

413

TM
551.46
변 22502
1999

碩士學位請求論文

9003892

여름철 제주도 서편 해역의 저염화에 관한 정량적 연구

全南大學校大學院

海洋學科

邊 都 星

指導教授 趙 暘 基

1999年 2月

여름철 제주도 서편 해역의 저염화에 관한 정량적 연구

全南大學校大學院

海洋學科

邊 都 星

上記者의 理學碩士學位論文을 認准함

	所屬	職位	學位	姓名
審査委員長	全南大學校	副教授	農學博士	徐海奎 
審査委員	全南大學校	助教授	理學博士	金光龍 
審査委員	全南大學校	助教授	理學博士	趙暘 

1999年 2月

목 차

목 차	i
List of Tables	ii
List of Figures	iii
초 록	vii
1. 서 론	1
2. 자료 및 방법	6
2-1. 자료	6
2-2. 저염수의 범위 정의	7
2-3. 염분변화에 필요한 담수량 계산	7
3. 결 과	9
3-1. 제주도 주변 해역의 표층 염분분포 특성	9
3-2. 저염수의 두께	17
3-3. 여름철 저염화를 일으키는 담수의 양	20
3-4. 저염화의 원인	23
3-5. 제주도 주변 해역의 해류	27
4. 토 의	30
5. 결 론	37
6. 참고 문헌	39
Appendix	43
Abstract	51

List of Table

Table 1. Annual Fluvial Runoff Resource in the Yangtze River(Changjiang) drainage basin.	2
Table 2. Fresh water discharge($\times 10^3$ m ³ /s) and sediment transport(tons/year) from the Yangtze river flowing into the East China Sea. Values represent annual monthly averages.	4
Table 3. Mean precipitation and evaporation at Cheju city in June and July for 10 years from 1986 to 1995 and at the same station in June and July 1996. (unit : mm)	23

List of Figures

- Fig. 1. Three-dimensional depth topography of the northern East China Sea and the southern Yellow Sea. 3
- Fig. 2. Location of the serial oceanographic stations taken by National Fisheries Research and Development Agency of Korea in the South Sea. 6
- Fig. 3. Schematic diagram of salt conservation box model. 7
- Fig. 4. Horizontal distributions of salinity at the sea surface in June(a, c) and August(b, d). Mean salinity over 30 years from 1966 to 1995 and salinity in 1996 are used for (a, b), and (c, d) respectively. 11
- Fig. 5. Horizontal distributions of the difference of (a) annual mean salinity, (b) salinity in 1996 between August and June, and distributions of the salinity anomalies at surface in (c)June and (d)August 1996 from the annual mean salinity. 12
- Fig. 6. Horizontal distributions of annual mean salinity at the depth of 10m (a, b) and of vertical annual mean

salinity difference between the depth of 10m and sea surface (c, d) in June(a, c) and August(b, d) over 30 years from 1966 to 1995. 14

Fig. 7. Horizontal distributions of salinity at the depth of 10m and of vertical salinity differences between the depth of 10m and sea surface in June(a, c) and August(b, d) in 1996. 15

Fig. 8. Horizontal distributions of salinity difference, and salinity anomaly between the depth of 10m and sea surface. (a) and (b) are salinity differences between August and June in annual mean and 1996 respectively. (c) and (d) are salinity anomalies between 1996 and annual year in June and August respectively. 16

Fig. 9. Vertical sections of salinity along Line 313 in June(a, c) and August(b, d). Mean salinity over 30 years from 1966 to 1995 and salinity in 1996 are used for (a, b) and (c, d), respectively. 18

Fig. 10. Vertical sections of salinity difference between August and June along Line 313. (a) is difference of annual mean salinity over 30 years from 1966 to 1995, and (b) is difference of salinity in 1996 between August and June. 19

Fig. 11. A map showing the study area.	20
Fig. 12. Variations of vertically monthly mean salinity up to depth of 10m with a linear trend in June and July respectively and of the volume of the fresh water per unit area needed for salinity the decrease at the study area between June and August from 1967 to 1997.	22
Fig. 13. The annual variation of monthly mean discharge (Shen <i>et al.</i> 1997).	24
Fig. 14. Monthly mean discharge (a) and annual mean discharge (b) during 1961 ~ 1985(Shen <i>et al.</i> 1998)	25
Fig. 15. Drifter trajectory in the East China Sea. Drifter trajectory starts near the mouth of the Yangtze River in July 15. 1986. Marks are printed along each trajectory every 12 days. Drifter 6986 is from Beardsely <i>et al.</i> (1992).	28
Fig. 16. Variations of sea surface salinity in the coast of Cheju Island for 5 -16 August 1996.	29

- Fig. 17. Relations between the discharge of Yangtze River in (a) June and (b) July and vertical mean salinity in August up to the depth of 10m at the study area. 31
- Fig. 18. Horizontal distributions of sea surface salinity in the coasts of Cheju Island in (a) early August and (b) early September. 32
- Fig. 19. Venn diagram of salinity showed up in the coasts of Cheju island in August from 1967 to 1998. 33
- Fig. 20. Paths of the Yangtze Diluted Water as inferred from salinity measurements(after Le, 1983). 35

(국문 요약)

여름철 제주도 서편 해역의 저염화에 관한 정량적 연구

변 도 성

전남대학교 대학원 해양학과

(지도교수 : 조 양 기)

국립수산진흥원에서 관측한 염분자료와 Shen *et al.*(1998)이 관측한 양쯔강 유출량 자료를 분석하여, 여름철 제주도 서편 해역의 저염화 현상을 정량적으로 규명하였다.

염보존 Box 모델 결과에 의하면, 여름철 저염화를 일으키는데 필요한 담수량은 평년(1966~1995)의 경우 $30.052 \text{ km}^3/2\text{month}$ 이고, 유난히 저염화가 심했던 1996년의 경우 $56.536 \text{ km}^3/2\text{month}$ 이다. 이 양을 단위 표면적당 담수량으로 환산하면 각각 $923.4 \text{ mm}/2\text{month}$ 와 $1,737.0 \text{ mm}/2\text{month}$ 의 강수량에 해당된다. 따라서 6월과 8월 사이의 저염화는 양적인 측면에서 제주도 인근의 강수량과 강물의 유입으로는 설명될 수 없고, 양쯔강물의 유입으로만 설명이 가능하며, 그 양은 양쯔강 유출량의 10~20 %이다. 이로인해 여름철에 제주도 서편 해역에 31 % 이하의 저염수가 출현한다. 기존의 연구결과에 의하면 양쯔강 회석수의 이동속도는 평균 $10\sim15 \text{ cm/sec}$ 이므로, 양쯔강 입구에서 제주도 연안까지 도달하는데 33~50일이 걸린다.

그러나, 해마다 여름철에 제주도 서편 해역이 저염화되는 것은 아니다. 드물지만 제주도 동편 해역이 서편 해역보다 더 저염이거나, 저염의 물이 전혀 출현하지 않는($< 32 \%$) 해도 존재한다. 그러므로 제주도 서편해역의 저염화는 양쯔강 유출량 뿐만 아니라 양쯔강물의 방향과도 깊은 관련이 있을 것으로 생각된다.

1. 서론

제주도 주변해역의 해수 특성은 겨울에는 저온고염이고, 여름에는 고온저염으로 계절적으로 크게 변한다. 수온과 염분의 계절 변화 폭은 평균 약 17℃와 3‰에 이른다(공, 1971; 강, 1974).

1996년 8월초에 전례 없는 저서생물들의 대량 폐사(mass mortality)가 제주도 서북부 연안에서 발생하였다. 국립수산진흥원의 조사결과에 따르면 피해를 입은 생물들은 주로 3 m 이내에 서식하는 전복, 소라, 오분자기, 성게 등 정착성 저서동물들로, 그 원인을 고수온(> 29℃) 및 해수의 저염화(< 30‰)로 인한 '쇼크사'라는 잠정적인 결론을 내렸다(공동어장 피해대책협의회자료, 1996).

대부분의 해양 무척추동물들의 체액 농도는 염분과 유사한 등장액(等張液, isotonic)으로 되어 있어, 자신들의 체액 농도를 주위 환경의 농도와 유사하게 조절할 수 있으나 그 조절 범위는 극히 좁다. 이 때문에 해수의 염분이 낮아지면 삼투현상에 의해 물이 세포 내로 들어와 세포막이 건널 수 있을 때까지 팽창하게 되며, 그 이상 물이 들어오면 결국 세포가 터져서 사망하게 된다. 이와 관련한 북제주군 수산종묘 배양장의 실험결과, 염분이 25‰까지 떨어지면 수온 29℃에서 전복류는 3일만에 13%가 폐사하는 것으로 나타났으며, 국립수산진흥원 동해수산연구소의 연구결과에 따르면, 가리비는 20‰ 염분에서 18시간만에 전부 폐사하였고, 30‰ 이상의 염분에서는 0.65 l/hr 이상의 많은 여수량을 나타냈으나 25‰ 이하에선 0.22 l/hr의 여수량을 나타내어, 염분이 낮아지면 여수율도 현격히 낮아져 생리적 장애를 받아 폐사로 이어질 가능성이 큰 것으로 추정하였다(류 등, 1997). 이러한 결과들은 고수온과 더불어 저염분이 생물들에게 생리적 스트레스로 작용함을 보여준다.

그렇다면, 이러한 저염수가 여름철에 제주도 서북부 연안에 출현하게 된 원인은 무엇이며, 해마다 출현하는 것일까? 이 문제에 대한 해결의 실마리를 해수의 염분변화 일으키는 물리적 요인과 이와 관련하여 해양환경의 시·공간적 변화를 일으키는 물리적 요인의 이해로부터 찾아보자.

저염화를 일으키는 물리적 요인으로 강을 통한 담수의 유입, 강수, 인접해역으로부터의 저염수 유입을 고려할 수 있으며, 해양환경의 시·공간적 변화를 일으키는 주된 요인으로 해류를 생각할 수 있다. 이러한 조건들을 고려했을 때, 가장 가능성 있는 가설로 제기되고 있는 것이 양쯔강물의 유입이다. 먼저 이에 대한 이해를 도모하기 위해 양쯔강의 특성과 유출된 강물의 이동에 관한 기존 연구들을 살펴보겠다.

양쯔강의 특성과 유출된 강물의 유로(流路)

티벳 고원(Tibetan Frigid Plateau)에서 발원하는 양쯔강(揚子江; Yangtze River)은 남아메리카의 나일강과 아프리카의 아마존강에 이어 세계에서 세 번째로 큰 강으로, 중국 대륙 중앙부를 횡단하여 동지나해로 흐른다(Fig. 1). 그 길이는 6,300 km로 중국 사람들은 흔히 긴 강을 뜻하는 장강(長江; Chang jiang)이라 부른다.

유역 면적(drainage area)은 중국전체면적 ($9.6 \times 10^6 \text{ km}^2$)의 약 19 %에 해당하는 약 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ 이고, 연평균 유출량(discharge)은 약 $9 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{yr}$ 으로 세계 다섯번째이며, 전체 유출량의 약 70 %가 동지나해로 흘러 들어간다(Table 1). 평균 토사 배출량은 세계 네 번째인 $5 \times 10^8 \text{ t/yr}$ 으로 해마다 상당량의 물질이 동지나해와 황해로 운반된다(Beardsley *et al.*, 1985; Hu, 1994).

Table 1. Annual fluvial runoff resource in the Yangtze River(Changjiang) drainage basin.

Drainage area		Annual fluvial runoff		Average runoff depth (mm)	Reference
Km ²	% of total land area	10 ⁸ m ³	% of total runoff resource		
1,807,119	18.83	9,793.89	37.66	542	Chinese Academy of Sciences(1981)
-	-	9,322	-	-	Cheng(1985)
1,808,500	18.84	9,513	-	-	Statistical yearbook of China(1994)
1,808,500	18.84	9,793.5	-	-	Zhao Songqiao (1994)

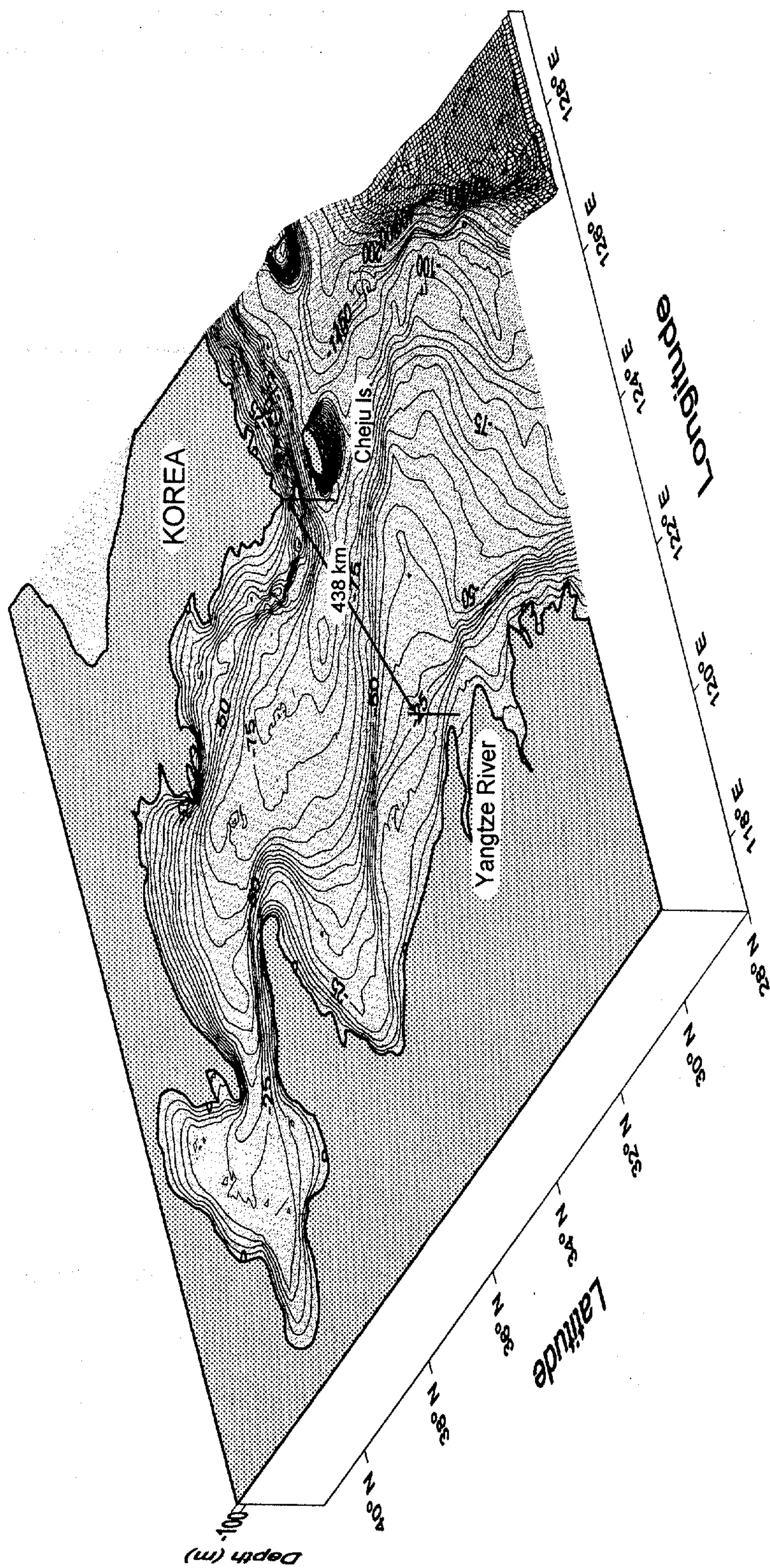


Fig. 1. Three-dimensional depth topography of the northern East China Sea and the southern Yellow Sea.

Table 2. Fresh water discharge($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$) and sediment transport (tons/year) from the Yangtze River flowing into the East China Sea. Values represent annual monthly averages.

Annual Mean	Maximum	Minimum	Sediment	Reference
20.0	50.0 (Jul.)	10.0 (Jan.)	-	Yang <i>et al.</i> (1983)
29.49	-	-	4.9×10^8	Milliman and Meade(1983)
30.0	45.0 (Jul.)	10.0 (Jan.)	-	Beardsley <i>et al.</i> (1985)
30.0	-	-	4.9×10^8	Wang and Aubrey (1987)
30.0	-	-	4.8×10^8	Yanagi (1994)
28.4	48.6 (Jul.)	10.4 (Jan.)	4.7×10^8	Shen <i>et al.</i> (1998)

연평균 유출량은 약 $30 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 1950년부터 1985년까지 36년 동안에 최대 연평균 유출량은 1954년에 $43,100 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 최소 연평균 유출량은 1978년에 $21,400 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 월평균 유출량의 최대값은 7월로 약 $50 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 최소값은 1월로 $10 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로, 6월부터 8월 사이가 전체 유출량의 39.07 %를 차지한다(Table 2). 이처럼 양쯔강의 유출량은 몬순기후의 영향으로 계절·연별 변화가 심하다.

유출된 양쯔강물(Changjiang Diluted Water; CDW)은 전형적으로 건기 때(11월~4월)는 강어귀를 떠나 좁은 띠 모양으로 해안을 따라 남하하고, 우기 때(5월~10월)는 대부분 경도 $122^\circ 10'E$ 와 $122^\circ 30'E$ 사이를 통과하여 북동쪽으로 흐른다(Zhao, 1992).

거의 해마다 동경 125° 이동(以東)의 제주도 서쪽 및 남해는 여름철에 표층해수가 뚜렷이 저염화 된다(강, 1971; 공, 1971). 제주해협을 가로질러 조사된 표층 염분은 7월초부터 10월까지 지속적으로 32.2 ‰ 이하의 값을 보이며, 여름철에 제주도 주변 대부분의 해역에서 표층에 32.2 ‰ 이하의 저염수가 출현한다. 그 중 최저염분을 갖는 핵(Core)은 제주도 서방해역에서 제주해협 서쪽

입구로 유입되어 해협을 동쪽으로 유출된다. 즉, 이 저염수는 양쯔강 입구에서 제주 해협을 거쳐 남해로 이동된 것으로 해석할 수 있다(김과 노, 1994). 김 등(1991)은 1980년 6월과 1981년 8월의 종관적 염분자료를 바탕으로 양쯔강 희석수가 저염수의 끝을 유지하며 제주해협을 통과하여 동진한다고 보고하였다.

위의 연구 보고들은 주로 여름철 표층 염분의 분포 구조로부터, 여름철 제주해협 표층에 출현하는 저염수가 중국대륙연안에서 기원하여 제주해협을 거쳐 남해로 흐를 가능성을 제시하고 있다. 그러나 지금까지 이에 대한 정량적인 설명은 거의 없다.

본 연구에서는 여름철 제주도 주변 해역의 염분 분포 특성을 살펴보고, 제주도 서편 해역을 저염화시키는데 필요한 담수량을 계산하여 담수의 공급원으로 양쯔강물이 양적으로 유일하다는 것을 보여주고자 한다. 그리고 기존 연구결과들을 토대로 양쯔강 유출수의 몇 %가 제주도 서편 해역에 영향을 미치며, 양쯔강 입구에서 제주도 연안까지 도달하는데 걸리는 소요시간에 관해 정량적으로 살펴보고자 한다. 아울러 양쯔강 유출량과 제주도 주변 해역의 저염화와의 관계도 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 방법

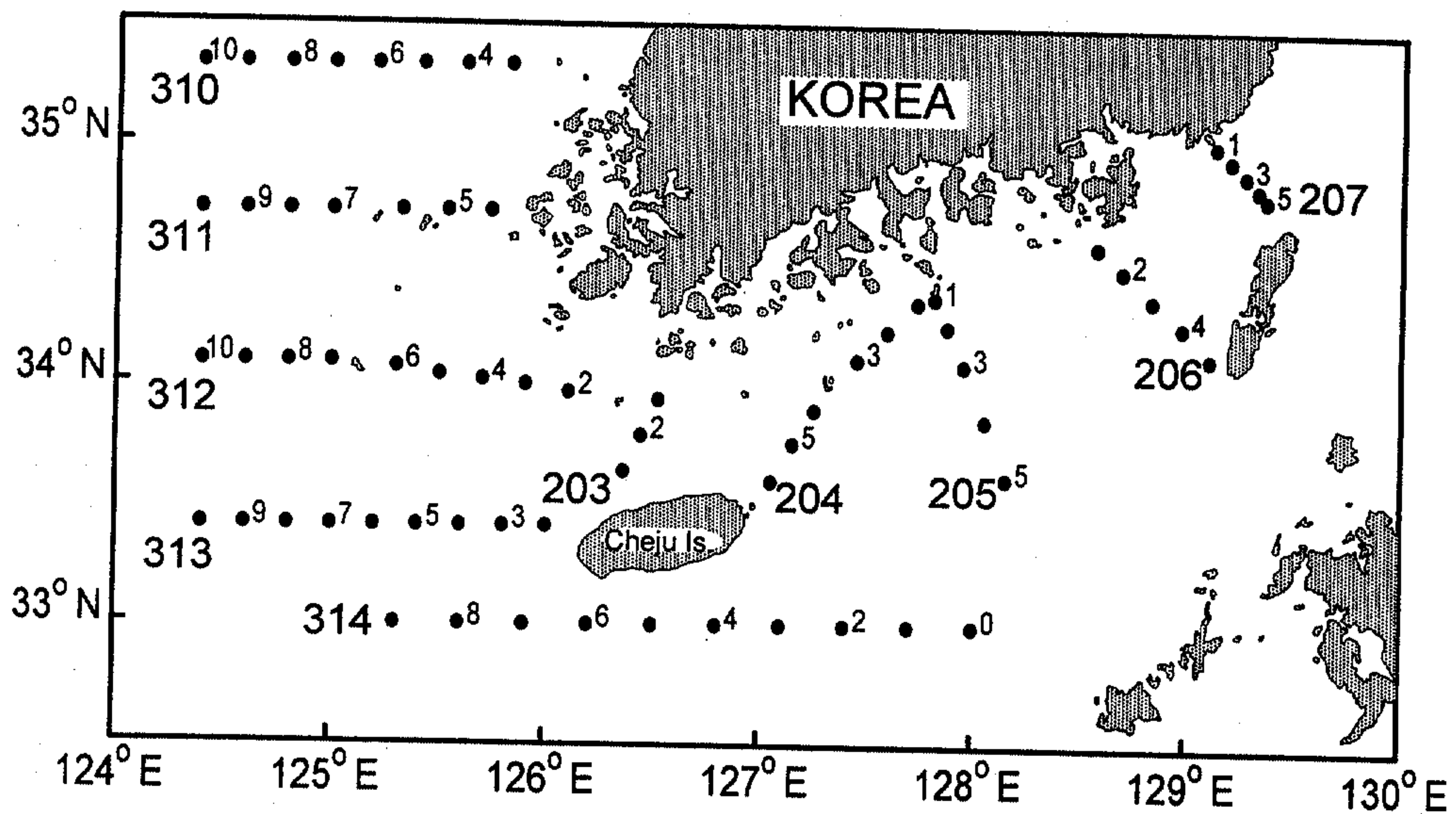


Fig. 2. Location of the serial oceanographic stations taken by National Fisheries Research and Development Agency of Korea in the South Sea.

