

碩士學位論文

# 3차원 해양유동모델에 의한 제주항 연안해역의 해수순환특성연구



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

梁 太 赫

2006 年 6 月

# 3次元 海洋流動모델에 의한 濟州港 沿岸海域의 海水循環特性研究

指導教授 楊 城 基

梁 太 赫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



梁太赫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2006 年 6 月

A study on the Circulation Characteristics of  
Seawater using the Three Dimensional Ocean  
Circulation Model in the Jeju Harbor Coastal  
Area of Jeju Island

Tae-Hyoek Yang

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for  
the degree of Master of Engineering

2006. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 目 次

目 次 .....	i
LIST OF TABLES .....	ii
LIST OF FIGURES .....	iii
SUMMARY .....	v
I. 서론 .....	1
1. 연구배경 .....	1
2. 연구목적 .....	2
II. 자료 및 방법 .....	4
1. 조위관측 자료 .....	4
2. 해수유동 조사 .....	4
III. 제주항 연안의 조석 및 해조류 분석 .....	8
1. 조위 특성 .....	8
2. 해수유동 특성 .....	10
IV. 3차원 해양수치모델(POM) .....	24
1. 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM)의 개요 .....	24
1.1 $\sigma$ -좌표계에서의 지배방정식 .....	24
1.2 난류종결모델 .....	28
1.3 연직경계조건 .....	31
1.4 연직적분방정식 .....	32
1.5 Smagorinsky 확산계수 .....	34
1.6 수치계산방법 및 격자배열 .....	34
1.7 계산안정조건 .....	37
2. 계산격자망 및 수심도 .....	38
3. 경계조건 및 주요입력자료 .....	42
4. 수치실험결과 .....	43
4.1 층별유속분포 .....	43
4.2 단면유속분포 .....	47
V. 검증 및 고찰 .....	
1. 조위 검증 .....	50
2. 해조류 검증 .....	51
VI. 결론 .....	53
참고문헌 .....	55

## LIST OF TABLES

Table 1. Observation point position and duration .....	6
Table 2. Tidal harmonic constants of Jeju harbor .....	8
Table 3. Vertical division on the sigma coordinate .....	39
Table 4. computational conditions and parameters .....	43



## LIST OF FIGURES

Figure 1. Research area, tidal elevation and current observation station .....	5
Figure 2. Baytech measurement systems and RCM-7 current meter ...	7
Figure 3. Tidal elevation at N-8, B-1 & B-2 .....	9
Figure 4. Vector diagram of tidal current observed in St. N-1 and St. N-2(upper), St. N-6 and St. N-7(middle), St. N-8 and St. B-1(lower) .....	12
Figure 5. Tidal ellipse at St. N-1 and St. N-2 .....	13
Figure 6. Tidal ellipse at St. N-6 and St. N-7 .....	14
Figure 7. Stick diagram and U-V components at St. N-1(upper) and St. N-2(lower) .....	15
Figure 8. Stick diagram and U-V components at St. N-6(upper) and St. N-7(lower) .....	16
Figure 9. Stick diagram and U-V components at St. B-1(upper) and St. N-8(lower) .....	17
Figure 10. Stick diagram of tidal ellipses at St. B-1 .....	18
Figure 11. Stick diagram of tidal ellipses at St. N-8 .....	19
Figure 12. Progressive vector at St. N-1(Upper) and St. N-2(lower)	20
Figure 13. Progressive vector at St. N-6(Upper) and St. N-7(lower)	21
Figure 14. Non-tidal current diagram at St. N-1(upper left), St. N-2(upper right), St. N-6(lower left) and St. N-7(lower right) .....	22
Figure 15. Non-tidal current diagram around Jeju harbor .....	23
Figure 16. Vertical divestiture in z and $\sigma$ -coordinate system .....	25

Figure 17. A simplified illustration of the interaction of the external mode and internal mode .....	35
Figure 18. Flow diagram of the POM Code .....	36
Figure 19. The staggered numerical model grid with the location of model variables indicated .....	37
Figure 20. Computational grid system .....	40
Figure 21. Map of water depth below datum level .....	41
Figure 22. Three dimensional bottom topography .....	42
Figure 23. Vector diagram of surface level(upper), middle level(middle) and bottom level(lower) in flood max. of spring tide .....	45
Figure 24. Vector diagram of surface level(upper), middle level(middle) and bottom level(lower) in ebb max. of spring tide .....	46
Figure 25. Distribution of cross-section .....	47
Figure 26. Vertical velocity of X-X' and Y-Y' cross-section in flood of spring tide .....	49
Figure 27. Vertical velocity of X-X' and Y-Y' cross-section in ebb of spring tide .....	49
Figure 28. Comparison between observed tidal elevation and computed ones at St. N-8 and St. B-1 .....	50
Figure 29. Comparison between computed Vector diagram and observed ones at St. N-7(upper), St. 1(middle) and St. N-8(lower) .....	52

## SUMMARY

In this research, by analyzing Jeju Island's coastal area including Jeju outport, it grip the spatial and visual features of oceanic current and the structure of seawater movement. And this research would perform the three dimensional seawater movement model by applying sigma coordinate, Princeton Ocean Model(POM) to find out the utensil for oceanic current circulation. The following were their finding.

Including Jeju harbor, to know the condition of seawater flow, we analyzed data used 25 hour data and fifteen day data, and they show the flow velocity component diagram, stick diagram, progressive vector, tidal residual currents diagram, and u-Component, v-component and the stick diagrams of each points. The tide around Jeju harbor, daily inequality is excellent. As we overview the 25 hour data, the current of flow velocity is greater in west-east than in north-south. The maximum flow velocity was  $94.7m/sec$ . As we observe the fifteen data, the flow velocity in Jeju harbor has excellent semi-diurnal tidal components, and the tidal changes by  $M_2$ ,  $S_2$  component tide are significant. However one spot from the fifteen day data which observed during the spring tide is located in the east breakwater in northeast coast, and it is considered as the middle part of the scheduled breakwater of Jeju outport. Because of the appearance of wastes by construction of the west breakwater and the development of water flow in the east breakwater, the flow is occurring in very unique ways during sunrise and sunset.

As a result of 3-dimension model operation, both in flood max. and ebb max. of spring tide, about the wide area, throughout the entire

depth of water, the outer seashore, compared to the costal seashore, has the strong water speed of 94cm/s and outer layer's water speed is the strongest and the speed is getting slower as it moves from the middle and low layer. Especially, in case of the sunrise strongest tide, the scale of outer seashore's flow velocity at the dawn becomes faster up to 93cm/s due to the dramatic change in depth, while shallow seashore at the costal area which has the shallow depth has the slow flow velocity(11cm/s).

As a result of analysis and consideration about the numerical value, At both the point of the tide level and seawater flow verification, the result of observation and calculation match each other throughout the harbor of Jeju and related area, and it approves that this model reappear the tide level, velocity and flow of the related area.

These results from research are able to use as important reference to set the basic design or the execution drawing and to analyze the predicted effects of marine environment by the oceanic current flow from the step-by-step construction, when they develop a harbor or structures on the adjacent costal area.

# I. 서론

## 1. 연구배경

사면이 바다로 둘러싸인 제주도는 해상·기상관측 부위와 같은 역할을 수행할 수 있는 천혜의 해역에 위치하고 있다. 탁월한 해륙풍과 계절풍의 영향으로 천기의 변화가 심한 도서지역이다. 하절기에는 상습적인 태풍의 통과지대에 위치하는 지리적인 조건으로 인해 고조와 해일, 집중호우와 침수 등의 자연재해가 발생하며, 동절기에는 북서 계절풍에 의한 폭풍과 해안침식, 월파, 표사이동 등이 현상이 발생하는 등 자연조건이 매우 가혹한 편이다(양, 2005)

제주도는 북위 33°11′- 33°33′, 동경 126°08′- 126°58′에 위치하고 있으며, 인구와 산업 그리고 경제활동 대부분이 임해부를 중심으로 활발히 전개되고 있다. 최근에는 국제자유도시로 발돋움하기 위해 국제도시로의 위상을 확립하고 동북아 관광거점도시로 개발을 위해 국제자유도시종합계획(2002-2011)을 수립하여하여 운용 중에 있다. 특히 연안역을 중심으로 한 해양관광단지의 개발과 5개 항만개발계획 등이 추진되고 있어 연안역의 해양환경에 대한 관심이 집중되고 있다.

연안해역의 해수유동은 조석에 의한 조류, 외양역을 흐르는 해류, 하천 유출수, 밀도류, 바람에 의한 취송류 등에 의하여 지배되며, 해안선 및 해저지형 등에 의하여 매우 복잡하고 비정상적인 유동양상을 나타낼 수 있다. 또한 최근 연안해역의 지속적인 개발로 인하여 연안역의 해수유동에 인위적인 변화를 가져왔고, 이로 인한 해양환경의 변화가 문제시되고 있는 실정이다(강, 1999).

연안역을 개발할 때는 해상과 기상조건으로부터 자연재해를 최소화 하도록 사전에 충분한 연구·조사와 함께 예방책을 수립하는 것이 중요하다. 하천 하구역의 개발이나 해양매립이 해양환경의 변화에 영향을 미치는 요인 중에는 먼저 매립 또는 그 부대시설의 존재가 환경변화에 영향을 미치는 경우가 있다. 특히 항만을 건설하거나 해안 및 하구역을 개발할 때는 해안지형과 함께 기상 및 해상(해수유동, 파랑, 표사이동) 등이 중요한 환경요소가 된다. 해

안매립이나 개발로 인한 파랑, 해일, 고조, 표사, 하천수, 해수유동 등의 변화는 연안해양의 환경특성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 연안해역의 물리해황 및 수질환경을 예측하기 위해서는 정확한 연안해역의 유동현상재현에 대한 연구·조사가 필수적이다.

## 2. 연구목적

제주항을 포함한 제주 외항 인근해역에 대한 해수유동의 특성과 해류계를 조사하여 제주외항에 단계적으로 건설할 접안시설의 확충과 해양관광시설로 인해 해양환경·해양수리학적인 변화가 예상한다. 특히, 외항해역에 대한 해조류 관측 조사 및 해양관측 자료를 이용하여 단계별 항만공사에 따른 해수유동의 변화와 구조를 관찰하고, 그 변화특성을 정밀하게 분석·검토할 필요가 있다.

이 연구에서는 제주외항을 포함한 연안해역의 해류관측자료와 연안역에서 관측한 해수유동의 자료를 분석하여 시공간적인 해류계의 특성 및 해수유동의 구조를 파악한다. 이들 결과를 이용하여 그 첫 단계로서 제주외항공사 및 내항의 어항 분구공사가 수행되기 이전의 제주항 부근의 해역을 연구대상으로 3차원 해수유동모델에 의한 수치해석을 실시하여 해수순환의 기구를 규명하고자 한다. 이러한 결과는 제주항 및 인근해역의 항만이나 해양구조물 및 연안해역의 개발시 기본계획·실시설계를 수립하거나 제주외항의 단계별 공사로 인한 해수유동의 변화로 예상되는 해양환경의 영향을 분석하는데 기초 자료로 활용될 수 있다.

이러한 해수유동연구에 사용되고 있는 3차원 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM) 및 본 연구의 대상해역인 남해동부해역의 해수유동에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Blumberg와 Mellor(1987)는 시그마 좌표계에서 자유수면을 고려할 수 있는 본 모델을 개발하여 미국 북부 California 해안에서의 용승류와 동안경계류(eastern boundary current)를 계산하여 모델의 효율성을 입증하였다. 이 모델이 적용된

경우를 살펴보면, 미국 Chesapeake Bay에서의 조석재현, 미국 연안의 중·남부 Atlantic Bight와 멕시코의 대순환 계산 등이 있다(Blumberg, 1987). Moores와 Kang(1997)은 쓰시마난류에 대하여 연직방향 26개층, 수평방향 격자간격은 10km의 해상도를 가지는 POM을 동해에 적용하여 그 연직순환구조를 수치모의 하였다. 黒山 順二(1998) 등은 수온, 염분 및 바람장을 초기조건 및 경계조건을 이용하여 연안해역에 분포하고 있는 만의 형상에 따라 외해에 대한 개방도를 분류하여 외양으로부터의 영향에 대한 연안해수유동 변화특성을 정략적으로 평가·예측을 시도하였다. 국내의 경우, 해양연구소(1996)는 POM을 황해 및 동해전역을 포함한 북서태평양을 대상으로 하는 영역에 적용(KEY모델)하여 쿠로시오 해류가 미치는 각 해역의 유동 특성 및 수온·염분장에 대한 계절적 분포에 대하여 연구하였다. Hong 등(1997)은 득량만에 적용하여  $M_2$ 분조를 고려한 수온 및 속도장의 반응에 대하여 연구하였다. 해양연구소(1997)에서는 하계에 황해로 유입되는 양자강 하천수 Plume의 확산거동해석을 모의하였다(윤, 2003).

제주외항을 포함한 제주북부해역의 해수유동에 관한 연구로서 제주지방해양수산청(2002)에서 일본 大阪大學에서 개발되어 東京灣 및 大阪灣 등의 여러 해역에서의 유동 및 수질구조를 해명하는데 적용되었던 모델인 ODEM(Osaka Daigaku Estuary Model)을 사용하여 제주외항 방파제축조에 따른 해수유동의 영향을 3차원모델을 이용하여 연구하였다.

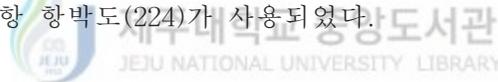
상기 연구는 대상해역의 조석 및 조류에 대한 일반좌표에 따른 유동만 언급하고 있기 때문에 본 연구에서는 대상해역의 실시간 조석·조류에 대한 3차원 유동 특성에 관하여 시그마좌표계를 이용하고, 풍속·풍향을 고려하여 조사하는데 목적이 있다.

## II. 자료 및 방법

### 1. 조위관측 자료

제주항 부근해역의 평균적인 풍향·풍속자료는 제주기상청에서 관측한 30년(1971-2000)간의 월별평균 풍속자료를 사용하였으며, 풍향은 30년간의 풍향 자료를 36방위로 빈도분석을 실시하여 동계와 하계의 자료로 하였다. 이들 자료는 해수유동을 재현하기 위해 수행된 3차원 수치해석시 입력자료로 사용되었다.

연구대상 해역 및 조위·해조류 관측 지점을 Fig. 2에 나타내었으며, 관측일정 및 기간은 Table 1과 같다. 조위 자료는 St. N-8(2002년 5월 12일~2002년 6월 10일)와 St. B-1(2005년 6월 30일~2005년 7월 28일) 및 St. B-2(2005년 1월 10일~2005년 2월 8일)에서 관측된 30일간의 조위자료가 사용되었다. 실측조위는 해수유동특성 파악과 수치해석시 입력자료와 모델의 검정시 비교·검토 되었다. 또한, 제주도 부근 및 제주 외항의 수심자료는 해양조사원의 수치지도와 2004년에 발행된 제주항 항박도(224)가 사용되었다.



### 2. 해수유동 조사

해양기초자료 조사 및 분석을 위하여 기존의 관측자료 및 추산자료를 검토·분석하여 해수유동 수치실험의 입력 및 검증자료 등으로 활용하였다. 조석주기에 따른 연속적인 유황의 변화 상태를 파악하기 위하여 유속계 RCM-7(Aandderra)에 의한 8개의 정점(St. 1~ St. 8)에서 관측(NORI)된 자료를 사용하였다. 이들 관측자료 중 25시간의 자료로서는 대조기시에는 3개 관측지점(St. N-2, St. N-5, St. N-7)이며, 소조기시에는 4개 관측지점(St. N-1, St. N-3, St. N-4, St. N-6)으로 매 10분 간격으로 관측되었다. St. N-8은 30일간(2002. 5.12~2002. 6.10) 10분 간격으로 연속 관측되어진 자료이다.

제주외항 항만공사 현장부근에서는 Iotech사의 해상관측시스템을 사용하여 Baytech사와 제주대학교 해양수리학 연구실이 공동으로 최대파고, 최대파주기, 유의파고, 유의파주기, 유속, 유황, 파향, 수온을 관측하였다. 본 연구에서는 조위, 유속 및 유황자료를 사용하여 조류관측자료를 분석하였다. 해류계는 한 정점의

유동상태만을 반영하기 때문에 해수입자의 연속적인 이동 상태를 알 수 없는 단점이 있으므로 필요시 이를 보완하기 위하여 시·공간적으로 가능한 많은 관측점을 선정하여 조사하였다.

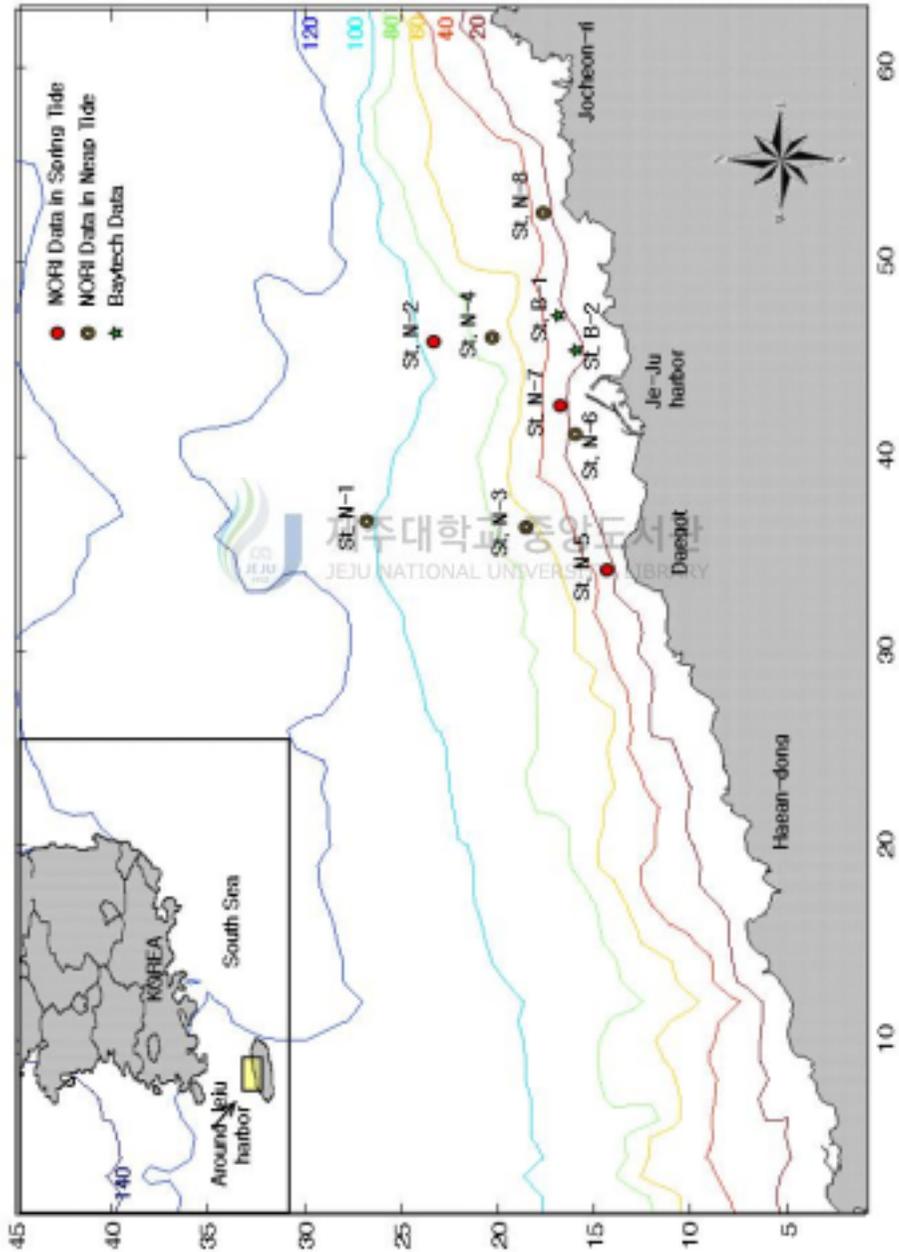


Fig. 1 Research area, Tidal elevation and current observation station

Table 1. Observation point position and duration

조사기관	측점	위치		수심	관측기간
		위도	경도		
Bayteck	St. B-1	33°32' 00"	126°33' 40"	24m	2003. 6. 30 ~2005. 7.28
	St. B-2	33°32' 05"	126°33' 50"	24m	2005. 1. 10 ~2005. 2. 9
NORI	St. N-1	33°32' 00"	126°27' 00"	22m	1994. 4. 24 ~1994. 4. 25
	St. N-2	33°33' 00"	126°32' 00"	26m	1994. 4. 23 ~1994. 4. 24
	St. N-3	33°37' 00"	126°35' 00"	78m	2002. 5. 24 ~2002. 5. 25
	St. N-4	33°37' 30"	126°29' 30"	81m	2002. 5. 12 ~2002. 5. 13
	St. N-5	33°35' 01"	126°35' 00"	57m	2002. 5. 13 2002. 5. 14
	St. N-6	33°35' 30"	126°29' 00"	62m	2002. 5. 12 ~2002. 5. 13
	St. N-7	33°31' 52"	126°32' 14"	21m	2002. 5. 13 ~2002. 5. 14
	St. N-8	33°32' 30"	126°35' 30"	25m	2002. 5.12 ~2002. 6.10



Fig. 2. Baytech measurement system and RCM-7 current meter

### Ⅲ. 제주항 연안의 조석 및 해조류의 분석

#### 1. 조위 특성

제주항 연안해역의 조위 관측 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 대조기시 관측점 St. N-8과 St. B-1에서의 조위, 소조기시 St. 2에서 조위의 시계열을 나타내었다. 이 시계열 자료로부터 제주외항 해역은 일조부등이 현저함을 알 수 있으며, 조차는 2 m 정도로서 제주항의 검조소에서 관측된 평균조차 2.028m와 거의 같은 값을 보이고 있다.

