



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

3차원 고해상도 모형을 이용한 남해와
대한해협 내부조석 재현



지도교수 이 호 진

2011년 12월

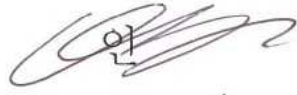
한국해양대학교 대학원

해양생명환경학과

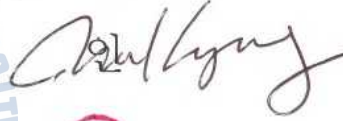
이 현 정

本 論文을 李賢貞의
理學碩士 學位論文으로 認准함.

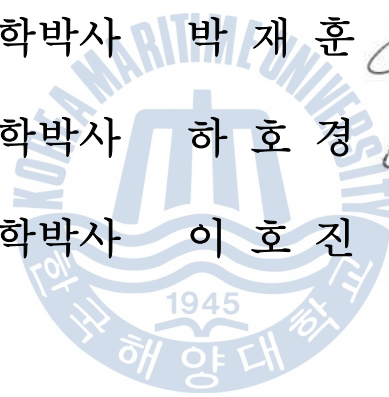
위원장 이학박사 박 재 훈



위 원 이학박사 하 호 경



위 원 이학박사 이 호 진



2011 년 12 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

목 차

	Page
List of figures -----	i
List of table -----	iii
초 록 -----	1
1. 서 론 -----	5
2. 모델 및 입력자료 -----	8
2.1. 모델 개요 -----	8
2.2. 입력 자료 -----	9
3. 결 과 -----	10
3.1. 표층 수온 -----	10
3.2. 조석 검증 -----	14
3.3. 내부 조석(Internal tide) -----	26
3.3.1 ADCP 관측 -----	26
3.3.2 모델 결과 -----	27
3.4. 내부 조석 에너지 -----	38
3.4.1 Barotropic forcing -----	38
3.4.2 에너지 변화량 및 플럭스 -----	40
4. 토 의 -----	48
5. 결 론 -----	53
참고논문 -----	54
감사의 글 -----	57

List of figures

	Page
그림 1. 연구영역 수심도 -----	7
그림 2. AVHRR Pathfinder 위성 자료 중 1999년 월평균 표층 수온 분포 -----	11
그림 3. 모델 결과의 1999년 월평균 표층 수온 분포 -----	12
그림 4. 모델결과 값에 대한 AVHRR Pathfinder 위성 자료 값의 차이 -	13
그림 5. 각 정점에서의 조화 분해하여 얻어진 모델 결과와 관측의 진폭 값의 비교 -----	16
그림 6. 각 정점에서의 조화 분해하여 얻어진 모델 결과와 관측의 위상 값의 비교 -----	17
그림 7. M_2 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian)---	20
그림 8. S_2 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian)---	21
그림 9. K_1 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian)---	22
그림 10. O_1 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian)---	23
그림 11. 4대 분조의 조류타원도 -----	24
그림 12. 모델 결과의 4대 분조 조류타원도 -----	25
그림 13. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 -----	29
그림 14. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 -----	29
그림 15. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 -----	30
그림 16. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 -----	30
그림 17. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 -----	31
그림 18. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 -----	31
그림 19. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 -----	32
그림 20. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 -----	32
그림 21. N2 정점의 연직 조류타원 시계열 -----	33
그림 22. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	34

그림 23. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	34
그림 24. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	35
그림 25. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	35
그림 26. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	36
그림 27. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	36
그림 18. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	37
그림 29. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포(모델 결과) -----	37
그림 30. 모델 영역에서의 수심 적분된 barotropic forcing의 2월, 8월 분포(3일 평균) -----	39
그림 31. 반일주기 barotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량 -----	43
그림 32. 일주기 barotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량 -----	44
그림 33. 수심 적분된 반일주기 내부 조석 에너지 플럭스(2월, 8월)---	45
그림 34. 수심 적분된 일주기 내부 조석 에너지 플럭스(2월, 8월)-----	46
그림 35. 그림 왼쪽편의 상자지역의 반일주기 brotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량과 내부 조석 에너지 플럭스 -----	47
그림 36. 왼쪽 지도의 빨간색 라인을 따라 그린 연직 수온 단면도(2월, 8월) -----	50
그림 37. 라인 S를 따라 1988년, 1989년, 1990년 9월의 수온 연직 단면도(좌), 모델 영역에서 라인 S를 따라 8월 9월의 수온 연직 단면도(우) -----	51
그림 38. 모델 전체를 평균한 수온, 염분, 부력 주파수(buoyancy frequency)의 2월과 8월의 깊이에 따른 변화 -----	52
그림 39. 왼쪽 지도의 빨간색 라인을 따라 그린 연직 수온 단면도(2월, 8월) -----	52

List of tables

	Page
표 1. 관측 (Observed)자료와 모델결과의 조위 자료를 조화 분해하여 얻어진 주요 4대 분조의 진폭(cm)과 모델값에 대한 관측값의 차이 -----	18
표 2. 관측 (Observed)자료와 모델결과의 조위 자료를 조화 분해하여 얻어진 주요 4대 분조의 위상(degrees)과 모델값에 대한 관측값의 차이 -----	19
표 3. 생성된 내부 조석 에너지의 양 -----	42



Internal tides simulation using three-dimensional high resolution Model in South Sea and Korea Strait

Hyun Jung Lee

*Department of Marine Bioscience and Environment, Korea Maritime
University, Busan 606-791, Korea*

Abstract

This study investigates the distribution and energetics of the internal tides in South Sea and Korea Strait using a three-dimensional high resolution model (Regional Ocean Modeling System; ROMS). The model covers 33.3° N to 36.5° N in latitude and 126.9° E to 132° E in longitude including the Korea Strait and the southern part of East Sea. The grid resolution is $1/108^{\circ}$ (about 1 km) in both longitude and latitude. The atmospheric forcing was obtained from the monthly mean ECMWF forecast data with $1/2^{\circ}$ resolution during the period 1999–2008. Calculation results of Research Institute for Applied Mechanics Ocean Circulation Model (resolution : $1/15^{\circ}$) were used for open boundary.

The array of acoustic Doppler current profilers deployed in the model area clearly detects the occurrence of internal tides. The calculated currents were analyzed by bandpass filter to separate the semidiurnal

and diurnal bands. Over the whole analyzed model domain, the conversion rate from barotropic to baroclinic energy generated in summer is twice more than that in winter. The numerical experiment shows that internal tides are effectively generated in a site that barotropic tides clearly emerge with prominent topographic features. For semidiurnal baroclinic tides, the conversion rates from barotropic to baroclinic energy are 0.24 GW and 0.5 GW in February and August, respectively.

There is the seasonal variation associated with the stratification in the region south of 35.5° N, where the water depth is lower than 200 m. Strong internal tides were generated around 35.5° N and $129.5^{\circ} \sim 131^{\circ}$ E, as Park and Watts (2006) suggested. In February, most of the semidiurnal baroclinic tides propagate into the East Sea, due to weak thermocline in winter, which can inhibit the propagation of excited internal tide toward the South Sea. Internal tides, however, were generated at the western Tsushima Island, because of the intensified stratification along its western boundary. This might be attributed to the intrusion of bottom cold water in the Korean side of the Korea Strait. In August, the propagation of excited internal tide toward the South Sea extends to 35° N because of the intensified stratification. Baroclinic tides generated at the western Tsushima Island propagate toward the south coast of Korea.

3차원 고해상도 모형을 이용한 남해의 내부조석 재현

이 현 정

한국해양대학교 해양생명환경학과

초 록

남해와 대한해협에서 생성되는 내부 조석 에너지의 시·공간적 크기 및 분포 특성을 정량적으로 파악하기 위하여 3차원 고해상도 모형 (Regional Ocean Modeling System; ROMS)을 이용하여 실험을 하였다. 모델 영역은 대한해협과 제주도, 동해 일부영역을 포함한 영역으로 북위 33.3 ~ 36.5도, 동경 126.9 ~ 132도로 설정하였으며, 모델의 해상도는 $1/108^\circ$ (약 1 km)이다. 1999년에서 2008년 까지 10년 월평균 기상자료를 사용하였고, RIAMOM (해상도 1/15도)에서 재현한 10년간의 유속, 수온, 염분, 표층 수위 값을 개방 경계에서 사용하였다.

남해와 대한해협에 계류된 12개의 ADCP 자료를 통해 남해의 내부 조석이 발생함을 확인하였다. 수치실험 결과는 반일주기 분조와 일주기 분조로 나누어 분석하기 위해 bandpass filter 하였다. 수치실험 결과 여름철이 겨울철보다 약 2배 이상의 내부조석 에너지가 생성되었고, 수심이 급격히 변하고 순압 조석 (barotropic tide)이 우세하게 나타나는 곳에서 내부 조석이 효과적으로 생성되었다. 반일주기의 조석의 경우 2월에 0.24 GW 의 내부 조석 에너지가 생성되고, 8월에는 0.5 GW의 내부 조석 에너지가 생성된다. 모델 영역에서 북위

35.5도 이남은 수심 200 m 이하의 지역으로 계절에 따라 성층화 정도가 달라져 생성된 내부 조석 에너지가 남해 연안으로 전파되는 범위에 영향을 미친다. 대부분의 내부 조석은 Park and Watts (2006)에서 제시한 약 북위 35.5도 동경 129.5 ~ 131도 사이 (울릉분지의 입구)에서 나타났다. 이곳에서 생성된 내부 조석 에너지는 성층이 약화되는 2월에는 생성된 에너지의 대부분이 동해 쪽으로 전파되고 남해연안으로의 전파는 제한되는 반면, 성층이 강화되는 8월에는 북위 35도까지 전파되어 남해연안에 영향을 준다. 그리고 대마도 서쪽 깊은 골에서 생성되는 내부 조석 에너지는 성층이 강화되는 여름철의 경우 골과 수직 한 방향으로 전파되어 남해연안에 영향을 준다. 성층이 약화되는 겨울철의 경우 여름철에 생성되는 내부 조석 에너지에 비해 적은 양이 생성되지만, 대한해협 저층냉수의 유입으로 지역적 성층화가 강화되어 내부 조석이 생성되었다.



1. 서론

남해와 대한해협은 서쪽으로 황해와 동중국해에 연결되어 있고, 동쪽으로는 동해와 연결되어 있어 조류, 해류, 밀도류, 취송류 등의 복합적 작용에 의한 해수유동이 일어나는 지역이다 (김 등, 2000). 지형적 특징은 연안을 따라 수심 50 m 이하의 완만한 경사를 가지며 제주도연안과 대마도연안에서 100 m 까지 다소 급한 수심 변화를 보인다. 대한해협 서수도에서는 200 m 이상의 깊은 골 (trough)이 해협과 평행하게 발달되어 있다. 골을 중심으로 한국 연안측은 경사가 완만하며 대마도 쪽으로는 경사가 비교적 급하다.

남해의 해수 유동을 일으키는 가장 큰 기작력 중의 하나인 조석은 반일주조의 경우 최고 0.8 m/s 정도의 강한 조류 (Odamaki, 1989)를 만든다. 또 다른 유동은 고온 고염의 대마난류로 제주연안을 시계방향으로 선회하여 남해로 유입되거나 제주-대마도 사이를 통해 남해로 유입되고 대한해협을 통해 동해로 유출된다 (Lie and Cho, 1997; 김 등, 1991; Chang et al., 1995). 또한 양자강 등 황해나 동중국해에서 기원한 저염의 해수도 제주해협을 통해 남해로 유입되기도 한다 (조와 김, 1994; 김과 노, 1994).

내부조석은 성층화된 해양과 대륙붕단 (shelf break), 해산과 같이 수심이 급격히 변하는 해저지형에서 흔하게 나타난다 (Niwa and Hibiya, 2001). 내부조석은 표면 조석과는 다르게 깊이별로 다른 방향의 흐름을 가지고, 대양에서 약 100 km 정도의 상대적으로 짧은 파장을 가진다. 성층화된 해양에서 발생되는 내부 조석과는 밀도 경계면의 상하 운동을 유발하여 단주기 혼합 층의 두께 변화에 큰 영향을 미친다.

Niwa and Hibiya (2001)는 3차원 모델을 이용하여 태평양 전체의 내부 조석 에너지를 계산하였고, 서태평양이 동태평양 보다 2~3배 더 크게 나타남을 확인하였다. Niwa and Hibiya (2004)는 고해상도 모델을 이용하여 동중국해의 M_2

내부조석 생성의 공간 분포 및 에너지 플럭스를 계산하였다. 하지만 그들은 동중국해의 주요한 해수유동인 쿠로시오 해류를 포함시키지 않았다. 기존에 수행된 남해를 포함한 해역에 대한 수치모델 연구들 (Fang, 1986; 최 등, 1994)은 조석 및 조류의 재현에 초점을 두었다. Book et al. (2004)은 Griffin and Thompson (1996)이 개발한 순압 (barotropic) 자료동화 2차원 조석 모델을 이용해 남해의 조류와 조위를 계산하였다. 하지만 경압 (baroclinic)성분은 고려하지 않고 순압성분만을 고려하였기 때문에 내부 조석의 존재를 확인 할 수 없었다. Park and Watts (2006)는 내부조석이 대한해협 북단 북위 약 35.5도 동경 130 ~ 131도 사이에서 제한되어 주로 생성되며 동해로 전파된다고 보고하였다. 하지만 남해연안으로의 내부조석의 전파는 규명되지 않았고, 내부조석 에너지가 얼마나 생성되어 전파되는지 정량적인 결과는 제시하지 못했다.

본 연구에서는 해류와 조류를 모두 포함시킨 3차원 고해상도 모형을 사용하여 남해에서 생성되는 내부조석 에너지의 시·공간적 크기 및 분포 특성을 정량적으로 파악하였다. 또한 생성된 내부조석 에너지의 플럭스 (flux)를 계산하여 남해에 미치는 범위를 확인하였다.

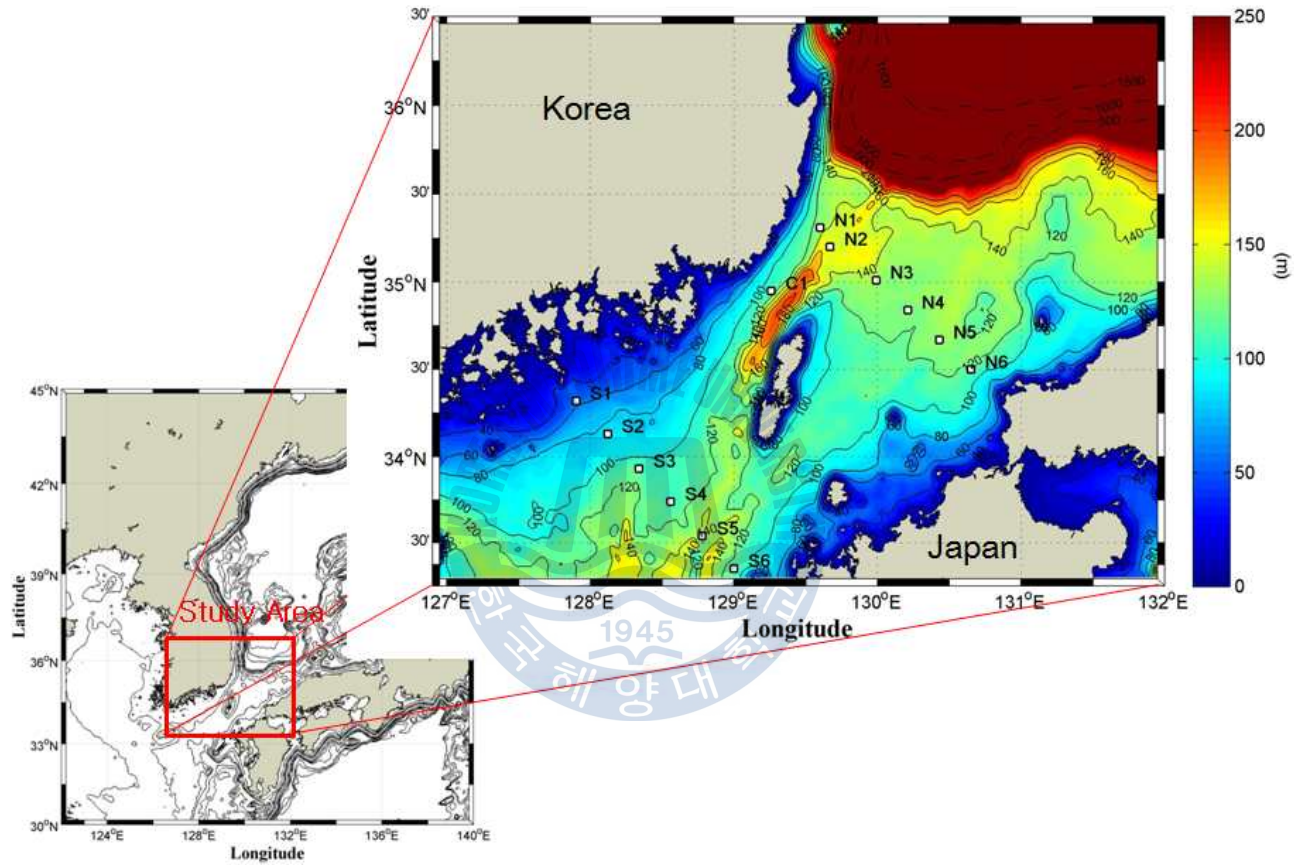


그림 2. 연구영역 수심도 및 ADCP 관측 정점. 등수심선 간격 (실선 : 20 m, 점선 : 500 m).

2. 모델 및 입력 자료

2.1 모델 개요

본 연구에 사용된 3차원 해양수치모형은 ROMS (Regional Ocean Modeling System - version3.4)이다. 이류항 계산을 위해 3차 upstream scheme을 사용하였다. 이는 계산 오차를 줄이는데 아주 효과적이고 모형에서 예측수정 방법을 이용하여 좀 더 안정적인 계산을 가능하게 한다. 수직 확산계수 계산은 남해와 같은 천해역에 적합한 Mellor-Yamada level 2.5 closure scheme (Mellor and Yamada, 1982)을 이용하였다. 난류와동점성계수는 모형의 격자 크기와 수평적인 전단속도가 비례한다는 Smagorinsky (1963)의 수식을 이용하여 계산하였다.

대기와 해양의 상호작용에 중요한 역할을 하는 열수지의 변화를 효율적으로 적용하기 위해 바람에 의한 표층의 운동, 현열, 잠열 등의 요소들을 이용하여 대기와 해양의 열수지를 계산하는 Fairall et al. (1996)의 Bulk 계산식을 사용하였다.

모형 영역은 남해와 대한해협, 동해 일부영역을 포함한 영역으로 북위 33.3 ~ 36.5도, 동경 126.9 ~ 132도로 설정하였다. 수평적으로 346 × 551 의 격자로 구성하였으며 격자 간격은 약 1 km 이며 수직적으로는 S-좌표계로 총 20개 층으로 구성된다. 본 모델에 적용된 수심자료는 한국해양연구원 30초 자료이다. 격자 간 수심이 급격히 변화하는 해역에서는 변화율을 줄이기 위해 수심 평활화 (smoothing)과정을 거쳤으며, 최소 수심은 2 m로 고정하였다.

개방경계는 해수면 변위, 2차원 유속, 3차원 유속 및 수온 이다. 해수면 변위의 개방경계조건은 Chapman (1985)방법을 이용하였다. 2차원 유속은 Flather (1976) 타입의 Radiation 조건을 사용한다. 3차원 유속 및 수온, 염분은 Radiation 조건을 이용하여 계산하였다. 개방경계의 수온과 염분은 damping

time 1일인 nudging도 포함한다.

2.2 입력 자료

개방경계에 입력되는 유속 및 수온, 염분 값은 큐슈대학의 RIAMOM (Research Institute for Applied Mechanics Ocean Circulation Model) 1/15도 결과를 2001년부터 2010까지 10년 월 평균하여 사용하였다 (<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp>).

바람에 의한 응력과 열교환량은 1999년 ~ 2008년까지의 12시간 간격의 ECMWF (European Centre for Medium - Range Weather Forecast)의 경위도 0.5도 간격 예보자료를 내삽 하여 사용했다. 사용한 자료는 해상풍, 대기온도, 상대습도, 표층의 대기압, 단파복사 이다.

남해연안에 염분 분포에 영향을 미치는 영산강, 낙동강은 국가수자원관리 종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr>)에서 1999년부터 2008년까지 10년 월평균 자료를 사용하였다. 두 강의 유량 모두 7월에 최대, 2월에 최소값을 보인다. 각 강물의 수온은 이 (2007)의 관측 값을 사용하였고, 염분은 연중 0으로 고정하였다.

