on the continental shelf west of Okinawa trough in March 1997 (28711, 27511). ....	79
Fig. 2-6.	Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the western sea of Cheju-do in June 1997 (28718, 28715, 28714, 28716). ....	80
Fig. 2-7.	Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released on the Changjiang bank in June 1997 (28719, 28721, 28713, 28720). ....	81
Fig. 2-8.	Survey line for ADCP measurements in March 1997(R/V Onnuri). ....	82

Fig. 2-9. Survey line for ADCP measurements in June 1997(R/V Eardo).	83
Fig. 2-10. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at (a) 25m and (b) 65m in March 1997.	84
Fig. 2-11. Distributions of residual current after removing tidal current by 5 major tidal constituents in March, 1997.	86
Fig. 2-12. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at (a) 9m, (b) 25m and (c) 49m in June 1997.	87
Fig. 2-13. Distributions of residual current after removing tidal current by 5 major tidal constituents in June 1997.	90
Fig. 3-1. Surface salinity distributions in a) February, and b) July, 1975 (from Hu (1994))	106
Fig. 3-2. Model configuration	107
Fig. 3-3. Model domain and geography	108
Fig. 3-4. 36-year-long (1950-1985) monthly mean discharge of the Yangtze River (from Sheng <i>et al.</i> (1997))	109
Fig. 3-5. Time variation of net discharge of EXP3-MB	109
Fig. 3-6. Salinity distributions in the 1st layer of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu. Numbers on both axes are grid numbers. Multiply them by 5 km to get distances.)	110
Fig. 3-7. Salinity distributions in the 7th layer of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)	111
Fig. 3-8. Velocity distributions in the 1st and 7th layers of EXP3-MB at day 100.	112
Fig. 3-9. Salinity distributions in the zonal section through the center of river mouth of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)	113
Fig. 3-10. Schematic diagram of vertical circulation	114
Fig. 3-11. Time variation of net discharge of EXP3-MBw	115
Fig. 3-12. Salinity distributions in the 1st layer of EXP3-MBw at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)	116
Fig. 3-13. Salinity distributions in the 1st layer of SLP1 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)	117



Fig. 3-14. Salinity distributions in the 1st layer of SLP2 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	118
Fig. 3-15. Salinity distributions in the 1st layer of SLP3 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	119
Fig. 3-16. Time variation of net discharge of SRO .....	120
Fig. 3-17. Salinity distributions in the 1st layer of SRO at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	121
Fig. 3-18. Salinity distributions in the 1st layer of STR1 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	122
Fig. 3-19. Salinity distributions in the 1st layer of STR2 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	123
Fig. 3-20. Salinity distributions in the 1st layer of STR3 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu) .....	124
Fig. 4-1. A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters deployed in the East China Sea by KORDI during 1991-1996. Symbol '◇' denotes release points. Red and blue lines correspond respectively drifters drogued at 15m and at deeper depths of 30m and 50m. ....	128
Fig. 4-2. Data number of drifters deployed during 1991-1996 by KORDI. Numerals on the upper left and lower right corners of each box correspond respectively to number of drifters entering the box and length of position data in days. ....	129
Fig. 4-3. 20' by 20' box-averaged surface current vectors derived from the composite map of trajectories in Fig. 4-1. ....	129
Fig. 4-4. A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters observed in the warm season (mid-April through mid-October) in the East China Sea by KORDI during 1991-1996. Symbol '◇' denotes release points. ....	130
Fig. 4-5. A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters observed in the cold season (mid-October through mid-April) in the East China Sea by KORDI during 1991-1996. Symbol '◇' denotes release points. ....	130
Fig. 4-6. 20' by 20' box-averaged surface current vectors for the warm season, derived from the composite map of Fig. 4-4. ....	130

Fig. 4-7. 20' by 20' box-averaged surface current vectors for the cold season, derived from the composite map of Fig. 4-5. ....	130
Fig. 4-8. Sea surface temperature estimated from an infrared images of NOAA-14 on February 22, 1997. ....	131
Fig. 5-1. Study area showing observation stations in March 1997. ....	143
Fig. 5-2. Study area showing observation stations in June 1997. ....	144
Fig. 5-3. T-S diagram of data observed in March 1997. ....	145
Fig. 5-4. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section A in March 1997. ....	146
Fig. 5-5. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section C in March 1997. ....	147
Fig. 5-6. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section G in March 1997. ....	148
Fig. 5-7. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section D in March 1997. ....	149
Fig. 5-8. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section F in March 1997. ....	150
Fig. 5-9. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section S in March 1997. ....	151
Fig. 5-10. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section O in March 1997. ....	153
Fig. 5-11. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section P in March 1997. ....	154
Fig. 5-12. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section Q in March 1997. ....	155
Fig. 5-13. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section L in March 1997. ....	156
Fig. 5-14. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section M in March 1997. ....	157
Fig. 5-15. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 5m depth in March 1997. ....	158
Fig. 5-16. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 30m depth in March 1997. ....	159

Fig. 5-17. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at the bottom in March 1997. ....	160
Fig. 5-18. T-S diagram of data observed in June 1997. ....	161
Fig. 5-19. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section A in June 1997. ....	162
Fig. 5-20. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section B in June 1997. ....	163
Fig. 5-21. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section C in June 1997. ....	164
Fig. 5-22. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section D in June 1997. ....	165
Fig. 5-23. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section E in June 1997. ....	166
Fig. 5-24. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section F in June 1997. ....	167
Fig. 5-25. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section G in June 1997. ....	168
Fig. 5-26. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H in June 1997. ....	169
Fig. 5-27. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section GH1-B1 in June 1997. ....	170
Fig. 5-28. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H2-B3 in June 1997. ....	171
Fig. 5-29. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H3-B5 in June 1997. ....	172
Fig. 5-30. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section E4-B7 in June 1997. ....	173
Fig. 5-31. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H5-B9 in June 1997. ....	174
Fig. 5-32. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 5m depth in June 1997. ....	175
Fig. 5-33. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 15m depth in June 1997. ....	176
Fig. 5-34. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 30m depth in June 1997. ....	177

Fig. 5-35. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 50m depth in June 1997. ....	178
Fig. 5-36. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at the bottom in June 1997. ....	179
Fig. 6-1. Locations of oceanographic stations in the Straits of Cheju. ....	193
Fig. 6-2. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in August, 1981 (after Yu <i>et al.</i> , 1983). ....	194
Fig. 6-3. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in July, 1981. ....	194
Fig. 6-4. Horizontal distributions of salinity(‰) at 10m in June, 1976. ....	195
Fig. 6-5. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in August, 1976. ....	195
Fig. 6-6. Track of Argos Buoy released in the west sea of Cheju Island from July 24, 1986 (after Beardsley <i>et al.</i> , 1992). ....	196
Fig. 6-7. Vertical variation of salinity(‰) when the minimum salinity appeared at station 203-03, 1965-1985. The vertical broken line indicates salinity of 32.20‰. ....	197
Fig. 6-8. Annual variations of the depth of salinity 32.20‰ in Fig. 6-7. The horizontal broken line indicates the depth of 25m. ....	198
Fig. 6-9. Monthly variations of vertical salinity at station E, 1985-1986. The vertical broken line indicates salinity of 32.20‰. ....	198
Fig. 6-10. Vertical distributions of salinity(‰) of Section 4 as shown in Fig. 6-1. ....	199
Fig. 6-11. Track of TGPS buoys released in the Straits of Cheju during 1996-1997. ....	201
Fig. 6-12. Stick currents vectors at the east boundary line of the Cheju Strait of as shown in Fig. 6-1. ....	203
Fig. 7-1. Location of sampling stations in the East China Sea in March, 1997. ....	224
Fig. 7-2. The horizontal distribution of dissolved oxygen ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer. ....	225
Fig. 7-3. The horizontal distribution of ammonium ion ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer. ....	226

Fig. 7-4. The horizontal distribution of nitrate ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer. ....	227
Fig. 7-5. The horizontal distribution of phosphate ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer. ....	228
Fig. 7-6. The horizontal distribution of silicate ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer. ....	229
Fig. 7-7. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section A. ....	230
Fig. 7-8. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section D. ....	232
Fig. 7-9. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section F. ....	234
Fig. 7-10. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section L. ....	236
Fig. 7-11. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section M. ....	238
Fig. 7-12. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section O. ....	240
Fig. 7-13. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section P. ....	242
Fig. 7-14. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section Q. ....	244
Fig. 7-15. Relationship between dissolved and temperature in the surface water (March, 1997). ....	246
Fig. 7-16. Relationship between ammonia and temperature in the surface water (March, 1997). ....	246
Fig. 7-17. Relationship between nitrate and temperature in the surface water (March, 1997). ....	247
Fig. 7-18. Relationship between phosphate and temperature in the surface water (March, 1997). ....	247
Fig. 7-19. Relationship between silicate and temperature in the surface water (March, 1997). ....	248
Fig. 7-20. Relationship between temperature and salinity in the surface water (March, 1997). ....	248

Fig. 7-21. Relationship between NO and temperature in the surface water (March, 1997). .....	249
Fig. 7-22. Sampling station for $^{226}\text{Ra}$ and $^{228}\text{Ra}$ in October 1996. ....	250
Fig. 7-23. The correlations of salinity with $^{226}\text{Ra}$ activity. ....	251
Fig. 7-24. The correlations of salinity with $^{228}\text{Ra}$ activity. ....	251
Fig. 7-25. The correlations of salinity with $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ratio in the surface water of study area, Kuroshio and Yellow Sea. ....	252
Fig. 8-1. Surface distribution of chlorophyll-a. ....	261
Fig. 8-2. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section C. ....	262
Fig. 8-3. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section D. ....	263
Fig. 8-4. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section F. ....	264
Fig. 8-5. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section L. ....	265
Fig. 8-6. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section M. ....	266
Fig. 8-7. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section O. ....	267
Fig. 8-8. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section P. ....	268
Fig. 8-9. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D07. ....	269
Fig. 8-10. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D08. ....	270
Fig. 8-11. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D09. ....	271
Fig. 8-12. Downwelling diffuse spectral extinction at St. O11. ....	272

# 제 1 장 서 론

본 보고서는 1997년 1월부터 1997년 12월까지 수행한 '동중국해 중·서부해역의 해양순환 연구'의 1차년도 사업성과를 정리한 것이다.

동중국해는 면적이 대단히 넓고 해양현상도 복잡 다양하여 장기간에 걸쳐 지속적인 조사가 요구된다. 따라서 1993년도에 연구기간 10년의 3단계 동중국해 연구의 기본계획을 마련하였고, 1단계 3년 사업을 1994년 5월에 착수하여 1996년 12월에 종료하였다. 일단계 3년간은 중점조사 연구해역으로 동중국해 동부역을 선정하여 동중국해는 물론 우리 나라의 동해와 황해에 가장 큰 영향을 미치는 대마난류와 이에 관련된 해양과정에 대한 체계적인 연구를 수행하였다. 2단계 3년간은 동중국해 서부와 중부해역을 중점해역으로 선정하여 해양순환과 관련과정을 이해하고 규명하는 것을 연구목표로 설정하였다.

## 제 1 절 연구동기 및 필요성

연구 대상해역인 동중국해는 우리나라 주변해역 중에서 부존 해양자원이 풍부하고 이용과 개발 가능성이 가장 높으며, 해양환경관리 측면에서도 특별한 관심과 국가적 대책이 필요한 해역이다. 특히, 주변 연안국인 일본이 자국의 국익 보호를 위하여 1996년 7월에 배타적 경제수역을 선포하였고, 우리나라와 중국도 1997년도에 선포하였다. 주변 연안국의 이러한 정책변화에 부응하기 위하여 우리나라도 이 해역을 어장으로만 취급하던 고정관념을 불식시키고 해양환경보전, 해역의 이용과 개발, 해양자원의 보호라는 국익차원에서 장기적이고 종합적인 국가적 차원의 관심과 노력을 기울여야 할 것이다. 본 연구에서는 연구해역에서 기초 해양과학자료의 수집과 해양환경 구조와 변동을 결정 짓는 주요 해양과정의 이해와 규명을 체계적으로 접근하였다.

대륙붕이 잘 발달된 동중국해는 생물자원과 해저자원의 보고이며 세계 2대 해류의 하나인 Kuroshio가 통과할 뿐만 아니라 중국대륙 및 한반도로부터 막대한 양의 담수 유입 등 다양한 해양현상이 공존하고 있다. 그러나 이 해역에 대한 국내 해양조사와 연구활동은 일본과 중국에 비해 미미하다. 이에 이 해역에 대한 국가정책수립과 해양경제활동을 위하여 기초자료의 획득과 해양순환의 이해가

요청된다.

동중국해의 전반적인 해양구조를 간략히 살펴보면, 세계 최대 해류중 하나인 Kuroshio가 통과하는 동중국해 대륙사면역에서는 대양수 (물질)와 대륙붕수 (물질)가 교환하며, Kuroshio로부터 분기되는 대마난류가 대양수인 고온 고염수를 동중국해, 황해와 동해로 수송하는 반면에 중국대륙과 한반도의 하천과 연안역을 통해 황·동중국해로 유입되는 연안수는 북서태평양 및 동해로 수송된다. 따라서 동중국해의 기본적인 해황을 이해하기 위하여, 크게는 연안수와 대양수의 시간에 따른 공간적 구조와 분포, 그리고 두 해수와의 혼합과정을 파악해야 한다. 이러한 해황의 공간적 구조와 시간에 따른 변화는 물리, 화학, 생물학적 해양과정에 의해 결정되며, 해황의 시·공간 변화를 예측하기 위해 무엇보다 주요 해양과정을 우선적으로 규명해야 한다.

동중국해 해황을 결정 짓는 주요 해양과정은 Kuroshio로부터 분리되는 대마난류수의 세력과 유동경로, 양자강 하천수의 유입과 유동, 한국 남해의 연안수와 대륙붕수의 혼합, 그리고 대륙사면에서 대양수와 대륙붕수와의 혼합과 연계되어 있다. 이러한 주요 해양과정은 독립적으로 발생되기도 하지만 여러 과정이 복합적으로 혹은 다른 과정이 더 개입되어 복잡한 해황변동을 야기시키기 때문에 단 시간에 이 모든 해양과정과 이에 관련된 해양역학을 정확히 조사하고 규명하기는 대단히 어렵다.

연구개발의 필요성을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동중국해는 대부분 수심 200 m의 천해역으로 수산 및 해저자원의 보고이며 천해의 양식장이자 지역기후변동의 조절자로서 역할을 한다.
- (2) 동중국해의 해양보전과 이용은 물론 동중국해의 해황의 영향을 직접 받는 황해와 동해남부의 해양환경관리와 보전을 위해서도 동중국해의 해양순환에 관한 자료의 축적, 주요해양과정의 이해와 규명, 해양환경변동 예측은 국익차원에서 해결해야할 중요한 과제이다.
- (3) 한국 남해, 황해, 동중국해 동부해역의 해수 및 물질순환은 동중국해 중·서부역에서의 주요해양과정에 의해 결정되거나 지대한 영향을 받으나 이러한 해양과정에 대한 체계적인 조사와 연구가 이루어지지 못한 상태이다
- (4) 황해, 남해, 동중국해의 해양환경구조와 변동에 대한 규명과 예측은 기본적으로 이들 해역간에 해수 및 물질의 교환 및 순환에 대한 정확한 정보와 관련 해양과정을 필요로 한다.



## 제 2 절 연구추진과정

동중국해의 해양순환을 파악하기 위해서는 해황의 전반적 구조와 변동을 지배하는 주요 해양과정을 이해하고 규명하는 것이 선행되어야 하며, 어느 특정분야만을 대상으로 중점 연구하는 것보다는 물리, 화학, 생물 등 다분야가 망라된 상호보완적인 연구가 더욱 효율적이고 좋은 성과를 얻을 수 있다. 최근 세계적인 연구동향도 단일분야 연구보다는 다분야가 참여하는 학제적 종합연구로 바뀌고 있다. 이에, 동중국해의 해양과정에 관심을 가진 한국해양연구소의 전문분야 연구자들이 1992년 10월 이후 수 차례의 모임을 통해 동중국해와 관련된 국내외 연구현황을 검토하였고 학제적 공동연구의 필요성을 공동적으로 인식하였다.

1993년 1월, 한국해양연구소 '93 기관첨단요소 후보과제로 '황·동중국해 이용과 개발을 위한 해황예측모델 개발연구'라는 연구과제를 제출하였으며, 동 계획서는 6개 세부연구분야 (해류 및 수괴, 순환모델과 대마난류, 조석과 조류, 친생물 물질순환, 일차생산력과 플랑크톤역학, 해황예보모델과 해황도 작성)로 구성되었다. 연구계획서가 수차례 수정 보완되어 '동중국해의 이용과 개발을 위한 동중국해의 해황과 대마난류수의 기원'이라는 제목으로 1993년 10월에 협약되었으나, 연구비의 대폭 삭감으로 연구내용 및 규모가 축소되었다. 한편, 연구과제의 대형화라는 시책에 따라 상기과제의 연구기간이 1년에서 7개월로 단축되었으며 본과제의 1단계 연구사업이 1994년 4월에 새로 협약되었다.

본 연구과제는 10년에 걸쳐 3단계로 수행하는 것으로 기획하였다. 1단계는 1994년부터 1997년까지 3년간으로 대마난류 분기역인 동중국해 동부역을, 2단계 3년간은 담수의 영향이 우세한 동중국해 서부역을, 3단계 3년간은 대륙붕수와 대양수의 혼합이 활발한 동중국해의 남부해역, 즉 대륙붕단 및 사면역을 중점해역으로 선정하였다. 최종년도인 10차년도에는 모든 자료를 종합하여 동중국해의 표층해류도를 포함한 종합해양도를 작성하고, 해양순환을 지배하는 주요 해양과정을 밝히며, 이를 근거로 해양예측모델을 제시하는 것으로 구성하였다. 한편, 본래의 1단계 사업 기간은 1994년 4월부터 1997년 4월까지 3차년으로 예정되었으나 기간이 단축되어 1996년 12월에 종료하게 되었다. 동중국해 중·서부해역을 대상해역으로 선정한 2단계 사업은 1997년 1월에 착수하여 1999년 12월에 종료할 계획이며 본 보고서에는 2단계 1차년도 사업성과를 중심으로 작성한 중간보고서의 성격을 갖는다.

## 제 3 절 연구개발 목표와 주요사업 내용

### 가. 연구방향

동중국해 중·서부역의 해양순환과 주요 해양과정의 규명이라는 목적을 달성하기 위하여 구체적 세부목표를 설정하였고, 지역 및 국제협력을 강화하여 해양순환과 관련된 양질의 자료를 수집·분석하는데 초점을 맞추었다. 이를 위해 연구소내의 전문가들로 연구팀을 구성하였고, 연구비의 효율적 집행과 조사자료의 동시성을 유지하기 위해 다분야 공동해양조사를 실시하였으며, 자료 분석과 해석을 위해 학제적 연구를 하였다. 또한 관련 지역 및 국제공동연구를 적극 활성화하여 제한된 국내생산자료를 보완하였다.

### 나. 연구개발 목표

#### (1) 2단계 연구목표

- 동중국해 중·서부역의 종합해양순환과 주요 해양과정 (coastal ocean processes)의 규명

#### (2) 2단계 중점 주요해양과정 연구

- 황해난류수의 세력과 계절변동, 쿠로시오 (대만난류)와의 관계
- 양자강 하천수의 거동과 확장범위, 물질수송
- 황해 남부와 동중국해 북서부의 해수 및 물질교환
- 하계 황해냉수의 남하와 황해난류와의 관계, 물질수송
- 해양전선과 생물, 화학물질분포와 관련성

다. 연차별 연구개발목표 및 범위

(단위: 백만원)

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (1997)	동계 해양조사 및 주요 해양과정의 분석  양자강수의 확장과 영향	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 중·서부 해역 동계 학제적 해양 조사 및 자료분석</li> <li>2. 제주도 주변해역에서 하계 양자강 수의 확장과 영향에 대한 하계 관측 및 분석</li> <li>3. 황해난류의 기원과 동계경로</li> </ol>
2차년도 (1998)	춘계, 하계 해양조사 및 주요 해양과정의 분석  해수순환모델 정립 및 시험운영	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 중·서부 해역 하계 해양조사 및 자료분석</li> <li>2. 춘계 대기-해양 교환 pilot survey (한-중 공동)</li> <li>3. 동중국해 해수순환모델 정립</li> <li>4. 양자강수의 흐름과 남해로의 확장 분석</li> </ol>
3차년도 (1999)	해류도 작성  추계 해양조사 및 주요 해양과정의 분석  춘계 대기-해양 상호 작용 집중조사	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 동중국해 중·서부역의 해류도 작성</li> <li>2. 중·서부 해역 추계 해양조사 및 자료분석</li> <li>3. 주요해양과정에 대한 종합 분석</li> <li>4. 황해난류의 기원과 황해난류의 계절변동</li> <li>5. 조석간차류, 해수유동 계산</li> <li>6. 춘계 대기-해양 상호작용 현장 집중조사 (한-중 공동)</li> </ol>

## 라. 1차년도 주요 연구내용

### (1) 동중국해 중·서부역에서 동계 학제적 종합해양관측 실시

- 조사해역: 동중국해 중·서부역.
- 조사항목: CTD, 해류(위성추적부이, ADCP), 친생물물질, 일차생산력, 플랑크톤.
- 조사일정: 1997. 3. 1.-10.
- 조사선박: 한국해양연구소 연구선 은누리호 (1400톤급).
- 조사팀구성: 해양물리, 화학, 생물 3개팀
- 조사내용
  - 해류조사 (위성추적부이, ADCP) 및 물리특성 (수온, 염분) 조사
  - 친생물물질 (동존산소 및 용존무기영양염류) 분포특성 및 해양과정 규명
  - Ra동위체, 산소안정동위원소를 이용한 동중국해 및 남해의 해수기원 파악
  - 일차생산력 조사
  - 생물광학적 특성 조사

### (2) 하계 양자강 하천수 거동을 위한 지역해양조사

- 조사해역: 양자강 하구와 제주도 사이 동중국해 북서부해역
- 조사항목: CTD, 해류 (위성추적부이, ADCP).
- 조사일정: 1997. 6. 7.-13.
- 조사선박: 한국해양연구소 연구선 이어도호 (350톤급).
- 조사팀구성: 해양물리분야 1개팀
- 조사내용
  - 양자강-제주도 해역의 지역관측
  - 해류조사 (위성추적부이, ADCP) 및 물리특성 (수온, 염분) 조사
  - 황해난류의 기원과 경로 조사

### (3) 제주도 주변 해양조사 (제주대와 공동연구)

- 조사해역: 제주해협, 제주도 동부 및 서부역
- 조사항목: CTD 및 해류 (TGPS)
- 조사일정

- 제주해협- 1997. 1. -10. 월별관측
- 제주서부- 1997. 7. 21.-22.
- 제주동부- 1997. 2. 22.-23.
- 조사선박: 제주대 실습선 한라호 (200톤급) 등 3척.
- 조사팀: 제주대학교 해양물리연구팀.

(4) 지역 및 국제공동조사

- 일본 Kagoshima 대학 연구팀과 Kyushu 서방해역에서 공동 해류관측. 본 연구팀과 Kagoshima 대학팀이 3개점에 유속계 계류
- 국제해양공동프로그램인 WOCE에 참여하여 선진국의 연구현황 파악 및 관련 조사자료 획득

(5) 동중국해 워크숍 공동개최

- 명칭: Circulation and air-sea interaction in the East China Sea
- 주최: 한국해양연구소, 중국국가해양국 제2해양연구소
- 장소: 중국 항주 Huajiashan Hotel
- 일시: 1997. 10. 3. - 5.
- 참가자: 25 명 (한국 9 명, 중국 15 명, 대만 1 명)

마. 추진전략 및 방법

(1) 목표지향적이고 종합적인 연구

- 동중국해, 특히 배타적 경제수역의 이용과 개발을 위한 동중국해 해양순환과정 규명을 주연구방향으로 결정하여 목표지향적으로 운영
- 세부과제의 목표를 최종목표에 맞도록 조정하고 분야간 유기적인 연계성 유지
- 해양과정의 종합적 이해를 위하여 다분야 학제적 공동연구
- 연구소의 물리, 화학, 생물, 공학연구부 소속 연구원이 공동 참여

(2) 주요 연구개발 추진 항목 및 방법

- 해류도작성 및 해류역학 : 위성추적부이 및 해류계를 이용한 해류의 시·공간 분포와 주요 해류의 계절 변동의 규명
- 조석·조류와 해양혼합과정 : 관측과 모델을 통하여 조석과 조류의 공간 특성, 조석 잔차류에 의한 순환, 조석에 의한 해양혼합과정 규명

- 해수기원과 친생물 물질순환 : 동위원소기법과 생태계 관련 화학원소의 flux, 해수의 물리특성을 조사하여 동중국해의 해수 기원과 해수순환 관련 친생물 화학물질 순환 규명
- 해양생태계 및 플랑크톤 역학 (dynamics) : P-I 실험 및 염록소 수직구조, 일차생산력 추산 및 해황, 일차생산력과의 상관분석.

(3) 국내 기관과 공동연구

- 소내 전문연구진이 부족한 분야에 국내 대학 연구팀의 참여 제주대: 제주도 주변 해황
- 국내 해양관련 정부기관 (국립해양조사원)과 협력추진

(4) 국제공동프로그램에의 참여

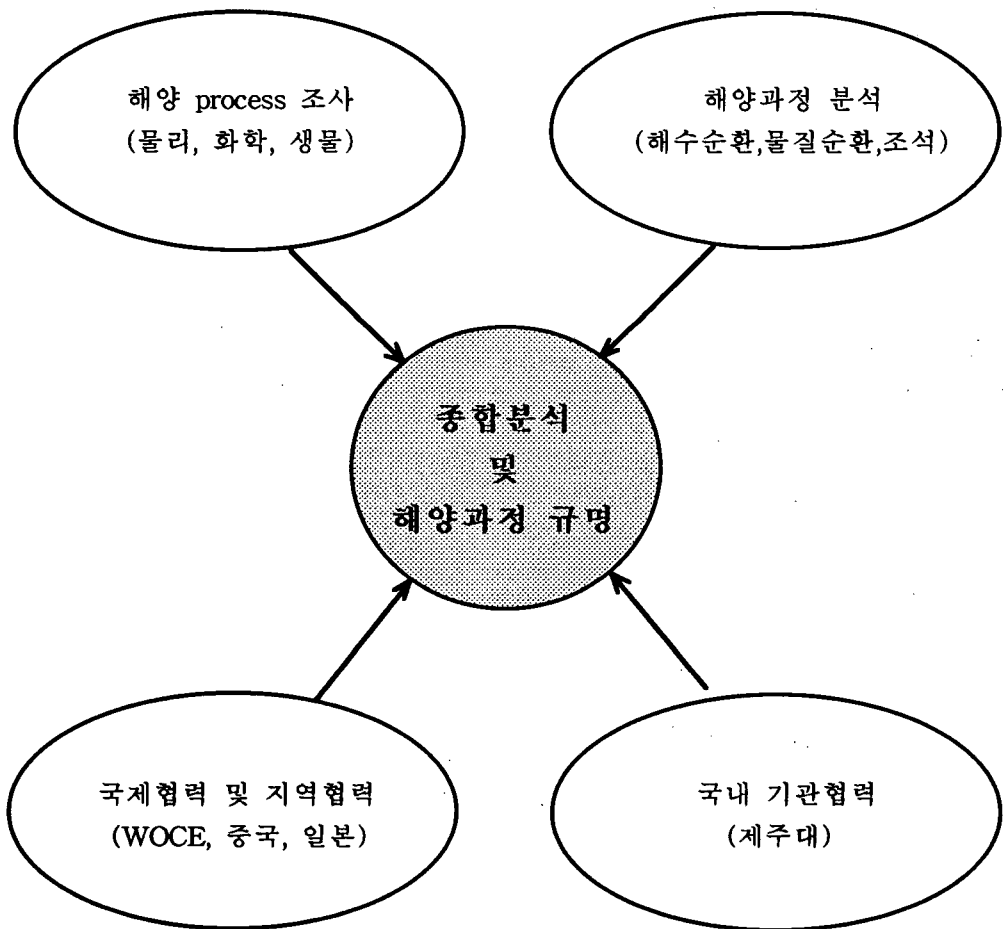
- 국제해양공동프로그램인 WOCE에 계속 참여하여 국제 연구동향의 파악 및 타국자료수집

(5) 지역국가간 공동해양조사

- 동중국해의 해양자료 확보 및 전해역 동시관측을 위해 주변국인 중국, 일본과 공동조사 및 자료교환
  - 중국: 국가해양국 제2해양연구소
    - 협력내용: 동중국해 북서부역에서 해양-대기 상호작용 및 양자강수의 확장
  - 일본: Gakoshima 대학, 일본 MASFLEX 연구팀 ('98. 3. 공동조사 예정)
    - 협력내용: 쿠로시오와 대마난류의 장기변화관측

## 바. 역할분담 및 추진체계

- 연구형태 : 학·연 공동연구, 국제공동연구
- 역할분담 및 추진체계



## 사. 기대성과

### (1) 기술적 효과

- 동중국해 중·서부역의 해양순환 및 주요 해양과정의 규명
- 동중국해의 해양순환예측을 위한 기반조성
- 동중국해의 해류도 작성
- 동중국해 중·서부역의 해양환경 기초자료 확보
- 몬순기후에 따른 marginal sea의 반응
- 선진국 수준의 해양순환과정의 조사 분석 기반기술 확보
- 다분야 학제적 해양종합 연구능력 향상

### (2) 경제적 효과

- 동중국해 해양보전과 이용을 위한 국가정책수립을 위한 기본 해황도 작성 (수산, 자원개발, 해양환경, 기후변동, 해상방위)
- 해양환경보전 및 오염방지 대책에 대한 기초환경 및 정책자료 제공
- 연안양식장 및 수산자원의 효율적 관리를 위한 어·해황 예보 지원
- 전지구적 기후변동 관련 국제정세 대비, 해상보급로 확보 및 유지
- 해상기상 예보 적중률의 향상과 대잠전을 위한 필수 자료 및 정보 제공

### (3) 타 연구에의 활용

- 연안양식장 및 수산자원의 효율적 관리를 위한 어·해황
- 황해의 해수 및 물질순환, 황해와 동중국해의 상호작용
- 남해연안역 해양환경 및 생태계의 변화에 미치는 외적 요인 양자강수, 황해냉수, 대마(황해)난류수



## 참고문헌

- 이 홍재 등, 1991: Kuroshio 해역에서 해황변동연구 (I) -세계해양대순환실험 표층류계획 한국해양연구소 프로그램 (1차년도)-. 한국해양연구소 보고서 BSPG 00131-377-1, pp. 135.
- 이 홍재 등, 1992: Kuroshio 해역에서 해황변동연구 (I) -세계해양대순환실험 표층류계획 한국해양연구소 프로그램 (2차년도)-. 한국해양연구소 보고서 BSPG 00168-473-1, pp. 122.
- 이 홍재 등, 1993: Kuroshio 해역에서 해황변동연구 (I) -세계해양대순환실험 표층류계획 한국해양연구소 프로그램 (최종년도)-. 한국해양연구소 보고서 BSPN 00179-603-1, pp. 193.
- 이 홍재 등, 1994: 동중국해의 이용과 개발을 위한 동중국해 해황과 대마난류수의 기원 (예비조사). 한국해양연구소 보고서, BSPN 00246-711-1, pp. 226.
- 이 홍재 등, 1995: 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (1차년도) -동중국해 동부해역 중심. 한국해양연구소 보고서, BSPN 00257-812-1, pp. 462.
- 이 홍재 등, 1997: 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (1단계 최종년도) -동중국해 동부해역 중심. 한국해양연구소 보고서, BSPN 00319-964-1, pp. 563.
- 日本科學技術廳, 1995: 明日おめざす科學技術シンポジウム-科學技術振興調整費成果. 1994年 3月14-16日, 日本, 東京, pp. 68.
- Japan National Committee for the IGBP, 1994: Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean-atmosphere system. Ed. S. Tsunogai, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP Symposium, Sapporo, Japan. Nov. 14-17, 1994. pp. 558.
- Liu, K.-K and W.-S. Chuang, 1994. Kuroshio edge exchange processes. Monograph (collected papers), vol. 2, Taiwan, pp. 266.
- Science and Technology Agency of Japan and State Oceanic Administration of China, 1990: Proceedings of Japan-China Joint Symposium of the Cooperative Study on the Kuroshio. Nov. 14-16, Tokyo, Japan. pp. 361.

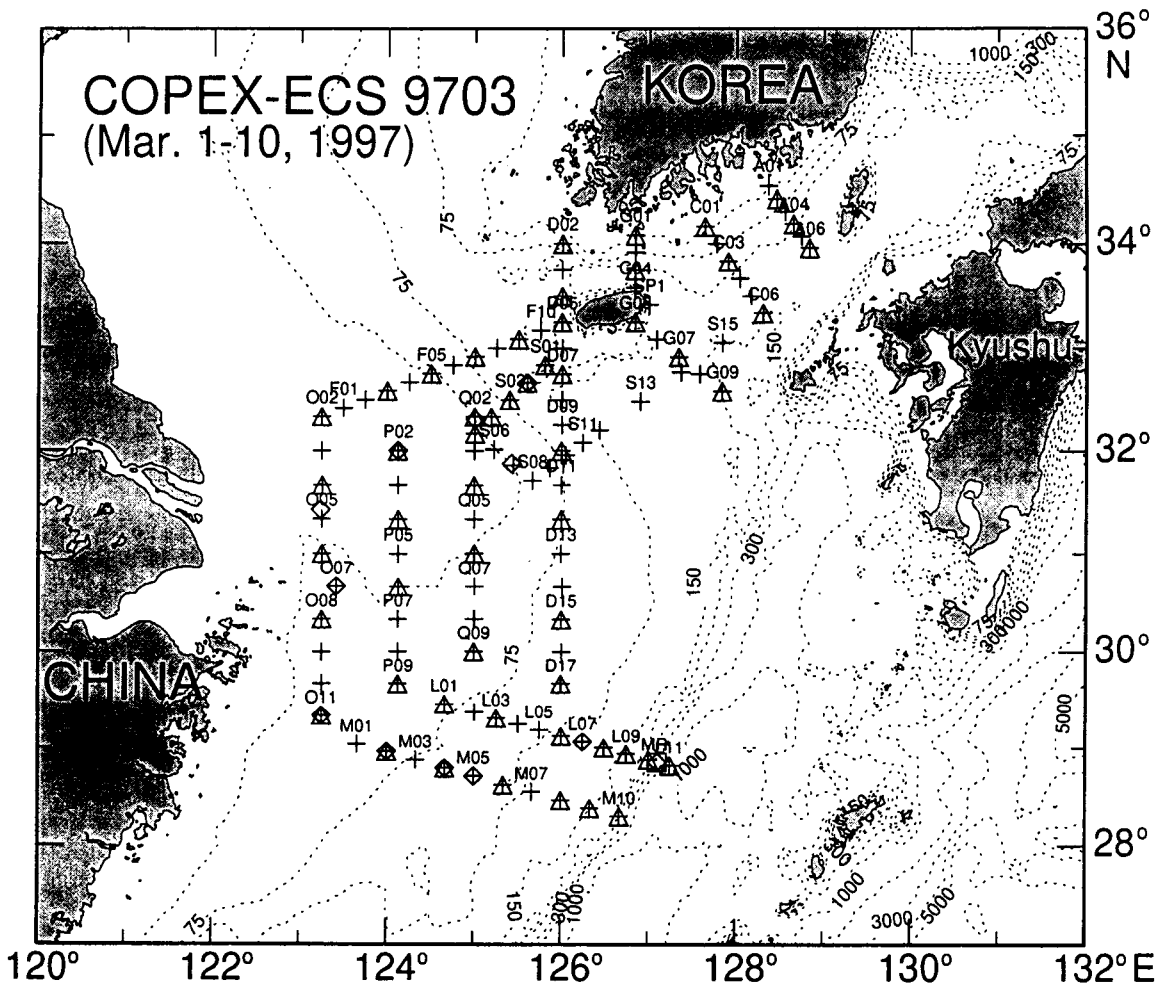


Fig. 1-1. Study area showing observation stations in March 1997. Symbol '+' denotes for CTD stations, '△' for water and plankton sampling, '◇' graphy is expressed in meters.

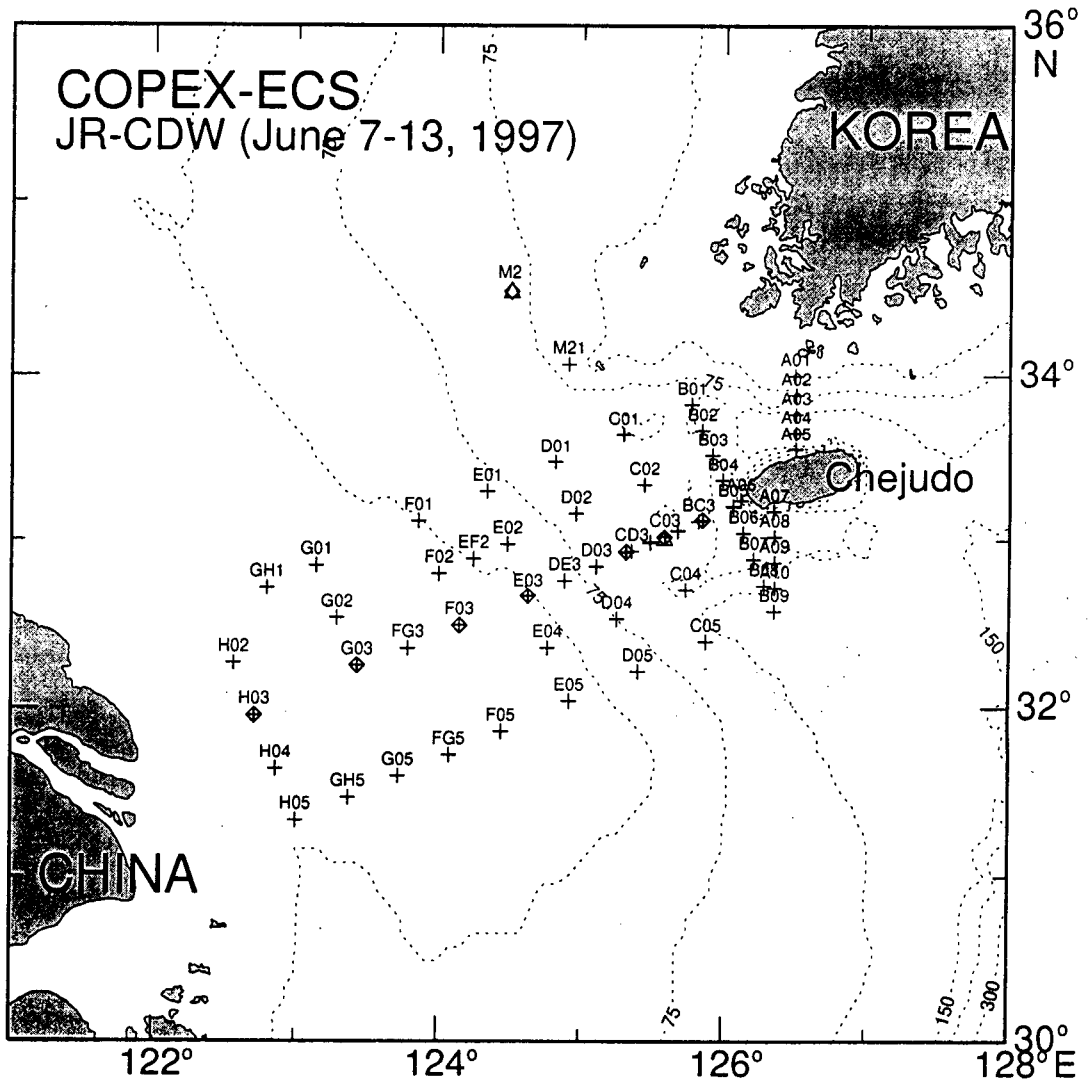


Fig. 1-2. Study area showing observation stations in early June 1997. Symbol '+' for CTD stations, '△' for water and plankton sampling, '◇' for releasing points of satellite-tracked surface drifters). Bottom topography is expressed in meters.



# 제 2 장 동중국해 중·서부역에서의 늦겨울 및 초여름 해류조사

## 제 1 절 서 론

동중국해 중서부역은 중국 연안으로부터 남쪽으로는 오키나와 골로 연결되고, 남쪽으로는 대만북부해역에 이르며, 북쪽으로는 황해 남부와 제주도 주변해역과 접하는 대륙붕상 수심 200 m 이하의 천해역이다.

본 연구해역의 순환계를 지배하는 주요 요인으로는 쿠로시오로부터 분지된 고온, 고염의 특성을 갖는 난류, 그리고 육지로부터 유입된 담수와 고염수 혼합되어 형성된 상대적으로 저염의 특성을 갖는 연안수의 흐름이다. 저염의 흐름으로는 동중국해 담수 유입의 절대량을 차지하는 양자강수로부터 형성된 양자강 회석수의 흐름과 황해 서쪽연안을 따라 남하하여 동중국해 북부해역에 영향을 미치는 중국연안수의 흐름이 있다. 난류계의 흐름으로는 쿠로시오의 지류인 대만 난류와 대마난류가 그리고 대마난류로부터 분지되는 것으로 알려진 황해난류가 있다 (Guan and Mao, 1982; Nitani, 1972). 양자강 회석수는 겨울철에는 중국연안을 따라 좁은 띠 형태로 남하하고 담수의 유량이 증가하는 여름철에는 북동쪽으로 확장하여 동중국해 북서해역 표층의 대부분을 차지한다 (Guan, 1994). 북동쪽으로 확장한 양자강 회석수는 제주도 서쪽을 지나 황해내부로 북상하거나 (Lie, 1986) 제주해협을 통과하여 동진 (김 등, 1991)하여 황해남부와 우리나라 남해까지 영향을 미친다. 동중국해에서 난류의 순환구조는 Uda (1934)가 대마난류와 황해난류의 순환모식도를 제시한 이래 큐슈 서방의 깊은 골에서 분지된 대마난류가 동해로 유입되기 전 제주도 남동쪽에서 분리되어 제주도 서방의 골을 통해 황해로 유입되어 황해 난류를 형성한다는 주장 (Nitani, 1972)과 대만해협에서 시작하는 대만난류가 대륙붕을 가로질러 북상하여 제주도 남서쪽에서 분리되어 동해로 유입하는 대마난류와 황해난류를 형성한다는 학설 (Beardsley et al., 1985; Fang et al., 1991)이 양립하여 왔으나 본연구사업의 1단계 사업을 통하여 대마난류는 큐슈서방의 골 왼쪽 대륙사면에서 쿠로시오로부터 분리되어 바깥 대륙붕상을 따라 북상하는 새로운 대마난류의 경로가 제시된 바 있다 (이 등, 1997; Lie and Cho, 1994; Lie et al, 1998). 따라서 대만난류가 북동진하여 대마난류와

연결되는 않는다면 대만 북쪽의 동중국해 대륙붕상으로 유입하는 대만난류가 어디까지 영향을 미치고 어떠한 경로로 빠져나가는지에 대한 의문이 제기된다. 또한 황해난류는 제주도 서쪽해역을 지나 황해로 유입되는 것으로 알려져 왔으나 (Nakao, 1977) 이 후의 연구 결과 (Lie, 1987; 김 등, 1991)는 제주도 서쪽에 유입된 황해난류는 황해 내부로 진입하지 않고 대부분이 제주도를 돌아서 제주해협으로 빠져나가는 것으로 밝혀졌다. 이러한 순환계의 제시는 기본적으로 해수의 물리특성 자료로부터 얻어진 것으로 해류의 직접관측에 의한 순환계 규명이 요구된다. 본 연구해역의 해류계를 알기 위해서는 양자강 회석수, 황해난류, 대만난류의 이동경로, 흐름의 세기, 영향 범위 등과 계절변동이 정확히 파악되어야 할 것이다.

## 제 2 절 조사개요

동중국해에서는 조업활동이 대단히 활발하여 해·조류 관측을 위한 유속계의 장기계류는 유실될 우려가 대단히 크다. 더욱, 동중국해와 같은 광역해역의 해수순환을 유속계의 계류로 조사하기 위해서는 해수순환의 특징적 공간규모 (characteristic space scale)를 충분히 분해할 수 있을 정도로 많은 점에서 관측이 필요하기 때문에 상당한 인력과 예산이 소요된다. 이에 한정된 예산으로 동중국해 동부해역의 해류관측은 비교적 적은 예산으로도 해류를 관측할 수 있는 ARGOS 위성추적부이와 조사선 은누리호에 부착된 ADCP로 실시하였다. 1980년대 후반에 개발된 이 두가지 관측방법으로 조사되는 자료는 그 정밀도가 세계적으로 이미 인정되었고 국내에서도 1991년부터 동중국해 연구사업에 최초로 도입하였으며 지금은 그 효용성이 잘 인식되어 여러학자들이 이 방법을 널리 이용하고 있다.

동중국해 중·서부역의 광역해역을 대상으로 3월 초순 늦겨울 조사를 실시 하였으며 양자강수 유입량이 증가하는 6월에 제주도-양자강사이의 동중국해 북서해역에서 초여름 조사를 수행하였다. 또한 1단계 사업에서 제기되었던 대만난류 분기역에서 흐름 구조의 장기 시간변동을 조사하기 위해 1997년 11월 대만난류 분기역에 RCM 유속계 3대를 설치하였다. 유속계는 1998년에 회수할 예정이다.

## 제 3 절 ARGOS 표류부이에 의한 해류조사

### 가. 조사방법

위성추적부이에 의한 해류조사는 Lagrangian 방법으로 표류부이를 해상에 투하하여 부이의 위치를 인공위성으로 측정하는 것이다. 따라서 인공위성 추적부이 (satellite-tracked drifter)라 불리우며 부이의 위치는 극궤도를 선회하는 위성으로 모니터링하여 해류의 유속과 공간구조를 조사하는 것이다. 표류부이 실험은 세계해양대순환실험 WOCE 표층류 프로그램 (Surface Velocity Programme)의 한국 계획으로 수행되었고, 부이실험 관련 기술 및 일반사항은 1990-1993년에 걸쳐 수행한 'Kuroshio 해역에서 해황변동연구 (I)'의 보고서 (이홍재 등, 1993)에 자세히 기술하였고, 부이의 재원에 관한 사항은 Sybrandy와 Niiler (1991)의 보고서에 자세히 수록되었다.

본 연구에서는 자료송신 시간대를 2중으로 선택하였다. 즉, 부이 투하 후 첫 한달간은 투하 주변해역에서 조류와 같은 단주기성 운동에 의한 영향을 평가하기 위해서 하루 24시간 연속 송신하였고, 둘째 달부터는 부이가 투하해역을 상당히 벗어날 확률이 높기 때문에 전원을 아껴 장기간 자료를 획득하기 위하여 하루에 8시간만 송신하고 16시간은 중단하는 8 hours-on, 16 hours-off 방법을 택하였다.

부이의 투하지점과 끌개 (drogue)의 수심은 기존의 연구에서 제시된 순환계를 참고하여 결정하였으며 다음과 같은 사항을 고려하기 위해 투하해역을 ① 황해 난류가 황해로 유입할 가능성이 있는 양자강퇴 동쪽-제주도 해역, ② 양자강 회석수와 중국대륙연안수의 흐름을 알기 위한 양자강 입구역의 양자강퇴 해역, ③ 대만난류의 북상 및 경로를 파악하기 위한 수심 100 m 이하의 대만 북동부 북위 29° 주변해역, ④ 쿠로시오수와 대륙붕수가 만나는 대륙붕단역으로 나누었다. 늦겨울 조사에서는 해역 ①에 4대, ②에 3대, ③에 4대, ④에 2대, 총 13대의 부이를 투하하였다. 양자강 유량이 증가하기 시작하는 초여름 조사에서는 양자강-제주도 선상을 따라 해역 ①과 ②에 각각 4대의 부이를 투하, 총 8대의 부이를 투하하였다. 투하지점은 그림 2-1과 같으며 부이의 투하지점, 투하일자, 끌개수심 (center of drogue)과 같은 상세한 내용은 표 2-1과 같다.

Table 2-1. Information on the satellite-tracked surface drifters deployed in March and June 1997.

I.D. number of floats	Date deployed	Releasing point		Water depth (m)	Center of Drogue (m)
		Lat.(N)	Long.(E)		
28697	Mar. 4, 1997	31° 25.49'	123° 14.27'	42	15
28698	Mar. 4, 1997	30° 40.12'	123° 25.07'	54	15
28699	Mar. 4, 1997	29° 20.39'	123° 15.19'	66	15
28700	Mar. 4, 1997	28° 57.86'	124° .19'	78	15
28701	Mar. 4, 1997	28° 47.53'	124° 40.13'	86	15
28706	Mar. 4, 1997	28° 42.46'	125° .05'	100	40
27511	Mar. 5, 1997	28° 50.90'	127° 6.35'	452	50
28711	Mar. 5, 1997	29° 3.87'	126° 15.01'	103	0
28712	Mar. 6, 1997	32° 0.04'	124° 7.43	43	0
28702	Mar. 7, 1997	32° 18.45'	125° .36'	51	15
28703	Mar. 8, 1997	32° 39.77'	125° 36.04'	90	15
27512	Mar. 8, 1997	32° 39.77'	125° 36.04'	90	50
28707	Mar. 9, 1997	31° 52.55'	125° 25.44'	59	40
28719	Junel1, 1997	31° 57.50'	122° 42.53'	29	0
28721	Junel2, 1997	32° 15.35'	123° 25.63'	35	0
28713	Junel2, 1997	32° 29.49'	124° 08.69'	39	15
28720	Junel3, 1997	32° 40.09'	124° 37.50'	53	0
28718	Junel3, 1997	33° 07.15'	125° 50.82'	104	15
28714	Junel3, 1997	33° 01.04'	125° 34.80'	85	15
28715	Junel3, 1997	33° 01.04'	125° 34.80'	85	50
28716	Junel4, 1997	32° 55.93'	125° 18.80'	87	50



## 나. 늦겨울 상층해류 관측성과

### (1) 제주도 남서해역에서의 흐름

최근의 연구결과에 의하면 쿠로시오의 한 지류로 제주도 서쪽 골을 통하여 황해로 유입되는 것으로 알려져 온 황해난류는 황해로 유입하지 않고 제주도 서쪽을 돌아서 제주해협으로 빠져나가는 것으로 발표되고 있다. 제주도 서쪽 연안 가까이에서 제주해협으로 돌아나가는 흐름이 존재한다면 황해로 유입하는 흐름은 그보다 더 서쪽일 가능성이 있다. 이를 알아보기 위하여 3월 7-9일에 양자강퇴 북서쪽 사면역 수심 50-90 m에 4대의 부이를 투하하였다 (그림 2-2).

수심 90 m로 비교적 깊은 골에 위치한 정점 S2에는 상층과 하층의 흐름을 조사하기 위해 끝개수심 15 m 와 50 m 두 대의 부이를 동시에 투하하였으나 끝개수심 50 m 인 부이 27512는 투하후 2일도 못되어 송신을 중단하였다. 끝개수심 15 m 인 부이 28703은 투하후 처음 6일간 약 10 cm/s 속도로 서북서진하다가 3월 15일경 남쪽으로 방향을 바꾸어 약 10일간 양자강퇴 북서쪽 등수심선을 가로질러 남진하였다. 남진 평균 유속은 20 cm/s로 비교적 빠르게 이동하였으며 이후 양자강퇴 위에서 서쪽으로 이동하여 양자강 입구역에 도달한 후 4월 20일 정부부터는 남하하다가 4월 25일 자료 송신을 중단하였다.

양자강퇴 북서단 수심 51 m에 투하한 부이 28702는 처음 10일간 시계방향으로 도는 불완전한 원의 궤적을 그린후 3월 말부터 평균유속 3 cm/s이하의 미약한 속도로 동진하여 양자강퇴를 벗어난 후 4월 하순에서 6월 중순까지 제주도 남쪽 31.5° N, 126.3° E 주변에서 정체하였다. 6월 14일 이후 부이는 북상하기 시작, 6월 20일경 100 m 등수심선을 통과하여 대마난류에 합류하여 10-20 cm/s의 속도로 제주도 남쪽까지 북상한 후 제주도 남서해역을 지나 대한해협 입구에 진입후 7월 6일 자료 송신을 중단하였다. 제주도 남서해역에서 북동류의 유속은 20 cm/s 이상이고 동쪽으로 진행하면서 점차 빨라져 대한해협입구역에서는 약 50 cm/s에 달하였다.

끝개수심 40 m인 부이 28707은 양자강퇴 동쪽 수심 59 m에 투하되었는데 투하후 2일간만 자료를 송신하였고 관측기간 동안 평균유속 8.4 cm/s의 속도로 남서진 하였다.

제주도 남서쪽에 투하한 부이 28703의 궤적이 처음 6일간 서북서진 한 것은 황해 내부로 향하는 흐름이 존재할 가능성을 보여주기는 하나 이후 남쪽으로 방향을 바꾼 것으로 보아 이러한 흐름이 황해 내부까지 지속적으로 연결되지는 않는 것으로 판단되며 양자강퇴 동쪽단 수심 51 m, 59 m에 투하한 두 대의 부이

케적과 함께 생각해 볼 때 양자강퇴 동쪽 50-60 m 부근에는 남향 혹은 남동향 하는 흐름이 존재함을 보여준다.

### (2) 양자강 하구역에서의 흐름

양자강 회석수를 포함한 중국대륙연안수의 흐름을 조사하기 위해 3월 4-6일에 양자강퇴 위에 부이 2대, 양자강 입구역에 형성되어 있는 작은 골 입구에 1대의 부이를 투하하였다 (그림 2-3).

골 북쪽 수심 42 m에 투하한 부이 28697은 투하지점 근처에서 맴돌다 3월 19일 중국 어선에 포획되었다. 양자강퇴 중앙부 수심 43 m에 투하한 부이 28712는 약 2개월간 자료를 송신하였는데 불규칙한 케적을 그리며 약간 서쪽으로 이동하였으나 양자강퇴 중앙부를 벗어나지 못하였다. 양자강 하구 동남쪽 골 입구에 투하한 부이 28698은 북상하다가 투하 8일 후인 3월 12일 중국 어선에 포획되어 더 이상 흐름을 관측할 수 없었다. 한편 1996년도에 골 입구에 투하한 부이도 북상하다가 양자강퇴 남쪽 골 끝단에 도달한 후 더 이상 진행하지 못하고 불규칙한 케적을 그린 것으로 보아 (이 등, 1997) 양자강 입구의 골 남쪽에는 북상하는 흐름이 존재하는 것으로 판단된다.

제주도 남서해역에 투하한 부이 28703의 이동케적과 함께 늦겨울 양자강 하구역에서의 흐름을 종합하면 양자강퇴 상부에서는 미약한 서향류가 존재하나 전반적으로 정체된 흐름을 보이고 양자강퇴 남쪽 골 입구에서는 북상하는 흐름이 존재하며 이 북향류는 양자강퇴까지 지속되지는 않는 것으로 판단된다.

### (3) 대만난류역에서의 흐름

대만 북쪽의 동중국해 남부 대륙붕으로 진입한 대만난류가 어디까지 북상하는지 그리고 어떠한 경로로 빠져 나가는지를 조사하기 위해서 3월 4일 최남단 관측선 M을 따라 수심 66 - 100 m 사이의 대륙붕상에 4대의 부이를 투하하였다 (그림 2-4).

중국 연안쪽의 수심 66 m에 투하한 부이 28699는 투하 다음날 자료 송신을 중단하여 흐름을 파악할 수 없었다. 수심 78 m에 투하한 부이 28700은 투하후 처음 9일간 평균유속 약 5 cm/s로 북동진하다가 이후 10여일간 29.3° N, 124.2° E 주변에서 정체한 후 3월 25일 부터는 10-15 cm/s의 비교적 빠른 속도로 남동진하여 4월 5일경에 수심 100 m까지 도달한 후 북동쪽으로 방향을 바꾸어 100 m 등수심선을 따라 30.5° N까지 북상하였다. 5월 초순부터는 등수심선을 비스듬히 가로질러 북동진하여 큐슈 서쪽 골의 북서부에 도달한 후 크고 작은 소용돌이 모양의 복잡한 케적을 그리다 남동진하여 골 중심부로 진입한 후 큐슈 서안을 따라 북진하여 고평열도 사이를 지나 대한해협 입구에 진입, 큐슈 북서 연안

을 따라 북동진하여 동해로 진입하였다.

수심 86 m에 투하한 부이 28701은 왼쪽에 투하한 부이 28700과 유사한 궤적을 그리며 북동진하다가 3월 27일 자료 송신을 중단하였는데 부이 28700이 3월 말경부터 남동진하여 28701 위치 주변을 지나간 것을 참조하면 이후 더 이상 북상하지는 않았을 것으로 판단된다.

동쪽의 수심 100 m에 투하한 부이 28706 (끝개수심 40 m)은 등수심선을 따라 북동진하여 4월 7일 30.7° N에 이르러 조업선박에 포획되었다. 투하후 10일간씩 구간을 나누어 평균유속을 살펴보면 처음 10일간은 6.5 cm/s이었고 3월 15-24일 동안은 8.5 cm/s, 3월 24일 - 4월 3일까지는 18.3 cm/s로 북상하면서 점차 흐름이 빨라졌으며 이후 조업선박에 포획되기 전까지 3일간 평균유속은 24.2 cm/s이었다. 이 부이는 4월 10일 제주도-고도열도 사이에 채투하 되었는데 채투하 후 약 20일 동안 채투하 지점 주변에서 복잡한 궤적을 그리며 정체된 상태로 머무르다 5월 1일부터 동진하여 5월 8일 대한해협 입구역에 도달한 후 송신을 중단하였다. 동진한 동안의 평균유속은 15.5 cm/s이었다.

이상의 관측결과를 종합하면 늦겨울-초봄에 동중국해 남부 수심 78-86 m를 통과하는 대만난류는 29.5° N 이남에서 동쪽으로 빠져나가 수심 100 m 부근으로 이동하였다. 연안쪽에 투하한 부이로부터 자료를 얻지는 못하였으나 양자강 하구역의 끝에서 북상하는 흐름을 생각해 볼 때 양자강 퇴 부근까지 북상하는 흐름이 존재할 가능성이 크다. 100 m 등수심선을 따라 북동진 하는 흐름은 큐슈 서방의 수심 100-200 m 사이에서 북향하는 대만난류와 합류할 가능성을 보여 주나 1994년도 여름철 실험에서는 100 m 등수심선을 따라 남서진한 경우도 있어 (이 등, 1995) 이 부근 흐름이 매우 복잡함을 알 수 있으며 앞으로 좀 더 많은 관측이 필요하다.

#### (4) 대륙붕단역에서의 흐름

쿠로시오와 대륙붕단역에서의 흐름을 알기 위해 3월 5일 오키나와섬 서쪽 북위 29° 부근의 대륙붕단역에 2대의 부이를 투하하였다 (그림 2-5).

바깥 대륙붕 수심 103 m의 표층에 투하한 부이 28711은 파동형태를 보이며 동진하여 오키나와 골 중심부를 지나 3월 30일에 큐슈 남단의 가고시마 만으로 진입하였다. 투하당시의 수온, 염분 분포는 투하해역 부근의 상층에 전선이 존재함을 보여준다. 따라서 파동형태의 궤적은 쿠로시오와 대륙붕수 사이의 전선역에서 발생하는 쿠로시오의 전선 사행 (frontal meander)과 관련된 흐름으로 생각할 수 있다. 이동 궤적을 자세히 살펴보면 동서방향의 폭은 약 90 km 이고 진폭은 60-70 km 정도로 투하후 처음 10일간의 평균유속은 35 cm/s 이었고 동쪽방향으로 이동한 평균속도는 25.6 cm/s 였다. 부이추적으로 관측한 전선 사행의 이동속

도는 Sugimoto et al. (1988)과 Qiu et al. (1990)이 계산한 쿠로시오 전선 파동의 진행속도 20-30 cm/s와 일치한다.

대륙사면역 수심 452 m에 투하한 부이 27511 (끝개수심 50 m)은 처음 5일간 평균유속 25.6 cm/s로 북동진하다가 동쪽으로 방향을 바꾸어 빠른 속도로 도까라 해협을 통해 빠져나갔다. 방향전환을 시작하여 빠져나가기 전까지의 평균유속은 82.6 cm/s 이었다. 도까라 해협을 빠져나간 부이는 오키나와 동쪽 27° -28° N, 131° -132° E 해역에서 5회에 걸쳐 반시계방향의 소용돌이 궤적을 그린후 5월 초순경 오키나와 열도 사이를 지나 오키나와 골로 재진입한 후 쿠로시오에 합류하여 약 40 cm/s의 속도로 북동진하여 도까라해협을 통하여 다시 빠져나가는 특이한 궤적을 보였다. 오키나와 동쪽의 소용돌이의 규모는 70-80 km 정도이고 평균 주기는 약 5일 이었다.

#### 다. 초여름 상층해류 관측성과

##### (1) 제주도 주변에서의 흐름

제주도 남서쪽 황해로 연결되는 골 중심부에 해당하는 수심 85-91 m 사이의 세 곳에 6월 13-14일 4대의 부이를 투하하였다. 투하지점은 제주도 남서연안으로부터 양자강퇴 쪽으로 각각 34 km, 60 km, 87 km 정도 떨어진 곳으로 제주도 연안쪽에는 끝개수심 15 m 부이를, 양자강퇴쪽 정점에는 끝개수심 50 m 부이를 투하하였고 가운데 지점에는 상층과 하층의 유속구조를 관측하기 위해서 끝개수심 15 m 와 50 m 두 대의 부이를 동시에 투하하였다 (그림 2-6).

제주도 연안에서 약 34 km 떨어진 수심 91 m에 투하한 부이 28718은 처음 5일간 북동북진후 북동쪽으로 방향을 바꾸어 제주해협 서쪽입구역을 지나 제주해협을 통과하면서 동진하였다. 흐름의 세기는 투하후 처음 5일간은 평균 6.4 cm/s로 약하였으나 제주해협 서쪽 입구역에서는 약 20 cm/s로 3배 이상 강해졌고 제주해협 동쪽으로 빠져나갈 때의 유속은 30 cm/s 이상에 달하였다. 제주해협을 통과하는 동안의 평균유속은 약 30 cm/s 이었다. 제주해협을 통과한 후 부이는 계속동진하여 대한해협의 서수도를 통과하여 동해로 진입하였다.

제주도 연안으로부터 약 60 km 떨어진 곳에 투하한 부이 28715 (끝개수심 15 m)는 투하후 9일간 평균유속 3.8 cm/s로 북서진하여 6월 23일 제주도 서쪽 약 70 km 지점에 도달한 후 북동쪽으로 방향을 바꾸어 제주해협 서쪽을 지나면서 제주도 연안쪽 부이 28718과 비슷한 거리를 유지하며 제주해협을 통과하였다. 제주해협 북서쪽에서 평균유속은 약 8.7 cm/s로 제주도 남서쪽에서 북서진 할 때보다 2배 이상 증가하였다. 제주해협을 지난후 대한해협 입구역까지의 평균유속

은 약 20 cm/s로 동진하면서 점차 증가하였다. 같은 위치의 수심 50 m 층에 투하한 부이 28714는 북진하다가 6월 18일 자료송신을 중단하였다. 투하 후 처음 5 일 동안 15 m와 50 m 두 층의 흐름을 비교하면 평균유속은 각각 3.4 cm/s, 6.0 cm/s 이었고 흐름의 방향은 평균치가 각각 326° 와 2° 로 50 m 층이 15 m 층에 비해 유속은 강하였고 유향은 시계방향으로 38° 편향된 흐름 구조를 보였다.

제주도 남서쪽 약 87 km 떨어진 곳에 투하한 부이 28716 (끝개수심 50 m)은 시계방향의 작은 원을 그리다가 투하 4일만에 조업선박에 포획되었다. 왼쪽에 투하한 부이의 관측기간이 짧아서 이곳에서의 흐름을 정확히 알 수 없으나 제주도를 돌아나가는 흐름의 폭은 28715의 궤적을 기준으로 하면 제주도 남서쪽에서는 약 60 km 이상이고 서쪽에서는 약 70 km 이상이며 제주해협에서는 40-50 km 정도의 폭을 갖는다.

## (2) 양자강 하구역과 제주도 남서해역 사이에서의 흐름

양자강수의 유량이 증가하는 초여름 양자강 회석수의 거동을 살펴보기 위해 6월 11-13일에 양자강-제주도 선상의 양자강퇴 위에 끝개수심 0 m인 부이 3대와 15 m인 부이 1대, 총 4대의 부이를 투하하였다. (그림 2-7).

양자강 입구역 수심 29 m에 투하한 부이 28719는 북서북진하다가 투하 4일 후 조업선박에 포획되었다. 관측기간 동안의 평균 유속은 13.6 cm/s이었다. 양자강퇴 중앙부 수심 35 m에 투하한 부이 28721은 투하후 파동형태의 궤적을 그리며 동진하여 7월 1일 양자강퇴를 가로질러 7월 6일 제주도 남서쪽의 32.6° N, 125.8° E 에 도달하였다. 평균 동진속도는 11.3 cm/s 이며 양자강퇴 상부에서와 양자강퇴를 벗어난 이후 평균 동진속도는 각각 8.4 cm/s, 22 cm/s로 양자강퇴를 벗어난 이후 속도가 급격히 빨라졌다. 파동모양의 궤적은 양자강퇴를 벗어나면서 보이지 않았다. 이후 이동궤적을 보면 시계방향으로 회전하여 북쪽으로 흐르다 북동진하여 7월 12일 제주해협에 진입하였고 제주도 연안을 따라 제주도 동북쪽 끝단으로 이동하였다. 제주해협에서의 평균유속은 29.2 cm/s 이었다.

양자강퇴 동부역 수심 39 m에 투하한 부이 28713 (끝개수심 15 m)는 왼쪽에 투하한 부이 28719와 같이 양자강퇴 위에서 파동모양의 궤적을 그리며 동진, 6월 말경 양자강퇴를 벗어나 계속 동진하여 7월 8일 제주도 남서부 32.3° N, 125.8° E 지점에 도달하였다. 평균 동진 속도는 7.0 cm/s로 표층부이 (29721)보다 느렸다. 이후의 이동궤적을 좀 더 살펴보면 8월 상순까지 32° N, 126° E 주변에서 맴돌다가 남서진하여 8월 중순경 양자강퇴의 동쪽 끝단의 수심 50 m 부근에 도달한후 9월 10일 까지 머무르다 북진, 북서진, 북동진하여 9월 28일 제주도 남쪽 32.9° N, 126.3° E 까지 북상한 후 제주도 남서쪽에서 북동-남서 방향으로 찌그러진 반시계방향의 타원궤적을 그린후 남동진하여 11월 1일 제주도 남쪽 32.3°

N, 126.7° E 부근까지 남하하다가 대마난류의 흐름과 합류하여 대한해협쪽으로 북동진하였다.

양자강퇴의 동북쪽 가장자리에 투하한 표층부이 28720은 동진하다가 투하하 6일만에 송신을 중단하였다. 관측기간동안의 평균 동진속도는 11 cm/s 이었다.

이상의 관측 결과를 종합하면 중국 연안쪽에 연안을 따라 북상하는 흐름이 있고 양자강퇴 위에서는 파동모양의 궤적을 그리며 제주도쪽으로 향하는 흐름이 존재하며 양자강퇴 동쪽 제주도 서남해역에서는 흐름이 매우 불규칙하여 뚜렷한 흐름을 보이지 않는다.

## 제 4 절 ADCP에 의한 유속관측

### 가. 자료획득 및 처리방법

1997년 늦겨울 (3월 1-10일)과 초여름 (6월 7-13일)에 조사선 온누리호 (3월)와 이어도호 (6월)에 장착된 ADCP를 이용하여 CTD 관측선을 따라 층별 흐름을 연속적으로 조사하였다. 늦겨울 관측해역은 동중국해 중·서부역의 광역해역에서, 초여름에는 양자강-제주도 사이의 국부해역이며 조사선이 관측선을 따라 통과한 시각을 그림 2-8과 2-9에 표시하였다. 관측해역의 수심이 350 m 보다 얕은 천해역이어 bottom tracking mode (BT mode)로 관측하였다.

ADCP로부터 측정된 유속자료는 각층에서 30초 평균치이며 이상치의 보정을 위해서 5분 간격으로 이동평균하였으며 평균시 평균간격내의 자료중 최대치와 최소치는 제외하였다.

관측해역이 시간에 따른 조류성분의 변화가 우세한 천해역이어 조사선 장착 ADCP를 이용한 관측자료를 이용 해류를 파악하기 위해서는 조류성분을 적절히 제거해 주어야 한다. ADCP 자료로부터 조류성분 제거방법은 수치모델 결과를 이용하는 방법 (Foreman and Freeland, 1991)과 최소사승법을 이용 조류와 잔류의 크기를 알아내는 방법 (Candela et al., 1992) 등이 있으나 여기서는 1단계 사업으로 수행된 황해와 동중국해의 조석 모델 결과 (이 등, 1997)의 M2, S2, K1, O1, N2 등 5개 주요 분조를 이용 수직 평균된 ADCP 자료로부터 조류성분 제거를 시도하였다.

## 나. 늦겨울 해류관측

관측은 상층 17 m부터 매 8 m 간격으로 관측하였으나 여기서는 25 m와 65 m 층의 수평분포도를 제시하였다 (그림 2-10). 수평분포 작성시 5 km 간격으로 공간평균한 자료를 사용하였다. 25 m 층에서의 유속이 65 m 층보다 다소 강하기는 하나 두 층의 유속은 흐름은 대체로 비슷하다. 관측해역의 대부분이 수심 150 m 이내의 천해역으로 조류변화에 의한 흐름변화가 강하게 포함되어 있으나 대한해협을 포함한 우리나라 남해안에서는 전반적으로 동쪽으로 향하는 흐름 분포를 보이며 최남단 관측선에서는 전반적으로 북상하는 흐름이 우세한 분포이다. 그림 2-11은 조석모델 결과를 이용하여 조류성분을 제거한 잔차류의 분포도이다. 양자강퇴 주변해역을 포함한 대부분의 해역에서 조석 주기에 해당하는 흐름의 시간변동이 여전히 존재하여 조류성분이 완전히 제거되지 못한 것으로 보인다. 제주도 주변해역을 포함한 대한해협에서는 동쪽으로 향하는 대마난류가 뚜렷히 나타나고 29° N 부근의 남쪽 관측선에는 미약한 북향/북동향의 흐름이 존재한다.

## 다. 초여름 해류관측

여름철에는 양자강수의 유입과 태양복사에 의한 표층 가열로 인해 상층 15-20 m에 강한 수직 성층이 형성된다 (이 등, 1995). 표층 가까이의 흐름을 관측하기 위해서 첫 번째 층을 9 m로 조정하였다. 관측은 매 4 m 간격으로 관측하였고 9 m, 25 m와 49 m 층의 흐름의 공간분포를 제시하였다 (그림 2-12). 25 m와 49 m 층의 흐름의 세기는 대체로 비슷하나 9 m 층의 유속은 25 m 층에 비해 매우 약하다. 조석모델 결과를 이용한 조류성분을 제거한 후의 잔류의 흐름 분포를 보면 제주도 서쪽과 북서쪽 연안을 따라 돌아가는 흐름을 보여 주며 제주도-양자강 선을 남북으로 가로지르는 관측선 B-E 에서는 동쪽으로 향하는 흐름이 존재한다 (그림 2-13). 그러나 대부분의 해역에서 조석주기의 해류변동은 여전히 존재하여 조류성분이 충분히 제거되지 못하였음을 말해 준다.

## 제 5 절 큐슈 남서방 해류계 계류

위성추적부이와 조사선 장착 ADCP에 의한 해류조사는 비교적 저렴한 경비로 공간분포를 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있으나 특정해역에서 흐름의 장기 시간변동을 파악하기 위해서는 해류계 계류에 의한 해류관측을 하여야 한다. 본 연구사업의 1단계 연구 (쿠로시오해역과 동중국해의 해양순환, 1994-1997)에서 필요성이 제기되었던 대마난류 분기역에서 흐름의 장기 시간변동을 조사하기 위하여 1997년 11월 27일  $30^{\circ} 29.268' N$ ,  $128^{\circ} 20.17' E$  해역에 RCM 유속계 3대와 계류용 CTD (Seacat, SBE) 1대를 설치하였다. 계류장소의 수심은 768 m이며 유속계 설치 수심은 525 m, 640 m, 740 m이며 Seacat은 580 m에 설치하여 쿠로시오 중층수의 변동을 파악할 수 있도록 하였다. 제한된 연구비 문제를 극복하기 위해 일본 가고시마 대학교의 동중국해 연구팀 (연구책임자 Hiroshi Ichikawa 교수)의 협조를 받아 가고시마대 소속 조사선 Keitenmaru호를 이용하여 계류 장비를 설치하였고 1998년 3월 가고시마 대학의 동중국해 조사시 회수할 예정이다.



## 참고문헌

- 김구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26:262-277.
- 이 홍재 등, 1993. Kuroshio 해역에서 해황변동연구 (I) -세계해양대순환실험 표층류계획 한국해양연구소 프로그램 (최종년도)-. 한국해양연구소 보고서 BSPN 00179-603-1, pp. 193.
- 이 홍재 등, 1995. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (1차년도) -동중국해 동부해역중심-. 한국해양연구소 보고서 BSPN 00257-812-1, pp. 462.
- 이 홍재 등, 1996. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (2차년도) -동중국해 동부해역중심-. 한국해양연구소 보고서 BSPN 00278-901-1, pp. 467.
- 이 홍재 등, 1997. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (최종년도) -동중국해 동부해역중심-. 한국해양연구소 보고서 BSPN 00319-964-1, pp. 563.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, 30: 297-314.
- Candela, J., R. beardsley and R. Limeburner, 1992. Separation of Tidal and subtidal Currents in Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Observations. *J. Geophys. Res.*, 97: 769-788.
- Fang, G., B. Zhao and Y. Zhu, 1991. Water volume transport through the Taiwan strait and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters. In: *Oceanography of Asian Marginal Seas*, ed. K. Takano, Elsevier, New York, 345-358.
- Foreman, M and H. Freeland, 1991. A Comparison Techniques for Tidal Removal From Ship-Mounted Acoustic Doppler Measurements Along the Southwest Coast of Vancouver Island. *J. Geophys. Res.*, 96: 17,007-17,021.
- Guan, B., 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huangjai and East China Seas. In: *Oceanology of China Seas*. Vol. 1, Ed. by Zhou D., Y. Liang and C. Zeng, Kluwer Academic Publishers, 17-26.
- Kondo, M., 1985. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea, I., Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near the

- bottom (in Japanese), Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab., 62, 19-66.
- Lie, H.-J., 1987. Summertime hydrographic features in the southern Hwanghae. Progress in Oceanogr., 17, 229-242.
- Lie, H.-J. and C.-H. Cho, 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. Journal of Geophysical Research, 99, 25,081-25,091.
- 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
- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio, In: Kuroshio, ed. H. stommel and K. Yoshida, Univ. Tokyo Press, 353-369
- Qiu, B., T. Toda and N. Imasoto, 1990. On Kuroshio Front Fluctuations in the East China Sea Using satellite and In Situ Observational Data. J. Geophys. Res. 95: 18191-18204.
- Sugimoto, T., S. Kimura and K. Miyaji, 1988. Meander of the Kuroshio Front and Current Variability in the East China Sea. J. Oceanogr. Soc. Japan, 44: 125-135.
- Sybrandy, A.L. and P.P. Niiler, 1991. The WOCE/TOGA SVP Lagrangian drifter construction manual, WOCE Rep. 63, 58 pp., Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. of Calif., La Jolla.
- 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.

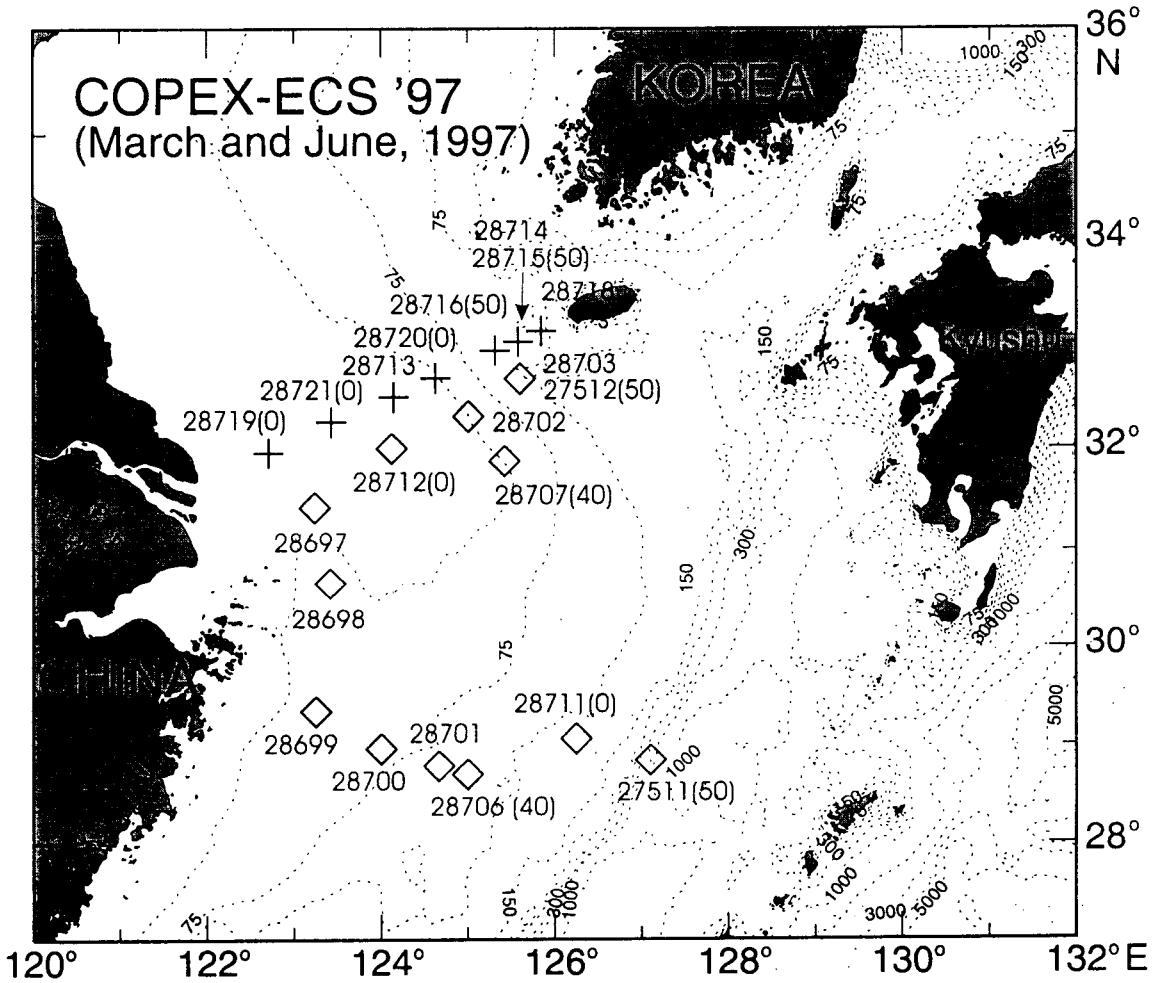


Fig. 2-1. Release point of satellite-tracked drifters deployed in 1997. Symbols '◇' and '+' denote respectively release points in March and June.

COPEX-ECS 9703

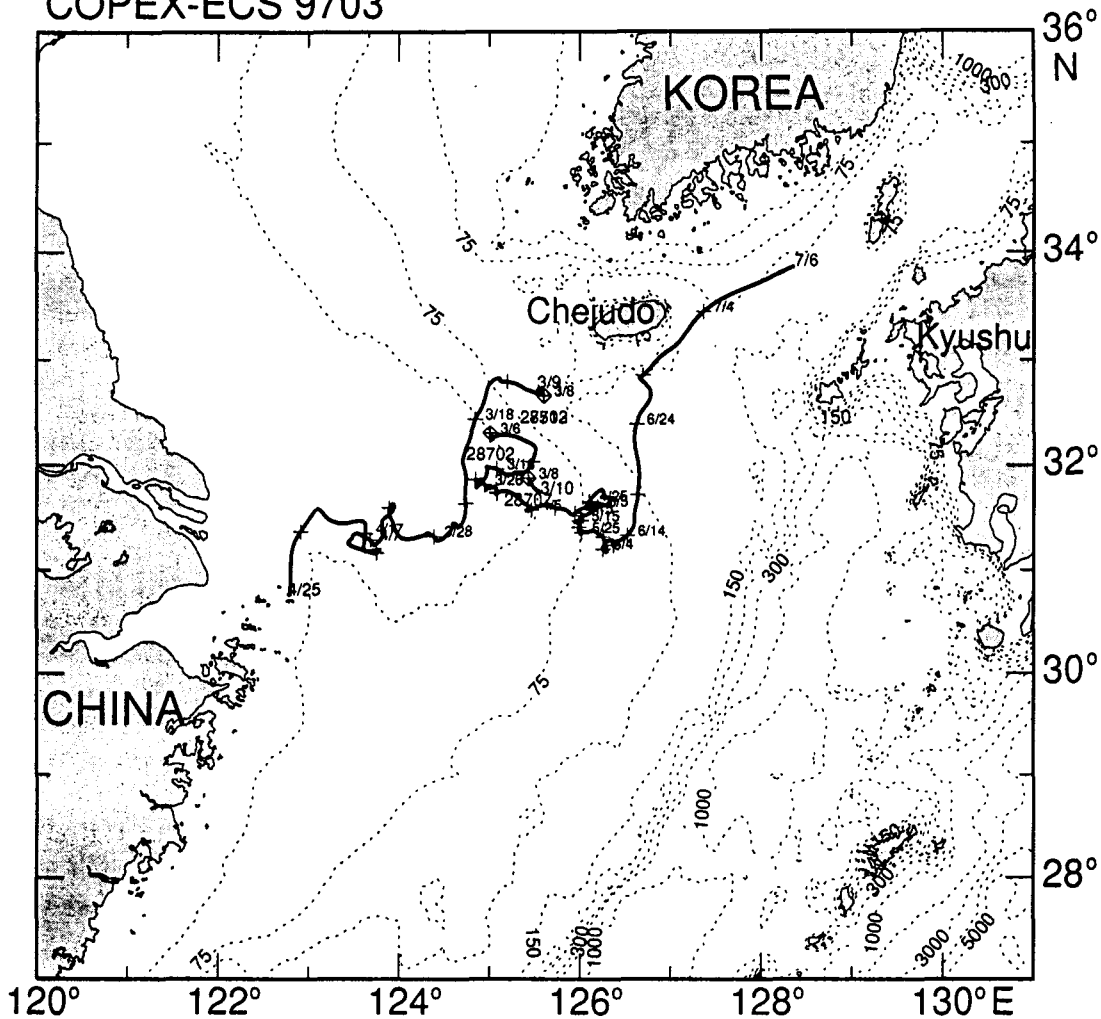


Fig. 2-2. Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the southwestern sea of Cheju-do in March 1997 (28703, 27512, 28702, 28707).

