

BSPE99491-11574-1

한반도 해역 수온 및 해수면 변화 전망 연구

(부제: 수온구조 계절 예측 및 미래 해수면 변화 전망)

Projection of ocean temperature and sea level change
around Korean Peninsula

(Sub-title: Seasonal prediction of ocean temperature and future
projection of sea level change)

2018. 2

연구기관
한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

이 보고서를 “한반도 해역 수온 및 해수면 변화 전망 연구 (부제: 수온구조 계절 예측 및 미래 해수면 변화 전망)”의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 2. 28

연구책임자 : 박영규

연구 원 : 권민호, 김민우, 김성대, 김영호, 김철호,
박균도, 서성봉, 이강진, 진현근, 최아라,
진현근

보고서 초록

과제고유 번호		해당단계 연구기간	2015. 01. 01 -2017. 12. 31	단계 구분	1단계
연구사업명	중사업명	한국해양과학기술원 주요사업			
	세부사업명	기관고유사업			
연구과제명	대과제명	미래바다보기			
	세부과제명	한반도 해역 수온 및 해수면 변화 전망 연구			
연구책임자	박영규	해당단계 참여연구원수	총 : 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 물리연구본부		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	126면
<p>지구시스템 모형을 적용하여 기후 계절예측을 위한 역학 시스템을 구축하였다. 실시간으로 관측자료를 수집하고 기후자료동화시스템을 적용하여 실시간 기후예측을 위한 초기화 방안을 수립하고 앙상블 예측 기법을 적용하여 기후예측 성능을 향상시켰다. 한반도 주변해역에 대한 역학 시스템의 예측 성능 평가 결과 미국 NCEP CFS의 계절예측 결과와 비교할 만한 것으로 나타났다. 특히 여름철과 겨울철 예측 성능이 높게 나타났다.</p> <p>역학모형의 한반도 부근 수온의 계절예측성능을 개선하기 위하여 통계모형 중 하나인 정준상관분석 모형을 이용하여 역학-통계모형을 개발하였다. 통계모형의 예측변수는 한반도 주변 3차원 수온구조이고, 예측인자로 역학모형에서 예측된 북서태평양 아열대고기압변동성과 열대/아열대 지역 해수면온도 및 강수량을 이용하였다. 개발된 역학-통계모형의 예측성을 성능점수로 진단한 결과, 역학모형만 이용한 경우보다 많은 지역에서 예측성이 상당 수준 개선되었다.</p> <p>한반도 주변해의 해수면에 대해 중장기 변동을 파악하고 미래 변화를 전망하였다. 관측과 모델에 의한 해수면 상승률(mm/yr)은 93-14년에 동해, 황해, 동중국해에서 각각 2.8~3.1, 3.4~3.8, 2.6~4.1로 추산되었다. RCP 4.5 시나리오에 기반한 2006-2100년의 한반도 주변해 해수면 상승률(mm/yr)은 GFDL-ESM2M에서 6.2~6.5, MPI-ESM-LR에서 5.0~5.3으로 예측되었다. 미래 기간의 해수면 상승은 황해와 동중국해에서 밀도변화의 성분이, 동해에서는 밀도변화성 성분이 각각 주도하는 것으로 예측되었다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	역학모형, 통계모형, 계절예측, 통계비부씨네스크 모델, 미래 해수면 전망			
	영 어	Dynamic Model, Statistical Model, Seasonal Prediction, non-boussinesq model, future sea level projection			

요 약 문

I. 제 목

한반도 해역 수온 및 해수면 변화 전망 연구 (부제: 수온구조 계절 예측 및 미래 해수면 변화 전망)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

□ 필요성

기후변화와 관련하여 기상 이변의 발생 빈도가 증가하고 있으며 자연 재해도 늘어나고 있는 추세이다. 기상청을 통해 기상 정보의 장기 예보 서비스가 국민들에게 제공되고 있으나, 해양과 관련된 장기 예측 정보는 거의 제공되고 있지 않은 실정이다. 자연 재해 저감을 위하여 해양 계절 예측 시스템의 국내 기술 개발이 절실히 요구되어진다. 미래 해수면 상승의 정량적 예측은 국가 기후변화 대응 정책 수립의 기본 자료가 되며, 기후변화 시나리오에 따른 한반도 주변해의 미래 해수면 상승 예측을 위한 국내 기술 개발이 요구되어진다.

□ 목적

한반도 주변해의 해양 계절 예측 시스템 수립을 위하여 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형을 개발하고 수온구조 예측성을 평가하며, 미래 해수면 변화를 전망하기 위하여 해수면 변동모형을 개발하고 기후변화 시나리오에 따른 해수면 변화를 예측함

III. 연구개발의 내용 및 범위

□ 연구기간

2015. 01. 01 - 2017. 12. 31

□ 연구개발의 내용

1. 한반도 주변해 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 고도화
 - 최적의 앙상블 기후 초기장 생성
 - 원격상관을 이용한 역학/통계 모형 고도화
2. 한반도 주변해 수온구조 예측성 평가
 - 4계절 예측을 위한 개별 예측시스템 기반 구축
 - 성능점수를 이용한 역학/통계모형의 예측성 평가
3. 한반도 주변해의 중장기적 해수면 변동 특성 모의 및 미래 해수면 변화 모델 예측
 - 해수면 변동 모델 개발 및 중장기 변동 모의
 - 기후변화 시나리오에 기반한 한반도 주변해 미래 해수면 및 수온 변화 전망

IV. 연구개발결과

1. 역학모형을 이용한 계절예측 시스템 개발

KIOST 지구시스템 모형을 적용하여 한반도 주변 해역의 계절예측을 위한 역학 시스템을 구축하였다. 과거 관측 자료를 앙상블 최적내삽법으로 KIOST 지구시스템 모형에 동화하여 생산된 기후재분석 자료를 초기장으로 활용하여 1981년부터 2010년까지 30년간 월별로 과거 기후예측을 수행하였다. 30년간의 과거 기후예측 자료는 역학모형을 이용한 기후예측 시스템의 예측성 평가와 실시간 예측을 수행할 때 모델의 편향성을 제거하는데 기초 자료로 활용하였다. 또한 실시간 해양관측자료의 수집 및 품질관리 체계를 구축함으로써 역학모형에 기반한 실시간 계절예측 시스템의 구동이 가능해졌다. 앙상블 최적내삽법에 기반한 기후자료동화시스템에 준실시간 관측 자료를 동화하여 KIOST 지구시스템 모형의 초기장을 생성하였으며, 이로부터 8개의 앙상블을 구성한 앙상블 예측 기법을 적용하여 실시간 계절예측을 수행하였다. 앞서 30년간의 과거 기후예측 자료로부터 한반도 주변해역에 대한 역학시스템의 예측 성능을 평가하기 위하여 SODA 해양재분석 자료와 비교 분석하였으며, 평가 결과 미국 NCEP CFS의 계절예측 결과와 비교할 만한 것으로 나타났다. 특히 여름철과 겨울철 예측 성능이 높게 나타났다. 구축된 실시간 계절예측 시스템을 적용하여 향후 3개월 후인 2018년 2월에 대한 계절예측을 시범적으로 수행하여 그 결과를 제시하였다.

2. 한반도 주변해 수온 계절예측을 위한 역학-통계모형

한반도 주변해의 수온에 대한 계절예측을 위하여 초기화과정이 포함된 접합대기해양대순환(Coupled atmosphere/ocean general circulation model) 모형이 많이 활용된다. 그러나 현재 수준의 접합 역학모형으로는 중위도 기후의 계절예측성을 충분히 확보하기 어렵다. 그러나 열대 기후에 대한 역학모형의 예측성은 비교적 우수하다. 특히, 엘니뇨 발생 지역을 포함한 열대 지역은 12개월까지 유의미한 수준의 예측이 가능하다. 또한, 열대/아열대 지역의 기후변동성은 지역에 따라 차이는 있지만 중위도 기후와 높은 상관성을 갖는다. 그래서 열대/아열대 지역의 역학모형 예측결과를 예측인자로 활용하고 중위도 지역 한반도 주변해의 수온을 예측변수로 한 역학-통계모형을 개발하였다. 여름철 수온 예측을 위해서는 북서태평양 지역의 아열대 고기압과 관련된 대기 순환이 중요한 예측인자로 분석되었고, 이를 활용한 역학통계모형이 개발되었고, 그 예측성이 진단되었다. 그러나 이 예측인자는 여름철에만 해당되는 예측인자이므로 한반도 주변해 수온의 월별 예측을 위한 역학-통계모형을 구축하기 위하여 열대/아열대 지역에 대한 해수면온도 혹은 강수량을 예측인자로 발굴하였다. 월별 계절예측을 위한 역학-통계모형의 예측성을 평가하기 위하여 성능점수(skill score)가 도입되었고, 이를 이용하여 한반도 주변해 수온 월별 계절예측을 위한 역학-통계모형의 예측성을 진단한 결과, 모형의 예측성이 현업적 활용이 가능한 수준이라는 것을 보였다.

3. 한반도 주변해 중장기 해수면 변동 특성 모의 및 미래 해수면 변화 전망

한반도 주변해의 해수면과 수온 등에 대해 과거의 중장기적인 변동을 파악하고 지구온난화에 따른 미래 변화를 전망하기 위하여 GFDL MOM5-SIS를 기반으로 해수면 변동모형을 수립하고 일련의 실험을 수행하였다. 1958-2009년 기간에 모델과 복원해수면에 의한 해수면 상승률은 동해와 황해에서 2.1~2.2 mm/yr, 동중국해에서 1.9~2.6 mm/yr로 추정되고, 1993-2014년 기간에 대한 모델과 위성고도계 자료의 해수면 상승률은 동해에서 2.8~3.1 mm/yr, 황해에서 3.4~3.8 mm/yr, 동중국해에서 2.6~4.1 mm/yr로 각각 추정되었다. RCP 4.5 시나리오에 기반한 한반도 주변해의 미래 해수면 상승률(mm/yr)은 GFDL-ESM2M의 경우, 2006-2100년 기간에는 6.2~6.5 mm/yr로 예측되었다. MPI-ESM-LR에서는 2006-2100년 기간에는 5.0~5.3 mm/yr로 예측되었다. 미래 기간의 해수면 상승을 주도하는 기여 성분은 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR 모두 황해와 동중국해에서는 밀도변화외의 해수면변화 성분으로, 동해에서는

밀도변화성 해수면 변화 성분으로 나타났다. 한반도 주변해의 미래 해수면 상승폭(cm)은 GFDL-ESM2M의 경우, 2006-2100년 기간 동안 59~62 cm, MPI-ESM-LR의 경우는 47~51 cm로 예측되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 개발된 수온구조 계절 예측 시스템은 직접적으로 현업에 활용 가능하며, 계절 예측 결과는 기상청 계절 예측 자문 회의에 KIOST 고유의 수온구조 계절 예측 결과로서 현업적으로 제공될 수 있다. 또한 계절 예측 결과는 기후 변화 적응 정책 수립과 자연 재해 저감 방안 도출에 활용될 수 있다.
- 향후 KIOST 기후 모형의 활용도와 KIOST 관측 자료의 활용도를 높이며 관측자료의 질을 향상시키는데 기여할 수 있도록 한다.
- 한반도 지역의 해양부문 표준 기후변화 시나리오 작성과 한국기후변화 평가보고서 작성에서 한반도 주변해의 수온과 해수면 변화 전망 분야에 기여할 수 있도록 한다.

S U M M A R Y

I. Title

Projection of ocean temperature and sea level change around Korean Peninsula (Sub-title: Seasonal prediction of ocean temperature and future projection of sea level change)

II. Necessities and Objectives of Research and Development

Necessities

Due to the climate change, the frequency of extrem weather events has increased, and accordingly the probability of cliamte disasters has also increased. The Korean Meteorological Agency has provided the long-term climate prediction service in terms of weather variables but the oceanic variables has not gotten attention so far. To mitigate the climate disaster, the ocean climate prediction system development is required. Quantitative forecasting of future sea level rise is the basic data for national policy response and it is required to develop domestic technology for predicting future sea level rise according to climate change scenarios around the Korean Peninsula.

Objectives

For the establishment of ocean seasonal prediction system in the seas around the Korean Peninsula, this study aims at developing the dynamic/statistical models for the prediction of temperature profile and estimating the predictability of seasonal temperature change. This study also incorporates the development of sea level model and prediction of future sea level change based on the climate change scenarios.

III. Contents of Research and Development

Period of research

01 January, 2015 - 31 December, 2017

Contents of research

1. **Dynamic/Statistical model improvement for seasonal ocean temperature prediction in Korean seas**
 - Optimal ensemble climate initialization
 - By using climate teleconnection
2. **Ocean temperature predictability in Korean seas**
 - Seasonal climate prediction system establishment
 - Climate predictability assessment by applying skill score
3. **Simulation of long-term sea level variation and prediction of future sea level change for the seas around the Korean peninsula**
 - Development of sea level model and simulation of long-term sea level variation
 - Projection of future sea level and temperature changes for the seas around the Korean Peninsula based on the RCP 4.5 AR5 scenario

IV. Results

1. Seasonal Climate Prediction System Based on Dynamic Model

Seasonal climate prediction system based a dynamic model of the KIOST Earth System Model (KIOST-ESM) has been developed. By applying the Data Assimilation System of KIOST, which is developed based on the Ensemble Optimal Interpolation, ocean observation data have been assimilated into the KIOST-ESM to produce climate reanalysis. In this study, the climate reanalysis during 30 years from 1981 to 2010 has been utilized as the initial condition for the seasonal hindcast experiments. The ensemble prediction system composed of 8 ensemble members has improved

the seasonal climate predictability. The seasonal hindcast outputs enable to access the predictability of the KIOST climate prediction system and to remove the model drift of the KIOST-ESM. Also, we have set up a real-time ocean observation data collection and quality control system, which is the basis of the real-time seasonal climate prediction system. The KIOST-ESM as the real-time seasonal climate prediction system has been initialized by the climate analysis by applying the Data Assimilation System of KIOST to assimilate the real-time ocean observation. To access the KIOST climate prediction system, its predictability have been estimated by comparing with the ocean reanalysis of the SODA regarded as the observation in the Korean seas. In a result, its predictability is comparable to that of the NCEP CFS, or better than that particularly in summer and winter season. Also, we have established a real-time seasonal climate prediction system.

2. Dynamical-statistical model for seasonal prediction of ocean temperature in the vicinity of Korean Peninsula

Coupled atmosphere-ocean general circulation models including initialization processes can be utilized for seasonal prediction of ocean temperature in the vicinity of Korean Peninsula. It is difficult to have high seasonal predictability of the mid-latitude climate using the-state-of-the-art coupled dynamical models. Although climate models have difficulty to simulate and predict the mid-latitude climate, the dynamical model can significantly predict the tropical climate including El Nino-active region up to 12 months. In addition, tropical-subtropical climate variability is highly correlated with mid-latitude climate, in spite of regional differences. Therefore, we developed a dynamical-statistical model using prediction results by dynamical models as predictors and mid-latitude ocean temperature in the vicinity of Korea as predictands. It was analyzed that atmospheric circulation associated with subtropical High in the western Pacific was important predictors for summertime seasonal prediction of ocean temperature in the vicinity of Korea. Using these results, we developed a dynamical-statistical model for ocean temperature in the vicinity

of Korea in summertime and evaluated the predictability of the model. In order to predict ocean temperature at the all calendar months, we used tropical/subtropical sea surface temperature and precipitation as predictors. We introduced some skill scores to evaluate the predictability of the dynamical-statistical model, which was developed in this study. It was revealed that the dynamical-statistical model has a high predictability, which could be operationally utilized.

3. Simulation of long-term sea level variations and projection of future sea level change for the seas around the Korean Peninsula

Based on the ocean-sea ice coupled model(GFDL MOM5-SIS), a series of numerical experiments were conducted to understand the historical long-term sea level variations in the seas around the Korean Peninsula and to predict the future sea level change due to the global warming. Rate of sea level rise for 1958-2009 estimated from model simulation and reconstructed sea level analysis is 2.1~2.2 mm/yr for the East Sea and the Yellow Sea, and 1.9~2.6 mm/yr for the East China Sea. For 1993-2014, it is estimated to be 2.8~3.1 mm/yr for the East Sea, 3.4~3.8 mm/yr for the Yellow Sea, and 2.6~4.1 mm/yr for the East China Sea from model and satellite altimeter data. Future sea level rise rate for 2006-2100 based on RCP 4.5 scenario is projected to be 6.2~6.5 mm/yr around the Korean Peninsula from the GFDL-ESM2M climate forcing experiment and 5.0~5.3 mm/yr from the MPI-ESM-LR. Major contribution to the future sea level rise is predicted to be non-steric sea level component in the Yellow Sea and the East China Sea, and steric component in the East Sea from both the GFDL-ESM2M and the MPI-ESM-LR climate forcing experiments. The projected sea level rise for 2006-2100 in the regional seas around the Korean Peninsula is 59~62 cm from the GFDL-ESM2M, and 47~51 cm from the MPI-ESM-LR experiments, respectively.

V. Application plan of results and products

- The developed ocean climate prediction system can be used directly in the field. The seasonal prediction results can be provided as a result of KIOST's unique ocean seasonal prediction in the Meteorological Agency. In addition, seasonal prediction results can be used to establish climate change adaptation policies and to reduce natural disasters.
- The utilization of KIOST climate model and the utilization of KIOST observation data will be improved in the future and contribute to improvement of quality of observation data.
- Contribution to the preparation of climate change scenarios for the Korean seas and national climate change assessment report by providing the projected results on the future sea level change

C O N T E N T S

Chapter I Introduction	1
Section 1 Necessities of the study	1
Section 2 Objectives and contents of the study	4
Chapter II Status of domestic and overseas research and development	6
Section 1 Research and development in Korea	6
Section 2 Research and development in overseas countries	9
Chapter III Contents and results of the study	11
Section 1 Dynamic model	11
Section 2 Statistical model	32
Section 3 Simulation of long-term sea level variation and prediction of future sea level change in the seas around Korean Peninsula	61
Chapter IV Achievements and contributions to the related area	111
Section 1 Adequacy of conducting research compared to initial objectives	111
Section 2 Achievements of objectives	112
Section 3 Contributions to the related area	120
Chapter V Outreach plans of the results	121
Chapter VI Reference	123

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용	4
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	6
제 1 절 국내 기술개발 현황	6
제 2 절 국외 기술개발 현황	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1 절 한반도 주변해 수온 구조예측을 위한 역학모형	11
제 2 절 통계모형	32
제 3 절 한반도 주변해 중장기 해수면 변동 특성 모의 및 미래 해수면 변화 전망 연구	61
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	111
제 1 절 계획대비 연구수행의 적절성	111
제 2 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성	112
제 3 절 관련분야에의 기여도	120
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	121
제 6 장 참고문헌	123

그림 목 차

그림 3.1.1. 가이아 지구시스템 모형의 개념도 (한국연구재단, 2015)	12
그림 3.1.2. 가이아 지구시스템 모형을 이용한 기후 과거예측 성능. 6개월 후 해수면 온도 예측 결과와 UK Metoffice 의 EN4와의 상관도 (한국연구재단, 2015)	14
그림 3.1.3. 가이아 지구시스템 모형의 대기요소모델의 격자 변경. 기존의 latitude-longitude 격자에서 육면구체 격자체계로의 변환 (한국연구재단, 2015)	14
그림 3.1.4. 가이아 지구시스템 모형의 모수화 방안의 특징 (GAIA 1.1, 1.2, 2.0) (한국연구재단, 2015)	15
그림 3.1.5. 가이아 지구시스템 모형의 KPP와 NK 해양혼합층 모수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과	16
그림 3.1.6. 가이아 지구시스템 모형의 대기 행성경계층 모수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과를 나타낸 MJO의 Phase Map. (a) Bretherton and Park (2009), (b) Grenier and Bretherton (2001)의 방안을 적용	17
그림 3.1.7. KIOST 지구시스템 모형의 대기 행성경계층 템수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과를 나타낸 MJO의 Spectral analysis. (a) Bretherton and Park (2009), (b) Grenier and Bretherton (2001)의 방안을 적용	18
그림 3.1.9. 자료동화 입력을 위한 관측 자료 비교(2016년 3월)	23
그림 3.1.10. 기후예측 시스템 개념도	25
그림 3.1.11. KIOST 지구시스템 모형으로 예측된 2015년 12월 해면 수온(좌측)과 실제 관측된 2015년 12월 해면 수온 (우측)	27
그림 3.1.12. 국립수산과학원의 서해 정선관측 308 라인에서의 월별 수온 단면도. (a) KODC 관측 자료, (b) SODA 재분석 자료, (c) EN4 자료	27
그림 3.1.13. 해수면온도에 대한 월별 3개월 예측 결과와 SODA 재분석자료의 장기 상관계수	29
그림 3.1.14. 해수 열용량(표층에서 300미터까지의 평균 수온)에 대한 월별 3개월 예측 결과와 SODA 재분석자료의 장기 상관계수	30
그림 3.1.15. 1980년부터 2012년까지 33년간 과거예측 자료로부터 북위 30도에서 40도까지 평균된 수온의 예측성 평가. SODA와의 상관성 검증	31
그림 3.2.1. (a) WNPI와 (b) INDSH에 대한 여름철 평균 해수면온도의 상관계수 지도	35