모델에서 이용된 조석자료는 Oregon State Univ. (OSU) 제공한 OTIS Regional Tidal Solutions 1/12도 자료를 모델영역에 맞게 내삽 하였다. 이 모델에 쓰인 자료에는 $M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$ 의 8대 분조와 장주기 분조인 Mm, Mf 가 포함되어 있다.

3. 결 과

남해 대한해협 모델을 재현하기 이전에 안정화를 위하여 1999년부터 2008년까지 10년 평균된 기후 자료를 사용하여 5년간 스핀업을 하였다. 스핀업 계산 후 1999년 ~ 2000년까지 12시간 간격의 일 자료를 이용하여 2년간 hindcast 모델을 수행하였다.

3.1 표층 수온

남해 모델의 정확성을 비교하기 위해서 NASA's Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC, <http://poet.jpl.nasa.gov/>)에서 제공하는 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Pathfinder Version 5 를 모델의 표층 수온 분포와 비교하였다.

AVHRR Pathfinder 5 위성 자료는 4 km의 해상도를 가지며 1999년 월평균을 구하여, 모델 결과와 비교했다 (그림 2와 3). 모델 결과와 위성 자료의 표층 수온 결과는 대체로 잘 일치하고 계절변화가 뚜렷하다. 하지만 모델 결과의 북쪽 개방경계 쪽의 수온 값이 낮게 모사되고 있다. 대한해협에서는 겨울철에 12 ~ 18°C의 수온 분포를 보이며, 여름철에는 25°C 내외의 표층 수온 분포가 모델 결과와 위성 자료 모두에서 나타난다. 모델 값에 대한 관측 값의 차이는 북쪽 개방경계를 제외하고 평균 약 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 여름철에 서남해안에서 조석 혼합으로 인한 표층 저온수가 대마도 부분까지 나타나고 있다.

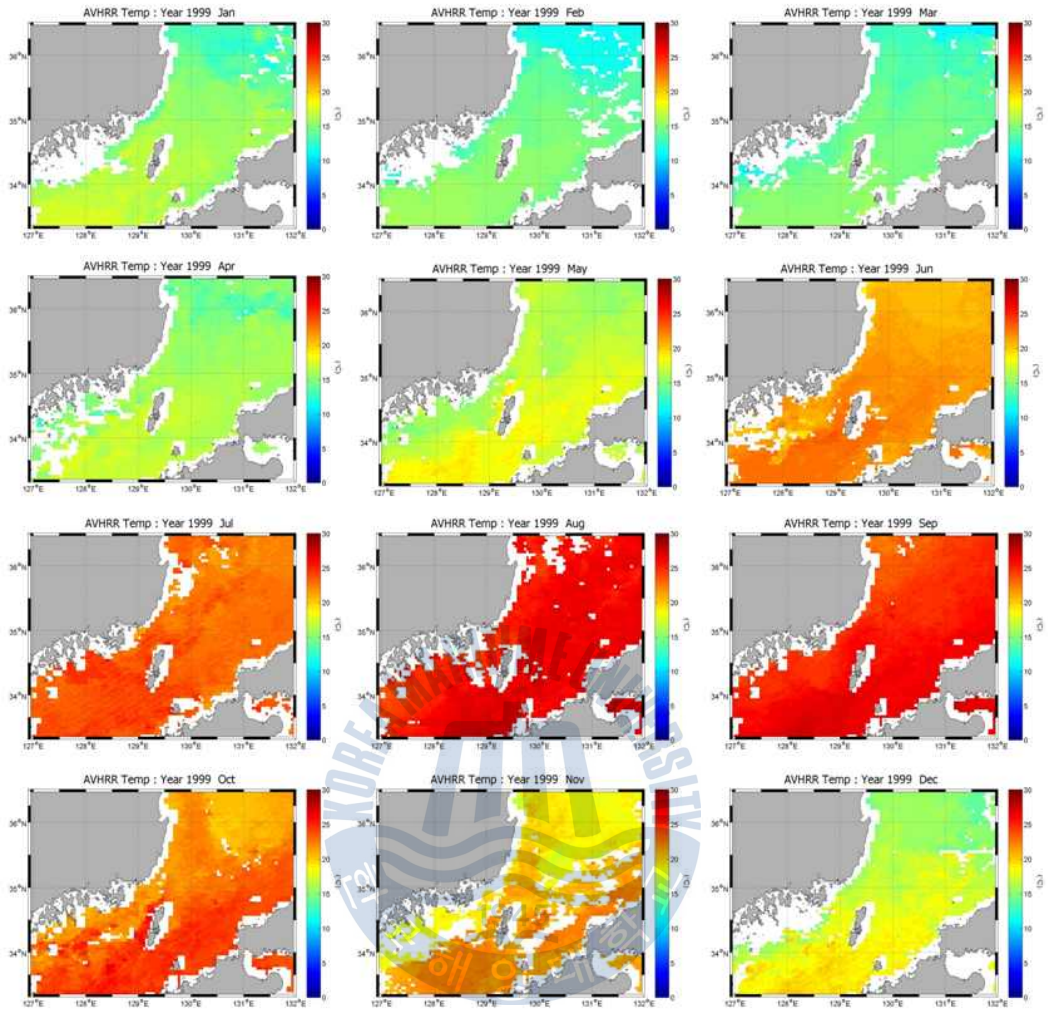


그림 3. 1999년 월평균 표층 수온 분포 (AVHRR Pathfinder 위성 자료).

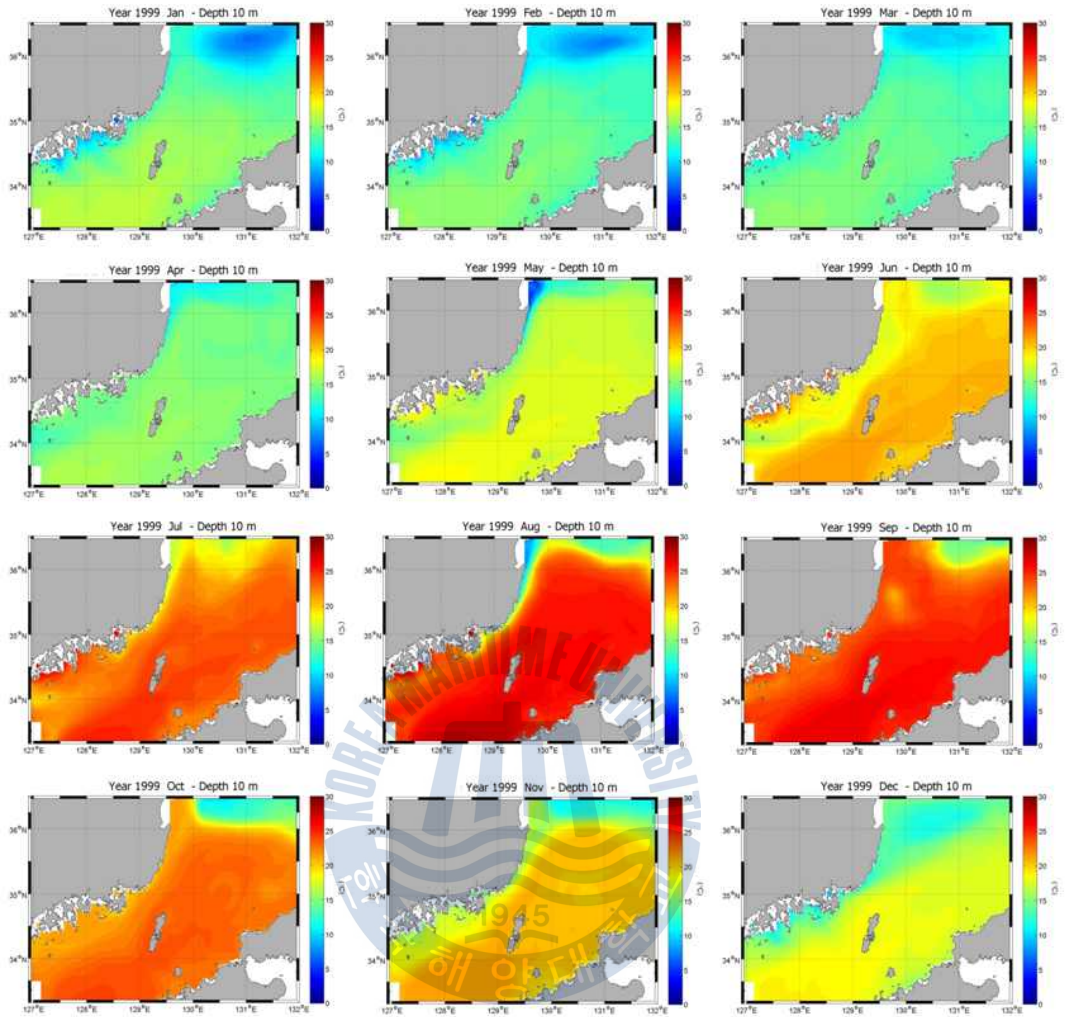


그림 4. 1999년 월평균 표층 수온 분포 (모델 결과).

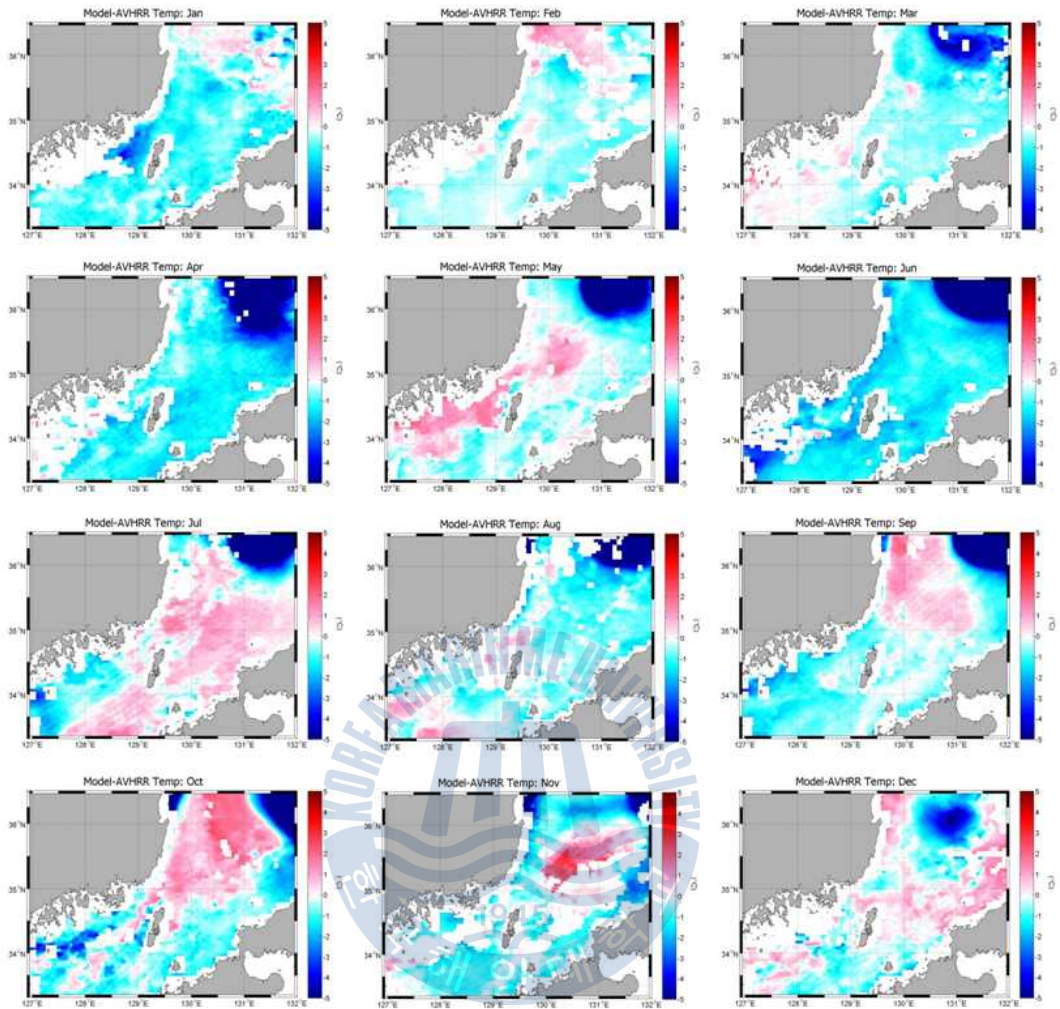


그림 5. 모델결과와 AVHRR Pathfinder 위성 자료 값의 차이.

3.2 조석 검증

미군 해군 연구소 (U.S Naval Research Laboratory, NRL)에서 “Link ages of Asian Marginal Seas (LINKS)” 프로그램의 일환으로 1999년 5월부터 2000년 3월까지 총 11개월 동안 설치된 acoustic Doppler current profiler (ADCP)를 이용해 해류 (current)와 압력 (Pressure)을 장기간 측정 하였다. 본 연구에서는 조석 검증을 위하여 LINKS 프로그램의 정점 중 대한해협을 가로지르는 2개의 라인을 따라 13개 정점을 사용하였다. 관측된 13개 정점과 같은 위경도의 모델정점을 선택하여 조위와 유속 값을 각각 조화 분해하였다.

계산된 모델결과 중 관측된 13개 정점 중 1999년 10월부터 관측된 C1을 제외하고, 같은 지점의 조위 값을 조화 분해하여 Book et al. (2004)의 연구에서 제시된 조위 값의 조화 분해 결과와 주요 4대 분조의 진폭과 위상을 비교하였다 (그림 5와 6). 분석된 진폭의 단위는 cm이고, 위상은 Greenwich 자오선을 기준으로 분석 하였다. 진폭의 경우 $S_1 \sim S_6$ 정점의 진폭이 $N_1 \sim N_6$ 정점의 진폭보다 크게 나타난다. M_2 분조의 경우 $S_1 \sim S_6$ 정점의 진폭이 77.64 ~ 93.37 cm 의 범위로 $N_1 \sim N_6$ 정점의 진폭 16.12 ~ 24.85 cm의 범위보다 약 4배 더 크게 나타났으며, S_2 분조의 경우 역시 S정점이 N정점보다 약 4배 더 크게 나타났다. 관측 값과 비교했을 때, M_2 분조와 S_2 분조의 경우 각각 평균 3.47 cm, 1.80 cm 더 높게 모사되었다. K_1 분조의 경우 $S_1 \sim S_6$ 정점의 진폭이 16.67 ~ 18.68 cm 의 범위로 $N_1 \sim N_6$ 정점의 진폭 7.91 ~ 0.80 cm의 범위보다 $S_1 \sim S_6$ 정점의 진폭이 약 2배 더 크게 나타났다. O_1 분조의 경우 역시 $S_1 \sim S_6$ 정점의 진폭이 약 2배 더 크게 나타났다 (표 1). 측정값과 비교했을 때, K_1 분조와 O_1 분조의 경우 각각 평균 0.73 cm, 0.87 cm 더 낮게 모사되었다.

위상의 경우 M_2 분조는 모델 값에 대한 관측 값의 차이가 평균 1.70° 이다. S_2 분조는 평균 2.47° 차이가 나며 K_1 , O_1 분조의 경우 각각 7.92° , 9.48° 차이가 난다. $N_1 \sim N_6$ 정점의 위상차가 $S_1 \sim S_6$ 정점의 위상차 보다 크게 나타난

다 (표 2). 전체적으로 실선에 가까운 값으로 관측치와 모델결과가 잘 일치함을 보인다 (그림 5와 6).

그림 7 ~ 10 은 모델 영역 전체에서 조위성분을 조화분석하여 얻어진 4대 분조의 조석도이다. 위상은 Greenwich 자오선을 기준으로 한 값이고 진폭의 단위는 m이다. 모델로 재현된 조석도는 Book et al. (2004)이 제시한 조석도와 모델결과를 비교하였다. M_2 분조의 진폭은 제주도에서 북쪽으로 가면서 1 m에서 0.1 m로 점차 감소한다. 등조위선의 기울기는 제주도 부근에서는 해안선과 수렴하는 각도로 나타나고 대마도 부근부터 해안선과 수직하게 나타난다. 모델의 결과가 Book et al. (2004)이 제시한 등조위선과 제주도와 서남해 연안 사이에 약 0.1 m 더 높게 모사된 것을 제외하면 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 위상의 경우도 모델의 결과가 Book et al. (2004)이 제시한 등조위선과 일치함을 보였다. S_2 분조의 진폭은 제주도에서 북쪽으로 가면서 0.5 m에서 0.05 m로 점차 감소한다. 등조위선의 기울기는 M_2 분조와 비슷하게 나타난다. 모델의 결과가 Book et al. (2004)이 제시한 등조위선과 제주도와 서남해 연안 사이에 약 0.05 m 더 높게 모사된 것을 제외하면 거의 일치함을 확인할 수 있다. 위상의 경우도 모델의 결과가 Book et al. (2004)이 제시한 등조위선과 일치함을 보였다. K_1 분조와 O_1 분조의 진폭은 각각 0.23 m에서 0.025 m와 0.15 m에서 0.025 m의 범위로 점차 감소하고, M_2 와 S_2 분조에 비해 공간적인 차이가 적은 편이다. K_1 분조와 O_1 분조의 경우 무조점의 위치도 모델의 조석도와 Book et al. (2004)의 조석도 에서 제시된 무조점의 위치와 비교할 때 거의 일치한다.

그림 11과 12 는 모델 영역 전체에서 수심평균 유속성분을 조화 분해하여 얻어진 조류타원도이다. 모델로 재현한 조류타원도를 Book et al. (2004)이 제시한 조류타원도의 공간분포와 비교하였다. 전반적으로 조류타원도의 크기는 모델결과가 약 0.1 m/s 크게 나타났다. 하지만, 대한해협 서수도와 동수도 에서 나타난 강한 왕복성 흐름의 패턴이 일치한다. M_2 분조의 경우 대한해협 서수도 에서 동해 입구 쪽으로 평균 0.7 m/s의 강한 조류 흐름을 나타내고 있다.

또한 수심이 급격히 깊어지는 북위 35.5° 부근의 200 m이상의 수심부터 조류타원의 크기가 약 10배 작아진다. S_2 , K_1 분조와 O_1 분조의 경우도 비슷하게 나타난다. 이곳의 경우 조류타원도와 등수심선이 수직을 이루고 있다.

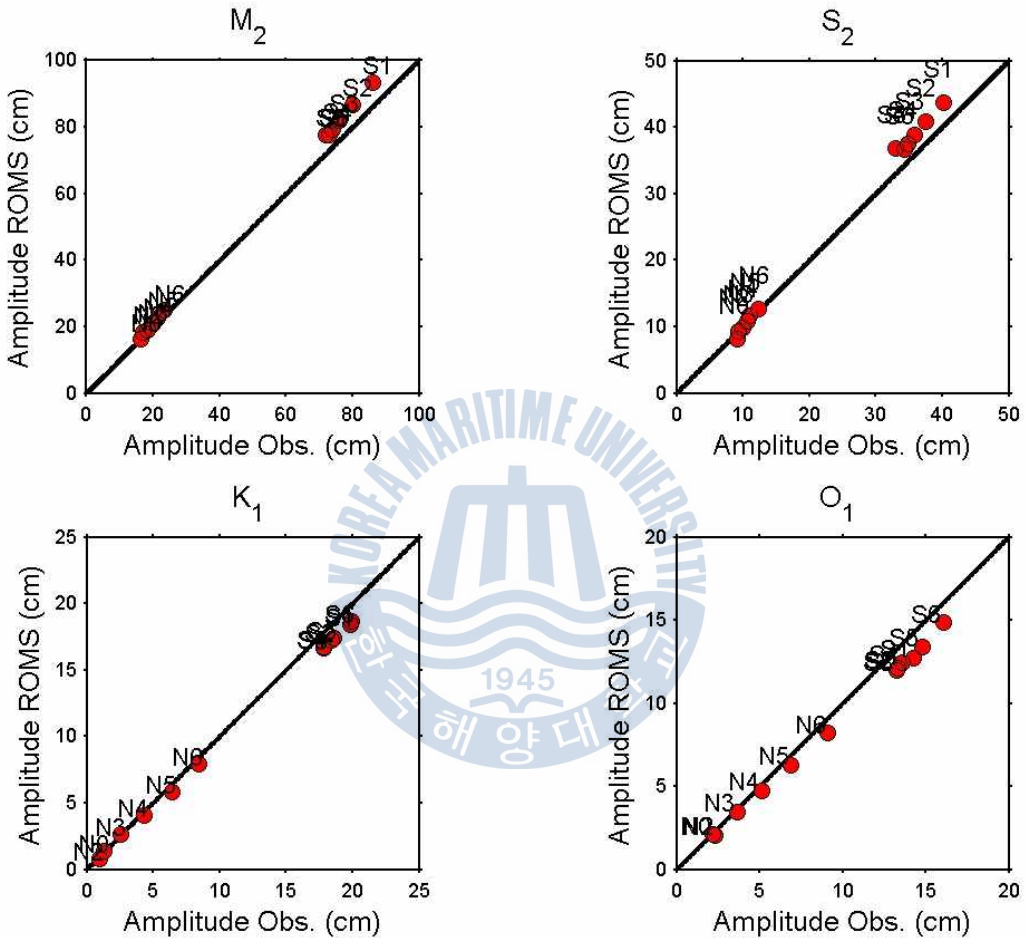


그림 6. 각 정점에서의 조화 분해하여 얻어진 모델 결과와 관측의 진폭 값의 비교 (단위 cm). x축은 관측 결과의 진폭 y축은 모델 결과의 진폭 (실선 : 관측=모델).