COPEX-ECS 9703

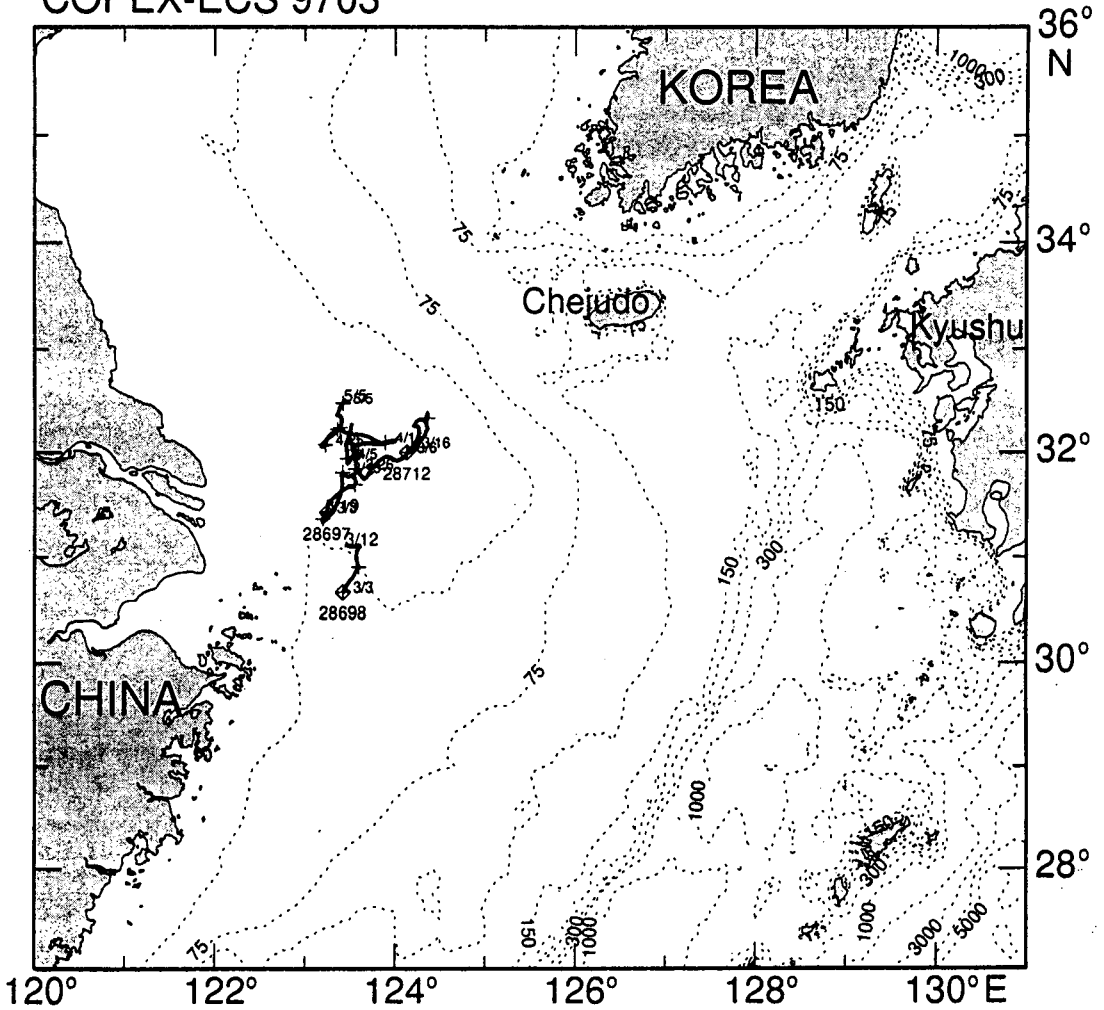


Fig. 2-3. Trajectories of three satellite-tracked surface drifters released in the east of the mouth of the Changjiang river in March 1997 (28697, 28712, 28698).

COPEX-ECS 9703

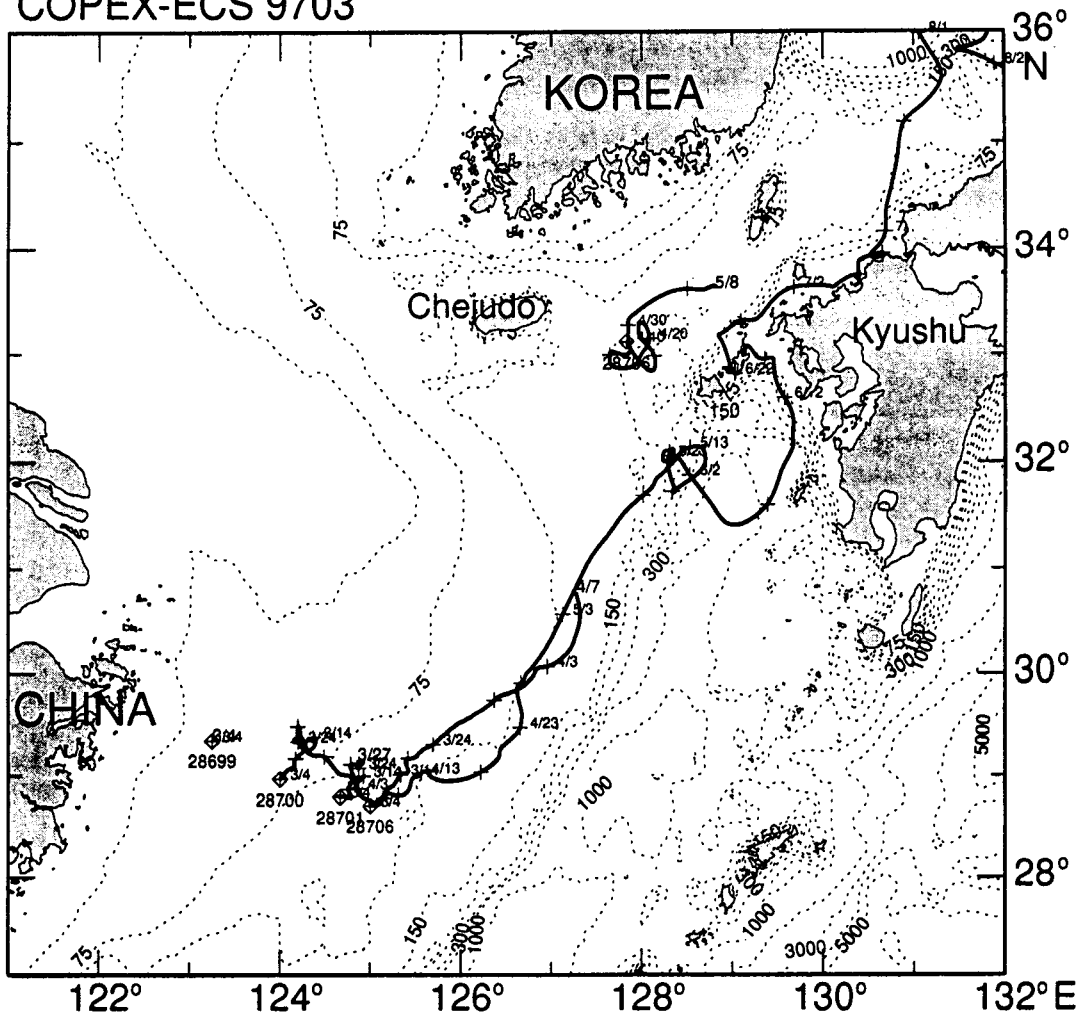


Fig. 2-4. Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the Taiwan warm current region in March 1997 (28699, 28700, 28701, 28706).

COPEX-ECS 9703

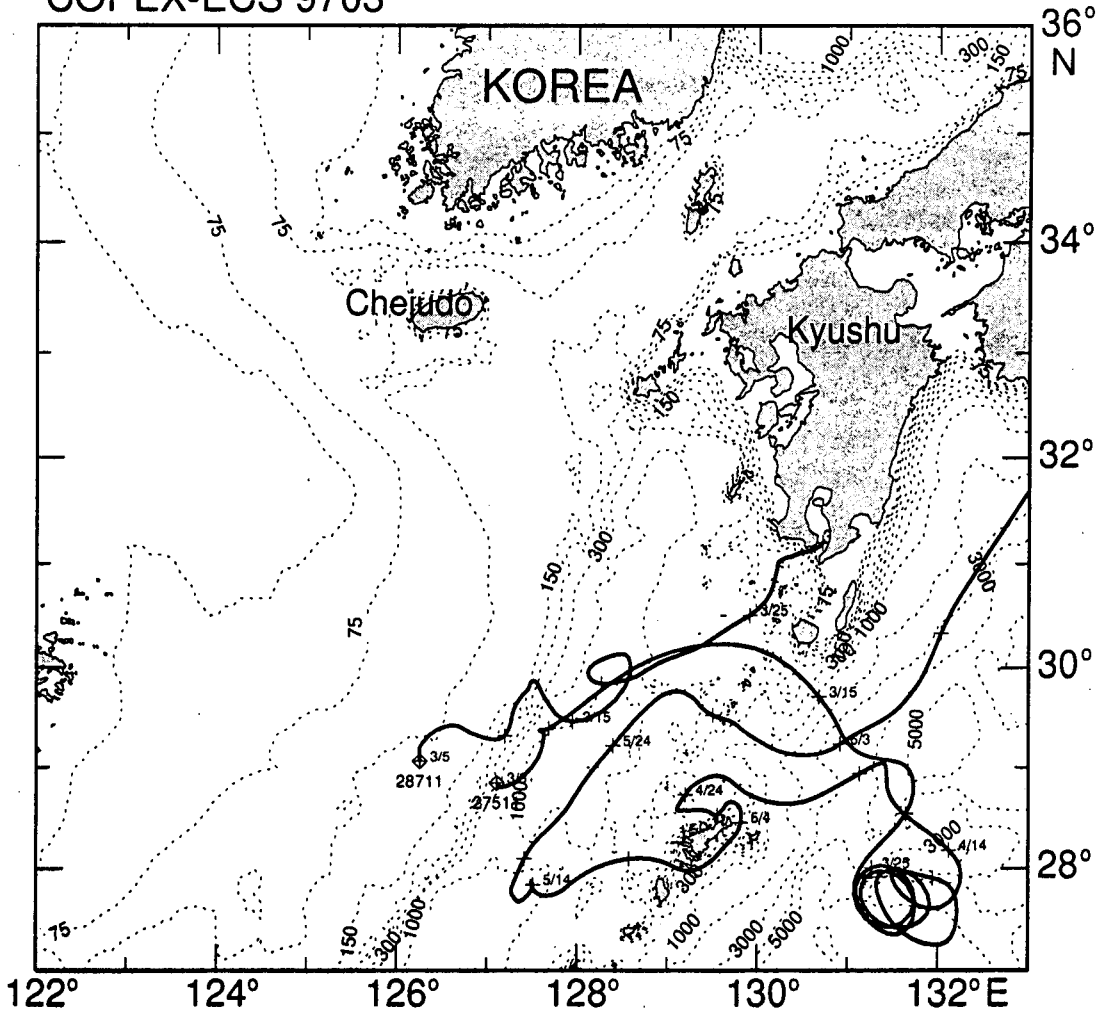


Fig. 2-5. Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released on the continental shelf west of Okinawa trough in March 1997 (28711, 27511).

COPEX-ECS 9706

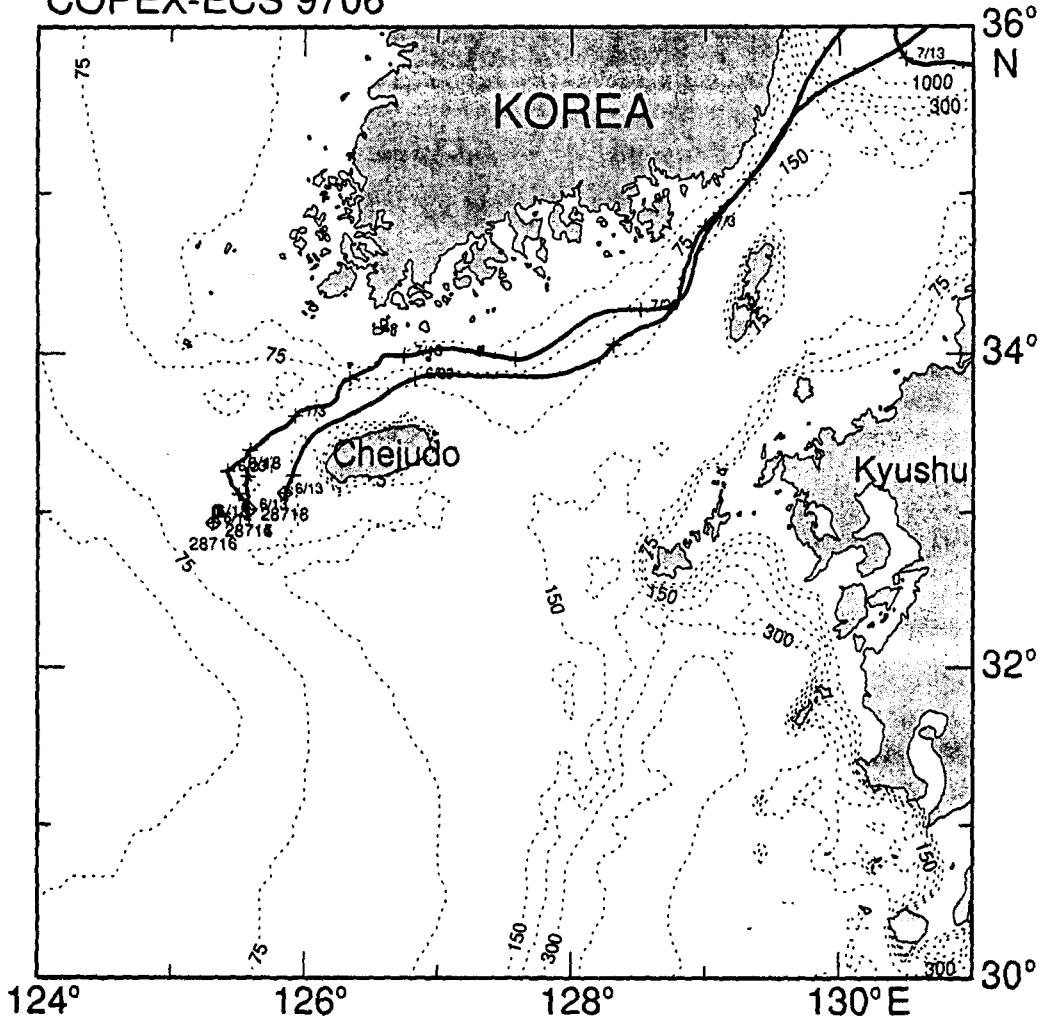


Fig. 2-6. Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released in the western sea of Cheju-do in June 1997 (28718, 28715, 28714, 28716).



COPEX-ECS 9706

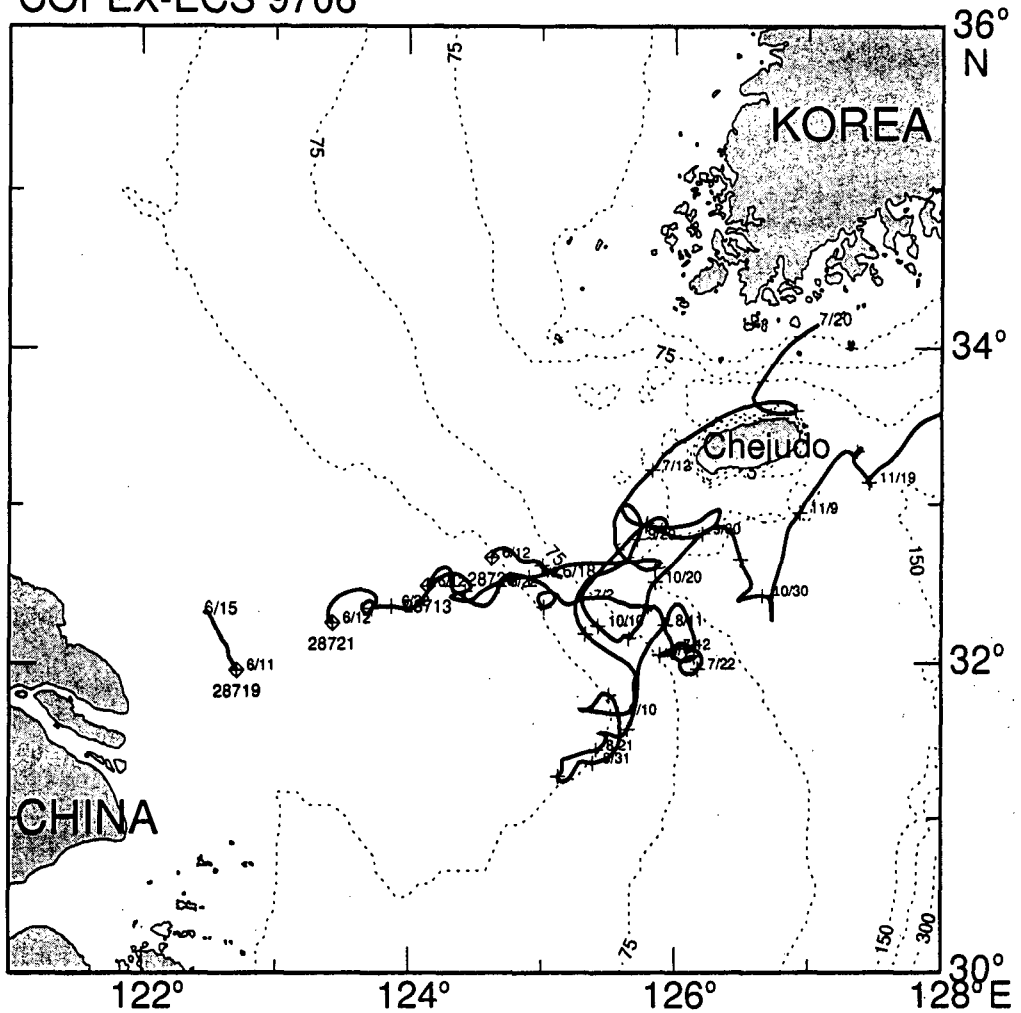


Fig. 2-7. Trajectories of four satellite-tracked surface drifters released on the Changjiang bank in June 1997 (28719, 28721, 28713, 28720).

COPEX 9703 Cruise track

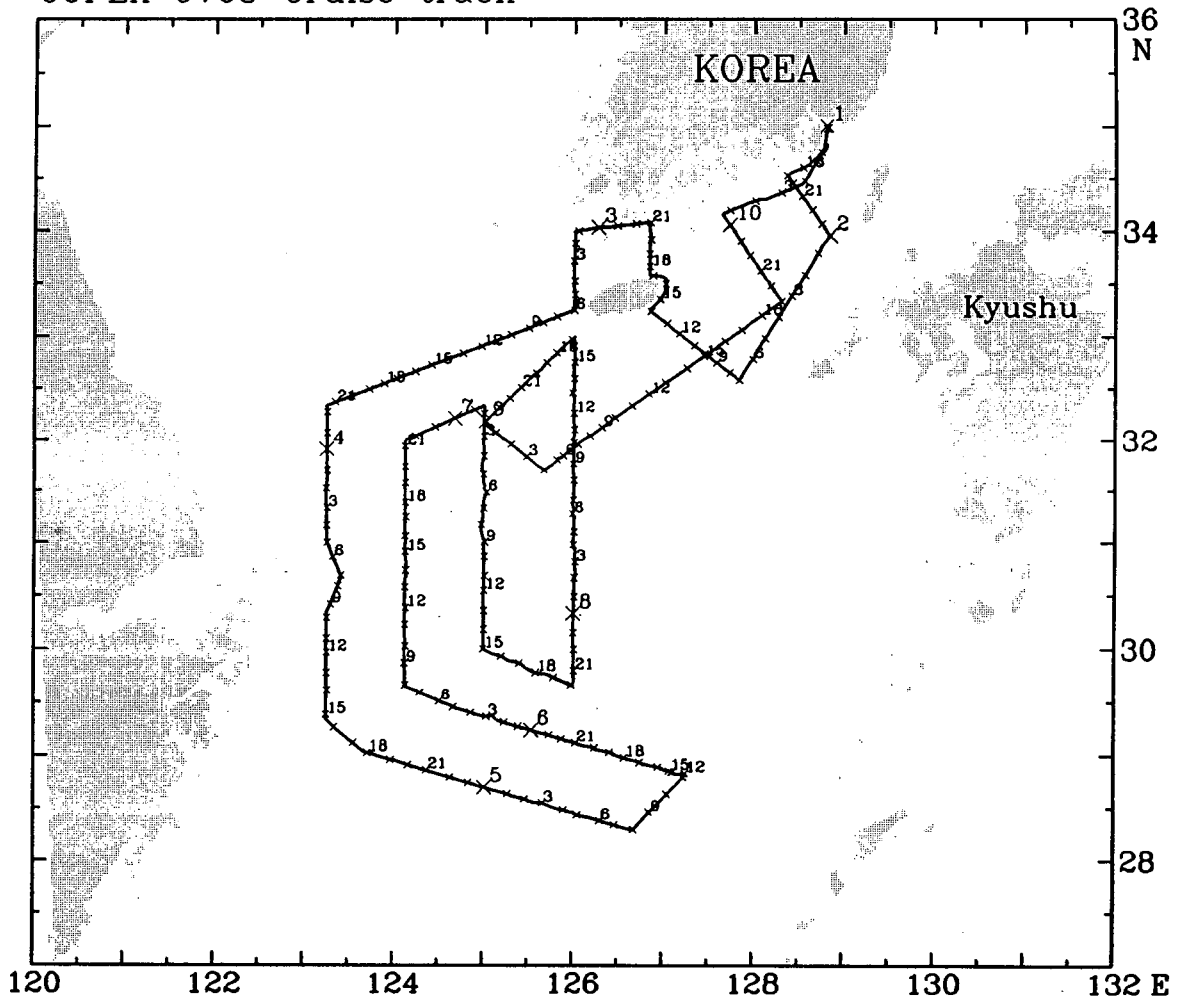


Fig. 2-8. Survey line for ADCP measurements in March 1997(R/V Onnuri).

# YS9706 Ship track

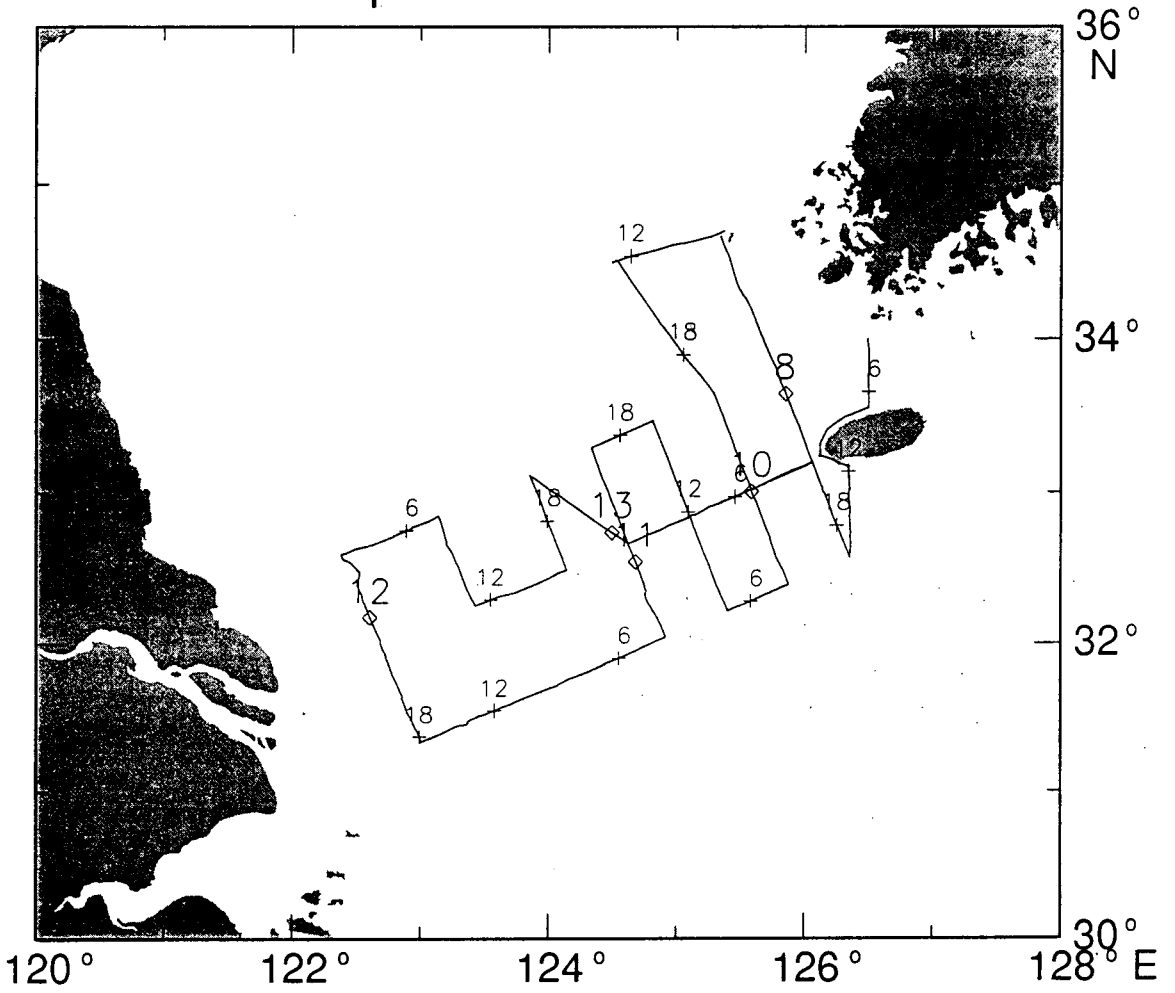


Fig. 2-9. Survey line for ADCP measurements in June 1997(R/V Eardo).

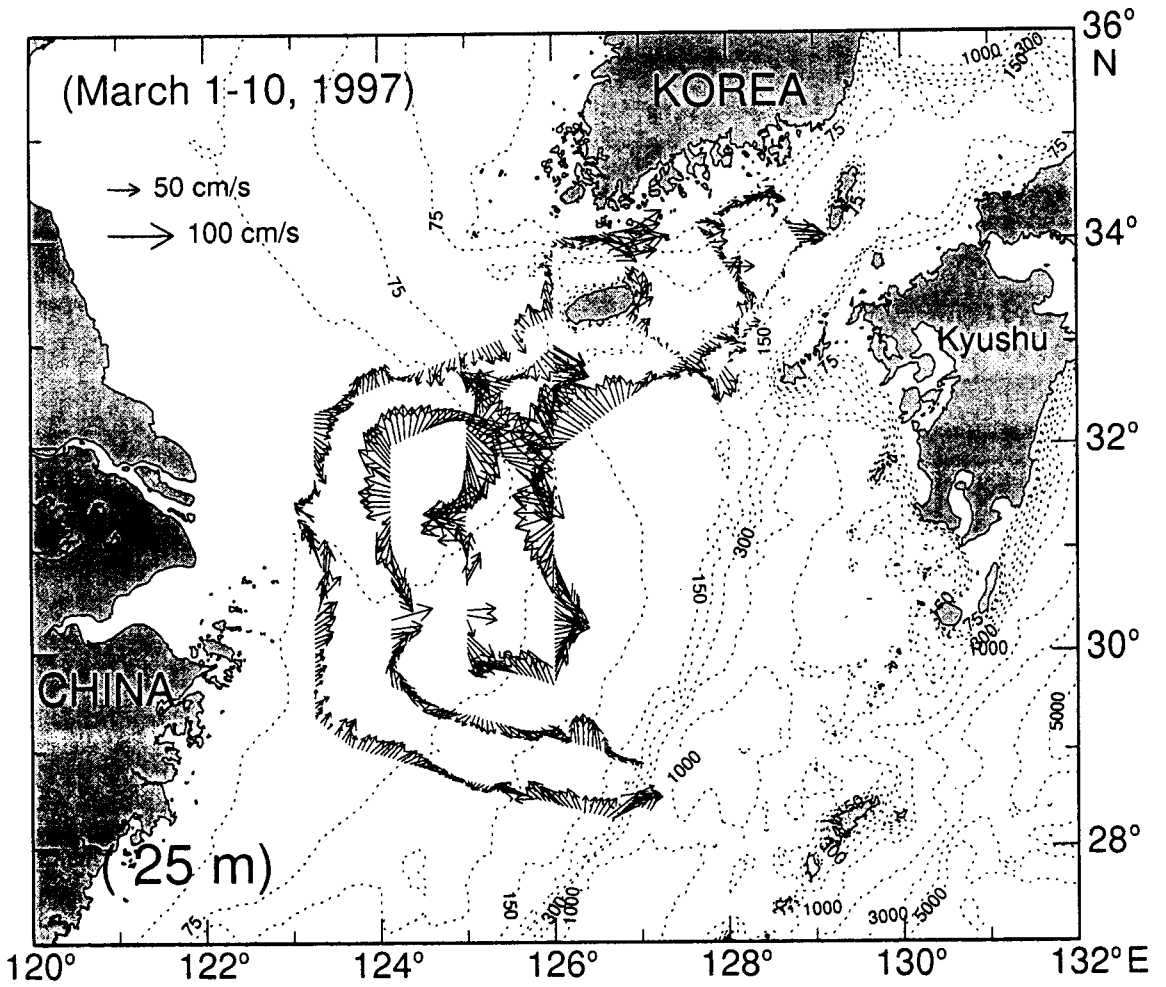


Fig. 2-10a. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at 25m in March 1997.

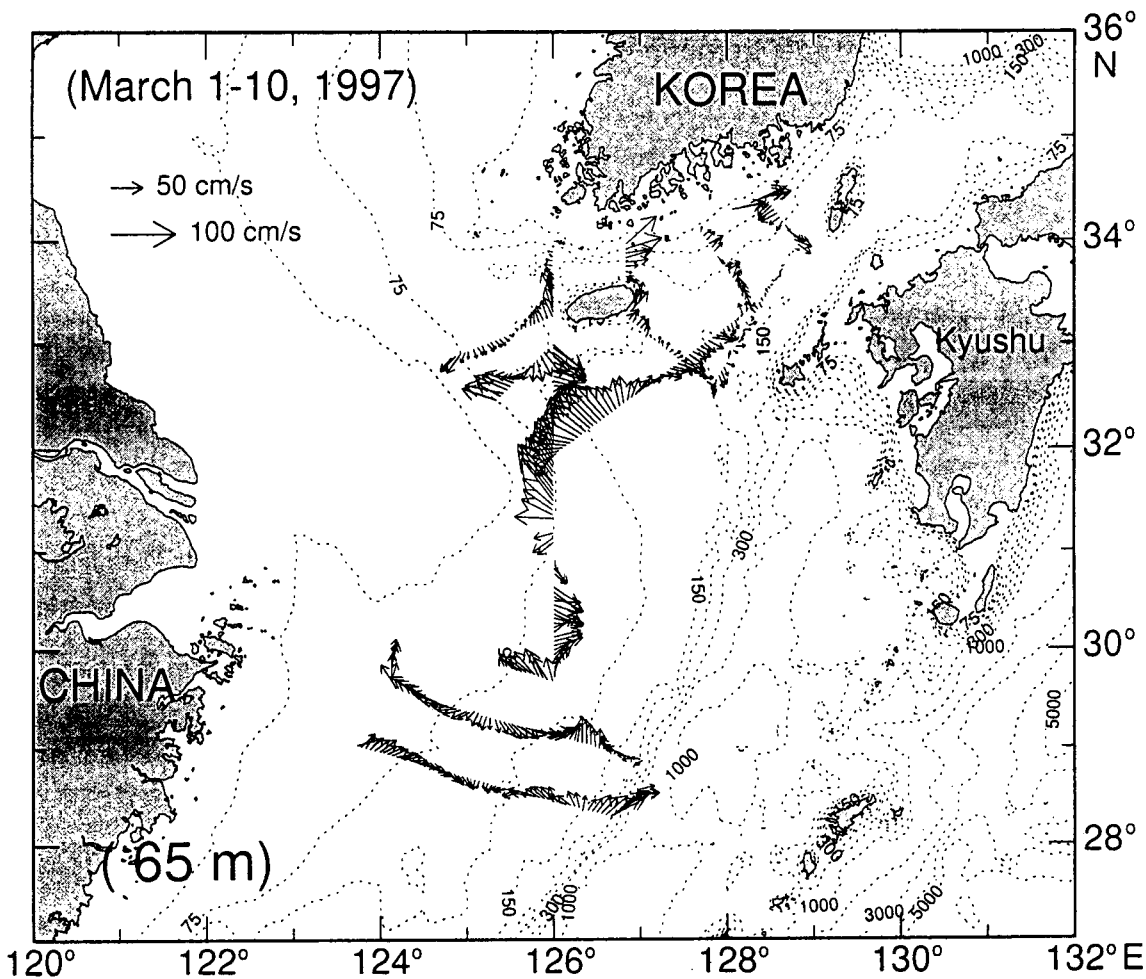


Fig. 2-10b. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at 65m in March 1997.

# ADCP - March 1997 ( detided )

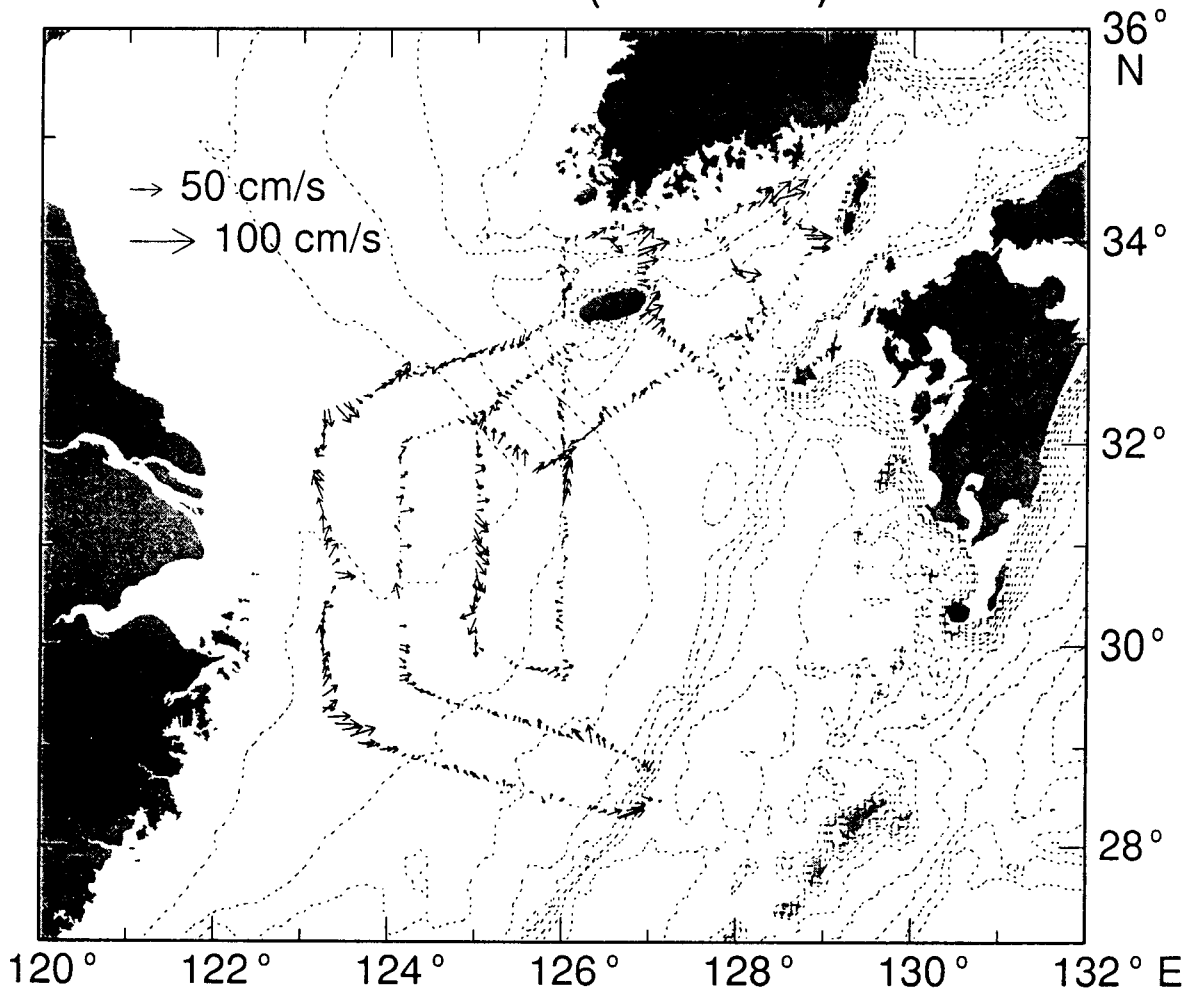


Fig. 2-11. Distributions of residual current after removing tidal current by 5 major tidal constituents in March, 1997.

# ADCP - June 1997 ( 9m )

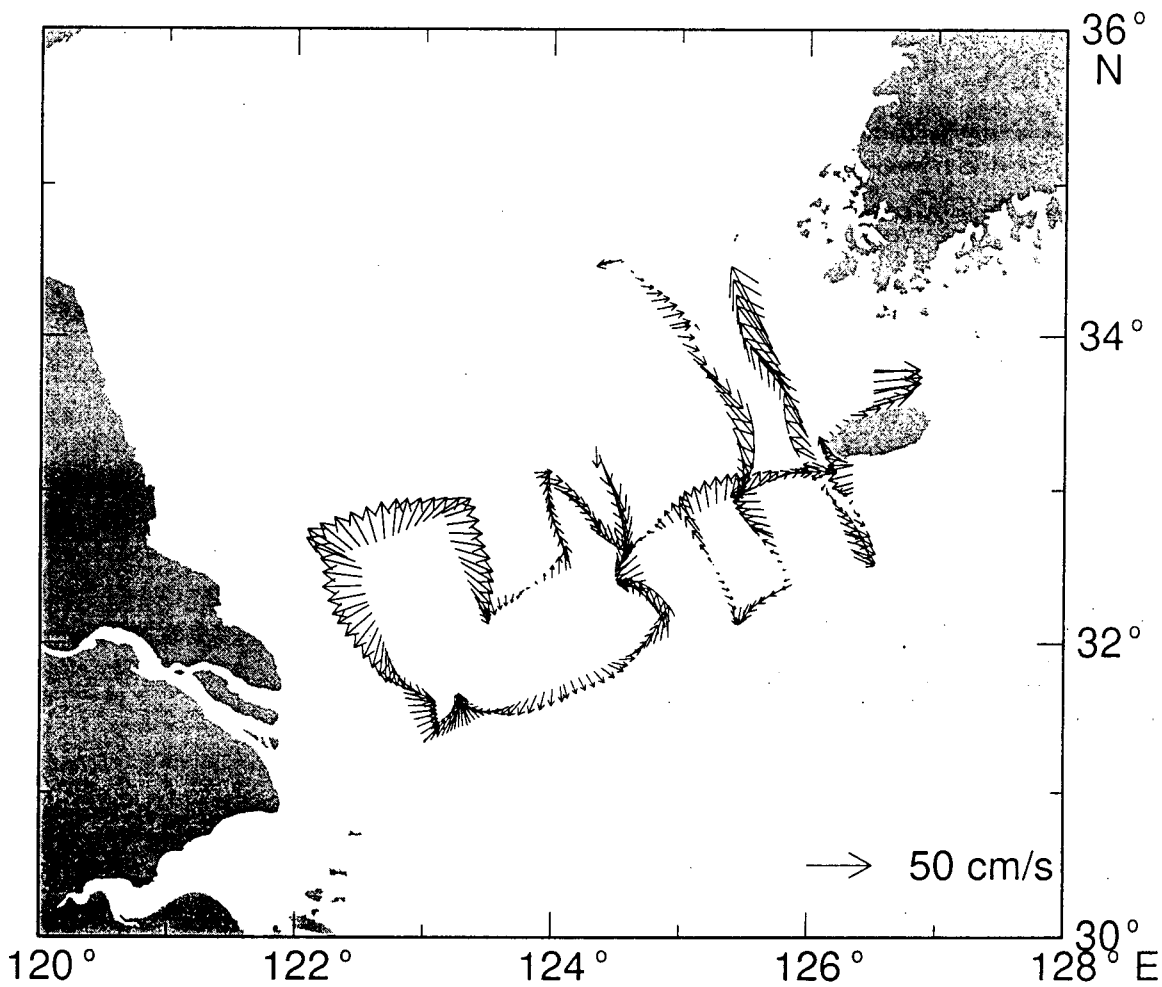


Fig. 2-12a. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at 9m in June 1997.

ADCP - June 1997 ( 25m )

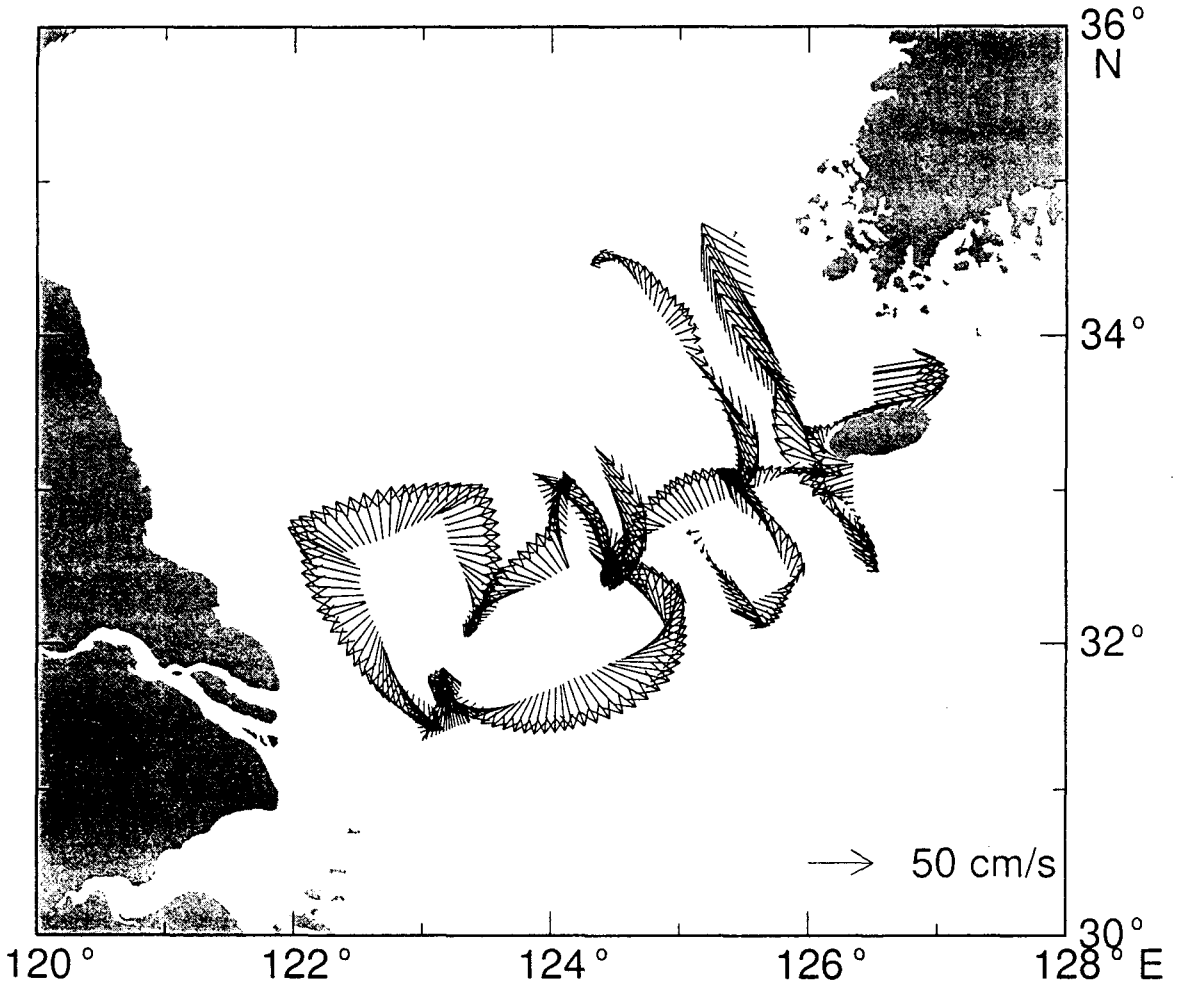


Fig. 2-12b. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at 25m in June 1997.



# ADCP - June 1997 ( 49m )

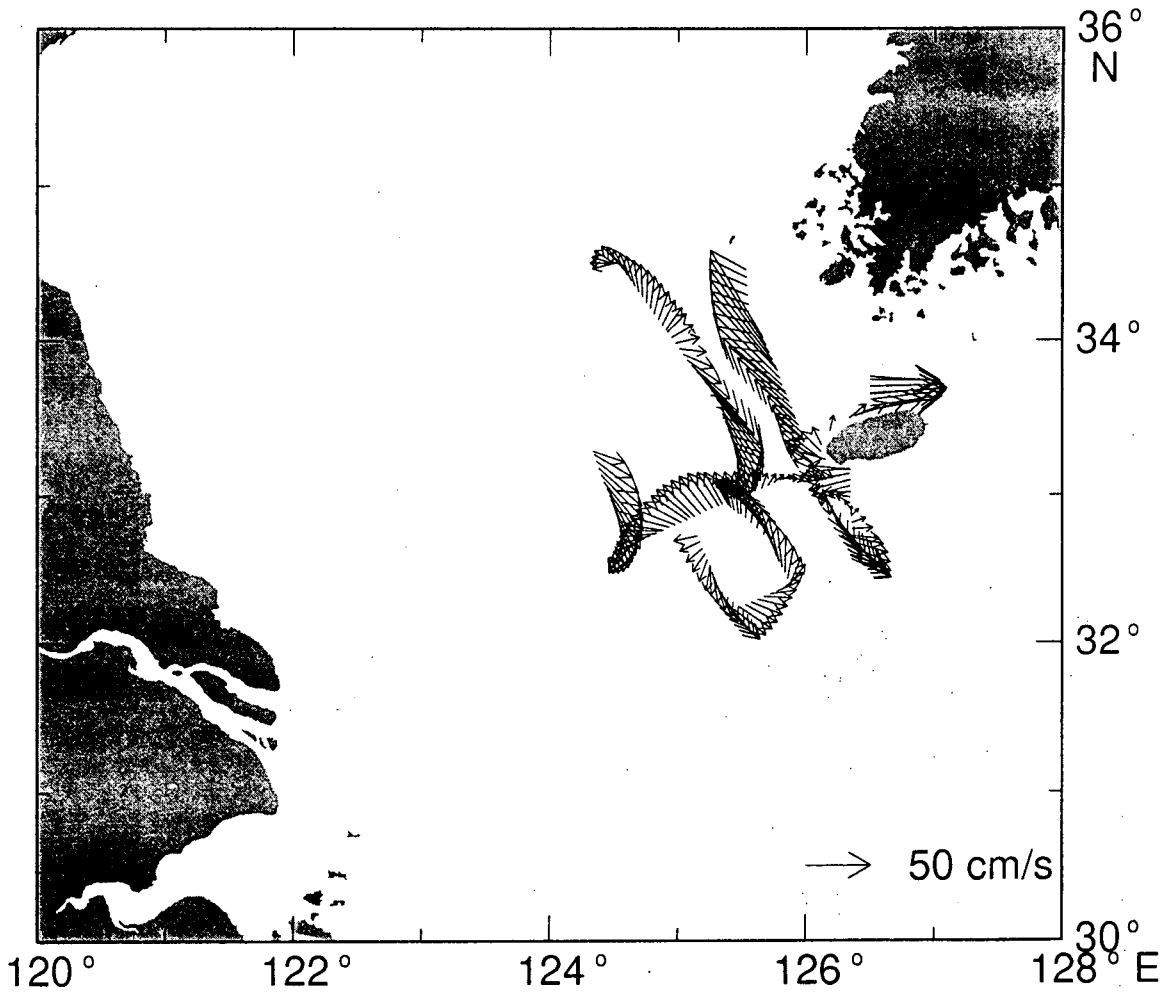


Fig. 2-12c. Distributions of horizontal velocities measured by ADCP at 49m in June 1997.

# ADCP - June 1997 ( detided )

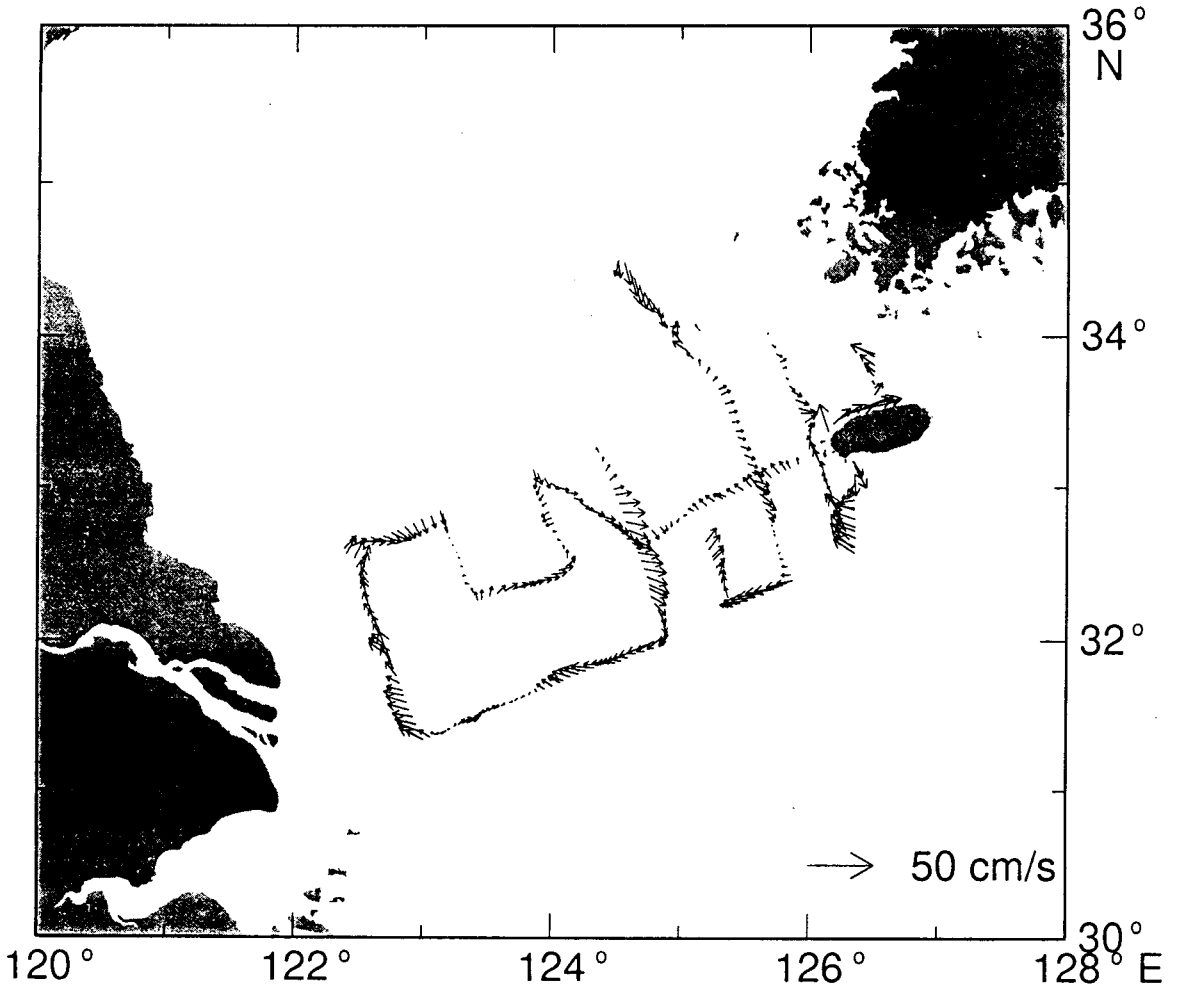


Fig. 2-13. Distributions of residual current after removing tidal current by 5 major tidal constituents in June 1997.

# 제 3 장 양자강 하천수 plume의 역학 연구

## 제 1 절 서 론

### 가. 국내·외 연구동향

우리나라 주변해에는 육지로부터의 담수유입이 해양환경에 큰 영향을 미치는 곳이 몇 군데 있다. 우선 강의 유량으로 볼 때 중국의 양자강이 가장 많으며 그 외 황해에는 황하, 압록강, 대동강, 한강, 그리고 금강을 들 수 있으며 남해에 낙동강이 있고 동해에는 큰 강은 없으나 담수의 유입에 의해 연안 가까이에 밀도류가 형성됨이 보고된 바 있다.

담수의 유입으로 인해 가벼워진 연안수와 상대적으로 밀도가 높은 외해수 간에는 전선이 형성되며 이 전선을 따라 밀도 차에 의한 흐름이 형성되며 그 유형은 북반구에서는 육지를 오른쪽에 두고 흐른다. 이러한 연안밀도류는 불안정하여 많은 와동류를 형성하게 되는데 양자강 남쪽의 연안류에서 Qui et al. (1988)은 인공위성 사진으로부터 규모가 약 50 km인 와동류를 확인하였으며 Zhang과 Klemas (1982)는 장축이 120 km, 단축이 60 km인 타원형의 저기압형 (cyclonic) 와동류를 보고한 바 있다. Qui et al. (1988)은 단순화한 3차원 Cox 모델을 이용하여 이 와동류가 경압 불안정성에 의해 야기됨을 보였다. 그 외에 담수유입에 따라 형성된 연안밀도류로서 불안정파가 관측된 해류는 Leeuwin 해류 (Legeckis and Cresswell, 1981; Cresswell and Golding, 1980), Norwegian Coastal Current (Mork, 1981), Ligurian Coastal Current (Crepon et al., 1982)를 들 수 있다.

유량이 세계에서 가장 많은 아마존강의 하천수 plume에 대한 연구로서 다분야 종합연구 (AMASSEDS)가 아마존강 하구의 대륙붕역에서 1989-1993년에 이루어졌다. 이 곳은 상당한 양의 담수유입, 강한 조류, 강한 바람, 서안경계류의 영향으로 매우 역동적인 곳이다 (Geyer and Beardsley, 1995). 아마존강의 유량은 11월에  $80,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최소이며 5월에  $250,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최대이다 (Geyer and Kineke, 1995). 강한 염분전선이 수심 10-30 m 사이의 해역에 형성되며 이는 고염수의 침투한계이다. Geyer and Kineke (1995)는 1989-1991에 염분전선이 하구

로부터 약 150 km 떨어진 곳에 형성되어 있으며 북서쪽으로 수심 10-20 m 해역에 약 400 km 이상까지 연장되어 있음을 관측하였다. 표층의 담수는 외해쪽으로는 수 백 km, 북서방향으로는 1000 km 이상 plume을 형성한다. 조류는 강한 대조기-소조기 변화를 보여 최대 200 cm/s에 이르며 주 유향은 대륙붕을 가로지르는 방향이다. 항류는 대체로 연안에 평행한 북서향이며 이는 대륙붕단 외해에 존재하는 북서향류인 북브라질 해류의 영향인 듯하다. 그러나 다른 중위도의 강과는 달리 적도 가까이 위치하고 있어서 Coriolis 효과가 역학 및 plume의 구조에 영향을 미치지 않으리라 사료된다.

#### 나. 양자강 하천수 plume의 계절변화

양자강은 아시아에서 가장 큰 강으로 담수의 유출량은  $(9 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{yr})$  세계에서 3번째이며 토사의 유출량은  $(5 \times 10^8 \text{ t/yr})$  4번째이다 (Hu, 1994). 양자강 plume은 26 psu 이하의 물로 정의된다 (Mao et al., 1963). 겨울철에는 연안을 따라 얇은 띠 모양으로 남향하나 여름철 홍수시에는 제주도 방향으로 퍼져나간다 (그림 3-1). 그러나 겨울철에 제주도 방향으로 향하고 (Pu, 1983) 여름철에 남동쪽으로 향하는 경우도 관측이 되었다 (Le, 1984).

양자강 하천수는 계절에 따라 그 유동방향이 달라지는 것이 많이 관측되어왔다. 겨울철에는 양자강에서 나온 하천수가 해수와의 혼합으로 희석되며 연안을 따라 남향하고 여름철에는 이와는 달리 강 하구를 벗어나자마자 북동향하여 우리나라 제주도 방향으로 확장되는 것으로 알려져 왔다. 겨울철에 연안을 따라 남향하는 것은 역학적으로 지구자전에 의한 것으로 다른 강에서도 많이 관측되었다. 그러나, 여름철의 북동향으로의 방향전환은 지구자전의 효과가 무시된 것으로서 이를 설명하고자 하는 많은 시도가 있었다. 특히 중국학자들이 많이 시도하였으며 우리나라에서는 전혀 연구가 이루어지지 않았다.

양자강 하천수가 우리나라에 미치는 직접적인 영향으로는 여름철 제주도 연안에 출현하는 비정상적인 저염수를 들 수 있으며 이로 인해 어패류가 폐사하여 어민들이 피해를 입게 된다. 또한, 여름철 동해에 나타나는 저염수의 기원이 양자강 하천수라는 연구결과도 있다 (이 등, 1996).

양자강 plume의 북동향으로의 전환에 대한 설명으로 여러 시도가 있었다 (Mao et al., 1963; Le, 1984; Gu, 1985). Hu (1994)는 바람과 해류가 (쿠로시오의 지류) 주 요인이라 하였다. 즉, 여름철에는 남풍계열의 바람이 우세하고 해류는 북향내지는 북동향하며 겨울철에는 연안 가까이에서는 해류가 남향내지 남서향하나 그 외해역에서는 여름철과 마찬가지로 북향내지 북동향한다. 바람이 바뀌거

나 멈추게 되면 이에 따라 양자강 plume의 진행방향도 바뀌게 된다고 설명하였다. Guan (1994)은 양자강 유출량의 시간적 변화가 양자강 plume의 범위와 방향을 결정하는 주 요인의 하나라 하였으며 하구로부터 외해로의 수심증가, 대만난류의 boundary effect, 남풍계열 바람, 경압효과 등이 북동향으로의 방향전환에 영향을 미친다 하였다. 수평혼합의 중요성이 많은 사람에 의해 지적되었다 (Mao et al., 1963; Cao, 1980; Le, 1984; Yuan et al., 1982).

양자강 하천수 유입을 포함하여 Yuan and Su (1984)는 1° 간격의 정상상태 (steady state) 순압모델과 time-dependent 2층 모델로 황해와 동중국해의 해수 순환을 살펴보았다. 양자강의 담수 유입량은 34,000 m<sup>3</sup>/s로 주어졌으며, 북향하는 대만난류에 의해 하천수 plume은 같이 북향하게 되며 황해냉수는 그 북상을 저지하는 역할을 하는 것으로 보고하였다. Lee (1996)와 Zhu and Shen (1996)은 역시 양자강 하천수 유입을 포함하여 3차원 원시방정식 모델로 황해와 동중국해 전체를 대상으로 하여 여름과 겨울철 순환의 재현을 시도하였다.

단순화한 영역에서의 연구로서 Ikeda (1984)는 선형 2층 모델로 밀도 플럭스에 의한 연안의 역학적 반응을 살펴보았다. 1차적 크기의 반응으로 anticyclonic eddy가 하구에 형성되며 연안류는 2차적 크기 반응으로 나타남을 보였다. 부력에 의한 비선형 반응의 이론 및 수치모델링 연구로는 Garvine (1987 and 1996), Chao and Boicourt (1986), Chao (1988), Oey and Mellor (1993), Kourafalou et al. (1996), McCreary and Zhang (1997) 등이 있다.

## 제 2 절 수치모델

사용한 수치모델은 POM (Princeton Ocean Model)의 1996년도 version이다. 모델의 영역은 직사각형의 channel로서 격자간격은 동서, 남북방향 모두 5 km이며 시간간격은 external mode는 20초, internal mode는 10분으로 하였다 (그림 3-2). 위도는 북위 30°로 f-plane approximation을 사용하였다. 동쪽과 서쪽은 막힌 벽으로 하였으며 남쪽과 북쪽의 경계조건으로는 방사 경계조건을 사용하였다. 남쪽경계에는 sponge layer를 설치하여 전파되어 오는 파를 소멸시켰다. sponge 층에서는 수평 와도계수가 증가되게 하였는데 이는 남북방향으로의 격자간격을 20개의 격자에 걸쳐 사인 함수의 형태로 증가시킴으로서 성취하였다. 강 입구의 넓이는 3개의 격자 크기인 15 km로 하였으며 동서방향으로는 10 km의 길이를 갖게 하였다. 강 입구와 서쪽 벽과의 사이에 담수 pool을 설정하였으며 동서방향 폭은 10 km이고 길이는 남북방향의 모델 영역과 같게 하였다. 모델의 크기는 세

종류를 실험하였으며 작은 영역부터 EXP1, 2, 3로 명명하였다 (그림 3-3).

Sheng et al. (1997)은 하구로부터 640 km 상류에 위치한 Datong Station에서 관측한 1950-1985년 사이의 양자강 유량 자료를 분석하였다. 36년간의 년평균 유량은  $28,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 계절적으로 큰 변화를 보여 7월에 최대  $48,600 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1월에 최소  $10,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 보였다. 계절변화 외에도 경년변화를 보여 관측기간 중 1954년의 년평균 유량은  $43,100 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최대였으며 1978년에  $21,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 최소였다. 월평균 최대유량은 1954년 8월에  $84,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 관측되었으며 최소유량은  $6,730 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 1963년 2월에 관측되었다.

월평균 유량은 5~10월의 6개월간은  $30,000 \text{ m}^3/\text{s}$  이상의 값을 보인다 (그림 3-4). 실험은 유량을 두 경우로 나누어 실시하였다. 유량이 많은 경우는  $30,000 \text{ m}^3/\text{s}$  정도로 하였고 유량이 적은 경우는 그 1/3인  $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$  정도가 되게 하였다. 참고로 Yuan and Su (1984)는  $34,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 를, Hu (1994)는  $28,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 사용하였다.

담수의 유입은 담수 pool의 서쪽 벽에 인위적으로 수심평균 유속을 처방함으로써 성취하였으며 전체 유입유량은 벽의 면적에 유속을 곱한 값이 된다. 즉, 수심이 20 m이고 격자간격이 5 km이며 격자수가 100개인 벽에  $0.3 \text{ cm/s}$ 의 유속을 처방하였다면 전체유량은  $20 \times 5000 \times 100 \times 0.003 = 30,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 된다. 유입되는 담수의 염분은 0인 경우와 20 psu인 경우로 나누어 실험하였다. 초기염분은 35 psu, 수온은  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 하였으며 수심은 20 m로 일정한 해저면의 경우를 표준실험으로 하였다.

## 제 3 절 결 과

### 가. 표준실험 (Control Experiment)

표준실험은  $99 \times 249$  개의 격자를 가진 영역에서 실시하였다. 강 입구의 중심은 남쪽 연안을 따라 남향하는 연안류를 고려하여 160번째 격자에 위치하게 하였다. 외력은 운동량 (momentum)과 부력, 두 종류의 힘을 같이 가하여 실험하였다. 운동량 입력을 위하여 서쪽 벽에 수심평균 유속을 일정하게 전 계산시간에 걸쳐 강제하였으며 본 실험에서 주어진 유속은  $0.12 \text{ cm/s}$ 이다. 부력은 서쪽 벽에서 첫 격자점의 첫 층의 염분을 주어진 값으로 강제함으로써 주었다. 초기 값인 35 psu로부터 주어진 값으로 완전히 바꾸기 위하여 주어진 값이 0 psu인 경우 선형적으로 감소하여 하루가 걸리게 하였고 염분값을 20 psu로 낮춘 실험 SRO

에서는 0 psu의 경우와 변화율을 같게 하여 20/35일 후에 되게 하였다. 계산은 100일 간 수행하였으며 매 10일마다 결과를 저장하여 그림 3-5에서 3-9에 도시하였다. 유량은 계산초기에 약간의 진동을 보이다가 10일 경부터 정상상태에 도달하여 약 32,000 m<sup>3</sup>/s의 값을 보였는데 이는 예상했던 30,000 m<sup>3</sup>/s 보다 약간 크게 나타나는데 이는 sponge 지역에서 격자의 크기가 증가함에 기인한다 (그림 3-5).

편의상 34 psu의 등염선을 담수 plume의 경계로 정의하였다. 제 1층에서의 염분분포의 시간에 따른 변화를 살펴보면 기본적인 분포형태는 강 입구의 고기압형 (anticyclonic) 순환과 남쪽 연안을 따라 흐르는 연안류로 구성되어 있다 (그림 3-6). 고기압형 순환은 마치 입으로 풍선을 불고 있는 모양으로 시간이 지남에 따라 초기의 반원형에서 점차로 원형에 가까워지며 그 크기가 커지고 있다. 연안류도 시간이 지남에 따라 남쪽으로 계속 진행·확장하며 불안정파가 형성되고 있음을 보여준다.

연안류의 영향권은 하루 약 20 km 씩 남쪽으로 확대되어 그 이동속도는 약 23 cm/s로 1차 경압 Kelvin파의 속도에 해당하는 것으로 판단된다. 연안류의 폭은 고기압형 순환과 만나는 부분에서 좁고 그 남쪽에서 다시 커져 최대 폭을 보이고 이후 남쪽으로 갈수록 계속 작아진다. 그러나 시간이 지남에 따라 최대 폭이 나타난 곳의 남쪽에 폭이 좁아지는 부분이 생기고 더 남쪽에도 폭이 넓은 부분과 좁은 부분이 교대로 나타나 전체적으로 파 형태가 형성되는 데 이것은 연안류 자체의 경압 불안정성에 의한 것으로 사료된다.

고기압형 순환의 크기는 초기에는 반원에 가까우나 시간이 갈수록 점차로 커지면서 점차 원형이 되며, 순환의 중심위치는 변하여 초기에는 하구의 남쪽에 위치하다가 점차로 북상하여 나중에는 하구의 바로 외해에 자리잡고 있다. 이러한 변화와 더불어 강으로부터 유출되는 흐름의 방향도 시간이 지남에 따라 동향에서 북동향으로 변하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 특히 흥미로운 것으로 바람 등의 외력 없이도 하천수의 유출방향이 북동향이 될 수 있음을 보여주고 있다.

자세한 유속구조를 살펴보면 하구 바로 동쪽에서는 동향이 월등히 우세한 가운데 약간의 남향성분을 보여준다 (그림 3-8). 동향류 바로 남쪽에는 육지에서 약 15 km 까지 남향류가 존재하며 이 남향류는 남쪽으로 감에 따라 폭이 증가한다. 하구 남쪽 약 250 km부터 불안정파가 발달하여 연안류의 폭이 더욱 커져 하구 남쪽 약 300 km 지점에서 최대 약 100 km에 도달한 후 남쪽으로 갈수록 점차로 감소한다. 동향류의 북쪽에는 북동향류가 발달되어 있는 데, 이곳이 고기압형 순환의 시작점이며 하구 남쪽의 동향류역이 순환의 마지막 점에 해당한다. 염분분포를 보면 하구로부터 시작된 혀 모양의 저염역은 강으로부터 멀어짐에 따라 점차 오른쪽으로 휘어 결국은 원을 형성하고 있다 (그림 3-6). 이 저염으로

둘러싸인 원의 중심 부분에서 염분은 높으며 시간이 지날수록 그 영역이 점차 확대된다.

하층의 (제 7층) 염분 분포를 보면 (그림 3-7) 상층과 마찬가지로 고기압형 순환과 연안류가 형성되어 있다. 그러나 상층과 달리 고기압형 순환의 중심에서의 염분은 주위에 비해 낮으나 순환의 방향은 상층과 마찬가지로 시계방향이다 (그림 3-8). 또한 이 저염의 핵은 저염의 source인 강과 직접 연결되어 있지 않아 이 저염이 수평방향으로 공급되기보다는 수직방향으로부터 공급되었음을 보여준다. 저염의 핵은 시간이 지남에 따라 북쪽으로 이동하고 있다. 유속구조를 살펴보면 강 입구에서 상층과는 달리 강 상류쪽으로 향하는 흐름이 발달되어 있어 성층시의 2층 estuary 순환을 잘 재현하고 있음을 보여주고 있다. 고기압형 순환은 하구 부근에서 상층과 달리 강으로부터의 유출류의 방해받지 않고 하구의 북쪽과 남쪽의 북향류가 직접 연결되어 있다.

시간에 따른 염분의 수직분포의 변화를 그림 3-9에 도시하였다. 우선 하구 역에서 하천수의 영향으로 2층 구조가 형성되어 있으며, 상층의 저염역은 시간이 지남에 따라 계속 외해 쪽으로 확장되고 하층의 염분은 점차로 낮아지고 있음을 볼 수 있다. 또한 50일 경부터 상대적으로 고염인 해역이 중간에 형성되기 시작하여 점차 그 영역을 넓히고 있음을 볼 수 있다. 이 고염의 중심해역은 수평분포도 (그림 3-6)에서 보았던 고기압형 순환의 중심에 해당된다.

하층에서는 30일 경부터 등염선이 아래쪽을 찌르는 썩기모양을 하고 있으며 시간이 지날수록 썩기모양이 커지며 바닥을 관통하는 듯한 분포를 하고 있다. 한편 썩기가 발달하면서 썩기내 염분이 점점 낮아짐을 볼 수 있다. 흥미로운 것은 하층의 저염역이 상층의 고염역의 바로 밑에 위치하고 있으며 시간이 지남에 따라 그 영역이 확장되고 있는 점이다.

상층의 고염 핵과 하층의 저염 핵은 시간이 지날수록 커지고 있는데 이는 수직방향의 해수순환과 직접적인 연관이 있다고 판단이 된다. 즉, 상층에서는 고염의 핵이 저염수로 둘러싸여 있고 하층에서는 저염의 핵이 고염수로 둘러싸여 있는데 이 둘 핵이 팽창하기 위해서는 수평방향으로의 유입에 의해서는 불가능하고 수직방향으로만 가능하기 때문이다. 상층에서는 밑으로부터의 유입만이 가능하며 하층의 경우는 염분이 낮은 윗 층으로부터만 저염의 유입이 가능하므로, 이를 종합하면 상층의 고염의 핵은 용승에 의해, 하층의 저염의 핵은 침강(downwelling)에 의해서만 유지·확장되고 있는 것으로 판단된다.

상층의 고기압형 순환 중심부에서 용승이 일어난다는 것은 Chao and Boicourt (1986)의 결과와 일치한다. Chao and Boicourt (1986)는 상층의 순환으로 중심에서 용승이 일어나고 변두리에서는 침강이 일어나며, 이들 수직이류가 표층에서는 중심에서 바깥으로, 상층의 바닥에서는 바깥에서 중심으로의 수평이



류에 의해 연결되어 완결되는 수직방향의 순환구조를 제시하였다. 단, Chao and Boicourt (1986)의 고기압형 순환은 원형을 이루기보다는 반원형의 구조로 그 중심이 강 입구에 위치해 있다는 것이 본 연구와 다른 점이나 본 실험에서는 상층의 순환뿐만 아니라 하층의 순환구조도 저염역의 확대를 통하여 유추할 수 있다. 즉, 하층 순환은 상층 순환의 거울에 비친 상의 구조로 중심에서 침강, 주변에서는 용승, 그리고 이 수직이류를 연결하는 하층 바닥에서는 중심에서 바깥으로, 하층 상단에서는 바깥에서 중심으로 수평이류가 예상된다. 이를 종합하면 그림 3-10과 같은 순환모식도를 작성할 수 있다.

본 실험인 EXP3-MB를 표준실험으로 하여 이 후의 실험에서는 조건을 변화시켜가며 실시하여 해양의 반응이 어떻게 달라지는가를 살펴보았다 (표 3-1).

Table 3-1. Given conditions for each experiment

Condition	Experiment	Modification	Remarks
Control Run	EXP3-MB		Discharge = 32,000 m <sup>3</sup> /s
Discharge	EXP3-MBw		Discharge = 10,700 m <sup>3</sup> /s
Slope	SLP1	flat region 80 km	
	SLP2	flat region 30 km	
	SLP3	no flat region	
Salinity of River Outflow	SRO	20 psu	Discharge = 32,500 m <sup>3</sup> /s
Stratification	STR1	initial S=33 for k<7	
	STR2	initial S=30 for k<7	
	STR3	STR2 + SRO	

## 나. 하천유량의 변화 (EXP3-MBw)

유량이 적은 겨울철의 경우를 살펴보기 위해 서쪽 벽에 주어진 유속을 0.04 cm/s로 하여 하천유량을 많을 때의 1/3 수준으로 조절하였으며 강 입구에서의 유량은 약 10,700 m<sup>3</sup>/s이었다 (그림 3-11). 전체적인 순환의 형태는 유량이 많을 때와 비교하여 큰 차이가 없으나 다만 고기압형 순환의 크기가 작게 나타나고 있어 (그림 3-12) 100일의 시점에서 약 200 km까지 확장되어 있다. 또한 하천수가 유출되는 각도는 유량이 많을 때에 비해 더 북쪽 방향으로 향하고 있으며 그 결과 고기압형 순환의 위치가 더 북쪽으로 치우쳐 있다.

## 다. 해저면의 경사 (SLP)

표준실험은 해저면이 평평하였으므로 본 실험에서는 해저면의 경사가 어떤 영향을 주는가 살펴보기 위해 우선 경사도를  $2 \times 10^{-4}$ 로 (5 km 마다 1 m) 일정하게 주어 실험하였다. 세 가지 경우로 나누어 실험을 실시하였는데 첫 번째 실험에서는 하구에서 80 km까지는 평평하게 하고 그 동쪽으로만 경사를 주었으며, 두 번째는 평평한 부분을 30 km로 축소하였으며, 마지막에는 평평한 부분을 없애 하구로부터 바로 경사가 시작되게 하였다.

먼저 평평한 부분이 가장 넓은 경우 (SLP1)를 살펴보면 표준실험과의 가장 큰 차이는 고기압형 순환이 보다 북쪽으로 이동되어 있다는 점이다 (그림 3-13). 100일에는 하구에서 나오는 저염수가 거의 연안에 평행하게 북향하고 있음을 볼 수 있다. 고기압형 순환의 동쪽에서의 영향범위도 표준실험에 비해 적으나 그 외에는 표준실험과 별다른 차이점을 보이지 않는다.

실험 SLP2는 평평한 부분이 SLP1에 비해 50 km 축소되어 평평한 부분의 폭이 30 km에 불과하다. 이 경우도 SLP1과 마찬가지로 고기압형 순환이 표준실험에 비해 북쪽으로 이동되어 나타난다 (그림 3-14). 그러나 SLP1과 달리 연안류는 폭이 좁아지고 안정된 모습을 보여 앞의 실험들에서 불안정성에 의해 발생했던 와동류가 사라졌다. 이는 해저면 경사가 연안류를 안정시키는 역할을 하는 것으로 동서방향으로의 운동이 역학적으로 어려워진 탓에 의한 것으로 판단된다.

평평한 부분이 전혀 없는 SLP3에서는 SLP2와 마찬가지로 연안류가 안정되어 있음을 알 수 있으나 고기압형 순환의 위치는 SLP2에 비해 오히려 남쪽에 있어 하구로부터의 유출방향이 약간 동쪽으로 향하고 있다 (그림 3-15).

## 라. 유입수의 염분 (SRO)

담수 pool의 서쪽 첫 번째 격자의 상층에 주어지는 강제 염분을 표준실험의 35 psu보다 낮은 20 psu를 주어 실험을 하였다. 하구에서의 유량은  $32,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 표준실험의 경우와 거의 일치하였다 (그림 3-16). 순환형태도 역시 표준실험과 같은 고기압형 순환과 연안류가 발달하였다 (그림 3-17). 연안류는 폭과 세기에 있어 표준실험에 비해 약하나 불안정성에 의한 파동이 형성됨을 볼 수 있다.

## 마. 연안수의 성층 (STR)

표준실험에서는 초기 염분은 35 psu로 균일하다고 가정하였다. 그러나 동중국해에서 여름철에는 2층 구조를 보이는 것으로 알려져 있으므로 이를 반영하기 위해 상층 6개 층의 초기염분을 35 psu보다 작게 주어 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험인 STR1에서는 초기염분을 33 psu로 하였으며 그 결과를 보면 (그림 3-18) 고기압형 순환과 연안류의 형태는 표준실험과 비슷함을 알 수 있다. 표층의 염분은 초기의 33 psu에서 점차 증가하여 60일에는 34 psu 이상의 염분을 지닌 영역이 크게 확장되어 표준실험의 경우와 비슷한 등염선 분포를 보인다. 두 번째 실험 (STR2)에서는 상층의 초기염분을 30 psu로 더 낮추었다. 이 실험 결과도 (그림 3-19) 표준실험 및 STR1과 크게 다르지 않으나 단지 연안류의 세력이 크게 약화되었으며 표층염분이 시간이 지남에 따라 증가하는 것은 STR1과 같다.

마지막 실험 STR3에서는 초기 염분구조를 STR2와 같이 2층으로 하는 외에 실험 SRO과 같이 담수 pool에서의 강제염분을 20 psu로 하였다. 이 실험 결과는 표준실험, SRO, 그리고 앞의 STR1, STR2와 상당히 다른 모양을 보여주고 있다 (그림 3-20). 가장 특징적인 것은 하구로부터 담수가 유출되는 각도가 표준실험과 달리 거의 동향이며 하구로부터 멀어짐에 따라 저염의 유출수가 오른쪽으로 휘는 모양도 보이지 않아 앞의 실험들에서 보였던 원형의 고기압형 순환의 모양이 나타나지 않는다. 연안류는 STR2에 비해 많이 세력이 약화되어 있고 SRO와는 비슷한 세기이며 여전히 불안정한 모습을 보여주고 있다.

## 제 4 절 논의 및 결론

표준실험을 통하여 하천으로부터 부력과 운동량의 외력이 주어졌을 때 연안 해양이 어떻게 반응하는가를 POM을 이용하여 살펴보았다. 이전의 연구들과 마찬가지로 하구의 남쪽연안을 따라 외해수와 하천으로부터 유래된 저염수의 밀도차이로 인해 남향하는 밀도류가 형성되었으며 이 밀도류는 시간이 지남에 따라 불안정하여져 불안정파가 발생되었다. 하구부근에는 시계방향의 고기압형 순환이 형성되며 그 크기는 본 연구의 계산시간인 100일 동안 계속 증가하여 100일에는 동서 약 250 km, 남북 약 300 km로 성장하였다. 하천수의 유출각도는 초기에는 동향이나 시간이 지남에 따라 북동향으로 점차로 바뀌었으며 그에 따라 고기압형 순환의 중심도 점차로 북으로 이동되었다.

이러한 형태는 Yankovsky and Chapman (1997)이 분류한 상층이류(surface-advected) plume에 속하는 것으로 이 경우 저염수는 상층에만 국한되어 하층과 외해에 존재하는 고염수와 염분전선을 형성하게 된다. 이와 구별되는 경우로서 Yankovsky and Chapman (1997)은 저염수가 표층부터 해저까지 채우며 하구로부터 외해로 밀고나오는 해저이류(bottom-advected) plume을 들었다. 상층이류 plume의 경우 고기압형 순환의 역학 균형이 정상상태일 때 cyclostrophic 균형으로 원심력과 Coriolis 힘, 그리고 압력경사힘이 균형을 이루게 된다.

하층의 유속 크기는 상층에 비해 작으나 수평방향의 순환은 상·하층 모두에서 시계방향으로 형성되어 있는데 반해 수직방향의 제2순환은 상층과 하층에서 공통적으로 두 개의 cell 모양의 순환구조를 갖고 있으나 그 방향은 서로 반대이다. 즉, 상층에서는 중심부에서 용승이 일어나며 변두리에서 침강이 일어나나, 하층에서는 중심부에서 침강, 변두리에서 용승이 일어나고 있으며 이 둘 수직방향의 이류는 각각의 층에서 수평방향의 이류에 의해 닫혀진 cell 모양의 순환을 형성하게 된다.

McCreary and Zhang (1997, 앞으로 MZ)은 1½층 모델을 이용하여 하천수 유입에 따른 해양의 반응을 상층혼합층이 존재하는 경우에 대해 살펴보았다. 표준실험 외의 실험결과를 그들의 결과에 비추어 해석을 시도해 보고자 한다. 본 연구는 원시방정식 모델로 1½층 모델에 비해 더 많은 역학적 요소가 포함되어 있어 해석하는데 있어 어려움이 있으나 간단한 조건으로부터 시작하여 점점 많은 조건을 더해갔으므로 그에 따른 변화를 살펴봄으로서 하천수 plume의 역학적 반응을 이해할 수 있으리라 여겨진다.

MZ의 연구결과 중 특이한 해로서 강에서 유출된 저염의 하천수가 연안에 포

획되어 모두 북쪽의 연안을 따라 북향하는 경우가 있는데 이는 유량이 적을 때에 발생한다. 이의 발생기작으로 저염의 하천수와 고염의 외해수와의 사이에 형성된 전선을 따라 남향류가 생기며 이 남향류에 대한 보류로서 하천으로부터 나온 저염수가 북향류를 형성하는 것으로 설명하였다. 북향한 저염수는 어느 정도까지 진행하다 U턴하여 북향류의 외해 쪽을 따라 남하하여 결국은 하구를 지나친 후 다시 연안에 붙어 남향의 연안류를 형성하게 된다.

본 연구에서는 MZ에서처럼 극단적으로 연안에 포획된 해는 보이지 않는다. 다만, 유량을 적게 주었던 EXP3-MBw의 경우 하천 유출수의 각도가 유량이 많았던 표준실험에 비해 더 북쪽을 향하고 있고 결과적으로 고기압형 순환의 위치도 더 북쪽으로 이동되어 있어 MZ에서 유량이 적을 때 포획된 해가 존재한다는 것과 일치하는 경향을 보여주었다. 이러한 경향은 해저에 경사를 준 세 실험에서도 모두 나타나고 있으며 그 중 특히 평평한 지역이 있는 경우에 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 이 세 실험은 모두 유량이 표준실험과 거의 같아 유량이 원인이 될 수는 없고 주어진 해저면의 조건에 의한 것임이 분명하다. 본 연구는 f-plane이므로 등수심선이 바로 potential vorticity의 등치선이다. 수심이 깊어지면 양의 상대와도 (relative vorticity)가 유도되며 또한 potential vorticity벽을 가로지르는 동서방향으로의 운동도 제한되어 북쪽으로의 운동이 용이하게 되어 결과적으로 고기압형 순환의 위치가 북쪽으로 이동하게 되는 것으로 판단된다.

MZ에 의하면 유량이 많고 Rossby 수가 큰 경우에는 연안에 포획되는 해가 성립되지 않고 저염의 하천수가 하구를 떠나 바로 외해로 향하게 되는 데 하구를 떠나는 각도는 여러 변수에 따라 달라짐을 보여주었다. 즉, 유량이 많아짐에 따라 유출류의 각도가 더 남쪽으로 향하게 되며 또한 하천의 염분이 높아짐에 따라 또는 초기에 주어진 해양의 혼합층의 깊이가 낮을수록 남쪽을 향하였다.

외해로 향하는 저염의 jet는 본 연구에서와 같이 그 남쪽에 고기압형 순환을 형성하며 jet의 북쪽에는 본 연구에는 나타나지 않는 저기압형인 반시계방향의 순환이 발생한다. 이 반시계방향의 순환 중 연안쪽으로 향하는 흐름은 연안을 만난 후 북쪽으로 향하게 되며 이 북향하는 저염수의 외해에는 연안에 포획된 해의 경우와 마찬가지로 남향하는 고염수가 존재한다. 이 남향류는 jet를 만나 jet의 외곽을 따라 흐르며 하구 남쪽의 연안류에 합류하게 된다.

흥미로운 결과로 북쪽으로 향하는 흐름은 혼합층이 없는 경우에 발생하지 않으며 또한 혼합층이 있는 경우에도 혼합층으로의 entrainment가 강할수록 북향류가 약하여지며 극단적으로 entrainment의 시간스케일이  $2\Delta t$ 인 경우에는 전혀 북쪽으로 향하는 저염수가 보이지 않고 있다. 이는 본 연구의 결과와도 일치하는 것으로 본 연구에서는 혼합층이 없으며 또한 활발한 수직방향의 운동이 일어나

고 있어 본 연구에서 북향류가 나타나지 않거나 나타나더라도 약한 이유를 설명할 수 있을 것으로 보인다.

