

BSPN 00222-721-1

東海에서의 中規模 海況變動에 관한 研究
(最終年度)

A Study on the meso-scale warm eddy in the
southwestern part of the East Sea

1994. 7.

研 究 機 關
韓 國 海 洋 研 究 所

科 學 技 術 處

提 出 文

科學技術處長官 貴下

本 報告書를 “東海에서의 中規模 海況變動에 관한 研究”의 最終年度 報告書로 提出합니다.

1994년 7월 일

主管研究機關名 : 韓國海洋研究所

研究責任者 : 金 哲 洙

研 究 員 : 申 弘 烈 · 卞 相 慶
 方 仁 權 · 朴 弼 聖
 黃 相 喆 · 申 昌 雄
 劉 銀 珠

研 究 助 員 : 李 大 夏 · 南 璟 愛

要 約 文

I 題 目

東海에서의 中規模 海況變動에 관한 研究 (最終年度)

II 研究의 必要性 및 目標

1. 必要性

東海는 韓半島의 氣象과 일반 自然環境에 많은 영향을 주고 있다. 大韓海峽을 통해 流入되는 쿠로시오의 支流인 쓰시마 난류, 東韓暖流 및 북동쪽의 北韓寒流의 상호 작용에 의하여 鬱陵盆地 주변의 海역에서 여러개의 暖水性 소용돌이가 生成되고 있으며, 이 소용돌이는 동해의 海況變動에 중요한 요인으로 작용하고 있다. 현재 이러한 中規模 海況變動에 관한 體系的인 研究나 調査가 없었다. 소용돌이는 海流의 解析 및 分析을 어렵게 만드는 동시에 海洋氣象, 水産資源 및 海洋防衛 등의 여러 分野에 많은 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

2. 目標

- 가) 東海의 中規模 海況變動의 力學構造 把握
- 나) 暖水性 소용돌이의 分析體制 確立
- 다) 海況豫報를 위한 基盤體제의 構築

III 研究開發의 內容 및 範圍

- 1. 東海의 暖水性 소용돌이(Eddy)에 대한 現場觀測(CTD, ADCP, 海流計 mooring)을 실시하여 소용돌이의 水平·垂直構造 및 海流資料 蒐集
- 2. 수집된 海水特性, 海流資料의 處理 및 分析
- 3. 既存資料 分析을 통한 鬱陵盆地 주변의 暖流水와 暖水塊의 分布, 移動 및 變化過程의 把握

IV 研究開發의 結果

1. 1993년 4월 울릉도 남서쪽 해역에서 直徑 약 140 km, 수심 약 340 m의 時計方向으로 回轉하는 暖水性 소용돌이 觀測
2. 1993년 9월 울릉도 남서쪽 해역에서 直徑 약 120 km, 수심 약 280 m의 時計方向으로 回轉하는 暖水性 소용돌이 觀測
3. 소용돌이 內部 構造의 把握 및 高溫·高鹽의 均質層 分析
4. 소용돌이의 가장자리에 50 km 幅의 高溫·高鹽水(warm streamer) 存在 確認
5. 소용돌이의 最大流速 및 水深
6. 소용돌이의 移動經路 分析, 把握

V 活用に 대한 建議

1. 水産資源 管理, 海洋資源 開發 等 經濟活動에 必要한 海況豫測에 活用
2. 正確한 海況豫報를 통한 效率的 沿岸管理
3. 海洋 生態係와 環境變化 豫測의 基礎資料 提供
4. 自然災害 豫報의 正確性 提高, 被害의 最小化
5. 海洋學 側面에서의 海洋防衛 戰略體制에 活用

SUMMARY

I Title

A study on the meso-scale warm eddy in the southwestern part of the East Sea

II Objectives and Significance of the Study

1. Significance

The East Sea has significant influence on the climate and environmental change in the Korean peninsula. The interaction between the Tsushima Current that is a tributary of the Kuroshio flowing into the East Sea through the Korea strait, the East Korean Warm Current, and the North Korean Cold Current gives rise to warm eddies in the sea of Ulleung Basin. These eddies are known to have significant influence on the variability of oceanographic conditions in the East Sea. However, no systematic study or observation on such mesoscale ocean variability has been done so far. The eddies not only make it hard to analyze and identify ocean currents, but also affect significantly on ocean climate changes, fisheries, and ocean protection. Hence the objective of this study is identify and analyze of the dynamical structure of the mesoscale ocean variabilities in the East Sea.

2. Goal

- a) Identification of the dynamical structure of the mesoscale ocean variability in the East Sea
- b) Establishment of warm eddy analysis sytem

- c) Establishment of a base system for better ocean prediction

III Scope of the Study

1. Collection of oceanographic data on the horizontal and vertical structure of warm eddies and currents through field observations(CTD, ADCP, current meter mooring)
2. Acquisition and analysis of obtained data such as water characteristics and ocean currents
3. Identification of the distribution of warm water mass, its movement and variability near Ulleung Basin through the analysis of existing data

IV Results of the Study

1. Observation of an anticyclonic warm eddy with diameter about 140 km at the depth of 340 m in the southwestern part of Ulleung Island in April 1993.
2. Observation of an anticyclonic warm eddy with diameter about 120 km at the depth of 280 m in the southwestern part of Ulleung Island in September 1993.
3. Identification and analysis of the internal structures of the eddy and high salinity, high temperature homogeneous water layer
4. Identification of the existence of warm streamer of width 50km at the edge of the eddy
5. Maximum water velocity and depth of the eddy
6. Identification and analysis of the moving path of the eddy

V Conclusions and Suggestions

1. Applications to better ocean prediction for economic activities in the sea such as fisheries and development of ocean resources
2. Efficient coastal management through more accurate ocean prediction
3. Supply basic data necessary for prediction of ocean environmental and ecosystem change
4. Enhancement of the accuracy in prediction to minimize possible damages from natural disasters
5. Application to marine protection strategy in the view of oceanography

目 次

요약문(국문)	3
요약문(영문)	5
그림목차	13
제 1 장 서론	15
제 1 절 동해남서해역의 일반적 해황	15
제 2 절 연구의 목표 및 방향	18
제 2 장 자료 및 방법	21
제 1 절 수은·염분 자료	21
제 2 절 해류관측	21
제 3 장 동해 난수성 소용돌이의 구조특성	23
제 1 절 1993년 4월의 난수성 소용돌이 관측성과	23
1. 수은분포	23
2. 염분분포	29
3. 밀도분포	33
4. 유속분포	38
제 2 절 1993년 9월의 난수성 소용돌이 관측성과	49
1. 수은분포	49
2. 염분분포	52
3. 밀도분포	58
4. 유속분포	58
제 4 장 요약 및 결론	69
참고문헌	71

CONTENTS

Summary(Korean)	3
Summary(English)	5
List of Figures	13
Chapter 1. Introduction	15
Section 1. General oceanographical condition in the southwestern part of the East Sea	15
Section 2. Objectives and goal of the study	18
Chapter 2. Data and Method	21
Section 1. Temperature and salinity data	21
Section 2. Current observation	21
Chapter 3. The structure characteristics of the anticyclonic warm eddy in the southwestern part of the East Sea	23
1. The observation of the anticyclonic warm eddy in April 1993	23
a. Distribution of temperature	23
b. Distribution of salinity	29
c. Distribution of density(σ_t)	33
d. Distribution of current velocity	38
2. The observation of the anticyclonic warm eddy in September 1993 ..	49
a. Distribution of temperature	49
b. Distribution of salinity	52
c. Distribution of density(σ_t)	58
d. Distribution of current velocity	58

Chapter IV. Conclusion	69
References	71

List of Figures

Figure	Page
1. Bottom topography of the East Sea	16
2. Locations of CTD, ADCP observation stations	24
3. Horizontal distributions of temperature at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993	25
4. Vertical distributions of temperature on section (a) E, and (b) N in April 1993	28
5. Vertical distributions of (a) temperature, and (b) salinity on section D in February 1993	30
6. Horizontal distributions of salinity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993	31
7. Vertical distributions of salinity on section (a) E, and (b) N in April 1993	34
8. Horizontal distributions of density(σ_t) at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993	35
9. Vertical distributions of density(σ_t) on section (a) E, and (b) N in April 1993	37
10. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993	39
11. Vertical distributions of current velocity in (a) east-west, and (b) north-south components on section E in April 1993	41
12. Vertical distributions of calculated geostrophic current using the data of KFRDA	43
13. Same as Fig. 11 except for section N	44
14. Vertical distributions of calculated geostrophic current on section (a) E, and (b) N in April 1993	45

15. Horizontal distributions of current at 10 m depth in February 1993	46
16. Same as Fig. 11 except for section D in February 1993	48
17. Horizontal distributions of temperature at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.	50
18. Vertical distributions of temperature on section (a) E, and (b) N in September 1993.	53
19. Horizontal distributions of salinity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.	54
20. Vertical distributions of salinity on section (a) E, and (b) N in September 1993.	57
21. Horizontal distributions of density(σ_t) at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.	59
22. Vertical distributions of density(σ_t) on section (a) E, and (b) N in September 1993.	61
23. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.	62
24. Vertical distributions of current velocity in (a) east-west, and (b) north-south components on section E in September 1993.	65
25. Same as Fig. 11 except for section N.	66
26. Vertical distributions of calculated geostrophic current on section (a) E, and (b) N in September 1993.	67

제 1 장 서 론

본 연구는 정부출연연구과제의 대형화 정책에 의거해 “한국근해 해양환경도 작성 연구”에 흡수되어 연구사업이 조기에 종결되었던 관계로, 연구보고서는 중간단계까지의 연구결과를 수록하였습니다.

제 1 절 東海 南西海域의 一般的 海況

東海는 北西太平洋의 緣海(marginal sea)로서 일본, 러시아 그리고 한국 등의 국가로 둘러 싸여 있다. 동해의 海水는 남쪽의 大韓海峽을 통하여 東中國海 및 黃海와 연결되어 있고, 동쪽으로는 쓰가루해협을 통하여 태평양과 연결되며, 북쪽으로는 소야, 타타르해협을 통하여 오츠크海와 연결되어 있다. 동해의 전체면적은 약 100만 km^2 이고 평균수심은 약 1,361 m이다(그림 1). 또한 동해는 대략적으로 橢圓形의 모습을 보이는 데 長軸의 방향은 남서에서 북동방향을 나타내고 있다. 동해는 한반도의 기상과 일반 자연환경에 많은 영향을 주고 있으며 대한해협을 통해 유입되는 쿠로시오의 지류인 쓰시마난류, 東寒暖流 및 북동쪽의 北韓寒流가 동해의 海況變動에 중요한 요인으로 작용하고 있다.

동해 남서해역은 대한해협 西水道를 거쳐 북위 38° 부근과 鬱陵島 주위에 이르는 해역을 지칭한다. 이해역의 해황은 沿岸水와 外海水의 분포에 따라 크게 좌우되고 있다. 대한해협 서수도 北端에서 浦項에 이르는 해역은 수심이 완만하게 깊어지나 浦項 외해역과 북부해역에서는 동서로 발달된 大陸斜面으로 인하여 수심이 남북방향으로 급격히 변하여 2,000 m 이상이 된다. 대한해협은 황해, 동중국해 및 남해의 여러 해수가 혼합되어 동해로 유입되는 통로이며 4 개(황해 냉수, 한국연안 및 중국대륙 연안수, 쓰시마난류수, 장강의 淡水 등) 이상의 주요 水塊가 존재하는 것으로 알려져 있으며 시·공간적으로 복잡한 변동을 보이고 있다(Lie 1984; Byun and Chang 1988). 이러한 다양한 수괴가 대한해협을 통과하여 동해로 유입되어 수괴 상호간에 혼합이 일어나며 海洋前線이 형성되어 해류의 형태에도 상당한 변화를 가져오고 있

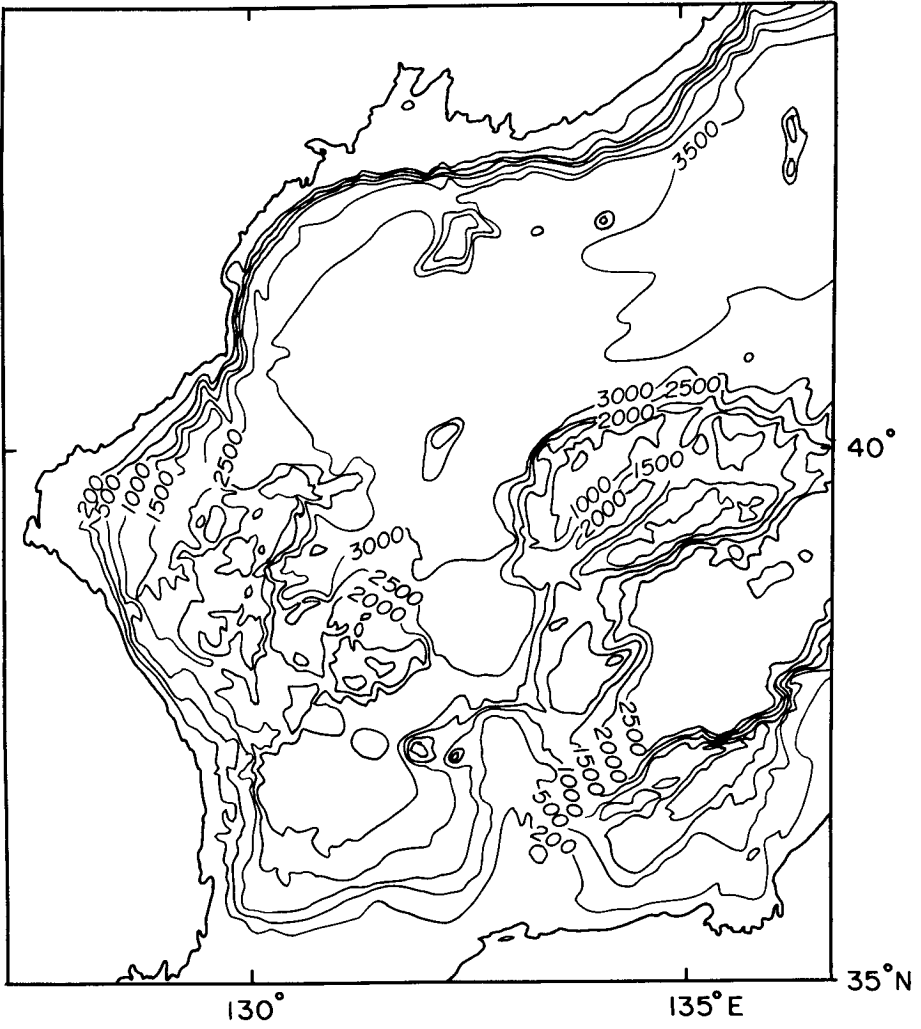


Fig. 1. Bottom topography of the East Sea.

다. 특히 동해 중부해역인 북위 39° 부근은 暖流와 寒流가 교차하여 極前線이 형성되고 이 극전선 주위에 많은 소용돌이(Eddy)가 존재하고 있다.

동해 남서해역은 몬순기후의 영향으로 해수의 물리특성인 水溫과 鹽分이 계절에 따라 심하게 바뀐다. 海面水溫은 여름에 최고 27℃까지 상승하나 겨울에는 11℃까지 하강하여 15℃ 이상의 年較差를 보인다. 일반적으로 여름철에는 집중된 降水로 표층염분이 최소가 되나(32.0 psu), 湧水期인 겨울철에는 최대가 된다(34.5 psu). 또한 수온과 염분은 수심에 따라 변화하는 데 여름철에는 강한 太陽輻射熱 때문에 표층수온이 가장 높고 저층으로 갈수록 낮아진다. 따라서 해수의 密度가 수심에 따라 증가하는 成層構造를 갖는다. 반면에 겨울철에는 寒冷한 北西季節風으로 표층해수가 열을 빼앗겨 온도가 하강하고 세찬 바람이 물을 뒤섞는 역할을 하여 상층과 하층의 온도차가 적은 垂直的으로 均質한 混合層구조를 갖는다.

동해 남서해역에는 크게 두 가지의 해류가 있다. 즉, 동중국해에서 형성되어 대한해협을 통하여 동해로 유입하는 쓰시마난류와 겨울-초봄에 동해북부에서 형성되어 주로 한반도 연안을 따라 남하하는 북한한류가 이에 해당된다. 이 두 해류는 형성된 해역이 서로 달라 해류들이 수반하는 해수의 물리특성이 매우 다르다. 쓰시마난류와 동한난류는 高溫·高鹽의 해수를, 북한한류는 低溫·低鹽이면서 산소가 많이 용해된 해수를 수송한다. 쓰시마난류와 동한난류는 대한해협 서수도를 통과한 후 동해안을 따라 북상하다가 묵호-주문진해역에서 울릉도쪽으로 방향을 바꾼다. 가을과 겨울 사이에 때로는 永興灣까지 동한난류가 북상하기도 한다. 동해 남서해역에서 북한한류의 세력은 동한난류에 비해 매우 약하나 증층과 저층에 미치는 영향은 결코 작지 않다. 일례로 한여름에 대한해협 海底의 골에 10℃ 이하의 冷水가 빈번히 나타나는 데 이는 북한한류에 의해 남으로 수송된 해수가 주위의 해수와 혼합되어 나타나는 것으로 밝혀지고 있다. 봄과 여름에 蔚山-甘浦 연안해역에서는 표층수온이 외해수보다 낮은 湧昇현상이 빈번히 발생하는 데 용승이 일어나는 가장자리에는 수온전선이 형성되고 전선을 따라 대단히 강한 해류가 발생한다.

人工衛星에서 관측한 표층 수온자료에 의하면 동해 남서해역은 많은 수의 暖水性 또는 寒水性 소용돌이가 존재하고 있으며 주로 39° N 부근에 형성되는 極前線 주위와 울릉도 남쪽 해역에서 이러한 소용돌이의 존재를 확인할 수 있다. 소용돌이는 해류의 해석 및 분석을 어렵게 만드는 동시에 海洋氣象, 水産資源 및 海洋防衛 등의 여

러 분야에 많은 영향을 미치므로 동해 남서해역의 해류의 구조를 파악하기 위해서는 이러한 소용돌이에 대한 고려가 필수적이다.

동해 남서해역에서 밀물(창조류)은 서쪽으로, 썰물(낙조류)은 동쪽으로 흐른다. 일반적으로 동해의 潮差는 매우 적어 0.3 m 내외에 불과하고 하루 한번 高潮와 低潮가 일어나는 때가 많으며 남해로 가면서 조차는 점차 커져 釜山에서 1.2 m에 달하고 규칙적으로 고조와 저조가 하루 2회씩 나타난다. 부산근해에서는 고조 후 2-4 시경 북동쪽으로 썰물이 최대 약 50 - 100 cm/s로 흐르고 저조경에 방향이 바뀌어 저조 후 2-4 시경에 남서쪽으로 밀물이 최대 50 - 75 cm/s로 흐른다. 따라서 실제의 유속은 海流와 潮流가 합해지므로 고조 후 3 시 전후에 북동류가 표층에서 약 150 cm/s에 달하기도 한다. 반대로 저조 후 약 3 시 전후에는 매우 느린 남서류가 흐른다. 조석의 중심이 대한해협 북쪽에 위치하기 때문에 滿潮가 되는 시간은 북쪽에서 남쪽보다 빠르게 나타난다. 이번의 연구에서는 조사해역을 포항 북쪽의 해역을 대상으로 하였기 때문에 조류에 의한 영향은 별로 크지 않을 것으로 판단된다.

제 2 절 研究의 目標 및 方向

東韓暖流와 北韓寒流가 만나는 동해 남서해역 울릉도 부근에서 暖水塊의 존재는 지금까지 단편적으로 종종 관측되었다. 그러나 울릉도 부근 해역의 난수괴가 소용돌이인가에 대해서 명확히 밝혀준 관측은 지금까지 드물었다. 즉 난수괴가 난수성 소용돌이라면 時計方向으로 回轉하는 流速을 가져야 한다. 그러나 난수괴가 회전한다는 것을 나타내는 유속관측은 1991년까지는 없었다. 또한 고온·고염의 소용돌이는 쓰시마난류로부터 분리되어 형성될 수 밖에 없는데, 분리된 후의 移動樣狀 및 構造變化에 대해서도 명확히 밝혀져 있지 않다.

