

석사학위논문

여름철 양자강 저염수의 확장과
그 원인



제주대학교 대학원

해양학과

문 재 홍

2004년 12월

여름철 양자강 저염수의 확장과 그 원인

지도교수 방 익 찬
문 재 홍

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.



문 재 홍의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장	<u>윤 정 수</u>	인
위 원	<u>이 준 백</u>	인
위 원	<u>방 익 찬</u>	인

제주대학교 대학원

2004년 12월

Extension of Changjiang Diluted Water(CDW)
in Summer and its Cause

Jae-Hong Moon

(Supervised by professor Ig-Chan Pang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

DECEMBER, 2004

목 차

그림 목차 (List of Figures)	i
표 목차 (List of Tables)	iv
Summary	v
I. 서론	1
II. 해양자료 분석	2
1. 제주도 주변해역의 저염수	2
2. 저염수와 기상요인과의 관계	7
1) 제주도 주변의 강수량과의 관계	7
2) 양자강 주변의 강수량과의 관계	7
3) 태풍과의 관계	8
4) 바람과의 관계	9
III. 수치 모델 실험	13
1. 양자강 저염수 이동의 원인	15
1) 양자강 유출량의 변화	15
2) 대만난류의 변화	19
3) 바람의 변화	21
2. 양자강 저염수의 예측	25
1) 1996년과 1998년의 바람	25
2) 수온과 염분	30
3) 인공위성 부이의 궤적 재현	35
IV. 결론	38
참고문헌	41
요 약	44
감사의 글	46

그림 목차 (List of Figures)

Fig. 1. Horizontal salinity distributions at the surface in the adjacent sea of Cheju Island in August of 1994-2001(Data from NFRDI).	4
Fig. 2. Horizontal temperature distributions at the surface in the adjacent sea of Cheju Island in August of 1994-2001(Data from NFRDI).	5
Fig. 3. Hydrostatic stations observed by R/V Ara of CNU in Aug. 26 - Sep. 3, 1997, Horizontal surface salinity distribution, and Vertical salinity profiles along Line C.	6
Fig. 4. Monthly precipitation averaged with the data from four weather stations (Cheju, Seogwi, Gosan, Sungsan) in Cheju Island in 1990-1998.	11
Fig. 5. Monthly precipitation averaged with five weather stations located near Changjiang River in China from 1995 to 1998 (Data from KMA).	11
Fig. 6. Monthly variation of Changjiang River discharge from 1991 to 1999 (Zhu et al. 2001)	12
Fig. 7. Wind vector and its meridional component at Gosan in August, 1996 and 1998 (data from KMA).	12
Fig. 8. Model domain and bottom topography (in meter) of the Yellow Sea and the East China Sea.	14
Fig. 9. Seasonal variation of (A) Changjiang River discharge and (B) Taiwan current input and (C) Meridional wind stress used for model experiment.	16
Fig. 10. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and fixed Taiwan Current input as 0.5Sv and without wind stress. Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰. ·	17

- Fig. 11. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B) and without wind stress. Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰. · 20
- Fig. 12. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A), Taiwan Current input as in Fig.9(B) and wind stress as in Fig.9(C). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰. … 23
- Fig. 13. 5 day interval trajectories of two surface water masses selected at Changjiang River mouth in model experiment of Fig.12. Yellow and blue ones are selected in June 15 and July 15, respectively. They show two different flow routes of the Changjiang Diluted water. Blue one reaches Cheju area earlier than Yellow one. … 24
- Fig. 14. Bimonthly surface salinity distributions in 1996 obtained from the model result with monthly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1°resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig. 9 (A) and Taiwan Current input as in Fig. 9 (B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰. … 26
- Fig. 15. Bimonthly exhibition of monthly MWF-ERS2 wind stresses in 1996(1° resolution) from CERSAT used the model running of Fig. 14. … 27
- Fig. 16. Bimonthly surface salinity distributions in 1998 obtained from the model result with monthly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1°resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan

	Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰.	28
Fig. 17.	Bimonthly exhibition of monthly MWF-ERS2 wind stresses in 1998(1°resolution) from CERSAT used the model running of Fig. 16.	29
Fig. 18.	Seasonal surface salinity distributions in 1998 obtained from the model result with weekly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1o resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.	32
Fig. 19.	Seasonal surface salinity distributions in 2000 obtained from the model result with daily satellite wind stress from QSCAT/NCEP (0.5°resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.	33
Fig. 20.	Comparison of the salinity distributions in August 2000 from (A) observation and (B) the model running of Fig. 19 in the area marked by rectangular box in Fig. 19.	34
Fig. 21.	Trajectories of (A) satellite-tracked drifters in Jun. 9 to Aug. 2, 2003 and (B) simulated drifters in numerical model in the same period with daily wind stress from MWF-QuikSCAT(0.5°resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.	37

표 목차 (List of Tables)

Table 1. Number of typhoons which influenced the area between the Changjiang River mouth and Cheju Island in 1990s(KMA).	9
--	---



Summary

Extension of Changjiang Diluted(CDW) Water in Summer and its Cause

The analysis of hydrographic data shows that Changjiang diluted water (CDW) appeared in the adjacent seas of Cheju Island in summer has a little higher temperature than adjacent water due to weak vertical mixing and various routes such as flowing to the Cheju Strait or to the south of Cheju Island. The distribution of CDW is frequently observed to be separated with more saline water between Changjiang river mouth and Cheju Island showing a disconnection of salinity. This disconnection seems to be persistent. The salinity value of CDW appeared in the adjacent seas of Cheju Island in summer shows closer relation with the precipitation around Changjiang river than around Cheju Island and some relation with meteorological factors such as Typhoon and monsoon wind.

In order to understand what drives CDW to the adjacent seas of Korean Peninsula in summer, numerical experiments with ROMS are performed using the factors which are known as its cause such as the increase of CDW, the increase of Taiwan Current, and the change of wind direction. As a result, the phenomenon can not be driven only by the first two factors but decisively driven by the last one (wind). The reason is because the areas in which CDW flows is shallow and not influenced by

strong current so that the wind effect can be dominant. Therefore, the flow of CDW can be satisfactorily simulated by the numerical experiment with the satellite wind stress in 1996 and 1998.

We can closely reproduce the trajectories of satellite-tracked drifters released in June 2003 by the numerical model. However, some of model trajectory are still different from the buoy trajectory specially in the area of strong current expected. It is not clear the reason is whether the model does not reproduce strong Tsushima Current well or the large ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) scale wind stress used in the model does not represent small scale strong wind stress well. In spite of such a discrepancy, we can have a confidence to expect a sufficiently accurate prediction by some improvements in the future from the success of reproducing small scale movement such as buoy trajectory in numerical model.

Besides, the model results show another important facts as follows: the northward flow along the west coasts of Korean Peninsula in summer is caused by wind, most of CDW flow into the Yellow Sea instead of to the East Sea, and the low salinity water rotates counterclockwise in the Yellow Sea by monsoon wind.

Key words: Changjiang Diluted Water(CDW), Hydrographic data, ROMS, Monsoon Wind.

I. 서론

제주도 주변해역은 11월에서 5월까지의 고온·고염분수인 대마난류수가 광범위하게 분포하여 제주도 연안해역에까지 영향을 미치므로 연안어민의 중요소득원인 전복, 소라, 성게 등의 외양성 수산생물이 서식하기에 알맞은 환경이 조성된다. 그러나 6월에서 10월까지의 저염분수인 양자강 저염수가 양자강 하구에서 제주도 서부해역으로 유입되어 남해안을 지나 대한해협으로 유출되면서 이러한 연안환경에 영향을 준다.

일반적으로 여름철 제주도 주변해역의 저염분수는 양자강으로부터 오는 것으로 보고되는데(Kim and Rho, 1994; Limeburner et al., 1983; Wang, 1988) 양자강의 유출량이 많아지는 여름철이 되면 저염수의 저염분 축이 양자강 하구에서 북동쪽을 향하여 분포한다는 것이 구체적으로 밝혀졌다(Yu et al., 1983; Le, 1983). 그 이후에 Rho(1985), Kim et al.,(1991), Kim and Rho (1994)등에 의해 제주도 주변해역 중 제주도 서쪽해역을 거쳐 제주해협을 통과하여 이동한다는 것이 알려졌다.

여름철 제주도 주변에 출현하는 양자강 저염수는 제주도 수산업에 크고 작은 피해를 끼치는데 특히, 1996년 여름에는 제주도 서부해역의 염분이 26‰이하로 낮아졌으며 이 양자강 저염수가 제주해협을 통과하여 지나가면서 제주도 서부 연안 양식생물을 모두 폐사시켜서 약 60억 원에 이르는 막대한 손실을 입히기도 했다. 1998년의 경우에도 피해규모는 1996년도에 비해 적었지만 제주도 수산업에 큰 피해를 입혔다. 따라서 이러한 양자강 저염수의 유입을 예보하여 그 피해규모를 최소화 할 수 있는 예보시스템이 필요하다. 그러나 양자강 저염수의 유입은 다양한 해양학적인 요인들과 기상학적인 요인들이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 예보시스템을 구축하는 일은 그리 간단한 문제가 아니다. 뿐만 아니라, 양자강 저염수가 우리나라 주변 해양환경에 어

떠한 영향을 미치고 있으며, 어떠한 경로를 따라 제주도 주변해역으로 유입되는지에 대해서도 아직까지 명확하게 규명되지 않았다.

이 연구에서는 양자강 저염수와 해양학, 기상학적인 요인들과의 관계를 관측 자료 분석을 통해 이해하고, 양자강 저염수가 제주도 주변해역으로 유입되는 역학을 수치모델을 통해서 알아보려고 한다. 관측 자료 분석은 1994년부터 2001년 사이에 관측된 해양자료를 중심으로 여름철 출현하는 양자강 저염수의 특징과 기상요소와의 관계를 분석하였고, 수치모델은 1996년과 1998년을 중심으로 실험하였다. 마지막으로 양자강 저염수 예측 가능성을 보기 위해 2003년 6월의 인공위성부이 궤적을 수치모델로 재현하였다.

II. 해양자료 분석



1. 제주도 주변해역의 저염수

Fig. 1과 Fig. 2는 1994년에서 2001년까지 8월에 국립수산진흥원에서 관측한 제주도 주변해역의 표층 염분과 수온 분포를 나타낸 그림이다. 제주도 주변해역에서 8월의 염분은 대략 26-34‰ 정도의 분포를 보이고 있지만, 1996년에는 가장 낮은 저염수의 값이 20‰까지 낮아졌는데, 이것은 다른 해 보다 약 6‰정도가 더 낮은 값이다. 이렇게 낮아진 저염수의 핵은 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 주변해역보다 약 1-2℃정도가 높은 수온을 보임으로써 저염수가 수온에 의해 구별되는 것을 알 수 있다. 일반적으로는 저염수가 수온으로 잘 구별되지 않는데 비해 1996년에 뚜렷하게 구별되는 이유는 표층염분과 그 아래의 염분이 차이가 클 경우 그만큼 수직혼합이 어려워지고 따라서 태양열이 표층의 저염분수에 집중되었기 때문이다. 양자강 저염수는 다양한 경로를 보

이면서 제주도 주변해역에 분포하는데 Fig. 1에 나타난 것처럼 1996년에는 제주도 서부해역에 출현한 저염수가 주로 제주도 북쪽연안을 따라 제주해협을 통과했던 반면에 1998년에는 저염수가 제주도 남부해역을 통과하여 지나가는 경로를 보였다(Pang et al., 1999). 여름철 제주도 주변해역에 출현하는 양자강 저염수의 또 다른 특징 중의 하나는 제주도 주변해역의 저염수가 양자강 입구에 분포하는 저염수와 분리되어 분포한다는 점이다. Fig. 3은 1997년 8월 26일에서 9월 4일까지 제주대학교 실습선 아라호를 이용하여 관측한 수평염 분분포와 수직염분분포를 나타낸 그림인데, 양자강 입구에서는 25%이하의 저염수가 분포하고, 제주도 주변해역에 30%이하의 저염수가 분포하는데 비해 두 저염수의 중간해역에는 31.6-32%의 고염수가 존재함으로써 두 저염수가 분리되어 있는 양상을 볼 수 있다. 이러한 분포양상은 1997년뿐만 아니라 다른 해의 관측에서도 지속적으로 나타난다.



