

BSPN 00234-738-1

# 황해의 해양환경 보전을 위한 해양확산의 실시간 예측시스템 연구

A study on the real time forecast system of oceanic  
diffusion for environmental preservation of the Yellow Sea

1994. 9.

연 구 기 관  
한 국 해 양 연 구 소

과 학 기 술 처

# 제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “황해의 해양환경 보전을 위한 해양확산의 실시간 예측시스템 연구”의 2차년도(최종년도) 보고서로 제출합니다.

1994년 9월 일

주관기관명 : 한국해양연구소

연구책임자 : 이재학 (해양물리연구부)

연구원 : 이홍재, 조철호, 강석구,  
서장원, 이태신,  
강용균(부산수산대),  
나정열(한양대)

연구조원: 김태희

# 요 약 문

## I. 제목

황해의 해양환경 보전을 위한 해양확산의 실시간 예측시스템 연구

## II. 연구의 필요성과 목적

해양에서의 환경보전은 육상에서의 그것과 동일하게 중요한 문제이다. 황해는 우리나라와 중국의 연안을 통하여 오염물질이 유입되고 오염물질의 투기해역이 있으며 유조선과 화학물질 운반선의 사고시 생태계 등의 환경에 큰 피해가 발생되고 있다. 특히, 황해는 반폐쇄성 바다이기 때문에 오염물질이 누적될 가능성이 많은 만큼 이의 피해를 줄이기 위한 노력이 절대 필요하다. 그동안 연안에 접한 만이나 국지적 해역에 대하여는 해양 오염 연구가 여러 기관들에 의해 부분적으로 수행되어 왔지만 해양확산의 실시간 예측시스템은 구축되지 못한 상태다. 해양확산의 실시간 예측시스템의 구축은 단시간에 이루어질 성질의 사업은 아니다. 즉, 오염물질의 해수에서의 화학 및 물리적 성질을 파악하여야 되고 이동 및 확산모델링에 앞서 순환 등 해양물리적 현상을 재현할 수 있는 수치모델링의 연구가 이루어져야 한다. 성공적인 순환모델링의 연구를 위해서는 황해의 해황을 사전에 정확히 이해하여야 되고 모델 검증에 위한 양질의 현장자료가 축적되어야 한다. 따라서 해양확산의 실시간 예측시스템이라는 최종목표를 위하여 기본적인 물리적 과정에 대한 연구가 절대 필요한 것이다. 이러한 배경으로 2차년도 연구는 황해의 물리적인 현상의 이해와 확산수치모델에 필요한 외적인 자료 확보에 그 목적을 두었다.

### Ⅲ. 연구개발의 내용 (2차년도)

#### 1. 황해 순환 형태의 조사

담수유입의 효과 고찰

#### 2. 해양관측

황해남부 횡단관측 1회 실시: 수온, 염분, 연속 유속관측

#### 3. 수치모델 운영을 위한 기본 입력자료의 데이터베이스 구축

2차원 조석모델을 통한 조석 및 조류의 조화상수

#### 4. 인공위성 적외선 영상자료를 통한 표층류 추정 가능성 실험

### Ⅳ. 연구개발의 결과

#### 1. 황해 순환의 고찰

지금까지 발표된 황해순환의 모식도를 설명하고 각 모델의 문제점을 살펴 보았다. 또한 축적된 자료를 바탕으로 겨울과 여름의 가능한 순환형태를 제시하였다.

#### 2. 해양관측

7월의 CTD 관측자료는 황해남부 해역의 해황이 양자강회석수, 황해저층냉수 및 동중국해에서 오는 고염수의 영향을 복합적으로 받고 있음을 보여 주었다. 양자강회석수는 표층에서는 제주도 부근까지 영향을 미치고 있으나 수심이 깊어짐에 따라 중국연안으로 그 세력이 국한되고 있음을 보였다. 황해저층냉수는 황해 깊은골에서 중국쪽 사면을 따라 남쪽으로 확장하는 모양으로 분포하여 제주해협 위도대 까지 이르고 있음을 나타내었다. 이는 8월 및 9월에 이르면 더욱 남쪽으로 확장하여 동중국해까지 이를 것으로 판단된다. 대마난류수괴로 판단되는 고염수의 물은 표층이하에서

보이며 주축은 제주도를 끼고돌아 동쪽으로 빠져나가며 일부는 매우 약하지만 저층냉수의 외곽의 한국연안 깊은 사면을 따라 북쪽으로 압박을 가하는 가능성을 보여준다.

### 3. 데이터베이스 구축

확산수치모델 운용시 기본적으로 필요한 조석 및 조류 조화상수를 데이터베이스화 하였다.  $M_2$  및  $S_2$  분조를 2차원 조류모델을 이용  $1/6^\circ$ (경도) x  $1/8^\circ$ (위도)의 격자점상에서 계산하였다. 예측시스템을 운용한다면 이는 황해 전체가 아닌 국지적 모델일 경우가 대부분일 것이기 때문에 해류의 현장자료가 없는 경우 조류조화상수를 이용한 유속장의 일시적 재현은 매우 유용하리라 본다.

### 4. 기타

인공위성의 적외선 영상자료로 부터 표층유속을 구하는 문제를 기술하였다. 현장자료가 없기 때문에 계산된 유속장의 진위는 판단할 수 없지만 조류성분을 제거할 수 있다면 조류조화상수로 부터 구한 조류장과 함께 준실시간으로 비조류 성분의 해류장을 산출할 수 있으므로 예측시스템에 이용할 수 있는 가능성이 크다. 한편, 여름철 황해해황의 기본적인 이해를 위하여 담수가 해수면을 덮었을 때의 가능한 현상을 설명하였다.

## V. 건의

본 연구사업은 3개년 계획으로 시작하였으나 연구사업의 대형화 정책에 의하여 2년차에 종료되어 예측시스템 연구라는 최종목표는 이룰 수 없게 되었다. 따라서 본 연구의 최종 목표가 이루어질 수 있는 연구사업의 개발이 필요하다.

# SUMMARY

## I. Title

A study on the system of real time forecast of oceanic diffusion for environmental preservation of the Yellow Sea

## II. Significance and objectives of the study

Environmental protection in the ocean is an important problem as well as that in the land. In the Yellow Sea, a large amount of pollutants flow out from the coast of Korea and China, dumping sites of pollutants exist and accidents of oil tankers and transport ships of chemical materials induce large damage to environment. Because the Yellow Sea is a semi-closed sea, it is very possible that various pollutants are accumulated, and thus an effort is needed to reduce its effects at any cost. Researches on oceanic pollution in the Yellow Sea have been carried out locally in the coastal area and bay, but it is very superficial for all areas of the Yellow Sea and the system of real time forecast is not developed. It is true that the work to set up a forecasting system is not a simple task. That is, chemical and physical properties of pollutants in the ocean should be understood and numerical circulation models which can simulate oceanic phenomena correctly should be developed before performing a pollutant diffusion modeling. To study a numerical circulation model one needs

understanding oceanographic condition and amounts of data of good quality. Therefore, a study of basic physical processes is required to achieve a goal of real time forecasting system of oceanic diffusion. With such a situation the second-year study has purposes of understanding the physical phenomena in the Yellow Sea and gathering of external data which are necessary for numerical diffusion models.

### **III. Scope of the study (2nd year)**

#### **1. Review of circulation pattern in the Yellow Sea**

Effects of freshwater input

#### **2. Field observation**

Observations across the southern Yellow Sea: temperature, salinity, and velocity

#### **3. Building databases of basic input data for numerical models**

Harmonic constants of tide and tidal current

#### **4. Estimating the surface velocity from AVHRR data**

### **IV. Results**

#### **1. Circulation pattern of the Yellow Sea**

Schematic models of circulation in the Yellow Sea are reviewed and discussed. New circulation patterns in winter and summer are introduced based on the data gathered.

#### **2. Field observation**

A field survey to measure temperature and salinity from CTD and velocity from ADCP was carried out across the southern Yellow Sea in July 1994. It is shown that oceanic condition in the southern Yellow Sea in July depends on the Yangtz River Diluted Water, the Yellow Sea Bottom Cold Water, and a saline water from the East China Sea.

### 3. Database of basic input data

Harmonic constants of  $M_2$  and  $S_2$  components of tide and tidal currents in the Yellow Sea are computed on the grid network of  $1/6^\circ$ (longitude) by  $1/8^\circ$ (latitude) based on a 2-dimensional tide model.

In addition, it is tested whether the surface velocity can be estimated from AVHRR/SST data. An effect of freshwater input on the Yellow Sea is also introduced.



# 차 례

요약문 (국문) .....	1
요약문 (영문) .....	4
표차례 .....	11
그림차례 .....	13
제1장 서론 .....	19
제1절 연구의 필요성 및 목적 .....	19
제2절 연구의 진행배경 .....	20
제3절 2차년도 사업내용 .....	21
제2장 황해의 해양순환 .....	24
제1절 해순순환 모식도 .....	24
1. Uda의 모식도 .....	24
2. Kondo의 모식도 .....	25
3. Beardsely 등의 모식 .....	26
4. Lie의 모식도 .....	27
제2절 해석 및 수치모델 .....	27
1. 2차원 수치모델 .....	27
2. 진단 수치모델 .....	28
3. 해석모델 .....	29
제3절 새로운 해수순환의 모식도 .....	30
1. 겨울순환 .....	30
2. 여름순환 .....	34
제3장 황해남부의 현장관측 .....	38

제1절 관측개요 및 자료처리 .....	38
제2절 관측결과 .....	43
1. 1993년 2월 .....	43
2. 1993년 4월 .....	52
3. 1994년 7월 .....	54
제3절 고찰 .....	68
제4장 해양확산모델링의 입력자료 .....	72
제1절 해양 난류확산계수의 추정 .....	72
제2절 기본입력자료의 데이터베이스 .....	78
1. 수심 .....	78
2. 조석 및 조류의 조화상수 .....	80
3. 바람 .....	82
제5장 결론 .....	83
참고문헌 .....	86
부록 A. AVHRR 자료를 이용한 표층류 추정 .....	93
B. 표층 담수막의 효과 .....	101

# CONTENTS

Summary (Korean) .....	1
Summary (English) .....	4
List of Tables .....	12
List of Figures .....	15
Chapter I. Introduction .....	19
Section 1. Necessity and goal of the study .....	19
Section 2. Background of the study .....	20
Section 3. Major items of the second-year study .....	21
Chapter II. Yellow Sea Circulation .....	24
Section 1. Schematic circulation pattern .....	24
1. Uda's pattern .....	24
2. Kondo's pattern .....	25
3. Beardsley et al.'s pattern .....	26
4. Lie's pattern .....	27
Section 2. Analytical and numerical modes .....	27
1. Two-dimensional numerical models .....	27
2. Diagnostic numerical models .....	28
3. Analytical models .....	29
Section 3. New circulation pattern .....	30
1. Summer circulation .....	30
2. Winter circulation .....	34
Chapter III. Field observation in the southern Yellow Sea .....	38

Section 1. Outline of observation and data handling .....	38
Section 2. Results of observations .....	43
1. February 1993 .....	43
2. April 1993 .....	52
3. July 1994 .....	54
Section 3. Discussion .....	68
Chapter IV. Input data for oceanic diffusion modeling .....	72
Section 1. Estimation of eddy-diffusion coefficient .....	72
Section 2. Databases of basic input data .....	78
1. Depths .....	78
2. Harmonic constants of tide and tidal current .....	80
3. Wind .....	82
Chapter V. Conclusions .....	83
References .....	86
Appendices	
A. An estimation of the surface velocity from AVHRR data .....	93
B. An effect of freshwater cap in the sea surface .....	101

# 표 차례

표 1. 2차원 등방성 확산에서 확산계수의 지수에 따른 농도와 분산면적의 시간적 변화 관계. ....	77
표 2. 부산수영만과 군산외해에서 3개 부표 분산실험 결과. ....	78
표 A1. 인공위성 영상자료의 관측시각. ....	93
표 A2. 영상자료를 분석한 계산에 이요된 상수들의 값. ....	96
표 A3. 대흑산도에서 고조시와 저조시. ....	98
표 B1. 강을 통하여 황해로 들어오는 담수의 연유입량. ....	101

# LIST OF TABLES

Table 1. Temporal variation of concentration and of variance area according to diffusion coefficient in two-dimensional isotropic diffusion. ....	77
Table 2. The results of diffusion experiment by using three drogues in the Suyong Bay and off Kunsan. ....	78
Table A1. Observing time of satellite images. ....	93
Table A2. Coefficients of MCSST correction. ....	96
Table A3. The time of high and low tides at Daeheuksando. ....	98
Table. B1. Annual freshwater discharge into the Yellow Sea through the major rivers. ....	101

# 그림 차례

그림 1. 연구사업 방향의 모식도. ....	22
그림 2. 1986년 1월에 유속계 계류점 (플로리다 주립대 Hsueh 교수). ..	32
그림 3. 1986년 동계 해류의 시간변화곡선. ....	33
그림 4. 1986년 7월에 투하한 표층 위성추적부이의 이동궤적 (WHOI Beardsley 박사). ....	35
그림 5. 해양관측 위치도: (a) 1993년 2월과 4월의 CTD 관측점; (b) 1993년 2월의 ADCP 관측항로; (c) 1993년 4월의 ADCP 관측항로; (d) 1994년 7월의 CTD 관측점; (e) 1994년 7월의 ADCP 관측항로. 1994년 7월은 '쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환' 연구사업과 공동관측 .....	39
그림 6. 1993년 2월 목포외해 (관측점 11)와 양자강 하구쪽 사이인 단면 D의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수. ....	44
그림 7. 1993년 2월 북위 34° 를 따른 단면 C의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수. ....	46
그림 8. 1993년 2월 표층의 수평해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	48
그림 9. ADCP로 관측된 유속의 수직평균: (a) 1993년 2월; (b) 1993년 4월. ....	50
그림 10. 1993년 2월 ADCP로 관측된 층별 유속: (a) 단면 D; (b) 단면 C. ....	51
그림 11. 1993년 4월 북위 34° 를 따른 단면 C상의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수. ....	53

그림 12. 1993년 4월 ADCP로 관측된 단면 D의 층별 유속. ....	55
그림 13. 1994년 7월 단면 A상의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	56
그림 14. 1994년 7월 진도 서쪽에서 중국연안에 이르는 단면 C상의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	58
그림 15. 1994년 7월 제주도 남서쪽에서 양자강쪽에 이르는 단면 E상의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	60
그림 16. 1994년 7월 제주도 서쪽의 남북을 가로지르는 단면 D상의 수직해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	61
그림 17. 1994년 7월 표층의 수평해황 분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도. ....	62
그림 18. 1994년 7월에 제주도 주변에서 관측된 수온 및 염분의 역전층. 63	
그림 19. 1994년 7월 ADCP로 관측된 단면 A의 층별 유속. ....	67
그림 20. 1992년 11월 1일 수영만에서 추적된 3개 부표의 궤적. ....	75
그림 21. 1992년 11월 12, 13일 군산외해서 추적된 3개 부표의 궤적. ..	76
그림 A1. 1990년 3월 19일 황해 동남해역의 AVHRR/SST 영상. ....	94
그림 A2. 1991년 11월 4일 황해 동남해역의 AVHRR/SST 영상. ....	95
그림 A3. 1990년 3월 19일 AVHRR/SST 자료에서 계산된 유속장. ....	99
그림 A4. 1991년 11월 4일 AVHRR/SST 자료에서 계산된 유속장. ....	99
그림 B1. 여름철몬순의 평균 위치. ....	102
그림 B2. Diffusive 형태 이중확산의 수직구조. ....	103
그림 B3. Diffusive 형태 이중확산의 과정. ....	104
그림 B4. Solar pond의 구조. ....	105
그림 B5. 여름철 황해의 수직구조 모식도. ....	106
그림 B6. T-S도에 표시한 여름철 황해의 해황. ....	107



# LIST OF FIGURES

Fig. 1. Schematic diagram of outline of the study. ....	22
Fig. 2. Location of currentmeter moorings deployed in January 1986 (from Professor Hsueh, Florida State University). ....	32
Fig. 3. Time plots of low-passed currents observed at stations marked Fig. 2. ....	33
Fig. 4. Trajectories of satellite-tracked surface drifters released in July 1986 (from Dr. Beardsley, WHOI). ....	35
Fig. 5. Location of observations: (a) CTD station in February and April 1993; (b) track of ADCP measurement in February 1993; (c) track of ADCP measurement in April 1993; (d) CTD station in July 1994; (e) track of ADCP measurement in July 1994. The survey in July 1994 was conducted jointly with the project 'A study on ocean circulation in the Kuroshio and East China Sea'. ....	39
Fig. 6. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity, (c) density and (d) beam attenuation coefficient along section D in February 1993. ....	44
Fig. 7. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity, (c) density and (d) beam attenuation coefficient along section C in February 1993. ....	46
Fig. 8. Horizontal distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density in February 1993. ....	48
Fig. 9. Distributions of vertically averaged velocity from ADCP	

measurement: (a) February 1993; (b) April 1993. ....	50
Fig. 10. Distribution of horizontal velocity in each layers measured by ADCP in February, 1993: (a) section D; (b) section C. ...	51
Fig. 11. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity, (c) density and (d) beam attenuation coefficient along section C in April 1993. ....	53
Fig. 12. Distribution of horizontal velocity in each layers measured by ADCP along section C in April 1993. ....	55
Fig. 13. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density along section A in July 1994. ....	56
Fig. 14. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density along section C in July 1994. ....	58
Fig. 15. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density along section E in July 1994. ....	60
Fig. 16. Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density along section D in July 1994. ....	61
Fig. 17. Horizontal distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) density in July 1994. ....	62
Fig. 18. Inversion structure of temperature and salinity observed near Jejudo in July 1994. ....	63
Fig. 19. Distribution of horizontal velocity in each layers measured by ADCP along section A in July 1994. ....	67
Fig. 20. Trajectories of 3 drogues in Suyoung Bay on 1 November	

1992. ....	75
Fig. 21. Trajectories of 3 drogues off Kunsan on 12 and 13 November 1992. ....	76
Fig. A1. The SST image of the southeastern Yellow Sea in 4 November 1991. ....	94
Fig. A2. The SST image of the southeastern Yellow Sea in 19 March 1990. ....	95
Fig. A3. Velocity field derived from AVHRR/SST in 19 March 1990.	99
Fig. A4. Velocity field derived from AVHRR/SST in 4 November 1991. ....	99
Fig. B1. Mean onset date of the summer monsoon. ....	102
Fig. B2. Vertical thermohaline structure in the case of double diffusion of diffusive type. ....	103
Fig. B3. Motions in a fluid containing thermohaline structure shown in Fig. B2. ....	104
Fig. B4. The structure of a solar pond. ....	105
Fig. B5. A vertical model of the Yellow Sea in summer. ....	106
Fig. B6. The T-S diagram of the Yellow Sea in summer. ....	107



# 제1장 서론

## 제1절 연구의 필요성 및 목적

해양에서의 환경보전은 육상에서의 그것과 동일하게 중요한 문제이다. 황해는 우리나라와 중국의 연안을 통하여 오염물질이 유입되고 오염물질의 투기해역이 있으며 유조선과 화학물질 운반선의 사고시 생태계 등의 환경에 큰 피해가 발생되고 있다. 특히, 황해는 반폐쇄성 바다이기 때문에 오염물질이 누적될 가능성이 많은 만큼 이의 피해를 줄이기 위한 노력이 절대 필요하다. 그동안 연안에 접한 만이나 국지적 해역에 대하여는 해양 오염 연구가 여러 기관들에 의해 부분적으로 수행되어 왔지만 해양확산의 실시간 예측시스템은 구축되지 못한 상태다.

해양확산의 실시간 예측시스템의 구축은 단시간에 이루어질 성질의 사업은 아니다. 즉, 오염물질의 해수에서의 화학 및 물리적 성질을 파악하여야 되고 오염물질의 이동 및 확산모델링에 앞서 순환 등 해양물리적 현상을 재현할 수 있는 수치모델링의 연구가 이루어져야 한다. 성공적인 순환 모델링의 연구를 위해서는 황해의 해황을 사전에 정확히 이해하여야 되고 모델 검증을 위한 양질의 현장자료가 축적되어야 한다. 따라서 해양확산의 실시간 예측시스템이라는 최종목표를 위하여 기본적인 물리적 과정에 대한 연구가 절대 필요한 것이다. 이러한 배경으로 2차년도 연구는 황해의 물리적인 현상의 이해와 확산수치모델에 필요한 외적인 자료 확보에 그 목적을 두었다.

## 제2절 연구의 진행배경

1992년 부터 시작된 소위 G7 프로젝트 중의 하나인 '환경공학기술'의 중과제로 선정된 '해양환경 관리기술개발 연구'에서는 오염물질 확산모델 연구가 연구과제 주요내용에 들어있지만 연근해 해양환경 최적관리기술의 수립이 그 최종목표의 하나로 되어있는 바 황해 전체를 대상으로 한 오염물질 확산에 대하여 개별적 외부요인에 의한 효과 연구를 모두 포함하는 데는 한계를 보여주고 있다. 이러한 배경으로 본 연구는 G7 프로젝트 중 관련분야 연구를 보조할 수 있는 다음 사항들을 최종 목적으로 하여 시작되었다.

1. 연안과 폐쇄성 만 등을 제외한 황해에서 해양오염 사고발생시 보전성이 강한 오염물질의 이동과 확산 상태를 실시간으로 예측할 수 있는 시스템 구축.

2. 황해의 해양환경보전을 위한 방제대책 수립을 위한 정책자료 제공.

따라서 본 연구는 해양 오염물질의 현황이나 분포변화의 실질적인 수치 제공이 아닌 오염사고 발생시의 대책을 위한 예측시스템에 관련된 연구에 그 초점이 주어져 있었다.

원래의 연구기간은 3년으로 되어 있었으나 과학기술처의 특정연구개발사업 운영의 정책이 바뀜에 따라 2차년도 연구로 중간에 종결되어 본 연구의 최종목표를 달성할 수 없게 되었다. 따라서 2년간의 연구만으로 나름대로 결론을 내리고 외부에서 활용할 수 있는 자료를 제공해 주기 위해 계획되었던 연구방향을 수정하였다. 즉, 원래 3차년도에 중점 연구 예정이었던 수치모델 분야는 완전히 제외시키고 G7 프로젝트의 관련 연구사업이나

황해의 순환에 대한 수치모델에 필요한 현장자료 수집, 물리해양학적인 과정 연구, 수치모델에 실질적으로 필요한 기본 입력자료 데이터베이스화 및 확산수치모델에서 중요한 요소인 확산계수 설정 등에 연구의 방향을 두었다. 그림 1 에 표시한 최초의 연구개요에서 일부분만 진행한 셈이 된다.

### 제3절 2차년도 사업내용

앞에서 설명한 바와 같이 2차년도로 연구사업이 종료되기 때문에 원래 예정되었던 3차년도의 최종모델 개발을 위한 일차적인 순환과 확산 수치모델의 운용은 제외시키고 황해의 해황과 물리적과정 및 입력자료에 연구사업의 초점을 맞추었다. 구체적인 사업내용은 다음과 같다.

황해 순환의 고찰 - 황해 순환에 대한 기존의 연구결과를 검토하고 지금까지의 자료를 바탕으로 한 겨울과 여름의 순환의 새로운 모형을 제시하였다.

황해 남부해역의 현장관측 - 황해의 남쪽 경계로서 동중국해와 물질교환이 일어나고 기본적인 해황에 대하여 상반된 주장이 있는 해역인 황해 남부해역에서 1차년도에 수행되었던 겨울(2월) 및 봄(4월) 관측의 연속으로 여름철인 7월에 수온, 염분 및 유속 관측을 실시하여 분석하였다. 연구의 효율성을 고려하여 다른 특정연구인 '쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환' 사업과 공동으로 조사를 실시하였다.

조석 및 조류 조화상수 데이터베이스화 - 임의해역에서 조석 및 조류의 재현을 위하여 정해진 격자점상의  $M_2$  및  $S_2$  분조 조화상수를 2차원 조류모델로 계산하여 데이터베이스화 하였다.

기타 - 여름철 담수유입의 일차적인 효과에 대한 고찰과 인공위성의 해

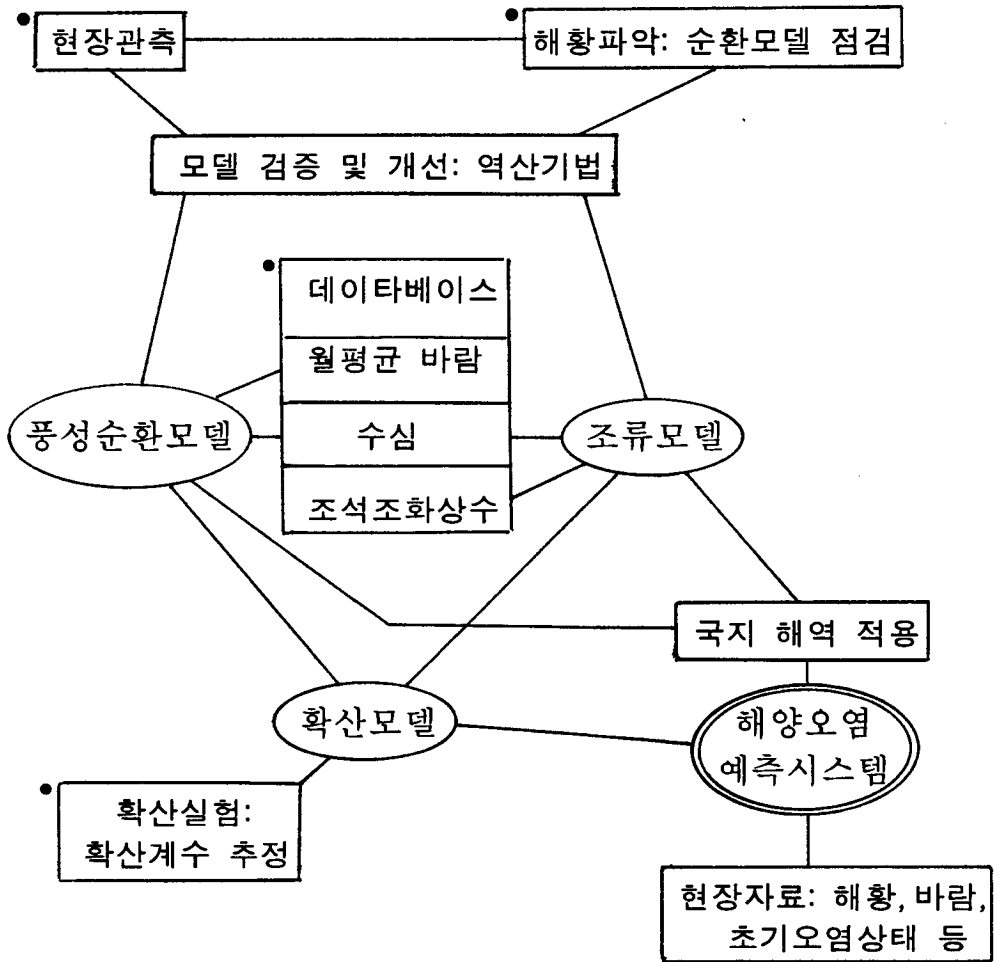


그림 1. 연구진행의 모식도. 2차년도로 연구사업이 종결됨에 따라  
 •로 표 시된 부분만 진행되었다.



수면온도 영상자료로 부터 표층류 산출이 가능한지를 제시하였다.