Table 2는 현장에서 관측된 조위 자료를 이용하여 조석조화상수를 산정한 결과 이다. 본 조사 결과에서는 St. N-8지점에서 15일간의 관측된 자료를 분석한 결과 조화상수는 각각  $M_2$ 분조의 진폭은 67.4cm, 지각은 313.6°,  $S_2$ 분조의 진폭은 26.4cm, 지각은 326°,  $O_1$  분조의 진폭은 24.3cm, 지각은 219.2° 그리고  $K_1$ 분조의 진폭은 16.0cm, 지각은 195°이었다. 국립해양조사원에서 1964년부터 1999년까지 제주항의 조위자료로부터 조사된 고극조위는 1974년 8월에 3.24 m로 나타났다(국립해양조사원, 2000).

Table 2. Tidal harmonic constants of Jeju harbor

위치	제주(기준)		제주	
위도	33°31' 00"		33°31' 00"	
경도	126°32' 00"		126°32' 00"	
기간	'64.1~'65.3			
분 조	조화상수		조화상수	
	반조차 (cm)	지각 (°)	반조차 (cm)	지각 (°)
주 태 음 반 일 주 조( $M_2$ )	71.3	304.9	67.4	313.6
주 태 양 반 일 주 조( $S_2$ )	30.1	326.4	26.4	326
일 월 합 성 주 조( $K_1$ )	23.0	211.1	24.3	219.2
주 태 음 일 주 조( $O_1$ )	17.3	189.9	16.0	195

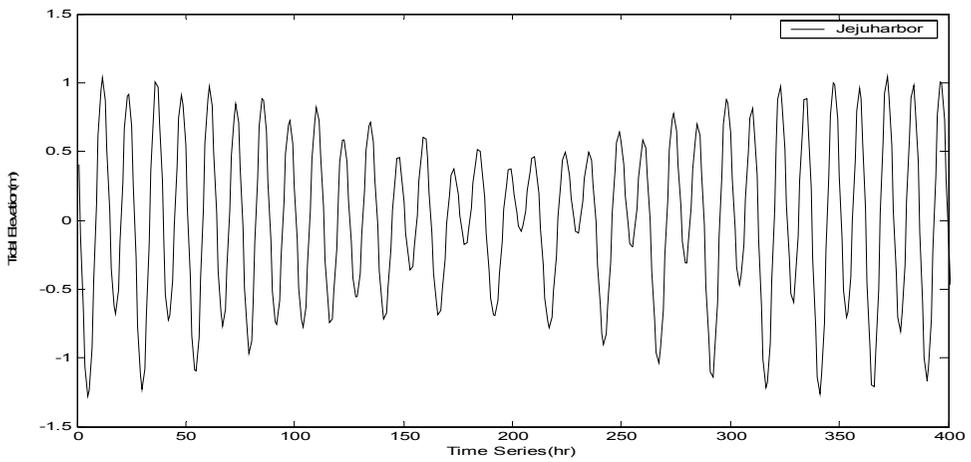
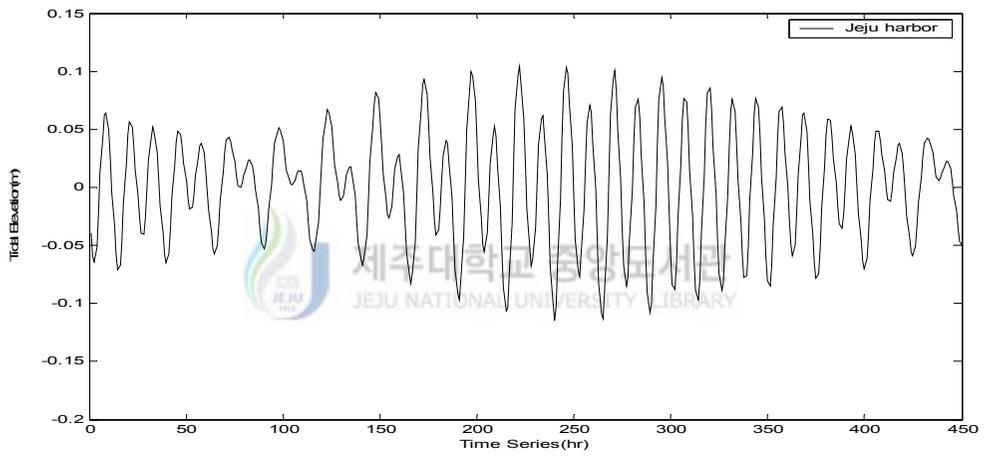
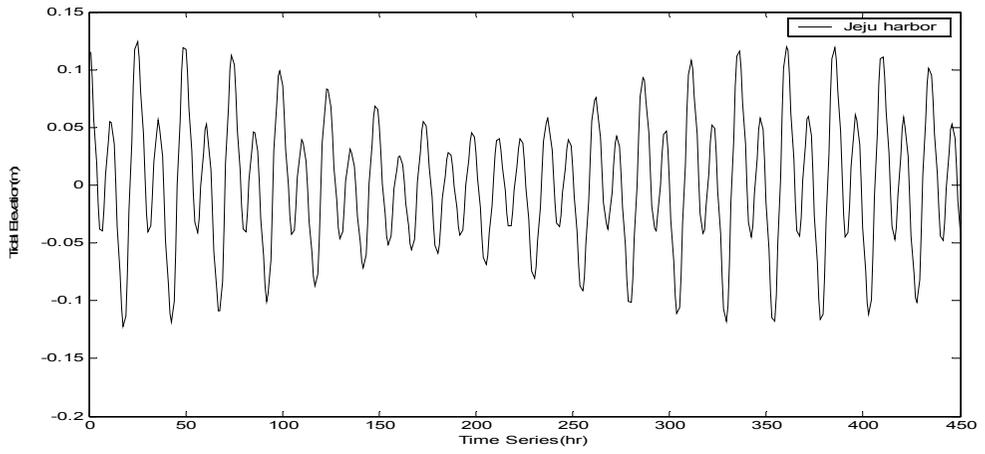


Fig. 3. Tidal elevation at N-8, B-1 & B-2

## 2. 해수유동 특성

제주항을 포함한 제주외항 부근해역의 해수유동 양상을 파악하기 위하여 Fig. 2의 관측지점에서 Table 1에 제시한 관측기간의 유속 및 유향 자료를 분석하였다. 분석된 항목은 25시간 데이터를 이용하여 각 정점의 유속성분도, 조류타원도, Stick Diagram, Progressive Vector, 조석잔차류도를 나타내었으며, 15일 이상의 관측자를 이용하여 유속성분도, Stick diagram과 U, V성분 및 각 분조별 Stick Diagram을 나타내었다.

Fig. 4는 각 지점에서의 유속성분도를 나타내고 있으며, Fig. 5~6은 각 지점에서 조류타원도를, Fig. 7~9는 유속 Stick diagram 및 U, V성분을 나누어 나타낸 것이다. Fig. 10~11은 분조별 Stick diagram, Fig. 12~13은 Progressive Vector를, Fig. 14는 연구대상해역의 조석잔차류의 분포를 보이고 있다.

제주항 연안해역의 해조류는 북동동류~남서서류 또는 동류~서류하는 흐름이 지배적이다(Fig. 4). 그러나 제주외항 공사가 진행 중에 있는 측점 St. B-1에서 주흐름의 방향은 전체적으로는 유사한 경향을 보이고 있으나, 연안역에서 외해로 향하는 남북성분의 흐름도 약간 보이고 있어 해저지형의 영향으로 사료되는 효과가 나타나고 있다. Fig. 4는 제주항 서방과제 말단부와 근접한 St. N-6과 St. N-7 지점의 유속성분도와 연구영역 중 외해역에 해당되는 St. N-1과 St. N-2 지점의 그리고 연구영역의 중간부분에 해당되는 St. B-1과 St. N-8의 유속성분도를 나타내었다. 이들 결과로부터 제주외항 부근해역의 조류의 흐름은 해안선과 거의 평행한 동서방향으로 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 제주항 서방과제 말단부와 근접한 St. N-6과 St. N-7 지점에서의 유속성분도는 다른 유속도와는 다르게 동류하는 유속이 관측점 중 가장 강한 유속(94.7cm/s)을 보이고 있다.

Fig. 7-8은 25시간 자료의 Stick diagram과 U-V 성분도를 나타내고 있다. St. N-7 지점에서의 평균유속은 42.195cm/s, 최대유속은 94.7cm/s로 흐름이 가장 강하게 나타나고 있다. St. N-1, St. N-2지점에서의 평균유속은 30~36cm/s, 최대유속은 72~81cm/s로 큰 차이가 없었으나, St. N-6 지점에서는 평균유속 19cm/s, 최대유속은 48.5cm/s로 현저히 약하게 나타나고 있다. 이러한 현상은 낙조류시보다 창조류시에 강하게 나타나고 있다. Fig. 9는 관측한 자료 중 15일간의 유속, 유향의 값을 조화분해하여, Stick diagram과 U, V성분 그리고 각 분조별 Stick Diagram을 나타낸 것이다. St. B-1에서의 유속은 최대유속 42cm/s, 평균유속 18.9cm/s로 다른 지점에 비하여 현저히 작게 나타나고 있으며, 흐름의 방향은 동

서, 남북방향으로 고르게 나타나고 있다. St. N-8에서의 최대유속은 79.2cm/s, 평균유속은 32.3cm/s이고, 동서방향의 흐름이 강하게 나타나고 있다.

Fig. 12~13은 Progressive Vector도 나타낸 그림이다. 연구영역의 내해에서는 서방향의 흐름이, 연구영역 외해에서는 북동류의 흐름을 보여주고 있다.

Fig. 14는 25시간 해조류 관측 자료를 이용하여 각 지점의 향류성분을 나타낸 그림이다. 모든 지점에서 방향은 북동방향, 크기는 15cm/s내외의 흐름임을 알 수 있다. 그러나 St. N-6지점에서는 30cm/s이상의 흐름을 보여주고 있다. Fig. 15는 관측지점에서의 향류성분을 대상해역위에 표현한 것이다.

25시간 데이터를 살펴보면, 일조부등이 탁월하며, 유속의 흐름은 동서방향이 남북방향보다 강하게 나타나고 있으며, 각 지점에서의 U성분은 (+)값이 크게 나타나, 즉 동방향의 흐름인 낙조류시의 흐름이 강하게 나타남을 알 수 있다. 최대 유속은 94.7m/sec 이었다. St. N-7지점은 조석에 의한 유속값은 다른 지점에 비하여 현저히 적으며, 향류의 의한 흐름은 현저히 커서 이 지점의 유속은 다른 힘에 의한 흐름이 발생되어진다고 사료된다.

대조기시 관측되어진 15일 데이터 중 관측지점 St. B-1은 동방과제의 북동쪽 해상에 설치되어있는데, 이곳은 계획 중인 제주의항 방과제의 중간부분에 해당하는 곳으로 서방과제의 건설로 인한 차폐역의 발생과 동방과제를 따라 흐르는 흐름의 발달로 창·낙조시의 유동이 특이하게 발달하고 있음을 보여주고 있다. 이들 자료로부터 제주항의 유속은 반일주조성분이 탁월하며,  $M_2$ ,  $S_2$  분조에 따른 조류변화가 현저함을 보여주고 있다.

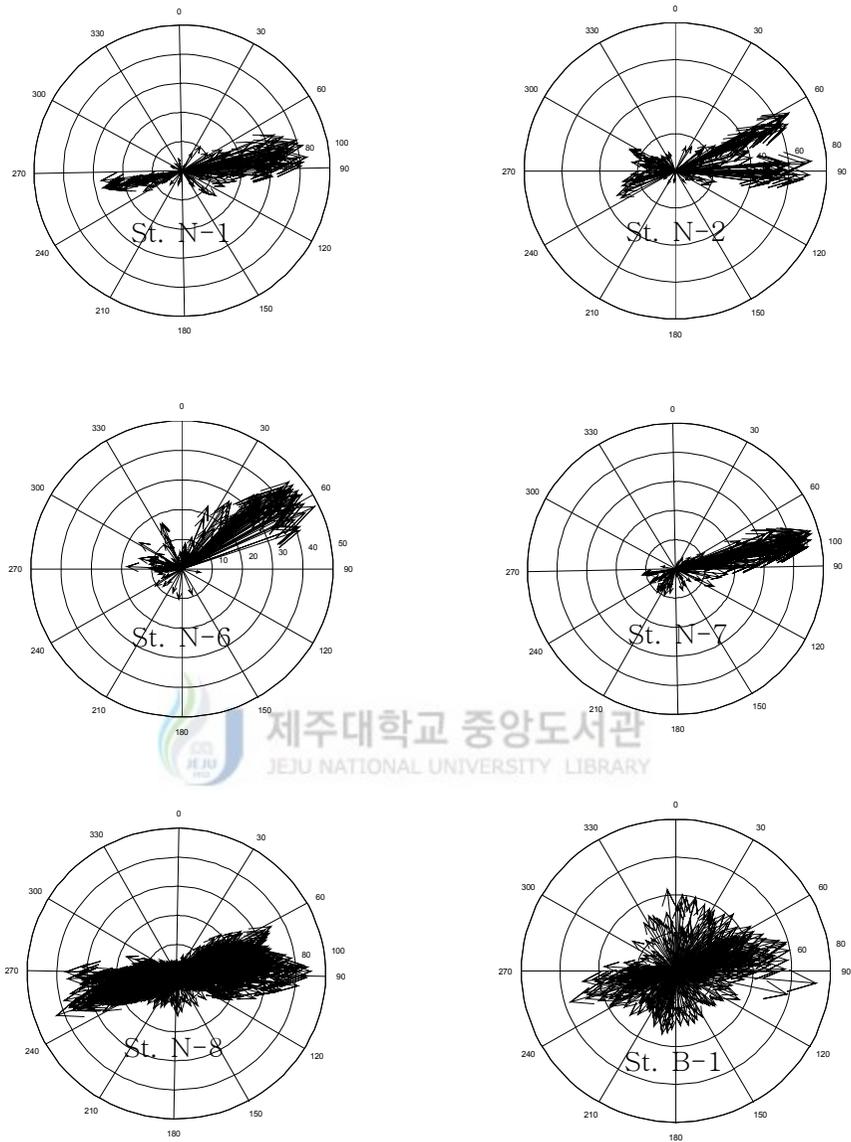


Fig. 4 Vector diagram of tidal current observed in St. N-1 and St. N-2(upper), St. N-6 and St. N-7(middle), St. N-8 and St. B-1(lower)

