

동해 해양순환 수치모델 개발  
Development of numerical ocean circulation  
model for the East Sea

한국해양연구원

서울대학교

## 제 출 문

서울대학교 총장 귀하

본 보고서를 "동해 해양순환 수치모델 개발" 과제의 2차년도 보고서로 제출합니다.

2003년 8월 일

연구 기관 : 한국해양연구원  
연구책임자 : 김철호  
연구 원 : 장찬주  
민홍식

# 요 약 문

## I. 제목

동해 해양순환 수치모델 개발

## II. 연구개발의 목적

### 1. 목적

동해의 기후학적 해양순환 특성을 신뢰도 높게 모사할 수 있는 수치예측모델을 개발함으로써 동해 순환 역학기구를 고찰하며 향후 관측자료의 모델동화기법 등을 활용한 해양 변동 실시간 수치예측시스템의 기반을 구축하는데 있음.

### 2. 연구개발 최종 목표

사실적 재현 성능을 가진 동해순환모델의 수립 및 동해 실측 자료에 근거한 동해 순환 재현과 역학적 이해

- 고해상도 해양순환모델의 구축
  - 해상도 : 수평격자간격 0.1도, 해저지형의 정밀 처리
- 해양표층과정 처리능력의 향상
  - 자유해면의 계산 : 자유해면 계산방안 도입
  - 표층혼합층의 모수화 : 혼합층모델 검토 및 내접
  - 해면경계조건 처방능력 향상 : 해면경계용 입력자료 질 검토, 입력방안 개발
  - 모델수립을 위한 바람응력자료, 열속조건, 열속자료 검토
- 대한해협에서 사실적인 유입 입력조건 부여
  - 자유해면 경계조건 부여
  - 관측에 기반한 수송량 조건 입력
- 동해 기후순환 패턴 모사
- 북한한류 특성의 성공적 재현

### III. 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. 내용

- 해양과정 모수화 방안 분석 및 모델적용
- 바람응력자료의 비교 분석
- 표면열속조건과 열속자료의 비교 분석
- 개방경계면 입력자료 및 입력조건 개선

#### 2. 범위

- 해양표층과정 처리능력의 향상
  - 해면경계조건 처방능력 향상 : 해면경계용 입력자료 질 검토, 입력방안 개발
  - 해양과정 모수화 방안 분석 및 모델 적용
  - 모델수립을 위한 바람응력자료, 열속조건, 열속자료 검토
- 바람응력에 의한 표층 및 중층 순환 고찰
- 열속 계산 방안 고찰
- 동해 심층순환 고찰
- 개방 경계조건 적용 고찰

### IV. 연구개발 결과

#### 1. 해양과정 모수화 방안 분석 및 모델적용

해양 표층의 혼합층 발달과정을 모사하기 위하여 kpp혼합층 방안을 분석하고 도입하였다.  $z$  좌표계가 가지는 수심처리상의 취약점(연직방향의 성긴 해상능력)을 보완하기 위하여 최저층 부분격자 처리방안을 분석하였고 모델에 도입하였다. 동해 중규모 현상(난수역과 냉수역에 나타나는 중규모 에디, 동한난류의 사행, 극전선 등)을 모사할 수 있도록 모델 해상도를 0.1도로 높였다.

모델의 수평혼합방안을 세련화시키기 위하여 운동량의 혼합에는 Smagorinsky 방안을 적용하고, 수온과 염분 등의 tracer에는 G-M 등밀도확산방안을 적용하였다. 또한 해면 고도가 산출 가능한 자유표면 계산방안을 적용하였다. 이상의 모수화 방안들은 종래의 해양순환 모형들에 적용된 방안들을 개선하거나 창안한 것으로서 이 방안들을 도입, 적용함으로써 이 연구에서 수립된 해양순환모형의 품위를 한 단계 향상시켰다.

## 2. 바람응력자료의 비교 분석

동해 해양순환모형에서 가장 널리 쓰이는 Na 바람응력과 미국기상청의 NCEP 재분석 바람응력을 해면 경계조건으로 하여 동해모델의 반응을 비교하였다. 비교결과 두 바람자료 모두 동계에 북서풍이, 하계에 약한 남풍계열 바람이 나타나 몬순 계절풍의 일반적 특징은 비슷하나 NCEP 바람응력이 Na 바람응력에 비해 상대적으로 세기가 약하게 나타났다.

Na 바람의 경우 동계에 양의 바람응력결 최대값이 동해 북서해역, 특히 블라디보스톡 근해에서 나타나나, NCEP 바람의 경우에는 동해 북동해역에 치우쳐 나타나고 최대값의 크기도 Na 바람에 비해 작게 나타났다. 두 바람응력결의 시공간 특성은 동해 순환에 서로 다른 반응을 야기시키는 것으로 나타났다. Na 바람 실험에서는 동계에 블라디보스톡 근해에서 최소값을 가지는 음의 해면고도 분포와 극전선 이북 전반에 걸쳐 반시계방향 순환이 형성되었다. 그러나 NCEP 바람 실험에서는 음의 해면고도 분포지역이 전체적으로 동해 북동해역에 치우쳐있고 해면고도 최소값도 동일본분지측에 중심을 두고 나타났다. 또한 동계에 한반도 북동해안을 따라 북상류가 형성되며 러시아 연안을 따른 남향-남서향류는 블라디보스톡 동쪽연안으로 제한되어 나타났다.

바람응력결의 차이는 극전선 이북해역의 표면수온분포에도 차이를 가져오는 것으로 나타났다. Na 바람 실험의 경우가 NCEP 바람의 경우보다 상대적으로 더 저온의 표층수온 분포를 가져왔다.

## 3. 표면열속조건과 열속자료의 비교 분석

동해 해양순환모형에서 가장 일반적으로 사용되는 restoring 조건(복원경계조건)과 Haney형 열속조건을 비교하였다. restoring 조건의 경우에는 월평균 GDEM 해면수온과 30일의 시간상수를 사용하였고, Haney 열속조건에는 Hirose(1996)의 열속값을 사용하였다. 두 경우 모두 Na 바람을 사용하였다.

Haney형의 Hirose 열속값에 의한 해면수온분포는 restoring조건에 비해 더 큰 계절변동폭을 보였다. 300m 층 수온분포도 restoring 조건에 비해 계절변동 특성이 더 명료하며 8월 수온이 2월에 비해 더 낮아졌다. 러시아 연안을 따라 한반도 북동안으로 남하하는 흐름도 restoring 조건의 경우보다 더 강화되는 것으로 나타났다.

바람응력자료의 비교결과 Na 바람의 사용이 극전선 이북의 반시계 방향 순환을 더 강화시키며 사실적인 순환특성 모사에 더 기여하는 것으로 판단된다. 표면열속조건으로는 Hirose 열속자료의 사용이 더 사실적인 수온분포를 모사하는 것으로 보인다.

## 4. 동해 기후순환 패턴 모사 및 주요 해류와 해수특성 모사, 분석

본 연구에서 수립된 동해 해양순환 수치모델은 기존에 알려진 동해의 일반적인 순환 형태를 성공적으로 재현하고 있다. 순환모델에서 대마난류의 분기에 의해 동한난류와 일본연안류가 형성되며 동한난류는 여름철 최대 약 1 m/sec에 이르고 북위 약 37° 선에서 이안

하여 동해 내부로 흘러 들어간다. 또한  $1/10^\circ$ 의 높은 해상도를 가짐으로 울릉에디와 원산에디 등도 재현하여 중규모 운동까지도 표현할 수 있는 성능을 가지고 있다. 기존의 모형들이 재현할 수 없었던 여름철 북한한류를 재현하였으며 모형의 중층 해류는 동해에서 APEX 관측을 이용하여 추정되었던 동해 중층 순환과 유사한 형태를 갖는다. 물성 구조에서도 한국 연안역에 염분최소층을 표현하며 동해 북부해역에서 형성되어 대마난류 중층수 밑으로 남하하는 동해중층수의 염분최소층 구조를 재현하고 있다.

본 연구의 고찰에서 북한한류의 남하는 강수량 및 담수속에 의해서 영향을 받지 않으며 겨울철 열속의 변화에 의해 여름철 북한한류의 세력이 변하는 것으로 파악되었다. 겨울철 냉각은 여름철 북한한류의 세력을 강화시키는 것으로 사료된다.

## 목 차

요약문 .....	1
목차 .....	5
<b>제 1 장 서론</b> .....	6
제 1 절 연구개발의 필요성 .....	6
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용 .....	6
<b>제 2 장 동해 해양순환 수치모델 수립</b> .....	9
제 1 절 서론 .....	9
제 2 절 수치모델의 구성 .....	12
<b>제 3 장 동해순환에 대한 표층경계조건 수치모델 실험</b> .....	21
제 1 절 모델 결과 - 표층 및 중층 순환 .....	21
제 2 절 모델 결과 - Meridional Overturning .....	37
제 3 절 개방경계조건 실험 .....	40
<b>제 4 장 결론</b> .....	46
참고문헌 .....	47

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 필요성

동해는 한국과 일본, 러시아, 북한이 각각 관할하는 해역으로 나뉘어 있어 분지규모의 해양 관측은 국제공동연구를 통하지 않고는 실질적으로 접근이 용이하지 않은 해양이다. 광역의 동해 해양관측과 이론 연구 이외에 동해 순환을 이해할 수 있는 가장 현실적인 수단은 동해의 역사자료 분석과 수치모델 연구가 될 것이다. 수치모델 연구는 자연현상에 대한 반복 모사실험이 가능하며 해석해가 불가능한 복잡한 비선형 방정식의 수치해를 제공해주는 장점이 있다. 또한 수치해에 대한 적절한 분석과 통찰을 통해 현상을 지배하는 역학을 이해할 수 있으며 정확도 높은 수치모델을 기본 도구로 하여 궁극적으로 예측과 예보가 가능하다.

동해의 순환을 결정하는 주 요소는 동해 자체의 지리적 특성과 위도 및 동해에 작용하는 외력 조건이라고 볼 수 있다. 외력은 바람 응력과 열속, 담수속 그리고 해협을 통해 출입하는 해수의 특성과 해류, 수송량 등으로 구성된다. 그러나 국내외적으로 아직까지 동해에 작용하는 외력들의 시공간 구조와 변동에 대해서 정량적으로 충분히 조사·파악되고 있지 못한 상태이다. 이와 같은 외력 조건들에 대한 정확한 정보 입력은 사실적인 동해 순환 모델링에서 가장 중요한 요소가 되며 각각의 외력이 동해의 순환에 미치는 역할에 대한 모델 실험연구는 동해 순환 역학을 이해하는데 주요한 방편을 제공한다. 또한 이 과정을 통해 동해순환 수치모델들이 가지고 있는 문제점들을 파악하고 개선함으로써 정확도 높은 동해 순환모델을 수립할 수 있다. 현재 국제적으로 활발히 시도되고 있는 자료동화 기법을 통한 실시간/준실시간 해양 예보 연구에 있어서도 성공적인 예보를 위하여서는 기본적으로 정확도 높은 수치모델의 수립 여부가 주요한 핵심요소를 이룬다.

## 제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

### 1. 연구개발의 목표

본 연구의 목표는 동해의 기후학적 해양순환 특성을 신뢰도 높게 모사하는 수치예측 모델을 개발하는데 있다. 또한 이로써 동해의 순환 역학 기구를 고찰하며 모델동화기법을 활용한 해양변동의 실시간 수치예측시스템을 구축하기 위한 기반을 마련하는데 있다. 이를 위한 세부목표는 다음과 같다.

#### 가. 고해상도 해양순환모델의 구축

- (1) 수평격자간격 0.1도의 고해상도 모델을 구성함
- (2) 모델의 해저지형 처리 능력을 향상시킴

#### 나. 해양표층과정 처리능력 향상

- (1) 자유해면 계산방안을 도입함으로써 자유해면처리를 가능하게 함
- (2) 표면혼합층 모델을 검토하고 동해순환 모사에 적절한 혼합층 방안을 내접함
- (3) 해면경계조건용 입력자료의 질을 검토하고 적절한 입력방안을 모색함으로써 동해수치모델의 해면경계조건 처방능력을 향상시킴

다. 현실적인 입력조건에 기초한 기후학적 순환 모사

- (1) 3개 해협을 개방경계조건으로 자유해면 경계조건을 부여함
- (2) 입력 수송량으로서 대한해협 실측 수송량을 적용함
- (3) 기후학적 순환패턴 모사를 위한 장기적분을 수행함

## 2. 연구개발의 내용 및 범위

연구의 내용은 모델을 구성하는 코드와 모델 모수화 기법을 분석하고 이해함으로써 동해순환 수치모델의 기본골격을 구성하는 연구와 실제 순환을 구동하는 입력자료의 특성, 특히 바람응력과 열속조건에 대한 검토를 통하여 동해순환에 대한 사실적인 구동조건을 파악하는 연구, 그리고 실측 수송량 자료에 기반한 사실적인 동해순환모델링 및 순환기구 연구로 구성되었다. 이를 위하여 1-3차년도에 걸친 전체적인 연구 내용과 범위는 다음과 같다.

가. 내용

- (1) 해양과정 모수화 방안 분석 및 모델적용
- (2) 바람응력자료의 비교 분석
- (3) 표면열속조건과 열속자료의 비교 분석
- (4) 개방경계에서 자유해면 경계조건 부여
- (5) 실측 수송량의 모델 입력
- (6) 기후 순환 패턴을 얻기 위한 모델 장기 적분
- (7) 동해 주요 해류와 수괴의 모사 및 분석

나. 범위

- (1) 동해 해양순환모델 기초수립;
  - partial cell 수심처리 기법 분석 및 적용
  - Smagorinsky 확산방안 기법분석 및 적용
  - 바람, 열속 기후치 확보 및 격자점값 작성
  - Na Wind와 NCEP Wind 사용에 따른 모델특성 비교분석
  - Haney 형과 Restoring 형 표면 열 경계조건에 따른 모델특성 비교분석

(2) 해양표층과정 처리능력 향상;

- kpp 혼합층 방안 분석
- 자유수면 계산을 위한 mode split 기법 분석
- 등밀도면 확산 방안 분석 및 적용
- 정밀격자체계 구성, 병렬처리기법 적용

(3) 개방경계조건 처리능력 향상;

- Stevens(1990) 개방경계조건의 분석
- Mutzke(1998) 방안과 Schmidt(2001) 코드 분석 및 개선, 적용
- 실측 대한해협 수송량 적용

(4) 동해 순환 모사 및 주요 해류와 해수특성 분석

- 표층 순환장 모사 및 분석
- 모사된 동한난류와 북한한류 변동성 분석
- 모델 수괴형성 고찰

## 제 2 장 동해 해양순환 수치모델 수립

### 제 1 절 서론

#### I. Introduction

동해는 반폐쇄성 해양으로 평균 수심이 약 1,700m에 이르는 심해성 해양인 반면 비교적 얕은 해협으로 북태평양과 연결되어 있다(Fig. 1). 동해는 풍부한 수산 자원 뿐만 아니라 한국과 북한 그리고 일본과 러시아가 접경해 있어 군사적인 이유로도 그 중요성이 높은 해역이다. 또한 동해는 그 단면적이 약 1,000km x 1,000km 로 태평양에 40배에도 못미칠 정도로 작지만 대양에서 나타나는 서안경계류나 열전선이 존재하고 열전선을 경계로 북쪽의 냉수역에서는 겨울철에 심층수가 생성되는 것으로 알려져 있다. 이러한 특징들 때문에 동해를 통해 기후변화로 인한 대양의 반응을 연구하고자 하는 시도가 있어 왔다(Kim and Kim, 2001). 대한해협을 통해 동해로 유입된 대마난류는 동해에 열과 염을 공급하며 한국 동해안을 따라 북상하는 동한난류(East Korea Warm Current)와 일본 서안을 따라 흐르는 Nearshore Branch를 형성한다. 동한난류는 약 북위 38°에서 연안으로부터 떨어져 열전선을 따라 흐르다가 쓰가루 해협과 쓰야 해협을 통해 대양으로 빠져 나간다. 열전선 북쪽의 냉수역에는 반시계방향의 순환이 존재하는데 북쪽으로부터 남쪽으로 흐르는 리만한류와 북한한류가 존재하며 북한한류는 동한난류와 만나 열전선을 따라 동진한다. 해양 표층을 통한 대기에서 해양으로의 열교환은 연평균 약  $-53 \text{ W/m}^2$  이며(Hirose, 1996)이며 바람 응력은 10월부터 2월까지  $1 \text{ dyne/cm}^2$  이상의 북서풍이 존재하고 여름철에는  $0.5 \text{ dyne/cm}^2$  이하의 남풍계열이 존재한다(Na, 1992).

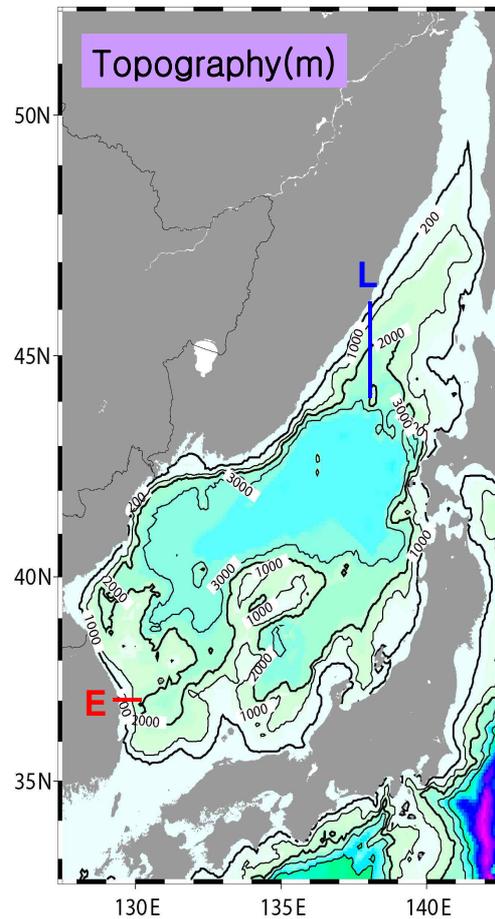


Figure I-1. Topography in the East Sea

위에 열거한 동해의 계략적인 순환 체계를 일찍부터 Yoon(1982)에 의해 수치모델을 통해 설명해 보려는 시도가 있었으며 Seung and Kim(1989)은 간단한 모델을 이용하여 동해의 순환에 열교환이 미치는 영향을 밝히고자 하였다. 또한 Yoshikawa(1999)는 동해 중층수의 생성 및 순환을 수치모델을 통해 설명하려 했으며 Hogan(2000)은 모델에서 해저 지형의 효과와 격자 간격 및 열염순환의 관계에 대해 논하였다. Ou(2001)와 Spall(2002)은 간단한 수치모델과 이론모델을 통해 동한난류와 Nearshore Branch 의 분기를 설명하려 했다. 특히 Kim and Yoon(1996)은 Reduced-Gravity 모델을 이용하여 겨울철에 북쪽에 존재하는 양의 바람응력과도가 냉수역의 반시계방향의 순환을 형성할뿐만 아니라 동한난류의 이안에도 중요한 역할을 담당함을 밝혔으며 이 연구를 바탕으로 Kim and Yoon(1999)은 원시 방정식을 이용한 GFDL MOM2를 이용하여 동해의 상층과 중층의 순환을 재현한 바 있다. 기존의 연구에서 밝혔듯이 수치모델을 이용하여 동해를 이해하고자 할 때 바람응력이 동해의 순환에 미치는 영향이 크기 때문에 실제에 가까운 바람 자료를 이용하는 것이 중요하게 생각된다. 기존의 연구들은 주로 이론적인 모델을 이용했거나 혹은 나바람(1992)을 이용했으나 최근에는 공간 격자 간격이 0.5625°인 ECMWF의 재분석 자료를 이용하는 경향이 있다.

동해는 비교적 얇은 해협을 통해 대양과 연결되어 있으며 수치모델을 통한 연구는 동해를 이해할 뿐 아니라 기후변화 등을 연구하는데도 유용할 것이다. 또한 동해의 순환을 특징지우는 외력이 제한되어 있고 서울대학교 해양순환계 연구실에서 실시간 관측하고 있는 대한

해협을 통한 수송량을 이용하여 장기적으로 자료 동화를 통한 동해의 물질 및 해류의 분포를 예보하는데까지 발전할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 바람 및 열속에 의한 동해의 순환에 대한 연구와 대한해협을 통한 수송량을 개방 경계 조건으로 이용한 연구를 수행하였다. 이러한 연구는 바람 장 및 열속 그리고 개방 경계 조건의 실시간 입력을 위한 기초 연구이며 특히 열속을 실시간으로 입력하기 위해 Bulk Formula를 모델에 입력하는 작업을 수행하고 이를 이용하여 연구를 수행하였다.

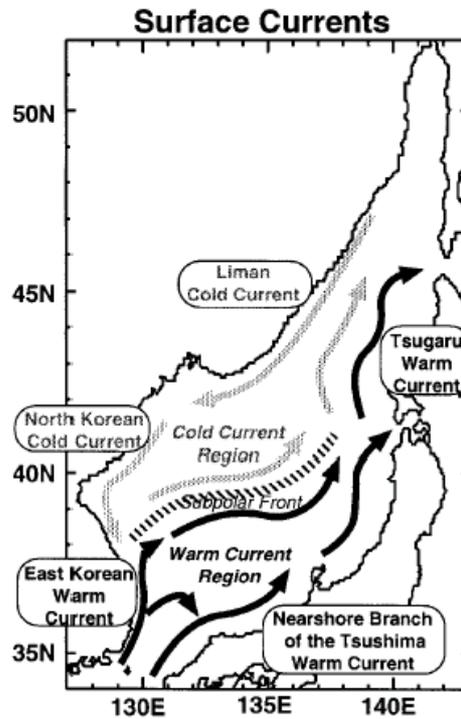


Figure. I -2. Schematic picture of surface current structures (after Uda 1934), Yoshikawa(1999).