이상의 사업내용을 바탕으로 본 보고서에서는 다음장에 황해순환에 대하여 설명하였고 제3장에서는 1차년도의 관측을 포함하여 현장관측의 분석결과를 수록하였다. 이어서 확산모델에서 매우 중요한 난류확산계수의 추정문제를 1차년도에 수행하였던 부이들을 이용한 현장실험의 결과와 함께 기술하였다. 수치모델의 기본적인 입력자료인 수심, 바람과 조석 및 조류의 조화상수의 데이터베이스화에 관하여 제5장에서 설명하였다. 완결되지 않은 연구인 인공위성 해수면온도 영상자료를 이용한 표층류 추정문제와 여름철에 형성되는 표층담수막의 효과에 대한 일차적인 분석을 부록으로 첨가하였다.

## 제 2 장 황해의 해양순환

황해의 해양순환은 대체로 네가지 주요 요인인 바람장, 담수유입, 황해난류, 양자강희석수에 의해 결정된다. 황해를 지배하는 바람장의 공간분포와 세기는 계절에 따라 심하게 변한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 즉, 겨울에는 북풍계열의 바람이, 여름에는 남풍계열이 탁월하다. 육지와 강으로부터의 하천수 유입과 강수는 여름철, 특히 장마철에 집중된다. 황해난류와 양자강희석수의 양과 경로 역시 심한 계절변화를 보인다.

지금까지의 황해의 해양순환은 위 네가지 주요 요인중 하나 혹은 두가지만을 대상으로 연구되었을 뿐 네가지 요인을 전부 고려하여 조사하거나 연구한 바는 없다. 따라서 정확한 황해순환은 아직도 잘 알려지지 않은 상태이다. 여기서는 황해순환을 보다 잘 이해하기 위해 지금까지 밝혀진 주요 연구내용을 검토하고 이러한 부분적인 결과와 매우 제한적이긴 하지만 직접 조사한 관측자료를 종합하여 황해순환의 모식도를 구성해 보았다. 그러나 해양순환의 실체를 밝히기 위해서는 무엇보다 황해 전해역을 대상으로 장기간에 걸쳐 체계적으로 유속자료를 획득하는 것이 대단히 중요하다.

### 제1절 해수순환 모식도

#### 1. Uda의 모식도

Uda (1934)는 처음으로 황해의 해수순환 모식도를 제시하였다. 그는 1930년대 초 채수에 의한 수온과 염분 자료를 분석하고 표류병에 의한 가상 궤적을 추정하여 모식도를 작성하였다. 그가 제시한 여름순환을 보면 황해난류가 일본 구주서방 고토열도 부근에서 대마난류로부터 분지된 후 제주도 서부해역을 통과하여 황해 동부로 북상하게 된다. 황해난류는 황해의 북부

역까지 도달하여 발해만에도 고염수를 공급한다. 한편 중국해안을 따라서 남향류가 흐르며 황해 남부와 중부역에 반시계방향의 순환이 존재함을 제시하였다. 가을철에는 황해난류가 사라지는 반면에 중국연안의 남향류가 강하게 된다.

Uda의 순환모식도는 아직도 많이 인용되고 있다. Niino와 Emery (1961), Guan과 Mao (1982)의 순환모식도는 Uda의 모식도와 유사하다. 한편 Niino와 Emery에 의하면 겨울에는 황해난류가 약해지긴 하지만 황해 동남해역으로 유입되어 반시계방향으로 순환하고 한국연안을 따라서 남향류가 존재한다. Guan과 Mao는 계절별 순환을 분리하여 얇고 Niino와 Emery와 유사한 여름순환 모식도를 제시하였다. Asaoka와 Moriyasu (1966)는 겨울철 해표면수온과 플랑크톤 분포를 조사하여 황해난류가 황해 동부역을 통해 유입되고 중국과 한국측 연안을 따라 연안수가 황해로부터 빠져 나오는 모식도를 제시하였다. 그들은 또한 반시계방향의 순환이 북풍계열의 바람장에 의해 형성된다고 설명하였다.

위에서 열거한 여름순환 모식도는 상층순환에 해당하며 뚜렷한 이층 수직구조를 갖는 황해의 하층순환을 반영하는 것은 아니다. 한편 가을에는 중국연안의 남향류가 강화되고 황해난류는 약해지는 것으로 나타낸 Uda의 해수순환은 질량보존의 개념과 부합하지 않는다. 즉, 동중국해로 빠져나가는 황해해수는 어떻게 보충되는가에 대해 구체적인 언급이 없다.

## 2. Kondo의 모식도

Kondo (1985)는 황해와 동중국해에서 장기간 조사된 수온과 염분자료를 수집분석하여 50 m 층의 여름과 겨울순환을 제시하였으며 또한 주요 전선의 위치를 표시하였다. 그의 모식도의 기본골격은 Uda의 모식도와 유사하나 다음과 같은 몇가지 사항은 서로 다르다. 겨울순환의 경우를 보면 황해

난류가 황해 동부역을 통해 유입하는 것이 아니라 황해 중앙부의 깊은 골원쪽을 통해 진입하며, 황해난류의 일부분이 제주도 서쪽에서 분리되어 제주해협으로 유입되고 대만 북동쪽에서 분기된 쿠로시오의 분지가 양자강 하구의 외해역까지 북상한다. 한편 여름에는 황해난류가 대만난류로부터 분지되지 않는 것으로 되어 있다. 많은 자료를 이용하여 얻은 Kondo의 모식도가 신빙성 있는 것처럼 보이나 여름에 50 m 층의 수평분포는 하층을 대표하기 때문에 그의 여름순환 모식도는 상층순환을 적절히 표현하지 못하고 있다.

### 3. Beardsley 등의 모식도

Beardsley 등 (1985)은 황해난류의 기원에 대해 Uda, Kondo 등과 다른 견해를 밝혔다. Uda와 Kondo 등은 황해난류가 규슈 서방 깊은 골을 따라 북상하는 대만난류로부터 분지된다고 주장하였으나 Beardsley 등은 대만난류가 대만해협을 통과한 후 동중국해의 대륙붕을 가로질러 북동진하는 부분을 대만난류라 하였고 황해난류는 제주도 남서부해역에서 대만난류로부터 분지되어 황해로 유입하는 것으로 주장하였다. 한편 중국연안을 따라서 남향류가 존재하는 것으로 나타냈으나 한국 서안을 따라 흐르는 연안류에 대해서는 언급하지 않았다.

Chao (1990)의 겨울순환 모식도는 Beardsley 등과 같이 대만난류가 대만난류의 연장이며 많은 중국학자들이 보고한 바와 같이 제주도 남서부에 반시계방향의 순환이 존재하며 황해난류가 제주도와 이 반시계방향의 순환사이를 통과하여 북서진 하는 것으로 보고하였다. 그러나 Beardsley, Chao 등은 모식도를 작성하는데 사용한 자료의 원천을 밝히지 않았다. 일부 중국학자들, 예를 들면 Fang 등 (1991)도 Beardsley 등처럼 대만난류가 대만난류의 연장이라고 주장하였지만 그들이 이용한 자료만으로는 이러한 주장이 충

분히 입증되지는 못한다.

#### 4. Lie의 모식도

Lie (1987)는 황해를 대상으로 처음으로 하계 CTD 정밀조사 자료를 이용하여 여름철에 양자강희석수가 황해 남동해역에서 북쪽으로 확장됨을 보였고 반시계방향의 상층순환을 제시하였다. 한편 제주도 남서연안을 따라 북진하는 황해난류가 황해로 유입하지 않고 제주해협으로 유입한다고 밝혔다. 그는 또한 겨울에도 황해난류가 황해남동해역을 통해서 북상하지 않는다고 보고하였다 (Lie, 1985).

Kim 등 (1991)은 여름에 제주도 서방과 북방 해역에서 비교적 조밀한 관측을 실시하여 고염수가 제주도 연안 20 km 이내에서 띠의 형태로 존재하며 이 고염수가 황해로 유입하지 않는다고 보고하였는데 이러한 결과는 Lie의 모식도와 잘 일치하는 것이다. 그들은 제주해협에서 나타나는 저염수는 양자강희석수에 기원한 것으로 해석하였다. 따라서 Lie와 Kim 등은 다른 저자와는 달리 하계에 고염의 황해난류수가 황해로 유입하지 않는다는 새로운 주장을 하였다.

## 제2절 해석 및 수치모델

### 1. 2차원 수치모델

Choi (1982)와 An (1987)은 시.공간적으로 균일한 바람장에 의해 발생되는 해수순환의 특성을 이해하기 위하여 수층이 수직적으로 균질하다는 가정하에 운동방정식을 수치적으로 계산하였다. 북서풍이 우세한 겨울에는 해표면이 북으로 갈수록 감소하고 황해 중앙부와 발해만에서는 반시계방향의 해수순환이 그리고 한국 해역에서는 시계방향의 순환이 발생될 수 있음을 보였다. 따라서 중국과 한국 연안에서 남향류가 형성된다. 남풍이 우세한 여름

에는 해표면의 경사방향과 해류의 방향이 겨울과 반대로 됨을 제시하였다. 한편 Choi (1984)는 똑같은 조건의 바람과 해황을 감안하여 3차원모델을 계산하였으나 2차원모델과 비슷한 결과와 얻었다.

이러한 단순모델은 수층이 수직적으로 균질하고 북풍이 우세한 겨울철의 순환형태를 잘 대변할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 겨울철에 황해의 바람장이 음의 curl을 가질 정도로 (이 등, 1994) 바람장이 공간적으로 균일하지 않다. 여름철의 바람장은 겨울에 비하여 훨씬 약하며 시간변화도 대단히 심하다. 따라서 위의 모델이 보여주는 결과는 여름순환을 적절히 재현하고 있다고 할 수는 없다.

Lee와 Beardsley (1994)은 최근에 3차원 조류모델링을 수행하여 성층화에 의한 조석잔차류의 변화가 황해저층냉수의 남하와 관련된 여름철 황해의 순환에 영향을 미치는 중요한 과정일 것임을 지적한 결과를 발표하였다. 그러나 이 모델에서는 담수의 유입에 의한 부력과 바람 등의 외력을 제외시켰기 때문에 이들을 포함한 모델링이 필요한 상태다.

## 2. 진단 수치모델

Yanagi와 Takahashi (1993)는 여름순환을 연구하기 위하여 수층을 상층, 중층, 하층으로 나누고 대한해협을 막은 상태에서 계절별 바람장과 해황을 고려하여 진단모델을 계산하였다.

진단모델에 의한 겨울순환은 2차원 수치모델과 비슷한 결과를 보였다. 양자강 하구와 제주도 사이에 반시계방향의 순환, 연안역에서는 남향류, 황해 중앙부에서는 시계방향의 순환, 그리고 제주도 주변을 시계방향으로 도는 연안류가 나타났다. 여름에는 황해 중앙부의 상층과 중층에서 반시계 방향의 순환이 그러나 하층에서는 시계방향의 순환이 존재하고, 중국 연안류는 상층에서는 남향류로 그러나 중층에서는 북향류로 나타났다. 한편 한국 연

안류는 상층과 중층에서는 북향류로 그러나 하층에서는 남향류로 계산되었다. 제주도 주변에서는 겨울과는 반대인 반시계방향의 순환이 존재한다.

이 진단모델은 다른 모델 보다 황해순환을 잘 표현한다고 생각되나 대한해협을 육지로 처리함으로 제주도 주변의 순환이 바람장에 의해 결정될 수밖에 없으며 양자강으로부터 유출되는 담수를 적절히 고려하지 못한 단점이 있다. 또한 COADS 바람자료가 실제 황해 바람장을 대표할 수 있을 정도로 공간적으로 조밀하지 못한 점도 있다.

### 3. 해석모델

황해 중앙부에서는 겨울에는 고온수가, 여름에는 저온수가 존재하는 것을 황해난류의 북상과 황해냉수의 확장으로 해석하고 이를 설명하기 위하여 Park (1986)은 남북으로 긴 반폐쇄성 해협을 가정하고 남북성분의 바람과 반대로 흐르는 역류가 생성됨을 단순해석모델로 설명하였다. 순환의 기본골격은 수치모델에 의한 결과와 유사하다. 한편 앞에서 지적한 바와 같이 강한 성층이 이루어지는 여름에 바람에 의해 황해냉수가 남하한다는 해석은 올바른 것이라 할 수 없다. 바람에 의한 역학적 에너지는 해표면에 직접 전달되기 때문에 성층조건을 무시하고 남풍에 의해 황해냉수가 남하한다는 설명은 적절하지 않다.

Kang (1982)은 시간에 따라 변하는 바람에 의해 생성되는 정압조건하에서 해류에 대한 단순해석적 모델연구를 수행한 바 있고, 겨울철 바람에 의한 황해순환에 대하여 Hsueh and Pang (1989)과 Pang (1991, 1992a,b)은 대륙붕과 이론으로 설명하였다.

여름에 조석혼합에 의해 연안수는 수직으로 균질한 반면에 외해수는 상층과 하층이 뚜렷이 구분된다 (Lie, 1989). Seung (1987)은 이러한 밀도분포에 지형류 개념을 적용하여 연안혼합수는 북쪽으로 이동하고 조석전선의 외해

쪽의 해수는 남쪽으로 이동한다는 결과를 제시하였다. 실제 해양에서는 여름에는 많은 양의 강수유입으로 조석전선이 전 연안에 걸쳐 형성되지 않으며 특히 중국 연안역에서는 남향류가 강하게 흐르고 있다. 따라서 Seung의 연구결과는 조석전선이 뚜렷한 일부연안역에 적용이 가능하며 전반적인 연안역의 순환을 설명하는데는 한계가 있다. 많은 기존의 연구들의 결과를 검증할 수 있는 자료의 부족으로 황해순환의 전반적인 이해에는 미약한 수준이다.

### 제3절 새로운 해수순환의 모식도

지금까지의 제시된 순환모식도와 모델, 그리고 관측자료를 종합하면 다음과 같은 해수순환 모식도를 생각해 볼 수 있다.

#### 1. 겨울순환

앞에서 제시한 여러 모식도에서 황해난류가 황해 동남해역을 통해 북상하는 것으로 표시하였다. 20년간의 수온과 염분자료를 분석한 결과 겨울에는 황해의 수층이 수직적으로 균질하나 황해 남동해역에서는 동서로 발달된 강력한 열.염전선이 형성된다 (Lie, 1985). 전선의 북부역에서는 저온저염수가, 남부역에서는 상대적으로 고온고염수가 자리하고 있다. 초겨울부터 봄까지 형성되는 전선을 따라 흐르는 해류는 가능하나 전선을 가로지르는 지속적인 해류는 존재하기 어렵다. 따라서 황해난류가 황해 동남역을 통해 북상한다고 보기는 어렵다. Hsueh (1986)는 유속과 해저면압력 자료를 분석하여 겨울에 황해의 해면이 남쪽으로 갈수록 상승하나 북풍이 약화될 때는 압력구배가 깨어지고 남쪽의 고염고온수가 간헐적으로 북상한다고 보고하였다. 따라서 남북방향의 압력이 평형이 이루어 지지 않을 때 동.서 방향의 열염전선이 깨진다고 볼 수 있다.



Hsueh의 유속자료를 보면 (그림 2와 3) 황해남부에서는 남북성분의 해류가 시간에 따라 펄스모양으로 변하고 단기간 형성되는 북향류의 최대가 15 cm/s를 초과하지 않았다. 군산 외해역 중심 골 부근에서는 비교적 지속적인 남향류가 보였으나 경기만 외해역 중심골에서는 북향류가 우세하게 나타났다. 한편 한국 연안을 따라 흐르는 연안류도 비슷한 형태의 유향을 보였다. 또한 한국해양연구소 (1983-1987)가 황해 남동 연안역에서 조사한 해류는 남향류가 우세한 것으로 나타났다. 또한 Lee (1970)가 10월과 3월에 한국연안역에서 투하한 표류병이 남 혹은 남동으로 이동하였으며 Beardsley 등 (1992)이 황해 골에 투하한 위성추적부이도 약 3 cm/sec의 유속을 갖고 남쪽으로 이동하였다. 따라서 관측자료는 황해난류가 지속적으로 황해로 유입하는 어떠한 결과도 보이지 않았다는 사실은 주목할 만 하다. 이 고온,고염수의 황해난류가 겨울에도 제주도 해안을 따라 시계방향으로 돌아나가는 것은 뚜렷하다.

이상의 관측결과와 과거의 연구성과를 종합하면 다음과 같은 겨울순환의 모식도를 구성할 수 있다. 우선 중국과 한국 연안에 남향류가 존재한다. 수치모델에서는 한반도 전 서안을 따라 남향류가 있는 것으로 나타나지만 관측결과는 산동반도와 경기만 이남에서 남향류가 존재하는 것을 입증하고 있다. 지금까지 지속적으로 북상하는 것으로 알려진 황해난류는 아직까지 해류관측으로 확인된 바 없으며 북풍계열의 바람이 약해질 때 간헐적으로 북상하는 것으로 보인다. 이 등 (1994)이 CZCS 자료로 부터 탁도의 변화로 가시화된 표층의 구조를 근거로 보고한 분석결과는 이러한 가능성을 뒷받침하고 있다. 그러나 다음과 같은 문제점이 제기된다. 즉, 연안류에 의해 연속적으로 빠져 나가는 해수는 어떻게 보충되는가? 우선 생각해 볼 수 있는 가능성은 간헐적으로 유입되는 황해난류수, 하천을 통한 담수의 유입, 전선역에서 발생하는 수직순환에 의한 고염수의 전선 이북역으로의 확장, 연안수

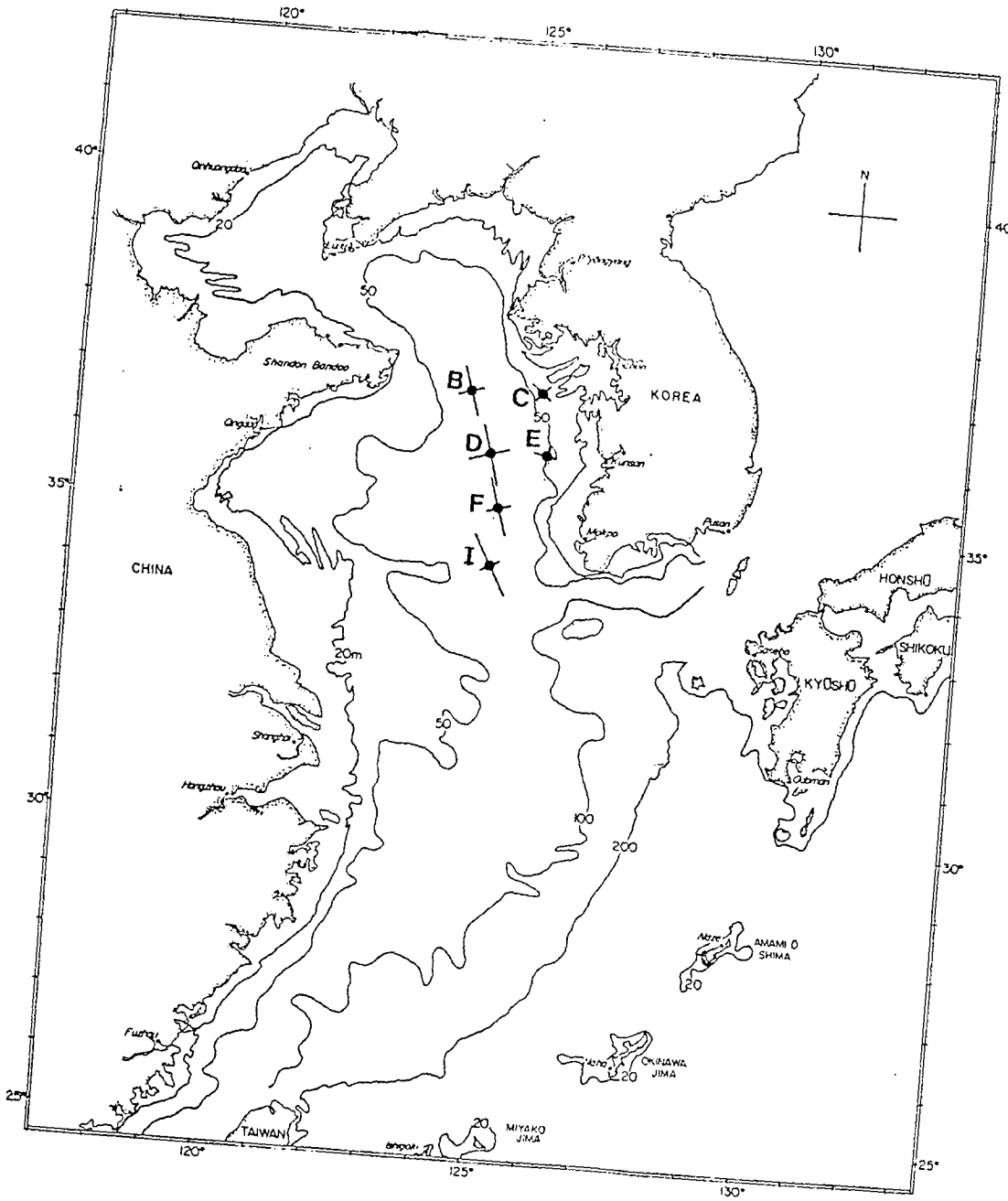
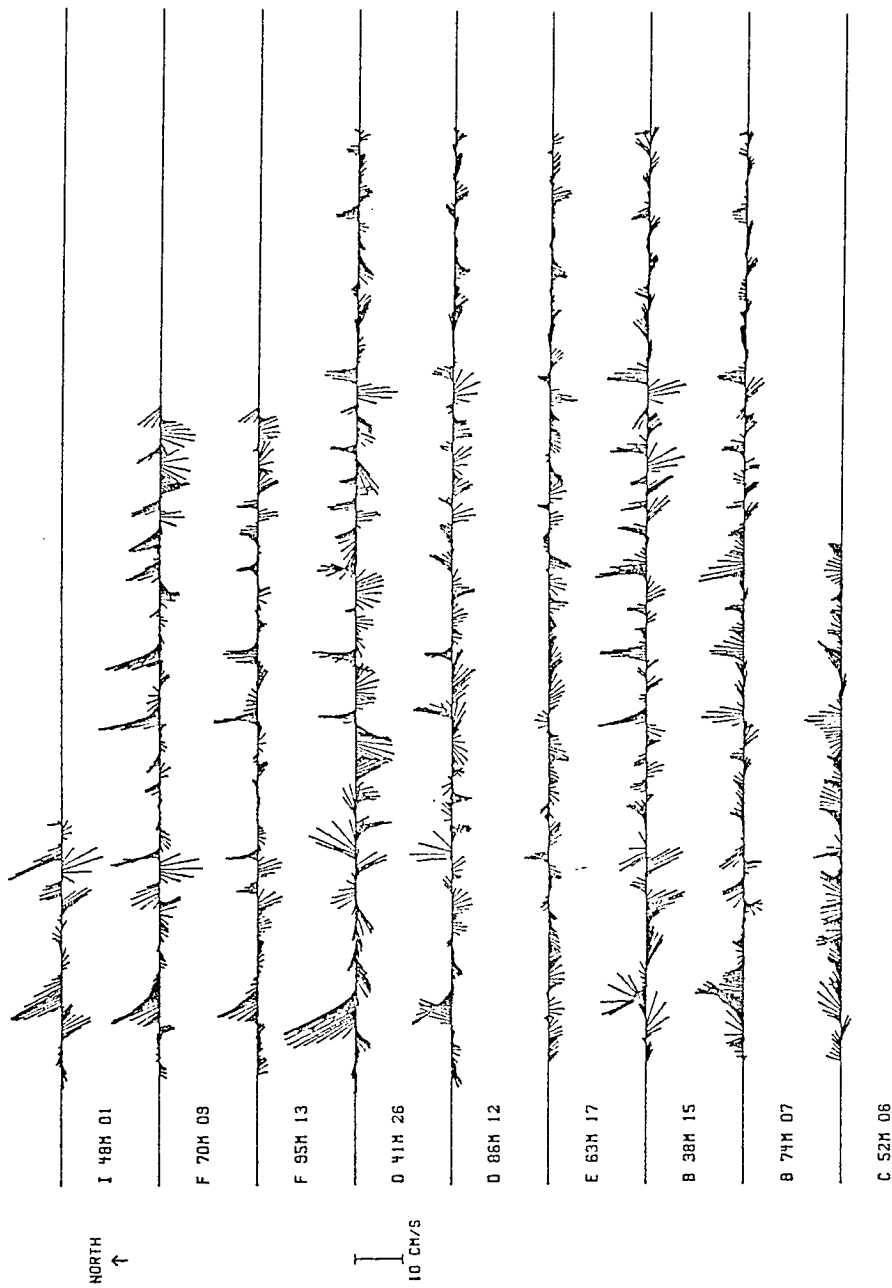


그림 2. 1986년 1월의 유속계 계류점 (플로리다 주립대 Hsueh 교수).



JAN FEB MAR APRIL  
 1986

그림 3. 1986년 동계 해류의 시간변화곡선.

의 재순환을 생각해 볼 수 있다. 전선역에서 수직순환에 의한 고염수의 이동량은 크지 않다. 따라서 해수의 보충은 주로 다른 세가지 과정이 복합되어 이루어 지는 것으로 판단된다.

## 2. 여름순환

여름에는 황해의 수층이 연안역에서는 조석혼합에 의해 수직적으로 균질하고 조류의 영향이 상대적으로 적게 미치는 외해역은 고온.저염수의 상층과 저온.고염수의 하층으로 구성된다. 눈에 띈 정도로 고염의 해수가 황해로 유입하는 것은 확인된 바 없다. 특히 혀 모양으로 황해 골을 따라 남쪽으로 확장된 황해냉수대를 가로 지르거나 냉수대의 외곽을 따라 유입하는 뚜렷한 관측결과도 아직은 없다. 황해난류로 분류될 수 있는 고염수는 제주도 남부역으로부터 제주도 서안쪽으로 북상하나 이 고염수는 황해로 진입하는 것이 아니라 제주도 서안을 시계방향으로 돌아 제주해협으로 빠져 나간다.

표층수는 고온.저염의 특성을 갖고 있는데 특히 중국연안수가 담수의 영향을 더욱 심하게 받으며 특히 양자강희석수가 확장되는 황해 남부역에서 30.0 psu 이하의 저염수가 나타난다. 대부분의 양자강 희석수는 양자강 이남의 연안을 따라 남하하거나 혹은 제주도 쪽으로 북동진 하지만 제주도 방향으로 확장되는 양자강 희석수의 일부가 흑산도 이북까지 북상하기도 한다. 조선전선역 외해에 위치한 흑산도 부근에서의 해류관측은 약 10 cm/s 정도의 지속적인 북향류를 보였다. 따라서 황해 중남부에서는 반시계방향으로 회전하는 상층순환이 존재한다. 이러한 결과는 표층위성추적부의 실험결과와 잘 일치하는 것이다 (그림 4). 한편 제주도 서방에 투하된 표류병 (Lee, 1970)과 위성추적부이 (Beardsley 등, 1992)는 제주해협으로 진입하였다. 이러한 사실은 양자강희석수가 동진 혹은 북동진한다는 사실을 잘 입증하는 것이다.