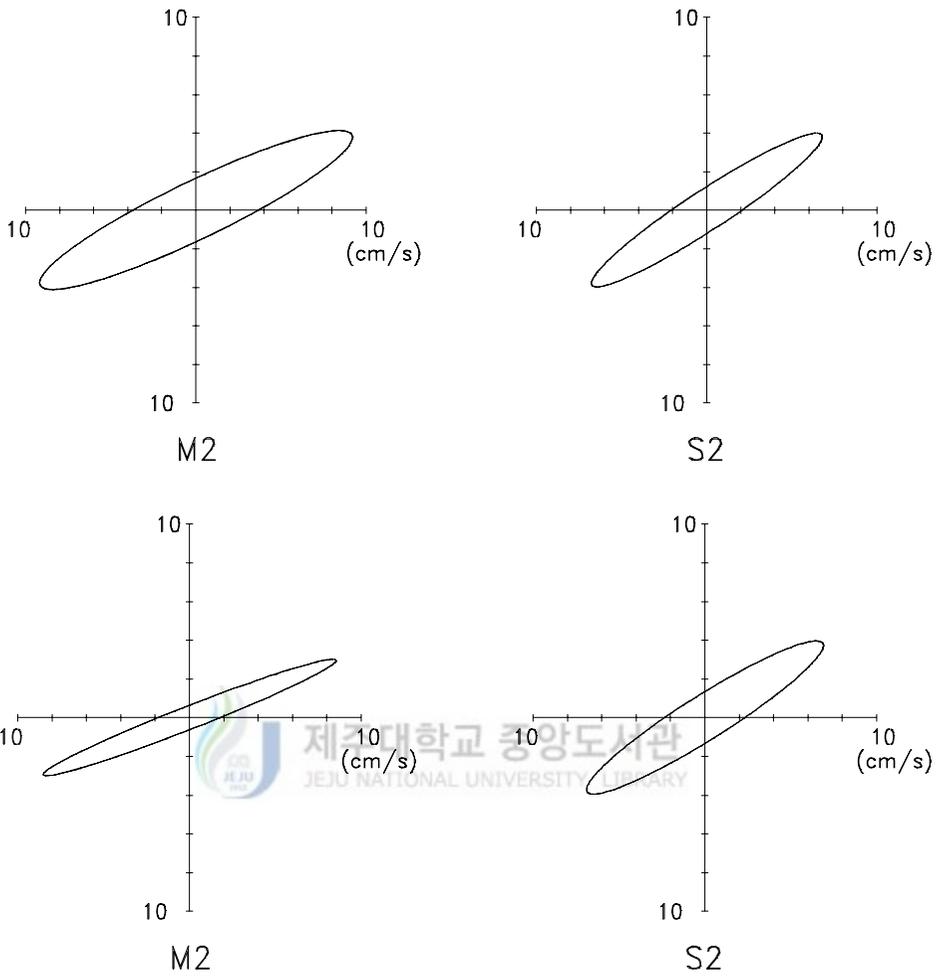


Fig. 5. Tidal ellipse at St. N-1 and St. N-2

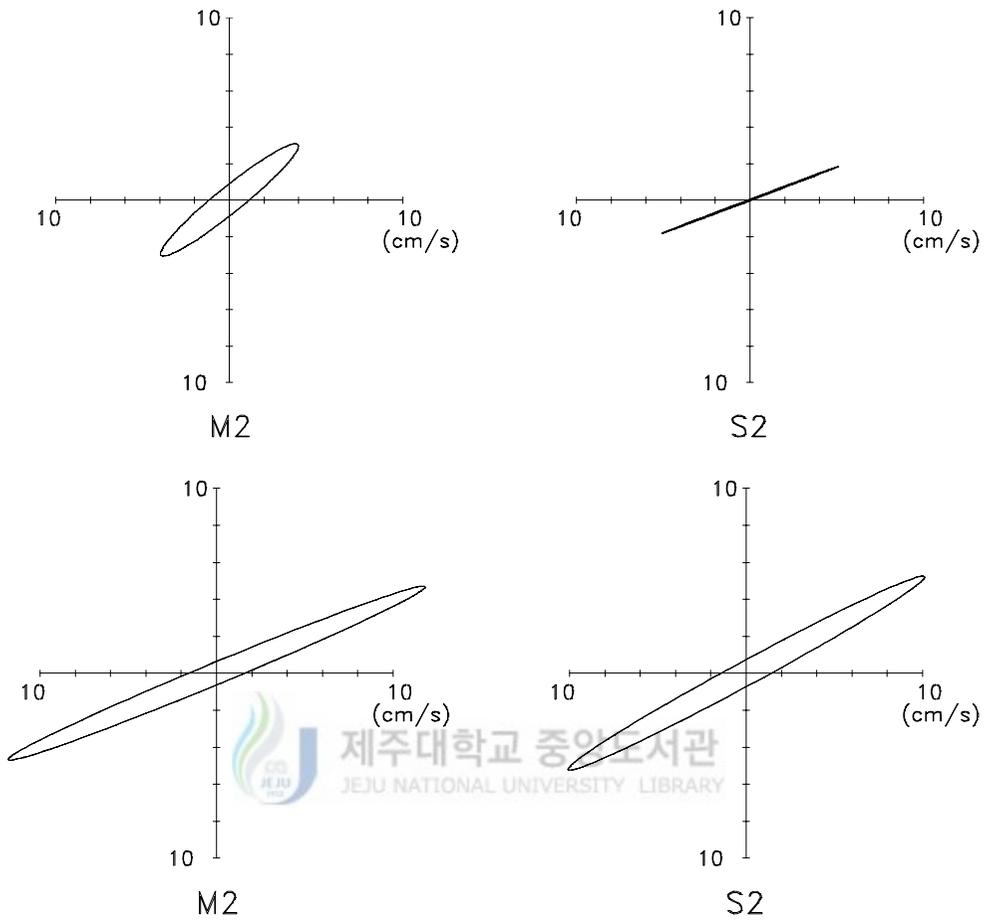


Fig. 6. Tidal ellipse at St. N-6 and St. N-7

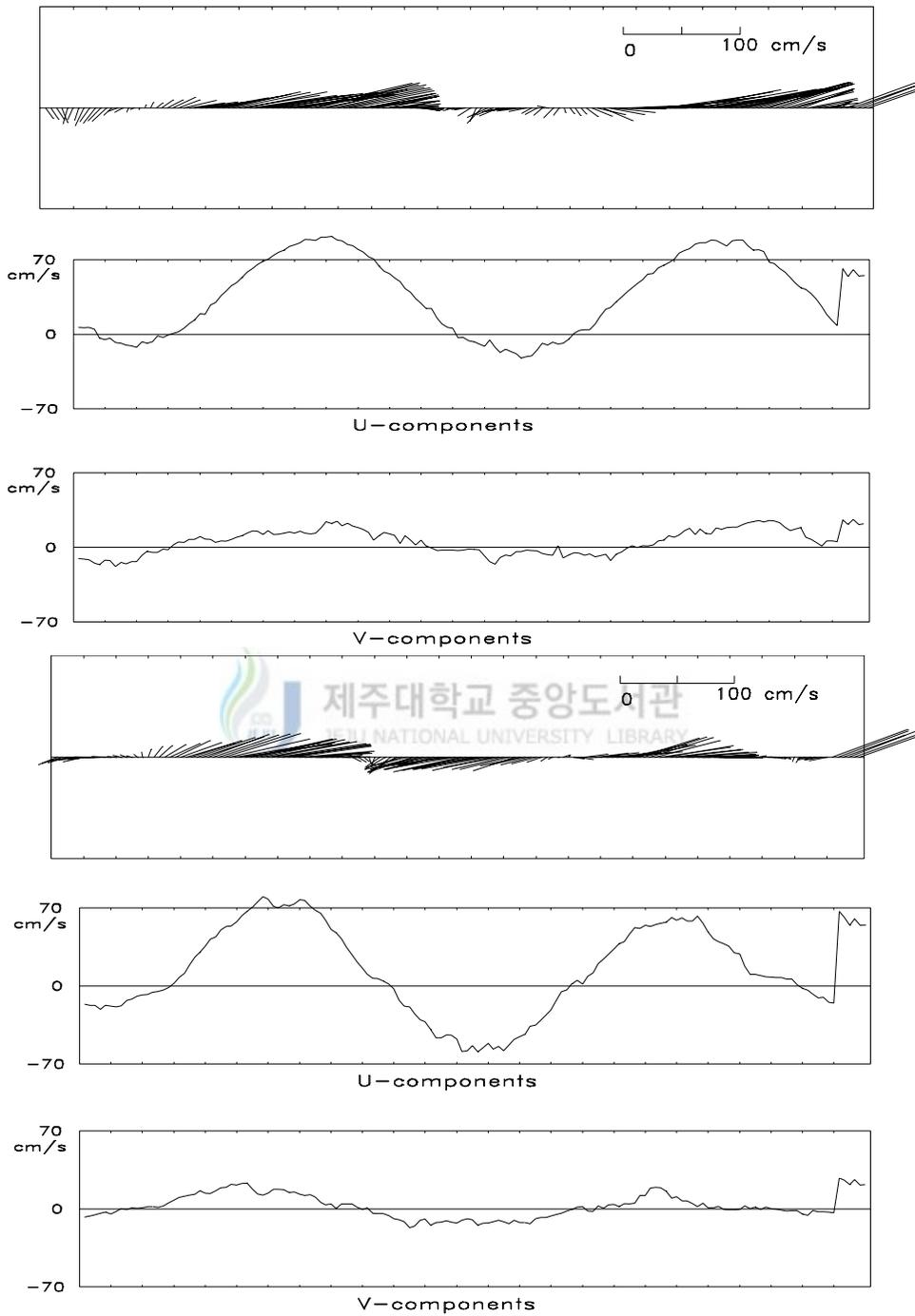


Fig. 7 Stick diagram and U-V components at St. N-1(upper) and St. N-2(lower)

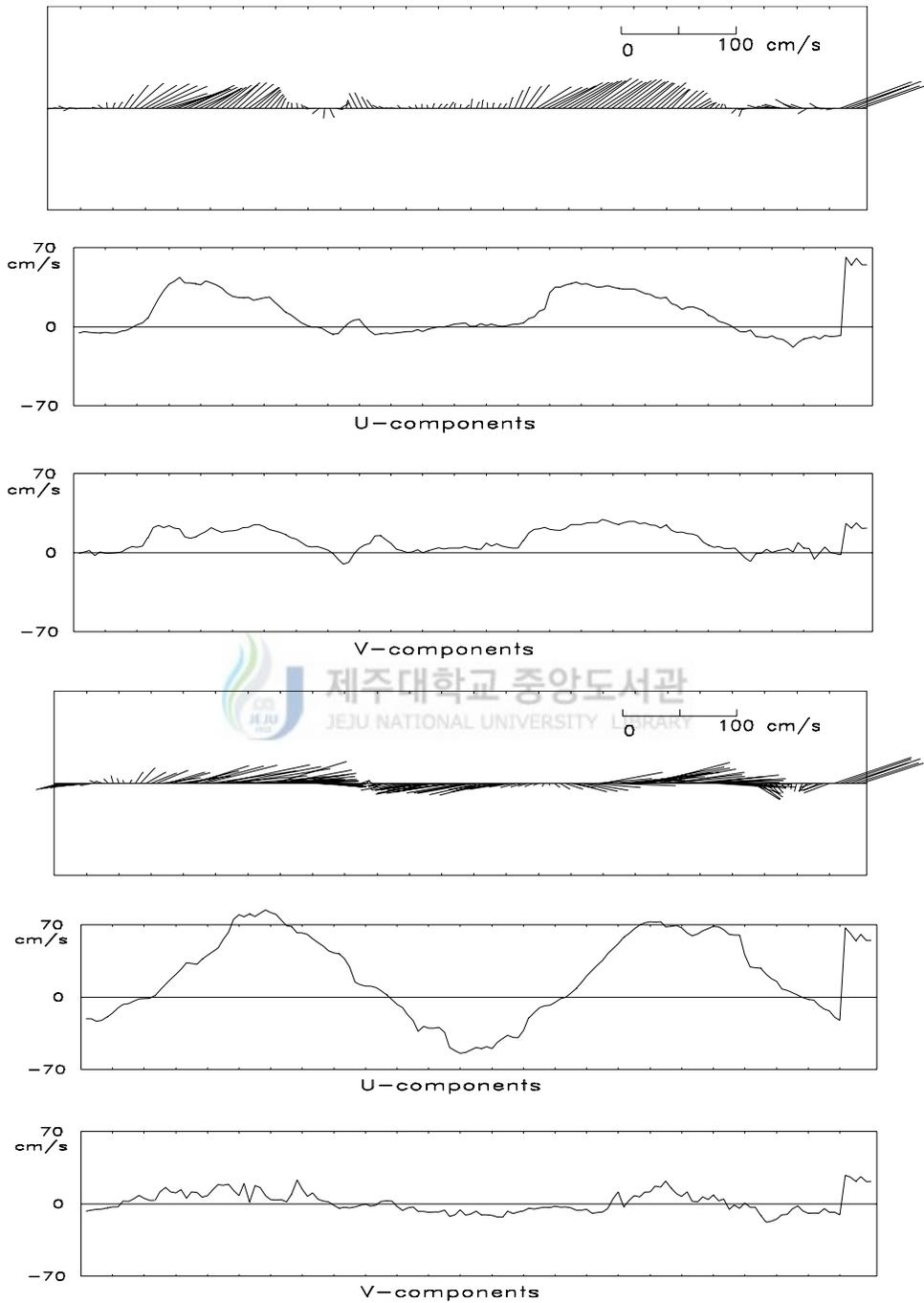


Fig. 8 Stick diagram and U-V components at St. N-6(upper) and St. N-7(lower)

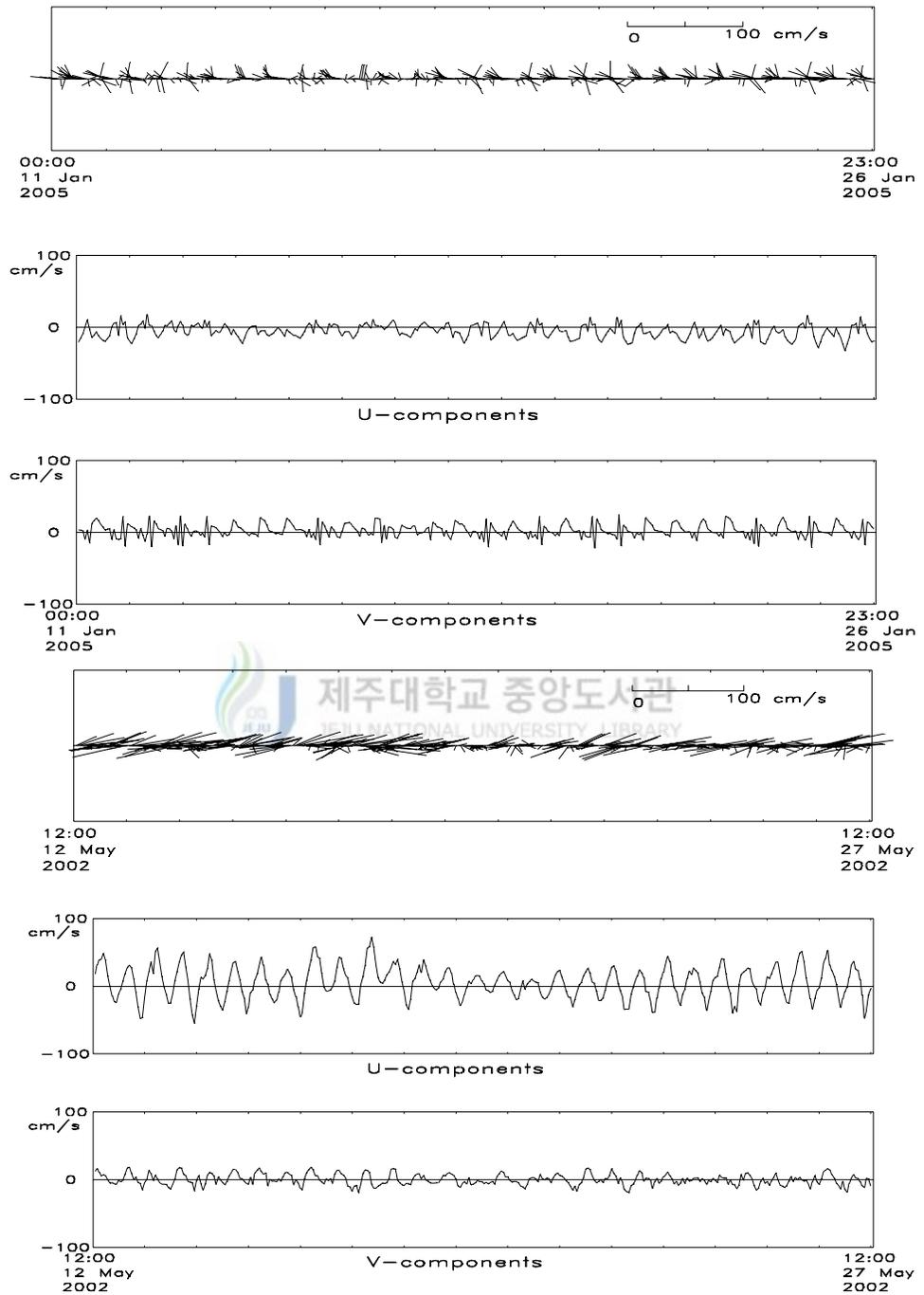


Fig. 9 Stick diagram and U-V components at St. B-1(upper) and St. N-8(lower)