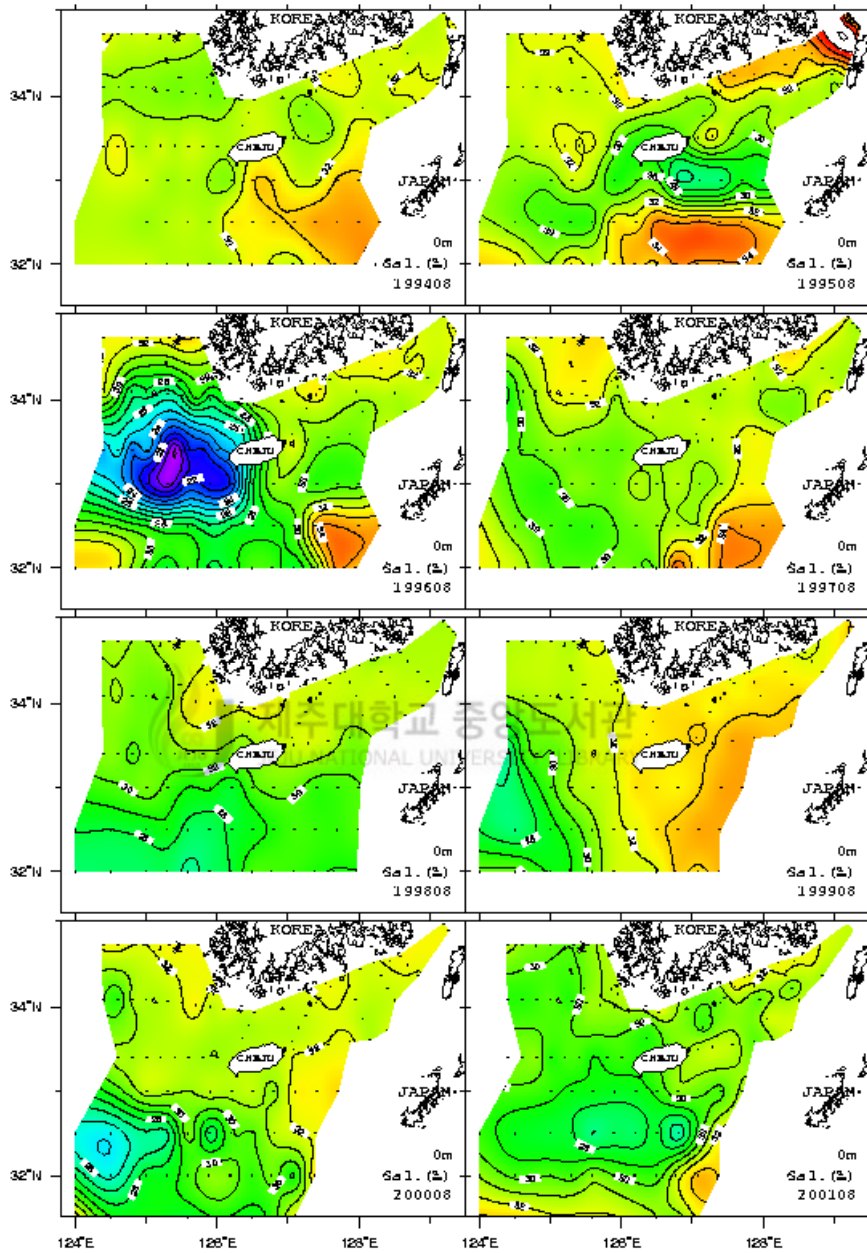


Fig. 1. Horizontal salinity distributions at the surface in the adjacent sea of Cheju Island in August of 1994-2001(Data from NFRDI).

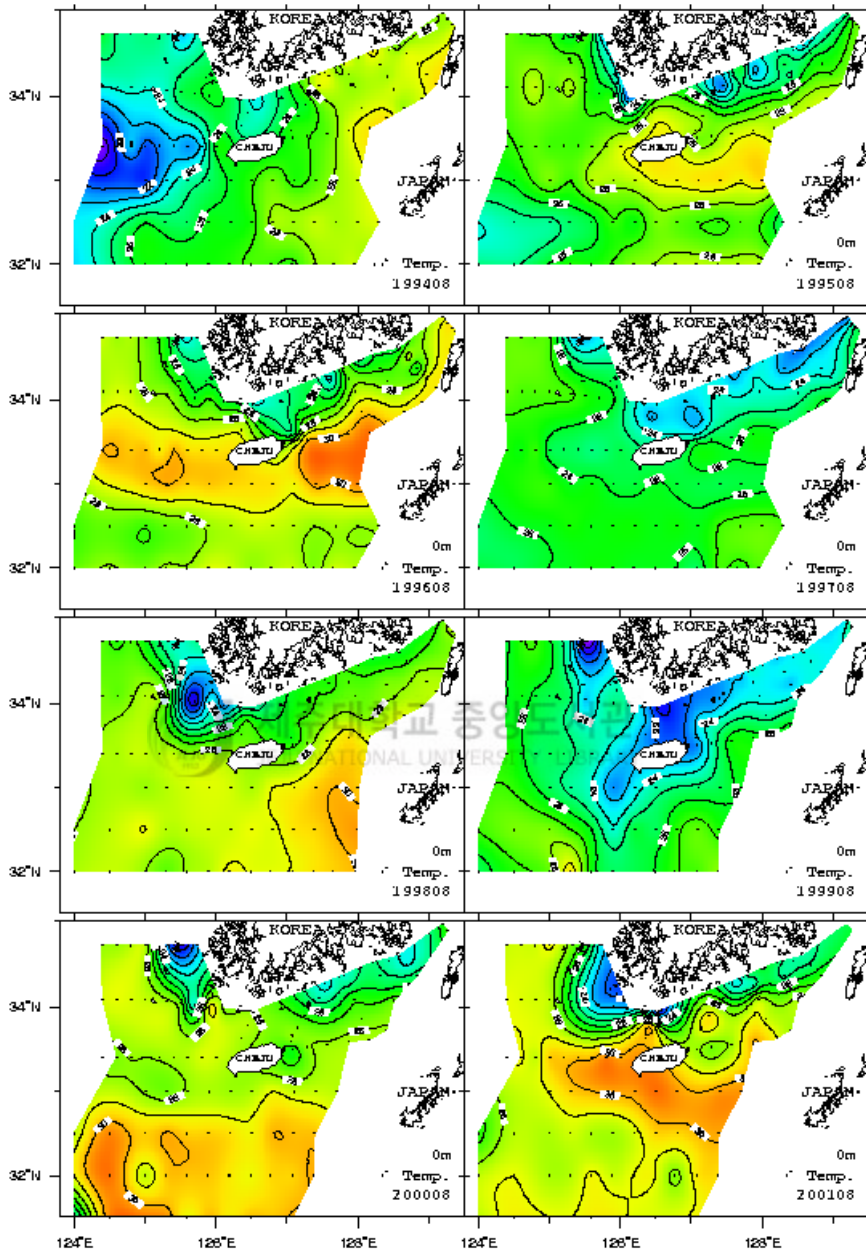


Fig. 2. Horizontal temperature distributions at the surface in the adjacent sea of Cheju Island in August of 1994-2001(Data from NFRDI).

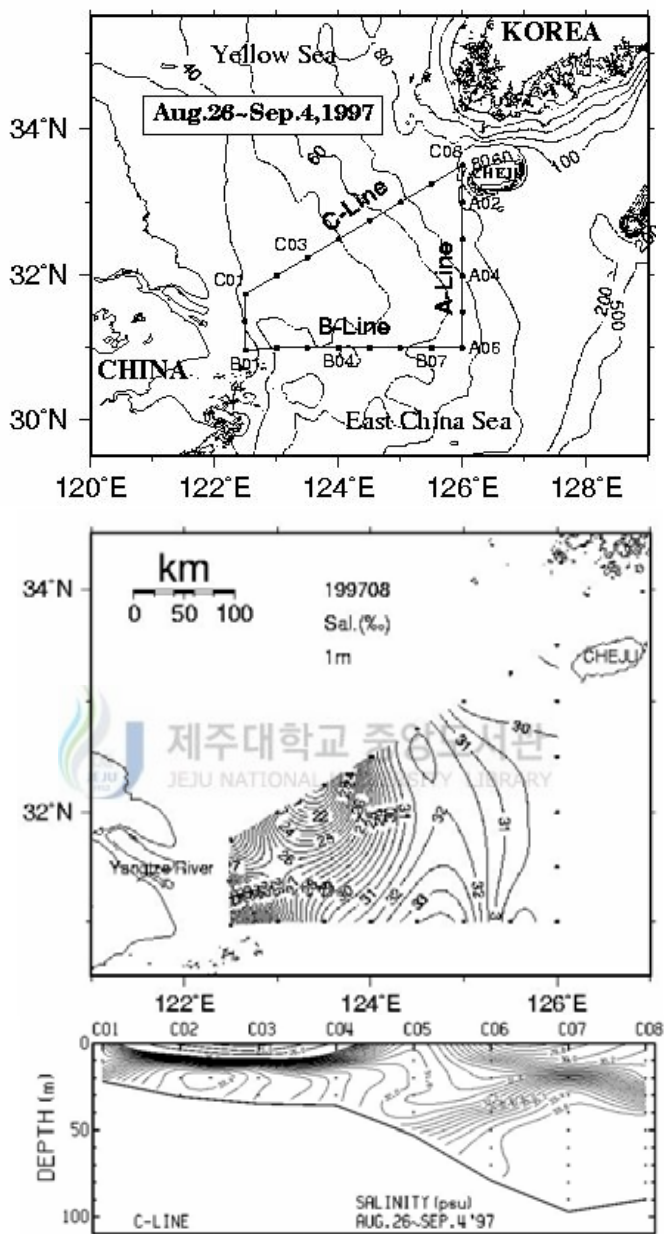


Fig. 3. Hydrostatic stations observed by R/V Ara of CNU in Aug. 26 - Sep. 3, 1997, Horizontal surface salinity distribution, and Vertical salinity profiles along Line C.

2. 저염수와 기상요인과의 관계

1) 제주도 주변의 강수량과의 관계

Fig. 4는 1990년에서 1998년까지 제주, 서귀포, 고산, 성산의 4개의 기상관측소에서 관측된 강수량을 평균한 제주도의 월 강수량을 나타낸 것이다. 저염수가 출현했던 1996년과 1998년의 8월의 강수량은 평년과 비슷하거나 오히려 약간 적었던 것으로 나타났다. 1998년 9월의 경우 많은 강수가 있었으나, 1998년도에 저염수는 8월말에서 9월초에 나타났기 때문에 저염수와는 관계가 없다. 이것은 제주도의 지역적 강수량이 여름철 제주도 주변해역에 출현하는 저염수의 염분에 미치는 영향은 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다 (Pang et al., 1999).



2) 양자강 주변의 강수량과의 관계

Fig. 5는 1995년에서 1998년까지 양자강 주변의 기상 관측소에서 관측된 강수를 평균하여 구한 6월, 7월, 8월의 월 강수량을 나타낸 것이다. 이 중에서 1998년 8월 자료는 1일에서 22일까지의 강수량만을 나타낸 것이다. 1996년과 1998년의 6월과 7월에는 다른 해보다 많은 강수가 있었음을 알 수가 있다. 단, 8월의 강수량은 8월에 나타난 제주도 주변해역의 저염수와는 관계가 없다. 이것은 제주도 주변해역에 출현하는 저염수가 제주도 지역적 강수량보다는 양자강 주변의 강수량과 관련이 있음을 확인시켜주는 결과이다(Pang et al., 1999).

Fig. 6은 1991-1999년 양자강 유출량의 월별 변동을 나타낸 그림이다(Zhu

et al., 2001). 특이할 만 한 점은 1998년의 양자강 유출량은 1996년도 보다 훨씬 많은 유출량이 있었음에도 불구하고, Fig. 1에서 나타난 것처럼 제주도 주변해역에서의 저염수는 1996년도가 1998년도 보다 훨씬 낮았다. 이것은 양자강 유출수가 제주도 주변해역으로 유입되는 과정에서 다른 요인들에 의해 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

3) 태풍과의 관계

Table 1은 1990-1998년도까지 우리나라에 영향을 준 태풍의 수를 연도별로 나타낸 표이다(기상청). 표에서 알 수 있듯이, 1996년도의 경우는 우리나라에 영향을 준 태풍이 한 차례도 없었으며, 1998년의 경우도 9월 이후에 영향을 주었던 것으로 나타났다. 즉, 1996년과 1998년도의 경우 제주도 주변해역에 저염수가 출현하는 8월에는 태풍에 의한 영향이 거의 없었다고 할 수 있다. 태풍은 많은 강우와 강한 바람을 동반하여 바다에 커다란 영향을 주는데, 이러한 태풍이 여름철 저염의 표층수와 고염의 저층수를 수직혼합 시키기 때문에 표층 염분이 상대적으로 높아지게 된다. 따라서, 태풍의 영향이 거의 없었던 1996년과 1998년도에 경우에는 다른 해에 비해 상대적으로 표층 염분이 더 낮았으며, 그로 인해서 더 많은 피해를 끼쳤던 것으로 보여 진다(Pang et al., 1999).

Table 1. Number of typhoons which influenced the area between the Changjiang River mouth and Cheju Island in 1990s(KMA).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Jun.-Aug.	3	2	1	4	4	2	0	3	0
Sep.-Nov.	1	2	1	0	1	1	0	1	1

4) 바람과의 관계

양자강 유출수가 제주도 주변해역으로 유입되는 과정에서 저염수에 가장 영향을 줄 수 있는 것은 바람일 것이다. 여름철 제주도 주변해역에 나타나는 저염수와 바람과의 관계를 알아보기 위해서, 1996년과 1998년 제주도 기상관측소 중 가장 서쪽에 위치한 고산에서 관측된 바람을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 1996년과 1998년도의 바람은 매우 다른 양상을 나타내고 있는데, 1996년도의 경우 바람의 세기는 약하게 불었으며, 특별하게 구별되는 풍향이 없었던 반면에 1998년도의 경우에는 상대적으로 1996년 보다 바람의 세기가 강했고, 풍향도 남풍이 지속적으로 불었다. 이와 같은 바람은 1절에서 나타났던 저염수의 염분 값이나 경로와 관련이 있을 것이다. 우선 저염의 유지는 태풍과의 관계에서 보았듯이 바람이 약할 때 가능한데 그 이유는 바람이 강할 때는 저염수와 밀의 해수가 바람에 의해 혼합되어 염분이 높아지기 때문이다. 이것은 1996년의 양자강 유출수가 1998년에 비해 적었음에도(Fig. 6) 제주도 주변해역에서는 1996년의 염분이 1998년보다 훨씬 낮았던 이유를 설명해 줄 수 있다. 저염수의 경로는 일반적으로 제주해협으로 보고되지만(Kim and Rho, 1994) 1998년과 같이 남풍이 지속적으로 불 경우 에크만 수송에 의해서 저염수의 경로가 제주도 남부해역을 통과하는 것으로 바뀔 수

가 있다. 그러나 한 지점에서 관측된 바람자료는 저염수와의 연관성을 추정할 수는 있지만 그것을 명확하게 증명하는 데는 어려움이 있기 때문에 좀더 넓은 해석을 포함하는 바람자료의 확인이 필요하다.