An(1994)은 1967~1986년의 國立水産振興院 자료를 사용하여 울릉도 부근의 해역에서 난수괴의 존재 및 이동방향과 속도에 대해서 서술하였다. 그 결과 동해 남서해역에는 거의 매년 1~2 개씩의 난수성 소용돌이가 존재하고 있으며, 북쪽과 서쪽 또는 남쪽으로 이동한다고 밝혔다. 그러나 난센관측에 의한 자료를 이용하였기 때문에

상세한 내부구조를 알 수 없었으며, 또한 유속관측이 없었던 탓으로 소용돌이의 회전에 대한 상세한 내용이 결여되어 있다.

김(1991)은 동해에서 1989년에 관측한 CTD 자료를 사용하여 울릉도 주변 中層均質水의 수직구조 및 시간변화에 대해 상세하게 언급하였다. 그는 10℃ 중층균질수를 난수괴로 보았으나 소용돌이와의 관계에 대해서는 명확한 언급이 없었다. 최근에 Isoda와 Saitoh(1993)는 인공위성 영상자료와 국립수산진흥원의 자료를 분석하여 한국 東岸부근에서 쓰시마난류(동한난류)로부터 소용돌이로 貫入하는 해수에 대하여 假說을 제시하였다. 그는 자신의 가설을 입증하기 위하여는 소용돌이의 유속구조가 자세하게 밝혀져야 한다고 보고하였다.

이와같이 울릉도 주변의 난수성 소용돌이의 水溫·鹽分·流速의 상세한 구조 및 변화를 정확한 관측을 토대로 하여 분석하는 것은 중요한 일이다. 동해 난수성 소용돌이는 동해의 해황변동에 매우 중요한 요인으로 작용하고 있으므로 소용돌이의 상세한 구조 및 변화과정을 파악하고 이동경로 등을 연구하는 것은 해양학 자체의 발전 뿐만 아니라 기후에의 영향, 수산 및 국가방위에도 필요한 연구이다.

이러한 필요성에 의하여 한국해양연구소의 동해중규모 해황분석 연구팀은 1992년 8월 27일부터 난수성 소용돌이에 대한 既存資料의 조사와 더불어 현장 관측계획을 수립하여 1993년 4월 19 - 21일 사이에 포항과 울릉도사이의 해역에서 난수성 소용돌이에 대한 CTD 및 流速觀測(ADCP 및 海流計 mooring)을 실시하였다. 또한 1992년 3월과 6월 東草와 울릉도 사이의 해역에서 관측된 소용돌이에 관한 구조 및 변화를 분석하고 토의하였다. 이 研究結果의 適用分野는 소용돌이의 구조와 변동성뿐만 아니라 여러 분야의 해양관련 연구에 널리 應用될 수 있을 것으로 사료된다.

울릉도 부근에서 발견되는 난수성 소용돌이는 동한난류가 蛇行하는 도중에 振幅이 커졌을 때 분리되어 형성된다고 생각한다. 그러나 지금까지 쓰시마난류(또는 동한난류)로부터 소용돌이가 분리되는 양상을 관측한 자료는 없다. 추후 이러한 소용돌이의 形成過程을 입증할 현장관측이 실시되어야 할 것으로 생각한다. 대상해역은 동한난류가 사행하는 蔚山과 竹邊사이의 해역이 적합하다고 사료된다.

제 2 장 자료 및 방법

제 1 절 水溫·鹽分 資料

1993년 4월과 9월에 暖水性 소용돌이의 特性을 파악하기 위하여 CTD 시스템 (Mark IIIB, EG & G)을 이용하여 수온 및 염분 관측을 실시하였다. 그림 2에 觀測 定点의 위치를 나타내었다. 관측자료는 1차적으로 물리적 단위인 水溫, 電氣傳導度, 壓力으로 換算한 후 국제연합 교육과학문화기구(UNESCO)에서 추천한 공식으로 鹽分과 密度를 계산하고 每 1 m 간격의 수온, 염분, 밀도의 대표치를 구하였다. 이러한 자료를 수온, 염분 및 밀도에 대한 각 定線의 鉛直斷面圖와 수심 10 m, 50 m, 100 m, 200 m의 水平斷面圖를 분석하였다.

또한 暖水塊의 시·공간적 변동성을 파악하기 위하여 隣接海域에서 1993년 2월, 4월 및 9월에 관측된 海洋特性資料를 분석하였다.

제 2 절 海流觀測

1993년 4월과 9월의 수온·염분 관측정점과 동일한 위치에서 超音波式 流速計 (ADCP : Acoustic Doppler Current Profilers, RD-SC0150)를 이용하여 해류를 관측하였다. ADCP 유속계는 초음파를 이용하여 정점에서 각 층별 流速 및 流向을 동시에 원격 관측하는 유속계이다. 이 장비는 일정한 주파수(150 kHz)의 音源을 電氣·音響 變換器를 통하여 水中으로 발사하고 수중의 微生物이나 微粒子의 반사체로부터 되 돌아오는 음파의 周波數 變移(frequency shift)를 이용하여 해류를 간접적으로 계산한다. 이러한 원리를 적용하여 표층에서 일정수심까지 여러층의 유속을 동시에 측정할 수 있기 때문에 해류의 수직구조와 공간적인 분포형태를 파악하기 쉽다.

관측은 각 정점에서 停船하여 유속계를 수심 5 m 층에 투하하고 1 초 간격으로 음원을 수중으로 발사시켜 30 초동안 유속·유향 자료를 평균하여 1 개의 수직분포 자



료를 얻고, 10 분동안 관측을 계속하여 20 개 이상의 자료를 얻었다. 조사 정점의 수심이 150 kHz 음원이 도달할 수 있는 350 m 보다 얕은 경우에는 Bottom tracking 방법으로 측정하고 그 이상의 깊은 수심에서는 Ship tracking 방법으로 측정하였다. Bottom tracking 방법은 조사선의 항해속도 만큼 해저가 이동한 것으로 가정한 계산 방법이고, Ship tracking 방법은 항해장치로부터 조사선의 漂流속도를 관측자료에서 제거하여 계산하는 방법이나, 位置測定裝置(GPS)에 나타난 위치가 計器의 誤差範圍內에 있기 때문에 표류속도를 계산하여 제거하기는 어려운 점이 있다. 따라서 동해에서 수심 250 m에서 300 m사이에는 해류의 유속이 없는 것으로 가정하고, 그 사이의 해류를 평균하여 선박의 표류속도를 구한 후, 絶對流速으로 환산하였다. 관측 자료의 수직 구조는 ADCP를 10 m 수심에 투하한 후 8 m 간격으로 Bottom tracking 방법이 가능한 淺海域에서는 거의 海底까지, 그 이상의 深海域에서는 약 350 m까지의 자료가 수집되었다. 자료 처리는 앞에서 설명한 바와 같이 10 분동안에 20개의 자료(ensemble)를 관측한 다음 각 자료에서 信賴度가 60% 이상인 자료만을 취합하고, 동일 수심의 자료를 이동평균(running mean)하여 오차를 최소화하고 다시 평균값을 취하여 이 수심의 대표유속으로 하였다.

제 3 장 동해 난수성 소용돌이의 구조특성

제 1 절 1993년 4월의 暖水性 소용돌이 觀測成果

난수성 소용돌이의 구조를 조사하기 위하여 동해 남서해역에서 1993년 4월 19일부터 4월 21일까지 3일간에 걸쳐서 南北 및 東西方向으로 소용돌이를 橫斷하면서 수온·염분 및 유속의 관측을 실시하였다(그림 2). 난수성 소용돌이의 조사를 위한 관측 시기 직전인 4월 3일부터 14일까지의 기간에 인접해역에서 CTD 및 ADCP 관측에 의한 海洋特性조사가 있었다. 두 시기의 관측이 시간적으로 가깝고 공간적으로도 상당히 인접해 있으므로 수평분포의 분석을 위한 평면도 작성에는 두 관측자료를 도면에 함께 나타내었다.

1. 수온분포

가. 수평분포

표층에서 수온은 9~15°C의 분포를 보이고 있으며, 소용돌이의 형태가 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 수심 100 m와 200 m 층에서는 포항과 동해 및 울릉도 사이의 해역에서 圓形의 등온선이 高溫의 해수를 중심으로 분포하여 소용돌이의 존재를 나타낸다(그림 3). 표층에서는 오히려 소용돌이의 중심에는 12°C 이하의 低溫層이 있었으며 가장자리를 따라서는 저온층을 중심으로 12°C 이상(34.5 psu)의 高溫層이 분포하고 있다. 수심 50 m 층에서는 소용돌이의 서쪽에서 북동쪽으로 11°C 이상의 고온층이 뻗어나가고 있다. 이러한 고온층은 두달 전인 2월의 관측에서는 나타나지 않았다. 이것은 3월 이후에 동한난류의 복상에 따라 고온(고염)의 해수가 좁은 띠 모양으로 남서쪽으로부터 공급되어 소용돌이의 가장자리를 따라 분포하고 있는 것이다. 표층에서 이러한 고온·고염의 warm streamer는 인공위성의 적외선사진에 잘 나타나기 때문에 위성자료를 사용하여 소용돌이의 위치를 파악할 경우에 중요한 역할을 한다.

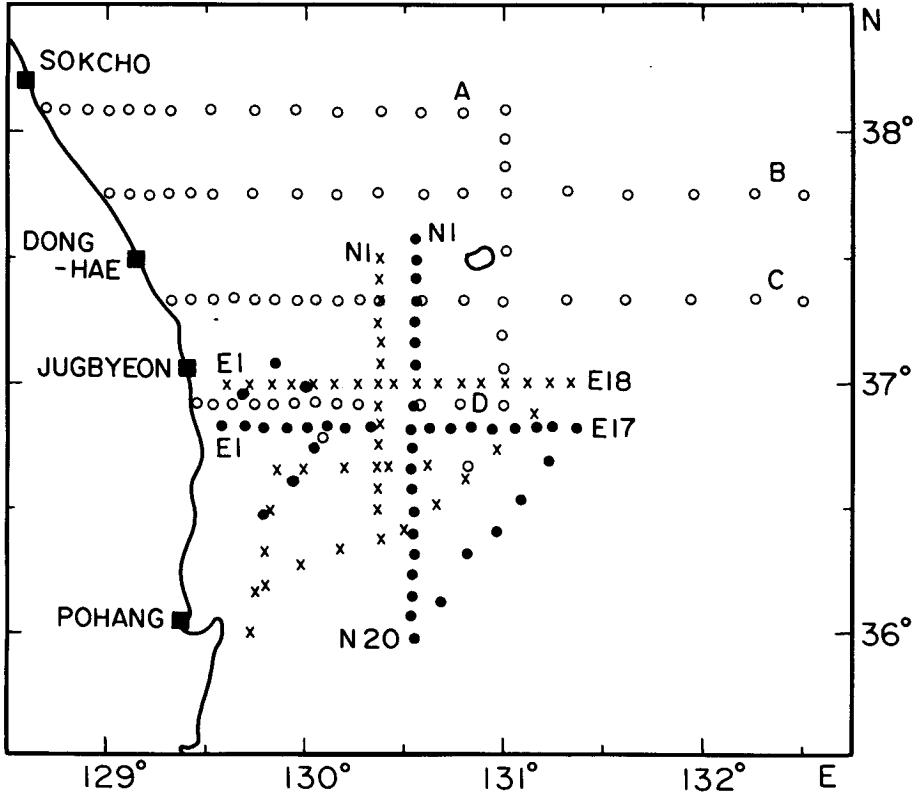


Fig. 2. Locations of CTD, ADCP observation stations. Open circles(O) indicate the locations observed in February, April and September 1993, Close circles(●) in April 1993 and crosses(x) in September 1993.

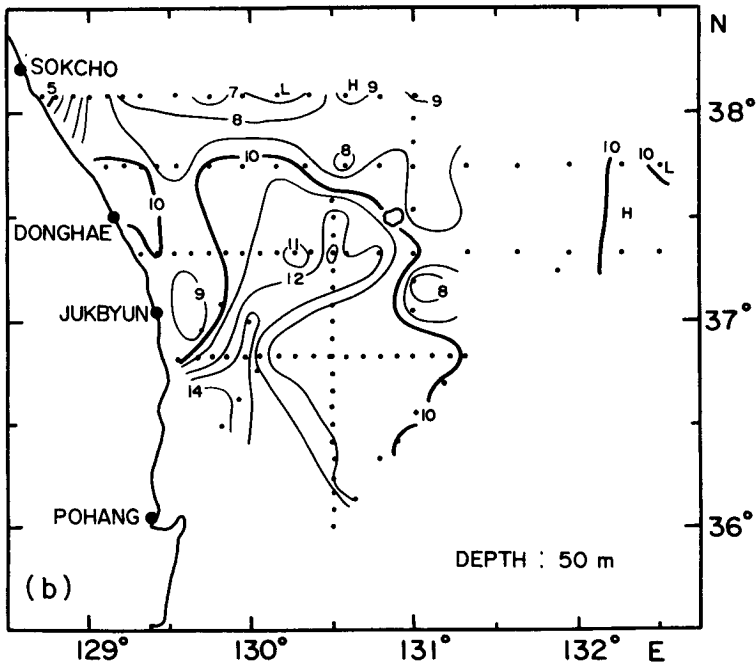
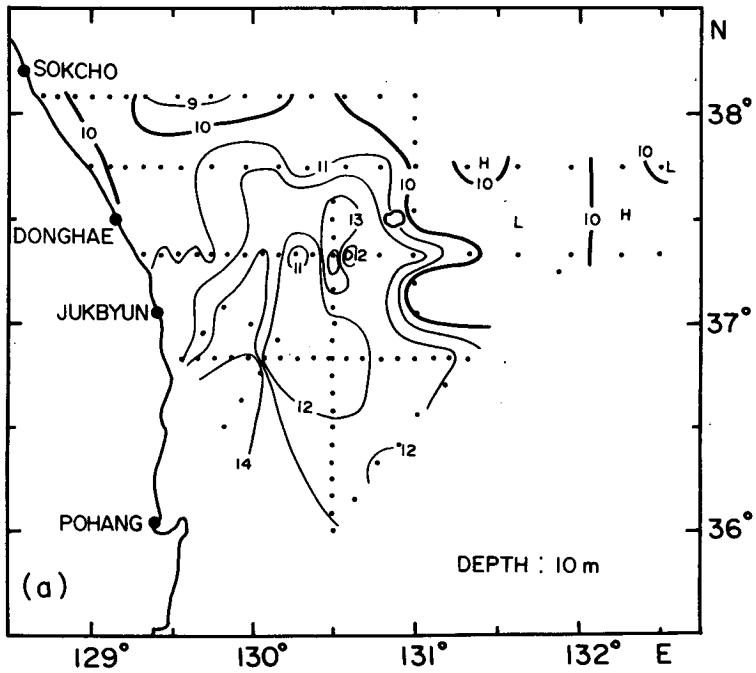


Fig. 3. Horizontal distributions of temperature at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993.

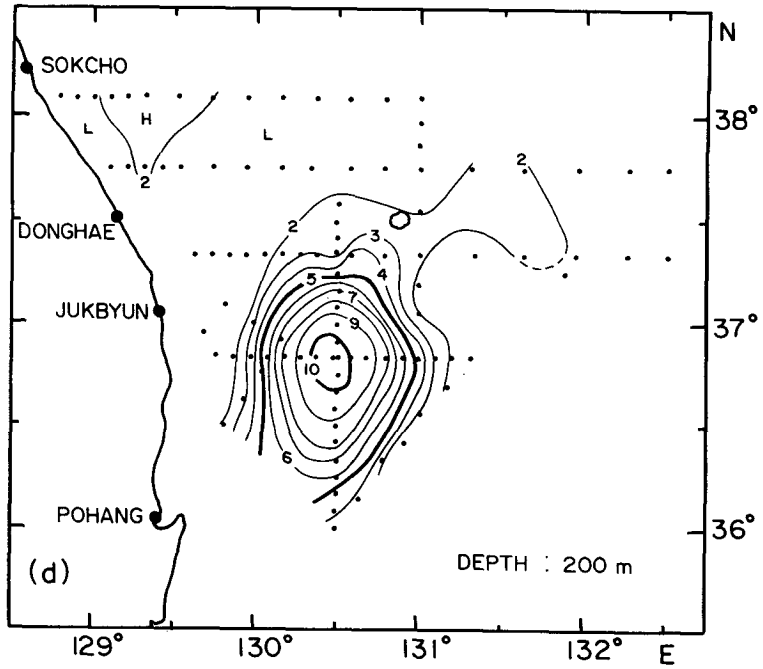
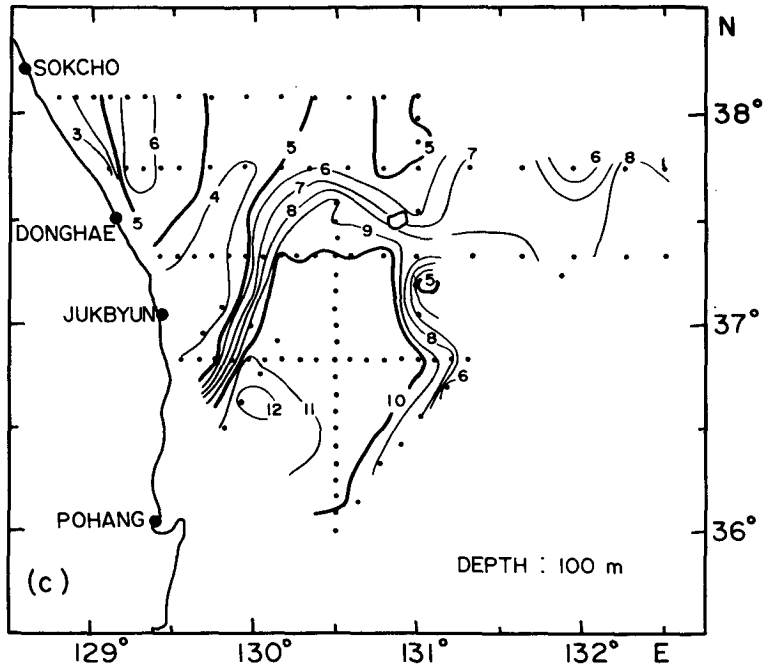


Fig. 3. Continued.

동한난류로부터 분리된 이후 소용돌이는 密度形成說(Isostasy) 때문에 그 구조가 표층에 나타나지 않을 때가 많다. 즉 수심 100~200 m 이내의 상층에서는 소용돌이의 중심이 低溫·低鹽의 해수로 구성되어 있는 경우가 많기 때문에, 표층의 수온분포만으로 볼때는 소용돌이의 존재가 뚜렷이 나타나지 않을 수 있다. 이러한 경우에 소용돌이의 가장자리에 時計方向으로 warm streamer가 분포하고 있으면 표층의 수온분포만으로도 소용돌이의 위치를 알 수 있다. 이 warm streamer가 존재하지 않았던 2월의 인공위성 사진에서는 소용돌이의 위치를 정확히 파악할 수 없었다.

수심 50 m에서는 竹邊과 蔚陵島 사이의 해역에서 소용돌이의 형태가 약간 나타난다. 특히 죽변 남쪽 해상으로부터 울릉도쪽을 향하는 북동방향으로 고온(고염)수가 확장되어, 동한난류로부터 공급된 11°C(염분은 34.3 psu) 이상의 해수가 warm streamer의 형태로 소용돌이의 가장자리를 따라 돌고 있는 양상을 보여주고 있다. 수심 100 m에서는 울릉도 남서해역에서 10°C 등온층이 동서방향 100 km, 남북방향으로 140 km의 매우 넓은 해역에 걸쳐 분포하고 있으며 그 주위에 6~10°C의 등온선이 분포하여 前線을 형성하고 있다. 수심 100 m에서 전선의 형태를 기준으로 본 소용돌이의 크기는 남북방향이 약 170 km, 동서방향이 약 120 km였다. 수심 200 m에서 온도분포는 소용돌이의 중심에서 10°C 이상의 고온을 보이면서 同心圓 모양으로 나타나 이 소용돌이가 동한난류로부터 분리되어 있다는 것을 알 수 있다.

