

표 지

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p>BS PE 99 27 1 10 65 6 1</p> <p>한반도 주변해 지역기후 접합모형</p> <p>한국해양과학기술원</p> <p>↑ 7cm ↓</p> <p>↑ 5cm ↓</p> <div data-bbox="215 1368 450 1487" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"><p>주 의 (편집순서8)</p></div> <p>(16 포인트 고딕체)</p>		<p style="text-align: right;">BSPE99271-10656-1</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p> <p style="text-align: center;">한반도 주변해 지역기후 접합모형(RCCM) 수립</p> <p style="text-align: center;">Development of a Regional Climate Coupled Model for the Seas around Korea</p> <p style="text-align: center;">↑ 5cm ↓</p> <p style="text-align: center;">2014. 12. 31.</p> <p style="text-align: center;">한국해양과학기술원</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p>
--	--	---

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “한반도 주변해 지역기후 접합모형(RCCM) 수립”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 12.

총괄연구책임자 : 장찬주

참 여 연 구 원 : 김철호, 김경욱
김영호, 국종성
권민호, 신호정
김용선, 이동원
고철민, 정희석
오유리, 정춘용
김민우, 조영지
이승겸, 이지현
최원근

위탁연구기관명 :

위탁연구책임자 :

보고서 초록

과제고유 번호	BSPE99271 -10656-1	해당단계 연구기간	2012. 01. 01~ 2014. 12. 31	단계 구분	1 단계
연구사업명	중사업명	주요사업			
	세부사업명	기관 역량 강화 사업			
연구과제명	대과제명	한반도 주변해 지역기후 접합모형(RCCM) 수립			
	세부과제명				
연구책임자	장 찬 주	해당단계 참여연구원수	총 : 18 명 내부: 6 명 외부: 12 명	해당단계 연구비	정부: 649000 천원 기업: 천원 계 : 649000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 18 명 내부: 6 명 외부: 12 명	총 연구비	정부: 649000 천원 기업: 천원 계 : 649000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 물리연구본부		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수	111
<p>기후변화 적응대책 마련을 위해 미래 기후변화 상세정보에 대한 지방자치단체 및 산업체의 요구가 증대되고 있다. 고해상도 전지구 모델링은 계산 부담이 커서 현실적인 어려움이 따르므로 지역기후모형을 이용한 역학적 규모축소법의 활용이 늘고 있다. 그동안 역학적 규모축소법을 이용하여 우리나라 및 주변 영역의 미래 상세변화 전망에 관한 연구가 있어 왔으나 주로 대기 변화를 모사하는데 그쳤고, 우리나라 주변해역의 미래 상세변화 전망에 관한 연구는 매우 제한적이었다. 한반도 주변해의 미래상세변화를 전망하는 데는 해양과 대기의 상호작용을 적절히 모사하는 것이 중요하다.</p> <p>이 연구과제에서는 지역기후 해양-대기 접합모형을 수립하고, 수립된 접합모형을 이용하여 한반도 주변해역에 대한 미래 상세변화 전망을 시범적으로 제시하였다. 수립된 접합모형은 해양 성분모형 ROMS와 대기 성분모형 WRF로 구성되었고, 접합자 MCT를 이용하여 매 시간마다 양방향 변수 교환이 이뤄진다. 한반도 주변해를 포함하는 북서태평양 접합모형의 해양 성분모형은 동쪽으로는 쿠로시오 이안 위치를 고려하고 북쪽으로는 동해가 모두 포함되도록 위도 10°N~55°N, 경도 105°E~175°E로 설정하였고, 해상도는 수평으로는 1/12도(약 10km) 이며, 연직으로는 30개 층을 두었다. 이 해역에 대해 100년 스핀업 실험을 수행하였고, 수심 보정을 통해 대한해협과 쓰가루해협을 통과하는 수송량을 개선하였다. 접합모형의 대기 성분모형은 서쪽으로 편서풍 사행을 고려하여 티벳고원을 포함하고, 남쪽으로 강수관련 중규모 에디의 북향전파를 고려하여 저위도 강수대를 포함하며, 수평 해상도는 50km 이고 연직으로 27개 층을 두었다. 파장 1000km 이상의 장파에 대해 분광너징 기법을</p>					

적용함으로써 바람 장을 좀 더 현실적으로 개선하였다.

수립된 지역기후 접합모형을 이용한 미래변화 상세전망 실험은 유사지구온난화 방법을 이용하여 수행하였고, 미래기후 전망을 위해 CMIP5 전구모형 중에서 동아시아 몬순 기후 모사성능이 비교적 우수한 CanESM2의 Historical 및 RCP4.5 시나리오 모사자료를 이용하였다. 이 접합모형으로 역학적 규모축소를 통해 시범적으로 제시한 한반도 주변해 미래변화는 황해보다 동해에서 수온 증가가 클 것으로 전망되며, 이 결과는 지금까지 관측된 경향성과 일치한다.

이 과제를 통해 국내 최초로 수립한 지역기후 해양-대기 접합모형은 지속적인 개선이 필요함에도 불구하고 한반도 주변해 미래변화 상세전망 자료를 생산하는 데 활용될 수 있으며, 기후변화에 따른 한반도 연안기후 및 수산자원 전망 등에도 활용될 수 있다. 아울러, 이 과제를 통해 습득한 지역모형 접합기술은 앞으로 해양생태계 등 다양한 권역의 성분모형을 추가하여 지역기후 통합모형을 개발하는 데 유용하게 쓰일 것으로 사료된다.

색인어 (각 5개 이상)	한 글	지역기후접합모형, 역학적 규모축소, 기후변화, 북서태평양 순환, 한반도 주변해
	영 어	Regional climate coupled model, dynamical downscaling, climate change, Northwest Pacific circulation, seas around Korea

요 약 문

I. 제 목

한반도 주변해 지역기후 집합모형(RCCM) 수립

II. 연구개발의 목적 및 기대효과

1. 연구개발의 목적

한반도 주변해 지역기후 집합모형 수립 및 미래 상세변화 시범 제시

2. 연구개발의 필요성

○ 기술적 측면

- 기상청은 국가 기후변화 적응대책 마련을 위한 기후변화 시나리오 개발 사업 수행 후 IPCC(기후변화에 관한 정부간협의체) AR5(제5차 평가보고서)의 근간이 된 집합모형상호비교사업(CMIP5)에 전지구기후모형 HadGEM-AO로 자체 생산한 모사자료를 출품하였고, 또한 역학적 규모축소법을 이용하여 우리나라 주변 대기 미래 상세변화를 제시하고 한반도 기후변화 영향예측을 위한 국가표준 기후변화 시나리오 워크숍을 개최하였으며, 결과 정교화를 위해 지속적인 연구 사업을 추진 중이다. 그러나 우리나라 주변 해양 미래변화에 대한 시나리오는 해상도가 낮은 전지구 집합 모형에 근거하여 상세 시나리오를 제시하지 못한다.
- 전지구 미래기후변화에 대한 투자는 활발하나 한반도 주변해 미래변화 전망에 대한 연구는 다학제 및 다모형 종합연구로서 그동안 국내에서 연구 활동이 제한적이었다.
- 한반도 주변해 미래 변화 전망은 해양과 대기 상호작용을 적절히 모사하는 해양·대기 기후 집합모형을 구축하여 상세한 변화를 제시하여야 한다. 또한 지구 온난화에 따라 대기 화학 반응, 해양 생물 혹은 탄소 순환을 고려한 상호작용을 추가하는 추세이다.
- 여러 성분모형을 집합 시, 모형 간 주고받는 경계 값의 개수와 집합하려는 모형의 수가 늘어났고, 그에 따라 집합모형의 실행시간도 늘어났다. 해양-대기 집합모형은 각 성분모형을 단독으로 실행한 것보다 적분시간이 늘어

나며, 이것은 해양모형과 대기모형 간 로드 밸런스(load balance)가 맞지 않아 발생하는 문제이다. 따라서 집합 함수를 최적화하여, 집합모형의 실행시간을 줄이는 것이 필요하다.

- 개발한 집합모형은 다양한 해양과 기후 연구에 활용 가능하다.
- 기존에 개발된 집합모형을 사용하면, 모형이 개선되어도, 집합모형 개발자가 개선된 내용을 집합모형에 적용하고 공개할 때까지 기다려야한다. 그러므로 집합기술의 확보는 이러한 기술 종속성에서 벗어날 수 있으며, 성분모형의 버전 업그레이드 또는 연구원이 직접 수정한 성분모형을 적용한 집합모형을 사용할 수 있다.

○ 경제·산업적 측면

- 기후변화는 우리 실생활에 영향을 주는 실체이며, 지난 100년간 6대 도시 평균 기온 1.7℃, 43년간 해수면 8cm 상승하고 한대성 어종 어획량 급감했다.
- 신속한 기후변화 적응대책 마련이 필요하며, 금세기 말까지 800조원 이상의 기후변화 관련 비용이 들 것으로 예상된다. 따라서 사전대비와 시행착오 최소화로 비용절감을 도모할 필요가 있다.

○ 사회·문화적 측면

- 정확한 기후변화 영향 전망 및 분석에 근거하여 기후변화 영향 비용 대비 효과가 높은 과학적 정책근거 마련이 필요하며, 기후변화 취약계층 보호에 효과적인 적응대책 마련 근거 제시가 필요하다.
- 저탄소 녹색기본법 시행(2010.04.14.)으로 국가기후변화 적응대책(2011~2015) 수립이 법적제도화 되었다: 해양/수산업 분야 등 10개 분야에 대한 대책 마련이 필요하다.

○ 연구소 고유기능 발전과의 연관성

- 고유기능 중 “해양환경 및 기후변화에 관한 연구 기후변화 예측 및 대응”에 해당하며 한국해양과학기술원에서 집합모형을 자체적으로 개발할 수 있는 기술을 확보하여 다양한 기후연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 기대효과

○ 기술적 측면

- 한반도 주변해에서 발생하는 다양한 기후연구에 이 사업을 통해 개발된 집

합모형 활용 기대된다.

- 지역기후집합모델링에 대한 국제적 선도 및 우월성 확보
- 한반도 주변해 미래 변화 전망 불확실성 평가에 기여.

○ 경제 산업적 측면

- 북태평양해양과학기구(PICES) 연례총회 등에서 지역해 미래변화 전망에 대한 선도적 역할을 기대하며. 특히 동해에 대한 미래변화 전망 제시로 동해 명칭에 대한 국제적 의사소통 및 발언 기회를 확대한다.
- 장기적으로 한반도 주변해 기후 및 미래변화 전망 제시로 해양/수산 분야 기후변화 대책 근거를 마련하여 사전대비를 통한 시행착오 최소화로 비용 절감 도모한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간

2012년 1월 1일 - 2014년 12월 31일

2. 연구개발의 내용 및 범위

○ 성분모형 수립 및 집합모형 초기 수립

- 해양/대기 성분모형 수립 및 집합모형 초기 수립

○ 지역기후 집합모형 수립

- 지역기후 집합모형 수립

○ 한반도 주변해 미래 상세 변화도 제시

- 유사지구온난화 역학적 규모축소법을 적용하여 미래 전망자료 생성
- 한반도 주변해 미래 상세 변화 시범 제시

Ⅳ. 연구개발결과

표 1 연차별 과제 이행도



제 1 절 지역기후집합모형 수립

1. 해양/대기 성분모형 수립

- 집합모형의 해양 성분모형으로는 지역해 순환모델링에 널리 사용되는 ROMS(Regional Ocean Modeling System)를 이용하였고, 연직 난류혼합과정에는 K-프로파일 모수화(KPP) 방안을 설정하였다.
- 동해 집합모형 수립을 위해 해양모형의 수평 영역은 위도 33°N~52°N, 경도 127°E~142°E로 설정하였고, 해상도는 수평으로 1/6도(약 20km) 간격을 두고 연직으로 30개 층을 두었다. 이 해역에 대해 10년 스피업 실험을 수행하였는데, 적분 후 약 5년 이후부터 해수면 고도와 전 영역의 수온이 일정하게 유지되면서 안정화되었다.
- 북서태평양 집합모형 수립을 위해 해양모형의 수평 영역은 위도 10°N~55°N, 경도 105°E~175°E로 설정하였고, 해상도는 수평으로 1/12도(약 10km) 간격을 두고 연직으로 30개 층을 두었다. 이 해역에 대해 100년 스피업 실험을 수행하였다.
- 북서태평양 해양모형에서 대한해협과 쓰가루해협 수송량이 관측에 비해 작게 나타나는 것을 개선하였다. 상세지형자료인 ETOPO1을 좀 더 안정적

인 ETOPO5로 대체하고 쓰가루해협 수심을 관측값에 가깝도록 보정한 결과 대한해협 수송량이 증가하였다.

- 북태평양 해양모형은 20°S~65°N까지 해빙 영역을 제외하였고 100°E~80°W로 설정하였다. 이로써 동해-북서태평양-북태평양에 대한 3단계 동지격자체계를 수립하였다. 그러나 동해 모형은 영역이 너무 작아서 생기는 문제점들이 발견되었고 북태평양 모형은 세밀한 지역모형 격자로 적분을 수행하는데 계산 부담이 가중되었다. 이에, 접합모형 실험은 북서태평양 해양모형을 활용하여 미래변화 상세도를 시범적으로 제시하는데 초점을 두었다.
- 접합모형의 대기 성분모형으로는 지역 기상 모델링 및 수치예보에 널리 사용되는 WRF(Weather Research and Forecasting model)를 이용하였다. 적운 물리과정에는 Kain-Fritsch 방안을 설정하였다.
- 대기모형의 초기 및 경계조건으로 NCEP/DOE(National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 재분석 전구자료를 이용하여 동아시아 영역에 대해 역학적 규모축소를 실시한 결과, 관측 및 재분석 자료에서 보이는 여름철 남풍 계열의 바람이 북풍 계열로 나타남을 확인하였다.
- 이러한 오차를 제거하기 위해 분광너징(spectral nudging) 기법을 적용한 결과, 여름철 남풍 계열 바람의 방향과 크기가 모두 개선되었다. 분광너징은 영역을 제한하는 지역모형에서 전지구 규모로 형성되는 장파의 영향을 제대로 모사할 수 없으므로 전구 자료 값으로 복원시켜주는 방법으로서 대기 지역기후 모델링에 널리 활용된다. 이 사업을 통해 수립된 접합모형에서는 수평 바람, 기온 및 지위 고도를 1000km 이상 장파에 대해 약 500hPa부터 모형 상단(50hPa)까지 1시간 단위로 복원시켜준다.

2. 접합모형 수립

- 접합모형은 대기모형 WRF에 의해 모사된 10m 바람, 지표 기압, 습도, 기온 등을 바람응력과 열속으로 계산하여 접합자 MCT(Model Coupling Toolkit)를 통해 해양모형 ROMS로 전달하도록 구성하였고, 해양모형은 해면온도를 대기모형으로 전달하도록 구성하였다. MCT를 이용한 양방향 자료교환은 1시간 간격으로 이뤄지도록 하였다.
- 접합자 MCT 코드를 최적화함으로써 접합모델링 적분 시간을 단축시켰다.
- 접합모형의 대기 성분모형인 WRF를 3.1에서 3.4 최신 버전으로 갱신하였다.
- 북서태평양 접합모형의 영역은 기존 동해 모형에서 해양/대기 영역을 서쪽으로는 편서풍의 사행을 고려하고, 남쪽으로는 강수관련 중규모 에디, 동

쪽으로는 쿠로시오 이안 위치 그리고 북쪽의 해빙을 고려하여 영역을 설정하고 해양은 10km, 대기는 50km로 해상도를 설정하였다.

제 2 절 미래변화 상세도 시범 제시

1. 접합모형 초기 실험 및 성능 검증

- 초기 수립한 접합모형으로 태풍 가상 실험을 통해 성능을 검증하였다. 접합모형의 가상 실험은 태풍이 외해에서 연안 근처로 상륙한다는 가정하에 상층 해양의 반응을 살펴 본 것이다. 태풍의 저기압성 바람에 의해 발생하는 연직혼합과 용승효과로 상층해양 냉각이 발생하고, 상대적으로 태풍 진로 우측에서 강한 해면수온 냉각이 발생하였다.
- 동해 접합모형을 이용하여 2000년부터 2004년까지의 기간에 대해 적분을 수행하였는데, 적분 기간이 길어질수록 관측에 가까운 결과를 보였다.
- 북서태평양 접합모형의 기후 모사성능을 검증하기 위해 미래변화 전망 실험에 사용한 CanESM2 전구 모사자료와 비교한 결과, 동해와 황해 해면수온의 공간패턴이 관측값(OISST)에 더 가까운 것을 확인하였다. 특히, 연안 내 상세변화를 비교적 잘 모사하였다.

2. 미래변화 상세도 시범 제시

- 미래변화 실험은 접합모델링을 시도하기 전에 우선적으로 대기단독모형과 해양단독모형으로 각각 수행되었다. 단독모형을 이용한 미래변화 실험은 접합모형으로 산출되는 미래변화에서 접합에 따른 효과를 배제하기 위한 것이다. 미래변화 전망을 위한 역학적 규모축소 실험에 유사지구온난화 방법을 이용하였다. 유사지구온난화 방법은 미래 전망 실험의 초기 및 경계조건으로 이용되는 전구 모형자료에 내포된 모형의 계통오차를 줄이고 실제 계산 부담을 줄이기 위한 역학적 규모축소법이다.
- 접합모형의 초기 및 경계 조건으로 현재기후에 대해서는 해양모형에 ECMWF-interim 재분석 자료를, 대기모형에 NCEP/DOE 재분석 자료를 사용하였고, 미래변화 전망을 위해서는 CMIP5 기후모형자료 중에서 CanESM2 모형자료를 사용하였다.
- 해양단독모형 미래변화 실험에서 한반도 주변해 해면수온은 겨울보다 여름에 더 크게 상승하였다.
- 대기단독모형 미래변화 실험에서 적도 태평양 지역의 강수가 과거에 비해 강해진 것과 중국과 일본의 남부를 포함한 북서태평양 일대의 강수가 과거에 비해 증가하며, 대규모 순환과 수분수송의 변화가 한반도를 포함한 동아

시아 지역의 강수 변화에 중요한 역할을 하였다.

- 집합모형 미래변화 실험 결과, 황해보다는 동해에서 지구온난화에 따라 해면수온 상승이 더 클 것으로 전망되었다. 이러한 경향성은 과거 관측 결과에 나타난 해면수온의 선형경향성과 일치하는 결과이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 이 과제를 통해 국내 최초로 수립된 해양-대기 집합 지역기후모형은 지속적인 개선이 필요함에도 불구하고 한반도 주변해 미래변화 전망자료를 생산하는데 활용될 수 있다.
- 시범적으로 제시된 한반도 주변해 미래 변화 상세도는 기후변화에 따른 한반도 주변해 해양 생태계 환경 및 수산자원 변화를 전망하는 데 참고자료로 활용될 수 있다.

S U M M A R Y 및 KEYWORDS

I. Title

Development of a regional climate coupled model for the seas around Korea

II. Necessities and objectives of the study

1. Objectives of the study

Implementation of a regional climate coupled model for the seas around Korea and generating a preliminary result of detailed climate change projection for the seas around Korea

2. Necessities of the study

○ Technical aspects

- Korea Meteorological Administration (KMA) accomplished a project for development of climate change scenarios for adaptation to climate change and submitted the standard outputs simulated with their global climate model HadGEM-AO to CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project-phase 5) of which the AR5 (Fifth Assessment Report) of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) is based on. KMA has projected detailed atmospheric changes in the future around the Korean Peninsular using a dynamical downscaling method and held a workshop on national standard climate change scenario for prediction of climate change impacts in Korea. They have continuously made efforts to improve their future climate projection results by conducting research projects.
- However, detailed changes projected following a future scenario for the seas around Korea have not been presented yet, but only with atmospheric forcing on a coarse resolution to project future change for the seas around Korea.
- Domestic research activity has been limited on the projection of future

changes in the seas around Korea that requires an integrated research using different models in various fields while research investment has been enriched for the global climate change projection.

- A projection for detailed climate changes in the seas around Korea can be accomplished by an ocean-atmosphere coupled climate model that simulates the ocean-atmosphere interactions properly.
- There has been an increasing demand on the investigation of the responses to global warming in atmospheric chemistry, marine biology and carbon cycle.
- The more a component model is coupled, the more the wall-clock time of the coupled model is required, depending on the number of variables to exchange between its components. An ocean-atmosphere coupled model takes more wall-clock time in simulation than the sum of the wall-clock time for each component, which is caused by a load imbalance between the component models. Thus, an optimization of the coupling functions is necessary to reduce the wall-clock time of the coupled model simulation.
- The coupling model developed by this project as an original technology for coupled modeling can be applied to climate and ocean research for the seas around Korea.
- The use of a coupled model without our own coupling technology would limit our usage of the model such that we cannot use a new version of the model until the developer make an improvement and release the revised model to public. Thus, mastering a coupling technology enables us to make our own revision to the model components, not relying on the developer.

○ Economic/industrial aspects

- Climate change is real affecting our lives. During the last 100 years, surface air temperature averaged over 6 large cities were increased by 1.7°C. Sea-level had risen by 8cm for 43 years. In accordance, the cold-water fish catch had dropped in the seas around Korea.
- It is necessary of a quick planning for adaptation to climate change: More than 8,000 billion won (KRW) has been estimated to cost for climate change by the end of this century.

- Therefore, it is important to reduce the cost by preparation and minimization of trial errors.

- Societal/cultural aspects

- The policy making based on scientific evidence including accurate prediction and analysis of climate change impacts is important not only for the cost-effectiveness of the policy but also for effectively protecting the vulnerable from any hazard caused by the climate change.
- Based on the framework act on low carbon (April 14th, 2010), establishment of a national adaptation plan (2011~2015) to climate change has been institutionalized in ten industry fields including marine fishery.

- Relation to proper functionality of KIOST

- Among the unique functions of KIOST, this research project is related to “research on marine environment and climate change” and also to “prediction of climate change and adaptation to the change”. The coupling and couple-modeling technology acquired through this project would enable KIOST to develop its own regional climate coupled model and utilize the coupled model for various climate change studies.

3. Expected effects

- Technical aspects

- The regional climate coupled model established through this project is expected be used for various climate studies for the seas around Korea.
- The researchers of this project at KIOST can attain international leadership and excellence for regional climate coupled modeling.
- The results of this project can be used as a reference for assessment of the uncertainty in future climate change projection for the seas around Korea.

- Economic/industrial aspects

- The research team of this project is expected to play an important role leading the science on regional climate coupled modeling for future

climate change projection at international conferences such as an annual meeting of North Pacific Marine Science Organization (PICES). Specifically presenting our results on the future climate change in the East Sea at the conferences would increase the opportunity to internationally communicate and address about the naming of the East Sea.

- Our testbed simulation results on the seas around Korea projected for detailed climate change information may reduce the cost by minimizing trial errors in establishment of basis for climate change adaptation plan in the field of marine fishery.

III. Contents and scopes of the study

1. Research period

January 1st, 2012 - December 31st, 2014

2. Contents and scopes of the study

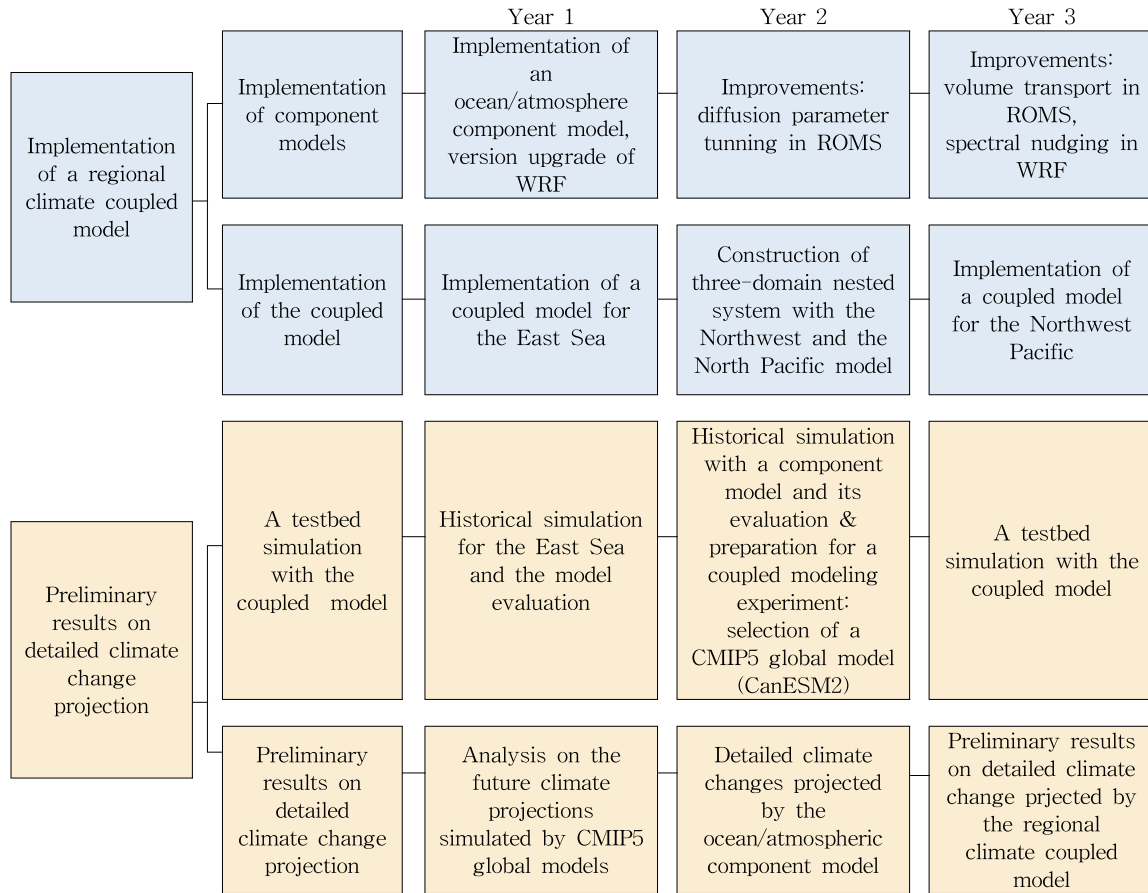
- Initial Development of component model and coupled model
 - Initial Development of Ocean/Atmosphere component model and coupled model

- Development of regional climate coupled model
 - Development of regional coupled model.

- A testbed simulation for detailed climate change projection for the Sea around Korea.
 - A testbed simulation for detailed climate change projection for the Sea around Korea.

IV. Results

Table 1 Road map of the project



Chapter 1. Implementation of a regional climate coupled model

1. Implementation of an ocean/atmosphere component model

- The ocean component of the coupled model is a regional ocean circulation model, ROMS(Regional Ocean Modeling System) that is widely used. The K-profile method is chosen for vertical turbulence mixing.
- To set up a coupled model for the East Sea, we set the spatial domain of the ocean component as 33°N~52°N in latitude and 127°E~142°E in longitude with 1/6 degree (about 20km) interval and 30 vertical layers. We have completed 10-year spin-up for this ocean domain. The ocean model was stabilized for seawater temperature and sea surface level after 5-year spin-up simulation.
- To set up a coupled model for the Northwest Pacific, we set the

spatial domain of the ocean component as $10^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ in latitude and $105^{\circ}\text{E}\sim 175^{\circ}\text{E}$ in longitude with $1/12$ degree (about 10km) interval and 30 vertical layers. We have completed 100-year spin-up simulations for this ocean domain.

- The Northwest Pacific model underestimated the transports in the Korea and Tsugaru Strait compared with observational data and we improved the underestimation. This improvement was achieved by replacing the ETOPO1 bathymetry with the ETOPO5 and by calibrating the bottom topography of the Tsugaru Strait in the ocean model closer to the observation. This calibration resulted in an increase in the transport through the Korea Strait and in turn, this increment also increased the transport through the Tsugaru Strait.
- To set up a coupled model for the North Pacific, we set the spatial domain as $20^{\circ}\text{S}\sim 65^{\circ}\text{N}$ in latitude excluding sea-ice area and $100^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{W}$ in longitude. Through these setting up processes, we have established a three-domain nested ocean model system for the East Sea, Northwest and North Pacific Ocean. The East Sea model, however, revealed a boundary problem caused by its small domain and the Pacific model loaded a computational burden by simulating on a fine resolution over its large domain. Hence, we focused our project on producing a testbed of regional coupled model simulation for the projection of detailed climate changes in the Northwest Pacific.
- The atmospheric component of the coupled model for this project is a WRF(Weather Research and Forecasting model) that is widely used for regional climate research as well as numerical weather forecasting. Kain-Fritsch scheme has been selected for cumulus process parameterization in this project.
- We used NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) reanalysis data as the initial and boundary condition of the atmospheric model and conducted a dynamical downscaling experiment using the model for East Asia. The downscaled results showed southward surface winds in summer while typically northward surface winds are observed in the region during summer.
- To remove such an error, we applied a spectral nudging technique in WRF and obtained a realistic summer wind for both of its direction and speed. A regional model is incapable of simulating long waves on

planetary scale due to its limited domain size and to overcome this limitation regional modeling requires a spectral nudging technique which restores the long waves in global data to prognostic variables in the regional model. Such a technique has been widely used in dynamical downscaling with a regional atmospheric model. The regional coupled model established through this project restores the long waves with a wavelength longer than 1000km for horizontal wind, air temperature and geopotential height above 500hPa to the top of the atmospheric model (50hPa) every one hour.

2. Implementation of a regional coupled model

- Through MCT(Model Coupling Toolkit), our coupled model calculates surface wind stress and heat flux with 10m wind, surface air pressure and humidity output from its atmospheric component WRF and inputs them to its oceanic component ROMS and also inputs sea surface temperature produced by ROMS to WRF. The ocean-atmosphere variable exchanges through MCT occurs every one hour in the coupled model.
- We have optimized the MCT source codes and shorten the model integration time by the optimization.
- We have upgraded the atmospheric component of the coupled model, WRF from its version 3.1 to 3.4 which was the latest released version as of 2013.
- We set the spatial domain of the coupled model for the Northwest Pacific with 10km resolution for its ocean component and 50km resolution for its atmospheric component, considering that the domain can include a westerly meandering in the atmosphere from the Tibetan Plateau, mesoscale eddies transported from the Tropical rainbands and Kuroshio extension to the east, and exclude sea-ice area to the north.

Chapter 2. A testbed simulation for detailed climate change projection

1. A testbed simulation with a coupled model and the model evaluation

- Our coupled model established through this project has been evaluated with an idealized experiment for typhoon. This experiment was

conducted to investigate the upper ocean responses to typhoon when the typhoon approaches to coastal sea from open ocean. Vertical mixing and upwelling caused by cyclonic wind cooled the upper ocean and a maximum of the cooling occurred at the sea surface on the right-hand side of the typhoon trajectory.

- We have simulated the East Sea using our coupled model from 2000 to 2004 and the simulated results were similar to observational data as the model integration continued.
- An evaluation of our regional coupled model for the Northwest Pacific was made in comparison with a global model, CanESM2 which was used as the initial and boundary condition of the regional model to project detailed climate changes. The regional coupled model showed a better spatial pattern of sea surface temperature in the East and Yellow Sea similar to the OISST observational data than the CanESM2 temperature, especially for the pattern near coastal line with details.

2. Preliminary projection results with detailed climate changes

- The experiments for future change projection were conducted with each of the ocean and the atmosphere component model prior to an experiment with their coupled model. Such experiment with a component model only was designed to isolate a coupling effect from its future change projection. We adopted a pseudo global warming method in our dynamical downscaling experiments for future projection. This pseudo global warming method is a dynamical downscaling method that can reduce a systematic error in the global model used as the initial and boundary condition of the regional model and also the computational burden.
- As the initial and boundary condition of our coupled model, we used ECMWF-interim reanalysis data for its ocean component and NCEP/DOE reanalysis data for its atmospheric component to simulate the present climate and CanESM2 global model projection data, one of the CMIP5 global models to project a future change.
- In the future changes projected solely by the ocean component model, the surface temperature of the seas around Korea showed a greater increase in summer than in winter.
- In the future changes projected solely by the atmospheric component

model, precipitation showed an increase over the Tropical Pacific Ocean and over the Northwest Pacific and a partial land area of China and Japan. Changes in large-scale atmospheric circulation and water vapor transport played a crucial role in determining such precipitation changes in East Asia including the Korean Peninsula.

- In the future changes projected by the regional coupled model, the sea surface temperature in the East Sea showed a greater increase than in the Yellow Sea as global warming continued. This regional difference in the linear trend of sea surface temperature is consistent with the trend based on observation.

V. Application plans of the results of the study

- The regional climate coupled model that was established for the first time domestically through this project still needs to be improved, but the model can be utilized to produce a future change projection for the seas around Korea.
- The preliminary results on the detailed climate changes in the seas around Korea can be used as a reference information in projection of the changes in marine ecosystem environment and marine resources.