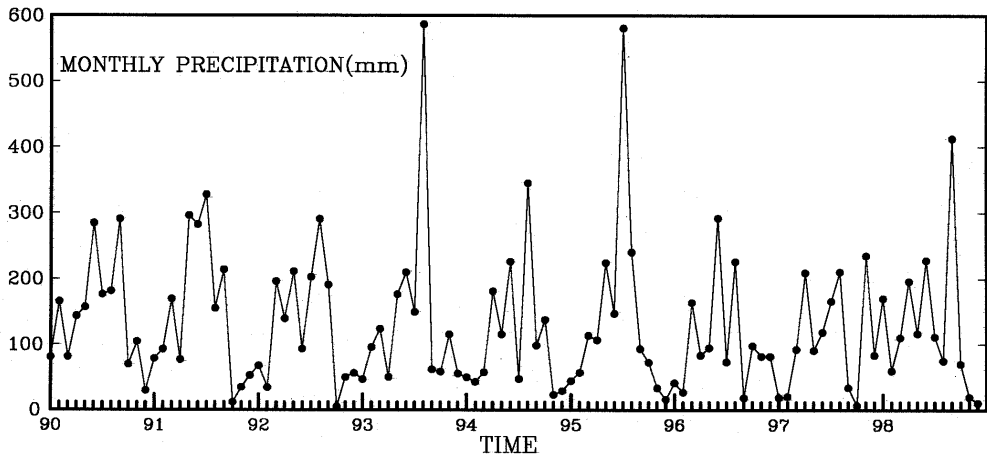


Fig. 4. Monthly precipitation averaged with the data from four weather stations (Cheju, Seogwi, Gosan, Sungsan) in Cheju Island in 1990-1998.

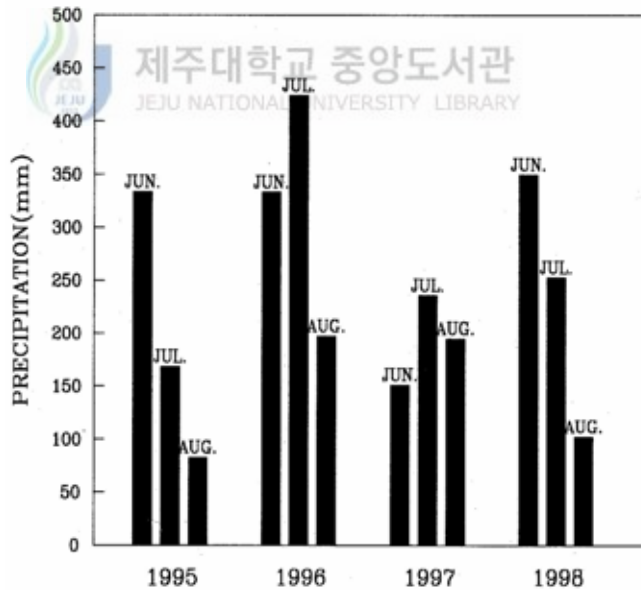


Fig. 5. Monthly precipitation averaged with five weather stations located near Changjiang River in China from 1995 to 1998 (Data from KMA).

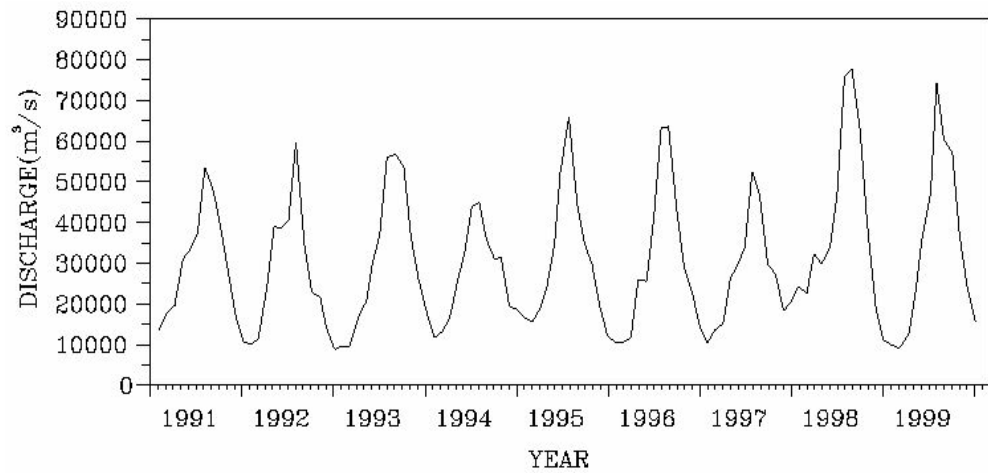


Fig. 6. Monthly variation of Changjiang River discharge from 1991 to 1999 (Zhu et al. 2001)

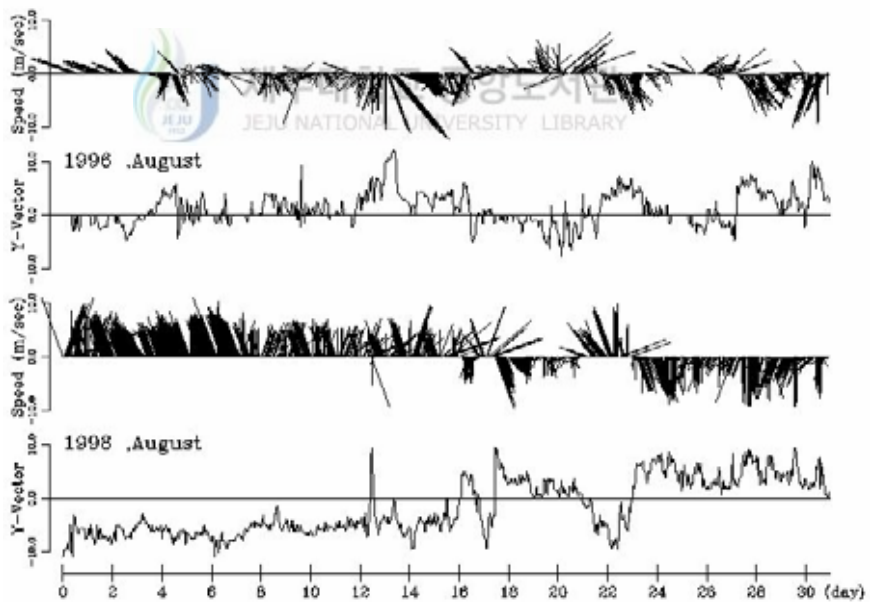


Fig. 7. Wind vector and its meridional component at Gosan in August, 1996 and 1998 (data from KMA).

III. 수치 모델 실험

이 장에서는 여러 수치모델 실험을 이용하여 양자강 저염수가 여름철에 제주도 해역으로 유입되는 원인과 그 경로에 대해서 알아보았다. 수치모델에 사용된 모델은 수평, 수직 방향의 3차원 ROMS(Regional Ocean Modeling System)이다.

참고로, ROMS는 SPEM(Semi-spectral Primitive Equation Model, Haidvogel et al., 1991) 모델을 기본으로 하고 SCRUM(S-coordinate Rutgers University Model, Song and Haidvogel, 1994) 모델을 따른 Terrain-following 모델을 기반으로 한 가장 최근의 모델이다. ROMS 모델에서 수평적으로는 직교좌표를 사용하며, 수직적으로는 해수면이나 해저면 등 특정 지역에서 분해능을 향상시킬 수 있는 Stretched terrain-following 좌표계(Song and Haidvogel, 1994)를 사용하여 변화하는 지형을 고려하였다.

모델 해역은 황해와 동중국해를 포함하는 해역을 선정하였으며, 모델 격자는 85×100 으로 Gridpak을 사용하여 만들었고, 해저지형은 ETOPO5 자료를 사용하여 최고수심을 1200m, 최소수심을 10m으로 하였다(Fig. 8). 모델의 서쪽 경계에는 대만해류와 쿠로시오 해류를 유속으로 유입시켰으며 동쪽 경계에서는 Flather Boundary Condition을 사용하여 해수가 자유롭게 흘러 나가도록 하였다. 그러나 남쪽 경계는 해수가 유출입하지 못하도록 Closed Boundary Condition을 사용하였다.

양자강 저염수가 여름철에 제주해역으로 유입되는 현상의 원인으로서는 양자강 유출량의 증가와 계절풍이 제시되어 왔다. 이 외에 양자강 저염수의 흐름에 영향을 줄 수 있는 것으로 대만난류의 계절변화가 있다. 이들 3가지 요인들이 양자강 저염수 유입에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 몇 가

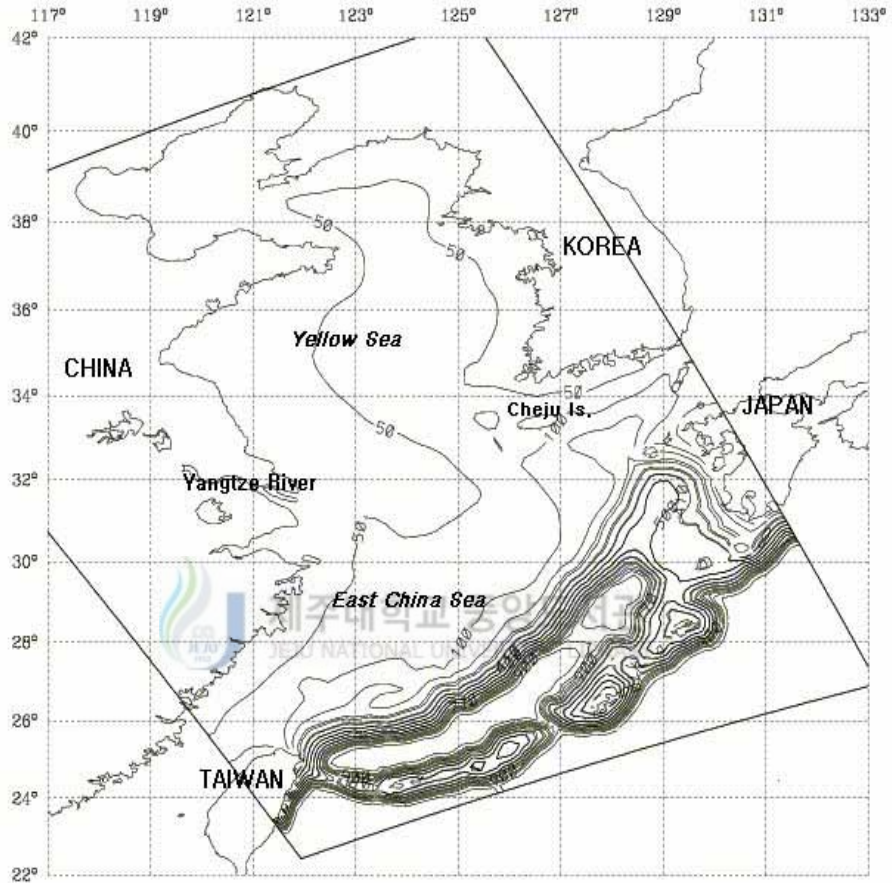


Fig. 8. Model domain and bottom topography (in meter) of the Yellow Sea and the East China Sea.

지 실험을 했는데, 실험에 앞서 기본 황해·동중국해의 해류를 만들기 위해서 서쪽경계에서 대만난류 0.5Sv과 쿠로시오 19.5Sv을 50일 동안 유입시켜 기본 해류를 만들고 이것을 기본상태로 하여 여러 경우의 실험들을 하였다. 따라서 해류가 없는 경우를 제외하고 모든 실험은 이 기본해류에서부터 시작하였으며 시작은 50일부터다. 이 실험에서 해양의 염분은 양자강 유출수 만의 영향을 보기 위하여 전 해역을 35‰로 하였으며 유입되는 양자강 유출수의 염분은 0‰이다.

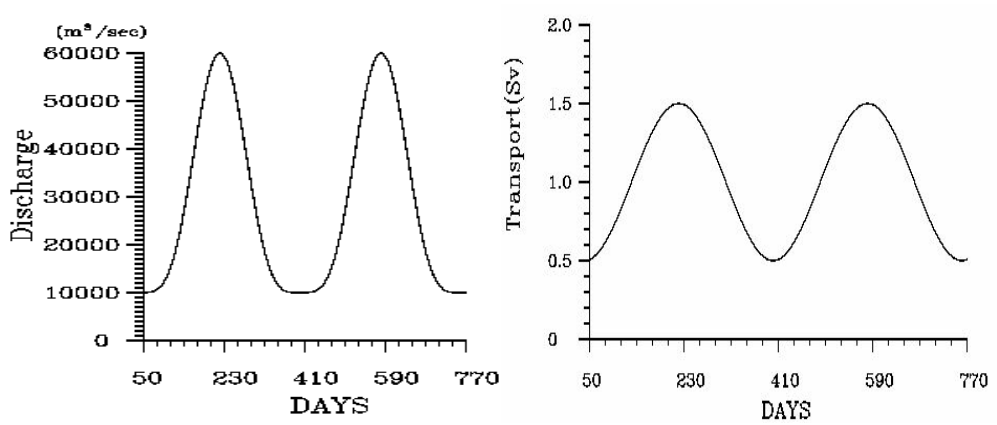
1. 양자강 저염수 이동의 원인

1) 양자강 유출량의 변화



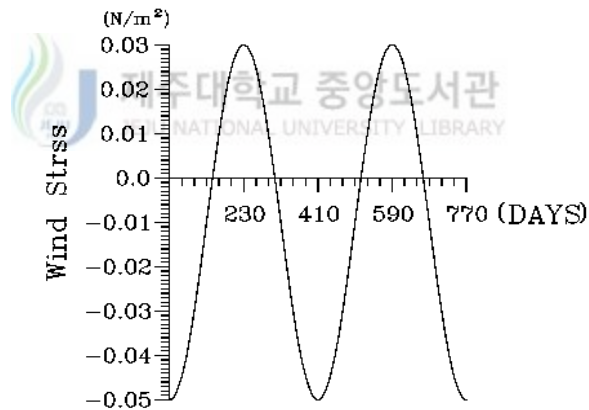
양자강 유출량은 Fig. 6에서 나타난 것처럼 겨울철 약 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 에서 여름철 약 $6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 으로 증가하는 계절적인 변동을 보인다. 그런데 여름철에 발생하는 양자강 유출량의 이러한 증가가 양자강 저염수를 제주도 해역으로 유입시키는 조건이라는 견해가 있다. 따라서 우선 양자강 유출량의 증가가 양자강 저염수의 흐름에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해서, Fig. 9(A)에서와 같이 겨울철의 최소유량이 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$, 여름철의 최대유량이 $6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 으로 변화하는 양자강 유출량을 모델에 입력하였다. 이 실험에서 대만난류의 유량은 0.5Sv으로, 쿠로시오의 유량은 19.5Sv으로 고정시켰다.