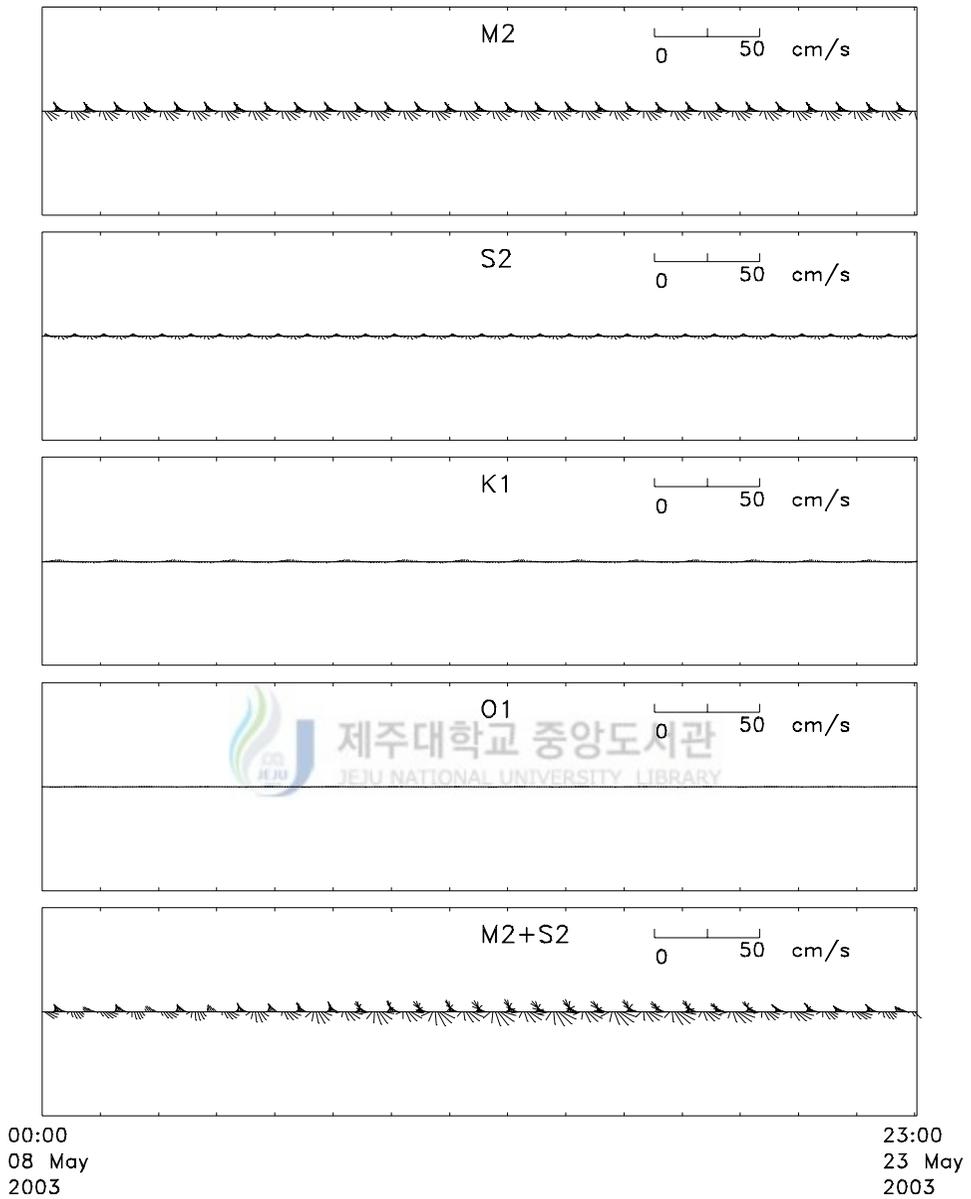


Fig. 10 Stick diagram of tidal ellipses at St. B-1

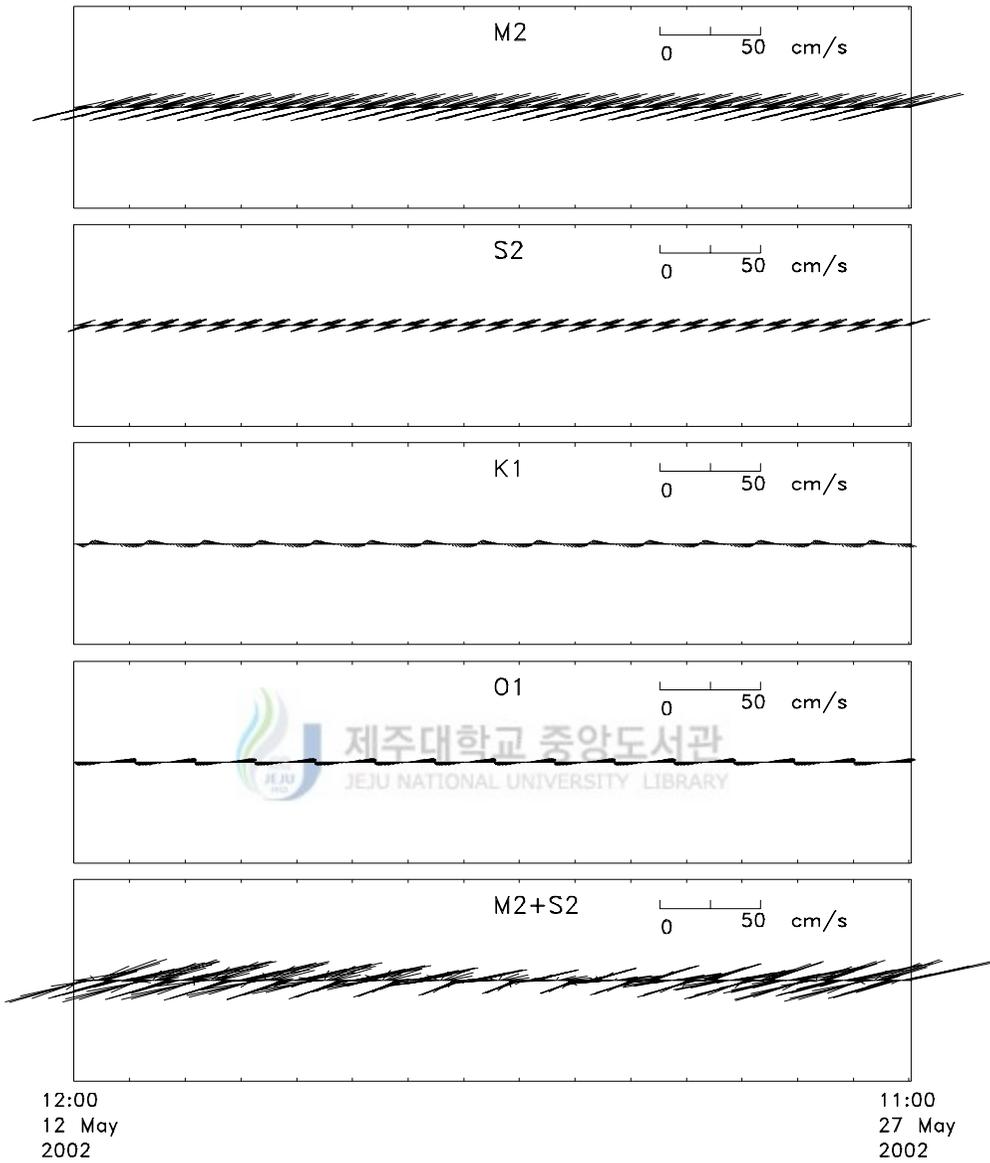


Fig. 11 Stick diagram of tidal ellipses at St. N-8

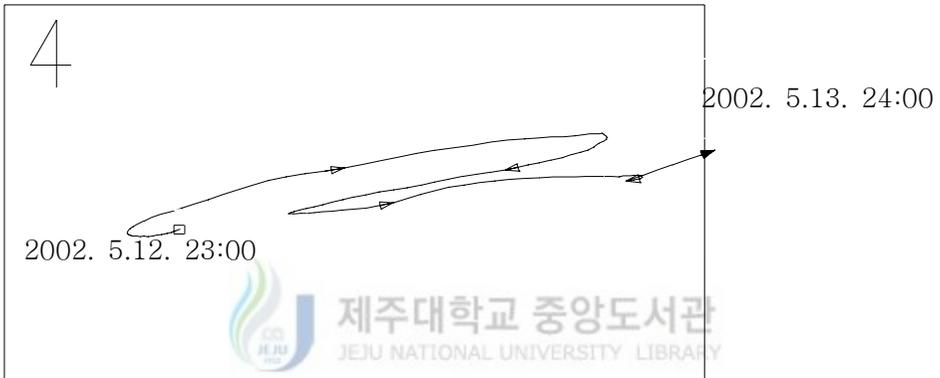
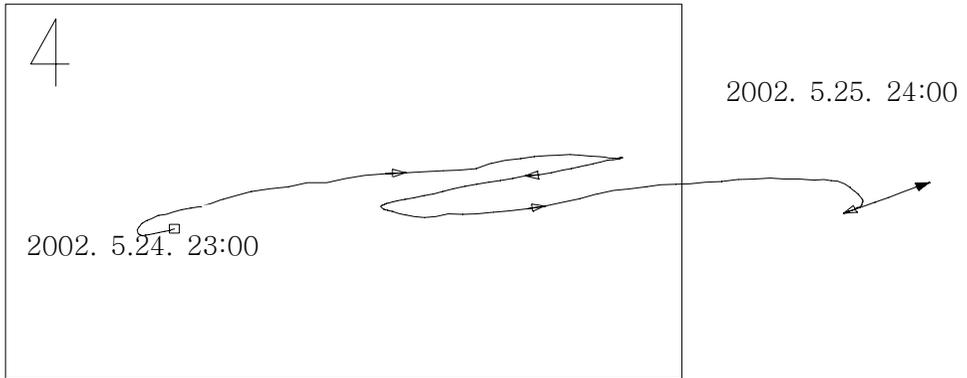


Fig. 12 Progressive vector at St. N-1(upper) and St. N-2(lower)

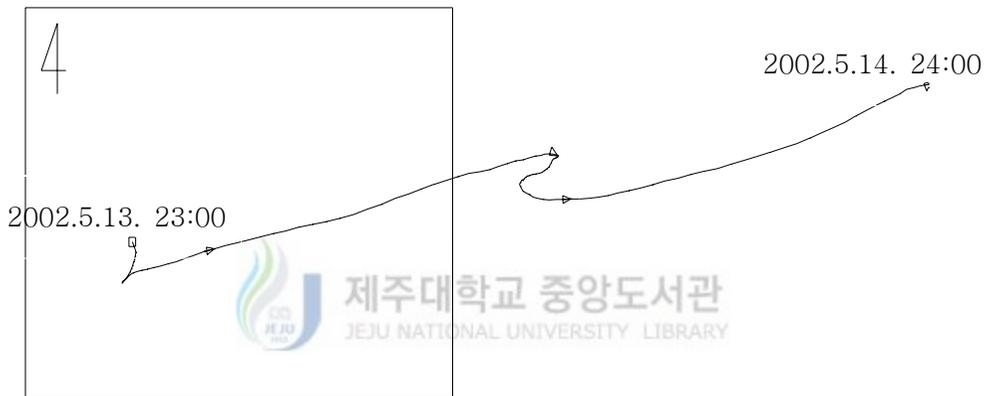
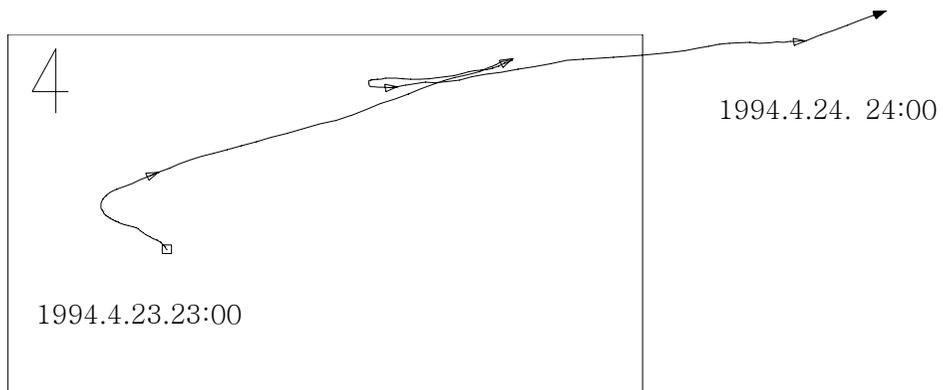


Fig. 13 Progressive vector at St. N-6(upper) and St. N-7(lower)

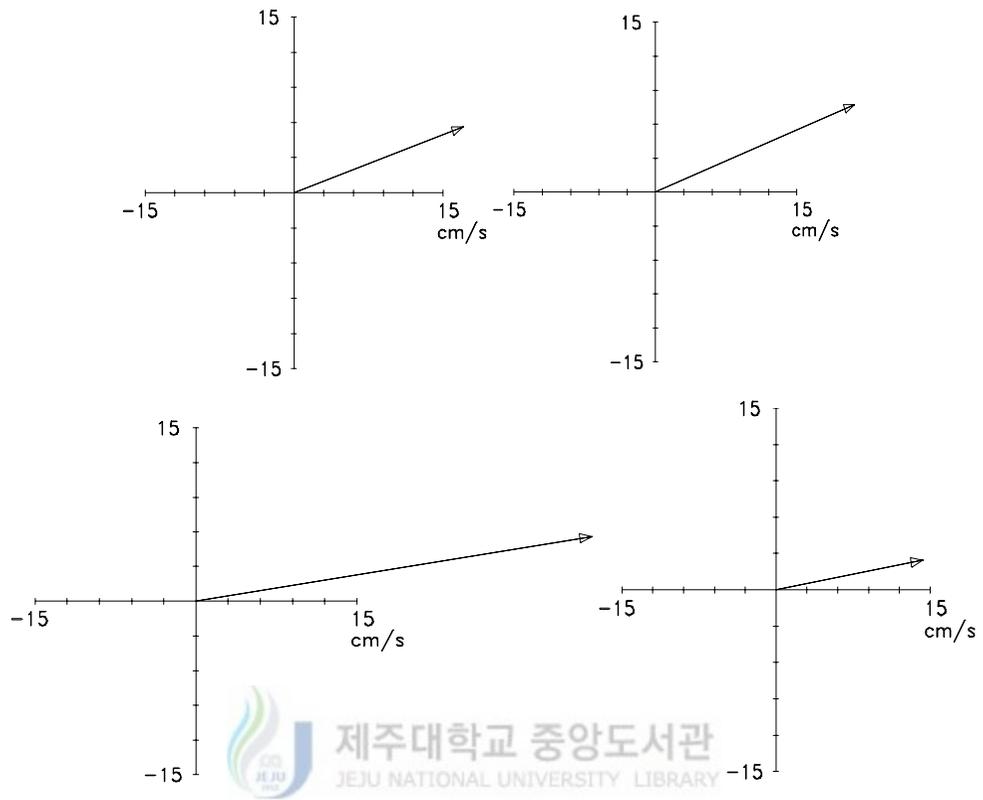


Fig. 14 Non-tidal current diagram at St. N-1(upper left), St. N-2(upper right), St. N-6(lower left) and St. N-7(lower right)

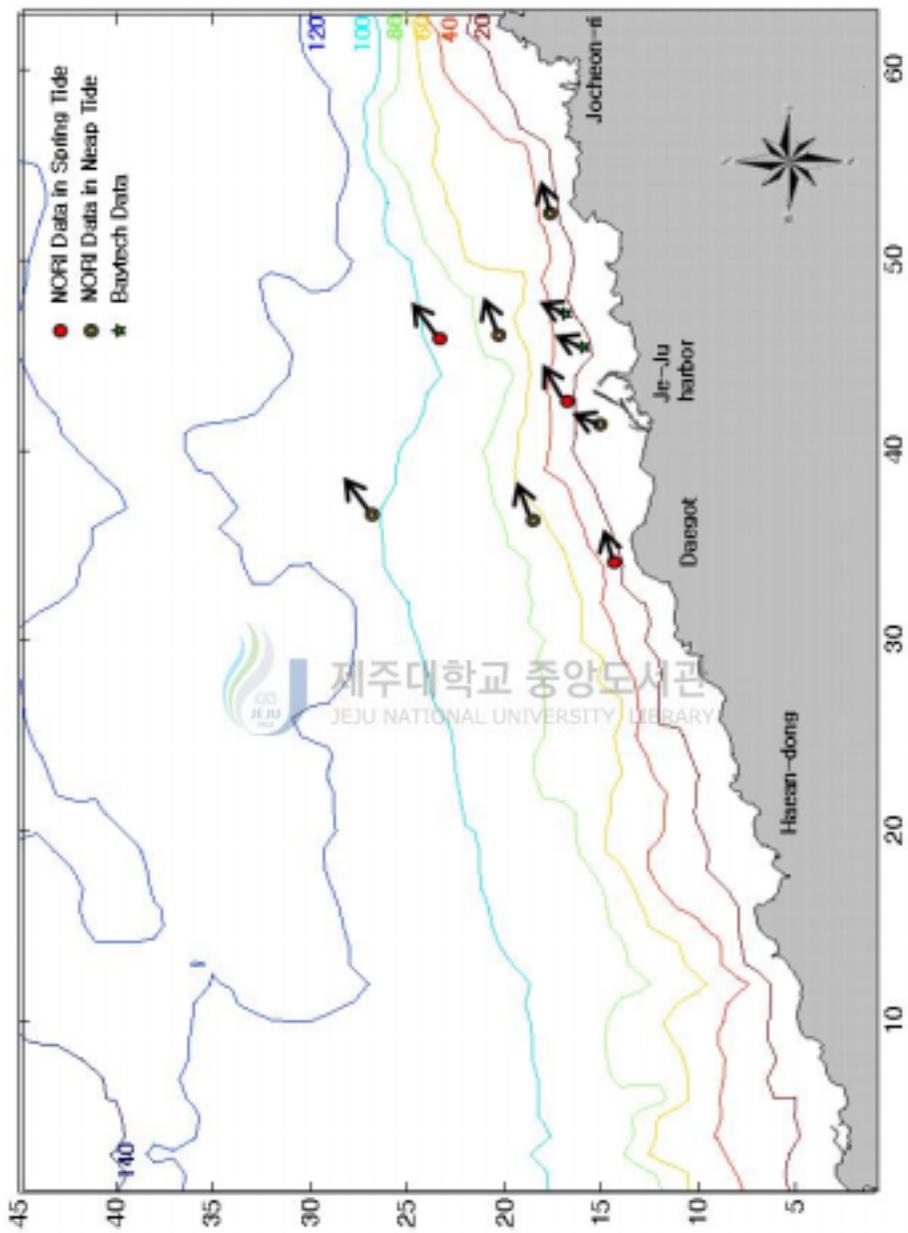


Fig. 15 Non-tidal current diagram around Jeju harbor

### III. 3차원 해양수치모델(POM)

#### 1. 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM)의 개요

본 연구에서 사용되고 있는 3차원 해양순환모델 POM은 Alan F. Blumberg와 George L. Mellor(1987)에 의해 개발되었고 다음과 같은 특징이 있다.

- 연직혼합계수를 산정하기 위하여 2차 난류종결모델을 이용하고 있다.
- 연직좌표를 수심에 대하여 분해하는  $\sigma$ -좌표계를 도입하고 있다.
- 수평격자는 직교곡선좌표(curvilinear orthogonal coordinates)를 고려할 수 있으면, 'Arakawa C' 격자체계를 도입하고 있다.
- 수평시간차분은 양해법(explicit)으로 연직시간차분은 음해법(implicit)으로 풀고 있으며 후자의 도입에 의해 연직좌표에 대하여 시간 제약성이 완화되고, 표층과 저층의 경계층에서 상세한 연직해를 구할 수 있다.
- 이 모델은 자유표면과 시간스텝분리를 이용하고 있다. 이 모델에서의 외부모드는 2차원적이고 외부과속도에 기초한 짧은 시간스텝의 CFL조건을 취해야 하며, 내부모드는 3차원적이고 내부과속도에 기초하여 보다 긴 시간스텝의 CFL조건을 취할 수 있기 때문에 계산 효율성에 있어서 매우 경제적이다.
- 완전한 열역학방정식을 만족하고 있다.

상기와 같은 특징으로 인하여 이 모델은 수많은 연구자들에 의해 현재 해양대순환 및 연안해양순환에 관한 연구에서 많은 연구성과를 보이고 있다.

또한, 프린스턴대학의 Dynalysis와 NOAA의 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(GFDL)를 중심으로 POM 사용자간의 연구성과 및 bug patch 등 활발한 상호교류가 이루어지고 있다.

#### 1.1 $\sigma$ -좌표계에서의 지배방정식

일반적인  $x, y, z$  좌표계는 해저지형의 불규칙성이 큰 부근이나 국지적으로 속도경사나 압력경사가 급변하는 부근에서의 해수유동 변동특성을 재현하는데 있

어 다소 단점을 내포한다.

은 기존의 직각좌표계와  $\sigma$ -좌표계에 관한 기본적인 모식도를 나타낸다.

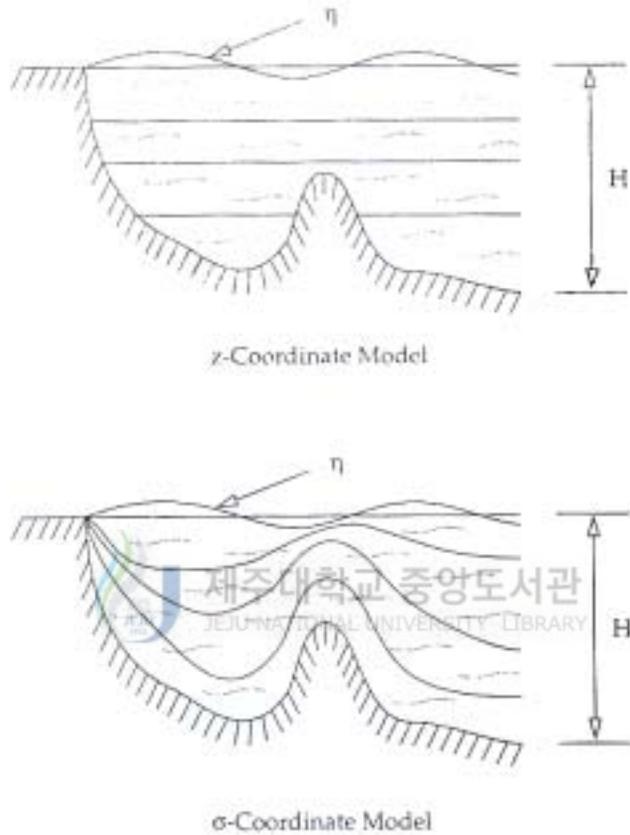


Fig. 16 Vertical divestiture in  $z$  and  $\sigma$ -coordinate system

본 수치모델의 기본방정식은 속도, 해수면 승강, 염분, 수온에 의한 밀도장을 기술하고 있으며, 단순화를 위한 근사로서는 일반적으로 사용되는 유체정역학적 근사와 부시네스크 근사가 사용되었다(Bryan, 1969).