2-1. 자료

사용된 자료는 국립수산진흥원(National Fishery Research Development Agency ; NFRDA)에서 격월 간격(2, 4, 6, 8, 10, 12월)으로 정선관측(Fig. 2)한 1965년부터 1998년까지 34년간 염분 자료와 Shen *et al.*(1998)이 보고한 1950년부터 1985년까지 36년간 월별 양쯔강 평균 유출량 그림에서 디지털라이저(Digitizer)를 이용하여 1961년부터 1985년까지 25년간 월평균 유출량을 숫자화한 자료이다.

2-2. 저염수의 범위 정의

저염수의 두께를 구하기 위해서, 6월과 8월의 표층염분 수평분포와 제주도 서편 해역의 국립수산진흥원 313 관측선을 기준으로 한 염분 수직단면을 고려하여 저염수의 염분범위를 정하였다. 특히, 6월과 8월의 국립수산진흥원 313 관측선을 기준으로 한 염분 수직단면에서, 6월에 형성되지 않았던 염분약층(halocline)이 존재하는 수심까지를 저염수의 두께로, 그 수심까지의 염분을 저염수의 염분범위로 보았다.

표층에서 저염수가 존재하는 수심까지 각 조사정점별 평균염분을 계산한 다음 계산된 수심 평균 염분값들을 내삽하여 각 격자별 염분값을 구하였으며, 이 값들을 평균하여 연구 해역내 수심 평균 염분을 구하였다.

2-3. 염분변화에 필요한 담수량 계산

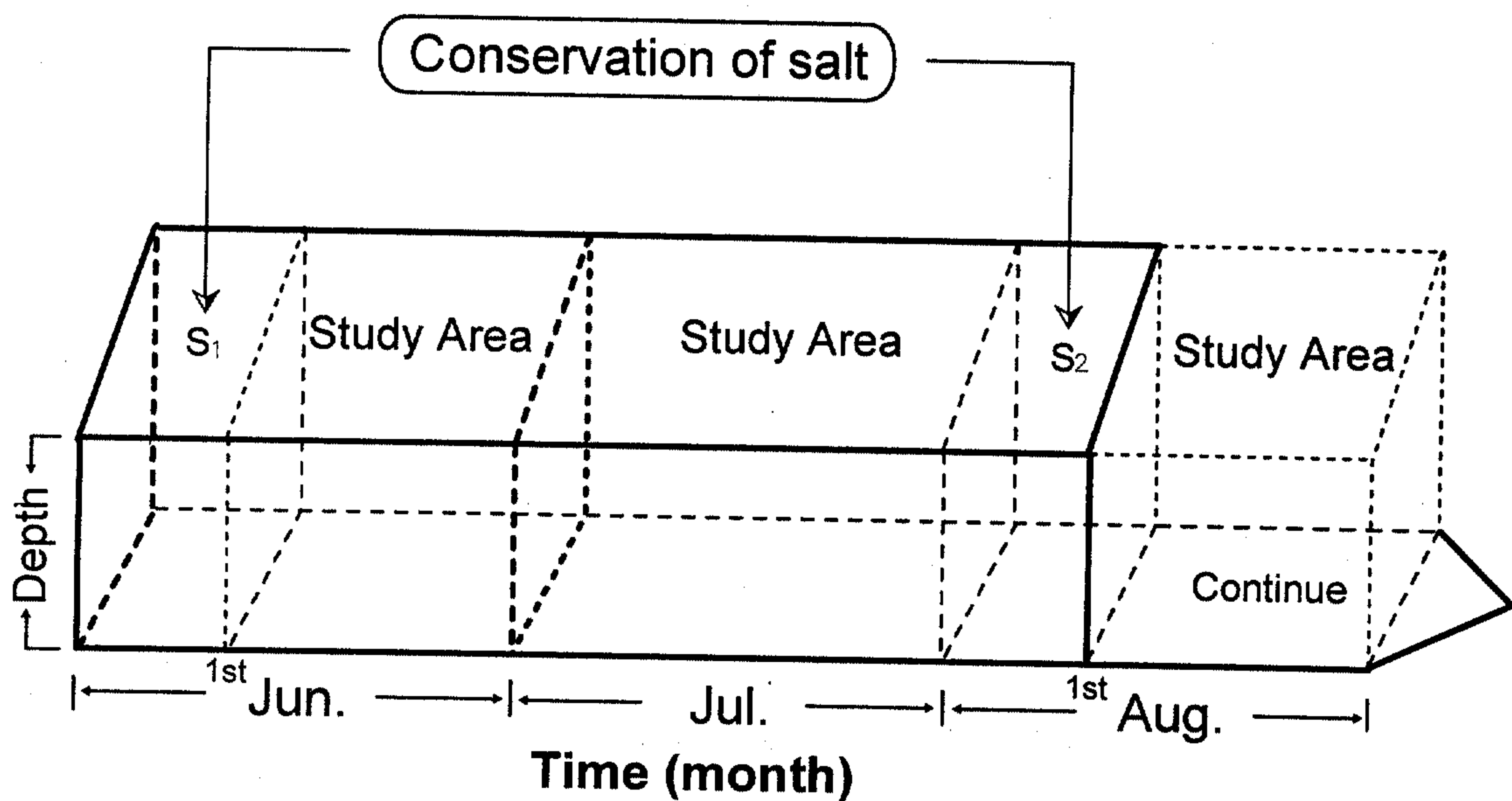


Fig. 3. Schematic diagram of salt conservation box model.
(S: mean salinity, V: water volume)

물의 압축률은 작으므로, 체적(volume)이 보존된다고 가정하고 Fig. 3과 같은 염보존 Box 모델을 이용하여 6월초와 8월초 사이에 염분변화에 필요한 담수량을 계산하였다. 이때 주위해역과의 해수 교환은 전혀 고려하지 않았다.

연구해역의 해수의 양을 V , 저염화를 일으키는데 필요한 담수량을 X , 기존 해수의 평균 염분 (S_1)과 일정시간 경과후의 평균 염분 (S_2)과의 차, 즉 염분 변화율을 ΔS 라 하면, 저염화되기 전과 후의 전체 염량은 같아야 하므로 다음과 같은 식이 성립한다(Knudsen, 1900; Knauss, 1997).

$$VS_1 = (V+X)S_2$$

$$\therefore X = V \frac{\Delta S}{S_2}$$

이 식으로부터 염분변화에 필요한 담수의 양(X)을 구한다.

3. 결 과

3-1. 제주도 주변 해역의 표층 염분분포 특성

3-1-1. 수심 0m 수평염분 분포

Fig. 4는 제주도 주변 해역의 표층 수평염분 분포도이다. 평년 6월의 경우 (Fig. 4. (a)), 제주도 서편 해역의 염분은 32~33.2 ‰이고 동편 해역의 염분은 33.4 ‰ 이상이며, 제주도 서쪽 약 140 km 해역에서 32.2 ‰ 이하의 저염수가 나타나지만 제주도 주변 해역은 대부분 32.2 ‰ 이상이다.

평년 8월(Fig. 4. (b))에는 평년 6월에 비해 염분이 낮아져, 제주도 서편 해역은 31 ‰ 이하의 저염수가 위도 약 33.7° N까지 폭넓게 분포하는 반면, 동편 해역은 서편 해역에 비해 더 고염인 31.2 ‰ 이상의 해수가 존재한다. 저염수의 핵은 30.4 ‰ 이하로 평년 6월의 최저 염분과 비교하였을 때, 최대 약 2.5 ‰ 더 낮으며, 평년 6월에 비해 제주도 서편 해역과 동편 해역은 각각 1.0~2.5 ‰과 1.5~2.0 ‰ 염분이 더 낮다(Fig. 5. (a)).

이처럼 서편 해역이 동편 해역에 비해 염분이 더 낮으며, 또한 상대적으로 위도와 경도에 따른 염분 변화가 심하지 않는 것이 특징이다.

1996년 6월(Fig. 4. (c))에, 제주도 서편 해역의 염분은 31~34 ‰로, 제주도 서쪽 약 150 km 해역에서 32 ‰ 이하의 저염수가 나타나지만, 대부분 32 ‰ 이상이며, 평년 6월 염분(Fig. 4. (a))과 비교하였을 때, 제주도 서편 125° E를 기준으로 한 서쪽 해역은 염분이 1~2 ‰ 더 낮지만, 동쪽 해역은 염분이 1 ‰ 이상 더 높다(Fig. 5. (c)). 제주도 동쪽 해역은 34 ‰ 내외의 고염수가 분포하고 있다.

그러나 8월에 이례적으로 평년에 비해 염분이 큰 폭으로 낮아져, 국립수산진흥원 정선관측 정점 313-05와 314-09에 걸쳐 존재하는 20 ‰ 이하인 저염의 핵(core)을 중심으로 제주도 서편 해역에 30 ‰ 이하의 저염수가 반경 100 km 이상의 넓은 범위로 존재한다(Fig. 4.(d)).

1996년 8월의 염분 최소값은 약 19 ‰로, 이 값은 같은 해 6월에 비해 약 12 ‰ 이상 더 낮은 값(Fig. 5. (b))이며, 평년 8월에 비해 약 10 ‰ 이상 더 낮은 값(Fig. 5. (d))으로 1965년부터 1998년까지 34년간 해양관측 이래 가장 낮은 값이다.

한편, 제주도 동편 해역의 경우, 30 ‰ 이하의 저염의 핵이 존재하지만, 서편 해역에 비해 10 ‰ 이상 고염이다(Fig. 4. (d)). 그러나 이 수치는 평년에 비해 1~2 ‰ 낮은 값으로, 1996년 8월에 제주도 주변 해역 전체가 평년에 비해 상대적으로 염분이 낮았음을 말해 준다(Fig. 5. (d)).

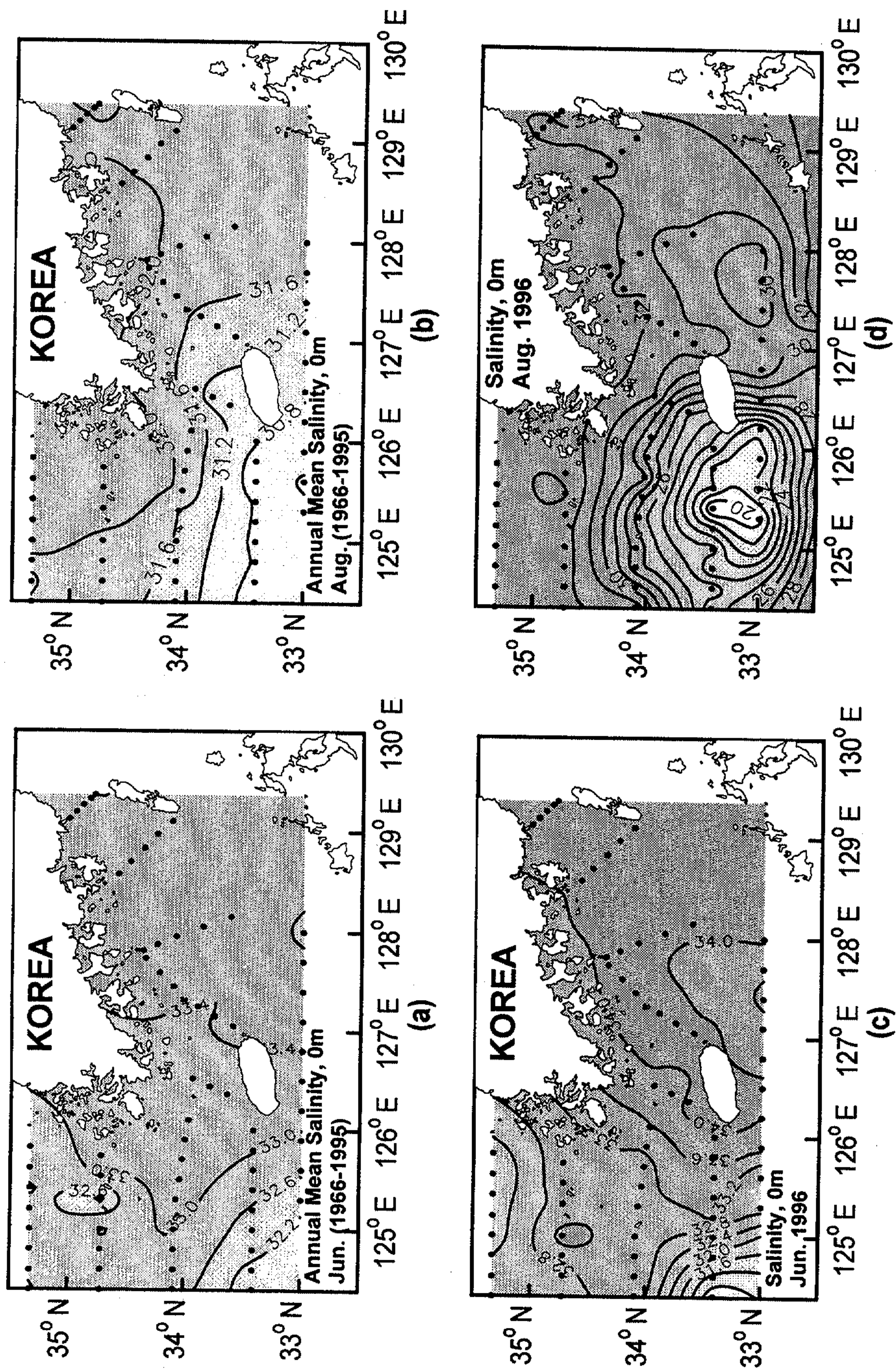


Fig. 4. Horizontal distributions of salinity at the sea surface in June(a,c) and August(b, d). Mean salinity over 30 years from 1966 to 1995 and salinity in 1996 are used for (a, b), and (c, d) respectively.

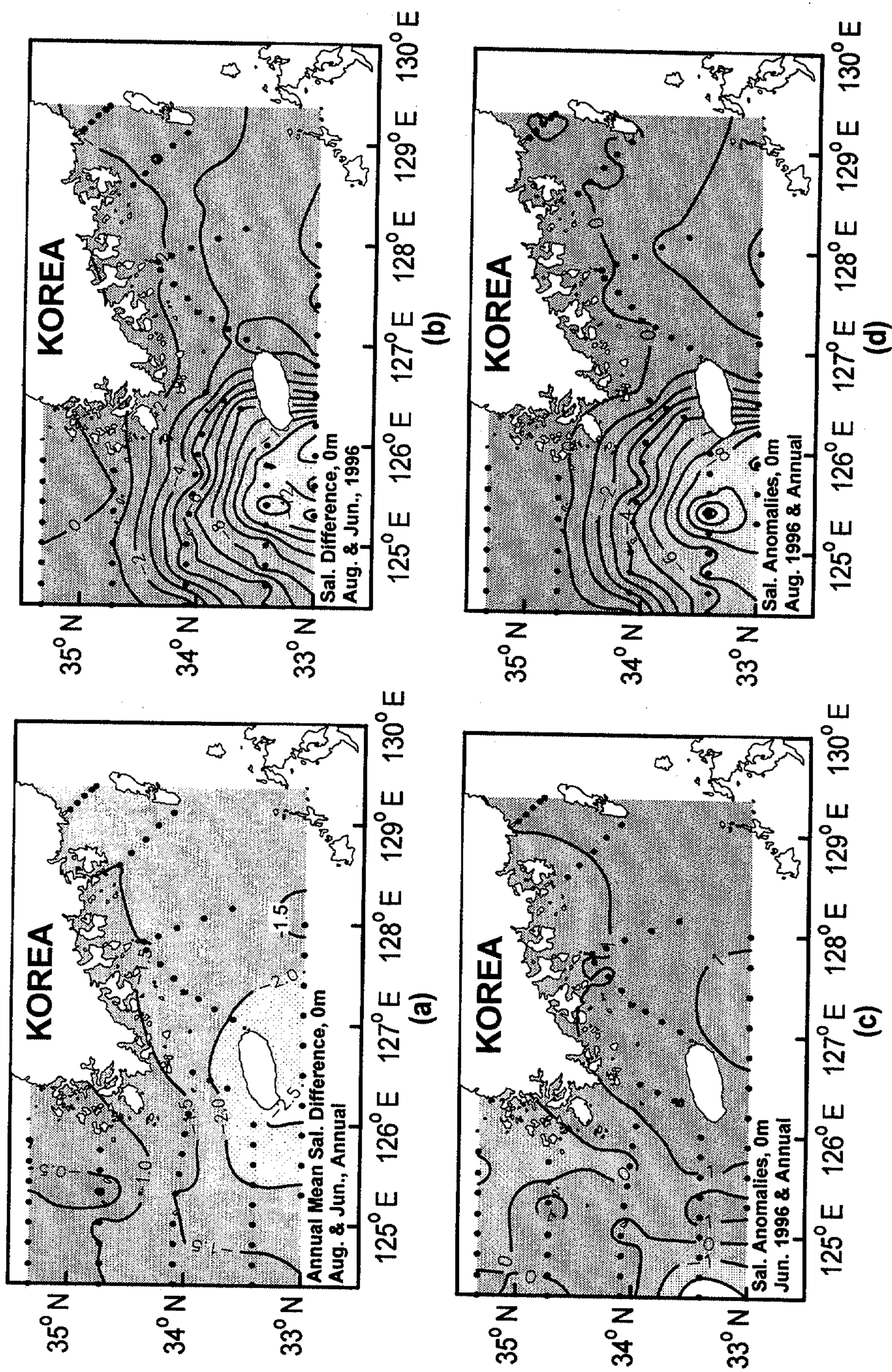


Fig. 5. Horizontal distributions of the difference of (a) annual mean salinity, (b) salinity in 1996 between August and June, and distributions of the salinity anomalies at surface in (c) June and (d) August 1996 from the annual mean salinity.

3-1-2. 수심 10 m 수평염분 분포

수심 10 m에서 평년 6월의 경우, 제주도 서편 해역의 염분은 약 32.2~33.4 ‰로 평년 6월의 표층에 비해 약 0.1~0.2 ‰ 더 높고, 동편 해역은 33.4 ‰ 이상으로 표층에 비해 0.1 ‰ 이내로 염분이 더 높으나, 수평염분 분포는 비슷하여 서편 해역에서 동편 해역으로 갈수록 염분이 증가한다(Fig. 6. (a), (c)).

평년 8월에, 수심 10 m에서 제주도 서편 해역의 염분은 약 30.8~32.0 ‰이고, 동편 해역은 약 31.4~32.0 ‰로, 표층에 비해 약 0.2~0.6 ‰ 더 고염이며(Fig. 6. (b), (d)), 수심 10 m에서 6월과 8월의 염분 편차는 약 1~2 ‰로, 8월에 염분이 수심 10 m까지 상대적으로 낮음을 알 수 있다(Fig. 8. (a)).

1996년 6월의 경우, 수심 10 m에서 제주도 서편과 동편 해역의 염분은 각각 약 33.0~34.2 ‰과 34.0 ‰ 이상으로(Fig. 7. (a)), 표층과의 염분차는 각각 약 0~1.4 ‰과 약 0 ‰로 125° E 서편의 일부 해역을 제외하고 표층보다 약간 높거나 표층과 거의 균일한 염분분포를 보인다(Fig. 7. (c)). 그리고 제주도 주변 해역 전체가 평년 6월보다 약 0.5 ‰ 높은 편이다(Fig. 8. (c)).

그러나 1996년 8월의 경우, 수심 10 m에서 제주도 서편과 동편 해역의 염분은 각각 약 29.0~32.0 ‰과 약 31.5~32.5 ‰(Fig. 7. (b))로, 제주도 서편 해역이 동편 해역보다 약 0.5~2.5 ‰ 더 낮으며, 표층과 달리 제주도 서편 해역 위도 34° N에서 약 29 ‰의 두 개의 핵(core)이 존재한다. 염분은 이 두 핵을 중심으로 평년 8월에 비해 1~2 ‰ 더 낮으나 동편 해역은 거의 비슷하다(Fig. 8. (d)).

수심 10 m에서 제주도 동편 해역은 표층에 비해 염분이 약 1 ‰ 정도 높아 염분 수직구배는 0.1 ‰/m인 반면에, 서편 해역은 동일한 수심에서 표층과의 염분차가 약 1~12 ‰로 염분 수직구배는 0.1~1.2 ‰/m이다. 서편 해역 표층에 상대적으로 아주 저염인 해수가 10 m 수심에 걸쳐 얇게 존재함을 알 수 있다(Fig. 7. (d)). 수심 10 m에서 8월과 6월과의 염분 편차를 살펴보면, 8월에 제주도 서편해역은 6월에 비해 약 1~4 ‰ 정도 염분이 낮으며, 동편 해역은 약 2~3 ‰ 정도 상대적으로 염분이 낮다(Fig. 8. (b)). 수심 10 m에서도 표층과 유사하게 여름철에 제주도 서편해역이 동편해역보다 염분이 더 낮으며, 6월에서 8월 사이에 염분이 낮아짐을 알 수 있다.

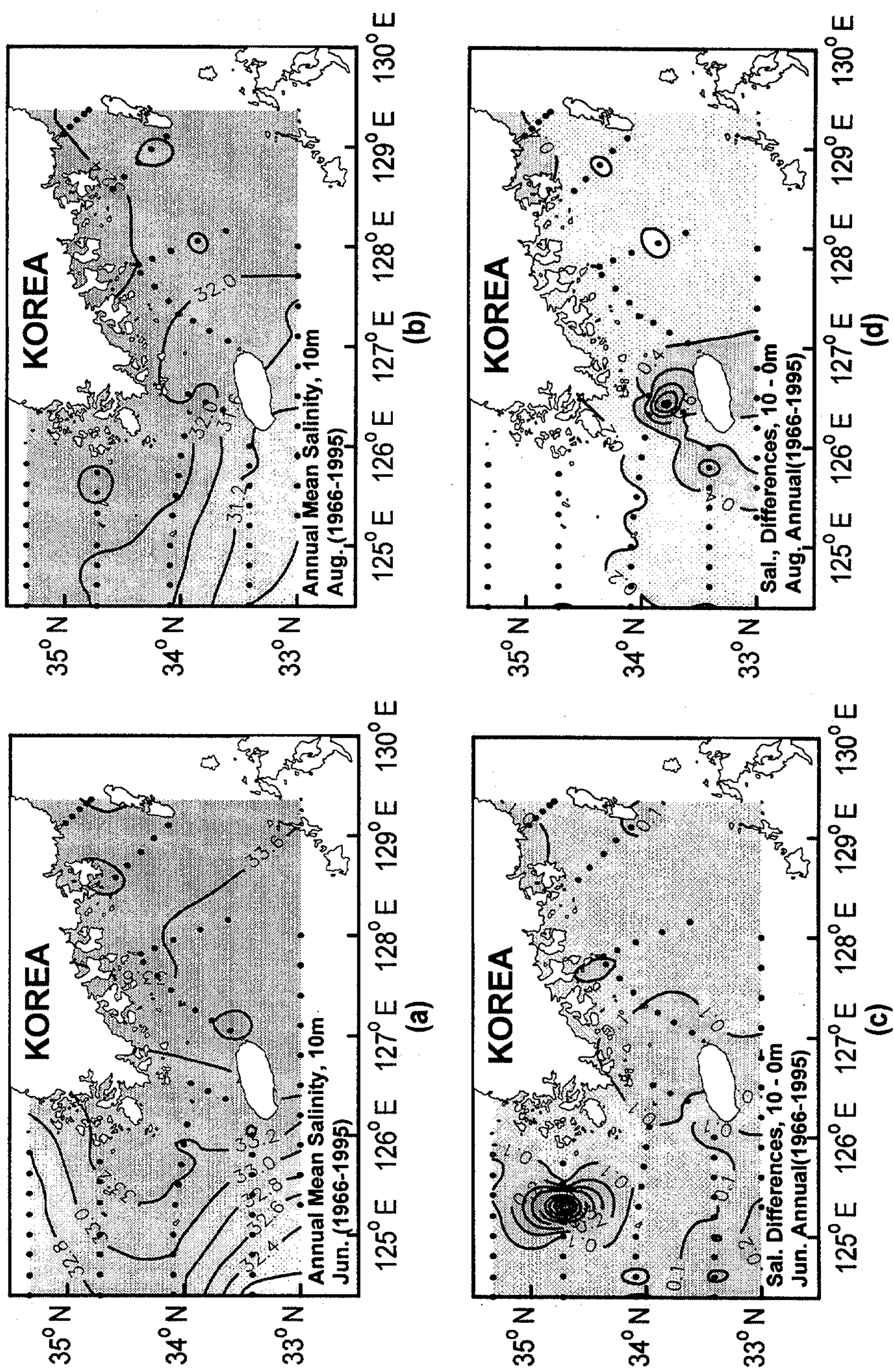


Fig. 6. Horizontal distributions of annual mean salinity at the depth of 10m (a, b) and of vertical annual mean salinity difference between the depth of 10m and sea surface (c, d) in June(a,c) and August(b, d) over 30 years from 1966 to 1995.