Fig. 10은 2년에 걸친 이러한 실험의 결과로서 표층 염분분포를 60일 간격으로 나타낸 것이다. 처음 1년을 보면 겨울철 유량이 적을 때 유출된 양자강 저염수는 전향력에 의해 중국해안을 따라 남하하는 분포를 보이지만, 유량이 점차 증가함에 따라서 양자강 저염수의 분포범위가 동중국해의 중앙 쪽으로



(A) Changjiang River discharge

(B) Taiwan Current input



(C) Wind stress

Fig. 9. Seasonal variation of (A) Changjiang River discharge and (B) Taiwan current input and (C) Meridional wind stress used for model experiment.

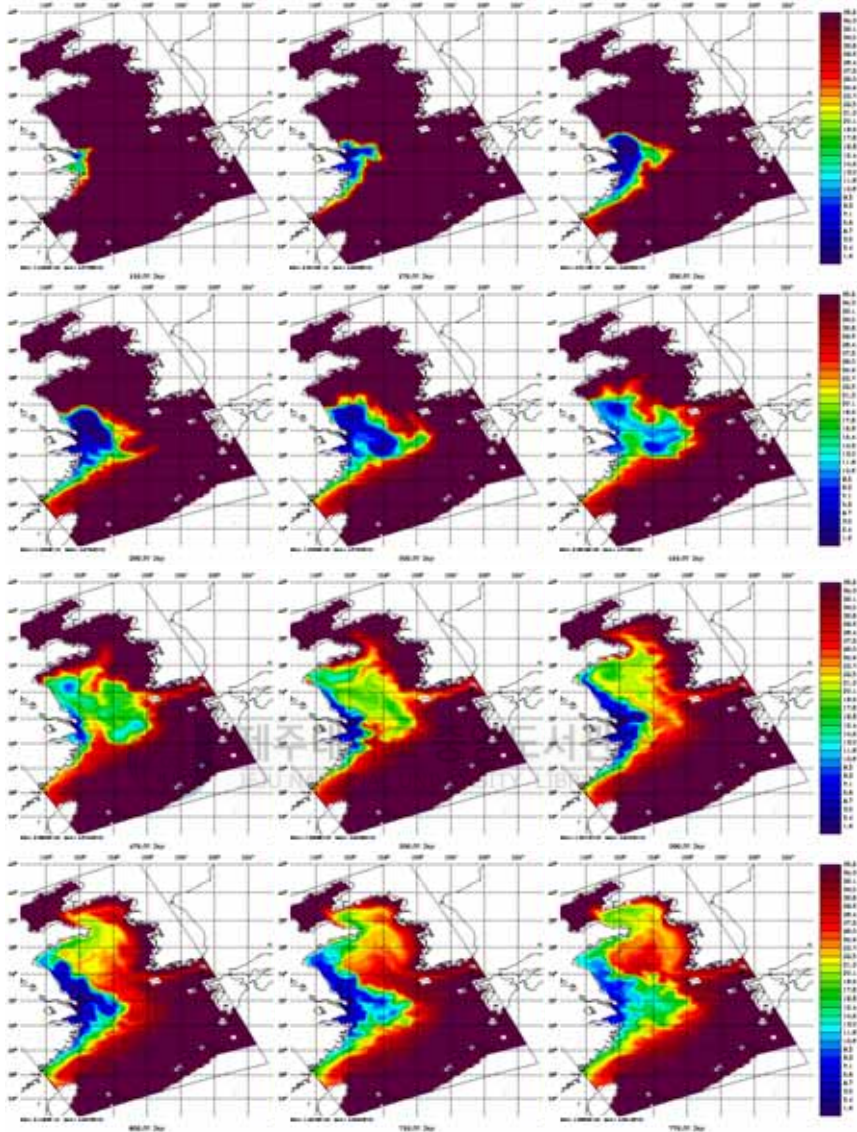


Fig. 10. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and fixed Taiwan Current input as 0.5Sv and without wind stress. Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰.

넓어지는 것을 볼 수 있다. 그 이후 여름이 지나 유량이 점차 감소할 때도 양자강 저염수의 분포는, 처음처럼 전향력의 영향을 받아 남쪽으로 이동하지 않고 계속 동중국해 중앙 쪽으로 넓어진다. 이것은 양자강 저염수가 해류의 영향을 받기 때문이다. 해류는 대만해협에서부터 양자강 입구 해역까지는 중국해안을 따라 북상하지만 양자강 입구 해역에서는 해저지형(Fig. 8)을 따라 방향을 바꿔 동쪽으로 흘러가는데 이 해류에 의해 양자강 저염수의 분포가 동쪽으로 넓어진다. 2년째에 양자강 저염수가 확장하는 방향은 크게 두 방향으로 나타나는 것으로 보인다. 하나는 대만난류와 제주난류를 따라 제주해역으로 확장하며, 다른 하나는 중국연안을 따라 북상하여 황해 연안을 시계방향으로 확장하는 것이다. 이것은 양자강 저염수가 전향력에 의해 대만해협으로 흐르는 대신 해류에 의해 동쪽과 북쪽으로 흐른다는 것을 보여준다. 해류가 대만해협에서 유입되어 대한해협으로 유출되기 때문에 당연한 현상으로 생각할 수 있지만, 해류가 매우 약한 중국연안을 따라서도 대만해협으로 남하하는 저염수가 없는 것은 전향력이 양자강 저염수의 흐름에 별로 영향을 미치지 않는다는 것을 의미할 수 있다.

이 실험의 결과는 여름철 양자강 유출량이 크게 증가할 때 양자강 저염수가 황해, 동중국해 중앙까지 넓게 분포하게 되며, 이것은 해류에 의해 언젠가는 제주도 해역으로 유입될 수 있음을 보여준다. 그러나 양자강 유출량의 증가와 해류만으로 양자강 저염수가 제주도 해역으로 유입되기 위해서는 몇 년이 필요하기 때문에 매년 여름철에 양자강 저염수가 제주해역으로 유입되는 현상의 원인으로 볼 수는 없다. 그러나 양자강 유출량의 증가는 해류를 따라 양자강 저염수가 제주도 해역으로 유입할 수 있도록 분포 범위를 넓혀주는 역할을 하기 때문에 여름철 양자강 유출수의 증가가 원인 중의 하나라고는 볼 수 있다.

2) 대만난류의 변화

양자강 저염수의 흐름에 영향을 주는 요인으로 대만난류의 계절변화를 생각해 볼 수 있다. 대만난류는 겨울철에는 유량이 적고 여름철에는 유량이 증가하는 계절변화를 보이는 것으로 알려져 있는데, 여름철 대만난류의 증가가 양자강 저염수의 흐름에 어떤 영향을 미치는 지를 알아보기 위해서 서쪽 경계에서 유입되는 대만난류의 유량을 Fig. 9(B)에서 나타낸 것처럼 겨울철에 0.5Sv에서 여름철에 1.5Sv로 변동시키면서 양자강 유출수의 유량은 앞 절에 실험과 동일한 상태에서 실험하였다.

Fig. 11은 대만난류의 유량변동에 의한 양자강 저염수의 수평염분분포를 나타낸 것으로, 60일 간격으로 2년 동안을 나타낸 것이다. 대만난류의 유량이 0.5Sv로 고정된 경우(Fig. 10)와 비교해볼 때, 양자강 저염수의 분포가 커지기 전에는 두 경우가 비슷하지만 분포가 어느 정도 커진 후(예 240일 후)에는 차이가 나기 시작한다. 대만난류의 유량이 고정된 경우와의 차이점을 보면, 양자강 저염수가 제주해역으로 좀 더 빠르게 유입되고 따라서 유입되는 양이 좀 더 많다는 것과, 전체적으로 양자강 저염수의 염분이 조금씩 높아져 있다는 것이다. 대만난류 유량의 증가는 대만난류와 제주난류를 강화시키기 때문에 양자강 저염수가 좀더 빠른 시간에 제주해역으로 유입될 수 있다. 또한 강화된 해류는 양자강 저염수를 보다 빨리 확산시키기 때문에 양자강 저염수의 염분이 높아진 것으로 보인다. 그러나 두 경우의 차이점은 그리 큰 것 같지는 않으며, 한 방향으로만 해류를 따라 제주도 해역으로 확장되고, 다른 방향으로 중국 연안을 따라 북으로 확장되는 기본적인 양상은 비슷하다.

이상에서 살펴본 바와 같이 여름철 양자강 유출량의 증가는 양자강 저염수가 제주해역으로 향하는 해류와 만날 수 있게 해 주며, 대만난류의 증가는 이러한 해류를 강화시킴으로써 양자강 저염수가 제주해역으로 유입되는 것을 돕는 역할을 하고 있다. 그러나 이 두 조건에 의해 형성된 양자강 저염수의

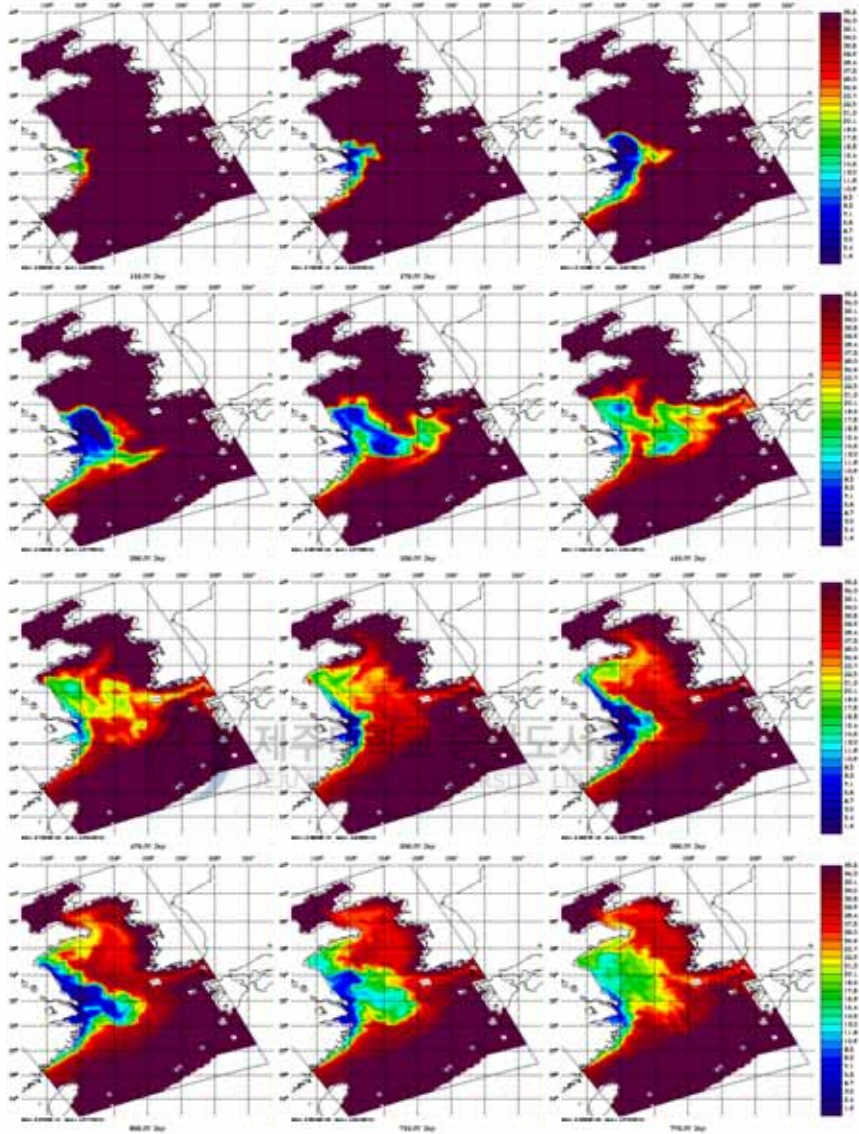


Fig. 11. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B) and without wind stress. Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰.

분포는 실제와 몇 가지 점에서 차이가 있다. 우선 실제 겨울철에는 거의 전 해역에 양자강 저염수의 분포가 사라지고 고염수의 영향이 뚜렷하게 나타나는데 비해 모델 결과에는 양자강 저염수의 분포가 항상 존재하는 점이다. 또 다른 점은 그림에도 불구하고 양자강 저염수가 제주해역으로 유입하는 데 시간이 너무 많이 걸리고 유입량이 적다는 것이다. 양자강 저염수는 여름철 양자강 유출량이 증가하기 시작하여 1-2개월이면 이미 제주해역에 출현하는 것으로 알려져 있는데 모델실험 결과에서는 200일이 넘어도 제주해협으로 유입되지 않는다. 그 외에도 황해에서 계절에 따른 저염수의 분포변화가 모델과 실제가 다르다. 관측된 자료에 의하면 양자강 저염수는 시간이 지남에 따라 황해내부에서 반 시계방향의 순환을 보이고 있는데 비해 모델결과에서 황해내부의 양자강 저염수는 시계방향의 순환을 보이고 있다. 이러한 결과는 양자강 유출량의 증가와 대만난류의 증가만으로는 양자강 저염수의 흐름을 설명하지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 다음절에서는 계절에 따른 바람의 변화를 모델에 사용하여 보았다.