여기서는 해수면과 해저면을 좌표표면으로 전환시키는 새로운 독립변수를 도입한다(Philips, 1957). 즉, 모든 방정식은  $(x,y,z,t)$  좌표에서  $(x^*,y^*,\sigma^*,t^*)$  좌표로 변형된다.

$$x^*=x, y^*=y, \sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}, t^*=t \quad (3-1)$$

그리고,  $D=H+\eta$ 라 두고 체인법칙(chain rule)을 적용하여 이전 직각좌표계에서의 미분항을  $\sigma$ -좌표계로 유도하면 다음의 관계가 얻어진다.

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial G}{\partial x^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial x^*} \right) \quad (3-1a)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial G}{\partial y^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y^*} \right) \quad (3-2b)$$

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{D} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (3-2c)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial t^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial t^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial t^*} \right) \quad (3-2d)$$

여기서,  $G$ 는 임의의 변수를 나타내고,  $\sigma$ 는  $z=\eta$ 인 곳에서  $\sigma=0$ 이고,  $z=-H$ 인 곳에서  $\sigma=-1$ 의 범위로 변한다. 새로운 연직속도는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega = W - U\sigma \frac{\partial D}{\partial x^*} + \frac{\partial \eta}{\partial x^*} - V\sigma \frac{\partial D}{\partial y^*} + \frac{\partial \eta}{\partial y^*} - \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial t^*} + \frac{\partial \eta}{\partial t^*} \right) \quad (3-3)$$

해수면과 해저면에서의 경계조건은

$$\omega(x^*, y^*, 0, t^*) = 0 \quad (3-4a)$$

$$\omega(x^*, y^*, -1, t^*) = 0 \quad (3-4b)$$

와 같이 되며, 연직적으로 적분된  $G$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\bar{G} = \int_{-1}^0 G d\sigma \quad (3-5)$$

연속방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

또한, 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K^M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma \\ + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_{\sigma}^0 \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma + DF_x \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K^M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma \\ + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial y} \int_{\sigma}^0 \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma + DF_y \end{aligned} \quad (3-8)$$

여기서,  $\rho_0$ 는 기준밀도,  $\rho$ 는 현장밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $K^M$ 은 난류운동량 혼합의 연직와동 확산계수이다. 위도 변화에 대한 코리올리 계수  $f$ 는  $\beta$ 평면근사를 사용하고 있다.

수온과 염분에 대한 보존방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K^H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + DF_T \quad (3-9)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K^H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + DF_S \quad (3-10)$$

여기서,  $T$ 는 포텐셜온도(또는 천해에서의 현장온도)이고,  $S$ 는 염분을 나타낸다. 열과 염의 난류혼합에 대한 연직와동확산은  $K^H$ 로 나타낼 수 있다. 수온과 염분을 이용하여 밀도는 다음 형태의 상태 방정식에 따라서 계산되어진다(Fofonoff, 1962).

$$\rho = \rho(T, S) \quad (3-11)$$

$\rho$ 는 포텐셜 밀도이고, 이는 대기압 하에서 온위와 염분의 함수로서 평가 되어진다. 그리고, 이것은 압력 경사함에 의한 압력효과가 중요하게 작용하는 심해에서

난류종결모델 내의 연직수괴의 안정성을 계산하기 위하여 정확한 밀도 정보를 제공한다.

모델에서 사용되는 격자간격 때문에 직접적으로 풀어지지 않은 작은 규모의 과정(process)에 기인하는 모든 운동은 수평혼합과정의 항으로 변수화된다. 식 (3-7),(3-8),(3-9),(3-10)에서의  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_T$  및  $F_s$  항은 직접 풀 수 없는 과정을 나타내며 분자확산과 유사하게 쓸 수 있다.

$$F_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( -\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (3-12a)$$

$$F_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (3-12b)$$

그리고

$$F_{T,S} = -\frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial (T,S)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial (T,S)}{\partial y} \quad (3-13)$$

여기서,  $F_x$ ,  $F_y$ 는 좌표계의 회전과 무관하다. 한편, 이러한 수평확산항은 격자 크기보다 작은 크기의 운동을 매개변수화한 것이나, 모델계산에서 수평확산계수  $A_M$ ,  $A_H$ 는 실제 작은 스케일의 계산오차를 감소시키는 역할을 한다.

$F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_{T,S}$  항에 있어서 변수  $A_M$ ,  $A_H$ 를 상수로서 사용하는 것도 가능 하지만 이러한 확산계수는 실제 현상의 과도한 평활화(smooth)를 야기할 수 있다. 일반적으로  $10m^2/s$  보다 작은 값들이 실제 현지에 적용되고 있지만 이러한 값은 수평 또는 연직해상도와 연관하여 사용해야 한다. 왜냐하면, 연직혼합효과에 따른 수평이류가 실제 물리현상에서 수평확산과 같이 작용하기 때문이다.

## 1.2 난류종결모델

지배방정식은 운동량, 열, 염분의 난류확산을 고려하여 매개변수화된 Reynolds 응력항과 Flux항을 포함되고 있다. 본 모델에서 도입된 난류의 매개변수화는 Mellor와 Yamada(1974)의 논문에 근거하여 서술하였다.

식(3-7), (3-8), (3-9), (3-10)에서 연직혼합계수  $K_M$ ,  $K_H$ 는 난류의 운동학적 에너지  $q^2/2$ 과 난류의 규모  $\ell$ 에 대한 방정식으로 난류를 특성화하는 Mellor와 Yamada(1982)의 2차 난류종결기법에 귀착하여 얻어지며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{Kq}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{2K^M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$+ \frac{2g}{\rho_0} K^H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{A_1} + DF_a$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 \ell D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 \ell D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 \ell D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{Kq}{D} \frac{\partial q^2 \ell}{\partial \sigma} \right) \\ &+ E_1 \ell \left\{ \frac{K^M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{g E_3}{\rho_0} K^H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right\} \\ & \quad - \frac{Dq^3}{B} W + DF_1 \end{aligned} \quad (3-15)$$

한편, 수평 점성과 확산항은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} DF_x &\equiv \frac{\partial \widehat{t_{xx}}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \widehat{t_{xx}} \right] \\ &+ \frac{\partial \widehat{t_{yx}}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \widehat{t_{yx}} \right] \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} DF_y &\equiv \frac{\partial \widehat{t_{xy}}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \widehat{t_{xy}} \right] \\ &+ \frac{\partial \widehat{t_{yy}}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \widehat{t_{yy}} \right] \end{aligned} \quad (3-17)$$

여기서,

$$\widehat{t_{xx}} = 2A \left[ \frac{\partial UD}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) U \right] \quad (3-18)$$

$$\widehat{t_{xy}} = \widehat{t_{yx}} = A \left[ \frac{\partial UD}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) U + \frac{\partial VD}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) V \right] \quad (3-19)$$

$$\widehat{t_{yy}} = 2A \left[ \frac{\partial VD}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) V \right] \quad (3-20)$$

또한,

$$DF_{\theta_i} = \frac{\partial \widehat{q}_x}{\partial \chi} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial \chi} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial \chi} \right) \widehat{q}_x \right] \quad (3-21)$$

$$+ \frac{\partial \widehat{q}_y}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \widehat{q}_y \right]$$

$$\widehat{q}_x = A_{\text{H}} \left[ \frac{\partial \theta_i D}{\partial \chi} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial \chi} + \frac{\partial \eta}{\partial \chi} \right) \theta_i \right] \quad (3-22)$$

$$\widehat{q}_y = A_{\text{H}} \left[ \frac{\partial \theta_i D}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \theta_i \right] \quad (3-23)$$

여기서,  $\theta_i$ 는  $T, S, q^2$ 와  $q^2 \ell$ 을 나타낸다.

난류종결모델을 포함하고 있기 때문에 혼합계수  $K_{\text{M}}, K_{\text{H}}, K_{\text{Q}}$ 를 다음의 표현으로 간단하게 나타낼 수 있다.

$$K_{\text{M}} = \ell q S_{\text{M}} \quad (3-24a)$$

$$K_{\text{H}} = \ell q S_{\text{H}} \quad (3-24b)$$

$$K_{\text{Q}} = \ell q S_{\text{Q}} \quad (3-24c)$$

안정함수  $S_{\text{M}}, S_{\text{H}}, S_{\text{Q}}$ 는 해석적으로 유도되고 대수관계는 함수적으로  $\partial U / \partial z, \partial V / \partial z, g / \rho_0, \partial \rho / \partial z, q$ 와  $\ell$ 에 의존된다. 이러한 관계는 Mellor(1973)가 기술한 종결가설(closure hypotheses)과 그 이후 Mellor와 Yamada(1982)에 의해 요약된 난류종결모델에 의해 유도된다. 이것은 다음과 같이 편리하게 정의된다.

$$C_{\text{M}} = \frac{\ell^2}{q^2} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3-25a)$$

$$C_{\text{H}} = \frac{\ell^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3-25b)$$

그래서, 안정함수는 다음과 같이 된다.

$$S_{\text{M}} [6A_1 A_2 C_{\text{M}}] + S_{\text{H}} [1 - 2A_2 B_2 C_{\text{H}} - 12A_1 A_2 C_{\text{H}}] = A_2 \quad (3-26a)$$

$$S_M[1+6A_1^2G_M-9A_1A_2G_H]-S_H[12A_1^2G_H+9A_1A_2G_M]=A_1(1-3C_1) \quad (3-26b)$$

$$Sq=0.20 \quad (3-26c)$$

이것은  $G_M$ 과  $G_H$ 의 함수로서  $S_M$ ,  $S_H$ 에 대해서 풀어진다. Mellor와 Yamada(1982)의 실험실 데이터에 기초하여 경험상수는 다음의 값들로 정의 된다.

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08) \quad (3-27)$$

$$(E_1, E_2) = (1.8, 1.33) \quad (3-28)$$

이상에서 수평확산항은  $\sigma$ 좌표계로의 변환에서 얻어지는 일반적인 형태가 아닌 것으로 주어졌는데 이러한 근거는 Mellor와 Blumberg(1985)에서 설명하고 있다. 그들은 모델에서 해저지형의 기울기가 클 때에 수평확산이 부정확하다는 것을 발견하고 보다 단순한 새로운 식을 도입함으로써 해저지형이 급변하는 곳에서 현실적으로 해저경계층을 도모할 수 있도록 하였다.

### 1.3 연직경계조건



식(3-6)에 대한 연직경계조건은 다음과 같다.

$$\omega(0) = \omega(-1) = 0 \quad (3-29)$$

식(3-7)과 (3-8)에 대한 경계조건은 아래와 같다.

$$\frac{K_M}{D} \left( -\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = -(\langle \omega u(0) \rangle, \langle \omega v(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0 \quad (3-30a)$$

여기서, 식(3-30a)의 오른쪽 항은  $\rho_0$ 로 나누어진 표면바람응력의 입력값이다.

$$\frac{K_M}{D} \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_2 [U^2 + V^2]^{1/2} (U, V), \sigma \rightarrow -1 \quad (3-30b)$$

여기서,

$$C_z = \text{MAX} \left[ \frac{k^2}{[\ln\{(1 + \sigma_{kb-1})H/z_0\}]^2}, 0.0025 \right] \quad (3-30c)$$

von Karman 상수  $k$ 는 0.4이고  $z_0$ 는 조도계수이다. 이것은 수치적으로 해저에서 가장 가까운 격자점에 적용된다. 이 조건은 “벽법칙(law of the wall)”으로부터 유도된다. 해저면이 잘 분해되지 않는 곳에서는  $(1 + \sigma_{kb-1})H/z_0$ 는 크고, 식 (3-30c)는 일반적인 항력계수식으로 변환시킬 수 있다.

식(3-14)와 (3-15)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$[q^2(0), q^2 \ell(0)] = [B_1^{2/3} u_i^2(0), 0] \quad (3-31a,b)$$

$$[q^2(-1), q^2 \ell(-1)] = [B_1^{2/3} u_i^2(-1), 0] \quad (3-31c,d)$$

여기서,  $B_1$ 은 난류종결상수 중의 하나이고,  $u_i$ 는 해수면과 해저면에서의 마찰속도이다.

#### 1.4 연직적분방정식

연안순환의 역학을 지배하는 방정식은 빠르게 이동하는 외부중력과 느리게 이동하는 내부중력과 전파특성을 포함하고 있다. 컴퓨터 계산에 있어서, 이것은 연직구조 방정식(내부모드)으로부터 연직적으로 적분된 방정식(외부모드)을 계산시간 효율성을 위해 분리한다. 모드분리(Simons, 1974; Madala and Piacsek, 1977)로 알려진 이 기법은 속도와 열역학적 특성의 3차원 계산으로부터 개별적으로 속도수송을 풀어버림으로써 계산시간에 있어서 조금의 손실도 없이 자유수면승강을 계산한다.

속도수송, 외부모드방정식은 내부모드 방정식을 수심에 대하여 적분하여 얻어지고, 이에 따라 모든 연직구조는 제거된다. 이와같이, 식(2-6)을  $\sigma = -1$ 에서  $\sigma = 0$ 까지 적분하고 경계조건(3-29)을 사용하면 자유수면승강에 대한 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \overline{UD}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{VD}}{\partial y} = 0 \quad (3-32)$$

운동량방정식을 적분하면 다음과 같이 된다.

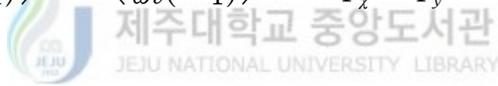
$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{UD}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U^2 D}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial y} - \widetilde{F}_x - \overline{fVD} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = -\langle \omega u(0) \rangle + \langle \omega u(-1) \rangle + G_x \\ - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] dx d\sigma \end{aligned} \quad (3-33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{VD}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V^2 D}}{\partial y} - \widetilde{F}_y - \overline{fUD} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = -\langle \omega v(0) \rangle + \langle \omega v(-1) \rangle + G_y \\ - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] dx d\sigma \end{aligned} \quad (3-34)$$

상단  $\bar{\quad}$ 는 다음과 같이 연직적으로 적분된 속도를 나타낸다.

$$(\overline{U}, \overline{V}) \equiv \int_{-1}^0 (U, V) d\sigma \quad (3-35)$$

바람응력성분은  $-\langle \omega u(0) \rangle$ 와  $-\langle \omega v(0) \rangle$ 이고, 해저마찰에 대한 저면응력성분은  $-\langle \omega u(-1) \rangle$ 와  $-\langle \omega v(-1) \rangle$ 이다.  $\widetilde{F}_x$ 와  $\widetilde{F}_y$ 의 양은 다음과 같이 정의된다.



$$\widetilde{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \overline{A_w} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ H \overline{A_w} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right] \quad (3-36a)$$

$$\widetilde{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ H \overline{A_w} \frac{\partial \overline{V}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \overline{A_w} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right] \quad (3-36b)$$

또한, 분산항은 다음과 같이 정의된다.

$$G_x = \frac{\partial \overline{U^2 D}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial y} - \widetilde{F}_x - \frac{\partial \overline{U^2 D}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial y} + \overline{F}_x \quad (3-37a)$$

$$G_y = \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V^2 D}}{\partial y} - \widetilde{F}_y - \frac{\partial \overline{UVD}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V^2 D}}{\partial y} + \overline{F}_y \quad (3-37b)$$

여기서,  $\overline{A_w}$ 이 연직적으로 변하지 않는 상수이면 식(3-37a)와 (3-37b)의

$\widetilde{F}_x, \widetilde{F}_y, \overline{F}_x, \overline{F}_y$ 항은 상쇄된다. 그러나, Smagorinsky형 확산계수가 사용되었을 경우에는 수평방향 확산계수에 있어서 연직적으로 가변적으로 적용이 가능하다.

### 1.5 Smagorinsky 확산계수

일반적으로 수평 확산에 대해서는 Smagorinsky(1963) 확산계수를 사용하였다. Smagorinsky 식은

$$A_M = C_A \Delta x \Delta y \frac{1}{2} \left| \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right| \quad (3-38)$$

여기서,

$$\left| \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right| = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 / 2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-39)$$

이다.

0.10에서 0.20의 범위인 C(HORCON 파라메타)의 값은 매우 적절한 것으로 보이지만 만약 격자간격이 충분히 작다면 C는 0이 된다(Oey et al., 1985a,b). Smagorinsky 확산계수의 이점은 C가 무차원이라는 것이고  $A_M$ 이 해상도가 증가함에 따라 감소하고  $A_M$ 이 만약 속도경사가 작다면 작은 값을 가진다는 것이다.

### 1.6 수치계산방법 및 격자배열

외부모드계산은 해수면 승강 EL과 연직평균유속 UA, VA에 대해 시간스텝 진행에 따라 계산하고 있으며, 내부모드계산에서는 U, V, T, S와 난류량에 대하여 계산을 수행하고 있다. Figure 17은 외부모드와 내부모드에 대한 시간스텝의 진행과정을 도시한 것이다.

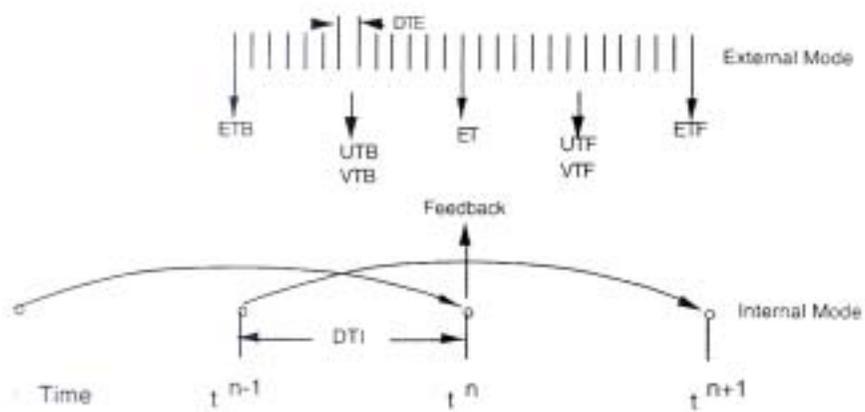


Fig. 17 A simplified illustration of the interaction of the external mode and internal mode.