그림 3.2.2. 예측변수와 (a) WNPI 혹은 (b) INDSH 사이의 부분상관계수 지도. (c) 관측과 추가적 제약 다중선형회귀 모형 결과의 상관지도	35
그림 3.2.3. 여름철 평균 해수면온도의 주요 EOF 모드 (a), (b), 그리고 (c) 는 세 EOF 모드, (d), (e), 그리고 (f)는 세 EOF 주성분 시계열(PCs). (g), (h), 그리고 (i)는 PC에 회귀된 해수면온도 편차	36
그림 3.2.4. 북서태평양 여름몬순지수와 여름철 평균 850 hPa 동서바람의 상관계수 지도. 두 상자안은 각각 동아시아 여름몬순 및 북서태평양 여름몬순 영역	37
그림 3.2.5. (a) 첫 번째 클러스터와 (b) 두 번째 클러스터에 대한 여름철 평균 지위고도 편차와 850 hPa 수평바람의 합성도. 각 클러스터는 1979-2009년 동안 여름철 평균 동서바람 편차에 대한 계층적 클러스터 분석에 의해서 산출됨(Kwon, 2013)	39
그림 3.2.6. (a) 정규화된 동아시아 여름강수지수(East Asian summer rainfall anomaly; EASRA), WNPSH (western North Pacific subtropical high), 그리고 WNPMI (western North Pacific monsoon index)는 각각 바와 닫힌 원, 그리고 열린 원으로 나타냄. (b) 11년 윈도우를 가진 EASRA와 WNPSH의 이동상관계수 및 EASRA와 -WNPSH의 이동상관계수. 수평 실선은 95% 신뢰수준을 의미함(Kwon, 2013)	40
그림 3.2.7. (a) 1979-1993, 그리고 (b) 1994-2011에 대한 M여름철 평균 지위고도의 EOF1 시계열과 여름철 평균 850 hPa 동서바람의 상관계수 지도. 상자로 표시된 지역은 WNPMI의 정의 영역임(Kwon, 2013)	41
그림 3.2.8. 네 주요 현업기관(NCEP/NCAR, APCC, KMA, 그리고 WCRP)의 강수량에 대한 역학모형 예측성.	42
그림 3.2.9. 주요 현업기관(NCEP/NCAR, APCC, 그리고 KMA)의 850 hPa 동서바람에 대한 역학 모형의 예측성	43
그림 3.2.10. 여름철 평균 북서태평양 지역 850 hPa 동서바람과 KIOST 지구시스템 모형으로부터 예측된 해수면온도에 대한 주요 CCA 모드	43
그림 3.2.11. 2015년 역학-통계모형에 의해 예측된 한반도 주변 해수면온도 편차와 재분석자료에서 나타나는 해수면온도 편차	44
그림 3.2.12. 역학통계모형에 의해 예측된 한반도 주변 해수면온도와 재분석자료와의 상관계수 지도 ..	45
그림 3.2.13. 영역평균(110E-140E, 30N-50N)된 해수면온도 편차와 (a) 200 hPa 지위고도, (b) 200 hPa 기온, (c) 500 hPa 지위고도, (d) 강수량, (e) 850 hPa 동서바람, 그리고 (f) 해수면온도와의 상관계수 지도	46
그림 3.2.14. 북서태평양 몬순지수에 대한 강수량 편차의 합성도	47
그림 3.2.15. 그림 3.2.13의 강제력에 의한 LBM 모형의 850 hPa 유선함수 편차 결과	47

그림 3.2.16. 1989년에 대하여 KIOST 지구시스템 모형에 의해 예측된 겨울철 평균 해수면온도 편차	49
그림 3.2.17. 재분석자료만 다르고 그림 3.2.15와 같음	49
그림 3.2.18. 역학-통계모형인 것만 다르고 그림 3.2.16과 같음	50
그림 3.2.20. 재분석자료만 다르고 그림 3.2.19와 같음	51
그림 3.2.21. 역학-통계모형인 것만 다르고 그림 3.2.19와 같음	51
그림 3.2.22. 사계절에 대한 역학통계모형과 재분석자료에 대한 해수면온도의 상관계수 지도. HSS 는 예측 영역에서 Heidke skill score를 의미함	52
그림 3.2.23. 겨울철에 대한 영역평균된 재분석자료의 해수면온도 편차(검정색)와 역학통계모형의 해수면온도 편차(하늘색)	54
그림 3.2.24. 봄철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음	54
그림 3.2.25. 여름철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음	54
그림 3.2.26. 가을철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음	54
그림 3.2.27. 열대지역에서 월평균 해수면온도에 대한 EOF 주요모드	55
그림 3.2.28. 5, 25, 50, 그리고 100 m 깊이에서 해수온의 EOF 모드. 윗 패널과 아래 패널은 각각 첫 번째 그리고 두 번째 EOF 모드를 의미함	56
그림 3.2.29. 5 m 깊이에서 월별 해수온에 대한 역학-통계모형의 예측성	57
그림 3.2.30. 열용량인 것만 다르고 그림 3.2.29와 같음	57
그림 3.2.31. 한반도 주변 수온에 대한 역학통계모형 예측결과의 Heidke 성능점수 지도	58
그림 3.2.32. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 3월 동아시아 수온 예측 결과	59
그림 3.2.33. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 4월 동아시아 수온 예측 결과	60
그림 3.2.34. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 5월 동아시아 수온 예측 결과	60
그림 3.3.1. 모델 적분 시간에 따른 전지구 평균해수면(상단; cm)과 평균수온(하단; °C) 변화. 파란색 실선은 전지구 0.5도 모델 결과이며 비교를 위해 전지구 1도 모델의 적분 결과(검은 색 실선)를 함께 나타냄. 가로축은 초기 0년부터 1000년까지의 모델 수치 적분 시간. 그림 에서 모든 곡선의 값은 각 년도에 연평균과 수심 평균을 거쳐 전체 해양 면적으로 평균된 값을 나타냄	67

그림 3.3.2. 기후평균강제력으로 모의된 해표면고도(상단; 적분 491-500년 기간 평균, 단위 m)와 위성관측 전지구 평균역학고도 (하단; Rio et al., 2011, 단위 cm)	68
그림 3.3.3. 지역해 평균해수면 모의·분석을 위한 동해와 황해와 동중국해에 대한 지역 구분	73
그림 3.3.4. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 지역 평균 및 장기 월평균 모델 해수면 변동(빨간색)과 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 장기 월평균 해면 고도(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. (단위; m)	74
그림 3.3.5. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 지역 평균 및 월평균 모델 해수면 변동(빨간색)과 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 해면고도 변동(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. (단위; m)	75
그림 3.3.6. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 각 지역해별 월평균해수면 아노말리(빨간색)와 1958-2009년 기간의 복원해수면 월평균 아노말리(연두색) 및 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 해면고도의 월평균 아노말리(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. 그림 내 직선들은 각각의 기간 동안 해수면 변화의 선형적 추세를 나타냄. (단위; cm)	76
그림 3.3.7. 한반도 주변해의 각 기간 동안의 해수면 차이 공간 분포(단위; cm). 93-02년 대비 05-14년의 모형 해수면 차이(좌상단)와 위성관측 해수면 차이(우상단) 및 58-67년 대비 05-14년의 모형 해수면 차이(하단). 각각 10년 동안의 월평균해수면의 전체평균을 취하고 그 차이를 나타냈음	78
그림 3.3.8. 한반도 주변해의 93-02년 대비 05-14년 기간의 해수면 변동과 각 기여성분의 공간 분포 (단위; cm). 각각 전체 해수면 차이(상단)와 밀도변화성 해수면 변화 성분(steric sea level, 좌하단) 및 밀도변화외 해수면 변화 성분(non-steric sea level, 우하단). 각 기간의 10년 평균을 취하였음	79
그림 3.3.9. 동해(상단), 황해(중단)와 동중국해(하단)의 지역 평균된 월평균 해수면(파란색)과 밀도 변화 성분(steric sea level, 연두색) 및 밀도변화외 성분(non-steric sea level, 빨간색)의 시계열. 두 해수면 기여 성분에 각각 1958년 1월의 전체 해수면 값을 더하여 표시하였음 (단위; cm)	80
그림 3.3.10. 동중국해의 영역 평균된 월평균 표면수온과 연평균 표면수온, 장기 월평균 표면수온 및 표면수온의 월평균 아노말리(모델-빨간색, 관측-파란색, 단위; °C)	83
그림 3.3.11. 동중국해의 영역 평균된 월평균 표면염분과 연평균 표면염분, 장기 월평균 표면염분 및 표면염분의 월평균 아노말리(모델-빨간색, 관측-파란색)	84
그림 3.3.12. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세 선을 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm)	88

그림 3.3.13. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면에 대한 각 기여성분들. 빨간색- 밀도변화의 성분, 연두색- 밀도변화 성분, 파란색- 전체 해수면. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm)	89
그림 3.3.14. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선을 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm)	90
그림 3.3.15. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면에 대한 각 기여성분들. 빨간색- 밀도변화의 성분, 연두색- 밀도변화 성분, 파란색- 전체 해수면. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm).	91
그림 3.3.16. GFDL-ESM2M의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 해수면 상승폭 (여기서 2006년은 2001-2010년 기간의 평균, 2050년은 2046-2055년 기간의 평균, 2075년은 2071-2080년 기간의 평균, 2095년은 2091-2100년 기간의 평균으로 정의하였음) (단위; m)	94
그림 3.3.17. MPI-ESM-LR의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 해수면 상승폭 (여기서 2006년은 2001-2010년 기간의 평균, 2050년은 2046-2055년 기간의 평균, 2075년은 2071-2080년 기간의 평균, 2095년은 2091-2100년 기간의 평균으로 정의하였음) (단위; m)	95
그림 3.3.18. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 표층수온 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선으로 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm)	97
그림 3.3.19. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 표층수온의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선으로 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm).	98
그림 3.3.20. GFDL-ESM2M의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 표층수온 변화 (2006년은 2001-2010년의 평균, 2050년은 2046-2055년의 평균, 2075년은 2071-2080년의 평균, 2095년은 2091-2100년의 평균을 대표함) (단위; °C)	100
그림 3.3.21. MPI-ESM-LR의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 표층수온 변화 (2006년은 2001-2010년의 평균, 2050년은 2046-2055년의 평균, 2075년은 2071-2080년의 평균, 2095년은 2091-2100년의 평균을 대표함). (단위; °C)	101
그림 3.3.22. 대한해협 월별 수송량의 시계열. 위로부터 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 기후강제력에 의한 1951-2005년 기간 수송량 변동과 2006-2100년 기간의 수송량 변동 예측 (단위; Sv)	104

그림 3.3.23. 장기 평균 대한해협 수송량. 위로부터 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 기후강제력에 의한 1951-2005년 기간 수송량 변동과 2006-2100년 기간의 수송량 변동 예측 (단위; Sv)	105
그림 3.3.24. GFDL-ESM2M 기후강제력에 의한 한반도 주변해의 표층해류 변동. (상단) 2001-2010년 8월 평균, (중단) 2091-2100년 8월 평균, (하단) (2091-2100년 8월 평균) - (2001-2010년 8월 평균). (벡터 단위; m/sec)	107
그림 3.3.25. MPI-ESM-LR 기후강제력에 의한 한반도 주변해의 표층해류 변동. (상단) 2001-2010년 8월 평균, (중단) 2091-2100년 8월 평균, (하단) (2091-2100년 8월 평균) - (2001-2010년 8월 평균). (벡터 단위; m/sec)	108

표 목 차

표 3.1.1. DASK의 자료동화 입력자료	22
표 3.1.2. 앙상블 구성도	25
표 3.2.1. 겨울철 역학-통계모형의 예측결과와 관측에 대한 결함 빈도 분포	53
표 3.2.2. 봄철에 대한 것만 다르고 표 3.2.1와 같음	53
표 3.3.1. 전지구 해양-해빙결합모델에 경계조건으로 사용되는 CORE 기후평균강제력의 해양, 해빙, 대기층 입력 변수들	66
표 3.3.1. 각각의 자료 전체 기간 및 공통 기간의 지역해별 해수면 상승률(단위; mm/yr)	77
표 3.3.3. 1958-2015년 기간의 각 지역해별 모델과 관측의 표면수온과 표면염분 변화율	85
표 3.3.4. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 평균해수면 상승률(mm/yr)	93
표 3.3.5. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 평균해수면 상승폭(cm)	93
표 3.3.6. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 표층수온 변화율($^{\circ}\text{C}/\text{yr}$)	99
표 3.3.7. 과거 기간(1951-2005년)과 미래 기간(2006-2100)의 대한해협 수송량 변동(단위; Sv) ...	106

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

○ 해양 계절 예측의 필요성

기상청은 지속적인 계절 예측 시스템의 개발과 개선을 통해 기상 정보의 장기 예보 서비스를 국민들에게 제공하고 있으나, 해양과 관련된 장기 예측 정보는 거의 제공되고 있지 않은 실정이다. 또한 해양과 관련된 계절 예측 시스템뿐만 아니라 장기 예보 생산 기술도 없어 해양 계절 예측 시스템의 국내 기술 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

○ 계절 예측에 의한 기상 예측 정확도 향상

중위도 지역에 대한 단순 역학모형의 계절 예측률이 상대적으로 떨어짐으로써 예측률 향상을 위한 기술 개발이 요구받고 있다. 이를 위한 방안으로서 기상 예측 정확도의 향상에 기여할 수 있는 한반도 주변해의 수온구조 예측 시스템 수립이 요구되어진다. 이와 같은 계절 예측의 정확도 향상은 계절 변동에 민감한 기업들의 정책적 적응(대응) 능력의 제고를 위해서도 필요하다.

○ 해수면 상승 예측의 필요성

우리나라 연안역에서 해수면의 중장기적 변동에 대하여는 서해안이나 동해안 혹은 남해안의 조위 자료 분석들을 통해 일부의 연구만이 이루어져왔다. 그러나 조위 관측의 단기적인 기록과 검조지점의 지각 운동 및 항만 건설에 의한 검조소 부근의 지형 변형 등으로 인해 조위 관측자료만으로는 해수면의 중장기적 상승 경향을 파악하기는 어려운 실정이다. 또한 한반도 해역의 미래 해수면 변화에 대하여 오 등(2011)과 국립기상연구소(2012), 해양수산부(2014) 등에 의해 일부의 연구가 시도되었으나, 해수면 예측에 사용한 모델들의 제약점과 공간적으로 낮은 해상도 및 예측 방법에 개선을 요하는 문제점 등을 안고 있어 신뢰도 높은 전망치는 제시하지 못하고 있는 실정이다.

2. 경제·산업적 측면

- 기후변화에 따른 자연재해 저감을 위한 개선된 계절 예측 시스템의 필요성
기후변화와 관련하여 기상 이변의 발생 빈도가 증가하고 있으며 이로 인하여 자연 재해도 늘어나고 있는 추세이다. 자연 재해 저감을 위하여 개선된 예측 시스템 수립과 계절 예측 시스템의 정확도 향상이 요구된다.
- 수산 및 어장 환경 변화 예측의 필요성
계절 예측 시스템은 안정적인 수산자원 확보를 위해 매우 유용한 계절 예측 정보를 제공할 수 있다. 해양 환경에 대한 계절 예측 정보는 수산 자원의 증양식, 잡는 어업, 어로 활동, 수산 자원의 분포, 이동과 회유 등 수산업 전반의 활성화에 필수적인 기초 정보로 활용 가능하다.
- 계절 예측 기술의 경제적 파급 효과
기상의 계절 예측 정확도 향상은 산업체의 계절 용품(선풍기, 냉방설비, 우의, 전열기 등) 생산 수급 예측과 맞물려 그 경제적 파급 효과가 매우 크다.
- 해수면 상승에 따른 경제·산업적 피해 저감의 필요성
해수면 상승 현상은 연안 침식/퇴적, 항만 구조물 및 기반 시설의 침수, 저지대 염수 피해, 파랑과 해일의 강화, 조류와 조석의 변화 등 우리나라 연안의 자연지형과 산업 시설에 많은 변화를 가져오는 중요한 요인중 하나이다. 미래 해수면 상승의 정량적 예측은 적절한 기후변화 대응 정책 수립의 기본 자료가 되며, 대응책 수립을 통해 미래 발생 가능한 경제·산업적 피해를 저감할 수 있다.

3. 사회·문화적 측면

- 기상 예측 및 악기상 예측 활용
전세계적으로 기상 예측의 정확도 향상 및 연안 활동의 안정성 제고를 위하여 해양 열용량 예측의 중요성이 부각되고 있다. 지구온난화에 따른 기후 재해의 증가로 기후 예측은 향후 재해를 저감하고 기업 및 국가의 정책을 지원하는 중요한 자료가 될 수 있다.

4. 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성

- 해양 환경의 계절 예측 기능 확보로 '기후변화 및 연안재해 대응기술 개발' 분야에서 국외 선도 해양 연구 기관과 동등한 수준으로 발전 지향
한국해양과학기술원에서는 해양 및 기후 예측을 위한 관련 연구를 수행하고 있다. 특히 기후 예측을 위한 전지구 해양/기후 재분석 자료를 생산하는 등 관련 분야를 선도하고 있으나 아직까지 해양 환경 계절 예측 결과를 제시하지 못하고 있다.
- 대국민 서비스를 할 수 있는 분야의 개발로 정부 출연 연구 기관으로서 역할 수행
기상 관련 기관에서는 기상 환경에 대한 계절 예측 결과를 제시하고 있으나 해양 관련 기관 중 해양 환경에 대한 계절 예측 결과를 제시하고 있는 기관은 없다.
- 국내 유일의 종합 해양 과학 연구 기관으로서 국내 해양학계 선도
한국해양과학기술원은 국내 유일의 종합 해양 과학 연구 기관이지만 아직까지 한반도 주변 해양 환경에 대한 예측 결과를 제공하고 있지 못하는 현 상황을 개선하여야 한다. 또한 한국해양과학기술원은 현장 관측을 활발히 수행하고 있으나 계절 예측 성능 개선을 위해 관측 자료를 제공해야 함에도 그 역할을 적절히 수행하고 있지 못하는 실정이다.
- 관련 분야(자료 동화 등)의 신진 연구자 배출로 인력 양성에 기여

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

- KIOST 지구 시스템 모형을 이용한 한반도 주변해 수온구조 계절 예측
 - 한반도 주변해 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 개발
 - 한반도 주변해 수온구조 예측성 평가
 - 한반도 주변해 평균해면고도의 시공간 분포 모델 개발 및 변동 모의
- 한반도 주변해의 해수면 중장기 변동 특성 모의 및 미래 해수면·수온 변화 예측
 - 한반도 주변해 해수면 변동 모델 개발 및 변동 모의
 - 기후변화 시나리오에 기반한 한반도 주변해 미래 해수면 및 수온 변화 전망

2. 연구개발의 목표 및 내용

구분	연차별 성과목표 및 연구내용	
	성과목표	연구내용
1차년도 (2015)	1. 한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발	1-1. 한반도 주변 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 시범 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기후 초기화 방안 수립 - 한반도 주변해 수온구조에 대한 원격 상관성 분석 - 인간 활동에 의한 기후 인자 고려 - Lagged averaged forecast 기법을 적용한 앙상블 초기화 생성 - 정준상관분석(CCA) 기법 적용 1-2. 한반도 주변해 수온구조 예측성 평가 기법 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 시범 예측 - 계절 예측 결과 비교 검증 - 5월 기준 한 계절 시범 예측 - 기존 재분석 자료와의 비교 검증
	2. 한반도 해역 해면고도의 시공간 분포 모델 수립 및 재현 실험	2-1. 해수면 변동 모델 수립 및 변동 재현 실험 <ul style="list-style-type: none"> - 비부씨네스크 모델 수립 - 한반도 해역 해면고도 변동 특성 모의 - 동아시아해역을 포함하는 서태평양 영역 모델 수립 - 지난 10년 규모의 해수면 변화 재현

3. 총 연구기간 로드맵(3개년)

핵심기술	요소기술	1차년도 (2015년)	2차년도 (2016년)	3차년도 (2017년)	Target 성과물
한반도 주변해 수온구조 계절예측 시스템 개발	• 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 개발	역학 모형을 위한 기후 초기화 기법 개발 한반도 주변 열용량 원격 상관성 분석	역학 예측 시스템의 고도화 통계 모형 개발	역학/통계 모형 구축 기후 초기장 개선	KIOST 수온구조 계절 예측 시스템 보유
	• 수온구조 예측 및 검증	한 계절 시범 예측 비교 · 검증	4계절 예측 지속성 평가	12개월 예측 예측 성능 평가	계절 예측 성능 평가 시스템
한반도 해역 해면고도 변동 모의	• 수온·해수면 예측 및 검증	해수면 변동 모델 수립 및 재현	한반도 해역 해면고도 중장기 변동 모의	한반도 해역 미래 해수면 변화 예측	중장기 해수면 변화 예측 결과 제시

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 기상·해양 계절 예측 기술 동향

최근 국내 해양 관련 기관에서는 현업 단기 해양예측 시스템 개발에 투자하고 있으나 아직까지 해양 계절 예측에 대해서는 고려하지 않고 있다. 기상청은 장기 예측과 관련 연구개발 과제들을 지속적으로 수행하여 단순 역학 모형의 한계를 극복한 계절 예측 시스템을 구축해오고 있으며 지속적으로 예측률을 향상시키고 있다. 관련된 기후 시스템의 이해를 통해 이상 기후에 대한 진단 시스템을 구축하려고 노력하고 있다. 또한 기상청은 매 계절에 계절 예측 전문가 회의를 개최하여 계절 예측과 관련된 학연산 협력 시스템을 구축함은 물론 주변국들과 협력하여 1년 6개월에 한번씩 북동아시아 국가(중국, 일본, 대만 등)들과 계절 예측 회의를 개최하여 현업적인 장기 예보 서비스를 국민들에게 제공하고 있으나 대부분 기온, 강수 등 대기 변수들로 해양 관련 변수에 대한 예측은 거의 이루어지지 않고 있다.