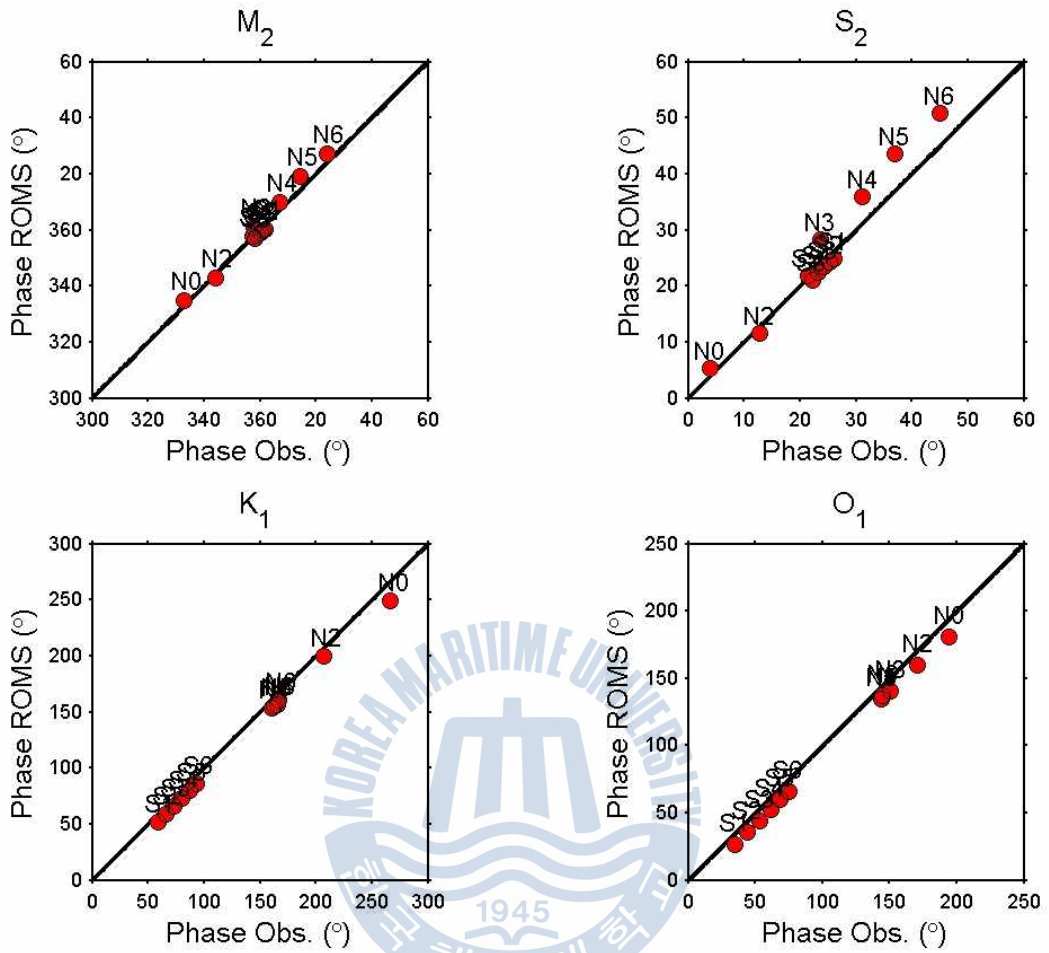


그림 7. 각 정점에서의 조화 분해하여 얻어진 모델 결과와 관측의 위상 값의 비교 (단위 $^{\circ}$). x축은 관측 결과의 위상 y축은 모델 결과의 위상 (실선 : 관측=모델).

표 1. 관측 (Observed)자료와 모델결과의 조위 자료를 조화 분해하여 얻어진 주요 4대 분조의 진폭 (cm)과 모델 값에 대한 관측 값의 차이.

	M ₂			S ₂			K ₁			O ₁		
	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.
S1	93.37	86.16	7.21	43.78	40.14	3.64	18.44	19.88	-1.44	12.73	14.28	-1.55
S2	86.62	80.09	6.53	40.82	37.52	3.30	17.21	18.41	-1.20	12.10	13.34	-1.24
S3	82.13	76.09	6.04	38.87	35.81	3.06	16.67	17.86	-1.19	11.97	13.27	-1.30
S4	79.28	73.87	5.41	37.57	34.79	2.78	16.73	17.79	-1.06	12.43	13.57	-1.14
S5	77.84	72.11	5.73	36.88	33.04	3.84	17.45	18.60	-1.15	13.41	14.78	-1.37
S6	77.64	72.85	4.79	36.73	34.27	2.46	18.68	19.95	-1.27	14.84	16.10	-1.26
N1	16.12	16.28	-0.16	8.14	9.22	-1.08	1.36	1.34	0.02	2.09	2.21	-0.12
N2	18.43	17.08	1.35	9.39	9.25	0.14	0.80	0.98	-0.18	2.05	2.34	-0.29
N3	18.88	18.28	0.60	9.81	9.96	-0.15	2.62	2.60	0.02	3.48	3.67	-0.19
N4	20.82	19.86	0.96	10.74	10.70	0.04	4.11	4.33	-0.22	4.74	5.14	-0.40
N5	22.76	21.32	1.44	11.63	11.00	0.63	5.86	6.38	-0.52	6.29	6.91	-0.62
N6	24.85	23.43	1.42	12.72	12.29	0.43	7.91	8.43	-0.52	8.22	9.12	-0.90

표 2. 관측 (Observed)자료와 모델결과의 조위 자료를 조화 분해하여 얻어진 주요 4대 분조의 위상 (degrees) 과 모델 값에 대한 관측 값의 차이. 위상은 Foreman (1997)의해 정의된 Greenwich 자오선을 기준으로 분석됨.

	M ₂			S ₂			K ₁			O ₁		
	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.	Model	Obs.	diff.
S1	0.37	1.80	-1.43	24.94	26.10	-1.16	51.64	58.50	-6.86	26.35	34.7	-8.35
S2	359.78	0.90	-1.12	24.2	25.20	-1.00	58.99	65.80	-6.81	35.67	44.1	-8.43
S3	358.98	0.10	-1.12	23.36	24.20	-0.84	66.24	73.30	-7.06	44.4	53.4	-9
S4	358.21	359.00	-0.79	22.53	23.30	-0.77	73.37	80.20	-6.83	52.53	61.3	-8.77
S5	357.59	357.40	0.19	21.82	21.50	0.32	80.28	87.50	-7.22	59.85	68.7	-8.85
S6	356.92	358.00	-1.08	21.02	22.20	-1.18	86.51	93.40	-6.89	65.85	74.7	-8.85
N1	334.84	333.00	1.84	5.34	4.00	1.34	249.18	266.70	-17.52	180.71	194.2	-13.49
N2	342.77	344.00	-1.23	11.6	12.70	-1.10	199.5	206.50	-7.00	159.91	171.1	-11.19
N3	0.95	357.80	-1.25	28.24	23.70	4.54	156.65	165.60	-8.95	140.23	150.8	-10.57
N4	9.86	7.20	2.66	35.9	31.20	4.70	153.19	160.50	-7.31	134.66	144.1	-9.44
N5	19.03	14.40	4.63	43.63	36.90	6.73	155.9	162.30	-6.40	134.91	144	-9.09
N6	27.01	23.90	3.11	50.92	45.00	5.92	160.49	166.70	-6.21	137.12	144.9	-7.78

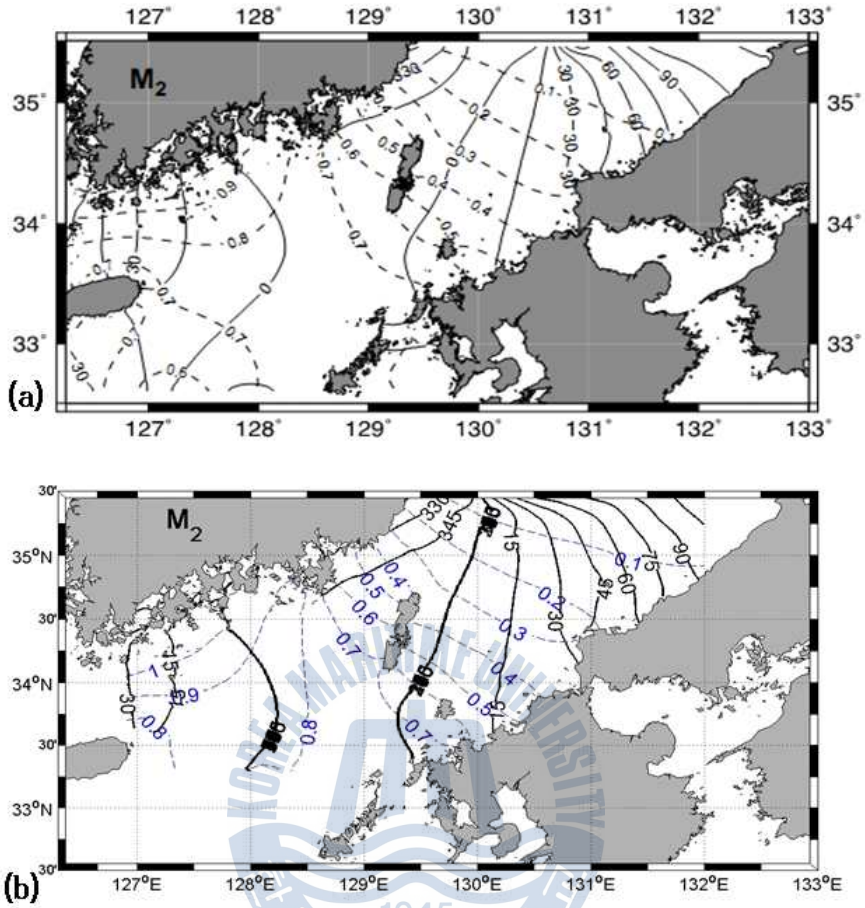


그림 8. M_2 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian). 등조위선과 등조시선의 간격은 각각 0.1 m, 15° . (a)는 Book et al. (2004)에서 발췌한 결과로 Griffin and Thompson (1996)에 의해 개발된 순압 자료 동화 모델 결과. (b)는 모델결과.

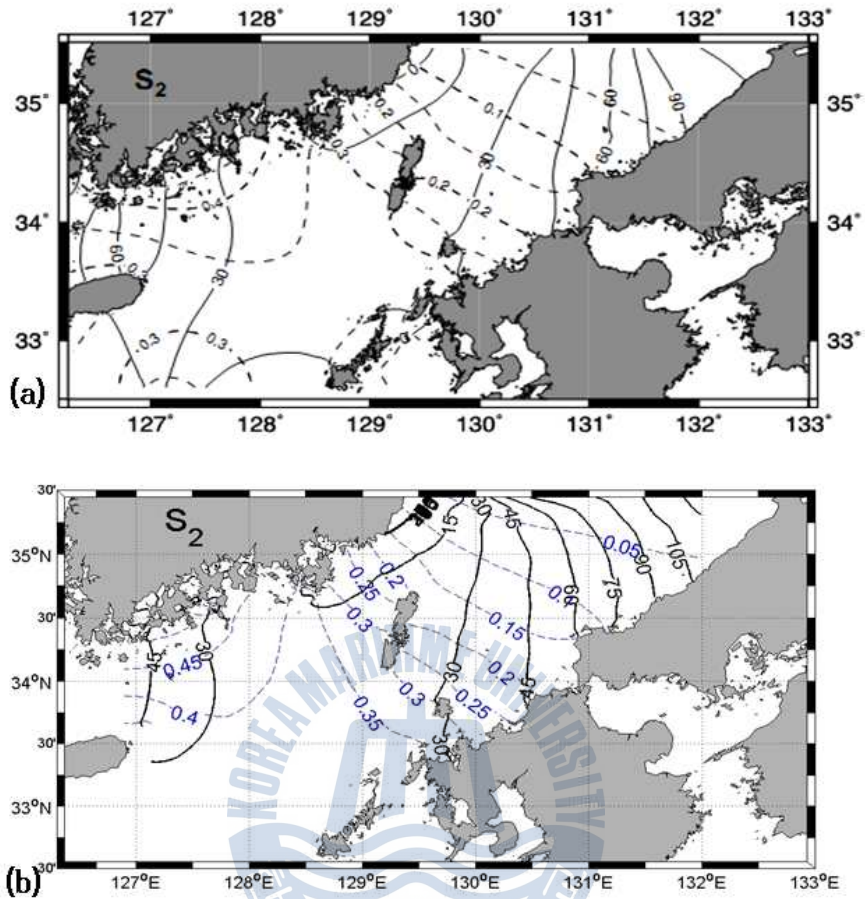


그림 9. S_2 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian). 등조위선과 등조시선의 간격은 각각 0.05 m, 15° . (a)는 Book et al. (2004)에서 발췌한 결과로 Griffin and Thompson (1996)에 의해 개발된 순압 자료 동화 모델 결과. (b)는 모델결과.

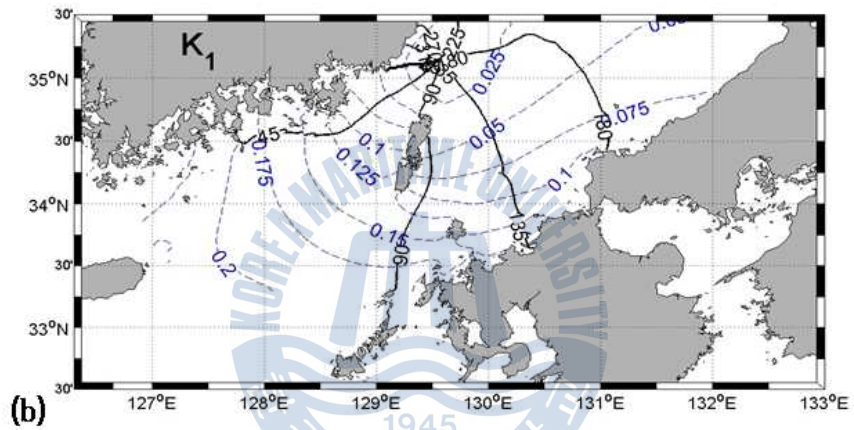
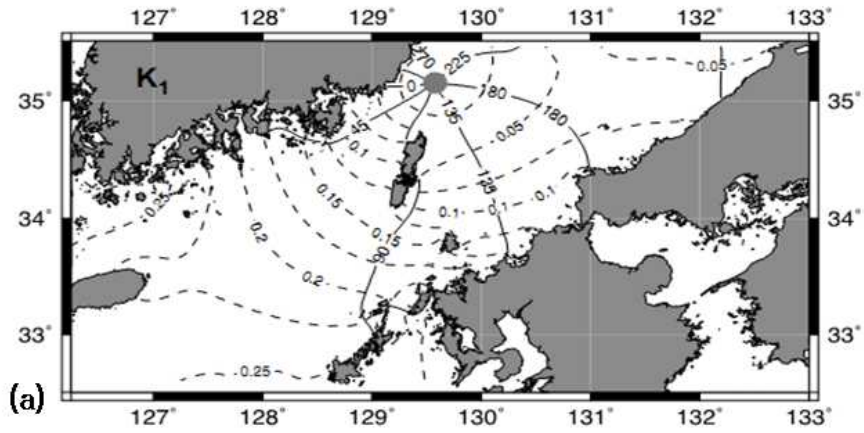


그림 10. K_1 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian). 등조위선과 등조시선의 간격은 각각 0.05 m, 45° . (a)는 Book et al. (2004)에서 발췌한 결과로 Griffin and Thompson (1996)에 의해 개발된 순압 자료 동화 모델 결과, (b)는 모델 결과.

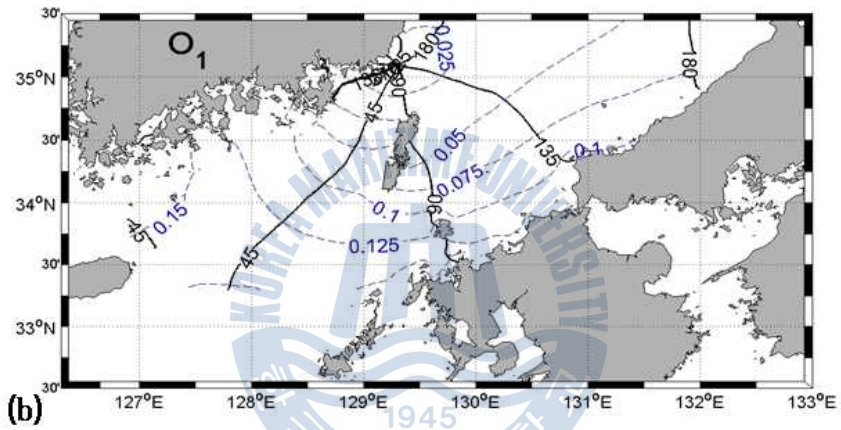
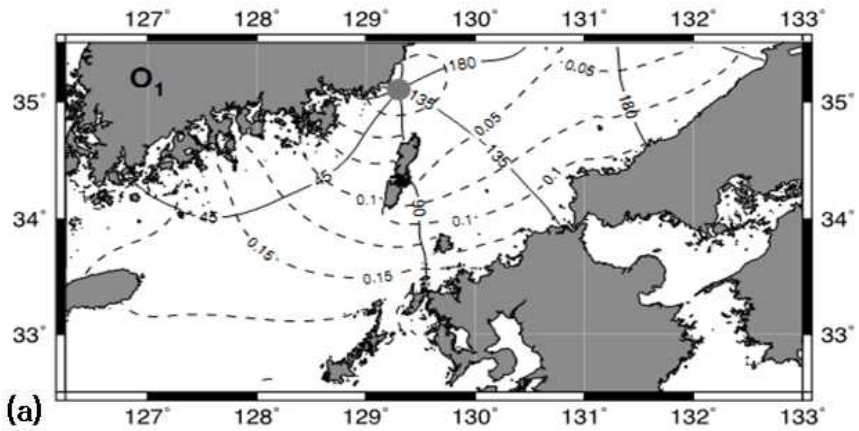


그림 11. O_1 분조의 등조위선 (점선, m)과 등조시선 (실선, radian). 등조위선과 등조시선의 간격은 각각 0.07 m, 45° . (a)는 Book et al. (2004)에서 발췌한 결과로 Griffin and Thompson (1996)에 의해 개발된 순압 자료 동화 모델 결과. (b)는 모델결과.