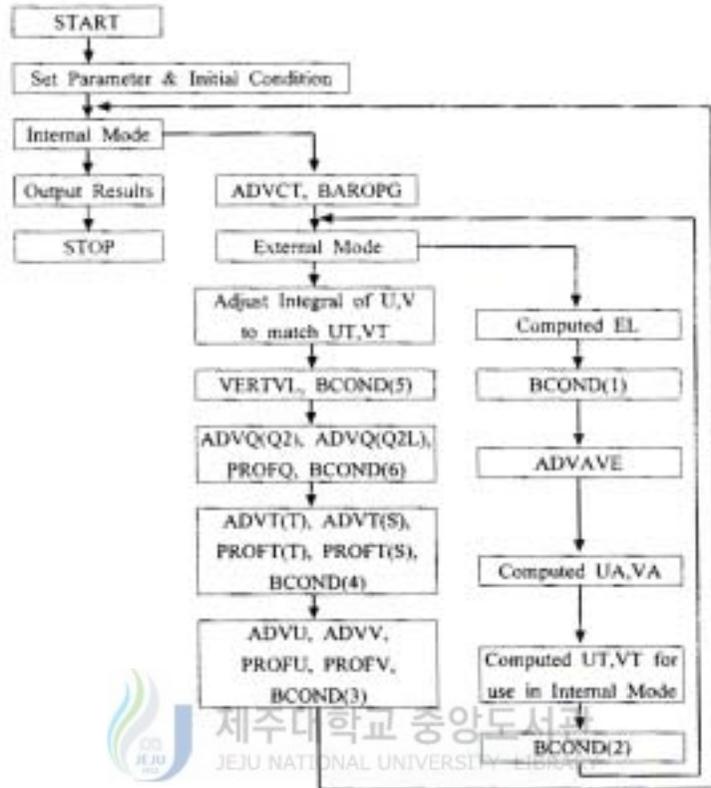


Fig. 18 Flow diagram of the POM Code.

Figure 18은 POM의 기본 코드에 관한 개략적인 계산 흐름도이다.

외부모드에 대해서는 짧은 시간스텝 DTE가 사용되고, 내부모드는 보다 긴 시간스텝 DTI를 사용한다. 외부모드는 주로 내부모드에 수면승강에 대한 정보를 제공하고 반면에 내부모드는 외부모드에 운동량이류, 밀도적분과 저면응력에 대한 정보를 제공한다.

내부모드 및 외부모드에 대한 엇갈림 격자배열은 Figure 19에 나타내었다. 이러한 격자배열은 직교곡선좌표계에서도 그대로 사용할 수 있다

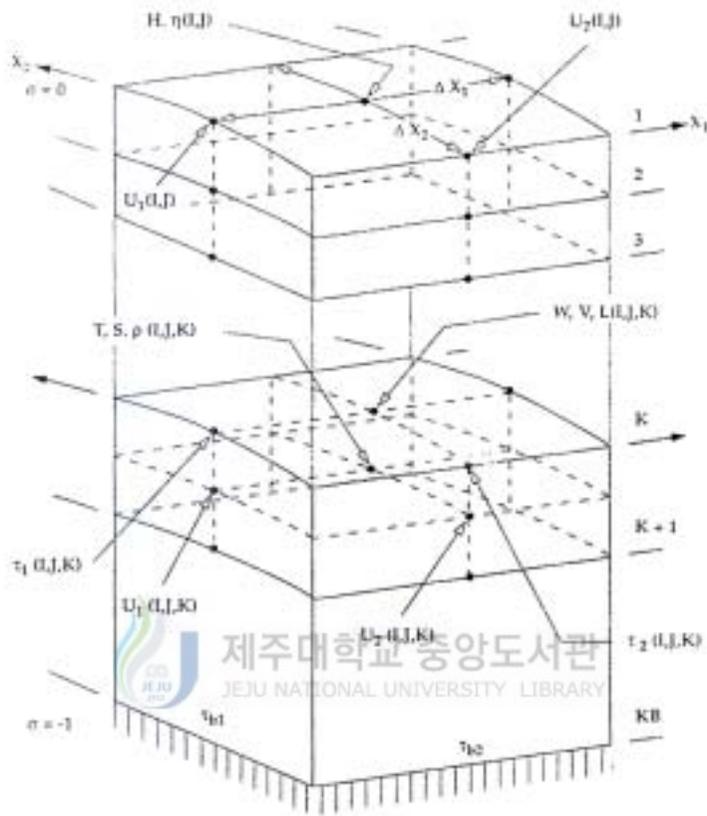


Fig. 19 The staggered numerical model grid with the location of model variables indicated.

### 1.7 계산안정조건

연직적분, 외부모드, 수송방정식 상에서의 CFL(Courant-Friedrichs-Levy) 계산 안정조건은 시간간격에 제한을 둔다(Blumberg and Mellor, 1981).

다음에서,

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left( \frac{1}{\partial x^2} + \frac{1}{\partial y^2} \right)^{-1/2} \quad (3-40a)$$

여기서,

$$Ct = 2(gH)^{1/2} + \overline{U_{\max}} \quad (3-40b)$$

$\overline{U_{\max}}$ 는 최대평균속도를 나타낸다. CFL조건은 모델에 대한 제한 중에 가장 중요한 조건으로써 모델시간간격을 보통 이 한계의 90% 범위 내에서 선정된다. 내부모드는 빠르게 움직이는 외부모드 보다 긴 시간간격을 가진다. 시간스텝 간격은 식(2-40a)에 주어진 외부모드에 대한 조건으로서 구해진다.

$$\Delta T_I < \frac{1}{C_T} \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (3-41)$$

여기서,  $C_T$ 는  $2C + U_{\max}$  이고, 여기서  $C_T$ 는 일상적으로 2m/s 정도의 크기를 가지는 최대 내부 중력파속도이다. 그리고  $U_{\max}$ 는 최대이류속도이다. 전형적인 연안해양조건에서 시간스텝 비율  $\Delta T_I / \Delta t_E$ 는 50~80 또는 그 이상의 규모를 갖는다.

부가적인 제한이 운동량이나 스칼라량의 수평확산에 의해 제기될 수도 있다. 다음에서  $A = A_M$  또는  $A = A_H$ 이면

$$\Delta T_I < \frac{1}{4A} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1} \quad (3-42)$$

이 사용된다.

회전에 대한 제한 조건은

$$\Delta T_I < \frac{1}{f} = \frac{1}{2\Omega \sin \phi} \quad (3-43)$$

여기서,  $A_H$ 는 수평확산계수이고  $\Omega$ 는 지구의 각속도이고,  $\phi$ 는 위도이다.

## 2. 계산격자망 및 수심도

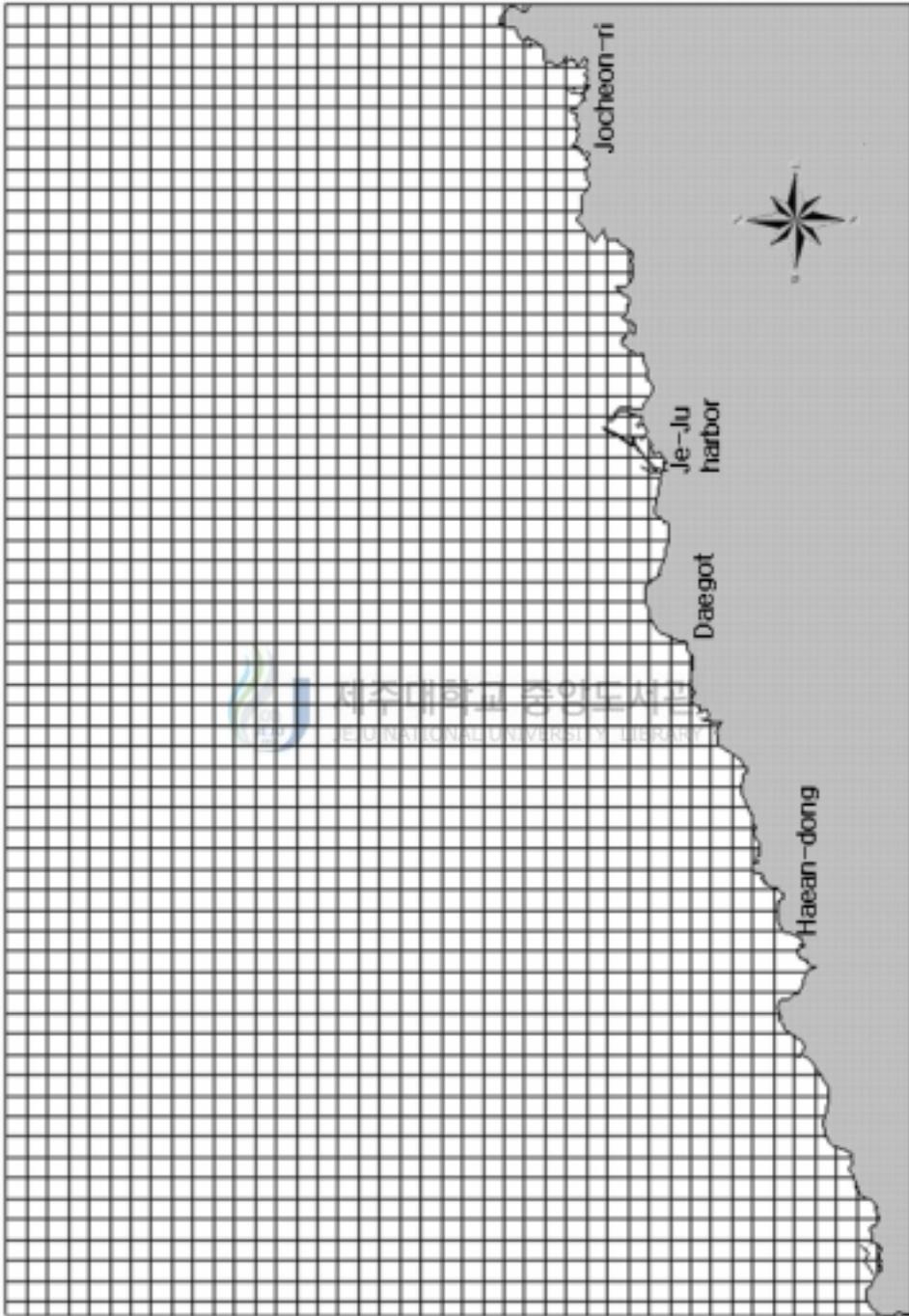
본 연구를 위한 계산영역은 동쪽으로 조천리로부터 서쪽으로 해안동까지를 경계역으로 두고, 제주항을 중심으로 계산격자망을 구성하였다(Fig.20). 격자간격을 계산영역 규모에 적절한  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 를 각각 500m로 정하였다. 계산격자망은 x방향인 동서방향으로 65개의 격자와 y방향인 남북방향으로 45개의 격자망을 갖춘 32.5km×22.5km의 영역으로 구성하였다.

연직방향의 격자분할은 Table 3과 같이 4개의 층으로 등분하여( $\Delta z=0.2$ )하였다.

Table 3 Vertical division on the sigma coordinate

Level	Z	ZZ	DZ	DZZ
1	0.000	-0.167	0.333	0.333
2	-0.333	-0.500	0.333	0.333
3	-0.667	-0.833	0.333	0.333
4	-1.000	-1.167	0	0

수심도 및 해저지형도의 작성은 해양수산부 국립해양조사원에서 발행한 제주도 부근 및 제주 외항의 수치지도와 2004년에 발행된 제주항 항박도(No.224)와 가 사용되었다. Fig. 21은 계산영역의 수심도를 나타내었다.



**Fig. 20 Computational grid system**

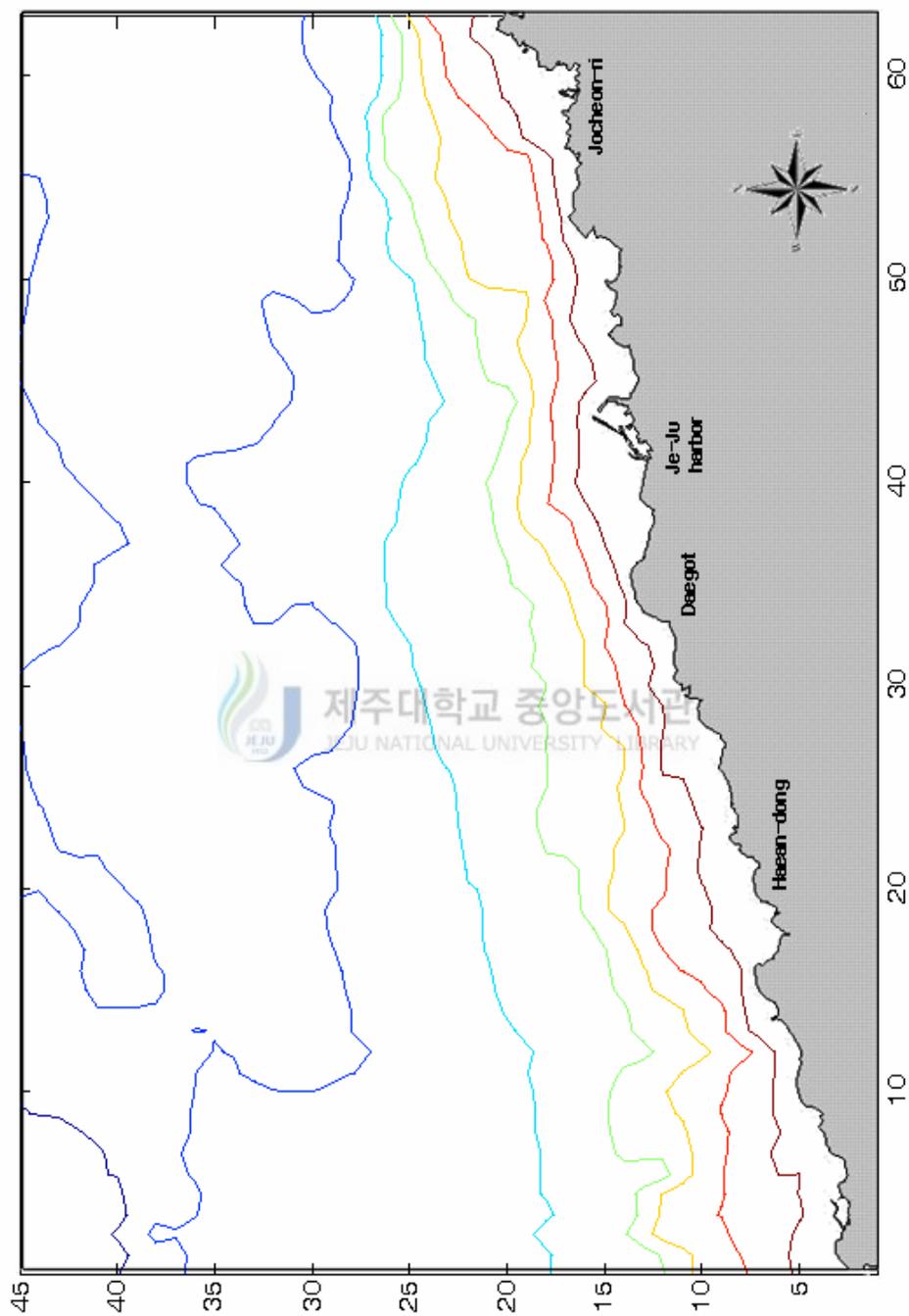


Fig.21 Map of water depth below datum level

본 대상해역은 제주도 북부해역에 위치하고 있으며 제주항을 중심으로 우측으로 조천리, 좌측으로는 해안동이 위치하고 있다. 제주외항 부근에는 20m내외의 수심분포를 나타내고 있으며 외해쪽으로 갈수록 깊어져 최대수심은 약 154m정도를 보이고 있다.

Fig. 22는 대상해역을 3차원그래픽으로 처리한 해저 지형도를 나타낸다.

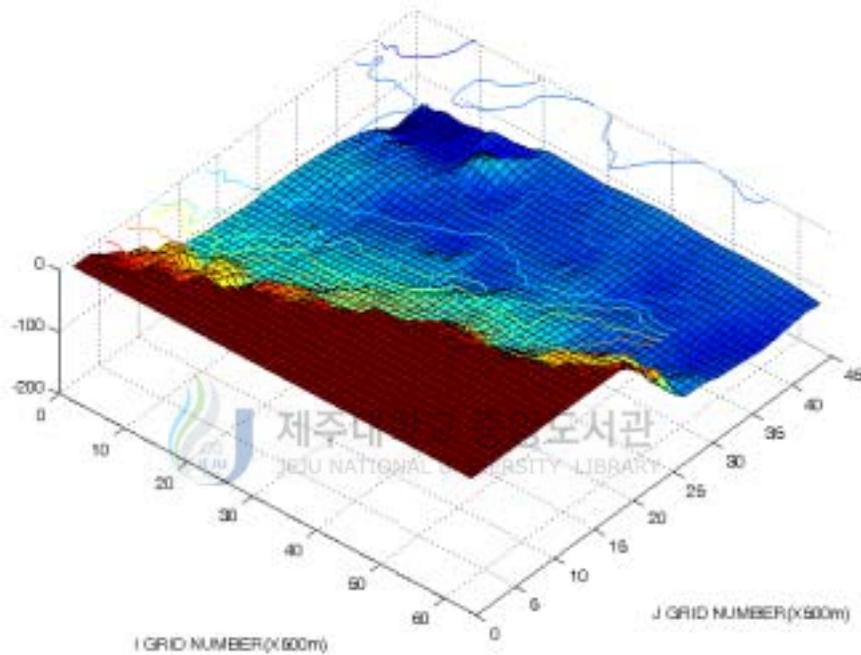


Fig. 22 Three dimensional bottom topography

### 3. 경계조건 및 주요입력자료

#### 3.1 경계조건

대상해역의 개경계에서의 경계조건은 국립해양조사원의 조석표와 실제의 관측

기록을 조석조화분해하여 그 값을 기초로 조위를 각각 산정하였다. 또한 본 경계조건에 대한 검증 및 외해경계조건의 산정을 위하여 기존의 연구성과물 및 관련 논문을 근거로 하여 시행착오적으로 조위를 주고 제어하였다.

### 3.2 주요입력자료

본 연구에 사용한 주요 계산조건 및 입력자료는 Table 4와 같다. 계산결과의 출력은 수치적으로 안정적인 해가 확보될 수 있도록 약 2조석주기(50시간)후부터 매시간 간격으로 각각 수위와 유속을 출력시켰으며 대조기, 중조기, 소조기에 대하여 각각 25시간 동안의 조위 및 유속자료를 저장하였다.

Table 4 Computational conditions and parameters

Condition & Parameters	Used Values
Computational Grid System	$I_{max} = 65, J_{max} = 45$
Grid Spacing	$\Delta x = \Delta y = 500m$
Internal Time-step	$\Delta t_I = 20.0sec$
External Time-step	$\Delta t_E = 1.0sec$
Total Computation Time	15 days
Central Latitude	35°00' N
Initial Salinity	35 ‰
Initial Temperature	20°C
Water Density	1,026 $kg/m^3$

## 4. 수치실험 결과

### 4.1 층별 유속분포

Figure 23~24 는 POM 모델에서 고려할 수 있는 계산모드 중 3차원 예측모드(prognostic mode)에 해당하는 계산결과로서 대조기의 각각의 조석위상에 따라 조류벡터도를 층별로 나타낸 것이다.

Fig.23은 대조기 창조류시 최강류시의 유속분포를 표층(1 level), 중층(2 level) 그리고 저층(3 level)의 층별로 나누어 나타낸 것이다. 전 수심을 통하여 외해역은 연안역에 비해 유속이 전반적으로 강함(91cm/s) 편이며, 표층의 유속 분포가 가장 강하며, 중층·저층 순으로 유속이 느려지고 있다. 특히, 창조류 최강류시에 조천 앞 외해역 유속의 크기는 수심이 갑자기 깊어지므로 인하여 유속분포가 빨라지는(84cm/s) 반면 수심이 비교적 얇은 연안의 천해역은 유속의 분포가 매우 느린 편이다.