KEYWORDS

국문: 지역기후집합모형, 역학적 규모축소, 기후변화, 북서태평양 순환, 한반도 주변해

영문: Regional climate coupled model, dynamical downscaling, climate change, Northwest Pacific circulation, seas around Korea

목 차

한글요약	i
영문요약	viii
한글목차	xvii
영문목차	xix
그림목차	xx
표목차	xxv
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
1. 기술적 측면	1
2. 경제·산업적 측면	1
3. 사회·문화적 측면	2
4. 기술원 고유기능 발전과의 연관성	2
제 2 절 연구개발목표 및 내용	2
1. 연구개발의 목표	2
2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용	2
가. 1차년도(2012년)	2
나. 2차년도(2013년)	3
다. 3차년도(2014년)	4
3. 연구 추진계획 및 수행 방법	4
가. 추진 체계	4
나. 추진 전략	4
제 2 장 국내외 기술개발 현황	6
제 1 절 국내 연구동향	6
제 2 절. 국외 연구동향	7
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
제 1 절 지역기후접합모형 수립	10
1. 해양/대기 성분모형 수립	10
가. 해양 성분모형 수립	10
(1) 동해 해양모형 수립	10
(2) 북서태평양 해양모형 수립 및 수송량 개선	18

(3) 북태평양 해양모형 수립 및 3단계 동지격자체계 수립	22
나. 대기 성분모형 수립	23
(1) 대기모형 설정	23
(2) 대기 성분모형 성능 검증	24
(3) 분광너징 기법의 적용을 통한 바람장 개선	25
2. 집합모형 수립	26
가. 집합자 코드 최적화	27
나. 동해 집합모형 수립	29
다. 북서태평양 집합모형 수립	30
제 2 절 미래변화 상세도 시범 제시	32
1. 집합모형 초기 실험 및 성능 검증	32
가. 태풍 가상 실험	32
나. 동해 집합모형 성능 검증	32
(1) 해류, 수온 및 염분의 분포	33
(2) 기온, 바람, 습도, 지위고도의 분포	37
다. 북서태평양 집합모형 성능 검증	40
2. 미래변화 상세도 시범 제시	41
가. 유사지구온난화 방법 소개	42
나. 전구모형 평가 및 선정	43
다. 해양 성분모형 미래변화 시범 제시	46
라. 대기단독모형 미래변화 시범 제시	48
마. 지역기후집합모형 미래변화 상세도 시범 제시	52
(1) 일방향 지역기후집합모형	53
(2) 양방향 지역기후집합모형	55
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	58
제 1 절 연구개발목표 달성도	58
1. 3단계 연구기간 내 연구내용 대비 달성률(%)	58
2. 정량적 목표 달성도 (부록 참조)	59
제 2 절 대외 기여도	60
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	63
제 6 장 참고문헌	64
제 7 장 부록	64

C O N T E N T S

Summary	i
Contents	xvii
List of Figures	xx
List of Table	xxvi
Chapter I Outline of the study	1
Chapter II States of technical development in the home and foreign countries	6
Chapter III Results of the study	10
section 1 Development of regional climate coupled model	10
section 2 presents detailed future changes	32
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related area	58
section 1 Achievements of objectives	58
section 2 Contributions to the related area	59
Chapter V Application plans of the results of the study	63
Chapter VI References	64
Chapter VII Appendix	65

List of Figures

Fig. 1. (Left) Bathymetry of the East Sea model and (right) monthly volume transport through the straits near Korea	10
Fig. 2. Monthly mean meridional geostrophic current (m s ⁻¹) at the southern boundary of the East Sea model	11
Fig. 3. Monthly mean temperature of sea water (°C) at the southern boundary of the East Sea model	12
Fig. 4. Monthly mean salinity at the southern boundary of the East Sea model	12
Fig. 5. Mean sea level (m) averaged over the East Sea model domain	13
Fig. 6. Seasonal variation of sea surface temperature simulated by the East Sea model. Contour interval is 1 degree.	13
Fig. 7. Same as Fig. 6 but from the GDEM, observation-based data	14
Fig. 8. Model bias in seasonal mean sea surface temperature obtained by subtracting the GDEM data from the East Sea model simulation result	14
Fig. 9. Seasonal variation in surface currents simulated by the East Sea model	14
Fig. 10. The vertical sections at 130°E of seasonal mean temperature of sea water obtained from the East Sea model (top), the GDEM observation-based data (middle) and their differences (bottom)	15
Fig. 11. Same as Fig. 10 but for the vertical sections at 38°N	16
Fig. 12. Same as Fig. 10 but for salinity of sea water	17
Fig. 13. Same as Fig. 11 but for salinity of sea water	18
Fig. 14. Climatological seasonal mean sea surface temperature (°C) in February (upper panels) and August (lower panels) averaged for twenty years from 1981 to 2000: (left panels) the dynamical downscaling results from the Northwest Pacific regional ocean model, (middle panels) OISST V2 observational data and (right panels) their differences.	20
Fig. 15. Monthly anomaly time-series of sea surface temperature based on the climatology for 1981~2000 averaged over the (a) East Sea, (b) Yellow Sea and (c) East China Sea. Black lines represent for the dynamical downscaling results from the Northwest Pacific regional ocean model and red lines for the OISST V2 observational data.	20
Fig. 16. Model biases in sea surface temperature (°C) in February (upper panels) and mixed layer depth (m) in March (lower panels) averaged for twenty years from 1981 to 2000 based on the OISST V2 and ECCO2 observational data - comparison between	

the simulation results from (left) the Northwest Pacific regional ocean model and the CanESM2 global model.	21
Fig. 17. Difference from the ETOPO bathymetry observational data in water depth at the Tsugaru Strait set by the Northwest Pacific model: (Left panel) before calibration of the model bathymetry and (right panel) after the calibration.	22
Fig. 18. Monthly mean volume transport (Sv) through the Korea(Tsushima) Strait. Black line represents for the transport after a bathymetry calibration of the Northwest Pacific model and blue line for the transport before the calibration.	22
Fig. 19. One-way nesting with three domains (two inner domains in red boxes) for the ocean component model, ROMS: East Sea-Northwest Pacific-North Pacific.	23
Fig. 20. Summer (May to August) mean from 1981 to 2000 for surface air temperature in °C (upper panels) and precipitation rate in mm month ⁻¹ (lower panels): (a, d) observation-based ECMWF-interim reanalysis temperature and GPCP precipitation (b, e) dynamically downscaled results by WRF and (c, f) CanESM2 global model data,	25
Fig. 21. Climatological summer mean horizontal wind at 850 hPa. Red arrows represent for the NCEP/DOE reanalysis and blue arrows for the dynamically downscaled results by WRF without spectral nudging.	26
Fig. 22. Same as Fig. 21, but the blue arrows represent for the dynamically downscaled results by WRF with spectral nudging applied from 850 hPa to the model top.	26
Fig. 23. Computational flow diagram of MCT	28
Fig. 24. Revised flow diagram of MCT	28
Fig. 25. Execution time of our established coupled model for the East Sea: comparison between the time before vs. after the optimization of MCT	29
Fig. 26. Diagram for the data exchange between ocean and atmospheric components through a coupling tool, MCT	29
Fig. 27. Horizontal domain for WRF (colored) and ROMS (red box) of the regional climate coupled model for the Northwest Pacific	31
Fig. 28. An initial state of the virtual typhoon passing through the upper ocean with flat bottom topography	32
Fig. 29. Seasonal mean averaged for year 2000~2004 of surface current simulated by the regional climate coupled model for the East Sea	33
Fig. 30. (continued). Seasonal mean of sea surface temperature simulated by the regional climate coupled model for the East Sea: Each row panels (from top to bottom) present the temperature distribution for each year from 2000 to 2004. Contour	

interval is 1 degree.	34
Fig. 31. Seasonal mean bias averaged for year 2000~2004 of surface current simulated by the regional climate coupled model for the East Sea: difference from the GDEM observation-based data. Contour interval is 1 degree.	35
Fig. 32. Latitude-depth cross section of the difference in sea water temperature at 130 °E between the regional climate coupled model for the East Sea simulation result and the GDEM observation-based data seasonally averaged for five years from 2000 to 2004.	36
Fig. 33. Same as Fig. 32 but for the longitude-depth cross section at 38°N	36
Fig. 34. Same as Fig. 32 but for salinity of sea water	36
Fig. 35. Same as Fig. 33 but for salinity of sea water	37
Fig. 36. Differences in seasonal mean air temperature at 2m above surface between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.	38
Fig. 37. Differences in seasonal mean wind speed (color-shaded) and direction (vector) at 10m above surface between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.	38
Fig. 38. Differences in seasonal mean relative humidity (color-shaded), air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 850 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.	39
Fig. 39. Differences in seasonal mean air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 500 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.	39
Fig. 40. Differences in seasonal mean wind speed (color-shaded), air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 300 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.	40
Fig. 41. Sea surface temperature in February (upper panels) and August (lower panels) in 1981: (a, d) OISST observational data, (b, e) the simulation results from the regional climate coupled model for the Northwest Pacific and (c, f) CanESM2 global model data. Unit is °C.	41
Fig. 42. Experimental design for climate change projection with a regional climate coupled model	42
Fig. 43. A flow diagram describing the dynamical downscaling using a pseudo global	

warming method	43
Fig. 44. The first (left) and second (right) leading MVEOF modes and their fractional variances obtained from GPCP precipitation and NCEP/NCAR zonal wind at 850 hPa.	45
Fig. 45. Scatter diagram displaying squared skill scores for East Asian summer monsoon simulated by CMIP5 global models with spatiotemporal correlation (STC) and the year-average of monthly-calculated spatial pattern correlation (PCC).	46
Fig. 46. Future changes in sea surface temperature (upper panels) and sea surface salinity (lower panels) projected by the Northwest Pacific regional ocean model (left four plots) and by the global model CanESM2 (right four plots).	47
Fig. 47. The marginal seas around Korea are denoted as boxes at the left-hand side and the future changes in sea surface temperature averaged over each boxed area are presented as line plots at the right-hand side. Red and black lines represent the mean temperature respectively for the future and present climates simulated by the Northwest Pacific regional ocean model and blue lines represent their difference (i.e., future change). Green lines represent for the OISST observational data.	48
Fig. 48. Projected changes in summer (May to August) mean surface air temperature in °C (upper panels) and precipitation in mm month ⁻¹ (lower panels) obtained from (a, c) the pseudo global warming experiment results with WRF and (b, d) the global model CanESM2 simulation data. These changes are the climatological mean differences between the end of 21st century (2081–2100) and the end of 20th century (1981–2000).	49
Fig. 49. Projected changes in summer mean specific humidity (color shaded) at 850 hPa in kg kg ⁻¹ and superimposed, vertically integrated moisture flux (arrows) in kg m ⁻¹ s ⁻¹ obtained from (a) the pseudo global warming experiment results with WRF and (b) the global model CanESM2 simulation data. These changes are the climatological mean differences between the end of 21st century (2081–2100) and the end of 20th century (1981–2000).	50
Fig. 50. Moisture budget terms calculated from the pseudo global warming experiments for a future climate averaged for 2081 to 2100 (PGW_CanESM2) and the downscaling result from NCEP/DOE reanalysis for the present climate averaged for 1981 to 2000 (CTRL): (a) the results averaged over the northern area of, 105°E~110°E and 30°N~35°N and (b) those averaged over the southern area of 105°E~110°E and 25°N~30°N. Green and yellow bars respectively denote the CTRL and PGW_CanESM2 results in mm month ⁻¹ with the scale at left. Purple boxes denote their differences in percent with the scale at right.	51

Fig. 51. Sea surface temperature in February (upper panels) and August (lower panels) simulated by the Northwest Pacific regional climate coupled model for a future climate (first column), present climate (second column) and their difference (third column) at the left-hand side, and the difference but calculated with the global model CanESM2 CMIP5 simulation data for winter (DJF) (upper panel) and summer (JJA) (lower panel) on the right-most panels.	53
Fig. 52. Same as Fig. 51 but for mixed layer depth (m) in February and winter (DJF) only	53
Fig. 53. Climatological mean sea surface temperature (top panels), net surface heat flux (middle panels) and zonal wind stress (bottom panels) in February averaged for 20 years from 2081 to 2100: dynamical downscaling results obtained from the Northwest Pacific regional climate coupled model with one-way coupling (first columns) and the results from the ocean component model with atmospheric forcing taken from the CanESM2 global model data (second columns), and their differences (third columns).	54
Fig. 54. (a) Sea surface temperature (SST) simulated by the Northwest Pacific regional climate coupled model for February in 2081 forced with the atmospheric data simulated by CanESM2 under RCP4.5 scenario and simulation and 1981, (b) SST from the CanESM2 RCP4.5 scenario, (c) the difference in (a) from the regional model for February in 1981, and (d) the difference in (b) from the CanESM2 model for February in 1981.	55
Fig. 55. Same as Fig. 54 but for August	56
Fig. 56. The marginal seas around Korea are denoted as boxes on the left-hand side and the future changes in sea surface temperature averaged over each boxed area are presented as line plots on the right-hand side. Red lines represent for the results from the Northwest Pacific regional climate coupled model with two-way coupling, green lines for the results from the same model but with one-way coupling and without spectral nudging for atmosphere, and blue lines for the results from the ocean component model only forced with CanESM2 RCP4.5 simulation data for the future climate change and ECMWF reanalysis data for the present climate.	57

List of Table

Table 1. Configuration of the ocean component for the regional climate coupled modeling for the Northwest Pacific	19
Table 2. Configuration of the atmospheric component for the regional climate coupled modeling for East Asia	24
Table 3. Configuration of the regional climate coupled model for the East Sea	30
Table 4. List of exchange variables in the regional climate coupled model	31
Table 5. List of CMIP5 global models evaluated for East Asian summer monsoon and their approximated horizontal resolution	44

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

기상청은 국가 기후 변화 적응 대책 마련을 위한 기후변화 시나리오 개발 사업 수행 후 IPCC (기후변화에 관한 정부간협의체)AR5 (제5차보고서)의 근간이 될 기후모형 상호 비교사업 (CMIP5)에 출품하였음. 또한 역학적규모축소법을 이용하여 우리나라 주변 대기 미래 상세변화를 제시 (한반도 기후변화 영향 예측을 위한 국가표준 기후변화 시나리오 워크숍)하고 결과 정교화를 위해 지속적인 연구사업을 추진 중이다. 그러나 우리나라 주변 해양 미래변화에 대한 시나리오는 해상도가 낮은 전지구 접합 모형에 근거하여 상세 시나리오를 제시하지 못하였다.

전지구 미래기후변화에 대한 투자는 활발하나 한반도 주변해 미래 변화 전망에 대한 연구는 다학제 및 다모형 종합연구로 연구가 제한적이다.

한반도 주변해 미래 변화 전망은 해양과 대기 상호작용을 적절히 모사하는 해양·대기 기후 접합모형을 구축하여 상세한 변화를 제시할 필요성이 있다.

ROMS-WRF 접합 모형은 ROMS를 단독으로 실행하는 것보다 느리다. 이것은 ROMS와 WRF의 Load Balancing이 맞지 않아서 발생한 문제이다. 또한 지구 온난화에 따라 대기 화학 반응, 해양 생물 혹은 탄소 순환을 고려한 상호 작용을 추가하는 추세에 따라서 모형 간 주고받는 경계 값의 개수와 접합하려는 모형의 수가 늘어남에 따라 접합모형의 실행시간은 늘어나게 된다. 그러므로 접합 함수를 최적화하여, 접합모형의 실행시간을 줄일 필요성이 있다.

개발한 접합기술은 해양과 기후 연구에 사용하는 다양한 모형 접합 시 원천 기술로 활용 가능하다.

기존에 개발된 접합모형을 사용하면, 각각의 성분모형이 업데이트가 되어도, 접합 모형 개발자가 업데이트된 모형을 적용한 접합모형을 개발할 때까지 기다려야한다. 그러므로 접합 기술의 확보는 이러한 기술 종속성에서 벗어날 수 있으며, 항상 새로운 버전의 성분 모형 및 연구원이 수정한 성분 모형을 적용한 접합모형을 사용할 수 있다.

2. 경제·산업적 측면

기후변화는 우리 실생활에 영향을 주는 실체이며, 지난 100년간 6대 도시 평균 기온 1.7℃ 상승하였고, 43년간 해수면 높이가 8cm 상승하였다. 이러한 기후변화로 인해 한반도 주변해에서 한대성 어종 어획량 급감하였다.

신속한 기후변화 적응대책 마련이 필요하며, 기후변화 관련 비용이 금세기 말까지 800조원 이상이 들 것으로 예상된다. 따라서 사전대비와 시행착오 최소화로 비용절감을 도모할 필요가 있다.

3. 사회·문화적 측면

정확한 기후변화 영향 전망 및 분석에 근거하여 기후변화 영향 비용 대비 효과가 높은 정책 근거 마련이 필요하다. 기후변화 취약계층 보호에 효과적인 적응 대책 마련 근거 제시하기 위함이다.

저탄소 녹색기본법 시행(10.4.14)으로 국가기후변화 적응대책(2011-2015) 수립이 법적제도화 되었고, 해양/수산업 분야 등 10개 분야에 대한 대책 마련되었다.

4. 기술원 고유기능 발전과의 연관성

고유기능 중 “해양환경 및 기후변화에 관한 연구 기후변화 예측 및 대응”에 해당하며 한국해양과학기술원에서 접합 모형을 자체 개발할 수 있는 기술을 확보하여 다양한 기후 연구에 활용이 기대된다.

제 2 절 연구개발목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

○ 한반도 주변해 지역기후 접합모형 수립 및 미래 상세변화 시범 제시

2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용

가. 1차년도(2012년)

구분	세부목표	내용 및 범위
1차년도 (2012)	• 해양/대기 성분 모형 수립	• 해양/대기 성분 모형 설치 • 가상 태풍-해양 모형 모사 및 검증
	• 해양 스핀업 실험	• 모형 안정화를 위한 3차원 해양순환 모형 모사
	• 접합모형 초기 수립	• 접합모형을 이용한 동해 영역 과거 기후 모사 및 검증 • 접합자(MCT)구조 파악 및 성능 개선

나. 2차년도(2013년)

구분	세부목표	내용 및 범위
2차년도 (2013)	• 접합모형 개선	• 민감도 실험을 이용한 접합모형 개선
	• 지역기후 접합모형 초기 수립	• 과거 기후 자료와 비교를 통한 지역기후 접합모형 최적 환경 구축
	• 미래 변화 실험 초기 적용	• 미래 변화 실험을 위한 모형 입력 자료 생성

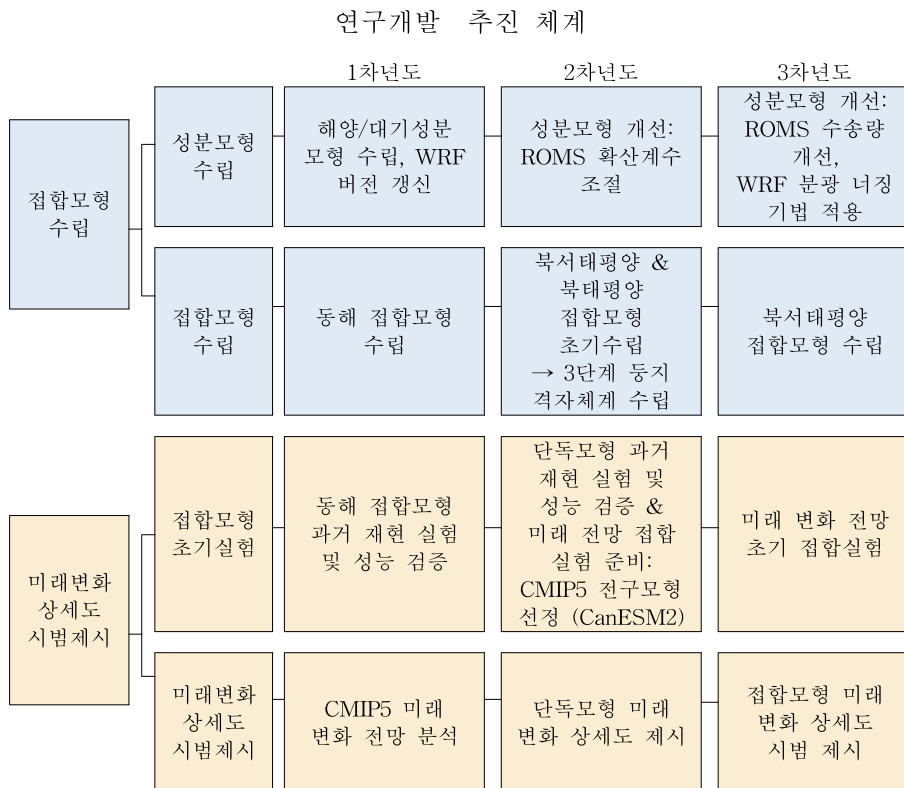
다. 3차년도(2014년)

구분	세부목표	내용 및 범위
3차년도 (2014)	<ul style="list-style-type: none"> 미래 변화 실험 초기 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 한반도 주변해 미래 변화 초기 실험을 위한 지역기후 집합모형 장기적분
	<ul style="list-style-type: none"> 한반도 주변해 미래 상세 변화 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 지역기후 집합모형을 이용한 한반도 주변해 미래 변화 초기 실험 집합모형을 이용한 미래(2081년~2100년) 변화 시범 실험 결과를 분석

3. 연구 추진계획 및 수행 방법

가. 추진 체계

아래와 같은 흐름으로 연구를 추진한다.



나. 추진 전략

국내외 연구진과 협력 연구: 전구 및 지역기후 접합모형 개발 관련 연구진과 상호 방문, 자문 등 협력 연구 추진

- 연세대 홍성유 교수 (전구 및 지역접합 모형인 GRIMs 모형 개발 중)
- 기상청 강현식, 박수희 박사 (지역접합모형 개발)
- 미국 우즈홀연구소 서효대 박사 (캘리포니아 연안 등의 지역해ROMS-WRF 접합모형 개발)
- 텍사스 A&M 대학교 JenShan Hsieh 박사 (대서양 접합모형인 CRCM개발)
- 서효대 박사(미국우즈홀연구소), 김형진 박사(JAMSTEC) 해양연구원 방문 및 참여연구원 우즈홀해양연구소 교육 훈련

국제 해양과학기구 위원회 참여 및 활동 주도로 최신 동향 파악과 국제 공조

- 연구책임자(장찬주)가 공동의장으로 활동하는 북태평양해양과학기구(PICES) 워킹그룹(WG-29) (지역접합모형 워킹그룹)에 주도적으로 참여하여 국제동향 파악 및 관련 연구 결과 홍보
- 국제공동 지역기후 접합모형(RCCM) 워크숍 개최

슈퍼컴퓨팅 센터와 모형 개발 협력 및 자원이용 협조

- 지역기후 접합모형 개발에 대한 협력: 최적화 및 컴퓨팅 자원 지원

해양모형과 대기 모형 접합을 위해 국제적으로 널리 사용되는 접합자인 MCT(Mode Coupling Toolkit)를 채택하여 편의성, 적용성 및 호환성 증대 도모

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구동향

해양 단독 모형을 이용한 한반도 주변해 미래변화 전망은 서울대 등 국내 대학과 해양과학기술원을 중심으로 진행되었으나 지속되지 않고 있으며 특히 지역기후 접합모형을 이용한 연구는 거의 없다. 또한 개별 성분 모형에 대한 개발은 활발히 진행되었으나 접합 모형에 대한 개발과 적용은 태풍 등 특정 현상에 국한된 단기 예측 연구에 사용되었으며 기후 및 기후변화에 적용된 사례는 매우 드물다.

○ COAMPS-ROMS coupled model

- 개발자: 부산대학교, 대기순환연구실(허기영, 하경자 등)

대기모형 COMAMPS와 해양모형 ROMS를 접합자 MCT로 접합하였다.

해양 모형은 대기 모형으로부터 바람 응력과 열 속을 받고, 대기 모형은 해양 모형으로부터 해면수온을 받는 구조이다.

○ GH-STORM(GFDLTM-HYCOM Synchronized Typhoon and Ocean Research Model)

- 개발자 : 한국해양과학기술원

GFDL 열대저기압 모형인 GFDLTM과 북서태평양 순환 모형인 HYCOM을 접합 모형으로 개발 중이다. GFDL-POM 접합 모형과 비슷한 구조로 해양 모형을 POM에서 HYCOM으로 대체하였고, 대기모형인 GFDL은 3겹의 등지 이동 격자($1/2^\circ$, $1/6^\circ$, $1/12^\circ$ 해상도)를 사용하고, HYCOM은 고정 격자($1/12^\circ$ 해상도)를 사용하여 구성하였다.

○ GRIMS(Global and Regional Integrated Modeling System)

- 개발자 : 연세대학교 대기과학과 수치 모델링 연구실(홍성유)

GRIMS는 다양한 규모의 수치 기상 예보, 계절 예측, 기후 연구를 위해 개발되었고, GMP(Global Model Program), RMP(Regional Model Program), SMP (Single-column Model Program)로 구성됨. 기후 예측을 위해 GOM(Global Ocean Model)인 MOM3는 GRIMS-GMP모형과 접합하였다. SSI(Spectral Statistical Interpolation)과 GSI(Grid point statistical interpolation)라는 자료 동화(data assimilation)방법이 포함되었다. 핵심 역학을 위한 DFS(Double Fourier Series), SPH(Spherical harmonics) 스펙트럼 방법이 추가되었다.

○ WRF-ROMS coupled model

- 개발자 : 제주대학교 해양-기상 연구실

MPI2 함수를 이용한 WRF-ROMS 접합 모형 개발 중이며, 태풍과 해양 및 태풍간의 상호작용을 접합 모형로 연구하였다.

제 2 절. 국외 연구동향

지역기후 접합모형에 대한 개발이 매우 활발함. 그러나 지역기후 접합모형을 이용한 미래 변화 전망에 대한 연구는 미약함.

○ COAWST(Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System)

- 개발자 : John C Warner(USGS, 미국)

퇴적물 이동 등 연안 변화 연구를 위해 개발한 접합 모형으로 대기(WRF), 해양(ROMS), 파랑(SWAN), 퇴적물(CSTM) 모형 간 접합을 위해 MCT(Model Coupling Toolkit)라는 접합자를 사용하였다.

- 관련 사이트: <http://woodshole.er.usgs.gov/operations/modeling/COAWST/index.html>

○ SCOAR(Scripps Coupled Ocean-Atmosphere Regional model)

- 개발자 : Scripps Institution of Oceanography, UCSD, 미국(서호대)

주로 RSM-ROMS 접합 시스템에 관한 설명과 파일들을 담고 있으며, 추가로 WRF-ROMS 접합을 위한 수정 내용을 담고 있다. UCLA Mechoso 교수 연구팀에서 ROMS 4DVAR를 활용하여 연구한 바 있고, 셸(shell)이 모형 간의 정보를 일정 시간 마다 교환해주는 방식으로 접합자 역할을 하고, 접합을 위한 모형 코드 수정이 거의 불필요하기 때문에 업데이트가 용이하다는 장점이 있다.

- 관련 사이트: <http://scoar.wikispaces.com/SCOAR-WRFROMS>

○ Coupled Regional Ocean Atmosphere Model(CROAM)

- 개발자 : Dian Putrasahan, Art Miller, Hyodae Seo, WHOI, 미국

SCOAR모형에 근거하여 만든 모형으로 WRF대기모형과 ROMS해양모형을 SST-flux 접합자로 접합하였다. 현재 버전은 WRF는 3.1이고, ROMS는 3.0이며, SCOAR모형처럼 접합자는 자체 셸 스크립트와 포트란 코드를 이용하여 자료 교환을 해줌으로써, 모형 내부 코드를 거의 수정할 필요가 없는 장점이 있다. SCOAR모형은 개발이 중단된 것에 비해, CROAM모형은 개발이 진행중인 WRF와 ROMS모형을 사용함으로써 향후 발전 가능성이 높다.

○ CRCM(Coupled Regional Climate Model)

- 개발자 : Texas A&M, 미국(M. Li, J. Hsieh, R.Saravanan, P.Chang, H.Seidel)

대서양에서 발생하는 열대 폭풍의 생성과 발달 과정 중에 나타나는 대기-해양 상호작용을 이해하기 위해 WRF-ARW3.1 + ROMS3.0을 접합하였고, 매 적분 시간마다 표층 열 속과 운동량 속 및 SST 교환이 이뤄지고, WRF 27km 해상도와 ROMS 9km 해상도로 mercator 도법과 Arakawa C-grid가 똑같이 적용된다. 접합 코드를 직접 만들어 초기 버전을 만들었으나, 이후 지면 모형 CLM을 추가로 결합하면서 MCT에 기반을 둔 CPL7 coupler(NCAR CESM에 사용됨)를 이용하여 WRF-ROMS-CLM 접합 시스템을 개발하였다.

- 관련 사이트: <http://sc.tamu.edu/research/chang/new/>

○ ROMS-WRF 접합 모형 개발

- 개발자 : NCAR MMMD(Mesoscale and Microscale Meteorology Division), 미국(J Michalakes, J Dudhia 등)

MCCEL를 이용한 WRF-SWAN-ADCIRC-LSOM(sediment optics) 접합 모형과 MCT를 이용한 WRF-ROMS 접합 모형이다.

WRF는 ROMS로 바람응력과 열 속을 주고, ROMS로부터 해수 표층 온도를 받는다. 접합 모형은 이상화된 허리케인과 관련된 연구에서 사용되며. MCT는 규칙적이고 계획적인 경계조건 교환을 지원하고, MCCEL은 다양한 시·공간 해상도 또는 불규칙적인 자료의 교환을 지원하는 특징이 있다.

- 관련 사이트: http://www.wrf-model.org/wrfadmin/docs/ecmwf_2004.pdf
http://people.arsc.edu/~kate/ROMS/HK/Michalakes_ROMS_WRF_MCT.pdf

○ WRF-ROMS-PISCES(생지화학모형) 접합 시스템 개발

- 개발자 : IRD 센터, 프랑스(Vincent Faure(vincent.faure@ird.fr), Nicolas Jourdain, Christophe Menkes, Patrick Marchesiello)

접합 모형 ROMS-PISCES는 WRF 모형에서 얻은 바람장에 의해 표층 응력을 받고, WRF모형의 바람으로부터 바람 응력을 계산하기 위해서는 WRF모형의 USTR, U10, V10 변수를 사용한다. 마찰계수는 Large et Pond(1981)과 Jarosz et al.(2007)의 식을 사용하였다. 접합할 경우 열대 폭풍에 의한 해양의 연직 혼합 증가가 해면수온을 감소시키고, 질산염을 증가시켜 일차 생산량이 증가하는 현상을 잘 재현한다.

- 관련사이트:

<http://prevision.ird.nc/index.php/cyclones-and-climate/ocean-biogechemistry-impact>

○ SOCIB (Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System)

2011년 7월부터 운영되는 WRF-ROMS SOCIB Meteotsunamis 예측 시스템으로 서지 중해 연안 지역의 해양을 예측하고, 열대 저기압의 대기-해양 상호작용을 연구가 주목

적이다.

- 관련 사이트: <http://www.socib.es/?seccion=modelling&facility=rissagaforecast>

○ REMO-OM

- 개발자 : Max Planck Institute für Meteorologie, Bundesstraße 55, 20146, Hamburg, 독일(Edvin Aldrian)

OASIS 접합자를 이용하여 55km 해상도의 REMO 지역대기모형과 15-37km 해상도의 MPI-OM 전구해양모형을 접합하였다. 해상대륙(maritime continent)에 대해 고해상도 기후를 장기간 모사하였으며 접합할 경우 강수와 해면수온 오차가 감소하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 지역기후접합모형 수립

1. 해양/대기 성분모형 수립

가. 해양 성분모형 수립

지역해 모델링에 널리 사용되는 ROMS(Regional Ocean Modeling System)모형은 원시 방정식에 근거하며 정수 어림과 부시네스크(Boussinesq) 어림을 사용하고, 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용하고, 연직 격자는 압력구배항의 오차가 최소화되도록 하는 σ -좌표계(terrain-following sigma coordinate)를 사용한다. 방정식의 이류항과 확산항을 계산하는 다양한 차수의 방정식이 존재하고, 연직 난류 모수화 기법으로 K-profile 방안(이하 KPP 방안)을 사용하였다.

(1) 동해 해양모형 수립

동해 접합모형 수립을 위해 해양모형의 수평 영역은 위도 33°N~52°N, 경도 127°E~142°E로 설정하였고(Fig. 1(좌)), 해상도는 수평으로 1/6°(약 20km) 간격을 두고 연직으로 30개 층을 두었다. 수심 자료는 ETOPO5를 사용하였고, 모형 초기장의 수온과 염분은 1월 평균값을 내삽하여 처방하였다.

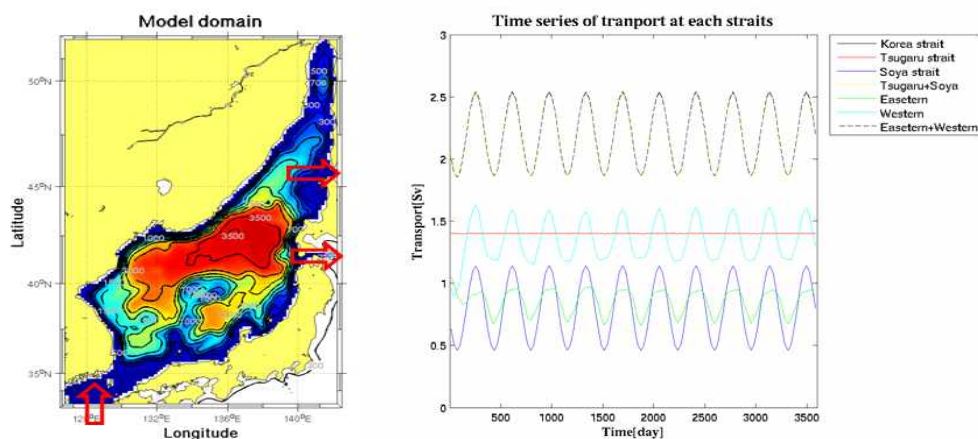


Fig. 1. (Left) Bathymetry of the East Sea model and (right) monthly volume transport through the straits near Korea

이 해역에 대해 10년 스핀업 실험을 수행하였는데, 적분 후 약 7년까지 영역 평균 해수면 고도는 상승하다가 이후부터 일정하게 유지되면서 안정화되었다. 모형 경계조건은 각 해협(대한, 쓰가루, 소야)에서 관측된 수송량(Fig. 1(우), Fig. 2), 수온(Fig. 3), 염분(Fig. 4)과 함께 격자에 내삽하여 처방하였다. 수송량의 경압성분은 처방된 밀도를 바탕으로 지형류 방정식을 이용하여 계산하였다. 대기 강제력은 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)에서 제공하는 6시간 간격의 바람, 기온, 습도, 해면 기압 자료 등을 총체 공기역학적 공식(bulk aerodynamic formula)으로 구한 바람응력과 열속을 사용하였으며, 강으로부터의 담수유입과 조석은 스핀업 실험에서 고려하지 않았다. 개방경계 조건으로 처방한 해류, 수온, 염분은 Fig. 2~4에 보였다.