## 제 2 절 수치모델의 구성

수치해양모델은 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)에 의해 배포된 MOM3에 근간하여 동해의 개방 경계 조건에 맞도록 개발하였다. MOM3는 Bryan-Cox 의 수직격자 체계 모델을 계승하였으며 대기-해양의 물질 교환을 위해 PP 및 KPP 방안을 사용하고 있다. 특히 KPP 방안은 대기 혼합층 모델을 해양에 적용한 것으로 해양 혼합층을 잘 모사하는 것으로 평가되고 있다(Li et al., 2001). MOM3는 계산 속도를 높이기 위해 MPI(Message Passing Interface)병렬 방안을 제공하고 있다. 동해 모델의 특징상 개방경계 조건을 필요로 하며 Steven 의 개방경계조건을 자유해면경계조건으로 개선한 Mutzke(1998)의 방안을 Schmidt의 코드를 동해에 맞도록 개선하여 사용하였다. 해표면을 통한 대기와 해양의 열교환을 다루기 위하여 Bulk Formula를 이용하였으며 이를 위한 방정식은 Large et al.(1997)의 결과를 참조하였다.

본 수치 모델은 원시 방정식을 모사하며 수직 격자를 수심별로 나눈 Z-coordinate 체계를 따른다. 또한 수평 격자로 Arakawa B 격자 체계를 채택하였다. Hydrostatic 근사를 이용함으로 수직 방향의 운동 방정식을 계산하지는 않지만 수평 방향의 유속과 보존 방정식을 이용하여 수직 방향의 유속이 계산된다.

모델에 사용된 원시 방정식은 다음과 같다.

$$u_t = -\nabla \cdot (u\vec{u}) + v \left( f + \frac{u \tan \phi}{a} \right) - \left( \frac{1}{a\rho_0 \cos \phi} \right) p_\lambda + (\kappa_m u_z)_z + F^u$$

.....Meridional u-momentum

$$v_t = -\nabla \cdot (v\vec{u}) - u \left( f + \frac{u \tan \phi}{a} \right) - \left( \frac{1}{a\rho_0} \right) p_\phi + (\kappa_m v_z)_z + F^v$$

.....Meridional u-momentum

$$w_z = -\nabla_h \cdot \vec{u}_h \dots \dots \dots \text{Continuity}$$

$$\theta_t = -\nabla \cdot [\vec{u}\theta + F(\theta)] \dots \dots \dots \text{Temperature State Equation}$$

$$s_t = -\nabla \cdot [\vec{u}s + F(s)] \dots \dots \dots \text{Salinity State Equation}$$

$$\rho = \rho(\theta, s, z) \dots \dots \dots \text{Boussinesq Approximation}$$

$$p_z = -\rho g \dots \dots \dots \text{Hydrostatic Approximation}$$

모델의 수평영역은 남북으로 33.0 ~ 52.0 °N이고 동서로 127.5 ~ 142.5° E 이다. 격자 간격은 0.1°× 0.1°이며 결과적으로 격자수는 152 × 192 개다. 수직으로는 최대 수심이 4000 m이며 수직 격자 간격이 표층으로부터 해저면까지 2.5 m에서 400 m에 이르는 가변격자를 이

용하였다(Fig. II-1).

해표면 경계조건을 위해 자유해면경계조건을 이용했고 중립밀도면의 중규모 운동의 모수화를 위한 Redi 혼합 방안(Redi 1982)과 Gent-McWilliam 방안(Gent and McWilliam, 1990)을 이용하였다. 중규모 운동에 의한 수직혼합을 모수화하기 위해 KPP 방안(Large et al., 1994)을 이용했고 해저면을 현실에 가깝게 모사하기 위해 Partial Cell 방안(Pacanowski and Gnanadesikan, 1998)을 사용했다.

수심 자료를 위해 성균관대학교의 최병호 교수팀이 제공한 1/60°자료를 이용하였으며 대기-해양간 운동량 교환을 얻기 위해 나바람(나 등, 1996)과 ECMWF의 재분석 자료(ERA15)를 이용하여 연구를 수행했으며 NCEP의 재분석 바람 자료와 QuikSCAT의 바람 자료를 실시간 입력을 위한 코드를 마련하였다. 해표면에서의 대기-해양간 열속을 얻기 위해 관측 기후치로부터 재구성된 Levitus(1994) 자료를 이용한 Restoring 방안과 Bulk Formula를 이용한 방안을 적용하여 실험한 후 그 결과를 비교하였다. 담속을 위해 Levitus(1994)의 해표면 염분값을 이용하였다.

바람 응력에 대한 동해의 반응을 보기 위해 해협을 통한 해수유출입을 배제한 상태에서 열속은 해표면 온도에 restoring 하면서 나바람과 ERA15 바람만을 바꾸어 실험하였으며 열속에 의한 영향을 보기 위해 해표면 바람 응력으로 ECMWF 바람을 사용하면서 해표면 온도에 restoring 하여 열속을 계산하는 방법과 Bulk Formula를 이용한 방법을 각각 적용하여 실험하였다. 또한 개방 경계 조건으로 대한해협을 통한 수송량을 입력하여 실험하였으며 이때는 ECMWF 바람을 이용하였다.

Table 1. Model configuration

실험	바람응력	열속	담속	수평경계조건
NA_CL_R	나 바람	Restoring (to Levitus)	Restoring (to Levitus)	closed
ER_CL_R	ERA15	Restoring (to Levitus)	Restoring (to Levitus)	closed
NA_CL_B	나 바람	Bulk Formula	Restoring (to Levitus)	closed
ER_CL_B	ERA15	Bulk Formula	Restoring (to Levitus)	closed
ER_OB_B	ERA15	Bulk Formula	Restoring (to Levitus)	opened

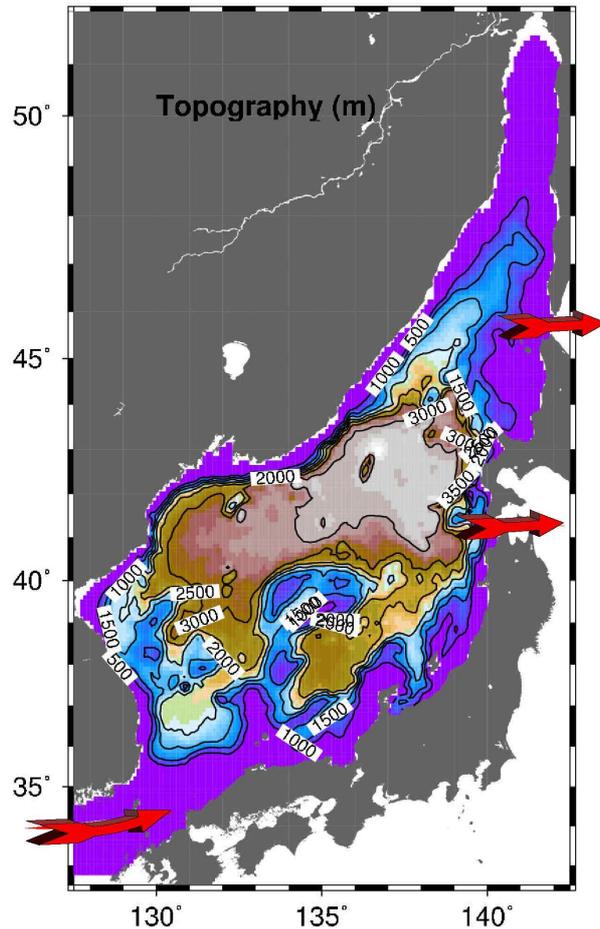


Figure. II-1. Model domain

### III. 바람 응력에 의한 표층 및 중층 순환(단한 경계 조건)

동해 북부역에서 바람 응력와도는 특징적으로 겨울철에 블라디보스토크 근해에 양의 바람 응력 와도와 음의 바람 응력 와도를 형성하며 동한만에도 남북으로 이러한 양의 바람 응력 와도와 음의 바람 응력 와도가 존재하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 구조는 공간 규모가 작아 기존의 바람 자료들에는 나타나지 않았고 최근에 QuikSCAT 이나 ECMWF 등을 통해 보다 조밀한 바람 자료를 얻게 됨으로 비로소 모델이 입력할 수 있게 되었다 (Fig. III-1). 또한 이러한 바람 응력 분포는 Kim and Yoon(1996)의 Reduced Gravity 모델을 이용한 연구에서 밝혔듯이 열전선 북쪽의 냉수역의 반시계 방향 흐름을 형성하며 동한 난류의 이안에도 중요한 역할을 담당하는 것으로 보인다.(Fig. III-2, III-3). 특히 Yoon and Kawamura(2002)에 의하면 블라디보스토크 근해에 존재하는 양의 바람 응력 와도는 동해 중층수 및 심층수 형성에 크게 관여하는 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 바람 응력 와도가 동해에 미치는 영향을 평가하고 동해의 특징적인 순환과 바람 응력 와도와의 관계를 살펴본다.

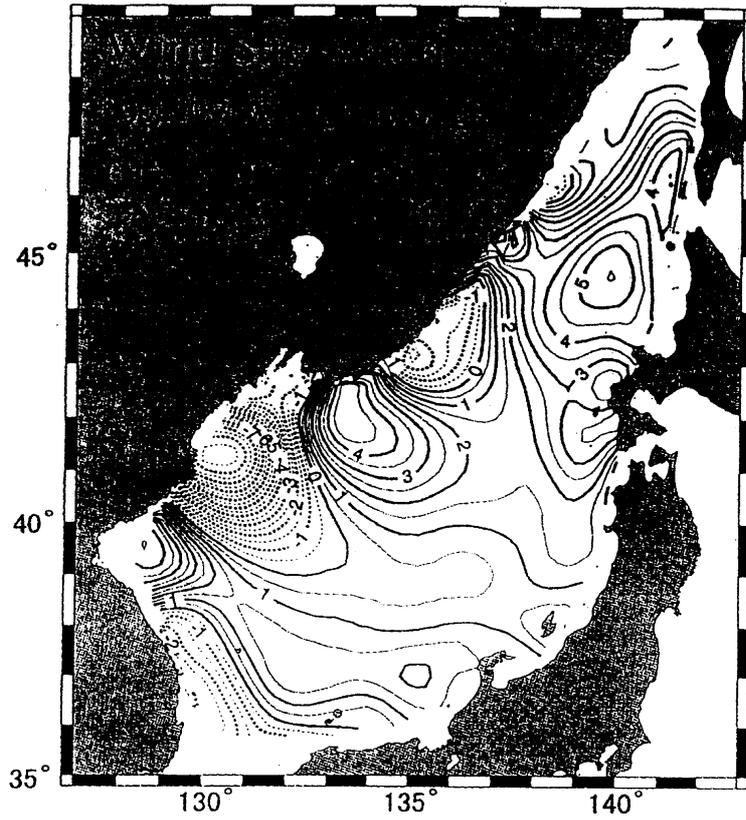


Figure. III-1. Wind stress curl( $10^{-8}$  dyne/cm<sup>3</sup>) in winter(Dec. to Feb.) averaged for 6years from 1992 to 1997 (ECMWF).

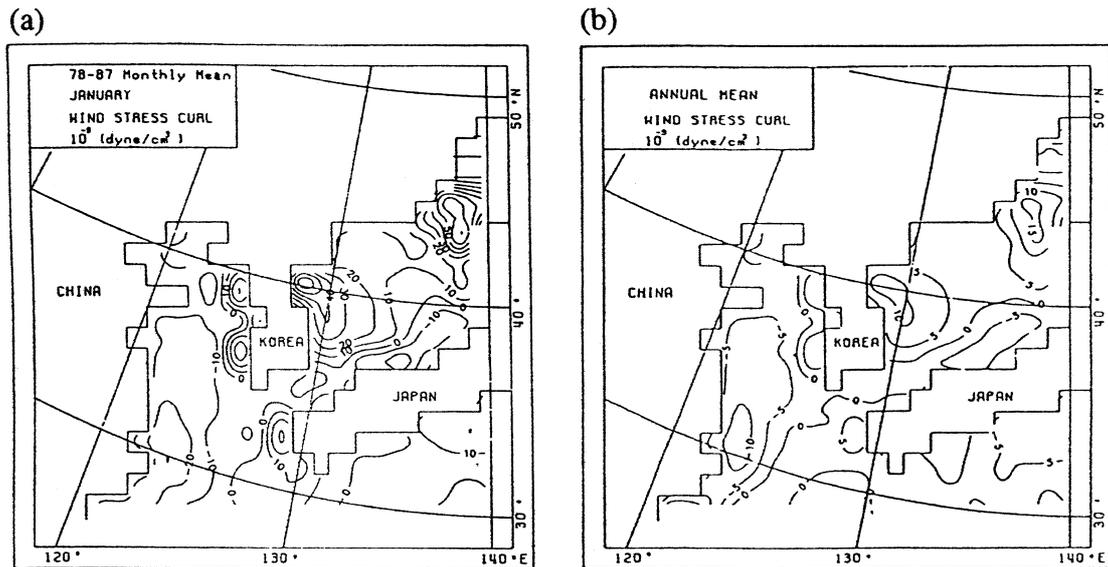


Figure. III-2. Wind stress curl (a) in January and (b) of annual mean computed by Na et al.(1992).

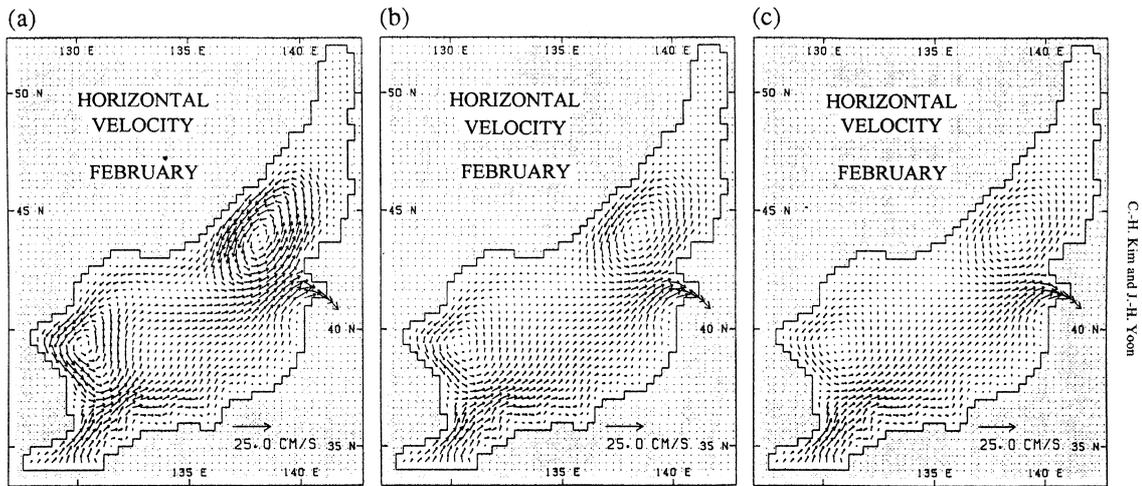


Figure. III-3. Distributions of horizontal velocity computed with different magnitude of  $\kappa$ .  
 (a)  $\kappa = 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , (b)  $\kappa = 5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , (c)  $\kappa = 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$

#### 1. 바람 응력 와도

본 연구진이 보유하고 있는 바람 응력 자료는 나바람(1982), ERA15, NCEP 재분석 자료 그리고 QuikSCAT에 의해 관측된 바람 자료이다. 그 중에서도 비교적 공간 격자 간격이 작은 나바람과 ERA15 그리고 QuikSCAT 자료를 비교 분석했다.

Yoon and Kawamura(2002)의 모델에 입력된 ECMWF 재분석 자료에서는 뚜렷하게 블라디보스토크 앞바다에 양의 바람 응력 와도가 나타나며 그 서쪽으로 강한 음의 바람 응력 와도가 존재한다. 그리고 동한 만에 존재하는 양의 바람 응력 와도는 오히려 블라디보스토크 앞바다에 존재하는 양의 바람 응력 와도보다 큰 값을 나타낸다. 이에 비하면 나바람은 블라디보스토크 앞바다의 양의 바람 응력 와도는 뚜렷하지만 음의 바람 응력 와도와 동한만의 양의 바람 응력 와도는 잘 나타내지 못한다. 또한 홋카이도 북서쪽에 존재하는 양의 바람 응력 와도도 ECMWF에 비해 약한 것으로 보인다. 반면에 ERA15는 바람 응력 와도의 공간적인 분포는 ECMWF 재분석 자료와 비슷하게 나타낸다. 그러나 동한만의 양의 바람 응력 와도는 여전히 비교적 작은 값을 나타낸다. QuikSCAT에 의한 바람응력은 위의 두 자료에 비해 절대값이 작으며 이는 QuikSCAT에 의해 측정된 바람 자료로부터 바람 응력을 구할 때 응력와도 계수 때문으로 사료된다. QuikSCAT에 의하면 블라디보스토크와 동한만에 나타나는 양의 바람 응력 와도는 시간적인 차이를 두고 나타난다. 동한만의 양의 바람 응력 와도는 11월 및 12월에 최대의 값을 갖는 반면 블라디보스토크 앞바다의 양의 바람 응력 와도는 2월에 최대의 값을 갖는다. 다음 절에서는 이러한 바람 응력 와도의 차이가 동해의 표층 및 중층 순환에 미치는 영향을 살펴본다.

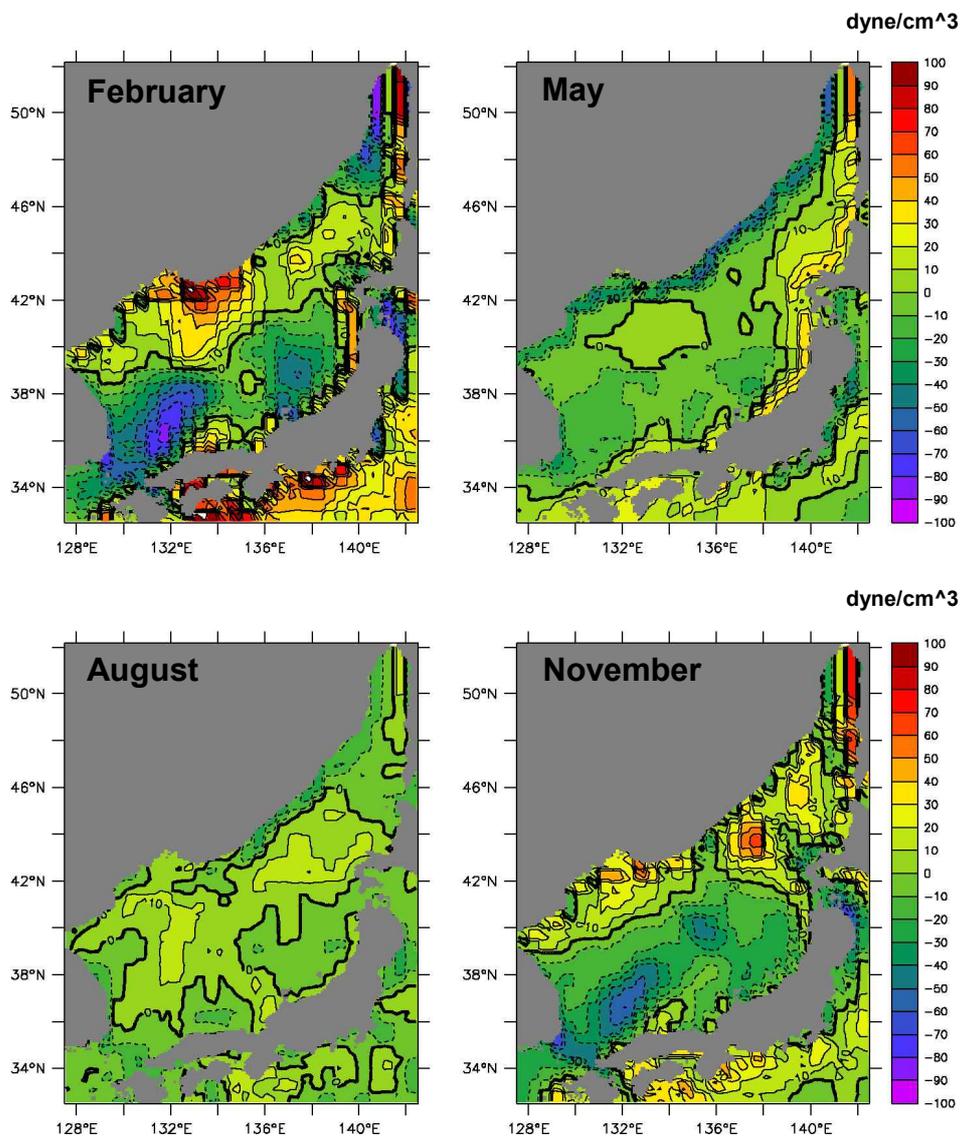


Figure. III-4. Wind stress curl of "Na" Wind. Monthly averaged value from 1978 to 1997.