Daily Mean Velocity (WHOI, 1986)

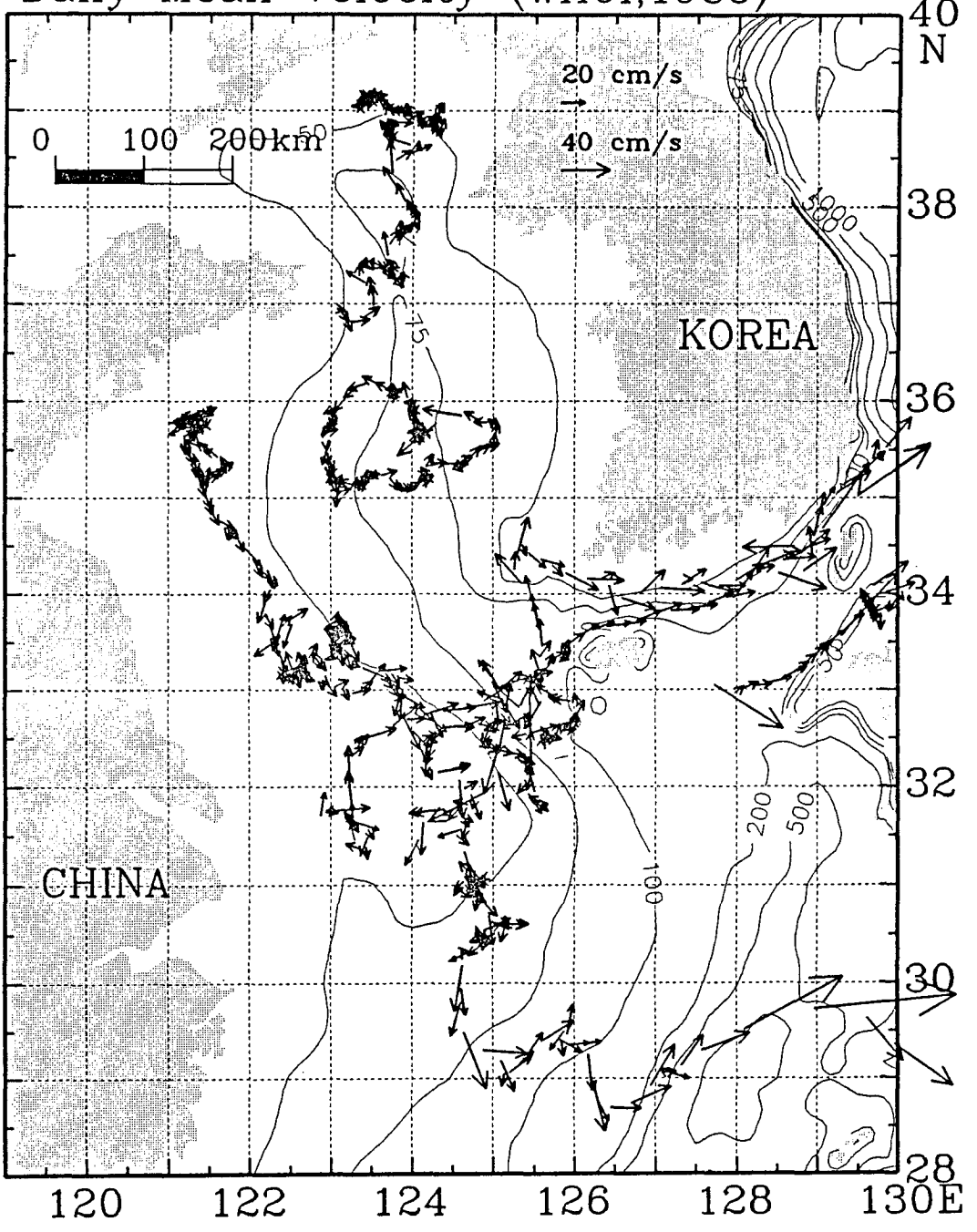


그림 4. 1986년 7월에 투하한 표층 위성추적부이의 이동궤적 (WHOI Beardsley 박사).

하천을 통해 한국 연안역으로 유입되는 담수의 양은 중국 연안역에 비해 적다. 따라서 중국 연안에서 많은 양의 담수는 강한 jet류를 형성하게 되나 한국 연안역에서 해류는 그 유속이 대단히 약하다. 영광부근에서 조사한 장기 유속관측자료는 미약하지만 남향류의 존재를 보인다. 이는 조석혼합역에서 지형평형에 의해 북향류가 존재할 것으로 추정된 Seung (1987)의 결과와 상반된다. 중국연안에서도 조석혼합이 한국 연안에서 만큼 활발하나 담수 유입이 더 크기 때문에 조석혼합이 남류하는 연안류에 큰 영향을 미치지 못하는 것이다.

황해냉수의 확장 내지 하층순환을 직접관측한 자료는 없다. 유속계 계류가 여러번 시도되긴 하였어도 유속계를 안전하게 회수하지 못하였다. 단순 2층모델의 경우 상층이 반시계 방향의 순환을 갖는다면 하층에서는 시계방향의 순환이 생성된다. 수치모델도 이와 같은 결과를 제시하고 있다 (Yanagi와 Takahashi, 1993). 한국해양연구소가 '동중국해의 해양순환' 연구사업의 일환으로 1994년 7월 2일 황해남부의 골에 ( $124^{\circ}\text{E}$ ,  $34^{\circ} 50'\text{N}$  부근) 투하한 두대의 위성추적부이가 드로그의 수심이 다름에도 불구하고 (5 m와 40 m 층) 약 1 개월간 똑같이 동남동으로 이동하였다. 불행히 40 m 층 부이의 자료전송이 단절되어 하층에서의 흐름을 계속 추적할 수 없었다. 반면에 상층부이는  $125^{\circ}\text{E}$  부근에서 급격히 북동북으로 방향전환을 하였다. 자료가 충분히 길지 않고 태풍의 정체 또는 통과 시기와 맞물려 단정하기는 어렵지만 부이의 궤적은 하층순환의 방향이 상층순환과 반대일 것이라는 가정에 배치된다. 이 문제는 향후 면밀히 검토되어야 할 사항이다.

이상의 결과를 종합하면 중국과 한국연안에서는 남향류가 존재하고 중국 연안류가 훨씬 강하며 폭이 넓으나 한국 연안류는 조석혼합역에 국한될 것으로 판단된다. 양자강희석수의 상당한 부분이 황해 남부역으로 북동진하며 그 일부가 황해로 유입되어 조석혼합역 외곽을 따라 계속 북상한다. 산동반

도 이남의 연안을 따라 남하하는 연안수는 등수심선을 따라 남동진하며 결국 그 일부가 재순환 가능성이 매우 높다. 따라서 중국 연안류와 황해로 진출하는 양자강회석수는 기본적으로 반시계방향의 상층순환을 구성하게 된다. 한편 황해난류에 해당하는 고염수는 황해로 유입하지 않고 제주도 서안을 따라 북상한 후 제주해협으로 진입한다. 현재의 제한된 자료를 근거하여 하층순환에 대해 언급하기는 어렵다.

강수도 해수순환에 지대한 영향을 미친다. 연강수량은 약 1 m에 달한다. 이중 30-40%에 해당하는 양이 장마철과 태풍 통과시에 집중된다. 따라서 단기간에 강수로 유입되는 담수가 평균수심 40 m인 황해순환에 지대한 영향을 미칠것은 분명한 사실이다. 300 mm의 강수가 내리고 염분이 33.0 psu를 갖는 상층 10 m 내에서 완전 혼합된다면 혼합 후 염분이 32.04 psu로 떨어진다. 만약 30 m 내에서 혼합된다면 염분은 32.67 psu이 된다. 따라서 공간적으로 같은 양의 강수가 내리는 경우라 해도 수심과 조석혼합의 정도가 공간에 따라 변하면 밀도류가 형성되게 된다. 실제로 강수는 시공간적으로 균일하지 않기 때문에 강수에 의한 해면상승도 시공간적으로 변한다. 황해의 공간규모가 400 km로 30 cm의 해면상승은 약 10 cm/sec 정도의 해류를 발생시킬 수 있는 압력구배가 조성된다. 이와같이 여름에 집중되는 강수는 황해의 해수순환을 결정하는 가장 중요한 요인의 하나이다.

한편, 담수의 다른 효과로 생각할 수 있는 면은 담수가 해수와 충분히 섞이기 전의 일로 해수면에 얇은 담수막이 있을때 해수와 대기 사이의 열 및 수분 교환에 관한 것이다. 이러한 효과를 추정하기 위한 일차적인 분석을 부록 B에 수록하였다.

## 제3장 황해남부의 현장관측

외해와 물질교환이 이루어지는 경계인 황해남부 해역은 황해만의 수치 모델링을 고려한다면 경계조건을 정확성을 위해 해황이 정확히 밝혀져야 한다. 기본적인 해황에 대해 상반된 견해가 있기 때문에 그 중요성을 더해 주고 있다. 예를들면, 겨울철 황해난류의 존재유무이다. 즉, Uda (1934)의 제의처럼 황해난류의 존재를 주장하는 측과 (Byun과 Chang, 1988; Pang 등, 1992) 이와 상반된 의견을 보이는 측이 있다 (Lie, 1984, 1985; Nakao, 1977; Kim 등, 1991). 또한, 겨울과 봄철 사이에 바람장이 변함에 따라 난류수가 간헐적으로 황해로 유입한다는 견해도 있다 (Hsueh, 1986; 이 등, 1994). 이러한 상황을 배경으로 본 연구에서는 겨울, 봄 및 여름에 각 한차례씩 황해남부 해역의 현장관측을 실시하였다. 가을철의 관측은 본 연구의 중단으로 이루어지지 않았다.

### 제1절 관측개요 및 자료처리

1993년 2월과 4월 및 1994년 7월에 황해와 동중국해의 지리적 경계에 해당되는 황해남부해역에서 동서 방향의 횡단선을 중심으로 기본해양관측을 실시하였다. 7월 하계관측은 특정연구과제인 '쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환'과 협동으로 이루어 졌다. 그림 5a 및 5d에 표시된 관측점들에서 CTD를 이용하여 수온 및 염분을 측정하였고 그림 5b, 5c 및 5e에 보인 선박의 이동경로를 따라 ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)에 의한 연속적인 해류관측을 수행하였다. 또한, CTD (Sea-Bird)에 부착된 Transmissometer를 이용하여 혼탁도의 정도를 알 수 있는 소광계수



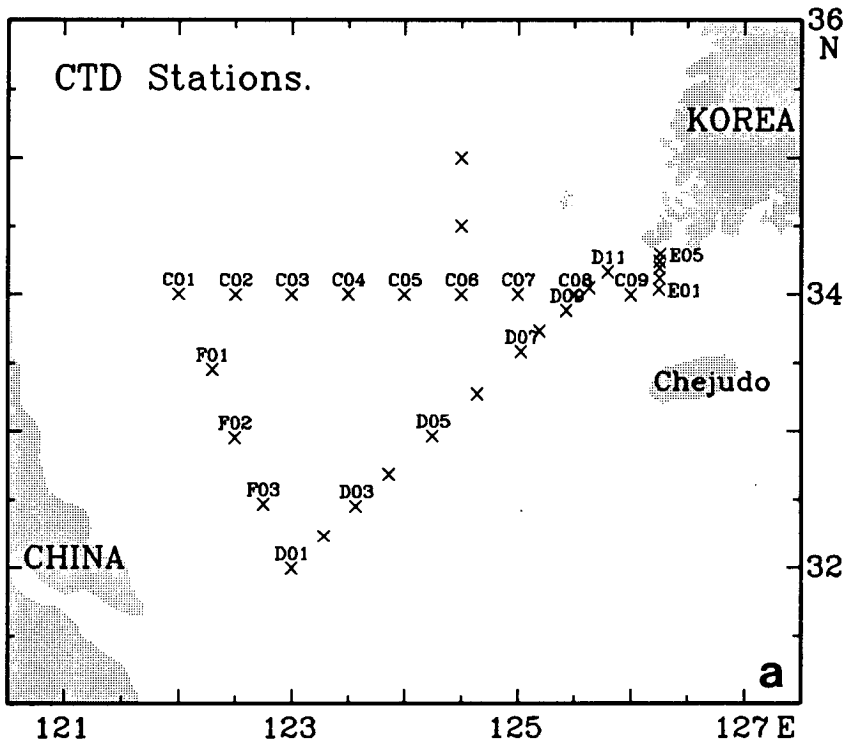


그림 5. 해양관측 위치도: (a) 1993년 2월과 4월의 CTD 관측점;

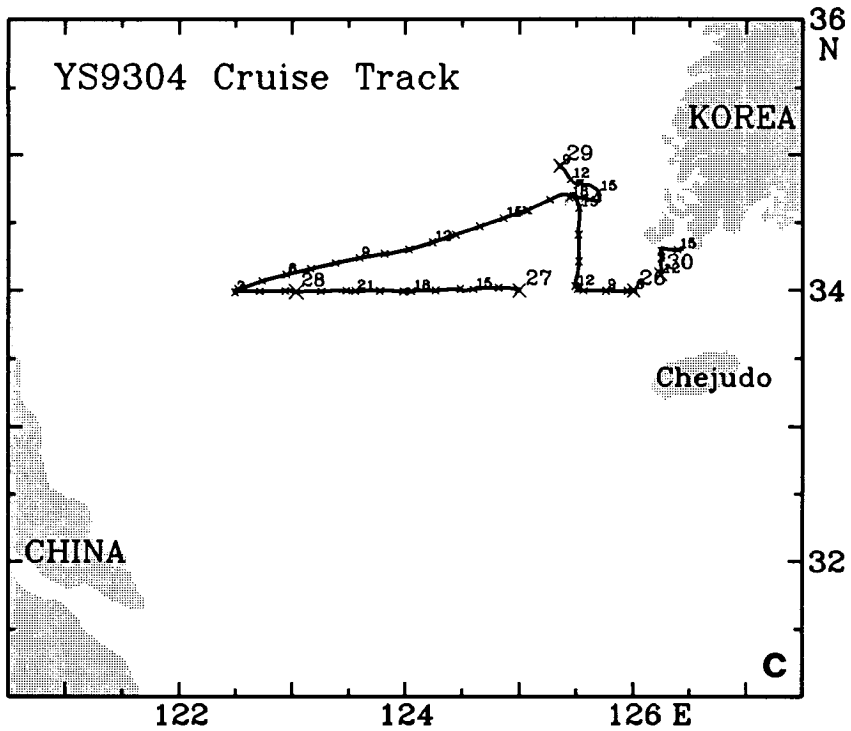
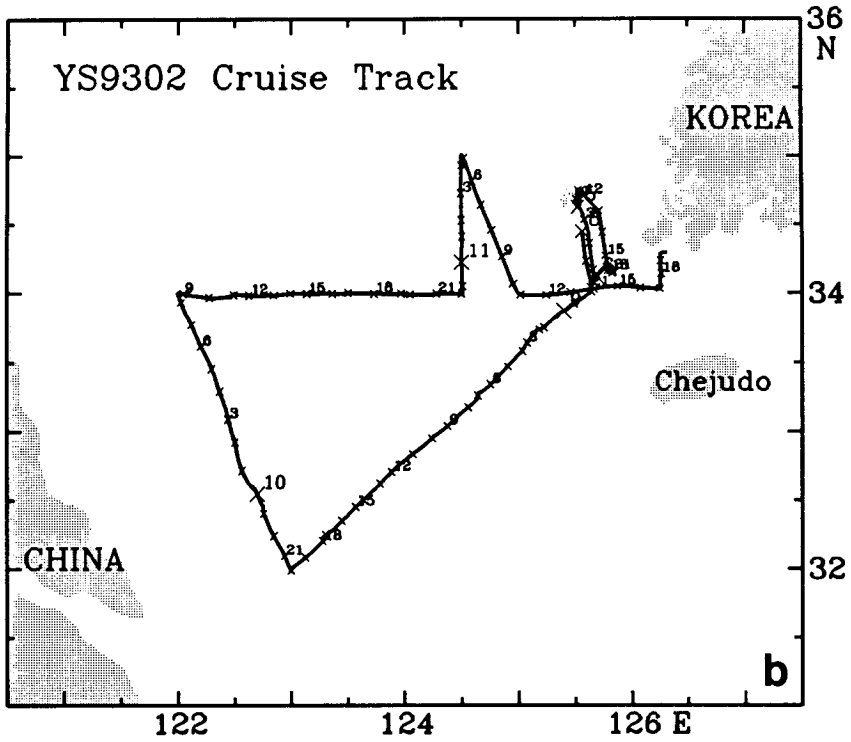
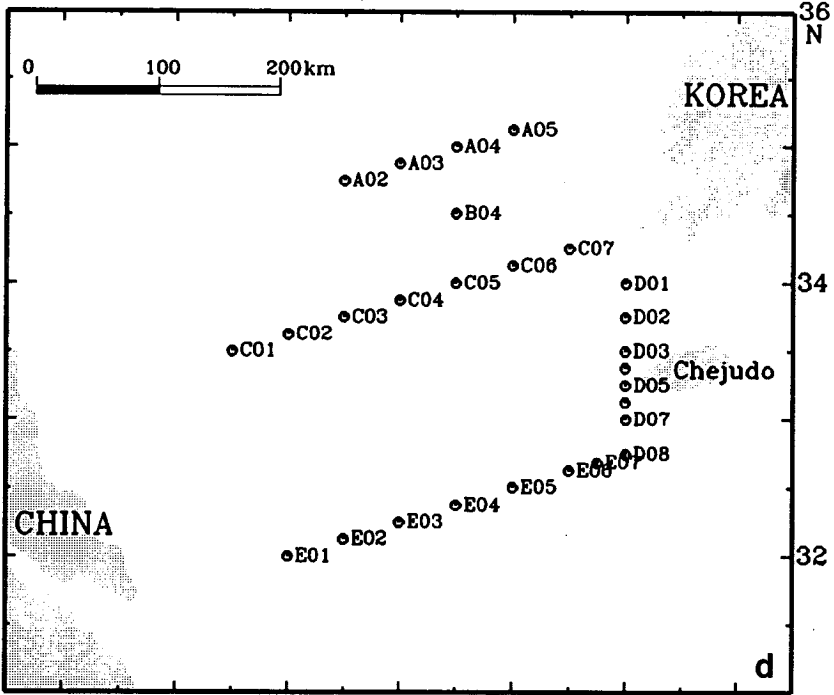


그림 5. (b) 1993년 2월의 ADCP 관측항로; (c) 1993년 4월의 관측항로;

YS9406 CTD Station



YS9406 Cruise track

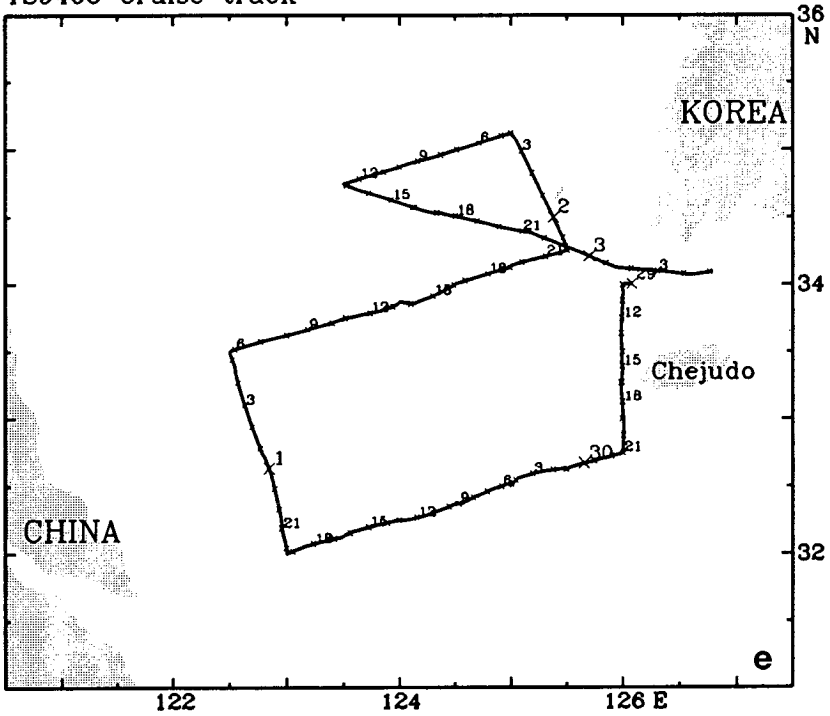


그림 5. (d) 1994년 7월의 CTD 관측점; (e) ADCP 관측항로. '쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환' 연구사업과 공동관측.

(beam attenuation coefficients)를 관측하였다.

수온과 염분 자료는 Neil Brown CTD (Mark IIIb) 및 Sea-Bird CTD (Model 25-03)를 이용하여 관측하였다. 수온은 보정없이 측정치를 그대로 이용하였지만 염분은 채수한 해수를 실험실에서 염분계 (salinometer; Autosal)로 따로 측정하여 얻어진 값을 근거로 보정을 하였다. 자세한 과정은 1차년도보고서 (이 와 이, 1993)에 자세히 설명되어 있다.

수평유속은 조사선에 장착된 ADCP (RD-VM0150)를 이용하여 선박의 이동과 함께 연속적으로 측정하였다. 사용된 ADCP는 153.6 KHz의 음파를 수중에 발사하여 해수의 운동으로 이동되는 부유물질 등에 의한 반사파를 수신한 후 선상의 PC로 처리하여 해류의 방향과 크기를 정해진 깊이에 따라 관측한다. 음파는 1초 간격으로 발사되며 30초 동안의 평균값을 매 8 m 깊이마다 측정하였다. 관측해역의 수심이 얇기 때문에 해저면에서의 유속이 없음을 가정한 bottom tracking으로 측정하였다. 선박의 위치는 조사선에 설치된 위성항법장치 (GPS)를 이용하였다. ADCP를 이용한 수평유속의 측정은 이동중인 선박에서 연속적으로 수행되었기 때문에 선박의 이동에 따른 영향의 제거가 필요하고 조류의 시공간적 변화를 알아야 하는 어려운 점이 있어서 전체 관측치의 해석은 무리가 있지만 한 정점에서 수직방향의 수평유속변화는 관측자료의 직접해석으로 가능하다. 관측해역의 수심이 얇은 관계로 해저면의 교란에 의한 효과를 고려해야 하는데 이러한 영향이 해저 가까이에 한정된다는 가정하에 측정시 자료에 표시되는 질의 정도를 기준으로 하여 나쁜 자료는 제외시켰다. 황해나 동중국해 처럼 조류가 강한곳에서는 ADCP 자료로부터 조석성분의 제거를 위한 방법의 개발이 없이는 ADCP를 이용하여 유속의 측정이 무의미하기 때문에 이

의 연구가 수행되어야 할 것이다.

빛의 해수중 투과정도를 나타내는 소광계수는 사용된 Sea-Bird CTD에 부착된 Sea-Tech의 Transmissometer를 통해 각 층별로 측정하였다. 해수를 통과한 빛의 세기  $I$ 는

$$I(r) = I(0)e^{-rc}$$

로 표시되는데 여기서  $r$  은 빛의 통과거리이고  $I(0)$ 과  $I(r)$ 은 각각 광원 및 통과거리를 지난 빛의 세기를 나타내며  $c$ 는 소광계수이다. 본 관측에서는  $r=0.05$  m 이었으며 빛의 파장은 생물에 의한 흡광정도가 낮은 665 nm 이었다.

## 제2절 관측결과

### 1. 1993년 2월

#### 가. 수온 및 염분

단면 D - 그림 6은 목포와 양자강 하구를 잇는 단면상의 물리해황을 나타낸것으로 대표적인 특성은 다음과 같다.

- 수온, 염분 및 밀도의 분포는 해저로부터 수 m 층을 제외하고 수직적으로 균질하다 (그림 6a, 6b, 6c).
- 13 °C 이상의 높은 수온은 중앙 골의 왼쪽사면인 관측점 6 부근에서만 그리고 9.0 °C 이하의 낮은 수온은 한국 및 중국의 연안해역 (관측점 9와 4)에서 각각 나타난다 (그림 6a).

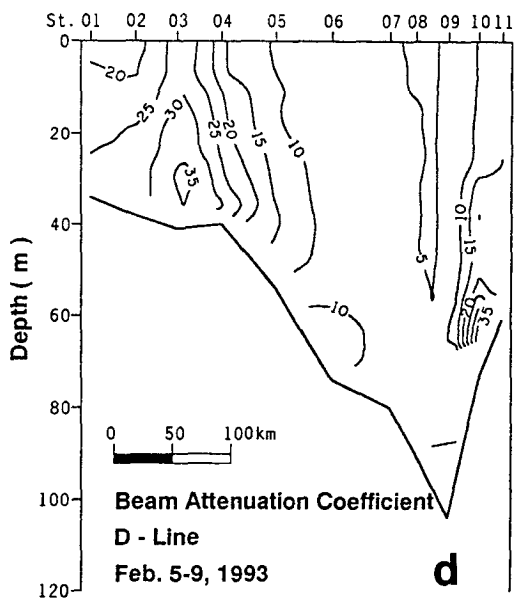
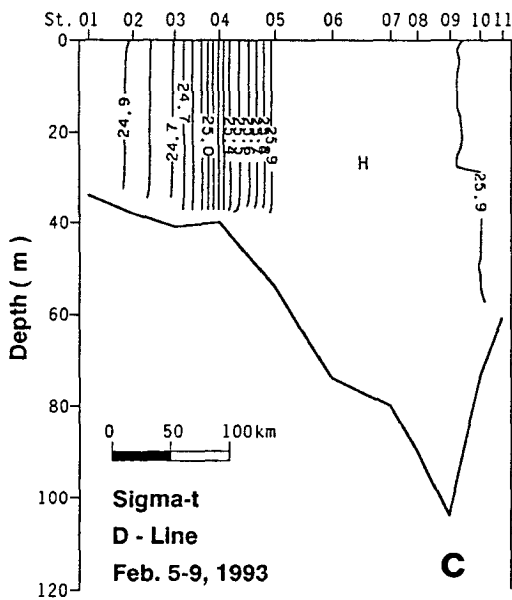
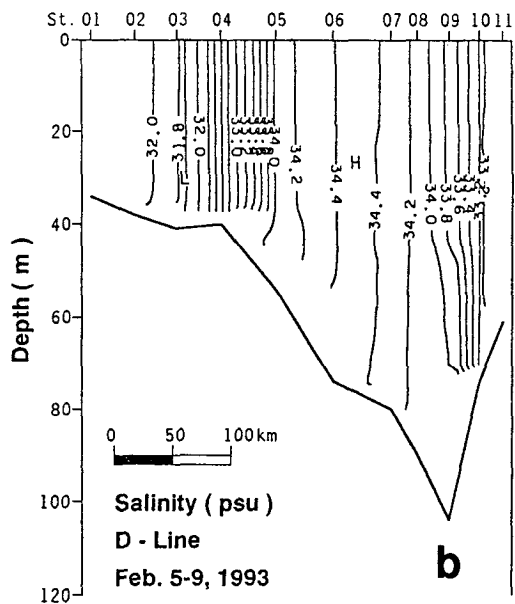
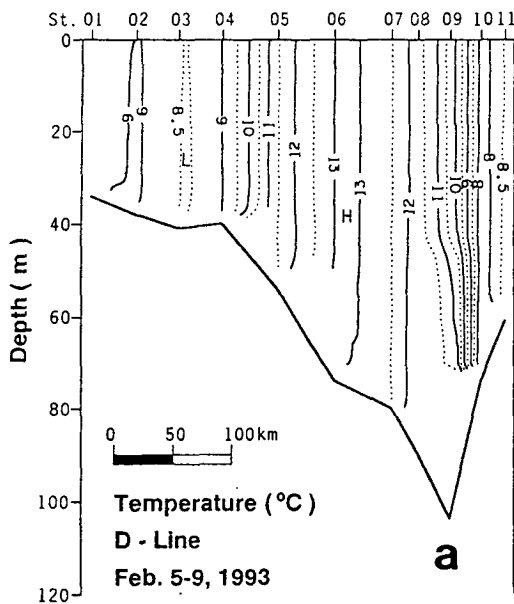


그림 6. 1993년 2월 단면 D의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수.

- 염분은 34.4 psu 이상의 고염수가 관측점 6 과 7 사이에서 보이고 31.9 psu 이하 및 33.3 psu 이하의 저염수가 관측점 3 및 10 부근에서 각각 위치하고 있다(그림 6b). 골의 왼쪽사면에 존재하는 고온,고염수는 황해순환과 관련하여 유의할 가치가 있는 바 만일 이 수괴가 대마난류수의 움직임과 관련이 있다면 위치에 대한 물리적 과정은 순환 이해에 큰 의미를 가질 것으로 사료된다.