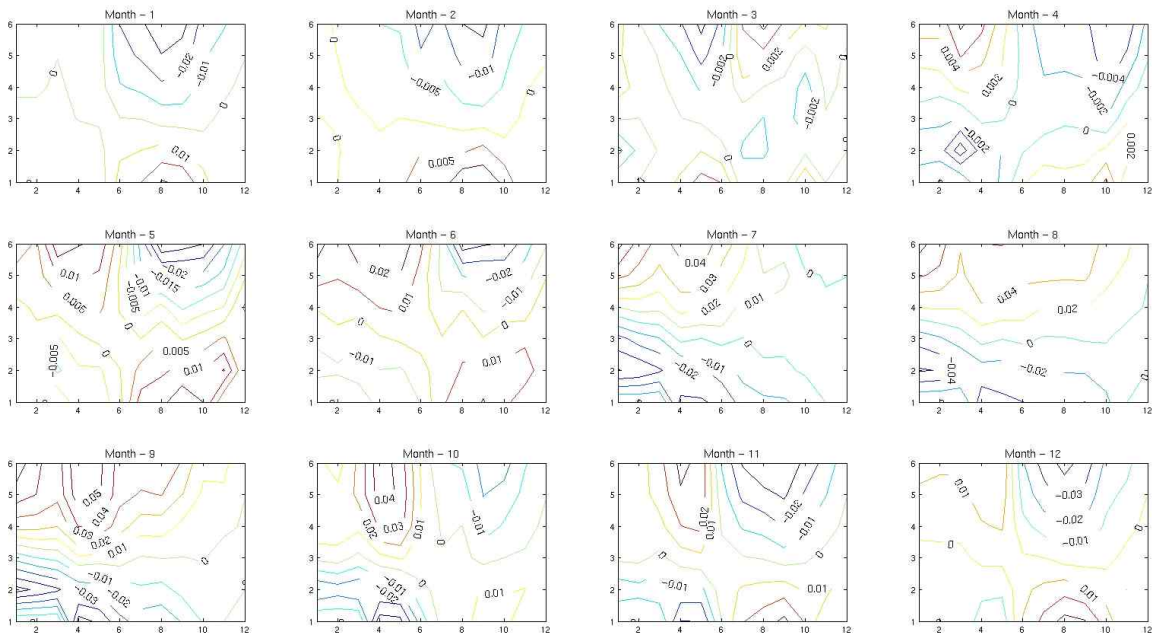


Fig. 2. Monthly mean meridional geostrophic current (m s^{-1}) at the southern boundary of the East Sea model

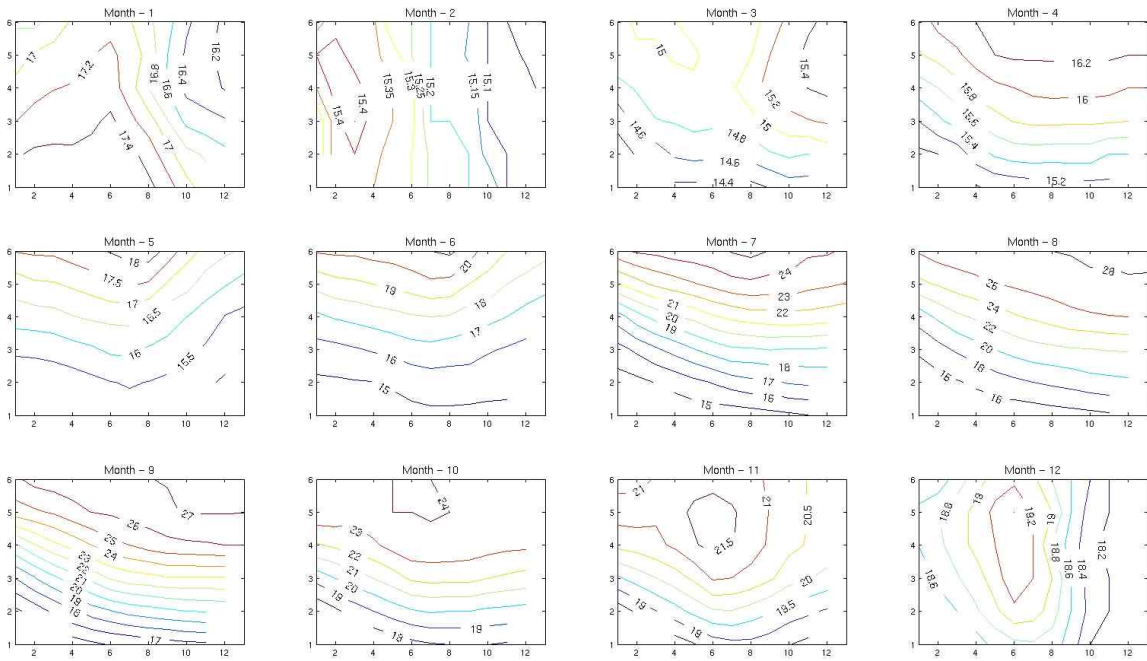


Fig. 3. Monthly mean temperature of sea water ($^{\circ}\text{C}$) at the southern boundary of the East Sea model

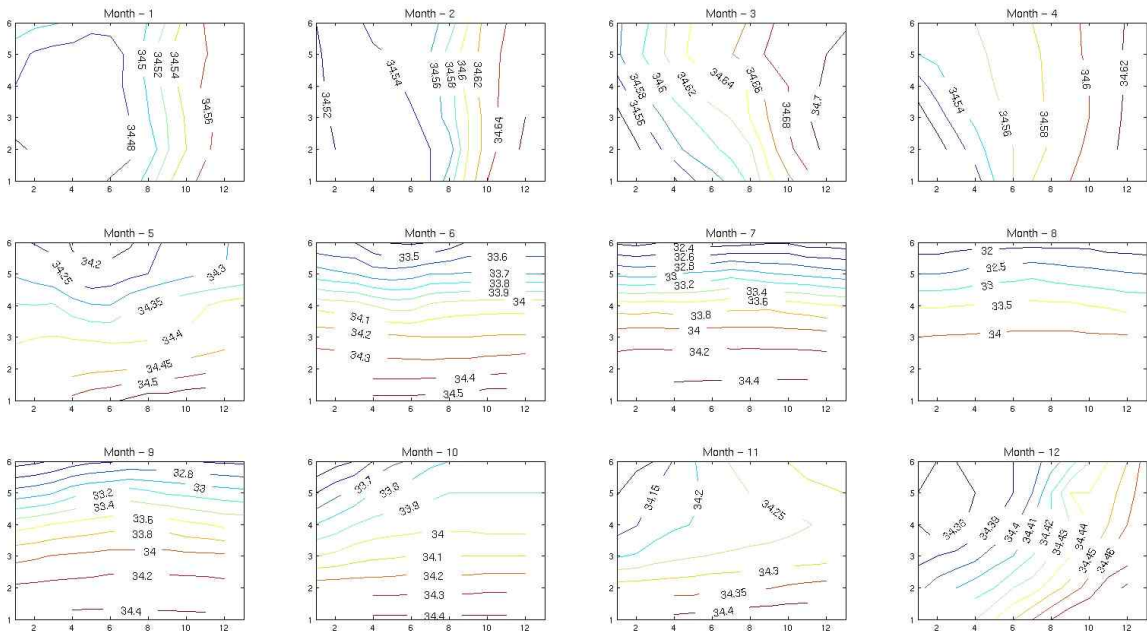


Fig. 4. Monthly mean salinity at the southern boundary of the East Sea model

10년 스핀업 동안 해양단독모형에서 동해 평균 해수면은 초기 약 7년간 상승하다가 이후부터 일정하게 유지된다(Fig. 5).

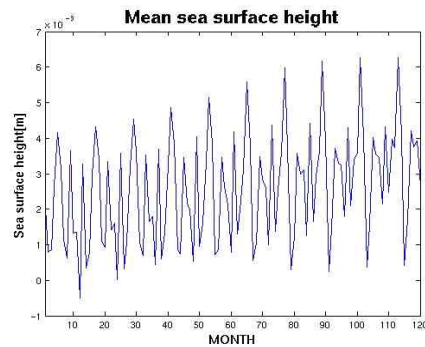


Fig. 5. Mean sea level (m) averaged over the East Sea model domain

모형에서 모사한 표층 수온(Fig. 6)을 $1/4^\circ$ 해상도의 Generalized Digital Environment Model(GDEM) 자료(Fig. 7)와 비교하면 봄철, 여름철 표층 수온은 관측에 비해 따뜻하게 모사되었고 겨울철은 차갑게 모사되어 수온의 계절진폭이 과다하게 모사하고 있음을 알 수 있다(Fig. 8). 동한난류는 약 38°N 부근에서 북한한류와 만나 이안하여 동쪽으로 사행하는 동해극전선을 형성한다. 그러나 해양단독모형에서는 해류가 강한 동해극전선을 제대로 모사하고 있지 못하다(Fig. 9). 이는 동한난류와 북한한류의 합류의 이안을 결정하는 해저지형을 모형 격자 분해능($1/6^\circ$)의 한계로 인하여 현실적으로 구현하기 못한 것으로 사료된다.

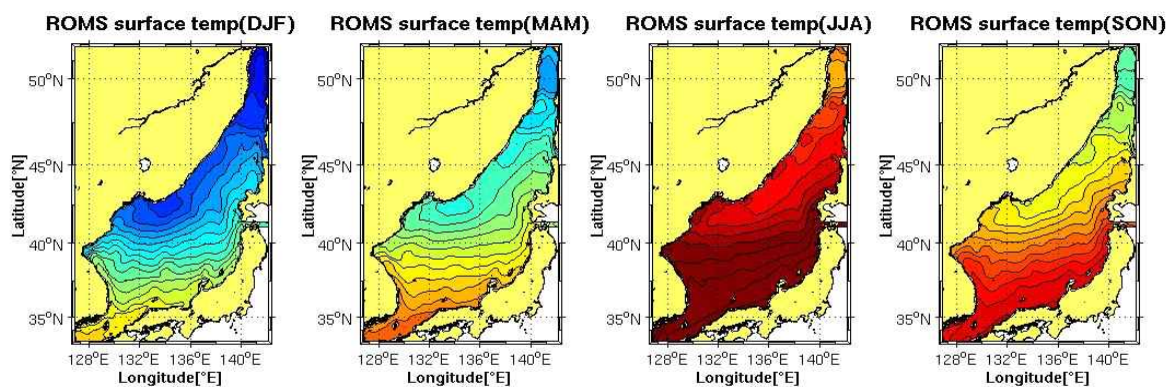


Fig. 6. Seasonal variation of sea surface temperature simulated by the East Sea model. Contour interval is 1 degree.

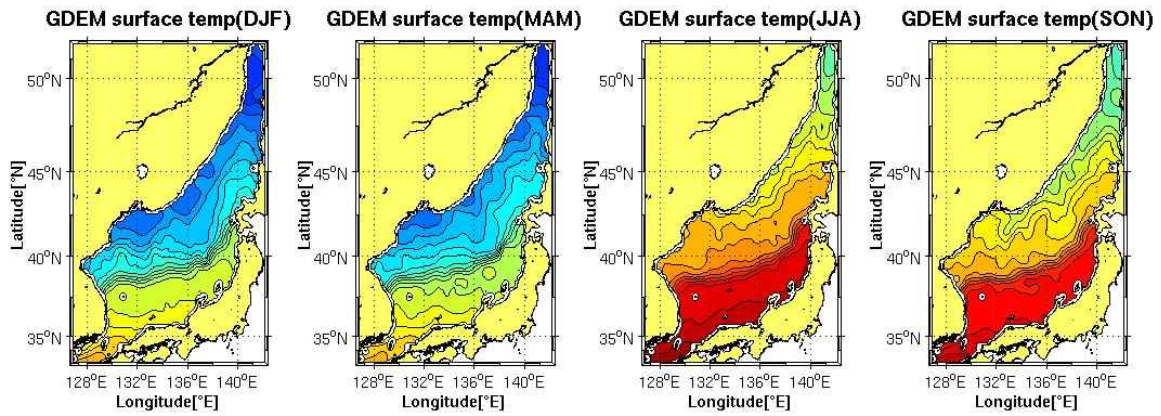


Fig. 7. Same as Fig. 6 but from the GDEM, observation-based data

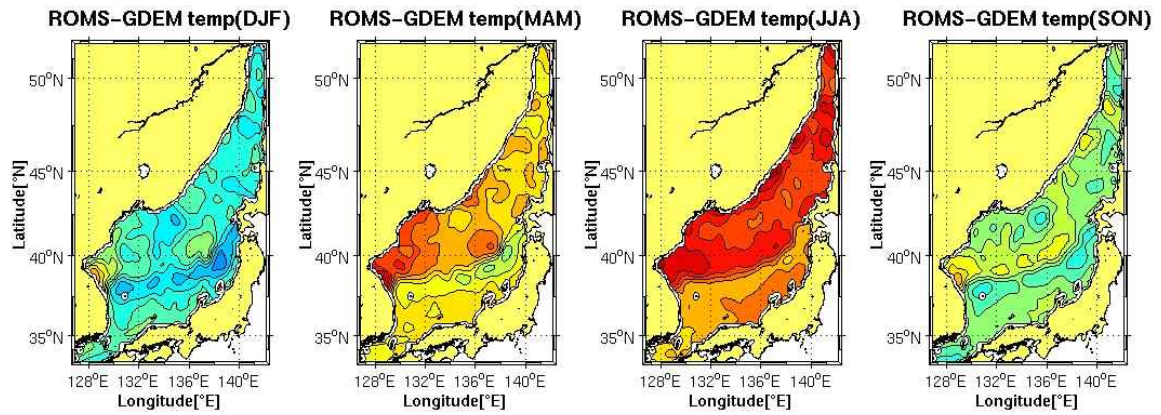


Fig. 8. Model bias in seasonal mean sea surface temperature obtained by subtracting the GDEM data from the East Sea model simulation result

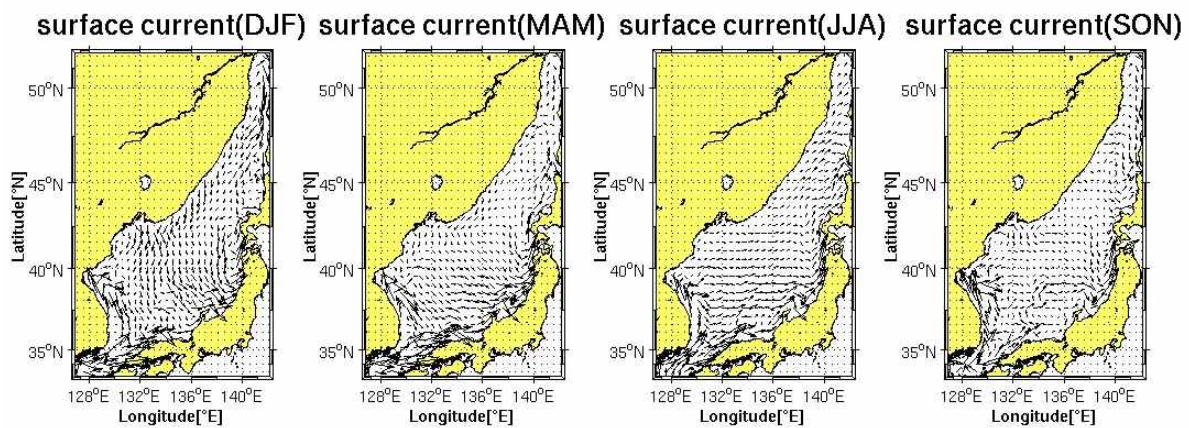


Fig. 9. Seasonal variation in surface currents simulated by the East Sea model

130°E 남북 연직 수온단면에서는 관측과 비슷한 성층 구조가 묘사되었으나, 동한난류가 오른쪽으로 사행하는 약 38°N 부근에서 전 계절에 걸쳐 해양 상층 수온이 관측과 비교하여 고위도에서 수온이 높고 저위도에서 낮은 쌍극자 형태의 차이가 나타났다(Fig. 10). 그 원인은 동한난류가 관측에 비해 높은 위도에서 이안하기 때문으로 사료된다. 38°N 동서 연직 수온단면에서는 표층과 동해 연안 부근이 관측에 비해 높게 묘사된 반면 하층부의 수온은 낮게 묘사되었는데, 이는 따뜻한 동한난류가 관측에 비해 높은 위도에서 이안하면서 난류의 유입이 적어 열수송량이 감소하였기 때문이다(Fig. 11).

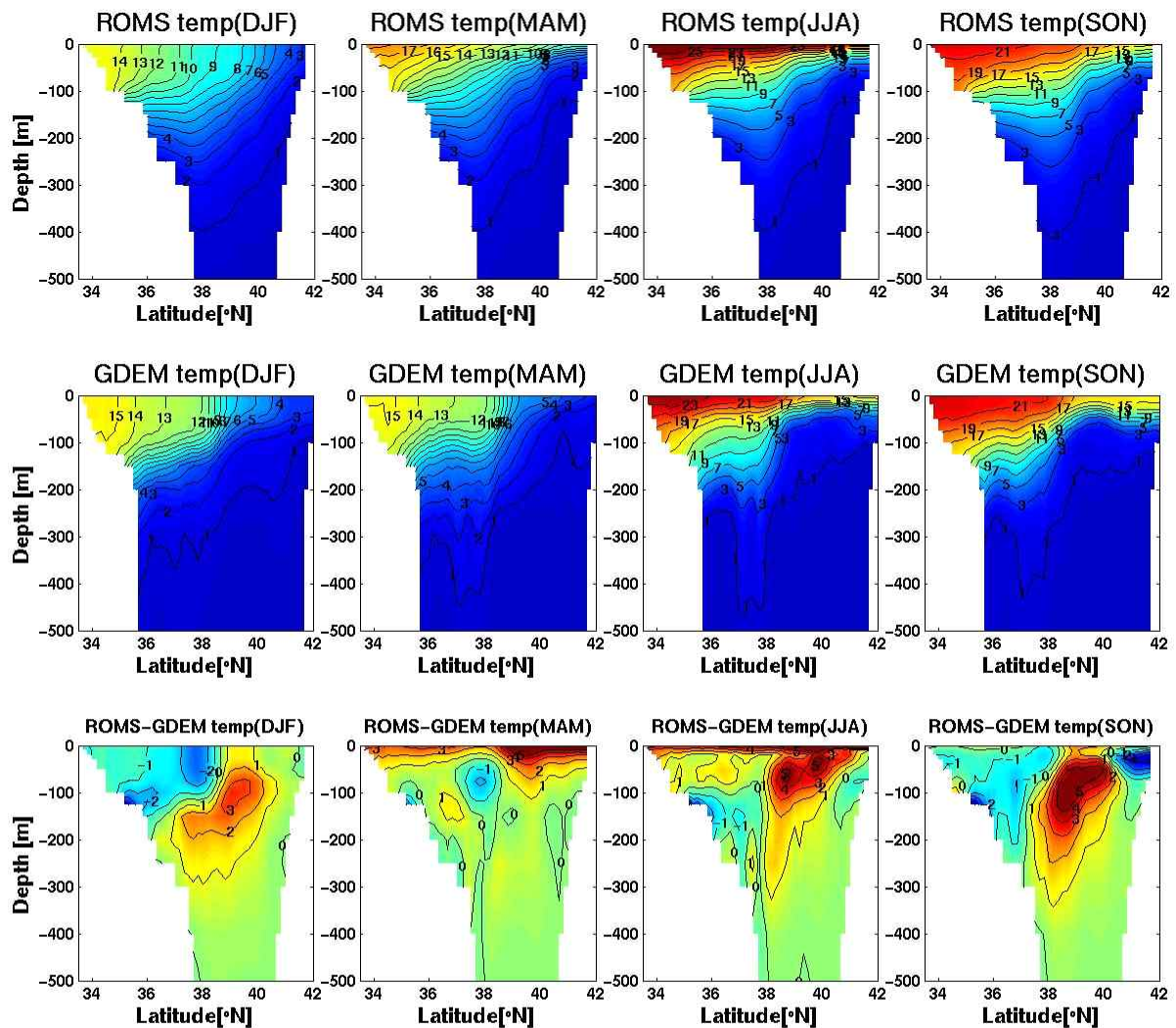


Fig. 10. The vertical sections at 130°E of seasonal mean temperature of sea water obtained from the East Sea model (top), the GDEM observation-based data (middle) and their differences (bottom)

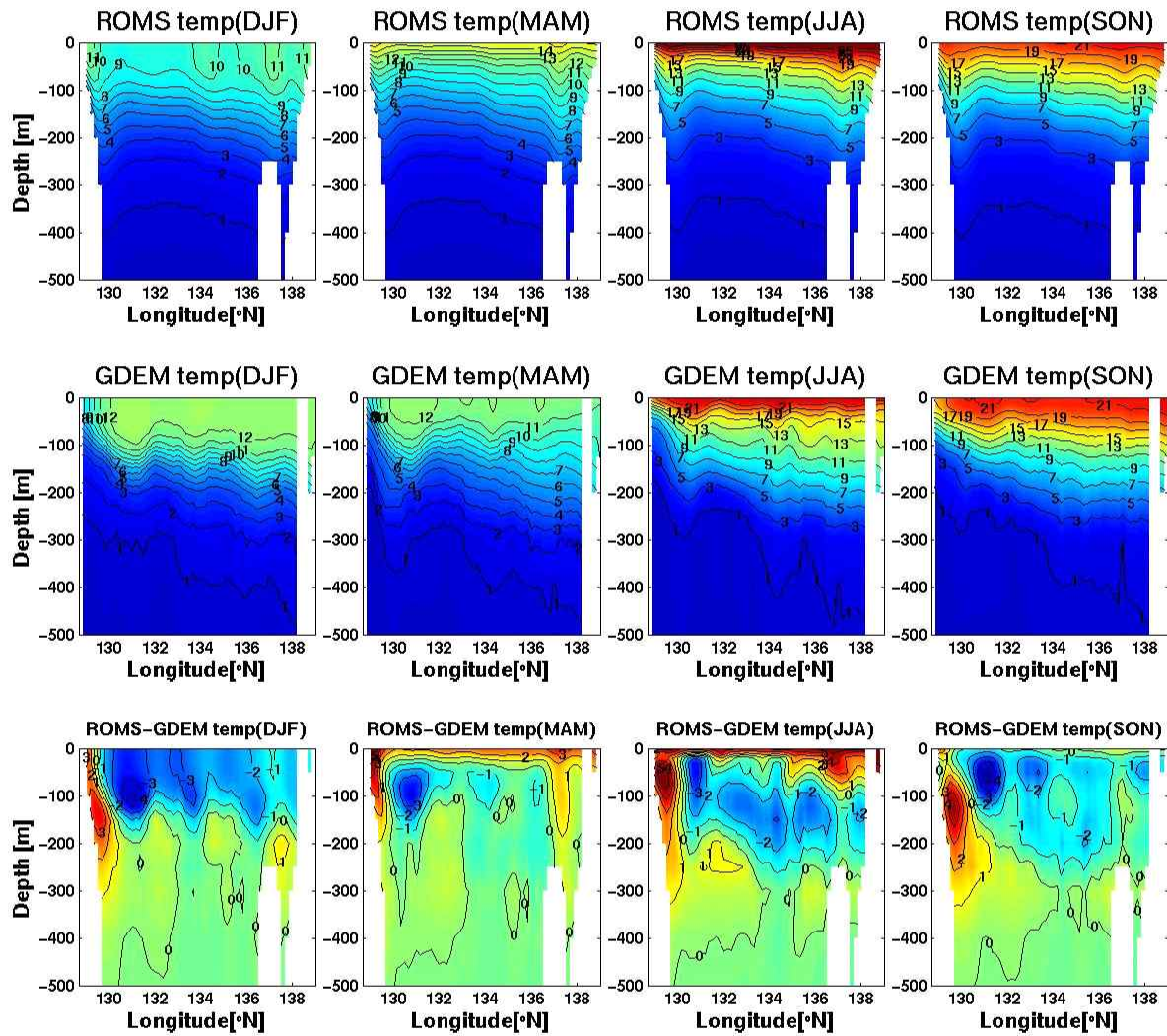


Fig. 11. Same as Fig. 10 but for the vertical sections at 38°N

모형에서 모사한 염분은 130°E, 38°N 연직 단면 모두 수온에 비해 비교적 관측값과 유사한 구조를 보인다: 130°E 연직 단면에서는 가을철 표층을 제외한 전 영역에서 관측과 유사한 수치를 나타냈고(Fig. 12), 38°N에서는 여름철과 가을철의 상층염분이 다소 낮게 모사되었다(Fig. 13).

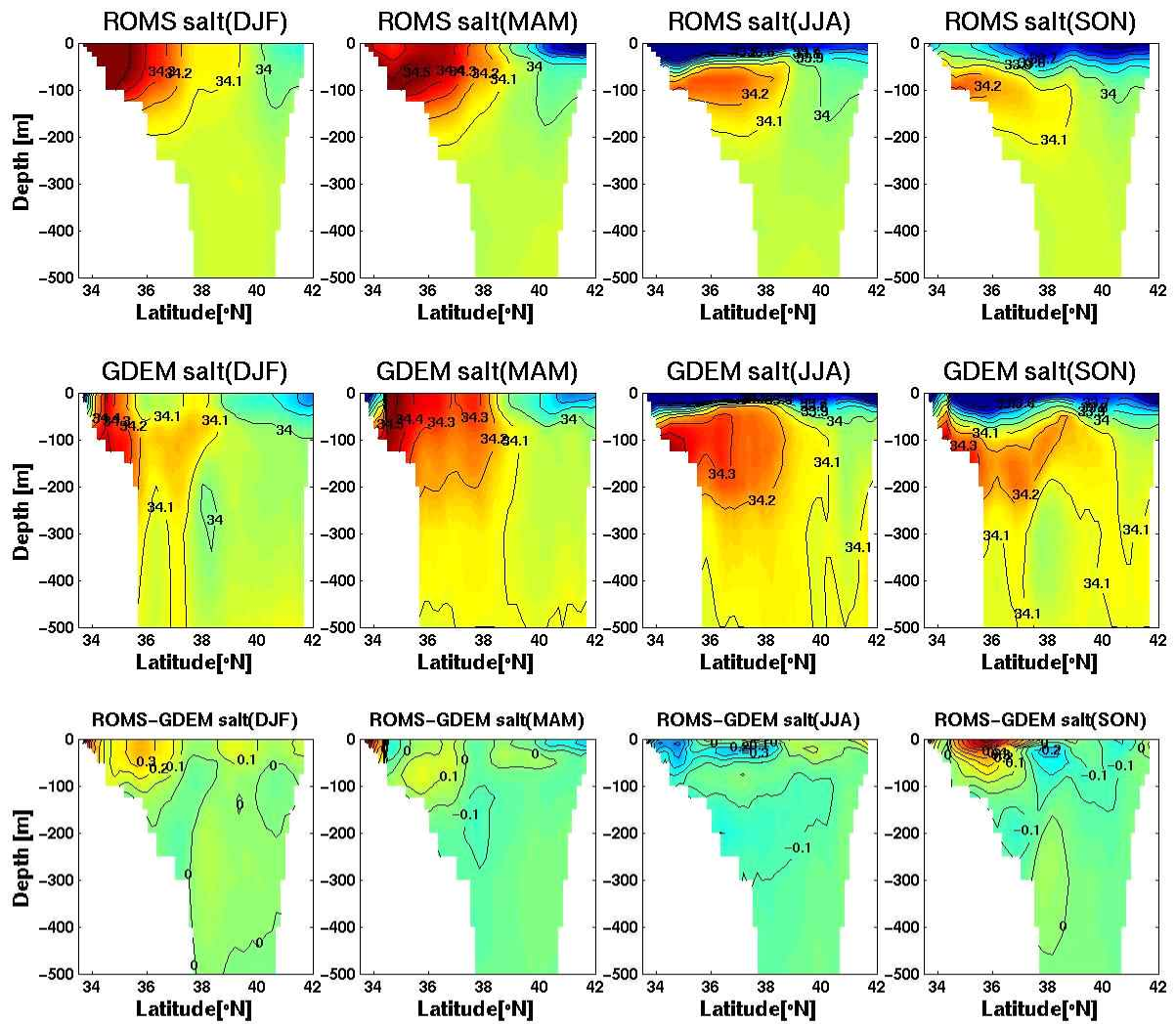


Fig. 12. Same as Fig. 10 but for salinity of sea water

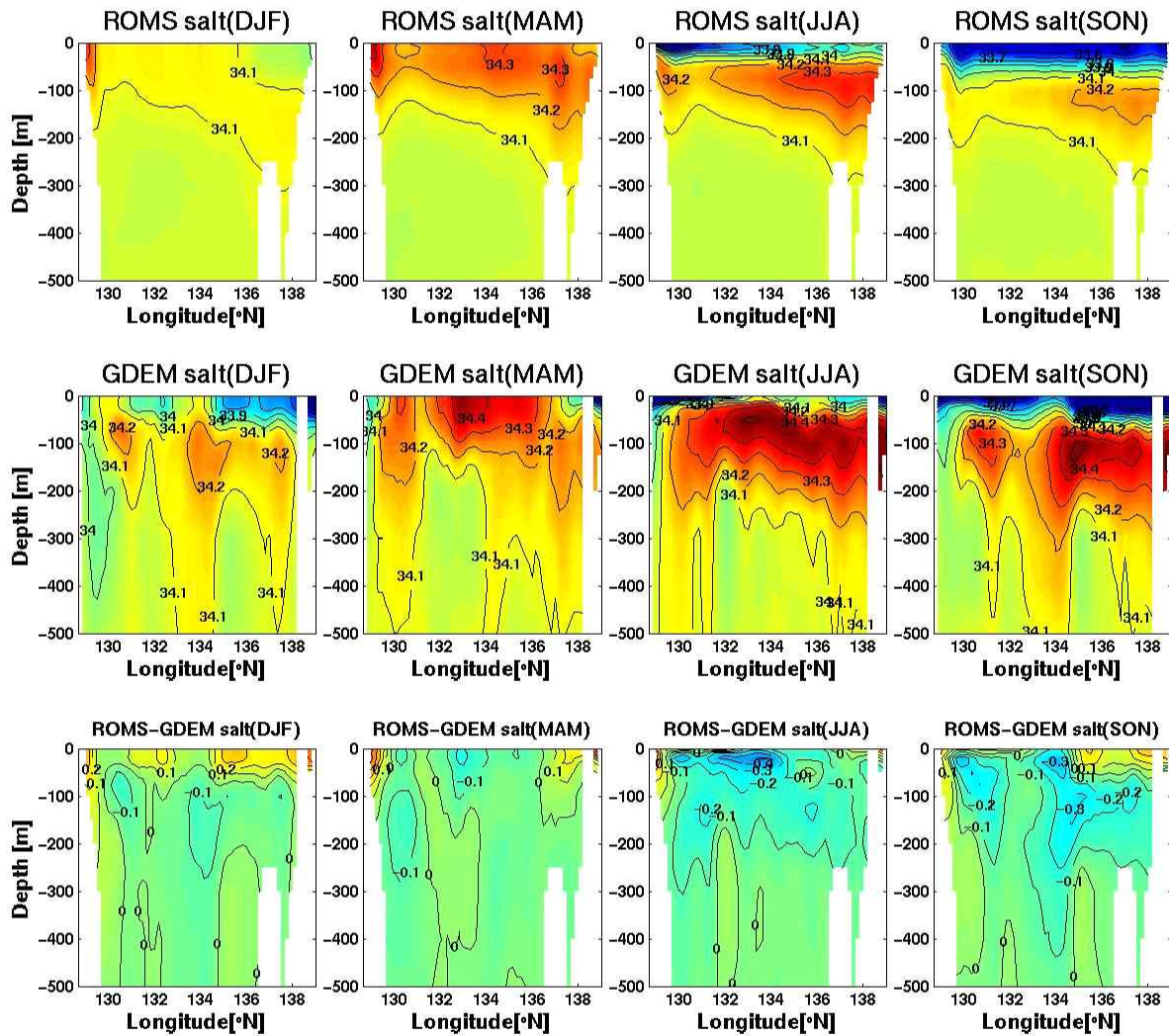


Fig. 13. Same as Fig. 11 but for salinity of sea water

(2) 북서태평양 해양모형 수립 및 수송량 개선

① 해양모형 설정

북서태평양 집합모형 수립을 위해 해양모형 ROMS의 수평 영역은 위도 10°N~55°N, 경도 105°E~175°E로 설정하였고, 해상도는 수평으로 1/12°(약 10km) 간격을 두고 연직으로 30개 층을 두었다(Table 1). 현재 기후에 대한 초기와 경계 자료로는 SODA와 NCEP/DOE(National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 재분석 자료를 활용하였고, 이 재분석 자료의 기후 평균값을 이용하여 100년 스피업 실험을 수행하였다.