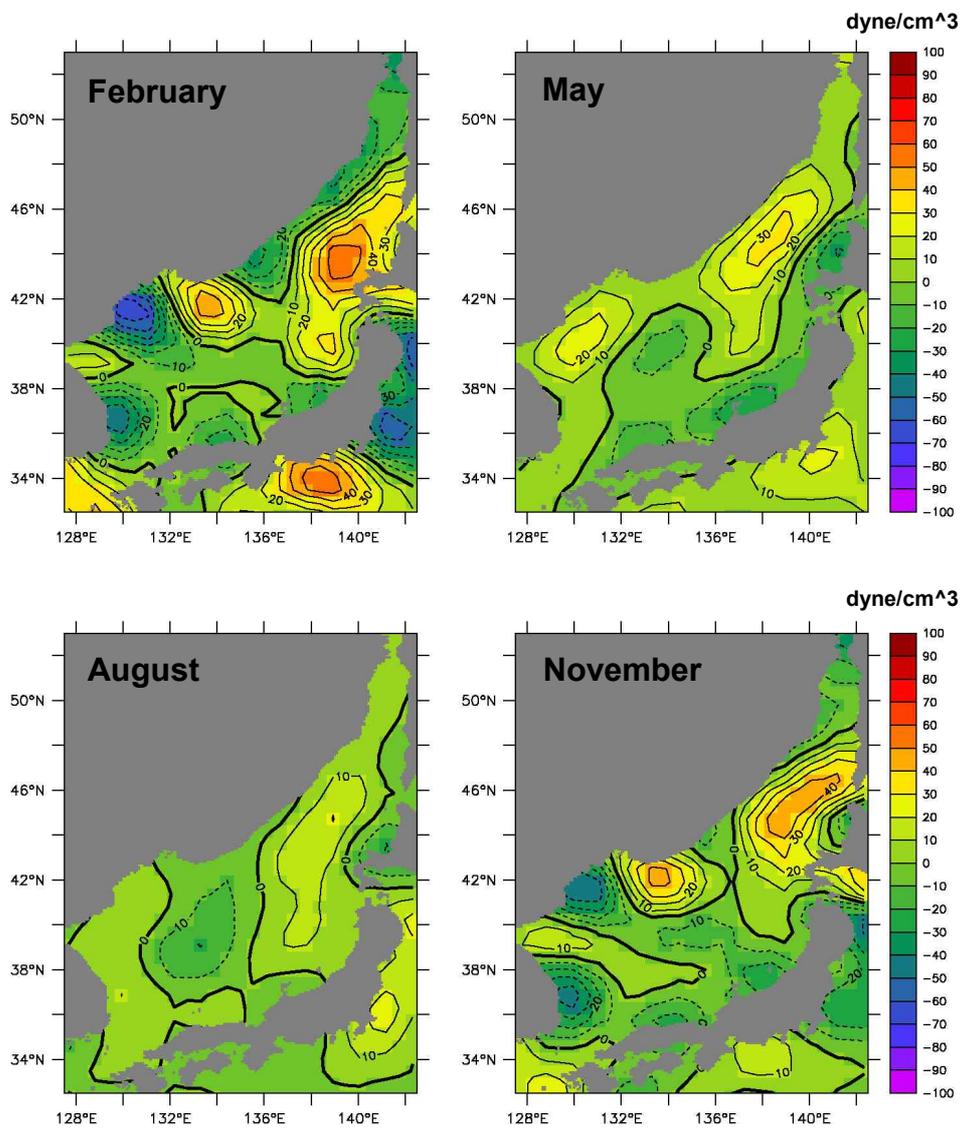


Figure. III-5. Wind stress curl of ERA15. Monthly averaged value from 1979 to 1993.

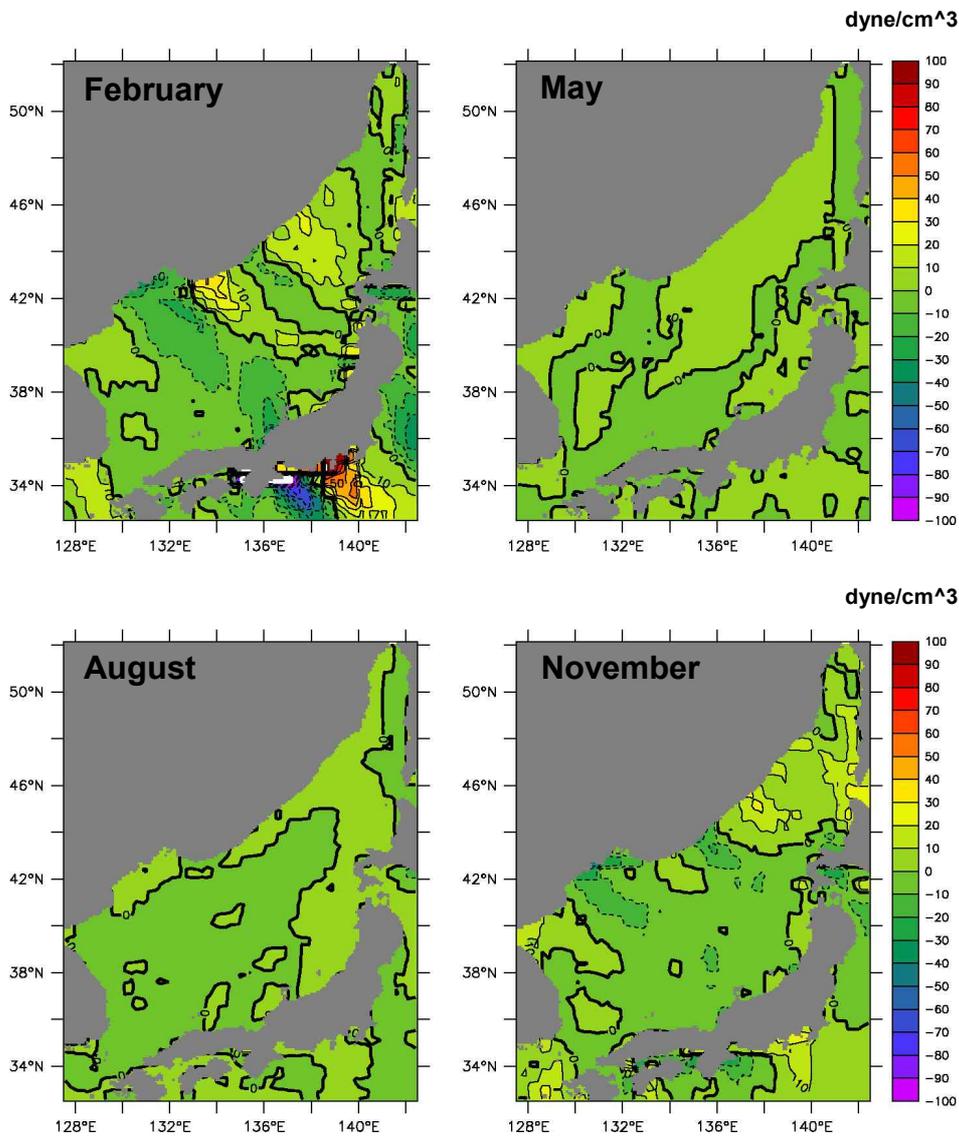


Figure. III-6. Wind stress curl of QuikSCAT Wind. Monthly averaged value from 1999 to 2002.

## 2. 열속 계산 방안

Seung(1982)는 리만 한류와 북한한류의 형성에 바람과 열속이 중요한 역할을 담당할 수 있음을 보였으며 Spall(2002)은 이론 모델을 통하여 Nearshore Branch 의 생성에 열속이 중요하게 작용함을 보였다. 본 연구에서는 열속을 위하여 두 가지 방안을 적용하여 실험을 수행하였으며 두 결과를 비교 분석할 것이다.

### i . Restoring Condition

모델의 해표면 온도와 관측된 해표면 온도의 차이에 의해 열속이 계산된다. 모델의 해표면 온도가 관측된 해표면 온도에 가까워지도록 보정해 가는 방법이기 때문에 관측된 해표면 온도에 가까운 해표면 온도를 모사할 수는 있지만 극한 겨울철을 모사하기 어렵고 따라서 심층수의 생성이나 순환을 모사하는데는 부족하다. 본 연구에서는 Restoring condition을 위해

Levitus(1994) 해양기후 자료를 이용하였고 보정 시간 계수는 7일로 하였다.

$$Q_{net} = \gamma(T_{obs} - T_{model})$$

.....Net Heat Flux(Restoring Condition)

ii. Bulk Formula

해양에 도달하는 열속은 크게 세 가지 형태로 나뉜다. 첫째는 태양으로부터 오는 단파 복사이며 두 번째는 해양 대기 사이의 열교환으로 이것은 또한 전도에 의한 열교환과 잠열에 의한 열교환으로 세분화된다. 세 번째는 장파 복사에 의한 해양에서의 열의 방출이다. 각각의 열속들은 장파 복사량과 구름의 양 그리고 습도와 바람의 속도에 의해서 계산되어질 수 있다.

Large et al.(1997)를 참조하여 Bulk Formula에 사용된 방정식은 다음과 같다.

$$Q_{net} = Q_{sw} - (Q_{sen} + Q_{lat} + Q_{lw}) \dots \dots \dots \text{Net Heat Flux}$$

$Q_{sw}$ : Net downward Solar Radiation

$$Q_{sen} = \rho_a C_p C_h W_{10} (T_a - \theta_1) \dots \dots \dots \text{Sensible Heat Flux}$$

$$Q_{lat} = \rho_a L_e C_E W_{10} (q_a - q_1) \dots \dots \dots \text{Latent Heat Flux}$$

$$Q_{lw} = -\epsilon \sigma_{SB} \{ T_a^4 [0.39 - 0.05(e_a)^{0.5}] F(c) + 4T_a^3 (\theta_1 - T_a) \} \dots \dots \dots \text{Longwave Radiation}$$

## 제 3 장 동해순환에 대한 표층경계조건 수치모델 실험

### 제 1 절 모델 결과 - 표층 및 중층 순환

#### i. NA\_CL\_R (나바람, Restoring condition)

1절에서 기술한 바와 같이 나바람에서는 겨울철에 블라디보스토크 앞에서 최대 양의 바람 응력 와도가 나타나며 동한만에서는 뚜렷하지는 않지만 양의 바람 응력 와도가 존재한다. 동한만 남쪽으로는 음의 바람 응력 와도가 나타난다(Fig. III-4).

2월의 열속은 전반적으로 음의 값이며 특히 동한만에서 약 200 W/m<sup>2</sup> 로 해양에서 대기로 열을 방출한다. 반면에 8월에는 전체적으로 양의 값이며 특히 러시아 연안을 따라 대기에서 해양으로 열을 흡수한다(Fig. III-7).

2월에 한국 동해안을 타고 북상하는 난류는 남쪽의 음의 바람 응력 와도가 형성한 시계 방향의 흐름에 해당하며 그 수송량은 5월에 약 3 Sv 의 최대값을 갖는다. 또한 북쪽의 양의 바람 응력 와도는 북위 40도 이북에서 반시계 방향의 흐름을 형성하며 약 북위 40도에서 남쪽의 시계 방향의 흐름과 만나 열전선을 형성한다(Fig. III-8, 9).

난수역의 반시계 방향의 흐름은 5월에 최대 3 Sv 이며 1월에 최소 약 1.5 Sv 이다. 반면에 냉수역의 리만 한류는 그 수송량이 1월과 8월에 최대로 약 2.5 Sv 이고 3월에 최소로 약 1.5 Sv이다. 일본 서안을 따라 북상하는 Nearshore Branch 는 여름철에만 존재한다(Fig. III-12).

겨울철 북쪽에 존재하는 양의 바람 응력와도에 의해 냉수역에 반시계 방향의 흐름은 모사되지만 남쪽의 음의 바람 응력와도에 의해 생성된 동한난류는 북위 40도 부근까지 북상한다. 수심 300m에서의 유속은 그 절대값이 작을 뿐 표층 순환과 유사하며 다만 Nearshore Branch 는 더 이상 존재하지 않는다(Fig. III-10).

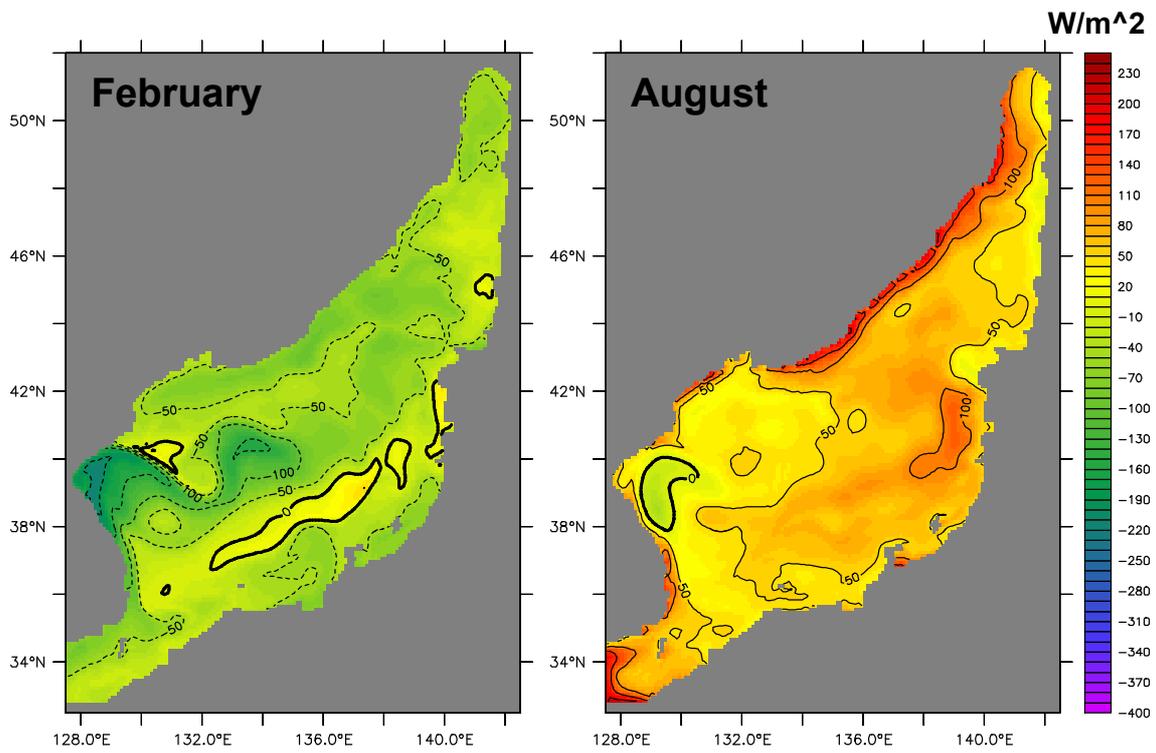


Figure. III-7. Heat flux ( $W/m^2$ ) from restoring condition to Levitus(1994) in the experiment NA\_CL\_R.

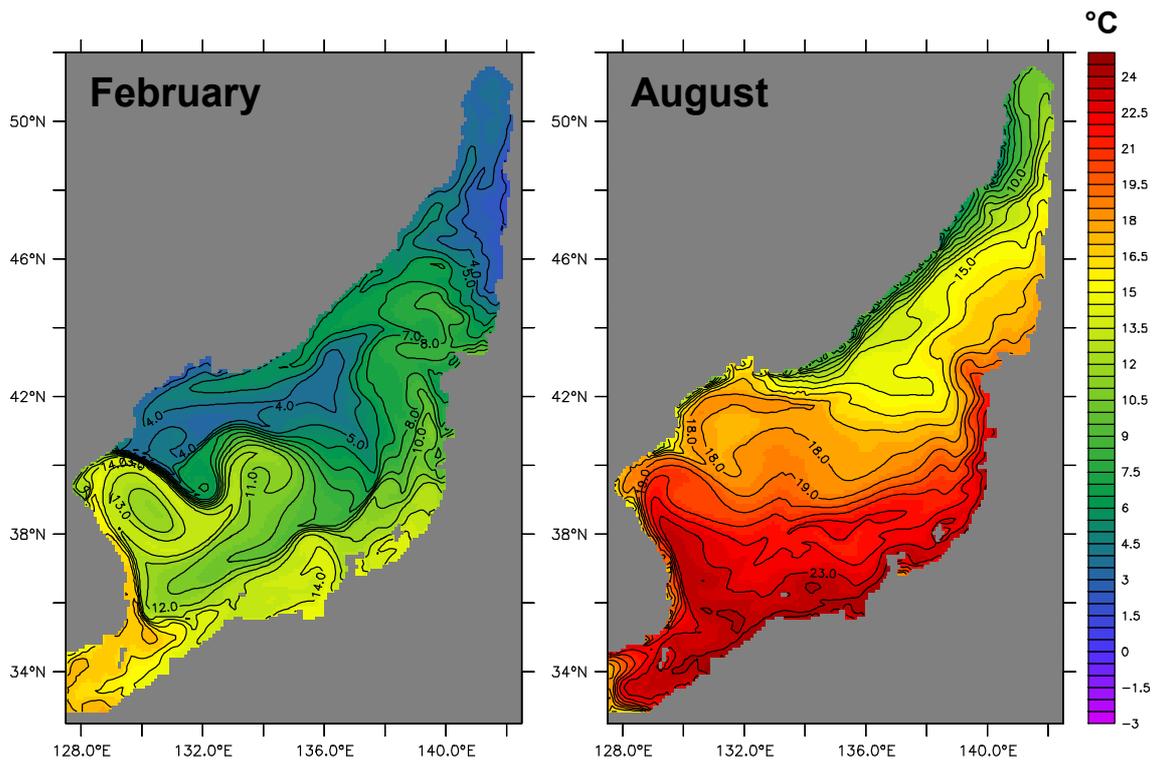


Figure. III-8. Sea Surface Temperature in the experiment NA\_CL\_R.

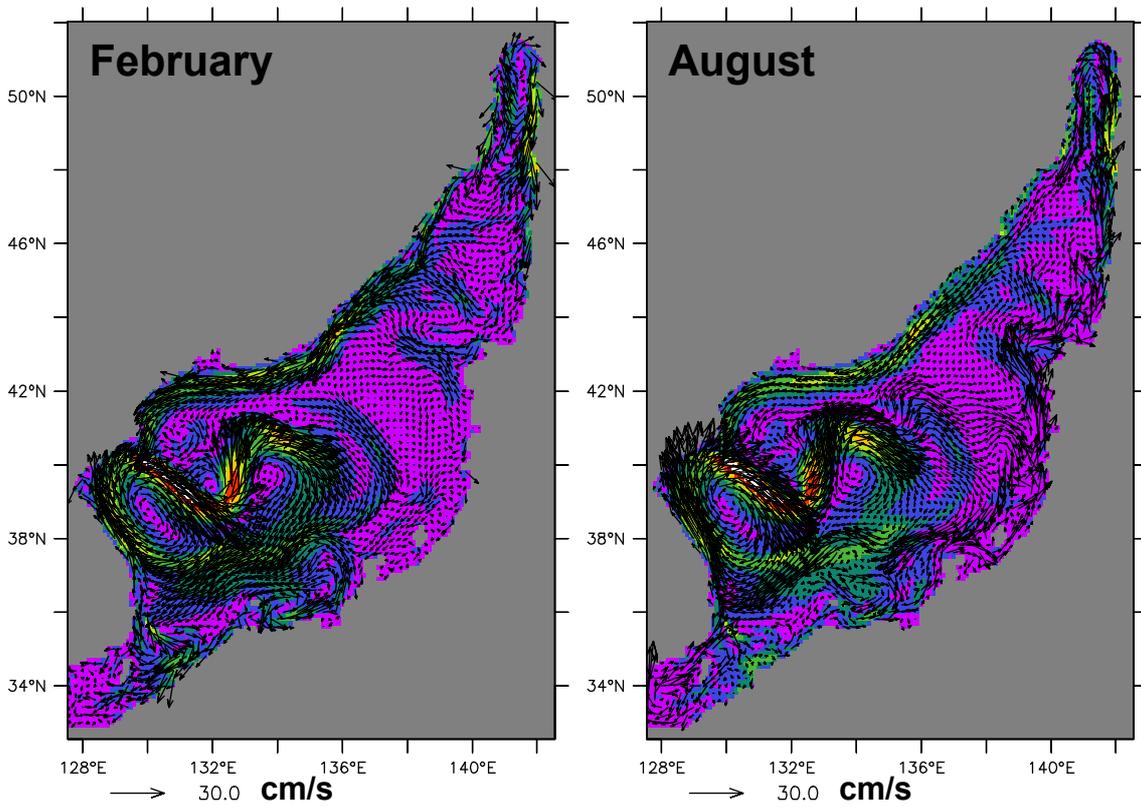


Figure. III-9. Sea Surface Current in the experiment NA\_CL\_R.