대조기 낙조류시의 표·중·저층의 유속 분포를 Fig.24 에 나타내었다. 유속은 표층에서 가장 빠르며, 외해역이 연안역보다 전반적으로 강하게(93cm/s) 나타나고 있다. 특히 조천 외해의 저층에서는 해저 지형의 영향으로 느린 유속(11cm/s)의 분포역이 나타나고 있다.

모델구동결과 연구영역의 해수유동은 동-서방향의 흐름이 강하며, 창조류시 보다는 낙조류시의 유속이 강함을 알 수 있다. 하지만, 이상의 결과로부터 수심이 얇은 제주항 부근의 해수유동 및 해수순환상은 뚜렷이 나타나지 않고 있다. 이는 보다 정밀한 수심 및 격자의 간격의 필요를 의미한다. 향후 이러한 면을 고려하여 시그마좌표계에 의한 연직단면의 유속분포 및 순환 특성과 단면별 유속의 분포를 통하여 대상해역의 해수순환현상과악이 필요한 것으로 사료된다.

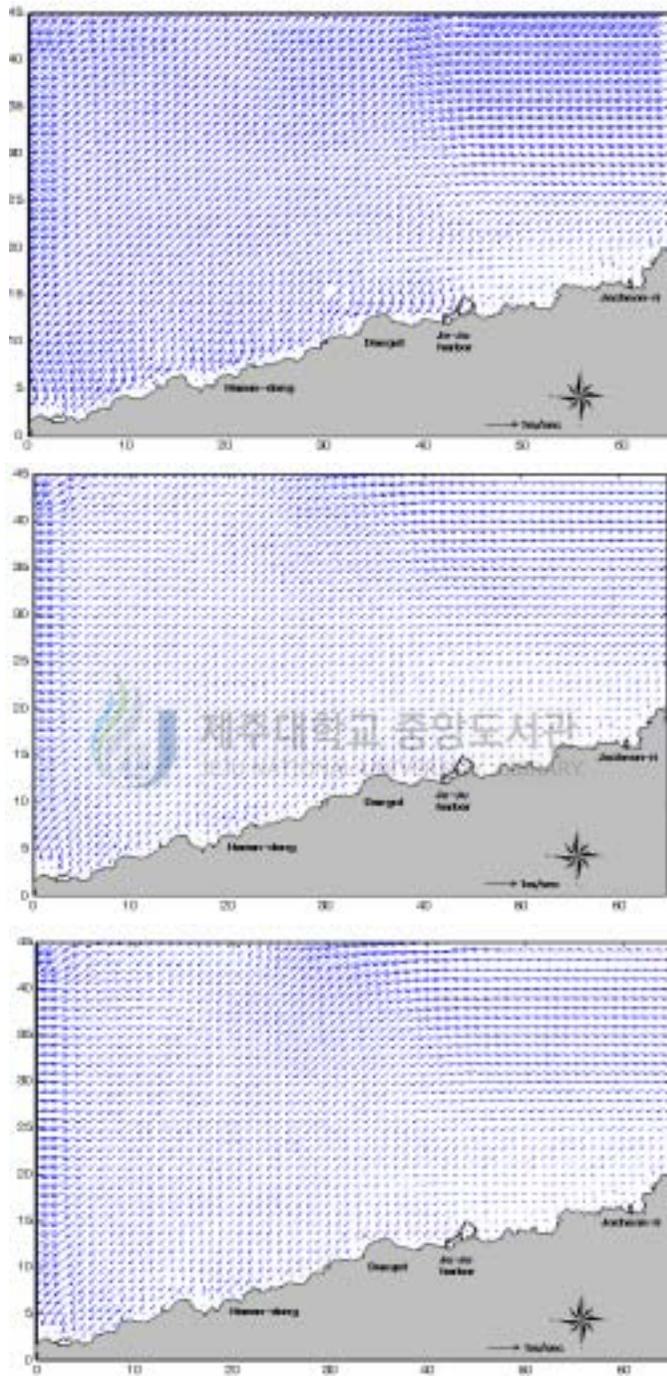


Fig. 23 Vector diagram of surface level(upper), middle level(middle) and bottom level(lower) in flood max. of spring tide

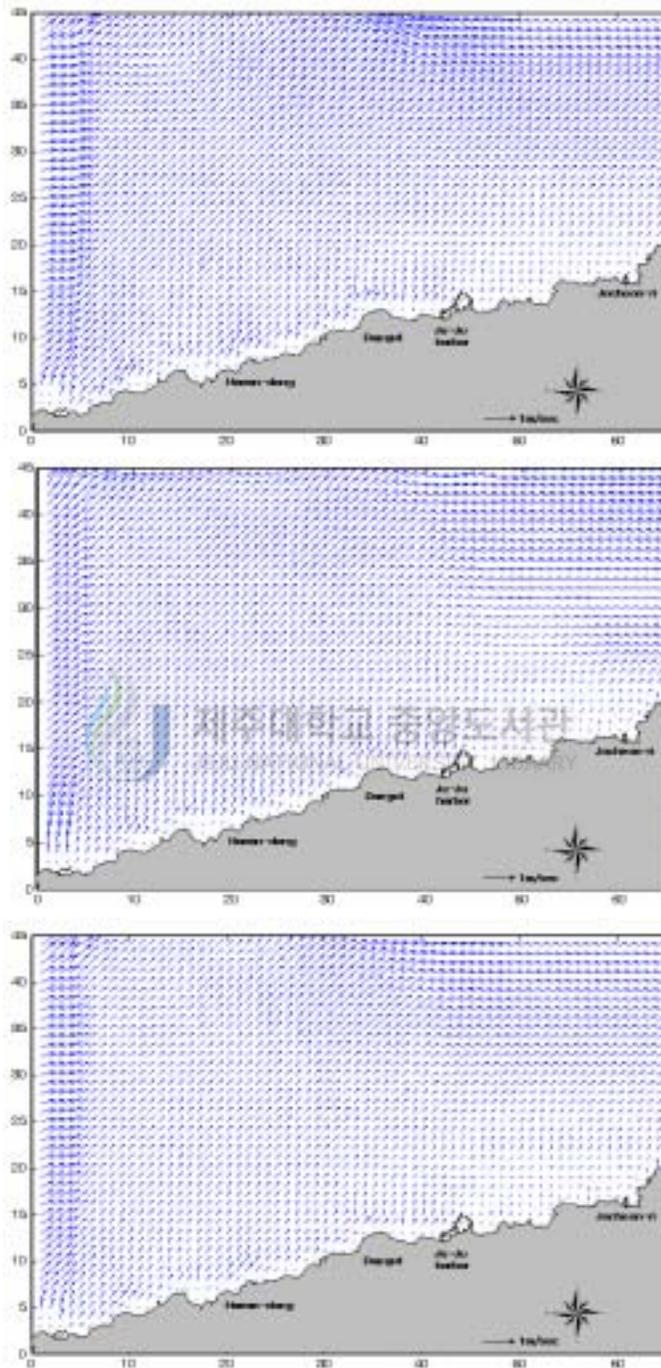


Fig. 24 Vector diagram of surface level(upper), middle level(middle) and bottom level(lower) in ebb max. of spring tide

## 4.2 단면별 유속분포

□-좌표계에 기초한 해저지형 변화에 따른 변동특성을 조사하기 위하여 Fig. 와 같이 조류의 주 흐름방향에 대하여 X-X', Y-Y'의 2개 단면으로 나누어 단면별 유속분포를 구하였다.

Fig.25는 X-X', Y-Y'단면에서의 층별유속도를 도시한 것이다. 이러한 단면별 층별유속분포를 볼 때, □-좌표계를 이용한 본 수치모델이 해저지형에 의하여 변화하는 유속분포 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다

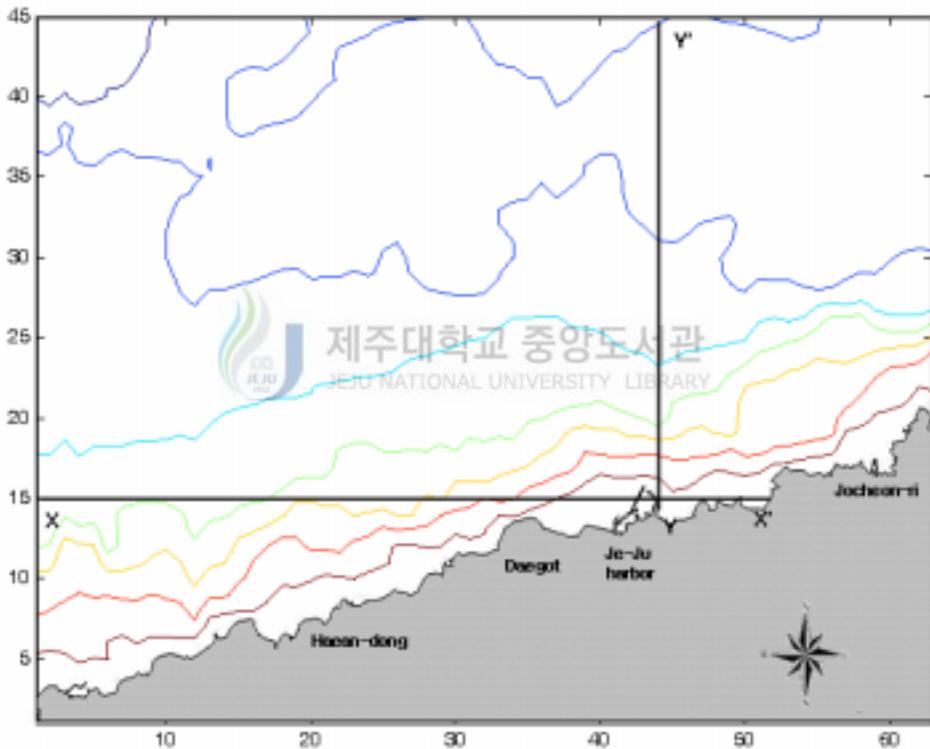


Fig. 25 Distribution of cross-section

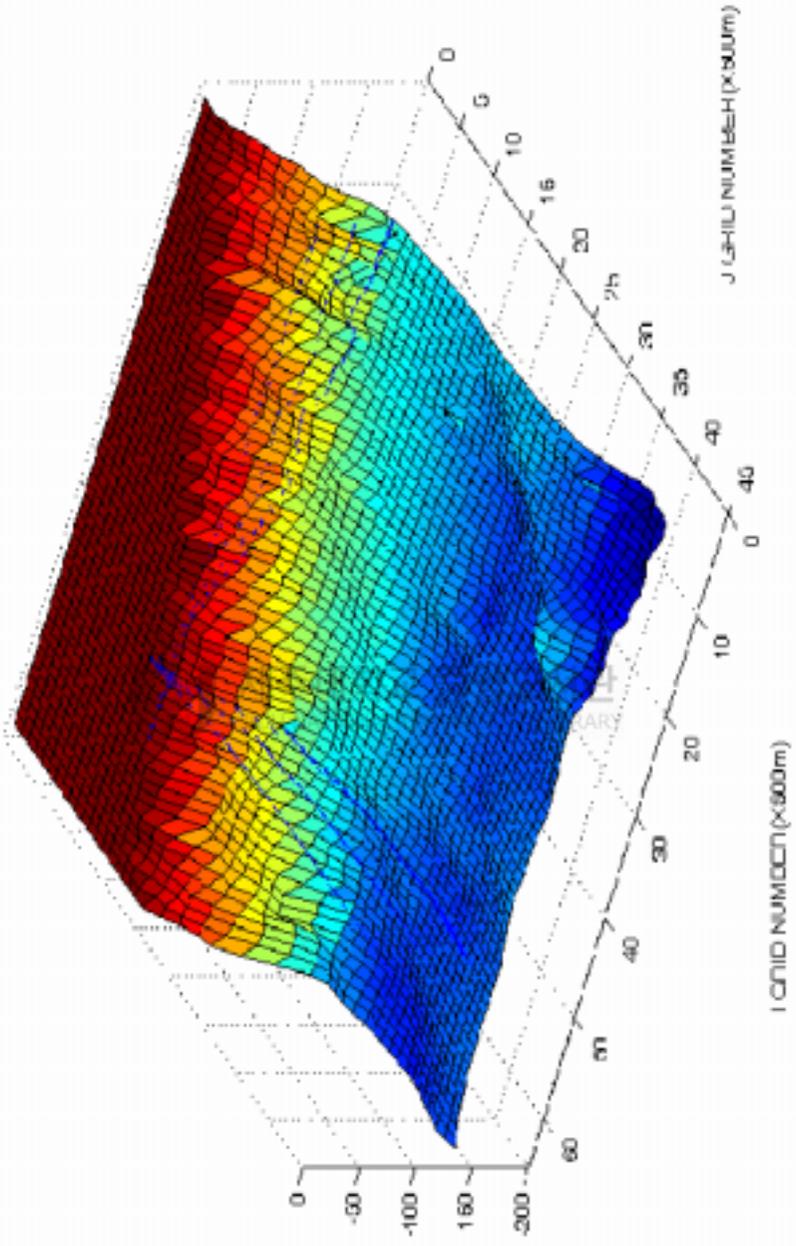
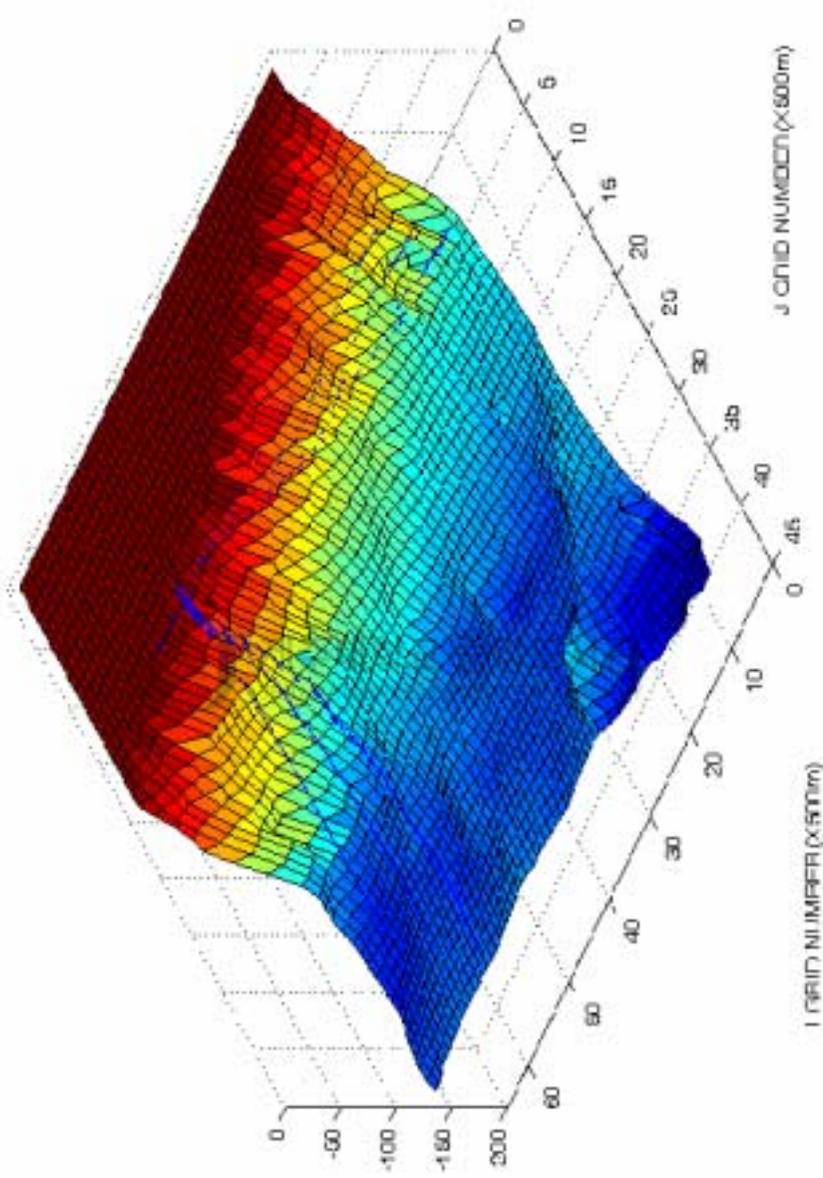


Fig.26 Vertical velocity of X-X' and Y-Y' cross-section in flood of spring tide



**Fig.27 Vertical velocity of X-X' and Y-Y' cross-section in ebb of spring tide**

## V. 검증 및 고찰

본 연구의 수치모형에서 재현한 해수유동을 검증을 위하여 대조기시 2002년 5월 12일부터 동년 6월 10일까지 NORI에서 RCM-7를 사용하여 관측한 연속조위 관측자료를 이용하여 대조기시 25시간동의 조위를 검증하였다. 또한 NORI에서 RCM-7를 사용하여 관측한 대조기시 1994년 4월 23일부터 동년 4월 24일의 25시간 자료, 2002년 5월 12일부터 동년 5월 13일까지의 25시간 자료와 2002년 5월 12일부터 동년 6월 10일의 30일 관측자료를 이용하여 조류의 흐름을 검증하였다.

### 1. 조위검정

제주외항 부근의 2개의 지점 St. N-8과 St. B-1 에서의 조위 관측 결과와 수치모형에서의 계산 결과를 대조기 25시간 동안의 시계열로 각각 도시한 것이다 (Fig. 28). 이들 관측점의 자료는 실측 조위 값을 수치모형에서의 입력조건으로 설정하기 위하여 조석조화분해를 실시하여  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  을 포함하는 27개 분조의 진폭 및 위상을 구하였다. 각각의 조위 검증점에서 제주항 및 대상영역의 전반에서 관측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있으며, 본 모델이 대상해역의 조위를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

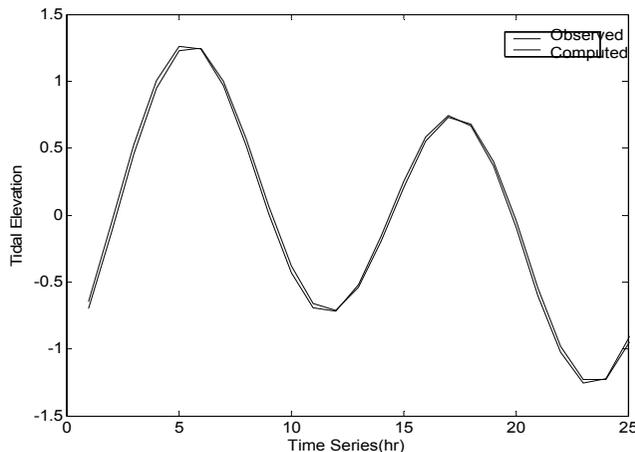


Fig. 28 Comparison between observed tidal elevation and computed ones at St. N-8

## 2. 해조류 검정

제주항 서부두 말단부 부근에서 관측한 St. N-7의 측류 자료와 연구영역의 외해역인 St. N-1의 측류자료 그리고 조천 앞 해상의 관측점 St. N-8에서 측류한 자료를 나타낸 조류분산도와 수치모형에서 계산된 조류분산도를 비교·검정하였다. 이를 위하여 대조기 25시간동안의 조류 계산결과와 대조기시 25시간동안 관측되어진 조류 관측결과를 벡터성분도를 이용하여 나타내었다(Fig. 16). 좌측그림은 수치모형에 의한 계산되어진 값을 나타내며, 우측그림은 실측된 값을 나타내었다. 그림을 살펴보면, 두 지점에서 모두 계산결과와 관측결과의 흐름이 거의 잘 일치하고 있으며 주 흐름방향 또한 잘 재현되고 있다.