Table 1. Configuration of the ocean component for the regional climate coupled modeling for the Northwest Pacific

Model	ROMS
Time-step interval	450sec.(7.5min.)
Model domain	105°E~175°E, 10°N~55°N
Horizontal resolution, vertical layers	1/12°(~10km), L30
Map projection	Mercator
Topography data	ETOPO 5'
Initial & boundary condition	SODA monthly reanalysis
Physical parameterization schemes	KPP vertical turbulent mixing scheme
Restoration	restoring to Levitus' sea surface salinity every 3 days

② 북서태평양 해양 성분모형 성능검증

북서태평양 집합모형 수립을 위해 해양 성분모형의 모사성능을 검증하였다. 해양 성분모형만을 이용한 역학적 규모축소 실험을 수행하고 그 결과를 관측자료 및 CMIP5 전구모형 CanESM2 전구 모사자료와 비교분석하였다. 규모축소 실험은 초기 및 경계조건으로 SODA 월 자료를 사용하였고, 1981년부터 2000년까지 20년에 대해 수행하였다.

북서태평양 지역기후모형에서 모사한 해면수온의 품위 평가를 위해 여름철과 겨울철 20년 평균 기후 해면수온에 대해 OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)와 비교·분석하였다. 계절별 공간분포에서는 약 1~2°C 오차가 발생하였지만(Fig. 14) 한반도 주변해 영역별로 공간 평균한 연도별 편차를 관측치와 비교하였을 때, 모든 해역에서 관측자료와 비슷한 변화를 보였다(Fig. 15). 한편, 재분석 자료를 모형입력자료로 사용한 지역기후모형이 모사한 해면 수온과 혼합층 깊이를 전구기후모형인 CanESM2 모형과 비교하였다. 동해, 황해, 남해를 포함한 한반도 주변해의 해면 수온은 지역기후모형은 작은 오차가 나타나는 반면에, 전구기후모형은 최대 5°C 이상의 차이를 보였고 또한, 혼합층 깊이도 동해 블라디보스토크 근처 연안의 차이를 빼고는 지역기후모형에서 나타내는 오차가 작지만, 전구기후모형은 100m 이상의 차이를 나타내는 것으로 보아 전구기후모형의 불확실성이 큼을 확인할 수 있다(Fig. 16).

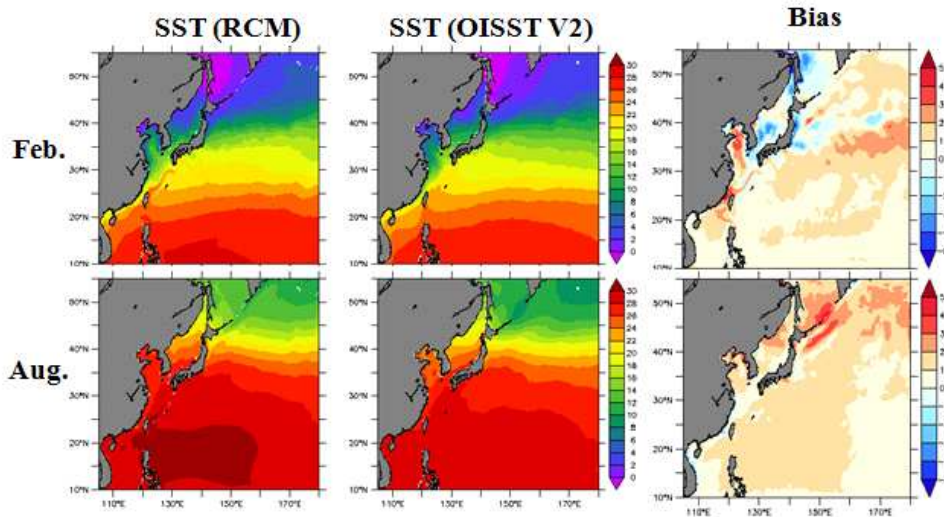


Fig. 14. Climatological seasonal mean sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in February (upper panels) and August (lower panels) averaged for twenty years from 1981 to 2000: (left panels) the dynamical downscaling results from the Northwest Pacific regional ocean model, (middle panels) OISST V2 observational data and (right panels) their differences.

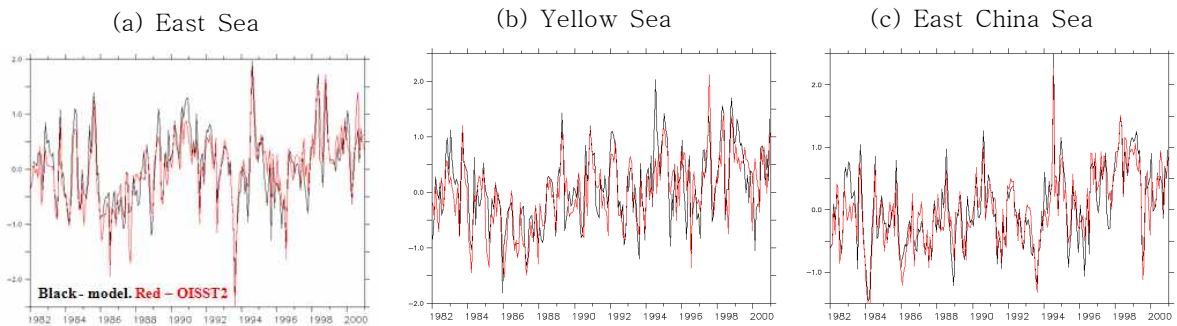


Fig. 15. Monthly anomaly time-series of sea surface temperature based on the climatology for 1981~2000 averaged over the (a) East Sea, (b) Yellow Sea and (c) East China Sea. Black lines represent for the dynamical downscaling results from the Northwest Pacific regional ocean model and red lines for the OISST V2 observational data.

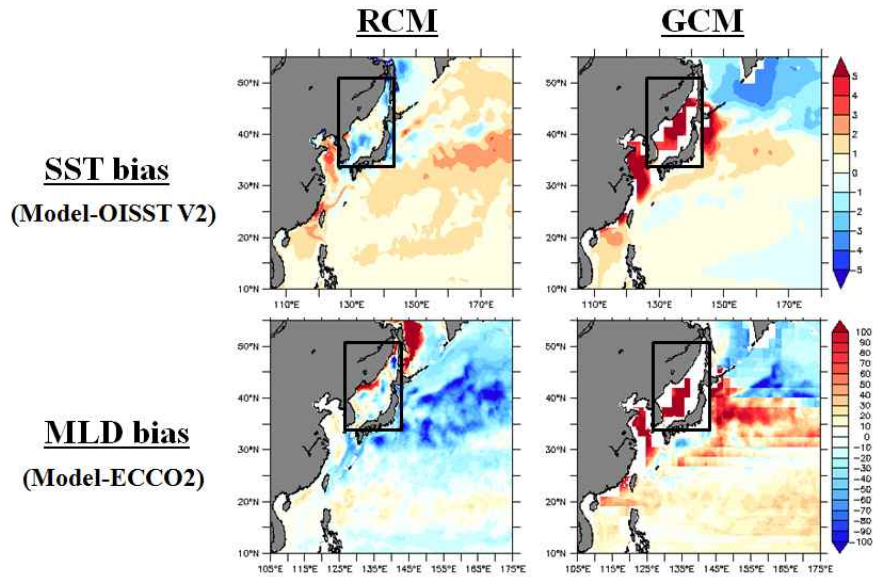


Fig. 16. Model biases in sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in February (upper panels) and mixed layer depth (m) in March (lower panels) averaged for twenty years from 1981 to 2000 based on the OISST V2 and ECCO2 observational data - comparison between the simulation results from (left) the Northwest Pacific regional ocean model and the CanESM2 global model.

③ 북서태평양 해양모형 수송량 개선

북서태평양 해양모형에서 대한해협과 쓰가루해협 수송량이 관측에 비해 작게 나타났다. 본 과제의 3차 년도에는 수심 보정을 통해 이러한 오차를 줄임으로써 해양모형을 개선하였다. 상세지형자료인 ETOPO1을 좀 더 안정적인 ETOPO5로 대체하고 쓰가루해협의 수심을 관측값에 가깝도록 보정한 결과 대한해협의 수송량이 증가한 것이다. Fig. 17은 쓰가루해협에 대한 수심 보정 결과를, Fig. 18은 그에 따라 개선된 대한해협 수송량 계산값을 나타낸다.

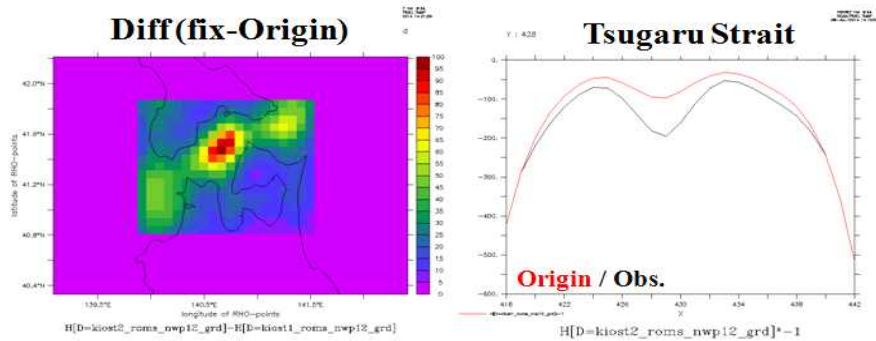


Fig. 17. Difference from the ETOPO bathymetry observational data in water depth at the Tsugaru Strait set by the Northwest Pacific model: (Left panel) before calibration of the model bathymetry and (right panel) after the calibration.

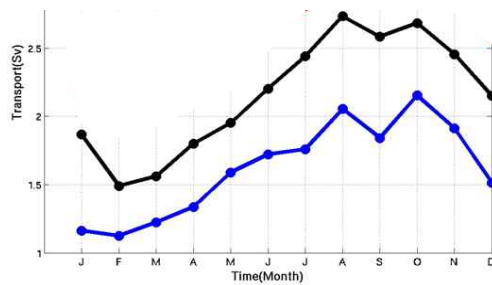


Fig. 18. Monthly mean volume transport (Sv) through the Korea(Tsushima) Strait. Black line represents for the transport after a bathymetry calibration of the Northwest Pacific model and blue line for the transport before the calibration.

(3) 북태평양 해양모형 수립 및 3단계 동지격자체계 수립

북태평양 해양모형은 20°S~65°N까지 해빙 영역을 제외하였고 100°E~80°W로 설정하였다. 이로써 동해-북서태평양-북태평양에 대한 3단계 동지격자체계(Fig. 19)를 수립하였다. 그러나 동해 모형은 영역이 너무 작아서 생기는 문제점들이 발견되었고 북태평양 모형은 세밀한 지역모형 격자로 적분을 수행하는데 계산 부담이 가중되었다. 이에, 집합모형 실험은 북서태평양 해양모형을 활용하여 미래변화 상세도를 시범적으로 제시하는데 초점을 두었다.

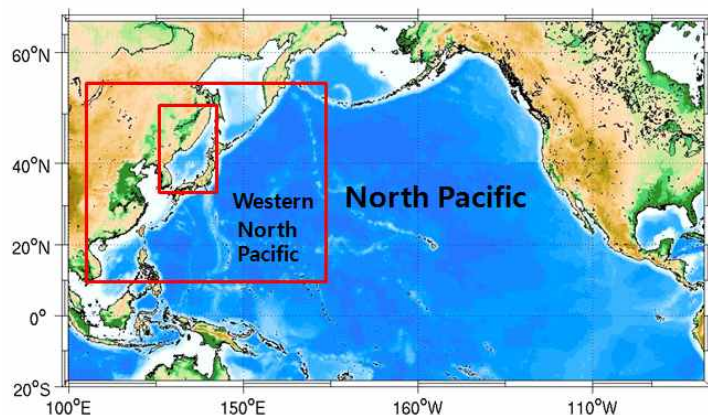


Fig. 19. One-way nesting with three domains (two inner domains in red boxes) for the ocean component model, ROMS: East Sea-Northwest Pacific-North Pacific.

나. 대기 성분모형 수립

(1) 대기모형 설정

접합모형의 대기 성분모형으로는 지역 기상 모델링과 수치예보에 활용되고 있는 WRF(Weather Research Forecasting)를 사용하였다. WRF는 완전 압축성 비정역학 방정식(fully compressible non-hydrostatic equation)을 사용하며, 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 따르고, 연직격자는 지형을 고려하는 σ -좌표계를 사용한다. 본 연구에서는 지면, 행성경계층, 장파/단파 복사, 미세물리, 적운대류 등 주요 대기물리과정에 대해 앞서 Table 2에 나열한 물리모수화 방안을 채택하여 사용하였다.

Table 2. Configuration of the atmospheric component for the regional climate coupled modeling for East Asia

Model	WRF
Time-step interval	180 sec.(3 min.)
Model domain	60°E~150°W, 8°S~65°N
Horizontal resolution, vertical layers	50 km, L28
Map projection	Lambert-conformal
Topography data	USGS 10'
Initial & boundary condition	NCEP/DOE daily reanalysis
Physical parameterization schemes	WSM6, RRTM/Dudhia, M-O, Noah, YSU, KF
Restoration	spectral nudging with NCEP/DOE reanalysis every 6 hours

(2) 대기 성분모형 성능 검증

NCEP/DOE 재분석 자료를 경계조건으로 준 규모축소 실험(CTRL)에서 WRF는 ECMWF-interim 재분석 자료가 보이는 표층 기온을 비교적 잘 모사하였고, 전구모형 CanESM2에서 기온이 높게 모사되었던 오류를 완화하였다(Fig. 20b). 강수에 대해서는 WRF가 다우 지역에서 과도하게 모사하였고, 동중국해 및 한반도 주변 해역에서 적게 모사하였다(Fig. 20e). 20세기 말 현재 기후에 대해 CanESM2은 대체로 GPCP(Global Precipitation Climatology Project) 관측 자료와 비슷한 패턴을 보였으나, 저위도 강한 강수대를 과소평가하였다.

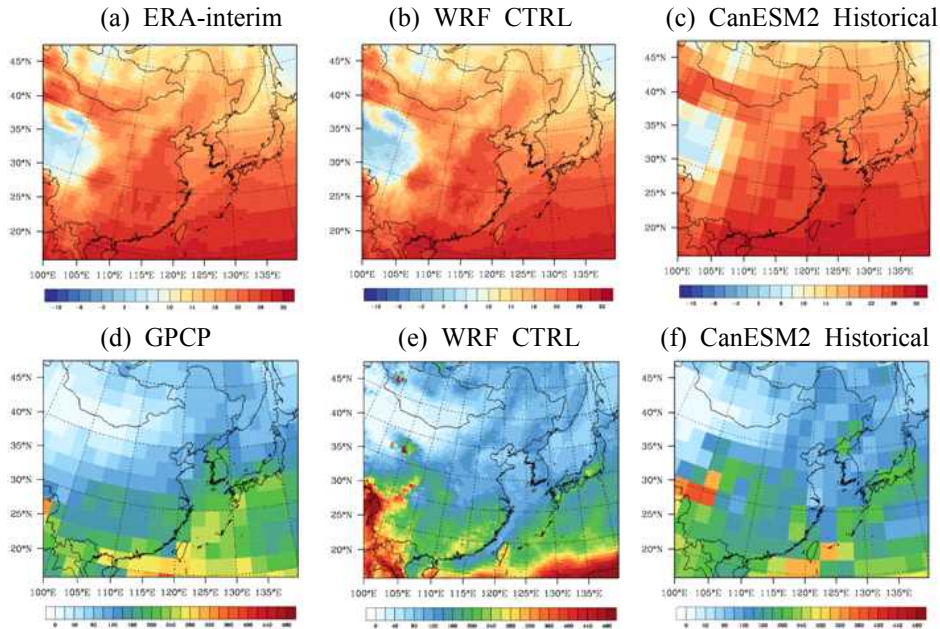


Fig. 20. Summer (May to August) mean from 1981 to 2000 for surface air temperature in $^{\circ}\text{C}$ (upper panels) and precipitation rate in mm month^{-1} (lower panels): (a, d) observation-based ECMWF-interim reanalysis temperature and GPCP precipitation (b, e) dynamically downscaled results by WRF and (c, f) CanESM2 global model data,

(3) 분광너징 기법의 적용을 통한 바람장 개선

대기성분 모형 WRF로 규모축소한 동아시아 바람장을 NCEP/DOE 재분석 자료와 비교해 본 결과, 관측 및 재분석 자료에서 보이는 여름철 남풍 계열 바람이 WRF에서는 북풍 계열로 상반된 바람 구조를 보였다(Fig. 21). 이것은 적분 영역이 상대적으로 작은 지역 기후모형에서 흔히 보이는 계통적 오차로서, 광역 규모 대기 운동을 적절히 묘사하지 못하기 때문인 것으로 알려져 있다. 이러한 오차를 제거하기 위해 분광너징 기법이 널리 이용되어져 왔다. 이에, NCEP/DOE 재분석 자료에 포함된 수평 바람, 기온 및 지위고도로부터 1000 km 이상 장과를 추출하여 약 500 hPa 고도에서부터 모형 상단(50 hPa)까지 적분 매 1시간마다 모형의 변수 값으로 복원시켜주는 분광너징 기법을 적용하였다. 그 결과, 대기성분 모형은 재분석 자료에 나타난 여름철 남풍 계열 바람을 방향과 크기 모두에 대해 개선된 결과를 보였다(Fig. 22).

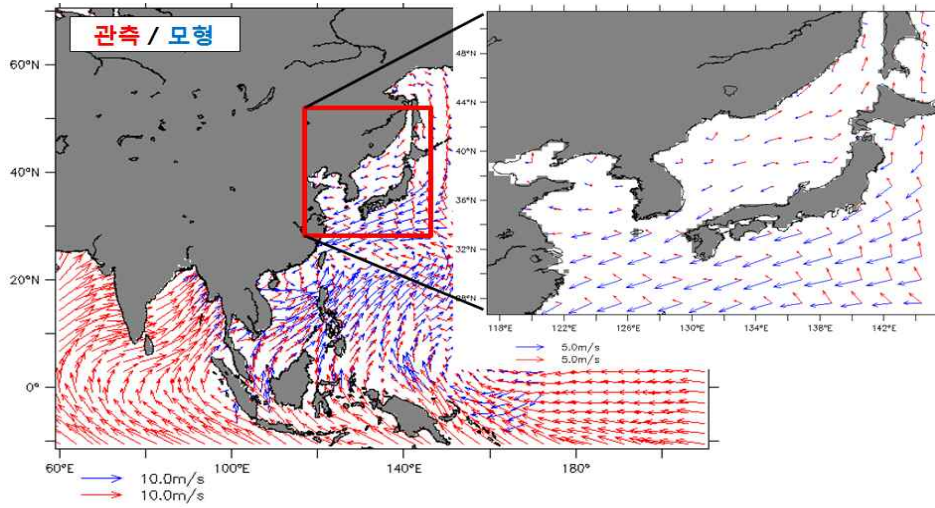


Fig. 21. Climatological summer mean horizontal wind at 850 hPa. Red arrows represent for the NCEP/DOE reanalysis and blue arrows for the dynamically downscaled results by WRF without spectral nudging.

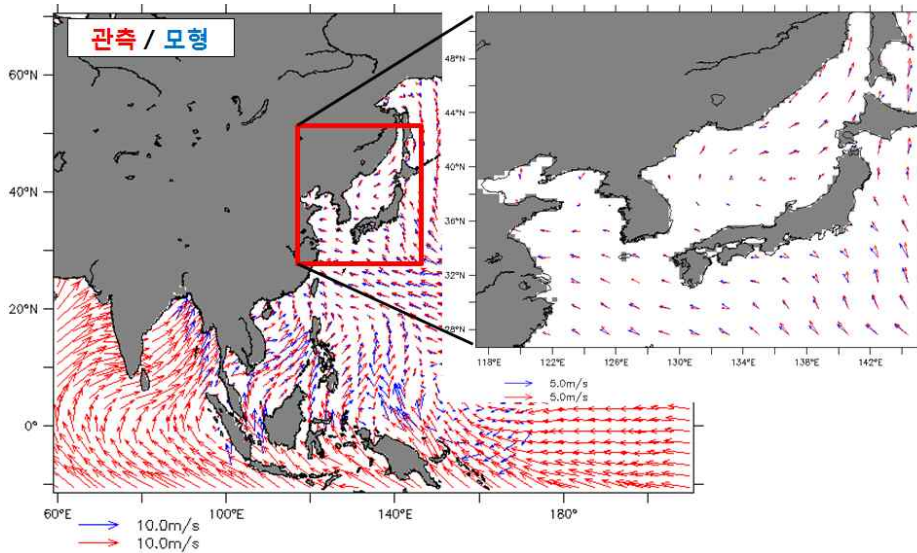


Fig. 22. Same as Fig. 21, but the blue arrows represent for the dynamically downscaled results by WRF with spectral nudging applied from 850 hPa to the model top.

2. 접합모형 수립

본 과제에서 수립한 접합모형은 미지질조사국(USGS)에서 개발한 COAWST(Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport) 접합모형을 기반으로 한반도 주변해역

지형에 맞도록 초기 및 경계 자료를 설정하고 좀 더 현실적인 모사 결과를 얻을 수 있도록 여러 가지 물리 모수들을 조정하였다. 이와 같이 모형 영역을 변경하는 일은 특히 해양모형의 경우에 전문적인 해양물리 및 수치모델링 지식과 경험적 지식, 그리고 충분한 계산 자원과 시행착오의 시간이 요구된다.

본 과제의 1차 년도에서는 동해를 포함하는 접합모형을 수립하였고, 해양/대기 성분모형에 동일한 수평 격자체계 및 해상도를 설정함으로써 해양-대기 간 자료 교환에 수반되는 내삽 과정을 없애고 격자 불일치에서 발생하는 수치적 오류를 지양하였다. 또한, COAWST 모형에 사용된 접합자 MCT(Model Coupling Toolkit)를 최적화함으로써 접합 모델링에 소요되는 적분시간을 단축시킴으로써 계산 부담을 완화시켰고, 대기 성분모형을 최신 버전으로 업그레이드하였다.

본 과제의 2차 및 3차 년도에는 북서태평양을 포함하는 접합모형을 수립하였다. 해양 성분모형에서 한반도 주변 해협 수심을 좀 더 관측 자료값에 가깝도록 변경하여 수송량 모사 능력을 제고하였다. 대기 성분모형에 분광너징 기법을 이용함으로써 여름 몬순 기간에 형성되는 바람 장을 좀 더 현실적으로 개선하였다.

본 과제를 통해 수립된 접합모형은 대기모형 WRF에 의해 모사된 바람, 기압, 습도, 기온 등을 10 m 바람속도와 열속으로 계산하여 접합자 MCT를 통해 해양모형 ROMS로 전달하고, 해양모형은 해면수온을 대기모형으로 전달하도록 구성하였다. MCT를 이용한 양방향 자료교환은 1시간 간격으로 이뤄지도록 하였다.

가. 접합자 코드 최적화

COAWST 접합모형은 해양모형과 대기모형이 서로 자료를 교환할 때 통신을 맡은 MCT 송신함수와 수신함수의 호출 시기가 비효율적으로 배치되었다(Fig. 23). 따라서 통신함수의 호출 시기를 변경함으로써 통신대기 시간을 최소화하였다(Fig. 24). 접합자 개선 전에는 교환 항목이 늘어남에 따라 실행 시간도 거의 선형적으로 증가한다. 반면, 개선 이후에는 교환 항목 수가 20개를 넘어가게 되면 실행시간이 더 이상 증가하지 않아 개선 전 대비 실행시간이 최대 9 % 정도 감소하였다(Fig. 25).

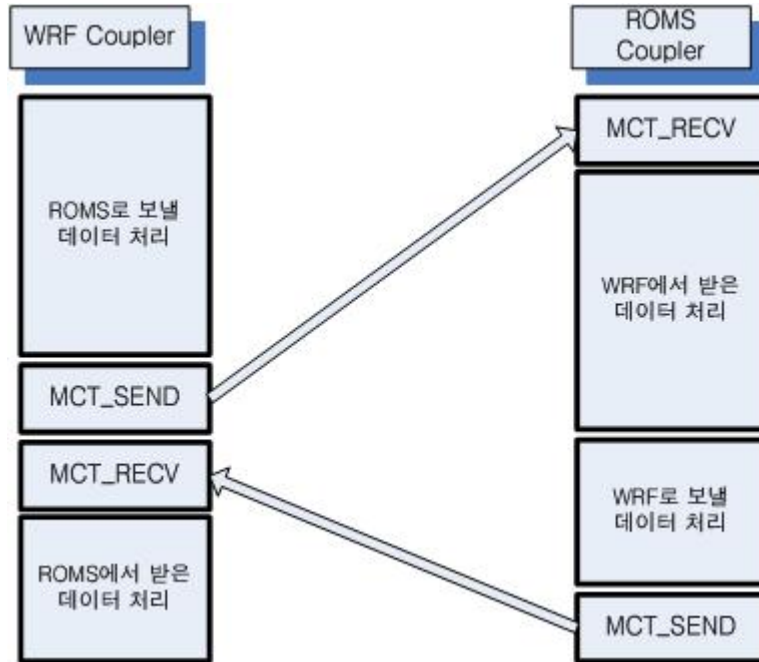


Fig. 23. Computational flow diagram of MCT

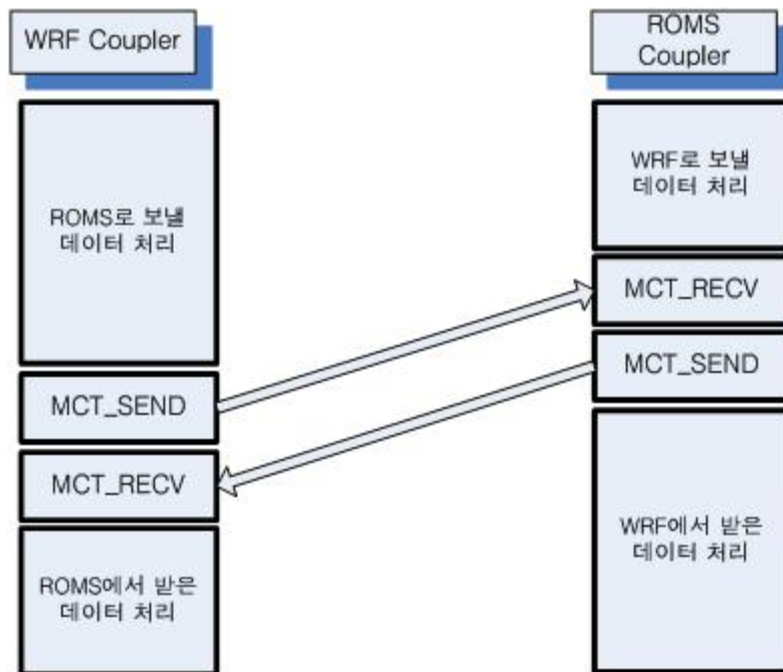


Fig. 24. Revised flow diagram of MCT

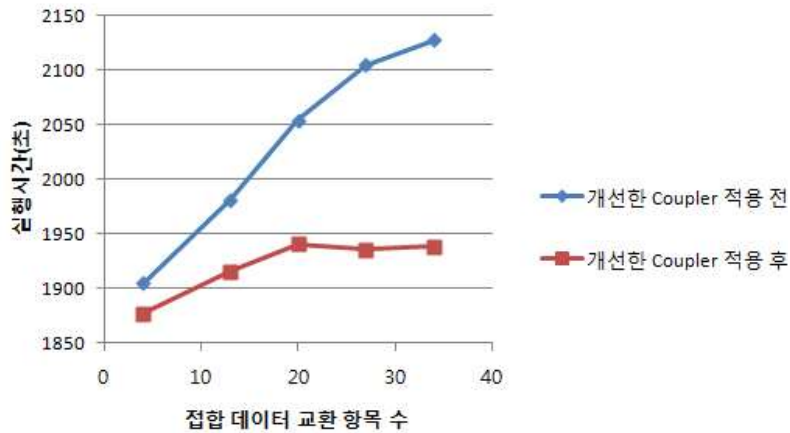


Fig. 25. Execution time of our established coupled model for the East Sea: comparison between the time before vs. after the optimization of MCT

나. 동해 접합모형 수립

해양/대기 접합모형에서 성분모형들 사이에 수평격자의 크기, 모양 및 위치가 서로 다를 경우, 내/외삽 프로그램을 통해 재격자화하여 성분모형들 사이의 자료교환을 용이하게 한다. 재격자화를 하는 데 가장 널리 활용되어 온 것은 미국 Los Alamos 연구소에서 개발한 SCRIP(Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package)이고, 본 과제에서 수립된 북서태평양 접합모형에서도 이 프로그램을 사용한다. Fig. 26은 해양모형과 대기모형이 서로 교환하는 변수들의 이름과 MCT를 통한 접합 흐름을 간단하게 표현한 모식도이다.

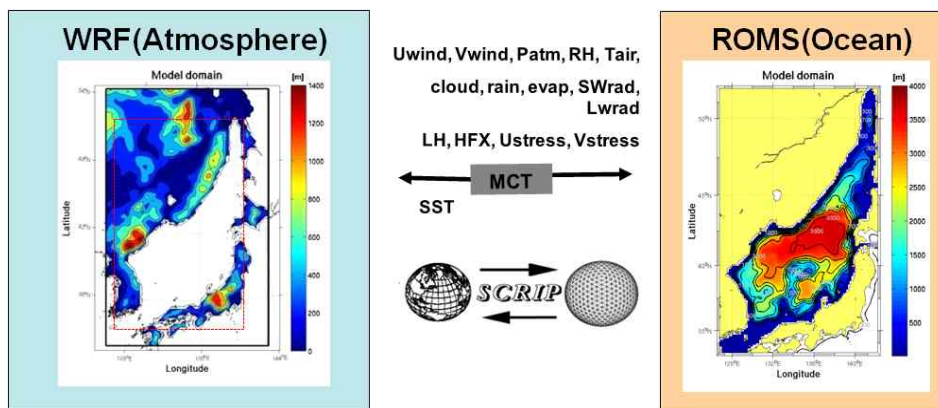


Fig. 26. Diagram for the data exchange between ocean and atmospheric components through a coupling tool, MCT

그러나 이러한 재격자화 과정에서 내/외삽에 따른 계산오차가 발생할 뿐만 아니라, 성분모형 간 서로 다른 격자 크기에서 생성된 흐름이나 운동의 규모에 차이가 생김으로써 권역 간 상호작용이 적절하게 모사되지 못한다. 이 과제의 1차 년도에 수립된 동해 접합모형은 이러한 문제점을 최소화하기 위해, 해양모형과 대기모형의 수평격자체계를 일치시켰다. 한편, 대기 성분모형 WRF는 3.2에서 3.4로 버전 업그레이드를 수행하였다. Table 3은 해양과 대기 성분모형의 설정 내용을 요약한 것이다.

Table 3. Configuration of the regional climate coupled model for the East Sea

	WRF (Ver. 3.4)	ROMS (Ver. 3.4)
적분 기간	2000.01.01.-2004.12.31 (5년)	
적분 간격	100 초	800 초
저장 간격	3 시간	일평균, 월평균
접합 간격	1600 초	
경도	126.5°E - 142.5°E	
위도	33°N - 52°N	
수평 해상도	1/6° (≒ 20km)	
연직층	28층 (최상위층 : 50hPa)	30층
지형	USGS10	ETOPO5
초기조건	NCEP R2	10년 스핀업 자료
경계조건		수온, 염분, 유속 관측자료
물리 모수화	미세물리: WSM6 복사: RRTM/Dudhia 적운: Kain-Fritsch 행성경계층: YSU 지면: Noah	연직난류혼합 : KPP

다. 북서태평양 접합모형 수립

이 과제에서 수립된 북서태평양 접합모형의 영역은 기존 동해 모형에서 해양/대기 영역을 서쪽으로는 편서풍의 사행을 고려하고, 남쪽으로는 강수관련 중규모 에디, 동쪽으로는 쿠로시오 이안 위치 그리고 북쪽의 해빙을 고려하여 영역을 설정하고 해양은 10 km, 대기는 50 km로 해상도를 설정하였다(Fig. 27).

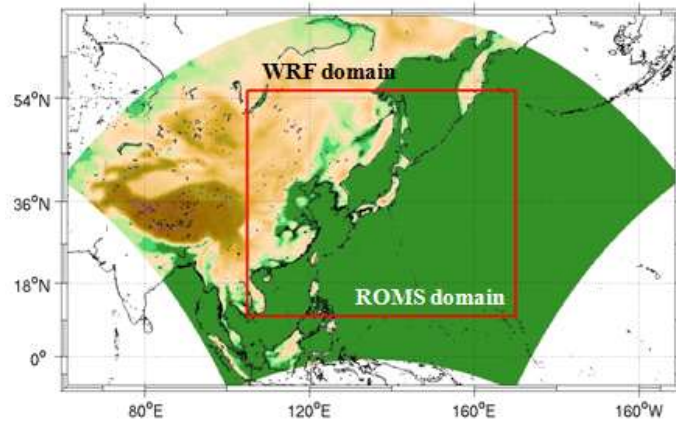


Fig. 27. Horizontal domain for WRF (colored) and ROMS (red box) of the regional climate coupled model for the Northwest Pacific

북서태평양 접합모형은 1차 년도에 수립한 동해 접합모형과 달리 접합자 해양모형과 대기모형의 수평격자체계가 서로 다르며, MCT와 재격자화 프로그램 SCRIP을 이용하여 두 성분모형 사이에 양방향 자료교환이 이뤄진다. 해양 성분모형과 대기 성분모형은 매 적분 1시간마다 MCT를 이용하여 정보를 교환하는데, 해양은 대기로부터 표층 바람, 표층 대기 상대습도, 표층 대기 온도, 구름(운량), 단파 및 장파 해면 열 속, 해면 기압을 받고, 대기는 해양으로부터 해면수온을 받는다. 해양모형은 3일마다 해면염분을 Levitus 기 후 값으로 복원하고(Griffies et al. 2009), 대기모형은 6시간마다 NCEP/DOE 재분석 자료로 분광너징을 실시하는데 지역기후모형이 광역규모 운동을 표현하지 못하는 데 따르는 제약을 완화시켜주기 위한 것이다. Table 4은 접합모형 접합 시 해양-대기 사이 교환 변수 목록을 나열한 것이다.