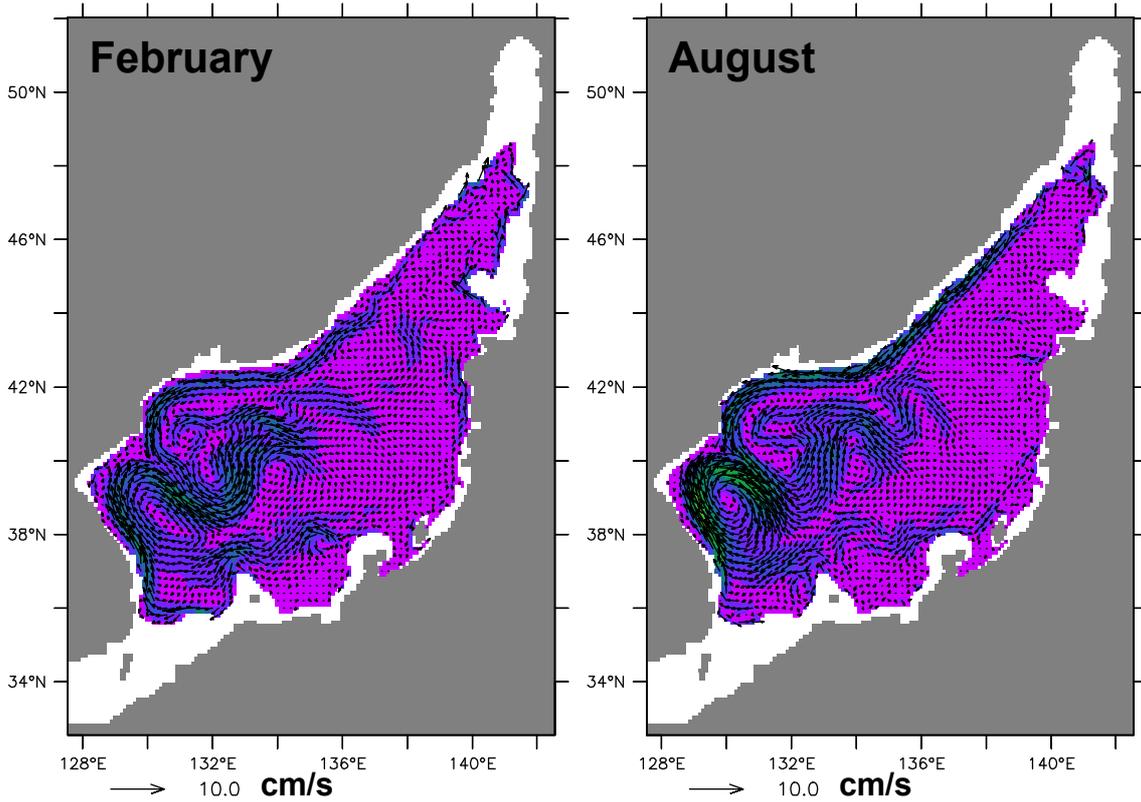


Figure. III-10. Sub-surface Current(300m) in the experiment NA\_CL\_R.

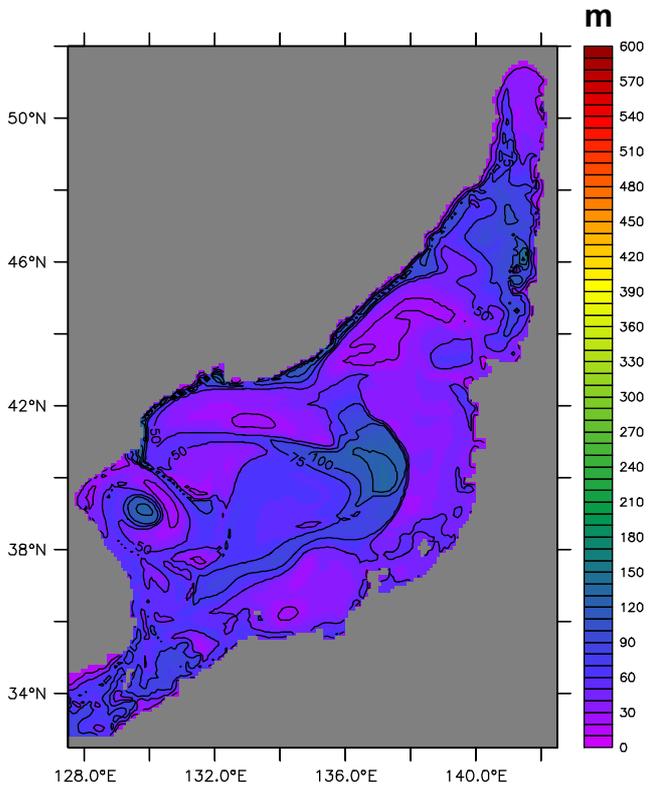


Figure. III-11. Mixed Layer Depth in February of the experiment NA\_CL\_R.

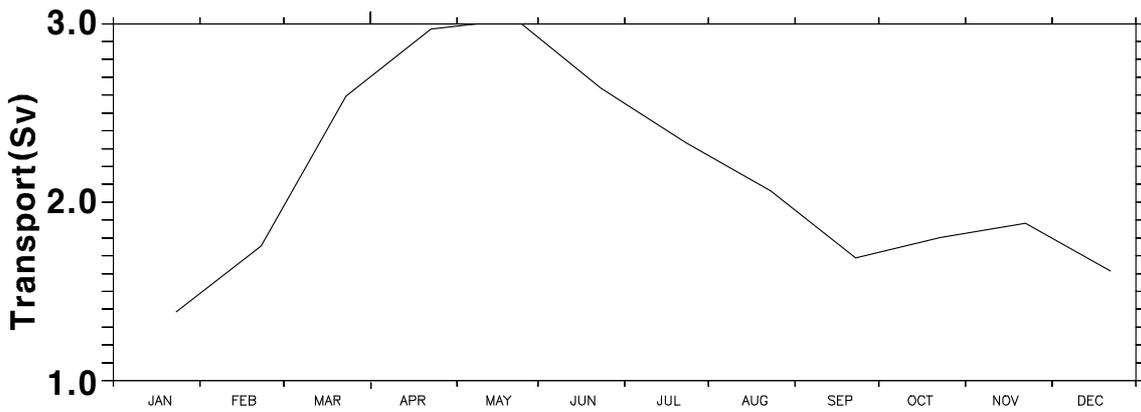


Figure. III-12a. Transport(Sv) across line E in the experiment NA\_CL\_R.

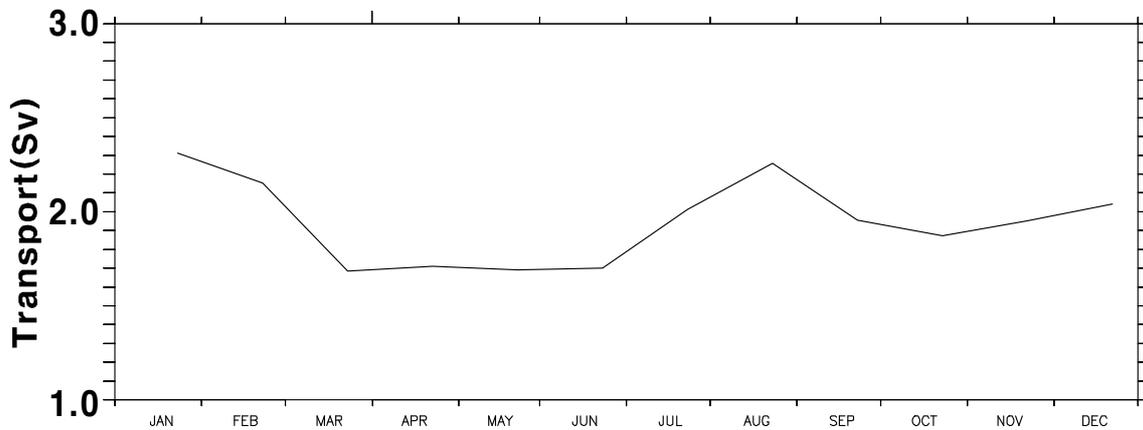


Figure. III-12b. Transport(Sv) across line L in the experiment NA\_CL\_R.

ii. ER\_CL\_R (ERA15, Restoring condition)

ERA15 바람에서는 겨울철에 블라디보스토크 앞에서 최대 양의 바람 응력 와도와 동한만에 서의 양의 바람 응력 와도가 뚜렷하게 나타난다. (Fig. III-5). 또한 두 양의 바람 응력 와도 사이에 강한 음의 바람 응력 와도가 존재하며 한국 동안 남쪽에도 음의 바람 응력 와도가 존재한다.

2월의 열속은 전반적으로 음의 값이지만 NA\_CL\_R의 결과에 비해 그 값이 작고 여름철에도 양의 값이지만 그 절대값은 작다(Fig. III-13).

ER\_CL\_R에서는 냉수역의 반시계 방향의 순환류는 잘 발달하지만 난수역의 동한난류는 매우 약하다. 동한 난류의 수송량은 봄철에 최대 약 2 Sv에서 가을철에 최소 약 0 Sv까지 계절 변동성을 하며 나바람에 관한 실험에서보다 수송량이 작다. 반면에 리만 한류의 수송량은 겨울철에 최대 3 Sv 그리고 가을철에 최소 2 Sv으로 나바람에 관한 실험에서보다 그 값이 증가하였다(Fig. III-18). 이것은 ERA15의 겨울철 바람에서 홋카이도 남서쪽에 존재하는 양의 바람 응력 와도에 의한 것으로 사료된다.

동한만에는 반시계 방향의 와류가 일년 중 존재하며 이것은 동한만에 위치한 양의 바람 응력 와도에 의한 것으로 사료된다. 남쪽으로부터 북상하는 동한 난류는 북위 약 38도에서 반시계 방향의 와류와 만나 이안하여 수온 극진선을 따라 동해 내부포 흐른다. NA\_CL\_R에서와는 달리 Nearshore Branch는 일년 중 일본 연안을 따라 북상한다(Fig. III-15).

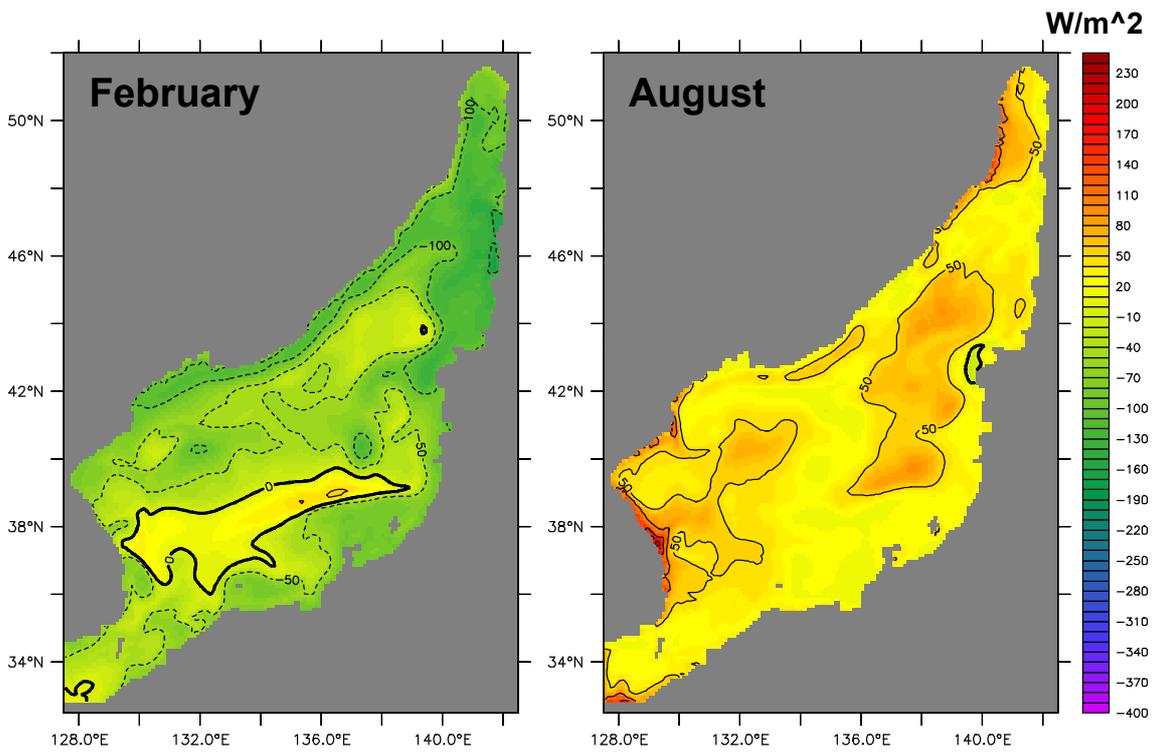


Figure. III-13. Heat flux ( $W/m^2$ ) from restoring condition to Levitus(1994) in the experiment ER\_CL\_R.

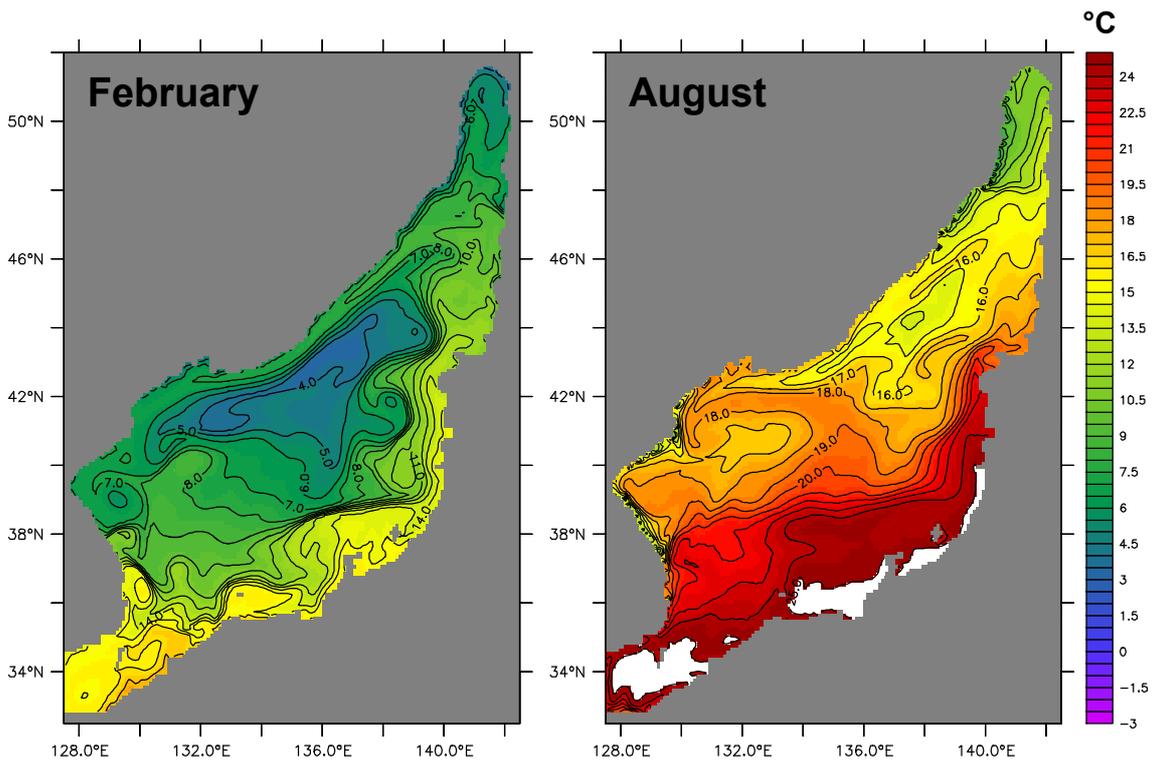


Figure. III-14. Sea Surface Temperature in the experiment ER\_CL\_R.

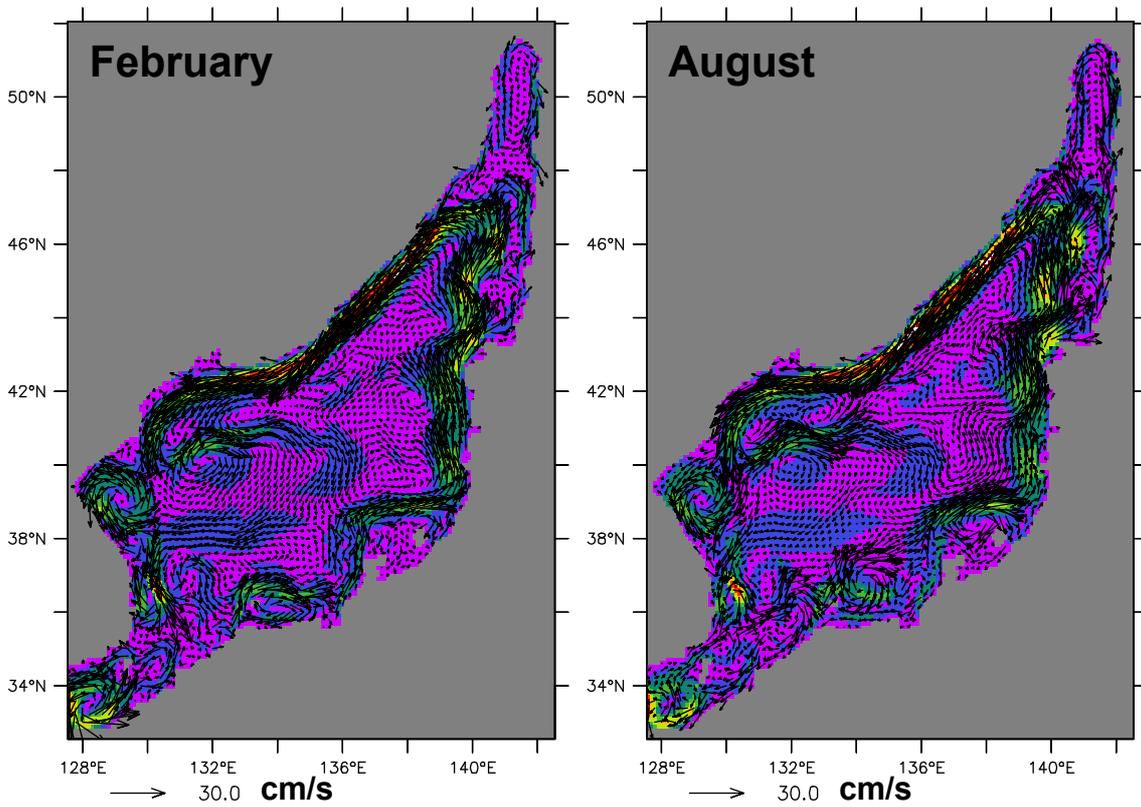


Figure. III-15. Sea Surface Current in the experiment ER\_CL\_R.

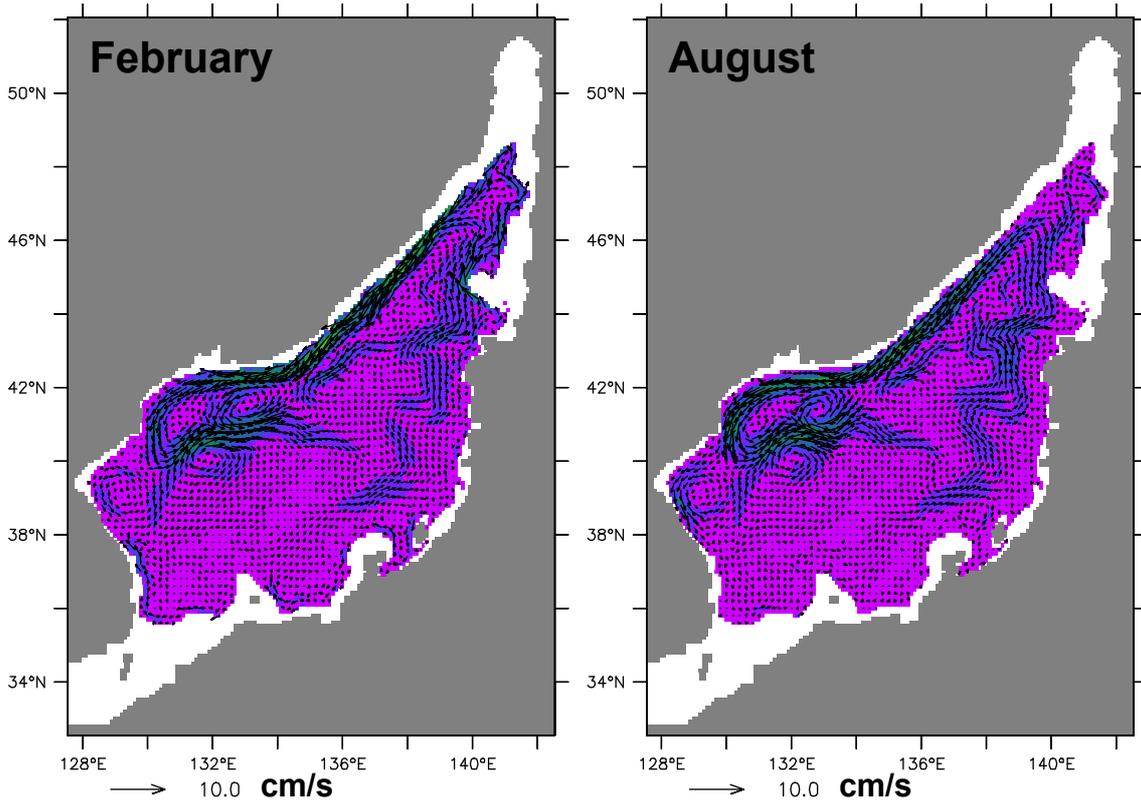


Figure. III-16. Sub-surface Current(300m) in the experiment ER\_CL\_R.