20세기 이후로 진행되고 있는 지구온난화로 인해 한반도가 속한 동아시아 지역에서도 최근 이상 기후 및 극한 해양 현상들의 출현이 빈번해지고 있다. 가뭄과 한파 그리고 열파 현상이 증가하고 홍수와 태풍의 강도가 세지고 있어 기후재해 가능성이 점차 높아지고 있다. 뿐만 아니라 고수온과 저수온 현상 그리고 적조 발생으로 인한 양식장의 어폐류가 패사하는 등 그 피해가 현실화되고 있어 국가적 · 사회적 관심 또한 높아지고 있다. 그러나, 이러한 극한 기후 또는 극한 해양 현상은 아직까지 기술적인 한계로 인해 예측에 어려움을 겪고 있다. 다만, 사후적인 진단을 통해 이를 예측하고자 하는 연구는 꾸준히 수행되고 있다.

한반도는 동아시아 몬순지역으로서 수문과정이 복잡하기 때문에 계절규모에서 계절기후를 예측하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 중위도 지역 계절예측을 위하여 통계모형은 역학모형 예측성 한계로 인하여 상호 보완적으로 이용될 수 있다. 통계모형은 역학적/물리적 과정의 이해가 부족하더라도 어느 정도의 예측성을 확보할 수 있기 때문에 현업적으로 널리 활용되고 있다. 국내 여러 연구기관에서는 다중선형 회귀모형을 이용하여 계절예측을 시도하는 노력이 있어왔다(Kang et al, 1992; Lee et al., 1999).

그러나 통계모형은 예측인자의 물리적 해석의 부족으로 종종 과적합문제로 불안정한 예측결과를 생산하는 경우가 많았다. 이러한 점을 보완하기 위하여 지점간 관련성을 고려한 주성분분석이나 정준상관분석 모형을 이용하여 계절예측을 하였다(Lee and Seo, 2013; Seo et al., 2015). 그러나 이들 통계예측모형도 예측성을 진단할 때는 비교적 높은 성능을 보이나 현업적으로 예측할 때는 상대적으로 낮은 예측성을 보인다. 이러한 통계모형의 불안정성을 보완하기 위하여 역학모형을 통계적으로 보정한 역학통계모형이 개발되어 현업적으로 활용되고 있다(Kwon and Lee, 2014; Lee et al., 2015). 역학통계모형은 비교적 예측성이 좋은 지역의 역학모형 예측결과를 활용하여 예측성이 낮은 지역의 예측성을 통계적으로 향상시키는 모형이다. 이러한 연구들은 모두 대기 변수 즉, 강수량과 기온에 대한 예측으로 해수온의 계절예측에 대한 통계모형 개발은 거의 이루어지지 않았다.

한국해양과학기술원(2012)은 2012년 여름철 폭염의 원인에 대해 분석하면서 한반도 해역의 해수면 수온이 평년보다 3-4도 높은 상태였음에 주목하였다. 특히 서해의 온도가 높았으며 이러한 해수면 수온 상승은 한반도 무더위가 시작되기 전 5월 말부터 지속되어 왔으며 이러한 해수면 수온 상승이 2012년 여름 한반도 폭염에 직간접적으로 영향을 줬을 가능성이 크다고 보았다. 정과 박(2013)은 WRF 실험을 이용하여 서해안 해수면 수온 상승이 호남지방 강설에 영향을 미치는 것을 보였으며, 안 등(1997)은 한반도의 기온 및 강수량 또한 한반도 해역의 수온과의 상관성에 주목하였다.

한국해양과학기술원에서는 연구재단의 지원을 받아 2009년부터 2019년까지 “통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측” 연구 사업을 수행하고 있으며, 이를 통해 KIOST 지구시스템 모형을 개발하고 해양 자료동화를 적용하여 장기간의 기후재분석 자료를 생산한 바 있다 (Kim et al., 2015). 이를 통해 개발된 KIOST 지구시스템 모형과 자료 동화 시스템은 기후 예측의 기반 기술로 활용될 수 있는 기술로서 국내에서는 최초로 개발된 것이다. 한반도 주변해역에 대한 실시간 계절 예측을 위해서는 국내외의 여러 기관에서 생산한 수온 염분 자료를 수집하고 이를 수치모델에 동화하기 위한 품질 관리가 수행되어야 하나, 아직까지 실시간 자료 제공이나 품질 관리 시스템이 마련되지 못한 한계가 있다.

2. 한반도 주변해 중장기 해수면 변동 연구 분야

우리나라 주변해역에 대한 해수면 변동에 대하여는 주로 연안의 조위 정점

관측자료를 위주로 하여 분석이 이루어졌다. 한반도 연안의 조위 관측자료에 기반한 연구 결과들에 의하면 우리나라 연안의 평균 해수면은 지속적으로 상승하는 경향을 보이는 것으로 보고되었다(Kang et al., 2000; Kang et al., 2005, 2008; Jeon, 2008; Yoon and Kim, 2012; KHOA, 2011, 2012, 2013, 2015; Kim and Cho, 2016; Kim et al., 2017). 그러나 이 연구 결과들은 동일한 분석 안에서도 사용한 조위 기록의 길이나 분석 기간들이 서로 다름으로 인해 제시되어진 해수면의 선형추세들에는 일관성이 결여되어 있다.

국립해양조사원(2015)에서는 최근에 1989-2014년의 공통된 조위자료 기간에 대하여 평균해수면의 상승 추세를 제시하였다. 이 보고에 의하면 서해안 검조 지점들의 해수면 상승률(mm/yr)은 목포의 3.19 mm/yr부터 흑산도의 -1.11 mm/yr까지 공간적으로 그 변동폭이 매우 크다. 또한 제주 지역은 제주가 6.36 mm/yr, 서귀포가 2.66 mm/yr를 나타냄으로 제주도 주변을 따라 매우 상이한 해수면 상승률을 보이고 있다. 동해안의 경우도 울산과 속초가 각각 2.57 mm/yr와 2.61 mm/yr 임에 비해 포항은 8.13 mm/yr로 보고됨으로 주변 지점들보다 매우 높은 상승률을 보였다. 이러한 검조 자료에는 검조소가 설치된 지점의 지각 변동이나 항만의 건설에 의한 조석의 변형 등에 의한 영향이 내포되어 있을 가능성이 높다. 이러한 조위 자료의 제약점을 보완할 수 있는 자료로서 위성고도계 관측에 의한 해면고도 자료와 해수 특성에 근거한 밀도변화 기인 해수면 자료 및 검조 자료 등에 기반한 해수면 복원자료 등을 들 수 있는데 우리나라 주변 해역에서 이와 같은 자료를 활용한 연구는 아직까지 매우 드물다 (Kang et al., 2005, 2008).

북서태평양과 한반도 주변해역의 미래 해수면 변화 예측에 대하여는 Choi et al.(2002)이 국내 최초로 대기-해양 접합모델을 이용한 연구를 시도하였는데, CO₂ 농도의 2배 증가와 4배 증가 실험을 통해 전지구와 북서태평양에서의 해수면 변동을 예측하였다. 이후에 오상명 등(2011)과 국립기상연구소(2012)가 IPCC AR4의 기후예측모델 결과들을 활용하여 2100년까지의 해수면 상승률을 제시한 바 있으나 모델 해상도가 성기고 분석에 사용한 모델들이 열팽창에 의한 해수면 변동 효과를 직접적으로 모의하지 못하는 모델 특성상의 제약점들이 있었다. 최근에 해양수산부(2014)에서는 열팽창 효과를 직접적으로 고려할 수 있는 해양순환모델을 이용하여 북서태평양 해역에 대해 비교적 높은 공간 해상도로 SRES A1B 시나리오에 근거한 미래 해수면 변화를 예측하는 연구를 수행하였다.

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 기상·해양 계절 예측 기술 동향

국외 많은 현업기관에서 역학모형과 통계모형을 적용한 기후예측 시스템을 개발하여 운영하고 있다. 특히 대표적인 해양연구기관인 미국의 GFDL, 일본의 JAMSTEC, 프랑스의 MERCATOR 등은 단기 기후(계절) 예측 결과를 제공하고 있으며, 다양한 기관들의 결과를 종합하여 다중앙상블예측 시스템이 운영되기도 한다 (Kirtman et al., 2014). 부산에 위치한 국제기구인 APEC 기후센터에서는 전세계 현업 기관 및 연구 기관의 계절 예측 자료를 수집, 가공하여 한반도 해역을 포함한 환태평양 국가에 계절 예측 정보를 실시간으로 제공하고 있다. 그러나 APEC 기후센터의 기후 예측에 이용되는 기후 예측 결과 중 우리나라 결과는 매우 제한적이어서 이에 대한 국내적인 기여가 필요한 실정이다. 뿐만 아니라, APEC 기후센터에서 제공하는 계절 예측 정보는 대부분 온도, 강수 등 대기 변수들이며 아직까지 해양예측에 대한 정보 서비스는 이루어지지 않고 있다. 향후 이에 대한 개선 및 해양연구 기관의 기여가 필요할 것이다.

국외 많은 현업기관에서도 계절예측을 위하여 주성분분석이나 정준상관분석을 이용한 통계모형이 다소 변형된 형태로 개발되어 왔다(Wu et al., 2009; Li and Mao, 2016). 한편, 시간에 따라 통계적 적합은 일정하지 않으므로 통계모형의 안정적인 예측을 평가하기 위하여 교차검증법이 많이 활용되고 있다 (Michaelsen, 1987). 교차검증(cross-validation)은 상대적으로 짧은 가용한 자료 기간을 보완하기 위하여 훈련기간과 실험기간을 나누고 예측성을 평가하는 방법이다. 물론 교차검증법도 통계모형의 예측성을 보장하지는 못한다. 국외 기관에서도 역학모형을 이용한 중위도 지역의 계절예측성능을 보완하기 위하여 통계적 보정법이 활용되고 있다. 이를 모형 결과 통계량(Model Output Statistics; MOS)라고 부른다(Mo and Straus, 2002). 한편, 선형적인 통계 적합방법을 극복하기 위하여 비선형적인 적합 방법들이 개발되고 운용되고 있다. 특히, Hsieh and Tang(1998)은 인공신경망을 이용하여 엘니뇨를 예측하는데 성공하였고, 몬순지역 강수량이나 기온을 비선형 적합방법을 이용하여 예측하려는 노력이 시도되고 있다(Kumar et al., 2012; Badr et al., 2014).

2. 기후변화에 따른 해수면 상승 평가 및 예측 연구 분야

지구온난화와 기후변화에 따른 전지구적인 해수면 상승에 대한 전망 연구는 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; 결합모델상호비교 프로젝트 5기) 그룹과 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change; 정부간 기후변화 패널)에서 주도적으로 수행해 오고 있다. IPCC에서는 지구온난화에 따른 해양의 변화와 해수면 상승에 대해 최근까지 발표된 관련 연구들을 전세계적으로 종합하여 지금까지 5차례의 기후변화 평가보고서(Assessment Report; 1990년, 1995년, 2000년, 2007년, 2013년)를 발간하였고 이를 통해 전지구적인 해양 특성의 변화를 평가하고 미래의 해수면 상승을 전망하였다.

IPCC 제5차평가보고서(AR5)에서는 1971년-2010년 기간에 해양 상층부(표층-700 m)의 온도가 상승한 것이 사실상 확실하며, 1870년대부터 1971년까지도 온난화 현상이 계속 진행되었을 가능성이 높은 것으로 평가하였다. 해양의 열함량 변화에 대하여도 표층-700m 수심층에서 1971년-2010년 기간 동안 증가되어 왔으며, 2003 - 2010년 사이에는 700 - 2000 m 수심에서 지속적으로 증가해왔을 가능성이 높은 것으로 평가하였다. 또한 전지구 평균 해수면은 조위관측 기록과 인공위성고도계 자료에 기반하여 1901년-2010년 동안 0.19 m 만큼 상승한 것으로 평가하였다. 1901년-2010년 사이의 평균 상승률은 1.7 ± 0.2 mm/yr, 1993년-2010년 사이에는 3.2 ± 0.4 mm/yr로 평가되었다. 이러한 해수면 상승의 원인으로서는 해양 상층부의 온난화가 해수면 상승에 기여해왔을 가능성이 매우 높은 것으로 제시하였다.

IPCC에서 종합하여 정리한 세계 각 기후연구기관들의 기후변화 예측 전망치들은 각국 정부의 기후변화 대응 정책 결정자들에 의해 점차 정책 수립의 기본자료로서 사용되기 시작하고 있다. AR5에서 전망한 해수면 상승폭은 1986-2005년 대비 2081-2100년에 RCP 2.6에서 40 cm, RCP 4.5에서 47 cm, RCP 6.0에서 48 cm, 그리고 RCP 8.5에서는 63 cm로 각각 제시되었다. AR5에서는 또한 전지구적인 규모에서 해수면의 지속적인 상승을 예측하였지만 지역적인 규모에서의 해수면 변화는 서안경계류 및 각 해역의 특성에 따라 그 정도에서 편차가 크게 나타날 것으로 전망하였다. 그러나 한반도 주변해의 미래 해수면 변화를 상세히 고찰하기에는 AR5에서 분석에 활용한 CMIP5의 지구시스템모델들의 공간 해상도가 아직까지도 낮은 상태에 머물러 있는 수준이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 한반도 주변해 수온 구조예측을 위한 역학모형

1. 가이아 지구 시스템 모형

가. 지구 시스템 모형 개요

해양순환·기후연구센터에서는 한국연구재단의 지원으로 수행 중인 “통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측” 사업을 통해 KIOST 지구시스템 모형을 개발하고 있으며 본 연구에서는 이를 이용한 계절 예측 시스템을 개발하였다. KIOST 지구시스템 모형은 해양-해빙-대기-지면 결합 모델에 해양자료동화 및 지면역학식생, 해양생지화학이 접합된 모형으로 기후 역학 뿐만 아니라 탄소순환 및 생지화학 순환을 함께 모의할 수 있다 (그림 3.1.1). 본 연구에서는 특히 KIOST 지구시스템 모형의 해양자료동화 시스템으로부터 생산된 기후재분석 자료를 초기장으로 하여 월별 예측이 가능한 기후(본 연구에서는 계절) 예측 시스템을 개발하였다. KIOST 지구시스템 모형을 통해 생산된 재분석 자료는 지난 수십 년 간의 해양 및 대기장을 잘 재현하여, 계절적인 시간 단위에서 수십 년 단위의 과거 기후 변화 분석 및 기후 예측시스템의 초기장을 제공하는 용도로 사용된다. 1947년 1월부터 2015년 8월까지 기간 동안 월 단위의 재분석장이 생산되어 있으며, 해양에만 자료동화를 적용하여 접합자 등을 통한 상호작용을 통해 해양의 개선 효과가 나머지 모델 구성요소에 영향을 미치도록 설계되어 있다. 해양의 열용량이 크기 때문에 해양에서의 개선 효과가 접합자를 통해 대기 등 다른 모형의 자료들에도 개선 효과가 나타날 것으로 기대하기 때문에 이러한 방식을 채택하고 있다. 현재 해양 자료동화만을 수행하여 나온 접합 모델 결과와, 동일한 접합 모델을 사용하면서 대기의 바람장에 ERA-interim 바람 재분석장을 절반 비율로 반영하여 특히 중위도 해역에서의 결과를 일부 개선한 버전까지 준비된 상태이다.



그림 3.1.1. 가이아 지구시스템 모형의 개념도 (한국연구재단, 2015)

나. 가이아 지구 시스템 모델 특성

KIOST 지구시스템 모형은 AM2.1 대기모델, MOM4.1 해양모델, LM2.1 육지모델 및 SIS 해빙모델 등으로 구성되어 있는데, 이는 IPCC 4차 보고서에 인용된 GFDL CM2.1 버전에서 MOM 모델이 4.0의 버전을 사용한 것만을 제외하고는 모형의 수평격자 및 수직격자 체계, 모형의 역학 계산 방식 등에서 모두 동일한 방식을 사용한다고 할 수 있다. 대기 및 육지 모델의 수평 격자는 B 격자 체계를 채택하고, 위경도 $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$ 로 구성되어 있으며, 대기 모델의 경우 연직 24개 층을 사용한다. 접합자를 통한 표층 열속 등은 2시간 마다 교환되며, 하천에서 유입되는 담수는 지면모델에서 처리된다.

해양모델은 해양 원시 방정식을 3차원 격자 체계에서 풀기 위한 MOM (Modular Ocean Model) 4.1버전에 기반하여 수립되어 있다. 해양의 시공간적 밀도 변화를 무시하는 Boussinesq 가정과 중력과 수직 수압이 평형을 이룬다는 정수압(Hydrostatic) 가정을 채택하고 있으며, z-level 수직 격자 체계와 Arakawa B 격자 체계를 채택하는 모델이다. 특히 MOM4.1은 GFDL CM2.1 접합 기후모델의 해양 요소 모델로 탑재되어 있으며, KIOST 지구시스템 모형에서도 동일한 버전의 모델을 기반으로 수립되어 있다. 해양모형의 격자는 위도의 변화에 따라서 다소 달라진다. 기본적으로 위경도 1° 간격의 격자 체계를 사용하지만, 북반구 및 남반구의 위도 30° 이내 해역에서는 위도 방향의 격자 간격이 점차 작아져서 적도 부근에서는 $1/3^{\circ}$ 가 된다. 해양모델에서 사용하는 격자체계는 남극 및 북극의 특이점(singularity)을 원활히 처리하기 위해 본래 북극해에 위치하는 북극점을 육지인 시베리아 및 캐나다 두 개의 위치로 옮기고, 남극점은 남극대륙에 그대로 위치하는 삼극(Tripolar) 격자 체계를 사용한다. 수직 격자는 지오폠펜셜 좌표계를 사용하여 총 50개 층으로 구성되어 있다. 운동량의 이류항은 Sweby 방식을 통해 각 격자에 대해 수평

및 수직 방향의 이류향을 한번에 계산하도록 하고 있으며, 수직 혼합 모수화 방법으로는 K-단면 모수화(K-profile parameterization) 방법론, 수평 마찰항은 Smagorinsky 방식을 이용하여 라플라스 연산자 형태로 표현하였다.

2. 계절예측 성능 향상을 위한 시스템 개선

가. 역학 모델 개선

지구온난화에 따른 기후변화가 진행됨에 따라 미래 기후를 전망하고 예측하고자 하는 노력들이 꾸준히 있어왔다. 특히, 전지구 기후시스템 모델(Global Climate Model)은 미래의 기후변화를 전망하는 역학적인 도구로서 기여해 왔으며, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 전지구 기후시스템 모델들이 참여하는 CMIP (Climate Model Inter-comparison Program)의 기후전망 결과들을 인용하여 기후변화 평가보고서를 작성해 왔을 뿐만 아니라, 기후변화 대응 및 적응에 중요한 참고 자료로 활용해 오고 있다.

본 연구에서는 KIOST 지구시스템 모형을 이용하여 전지구 기후예측 실험을 수행하였다. 이를 통해 KIOST 지구시스템 모형이 엘니뇨 예측 성능에 있어 유의할만한 예측 성능을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 그림 3.1.2는 1981년부터 2012년까지 32년동안 각 2, 5, 8, 11월부터 시작하여 6개월 후의 기후를 예측하고 예측된 해수면 온도를 관측(UK Metoffice의 EN4; Ingleby and Huddleston, 2007)과 비교하여 그 상관도를 나타낸 것이다. 엘니뇨 현상이 지배적인 적도 태평양을 중심으로 높은 예측 성능이 나타나고 있으며 적도 서대서양과 서인도양 그리고 북대서양에서 높은 예측성능이 나타나고 있다. 반면에 한반도 주변해역을 포함하여 북서태평양에서는 예측 성능이 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 북서태평양을 포함하여 중위도 지역에서 지구시스템 모형의 기후모의 성능이 저하되는 것은 잘 알려진 바이다. 중위도 지역의 기후모의 성능에 영향을 주는 MJO (Madden-Julian Oscillation)나 ISO (Intra-Seasonal Oscillation) 등을 모의함에 있어 전지구 지구시스템 모형이 한계를 가지고 있기 때문으로 알려져 있다.