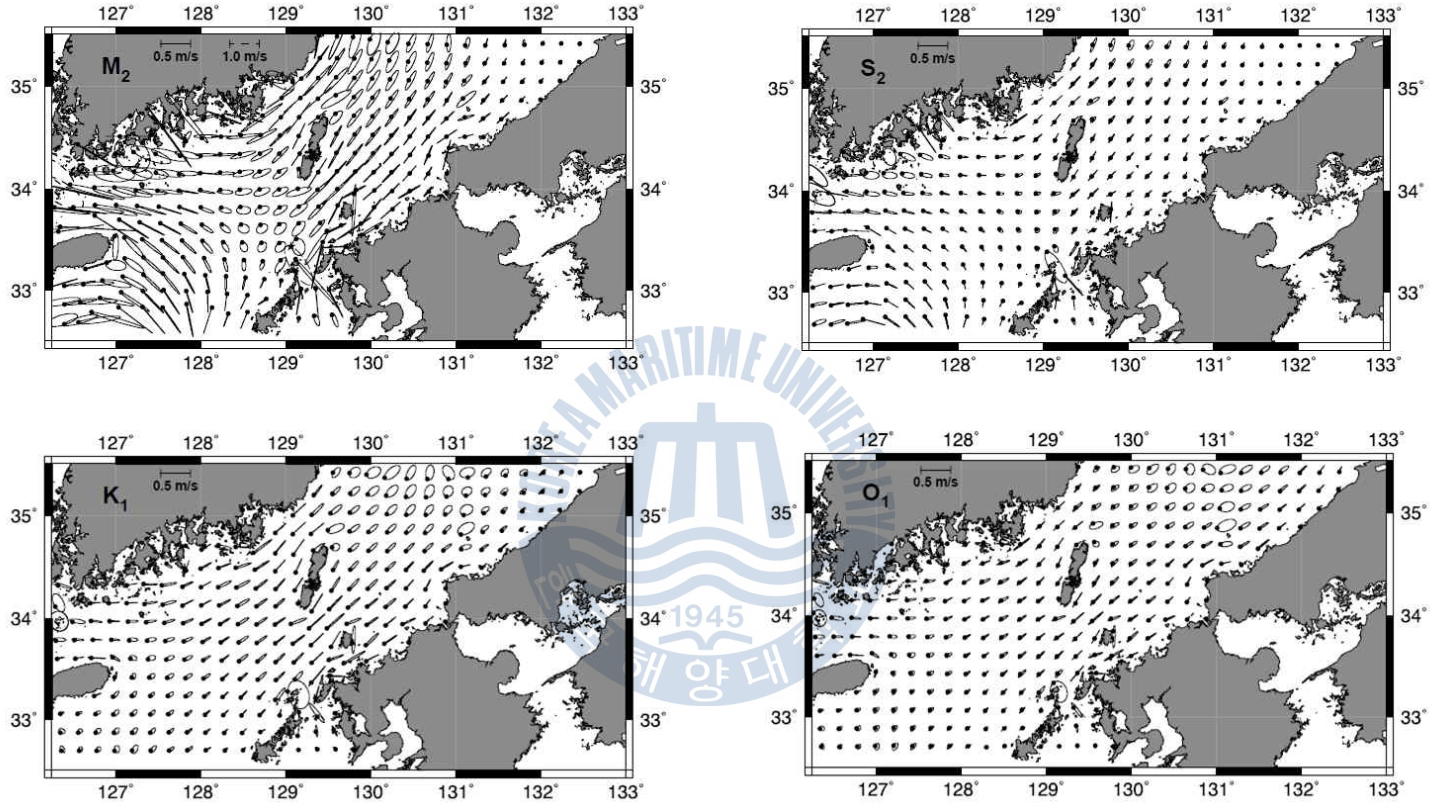


그림 12. 4대 분조의 조류타원도. Book et al. (2004)에서 발췌한 결과로 Griffin and Thompson (1996)에 의해 개발된 순압 자료 동화 모델 결과.

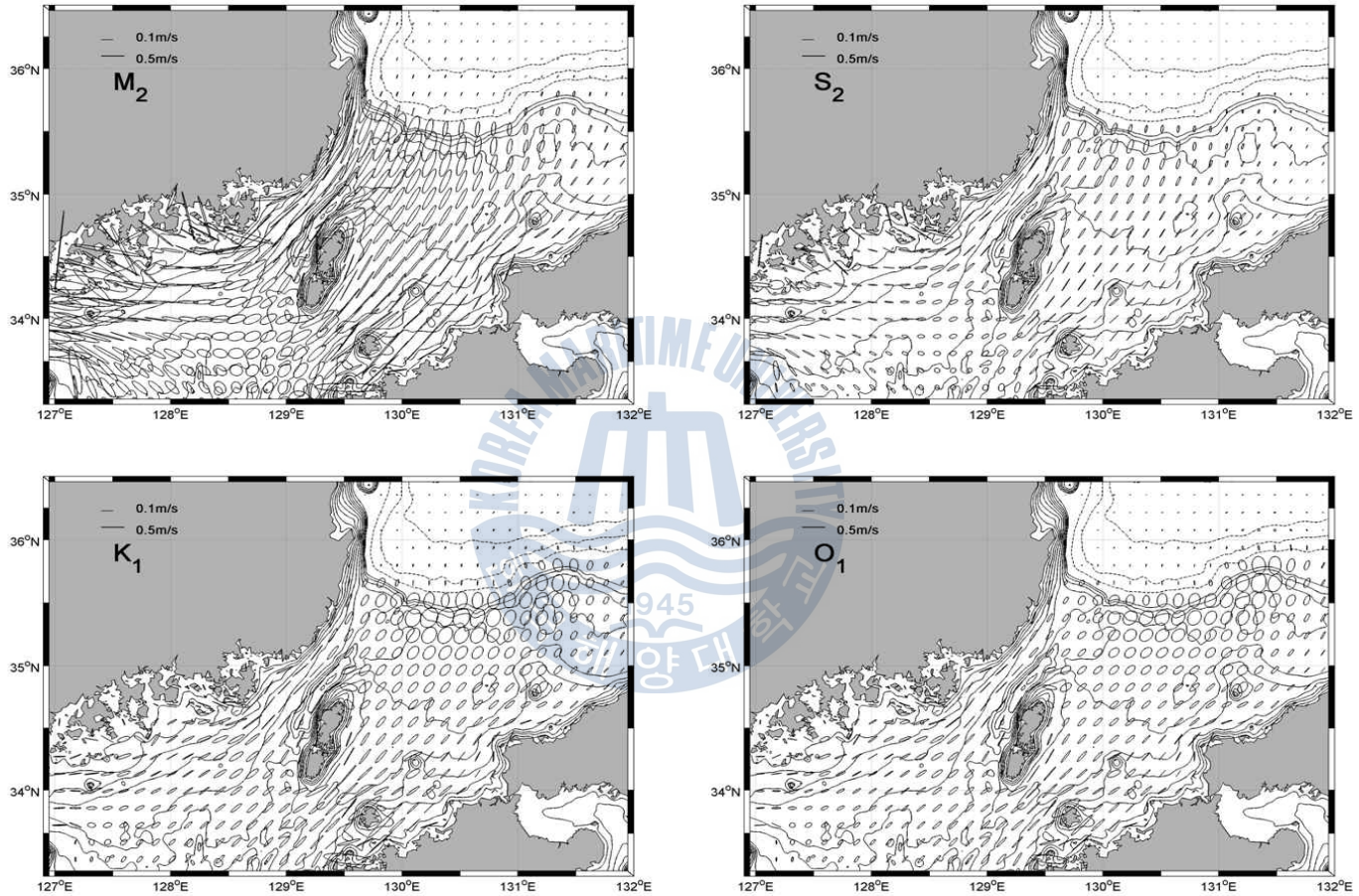


그림 13. 모델 결과의 4대 분조 조류타원도.

3.3 내부 조석 (Internal Tide)

3.3.1 ADCP 관측

1999년 5월부터 2000년 3월까지의 ADCP 관측 자료를 이용하여 13개 정점의 내부조석을 확인하였다. N2 ~ N6 와 S1 ~ S6 정점은 1999년 5월과 1999년 10월 중순에 설치되어 2000년 3월까지 측정하였고, N1과 C1정점은 추가로 설치하여 1999년 8월 자료가 없다 (그림 1 참조). 측정된 유속 값은 연직으로 4 m간격이고, 15 분 ~ 1 시간의 시간 간격을 가진다.

내부 조석의 연직 구조를 파악하기 위해 각 정점의 유속 값을 깊이 별로 조화 분해하였다. 유속의 조화분해 시 경압 (baroclinic) 성분만을 고려하기 위해 각 깊이별 유속에 수심 평균된 유속을 제거하여 분석하였다. 본 연구에서는 내부조석의 계절 변동을 관측하기 위해 여름과 겨울을 대표하는 8월과 2월을 비교 분석하였다.

그림 13 ~ 20 은 4대 분조의 2월과 8월 연직 조류타원도이다. 성층이 강해지는 8월의 경우, 4대 분조 모두에서 내부 조석이 발생한다. 표층에서 조류타원이 가장 강하게 나타나고 점차 감소하며 노드 점에 의해 다시 저층으로 가면서 강하게 나타나는 특징을 보인다. 그리고 깊이에 따라 조류타원이 시계방향으로 회전하고 있다. 반일주기 분조의 경우는 하나의 노드점이 관찰되지만, N2 정점의 경우, 일주조인 K_1 과 O_1 분조는 두 개의 노드점이 관찰된다. 분석된 조류타원의 연직 분포 중 N2 정점이 내부 조석 특징을 가장 잘 반영한다. 그림 21 은 관측된 N2정점의 11개월 자료를 15일씩 조화 분석한 결과이다. (a)는 M_2 분조를 (b)는 K_1 분조를 나타낸다. M_2 분조의 경우 129일부터 264일까지 점차적으로 내부 조석이 강하게 발생한다. 그러나 264일 이후부터는 발생하는 내부 조석의 크기가 작아지고 365일 이후는 나타나지 않는다. K_1 분조의 경우도 290일까지 점차적으로 내부 조석이 강하게 발생하고, 290일 이후로 발생하는

내부 조석의 크기는 점차 작아지나 410일부터 다시 커진다. K_1 분조를 제외한 M_2 , S_2 , O_1 분조에서 2월과 8월의 조류타원을 비교했을 때 2월은 내부조석이 나타나지 않는다. K_1 분조의 경우 2월에도 남해 연안에 가까운 정점 (S1, S2, C1, N1, N2, N3)에서 내부 조석이 발생된다.

3.3.2 모델 결과

그림 22 ~ 29는 ADCP 관측 정점에서의 4대 분조의 2월과 8월의 연직 조류 타원도의 모델 결과이다. 모델결과와 관측결과의 2월과 8월의 연직 조류 타원도를 비교해 보면, 관측결과와 모델결과 모두 8월은 내부 조석이 강하게 발생하고, 2월에는 내부 조석이 발생하지 않는 패턴을 보인다.

M_2 분조의 경우, 모델 결과는 성층이 약해지는 2월에 S1 정점과 C1 정점을 제외한 나머지 정점에서는 내부 조석이 발생하지 않는다. 내부 조석이 발생한 C1 정점은 약 90 m에서 노드점이 나타나고, 저층에서 조류타원이 크게 발생한다 (그림 22). 관측 결과도 마찬가지로, 약 80 m에서 노드점이 나타나고, 저층에서 조류타원이 크게 발생한다 (그림 13). 내부조석이 발생하지 않은 나머지 정점들도 모델 결과와 관측 결과를 비교했을 때, 깊이별 조류타원의 크기와 위상이 일치한다. 반면에 성층이 강해지는 8월의 결과를 비교해 보면, 관측결과에서 내부 조석이 가장 강하게 발생한 N2 정점의 경우 모델에서는 재현되지 않았다. 그리고 N2 정점을 제외한 N 라인 (N3, N4, N5 그리고 N6)정점의 조류타원은 모델 결과가 관측 결과의 조류타원보다 약 2배 이상 크게 나타났다 (그림 14와 23).

S_2 분조의 연직 조류 타원도는 전반적으로 다른 분조에 비하여 크기가 작다. 그리고 M_2 분조와 마찬가지로 모델 결과가 관측결과보다 크게 나타난다. 그리고 2월의 연직 조류 타원의 방향성과 위상은 관측결과와 모델결과가 일치한다 (그림 15와 24). 하지만 8월은 관측결과와 모델결과가 일치하지 않는다 (그림

16과 25). 그리고 2월의 C1 정점의 경우, M_2 분조와 마찬가지로 관측결과와 모델결과 모두 저층에서 내부조석 발생한다. 약 90 m에서 노드점이 나타나고, 저층에서 조류 타원이 강해지는 것을 확인 할 수 있다.

2월 C1 정점의 저층에서 발생하는 내부 조석은 K_1 분조와 O_1 분조의 관측결과와 모델 결과에서도 나타난다. 그림 17과 26은 K_1 분조의 2월 연직 조류 타원 분포이다. 관측결과는 S6 정점을 제외한 모든 정점에서 내부 조석이 나타나고, C1 정점에서 내부 조석이 강하게 발생한다. 하지만 모델결과의 S3, S4, S6 그리고 N3 정점에서는 내부조석이 발생하지 않는다. 반일주기 조석 (M_2 와 S_2)과 다르게 일주기 조석 (K_1 과 O_1)의 경우, 2월에도 내부조석이 약하게 발생한다 (그림 26과 28). 하지만 8월의 연직 조류타원도는 반일주기 조석과 다르게 S2, S4 그리고 N2를 제외하고는 내부조석이 뚜렷이 나타나지 않는다 (그림 27과 29).



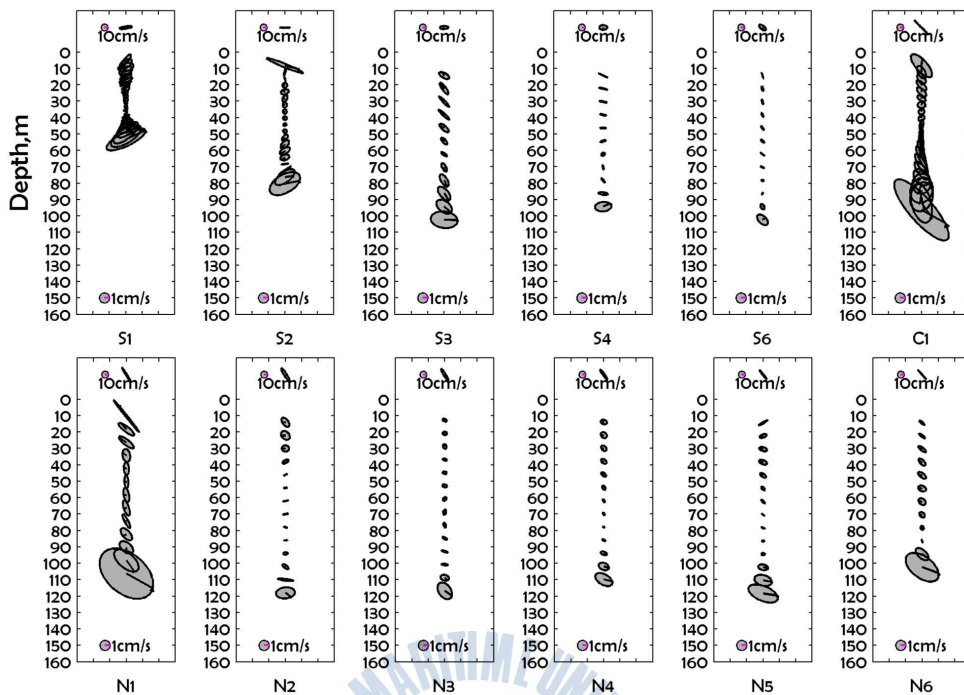


그림 14. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포.

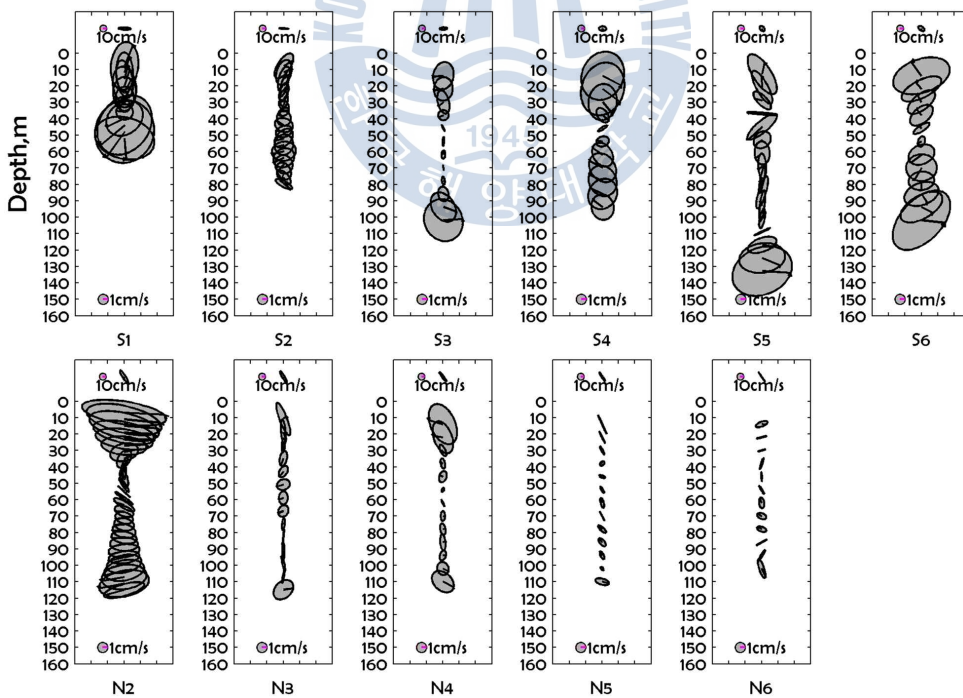


그림 15. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포.

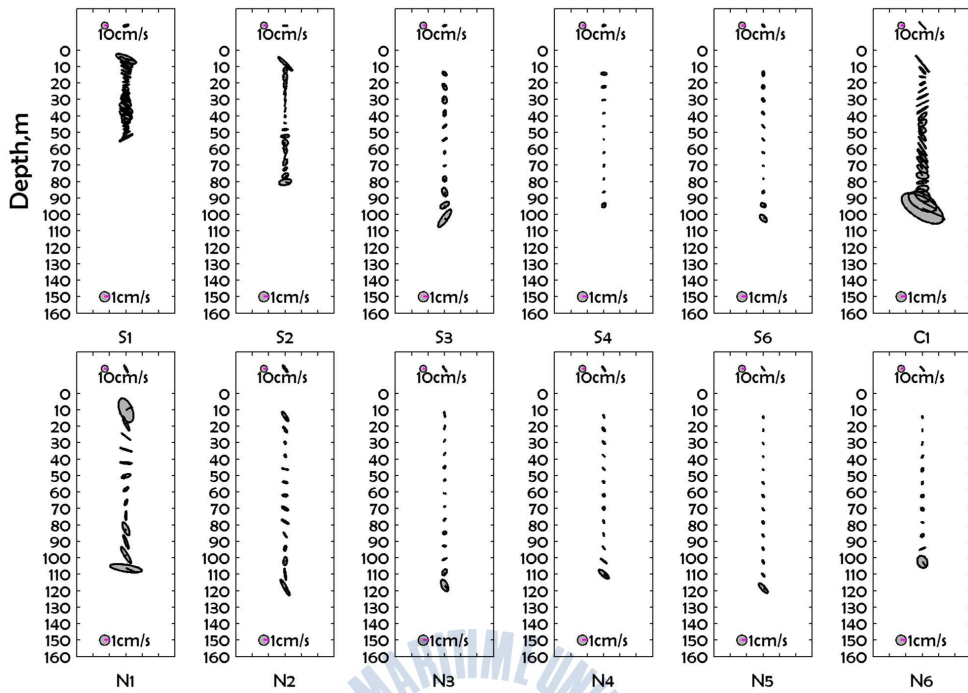


그림 16. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포.

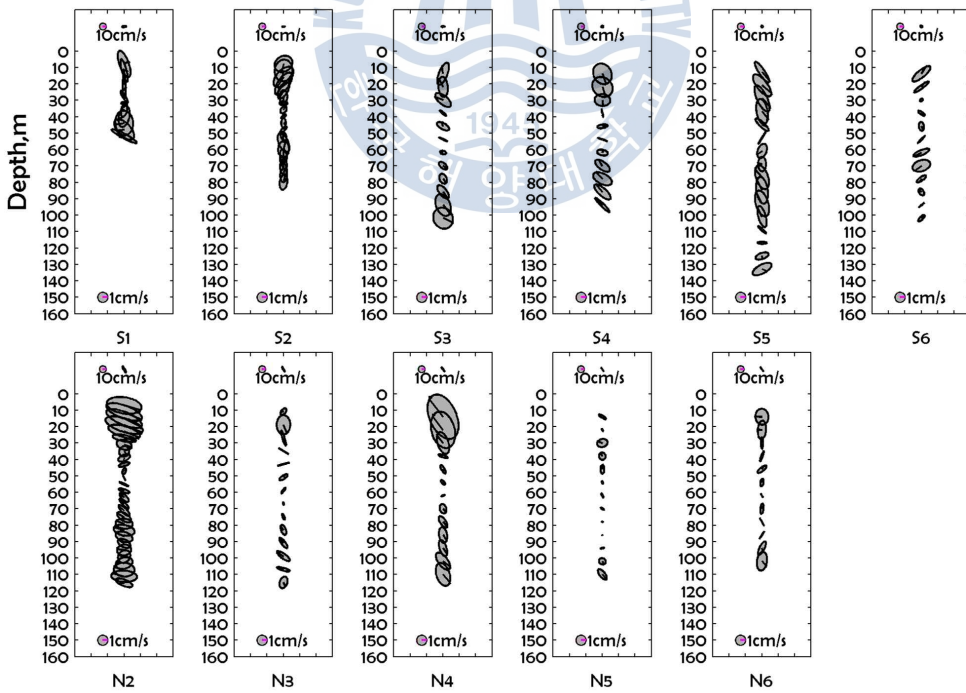


그림 17. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포.