3) 바람의 변화

양자강 저염수가 흐르는 해역은 수심이 깊은 경우가 100m 정도이기 때문에 상당히 얕은 해역이다. 그러므로 양자강 저염수의 흐름에는 바람이 중요한 요인일 가능성이 있다. 우리나라는 겨울철에 북서계절풍이 불고, 여름철에는 남동계절풍이 부는데 이러한 계절풍의 변화가 양자강 저염수에 미치는 영향을 모델로 실험해 보았다. 이 절에서 바람의 방향은 북풍과 남풍만을 사용하였으며, 겨울철 최대 북풍의 응력은 0.05N/m^2 여름철 최대 남풍의 응력은 0.03N/m^2 로 실험하였다(Fig. 9(C)). 양자강 유출수는 1절에서와 같이 겨울철 최소가 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 에서 여름철 최대가 $6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 로 변화시켰고(Fig. 9(A)),

대만난류의 유량은 Fig. 13(B)에서와 같이 변화시켰으며, 쿠로시오의 유량은 19.5Sv로 고정시켰다. 실험결과는 60일 간격으로 2년의 변화를 Fig. 12에 나타내었다.

겨울철에 북풍이 불 경우에 유출된 양자강 저염수는 동쪽으로 확장되지 못하고 중국남부 연안을 따라 연안 가까이에만 분포한다. 바람을 사용할 경우에 가장 현저하게 나타나는 변화 중의 하나는 북풍에 의해 이미 황해와 동중국해에 분포해 있던 양자강 저염수들도 대부분 사라져 버리는 것이다. 남하한 양자강 저염수의 일부는 해류를 따라 북동진하여 대만난류가 흐르는 해역에 고염화된 혼합수 형태로 분포하지만 이것은 모델이 경계에서 해수를 모두 밖으로 유출시키지 못한 결과로 보인다. 반면에, 바람이 남풍으로 바뀌면 양자강 저염수는 제주도를 향해 동쪽으로 확장하는데 60일 정도면 이미 제주해협을 통과하며, 그 이후에 대한해협으로 빠져나가는 분포를 보인다. 이러한 변화는 바람에 의한 에크만 수송으로 설명할 수 있으며 양자강 저염수의 흐름이 바람에 의해 결정적으로 영향을 받는다는 것을 보여준다.

모델실험 결과로부터 여름철에 양자강 저염수가 제주도 해역으로 유입되는데 가장 중요한 요인은 여름철 계절풍이라는 것을 알 수 있다. 이와 더불어 밝혀진 중요한 사실은 양자강 저염수가 황해로 유입된 후에는 황해내부에서 반 시계방향의 순환을 한다는 것이다. 황해내부에서 양자강 저염수가 반 시계 방향으로 순환하는 현상은 최근에 관측되었으나 그 원인에 대해서는 아직 밝혀지지 않았었다. 이 실험은 그 원인이 계절풍이라는 것을 보여준다. 실험 결과로부터 이해할 수 있는 또 다른 현상은 양자강 저염수가 양자강 입구와 제주도 사이에서 분리되어 나타나는 것이다. 계절풍을 사용한 Fig. 12의 2년째 분포를 보면 첫째 그림(470일)은 전 해의 겨울에 대만해협으로 남하했던 양자강 저염수가 염분이 많이 높아진 상태에서 대만난류를 따라 제주 해역으로 북상하는 것을 보여주며 둘째 그림(530일)은 이러한 고염의 양자강 저염수 분포와 더불어 양자강에서 유출된 지 오래지 않은 매우 저염의 양자강 저염

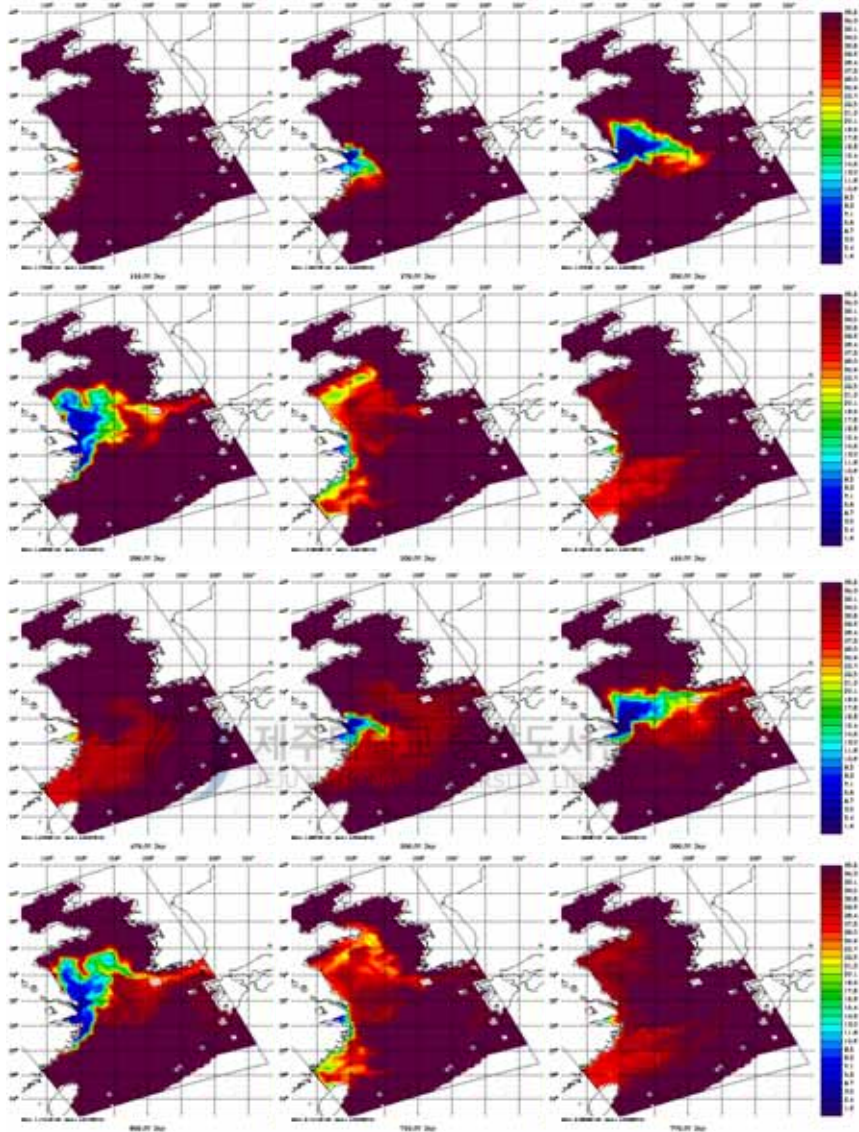


Fig. 12. Serial surface salinity distributions in 60 day interval for two years obtained from the model experiment with seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A), Taiwan Current input as in Fig.9(B) and wind stress as in Fig.9(C). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰.

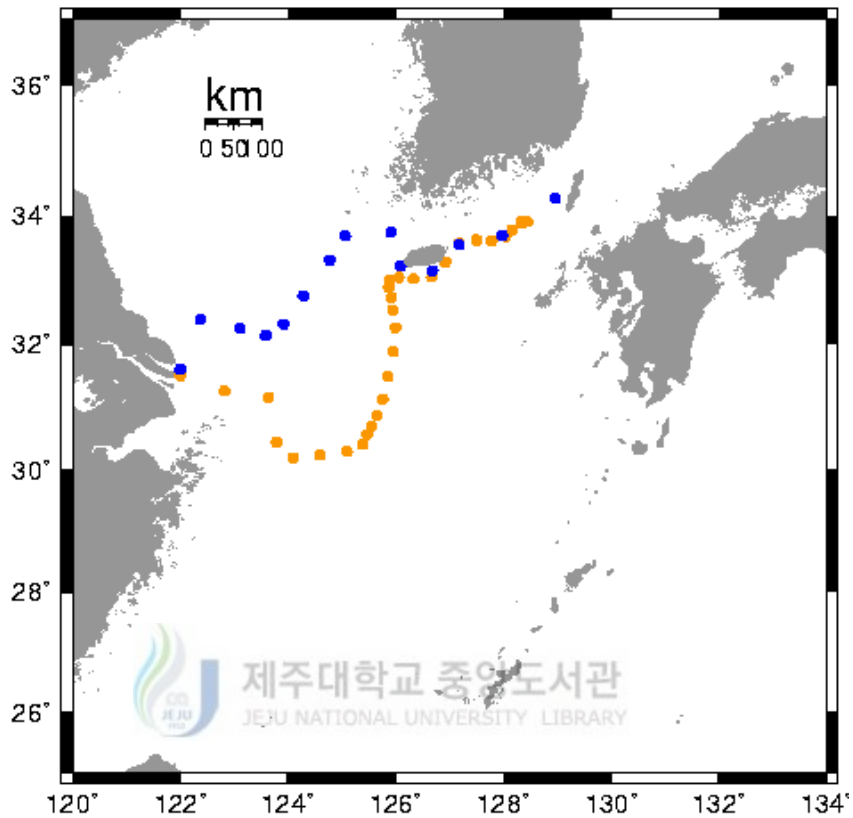


Fig. 13. 5 day interval trajectories of two surface water masses selected at Changjiang River mouth in model experiment of Fig.12. Yellow and blue ones are selected in June 15 and July 15, respectively. They show two different flow routes of the Changjiang Diluted water. Blue one reaches Cheju area earlier than Yellow one.

수가 동쪽으로 확장하기 시작한 분포를 보여준다. 따라서 양자강 입구와 제주 사이에는 양자강 입구에 가까운 해역에 아주 염분이 낮은 양자강 저염수와 제주에 가까운 해역에 염분이 높은 양자강 저염수가 고염의 해수에 의해 분리되어 분포하는 것을 볼 수 있다. 즉 양자강 저염수가 제주 해역으로 유입되는 경로에는 두 가지가 있는 것을 알 수 있는데, 유량이 적은 봄철에는 남동으로 확장한 후에 해류를 따라 제주도 주변해역으로 북상하는 경로와 유량이 많은 여름철에는 바람에 의해 직접 제주도로 유입되는 경로이다. 이 두 경로에 의해 1.3절에서 언급한 것처럼 제주도와 양자강 입구사이에서 양자강 저염수가 분리되어 나타나는 것으로 생각된다. Fig. 13은 양자강 입구에서 유출된 양자강 저염수를 따라가는 추적자를 사용한 모델실험결과로서 양자강 유출수가 적은 6월에 유출된 해수(노란색)는 남동방향으로 흐르다가 북상하는 경로를 보이며 양자강 유출수가 많은 7월에 유출된 해수(파란색)는 곧바로 제주해역으로 이동하는 경로를 보여준다. 두 해수 중 7월에 유출된 해수가 6월에 유출된 해수보다 먼저 제주해역에 도달한다.

2. 양자강 저염수의 예측

1) 1996년과 1998년의 바람

1장의 관측 자료에서 볼 수 있듯이 1996년과 1998년도 여름철에 출현했던 양자강 저염수는 서로 다른 경로를 보였는데, 1996년에는 제주도 북쪽 연안을 따라 제주해협을 통과하여 지나간 반면에 1998년에는 제주도 남부해역을 통과하여 지나갔다. 따라서 이러한 경로가 바람에 의한 것임을 확인하기 위해서 1996년과 1998년도의 월평균 바람자료를 사용하여 실험하였다. 사용된 바람자

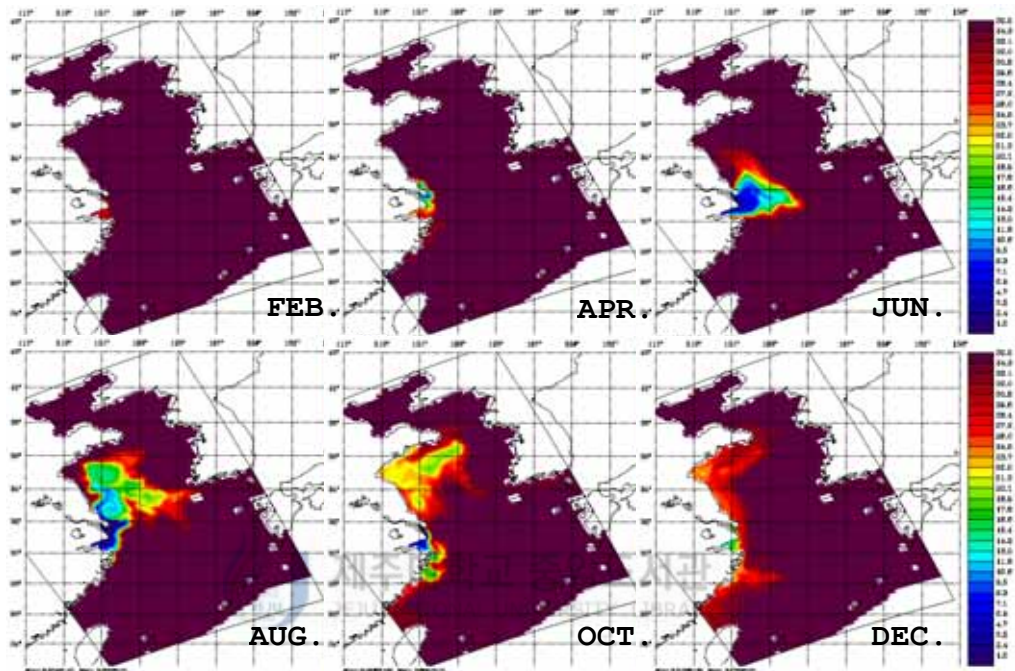


Fig. 14. Bimonthly surface salinity distributions in 1996 obtained from the model result with monthly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1° resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig. 9 (A) and Taiwan Current input as in Fig. 9 (B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5‰.