연안에 포획된 해에서 하천으로부터 유출되는 모든 저염수가 북향하는 것은 우리가 알고 있는 순환과는 배치되는 것으로 MZ도 실제 이러한 흐름을 관측하기는 어렵다고 하였으나 양자강의 바로 북쪽에서 염분이나 부유물질의 분포로부터 그런 흔적을 찾을 수 있다 하였다. 다만, MZ는 북향류를 형성하는 기작, 즉, 전선을 따른 남향류의 형성과 북향한 저염수의 끝부분으로부터 남쪽으로 전파되는 Kelvin파의 진행 후 북향류의 형성은 실제 해양에서도 일어나고 있으리라고 주장하였으며 이 부분이 지금까지의 하천수 plume 연구에서 간과된 부분이라 하였다.

본 연구의 결과 중 몇 부분에 있어 MZ와 일치하는 것이 있으나 MZ의 모델과 본 연구에서 사용한 모델과는 차이가 있어 MZ의 주장을 철저히 시험하기 위해서는 앞으로 좀더 다양한 조건들을 포함한 실험이 필요하리라 본다. 또한, MZ의 실험은 가장 단순한 경압모델로서 순압반응이 포함되어 있지 않고 수직방향의 운동도 제한되어 있어 실제 해양에서 일어나는 현상을 설명하기에는 거리가 있을 수 있어 본 연구와 같이 원시방정식 모델을 이용한 실험이 필요하다. 앞으로, 본 연구에서 살펴본 조건에 대해 더 자세히 살펴봐야 하며 더 고려해봐야 할 조건들로서는 수직 와도계수의 영향, 하구의 폭, 바람 및 평균해류의 영향, 조석의 영향, 유량의 시간적 변화, 실제 지형 및 해저경사의 영향 등이 있다.

## 참고문헌

- 해양연구소 1991, 수온의 수직구조 분석연구, 한국해양연구소 보고서, BSPE 00194-349-1, pp64.
- 이동규, 강기룡, 한상복 1996. 여름-가을 동해표층해역의 저염수에 관한 연구. 한국해양학회 1996년도 추계학술발표회, 1996년 10월 31일-11월 1일, 서울대학교, 서울.
- Cao, X. 1980. The numerical model of the summer surface salinity distribution of the Changjiang Diluted Water. *Acta Oceanologica Sinica*, 2(2), 1-6 (in Chinese).
- Chao, S.-Y. 1988. River-forced estuarine plumes. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 72-88.
- Chao, S.-Y. and W.C. Boicourt 1986. Onset of estuarine plumes. *J. Phys. Oceanogr.*, 16, 2137-2149.
- Crepon, M., L. Wald and J.M. Monget 1982. Low-frequency waves in the Ligurian Sea during December 1977. *J. Geophys. Res.*, 87, 595-600.
- Cresswell, G.R. and T.G. Golding 1980. Observations of south-flowing current in the southeastern Indian Ocean. *Deep Sea Res.*, 27, 449-466.
- Garvine, R.W. 1987. Estuary plumes and fronts in shelf waters: a layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 1877-1896.
- Garvine, R.W. 1996. Buoyant discharge on the inner continental shelf: a frontal model. *J. Mar. Res.*, 54, 1-33.
- Geyer, W.R. and R.C. Beardsley 1995. Introduction to special section on physical oceanography of the Amazon shelf. *J. Geophys. Res.*, 100(2), 2281-2282.
- Geyer, W.R. and G.C. Kineke 1995. Observations of currents and water properties in the Amazon frontal zone. *J. Geophys. Res.*, 100(2), 2321-2339.
- Gu, Y. 1985. A study on the cause of the path turning of the Changjiang River Diluted Water. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 16(5), 354-363 (in Chinese).
- Guan, B. 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai, and East China Seas. In *Oceanology of China Seas. Volume 1.* edited

- by Zhou Di et al., Kluwer Academic Publishers, 17-26.
- Hu, D. 1994. Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea. In *Oceanology of China Seas*. Volume 1. edited by Zhou Di et al., Kluwer Academic Publishers, 27-38.
- Ikeda, M. 1984. Coastal flows driven by a local density flux. *J. Geophys. Res.*, 89, 8008-8016.
- Kourafalou, V.H., L.-Y. Oey, J.D. Wang, and T.N. Lee, 1996. The fate of river discharge on the continental shelf 1. modeling the river plume and the inner shelf coastal current. *J. Geophys. Res.*, 101(2), 3415-3434.
- Le, K. 1984. A preliminary study of the path of the Changjiang Diluted Water (I) model. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 15(2), 157-167 (in Chinese).
- Lee, H.-C. 1996. A numerical simulation for the water masses and circulations of the Yellow Sea and the East China Sea. Ph.D. Thesis, Kyushu university, Fukuoka, Kyushu, Japan, pp. 150.
- Legeckis, R. and G. Cresswell 1981. Satellite observations of sea surface temperature fronts off the coast of western and southern Australia. *Deep Sea Res.*, 28, 279-306.
- Mao, H., Y. Ren and G. Sun 1963. A preliminary study of the Yangtze Diluted Water and its mixing process. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 5(3), 183-206 (in Chinese with English abstract).
- Mork, M. 1981. Circulation phenomena and frontal dynamics of the Norwegian Coastal Current. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 302, 635-647.
- Oey, L.-Y. and G.L. Mellor 1993. Subtidal variability of estuarine outflow, plume, and coastal current: a model study. *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 164-171.
- Paluszkiwicz, T. 1993. A numerical modeling study of the near- and far-field dispersal of the Amazon outflow. Ph.D. Thesis, University of Maryland College Park, pp. 147.
- Pu, Y. 1983. The preliminary analysis of the expansion mechanism of the Changjiang Diluted Water. *Donghai Marine Science*, 1, 43-51 (in Chinese).
- Qui, B. and N. Imasato 1988. Baroclinic instability of buoyancy-driven coastal density currents. *J. Geophys. Res.*, 93, 5037-5050.



- Sheng, H., C. Zhang, C. Xiao, and J. Zhu 1997. Change of the discharge and sediment flux to estuary in Changjiang River. Proceedings of The International Symposium on The Health of The Yellow Sea, September 30, 1997, Seoul, Korea, 79-89.
- Yankovsky, A.E. and D.C. Chapman 1997. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1386-1401.
- Yuan, Y. and J. Su 1984. Numerical modelling of the circulation in the East China Sea. In *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. edited by T. Ichiye, 167-186.
- Yuan, Y., J. Su and J. Zhao 1982. A single layer model of the continental shelf circulation in the East China Sea. *La mer*, 20, 131-135.
- Zhang, Q.A. and V. Klemas 1982. Determination of winter temperature pattern, fronts, and surface current in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery. *Remote Sens, Environ.*, 12, 201-218.
- Zhu, J. and H. Shen 1996. The mechanism of the expansion of the Changjiang (Yangtze River) Diluted Water. East China Normal University Press, Shanghai, China, pp. 255.

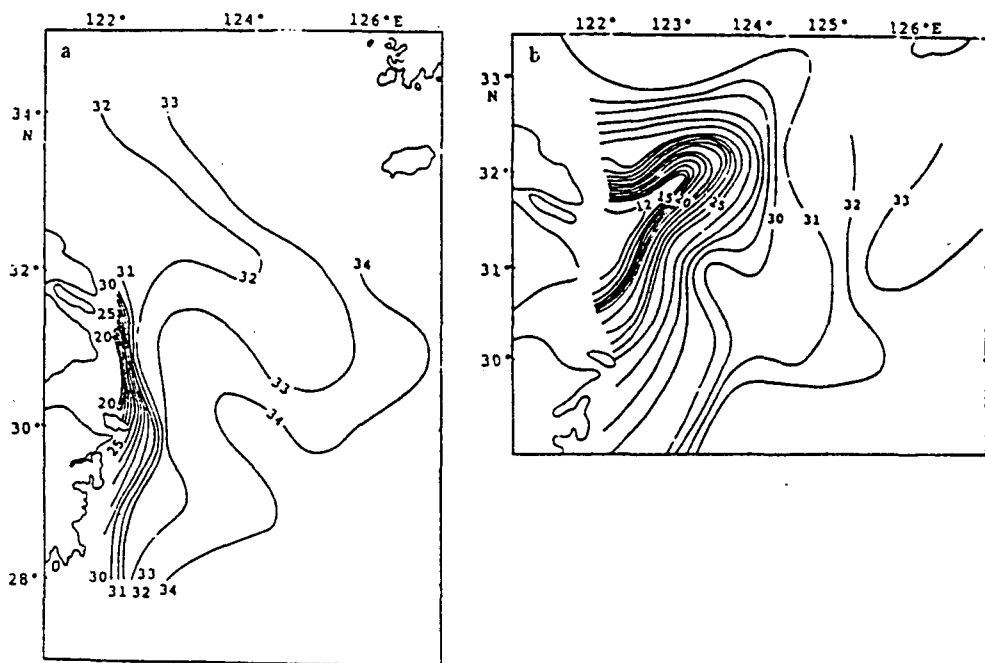


Fig. 3-1. Surface salinity distributions in a) February, and b) July, 1975 (from Hu (1994)).

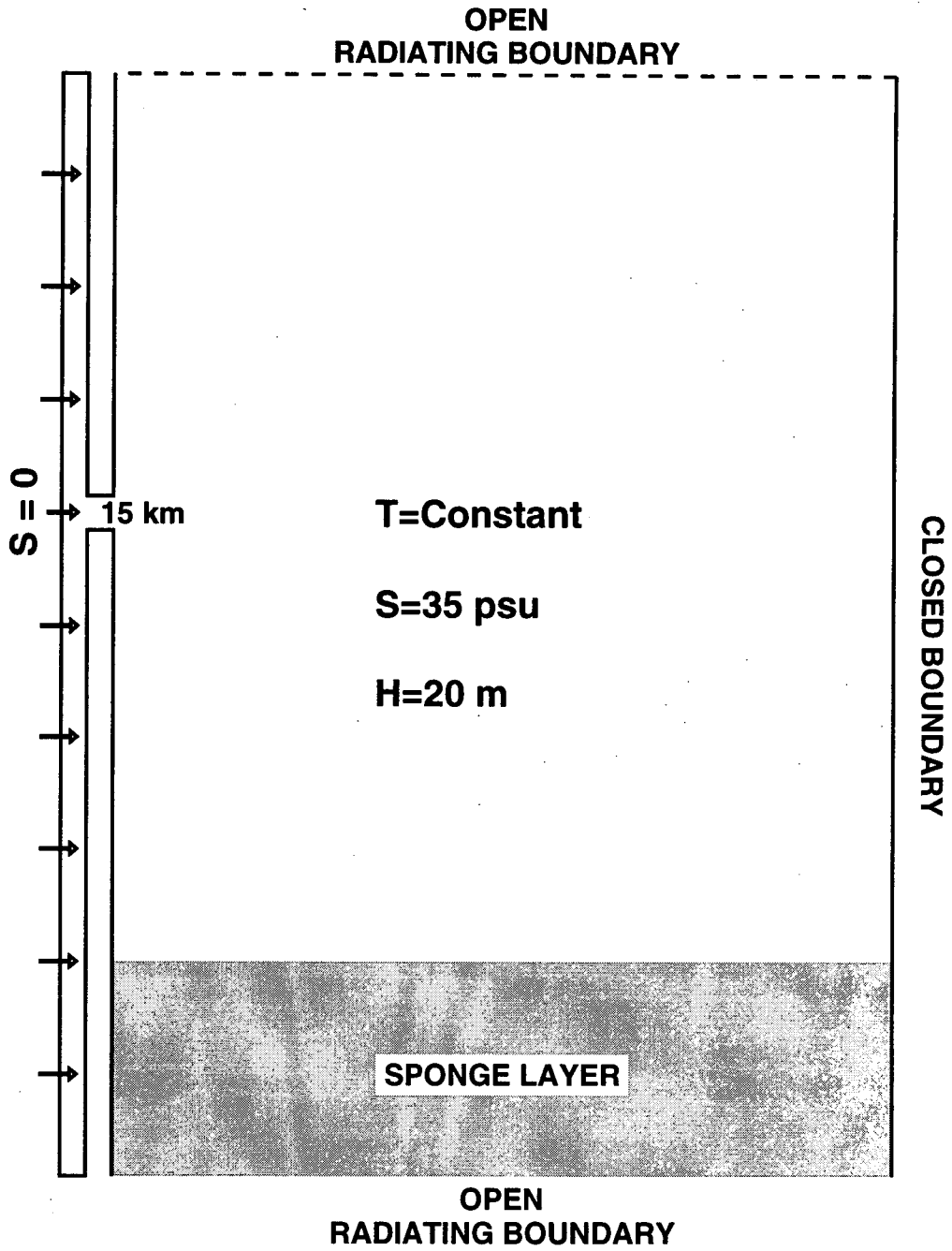


Fig. 3-2. Model configuration.

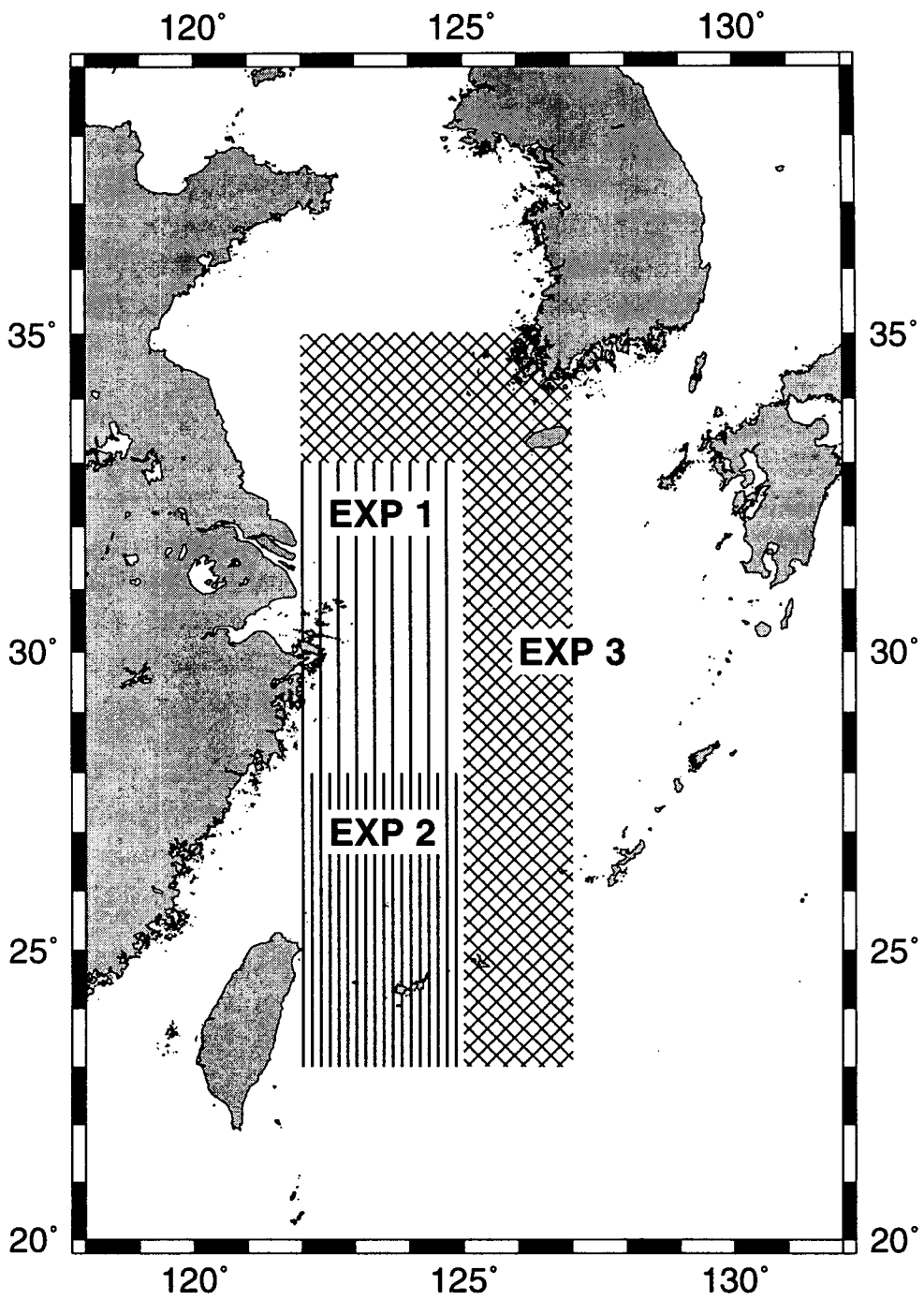


Fig. 3-3. Model domain and geography.

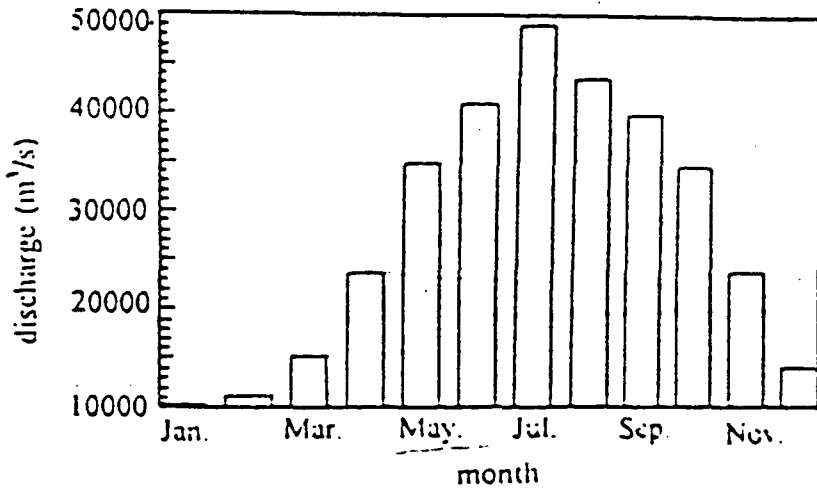


Fig. 3-4. 36-year-long (1950-1985) monthly mean discharge of the Yangtze River (from Sheng *et al.* (1997))

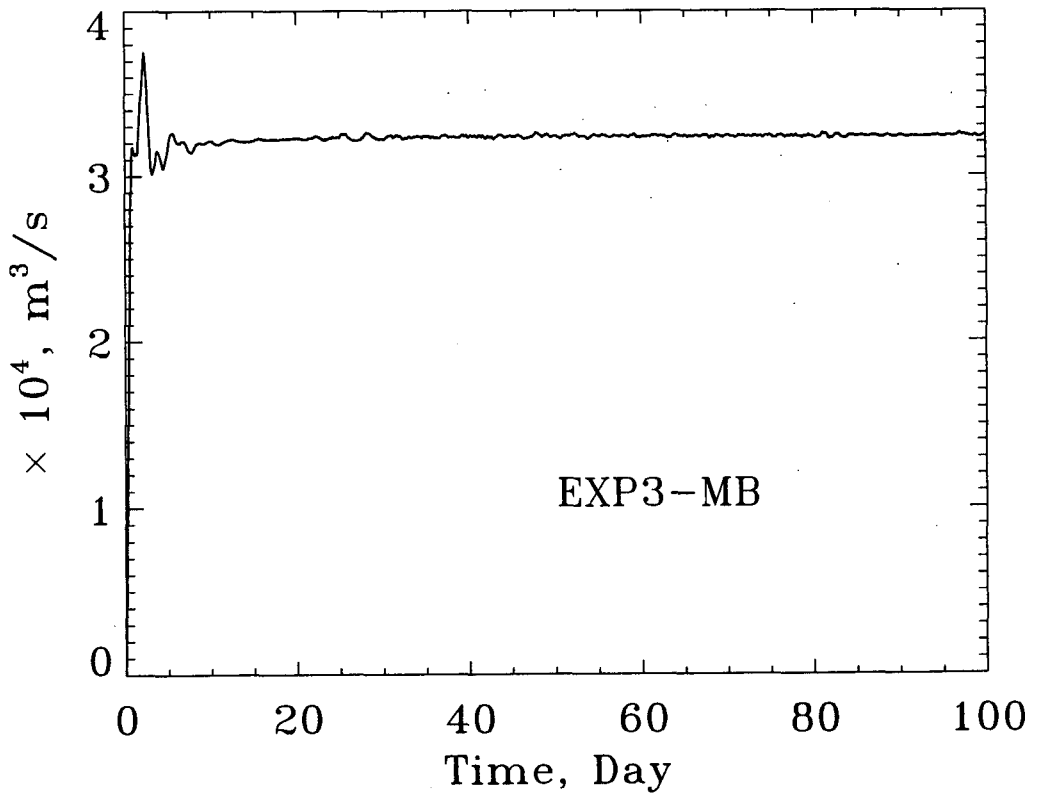


Fig. 3-5. Time variation of net discharge of EXP3-MB.

# EXP3-MB; S in the 1st layer (CI=2)

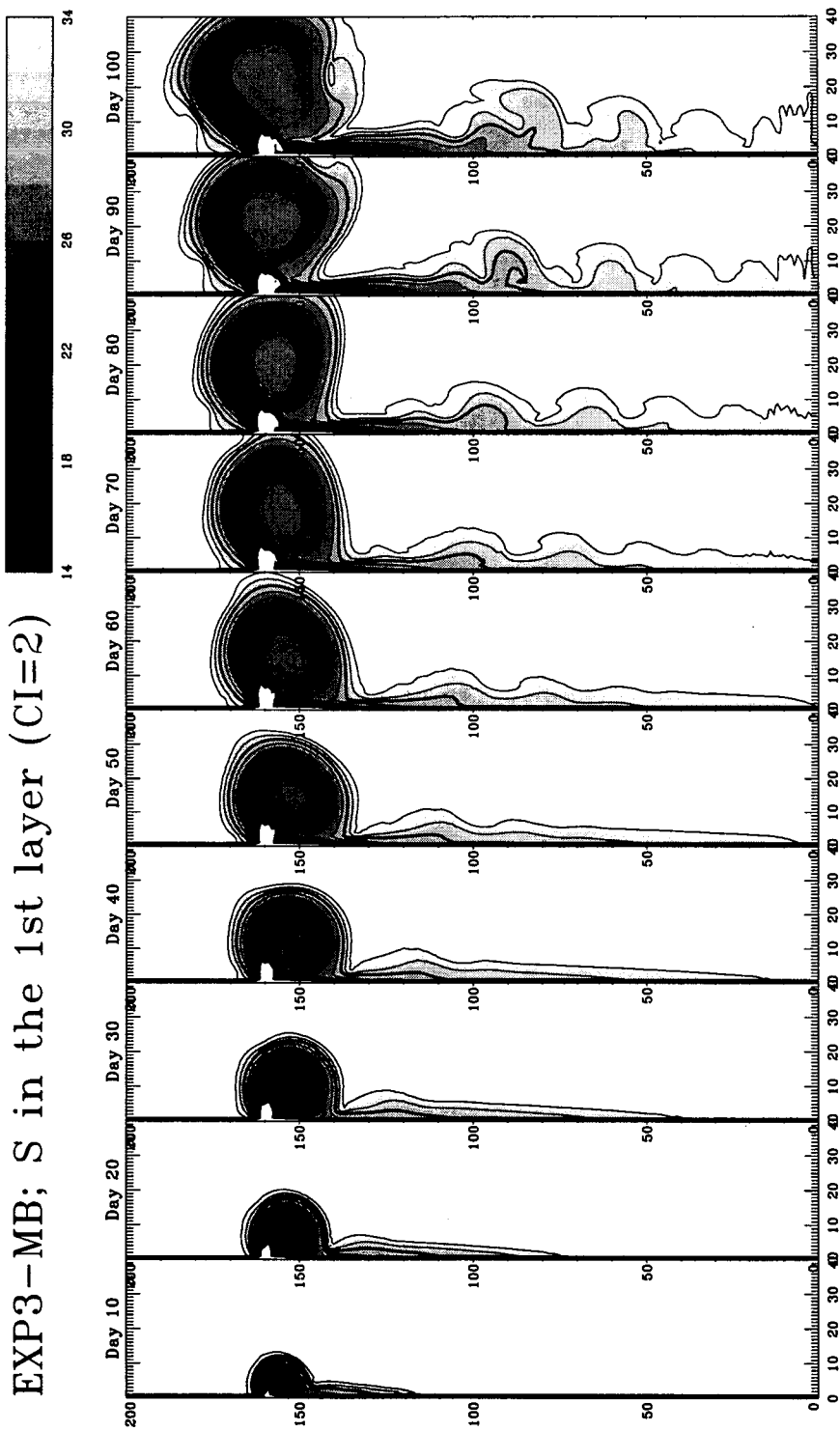


Fig. 3-6. Salinity distributions in the 1st layer of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu. Numbers on both axes are grid numbers. Multiply them by 5km to get distances.)

# EXP3-MB; S at 10 m depth (CI=2)

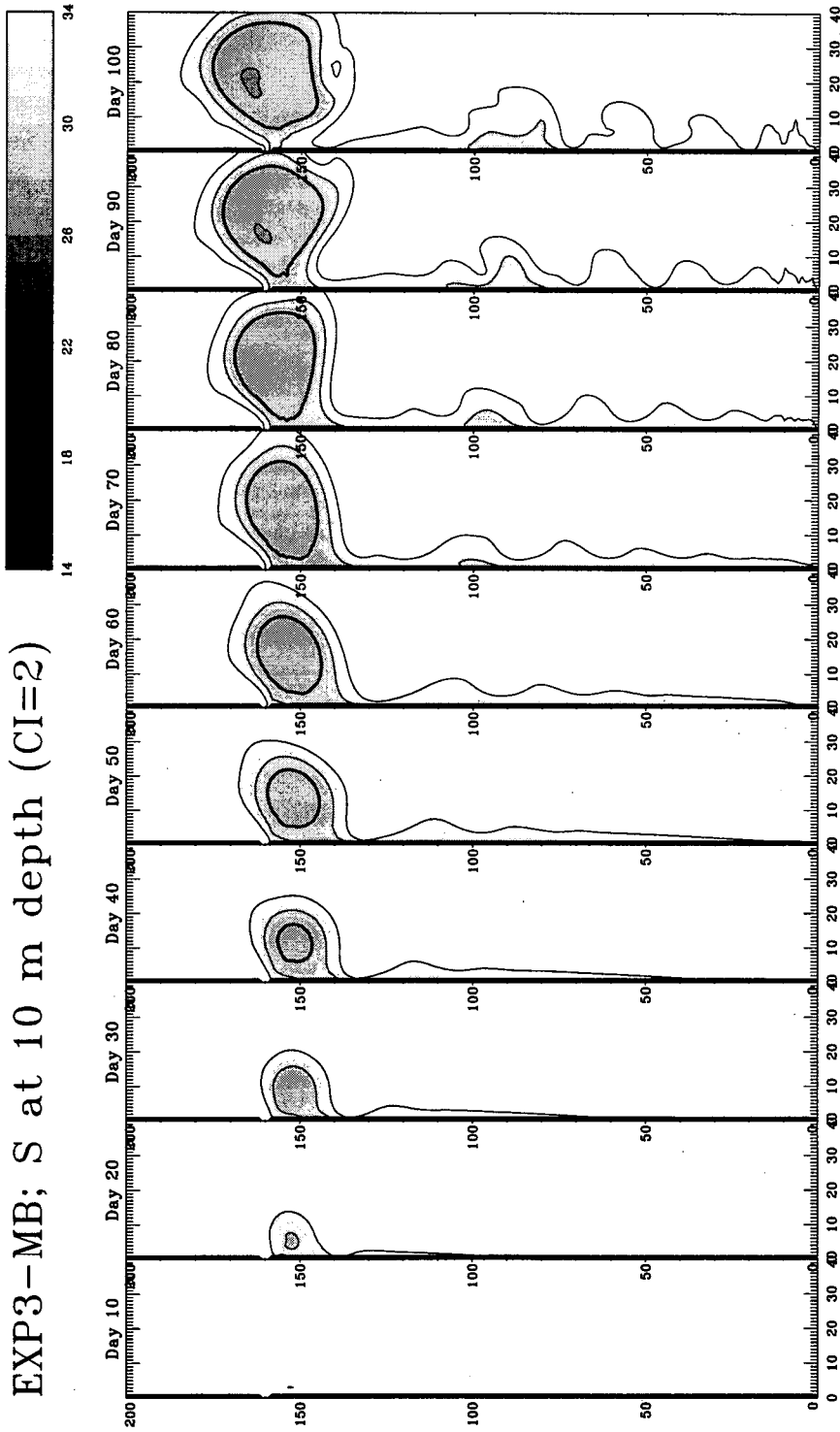


Fig. 3-7. Salinity distributions in the 7th layer of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

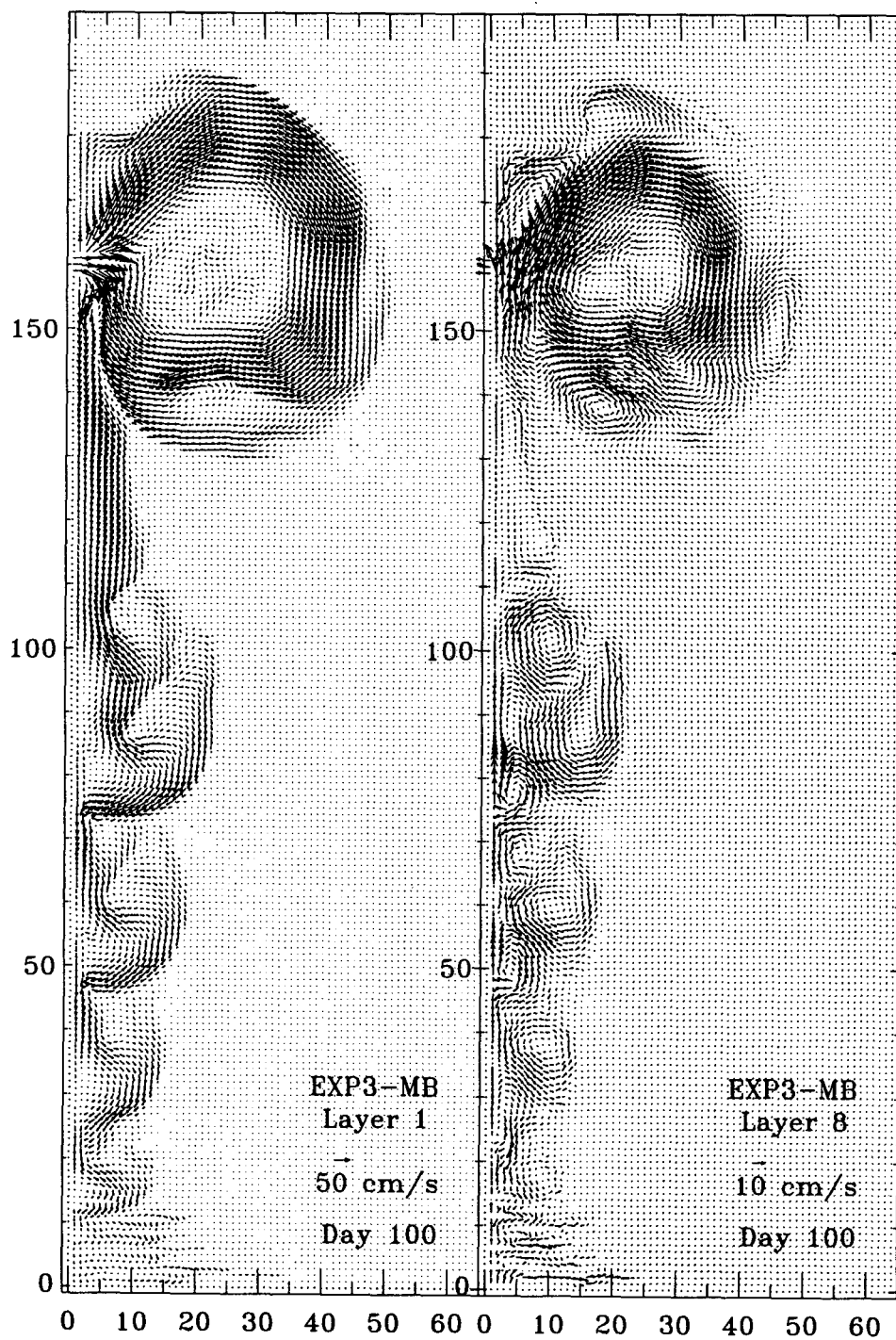


Fig. 3-8. Velocity distributions in the 1st and 7th layers of EXP3-MB at day 100.



EXP3-MB; S in EW section through  
center of river mouth (CI=2)

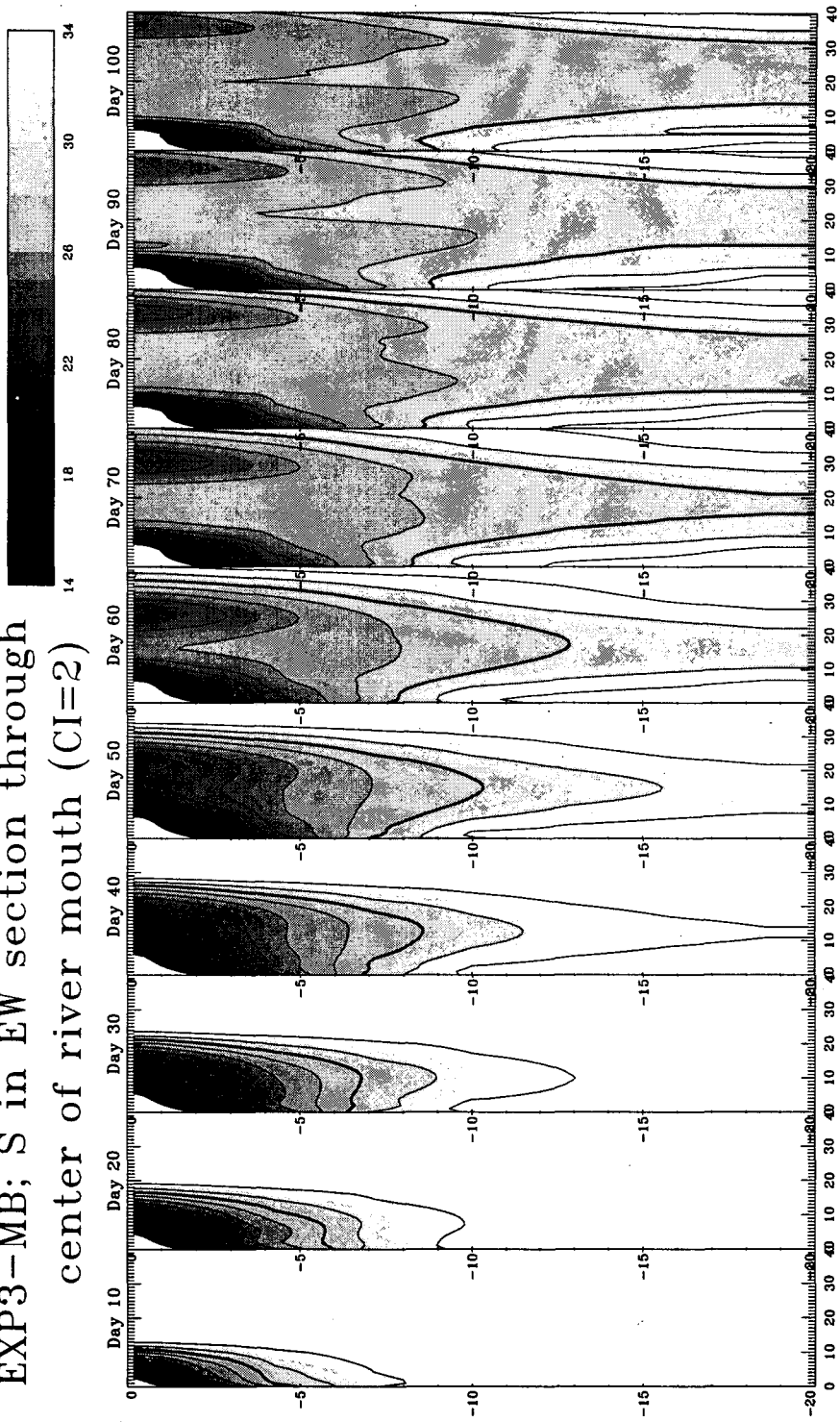


Fig. 3-9. Salinity distributions in the zonal section through the center of river mouth of EXP3-MB at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

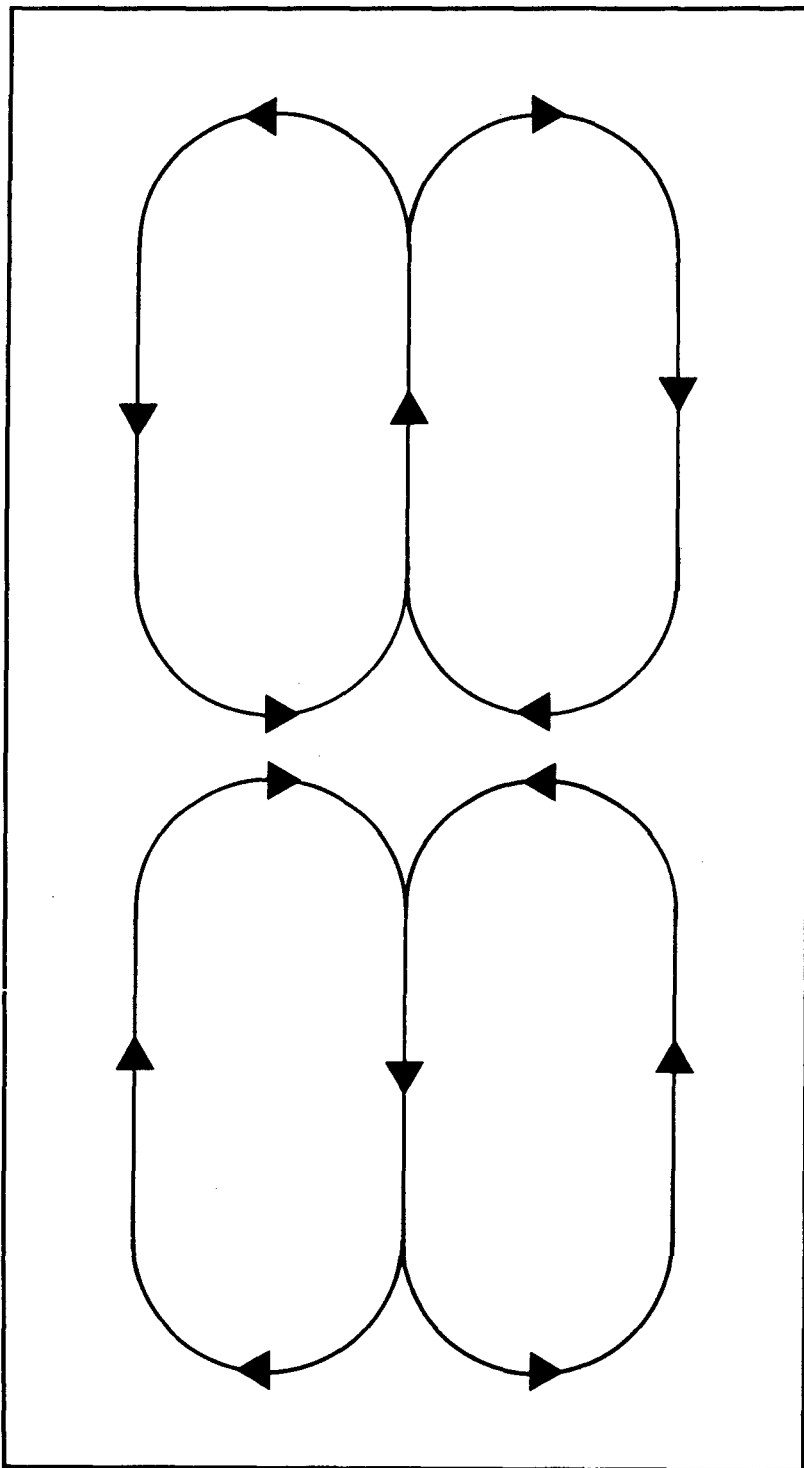


Fig. 3-10. Schematic diagram of vertical circulation.

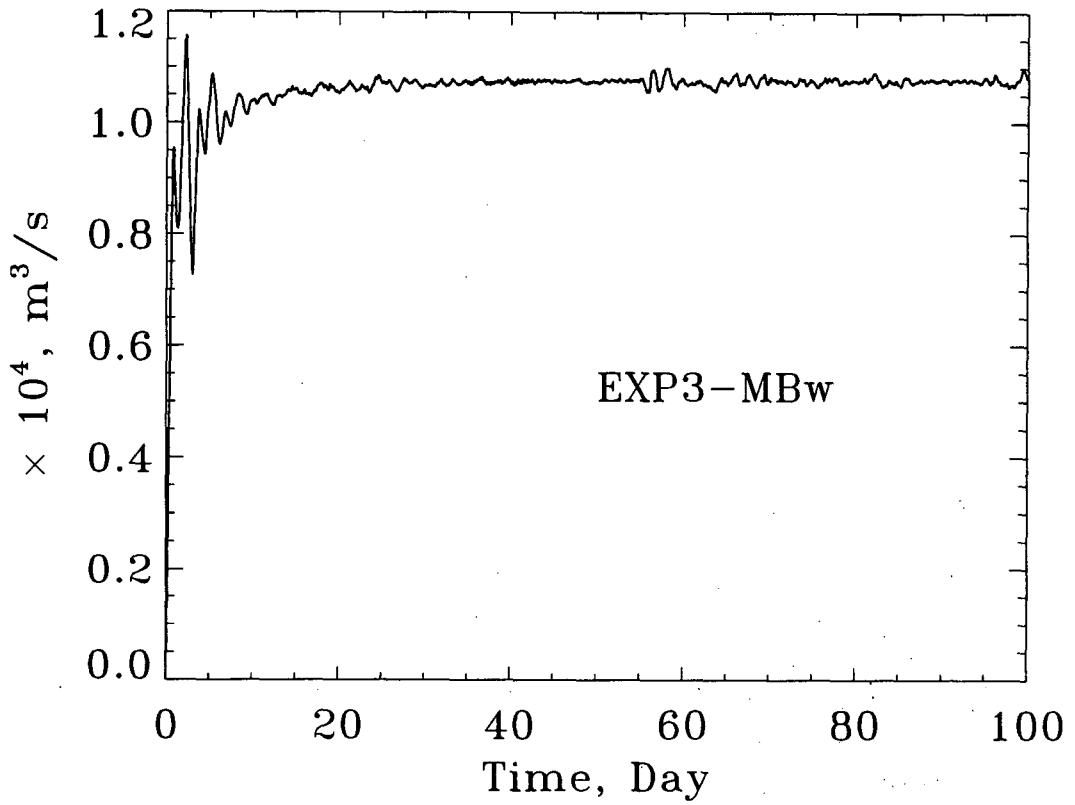


Fig. 3-11. Time variation of net discharge of EXP3-MBw.

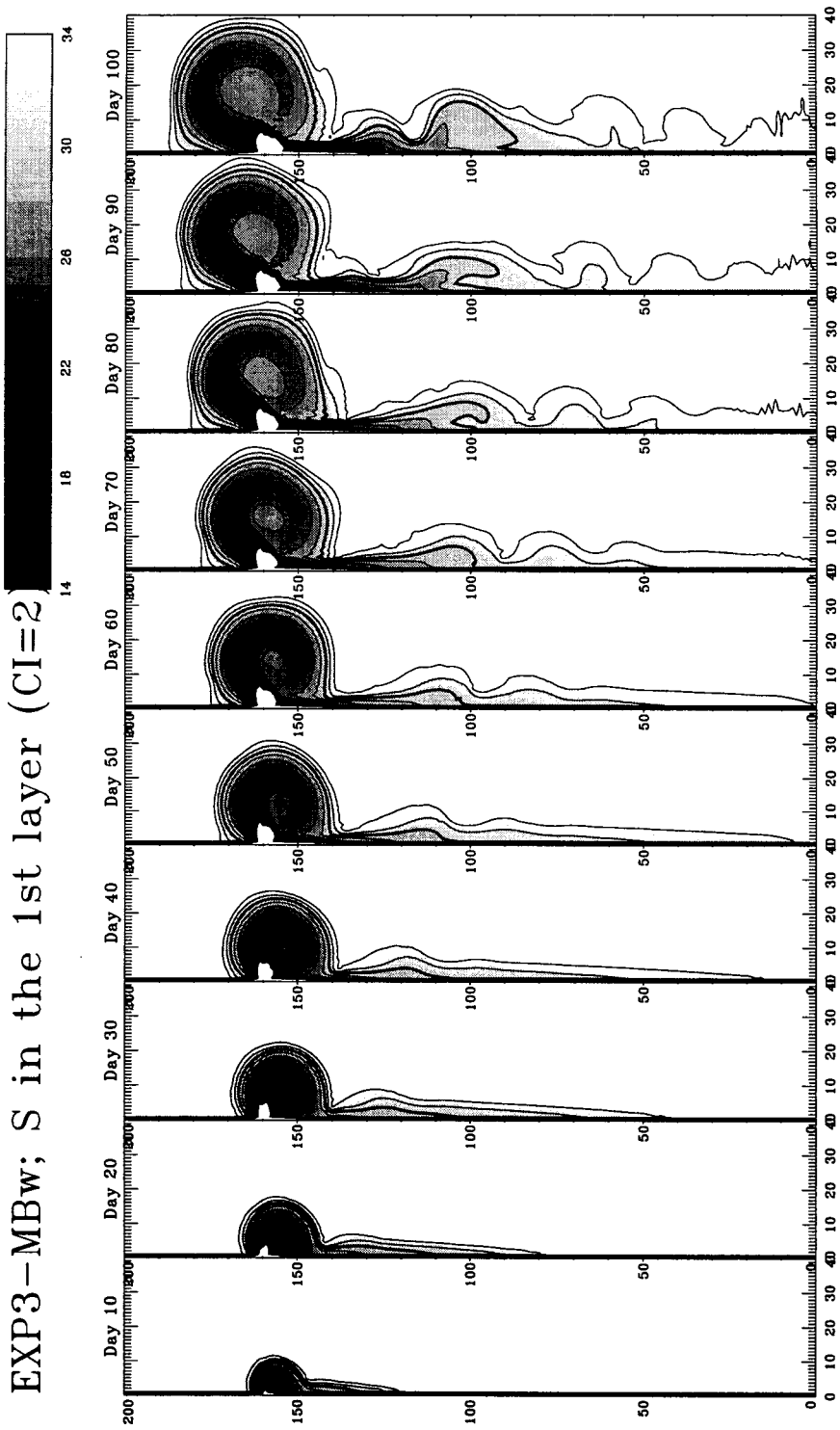


Fig. 3-12. Salinity distributions in the 1st layer of EXP3-MBw at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

# SLP1; S in the 1st layer (CI=2)

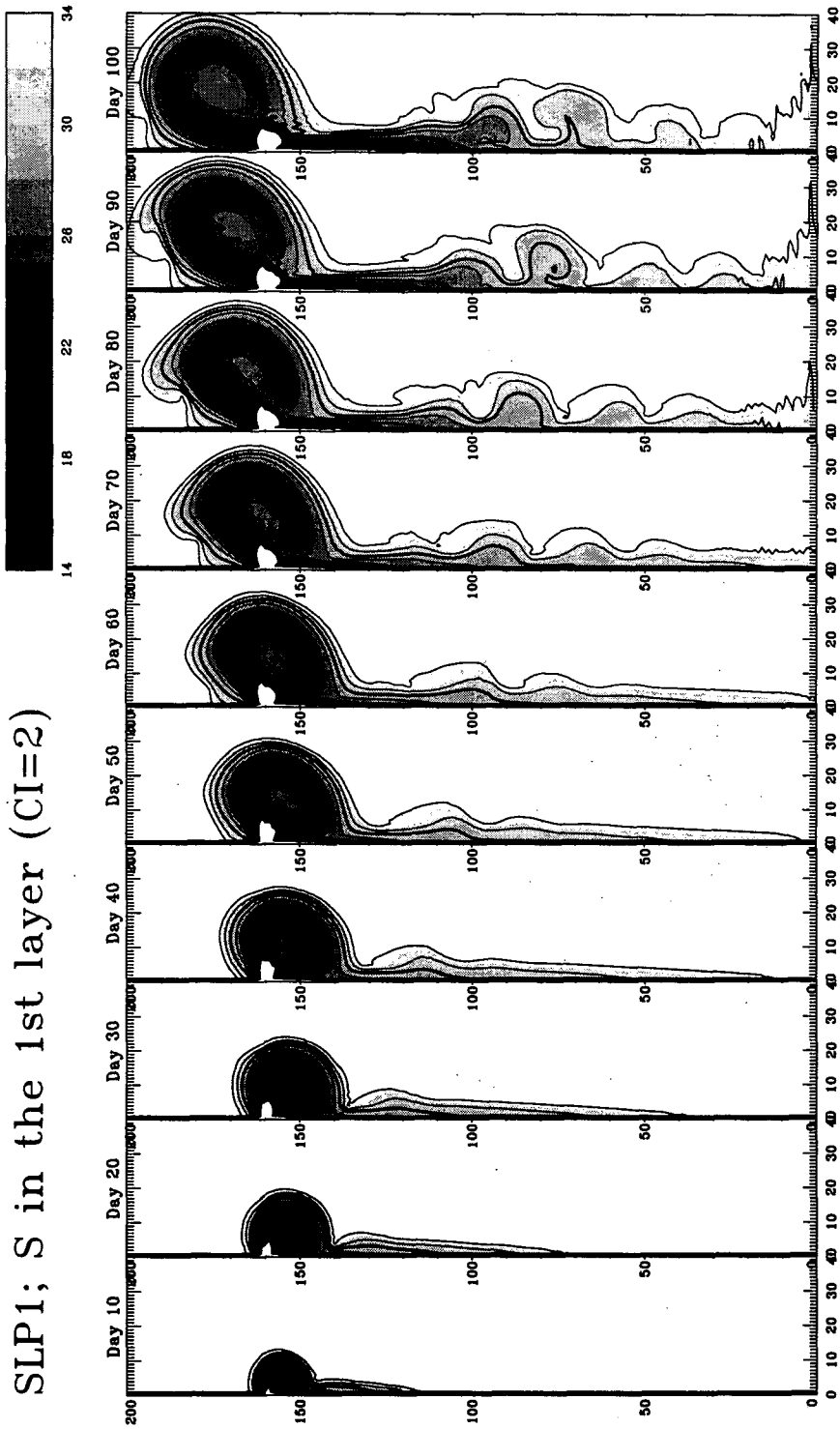


Fig. 3-13. Salinity distributions in the 1st layer of SLP1 at 10-day intervals (thick line indicates 30 days)



SLP3; S in the 1st layer (CI=2)

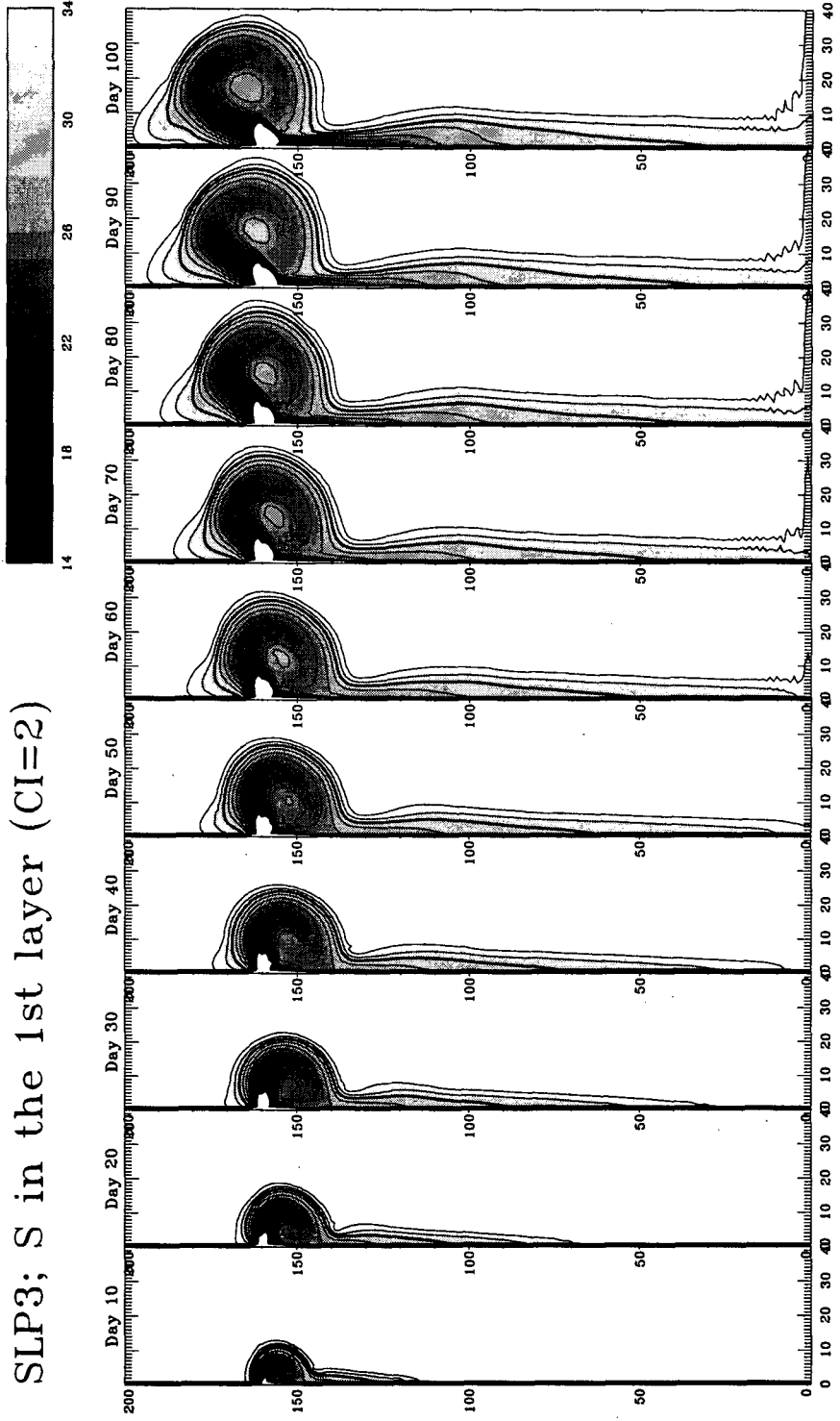


Fig. 3-15. Salinity distributions in the 1st layer of SLP3 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

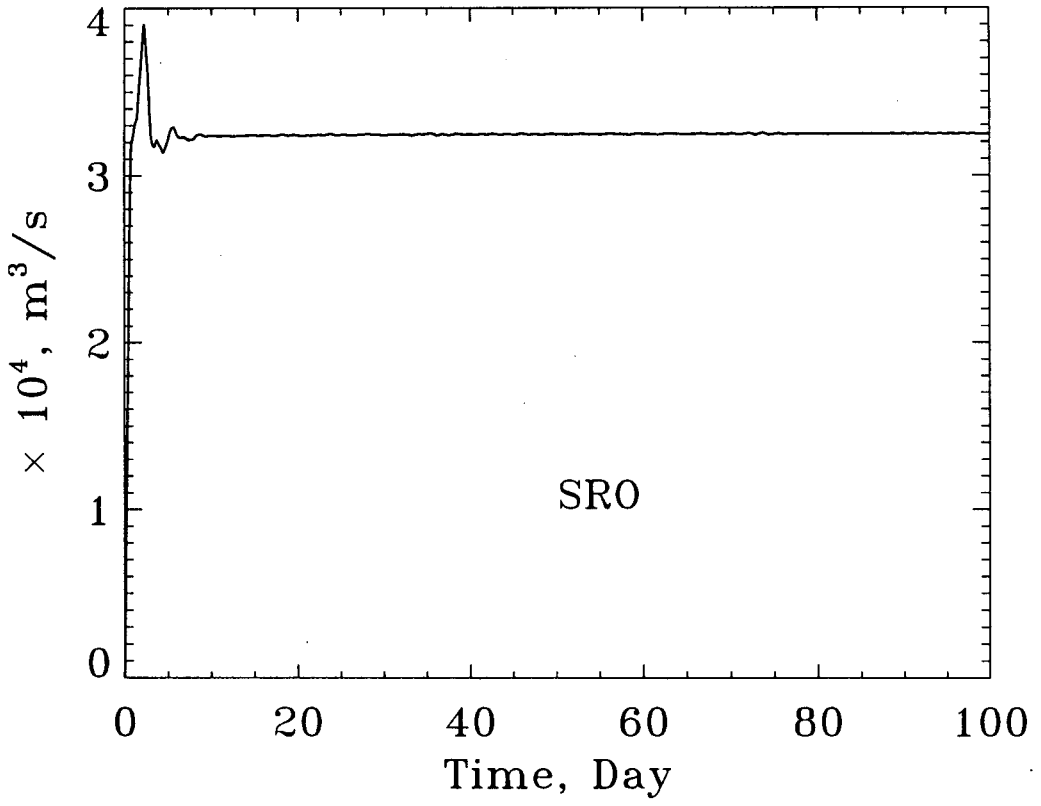


Fig. 3-16. Time variation of net discharge of SRO.



# SRO; S in the 1st layer (CI=2)

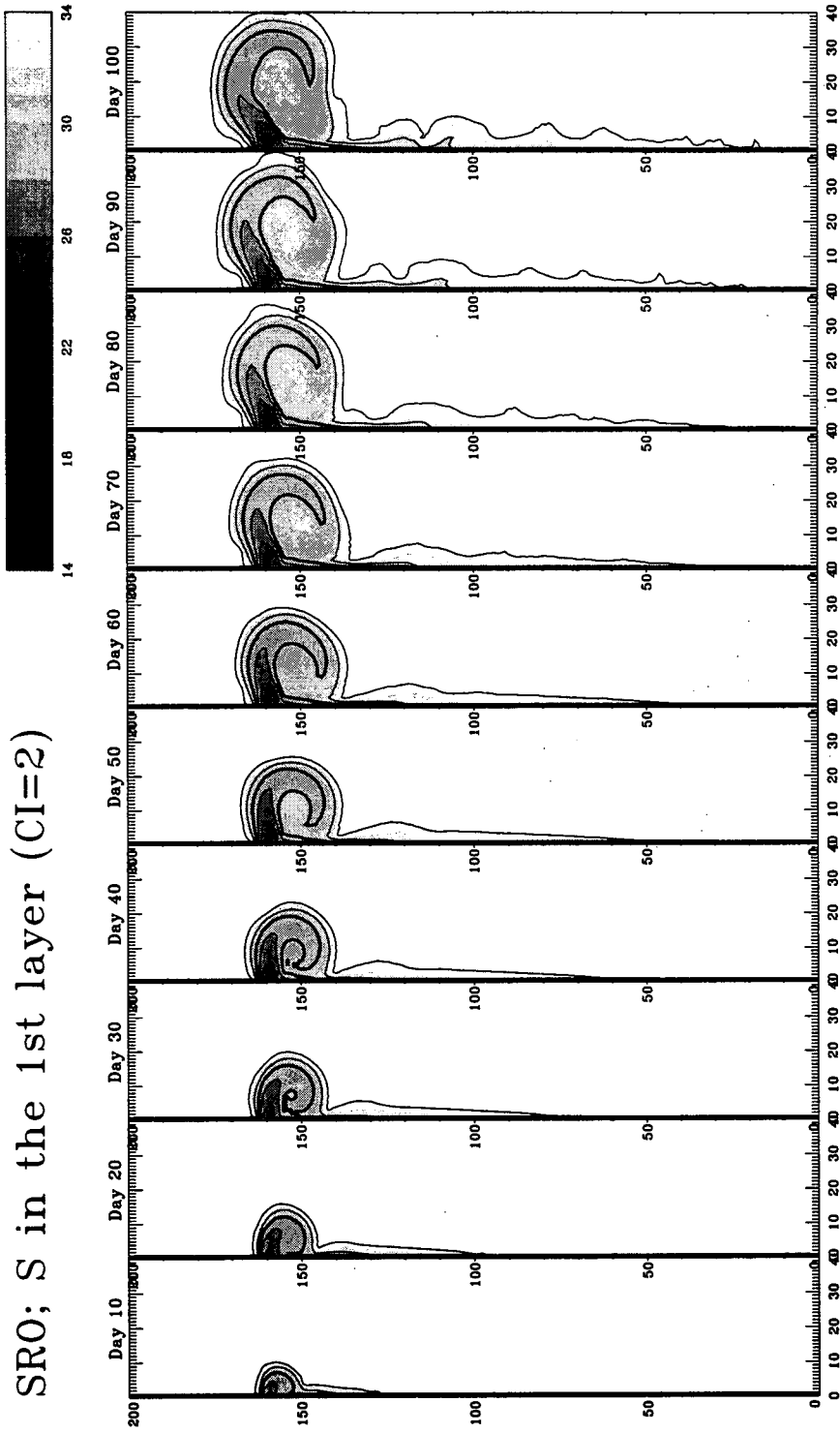


Fig. 3-17. Salinity distributions in the 1st layer of SRO at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

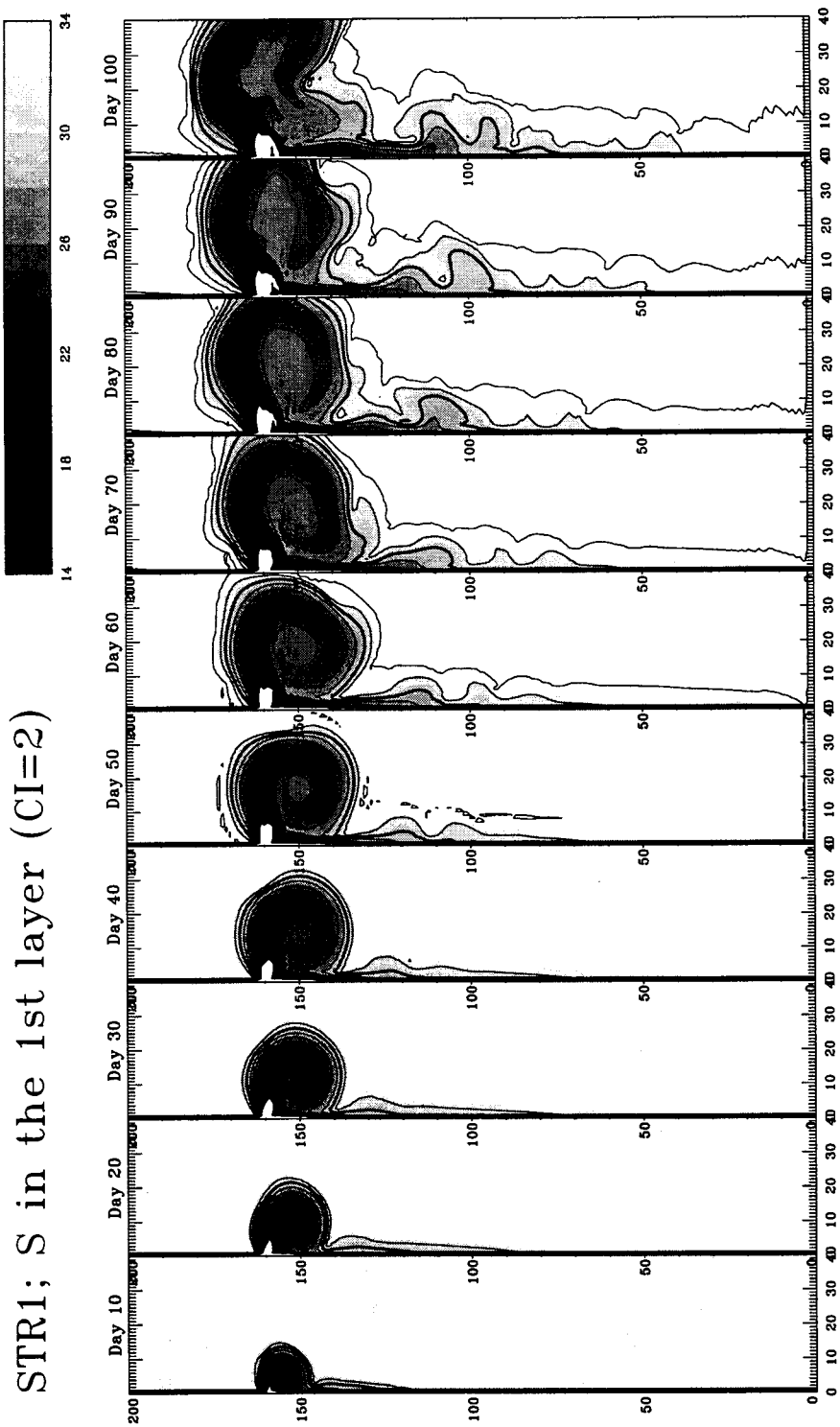


Fig. 3-18. Salinity distributions in the 1st layer of STR1 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

STR2; S in the 1st layer (CI=2)

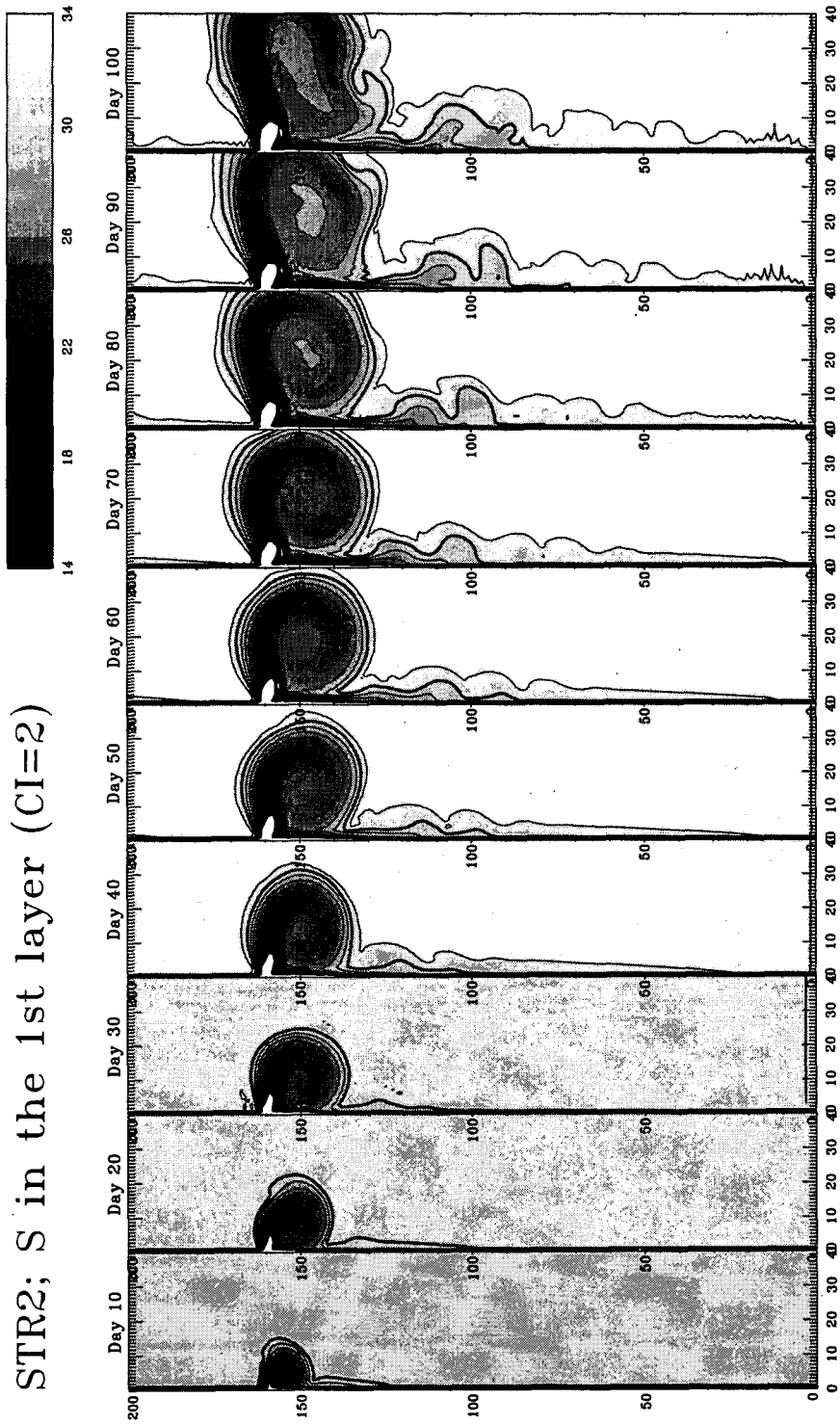


Fig. 3-19. Salinity distributions in the 1st layer of STR2 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

# STR3; S in the 1st layer (CI=2)

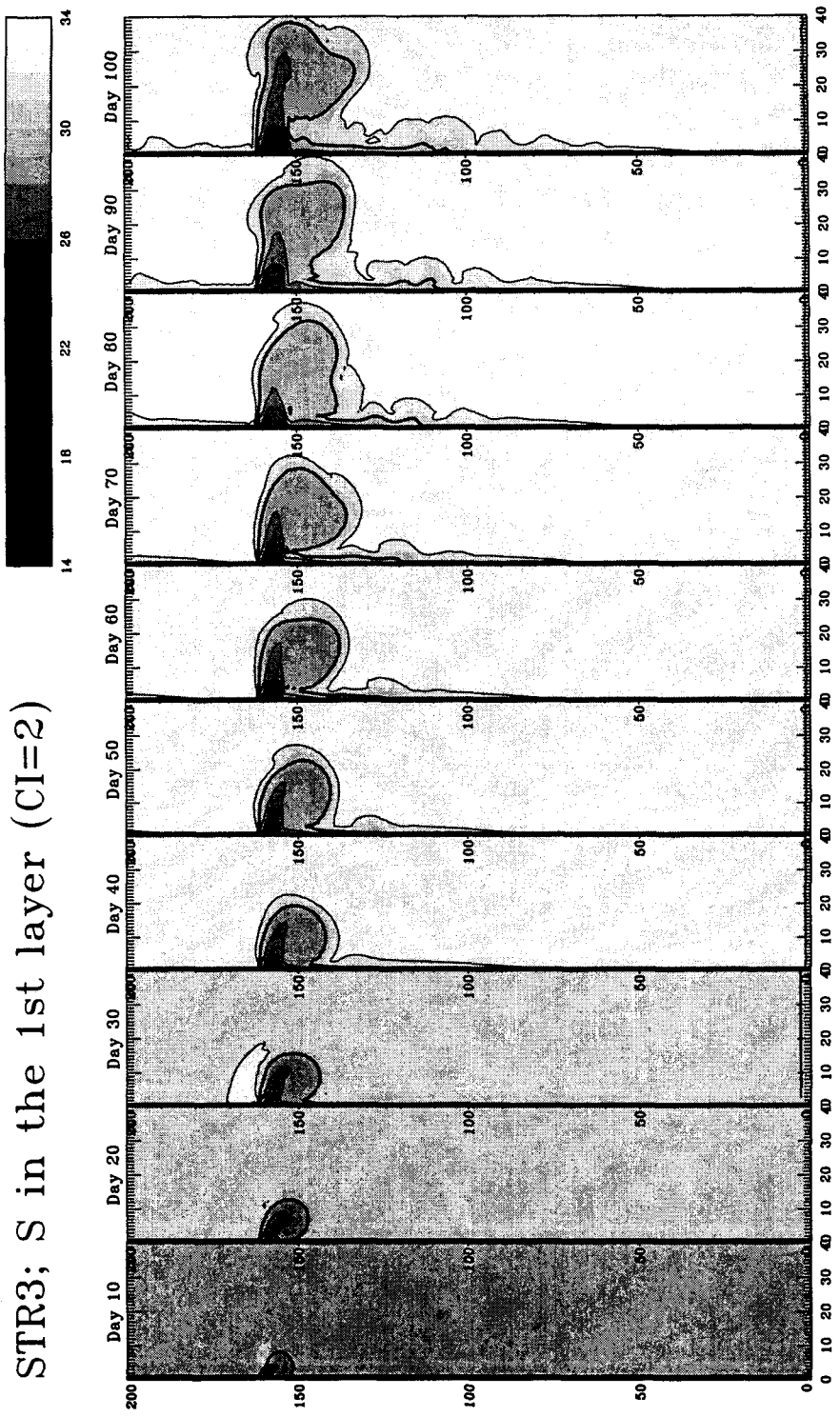


Fig. 3-20. Salinity distributions in the 1st layer of STR3 at 10-day interval (thick line indicates 30 psu)

## 제 4 장 동중국해 동부역의 상층해수순환

1991년도부터 1996년도까지 6년간 조사한 58대의 위성추적부이의 이동궤적을 분석하여 동중국해 동부역의 상층해류장을 작성하였다. 전체 부이의 이동궤적과 경위도 20' x 20' 평균 해류벡터는 다음과 같은 세가지 해류로 구성된 기본구조를 보인다.

- (1) 동중국해 대륙사면을 따라 북동진하는 Kuroshio가 Tokara 해협을 향해 동으로 방향전환을 하며,
- (2) Kuroshio의 지류가 수심 100 m 이상 외곽대륙붕역에서 북상하며,
- (3) 큐슈서방 Okinawa Trough내에서 시계방향의 순환이 있다. 북향류인 지류는 한국의 제주도와 일본의 Goto열도를 잇는 선을 통과하자마자 흐름방향을 급격하게 북동류로 바꾼다. 겨울과 여름철사이 해류장의 기본형태는 약간 바뀌고 대한해협에서 대마난류의 주축도 겨울철적으로 이동한다. 위성추적부이 실험은 황해난류 (Yellow Sea Warm Current)가 제주도 남동해역에서 북향류인 지류로부터 분기된다는 기존의 주장을 뒷받침하지는 않는다.

대마해류 (Tsushima Current)는 다음과 같이 세가지 다른 의미로 혼용하여 사용하고 있기 때문에 정확하게 어떤 해류를 지칭하는지 자주 혼란을 일으킨다.

- (1) 큐슈서방에서 Kuroshio로부터 분기되는 해류 (Uda, 1934; Nitani, 1972),
- (2) 대만해협을 통과한 해류가 동중국해 중간대륙붕 (middle shelf)을 거쳐 대한해협으로 유입하는 북동해류 (Beardsley et al., 1985, Fang et al., 1991),
- (3) 대한해협을 통해 동해로 유입하는 북향류 (Yi, 1966, Kawabe, 1982). 이에, 대마해류 용어는 (3)에서 정의한 해류에만 제한적으로 적용하고 또한 'Tsushima'가 대마도라는 지명을 지칭하기 때문에 (1)의 의미로 사용하는 대마해류는 'Kuroshio Branch Current'라는 새로운 용어로 사용할 것을 제안한다.

## Surface Current Fields in the Eastern East China Sea

HEUNG-JAE LIE AND CHEOL-HO CHO

*Physical Oceanography Division Korea Ocean Research and Development Institute  
P.O. Box 29, Ansan, 425-600 Seoul, Korea*

Surface current fields in the eastern East China Sea (ECS) were constructed by analyzing trajectories of 58 satellite-tracked surface drifters released during 1991-1996. Composite trajectories and 20-minute-by-20-minute box-averaged current vectors show that the basic current pattern composes of: the Kuroshio main stream, which turns eastward toward the Tokara Strait; a northward branch current of the Kuroshio on the ECS outer shelf deeper than 100 m; and an anticyclonic circulation in the northern Okinawa Trough west of Kyushu. The northward branch current sharply changes its direction to the northeast when it crosses a line connecting Cheju Island, Korea and Goto Islands, Japan. The basic pattern of current field changes slightly from winter to summer, and the main axis of the Tsushima Current in the Korea Strait is found to shift seasonally. The drifter experiment does not support the claim that the Yellow Sea Warm Current is separated from the northward branch current on the outer shelf southeast of Cheju Island. We suggest that the use of the term 'Tsushima Current' be limited to the northeast channel flow in the Korea Strait. The new term 'Kuroshio Branch Current' is suggested for the northward branch current on the outer shelf south of Cheju-do, which is separated from the Kuroshio.

### INTRODUCTION

The circulation in the eastern East China Sea (ECS) may be determined basically by the Kuroshio main stream, a branch current of the Kuroshio west of Kyushu, and the outward extension of fresh coastal water in summer, even though the three are variable in time and space. Schematic flow patterns of the ECS have been suggested, mostly based on hydrographic data (e.g., Uda, 1934; Nitani, 1972; Guan and Mao, 1982; Beardsley *et al.*, 1985; Fang *et al.*, 1991). Some of the patterns are similar, but others are totally different. The differences have been briefly commented on by Lie and Cho (1994). Qiu and Imasato (1990) presented a comprehensive surface current field, using historical Japanese geoelectrokinetograph (GEK) data accumulated over a period of more than three decades. The current field properly represents the main path of Kuroshio along the continental shelf of the ECS and its eastward turning toward the Tokara Strait southwest of Kyushu. However, it does not show the existence of a branch current in the eastern ECS which is separated from the Kuroshio. Recently, Lie and Cho (1994) deployed satellite-tracked drifters west of Kyushu during 1991-1992 and observed a

branch current which flowed northward along the western shelf edge of the deep trough west of Kyushu.

Although various circulations have been suggested, there are no comprehensive and reliable current fields for the ECS denoting current direction and speed, because of shortage of direct current measurements. Tracking of cost-effective drifters is one of the best ways to observe ocean current. Therefore, we conducted an extensive drifter experiment in the eastern ECS during the Coastal Ocean Process Experiment of East China Sea (COPEX-ECS) in 1991-1996. In this study, we present the mean surface current field of the eastern ECS, using all drifter data collected through the COPEX-ECS in 1991-1996. Seasonal patterns of the current field are also constructed from the same drifter data file.

### DRIFTER EXPERIMENT

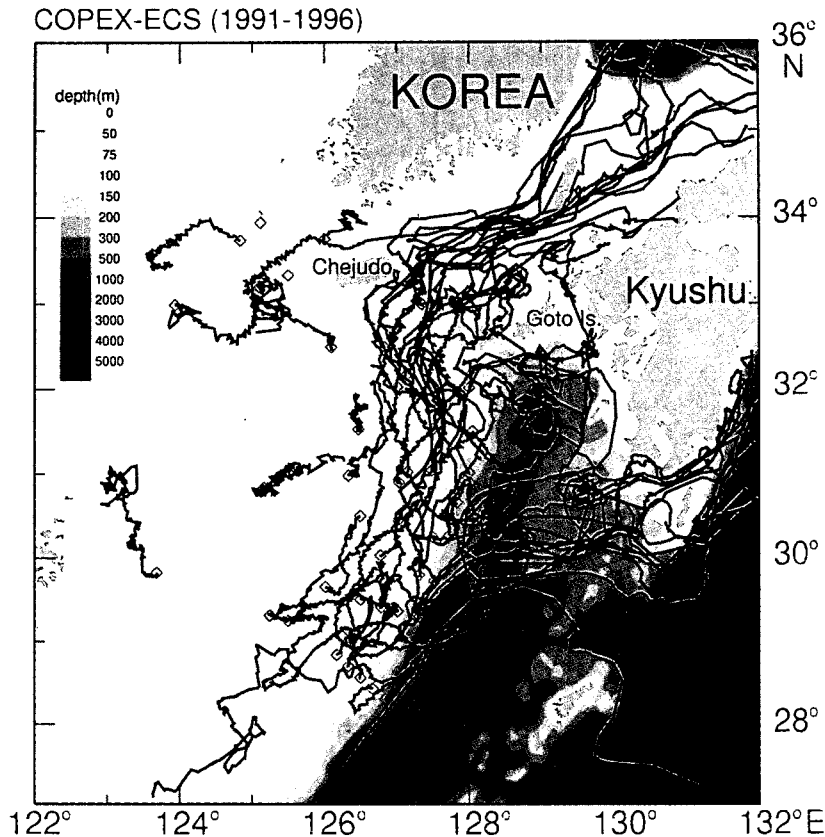
Fifty eight satellite-tracked drifters were released at different times during 1991-1996. The number of drifters deployed each year was 3 in 1991, 7 in 1992, 5 in 1993, 13 in 1994, 14 in 1995, and 16 in 1996. Most of the drifters were released on the outer shelf of the eastern ECS deeper than 100 m, and on the

**Table 1.** Information on satellite-tracked drifter experiments for 1991–1996

Float number	Date Deployed			Releasing Point		Wast depth, m	Center of drogue, m
				North Latitude	Float Longitude		
9728	July	17,	1991	32°	127°	124	15
9729	July	17,	1991	32°	128°	166	15
9727	July	17,	1991	32°	129°	821	15
2031	Apr.	17,	1992	32° 10'	127°	112	15
2032	Apr.	17,	1992	32° 10'	128°	143	15
2033	Apr.	17,	1992	32° 10'	129°	466	15
11010	Nov.	18,	1992	31°	125° 30'	63	15
11013	Nov.	18,	1992	31°	126° 20'	81	15
11012	Nov.	18,	1992	31°	127° 10'	110	15
11011	Nov.	18,	1992	31°	128°	210	15
09729	Dec.	9,	1993	30°	126° 46'	100	15
03157	Dec.	9,	1993	29° 48'	127° 18'	126	45
09731	Dec.	9,	1993	29° 45'	127° 26'	200	15
09728	Dec.	12,	1993	32° 30'	126° 45'	115	15
09727	Dec.	12,	1993	33° 20'	125° 30'	88	15
23019	Aug.	31,	1994	30° 51'	127°	101	30
23024	Aug.	31,	1994	30° 40'	127° 50'	164	30
23020	Sept.	3,	1994	29° 20'	127° 13'	180	50
23017	Sept.	3,	1994	29° 19'	127° 16'	220	50
21581	Sept.	3,	1994	29° 19'	127° 18'	260	15
23016	Sept.	3,	1994	29° 18'	127° 21'	353	50
23022	Sept.	3,	1994	29° 18'	125° 15'	92	15
23025	Sept.	3,	1994	29° 30'	126° 30'	104	15
21582	Sept.	3,	1994	29° 22'	127°	124	30
23018	Sept.	5,	1994	32° 30'	126° 02'	100	15
23023	Sept.	5,	1994	33°	127° 20'	127	15
09761	Oct.	6,	1994	33° 57'	125° 07'	94	50
23021	Oct.	6,	1994	32° 57'	123° 46'	41	15
21584	Apr.	27,	1995	31° 30'	128°	150	15
09728	Apr.	27,	1995	31° 30'	127° 30'	131	15
09730	Apr.	30,	1995	30° 12'	127° 45'	250	50
03156	Apr.	30,	1995	30° 23'	127°	103	15
09731	May	3,	1995	29° 38'	126°	97	15
21581	May	3,	1995	29° 26'	126° 45'	110	15
03157	May	3,	1995	29° 23'	126° 59'	122	50
21579	May	3,	1995	29° 19'	127° 15'	204	15
21582	May	3,	1995	29° 18'	127° 19'	282	15
21580	Sept.	27,	1995	33° 12'	125° 6'	85	15
03548	Dec.	3,	1995	31° 30'	126° 30'	89	15
03580	Dec.	5,	1995	30° 54'	128° 01'	307	50
03531	Dec.	5,	1995	30° 55'	127° 57'	180	15
08041	Dec.	5,	1995	31°	127° 30'	124	50
27262	May	28,	1996	28° 26'	126° 40'	170	50
27263	May	28,	1996	28° 42'	126° 20'	119	50
27264	May	28,	1996	28° 50'	126° 10'	112	15
27265	May	28,	1996	28° 10'	126° 50'	260	15
27266	May	28,	1996	28° 34'	126° 30'	136	15
27267	Oct.	5,	1996	33° 45.14'	126° .13'	87	15
27268	Oct.	5,	1996	33° 44.13'	124° 50.12'	82	15
27269	Oct.	7,	1996	29° 49.61'	123° 40.87'	74	15
27270	Oct.	9,	1996	30° 50.14'	125° 9.78'	58	15
27513	Oct.	9,	1996	30° 30.01'	126° 29.81'	87	50
27271	Oct.	9,	1996	30° 15.00'	127° 29.90'	130	15
27272	Oct.	11,	1996	29° 18.87'	125° 15.12'	90	15
27514	Oct.	11,	1996	29° 15.03'	125° 30.03'	89	50
27274	Oct.	11,	1996	29° 3.98'	126° 14.86'	103	15
27515	Oct.	11,	1996	29° 2.16'	126° 21.64'	110	50
27273	Oct.	12,	1996	33° 51.59'	128° 9.70'	100	15

continental slope. The others were released on the middle shelf 70–100 m deep, and in the northern

ECS. Table 1 presents information on the drifter experiment, including date and location of releases,



**Fig. 1.** A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters deployed in the East China Sea by KORDI during 1991~1996. Symbol  $\odot$  denotes release points. Red and blue lines correspond respectively drifters drogued at 15 m and at deeper depths of 30 m and 50 m.

water depth, and drogue depth.