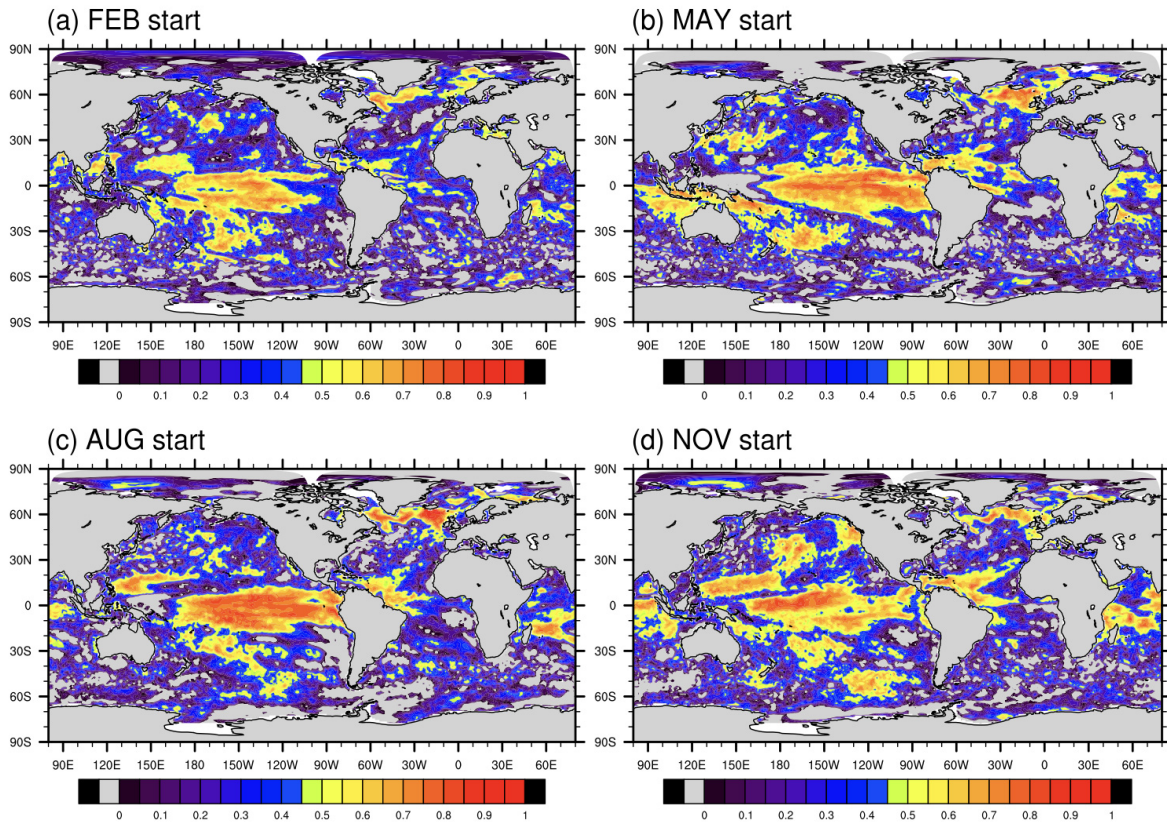
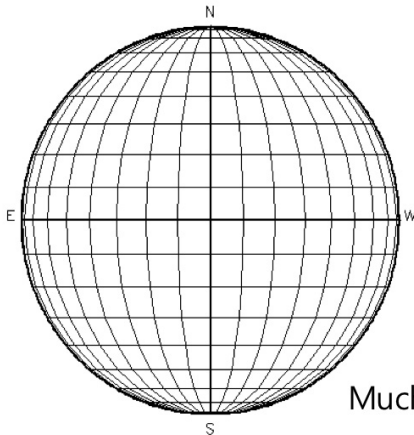
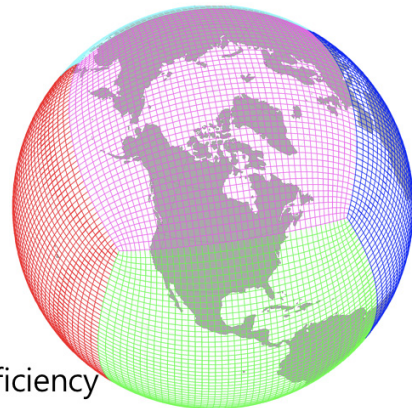


그림 3.1.2. 가이아 지구시스템 모형을 이용한 기후 과거예측 성능. 6개월 후 해수면 온도 예측 결과와 UK Metoffice 의 EN4와의 상관도 (한국연구재단, 2015)

Traditional latitude-longitude grid



Cubed Sphere grid



Much better Parallel efficiency

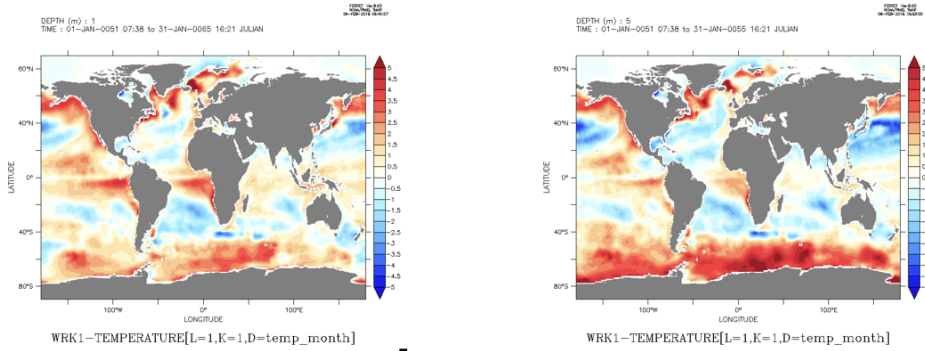
그림 3.1.3. 가이아 지구시스템 모형의 대기요소모델의 격자 변경. 기존의 latitude-longitude 격자에서 육면구체 격자체계로의 변환 (한국연구재단, 2015)

	GAIA1.1	GAIA1.2	GAIA2.0
Base model	CM2.1	CM2.1	CM2.5
Land model	LM2.1	LM3.0 + CLM4.0 with OASIS	Modified LM3.0 (CLM4.0)
Ocean model	MOM4p1	MOM4p1	MOM5 +NK mixing
Atmospheric core	Finite-volume core	Finite-volume core	Cubed-sphere grid finite volume
PBL scheme	Lock, 2001	Lock, 2001	Bretherton and Park, 2009
Deep convection		SNU convection	
Shallow Convection	SNU convection	UW shallow convection	Relaxed Arakawa/Schubert With Tokioka
Macrophysics	<u>Tiedke, 1993</u>	<u>Tiedke, 1993</u>	<u>Tiedke, 1993*</u>

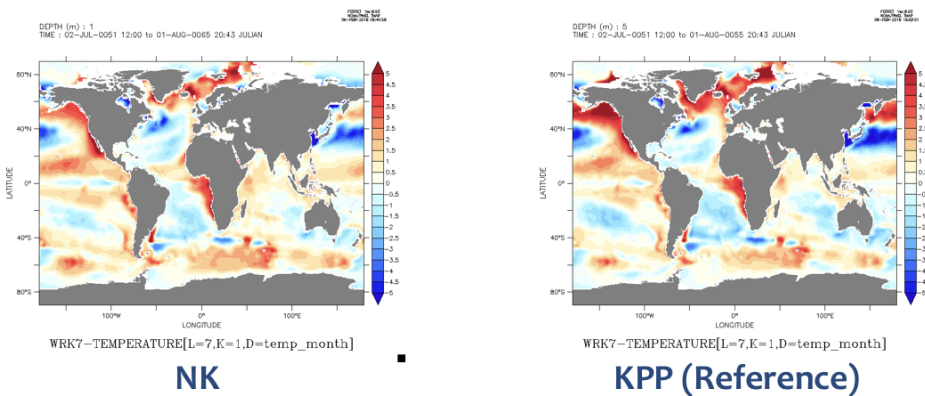
그림 3.1.4. 가이아 지구시스템 모형의 모수화 방안의 특징 (GAIA 1.1, 1.2, 2.0) (한국연구재단, 2015)

해양순환·기후연구센터에서는 중규모 기후변동 현상을 개선하기 위해 KIOST 지구시스템 모형 개선 연구를 수행하고 있다. 대기모델의 격자를 육면구체로 변경함으로 남북극의 특이점이 사라졌다 (그림 3.1.3). 또한 해양혼합층 모수화 방안을 NK 방안으로 변경함으로 남극해 주변의 고수온 편향을 보정하는 효과를 얻었으며, 대기의 행성경계층 모수화를 위해 Bretherton and Park (2009) 방안을 사용함으로 MJO 모의 성능을 크게 향상시켰다.

Jan., SST bias (model – WOA2009)



Jul., SST bias (model – WOA2009)



NK

KPP (Reference)

그림 3.1.5. 가이아 지구시스템 모형의 KPP와 NK 해양혼합층 모수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과.

그림 3.1.5는 가이아 지구시스템 모형의 해양혼합층 모수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과를 나타낸다. Noh and Kim (Noh et al., 2016) 방안과 KPP (Large et al., 1994) 방안을 적용하여 각각 1월과 7월에 대해 관측 자료와의 차이를 비교하였다. 저해상도의 전지구 기후모형이나 지구시스템 모형의 경우 남극해 주변에서 고수온 편향, 적도 동태평양에서 저수온 편향 그리고 북반구 서안경계류에서 저온의 편향이 나타나는 것이 일반적이다. NK 방안을 적용했을 때 전반적으로 남극해와 북반구 서안경계류에 나타났던 고수온 편향과 저수온 편향이 KPP 방안을 적용했을 때보다 크게 개선된 것을 확인할 수 있었다.

특히 대기 행성경계층 모수화를 위해 Bretherton and Park (2009)의 방안을 적용했을 때 MJO의 모의 성능이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3.1.6은 MJO의 phase map을 나타낸 것이다. 각각 (a)와 (b)는 Bretherton and Park (2009) 과 Grenier and Bretherton (2001) 방안을 적용하여 모의된 결과를

나타낸 것이다. Bretherton and Park (2009)를 적용하였을 때 MJO가 서쪽에서 동쪽으로 진행되는 특징을 관측에 가깝게 모의하는 것을 볼 수 있었다. 또한 Marine Continent를 지나면서 남쪽으로 우회한 후에 지난 후에 다시 신호가 강해지는 전형적인 형태를 잘 모의하고 있다. 반면에 Grenier and Bretherton (2001)의 경우 MJO의 진행 방향이 동쪽에서 서쪽으로 향하고 있어 관측과는 거리가 먼 결과를 모의하고 있다. 그림 3.1.7은 OLR (Outgoing Longwave Radiation)과 U850 (850 hPa에서의 동서방향 풍속)을 이용하여 MJO의 wave analysis를 수행한 것이다. 동쪽으로 진행되는 파에 대한 에너지가 크게 나타나고 있으며 이는 그림 3.1.6과 일맥상통하는 결과이다. 향후 개선된 가이아 지구시스템 모형을 이용하여 한반도가 속한 중위도의 기후 모의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

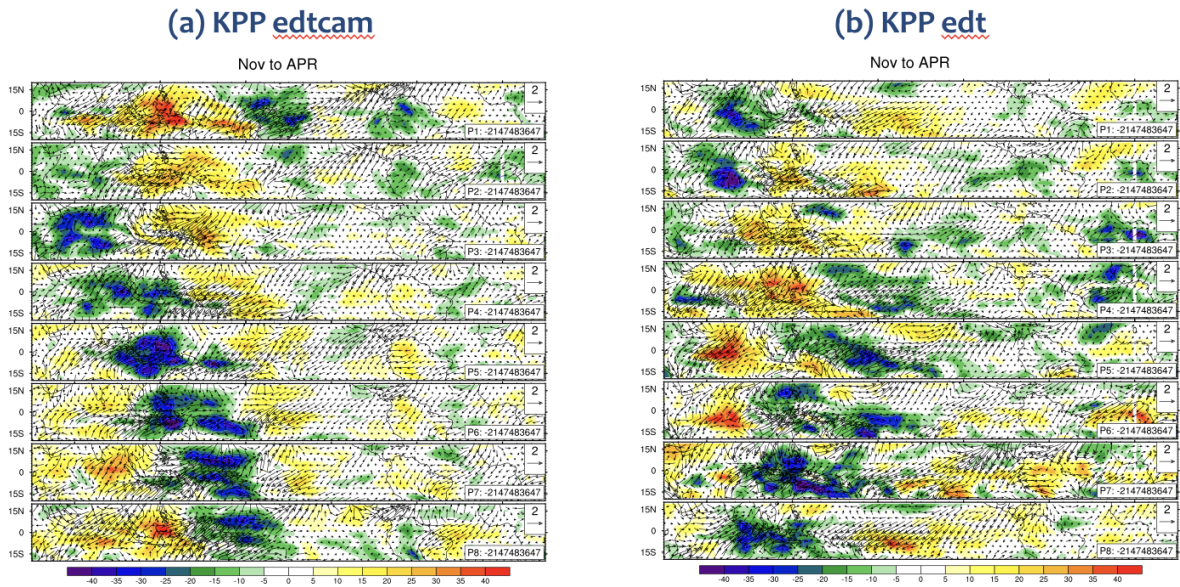


그림 3.1.6. 가이아 지구시스템 모형의 대기 행성경계층 모수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과를 나타낸 MJO의 Phase Map. (a) Bretherton and Park (2009), (b) Grenier and Bretherton (2001)의 방안을 적용

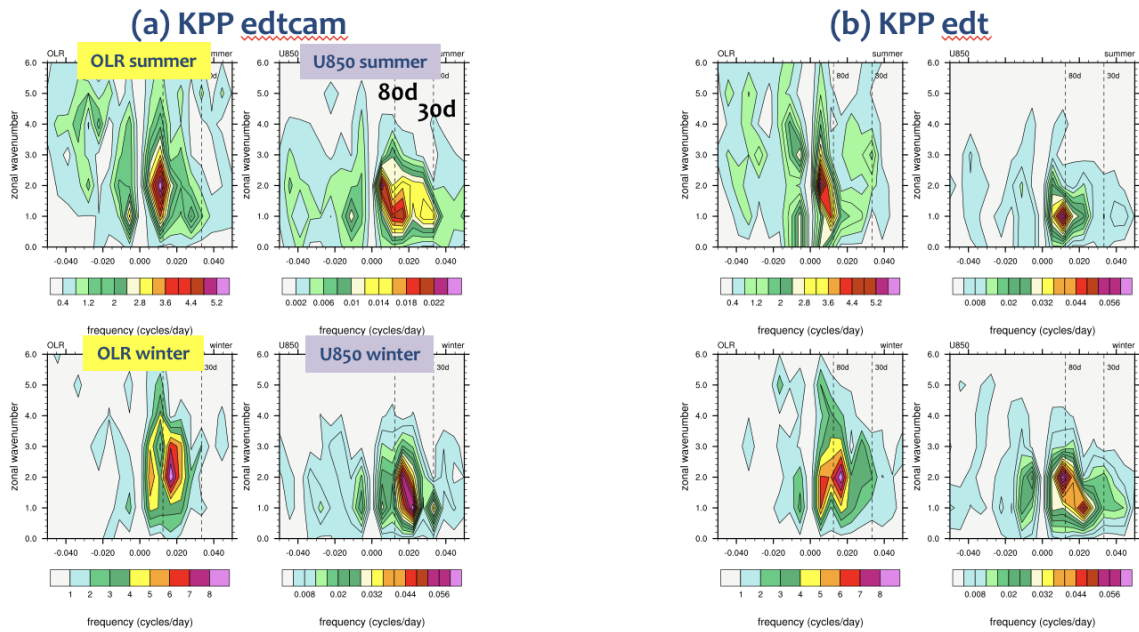


그림 3.1.7. KIOST 지구시스템 모형의 대기 행성경계층 템수화 방안의 적용에 따른 민감도 실험 결과를 나타낸 MJO의 Spectral analysis. (a) Bretherton and Park (2009), (b) Grenier and Bretherton (2001)의 방안을 적용

나. 해양 자료동화 시스템 개선

계절 예측을 위해서는 정확한 초기장 값이 필요하여 KIOST 지구시스템 모형과 동일한 모형에 자료동화 기법을 적용하여 장기간의 재분석 자료를 생성한 뒤, 이를 각 계절의 초기장으로 사용하고 있다. 이러한 초기장을 동일한 모형을 통해 자료동화를 적용하지 않고 모형을 시간적으로 적분하는 형태로 예측장을 생성하고 있다. 이 모형에서 초기장을 생성하기 위해 사용하고 있는 자료동화 기법은 앙상블 최적내삽(Ensemble Optimal Interpolation; EnOI) 기법으로, 비교적 적은 계산량을 사용해서 관측값을 모델에 동화하는 기법이다. 한국해양과학기술원에서는 앙상블 최적내삽기법을 KIOST 지구시스템 모형에 적용하여 장기 재분석 자료를 생산하고 검증한 바 있으며, 비교적 해상도가 낮고 앙상블 칼만필터에 비해 적은 계산량을 사용했음에도 불구하고 KIOST 기후재분석 자료의 성능이 뛰어난 것으로 보고한 바 있다 (Kim et al., 2015). 한국해양과학기술원의 기후재분석 자료 (DASK)와 SODA 2.2.4 (Behringer, 2007; Carton et al., 2000) 그리고 GFDL ECDA (Chang et al., 2013) 를 비교 검증하였으며, 각 재분석 자료의 품질을 평가하기 위해서 EN4 자료를 관측으로 간주하고 표층에서 수심 300미터까지의 평균 수온장에 대한 상관도를

각각 계산하였다. 대부분의 지역에서 KIOST 기후재분석 자료가 다른 자료와 비교할 만한 성능을 보여주고 있다. 특히, 한반도 주변해역을 포함하는 북서태평양에서 SODA나 ECDA 보다 좋은 품위를 나타내고 있다는 것이 특징적이다. 열대 적도태평양에서의 KIOST 기후재분석 자료의 품위가 낮으며 이는 대기 모델에서 적도태평양을 따라 부는 무역풍이 편향되었기 때문으로 파악되고 있다. 대기 모델에 나타난 바람장의 편향을 보정하기 위해서 대기 모델에서 해양 모델로 전달되는 열속과 바람속을 계산할 때 바람장의 관측장을 50% 섞어서 계산하도록 하였으며, 이렇게 하여 열대 적도태평양의 낮은 품위를 개선할 수 있었다 (그림 3.1.8).

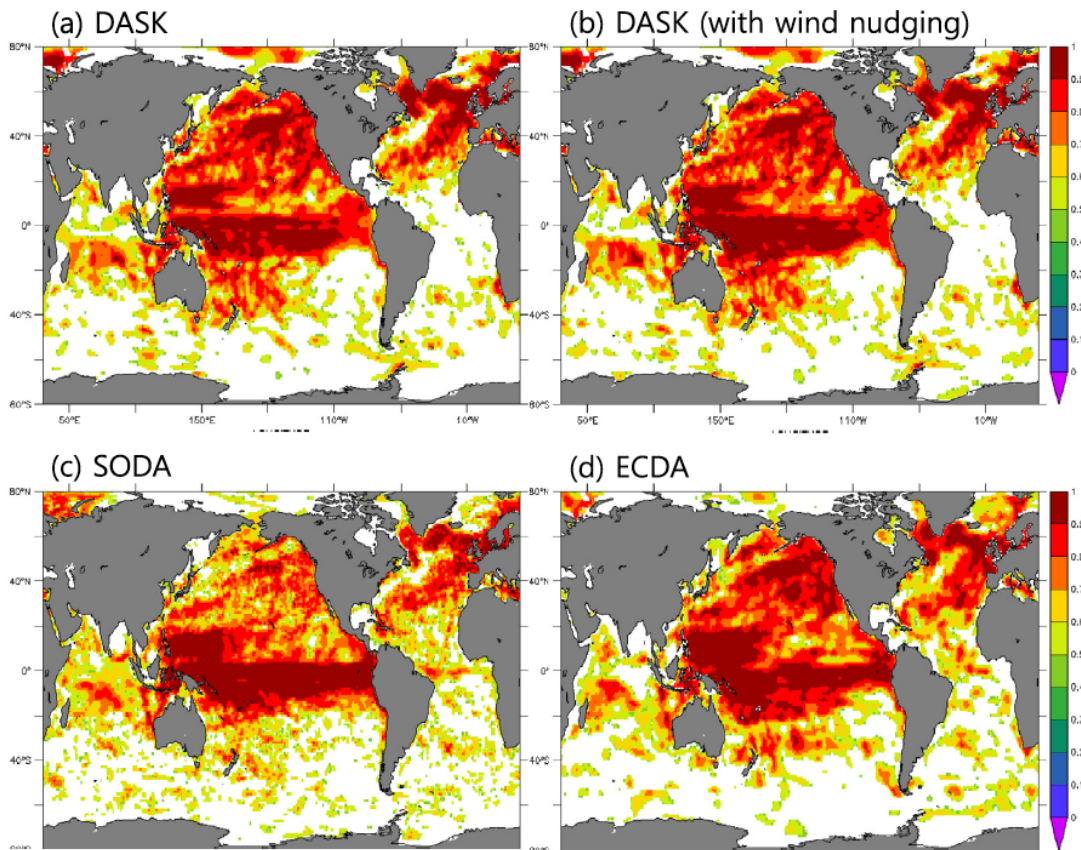


그림 3.1.8. 관측(EN4)과 재분석 자료 사이의 열용량 (표층부터 300미터까지 평균 수온) 상관도. (a) 해양과학기술원의 기후재분석 자료, (b) 바람장이 보정된 해양과학기술원의 기후재분석 자료, (c) SODA, (d) GFDL ECDA. (Kim et al., 2015)

EnOI기법은 칼만이득행렬(Kalman gain matrix)이라는 일종의 모델 배경장과 관측장 사이의 반영 계수를 결정하는 행렬을 이용하여 최적해를 찾아내는 칼만 필터 기법과 유사한 방법론이다. 특히 EnOI에서는 특정 모델장들을 추출하여

양상블들을 구성한 뒤 이로부터 배경오차 공분산(background error covariance)을 생성하여 Kalman gain matrix를 구성하는데, 이는 모델 dynamics나 초기장 및 강제력 등을 다르게 주어 비교적 독립적인 양상블 모델들로부터 양상블을 구성하는 양상블 칼만 필터(EnKF)와 매우 유사하다고 할 수 있다. 다만 EnOI는 EnKF와는 달리 하나의 모델에서 다른 time-step의 모델장들을 추출하여 양상블을 구성한다는 점에서 차이가 난다. 이러한 이유로 EnOI는 EnKF에 비해 전산자원 소모량이 극도로 적다는 장점이 있으며, 다른 자료동화 방법론들과 비교해보아도 EnOI기법의 계산 비용은 상당히 저렴한 편이다.