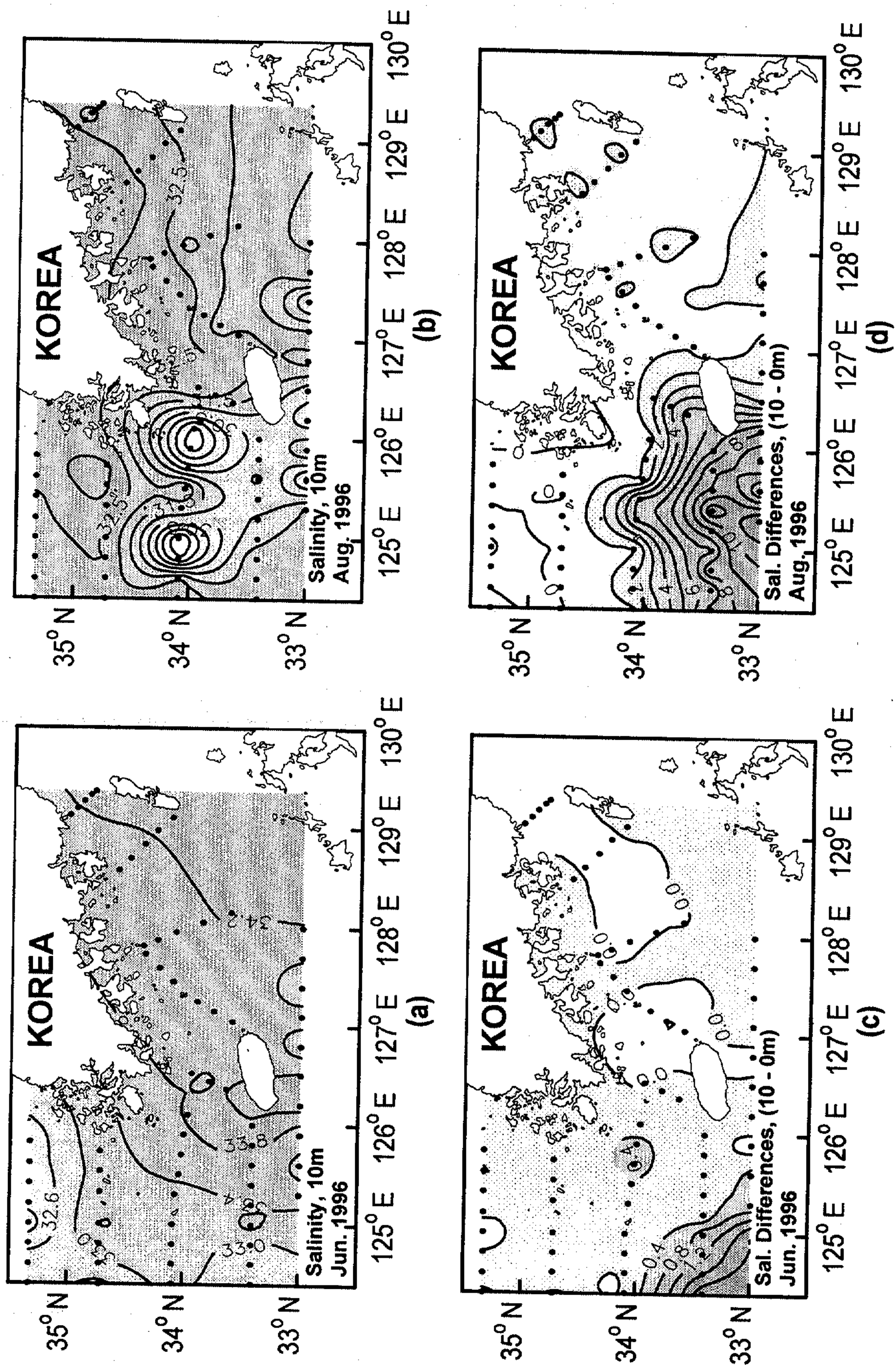


Fig. 7. Horizontal distributions of salinity at the depth of 10m and of vertical salinity differences between the depth of 10m and sea surface in June (a, c) and August (b, d) in 1996.

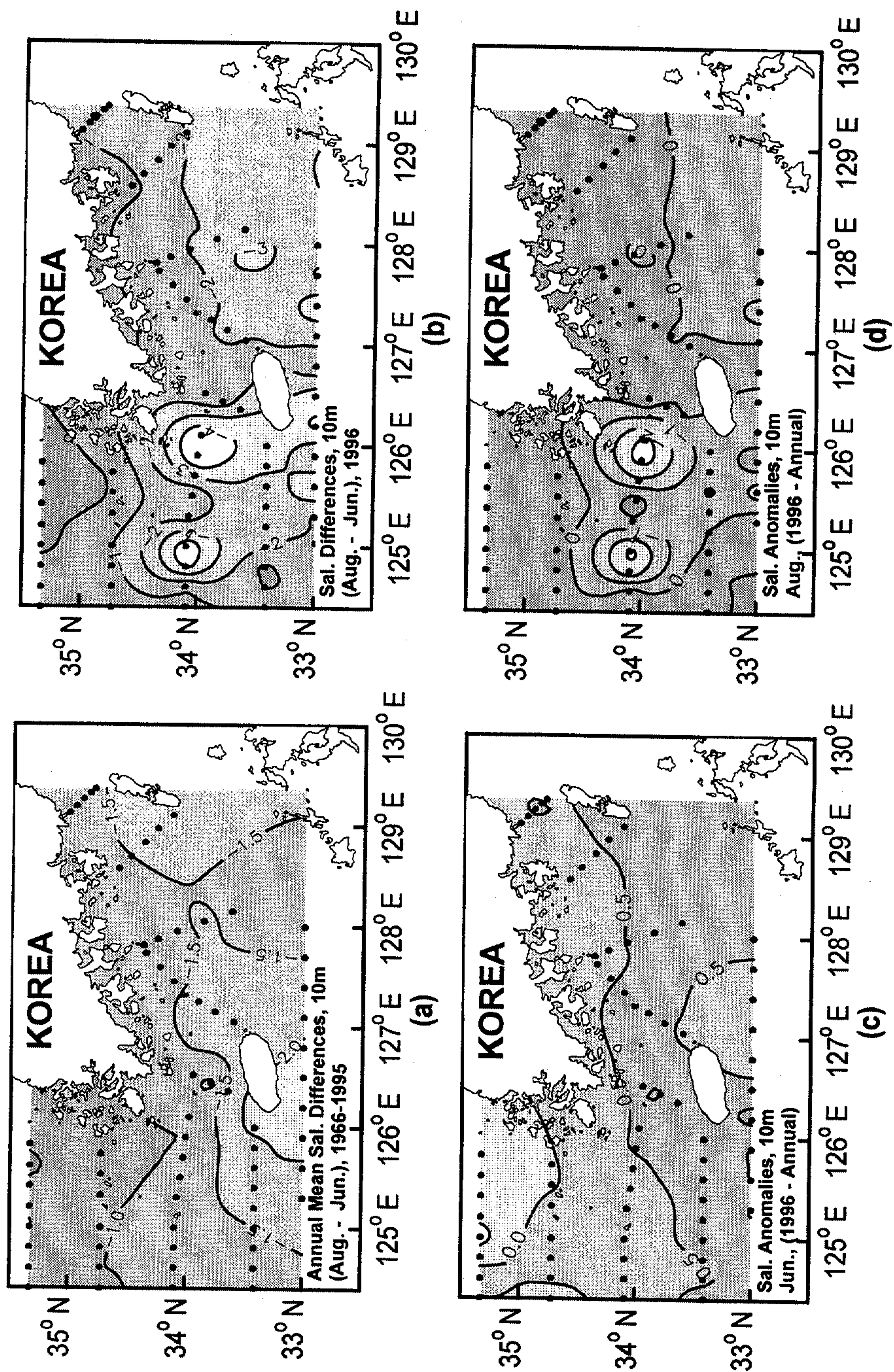


Fig. 8. Horizontal distributions of salinity difference, and salinity anomaly between the depth of 10m and sea surface. (a) and (b) are salinity differences between August and June in annual mean and 1996 respectively. (c) and (d) are salinity anomalies between 1996 and annual year in June and August respectively.

3-2. 저염수의 두께

저염수의 두께는 어느 정도나 될까? 이 문제를 해결하기 위해선 먼저 몇 ‰의 해수를 저염수로 볼 것인지에 대한 기준 설정이 필요하다. 김(1985)은 국립수산진흥원 관측정점 203-03점(제주도 북쪽)에 대한 20년간(1965~1984년) 표층에서 최저염분이 출현하는 월의 염분 수직분포를 통해, 32.2 ‰ 이하를 중국대륙연안수의 영향에 의한 저염수로 정의하였다.

이와 달리 본 연구에선 앞서 제시한 바와 같이 8월에 국립수산진흥원 313 관측선을 기준으로 한 염분 수직단면에서 표층으로부터 염분약층(halocline)이 존재하는 수심까지의 염분을 저염수의 염분범위로, 그 수심을 저염수의 두께로 정의하고자 한다.

이를 위해 제주도 서편 해역의 국립수산진흥원 313 관측선을 기준으로 한 염분 수직단면을 살펴보기로 하자. Fig. 9의 (a), (b) 평년 염분수직단면에서 알 수 있듯이 6월에는 서쪽 해역 일부 표층수를 제외하고 대부분 32.2 ‰ 이상이며, 8월에는 전체 단면에서 31 ‰ 이하의 저염수가 약 10 m 두께로 나타나 10 m 수심까지 염분의 수직구배는 0.08 ‰/m이다. 그리고 32.2 ‰ 이하의 저염분의 물이 수심 약 20 m까지 존재하여, 20 m 수심까지 염분의 수직구배는 약 0.07 ‰/m이다. 1996년의 경우(Fig. 9. (c),(d)), 6월에는 서쪽 해역 일부 표층수를 제외하고 대부분 33 ‰ 이상이며, 8월에는 전체 단면에서 30 ‰ 이하의 저염수가 약 10 m 두께까지 나타나 평년보다 약 7.5배 강한 염분 약층을 보인다. 그리고 표층에서 수심 20 m까지 염분이 약 9 ‰ 증가하여 염분의 수직구배는 약 0.45 ‰/m로 평년보다 6배 이상 큰 매우 강한 염분 성층을 이루고 있다. Fig. 10의 (a)는 평년 8월과 6월의 염분 차를 나타낸 그림이며, Fig. 10의 (b)는 1996년 8월과 6월의 염분 차를 나타낸 그림이다. 여름철에 Fig. 10의 (b)에 같은 강한 염분 성층은 수온 성층과 함께 안정된 구조를 이루어 해수의 수직적인 혼합을 방해하고 그 구조가 오랜 기간 지속될 수 있게 한다.

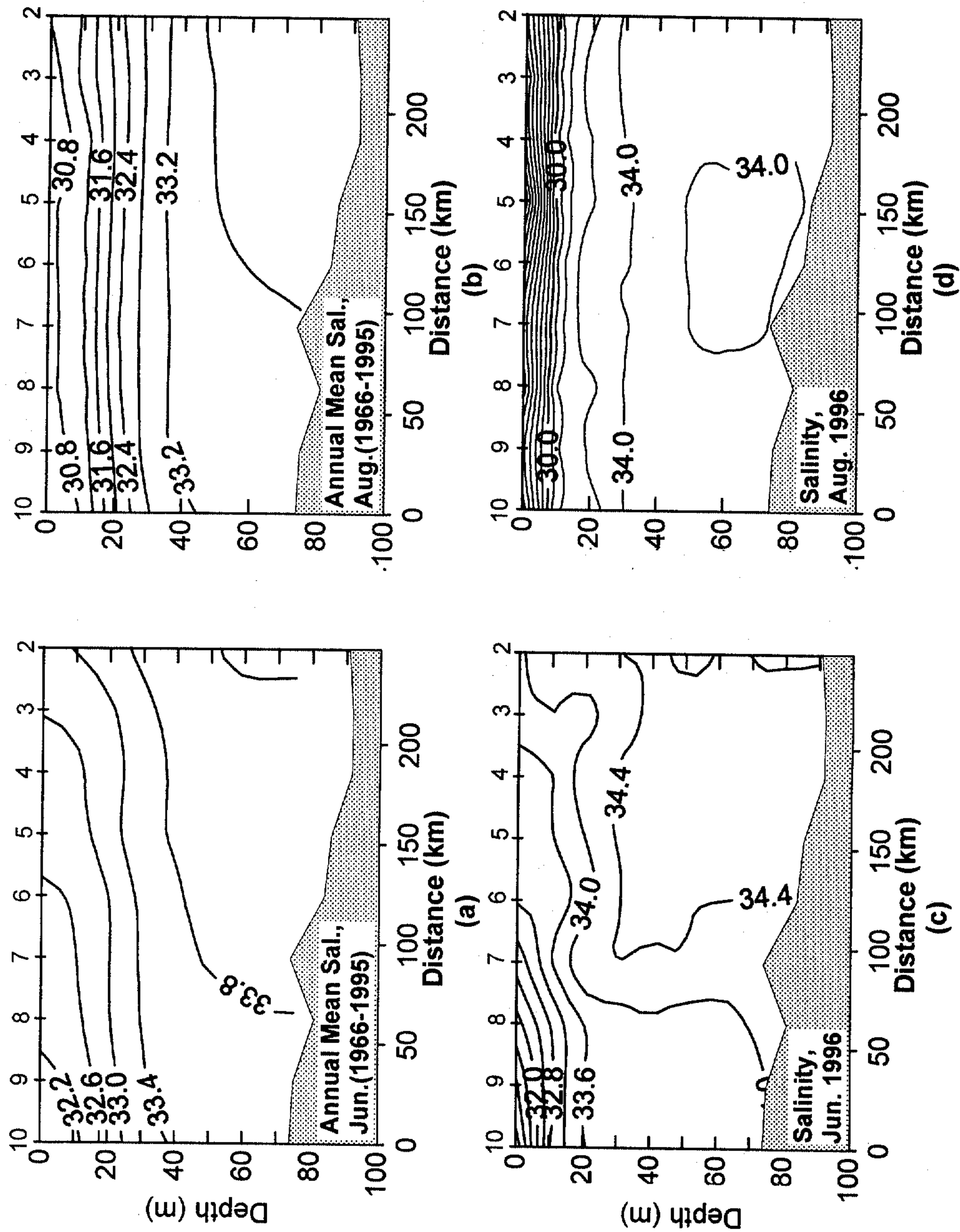


Fig. 9. Vertical sections of salinity along Line 313 in June(a,c) and August(b,d). Mean salinity over 30 years from 1966 to 1995 and salinity in 1996 are used for (a, b) and (c, d), respectively.

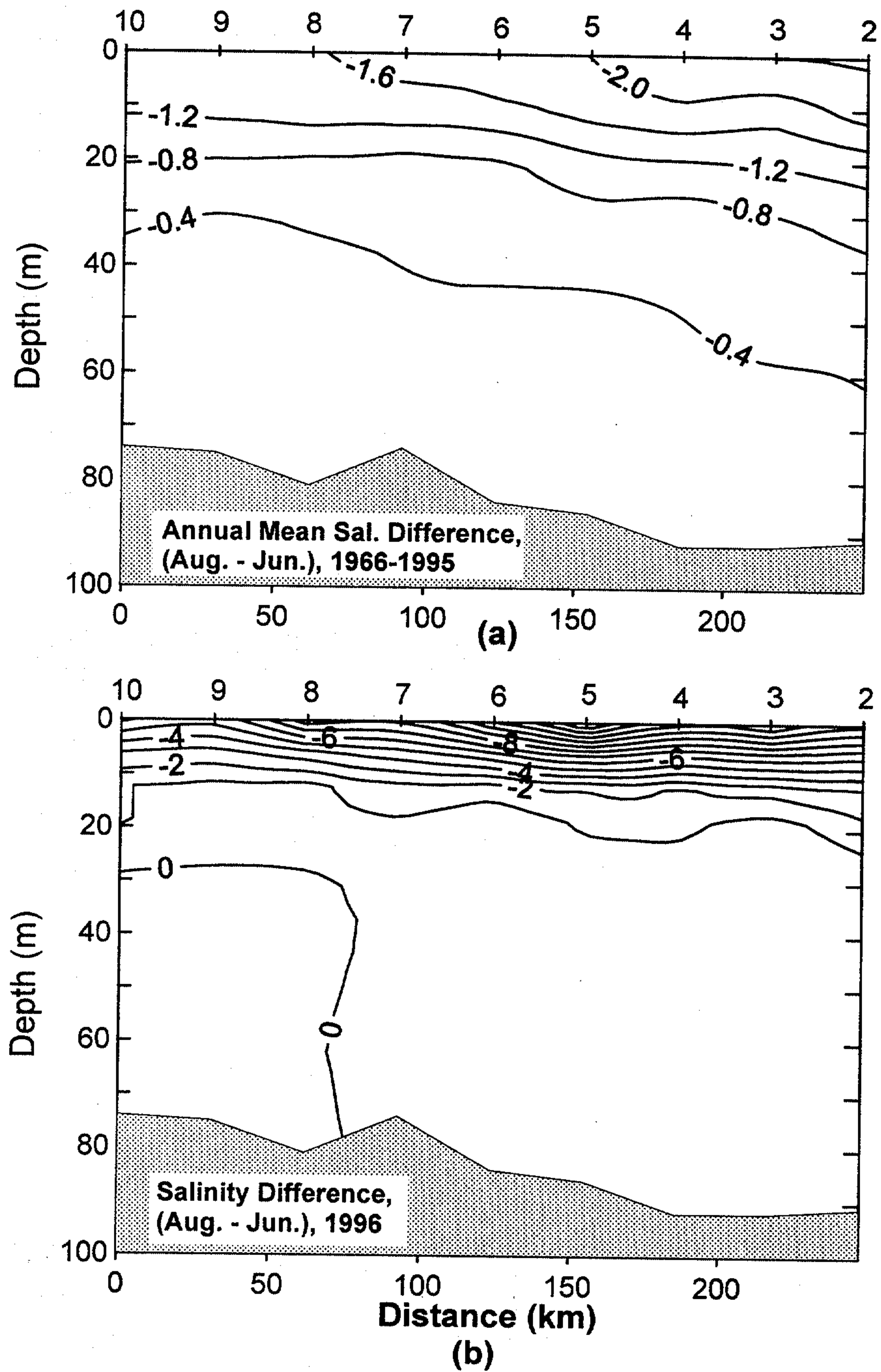


Fig. 10. Vertical sections of salinity difference between August and June along Line 313. (a) is difference of annual mean salinity over 30 years from 1966 to 1995, and (b) is difference of salinity in 1996 between August and June.

3-3. 여름철 저염화를 일으키는 담수의 양

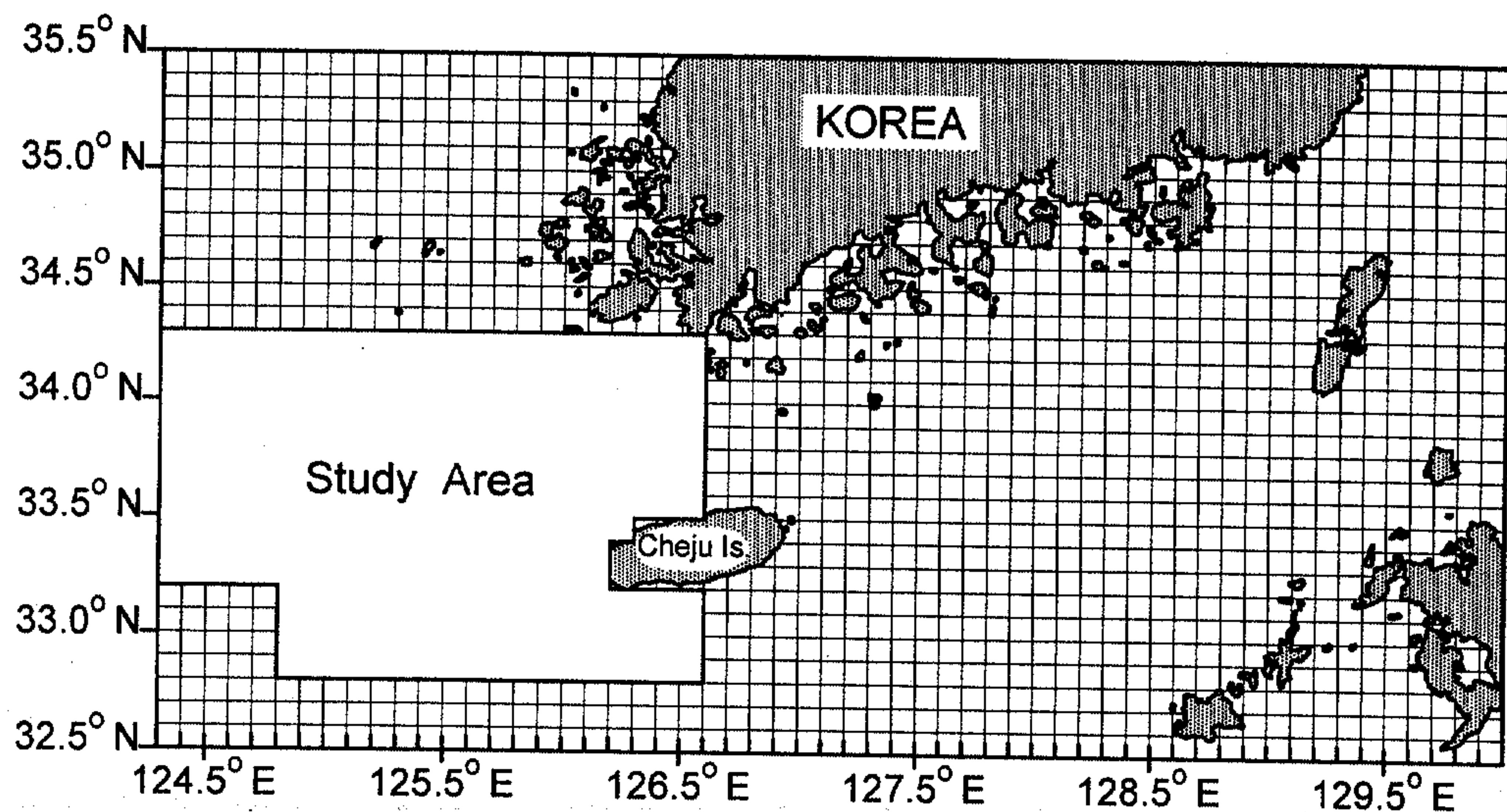


Fig. 11. A map showing the study area.