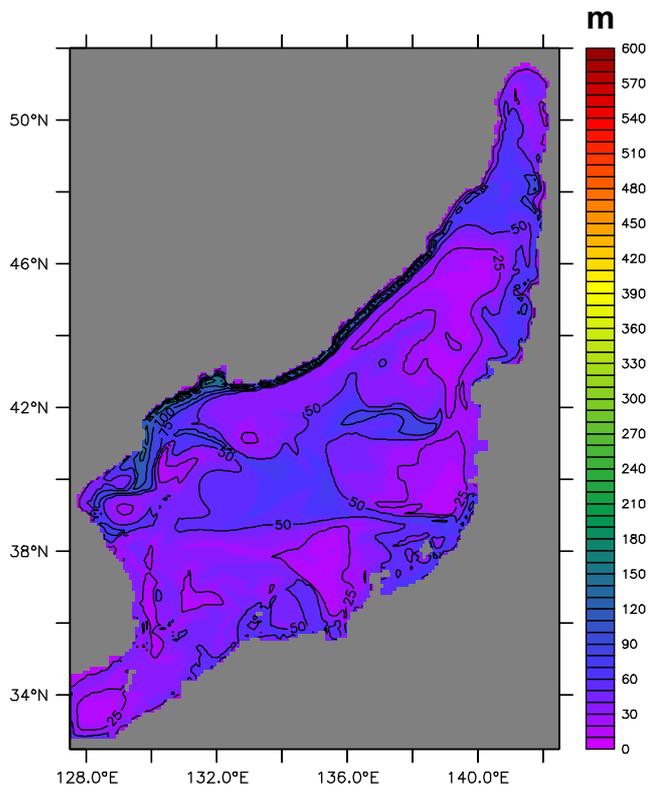


Figure. III-17. Mixed Layer Depth in February of the experiment ER\_CL\_R.

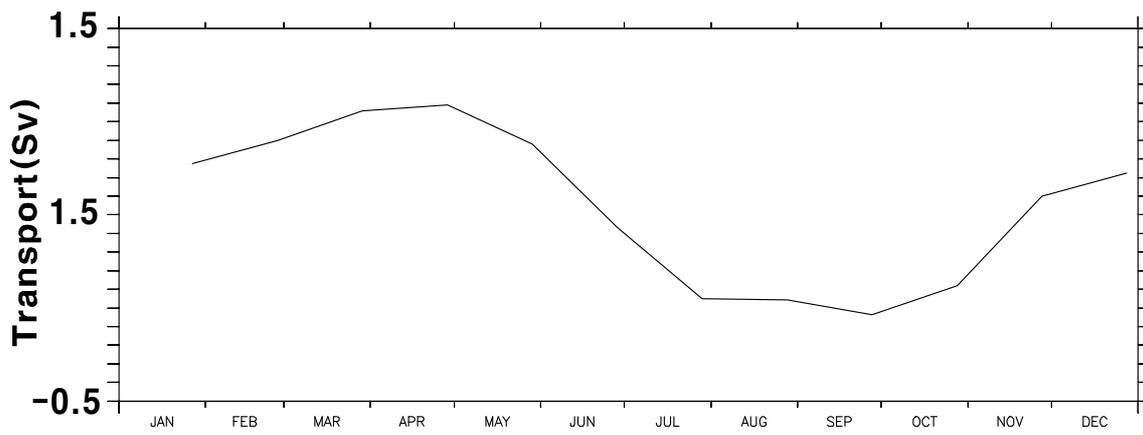


Figure. III-18a. Transport(Sv) across line E in the experiment ER\_CL\_R.

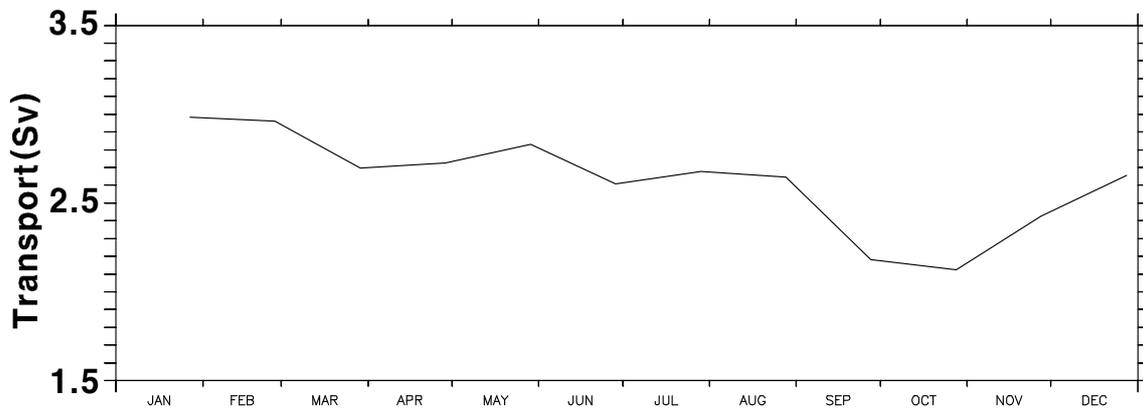


Figure. III-18b. Transport(Sv) across line L in the experiment ER\_CL\_R.

### iii. NA\_CL\_B (나바람, Bulk Formula)

전반적으로 NA\_CL\_R보다 겨울철에는 해양에서 대기로 보다 많은 열을 방출하고 여름철에는 보다 많은 양의 열을 흡수한다. 특히 겨울철에 동한만과 블라디보스토크 앞바다 그리고 Mamiya 해협 근해에서 열의 방출이 크다. 또한 겨울철 혼합층이 블라디보스토크 앞바다에서 600m 이상일 정도로 NA\_CL\_R에서보다 깊게 발달하고 있다(Fig. III-19, 23).

전반적인 해류의 방향은 비슷하지만 표층해류는 전반적으로 감소하였다. 수송량 또한 감소하여 리만 한류의 경우 최소 1.3 Sv, 최대 2.0 Sv 이며 동한 난류의 경우 최소 1.6 Sv에서 최대 2.8 Sv 이다(Fig. III-24). 그러나 수심 300m 해류는 오히려 증가하였는데 이것은 restoring 방안보다 bulk formula를 사용할 때 해양 혼합층이 잘 발달하기 때문인 것으로 보인다(Fig. III-21, 22).

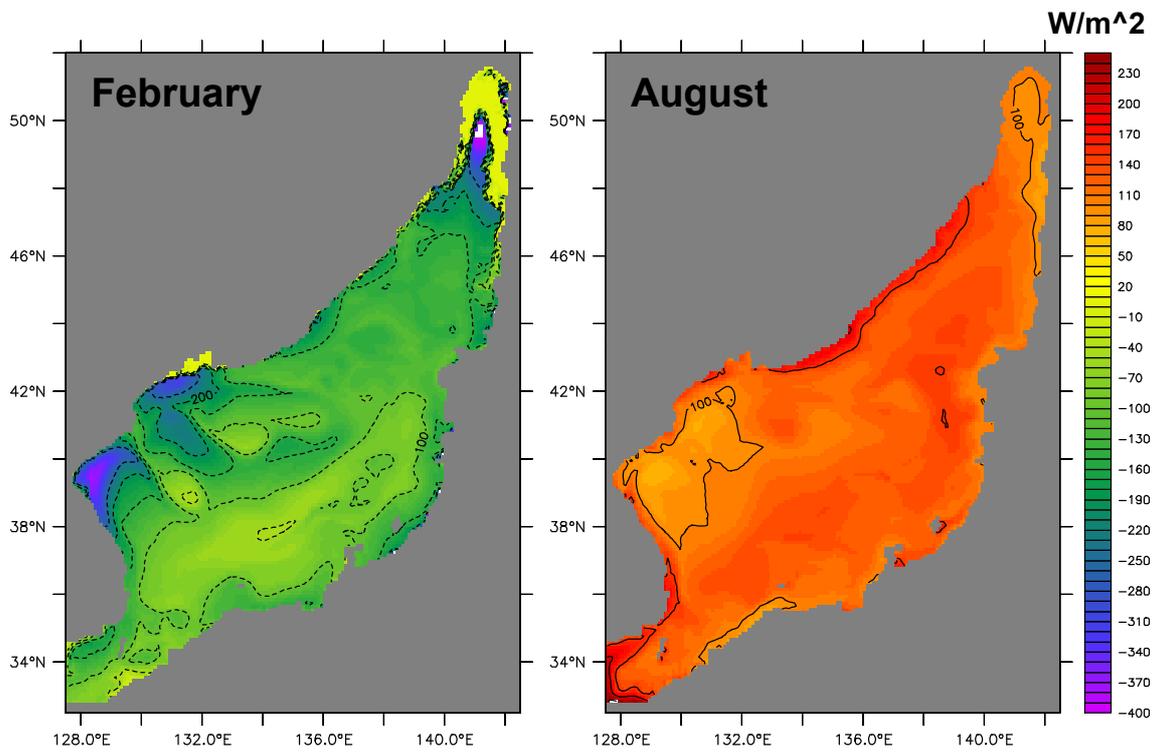


Figure. III-19. Heat flux ( $W/m^2$ ) from restoring condition to Levitus(1994) in the experiment NA\_CL\_B.

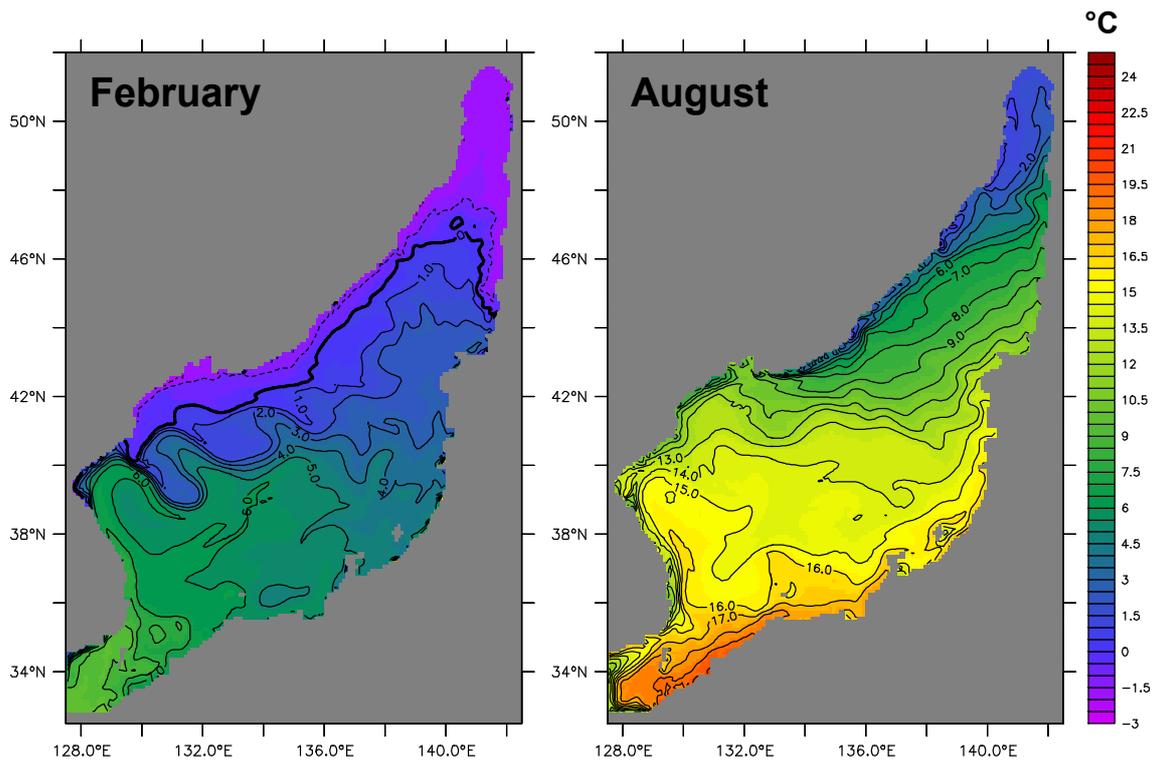


Figure. III-20. Sea Surface Temperature in the experiment NA\_CL\_B.

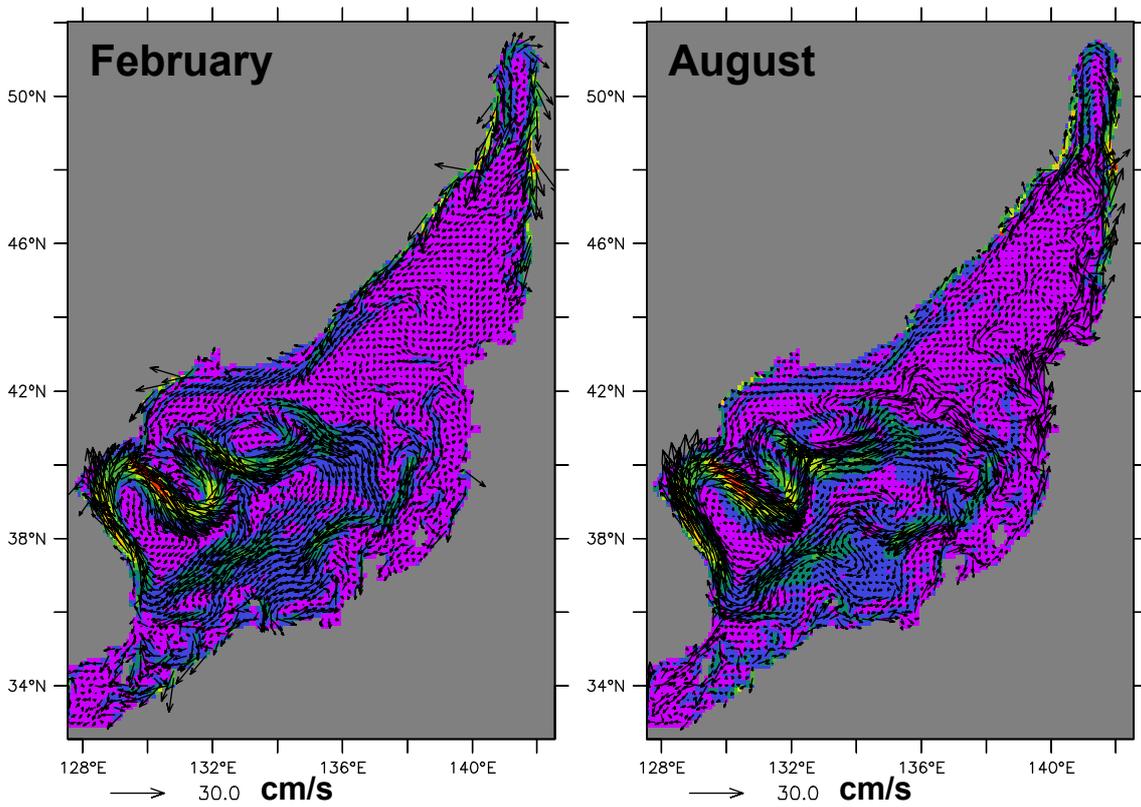


Figure. III-21. Sea Surface Current in the experiment NA\_CL\_B.

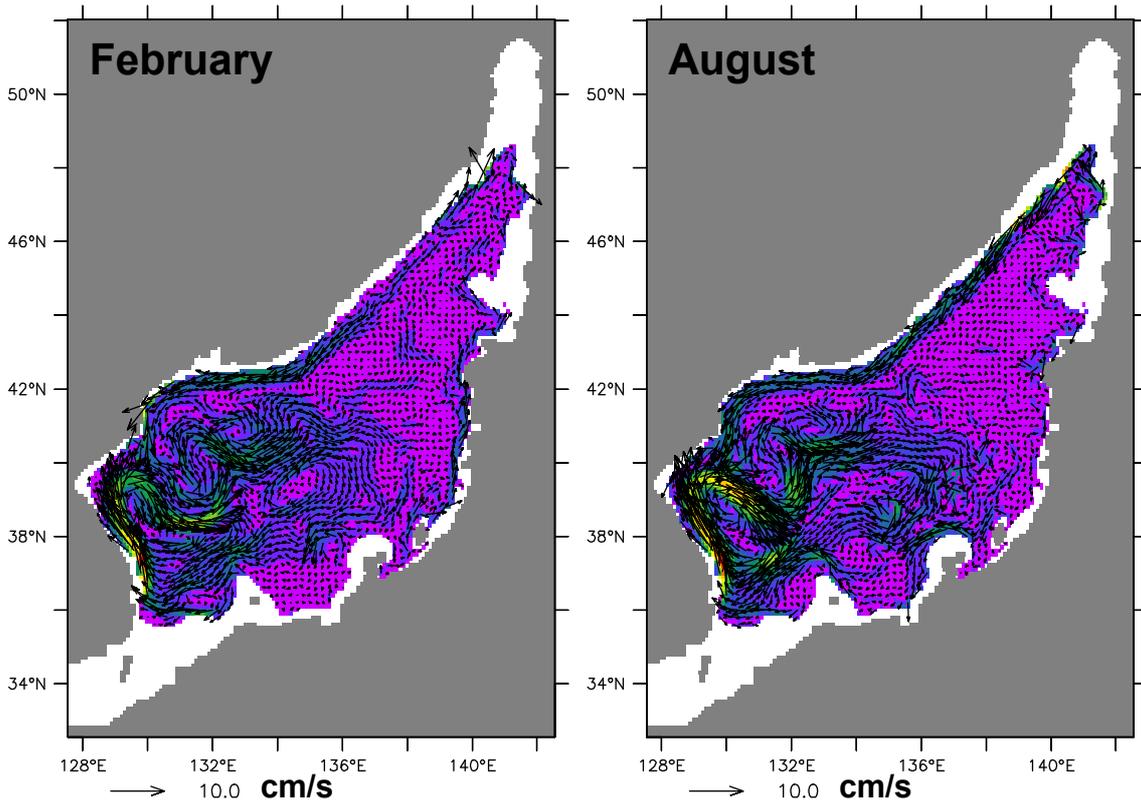


Figure. III-22. Sub-surface Current(300m) in the experiment NA\_CL\_B.

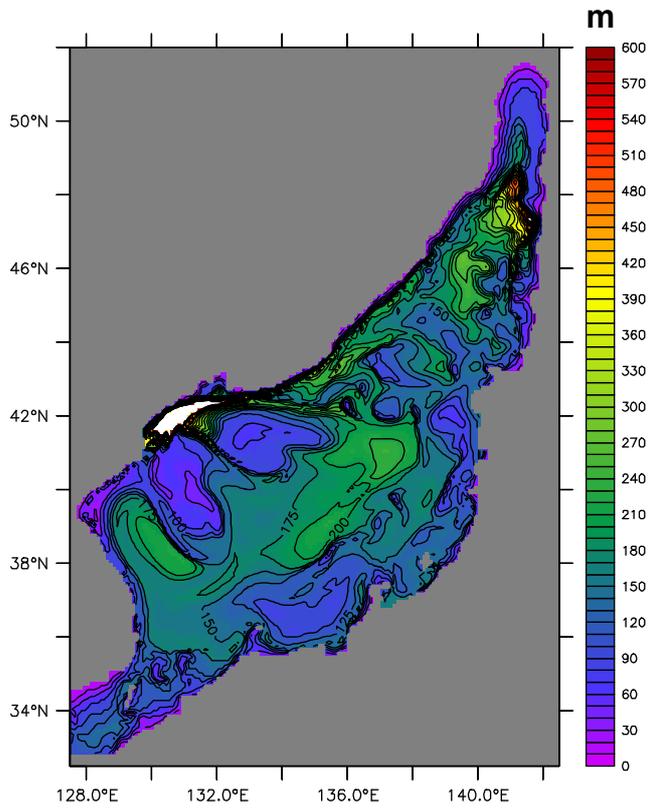


Figure. III-23. Mixed Layer Depth in February of the experiment NA\_CL\_B.

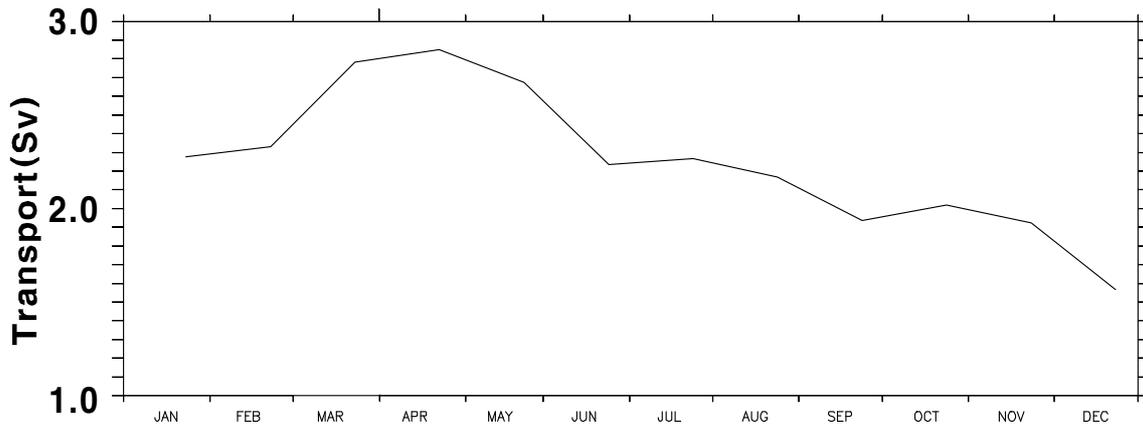


Figure. III-24a. Transport(Sv) across line E in the experiment NA\_CL\_B.