나. 수직분포

동서단면과 남북단면에서 렌즈 모양의 수온분포가 소용돌이의 존재를 나타낸다(그림 4). 이 소용돌이는 내부에 두터운 10°C 등온층이 있는 것이 특징인데, 34.2 psu의 등염분층에 대응한다. 이 10°C 등온층은 東西斷面에서는 중심인 정점 E10에서 최대 두께가 나타나며, 수심 25~215 m 사이에 분포하여 190 m의 두께를 보이고 있다. 南北斷面에서는 정점 N11에서 가장 깊은 10°C 등온층이 나타나는데 그 두께는 210 m 정도이다. 10°C 등온층이 갖는 수평방향의 최대폭은 100 m 수심에서 나타나며 동서방향으로 약 90 km, 남북방향으로는 약 140 km 길이의 폭을 갖는다. 이러한 10°C 등온층은 越冬을 한 난수성 소용돌이에서 자주 볼 수 있는 구조로 1992년 3월 관측에서 발견한 소용돌이 내부에도 존재했다. 쿠로시오나 쓰시마난류로부터 분리된 후 거

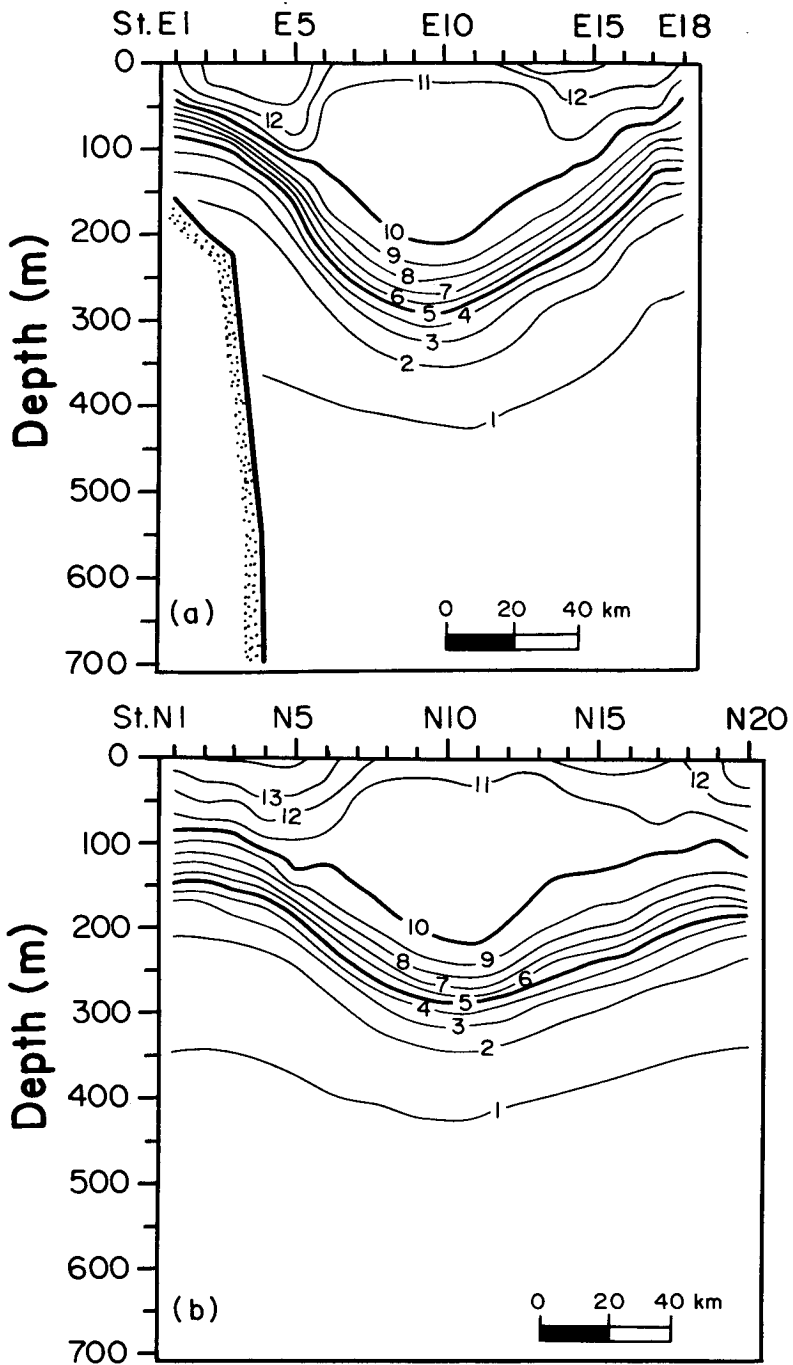


Fig. 4. Vertical distributions of temperature on section (a) E, and (b) N in April 1993.

울을 지나지 않은 난수성 소용돌이는 이와 같이 낮은 온도의 두터운 등온층이 나타나지 않고, 분리되기 전의 쿠로시오나 쓰시마난류가 보유한 10℃ 이상의 고온수가 존재하는 성층구조를 갖는다. 겨울을 지나는 동안에 난수성 소용돌이는 대기 쪽으로 열을 방출함으로써 냉각되면서 對流에 의하여 수심 200 m 이내의 상층에 두터운 등온층이 형성된다. 10℃ 부근에서 형성되는 두터운 등온층은 쿠로시오해역에서는 약 400 m의 두께를 갖고 있으며(Tomosada, 1978; Shin et al., 1993), 동해 남서해역에서는 약 200 m의 두께를 갖는다(그림 4; 김, 1991). 이러한 소용돌이 내부 등온층의 온도와 두께차이는 소용돌이가 越冬하는 해역에서 겨울의 大氣溫度와 바람의 세기에 따라 결정된다고 생각된다. 겨울의 대기온도가 낮고 바람이 강할 수록 낮은 온도에서 두터운 등온층이 형성될 것이다.

이 소용돌이는 2월과 3월사이 36° 50' N 線의 관측에서도 일부가 나타났다. 그 당시는 관측해역이 일부 해역에 국한되었기 때문에 소용돌이인지 아니면 동한난류의 일부분인지 명확하지 않았다. 3월 4일에 관측된 정선 D(36° 50' N)의 東西斷面構造에 의하면 수심 200 m 이내의 상층에 11℃의 등온층이 수심 약 200 m까지 존재한다(그림 5a). 3월 초에 존재하였던 이러한 형태의 11℃ 등온층이 4월 중순에 나타나지 않는 것은 3월까지의 소용돌이의 내부에서 냉각과 대류과정이 일어나고 있음을 추정할 수 있다. 10℃ 등온층은 3월에는 해수면부터 존재하지만, 4월 이후에는 태양열에 의해 표층이 가열되어 표층에 또 다른 11℃ 이상의 고온층이 생기기 시작한다. 또한 4월 이후 동한난류의 북상에 따라 동한난류로부터 고온·고염수가 warm streamer의 형태로 소용돌이의 내부로 유입되면서 소용돌이의 가장자리를 따라 시계방향으로 회전한다.

2. 염분분포

가. 수평분포

표층에서 수심 100 m까지는 소용돌이의 중심에서 저염분층이 나타나고, 소용돌이의 가장자리를 따라서는 고염분층이 나타나는 warm streamer의 존재를 보여준다(그림 6). 수심 200 m 층에서는 소용돌이 중심에 34.2 psu 이상의 고염분층이 존재하여 난수성 소용돌이의 특징인 고온·고염을 나타내고 있다.

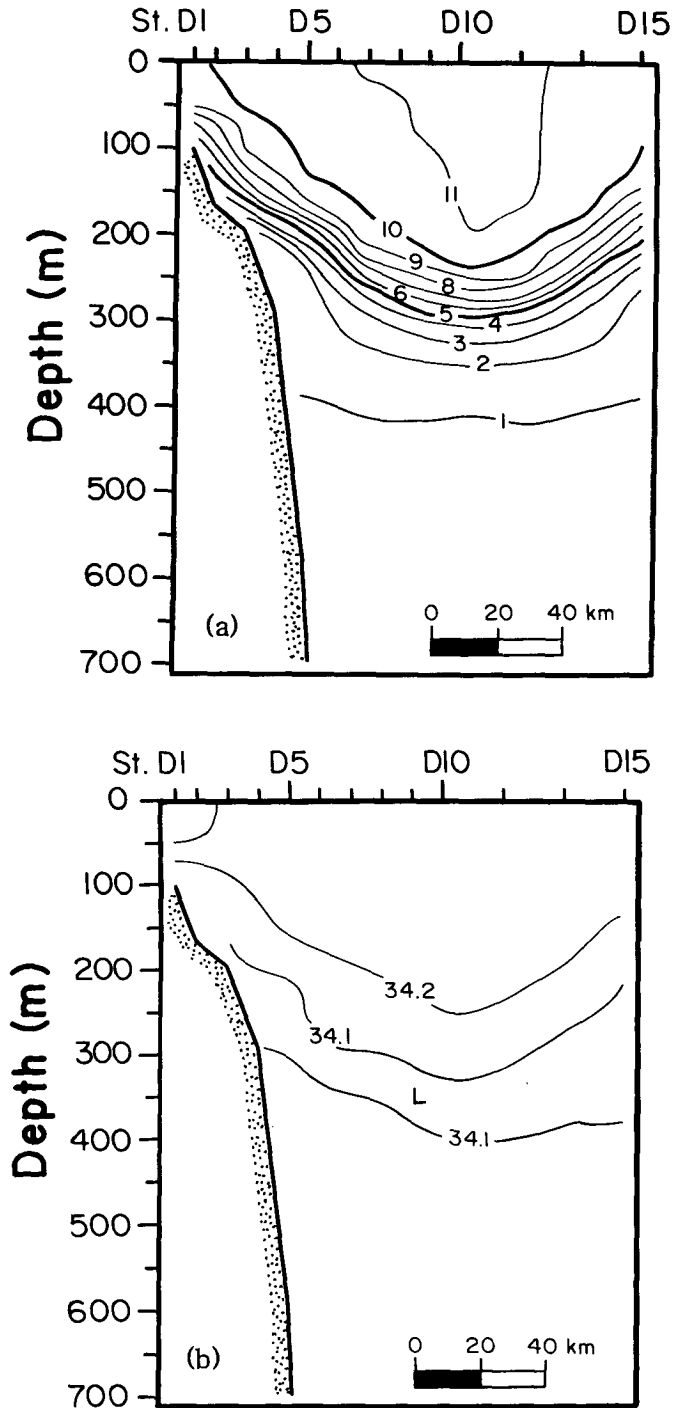


Fig. 5. Vertical distributions of (a) temperature, and (b) salinity on section D in February 1993.

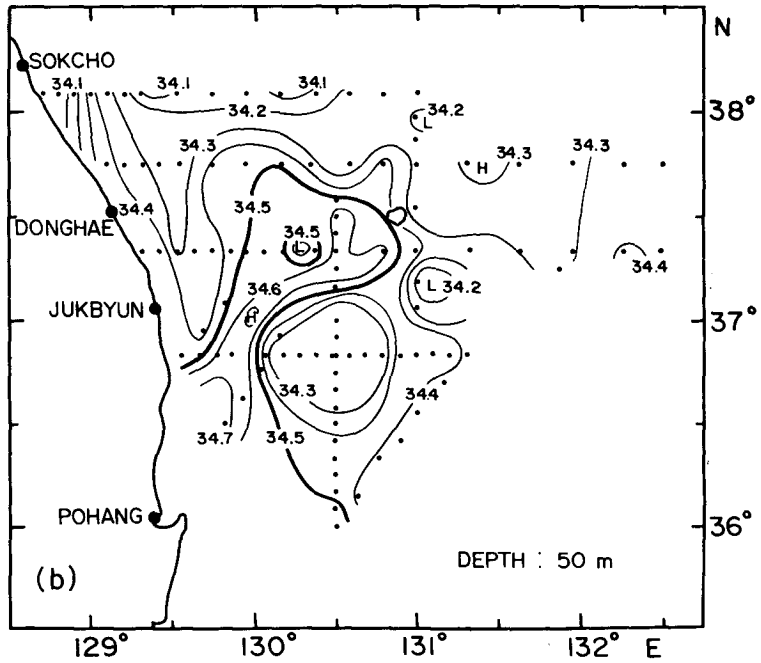
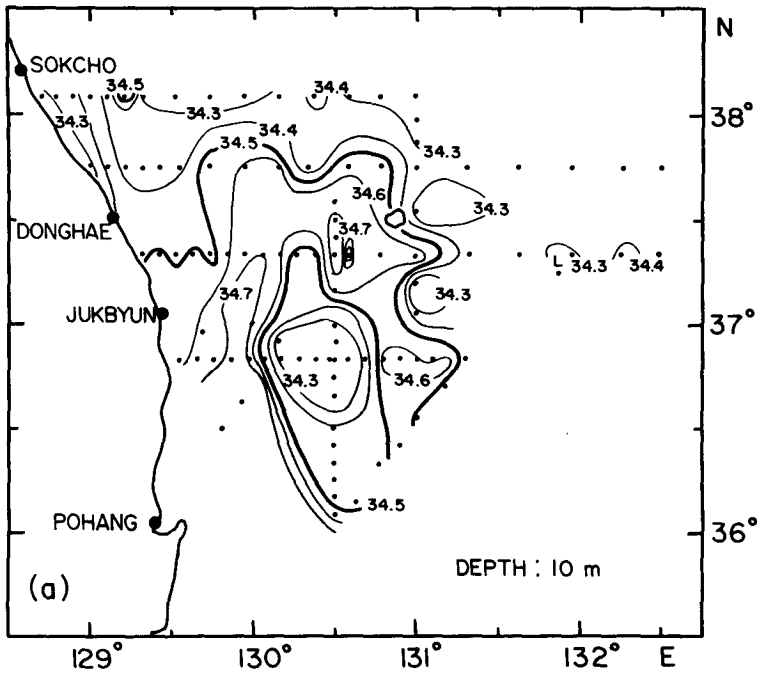


Fig. 6. Horizontal distributions of salinity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993.

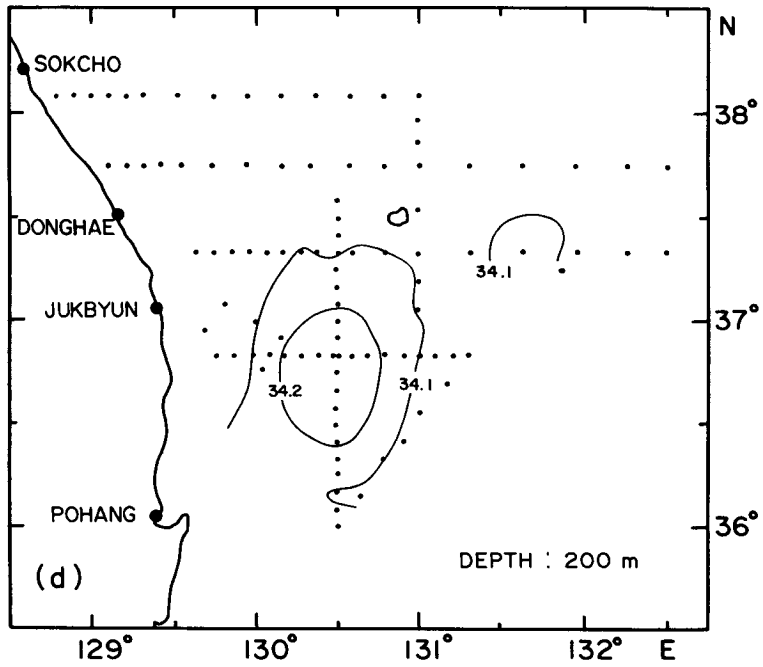
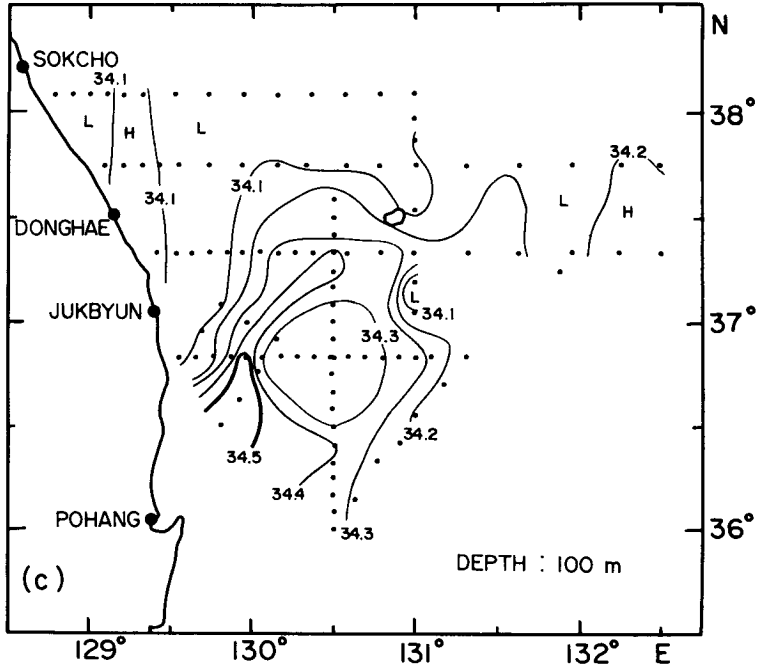


Fig. 6. Continued.

나. 수직분포

동서단면과 남북단면에서 소용돌이의 중심에 34.2 psu의 등염분층이 최대수심 약 250 m까지 존재하여 10℃ 등온층에 해당하는 분포를 나타내고 있다(그림 7). 난수성 소용돌이가 동한난류로부터 분리되어 형성된 직후에는 34.3 psu 이상의 고염분수도 내포하고 있었을 것으로 생각된다. 겨울을 지나면서 수개월동안 對流에 의해 상하층이 혼합되면서 상층에 34.2~34.3 psu의 均質層이 형성된 것으로 사료된다. 그 밑에는 34.1 psu 이하의 저염분층이 수심 300~400 m 사이에서 약 100 m의 두께로 분포하고 있다. 34.1 psu 이하, 수온 1~3℃인 염분최소층은 상층의 高溫·高鹽의 해수와 하층의 東海固有水 사이의 경계를 이루기 때문에 염분최소값이 나타나는 깊이를 소용돌이의 수심으로 정의하였을 때, 이 소용돌이의 수심은 최대 약 335 m 정도이다.

1993년 4월에는 11~14℃, 34.30~34.73 psu의 고온·고염의 warm streamer가 약 45~55 km의 폭으로 소용돌이의 가장자리를 따라 회전하면서 수심 약 150 m까지 존재하고 있었다. 이러한 warm streamer는 3월에 관측된 소용돌이에서는 나타나지 않았다(그림 5b).

3. 밀도분포

가. 수평분포

수심 100 m 이내의 상층에서 밀도의 분포는 소용돌이의 남쪽과 남서쪽에서 작은 값이 나타나는데, 이것은 수온이 상대적으로 높은 동한난류의 영향을 나타낸다(그림 8). 수심 200 m 층에서는 고온수의 영향으로 소용돌이의 내부에 밀도가 작은 값이 보였다.

나. 수직분포

소용돌이의 중심에 오목한 형태의 低密度分布가 나타나고 있으며, 내부에 26.5 이하의 等密度層이 두텁게 존재하고 있었다(그림 9). 이 등밀도층은 10℃, 34.2 psu의 균질층에 해당되는 밀도분포를 나타낸다. 소용돌이의 가장자리에 위치하는 warm streamer의 존재를 나타내는 밀도분포는 뚜렷하지 않다.