국립수산진흥원의 정선해양관측 312, 313, 203 관측선을 포함하는 제주도 서편 해역을 연구 대상 해역으로 설정하여 여름철에 제주도 서편 해역의 염분 변화에 영향을 주는 담수의 양이 어느 정도인지 알아보았다(Fig. 11). 즉, 위도 $32.8^{\circ} \sim 34.3^{\circ}$ (167.028 km)와 경도 $124.3^{\circ} \sim 126.6^{\circ}$ (위도 32.8° 에서의 거리: 215.273 km, 위도 34.3° 에서의 거리: 211.567 km, 평균거리: 213.420 km)의 연구 해역(Box)을 설정한 후, 위·경도 0.1° 의 단위격자망을 구성하였다.

평년 6월에 형성되지 않았던 염분약층이 존재하는 수심까지 저염수의 부피를 평년 8월의 수직염분단면도(Fig. 9)를 이용하여 구한 후, Fig. 11의 연구 해역에 적용하였다. 표면적은 약 $32,547 \text{ km}^2$ 이고, 두께는 약 20 m임으로 전체 부피는 650.94 km^3 이다. 이 해역의 20 m까지 수심 평균염분은 6월에 32.99‰이고, 8월에는 6월보다 약 1.45‰ 더 낮은 31.54‰이다.

염보존 방정식을 이용하여 구한 담수의 총량은 30.052 km^3 로, 이것을 단위 표면적당 담수량으로 환산하면 923.4 mm이다. 즉, 6월에서 8월 사이에 연구 해역에 매년 평균적으로 923.4 mm의 비가 내리면 이와 같은 저염화를 설명

할 수 있다. 물론 저염수의 범위에 따라, 연구 해역의 부피가 변하여 구하고자하는 담수의 양 또한 증가하거나 감소하게 된다.

같은 방법으로 1996년 제주도 주변 해역의 여름철 저염화를 일으키는데 필요한 담수량을 계산한 결과, 10 m까지 수심평균 염분은 6월에 33.30 ‰이고 8월에 28.37 ‰로, 6월에 비해 약 4.93 ‰ 더 낮다. 여기서 두께를 10 m로 설정한 이유는 앞의 경우와 같이 6월에 출현하지 않은 30 ‰ 이하의 저염수가 존재하는 수심이기 때문이다. 이 때 저염화를 일으키는데 필요한 담수량은 56.536 km^3 이고, 단위 표면적당 담수량은 1,737.0 mm로, 10 m의 두께를 감안한다면 평년에 비해 2배 이상 많은 양의 담수가 외부로부터 유입되었음을 알 수 있다.

Fig. 12는 저염수의 범위를 편의상 10 m로 가정하고, 1967년부터 1997년까지 31년간 제주도 서편에 위치한 연구 해역내 6월과 8월의 수심 10 m까지 평균한 염분과 이들 값들을 염보존 방정식에 대입한 후, 단위면적당 담수량으로 환산한 결과이다. 그런데 1997년은 6월초에 조사가 이루어지지 못하고 7월초에 조사가 이루어진 관계로 기간을 한달로하여 단위면적당 담수량을 계산하였다.

1967년부터 1997년까지 여름철에 연구 해역내 표층 염분(10 m까지) 변화는 음의 선형 경향성(linear trend)을 갖고 있으며, 선형 회귀직선의 기울기는 6월에는 -0.00958 ‰/yr 이고 8월에는 -0.01930 ‰/yr 로 8월이 6월보다 2배 이상 크다.

이와 같은 최근 31년간 여름철 표층 염분의 일차 경향성은 염분 변화에 영향을 미치는 강수량의 증가, 해류의 방향 등 해양 내·외적 요인에 의해 일어나는 현상으로 판단된다.

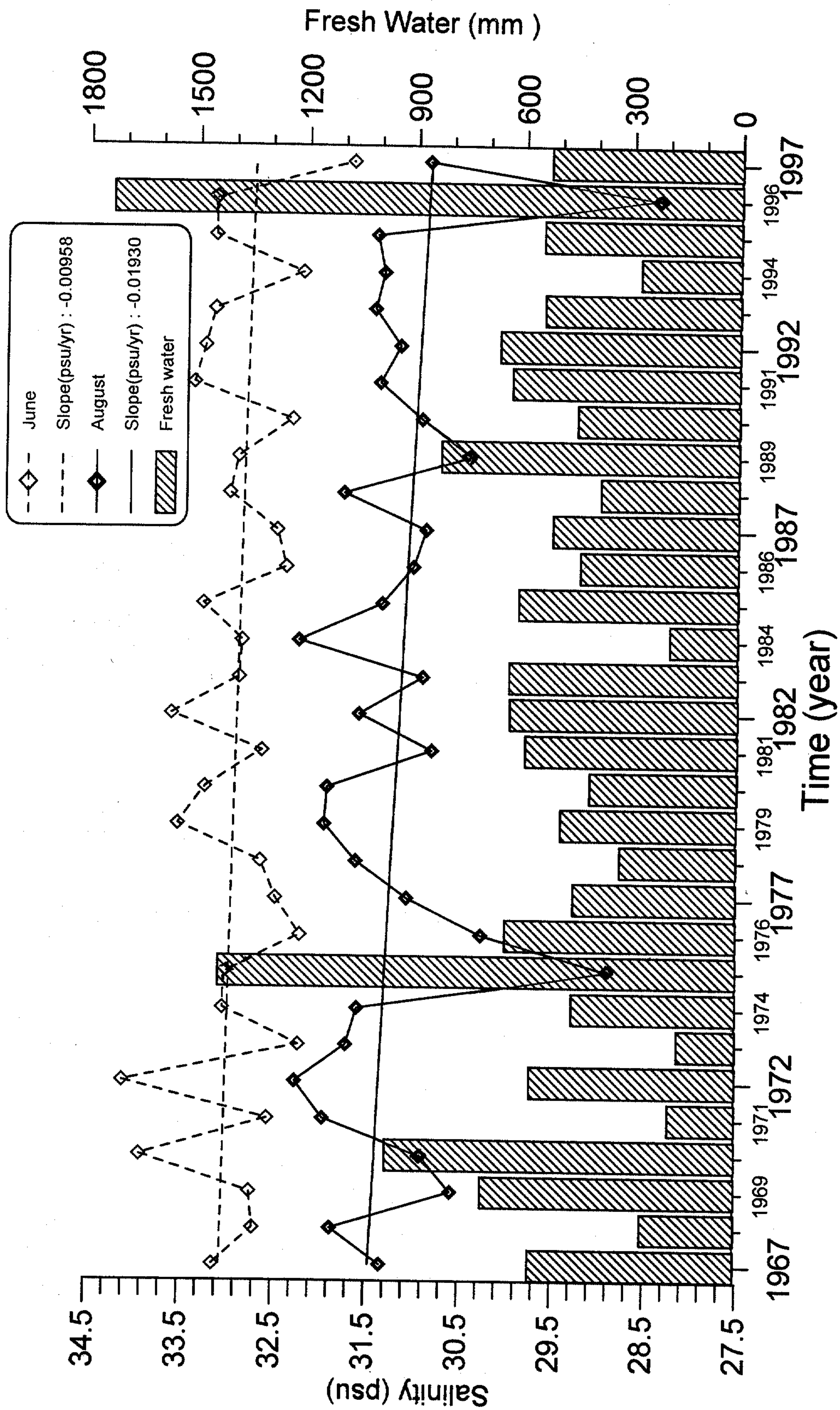


Fig. 12. Variations of vertically monthly mean salinity up to depth of 10m with a linear trend in June and July respectively and of the volume of the fresh water per unit area needed for salinity decrease at the study area between June and August from 1967 to 1997.

3-4. 저염화의 원인

해수의 저염화는 궁극적으로 외부로부터 담수의 유입이 있어야만 가능하다. 담수의 유입원으로는 강수나 육지로부터 강물의 유입 및 인접해역으로부터 저염수의 유입을 고려할 수 있다.

먼저 강수가 저염화를 일으키는데 어느 정도 기여하는지 구체적으로 알아보자. 이를 위하여 제주지역의 1986년부터 1995년까지 10년간 6월과 7월의 강수량과 증발량, 그리고 저염화가 심했던 1996년 6월과 7월의 강수량과 증발량을 살펴보았다. 여기서 6월과 7월을 택한 것은 보통 염분관측이 월 초에 이루어지기 때문이다.

제주지역의 6월과 7월의 10년 평균 강수량은 456.9 mm로, 이 양은 평년의 저염화에 필요한 담수량의 약 50 %에 해당한다(Table 3). 그러나 같은 기간 동안 평균 증발량은 271 mm로, 증발량을 제외한 강수량 166.6 mm는 저염화에 필요한 담수량의 5.5 %에 해당하는 값이다. 따라서 강수를 저염화의 주요인으로 보기 힘들다. 더욱이 1996년의 경우 강수량에서 증발량을 뺀 순강수량(net precipitation)은 2.1 mm로, 강수의 저염화에 대한 기여도가 미미하다는 것을 단적으로 보여 준다.

제주도 부근 해역에서 비교적 가까운 강에는 탐진강과 영산강이 있다. 이들의 유역면적(drainage area)은 각각 488 km²와 3,371.4 km²로(푸른전남 21, 1997), 이들 면적의 합은 연구 해역의 약 12 %에 해당된다. 유역면적이 약 7 배 더 넓은 영산강의 6월과 7월의 평균 유출량은 각각 0.249 km³과 0.639 km³로 이 양은 저염화에 필요한 담수량의 5 %미만이다.

Table 3. Mean precipitation and evaporation at Cheju city in June and July for 10 years from 1986 to 1995 and at the same station in June and July 1996. (unit : mm)

Year	Precipitation(P)			Evaporation(E)			P-E
	June	July	Sum	June	July	Sum	
1986~1995	182.5	274.4	456.9	131.1	159.2	290.3	166.6
1996	223.7	48.7	272.4	112.5	157.8	270.3	2.1

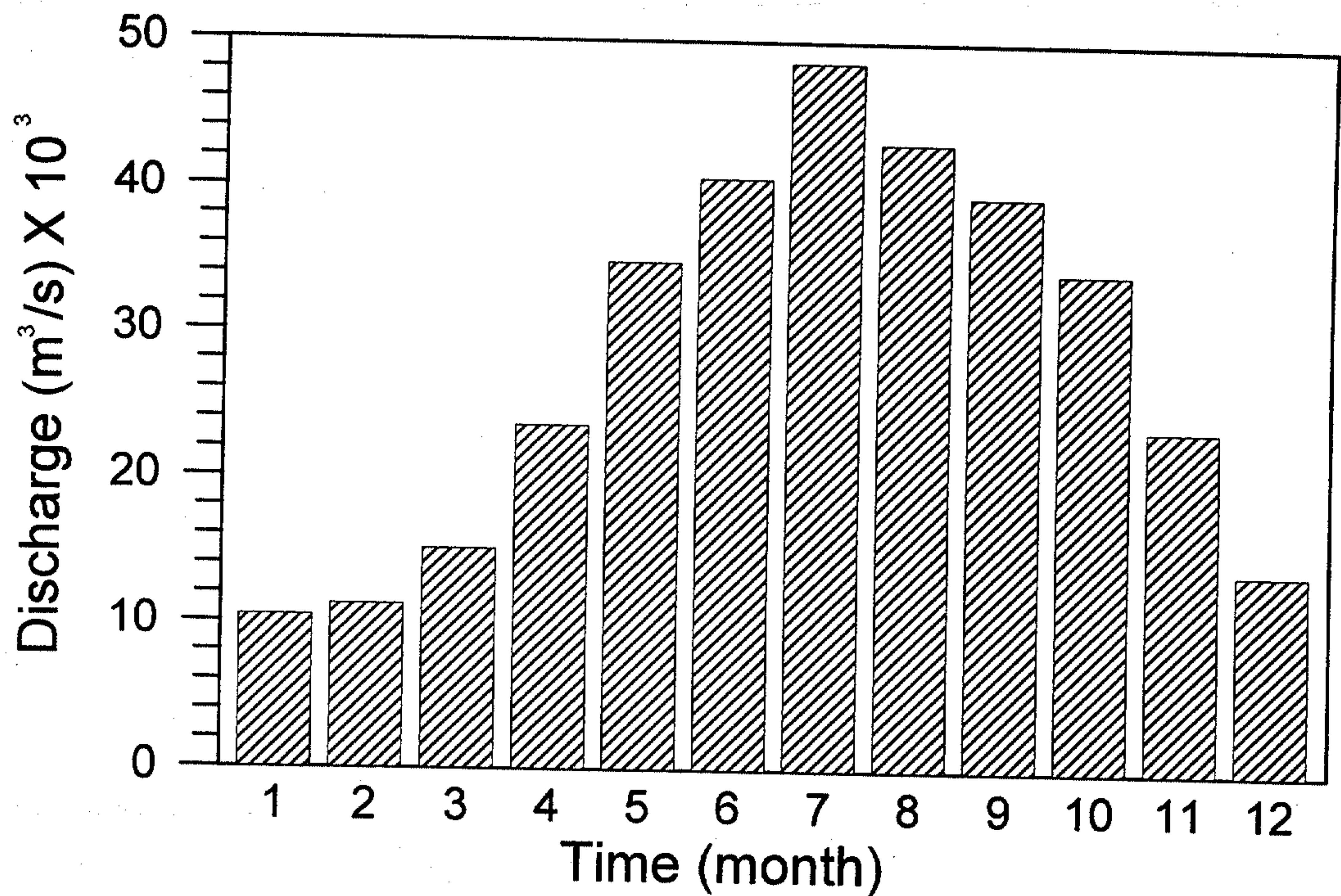


Fig. 13. The annual variation of monthly mean discharge(Shen *et al.*, 1997).

해수의 유동 및 강수와 증발을 고려하지 않은 염보존 Box모델을 이용하여 구한 저염화에 필요한 담수의 양은 연구 해역의 저염화가 강수량, 육수의 유입 등 지역적인 원인으로 설명될 수 없음을 분명히 보여준다. 따라서, 주변 해역으로부터 저염수의 유입이 마지막 고려의 대상으로 남는다.

주변 해역의 염분에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 담수의 공급원은 양쯔강 유출수이다. 양쯔강 유출량의 월별 최대값은 7월이며 평년 평균 약 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 6월과 8월은 약 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 겨울에는 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다(Fig. 13).

평년인 경우에 여름철 제주도 주변해역의 저염화에 필요한 담수의 양은 30.052 km^3 으로 양쯔강의 6월과 7월 평균 유출량 $231.0 \text{ km}^3/2\text{month}$ 의 약 13 %에 해당하는 양이며, 1996년의 경우에는 약 24 %에 해당하는 양이다.

특히 1996년 여름은 양쯔강 유역에 연일 폭우가 내려 홍수피해가 컸던 점을 고려해 볼 때, 양쯔강의 유출량도 많았을 것으로 생각된다. 따라서 1961년부터 1985년까지 25년 동안 6월과 7월의 유출량의 합이 약 $106.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로

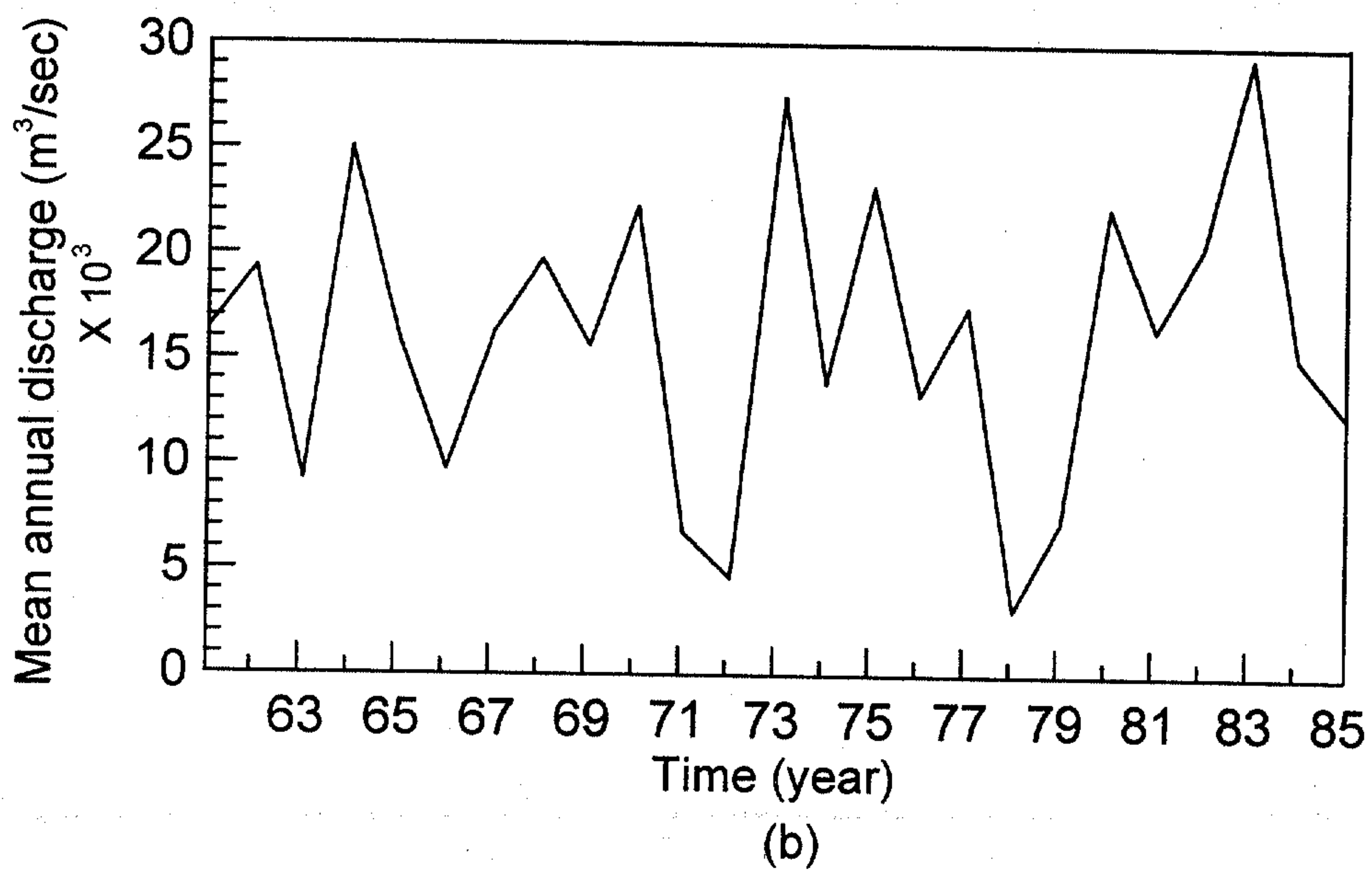
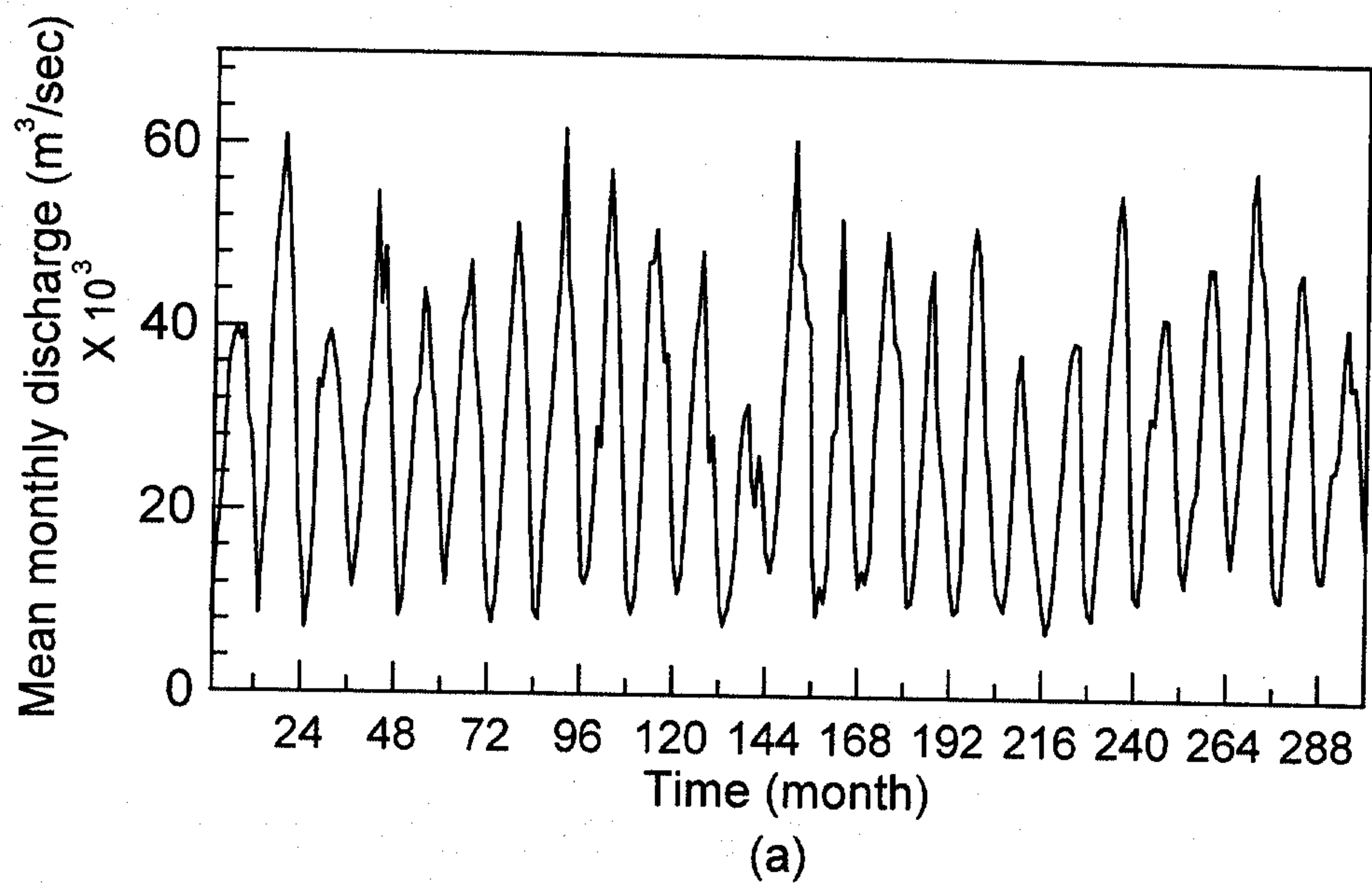


Fig. 14. Monthly mean discharge(a) and annual mean discharge(b) during 1961 - 1985(Shen *et al.*, 1998).