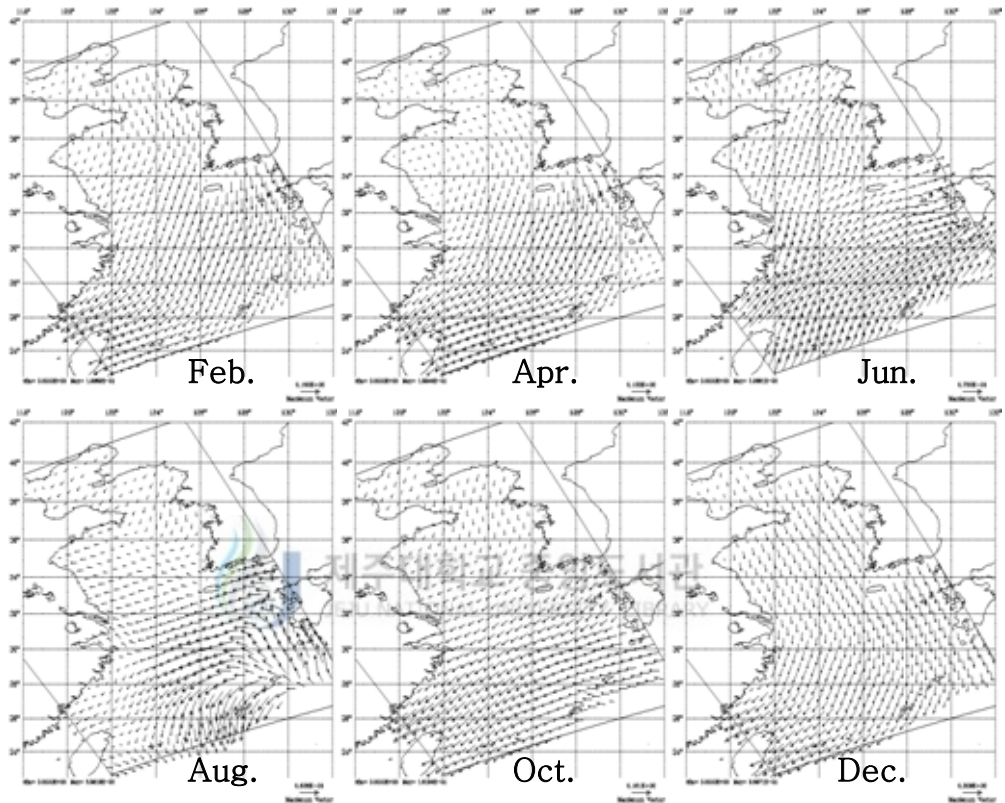


Fig. 15. Bimonthly exhibition of monthly MWF-ERS2 wind stresses in 1996(1° resolution) from CERSAT used the model running of Fig. 14.

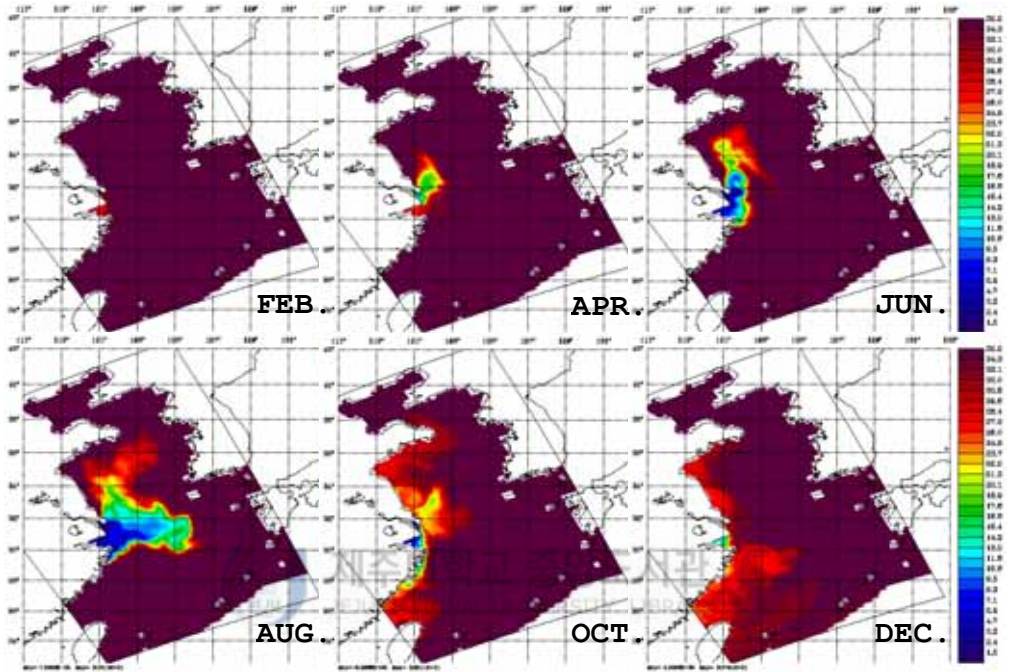


Fig. 16. Bimonthly surface salinity distributions in 1998 obtained from the model result with monthly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1° resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the salinity in the ocean is fixed as 35.5% .

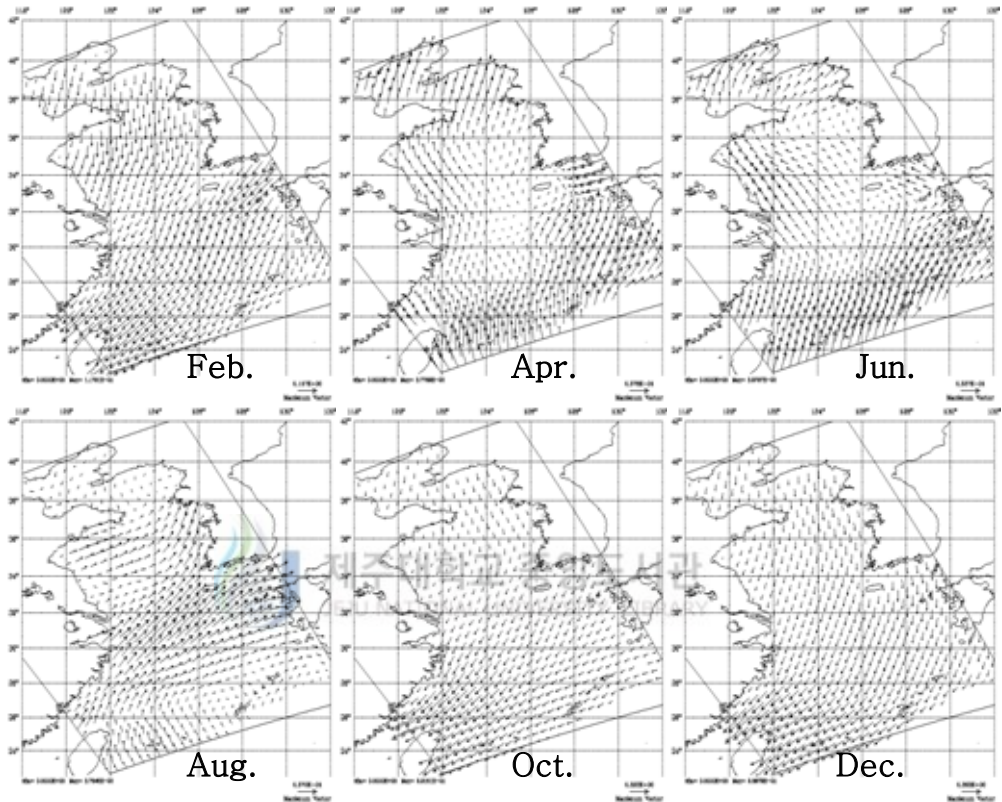


Fig. 17. Bimonthly exhibition of monthly MWF-ERS2 wind stresses in 1998(1°resolution) from CERSAT used the model running of Fig. 16.

료는 CERSAT에서 제공되는 MWF-ERS2 바람자료($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)를 사용하였으며, 양자강 유량은 앞에 실험과 동일하게 하였다(Fig. 9(A)). Fig. 14와 16은 1996년과 1998년도 바람을 사용하였을 때의 결과를 2월에서 12월까지 격월로 나타낸 그림이다. 1996년과 1998년도 양자강 저염수의 분포는 다른 양상을 보여 준다. 2월에는 적은 양자강 유출량과 강한 북서계절풍에 의해 양자강 저염수가 동쪽으로 거의 확장되지 못하기 때문에 두 해의 차이가 별로 없다. 그러나 양자강 유출량이 증가하는 봄철부터 두 해의 바람이 다르게 바뀌며 양자강 저염수의 이동에 차이가 생긴다. Fig. 15와 17은 1996년과 1998년도의 바람(MWF-ERS2)을 나타낸 그림으로, 1996년도에는 봄철에서 여름철에 이르기까지 남풍계열이 강한 남서풍, 남풍, 남동풍이 분 후 여름철에서 가을철로 갈수록 동풍계열이 강한 남동풍, 동풍, 북동풍이 불었던 것에 비해, 1998년도에는 봄철에서 여름철에 이르기까지 동풍계열의 바람이 분 후 여름철에 바람의 방향이 바뀌어 남서풍이 불었다. 그 결과 1996년에는 양자강 저염수가 6월에 동쪽으로 빠르게 확장되는 것이 보이며 8월에 제주해협을 통과하는 분포를 보이는 데 비해, 1998년도에는 4월과 6월에 양자강 저염수가 동쪽으로 확장되지 못하고 동풍에 의해 북쪽으로 확장되며 8월에는 남서풍에 의해 제주도 남부해역으로 빠르게 확장되는 분포를 보이고 있다. 이 결과로 양자강 저염수가 1996년에 제주해협을 통과한데 비해 1998년에 제주도 남부해역을 통과한 차이는 바람에 의한 것이었다는 확인할 수 있다.

2) 수온과 염분

지금까지 실험들은 양자강 저염수의 유입 원인과 유입경로를 이해하기 위해 바다의 염분을 35‰로 고정시켰기 때문에 양자강 저염수의 분포는 정확하게 볼 수 있었지만 양자강 저염수의 염분은 정확하지 않았다. 또한 모델실험에서

사용한 월 평균 바람으로는 여름철 단기간에 출현하는 양자강 저염수의 염분을 재현하기 힘들다. 이 절에서는 염분의 값을 보다 정확하게 재현해 보기 위해서 해양의 실제 수온과 염분 자료와 함께 실제 바람을 사용하여 1998년과 2000년의 양자강 저염수를 재현해 보았다. 바람은 1998년에는 일주일 평균 바람자료를 사용하였고 2000년에는 일 평균 바람자료를 사용하였는데, 1998년에 일주일 평균바람 자료를 사용한 이유는 그 해에는 일 평균 바람자료를 얻을 수 없었기 때문이다. 해양의 수온과 염분 값에는 LEVITUS(Levitus and Boyer 1994, Levitus et al., 1994)의 월 평균 수온과 염분 자료를 사용하였다. 해수면 외력은 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)으로부터 얻어진 자료를 사용하였으며, 모델에 입력한 자료는 열속(heat flux), 담수속(freshwater flux), 열속 민감도(heat flux sensitivity to SST) 등이 포함된다(Da Silva et al., 1994). 1998년의 재현을 위해 바람은 CERSAT에서 제공되는 MWF-ERS2 일주일 평균 바람자료(위·경도 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)를 사용하였으며, 양자강 유출량으로는 겨울철에 최소 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$, 여름철에 최대 $8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 으로 변화하는 유량을 사용하였다(Fig. 6). Fig. 18은 1998년 일주일 평균 바람을 사용하여 재현된 결과를 계절별로 나타낸 그림이다. 겨울철에 양자강 저염수는 강한 북풍에 의해 중국 연안을 따라 남하하는 분포를 보이며 동쪽으로는 확산은 나타나지 않는다. 이 때 제주도 주변해역에는 34% 이상인 고염수의 북상이 나타난다. 양자강 저염수의 유량이 점차 증가하는 봄철에는 양자강 저염수의 분포는 북동쪽으로 확장되고, 제주도 북서부까지 확장되었던 고염수의 분포는 제주도 남동쪽으로 축소되었다. 양자강 저염수의 유량이 가장 많아지는 여름철에는 양자강 저염수가 남풍에 의해 제주도 남부해역을 향해 동진하여 제주도 남부해역에 저염의 양자강 저염수가 분포한다. 이 때 제주도 남서부 해역의 염분 값은 28-31% 정도로 1998년 여름철에 관측된 염분 값과 비슷한 값을 보이고 있다. 그 이후 가을철이 되면 제주남부해역까지 확장되었던 양자강 저염수는 북풍의 바람과 양자강 유출량의 감소로 빠르게 축소되며, 여

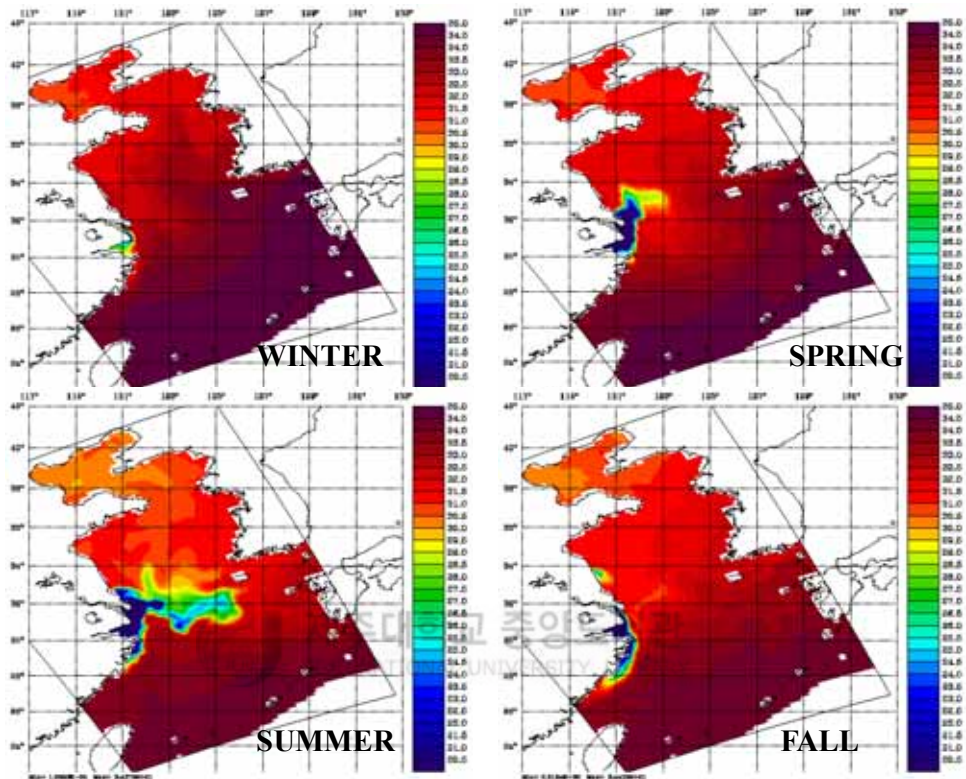


Fig. 18. Seasonal surface salinity distributions in 1998 obtained from the model result with weekly satellite wind stress from MWF-ERS-2 (1° resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.