Table 4. List of exchange variables in the regional climate coupled model

Model	ROMS	WRF
Surface forcing & exchange variables	surface wind, surface pressure, shortwave and longwave radiation at surface, cloudiness, surface air temperature, relative humidity from WRF	sea surface temperature from ROMS
Coupling frequency (data exchange interval)	every 1 hour	every 1 hour

제 2 절 미래변화 상세도 시범 제시

1. 접합모형 초기 실험 및 성능 검증

가. 태풍 가상 실험

초기 수립한 접합모형은 태풍 가상 실험을 통해 성능을 검증하였다. 태풍이 외해에서 연안 근처로 상륙한다는 가정 하에 가상 태풍을 동쪽(수심이 일정하게 깊은 구역)에서 서쪽(수심이 점점 얕아지는 구역)으로 이동하도록 구성하고, 태풍 통과에 따른 상층 해양 반응 실험을 하였다. 태풍의 저기압성 바람에 의해 발생하는 연직혼합과 용승효과로 상층 해양 냉각이 발생하고, 상대적으로 태풍 진로 우측에서 강한 해면 수온 냉각이 발생하였다(Fig. 28).

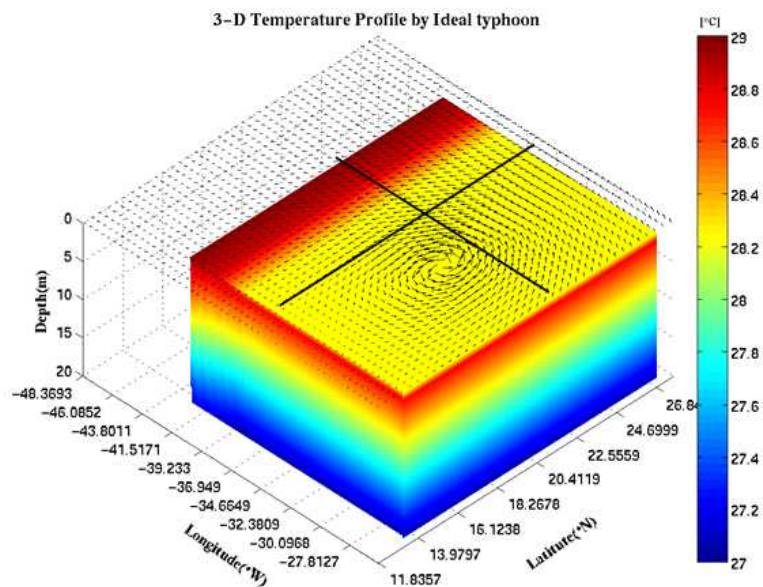


Fig. 28. An initial state of the virtual typhoon passing through the upper ocean with flat bottom topography

나. 동해 접합모형 성능 검증

이 과제의 1차 년도에 수립된 동해 접합모형의 성능을 검증하기 위해 2000년부터 2004년까지 접합실험을 수행하였다. 해양모형의 초기 조건으로는 제1절에서 다룬 동해모형 스

편입 결과를 사용하였고, 대기모형의 초기 및 경계조건은 6시간 간격의 NCEP/DOE 재분석 지구자료를 사용하였다.

(1) 해류, 수온 및 염분의 분포

동해 집합모형의 검증실험 결과, 겨울철 리만한류와 북한한류는 관측에 비해 평균적으로 강하게 나타났고, 동한난류는 상대적으로 약하게 나타났다. 해양 성분모형의 검증결과와 마찬가지로 봄철부터 가을철까지 동한난류가 강하게 북상하여 약 38°N 부근에서 동쪽으로 사행하지 않고, 연안을 따라 알려진 위도보다 북쪽으로 이루어졌다. 이것은 동한난류가 수심의 영향을 크게 받는데 모형의 수심이 관측과 차이를 보이기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 29). 집합모형에서 전체적으로 동한난류는 약 38°N보다 고위도까지 이루어지는 것으로 모사되었다.

해면수온은 평균적으로 계절변화를 뚜렷하게 나타냈으며, 모사된 5년 동안에도 뚜렷한 경년 변동성을 드러냈다(Fig. 30). 전체적으로 모형 해면수온은 해양 성분모형의 검증결과와 마찬가지로 아극전선(subpolar front)을 경계로 관측에 비해 남쪽이 차갑게 모사된 반면, 북서쪽은 동한 난류의 고위도 이동으로 따뜻하게 모사되었다(Fig. 31). 130°E 연직 단면에서는 약 38°N을 기준으로 고위도의 표층부터 약 300m까지 모형 수온이 관측에 비해 높게 모사되었고, 저위도는 차갑게 모사되었다(Fig. 32). 38°N 연직단면에서는 표층부터 약 250m 까지 전 계절에 걸쳐 수온이 낮게 모사되었는데, 동한난류의 고위도 이동으로 인해 해류에 의한 열수송이 약하기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 33). 모형 염분은 130°E와 38°N 연직 단면 모두 관측과 비슷하게 모사되었으나, 표층에서 다소 높게 모사된 것은 고염분 특성을 가진 동한 난류의 고위도 이동으로 추정된다(Fig. 34, 35).

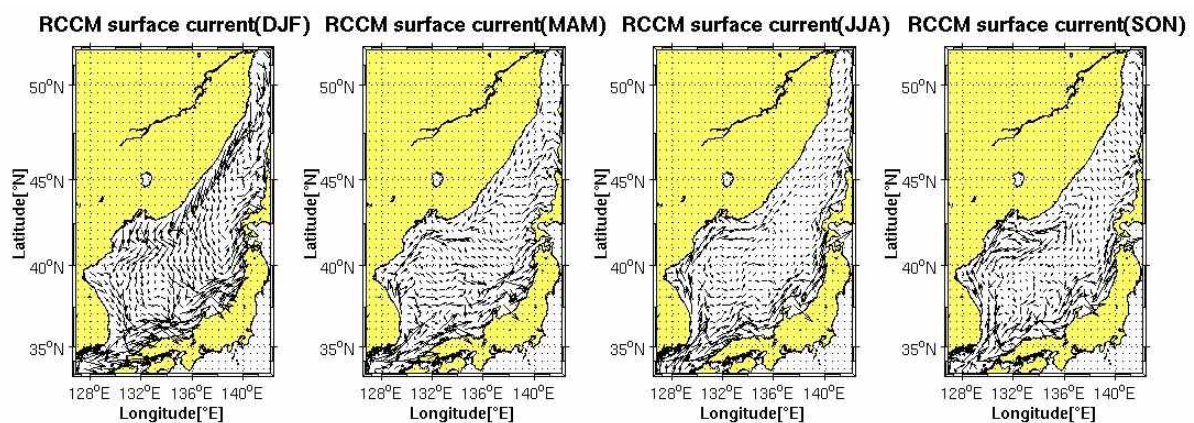


Fig. 29. Seasonal mean averaged for year 2000~2004 of surface current simulated by the regional climate coupled model for the East Sea

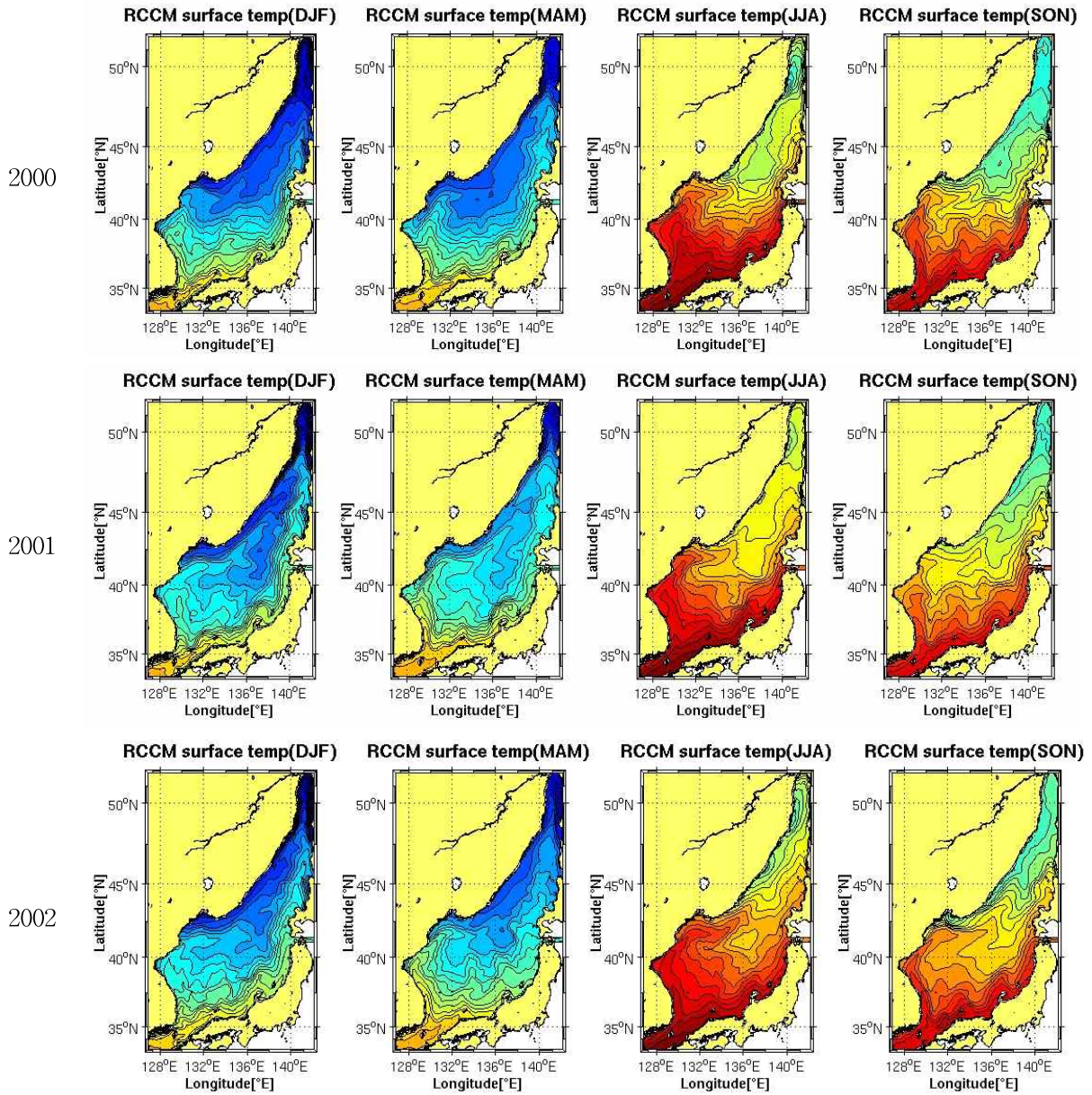


Fig. 30. Seasonal mean of sea surface temperature simulated by the regional climate coupled model for the East Sea: Each row panels (from top to bottom) present the temperature distribution for each year from 2000 to 2004. Contour interval is 1 degree. (to be continued)

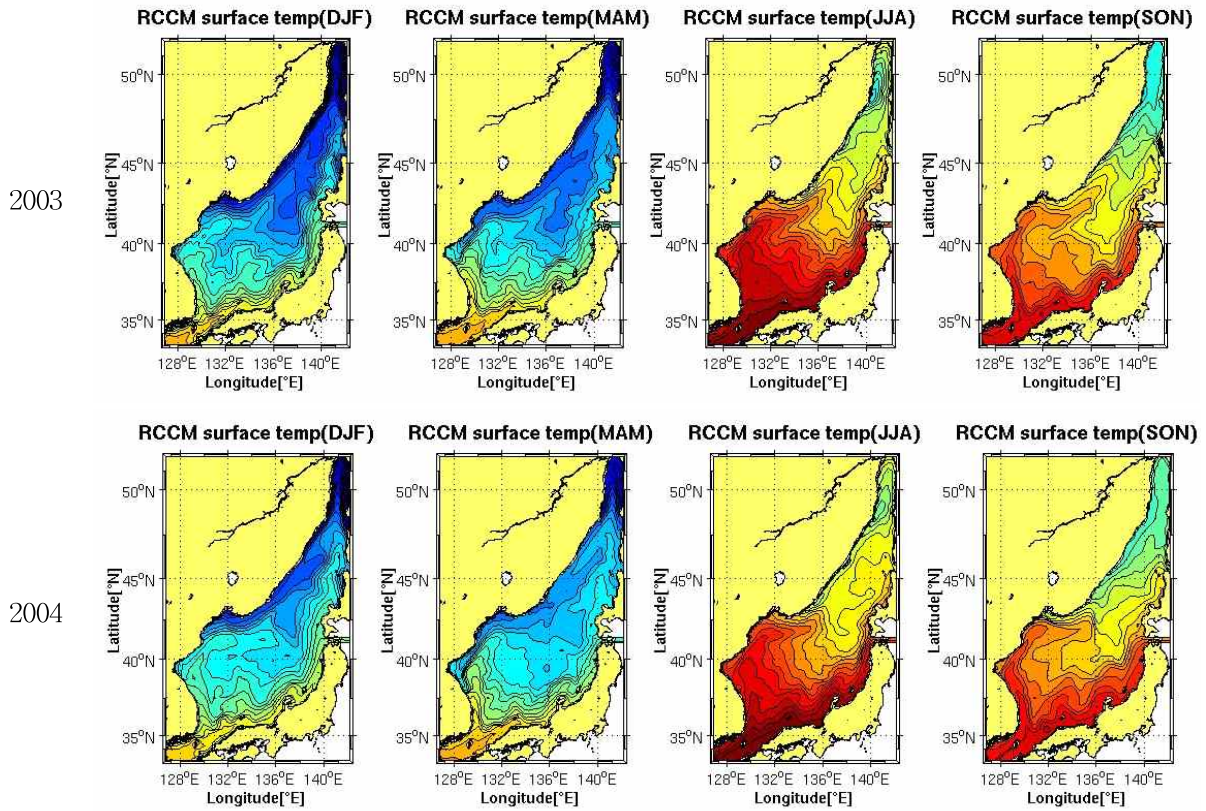


Fig. 30. (continued). Seasonal mean of sea surface temperature simulated by the regional climate coupled model for the East Sea: Each row panels (from top to bottom) present the temperature distribution for each year from 2000 to 2004. Contour interval is 1 degree.

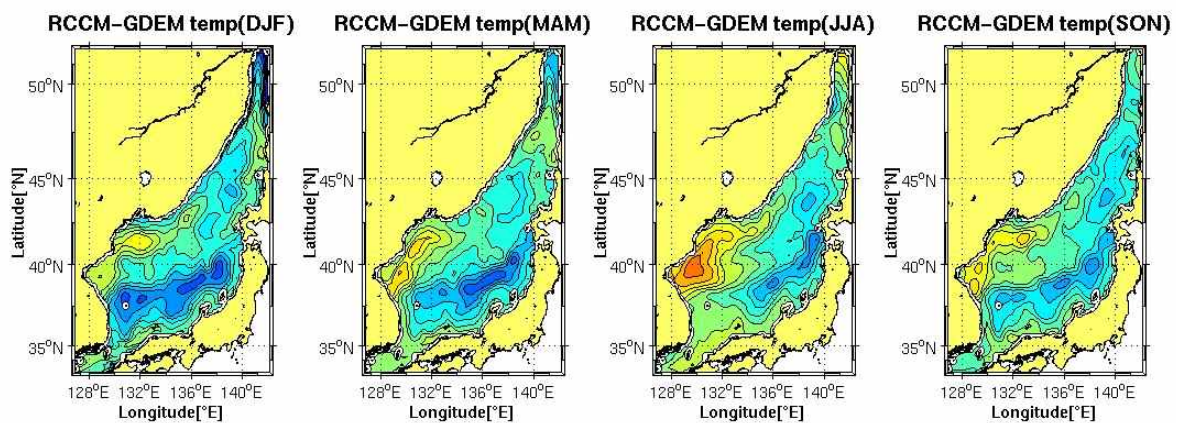


Fig. 31. Seasonal mean bias averaged for year 2000~2004 of surface current simulated by the regional climate coupled model for the East Sea: difference from the GDEM observation-based data. Contour interval is 1 degree.

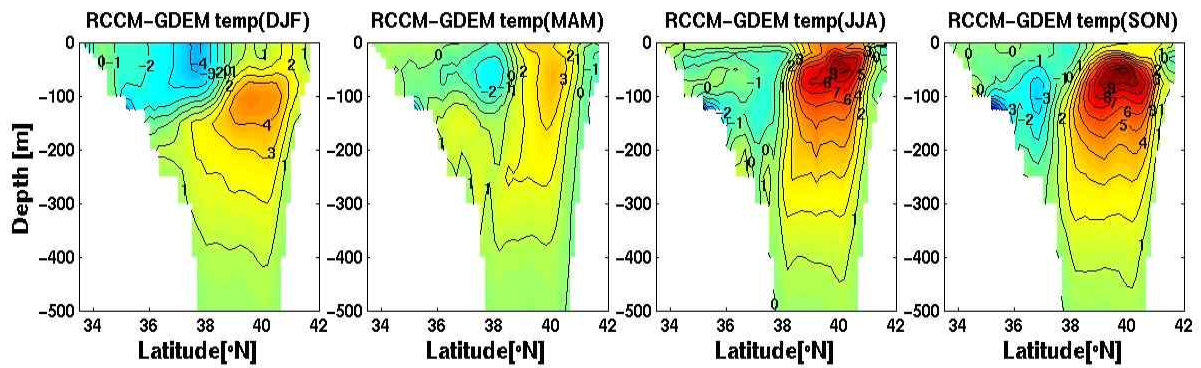


Fig. 32. Latitude–depth cross section of the difference in sea water temperature at 130°E between the regional climate coupled model for the East Sea simulation result and the GDEM observation–based data seasonally averaged for five years from 2000 to 2004.

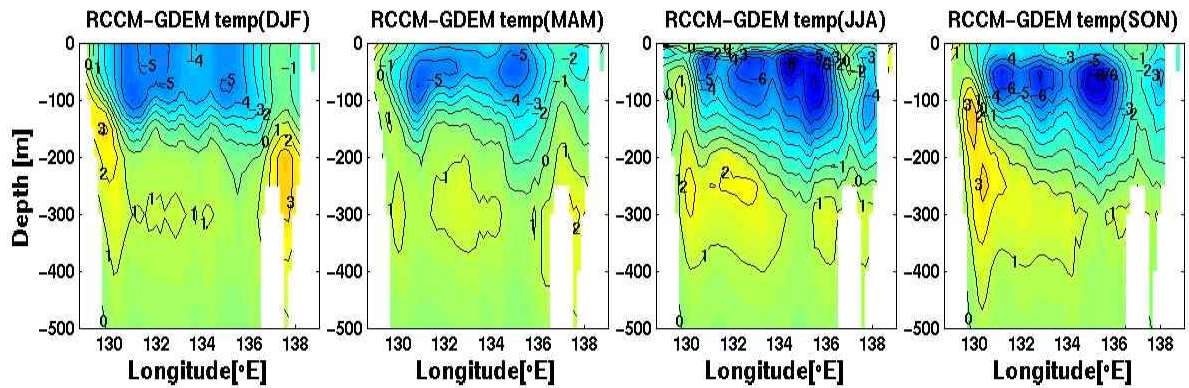


Fig. 33. Same as Fig. 32 but for the longitude–depth cross section at 38°N

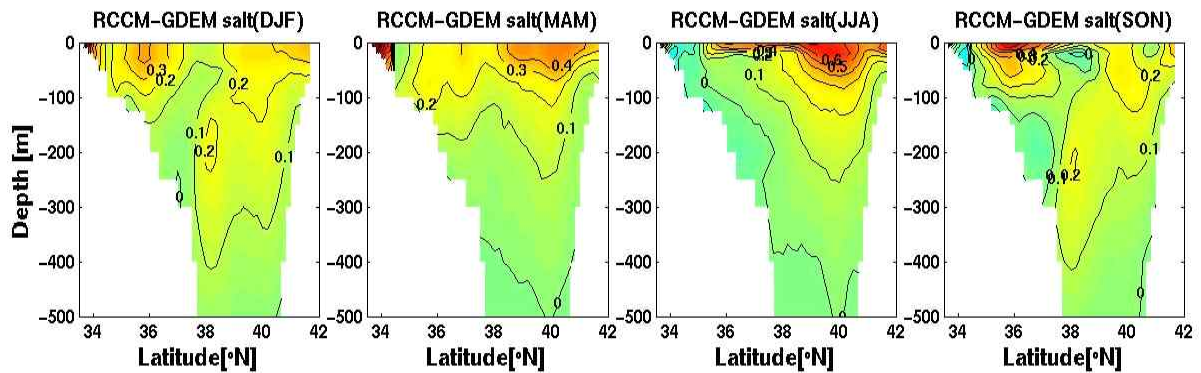


Fig. 34. Same as Fig. 32 but for salinity of sea water

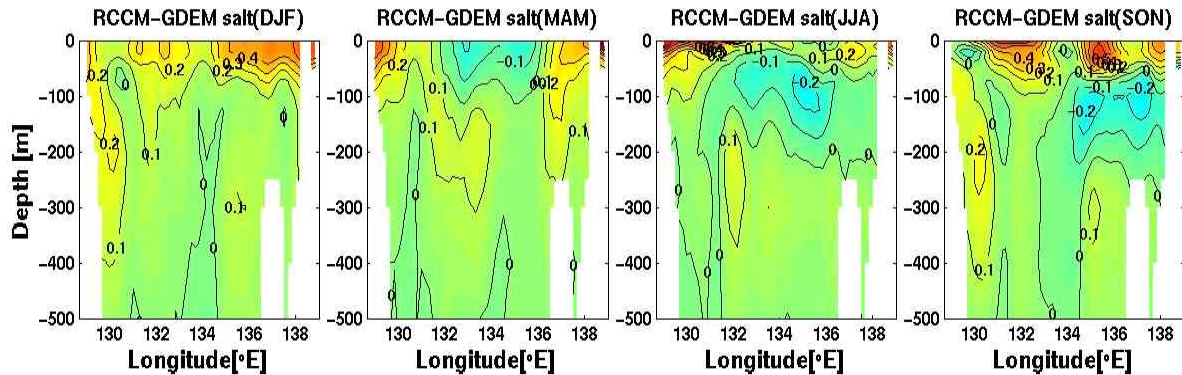


Fig. 35. Same as Fig. 33 but for salinity of sea water

(2) 기온, 바람, 습도, 지위고도의 분포

동해 접합모형 실험결과 중에서 주요 대기 변수인 기온, 바람, 습도 및 지위고도를 비교적 고해상도로 제공되는 ECMWF-interim 재분석 월평균 전구자료를 관측값으로 사용하여 지역기후 접합모형 검증을 수행하였다.

접합모형으로 역학적 규모축소하여 모사된 표층 2m 기온은 동해상에서 대체로 관측값에 비해 차게 모사하였으나, 가을과 겨울에는 동한난류가 북쪽으로 치우쳐 이안되는 양상을 나타내었다(Fig. 36). 표층 10m 바람은 관측값에 비해 풍속이 대체로 약하게 모사되었으나, 동한난류 북상에 따른 기온구배 증가로 인해 국지적으로 풍속이 세게 모사되었고, 북동 계열 풍향이 더 강화되어 나타났다(Fig. 37). 가을과 겨울에는 남풍 계열로 모사되었고, 여름에는 북풍 계열로 모사되었다. 이것은 관측으로 알려진 기후 평균적 풍향과 반대되는 계절변화이므로 대기 성분모형의 개선이 요구된다.

대기 하층 850 hPa 기압면에서 상대습도는 봄철을 제외하고 관측값에 비해 해상에서는 대체로 더 습하게, 육상에서는 대체로 더 건조하게 모사되었다(Fig. 38). 대기 중층 500 hPa 기압면에서 가을철과 겨울철에 동해영역 기온이 크게 모사되었고, 지위고도 또한 크게 모사되었다. 크게 모사된 원인은 대기 하층의 영향뿐만 아니라, 입력자료의 낮은 연직 해상도인 것으로 사료된다(Fig. 39). 대기 상층 300 hPa 기압면에서 풍속의 계절 변화가 상당히 다르게 나타난다. 겨울철에서는 동해 전영역에서 크게 모사되었고, 봄/여름철은 상대적으로 조금 크게 모사되었으며, 가을철은 남북구조가 서로 다른 패턴을 보였다. 2000년부터 2004년까지 적분한 자료를 분석해 보면 적분기간이 길어질수록 점차 관측값과 차이가 줄어드는 것으로 보아 안정화되는 것으로 사료된다(Fig. 40).

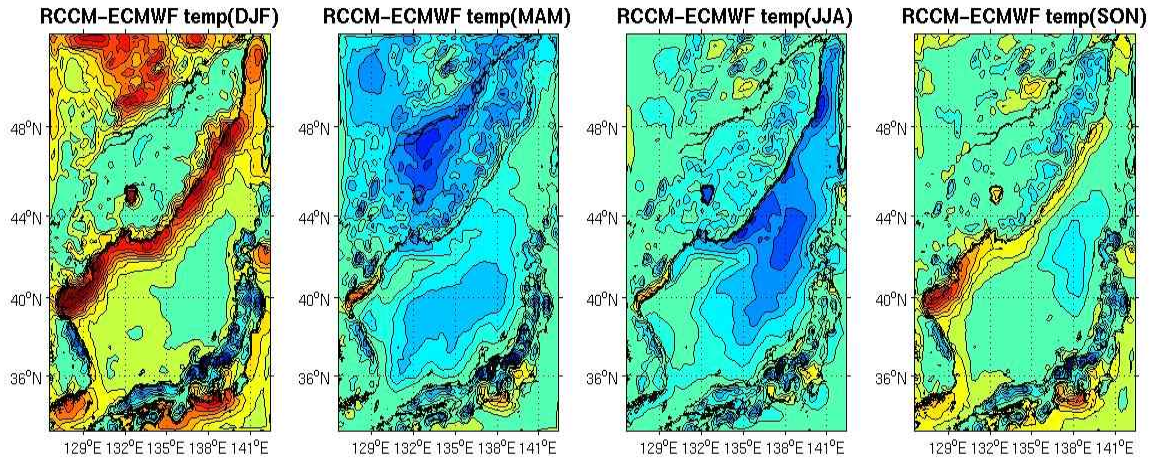


Fig. 36. Differences in seasonal mean air temperature at 2m above surface between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.

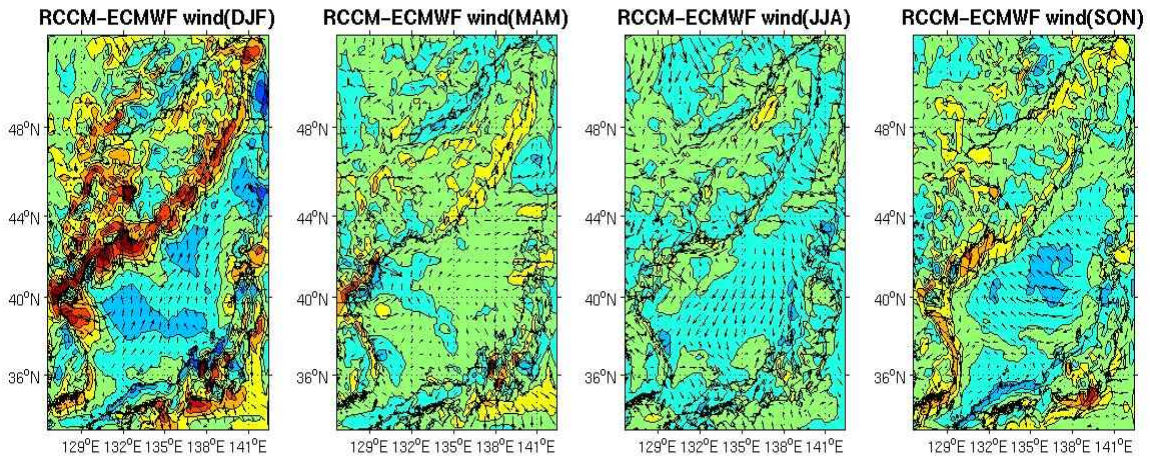


Fig. 37. Differences in seasonal mean wind speed (color-shaded) and direction (vector) at 10m above surface between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.

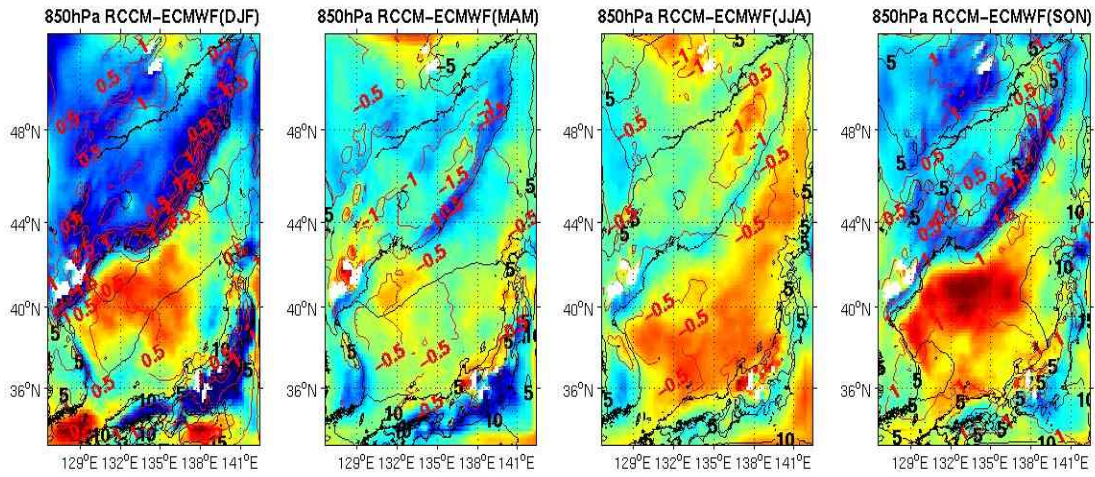


Fig. 38. Differences in seasonal mean relative humidity (color-shaded), air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 850 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.

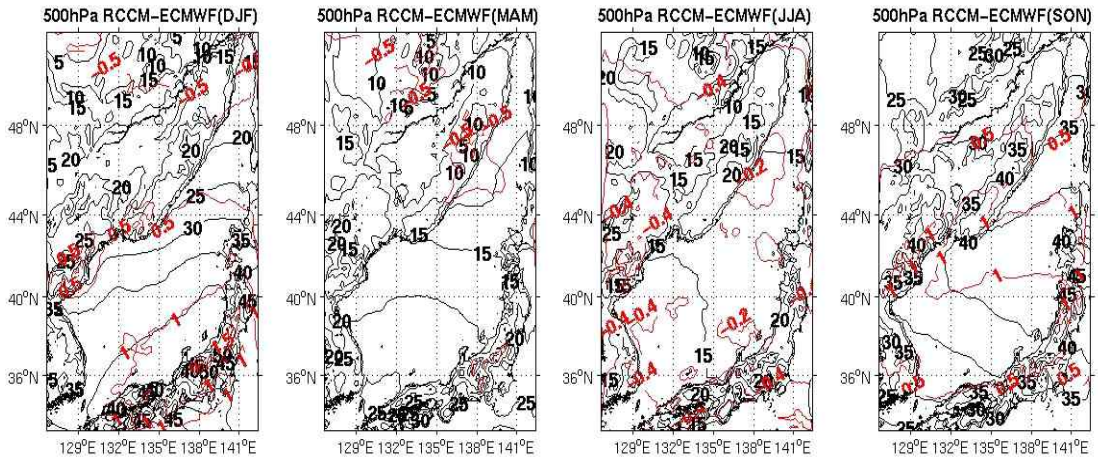


Fig. 39. Differences in seasonal mean air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 500 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.

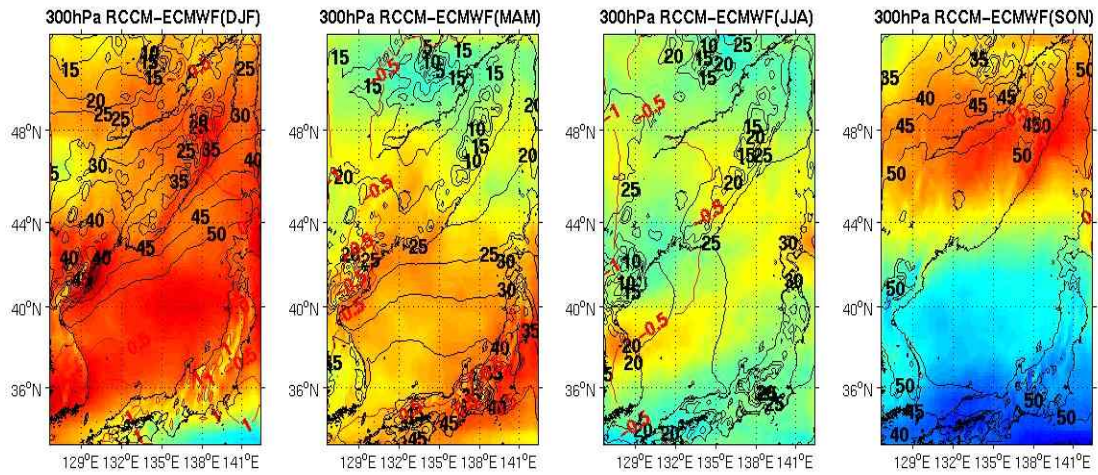


Fig. 40. Differences in seasonal mean wind speed (color-shaded), air temperature (red contour line) and geopotential height (black contour line) at 300 hPa between the simulation result from the East-Sea regional climate coupled model and the ECMWF-interim reanalysis data in year 2000.