가장 컸던 1962년의 유출량(Fig. 14)을 적용했을 경우, 이 유출량의 약 20 %가 여름철 제주도 서편해역의 저염화에 필요한 담수량과 같다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 제주도 서편 해역의 저염화에 필요한 담수의 유입원으로 양쯔강 유출수가 양적으로 유일하며, Fig. 4 (b), (d)에서 알 수 있었듯이, 제주도 남서쪽 해역의 저염수 존재가 이를 잘 뒷받침해 준다.

그렇다면 양쯔강 입구(위도: 31.43° , 경도: 121.91°)에서 약 438 km 떨어진 제주도 서편 해역(위도: 33.4° , 경도: 126°)까지(Fig. 1) 담수가 어떤 경로를 통해 흘러 올 수 있으며, 도달하는데 어느 정도의 시간이 소요될까?

3-5. 제주도 주변 해역의 해류

최근까지 제주도 주변에 관한 해류연구는 해수의 특성분석을 통한 간접적인 방법과 해류계나 인공위성 추적 부이를 이용한 직접 관측에 의해 실시되었다.

해수의 특성분석을 통한 연구결과, 제주도를 우회한 고온고염의 해수가 황해로 유입되지 않고 제주도를 우회하여 제주해협을 통과하여 동쪽으로 향한다고 알려지게 되었다(노와 김, 1983; Rho, 1986; 김 등, 1991). 조와 김(1994)의 연구결과는 여름철 남해의 저온수가 제주해협의 북부를 거쳐 남해로 유입됨을 보여주어, 해수의 특성분석에 의한 연구결과들은 제주해협 부근 모든 해역에서 해수가 남해쪽으로 흐르고 있음을 시사한다.

해류의 직접관측은 주로 제주해협에서 이루어졌으며, 대부분 해협의 남부에서 실시되었다. 제주해협 내 남북방향으로 세 정점에서 1974년 8월에 25시간동안 해류 관측을 실시한 김(1979)은, 북동쪽으로 3.5~13.7 cm/sec 크기의 해류를 보고하였다. Chang *et al.*(1995)은 1983년 4월 12일부터 5월 12일까지 20일간 해협 내 수심 30m와 수심 50m에서 해류를 관측하여 북동쪽으로 유속이 각각 12.5 cm/sec와 9.2 cm/sec라고 보고하였다. 조 등(1995)이 염보존 Box모델을 이용하여 제주해협의 평균 유속을 구한 결과 10~13 cm/sec로 직접 관측한 유속과 비슷하였다.

황해와 동지나해의 해수순환을 연구하기 위해 1986년 여름철에 10개의 인공위성 추적 부이를 표층 10m에 띄워 실시한 실험의 결과는 여름철 양쯔강 물 경로와 속도를 보다 정량적으로 제시해준다(Beardsely *et al.*, 1992). 양쯔강에서 약 100 km 떨어진 곳에 7월에 투하된 부이가 북동쪽으로 14 cm/sec 속도로 움직여 제주도 서쪽 해역에 8월에 도착하였다(Fig. 15).

해류의 속도와 방향은 시·공간적으로 크게 변하지만, 지금까지 살펴본 바와 같이 여러 가지 방법으로 구한 제주도 주변해역의 여름철 평균 유속은 북동쪽으로 10~15 cm/sec이다. 양쯔강 입구에서 제주도까지 약 438 km이므로 양쯔강에서 유출된 담수가 제주도 서편 해역까지 도달하는데 33~50일이 소요될 것으로 생각된다.

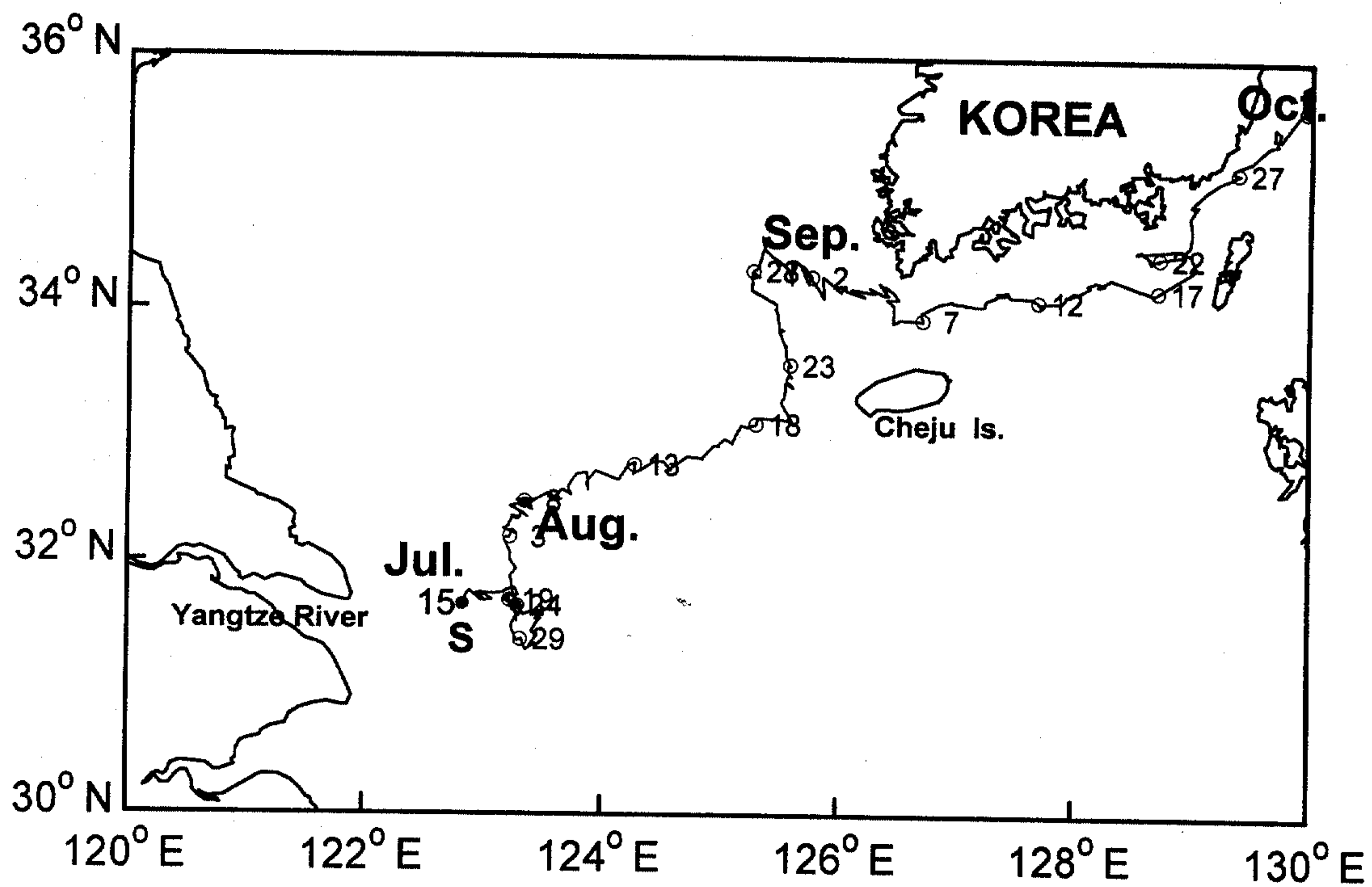


Fig. 15. Drifter trajectory in the East China Sea. Drifter trajectory starts near the mouth of the Yangtze River in July 15, 1986. Marks are printed along each trajectory every 12 days. Drifter 6986 is from Beardsely *et al.*(1992).

중국 동부지방과 남부지방에 1996년 7월 1일경부터 내린 집중 호우로 대홍수가 발생했다는 1996년 7월 3일자 북경 AFP연합의 보도가 있는 후, 8월 5일에서 10일 사이에 제주도 서북부 연안에서 25%이내의 저염분(Fig. 16)이 남해수산연구소 제주분소와 제주어촌지도소에 의해 관측되어서 위에서 구한 결과를 간접적으로 뒷받침해 준다.

제주도 서편해역에 나타난 저염수는 부이의 경로(Fig. 15)와 Fig. 16에서도 볼 수 있었듯이 제주해협을 거쳐 동해로 유입되어, 여름철 동해의 표층 저염화에 영향을 주고 동해에서 관측되는 대마난류 표층수 형성에 중요한 역할을 하리라 여겨진다.

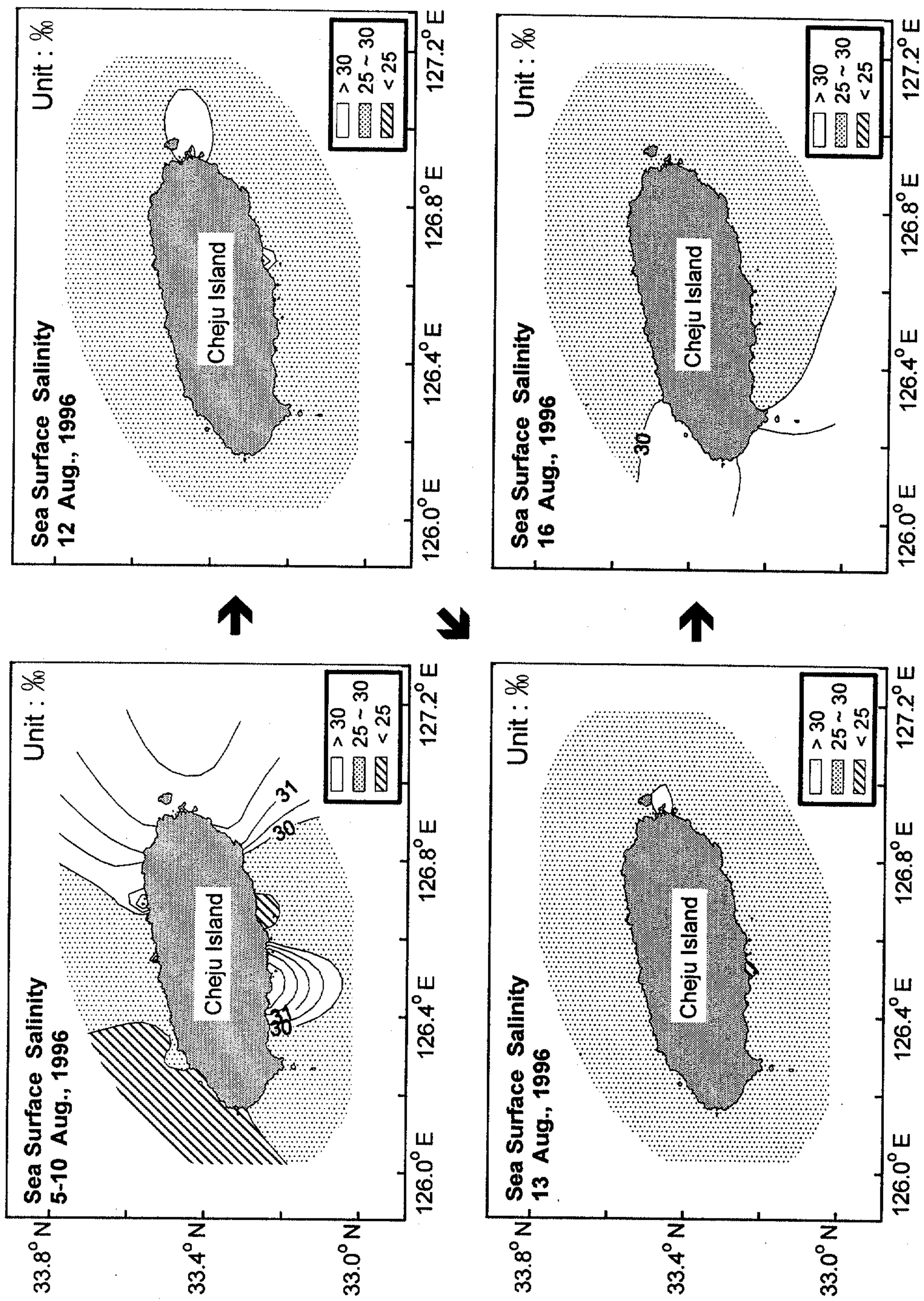


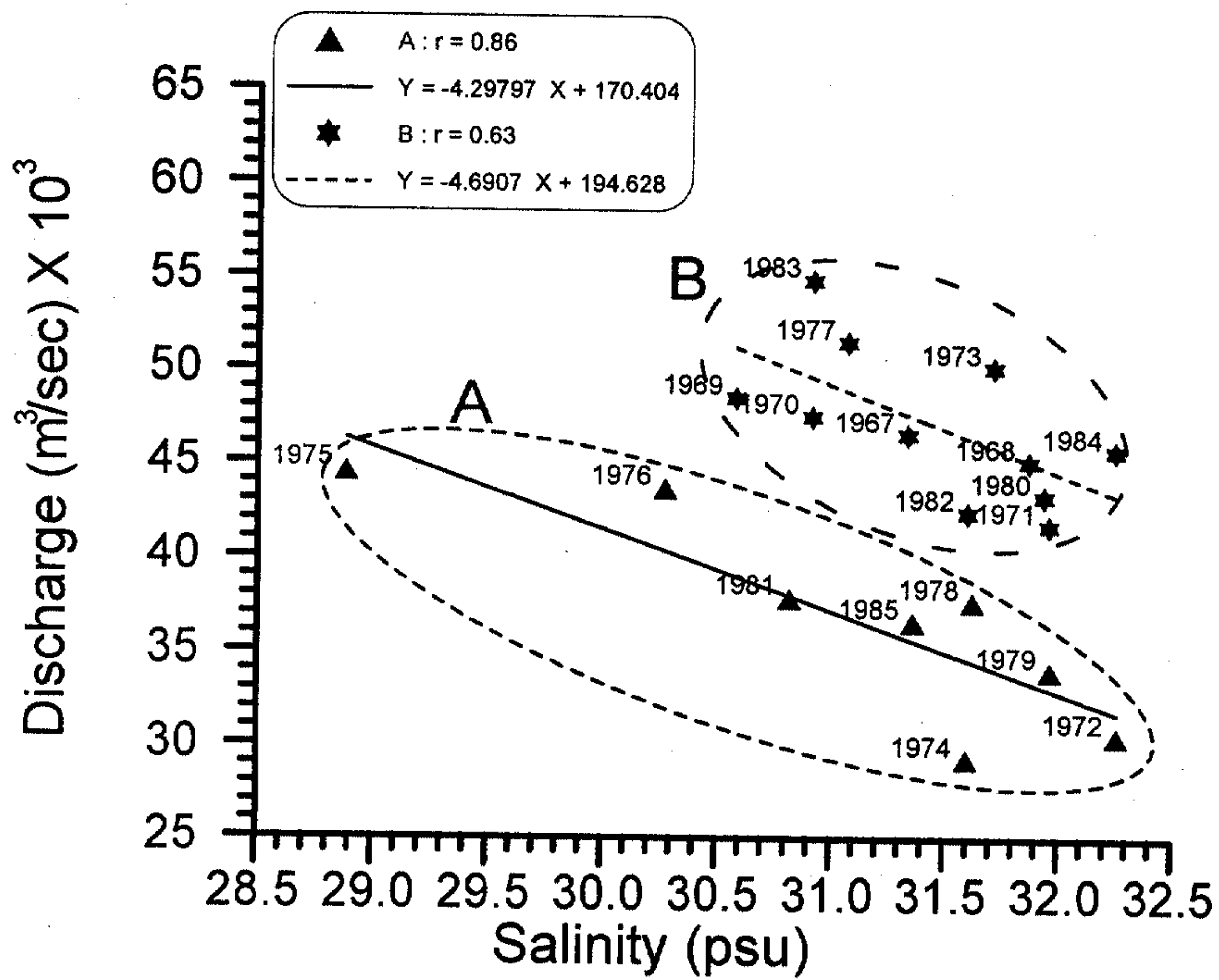
Fig. 16. Variations of sea surface salinity in the coast of Cheju Island for 5 -16 August 1996.

4. 토 의

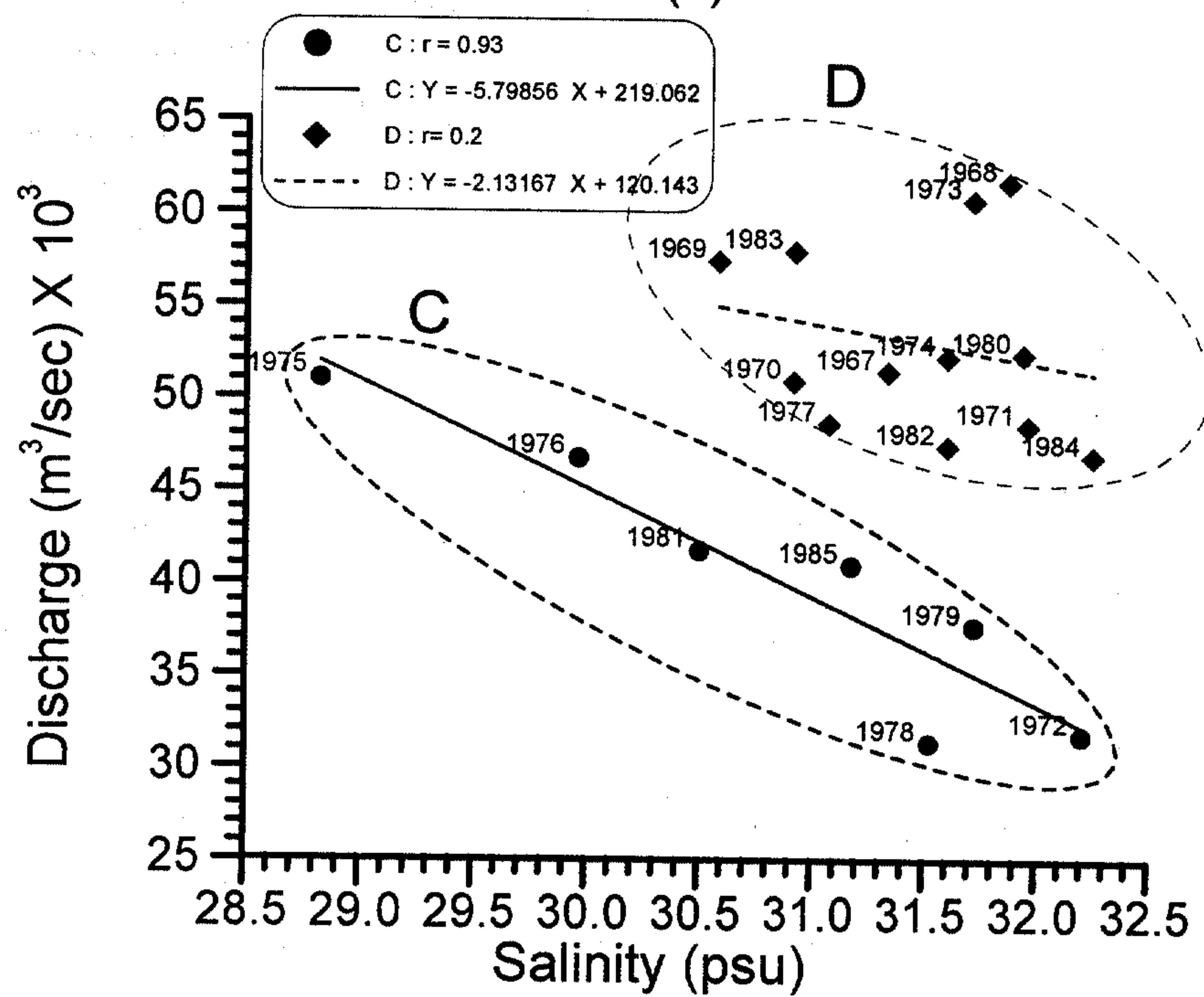
앞서 평년 8월과 1996년 8월의 표층과 수심 10m 수평 염분분포를 통하여 제주도 서편 해역이 동편 해역보다 더 저염이며, 제주도 연안의 염분 변화, 해류 관측, 염보존 Box모델, 인공위성 추적 부이 등 기존연구 결과들로부터, 여름철에 양쯔강 유출수가 한 달에서 두 달 사이(33~50일)에 제주도 서편 해역으로 유입되어 우회하여 제주해협을 통과할 수 있음을 알았다. 과연 이것이 사실이라면, 8월에 제주도 서편 해역의 저염화는 6월이나 7월 평균 양쯔강 유출량과 음의 상관관계를 가질 것이다.

Fig. 17의 (a)와 (b)는 각각 1967년부터 1985년까지 19년간 매년 6월과 7월 양쯔강 유출량과 같은 기간 8월 제주도 서편 연구해역의 10 m 수심까지 평균염분과의 관계를 나타내고 있다. 6월과 7월의 양쯔강 유출량과 8월 제주도 서편 연구해역의 평균염분은 각각 전체적으로 음의 상관 관계를 보여 준다. 이들을 경향이 비슷한 것끼리 집단화한 결과, 6월에 양쯔강 유출량 약 $42 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 을 기준으로 A, B 두 집단으로 구분되고(Fig. 17. (a)), 7월에 양쯔강 유출량 약 $47 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 을 기준으로 C, D 두 집단으로 구분된다(Fig. 17. (b)). A와 C 집단은 1967년부터 1985년 중에서 상대적으로 염분이 가장 낮았던 1975년과 가장 높았던 1972년을 잇는 선형 경향성(linear trend)을 갖으며, 상관 계수는 각각 0.86과 0.93으로 강한 음의 선형 상관관계를 보인다. 반면에 B와 D집단은 상관 계수가 각각 0.63과 0.2로 약한 음의 상관관계를 보인다. 제주도 서편 해역에 유난히 낮은 염분이 출현하였던 1996년 8월의 양쯔강 유출량을 알아보기 위해, 상관 관계가 강한 C집단의 회귀방정식에 적용한 결과, 약 $56,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유출량을 보였다.

여기서 우리는 상관 관계가 낮은 B와 D집단에 속하는 해처럼 양쯔강의 유출량이 많다고 해서 반드시 제주도 서편 해역이 저염화되지 않는다는 사실을 발견할 수 있다. 그 원인으로 다음과 같은 두 가지 가능성을 생각할 수 있다. 첫째, 두 달에 한번 관측이 이루어지는 국립수산진흥원의 관측시기가 양쯔강 물이 최대로 도달했을 때 이루어지지 못했을 가능성과 단 한번의 관측을 통해 얻어진 자료가 그 달의 염분값을 대표할 수 있는가 하는 문제이다.



(a)



(b)

Fig. 17. Relations between the discharge of Yangtze River in (a) June and (b) July and vertical mean salinity in August up to the depth of 10m at the study area.