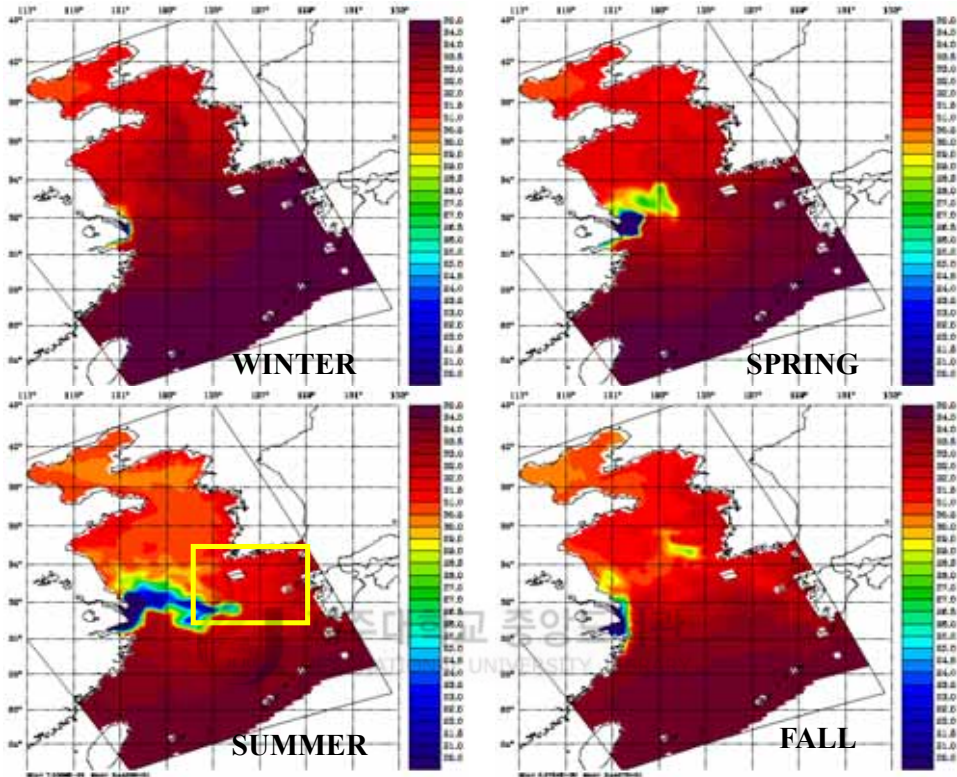
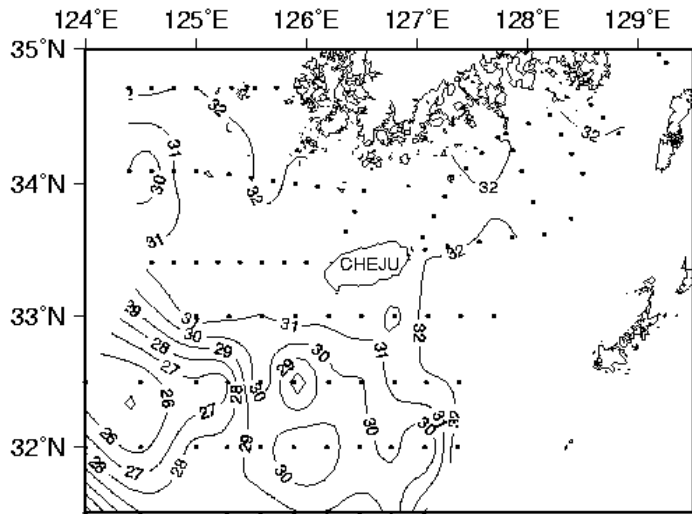
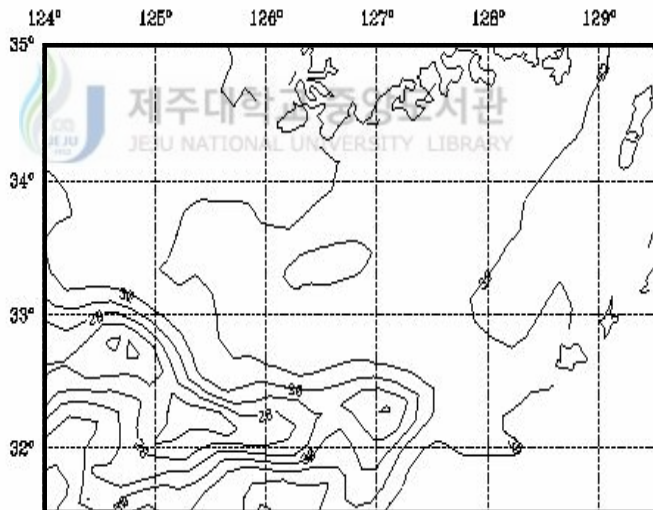


Fig. 19. Seasonal surface salinity distributions in 2000 obtained from the model result with daily satellite wind stress from QSCAT/NCEP (0.5° resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.



(A)



(B)

Fig. 20. Comparison of the salinity distributions in August 2000 from (A)observation and (B)the model running of Fig. 19 in the area marked by rectangular box in Fig. 19.

름철에 제주도 남부까지 축소되었던 34%이상의 고염수가 다시 복상하는 모습을 나타낸다.

2000년의 재현을 위해서 바람은 QSCAT/NCEP에서 제공되는 위·경도 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 간격의 일평균 자료를 사용하였고, 양자강 유출량으로는 자료가 없기 때문에 겨울철에 최소 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$, 여름철에 최대 $6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{sec}$ 으로 변화하는 유량을 사용하였다. Fig. 19는 2000년 일 평균 바람을 사용하여 재현된 결과를 계절별로 나타낸 그림이다. 1998년 결과에서 설명했던 계절에 따라 변하는 양자강 저염수의 일반적인 큰 규모의 분포는 2000년에도 비슷하다고 볼 수 있다. 그러나 자세한 분포는 바람의 차이로 많은 차이를 보인다. 염분 값을 보면 여름철에 제주도 남부해역의 저염분수는 24-29%을 나타내는데, Fig. 20에서 나타나는 것처럼 2000년 여름철에 관측된 염분 값과 비교할 때 비슷한 값이며, 그 분포양상도 관측 자료와 잘 맞는다.

이 모델 결과는 실제 수온과 염분 그리고 바람의 자료를 사용할 경우 양자강 저염수의 분포와 염분을 상당한 정도로 재현할 수 있다는 것을 보여주며 또한 양자강 저염수의 분포나 염분과 같이 큰 규모의 문제에 있어서는 일주일 평균 바람도 사용할 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 양자강 저염수를 예측하기 위해서는 보다 작은 규모의 현상도 모델로 재현할 수 있어야 한다. 다음 절에서는 인공위성 부이의 궤적과 같은 보다 작고 세밀한 현상을 모델이 어느 정도 재현할 수 있을 지를 실험해 보았다.

3) 인공위성 부이의 궤적 재현

이 절에서는 양자강 저염수의 흐름을 추적하기 위하여 2003년 6월 9일에 경도 $124^{\circ}00'$ 을 따라 위도 $31^{\circ}00'$ 에서 $31^{\circ}20'$ 까지 $20'$ 간격으로 바다에 띄운 8개의 인공위성 부이의 궤적을 수치모델로 재현해 보았다. 모델에 사용한 바람

자료는 CERSAT에서 제공하는 MWF-QuikSCAT($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 일 평균 바람자료로 2003년 1월 1일부터 2003년 8월 2일의 자료를 사용하였으며 다른 모델 초기조건과 해수면 외력, 양자강 유출량 등은 전결과 같은 조건을 사용하였다.

Fig. 18은 2003년 6월 9일부터 2003년 8월 2일까지의 인공위성부이의 궤적(A)과 수치모델에 의해 재현된 궤적(B)을 나타낸 그림이다. 관측된 부이궤적의 일반적인 양상은 다음과 같다. 위도 $32^{\circ}00'$ 이북에 띄운 부이들은 가장 북쪽의 부이(15, 진홍색)를 제외하고는 북동쪽으로 진행하여 한반도 남서부 해안까지 북상하였으며, 그 이남의 부이들은 가장 남쪽의 부이(8, 검정색)를 제외하고는 완만하게 동쪽으로 이동하였다. 이러한 일반적인 경향과 다르게 진홍색의 부이와 하늘색의 부이(11)는 같은 자리에 머물러 있었으며, 검정색 부이는 매우 빠른 속도로 북동쪽으로 이동하여 대한해협에 이르렀다. 수치모델은 위에서 설명한 일반적인 경향을 잘 재현하고 있고 있는데 비해 특이한 궤적들은 재현하지 못하고 있다. 이러한 결과는 부이 8, 11, 15가 보이는 특이한 궤적은 모델이 재현할 수 없는 작은 규모의 바람이나 해양의 현상에 의한 영향을 받은 것이라고 생각하게 만든다. 그러나 부이 8의 불일치는 앞으로 해결해야 할 문제이다. 부이 8의 불일치에는 두 가지 가능성이 있다. 하나는 부이 8이 모델에서 재현하는 것보다 훨씬 빠른 대마해류를 따라 이동했을 수 있다는 것이다. 다시 말해 수치모델이 대마해류를 재현하는 데 실패한 것이다. 다른 하나는 부이 8 역시 모델이 재현할 수 없는 작은 규모의 바람이나 해류의 영향에 의해 빠르게 이동했을 수 있다는 것이다. 모델이 보여주는 궤적들은 이웃의 궤적들과 커다란 차이를 갖지 않고 있는데 비해 실제의 궤적들은 바로 이웃의 궤적들과 전혀 다른 모양들을 보이기 때문이다. 사용한 바람도 매우 큰 규모로 관측되었고 일평균이기 때문에 작은 규모의 급격한 변화는 제거되어 있다. 그러므로 보다 부이궤적을 보다 정확하게 재현하기 위해서는 바

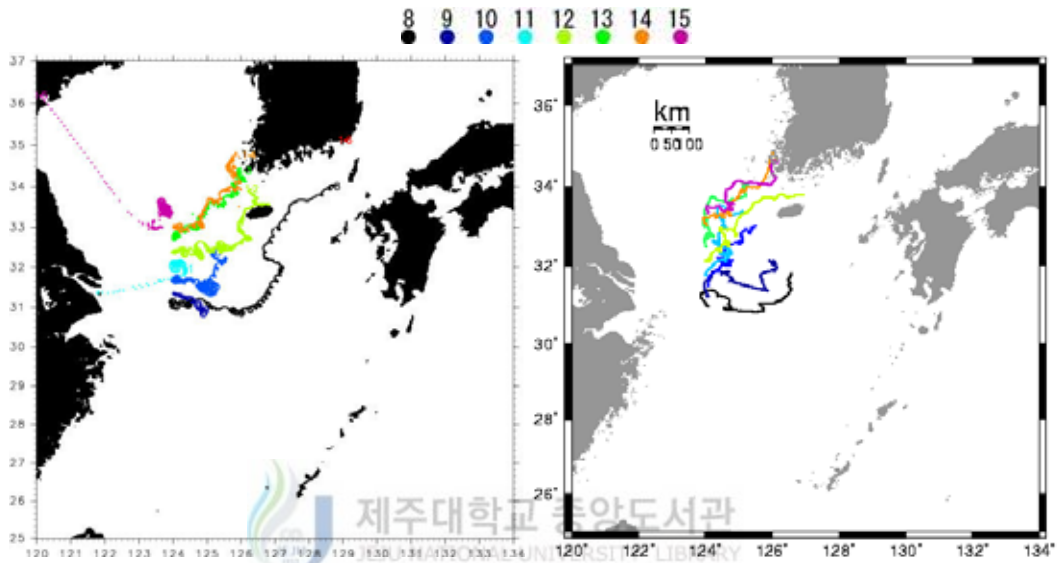


Fig. 21. Trajectories of (A) satellite-tracked drifters in Jun. 9 to Aug. 2, 2003 and (B) simulated drifters in numerical model in the same period with daily wind stress from MWF-QuikSCAT(0.5° resolution), seasonally varying Changjiang River discharge as in Fig.9(A) and Taiwan Current input as in Fig.9(B). Kuroshio Current input is fixed as 19.5Sv and the temperature and salinity data from LEVITUS are used in the ocean.

람 자료의 개선이 필요하다.

언급할 가치가 있는 다른 점은 부이 13과 14 부이가 서해안을 따라 북상했다는 것이다. 이것은 여름철에 해류가 서해안을 따라 북상한다는 이론을 뒷받침해 준다(Pang and Hyun, 1998).