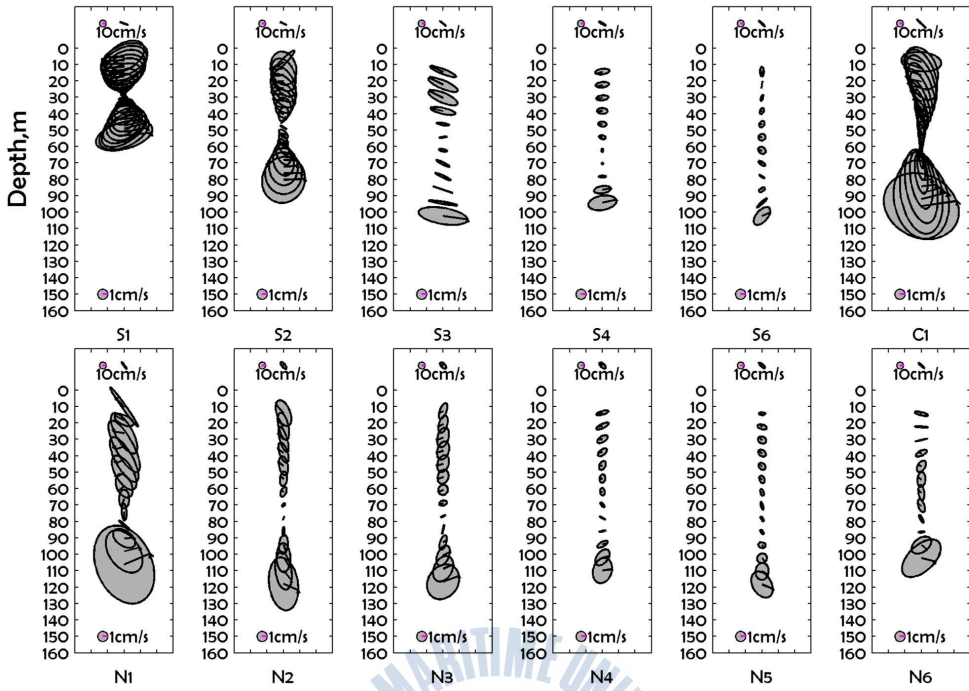


그림 18. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포.

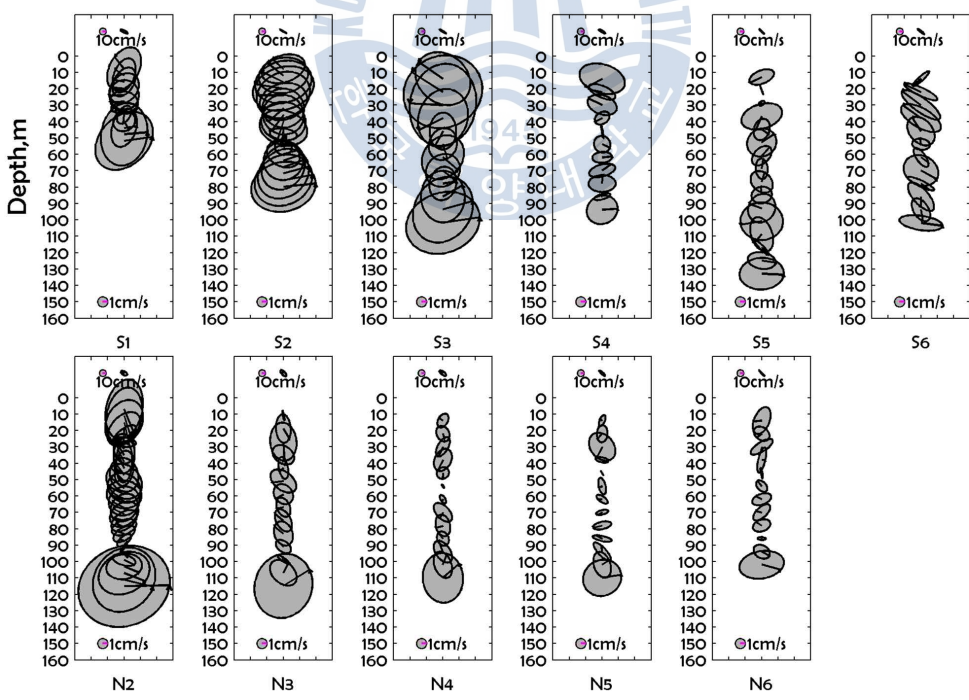


그림 19. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포.

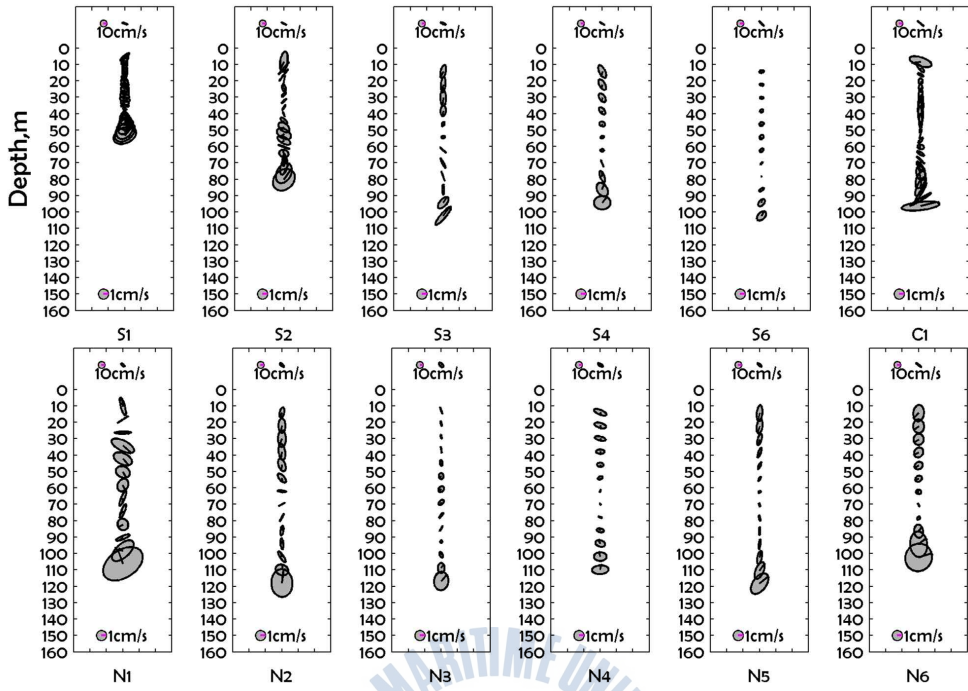


그림 20. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포.

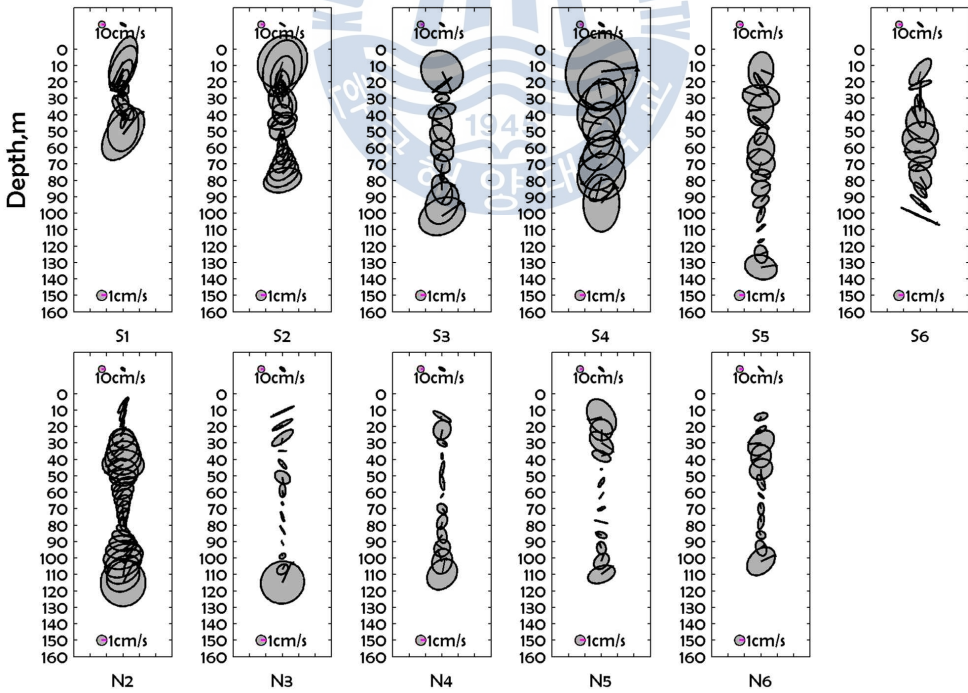


그림 21. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포.

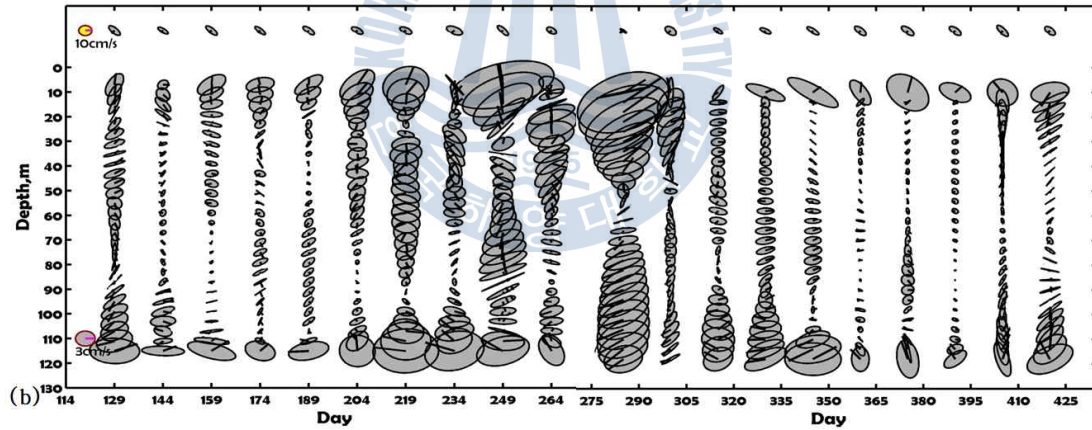
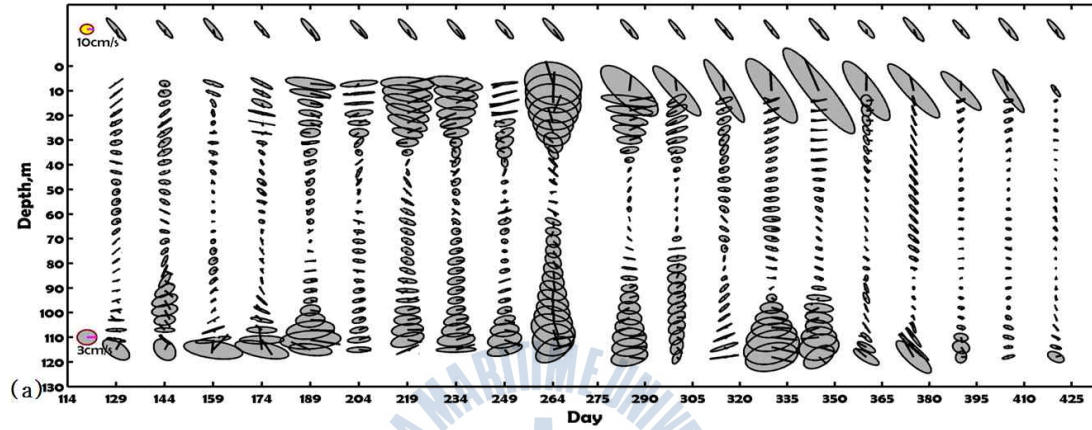


그림 22. N2 정점의 연직 조류타원 시계열. 1999년 5월부터 2000년 3월 (11개월)까지 15일 간격으로 조화분해 하였다. (a) M_2 분조, (b) K_1 분조.

