

碩士學位論文

장기 ADCP 자료분석을 통한
제주해협 해류의 변동특성



濟州大學校 大學院-韓國海洋研究院 學研課程

海洋學科

姜 在 訓

2003年 8月

장기 ADCP 자료분석을 통한 제주해협 해류의 변동특성

指導教授 方 益 燦

姜 在 訓

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2003年 4月

姜在訓의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2003年 5月

The characteristics of the long-term ADCP currents observed in the Strait of Jeju, Korea

Jae-Hoon Kang

(Supervised by Professor Ig-Chan Pang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

April 2003

This thesis has been examined and approved.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Seok-Hoon Yoon

Professor, Department of Oceanography
Cheju National University

Kyung-Il Chang

Principal Research Scientist Ph. D.
Korea Ocean Research and Development Institute

Ig-Chan Pang

Professor, Department of Oceanography
Cheju National University

May 2003

Department of Oceanography
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목차

List of Figures	i	
List of Tables	vii	
Abstract	viii	
I. 서론		
1. 연구배경 및 의의	1	
2. 연구자료 및 분석방법	10	
II. 저주파 해류의 시간구조와 수직구조의 변동성		
1. 관측결과	26	
2. 해류의 역학 (해류, 바람, 해수면 편차 (SLD)의 관계)	37	
3. 해류의 경험적 직교함수(EOF)의 모드별 특성과 시계열 재구성	46	
4. 해류의 불연속적 계절신호의 원인	65	
III. 고주파 해류의 시간구조와 수직구조의 변동성		
1. 조류의 변동특성	80	
2. 관성진동류의 변동특성	89	
IV. 해류의 변동원인		100
V. 토의 및 결론		105
-참고문헌	107	
-요 약	115	
-후 기	116	

List of Figures

- Fig.1. Distribution of water masses and current system in the Yellow Sea and East China Sea.5
- Fig.2. Seasonal variations of the northern boundary (34‰ isoline) of Tsushima waters areas in the East China Sea (Kim, 1990).7
- Fig.3. Weekly composited sea surface temperature (SST) from infrared rays image on April, 1999 (upper panel), 2000 (lower panel) received from Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI).8
- Fig.4. Monthly T-S diagrams from the NODC data drawing in the Yellow Sea and East China Sea.9
- Fig.5. Map of the Cheju Strait and the South Sea with major isobaths in meters. Location of long-term ADCP mooring station was shown in a black triangle.18
- Fig.6. TRBM ADCP on the sea surface before bottom mooring in the Cheju Strait (Chang, 1999).19
- Fig.7. Time series of heading, pitching, rolling, and bottom temperature for TRBM ADCP sensors.20
- Fig.8. Echo intensity, correlation, percent good and error velocity shows raw TRBM ADCP data quality.21
- Fig.9. Power spectrum of the echo intensity and vertical velocity (upper panel) and the u velocity and v velocity (lower panel).22
- Fig.10. Daily mean anomaly of back scatter strength calculated from echo intensity(upper panel) and daily mean vertical velocity(lower pan-

nel).....	23
Fig.11. Frequency response functions of 30 minute smoothing filter (upper panel) and Doodson's X0 filter(lower panel) (Pugh, 1987).	24
Fig.12. 19 lines arbitrarily selected to analyze SST data observed by Satellite NOAA 12 and 14 from July, 1998 to July, 1999 in the East China Sea and the Yellow Sea.	25
Fig.13. Mean speeds and directions averaged in the whole observation period and the vector plot of mean current with depth. Direction measured clockwise from the north.	29
Fig.14. Stick vector plots of low frequency currents in the Cheju Strait in every 8m depth.	30
Fig.15. Progressive vector diagrams of low frequency currents for each depth.	31
Fig.16. Stick vector plots of predicted tidal currents from harmonic analysis in the Cheju Strait in every 8m depth.	34
Fig.17. Low frequency currents of u component (upper) and v component (lower) for each time and depth.	35
Fig.18. Rotary spectrum of vertically averaged principal axis component (SD: Semidiurnal, D: Diurnal).	36
Fig.19. Selection of an amount of principal axis (upper panel) and air pressure correction (middle panel). Lower panel show low frequency wind and current vector for principal axis direction. Principal axis direction measured anticlockwise from the east.	40
Fig.20. Decomposed wind and current by principal axis and air pressure, adjusted sea level, adjusted sea level difference. Vertical bar means typhoon period.	41

Fig.21. Seasonally cross spectrums of along strait current vs. wind.	42
Fig.22. Seasonally cross spectrums of along strait current vs. SLD.	43
Fig.23. Seasonally cross spectrums of sea level vs. along strait wind.	44
Fig.24. Seasonally cross spectrums of sea level vs. across strait wind.	45
Fig.25. Temporal and vertical structure of monthly mean currents and standard deviation ellipses.	47
Fig.26. The first six empirical orthogonal functions of low frequency cur- rents in the Cheju Strait.	49
Fig.27. U, V currents reconstructed from all EOF modes.	50
Fig.28. Wavelet analysis of the time coefficient for 1st (upper panel) and 2nd (lower panel) EOF mode. Black contour is 10% significance level.	54
Fig.29. U, V currents reconstructed from mean value, 1st and 2nd EOF modes.	55
Fig.30. Bottom temperature obtained from bottom mooring ADCP (upper panel) and along strait velocity (lower panel) obtained by NORI in the Cheju Strait.	56
Fig.31. Wavelet analysis of the time coefficient for third EOF mode. Black contour is 10% significance level.	58
Fig.32. Wavelet analysis of the time coefficient for fourth EOF mode. Black contour is 10% significance level.	61
Fig.33. Tracks of typhoon obtained from U.S. Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center / Joint Typhoon Warning Center in 1999. ...	62
Fig.34. Along and across strait component of low frequency currents.	63
Fig.35. U, V component reconstructed from EOF mode 1~6.	64
Fig.36. Horizontal temperature and salinity distributions from each standard	

depth obtained by NFRDA in August, 1999. Black area means very low salinity value.	69
Fig.37. Horizontal temperature and salinity distributions from each standard depth obtained by NORI in November, 1999.	70
Fig.38. Observed and calculated velocity profiles referred to 100m depth using the hydrographic data obtained by NORI.	72
Fig.39. Monthly mean sea level at Cheju city and Chuja-Do (upper panel), and sea level difference between Cheju city and Chuja-Do (lower panel) based upon sea level data from permanent tide gauge stations during 1988-1995 (Chang <i>et al.</i> , 2000).	73
Fig.40. Linear regression analysis results of along strait current at 10m vs. Cheju-Chuja SLD (upper panel) and vertically averaged along strait current vs. Cheju-Chuja SLD (lower panel).	74
Fig.41. 56 stations selected to analyze SST data observed by Satellite NOAA 12 and 14 from July, 1998 to July, 1999 in the East China Sea and the Yellow Sea. The study area is divided into Areas 1, 2, and 3, each of which includes 16 stations, to see their time series in Fig.42. A, B, and C lines are also selected to see spatial SST gradients in Fig.44.	75
Fig.42. Time series of SST at (1), (2), and (3) areas shown in Fig.41.	76
Fig.43. Horizontal distribution of the monthly mean SST (°C) in Feb., 1999 and Aug., 1998.	77
Fig.44. Spatial SST gradients along Lines A, B, and C shown in Fig.41 in Feb. and Aug.	78
Fig.45. Dynamic height anomaly in the East China Sea and the Yellow Sea. Unit is in 1 dynamic meter (=10m ² /s ²).	79

Fig.46. Tidal current ellipses for 9 tidal constituents as a function of depth. The sense of rotation is also shown for each component at each depth.	84
Fig.47. Monthly harmonic analysis results of u (upper panel) and v (lower panel) component for Z0 constituent as a function of depth.	85
Fig.48. Monthly harmonic analysis results of amplitude (top panel) and GMT phase (bottom panel) for M2 constituent as a function of depth.	86
Fig.49. Time plots of band-pass filtered w component for M2 tidal frequency band.	87
Fig.50. Profiles of water temperature (upper panel) and salinity (lower panel) observed in the Cheju Strait during 50 hours in July, 2000.	88
Fig.51. Positive (left panel) and negative (right panel) rotary components of band-passed near inertial oscillation current at each depth.	92
Fig.52. Time plots of raw wind data obtained from Jeju weather station. Direction measured clockwise from the north.	93
Fig.53. Track of super typhoon Olga obtained from U.S. Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center / Joint Typhoon Warning Center.	94
Fig.54. Positive (upper panel) and negative (lower panel) rotary components of complex demodulated inertial oscillation currents only for local inertial frequency.	95
Fig.55. Monthly temperature profiles from GDEM climatological CTD data.	96
Fig.56. First extended EOF mode explained by 23.99% of the total variance. Vertical gray bar of time coefficient means a period of the passage	

	of super typhoon Olga through the Cheju island. Amplitude of time coefficient is relative amplitude.	97
Fig.57.	Secondary extended EOF mode explained by 22.73% of the total variance. Vertical gray bar of time coefficient means a period of the passage of super typhoon Olga through the Cheju island. Amplitude of time coefficient is relative amplitude.	98
Fig.58.	Rotary power spectrums at surface, middle, and bottom (Black solid line: total power, Red solid line: positive rotary component, Blue solid line: negative rotary component, Vertical dotted red line: local I. O. frequency, Vertical dotted black line: I. O. frequency band).	99
Fig.59.	Linear regression analysis result of along strait current at 10m vs. sea level difference (SLD) between Jeju and Busan.	102
Fig.60.	Comparison of tidal residual current vs. 34m current.	103
Fig.61.	Ekman depth calculated by Cheju wind data. Dotted line is ADCP mooring depth(124m).	104

List of Tables

Table.1. Previous observation results by direct current measurement method in the Cheju Strait.	6
Table.2. Basic statistics of low frequency currents in the Jeju Strait.	32
Table.3. Normalized residuals of u component calculated at 10m, 34m, 82m, 118m.	33
Table.4. Eigenvalues and percentages and cumulative percentage of the total variance explained by the lowest six modes of empirical orthogonal functions for the low frequency current.	46
Table.5. Richardson numbers calculated by vertical density gradient and velocity shear in August and November, 1999.	71
Table.6. Results of tidal harmonic analysis for u component at 10m.	83

Abstract

The characteristics of the long-term ADCP currents observed in the Strait of Jeju, Korea.

To find out what are the major causes of the variation of the current in the Strait of Jeju, the temporal and vertical current structures are examined, which are based on the data obtained from the ADCP mounted at the bottom with a trawl-resistant frame for a long period of time. Cross-spectral analysis shows that local winds and large-scale sea water circulation seem to highly affect the currents in a low-frequency band. In EOF analysis, the barotropic component of the variation represents 66% of the total, which is composed of two sub-components throughout the whole period: a nonstationary short-period (2~10 days) variation, and a steady-state-and-longer-period one (over 20 days). Time series reconstructed by the barotropic component shows discontinuous seasonal signal in a reasonable manner, which seems to be driven by locally-strengthened density currents with seasonal variation. The currents in a high-frequency band show that semi-diurnal tidal currents and inertial oscillations sensitively respond upon the frontal system. However, the geostrophic component indicating the characteristics of the frontal system shows only about 23% of the total variation of its linear regression in a principal axis direction, while the pressure gradient force by the sea level difference between Jeju and Busan represents about 10%. No effect of tidal residual current was shown. Summing up of these two factors, 33% is still too small as major driving forces, which implies that the barotropic component of the current seems to be greatly governed by the wind friction. In conclusion, nonstationarity caused by weather variability must be another significant factor in the current system of the Strait of Jeju.

Key words: barotropic component, frontal system, geostrophic component, pressure gradient force, wind friction, nonstationarity

I. 서론

1. 연구배경 및 의의

제주대학교, 한국해양연구원(KORDI) 학연공동 협동연구 프로그램에 의하여 1999년 3월에서 12월까지 약 10개월간 제주해협 깊은 골 124m에 트롤어선 방지용 초음파 유속계(TRBM ADCP)를 계류하여 국내에선 해류관측 역사상 가장 긴 고해상도 3차원 해조류 유속자료를 성공적으로 획득하였다. 지금까지 제주해협에서 해수유동 특성을 파악할 목적으로 직접측류 방법에 의한 장기간 해류관측은 제주도 주변에서 형성되는 조경수역으로 인한 활발한 어로활동 때문에 유속계 설치상의 문제점이 많아서 막대한 실정이었으나 그보다 더 중요한 이유는 대한해협이 갖는 해수유동의 중요성에 비해 제주해협의 중요성에 대한 인식 부족 때문이었다. 한국 주변의 해류분포는 Fig.1의 해류도에서처럼 Uda(1934)에 의한 최초 제안 후로 대마난류와 황해난류가 주요 2대 해류로 간주되어 왔으나 최근에 여름철 황해난류의 존재유무와 관련하여 황해남동부와 제주도 서쪽주변 해역에 대한 집중적인 여러 연구들의 수행 결과 주로 황해저층냉수의 세력 소장에 지배되는 수괴분포의 특성이 점차 밝혀지면서(Lie, 1986; Park, 1986; Youn, 1986; Kim *et al.*, 1991; Pang *et al.*, 1992; Cho and Kim, 1994; Pang *et al.*, 1996) 제주해협에 대한 해수유동 특성이 크게 주목받고 있다. 또한 제주도와 한국주변에서 해황과 해양성 기후를 지배하는 대마난류의 정체성이 무엇인지 오늘날까지도 확실히 규명되지 못한 상황에서 일반적으로 대마난류의 가장자리 부근이 지나가는 곳으로 받아들여지는 제주해협은 대마난류의 변동을 이해하기 위해서도 연구되어야 할 매우 중요한 지역이다. Table.1에서처럼 기존에 제주해협에서 직접측류 방법에 의한 해류자료를 분석

한 연구결과로는 비록 관측기간이 짧더라도 제주해협에서 대부분 연중 평균 10~15 cm/s의 동향류가 존재함을 보여주었다(Lee, 1974; Kim, 1979; Chang *et al.*, 1995; Suk *et al.*, 1996; Kim and Rho, 1997; Rho *et al.*, 1997; Lie and Cho, 1997). 최근 들어 위성추적부이와 고온·고염수와와의 관계를 통한 해류의 수평분포는 여름철에 황해난류로 보이는 흐름은 없고 제주도를 시계방향으로 돌아 제주해협으로 들어가는 계절변화를 갖는 고온고염의 제주난류(CWC)를 인정하고 있다(Lie *et al.*, 2000). 한편 제주해협에서 집중적으로 계절별 유속단면 관측을 통한 해류의 단면분포는 연중 동향을 가지며 해류의 핵의 위치가 겨울에는 해협의 남쪽으로 여름에는 해협의 중앙에 분포하는 계절변동을 보였으며 그것을 제주해류(CC)로 간주하였다(Chang *et al.*, 2000). 그러나 이렇게 많은 직접측류 방법에 의한 해류의 정밀 분석에도 불구하고 제주난류나 제주해류라고 명명된 뚜렷한 항류의 존재는 인정되었지만 제주해협에서의 유동변동 특성은 우리에게 그다지 충분한 이해를 주지 못하고 있다. 왜냐하면 첫째로 제주해협을 비롯하여 제주도 주변해역에서의 해류 및 해수특성 분포는 수심이 100m 미만의 천해이기 때문에 조류가 해류보다 더 우세하고(Teague *et al.*, 1998) 바람과 같은 외력에 의해 매우 빠르고 민감하게 반응하기 때문이다(Lie *et al.*, 2000). 또 하나의 어려운 점은 제주도 주변지역을 비롯한 황·동중국해에서 해수분포의 계절변화가 뚜렷하다는 점이다. Fig.2는 황·동중국해에서 여름철과 겨울철 50m층의 13년 평균된 염분 34‰의 등치선을 나타낸 것인데 34‰ 선은 일반적인 연안수와 대마난류수의 경계로 인정되는 것으로서 A 영역에 표시된 것처럼 겨울에서 여름 사이에 그 구조가 황·동중국해 전 해역에서 크게 변화하고 있다는 점이다. 그런데 해수분포의 계절변화 외에 여름철에는 대마난류수의 분포가 겨울철에 비해 좁은 해역에 국한되어 있어 여름철에 강한 밀도류가 생성될 것임을 암시한다(Kim, 1990). Fig.3은 1999년과 2000년에 한국해양연구원에서 미국 기상위성 NOAA 12, 14호로부터 수신한 표층수온(SST)의 일주일 합성된 적외선 사진을 나타낸 것으로서 기상의 효과와

해양의 효과가 극명하게 대조를 이루며 나타나는 겨울몬순 기간에 냉수와 난수의 경계가 황·동중국해뿐만 아니라 동해까지 연장되어 잘 나타나 있으며 영년변화가 있음을 보여준다. 다시 말하면 이러한 분지구모의 계절변화 및 영년변화를 갖는 염분경계나 수온경계의 변동을 중규모 운동을 하는 극전선의 개념으로 본다면 특히 제주해협에서의 유동은 계절이나 년도에 따라 국지적으로 매우 큰 변동을 보일 것이다. 그러므로 짧은 기간이나 특정시기에 관측한 해류나 해수특성 분포만으로는 너무나 복잡 다양한 해황 때문에 제주해협에서 해류의 변동특성을 이해하기가 매우 어려울 것이다. 따라서 이 논문에서 사용할 약 10개월간의 장기간 관측된 해·조류 자료는 충분히 긴 자료는 아니지만 계절변화까지 파악이 가능하다는 점에서 이러한 문제의 목적에 어느 정도 부합한다. 한편 Fig.4에서 보여진 황·동중국해 전 해역에 걸쳐서 40년간 수집된 미국해양자료센터(NODC) 수온과 염분자료로 나타낸 월별 T-S diagram을 보면 수괴의 뚜렷한 계절변화가 나타나 있는데 이것은 황·동중국해에서 가장 중요한 현상으로서 최근에는 몬순계절풍에 의하여 강화된 황·동중국해에서의 해수면경사의 계절변화와 그에 따른 해수의 계절순환으로 설명하고 있다 (Pang and Oh, 1995). Fig.2에서 살펴본 것처럼 제주도 서쪽 주변해역에서 해수분포의 계절변화가 뚜렷하므로 제주해협에서 해류의 변동특성을 이해하는데 해수면경사가 어떠한 형태로 영향을 줄 수 있는지 살펴보기 위하여 미국 기상 위성 NOAA 12, 14호의 응용고해상도복사계(AVHRR)를 이용한 황·동중국해에서 1998년 8월에서 1999년 7월까지 1년 동안의 종관적인 표층수온(SST) 시계열 자료를 분석하였다. 따라서 이 논문의 주목적은 기술해양학적인 측면에서 제주해협에서 장기간 관측된 해·조류 자료의 장점을 살려 그 시간구조와 수직구조의 변동특성을 정량적으로 살펴봄으로서 제주해협 해류의 주된 변동원인이 무엇인지를 규명하는데 있다. 제II장에서는 대역 주파수 밴드에서 저주파 해류와 바람, 그리고 해수면편차(SLD)의 변동과 상호 상관성을 조사하여 외력에 대한 해류의 반응을 분석하였으며 해류의 심한 계절적인 불연속 현상

과 저층에서의 간헐적인 반류현상의 원인을 파악하기 위하여 경험적 직교함수(EOF) 분석을 통하여 그 시간구조와 수직구조를 연구해 보았다. 제Ⅲ장에서는 저주파 해류와의 관련성을 보기 위하여 고주파 진동류인 조류와 관성진동류의 시간구조와 수직구조를 연구하여 보았다. 마지막으로 제Ⅳ장에서는 제주해협에서 총체적인 해류의 변동원인을 다루어 보았다.



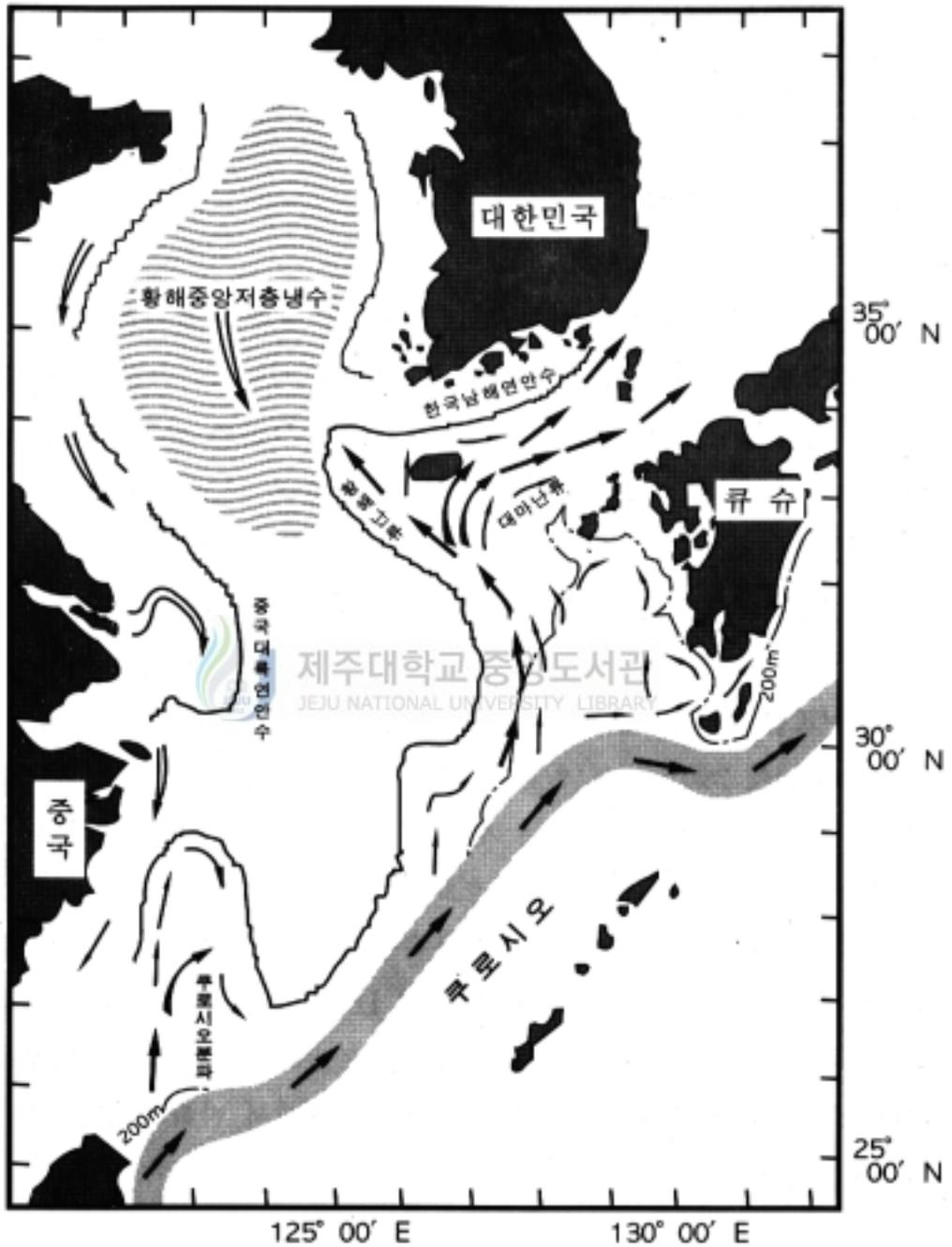


Fig.1. Distribution of water masses and current system in the Yellow Sea and East China Sea.

Table.1. Previous observation results by direct current measurement method in the Cheju Strait.

Author	Date	Magnitude
Kim (1979)	Mar., 1974	4.5 cm/s
	Aug., 1974	11.5 cm/s
Beardsley <i>et al.</i> (1992)	year round	10.0 cm/s
Chang <i>et al.</i> (1995)	Apr. ~ May, 1983	9.3 ~ 12.5 cm/s
Chang and Kim (1996)	Apr. ~ May, 1983	9.3 ~ 12.5 cm/s
Suk <i>et al.</i> (1996)	Apr., 1995	10.0 ~ 20.0 cm/s
Rho <i>et al.</i> (1997)	year round	9.0 cm/s



Fig.2. Seasonal variations of the northern boundary (34‰ isohaline) of Tsushima waters areas in the East China Sea (Kim, 1990).

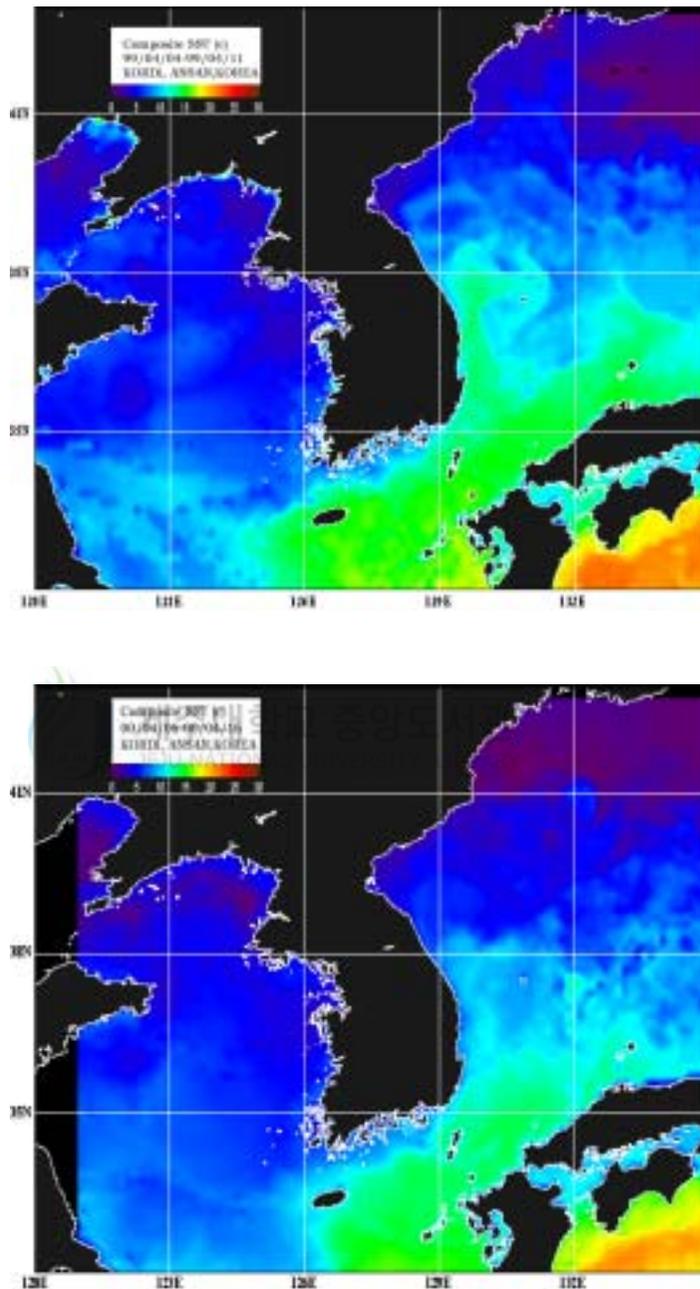


Fig.3. Weekly composited sea surface temperature (SST) from infrared rays image on April, 1999 (upper panel), 2000 (lower panel) received from Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI).

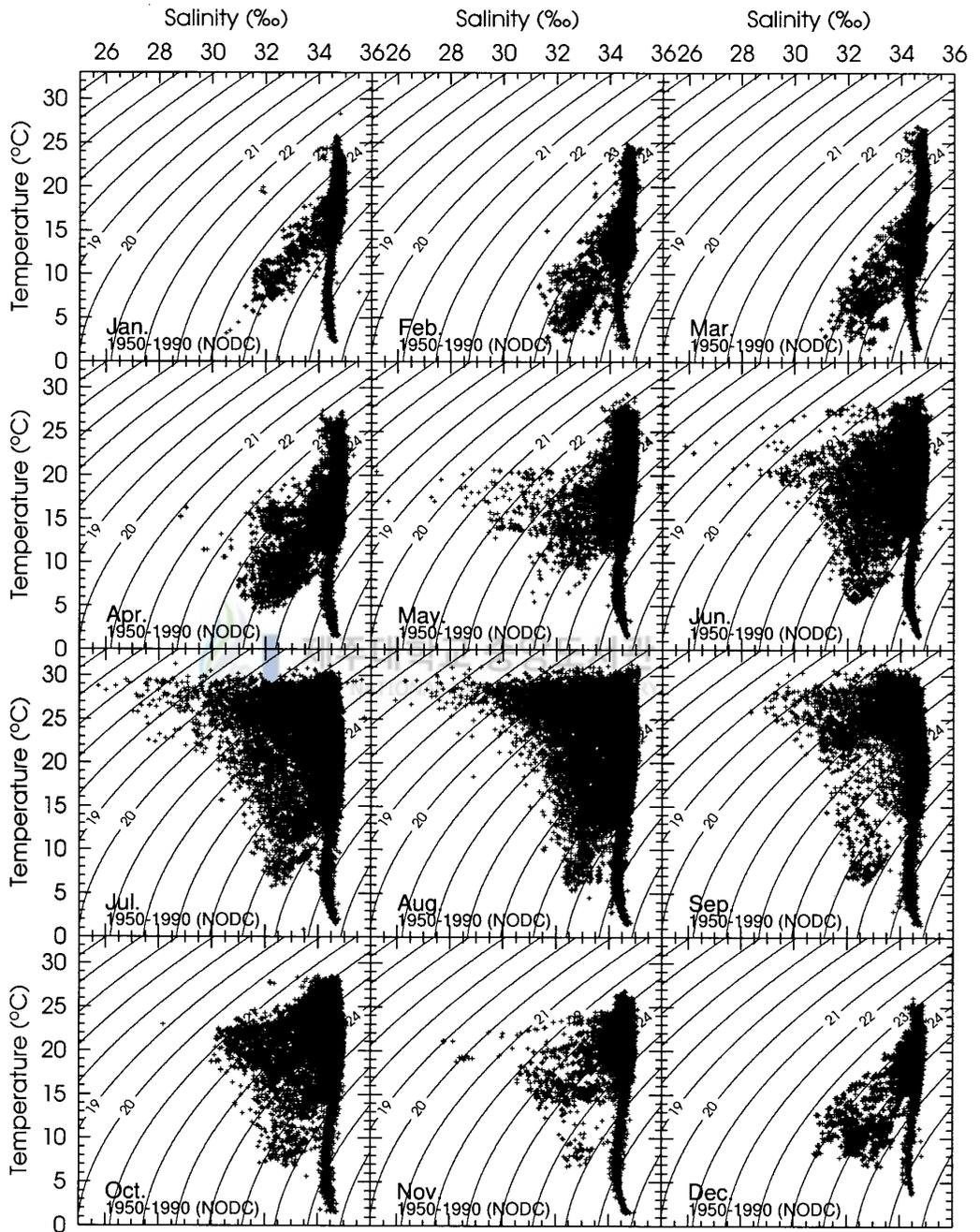


Fig.4. Monthly T-S diagrams from the NODC data drawing in the Yellow Sea and East China Sea.

2. 연구자료 및 분석방법

1) 사용된 자료

본 연구에서는 제주해협에서 해류의 변동특성 및 원인의 파악을 주목적으로 하여 Fig.5에 보여진 것처럼 주 자료로서 제주해협 중앙 깊은 골에서 장기간 계류관측된 TRBM ADCP 해·조류 시계열 자료를 획득하였으며 보조자료로서 황·동중국해 전 해역에 걸친 종관적인 표층수온(SST) 시계열자료, 해류자료와 비교하기 위한 기상 및 조석 시계열자료, 국립수산과학원(NFRDA)과 국립해양조사원(NORI)의 월별 수온과 염분 CTD 자료가 각각 사용되었다.

(1) ADCP 자료의 처리 및 특징

1999년에 제주대학교 연구조사선 아라호를 이용하여 저인망 어선의 어로 활동을 피해 해저에 장기간 계류할 수 있는 최첨단 해류관측 시스템인 TRBM ADCP를 제주해협에서 약 10개월 동안 28개 수심층에 대해 수직해상도 4m를 갖는 3차원 유속자료를 성공적으로 수집하였다. Fig.6는 TRBM ADCP의 자유낙하 모습으로 본체는 Flotation Technology사의 자유낙하식 TRBM 프레임과 그 안에 RD Instrument 사의 초음파 유속계인 307.2 kHz Work Horse ADCP와 ADCP를 감싸고 있는 pop up bouy 회수를 위한 음파분리기(A/R) 세트로 이루어져 있다. 일반적으로 ADCP 자료를 처리하는데 있어서 자료의 질은 크게 신호의 질(signal quality)과 자료의 질(data quality) 두 부분으로 나누어 볼 수 있는데 첫째로 신호의 질은 자료의 질을 하드웨어적으로 좌우하는 단계로서 ADCP 내부의 디지털 신호처리 기관의 자동이득보상(AGC) 회로에서 고정된 임계값을 가지고 일련의 screening 과정과 양상블 평균을 수행한다. 그 임계값은 상관관계(correlation)가 64회(count), 음향강도(echo intensity)가 50 회로 각각 고정돼 있으며 이때의 음향강도 값은 ADCP가 실제 해류의 흐름과

관련된 음향신호와 어군탐지를 동시에 탐지 할 수 있는 허위표적한계를 의미하며 상관관계는 S/N비를 의미하는 것으로서 상관관계가 64회 이하의 값들에 대하여 ADCP는 자료를 수집할 수가 없다(RD Instruments, 1989). 우선 Fig.7은 TRBM의 계류상태를 나타내는 것으로서 관측기간 전반부에 약 12시간에 걸쳐 큰 방향의 변화가 나타났는데 이것은 저인망 어선에 의해 TRBM ADCP가 몇 번 끌렸었음을 의미한다. 그러나 자료의 상태는 별 이상이 없는 것으로 나타났다. Fig.8은 관측된 원시자료의 상태를 종합적으로 보여주는 것으로서 첫 번째로 볼 수 있는 것이 2~10m의 표층에서 음향강도, 상관관계, 양호백분율(percent good), 오차속도(error velocity) 모두가 급격한 증가를 보인다. 이것은 표층에서의 활발한 wave motion 때문에 나타나는 현상으로서 side lobe에 의한 background noise가 강하기 때문이다. 따라서 10m보다 작은 수심의 자료는 오염된 부분이며 분석을 위해 버려졌다. 그러나 표층에서의 해상풍을 이해하는데 잠재적으로 쓰여질 수 있다(Schott, 1989). 겨울철에 비해 봄철과 여름철에 상층 10~58m에서 대부분 임계값보다 적은 상관관계와 낮은 양호백분율 값을 가지는 계절변화를 보여주며 자세히 보면 주로 하루 주기의 변동이 심한 것을 함께 볼 수 있다. Fig.9는 표층에서의 음향강도와 3차원 유속자료의 파워스펙트럼을 나타낸 것인데 음향강도와 수직속도 성분에서 1일 주기가 반일주기보다 우세하고 U, V 속도성분의 일주조는 조석의 K1, O1 분조로 뚜렷이 구분되어 있어 1일 주기가 조석주기에 의한 것보다는 생물학적인 기원에 의한 것임을 의미한다. Fig.10은 음향강도를 dB단위로 환산한 후방산란 음향강도(Back scatter strength)를 관측기간 동안의 일평균 편차와 수직속도의 일평균에 대한 그림으로서 밤에 비해 낮 시간에는 상층에서 후방산란 음향강도가 상대적으로 감소하며 오히려 저층에서 증가하는 역상분포가 뚜렷해 보인다. 수직속도에는 아침과 저녁으로 1~3cm/s의 하강속도와 상승속도가 잘 나타나 있다. 흥미롭게도 자료의 결측과 관련된 이러한 현상들은 307.2 kHz의 작동 주파수를 갖는 ADCP 음파의 파장이 0.5cm 정도 되며 제주도 주변해역

에서 많이 볼 수 있는 Copepoda와 같은 수중 부유생물인 동물플랑크톤의 크기에 음파의 파장이 잘 맞기 때문에(RD Instrument, 1989) 동물플랑크톤의 하루주기 수직일주운동으로 인한 수중매질의 변동에 의한 것으로 판단된다. 이러한 후방산란 음향강도를 이용한 동물플랑크톤의 수직일주운동과 수직운동속도를 연구한 결과들(Kaneko *et al.*, 1996, Zhu *et al.*, 2000)은 Fig.9과 Fig.10의 특징을 잘 반영하고 있다. 둘째로 자료의 질에 입각하여 Fig.8의 오차속도에서 보여진 것처럼 하드웨어적으로 산출된 원시자료에는 하층부에 비해 상층부에서의 상대적으로 낮은 신호의 질 자체 때문에 생기는 여전히 제거될 수 없는 무작위 오차가 포함돼 있다. 따라서 상층부분에서 이러한 가짜자료를 우선 제거하고 상층의 낮은 신호의 질을 보완함으로써 상층과 하층의 신호의 질을 일정하게 하여 속도 bias를 제거할 수 있다(Zedel and Church, 1987). 이러한 낮은 신호의 질을 보정하기 위해서 자료의 질 검정(data quality test)을 하게 되는데, 오차속도는 수평방향의 밀도변화나 급한 속도경사등이 원인이 되는 것으로 자료의 질을 판단해 주는 중요한 기준 중의 하나가 된다. 따라서 획득된 원시자료를 소프트웨어적으로 후처리하여 신호의 질이 낮은 10~58m의 상층 자료에 대하여 이용할 수 있는 자료의 개수가 너무 많이 제거되지 않도록 적절한 자료개수의 수준에서 오차속도 표준편차(σ)의 5σ 이상을 제거하였으며 상층과 하층의 속도 bias를 제거하여 자료의 질을 높였다. 이러한 속도 bias가 제거된 원시자료는 우선 제주해협 내에서 시간에 따른 지구자기장 변동에 의한 자기편차를 보정하기 위하여 미국지구물리자료센터(NGDC) web site(<http://www.ngdc.noaa.gov/cgi-bin/seg/gmag/>) 상의 java 프로그램으로 자기편차를 계산하여 자기편차 보정을 실시하였다. 관측된 자료가 조류와 해류의 합으로 이루어졌다는 가정 하에 영국 Proudman Oceanographic Lab.에서 제공하는 TASK2000 프로그램을 이용하여 결측된 부분 중 조류부분은 비록 전체 해류 자료의 길이가 1년보다 짧지만 least square fitting의 향상을 위하여 장주기 기상조석 분조를 포함하여 총 63개 분조로 조화분석하여 자료를

생산하였고 해류부분은 조석의 제거된 잔차성분을 weight-folding interpolation(KORDI, 1999) 하였으며 합성된 조류성분과 보간된 잔차성분을 합쳐 최종 편집된 시계열 자료를 구성하였다. 마지막으로 편집된 시계열 자료에 30분 smoothing filter를 적용하여 고주파 부분을 제거하고 1시간 간격으로 자료를 재정리하였으며 저주파 해류를 연구하기 위하여 정리된 1시간 간격의 자료를 이용하여 장주기 기상분조를 제외한 60개 분조로 다시 조화분석을 실시하였으며 조류성분을 제거하고 남은 잔차류 성분에 대하여 half power에서 cut off 주파수가 0.456cpd인 Doodson X0 filter를 적용하여 low-pass filter하였다. Fig.11은 사용된 30분 smoothing filter와 Doodson X0 filter의 주파수 반응함수를 각각 나타낸다(Pugh, 1987).