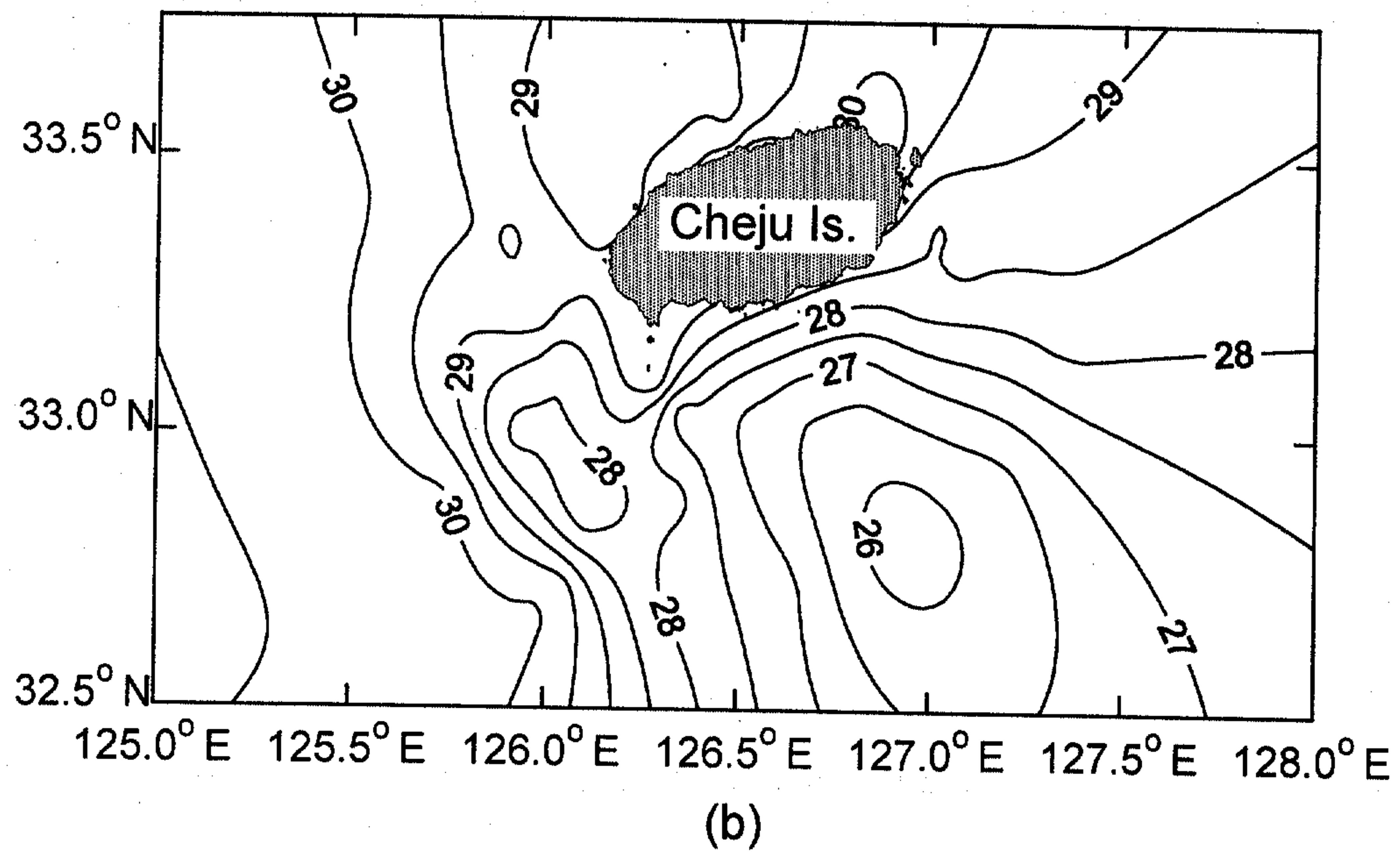
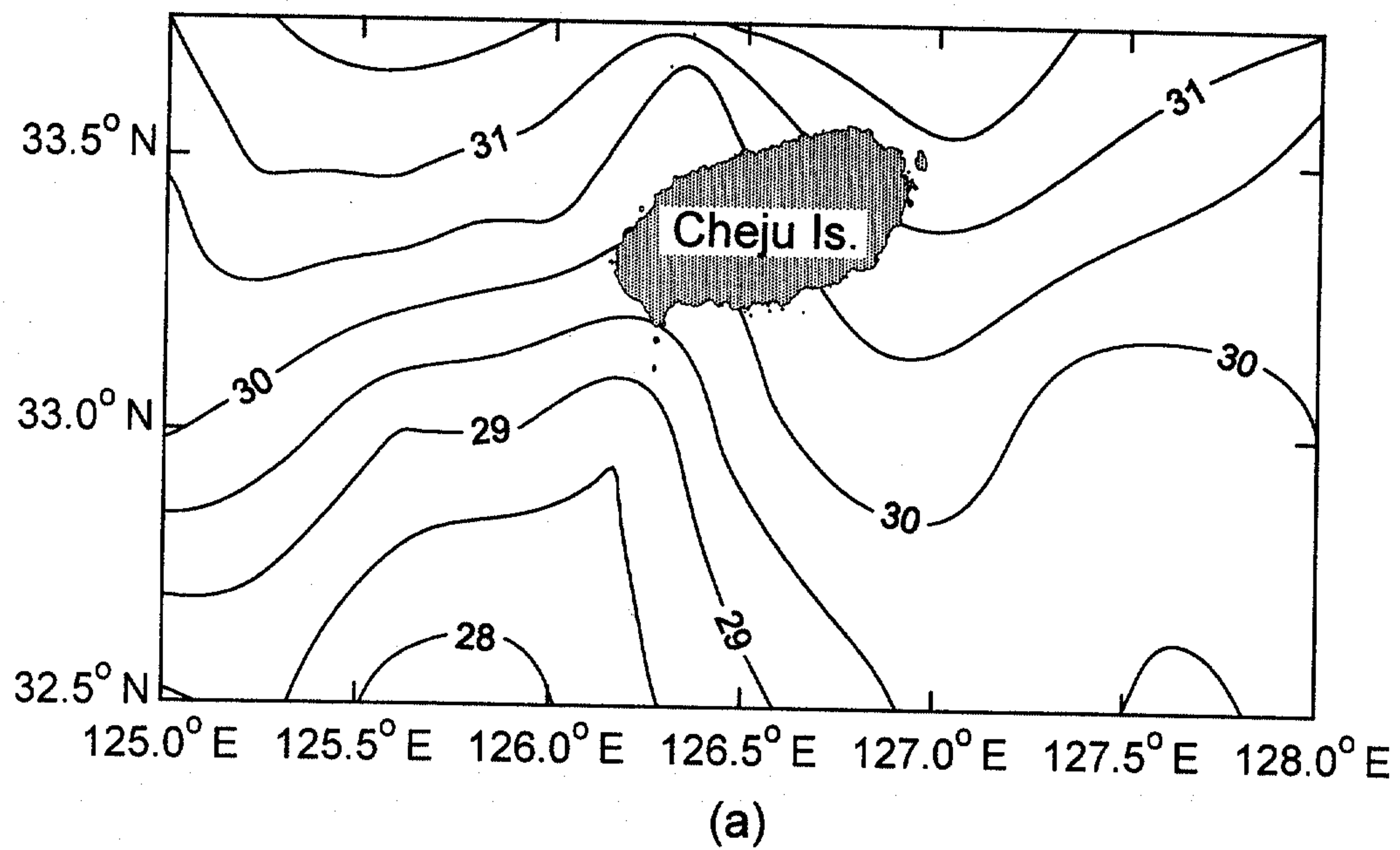


Fig. 18. Horizontal distributions of sea surface salinity in the coasts of Cheju Island in (a) early August and (b) early September.

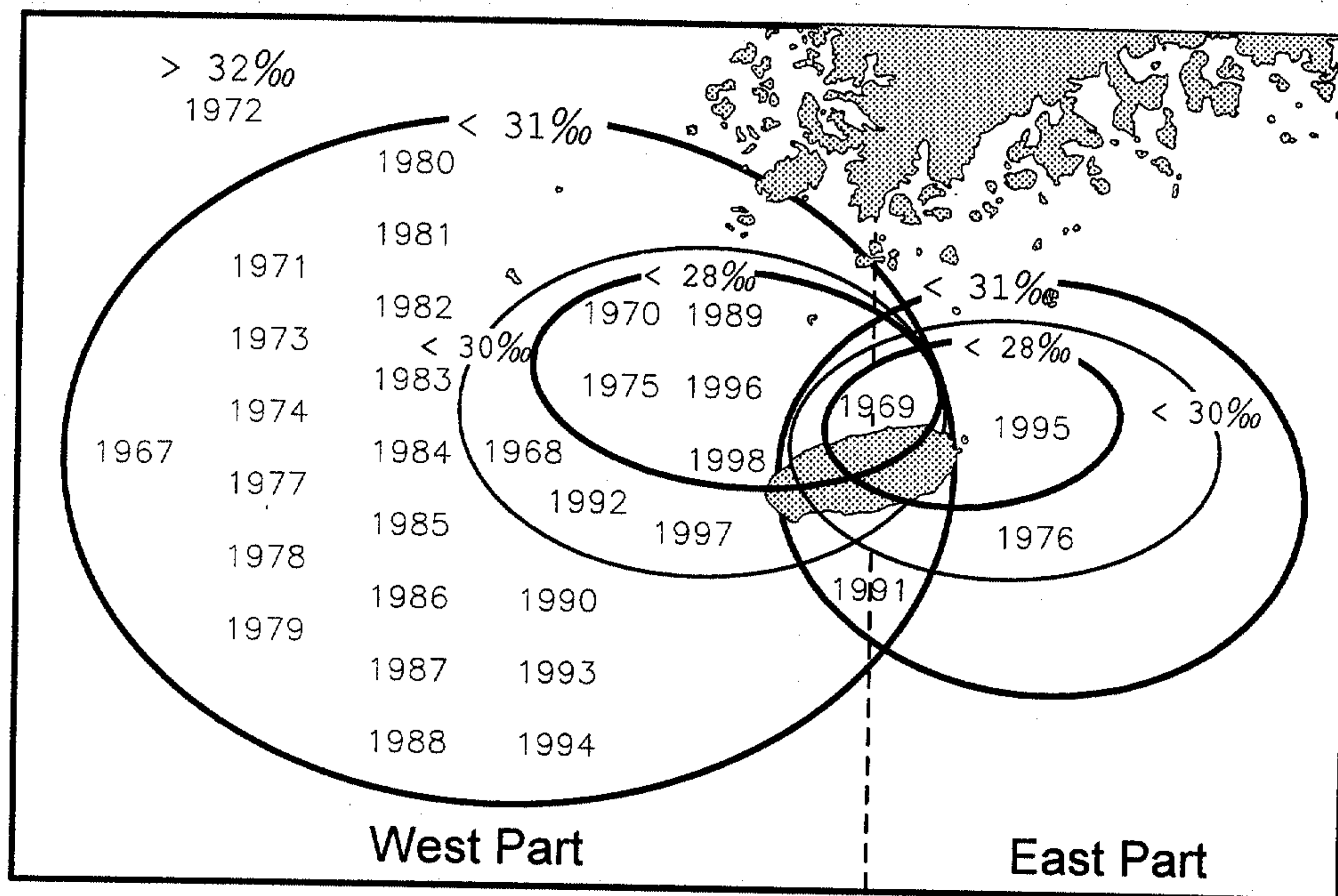


Fig. 19. Venn diagram of salinity showed up in the coasts of Cheju Island in August from 1967 to 1998.

한 예로 1998년 6월 중순부터 시작되어 8월말까지 계속된 양쯔강 대홍수를 들 수 있다. 이로 인하여 8월에 28.2 ‰이하의 저염수가 제주도 남서 해역에 출현하였으며, 9월초에는 8월보다 더 저염인 26 ‰이하의 저염수가 제주도 남동 해역에 출현하였다(Fig. 18). 유로(流路)와 염분에 있어서 8월과 9월이 상당한 차이를 보인다. 그러나 현실적으로 양쯔강물의 최대 도달시기에 맞추어 관측을 나가는 일은 불가능한 일이므로, 이로 인해 생길 오차는 접어두기로 하자. 둘째, 양쯔강물의 주축이 해마다 제주도 서편 해역을 통과하지 않을 가능성을 생각할 수 있다. 이를 위해 국립수산진흥원에서 정선 관측한 자료를 이용하여 제주도 주변 해역의 8월 표층과 수심 10m 염분자료를 평균한 1967년부터 1998년까지 32년간 수평 염분분포(Appendix Fig. A1 ~ A8)를 분석한 후, Fig. 19에 정리하였다. 참고로 1965년부터 자료를 분석하지 않은 이유는 1965년과 1966년에는 관측이 이루어지지 않은 정선 관측선이 많았기 때문이며, 1998년은 표층염분임을 밝혀둔다. 그리고 앞에서 잠깐

살펴보았듯이, 1998년의 경우 8월보다 9월에 더 저염이었으며, 제주도 남동부 해역에 서편 해역보다 더 저염인 해수가 존재하였다.

Fig. 19로부터 제주도 주변 해역에 거의 매년 8월에 10 m 수심에 걸쳐 31 % 이하의 저염수가 출현함을 알 수 있다. 제주도를 기준으로 동편해역이 서편해역보다 더 저염인 해는 1976년과 1995년, 1998년(9월) 3회이며, 양쪽 해역이 비슷하게 저염인 해는 1969년과 1991년으로 대부분 매년 제주도 서편해역이 동편해역보다 더 저염이다. 좀더 자세히 살펴보면, 28 % 이하의 저염수가 나타난 해는 1969년, 1970년, 1975년, 1989년, 1996년, 1998년 총 6회로 10년에 약 2번 정도의 출현빈도를 보이며, 그 중 양쪽 해역이 비슷하게 저염인 1969년을 제외하고 모두 제주도 서편 해역에 출현하였다. 한편, 1972년에는 특이하게 전 해역에 걸쳐 32 % 이상의 고염의 해수가 분포하였다. 이처럼 제주도 주변 해역은 거의 매년 8월에 10 m 수심에 걸쳐 31 % 이하의 저염수가 출현하는 것이 일반적인 특성임을 알 수 있다.

위의 결과로부터 우리는 거의 해마다 여름철에 제주도 서편 해역이 동편 해역보다 더 저염인 해수가 존재하지만, 약 10년에 1번 정도 제주도 동편해역이 서편해역보다 더 저염인 해가 존재하며, 1972년과 같이 저염의 물이 전혀 출현하지 않는 해도 있다는 아주 중요한 사실을 발견할 수 있다. 즉 제주도 서편해역을 우회하지 않고 바로 동편해역으로 저염수가 유입될 수 있으며, 저염수의 유입이 거의 없는 해도 있음을 시사한다.

Le(1983)의 연구결과는 이러한 사실을 잘 뒷받침해 준다. Fig. 19는 Le가 양쯔강 하구부근에서 염분관측을 통해 분석한 여러 연구결과를 종합하여 양쯔강물의 월별 유로(流路)를 나타낸 것이다. Fig. 20에서 월과 년도가 표시된 것은 그 해의 유로(流路)를 나타내며, 월만 표시된 것은 평균적인 유로(流路)를 나타낸다.

대체로 양쯔강 유출량이 많은 시기인 6월부터 8월까지 양쯔강 하구에서 제주도를 향하는 북동방향의 유로(流路)를 취하고 있어, 양쯔강 유출수가 제주도 서편 연구 해역으로 유입될 가능성이 다른 시기에 비해 높음을 알 수 있다.

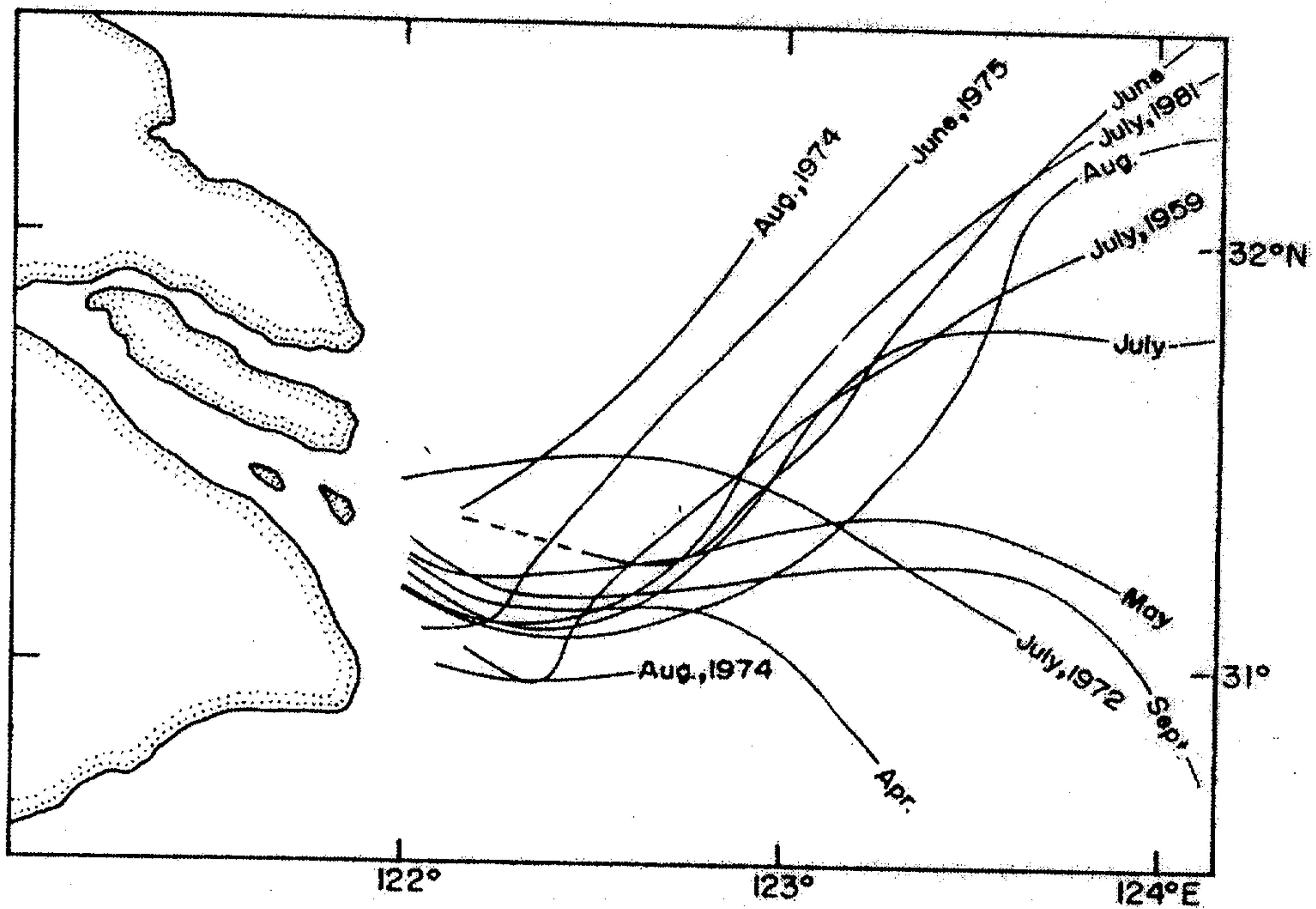


Fig. 20. Paths of the Yangtze Diluted Water as inferred from salinity measurements(after Le, 1983).

그러나 1972년 7월은 유출량이 적은 4, 5, 9월과 같이 유로(流路)가 남동쪽을 향하고 있어, 같은 해 8월에 제주도 주변 해역의 염분이 다른 해에 비해 상대적으로 높은 이유를 잘 대변해 준다. 또한 이 시기에 양쯔강 유출량(Fig. 13)이 다른 해에 비해 상대적으로 매우 적어 양쯔강 유출량과 양쯔강물의 유로(流路)가 어느 정도 관련성이 있음을 암시해 준다.

그러나 우리는 Fig. 19에서 B와 D집단처럼 유출량과 저염화가 서로 관련이 없는 해도 있음을 살펴보았다. 따라서, 양쯔강 유출량은 제주도 서편 해역을 저염화시키는데 필요조건이지 충분조건은 아니며, 유로(流路)가 저염화와 밀접한 관련이 있다고 생각된다.

그렇다면 어떤 요인들이 양쯔강물의 경로에 영향을 주는 것일까? 양쯔강 희석수의 북동쪽으로 방향전환 현상(turning phenomena)은 양쯔강의 유출량

뿐만 아니라 동지나해의 해면경사(sea surface slope), 바람 응력 컬(wind stress curl)과 관련이 깊을 것으로 생각된다(Zhao, 1992).

Mao 등(1963)과 Guan(1984), Yu 등(1983)은 양쯔강물의 방향전환 현상이 우기 때(flood season)에 일어나고 양쯔강 희석수(CDW; Changjiang Diluted Water)의 염분 분포와 변화가 유출량과 관련이 있기 때문에, 양쯔강 유출량이 양쯔강물의 방향전환을 지배하는 주요인으로 보았다. 그러나 양쯔강의 유출량이 매우 클 때, CDW가 방향을 전환하지 않는 경우가 실제로 존재하므로, Pu와 Xu(1983), Wang 등(1986)은 대만난류(TWC; Taiwan Warm Current)를 주된 요인으로 생각하였다.

또한 몇몇 학자들은 우기 때 양쯔강 입구에서 남동풍이 탁월하고, 건기 때 북서풍이 탁월하기 때문에, 바람응력 또한 CDW의 방향전환에 영향을 주는 요인이라고 보고하였다. Wang(1988)은 여름철 몬순(monsoon)과 해저지형효과(bottom effect)가 CDW의 방향을 전환시키는 주된 힘들이라고 생각하였다. Yuan 등(1982)은 수치모델을 통해 TWC와 해저지형, 경압(baroclinic) 효과들이 주된 외력이라고 제안하였고, Gu(1985)는 수학적 모델을 통하여 TWC와 몬순의 효과를 강조하였다.

이러한 CDW의 방향전환 기작에 관한 의견의 차이는 아직까지 양쯔강물의 방향전환 현상을 설명할 수 있는 충분한 관측 자료의 결여에서부터 시작되며, 따라서 어느 누구도 아직까지 이 현상을 명확히 설명할 수 있는 이론적 모델을 제시를 하지 못하고 있는 실정이다.

5. 결 론

평년(1966~1995년)의 경우, 6월에 형성되지 않았던 염분약층(halocline)이 8월에 제주도 서편 해역 수심 약 20 m에 걸쳐 나타나며, 6월보다 평균 1.5 ‰ 더 낮았다. 반면에 1996년에는 6월에 형성되지 않았던 염분약층이 수심 약 10 m에 걸쳐 존재하며, 6월보다 무려 4.93 ‰ 낮아 평년에 비해 외부로부터 많은 양의 담수 유입이 있었음을 시사한다. 또한 염분의 수직구배는 평년보다 약 7배 큰 0.5 ‰/m이다. 이와 같은 강한 염분 성층은 여름철 수온성층과 함께 안정된 구조를 이루어, 해수의 수직 혼합을 차단시키고 그 구조를 장시간 지속시킨다. 따라서 이러한 해양 환경은 저서생물들에게 치명적인 생리적 장애를 일으키는 스트레스(stress)로 작용하여, 대량 폐사(mass mortality)로 이어질 가능성이 높다.