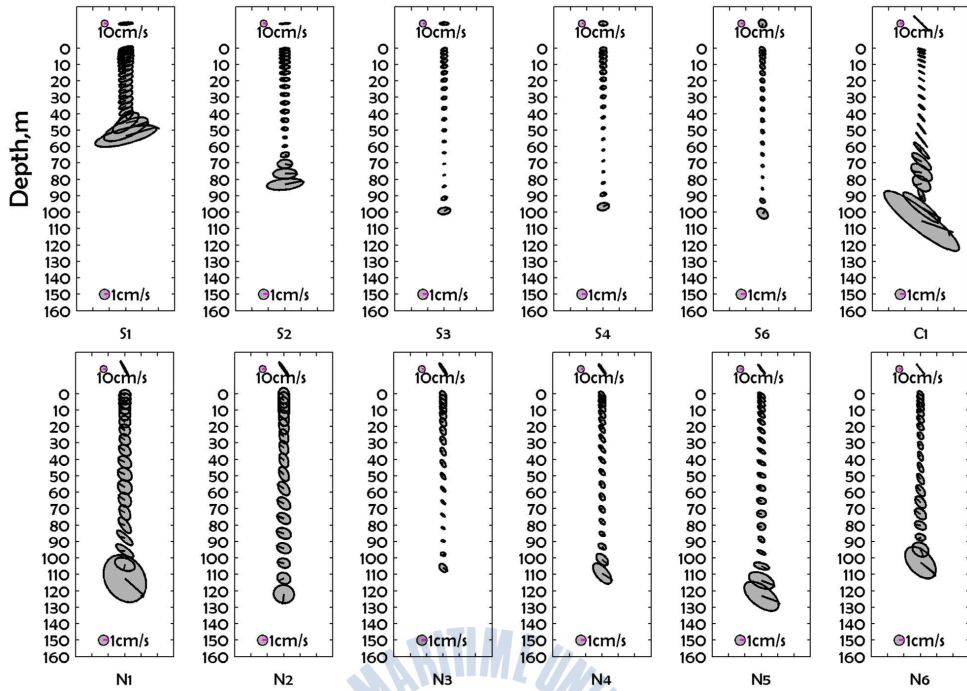


그림 23. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

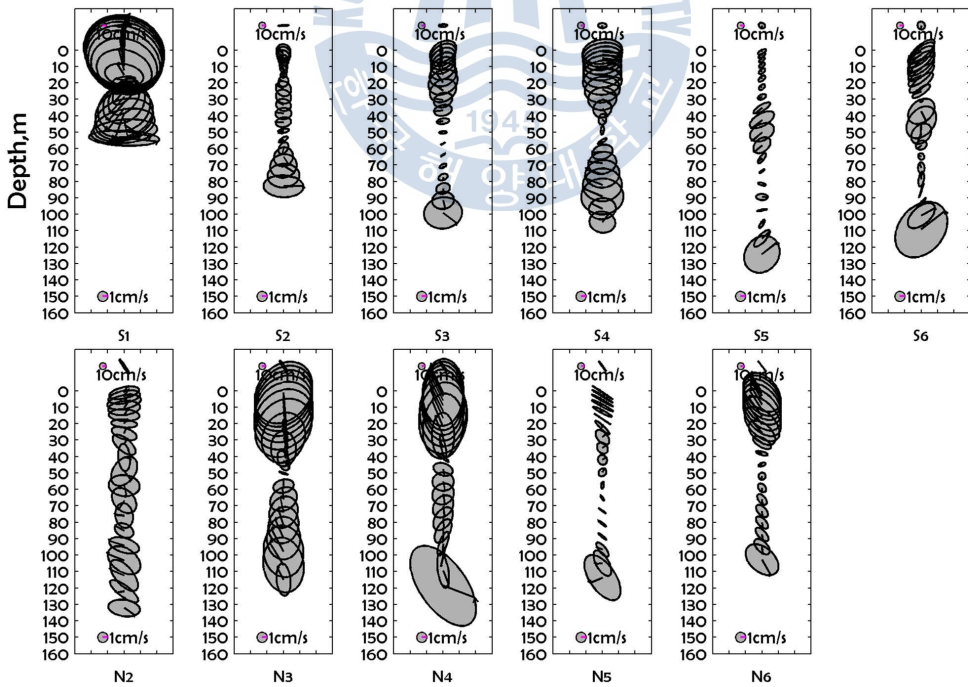


그림 24. 각 ADCP 정점에서의 M_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

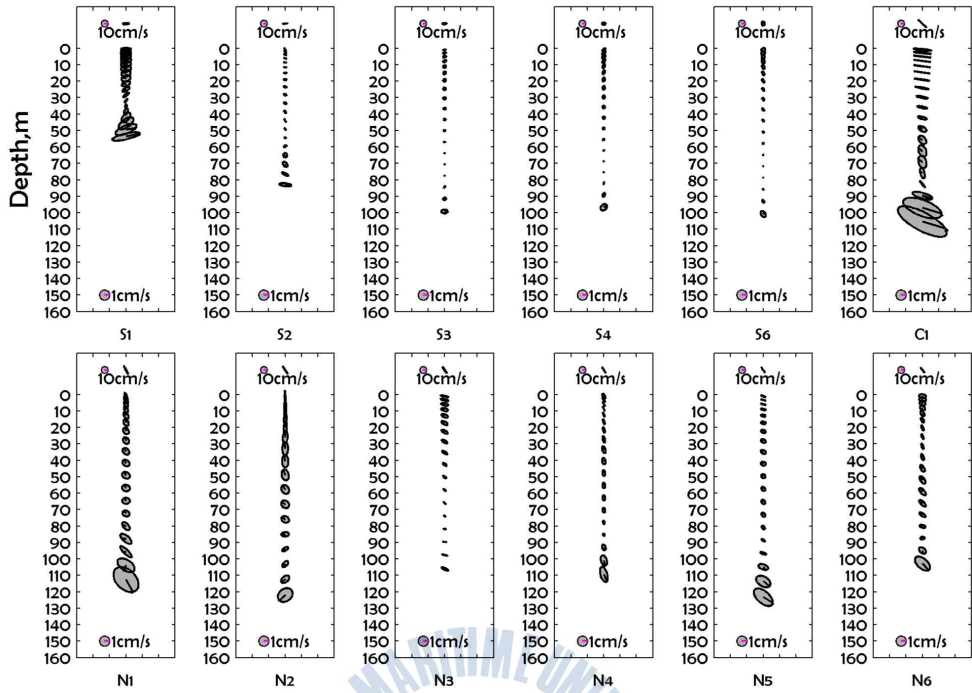


그림 25. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

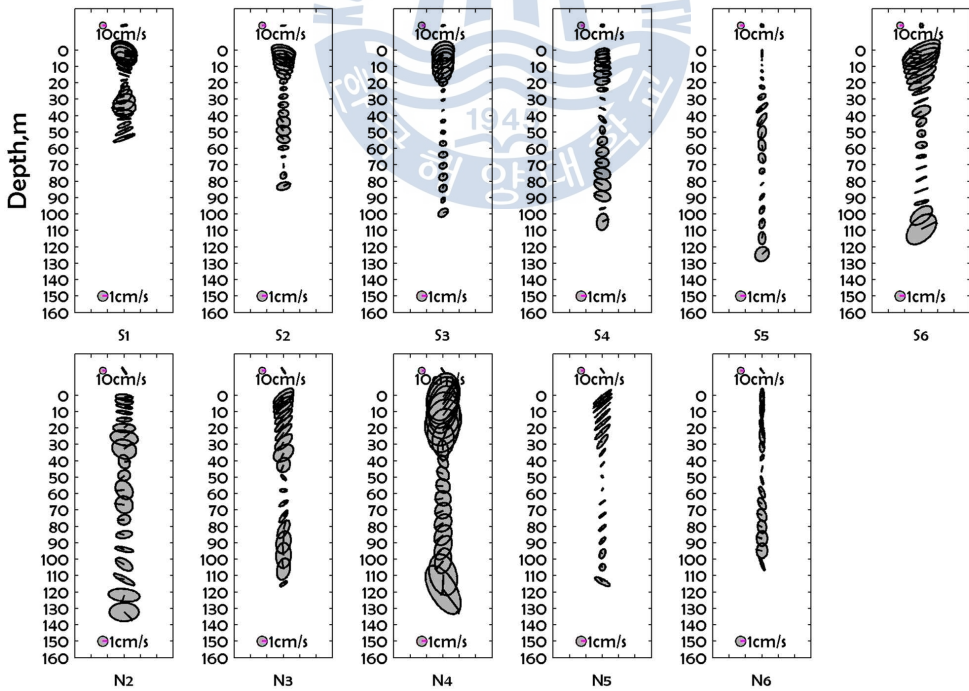


그림 26. 각 ADCP 정점에서의 S_2 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

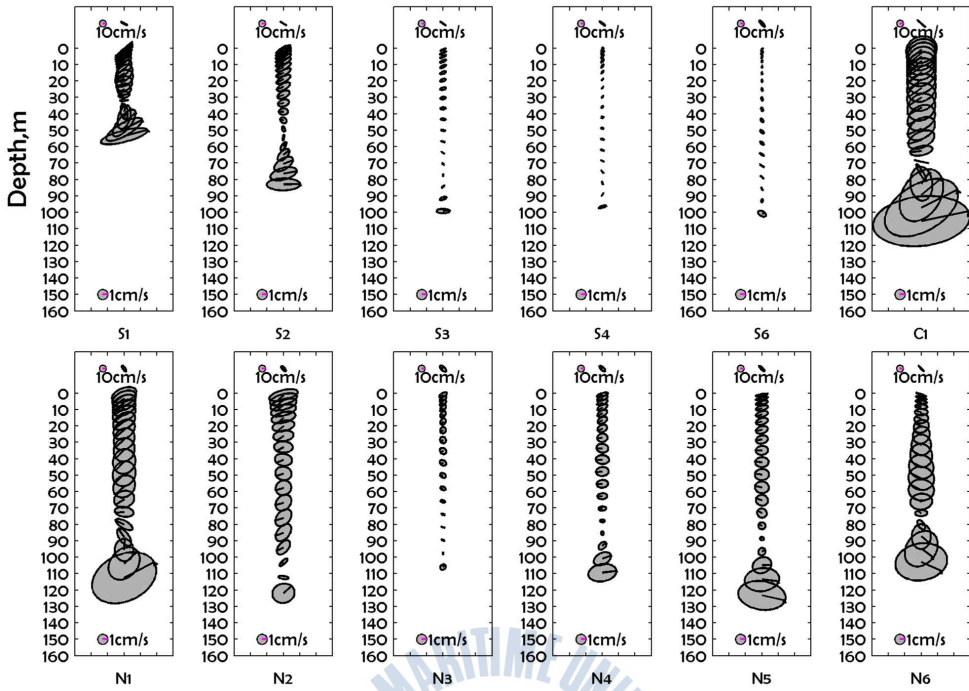


그림 27. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

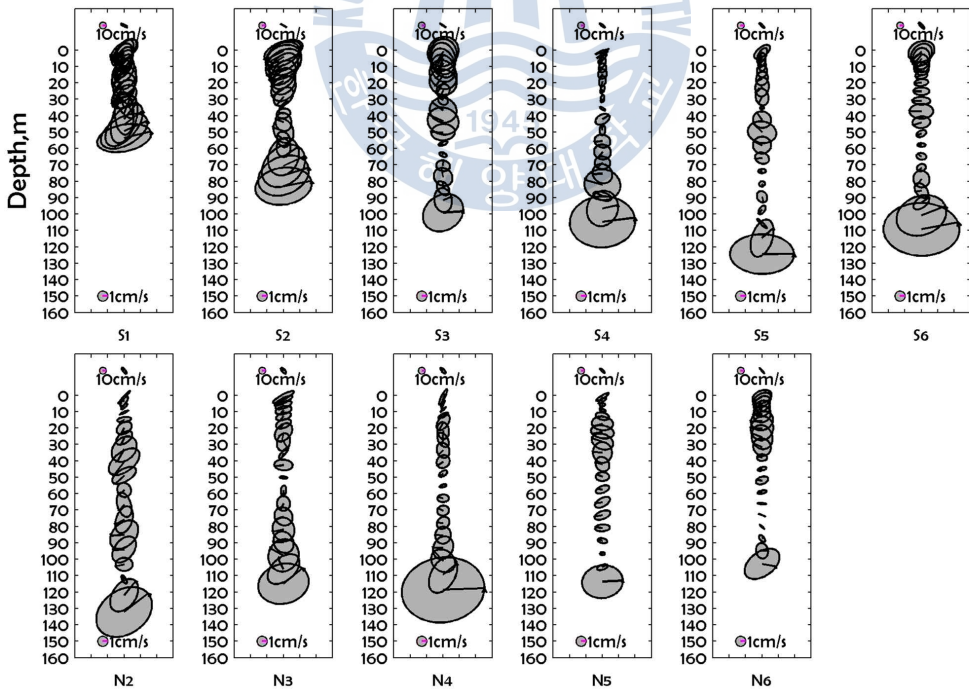


그림 28. 각 ADCP 정점에서의 K_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

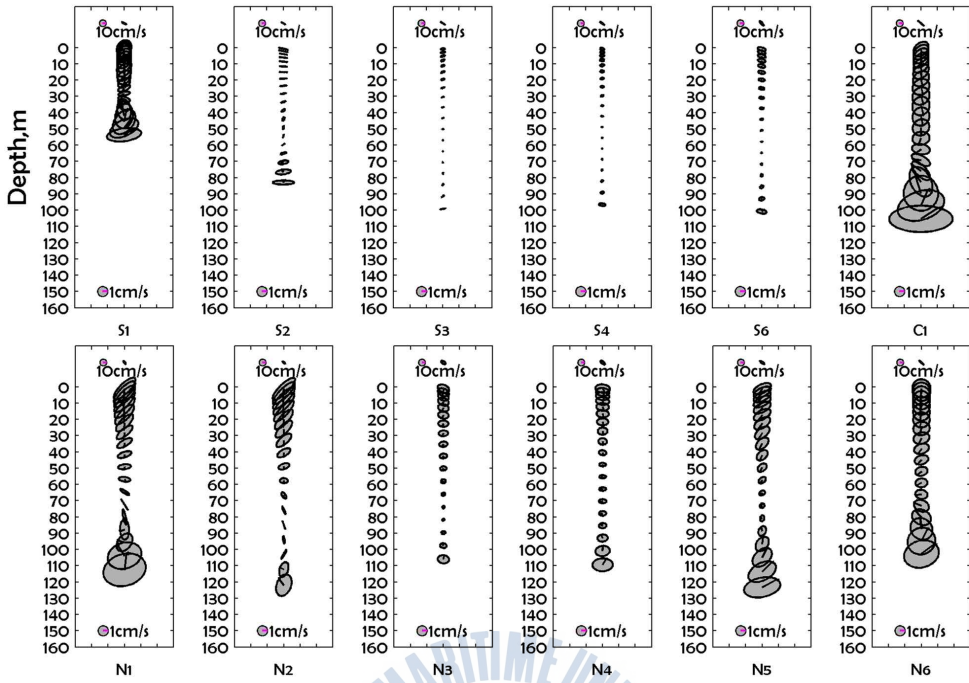


그림 29. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 2월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

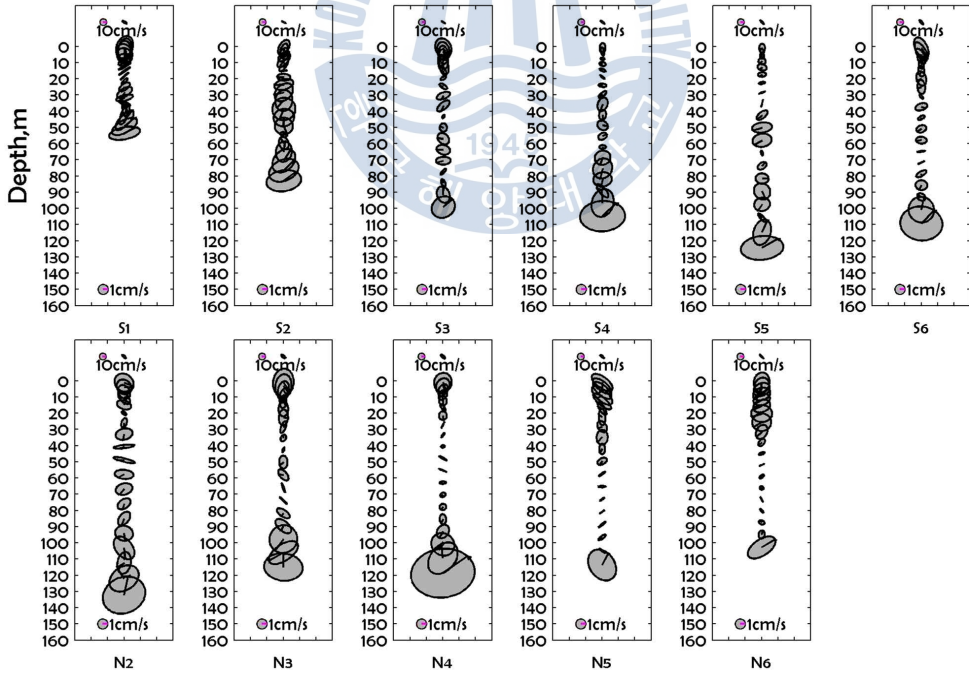


그림 30. 각 ADCP 정점에서의 O_1 분조의 8월 조류 타원 연직 분포 (모델 결과).

3.4 내부 조석 에너지

3.4.1 Barotropic forcing

내부조석은 가파른 해저지형의 변화와 성층이 존재하는 해역에서 생성된다. 동해의 경우 Park and Watts (2006)는 내부조석이 북위 약 35.5도, 동경 130 ~ 131도 사이에 제한되어 주로 생성된다고 하였다. Baines (1982)는 내부조석 생성에 영향을 미치는 순압조석 (Barotropic tide)의 효과를 Barotropic forcing 이라 정의하고 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$F = \left(-\bar{U} \frac{\partial H}{\partial x} - \bar{V} \frac{\partial H}{\partial y} \right) \times \left(\frac{-z}{H} \right) \times \left| \frac{\partial \rho}{\partial z} \right| \quad (1)$$

여기서, \bar{U} 와 \bar{V} 는 수심 평균된 유속이고, H 는 수심이다. 그림 30은 2월과 8월의 3일 평균하여 수심 적분한 forcing function의 크기를 나타내고 있다. 그림 12와 비교할 때 조류타원과 등수심선이 수직을 이루는 곳에서 barotropic forcing이 큰 것을 확인할 수 있다. 강한 forcing은 Park and Watts (2006)에서 언급된 내부조석 생성지역과 유사하다.

성층이 약해지는 겨울철인 2월의 경우, 북위 약 35.7도 부근의 수심이 급격히 변하는 등수심선을 따라 barotropic forcing이 존재한다. 북위 약 35.7도 동경 129.5 ~ 131도 사이에 barotropic forcing은 $0.007 \text{ Nm}^{-3}\text{s}$ 까지 나타나고, 북위 35.5도 이남에서의 barotropic forcing은 대한해협 서수도 에서 약 $0.001 \text{ Nm}^{-3}\text{s}$ 로 약하게 존재할 뿐 거의 생성되지 않는다. 반면에 성층이 강해지는 여름철인 8월의 경우, 북위 약 35.7도 동경 129.5 ~ 131도 사이에 barotropic forcing은 $0.009 \text{ Nm}^{-3}\text{s}$ 까지 나타나고 존재하는 범위가 2월에 비하여 2배 이상 확장되었다. 또한 대한해협 서수도 부근에서도 $0.003 \text{ Nm}^{-3}\text{s}$ 까지 나타나고, 북위 35.5도 이남에 존재하는 barotropic forcing의 범위가 2월에 비하여 확장되었다.

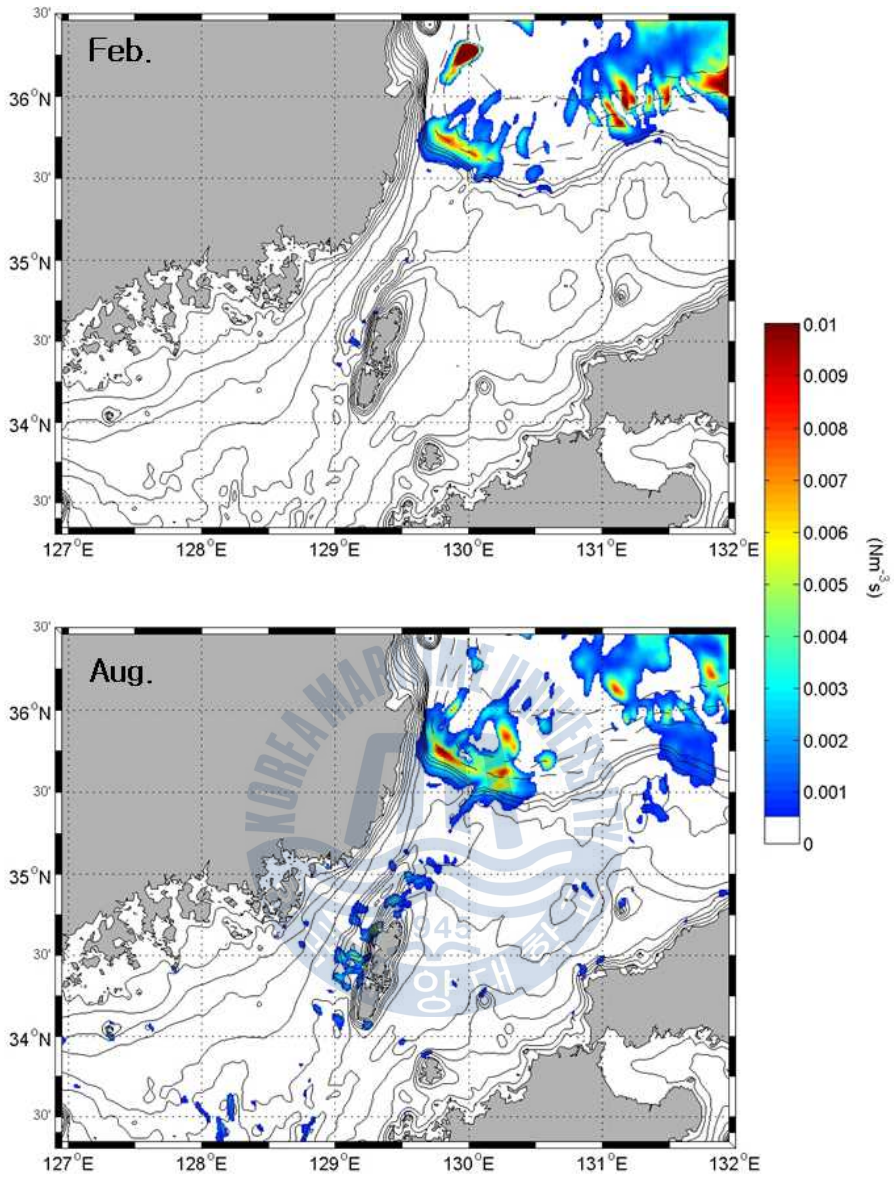


그림 31. 모델 영역에서의 수심 적분된 barotropic forcing의 2월, 8월 분포 (3일 평균).

3.4.2 에너지 변환량 및 플럭스

순압조석 (barotropic tide)은 경압조석 (baroclinic tide)이 생성되는데 중요한 기원이 된다. 다음 식 2는 Niwa and Hibiya (2004)가 순압조석으로부터 내부 조석으로 에너지가 변환되는 양 (conversion rate)을 계산한 식이다. 그리고 식 4는 내부 조석 에너지가 생성되어 이동하는 플럭스를 계산한 식이다. ρ' 은 perturbation density이고, T는 평균된 기간으로 3일을 평균하였다. w_{bt} 는 barotropic 흐름의 데카르트 수직 속도 (Cartesian vertical velocity)로 식 3으로 설명된다. S-좌표계의 σ 는 바닥에서 -1 이고 해표면 에서 0 이다. \vec{U} 는 baroclinic velocity vector를 말하고, P' 은 perturbation pressure를 이다.

$$E_{bt2bc} = \frac{1}{T} \int_0^t \left(g \int_{-H}^{\eta} \rho' w_{bt} dz \right) dt \quad (2)$$

$$w_{bt} = \bar{U} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \bar{V} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$E_{bc} = \frac{1}{T} \int_0^t \left(\int_{-H}^{\eta} \vec{U} P' dz \right) dt \quad (4)$$

모델 영역에서 생성된 내부조석 에너지중 반일주기 조석과 일주기 조석에 의해 생성된 내부조석 에너지를 구하기 위해 bandpass filter 하였다. 반일주기 주파수 범위 (통과대역)는 11 ~ 13.42시간이고, 일주기 주파수 범위는 21 ~ 27 시간 이다.

가) 반일주기 내부조석 에너지

그림 31의 (a)와 (b)는 각각 2월과 8월의 반일주기 순압조석으로부터 내부 조석으로 에너지가 변환되는 양 (E_{bt2bc})이다. 모델 영역 전체에서 수심 적분된

변환량을 3일 평균하여 계산하였다. 내부조석 에너지가 생성된 지역은 Park and Watts (2006)에서 제시한 약 북위 35.5도 ~ 35.7도, 동경 129.5도 ~ 131도 사이 (울릉분지의 입구)의 가파른 해저지형 변화가 있는 곳이다. 그림 30에서 barotropic forcing이 강하게 발생한 지역과 일치한다. 모델 영역 ($33.3^{\circ} \text{ N} \sim 36.5^{\circ} \text{ N}$, $126.9^{\circ} \text{ E} \sim 132^{\circ} \text{ E}$)에서 분석된 E_{bt2bc} 는 2월에 약 0.24 GW이고, 8월에 약 0.50 GW이다. 생성된 내부조석 에너지의 양은 여름철인 8월이 2월에 비해 약 두 배 이상 크다. 생성된 내부조석 에너지의 분포도 2월과 8월에서 차이가 있다. 대한해협 서수도 부근에서 2월의 경우 거의 생성되지 않은 내부조석 에너지가 성층이 강화되는 8월의 경우 골의 양쪽으로 생성된다 (그림 35a와 35c).

그림 32는 생성된 내부조석 에너지가 이동하는 플럭스이다. 모델 영역 전체에서 수심 적분된 내부조석 에너지 플럭스를 3일 평균하여 계산하였다. 그림 25의 내부조석 에너지가 생성된 지역 (북위 35.5도 ~ 35.7도, 동경 129.5도 ~ 131도 사이)에서 등수심선을 따라 양방향으로 전파된다. 전파되는 크기와 범위는 계절에 따라 차이를 보인다. 2월의 경우 동해 쪽으로 전파되는 최대 에너지 플럭스는 1 kWm^{-1} 에 달하고 평균 0.5 kWm^{-1} 이다. 반면에 남해연안 쪽으로 전파되는 에너지 플럭스는 생성지역 근처에서 제한되어 남해연안으로 들어오지 못한다. 8월의 경우 동해 쪽으로 전파되는 최대 에너지 플럭스는 2 kWm^{-1} 에 달하고 평균 1 kWm^{-1} 이다. 에너지 플럭스의 범위도 2월에 비해 북쪽 바운더리까지 확장되었다. 또한 남해연안 쪽으로 전파되는 에너지 플럭스도 북위 35도까지 확장되었다. 대한해협 서수도 부근의 에너지 플럭스는 내부조석 에너지가 생성되는 8월에 부산 연안쪽으로 전파되고 대마도 쪽으로 전파는 제한된다.