(2) SST 자료의 처리

Fig.12에서 황·동중국해 전해역에 걸쳐 보여진 19개 라인들에 대하여 1998년 8월에서 1999년 7월까지 한국해양연구원에서 NOAA 12, 14호로부터 하루에 최소 1번에서 최대 9번까지 수신된 약 600MB 분량의 SST 원시자료를 추출하였다. 우선 19개 라인에 대하여 총 56개 정점을 선택하여 각각의 정점에 대한 1년간의 표층수온 시계열 자료를 완성하였다. 그러나 원시자료는 구름이 끼어서 날씨가 좋지 않거나 야간에는 AVHRR 센서가 제약을 많이 받으므로 자료가 없거나 가짜 값을 매우 많이 포함하고 있어 자료의 질이 상당히 나쁜 편이었다. 그러므로 이용할 수 있는 적절한 자료개수의 수준에서 비교적 측정이 잘되고 신뢰도가 높은 오전 5시에서 오후 7시까지의 낮 동안의 자료만을 선택하여 가짜 값들을 최대한 배제한 자료를 분석에 사용하였다.

(3) 기상 및 조석자료의 처리

바람, 기압, 조석자료 모두 세계적으로 널리 사용하고 있는 영국 Proudman Oceanographic Lab.에서 제공하는 TASK2000 프로그램을 사용하여 장주기

기상분조를 제외한 60개 분조로 조화분석하여 정확히 조석을 제거한 후 Fig. 10에서 보여진 X0 filter를 이용하여 ADCP 자료처리에서와 마찬가지로 똑같이 low-pass filter하였다. low-pass filter된 조석자료는 해류의 이류와는 관계가 없는 정역학적인 역기압효과(inverse barometric effect)를 제거하기 위하여 제주와 추자의 조석자료는 low-pass filter된 제주에서의 기압으로 $\pm 1.1\text{cm}/\mp 1\text{mb}$ 씩 기압보정 하였고 나머지 부산의 조석자료는 부산의 기압으로 기압보정 하였다.

2) 분석방법

(1) Power spectrum, Rotary spectrum 과 Cross spectrum

주파수별 특성을 파악하기 위한 분석으로서 power spectrum은 주파수별 에너지 밀도를 파악하며 rotary spectrum은 직교좌표 성분 대신에 시계방향과 반시계방향 성분으로 분해된 회전성분에 대한 스펙트럼 밀도를 파악한다. cross spectrum은 두 시계열 사이에서 주파수별 상관관계와 위상지연을 구한다. 신뢰도 있는 스펙트럼 추정치를 구하기 위하여 짧은 시계열에서는 다소 주파수 해상도가 떨어지는 단점이 있긴 하지만 고속 푸리에 변환(FFT)을 기저함수로 사용하는 스펙트럼 프로그램을 사용하였다. 원시스펙트럼은 자유도가 낮아 뚜렷한 피크를 잡아낼 수가 없기 때문에 프로그램에서 사용된 스펙트럼 추정방법은 자유도를 증가시키기 위하여 50% over-lapped된 hanning window를 적용하여 일정한 자료 폭을 갖는 여러 쌍의 시계열을 고속 푸리에 변환한 다음 앙상블 평균하여 스펙트럼을 추정한다. 마지막으로 스펙트럼 추정치(G_{pp})와 상관제곱 추정치(v^2) 신뢰구간을 식 (1)과 (2)에서 x^2 분포에 의하여 자유도(DOF)와 유의수준 α 에서 다음처럼 계산하여 스펙트럼 추정치를 완성하였다.

$$\frac{DOF \langle Gpp \rangle}{\chi^2(DOF, \alpha/2)} \leq Gpp \leq \frac{DOF \langle Gpp \rangle}{\chi^2(DOF, 1 - \alpha/2)} \quad (1)$$

$$v_{1-\alpha}^2 = 1 - \alpha^{[2/(DOF-2)]} \quad (2)$$

(2) Wavelet power spectrum과 Complex demodulation

스펙트럼은 시계열의 길이에 의해 결정되는 일정한 간격의 모든 주파수에 대하여 평균 진폭과 위상을 구하지만 시계열이 비정상적인 특징을 가질 때 국지적인 시간에 따라 변화하는 진폭과 위상이 의미가 있게 된다. Wavelet은 자료의 길이에 따라 결정되는 모든 주파수에 대하여 국지적으로 변화하는 진폭과 위상을 구하는 효과적인 방법이다. 반면 Complex demodulation 테크닉은 조석주파수처럼 정확히 알고 있는 단 하나의 주파수에 대하여 국지적으로 변화하는 진폭과 위상을 구할 수 있는 방법이다. 첫째로 이 연구에 사용된 연속 파엽변환 프로그램은 DOG나 Mexican hat과 같은 기저함수에 비해 주파수 분해능이 상대적으로 뛰어나 스펙트럼 분석에 탁월한 식 (3)의 복소수 형태의 Morlet Wavelet을 사용(Lau and Weng, 1995; Wang, 1996; Moon, 1998; Jung *et al.*, 2000; Lee, 2000)하여 식 (4)에서 서로 다르게 scale되고 translation되어진 daughter wavelet들과 함께 시계열(x_n)을 convolution 적분하여 파엽변환을 하게된다. 그러나 자료의 길이가 길수록 엄청난 계산량 때문에 계산 속도를 증가시키기 위하여 식 (5)에 의해 fourier 공간상에서 convolution을 표현하였으며 고속 푸리에 변환(FFT)을 적용하여 푸리에 역변환하여 파엽변환하는 방법을 사용하였으며 식 (6)에 의해 진폭과 위상을 정의하며 식 (7)에 의해 신뢰구간을 정의한다(Torrence and Compo, 1998).

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}, \quad \omega_0 = 6 \quad (3)$$

$$W_n(s) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{n'} \Psi_0^* \left[\frac{-(n' - n)\delta t}{s} \right], \quad * = \text{complex conjugate} \quad (4)$$

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} x(w_k) \Psi_0^*(s w_k) e^{i w_k n \delta t} \quad (5)$$

$$\text{Amp.} = |W_n(s)|, \quad \text{Phase} = \tan^{-1} \frac{\text{Img.}}{\text{Real}}, \quad \text{Power} = |W_n(s)|^2 \quad (6)$$

$$\frac{2}{\chi^2(2, \alpha/2)} |W_n(s)|^2 \leq |W_n(s)|^2 \leq \frac{2}{\chi^2(2, 1 - \alpha/2)} |W_n(s)|^2 \quad (7)$$

둘째로 complex demodulation 테크닉은 식 (8)과 같이 시계열 x_t 가 진폭(R_t)과 위상(ϕ_t)이 시간에 따라 변한다는 가정 하에 복소지수로 표현할 수 있으며 주파수 λ 만 알려지면 demodulation된 식 (9)에서 2λ 부분의 노이즈를 제외한 식을 사용하여 식 (10)에 의하여 진폭과 위상이 구해진다(Bloomfield, 1976).

$$x_t = R_t \cos(\lambda t + \phi_t) = \frac{1}{2} R_t [\exp(i(\lambda t + \phi_t)) + \exp(-i(\lambda t + \phi_t))] \quad (8)$$

$$y_t = x_t \exp(-i\lambda t) = \frac{1}{2} R_t \exp(i\phi_t) + \frac{1}{2} R_t \exp(-i(2\lambda t + \phi_t)) \quad (9)$$

$$R_t = 2|y_t|, \quad \phi_t = \tan^{-1} \frac{\text{Img.}}{\text{Real}} \quad (10)$$

(3) EOF 와 EEOF

ADCP 자료는 수직적인 해상도가 높아 시간구조 뿐만이 아니라 그 수직구조를 정량적으로 살펴 볼 수 있는 장점이 있다. 따라서 시·공간 변동성을 동시에 제시할 수 있는 시간영역 경험적 직교함수(EOF)를 다음처럼 프로그램 하였다(Emery and Thomson, 1997)

$$N(I, J) = [V(I, J) - V(I, J)_{\text{avg}}] / (\text{linear detrend}) / \sigma, \quad I = \text{depth}, \quad J = \text{length} \quad (10)$$

$$C(I, I) = [N(I, J) \times N(I, J)^T] / (J-1), \quad T = \text{transpose matrix} \quad (11)$$

$$\sum_{I=1}^N C(I,I)\Phi_n(I)=\lambda_n\Phi_n(I), n=1,\dots,N \text{ mode} \quad (12)$$

$$\sum_{I=1}^N \Phi_n(I)\Phi_m(I)=\delta_{nm} \text{ (orthogonality condition)} \quad (13)$$

$$A_n(J)=\sum_{I=1}^N [V(I,J)-V(I,J)_{avg}]\Phi_n(I) \quad (14)$$

$$V(I,J)=V(I,J)_{avg}+\sum_{n=1}^N A_n(J)\Phi_n(I) \quad (15)$$

식 (10), (11)에 의해 실수 형태의 정방대칭행렬을 가지는 교차공분산 행렬을 구성하면 이의 해를 구하는 과정은 식 (12)에서 고유치(λ_n)를 구하는 문제가 되며 이때 구해지는 고유벡터 $\Phi_n(I)$ 를 경험적 직교함수(EOF)라하며 식 (13)의 직교조건을 만족한다. 식 (12), (13)의 고유치 계산은 SLATEC 표준수학 라이브러리 서브루틴 SSIEV.F를 이용하여 Pentium 800MHz PC에서 GNU FORTRAN77으로 계산하였다. 마지막으로 식 (14), (15)에서 각 EOF 모드의 시간계수를 구하고 시계열을 재구성하였다. 확장경험직교함수(EEOF)는 단지 지연된 시간을 갖는 교차공분산 행렬을 구성하여 위와 같이 계산하면 된다.

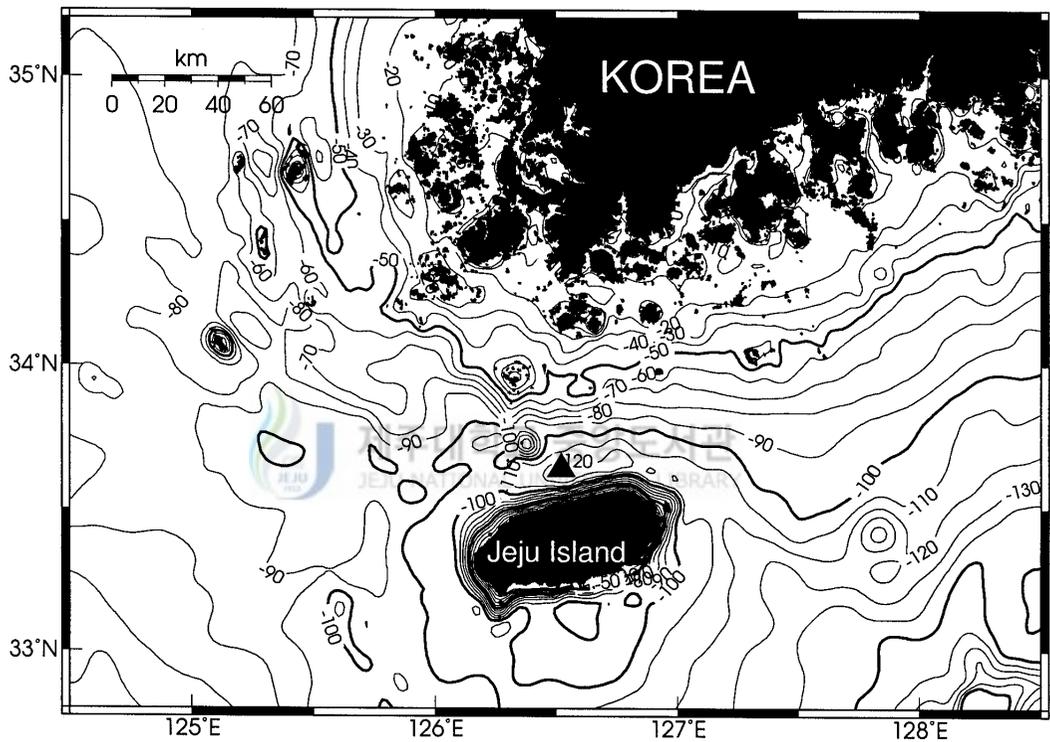


Fig.5. Map of the Cheju Strait and the South Sea with major isobaths in meters. Location of long-term ADCP mooring station was shown in a black triangle.



Fig.6. TRBM ADCP on the sea surface before bottom mooring in the Cheju Strait (Chang, 1999).

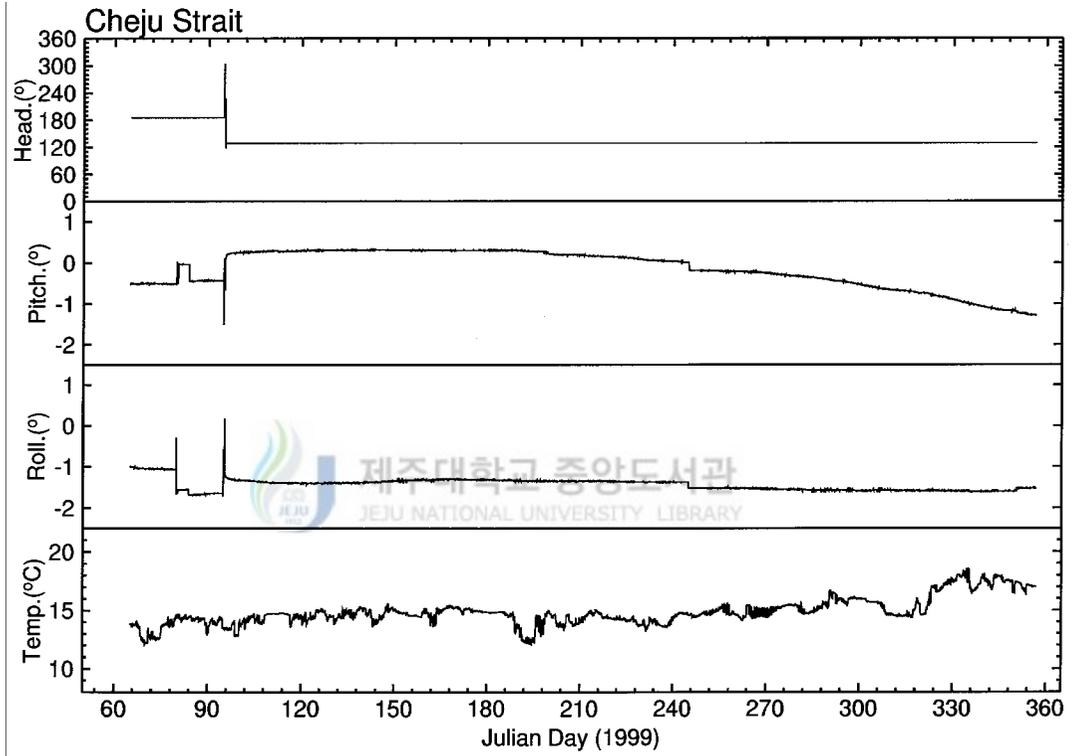


Fig.7. Time series of heading, pitching, rolling, and bottom temperature for TRBM ADCP internal sensors.

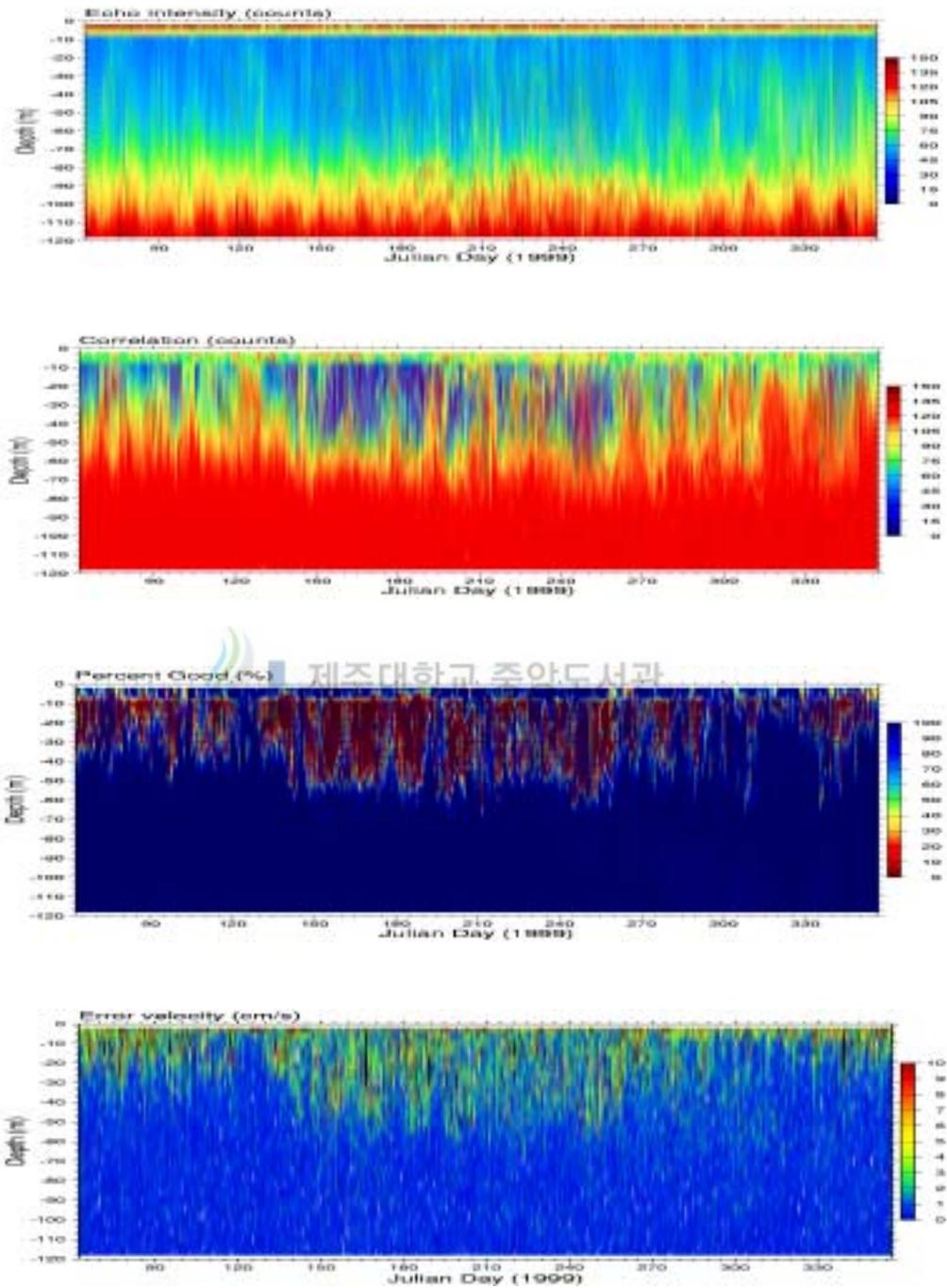


Fig.8. Echo intensity, correlation, percent good and error velocity shows raw TRBM ADCP data quality.

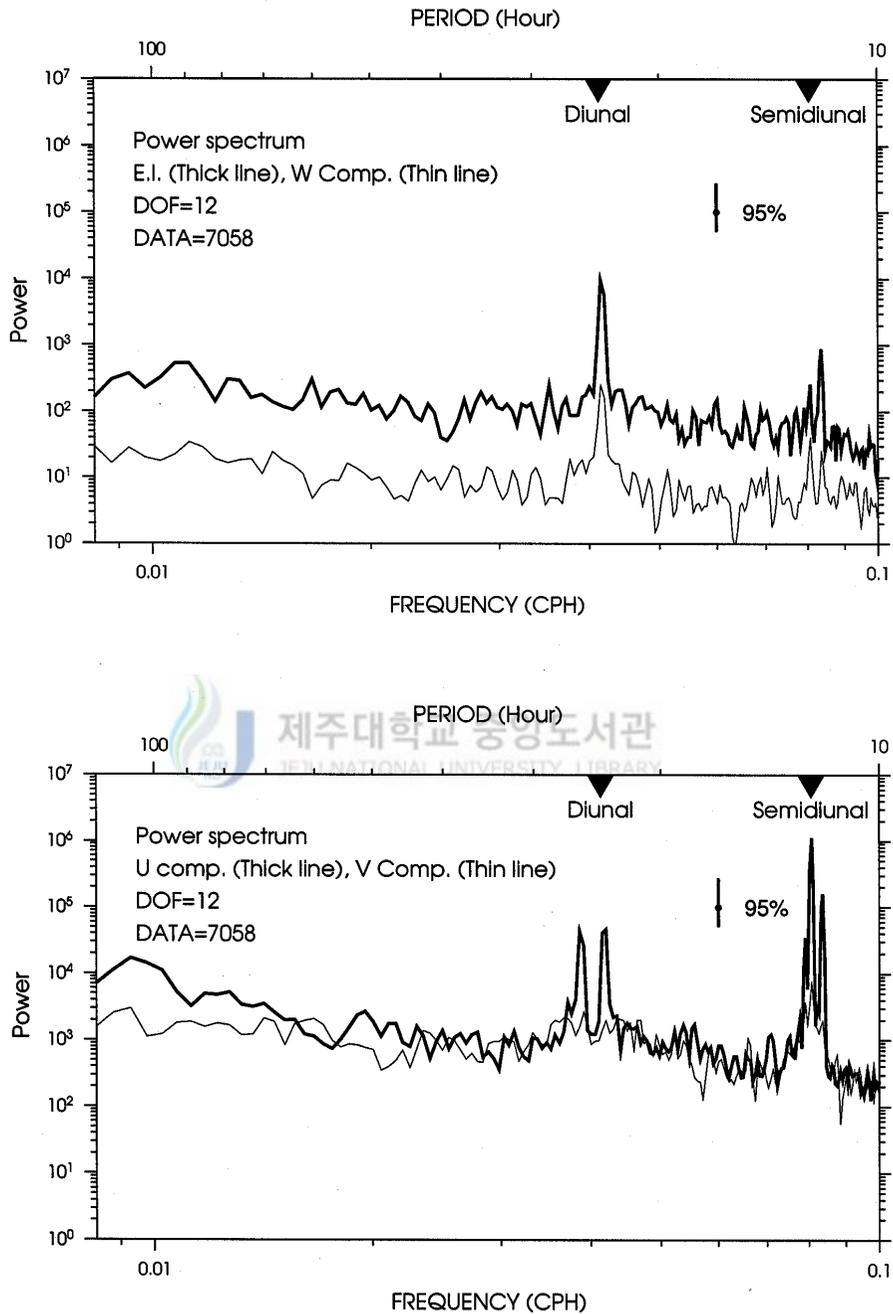


Fig.9. Power spectrum of the echo intensity and vertical velocity (upper panel) and the u velocity and v velocity (lower panel).

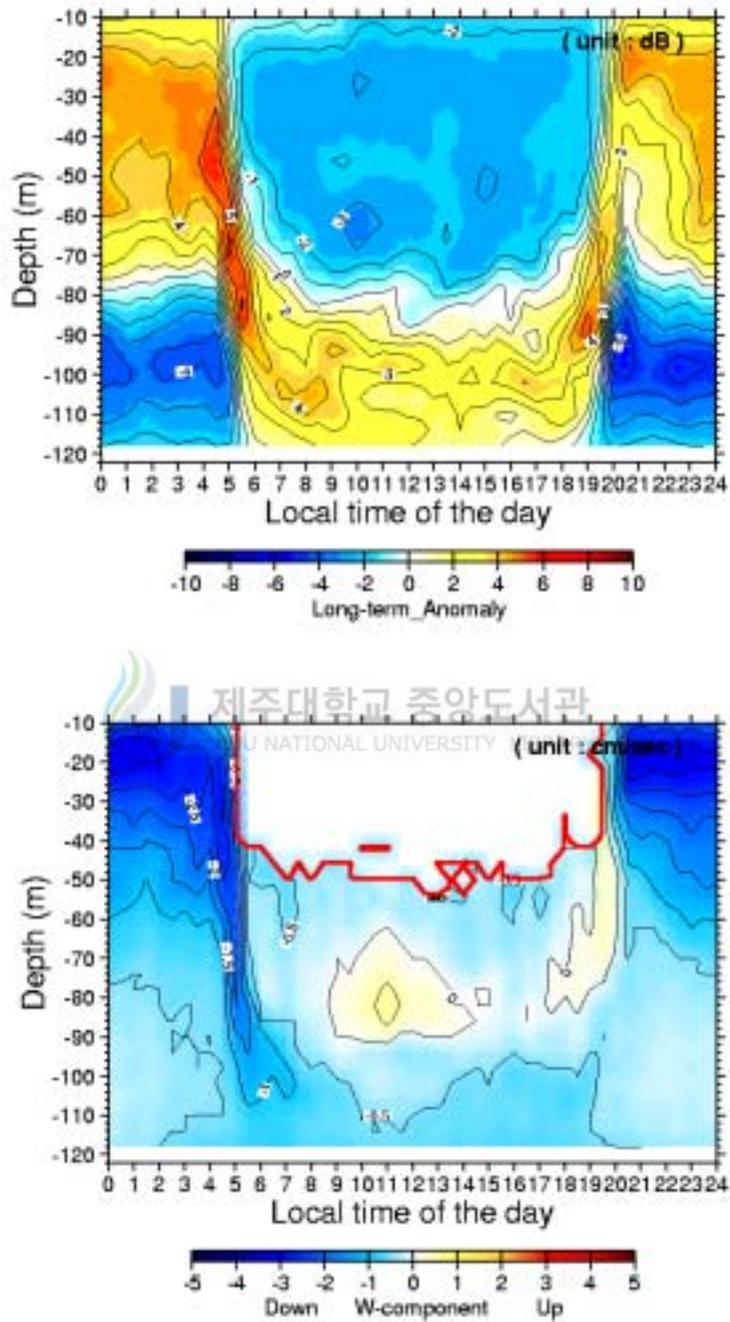


Fig.10. Daily mean anomaly of back scatter strength calculated from echo intensity(upper panel) and daily mean vertical velocity(lower panel).

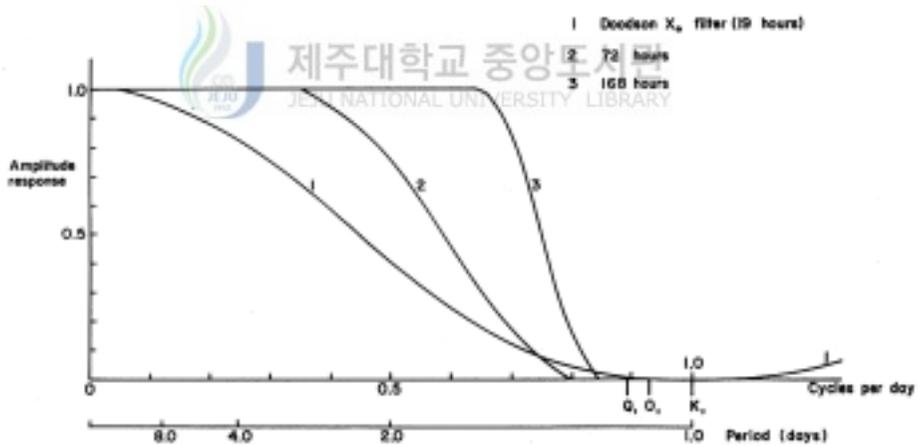
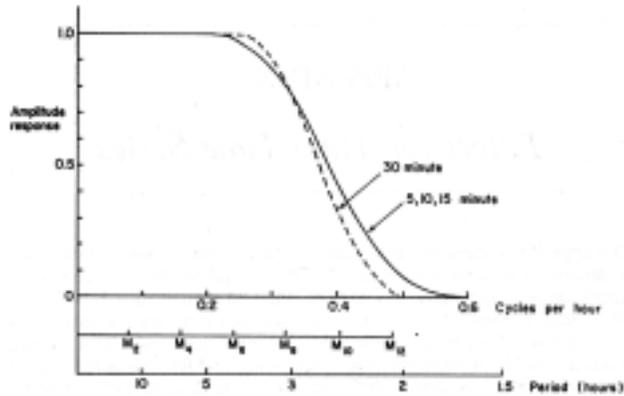


Fig.11. Frequency response functions of 30 minute smoothing filter (upper panel) and Doodson's X_0 filter (lower panel) (Pugh, 1987).

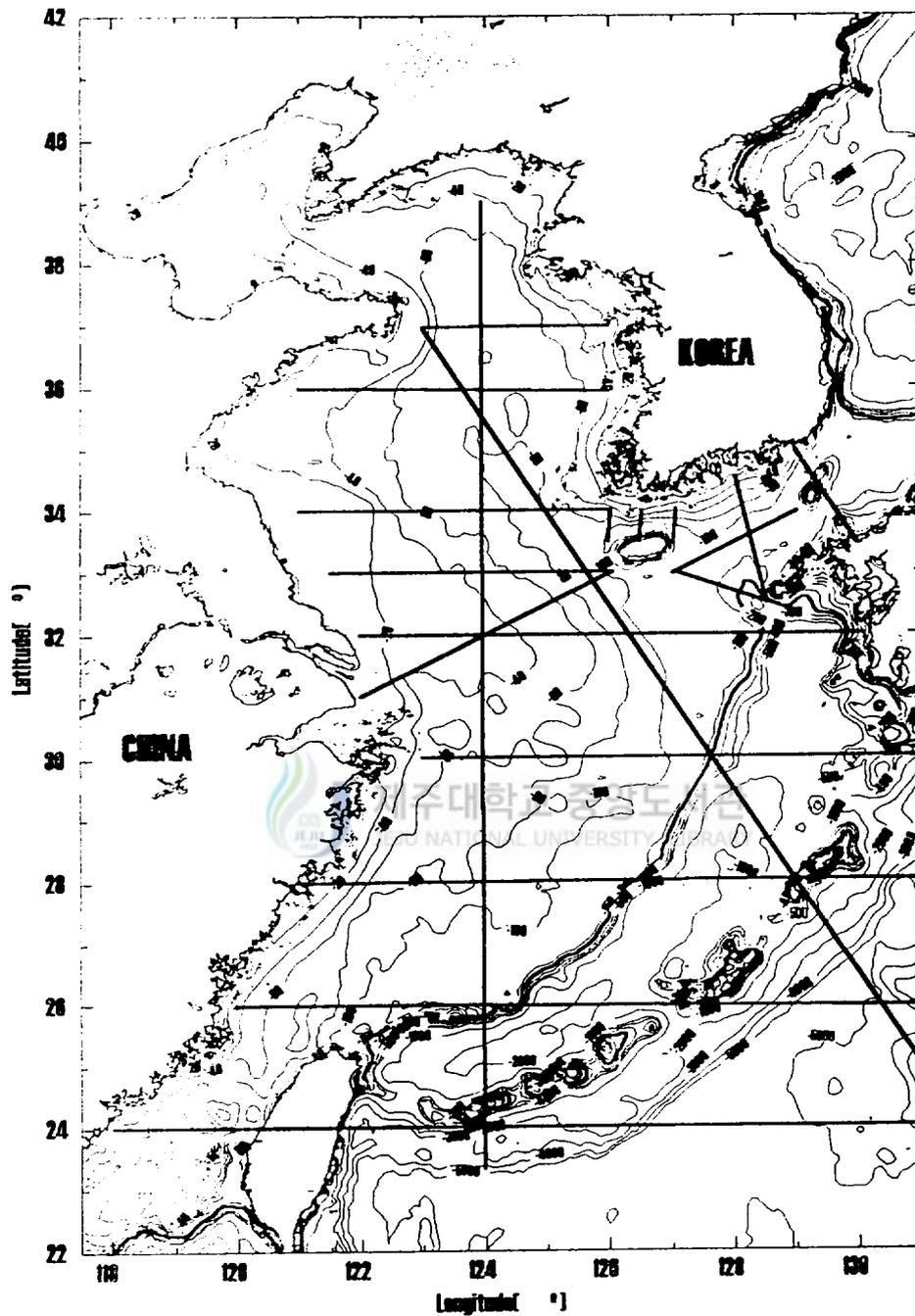


Fig.12. 19 lines arbitrarily selected to analyze SST data observed by Satellite NOAA 12 and 14 from July, 1998 to July, 1999 in the East China Sea and the Yellow Sea.

II. 저주파 해류의 시간구조와 수직구조의 변동특성

1. 관측결과.

한국 남해의 서쪽에 위치한 제주해협은 황·동중국해와 남해 사이의 해수 및 물질수송의 중요한 통로가 되는 해역이다. 기존의 단기간에 걸친 해류관측 자료와 정성적인 해수분포는 제주해협에 동향의 평균해류가 존재함을 제시하였지만 제주해협내 해류의 시간적인 변화는 관측자료가 부족하여 잘 알려져 있지 않다. 그러므로 제주해협에서 10개월간 관측된 ADCP 자료에는 그 시간 변화 뿐만 아니라 수직적인 변화까지 매우 풍성하게 나타날 것으로 사료된다. 따라서 관측치의 시계열 특성에 어떠한 규모의 현상들이 나타나고 있는지 우선 확인해 보려고 한다.

1) 항류 특성 및 통계적 특성

Fig.13~16은 전 기간에 걸친 수심별 평균 유속 및 유향과 저주파 필터된 시간별 유속벡터도와 연속 유속벡터도, 예보된 조류를 각각 나타낸다. 가장 먼저 항류의 특성을 관찰하기 위해 Fig.13에서 10m 표층에서의 유속은 13cm/s이며, 수심이 깊어질수록 유속이 증가하여 수심 30m 부근에서 최대 17cm/s에 달하고 바닥에서는 약 4cm/s가 되어 수심평균 약 12cm/s이다. 평균방향은 방위각 63~73°의 범위를 나타내어 수심평균 약 70°이다. 따라서 강력한 shear 구조 형태의 동북동향의 명백한 항류가 존재하며 지형류 계산에서는 나타나지 않는 바닥에서 4cm/s 정도의 순압성분이 존재하여 마찰력과 균형을 이룬다. 마찬가지로 시간별 유속벡터도에서 대부분의 해류가 해협을 따르는(along strait) 방향으로 잘 분해되어 있으며 연속 유속벡터도에는 동북동방향으로 항

류가 존재함을 잘 보여준다. 이와 함께 저층으로 갈수록 해류가 감소하고 반시계방향으로 회전하면서 약 10° 정도의 회전각을 갖는 Ekman veering 현상 (Kundu, 1976; Lee, 1987)을 보인다. Table.2는 관측된 해조류의 X0 filter된 자료의 기본통계를 보여준다. 항류와 표준편차(σ)의 크기는 그 차수가 서로 비슷하며 항류운동에너지(MKE)보다 변동운동에너지(EKE) 성분이 전체 수심에 대하여 평균적으로 약 42배 큰 것으로 계산되어 시간적으로 그 변동성이 매우 심하며 역학적으로 볼 때 변동성분이 항류보다 중요한 것임을 알 수 있다. 스칼라 평균속도에 대한 벡터평균속도의 비를 나타내는 이른바 유향안정도 (Rikhshi and Ichiye, 1986)는 표층과 바닥 경계층에서 작아서 해류의 방향이 상대적으로 중층에서 안정됐음을 의미하며 Fig.15에서도 잘 보인다.

한편 Table.3은 4개의 대표층에 대하여 원시자료에서 예보된 조류를 제거한 잔차성분의 RMS를 표준편차로 나눈 표준화된 RMS 값(Teague *et al.*, 1998)으로 각각 0.44, 0.38, 0.26, 0.25로서 평균 0.33이며 조류 이외의 단주기 성분이 작아서 무시할 수 있다면 이것은 평균적으로 해류가 33%, 조류가 67%로 지배적이나 10m에서는 RMS 값이 다소 커서 해류성분이 44%, 조류가 56%로서 조류가 일반적으로 거의 순압적이라는 사실과 항류가 강한 shear 구조를 나타내는 것을 고려하면 제주해협에서 조류와 저주파 해류 모두가 중요하다. 또한 Fig.16은 조화분석에 의해 예보되고 along strait 방향으로 회전된 매 수심별 조류를 나타내는데 저층에 비해 항류가 강했던 중·상층의 예보된 조류에는 창조류보다 동쪽(along) 방향의 낙조류가 우세하며 계산결과 수심평균 4cm/s 정도 낙조류가 우세한 조류의 비대칭 현상을 보여 다소 저주파 해류와 상호작용의 가능성이 있는 것으로 생각된다. 결과적으로 항류와 조류 모두가 주로 해협을 따르는 방향으로 잘 분해되어 해협이라는 수륙분포가 유동변동에 큰 영향을 주고 있는 것으로 사료된다.

2) 시계열 특성

첫째로 시간영역 특성을 보면 Fig.17은 시간-수심의 함수로 나타낸 동서성분과, 남북성분의 저주파 필터된 해류를 나타낸다. 우선 눈에 띄는 것이 변동성이 매우 큼을 알 수 있는데 주로 해협을 따르는 동서방향 성분이 남북방향 성분보다 크게 나타나며 계절변화와 관련된 듯한 shear 구조의 여름과 가을철 해류의 큰 불연속과 함께 기상변동과 관련된 듯한 3~5일의 단주기와 비교적 장주기의 10~15일 주기 형태가 전층에 걸친 서향류와 간헐적인 남서류의 저층반류가 가장 특징적인 현상으로 나타났다. 따라서 대부분 순압 변동성분이 우세하지만 간헐적인 반류현상은 관측해류에 경압 변동성분도 존재함을 의미하며 그 수직구조가 매우 복잡하다. 둘째로 주기특성을 더 자세히 보기 위한 주파수 영역 특징은 Fig.18의 수심적분된 주축성분의 회전스펙트럼에서는 저주파에서 비교적 랜덤한 계절변화 밴드(>20 days)와 종관기상밴드(2~20 days)가 특징적이며 고주파에서는 조석주기(10~30 hours)가 peak 형태로 나타난다. 따라서 육지에 가까이 접해 있는 내 대륙붕 특성 때문에 조류 및 취송류가 특징적으로 나타나고 장주기 해수순환 효과에 의한 계절변화 형태의 20일 이상 장주기 랜덤 에너지 성분 등 그 규모가 매우 다양하다. 한편 회전스펙트럼은 모든 주파수 밴드에서 시계방향과 반시계방향의 에너지가 서로 비슷하여 조류나 저주파해류 모두 직선운동이 탁월함을 의미하며 해협류의 특징을 잘 나타낸 것이라 할 수 있다.