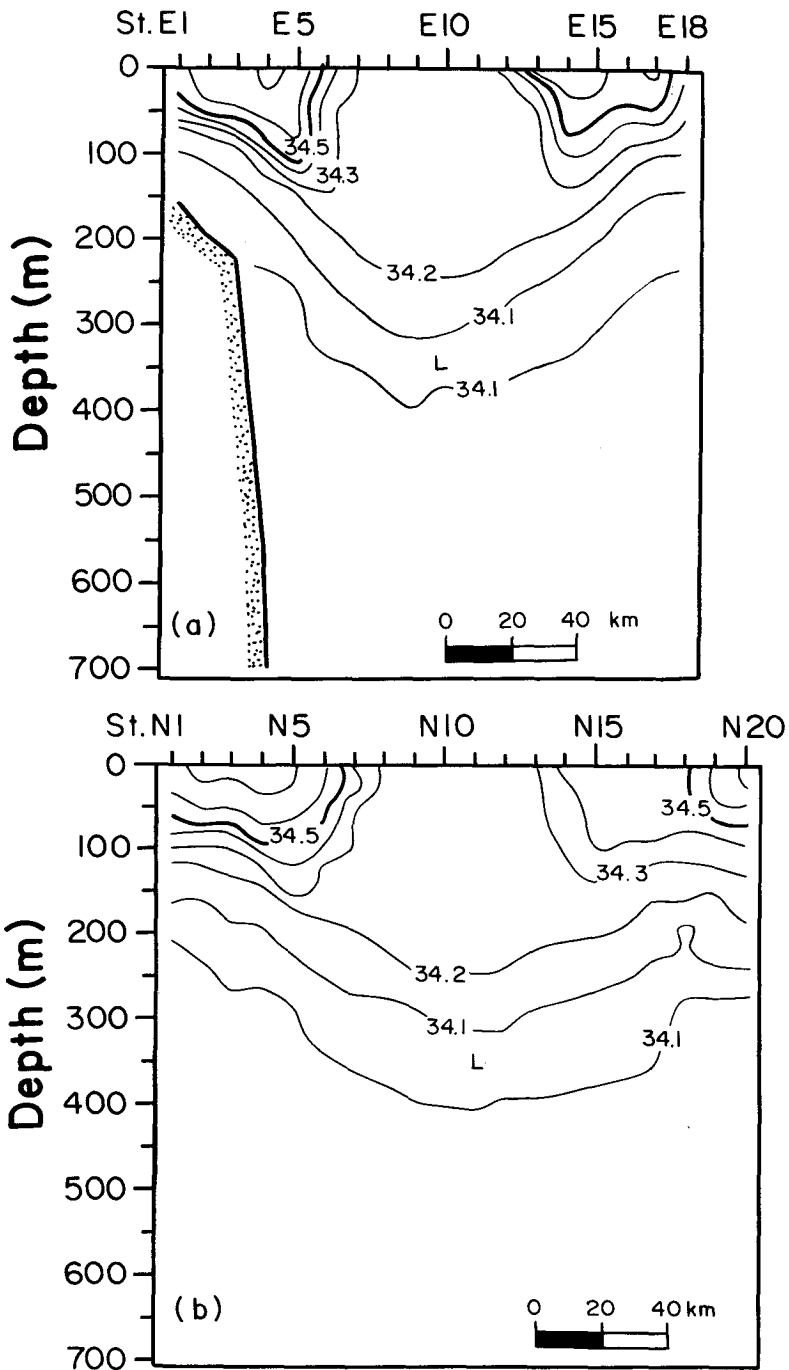


Fig. 7. Vertical distributions of salinity on section (a) E, and (b) N in April 1993.

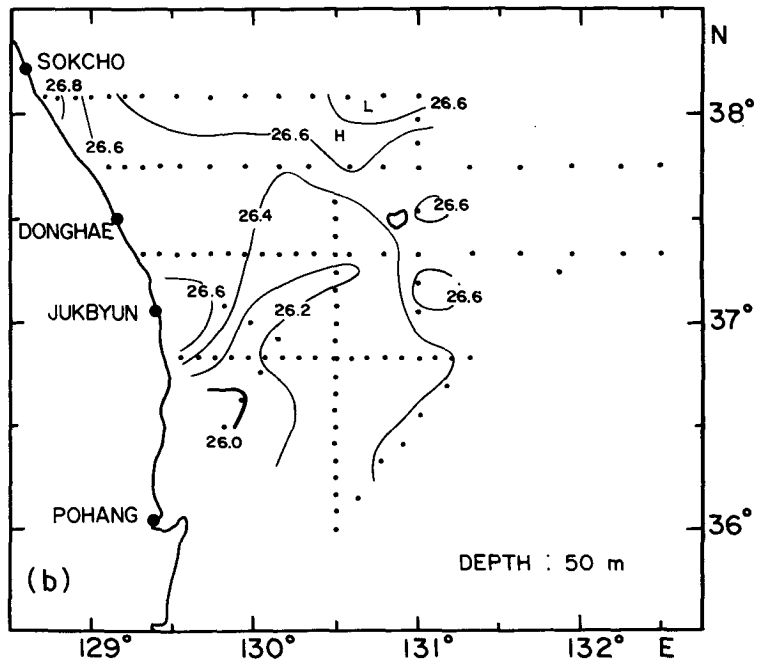
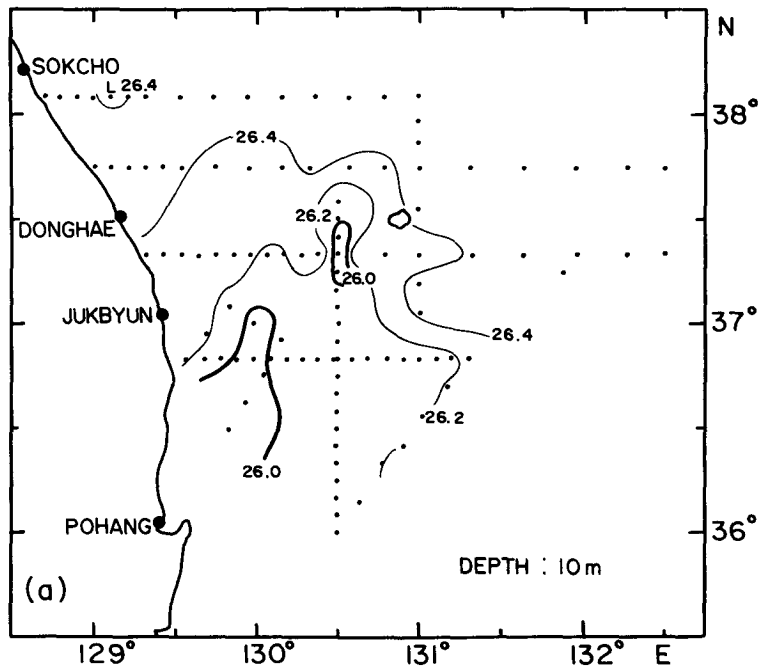


Fig. 8. Horizontal distributions of density(σ_t) at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993.

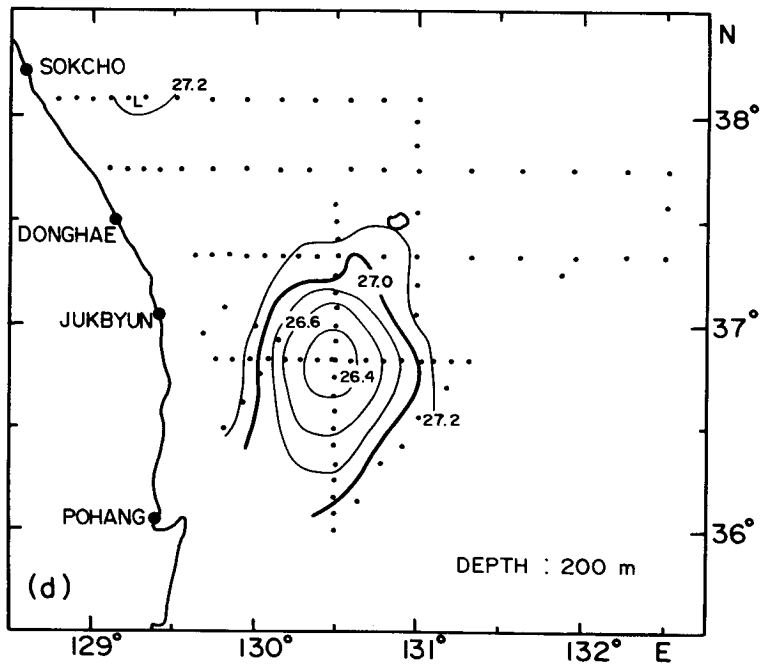
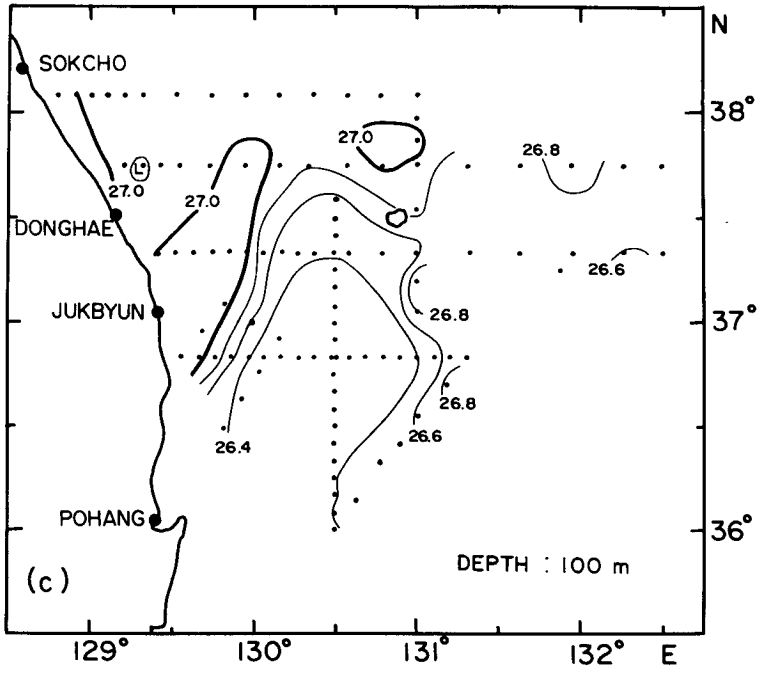


Fig. 8. Continued.

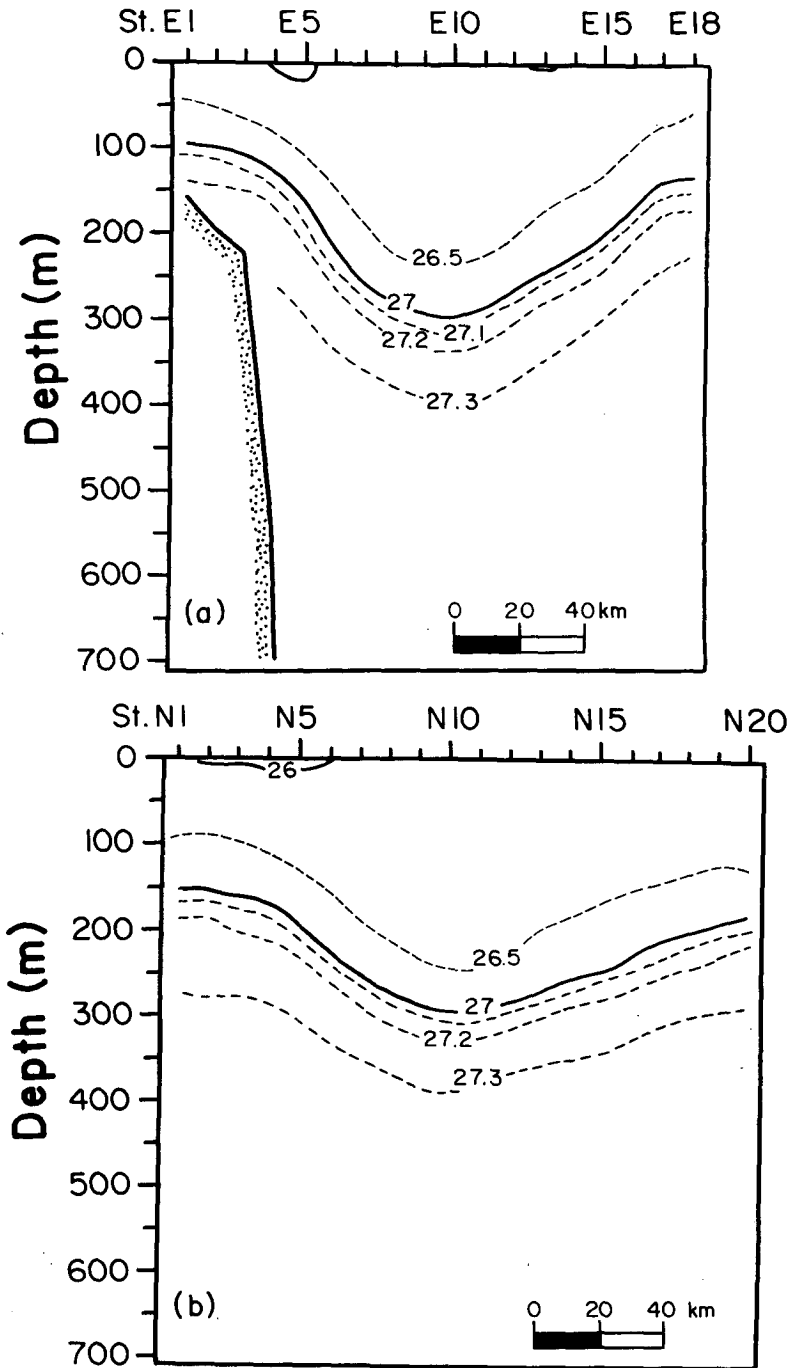


Fig. 9. Vertical distributions of density(σ_t) on section (a) E, and (b) N in April 1993.

수온·염분의 구조 및 유속분포로부터 이 소용돌이의 크기는 직경이 약 140 km, 수심은 약 335 m이고 남북방향으로 거의 대칭을 이루고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 밀도의 분포에서 보면 수심 700 m 정도까지는 미약하지만 소용돌이의 영향이 미치고 있다(σ_t 구배 : $6.5 \times 10^{-5}/\text{km}$). 일본동쪽의 쿠로시오해역에서 발견되는 난수성 소용돌이 중에는 수심 2,500 m에서도 소용돌이의 영향이 나타나는 사실이 보고되었다(Yasuda et al., 1992). 1992년 3월에 東草 동쪽해상에서 관측되었던 소용돌이는 수심 700 m 아래에서도 그 영향이 나타났으며, 보다 자세한 구조는 繫留에 의한 유속관측을 실시하여 규명하는 것이 필요하다.

4. 유속분포

가. 수평분포

수온과 염분의 분포에서는 표층에서 소용돌이의 존재가 뚜렷하지 않았지만, 유속의 표층분포에서는 $130^\circ 30' \text{E}$ 의 남북정선(N)과 $36^\circ 50' \text{N}$ 의 동서정선(E)에서 시계방향으로 소용돌이 모양의 흐름이 나타난다(그림 10). 유속의 분포에서 나타난 소용돌이의 중심은 해안으로부터 약 90 km 떨어진 $36^\circ 50' \text{N}$, $130^\circ 30' \text{E}$ 부근이었으며, 크기는 약 140 km 였다. 표층에서 최대유속은 약 50 cm/s로 해안으로부터 약 45 km 떨어진 E5 정점에서 나타났으며, 소용돌이의 서쪽과 북쪽에서 강한 유속이 존재했다. 수심 100 m까지는 소용돌이내에서의 유속이 표층과 거의 비슷한 크기를 보이지만 수심 200 m 층에서는 약 절반 정도로 작아졌다. 다만 시계방향의 소용돌이 형태는 변함없이 유지되고 있다.

나. 수직분포

동서정선에서는 남북방향의 유속성분이 매우 커서 40~67 cm/s의 크기를 갖는다(그림 11). 최대유속은 소용돌이의 서쪽에서 나타나는데 E5 정점의 수심 98 m에서 북향성분으로 67 cm/s이다. 소용돌이의 동쪽에서 남향성분의 최대값은 42 cm/s로 E13 정점의 수심 10 m에서 나타난다. 소용돌이 서쪽(연안쪽)에서의 북향류가 동쪽의 남향류보다 큰 것이 특징인데, 이러한 현상은 1992년 3월과 6월의 난수성 소용돌이에서도 나타나며 약 20 cm/s의 차이를 보이면서 서쪽에서 유속이 크다(김 등, 1993).

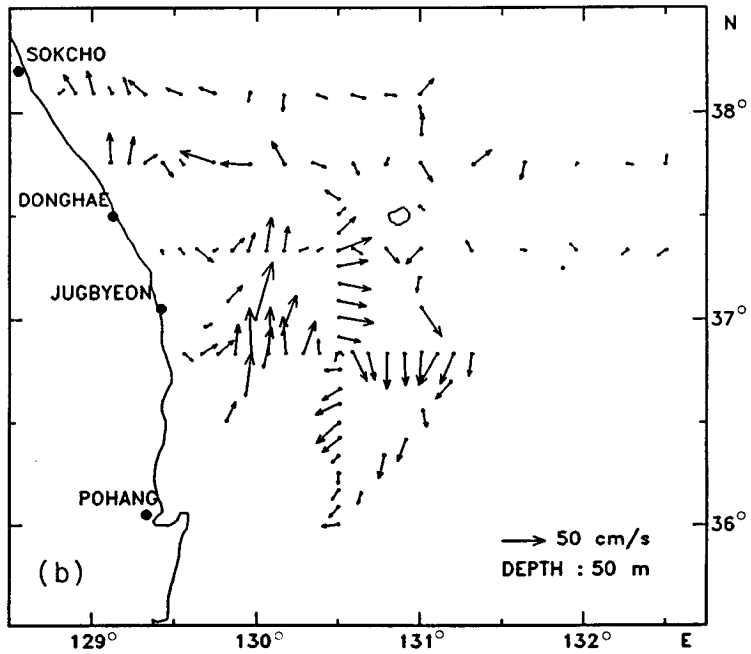
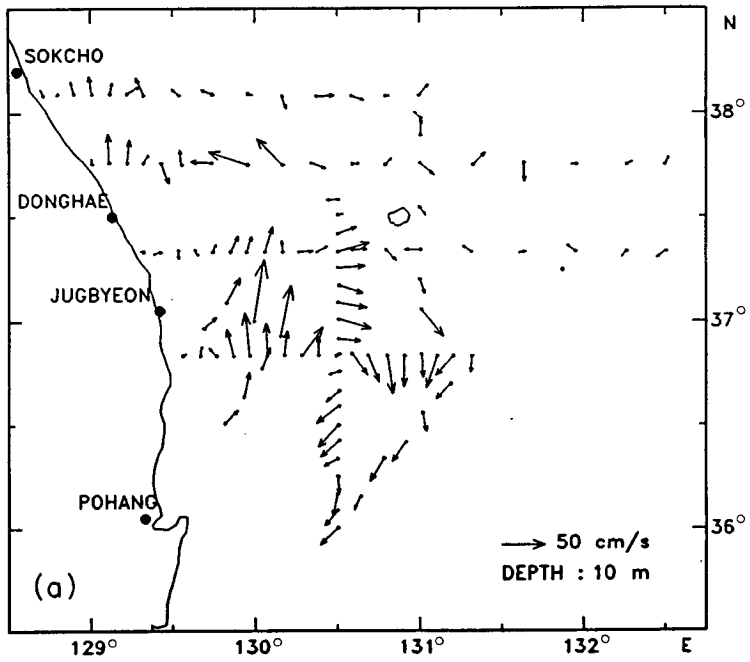


Fig. 10. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in April 1993.

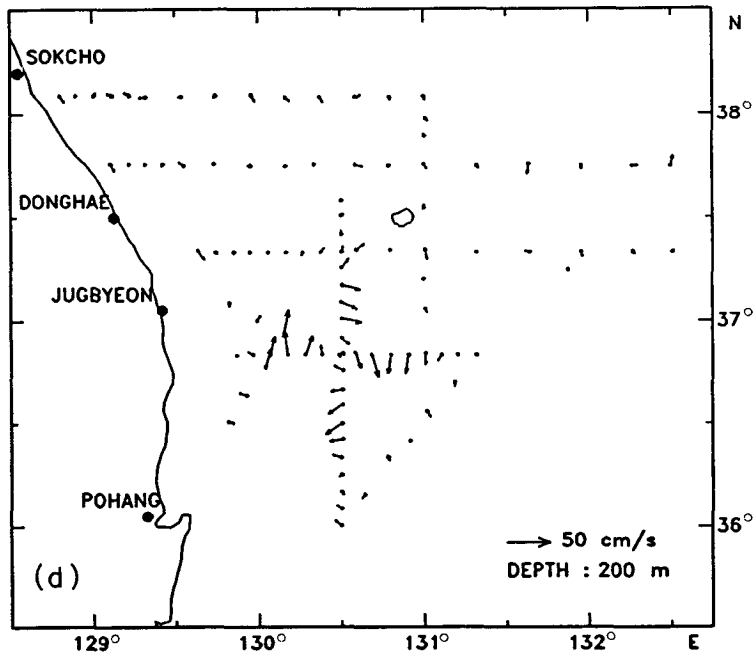
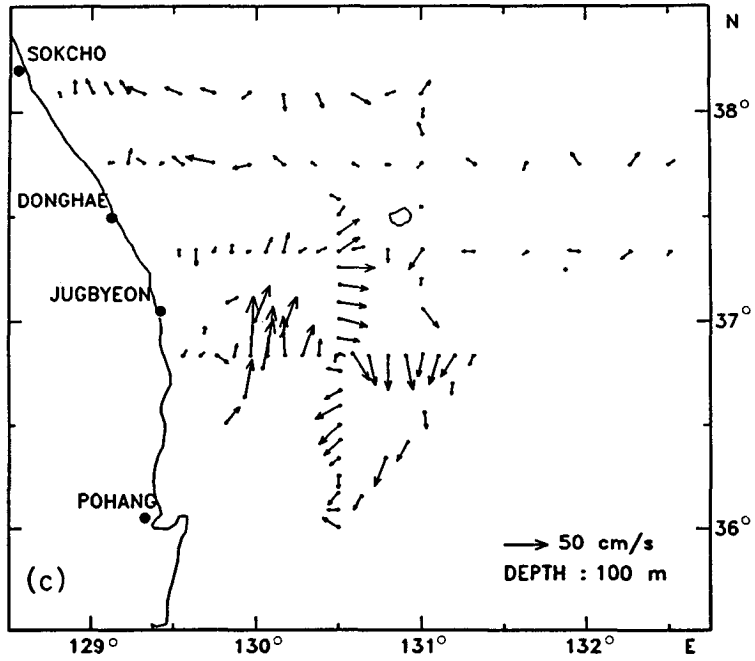


Fig. 10. Continued.