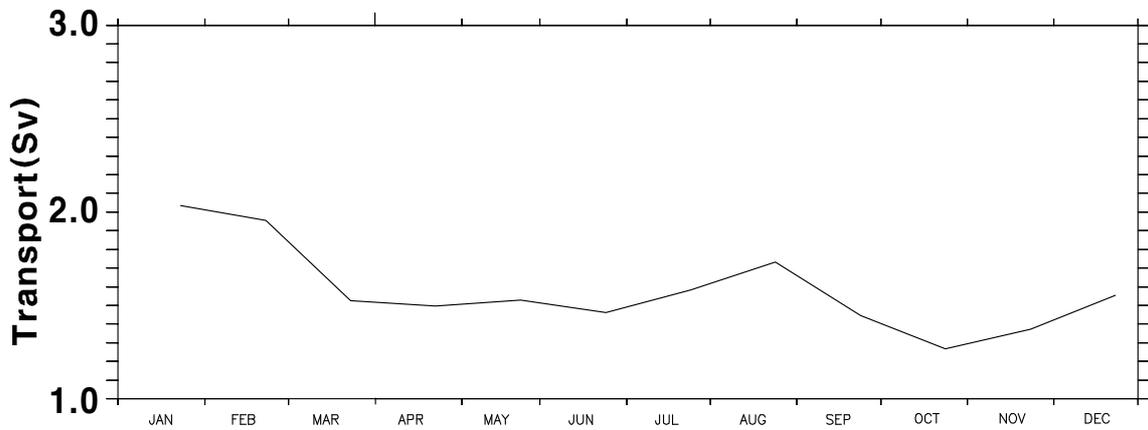


Figure. III-24b. Transport(Sv) across line L in the experiment NA\_CL\_B.

iv. ER\_CL\_B (ERA15, Bulk Formula)

나바람에 관한 실험에서와 마찬가지로 restoring 방안을 사용했을 때보다 겨울철에는 열의 방출이 그리고 여름철에는 열의 흡수가 증가했다. 해양 혼합층의 깊이 또한 전반적으로 깊어졌는데 블라디보스토크 앞바다와 동일본 분지 북쪽에서 가장 깊다. 표층 해류는 전반적으로 감소하였고 수송량 또한 감소하여 동한 난류의 경우 0.5에서 1.5 Sv 이며 리만 한류의 경우 1.6에서 2.5 Sv 이다. NA\_CL\_B에서와 마찬가지로 300m 수심에서 해류는 증가하였다.

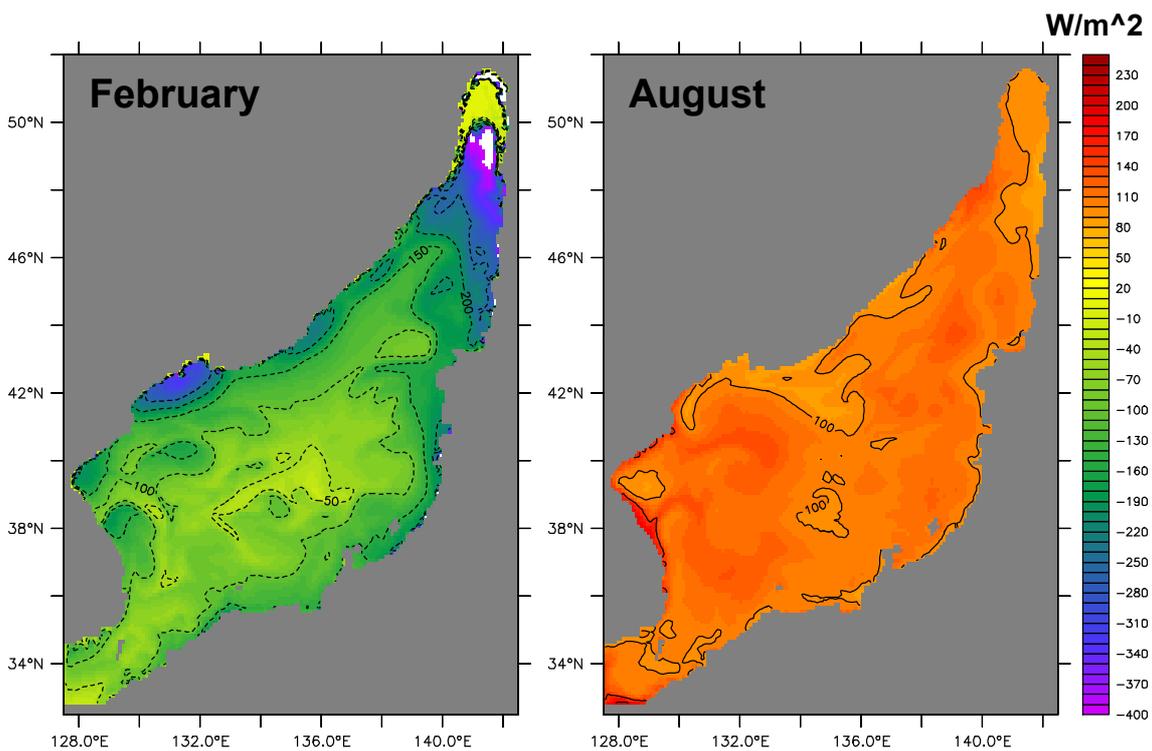


Figure. III-25. Heat flux ( $W/m^2$ ) from restoring condition to Levitus(1994) in the experiment ER\_CL\_B.

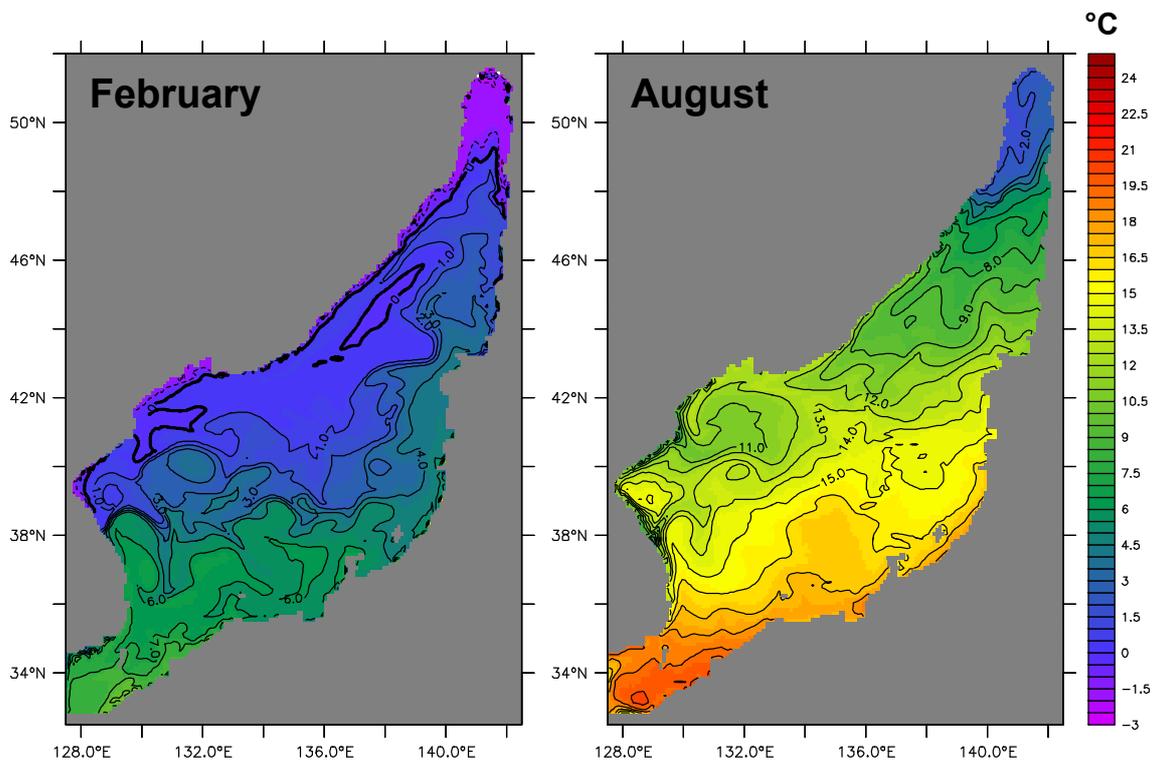


Figure. III-26. Sea Surface Temperature in the experiment ER\_CL\_B.

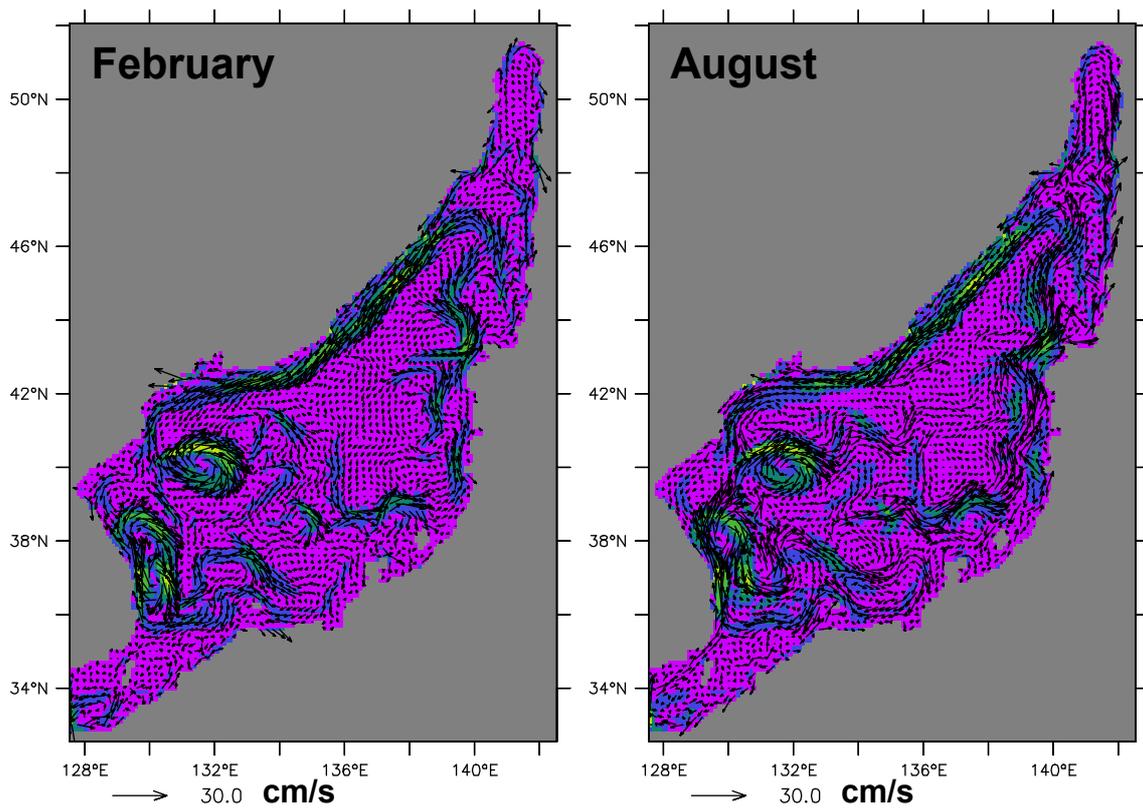


Figure. III-27. Sea Surface Current in the experiment ER\_CL\_B.

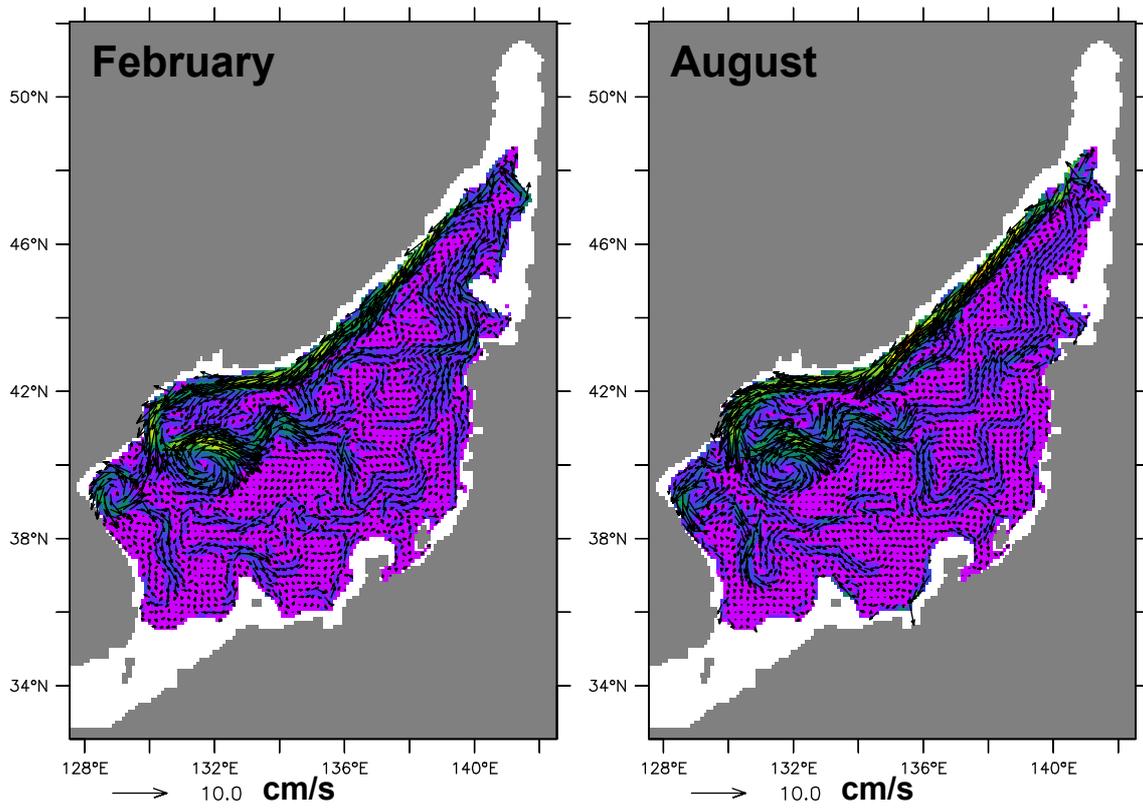


Figure. III-28. Sea Surface Current in the experiment ER\_CL\_B.

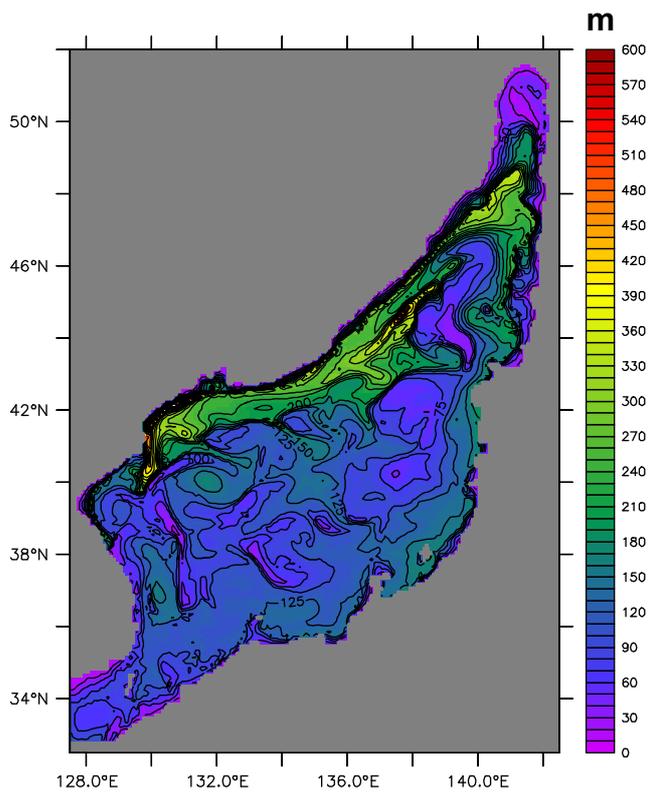


Figure. III-29. Mixed Layer Depth in February of the experiment ER\_CL\_B.

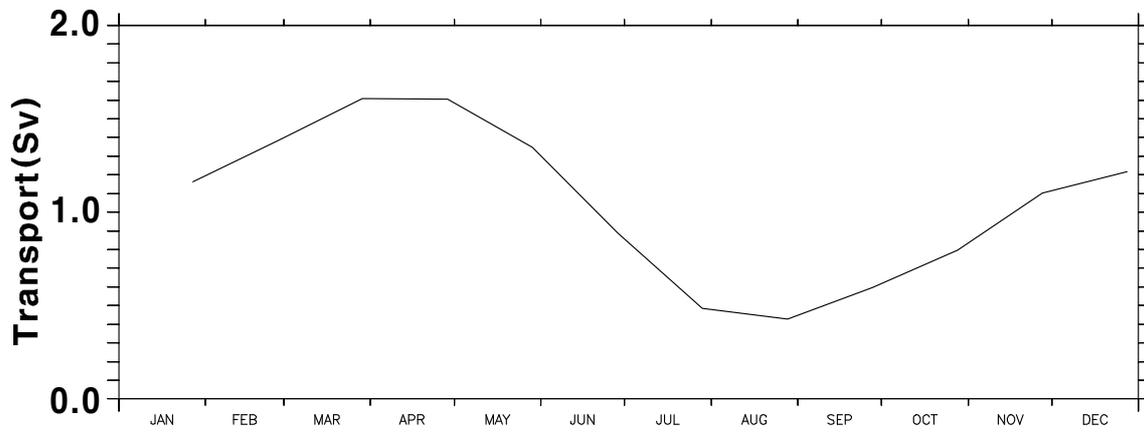


Figure. III-30a. Transport(Sv) across line E in the experiment ER\_CL\_B.

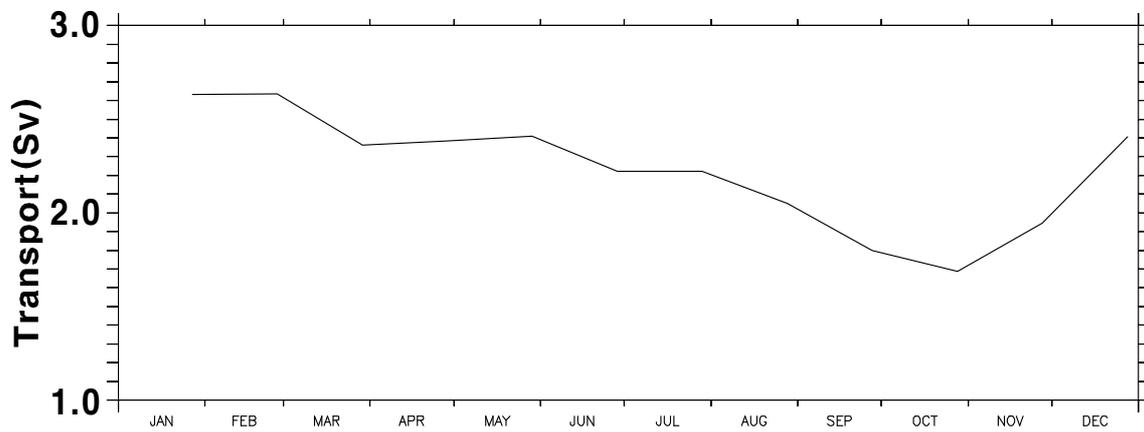


Figure. III-30b. Transport(Sv) across line L in the experiment ER\_CL\_B.

## 제 2 절 모델 결과 - Meridional Overturning

Yoshikawa et al.(1999)는 동해의 해류장 수온장의 실제 계절 변동을 모사하기 위해 Nudging 방안을 이용하여 수치모델을 수행하였다. 또한 동해의 Meridional Overturning을 계산하여 동해의 심층 순환을 보고자 하였다(Fig. III-31). 이 결과는 겨울철에 동해의 북쪽 경계에서 심층으로부터 해수가 용승하여 남쪽 경계에서 침강하는 것을 그리고 여름철에는 북쪽 경계에서 침강하고 남쪽 경계에서 용승하는 것을 나타낸다. 그는 이 결과에서 겨울철에 동해의 북쪽에서 심층수가 형성되어 심층 순환을 만들어낸다는 상식과는 맞지 않는 것을 지적하였으며 이를 근거로 동해의 심층 순환이 열속보다는 바람에 의한 것으로 생각했다. 그러나 본 연구의 결과 네 경우 모두 겨울철에 동해의 북쪽 경계에서 해수가 침강하여 남쪽 경계에서 용승하며 여름철에는 반대로 남쪽 경계에서 침강하여 북쪽 경계에서 용승하는 것을 나타낸다. 비록 네 실험 모두 각 해협에서 유입량을 고려하지 않은 결과이지만 동해의 심층수 순환이 바람이나 혹은 열속에 의한 것으로 생각해 볼 수 있을 때 이것은 Yoshikawa et al.(1999)의 결과와는 반대의 결과를 보여준다. 특히 Yoshikawa et al.(1999)의 수치 모델 실험에서 Nudging 항의 보정 계수를 시간 규모로 약 1년에서 3년으로 하였는데 이것이 심층 순환에 어떤 영향을 줄 것인지 그 해석에서 주의가 필요한 것으로 사료된다. 네 실험의 경우에서 나바람을 이용한 실험에서 Meridional Overturning이 보다 활발한 것으로 보인다. 이것은 Meridional Overturning이 주로 두가지에 의해서 즉 바람 응력과 열속에 의해서 일어나는 것을 고려할 때 나바람이 ERA15의 바람보다 바람 응력이 더 세기 때문인 것으로 사료된다. 또한 restoring 방안과 bulk formula를 이용한 실험을 비교해 보면 bulk formula를 이용한 실험에서 전반적으로 Meridional Overturning이 활발한 것을 알 수 있다. 특히 ER\_CL\_R에서 표층의 해수가 수심 500m 이상을 도달하지 못하지만 ER\_CL\_B에서는 겨울철에 수심 1000m까지 이르고 있다(Fig. III-32~35).