다. 북서태평양 집합모형 성능 검증

북서태평양 집합모형의 기후 모사성능을 검증하기 위해 OISST V2 해면수온 관측자료를 사용하였고, 역학적 규모축소에 따른 고해상도 효과를 비교하기 위해 제5단계 집합기후모형상호비교사업(the fifth phase of Coupled Model Intercomparison Project, 이하 CMIP5) 모형 중에서 동아시아 여름 몬순 기후 모사능력이 비교적 우수한 CanESM2 전구 모사자료를 사용하였다. Fig. 41은 북서태평양 집합모형으로 모사된 해면수온 분포를 1981년 2월과 8월에 대해 보인 것이다. 북서태평양 집합모형으로 규모축소한 결과는 특히, 동해와 황해에서 CanESM2에 비해 관측자료 OISST와 더 비슷한 수온의 공간구조 및 크기를 보이고 있다. 리만한류와 북한한류가 저해상도 전구모형에서는 적절히 모사되지 못했으나, 집합모형에서는 관측자료와 비슷하게 비교적 상세히 모사되었다. 북서태평양 집합모형은 또한 관측자료에서 보이는 중규모 에디와 같은 패턴도 잘 모사하였다. 반면, 여름(8월)에는 동중국해와 일본 남쪽 해역에서 수온이 높게 모사되었다.

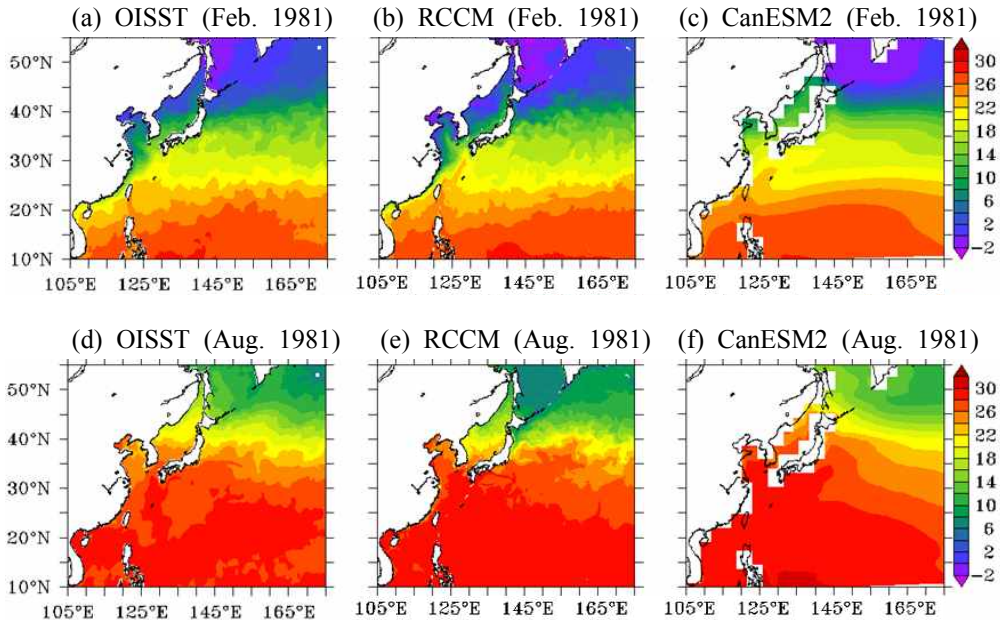


Fig. 41. Sea surface temperature in February (upper panels) and August (lower panels) in 1981: (a, d) OISST observational data, (b, e) the simulation results from the regional climate coupled model for the Northwest Pacific and (c, f) CanESM2 global model data. Unit is $^{\circ}\text{C}$.

2. 미래변화 상세도 시범 제시

미래변화 실험은 접합모델링을 시도하기 전에 우선적으로 대기 성분모형과 해양 성분모형 단독으로 각각 수행하였다. 단독 성분모형을 이용한 미래변화 실험은 접합모형으로 산출되는 미래변화에서 접합에 따른 효과를 구별하여 이해하기 위한 것이다. 또한 해양과 대기 상호작용에 경계조건으로 사용되는 대기/해양 강제력의 해상도에 따른 효과를 살펴 보기 위해, 해양-대기 양방향 접합 효과를 포함하여 Fig. 42에 보인 것과 같이 다섯 가지 미래변화 실험을 구상하였다.

이 과제를 수행한 3년 동안에는 양방향 접합 효과와 대기/해양강제력의 해상도 증가에 따른 미래변화 실험을 수행하였다. 이 실험은 북서태평양 접합모형 결과와 비교했던 저해상도 CMIP5 전구모형 CanESM2 모사자료를 대기/해양 강제력으로 이용하여 해양/대기 성분모형 단독으로 수행한 미래변화 실험(Fig. 42에서 실험 ①과 ③) 및 고해상도 대기 성분모형 WRF 모사자료(위 실험 ③)를 대기강제력으로 이용하여 해양 성분모형 단독으로 수행한 일방향 접합 미래변화 실험(Fig. 42에서 실험 ②), 그리고 북서태평양 접합모형으로 수행한 양방향 미래변화 실험(Fig. 42에서 ⑤)이다.

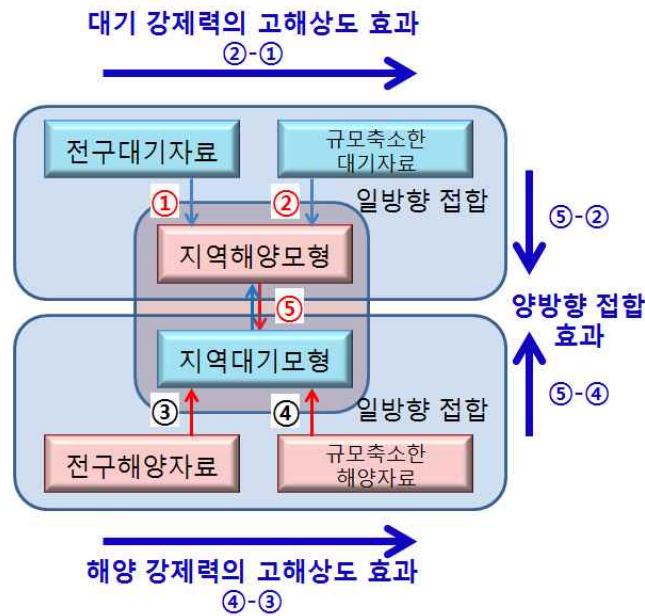


Fig. 42. Experimental design for climate change projection with a regional climate coupled model

이 네 가지 미래변화 전망을 위한 역학적 규모축소 실험에는 유사지구온난화(Pseudo Global Warming) 방법을 이용하였다. 유사지구온난화 방법은 미래 전망 실험의 초기 및 경계조건으로 이용되는 전구 모형자료에 내포된 모형계통오차를 줄이고, 실제 계산 부담을 줄이기 위한 역학적 규모축소법이다. 이 과제의 2차년도 연구 수행을 통해, CMIP5 모형들 중에서 동아시아 여름 몬순 모사성능이 상대적으로 우수한 CanESM2를 선정하였고, 역학적 규모축소 실험의 미래기후 초기 및 경계 조건으로 사용하였다. 향후 미래변화 상세 전망의 불확실성을 평가하기 위해서는 여러 개의 전구모형 자료를 이용하여 지역기후 접합모형 앙상블 실험을 구성하는 것이 바람직하다고 사료된다.

가. 유사지구온난화 방법 소개

한반도 주변해 미래변화 상세도를 시범적으로 제시하기 위해 수행한 세 가지 역학적 규모축소 실험들은 모두 이른바 유사지구온난화 방법을 활용하였다. 유사지구온난화 방법은 역학적 규모축소법의 한 종류로서 전구모형이 생산한 미래 기후 평균장과 현재 기후 평균장의 차이 즉, 모사된 미래 기후 변화값을 관측된 현재 기후값에 더하여 미래 기후를 전망하는 방법이다(Kimura and Kitoh, 2007). 이 방법은 전구모형에 내재된 모형의 계통오차를 줄임으로써 좀 더 현실적인 결과를 주는 것으로 알려져 있다(Kawase et al.

2008). Fig. 43은 이 방법을 도식적으로 표현한 것이다.

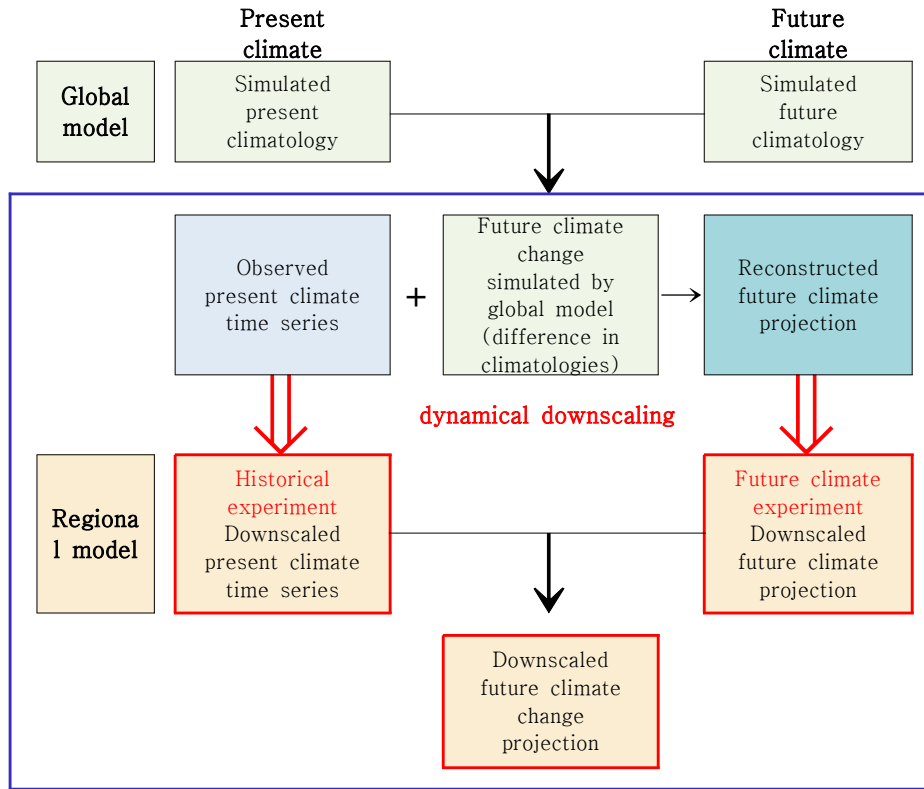


Fig. 43. A flow diagram describing the dynamical downscaling using a pseudo global warming method

유사지구온난화 방안을 이용하여 미래변화 전망 실험을 수행하기 위해 정부간기후변화 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 평가보고서에 활용된 CMIP5 전구기후모형 자료를 사용하였다. 미래변화 상세 전망을 위해 지역기후 접합모형의 초기 및 경계 조건으로 사용된 전구모형자료는 CMIP5 과거재현 실험 Historical과 지구온난화 시나리오 실험 RCP(representative concentration pathway) 4.5에 대해 CanESM2로 모사된 표준 출력자료이다.

나. 전구모형 평가 및 선정

CMIP5 전구모형 평가는 동아시아 몬순 기후 모사성능 검증을 통해 이뤄졌다. 동아시아 몬순 기후는 850 hPa 수평 바람과 지표 강수량으로 대표될 수 있다. 동아시아 영역에 포함된 티벳고원은 해발이 높아 모형에서 850 hPa 자료가 계산되지 않는다. 여기서는 CMIP5 Historical 실험에 참여한 전구모형 중에서, 계산 편의성을 도모하여 외삼을 통해

850 hPa 수평 바람장을 제공하는 16개 모형의 결과를 사용하였다(Table 5).

Table 5. List of CMIP5 global models evaluated for East Asian summer monsoon and their approximated horizontal resolution

Model I.D.	Modeling Center	Resolution
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2.8° x 2.8°
BCC-CSM1-1-M	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	1.1° x 1.1°
BNU-ESM	Beijing Normal University	2.8° x 2.8°
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Euro-Mediterranean Center on Climate Change)	3.8° x 3.8°
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Euro-Mediterranean Center on Climate Change)	0.8° x 0.8°
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Euro-Mediterranean Center on Climate Change)	1.9° x 1.9°
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	1.4° x 1.4°
CanCM4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.8° x 2.8°
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.8° x 2.8°
FIO-ESM	The First Institute of Oceanography, SOA, China	2.8° x 2.8°
HadCM3	Met Office Hadley Centre	3.8° x 2.5°
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	1.9° x 1.9°
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	1.9° x 1.9°
MPI-ESM-P	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	1.9° x 1.9°
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	2.5° x 1.9°
NorESM1-ME	Norwegian Climate Centre	2.5° x 1.9°

동아시아 몬순 모사성능 평가를 위해, 관측자료로는 NCEP/NCAR 재분석 자료의 850 hPa 수평 바람장과 GPCP 강수 자료이며, 이 두 변수를 이용해 다변량 경험직적교함수 (multi-variate empirical orthogonal function, 이하 MVEOF) 분석을 수행하였다. 관측자료로 MVEOF 수행 결과, EOF 첫 번째 및 두 번째 모드가 연 변화의 86 % 정도에 해당됨을 확인하였다(Fig. 44).

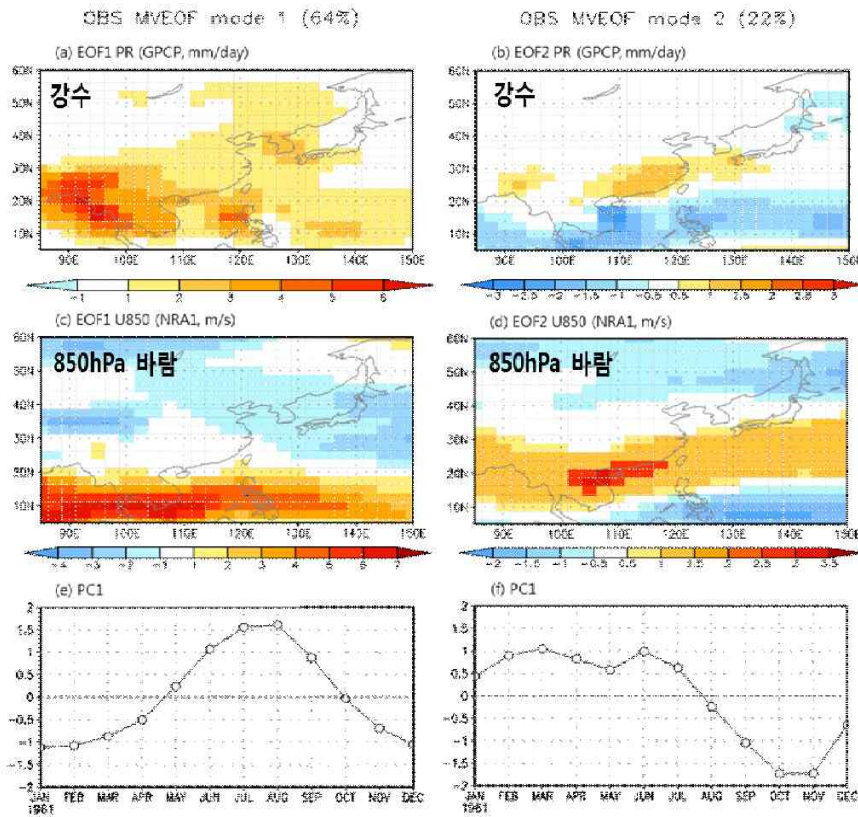


Fig. 44. The first (left) and second (right) leading MVEOF modes and their fractional variances obtained from GPCP precipitation and NCEP/NCAR zonal wind at 850 hPa.

동아시아 영역(85°E~150°E, 5°N~60°N)에서 월평균 강수량 및 850 hPa 수평 바람에 대해 관측값과 모형의 패턴상관계수를 계산하고, 이 두 값의 평균값을 산출하여 모형 성능평가에 활용하였다. Fig. 45은 그 결과를 보인 것으로, 16개 모형들 중에서 3개의 모형 CanESM2, CanCM4, CNRM-CM5이 상대적으로 우수하다고 할 수 있다.

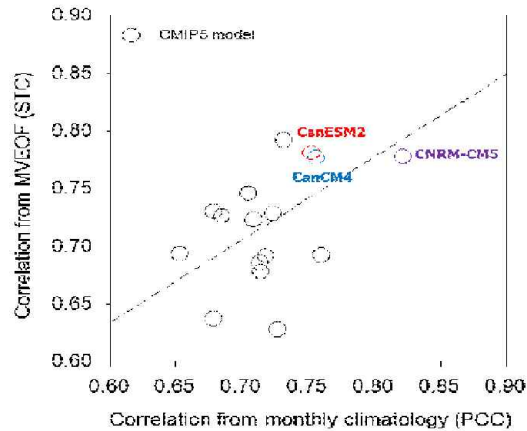


Fig. 45. Scatter diagram displaying squared skill scores for East Asian summer monsoon simulated by CMIP5 global models with spatiotemporal correlation (STC) and the year-average of monthly-calculated spatial pattern correlation (PCC).

다. 해양 성분모형 미래변화 시범 제시

북태평양 접합모형의 성분모형 중 해양 성분모형을 이용하여 미래변화 시범 제시를 하였다. 미래변화 실험은 유사지구온난화 방법을 이용하였고, 이에 의한 미래변화가 유사하기 때문에 해면수온과 해면염분이 해양 성분모형과 전구 기후모형인 CanESM2의 미래변화 공간 분포는 유사하게 나타난다(Fig. 46). 그러나 고해상도 모형인 해양 성분모형의 결과가 전구 기후모형에 비해 한반도 주변해에서 상세 공간분포를 나타낸다. 시계열 분포에서는 해양 성분모형과 전구 기후모형 결과 두 개의 모형에서 모든 해역이 여름철 해면수온 상승률이 겨울철에 비해 높게 나타났다(Fig. 47). 여러 전구모형 분석을 통해 겨울철 해면수온 상승 경향이 높게 나타난다는 분석들과는 상당한 차이가 있으며, 여러 모형 실험을 통해 해양 성분모형 결과에서 보인 상승 경향과 차이가 나는 이유에 대한 상세 분석이 필요하다.

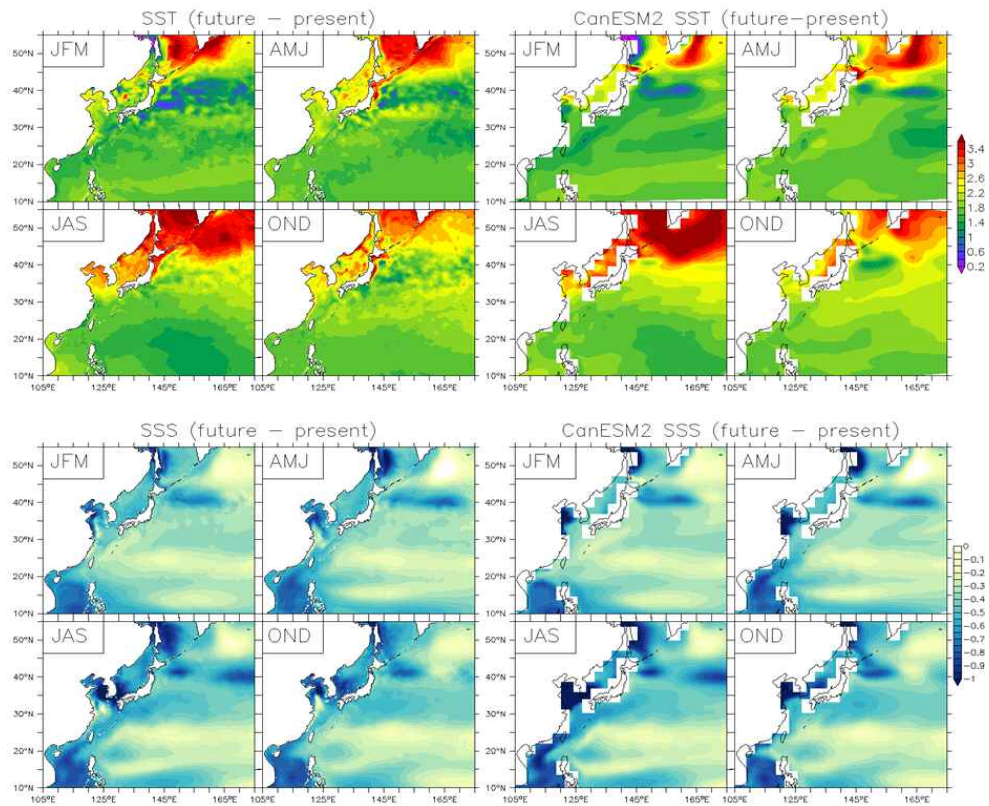


Fig. 46. Future changes in sea surface temperature (upper panels) and sea surface salinity (lower panels) projected by the Northwest Pacific regional ocean model (left four plots) and by the global model CanESM2 (right four plots).

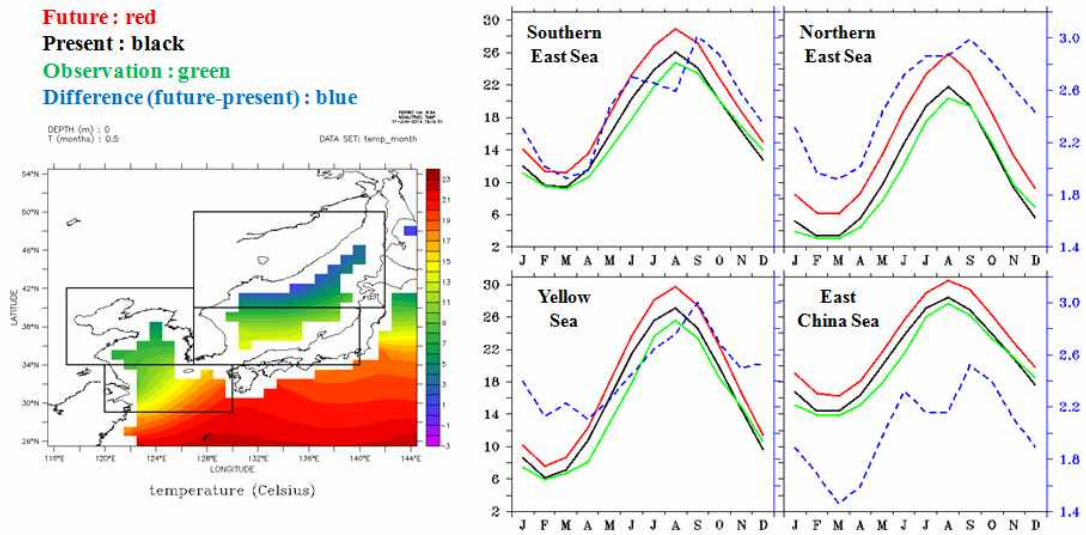


Fig. 47. The marginal seas around Korea are denoted as boxes at the left-hand side and the future changes in sea surface temperature averaged over each boxed area are presented as line plots at the right-hand side. Red and black lines represent the mean temperature respectively for the future and present climates simulated by the Northwest Pacific regional ocean model and blue lines represent their difference (i.e., future change). Green lines represent for the OISST observational data.

라. 대기단독모형 미래변화 시범 제시

동아시아 여름 몬순에 대해 대기 성분모형 WRF를 이용하여 유사지구온난화 규모축소 실험을 수행하였다. 이 실험은 전구모형 CanESM2의 RCP4.5 시나리오 모사자료로 2081~2100년 월평균 기후값에서 Historical 실험 모사자료로 1981~2000년 월평균 기후값을 뺀 차이, 즉 CanESM2 RCP4.5 기후변화 전망자료를 NCEP/DOE 재분석 자료로 규모축소한 대기자료에 더하여 미래기후 전망 자료를 구성한 것이다. 계산 부담을 덜기 위해, 규모축소 실험은 4/20~8/31일에 대해서만 수행하였고, 분석은 확장된 여름인 5~8월에 대해 실시하였다.

실험 결과 중에서 여름철 강수분포의 변화에 주목하여 그 물리적 원인을 분석하였다. 그동안 동아시아 기후의 미래변화에 관한 연구들은 많이 있었으나, 그 변화의 원인에 대한 설명은 대체로 온도, 강수, 바람 등 주요 기후변수의 시공간적 분포를 보이는 정성적 분석에 그쳤다. 이 과제에서는 더 나아가 수분 수지분석을 통해 동아시아 강수변화를 일으킨 원인을 정량적으로 분석하였다.

WRF는 동아시아 지역에서 CanESM2에 비해 표층 기온의 미래변화를 대체로 작게 모사하였는데 이러한 특징은 현재기후 모사실험에 나타난 경향과 같다. CanESM2와 WRF에 의해 모사된 미래 전망 결과, 동아시아에서 고위도 및 육지에서 상대적으로 기온 증가가 크게 나타났는데(Fig. 48a, b), 이것은 지구온난화로 인한 지표 온도의 선형 경향 패턴으로 알려진 바와 같다. 전구모형으로 모사된 동아시아 강수 증가는 북서태평양 고기압의 확장과 이 고기압을 따라 서쪽 경계로부터 유입되는 수증기의 증가 때문인 것으로 논의되었다(Seo et al., 2013). 유사지구온난화 방안을 이용한 규모축소 결과, 북위 40도 이상 중위도에서 전구모형에 비해 강수 증가가 적게 모사된 반면, 한반도를 통과하는 메이유-바이유 전선 부근에서 더 큰 강수 증가가 나타났다. 이와 같은 지역적 대비는 CanESM2 결과에 나타나지 않았던 변화 패턴으로서 주목할 만하며, 특히 양자강을 가운데 두고 중국 내륙 중부와 남부로 나뉘어 뚜렷이 나타난다(Fig. 48c, d).

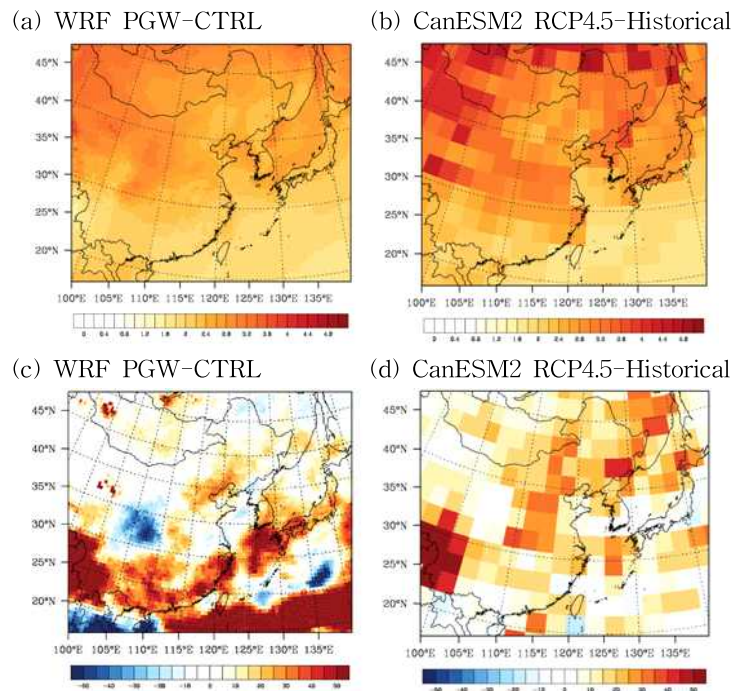


Fig. 48. Projected changes in summer (May to August) mean surface air temperature in $^{\circ}\text{C}$ (upper panels) and precipitation in mm month^{-1} (lower panels) obtained from (a, c) the pseudo global warming experiment results with WRF and (b, d) the global model CanESM2 simulation data. These changes are the climatological mean differences between the end of 21st century (2081-2100) and the end of 20th century (1981-2000).

Fig. 49는 WRF와 CanESM2에 의해 모사된 20세기 말 대비 21세기 말 850 hPa 비습과 연직 적분된 수평 수분 속의 미래 변화를 보인 것이다. 유사지구온난화 실험에서는 중국 내륙에서 남하하는 수분 속이 양자강을 지나면서 증가하고 동중국해와 북서태평양에서 북동쪽으로 향하는 수분 속이 증가되는 경향이 나타났다. CanESM2은 해안선을 따라 육지와 바다에서 북동쪽으로 수분 속이 유입되고 해상보다 육상에서 수분 증가가 클 것으로 전망하였다. 이 두 결과에서 공통적으로 나타난 북동향 수분 속의 증가는 북서태평양 고기압의 확장을 암시한다.

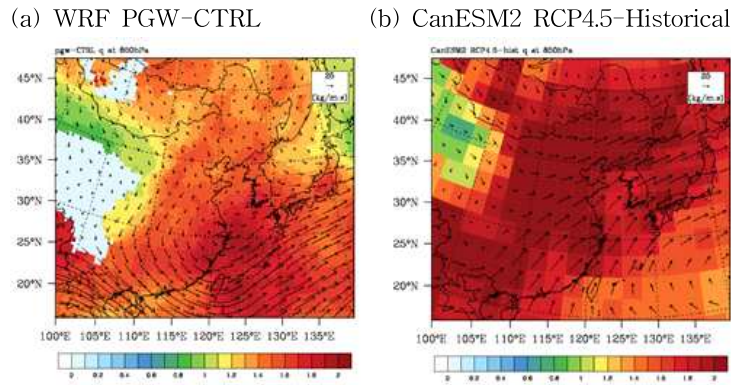


Fig. 49. Projected changes in summer mean specific humidity (color shaded) at 850 hPa in kg kg^{-1} and superimposed, vertically integrated moisture flux (arrows) in $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ obtained from (a) the pseudo global warming experiment results with WRF and (b) the global model CanESM2 simulation data. These changes are the climatological mean differences between the end of 21st century (2081-2100) and the end of 20th century (1981-2000).

앞서 논의한 바와 같은 정성적 분석만으로는 왜 양자강 유역을 중심으로 강수 변화가 반대로 나타나는지 명확하게 파악하기 어렵다. 강수 변화가 뚜렷하게 대비되는 이 지역을 둘로 나누어 수분 수지 분석을 실시하였다. 두 영역은 동경 105-110도에 대해 북위 25도에서 35도까지 30도를 기준으로 나눈 것이다. 대기 중 수분 수지는 수평 확산을 무시할 경우 단위 면적당 공기 기둥에 대해 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{1}{g} \int_{p_s}^0 q \vec{v} dp = E - P \quad (4)$$

$$\overline{\langle \vec{v} \cdot (\vec{v}q) \rangle} + \overline{\langle q \vec{v} \cdot \vec{v} \rangle} = \bar{E} - \bar{P} + \varepsilon \quad (5)$$

$$\Delta \bar{P} = \Delta \bar{E} - \Delta \overline{\langle \vec{v} \cdot (\vec{v}q) \rangle} - \Delta \overline{\langle q \vec{v} \cdot \vec{v} \rangle} + \Delta \varepsilon \quad (6)$$

여기서 t 는 시간, W_A 는 가강수량(precipitable water), g 는 중력가속도, q 는 비습, V 는 수평 바람, p 는 기압, p_s 는 표면 기압, E 는 지표 증발률, P 는 지표 강수량, ε 은 잔여 값을 나타낸다. 각 항은 WRF에서 3시간 간격으로 출력된 모형자료로 계산하였고, 식 (5)와 (6)에 나타난 꺾쇠 괄호는 공기 기둥에 대한 연직 적분을, 윗줄은 시간(월) 평균을 의미한다. 따라서 잔여 값 ε 은 수분수지 오차뿐만 아니라 수평 확산에 의한 기여를 포함한다고 볼 수 있다. 식 (6)은 강수량의 미래 변화를 설명하기 위해 수분 수지의 시간 변화를 나타낸 것이다.

$$\text{precip} = qadv + qconv + \text{evap} + \varepsilon$$

남부 지역에 나타난 강수량 증가는 주로 지표 증발의 증가와 수렴을 통한 수증기 유입에 따른 것이다(Fig. 50b). 반면, 중부 지역에 나타난 강수량 감소는 지표 증발이 다소 증가함에도 불구하고 주로 북쪽 내륙에서 불어오는 건조한 바람의 이류와 발산에 의한 수증기 유출로 인한 것이다(Fig. 50a). 두 지역 모두에서 지구온난화로 인한 대기 중 수분 함량 증, 가강수량은 증가했으나 그 값은 매우 작아 무시할 만하며, 잔여 값들도 기여도가 매우 작다.

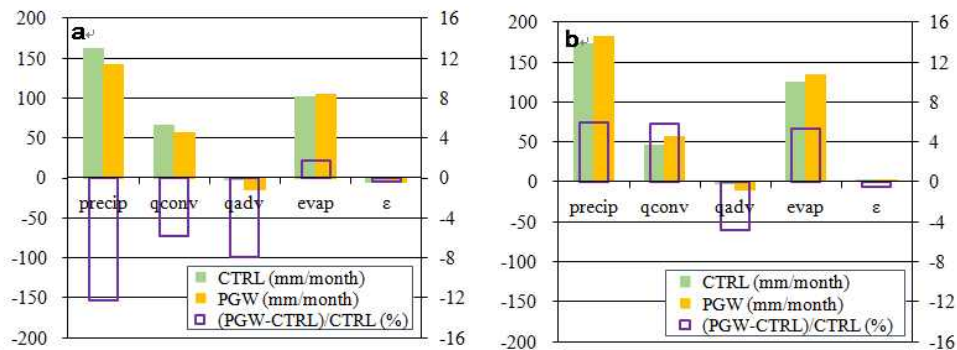


Fig. 50. Moisture budget terms calculated from the pseudo global warming experiments for a future climate averaged for 2081 to 2100 (PGW_CanESM2) and the downscaling result from NCEP/DOE reanalysis for the present climate averaged for 1981 to 2000 (CTRL): (a) the results averaged over the northern area of, 105°E~110°E and 30°N~35°N and (b) those averaged over the southern area of 105°E~110°E and 25°N~30°N. Green and yellow bars respectively denote the CTRL and PGW_CanESM2 results in mm month⁻¹ with the scale at left. Purple boxes denote their differences in percent with the scale at right.