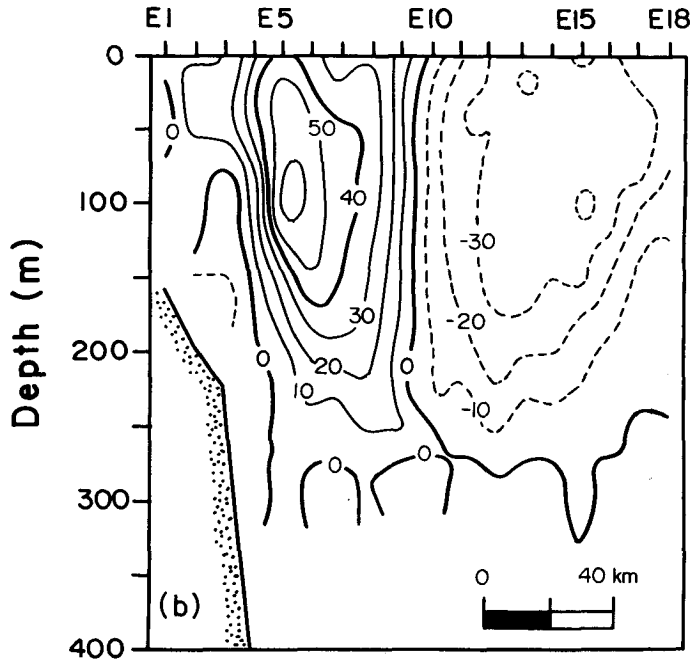
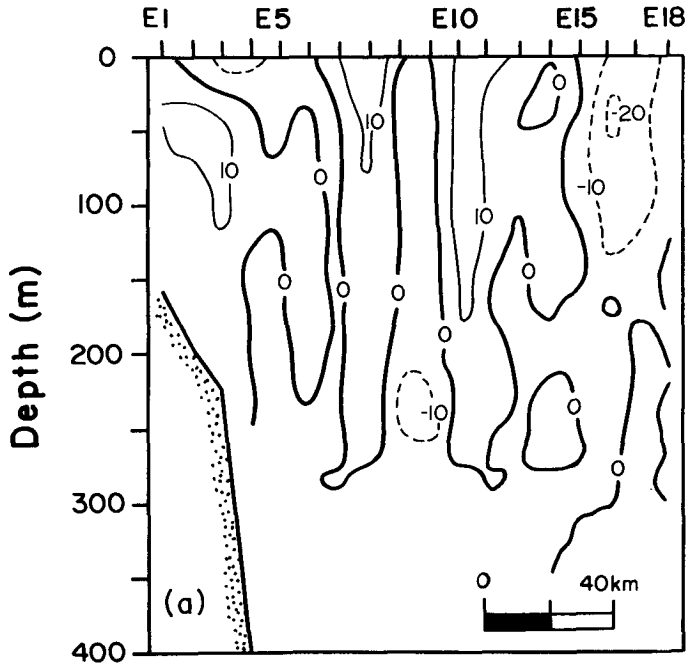


Fig. 11. Vertical distributions of current velocity in (a) east-west, and (b) north-south components on section E in April 1993.

國立水産振興院의 관측자료를 사용하여 수심 400 또는 500 m를 無流面으로 가정하고 소용돌이의 地衡流를 계산한 유속에서도 서쪽의 북향성분이 동쪽의 남향성분보다 대체로 크게 나타났다. 한 예로 1979년 2월 104 定線 지형류의 최대유속(그림 12)은 서쪽에서 80 cm/s, 동쪽에서 37 cm/s로 서쪽의 유속이 약 43 cm/s 정도 빠르다. 수심 150 m보다 깊은 곳의 유속은 급속히 감소하여 수심 250 m의 하층에서는 10 cm/s 이하가 된다. 동서정선에서 유속의 동서성분은 남북성분에 비하면 매우 작아 최대유속이 동향류로 E8 정점에서 22 cm/s, E11 정점에서 16 cm/s 이다.

남북정선에서는 동서성분의 유속이 남북성분의 유속보다 상대적으로 크다. 동서성분의 최대유속은 소용돌이의 북쪽 N5 정점에서 나타나는데, 수심 100~130 m에서 동향으로 40 cm/s이다(그림 13). 소용돌이의 남쪽에서는 N14 정점의 수심 26 m에서 27 cm/s의 서향성분이 가장 크다. 따라서 소용돌이 북쪽에서의 유속이 남쪽보다 크다. 수심 250 m 아래에서는 유속이 10 cm/s 이하로 매우 작다. 남북성분의 최대유속은 소용돌이의 남쪽 N14 정점에서 나타났으며 수심 10 m에서 남향으로 24 cm/s 이다. 소용돌이의 북쪽에서는 N3 정점의 수심 66 m에서 20 cm/s의 북향성분이 최대값이다.

그림 14는 동서정선과 남북정선에서 수심 700 m를 無流面으로 가정하여 계산한 地衡流의 유속분포이다. ADCP 관측에 의한 유속분포와 비교하였을 때, 소용돌이의 서쪽과 남쪽의 가장자리를 제외한 나머지 부분에서는 분포양상이 잘 일치하였고 절대값도 10 cm/s 이내의 차이를 보이고 있었다.

그림 15는 1993년 2월 25일 - 3월 4일까지 관측한 유속의 평면도이고, 그림 16은 3월 4일 정선 D(36° 55'N)를 따라 해안으로부터 131° E까지 관측한 유속의 수직단면도이다. 3월(그림 15)과 4월(그림 10)의 평면도에서 소용돌이의 서쪽해역의 표층유속을 비교하면, 3월에는 36° 55'N과 37° 20'N 線의 유속의 방향이 4월의 유속보다 동향성분이 큰 것을 알 수 있다. 이 사실은 소용돌이의 위치가 약간 北上하였기 때문에 4월에 거의 같은 위치에서 관측한 유속에서는 동향성분이 적어진 탓에 유속이 더욱 북쪽을 향한 양상으로 나타났다. 이 사실을 확인하기 위하여 3월의 수직단면도(그

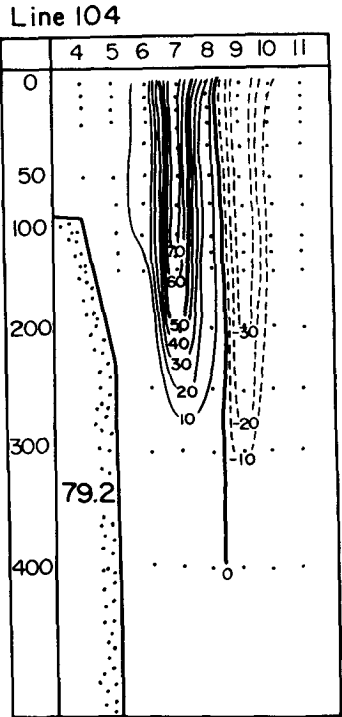


Fig. 12. Vertical distribution of calculated geostrophic current using the data of KFRDA.

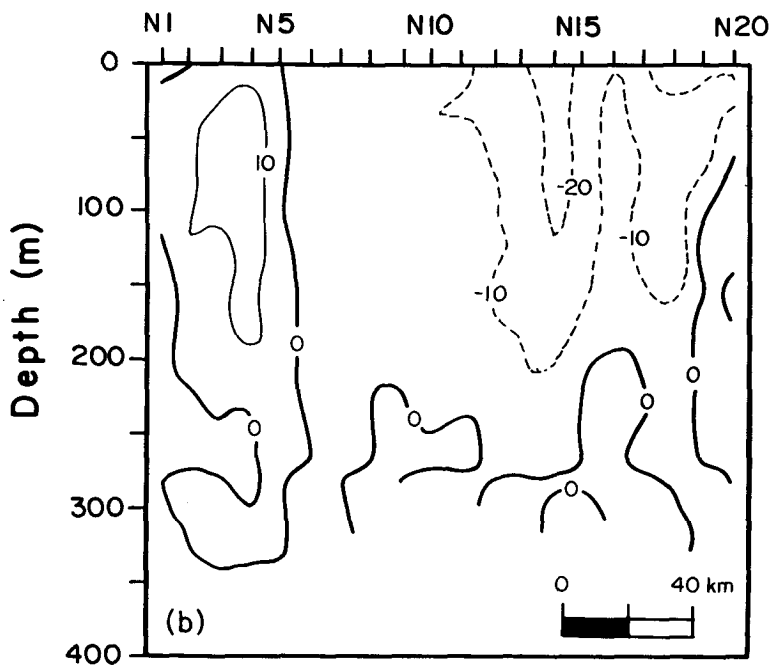
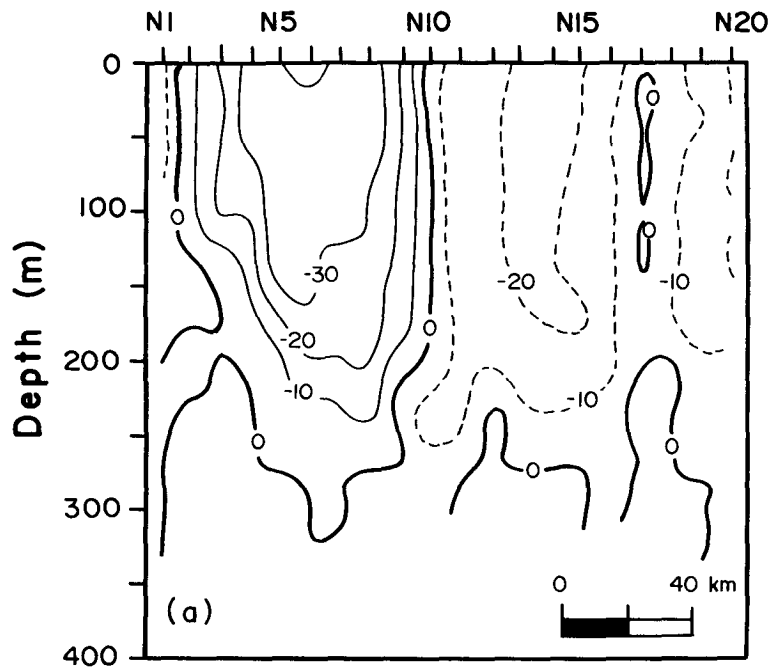


Fig. 13. Same as Fig. 11 except for section N.

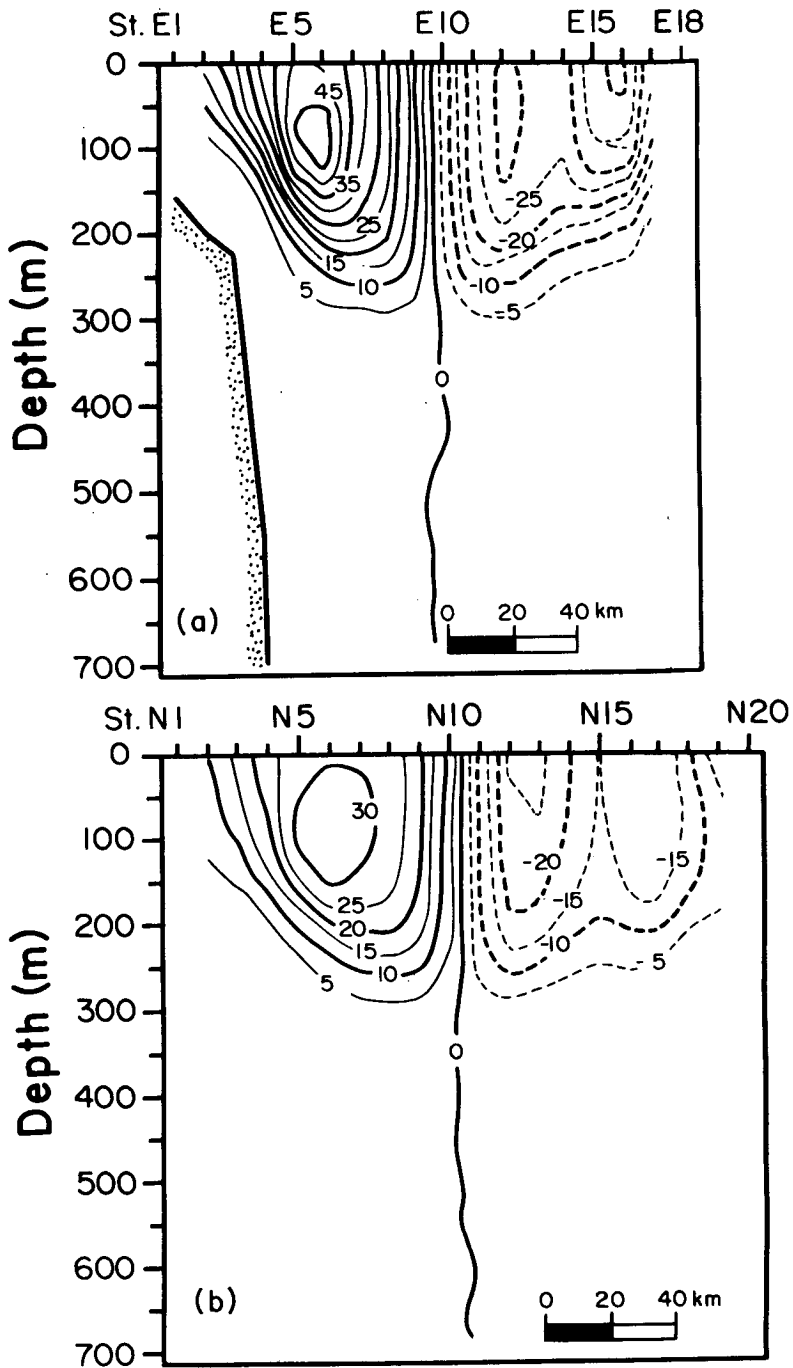


Fig. 14. Vertical distributions of calculated geostrophic current on section (a) E, and (b) N in April 1993.

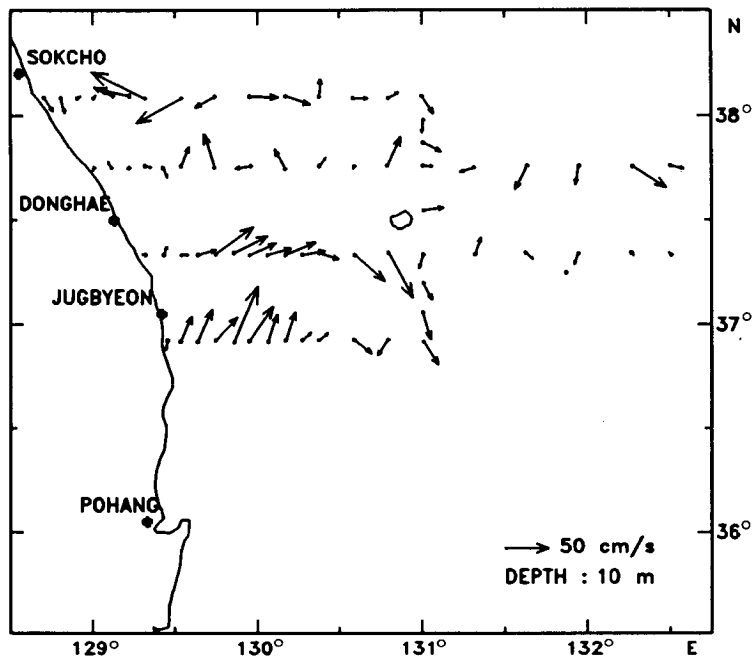


Fig. 15. Horizontal distributions of current at 10 m depth in February 1993.

림 16)와 4월의 수직단면도(그림 11)를 비교한 결과 3월에는 D4 정점의 수심 26 m에서 동향성분이 32 cm/s, 4월에는 E8 정점의 표층에서 22 cm/s의 동향성분이 나타나 3월의 유속이 10 cm/s 정도 더 크게 나타났다. 이 소용돌이는 1달 반 사이에 그 위치가 약간 북상한 것으로 보인다.

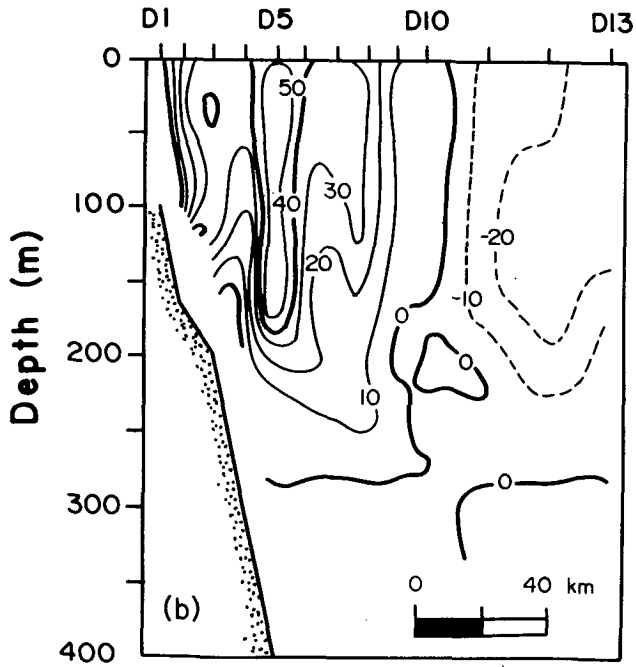
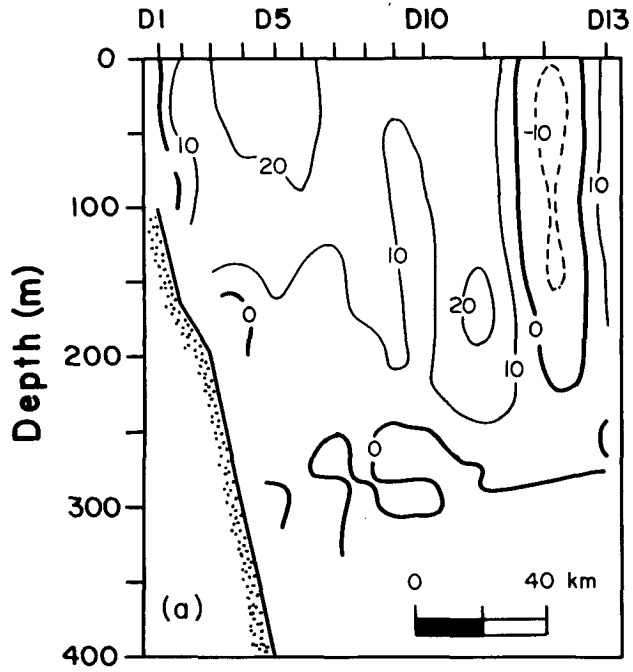


Fig. 16. Same as Fig. 11 except for section D in February 1993.

제 2 절 1993년 9월의 暖水性 소용돌이 觀測成果

동해 남서해역에서 1993년 4월부터 계속 존재하고 있었던 난수성 소용돌이의 구조변화를 조사하기 위하여 1993년 9월 19일부터 9월 21일까지 3일간에 걸쳐 남북 및 동서방향으로 소용돌이를 횡단하면서 수온·염분 및 유속을 관측하였다(그림 2). 난수성 소용돌이의 조사를 위한 관측시기 직전인 9월 6일부터 18일까지의 기간에 인접해역에서 CTD 및 ADCP에 의한 해양특성조사가 있었다. 두 시기의 관측이 시간적으로 가깝고 공간적으로도 상당히 인접해 있으므로 수평분포의 분석을 위한 평면도 작성에서는 두 관측자료를 도면에 함께 나타내었다.