The drifters used for the study were of the World Ocean Circulation Experiment/Surface Velocity Programme (WOCE/SVP) type, equipped with a thermistor for sea surface temperature and holey sock drogue 644 cm in length. Of 58 drifters, 41 sets were drogued at 15 m below sea surface and the others at deeper depths of 30 m or 50 m. Drifters which were released in 1991 and 1992 transmitted positions for 8 hours a day, while drifters released in 1993~1996 were manufactured to transmit positions in dual cycles, for 24 hours a day during the first 30 days after launch, and for 8 hours a day during the remaining lifetime. The reason for the dual transmission cycles was to observe drifter positions more frequently in the study area.

#### SURFACE CURRENT FIELD

A composite map of all trajectories positioned during 1991~1996 is presented in Fig. 1. Trajectories of the 41 standard drifters with a drogue at 15 m are marked in red, and those of drifters drogued at deeper depths are marked in blue. Trajectories are distributed in a southwest-northeast direction on the continental slope, and in a west-east direction in the deep Okinawa Trough west of the Tokara Strait. This shows that the northeastward-flowing Kuroshio main stream along the continental slope turns eastward toward the Tokara Strait. Trajectories in the northern cul-de-sac of the trough west of Kyushu result from clockwise turning of drifters around the trough (Lie and Cho, 1994). South-north trajectories on the outer shelf deeper



than 100 m between Cheju Island and the Kuroshio, and southwest-northeast trajectories in the Korea Strait show the main path of a branch current of the Kuroshio. This branch current will be discussed in detail later. The trajectories on the shelf are clearly indicative of a sharp change in direction of the branch current when it crosses a line connecting Cheju Island, Korea and Goto Islands, Japan (hereafter, this line is called the 'Cheju-do line').

Fig. 2 shows the distribution of data in 20'-by-20' boxes. Numerals on the upper left and lower right sides of each box correspond, respectively, to number of drifters entering the box and the length of position data in days. In an area where strong current exists, the data length is short relative to a large number of drifters, and vice versa. Fig. 3 presents box-averaged current vectors which are estimated from the trajectories in Fig. 1. The Kuroshio main stream is identified by strong current vectors at a speed of about 1 m/s, faster than the estimate based on GEK data (Qiu and Imasato, 1990). The northeast-flowing Kuroshio along the continental slope of the ECS turns eastward toward the Tokara Strait after leaving the slope. The eastward turning of the Kuroshio is clearly seen in the trajectories. In the neighbourhood of the turning

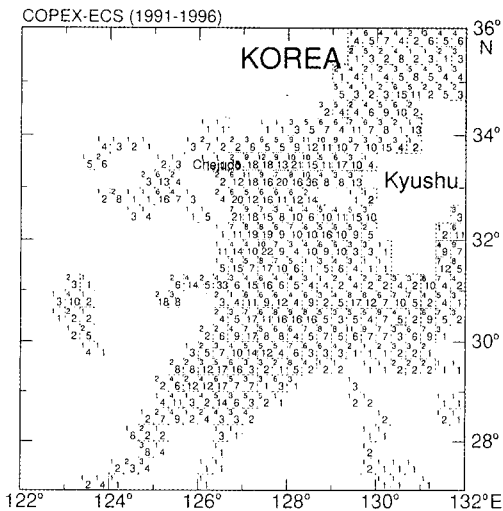


Fig. 2. Data number of drifters deployed during 1991~1996 by KORDI. Numerals on the upper left and lower right corners of each 20-minute-by-20-minute box correspond respectively to number of drifters entering the box and the length of position data in days.

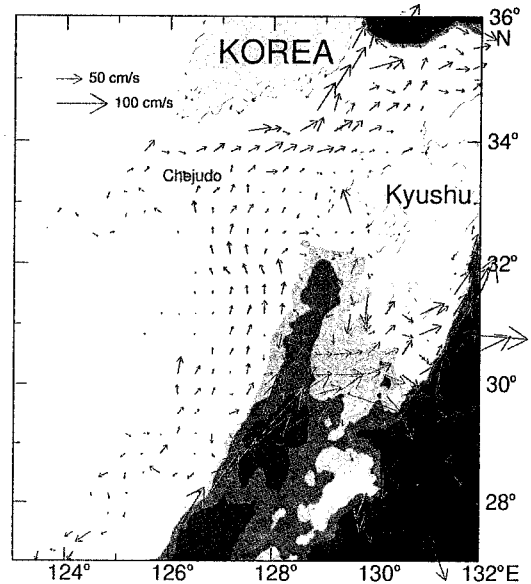
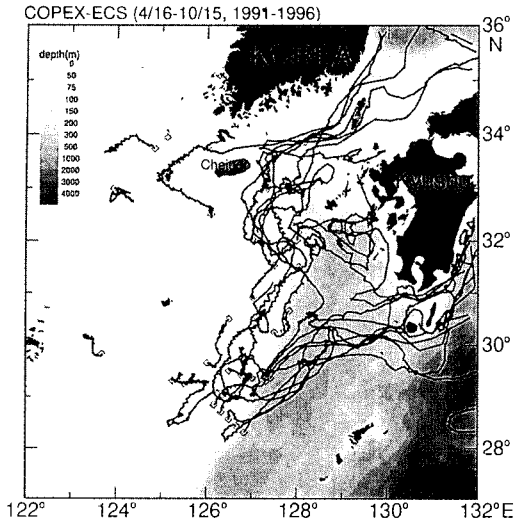


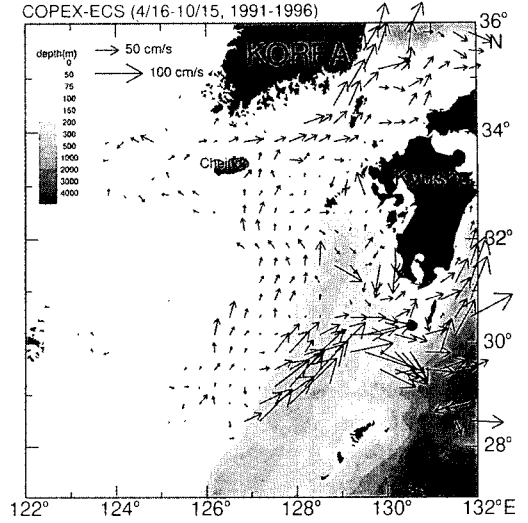
Fig. 3. 20'-by-20' box-averaged surface current vectors derived from the composite map of trajectories in Fig. 1.

point of the Kuroshio, the Kuroshio is separated into the main stream and a branch current (Lie *et al.*, 1995). The branch current at a speed of 10~35 cm/s flows northward both on the outer shelf deeper than 100 m and on the western flank of the trough west of Kyushu. Southwest of the Goto Islands, it splits into a northward-continuing flow and an eastward-turning flow along the shelf edge, as already pointed out by Lie and Cho (1994). The eastward flow turns back to the south along the west coast of Kyushu. Therefore, an anticyclonic circulation is formed in the northern trough. This anticyclonic circulation is also seen on the current field constructed from GEK data (Hsueh *et al.*, 1996). The northward-continuing flow turns sharply to the northeast after passing the Cheju-do line.

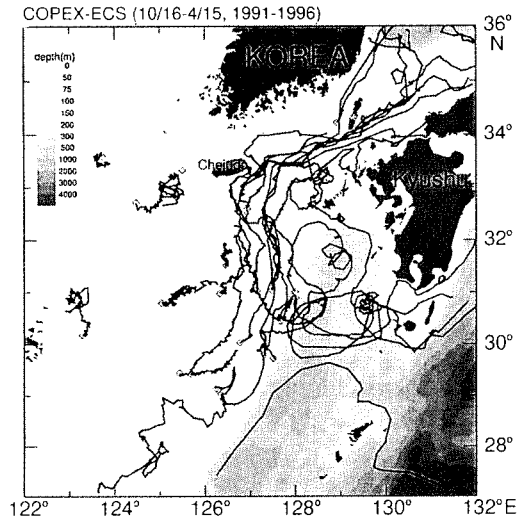
The northeast flow maintains its direction almost along isobaths between Cheju Island and Tsushima Island. It is interesting to see the trajectory of a drifter which was deployed southwest of Cheju Island. The drifter turned around Cheju Island and moved into the Korea Strait after passing through the Cheju Strait in autumn. The existence of the eastward channel flow in the Cheju Strait was detected by drifter trajectories in summer (Beadsley *et al.*, 1992) and by moored current data in spring (Chang *et al.*, 1995). The eastward channel



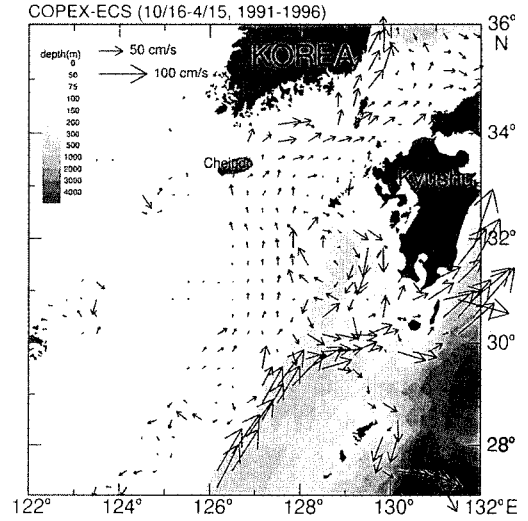
**Fig. 4.** A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters observed in the warm season (mid-April through mid-October) in the East China Sea by KORDI during 1991-1996. Symbol '◇' denotes release points.



**Fig. 6.** 20'-by-20' box-averaged surface current vectors for the warm season, derived from the composite map of Fig. 4.



**Fig. 5.** A composite map of all trajectories of satellite-tracked drifters observed in the cold season (mid-October through mid-April) in the East China Sea by KORDI during 1991-1996. Symbol '◇' denotes release points.



**Fig. 7.** 20'-by-20' box-averaged surface current vectors for the cold season, derived from the composite map of Fig. 5.

flow eventually joins the northeast extension of the branch current in the eastern part of the Cheju Strait. Consequently, the northeastward flow in the Korea Strait is concluded to consist of the northeast con-

tinuation of the branch current and the eastward channel flow passing through the Cheju Strait. The flow in the western channel, with a speed of more than 50 cm/s, is much stronger than that in the

eastern channel. The eastward channel flow in the Cheju Strait contributes to an increase in flow speed in the western channel of the Korea Strait.

### SEASONAL VARIATION OF SURFACE CURRENTS

The water column on the ECS shelf is strongly stratified in the warm season, but well mixed or weakly stratified in the cold season (e.g., Lie and Cho, 1994). Surface wind fields are also very seasonal: strong northerly wind in the cold season, but weaker southerly wind in the warm season (Lie *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1995). Therefore, it is necessary to examine seasonal patterns of the surface current. Trajectories and box-averaged current vectors were mapped for both the warm season (mid-April through mid-October) and the cold season (mid-October through mid-April).

Spaghetti diagrams of trajectories and box-averaged current vectors for the two seasons are presented in Figs. 4-7. The Kuroshio path in the cold season is not clearly seen in Figs. 5 and 7, since only a small number of drifters were deployed across the continental slope. However, WOCE drifter data clearly show the eastward turning of the Kuroshio west of the Tokara Strait (Lie *et al.*, 1995). The flow patterns for the two seasons resemble each other, both showing the eastward Kuroshio west of the Tokara Strait, the northward branch current on the outer shelf west of Kyushu, and the northeast continuation of the branch current in the Korea Strait. However, smaller scale structures are slightly different, especially on the shelf.

Trajectories on the outer shelf in the cold season are relatively straight in the north-south direction, while those in the warm season are bent (Figs. 4 and 5). Furthermore, the northward current in the cold season is weaker than that in the warm season (Figs. 6 and 7). Reasons for the bent trajectories are not clear, although the trajectories are expected to be associated with the meander of the Kuroshio front (e.g., Qiu *et al.*, 1990) and an outward extension of fresh coastal water in summer, mostly the Changjiang diluted water (Lie and Cho, 1994). Drifters which were deployed in the area south of the Cheju-do line, approached closer to the southern Korean coast in the warm season than those deployed in the cold season, but drifters deployed in the cold season shifted toward the northwestern Kyushu coast. In the cold season, a surface-to-bottom thermohaline

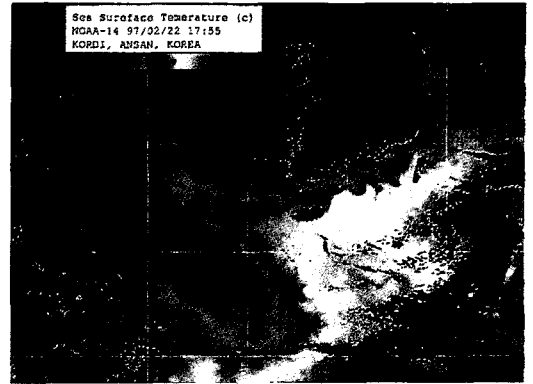


Fig. 8. Sea surface temperature estimated from an infrared image of NOAA-14 on February 22, 1997.

front runs almost along a line between Cheju Island and the southern tip of Tsushima Island, as pointed out by Lie and Cho (1994). Sea surface temperature estimated from an infrared image of NOAA-14 on February 22, 1997 (Fig. 8) clearly shows the existence of a strong thermal front along the southern Korean coast in winter. Drifters coming up from the south hardly cross the front. On the other hand, in the warm season, the thermohaline front is broken and the water column in the Korea Strait is vertically stratified. The surface layer in the southern Korean coastal area is largely filled in with fresh coastal water. Therefore, drifters which were deployed south of Cheju Island approached a little closer to the Korean coast in the warm season than those deployed in the cold season. This implies a shift of the northeast branch current to the Korean coast in the Korea Strait in the warm season.

### NEW TERMINOLOGY OF KUROSHIO BRANCH CURRENT

The term 'Tsushima Current' (TC) has been confusingly used in three different senses: (1) a branch current of the Kuroshio west of Kyushu (Uda, 1934; Nitani, 1972); (2) a northeastward continuation over the ECS shelf of the outflow through the Taiwan Strait (Beardsley *et al.*, 1985; Fang *et al.*, 1991); and (3) a northeastward channel flow passing through the Korea Strait (e.g., Yi, 1966; Kawabe, 1982). Therefore, the terminology should be more precisely defined to avoid such confusion. We suggest that the use of the term 'TC' be limited to the northeast channel flow in the Korea Strait, since

the word 'Tsushima' is the geographical name of the Tsushima Island, located in the Korea Strait. In this sense, 'TC' may designate the channel flow in the Korea Strait which transports two different water masses of saline Kuroshio water and fresher coastal water to the East Sea. Therefore, the northward branch current on the outer shelf south of Cheju Island needs to be newly named to differentiate it from the TC in the Korea Strait. 'Kyushu Warm Current', 'Cheju Warm Current', 'East China Sea Warm Current', and 'Kuroshio Branch Current' may be candidate names for the branch current. Of the four candidates, 'Kuroshio Branch Current' seems to be the most proper name, since it describes the branching of the Kuroshio more explicitly than the other three. It may be objected that the Kuroshio has another branch current northeast of Taiwan. However, the latter has been known to the oceanographic community as the 'Taiwan Warm Current', rather than the 'Kuroshio Branch Current'.

### CONCLUSIONS

The surface current fields in the eastern ECS were constructed, based on trajectories of numerous drifters deployed during 1991~1996. They present clearly for the first time the surface current pattern which consists of: (1) the eastward turning of the Kuroshio; (2) a northward branch current on the outer shelf; (3) an anticyclonic circulation in the northern Okinawa Trough west of Kyushu; and (4) a northeastward channel flow in the Korea Strait. The basic pattern changes slightly from the warm season to the cold season.

We suggest that the use of the term 'Tsushima Current' be limited to the northeast channel flow in the Korea Strait. The new term 'Kuroshio Branch Current' is suggested for the northward branch current on the outer shelf south of Cheju-do, since it describes the branching of the Kuroshio more explicitly than the Tsushima Current.

Uda (1934) and Nitani (1972) suggested that the Yellow Sea Warm Current (YSWC) is branched from the northward branch current southeast of Cheju Island. However, the drifter experiment does not indicate its branching there southeast of Cheju Island. The origin and detailed structure of the YSWC should be investigated in future, which will require comprehensive current measurements in the northwestern ECS.

### ACKNOWLEDGEMENT

This study is a Korean contribution to the World Ocean Circulation Experiment/Surface Velocity Programme and was supported mostly by grants from the Korean Ministry of Science and Technology for 1991~1997.

### REFERENCES

- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas, *La mer*, **30**: 297-314.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu, and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 57-76.
- 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. Kor. Soc. Oceanogr.*, **30**: 203-215.
- Fang, G., B. Zhao, and Y. Zhu, 1991. Water volume transport through the Taiwan Strait and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters. In: Oceanography of Asian Marginal Seas, edited by K. Takano, Elsevier, New York.
- Guan, B. and H. Mao, 1982. A note on circulation of the East China Sea. *Chinese J. Oceanol. Limnol.*, **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. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 550-564.
- Hsueh, Y., H.-J. Lie, and H. Ichikawa, 1996. On the branching of the Kuroshio west of Kyushu. *J. Geophys. Res.*, **101**: 3851-3857.
- Kawabe, M., 1982. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea. Part I. Data analysis. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**: 95-107.
- 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., J.-Y. Na, S.-K. Han, and J.-W. Seo, 1994. Monthly mean sea surface winds over the East China Sea. KORDI Rep., BSPE 00367-683-1, 91 pp (abstract only in English).
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, J.-H. Lee, P. Niiler, and J.-H. Hu, 1995. Separation of the Kuroshio water and its penetration onto the continental shelf west of Kyushu. *International WOCE Newsletter*, **20**: 10-13.
- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Kuroshio, edited by H. Stommel and K. Yoshida, University of Tokyo Press, Tokyo.
- Qiu, B. and N. Imasato, 1990. A numerical study on the formation of the Kuroshio countercurrent and the Kuroshio branch current in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **10**: 165-184.
- Qiu, B., T. Toda, and N. Imasato, 1990. On Kuroshio front fluctuations in the East China Sea using satellite and in situ observational data. *J. Geophys. Res.*, **95**: 18191-18204.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *J. Imp. Fish. Exp. St.*, **5**: 138-190 (in Japanese).
- Yi, S.-U., 1966. Seasonal and secular variations on the water volume transport across the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **1**: 7-13.

# 제 5 장 해수의 물리적 특성

## 제 1 절 서 론

동중국해 동부해역이 대상해역이었던 동중국해 해수 순환연구의 제1단계 연구사업 (1994 - 1996)에 이어 제2단계 연구사업은 동중국해 서부해역을 대상으로 하였다. 동부해역이 쿠로시오해수로부터 고염수 공급과 동해로의 해수공급의 길목이라는 면에 비추어 서부해역은 양자강 및 황해 연안으로부터 유입되는 저염수 공급과 황해와 연결되는 특성으로 뚜렷이 구분이 된다. 따라서 제2단계 연구사업의 목적은 양자강유출수의 유동과 황해난류, 제주난류 및 황해저층냉수의 흐름 또는 확장, 그리고 소위 대만난류의 북향한계 등과 관련된 해수의 특성을 밝히는데 두었다. 특히, 황해와 지리적 경계가 되는 제주도와 양자강 사이 해역은 여러 수괴의 해수가 만나고 황해내부와 동중국해 동북부 해역의 해황에 절대적인 영향을 주기 때문에 중점적인 조사 해역으로 설정하였다. 제2단계 1차년도에는 겨울철(3월)에 광역 현장조사를 실시하였고, 장마가 시작되기 직전인 6월초에 제주도 서쪽해역을 중심으로 집중관측을 수행하였다. 본 장에서는 3월의 광역관측 및 6월의 국지해역 집중관측의 자료분석 및 물리적 현상을 설명하였고 황해와 동중국해 사이 저염수 분포의 변화와 제주도 서쪽해역의 약층구조에 대하여 논의 하였다.

## 제 2 절 관측개요

1차년도에는 겨울철의 해양물리 특성 파악을 위한 수온 및 염분 관측을 1997년 3월 1-10일에 연구선 은누리호를 이용하여 실시하였다. 관측해역은 그림 5-1에 표시한 바와 같이 전체 조사정점 98개로 양자강 하구 동쪽의 동중국해 서부해역, 대한해협 서수도에서 제주해협의 해역, 제주도 동쪽 해역이 설정되었다. 남쪽의 관측선은 대륙붕단까지 계속되어 제1단계의 조사와 연계성을 갖도록 하였다. 1997년 6월 7 - 13일에는 제주도와 양자강 하구 사이의 해역의 58개 조사정점에서 연구선 이어도호를 이용하여 집중관측을 실시하였다(그림 5-2). 특히, 제주도 서쪽의 관측점 E03와 B05를 잇는 선은 ADCP 자료의 조류성분 처리를 위

한 반복 관측을 하였다. 수온 및 염분 측정에는 두 관측 모두 SBE 911 CTD를 사용하였고 관측치 보정은 하지 않고 사용하였다. 6월의 집중관측은 과학기술처 국책연구 사업인 '황해 해수순환과 물질플럭스 연구'와 함께 수행하였고 중국국가해양국 제1해양연구소의 연구진 1명이 참여하였다.

## 제 3 절 1997년 3월 관측 결과

### 가. 수온-염분도(T-S diagram)분석

그림 5-3은 관측 자료 전체를 T-S도상에 나타낸 것이다. 전체적으로 수온은 7 - 21 °C의 변화와 염분은 31.6 - 34.8 psu의 변화폭을 보이고, 모양상의 특징은 고염이면서 수온변화가 많은 부분과 저온이면서 염분변화가 많은 것으로 구분할 수 있다. 34.0 psu 이상 고염수의 경우 20 °C 이상의 고온수는 쿠로시오 상층수에 해당하며 8 °C 이하는 오키나와골 대륙사면에 분포하는 쿠로시오중층수이다. 또한 14 - 17 °C의 범위를 갖는 부분은 대마난류수괴로 제주도도를 감싸고 도는 제주난류수를 포함한다. 저염의 수괴는 제주도와 양자강 사이에 나타나는 혼합수로 전년도 여름에 공급된 담수가 혼합 변질되어 월동한 해수로 보인다. 자세한 것은 수직 및 수평분포와 제 5절에서 설명하였다. 수온과 염분이 다소 동떨어진 해수는 양자강에 가까운 남북방향 관측선상의 남쪽 조사점의 것으로 양자강에서 유출되어 남향하는 담수가 변질된 것의 일부로 판단된다.

### 나. 수직분포

#### (1) 단면 A, C, G (대한해협관측선부터 제주해협-제주도동남관측선) (그림 5-4,5,6)

대한해협 서수도에는 남해연안 가까이 수온전선이 형성되어 있고 대마도쪽으로 수온과 염분이 높아져 겨울형태를 보여준다. 조사점 A4를 중심으로 해저면층에 11 °C 이하, 34.4 psu 이하의 저온저염수가 분포하는데 제1단계사업 중 관측하였던 1995년 4월보다는 저온수핵이 대마도쪽으로 이동되었음을 알 수 있다. 밀도는 수온분포의 구조에 더 가깝게 나타나 예비연구 및 제1단계사업중 12월 (1993년, 1995년)의 경우와 유사하다. 제주도와 대마도 사이 관측단면(단면 C)에서는 수심 100 - 150 m 사이에 해당하는 관측점 C4 - C6에 16 °C 이상, 34.5 psu 이상의 고온고염수가 나타나 대마난류의 경로를 보여준다. 대한해협 저층에 보였던 저염수핵은 나타나지 않아 대한해협 해저

저온수가 동해로부터 유입된 것임을 시사해준다. 제주해협 (조사정점 G1 - G4)에서는 남해안쪽으로 수직적으로 균질한 분포를 보이고 제주도쪽 가까이 이르면 50 m 수심을 경계로 2층 구조를 나타낸다. 조사정점 G4와 SP1(제주도 동단 부근) 사이에서는 2층 구조가 더욱 뚜렷하게 보이는데 이 해역이 제주도 서단쪽이나 황해쪽과는 달리 겨울철 바람에 의한 수직 혼합이 약했던 가능성이 있다. 제주도 동남해역에는 16 °C 이상 34.5 psu 이상의 대만난류수가 폭넓게 분포한다.

(2) 단면 D (제주도 서쪽 남북방향 관측선) (그림 5-7)

제주도 서단해역에서부터 북쪽으로는 전층이 균질한 특징을 보이며 남쪽 조사정점들에서는 수직적인 변화가 크게 나타난다. 15 °C 이상의 고온수는 제주도 남서 해역의 표층과 대륙붕단에 보다 가까운 조사정점 D17의 전층에 분포하고 있다. 34.5 psu 이상의 고염은 제주도 서단 부근인 조사정점 D4 근처에만 나타나 제주난류의 근원이 제주도 남쪽인 조사정점 S13에 연결될 가능성을 제시해준다. 조사정점 D10 - D15에 보이는 상층 저염수들은 제주도와 양자강 사이에 분포한 저염수의 일부가 확장한 것이다.

(3) 단면 F, S (제주도 남서 인접해역 관측선) (그림 5-8,9a,9b)

제주도와 양자강 사이의 관측단면의 수직분포는 조사정점 F1과 F5 사이에 저온·저염수핵이 나타나고 이어 조사정점 F5 - F7과 S5 - S3에 강한 전선이 형성되어 있는 특징을 보인다. 이 저염수는 동중국해 동쪽으로 향할수록 상층에 분포하는 층구조를 나타내고 밀도의 수평변화가 강하기 때문에 이 구조를 유지시키기 위한 해수운동이 있음을 암시해준다. 31.7 psu 이하의 저염수 분포에 대해서는 제5절에서 자세히 설명하였다. 조사정점 S13보다 동쪽에는 16 °C 이상, 34.5 psu 이상의 대만난류수가 폭넓게 분포한다.

(4) 단면 O, P, Q (양자강 동쪽 남북방향 관측선) (그림 5-10,11,12)

단면 O와 P의 경우 대체로 북쪽(황해방향)에서는 수직적으로 균질한 특성을 보이고 남쪽(대륙붕단 방향)에서는 층구조를 보인다. 조사정점 O9와 P8 - P9에 14°C 이상, 34.4 psu 이상의 고온고염수가 보이는데 이는 대만난류수의 일부일 가능성이 높다. 단면 Q는 남쪽으로 강한 전선이 걸쳐있는데 수온분포에서 중층에 역전현상이 많아 수평적 해수혼합이 있음을 나타낸다. 수온역전은 인접한 다른 관측단면에서는 나타나지 않는점에 비추어 단면 Q의 남쪽해역에서는 해수운동의 기작이 틀림을 나타낸다.

(5) 단면 L, M (대륙사면에 이르는 관측선) (그림 5-13,14)

대륙붕단에서 100 m 수심의 대륙붕에 20 °C 이상, 34.6 psu 이상의 쿠로시오수가 'V'자 일부 형태로 분포하여 대륙붕단쪽 쿠로시오수 분포의 겨울형태를 나타낸다. 또한 대륙붕단 부근 쿠로시오 전선역에 발생하는 소용돌이나 관입

등의 결과로 판단되는 소규모의 고염수핵들이 분포한다.

## 다. 수평분포

### (1) 5 m층 (그림 5-15)

가장 두드러진 특징은 제주도 남서해역에 형성되어 있는 열염전선이다. 수온 10 - 14 °C, 염분 32.0 - 34.2 psu의 변화폭을 보이는 전선은 대체로 수심 50 - 75 m의 등심선과 일치하고 있으며 소흑산도 남서쪽까지 계속된 후 제주해협으로 연결된 것으로 보인다. 이는 잘 알려진 겨울철 분포 특성을 나타낸 것으로 제주도쪽으로 쿠로시오계통의 해수와 중국과 한반도쪽으로 연안수계통의 저염수 사이 경계를 표시하는 것이다. 남쪽 관측선의 대륙붕단쪽 수심 100 - 150 m 해역에 16 - 20 °C 범위의 수온전선이 형성되어 있으며 염분은 34.6 psu 이상으로 쿠로시오전선임을 보여준다. 남서쪽 관측점 부근에는 34.0 psu 이하의 저염수가 분포하여 겨울철에 양자강으로부터 나오는 담수가 중국 연안에 바짝 붙어 남쪽으로 흐른다는 과거의 보고(Hu, 1994)를 뒷받침하고 있다. 제주도와 양자강 사이 해역에 나타난 33.0 psu 이하의 저염수핵(10 °C 이하 저온수)은 전년도 여름에 양자강과 황해의 중국쪽 연안으로부터 공급된 담수의 영향을 받은 해수일 것으로 판단된다. 이에 대한 자세한 토의는 제5절에 기술하였다. 밀도는 대체로 수온과 유사한 모양으로 분포하고 있다. 이 점은 황해 남쪽에서의 겨울철 밀도분포가 수온과 염분이 서로 상쇄 역할을 하여 밀도의 수평 변화가 매우 작은 것과는 상반하여 겨울철 해수 혼합 양상이 황해남부-황해중앙부 해역과 동중국해 서부해역에서 다름을 시사해 준다. 밀도장으로부터 혼합 해석은 차기년도 보고서에 설명할 예정이다. 34.5 psu 이상의 고염수가 제주도 남동해역에서 대한해협에 이르는 넓은 해역에 분포하여 대마난류수의 영향권임을 보여준다.

### (2) 30 m 층, 해저면 층 (그림 5-16,17)

대체로 5 m층과 유사한 분포이지만 저온저염수핵이 깊어질수록 표층보다 규모는 작지만 더 뚜렷하게 나타남을 보여준다. 해저면층의 분포는 이러한 저온저염수의 동쪽경계가 대략 50 m의 등심선과 일치함을 나타내어 해수 특성 분포에 지형효과가 강할것임을 암시해준다.



## 제 4 절 1997년 6월 관측 결과

### 가. 수온-염분도(T-S diagram)분석

그림 5-18의 T-S도상에 수괴분포는 크게 제주도에 인접한 해역의 고온고염수, 양자강에 인접한 해역의 고온저염수 및 황해골쪽의 저온수의 수괴로 구분할 수 있다. 또한 32.3 - 32.6 psu 범위의 수괴는 황해골의 축을 중심으로 중국쪽 사면에 분포하는 해수로 보다 동쪽에 분포하는 고염수와 뚜렷하게 구분되는 특징이 있다. 이 수괴와 제주도남쪽의 고온고염수괴 사이에는 수온 및 염분의 수직 변화가 매우 심한 분포상 특징을 나타내어 두 수괴사이에 활발한 혼합작용이 진행중임을 암시해 준다.

### 나. 수직분포

#### (1) 단면 A (제주해협, 제주남부 관측선) (그림 5-19)

제주해협(조사정점 A1 - A5)에서는 중앙부 상층에 19 °C 이상의 고온수핵을 중심으로 제주도쪽으로 보다 깊게 고온수가 분포하고 저층은 14 °C 이하의 저온수가 보인다. 염분은 제주도쪽으로 34.1 psu 이상의 고염수가 있으며 남해안쪽 상층에 저염수가 보인다. 이 저염수는 수평분포도와 비교하면 양자강쪽에서보다 한반도 연안회석수인 것으로 판단된다. 제주도 남쪽(조사정점 A7 - A10, B9)에서는 제주도에서 멀어질수록 수심 약 30 m를 중심으로 약층의 발달이 현저하다.

#### (2) 단면 B, C (제주도 서쪽 남북방향 관측선) (그림 5-20,21)

제주도에 가까운 관측선 B에서는 수온은 수심 10 - 20 m까지 혼합층, 약 20 m 두께의 약층 및 해저면까지 거의 균질한 저층의 3층구조를 보여준다. 제주도에 인접한 조사정점 B5에서는 약층의 형성이 매우 약함을 보인다. 염분은 상층에서 변화가 매우 심한 반면 저층에서는 34.1 psu 이상의 고염수가 남쪽에서 영향을 미치고 있는 분포를 나타낸다. 관측선 B보다 제주도에서 더 떨어진 관측선 C에서는 약층의 강도가 높아진 특징이 있고, 남쪽에 이를수록 약층에서는 수온역전과 염분의 소규모 수직변화가 매우 심하게 나타났다. 이는 15, 30 m수심의 수평분포도에서 수평분포의 구조가 복잡한 것과 마찬가지로 제주도 서쪽해역의 해황이 표층에서는 저염수의 동쪽방향 유입, 저층의 남쪽에서는 고염수의 유입 그리고 저층북쪽에서 황해저층냉수의 남쪽방향 확장 등 여러 방향으로부터 오는 힘이 충돌한 결과로 생각된다.

- (3) 단면 D, E, F (제주도와 양자강 사이 중심해역의 관측선) (그림 5-22,23,24)  
 단면 D의 분포구조는 단면 C에서처럼 강하지는 않지만 약층에서 수온역전과 복잡한 염분변화를 보인다. 저층에서 북쪽으로 갈수록 염분이 높아지는 것은 깊은 골쪽에 제주난류수인 고염수가 분포하기 때문이다. 단면 E와 F에서는 약층에서의 수온역전은 나타나지 않고 표층에 저염수가 두드러지게 분포함을 보인다.
- (4) 단면 G, H (양자강에 가까운 관측선) (그림 5-25,26)  
 양자강에 가까워질수록 수온구조 단순해지고 염분은 수평변화가 강해진다. 특히, 조사정점 G3 및 H4를 중심으로 상층 10 m에 분포한 30 psu 이하의 저염수는 저층의 염분과 많은 차이를 보여 양자강으로부터 새로 유출된 담수가 희석된 것으로 판단된다.
- (5) 제주도-양자강을 잇는 방향의 단면 (그림 5-27,28,29,30,31)  
 북쪽인 단면 GH1 - B1, H2 - B5에서는 조사정점 E1 및 E2의 저층에 황해저층냉수의 일부인 12 °C 이하의 저온수핵이 보이고 제주도쪽으로는 34.1 psu 이상의 고염수가 분포한다. 보다 남쪽의 단면에서는 조사정점 D3, D4, D5의 저층에 저온수핵의 수온이 13°C 이하로 계속 형태를 유지한다. 이들의 수심은 모두 50 - 75 m로 황해저층냉수의 남쪽확장이 지형의 영향을 받는 것임을 암시한다. 수심이 50 m 보다 깊은 관측점의 약층 부근에는 관입으로 보이는 소규모 현상들이 특징적으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 제주도에 보다 가까운 단면(관측점 D3 - B5, D4 - B7, D5 - B9)에서 더욱 두드러지게 발견되는데 이들은 모두 저층 저온수핵이 분포하는 관측점의 동쪽에서만 나타난다.

## 다. 수평분포

### (1) 5 m층 (그림 5-32)

제주도 서쪽 해역에 염분분포는 32.6 - 33.8 psu 범위의 전선이 형성되어 있는 반면 수온은 19 - 21 °C로 태양복사의 영향으로 전 해역이 가열되었음을 보여준다. 양자강 하구쪽에 이를수록 염분이 낮아져 28.0 psu 까지 이르는데 양자강 하구쪽에서 제주도쪽으로 혀모양의 분포를 보여 양자강에서 유출되는 담수가 북동방향으로 이동함을 나타낸다. 이는 이미 알려진바와 같이 여름철의 해황을 나타내는 것이다 (Beardsley et al., 1985; Hu, 1994).

### (2) 15 m, 30 m층 (그림 5-33,34)

15 m 층의 염분분포 양상은 5 m 층과 비슷하지만 저염수핵이 5m층보다 북

동쪽에 위치하고 수온분포의 구조는 복잡하게 나타났다. 17 - 18 °C의 등온선은 겨울철 분포의 형태가 변해가는 과정에 있음을 암시해준다. 30 m 층에 이르면 수온분포의 구조는 더욱 복잡해져 제주도 서쪽에서는 소규모 핵들이 많아지고 13 °C 이하의 저온수가 황해쪽에서 확장하는 듯한 모양을 보여준다. 저염수는 상층보다 더욱 고립된 모양으로 분포한다.

(3) 50 m, 해저면층 (그림 5-35,36)

50 m층에서는 13°C 이상, 34.0 psu 이상의 고온고염수가 제주도 남쪽해역에서부터 서쪽해역을 거쳐 제주해협에 분포하여 제주난류의 흐름을 나타내준다. 해저면층의 분포는 저염수핵이 고립된 형태로 3월의 저염수핵보다 서쪽에 위치한다. 저염수핵의 염분값은 3월보다 2 psu 낮기 때문에 새로 유입된 저염수로 판단된다. 양자강유출수의 거동과 관련하여 제5절에서 토의하였다.

## 제 5 절 해황 분석

### 가. 동중국해 서부해역의 저염수 분포 변화

1차년도에 관측 자료는 제주도와 양자강 사이의 저염수 거동에 대하여 몇가지 실마리를 제공해준다. 3월 자료에서 제주도와 양자강 사이의 50 m 수심보다 얇은 곳에 분포하는 33.0 psu 이하의 저염수는 그 직접적인 기원이 겨울철에 양자강에서 바로 유출된 것은 아닌 것으로 판단된다. 3월 조사 직전 2월 말경에 실시한 한중 황해 공동조사 자료와 함께 비교하여 보면 33.3 psu의 동쪽 등염분선은 산둥반도쪽으로 계속되고 서쪽 등염분선은 양자강 하구보다 훨씬 북쪽으로 향하고 있음을 알 수 있다. 또한 일반적으로 겨울철에 양자강 담수가 중국연안을 따라 남쪽으로 유출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 저염수는 겨울철에 황해 서쪽 연안 가까에서 남향한 것이거나 전년도 여름철에 양자강과 황해서북부에서 공급된 담수의 영향을 받은 해수가 월동하면서 더욱 희석된 것으로 생각된다. Lee et al. (1997a)은 여름철에 황해남부에 공급된 저염수가 1996년 9월에는 황해남부 전역에 분포하다가 10월이 되면 황해 서남부로 이동함을 관측자료로부터 보여준 바 있고, 이는 저염수피가 제주도 서쪽해역으로부터 점차 강해지는 고온고염수 세력에 밀리는 것으로 해석을 하였다. 이와 관련시켜 1997년도 2월의 한중 황해 공동조사 자료와 본연구의 3월 자료를 연속적으로 비교해보면 제주도와 양자강 사이의 저염수피는 1996년 10월 황해남서해역에 분포하던 저염수피가 강화된 황해난류수의 세력과 약해진 양자강 유출수의 세력의 틈을 따라 이동한 것

으로 보는 해수순환의 해석이 가능하다. 또한 황하의 유출량이 점점 감소하고 있고 발해만이 해빙기가 아니기 때문에 3월에 분포하는 제주도과 양자강 사이의 저염수괴는 전년도 여름에 공급된 저염수가 월동한 것으로 보는 것이 더 타당하다.

6월에는 3월 저염수괴의 염분값 31.8 - 33.0 psu의 분포 범위가 제주도 및 소흑산도 방향으로 확장 이동된 것으로 나타난다. 3월 저염수괴 동쪽에 형성된 강한 열염전선도 제주도를 끼고 제주해협쪽으로 바로 연결되는 형태로 바뀌었다(수온은 해수면 가열 때문에 15 m 수평분포 참조). 양자강 가까운 조사정점들에서는 27.0 psu 정도의 저염수가 제주도쪽으로 확장하는 형태로 분포하여 여름철 우기에 증가한 양자강유출수가 제주도와 양자강 사이에 있던 해수들을 동쪽으로 미는 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

이상의 설명을 바탕으로하여 황해남부와 동중국해 사이의 저염수괴의 연변화는 다음과 같이 요약이 가능하다.

- (1) 여름 우기에 증가된 담수가 6 - 8월에 양자강을 통하여 유출된 후 제주도 쪽으로 이동한다.
- (2) Lee et al. (1997a)이 제시한 바와 같이 양자강 유출수는 제주해협을 통과하며 이때 황해 북서쪽에서 공급되는 저염수가 계속 남하하는 것을 가로막는 역할을 하거나 혼합되어 황해 남부해역이 저염화 된다.
- (3) 10월이 되면 제주도 서쪽해역에서 북쪽으로 향하는 고온고염수의 세력이 강해지면서 황해남부의 저염수괴는 황해남서쪽으로 밀리게 된다.
- (4) 겨울철 고온고염수가 제주도 서쪽에서 산동반도 방향으로 공급되고 (즉, 황해 난류수), 양자강 유출수는 양이 작아지면서 중국연안을 따라 남쪽으로 흐르게 되어 힘의 공백을 메우는 쪽으로(즉, 제주도와 양자강 사이) 저염수괴가 분포한다.
- (5) 봄이 지나면서 황해 쪽으로 형성되었던 혀모양의 열염전선은 제주도쪽으로 후퇴를 하게 된다.
- (6) 6월 양자강으로부터 담수유입이 증가하고 이 유출수는 제주도 방향으로 압력을 가하여 월동을 한 저염수를 제주도쪽으로 미는 역할을 한다.

6월 이전에 제주해협에서 관측되는 저염수(김 등, 1991; Chang et al., 1995)는 한반도 연안수를 제외하고 전년도에 중국쪽에서 공급된 저염수가 월동한 후 흘러들어온 것으로 볼 수 있다. 여기에서 제주도 남쪽에서 공급되는 고온고염수의 세력이 가을부터 강해지고 봄이 지나면 약해지는 것은 계절풍의 영향으로 볼 수 있다. Lee et al. (1997b)은 동중국해 북부해역의 열염전선이 기계적인 계절변동성이 있음을 제시하였고, 이의 요인으로 겨울철 강한 북풍계열의 바람과 여름철 담수유입의 증가라고 설명한 바가 있는데 6월의 관측 자료는 이를 잘 뒷받침 해

준다.

## 나. 제주도 서쪽 해역의 약층구조

6월 관측 자료에서 특이한 현상은 수평 및 수직분포에서 설명한 바와 같이 제주도 부근 해역에서 약층 깊이에 형성된 수온 역전 등의 소규모 변화 분포다. 이들의 분포상 특징은 황해저층냉수인 저온수핵이 위치하는 곳의 동쪽에서만 나타난다는 것과 제주도 북서쪽에서 소흑산도쪽으로 멀어질수록 강도가 약하고 남쪽으로 내려올수록 더욱 복잡해진다는 점이다. 소규모 현상들은 수직적으로 대략 5 - 10 m 크기의 특성을 보여준다. 이러한 현상들은 전선역에서 흔히 발견되는 것으로 제주도 남서쪽에서 공급되는 고온고염수와 제주도 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 표층저염수 사이에 형성된 전선상에서 일어나는 두 수괴 사이의 혼합과정으로 볼 수 있다. 수온과 염분의 수직분포의 모양으로 보아 등밀도면을 따르는 관입의 특성이 강하다. 이 해역에서의 흐름이 조류의 성분도 강하므로 (해류의 크기를 고려한) 소규모 현상의 과정연구에 적절한 경우라 할 수 있다.

## 제 6 절 맺음말

동중국해 순환연구 제 2단계 1차년도에는 3월과 6월에 현장관측이 수행되어 제주도와 양자강 사이해역의 늦겨울철 해황과 초여름 해황에 대한 여러 수괴들의 명확한 분포를 나타내었다. 특히, 이 해역에서 저염수괴의 연변화를 해석할 수 있는 실마리를 제공해주는 결과들을 주었다. 즉, 여름철에 양자강과 황해북부에서 공급된 담수의 영향을 받은 저염수는 제주도쪽을 지나 동쪽으로 빠져나가는데 상당 부분은 제주도와 양자강 사이의 해역에서 월동을 한후 다음해 여름이 시작되면서 제주도 인접해역을 통과하는 것으로 나타났다. 이는 일부 저염수의 황해남부 체류기간이 6-10개월임을 뜻하는 것으로 대륙기원의 물질이 동중국해나 동해로 이동하는데 걸리는 시간 상한선을 제시하는 중요한 결과라 할 수 있다. 또한, 이 저염수의 염분 변화로부터 혼합강도를 유추할 수 있는바 보다 정확한 해석을 위하여 3차년도의 자료까지 분석한 후에 계산할 예정이다. 6월에 조사에서는 약층에서 소규모 변화들이 강함이 관측되어 저염수의 혼합과정과 혼합해역에 대한 중요한 단서를 제공해주었다. 두 수괴사이에 혼합에서 국지적 난류혼합에 의한 혼합층 형성보다는 관입의 효과가 더 많은 것으로 나타나 앞으로 혼합과 관련된 과정연구의 방향을 제시해준다.

## 참고문헌

- 김구, 노홍길, 이상호, 1991, 하계 제주도 주변 해역의 수괴 및 해수순환, 한국해양학회지, 26, 262-277.
- 이홍재 등, 1997, 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환, 한국해양연구소 보고서, BSPN 00319-964-1, 563pp.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner and G.A. Cannon, 1985 Discharge of the Changjiang (Yangtz River) into the East China Sea, Cont. Shelf Res., 4, 57-76.
- Chang, K.-I., K. Kim, S.W. Lee and T.B. Sim, 1995 Hydrography and sub-tidal current on the Cheju Strait in spring, 1983, J. Korean Soc. Oceanogr., 30, 203-215.
- Hu, D.-X., 1994, Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea, In Oceanology of China Seas. Vol. 1. Eds. Zhou D. et al., 27-38.
- Lee, J.H., H.-J. Lie and C.-H. Cho, 1997a, Frontal structure in the northern East China Sea, 9th PAMS & JECSS Workshop, 22-24 Sept., 1997, Taipei, Taiwan.
- Lee, J.H., H.-J. Lie, Y. Tang and E. Zou, 1997b, Distribution of low salinity waters in the southern Yellow Sea in the late warm season, Fall meeting of the Korean Soc. of Oceanogr., 31 Oct.-1 Nov. 1997, Inha Univ.

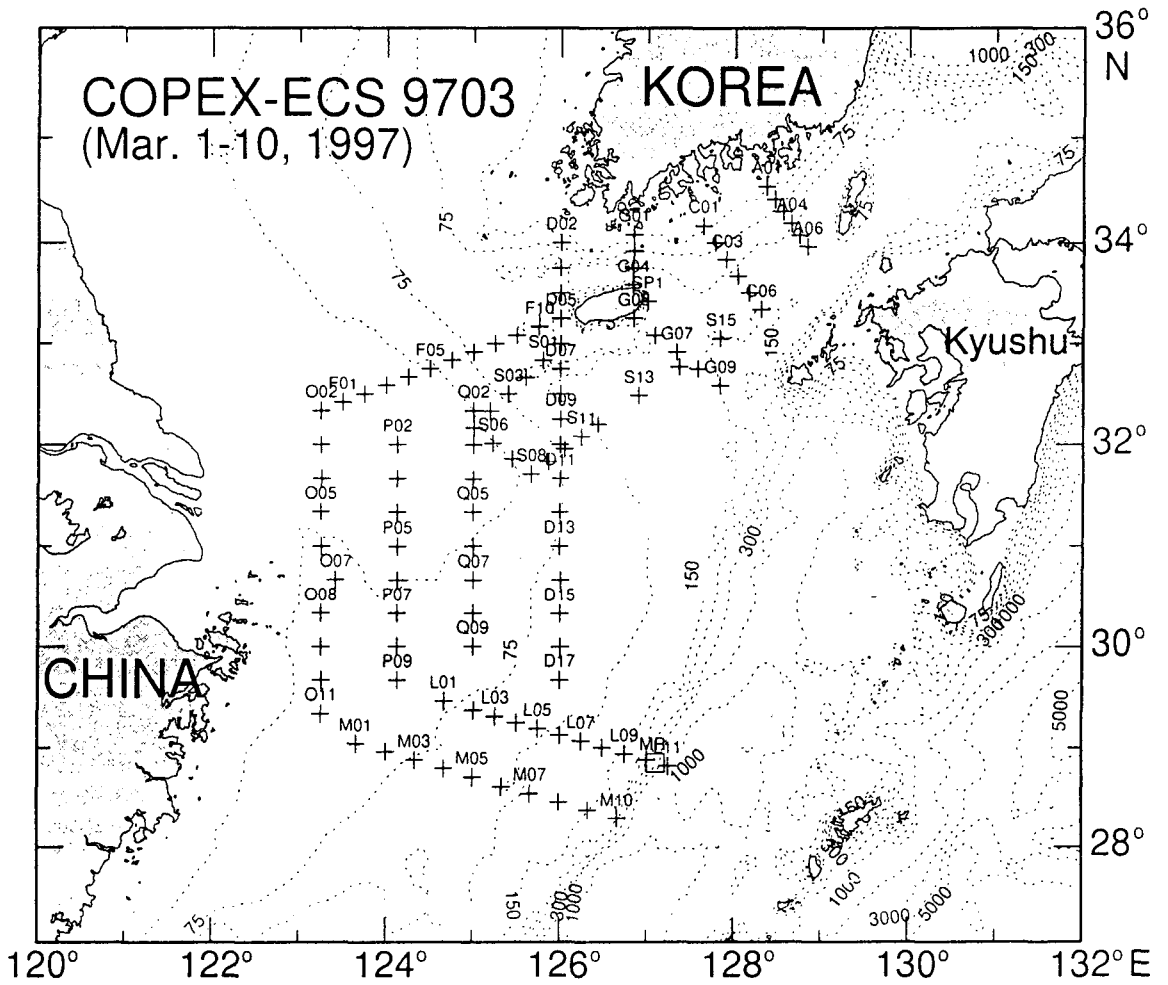


Fig. 5-1. Study area showing observation stations in March 1997.

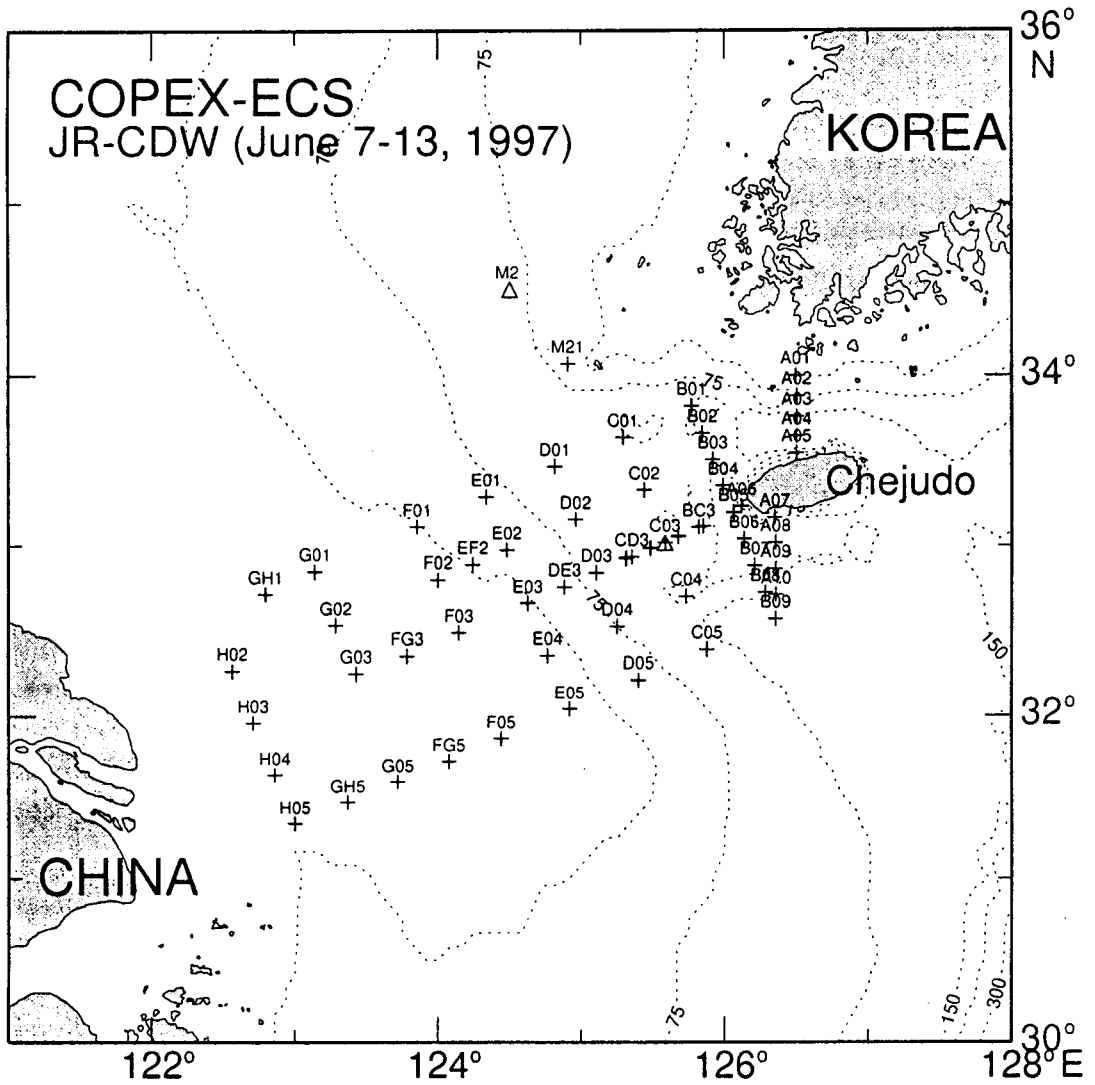


Fig. 5-2. Study area showing observation stations in June 1997.



# COPEX-ECS, CDW9706

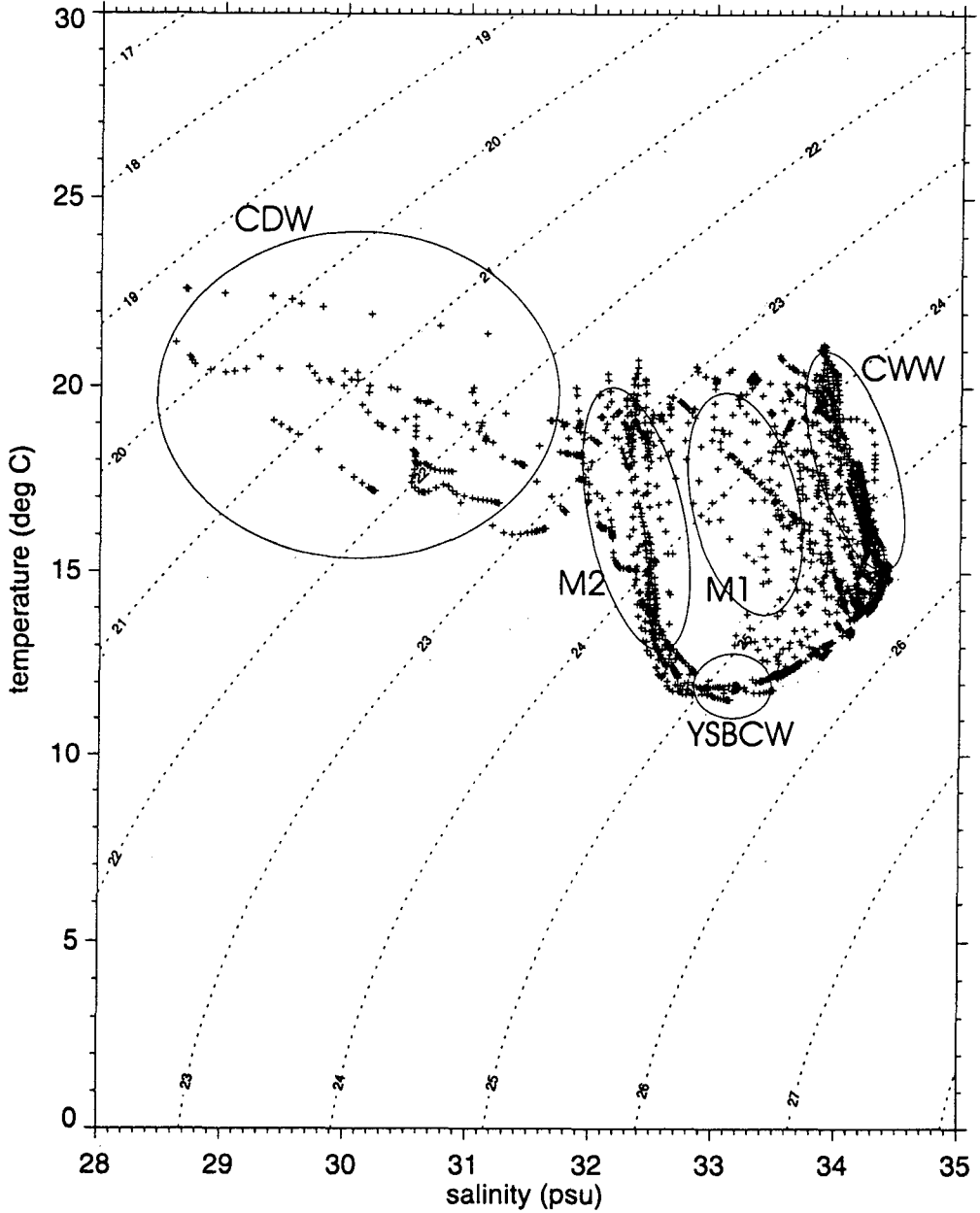
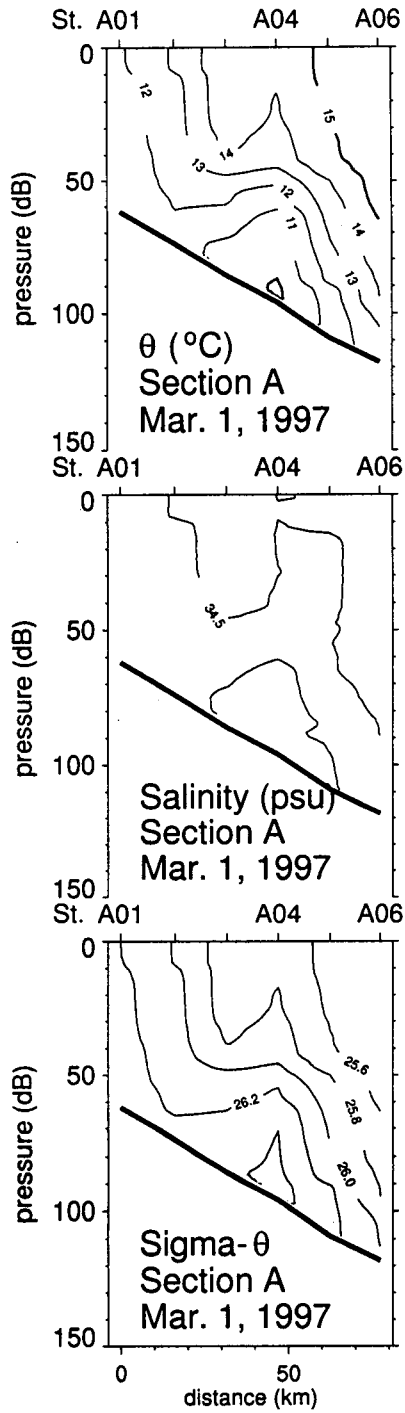


Fig. 5-3. T-S diagram of data observed in March 1997.



**Fig. 5-4.** Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section A in March 1997.

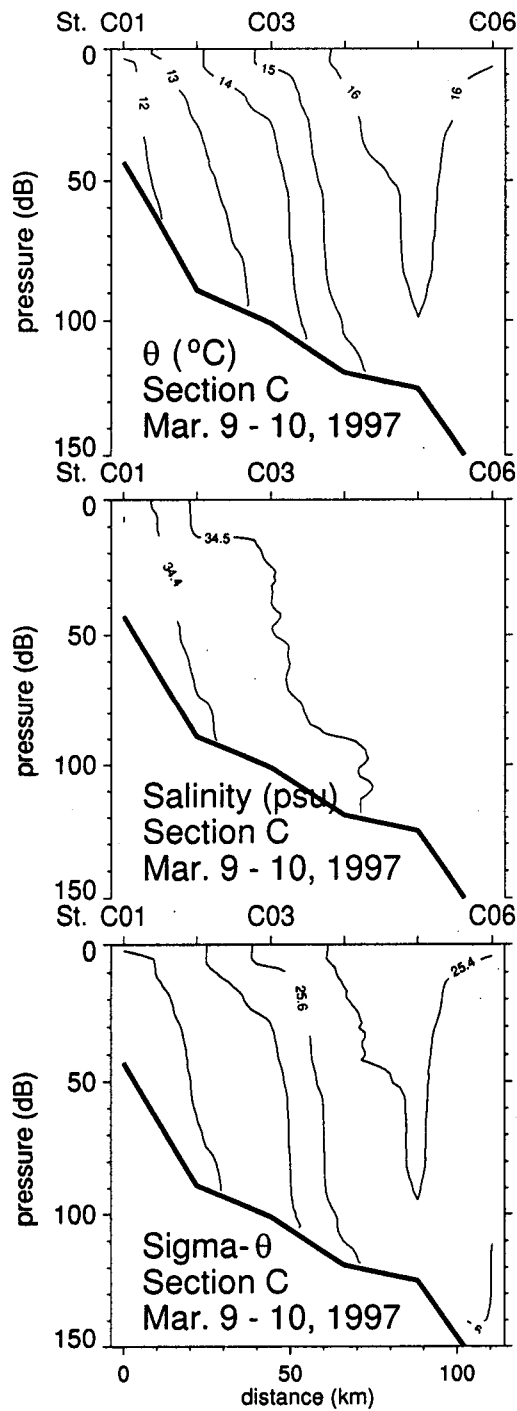


Fig. 5-5. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section C in March 1997.

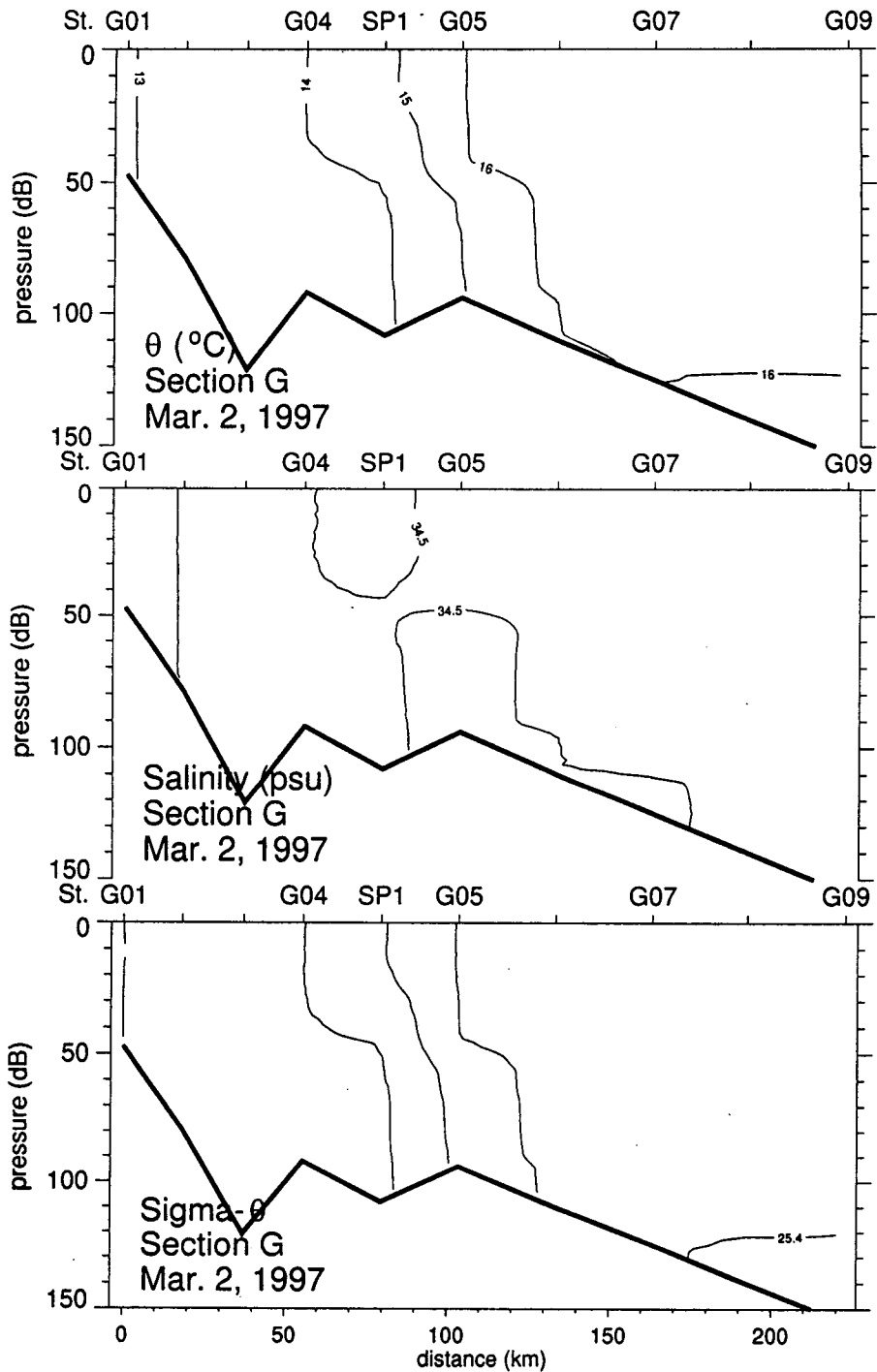


Fig. 5-6. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section G in March 1997.

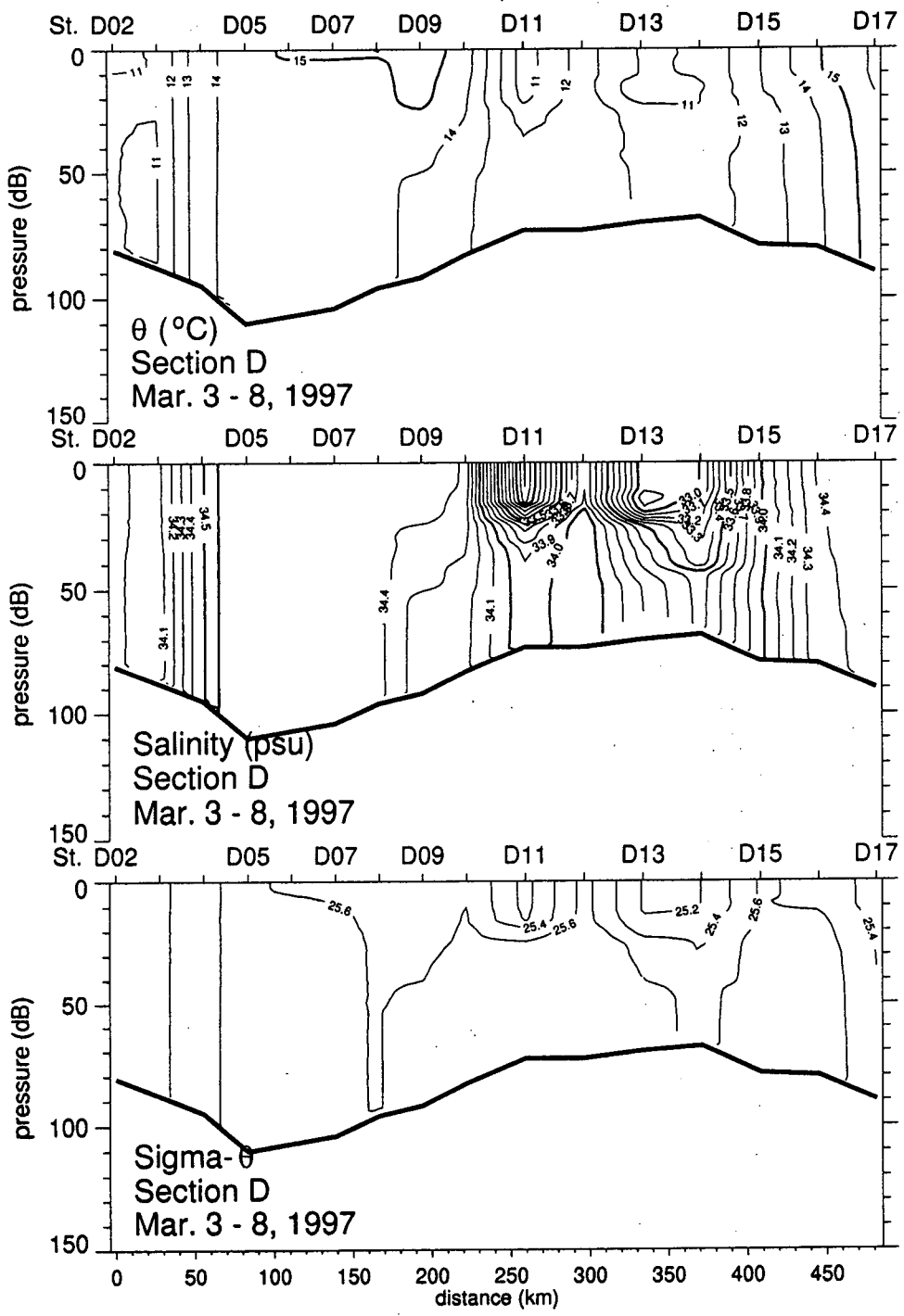


Fig. 5-7. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section D in March 1997.

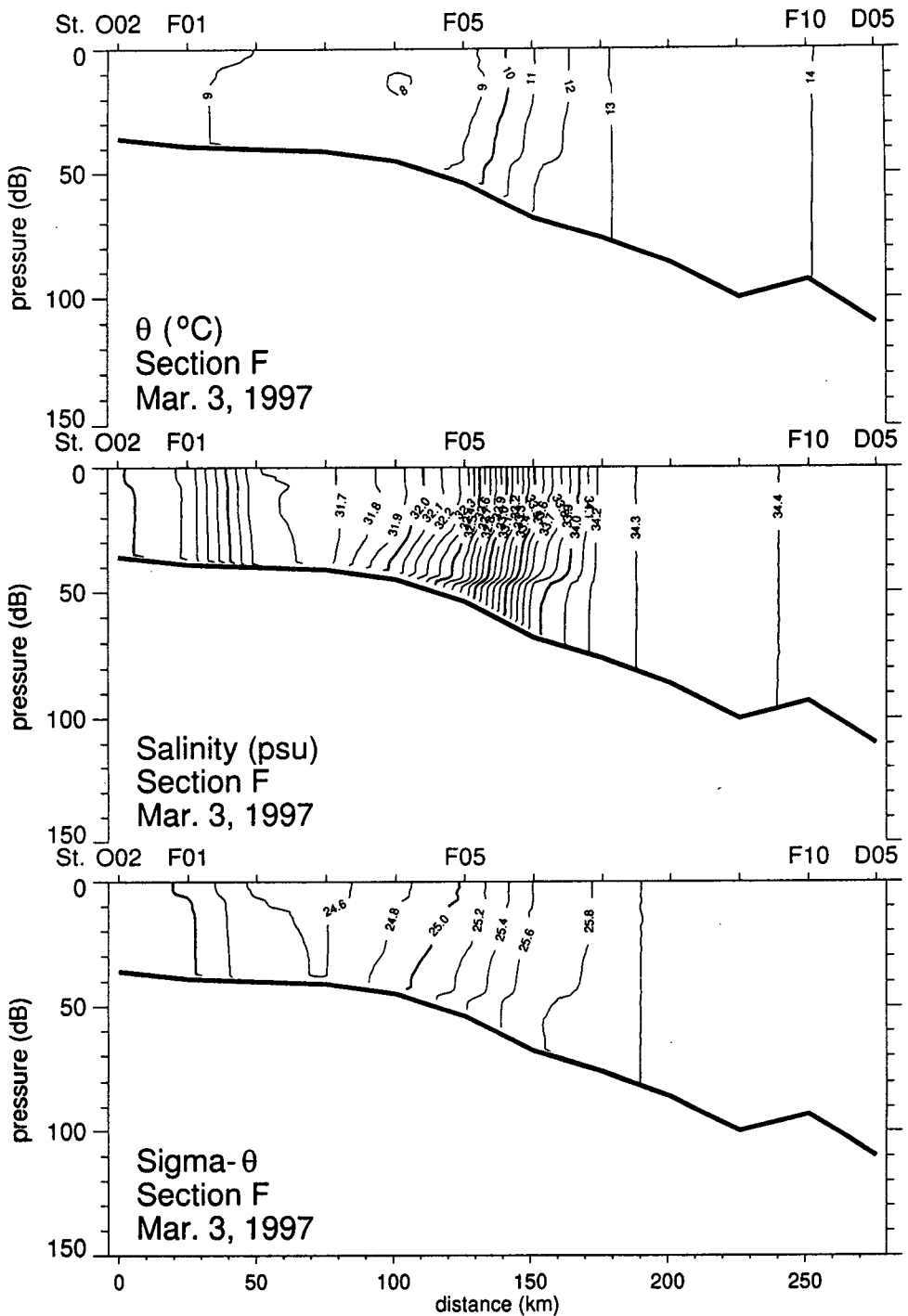


Fig. 5-8. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section F in March 1997.

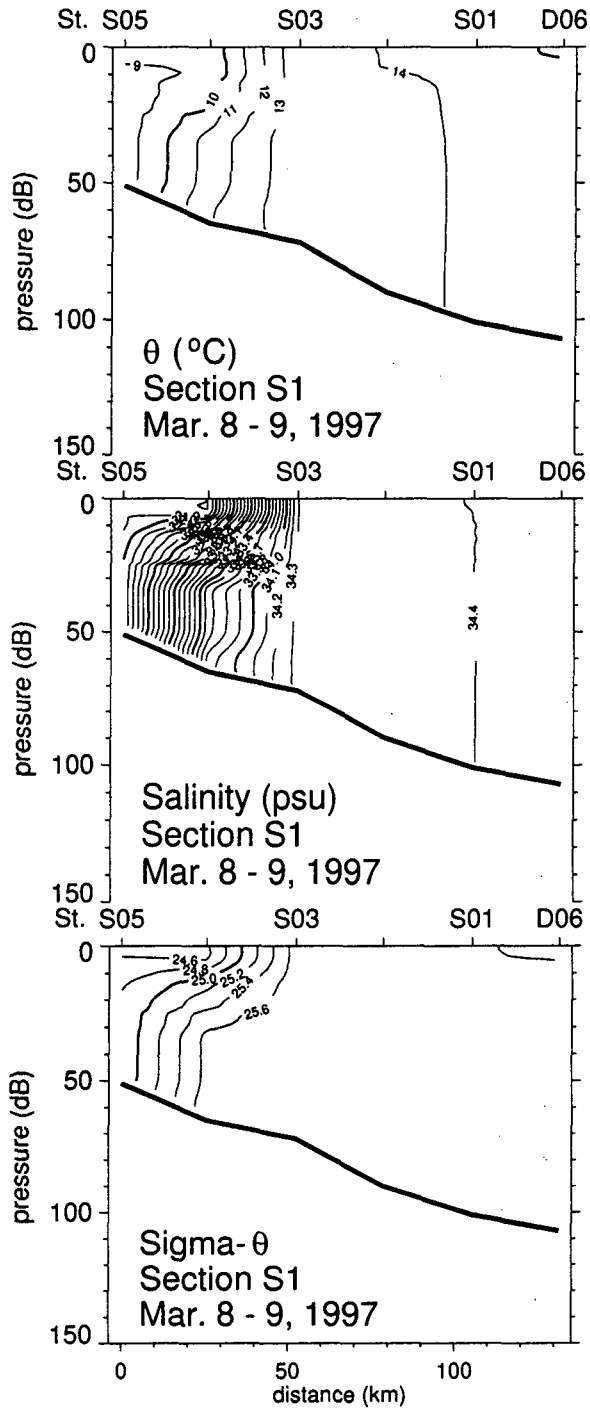


Fig. 5-9a. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section S in March 1997.

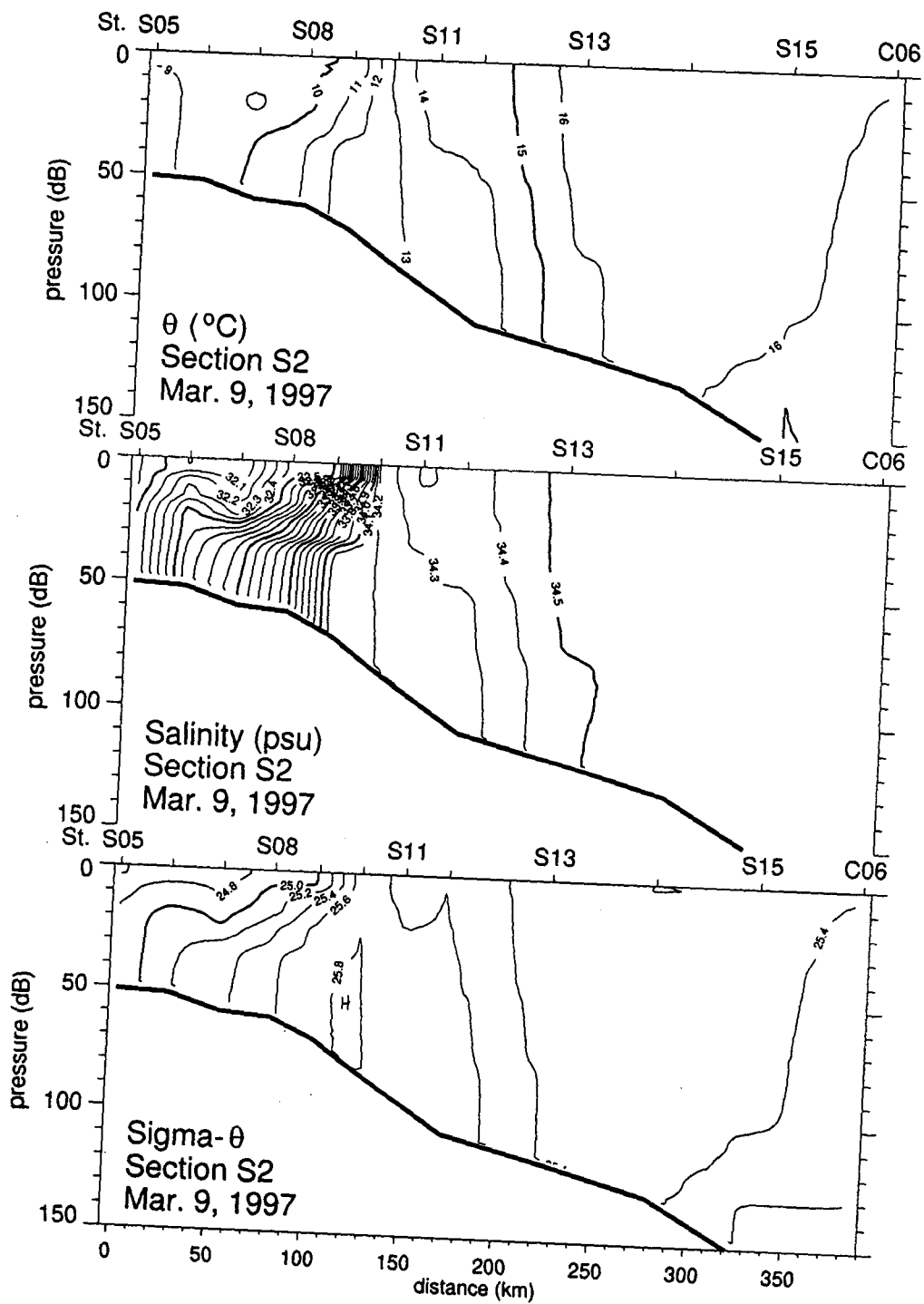


Fig. 5-9b. Continued.



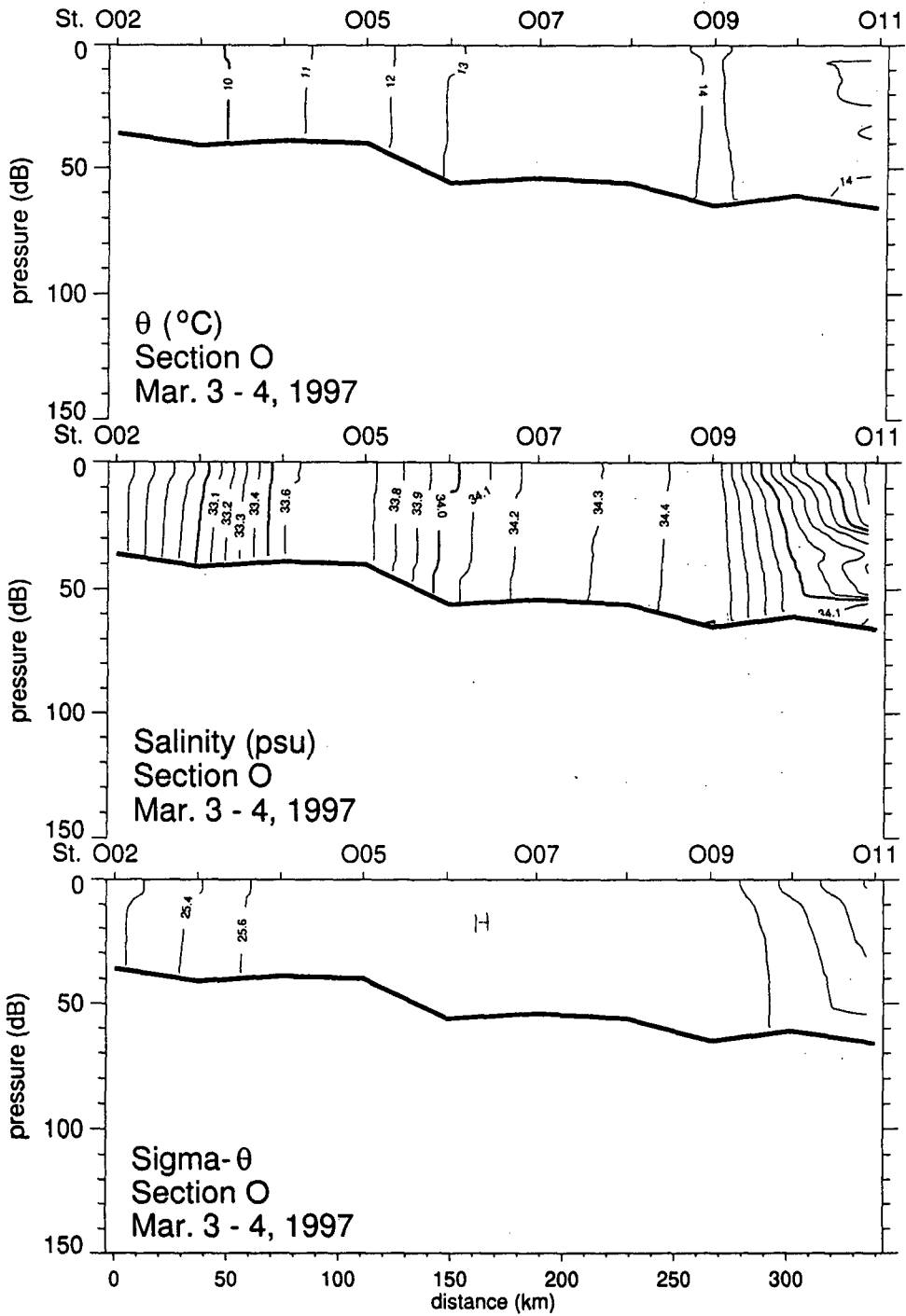


Fig. 5-10. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section O in March 1997.