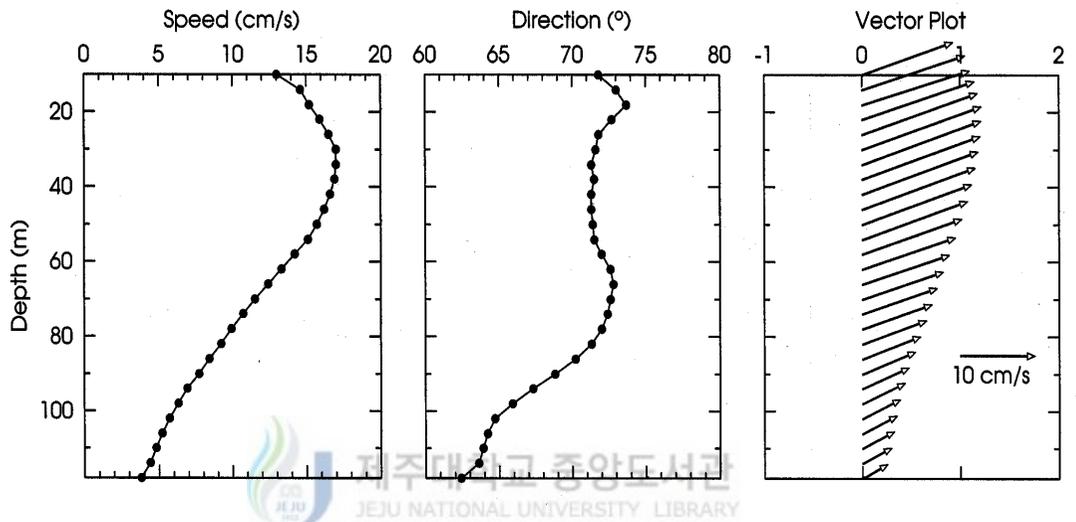


Fig.13. Mean speeds, directions averaged in the whole observation period and the vector plot of mean current with depth. Direction measured clockwise from the north.

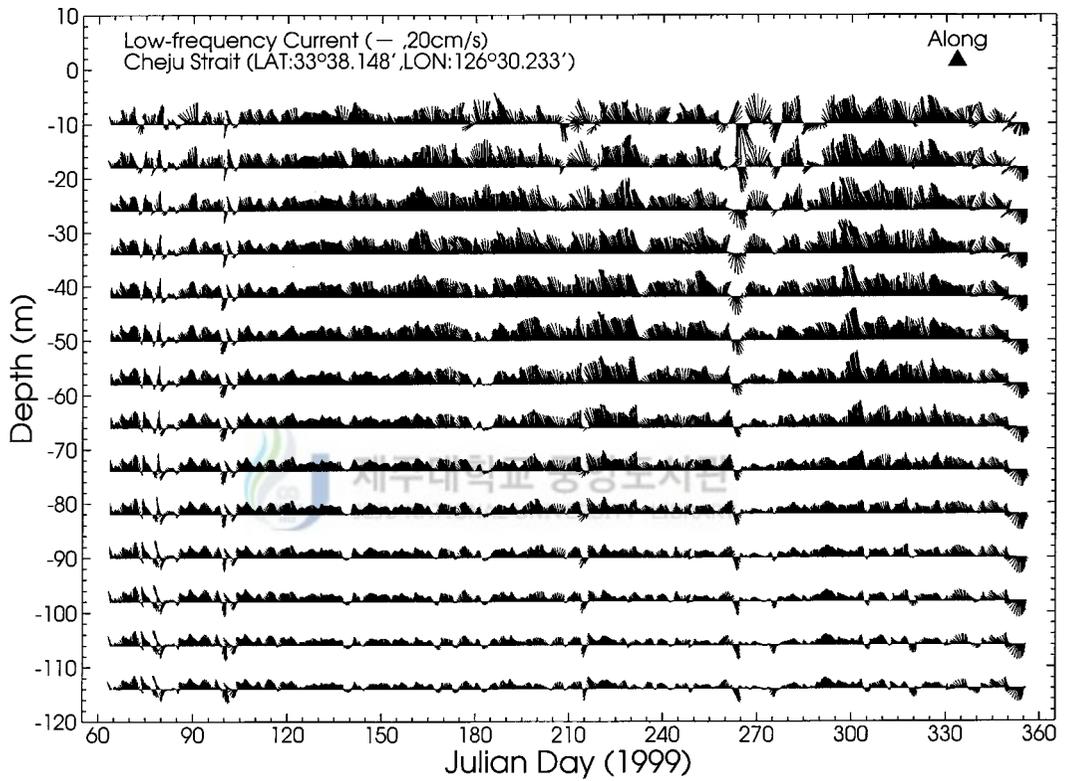


Fig.14. Stick vector plots of low frequency currents in the Cheju Strait in every 8m depth.

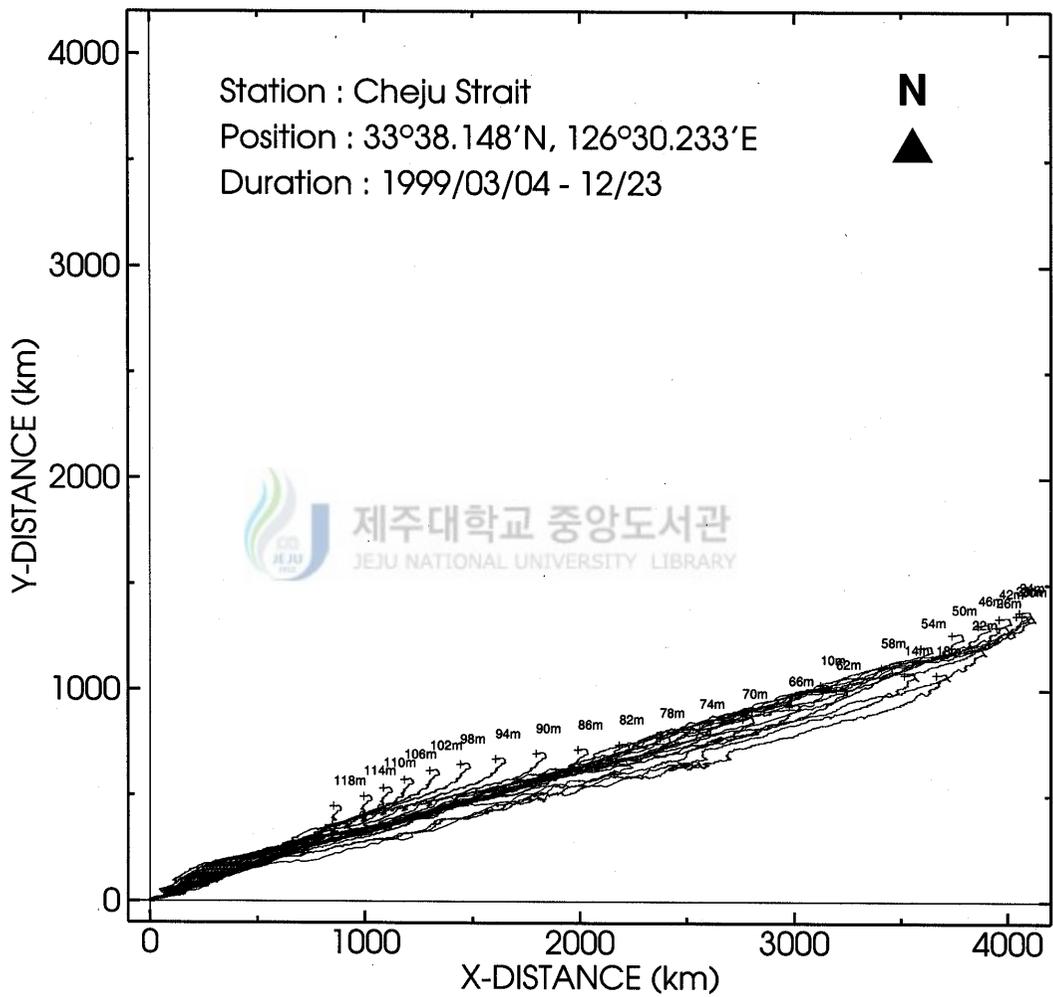


Fig.15. Progressive vector diagrams of low frequency currents for each depth.

Table.2. Basic statistics of low frequency currents in the Cheju Strait.

Direction measured clockwise from the north.

Depth (m)	u mean (cm/s)	σ (cm/s)	v mean (cm/s)	σ (cm/s)	Speed (cm/s)	Dir.(°)	MKE (cm ² /s ²)	EKE (cm ² /s ²)	MKE/EKE	Direction stability
10	12.4	12.6	4.1	5.6	13.0	71.8	8.49E+01	1.30E+04	6.54E-03	0.8
14	14.0	11.7	4.3	4.9	14.6	73.0	1.07E+02	9.80E+03	1.09E-02	0.8
18	14.6	11.3	4.3	4.9	15.2	73.7	1.15E+02	8.41E+03	1.37E-02	0.9
22	15.2	10.8	4.7	4.5	15.9	72.7	1.27E+02	7.13E+03	1.78E-02	0.9
26	15.7	10.5	5.2	4.6	16.5	71.8	1.36E+02	6.23E+03	2.19E-02	0.9
30	16.1	10.4	5.4	4.6	17.0	71.6	1.45E+02	6.11E+03	2.37E-02	0.9
34	16.1	10.0	5.4	4.6	17.0	71.3	1.44E+02	5.32E+03	2.71E-02	0.9
38	16.0	9.6	5.4	4.4	16.9	71.5	1.43E+02	4.51E+03	3.17E-02	0.9
42	15.7	9.4	5.3	4.3	16.6	71.3	1.38E+02	4.02E+03	3.42E-02	0.9
46	15.3	9.2	5.2	4.1	16.2	71.3	1.31E+02	3.70E+03	3.54E-02	0.9
50	14.9	9.0	5.0	4.2	15.7	71.4	1.23E+02	3.45E+03	3.56E-02	0.9
54	14.3	8.9	4.8	4.0	15.1	71.5	1.13E+02	3.21E+03	3.53E-02	0.9
58	13.5	8.6	4.4	3.8	14.2	72.0	1.01E+02	2.79E+03	3.62E-02	0.9
62	12.7	8.1	4.0	3.5	13.3	72.6	8.85E+01	2.22E+03	3.98E-02	0.9
66	11.8	7.5	3.7	3.4	12.4	72.8	7.66E+01	1.69E+03	4.53E-02	0.9
70	11.0	7.0	3.4	3.2	11.5	72.6	6.60E+01	1.27E+03	5.21E-02	0.9
74	10.2	6.6	3.2	3.1	10.7	72.4	5.70E+01	1.00E+03	5.70E-02	0.9
78	9.4	6.3	3.1	3.0	9.9	72.0	4.93E+01	8.31E+02	5.93E-02	0.9
82	8.7	6.1	2.9	2.9	9.2	71.3	4.20E+01	7.27E+02	5.78E-02	0.9
86	7.9	6.0	2.8	2.9	8.4	70.2	3.54E+01	6.66E+02	5.31E-02	0.9
90	7.1	5.9	2.8	2.8	7.7	68.8	2.93E+01	6.39E+02	4.59E-02	0.8
94	6.4	5.9	2.7	2.7	6.9	67.3	2.40E+01	6.27E+02	3.82E-02	0.8
98	5.7	5.9	2.6	2.6	6.3	65.9	1.98E+01	6.19E+02	3.20E-02	0.8
102	5.2	5.9	2.4	2.6	5.7	64.7	1.64E+01	6.09E+02	2.70E-02	0.7
106	4.7	5.8	2.3	2.6	5.2	64.2	1.37E+01	5.83E+02	2.35E-02	0.7
110	4.3	5.7	2.1	2.7	4.8	63.9	1.16E+01	5.53E+02	2.10E-02	0.7
114	4.0	5.5	2.0	2.6	4.4	63.6	9.81E+00	4.97E+02	1.97E-02	0.7
118	3.4	5.2	1.8	2.6	3.8	62.4	7.41E+00	4.01E+02	1.85E-02	0.6

Table.3. Normalized residuals of u component calculated at 10m, 34m, 82m and 118m.

	10m	34m	82m	118m	Mean
Residual RMS, cm/s	16.39	13.88	9.41	7.38	11.77
Normalized residual	0.44	0.38	0.26	0.25	0.33

$$\text{Residual RMS}(\sigma_r) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U(t) - T_p(t)]^2 dt}$$

$$\text{Normalized residual} = \sigma_r / \sigma_U \quad (\text{Teague } et \text{ al.}, 1998)$$



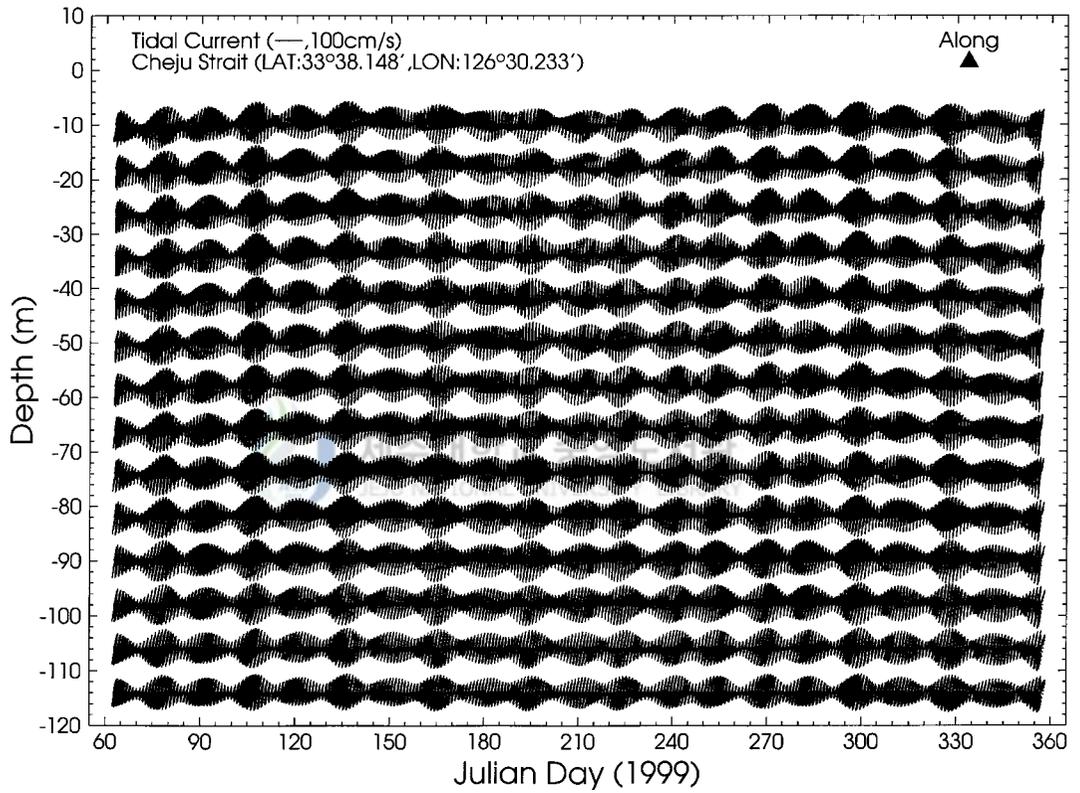


Fig.16. Stick vector plot subsampled every 8m interval of predicted tidal currents from harmonic analysis in the Cheju Strait.

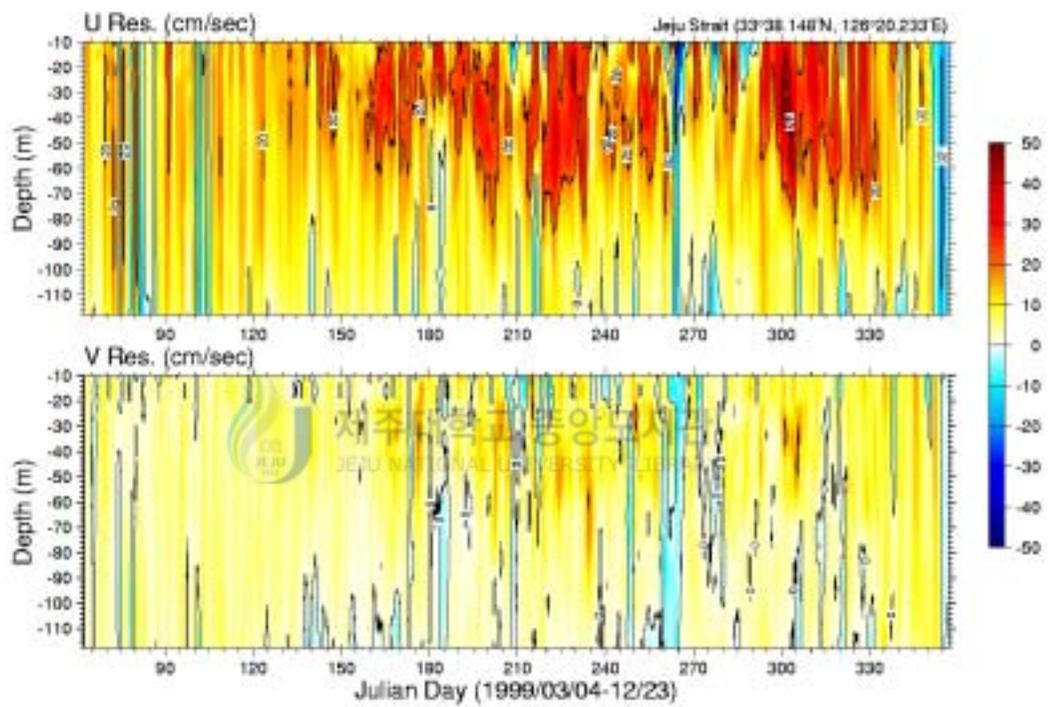


Fig.17. Low frequency currents of u component (upper panel) and v component (lower panel) for each time and depth.

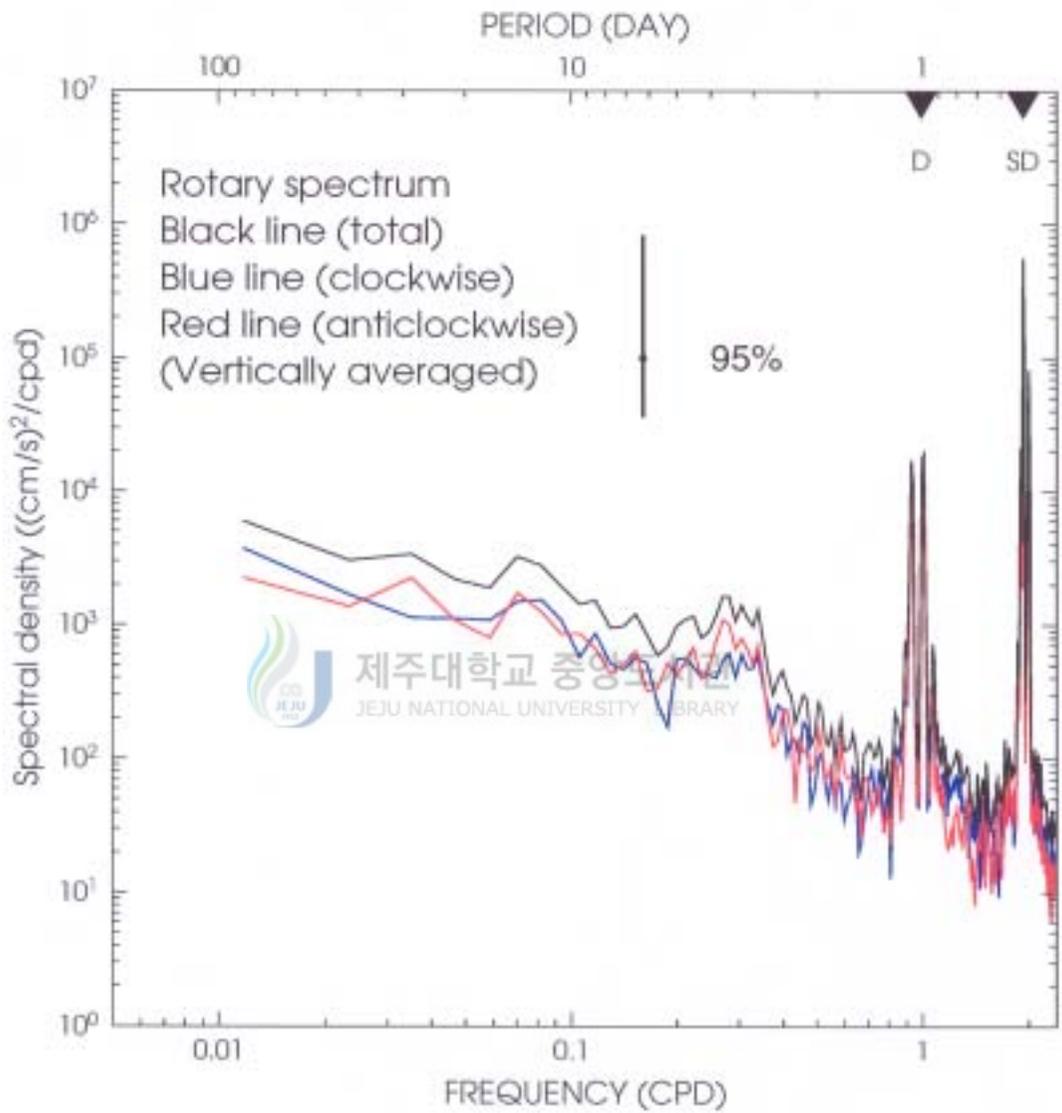


Fig.18. Rotary power spectrum of vertically averaged principal axis component (SD: Semidiurnal, D: Diurnal).

2. 해류의 역학 - 해류, 바람, 해수면 편차(SLD)와의 관계.

위에서 본 관측된 저주파 해류의 변동원인에 대한 구동력이 될 수 있는 몇 가지 중요한 힘들에 대한 역학적 기여도를 살펴보기 위해 외력과의 관점에서 저주파 해류와 바람, 해수면 편차와의 상관관계를 살펴보기로 하자. 일반적으로 바람은 지속적으로 불지도 않으며 그 크기나 방향의 변화가 매우 심하고 비정상적인 특성을 가지므로 해류를 매우 복잡하게 변질시킬 것이다. 따라서 선형적인 상관관계보다는 광대역 주파수 밴드에서 상관관계와 위상지연을 함께 살펴볼 수 있는 교차스펙트럼(cross spectrum) 분석이 매우 효과적이며 짧은 시계열 자료로 인한 주파수 해상도의 감소가 있지만 계절변화가 중요하므로 계절별로 시계열을 나누어 각각 분석을 수행하였다. Fig.19는 바람과 표층 10m에서의 저주파 해류의 주축분해를 위해 다음 식(Freeland *et al.*, 1975; Kundu and Allen, 1976; Preisendorfer, 1988)에 의해 계산한 주축방향(θ_p)과

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\overline{u'v'}}{u'^2 - v'^2}$$

선형회귀 분석된 기압보정량($\pm 1.1\text{cm}/\mp 1\text{mb}$), 주축방향을 기준으로 회전된 제주의 바람과 표층 10m의 유속벡터를 각각 나타낸다. 바람은 300일 이후부터 급속히 발달하는 북서계절풍을 제외하면 동풍계열이 탁월하다. Fig.20은 해류와 바람의 주축분해된 결과와 제주, 추자, 부산의 기압보정된 해수면과 제주-추자, 제주-부산 SLD를 각각 나타낸다. 주축방향의 저주파해류는 명백한 항류 때문에 대부분 동향을 보이지만 여름철에 영향을 끼쳤던 태풍기간들을 의미하는 회색막대 부분을 자세히 살펴보면 265일에 초대형 태풍 Bart의 통과시에는 SLD의 감소와 주축성분 해류에서 강력한 서향류의 발달은 잘 일치한다.

1) 해류와 바람과의 관계

Fig.21의 해류와 바람과의 교차스펙트럼 결과는 대체적으로 성층이 강한 여름철에 상관제곱(v^2) 값이 낮아 주축방향 저주파 해류가 다른 계절에 비해 국지바람과 반응정도가 낮음을 보이며 전 계절을 통해 바람과 2~4일의 단주기에서 높은 상관관계가 나타난다. 한편 성층구조가 약한 봄과 가을, 겨울철 모두는 보다 넓은 2~10일 주기밴드에서 국지바람과 상관관계가 매우 높았다. 특히 주축방향(along strait)과 주축에 수직인 방향(across strait) 모두에서 상관을 보이는데 전체적인 위상의 모양이 across strait 바람에서 음수값을 보여 봄과 가을, 초겨울에는 주로 북서계절풍이 영향을 끼친다. 한편 가을, 초겨울에는 across strait 바람이 계절사이에서 바람의 방향이 바뀔 때 따라 변화하는 20일 이상의 장주기(Chuang, 1986)에서 상관제곱 값이 0.8로 매우 높아 그 위상은 약 20° 빠르며 거의 in phase 이었다. 즉, Fig.20의 across strait 바람에서 약 280일 이후부터 부호가 음수가 되는 북풍계열의 바람이 강화되면 약 26시간의 마찰적응 후 제주해협에서 주축방향의 약 20일 주기 해류가 감소한다는 것을 뜻하며 이때 across strait 해류도 증가하는 경향을 보인다. 다시 말해서 2~10일의 단주기 변동성분은 국지적인 바람마찰에 반응하는 연안 에크만 모델(Csanady, 1976)로 설명할 수 있지만 20일 이상 장주기 변동성분 해류는 기존에 황·동중국해에서 알려져 왔던 역풍류 이론(Park, 1986; Pang, 1987; Hsueh and Pang, 1989)과 관련된 기작을 보여 large scale 해수순환이 영향을 끼침을 알 수 있다. 특히 Hsueh(1988)는 황해 깊은 골에서 실제로 해류를 관측하여 역풍류 이론과 부합하는 해류의 흐름을 보고하였다.

2) 해류와 해수면 편차(SLD)와의 관계

Fig.22를 보면 기본적으로 해류와 바람과의 관계에서 볼 수 있었던 것처럼 전 계절에 걸쳐 기상변동과 관련된 것으로 보이는 2~10일의 단주기 밴드에서

상관계급 값이 매우 높게 나타나고 있다. 그러나 성층이 강한 여름철은 이러한 단주기 효과가 다소 작았다. 한편 20일 이상의 장주기 밴드에서도 상관관계를 보인다.

3) 해수면과 바람과의 관계

Fig.23을 보면 제주, 추자 해수면 모두 주축방향 바람과 여름철의 약간 낮은 상관계급값을 제외하면 계절에 관계없이 주로 2~10일의 단주기 기상밴드에서 매우 높은 상관을 보이거나 그 위상 값이 약 180°로서 모두 out of phase를 나타내며 서로 유사한 구조를 보인다. 즉, 제주와 추자 해수면 모두 똑같은 형태의 반응을 하며 계절에 관계없이 에크만수송 법칙을 잘 따른다. 한편 Fig.24에서도 across strait 바람에 대해 2~10일 주기 밴드가 지배적으로 나타나는데 봄과 가을, 초겨울에는 그 위상차가 작아 북풍계열 바람에 의해 제주, 추자 해수면이 동시에 직접 하강한다. 이러한 사실들은 제주해협 내에서 바람의 외력이 매우 중요함을 잘 보여준다.

4) 지배적인 역학적 원인

여름몬순 기간에는 대부분의 주파수에서 저주파해류가 바람에 직접 반응하는 효과가 다소 작았다. 한편 겨울몬순 기간에는 저주파해류가 주로 단주기와 장주기 모두에서 바람과의 상관관계가 높는데 이러한 심한 단주기 변동은 여름철에 비해 해수가 균질하고 바람마찰에 직접 반응하는 연안 에크만 모델로 설명할 수 있으며 해수순환 효과에 의한 20일 이상의 장주기 변동은 기존에 알려져 왔던 역풍류 이론과 매우 흡사한 변동을 보인다. 그러므로 전계절을 통하여 저주파해류가 국지바람과 제주해협 밖의 분지규모의 황·동중국해 해수순환에 지배되는 것을 알 수 있었다.

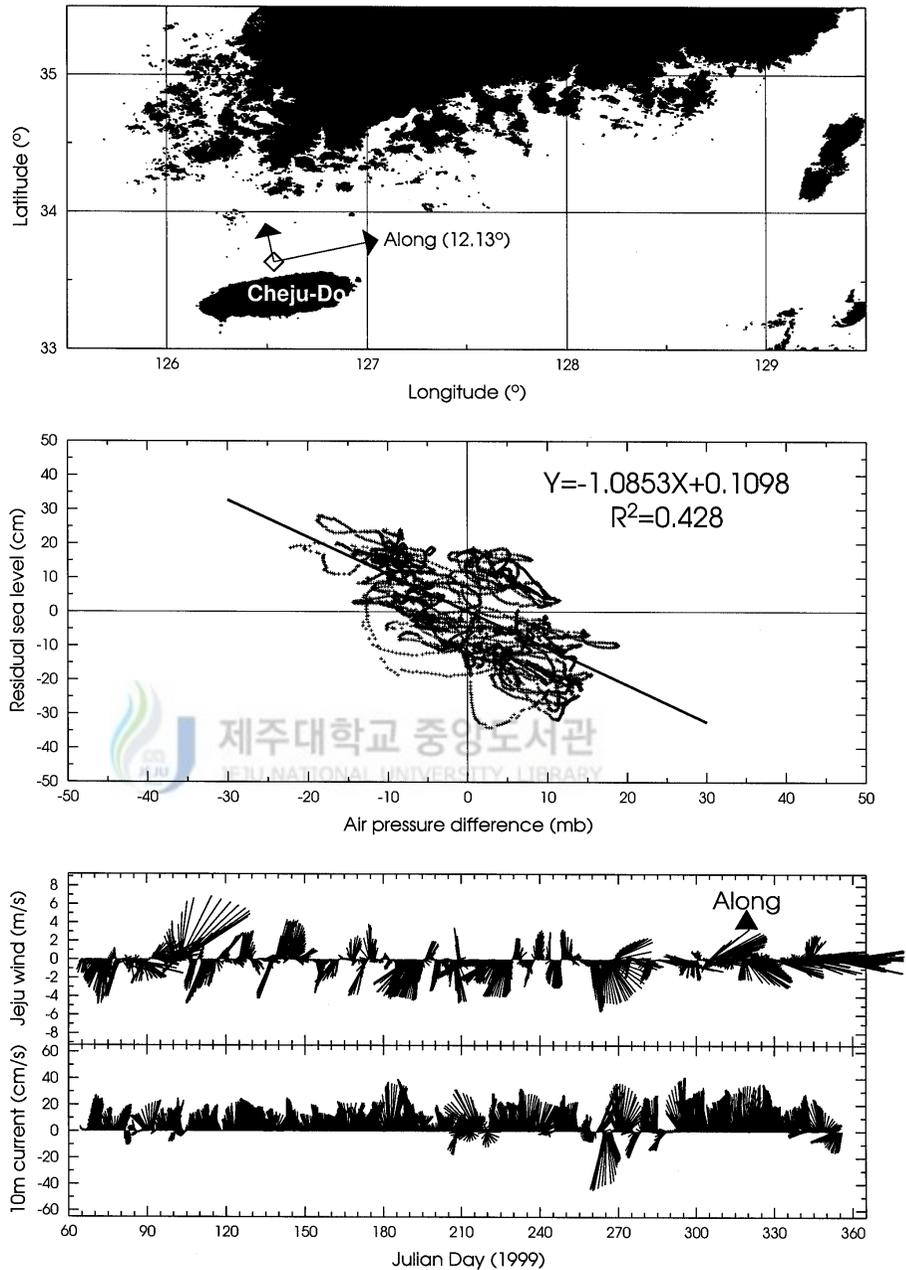


Fig.19. Selection of an amount of principal axis (upper panel) and air pressure correction (middle panel). Lower panel show low frequency wind and current vector for principal axis direction. Principal axis direction measured anticlockwise from the east.

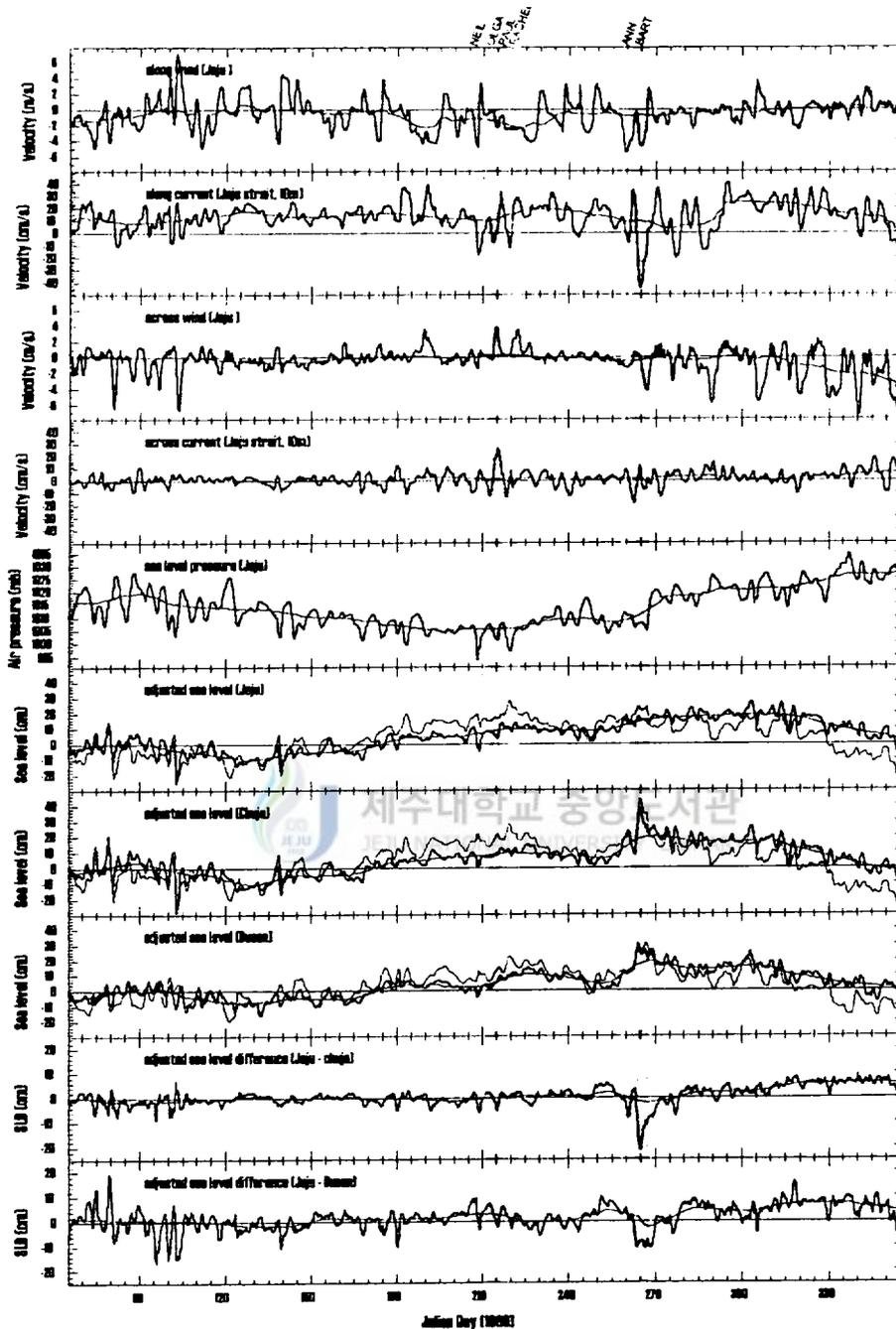


Fig.20. Decomposed wind and current by principal axis and air pressure, adjusted sea level, adjusted sea level difference. Vertical bar means typhoon periods.

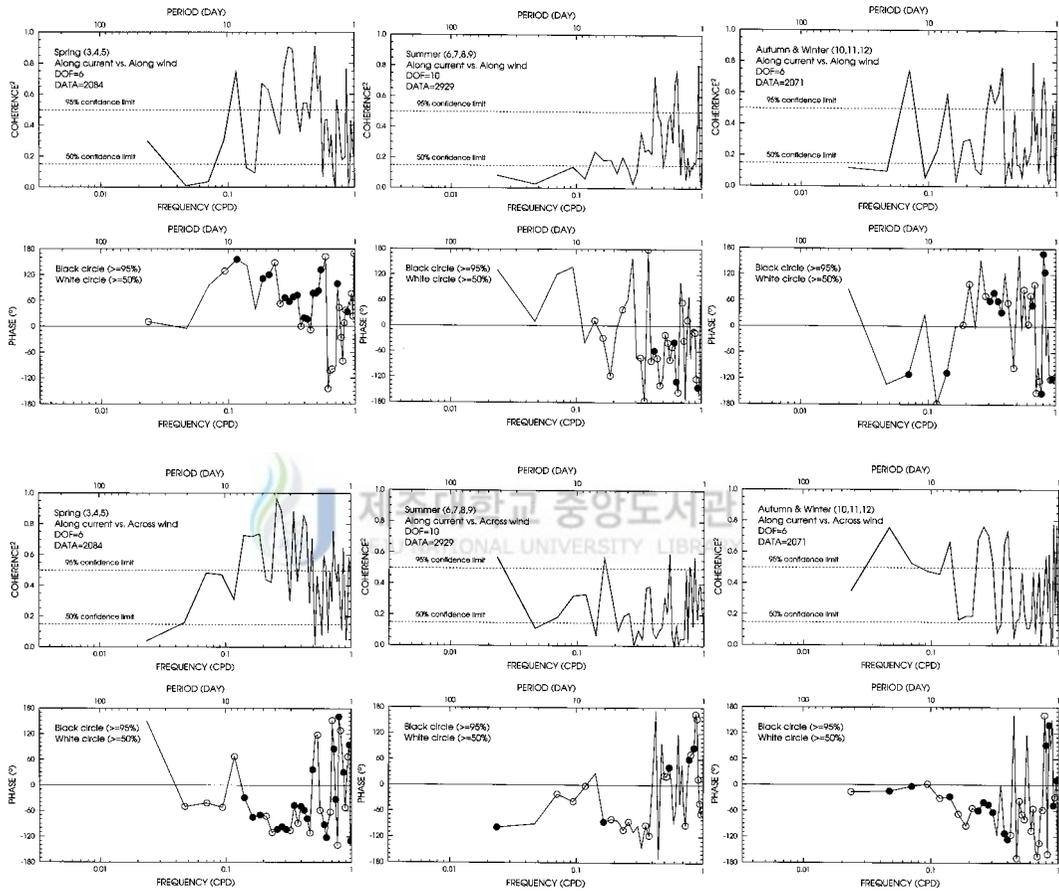


Fig.21. Seasonally cross spectrums of along strait current vs. wind.