- 밀도분포는 관측점 7 부근에서 고밀도 해수를 보이고 관측점 3 부근에서 최저값을 보인다 (그림 6c). 밀도가 수직적으로 균일한 형태를 보여주고 있음은 이를 유지시켜주는 해수의 흐름과 관계되는 물리적 현상이 강하게 존재하고 있음을 시사한다.

- 한국측 해안 가까이에 염분과 수온의 전선은 고온,고염수와 저온,저염수의 수괴의 접촉으로 형성되는 열염전선으로 밀도에 대한 효과는 서로 상쇄되는 수평변화가 적은 밀도장을 보인다. 중국측 해안 가까이에 염분과 밀도의 강한 전선이 형성되어 있는 반면 수온전선은 약하다. 이는 황해 남부의 해황이 한국연안과 중국연안이 근본적으로 다른 형태임을 암시하고 있다.

**단면 C** - 북위 34° 선 단면상의 해황특성은 다음과 같다 (그림 7).

- 수온, 염분 및 밀도의 분포는 중국쪽 해역이 수직적으로 보다 균질하며 한국연안 (관측점 7)은 층구조를 보이고 있다 (그림 7a, 7b, 7c).

-최고수온은 약 11 °C, 최고염분은 약 34.0 psu로 관측점 4와 5 사이에서 보이며 특히 최고염수는 40 m 이하의 저층에서만 나타난다 (그림 7a, 7b).

- 최저수온은 9°C 이하로 관측점 1과 2 사이의 중국연안과 관측점 7 부근

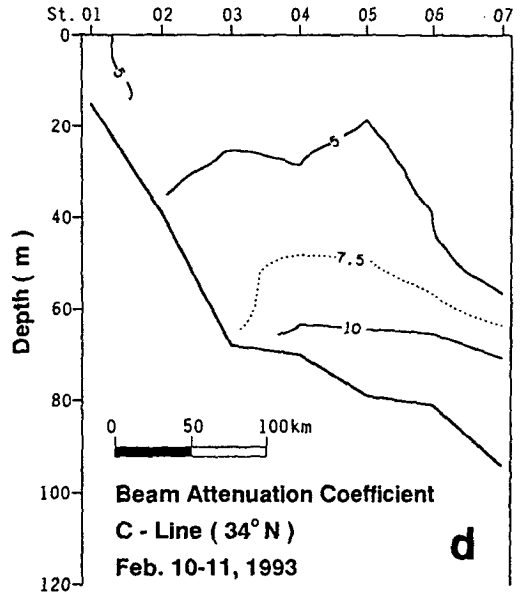
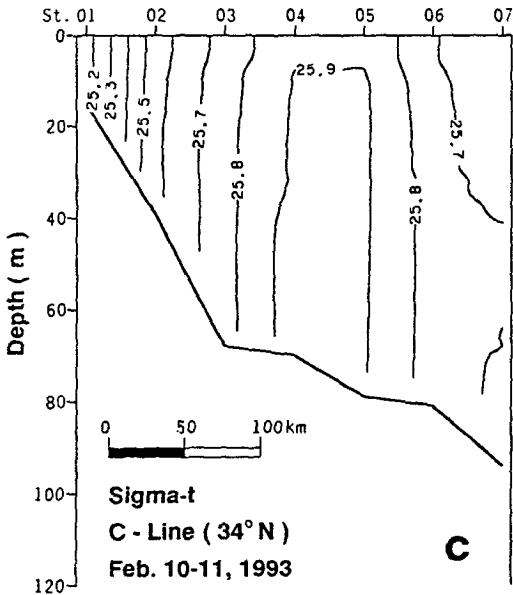
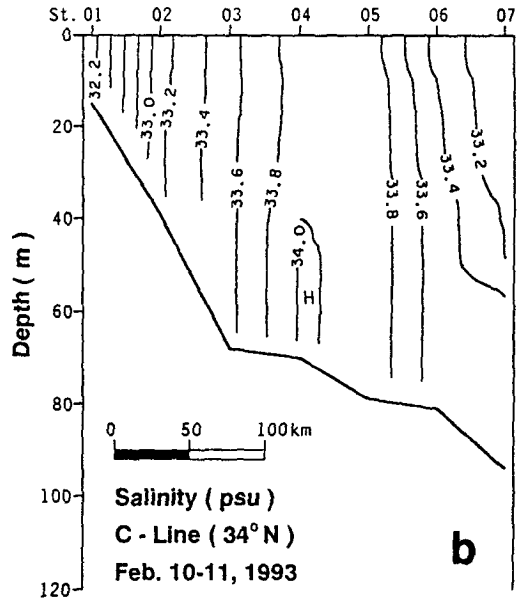
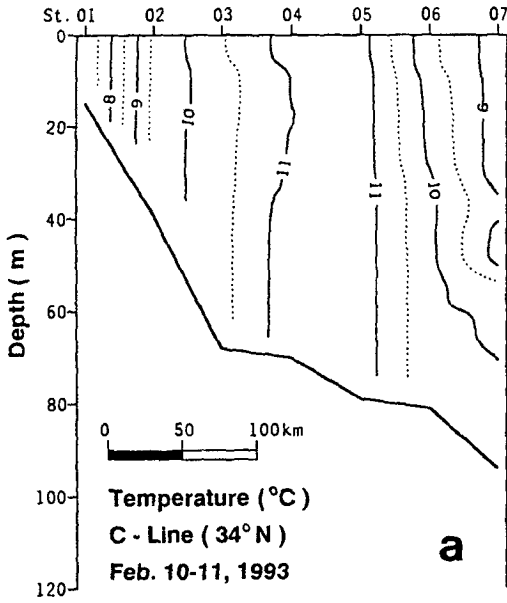


그림 7. 1993년 2월 단면 C의 해황분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수.



의 한국연안에 보이고 최저염분도 동일한 해역에서 33.2psu 이하의 값을 보이고 있다 (그림 7a, 7b).

- 단면 D 에서와 같은 강한 전선은 보이지 않으나 관측점 1 과 2 사이에서 수온, 염분 및 밀도전선이 형성되어 있고 관측점 5와 6 사이의 수평변화 기울기가 다소 높은 경향을 보이고 있다 (그림 7a, 7b, 7c). 이는 한국연안쪽에서 전선이 동서방향으로 형성되어있을 가능성을 나타낸다.

수평분포 - 그림 8에 보인 수온, 염분 및 밀도의 수평분포도상에 나타난 특성은 다음과 같다.

- 한국쪽 해역에 동서방향으로 발달된 수온전선이 형성되어있다 (그림 8a). 이러한 분포는 이미 관측 보고된 적이 있기 때문에 겨울철의 일반적인 해황을 벗어나지 않고 있음을 의미한다. 중국쪽 해역에는 약하지만 중국연안과 평행한 수온전선이 보이고 있다.

- 12 °C 이상의 고온수는 제주도 서부역을 감싸고 도는 분포를 보이고 있다 (그림 8a).

- 염분전선의 형성 해역은 수온전선과 거의 일치하고 있으나 그 강도는 대조적이다 (그림 8b). 즉, 중국연안에서 염분구배가 강하고 한국쪽의 동서방향 전선은 그 기울기가 약하다. 이는 두해역에서 전선을 형성하는 원인이 다름을 시사해주고 있다.

- 양자강수의 영향을 받은것으로 믿어지는 32.0 psu 이하의 저염수가 관측해역의 남서쪽에 보이고 34.0 psu 이상의 고염수가 제주도 북서쪽 해역에 보이고 있다.

- 수온, 염분 및 밀도의 전체적인 분포양상은 서로 비슷하나 중국연안역에

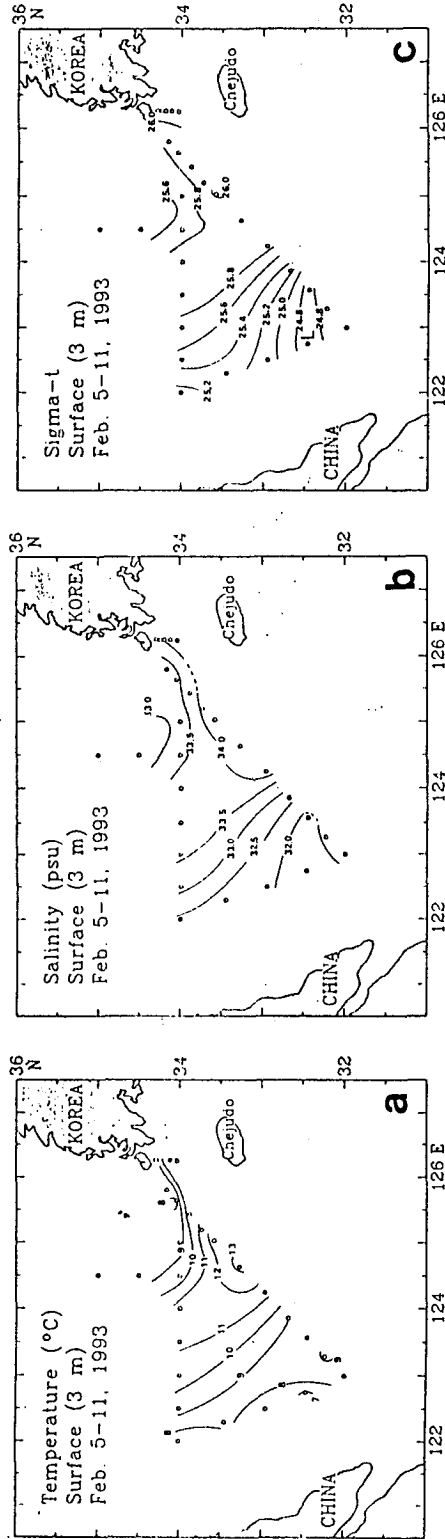


그림 8. 1993년 2월 표층의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도.

서는 밀도 분포가 염분에 가까운데 이는 밀도에 대하여 염분의 효과가 수온보다 월등함을 뜻하고 있다 (그림 8c).

- 한국쪽 해역에서 수온과 염분의 남북방향 구배가 큰데 비하여 밀도구배는 매우 작아 중국연안역에서와 큰 대조를 보이고 있다.

#### 나. 유속

그림 9은 선박의 이동경로를 따라 관측된 수평유속의 전층 평균값의 수평분포로 반복성 운동인 조류가 탁월함을 잘 보이나 일정한 방향으로 흐르는 해류의 존재는 나타나고 있지 않다. 선박의 항속과 강한 조류의 시공간적 변화가 있기 때문에 전체 자료를 바로 해석하기에는 무리가 있지만 각 정점에서 수직변화를 검토하는데는 적당하다.

단면 C 및 D - 그림 10는 층별로 관측된 수평유속을 보여주고 있다. 수직분포의 특징은 전층의 유속방향의 변화가 작고 유속의 크기는 상층에서 저층에 이를수록 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 분포는 수직적으로 균질한 수온 및 염분분포와 함께 유속장도 단층구조를 나타내어 해수유동 수치모델링의 경우 2차원 모델이용에 무리가 없음을 시사해주고 있다.

#### 다. 혼탁도

단면 D - 소광계수는 해저부근 저층에서 그리고 수심이 얇은 천해역에서 높다. 한편 중국연안에서의 계수가 한국연안보다 훨씬 높게 나타나 저염저온수가 위치한 관측점 3 부근에서 가장 큰 값을 보인다 (그림 6d). 이

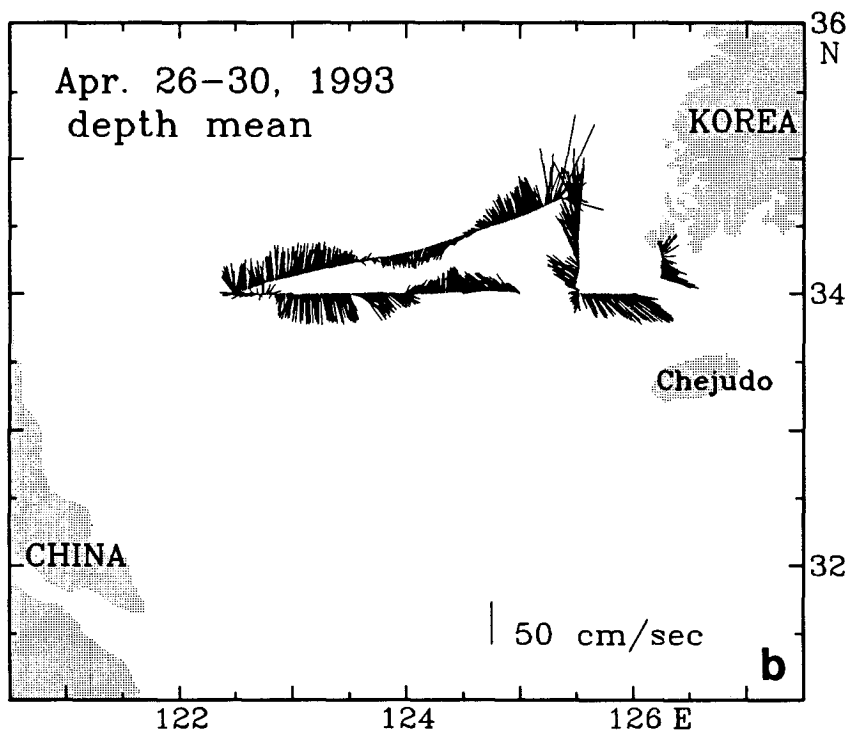
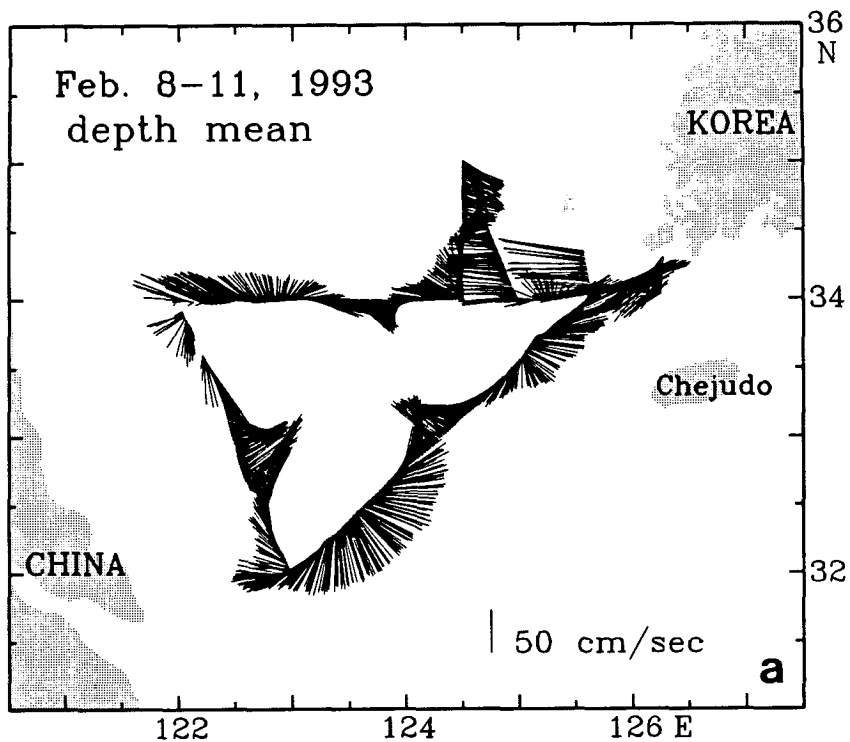


그림 9. ADCP에 의한 유속의 수직평균: (a) 1993년 2월; (b) 1993년 4월.

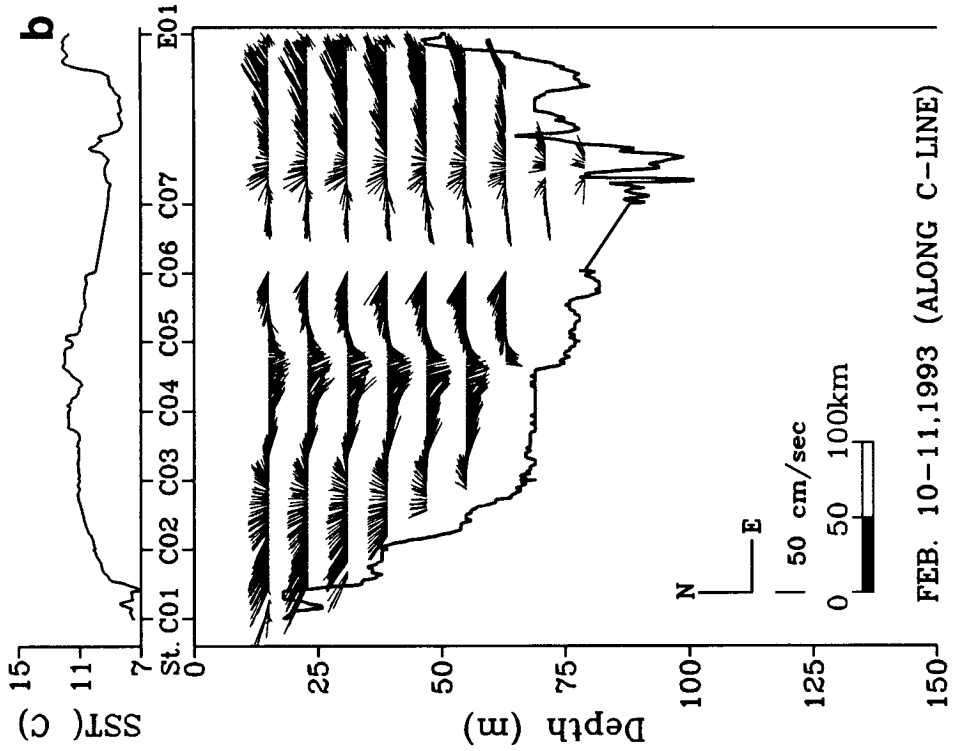
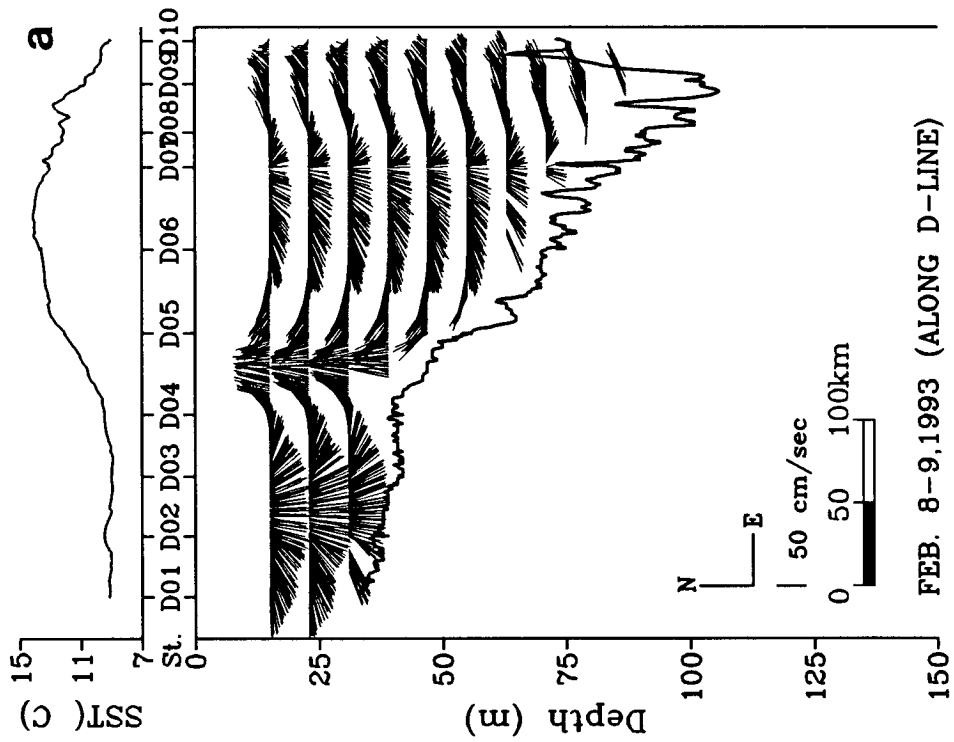


그림 10. 1993년 2월 ADCP로 관측된 층별 유속: (a) 단면 D; (b) 단면 C.

러한 양상은 강한 겨울철 북서풍에 의한 한국 및 중국 연안을 따라 남하하는 저온, 저염 그리고 고탁도수의 연안류가 존재함을 나타낸 것으로 볼 수도 있으나 양자강 하구쪽의 해황이 복잡하기 때문에 주의깊은 해석이 요망된다.

단면 C - 해저면 부근에서 가장 높은 소광계수를 나타내고 있지만 단면 D 보다는 훨씬 낮은값을 보여주고 있다 (그림 7d). 또한 단면 D에서 보여준 중국연안쪽의 연안류 증거를 보여주지 않고 있다.

## 2. 1993년 4월

### 가. 수온 및 염분

- 단면 C - 2월과는 다른 분포를 보이며 특성들은 다음과 같다 (그림 11).
- 2월과는 달리 중국연안에서 보다 뚜렷한 층구조 형태의 분포를 보이고 있으며 관측점 2 에서는 수심 20 m 에서 층이 구별이되고 황해 중심부에 이를수록 완만하게 깊어져 관측점 5 에서는 약 30 m의 수심에서 층이 구분되고 있다 (그림 11a, 11b, 11c).
  - 한국연안쪽 (관측점 7의 동쪽)에 12 °C 이상의 고온수가 보이고 10 °C 이하의 저온수가 중국연안의 저층에 보인다 (그림 11a). 전체적인 수평방향 변화는 저층에서 2 °C 정도로 상층의 1 °C 보다 훨씬 크다.
  - 전반적인 염분분포는 한국연안에서 34.4 psu 이상의 고염수가 보이고 중국쪽에 이를수록 33.8 psu 이하의 저염수가 나타나는데 최고염분값은 저층 (관측점 7-9), 최소염분값은 상층 (관측점 4)에서 보인다. (그림 11b).
  - 밀도분포는 중국연안쪽과 관측점 7 사이에서 뚜렷한 2층 구조를 보이고

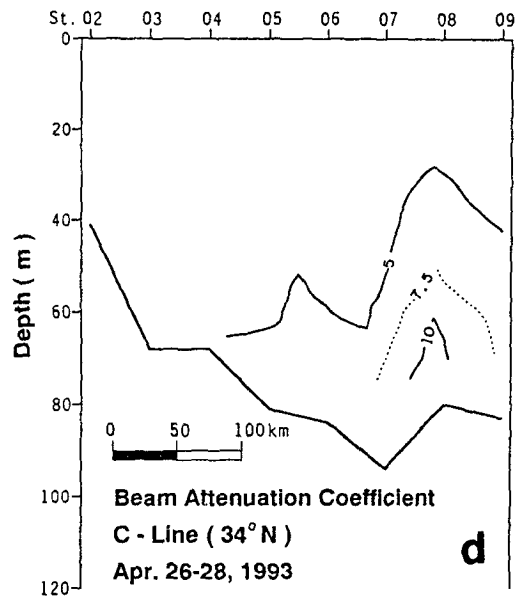
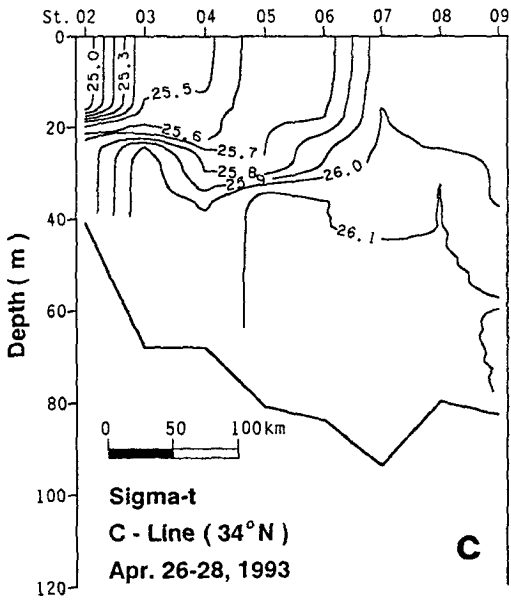
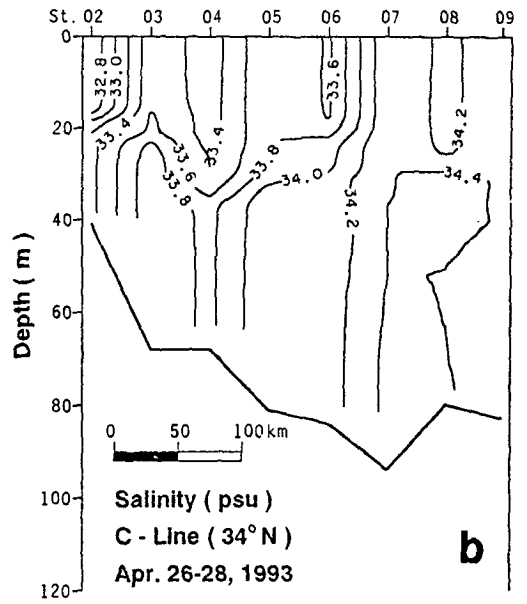
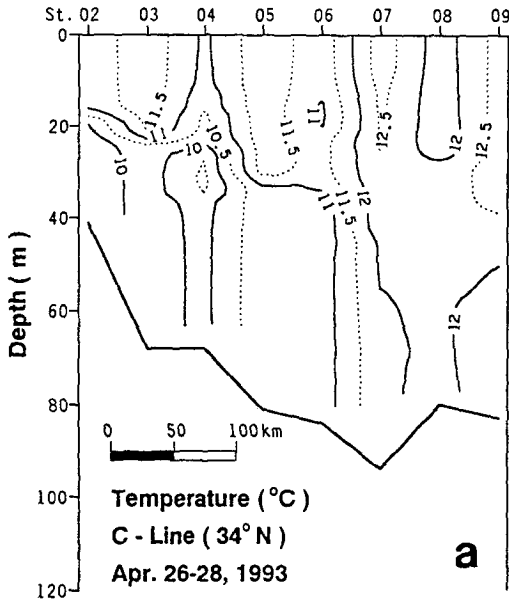


그림 11. 1993년 4월 단면 C의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도; (d) 소광계수.

중국연안 (관측점2-3)에서 염분분포에 기인된 밀도전선을 보여주고 있다 (그림 11c).

#### 나. 유속

단면 C - 그림 12에 나타난 바와 같이 2월 자료와는 다르게 한정점에서 상층과 저층의 유속방향이 약간 다르고 저층의 유속이 상층보다 약간 큰 값을 보이고 있다. 특히 관측점 2와 3 사이 2층구조가 뚜렷한 중국연안역에서 상하층 경계면을 중심으로 유속방향이 반대로 나타났다. 이는 유속장이 2층구조를 가지고 있음을 나타내고 수치모델링에서 3차원 모델의 적용이 필요함을 말해주고 있다.

#### 다. 혼탁도

단면 C - 관측점 8 을 중심으로 저층에서 높은값을 나타내고 있지만 그 위치가 2월 보다는 동쪽으로 편향된 모습을 보여준다 (그림 11d).

### 3. 1994년 7월

#### 가. 수온 및 염분

단면 A - 그림 13에 나타난 해황의 특성은 다음과 같다.

- 20 m 이내의 표층에서는 한국연안에서 황해내부로 갈수록 수온과 염분이 증가한다.
- 염분은 뚜렷한 약층이 보이지 않지만 수온은 20-40 m에서 약 0.5 °C/m의 기울기를 가지는 강한 계절수온약층을 형성하고 있다. 밀도는 수온과 비슷한 형태의 약층을 보여준다.