EnOI 기법은 위에서 설명한 바와 같이 모델 배경장(B)과 관측장(o)을 칼만이득행렬(K)을 통해 반영 계수를 결정하여 분석장(a)을 생성하는 칼만필터 계열의 자료동화 기법 중 하나이다. 배경장, 관측장 및 분석장의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a = B + K(d - HB)$$

H는 모델 배경장의 격자 위치를 관측장의 격자 위치로 옮겨주는 연산자를 말하기 때문에 일반적으로 HB는 모델 배경장의 값을 내삽하여 관측장으로 옮긴 값을 의미하게 된다. EnOI에서는 모델의 시간 적분 결과들로부터 양상블들을 추출하여 이로부터 칼만이득행렬을 얻어내기 때문에 위의 수식은 각 양상블 멤버에 대응하는 모델 배경장을 통해 표현된다. 위의 수식은 결국 배경장과 관측장 사이의 반영 비율을 통해 선형적으로 분석장을 획득한다는 의미이다. 따라서 칼만이득행렬에 따라 모델 배경장과 관측장의 반영 비율이 결정되는데, 일반적으로 칼만이득행렬은 다음과 같이 얻어진다.

$$K = [PH^T][HPH^T + R]^{-1}$$

P는 배경장의 오차 공분산 행렬로 이 행렬의 대각성분은 모델 배경장 각 격자의 분산을 의미하며 나머지 성분은 각 격자별 변수들의 공분산을 나타낸다. EnOI에서는 모델 시간 적분 결과로부터 얻어진 양상블들을 통해 계산되어 P 행렬을 구성하게 된다. 첨자 T 및 -1은 각각 전치행렬 및 역행렬을 의미한다. 실제 P 행렬의 경우 크기가 매우 크기 때문에 이를 실질적으로 저장하거나 계산하기에는 많은 제약이 따른다. 그러므로 실질적인 칼만이득행렬의 계산에서는, 관측지점과 모델 격자지점의 배경 오차 공분산인 PH^T 및 관측지점 간의 배경 오차 공분산인 HPH^T 을 추정하여 사용하게 된다.

R은 관측장의 오차 공분산 행렬인데, GAIA 지구시스템 모형에서는 각 관측자료들을 독립적인 것으로 간주하여 이 행렬은 대각 성분만을 통해 관측 자료의 오차만을 고려하게 된다.

한정된 앙상블 멤버 수로 인해, 일반적으로는 독립적일 가능성이 큰 원거리에 놓인 변수들이 높은 상관관계를 보여 배경오차 공분산 행렬이 비정상적인 형태를 가질 수 있게 되는데, 이를 위해 거리에 따른 공분산의 반영 비율을 인위적으로 책정하여 이러한 문제를 해결하고 있다.

초기장 생성을 위한 재분석장 생산 체계는 해표면 수온(SST), 단면 수온·염분 프로파일, 그리고 해면고도이상(SSHA) 등의 변수들을 대상으로 자료동화를 수행하며, 자료동화에 사용된 입력자료는 표 3.1.1에서 확인할 수 있다. 특히 국립수산과학원 한국해양자료센터(KODC)로부터 약 2개월에 한번 씩 획득되는 한반도 주변 정선 관측 자료 등을 자료동화에 반영함으로써, 우리나라 주변 해역에서의 재현성 측면에서는 해외에서 생산되는 다른 재분석장 자료들과 차별화될 것으로 기대하고 있다.

자료명	관측변수	기간	자료 출처
HadISST	SST	194701-198108	UK Met Office (https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/)
OISST	SST	198109-201212	NOAA(https://www.ncdc.noaa.gov/oisst)
DT-MSLA	SSH anomalies	199211-201212	AVISO(https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-h.html)
MBT	T profile	194701-200407	WOD 2009 (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html)
OSD	TS profile	194701-201212	WOD 2009 (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html)
CTD	TS profile	196101-201212	WOD 2009 (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html)
MRB	TS profile	197711-201212	WOD 2009 (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html)
PFL	TS profile	199407-201212	WOD 2009 (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/readwod.html)
KODC	TS profile	1961-2012	http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc 약 2개월 간격 자료

표 3.1.1. DASK의 자료동화 입력자료

KODC를 제외한 관측 자료들은 주로 GTSPP(The Global Temperature and Salinity Profile Programme)을 통해 준실시간적으로 수집이 진행되고 있어 GTSPP의 실시간 및 지연시간모드 자료들을 자동화 스크립트를 통해 지속적으로 수집함으로써 초기장 생성을 위한 재분석 시스템에 사용하고 있다. GTSPP는 아스키형태의 자료를 1주일에 3회 가량 준실시간 업데이트 하고 있으며, NetCDF 형태로는 매주 일요일에 자료를 제공하고 있다. 또한 어느 정도 품질관리를 한 Best-copy 자료를 매월 7일에 공개하고 있어 지연 시간 모드 자료도 비교적 빠르게 획득할 수 있는 장점이 있다. GTSPP를 이용하는 이러한 시스템은 기존의 다양한 자료 출처(ARGO 웹사이트, JODC, WOD 등)로부터 각각의 관측자료를 수집하던 최장 3개월 이상의 시간이 필요했던

시스템과 비교했을 때 결과물의 차이가 없어 사실상 동일한 자료를 비교적 짧은 시간 안에 간편하게 획득할 수 있는 것으로 판단하여 지속적으로 사용 중이다. 그림 3.1.9는 2016년 3월 다양한 출처의 자료로부터 획득한 해양 자료 프로파일과 GTSP를 통해 획득한 프로파일의 분포를 보여주는 것인데 GTSP를 통해 이들 프로파일 자료들이 원활히 획득된 것을 보여주고 있다.

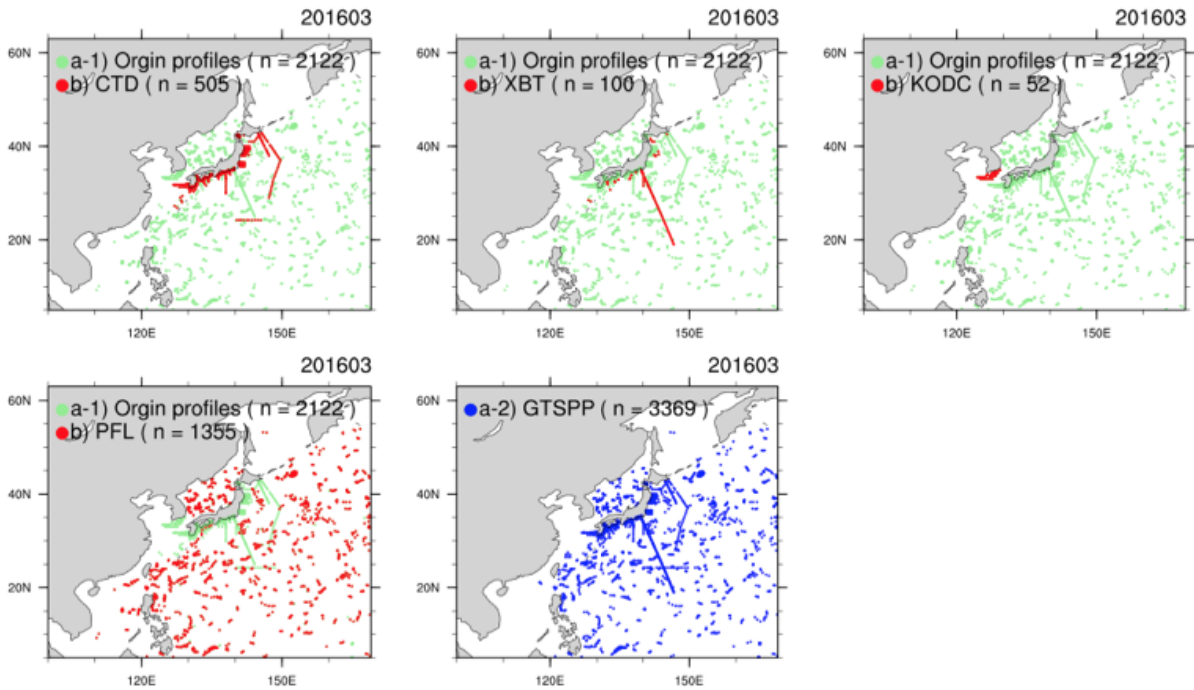


그림 3.1.9. 자료동화 입력을 위한 관측 자료 비교(2016년 3월)

하지만 관측자료를 수집하더라도 모든 자료를 바로 사용할 수 있는 것이 아니라 일부 문제가 있는 자료를 걸러내는 품질관리가 필요하다. 특히 실시간으로 업데이트 되는 자료의 경우에는 품질관리가 잘 이루어지지 않은 프로파일들이 포함되는 경우가 많아 이를 제거해주어야 하는데, 자체적으로 비교적 간단한 알고리즘을 통해 자료의 품질관리를 진행하고 있다. 총 5단계의 알고리즘을 거쳐 문제가 있는 프로파일 자료가 발견되면 제거하는 형태이다. 1) 프로파일 자료의 위경도 및 시각 정보가 사용자가 지정한 영역에 포함되는지 확인하고, 2) 하나의 프로파일에서 겹치는 수심 값이 있는지를 확인(위층에서 아래층으로 이동하며 인접한 두 개의 동일한 수심 발견시 위층을 제거하고, 수심값에 역전된 값이 있는 경우 제거)하며, 3) 수온의 수심에 따른 감쇄율이 일반적인 범위(-0.7 - 0.3 K/m)에 속하는지 확인하며, 4) 미리 입력한 최대 최소 수온 및 염분 값 범위에서 프로파일이 나타나는지 확인하며, 5) 마지막으로

염분의 수심에 따른 기울기를 확인하게 되는 절차를 거친다. 또한 앙상블 자료동화 기법 특성 상 모델의 수직 격자에 여러 개의 자료가 들어가는 경우 중복된 분석장 업데이트로 인해 과도한 분석장의 변형이 나타날 수 있는데, 이러한 부분을 제거하기 위해 하나의 모델 수직 격자에 대해 하나의 관측 자료만을 포함하도록 자료를 추출하여 저장하도록 하고 있다.

다. 앙상블 예측 기법

앙상블 예측 기법은 기후 예측 방법 중 하나이다. 주어진 하나의 예보 값이 아니라, 여러 개의 앙상블을 통해 여러 개의 예보를 생산하여, 몬테카를로 기법적인 접근을 통해 미래의 기후 상태가 어떻게 될 수 있을지에 대해 확률적인 범위를 제시하게 된다. 여러 개의 앙상블들을 통해 일반적인 예측 모델에서 나타나는 비확실성의 효과를 줄일 수 있게 된다. 아무리 정교하게 구성된 초기장이라도 어느 정도 오차를 가질 수 밖에 없고, 비선형적인 지구 시스템에서는 이러한 오차가 나중에는 커다란 오차로 증폭되어 나타날 수 있으며, 또한 수치 모델을 푸는 수학적 기법에서도 오차가 있을 수 있는데, 이러한 앙상블 실험들을 통해 이러한 오차의 범위를 추정할 수 있도록 해준다.

일반적으로 앙상블 멤버는 많을수록 좋으나 이를 위해서는 많은 계산량이 필요하다. 현재 보유 중인 계산 자원의 한계를 고려하여 KIOST 지구시스템 모형의 예측 시스템은 8개의 앙상블 멤버로 구성되며 재분석 자료로부터 주어지는 초기 조건에 교란장을 더하여 4개의 초기장 앙상블을 구성하였으며, 2개의 다른 모델 적분 시간 전진방법을 사용하여 총 8개의 앙상블 구성하고 있다. 실제로 예측을 시작하는 시각으로부터 초기장을 각각 0시간, 6시간, 12시간, 18시간 추가 적분하여 다소 교란된 총 4개의 모델장을 각각의 초기장으로 구성하였으며, 이들 초기장들을 각각 MOM4.0 및 MOM4.1에서 기본적으로 채택하고 있는 모델 적분 시간 전진 방법을 이용하여 서로 다른 상태의 총 8개의 앙상블들을 구성할 수 있게 된다. 이러한 8개의 앙상블 모델을 추가적인 자료동화 없이 모델 적분만을 통해 미래 예측 자료를 생산할 수 있게 된다.

그림 3.1.10는 KIOST 지구시스템 모형을 이용하여 구성된 기후예측시스템의 개념도를 나타낸 것이다. 관측자료를 KIOST 지구시스템 모형에 동화하여 분석장을 생산하고 분석장으로부터 앙상블 초기장을 구성하여 예측을 수행하게 된다.

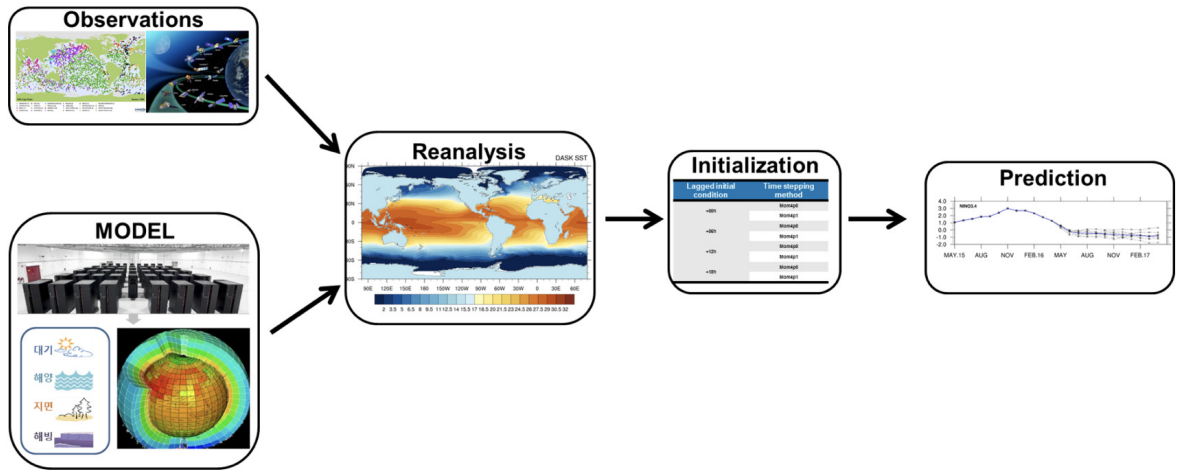


그림 3.1.10. 기후예측 시스템 개념도

표 3.1.2. 앙상블 구성도

Ensemble Number	Lagged initial condition	Time stepping method
1	+00h	Mom4p0
2		Mom4p1
3	+06h	Mom4p0
4		Mom4p1
5	+12h	Mom4p0
6		Mom4p1
7	+18h	Mom4p0
8		Mom4p1

3. 역학 모델 예측 성능 평가

가. 한반도 주변 해역 표층 수온 예측

자료동화 및 KIOST 지구시스템 모형을 통해 생성한 기후 재분석장으로부터 초기장을 얻고 다시 이 모형을 통해 미래 예측 자료를 얻을 수 있다. 한반도 주변해역에 대해 1980년부터 2012년까지 과거 예측을 수행하여 관측자료와의 비교를 통해 예측성을 평가하였다.

한반도 주변 해역의 표층 수온은 겨울철 및 여름철 강한 계절풍에 의한 영향 및 쿠로시오 및 오야시오 해류 등 강한 서안 경계류에 의한 열의 이류와

이로 인한 해양의 열속 방출, 전선의 위치 변화, 그리고 서쪽으로 전파하는 로스비파에 의한 대양에서의 열 변화 수송 등 다양한 기작에 의해 변화를 하기 때문에 예측하기 쉽지 않다. 실제 이러한 어려움을 보여주듯 그림 3.1.11에서 2015년 12월 예측된 표층 수온장이 재분석장과 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. 재분석장에서는 일부를 제외한 태평양, 동해, 동중국해 등 북위 40도 이남의 대부분의 해역에서 평년보다 높은 수온을 확인할 수 있으며, 오야시오 해류의 사행이 나타나는 북위 40도, 동경 160도 부근 해역에서 대체로 평년보다 낮은 수온이 나타난다. 이에 반해, 예측 결과에서는 동해 및 오후츠크해 등 북위 40도 이북 해역 모두가 평년에 비해 섭씨 2도 이상의 상당히 높은 수온을 보이는 반면, 쿠로시오 확장역 등 북위 40도 이남 해역에서는 평년에 비해 섭씨 2도 이상 낮은 수온을 나타내고 있어 북위 40도를 축으로 정반대의 분포를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

이 해역은 북위 40도를 경계로 동아시아 제트류가 발달해 있으며 북태평양 진동(North Pacific Oscillation) 등의 쌍극자 형태의 대기 순환 패턴이 발달되어 있는 것으로 잘 알려져 있는데, 이러한 순환의 패턴이 반대로 재현될 경우 재분석 자료와 예측 자료의 패턴이 반대의 수온 분포를 나타내는 것을 설명할 수 있다. 하지만 상기했듯 이 해역의 표층 수온 변화는 대기의 영향뿐만 아니라 복잡한 해양 역학에 의해서도 영향을 받아 변동을 일으키기 때문에 재분석 자료와 예측 결과의 차이가 나타난 이유에 대한 보다 심도있는 분석이 필요하며, 이를 통해 예측 모형의 개선이 될 수 있을 것으로 기대된다.

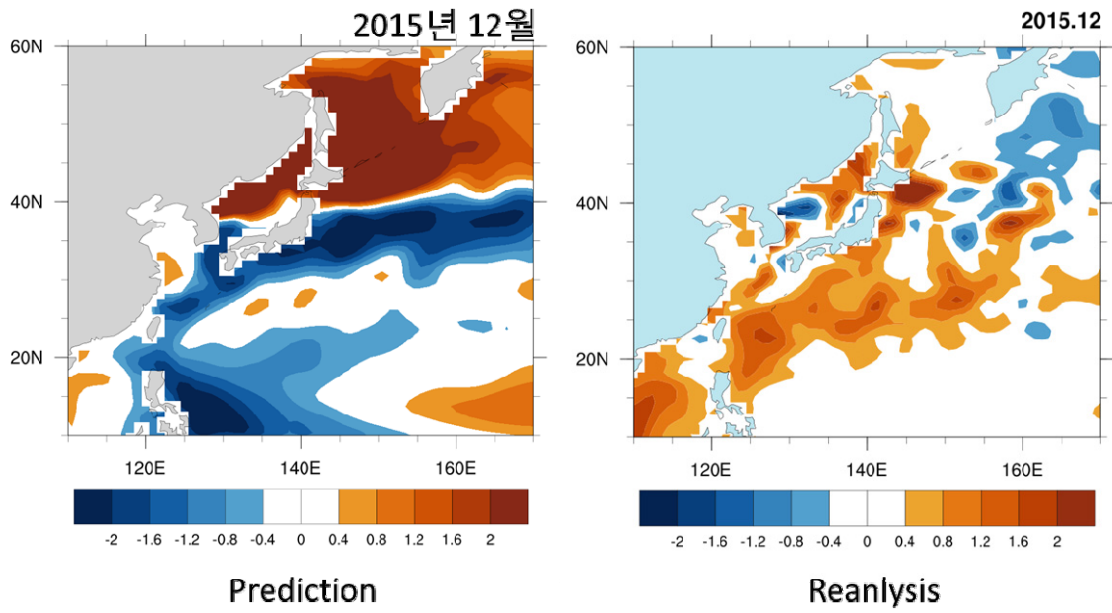


그림 3.1.11. KIOST 지구시스템 모형으로 예측된 2015년 12월 해면 수온(좌측)과 실제 관측된 2015년 12월 해면 수온 (우측)

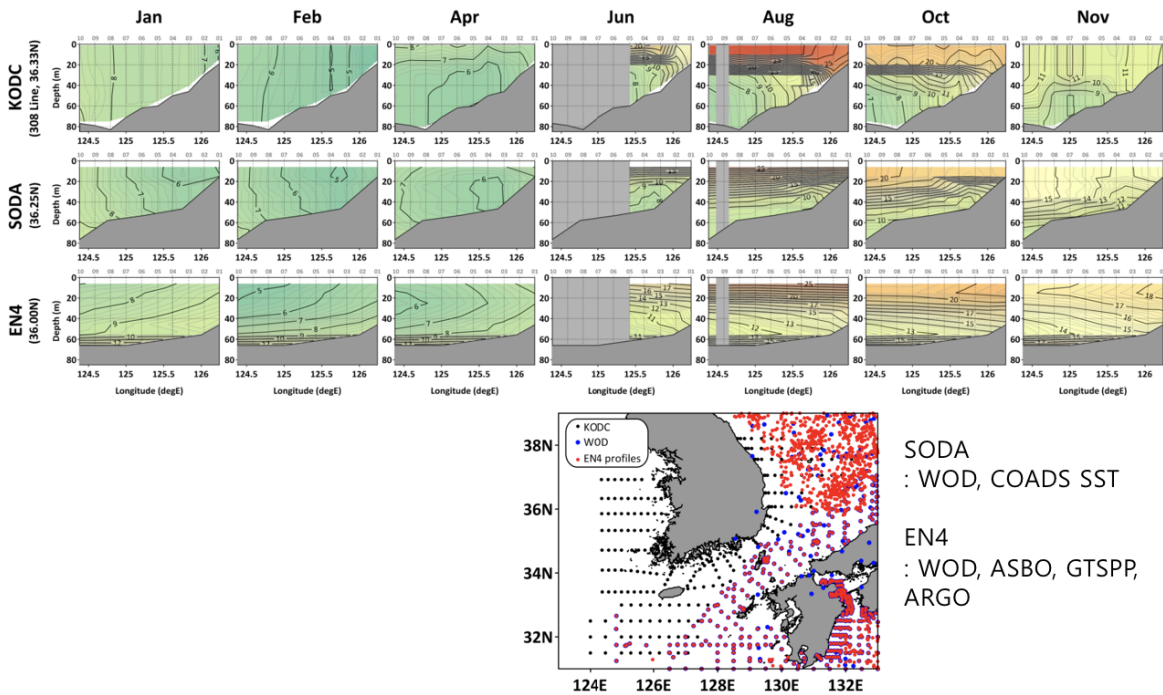


그림 3.1.12. 국립수산과학원의 서해 정선관측 308 라인에서의 월별 수온 단면도. (a) KODC 관측 자료, (b) SODA 재분석 자료, (c) EN4 자료

앞으로 KIOST 지구시스템 모형의 기후예측 자료를 검증하기 위한 비교 대상 자료를 선택하기 위하여 SODA 와 EN4 자료를 실험역 관측자료와 비교 검토하였다. SODA와 EN4는 관측자료를 동화하여 구성된 재분석 자료들이며 자료동화에 사용된 관측 자료는 비슷하다. 그림 3.1.12는 월별 평균 수온 단면도를 보여주고 있다. 일반적으로 EN4 자료를 관측에 해당하는 비교 대상 자료를 사용해왔으나 그림 3.1.12에서 보는바와 같이 바닥층에 고온의 해수가 나타나는 등 오류가 큰 것으로 파악되었다. 반면 SODA 의 경우 1월과 2월의 겨울철에 표층에서부터 바닥까지 혼합되는 특징을 잘 반영하고 있고 여름철의 혼합층의 두께 등을 관측에 가깝게 표현하고 있다. 따라서 본 연구에서는 예측성을 평가하기 위해 관측자료로서 SODA 자료를 사용하였다.