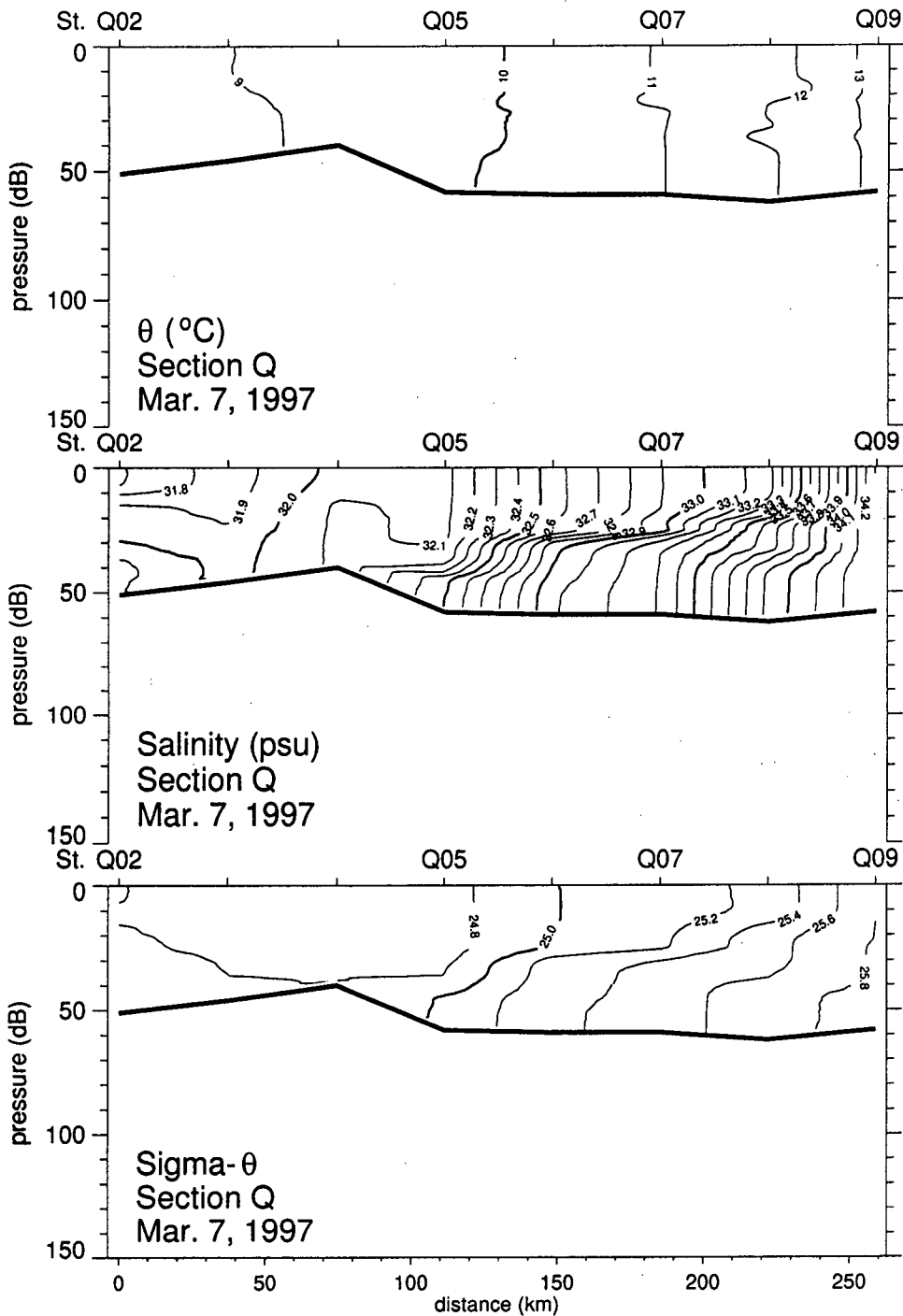


Fig. 5-12. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section Q in March 1997.

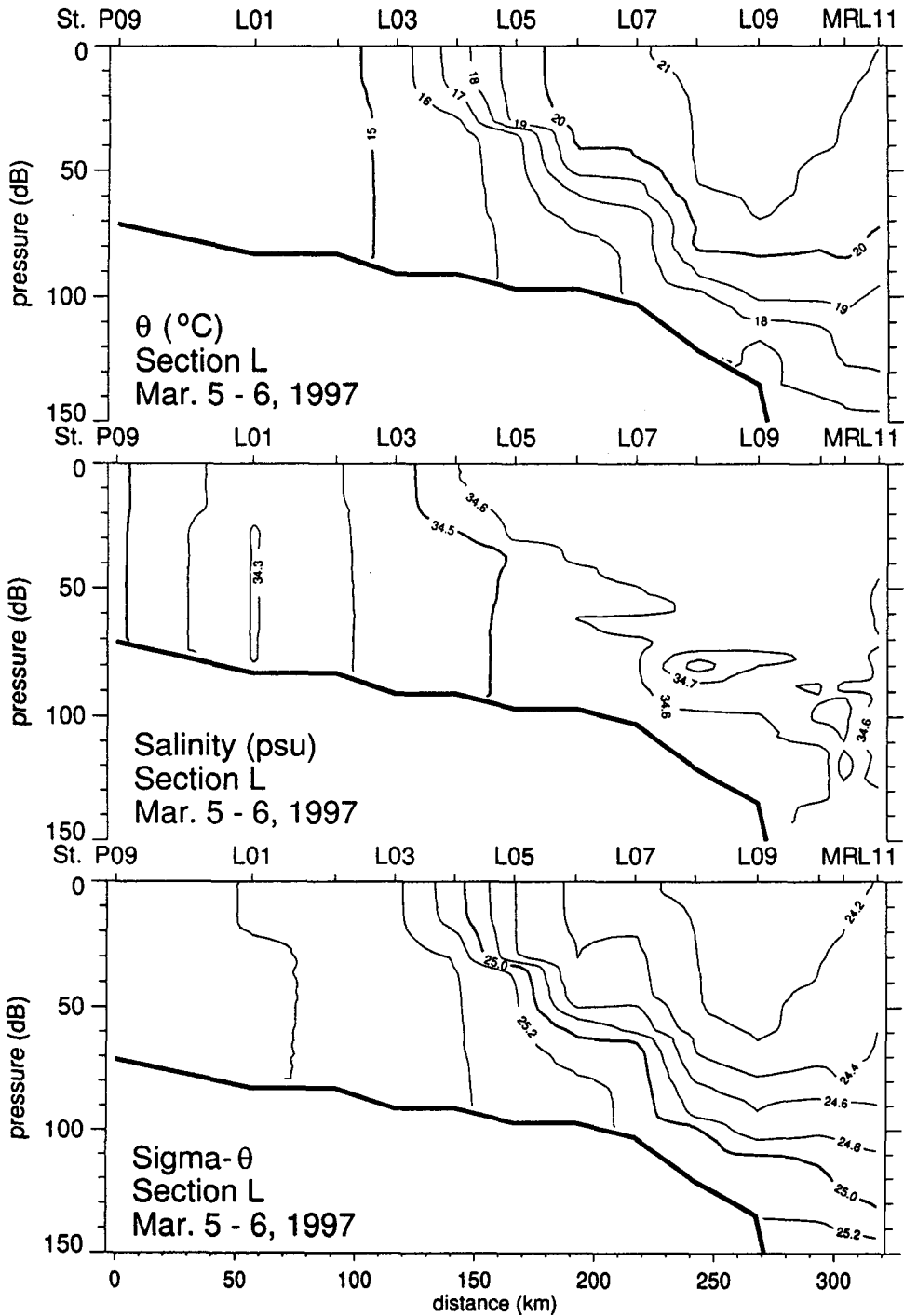


Fig. 5-13. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section L in March 1997.

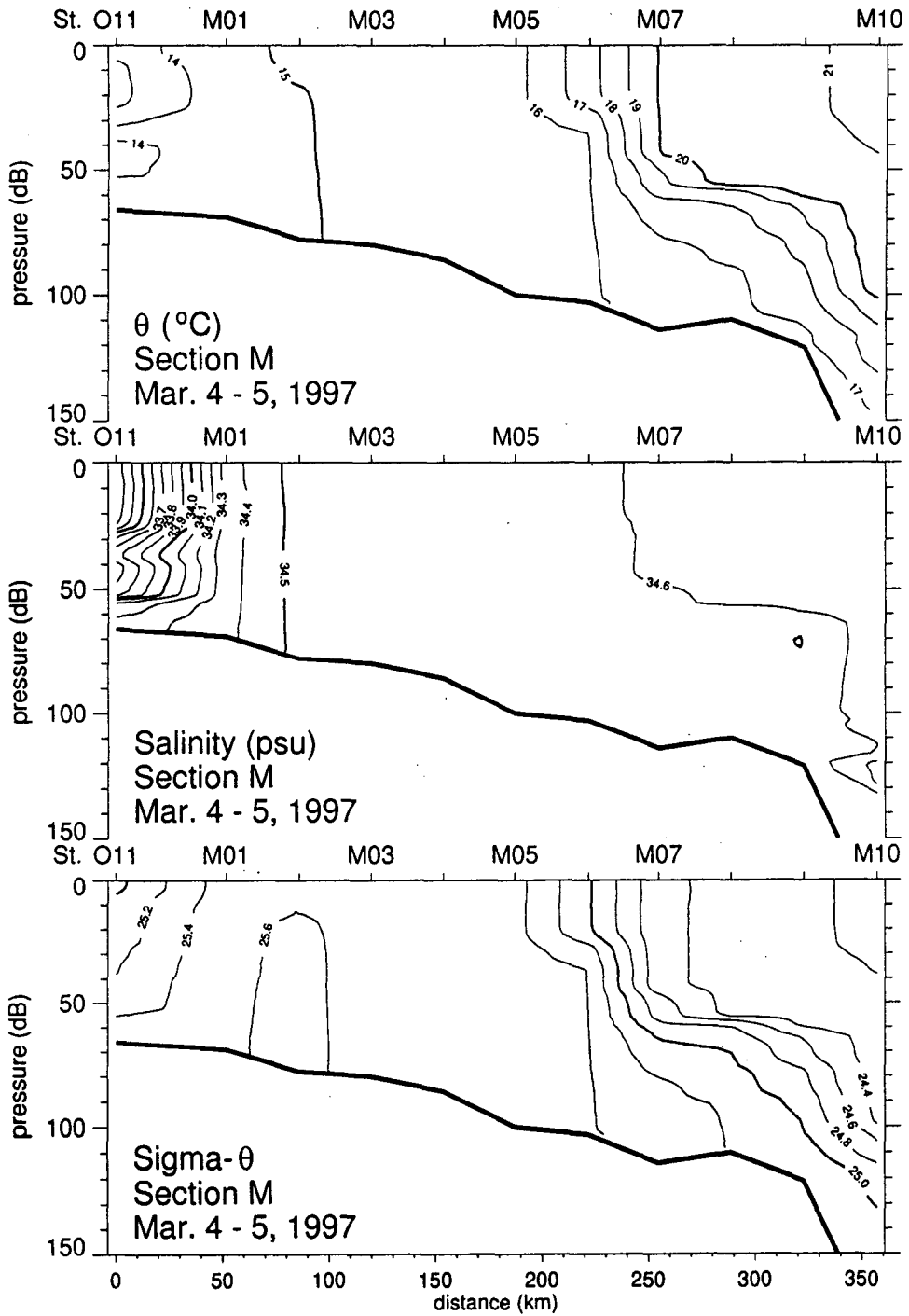


Fig. 5-14. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section M in March 1997.

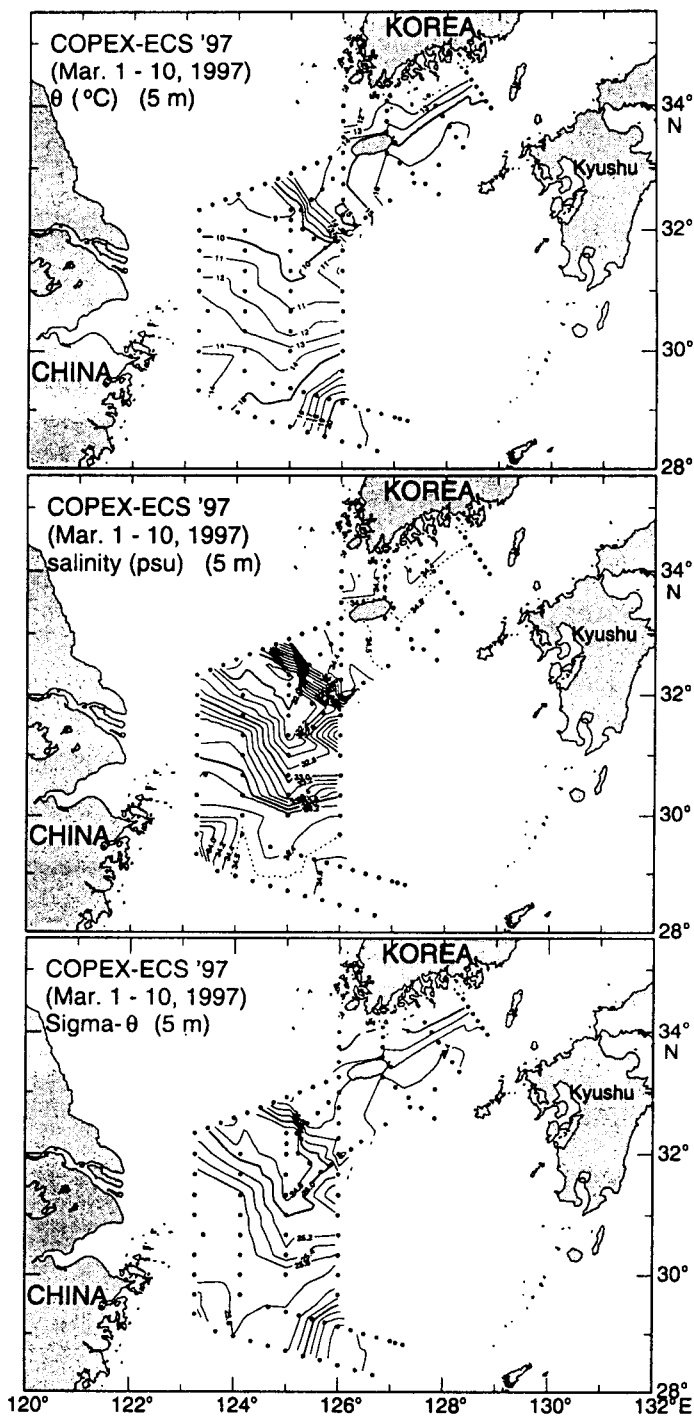


Fig. 5-15. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 5m depth in March 1997.

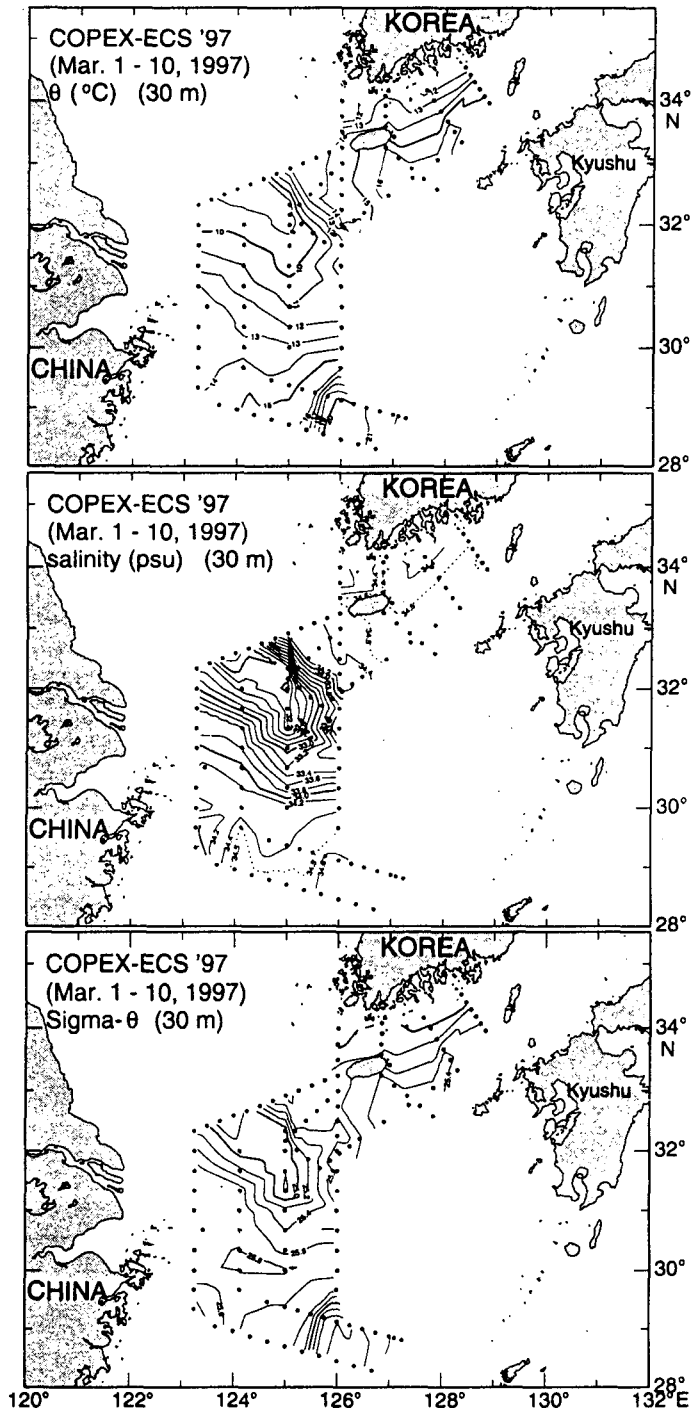


Fig. 5-16. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 30m depth in March 1997.

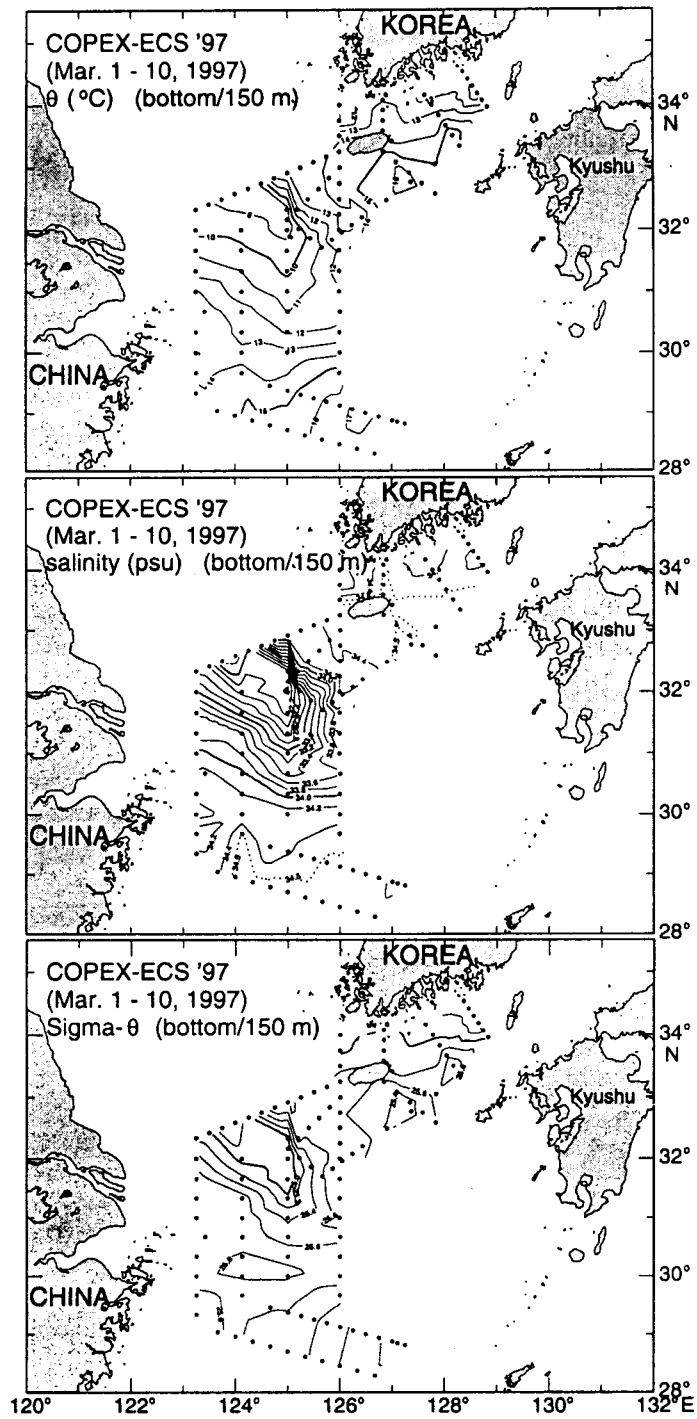


Fig. 5-17. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at the bottom in March 1997.



# COPEX-ECS 9703

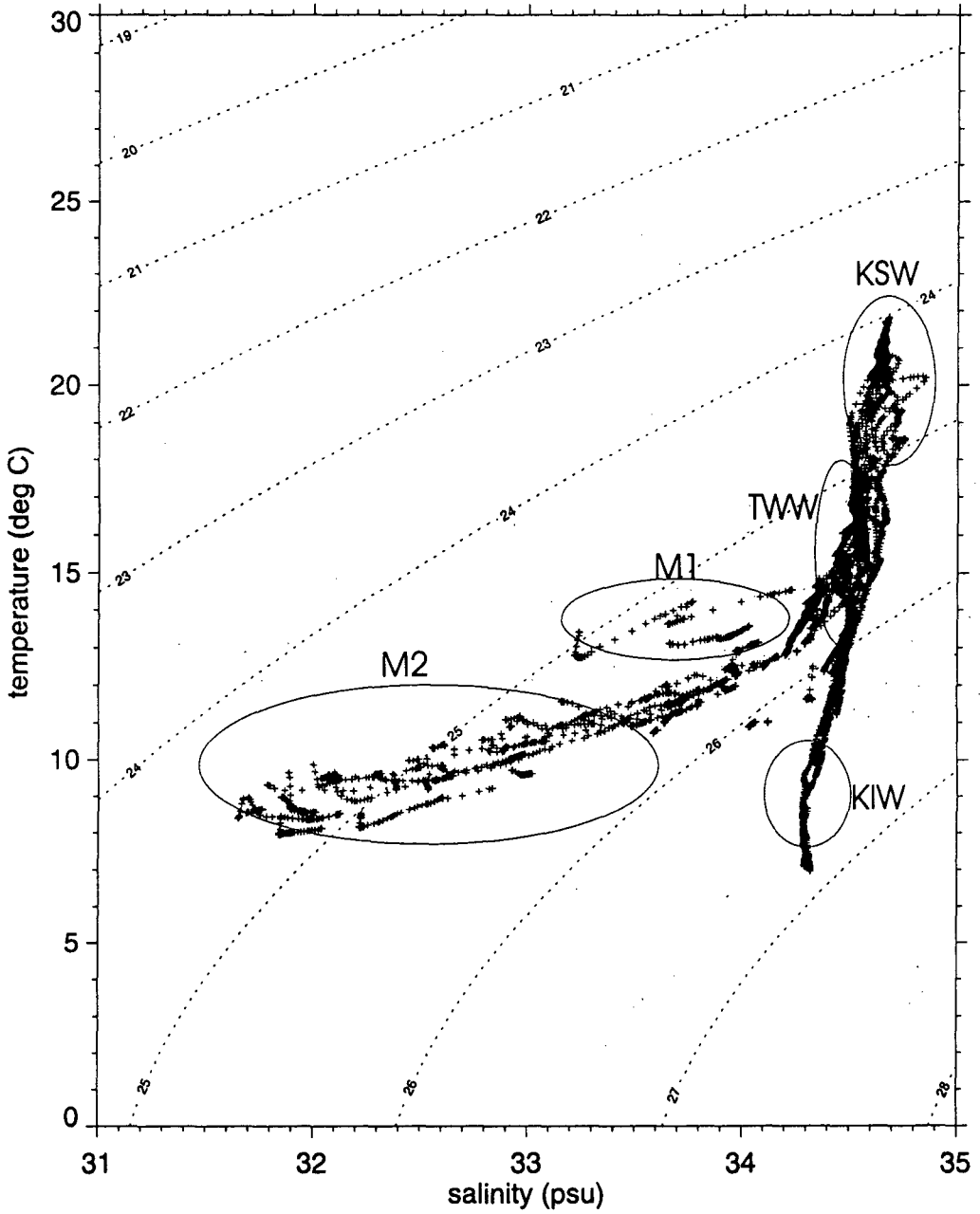


Fig. 5-18. T-S diagram of data observed in June 1997.

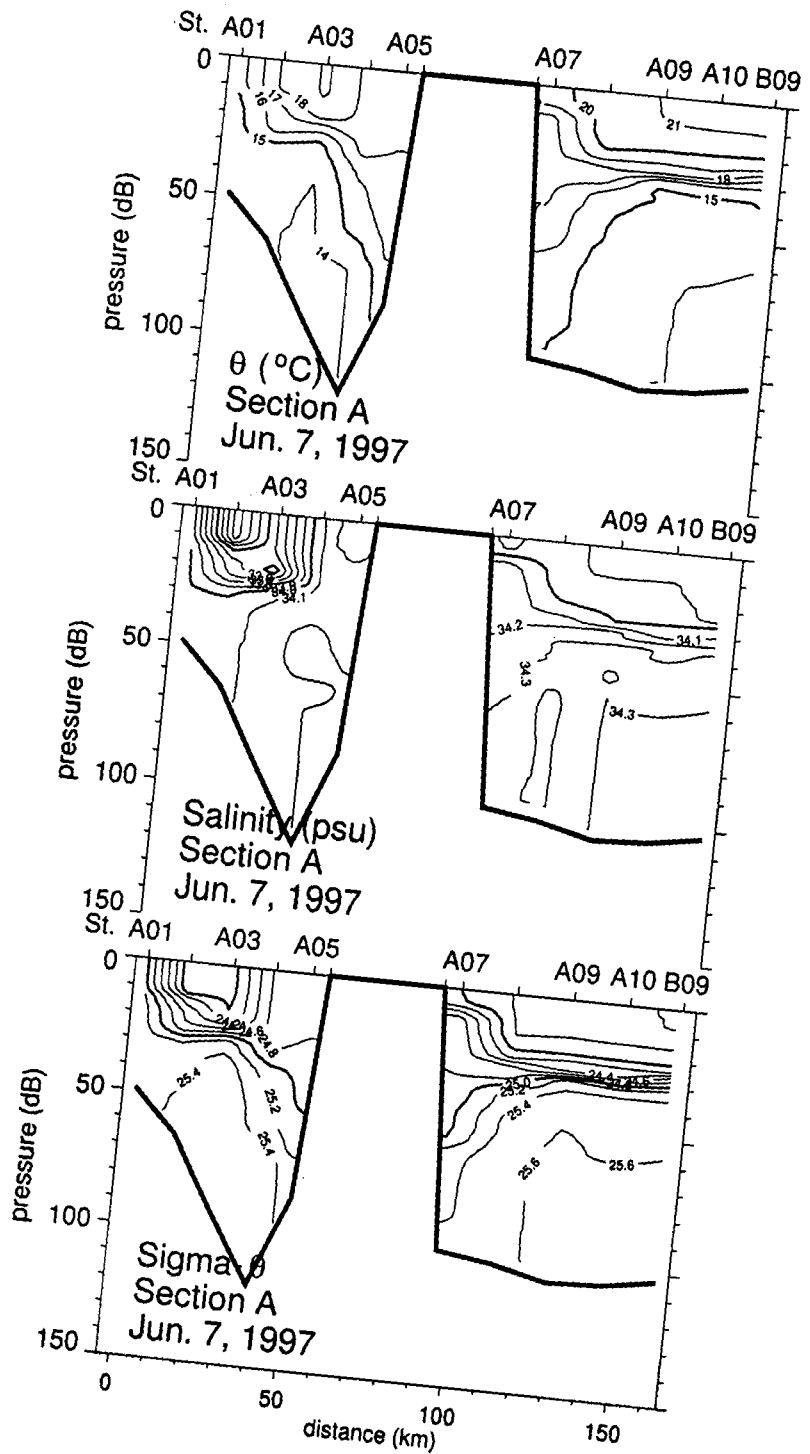


Fig. 5-19. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section A in June 1997.

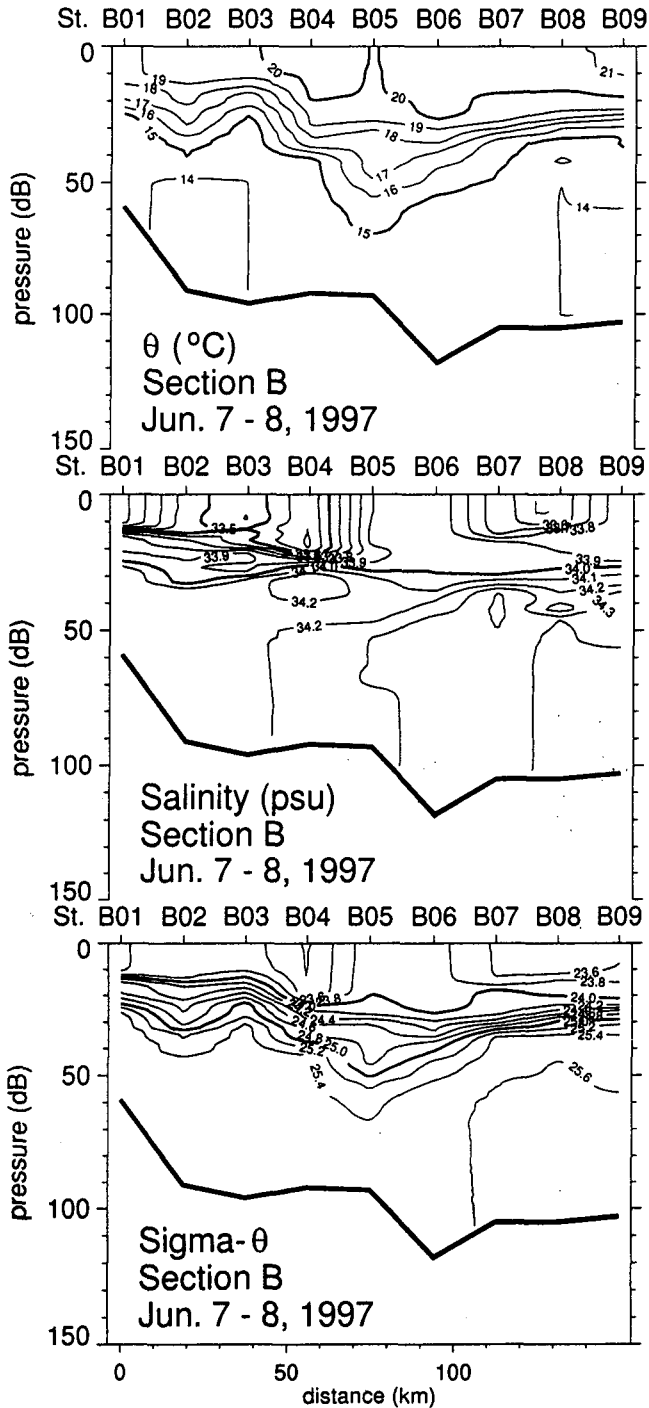


Fig. 5-20. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section B in June 1997.

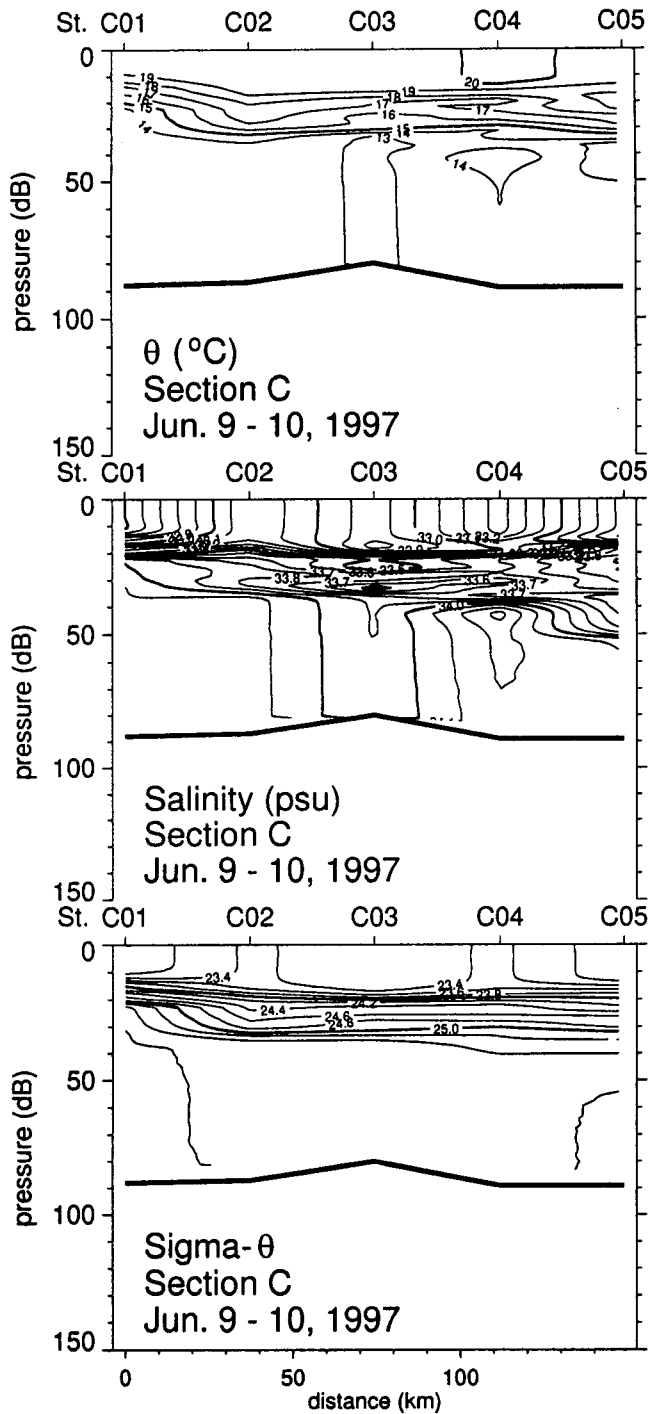


Fig. 5-21. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section C in June 1997.

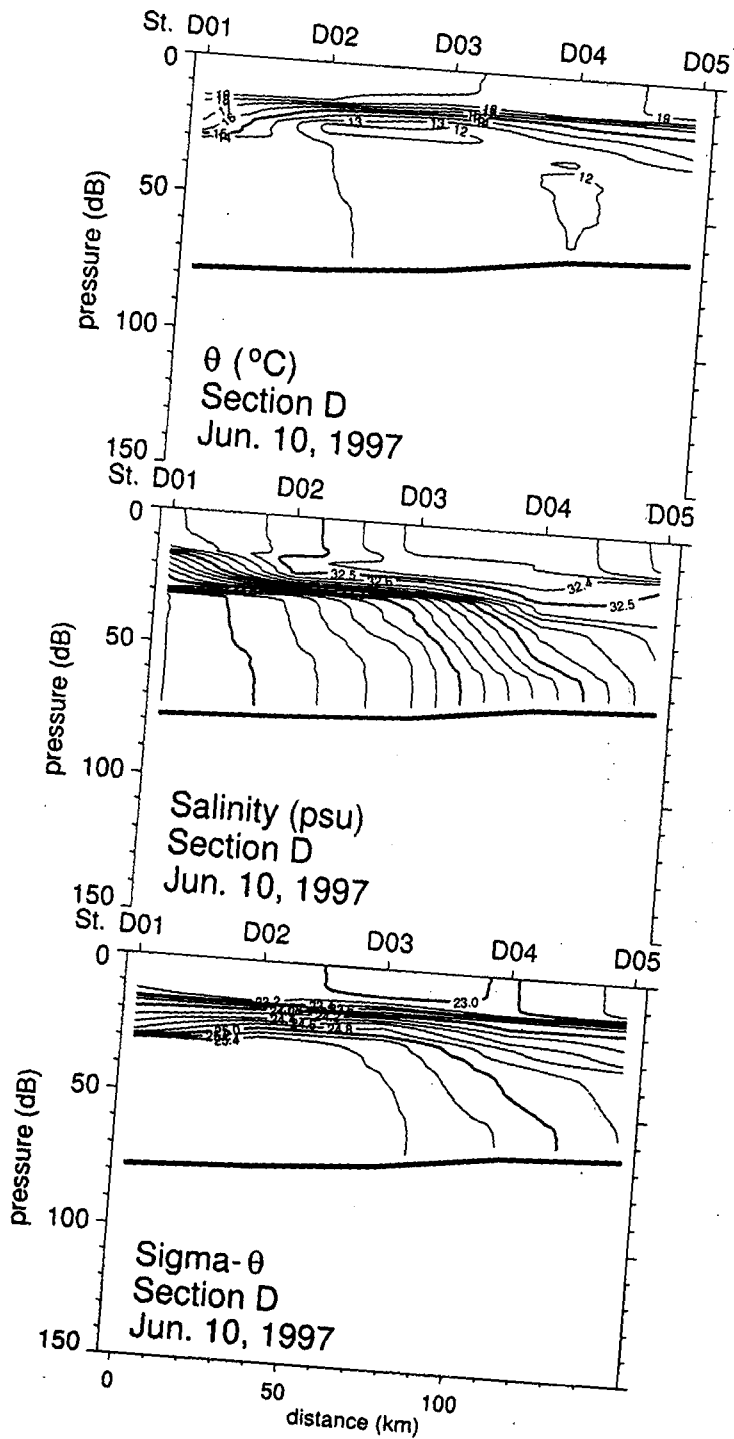


Fig. 5-22. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section D in June 1997.

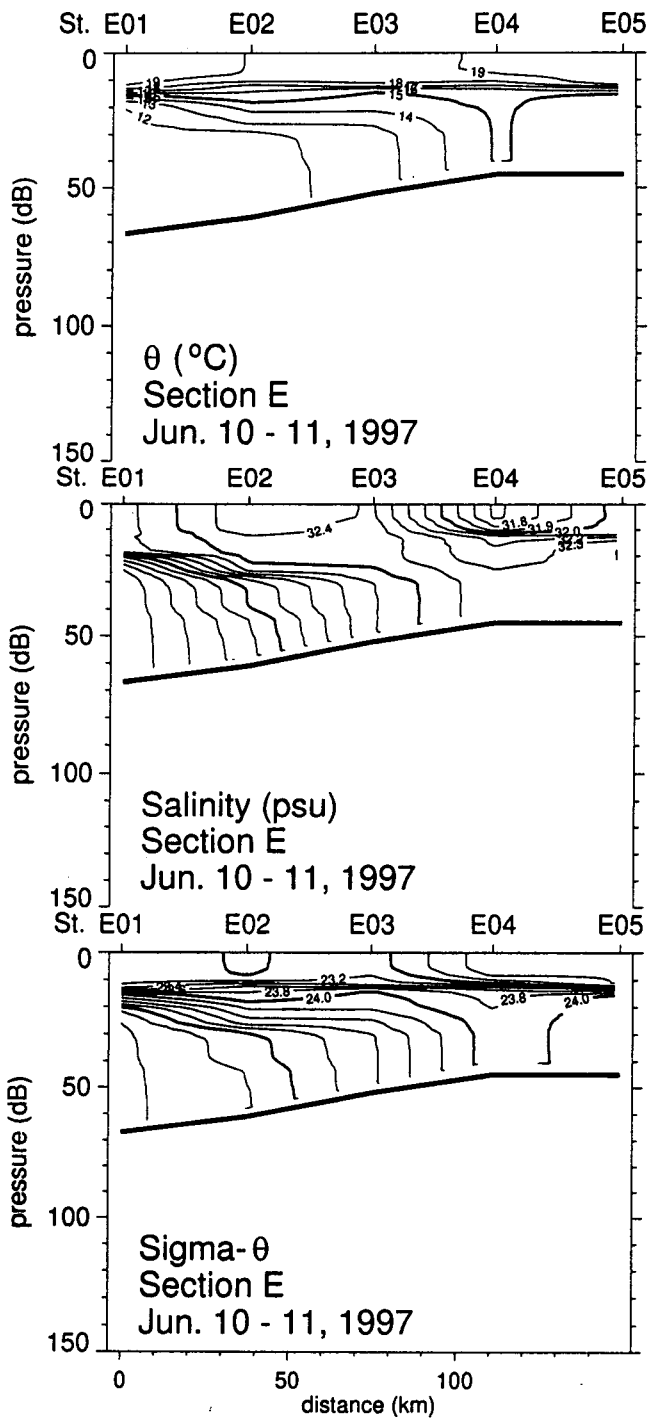


Fig. 5-23. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section E in June 1997.

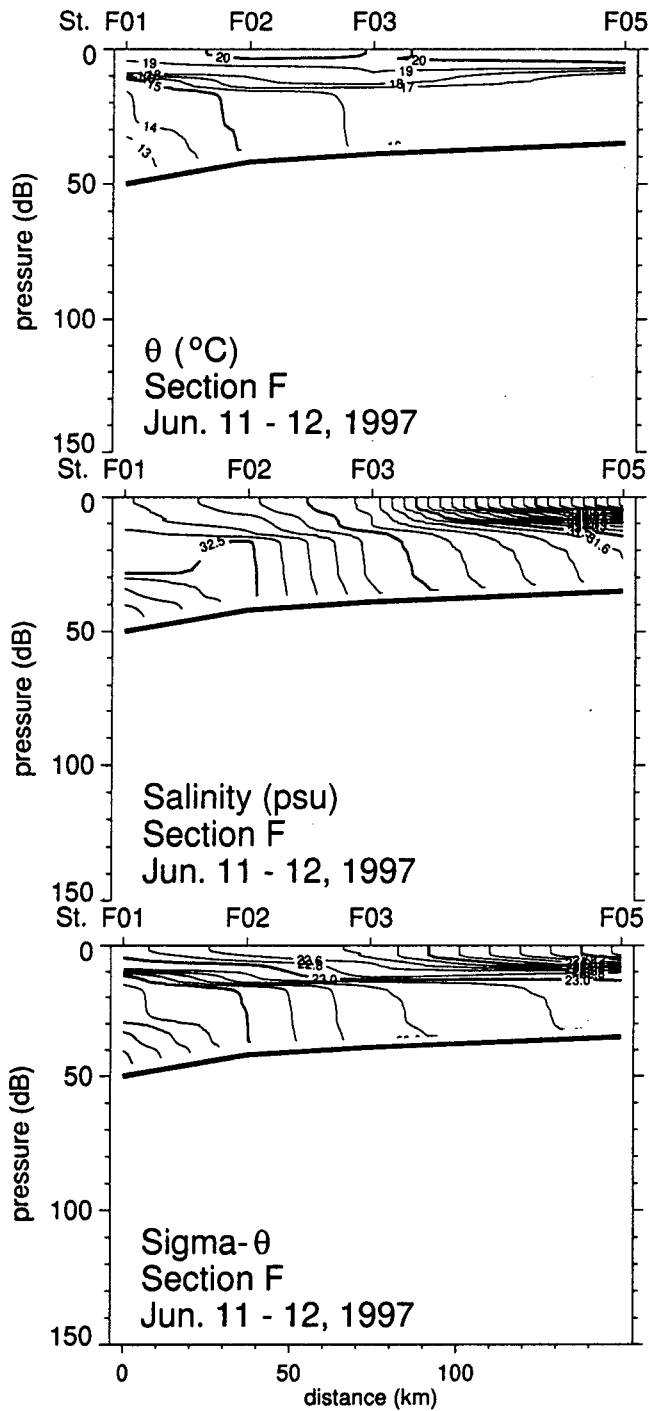


Fig. 5-24. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section F in June 1997.





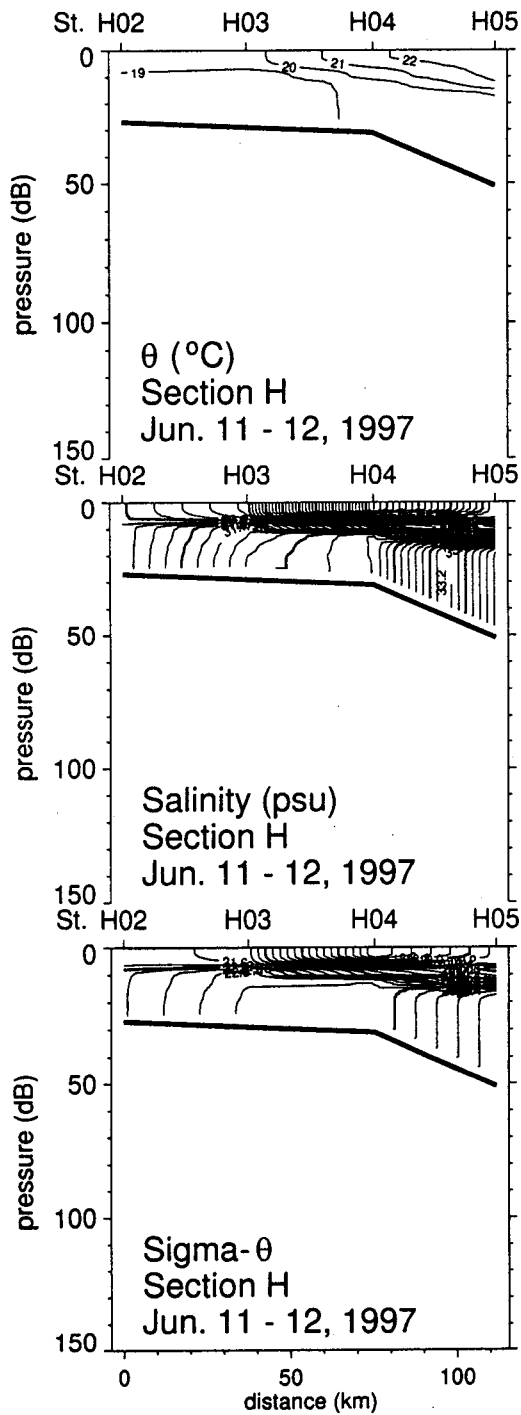


Fig. 5-26. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H in June 1997.

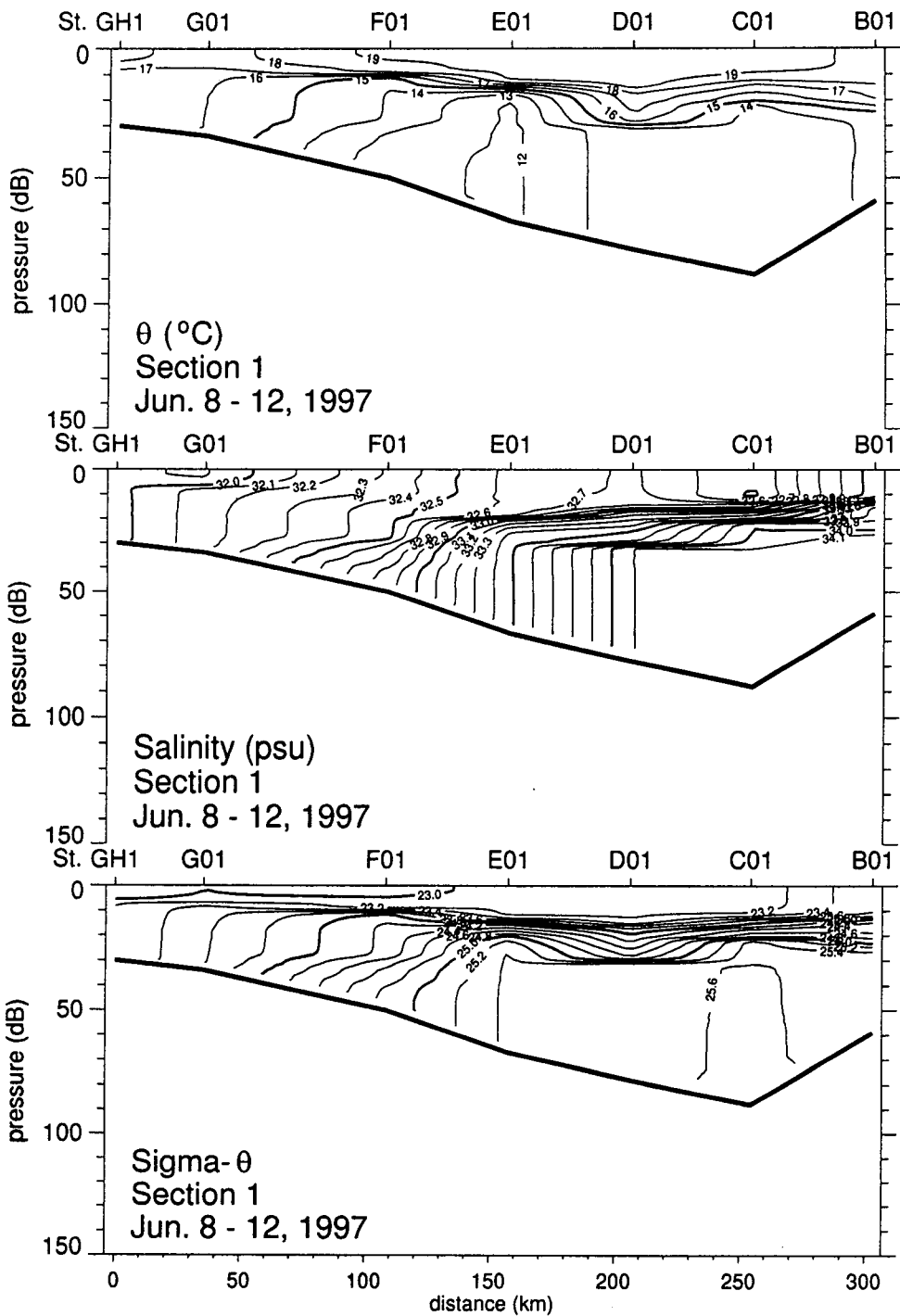


Fig. 5-27. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section GH1-B1 in June 1997.

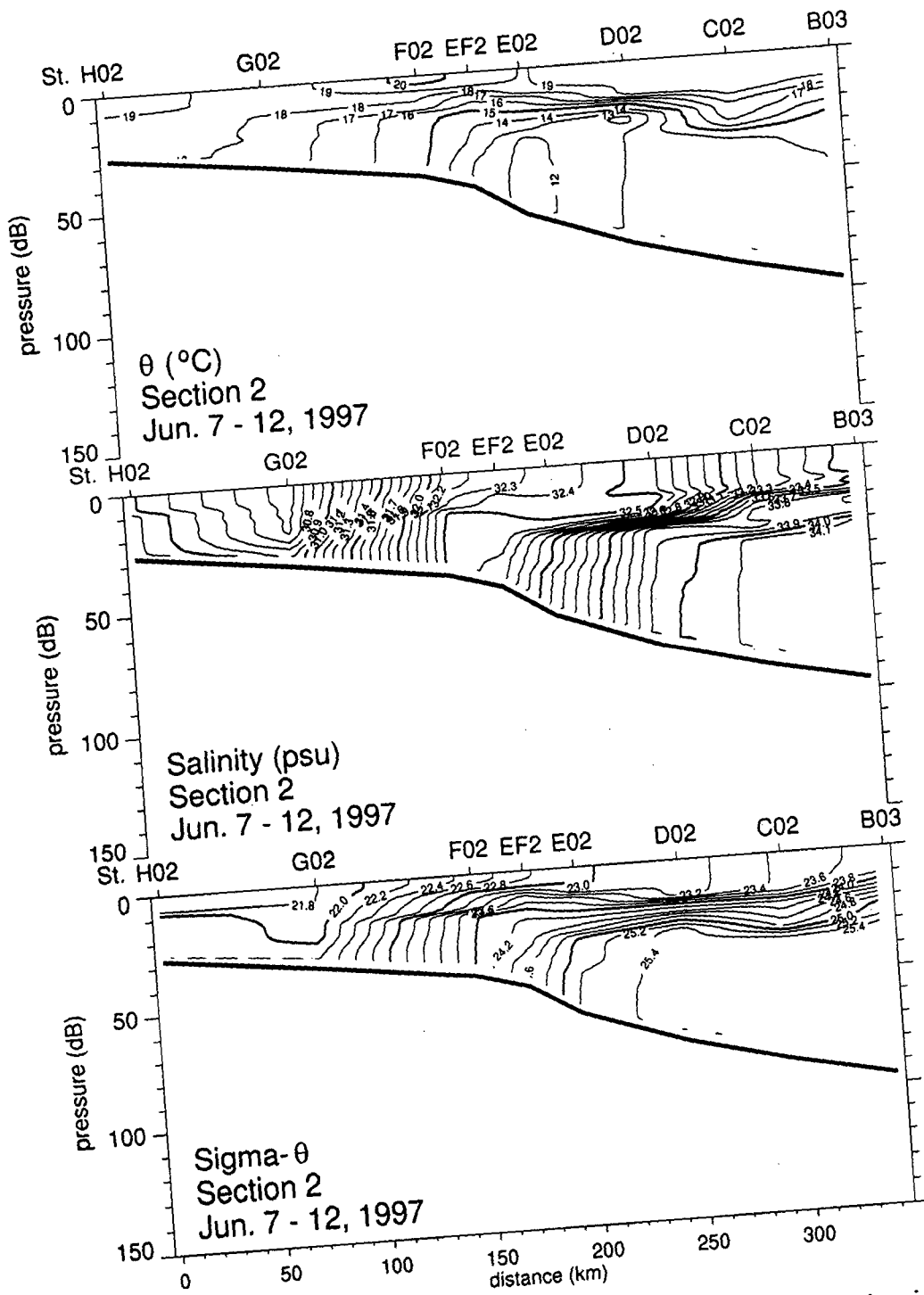


Fig. 5-28. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H2-B3 in June 1997.

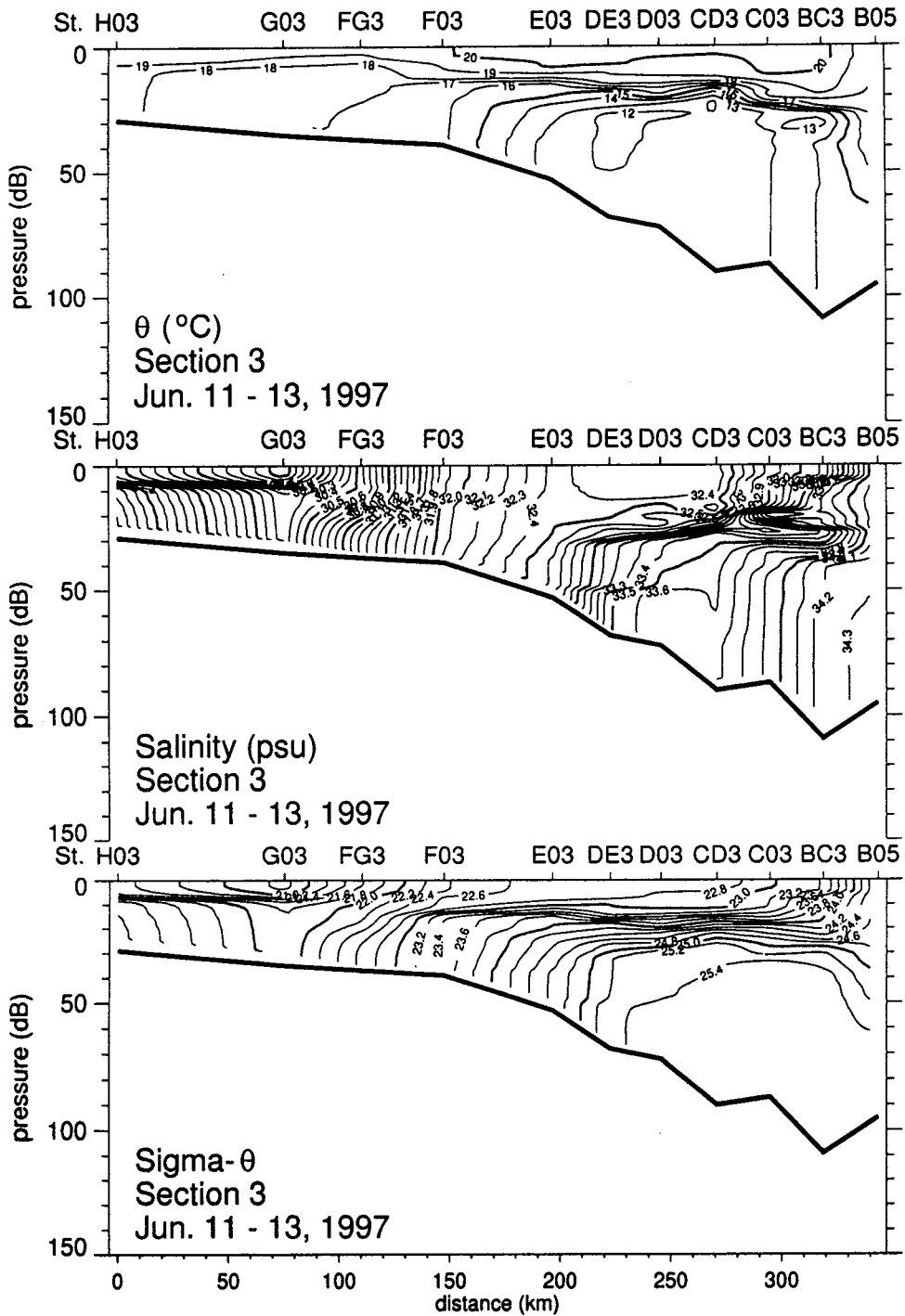


Fig. 5-29. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H3-B5 in June 1997.

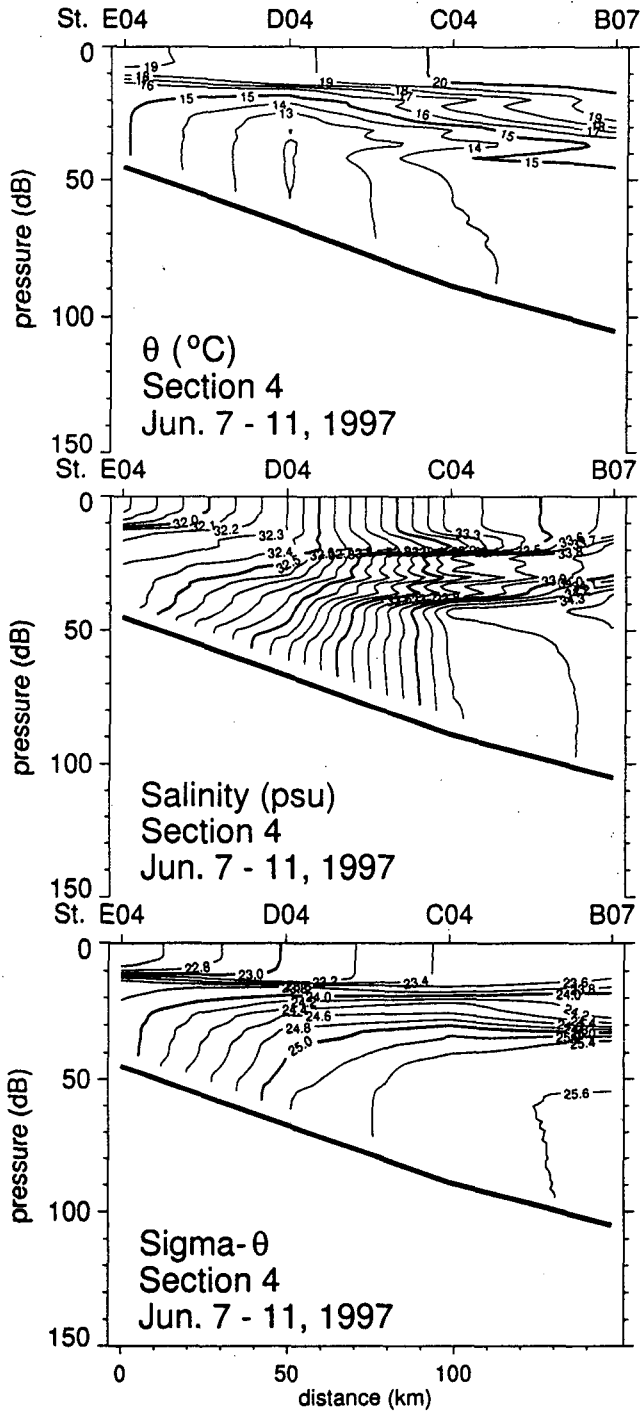


Fig. 5-30. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section E4-B7 in June 1997.

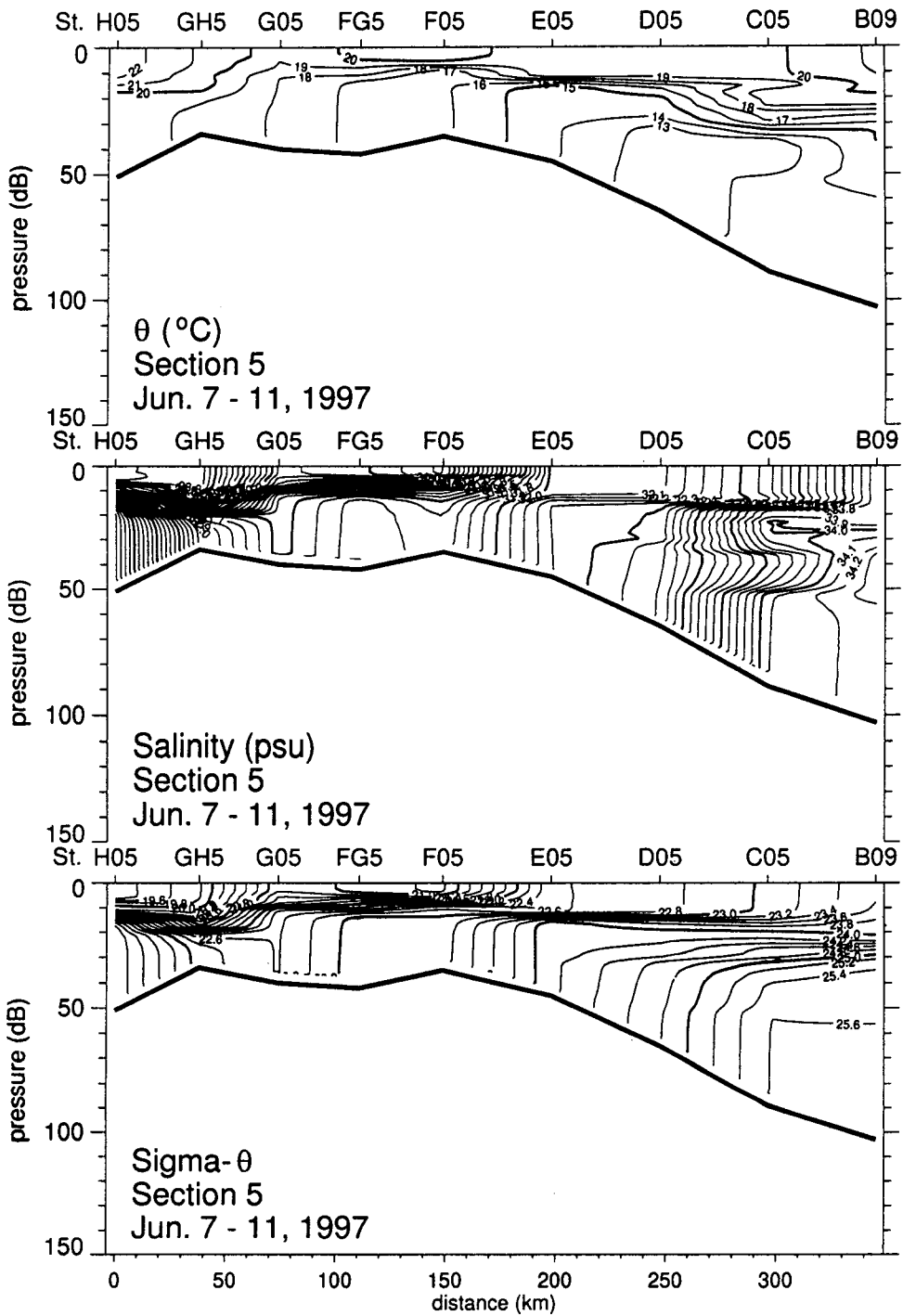


Fig. 5-31. Vertical distributions of temperature, salinity and density in the section H5-B9 in June 1997.

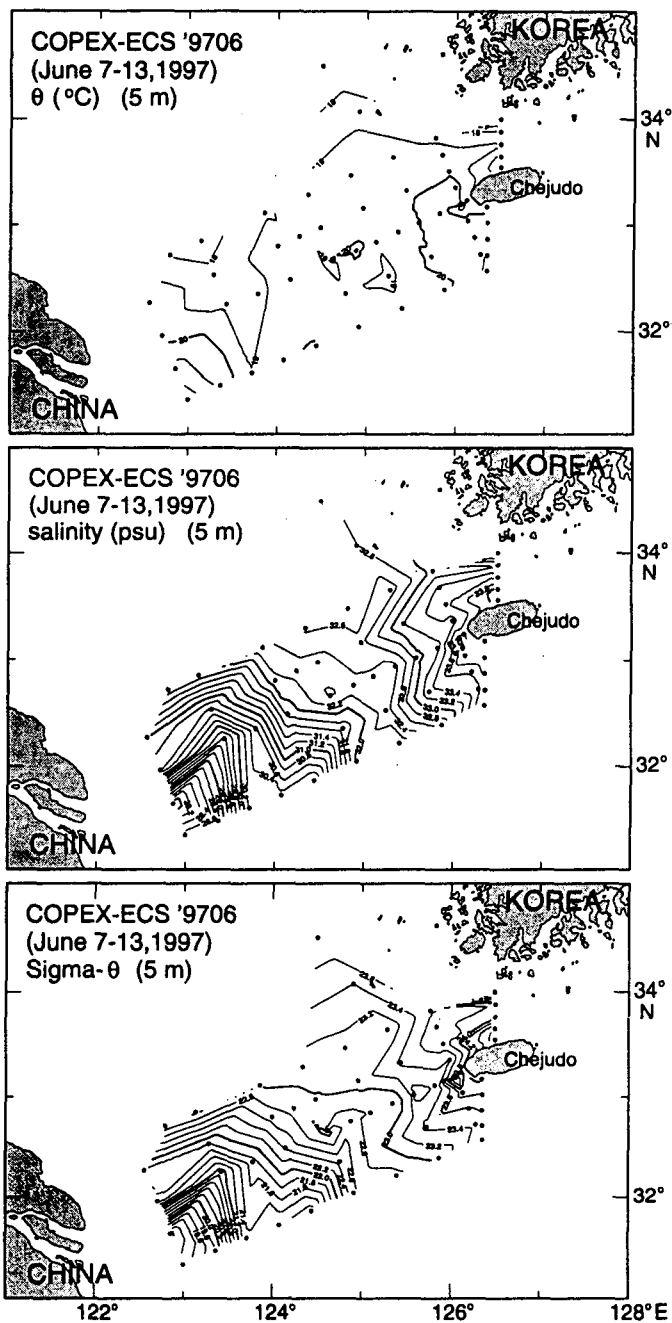


Fig. 5-32. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 5m depth in June 1997.

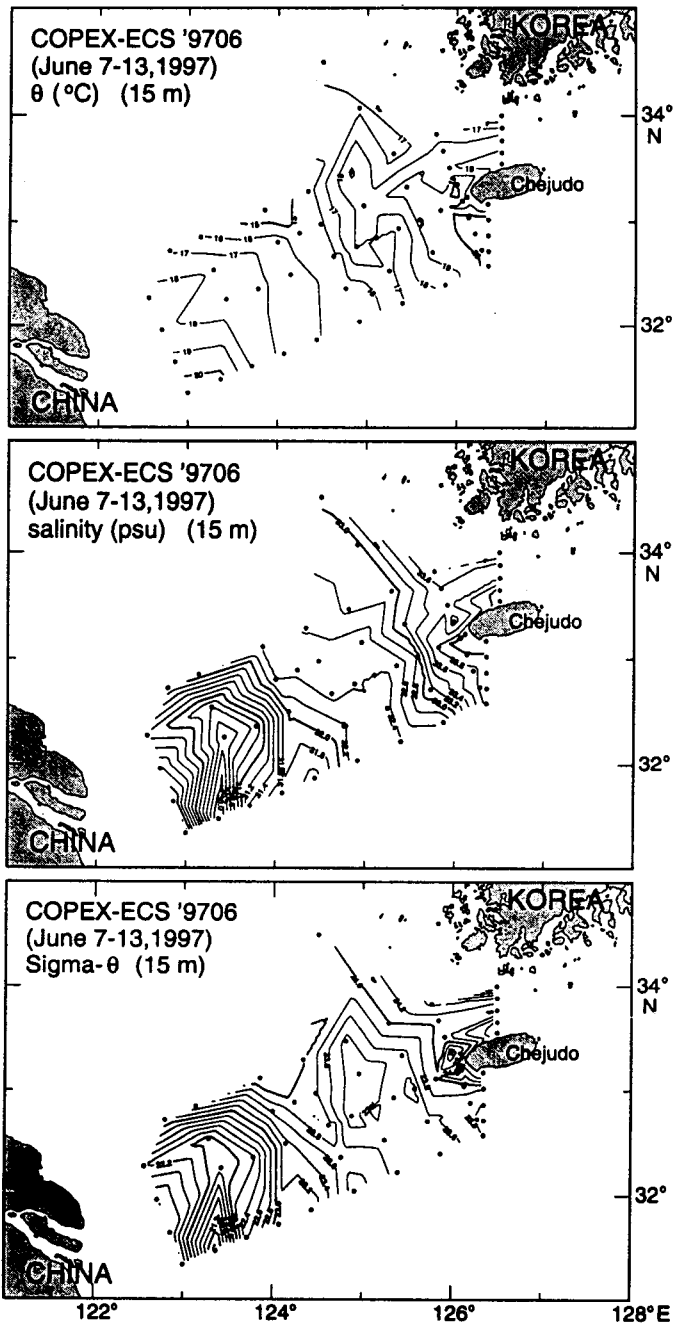


Fig. 5-33. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 15m depth in June 1997.



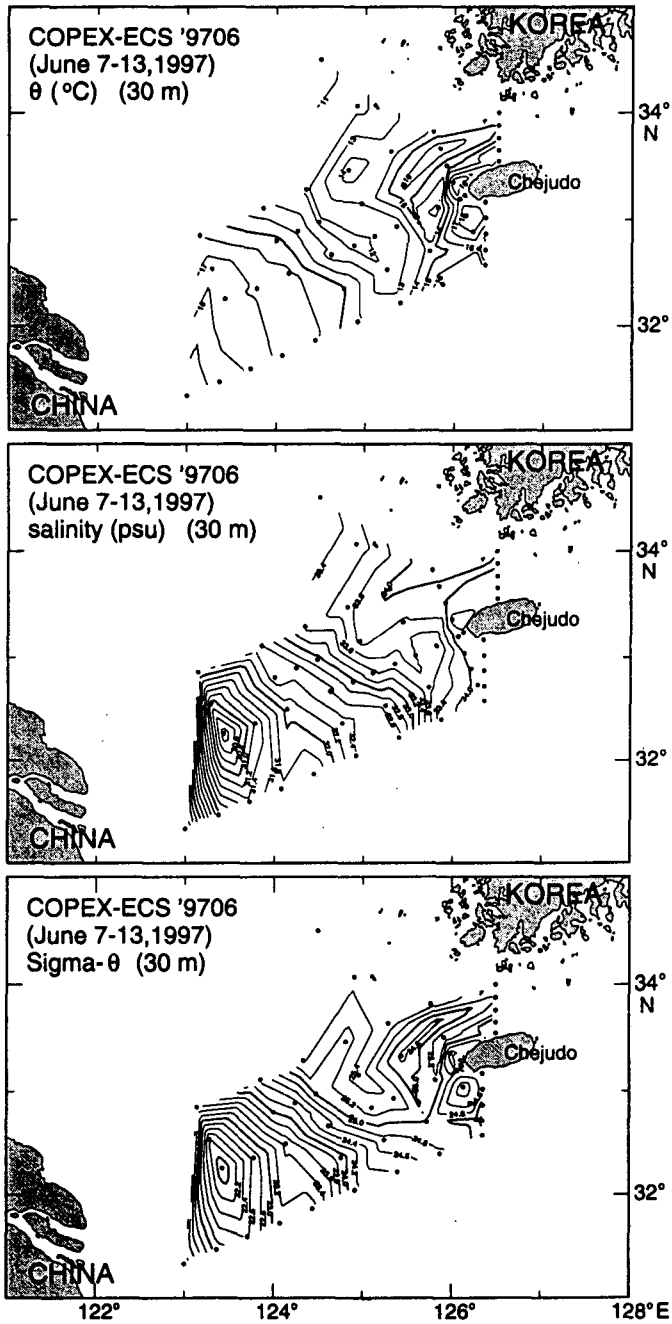


Fig. 5-34. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 30m depth in June 1997.

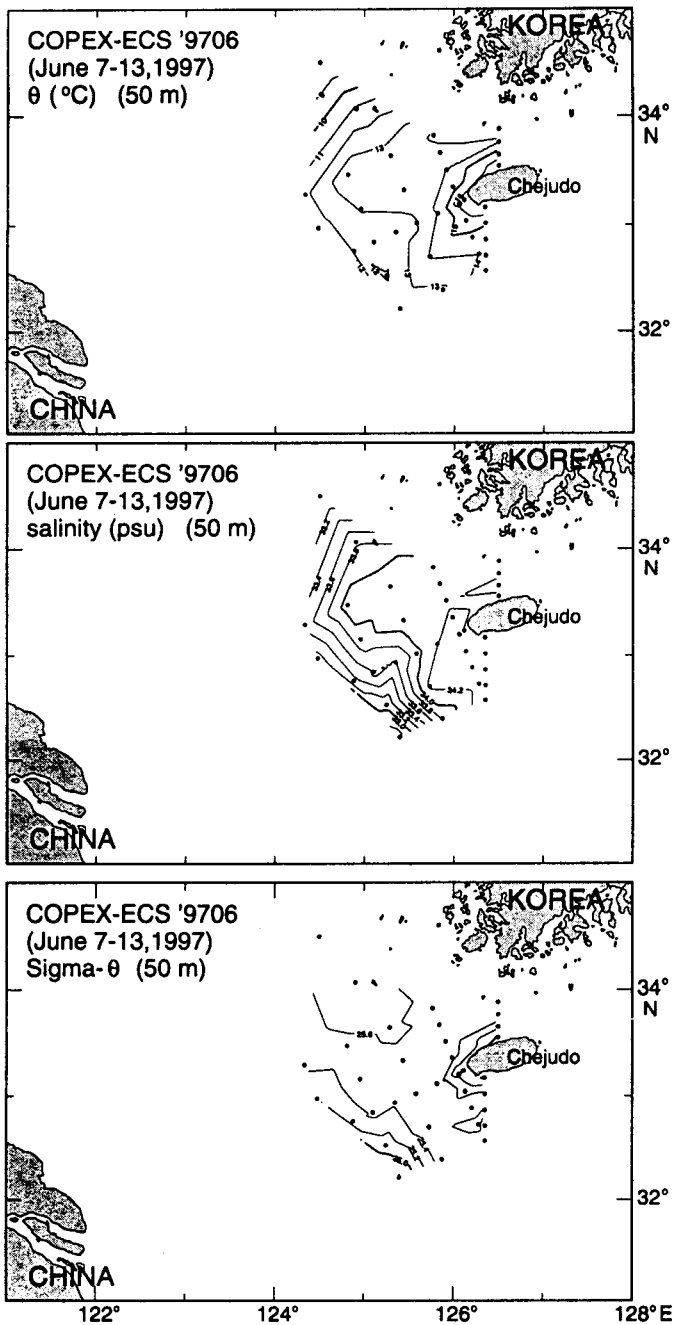


Fig. 5-35. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at 50m depth in June 1997.

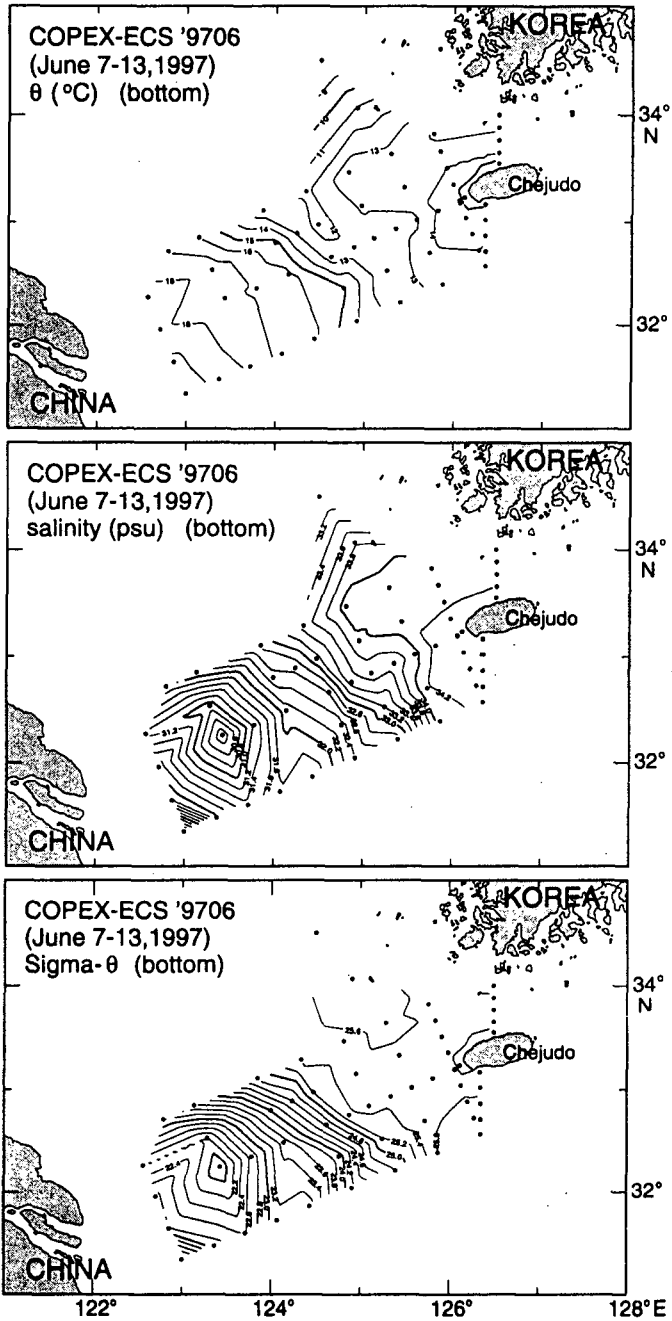


Fig. 5-36. Horizontal distributions of temperature, salinity and density at the bottom in June 1997.



# 제 6 장 양자강 연안수의 유입과 제주도 주변해역의 해양순환

## 제 1 절 서 론

제주도 주변해역은 12월부터 5월까지 34.10% 이상의 고염분수가 표층부터 저층까지 전 층에 출현하여 대마난류수에 의해 지배되고 있지만 6월부터 표층염분이 저하하기 시작하여 8, 9월의 하계에는 32.00% 이하의 저염분수가 표층에 나타나며 이러한 저염분수는 10월까지 지속되는 경우가 많다. 이러한 저염분수 출현은 제주도나 한반도로부터 유입되는 육수의 영향을 받아 만들어지는 제주도 연안 또는 한국 남·서해 연안수의 확장 때문이 아니고 양자강 하구 외해로부터 북부해역에 분포의 중심이 있고 주로 중국대륙으로부터 배출되는 하천수에 의해 만들어진 중국대륙연안수 때문이라고 宇田(1934), 井上(1974) 등은 지적한 바 있으며, 이 저염분수는 동계에는 분포범위가 축소되어 대마난류역까지 영향을 미치지 않고 중국대륙연안쪽에 한정되지만 강수량이 많아지는 하계가 되면 분포범위가 확장되어 제주도 주변해역은 물론 한국남해 및 동해까지 영향을 미치고 있다(강, 1974; Moriyasu, 1972; Lim, 1976).

이처럼 하계 한국 남, 동해의 표층해황에 큰 영향을 미치는 중국대륙연안수의 확장경로에 대하여 宇田(1936)가 양자강 범람기인 하계에는 설상(舌狀)의 저염분축이 제주도 쪽을 향한다는 최초의 보고가 있었다. 1980년 이후 이 연안수의 확장경로에 관한 중국의 연구가 활발해지면서 Yu et al.(1983), Le(1983) 등에 의해 양자강수의 유출량이 많아지는 하계가되면 이 연안수의 저염분축이 양자강 하구에서 북동쪽을 향하여 분포한다는 것이 구체적으로 밝혀졌다. 그러나 제주도 쪽으로 이동하여 오는 이 저염분 Core가 제주도 주변 및 한국남해의 어떤 해역을 경유하여 한국동해로 이동하는지에 대한 상세한 보고가 없다가 노(1985), 김등(1991), 김·노(1994) 등에 의해 제주도 주변해역 중 제주도 서쪽해역을 거쳐 제주해협을 통하여 한국남해로 이동한다는 것이 밝혀진바 있다.

그러나 이상의 제 연구는 모두 염분분포 상황으로부터 저염분수의 이동경로를 유추한 것 뿐이고 해수유동자료까지 종합하여 분석한 결과가 아니므로 이 연안수의 이동을 논하기는 미흡한 점이 있으므로 본 연구에서는 염분분포자료는

물론 해수 유동자료까지 포함시켜 중국대륙연안수의 확장경로와 이 연안수가 제주도 주변해역의 해수순환에 어떠한 영향을 미치는가에 관하여 구체적으로 규명해 보려고 했다.

## 제 2 절 자료 및 방법

### 가. 제주도 서쪽해역 및 제주해협내의 염분자료

하계에 양자강 연안수가 제주도 주변해역에 접근하는 양상을 파악하기 위하여 제주대학 실습선을 이용하여 1981년 7월, 1986년 8월에 제주해협 및 제주도 서쪽 해역과 제주시 북쪽 약 5마일 떨어진 정점 E(Lat.  $33^{\circ} - 36.3'$  N, Long.  $126^{\circ} - 32.3'$  E)에서 1985년 4월부터 1986년 8월까지 관측한 염분자료, 1965년부터 1984년(20년)까지의 국립수산진흥원 해양관측정점 203-03의 염분자료 및 1976년 6월의 제주도 주변 정선자료와 Yu 등의 1981년 8월 자료 등을 활용했다. 또 제주해협내의 양자강수 유입실태를 구체적으로 제시하기 위하여 제주해협내에 그림 6-1과 같이 조밀하게 설정한 관측정선의 각 정점에서 제주도 어업지도선 삼다호(250톤)를 이용하여 1995~1997년에 월별로 조사한 CTD자료 등을 사용하여 분석했다.

### 나 해수유동조사

양자강연안수의 이동실태를 Lagrangian method에 의해 해수입자의 연속 이동 양상을 제시할 목적으로 1986년도 Argos Buoy 추적자료 및 본 연구자가 1996, 1997년에 조사한 제주해협 내의 TGPS(Telemetric of Global Positioning System) Buoy 추적자료를 이용했으며 또 Eulerian method에 의한 유동실태 파악을 위하여 그림 6-1의 Mooring Station에서 해류계를 사용하여 25시간 이상 측류한 자료를 분석했다. 표 6-1은 TGPS Buoy의 투하 및 회수 일시와 위치를 나타내고 있다.

Table 6-1. Positions and time of release and collection of TGPS buoys in the Cheju Straits in 1997 except Case No. 2 in 1996. Meridional line of 126° 57.0' E is taken as the east boundary line of the Cheju Straits.