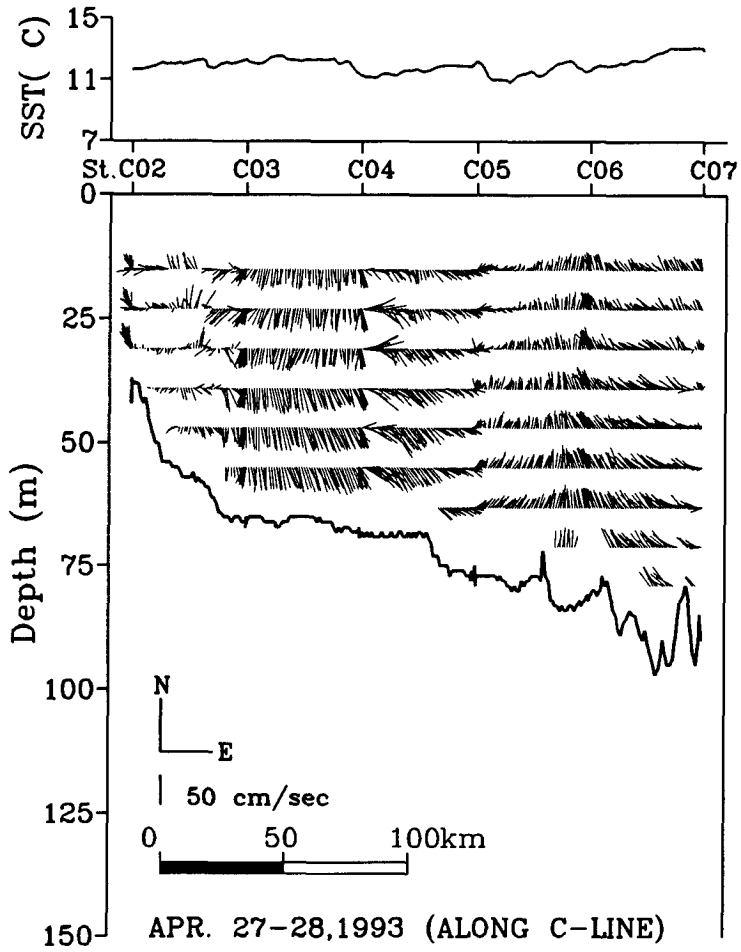


그림 12. 1993년 4월 ADCP로 관측된 단면 D의 층별 유속.

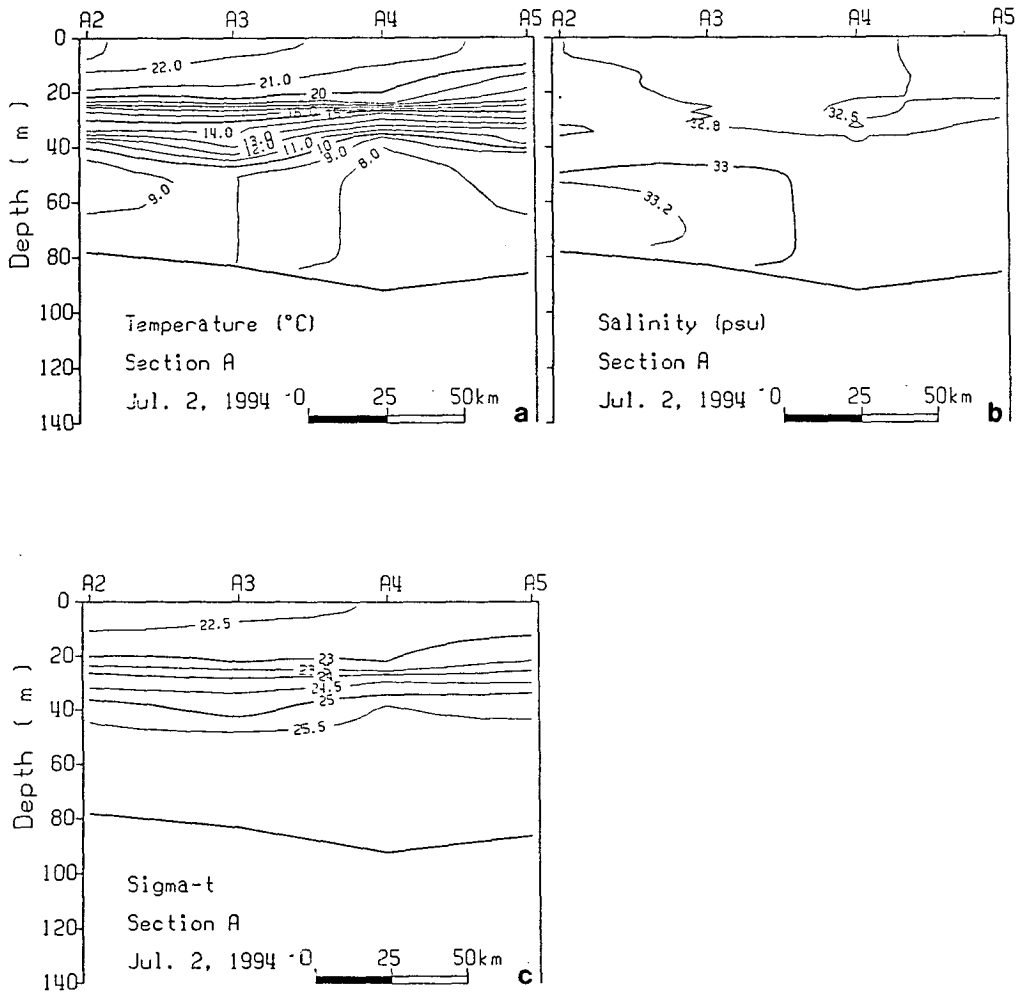


그림 13. 1994년 7월 단면 A의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도.

- 40 m 이하에서는 수온의 경우 관측점 A4를 중심으로 8 °C 이하와 관측점 A2의 9 °C 이하의 두개의 핵을 보인다 (그림 13a).
- 염분은 33 psu 이상의 고염수가 관측점 A2, A3에 나타난다 (그림 13b).
- 밀도는 수온과 염분의 효과가 상쇄되어 25.5 이상의  $\sigma_t$  값을 균질하게 보이고 있다 (그림 13c).

**단면 C** - 진도 서쪽에서 중국연안에 이르는 단면상의 해황 특성은 다음과 같다 (그림 14).

- 관측점 C6과 C7을 제외하고 수온, 염분 및 밀도의 구조가 뚜렷한 표층, 중층 및 저층의 구조를 보여준다.
- 10 m 이내의 표층에서 수온은 관측점 C2, C3를 중심으로 23.5 °C 이상의 최고수온이 보이고 한국 및 중국 연안으로 갈수록 거의 일정한 변화율을 가지고 감소하며(그림 14a) 염분은 관측점 C3에서 29 psu 이하의 저염수를 중심으로 연안쪽으로 증가한다 (그림 14).
- 수온과 밀도의 약층은 중국연안에서 10-20 m에 강하게 형성되어 있고 관측점 C5에 이를수록 10-40 m로 두꺼워져 나타난다 (그림 14a, 14c).
- 9 °C 이하 저층냉수는 관측점 C4와 C6 사이에서 발견된다 (그림 14a).
- 관측점 C6과 C7에서는 약한 수온약층을 경계로 상하층이 각각 수직적으로 균질한 수온분포를 보인다 (그림 14a).
- 저층에는 33.0 psu 이상의 고염수가 골고루 나타나고 관측점 C2와 C3 사이 및 C7에서 최고염분값을 보여준다 (그림 14b).

**단면 E** - 제주도 남서쪽에서 양자강 하구쪽 까지 이르는 단면상의 해황

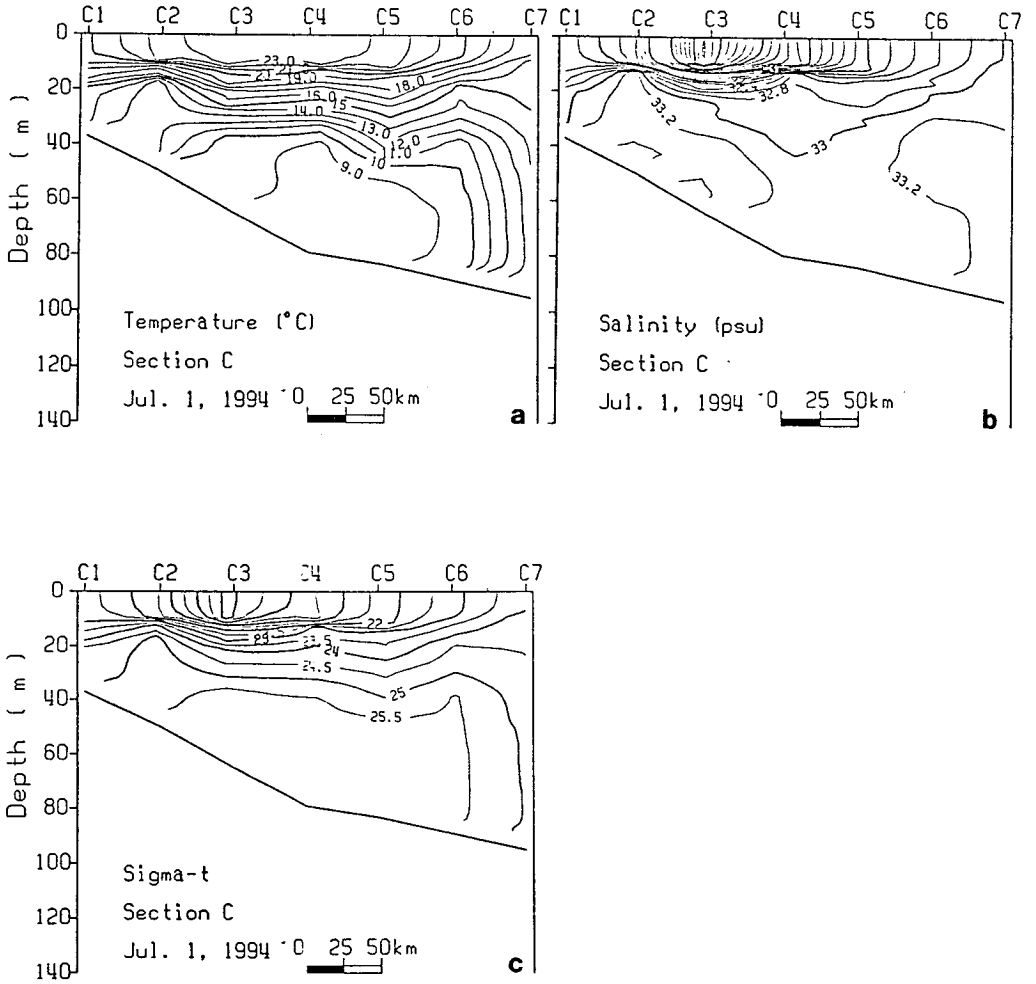


그림 14. 1994년 7월 단면 C의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도.

특징은 다음과 같다 (그림 15).

- 수온, 염분 및 밀도는 대체로 표층, 약층 및 저층의 형태를 유지하고 있으며 양상은 관측점 E3를 경계로 동서로 달리 나타난다.
- 12 °C 이하의 저온수가 관측점 E6를 중심으로 해서 나타난다(그림 15a).
- 표층에 중국 양자강 쪽으로 31 psu 이하의 저염수가 있고 골(관측점 E6 및 E7)의 저층에 33 psu 이상의 고염수가 분포한다 (그림 15b).

단면 D - 제주도 서쪽의 남북으로 가로지르는 단면상의 해황 특징은 다음과 같다 (그림 16).

- 제주도에 인접한 관측점 D4 및 D5를 중심으로 수온과 염분은 남쪽과 북쪽이 다른 구조를 보이는 반면 밀도는 대칭의 분포양상을 나타낸다.
- 관측점 D4의 남쪽 표층에 21 °C 이상의 최고수온층이 보이고 수온약층은 관측점 D4와 D5를 제외하고 10-40 m에 형성되어 있다 (그림 16a).
- 최소수온층의 핵은 관측점 D3의 저층에 있고 관측점 D3과 D4 사이에 강한 수온전선이 형성되어 있다 (그림 16a).
- 염분은 표층에서 저층으로 갈수록 증가하고 34 psu 이상의 최고염분층은 관측점 D4 이남에 분포해 있다 (그림 16b).
- 관측점 D3, D6 및 D7 에서는 수온과 염분의 역전층이 보인다 (그림 17). 이는 관입의 결과로 판단되며 고염수가 제주도를 끼고돌면서 다른 해수와 접촉하여 생긴 현상으로 생각된다.

수평분포 - 그림 18은 5, 20, 50 m 및 해저면 부근에서의 수온과 염분의 수평분포를 보여주고 있다. 분포의 특징은 다음과 같다.

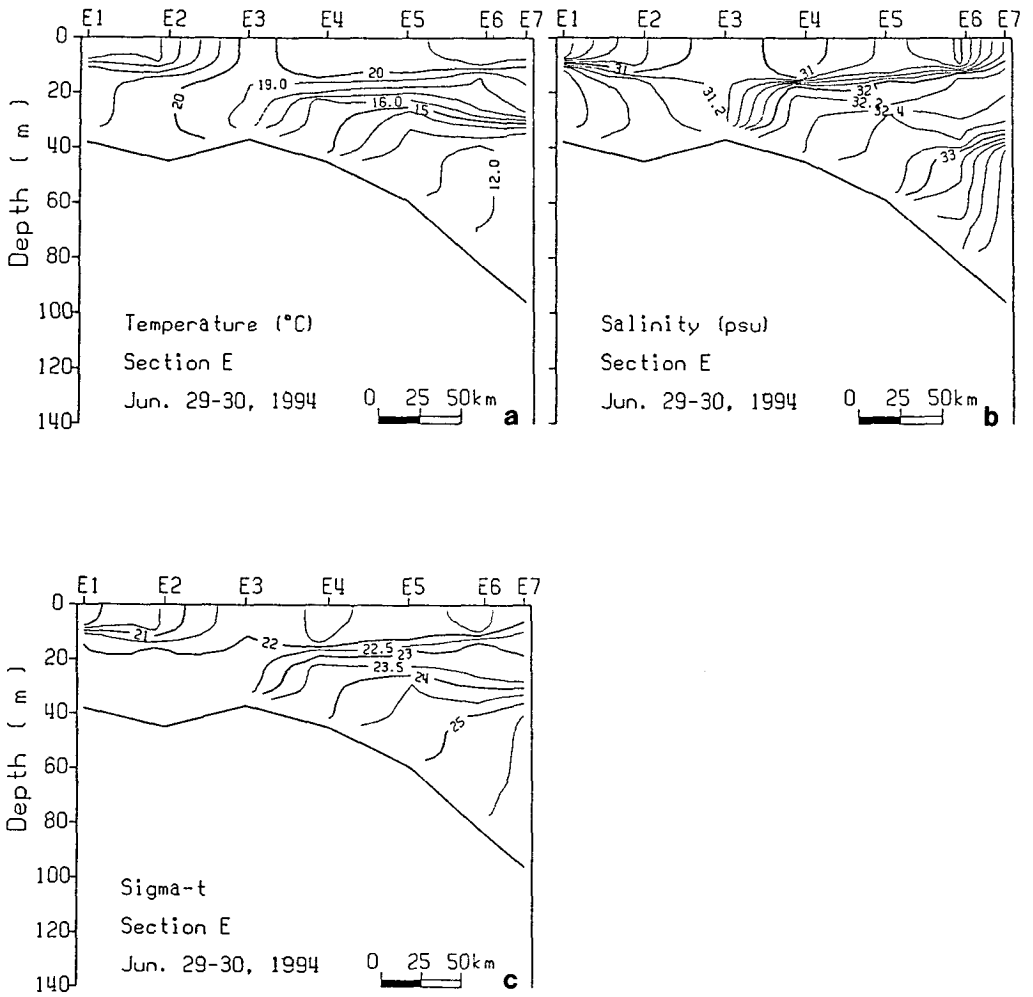


그림 15. 1994년 7월 단면 E의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도.

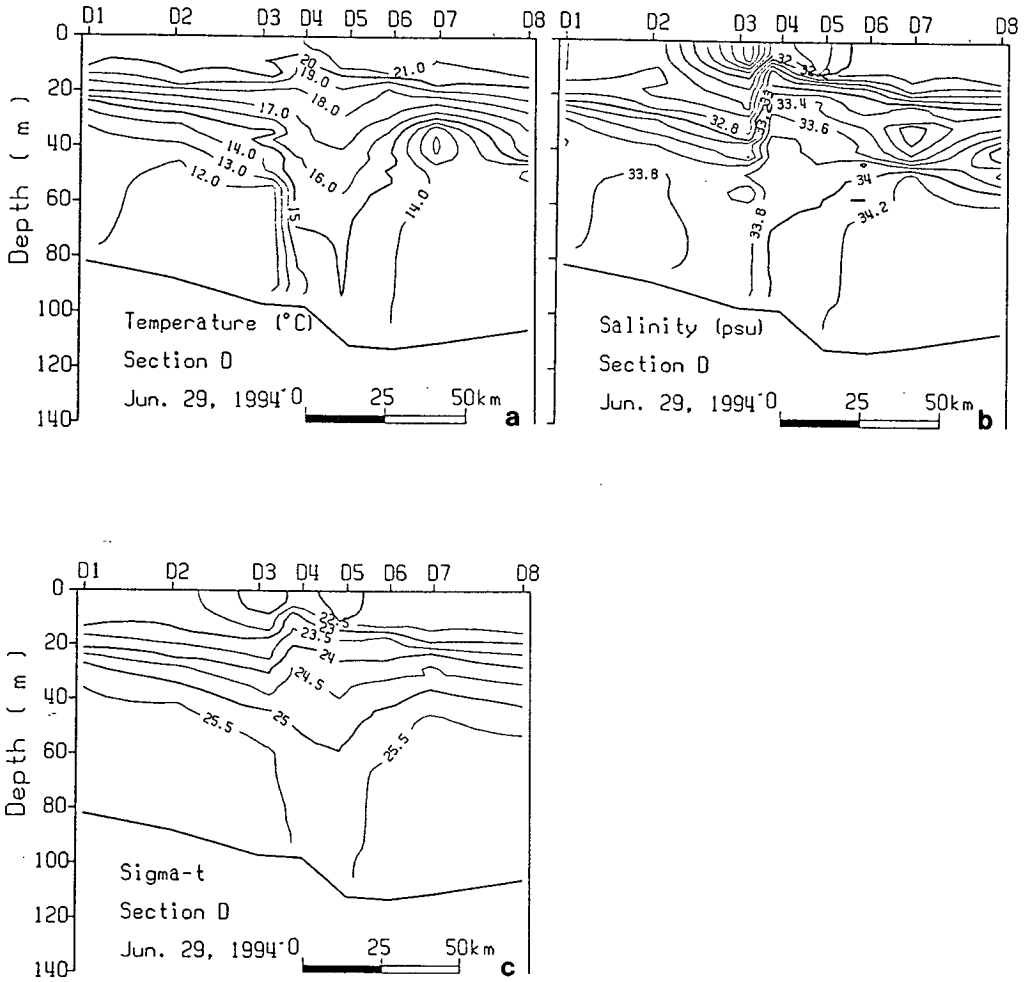


그림 16. 1994년 7월 단면 D의 해양분포도: (a) 수온; (b) 염분; (c) 밀도.

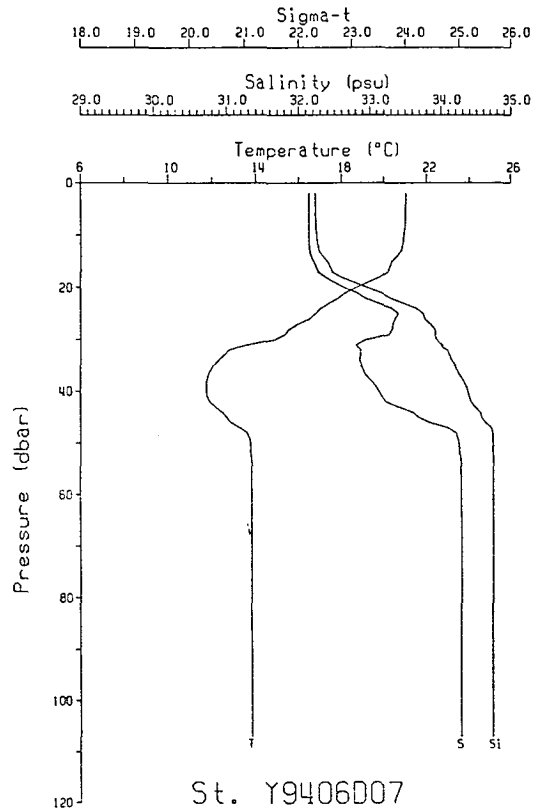
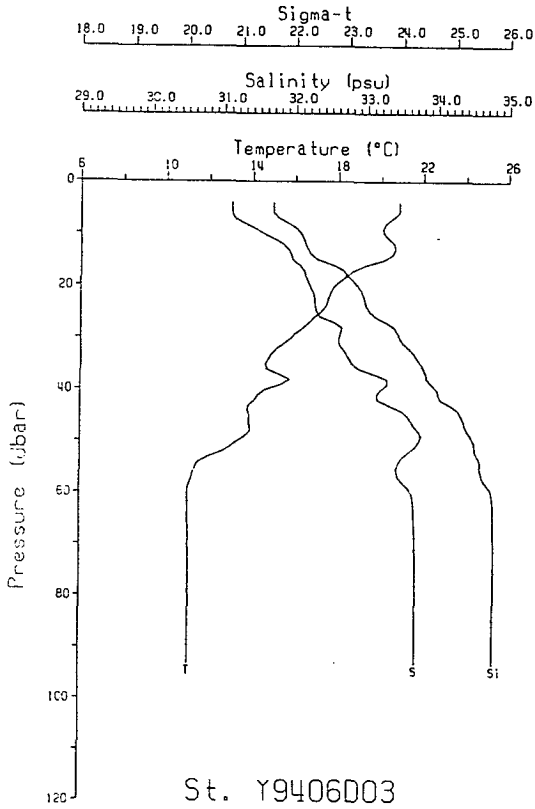


그림 17. 1994년 7월에 제주도 주변에서 관측된 수온 및 염분의 역전층.



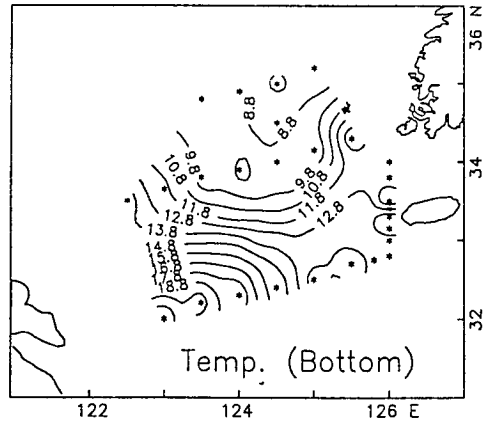
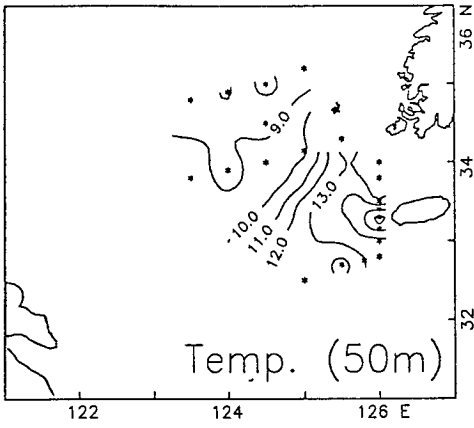
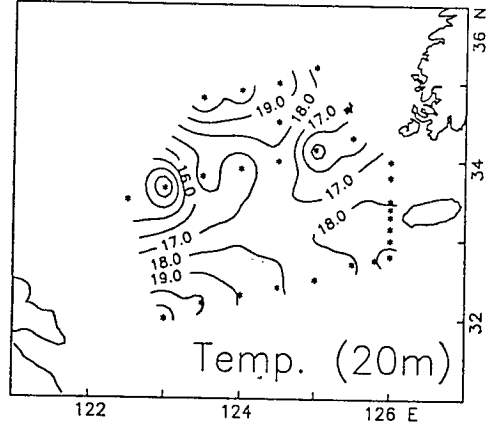
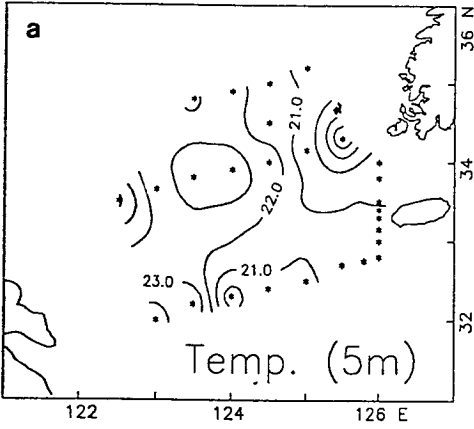


그림 18. 1994년 7월의 수평 해황분포도: (a) 수온;

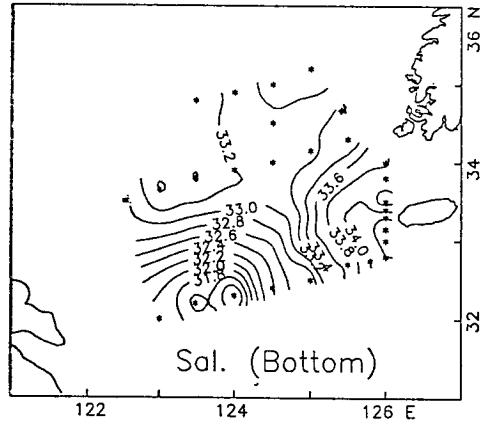
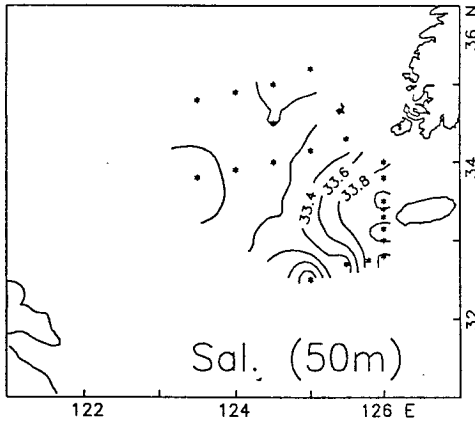
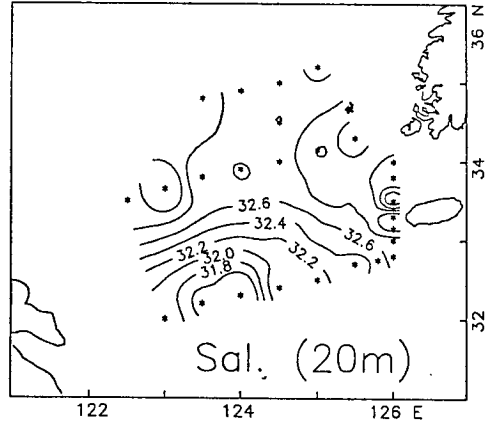
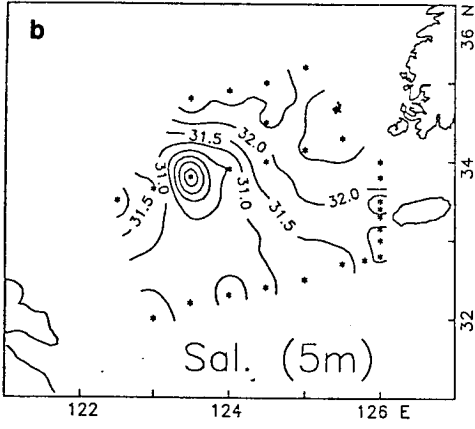


그림 18. (b) 염분;

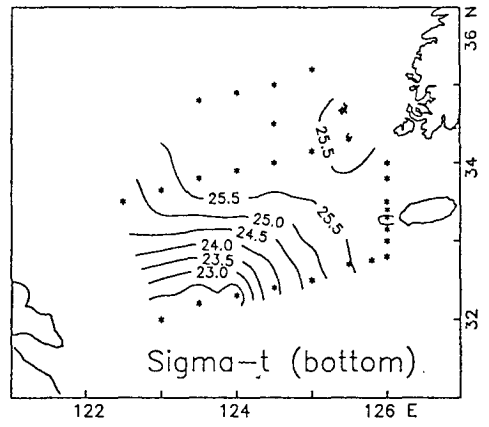
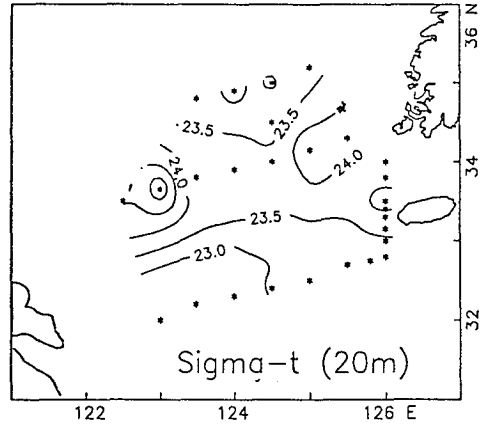
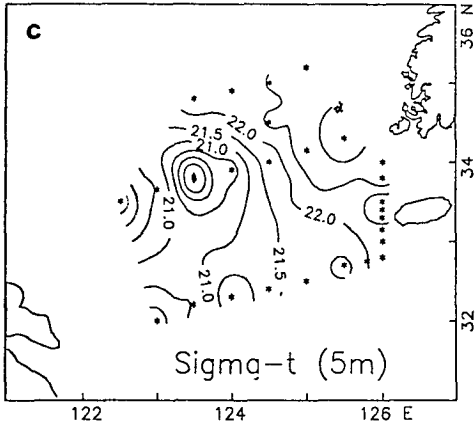


그림 18. (c) 밀도.