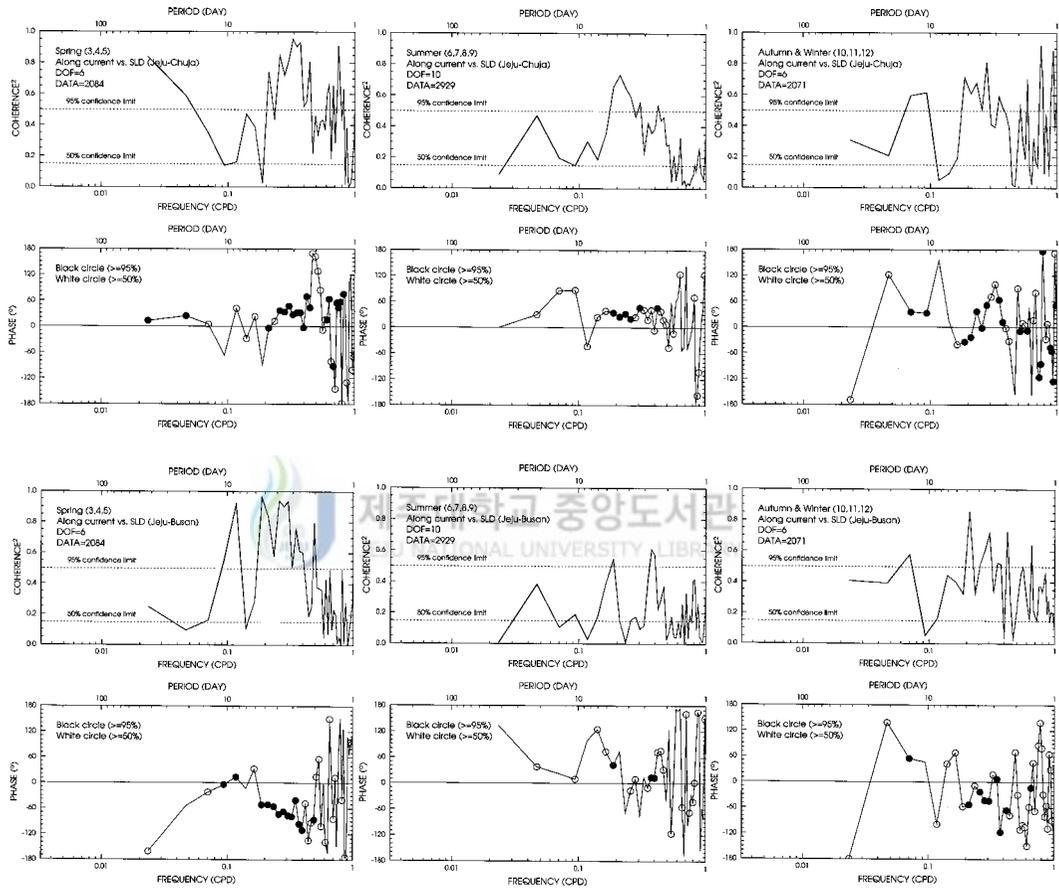


Fig.22. Seasonally cross spectra of along strait current vs. SLD.

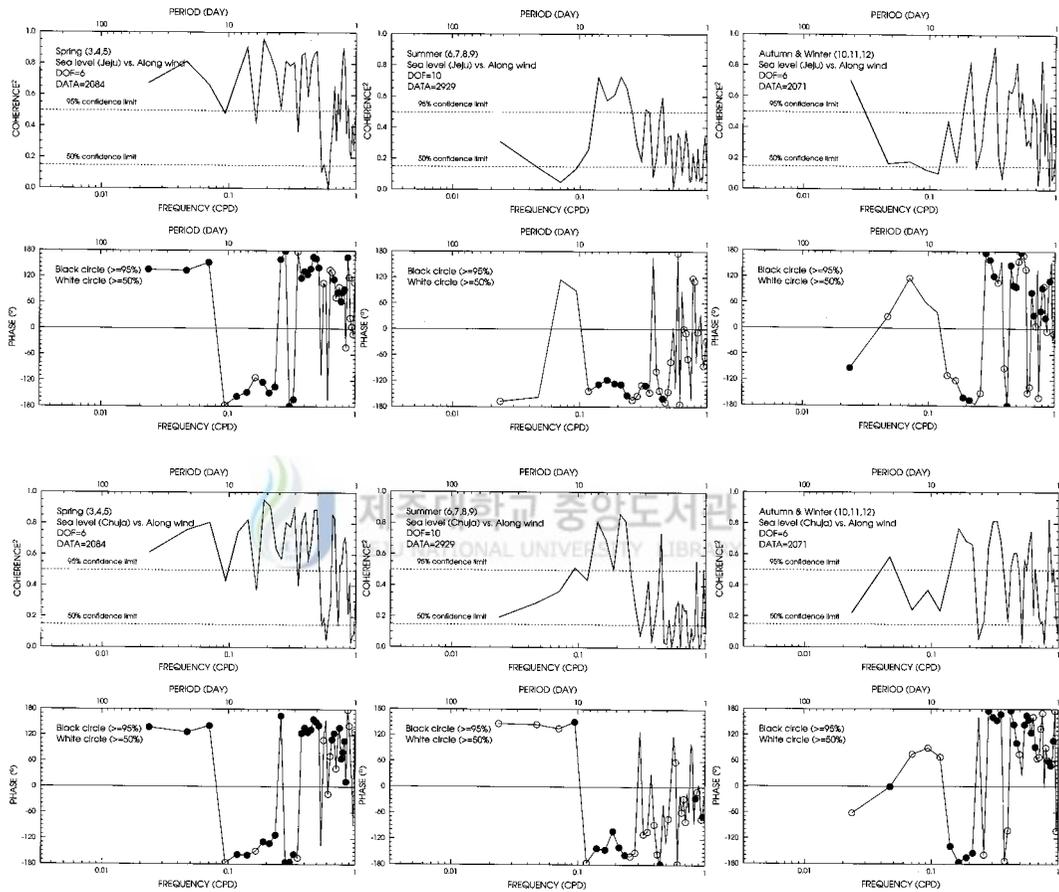


Fig.23. Seasonally cross spectra of sea level vs. along strait wind.

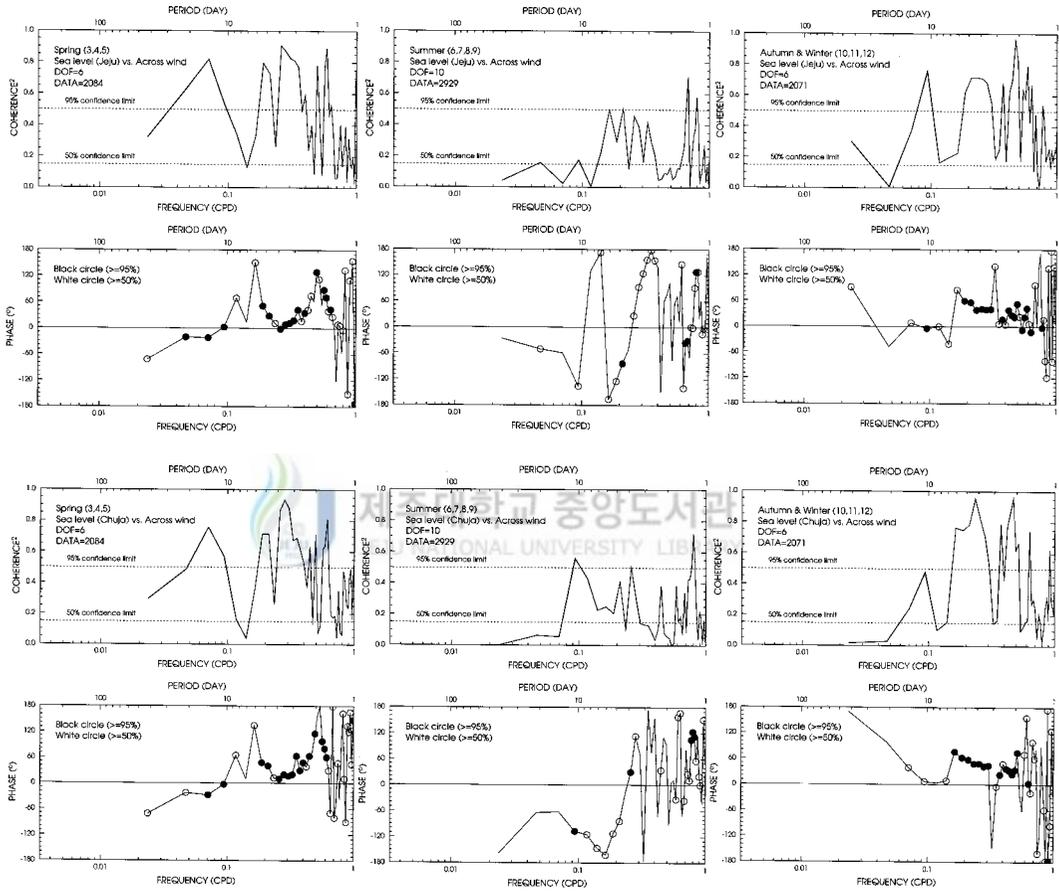


Fig.24. Seasonally cross spectra of sea level vs. across strait wind.

3. 해류의 경험적 직교함수(EOF)의 모드별 특성과 시계열 재구성

Cross spectrum 분석은 광대역 주파수 공간에서 해류와 외력간의 반응을 살펴볼 수 있는 장점이 있는 반면 수직적으로 해류가 어떻게 반응하는지는 자세히 살펴볼 수 없었다. Fig.25는 항류와 변동성분을 의미하는 1σ 표준편차타원(Perkins *et al.*, 1998)을 전체와 계절별로 나타낸 것이다. Fig.25를 보면 시간과 수심에 따라 표준편차타원의 주축방향과 진폭이 때때로 해협을 따라 고정된 방향을 갖는 항류보다 큰 변동을 보여주고 있다. 따라서 변동성분의 시간구조와 수직구조 특성을 동시에 살펴보는 것은 역학적인 관점에서 더 의미가 있다. EOF 분석은 가장 통계적인 방법에 입각하여 해양학적 자료의 변동성분을 주요 직교모드별로 시·공간적으로 동시에 제시할 수 있는 대표적인 방법중의 하나이다. 각 고유벡터가 갖는 물리적인 의미를 정확히 규명할 수는 없어도 단지 몇 개의 고유함수만으로 관측치를 재현할 수 있다는 것은 경험적 직교함수의 큰 장점이다. 따라서 저주파 변동성분의 경험적 직교함수의 모드별 특성을 wavelet 분석과 함께 살펴보았다. 한편 저층에서 간헐적으로 나타났던 남서향의 반류가 과연 역학적으로 어떻게 재현이 되는지에 초점을 맞추어 시계열을 재구성하면서 살펴보았다. 벡터량 형태로 분석하기 위하여 총 28개 수심에 대하여 각 수심마다 저주파 필터되고 평균류가 제거된 변동성분에 대한 1시간 간격의 모든 자료에 대하여 U성분과 V성분을 동시에 프로그램에 입력하여 제 I 장 2절의 계산순서에 의해 EOF의 해를 구하고 시계열을 재구성하였다. Table.4와 Fig.26은 모두 총 분산의 90.5%까지 설명할 수 있는 주요 6개 모드에 대한 EOF분석 결과를 각각 나타내며 Fig.27은 모든 직교모드로 재구성된 시계열이다.

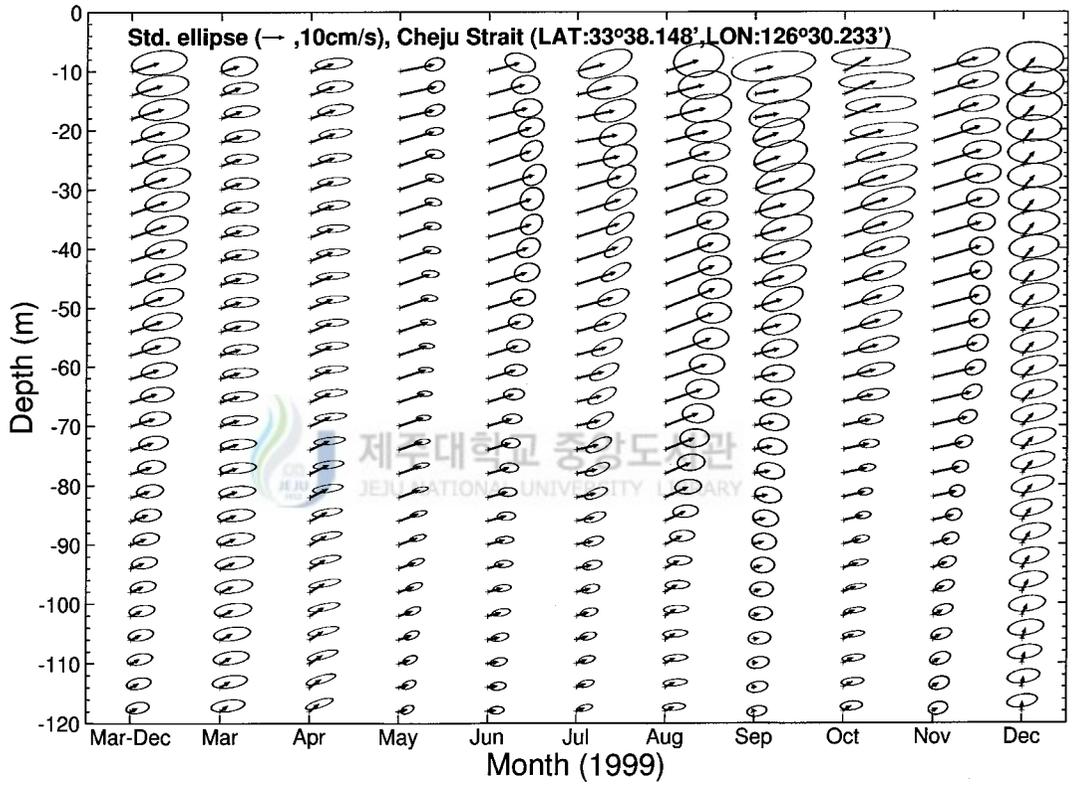


Fig.25. Temporal and vertical structure of monthly mean currents and standard deviation ellipses.

Table.4. Eigenvalues and percentages and cumulative percentages of the total variance explained by the lowest six modes of empirical orthogonal functions for the low frequency current.

Mode	Eigenvalue	Contribution (%)	Cumulative Sum (%)
1	24.3	43.4	43.4
2	12.6	22.4	65.8
3	6.2	11.0	76.8
4	3.2	5.7	82.5
5	2.8	5.0	87.5
6	1.7	3.0	90.5



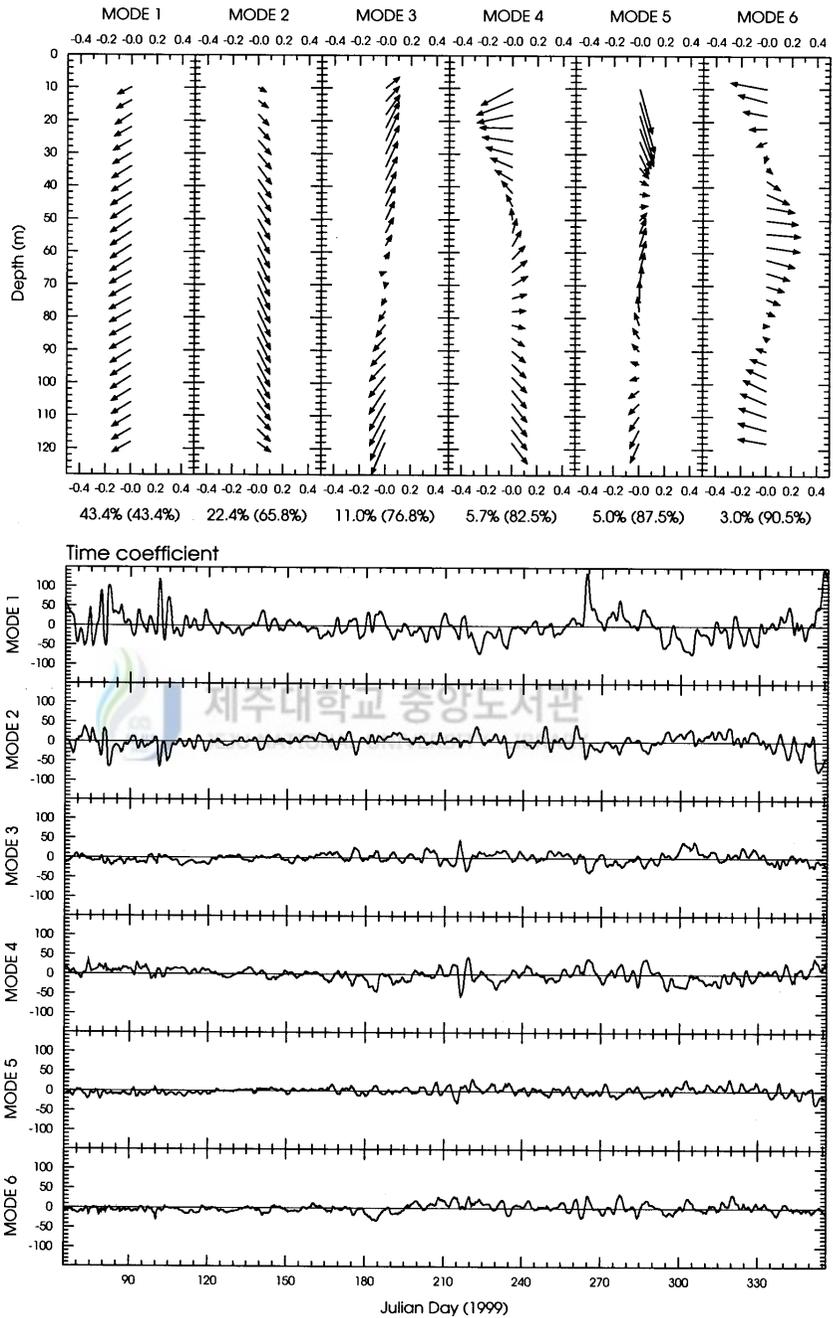


Fig.26. The first six empirical orthogonal functions of low frequency currents in the Cheju Strait.

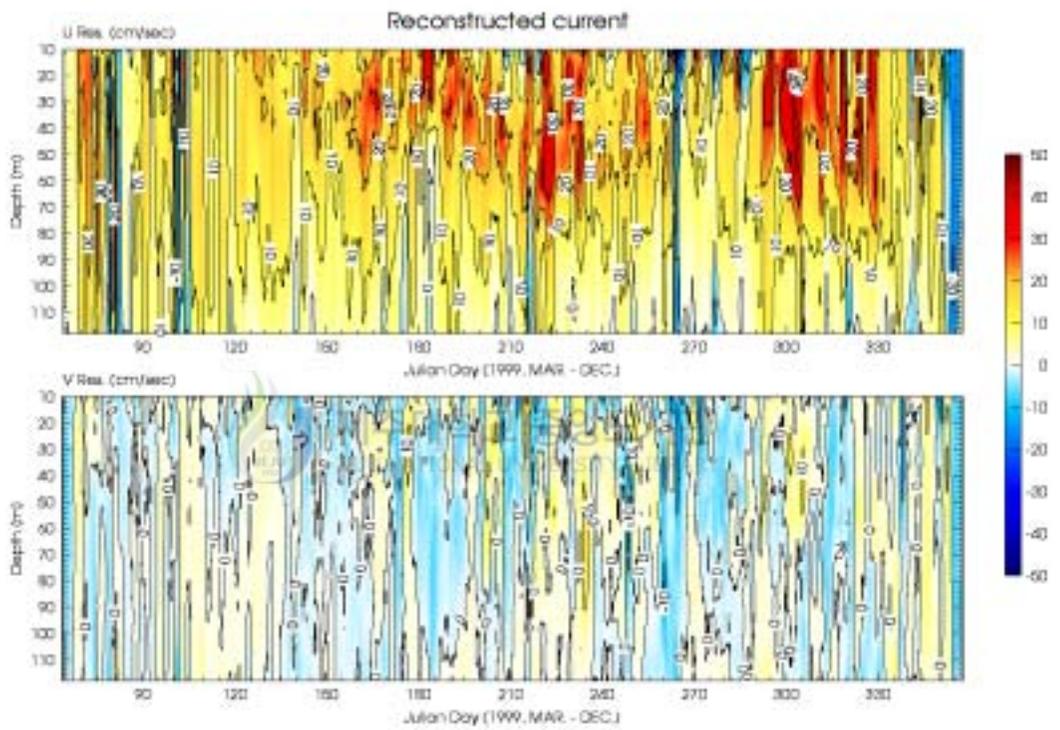


Fig.27. U, V currents reconstructed from all EOF modes.

(1) 제1, 2모드

Table.4와 Fig.26에서 우선 고유치는 각각 제1모드가 43.4%이고 제2모드가 22.4%로서 제1모드가 제2모드의 약 2배정도 크며 제2모드가 다소 수직적으로 다른 방향을 가리키지만 대부분 순압적으로 변동하며 이 두 모드의 합이 총분산의 65.8%를 차지해 순압적인 변동특성이 저주파 변동성분의 대부분의 시·공간 변동을 지배한다. 고유벡터의 특성방향은 제1모드와 제2모드가 약 90도로 서로 교차 방향을 나타내는데 이렇게 서로 다른 고유벡터가 나타난 물리적인 의미를 찾기 위해 먼저 고려해야 할 점은 관측 전기간 동안 제1, 2모드의 시간계수에서 각각 단주기 효과와 장주기 효과 모두가 포함되어 나타난다는 점이다. 제1모드의 고유벡터가 서남서 방향을 가리키는 것은 Fig.27의 재구성된 시계열과 비교해 볼 때 초대형 태풍 Bart의 통과에 의하여 비정상적인 단주기의 강력한 서향류가 나타났던 260~270일에 시간계수가 양수로 나타나는 것과 매우 잘 일치한다. 서향류를 의미하는 양수의 시간계수는 시간축 상에서 큰 진폭을 보이며 주로 해수가 균질한 봄, 초겨울 특성으로 나타나며 이뿐만 아니라 성층상태의 여름철에도 보여졌는데 이러한 단주기의 비정상적인 순압적 반응은 우리나라 주변이 편서풍대에 속하기 때문에 극심한 기상변동에 따른 국지바람과 깊게 관련되는 것으로 보인다. 특히 관측기간 동안 해협을 따르는 바람 성분에서 동풍계열이 탁월한 것은 이러한 단주기 서향류의 발달과 잘 일치한다. 그러나 저주파 해류가 강했던 시기인 180~260일(7월~9중순), 280~330일(10월말~12월초)에서 계절변화 형태의 시간계수가 음수를 나타내므로 제1모드의 특성방향을 설명할 수 없는 부분이며 실제 해류벡터는 동북동쪽을 향해야 한다. 한편 제2모드의 고유벡터는 남동쪽 방향을 가리키며 Fig.27의 재구성된 U성분과 비교해 볼 때 주로 저주파 해류가 강했던 여름, 가을철과 일치하는 기간에서 시간계수가 양수를 나타내었다. 그러므로 여름, 가을철의 특성이 된다. 시간계수와 고유벡터의 곱에 의해 제1모드는 최대 30cm/s 정도, 제2모드는 최대 10cm/s의 진폭변동을 보인다. Fig.28은 시간계

수의 주파수 변동특성을 보기 위한 wavelet power spectrum으로서 90% 신뢰도로 볼 때 제1모드와 제2모드 모두에서 2~10일의 단주기에서 유의미하게 나타났으나 매우 비정상적인 형태를 보인다. 놀랍게도 이러한 단주기 순압변동은 봄철 대륙성 고기압의 확장과 여름철 장마전선의 정체, 태풍의 내습 기간 등과 잘 일치하여(KMA, 1999) 극심한 기상변동에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. 특히 제1모드의 255~260일 근처에서는 주기가 15~4일로 감소하면서 변하는 장주기가 초대형 태풍 Bart의 통과 후에 생성되어 60일간 지속되었음 볼 수 있다. 한편 약 20~30일, 60일 주기의 비교적 정상상태의 장주기변동이 뚜렷이 존재하며 제2모드에서는 더욱 증폭되어 나타난다. 그러므로 제2모드의 특성방향은 단주기 기상변동 효과보다 장주기 해양순환 효과가 더 반영되어 나타난 것 같다. 그러나 이러한 장주기 변동들은 신뢰도가 떨어지는 반면 global wavelet에서 그 에너지는 단주기 기상변동 보다 다소 크다. 따라서 고유벡터 방향이 뚜렷이 다른 두 개의 순압변동모드에는 관측기간 동안 단주기 형태의 비정상적인 기상변동의 효과와 계절변화를 포함한 장주기 해수순환의 효과에 의한 순압변동성분이 함께 존재한다. 해협을 따라서 변동하는 제1모드는 해협의 지형적 분포가 해수유동에 하나의 큰 경계조건으로 작용하는 것 같으며 관측기간 동안 동풍계열이 탁월한 국지바람 성분에 의한 단주기 변동성분이 장주기 해수순환 효과에 의한 변동성분보다 그 시간적 변화가 컸기 때문에 서남서의 특성방향이 나타난 것으로 이해할 수 있다. 그러나 해협을 가로질러 변동하는 제2모드는 봄과 겨울철에 탁월한 북서계절풍과 제1모드보다 상대적으로 강화된 장주기 해수순환 효과가 합하여 제2모드의 특성방향으로 나타난 것 같다. 특히 제2모드의 장주기의 상대적 강화는 해류의 주축이 계절에 따라 해협을 가로지는 방향으로 변하기 때문인 것으로 사료된다. 기존에 제주해협에서 관측된 해류는 그 핵이 제주해협 가장 깊은 골에 위치하며 계절에 따라 그 위치가 변한다는 내용(Nam *et al.*, 1999; Chang *et al.*, 2000)과 일치하는 부분이다. 한편 Fig.29는 순압성분을 나타내는 제1, 2모드를

평균값과 더하여 시계열을 재구성한 것으로서 대부분 비정상적인 서향류 및
 간헐적인 저층반류와 계절특성인 여름과 가을철의 불연속적인 해류의 강화가
 잘 재현되었다. 이와 동시에 저주파 해류가 상대적으로 약했던 시기에 초대형
 태풍 Bart의 통과 후 약 10일 주기의 barotropic wave가 항류와 합쳐져 시간
 이 지나면서 저층에서 남서류의 생성과 10일주기의 변동을 잘 볼 수 있다.
 Fig.30은 바닥수온과 장주기파에 의해 저층에서 서향류가 나타났던 312일에
 관측된 제주해협 단면 해류구조이다(NORI, 1999). 흥미롭게도 전 단면의 저층
 에서 남서류의 저층반류가 나타나며 이시기에 바닥수온은 급강하하였다. 따라
 서 이러한 현상들을 설명하기 위해서는 초대형 태풍 Bart가 생성하는 비정상
 적인 장주기파의 효과를 고려해야만 한다. 한편 바닥수온은 195일(7월 14일)에
 관측기간 동안 최저(12.1°C)를 기록하는데 Cho *et al.*(1994)은 제주해협에서
 14°C이하의 해수가 황해저층냉수의 유입에 의한 것이라 밝히고 있다. Fig.28
 과 Fig.26에서 황해-제주도 방향의 순압변동을 의미하는 제2모드만을 차례로
 살펴보면 최저수온을 기록한 195일에 20~30일의 장주기가 2~10일의 중관기
 상변동이 약화된 후 파엽에너지가 매우 강하게 나타나고 고유벡터와 시간계수
 의 곱에 의한 실제 해류가 4~5cm/s로 남동쪽의 변동을 나타낸다. 한편 바람
 은 195일 직전에 약 7m/s의 강한 남동풍이 약 5일간 불었다. 따라서 12.1°C의
 저온수는 황해에서 기원함을 보이며 역풍류가 적용된다. 이상으로부터 제1, 2
 모드는 제주해협내 해수가 국지 바람변화에 의해 매우 비정상적으로 바닥까지
 심하게 교란되고 있었으며 계절변화 형태의 여름과 가을 사이에서 급격한 해
 류의 불연속 현상은 장주기 해수순환 효과가 국지 해류관측점에서 계절에 따
 라 불연속적인 순압변동성분을 유발할 수 있다고 생각된다.

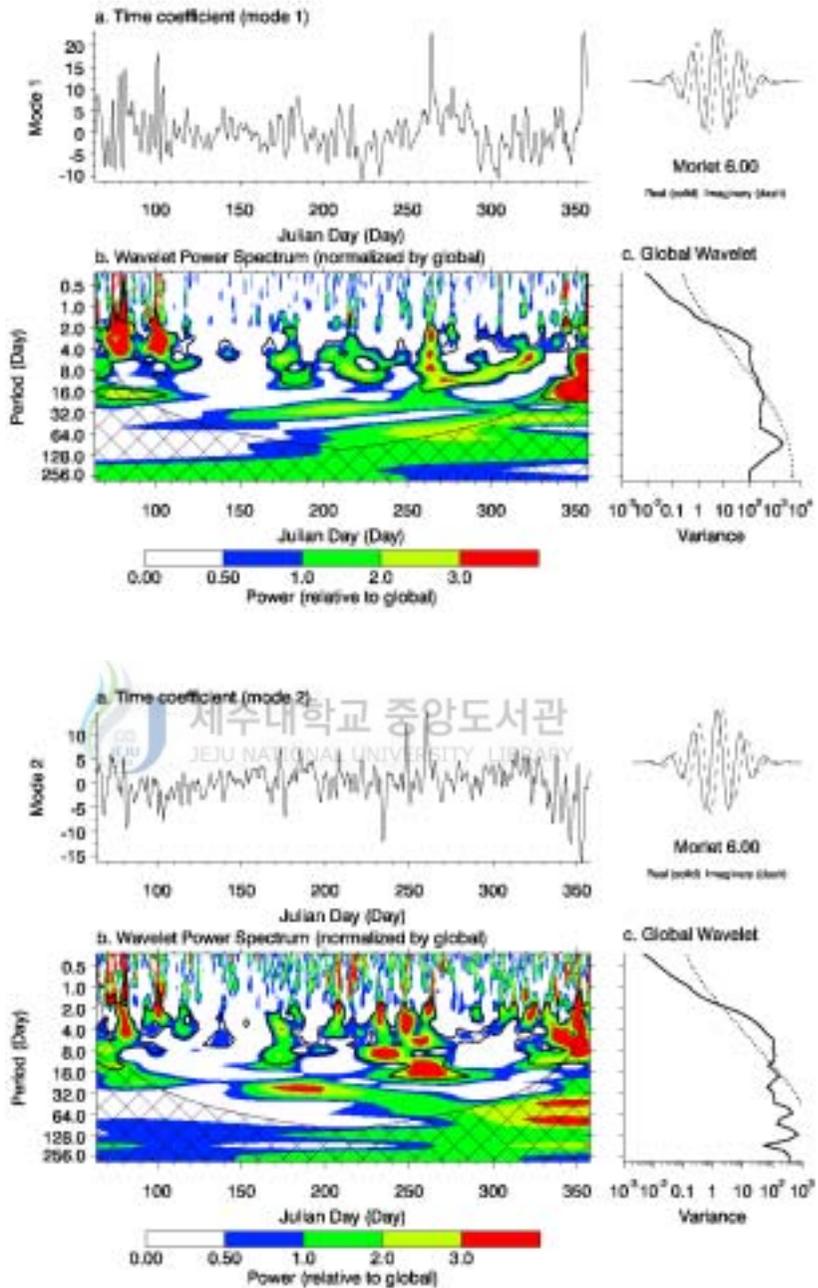


Fig.28. Wavelet analysis of the time coefficient for 1st (upper panel) and 2nd (lower panel) EOF mode. Black contour is 10% significance level.

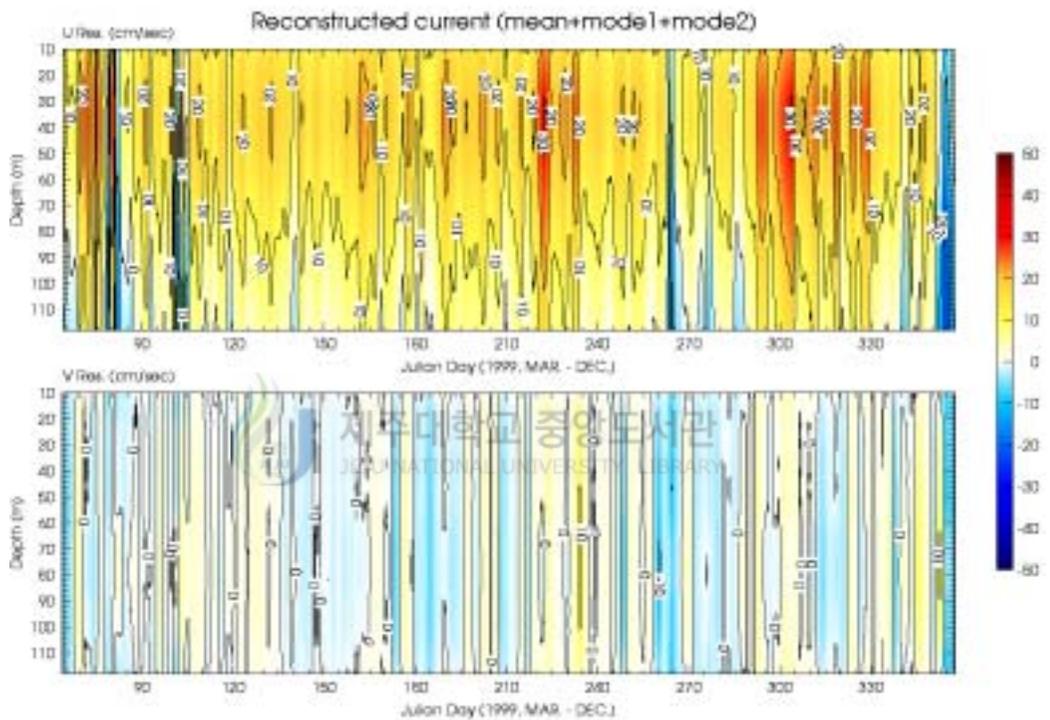


Fig.29. U, V currents reconstructed from mean value, 1st and 2nd EOF modes.

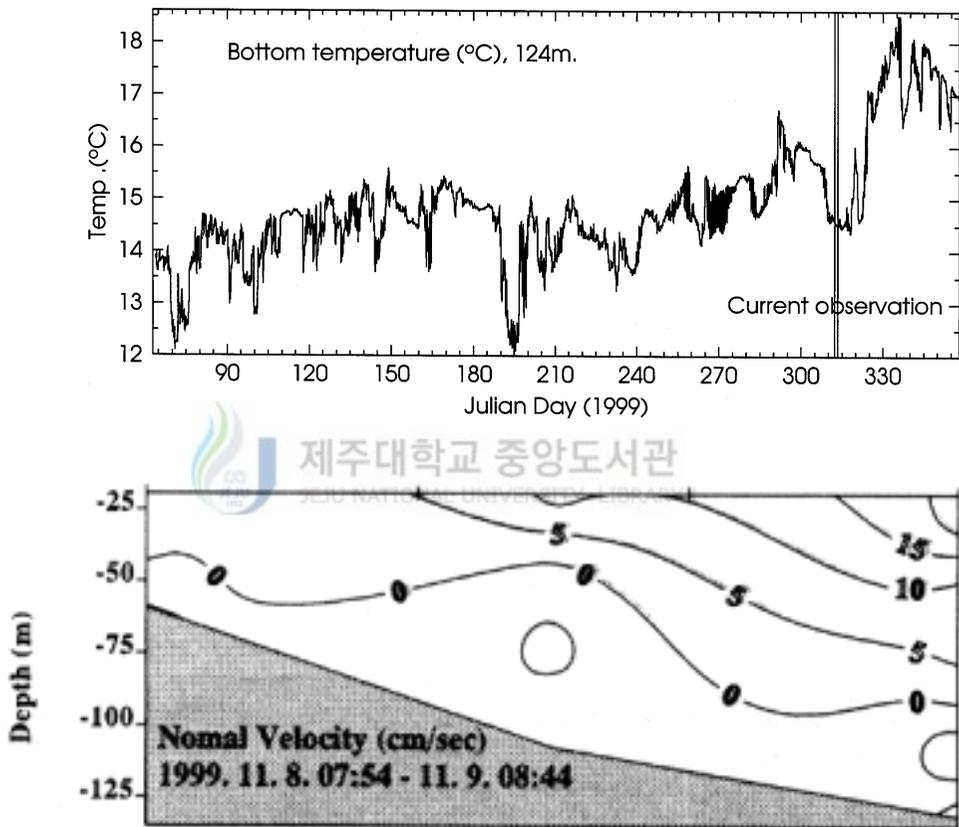


Fig.30. Bottom temperature obtained from bottom mooring ADCP (upper panel) and along strait normal velocity (lower panel) obtained by NORI in the Cheju Strait.