이 연구 결과는 지구온난화로 유발되는 미래 강수 변화의 원인이 단순히 지표 기온의 증가와 그에 따른 지표 증발의 증가 등으로만 설명될 것이 아니라, 지역마다 다를 수 있다는 것을 시사한다. 이것은 고해상도 지역모형을 이용한 규모축소의 필요성을 부각시키는 결과이다.

마. 지역기후접합모형 미래변화 상세도 시범 제시

앞서 대기단독모형으로 모사된 미래변화 전망 자료를 매 시간 입력 받아 해양단독모형으로 수행한 일방향 접합 실험과 해양모형과 대기모형이 매 시간 자료를 주고받는 양방향 접합 실험을 수행하였다. 일방향 접합 실험에 사용한 해양 성분모형은 수심 보정을 통한 수송량 개선 내용이 아직 반영되지 않은 것이고 대기 성분모형은 행성경계층까지 분광너징을 시도한 버전이다. 반면, 양방향 접합 실험에 사용한 해양 성분모형은 수송량 개선 내용이 반영된 것이고 대기 성분모형은 티벳고원 등 고도가 높은 지형을 고려하여 분광너징을 500 hPa이상에서만 실시한 것이다. 접합모형은 성분모형 단독 실험에 비해 아직 안정적인 결과를 주지 못하고 있으나, 우리 연구진에 의해 국내 처음으로 양방향 접합으로 한반도 주변해 미래변화 전망 실험을 수행하였다는 점에서 의의를 찾을 수 있다. 일방향 및 양방향 접합 실험에서 나타난 공통된 주요 결과는 황해보다는 동해에서 지구온난화에 따라 해면수온 상승이 더 클 것이라고 전망하였다는 점이다. 이러한 경향성은 관측자료에 나타난 해면수온의 선형경향성과 일치한다.

(1) 일방향 접합 실험

대기단독모형으로 유사지구온난화 방법을 이용하여 21세기 말(2081~2100년) 미래기후에 대한 고해상도 대기 강제력을 얻고, 이 강제력을 해양모형에 입력하여 한반도 주변해 미래기후에 대한 상세도를 산출하였다. 이와 같이 역학적 규모축소를 통해 얻은 일방향 접합 실험 결과를 초기 및 경계 조건에 사용한 CMIP5 전구모형 CanESM2 미래기후 전망 결과와 비교하였다. 북서태평양 지역기후 접합모형은 CanESM2에 비해 겨울보다는 여름에 해면수온이 더 많이 상승하는 경향성을 보였으며, 저해상도 전구모형이 모사하지 못하는 상세 공간구조, 특히 연안에서의 분포를 잘 나타냈다(Fig. 51).

일방향 접합 실험으로 전망한 미래 혼합층 깊이 변화는 전구모형 CanESM2와 비슷한 공간분포를 보였고, 북서태평양 해역에서 대체로 깊이가 감소하는 경향성을 보였다. 쿠로시오 확장역과 동해에서 혼합층 깊이가 감소할 것으로 전망된 반면, 오야시오 해류 부근에서 혼합층 깊이는 서로 다른 변화 경향성을 나타냈다(Fig. 52). 이러한 차이는 수온과

염분의 연직구조 및 바람과 열속 변화 등을 포함하는 좀 더 심도 있는 분석을 통해 지역 기후 접합모델링의 효과를 파악하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

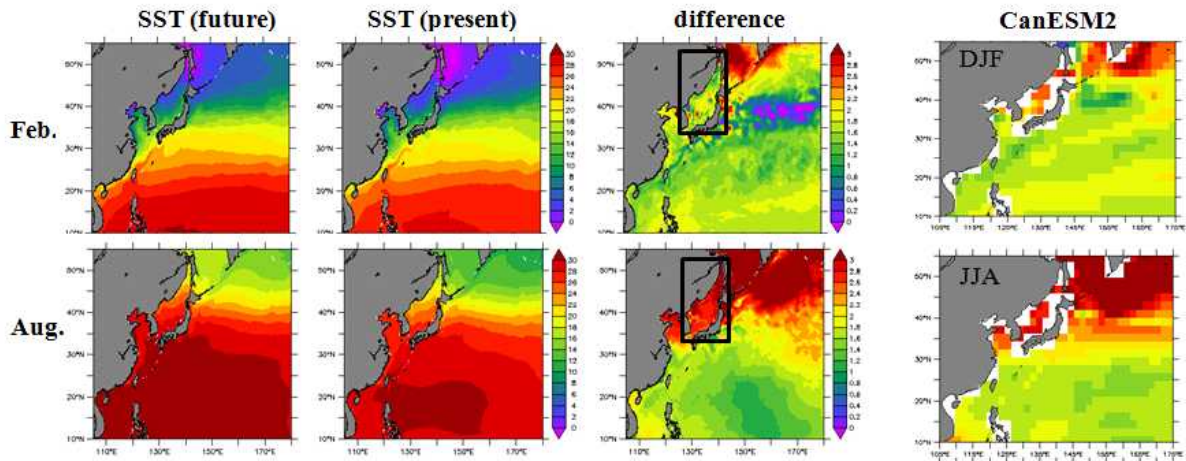


Fig. 51. Sea surface temperature in February (upper panels) and August (lower panels) simulated by the Northwest Pacific regional climate coupled model for a future climate (first column), present climate (second column) and their difference (third column) at the left-hand side, and the difference but calculated with the global model CanESM2 CMIP5 simulation data for winter (DJF) (upper panel) and summer (JJA) (lower panel) on the right-most panels.

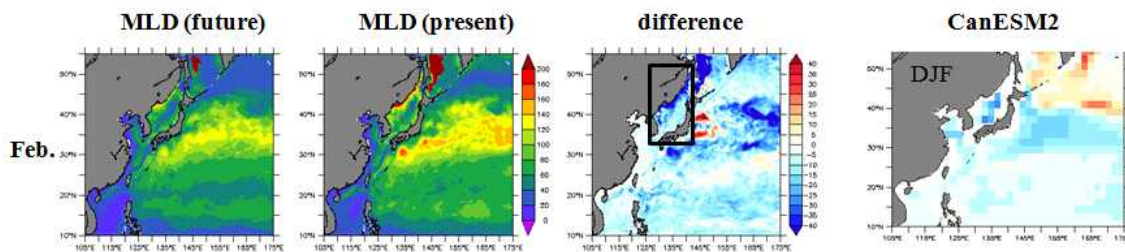


Fig. 52. Same as Fig. 51 but for mixed layer depth (m) in February and winter (DJF) only

Fig. 53은 2월평균 해면수온, 열속, 바람응력을 해양단독모형 실험과 비교하여 나타낸 것이다. 고해상도 대기 강제력을 사용한 일방향 접합 실험은 저해상도 전구모형으로부터 얻은 대기 강제력을 사용한 해양단독모형 실험에 비해 북서태평양 해역에서 대체로 해면 수온을 더 차게 모사하였다. 이러한 차이는 우리나라 및 중국 연안과 중규모 에디가 뚜렷한 쿠로시오 확장역에서 더욱 뚜렷하다. 이것은 동일한 해양모형을 사용하는 경우, 대기 강제력의 해상도가 비교적 작은 규모의 해양-대기 상호작용에 상당한 영향을 줄 수 있음

을 의미한다.

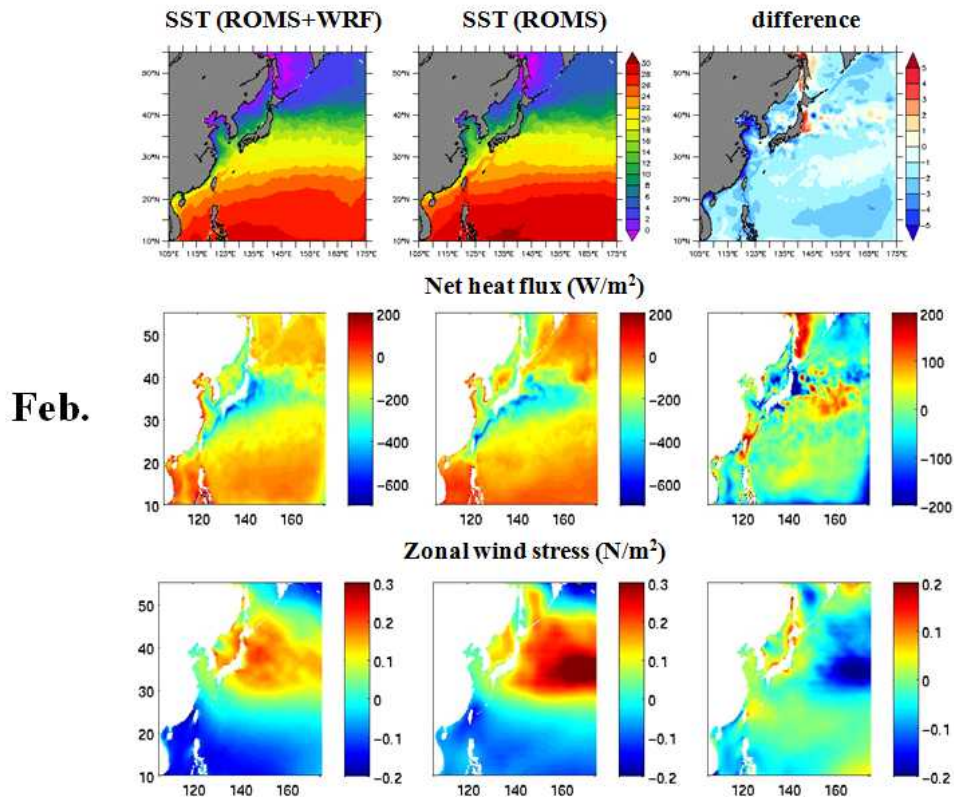


Fig. 53. Climatological mean sea surface temperature (top panels), net surface heat flux (middle panels) and zonal wind stress (bottom panels) in February averaged for 20 years from 2081 to 2100: dynamical downscaling results obtained from the Northwest Pacific regional climate coupled model with one-way coupling (first columns) and the results from the ocean component model with atmospheric forcing taken from the CanESM2 global model data (second columns), and their differences (third columns).

(2) 양방향 집합 실험

대기단독모형으로 유사지구온난화 방법을 이용하여 21세기 말(2081~2100년) 미래기후에 대한 고해상도 대기 강제력을 얻고, 이 강제력을 해양모형에 입력하여 한반도 주변해 미래기후에 대한 상세도를 산출하였다. 이와 같이 역학적 규모축소를 통해 얻은 일방향 집합 실험 결과를 초기 및 경계 조건에 사용한 CMIP5 전구모형 CanESM2 미래기후 전망 결과와 비교하였다. 북서태평양 지역기후 집합모형은 CanESM2에 비해 겨울보다는 여름에 해면수온이 더 많이 상승하는 경향성을 보였으며, 저해상도 전구모형이 묘사하지 못하는 상세 공간구조, 특히 연안에서의 분포를 잘 나타냈다(Fig. 54).

일방향 결합 실험으로 전망한 미래 혼합층 깊이 변화는 전구모형 CanESM2와 비슷한 공간분포를 보였고, 북서태평양 해역에서 대체로 깊이가 감소하는 경향성을 보였다. 쿠로시오 확장역과 동해에서 혼합층 깊이가 감소할 것으로 전망된 반면, 오야시오 해류 부근에서 혼합층 깊이는 서로 다른 변화 경향성을 나타냈다(Fig. 55). 이러한 차이는 수온과 염분의 연직구조 및 바람과 열속 변화 등을 포함하는 좀 더 심도 있는 분석을 통해 지역 기후 결합모델링의 효과를 파악하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

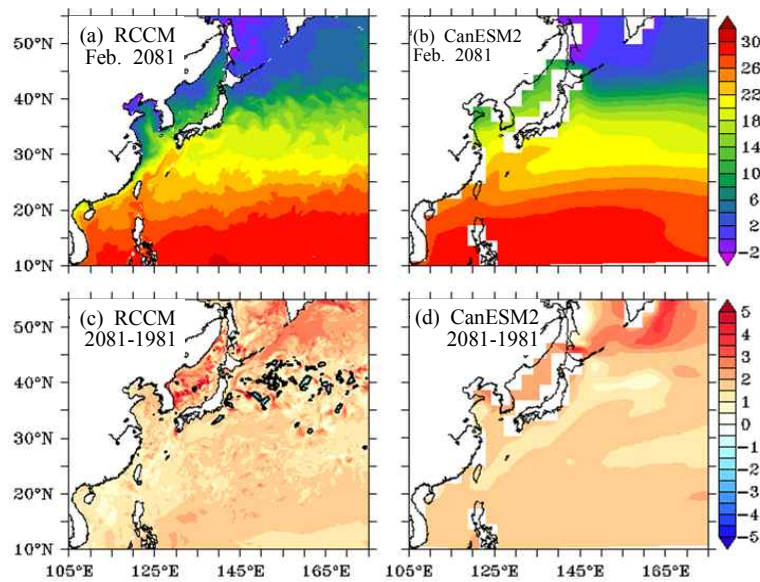


Fig. 54. (a) Sea surface temperature (SST) simulated by the Northwest Pacific regional climate coupled model for February in 2081 forced with the atmospheric data simulated by CanESM2 under RCP4.5 scenario and simulation and 1981, (b) SST from the CanESM2 RCP4.5 scenario, (c) the difference in (a) from the regional model for February in 1981, and (d) the difference in (b) from the CanESM2 model for February in 1981.

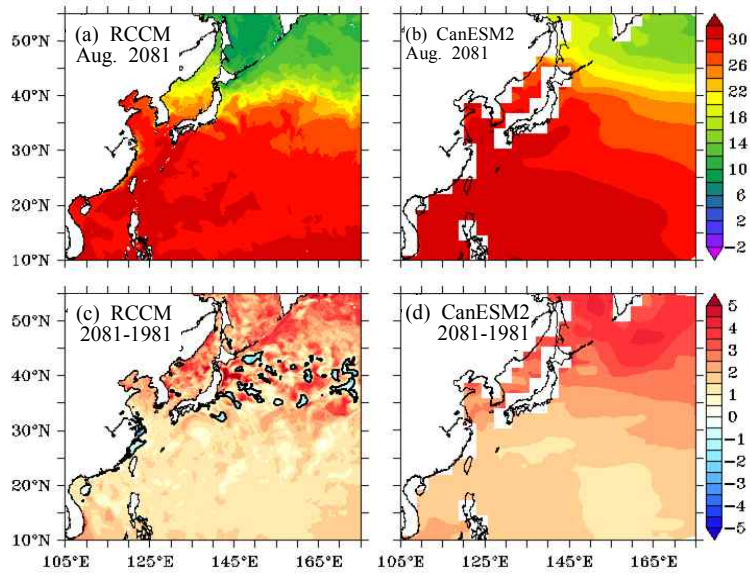


Fig. 55. Same as Fig. 54 but for August

양방향 지역기후접합모형의 접합 효과를 효율적으로 분석하기 위해 대기모형 WRF의 규모축소 결과를 경계조건으로 사용한 즉, 일방향 접합모형 실험, 저해상도 전구모형 CanESM2를 경계조건으로 사용한 해양 성분모형 실험과 비교하였다. Fig. 56은 한반도 주변해를 황해, 동중국해, 동해 북부 및 남부로 나누어 해면수온의 계절변동을 살펴보았다. 해면수온의 미래 변화는, 일방향 접합모형에서 다른 모형에 비해 모든 해역과 계절에 두 배 이상 크게 나타났으며, 양방향 접합모형은 해양 성분모형에 비해 황해 겨울철(2-3월)에 작게 나타났다. 양방향 접합모형과 해양 성분모형의 경우, 겨울보다는 여름에 해면수온 증가가 큰 것으로 전망되었다.

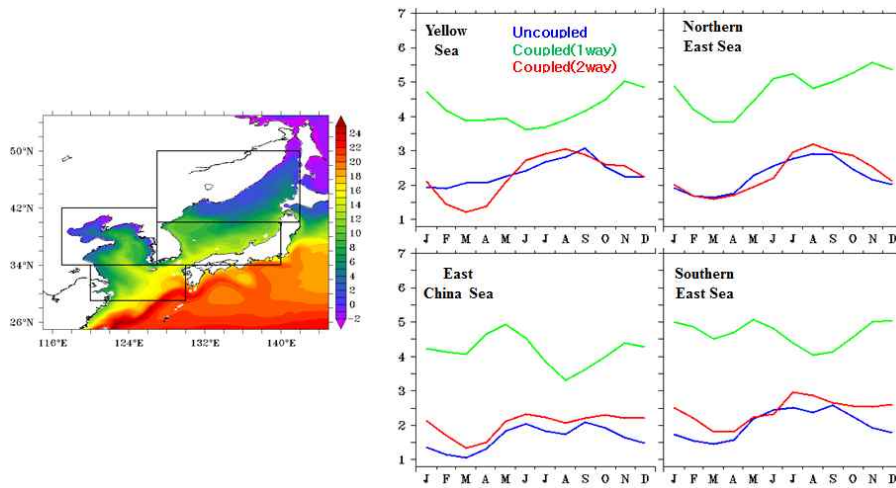


Fig. 56. The marginal seas around Korea are denoted as boxes on the left-hand side and the future changes in sea surface temperature averaged over each boxed area are presented as line plots on the right-hand side. Red lines represent for the results from the Northwest Pacific regional climate coupled model with two-way coupling, green lines for the results from the same model but with one-way coupling and without spectral nudging for atmosphere, and blue lines for the results from the ocean component model only forced with CanESM2 RCP4.5 simulation data for the future climate change and ECMWF reanalysis data for the present climate.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 3단계 연구기간 내 연구내용 대비 달성률(%)

총 연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년차	연구성과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획대 비	총연구 기간대 비		
1차년 (2012)	해양/대기 성분모형 수립	20	6	정상	
	접합모형 개발 및 검증	20	6		
	해양단독모형 스핀업 실험	30	10		
	접합모형 동해 과거 기후 모사 및 검증	30	10		
2차년 (2013)	접합모형 개선	20	6	정상	
	지역기후 접합모형 수립	40	14		
	미래 변화 초기 실험 준비	40	14		
3차년 (2014)	미래 변화 초기 실험	60	20	정상	
	한반도 주변해 미래 상세 변화 시범 제시	40	14		

2. 정량적 목표 달성도 (부록 참조)

구분		3년간 실적	
논문게제	SCI/E	4	
	기타 국외학술지	1	
	국내 학술지	2	
학회 발표	국외	33	
	국내	55	
특허	국외	출원	
		등록	
	국내	출원	
		등록	
단행본		1	
세미나 개최		9	
인터넷 사이트 개설		1	

제 2 절 대외 기여도

○ KOICA 국제교육 프로그램 강의

-강의제목: 해양대순환모델링 및 기후변화

북태평양해양과학기구(PICES) 워킹그룹29(WG-29)(Regional Climate Modeling) 2012년도 회의를 공동의장 자격으로 주제

○ 북태평양해양과학기구(PICES) 2013년 토평 세션 제안 및 승인

-토평 세션 제목: Recent trends and future projections of North Pacific climate and ecosystems (Convenors: Jim Christian (Canada), Enrique Curchitser (USA), Chan Joo Jang (Korea), Angelica Pena (Canada))

○ 국내학계(2013년 해양학회 물리분과)에 본 연구과제(지역기후집합 모형 개발)에 관한 진행 상황을 초청연사 자격으로 보고함

○ 북태평양해양과학기구(PICES) 워킹그룹29(WG-29)(Regional Climate Modeling) 2013년도 회의 주도 (2013. 10. 12)



○ 국제 지역기후모형 워크숍 주도(Co-convenors) 및 연구관련 결과 발표

International Workshop Regional Climate Models-II (Convenors: Kyung-II Chang (SNU, KOR), Enrique Curchitser (Rutgers Univ. USA), Chan Joo Jang (KIOST, KOR), Kelvin Richards (Hawaii Univ. USA))



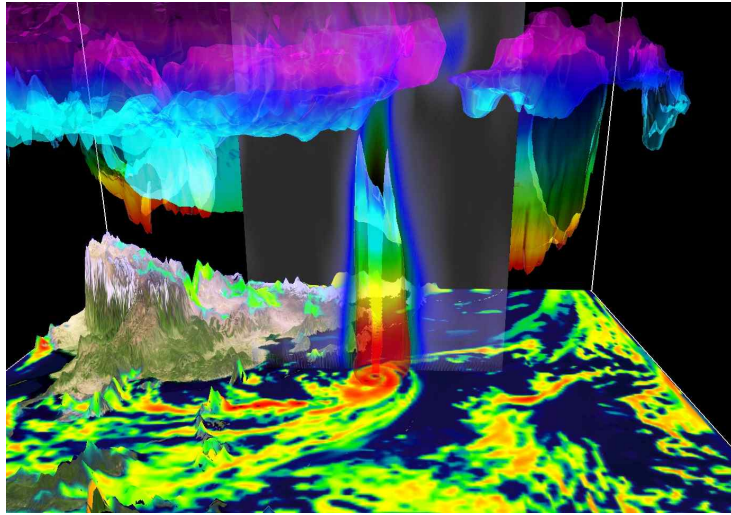
- 환경부/기상청 주관 한국기후변화평가보고서 2014 공동저술
10장 2절 한반도 주변해를 포함하는 해양의 미래 변화 전망에 관해 저술함.
한국기후변화평가보고서 2010에는 한반도 주변해를 포함하는 해양의 미래 변화에 관한 내용이 실리지 않았으나 2014년도 평가보고서에 이 내용이 추가됨.
주저자: 장찬주, 기여저자: 김철호, 신호정, 김용선

- 북태평양해양과학기구(PICES) 2014년도 연례총회에서 토픽세션(S10: Regional climate modeling in the North Pacific) 공동의장 수행 및 우수포스터발표상 수상 3건

- 한국해양학회 2014 추계학술대회 특별세션(지역기후모델링: 현황과 문제) 제안 및 승인

- 공주대학교, 한국과학기술정보연구원, 극지연구소 초청 세미나 발표 3건
장찬주, 신호정, 이동원, 정희석, 2014: 한반도 주변해 지역기후점합모형(RCCM) 수립 및 기후변화 전망(초기결과). 2014. 8. 29, 공주대학교.
장찬주, 2014: 동아시아중해 지역기후점합모형(RCCM) 수립 및 기후변화 적용. 2014. 8. 29, 한국과학기술정보연구원.
장찬주, 김용선, 신호정, 조영지, 이동원, 이지현, 2014: 기후모형 품위 및 미래기후변화 전망 평가: 북태평양순년진동(PDO) 및 해양 상층 관점. 2014. 7. 10, 극지연구소.

- 이 과제를 통해 생산된 고해상도 모형자료를 이용하여 과학적 가시화 경진대회 최우수상 수상
 - 한국과학기술정보연구원 주관 “제1회 3차원 과학적 가시화 경진대회”에서 지정된 가시화 프로그램 VAPOR(Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers)를 역학적 규모축소된 대기모형 자료에 적용하여 최우수상 수상 (2014. 10. 07).



<동아시아 여름철 태풍과 지구장파복사>

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 이 과제를 통해 국내 최초로 수립된 해양-대기 접합 지역기후모형은 지속적인 개선이 필요함에도 불구하고 한반도 주변해 미래 변화 전망 자료를 생산하는 데 활용될 수 있음.
- 아울러, 이 접합모형은 한반도 주변해에서 해양-대기 상호작용과 그 장기적 변화를 이해하는 데 학술적 도구로서 중요하게 활용될 수 있음.
- 이 과제에서 시범적으로 제시된 한반도 주변해 미래 변화 상세도는 기후변화에 따른 한반도 주변해 해양 생태계 환경 및 수산자원 변화를 전망하는 데 참고 자료로 활용될 수 있음.

제 6 장 참고문헌

- Cho, Y. K., Seo, G. H., Choi, B. J., Kim, S., Kim, Y. G., Youn, Y. H., & Dever, E. P. (2009). Connectivity among straits of the northwest Pacific marginal seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 - 2012), 114(C6).
- Griffies, S. M., Biastoch, A., Böning, C., Bryan, F., Danabasoglu, G., Chassignet, E. P., ... & Yin, J. (2009). Coordinated ocean-ice reference experiments (COREs). *Ocean Modelling*, 26(1), 1-46.
- Kawase, H., Yoshikane, T., Hara, M., Ailikun, B., Kimura, F., & Yasunari, T. (2008). Downscaling of the climatic change in the Mei-yu rainband in East Asia by a pseudo climate simulation method. *SOLA*, 4, 73-76.
- Kimura, F., & Kitoh, A. (2007). Downscaling by pseudo global warming method. *The Final Report of ICCAP*, 4346.
- Seo, K. H., Ok, J., Son, J. H., & Cha, D. H. (2013). Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models. *Journal of Climate*, 26(19), 7662-7675.
- Seo, G. H., Cho, Y. K., Choi, B. J., Kim, K. Y., Kim, B. G., & Tak, Y. J. (2014). Climate change projection in the Northwest Pacific marginal seas through dynamic downscaling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Seo, G. H., Cho, Y. K., & Choi, B. J. (2014). Variations of heat transport in the northwestern Pacific marginal seas inferred from high-resolution reanalysis. *Progress in Oceanography*, 121, 98-108.
- Yang, D., Yin, B., Liu, Z., & Feng, X. (2011). Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 - 2012), 116(C5).
- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. (2010). Development of a coupled ocean - atmosphere - wave - sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 35(3), 230-244.

제 7 장 부록

발간 논문목록 및 자료

◦ 논문 실적

계재일	논문명	저 자			학술지명	Vd. (No)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				
2012.04.19	Seasonal Variation of Freshwater Budget in the Yellow and East China Seas Simulated from an Ocean General Circulation Model	박태욱		장찬주	Ocean Science Journal	47(1)	국외	SCI(E)
2013.06.28	위성해색자료에서 추정된 동중국해 클로로필 선형경향의 계절별 차이	손영백	장찬주	장찬주, 김상현	Ocean and Polar Research	35(2)	국내	
2013.09.02	Climate response to imposed solar radiation reduction in high latitude	Michael MacCracken		신호정, Ken Caldeira, George A. Ban-Weiss	Earth System Dynamics	4(1)	국외	
2013.09.16	두 가지 연직혼합방안에 따른 해양대순환모형 혼합층깊이 및 상층수온 모사 민감도 비교	이동원	예상욱	장찬주, 예상욱, 박태욱, 신호정, 김동훈, 국종성	Ocean and Polar Research	35(3)	국내	
2013.12.10	Changes in the spatial structure of strong and moderate El Nino events under global warming	예상욱		김혜라 권민호 Boris Dewilte	International Journal of Climatology	34	국외	SCI
2014.11.28	An effect of ENSO	박태욱	장찬주	권민호	Journal of Marine	141	국외	SCI

	on summer surface salinity in the Yellow and East China Seas			나한나 김광열	Systems			
2014	On the variability of Antarctic Circumpolar Current fronts inferred from 1992 - 2011 altimetry.	김용선		Alejandro H. Orsi	Journal of Physical Oceanography	44	국외	SCI

◦ 학술회의 발표 성과

발표일	논문명	저 자		학술회의명	국내 외 구분
		주발 표자	공동발표 자		
2012.01.30.	Comparison of the global ocean circulation in the different grid-resolution models	김철호	장찬주, 김민우, 조현수	The 10th Japan-Korea Joint Seminar on Physical Oceanography	국제
2012.06.06.	An IFRAME approach for estimating exploitable biomass of fish stocks changing climate	장창익	이종희, Anne B. Hollowed , 장찬주, 이재봉	2nd International Symposium: Effects of climate change on the world	국제
2012.06.06.	Predicted ecological characteristics of common squid (Todarodes pacificus) larvae inferred by various climate models under IPCC SRES A1B Scenarios	김중진	김철호, 민홍식, 장찬주, W T Stockhou sen , 김수암	2nd International Symposium: Effects of climate change on the world	국제
2012.06.08.	Simulated seasonal variation of freshwater budget in the Yellow and East China Seas	박태욱	장찬주, 김철호	한국해양과학기술 술회의회 공동학술대회	국내
2012.06.08.	Effect of ENSO on summer salinity variability in the Yellow and East China Seas	박태욱	장찬주, 권민호, 김철호, 나한나, 김광열	한국해양과학기술 술회의회 공동학술대회	국내
2012.06.08.	동해 혼합층깊이 변동에 따른 클로로필 농도변화	소지현	장찬주, 박태욱, 유신재	한국해양과학기술 술회의회 공동학술대회	국내
2012.08.20.	자료동화의 기초 이론 및 실습	김영호		한국형수치예보 모델개발사업단 초청 세미나	국내
2012.10.16.	Enhanced stratification in the southwestern East Sea (Japan Sea)	오유리	장찬주, 이지현	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.01.	3차원 해양순환-생태계 접합모형을 이용한 동해 생태계 모사	오유리	장찬주, 고철민	한국해양학회 2012	국내

				추계학술발표대회	
2012.11.08.	북서태평양 태풍의 진로 및 강도 예측에서 선행 태풍과 근접 태풍의 영향	고철민	문일주, 장찬주	한국해양학회 2012 추계학술발표대회	국내
2012.11.08.	아라온호 경로를 따른 2012년 여름 북서태평양 해수물성 특성	장찬주	김윤배, 박태욱	한국해양학회 2012 추계학술발표대회	국내
2012.11.08.	GAIA과제: GAIA해양대순환모형에서 두 가지 연직혼합층방안의 상층수온 및 혼합층 결과 비교	이동원	장찬주, 예상욱, 박태욱, 김동훈, 국종성	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012.11.08.	Mixed layer variability and its associated chlorophyll a changes in the East Sea (Japan Sea)	장찬주	소지현, 박태욱, 유신재	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.08.	Effect of preceding and adjacent typhoons on the intensity and track prediction of typhoon in the western North Pacific	고철민	문일주, 장찬주	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.08.	아고뜰개 자료와 1차원 혼합층모형을 이용한 동해 혼합층 분석	김보연	장찬주, 박종진	한국해양학회 2012 추계학술발표대회	국내
2012.11.08.	Seasonal variability of the mixed layer depth in the East Sea(Japan Sea)	임세한	장찬주, 오임상, 박종진, 이기영	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.08.	한반도 주변해 고해상도 지역기후 접합모형 수립	고철민	장찬주, 박태욱, 이진영, 김철호	한국해양학회 2012 추계학술발표대회	국내
2012.11.09.	ENSO effect on surface salinity variability in the Yellow and East China Seas in summer	박태욱	장찬주, 권민호, 나한나, 김광열	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.09.	엔소가 황·중국해 표층염분 변동에 미치는 영향	박태욱	장찬주, 권민호, 김철호,	한국해양학회 2012 추계학술발표대회	국내

			나한나, 김광열	회	
2012.11.09.	접합자(Model Coupling Toolkit)를 이용한 해양-대기 접합모형 구축	이진영	장찬주, 고철민	한국해양학회 2012 추계학술발표대 회	국내
2012.11.09.	CMIP5/IPCC 온난화 실험에서 나타난 적도 태평양의 상층수온 및 혼합층 깊이 모사 민감도 비교	이동원	예상욱, 장찬주, 박태욱, 권민호	한국해양학회 2012 추계학술발표대 회	국내
2012.11.12.	CORE 자료에 근거한 해양-해빙접합모델실험 해상도 의존성	김철호	장찬주, 김민우	제7차 기후공동워크숍	국내
2012.11.12.	Projected sea level change in the North Pacific Ocean based on IPCC AR4 Scenario	김민우	김철호, 장찬주	PICES 2012 Annual Meeting	국제
2012.11.13.	동해, 북서태평양, 베링해 표층 용존산소포와어노말리/아르곤 및 커뮤니티 순생산 공간분포	함도식	이태식, 박경아, 박기홍, 장찬주	한국해양학회 2012 추계학술발표대 회	국내
2012.11.14.	SEASONAL TO INTERANNUAL VARIABILITY OF THE CHLOROPHYLL IN RELATION WITH PHYSICAL ENVIRONMENT IN THE EAST SEA	장찬주	유신재, 김현철, 노재훈, 박상중, 박기홍, 황청연, 한승희, 이강웅, 김현철, 김윤배, 박태욱, 한정민, 전현덕	한국해양학회 2012 추계학술발표대 회	국내
2012.11.14.	SHIPPO(Shipborne Pole-to-Pole Observations)에서 본 북서태평양 해양-대기 상호작용: 2012년 연구향해를 중심으로	이태식	장찬주, 이태형, 함도식	한국해양학회 2012 추계학술발표대 회	국내
2012.11.21.	Ocean General Circulation Models and Climate Change	장찬주	오유리, 박태욱	국립해양조사원 세미나	국내
2012.11.27.	How can Changjiang freshwater contribute to maintain warm sea	박태욱	장찬주, Johann	Ocean Sciences Meeting	국제

	surface in the Yellow and East China Seas?		H. Jungclaus , Helmuth Haak . 박원선, 오임상		
2012.11.29.	Projected mixed layer depth change in the North Pacific Ocean and its impacts on primary production	장찬주	박지수, 박태욱, 유신재	Ocean Sciences Meeting	국제
2012.12.06.	Research on Coastal Environmental Problems	김경옥		Summary and Perspectives of EIA Research and Education at IDEC	국제
2013.01.28.	YEAR-TO-YEAR VARIABILITY OF CHLOROPHYLL-A IN RELATION WITH MIXED LAYER DEPTH CHANGES IN THE EAST SEA (JAPAN SEA)	장찬주	소지현, 박태욱, 유신재	IMBiZO III	국제
2013.01.28.	Application of the nested biological-physical model to the East Sea	오유리	장찬주	IMBiZO III	국제
2013.05.23.	동중국해에서 클로로필의 계절적 양극화 현상 및 원인 연구	손영백	장찬주, 유신재, 김상현, 이태희	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	Validation of a Western North Pacific Ocean Model for Development of a Regional Climate Coupled Model	고철민	장찬주, 정춘용, 박태욱	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	Relationship between a tropical cyclone landing on southern China and development of cyclonic disturbance in eastern China which induces heavy rainfall over the Korean Peninsula	정춘용	이태영	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	황동중국해 표층염분 변동과 엔소	박태욱	장찬주,	한국해양과학기술	국내