나) 일주기 내부조석 에너지

그림 31의 (a)와 (b)는 각각 2월과 8월의 일주기 E_{bt2bc} 이다. 모델 영역 전체

에서 수심 적분된 변환량을 3일 평균하여 계산하였다. 모델 영역 ($33.3^{\circ} \text{ N} \sim 36.5^{\circ} \text{ N}$, $126.9^{\circ} \text{ E} \sim 132^{\circ} \text{ E}$)에서 분석된 E_{bt2bc} 는 2월에 약 0.17 GW이고, 8월에 약 0.09 GW이다. 생성된 내부조석 에너지의 양은 반일주기 내부조석 에너지와 다르게 겨울철인 2월이 8월에 비하여 약 2배 크다. 그림 34는 생성된 내부조석 에너지가 이동하는 플럭스이다. 생성된 내부조석 에너지는 등수심선을 따라 양방향으로 전파된다. 전파되는 크기와 범위는 반일주기 내부조석과 마찬가지로 계절에 따라 차이를 보인다. 2월의 경우 동해 쪽으로 전파되는 최대 에너지 플럭스는 0.5 kWm^{-1} 에 달하고 평균 0.3 kWm^{-1} 이다. 생성된 내부조석 에너지의 대부분은 동해 쪽으로 전파되고, 남해연안으로 전파되는 에너지 플럭스는 생성지역 근처에서 제한되어 남해연안으로 들어오지 못한다. 반면에 8월의 경우 생성된 내부조석 에너지 플럭스는 양방향으로 비슷한 크기로 발산하고, 남해연안으로 전파되는 에너지 플럭스의 범위는 약 북위 35.2° 까지 확장된다.

표 3. 생성된 내부 조석 에너지의 양

	반일주기	일주기
2월	0.25 GW	0.17 GW
8월	0.47 GW	0.09 GW

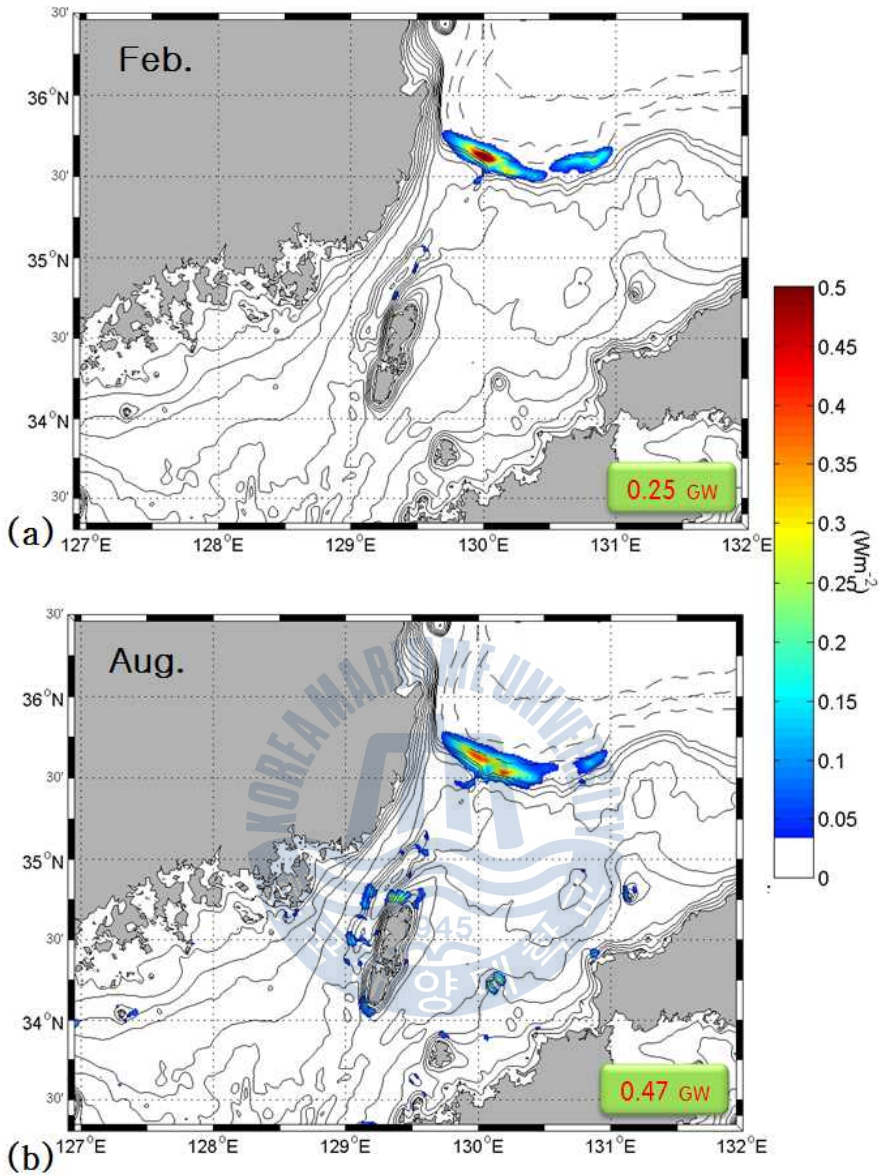


그림 32. 반일주기 barotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량. (a) 2월, (b) 8월. 실선과 점선은 수심을 나타냄 (실선 간격 : 20 m, 점선 간격 : 500 m).

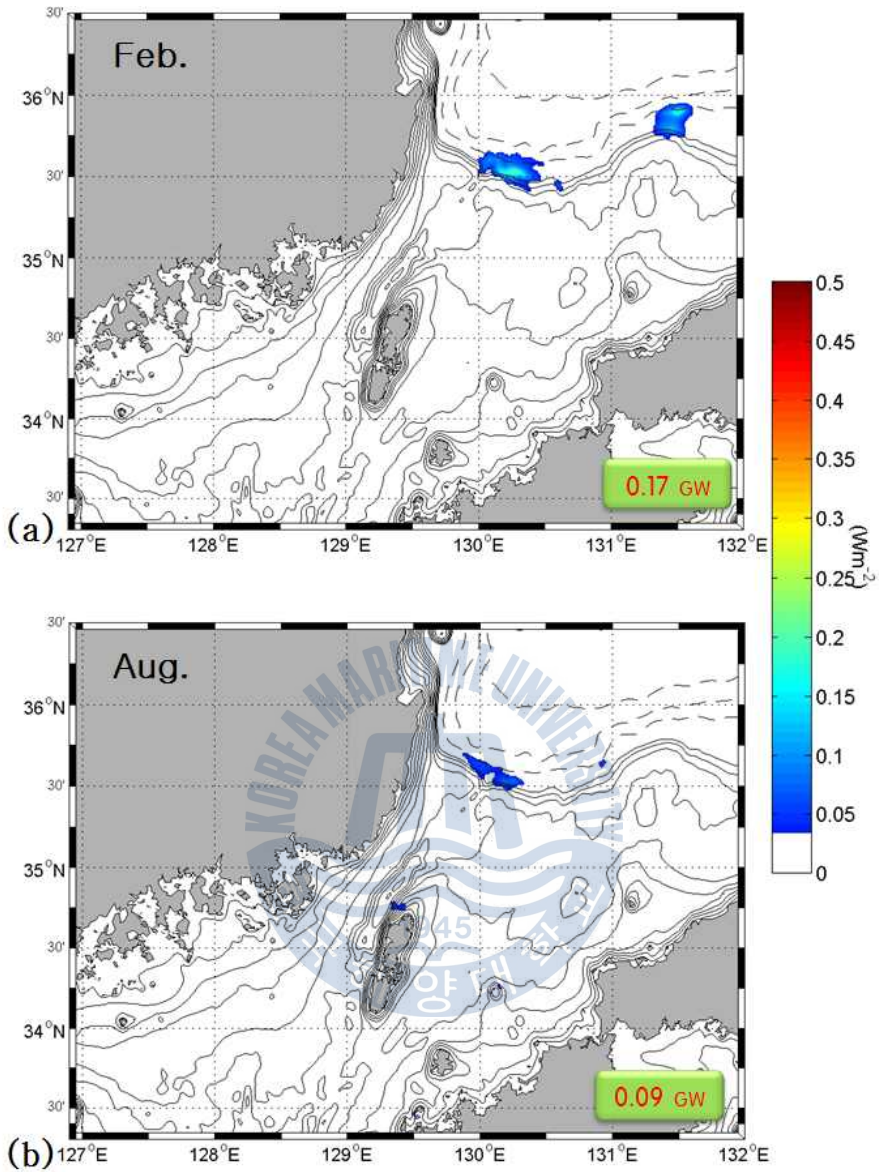


그림 33. 일주기 brotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량. (a) 2월, (b) 8월. 실선과 점선은 수심을 나타냄 (실선 간격 : 20 m, 점선 간격 : 500 m).

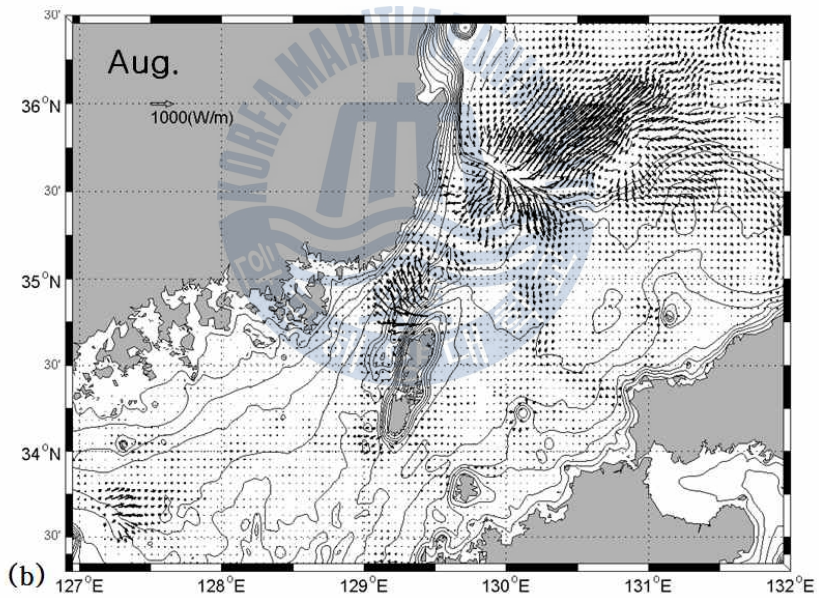
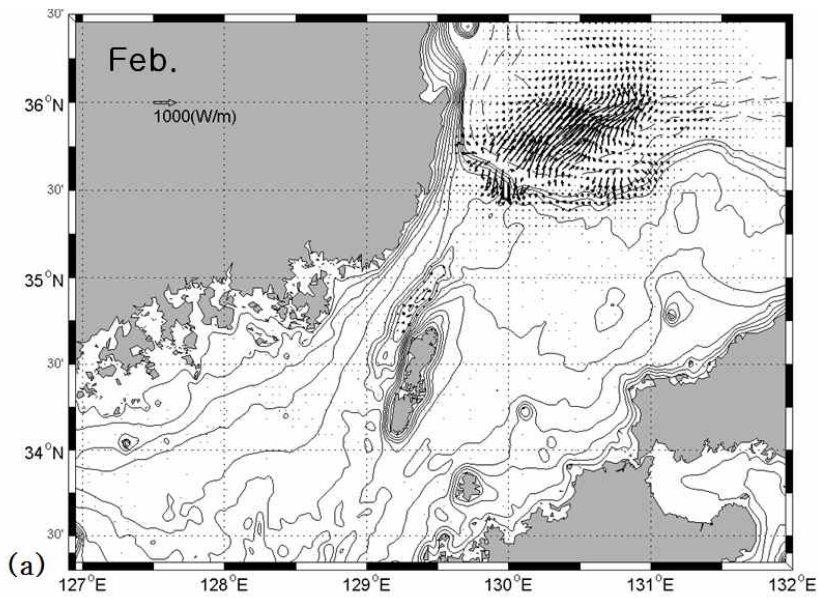


그림 34. 수심 적분된 반일주기 내부조석 에너지 플럭스. (a) 2월, (b) 8월. 실선과 점선은 수심을 나타냄 (실선 간격 : 20 m, 점선 간격 : 500 m).

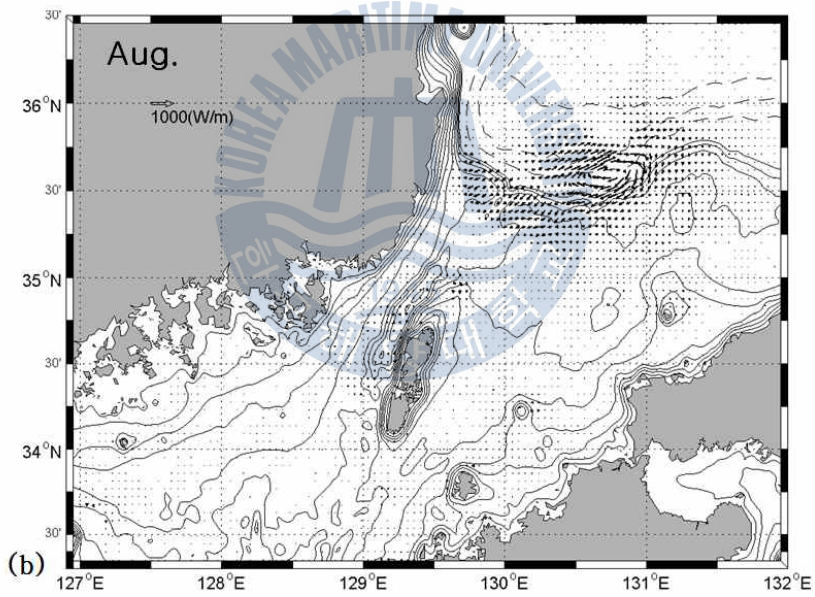
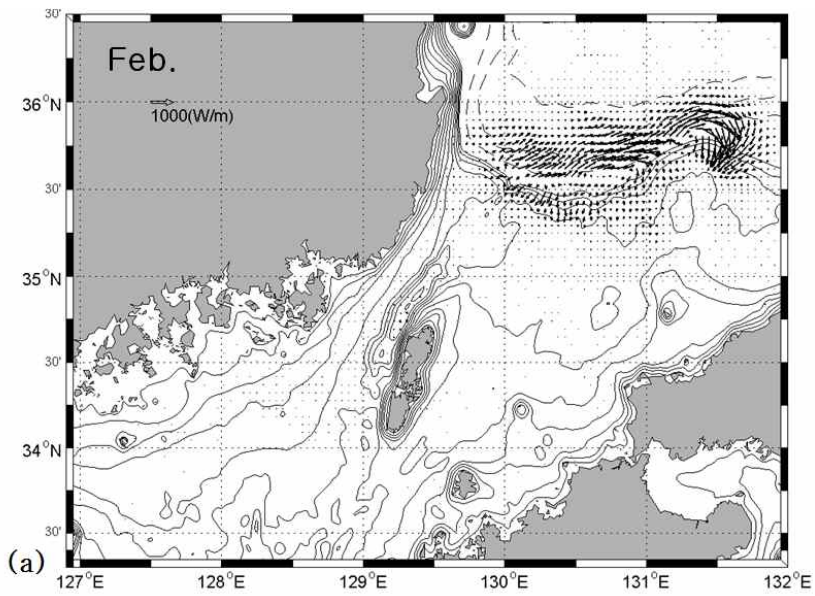


그림 35. 수심 적분된 일주기 내부조석 에너지 플럭스. (a) 2월, (b) 8월. 실선과 점선은 수심을 나타냄 (실선 간격 : 20 m, 점선 간격 : 500 m).

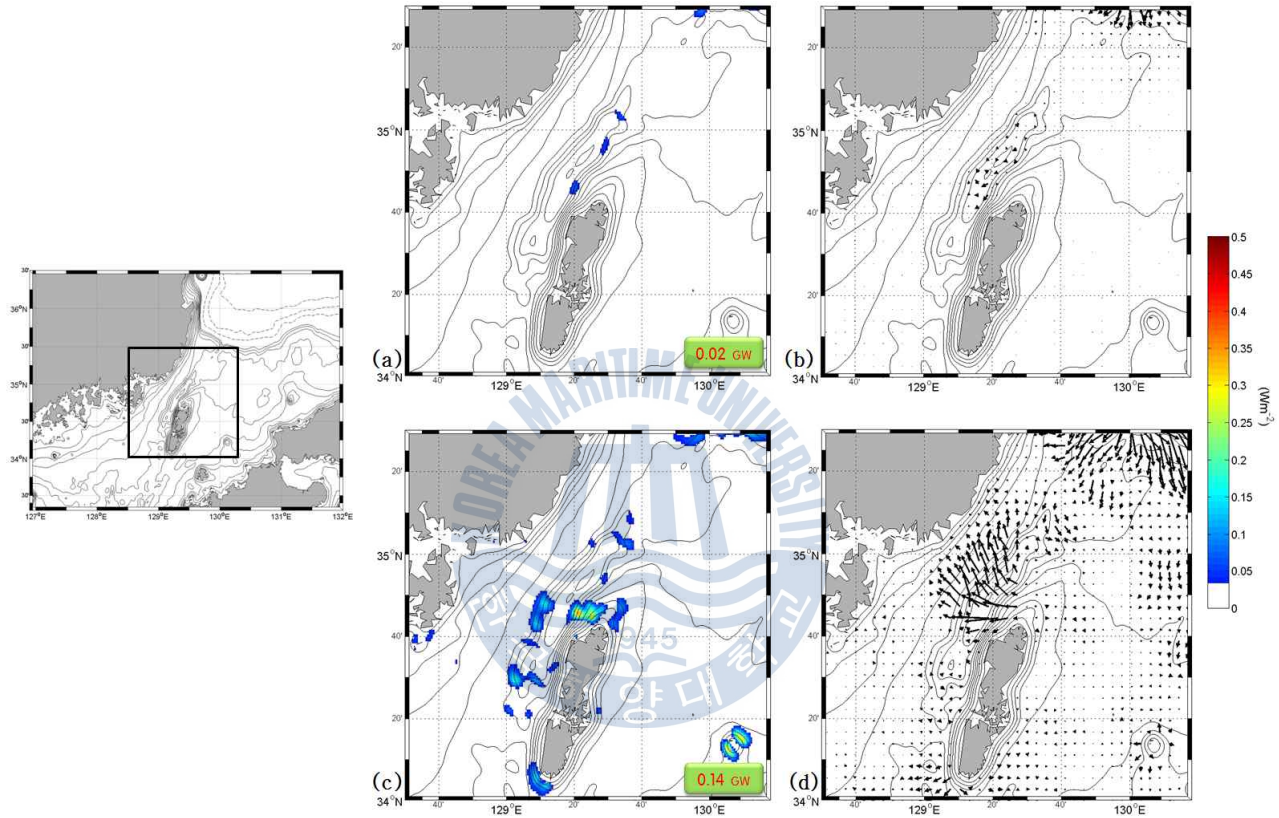


그림 36. 그림 왼쪽편의 상자지역의 반일주기 barotropic tidal energy에서 baroclinic tidal energy로의 변환량 ((a) 2월, (c) 8월)과 반일주기 내부조석 에너지 플럭스 ((b) 2월, (d) 8월). 실선과 점선은 수심을 나타냄 (실선 간격 : 20 m).

4. 토의

모델 영역 ($33.3^{\circ} \text{ N} \sim 36.5^{\circ} \text{ N}$, $126.9^{\circ} \text{ E} \sim 132^{\circ} \text{ E}$)에서 생성된 내부조석 에너지는 생성지역에서 동해 쪽뿐만 아니라 남해와 대한해협으로 전파되었다. 생성되는 내부조석 에너지가 남해연안으로 전파되는 범위는 북위 35도까지 영향을 미친 8월이 2월보다 크게 나타났다. 하지만 8월의 모델결과는 ADCP정점에서 연직 조류타원도의 크기나 위상이 관측결과와 차이를 보였다. 물론 내부조석은 성층화 정도와 수심에 큰 영향을 받기 때문에 실제 수심과 차이가 나는 모델 결과는 일대일 비교가 힘들다. 또한 각 정점에서 발생한 내부조석이 지역적으로 생성된 내부조석일 수도 있지만, 그림 33(b)에서 확인하였듯이 북위 $35.5 \sim 35.7$ 도, 동경 $129.5 \sim 131$ 도 사이에서 생성된 내부조석이 남해연안으로 전파되어 발생한 내부조석일 수도 있기 때문에 각 정점에서 발생한 내부조석이 어느 요인에 의한 것인지 확일 할 필요가 있다.