위의 결과를 종합해 볼 때 동해에서 Meridional Overturning은 바람에 의한 효과가 큰 것으로 보이지만 열속에 의한 효과 또한 무시할 수 없을 것으로 보인다.

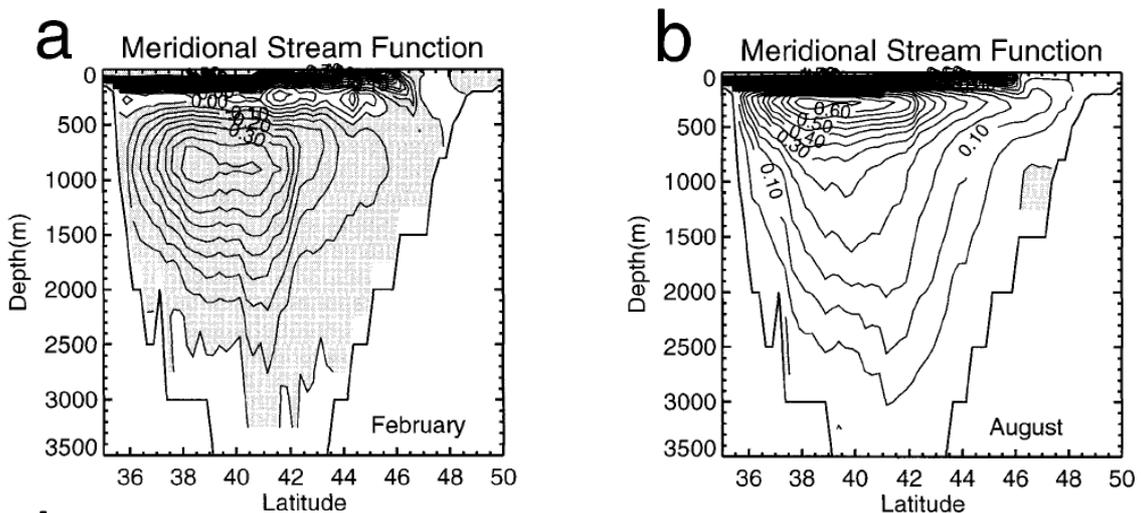


Figure. III-31. Meridional Overturning. (a) February, (b) August, after Yoshikawa et al. (1999).

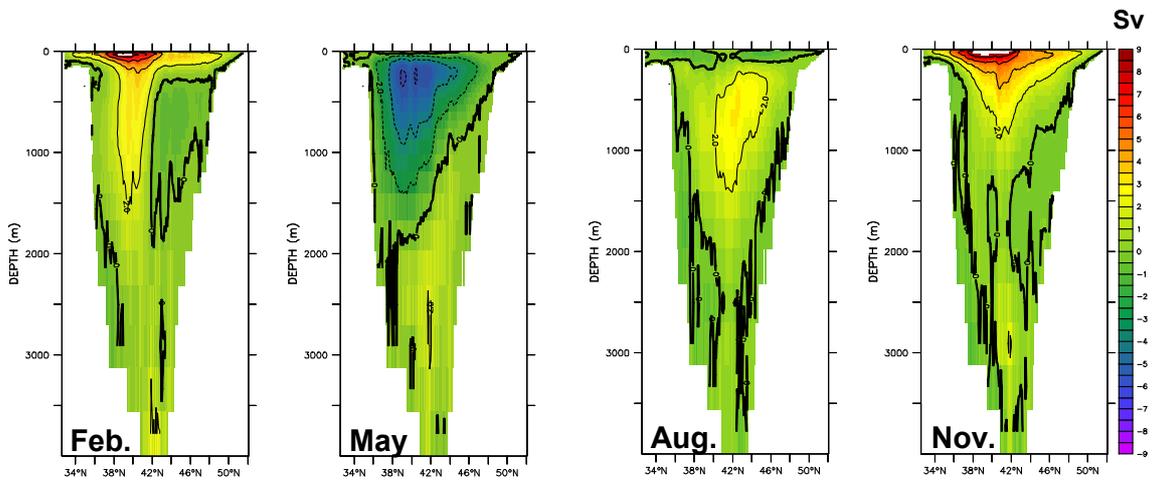


Figure. III-32. Meridional Overturning in the NA\_CL\_R.

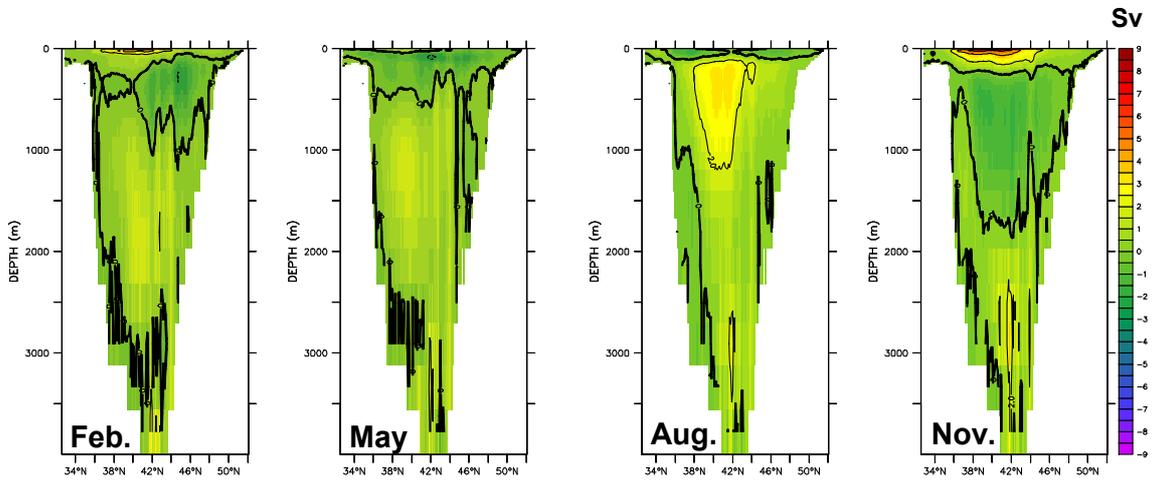


Figure. III-33. Meridional Overturning in the ER\_CL\_R.

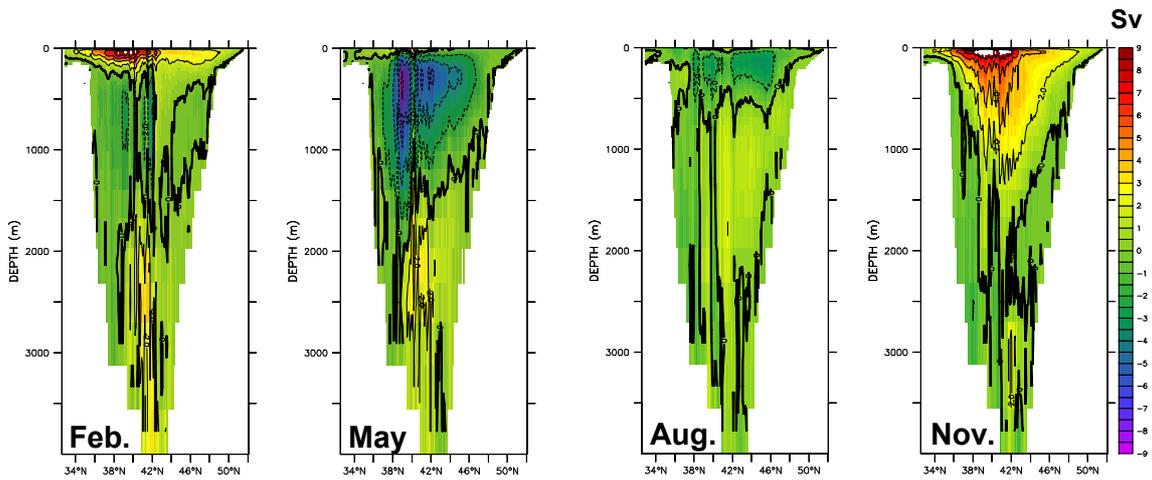


Figure. III-34. Meridional Overturning in the NA\_CL\_B.

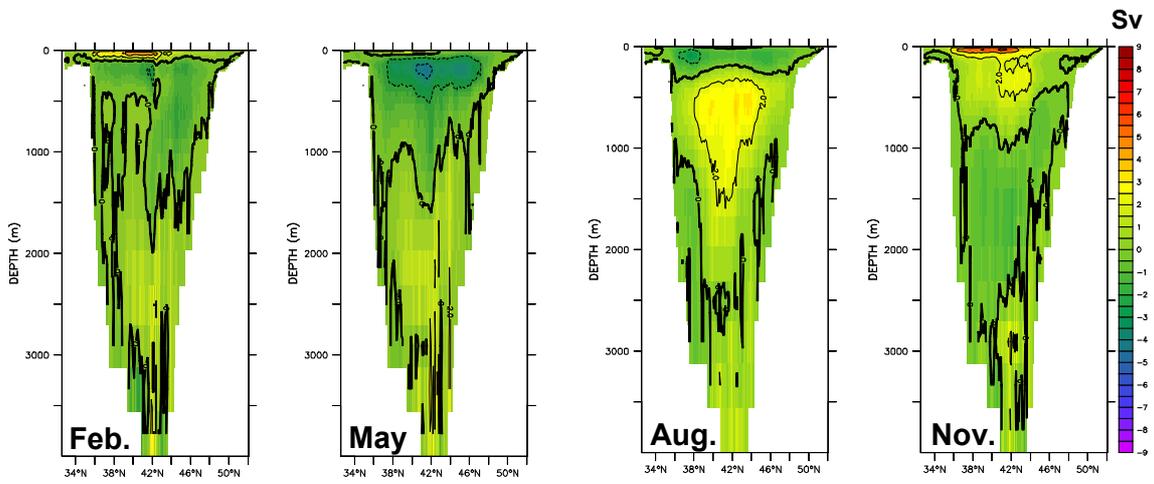


Figure. III-35. Meridional Overturning in the ER\_CL\_B.

### 제 3 절 개방경계조건 실험

서울대학교 해양순환계 연구실에서는 대한해협을 전압차를 이용해 대마 난류의 수송량을 실시간으로 관측하고 있다. 본 연구에서는 관측된 수송량 자료를 해양 모델에 입력하여 실험을 실시하였다(Fig. IV-1). 비록 계산량이 많아 초기장으로부터 8년을 계산하여 아직 모델이 평형 상태에 이르지 못하는 못했지만 대한해협으로 유입된 대마 난류가 동한 난류와 Nearshore Branch 로 분기되는 것을 확인할 수 있으며 동한 난류는 북위 약 38°N에서 이안하여 극전선을 따라 흐른다. 특히 수송량의 변동은 동해 내부의 중규모 와류를 만들며 동한만에 반시계 방향의 와류가 나타난다. 이것은 지금까지 모델을 이용한 연구에서 재현하지는 못했지만 인공위성으로 관측된 SST(해표면 온도)에서도 확인할 수 있듯이 동해에서 자주 관측되는 현상이다(Fig. IV-7). 또한 한국 동해안을 따라 남하하는 북한한류가 동한 난류 밑으로 침투하여 염분 최소층을 형성하며 남쪽으로 이류하는 것을 볼 수 있으며 기존의 관측 결과에서처럼 여름철에 그 세력이 강해지는 것으로 보인다(Fig. IV-3, 8). 북한한류의 남하는 300m 수심의 유속 벡터에서도 확인할 수 있다(Fig. IV-5). ER\_CL\_B에서는 북한한류가 나타나지 않았던 것을 생각할 때 이는 대마난류에서 분기한 동한난류와 연관되어 나타나는 현상으로 사료된다. ER\_CL\_B에서는 연중 존재했던 Nearshore Branch 는 본 실험에서는 겨울철에 그 세력이 많이 약해져 있고 여름철에는 더 강해졌다. 동한 난류는 대한해협을 통한 수송량에 크게 좌우되는 것으로 보인다. 동한난류의 수송량은 대한해협 수송량이 최대인 10월에 최대이며 약 2.1 Sv이고 1월에 최소가 된다. 대한해협 수송량은 또한 리만 한류에도 영향을 미치는 것으로 보인다. ER\_CL\_B에서 최대 2.6 Sv 이던 수송량이 개방 경계 조건 실험에서는 최대 1.8 Sv으로 그 세력이 약해졌으며 최대 수송량이 나타나는 시기도 겨울철에서 늦은 봄철로 변했다(IV-6).

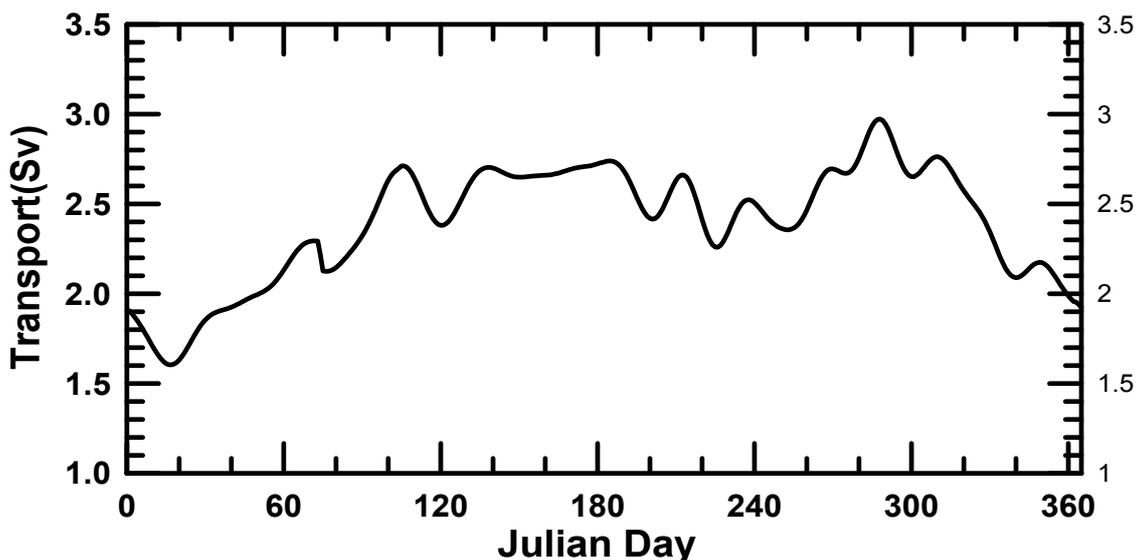


Figure. IV-1. Open boundary condition at the Korea Strait based monthly averaged from the observed tranport.

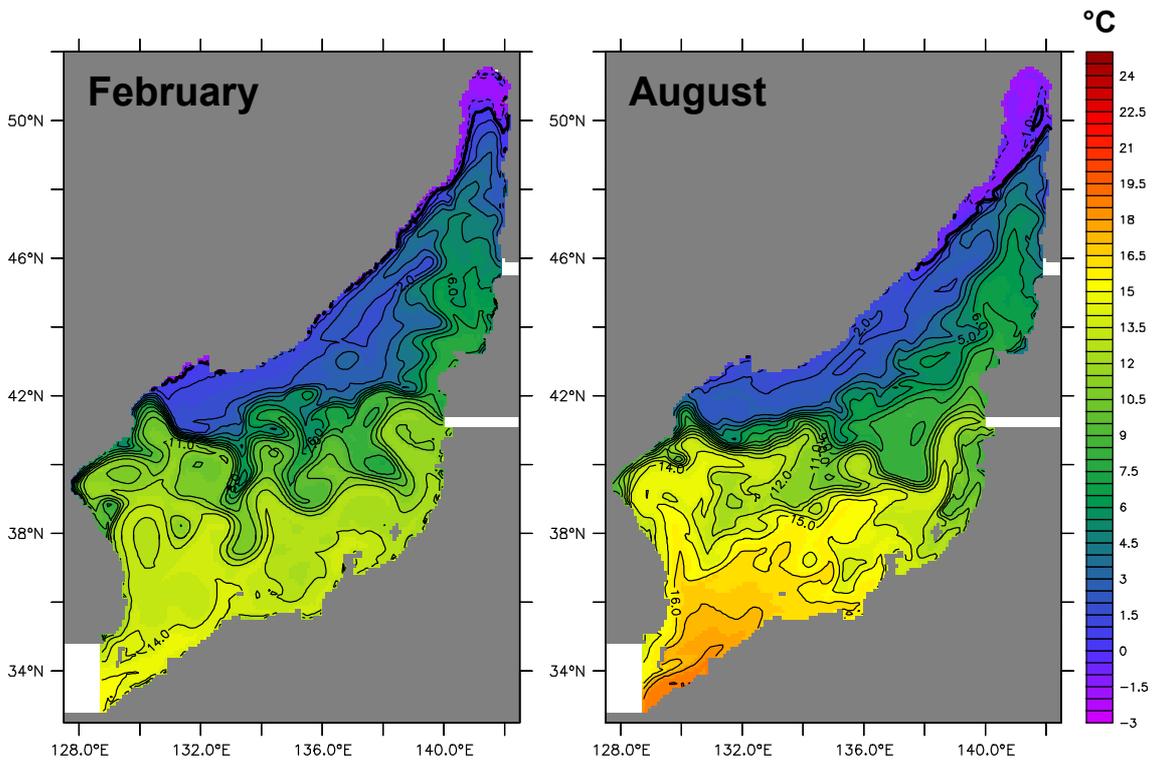


Figure. IV-2. Sea Surface Temperature in ER\_OB\_B.

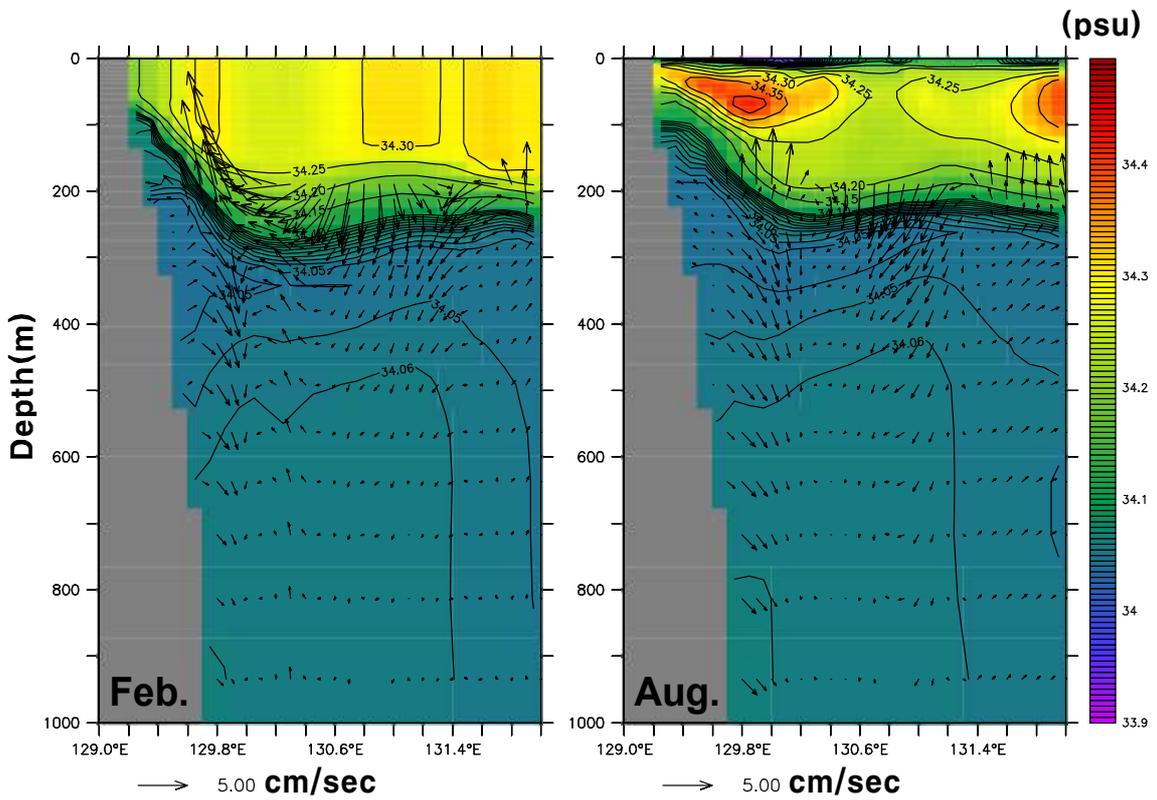


Figure. IV-3. Current and Salinity Section Map along 37.5°N in ER\_OB\_B

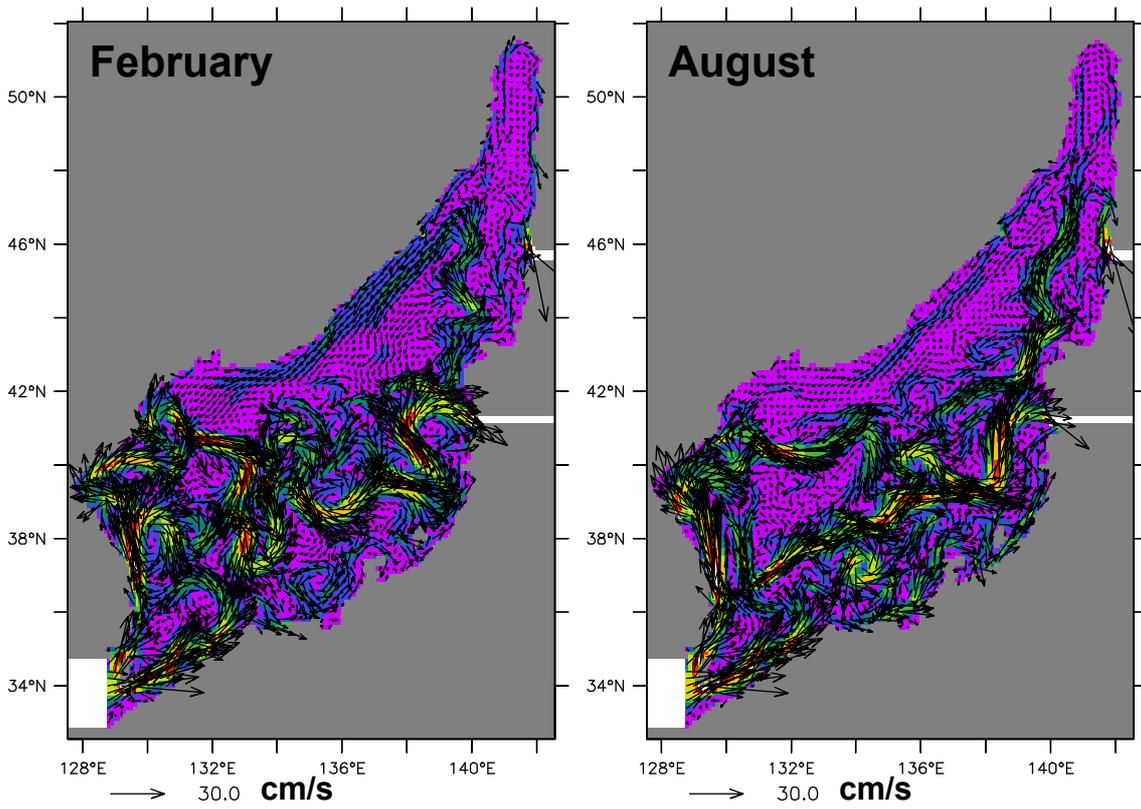


Figure. IV-4. Surface Current in ER\_OB\_B.