1. 수온분포

가. 수평분포

표층에서는 20~23℃의 분포로, 난수성 소용돌이의 형태는 나타나지는 않는다(그림 17). 이러한 소용돌이는 인공위성 적외선 영상사진으로는 위치를 파악할 수 없다. 수심 50 m에서는 울릉도 남쪽과 북쪽에 11℃ 이상의 난수역이 인접하여 존재하였고, 7~14℃ 등온선에 의한 전선의 모양이 원형을 이루고 있었다.

수심 100 m에서는 울릉도 남서쪽과 북쪽에 2개의 난수성 소용돌이가 뚜렷히 나타났다. 울릉도 남서쪽의 난수성 소용돌이는 내부에 10℃ 균질층이 동서방향으로 약 90 km, 남북방향으로 약 60 km의 폭을 갖고 있었으며, 가장자리에는 4~10℃ 등온선으로 구성된 전선이 타원형을 이루고 있었다. 수심 100 m층에서 이 난수성 소용돌이는 동서방향으로 약 120 km, 남북방향으로 약 100 km의 크기를 갖고 있었다. 한편 울릉도 북쪽에도 5℃ 이상의 등온선이 원형의 전선을 이루고 있어서 또다른 난수성 소용돌이가 북서쪽에 인접해 있음을 보여 주고 있었다.

수심 200 m에서는 2~5℃ 등온선이 동서방향으로 긴 타원형 모양으로 나타나, 이 소용돌이가 대마난류로부터 분리되어 있음을 알 수 있었다. 소용돌이의 중심 수온은 약 6℃로 주변해역과 약 4℃의 차이를 보이고 있었다.

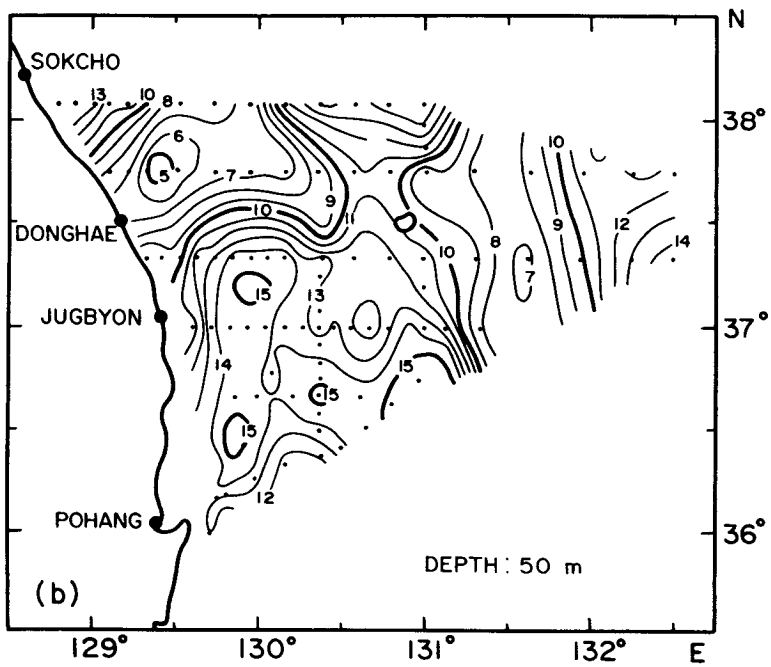
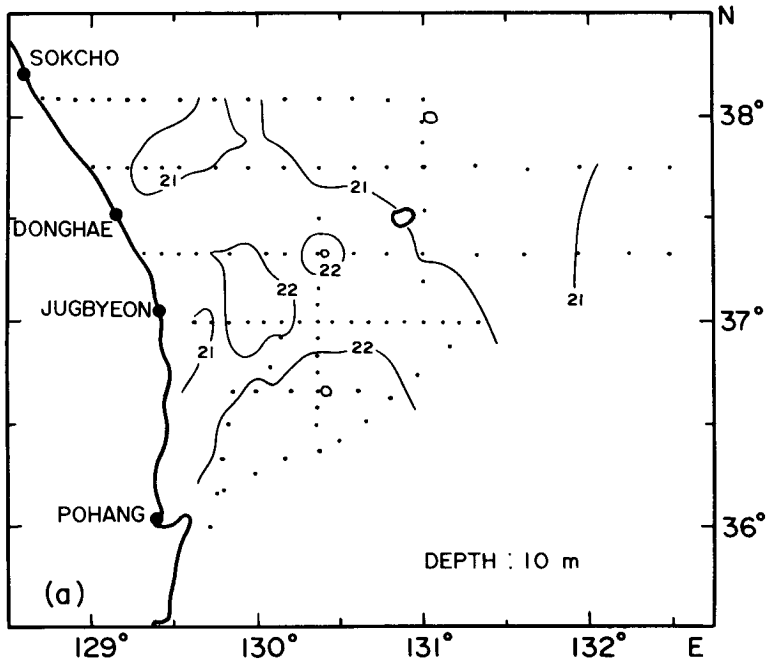


Fig. 17. Horizontal distributions of temperature at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.

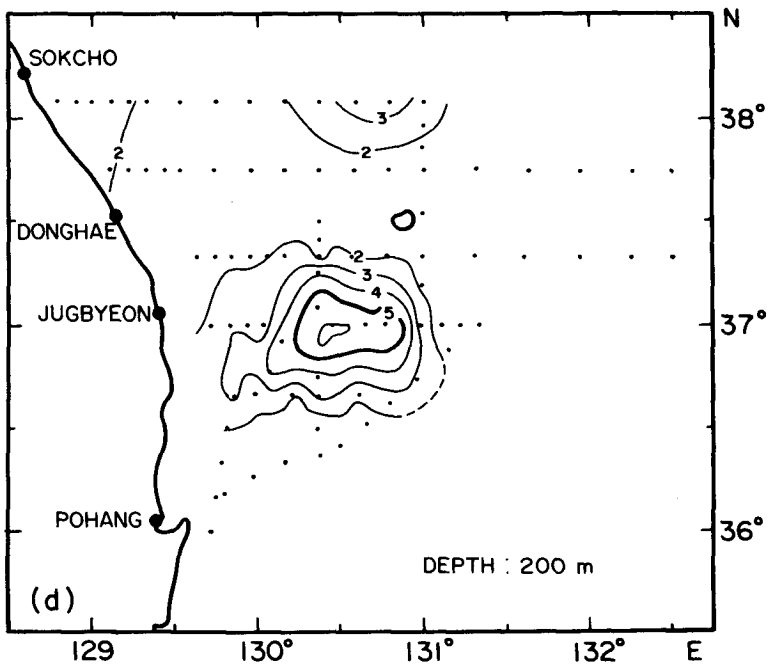
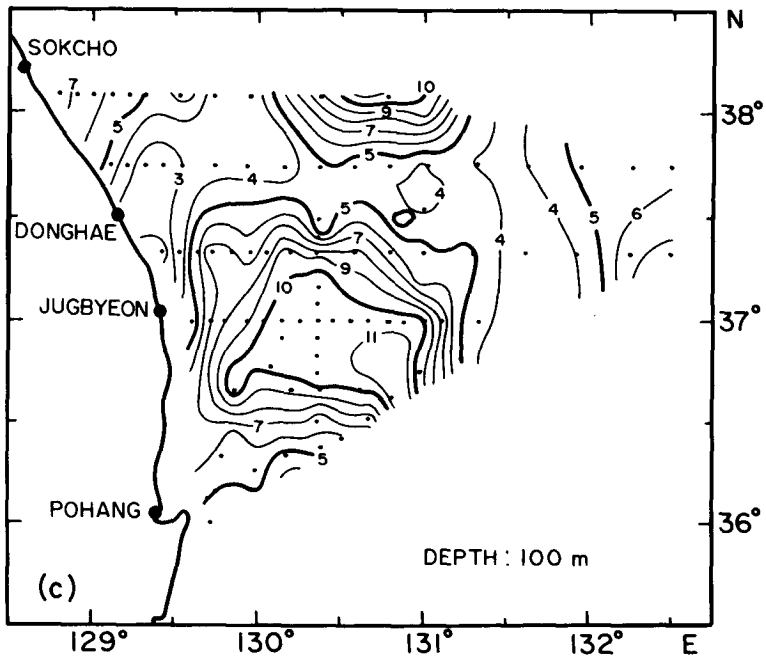


Fig. 17. Continued.

이 난수성 소용돌이는 1993년 4월에 울릉도 남서쪽(소용돌이의 중심위치는 36° 50' N, 130° 30' E)에서 관측된 것과 같은 것으로, 6월에는 東進하여 울릉도 남쪽으로 이동하였다가 8월에 다시 西進하여 9월에는 울릉도 남서쪽에 위치하고 있었다. 4월에 관측된 소용돌이의 모양은 남북방향인 긴 타원형(그림 3)이었으나, 9월에는 동서방향인 긴 타원형이었다(그림 17). 수심 100 m층을 기준으로 하면, 9월의 10°C 균질층의 폭은 60~90 km로 4월의 140~100 km 보다 40~50 km 작아졌으며, 난수성 소용돌이의 크기도 9월에는 100~140 km로 4월의 120~170 km보다 20~30 km 작아졌다. 또한 200 m 수심에서의 중심수온이 4월에는 약 10°C 였으나, 9월에는 5°C로 4월보다 5°C 낮아졌고 난수성 소용돌이의 크기도 4월보다 작아졌음을 알 수 있다.

나. 수직분포

블록렌즈 모양의 수온구조가 동서단면과 남북단면에서 나타나 소용돌이의 존재를 나타낸다(그림 18). 표층에서 수심 약 80 m까지의 상층에는 태양열의 표층가열에 의한 성층구조가 형성되어 있어 4월에 없었던 계절수온약층이 존재하고 있었음을 나타낸다. 소용돌이의 내부에는 4월과 마찬가지로 10°C 균질층이 있으나, 두께가 축소되었다. 즉, 9월에는 수심 60~140 m에 약 80 m의 두께로 존재하여, 4월의 약 190 m(수심 25~215 m)의 절반으로 작아졌다. 이 10°C 균질층 내부의 윗부분은 34.3 psu 이상의 고염분, 아랫부분은 34.2 psu로 상대적으로 저염분으로 구성되어 있었다. 수심 약 140 m부터 1~10°C의 수온약층이 최대수심 약 440 m까지 존재하였는데, 1°C 최대수심은 4월 관측시와 거의 같았다.

한편 4월에 소용돌이의 가장자리에는 고온·고염의 warm streamer가 있었으나, 9월 관측에서는 존재하지 않았다. 이것으로 보아 이 난수성 소용돌이는 여름철 이후로는 대마난류로부터 고온·고염의 새로운 해수를 공급받지 못한 것으로 사료된다.

2. 염분분포

가. 수평분포

표층염분 분포는 32.2~33.7 psu의 저염분으로 구성된 복잡한 구조를 이루고 있었다(그림 19). 대체로 울릉도 남쪽해역에는 33.0 psu 이하의 저염수, 울릉도 북쪽에

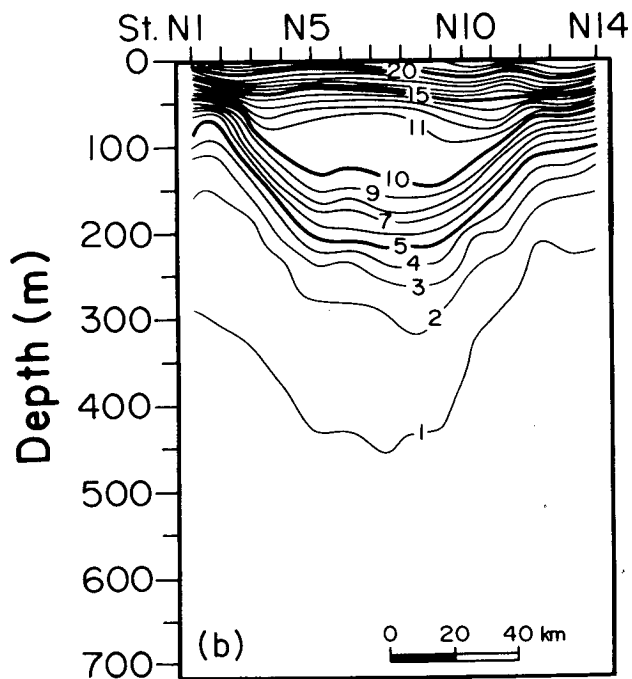
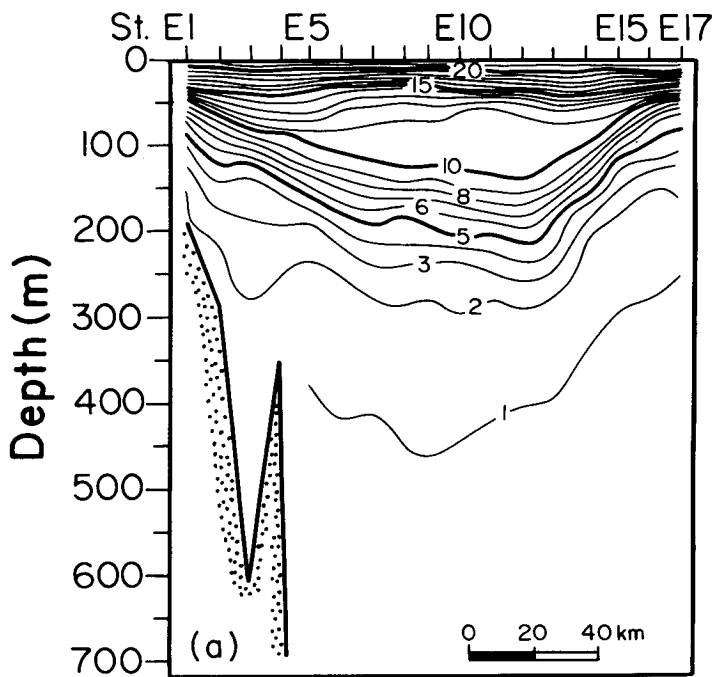


Fig. 18. Vertical distributions of temperature on section (a) E, and (b) N in September 1993.

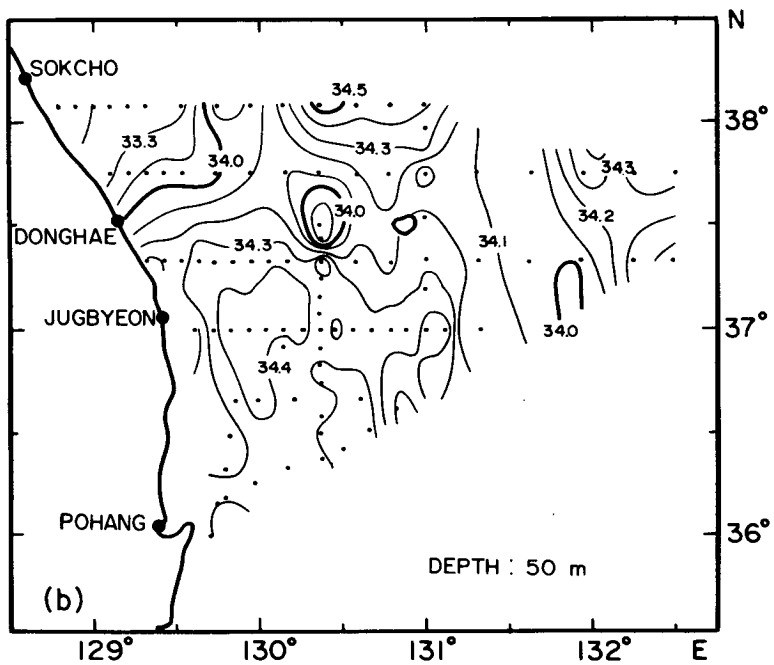
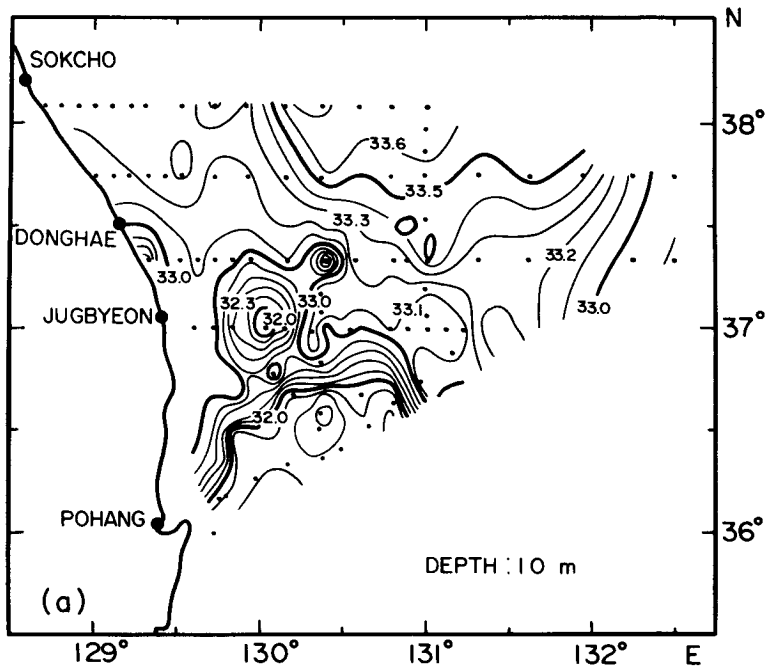


Fig. 19. Horizontal distributions of salinity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.

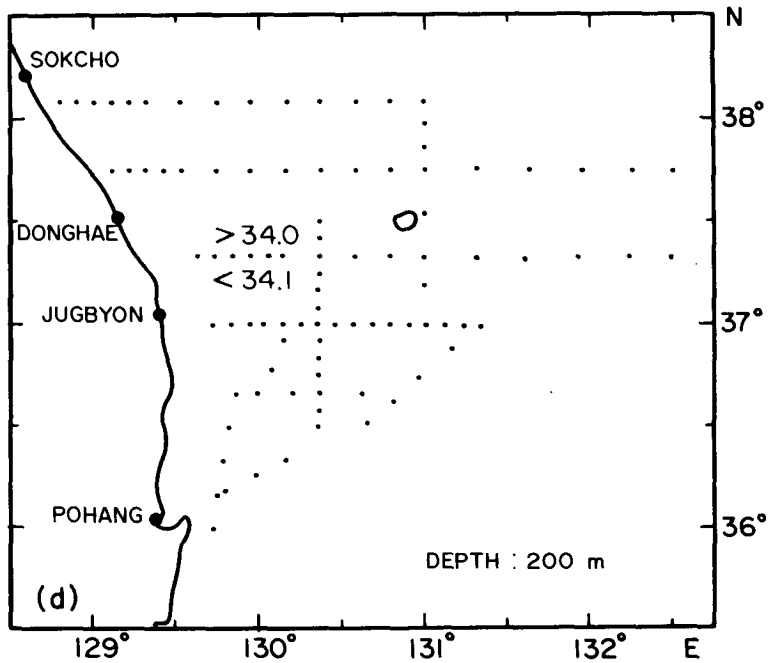
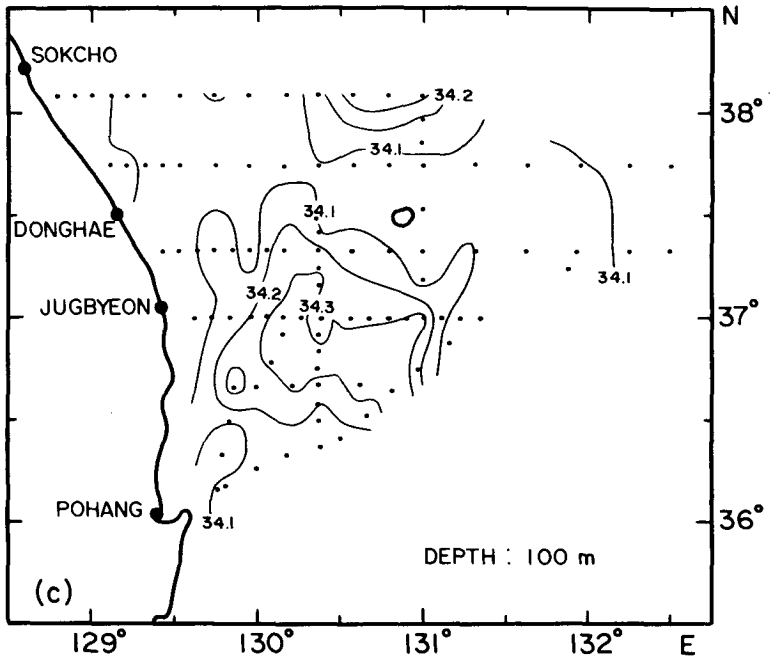


Fig. 19. Continued.