그림 36은 ADCP 정점 중 내부조석 에너지가 강하게 생성되는 지점과 일직선상에 놓인 N2정점과 C1정점의 2월과 8월 연직 조류타원도이다. C1정점은 ADCP 설치 시 추가로 설치되어 8월 관측결과가 없다. 8월 연직 조류타원을 보면, N2 정점에서는 내부조석이 발생하지 않는 반면에 C1정점에서는 N2정점을 제외한 N라인에서 발생한 내부조석보다 강하게 내부조석이 발생하였다. 또한 C1정점과 N2정점의 2월 연직 조류타원을 보면, N2 정점에서는 관측과 모델결과 모두에서 내부조석이 발생하지 않았고, N 라인 모든 정점에서도 같은 결과를 보였다. 하지만 C1정점의 2월에는 관측과 모델결과 모두에서 내부조석이 나타났고, 저층에서 (약 90 m) 노드점이 발생하였다. C1 정점은 1999년 12월에 유입되기 시작한 저층냉수가 2월까지 영향을 주었고, 이렇게 유입된 저층냉수는 지역적 성층화에 영향을 준다 (Teagus et al., 2002). 그림 37의 왼쪽 그림은 Min et al. (2006)이 관측한 대한해협 저층냉수의 1988년, 1989년 그리고 1990년 9월 수온 연직 단면도 (라인 S)이고, 오른쪽은 8월과 9월 모델

결과의 수온 연직 단면도이다. 수심 100 m ~ 150 m에서 나타나는 대한해협 저층 냉수가 모델에서도 재현된다. 즉, C1 정점에서 발생한 내부조석은 대한해협 저층냉수에 의해 강화된 지역적 성층화에 의해 발생했을 가능성이 크다. 또한 모델의 북위 35.5도 ~ 35.7도, 동경 129.5도 ~ 131도 사이에서 생성된 내부 조석 에너지는 2월에 N2 정점에서 나타나지 않는 내부 조석이 내부 조석 생성지역에서 직선상의 거리가 N2 정점보다 먼 C1 정점에서 발생하는 것으로 보아 C1 정점까지는 영향을 미치지 않을 것이라고 예측할 수 있다.

북위 35.5도 ~ 35.7도, 동경 129.5도 ~ 131도 사이에서 생성된 내부조석 에너지는 N 라인까지 영향을 미친다. 하지만 계절에 따라 남해연안으로 전파되는 범위는 차이를 보였다. 모델 전체를 평균한 수온, 염분, 부력 주파수 (buoyancy frequency)의 2월과 8월의 깊이에 따른 변화를 보면 수심 150 m 를 기준으로 150 m 보다 낮은 깊이에서 2월과 8월의 차이가 있다 (그림 38). 수온의 깊이별 변화를 살펴보면 표층에서 100 m 까지가 계절적 수온약층으로 보이고, 100 m 이상의 깊이는 계절에 변화가 없는 영구 수온약층으로 보인다. 즉 모델에서 재현한 겨울철은 계절적 수온약층이 거의 존재하지 않아 약 100 m 까지 혼합되어 수심이 상대적으로 얇은 북위 35.5도 이남의 영역에서는 성층이 존재하지 않는다. 그림 39는 생성지역에서 붉은 선을 따라 그린 연직 수온 단면도이다. 8월은 50 m ~ 100 m 깊이에서 계절적 수온약층이 뚜렷하게 나타나고 강한 성층을 이루고 있다. 반면에, 2월의 경우 계절적 수온약층은 약화되고, 100 m 깊이 아래의 영구 수온약층만 존재한다. 북위 35.5 ~ 35.7도, 동경 129.5 ~ 131도 사이에서 생성되는 내부조석 에너지가 8월에는 강화된 성층을 따라 N 라인까지 전파되지만, 2월에는 영구 수온약층이 발생하지 않는 북위 35도 부근에서 더 이상 전파되지 못하고 대부분의 에너지는 동해 쪽으로 전파된다.

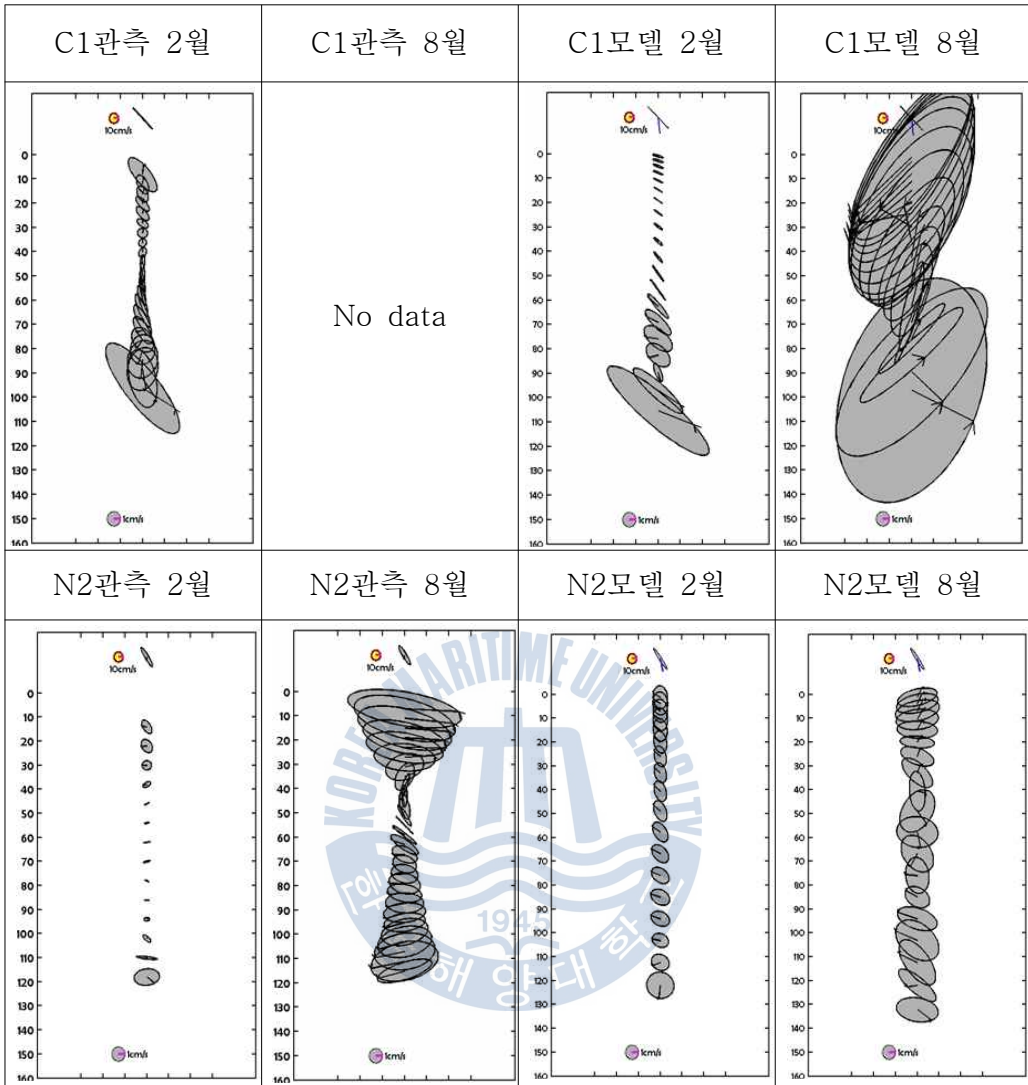


그림 36. 모델 영역 중 C1, N2 정점의 M_2 분조의 2월, 8월 조류 타원 연직 분포 (위: 관측 결과. 아래: 모델 결과).

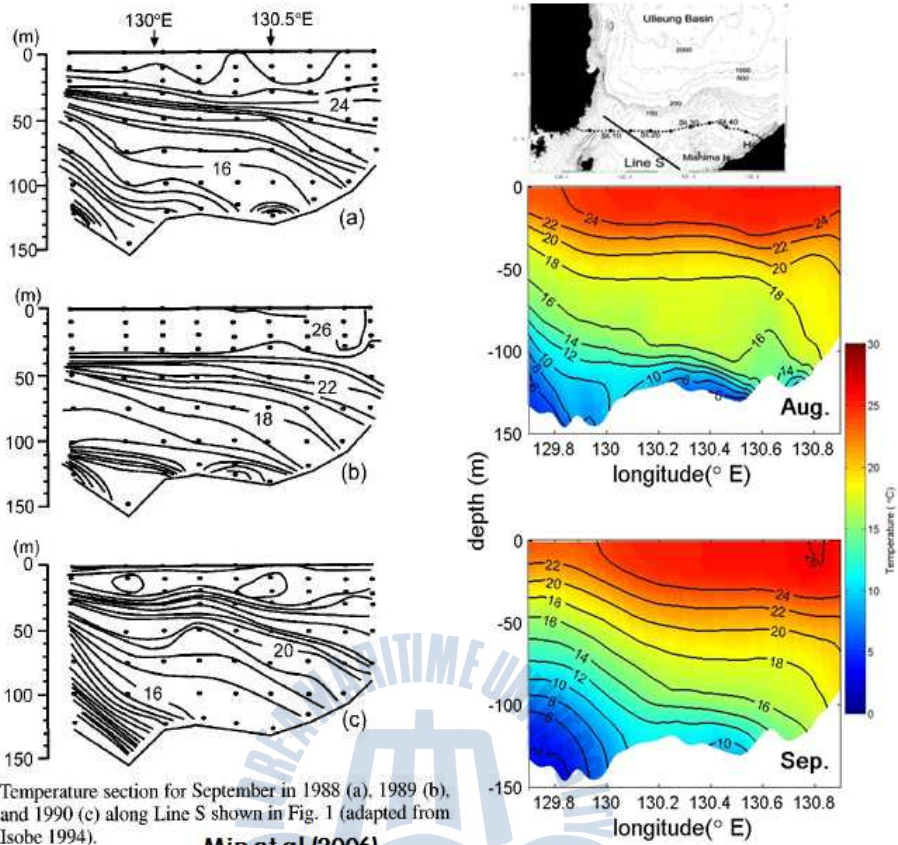


Fig. 5. Temperature section for September in 1988 (a), 1989 (b), and 1990 (c) along Line S shown in Fig. 1 (adapted from Isobe 1994).

Min et al. (2006)

그림 37. 라인 S를 따라 1988년, 1989년, 1990년 9월의 수온 연직 단면도 (좌), 모델 영역에서 라인 S를 따라 8월 9월의 수온 연직 단면도 (우).

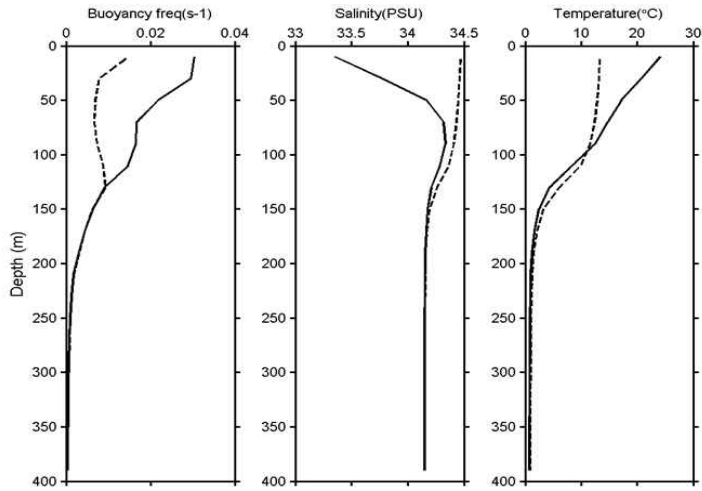


그림 38. 모델 전체를 평균한 수온, 염분, 부력 주파수 (buoyancy frequency)의 2월과 8월의 깊이에 따른 변화 (점선-2월. 실선-8월).

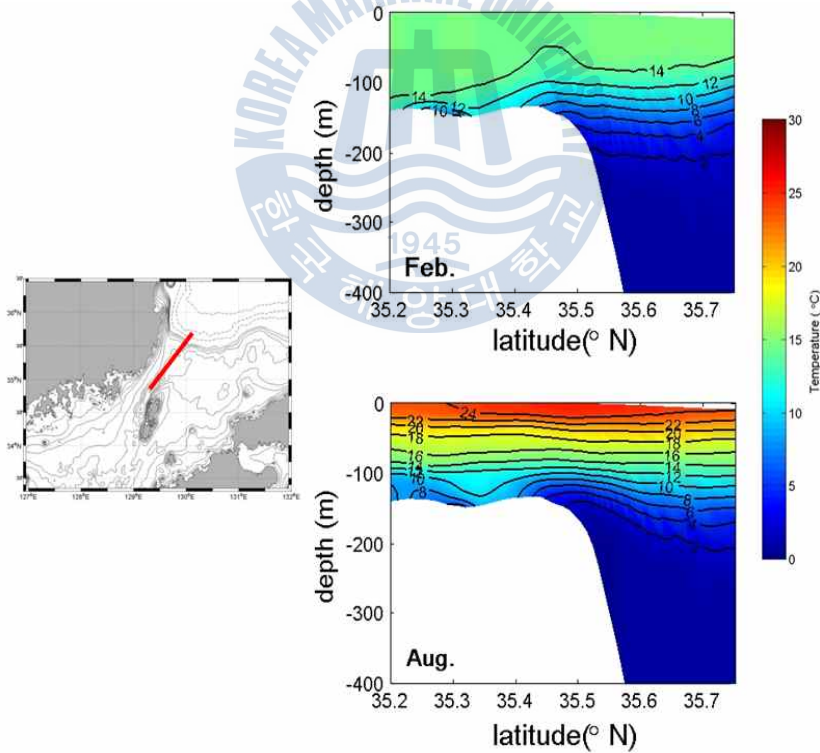


그림 39. 왼쪽 지도의 빨간색 라인을 따라 그린 연직 수온 단면도 (2월, 8월).

5. 결론

본 연구에서는 해류와 조류를 모두 포함시킨 3차원 고해상도 모형을 사용하여 남해에서 생성되는 내부조석 에너지의 시·공간적 크기 및 분포 특성을 정량적으로 파악하였다. 수치실험 결과 여름철이 겨울철보다 약 2배 이상의 내부조석 에너지가 생성되었고, 수심이 급격히 변하고 barotropic tide가 우세하게 나타나는 곳에서 내부조석이 효과적으로 생성되었다. 생성된 내부 조석 에너지의 양은 표 4에 나타내었다. 모델 영역에서 북위 35.5도 이남은 수심 200 m 이하의 지역으로 계절에 따라 성층화 정도가 달라져 생성된 내부 조석 에너지가 남해 연안으로 전파되는 범위에 영향을 미쳤다. 대부분의 내부 조석은 Park and Watts (2006)에서 제시한 약 북위 35.5도 동경 129.5 ~ 131도 사이 (울릉분지의 입구)에서 나타났다. 이곳에서 생성된 내부 조석 에너지는 성층이 약화되는 2월에는 생성된 에너지의 대부분이 동해 쪽으로 전파되고 남해연안으로의 전파는 제한되는 반면, 성층이 강화되는 8월에는 북위 35도까지 전파되어 남해 연안에 영향을 준다. 그리고 대마도 서쪽 깊은 골에서 생성되는 내부 조석 에너지는 성층이 강화되는 여름철의 경우 골과 수직한 방향으로 전파되어 남해연안에 영향을 준다. 성층이 약화되는 겨울철의 경우 여름철에 생성되는 내부 조석 에너지에 비해 적은 양이 생성되지만, 대한해협 저층냉수의 유입으로 지역적 성층화가 강화되어 내부 조석이 생성되었다.

본 연구에서는 연구영역에서 내부 조석 에너지가 생성되어 계절에 따라 다른 패턴으로 전파되는 것을 확인하였다. 더 나아가 모델영역 북위 35.5도, 동경 129.5 ~ 131도 사이에서 생성되는 내부 조석 에너지가 남해 연안에 미치는 범위를 더 많은 관측 자료를 통해 검증할 필요가 있고, 생성된 내부 조석 에너지가 남해 연안 용승에 미치는 영향에 대해서도 연구해야 할 것이다.

참고문헌

- 김 구, 노홍길, 이상호. 1991, 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. *한국해양학회지*, 26, 262-277.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한연구. *한국수산학회지*, 27, 515-528.
- 김충기, 장경일, 박경, 석문식, 2000, 한국 남해의 해수순환: 2차원 순압모델. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 5(4), 257-226.
- 조양기, 김구, 1994, 여름철 남해 저운수의 특성과 기원. *한국해양학회지*, 29(4), 414-421.
- 최병호, 방인권, 김경환, 1994. 대한해협조류의 3차원분포. *한국해양·해양공학학회지*, 6, 421-438.
- Chang, K.I., Kim, C.K., Lee, S.W. and Shim, T.B., 1997, Barotropic circulation of the South Sea-preliminary model results. *Ocean Research*, 19, 139-152
- Baines, P.G. 1982, On internal tide generation models. *Deep-Sea Research*, 29, 307-338.
- Book, J.W., Pistek, P., Perkins, H. Thompson, K.R., Teague, W.J., Jacobs, G.A., Suk, M.S., Chang, K.I., Lee, J.C. and Choi, B.H., 2004, Data Assimilation Modeling of the Barotropic Tides in the Korea/Tsushima Strait. *Journal of Oceanography*, 60, 977-977.
- Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chinese Journal Oceanology and Limnology*, 4, 1-16.
- Fairal, C.W., Bradley, E.F., Rogers, D.P., Edson, J.B., and Young, G.S., 1996, Bulk parameterization of air-sea fluxes in TOGA COARE. *Journal*

- of Geophysical Research*, 101, 3747-3767.
- Foreman, M. G. G., 1977, Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report, 77-10, Institute of Ocean Science, Patricia Bay, Sidney, B.C., Canada.
- Griffin, D.A. and Van Loan, C.F., 1996. The adjoint method of data assimilation used operationally for shelf circulation. *Journal of Geophysical Research*, 101(C2), 3457-3477.
- Jan, S., Lien, R.C. and Ting, C.H., 2008, Numerical Study of Baroclinic Tides in Luzon Strait. *Journal of Oceanography*, 64, 789-802.
- Lie, H.J. and Cho, C.H., 1997, Surface current fields in the eastern East China Sea. *Journal of Korean Society Oceanography*, 32, 1-7.
- Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20, 851-875.
- Niwa, Y., and Hibiya, T., 2001, Numerical study of the spatial distribution of the M2 internal tide in the Pacific Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 106, 22441-22449.
- Niwa, Y. and Hibiya, T., 2004, Three-dimensional numerical simulation of M2 internal tides in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. *Journal of Oceanographical Society of Japan*, 45, 65-82.
- Pack, J.H. and Watts, R., 2006, Internal Tides in the Southwestern Japan/East Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 36, 22-34.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.*, 91, 99-164.
- Teagus, W.J., Jacobs, G.A., Perkins, H.T. and Book, J.W., 2002,

Low-Frequency Current Observations in the Korea/Tsushima Strait.
Journal of Physical oceanography, 32, 1621-1641.



감사의 글

해양 물리학을 알려주시고, 본 논문을 지도해 주시고 늘 부족하고 실수도 많은 저를 믿어주시고 격려해 주시고 여기까지 이끌어주신 이호진 교수님께 진심으로 감사드립니다. 부족한 논문 심사해 주시고 좋은 말씀 많이 해주신 한국해양연구원 박재훈 박사님과 민홍식 박사님, 극지연구소 하호경 박사님께도 감사를 드립니다. 그리고 투정부려도 잘 받아주시는 김태완 박사님 감사합니다. 논문 쓰도록 배려해주신 극지연구소 모든 분들께 감사합니다. 항상 웃으면서 기쁘게 도와주시는 찬영이 오빠, 힘들고 지친 나를 웃게 해주는 에너지이저 승겸이, 윤정이에게 감사합니다.

또한 해양수치모델링 연구실의 항상 풀리지 않는 문제에 닥쳤을 때 말없이 옆에 와서 같이 해결해주고 가끔은 언니 같고 가끔은 동생 같은 우리 미옥이, 대학원 처음 들어와서 모델이라는 큰 벽을 같이 헤치고 나간 우리 희진이, 연구실 예쁜이들 예술이, 현경이, 항상 챙겨주고 싶은 지영이, 연구실 웃음 마스크트 희열이, 열정 가득한 상엽이에게 감사합니다. 그리고 마지막까지 고생 같이하는 화끈한 대학원 동기 성혜, 뭐든지 좋아! 해주시는 용기언니, 학문의 길을 포기하려 할 때 좋은 격려로 절 붙잡아 주신 형주언니 정말 감사합니다. 05학번 동기들 화선이, 명은이, 성연이, 주완이 모두 감사합니다. 그리고 정말 사랑하는 파도소리 19기 동기들 항상 힘이 되어주어 감사합니다. 그리고 멀리서 항상 응원하고 위로해주는 평생친구 은정, 재봉, 현민, 미애, 진희 모두에게 감사합니다.

마지막으로 항상 제 옆에서 저를 지켜주고 사랑해주시는 부모님과 사랑하는 언니 동생에게 진심으로 감사드립니다.