특정 시기의 수온 분포 비교뿐만 아니라 3개월 예측 자료를 각각의 SODA 재분석 결과와 1980년부터 2012년 장기간에 걸쳐 비교하여 이들의 비계절적 값에 대한 상관계수를 구해보았다(그림 3.1.13). 양의 상관계수가 클수록 모형으로부터 3개월 예측된 결과가 재분석 자료에서 나타나는 비계절적 표층 수온의 변동성을 유사하게 재현한다는 의미이다. 그림 3.1.13(b)에서는 본 연구를 통해 개발된 기후 예측시스템으로부터 각 월별 예측결과를 보여주는데, 대체로 1월, 3월, 4월 및 10월, 11월의 예측 성능이 우수한 것으로 나타나고 있으며, 특히 4월 예측 결과가 재분석 자료의 수온 변동성을 잘 모사하는 것으로 나타나고 있다. 대체로 일본 및 동중국해 남동쪽의 열린 해역에서의 예측 성능이 우수하게 나타나고 있으며, 황해, 동해 등 좁은 해역에서의 예측 성능은 일부 시기를 제외하고는 상당히 낮은 것으로 나타난다. 열린 해역에서는 비록 강한 쿠로시오 해류가 지나가는 경로가 어느 정도 포함되기는 하지만 비교적 복잡한 해양 역학이 표층 수온 변동에 적게 관여를 하고 있기 때문에 이 해역에서는 비교적 예측 성능이 우수하게 나타나는 것으로 풀이된다. 반면 황해 및 동해 등 닫힌 해역에 가까운 연안 해역은 좁은 입구를 통해 출입하는 유량 및 열량 등이 정확히 고려되어야 이들 해역에서의 장기적인 수온 변동 추이를 잘 예측할 수 있는데 현재 사용 중인 예측 시스템은 1도 간격의 비교적 저해상도 모형을 바탕으로 수립되어 있어 지역해에서의 정확한 예측을 수행하는데 비교적 어려움을 겪고 있는 것으로 보인다. 그림 3.1.13(a)는 비교 분석을 위해 미국 NCEP에서 생산한 3개월 예측 수온에 대해 SODA 재분석 결과와 비계절적 값에 대한 상관계수를 나타낸 것이다. KIOST 지구시스템 모형을 이용해 예측된 결과가 NCEP CFS의 결과와 비교했을 때 전반적인 성능면에서 비교할 만한 것으로 평가되었다.

NCEP CFS의 경우 2월, 3월, 4월, 그리고 10월의 예측 성능이 높은 것으로 나타났으나 1월과 6월 그리고 7월의 예측 성능이 낮게 나타났다.

(a) 미국 현업기관 모형의 예측성

(b) 개발된 역학모형의 예측성

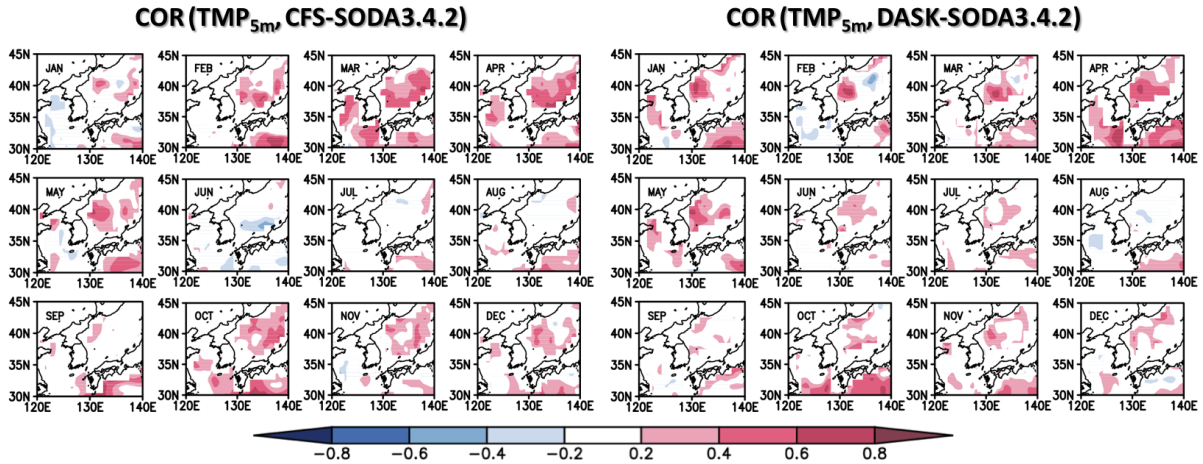


그림 3.1.13. 해수면온도에 대한 월별 3개월 예측 결과와 SODA 재분석자료의 장기 상관계수.

(a) 미국 NCEP CFS의 결과, (b) KIOST 지구시스템 모형을 이용한 기후예측 결과

그림 3.1.14은 KIOST 지구시스템 모형으로 예측된 해수열용량의 예측성을 평가한 것이다. 해수열용량은 표층에서부터 300미터까지의 평균 온도로 규정하였다. 해수면온도에 대한 예측성 평가에 비해 대기 변동정보는 해양의 역학에 의한 예측성이 더 크게 반영될 것으로 기대할 수 있다. 1월, 3월, 4월 및 10월, 11월에 높은 예측성을 나타냈던 해수면온도(그림 3.1.13)에 비해 해수열용량의 예측성은 2월, 3월, 4월, 5월, 6월, 7월 그리고 9월의 예측성이 높은 것으로 나타났다. 1월과 10월 그리고 11월에 해수면온도의 예측성이 높게 나타났고 5월, 6월, 7월 그리고 9월에는 해수열용량의 예측성이 높게 나타났다. 이러한 계절적인 차이는 해수면온도에 영향을 주는 대기변동성과 해양변동성의 기여도가 계절적으로 달라지기 때문으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 향후 필요할 것으로 보인다.

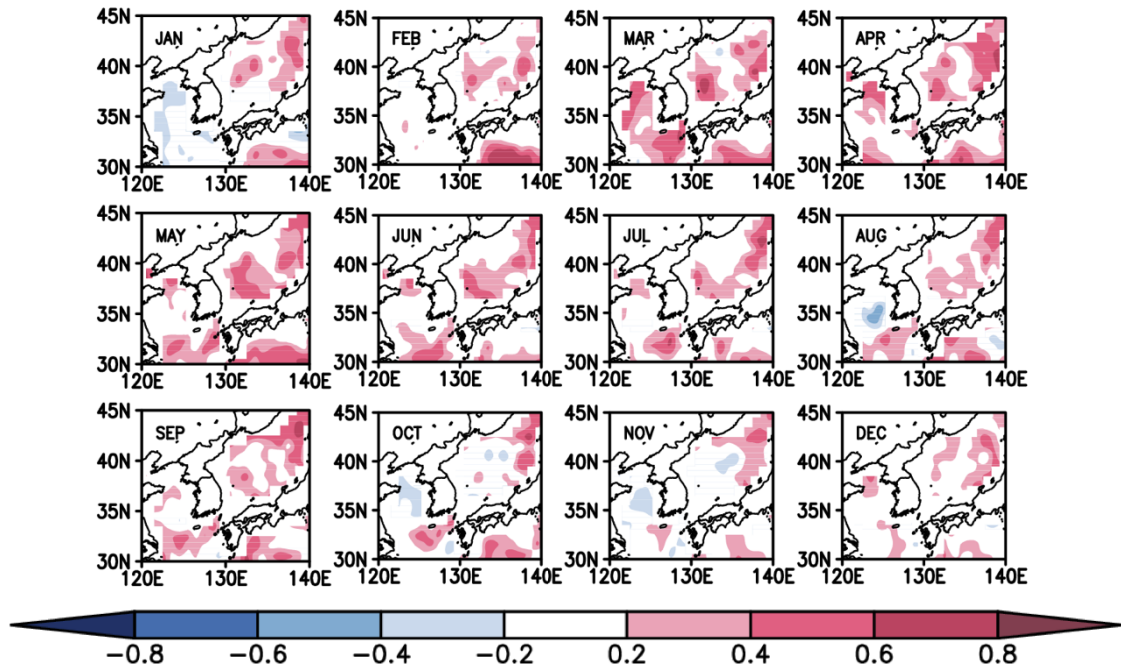


그림 3.1.14. 해수 열용량(표층에서 300미터까지의 평균 수온)에 대한 월별 3개월 예측 결과와 SODA 재분석자료의 장기 상관계수

나. 지역별 예측 성능 평가

우리나라를 중심으로 한 북서태평양 해역은 강한 서안경계류의 영향을 받는 특징이 있으며, 특히 저위도에서 기원되는 쿠로시오 해류의 영향이 크게 작용하는 것으로 알려져 있다. 특히 우리나라가 위치하는 경도 125-135도를 중심으로 저위도 해역은 필리핀해가 위치해 있으며 이 해역에서는 서쪽으로 전파하는 북적도 해류가 필리핀 등의 육지 경계를 만나 민다나오 해류 및 쿠로시오 해류로 분기되어 중위도에 강한 영향을 주는 쿠로시오의 상류 해역이라고 할 수 있다. 실제 우리 예측 모형에서는 비록 몇 개월 정도의 규모이지만 비교적 양호한 수준으로 적도에서의 ENSO 변동성을 예측하는 것이 가능하고, 그러한 영향이 쿠로시오 등의 해류와 대기의 변동을 통해 우리나라가 위치한 중위도 해역에 영향을 미치게 될 것인데, 여기서는 우리나라 주변 경도의 저위도부터 중위도 해역에 걸쳐 예측 성능이 달라지는 것인지 살펴보았다.

그림 3.1.15는 우리나라 주변해역을 포함하는 북위 30도에서 40도까지 평균된 각 수심별 수온의 각 경도별 예측 결과와 격자화된 SODA 자료간의 상관관계를 나타낸 것이다. 앞서 보여준 해수열용량의 예측성과 비슷하게 2월, 3월, 4월, 5월, 6월, 7월의 예측성이 높게 나타났다. 2월부터 7월까지 표층에서

200미터까지 예측성이 높게 나타났으며, 8월 이후부터 보다 깊은 수심에서 예측성이 높게 나타났으나 전반적인 예측성이 낮아지는 것으로 나타났다. 동경 130도에서 140도까지 예측성이 높게 나타나는 것은 해수열용량의 예측성에서 동해와 쿠로시오 해역에서 높게 나타났던 일맥상통하는 것이다.

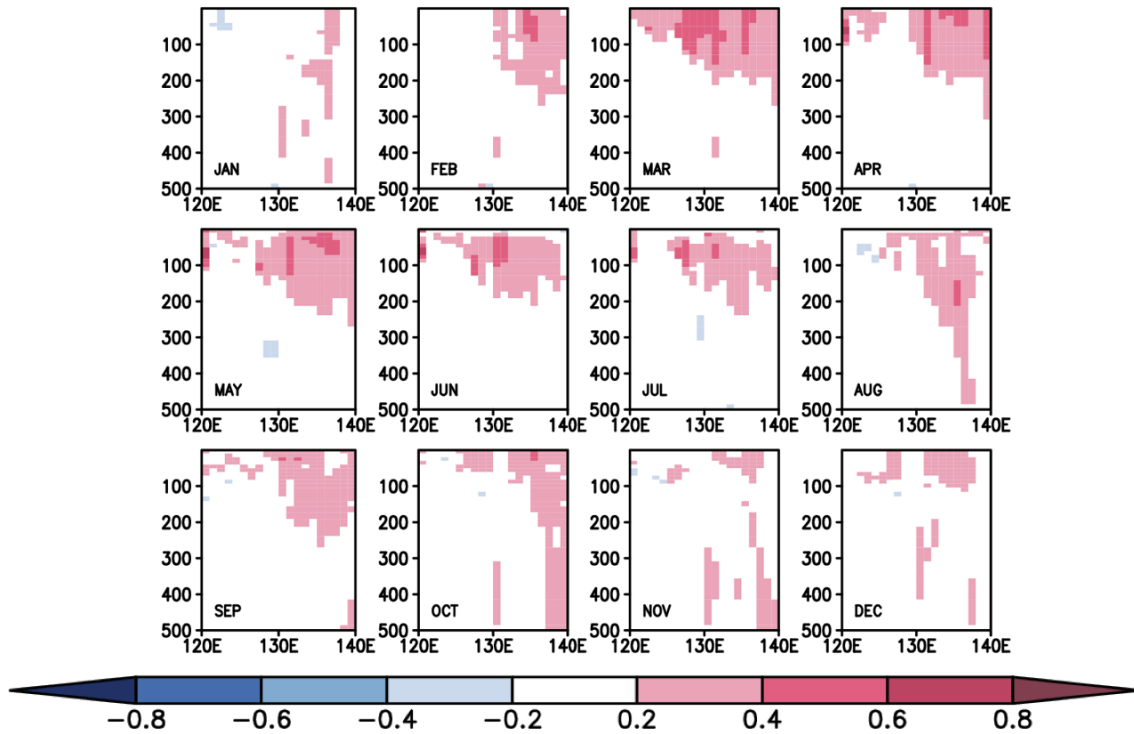


그림 3.1.15. 1980년부터 2012년까지 33년간 과거예측 자료로부터 복위 30도에서 40도까지 평균된 수온의 예측성 평가. SODA와의 상관성 검증

제 2 절 통계모형

1. 통계모형의 수립

가. 선형통계모형의 개요

중위도 지역의 역학모형의 예측 정확도가 높지 않기 때문에 통계모형은 계절예측을 하기 위한 보조적인 방법으로 이용되어 왔다(예, Kang et al., 2002). 특히, 우리나라를 포함하는 중위도 지역의 계절예측을 위한 역학모형의 예측성은 물리과정에 대한 이해의 부족 및 부적절한 물리과정의 적용 때문에 크게 떨어진다. 그렇지만, 통계모형을 이용한다면, 물리과정을 정확히 이해하고 있지 않다고 하더라도 예측인자가 적절하게 선택된다면 어느 정도 예측성을 확보할 수 있다. 통계모형은 모집단으로부터 관측자료 혹은 예측자료를 생성하는 모형이며, 그 방법에 따라 유사법(analog method), 시계열모형, 다중회귀모형, 정준상관분석모형, 그리고 인공신경망모형이 있다. 유사법은 합성도 혹은 군집분석 방법을 통해 과거 유사한 경우를 이용한 통계적 모델로서 과거에 많이 쓰였지만 지금은 검증이 어려운 점 등의 이유로 거의 쓰이지 않는다. 시계열모형은 시계열의 통계적 성질을 이용한 통계모형으로 ARIMA(Autoregressive Intergrated Moving Average) 모형, 파엽(wavelet) 모형 등이 있으나 시계열 모형은 시계열의 메모리가 커야 하므로 확률변수에 가까운 계절평균 기상/기후 요소의 예측에는 적합하지 못하다. 그러나 엘니뇨 예측이나 계절내 진동과 같이 비교적 주기성이 분명한 현상에 대해서는 활용되고 있다. 다중회귀모형(multiple linear regression)은 다중회귀분석에 기반한 모형으로서 다수의 예측인자(predictor)와 예측변수(predictand)를 통계적으로 적합(fitting)시킴으로써 예측모형을 구성할 수 있다. 다중회귀모형은 계절예측 뿐 아니라 다양한 분야에서 쓰이는 통계모형이지만, 높은 예측성과 안정적인 예측인자를 찾는 것이 매우 어렵다는 단점이 있다. 정준상관분석모형(canonical correlation analysis model; CCA model)은 가장 복잡한 선형 통계모형으로서 다중회귀모형과는 다르게 여러 지점의 값을 동시에 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 정준상관분석모형은 예측인자지역과 예측변수지역을 적합(fitting)시킴으로써 예측모형을 구성한다. 정준상관분석모형 역시 다양한 분야에서 많이 쓰이고 있지만, 그 예측인자 지역을 찾기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 인공신경망(artificial neural network) 모형은 인공신경망이라는 통계적 기법을 바탕으로 만들어진 통계모형이며, 정준상관분석모형과 마찬가지로 여러

지점의 예측인자와 여러 지점의 예측인자를 동시에 적합시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며, 특히 비선형 적합이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히, 2000년대 들어 인공지능 기술이 발전하여, 심층학습(machine learning), 합성인공지능(convolutional neural network) 등 정교화된 인공지능 기법이 개발되어 패턴인식, 인공지능 등 많은 분야에 쓰이고 있다. 그러나 기본적으로 인공지능모형을 쓰기 위해서는 아주 많은 수의 샘플이 요구되나 기후 자료의 샘플수는 그리 많지 않으므로 아직까지 이 기술을 기후예측에 적용하기에는 어려움이 많다. 현업적으로 기상청 기후예측과의 장기기상전망의 대상은 계절평균 기온 및 강수량, 월평균 기온 및 강수량, 그리고 황사나 태풍과 같은 특이 기상이다.

다중선형회귀모형은 예측인자(predictors)와 예측변수(predictand)의 지연상관을 이용한 선형통계모형으로서 계절예측에 많이 이용되어 왔다(예, Wu et al., 2009). 그러나 물리적으로 연관이 있는 예측인자를 이용하지 않는다면 종종 과적합문제(overfitting problem)로 인하여 불안정한 예측결과를 생산할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 예측인자들의 상관성을 고려하는 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF)나 예측인자 공간분포와 예측변수의 공간분포를 통계적으로 적합시키는 정준상관분석모형(Canonical Correlation Analysis model; CCA model)이 이용된다. 이들을 이용한다면 상대적으로 예측인자와 예측변수간의 물리적 이해를 바탕으로 하는 지연상관관계를 알 수 있다. 다중선형회귀모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{Y} = X\beta$$

여기서 \hat{Y} 는 예측변수이고, X 는 예측인자, β 는 회귀계수이다. \hat{Y} 의 hat은 추정된 예측값을 의미한다. 이 예측변수를 이용하여 다중선형회귀모형을 구성하였다. 그런데, 다음과 같이 추가적 강제조건을 두면 지역에 따른 통계모형의 불안정성을 크게 감소시킬 수 있다(Weare, 1982).

$$\frac{\partial}{\partial \beta^T} [\epsilon^2 + \gamma(\hat{Y} - \tilde{Y})^2] = 0$$

여기서 ϵ 은 예측변수와 예측값과의 오차이고, \tilde{Y} 는 EOF를 이용해 재구성된 예측변수이다. γ 는 추가적 강제조건에 대한 가중치를 의미하는 매개변수이다. 만약, 매개변수 γ 가 0이면 통상적인 다중선형회귀모형과 같다. 이 행렬방정식을 풀면 다음과 같이 회귀계수를 얻을 수 있다.

$$\beta = \frac{1}{1+\gamma}(X^T X)^{-1} X^{-1}(Y + \gamma \tilde{Y})$$

여기서 X 는 예측인자에 대한 행렬이다. 매개변수 γ 는 선행연구에서 가장 높은 예측성능을 보이는 0.5가 많이 이용된다.

나. 통계모형의 개발 및 예측인자 분석

1절에서 소개된 모형을 여름철 한반도 주변 해수면온도의 계절예측에 적용하기 위하여 예측인자로 다양한 기후변동성이 고려되어 왔다. 북동아시아 지역은 동아시아 여름몬순 지역으로서 많은 선행 연구에서 분석 한 것처럼 극 지역, 중위도 지역, 열대 지역의 영향을 다양하게 받고 있다(Chang et al., 2000a, 2000b, Nitta, 1987, Wang et al., 2001, Yamaura and Tomita 2011, Yim et al., 2010). 특히, 북서태평양 지역과 인도양 지역의 기후변동성이 여름철 북동아시아 기후에 영향을 많이 미치는 것으로 알려져 있다. 그래서 북서태평양 지역의 해수면온도 지수, 그리고 인도양지역의 아열대 고기압 지수를 다음과 같이 정의하고 이용하였다.

북서태평양 지수(western North Pacific index; WNPI) = SSTA_JJA
(140E-160E, 5N-20N)

인도양아열대고기압지수(Indian Subtropical High; INDSH) = HGT850_JJA
(90E-110E, 5N-15N)

이 지수들을 이용하여 예측변수인 한반도 주변 여름철 해수면온도편차와 상관계수를 구한 값을 그림 3.2.1에 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 북서태평양 지역의 해수면온도 예측인자와 인도양 지역의 고기압인자는 여름철 한반도 주변 해수면온도와 비교적 높은 상관성을 갖는다. 이들을 이용하여 1절에서 제시된 추가적인 강제조건이 포함된 다중선형회귀모형을 구성하였다. 그 결과는 그림 3.2.2에 보인다. 그림 3.2.2에서 보이듯이 통계모형은 약 상관계수 0.61 정도의 예측성을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 첫 번째 예측인자인 북서태평양 예측인자(WNPI)와의 부분회귀계수는 대부분의 영역에서 0.8 이상의 높은 값을 가지므로 인도양 고기압지수에 비하여 상대적으로 북서태평양 예측인자가 북동아시아 지역의 해수면온도 변동에 많은 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 예측인자를 북동아시아 지역 한반도 근해 해수면온도, 특히 여름철 해수면온도 편차에 대한 계절예측모델을 구성하는데 활용할 것이다.