- 5, 20 m의 염분분포는 양자강쪽을 중심으로 한 저염 구조가 뚜렷하지만 강우때문으로 생각되는 국지적 저염구조가 많이 나타난다.
- 황해저층냉수는 50 m 이하에서 잘 보여주고 있으며 흑산도에서 양자강 입구쪽을 향하여 형성된 수온전선은 조사기간 중의 황해저층냉수의 남하 한계로 판단된다.
- 양자강회석수는 염분 및 수온의 분포형태에서 잘 나타나고 있으며 표층(5 m 층)에서는 제주도에서 산둥반도 쪽으로 이어지는 등염분선의 분포가 세력의 확장경향을 보여주고 수심이 깊어질수록 그 범위가 양자강 쪽으로 축소됨을 알 수 있다.
- 동중국해에서 오는 고염수는 50 m 또는 해저면의 염분분포에서 뚜렷이 볼 수 있다. 33.2 또는 33.4 psu의 등 염분선은 황해쪽으로 압박을 가하는 모양을 보여주고 있으나 황해로 해수가 유입하지는 않음을 시사하고 주축인 최고염분의 해수는 제주도를 끼고돌아 동쪽으로 빠짐을 나타내고 있다.

## 나. 유속

단면 A - 그림 19는 관측선 A를 따라 측정된 유속과 각 위치의 수직평균치를 뺀 차이를 보여준다. 25 m 깊이를 경계로 상층의 유속이 하층보다 약하고 방향의 변화가 있음을 보여준다. 밀도의 약층이 형성된 20-40 m를 중심으로 유속의 양상이 뚜렷하게 구분되는 점은 1993년 4월 자료와 공통점이 있다. 이는 성층이 발달하는 여름철에는 3차원 수치모델이 적절하다는 앞서의 지적을 뒷받침 해주는 것이다.

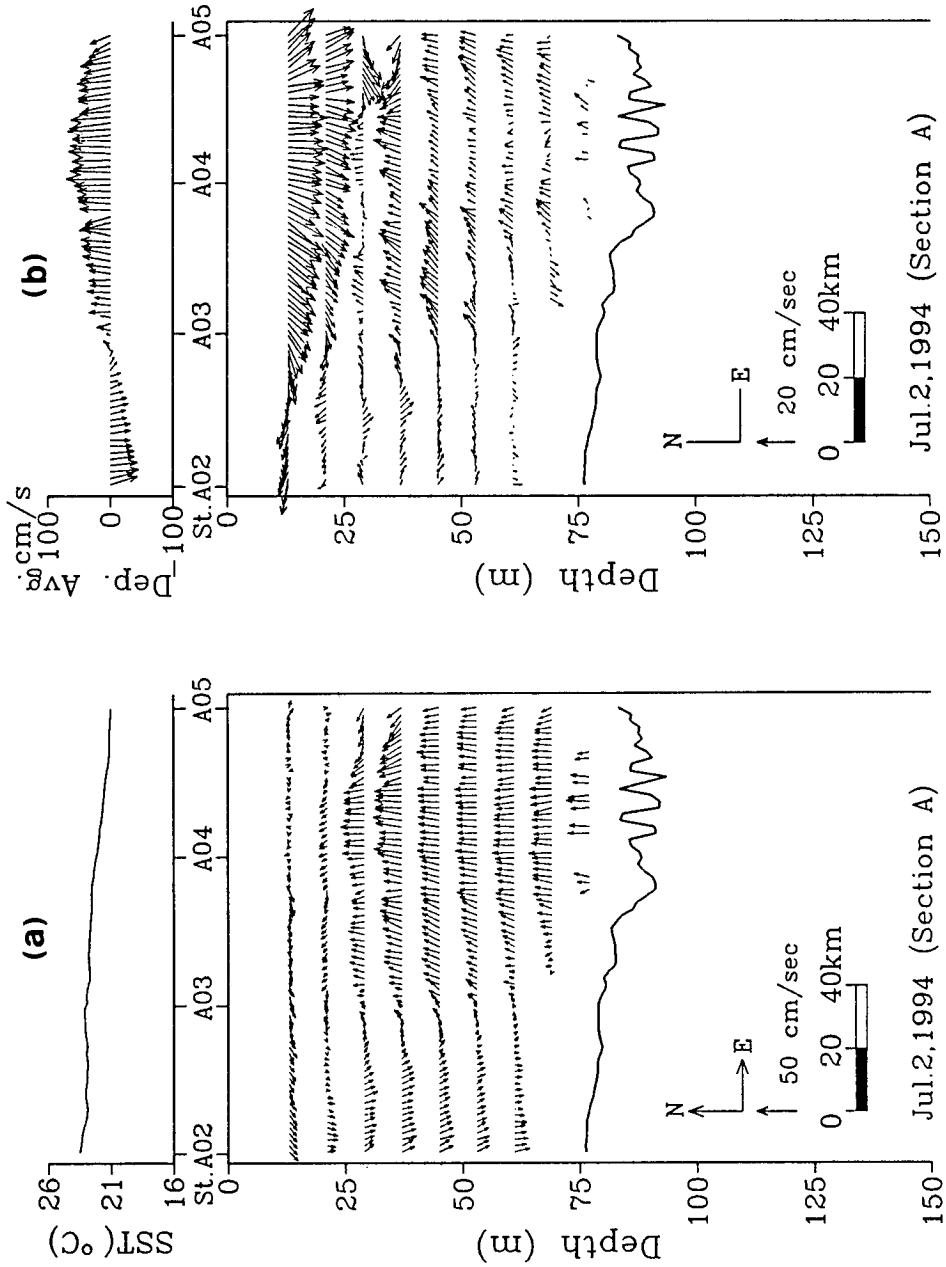


그림 19. 1994년 7월 ADCP로 관측된 단면 A의 층별 유속: (a) 관측치, (b) 각 지점의 수직평균값으로 부터의 차이.

## 제3절 고찰

이상 살펴본 관측결과로부터 본 연구의 목적에 관련시켜 제기되는 몇 가지 사항에 대해 검토하기로 한다.

### 1. 겨울철의 황해난류의 존재 유무

제2장에서 설명한 바와 같이 겨울철에 황해난류의 존재여부는 아직 확실하게 풀리지 않은 물음이다. 이는 황해와 동중국해 사이의 해수와 물질이동을 지배하는 가장 중요한 요인이다. 뿐만 아니라 만일 해양오염사고가 일어날 경우 해수의 이동방향이 오염물질의 분포의 1차적인 인자이기 때문에 확산모델링에 앞서 필히 밝혀야할 부분이다. 2월의 관측자료로는 명확한 결론을 얻기가 힘들지만 한국연안에 형성된 동서방향의 강한 수온과 염분 전선역을 가로지르는 물의 흐름은 존재할 수가 없다는 점을 유추할 수 있다. 동중국해에서 기원한 수괴가 만일 12 °C 이상과 34.0 psu 이상의 고온·고염수라면 관측된 자료는 (그림 6) 난류수는 황해로 유입되지 않고 제주도를 감싸고 돌아서 동쪽으로 빠져나가고 있음을 보여준다. 그렇지만 동서방향으로 발달된 전선이 중국연안쪽에서 존재하지 않고 11.0 °C 등온선과 33.5 psu 등염분선은 중앙골 왼쪽사면을 따라 좁은 띠 형태로 산동반도쪽으로 확장되어 있는 원인에 대한 조사와 연구는 부족하여 앞으로 이에 대한 검토가 필요하다.

### 2. 2차원 수치모델링의 적합성

앞 절에서 설명한대로 2월 ADCP 자료는 한 정점에서 수평유속의 수직방향의 변화가 거의 없음을 보여주고 있기 때문에 수치모델링에 있어서 2

차원 모델 이용이 적합함을 시사해주고 있다. 4월과 7월 자료는 유속 분포가 방향이 일치하지 않고 저층에서 유속이 강한 2층 구조를 보여주고 있다. 유속의 크기가 변하는 수심이 수온(밀도)약층의 깊이와 일치하고 변화의 크기는 밀도약층의 강약정도와 경향이 유사하여 밀도장과 유속장의 2층구조가 높은 상관관계가 있음을 나타내고 있다. 이는 수치모델링에서 적어도 2층의 3차원 모델이 보다 적합함을 의미한다.

### 3. 한국쪽과 중국쪽의 전선 특성

2월에 관측된 전선들 (그림 6)은 서로 다른 두 해류 또는 수괴의 경계에서 형성되는 것으로 중국연안의 전선은 저온저염의 중국연안류와 동중국해의 고염의 난류수괴의 경계를 나타낸 것이라 믿어지고 한국연안의 전선은 한국연안수와 동중국해수 흐름의 경계라 사료된다. 한국연안의 전선의 경우 부근 해역에서 흔히 관측되는 조석혼합의 전선형성에 대한 기여는 보다 연안역에서의 자료의 획득과 검토후에 그 해석이 가능하리라 생각된다.

### 4. 7월 황해남부해역의 현황

표층의 양자강회석수, 저층의 황해저층냉수 및 제주도 주위의 고염수로 크게 구분되며 연안수의 특성을 본 자료 만으로는 언급하기가 어렵다.

황해저층냉수는 4월경에 황해내부 골의 중국쪽 사면에서 부터 시작되는 성층현상으로 나타나기 시작하여 시간이 지나면 중국쪽 사면을 따라 남쪽으로 확장하여 7월 초에는 제주해협 위도대 범위까지 이르는 것으로 판단된다. 8월과 9월이 되면 그 세력이 더욱 남쪽까지 이를 것으로 보인다. 여기서 해결해야될 문제는 황해저층냉수의 기원과 남하하는 원인이다. 기

원의 문제는 발해만을 포함한 황해북부의 관측자료가 없이는 불가능하리라 본다. 남하하는 이유는 황해의 전반적인 순환의 일부로 이해해야 되는데 성층화된 황해의 조석잔차류, 담수의 표층유입으로 증가된 압력의 영향인 유출, 또는 우리가 모르는 독특한 순환계 등 여러 요인이 가능한 바 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다.

동중국해에서 올라오는 고염수의 주축은 제주도를 끼고돌아 동쪽으로 빠져나가며 황해로 유입하는 직접적인 증거는 없다. 그러나 일부는 황해저층냉수의 외각에서 한국연안을 저층을 따라 북쪽으로 영향을 미칠 가능성을 보여준다. 이 (1993)의 보고에서도 이러한 가능성을 뒷받침하고 있다.

년중 계속하여 영향을 미치는 양자강회석수는 제2장에서 설명한 바와 같이 그 주축이 중국연안을 따라 남하하고 제주도 쪽으로도 영향을 주지만 표층에 국한된다. 일부가 한국쪽 조석혼합역 외곽을 따라 북상하는지는 본 자료로는 언급하기 어렵다.

## 5. 소광계수의 해석

관측된 소광계수 분포의 특성은 전체적으로 해저부근에서 값이 크다는 점이다. 이는 황해처럼 수심이 얇은 해역에서는 조석의 영향을 전 수심에 걸쳐 받기 때문에 조석혼합에 의한 부유물질의 양은 퇴적물이 많은 해저부근에서 높을 것이라는 사실과 일치하고 있다. 2월 단면 D (그림 6d)의 경우 관측점 3 부근에서는 저층에서 30 이상의 소광계수값을 보여 혼탁도가 매우 높음을 나타내는데 이는 수온 및 염분 전선의 위치 (관측점 3-5)에 비추어 남향하는 중국연안류 때문일 것으로 생각되며 해류의 축이 관측점 3을 통과한 것으로 판단된다. 관측점 10 (그림 6d)의 저층에서도 20 이상의 소광계수값을 보이는데 이는 관측점 10 부근에서 어떤 형태로든



활발한 해수유동이 존재함을 나타내고 있다. 단면 C (그림 7d과 그림 11d)에서는 소광계수가 특별하게 높은곳이 없어 중국연안류는 관측점 1 보다 중국연안쪽에 위치하고 있음을 시사해주고 있다.

## 제4장 해양확산모델링의 기본 입력자료

앞장에서는 확산모델링 내에서 오염물질의 분포를 결정하는 중요한 과정인 유속장의 이해에 필요한 황해중앙부의 순환을 고찰하였고 황해의 남쪽 경계면인 남부해역에서의 현장관측 결과를 설명하였다. 본장에서는 또다른 주요과정인 난류적 확산과 관련하여 이의 계수를 추정하는 문제와 실제 국지적 수치모델링에서 기본적으로 필요한 자료의 데이터베이스화에 대하여 기술하였다.

### 제1절 해양 난류확산계수의 추정

해양에서 오염물질의 확산을 모델링하기 위해서는 와동확산 (eddy diffusion)에 대한 정량적인 이해가 필요하다. 브라운 (Brown) 운동에 따른 분자적 확산의 경우 확산계수는 상수로 취급된다. 확산계수를 상수값으로 사용하는 확산모델링에서 오염물의 분산면적은 시간에 1차적으로 비례한다. 이러한 시간선형적 분산관계는 오일러 (Euler) 좌표의 확산방정식을 유한차법 또는 유한요소법으로 모델링 할 경우 뿐만 아니라 라그랑쥐 (Lagrange) 입장에서의 확산을 재현할 경우에도 마찬가지로 나타난다.

실제 해양에서의 난류적 확산 정도는 난류장의 시간 및 공간 규모에 따라 달라지며, 시간에 대해 1차보다 높은 지수 관계를 가진다. 미국 동해안 외해역에서 1961-1967년 사이에 수행한 염료확산 실험을 Okubo (1971)가 종합한 결과에 의하면, 1시간부터 1개월 간 시간크기의 확산에 있어서 분산면적  $\sigma^2$ 은 시간과 분산면적을 각각 sec 와  $\text{cm}^2$  단위로 했을 때

$$\sigma^2 = 0.0108t^{2.34}$$

로 주어진다. 한편  $l=3\sigma$  로 정의된 확산의 공간적 크기  $l$ 의 함수로 결정한  
 결보기 와동확산계수  $K_a$ 는

$$K_a = 0.0103l^{1.15}$$

로 표현되어  $l$ 의 1.15승에 비례하는 것으로 보고하였다. 여기서  $l$ 은 cm 단  
 위이고  $K$ 는  $\text{cm}^2/\text{sec}$  단위이다.

해양에서 염료확산 실험이나 다중 부표추적 실험의 경우 분산  $\sigma^2$ 은

$$\sigma^2 = at^m$$

와 같이 시간의  $m$ 승에 비례하는 관계로 놓을 수 있다 (Bowden, 1983). 여  
 기서  $a$ 는 상수이며,  $m$ 은 지수이다. 난류에 따른 와동확산계수  $K$ 는

$$K = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma^2}{\partial t}$$

와 같이 분산의 시간적 변화율에 비례하므로, 시간에 따른 분산면적이 증가  
 가 관계식  $\sigma^2 = at^m$ 을 만족할 경우 와동확산계수  $K$ 는

$$K = \frac{1}{2} amt^{m-1}$$

또는

$$K = b\sigma^n$$

로 주어진다. 여기서  $b$ 는 상수이며,  $n=2(m-1)/m$  이다. 이들 관계식에 의하면 해양에서의 와동확산계수는 일정하지 않고 시간  $t$ 와 확산 거리  $\sigma$ 에 따라 크기가 달라진다.

시간에 따른 분산면적의 지수  $m$ 은 통상 1~3 범위의 값이다. Okubo (1971)가 종합한 미국 동해안 외해역의 여러가지 확산 실험의 결과에서  $m$ 의 값은 2.34였으며, Bowden et al (1974)에 의한 Irish Sea 에서의  $m$  값은 1.5~2.0의 크기였다. 동해의 고리 해역에서 1초 간격으로 연속측류한 자료로부터 추정된 10초 내지 5분의 시간크기에 대한  $m$ 의 값은 1.6이었다 (이, 1991).

2차원적 등방성 확산의 경우 농도  $c(r,t)$ 는 확산방정식

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( K r \frac{\partial c}{\partial r} \right)$$

에 의해 기술된다. 확산계수  $K$ 가 상수인 경우, 확산거리  $r$ 에 선형적으로 비례할 경우, 그리고  $r$ 의 4/3승에 비례할 경우 시간에 따른 중앙점 농도  $c(0,t)$ 와 분산면적  $\sigma^2$ 을 종합적으로 요약하면 표 1과 같다 (Bowden, 1983).

실제 우리나라 해역에서 와동확산계수의 정량적 추정을 위하여 여러개의 부표를 동시에 추적하는 다중부표 추적 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 부표의 모양은 1차년도 보고서(이와 이, 1993)에 수록되어 있다. 각 실험마다 동일지점에서 동시에 투하된 3개 부표의 위치를 위성항법장치 (GPS)를 장착한 선박을 사용하여 추적하였다. 부표추적 실험은 부산 수영만에서 1회, 황해의 군산 외해에서 2회에 걸쳐 수행하였다 (그림 20, 21). 3개 부표 위치

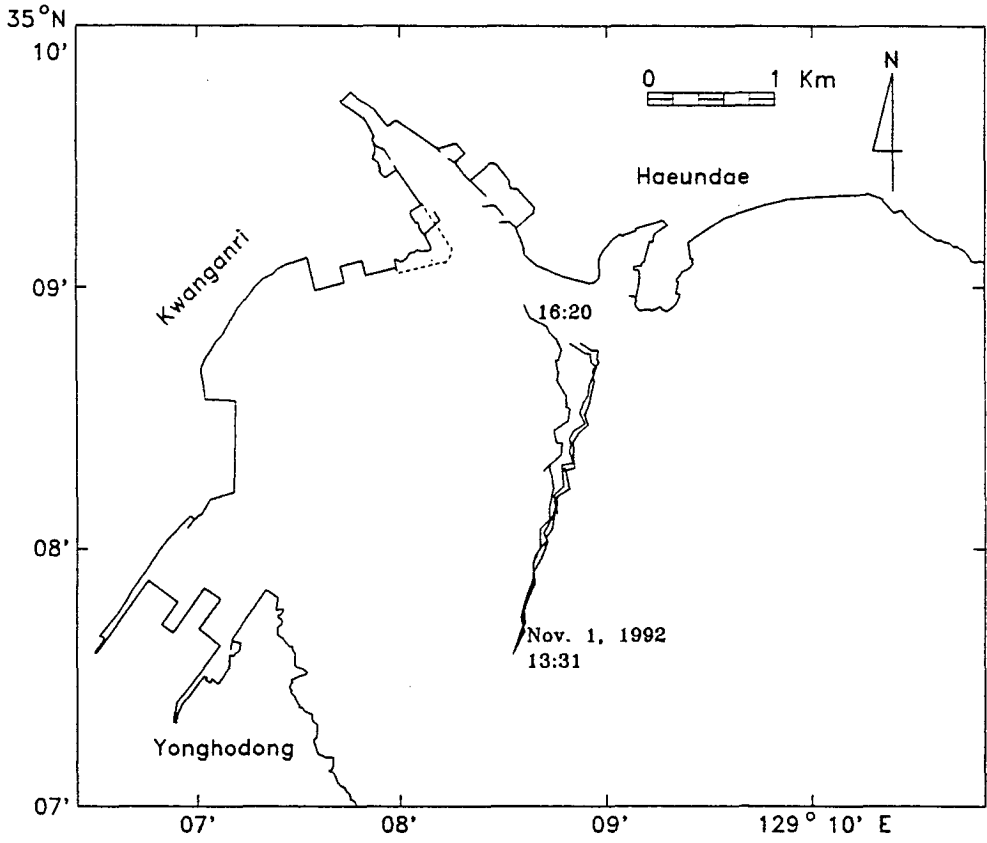


그림 20. 1992년 11월 1일 수영만에서 추적된 3개 부표의 궤적.

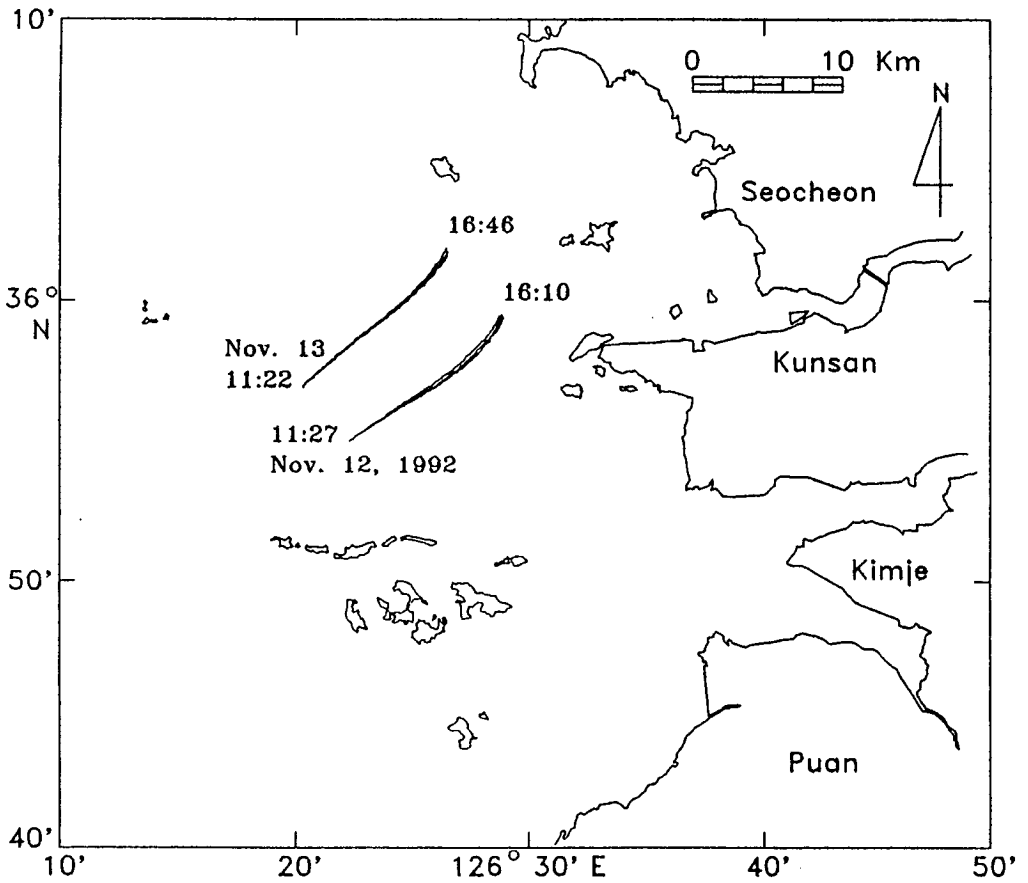


그림 21. 1992년 11월 12, 13일 군산외해서 추적된 3개 부표의 궤적.

표 1. 2차원 등방성 확산에서 확산계수의 지수에 따른 농도와 분산 면적의 시간적 변화 관계

확산계수 $K$	중앙점 농도 $c(0, t)$	분산면적 $\sigma^2$	비 고
Constant	$\propto t^{-1}$	$\propto t^1$	분자적 확산
$\propto r^1$	$\propto t^{-2}$	$\propto t^1$	확산속도 일정
$\propto r^{4/3}$	$\propto t^{-3}$	$\propto t^1$	관성(inertial) 영역

로 부터 부표 1과 2, 부표 2와 3, 부표 3과 1 간의 거리인 근접거리를 계산하였다. 얻어진 시간 경과에 따른 평균분산값에 대해 관계식  $\sigma^2 = at^m$ 을 이용하여 최소자승법으로 계산한 시간에 따른 분산값의 변화는 표 3과 같다. 여기서 부표거리의 분산  $\sigma^2$ 의 단위는  $m^2$ 이고, 시간  $t$ 의 단위는 분이다. 부표 간의 근접거리의 벌어짐에 의한 분산값은 표 2에 보인 바와 같이 시간에 선형적으로 비례하지 않고 시간의 1.5~2.0승에 비례한다. 이 결과는 1일 내지 수개월간의 분산이 시간의 2.34승에 비례한다는 Okubo (1971) 결과보다는 낮은 지수이며, Bowden 등 (1974)이 보고한 Irish Sea에서의 확산실험 결과와 비슷하다. 부표의 분산값 증가  $\sigma^2 = at^m$  으로부터 추정된 확산계수  $K$ 는 관계식  $K = \frac{1}{2}amt^{m-1}$  으로 주어지며, 이렇게 추정된 확산계수는 상수가 아니라 시간의 0.5~1.0승에 비례하여 증가한다. 이 점을 고려할 때, 일정한 상수값을 와동확산계수로 사용하여 해양 오염물의 확산을 모델링하는 것은 실제 확산의 재현에 있어서 문제점이 있음을 알 수 있다. 해양의 난류적 확산을 '현실'과 부합하게 재현하기 위해서는 시간에 따른 분산의 증가 또는 시간

에 따른 확산계수의 증가 관계가 정량적으로 반영된 해양 확산모델의 개발이 필요하다.

표 2. 부산 수영만과 군산 외해에서 3개 부표 분산실험 결과

실험	장 소	일 자	부표추적시간	저조시	부표의 분산
I	부산수영만	1992. 11. 1	13:31-16:34	12:08	$\sigma^2 = 2.8 t^{1.99}$
II-1	군산 외해	1992. 11. 12	11:27-16:10	10:44	$\sigma^2 = 26.4 t^{1.49}$
II-2	군산 외해	1992. 11. 13	11:22-16:40	11:22	$\sigma^2 = 3.6 t^{1.82}$

## 제2절 기본입력자료의 데이터베이스

조류 및 풍성순환의 개별모델과 확산의 종합모델링의 운용에 필요한 기본 입력자료인 수심과 바람 자료를 1차년도에 데이터베이스화하여 본 연구 뿐만 아니라 향후 수치모델링 연구에도 이용될 수 있도록 하였다. 대상해역은 황해, 동중국해, 동해 및 북서태평양 일부까지 포함시켰다. 2차년도에는 다른 기본 입력자료인 조석과 조류에 대하여 조화상수 데이터베이스화를 수행하였다.