(2) 제3모드 (제1 경압변동 모드)

Table.4와 Fig.26에서 제3모드는 고유치가 총분산의 11%를 차지하며 순압변동 성분만큼 전체 변동에 영향을 줄 정도로 지배적인 변동은 아니다. 고유벡터는 제1모드에서 큰 변위를 나타냈던 60~70m의 nordal point를 기준으로 표층과 저층으로 갈수록 커지면서 북동~남서의 정반대의 변위를 갖는 경압구조를 보여주며 특히 제1모드의 변동방향과 같다. 시간계수와 고유벡터의 곱은 최대 10cm/s 정도의 변동을 갖는 해류를 유발한다. 고유벡터의 시간변화 특성을 파악하기 위한 Fig.31의 시간계수의 wavelet power spectrum은 90% 신뢰도로 볼 때 유의미한 것이 순압변동 모드에서처럼 주로 2~10일 주기의 기상밴드에서 비정상적인 형태로 나타나며 여름철이 다소 주기가 길어졌다. 반면에 약 20~30일과 60일의 장주기 형태가 단주기에 비해 선형적으로 나타나며 에너지가 크다. 300일 주변에서는 기상변동 외에 20~25일의 장주기 변동이 유의미하게 나타났다. 전반적으로 순압변동 성분을 나타내는 제1모드의 wavelet power spectrum과 그 모양이 매우 유사한 구조를 보여주어 비정상적인 기상변동과 장주기변동 모두 제1모드와 그 위상변화가 같음을 의미하며 고유벡터의 방향이 제1모드처럼 주축방향을 나타내는 것과 잘 일치한다. 따라서 기상변동 성분과 해수순환 효과에 의한 장주기변동 성분을 갖는 주축방향 해류가 순압변동 성분과 상대적으로 약한 경압변동 성분을 동시에 유발하는 것으로 이해할 수 있다. 이것은 해양의 성층구조가 해류의 변동에 매우 큰 영향을 끼치며 동시에 바람의 외력이 매우 중요함을 시사한다.

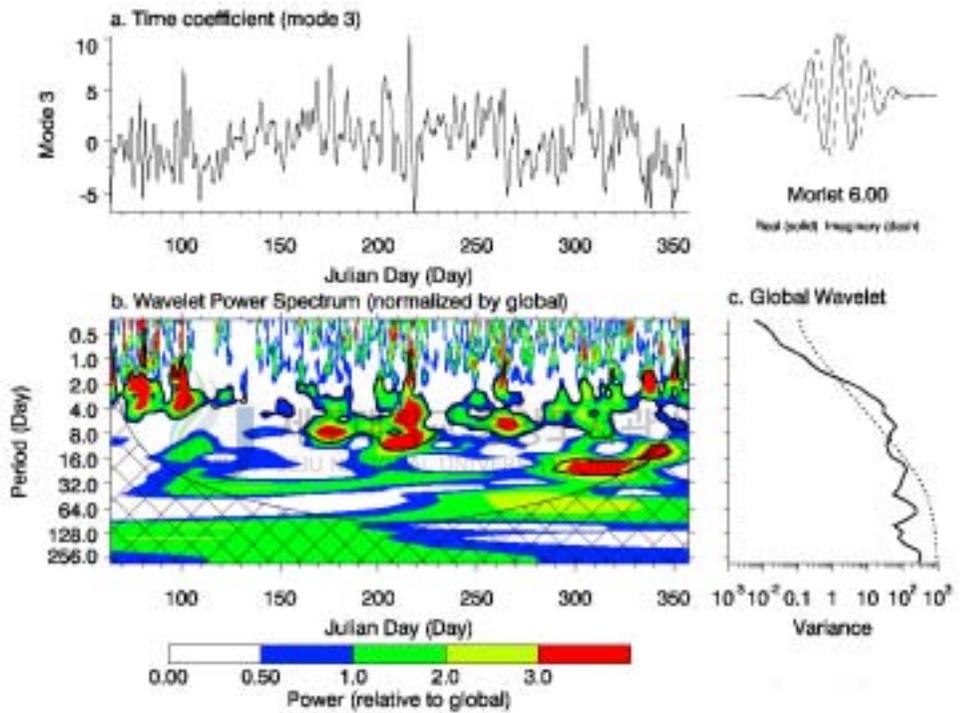


Fig.31. Wavelet analysis of the time coefficient for third EOF mode. Black contour is 10% significance level.

(3) 제4모드 (제2 경압변동 모드)

제4모드는 고유치가 전체 분산의 5.7%를 차지하며 고유벡터는 40m를 기준으로 상층에서 최대의 고유벡터 값을 나타내며 하층으로 시계방향으로 회전하며 방향이 반대가 되는 경압구조를 나타낸다. 그러나 전체 분산 중에 차지하는 비율은 작지만 고유벡터 값 자체가 표층에서 다른 모드의 값보다 다소 커서 국지적인 개념으로 보면 표층에서 비교적 큰 해류를 유발 할 수 있다는 점이다. 실제로 그러한 파동이 장주기 형태로 크게 나타나는 시간계수가 210~310일 사이에서 고유벡터와 시간계수를 곱한 해류는 약 25cm/s 정도로 항류보다도 크다. 고유벡터의 변동특성을 보기 위하여 Fig.32에서 시간계수의 wavelet power spectrum을 살펴보면 종관적인 기상변동과 해수순환 효과에 의한 월변동 만으로 여전히 설명할 수 없는 90% 신뢰도로 볼 때 유의미한 15~25일 주기의 비정상적인 baroclinic wave가 약 210일 경부터 생성되어 약 100일간 지속되었음을 볼 수 있다. 그러나 1999년은 우리나라에 다른 해 보다 월등히 많은 태풍이 올라와 많은 기상재해를 입혔으며(KMA, 1999) Fig.33에서 영향을 끼친 태풍들의 북상경로를 살펴보면 바로 이 시기에 제주도를 관통하여 북상하는 초대형 태풍 Olga를 확인 할 수 있다. 따라서 그 원인력은 분명히 태풍의 외력에 의한 것만은 틀림이 없으며 태풍이 완전히 지나간 후에도 장주기 baroclinic wave가 생성된 비선형적인 제반현상은 Coastal Trapped Wave(CTW)와 관련되는 것으로 보인다. CTW는 대륙사면에서 급격한 수심 변화로 생성되는 대륙붕과와 수심변화가 없이도 성층화에 의해 나타날 수 있는 내부 켈빈파를 포괄적으로 일컫는 장주기파이다. 그런데 제주해협은 대륙사면과는 거리가 멀고 여름철에 강한 성층과 열염전선 구조가 지배적이며(Kim *et al.*, 1991) 계산된 로쓰비 내부변형반경은 15.3km로서 관측지점이 연안에서 충분히 떨어져 있기 때문에 강력한 연직밀도 구조를 갖는 표층에 태풍과 같은 강한 바람에 의한 교란이 이러한 장주기 경압파를 생성한 것으로 보인다. Fig.34의 주축성분 해류에서 명확하게 볼 수 있듯이 250일에서 300일 사

이의 상층에서 20cm/s 이상의 주축방향 해류가 약 15~25일 주기로 마치 해류가 떠는 것처럼 매우 극심한 변화를 보여주는 것은 저주파 해류가 상대적으로 약해진 반면 장주기파가 이 기간 동안에 계속 살아남아 있기 때문이다. Fig.35에서 모드 1~6과 항류를 합하여 재구성한 해류는 저주파 해류가 상대적으로 약한 250~300일 사이에서 약 15~25일 주기의 해류가 잘 재현되어 위에서 설명한 내용을 뒷받침 해준다. 한편 Fig.26에서 제5, 6모드를 살펴보면 제4모드와 비슷한 경압구조를 보여주는데 제5, 6모드를 포함하여 재구성한 Fig.35에서 초대형 태풍 Bart가 통과한 265일 후에 제1, 2모드로 재구성된 Fig.29과는 달리 남서류의 저층반류가 더 명확해지는데 태풍 Olga와는 달리 태풍 Bart에 의한 장주기파는 순압모드 뿐만 아니라 여러 경압모드로 구성됨을 확인할 수 있다. 제5, 6모드는 고유벡터 값이 상대적으로 커서 최대 10cm/s 정도의 비정상적인 해류를 유발한다. 실제로 3차원 POM 모델에 의한 이 근처 해역에서 경계조건으로 여름철 태풍의 외력에 의한 위와 유사한 해류의 경압구조가 모사된 것은 위의 분석결과를 잘 뒷받침 해준다(Suk *et al.*, 1999).

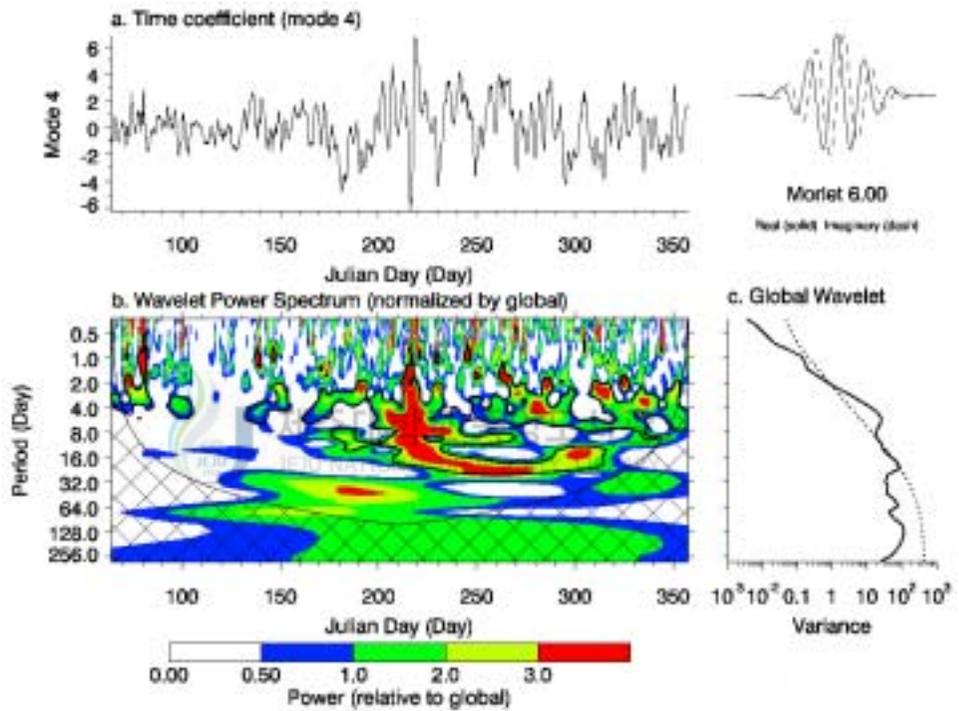


Fig.32. Wavelet analysis of the time coefficient for fourth EOF mode. Black contour is 10% significance level.

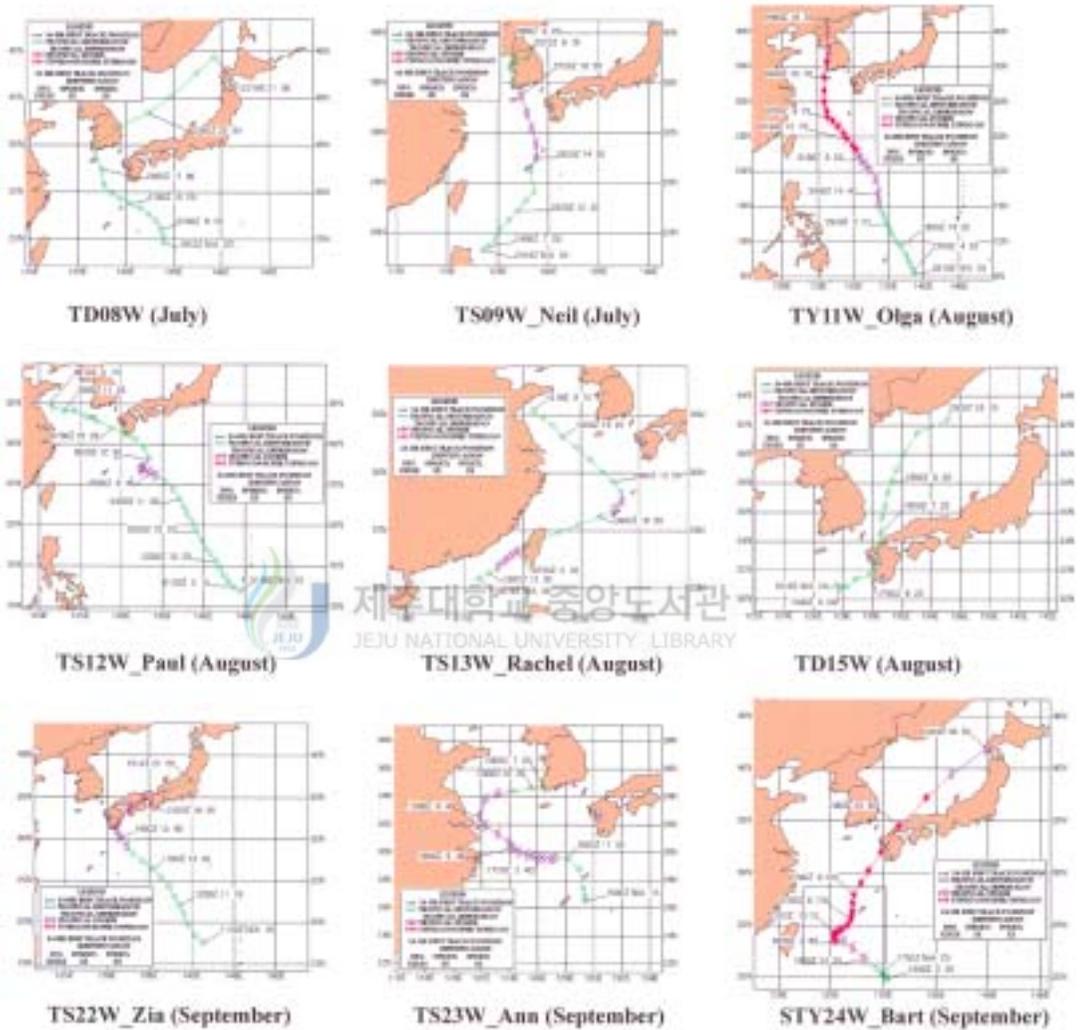


Fig.33. Tracks of typhoon obtained from U.S. Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center / Joint Typhoon Warning Center in 1999.

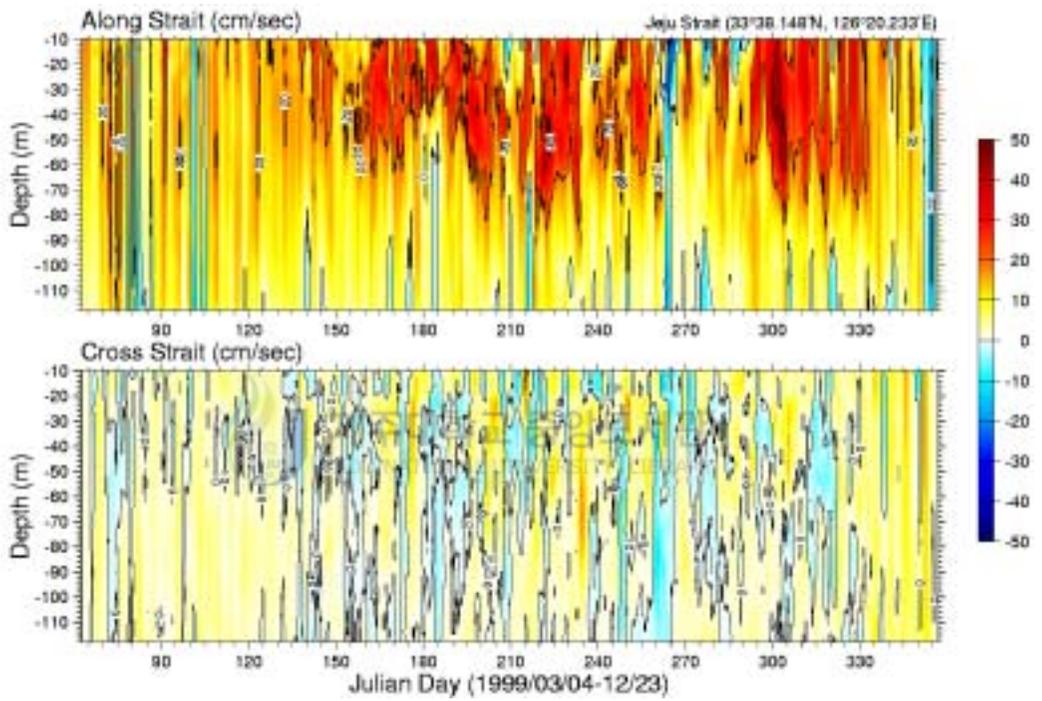


Fig.34. Along and across strait component of low frequency currents.

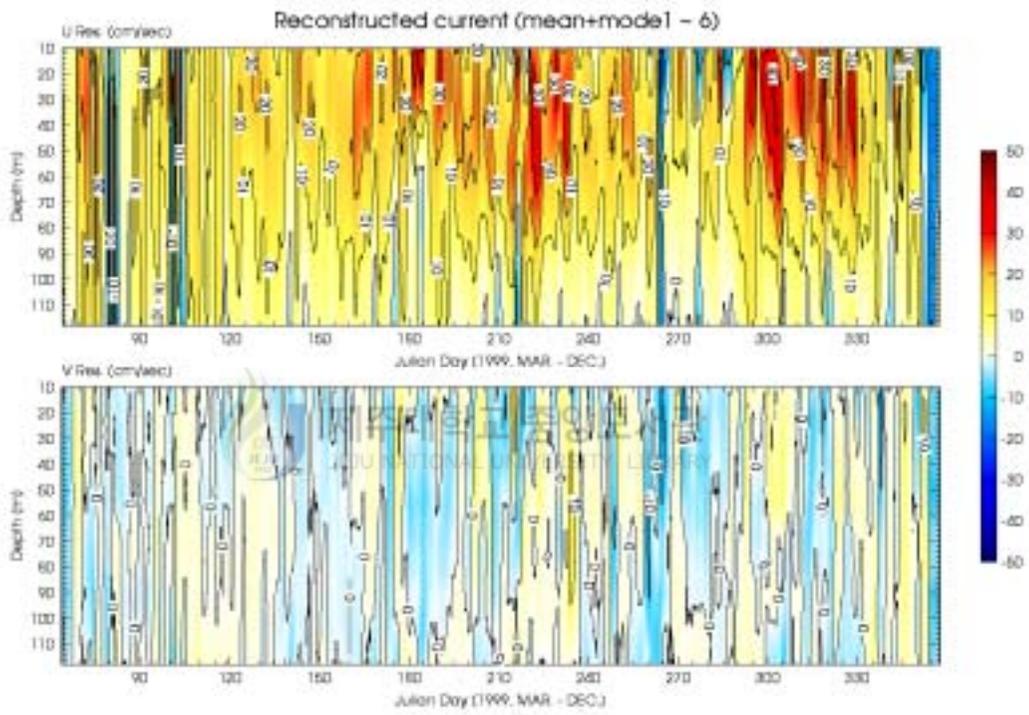


Fig.35. U, V component reconstructed from EOF mode 1~6.

4. 해류의 불연속적 계절신호의 원인

저주파 해류의 변동특성 중 마지막으로 살펴보게 될 중요한 현상은 Fig.34에서 잘 나타났듯이 관측기간 동안 계절변화 형태의 8월과 11월 사이의 해류의 불연속적인 강화일 것이다. cross spectrum은 장주기에서 역풍류와 관련된 분지규모 해수순환의 중요성을 보여주며 EOF 분석은 대부분의 변동을 지배하는 순압변동성분(65.8%) 중에 장주기 순압변동성분의 에너지가 단주기 에너지에 비해 높아 제1, 2 순압모드만으로도 여름과 가을철 사이의 해류의 불연속 계절신호가 재현됨을 확인하였다. 실제로 관측치의 평균류가 바닥에서 4cm/s로 나타났었는데 이것은 바닥마찰이 중요한 순압성분의 존재를 잘 뒷받침한다. 이것이 제주해협에서 경압성분만을 의미하는 바닥 기준의 간접적인 지형류 수송량이 직접측류에 의한 총 수송량의 50% 이하밖에 안되는 이유로서 제주해협의 해류 및 수송량을 이해(Rho *et al.*, 1997; KORDI, 1997; Nam *et al.*, 1999; Boo, 2000)하는데 어려움을 주었던 주요인이다. 이러한 순압적인 운동은 표면경사 및 속도와 연관된 일종의 파(Wave) 개념이 될 수 있다(Pond and Pickard, 1983). Pang(1987)은 Coastal trapped wave 이론을 황해에 적용하여 계절변화 현상인 역풍류를 재현하였으며 그 Wave 모델은 순압적인 경우 제1모드가 대부분의 속도장을 결정한다고 하였다. 따라서 단주기 순압변동성분을 제외한다면 관측해류의 계절 불연속 현상은 첫째로 황·동중국해에서 해수면경사의 계절변화를 생각해 볼 수 있다. 한편 관측된 평균류의 shear 구조는 일반적으로 전선 해역에 나타나는 해류특성이다(Aken *et al.*, 1987). 특히 해양전선 구조는 수산학적으로 매우 중요한 현상이어서 일찍이 한국 남해와 제주도 주변에서 해양전선의 구조와 고등어 어획량과의 상관관계를 제시하여 전선의 변동특성에 주목하였다(Gong, 1971). 조밀한 정점의 수온, 염분 자료를 이용하여 Lee(1983)와 Lee *et al.*(1984)은 11월에 제주해협에서 남해로 이어지

는 다른 해역에 비해 매우 강한 표층 전선을 보고하였으며 Kim *et al.*(1991)은 여름철에 제주해협 중층이하에서 쿠로시오 기원의 고온고염수와 황해의 저층냉수 사이에 강력한 저층 열염전선이 형성됨을 보고하였다. 따라서 불연속적 계절신호는 둘째로 전선체계의 계절변화와 관련을 보일 수 있다. Fig.36과 Fig.37은 각각 1999년에 NFRDA와 NORI에서 제주도를 포함한 한국 남해에서 관측된 8월과 11월의 표준심도별 수온, 염분 수평분포를 나타낸다. 먼저 11월에는 뚜렷한 열염전선이 제주해협 모든 수심에서 잘 나타나 관측된 강한 해류와 전선과의 관련성을 높여주지만 8월은 거친 격자와 복잡한 수괴분포 때문에 전선의 관련성을 잘 알 수 없다. 그러나 위에서 주지했듯이 여름철 수괴간 전선의 존재는 충분하다. Table.5는 해류가 가장 센 8월과 11월의 Bulk Richardson 수와 수심 평균된 국지 Richardson 수를 나타낸다. 국지 Ri. 수가 약 10~25 정도로 정적안정도가 매우 높아 shear 해류가 수직혼합을 할 수 없고 단지 내부파 생성에만 기여하는 환경이었다(Bowden, 1983). 그러나 해류 관측점에서의 밀도경사가 성층보다는 전선층에 의한 것이라면 해석은 달라진다. Fig.38은 수평방향의 밀도경사가 수직방향의 shear로 나타나는 다음 열풍 방정식(Benoit, 1994)에 의한 6월과 10월말에 관측해류와 계산된 지형류를 비

$$\frac{\partial u}{\partial z} = + \frac{g}{\rho f} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

교한 그림이다. 순압성분을 제외한 해류의 shear 구조가 매우 유사하다. 즉, 성층보다는 수평방향 전선체계와 관련된 밀도류임이 잘 나타난다. Fig.39는 지형류균형을 나타내는 8년간 장기 평균된 월별 제주-추자 해수면편차이다 (Chang *et al.*, 2000). 흥미롭게도 관측해류처럼 8월에 최대를 기록하고 감소하다가 11월에 최대에 이르는 불연속 peak가 뚜렷하여 8월과 11월에 형성되는 연안전선이 장기적으로 안정됐음을 의미하고 지형류균형이 잘 적용됨을 나타낸

다. 또한 지형류계산에 의한 대한해협 수송량도 이러한 8월에서 11월 사이의 불연속 경향을 볼 수 있다(Yi, 1966). 한편 Fig.40의 위쪽은 10m 주축해류와 일평균 제주-추자 해수면편차의 선형회귀분석이며 아래쪽은 수심적분된 해류와의 선형회귀분석 결과를 각각 나타내는데 10m 주축해류에 대해서는 선형상관계수(r)가 0.48로 비교적 높지만 지형류균형이 총분산의 23%($r^2=0.23$)만을 설명한다. 그런데 수심적분된 해류와는 r^2 값이 0.14로 지형류 변동성분 중에 순압지형류가 61%로 우세해 8월과 11월 사이의 불연속 계절신호가 순압 제1, 2모드로 재구성된 것을 잘 뒷받침하며 전선 jet류와 관계가 있음을 시사한다. 따라서 해류의 계절 불연속 원인은 첫번째 이유에서 밝혔듯이 황·동중국해의 해수면경사의 계절변화와 관련된 순압성분과 8월, 11월 제주해협에 형성되는 강한 전선과의 관계를 고려해야만 한다.

다음은 미국기상위성 NOAA 12, 14호의 AVHRR 센서를 이용한 1998, 7월~1999, 7월 동안의 표층수온(SST) 자료에서 Fig.41에 표시된 점의 표층수온을 이용한 해수면경사의 계절변화를 살펴보았다. Fig.42는 Fig.41의 해역 1, 2, 3에 대한 각점들의 표층수온 시계열인데 전반적으로 표층수온의 계절변화가 황해에서 가장 크고 동중국해, 쿠로시오 해역 순으로 나타난다. 쿠로시오 해역에서 계절변화가 가장 작다는 것은 수심이 낮은 황해와 동중국해의 표층수온 변화에서 기상의 영향이 중요하게 작용하는 것을 보여준다. Fig.43은 2월과 8월의 월평균 표층수온 분포이다. 연구지역 전체로 볼 때 표층수온은 남동에서 북서방향의 경사를 이루고 있으며 쿠로시오 유역 남단에서 황해북부 해역에 걸친 표층수온의 차이는 2월에는 약 10°C인데 비해 8월에는 약 2°C이다. 이러한 차이로 인한 표층수온 기울기의 계절변화를 보이기 위해 Fig.41에서 보인 A, B, C 선을 따라 2월과 8월의 표층수온을 그려보았다. Fig.44에 보이는 바와 같이 A, B, C 선에 나타난 수온경사는 여름철에 각각 0.97°C, 1.78°C, 2.69°C이고 겨울철에는 각각 6.93°C, 7.46°C, 10.32°C로서 여름철의 수온차이가 겨울철의 수온차이에 비해 0.22배 정도에 지나지 않음을 보여준다. 이것은 표

증수온으로 볼 때 황해 쪽으로 기울어져 있는 해수면경사는 여름보다 겨울에 훨씬 강해짐을 보여준다. C-line을 본다면 겨울철이 여름철에 비해 수온경사가 크기 때문에 지형류인 해류는 이 선을 가로질러 대한해협으로 흐르는 해류가 겨울에 더 강할 것으로 기대할 수 있다. 그러나 실제 대한해협의 유량은 겨울보다 여름에 증가하는 뚜렷한 계절변화를 보인다(Yi, 1966; Toba *et al.*, 1982; Mitta and Ogawa, 1984; Pang and Kim, 1990). 이와 같이 상반되어 보이는 현상은 수괴분포의 계절변화로 이해할 수 있는데 겨울철에는 대마난류수가 황해 쪽으로 확장하는 반면, 여름철에는 대마난류수의 분포범위가 동중국해 쪽으로 후퇴하고 있다(Pang and Kim, 1989; Pang and Hyun, 1998). 따라서 겨울철에 황해방면으로 강화된 압력경도력이 대한해협으로 향하는 유량을 증가시키는 것보다 황해로 향하는 유량을 더 증가시켜 대한해협으로 향하는 유량이 감소된다고 볼 수 있다. Fig.45는 황·동중국해에서 GDEM 기후학적 수온, 염분자료를 사용하여 UNESCO 추천식(Unesco, 1991)으로 황해는 바닥까지, 쿠로시오 해역은 200m까지 적분하여 계산한 역학적 고도를 나타내는데 여름철에는 황해의 해수면이 높아지면서 제주도 주변을 포함한 동중국해 대륙붕단으로 해수면고도가 퇴적되며 겨울에는 이와 정반대의 분포를 보여 위의 내용을 잘 뒷받침하며 동시에 제주해협에서는 여름에 해류가 강하고 겨울에는 해류가 약한 계절변화를 시사한다. 따라서 동중국해에서 황해방면 해수면경사의 계절변화는 계절에 따라 압력경도력의 방향으로 해수를 순압적으로 수송하게 되어 결국 제주도 주변에 연중 형성돼 있는 전선체계의 강도와 위치가 같이 따라서 계절변화 할 수 밖에 없기 때문이다. 그러므로 8월~11월 사이에 관측해류의 불연속적인 계절신호는 일정한 수평 공간폭을 갖는 전선체계가 수평적으로 계절변화 할 때 국지 해류관측점에서 계절에 따라 매우 불연속적인 해류를 유발하는 것으로 이해할 수 있다.

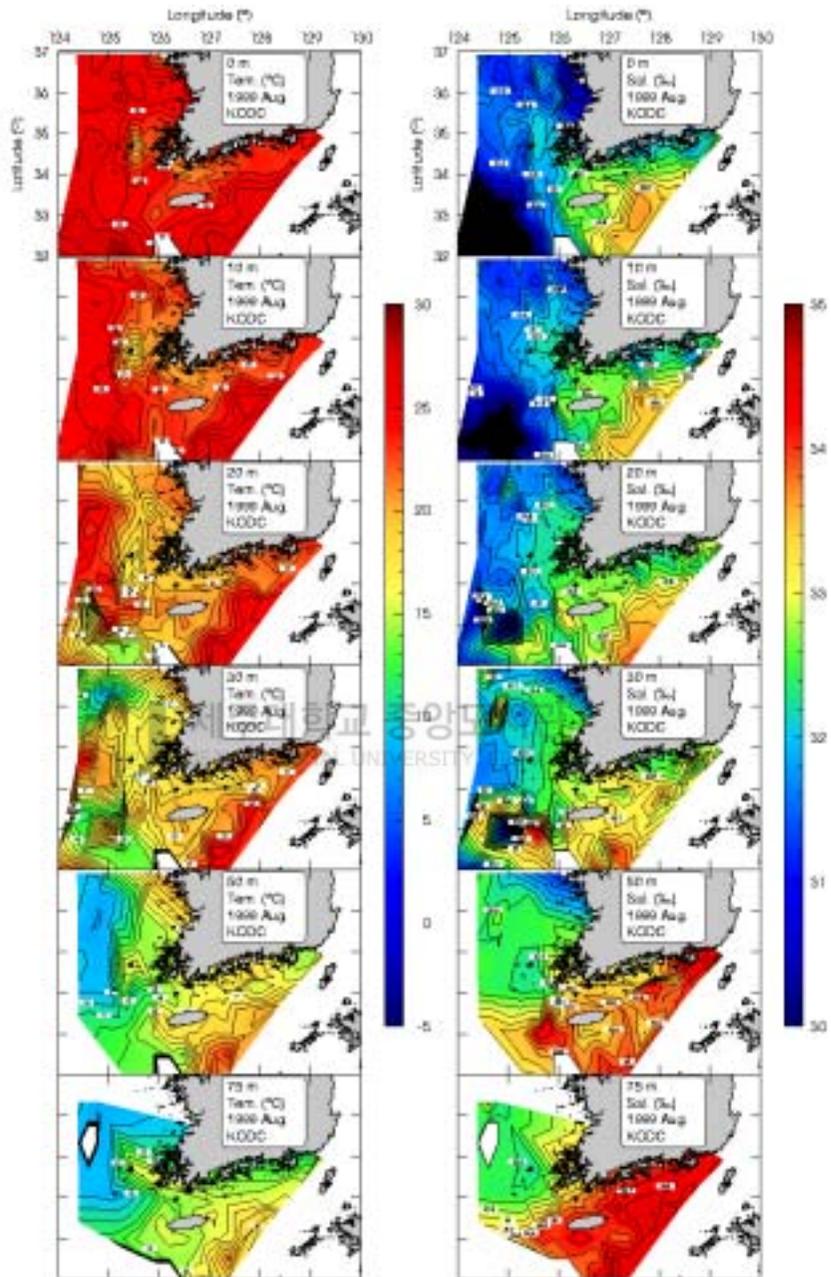


Fig.36. Horizontal temperature and salinity distributions from each standard depth obtained by NFRDA in August, 1999. Black area means very low salinity value.

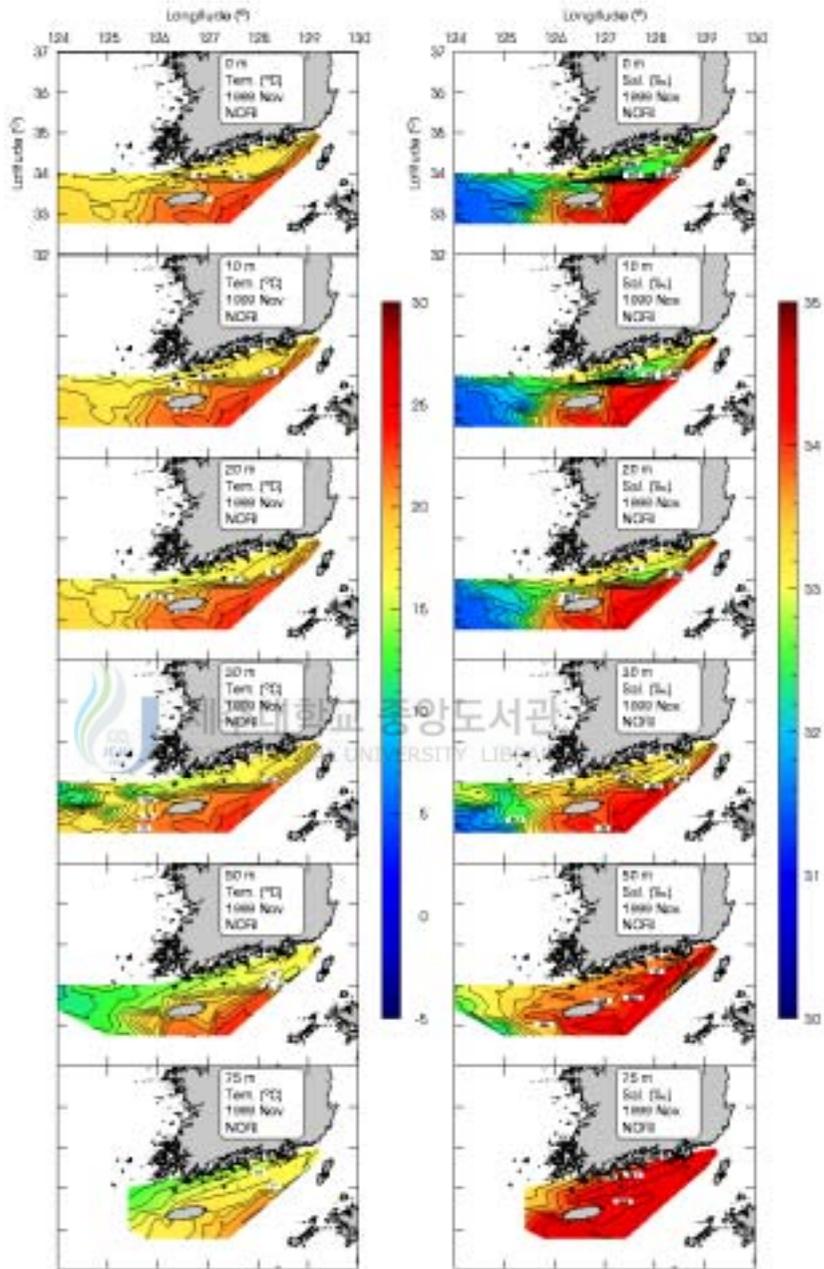


Fig.37. Horizontal temperature and salinity distributions from each standard depth obtained by NORI in November, 1999.

Table.5. Richardson numbers calculated by vertical density gradient and velocity shear in August and November, 1999.

Month	Density gradient	Mean density	Velocity shear	Depth	Gravity accel.	Bulk Ri. Number	Local Ri. Number
Aug.	5.05 kg/m ³	22.84 kg/m ³	0.30m/s	124.00m	9.80m/s ²	2990.29	24.12
Nov.	2.33 kg/m ³	24.40 kg/m ³	0.30m/s	124.00m	9.80m/s ²	1288.55	10.39

$$Ri_B = \frac{gH\Delta\rho}{\rho(\Delta U)^2} \text{ (Bowden, 1983)}$$


제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

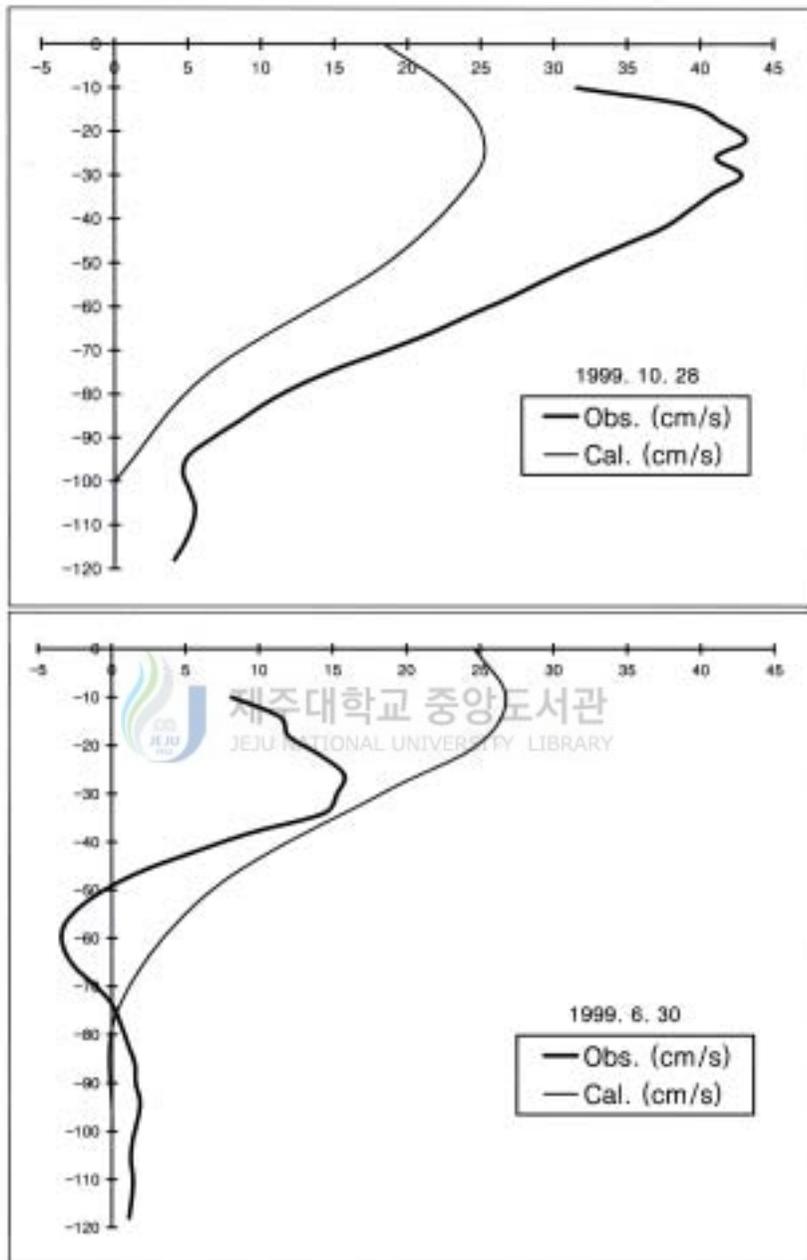


Fig.38. Observed and calculated velocity profiles referred to 100m depth using the hydrographic data obtained by NORI and NFRDA.