한편, 해수의 저염화를 일으킬 수 있는 담수원으로 강수나 육지로부터 강물의 유입 및 인접해역으로부터 저염수의 유입을 고려할 수 있다. 이 중 강수와 강물의 유입에 의한 담수의 양은 저염화 시키는데 필요한 담수량의 약 10%에 지나지 않는다. 따라서 양쯔강물이 양적으로 가장 가능성 있는 담수 공급원이며, 그 양은 양쯔강 유출량의 약 10~20 %이다.

해류 관측, 염보존 Box모델, 인공위성 추적 부이 등 기존의 연구 결과들로부터 구해진 유속들은 여름철 양쯔강물의 이동속도가 북동쪽으로 평균 10~15 cm/sec임을 시사한다. 이러한 속도로 저염수가 이동한다면 양쯔강 입구에서 제주도 서편해역까지 도달하는데 약 한달에서 두달(33~50일)이 소요된다. 그러므로 6월과 7월에 크게 증가한 양쯔강 유출수가 8월에 제주도 주변 표층수의 염분을 크게 떨어뜨려 일반적으로 10 m 수심에 걸쳐 31 ‰ 이하의 저염수가 출현한다. 1967년부터 1985년까지 6월과 7월 중 상대적으로 가장 염분이 낮았던 해(1975년)와 가장 높았던 해(1972년)를 잇는 선형 경향성(linear trend)을 갖는 집단(A, C)과 이 집단에 속하지 않는 집단(B, D)으로 임의로 나누어 볼 때, A, C집단의 6월과 7월 양쯔강 유출량과 8월 제주도 서편 연구해역의 염분과의 상관 계수는 각각 0.86과 0.93이며, 선형 회귀직선

의 기울기는 각각 -4.298과 -5.796이다. B, D집단의 경우, 상관 계수는 각각 0.63과 0.2이며, 선형 회귀직선의 기울기는 각각 -4.691과 -2.132이다.

그러나, 해마다 여름철에 제주도 서편 해역이 저염화 되는 것은 아니다. 1998년 9월처럼, 드물지만 약 10년에 1번 빈도로 제주도 동편해역이 서편해역보다 더 저염인 해가 존재하며, 1972년과 같이 31 %이하의 저염의 물이 전혀 출현하지 않는 해도 있다. 이처럼 저염수가 제주도 서편해역을 우회하여 제주해협을 통과하지 않고 바로 제주도 동편해역으로 유입될 수 있으며, 저염수의 유입이 거의 없는 해도 존재한다. 그리고 양쯔강 유출량이 많을수록 그와 비례해서 제주도 서편 해역이 저염화되지는 않는 것 같다. 따라서 관측시기와 횡수에 따른 오차를 고려하지 않으면, 양쯔강 희석수의 유로(流路)가 제주도 서편 해역의 저염화에 큰 영향을 미친다고 생각된다.

양쯔강 희석수의 유로는 양쯔강의 유출량, 동지나해의 해면 경사(sea surface slope), 바람 응력 컬(wind stress curl) 등과 관련이 깊을 것으로 여겨지며, 앞으로 이에 대한 종합적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

6. 참고 문헌

- 강철중, 1971. 한국 서해 해안의 계절적 변동에 관하여. 국립수산진흥원 연구 보고서, 8 : pp. 9~29.
- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고서, 12 : pp. 107~121.
- 공동어장 피해대책협의회자료, 1996. 8. 19. 제주 서부연안 생물피해조사 결과. pp. 12
- 공 영, 1971. 한국 남해안 전선에 관한 연구. 한국해양학회지, 6 : pp. 25~36.
- 국립수산진흥원, 1997. 한국근해 30년 평균염분 및 변동범위(1966~1995), 291pp.
- 류호영, 지영주, 이 주, 김봉석, 1997. 동해안 가리비의 염분농도에 따른 생존율 및 여수율, 국립수산진흥원 '97년도 제2회 연구발표 및 귀국 보고 요약집, pp. 95.
- _____, 1997. 동해안 가리비의 수온 및 염분농도에 따른 산소 소비율. 국립수산진흥원 '97년도 제2회 연구발표 및 귀국 보고 요약집, pp. 96.
- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국 해양 학회지, 26(3) : pp. 262~277.
- 김복기, 1979. 제주해협내 해류에 관한 연구. 국립 수산진흥원 연구보고, 25 : pp. 7~16.
- 김인옥, 노홍길 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27(5) : pp. 515~528
- 노홍길, 김 구, 1983. 제주와 목포, 제주와 완도간의 표면수온 변화. 한국해양 학회지, 18(1) : pp. 64~72.
- 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저온수의 특성과 기원. 한국해양학회지. 29(4) : pp. 414~421

- 조양기, 김 구, 노홍길, 1995. 여름철 남해의 저염화와 수송량. 한국해안해양 공학회지. 7 : pp. 126~134.
- 중국통계연감, 1994. 중국통계출판사, 北京.
- 전라남도 푸른 전남 21협의회, 1997. 푸른 전남 21, pp 18~21.
- Beardsley R. C., R. Limeburner, H. Yu and G. A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang(Yangtze River) into the East China Sea, *Continental Shelf Research*, Vol. 4, Nos, 1/2, pp. 57~76.
- Chang, K.-I., K. Kim, S. W. Lee and T. B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in Spring, 1983. *J. Oceanol. soc. Korea*, 30(3), pp. 203~215.
- Cheng Tianwen and Zhao Chunian, 1985. Water and suspended sediment discharges of the large rivers in China and their influences on the coastal areas, *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 7, pp. 460~471.
- Compilation Committee, Chinese Academy of Sciences, 1981. Surface Water of China, Physical Geography of China, Beijing : Science Press(in Chinese).
- Gu Yuhe, 1985. A study on the cause of the path turning of the Changjiang River diluted water. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 16, pp. 354~363.
- Guan Bingxian, 1984. Major features of the shallow water hydrography in the East China Sea and Huanghai Sea. *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 1~13.
- Hu, D. 1994. Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea. In *Oceanology of China Seas*. Vol. 1. edited by Zhou Di et al., Kluwer Academic Publishers, pp. 27~38.

- Knauss, J.A., 1997. Introduction to physical oceanography, 2nd edit. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. 309pp.
- Knudsen, M., 1900. Ein hydrographische Lehrsatz. *Annalen der Hydrographie und Marinen Meteorologie*, **28**, pp. 316~320.
- Le, K., 1983. Some Results from the Study of the Path of the Changjiang Diluted Water. Int. Symp. on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, Hangzhou, April, pp. 346~351.
- Mao Hanli, Gan Zhijun and Lan Sufang, 1963. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing process. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), **5**, pp. 183~206
- Milliman, J. D., and Meade, R. H., 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans, *Jour. Geol.*, Vol. 91, pp. 1~21.
- Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Tech.*, Sp. No., pp. 199~367.
- Pu Yongxiu and Xu Xiaoyun, 1983. The expansion of diluted water in the Changjiang River as seen from the variations in the runoff water, level and salinity. *Marine Science Bulletin* (in Chinese), **2**, pp. 1~7.
- Robert C. Beardsley, Richard Limeburner, Kuh Kim and Julio Candela 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas, *La mer*, **30**, pp. 297~314.
- Shen Huanting, Zhang Chao, Xiao Chengyou, Zhu Jianrong, 1998. Change of the Discharge and Sediment Flux to Estuary in Changjiang River, *Health of the Yellow Sea*, pp. 129~148.

- Wang Congmin and Weng Xuechuan, 1986. Effect of the Taiwan Warm Current Water on the expansive direction of the Changjiang diluted water in summer - an application of the fuzzy relation equation. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), Supp., pp. 13~19.
- Wang Wensu, 1988. Yangtze brackish water plume - circulation and diffusion. *Progress of Oceanography*, 21, pp. 373~385.
- Yu Honghua, Zheng Dacheng and Jiang Jingzhong, 1983. Basic hydrographic characteristics of the study area. In : *Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea*, April 12~16, 1983, China Ocean Press, pp. 270~279.
- Yuang Yaochu, Su Jilan and Zhao Jinsan, 1982. A simple layer model of the continental shelf circulation in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 4, pp. 1~11.
- Zhao Baoren, 1992. Turning mechanism problems of the Changjiang River diluted water, *Acta Oceanologica Sinica*, 11(3), pp. 317~329.
- Zhao Songqiao, 1994. Geography of China : environment, resources, population, and development, 332pp.

Appendix

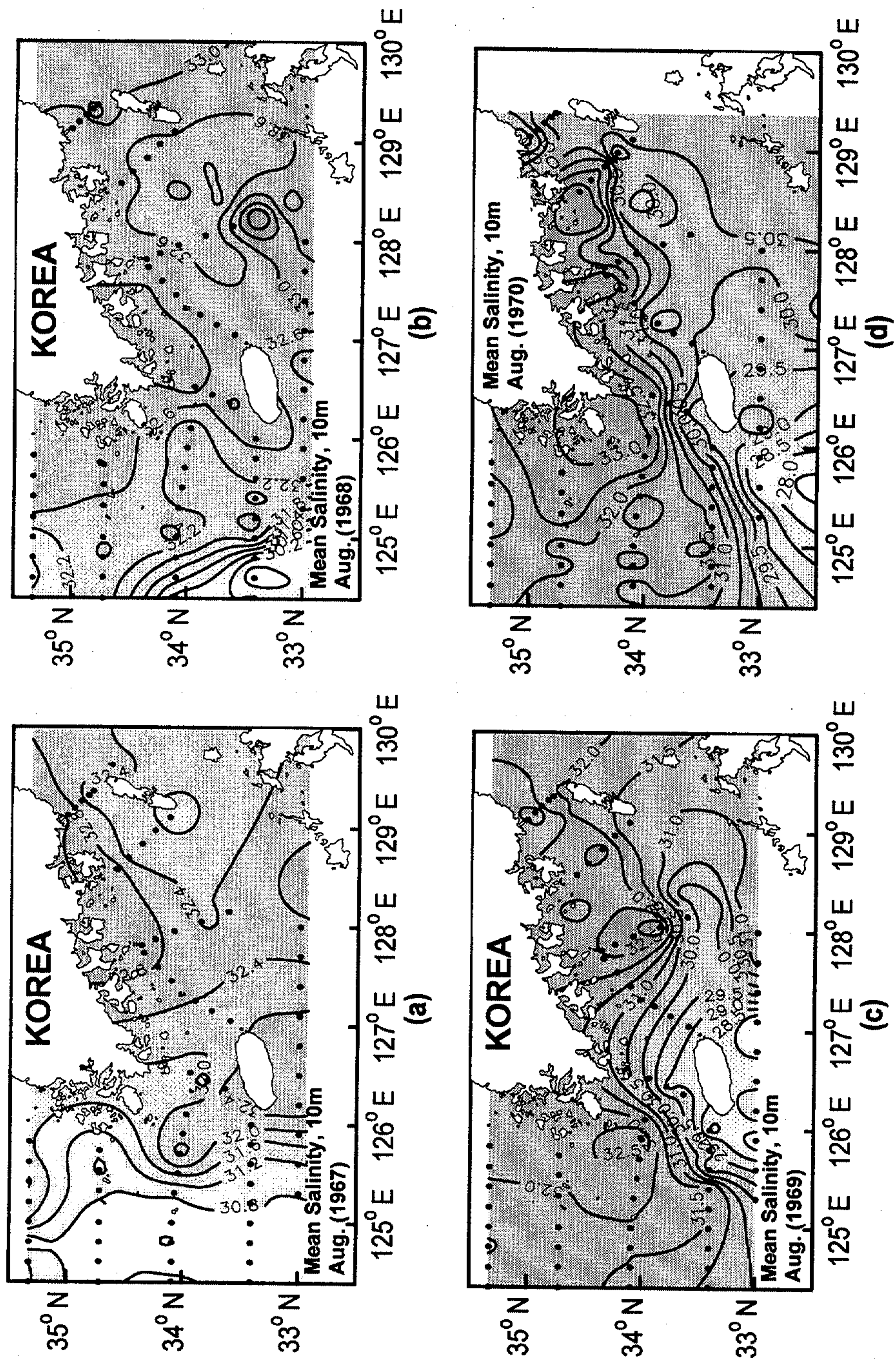


Fig. A1. Horizontal distributions of the vertical mean salinity up to the depth of 10m in August. (a) 1967, (b) 1968, (c) 1969, and (d) 1970 respectively.

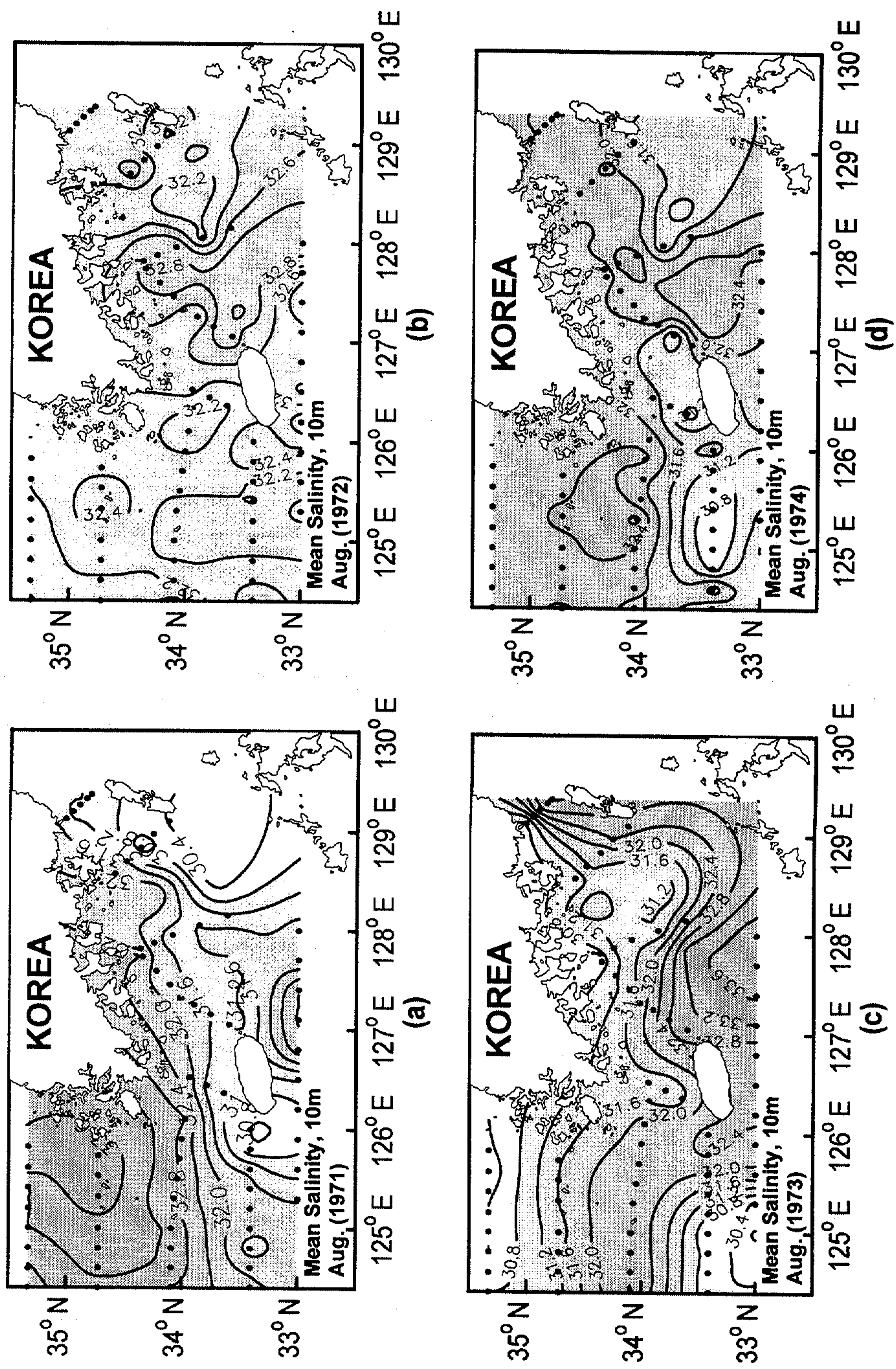


Fig. A2. Same as in Fig. A1. expect for (a) 1971, (b) 1972, (c) 1973, and (d) 1974.

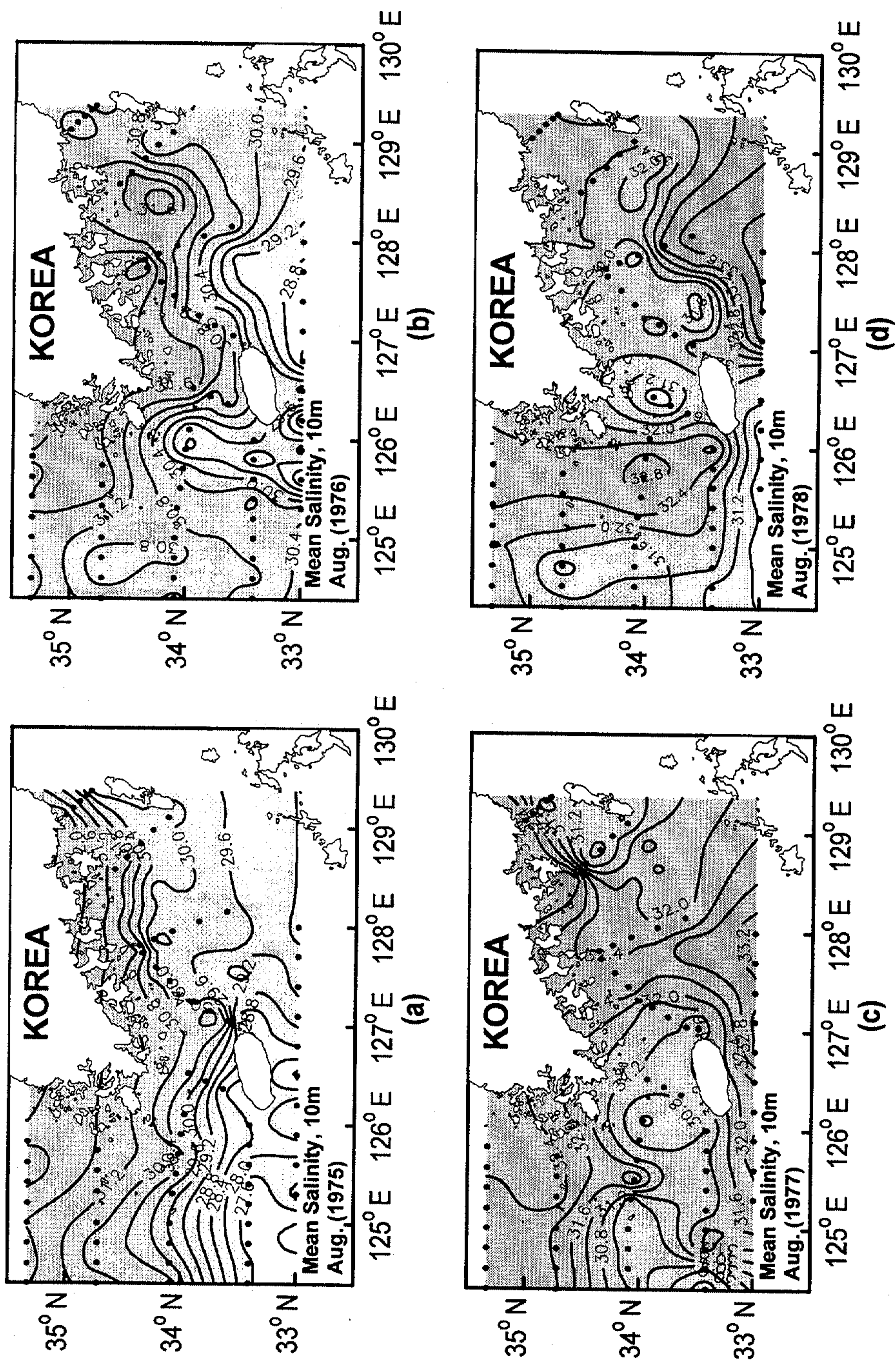


Fig. A3. Same as in Fig. A1 except for (a) 1975, (b) 1976, (c) 1977, and (d) 1978.

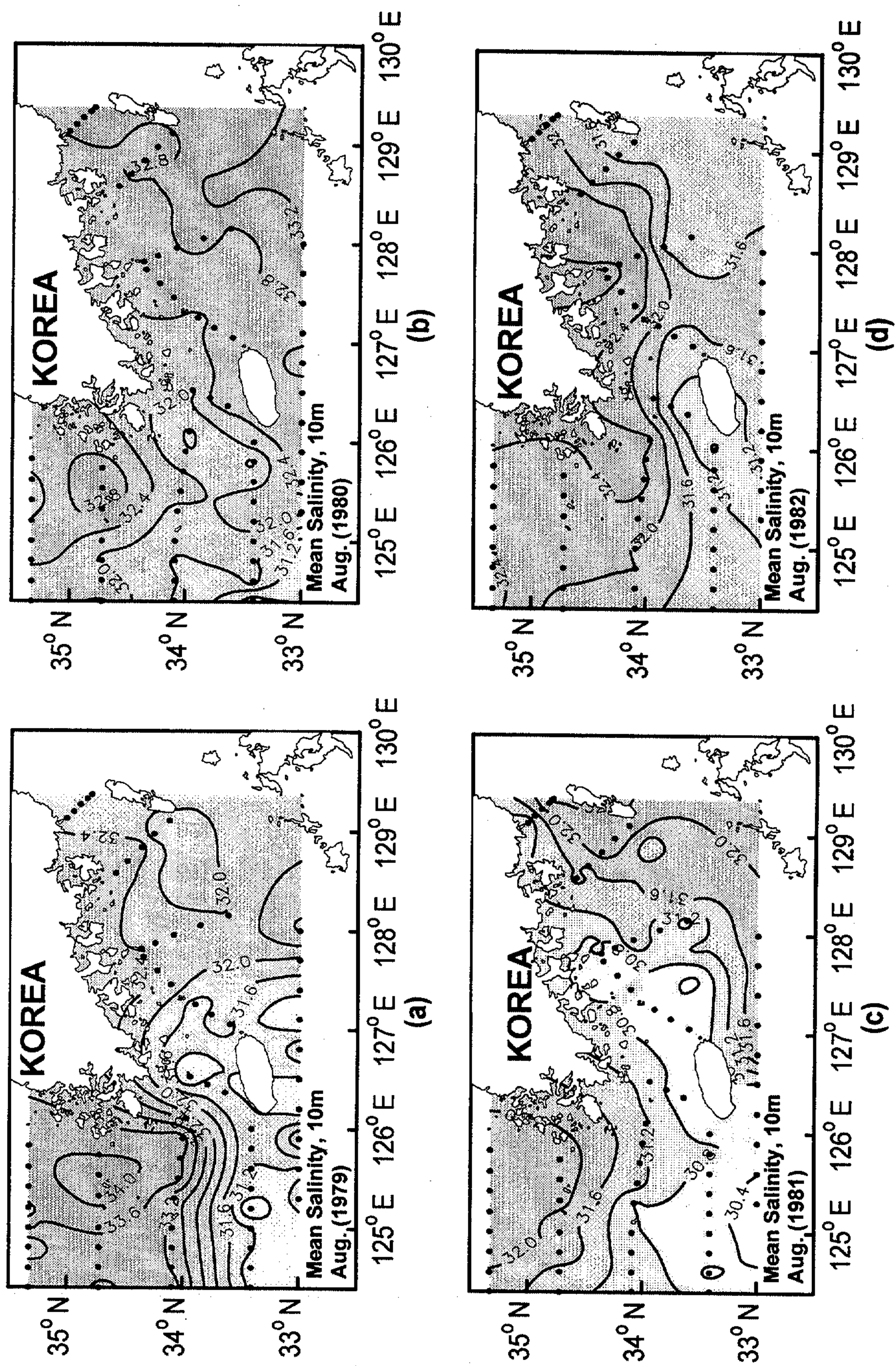


Fig. A4. Same as in Fig. A1 except for (a) 1979, (b) 1980, (c) 1981, and (d) 1982.