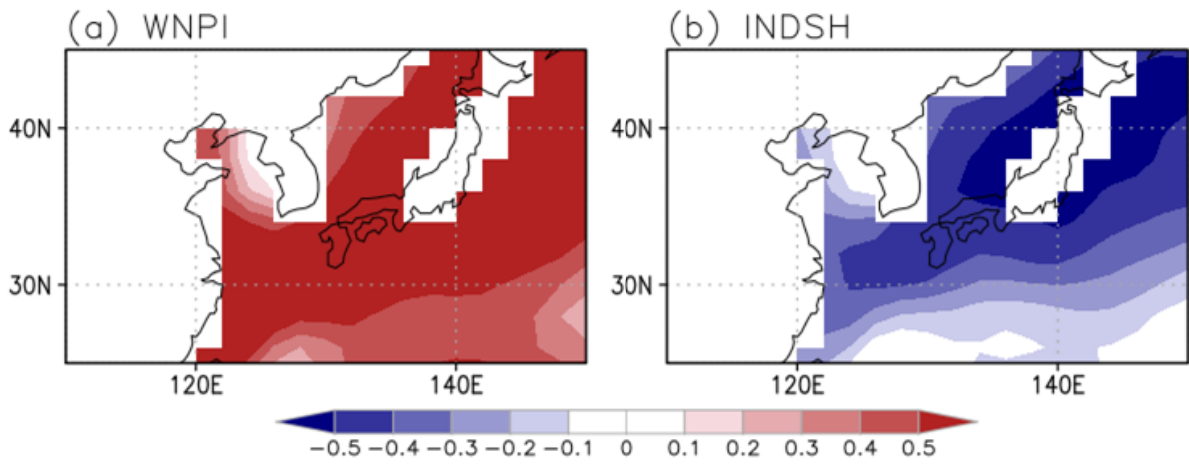


그림 3.2.1. (a) WNPI와 (b) INDSH에 대한 여름철 평균 해수면온도의 상관계수 지도

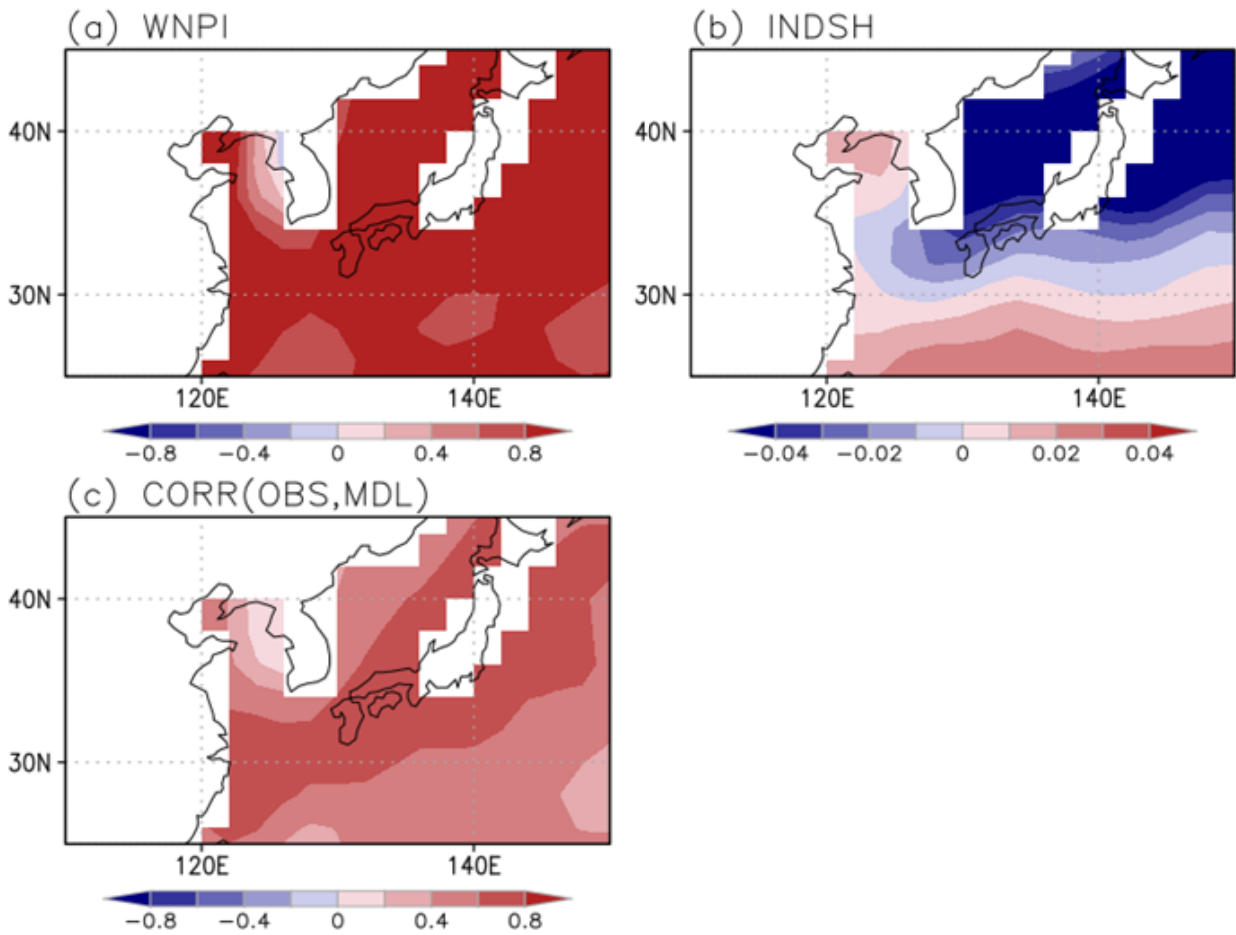


그림 3.2.2. 예측변수와 (a) WNPI 혹은 (b) INDSH 사이의 부분상관계수 지도. (c) 관측과 추가적 제약 다중선형회귀 모형 결과의 상관지도

2. 여름철 예측을 위한 역학통계모형

가. 동아시아 원격상관

북동아시아 지역 여름철 해수면온도의 변동성을 살펴보기 위하여 EOF 분석을 실시하였다(그림 3.2.3). 그림에서 보이듯이 첫 번째 모드는 동해와 서해를 아우르는 basin wide 모드로서 지역적인 변동성과 관련이 있다. 두 번째 모드는 북서태평양으로부터 올라오는 파동패턴과 관련이 있고, 세 번째 모드는 엘니뇨와 동시상관이 있는 모드이다.

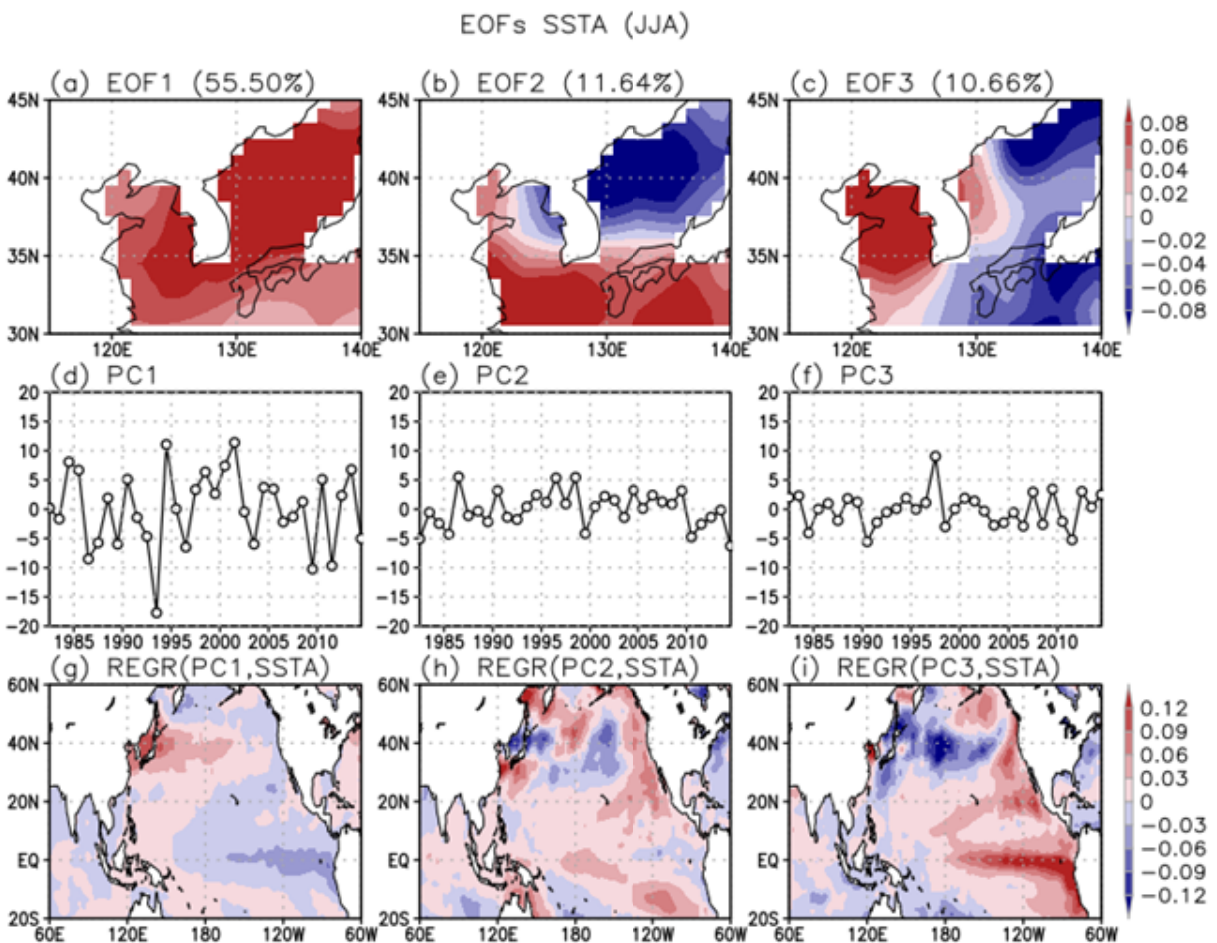


그림 3.2.3. 여름철 평균 해수면온도의 주요 EOF 모드 (a), (b), 그리고 (c) 는 세 EOF 모드, (d), (e), 그리고 (f)는 세 EOF 주성분 시계열(PCs). (g), (h), 그리고 (i)는 PC에 회귀된 해수면온도 편차

경험적 직교함수 패턴을 보면 모두 한반도를 걸친 모노 패턴 혹은 다이폴 패턴을 볼 수 있는데, 이는 해류에 의한 효과보다 대기를 통한 해수면온도 변동성이 매우 크다는 것을 의미한다. 처음 3개의 모드를 합하면, 약 80%

정도의 해수면온도 변동성을 설명한다. 그러므로 한반도 근해 해수면온도의 변동성을 예측하기 위해서는 대기를 통한 원격상관을 이해하여야 한다. 실제, Wang et al., (2001)은 북서태평양 지역의 몬순 변동이 우리나라 지역의 여름몬순 변동과 음의 상관성이 있다는 것을 보였다. 이러한 변동은 북서태평양 지역의 강수활동이 지역적인 정상로스비파의 형태로 중위도로 영향을 주기 때문이다. 또한, 이러한 역관계는 1990년대 중반이후 매우 강해졌음이 알려져 있다(Kwon et al., 2005). 그림 3.2.4는 북서태평양 여름몬순지수와 하층 동서바람의 상관계수를 보인다. 그림에서 보이듯이 북서태평양 지역이 저기압성 순환은 북동아시아 지역 고기압성 순환과 높은 관련성을 가지고 있다. 반대로 북서태평양 지역 고기압성 순환은 북동아시아 지역 저기압성 순환과 높은 관련성을 가지고 있다.

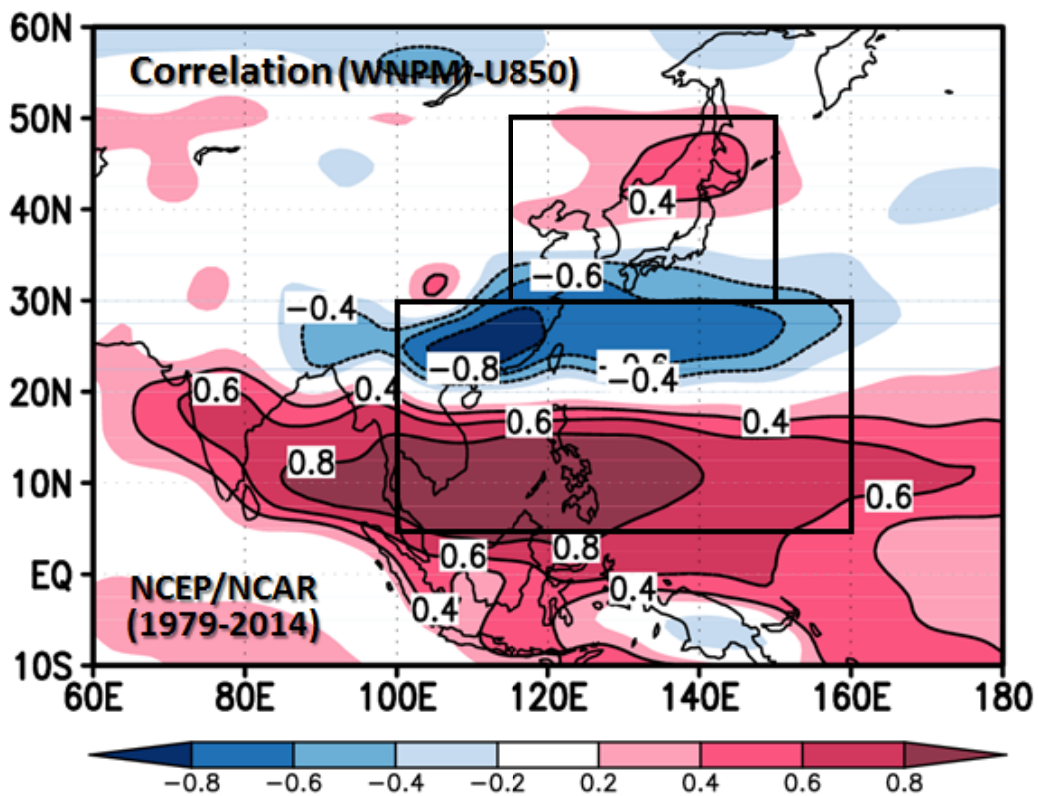


그림 3.2.4. 북서태평양 여름몬순지수와 여름철 평균 850 hPa 동서바람의 상관계수 지도.
두 상자 안은 각각 동아시아 여름몬순 및 북서태평양 여름몬순 영역

북동아시아 지역 여름철 대기 순환장의 경년변동성 특징을 살펴보기 위하여 군집분석(cluster analysis)을 수행하였다. 군집분석은 자료를 소수의 군집으로 묶는 방법으로 종관패턴이나 예측 앙상블의 분류에 활용될 수 있다. 사용된 군집분석 방법은 계층적 군집분석(the hierarchical clustering analysis)이며, 패턴과의

유사성을 나타내는 지표로 패턴 상관계수(the pattern correlation coefficient)를 이용하였다.

군집분석 결과, 전체 31개의 패턴 중 18개가 하나의 군집(CLUST1)으로 묶을 수 있으며, 10개가 또 다른 군집(CLUST2)으로 묶을 수 있었다. 각 군집에 대한 850 hPa 수평바람 및 지위고도(geopotential height)의 합성도가 그림 3.2.5에 도시되었다. 그림에서 보이듯이 전체 31개의 패턴 중 28개 즉 약 85%가 북서태평양 아열대 고기압과 관련된 패턴이다. 그림 3.2.5a는 북서태평양 아열대 고기압의 음의 위상 즉, 북서태평양 여름몬순의 양의 위상을 나타내고, 그림 3.2.5b는 그림 3.2.5a의 반대 위상을 나타낸다. 그러므로 북동아시아 지역 여름철 해수면온도의 계절예측을 위해서는 북서태평양 여름몬순과 관련된 원격상관을 이용하면 된다. 다음절에 이 원격상관을 이용한 통계모형을 구축할 것이다.

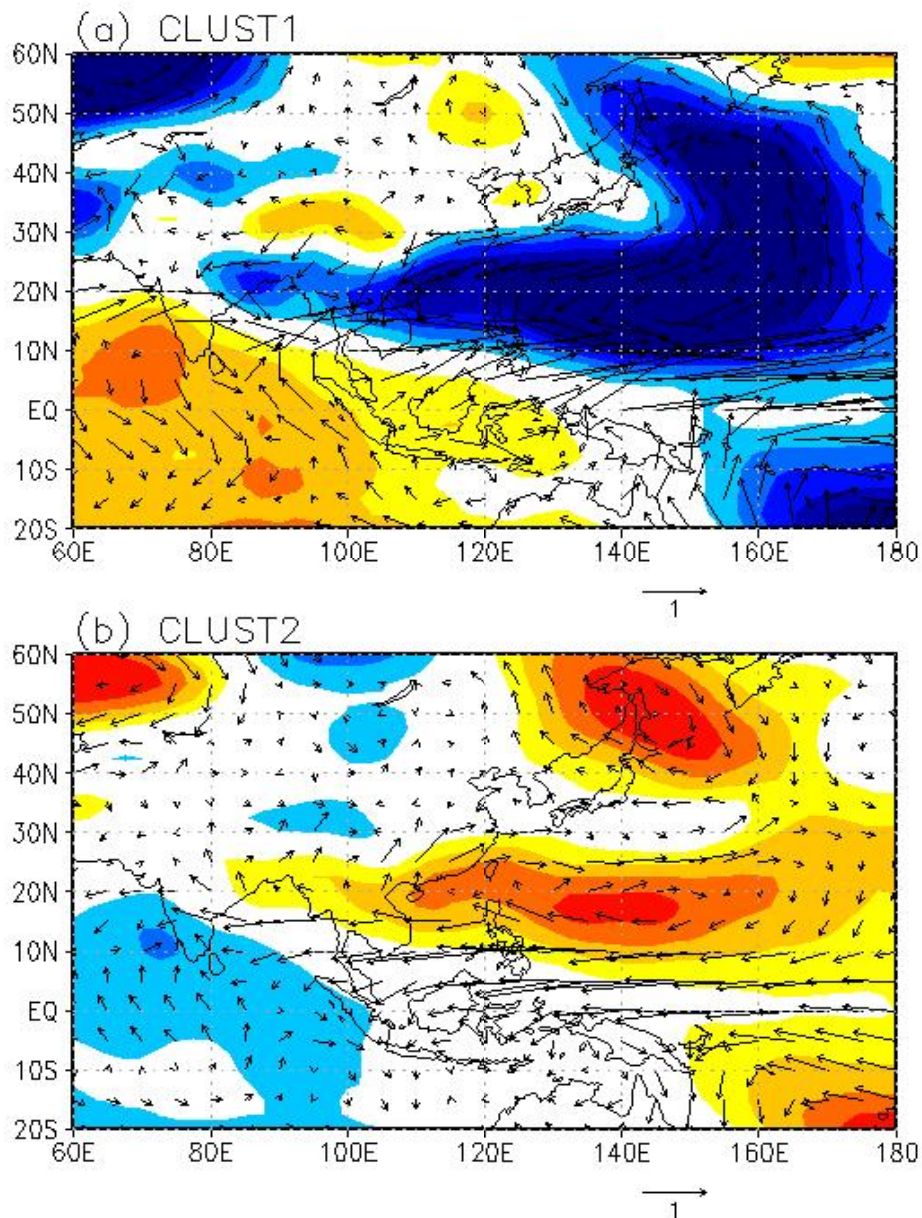


그림 3.2.5. (a) 첫 번째 클러스터와 (b) 두 번째 클러스터에 대한 여름철 평균 지위고도 편차와 850 hPa 수평바람의 합성도. 각 클러스터는 1979-2009년 동안 여름철 평균 동서바람 편차에 대한 계층적 클러스터 분석에 의해서 산출됨(Kwon, 2013).

원격상관은 장주기적 관점에서 변화할 수 있다. 이러한 변동을 살펴보기 위하여 우선 몬순강도에 대하여 지수화할 필요가 있다. 북서태평양 여름몬순과 북동아시아 지역 여름철 강수를 지수화하기 위하여 WNPMI (western North Pacific monsoon index; Wang et al., 2001)와 EASRA (East Asia summer rainfall anomaly; Lee et al., 2005)가 각각 이용되었다. 한편, 여름철 850 hPa 지위고도편차의 분산은 북서태평양 일부 지역(115°E~150°E, 15°N~25°N)에서

크게 나타나는데, 그 지역을 평균한 지위고도편차가 북서태평양 아열대 고기압지수로 이용되었다. 편의를 위해서 이 지수를 이후 WNPSH (western North Pacific subtropical high)라고 한다. 이 세 지수가 그림 3.2.6a에 비교되었다.