는 33.0 psu 이상으로 상대적으로 고염의 해수였다. 이와같은 표층의 저염수는 여름철의 강수와 대마난류 표층수의 영향으로 사료된다. 수심 50 m에서 울릉도 남서쪽과 북쪽에 나타난 고염수의 해역은 수온의 분포에서 난수역에 해당되는데 소용돌이의 형태가 뚜렷하지는 않았다.

수심 100 m에서는 울릉도 남서쪽과 북쪽에 각각 34.1 psu 이상의 고염수가 나타나 난수성 소용돌이의 존재를 나타내었다. 울릉도 남서쪽 소용돌이의 중심에 34.3 psu 이상의 고염수가 넓게 분포하여 있는 것으로 보아 봄철에 대마난류로부터 warm streamer의 형태로 유입된 고염수가 소용돌이 내부에서 폭넓게 확산되고 있었음을 보여준다.

수심 200 m에서는 전해역에서 34.0~34.1 psu의 분포로 소용돌이의 형태는 나타나지 않는다. 그 이유는 소용돌이의 수심이 4월보다 얕아졌기 때문에 200 m 수심이 대체로 염분최소층에 해당되었기 때문이었다.

나. 수직분포

해수면으로부터 수심 약 30 m까지의 상층은 34.0 psu 이하의 저염수로 덮여 있는 반면에 그 아래는 34.0 psu 이상의 고염수로 구성되어 있다. 특히 난수성 소용돌이 내부에 34.4 psu 이상의 고염수가 약 40~80 m 수심에서 동서단면의 정점 E3부터 E9까지와 정점 E13와 E15 사이에서, 남북단면에서는 정점 N3에서 N4까지 그리고 N9부터 N12까지 분포하고 있다(그림 20). 이와같이 고염수가 소용돌이 내부에서 폭넓게 분포하고 있는 모양은 4월의 구조와는 다른 양상이다.

염분최소층의 두께가 4월에 비해 매우 두터워졌다. 34.1 psu 이하의 염분최소층이 4월에는 수심 300~400 m에서 약 100 m의 두께로 존재하였으나, 9월에는 수심 180~420 m에서 최대 약 240 m 두께가 되어 상층쪽으로 약 2배 정도 두터워졌다. 또한 염분최소값이 나타나는 수심이 약 280 m로, 이 소용돌이의 수심은 280 m가 되며 4월의 340 m와 비교하면 약 60 m 얕아진 것이다.

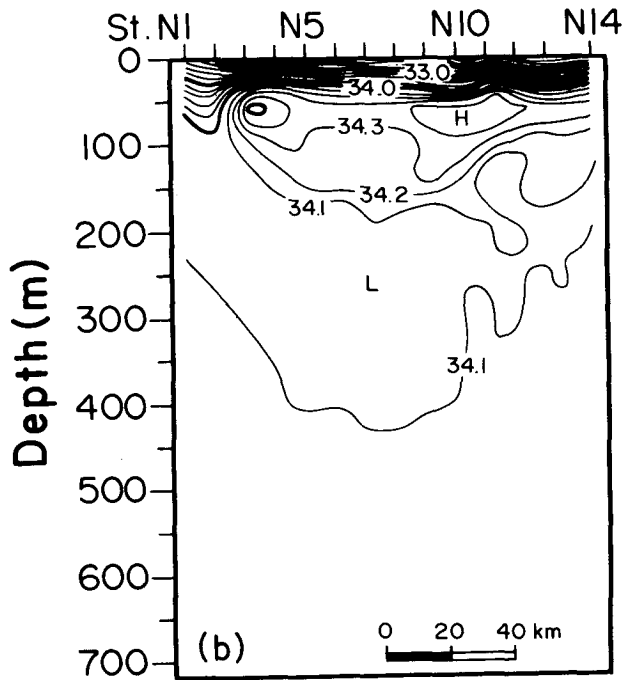
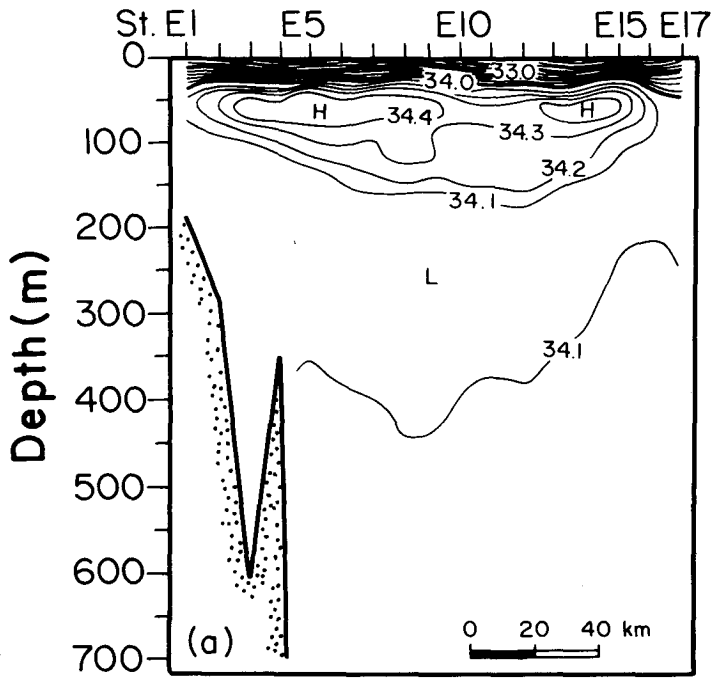


Fig. 20. Vertical distributions of salinity on section (a) E, and (b) N in September 1993.

3. 밀도분포

가. 수평분포

표층에서 밀도의 분포는 염분의 영향이 크기 때문에, 남쪽에서 밀도가 작고, 북쪽에서 밀도가 큰 해수가 존재하였을 뿐 난수성 소용돌이의 형태는 나타나지 않았다(그림 21). 수심 50 m 아래에서는 주로 수온의 분포와 비슷한 분포양상을 나타냈으며, 소용돌이가 있는 난수역에서의 해수밀도는 주변의 해역보다 작았다.

나. 수직분포

표층부터 약 50 m 수심까지 26.0 이하의 저밀도 해수로 덮여 있었다. 이것은 4월 관측시에는 없었던 것으로, 여름철에 형성된 고온·고염의 해수에 의해 형성된 것이다(그림 22). 수심 50~140 m에는 26.2~26.4의 등밀도층이 두텁게 있었는데, 이것은 10 °C, 34.2 psu의 균질층에 해당되는 것이다.

수온·염분의 분포특성을 기준으로 소용돌이의 수심은 280 m로 정의했지만, 수심 700 m에서도 미약하나마 밀도의 구배(σ_t 구배 : 약 $2 \times 10^{-4}/\text{km}$)가 있기 때문에, 소용돌이의 영향은 수심 700 m 아래의 하층까지 미치고 있었음을 알 수 있다.

4. 유속분포

가. 수평분포

유속의 표층분포에서는 울릉도 남서쪽에서 시계방향의 소용돌이 흐름이 명확히 나타난다(그림 23). 표층에서의 최대 유속은 약 50 cm/s로 소용돌이의 동쪽에서 동남류, 서쪽에서 북동류 및 동남쪽에서 북서류의 강한 와류가 있었다. 전체적으로 수심 50 m 부근에서 최대유속이 나타나고, 정점 E15에서 남향류로 약 70 cm/s가 가장 강하게 나타났다. 수심 100 m까지 유속은 표층과 크게 변하지 않았지만, 수심 100 m 아래에서는 유속이 급속히 감소하여 수심 200 m에서는 대체로 10 cm/s 이하였다. 다만 소용돌이 형태의 해류는 유지되었다. 4월과 비교하였을 때 전체적으로 10~20 cm/s 정도로 유속이 감소되었다.

나. 수직분포

동서정선에서는 4월과는 달리 북향성분보다 남향성분의 해류가 더 강한 것으로

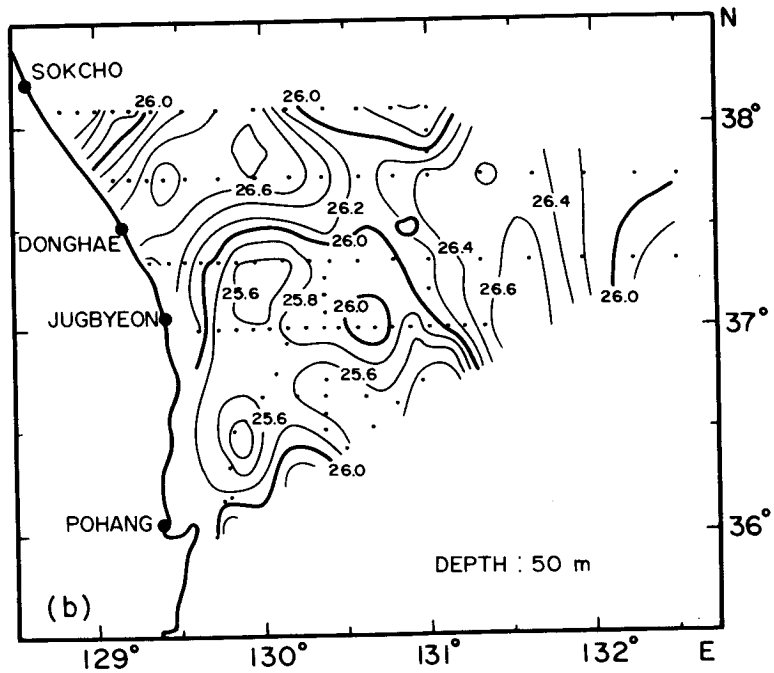
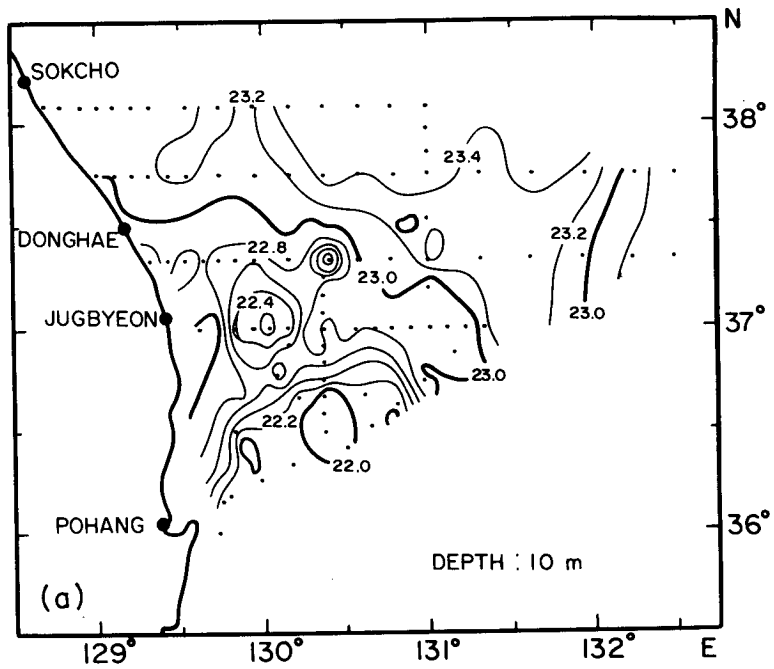


Fig. 21. Horizontal distributions of density(σ_t) at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.

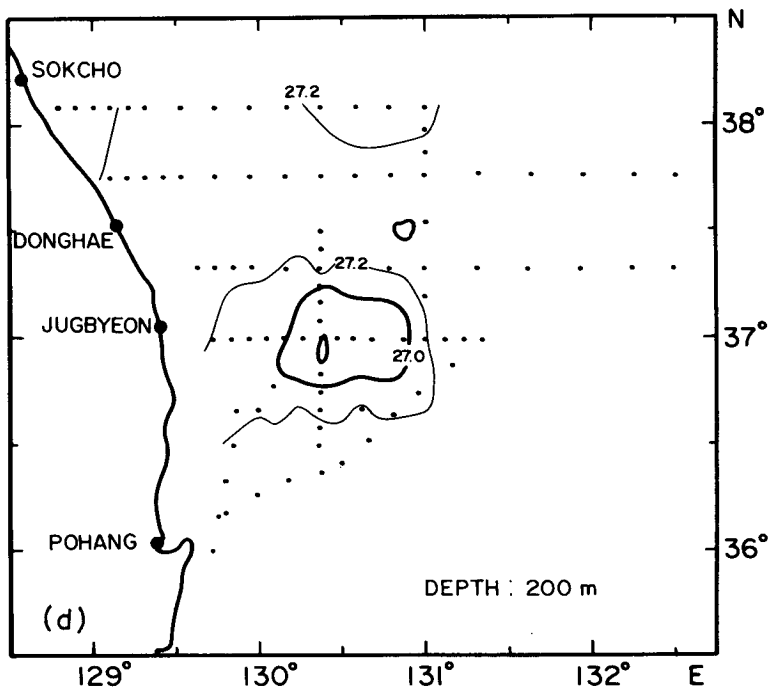
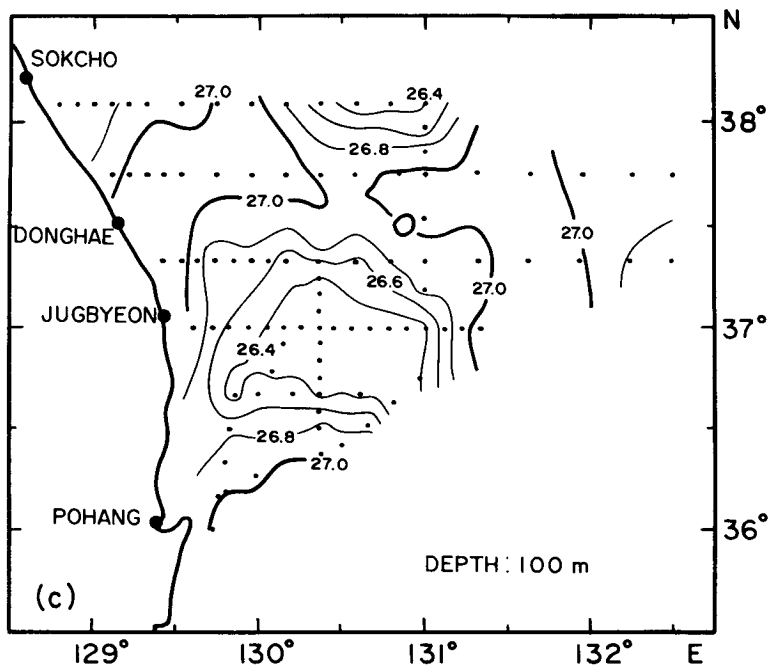


Fig. 21. Continued.

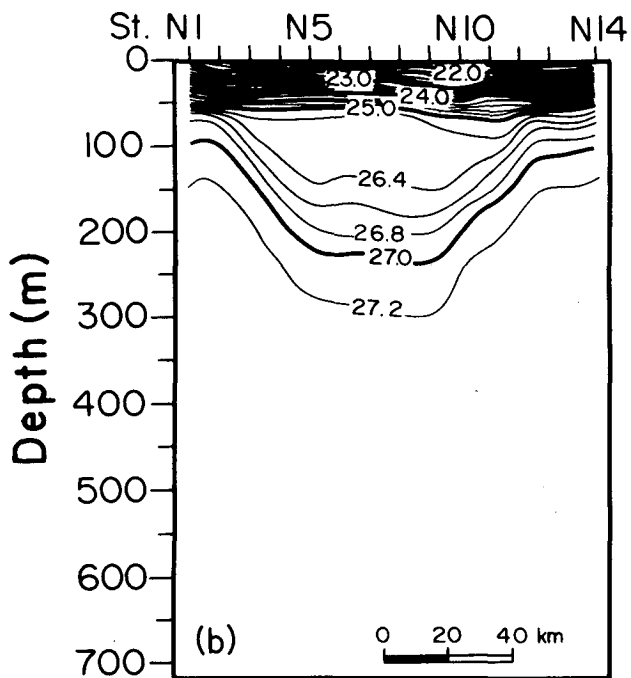
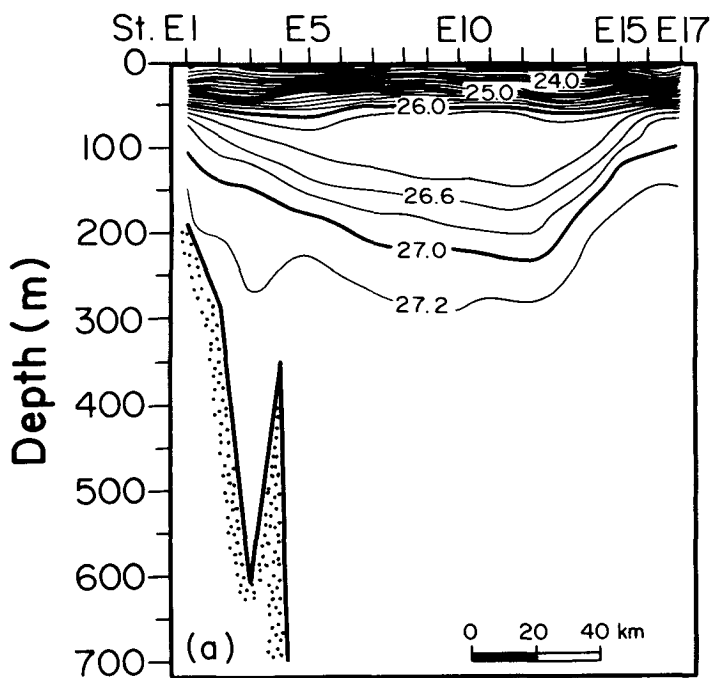


Fig. 22. Vertical distributions of density(σ_t) on section (a) E, and (b) N in September 1993.

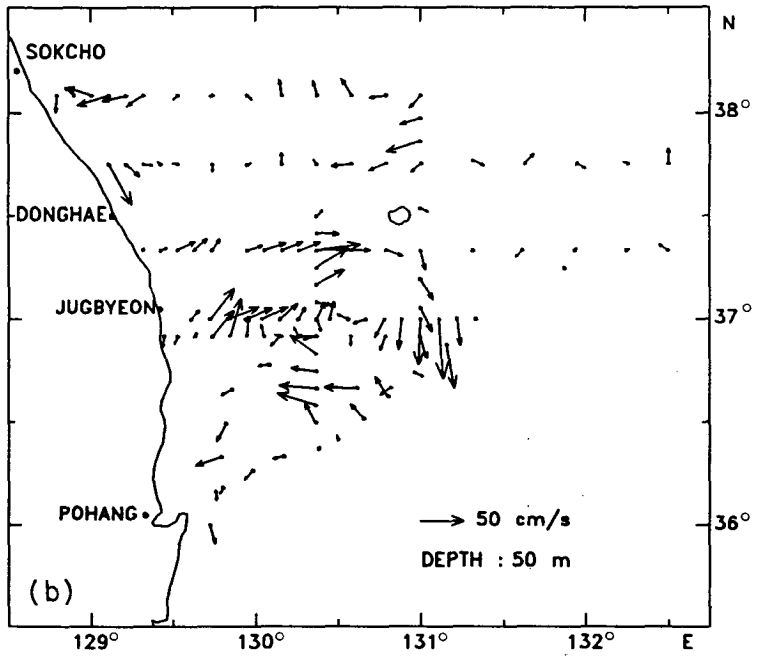
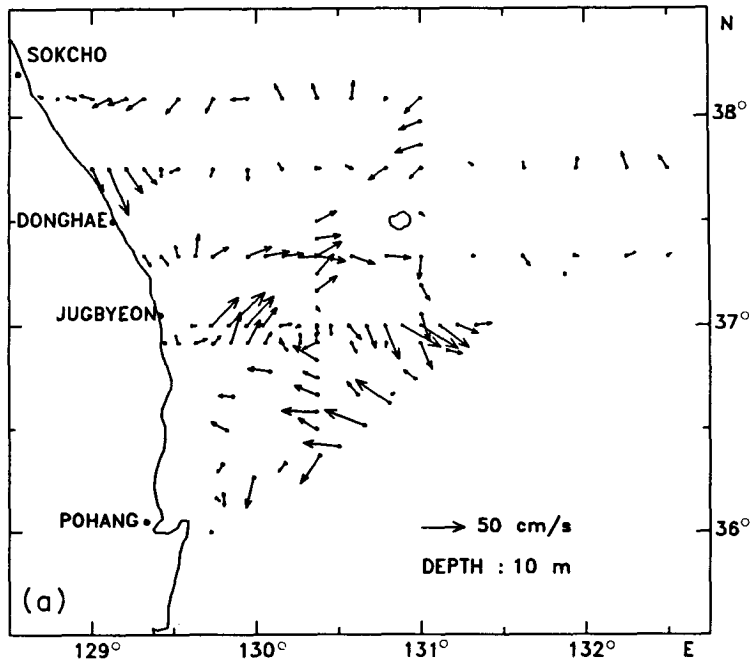


Fig. 23. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, and (d) 200 m depth in September 1993.