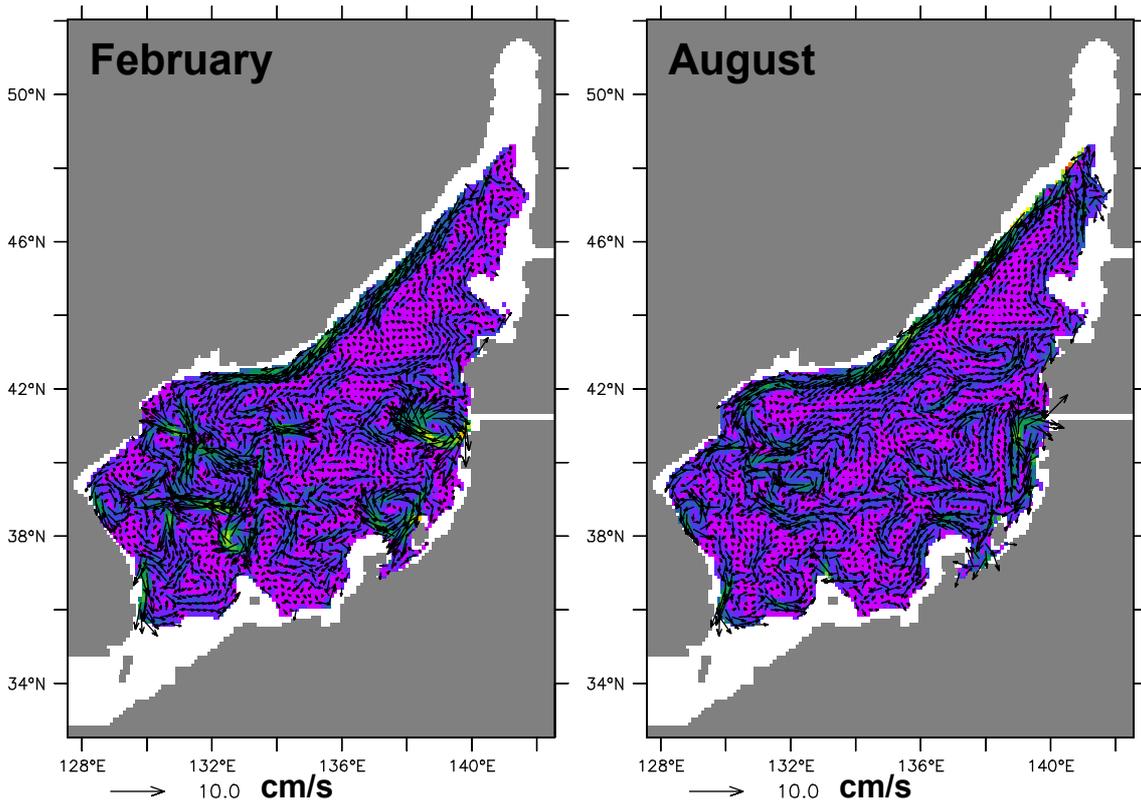


Figure. IV-5. Sub-surface(300m) Current in ER\_OB\_B.

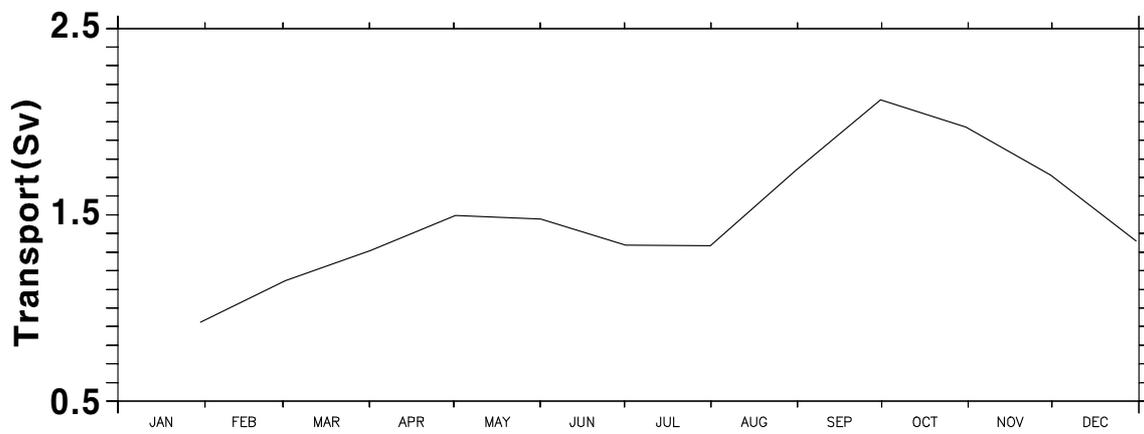


Figure. IV-6a. Transport across line E in ER\_OB\_R.

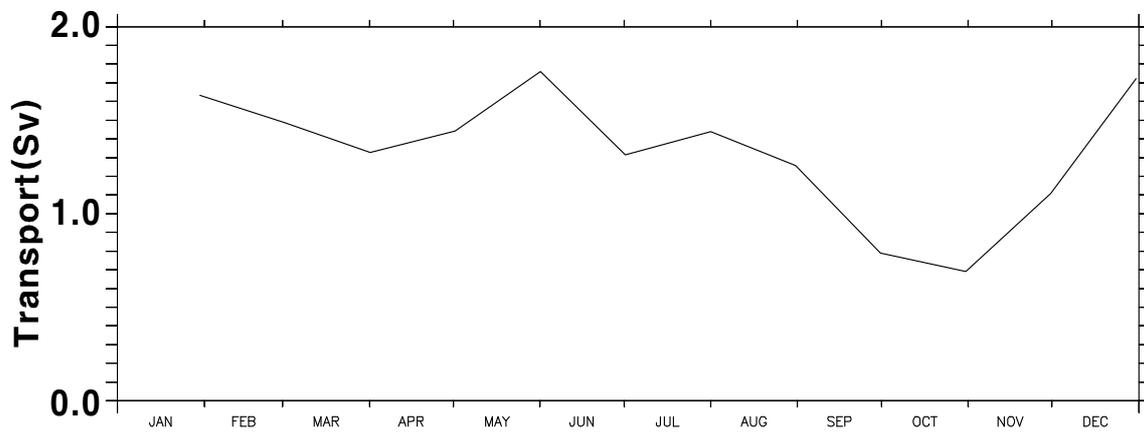


Figure. IV-6b. Transport across line L in ER\_OB\_R.

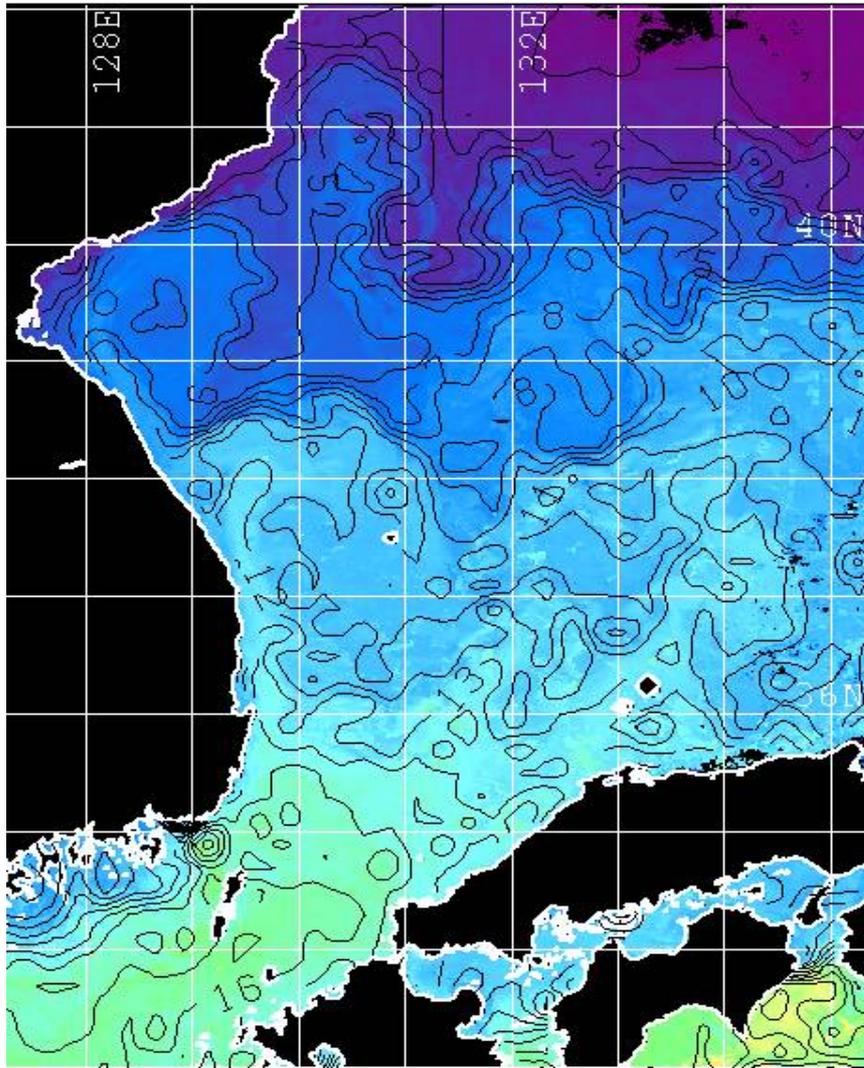


Figure. IV-7. Observed SST from AVHRR in March, 2001.

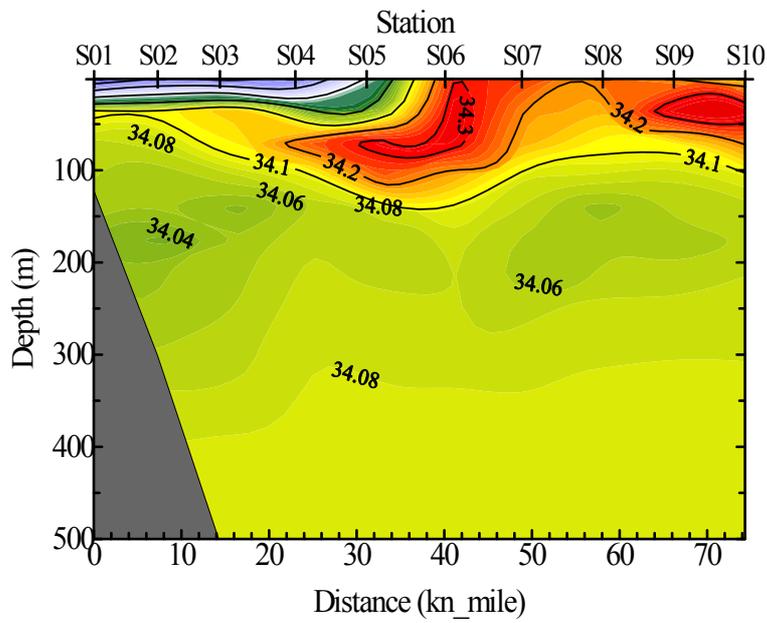


Figure. IV-8a. Vertical Section of Salinity in May, 2002.

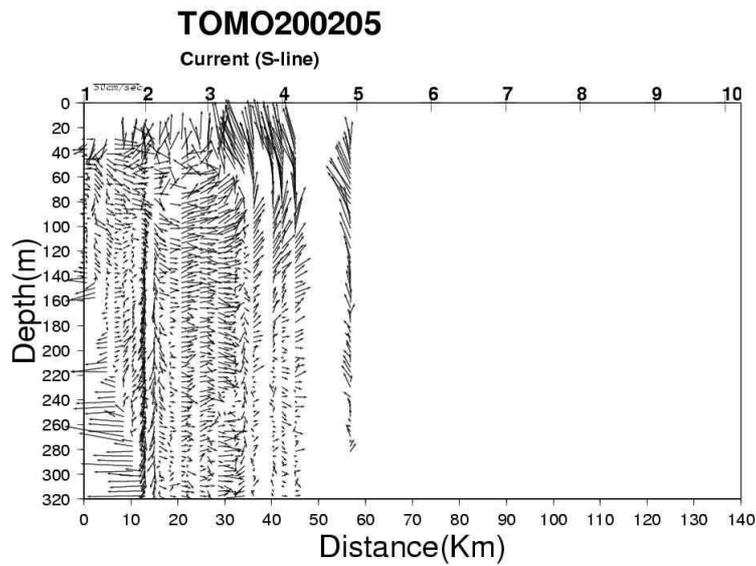


Figure. IV-8b. Vertical Section of velocity in May, 2002.

## 제 4 장 결론

동해의 표층과 중층 순환 그리고 Meridional Overturning에 미치는 영향들을 알아보기 위하여 닫힌 경계 조건 하에서 바람 응력 자료로 ERA15 바람과 나바람을 그리고 열속을 위하여 Restoring 방안과 Bulk Formula를 각각 적용하여 네 가지 실험을 실시하였다. 또한 개방 경계 조건이 동해 전체 순환에 미치는 영향을 고려하기 위하여 서울대학교 해양순환계 연구실에서 실시간 관측하고 있는 대한해협을 통한 수송량을 개방 경계 조건으로 이용하여 실험을 실시하였다. 이를 통하여 바람 응력과 열속이 동해에 미치는 영향을 구분해 볼 수 있으며 개방 경계 조건의 영향 또한 파악할 수 있었다.

동해 북부 냉수역의 반시계 방향의 순환은 주로 바람 응력에 의해서 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며 열속 조건이 Bulk Formula로 바뀔 때 따라 겨울철 해양에서 대기로의 열방출이 증가함에 따라 해표면혼합층의 깊이가 깊어지고 이에 따라 해표면 유속은 감소하는 반면 심층 유속은 증가함을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 개방 경계 조건은 북쪽 냉수역의 순환은 약화시켜 리만 한류의 수송량이 최대 2.6 Sv에서 1.8 Sv으로 감소하였고 최대의 수송량이 나타나는 시기도 바뀌었다.

닫힌 경계 조건의 네 시험 모두에서 Meridional Overturning을 계산하였으며 겨울철에 동해 북부에서 냉수가 침강하여 남쪽 경계에서 용승하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 바람 응력이 큰 나바람을 이용한 실험에서 Meridional Overturning이 활발하게 일어났으며 순환은 표층에서부터 2000m 이상의 수심에까지 이른다. 반면에 ERA15의 바람을 이용하고 열속을 위해 Restoring 조건을 적용한 실험(ER\_CL\_R)에서는 표층에서 시작된 순환이 수심 500m 이상까지 이르지 못하고 표층과 중층에만 그 순환이 제한된다. 그러나 열속을 위해 Bulk Formula를 적용한 실험(ER\_CL\_B)의 경우 표층에서 시작된 Meridional Overturning이 수심 1000m에까지 이르며 순환이 강해진다. 따라서 동해에서 바람 뿐 아니라 열속 또한 Meridional Overturning에 크게 영향을 미치는 것으로 보인다.

닫힌 경계 조건 실험에서는 북위 38°N 이하로 남하하지 못하던 북한한류 계수가 개방 경계 조건 실험에서는 동한 난류 아래 존재하며 염분 최소층에서 남향류가 존재하며 이것은 북한한류의 남하가 동한 난류와 연관되어 나타나는 현상임을 보여준다. 북한한류는 그 최소 염분값은 다르지만 연중 남하하는 해류로 나타나며 여름철에 다소 강화되는 것으로 보인다.

닫힌 경계 조건과 개방 경계 조건의 실험 중 ERA15의 바람을 가지고 수행했던 실험들에서 모두 일본 연안을 따라 북상하는 Nearshore Branch를 모사할 수 있었다. 그러나 닫힌 경계 조건 실험(ER\_CL\_R, ER\_CL\_B)에서 겨울철과 여름철의 세력이 비슷했던 반면에 개방 경계 조건 실험(ER\_OB\_B)에서는 겨울철보다는 여름철에 그 세력이 다소 강하다.

개방 경계 조건은 Nearshore Branch와 동한 난류에 직접적으로 영향을 줄 뿐 아니라 동해 북부역의 순환을 약화시키는 등 동해 전체 순환에 중요한 역할을 담당하는 것으로 보인다. 다만 실험이 평형 상태에 이르지 못하여 Meridional Overturning은 의미를 갖지 못해 이에 대한 영향은 파악할 수 없었다. 차후 적분 시간을 늘려 이에 대한 영향도 고려해 볼 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 나정열, 서장원, 한상규, 1992, 한국근해의 월평균 해상풍, *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, 27, 1-10.
- Auad, Guillermo, Arthur J. Miller, John O. Roads and Daniel Cayan, 2001, Pacific ocean wind stress and surface heat flux anomalies from NCEP reanalysis and observations: Cross-statistics and ocean model responses, 106, 22,249-22,265.
- Bryan, Kirk, Syukuro Manabe and Ronald C. Pacanowski, 1975, A global Ocean-Atmosphere climate model. Part II. The oceanic circulation, *Journal of Physical Oceanography*, 5, 30-46.
- Chu, Peter C., Jian Lan and Chenwu Fan, 2001, Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part II: A variational P-Vector method, *Journal of Physical Oceanography*, 31, 2886-2902.
- Haney, R. L., 1971, Surface thermal boundary condition for ocean circulation models, *Journal of Physical Oceanography*, 1, 241-248.
- Hellerman, S. and M. Rosenstein, 1983, Normal Monthly Stress over the World Ocean with Error Estimates. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1093-1104.
- Hirose, Naoki, Cheol-Ho Kim and Jong-Hwan Yoon, 1996, Heat budget in the Japan Sea, *Journal of Oceanography*, 52, 553-574.
- Kim, Y. H., 1999. Physical characteristics of the North Korean Cold Water and Currents off Jumunjin. M.S. thesis, Seoul National University, 90pp.
- Large, W. G. , J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994, Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. of Geophys*, 32, 363-403.
- Levitus, S., 1982, Climatological atlas of the world ocean. NOAA Prof. Pap. 13, 173 pp. U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- Min, H. S., 1994. A study on the variation of the bottom water temperature in the Korea Strait. M.S. thesis, Seoul National University, 53pp.
- Ou, Hsien-Wang, 2001, A model of buoyant throughflow : with application to branching of the Tsushima current, *Journal of Physical*

Oceanography, 31, 115-126.

Park, Young-Gyu, Kyung-Hee Oh, Kyung-Il Chang, and Moon-Sik Suk, 2004, East/Japan Sea estimated from autonomous isobaric Profiling and Intermediate level circulation of the southwestern part of the floats, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L13213

Pacanowski, R. C., and A. Gnanadesikan, 1998, Transient response in a z-level ocean model that resolves topography with partial-cells. *Monthly Weather Review* 126, No. 12, 3248-3270.

Redi, M. H., 1982, Oceanic isopycnal mixing by coordinate rotation. *Journal of Physical Oceanography*, 12, 1154-1158.

Senjyu, T., and H. Sudo, 1993, Water characteristics and circulation of the upper portion of the Japan Sea Proper Water, *J. Mar. Sys.*, 4, 349-362.

Teague, William J., 1990, A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies, *Journal of Geophysical Research*, 95, 7176-7183.

Thompson, J. Dana and W. J. Schmits, Jr., 1989, A Limited-Area Model of the Gulf Stream: Design, Initial Experiments, and Model-Data Intercomparison, *Journal of Physical Oceanography*, 19, 791-814

Yoshikawa Yutaka, Toshiyuki Awaji and Kazunori Akimoto, 1999, Formation and circulation processes of Intermediate Water in the Japan Sea, *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1701-1772.