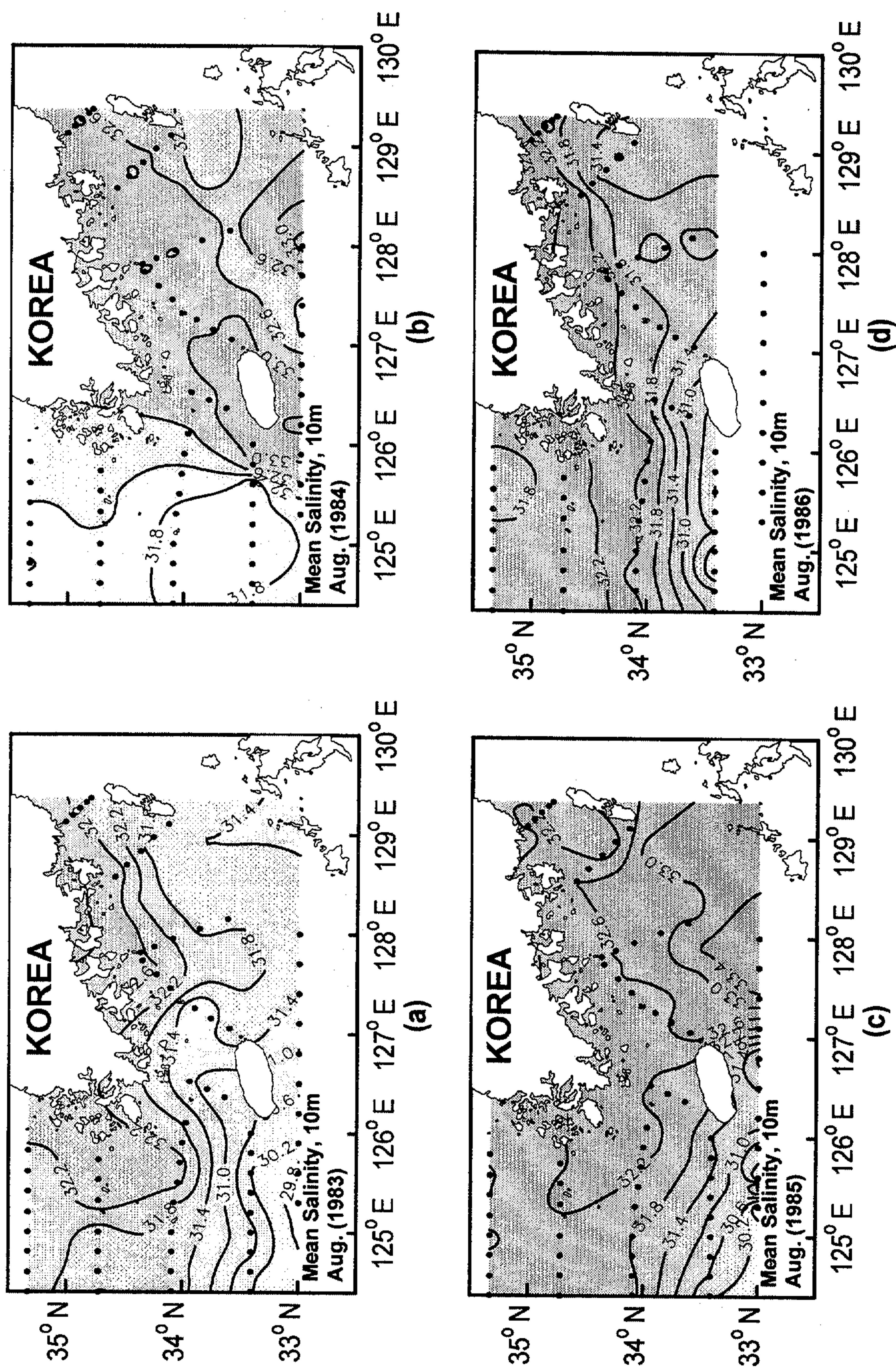


Fig. A5. Same as in Fig. A1 except for (a) 1983, (b) 1984, (c) 1985, and (d) 1986.

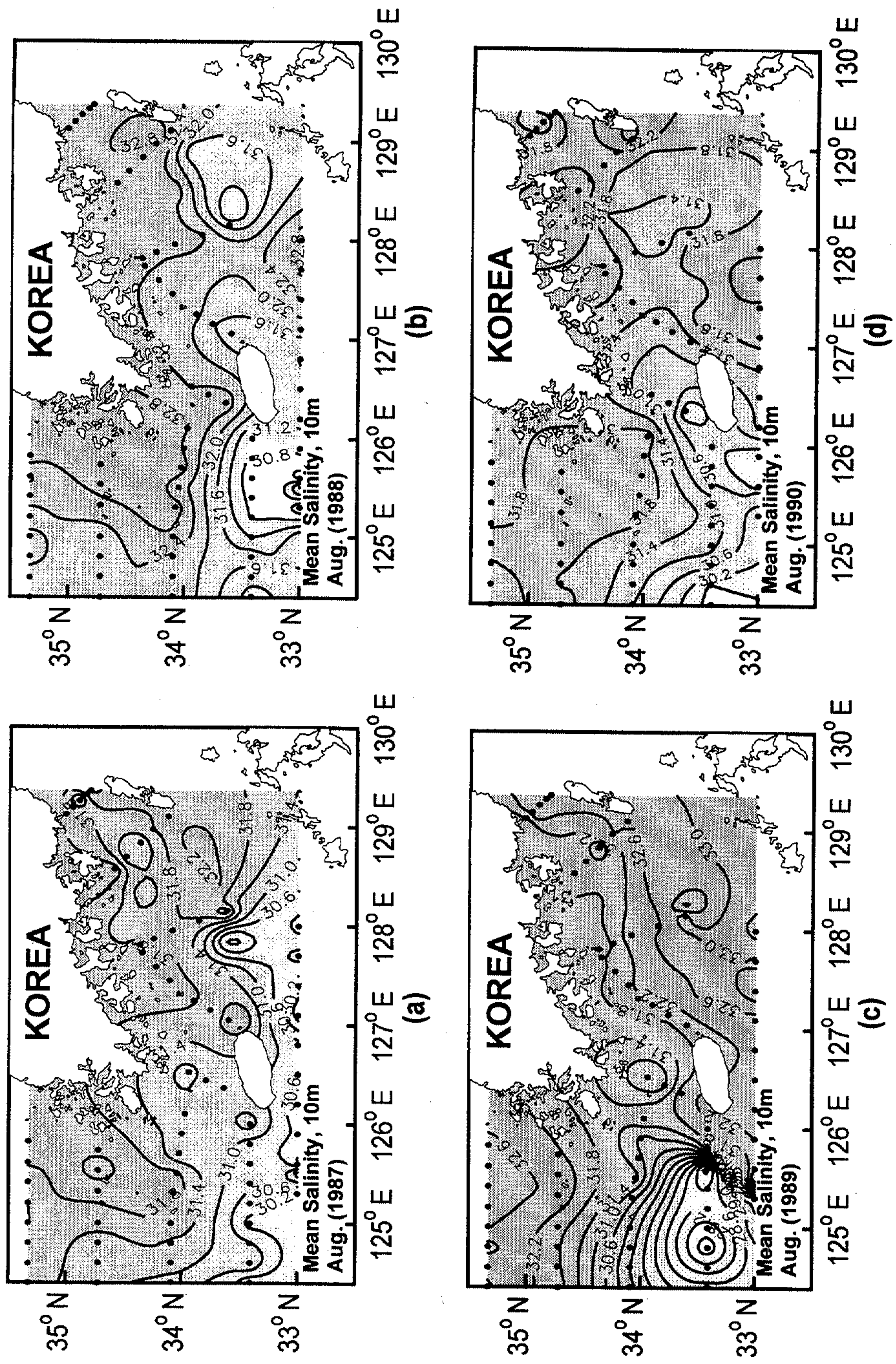


Fig. A6. Same as in Fig. A1 except for (a) 1987, (b) 1988, (c) 1989, and (d) 1990.

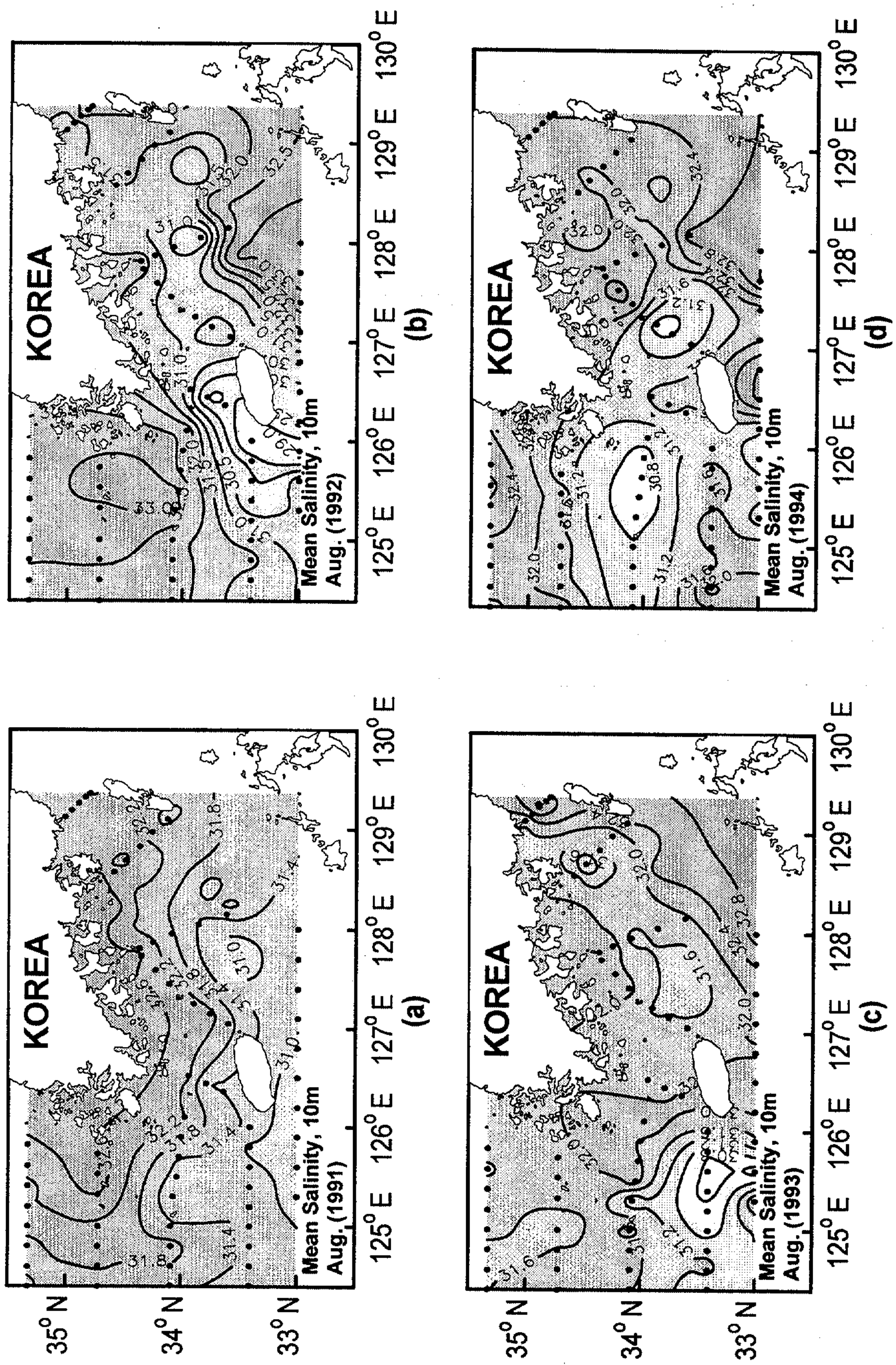


Fig. A7. Same as in Fig. A1 except for (a) 1991, (b) 1992, (c) 1993, and (d) 1994.

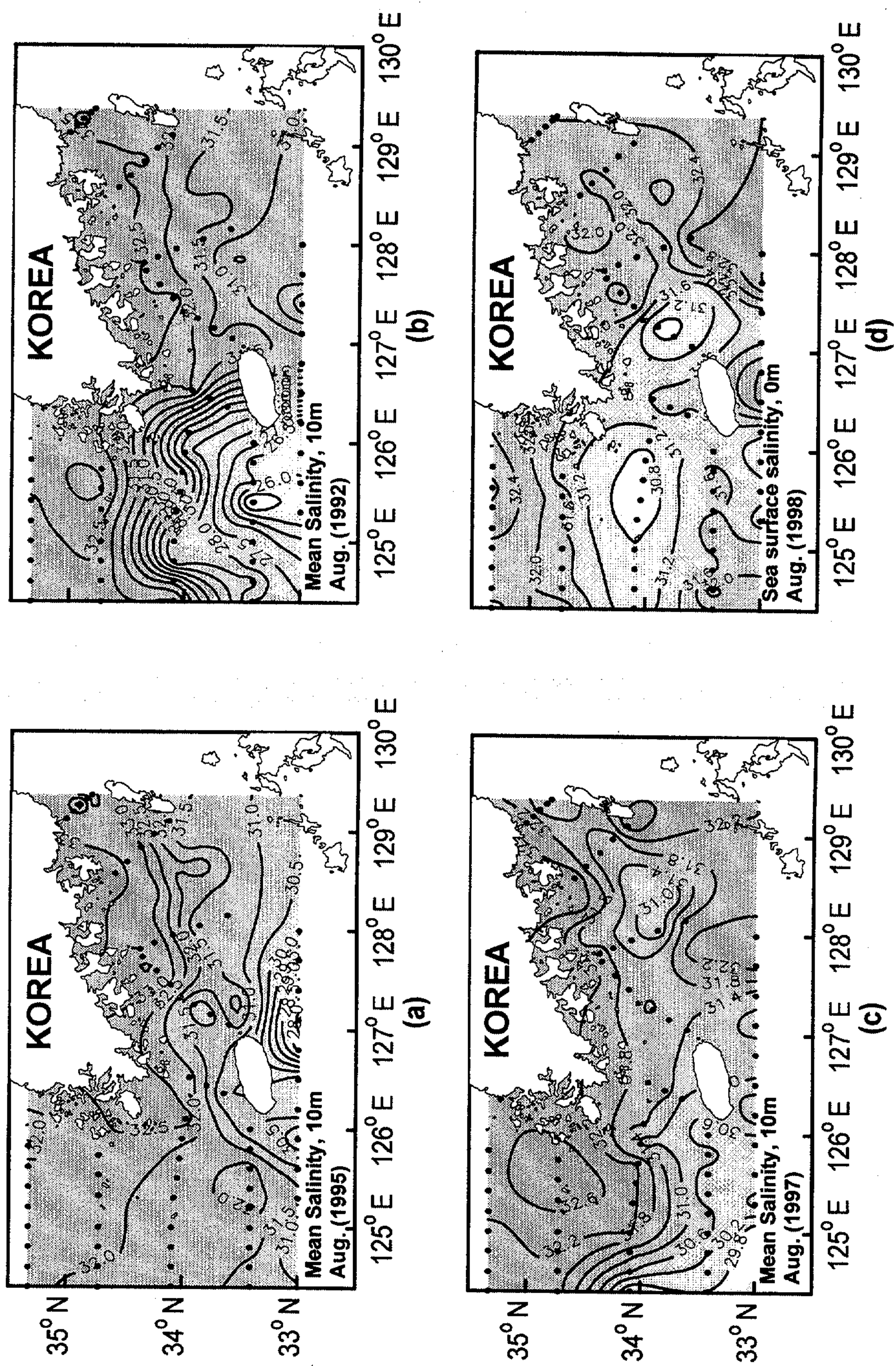


Fig. A8. Same as in Fig. A1 except for (a) 1995, (b) 1996, and (c) 1997. (d) is sea surface salinity in 1998.

A Quantitative Study on Summertime Salinity Decrease in the West Sea of Cheju Island

Do-Seong Byun

Department of Oceanography
Graduate School of Chonnam National University
(Advised by Assistant Professor Yang-Ki Cho)

To study quantitatively decrease in salinity in the west sea of Cheju Island during the summer, salinity data taken by National Fishery Research Development Agency and discharge data for the Yangtze River from Shen *et al.*(1998) were analyzed.

According to a Box model of salt conservation, the estimated mean volume of fresh water needed for the salinity decrease in summer are about $30.052 \text{ km}^3/2\text{month}$ for the annual mean(from 1966 to 1995) and $56.536 \text{ km}^3/2\text{month}$ for 1996, respectively. These are $923.4 \text{ mm}/2\text{month}$ and $1,737.0 \text{ mm}/2\text{month}$ in precipitation.

Decrease in salinity between June and August can not be accounted for by the input of precipitation and river discharge around Cheju Island in view of the quantity of the fresh water. The only reasonable source for such a large volume of freshwater is Yangtze River discharge, of which the volume of fresh water for decreasing salinity is 10 ~ 20 %. Thus, low-salinity waters less than 31 ‰ were found in that region in summer.

The results of the previous studies indicate that the mean velocity of Yangtze Diluted Water is 10 ~ 15 cm/sec. Therefore, it takes 33~50 days to travel from the mouth of the Yangtze River to the coasts of Cheju Island, a distance of 438 km.

However, a decrease in salinity in the West sea of Cheju Island does not occur every summer. Although it is rare, we can find that the salinity in the east sea of

Cheju Island is lower than that in the west sea of the island, and there was no low salinity water less than 32‰ in both side.

It is thought that the salinity decrease in west sea of Cheju Island is related with not only the volume of Yangtze River discharge but also the path of Yangtze Diluted Water.

감사의 글

IMF의 시련으로 시작된 1998년. 저에게 있어서도 가장 큰 변화가 있었던 특별한 한 해였습니다. 혼자 힘으로 불가능하였을 일들이 많은 분들의 도움으로, 꽃을 피우고 열매를 맺어 풍성한 수확을 거두게 된 한 해였습니다. 게으른 저에게 이런 풍성한 열매를 수확하게 해 주신 하나님께 정말 감사드리며, 이 기쁨의 열매를 저를 알고 있는 모든 분들과 함께 하고 싶습니다.

항상 제자의 장래를 염려해주시고, 여러모로 부족한 저에게 자상하게 학문하는 법을 가르쳐 주신 조양기 선생님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 중에도 논문심사를 위해 애써 주신 서해립 선생님과 김광용 선생님께 감사드리며, 제 논문에 많은 관심을 보여 주신 차성식 선생님, 그리고 김주용 선생님께 감사드립니다. 지난해 진도에 관해 연구하고자 했을 때, 순수 논문 제목까지 지어주시며, 평소 많은 관심을 가져주신 유환수 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

서울에 계심에도 광주까지 내려오셔서 항상 성실하신 모습으로 물리해양에 관해 많은 가르침을 주신 김영규 선생님과 예전에 알지 못했던 수치모델의 개념에 관해 좋은 가르침을 주신 강운호 선생님, 항상 열성적이시고 자상하신 모습으로 저서동물에 관해 좋은 가르침을 주신 임현식 선생님, 바쁘신 가운데 해양화학에 관해 많은 것을 가르쳐 주시려고 노력하신 양성철 선생님께 감사드립니다. 아울러 부안종묘배양장에서 삶을 사는 법에 관해 많은 조언을 주시고, 아무 것도 모르는 저에게 대하 종묘 생산하는 방법을 자상하게 가르쳐 주신 김충식 선생님과도 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

논문을 쓰기까지 여러모로 배려해주신 전남수산시험연구소 소장님과 과장님, 그리고 평소 많은 관심을 가져주신 연구소 가족 여러분께 감사드립니다. 특히, 지도에서 가장 좋은 프린터를 선뜻 빌려주신 희지 아빠와 맛있는 음식이 있으면 항상 불러주신 희지 엄마께 정말 감사드립니다.

가장 큰 힘이 되어 준 해양물리실험실 가족 여러분께 감사드립니다. 많은 문제를 함께 고민하고 열성적으로 여러모로 도와주려고 애쓴 용우와 젊은 후배 못지 않으신 정열로 열심히 대학원 생활을 하시면서 항상 편안하게 대해주신 김병춘 선배님, 아무런 불평불만 없이 자료정리를 끝까지 도와준 믿음직스런 후배 박래환, 실험실을 찾을 때마다 항상 밝은 얼굴로 따뜻하게 맞아주고, 서투른 솜씨로나마 도와주려고 노력했던 후배 봉선화, 선연종, 김효정, 그리고 지도에서 가장 좋은 컴퓨터를 광주에서 지도까지 들고 와서 조립해 준 동기 조철에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶군요. 초창기 선배가 없었던 시절, 해양물리실험실의 선배 역할을 해주시며, 많은 가르침과 삶의 본이 되어주신 최병주 형에게 진심으로 감사드립니다. 마지막으로 해양물리실험실에서 가장 연세가 많으신 선배 김문옥 과장님과도 기쁨을 나누고 싶군요.

영문 교정을 도와주신 YUSusa선생님, 수퍼맨 기슭이형 그리고, 바쁘신 가운데에서도 강수량 자료를 제공하여 주신 부안기상관측소 김태진님께도 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

어려울 때마다 찾아 주고, 서로의 고민을 함께 하며, 기쁨을 나눌 수 있는 친구가 있다는 것은 참으로 행복한 일인 것 같습니다. 21세기를 젊어지고 나갈 젊은이답게 항상 꿈을 가지고 열심히 생활하는 원일이와 관성이, 멀리 있으면서도 변함없는 우정으로 안부를 걱정해준 죽마고우 용승이와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다. 이 밖에 91학번 동기들과 저를 아는 동명 제2청년부 형제, 자매들과도 함께 기쁨을 나누고 싶군요.

뒤에서 묵묵히 사랑으로 성원해주신 형님, 형수님 그리고 누님들, 큰 매형, 작은 매형, 특히 이모께 진심으로 감사드립니다. 그리고 올해 태어난 킬웅이 비롯한 조카들과도 기쁨을 나누고 싶군요.

늘 사랑으로 감싸주고 염려해주시며 믿어주신 부모님과 할머니, 큰할머니께 가장 큰 감사와 함께 부족하나마 이 논문이 그 보답이 되었으면 합니다.