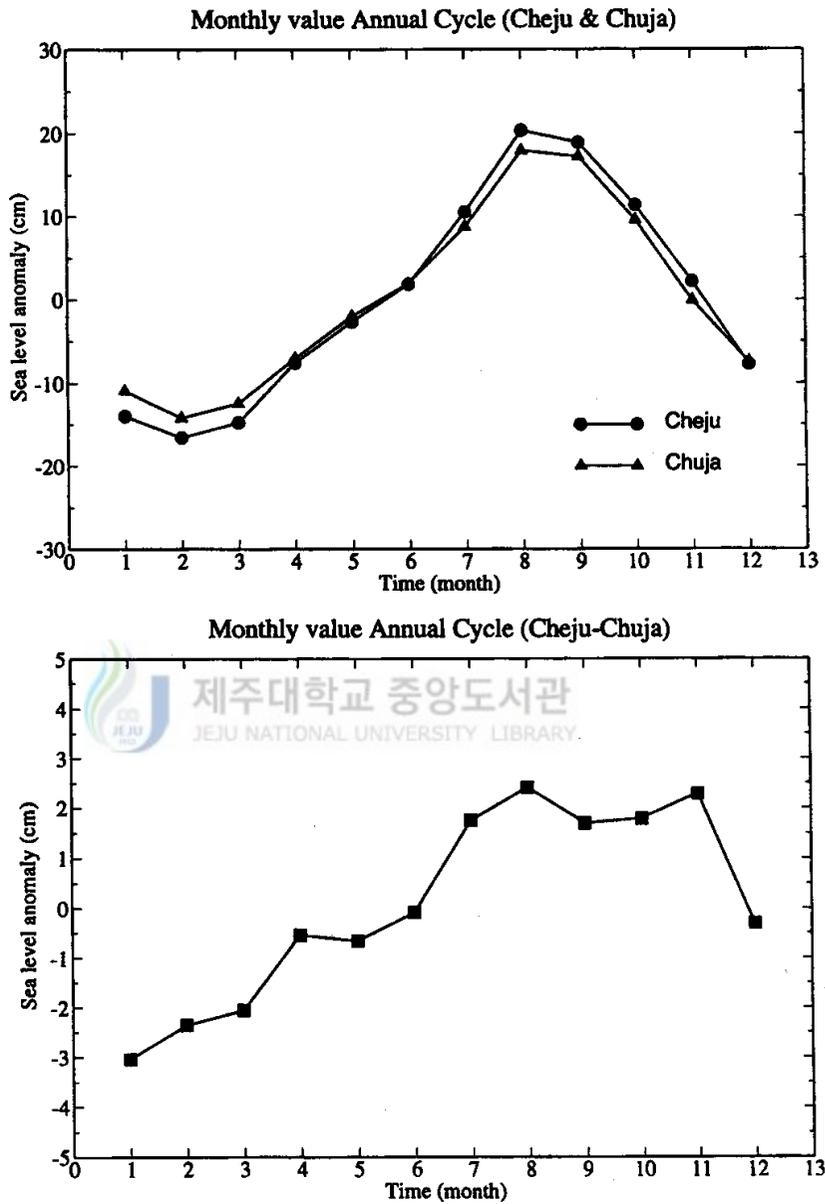


Fig.39. Monthly mean sea level at Cheju city and Chuja-Do (top panel), and sea level difference between Cheju city and Chuja-Do (bottom panel) based upon sea level data from permanent tide gauge stations during 1988-1995 (Chang *et al.*, 2000).

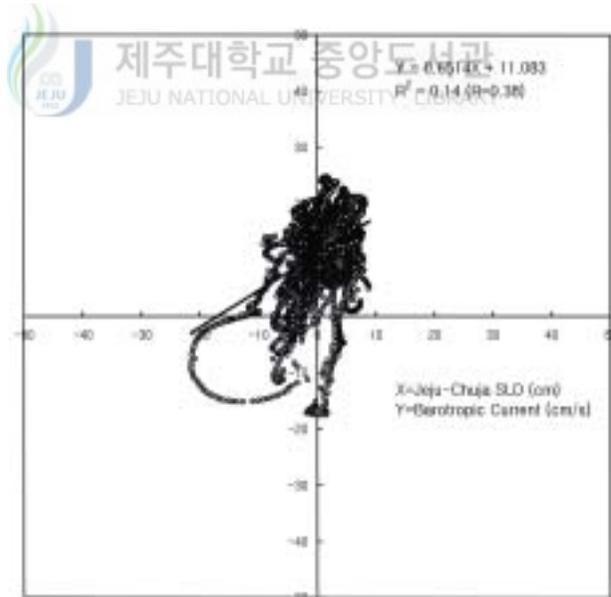
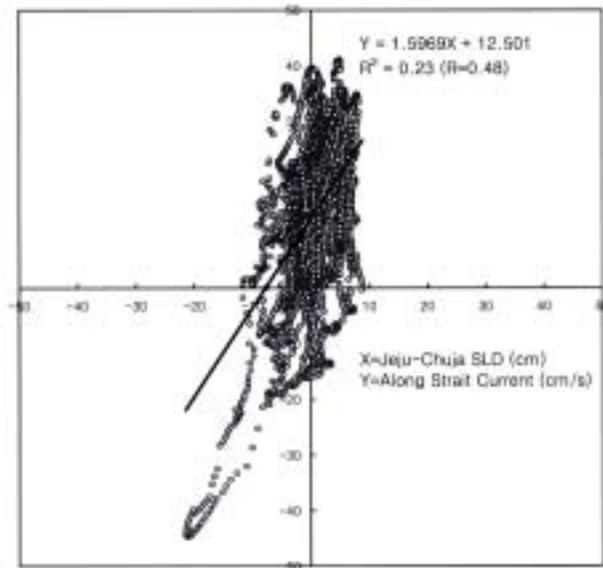


Fig.40. Linear regression analysis results of along strait current at 10m vs. Cheju-Chuja SLD (upper panel) and vertically averaged along strait current vs. Cheju-Chuja SLD (lower panel).

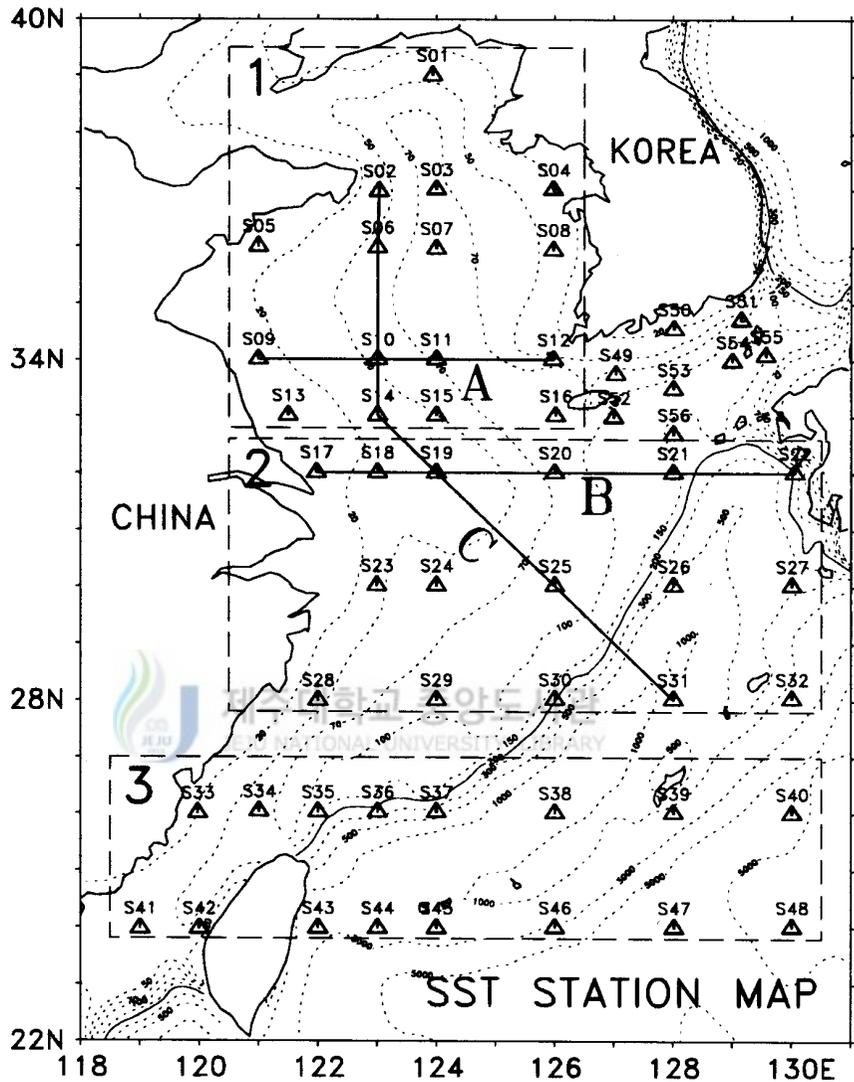


Fig.41. 56 stations selected to analyze SST data observed by Satellite NOAA 12 and 14 from July, 1998 to July, 1999 in the East China Sea and the Yellow Sea. The study area is divided into Areas 1, 2, and 3, each of which includes 16 stations, to see their time series in Fig.42. A, B, and C lines are also selected to see spatial SST gradients in Fig.44.

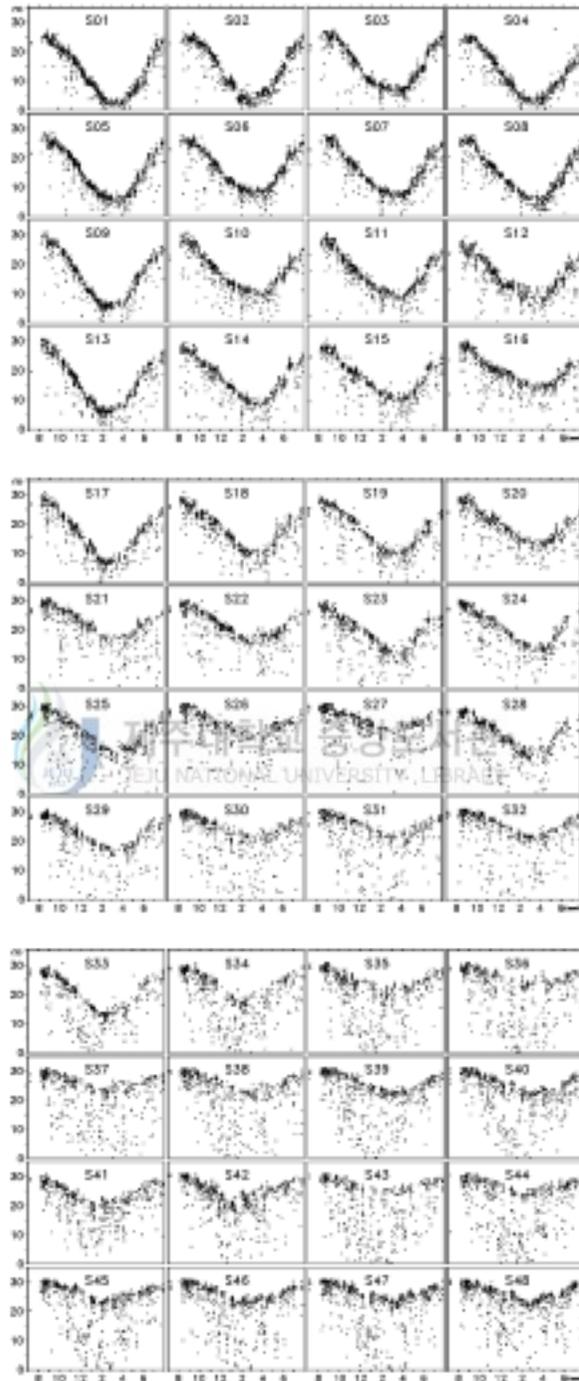


Fig.42. Time series of SST at (1), (2), and (3) areas shown in Fig.41.

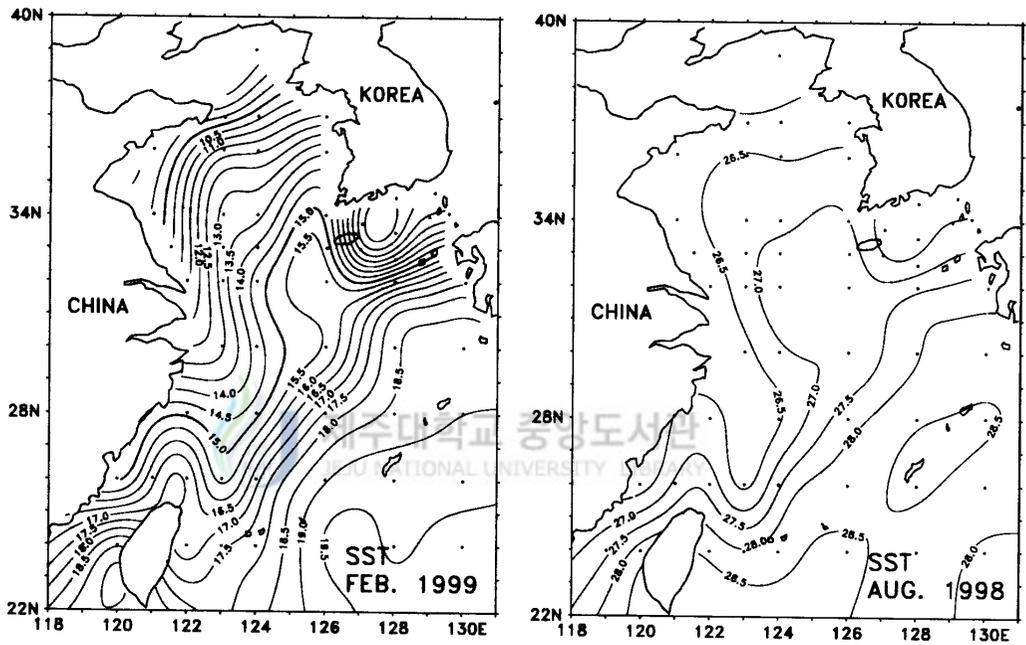


Fig.43. Horizontal distribution of the monthly mean SST ($^{\circ}$ C) in Feb., 1999 and Aug., 1998.

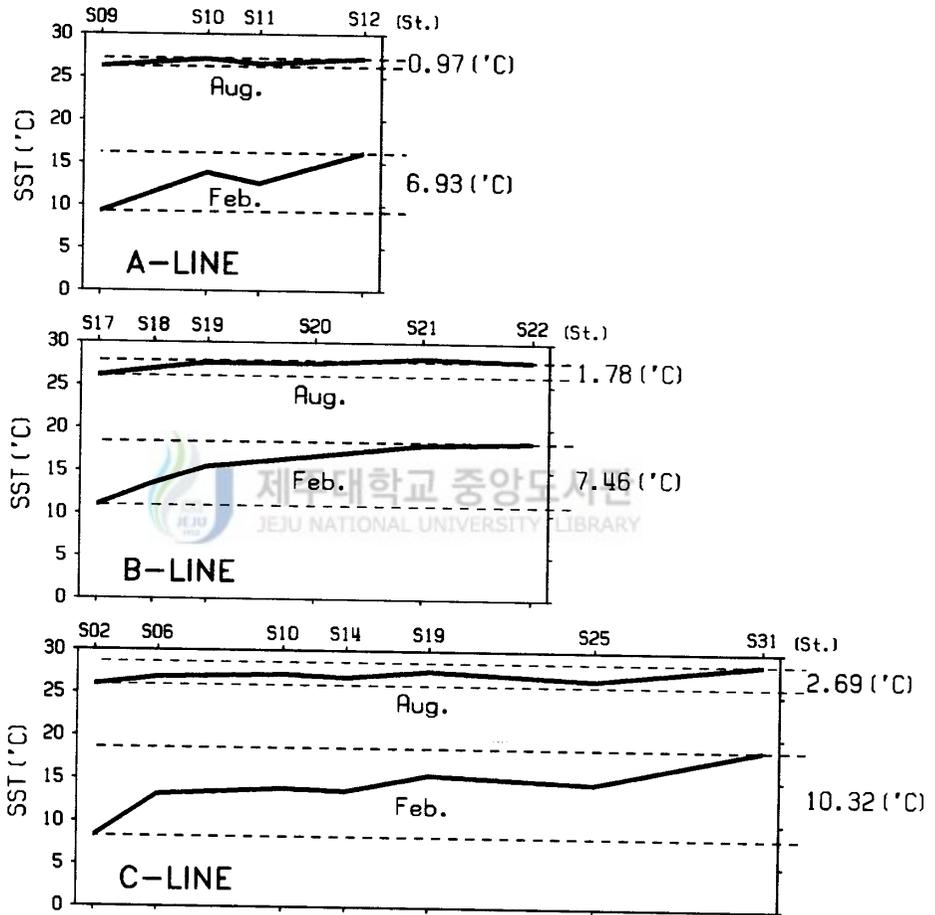


Fig.44. Spatial SST gradients along Lines A, B, and C shown in Fig.41 in Feb. and Aug..

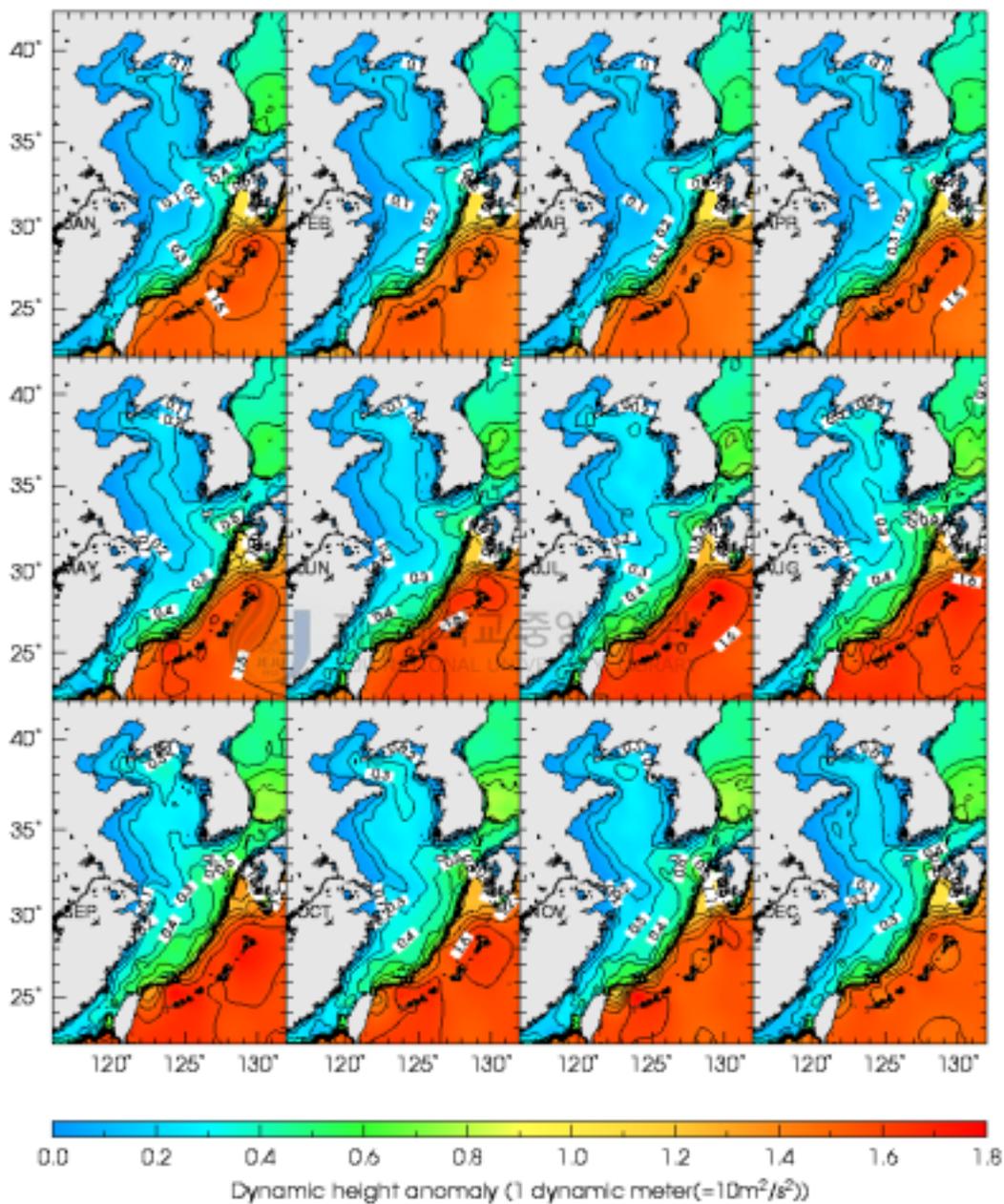


Fig.45. Dynamic height anomaly in the East China Sea and the Yellow Sea. Unit is in 1 dynamic meter ($=10\text{m}^2/\text{s}^2$).

Ⅲ. 고주파 해류의 시간구조와 수직구조의 변동특성

장기간 관측된 자료의 특성상 저주파 해류와 상호작용의 관점에서 고주파 해류의 변동특성을 살펴보는 것 또한 저주파 해류의 변동특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 따라서 이번 장에서는 그 역학적 원인이 알려져 있는 조류와 관성진동류에 대한 시간구조와 수직구조의 변동특성을 살펴보았다.

1. 조류의 변동특성

주지하였듯이 II장의 관측결과에서 63개 분조로 합성된 조류는 특히 여름철 해류가 강했던 중·상층에서 창조류보다 낙조류가 강한 조류의 비대칭 현상이 나타났었는데 이것은 해류와 마찰에 의한 영향이 있을 것으로 인지되어졌다. 우선 Table.6는 표층 10m에서 U성분의 조화분석 결과를 나타내며 Fig.46은 전 수심에 대한 합성된 주요 분조의 조류타원을 나타낸다. 조석 형태수가 표층에서 0.33으로서 반일주조(M2)가 우세한 혼합조에 속하지만 거의 반일주조류가 대부분이며 왕복직선운동에 가까워 조류가 해저지형에 강하게 영향을 받음을 시사한다. 따라서 M2의 U성분 반일주조류만을 분석하였다. Fig.47~48은 해류자료를 월별로 나누어서 조화분석한 수심별 항류(Z0)와 M2의 진폭과 그리니치 위상을 각각 나타낸다. 우선 Z0의 진폭이 저주파 해류의 변동특성처럼 여름철에 강하였다가 다시 11월에 이르러서 갑자기 강해지는 매우 불연속적인 특징을 잘 반영한다. 한편 M2조류의 진폭과 위상이 월별로 다양한 경압적인 수직구조를 보여주어 일반적으로 조류가 순압적인 특성을 갖는 것에 비해 다른 요인들에 큰 영향을 받고 있음을 시사한다. 특히 Table.6에서는 이러한 M2

조류의 계절변화를 나타내는 MA2, MB2 2차분조(Lee, 2000) 진폭의 합이 약 3.5cm/s가 되어 표층에서 변동폭 약 5cm/s를 갖는 Fig.48의 결과를 잘 뒷받침한다. 전기간에서 공통적인 특징은 바닥 에크만 경계층에서 조류의 진폭이 급격히 감소하며 그 위상은 빨라져 바닥마찰에 의한 수직구조 특성을 잘 보여준다(Mass and Haren, 1987). 그러나 바닥경계층 위쪽 수심에서도 진폭의 매우 큰 변화를 잘 보여주는데 특히 Z0의 진폭의 월변화와 그 위상이 매우 잘 일치한다. 즉, 저주파 해류가 불연속적으로 강했던 여름철과 가을철에서는 그 진폭이 크게 감소하고 경압구조가 커지며 겨울을 포함한 나머지 부분은 대부분 순압구조이며 상대적으로 진폭이 큰 조류의 계절변화를 잘 볼 수 있다. 따라서 경압구조의 원인은 지금까지 알려져 온 것처럼 단순히 여름철 강력한 성층 구조에만 있는 것(Souza and Simpson, 1996)이 아닌 것으로 보인다. Kang *et al.*(1995)은 대한해협에서 M2 조석의 진폭이 겨울철에 최대가 나타나는 이유를 여름철 대마난류와의 비선형 상호작용에 의한 M2 조석의 감소로 설명하였다. 한편 Tang and Lee는 대만 북동부에서 약 2개월간의 ADCP 자료를 사용하여 M2조류의 수직구조의 변동을 국지적 성층과 background 저주파 해류의 변동 때문이라고 제시하였다. 따라서 이러한 조류의 계절변화는 항류를 포함한 관측된 background 저주파 해류가 국지적으로 매우 크게 계절변화하기 때문에 해류와의 비선형 상호작용 때문일 가능성이 매우 높다. 그런데 Fig.49는 수직속도를 나타내는 W성분을 M2조석 주파수를 포함하는 0.0745cph~0.0866cph에서 band-pass filter한 결과를 나타낸다. 전반적으로 표층 10~14m와 바닥마찰이 강한 저층부를 제외한 중·상층부에서는 수직속도가 대조와 소조의 변동 외에 해류가 강한 여름철과 심지어 가을철에도 강하게 나타난다. 이러한 M2 주기 밴드에서 해수의 수직적인 승강운동은 내부조석의 영향일 수 있다. 특히 내부조석은 수산학적인 측면에서 저층의 영양염류를 상층으로 운반할 수 있으므로 일차생산에 매우 중요하다(Kamykowski, 1974; Haury *et al.*, 1983). Fig.50은 2000년 7월에 제주해협 해류관측점에서 약 2일간 반복 관

측된 수온, 염분 수직구조를 나타낸다. 수온과 염분이 조석에 지배적인 짧은 기간동안에 수직적인 승강운동이 잘 보이는데 이러한 기작은 내부조석의 강력한 증거이다(Choi *et al.*, 1997). 이론적으로 부력주파수(N)에서부터 관성주파수(f)를 갖는 내부파는 수직적인 밀도경사만 주어지면 어디서든지 발생할 수 있다. 따라서 성층현상 외에 여름철뿐만 아니라 성층이 파괴되는 가을철에도 국지적인 장소에서 강한 수직밀도 경사를 줄 수 있는 요인은 전선체계의 계절 변화 뿐이다.



Table.6. Results of tidal harmonic analysis for u component at 10m.

NO	NAME	SPEED(DEG/H)	PERIOD(H)	AMPLITUDE(CM/S)	PHASE (DEG)
1	ZO	0.0000000	0.00	11.1159	0.0000
2	SA	0.0410686	8765.82	3.2787	131.3870
3	SSA	0.0821373	4382.91	4.0873	115.9030
4	MM	0.5443747	661.31	3.6971	150.1000
5	MSF	1.0158958	354.37	1.7307	299.9320
6	MF	1.0980331	327.86	4.2249	262.2180
7	2Q1	12.8542862	28.01	0.6278	153.4240
8	SIG1	12.9271398	27.85	0.5097	144.0850
9	Q1	13.3986609	26.87	2.0409	218.4600
10	RO1	13.4715145	26.72	0.7209	138.0960
11	O1	13.9430356	25.82	9.1062	320.2830
12	MP1	14.0251729	25.67	0.8781	308.5000
13	M1	14.4920521	24.84	0.7990	135.3390
14	CH11	14.5695476	24.71	0.1241	308.3450
15	PI1	14.9178647	24.13	0.7950	114.0300
16	P1	14.9589314	24.07	3.1157	223.1290
17	S1	15.0000000	24.00	1.4848	123.0200
18	K1	15.0410686	23.93	9.3448	223.3380
19	PSI1	15.0821353	23.87	1.8602	326.4590
20	PHI1	15.1232059	23.80	1.0265	216.9310
21	TH1	15.5125897	23.21	0.8216	7.6100
22	J1	15.5854433	23.10	1.5916	294.9690
23	SO1	16.0569644	22.42	0.6380	153.8620
24	OO1	16.1391017	22.31	0.8083	107.5830
25	OQ2	27.3416965	13.17	0.5130	72.6080
26	MNS2	27.4238337	13.13	0.2511	177.2260
27	2N2	27.8953548	12.91	1.3484	125.5830
28	MU2	27.9682084	12.87	1.1320	118.6570
29	N2	28.4397295	12.66	6.4651	244.2540
30	NU2	28.5125831	12.63	2.4056	153.6430
31	OP2	28.9019669	12.46	0.3645	287.6820
32	M2	28.9841042	12.42	41.0544	334.7860
33	MKS2	29.0662415	12.39	1.4396	60.6420
34	LAM2	29.4556253	12.22	1.2055	125.8200
35	L2	29.5284789	12.19	1.3257	94.7010
36	T2	29.9589333	12.02	1.7869	229.2360
37	S2	30.0000000	12.00	16.1319	244.2450
38	R2	30.0410667	11.98	0.7005	88.5860
39	K2	30.0821373	11.97	5.0917	230.4230
40	MSN2	30.5443747	11.79	0.5294	196.5780
41	KJ2	30.6265120	11.75	0.2670	334.5600
42	2SM2	31.0158958	11.61	0.5889	312.1610
43	MO3	42.9271398	8.39	0.4488	305.7730
44	M3	43.4761563	8.28	0.0431	257.4360
45	SO3	43.9430356	8.19	0.5590	357.2380
46	MK3	44.0251729	8.18	0.4031	61.7630
47	SK3	45.0410686	7.99	0.5776	323.6530
48	MN4	57.4238337	6.27	0.2632	174.3570
49	M4	57.9682084	6.21	0.4987	328.9300
50	SN4	58.4397295	6.16	0.3679	242.5680
51	MS4	58.9841042	6.10	0.6581	247.7270
52	MK4	59.0662415	6.09	0.2535	205.7340
53	S4	60.0000000	6.00	0.4524	268.2380
54	SK4	60.0821373	5.99	0.6025	172.0130
55	2MN6	86.4079380	4.17	0.2016	68.0230
56	M6	86.9523127	4.14	0.1434	186.3910
57	MSN6	87.4238337	4.12	0.0840	148.7800
58	2MS6	87.9682084	4.09	0.0995	39.3580
59	2MK6	88.0503457	4.09	0.0563	307.1910
60	2SM6	88.9841042	4.05	0.0432	215.9260
61	MSK6	89.0662415	4.04	0.2291	163.7000
62	MA2	28.9430356	12.44	1.4026	355.0350
63	MB2	29.0251728	12.40	2.1237	285.4240

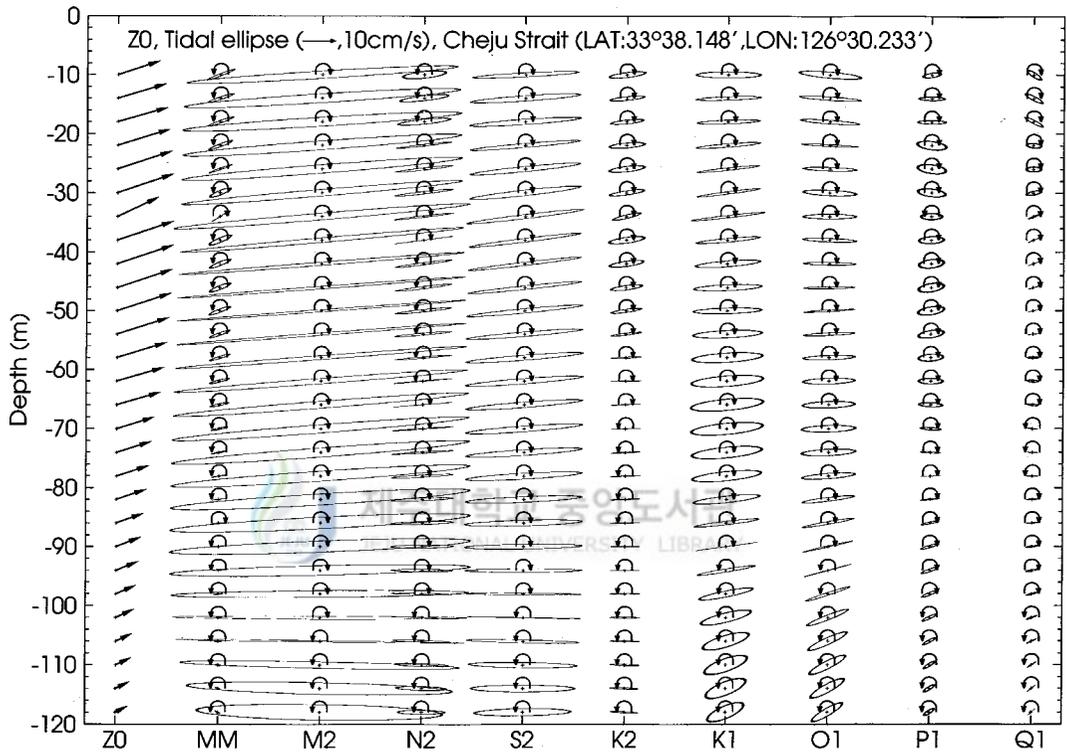


Fig.46. Tidal current ellipses for 9 tidal constituents as a function of depth. The sense of rotation is also shown for each component at each depth.

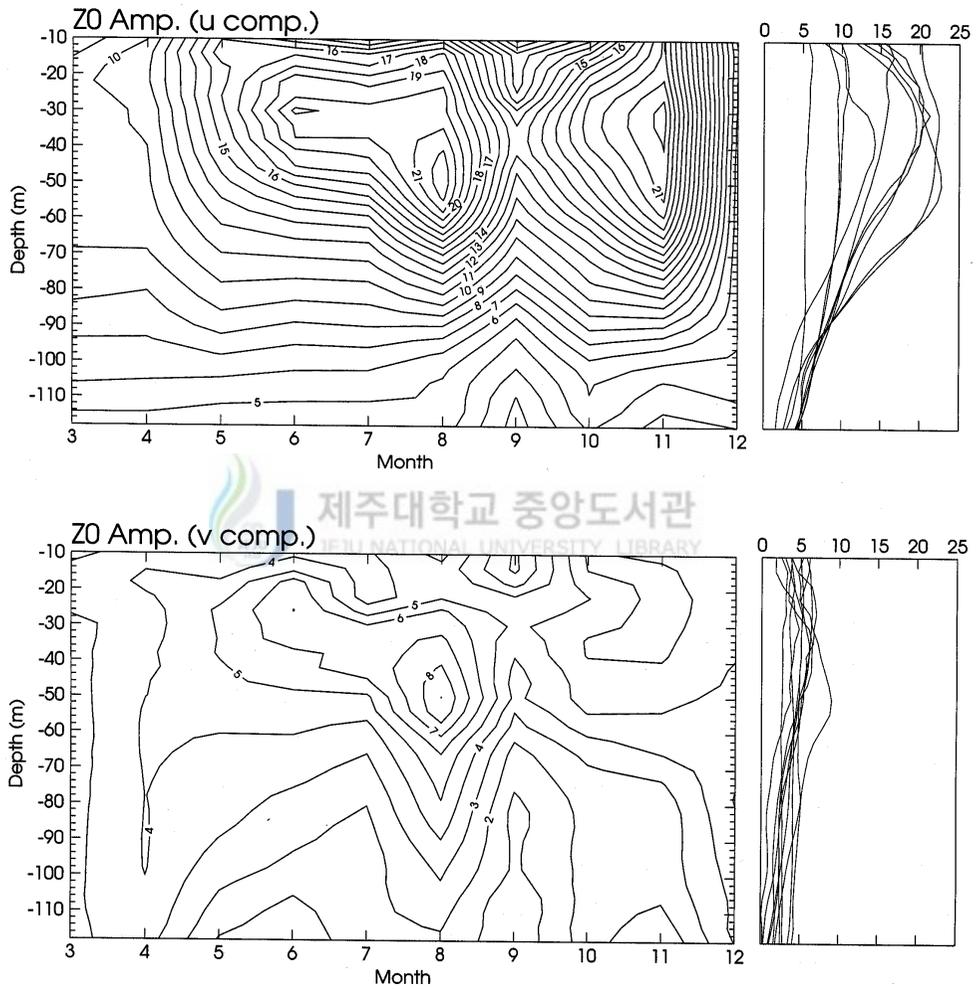


Fig.47. Monthly harmonic analysis results of u (upper panel) and v (lower panel) component for Z0 constituent as a function of depth.