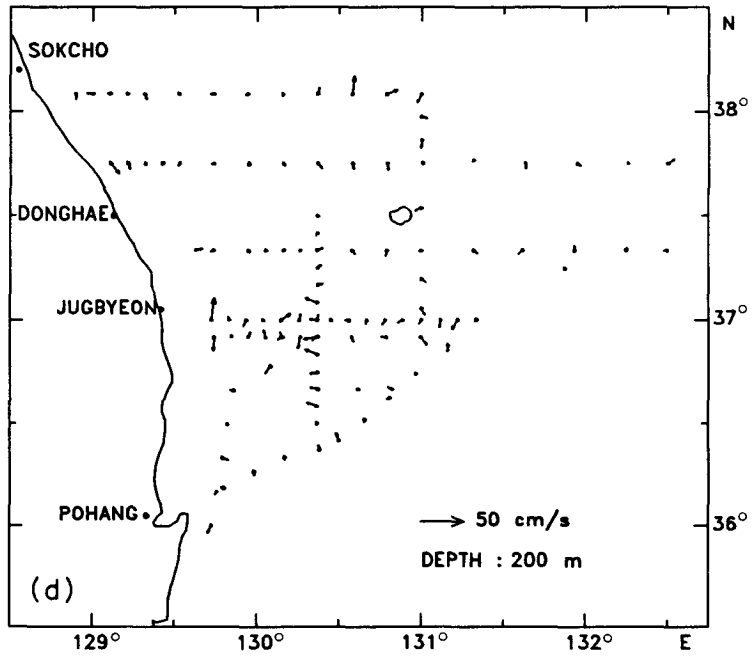
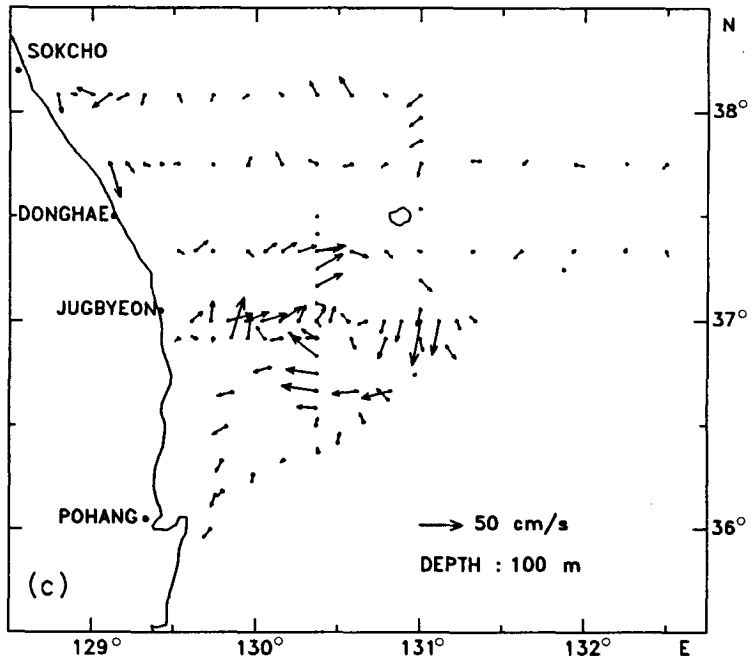


Fig. 23. Continued.

나타났다. 즉 소용돌이의 서쪽 정점 E15에서 약 70 cm/s의 남향성분의 해류가 나타나 소용돌이의 동쪽 정점 E2에서 나타난 40 cm/s의 북향성분보다 약 30 cm/s 더 강하다(그림 24). 이와같이 소용돌이의 서쪽에서 유속의 값이 동쪽보다 약한 원인은 서쪽의 얕은 해저지형(특히 정점 E14) 때문으로 사료된다. 남북정선에서 동서성분의 해류 크기(40~50 cm/s)는 거의 같으면서 대칭구조를 갖고 있는 것으로 나타나 위와 같은 판단을 뒷받침 해주고 있다(그림 25).

동서정선에서 서향류의 성분보다는 동향류의 성분이 강하고, 남북정선에서는 남향류의 성분보다는 북향류의 성분이 더 강한 것으로 보아 동서정선은 소용돌이 중심에서 약간 북쪽에, 남북정선은 약간 서쪽에 위치한 것으로 사료된다.

그림 26은 동서정선과 남북정선에서 수심 700 m를 無流面으로 가정하여 계산한 지형류의 유속분포이다. ADCP 관측에 의한 유속분포와 비교하였을 때, 표층부근을 제외하면 분포구조가 대체로 잘 일치하고 있었으며 절대값도 10 cm/s 이내의 작은 차이를 보이고 있었다. 따라서 이 난수성 소용돌이는 지형류 평형을 잘 유지하고 있었기 때문에 1993년 9월 이후로도 소용돌이의 형태가 수 개월 이상 지속되었을 것으로 판단된다.

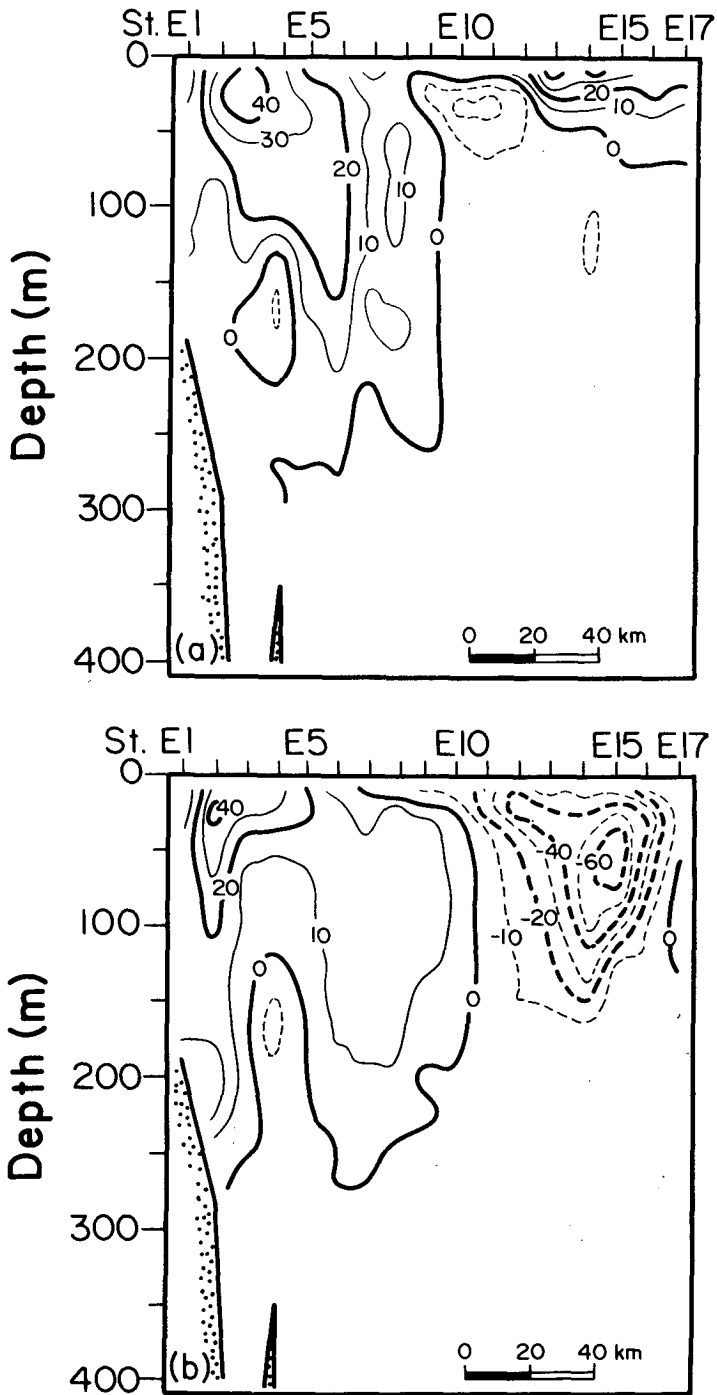


Fig. 24. Vertical distributions of current velocity in (a) east-west, and (b) north-south components on section E in September 1993.

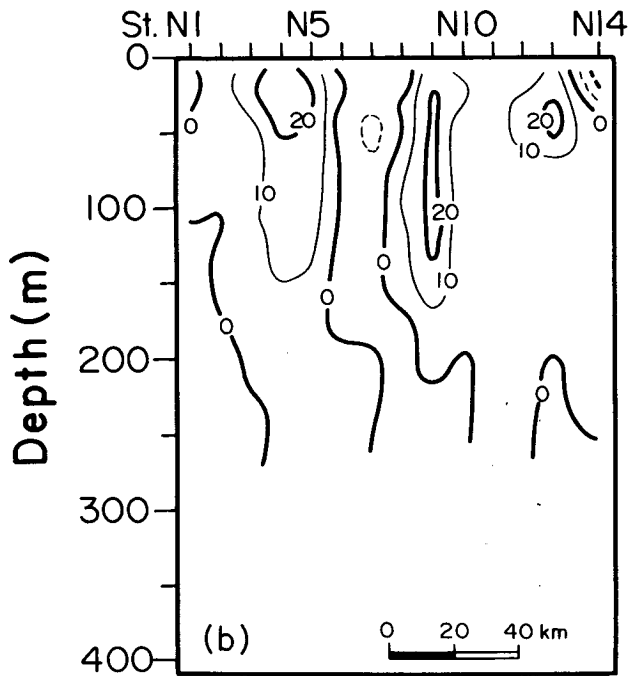
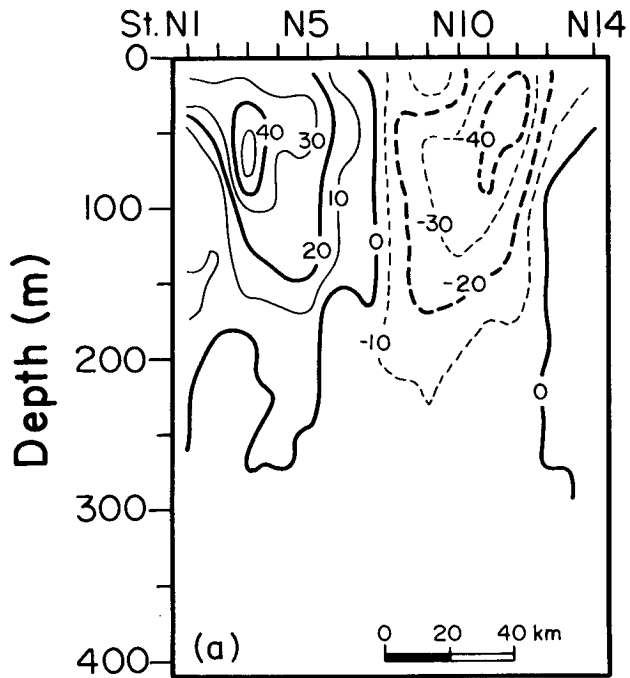


Fig. 25. Same as Fig. 11 except for section N.

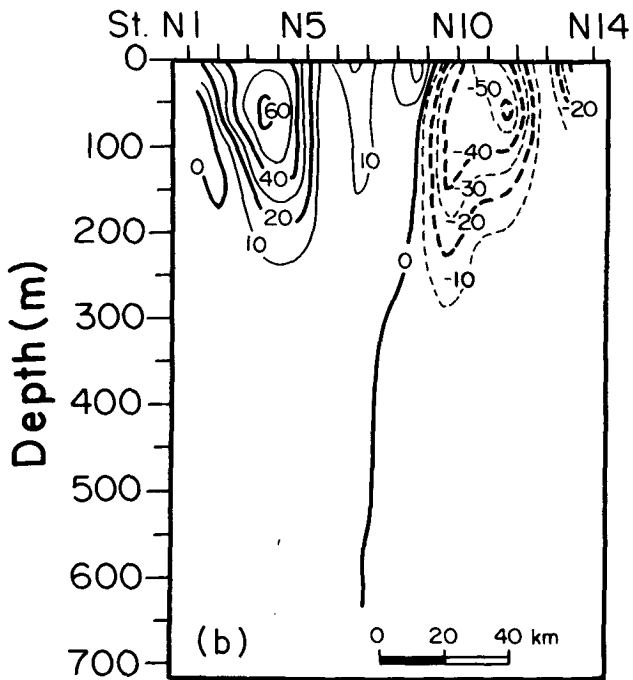
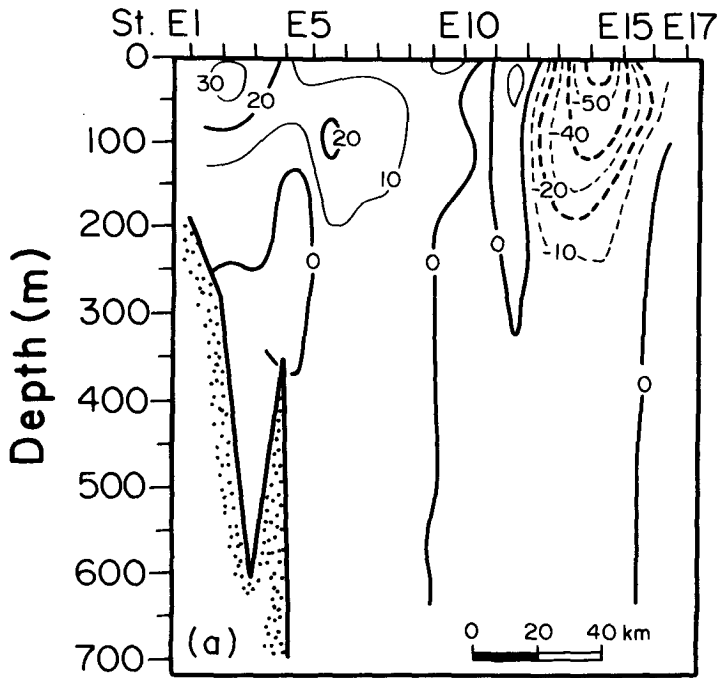


Fig. 26. Vertical distributions of calculated geostrophic current on section (a) E, and (b) N in September 1993.

제 4 장 요약 및 결론

1993년 4월과 9월에 東海 南西海域에서 실시한 海洋特性調査 및 소용돌이의 觀測에 관한 分析을 통하여 그 結果를 다음과 같이 要約하였다.

- 1993년 4월 鬱陵島 남서쪽 해역(36° 50' N, 130° 30' E 부근)의 수심 100 m에서 直徑 120-170 km, 수심 약 340 m의 크기를 갖는 暖水性 소용돌이가 존재하였다. 그후 6월에는 東進하여 울릉도 남쪽으로 이동하였다가 8월에 다시 西進하여 9월에는 울릉도 남서쪽(36° 55' N, 130° 34' E 부근)에 위치하고 있었다. 수심 100 m층을 기준으로 하면, 9월에는 直徑 100-140 km, 수심 약 280 m의 크기로 4월 보다 20-30 km 작아졌고 수심은 약 60 m 얕아졌다.
- 4월에 소용돌이의 내부에는 10℃, 34.2 psu의 均質層이 폭 약 140 km, 수심 25-215 m에서 두께 190 m의 크기로 존재하고 있었다. 이러한 均質층은 소용돌이가 겨울을 거치면서 대기와의 상호작용때문에 冷却되면서 對流가 일어나 形成되었다. 이 사실로 이 소용돌이는 1992년에 形成되었음을 알 수 있으며, 1993년 9월 이후까지 존재하여 소용돌이가 1년이상 유지되고 있음을 입증해 주고 있다.
- 9월에 관측된 소용돌이의 내부에는 4월과 마찬가지로 10℃ 均質층이 있었으나, 두께가 축소되었다. 즉, 9월에는 수심 60~140 m에 약 80 m의 두께로 존재하여, 4월보다 약 절반으로 작아졌다. 또한 10℃ 均質층 내부의 윗부분은 34.3 psu이상의 고염분으로 구성되어 고염분 해수가 확산되고 있었다.
- 소용돌이의 가장자리에는 수온 11~14℃, 염분 34.3~34.7 psu의 高溫·高鹽水(warm streamer)가 수심 150 m 이내에서 약 50 km의 幅으로 回轉하고 있었다. 이 warm streamer는 3월 초에 관측된 소용돌이에서는 나타나지 않았다. 주로 3월 중순 이후에 東韓暖流의 北上에 의하여 공급되는 warm streamer가 소용돌이 주위를 회전

하기 때문에 人工衛星 赤外線 寫眞에서는 반지(ring)모양으로 나타나기 때문에 소용돌이의 위치파악에 좋은 자료가 된다. 여름 이후에 warm streamer의 공급은 없었다.

- 9월에는 염분최소층의 두께가 4월에 비해 두터워졌다. 34.1 psu 이하의 염분최소층이 4월에는 수심 300~400 m에서 약 100 m의 두께로 존재하였으나, 9월에는 수심 180~420 m에서 최대 약 240 m 두께가 되어 상층쪽으로 약 2배 정도 두터워졌다.
- 소용돌이의 표층에는 時計方向으로 회전하는 해류가 나타나며 최대유속은 약 50 cm/s이다. 4월에는 표층에서 수심 100 m까지의 유속분포는 큰 변화가 없었으며, 소용돌이의 최대유속은 수심 100 m에서 약 70 cm/s의 북향류로 나타났다. 수심 250 m 아래에서 유속은 10 cm/s 이하로 급속히 감소한다.
- 9월에는 전체적으로 수심 50 m 부근에서 소용돌이의 최대유속이 나타나며, 수심 100 m까지 유속은 표층과 크게 변하지 않았지만, 그 아래에서는 유속이 급속히 작아져 수심 200 m에서는 대체로 10 cm/s 이하 였다. 4월과 비교하였을 때 전체적으로 10~20 cm/s 정도로 유속이 감소하였다. 4월과 9월에 ADCP에 의하여 관측된 유속은 지형류 계산에 의한 유속분포와 대체로 잘 일치하여 소용돌이가 地衡流 平衡을 잘 이루고 있었기 때문에 1993년 9월이후에도 수개월 이상 더 지속되었을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 국립수산진흥원, 1979. 해양조사연보 28권, pp. 586
- 김철수 등, 1993. 동해에서의 중규모 해황변동에 관한 연구(1차년도), 해양연구소 보고서 BSPN 00187-611-1, pp 84.
- 김형록, 1991. 울릉도 주변 중층균질수의 수직구조와 시간적변화, 서울대학교 이학석사 학위논문, pp 84.
- 석문식, 이홍재, 변상경, 육상섭, 1988. 동해해황특성과 수치실험, 해양연구소 보고서 BSPE00112-186-1, pp. 148.
- An, HuiSoo, Kyungsin Shim and Hong-Ryeol Shin, 1994. On the Warm Eddies in the Southern part of the East Sea (the Japan Sea), The Journal of the Korea Society of Oceanography, Vol. 29, No.2, pp.152-163.
- Byun, S.-K., and K. I. Chang, 1988. Tsushima Current water at the entrance of the Korea Strait in Autumn, Prog. Oceanogr., 21, 295-306.
- Isoda Y., and S. Saitoh, 1993. The northward intruding eddy along the east coast of Korea, Journal of Oceanography, in press.
- Lie, H.-J., 1984. A note on water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae), J. Oceanol. Soc. Korea 19, 187-194.
- Shin H.-R., Y. Nagata, and J. Yoshida, 1992. Detailed structure and water-type distribution of the warm-core ring 86B, September 1987, Deep-Sea Research, 39(Suppl.), s115-s130.
- Tomosada A., 1978. A large warm eddy detached from the Kuroshio east of Japan, Bulletin of the Tokai Regional Fisheries Research Laboratory, 94, 59-103.
- Yasuda I., K. Okuda, and J. Li, 1992. Evolution of a Kuroshio warm-core ring variability of the hydrographic structure, Deep-Sea Research, 39(Suppl.),