이상의 결과에서 보면, 유속이 비교적 빠른 St. N-7에서는 조류의 유동 특성이 실측치와 변동 폭에서는 약간의 차이를 제외하고는 그 주된 흐름방향에 있어서는 잘 일치하는 경향을 보였다. 또한 이 정점의 위치는 조량이 지나가는 주수로 부근에 위치하고 있기 때문에 유속이 비교적 빠른 편이다.

상기의 조위 및 조류에 대한 현장 관측결과 및 수치모형 계산결과를 비교한 결과, 본 수치 모형이 대상해역에 대한 조위 및 조류를 잘 재현하고 있음을 검증할 수 있었다.



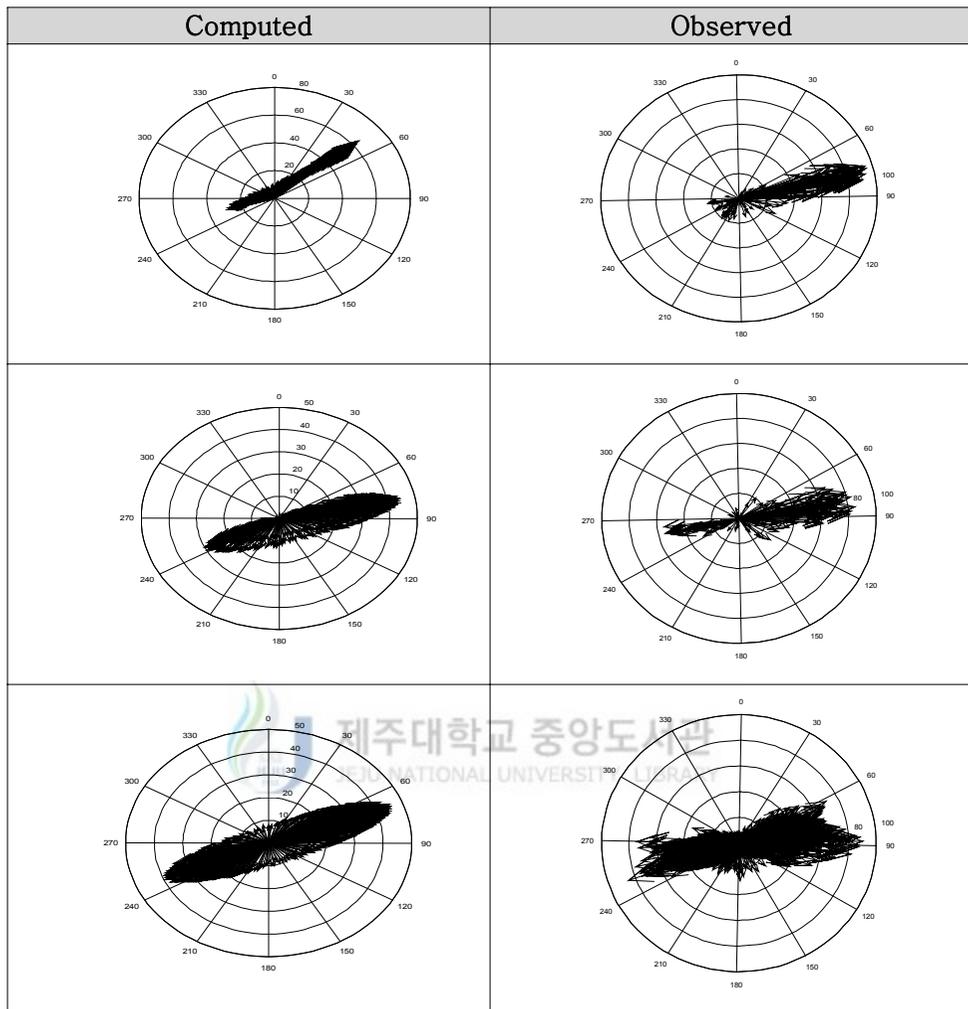


Fig. 29 Comparison between computed vector diagram and observed ones at St. N-7(Upper), St. 1(Middle) and St. N-8(Lower)

## VI. 결론

본 연구에서는 제주의향을 포함한 연안해역의 해조류관측 자료와 외해역에서 관측한 해수유동의 자료를 분석하여 시공간적인 해류계의 특성 및 해수유동의 구조를 파악하였다. 또한 이들 결과를 이용하여 제주의향공사 및 내항의 어항 분구공사가 수행되기 이전의 제주항 부근의 해역을 연구대상지의 3차원 해수유동모델에 의한 수치해석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

제주항을 포함한 제주의향 부근해역의 해수유동 양상을 파악하기 위하여 25시간 및 15일 이상의 해조류 관측 자료를 이용하여 각 정점의 유속성분도, 조류타원도, Stick Diagram, Progressive Vector, 조석잔차류도를 분석하였다. 제주항 부근해역의 조석은 일조부등이 현저하며, 25시간 해조류관측 자료에 의한 해조류는 동서방향이 남북방향보다 강하게 나타나고 있었다. 또한 각 지점에서의 동서방향 성분이 남북방향에 비해 매우 크게 나타나고 있다. 동서방향 중에서도 동쪽방향이 서쪽방향을 흐름보다 크게 나타나고 있으며, 특히 낙조류시에 강하게 나타나고 있었다. 이때 최대유속은  $94.7m/sec$  이었다. 제주항 서방파제 말단부 해역의 조류성분은 다른 해역에 비해 매우 약한 반면에 항류성분의 흐름은 크게 나타나고 있어 이 해역의 흐름은 제주항 방파제에 의한 영향을 크게 받고 있는 것으로 사료되어진다.

장기간의 해조류 관측결과에 의하면 제주항의 조석은 반일주조성분이 탁월하며,  $M_2$ ,  $S_2$  분조에 따른 조류변화가 현저함을 보여주고 있다. 또한 대조기시 관측된 해조류관측자료 중 제주항 동방파제의 북동쪽 해상에 설치되어있는 관측지점의 해조류관측 자료는 제주내항 서방파제의 건설로 인한 차폐역의 발생과 동방파제를 따른 흐름에 의해 창·낙조시의 유동이 특이하게 나타나고 있었다.

연구대상 해역의 3차원 해수유동모델에 의한 수치해석을 시행한 결과, 대조기 창조류시 유속은 전 수심을 통하여 외해역은 연안역에 비해 유속이 전반적을 강한( $91cm/s$ ) 편이다. 이중 표층의 유속 분포가 중·저층에 비해 강하며, 중층·저층 순으로 유속이 느려지고 있었다. 특히, 창조류 최강류시에 조천 앞 외해역 유속의 크기는 수심이 갑자기 깊어지므로 인하여 유속분포가 빨라지는( $74cm/s$ ) 반면 수심이 비교적 얇은 연안의 천해역은 유속의 분포가 매우 느리게 조사되었다. 대조기 낙조류시의 표·중·저층의 유속 분포 또한 표층에서 가장 강하며, 외해역이 연안역보다 전반적으로 강하게( $93cm/s$ ) 나타나고 있다. 특히 조천 외해의 저층에서는 해저 지형의 영향으로 약한 유속( $11cm/s$ )의 분포역이 나타나고

있다.

3차원 수치모형에서 제주항 주변해역의 해수순환을 재현한 결과와 관측한 해수유동자료를 비교·검증하기 위하여 각 관측 지점의 조위와 조류를 비교해 본 결과, 조위 검증점과 조류 검증점 모두 제주항 및 전 대상해역에서 관측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있었다. 따라서 본 연구에서 사용된 수치모델은 대상해역의 조위를 잘 재현하고 있으며, 주 흐름방향 또한 잘 재현되었음을 알 수 있었다.

이상의 연구 결과로부터 수심이 얇은 제주항 부근과 해안역의 해수유동 및 해수순환상은 뚜렷이 나타나지 않고 있다. 이는 보다 정밀한 수심 및 격자의 간격의 필요를 의미한다. 향후 이러한 면을 고려하여 시그마좌표계에 의한 연직단면의 유속분포 및 순환 특성과 단면별 유속의 분포를 통하여 대상해역의 해수순환 현상파악이 필요한 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- 양성기, 최찬문, 1999. 제주항의 해양수리학적 특성, 제주대학교 해양연구소보, 23, 9-21.
- 양성기, 고건, 양태혁, 2004, 제주도 동부 연안해역의 해수유동 특성, 한국환경 과학회 학술발표회 요지
- 양성기, 김해동, 최찬문, 1995, 제주도 함덕연안해역의 해황·기상의 계절변동에 관한 연구, 제주대학교해양연구소연구보고, 19, 1~10pp
- 해양연구소, 오염물질이동·확산예측기술개발, 해양환경관리기술, 환경부·과학기술처, 1996
- 국립해양조사원. 2000-2004. 조석표, 국립해양조사원
- 수산진흥원. 2000-2003. 수산진흥원 해양조사연보. 수산진흥원, 1-320pp
- 제주해양개발주식회사. 1987. 제주탐동지구 공유수면매립공사 환경영향평가서, 1-308pp
- 윤은찬, 2003, 낙동강 하천플룸의 3차원 혼합거동 해석, 부경대학교 석사학위논문, 61pp
- 권철휘, 2002, 한국 남해안의 *Cochlodinium* 적조확산 모델링 응용연구, 부경대학교 박사학위논문
- 박성은, 1997, 바람이 가막만의 조류에 미치는 영향, 부경대학교 석사학위논문,
- 배상완, 1997, 진단 3차원 모델을 이용한 진해만의 유동특성, 부경대학교 석사학위논문
- 김삼문, 1975. 제주항의 조석. 수로기술연보, 115-121pp
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Ocean Model, Vol.4, edited by N. Heap, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987.
- Blumberg, A . F. and Herring, H. H., Circulation Modelling using Orthogonal Curvilinear Coodinates, in Three Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamic, edited by J. C. J. Nihoul and B. M. Jamart, Elsevier Oceanography Series, 45, 1987, pp.55~58.

- Blumberg, A . F. and Kantha, L. H., Open Bounfary Condition for Circulation Models, Journal of Hydro Engineering, Vol.111, No.2, ASCE,, 1985, pp.247~255.
- Blumberg, A . F. and Mellor G. L., A numeical calculation of the circulation in the Gulf of Mexico, Dynalysis of Princeton, Report No.66, 1981a, pp.153.
- Blumberg, A . F. and Mellor G. L., Diagnostic and Prognotic Numerical Circulation Stadies of the South Atlantic Bight, Journal of Geophys. Res., Vol.88, 1983, pp.4579~4592.
- Blumberg, A . F. and Mellor G. L., Some results from a Gulf of Mexico circulation model, in Proc. 8th Ocean Energy Conf., Department of Energy, Washington, D.C., 1981b, pp.483~493.
- Blumberg, A . F., A Numerical Investigation into the Dynamic of Estuarine Circulation, Technical Report 91, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopins Univ., 1975.
- Blumberg, A . F., Galperin, B. and O□□Connor, D. J., Modelling Vertical Structure of Open-Channel Flows, Journal of Hydro Engineering, Vol.118, No.8, ASCE, 1992, pp.1119~1134.
- Boris Galperin and G. L. Mellor, A time-dependent, Three-dimenssional Model of the Delaware Bay and River System. Part I : Description of the Model and Tidal Analysis, Estuarine, coastal and Shelf Science, 1990, 31, pp.231~253.
- Cha-Kyum Kim, Three-dimensional Numerical Model Experiments of Tidal and Oceanography, Vol.29, No.2, pp.95~106, 1994.
- Chul-Hoon Hong and Yong-kyu Choi, The Response of Temperature and Velocity Fields to M<sub>2</sub> Tide in Deukryang Bay in the Southen Sea o f Korea, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol.30, No.4, 1997.
- Chul-Hoon Hong, The Effect of a Typhoon on Sea Level Variation in the Korea Strait Using the Princeton Ocean Model, 1998 International ear of the Ocean - Memorial Joint Meeting and Symposium of the Korean Societies on Fisheries and Ocean Science, 1998, pp.437.
- Cooper, C. and B. Pearce, A three-dimensional numerical model to calculate currents in coastal waters utilizing a depth varying vertical eddy viscosity, J. of Physical Oceanography, Vol.12, 1977,

- pp.1071~1091.
- George L. Mellor and Alan F. Blumberg, Modeling Vertical and Horizontal Diffusivities with the Sigma Coordinate System, Monthly, Weather Review, American Meteorological Society, Vol.13, 1985, pp.1379~1383.
- George L. Mellor and T. Yamada, A hierarchy of turbulence closure models for planetary, boundary layers, J. Atmos. Sci., Vol.31, 1974, pp.1791~1896.
- George L. Mellor and T. Yamada, Development of turbulence closure models for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, No.4, 1982, pp.851~875.
- George L. Mellor, Analytic prediction of the properties of stratified planetary surface layers, J. Atmos. Sci., 30, 1973, pp.1061~1069.
- Lakshmi H. Kantha, George L. Mellor and Alan F. Blumberg, A diagnostic Calculation of the General Circulation in the South Atlantic Bight, Journal of Physical Oceanography, Vol.12, 1982, pp.805~819.
- Mellor G. L. and Yamada, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer, J. of Atmos. Sci., Vol.31, 1974, pp.1791~1806.
- Mellor G. L. and Yamada, T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. of Geophys. Space Phys., Vol.20, No.4, 1982, pp.851~875.
- Oey, L-Y., Mellor G. L. and Hires, R. I., A Three-Dimensional Simulation of the Hudson-Raritan Estuary. Part I : Description of the model and model simulations, J. of Phys. Oceanogr., Vol.1, 1985a, pp.1676~1692.
- Oey, L-Y., Mellor G. L. and Hires, R. I., A Three-Dimensional Simulation of the Hudson-Raritan Estuary. Part II : Comparison with observation, J. of Phys. Oceanogr., Vol.15, 1985b, pp.1696~1709.
- Robert L. Haney, On the Pressure Gradient Force over Steep Topography in sigma Coordinate Ocean Models, Note and Correspondence, Journal of Physical Oceanography, Vol.21, 191, pp.610~619.
- Smagorinsky, J., General circulation experiments with primitive equations, I. basic experiment, Mon. Weather Rev., Vol.91, 193, pp.557~570.

Weatherly, G. and P. J. Martin, On the structure and dynamic of the ocean bottom boundary layer, J. Phys, Oceanogr., Vol.8, 1978, pp.557~570.



## 감사의 글

그동안 저의 학업과 연구에 많은 도움을 주신 분들이 계십니다. 이 자리를 빌어서 그분들께 감사의 말을 남기고 싶습니다.

먼저 부족한 저를 학문의 길로 인도하여 주시고, 끊임없는 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 양성기교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 세심하게 검토하여주신 이병걸교수님, 김상진교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 아울러, 학부에서부터 대학원에 이르는 기간 동안 많은 가르침을 주신 김남형교수님, 남정만교수님, 박상렬교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

수치모델링에 모자란 저를 연구실 제자처럼 아낌없는 격려와 조언을 해주신 홍철훈교수님, 연구실 후배처럼 많은 가르침을 주신 윤은찬박사님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 제가 연구실생활을 함에 있어 좋은 본보기를 되어준 봉석형, 건형, 덕철형에게 고마움을 전하고 싶습니다. 또한 논문작업 중 연구실에서 같이 동고동락하며 조금이나마 저의 짐을 나누어 가지려 했던 우열, 상봉과 대학원 2년의 생활동안 학부학생이지만 좋은 후배이자 동생으로써 수리연구실을 지켜주었던 호성, 성윤, 안수와 앞으로 수리연구실을 든든하게 지켜줄 재훈, 지현, 현철에게도 고마움을 전합니다. 자주 못 뵈지만 항상 뜻깊은 조언을 해주시는 박원배박사님과 작년 겨울 함께 논문작업을 하며 저에게 많은 격려를 해주신 양성필계장님, 이재부계장님, 고재욱사장님께도 고마움을 전합니다. 그리고 많이 모자란 후배이자 동기인 저에게 항상 힘을 주었던 저희 대학원 졸업선배인 영웅형, 순보형, 창훈형, 성욱형, 현형, 혁춘, 강일군과 일반대학원동기와 후배인 민수형, 경보형, 철영, 승범형, 성환, 준호, 강일, 승현형, 행식, 성룡, 지원, 향혜에게 고마움을 전합니다. 또한 저의 시간을 위하여 자기의 시간을 내어 주었던 경남, 경태에게도 고마움을 전합니다.

잔고민이 많은 저를 위해 자신의 시간을 내어 주었고 내일도 함께할 소중한 친구들인 동훈, 석기, 수용, 승균, 승환, 승철, 진호, 용광, 원기, 찬영과 멀리 있지만 늘 가까이 있는 것처럼 느껴지는 병철, 호영, 친동생처럼 아껴주시는 친누이같은 현희누나, 후배가 아닌 동생으로 아껴주시는 두석형, 석훈형, 제언형, 봉호

형, 행정에 부족한 저에게 많은 도움을 준 환경공학과조교인 백동명선생, 송정화 선생, 자신의 일처럼 행정업무에 도움을 주는 은정에게도 고마움을 전합니다. 그리고 자주 찾아뵙지 못하는 저를 항상 반갑게 맞아주시고 격려해주시는 이대원 신부님, 양명헌신부님, 고성자선생님께 감사의 말씀을 전합니다. 또한 축구로 인연을 맺어 이제는 친동생과 같은 대운, 준호, 현관과 모자란 저를 항상 격려해주시는 서문청년회원들에게도 고마움을 전합니다. 또한 여기 열거하지는 못하였지만 수많은 인연 중 저와 인연의 끈을 놓지 않고 있는 제 주위의 모든 사람들에게도 고마움을 전합니다.

올해 제 나이 28살. 석사논문이 완성되기까지 저는 무척 불안정하였습니다. 하지만 이런 저의 곁에 항상 지켜주셨던 저의 가족 할머니, 할아버지, 어머니, 누나, 매형이 안계셨으면 저는 이 자리에 있지 못하였을 것입니다. 이 자리를 빌어서 감사의 마음과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 하늘에 계신 아버지께 존경과 감사의 마음을 드립니다. 또한 많이 부족한 저에게 항상 많은 관심과 격려를 해주시는 고모부, 고모, 삼촌, 숙모들, 저를 같은 성가의 조카처럼 아껴주시는 외삼촌, 외숙모들, 친아들처럼 저를 아껴주시는 이모들, 사촌형, 사촌누나께도 감사의 말을 전합니다. 그리고 다시 일어날 수 있는 용기와 지혜를 준 사랑하는 인선에게도 고마운 마음과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 무사히 석사논문을 마칠 수 있게 어둠속에서도 항상 빛을 보여주시는 하느님께 감사드립니다.

2006년 7월.....  
해양수리학 연구실에서.....