Case No.	Release			Collection			Arrival at 126° 57.0' E	
	Time	Position		Time	Position		Time	Lat.(N)
		Lat.(N)	Lon.(E)		Lat.(N)	Lon.(E)		
1	Apr. 28 17:00	33° 40.3'	126° 38.0'	May 3 12:33	33° 47.2'	127° 10.2'	May 1 13:39	33° 41.8'
2	May 31 07:31	33° 34.5'	126° 48.8'	Jun. 2 08:57	33° 30.0'	126° 58.9'	Jun. 2 01:52	33° 31.9'
3	Jul. 10 12:24	33° 40.0'	126° 38.8'	Jul. 12 05:31	33° 37.0'	126° 58.4'	Jul. 12 03:57	33° 37.9'
4	Aug. 27 21:13	33° 35.6'	126° 37.2'	Aug. 29 15:39	33° 31.8'	126° 51.5'		
5	Aug. 27 21:15	33° 45.2'	126° 36.8'	Aug. 29 09:08	33° 57.6'	127° 24.5'	Aug. 28 14:31	33° 53.8'
6	Sep. 4 12:47	33° 39.8'	126° 36.2'	Sep. 9 23:35	34° 8.2'	127° 50.6'	Sep. 7 16:13	34° 4.3' (126° 55.0' )
7	Oct. 18 11:02	33° 37.2'	126° 36.4'	Oct. 24 11:40	33° 46.1'	126° 49.4'		
8	Oct. 18 10:03	33° 42.4'	126° 36.7'	Oct. 21 13:03	33° 52.3'	127° 52.1'	Oct. 19 08:21	33° 46.0'

### 제 3 절 결 과

#### 가. 양자강연안수가 제주도 주변해역에 접근하는 양상

그림 6-2는 Yu 등(1983)에 의해 제시된 1981년 8월의 양자강하구에서 제주도 사이의 표층염분수평분포이다. 양자강 하구에는 거의 담수에 가까운 5~10%의 저염분핵이 있고 이 핵으로부터 설상(舌狀)의 저염분 축이 제주도를 향하여 북동쪽으로 확장하고 있는 양상이 잘 나타나 있다. 또 29% 이하의 저염분수는 양자강 하구로부터 중국연안과 제주도간의 중간 해역까지만 나타나고 그 이동(以東) 해역에는 30% 전후의 고염분이 나타나 제주해협 서쪽입구에 중간해역보다는 염분이 낮은 29%의 저염분수가 다시 출현하는 특이한 염분분포이다. 이처럼 제주해협 서쪽입구에 29%의 저염분수가 나타나는 것은 양자강 하구에서 북동쪽으로 확장하는 29% 이하의 저염분수가 그 과정은 명확하지 않지만 제주해협내로 보급되고 있음을 시사하고 있다.

그림 6-3은 그림 6-2 보다 한달전에 관측된 1981년 7월의 표층염분포로 제주해협 중앙부에는 29.60~30.00%의 저염분 축이 서쪽입구에서 동쪽을 향해 설상으로 확장하고 있고 이 저염분수는 제주해협으로부터 와(渦)의 형태로 제주도 동쪽인 한국남해로 이동하는 양상의 염분분포를 하고 있다. 30.00% 미만의 저염분수는 제주해협과 그 동쪽해역 외에는 한국남해 및 제주도 연안, 제주도 주변 다른 해역 어느 곳에도 전혀 나타나고 있지 않다. 이상의 제 상황을 고려할 때 1981년 7월 제주해협 및 그 동쪽해역에 나타난 30.00% 미만의 저염분수는 그림 6-2에 나타난 경로를 따라 양자강 하구로부터 30.00% 미만의 양자강 연안수가 제주도 주변해역 중 제주해협으로 유입된 결과라고 유추할 수 있다.

그림 6-4는 1976년 6월, 그림 6-5는 1986년 8월의 제주도 주변해역의 10m 층 및 표층염분분포로 제주도 서쪽해역에 나타나는 최저염분수 축이 제주도 주변해역 중 제주해협내로 설상으로 유입되고 있는 양상을 잘 보인다. 즉, 1976년 6월에 이미 32.00% 미만의 최저염분수 축이 제주도 서쪽해역으로부터 제주해협 서쪽입구까지 설상으로 삼입되고 있고 이러한 저염분수는 그림 6-3과 같이 제주해협 동쪽에도 와(渦)의 형태로 나타나 제주해협에 유입된 양자강 연안수는 와의 형태로 한국남해에 이동하는 양상을 하고 있다. 이때도 제주해협 및 그 동쪽해역 이외의 제주도 주변 및 한국남해 연안역 어떠한 곳에도 32.00% 미만의 저염분수는 출현하지 않았다.



1986년 8월(그림 6-5)의 경우도 27.40~30.40%의 최저염분 축이 제주도 서쪽 해역에서 제주해협을 향하고 있고 제주도 남쪽 및 동쪽해역에는 이 최저염분 축보다 고염분수가 분포하고 있다. 그리고 이때의 최저염분 축의 염분범위는 1981년 8월(그림 6-2) 제주도 서쪽해역의 염분범위보다 훨씬 낮고, 특히 1981년의 28.00% 미만의 저염분수가 양자강 하구와 제주도 사이의 중간해역보다 오히려 양자강하구 쪽에서 나타났으나 1986년 8월에는 제주도 서쪽해역까지 28.00% 미만의 저염분수가 나타나고 있어 제주도 주변해역의 하계 표층염분분포가 심하게 변화 할 수 있음을 시사하고 있다.

그림 6-6은 제주도 서쪽해역 및 제주해협에 예년보다 훨씬 낮은 27.40~30.40%의 저염분수가 나타난 1986년에 양자강하구와 제주도 간의 중간해역에 Argos Buoy를 투하여 7월부터 연속적으로 추적한 Argos Buoy 이동궤적을 나타내고 있다.

표층류의 유향과 유속을 반영하는 이 Buoy의 이동궤적 역시 투하지점에서 북동쪽으로 이동하여 8월에는 제주도 서쪽해역에서 34° 30' N 부근까지 북상했다가 9월초에는 제주해협을 경유하여 한국남해로 이동하는 양상이 이때의 최저염분수 확장방향과 매우 잘 일치하고 있다.

이상의 제 상황을 정리하면 양자강 하구에서부터 확장되는 저염분수인 양자강연안수가 하계에 그 분포범위가 넓게 확장되어 제주도 주변해역의 표층수가 현저하게 저염화 되지만 이 연안수의 최저 염분축은 양자강하구로부터 북동쪽으로 이동하여 제주도 서쪽해역까지 접근하여 제주해협내로 설상으로 삼입되어 와(渦)의 형태로 한국남해에 공급되는 것이 일반적인 경향이라고 할 수 있다. 또 제주도 주변해역에 나타나는 양자강 연안수의 염분범위가 심하게 변할 수 있음을 1986년 8월의 염분분포는 시사하고 있다.

## 나. 제주도 주변해역에서 양자강 연안수의 연직적 영향범위 및 출현시기

제주도 주변해역에 출현하는 양자강 연안수가 연직으로 어느 정도의 깊이까지 영향을 미치고 있는가를 파악하기 위해 이 연안수의 최저염분 축이 통과하는 제주해협을 택하여 그 깊이 변화를 분석했다.

그림 6-7은 1965~1984년(20년간)까지 국립수산진흥원 해양관측정점인 203선의 03점(제주해협서쪽입구)에서 표층최저염분 출현 월의 염분연직분포를 나타내고 있다. 김·노(1994)가 제주주변에 출현하는 양자강 연안수라고 정의한 32.20% 이하의 저염분수가 1968년과 1980년을 제외하면 매년 표층에 출현했고 표층

에서 50~70m 사이에는 심한 염분약층이 형성되고 약층 아래쪽은 염분이 거의 일정한 균질층이 나타나고 있다.

그림 6-8은 그림 6-7로부터 구한 32.20% 이하의 염분이 출현하는 수심의 연별 변화이다. 32.20% 이하의 염분이 전혀 출현하지 않은 1968, 1980년을 제외하면 이 염분치가 출현하는 수심은 10~38m까지 해(年)에 따라 변하고 있지만 평균 25m였다.

그림 6-9는 제주항에서 북쪽으로 약 5마일 떨어진 정점 E에서 1985년 4월~1986년 8월까지 조사한 염분연직분포이다. 1월부터 6월 초순까지는 표층부터 저층까지 염분이 거의 같아 균질층을 이루고 있지만 6월 하순이 되면 표층부터 염분이 점점 저하하기 시작하여 1985년에는 8월 초순에, 1986년에는 8월 중순에 각각 29.90%과 30.31%의 최저염분이 출현 하지만 11월 하순 이후는 다시 표층에서 저층까지 거의 같은 염분이 된다. 관측기간 중 32.20% 이하의 염분이 출현한 최대 수심은 26m 였다.

그림 6-10은 제주해협 동쪽입구인 우도에서 청산을 향한 Section 4(그림 6-1)에서 염분의 연직분포를 나타내고 있다. 2월에는 전 단면에 34.30~34.60%의 고염분수가 표층부터 저층까지 균질한 상태로 분포하며 단면의 대부분은 34.50% 이상으로 동계 제주도 서방해역에 나타나는 대마난류수의 최고염분 범위의 염분수로 가득차 있지만 단면의 북부역에는 34.30~34.50% 사이의 염분전선이 나타난다. 동계의 해류관측 결과에서도 이 전선역에 가장 강한 항류성분이 나타났다. 이러한 동계상황은 4월까지 지속되지만 5월 하순에는 표층부터 수심 30m 사이의 염분이 동계 보다 많이 낮아져 34.00~34.40%의 염분 범위로 약한 염분 성층이 형성되고 있다. 이러한 표층 저염화 현상은 6월에도 지속되어 전단면의 염분이 동계보다 전체적으로 낮아져 33.80~34.20%의 염분범위가 되지만 7월 하순에는 표층염분이 현저하게 낮아져 31.20%의 저염분이 나타나고 이러한 저염화 현상은 표층에서 수심 50m 사이에서 현저하며 50m 이심에는 34.00~34.40%의 고염분인 대마난류수가 분포해 표층 저염분수와 저층 고염분수 사이에는 제주해협의 하계 특성인 심한 염분성층이 형성되고 있다. 하계 양자강 연안수의 지표염분인 32.20% 이하의 저염분수가 나타나는 깊이는 수심 20m 정도이다.

이러한 표층 저염화현상은 8월과 9월에도 지속되며 32.20% 이하 저염분수가 나타나는 깊이는 9월에는 수심 30m까지 깊어지며 이 저염분수의 주축은 해협의 중앙부를 통하고 있다. 또 수심 50m 이하의 고염분수는 비록 8월에는 33.90% 정도로 낮아졌다가 9월에는 다시 34.30%까지 높아지는 변화를 보이기는 하지만 계속 나타나고 있다. 10월에도 32.20~32.40%의 최저염분수가 해협의 중앙부 수심 25m 부근까지 나타나고 있어 하계의 염분 연직분포 양상이 유지되며 특히 32.20%의 최저염분 축이 나타난 정점의 표층해류가 해류계 관측유속 중 최강유속인

55.1cm/s(표 6-3의 B점)를 보인 것은 양자강 연안수 유입이 제주해협 유속 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 잘 입증는 좋은 예가 된다.

11월에는 단면 북쪽 한국남해연안역 표층 일부를 제외하면 34.00% 이상의 고염분인 대마난류수가 전단면에 나타나 양자강 연안수는 제주해협 동쪽입구에서는 거의 영향을 미치지 않는 것처럼 보이나 이때까지도 하계와 같이 염분성층은 형성되고 있다. 그러나 12월이 되면 염분성층도 완전히 사라지고 전 단면이 균질하게 되는 동계의 상황이 된다. 이상의 월별 염분분포로 보아 제주해협에는 양자강 연안수가 6월부터 영향을 미치기 시작하여 11월까지 지속되지만 양자강 연안수가 직접 나타나는 시기는 7월부터 10월까지인 하계이고 이 수괴의 연직분포범위는 표층부터 수심 30m까지이며 수심 30m~50m 사이에는 이 저염분수와 저층의 고염분수가 서로 혼합하여 만들어진 34.00% 이하의 혼합수가 분포하여 표·저층간에 심한 염분성층이 형성되고 있다. 양자강 연안수의 제주해협내 출현시기에 관하여 김·노(1994)는 제주시에서 추자도간의 여객선을 이용한 15일 간격의 표층염분 관측결과로부터 7월부터 10월까지 지속되는 현상이라고 했다.

## 다. 제주해협의 유황(流況)과 양자강연안수와의 관계

### (1) TGPS Buoy 추적결과

그림 6-11은 제주해협에 투하한 TGPS Buoy의 이동궤적을 나타내고 있고 표 6-2는 Buoy 추적결과를 종합하여 계산한 표층해류의 유속을 나타내고 있다. Buoy 이동속도를 계산할 때 제주해협의 범위를 벗어난 경우는 126° 57.6' E 선을 제주해협의 동쪽경계선으로 설정하여 그 동쪽의 궤적은 계산에서 제외하였다. TGPS Buoy 추적결과 제주해협의 평균표층유속은 22.3cm/s로 북동방향의 항류가 나타났으며 최대유속은 56.2cm/s로 8월에 나타났다. 투하지점별로 보면 양자강 연안수의 최저염분 축이 제주해협을 통과하는 제주도 연안에서 북쪽으로 10~11마일 해역에 투하한 Case 1(1997. 4. 30~5. 3), Case 3(1997. 7. 10~10~12), Case 5(1997. 8. 27~28), Case 6(1997. 9. 4~7), Case 8(1997. 10. 17~24)의 유속은 각각 11.9cm/s, 21.5cm/s, 56.2cm/s, 19.8cm/s, 39.8cm/s로 평균 29.8cm/s의 동~북동류였고 양자강연안수가 영향을 미치는 7~10월의 유속이 그 외의 시기인 4월 보다 2~4.7배 정도 빠르게 나타났다. 이처럼 하계 유속 증가는 부분적으로 양자강 연안수 확장에 의한 것이라고 해석될 수 있다. 즉 앞에서 지적한 바와 같이 제주해협에는 하계 30m 정도의 두께로 양자강연안수가 표층을 덮으면서 확장하여 오기 때문에 제주해협을 통과하는 유량이 크게 증가하므로 제주해협의 하계 유속을 증가시킬 수 있는 것으로 해석할 수 있다.

Table 6-2. Current speed calculated from the surface float tracks in the Cheju Strait in 1997 except Case No. 2 in 1996. Tracks out of the strait (east of the meridional line of 126° 57.0' E) are excluded.(+: eastward or northward, -: southward or westward)

case no.	period	duration time	E-W direction		N-S direction		Total		Ratio (EW/N S)
			distance(m)	speed (cm/s)	distance (m)	speed (cm/s)	distance(m)	speed (cm/s)	
1	Apr. 28 -May 1	68hr 39min	29,299	+11.9	2,780	+1.1	29,427	11.9	10.8
2	May 31 -Jun. 2	42hr 21min	12,299	+8.3	4,818	-3.2	13,548	8.9	2.6
3	Jul. 10-12	40hr 22min	29,958	+20.6	8,894	+6.1	31,237	21.5	3.4
4	Aug. 27-29	42hr 26min	22,071	+14.4	7,041	-4.6	23,175	15.2	3.1
5	Aug. 27-28	17hr 16min	31,120	+50.1	15,935	+25.6	34,940	56.2	2.0
6	Sep. 4-7	75hr 26min	28,994	+10.7	45,397	+16.7	53,829	19.8	0.6
7	Oct. 18-24	144hr 38min	20,059	+3.9	16,491	+3.2	25,955	5.0	1.2
8	Oct. 18-19	22hr 18min	31,292	+39.0	6,671	+8.3	31,984	39.8	4.7
Average				+19.9		+6.7		22.3	3.6

또 Case 5와 Case 8은 제주해협을 북동내지 동북동쪽으로 이동하여 거문도 남쪽을 지나 한국남해에서 거의 동쪽으로 이동하는 비슷한 유로를 나타내고 있는 것과는 다르게 Case 6은 제주해협에서 북북동쪽으로 이동하여 여서도와 청산도 사이를 통하여 거문도 북쪽을 지나 한국남해를 거의 동쪽으로 이동하는 궤적을 나타냈다. 즉 제주해협의 유로도 시기에 따라 매우 달라질 수 있음을 시사하고 있다. 그러나 제주도 연안에서 6마일 이내에 투하한 Case 4(1997, 8, 27~29)와 Case 7(1997, 10, 18~24)은 각각 15.2cm/s, 5.0cm/s로 같은 시기에 외해쪽에 투하한 Case 5와 Case 8 보다도 유속이 느리고 유향도 크게 달라 Case 4는 남동쪽으로 이동하여 제주도 북동연안에 표착하였고 Case 7의 경우는 연안을 따라 동쪽으로 이동하여 우도 북서쪽까지 이동했다가 다시 서쪽으로 이동하여 제주시 부근까지 이동한 후 제주시로부터 북쪽 약 8마일 부근해상에서 다시 북동쪽으로 이동하는 매우 독특한 유로를 나타냈고 유속도 매우 느렸다. 이때 우도 북쪽 1마일 지점에 계류한 해류계 관측결과(표 6-3의 D 측류점)에서도 표층에 9.4cm/s의 서류가 나타나고 있어 Buoy가 우도 서쪽에서 다시 제주시까지 이동한 원인이 이 서향류 때문이었을 가능성이 있다. 또 1996년 5월 31일 제주도 연안쪽에 투하한 Case 2의 궤적 역시 제주도 연안을 따라 남동쪽으로 이동하여 우도 북쪽연안을 지나 방향을 남쪽으로 바꾸어 약간 남하하다가 다시 북상하는 유로를 나타냈다. 이처럼 제주도 북부연안에서 북쪽 6마일 이내에 투하한 Buoy는 모두 제주도 북부연안을 따라 느리게 이동하다가 연안에 표착하거나, 우도 서쪽 연안쪽에서 맴돌다가 다시 서쪽으로 이동하거나, 또는 제주도 동쪽을 따라 남하하는 특수한 궤적을 보인다. 이는 제주도 북부 연안역 10마일 이내의 좁은 범위에서 동류, 서류, 북동류가 동시에 나타날 수 있는 가능성과 제주도 동쪽 해역에 남하류가 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 이상의 제주해협내 Buoy 추적결과를 종합하면, 제주도 북부연안 6마일 이내의 해수는 노·平野(1983)가 지적한 제주해협 동쪽입구에 나타나는 설상의 대마난류수가 제주해협쪽으로는 접근 정도에 따라, 우도에서 제주시 사이의 제주도 북부연안역과 제주도 동쪽 연안역에 서류나 남하류가 나타나게 만들어 제주해협에서 동쪽으로 직접 유출되지 않게 만들므로 제주해협내 해수의 대부분은 제주도 북부연안에서 6~8 마일 이상의 외해쪽에서 북동내지 동쪽으로 이동하여 제주해협 동쪽입구로부터 한국남해로 유출되는 것으로 해석할 수 있다.

Table 6-3. Current meter mooring positions and mean currents in the Cheju-Strait in 1997 (+: eastward or northward, -: southward or westward).

Position (Lat.(N) Lon.(E))	Mooring period	Mooring layer(depth)	Mean Current				Ratio (EW/NS)
			Speed(cm/s)			Directio n	
			E-W	N-S	Total		
A							
(34° 4.0' 126° 57.0')	Feb. 24-25	surface(10m)	27.1	-4.7	27.5	ESE	5.7
		surface(10m)	13.9	-2.5	14.2	ESE	5.5
B							
(33° 53.0' 126° 57.0')	Feb. 23-24	bottom(70m)	10.6	1.1	10.7	E	9.0
		surface(10m)	52.9	-15.4	55.1	SE	3.4
	Oct. 22-24	middle(50m)	16.9	-8.1	2.1	SE	2.1
		bottom(90m)	15.8	6.2	2.5	NE	2.5
	Feb. 22-23	surface(10m)	3.6	-4.6	6.0	SE	0.8
		middle(50m)	2.9	-2.7	4.0	SE	1.1
bottom(100m)		0.3	-2.7	2.7	S	0.1	
C							
(33° 40.0' 126° 57.0')	Jun. 14-16	surface(10m)	-11.0	11.8	16.2	NW	0.9
		middle(50m)	2.1	0.3	2.2	NE	6.9
		bottom(100m)	1.6	-2.8	3.3	SE	0.6
	Aug. 28-29	bottom(100m)	10.4	5.4	11.8	NE	1.9
	Oct. 20-21	surface(10m)	21.0	-4.1	21.4	ESE	5.1
		bottom(100m)	-0.1	10.8	10.8	N	0.01
D							
(33° 33.0' 126° 57.0')	Jun. 16-17	surface(10m)	1.4	6.2	6.5	NNE	0.2
		middle(50m)	6.1	0.0	6.1	E	
		bottom(90m)	-1.3	5.1	5.4	NNW	0.3
	Sep. 4-7	surface(10m)	10.9	10.4	15.2	NE	1.1
		bottom(90m)	0.8	1.6	1.8	NE	0.5
	Oct. 22-23	surface(10m)	-11.5	2.6	11.9	WNW	4.4
bottom(90m)		0.7	1.4	1.6	ENE	0.5	
Average			8.0	0.7	10.9	E	

## (2) 정점측류(定點測流)결과

제주해협 유황을 파악하기 위하여 그림 6-1에 나타난 바와 같이 제주해협 동쪽입구 단면인 Section 4에 북쪽으로부터 A, B, C, D의 순으로 4개의 정점을 설정하여 층별(표층, 중층, 저층)로 해류계를 계류하여 유황을 측정했다. 그림 6-12는 각 측류정점의 층별, 시기별 유황 유속을 나타내고 있으며, 이들 각 측류 정점의 유황을 분석정리하여 표 6-3에 나타냈다.

2월은, 해협의 북쪽인 Sta. A와 B의 표층유속이 빨라 14.2~27.5cm/s의 비교적 강한 항류가 ESE의 방향으로 흐르는 것과는 대조적으로 해협의 중앙부인 Sta. C의 경우는 6.0cm/s의 약한 항류가 SE 방향으로 흐르고 있다. 특히 청산도와 여서도 사이에 27.5cm/s의 강한 항류성분이 나타난 것이 동계의 특징이며 Sta. C의 경우는 표층부터 저층까지 전층에 2.7~6.0cm/s의 남동내지 남류의 약한 항류가 나타나고 있다. 동계에는 약한 항류가 나타나던 Sta. C의 경우, 10월에는 21.4cm/s로 유속이 빨라져, 동계 보다는 5~7배 빠른 ESE 방향의 항류가 표층에 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 유속의 절대치는 다르지만 양자강 연안수가 출현하는 시기에 해협내의 유속이 그 외의 시기보다 크게 빨라지는 TGPS Buoy 추적결과와도 잘 일치하고 있다. 또 Sta. B의 경우도 2월 보다 10월의 표층유속이 약 4배 정도 빠른 55.1cm/s의 강한 항류가 나타나고 있다. 우도 북쪽 약 1마일 정도 떨어진 Sta. D의 경우는 동계의 측류자료가 없지만 표층에서 6월의 경우는 NNE 방향으로 6.5cm/s, 9월 NE 방향의 15.2cm/s, 10월 WNW 방향의 11.9cm/s의 유속이 약한 항류성분이 나타나고 있다. 이처럼 우도 북쪽연안에 북북동내지는 북동류 또는 서류의 약한 항류성분이 나타나는 것은 TGPS Buoy 추적결과에서 제주도 북부연안에서 북쪽으로 6마일 이내의 연안역에 투하한 Buoy의 이동속도가 10~11마일 부근에 투하한 Buoy 보다 매우 느리고 그 이동 궤적도 연안에 표착하거나 우도 부근에서 맴도는 양상을 보인 원인을 설명할 수 있는 좋은 자료가 된다.

층별 항류성분은 표층(10m) 유속이 중(40~50m), 저층(90~100m) 유속보다 전정점에서 모두 빠르게 나타났으며 중·저층 유속은 큰 차가 없으나 대체로 중층이 저층보다 강하며 저층 유속도 1.5~17.0cm/s의 범위로 지형류 계산시 저층을 무류면으로 일률적으로 취급해도 무방한지에 대한 점검이 필요할 것 같다. 또 유황은 대체적으로 층별로 큰 차는 없지만 Sta. C와 D에서는 층별 유황이 현저하게 다른 경우도 관측되고 있다.

관측기간 중의 순간 최대 유속은 D 정점의 표층에서 137.5cm/s를 보였고 제주해협 동쪽입구에 나타나는 조류는 밀물 때 북서방향, 썰물 때 남동방향이고 유속은 대체로 20~50cm/s 정도이다. 관측된 전 자료를 층별에 관계없이 전체 평균한 항류의 유속은 10.9cm/s이고 유황은 동류이다.

## 참고문헌

- 강철중. 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 12, 107~121.
- 김구·노홍길·이상호. 1991. 하계 제주도 주변해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26(3), 262~277.
- 김인옥·노홍길. 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27(5), 515~528.
- 노홍길·平野敏行. 1983. 제주해협 동쪽입구에 출현하는 설상의 난수. 한국수산학회지, 16(4), 299~304.
- 盧洪吉. 1985. 濟州島 周邊海域의 漁場海洋環境に關する研究. 博士學位論文, 東京大學, 1~125.
- 宇田道隆. 1934. 日本海及び其の隣接海區の海況(第一次 日本海一齊海洋調査報告). 水産試験場報告, 5, 57~190.
- 宇田道隆. 1936. 日本海及び其の隣接海區の海況(第二次 日本海一齊海洋調査報告). 水産試験場報告, 7, 91~151.
- 井上尙文. 1974. 西日本海海域の海洋學的特性. 對馬暖流-海洋構造と漁業. 日本水産學會編, 水産學シリーズ5, 恒性社厚生閣, 27~41.
- Le, K., 1983. Some Results from the study of the path of the changjiang diluted water. Int. Symp. on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, Hangzhou, April, 346~351.
- Lim, D. B., 1976. The Movement of the waters off the South Coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 11(2), 77~88.
- Moriyasu, S., 1972. The Tsushima Current. In Kuroshio, its physical aspects. edited by H. Stommel and K. Yoshida. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 353~369.
- Yu, H., D. Zheng and J. Jiang., 1983. Basic hydrographic characteristics of the studied area. Int. Symp. on sedimentation on the continental shelf with special reference to the East China Sea, Hangzhou, April, 270~279.
- Beardsley, R., R. Limburner, K. Kim and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. La mer, 30(3), 297~314



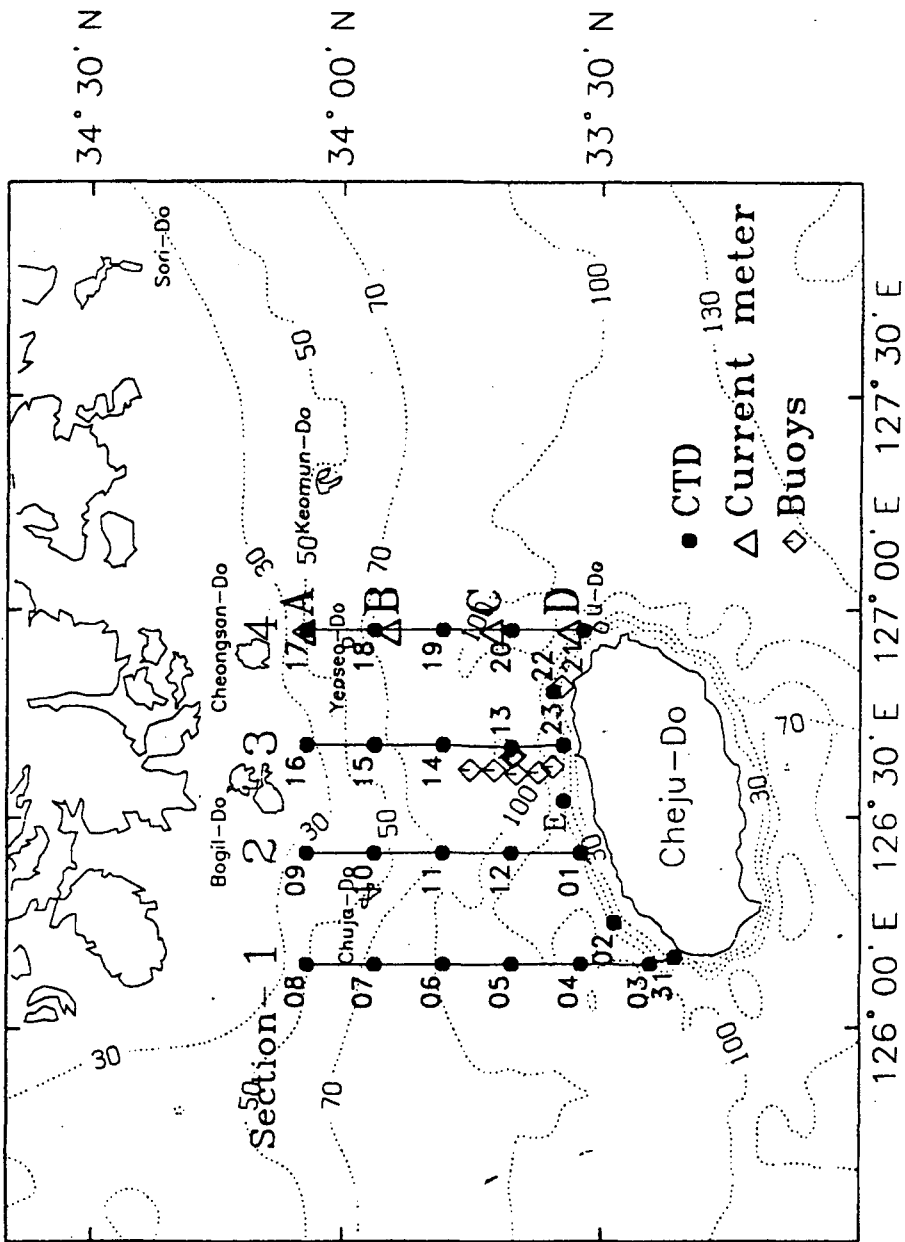


Fig. 6-1. Locations of oceanographic stations in the Straits of Cheju.

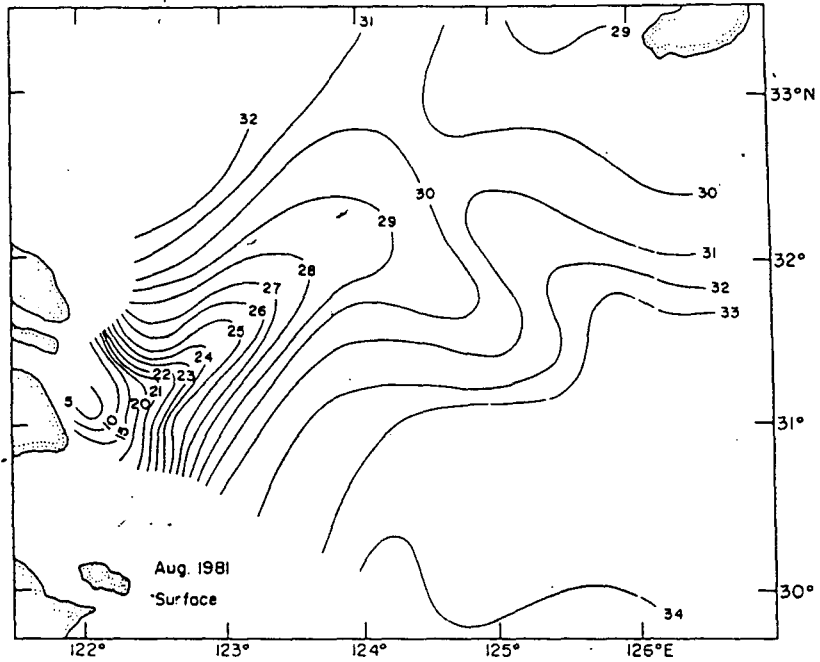


Fig. 6-2. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in August, 1981 (after Yu *et al.*, 1983).

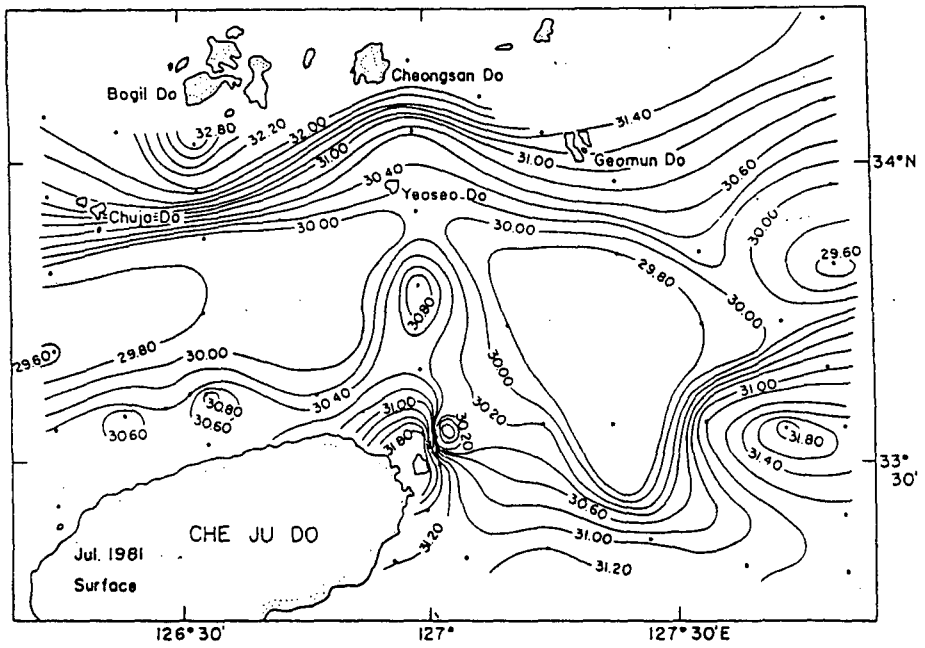


Fig. 6-3. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in July, 1981.

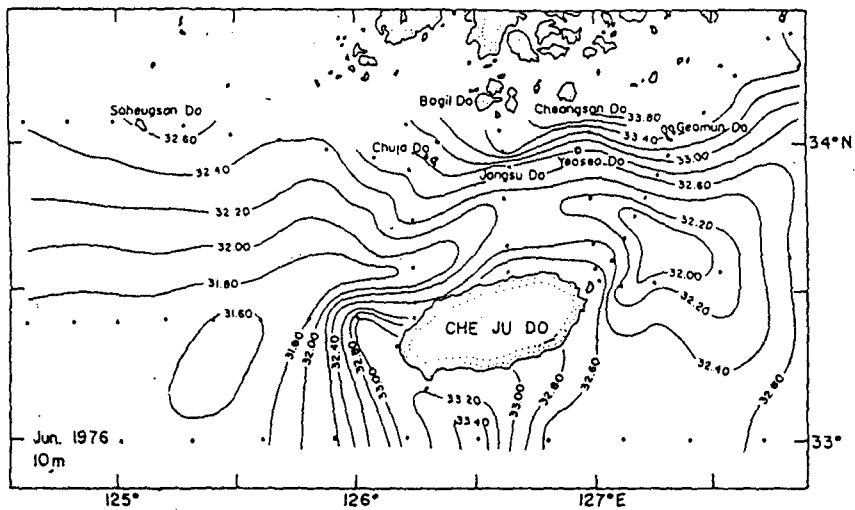


Fig. 6-4. Horizontal distributions of salinity(‰) at 10m in June, 1976.

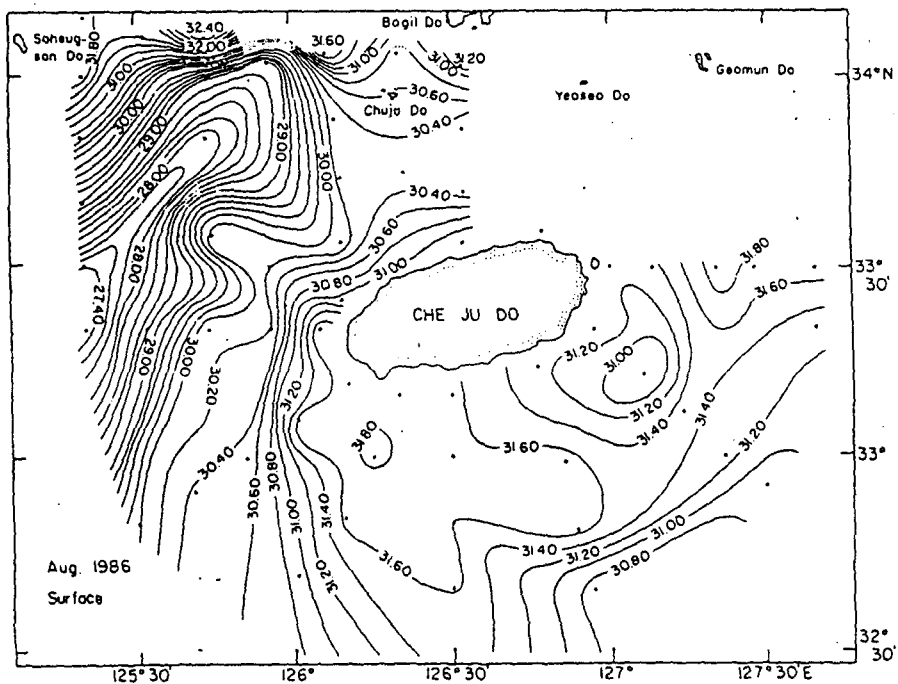


Fig. 6-5. Horizontal distributions of salinity(‰) at the surface in August, 1976.

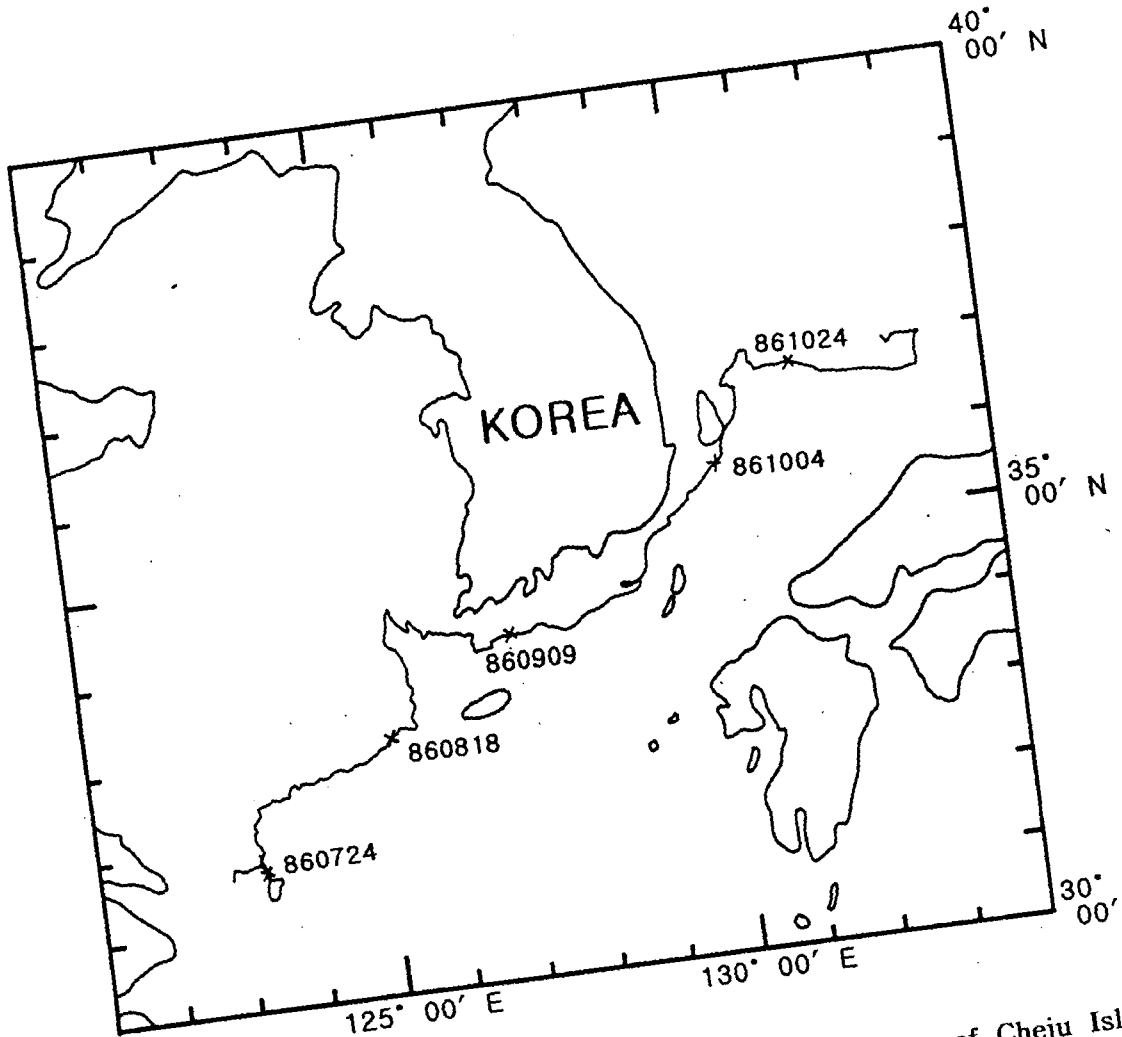


Fig. 6-6. Track of Argos Buoy released in the west sea of Cheju Isl. from July 24, 1986 (after Beardsley *et al.*, 1992).

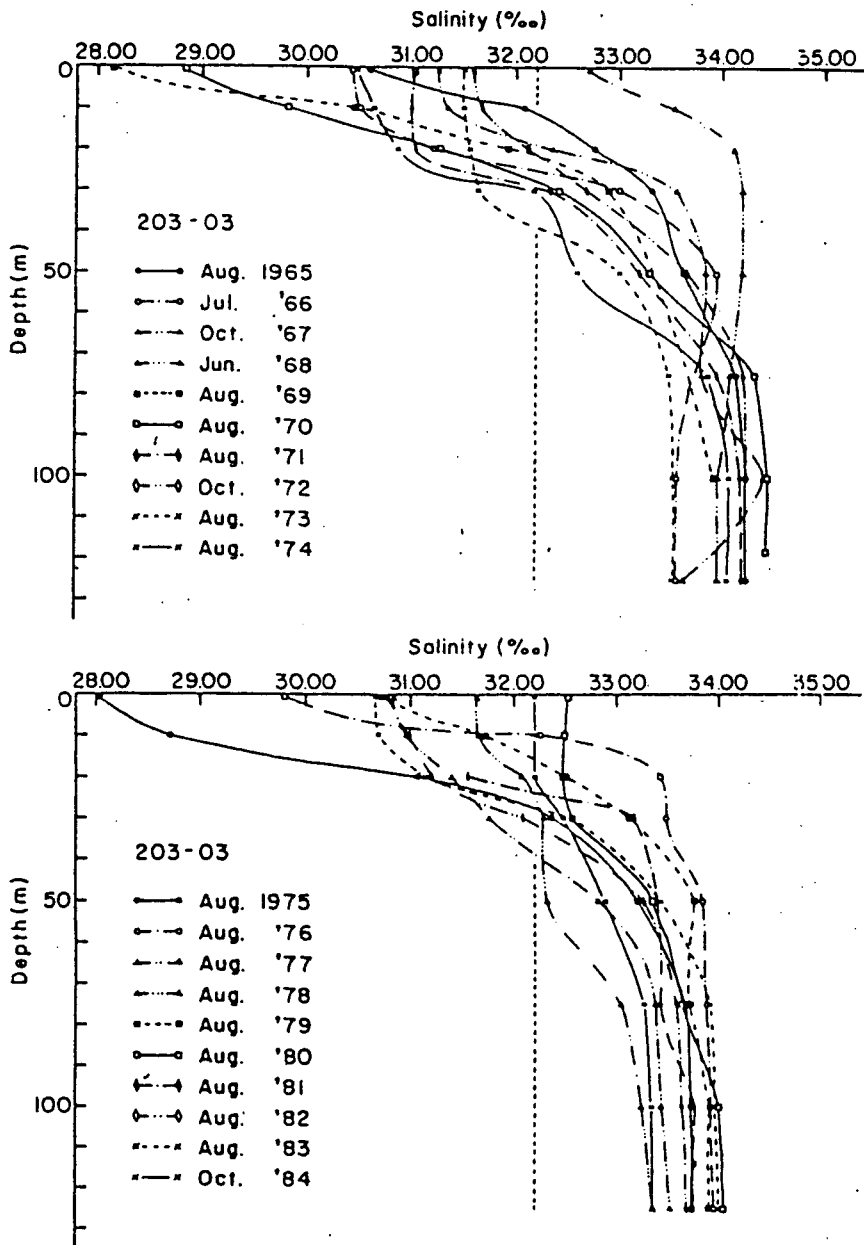


Fig. 6-7. Vertical variation of salinity(‰) when the minimum salinity appeared at station 203-03, 1965-1985. The vertical broken line indicates salinity of 32.20‰.

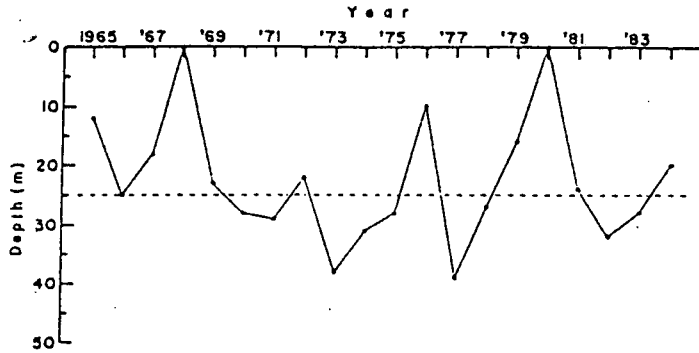


Fig. 6-8. Annual variations of the depth of salinity 32.20‰ in Fig. 6-7. The horizontal broken line indicates the depth of 25m.

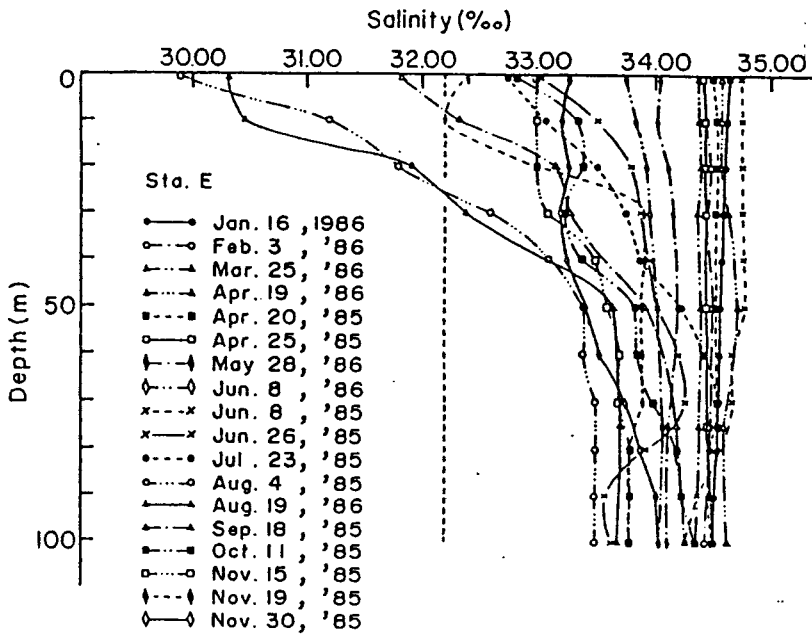


Fig. 6-9. Monthly variations of vertical salinity at station E, 1985-1986. The vertical broken line indicates salinity of 32.20‰.

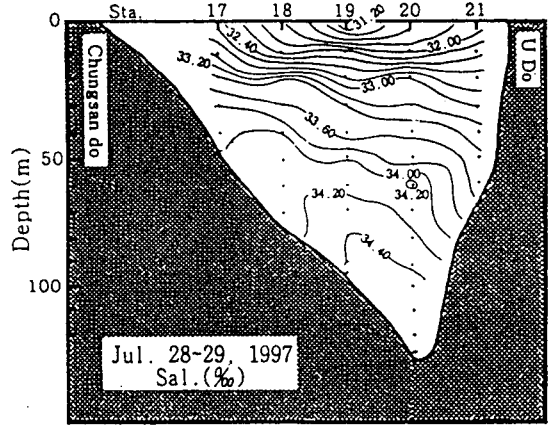
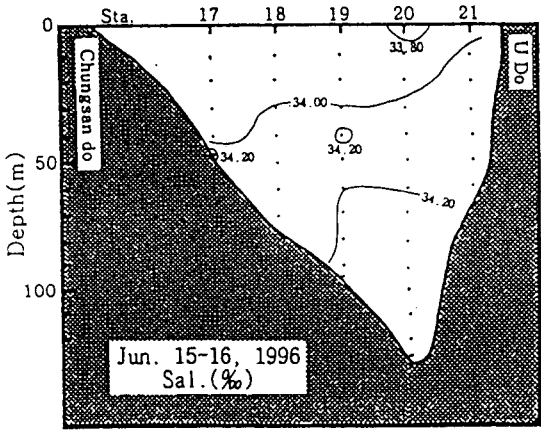
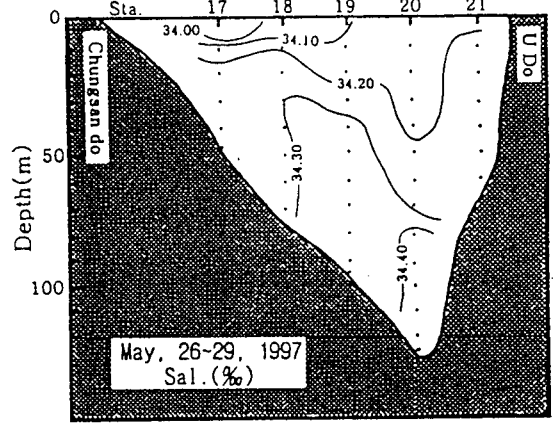
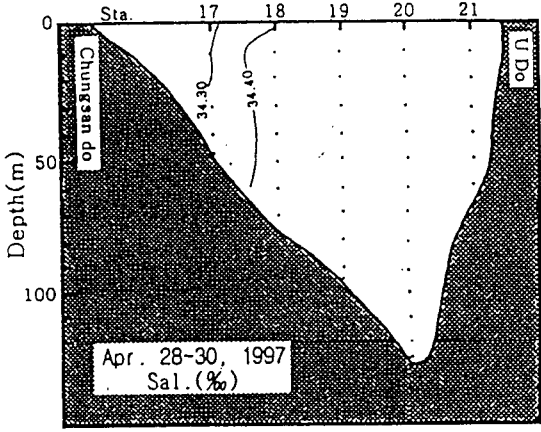
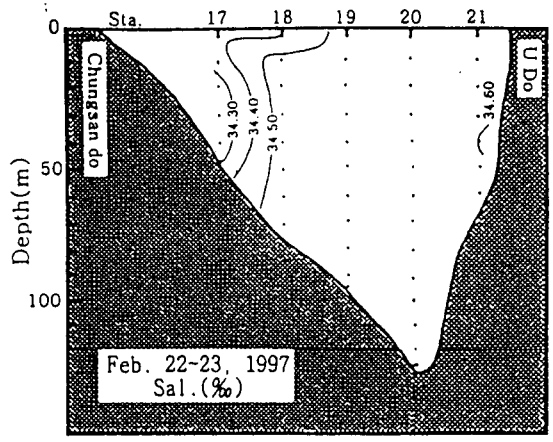
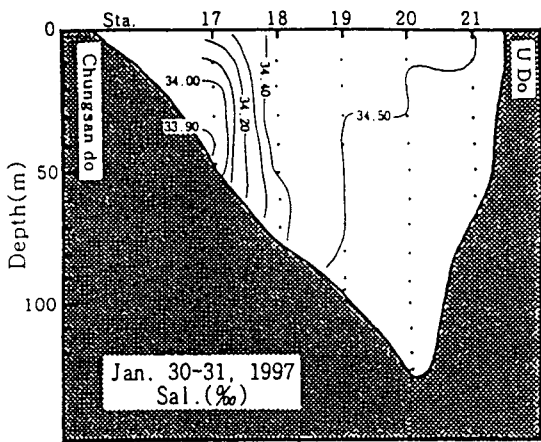


Fig. 6-10. Vertical distributions of salinity(‰) of Section 4 as shown in Fig. 6-1.

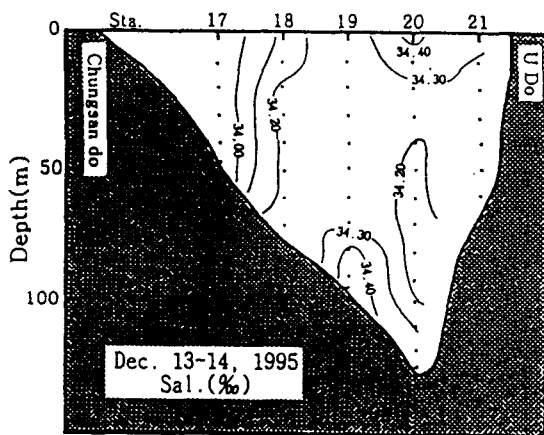
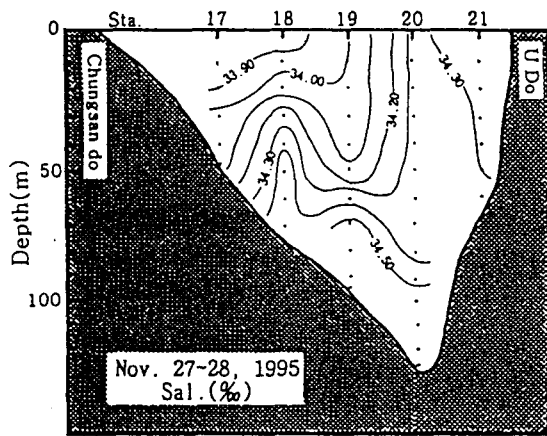
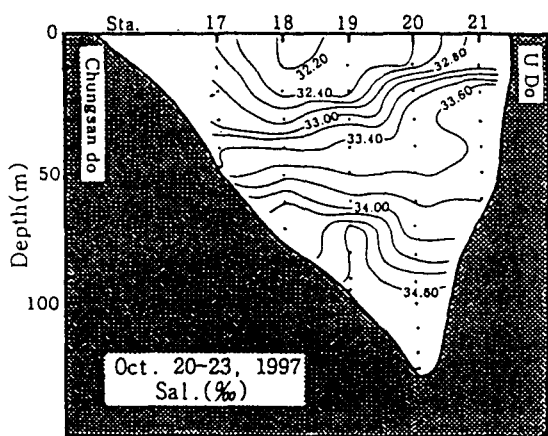
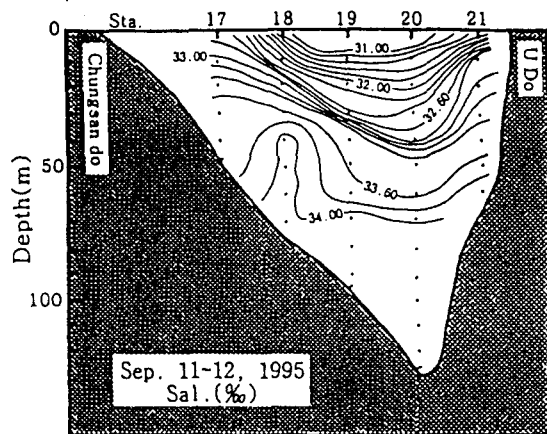
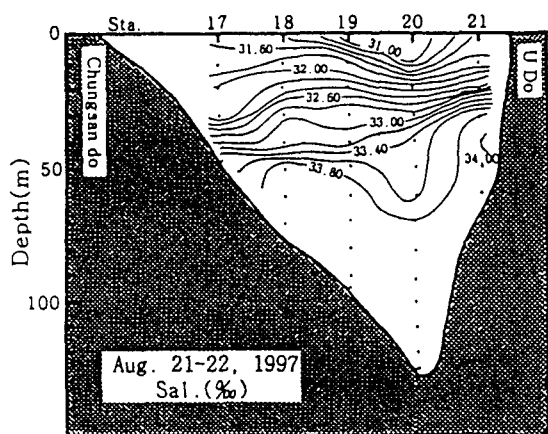


Fig. 6-10. Continued.



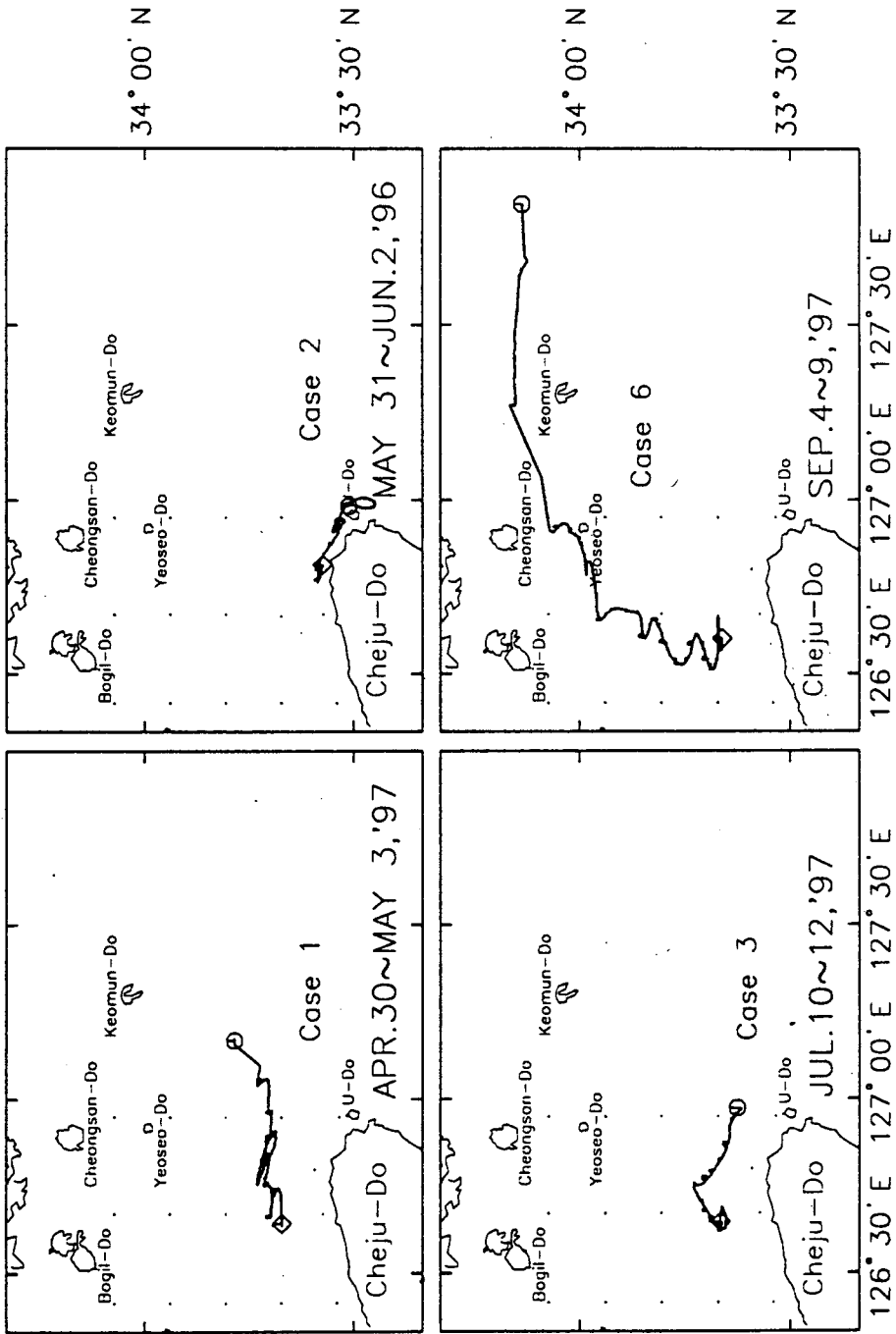


Fig. 6-11. Track of TGPS buoys released in the Straits of Cheju during 1996-1997.

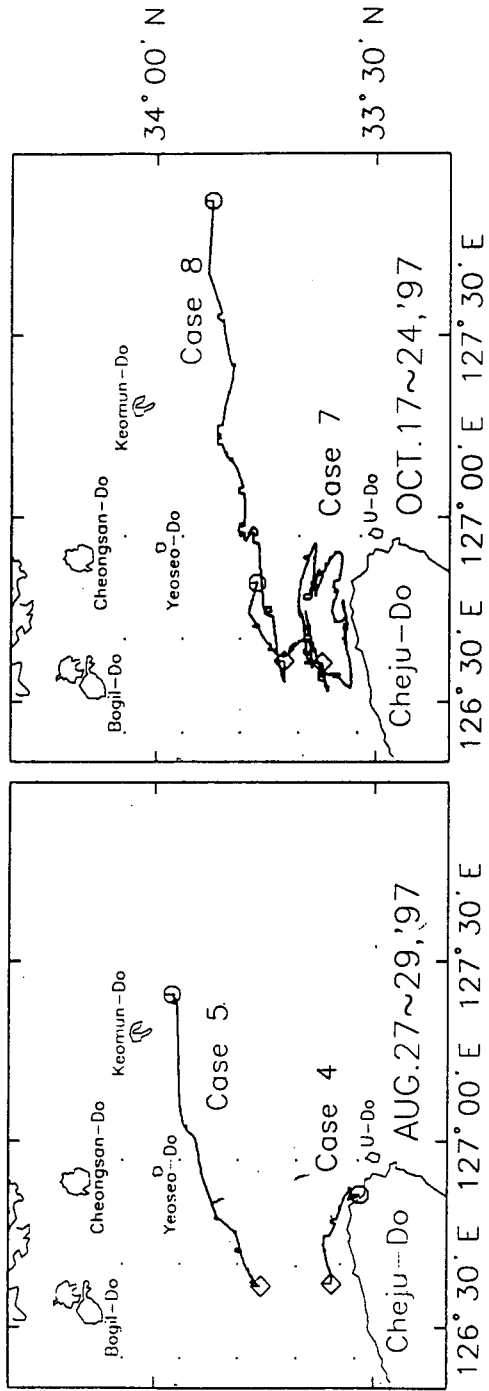


Fig. 6-11. Continued.

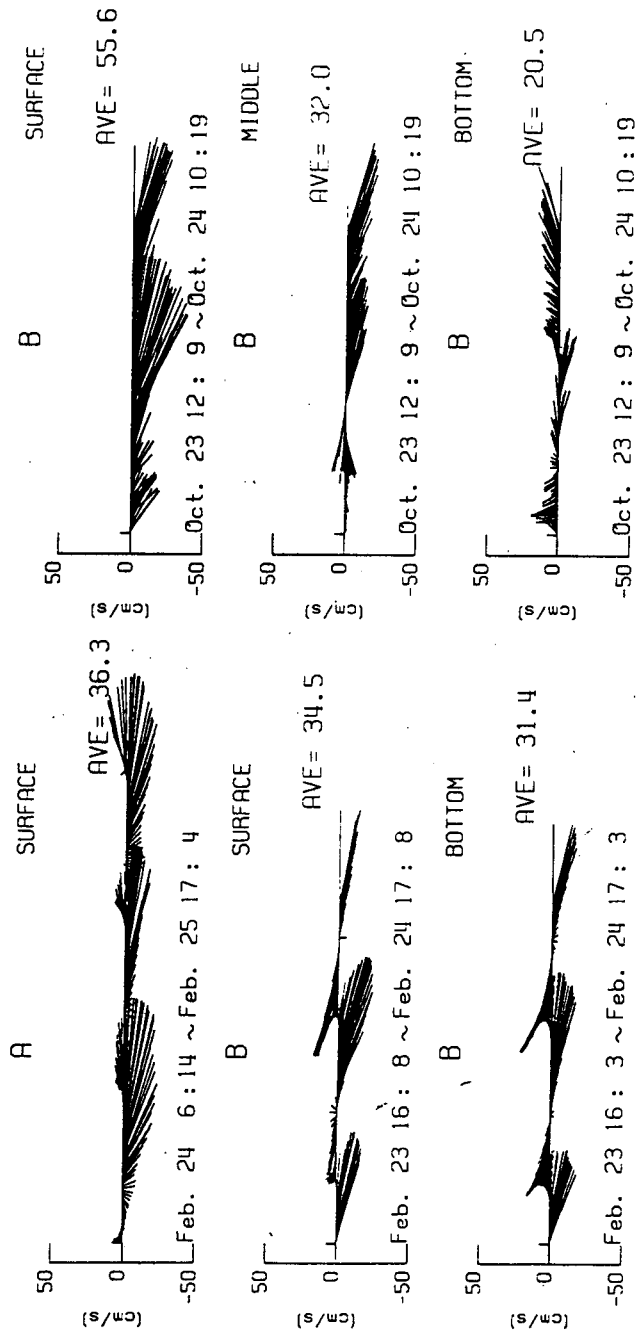


Fig. 6-12. Stick currents vectors at the east boundary line of the Cheju Strait of as shown in Fig. 6-1.

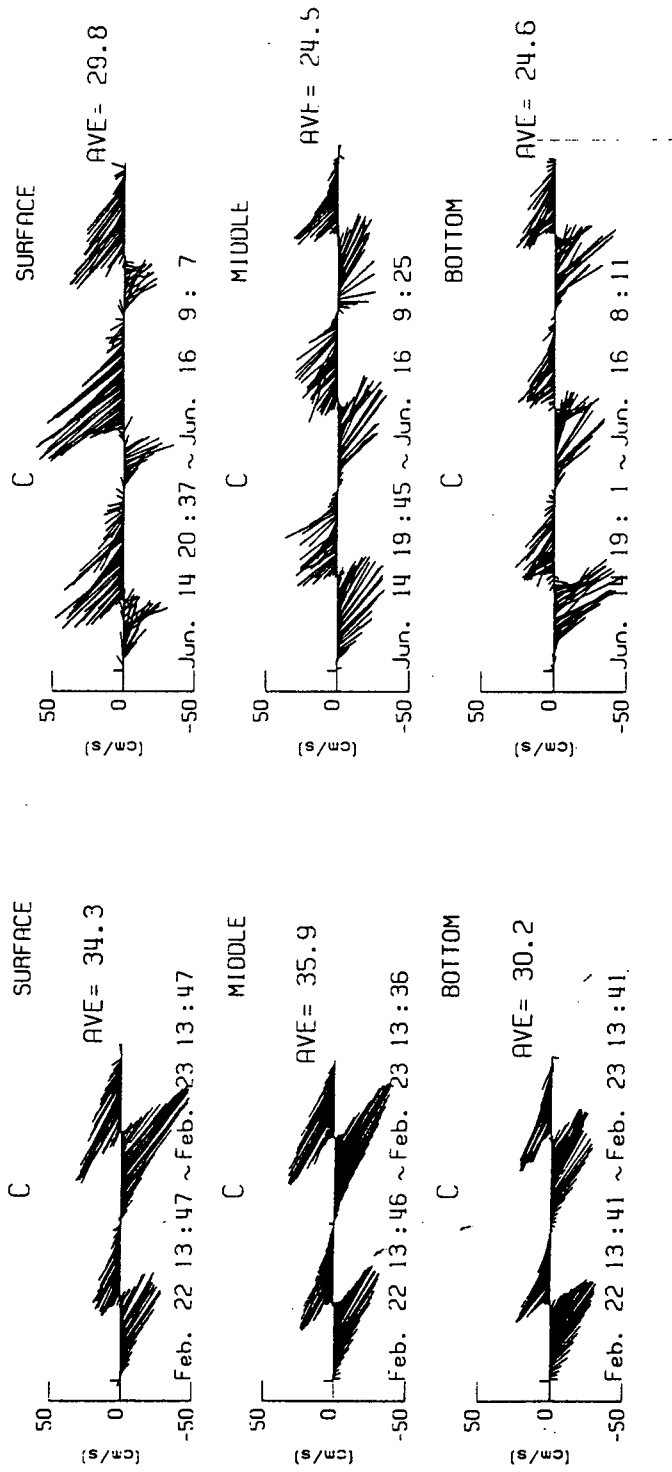


Fig. 6-12. Continued.

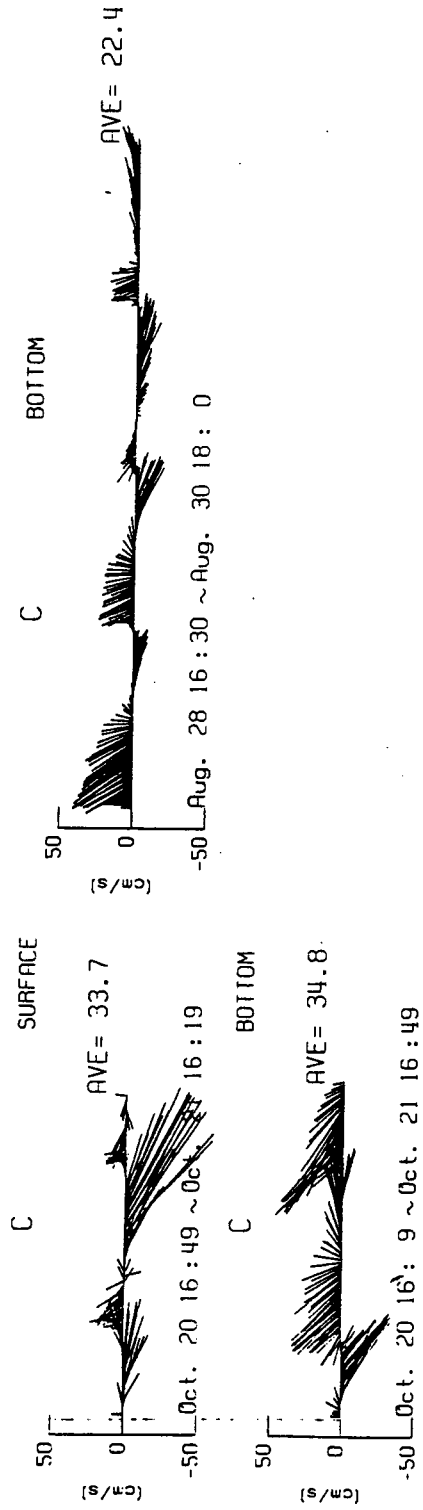


Fig. 6-12. Continued.

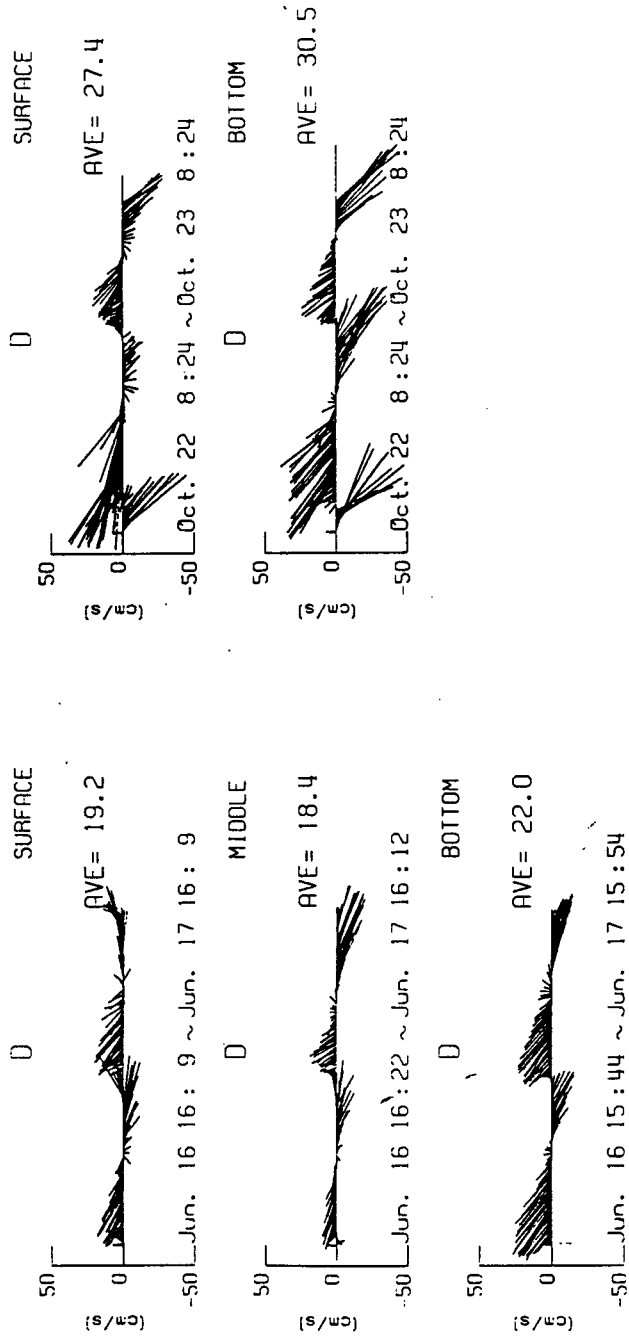


Fig. 6-12. Continued.

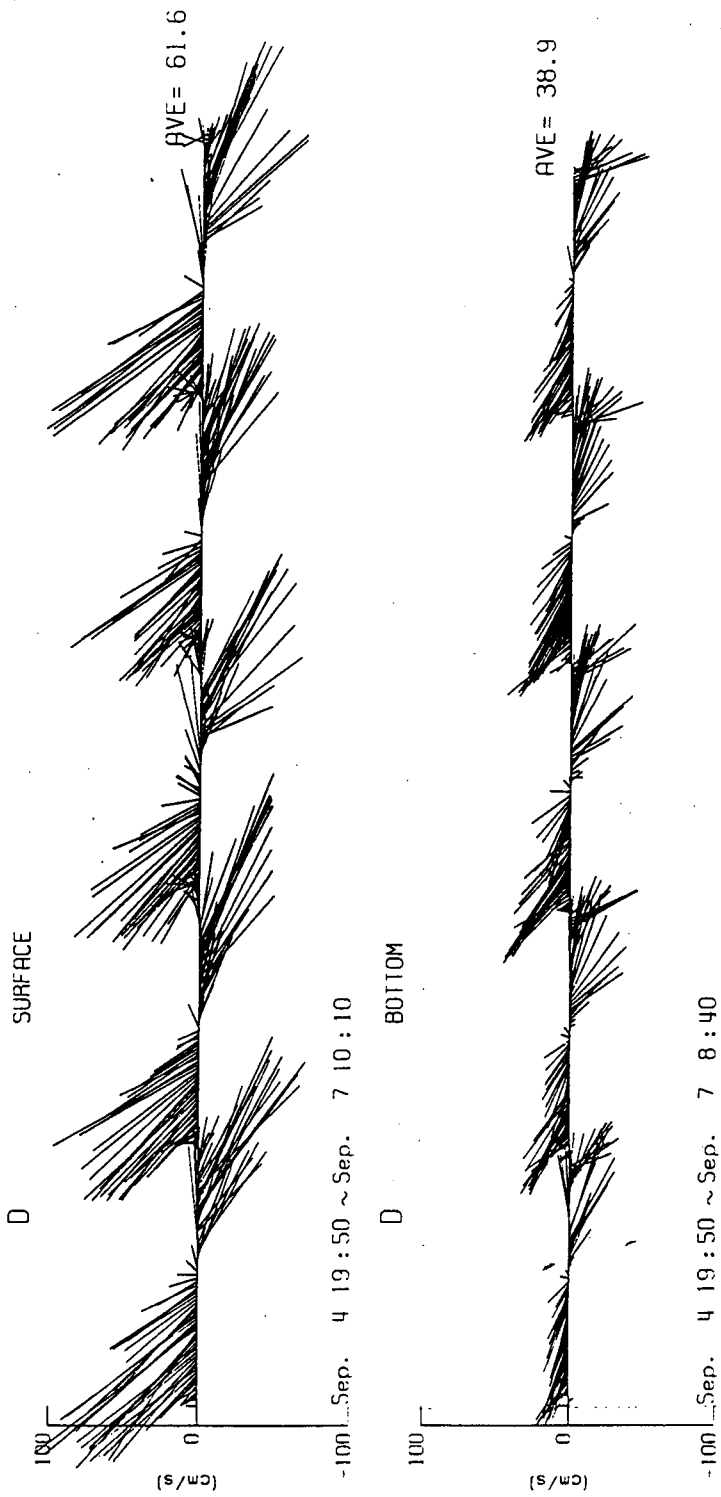


Fig. 6-12. Continued.





# 제 7 장 동중국해 중·서부역에서의 친생물원소의 동계분포특성

## 제 1 절 연구 개요

ICSU (International Council of Scientific Unions)는 최근 JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study)에 대한 평가에서 해양 주변부 (Ocean margin)에서의 자료 부족을 지적하고 대륙주변부와 대양간의 물질교환에 대한 연구의 필요성을 강조하였다. 동중국해는 전세계에서 대륙주변부와 대양간의 물질교환 연구에서 매우 중요한 해역중의 하나이다.

동중국해 대륙붕역은 양자강으로부터 상당한 양의 담수 및 퇴적물과 인간활동 기원 물질들이 유입이 된다. 대륙사면 해역에서는 세계 2대 해류의 하나인 고온고염의 쿠로시오수가 유입되어 양자강 유출수등 연안해수와 서로 혼합되기 때문에 이들의 혼합과정은 동중국해의 해황과 물질교환을 결정한다. 또한 대륙붕단역에서는 용존무기영양염이 풍부한 대륙사면 심층수가 용승되어 대륙붕단을 따라 대륙붕상으로 이동되어지기 때문에 해수 화학 특성이 연중 변화가 크다 (Liu et al., 1992; Ito et al., 1994; Chen et al., 1995).

동중국해 28°N 이북에서 분기되는 대마난류는 황해, 남해 및 동해에 열, 염을 비롯한 친생물원소등 모든 해양물질을 수송하기 때문에 (Song et al., 1990), 한국 남해, 황해 및 동중국해 동부해역의 해수 및 물질순환은 동중국해 중·서부역에서의 주요 해양과정에 의해 결정되거나 지대한 영향을 받는다. 따라서 우리나라 주변해역의 해황을 정확히 이해하기 위해서는 동중국해에서의 용존무기영양염류 분포특성 및 쿠로시오 기원수의 점유율을 이해하는 것이 매우 중요하다. 특히 중국의 삼협댐의 건설로 인하여 동중국해에서의 이들 물질순환은 차후 변동이 예견되어 동중국해의 해양환경 보전과 관리 측면에서 동중국해 해황특성의 정량적인 자료가 요구된다 (Chen, 1997).

동중국해에서의 쿠로시오 기원수의 점유율은 Ra 동위체 (226Ra, 228Ra) 추적자를 이용하여 추정될 수 있다 (Nozaki, 1989; Elsinger and Moore, 1984). 228Ra (반감기: 5.7년)과 226Ra (반감기: 1620년)은 천연 U/Th 계열 방사성 핵종으로서 주로 저층퇴적물로부터 공급되거나 강물기원의 입자들로부터 탈착 (desorption)

되어 연안역에 공급된다 (Elsinger and Moore, 1984; Reid et al., 1979; Okubo, 1980). 육상기원의 중금속과 다른 오염물질은 연안역과 대륙붕에서 체류시간이 수개월 미만으로 짧아 대부분이 연안과 대륙붕지역 퇴적물에서 침적되는 반면에 이들 Ra 동위체들은 해수중에서 용해성 및 방사붕괴를 제외한 비반응성으로 혼합과 순환에 의해 확산되고 운반되면서 연안으로부터 외양으로 멀어짐에 따라 뚜렷하게 감소한다. 특히  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 오직 반감기가 짧은  $^{228}\text{Ra}$ 의 붕괴에 의해 변화되기 때문에 해역 및 수심에 따라 현저히 다른 특성을 보인다. 따라서 이들 Ra 동위체들은 성질이 서로다른 수괴들의 특성을 이해하는 추적자로서 유용하다 (Moore et al., 1986; Okubo, 1980; Nozaki, 1989). 그러나 한반도 근해해역에서 현재까지 대부분의 연구는 동해 (Okubo, 1980; Harada and Tsunogai, 1986)와 동중국해 양쯔강 주변해역 (Nozaki, 1989; Elsinger and Moore, 1984)에서 조사되었으나 한국 남해역과 동중국해  $30^\circ\text{N}$  이북해역에서의 연구는 미비한 상태이다.

이에 따라 본 연구에서는 첫째, 동중국해 중서부역에서의 용존산소 및 용존무기영양염류의 동계 분포특성 및 수괴별 화학특성을 이해하고, 둘째로 수온과 화학성분들간의 관계를 이용하여 표층수의 기원을 추정하며, 셋째로 Ra 동위체를 이용하여 해수 기원 및 기원별 점유율을 규명하는데 주안점을 두었다.

## 제 2 절 재 료 및 방 법

### 가. 조사해역 및 관측시기

본 연구해역은 북위  $28^\circ 30' \sim 34^\circ 30'$ , 동경  $123^\circ \sim 129^\circ 30'$ 으로서 대한해협 의 남쪽입구, 황해와 동중국해 경계해역 및 동중국해 중서부해역을 포함한 해역으로서 1997년 3월 1일부터 10일까지 11일간에 걸쳐 한국해양연구소 해양연구선 온누리호를 사용하여 시료채취 및 현장관측을 실시하였다. (Fig. 7-1).

### 나. 시료채취, 보존 및 분석방법

#### (1) 시료채수 및 보존

용존무기영양염 및 용존산소 분석용 해수 시료채취는 표준수심 (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000 m, bottom)을 기본으로 하여 Rosette에 부착된 5리터들이 Niskin 채수기를 이용하여 채수하였다. 용존무기

영양염 측정을 위한 시료는 10 % 염산으로 미리 세척한 20 ml 고밀도 폴리 에틸렌 병에 담아 냉동보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

(2) 용존산소 (Dissolved Oxygen)

용존산소함량은 Winkler 방법을 이용하여 현장에서 측정하였고, 결보기산소 소비율 (AOU)은 포텐셜 수온 (potential temperature)과 염분으로부터 계산된 용존산소의 포화농도에서 관측된 용존산소의 농도를 뺀 값으로 정의하였다 (precision :  $\pm 0.5\%$  at 250 mmol/kg).

(3) 용존무기영양염류 (Dissolved Inorganic Nutrients)

용존성 암모니아이온, 질산이온, 규산은 Grasshoff 등 (1983)에 의거 자동분석기 (Aliance AutoAnalyzer)를 사용하여 측정하였으며 분석방법은 다음과 같다.

- 암모니아이온 ( $\text{NH}_4^+$ ): 시료에 phenol과 sodium nitroprusiate 혼합용액 및 sodium citrate과 sodium dichloroisocyanate 혼합용액을 가하여 발색시켰다 (precision :  $\pm 4.8\%$  at  $1 \mu\text{M}$ ).
- 질산이온( $\text{NO}_3^-$ ): 시료를 Cu-Cd Column에 통과시켜서 아질산이온으로 환원시킨 후 아질산이온 분석방법과 같은 방법으로 발색시켰다 (precision :  $\pm 0.5\%$  at  $10 \mu\text{M}$ ).
- 인산이온 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ): 시료에 ammonium molybdate potassium antimonyl - tartarate와 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 (precision :  $\pm 0.5\%$  at  $10 \mu\text{M}$ ).

(4) Ra 동위체 분석 ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ )

해수중 Ra 동위체를 추출하기 위해 선상 Ra 농축장치를 사용하였다. 선박에 설치된 해수펌프를 이용하여 표층해수를 30 L/min 속도로 입자 여과용 prefilter와  $\text{MnO}_2$  를 피복시킨 2개의 폴리프로필렌 필터에 해수를 1000리터 이상 통과시킨다. 시료채취 후 Mn 피복 필터를 회수하여 증류수로 씻어 염분을 제거한다. 필터를 절개하여 전기로에서  $550^\circ\text{C}$ 의 온도로 태운 후 빵아재로 만든 다음  $^{234}\text{Th}$  측정을 위해 10 ml 튜브에 넣어  $\gamma$  계수기로 측정하였다.  $^{228}\text{Ra}$ 과  $^{226}\text{Ra}$  측정을 위하여 20일 경과 후 다시 계수하였다.  $^{228}\text{Ra}$  (반감기; 5.75년) 측정을 위하여  $^{228}\text{Ra}$ 과 영년 평형 (secular equilibrium)을 이룬 딸 핵종인  $^{228}\text{Ac}$  (반감기; 6.13시간)을 측정하였고,  $^{226}\text{Ra}$  측정은 영년 평형을 이룬 딸 핵종인  $^{214}\text{Pb}$  (반감기; 26.8분)을 측정하였다.