### 1. 수심

해수순환 모델에서 필수적인 수심자료를 임의의 모델에 사용할 수 있도록 데이터베이스화 하였다. 임의의 구간에 대하여 5'(경도)x5'(위도) 또는 4'(경도)x3'(위도)의 정해진 격자점에서 수심자료를 편집할 수 있으며 수심자료의 수정이 필요한 경우 그 작업이 용이하게 되어있다. 수정 및 편집된 수심



자료는 별도의 자료파일에 저장되어 사용자가 모델과 연결할 수 있도록 구성하였다. 각종 해도를 바탕으로 5분 간격으로 읽혀진 기본 수심자료가 OCEAN1.DAT 라는 파일에 저장이 되어있고, 수치모델에서 사용할 자료파일 생성을 위하여 3 개의 수행프로그램이 구성되어 있는 데 INTRO.EXE, MAPPER1.EXE 및 MAPPER2.EXE 로 명명되어 있다. 다음은 각 수행 프로그램의 사용설명이다.

### 가. INTRO.EXE

본 프로그램에 대한 간단한 설명과 자료의 내삽(interpolation) 방법을 소개하는 프로그램이다.

### 나. MAPPER1.EXE

5'(경도) x 5'(위도)의 수심자료를 나타내는 프로그램으로 이용순서는:

(1) OCEAN1.DAT의 수심자료를 OCEAN11.DAT 라는 자료파일로 복제한 후 본 프로그램을 실행시키면 화면에 5분 간격으로 수심자료가 나타난다.

(2) F2 키를 누르면 300 m 이상되는 수심을 색깔별로 나타내며, 다시 F1 키를 누르면 300 m 이하의 수심을 보여준다.

(3) 화면에 사각형이 표시되면 커서(cursor) 키를 움직여 원하는 해역으로 사각형을 이동시킨다. 이때 PageUp 키나 PageDown 키를 누르면 사각형의 크기가 조정이 되며 화면의 오른쪽에는 사각형에 포함된 해역의 위도와 경도값이 표시된다. F3 키를 누르면 사각형내의 해역만을 화면에 확대하여 보여지게된다.

(4) 수심자료의 수정이 필요한 경우 수정대상이 되는 해역의 위치로 (+) 모양의 커서를 이동시킨 후 새로운 수심값을 입력하고 F10 키를 누른다. 이

때 새로 수정한 자료를 OCEAN11.DAT 파일에 저장할 것인지를 묻게되고 이를 확인시켜 주면된다. 한편, 추후 용이한 확인을 위하여 새로 수정한 수심과 그 위치가 원래 수심과 함께 CHANGE.DAT 라는 새로운 파일에 따로 저장되다. Y나 N 키를 누르면 원래 화면으로 되돌아 간다.

(5) OCEAN11.DAT 파일을 모델링의 자료로 이용하게 되는데 Work station이나 대형 컴퓨터에서 이용하려면 network 연결이 되어있는 경우 Kermit 프로그램을 이용하면 된다.

#### 다. MAPPER2.EXE

MAPPER1.EXE 보다 개선된 프로그램으로 4분(경도) x 3분(위도)의 수심 자료가 추가되었고 원하는 해역의 경,위도 값을 입력하면 그 해역의 수심자료가 GRID.DAT 라는 파일로 저장 되면서 화면에 수심도를 나타내어준다. 격자의 크기와 해역선정을 위한 입력은 메뉴형식으로 사용이 쉽게 되어있고 해역의 한계는 다음과 같다.

5'(경도) x 5'(위도)인 경우 : 117° 30' -145° E, 24° 15' -53° N

4'(경도) x 3'(위도)인 경우 : 117° 32' -145° E, 24° 15' -53° N

그 밖의 이용순서와 자료의 수정방법은 MAPPER1.EXE 와 같다. 상기 프로그램을 이용한 수심도 화면수행은 현재 EGA/VGA mode에서만 가능하게 되어있다. 기본수심자료는 수정보완이 가능하게 되어있다.

## **2. 조석 및 조류 조화상수**

오염사고 발생시 신속한 대책을 위해서는 오염물질의 분포에 대한 예보가 빨리 이루어져야 한다. 이 경우 국지적인 확산모델링이 필연적이므로 모델 입력자료인 유속장의 계산을 위하여 황해 전해역에 대한 조석과 순환모델을

운용하는 것은 비능률적이다. 조류의 조화상수가 격자점마다 계산이 미리 되어 있다면 국지적인 조류의 계산이 훨씬 용이하므로 오염물질 확산의 예측에 큰 도움이 될 것이다. 이를 위하여 황해 내부의 정해진 격자점상에서 조석과 조류의 조화상수 자료를 데이터베이스화 하였다.

계산에 사용된 모델은 한국해양연구소 공학연구부에서 운용하고 있는 2차원 조류모델로 code는 KORFLO (KORDI FLOW MODELLING SYSTEM in plane)로 명명되어 있다. 이 모델은 계산시간, 계산결과의 정확도 (accuracy) 및 조건대 처리 등의 효율성 측면이 특히 고려되어 있으며 계산 시간 간격의 효율적 선택이 가능한 implicit 방법을 채택하고 있다. 또한, 광역과 협역의 격자구성을 고려한 가변격자망 (irregular grid network)의 이용이 가능하다. 기존의 유사한 모델과 비교하면 Heaps (1972) 형태 모델보다 계산시간의 절약 및 정확도에서 1 order 정도 향상되어 있고, Leendertse (1967) 형태 모델과 선형 scheme의 전파특성은 동일하나 대류 (convection) 처리, 가변격자망 및 내부격자 (subgrid) 모델기법의 도입 측면에서 탁월하다.

계산은  $M_2$ 와  $S_2$  분조만 수행하였으며 그 결과는 각각의 파일로 분리되어 수록하였다.  $M_2$  및  $S_2$  자료파일의 이름은 각각 YSM2.HUV와 YSS2.HUV이다. 각 파일은 경도  $1/6^\circ$  및 위도  $1/8^\circ$ 의 크기로 정해진 모든 격자점에서 자료가 수록된 10741개의 격자점 좌표의 번호, 격자점상의 조위의 크기(cm) 및 위상차( $^\circ$ ), 조류 남북방향 성분의 크기(cm/sec, 북쪽 +) 및 위상차( $^\circ$ ), 조류 동서방향 성분의 크기(cm/sec, 동쪽 +) 및 위상차( $^\circ$ ) 순서로 자료가 수록되어 있다. 격자점 좌표가 (7,2)인 경우 실제 위치는 ( $118^\circ35'E$ ,  $24^\circ22.5'N$ )이 된다. 조위의 경우는 연안에 설치된 검조소의 자료로 검증을 거쳤기 때문에 오류가 극히 적은 반면 조류의 경우는 검증할 만한 장기 현장 유속자

료가 부족하여 정확도는 판단하지 못하였다.

### 3. 바람

나 등 (1992)에 의한 한국근해의 월평균 해상풍 계산의 연장으로 대상해역을 동중국해 전역 ( $20^{\circ}$ - $50^{\circ}$  N,  $115^{\circ}$ - $150^{\circ}$  E) 까지 넓혀 10년간(1978-1987년) 일본 기상청에서 발행된 1일 2회 천기도를 근거로하여 해면위 10 m의 월평균 바람자료를 계산하고 이 결과를 데이터베이스화하여 황해의 모델링뿐만 아니라 한반도 주변 해역에 대한 모델링의 입력자료로 활용할 수 있게 하였다. 또한, wind stress 및 이의 curl을 계산하여 모델에 직접이용이 가능하도록 하였다.

해상풍의 계산은 Cardone (1969) 모델을 이용하였으며 wind stress 계산에서는 bulk formula를 사용하였다. 즉,

$$\tau = \rho C_D U |U|$$

이며 여기서  $\tau$ 는 wind stress,  $\rho$ 는 공기의 밀도 그리고  $C_D$ 는 Garratt (1977)의 식을 이용한 바람응력계수,  $C_D = (0.75 + 0.067 |U|) 10^{-3}$ ,를 나타낸다.

여기에서 준비된 바람자료는 나 등 (1992)의 자료를 확장한 이 등 (1994)에 의한 자료와 근본적으로 같으며 이미 수치모델링에 많이 사용중이기 때문에 입수가 쉬울 것으로 본다.

# 제5장 결론

## 1. 황해의 순환

지금까지 발표된 황해순환의 모식도를 설명하고 각 모델의 문제점을 살펴 보았다. 또한 축적된 자료를 바탕으로 겨울과 여름의 가능한 순환형태를 제시하였다.

## 2. 현장관측 결과

1993년 2월, 4월 및 1994년 7월에 황해남부 해역에서 해양관측을 실시하여 CTD를 이용한 수온 및 염분, ADCP에 의한 유속 그리고 소광계수를 측정하였다. 관측된 자료로 부터 얻어진 중요한 결과들은 다음과 같다.

- 2월 자료는 황해 남동부해역에서 동서방향으로 전선이 형성되어 있음을 보여 소위 황해난류가 황해로 유입되지는 않는 것으로 나타났다.

- 겨울철에는 수온 및 염분 뿐만 아니라 유속의 분포도 수직적으로 균질함이 확인 되었기 때문에 수치모델링에서 2차원 모델이용이 무리가 없음을 알 수 있었다.

- 4월의 관측자료는 여름철의 해황 특징인 약층이 이미 형성되어 있고 수평유속도 약층의 깊이를 경계로 상하층이 방향과 크기가 구분이 되고 있음을 보여 수치모델링에서 여름철에는 3차원 모델이 적합함을 시사해 주었다.

- 7월의 관측자료는 황해 남부해역의 해황이 양자강희석수, 황해저층냉수 및 동중국해에서 오는 고염수의 영향을 복합적으로 받고 있음을 보여 주었다. 양자강희석수는 표층에서는 제주도 부근까지 영향을 미치고 있으나 수심이 깊어짐에 따라 중국연안으로 그 세력이 국한되고 있음을 보였다. 황

해저층냉수는 황해 깊은골에서 중국쪽 사면을 따라 남쪽으로 확장하는 모양으로 분포하여 제주해협 위도대까지 이르고 있음을 나타내었다. 이는 8월 및 9월에 이르면 더욱 남쪽으로 확장하여 동중국해까지 이를 것으로 추측된다. 대마난류수괴로 분류되는 고염수의 물은 표층보다 깊은곳에서 보이며 주축은 제주도를 끼고돌아 동쪽으로 빠져나가며 일부는 약하지만 저층냉수의 외곽의 한국연안 깊은 사면을 따라 북쪽으로 영향을 미칠 가능성을 보여준다.

- 소광계수의 자료는 전반적으로 해저마찰에 의한 에너지 손실이 큰 해저부근의 저층과 고탕도의 연안수를 수송하는 해류역에서 혼탁도가 높음을 나타내고 있어서 소광계수가 해황과악에 간접적인 자료가 될 수 있음을 보여주었다.

### 3. 난류확산계수의 추정

와동확산계수의 정량적 추정을 위하여 부산 수영만과 군산 외해에서 여러개의 부표를 동시에 추적하는 다중부표 추적실험을 3차례 수행하였다. 실험자료로 부터 시간에 따른 평균분산값을 계산하였는데 확산계수는 상수가 아니라 시간의 0.5-1.0승에 비례하여 증가함을 나타내었다. 따라서 해양오염물질의 확산모델링에 있어 해양의 난류적 확산을 현실과 부합하게 재현하기 위해서는 시간에 따른 분산의 증가 또는 시간에 따른 확산계수의 증가 관계가 정량적으로 반영된 해양 확산모델을 이용해야 할것이다.

### 4. 예측시스템 기본 입력자료

확산수치모델 운용시 기본적으로 필요한 수심, 월평균 바람과 조석 및 조류 조화상수를 데이터베이스화 하였다. 수심자료의 경우  $1/12^\circ$ (경도) x

1/12°(위도) 또는 1/15°(경도) x 1/20°(위도)의 정해진 격자점에서 수심자료를 편집한 후 수치모델과 연결할 수 있도록 구성하였다. 바람자료는 10년간 (1978-1987) 발행된 일본기상청의 1일 2회 천기도를 근거로 하여 해상 10 m의 월평균값을 계산하고 wind stress와 이의 curl 값을 데이터베이스화 하였다. 이 자료는 예측시스템에서 현장의 직접 관측자료가 없을 때 사용할 수 있을 것으로 본다. 조석과 조류의 조화상수는  $M_2$  및  $S_2$  분조를 2차원 조류모델을 이용하여 1/6°(경도) x 1/8°(위도)의 격자점상에서 계산하여 데이터베이스화 하였다. 예측시스템을 운용한다면 이는 황해 전체가 아닌 국지적 모델일 경우가 대부분일 것이기 때문에 해류의 현장자료가 없는 경우 조류조화상수를 이용한 유속장의 일시적 재현은 매우 유용하리라 본다.

## 5. 기타

부록 A에서는 AVHRR의 해수면온도 영상자료로 부터 표층유속을 구하는 문제를 기술하였다. 현장자료가 없기 때문에 계산된 유속장의 진위는 판단할 수 없지만 조류성분을 제거할 수 있다면 조류조화상수로 부터 구한 조류장과 함께 준실시간으로 비조류 성분의 해류장을 산출할 수 있으므로 예측시스템에 이용할 수 있는 가능성이 크다. 부록 B에서는 여름철 황해해황의 기본적인 이해를 위하여 담수가 해수면을 덮었을 때의 가능한 현상을 설명하였다. 순환에 미치는 영향을 연구하기 위해서 이러한 분석이 선행되어야 할 것이다.

1차년도보고서와 본 보고서에서 설명한 조류모델(Canada IOS 모델)과 디스켓에 수록된 모든 자료들은 연구주관기관이 정하는 규칙의 범위 내에서 공개가 가능하다.

## 참고문헌

- 나정열, 서장원, 한상규, 1992. 한국근해의 월평균 해상풍. 한국해양학회지, 27, 1-10.
- 이문진, 1991. 연안역 확산 수치모델에 적합한 와동확산계수의 추정. 부산수산대 이학석사 학위논문, 49pp.
- 이영철, 1993. 황해의 해양자원 개발 연구. 제2차년도 연차보고서, 과학기술처, 827pp.
- 이재학, 유신재, 장경일, 1994. CZCS에 의해 관측된 겨울철 황해 남부해역의 난수 유입. 1994년도 춘계학술발표회요약문, 한국해양학회지, 29, 200.
- 이홍재, 나정열, 한상규, 서장원, 1994. 동중국해의 해상풍 계산. 한국해양연구소 보고서 BSPE 00367-683-1, 91pp.
- 이홍재, 이재학, 1993. 황해의 해양환경 보전을 위한 해양확산의 실시간 예측시스템 연구 (1차년도 연차보고서). 한국해양연구소 BSPN 00207-608-1, 과학기술처, 84pp.
- An, H.S. 1987. The numerical simulation of the oceanic circulation in the Yellow Sea. J. Korean Earth Sci. Soc., 8, 171-176.
- Asaoka, O. and S. Moriyasu, 1966. On the circulation in the East Chiba Sea and the Yellow Sea in winter (Preliminary Rep.). Oceanogr. Magazine, 18(1-2), 73-81.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candella, 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.
- Bowden, K.F. 1983. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. Ellis Horwood Ltd., 302pp.
- Bowden, K.F., Krauel, D.P. and Lewis, R.E. 1974. Some features of turbulent diffusion from a continuous source at sea. *Advances in Geophysics*, 18A, 315-329.
- Byun, S.K., and K.I. Chang, 1988. Tsushima Current Water at entrance of the Korea Strait in autumn. *Prog. Oceanog.*, 21, 295-296.
- Cardone, V.J., 1969. Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting New York Univ. School of Engineering and Sci., Report GSL-TR69-1, 181pp.
- Chao, S.-Y. 1990. Circulation of the East China Sea, A numerical study. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 273-295.
- Choi, B.H. 1982. Note on current driven by a steady uniform wind stress on the Yellow Sea and East China Sea. *La mer*, 20, 65-74.
- Choi, B.H. 1984. Computation of current driven by a steady uniform wind stress on the East China Sea using a three dimensional numerical model. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19, 36-43.
- 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 Science Publishers B.V.,

- Amsterdam, 345-358.
- Garratt, J.R., 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 915-929.
- Guan, B. and H. Mao, 1982. A note on circulation of the East China Sea. *Chinese J. Oceanol. and Limnol.*, **1**(1), 5-16.
- Heaps, N.S., 1972, On the numerical solution of the three-dimensional hydrodynamical equations for tides and storm surges, *Memoires Societe Royale des Sciences de Liege*, **6 II**, 143-180.
- Hsueh, Y., and I.-C. Pang, 1989. Coastally trapped long waves in the Yellow Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 612-625.
- Hsueh, Y., R.D. Romea and D.W. DeWitt, 1986. Winter-time winds and coastal sea-level fluctuations in the Northeast China Sea. Part II: Numerical model. *J. Phys. Oceanogr.* **16**, 241-261.
- Kang, Y.Q., 1982. On transports driven by time-varying winds in horizontally bounded shallow sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **17**, 41-51.
- Kim, K., H.K. Rho, and S.H. LEE, 1991. Water masses and circulation around Cheju-do in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**, 262-277.
- 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. *Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab.*, **62**, 19-66.
- Korea Ocean Research & Development Institute, 1983-1986. A study on the atlas of Marine resources in the adjacent seas of Korea-Yellow

Sea. Annual Reports.

- Korea Ocean Research & Development Institute, 1987. Oceanographic Atlas of Korean Waters. Vol. 1. Yellow Sea. 147 pp.
- Lee, C.K. 1970. Drift bottle experiments in the eastern Yellow Sea, 1962-1966. In. The Kuroshio, edited by J.C. Marr, East-West Center Press, Honolulu, 79-84.
- Lee, S.H. and R. Beardsley, 1994, Residual tidal currents in the Yellow Sea, (Submitted to J. Geophys. Res.).
- Leendertse, J.J., 1967, Aspect of a computational model for long-period wave propagation. RM-5294-PR, The Rand Cooperation, Santa Monica.
- Lie, H.-J., 1984. A note on water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae). J. Oceanolo. Soc. Korea, 19, 187-194.
- Lie, H.-J. 1985. Wintertime temperature-salinity characteristics in the southern Hwanghae (Yellow Sea). J. Oceanogr. Soc. Japan, 41, 291-198.
- Lie, H.-J. 1987. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. Progress in Oceanogr., 17, 229-242.
- Lie, H.-J. 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea). Cont. Shelf Res. 9, 527-546.
- Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. J. Fac. Mar. Sci. Technol., Tokai Univ. Spec. No. Nov., 199-366.
- Niino, H. and K.O. Emery, 1961. Sediments of shallow portions of the

- East China and South China sea. *Geo. Soc. American Bull.*, 72, 731-762.
- Okubo, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams, *Deep-Sea Res.*, 18, 789-802.
- Pang, I.-C., 1991. Coastally trapped waves over a double shelf topography (I): Free waves with exponential topography. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 24, 428-436.
- Pang, I.-C., 1992a. Coastally trapped waves over a double shelf topography (II): Free waves with linear topographies. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 25, 443-456.
- Pang, I.-C., 1992b. Coastally trapped waves over a double shelf topography (III): Forced waves and circulations driven by winds in the Yellow Sea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 25, 457-473.
- Park, Y.H. 1986. A simple theoretical model for the upwind flow in the southern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 21, 203-210.
- Seung, Y.H. 1987. A summer circulation inferred from the density (temperature) distribution in the Eastern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 22, 63-70.
- 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.
- Yanagi, T. and S. Takahashi, 1993. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Oceanogr.*, 49, 503-520.

## 부 록

- A. AVHRR 자료를 이용한 표층류 추정
- B. 해수표층 담수막의 효과



## A. AVHRR 자료를 이용한 표층류 추정

오염사고의 발생시 가장 중요한 일의 하나는 해황, 특히 유속장을 빨리 파악하는 일이다. 이를 위하여 가능한 방법 중의 하나는 인공위성 자료를 이용하는 것이다. 본절에서는 NOAA/AVHRR 자료로 부터 표층류의 추적이 가능한지를 알아보았다. 만일 여기서 설명한 방법이 타당한 것이라면 동시적인 표층류의 자료가 광범위한 해역에서 얻어질 수 있기 때문에 오염물질의 이동확산모델을 운용하는데 큰 도움이 되리라 본다.

### A.1 자료

분석자료로 이용한 AVHRR/SST(해수면온도)는 표 A1과 같이 1990년 3월과 1991년 11월에 서울대학교 해양연구소에서 운용중인 NOAA위성 수신시스템으로 수신한 AVHRR 자료로 부터 황해동남해역을 선정하여 다음과 같은 다중채널법에 의해 산출한 온도를 이용하였다.

$$SST = C_1T_4 + C_2(T_4 - T_5) + C_3(T_4 - T_5)(\sec\theta - 1) + C_4(\sec\theta - 1) + C_5 \quad (A1)$$

표 A1. 인공위성 영상자료의 관측시각 (영상의 예: 그림 A1, A2).

Data	Time	Data	Time
B	1991.11. 4. 4:13	F	1991. 11. 5. 4:02
C	11. 4. 7:22	2	1990. 3.19. 14:18
D	11. 4. 13:57	3	3.19. 19:54
E	11. 4. 18:46	4	3.20. 2:43

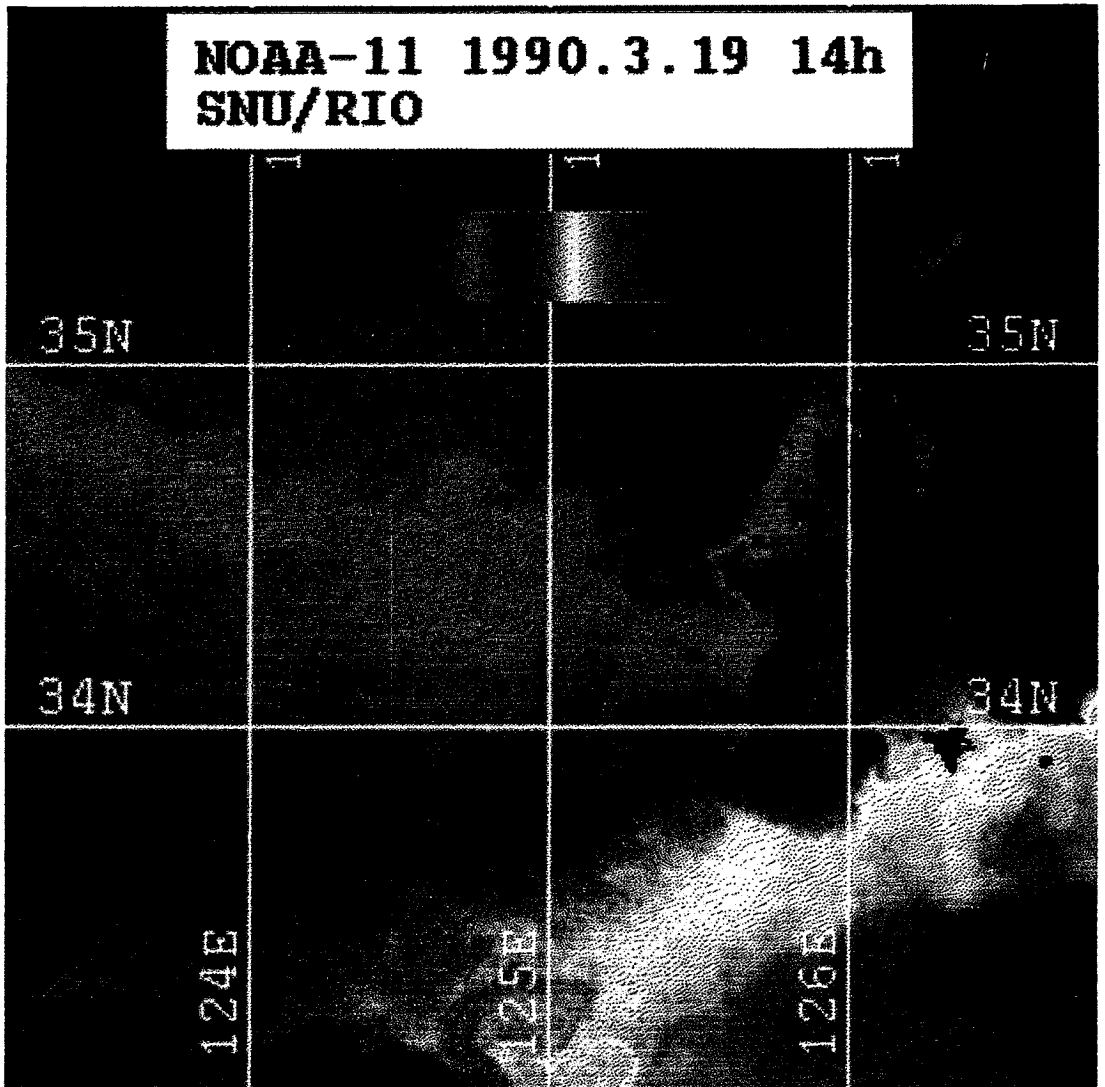


그림 A1. 1990년 3월 19일 황해 동남해역의 AVHRR/SST 영상.



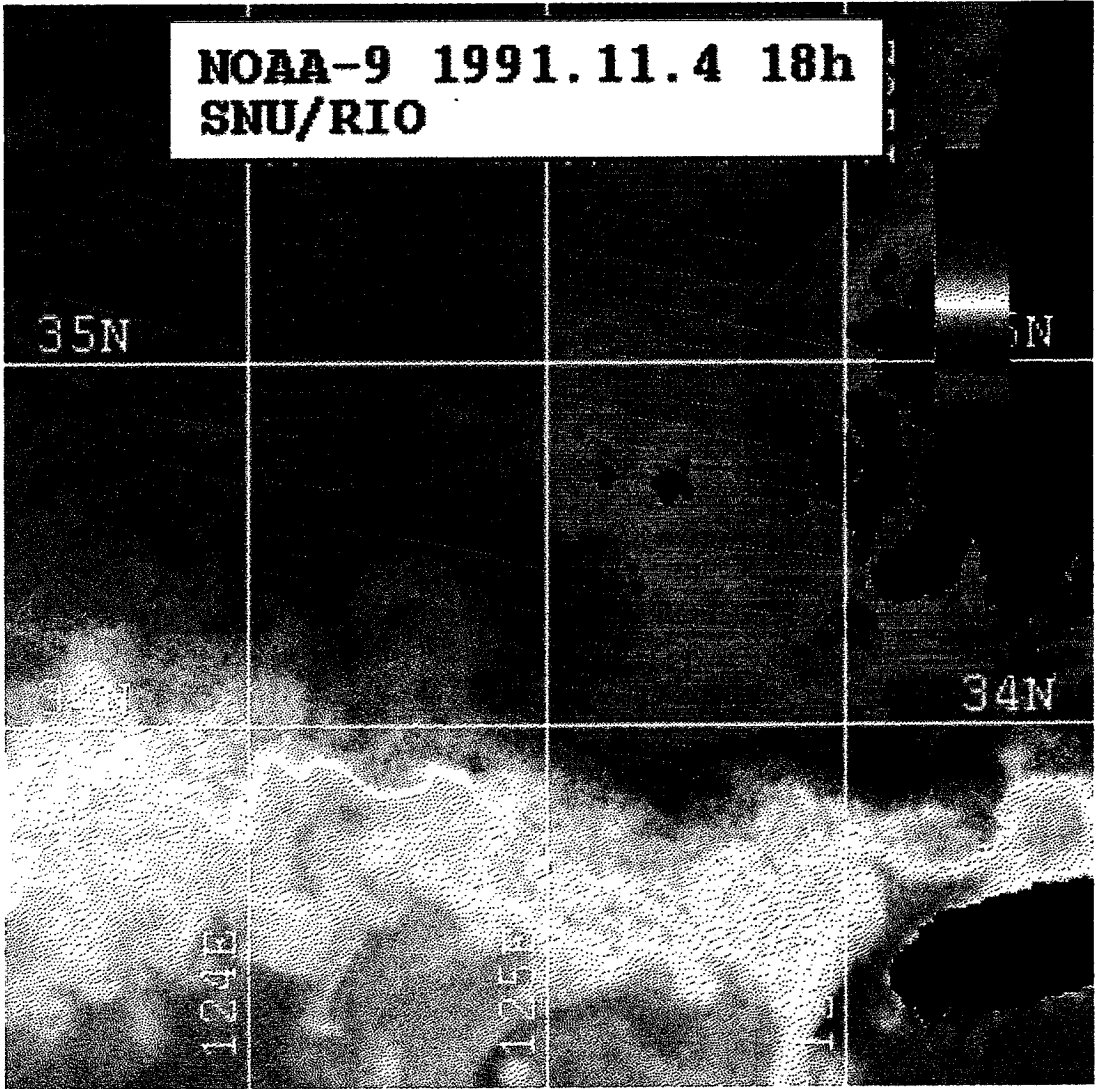


그림 A2. 1991년 11월 4일 황해 동남해역의 AVHRR/SST 영상.