IV. 결론

해양자료 분석을 통해 확인할 수 있는 여름철 제주도 주변해역의 양자강 저염수는 몇 가지 특징을 나타낸다. 첫째, 저염 현상이 큰 경우에 주변해역보다 약 1-2°C 정도 높은 수온을 보임으로써 저염수가 밀도 차에 의한 강한 성층으로 수직혼합이 약화되는 특징을 보인다. 둘째, 양자강 저염수가 우리나라를 지나는 경로는 제주해협을 통과하거나 제주도 남부해역을 통과하는 등의 다양한 경로를 보여준다. 셋째, 양자강 저염수의 분포는 양자강 입구와 제주도 주변해역 사이에서 보다 고염의 해수에 의해서 분리되는 것이 자주 관측되는데 이러한 저염수의 분리현상이 지속적인 특징일 가능성을 보여준다. 이와 같은 특징을 보이는 양자강 저염수는 여름철 기상현상과의 관계에서도 연관성을 나타내는데, 우선 제주도 주변의 강수량보다는 양자강 주변의 강수량과 높은 관계를 보임으로써 여름철 증가하는 양자강 유출량이 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 그러나 1996년의 양자강 유출량은 1998년도 보다 오히려 적었음에도 불구하고 제주도 주변해역의 저염 현상은 1996년도가 훨씬 큰 것으로 보아 양자강 저염수가 유입되는 과정에서 강수량 이외에 태풍, 바람(계절풍), 해류 등의 다양한 요인들에 의해 영향을 받는다는 것을 확인할 수가 있다. 그 중에 태풍은 강한 바람과 비를 동반하기 때문에 양자강 저염수의 염

분 값과 연관성을 보이는데 저염 현상이 컸던 해에는 태풍이 없었다는 것을 확인할 수가 있다.

이러한 다양한 요인들이 양자강 저염수에 미치는 영향과 아울러 양자강 저염수가 제주도 주변해역으로 유입되는 원인과 경로를 알아보기 위해서 ROMS 모델로 황해와 동중국해의 모델을 만들어 다양한 실험을 하였다. 수치 모델 실험결과에 의하면 양자강 유출량의 증가와 대만해류의 증가만으로는 양자강 저염수가 여름철에 우리나라 연안으로 유입되는 현상을 설명하기 어려우며, 바람이 결정적인 작용을 하는 것으로 나타났다. 바람은 에크만 수송에 의해서 양자강 저염수의 이동을 결정하는데, 1996년과 1998년도의 바람자료를 사용하여 실험한 결과를 통해서 양자강 저염수가 1996년에는 제주해협을 1998년에는 제주도 남부해역을 통과하는 것을 확인할 수가 있었다. 또한 바람은 저염수의 이동속도와 수직혼합에 영향을 주어 염분 값에도 영향을 미친다. 계절풍을 사용한 모델결과를 보면 여름철에 양자강 저염수의 대부분은 남해안을 거쳐 동해로 유입되지 않고 황해로 유입된다. 또한 여름철에 황해로 유입된 양자강 저염수는 계절이 지나며 황해에서 반시계방향의 순환을 하는데 이것은 황해에서 저염수의 이동에 관한 최근의 관측결과를 뒷받침해 준다 (Lee et al., 2003) .

황해와 동중국해의 모델에 LEVITUS 수온과 염분 자료를 사용하고 CERSAT와 QSCAT/NCEP에서 제공하는 바람자료를 사용하여 수행한 모델 결과는 양자강 저염수의 이동 경로뿐만 아니라 염분도 관측결과와 유사하게 나타났다. 2000년도 일 바람자료를 사용하여 실험한 결과 제주도 남서부 해역에 25-29%의 저염수가 분포함으로써 실제 관측 값과 매우 잘 맞는 결과를 얻었다. 염분 값의 재현에는 월평균 바람자료보다는 일평균 바람자료가 더욱 효과적이며 따라서 보다 정밀한 바람자료의 사용으로 보다 정확한 결과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

2003년 6월의 인공위성부이의 궤적을 인공위성에서 관측된 일바람

(CERSAT의 MWF-QuikSCAT)을 사용하여 재현한 결과, 가장 남쪽에 투하한 부이의 궤적을 제외하고는 대부분의 궤적을 비슷하게 재현할 수 있었다. 가장 남쪽의 부이는 다른 부이와 다르게 매우 빨리 이동하였는데, 모델이 이 부이의 궤적을 재현하지 못한 이유가 모델이 강한 대마해류를 잘 나타내지 못해서인지 아니면 그 부이가 일바람에서는 나타나지 않는 보다 작은 규모의 강한 바람에 영향을 받아서인지는 아직 분명하지 않다. 그 이외의 부이궤적은 상당히 비슷했으며 특히 여름철에 서해안을 따라 북상하는 궤적도 재현할 수 있었다. 이러한 결과는 인공위성부이의 궤적이 바람에 의한 표층수의 이동에 의해서 나타나는 것이며, 동시에 표층수인 양자강 저염수의 이동 또한 바람에 의해서 나타내는 결과라는 것을 의미하는 것이다. 이것은 앞으로 모델이 보완될 경우 양자강 저염수의 예측이 상당히 정확하게 예측될 수 있음을 보여준다.



참고문헌

- Bang, I.-K. and H.-J. Lie, 1999. A Numerical Experiment on the Dispersion of the Changjiang River Plume. *J. Korean Soc. Oceanog.*,34: 185-199.
- da Silva, A. M., C. C. Young-Molling, and S. Levitus, 1994. Algorithms and Procedures. Vol. 1, Atlas of surface Marine Data 1994, NOAA Atlas NESDIS 6.
- Haidvogel, D.B., H.G. Arango, K.S. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte-Rizzoli and A. Shchepkin, 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dyn. Atmos. Oceans.*,32: 239-281.
- Kim, I.-O. and H.-K. Rho, 1994. A Study on China Coastal Water appeared in the Neighbouring Seas of Cheju Island. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 27(5), 515-528.
- Lee, J.-H., H.-J. Lie and C.-H. Cho, 2003. Upper low salinity water in the Yellow Sea. *Int. Sym. for PEACE, Seoul, KOREA*, 161-172.
- Levitus, S. and T. P. Boyer, 1994. World ocean atlas 1994. Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, NOAA, Washington D.C.
- Levitus, S. and T. P. Boyer, 1994. World ocean atlas 1994. Volume 4: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 4, NOAA, Washington D.C.
- Limeburner R., R. C. Beardsley and J. Zhao, 1983. Water masses and circulation in the East China Sea. *Proc. Int. Sym. on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Ref. to the East China Sea, Hangzhou*, 261-291.
- Matsuno, T., M. Shimizu, A. Isobe, J. Ishijaka, I.-C. Pang, S.-H. Kim and

- J. Zhu, 2003. Behavior of Changjiang diluted water observed by drifting buoys with salinity sensor. Int. Sym. for PEACE, Seoul, KOREA, 14-16.
- Pang, I.-C. and K.-H. Hyun, 1998. Seasonal Variation of Water Mass Distributions in the Eastern Yellow Sea and the Yellow Sea Warm Current. J. Korean Soc. Oceanog., 33,3:41-52.
- Pang, I.-C., H.-K. Rho and H.-J. Lie, 1996. Water Mass Distribution and Seasonal Circulation Northwest of Cheju Island in 1994. Bull. Kor. Fish. Soc.,29,6: 862-875.
- Pang, I.-C., K.-H. Hyun and H.-K. Rho, 1999. Preliminary Study on Abnormally Low Salinity Saters around Cheju Island in Summer. Proc. 2nd Internat. Workshop on Oceanography and Fisheries in the East China Sea. Nagasaki, 25-26 Nov. 1999.
- Song, Y.T and Haidvogel, D.B., 1994. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinates. J. Comput. Phys. 115, 228-244.
- Song, Y.T and Tao Tang., 2002. Eddy-Resolving Simulations for the Asian Marginal Seas and Kuroshio Using Nonlinear Terrain-Following Coordinate Model. J. Korean Soc. Oceanog., 37, 3: 160-177.
- Wang W., 1988. Yangtze Brackish Water Plume-Circulation and Diffusion. Prog. Oceanog. 21, 373-385.
- Yu H.,D. Zheng and J.Jiang, 1983. Basic hydrographic characteristics of the study area. Proc. Int. Sym. on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Ref. to the East China Sea. Hangzhou, 270-279.
- Zhu Jianrong, P. Ding, S. Hu. and L. Yang, 2001. Observation of the Changjiang Diluted Water, Plume Front and Upwelling off the

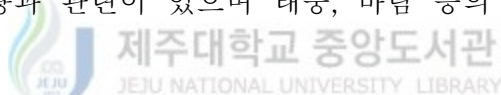
Changjiang Mouth during August in 2000. Proceedings of 11th PAMS/JECSS Workshop. 79-83.



여름철 양자강 저염수의 확장과 그 원인

요 약

관측자료 분석결과 여름철 제주도 주변해역에 출현하는 저염수는 저염 현상이 강한 경우에 수직혼합이 약화되어 수온이 주변해역보다 상승하는 특징을 보이고, 우리나라로 유입될 때 제주해협을 지나거나 제주도 남부해역을 지나는 등의 다양한 경로를 나타내기도 한다. 또한 양자강 저염수는 양자강 입구와 제주도 사이에서 보다 고염의 해수에 의해서 분리되어 분포하기도 하는데 이러한 현상은 지속적으로 나타나는 특징으로 보인다. 제주도 주변해역에 나타나는 양자강 저염수의 염분은 제주도 주변의 강수량보다는 오히려 양자강 주변의 강수량과 관련이 있으며 태풍, 바람 등의 기상요인들과도 관계를 보인다.




여름철에 양자강 저염수가 우리나라 해역으로 유입되는 역학을 이해하기 위해서 그 원인으로 알려져 있는 양자강 유출수의 증가, 대만난류의 증가, 바람의 변화를 중심으로 수치모델(ROMS)을 사용하여 실험한 모델결과에 의하면 양자강 유출량과 대만난류의 증가만으로는 양자강 저염수의 유입을 설명하기는 어려우며, 바람이 양자강 저염수의 이동을 결정적으로 지배하고 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 양자강 저염수가 흐르는 해역이 비교적 수심이 얕고 해류가 강하지 않아서 바람의 영향이 크게 미치기 때문이다. 그러므로 1996년과 1998년도의 양자강 저염수의 유입경로는 월평균 실측바람을사용하여서도 정확하게 재현될 수 있었다. 그보다 복잡한 염분의 재현은 일평균 실측바람과 월평균 수온과 염분 자료를 사용하여 2000년의 염분을 거의 정확하게 재현되었다.

그러나 인공위성부이의 궤적은 아직도 문제가 있다. 아직은 실제와 다르게

나타나는 부분이 있으며 그 이유가 모델이 강한 대마해류를 잘 재현하지 못하고 있어서인지 아니면 사용된 일 바람자료보다 더 작은 규모의 강한 바람의 영향 때문인지는 분명하지 않다. 하지만 부이케적과 같은 작은 규모의 이동이 수치모델을 통해서 재현이 된다는 사실은 앞으로 모델이 보안이 될 경우에 양자강 저염수의 예측이 상당히 정확하게 예측될 수 있음을 의미하는 것이다.

이밖에도 모델결과들은 몇 가지 중요한 결과를 보여주는데, 여름철에 서해안을 따라 북상하는 흐름이 바람에 의한 것이라는 것과 양자강 저염수의 대부분이 지금까지 알려져 왔듯이 남해안을 통해 동해로 흘러가는 것이 아니라 황해로 유입되고 있으며 그 저염수는 황해에서 계절에 따른 바람에 의해 반시계 방향으로 순환한다는 것이다.

 제주대학교 중앙도서관
주요어 : 양자강 저염수, 해양자료, 수치모델, 계절풍

감사의 글

그 동안 많은 학문적 가르침과 삶에 대한 지속적인 관심과 지도를 주신 방익찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문 심사를 위해 애써 주신 윤정수 교수님과 이준백 교수님, 그리고 미흡한 논문이지만 많은 관심과 조언을 주신 고유봉 교수님, 최영찬 교수님, 윤석훈 교수님께도 진심으로 감사의 말씀드립니다.

멀리 떨어져 있지만 많은 도움과 조언을 아끼지 않은 경훈이형, 항상 웃는 얼굴로 맞아주고 관심을 가져준 경희 누나, 그리고 어려운 일 생길 때 마다 묵묵히 도움을 준 창수형 그리고 옆에서 지켜봐주는 희종이형에게도 감사의 마음 전합니다. 대학원 생활하면서 힘들고 어려울 때 항상 옆에서 도움과 조언을 아끼지 않았던 승종이형, 승철이형, 보영이형, 그리고 학부생일 때부터 지금까지 언제나 옆에서 지켜봐준 친구 수강이에게도 고마움을 전하고 아울러 앞으로는 좀더 좋은 일만 생기길 바랍니다. 그리고 일한다는 핑계로 잘 챙겨주지 못한 연구실 후배님들에게도 고마움을 전하며, 특히 요즘 건강이 안 좋아 고생하고 있는 지미에게도 빠른 쾌유를 기원합니다. 또한 학부생일 때부터 항상 저의 일을 걱정해주고 자신의 일처럼 도와준 친구처럼 편한 승민형, 나의 영원한 친구 상호, 상훈 그리고 모든 친구들에게도 언제나 좋은 일만 생기길 바랍니다.

요즘 힘든 시기를 겪고 있는 큰형, 형수님, 그리고 작은형에게도 감사하다는 말씀 전하고 앞으로 좋은 일만 생기길 바라며 또한 그렇게 될 거라고 항상 믿고 있습니다.

마지막으로 단 한 번도 그 흔한 감사하다는 말을 하지 못했던 아버지, 어머니께, 언제나 제가 하는 일이 무엇이든 저를 믿고 뒷바라지 해주시는 아버지, 어머니께, 그 어떤 말로도 그 고마움을 표현할 길이 없는 아버지, 어머니께 미흡하지만 이 작은 결실을 바치고 싶습니다.