### 제 3 절 결 과

#### 가. 용존산소 및 용존무기영양염류 수평분포 특성

- (1) 표층 용존산소 함량 범위는 232 (정점 L10) ~ 342  $\mu\text{M}$  (정점 G3)로서 수온 및 염분의 분포양상과 유사하여 저온저염 ( $<10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)의 제주도 서남해역에서는 310  $\mu\text{M}$  이상으로 높은 반면에 고온고염 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)을 보이는 동중국해 남동쪽의 쿠로시오 수계에서는 250  $\mu\text{M}$  이하이다. 300  $\mu\text{M}$ 의 용존산소 함량 등치선이  $30^{\circ}\text{N}$  이남까지 확장되어 있다 (Fig. 7-2a).
- (2) 수심 20 m와 50 m에서의 용존산소 함량은 각각 238 (정점 L11) ~ 322  $\mu\text{M}$  (정점 A2), 215 (정점 L6) ~ 337  $\mu\text{M}$  (정점 G5) 범위로서 표층과 거의 유사하여 제주도 서남해역의 저온저염수에서는 300  $\mu\text{M}$  이상으로 높고, 고온고염의 쿠로시오수에서는 250  $\mu\text{M}$  이하이다 (Fig. 7-2b, 7-2c). 이러한 고온고염의 외양수의 성질을 가진 쿠로시오는 동중국해로 유입되어 쿠로시오수와 연안수간의 혼합을 통해 용존산소함량 변화와 분포에 중요한 역할을 한다.
- (3) 표층 암모니아이온 농도는 0.01 (정점 F7) ~ 0.86  $\mu\text{M}$  (정점 A4) 범위로서 용존산소 함량이 가장 높은 제주도 서남해역에서 대체로 낮은 농도를 보인다 (Fig. 7-3a). 수심 20 m에서는 0.49 ~ 0.61  $\mu\text{M}$ 로서 범위 폭이 표층보다는 작다 (Fig. 7-3b). 수심 50 m에서의 암모니아이온농도 범위는 0.03 (정점 G3) ~ 1.33  $\mu\text{M}$  (정점 A4)로서 표층의 분포양상과 유사하다 (Fig. 7-3c).
- (4) 표층 질산이온 농도는 0.48 (정점 L9) ~ 9.95  $\mu\text{M}$  (정점 O2)로서 용존산소 함량분포와 유사하여 저온저염 ( $<10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)의 제주도 서남해역에서는 6  $\mu\text{M}$  이상으로 높은 반면에 고온고염 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)을 보이는 동중국해 남동쪽의 쿠로시오 수계에서는 1  $\mu\text{M}$  이하이다 (Fig. 7-4a). 수심 20 m에서는 0.62 ~ 10.59  $\mu\text{M}$ 로서 표층의 분포양상과 유사하다 (Fig. 7-4b). 수심 50 m에서의 질산이온 농도는 0.69 (정점 B9) ~ 6.54  $\mu\text{M}$  (정점 O2)의 범위로서 표층 분포 양상과 유사하여 표층과의 혼합이 비교적 활발하다는 것을 암시한다 (Fig. 7-4c). 표층 인산이온 농도는 0.01 (정점 L9) ~ 0.65  $\mu\text{M}$  (정점 O2) 범위로서 질산이온 농도 분포와 마찬가지로 저온저염 ( $10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)의 제주도 서남해역에서는 0.3  $\mu\text{M}$  이상이고, 고온고염 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)의 동중국해 남동쪽의 쿠로시오 수계에서는 0.1  $\mu\text{M}$  이하이다 (Fig. 7-5a). 수심 20 m와 수심 50m에서의 인산이온 농도는 0.01 ~ 0.50  $\mu\text{M}$ 로서 표층과 유사한 분포를 보였다 (Fig. 7-5b, 7-5c). 규산농도는 표층이 2.1

(정점 M9) ~ 18.64  $\mu\text{M}$  (정점 O2), 20 m에서는 0.9 ~ 22.03  $\mu\text{M}$ , 50 m에서는 2.0 (정점 M9) ~ 13.83 (정점 O2)의 범위로서 질산이온 및 인산이온 농도분포와 유사하여 저온저염의 제주 서남해역에서 15  $\mu\text{M}$  이상으로 높다 (Fig. 7-6a,b,c).

## 나. 용존산소 및 용존무기영양염류 수직분포 특성

### (1) 관측선 A (대한해협 횡단면)

용존산소 함량은 저온저염 ( $>11^\circ\text{C}$ ,  $<34.4$  psu)인 정점 A4의 수심 75 m에서 296  $\mu\text{M}$ 로 최대값을 보였고, 한국연안에서 일본쪽으로 갈수록 감소하여 고염수 (34.53 psu)로 구성된 정점 A6의 50 m 수심에서 256  $\mu\text{M}$ 로서 최소값을 보였다 (Fig. 7-7). 수직적으로는 표층과 저층이 비교적 균일하다.

암모니아이온, 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 대체로 용존산소함량 분포와 유사하다 (Fig. 7-7). 저온 ( $>11^\circ\text{C}$ ), 고함량의 용존산소 ( $>290$   $\mu\text{M}$ )를 함유한 정점 A4의 50~75 m 수심에서는 암모니아이온농도는 1.33  $\mu\text{M}$ 로 높은 반면에 질산이온, 인산이온 및 규산은 각각  $<2.8$ ,  $<0.2$ ,  $<4.0$   $\mu\text{M}$ 의 낮은 농도를 갖는 것이 특이하다.

### (2) 관측선 D (126 $^\circ\text{E}$ 남북 횡단면)

용존산소와 용존무기영양염류 농도는 활발한 수직혼합이 일어나는 정점 D2~D7, 상층에 저온저염수 ( $<12^\circ\text{C}$ ,  $<33.9$  psu)의 유입으로 성층이 형성되어 있는 정점 D9~D15, 저온저염수와 고온고염수 ( $>20^\circ\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)간의 경계인 정점 D15~D17, 고온고염수가 유입되는 정점 L6~M8등 크게 4 구역으로 나눌 수 있다.

일반적으로 용존산소와 용존무기영양염류 농도는 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 감소하며, 저온저염의 특성을 보이는 정점 D9~D15의 수심 30 m 이내의 상층부에서는 질산이온, 인산이온 및 규산농도가 각각  $<3.0$ ,  $<0.2$ ,  $<4.0$   $\mu\text{M}$ 로 낮다. 반면에 제주도 이북해역 (정점 D2~D7)에서는 활발한 수직혼합으로 인해 수직적으로 균일하며, 저층으로 부터의 공급으로 인해 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 각각 3.5~6.0, 0.2~0.5, 4~10  $\mu\text{M}$ 의 범위이다. 29  $^\circ\text{N}$  이남의 정점 L6~M8의 표면혼합층에서는 빈영양의 고온고염수 ( $>20^\circ\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)의 유입으로 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 각각  $<1.0$ ,  $<0.1$ ,  $<2.0$   $\mu\text{M}$ 로서 거의 결핍되어 있지만 수온약층을 경계로 하여 수심증가에 따라 영양염 농도는 급격히 증가한다 (Fig. 7-8).

### (3) 관측선 F (황해 입구)

용존산소 및 용존무기영양염류 농도분포는 활발한 표·저층수간의 혼합으로 인해 수직적으로 균일하다. 정점 F3~F7간의 수온 및 염분전선을 경계로 하여 저온저염 (<9°C, <32 psu)의 특성을 보이는 중국 근접해역에서 용존산소, 질산이온, 인산이온 및 규산농도가 각각 >310, >9.0, >0.6, >18  $\mu\text{M}$ 로 높고, 한반도근접해역에서는 각각 <280, <4.0, <0.3, <8  $\mu\text{M}$ 로 낮다 (Fig. 7-9).

(4) 관측선 L (동중국해 횡단면; 28.5~29.5 °N)

용존산소함량 및 용존무기영양염류 농도는 내대륙붕 (정점 O8~L3)에서는 수직적으로 균일하다. 외해쪽으로 갈수록 이들 농도들은 감소하여 고염 (>34.6 psu)의 대륙사면해역 표면혼합층에서의 용존산소 함량은 240  $\mu\text{M}$  이하이고, 질산이온 및 인산이온농도는 각각 <1, <0.1  $\mu\text{M}$ 로서 결핍되어 있다. 수심 증가에 따라 질산이온 및 인산이온농도는 급격히 증가하여 수심 500 m 에서 각각 31.7, 2.3  $\mu\text{M}$ 의 최대값을 보였다 (Fig. 7-10).

(5) 관측선 M (동중국해 동서횡단면; 28~29 °N)

용존산소 및 용존무기영양염류 농도분포는 수온 및 염분분포와 유사하다. 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 대륙붕에서 외해쪽으로 갈수록 점차 감소하여 고온고염수 (>18°C, 34.6 psu)의 특성을 보이는 표면혼합층에서의 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 각각 <1.0, <0.1, <2.0  $\mu\text{M}$ 로 결핍되어 있다 (Fig. 7-11).

(6) 관측선 O (123 °E 남북횡단면)

수심이 70 m 이내로 얕은 관측선 O에서의 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 대체로 수직적으로 균일하다. 용존산소, 질산이온, 인산이온 및 규산농도범위는 각각 275~310  $\mu\text{M}$ , 4.9~10.8  $\mu\text{M}$ , 0.3~0.6  $\mu\text{M}$ , 9.0~21.6  $\mu\text{M}$ 로서 저온저염 (<10°C, <33 psu) 특성을 보이는 북쪽에서 고온고염 (>13°C, >34.3 psu)의 남쪽으로 내려올수록 점차 감소한다 (Fig. 7-12).

(7) 관측선 P (124 °E 남북단면)

관측선 O와 마찬가지로 용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 수직적으로 균일하다. 용존산소, 질산이온, 인산이온 및 규산농도범위는 각각 272~313  $\mu\text{M}$ , 3.5~8.1  $\mu\text{M}$ , 0.2~0.4  $\mu\text{M}$ , 5.9~15.5  $\mu\text{M}$ 로서 용존무기영양염류 농도는 관측선 O와 마찬가지로 저온저염의 북쪽에서 고온고염의 남쪽으로 내려올수록 감소하지만, 농도는 3/4 수준이다 (Fig. 7-13).

(8) 관측선 Q (125 °E 남북단면)

용존산소 및 용존무기영양염류 농도는 대체로 수직적으로 균일하다. 정점 Q6의 수심 30 m 에서는 용존산소함량이 223  $\mu\text{M}$ 로 최소값을 보였다. 반면에 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 각각 7.6, 0.4, 14.9  $\mu\text{M}$ 로서 최대값을 보였는데 이는 수심 30~40 m 에 형성된 염분약층으로 인해 축적된 유기물의

분해 결과이다. 용존산소, 질산이온, 인산이온 및 규산농도는 각각 223~329  $\mu\text{M}$ , 0.7~7.6  $\mu\text{M}$ , 0.1~0.4  $\mu\text{M}$ , 3.0~14.9  $\mu\text{M}$  범위이다 (Fig. 7-14).

## 제 4 절 고 찰

### 가. 동중국해 중서부역의 해수기원 예비 평가

1997년 3월 동중국해 표층수에서의 염분과 수온, 화학성분들과 수온간의 관계를 Fig. 7-15~7-21에 나타내었다.

용존산소는 저온저염수 ( $<10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)에서는 300  $\mu\text{M}$  이상이나 고온고염수 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)에서는 260  $\mu\text{M}$  이하로 낮다. (Fig. 7-15).

암모니아 이온 농도와 수온간의 관계는 질산이온, 인산이온 및 규산과는 달리 수온과는 빈약한 관계를 보인다 (Fig. 7-16). 이것은 일반적으로 해양에서 암모니아는 질소계 유기물의 분해시 가장 먼저 분해되어 나온 환원된 화학 형태로서 해양식물의 질소계 영양염중 가장 선택적으로 먼저 흡수하는 성분이기때문에 유허대에 낮은 농도로 존재하고, 그 농도 또한 시·공간적으로 크게 변화된다 (Spencer, 1975).

질산이온과 인산이온 농도는 저온저염수 ( $<10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)에서는 각각 4~10, 0.25~0.65  $\mu\text{M}$ 의 범위로서 농도변이폭이 크다. 반면에 고온고염수 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)에서는  $<1$ ,  $<0.1$   $\mu\text{M}$  이하로서 저온저염수에서의 농도들과는 달리 범위 폭이 매우 작고, 거의 결핍되어 있다 (Fig. 7-17~18). 규산농도 또한 질산이온 및 인산이온 농도와 마찬가지로 저온저염수 ( $<10^{\circ}\text{C}$ ,  $<33$  psu)에서는 11~21  $\mu\text{M}$ 로 높고, 고온고염수 ( $>20^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu)에서는  $<2$   $\mu\text{M}$  이하로서 변이폭이 작고, 농도 또한 낮다 (Fig. 7-19).

염분과 수온간의 도표에서는 저온저염수 ( $<9^{\circ}\text{C}$ ,  $<32$  psu), 고온고염수 ( $>22^{\circ}\text{C}$ ,  $>34.6$  psu), 그리고 이 두해수의 수온과 염분 특성이 교차되는 혼합수 (T:13~14 $^{\circ}\text{C}$ , S $\approx$ 34.5 psu) 등 크게 3개의 단성분(end-member)으로 나뉘어 진다 (Fig. 7-20). 암모니아이온을 제외한 용존산소 및 용존무기영양염류와 수온간의 관계에서도 고산소고영양염의 저온저염수, 저산소저영양염의 고온고염수 및 이 두해수의 특성이 교차되는 혼합수 (T:13~14 $^{\circ}\text{C}$ , S $\approx$ 34.5psu)로 크게 3개의 단성분으로 나눌 수 있다. 각각의 단성분들에 해당하는 해수에서의 수온, 염분 및 화학성분들의 조성을 Table 7-1에 나타내었다. 여기서 화학성분들은 평균값으로 나타내었다.

Table 7-1. Characteristics of end-members in the northwestern East China Sea.

Water masses	T (°C)	S (psu)	DO ( $\mu$ M)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ M)	Si(OH) <sub>4</sub> ( $\mu$ M)	NO ( $\mu$ M)	<sup>228</sup> Ra/ <sup>226</sup> Ra
중국대륙연안수	<9	<32	325	9.9	0.65	21.0	395	3.5(Nozaki,1989)
혼합수	13~14	≈34.5	277	4.0	0.30	7.2	312	0.6
쿠로시오수	>20	>34.6	232	0.6	0.03	1.3	238	0.2(Nozaki,1989)

두해수의 특성이 교차되는 혼합수는 쿠로시오 해수에 중국대륙연안수가 일부 (11~49%) 혼합된 것으로 사료되나 동중국해 해수를 구성하는 단성분으로 뚜렷하게 정의하기 위해서는 차후 정밀관측과 심도있는 자료분석이 필요하다.

직선에서 벗어난 정점들 (Q9, O8, L1, M6, Q2, S4, S5)은 식물플랑크톤의 광합성으로 용존산소가 생성되고 영양염류가 흡수되어 주변 정점들보다 고용존산소와 저영양염 농도 특성을 보인다 (Fig. 7-15~19).

실제로 이들 정점들에서의 용존산소 포화도 및 엽록소 a 농도는 각각 >110%, >1  $\mu$ g/l 로서 주변정점들보다 높아 식물플랑크톤에 의한 광합성이 활발하였다. 따라서 용존산소 및 용존무기영양염류농도는 비보존적 (non-conservative)으로 생물과정에 의해 변화되는 특성을 갖고 있기때문에 보존성 변수 (conservative parameter)인 NO로 치환하였다. NO는 유기물질이 분해되면서 소모된 용존산소와 생성된 질산이온의 합 ( $[NO] = 8.6[NO_3] + [O_2]$ )으로서 용존산소와 질산이온 농도는 각각은 생물과정에 의해 변화하지만 이 두개의 합은 변화되지 않는다 (Broecker, 1974). NO와 수온간의 관계에서 또한 높은 NO값을 갖는 저온저염수, 낮은 NO값의 고온고염수 및 변곡점부근의 해수등 3개의 단성분 (end-member) 을 보여준다 (Fig. 7-21).

위의 사항들을 종합해보면 3월 동중국해 중서부역에서의 표층 해수는 저온저염수, 고온고염수 및 두해수가 수온과 염분 특성이 교차되는 혼합수에 해당하는 3개의 단성분 해수의 혼합과 생물과정에 의해 용존산소 및 용존무기영양염류의 분포특성이 결정되는 것으로 판단된다.



## 나 표층수중 $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ 방사능 분포

1996년 10월 2일부터 12일까지 11일간 총 12개 정점에서 표층수중 Ra 동위체 분석용 해수시료를 채수하여 분석하였다 (Fig. 7-22). 조사된 정점들에서의 수온 및 염분은 각각  $20.15 \sim 26.06 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $31.29 \sim 34.01 \text{ psu}$  범위로서 한국서남해역에서 저온저염 ( $<23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $<32 \text{ psu}$ )을 보이고, 동중국해의 대륙붕단역에서 고온고염 ( $>25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $33.7 \text{ psu}$ )을 보였다 (Table 7-2).

표층수중  $^{228}\text{Ra}$  방사능은  $0.075 \sim 0.339 \text{ dpm/l}$  의 범위로서 쿠로시오의 영향을 받는 동중국해 대륙붕단역과 대한해협 및 일본쪽 해역에서  $0.2 \text{ dpm/l}$  이하의 낮은 농도를 보인 반면에 한국 및 중국연안정점들에서  $0.3 \text{ dpm/l}$  이상의 높은 농도를 보였다. 동중국해 대륙붕단역에서의  $^{228}\text{Ra}$  농도는 쿠로시오 본류역에서 Nozaki 등 (1991)에 의한 조사된  $0.007 \sim 0.015 \text{ dpm/l}$  보다는 약 10배 정도 높다. 이것은 수심이 낮은 천해역에서는 저층퇴적물로부터  $^{228}\text{Ra}$ 의 공급이 많기 때문이다.

표층수중  $^{226}\text{Ra}$  방사능은  $0.09 \sim 0.18 \text{ dpm/l}$  로서 황해표층수중의  $0.16 \sim 0.20 \text{ dpm/l}$  보다는 약간 낮다 (Nozaki et al., 1991).  $^{226}\text{Ra}$  방사능 분포는  $^{228}\text{Ra}$  과 유사하여 한국 및 중국연안에서 높고 동중국해 대륙붕단역에서 낮지만,  $^{226}\text{Ra}$ 의 최대값과 최소값간의 농도차이는  $0.09 \text{ dpm/l}$  로서  $^{228}\text{Ra}$  의 방사능 차이인  $0.26 \text{ dpm/l}$  보다는 상당히 적다. 이것은  $^{226}\text{Ra}$  ( $t_{1/2}$ : 1622년)과  $^{228}\text{Ra}$  ( $t_{1/2}$ : 5.75년)간의 반감기 차이와  $^{228}\text{Ra}$ 이  $^{226}\text{Ra}$ 에 비해 해저퇴적물로부터 훨씬 많이 공급되기 때문으로 사료된다 (Yamada and Nozaki, 1986). 따라서 연안역 해수중에서  $^{228}\text{Ra}$ 은  $^{226}\text{Ra}$ 에 비해 상대적으로 높은 방사능을 보인다. 이와같이 Ra 동위체들은 해역에 따라 현저히 다르기 때문에 각 수괴의 특성과 혼합정도를 이해하는데 유용하다 (Moore et al., 1986).

Table 7-2. Ra isotopes activities in the surface water of East China Sea and the South Sea of Korea in October, 1996.

Region	St.	Location		T (°C)	S (psu)	<sup>228</sup> Ra (dpm/l)	<sup>226</sup> Ra (dpm/l)	$\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$
		Latitude	Longitude					
Korea Strait	A2	34° 31.63'	128° 22.37'	22.14	31.954	0.334±0.020	0.178±0.009	1.88
	A4	34° 24.26'	128° 27.95'	22.96	32.856	0.226±0.014	0.140±0.007	1.61
	A6	33° 57.76'	128° 50.13'	24.98	34.013	0.075±0.007	0.093±0.002	0.83
South Sea	C1	34° 09.77'	127° 37.81'	22.15	32.143	0.283±0.009	0.148±0.004	1.90
	C3	33° 50.03'	127° 53.98'	20.61	32.450	0.299±0.018	0.157±0.009	1.92
	G1	34° 04.91'	126° 49.90'	21.59	31.702	0.337±0.010	0.116±0.004	2.12
	D2	34° 00.07'	126° 00.18'	22.43	31.806	0.339±0.017	0.160±0.007	2.12
	D4	33° 30.03'	126° 00.09'	22.75	32.404	0.293±0.015	0.154±0.007	1.90
	E6	33° 43.98'	124° 50.18'	20.83	31.342	0.293±0.009	0.142±0.004	2.06
	E8	34° 00.02'	125° 30.06'	20.15	31.929	0.290±0.011	0.144±0.005	2.02
East China Sea	B5	31° 29.89'	127° 00.09'	26.06	33.913	0.121±0.021	0.159±0.007	1.05
	D8	32° 30.04'	125° 59.88'	24.65	33.739	0.152±0.006	0.151±0.005	1.01

(1) 염분과 Ra 동위체와의 관계

천연 U/Th 계열 방사성 핵종인 <sup>228</sup>Ra 과 <sup>226</sup>Ra은 주로 저층퇴적물로부터 확산에 의해 공급되거나 강물기원의 입자들로부터 탈착 (desorption)되어 연안역에 공급된다. 그러나 육상기원의 중금속과 다른 오염물들은 연안역과 대륙붕에서 체류시간이 수개월 미만으로 짧아 대부분이 연안과 대륙붕지역 퇴적물에서 침적되는 반면에 이들 Ra 동위체들은 해수중에서 용해성으로 해수의 물리적 혼합과 순환에 의해 표층해수로 확산하고 운반되면서 방사붕괴 (radio-decay)하여 외양역까지 영향을 미쳐 연안으로부터 멀어짐에 따라 뚜렷한 농도구배를 나타낸다. 본 연구해역에서의 혼합과 순환에 의한 Ra 동위체 추적자로서의 유용성을 이해하기 위한 염분과 <sup>226</sup>Ra과 <sup>228</sup>Ra에 대한 상관관계는 아래와 같다.

$$^{226}\text{Ra} = 0.357 - 0.007 \times \text{Salinity} \quad (r=-0.27)$$

$$^{228}\text{Ra} = 3.261 - 0.092 \times \text{Salinity} \quad (r=-0.95)$$

<sup>226</sup>Ra에 비해 <sup>228</sup>Ra은 염분과 상당히 양호한 역의 상관관계를 보여 저염수에서는 높은 <sup>228</sup>Ra 농도를 갖고있어 남해와 동중국해는 일반적으로 저염수에 의해 크게 영향을 받는 것을 알수있다 (Fig. 23, 24). 또한 <sup>228</sup>Ra의 기울

기는  $^{226}\text{Ra}$ 의 기율기보다 약 13배 정도 높다. 이것은  $^{226}\text{Ra}$  (1622년)과  $^{228}\text{Ra}$  (5.75년)간의 반감기 차이에 기인하는 것으로서  $^{228}\text{Ra}$ 은 염분이 높은 외양으로 갈수록  $^{226}\text{Ra}$ 보다는 상대적으로 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

(2)  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 농도비

외양 표층에서의  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ra}$ 은 염분과 같이 강수와 증발에 의해, 영양염류같이 생물 섭취에 의해 농도가 변할 수 있다. 그러나  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비율은 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 추적자로 이용할 수 있다. 또한 이들 Ra 동위체의 농도분포는 해역 및 수심에 따라 현저히 다르기 때문에 다양한 해양환경에서의 성질이 서로 다른 수괴들의 특성과 혼합정도를 이해하는 추적자로서도 유용하다 (Moore et al., 1986; Okubo, 1980; Nozaki, 1989).

본 연구해역  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비와 염분과의 상관관계는 다음과 같다.

$$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra} = 21.61 - 0.61 \times \text{Salinity} \quad (r=0.91)$$

본 연구해역에서  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 농도비는 한국 남해 및 중국연안에서 1.61 ~ 2.12 로서 쿠로시오의 영향을 많이 받는 동중국해 대륙붕단역의 0.80 ~ 1.01 보다 약 2배정도 높다 (Table 7-2).  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비율 또한 염분과 상당히 양호한 역의 상관관계를 보여 남해와 동중국해는 일반적으로 저염수에 의해 크게 영향을 받는 것을 알수있다. 일반적으로 쿠로시오 표층수에서의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비율은 0.5이하로서 낮고, 황해 및 동중국해 연안해역에서는 3-4 정도 범위이다 (Nozaki, 1989). 본 연구해역과 쿠로시오 및 황해에서의 염분에 대한  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 대체로 직선관계를 보이고 있다 (Fig. 7-25). 이것은 다음과 같이 추정할 수 있다.  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비가 3 이상으로서 높은 황해와 동중국해 대륙붕 해수가 한국 남해안으로 유입되고, 또한  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 가 1 이하로서 낮은 쿠로시오가 유입되면서 서로 혼합되어 남해의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비가 결정되는 것이다. 유입원인 대륙붕 해수는 높은  $^{228}\text{Ra}$  농도를 갖고 있으며 쿠로시오 영향이 큰 제주도 남쪽에 위치한 정점 B5와 D5의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비는 약 1로서 한국 남해안보다 낮은  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비를 갖는다.

(3) 한국 남해역에서의 황해 및 동중국해 대륙붕수의 기여율

$^{228}\text{Ra}$  붕괴가 이동과 혼합하는 동안 무시된다고 가정하여 (Nozaki, 1989) 아래식을 통해 한국남해의 해수중 황해와 동중국해 기원의 대륙붕 해수의 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

$$f = \frac{[(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_K] / \{ (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_K + ^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_K [ (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_s - (^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}}] \}}{\quad} \quad \text{----- (1)}$$

f = a fraction of the shelf water component in the South Sea of Korea

SSK = South Sea of Korea

S = The Shelf Water

K = The Kuroshio Water

본 조사와 Nozaki (1989)의 결과를 인용하면 다음과 같다.

$$(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_{\text{SSK}} = \text{남해 정점별 비율 (Table 7-2)}$$

$$(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_s = 3.5 \text{ (Nozaki, 1989)}$$

$$(^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra})_K = 0.2 \text{ (Nozaki, 1989)}$$

$$^{226}\text{Ra}_s = 0.131 \text{ dpm/l (Nozaki, 1989)}$$

$$^{226}\text{Ra}_K = 0.065 \text{ dpm/l (Nozaki, 1989)}$$

위의 결과를 방정식 (1)에 삽입을 하면 남해에서의 f 값은 0.105~0.408 (평균 0.36)의 범위이다. 염분이 32 psu 이하로서 비교적 한국연안에 위치한 정점 D2에서 최대값 (0.408)을 보이는 반면에 염분이 34 psu 이상으로서 비교적 남해 정점 중 가장 쿠로시오의 영향을 많이 받는 대한해협 중앙부에 위치한 정점 A6에서 0.105로서 최소값을 보인다. 즉 다시말하면 연안에 위치한 정점 D2의 표층수중 약 41 %가 황해 및 동중국해의 대륙붕해수로 부터 기원하는 반면에 정점 A6는 11 % 정도에 불과하다.

## 제 5 절 결 론

- (1) 1997년 3월 동중국해 중서부해역에서의 표층 용존산소 및 용존무기영양염농도는 대륙붕에서 쿠로시오쪽으로 갈수록 감소하고, 저온저염의 제주서남해역에서 높은 반면에 고온 고염인 쿠로시오 해역에서 낮다.
- (2) 동중국해 중서부역에서의 표층 해수는 저온저염수, 고온고염수 및 이 두해수

의 수온과 염분 특성이 교차되는 혼합수등 3개의 단성분 해수의 혼합과 생물 과정에 의해 용존산소 및 용존무기영양염류의 분포특성이 결정되는 것으로 판단된다.

- (3) 한국남해와 쿠로시오 및 황해대륙붕에서의 염분에 대한  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 비의 양호한 직선관계는  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비가 3 이상으로서 높은 황해와 동중국해 대륙붕 해수가 한국 남해안으로 유입되고, 또한  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 가 1 이하로서 낮은 쿠로시오가 유입되면서 서로 혼합되어 남해의  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  비가 결정되는 것으로 사료된다.
- (4)  $^{228}\text{Ra}$  붕괴가 이동과 혼합하는 동안 무시된다고 가정하여 계산한 준계의 한국남해의 해수중 황해와 동중국해 기원의 대륙붕 해수의 기여율은 0.11~0.41 (평균 0.36)으로서 현재 남해의 해수중 약 11~41 % (평균 36 %)는 황해와 동중국해 대륙붕해수에서 기원하고 59~89 %는 쿠로시오해류에서 기인한다.

## 참 고 문 헌

- Chen, C.T.A., S.L. Wang, and H.I. Huang, 1995. Sources of the high nutrient near-bottom water on the East China Sea continental shelf. 8th PAMS and JECSS Workshop.
- Chen, C.T.A., 1997. Eutrophication is not responsible for making East China Sea a large CO<sub>2</sub> sink. Proceedings of 9th PAMS and JECSS Workshop 4-1~4-7. September 1997. Taipei.
- Elsinger, R.J. and W.S. Moore, 1984. 226Ra and 228Ra in the mixing zones of the Pee Dee River-Winyah Bay, Yangtze River and Delaware Bay estuaries, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 18:601~613.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling, 1983. Methods of seawater analysis. verlag chemic., 419p.
- Harada, K. and S. Tsunogai, 1986. 226Ra in the Japan Sea and the residence time of the Japan Sea water. *Earth Planet. Sci. Lett.* 77:236~244.
- Ito, T., A. Kaneko, H. Tsubota and N. Gohda, 1994. The characteristic distribution of silica over the East China Sea Shelf Slope. *J. Oceanogr. Japan*, 50:465~477.
- Key, R.M., R.F. Stallard, W.S. Moore, and J. Sarmiento, 1985. Distribution and flux of Ra-226 and Ra-228 in the Amazon River estuary, *J. Geophys. Res.* 90, 6995~7004.
- Liu, K.K., G.C. Gong, C.Z. Shyu, S.C. Pai, C.L. Wei and S.Y. Chao, 1992. Response of Kuroshio upwelling to the onset of the northeast monsoon in the sea north of Taiwan: Observations and a numerical simulation. *J. Geophysical Res.*, 97(C8):12511~12526.
- Moore, W.S., J.L. Sarmiento and R.M. Key, 1986. Tracing the Amazon component of surface Atlantic water using 228Ra, salinity and silica. *J. Geophys. Res.* 91:2574~2580.
- Nozaki, Y. 1989. Mean residence time of the shelf water in the East China and the Yellow Seas determined by 228Ra/226Ra 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 210Pb and

- 210Po in the East China and Yellow Seas. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 55, 1265~1272.
- Okubo, T. 1980. 228Ra in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan.* 36:263~268.
- Park, Y.H., 1985. Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea. *J. of the Oceanogr. Soc. Korea*, 20(2):12~21.
- Reid, D.F., W.S. Moore and W.M. Sackett. 1979. Temporal variation of 228Ra in the near-surface Gulf of Mexico. *Earth Planet. Sci. Lett.* 43:227~236.
- Song, W., K. Lin and B. Guo, 1990. A study on the source of the Tsushima warm current water. Science and technology agency, Japan state oceanic administration, China, 361p.
- Spencer, C.P., 1975. The micronutrient elements. *Chemical Oceanogr.* 2: 245-300.
- Su, J., 1990. Review of the works of Chinese scientists in the first three years of JRK. Japan-China Joint Research Programme on the Kuroshio (JRK), 7~12.
- 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.

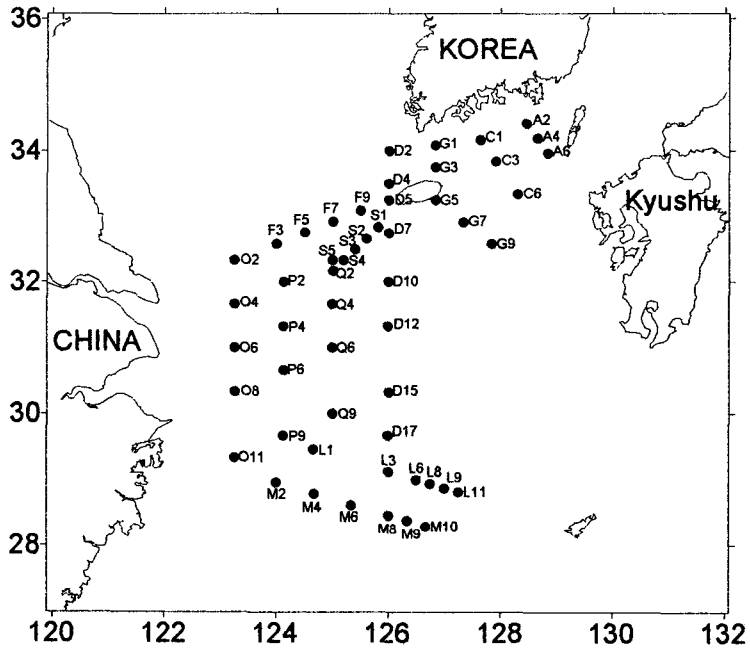


Fig. 7-1. Location of sampling stations in the East China Sea in March, 1997.



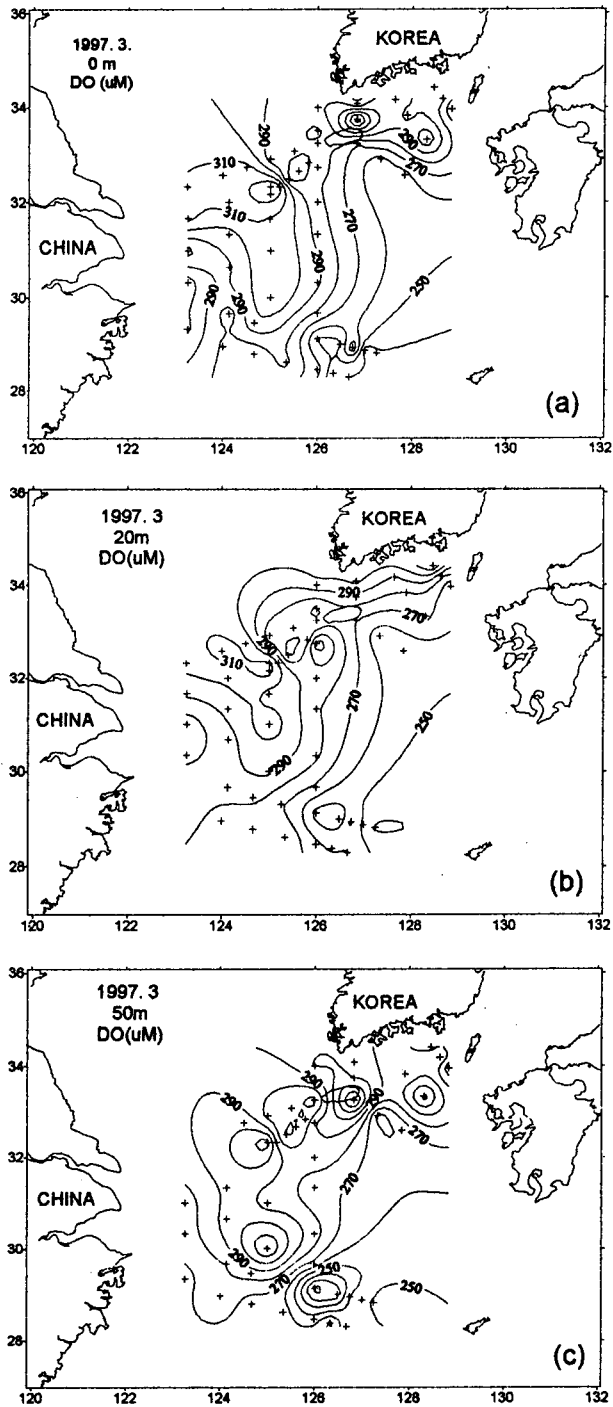


Fig. 7-2. The horizontal distribution of dissolved oxygen ( $\mu\text{M}$ ) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer.

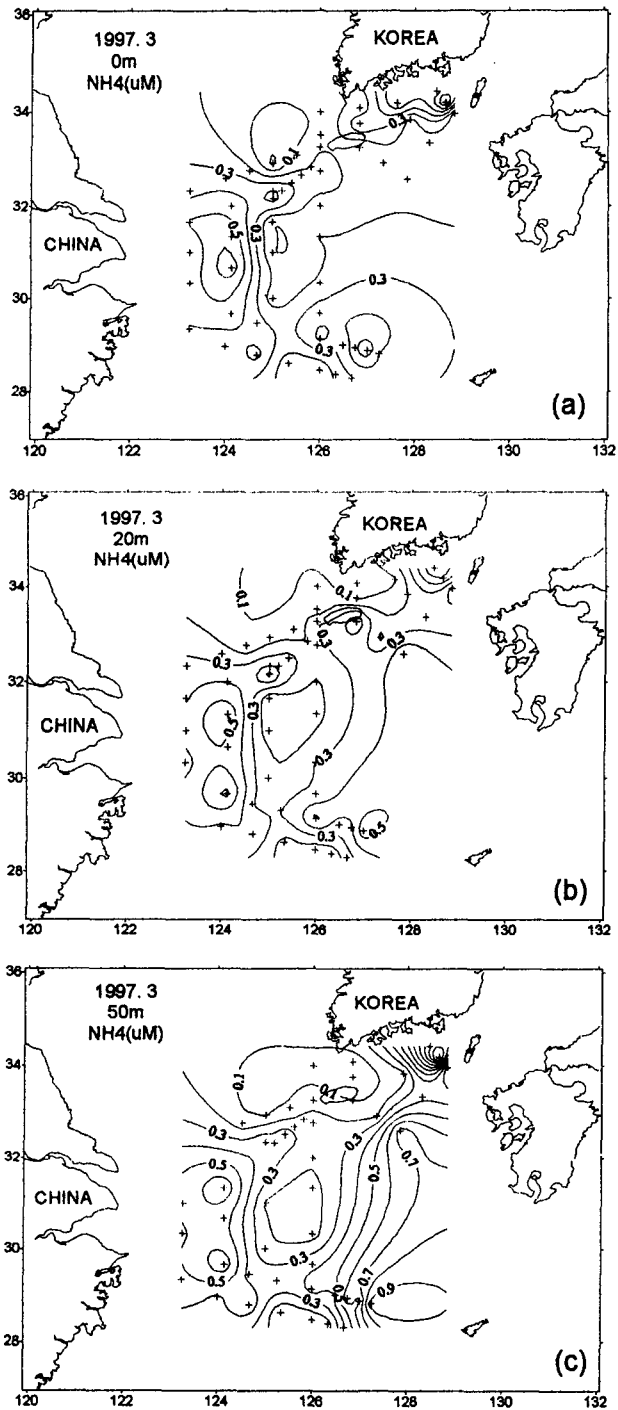


Fig. 7-3. The horizontal distribution of ammonium ion ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer.

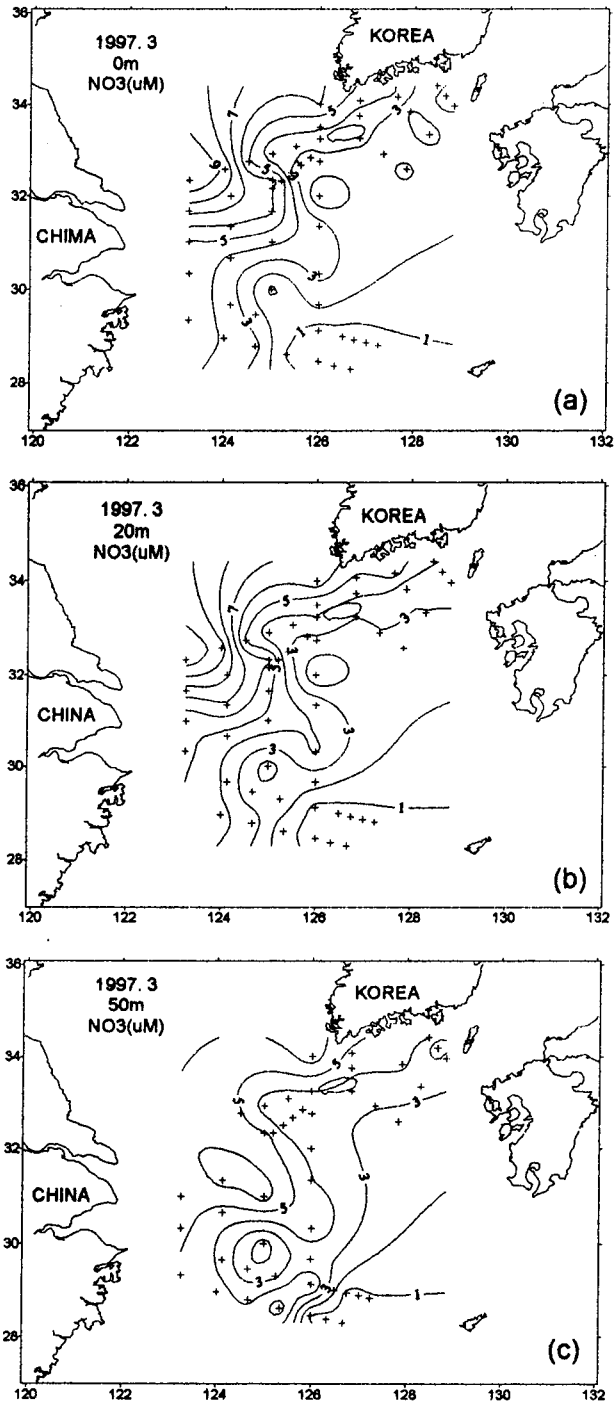


Fig. 7-4. The horizontal distribution of nitrate ( $\mu$ M) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer.

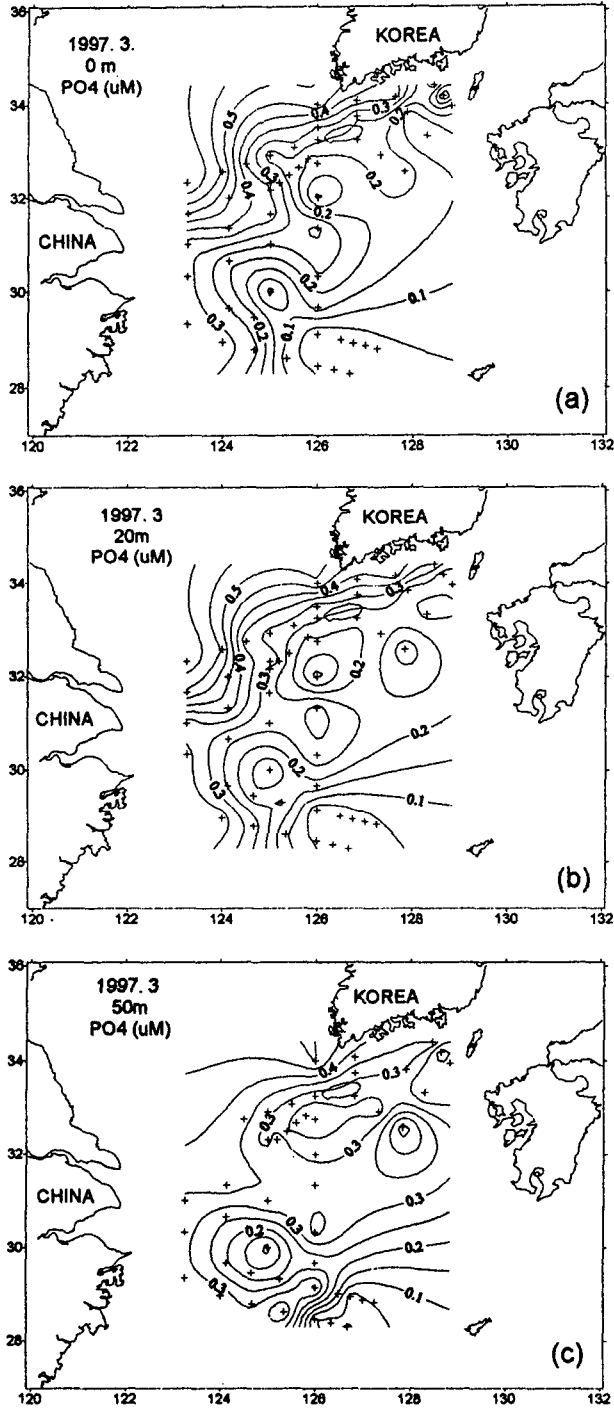


Fig. 7-5. The horizontal distribution of phosphate ( $\mu\text{M}$ ) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer.

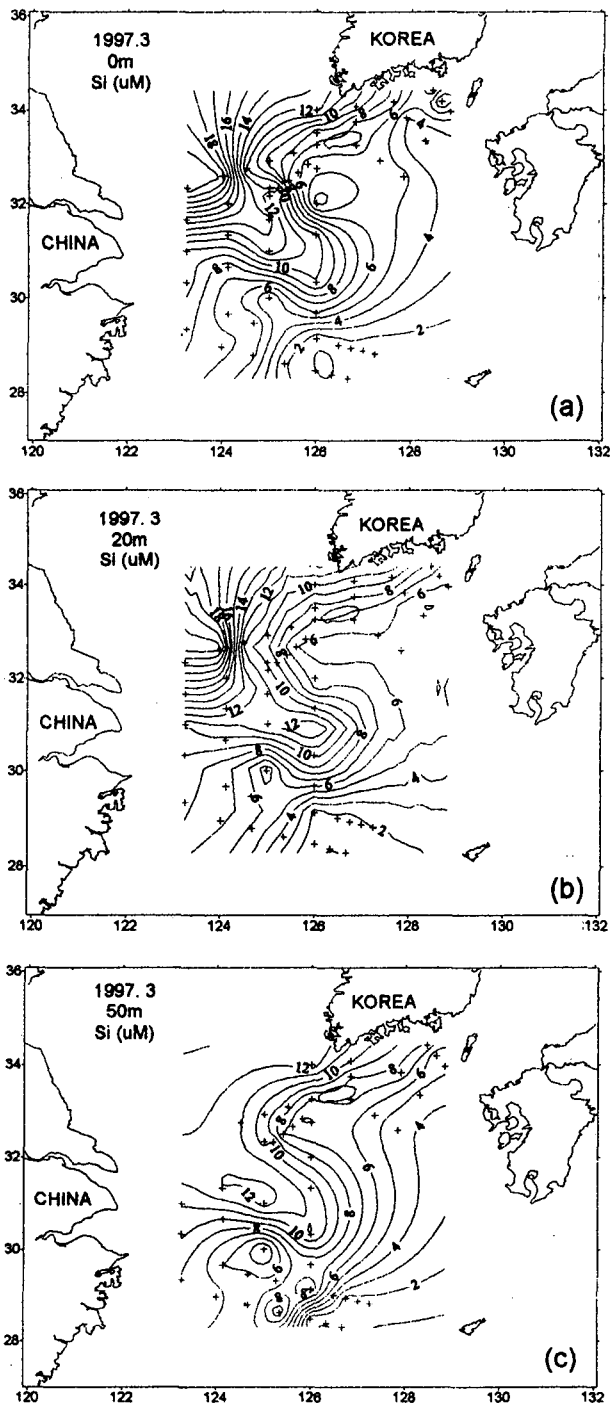


Fig. 7-6. The horizontal distribution of silicate ( $\mu\text{M}$ ) in March, 1997. (a) 0m, (b) 20m, and (c) 50m layer.

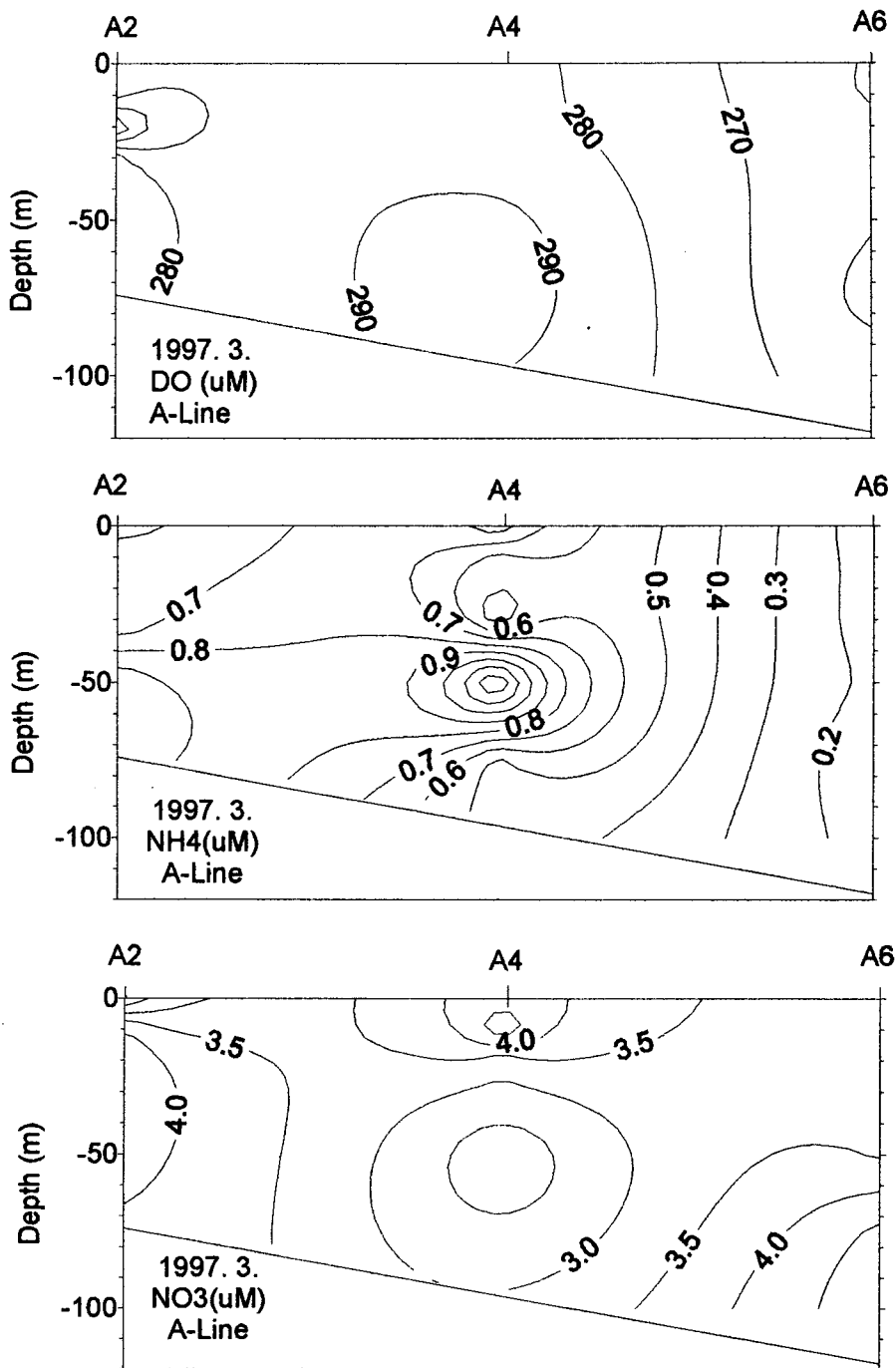


Fig. 7-7. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section A.

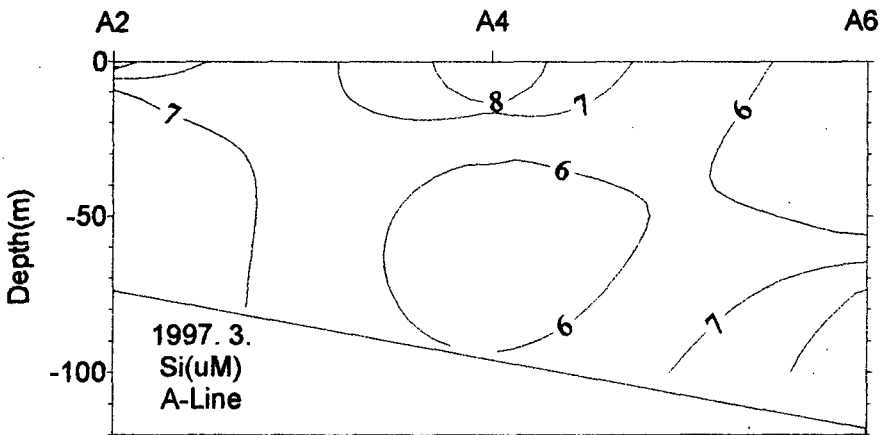
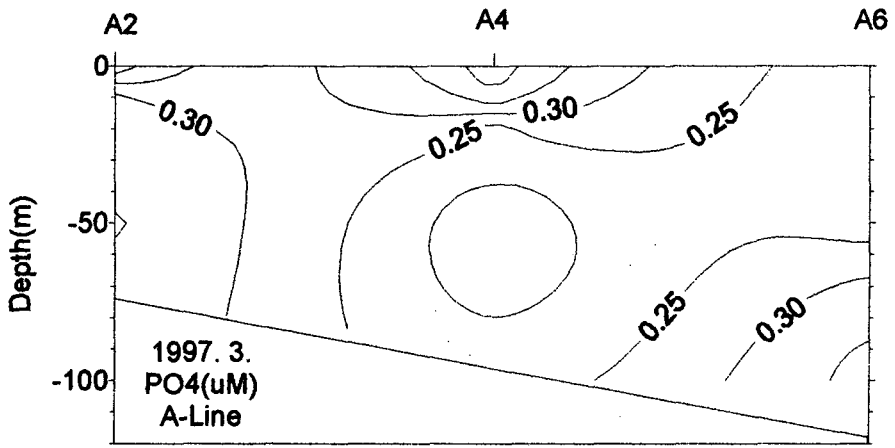


Fig. 7-7. Continued.

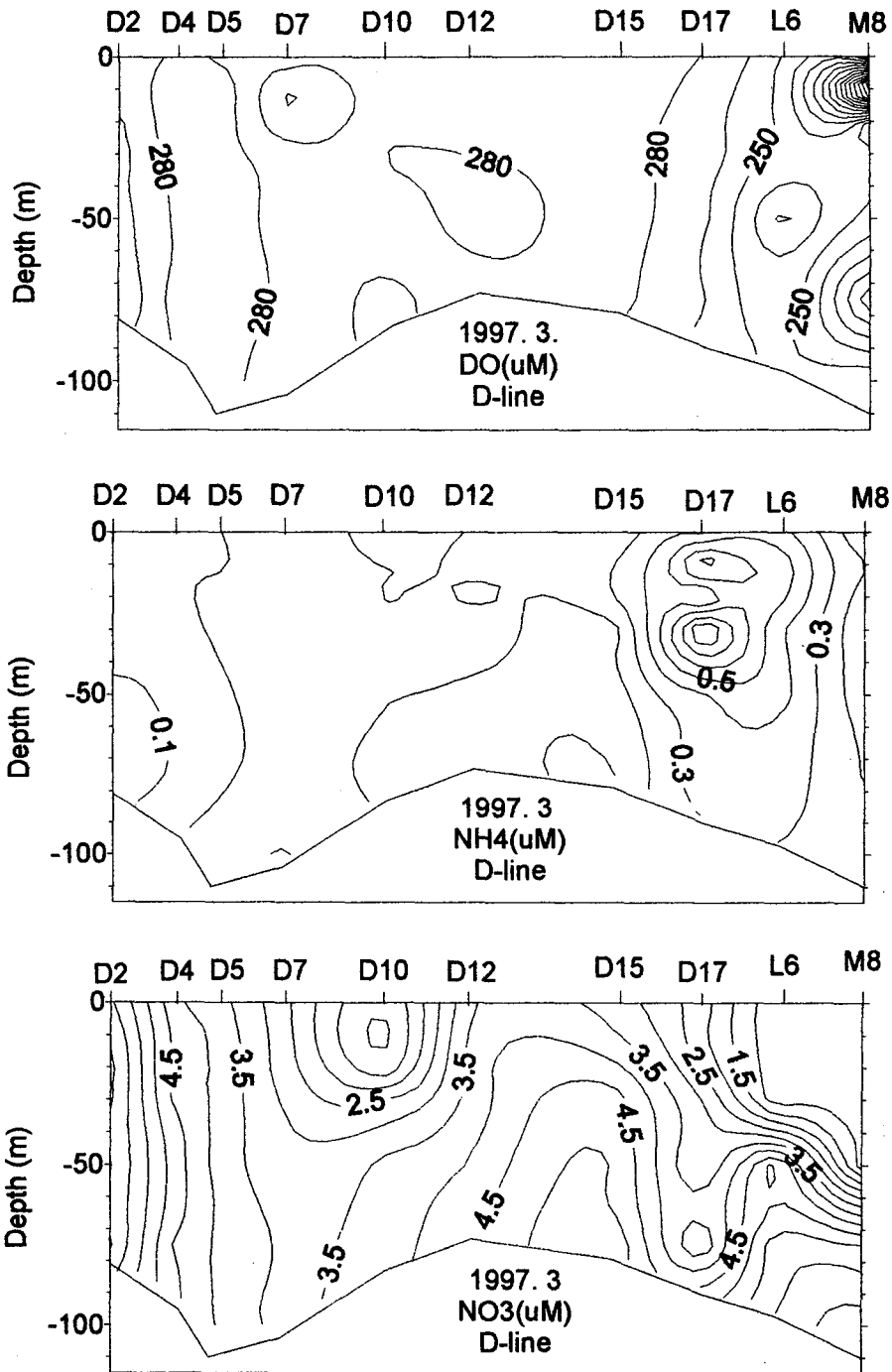


Fig. 7-8. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section D.



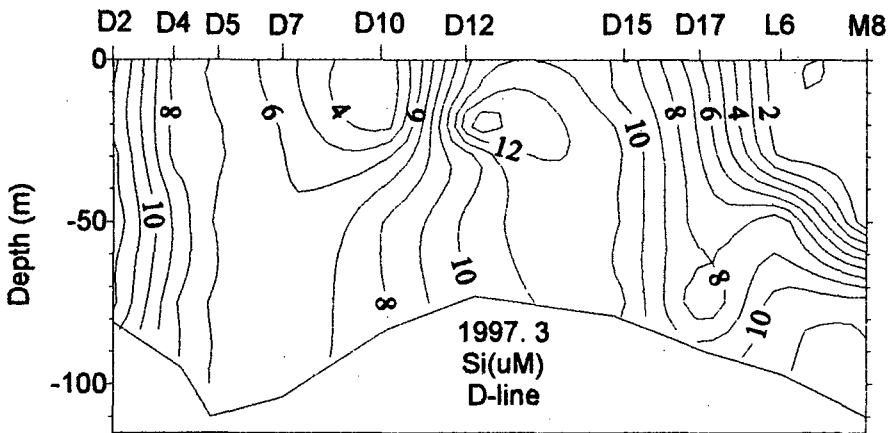
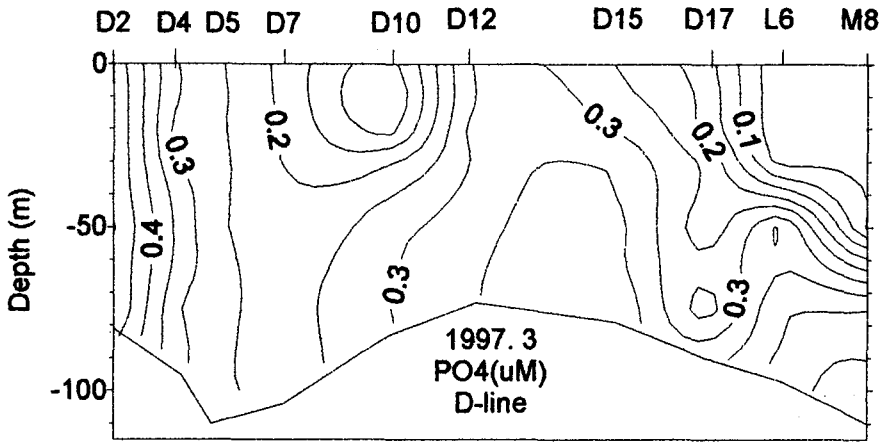


Fig. 7-8. Continued.

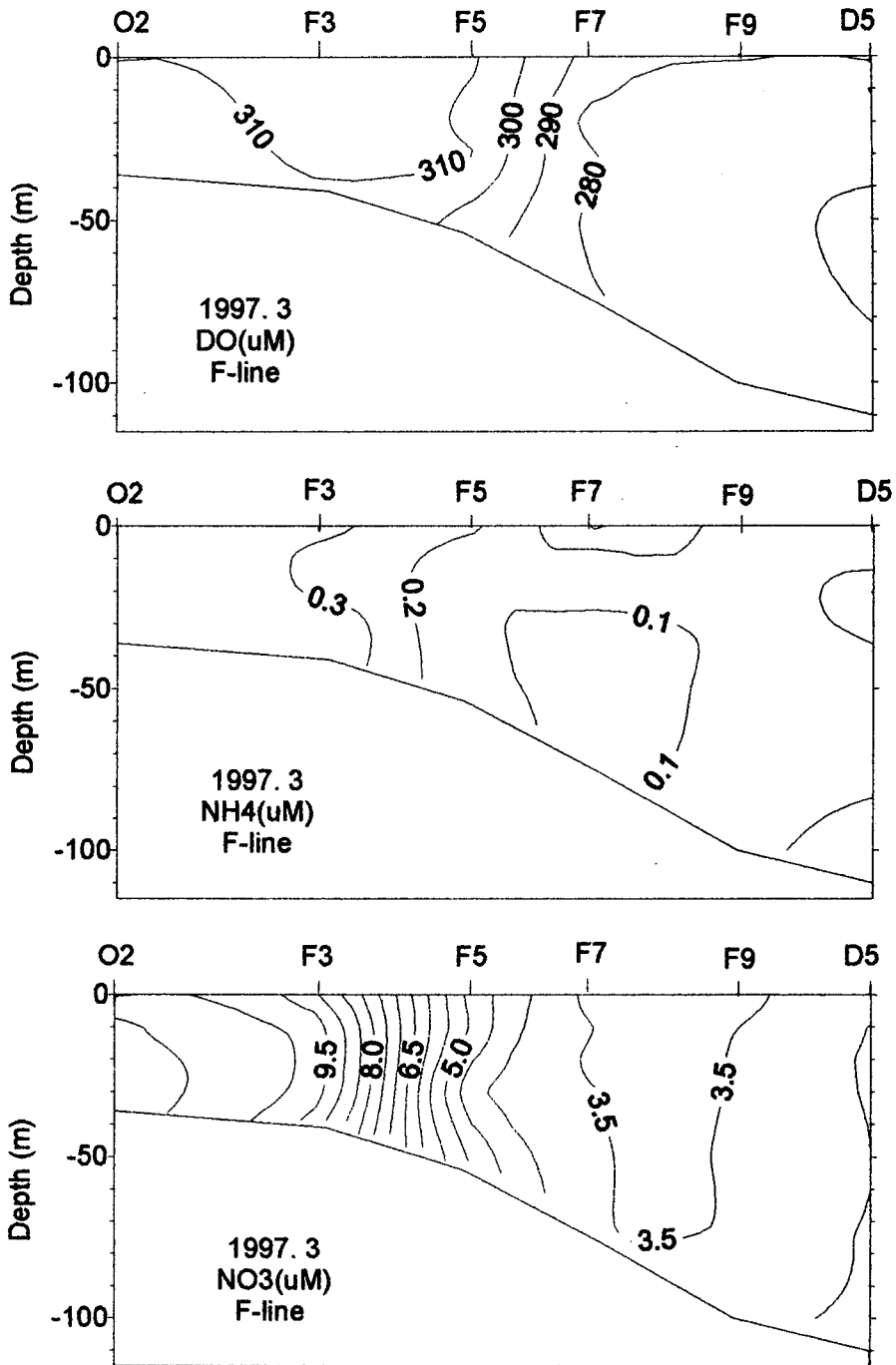


Fig. 7-9. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section F.

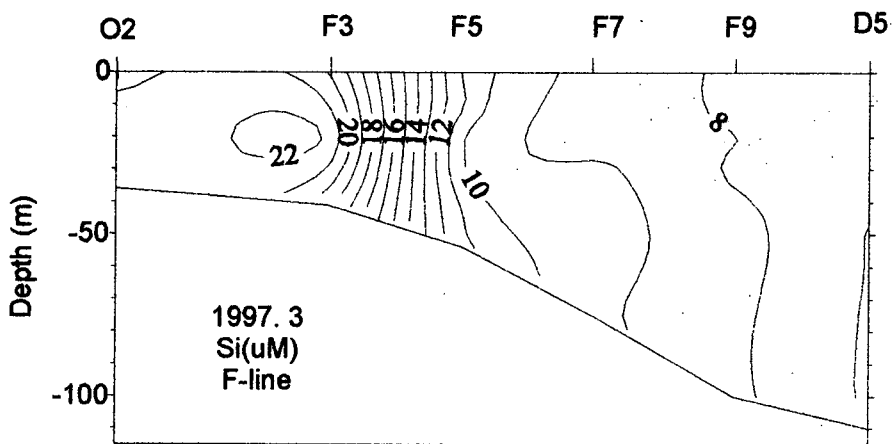
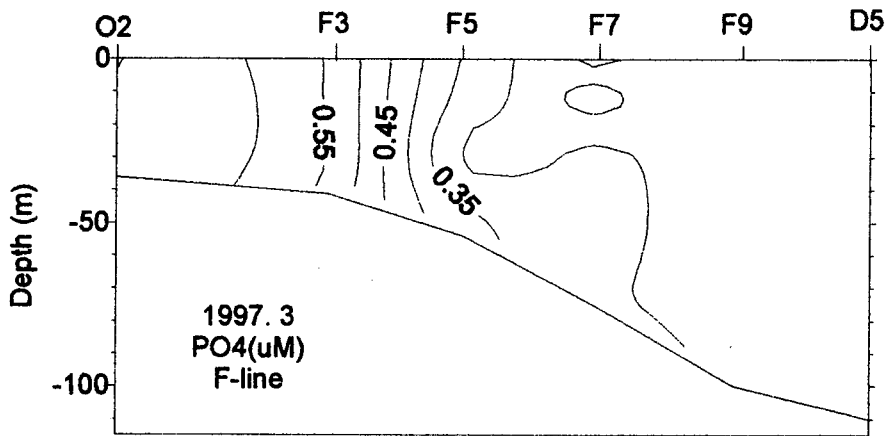


Fig. 7-9. Continued.

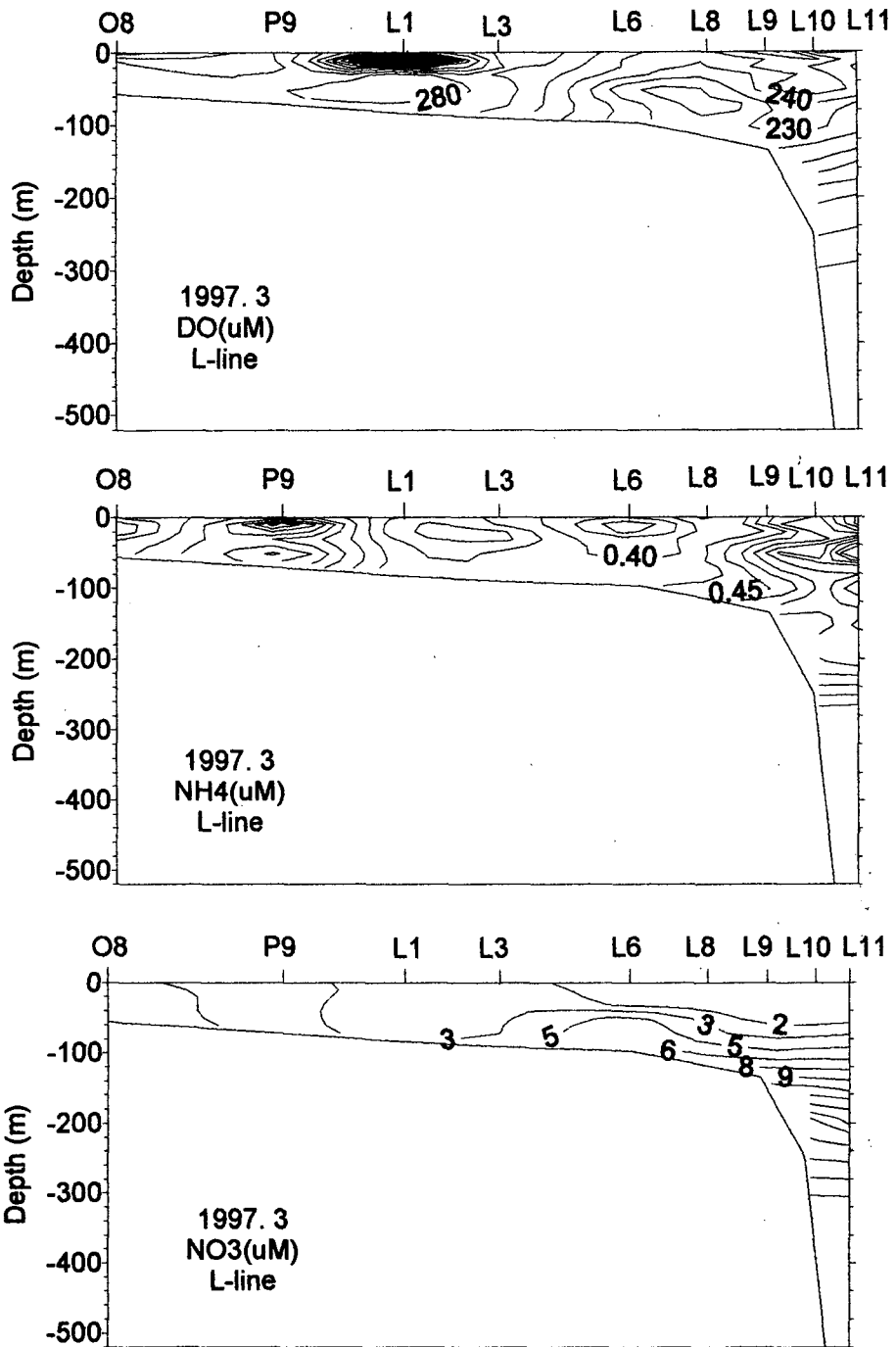


Fig. 7-10. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section L.

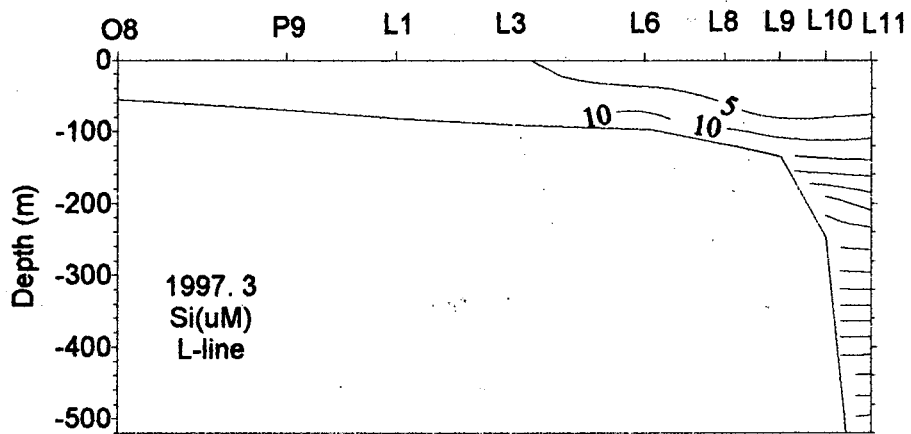
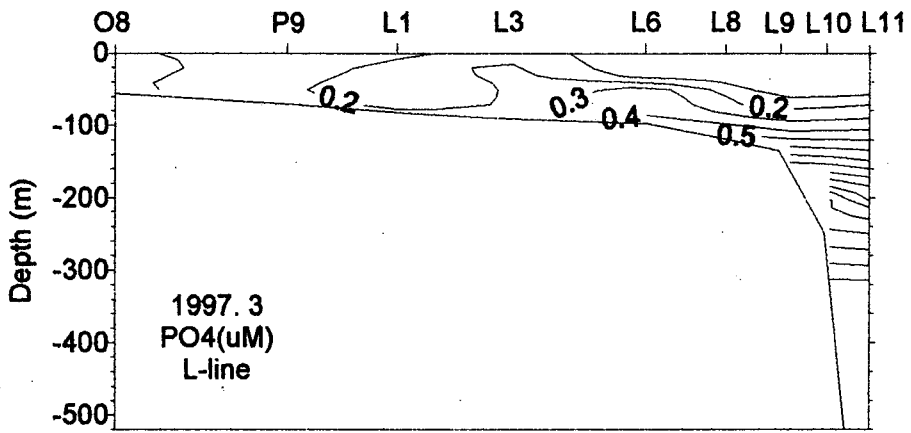


Fig. 7-10. Continued.

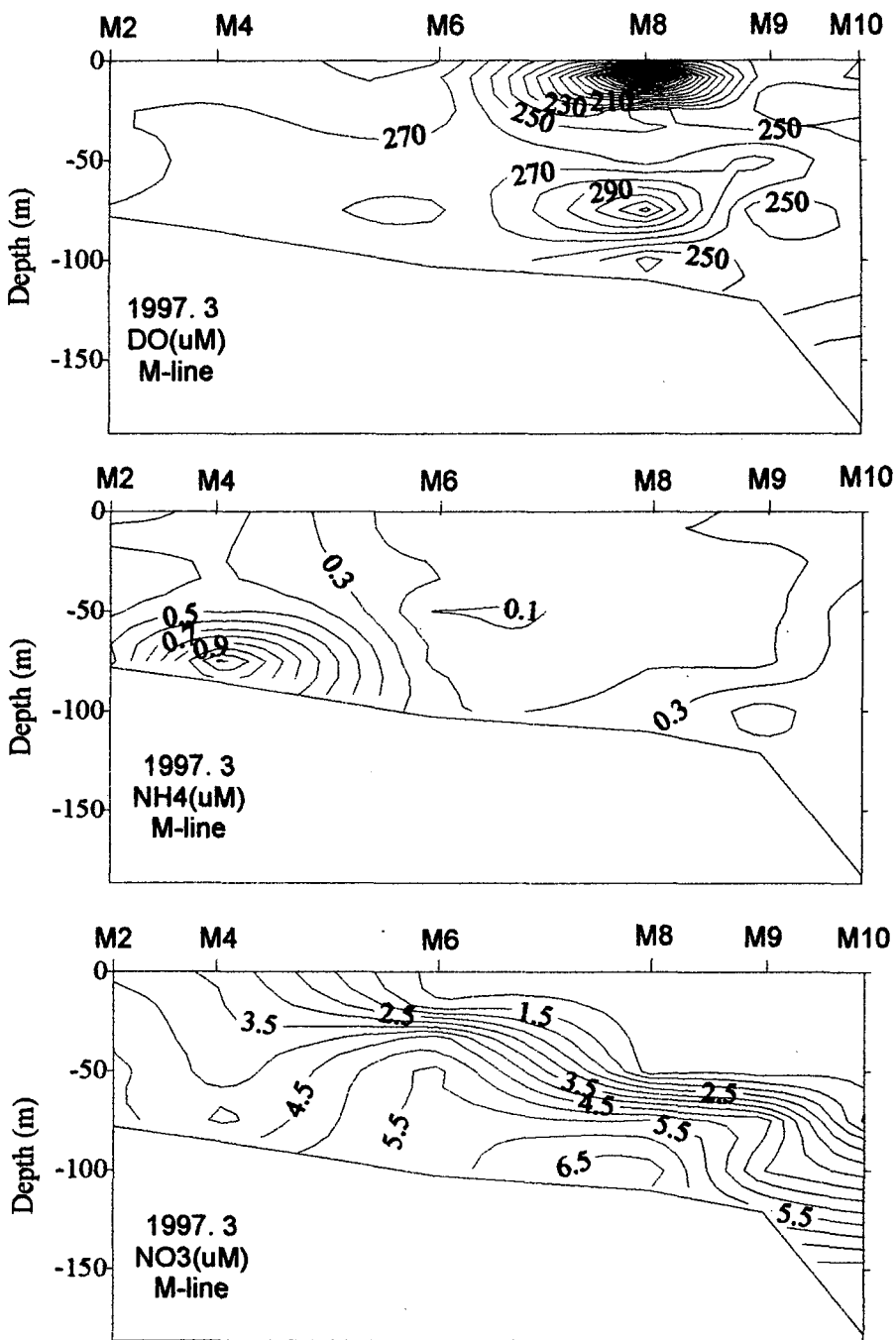


Fig. 7-11. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section M.

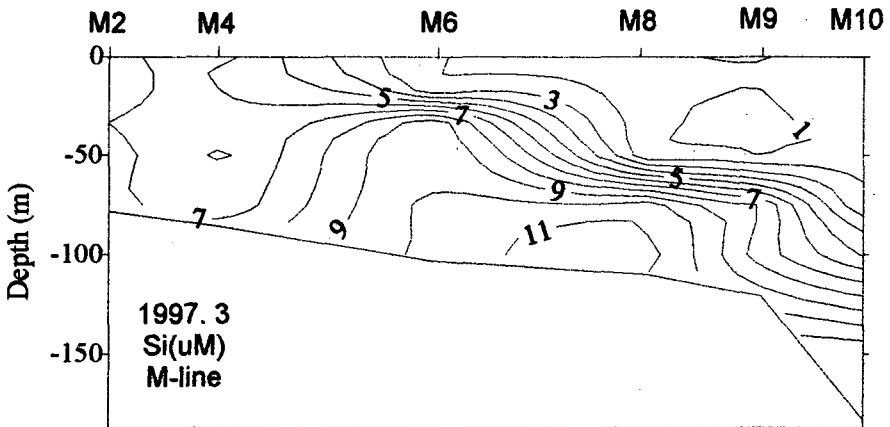
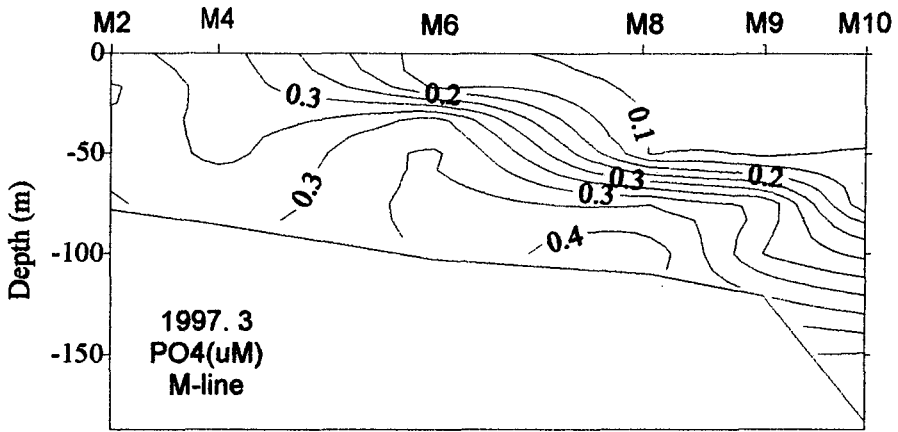


Fig. 7-11. Continued.

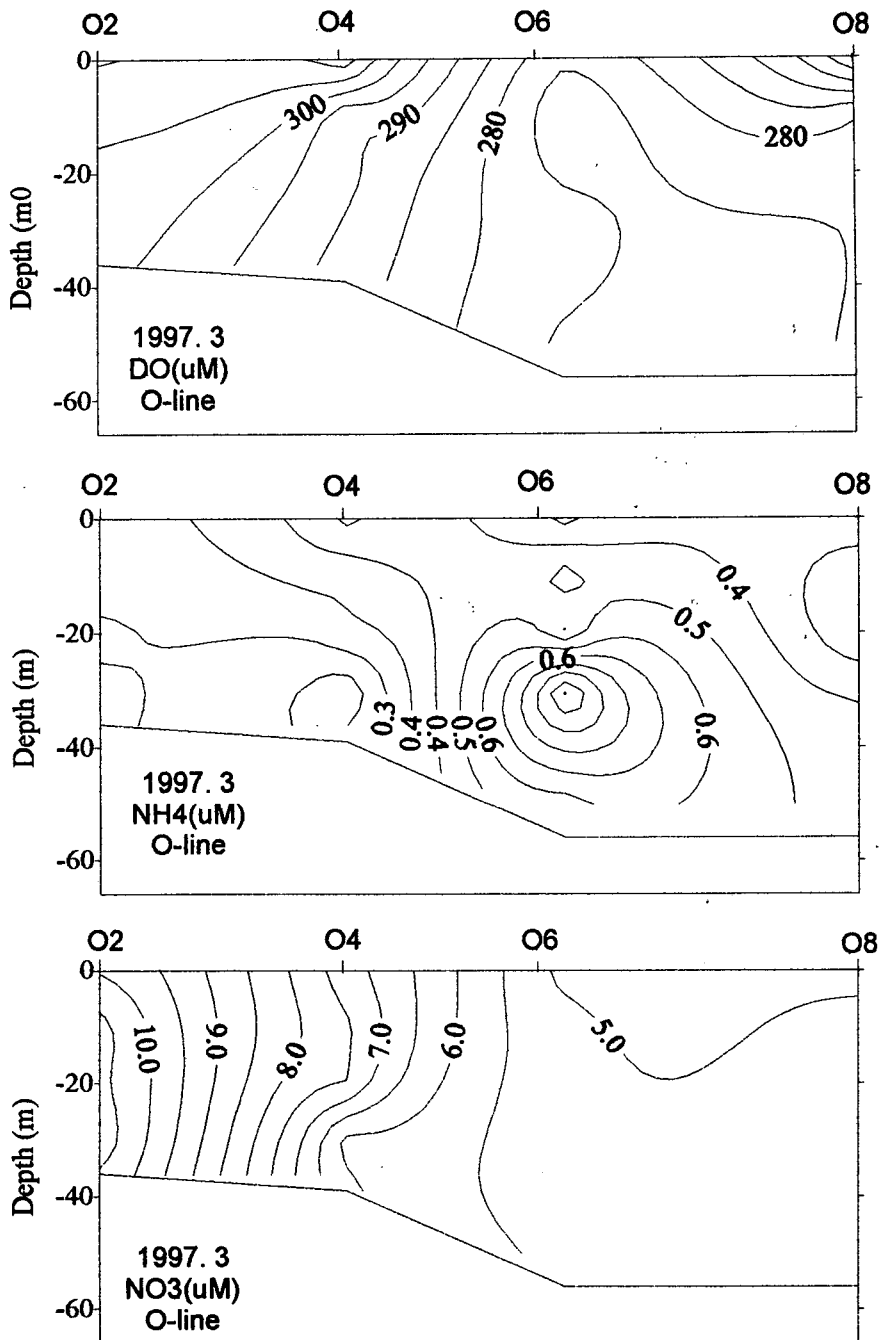


Fig. 7-12. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section O.



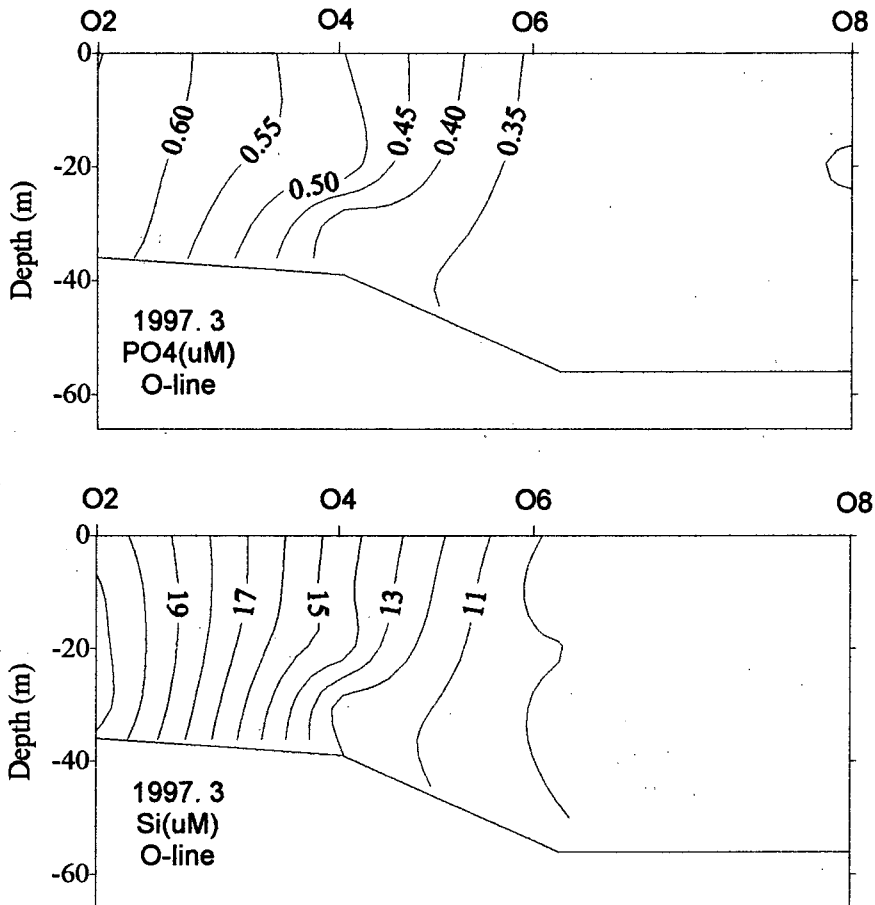


Fig. 7-12. Continued.