여기서  $\theta$ 는 주사각도이고  $T_4$ 와  $T_5$ 는 각각 채널 4와 5의 휘도온도 (brightness temperature)를 나타낸다. 계산에 사용된 계수  $C_i$ 의 값은 표 A2와 같다.

표 A2. 계산에 이용된 상수의 값.

Satellite	Time	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
NOAA-9	day	0.9994	2.7057	-2.7	0.73	-0.046
	night	0.9994	2.7057	-2.7	0.73	-0.046
NOAA-10	day	1.1	0	0	0	0
	night	1.1	0	0	0	0
NOAA-11	day	1.01345	2.659762	0.526548	0	-0.918
	night	1.052	2.397089	0.959766	0	-1.316

## A.2 내용 및 방법

AVHRR자료에서 SST를 산출하는 경우에 다중채널법은 AVHRR의 각 적외선채널에서 감지되는 복사량이 대기의 흡수인자에 따라 다르게 나타나는 것을 이용하는 실험식으로서 (McClain, 1981) NOAA/NESDIS의 다중채널법 알고리즘을 이용하였다.

상기와 같이 산출한 AVHRR/SST를 이용하여 표층류를 추정하는 방법은 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 해수면온도의 형태를 추적자로 간주하는 형태추적법 (Vastano 와 Border, 1984)과 최대상관계수법 (Emery 등, 1986)이 있으며 다른 하나는 온도보존식의 이류항에 있는 이류를 추정하는 역행렬법 (Kelly, 1989)이 있다. 본 연구에서는 이(1994)에 의해 시도된 역행렬법에 의해 표층류를 추정하였다.

역행렬법은 수평방향의 이류와 확산효과를 무시한 다음과 같이 표시되는 온도보존식에서 표층류를 추정하는 것이다.

$$\partial T / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla_H T = \kappa \nabla_H^2 T + Q \quad (\text{A2})$$

여기에서  $T$ 는 해수면온도,  $\mathbf{u}$ 는 유속,  $\kappa$ 는 온도확산계수,  $Q$ 는 열속이다. 식 A2 에서 좌변 첫째 항과 둘째 항의 온도경사 및 우변의 온도확산은 AVHRR/SST를 이용하여 계산할 수 있으므로 열속을 공간적으로 일정하게 간주하는 경우에 위식은 유속과 온도 확산계수에 대한 선형식이 된다. 이와 같은 선형식은 격자화된 영상의 각 격자에서 성립되므로 여러개의 시간연속 영상에서 선형식 체계는 다음과 같은 과결정체계의 행렬식으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (\text{A3})$$

여기에서  $\mathbf{A}$ 는 계수행렬,  $\mathbf{x}$ 는 미지수 유속벡터,  $\mathbf{b}$ 는 자료벡터이다.

식 A3 으로부터 미지수 유속벡터는 역행렬법에 의해서 추정할 수 있다. 그러나 이와같이 추정하는 유속장은 온도보존식의 이류항이 내적이므로 등온선에 평방향의 유속성분을 추정하는 것이 불가능하다. 이와같은 성분을 추정하기 위해서 가중치( $w$ )가 포함된 수평발산최소화 ( $w \nabla_H \cdot \mathbf{u} = 0$ ) 등을 제한요소로 추가할 수 있다. 여기에서 추정요소의 의미가 있는 가중치의 크기는 0.5로 하였다.

역행렬법에 의해 추정한 유속장은 영상자료 기간 동안의 시간 평균유속으로서 영상자료의 기간이 조류주기와 일치하지 않은 경우에는 연구해역에서 활발하게 나타나는 조류성분을 포함한다. 따라서 조류성분을 제거하고 평균 해류를 추정하기 위해서는 조류주기와 일치하는 영상자료를 이용할 필요가 있다. 이 경우에도 연구해역의 각 지점에서 조류주기가 일정하지 않으므로 조류성분이 포함될 가능성이 있다.

### A.3 결과

그림 A3은 1990년 3월 중순인 표 A1의 자료 2와 4를 이용한 결과로서 시간간격은 약 12시간 25분이다. 추정유속장에 나타나는 표층류의 특징적인 형태는 다음과 같다. 제주도과 동일위도의 124° 30'E 서쪽해역에서 북서방향의 흐름이 있으며 제주도를 끼고도는 시계방향의 흐름과 한반도 남동연안을 끼고도는 반시계 방향의 흐름이 있다. 그림 A4는 1991년 11월 초순인 표 A1의 자료 B부터 F까지를 이용한 결과로서 시간간격은 약 23시간 49분이다. 추정유속장에 나타나는 특징적인 형태는 다음과 같다. 제주도과 동일위도의 124° 30'E 서쪽해역에서 북서방향의 흐름이 있으며 124° 30'E와 제주도 사이의 해역에는 북동방향의 흐름이 있다. 이는 한반도 남동연안을 끼고도는 시계방향의 흐름과 연결되며 대흑산도 근해에서 북류로 지속된다.

그러나 이상의 설명은 하나의 실험적인 해석에 불과하다. 계산의 결과가 실제현상을 나타내었다고 할지라도 강한 조류의 성분이 포함되어있기 때문이다(표 A3 참조). 여기서 강조하고자 하는점은 인공위성 자료가 확산모델링을 통한 실시간 예보에 이용이 가능하다는 것이다.

표 A3. 대흑산도에서 고조시와 저조시.

	고 조	저 조
1990년	3. 19. 6:32	3. 19. 12:37
	3. 19. 18:24	3. 20. 00:24
	3. 20. 07:40	3. 20. 14:23
1991년	11. 3. 23:43	11. 4. 05:42
	11. 4. 12:15	11. 4. 18:13
	11. 5. 00:25	11. 5. 06:19

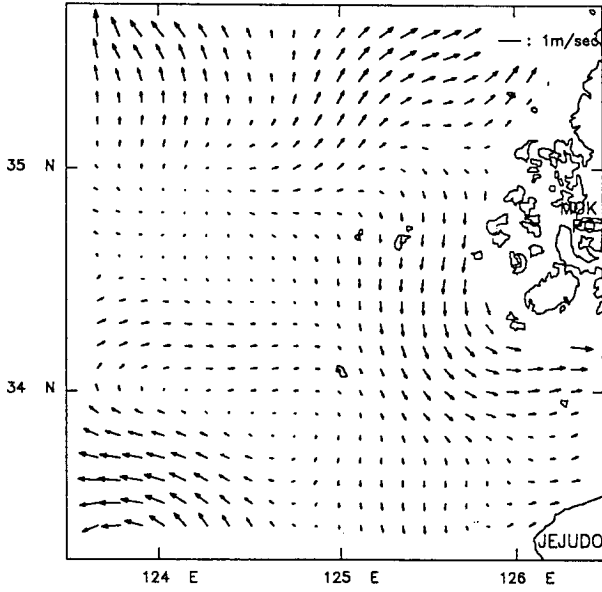


그림 A3. 1990년 3월 19일 AVHRR/SST 자료에서 계산된 유속장.

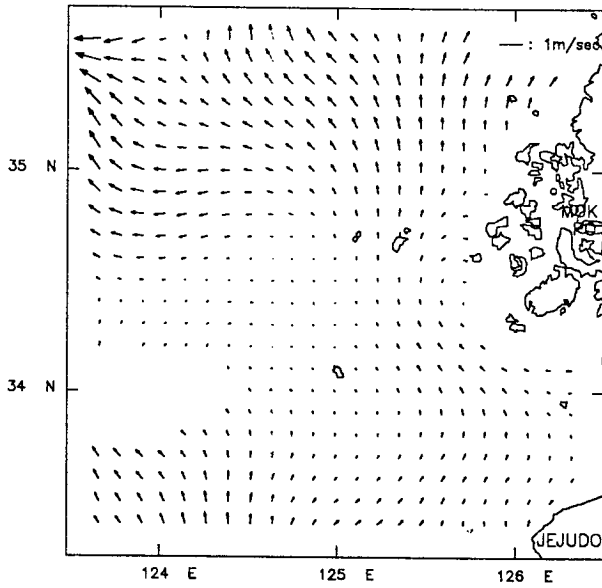


그림 A4. 1991년 11월 4일 AVHRR/SST 자료에서 계산된 유속장.

## 참 고 문 헌

- 이태신, 1994, NOAA/AVHRR 자료를 이용한 표층 이류 추정, 이학박사 학위논문, 서울대학교, 126pp.
- Emery, W.J., A.C. Thomas, M.J. Collins, W.R. Crawford, and D.L. Mackas, 1986, An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, *J. Geophys. Res.*, 91, 12865-12878.
- Kelly, K.A., 1989, An inverse model for near surface velocity from infrared images, *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1845-1864.
- McClain, E.P., 1981, Multiple atmospheric-window techniques for satellite sea surface temperatures, *Oceanography from Space*, Plenum, New York.
- Vastano, A.C. and S. E. Border, 1984, Sea surface motion over an anticyclonic eddy on the Oyashio front, *Remote sensing Environ.*, 16, 87-90.

## B. 해수표층 담수막의 효과

여름철의 담수유입의 영향을 이해하는 것은 순환의 정확한 파악에 있어 대단히 중요한 일이다. 여기에서는 연안을 제외한 황해내부의 표층에서 가능한 담수의 효과에 대하여 고찰하였다.

### B.1 여름철의 담수유입

아시아의 기후특징은 계절몬순이다. 여름철몬순은 많은 강수를 동반하는 전선이 남쪽에서 느린 속도로 북상하는 특징을 보인다(그림 B1). 황해의 경우 중국내륙에서 동해까지 연결된 전선이 6월 하순부터 7월 중순 사이에 통과하여 황해 자체 내의 강우와 함께 많은 양의 담수가 육지로 부터 유입이 된다. 표 B1의 육지로 부터 연간 담수유입량과 장마기간 동안 연안의 강우량을 기준으로 추정하면 약 30 cm 이상의 해수면 상승이 있을 것으로 판단된다. 이러한 추정치의 진위를 떠나서 얇은 담수의 막이 짧은 기간동안 형성되어 있을 것이라는 데는 무리가 없다. 장마가 끝난 후에는 많은 태양열

표 B1. 황해로 강을 통하여 들어오는 담수의 년유입량 ( $10 \times 10^9 \text{ m}^3$ ).

	Schubel et al (1984)	Wang and Aubrey (1987)
Yellow River	44.28	49
Yalu River	34.7	28
Han River	25	
Keum River	5	
Liao River		6
Luan River		4.6
Han River		2

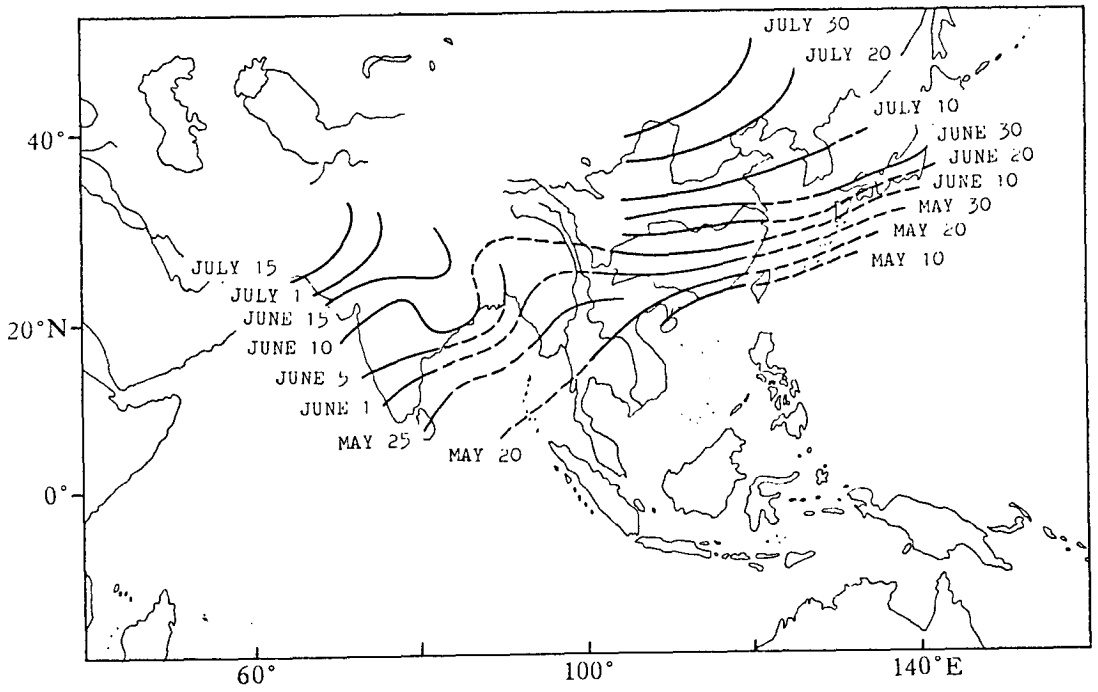


그림 B1. 여름철몬순의 평균 위치.



복사가 있다. 해수면의 강한 태양열 복사와 많은 담수의 유입으로 여름철의 계절약층이 잘 발달된다는 것은 알려져 있지만 구체적인 물리적 과정에 대해서는 거의 접근된 바 없다. 본절에서는 고염의 해수위에 얇은 담수층이 형성되고 높은 복사열이 있는 경우의 가능한 현상에 대하여 알아보기로 한다.

## B.2 Diffusive 형태의 이중확산

그림 B2 처럼 수온과 염분이 모두 깊이에 따라 증가하는 경우를 고려하자. 수온과 염분이 밀도에 미치는 영향은 반대이지만 염분의 영향이 더 크다면 밀도는 안정된 분포를 가진다. 이때 물 입자가 수직방향으로 조금 움직이기 시작한다면 수온의 분자적확산 계수가 염분보다 100 배 이상 크므로 그림 B3에서 설명한 바와 같이 조그만 진폭으로 진동하게 된다. 즉, 운동이 이중확산의 성질에 의하여 제한된 두께를 갖는 층내에 고립이 되고 열의 이동이 억제되는 것이다. 이러한 유체역학적 현상을 diffusive 형태의 이중확산이라 하는데 (Turner, 1973) 해수위에 얇은 담수층을 형성된 경우에 이러한 현상을 볼 수 있다.

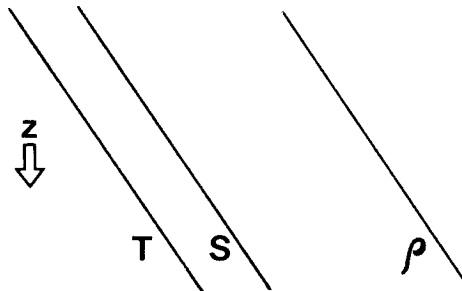


그림 B2. Diffusive 형태 이중확산의 수직구조.

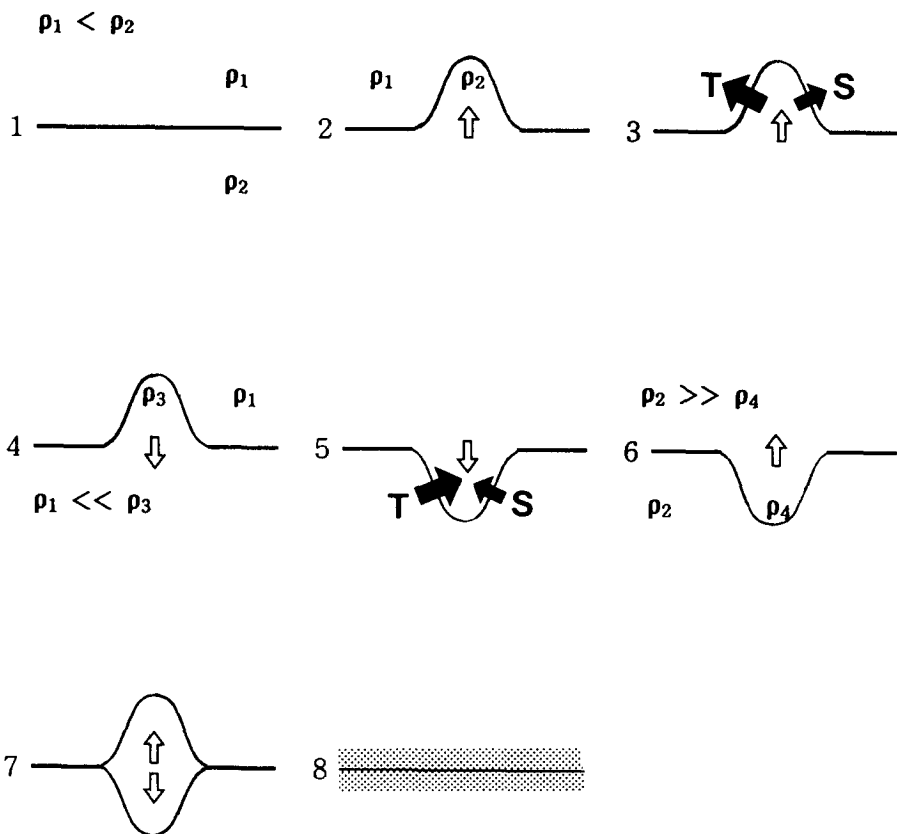


그림 B3. Diffusive 형태 이중확산에 의한 물입자의 수직 운동 과정. 1. 평형상태에서, 2. 하층의 물이 어떤 요인에 의해 윗층 내부로 상승을 하면, 3. 분자적 확산에 의하여 열과 염은 값이 낮은 쪽으로 성질이 이동하는데 열이 훨씬 빠르다. 4. 따라서 하층에서 상승한 물은 온도가 낮아지게 되고 새로운 밀도값이 주위보다 높게 되면 부력의 차이로 하강하게 되고, 5. 관성에 의하여 최초의 하층 내부까지 하강하면 다시 분자적 확산에 의하여 외부에서 염보다 빨리 열의 이동이 있게된다. 6. 온도의 상승으로 밀도는 주위보다 높아져 상승을 하게되고, 7. 수직 방향 진동을 계속하기 때문에 물 입자의 운동은 어떠한 두께를 갖는 층내에 국한이 된다.

### B.3 A solar pond

황해의 현상을 고찰하기 전에 유사한 경우의 diffusive 형태의 이중확산을 응용한 예로 그림 B4에 나타난것과 같이 두층의 유체로 된 경우를 보기로 하자. 상층에서는 염분의 수직 변화가 높은 안정구조를 유지하도록 담수와 염수가 위와 아래에서 각각 계속 공급이 된다. 상층은 얇기 때문에 외부에서 공급되는 태양열은 아래의 층 까지 도달되어 흡수가 된다. 아래층에서는 내부대류가 발달하지만 위의 층에서는 염분에 의한 안정도 때문에 열의 대류가 억제된다. 따라서 아래층에서 흡수된 태양열은 위층 때문에 갇히게 되어 공기중으로 재복사가 힘들며 아래층 물은 매우 뜨겁게 된다. 이러한 장치를 solar pond (Nielsen, 1987)라 하는데 diffusive 형태 이중확산의 구조 때문에 외부에서 복사된 열이 수중에 갇히게 되어 외부로 재복사가 힘들게 되는 것을 응용하여 태양열을 이용하는 것이다.

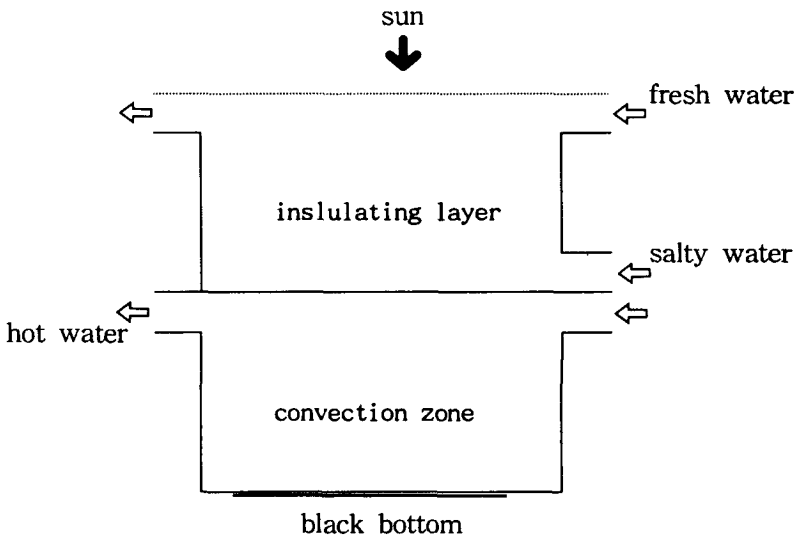


그림 B4. Solar pond의 구조.

## B.4 황해의 담수 영향

이상의 설명을 황해에 적용하기 위하여 난류적 혼합으로 담수와 해수가 빨리 섞이지 않음 등의 가정이 필요하다. 즉, 강한 해류가 없고, 수직적인 조석혼합이 약하며, 낮은 증발량과 파가 약하다는 가정들이다. 따라서 조석 효과가 큰 연안은 제외하기로 한다. 장마철에 공급된 담수가 황해 표층에 막을 형성한다면 수온과 염분이 solar pond와 유사한 이중확산의 구조를 갖게 된다(그림 B5). 태양복사열은 상부혼합층에 갇히게 되어 수온이 상승하리라 보며 이는 여름철 황해 성층현상을 더욱 강하게 하는 요인의 하나가 될 것이다. 그림 B6는 여름철 황해의 평균해황과 담수의 효과를 나타낸 T-S도이다. 온도의 상승폭이 얼마나 될 것인지는 앞으로 연구되어야 할 사항이다.

여기에서 기술한 설명이 매우 단순화한 모델이지만 황해에서 담수가 순환에 미치는 영향의 연구를 위해서 필요한 과정이라고 본다.

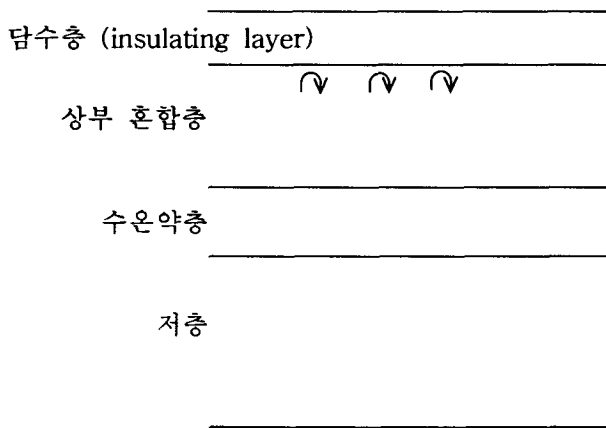


그림 B5. 여름철 담수의 표층막이 있는 황해의 수직 모식도.

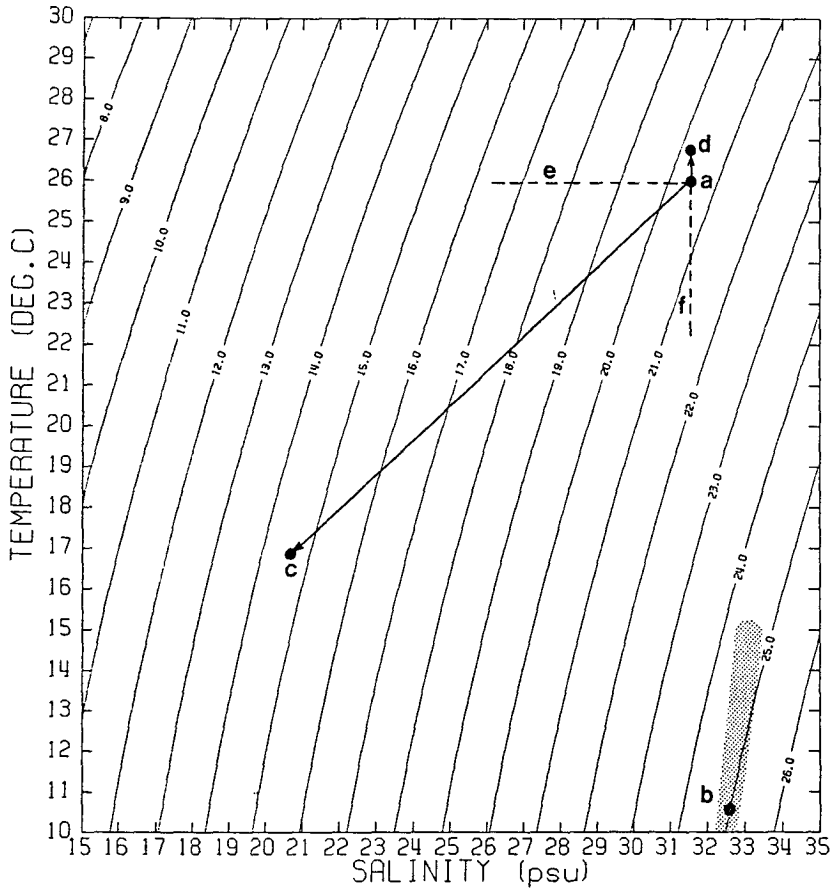


그림 B6. T-S도에 표시한 여름철 황해의 해황. a는 상부 혼합층을 나타내고 b 주위의 짙게 표시한 것은 저층냉수를 표시한다. 강우와 육지에서 유입되는 담수는 c처럼 저온 및 (특히) 저염으로 나타난다. 점선 e와 f는 상층의 수온과 염분값을 보여주는데 담수의 특성은 일차적으로 두 선분의 사이에 놓인다. 물론 a를 지나는 밀도선의 왼쪽에 국한된다. 이때 c는 a보다 상층에 위치하므로 diffusive 형태의 이중확산이 가능한 구조다. 따라서 상층에 흡수된 태양복사열에 의한 대류는 억제되어 상층의 수온이 상승하는 효과를 준다. 담수와 표층의 해수가 혼합이 일어나더라도 수직방향으로 염분의 경사가 있을 것이므로 표층의 수온이 점선 e보다 낮은 경우라면 대기중으로 열의 재복사는 계속 억제가 된다. d는 온도가 상승된 후의 상층을 표시한 것인데 이는 앞으로의 연구과제다.

## 참고문헌

- Nielsen, C.E., 1987, Solar ponds: dynamical processes and environmental influences. Lecture notes, International Seminar "Solar Pond Science and Technology", Cuernavaca, Mexico.
- Tao, S. and L. Chen, 1987, A review of recent research on the east Asian summer monsoon in China, In *Monsoon Meteorology* (Ed. by Chang C.-P. and T.N. Krishnamurti), Oxford Univ. Press, 60-92.
- Schuble, J.R., H. Shen, and M.J. Park, 1984, A comparison of some characteristics sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea, Proceedings of Korea-U.S. Seminar Workshop, June 1984, 286-308.
- Turner, J.S., 1973, *Buoyancy effects in fluids*, Cambridge Univ. Press, London, 368pp.
- Wang, Y. and D.G. Aubrey, 1987, The characteristics of the China coastline, Cont. Shelf Res., 7, 329-349.