	상관성		권민호, 김철호, 나한나	술협의회 공동학술대회	
2013.05.23.	Climate Response to Solar Radiation Reduction in High Latitudes	신호정	장찬주	한국해양과학기술 술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	아고뜰개 수온자료에 근거한 동해 혼합층 계절변화	김보연	장찬주, 박종진	한국해양과학기술 술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	CMIP5 모형에서 나타난 PDO 모의 성능의 향상	조영지	장찬주, 권민호, 신호정, 박태욱	한국해양과학기술 술협의회 공동학술대회	국내
2013.05.23.	An Effect of Nutrient Transport through Korea Strait on the East Sea Ecosystem: A Biological-Physical Couple Modeling	오유리	장찬주, 고철민	한국해양과학기술 술협의회 공동학술대회	국내
2013.07.24.	Climate changes and regional climate modeling for the seas around Korea	김경옥	고철민, 이용열	EKC2013	국제
2013.09.05.	북태평양 해양상층 미래기후 전망	이동원	장찬주, 김철호, 김민우	제8차 기후연구 공동 워크숍	국내
2013.09.06.	Future projections of precipitation change over the Korean peninsula using dynamical downscaling method	정춘용	장찬주, 김형진, 권민호	제 8차 기후연구 공동 워크숍	국내
2013.09.10.	Effects of mixed layer depth on the changes in the sea surface temperature under global warming in CMIP5 models	이동원	장찬주, 예상욱, 김용선	International Workshop: Regional Climate Models-II	국제
2013.09.12.	Dynamical downscaling of future projections of climate over the Korean Peninsula using Pseudo Global Warming method.	정춘용	장찬주, 김형진, 권민호	International Workshop Regional Climate Models-II	국제
2012.09.12.	A development of regional climate model for western north	고철민	장찬주, 정춘용	International Workshop	국제

	pacifi: Assessment of a present ocean climate simulation			Regional Climate Models-II	
2013.09.24.	WAVE HINDCAST FROM INTEGRALLY COUPLED WAVE-TIDE-SURGE MODEL OF THE EAST CHINA SEA	김경옥	최병호, 육진희	International Conference on Asian and Pacific Coasts	국제
2013.10.11.	Development of a regional climate model for ocean climate projection in the seas around Korea	고철민	장찬주, 정춘용	제 1회 한국연안방재학회 연례학술대회	국내
2013.10.15.	A Regional Climate Coupled Model for the Western North Pacific: Assessment of a Present Climate Simulation	고철민	장찬주, 정춘용, 김철호	PICES 2013 Annual Meeting	국제
2013.10.15.	Effects of nutrient transport through the Korea Strait on the seasonal and interannual variability in the East Sea (Japan Sea) ecosystem	오유리	장찬주, 유신재, 고철민	PICES 2013 Annual Meeting	국제
2013.10.15.	CMIP5에서 나타난 PDO 모의 성능 향상 및 그 원인	장찬주	권민호, 신호정, 국종성	PICES-2013 Program and Abstracts	국제
2013.10.25.	Ocean climate projection for the seas around Korea using a regional climate model	고철민	장찬주, 정춘용	한국해양학회 2013 추계학술발표대회	국내
2013.11.05.	한반도 주변해 지역기후접합모형(RCCM) 수립 및 미래해양변화 전망	장찬주	고철민, 정춘용, 김형진	한국해양학회 물리분과	국내
2014.02.27.	Selective mechanisms controlling oceanic variability in the Southern Ocean	김용선	장찬주	제1차 기후분석공동워크숍(K2C Workshop)	국내
2014.02.27.	에너지 불균형과 기후 민감도	신호정		제1회 기후분석공동 워크숍	국내
2014.03.20.	Simulation of phytoplankton blooms in the Ulleung Basin using 1D GOTM-ERSEM	오유리	강현우, 장찬주, Momme Butensch	The 3rd Joint PML-KIOST Workshop	국제

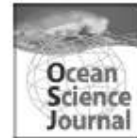
			on, 유신재, 이순미		
2014.03.25.	기후모형에서의 모의되는 열대저기압의 잠재빈도	권민호	이강진, Tim Li, Jing-Jia Luo	KIAPS 세미나	국내
2014.04.21.	CMIP5 모형자료에 나타난 해양 열에너지 수지	신호정	장찬주, 신호정	한국기상학회 2014 춘계 학술대회 초록집	국내
2014.05.22.	Storm Surge Simulation using Wave-Tide-Surge Coupled Model due to the Typhoon Haiyan	김경옥	최병호, 육진희	한국해양학회 2014 춘계학술발표대 회	국내
2014.05.22.	Strong Wind and Wave Simulation during the Mongol Invasion of Japan	육진희	김경옥, 정경태, 최병호	2014년도 한국해양과학기술 술협의회 공동학술대회	국내
2014.05.22.	Implementation of Integrally Coupled Model: Revisit Simulation of DDay Normandy Invasion	최병호	김경옥, Ian Vassie. 정경태	한국해양학회 2014 춘계학술발표대 회	국내
2014.05.27.	남극해 클로로필 경년 변동성	이승겸	김용선, 장찬주, 손영백	제20차 국제 극지과학 심포지움	국내
2014.06.30.	동해 하위영양단계 생태계에 연직혼합이 미치는 영향: 1차원 GOTM-ERSEM 모형의 울릉분지 적용	오유리	강현우, 장찬주, 유신재, 이순미	AMEMR2014	국제
2014.07.10.	기후모형 품위 및 미래기후변화 전망 평가: 북태평양순년진동(PDO) 및 해양 상층 관점	장찬주	김용선, 신호정, 조영지, 이동원, 이지현	극지연구소 2014년 상반기 수요세미나	국내
2014.08.04.	동해 남서부해역의 식물플랑크톤 번성 시기와 강도에 미치는 성층의 영향: 1차원 GOTM-ERSEM 모형의 울릉분지 적용	오유리	장찬주, Momme Butensch on	ClimEco4 summer school	국제
2014.08.29.	지역기후집합모형(RCCM) 수립 및 기후변화 전망(초기결과)	장찬주	신호정, 이동원, 정희석	공주대학교 세미나	국내

2014.08.29.	동아시아중해 지역기후집합모형(RCCM) 수립 및 기후변화 적용	장찬주		한국과학기술정보연구원 세미나	국내
2014.09.18.	Regional ocean heat uptake varying with depth	신호정	Ken Caldeira, 장찬주, 김용선	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.18.	Is Southern Ocean sea surface warming linked with changes in the westerlies?	김용선	장찬주	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.18.	엔소와 관련된 남극해 클로로필 경년 변동성	이승겸	김용선, 장찬주, 손영백	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.18.	지역기후집합모형 수립: 현황과 문제점	장찬주	김철호, 신호정, 이동원, 정희석	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.18.	3차원 수치 모형을 이용한 동해 표층 순환의 연간 변동성 분석	정희석	최병주, 장찬주	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.19.	CMIP5 모형 적도태평양 혼합층 깊이와 해면수온 모사 민감도	이동원	장찬주, 김철호	제9차 기후연구 공동 워크숍	국내
2014.09.21.	Chlorophyll interannual variability and its relation with mixed layer depth changes in the East Sea	장찬주	유신재, 조영지	The 3rd Joint PML-KIOST Workshop on Marine Ecosystem Modelling-Observation-Remote sensing Integration (MEMORI)	국제
2014.09.21.	Climate Change Projection for the western North Pacific: Dynamical Downscaling	장찬주	정춘용, 고철민	PICES FUTURE OSM	국제
2014.10.21.	Regional efficacy of ocean heat uptake under a CO2 quadrupling	신호정	Ken Caldeira, 장찬주, 김용선	PICES 2014 연례총회	국제
2014.10.21.	North Pacific upper-ocean changes projected by CMIP5 models	장찬주	이동원, 이지현, 신호정,	PICES 2014 연례총회	국제

			김용선		
2014.10.21.	Interannual variability of chlorophyll associated with mixed layer depth changes in the East Sea (Japan Sea)	장찬주	조영지, 유신재	PICES 2014 연례총회	국제
2014.10.21.	Summer surface salinity variability in the Yellow and East China Seas: ENSO effects	장찬주	박태욱	PICES 2014 연례총회	국제
2014.10.21.	Projected change in East Asian summer monsoon from dynamical downscaling : Moisture budget analysis	정춘용	장찬주, 김형진, 신호정	PICES 2014 연례총회	국제
2014.10.21.	Climate Change Projection for the western North Pacific Ocean by Dynamical Downscaling	고철민	장찬주, 신호정, 김용선	PICES 2014 연례총회	국제
2014.11.06.	지구온난화와 지역 간 지표 온도변화의 상관성	최원근	신호정, 장찬주	한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.11.06.	남극해 여름 클로로필 경년 변동성: 엔소의 영향	김용선	장찬주, 이승겸, 손영백	한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.11.06.	Is Southern Ocean sea surface warming linked with changes in the westerlies?	김용선	장찬주	한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.11.06.	Future projection of East Asian summer monsoon by dynamical downscaling: moisture budget analysis	정춘용	장찬주, 신호정, 김형진	한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.11.06.	지구온난화에 따른 해양의 열 흡수율: 해역별 정량적 비교	신호정	Ken Caldeira, 장찬주, 김용선	한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.11.06.	한반도 주변해 지역기후접합모형 수립: 현황과 문제점	장찬주		한국해양학회 2014 추계학술발표대회	국내
2014.12.01.	한반도 주변해 지역기후 접합모형(RCCM) 수립	장찬주		2014년 해양기상위크숍	국내

◦ 단행본

출판일	구 분	제 목	저작자		등록번호	출판국가
			주저작자	공동 저작자		
2014.10. 06.	저 서	해양생물자원과 기후변화	김수암	장찬주, 윤상선, 정석근, 심정희, 강수경, 이충일, 김도훈, 신형철	ISBN-978-89-9113 1-88-0 94520	한국



Seasonal Variation of Freshwater Budget in the Yellow and East China Seas Simulated from an Ocean General Circulation Model

Taewook Park* and Chan Joo Jang

Climate Change and Coastal Disaster Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Received 17 May 2011; Revised 19 December 2011; Accepted 19 March 2012
© KSO, KORDI and Springer 2012

Abstract – This study investigates a freshwater budget in the Yellow and East China Seas (YECS) using a global ocean general circulation model with a regional focus on the YECS. A freshwater budget analysis finds that major freshwater contributors over the YECS change seasonally. In summer, freshwater inflow from Changjiang and positive precipitation minus evaporation (P-E) dominates freshwater outflow across the boundaries around the YECS, resulting in net freshwater gain in the YECS. In winter, evaporation, intensified by strong winds, dominates freshwater inflow from Changjiang and precipitation, while net freshwater transport across the boundaries around the YECS is negligible, causing freshwater loss in total over the YECS. Although P-E has often been assumed to be negligible by supposing that the annual mean of precipitation is nearly equal to that of evaporation, this study suggests that P-E needs to be included in the seasonal freshwater budget in the YECS.

Key words – freshwater budget, seasonal variation, Yellow and East China Seas, global ocean general circulation model

1. Introduction

In the Yellow and East China Seas (YECS), freshwater gain or loss mainly results from river discharge, precipitation minus evaporation (P-E), and freshwater exchange through the straits (the Taiwan and the Korea Straits) and by the Kuroshio intrusion. One of the major rivers in terms of freshwater sources in the YECS is the Changjiang (also called the Yangtze River) that supplies about 90% of the total discharge of rivers around the YECS (Beardsley et al. 1985). Observational measurements (e.g. Siswanto et al. 2008) and numerical simulations (e.g. Chang and Isobe 2003; Moon et al. 2009) have investigated the effect of

Changjiang river discharge (CRD) on surface salinity distribution in the YECS. On the other hand, both P-E and freshwater inflow from strait-through flows and Kuroshio intrusion are likely to be additional important freshwater sources. In particular, the Kuroshio intrusion can be a contributor of freshwater because some studies (Isobe 2008; Lee and Matsuno 2007; Teague et al. 2003) suggest that the Kuroshio intrusion exchanges continental shelf water over the YECS with the Kuroshio Current. Nevertheless, the role of freshwater transport through the Kuroshio intrusion on freshwater budget in the YECS has been poorly understood mainly because it is hard to conduct direct observation of both volume transport and salinity for the Kuroshio intrusion.

An estimation of freshwater transport through the Korea Strait (Isobe et al. 2002) based on observation data suggests that the total river discharge in the YECS and freshwater transport through the Korea Strait are two dominant components in the freshwater budget, averaged annually in the YECS. They suggest that the freshwater transport through the sea surface is a minor contributor to annually-averaged freshwater budget of the YECS, assuming that the annual mean of evaporation is nearly equal to that of the precipitation in these areas (Chen et al. 1994). On the other hand, few studies have focused on the seasonal variations of freshwater components such as precipitation, evaporation, freshwater inflow from advection across the boundaries around the YECS as well as the CRD (Isobe et al. 2002). The primary reason is that it is hard to conduct annual observations of surface freshwater exchanges, volume transports and hydrography of the strait-through flows and Kuroshio intrusion that veers over the shelf break of the

*Corresponding author. E-mail: twpark@kordi.re.kr

Article

위성 해색자료에서 추정된 동중국해 클로로필 선형경향의 계절별 차이

손영백¹ · 장진주^{2*} · 김상현³

¹한국해양과학기술원 해양생태계연구부
²한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부
 (426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
³한성대학교 공과대학 기계시스템공학과
 (136-792) 서울시 성북구 삼선동 3가 389

Seasonal Difference in Linear Trends of Satellite-derived Chlorophyll-a in the East China Sea

Young Baek Son¹, Chan Joo Jang^{2*}, and Sang-Hyun Kim³

¹Marine Ecosystem Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology
²Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology
 Ansan 426-744, Korea
³Department of Mechanical Systems Engineering, College of Engineering, Hansung University
 Seoul 136-792, Korea

Abstract : The purpose of this study is to investigate seasonal difference in linear trends in satellite-derived chlorophyll-a concentration (Chl-a) and their related environmental changes in the South Sea of Korea (SSK) and East China Sea (ECS) for recent 15 years (Jan. 1998~Dec. 2012) by analyzing climatological data of Chl-a, Rrs(555), sea surface wind (SSW) and nutrient. A linear trend analysis of Chl-a data reveals that, during recent 15 years, the spring bloom was enhanced in most of the ECS, while summer and fall blooms were weakened. The increased spring (Mar. - May) Chl-a was associated with strengthened winter (Dec. - Feb.) wind that probably provided more nutrient into the upper ocean from the deep. The causes of decreased summer (Jun. - Aug.) Chl-a in the northern ECS were uncertain, but seemed to be related with the nutrient limitation. Recently (after 2006), low-salinity Changjiang diluted water in the south of Jeju and the SSK had lower phosphate that caused increase in N/P ratio with Chl-a decrease. The decreased fall (Sep. - Nov.) Chl-a was associated with weakened wind that tends to entrain less nutrient into the upper ocean from the deep. This study suggests that phytoplankton in the ECS differently changes in response to environmental changes depending on season and region.

Key words : seasonal difference, satellite-derived chlorophyll-a, East China Sea, linear trend

1. 서 론

동중국해는 북쪽 경계인 대한민국의 남해와 연결되고,

서쪽의 중국, 동쪽의 일본 남부 열도, 남쪽으로 대만의 북쪽 해안에 둘러싸인 바다이다(Fig. 1). 중국 대륙에서 유입되는 장강(또는 양자강)의 영향 및 연안 용승으로 인하여 상대적으로 높은 생산성을 나타내는 해역과 고온·고염의 쿠로시오 분류와 대만난류 해역의 민영양 해양환경으로

*Corresponding author. E-mail : cjiang@kiost.ac



Climate response to imposed solar radiation reductions in high latitudes

M. C. MacCracken¹, H.-J. Shin^{2,3}, K. Caldeira², and G. A. Ban-Weiss^{2,4}

¹Climate Institute, 900 17th St. NW, Suite 700, Washington, DC 20006, USA

²Carnegie Institution for Science, Dept. of Global Ecology, 260 Panama Street, Stanford, CA 94305, USA

³Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 787Haean-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-744, South Korea

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089, USA

Correspondence to: M. C. MacCracken (mmaccrac@comcast.net)

Received: 18 July 2012 – Published in Earth Syst. Dynam. Discuss.: 26 July 2012

Revised: 8 July 2013 – Accepted: 20 July 2013 – Published: 2 September 2013

Abstract. With human-induced climate change leading to amplified warming in high latitudes, mitigation alone is unlikely to be rapid enough to prevent significant, even irreversible, impacts. Model simulations in which solar insolation was arbitrarily reduced poleward of 51, 61, or 71° latitude in one or both hemispheres not only cooled those regions, but also drew energy from lower latitudes, exerting a cooling influence over much of the particular hemisphere in which the reduction was imposed. The simulations, conducted using the National Center for Atmospheric Research's CAM3.1 atmospheric model coupled to a slab ocean, indicated that high-latitude reductions in absorbed solar radiation have a significantly larger cooling influence than solar reductions of equivalent magnitude spread evenly over the Earth. This amplified influence occurred primarily because concentrated high-latitude reductions in solar radiation led to increased sea ice fraction and surface albedo, thereby amplifying the energy deficit at the top of the atmosphere as compared to the response for an equivalent reduction in solar radiation spread evenly over the globe. Reductions in incoming solar radiation in one polar region (either north or south) resulted in increased poleward energy transport during that hemisphere's cold season and shifted the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) away from that pole, whereas comparable solar reductions in both polar regions resulted in increased poleward energy transport, but tended to leave the ITCZ approximately in place. Together, these results suggest that, until emissions reductions are sufficient to limit the warming influence of increasing greenhouse gas

concentrations, polar reductions in solar radiation, if they could be efficiently and effectively implemented, warrant further research as an approach to moderating the early stages of both high-latitude and global warming.

1 Introduction

Increases in the atmospheric concentrations of carbon dioxide and other radiatively active substances have initiated changes in the global climate that are projected to become substantially larger in the future (IPCC, 2007a; NRC, 2010). Not only are surface temperatures increasing, but significant shifts are also being observed in mean and extreme precipitation, drought, sea level, extent and duration of snow cover and sea ice, ocean acidification, and more (IPCC, 2007a; Blunden and Arndt, 2012). Taken together, these changes are starting to adversely impact water resources, agriculture, terrestrial and aquatic ecosystems, coastal infrastructure, and human health (IPCC, 2007b).

In the Arctic, the amplified temperature increase in high latitudes is accelerating the loss of land and sea ice (ACIA, 2004; AMAP, 2011), which is contributing to sea level rise around the world (IPCC, 2007a; Meier et al., 2007). The extra solar energy being absorbed by darker ocean waters during the sunlit season appears, in turn, to be contributing to changes in the atmospheric circulation and weather in high and mid-latitudes in following seasons (Francis and Vavrus, 2012; Overland et al., 2012). Acceleration of the loss of mass

Note

두 가지 연직혼합방안에 따른 해양대순환모형 혼합층깊이 및 상층수온 모사 민감도 비교

이동원^{1,2} · 장찬주² · 예상욱^{1*} · 박태욱² · 신호정² · 김동훈³ · 국종성²

¹한양대학교 과학기술대학 해양융합학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 한양대로 55

²한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³연세대학교 이과대학 대기과학과
(120-749) 서울특별시 서대문구 연세로 50

A Comparison of Two Vertical-Mixing Schemes on the Simulation of the Mixed Layer Depth and Upper Ocean Temperature in an Ocean General Circulation Model

Dong-Won Yi^{1,2}, Chan Joo Jang², Sang-Wook Yeh^{1*}, Taewook Park², Ho-Jeong Shin², Donghoon Kim³, and Jong-Seong Kug²

¹*Department of Marine Sciences and Convergence Technology, College of Science and Technology, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea*

²*Ocean Circulation and Climate Research Division, KIOST Ansan 426-744, Korea*

³*Department of Atmospheric Science, College of Science, Yonsei University Seoul 120-749, Korea*

Abstract : Vertical and horizontal mixing processes in the ocean mixed layer determine sea surface temperature and temperature variability. Accordingly, simulating these processes properly is crucial in order to obtain more accurate climate simulations and more reliable future projections using an ocean general circulation model (OGCM). In this study, by using Modular Ocean Model version 4 (MOM4) developed by Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, the upper ocean temperature and mixed layer depth were simulated with two different vertical mixing schemes that are most widely used and then compared. The resultant differences were analyzed to understand the underlying mechanism, especially in the Tropical Pacific Ocean where the differences appeared to be the greatest. One of the schemes was the so-called KPP scheme that uses K-Profile parameterization with nonlocal vertical mixing and the other was the N scheme that was rather recently developed based on a second-order turbulence closure. In the equatorial Pacific, the N scheme simulates the mixed layer at a deeper level than the KPP scheme. One of the reasons is that the total vertical diffusivity coefficient simulated with the N scheme is ten times larger, at maximum, in the surface layer compared to the KPP scheme. Another reason is that the zonal current simulated with the N scheme peaks at a deeper ocean level than the KPP scheme, which indicates that the vertical shear was simulated on a larger scale by the N scheme and it enhanced the mixed layer depth. It is notable that while

*Corresponding author. E-mail : swyeh@hanyang.ac.kr

Short Communication

Changes in the spatial structure of strong and moderate El Niño events under global warming

Sang-Wook Yeh,^{a*} Hera Kim,^a MinHo Kwon^b and Boris Dewitte^c

^a Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan, Korea

^b Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

^c LEGOS, Toulouse, France

ABSTRACT: In this study, we examine how the spatial structures of strong and moderate El Niño events have changed due to global warming using the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) coupled general circulation models (CGCMs) based on a historical run and a Representative Concentration Pathways (RCP)4.5 run. The centre of the maximum anomalous sea surface temperature (SST) in the moderate El Niño has shifted significantly westward from the historical run to the RCP4.5 run; however, this is not seen with the strong El Niño events. Further analysis indicates that the centre of the maximum anomalous SST in the moderate El Niño with a negative Pacific Decadal Oscillation (PDO) phase shifted westward around the international dateline from the historical run to the RCP4.5 run. This is in contrast to the moderate El Niño, which shows a positive PDO phase. We also briefly discuss a possible mechanism on the change in the spatial structure of moderate El Niño with a negative phase of PDO from the historical run to the RCP4.5 run.

KEY WORDS El Niño; Pacific Decadal Oscillation; global warming; spatial structure

Received 19 April 2013; Revised 16 September 2013; Accepted 22 October 2013

1. Introduction

One of the most critical issues concerning climate change is that of El Niño–Southern Oscillation (ENSO) diversity, specifically, the ENSO properties, which include the amplitude, frequency and spatial pattern, and diversity changes on decadal-to-multidecadal timescales (Gu and Philander, 1995; Wang and Wang, 1996; Stahle *et al.*, 1998; Cobb *et al.*, 2003; D'Arrigo *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2011). Among these, most recent studies have focused on the changes of the ENSO spatial structures in the tropical Pacific basin. It has been suggested that there exist two different types of El Niño events in the tropical Pacific (e.g. Trenberth and Stepaniak 2001; Larkin and Harrison 2005; Yu and Kao 2007; Ashok *et al.*, 2007a, 2007b; Kao and Yu 2009; Kug *et al.*, 2009). We refer here to the conventional El Niño, in which the centre of the maximum anomalous sea surface temperature (SST) is located in the eastern Pacific, as an Eastern Pacific (EP) El Niño and the non-conventional El Niño, in which the centre of the maximum anomalous SST is located in the central Pacific, as a Central Pacific (CP) El Niño. In addition, several studies have showed that CP El Niño events occur more frequently with intensified

amplitudes during recent decades (Yeh *et al.*, 2009; Lee and McPhaden 2010).

There exist several reasons why changes in the spatial structure of El Niño events matter. The climate impacts due to the shift of the centre of the maximum anomalous SST (e.g. EP El Niño vs CP El Niño) can be distinctly different across the globe because of atmospheric teleconnections (Yeh *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2011; Graf and Zanchettin 2012; Yoon *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2012; Yuan and Yang, 2012). Therefore, a detailed investigation of ENSO diversity in warmer climates is useful for documenting and interpreting its distinct remote effects.

Using the Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) coupled general circulation models (CGCMs) datasets, former studies showed that the frequency of CP El Niño events increase under global warming, perhaps due to changes in the tropical Pacific mean state, including changes in the thermocline depth (Yeh *et al.*, 2009). Using preindustrial and historical simulations with Representative Concentration Pathways (RCP)4.5 simulations based on the ensemble means of the CMIP5 CGCMs, Kim and Yu (2012) also determined that the ratio of CP and EP ENSO intensity has increased in recent years. Both studies concluded that the intensity and frequency of CP El Niño events have increased because of global warming. However, they note that both CMIP3 and CMIP5 are unable to correctly reproduce the EP and CP El Niño intensities as compared with actual

*Correspondence to: S.-W. Yeh, Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan, Korea. E-mail: swyeh@hanyang.ac.kr



Contents lists available at ScienceDirect

Continental Shelf Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/csr

Research papers

Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer

Jaewook Park^{a,b}, Chan Joo Jang^{b,*}, Johann H. Jungclauss^c, Helmuth Haak^c, Wonsun Park^d, Im Sang Oh^a^a School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea^b Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Sadoong, Ansan 426-744, Republic of Korea^c Max Planck Institute for Meteorology, Bundesstrasse 53, 20146 Hamburg, Germany^d Leibniz Institute of Marine Sciences (LIW GEOMAR), Düsternbrooker Weg 20, D 24105 16d, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 March 2010

Received in revised form

24 September 2010

Accepted 25 October 2010

Available online 12 November 2010

Keywords:

Changjiang river discharge

Sea surface warming

Barrier layer

Vertical stratification

Yellow and East China Seas

ABSTRACT

This study explores the effects of the Changjiang (also called the Yangtze River) river discharge (CRD) on the density stratifications and associated sea surface temperature (SST) changes using a global ocean general circulation model with regional focus on the Yellow and East China Seas (YECS). It is found that CRD increases the SST in summer through a barrier layer (BL) formation that tends to enhance stratification at the mixed layer base, and thus reduces both vertical mixing and entrainment. This process is effective, particularly in August, after the CRD reaches its maximum in July. The SST difference between the composites of flood and drought years confirms that the surface warming is related to surface freshening by the CRD. This result suggests that the BL induced by the CRD is an important contributor to the surface heat budget in the YECS.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Freshwater flux and salinity changes can create a pronounced salinity-induced mixed layer (ML) above the top of the thermocline. The layer between the base of the ML and the top of the thermocline is called a barrier layer (BL), because it acts as a barrier that isolates the warm surface water from cold deep water (Godfrey and Lindstrom, 1989; Spintall and Tomczak, 1992). The BL helps to maintain a higher sea surface temperature (SST) by inhibiting the cooling of the surface water through restraining heat exchanges between the surface and the thermocline (Miller, 1976; Vialard and Delecluse, 1998). Both numerical model experiments and observational data have supported the idea that the BL formation is responsible for sea surface warming. For example, numerical simulations of the Atlantic Ocean showed that freshwater inflow from the Amazon (Congo) River increases the SST by 0.25 (1.0 °C) (Carton, 1991). An analysis based on high vertical resolution data suggested that a higher SST in the Amazon River runoff region is associated with low surface salinity and a thick BL (Pailler et al., 1999). Also, the warming by the BL formation has been observed in the long-term moored buoy data in the central North Atlantic Ocean (Foltz and McPhaden, 2009), and measurements and numerical simulations in the western Pacific warm pool region

(Vialard and Delecluse, 1998). Proper simulations of the BL in the southeastern tropical Atlantic are believed to be important for reducing warm SST biases that are commonly found in most coupled atmosphere–ocean models (Breugem et al., 2008). However, no complete consensus has been reached yet on the warming effects of the BL. For example, Howden and Murtugudde (2001) showed that the river runoff in the Bay of Bengal decreases the surface temperature and suggested that an enhanced entrainment cooling is responsible for the SST decrease. Masson and Delecluse (2001) demonstrated that the BL generated by the Amazon River runoff does not have a clear impact on the SST from ocean model experiments. Foltz and McPhaden (2009), on the other hand, pointed out that such a feature could be an artifact caused by the forced SST restoring to mean values.

The Changjiang (also called the Yangtze River), the fifth largest river in the world in terms of the discharge, is a major freshwater source in the Yellow and East China Seas (YECS) (Fig. 1a) (Shen et al., 1998). Fig. 1b shows the climatological Changjiang river discharge (CRD) by Senjyu and Enomoto (2006). The CRD has a distinct seasonal variation; it is largest in July (0.051 Sv) ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and smallest in January (0.011 Sv). The CRD contributes significantly to sea surface salinity (SSS) distribution in the YECS, which is evident from both analyses using measurement data (e.g., Lie et al., 2003; Chen et al., 2006b; Siswanto et al., 2008; Yan et al., 2008; Kim et al., 2009) and numerical experiments (e.g., Chang and Isobe, 2003; Lee et al., 2004; Chen et al., 2008a; Moon et al., 2009). Some studies have explored that Changjiang diluted water (CDW)

* Corresponding author. Tel.: +82 31 600 6317; fax: +82 31 408 5829.
E-mail address: cjjang@krdi.re.kr (C. Jang).

On the Variability of Antarctic Circumpolar Current Fronts Inferred from 1992–2011 Altimetry*

YONG SUN KIM

Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, and Ocean Circulation and Climate Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, South Korea

ALEJANDRO H. ORSI

Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, Texas

(Manuscript received 8 October 2013, in final form 25 September 2014)

ABSTRACT

Antarctic Circumpolar Current (ACC) fronts, defined as water mass boundaries, have been known to respond to large scale atmospheric variabilities, especially the Southern Hemisphere annular mode (SAM) and El Niño Southern Oscillation (ENSO). Distinct patterns of localized variability in meridional front displacements during 1992–2011 are derived from the analysis of satellite sea surface height data. Major basin scale differences are found between the southeast Pacific (150°–90°W) and the southeast Indian (75°–150°E) sectors of the ACC. Frontal positions in the southeast Pacific show large year to year meridional fluctuations, attributed mostly to ENSO and in part SAM, and no apparent seasonal cycles or long term trends. In contrast, summer (winter) frontal locations in the southeast Indian extend farther to the south (north) of their long term mean distribution. A southward drift of ACC fronts is indicated over the Indian sector during the past two decades. This long term shift is not directly related to the atmospheric variabilities, but this is most likely in response to changes in large scale ocean circulation, in particular to the poleward expansion of the Indian subtropical gyre. The existence of these localized, contrasting variability patterns suggests that a circumpolar averaging analysis could possibly smooth out a local climate signal, with an emphasis on a basin scale investigation for climate studies in the Southern Ocean.

1. Introduction

The Antarctic Circumpolar Current (ACC) plays a crucial role in the Southern Ocean, and a knowledge of its structure and variability is essential for understanding global climate changes (Sloyan and Rintoul 2001; Toggweiler and Russell 2008; Morrison and Hogg 2013; Wang et al. 2014). Its path between subtropical and subpolar circulations is delineated by the Subtropical Front (STF) and the southern boundary of the ACC (SBdy); the bulk of its transport is carried out by multiple deep-reaching jets, of which three correspond to

the circumpolar Subantarctic Front (SAF), the Polar Front (PF), and the southern ACC Front (sACCf) from north to south (see Fig. 1a; Orsi et al. 1995). This robust frontal system acts as a thermohaline boundary between subtropical and subpolar regimes (Naveira Garabato et al. 2011). Therefore, even a minor change in their meridional position could give a nontrivial impact, not only on volume transport (Morrison and Hogg 2013), but also on a hydrological cycle associated with sea ice extent (Liu and Curry 2010).

ACC fronts, defined as water mass boundaries, have been traced around Antarctica by means of specific indicators, that is, particular subsurface water property values from in situ hydrographic data (Nowlin and Clifford 1982; Orsi et al. 1995; Belkin and Gordon 1996). To overcome the spatial and temporal restrictions inherent in these observations, remote sensing data have been used to track sea surface signals associated with the fronts (e.g., Gille 1994; Dong et al. 2006). Sokolov and Rintoul (2002) suggested that a selection of contours in

* Supplemental information related to this paper is available at the Journals Online website: <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-13-0217.1>.

Corresponding author address: Yong Sun Kim, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 787 Haean-ro, Sangrok-gu, Ansan, 426-744, South Korea.
E-mail: yongsun@kiost.ac

DOI: 10.1175/JPO-D-13-0217.1

© 2014 American Meteorological Society

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.