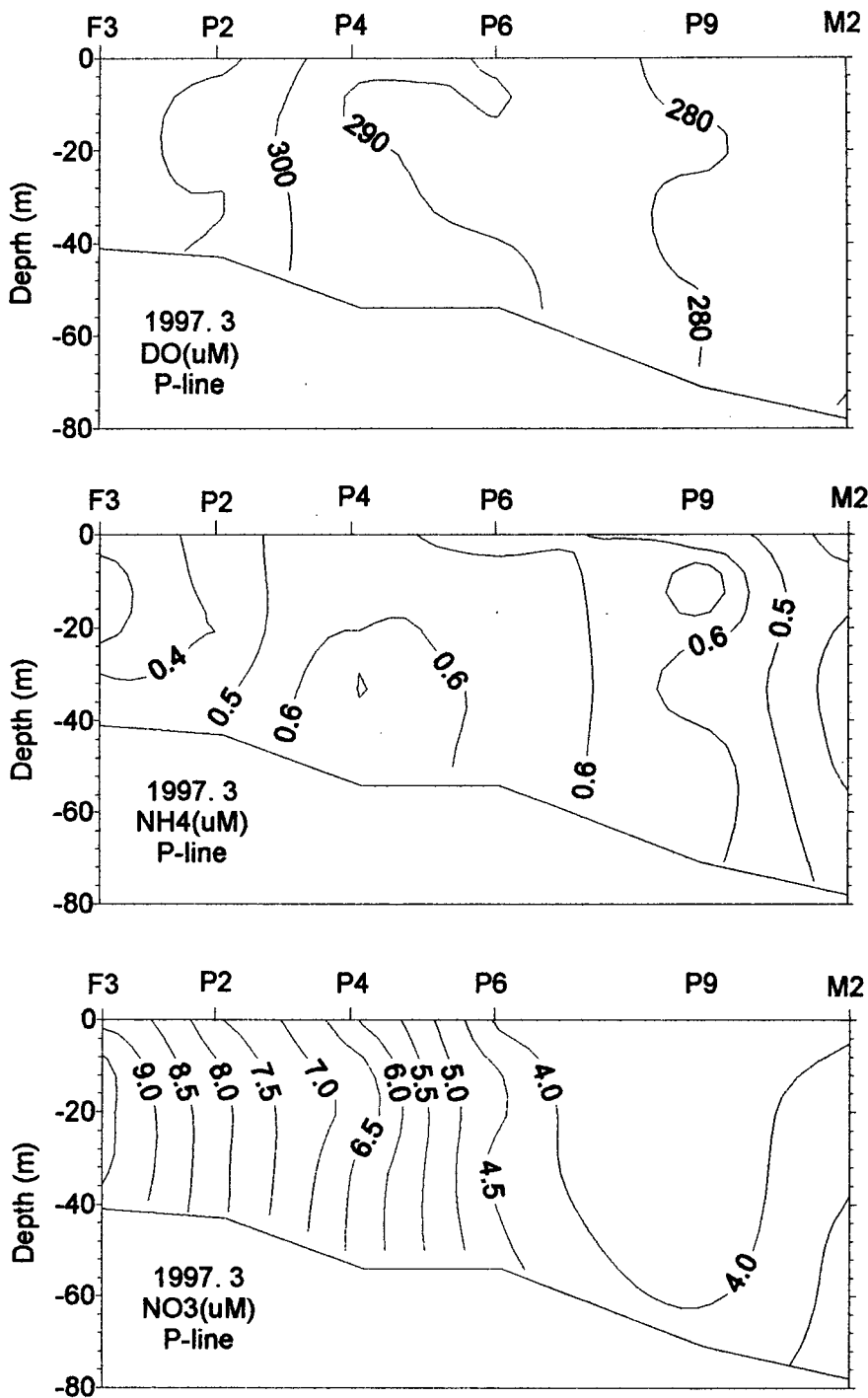


Fig. 7-13. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu$ M) along section P.

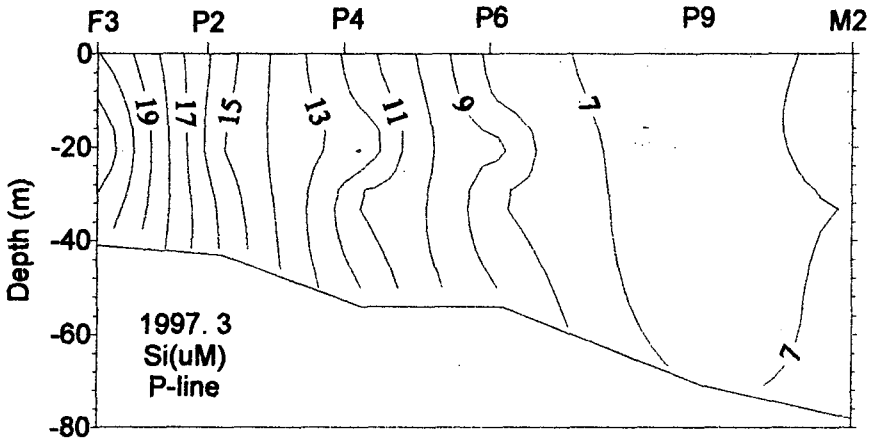
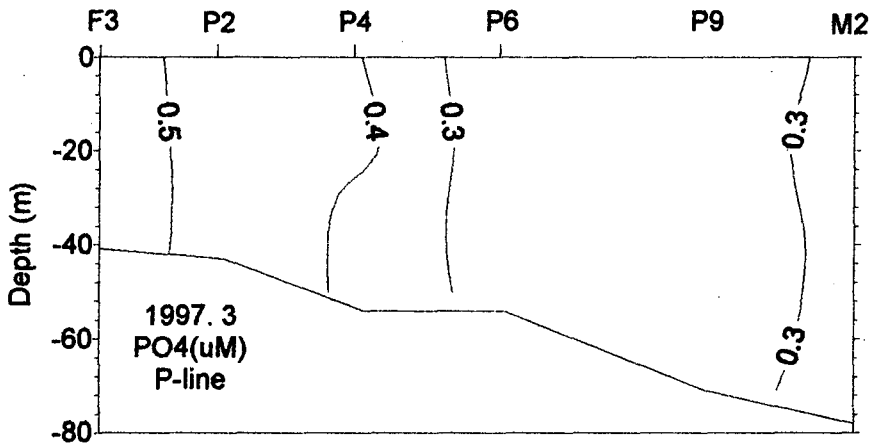


Fig. 7-13. Continued.

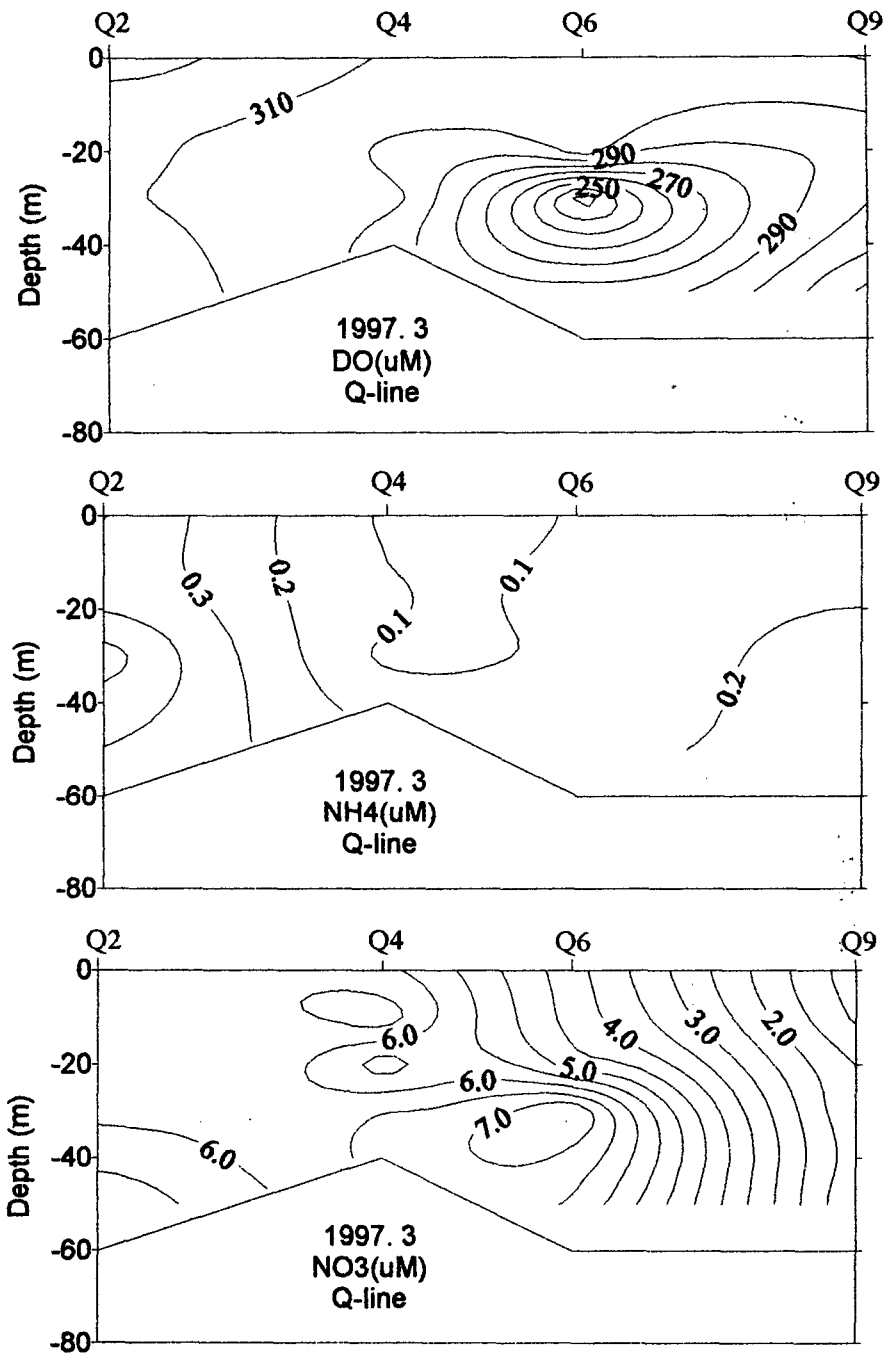


Fig. 7-14. The vertical distribution of dissolved oxygen, ammonium, nitrate, phosphate and silicate ( $\mu\text{M}$ ) along section Q.

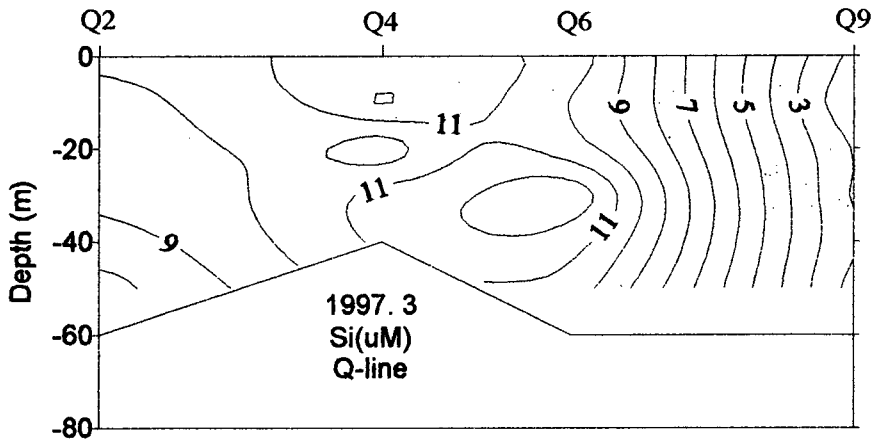
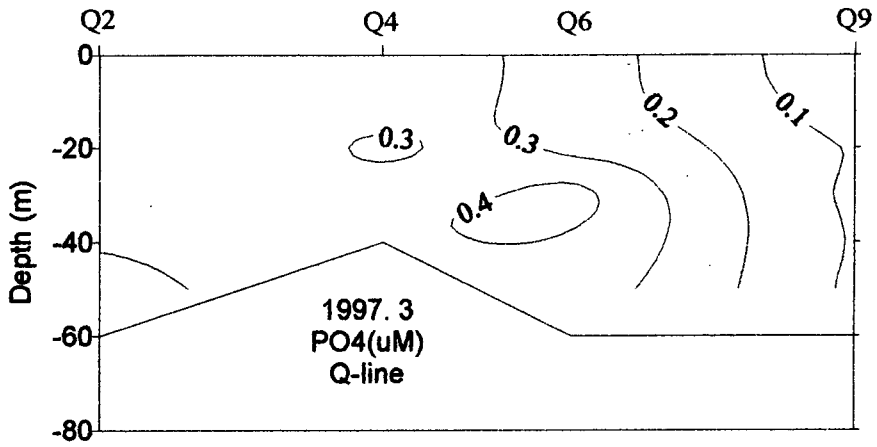


Fig. 7-14. Continued.

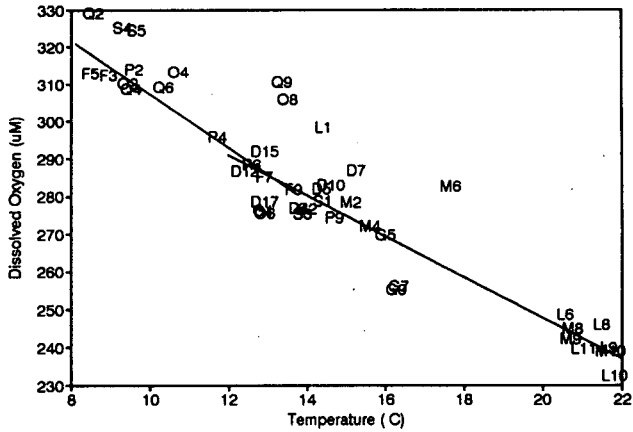


Fig. 7-15. Relationship between dissolved and temperature in the surface water (March, 1997).

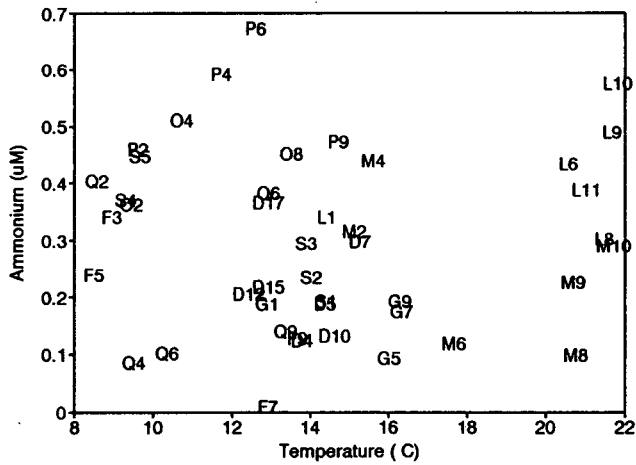


Fig. 7-16. Relationship between ammonia and temperature in the surface water (March, 1997).

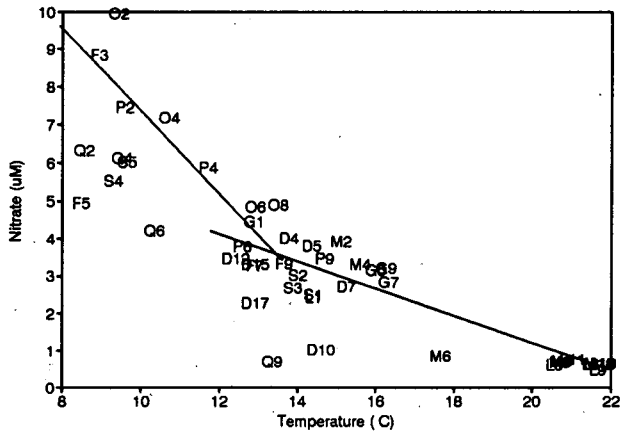


Fig. 7-17. Relationship between nitrate and temperature in the surface water (March, 1997).

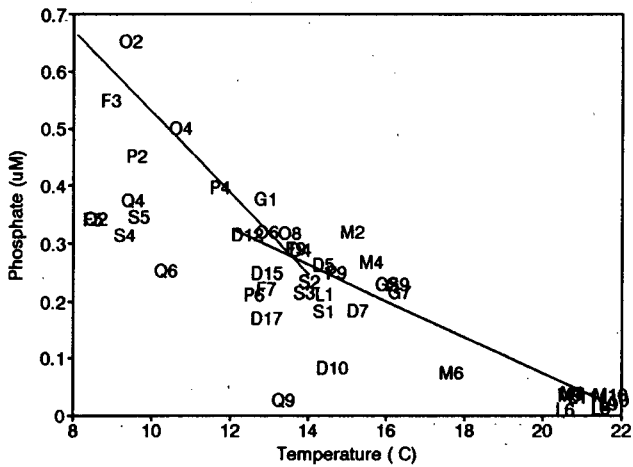


Fig. 7-18. Relationship between phosphate and temperature in the surface water (March, 1997).

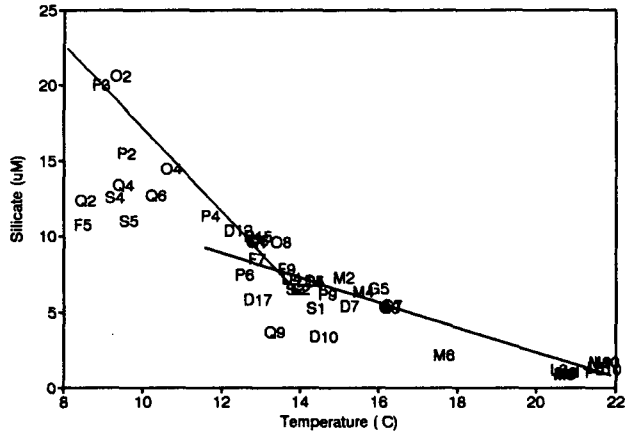


Fig. 7-19. Relationship between silicate and temperature in the surface water (March, 1997).

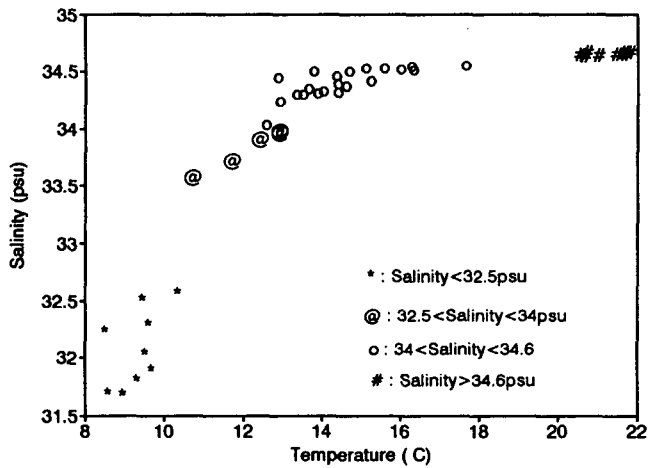


Fig. 7-20. Relationship between temperature and salinity in the surface water (March, 1997).



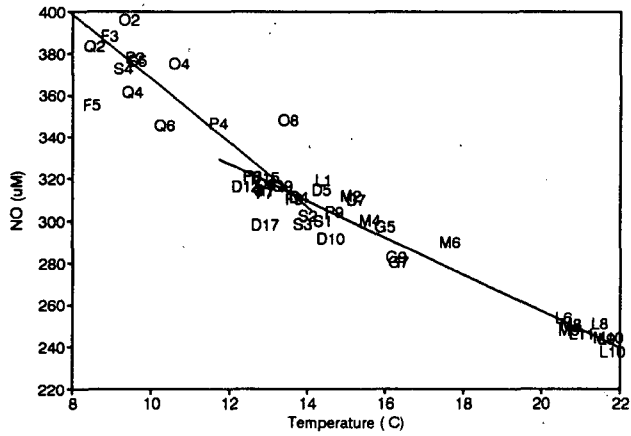


Fig. 7-21. Relationship between NO and temperature in the surface water (March, 1997).

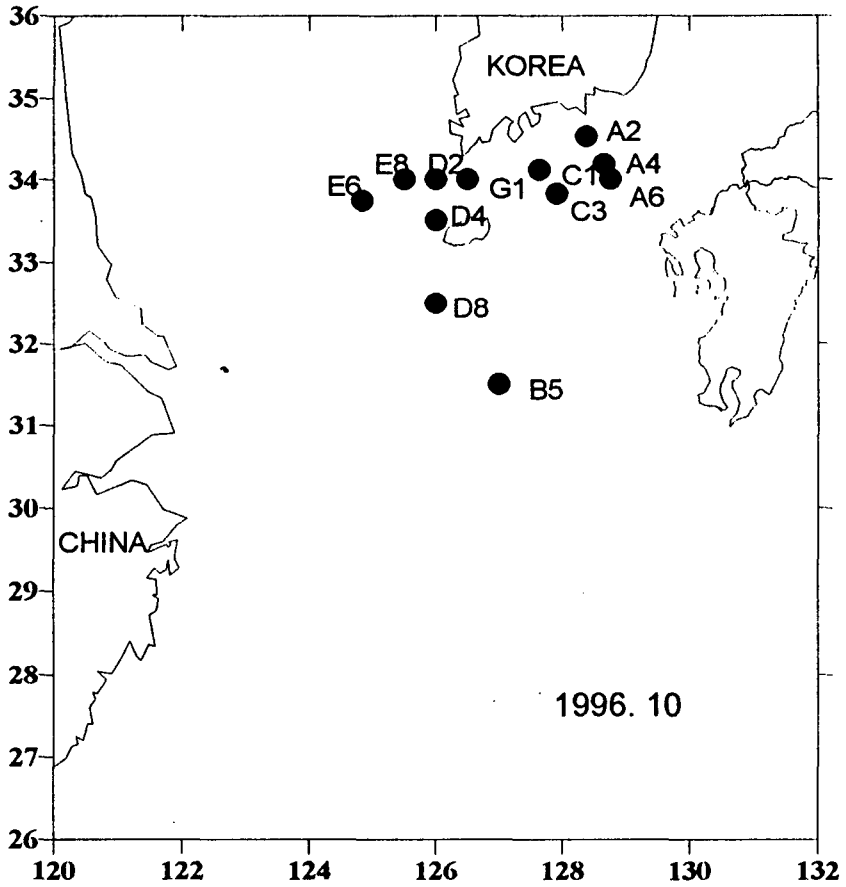


Fig. 7-22. Sampling station for  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  in October 1996.

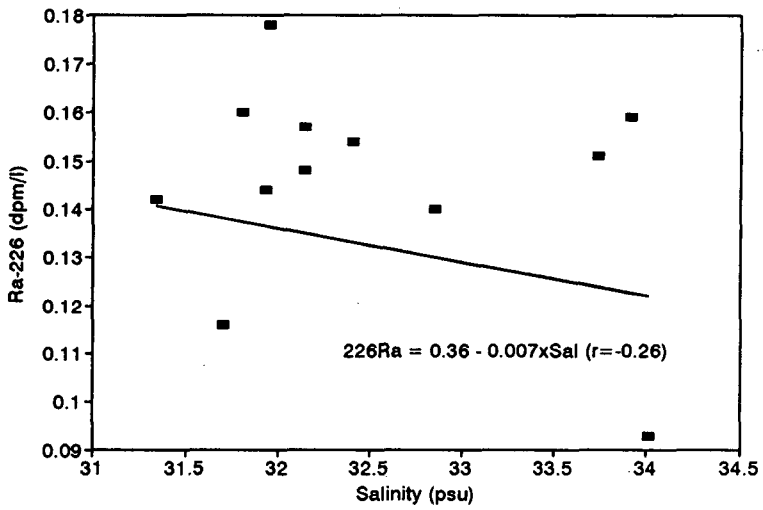


Fig. 7-23. The correlations of salinity with  $^{226}\text{Ra}$  activity.

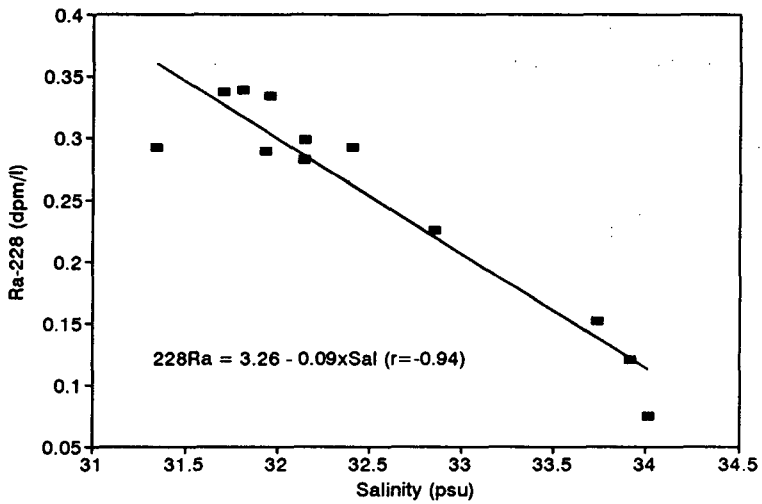


Fig. 7-24. The correlations of salinity with  $^{228}\text{Ra}$  activity.

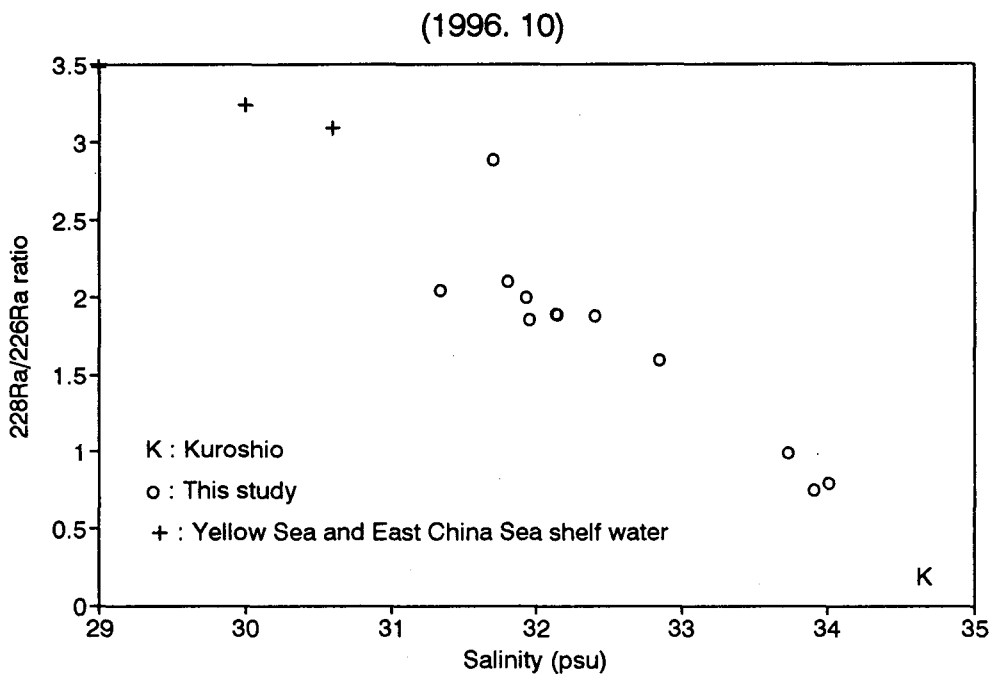


Fig. 7-25. The correlations of salinity with  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio in the surface water of study area, Kuroshio and Yellow Sea.

# 제 8 장 엽록소 분포와 일차 생산력

## 제 1 절 재료 및 방법

### 가. 엽록소

SBE25 (Seabird Electronics Co.)를 사용하여 수온, 염분, 형광, 소광계수를 연속적으로 측정하였다. 채수기를 사용하여 해수를 채취하여 이 중 1 l의 해수를 GF/F(Whatman Co.) 필터로 거른 다음 바로 90% 아세톤 용액에 담구어 24시간 동안 용출시켰다. 용출된 용액의 형광을 엽록소 표준용액 (Sigma Co.)으로 보정된 Turner model 10 fluorometer로 측정하여 Strickland and Parsosns (1972)의 방법을 따라 엽록소농도로 바꾸었다. 이렇게 계산된 엽록소 값을 이용하여 SBE25에 실린 Seatech fluorometer로 측정된 현장농도와의 관계식의 매개변수를 구하였다.

### 나. P-I 특성

P-I 특성을 재기 위하여 본 조사에서는 Babin et al. (1994)의 radial photosynthetron 방법을 채용하였다. 밀폐된 상자에 60ml Falcon culture flask를 일렬로 배열하고 한쪽에서 diffused light를 비추어 플라스크 내에 광량의 구배가 생기게 하였다. 광원으로는 Osram의 HQI/D 400W 램프를 사용하였다. 배양은 2 시간을 유지하였으며 각 플라스크의 광량은 QSL 100 scalar quantum meter (Biospherical Co)를 써서 측정하였다. 수온의 조절을 위하여 표층 시료의 경우 조사선의 펌프 수를 배양상자 내로 순환시켰고 저층 시료일 경우 circulation bath를 사용하여 현장의 수온을 유지하였다.

시료 770ml를 채수하여 1 리터 짜리 multi-dispenser에 넣은 다음 14C (bicarbonate, Amersham Inc.)을 첨가하여 잘 섞은 후 10~12개의 플라스크에 60ml 씩 주입하였다. 동시에 2개의 초기 활성도 시료를 만들었다. 이를 위하여 50 $\mu$ l의 시료를 채취하여 scintillation vial에 넣고 50 $\mu$ l의 ethanalamine과 0.5ml의 증류수를 가하고 10ml의 Aquasol-2를 첨가하였다.

배양이 끝나면 즉시 12개의 filter funnel이 달린 manifold를 써서 0.45 $\mu$ m

nucleopore filter로 여과한 뒤 여과지를 vial에 넣어 1N HCl 0.1ml를 가하여 후드에 넣고 2 시간 가량 fuming하였다. Fuming이 끝나면 즉시 Aquasol-2 10ml를 가하여 냉암소에 보관한 뒤 실험실에서 RackBeta II Scintillation Counter로 dpm을 측정하였다. Total alkalinity를 추정하기 위하여 Parsons et al. (1984)의 방법을 따라 시료 100ml에 0.01N HCl 25ml를 첨가하여 전 후의 pH를 측정하였다. 모든 배양시료에서  $^{14}C$ 의 농도는  $0.05 \sim 0.1 \mu Ci/ml$ 가 되도록 하였다.

P-I 실험에서 얻어진 결과는 다음의 두 가지 중 하나의 광합성 모형에 적합화하여 매개변수화 하였다. 광저해가 없을 경우 광량자의 흡수를 Poisson 과정으로 한 모형이 적합하며 다음과 같이 정의된다 (Cullen, 1990).

$$P = B P_m^B (1 - \exp[-\alpha^B I / P_m^B])$$

여기서 B는 생체량, 위첨자 B는 단위 생체량당 매개변수임을 의미한다.  $P_m^B$ 는 단위 엽록소 당 광합성량이고,  $P_m^B$ 는 포화 광도 이상에서의 단위 생체량 당 광합성량, 즉 동화율 (assimilation number)이다.  $\alpha$ 는 광합성의 광량자 효율과 관련된 매개 변수로 광합성-광도 곡선 중 포화 광도 이하에서의 선형 반응의 기울기를 가리킨다.

광저해 현상이 있을 경우 3 개의 매개변수를 가지고 있는 Platt et al. (1980)의 모델을 사용하였다.

$$P = B P_s^B (1 - \exp[-\alpha^B I / P_s^B]) \exp[-\beta^B I / P_s^B]$$

$\beta$ 는 광저해 정도를 결정짓는 매개 변수이다.  $P_s^B$ 는  $\beta \rightarrow 0$  일때  $P_m^B$ 의 최대값으로 정의된다. Gauss-Newton 법에 의한 비선형 모형의 적합화를 하여 매개변수의 추정을 하였다. 앞의 세 가지 기본 매개변수에서 다음의 세 가지 매개변수가 유도된다. 광합성이 최대가 되는 광도를  $I_m$  라 하면,

$$I_m = \frac{P_s^B}{\alpha} \ln \left( \frac{\alpha + \beta}{\beta} \right)$$

이 때의 최대 광합성값은 (동화율)

$$P_m^B = P_s^B \left( \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right) \left( \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right)^{\frac{\beta}{\alpha}}$$

로 주어진다. 또한 광 적응 매개변수  $I_k$ 는 (Talling, 1975)

$$I_k = \frac{P_m^B}{\alpha} \text{로 정의된다.}$$

## 다. 수중광 측정

6개의 정점에서 MER2040을 사용하여 13 채널에서의 downwelling irradiance와 upwelling radiance를 측정하였다. 각 채널 별 파장대는 340, 380, 412, 443, 490, 510, 530, 555, 590, 625, 665, 683nm 등이다.

# 제 2 절 결 과

## 가. 엽록소의 분포

엽록소의 수평적 분포는 연안류와 대마난류가 형성하는 전선의 분포와 밀접한 관계를 보인다 (그림 8-1). 조사지역은 전체적으로  $0.5 \text{ mg/m}^3$  이하의 낮은 엽록소 밀도를 보이거나 세 개의 지점에서  $1.0 \text{ mg/m}^3$  이상의 높은 색소량을 보이고 있다.

### (1) 관측선 C (그림 8-2)

엽록소 밀도가  $0.6 \text{ mg/m}^3$  이상으로 비교적 높았으며 연안에서 외양 쪽인 C01 --> C06 방향으로 증가하는 경향을 보였으며 C05-C06에서는 수심 30-40m 부근에 저층 엽록소 최대층이 나타났다.

### (2) 관측선 D (그림 8-3)

정점 D07-D11까지 최고  $2.5 \text{ mg/m}^3$  에 이르는 높은 엽록소 밀도를 보이거나 그 남쪽인 D12에서 D17에 이르기까지  $0.3 \text{ mg/m}^3$  이하의 매우 낮은 밀도를 보였다. 북쪽 정점인 D04-D07은 밀도가  $0.8 \text{ mg/m}^3$  이상이었다.

### (3) 관측선 F (그림 8-4)

중국연안역 쪽에서 제주도 쪽으로 낮아지는 경향이 있었으며  $0.5 \text{ mg/m}^3$  부근의 비교적 낮은 밀도를 보였다.

### (4) 관측선 L (그림 8-5)

전체에서  $0.5 \text{ mg/m}^3$  이하의 낮은 값을 보이거나 L01에서 L10쪽으로 표층에서 상대적으로 약간 높은 구조가 형성되어 있다.

### (5) 관측선 M (그림 8-6)

관측선 L과 평행하나 더 남쪽에 위치한 M선에서는 훨씬 높은 밀도의 엽록소 구조가 형성되어 있으며 M04-M07에서는 표층에서 저밀도의 수피를 타고 들어가는 형태를 보이고 있다.

(6) 관측선 O (그림 8-7)

북쪽에는 밀도가 낮으며 남단의 정점 O10-O11에서만 고밀도의 엽록소 핵이 나타나고 있다. 이는 M선에서 나타난 고밀도와 연속된 구조이다.

(7) 관측선 P (그림 8-8)

전체적으로 엽록소 밀도는 낮으나 P06 부근에 약간 밀도가 높은 ( $0.6 \text{ mg/m}^3$ ) 구조가 형성되기 시작하여 수괴의 안정도가 높아지며 춘계대변성이 시작되는 극히 초기단계임을 시사한다.

## 나. P-I 특성

총 38개의 P-I 실험 결과로 적합화된 P-I 특성은 각 정점 별로 표 8-1에 요약되어 있다.  $\alpha$ 의 경우  $0.0042 \sim 0.169 \text{ mgC/mgChl-a}/(\mu\text{E/m}^2/\text{s})/\text{h}$ , PmB는  $1.817 \sim 24.615 \text{ mgC/mgChl-a/h}$ 의 범위를 보였다. 광적용 정도를 나타내는  $I_k$ 는  $89.8 \sim 306.4 \mu\text{E/m}^2/\text{s}$ 의 범위를 보였다.  $\alpha$ 값의 분포는 대체적으로 1995년 봄과 비슷하고 PmB 값의 분포범위는 1995년 봄보다는 높았다. 따라서 조사시기의 식물 플랑크톤은 수층의 안정도가 만족되어 광조건이 좋아지면 급격한 성장을 할수 있는 생리적 상태에 있다.

## 다. 수중광 특성

수직 소광계수의 분광분포를 보면 (그림 8-9, 8-10, 8-11, 8-12) case 2 해수의 특성이 명백하다. 즉, 엽록소 흡광 최대역인  $443\text{nm}$ 에서  $340\text{nm}$  쪽으로 갈수록 소광이 증가하고 있다. 이는 CDOM (colored dissolved organic matter)나 이러한 유기물이 표면에 침착된 부유사에 의한 것으로 추정된다 (Kirk, 1994). FSK cable의 고장으로 측정 수심이  $10 \text{ m}$  이하에 한정되었다. 그 결과 전체 6개의 정점에서 수중광이 측정되었으나 이중 대마난류역인 L10, L11의 자료는 쓸 수가 없었다.



Table 8-1. Primary photosynthesis parameters and derived parameters.

Station.	$\alpha$ †	$P_m^B$ **	$I_k^B$ ††	Chi2.
D10-0a*	0.0288	5.853	203.2	0.6720
D10-0f**	0.0207	3.927	189.7	0.26115
D10-10a	0.0233	4.851	208.2	0.33302
D10-10f	0.0271	3.951	146.0	0.10930
D10-20a	0.0143	2.340	163.8	0.09046
D10-20f	0.0124	2.056	165.2	0.08335
D7-0a	0.0223	4.681	209.6	1.49934
D7-0f	0.0211	2.384	113.2	0.10816
D7-20a	0.0394	7.567	192.2	0.43613
D7-20f	0.0283	5.031	178.1	0.23388
D7-30a	0.0444	7.211	162.4	0.35618
D7-30f	0.0369	4.694	127.1	0.49236
D8-0f	0.0164	3.808	232.5	0.32052
D8-20f	0.0348	5.176	148.8	0.54432
L10-0f	0.0096	1.817	189.2	0.04795
L10-20a	0.0515	8.568	166.3	1.95517
L10-20f	0.0458	7.317	159.9	0.28503
L11-0f	0.0042	1.302	306.4	0.02922
L11-20a	0.1699	23.770	139.9	11.7955
L11-20f	0.1497	17.445	116.6	1.77912
O11-0a	0.1504	24.615	163.7	3.45219
O11-0f	0.1243	20.531	165.2	2.16248
O11-10a	0.0361	3.291	91.3	0.05096
O11-10f	0.0260	3.220	123.7	0.01865
O9-0a	0.1157	16.615	143.6	2.77310
O9-0f	0.0311	9.379	302.0	4.16950
O9-10a	0.0923	8.292	89.8	1.76653
O9-10f	0.0448	4.284	95.7	0.89138
P6-0f	0.0329	6.535	198.5	2.41084
P6-20f	0.0129	2.519	195.1	0.39558
Q9-0a	0.0692	12.010	173.4	0.49792
Q9-0f	0.0535	8.329	155.6	0.15650
Q9-10a	0.0703	12.716	180.9	0.83627
Q9-10f	0.0559	10.060	180.1	0.70631
S14-0a	0.0599	12.253	204.6	20.6962
S14-0f	0.0178	9.424	529.9	0.25945
S14-22a	0.0409	10.541	258.0	2.46920
S14-22f	0.0257	7.123	277.4	0.42955

\* \* Units  $\text{mg C (mg Chl a)}^{-1} \text{h}^{-1}$

† Units  $\text{mg C (mg Chl a)}^{-1} (\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1})^{-1}\text{h}^{-1}$

†† Units  $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$

\* by ABM method

\*\* by filter method

### 제 3 절 토 의

조사시기는 96년 춘계조사에 (4-5월) 비해 1 달 이상 이른 시기이나 이미 국지적으로 식물 플랑크톤의 증식이 일어나고 있다. 이는 대개의 온대역에서 일어나는 춘계 대증식의 시기인 4-5월 보다 빠르다. 일반적인 춘계 대증식은 일사량의 증가로 성층이 일어나고 혼합층이 얕아지는 반면 임계수심 (critical depth)이 깊어져 식물의 증식이 일어나게 된다는 소위 광-영양염 가설 (Jones and Gowan, 1990; Pingree et al., 1976; Platt et al., 1991; Steele, 1974; Yentch, 1990)로 설명되고 있다.

그러나 본 조사시기는 이러한 조건이 만족되기 전이라는 점에서 흥미롭다. 증식이 일어나는 곳이 서로 다른 다른 수괴가 만나는 전선역이며 그림 8-1에서 보듯이 3개의 핵이 나타난다. 두 개는 각각 D10, Q07을 중심으로 하고 있고 이는 대만난류와 중국대륙붕수가 만나는 해역이다. 나머지 하나는 O10, M01-M06를 중심으로하고 그 북쪽과는 극히 다른 구조를 보이고 있다. 이 곳은 이 시기에 북상하는 대만난류와 대륙붕수가 만나는 해역이다. 이렇게 수괴가 만나는 전선역에서 생기는 국지적인 식물 플랑크톤의 번성이 얼마나 자주 일어나는지, 얼마나 지속하는가 하는 것은 동중국해 생태계의 에너지 흐름을 이해하는데 있어 중요하다. 현재 분석 중인 OCTS 자료는 이러한 질문에 대해 단서를 제공할 것으로 기대된다.

본 조사에서 처음 시도된 수중광 분포 측정은 조사 정점이 case 2 해수입을 보여주었다. 특히 흡광에 있어 CDOM과 부유사의 특성을 밝히는 것은 알고리즘 개발에 있어서도 중요하다 (Prieur and Sathyendranath, 1981). 차기년도 조사에서는 수중광 분포 측정과 CDOM 및 부유사의 광학적 특성을 조사할 예정이다.

## 참고문헌

- 해양연구소, 1996. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 (2차년도 보고서). 과학 기술처 보고서 BSPN 00278-901-1, pp.467.
- Carpenter, E. J., and J. S. Lively, 1980. Review of estimates of algal growth using  $^{14}\text{C}$  tracer techniques. In: Primary productivity in the sea, edited by P. G. Falkowski. Plenum Press, New York, p161-178.
- Cullen, J. J. 1990. On models of growth and photosynthesis in phytoplankton. *Deep-Sea Res.* Vol 37:667-683.
- Cullen, J. J., 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 39:791-803.
- Eppley, R. W., E. Stewart, M. R. Abbott, and U. Heyman, 1985. Estimating ocean primary production from satellite-derived chlorophyll: Introduction to regional differences and statistics for the southern Californian bight. *J. Plankton Res.*, 7:57-70.
- Fei, Z. L., 1991. An analysis on the formation mechanism of the distribution of high content of chlorophyll-a in the continental shelf edge waters of East China Sea. *Acta Oceanologia Sinica*, 11: 97-107
- Fruya, K. and R. Marumo, 1983. The structure of the phytoplankton community in the subsurface chlorophyll maxima in the western North Pacific Ocean. *J. Plank. Res.*, 5: 393-406.
- Guo, Y.J., 1991. The Kuroshio. part 2. Primary productivity and phytoplankton. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, 29: 155-189.
- Harris, G.P., 1986. *Phytoplankton Ecology: Structure, Function and Fluctuation.* Cambridge University Press, 384 pp.
- Huang, R., 1988. The influence of hydrography on the distribution of Phytoplankton in the southern Taiwan strait. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.*, 26:643-656.
- Joint, I. R., 1986. Physiological ecology of picoplankton in various oceanographic provinces. In: Platt, T., Li, W. K. W. (eds.) *Photosynthetic picoplankton.*, 287-309.
- Jones, K. J., and R. J. Gowen, 1990. Influence of stratification and irradiance regime on summer phytoplankton composition in coastal water and

- shelf seas of the British Isles. *Estuar. Coast Shelf. Sci.*, 30, 557-567.
- Kirk, J., 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Environments*. 2nd. Ed. Cambridge Univ. Press.
- Pingree, R.D., Holligan, P.M., Mardell, G.T. and R.N. Head, 1976. The influence of physical stability on, spring summer and autumn phytoplankton blooms in the Celtic Sea. *J.Mar.Biol. Assoc.UK*, 56,845-874
- Platt, T., 1986. Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.*, 33:149-163.
- Platt, T., C. Gallegos, and W.G. Harrison, 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.*, 38:687-701.
- Platt, T., D. F. Bird, and S. Sathyendranath. 1991. Critical depth and marine primary production. *Proc. R. Soc. Lond. B* Vol 246:205-217.
- Platt, T., S. Sathyendranath, and P. Ravindran, 1990. Primary production by phytoplankton: analytic solutions for daily rates per unit area of water surface. *Proc. R. Soc. Lond. B*. Vol 241:101-111.
- Prieur, L. and S. Sathyendranath, 1981. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.*, 26:671-689.
- Sathyendranath, S., and T. Platt, 1995. Remote sensing of water-column primary production. Preprint. Published in: *Measurement of primary production from the molecular to the global scale*, edited by W. K. W. Li and S. Maestrini, ICES Marine Science Symposia, Vol. 197. Copenhagen. pp. 236-243.
- Steele, J. H. 1974. *The structure of marine ecosystems*. Blackwell, Oxford, England.
- Strickland, J. D. H., and T. R. Parsons, 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, p. 185-206.

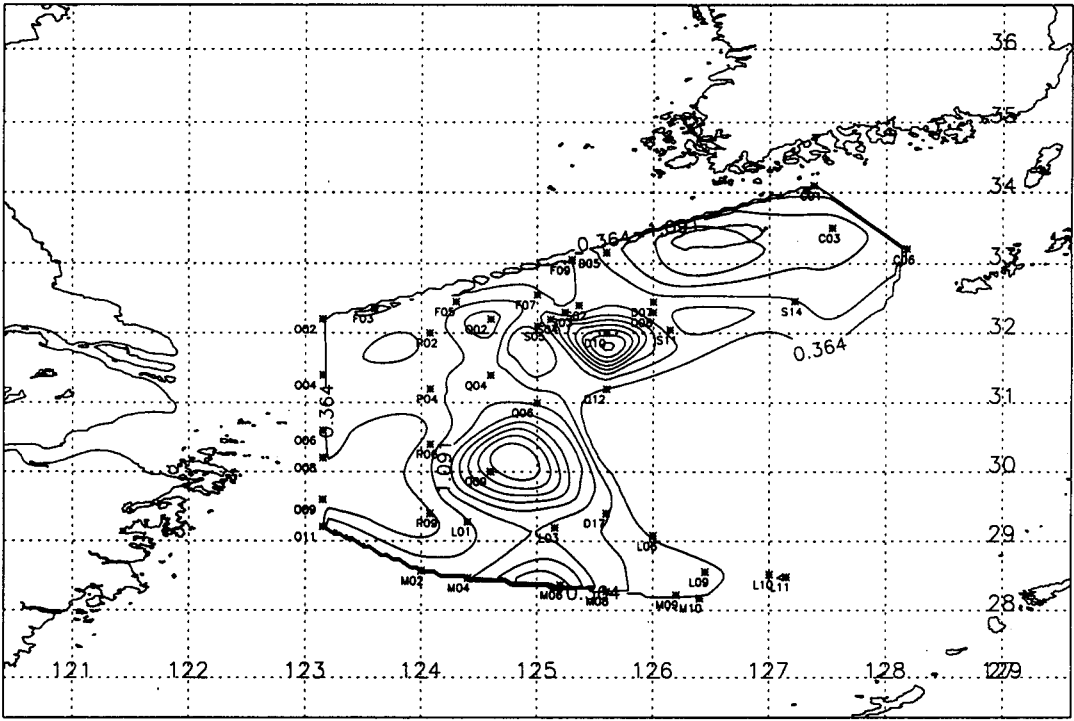


Fig. 8-1. Surface distribution of chlorophyll-a.

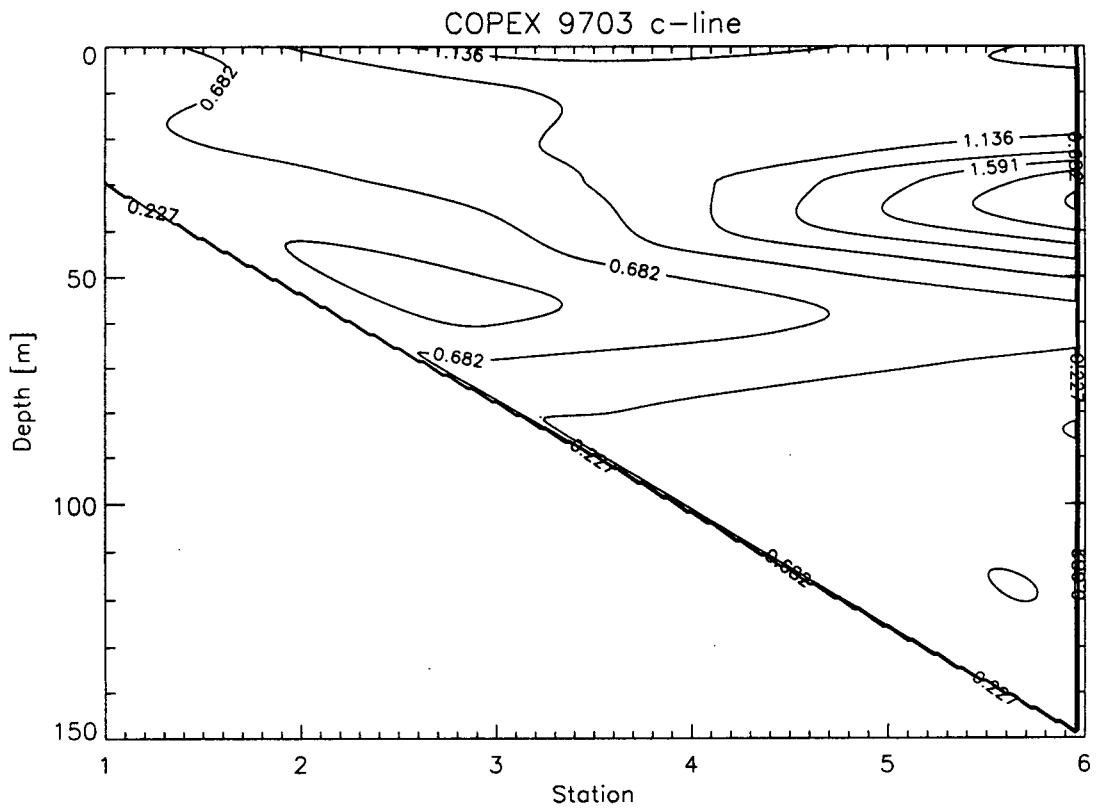


Fig. 8-2. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section C.

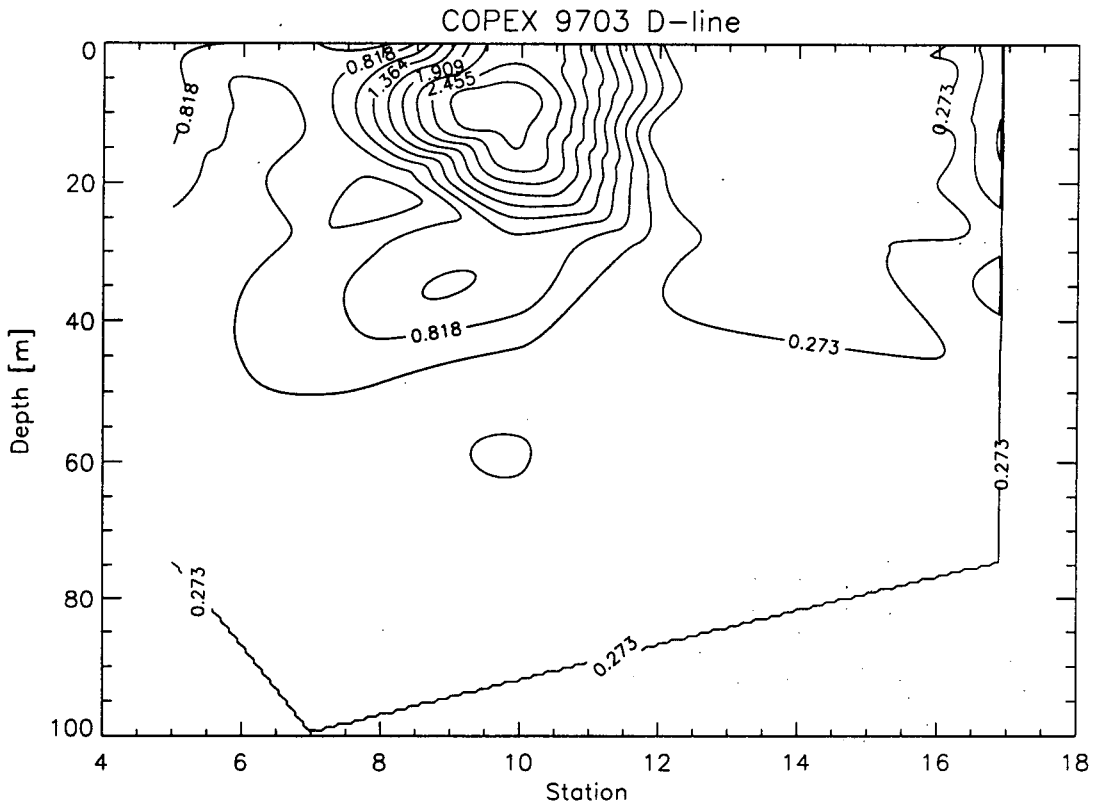


Fig. 8-3. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section D.

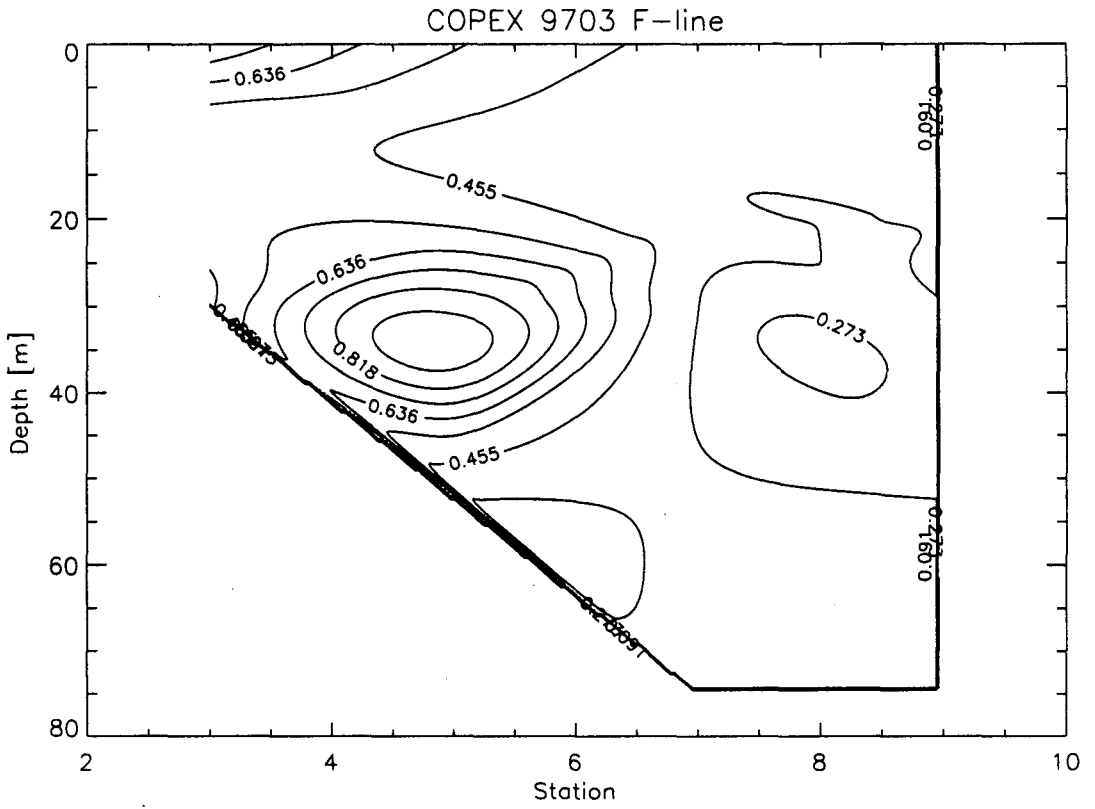


Fig. 8-4. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section F.



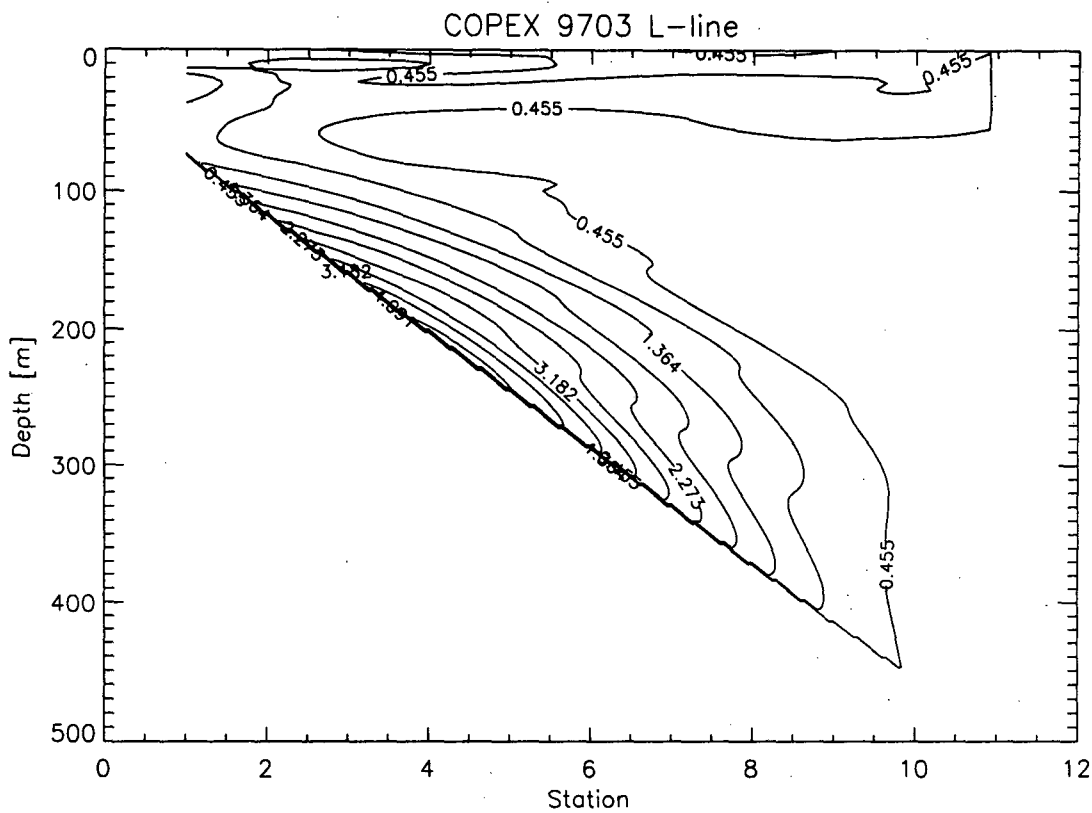


Fig. 8-5. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section L.

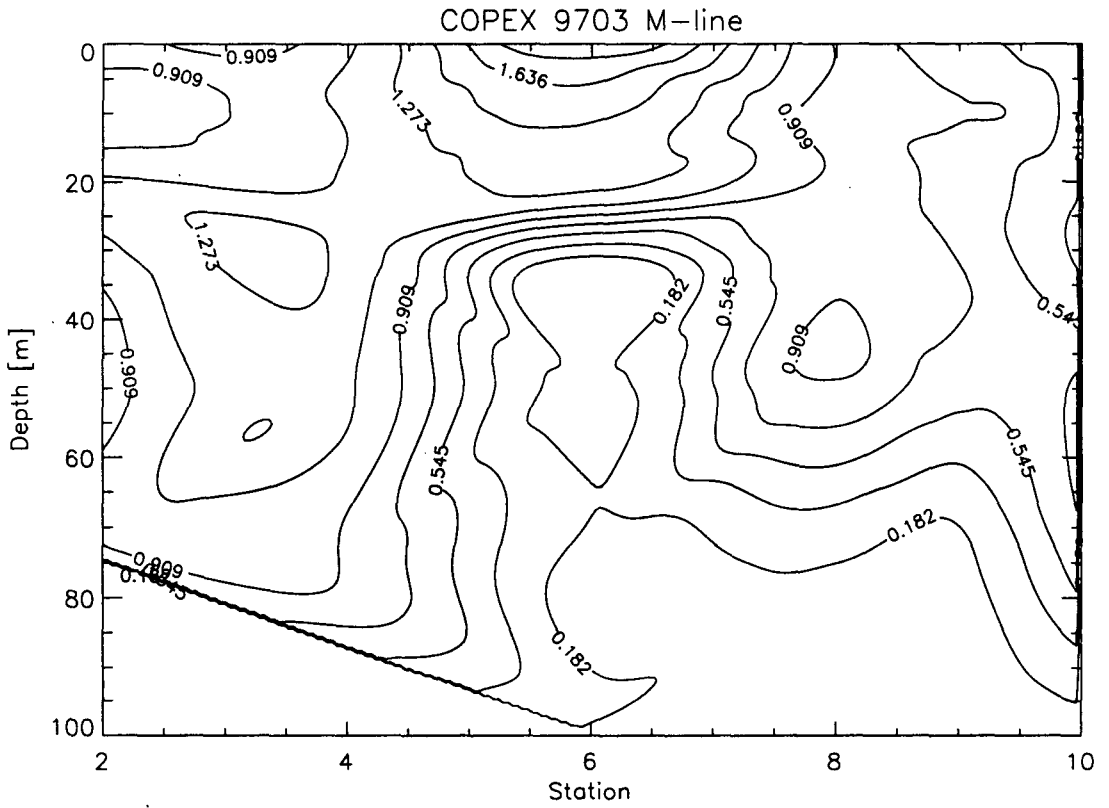


Fig. 8-6. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section M.

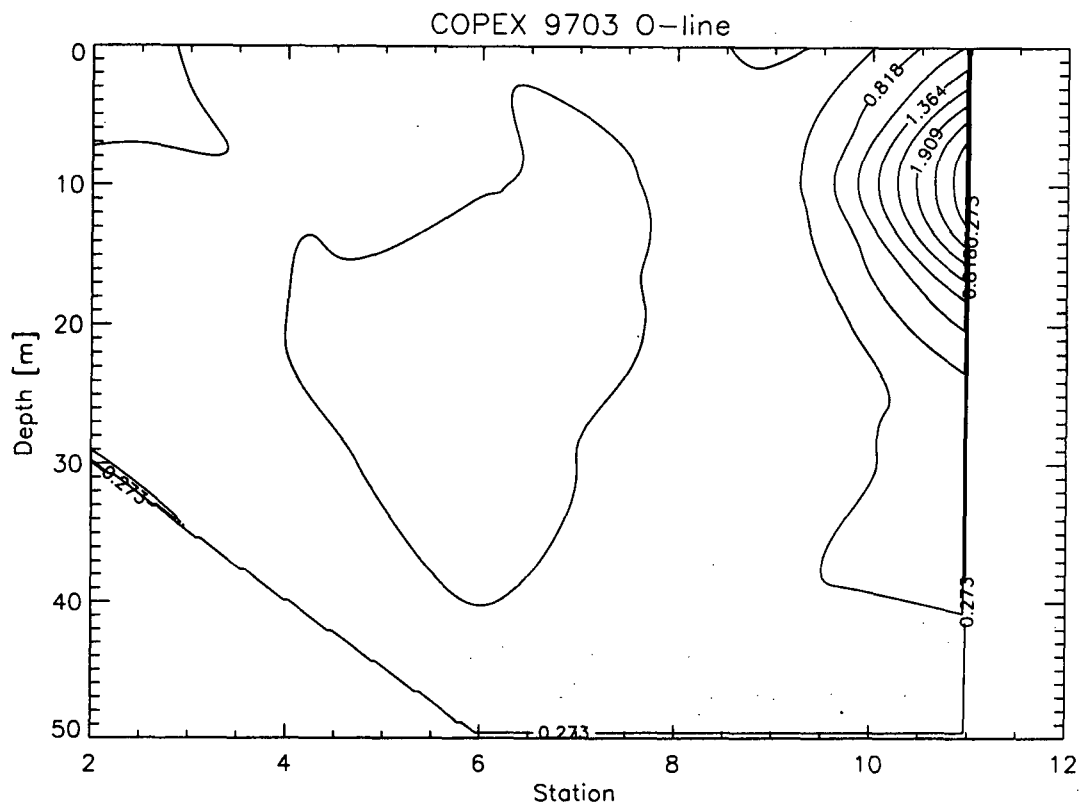


Fig. 8-7. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section O.

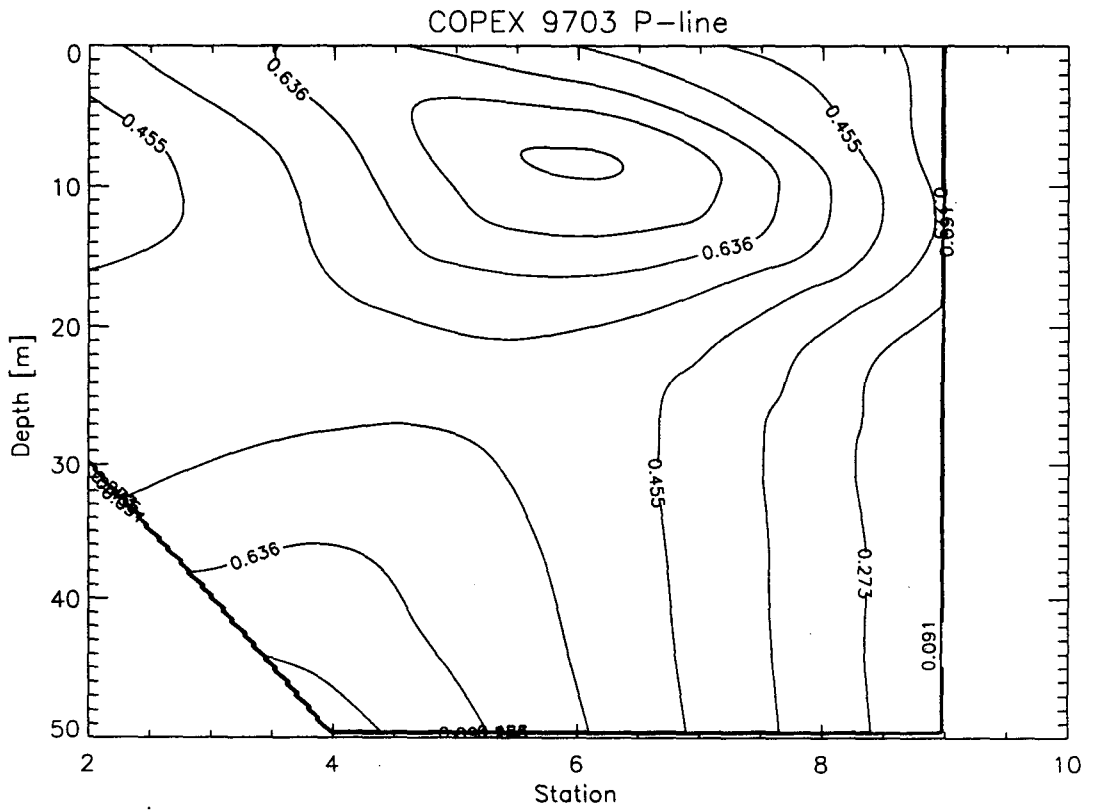


Fig. 8-8. Vertical profile of chlorophyll-a at the cross-section P.

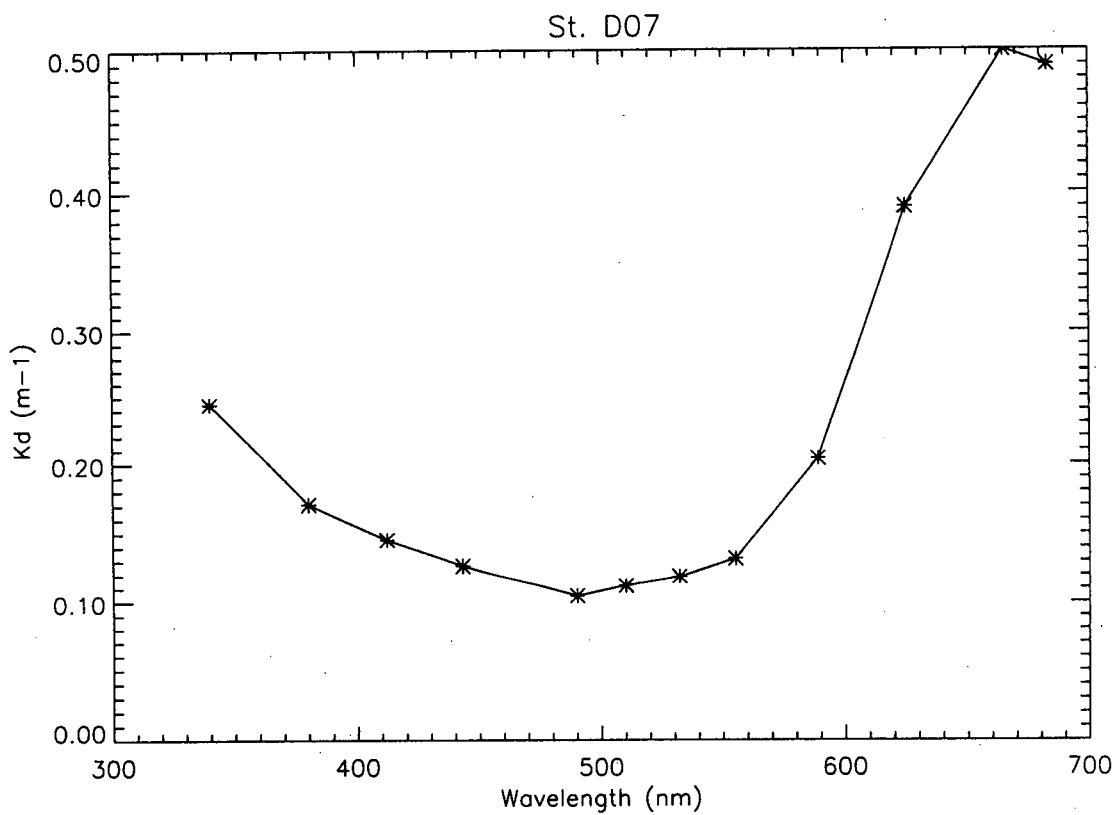
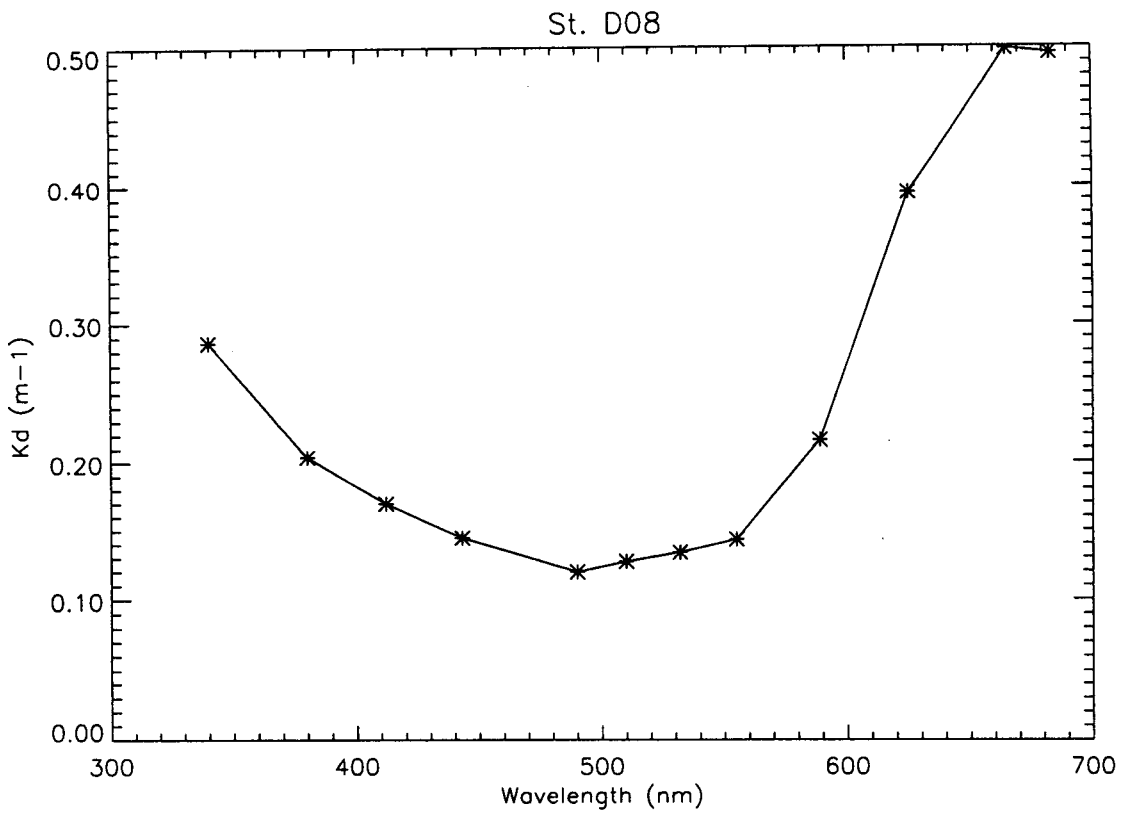


Fig. 8-9. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D07.



**Fig. 8-10. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D08.**

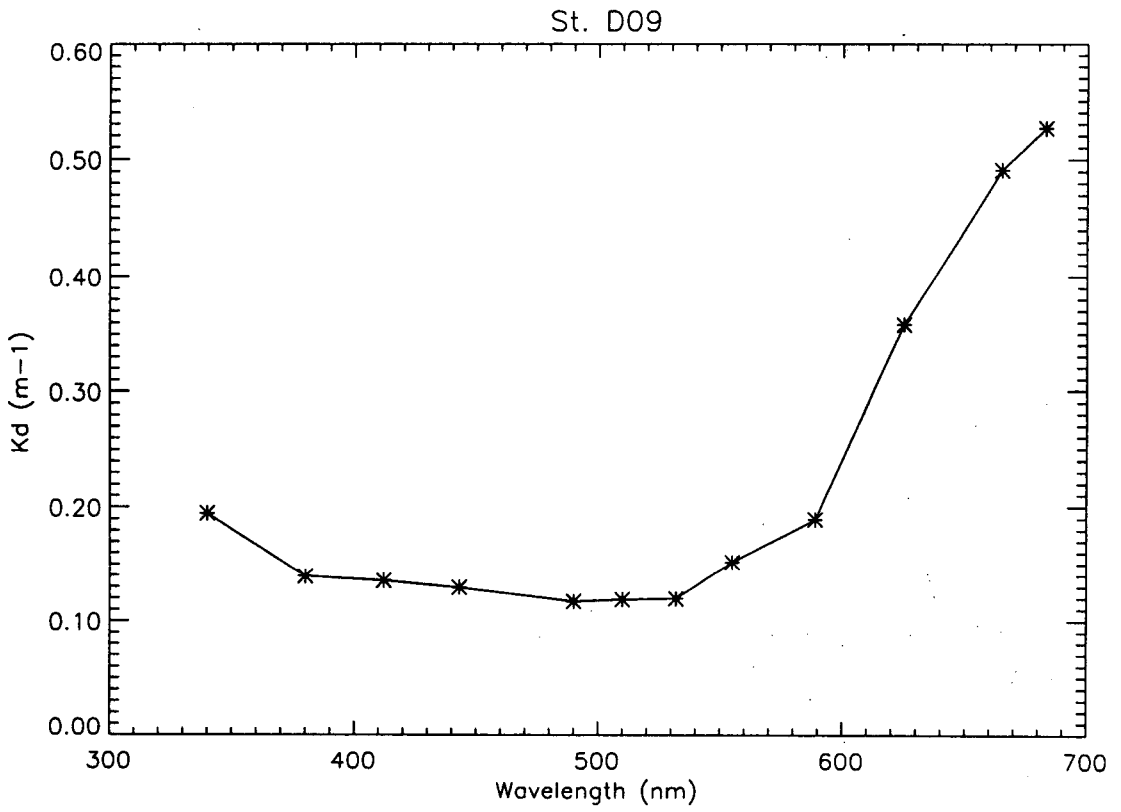


Fig. 8-11. Downwelling diffuse spectral extinction at St. D09.

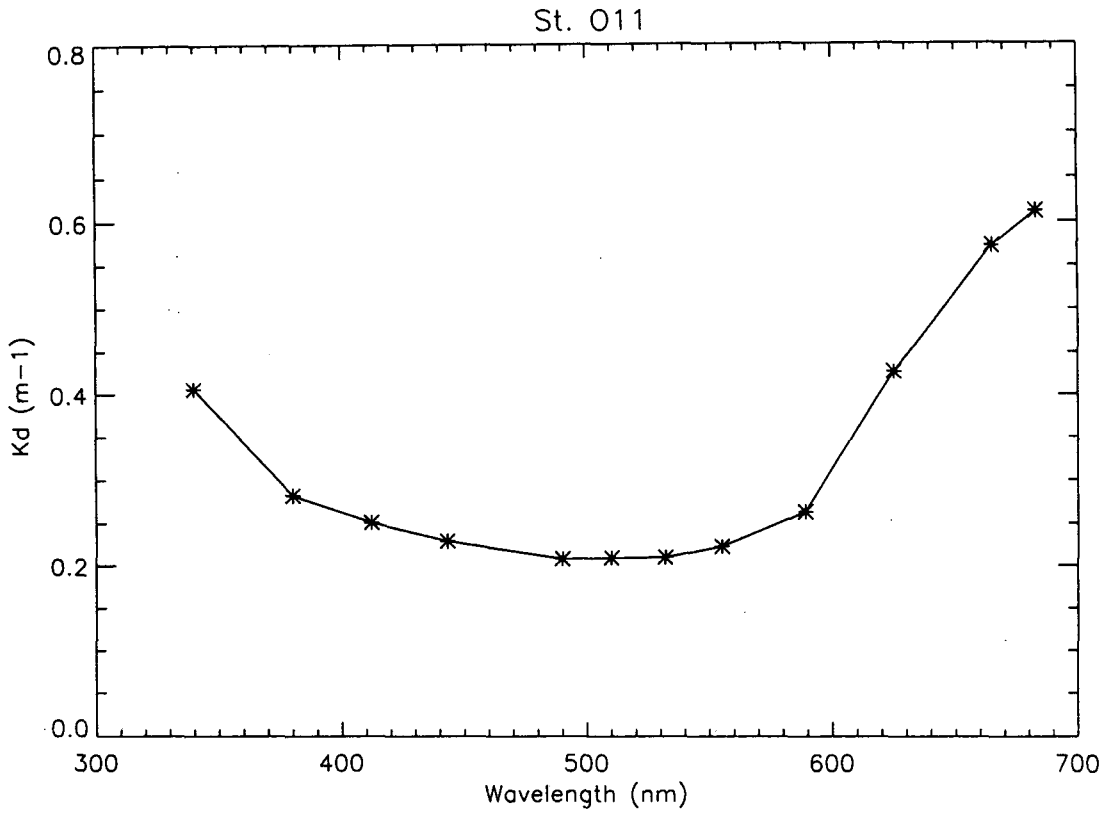


Fig. 8-12. Downwelling diffuse spectral extinction at St. 011.

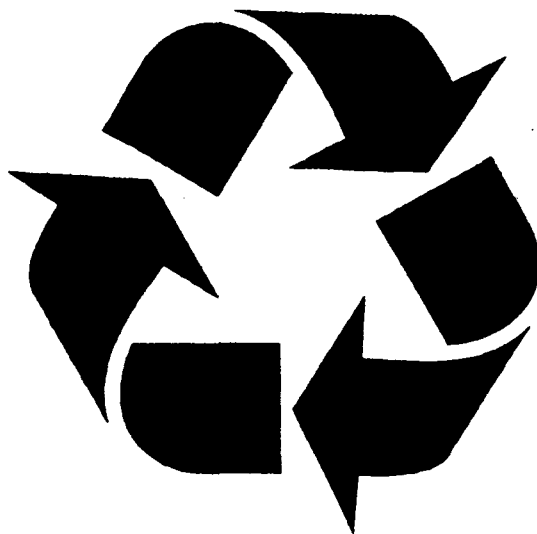


# 부 록



**“Circulation and Air-Sea Interaction  
in the East China Sea” Workshop**

东海环流和海气相互作用研讨会



**3-5 October 1997  
Hangzhou**



## The Program of "Circulation and Air-Sea Interaction in the East China Sea" Workshop

### Thursday, October 2

14:00-22:00 Registration

### Friday, October 3

7:30 Breakfast

Chairpersons: Jilan Su and Haisheng Zhang

8:40-9:20 Opening Remark

Chairperson: Yaochu Yuan

9:20-9:40 Structure of surface current and hydrography in summer in the boundary zone between the yellow and East China Seas  
Heung Jae Lie\*, Cheol Ho Cho, Seok Lee and Jae Hak Lee

9:40-10:00 Geographical and temporal variation of sensible and latent heat fluxes in the ocean area near China

Mingyu Zhou\*, Fenlan Qian and Shiming Li

10:00-10:20 Advances in the study of coastal and oceanic cyclones to the East of China

Zenghao Qin\*

10:20-10:50 Coffee Break

10:50-11:10 Synoptic characteristics of 1993 and 1994 Changma in Korea

Yoon Hong\* and Deuk-Kyun Rha

11:10-11:30 Variability of the Kuroshio in the East China Sea during 1992-1995

Yonggang Liu\* and Yaochu Yuan

12:00 Lunch

Chairperson Heung Jae Lie

14:00-14:20 Tide and wave simulations for the Hangzhou Bay

Byung Ho Choi\*

14:20-14:40 On the current field associated with the Yellow Sea cold water mass

Jilan Su and Daji Huang\*

14:40-15:00 Three dimensional diagnostic, semidiagnostic and prognostic calculations of current in the Taiwan Strait during summer

Huiqun Wang\* and Yaochu Yuan

15:00-15:30 Coffee Break

15:30-15:50 A numerical modeling study of the fresh water plume

Inkweon Bang\*

- 15:50-16:10 Distribution of low salinity waters in the southwestern Yellow Sea in October 1996  
Jae Hak Lee\*
- 16:10-16:30 Hydrographical conditions in the East China Sea  
Jingzhong Jiang\* and Tongde Fang
- 18:00 Welcome Party(at *Huajiashan Hotel*)

**Saturday, October 4**

7:30 Breakfast

Chairpersons: Jilan Su and S.K. Yi

9:00-10:00 Proposals of Chinese side  
(1)Yaochu Yuan: The physical oceanography  
(2)Mingyu Zhou: Meteorology( I )  
(3)Zenghao Qin: Meteorology(II)

10:00-10:30 Coffee Break

10:30-11:30 Proposal of Korea side  
Heung Jae Lie

11:30-12:00 Proposal of Japanese side  
Yaochu Yuan

12:00 Lunch

14:00-17:00 Discussion and summary

18:00 Dinner

19:00-20:45 Excursion around *the West Lake*

**Sunday, October 5**

7:30 Breakfast

8:00-11:30 Excursion to *the Lingyin Temple, Tea Museum* and so on

12:00 Lunch

13:00-17:00 Excursion to *the Tiger Spring, Six Harmony Pagoda* and so on

18:00 Closing Party

*The mark \* means the person who will present the paper.*