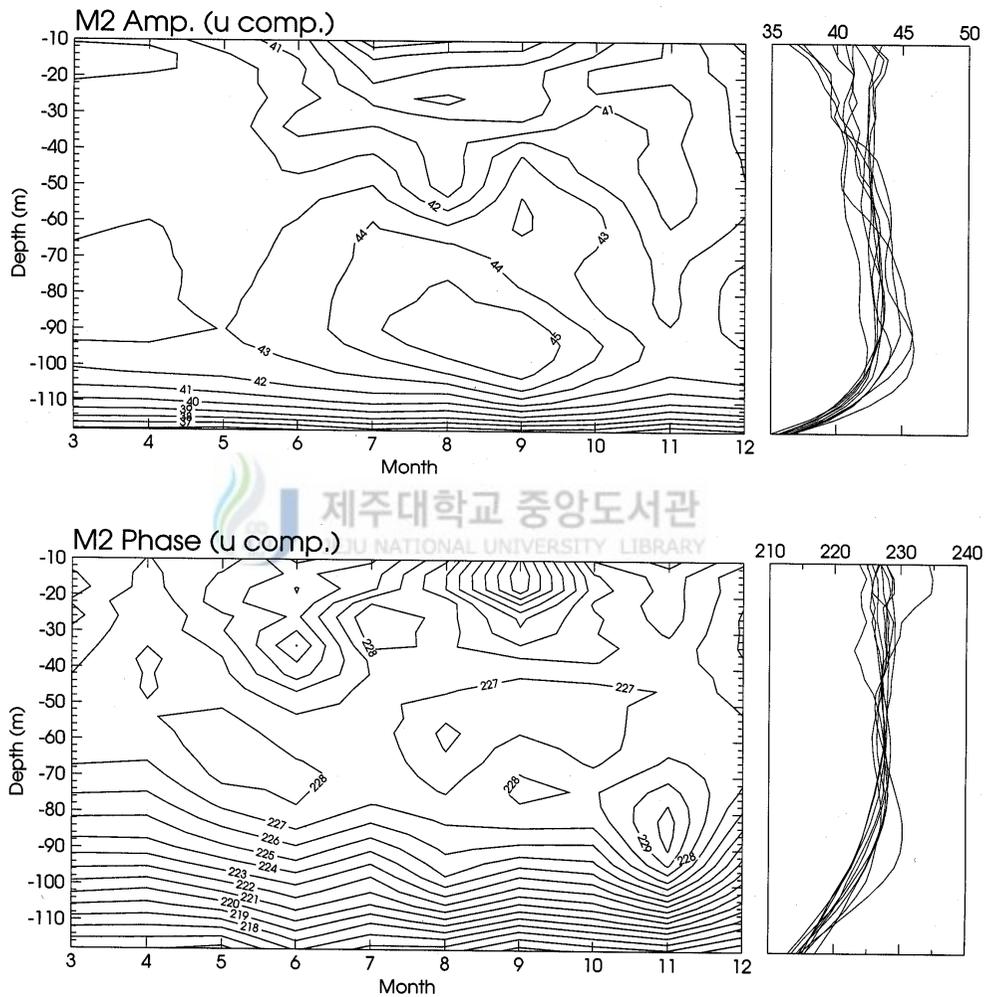


Fig.48. Monthly harmonic analysis results of amplitude (upper panel) and GMT phase (lower panel) for M2 constituent as a function of depth.

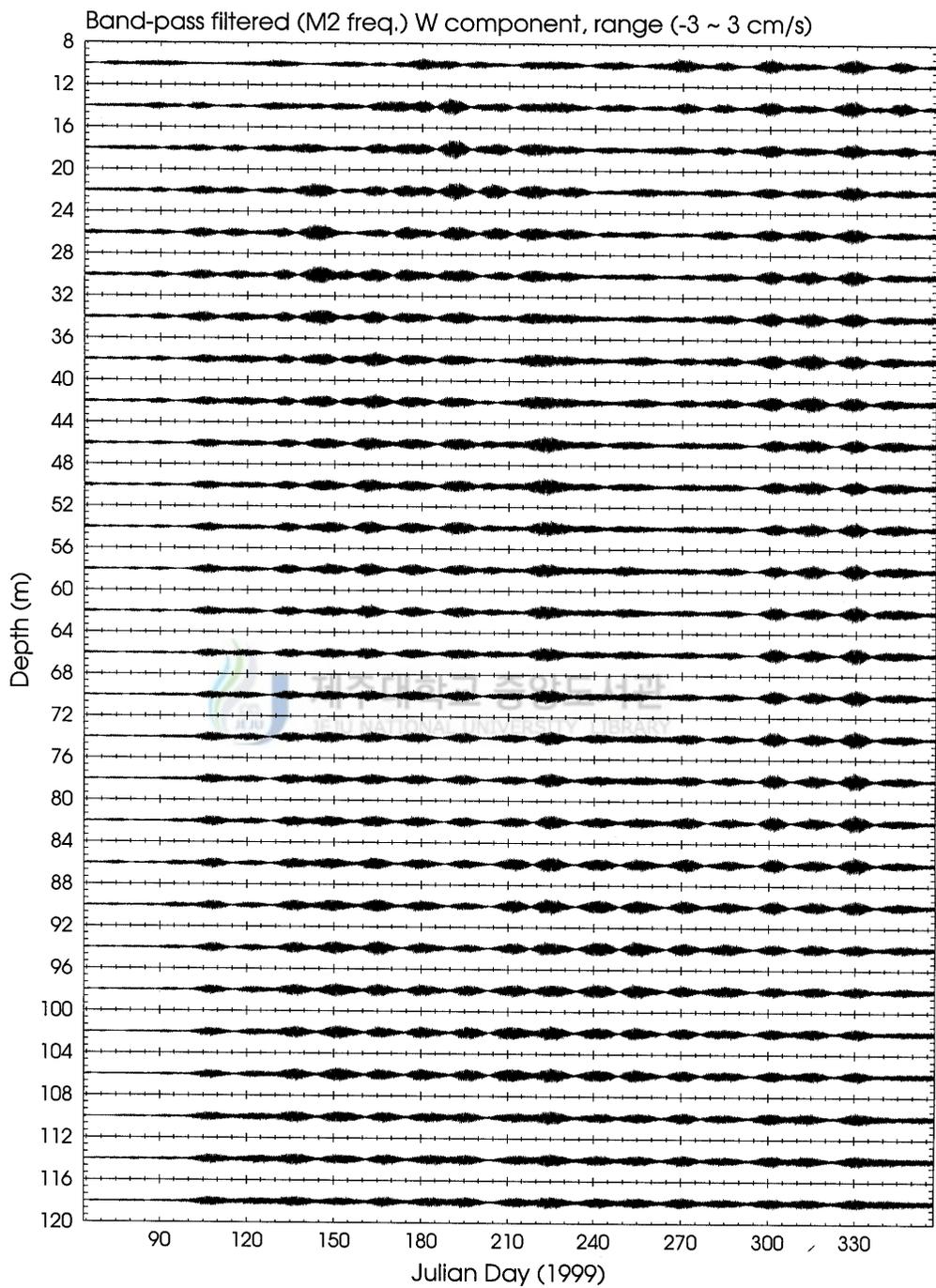


Fig.49. Time plots of band-pass filtered vertical velocity for M2 tidal frequency band.

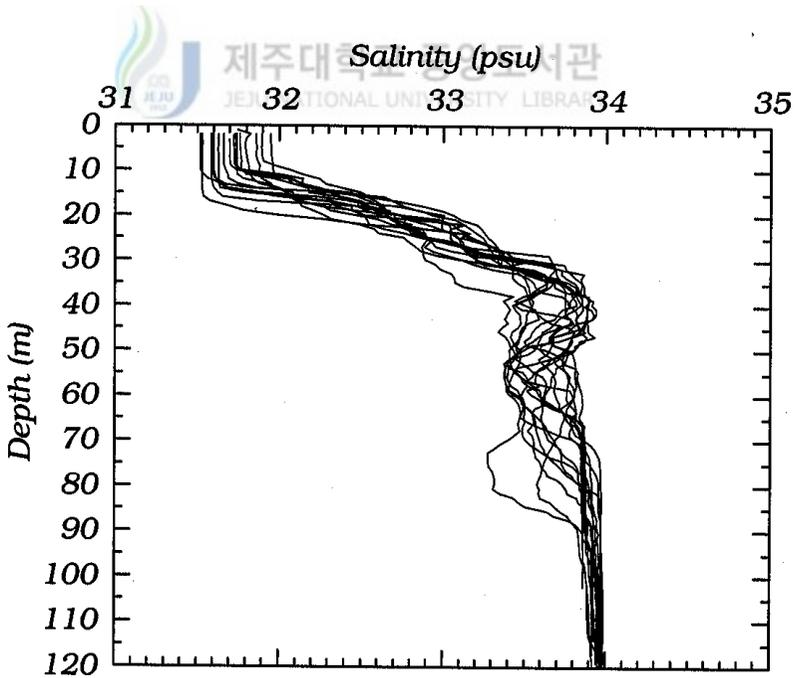
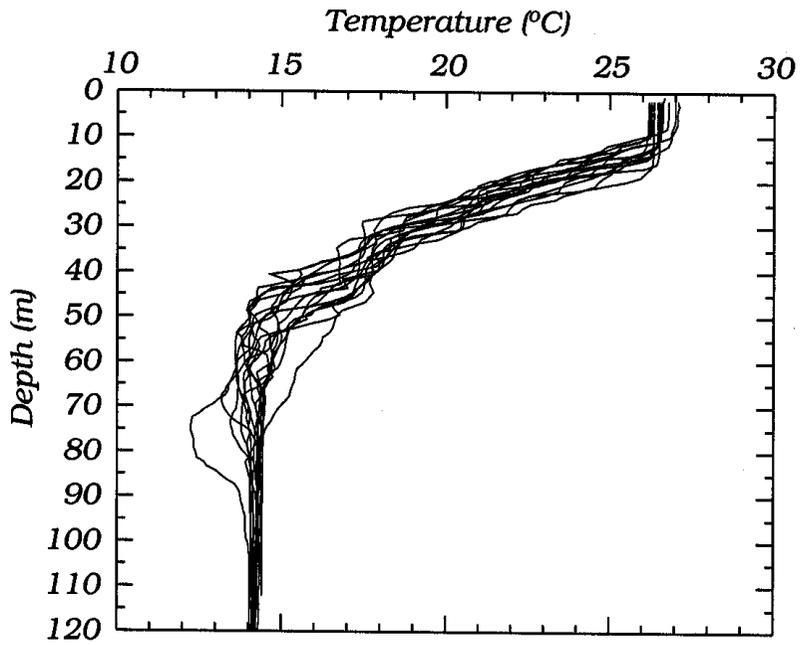


Fig.50. Profiles of water temperature (upper panel) and salinity (lower panel) observed in the Jeju Strait during 50 hours in July, 2000.

2. 관성진동류의 변동특성

관성진동류는 관성력과 전향력이 균형을 이루어 시계방향으로 수평 원운동을 한다. 최근의 관측증거는 관성진동류가 빈번하게 전파하는 바람장의 통과와 기상전선 체계에 밀접하게 관련되어짐을 지시한다(Thomson and Haggett, 1981; D'Asaro, 1985; Kundu, 1990; Young and Tang, 1990; Firing, 1997). 우리나라 동해에서는 조류는 작은 반면에 상당히 크고 안정적인 관성진동류가 자주 관측된다(Lie, 1988; Kim, 2000; Nam, 2002). 한편 Park(1997)은 동중국해 대류봉단에서도 관성진동이 존재함을 보고하였다. 우선 제주해협에서 관성진동류의 증거를 보이기 위하여 Fig.51은 조석을 제거한 잔차류에서 시계방향과 반시계방향으로 분해된 시계열을 관성주파수(f)를 포함하는 1.057cpd ~ 1.159cpd에서 band-pass filter한 결과를 나타낸다. 시계방향 회전성분에서 주로 여름철에 진폭이 매우 크고 경압적인 구조가 잘 나타나며 심지어 가을철에도 큰 진폭을 보이지만 반시계방향 성분에서는 이러한 경향은 없어 시계방향으로 회전하는 관성진동류의 특성이 잘 보인다. 그런데 Fig.52에 보여진 제주의 원시바람자료와 비교하면 겨울에는 바람이 강하지만 관성진동류는 매우 작고 오히려 바람이 다소 약하더라도 대부분 여름철에 강해 성층현상이 영향을 끼칠 수 있음을 말해준다. 한편 진폭이 가장 크게 나타나는 200일 근처에는 Fig.53에 나타난 것처럼 초대형 태풍 Olga가 제주도를 근접하여 통과한 것으로 보아 기존의 연구들처럼 제주해협에서 여름철 관성진동류는 태풍에 의하여 비정상적으로 생성될 수 있음을 잘 나타낸다. 세밀한 분석을 수행하기 위하여 조석이 제거된 각각의 회전성분에 대하여 complex demodulation을 하였다. 이때 처리는 국지 관성주파수(f) 1.108cpd를 demodulation 주파수로 하여 complex demodulation 후 고주파 에너지를 제거하기 위해 cutoff 주파수 0.25cpd에서 저주파 필터하여 Fig.54의 결과를 얻었다. band-pass filter한 결

과와 마찬가지로 단지 시계방향 성분에서만 관성진동류가 나타나며 성층기단인 여름철에 크고 특히 표층 10m에서 약 40cm/s의 최대진폭은 태풍 Olga와 Paul의 잇따른 내습기간과 관련을 보이며 그 위상은 저층이 빠르게 나타났다. 특히 성층이 파괴되는 11월에는 중층에도 다소 강한 관성진동류가 발견되는데 이것은 Fig.55의 제주해협 해류관측점에서의 기후학적 월별 수온, 염분 수직구조를 보면 11월 밀도경사가 가장 큰 40~50m와 잘 일치한다. 그러므로 M2 조류의 경압구조와 마찬가지로 관성진동류 또한 성층현상 뿐만이 아니라 주로 여름과 가을철에 제주해협내에 형성되는 강력한 연안전선의 계절변화에 크게 영향을 받고 있음을 시사한다. 관성진동류의 수직적인 구조를 보다 정량적으로 살펴보기 위하여 EEOF 분석을 실시하였다. 이때 분석은 관성주파수 밴드에서 band-pass filter된 전기간 동안의 U, V 성분을 이용하였다. 관성주기 1 cycle 동안 EEOF 분석 결과는 제1~2모드가 총분산의 46.72%로 대부분을 차지하여 Fig.56~57에는 제1모드와 제2모드의 EEOF 분석 결과만을 나타내었다. 우선 잘 볼 수 있듯이 고유벡터는 매우 뚜렷한 경압구조가 나타난다. 시간에 따라서는 모든 수심에서 시계방향의 회전을 잘 보여주며 complex demodulation 결과처럼 저층의 위상이 빨라서 고유벡터의 위상이 관성주기 1 cycle 동안 위로 전파하는 것이 잘 나타나며 내부파 이론에 따르면 에너지는 아래로 전파한다. 그리고 시간계수는 대부분 수직밀도 경사가 큰 여름철에서 가을사이에 큰 진폭의 변화를 보여주어 표층의 바람에너지와 수직밀도 경사의 중요성을 잘 뒷받침해준다. 이 결과로부터 추정된 내부파 수직성분의 위상속도는 약 0.13cm/s였다. 그런데 시간계수의 회색막대 부분은 초대형 태풍 Olga의 제주 내습기간을 표시하는데 관성진동류의 최대 기간과는 약 7일정도의 시간지연이 있다. Firing *et al.*(1997)은 열대성 태풍 Ofa의 통과 후 약 일주일 후에 100cm/s의 near inertial oscillation이 생성됨을 보고하였다. 따라서 태풍에 의해 표층에서 바람에너지가 입력되고 난 후 사라지면 생성되는 관성력이 전향력과 균형을 이루는 관성류의 특성을 잘 나타낸 것이라 생각할 수 있다.

Fig.58은 조석이 제거된 잔차류의 표층, 중층, 저층의 회전 스펙트럼을 각각 나타낸다. 시계방향 성분에서 관성주기 근처에서 피크를 보이고 표층에서는 국지 관성주파수와 거의 같지만 중층은 주파수가 다소 작아 졌으며 저층은 오히려 높아졌다. 이러한 주파수 변이는 내부파 특성을 갖는 관성진동류의 생성과 소멸 또는 바닥마찰이나 저주파해류 등 여러 요인이 관계될 수 있지만 수심평균된 특성은 관성주파수보다 더 저주파에서 나타나 주기가 비슷한 조류의 일주조 분조와의 상호작용일 가능성이 높다. 결과적으로 관측된 관성진동류는 순수한 관성진동류는 아니다. 관성진동류의 시간구조와 수직구조의 변동특성으로 이해하고 싶은 점은 성층이 소멸되는 11월에도 중층에서 다소 강한 관성진동류가 나타나므로 해수특성 자체가 여름철 성층현상 뿐만이 아니라 주로 해협내의 전선체계의 계절변화가 크게 반영된 때문인 것으로 이해할 수 있다.



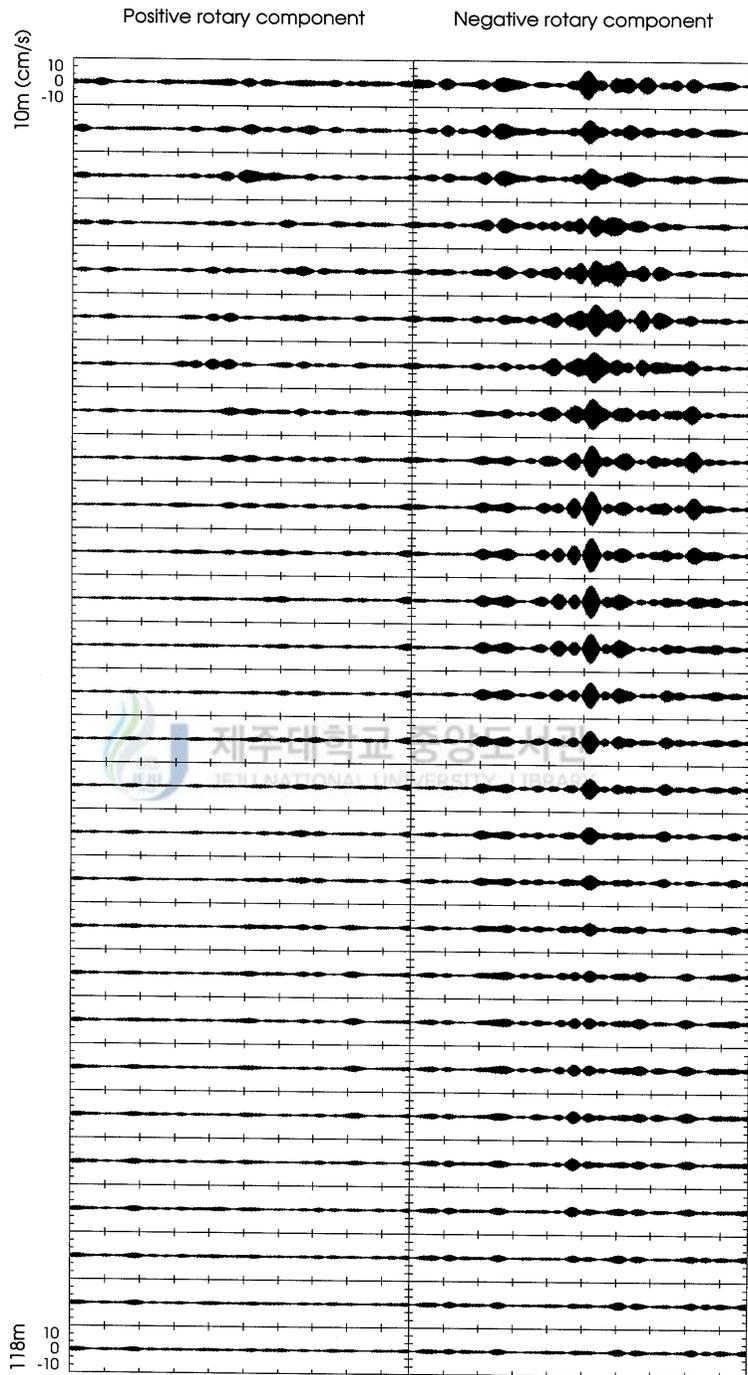


Fig.51. Positive (left panel) and negative (right panel) rotary components of band-passed near inertial oscillation current at each depth.

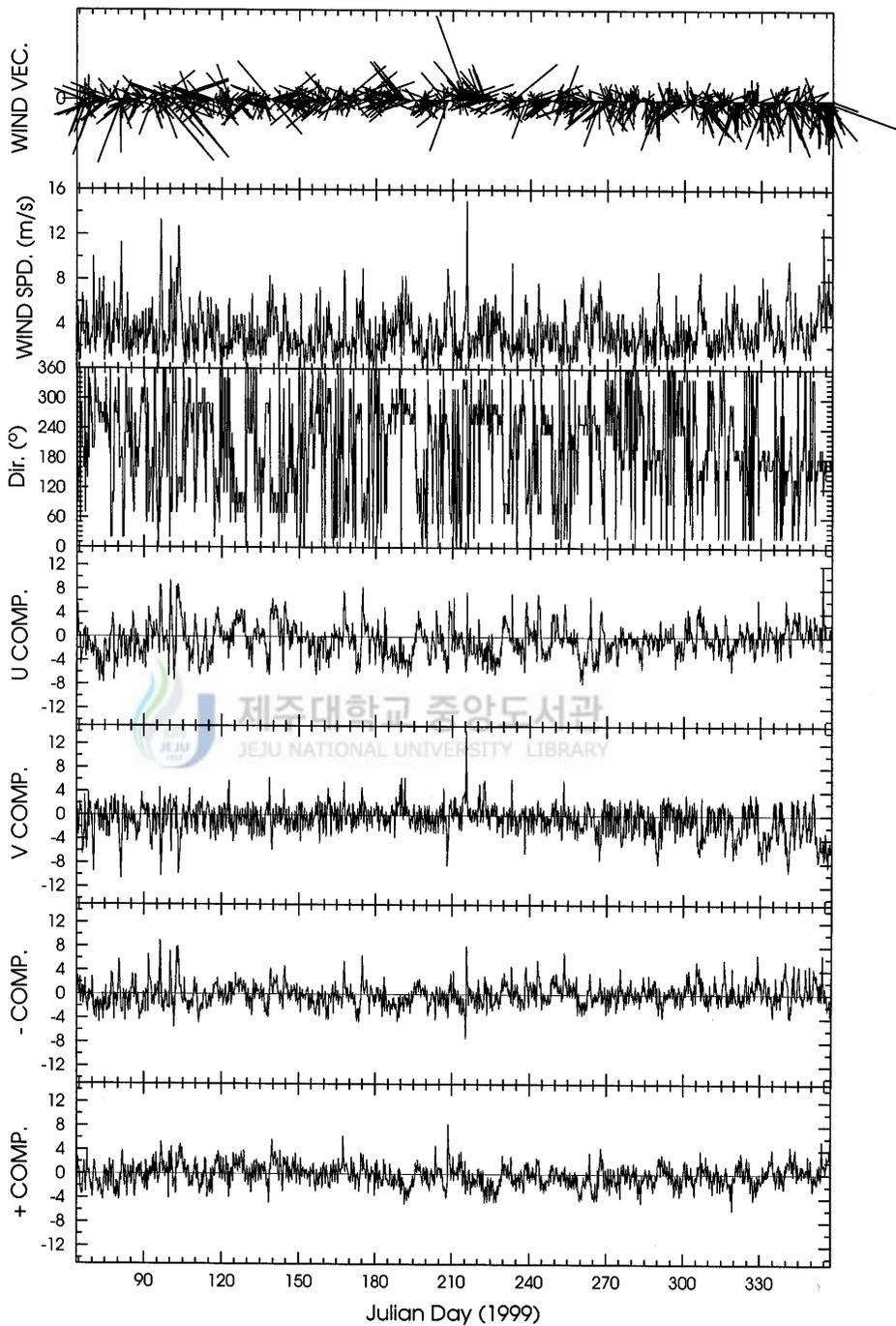


Fig.52. Time plots of raw wind data obtained from Cheju weather station. Direction measured clockwise from the north.

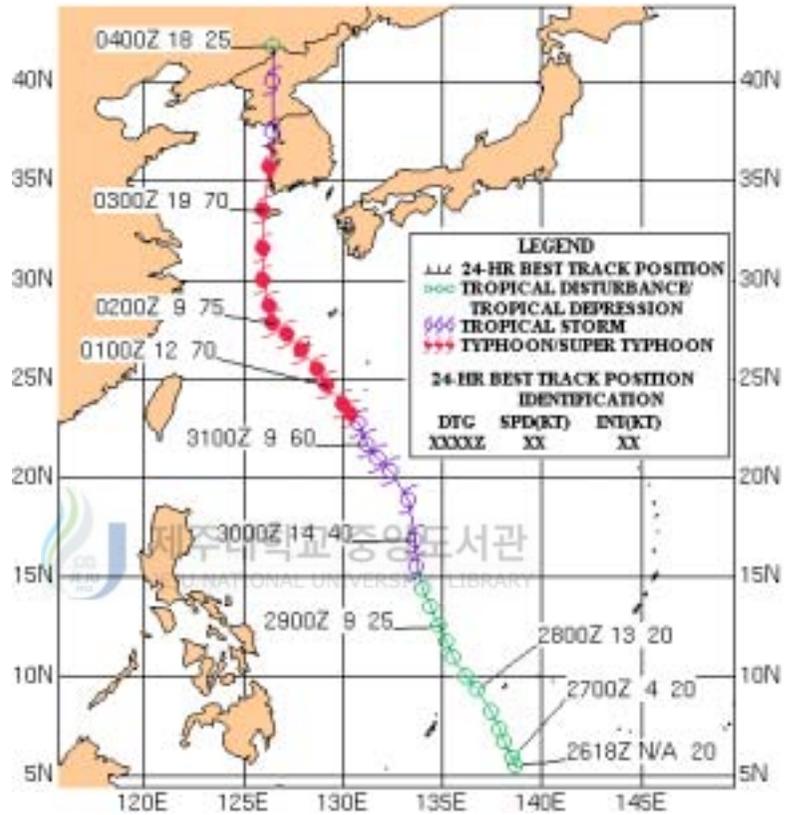


Fig.53. Track of super typhoon Olga obtained from U.S. Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center / Joint Typhoon Warning Center.

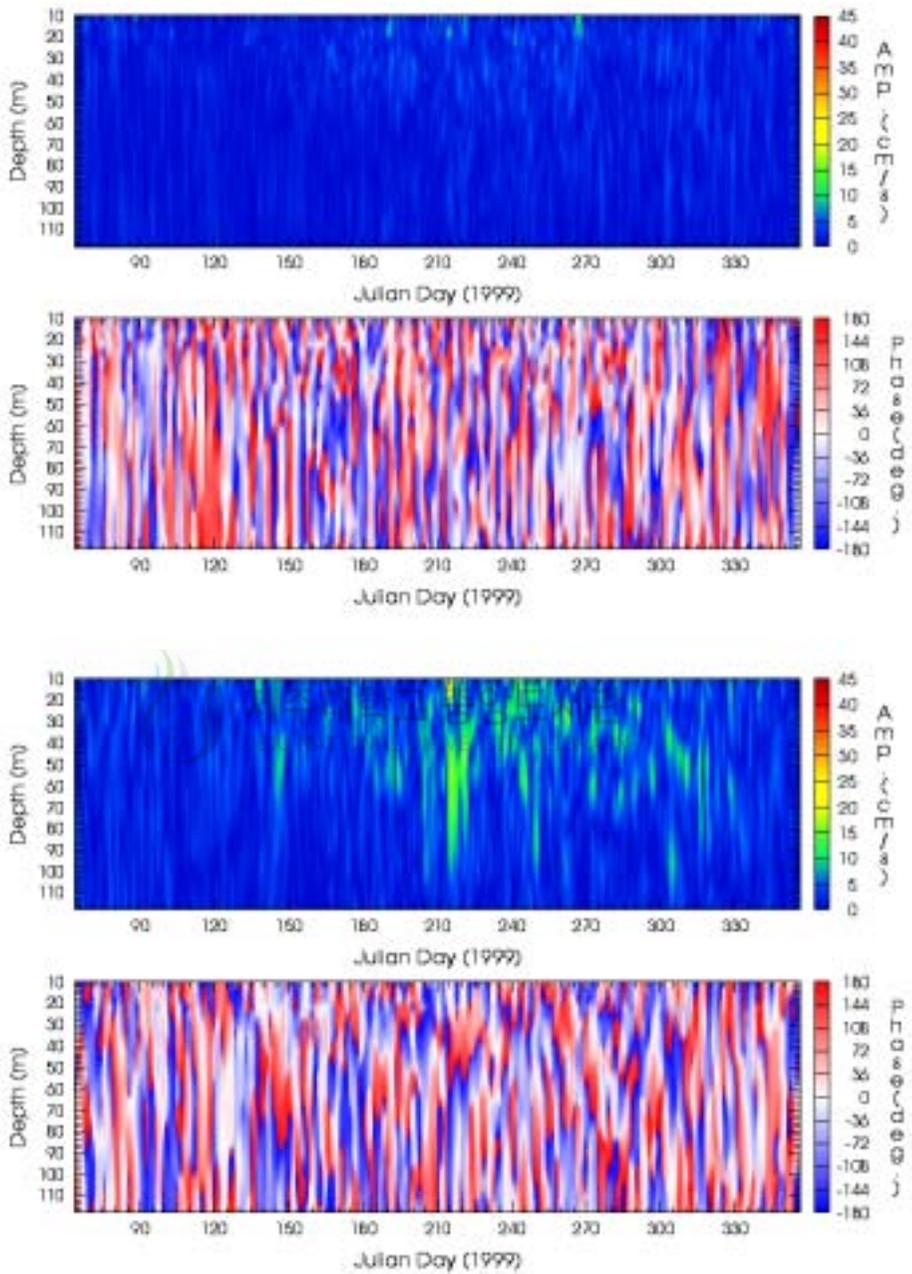


Fig.54. Positive (upper panel) and negative (lower panel) rotary components of complex demodulated inertial oscillation currents only for local inertial frequency.

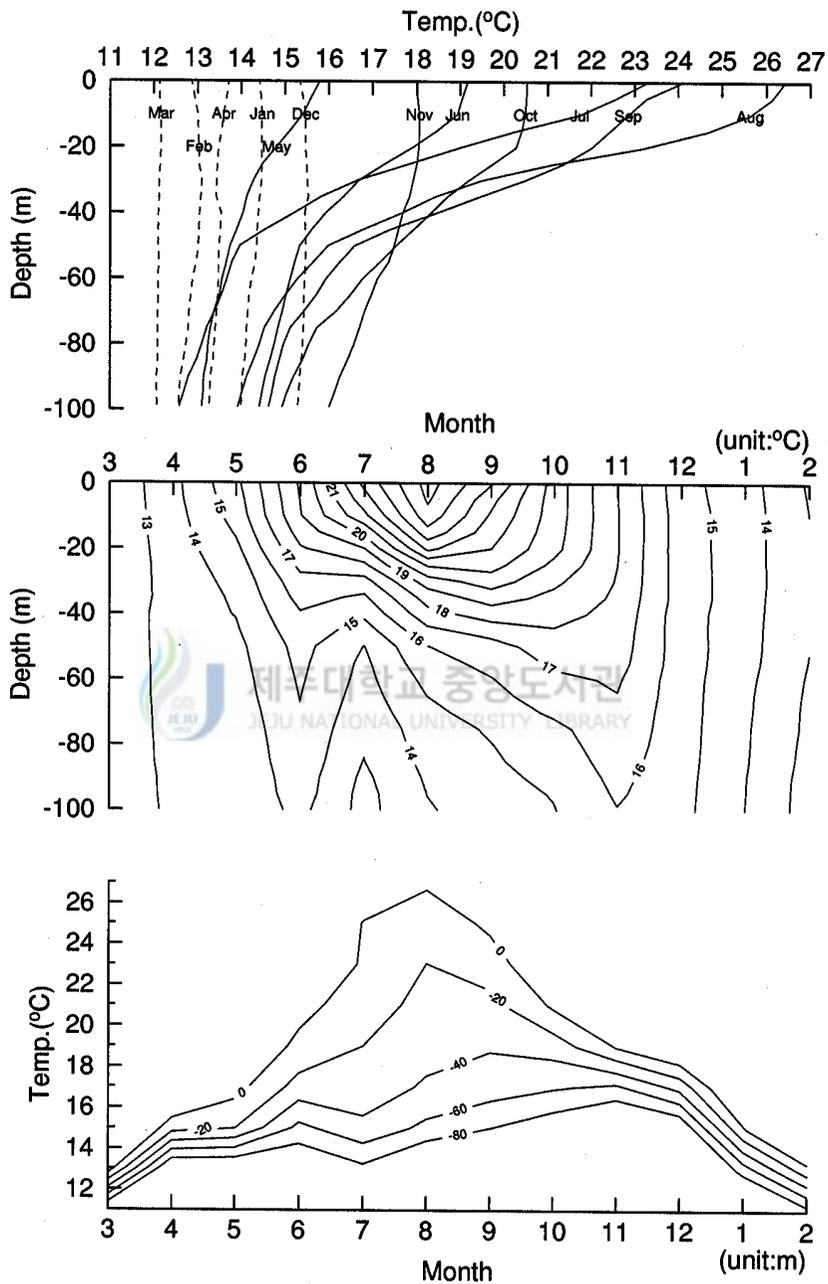


Fig.55. Monthly temperature profiles from GDEM climatological CTD data in the Cheju Strait.

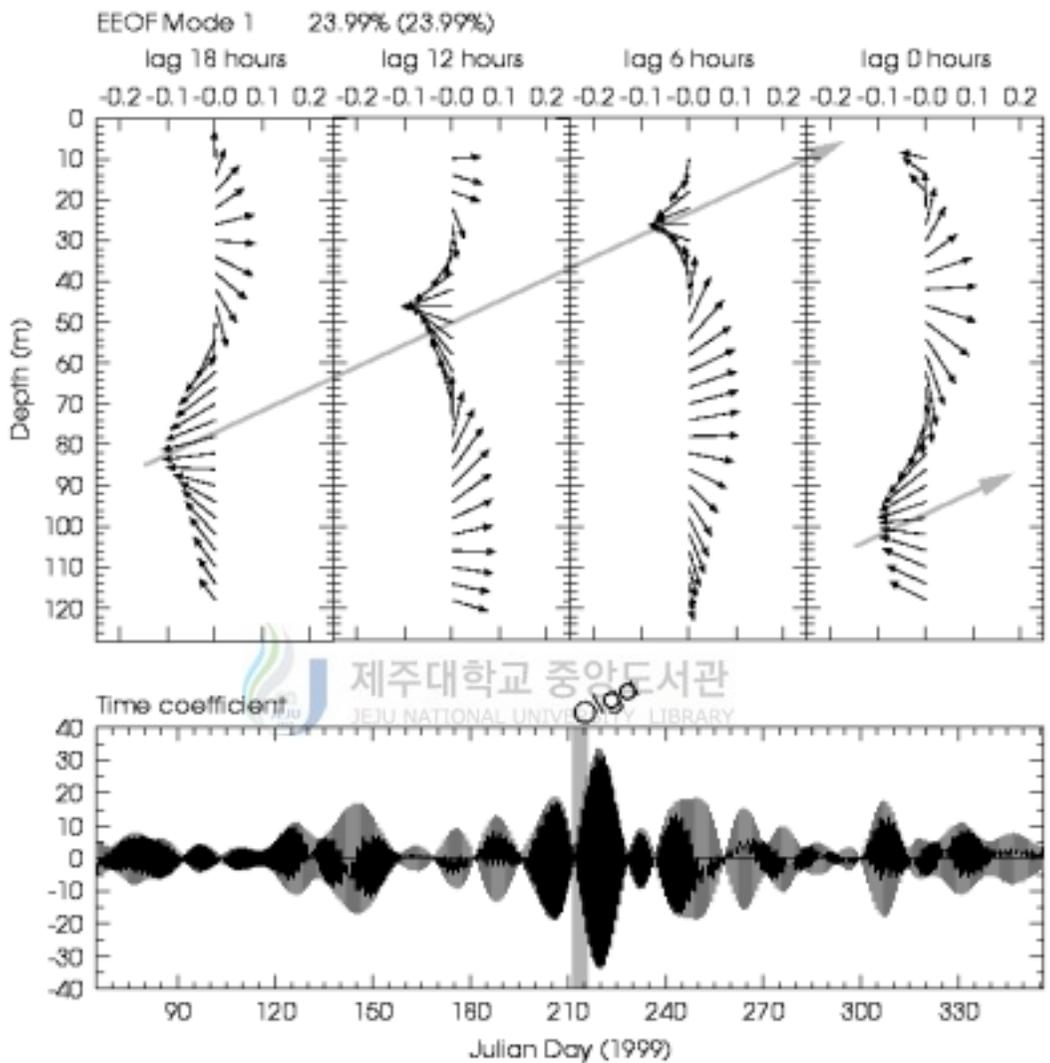


Fig.56. First extended EOF mode explained by 23.99% of the total variance. Vertical gray bar of time coefficient means a period of the passage of super typhoon Olga through the Cheju island. Amplitude of time coefficient is relative amplitude.

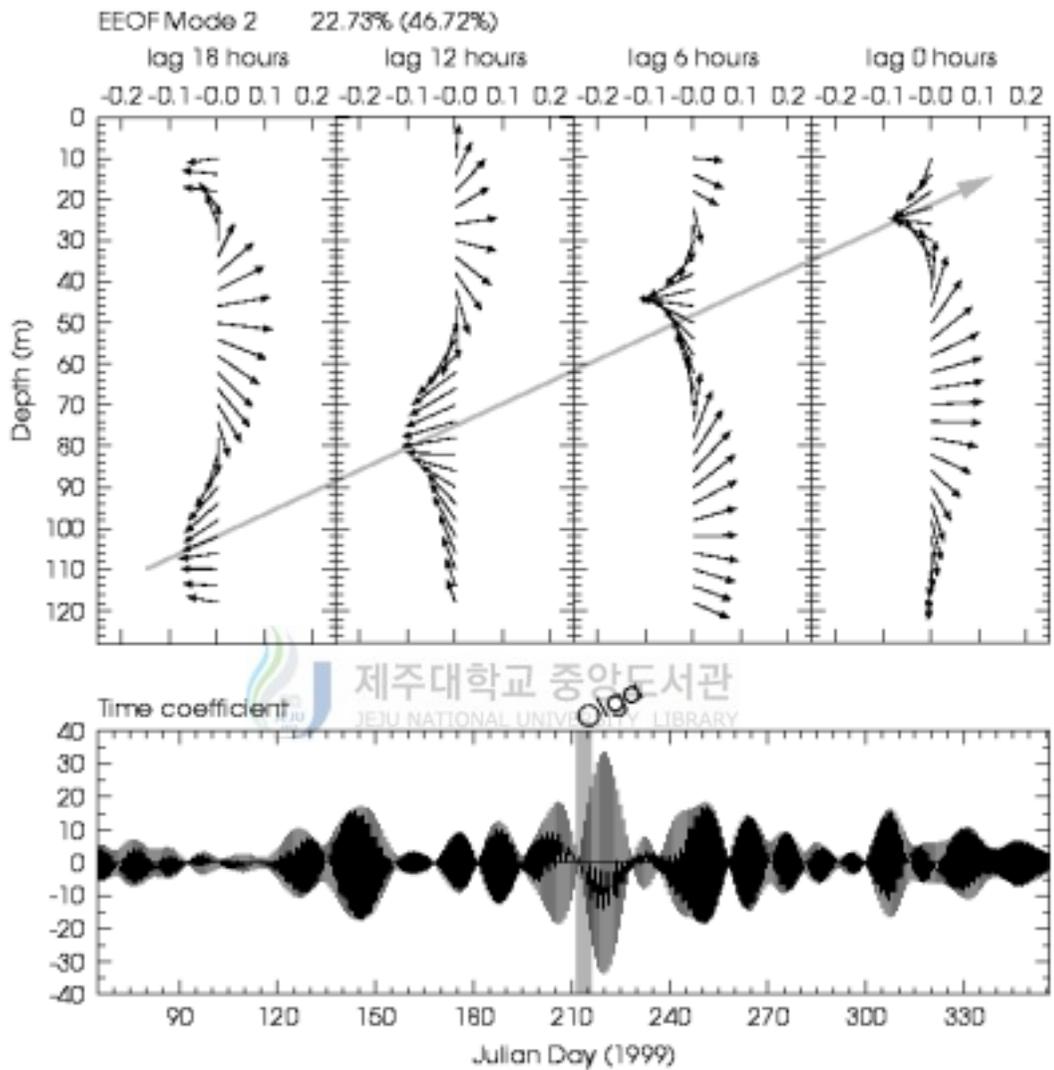


Fig.57. Secondary extended EOF mode explained by 22.73% of the total variance. Vertical gray bar of time coefficient means a period of the passage of super typhoon Olga through the Cheju island. Amplitude of time coefficient is relative amplitude.

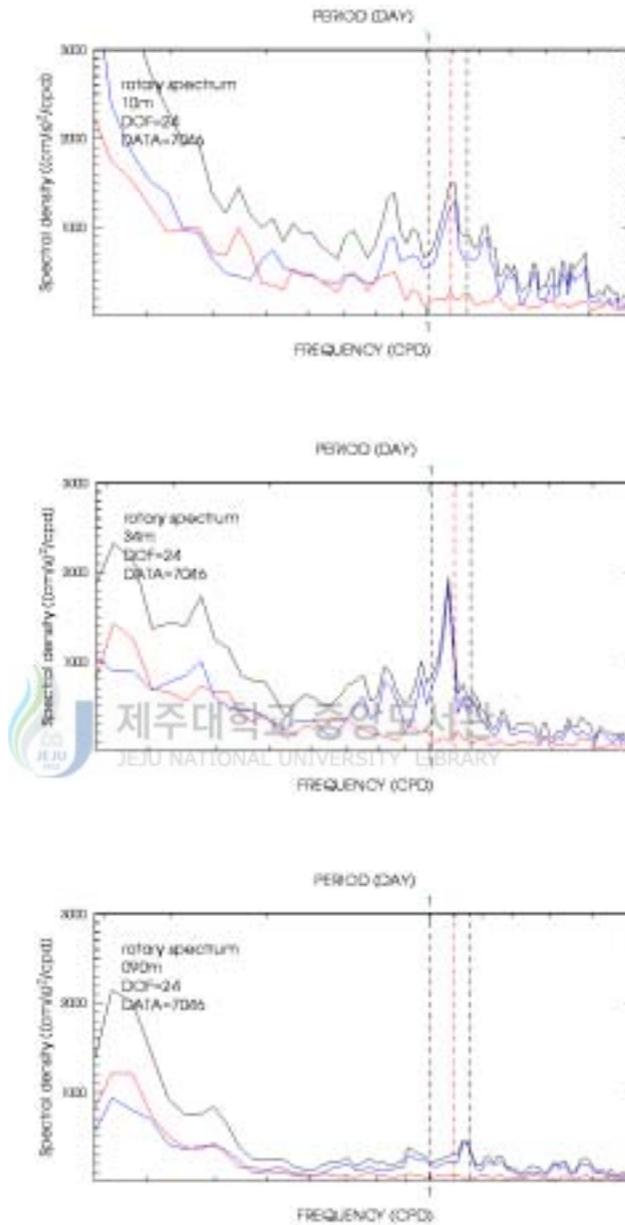


Fig.58. Rotary power spectrum at surface, middle, and bottom (Black solid line: total power, Red solid line: positive rotary component, Blue solid line: negative rotary component, Vertical dotted red line: local I. O. frequency, Vertical dotted black line: I. O. frequency band).

IV. 해류의 변동원인

II장과 III장의 결과는 관측기간 동안 기상변동에 관련된 단주기밴드에 비해 20일 이상 장주기밴드에서 에너지가 더 크고 불연속적인 계절신호가 매우 강하여 전선체계의 계절변화가 해류변동에 지배적임을 보여준다. 그러나 전선체계의 특성을 잘 반영하는 지형류균형은 선형회귀분석에 의해 주축해류 총분산의 23%밖에 설명하지 못하므로 나머지 77%의 해류변동을 설명해야 한다. 전선체계의 계절변화는 황·동중국해 해수면경사의 계절변화가 매우 중요한 역할을 하며 또한 EOF 분석에서는 순압성분을 나타내는 제1모드가 주로 해협을 따르는 주축방향의 변동을 보여 해저지형 특성과 해수면변화가 해류변동과 해수순환에 중요한 영향을 끼침을 알 수 있었다. 따라서 황해와 동중국해 사이의 조그만 해역에 해당하는 제주해협에서 저주파해류의 변동원인은 전선체계에 의한 밀도류 성분 외에도 황·동중국해 해수면 변화에 따라서 직접적으로 주어지는 해협입구 사이에서의 해수면 변화와 해저지형 특성이 큰 역할을 하는 것으로 사료된다. Fig.59는 해협을 따르는 방향의 해수면경사를 나타내는 대용물로서 일별 제주-부산 해수면편차를 독립변수로 하여 주축방향 해류성분에 대하여 선형회귀분석한 결과이다. 선형상관계수가 0.3으로 주축해류 총분산의 약 10%($v^2=0.10$)를 차지하여 해수면경사 방향으로 직접 해류가 구동됨을 말해 준다. 이러한 결과는 Chang *et al.*(2000)이 제주해협에서 해류의 구동 메카니즘이 황해 남동부와 동해 남서부 사이의 압력경도력 차이 때문일 것이라고 제시한 내용과 Seung and Shin(1996)이 대마난류가 해저지형에 의해서 제주해협으로 들어온다고 제시한 내용과 잘 일치하는 결과이다. 그런데 저주파해류에는 M2와 S2, M2와 N2 조류 분조간 비선형 상호작용으로 인해 각각 14일, 28일 주기의 조석잔차류가 저주파해류에 남아있게 된다(Tee, 1989). Fig.60

은 수심 34m에 대해 이러한 비선형신호를 함유한 중심주파수 0.08cph에서 밴드폭 0.008cph를 갖는 Complex demodulation한 곡선과 주축해류를 비교한 그림이다. 잘 볼 수 있듯이 상관계수가 0.02로 매우 낮아 저주파변동 성분에는 조석잔차류의 영향이 무시할 만 하다. 따라서 해협역학에 의한 지형류균형을 의미하는 제주-추자 SLD와 압력경도력 방향의 직접 해류변동을 의미하는 제주-부산 SLD의 변화에 의한 해류변동의 합은 선형관계에 의해 주축해류 총 분산의 33%에 지나지 않아 생각보다 너무 값이 작았다. 따라서 이러한 원인은 제주해협에서 해류가 폭풍에 의한 비정상적인 기상변화에 매우 민감하게 반응하고 바람마찰이 중요하기 때문으로 보인다. Fig.61은 제주의 원시바람으로 계산한 표층 에크만심도를 나타내는데 바람이 강한 겨울철에는 대부분이 전수심에서 바람의 영향을 받지만 성층이 강한 여름철은 비정상적으로 태풍이 통과할 때만 전수심이 바람의 영향을 받는다. 다시 말해 간헐적인 기상전선이나 태풍 통과가 유발하는 국지적인 취송류 성분과 여러 가지 종류의 장주기과 성분들과 같은 매우 비정상적인 해류성분들은 비교적 정상상태의 해류에 비해 국지적으로 매우 큰 해류변동 에너지를 활성화하기 때문이다. 한편 이러한 성분들은 제주해협에서 계절에 따라 해수수송량을 변질시키는 한 요인이 될 수 있으며 수산학적으로는 전선해역의 해수를 수평으로 매우 잘 섞어서 많은 어획량을 기대할 수도 있다. 그러므로 해양과 대기의 상호작용의 관점에서 내 대륙붕에 위치한 제주해협은 비정상적인 기상변동에 의한 외력이 매우 중요하여 지형류만으로 해류의 변동특성을 설명하기에는 무리가 있다.

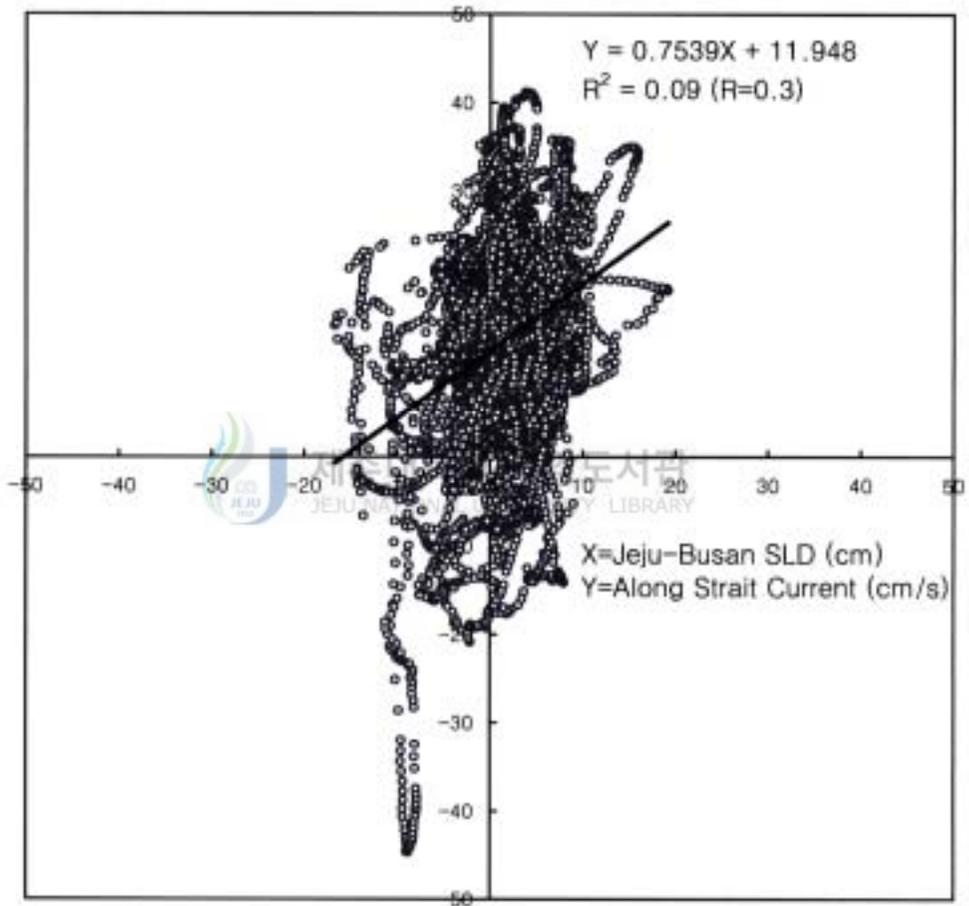


Fig.59. Linear regression analysis result of along strait current at 10m vs. sea level difference(SLD) between Cheju and Busan.

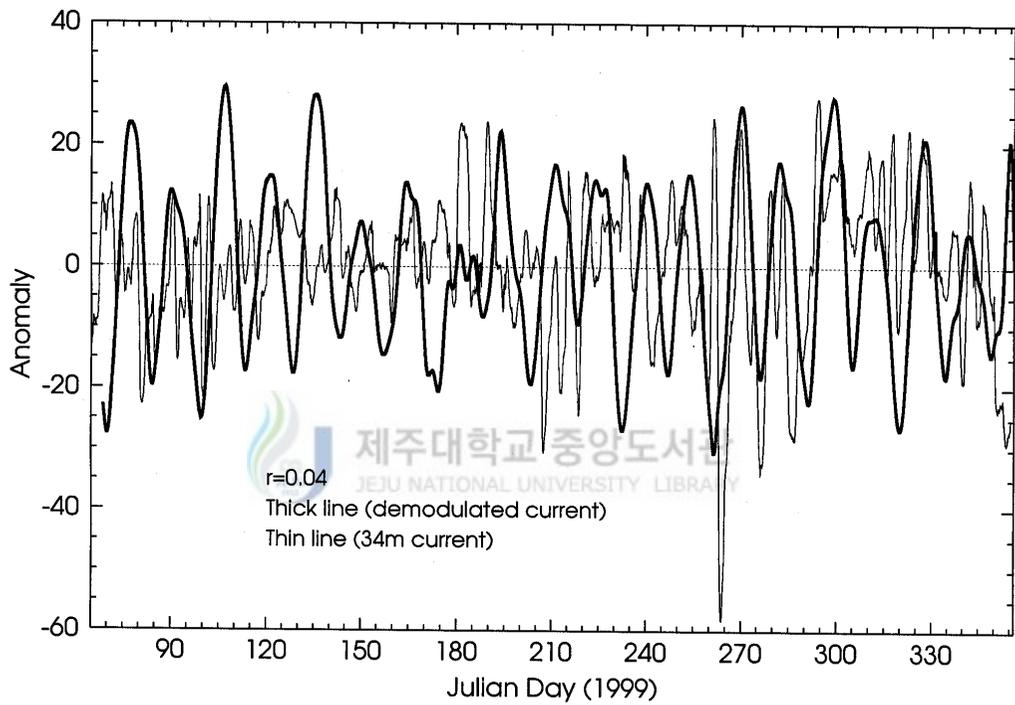


Fig.60. Comparison of tidal residual current vs. 34m current.

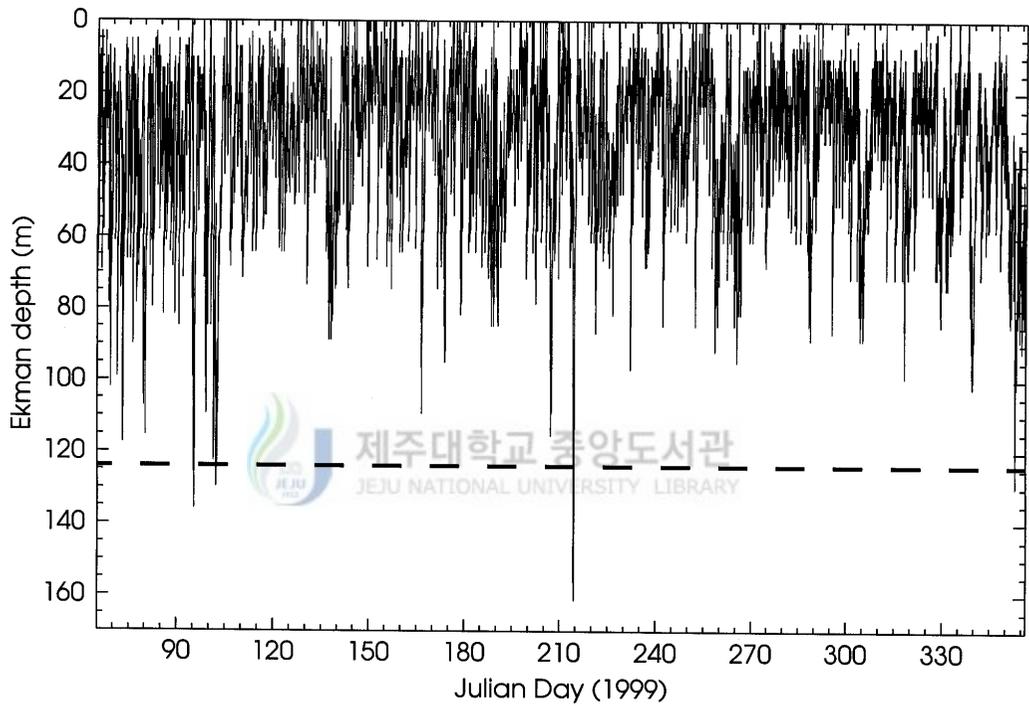


Fig.61. Ekman depth calculated by Cheju wind data. Dotted line is ADCP mooring depth (124m).

IV. 토의 및 결론

이 연구의 목적은 제주해협에서 해류의 주 변동원인이 무엇인지를 규명해 보고자 하는 것이다. 그러나 수많은 해류의 직접관측에도 불구하고 제주난류나 제주해류라고 명명된 명백한 항류의 존재는 인정되었지만 좀처럼 제주해협에서 유동변동 특성은 우리에게 그다지 충분한 이해를 주지 못하고 있다. 왜냐하면 첫째로 제주도 주변해역은 수심이 낮아 조류가 강하고(Teague *et al.*, 1998) 바람과 같은 외력에 매우 민감하게 반응하기 때문이다(Lie *et al.*, 2000). 둘째로 제주도 주변에 연중 형성되는 극전선이 계절에 따라 크게 변하기 때문에 국지적으로 매우 큰 변동을 보일 것이다. 그러므로 짧은 기간이나 특정시기에 관측한 해류나 해수특성분포 만으로는 계절변화를 갖는 시간규모나 복잡 다양한 해황 때문에 제주해협에서 해류의 변동원인을 이해하기가 매우 어려울 것이다. 이 논문에서는 이러한 문제를 제주해협에서 약 10개월간 관측된 해·조류 자료와 1년간 인공위성 표층수온 시계열 자료를 통하여 연구하였다. cross spectrum 분석은 국지바람에 즉각적으로 반응하는 2~10일의 단주기 성분과 역풍류 이론과 관련된 20일 이상 장주기 해수순환 모두에서 높은 상관을 보였다. 그러나 성층이 강한 여름철은 국지바람과 다소 관련이 적었다. 저주파 해류의 EOF분석은 순압변동성분이 약 66%로서 대부분의 변동을 지배하며 그 시간계수의 wavelet 분석은 2~10일의 비교적 단주기 성분이 국지적으로 매우 큰 변동을 보였으며 이러한 기간이 기상전선이나 태풍 내습기간과 잘 일치하여 기상변화에 전수심이 매우 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 전기간을 통하여 20일 이상 장주기에서 에너지가 다소 높아 기본적으로 장주기 해수순환이 유지되지만 국지시간에서는 바람마찰이 매우 중요함을 나타내었다. 또한 여름철은 태풍이나 기상전선 등에 의한 순압적이고 경압적인 장주기과를 모두 유발하였으며 그 진폭은 매우 컸다. 순압성분만으로 재구성한

시계열은 8월과 11월 사이의 불연속적인 계절신호를 대부분 잘 재현하였다. 그런데 이러한 불연속적 계절신호의 원인은 8월과 성층이 파괴되는 11월 각각에서 Ri 넘버가 약 15정도로 수직안정도가 강하여 쉬어해류가 수직혼합을 할 수 없는 환경이었으며 관측해류가 열풍방정식을 잘 만족하여 전선체계의 계절변화가 주요인이었다. 지형류 균형을 나타내는 장기 평균된 월별 제주-추자 해수면편차 또한 8월과 11월의 불연속 특징을 잘 나타내었으며 수심적분 해류와도 상관을 갖는 순압지형류가 우세하여 순압변동성분에 의해 재현된 계절 불연속 신호와 잘 일치한다. 인공위성으로 본 황·동중국해에서 표층수온경사의 계절변화는 궁극적으로 전선체계의 계절변화가 동중국해에서 황해방면으로 향하는 압력경도력의 계절변화에 의해 결정됨을 보여주었다. 그러나 전선체계의 특징을 반영하는 지형류균형은 주축해류 총분산의 약 23%($v=0.48$) 뿐이었다. 한편 고주파 해류인 조류와 관성진동류 또한 전선체계의 계절변화에 매우 민감한 반응을 보였다. 압력경도력 방향의 해류변동을 나타내는 제주-부산 해수면편차는 주축해류 총분산의 약 10%($v=0.30$) 정도였다. 그런데 전선체계에 의한 밀도류가 해류변동에 중요한 원인이지만 지형류균형과 해협방향의 압력경도력에 의한 합은 선형관계에 의해 주축해류 총분산의 33%정도로 생각보다 너무 작은 값이었다. 한편 조석잔차류의 영향은 총분산의 약 1%정도로 무시할 만큼 작았다. 그러므로 나머지 66%를 설명할 수 있어야 하는데 EOF 분석은 순압성분이 대부분이며 기상변동에 의한 비정상적인 해류가 매우 뚜렷이 나타난다. 이상의 결과로부터 제주해협에서 해류의 주 변동원인은 명백한 항류를 포함한 전선체계와 관련된 계절변화가 매우 중요하고 여기에 비정상적인 극심한 기상변동과 관련된 바람마찰에 의한 취송류와 여러 가지 종류의 장주기파에 의한 강한 해류가 매우 비정상적으로 나타난다. 따라서 여름철 난류수의 황해 유입 문제(Hyun, 1996)와 관련하여 지금까지 제주도 주변에서 매우 중요한 현상으로 받아들여져 왔던 계절변화 외에 바람마찰에 의해 구동되는 장주기파의 효과를 역학에 추가해야 할 것이다.

참고문헌

- Beardsley, R. C., R. Limehurner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, 30, 297-314.
- Benoit, Cushman-Roisin, 1994. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, 181-183pp.
- Bowden, K. F., 1983. *Physical Oceanography Of Coastal Waters*. Ellis Horwood Ltd., 302pp.
- Chang, K. I. and K. Kim, S. W. Lee and T. B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30, 203-215.
- Chang, K.-I., C. K. Kim, M. S. Suk, S. Y. Nam, Lakshmi H. Kantha, 1997. Barotropic Circulation of the South Sea - Preliminary Model Results. *Ocean Research*, 19(2), 139-152.
- Chang, K.-I., M. S., Suk and I.-C., Pang and W. J., Teague, 2000. Observations of the Cheju Current. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 35, 129-152.
- Chang, Kyung-Il, Kuh Kim, 1995. Subtidal flow in the Cheju Strait. *The Yellow Sea*, 1, 93-103.
- Cho, Y. K. and K. Kim, 1994. Characteristics and origin of the cold water in the South Sea of Korea in summer. *J. Oceano. Soc. Korea*, 29, 414-421.
- Choi, Hyun-Yong, Sang-Ho, Lee and Jae-Hak, Lee, 1997. Isotherms

- oscillation in stratified coastal ocean off central western coast of Korea, *The Yellow Sea*, 3, 52-57.
- Chuang, Wen-Ssn, 1985. Dynamics of Subtidal Flow in the Taiwan Strait. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 41, 65-72.
- Chuang, Wen-Ssn, 1986. A Note on the Driving Mechanisms of Current in the Taiwan Strait. *Journal of the Oceanographic Society of Japan*, 42, 355-361.
- Csanady, G. T., 1976. Mean circulation in shallow seas. *J. Geophys. Res.*, 81, 5389-5399pp.
- D'Asaro, E. A., 1985. The Energy Flux from the Wind to Near-inertial Motions in the Surface Mixed Layer, *J. Phys. Oceanogr.* 15, 1043-1059.
- Emery, William J. and Richard E. Thomson, 1997. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press., 634pp
- Freeland, H. J., P. B. Rhines, and T. Rossby, 1975. Statistical observations of the trajectories of neutrally bouyant floats in the North Atlantic. *J. Marine Res.*, 33, 383-404pp.
- Gong, Y., 1971. A study on the south Korean coastal water along the west coast of Jeju Island, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 6(1), 25-36.
- Haury, Loren R., Wiebe Peter H., Marshall H. Orr and Melbourne G. Briscoe, 1983. Tidally generated high-frequency internal wave packets and their effects on plankton in Massachusetts Bay. *Journal of Marine Research*, 41, 65-112.
- Hsueh, Y. and I. C. Pang, 1989. Coastally Trapped Long Wave in the Yellow Sea. *J. Phys. Oceano.*, 19, 612-625.
- Hsueh, Y., 1988. Recent current observations in the eastern Yellow Sea.

- Journal of Geophysical Research, 97, 14,323-14,330.
- Kamykowski, D. L., 1974. Possible interactions between phytoplankton and semidiurnal internal tides. *J. Mar. Res.*, 32, 67-89.
- Kim, B. K., 1979. A Study on the Currents in the Jeju Strait, Bill. Fish. Res. Dev. Agency. Kor., 21pp.
- Kim, H. J., 2000. Near-inertial internal waves off the east coast of Korea, M. Sc. Thesis, Seoul National University.
- Kim, K. and H. K. Rho and S. H. Lee, 1991b. Water masses and circulation around Cheju-Do in summer. *J. Ocean. Soc. Korea*, 26, 262-277.
- Knauss, J., 1978. Introduction of Physical Oceanography. Prentice-Hall, 339pp.
- Kundu, P. K. and J. S. Allen, 1976. Some three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 181-199pp.
- Kundu, Pijush K. and Richard E. Thomson, 1990. Inertial Oscillations Observed near British Columbia. *PAGEOPH*, 133(4), 677-689.
- Lau, K.-M., and H. Weng, 1995. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 76, 2391-2402.
- Lee, J.-C., 1983. Characteristics of front near the Cheju Strait in Early Winter. *Bull. Korean Fish Soc.*, 16(20), 51-58.
- Lee, J.-C., J.-Y. Na, and S.-D. Chang, 1984. Thermohaline Structure of the Shelf Front in the Korea Strait in Early Winter, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19(1), 56-67.
- Lie, H. J., 1988. Near-inertial current oscillations off the mid-east coast of

- Korea, Prog. Oceanogr., 21, 241-253.
- Lie, Heung-Jae and Cheol-Ho, Cho and Jae-Hak, Lee and Suk, Lee and Yuxiang, Tang, 2000. Seasonal Variation of the Cheju Warm Current in the Northern East China Sea. Journal of Oceanography, 56, 197-211.
- Mass, L. R. M., J. J. M. van Haren, 1987. Observations on the vertical structure of tidal and inertial currents in the central North Sea. Journal of Marine Research, 45, 293-318.
- Mitta, T. and Y. Ogawa, 1984. Tsushima currents measured with Current meter and Drifters : In Ocean hydrodynamic of the Japan and East China sea. T. Ichiye, editor, Elsevier, Amsterdam, 67-76.
- Nam, S. H., 2002. Observed Variability from ESROB (East Sea Real-time Ocean Buoy) off Donghae city, Korea. Proceedings of the spring meeting, 2002 of the Korean Society of Oceanography, 77-80.
- Nam, S. Y., K.-Y., Chang and M.-S., Suk and D.-Y., Kim and K.-H., Lee and M.-B., Sim, 1999. On the seasonal variation of volume transport between the straits in the South Sea of Korea. The 10th PAMS/JECSS, 1-4.
- Pang, I. C. and K. H. Hyun, 1988. Seasonal Variation of Water Mass Distributions in the Eastern Yellow Sea and the Distributions in the Eastern Yellow Sea and the Yellow Sea Warm Current. J. of Kor. Soc. of Oceanography, 33(3), 41-52.
- Pang, I. C., 1987. Theory of coastally trapped waves and its application to the Yellow Sea. Ph. d. dissertation, Florida State Univ., Tallahassee, 128pp.
- Pang, I. C., Hong-Kil Rho and Jae-Hak Lee and Heung-Jae Lie, 1996.

- Water Mass Distribution and Seasonal Circulation Northwest of Cheju Island in 1994. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 29(6), 862-875.
- Pang, I. C., Hong-Kil, Rho and Tae-Hee, Kim, 1992. Seasonal Variations of Water Mass Distributions and Their Causes in the Yellow Sea, the East China Sea and the Adjacent Seas of Cheju Island. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 25(2), 151-163.
- Pang, I. C., T. H. Kim, T. Matsuno. and H. K. Rho, 1993. On the origin of the Tsushima Current(I) : Barotropic case. *Bull. Korean fish. Soc.*, 26(6), 677-697.
- Park, Y. H., 1986. A Simple Theoretical Model for the Upwind flow in the Southern Yellow Sea. *J. Oceanog. Soc. Korea*, 21, 203-210.
- Perkins, H. and T. S. Hopkins and S.-A. Malmberg and P.-M. Poulain and A. Warn-Varnas, 1998. Oceanographic conditions east of Iceland. *Journal of Geophysical Research*, 103, 21,531-21,542.
- Pond, S. and G. L., Pickard, 1983. *An Introductory to Dynamical Oceanography*, 2nd Edition, Pergamon press, 329pp.
- Preisendorfer, R. W., 1988. *Principal Component Analysis in Meterology and Oceanography*. *Developments in Atmospheric Science*, 17. Elsevier, Amsterdam.
- Pugh, D. T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons, 472pp.
- RD Instruments, 1989. *Principles of Operation: A Practical Primer.*, 36pp.
- Rikhshi, Kunio and Ichiye, Takashi, 1986. Tidal fluctuation of the surface currents of the Kuroshio in the East China Sea, *Prog. Oceanog.*, 17, 193-213.
- Schott, F., 1989. Measuring winds from underneath the ocean surface by

- upward looking Acoustic Doppler Current Profiler, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 5, 154-159.
- Seung, Y. H. and S.-I. Shin, 1996. A simple model of the formation of thermo-haline front in the southeastern Yellow Sea in winter. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31: 23-31.
- Souza, A. J. and J. H. Simpson, 1996. The modification of tidal ellipses by stratification in the Rhine ROFI. *Continental Shelf Research*, 15(9), 1087-1113.
- Suk, M. S., G. H. Hong, C. S. Chung, K. I. Chang, and D. J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31, 55-63.
- Tang, Tswen Yung and Da Wei Lee, 1996. Semi-Diurnal Tide on the Shelf Break in Northeast of Taiwan. *TAO*, 7, 11-26.
- Teague, W. J., H. T. Perkins, Z. R. Hallock, and G. A. Jacobs, 1998. Current and tide observations in the southern Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, 103, 27, 27,783-27,793
- Tee, K. T., 1989. Subtidal Salinity and Velocity Variations in the St. Lawrence Estuary. *J. Geophys. Res.*, 94, 6, 8,075-8090.
- Thomson, R. E. and Haggett, W. S., 1981. Wind-driven Inertial Oscillations of Large Spatial Coherence. *Atmos. Ocean.*, 19, 281-306.
- Toba, Y., K. Tomizawa, Y. Kurasawa and K. Hanawa, 1982. Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its possible cause. *La mer (Tokyo)*, 20, 41-51. Also in "Proceedings of the First JECSS Workshop"(ed. by T. Ichiye and K. Takano). *The Japanese-French Oceanogr. Soc.*, 5-15.

- Torrence, Christopher and Gilbert P. Compo, 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of American Meteorological Society, 79, 61-78.
- Uda, M., 1934, The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932, Japan Imp. Fish. Stations, 5, 57-190.
- UNESCO, 1991. Processing of oceanographic station data. UNESCO, 138pp.
- Van Aken, H. H., G. J. F. van Heijst and L. R. M. Maas, 1987. Observations of fronts in the North Sea. J. Mar. Res., (in press)
- Wang B, and Yan Wang, 1996. Temporal Structure of the Southern Oscillation as Revealed by Waveform and Wavelet Analysis. J. Climate, 9, 1,586-1,598.
- Yi S. U., 1966. Seasonal and Secular variations of the water volume transport across the Korea Strait. J. Oceanogr. Soc. Korea, 12, 7-13.
- Youn, Y. H., 1986. The identification of water characteristics of the Yellow Sea Bottom Cold Water and the evidences of its southwards extension. M. S. Thesis, Cheju National University, 55pp.
- Young, De Brad and C. L. Tang, 1990. Storm-Forced Baroclinic Near-Inertial Currents on the Grand Bank. Journal of Physical Oceanography, 20, 1725-1741.
- Zedel, L. J. and John A. Church, 1987. Real-time screening techniques for Doppler Current Profiler Data. J. Atmos. Oceanic Technol., 4, 572-581.
- 기상청, 1999. 기상연보. 248pp.
- 김태희, 1990. 황해와 동중국해의 해수순환에 대한 바람의 영향. 제주대학교 석사학위논문, 40pp.
- 노홍길 등, 1997. 제주해협의 해류와 월별 유량변화. 제주대 해양연구논문집.

- 21, 75~84.
- 문동준, 1998. Wavelet을 이용한 항만부진동 연구. 부산대학교 석사학위논문, 5-15.
- 박재훈, 1997. 동중국해 대륙붕단 해역에서의 반일주조 내부조석과 및 관성진동에 관한연구. 이학석사학위논문, 서울대학교 해양학과, 71pp.
- 방익찬, 오임상, 1995. 해수면변화와 해저지형에 의한 난류수의 순환과 그 기원, J. Kor. Fish. Soc., 28(5), 689.
- 부지훈, 2000. 대한해협과 제주해협의 해수수송량에 관한 연구. 수로기술연보, 820, 9-15.
- 석문식 등, 1999. 해양예보시스템 구축. 한국해양연구원보고서, BSPM 99025-00-1216-1, 266pp.
- 이 석, 2000. 황·동중국해에서 조류특성과 조석의 계절변동성 연구. 성균관대학교 토목환경공학과 박사학위논문, 190.
- 이용국, 1987. 제주도 남동 대륙붕 해저의 Ekman 회전. 인하대학교 석사학위논문, 26pp
- 이찬구, 2000. 기온과 강수량 및 해수면온도의 주기변동성에 관한 연구. 제주대학교 석사학위논문, 62pp.
- 장경일, 강재훈 등, 2000. TRBM-ADCP를 이용한 제주해협 장기 해류관측 결과. 부경대학교 해양과학공동연구소 남해 워크샵, 27-30.
- 전동철 등, 1999. 엘니뇨가 우리나라 주변해역에 미치는 영향. 한국해양연구원 보고서, BSPE 97678-00-1148-1, 211pp.
- 정현숙, 박정수, 임규호, 오재호, 2000. 측우기 자료를 포함한 서울 강수량 시계열에 대한 추세분석 및 파엽분석. 통계학회(응용통계연구), 13(2), 525-544.
- 현경훈, 1996. 남·서해의 계절순환과 여름철 난류수의 서해 유입. 제주대학교 석사학위논문, 44pp.

요약

장기 ADCP 자료분석을 통한 제주해협 해류의 변동특성

제주해협에서 해류변동의 주요원인이 무엇인지 알아보기 위해 음향 도플러 유속계(ADCP)를 트롤어선 방지용 계류장치에 부착하여 해협중앙골 해저면에서 장기간 계류관측된 해·조류 자료를 통한 시간구조와 수직구조의 변동특성을 살펴보았다. 그 결과, 저주파해류는 교차스펙트럼(cross spectrum) 분석에서 국지바람과 분지규모(large scale) 해수순환 모두 중요하였다. 경험직교함수(EOF) 분석에서는 순압변동성분이 총분산의 66%로 지배적이며 그 시간계수의 파엽(wavelet) 분석은 기상변화에 매우 민감하게 반응하는 2~10일의 비정상적인 단주기 변동과 20일 이상의 정상상태의 장주기 해수순환에 의한 변동이 전기간을 통해 각각 비슷한 에너지를 나타내었다. 순압변동성분에 의해 재구성된 시계열은 불연속적 계절신호를 잘 재현하였으며 이러한 신호는 전선체계의 계절변화에 따라 국지적으로 강화된 밀도류에 기인하였다. 고주파해류는 조류와 관성진동류가 전선체계에 민감하게 반응함을 보여주었다. 한편 전선체계의 특징을 잘 나타내는 지형류균형은 선형회귀 분석에 의해 주축해류 총분산의 약 23%였다. 해협을 따르는 제주-부산 해수면 편차에 의한 압력경도력은 약 10%였다. 조석잔차류의 영향은 나타나지 않았다. 따라서 이러한 두 요소의 합은 약 33%로서 너무나 작아 나머지를 설명해야 하는데 EOF 분석에는 기상변화에 의한 비정상적인 해류변동이 매우 뚜렷하므로 바람마찰과 이와 관련된 장주기파의 효과가 나머지를 설명해야 한다.

주요어: 순압성분, 전선체계, 지형류균형, 압력경도력, 바람마찰, 장주기파

후기

바쁜 생활 속에 드디어 한편의 논문이 완성되어 세상에 나올 수 있게 되어 기쁘게 생각합니다. 그동안 묵묵히 지켜봐주신 사랑하는 어머니, 아버지께 그동안 효도한번 못한 점 죄송스럽게 생각하며, 사랑하는 내동생들 정희, 정미, 정화, 재준에게도 그동안 챙겨주지 못해 이 미안함을 한편의 소중한 결실로 마음을 전합니다. 그리고 대학원에 입학원서를 내고 흔쾌히 입학을 허락해주시고 해양물리학이란 학문을 공부할 수 있도록 길을 열어주신 방익찬 지도교수님께 큰 감사의 마음을 전합니다. 그리고 발표회장에 직접 참가하셔서 귀중한 조언을 해주신 고유봉, 윤석훈 교수님과 윤정수, 최영찬, 이준백 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 해양학과 선후배님과 해양물리연구실 선후배님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 해양연구원 생활을 시작할 수 있도록 길을 열어주신 석문식 박사님과 훌륭한 자료를 제공해주신 장경일 박사님 이하 key group께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 해양연구원 생활동안 한 연구실에서 죽 지켜봐주시고 격려해주신 진동철 박사님과 현장감각을 일깨워 주신 황상철 선생님께도 마음속으로 큰 감사의 마음을 전합니다. 그리고 김철수 박사님 이하 해군사업팀과 거제 장목의 최진우 박사님 이하 남해어패류 사업팀에게도 그 동안 감사의 마음을 전하며 아울러 해양물리연구단 모든 박사님께도 감사의 마음을 전합니다. 제가 질문을 했을 때 바쁘지만 항상 자상히 가르쳐 주신 신창웅, 이석, 장성태 박사님께도 감사의 마음을 전합니다. 연구소 생활을 동고동락한 문정언 형께도 감사드리며 지금은 연구소를 나간 김도연씨, 김창희씨, 박성혜씨, 봉선화씨, 김윤배씨, 김평중씨, 조경호씨, 김병남씨, 오은영씨 께도 소식을 전합니다. 그리고 지금까지 지켜봐 주신 저를 아는 모든 분들께 마음속으로 감사의 마음을 전합니다.

♥ mail to oceann@kordi.re.kr, oceann@naver.com