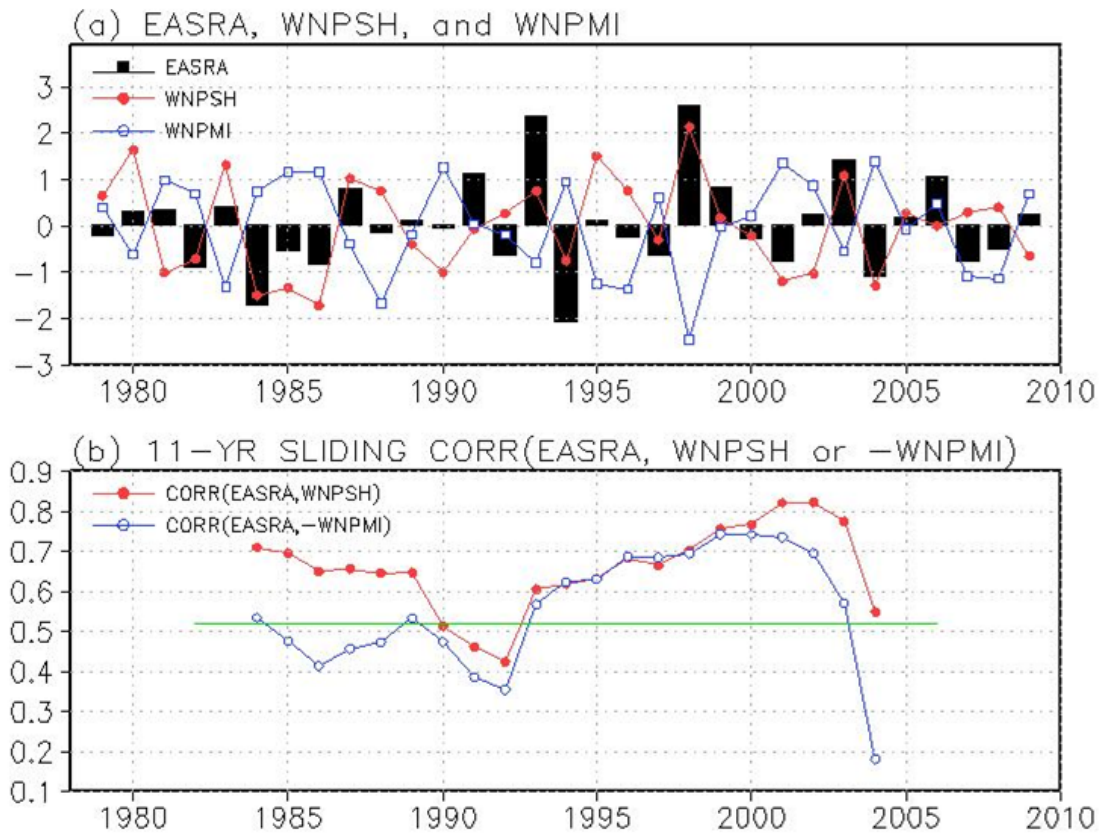


그림 3.2.6. (a) 정규화된 동아시아 여름강수지수(East Asian summer rainfall anomaly; EASRA), WNPSH (western North Pacific subtropical high), 그리고 WNPMI (western North Pacific monsoon index)는 각각 바와 달린 원, 그리고 열린 원으로 나타냄. (b) 11년 윈도우를 가진 EASRA와 WNPSH의 이동상관계수 및 EASRA와 -WNPSH의 이동상관계수. 수평 실선은 95% 신뢰수준을 의미함(Kwon, 2013).

선행연구에서 지적된 것과 같이 WNPMI는 EASRA와 통계적으로 유의한 음의 상관(상관계수는 -0.47)을 가지고 있고(Lee et al., 2005), WNPSH와 EASRA의 상관계수는 상대적으로 더 높은 0.60 이다. 한편, WNPMI와 EASRA의 상관관계는 1990년대 중반을 전후로 강화되는데(Kwon et al., 2005), WNPSH와 EASRA의 상관관계는 1990년대 초반을 제외한 분석자료의 기간에 대하여 보다 더 통계적으로 유의하다(그림 3.2.6b). 두 지수가 차이가 나는 이유는 북서태평양 아열대 고기압의 수평구조가 달라졌기 때문이다(Kwon and Lee, 2012). 그림 3.2.7은 여름철 평균 850

hPa 지위고도편차의 EOF (empirical orthogonal function) 첫 번째 모드의 PC (principal components)와 여름철 평균 850 hPa 동서바람 편차의 상관도를 보인다. 사각형들은 Wang et al.(2001)에서 정의한 동서바람 영역을 의미하는데, 1994년에서 2011년까지 기간에서는 그 사각형의 영역과 상관계수 패턴이 잘 일치하나 1979년부터 1993년까지는 사각형 영역과 상관계수 패턴이 잘 일치하지 않는다. 즉 WNPSH의 수평구조가 시간에 따라 달라지기 때문에 WNPMI와 WNPSH의 시계열은 약간의 차이를 가질 수 있다.

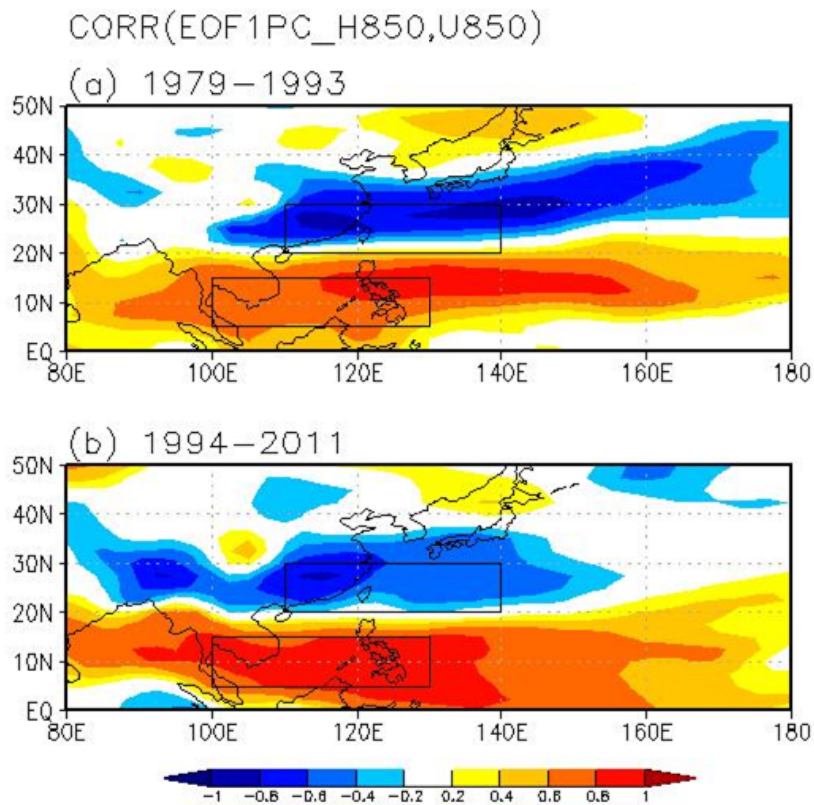


그림 3.2.7. (a) 1979-1993, 그리고 (b) 1994-2011에 대한 M여름철 평균 지위 고도의 EOF1 시계열과 여름철 평균 850 hPa 동서바람의 상관계수 지도. 상자로 표시된 지역은 WNPMI의 정의 영역임(Kwon, 2013).

나. 원격상관을 이용한 역학통계모형의 개발 및 검증

앞절에서 제시된 원격상관은 동시적인 관련성이므로 이 패턴을 예측하기 위해서는 북서태평양의 강도를 예측하여야 한다. 현재 수준의 기후모형을 이용한 중위도 지역 계절예측은 초기조건이 정확하다고 하더라도 그 예측률은 매우 낮은 반면에 북서태평양을 비롯한 저위도 지역 역학적 변수의 예측률은 비교적 높다. 특히, 북서태평양 아열대 고기압의 기작(mechanism)은 인도양-

북서태평양 결합모드와 라니냐 강제 모드(La Nina-forced mode)로 설명할 수 있어(Wang et al., 2012), 그 변동성을 진단하거나 예측하기 용이하며, 특히 대기대순환모형은 물론 대기-해양 결합 대순환모형에서도 그 변동성이 잘 모의된다(Lee et al., 2008). 그림 3.2.8은 현재 현업기관에서 운용중인 다양한 집합 기후모형을 이용한 여름철 강수량 예측성능을 보인다. 상대적으로 열대지역의 예측성능이 중위도 지역보다 우수함을 알 수 있다. 한편, 북서태평양 여름몬순과 관련하여 하층 동서바람의 예측성은 그림 3.2.9에 보인다. 북서태평양 여름몬순과 관련하여 아열대 지역 예측성이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 열대 지역의 강수량 변동이 해수면온도 변동과 매우 높은 상관성을 가지고 있기 때문이다. 그러므로 역학모형의 예측결과를 통계적으로 활용하면 여름철 북동아시아 지역 해수면온도를 계절규모에서 예측할 수 있다. 이를 위하여 우선, 모형에서 예측한 북서태평양 지역 여름철 평균 하층 바람과 북동아시아 지역 여름철 관측 해수면온도와의 SVD(Singular Value Decomposition) 분석을 하였다(그림 3.2.10). 상위 5개 모드를 보면 북서태평양 지역과 북동아시아 지역의 결합 변동성의 약 90%를 설명하고 있다. 이들 관계를 이용하여 역학통계모형을 구성하였다.

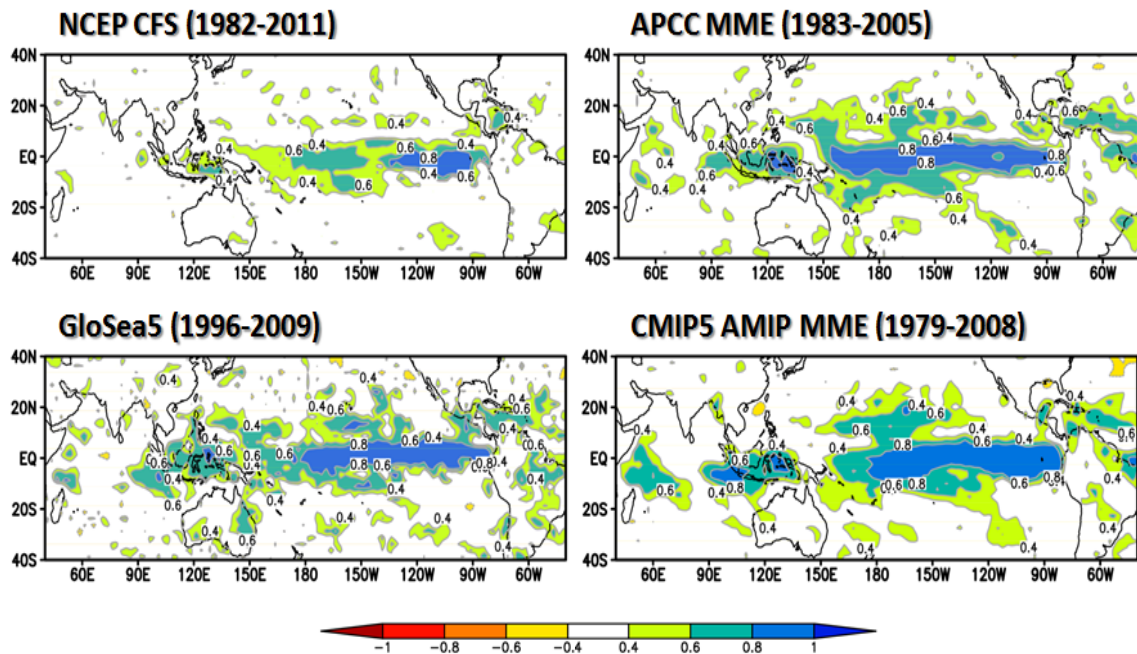


그림 3.2.8. 네 주요 현업기관(NCEP/NCAR, APCC, KMA, 그리고 WCRP)의 강수량에 대한 역학 모형 예측성.

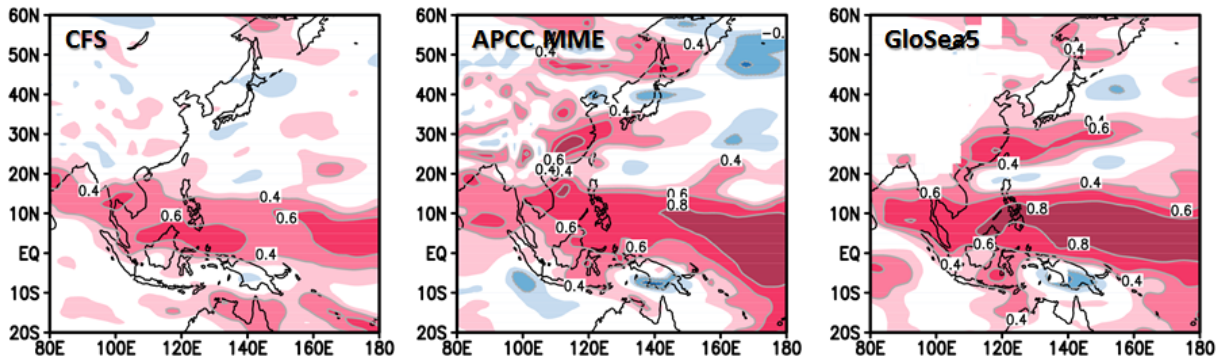


그림 3.2.9. 주요 현업기관(NCEP/NCAR, APCC, 그리고 KMA)의 850 hPa 동서바람에 대한 역학모형의 예측성

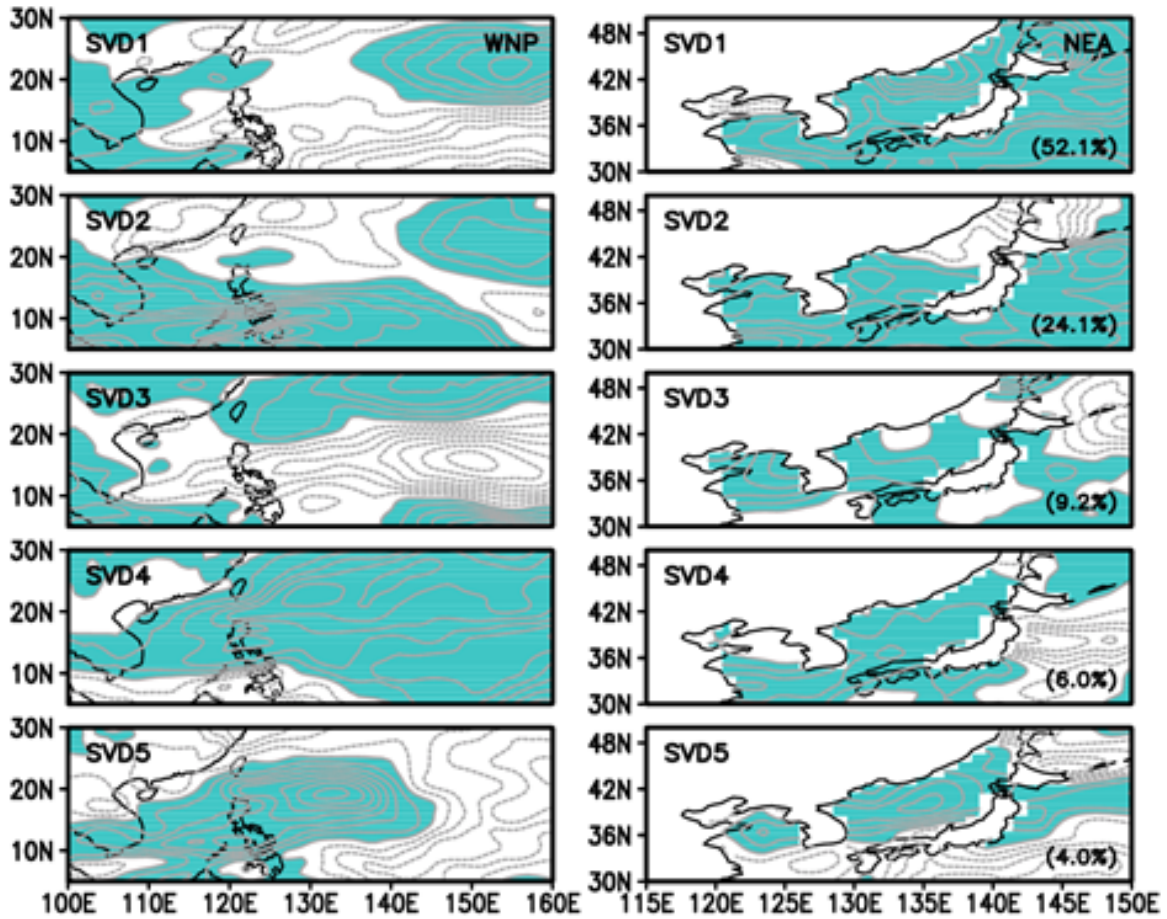


그림 3.2.10. 여름철 평균 북서태평양 지역 850 hPa 동서바람과 KIOST 지구시스템 모형으로부터 예측된 해수면온도에 대한 주요 CCA 모드.

여름철 북동아시아 지역 해수면온도 편차(P_{ik})와 북서태평양 지역의 동서바람편차(H_{jk})는 특이값분해(Singular Value Decomposition; SVD)에 의해

다음과 같이 분해될 수 있다.

$$P_{ik} = \sum_m U_{im} p_{mk}, \quad H_{jk} = \sum_m V_{jm} q_{mk}$$

여기서 U_{im} 과 V_{jm} 은 정규화된 특이벡터(singular vector)이고 p_{mk} 와 q_{mk} 는 그에 상당하는 시계열이다. 또한 i, j, k, m 은 각각 북동아시아 지역 공간, 북서태평양 지역, 시간, 그리고 SVD 모드에 대한 인덱스이다. 북서태평양 고기압 변동성을 위하여 지위고도 대신 동서바람을 이용한 이유는 그 지역에서 바람은 계절적으로 지균편적(geostrophic)이며, 지위고도 보다 동서바람에 의한 주성분 모드가 더 뚜렷하기 때문이다. 그림 3.2.10는 SVD에 의한 첫 번째 결합모드 패턴을 보인다. 첫 번째 결합 모드의 정규화된 평균 제곱 공분산의 비율은 약 52.1%이다. 동서바람에 대한 모드는 북서태평양 고기압의 변동성을 나타내며, 해수면온도에 대한 모드는 우리나라를 비롯한 여름철 동아시아 해수면온도의 경년 변동성을 나타낸다. 이를 이용하면, 특정한 해 k_1 에 대하여 예측된 여름철 북동아시아 지역 해수면온도 편차 P_{ik_1} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{ik_1} = \sum_m U_{im} \left\{ \sum_k p_{mk} \cdot q_{km} / \sum_k q_{km}^2 \right\} \sum_j V_{mj} H_{jk_1}$$

여기서 H_{jk_1} 는 GAIA 결합 기후모형에 의해서 예측된 여름철 북서태평양 지역의 850 hPa 동서바람 편차이다. 한편, SVD 모드의 재조합은 5개 모드만 사용되었으며, 모형의 검증을 위하여 매해마다 해수면온도를 개별적으로 예측하였다.

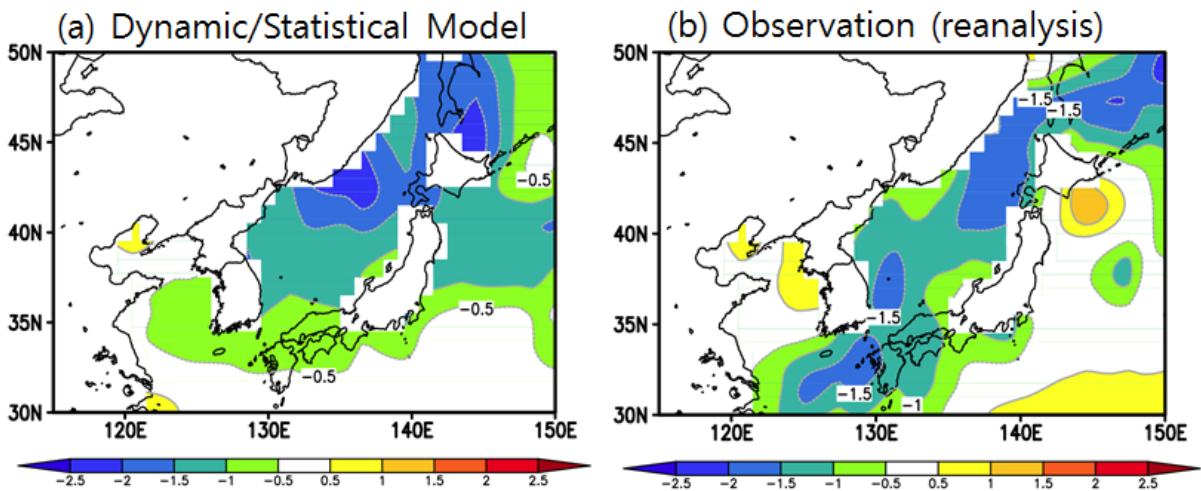


그림 3.2.11. 2015년 역학-통계모형에 의해 예측된 한반도 주변 해수면온도 편차와 재분석자료에서 나타나는 해수면온도 편차.

우선, 역학통계모형을 이용하여 시범적으로 2015년 여름철 한반도 주변 수온을 예측한 결과는 그림 3.2.11에 보인다. 동해의 음의 편차를 예측한 결과와 재분석자료의 편차가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

개발된 역학통계모형의 예측성을 평가하기 위하여 hindcast 전 기간에 대하여 북동아시아 지역 여름철 해수면온도를 예측하고 재분석자료와 상관계수를 구하였다(그림 3.2.12). 그림에서 보이는 바와 같이 한반도 주변 해역의 상관계수 예측성이 0.4 이상으로서 유의미한 예측성을 보이는 것을 알 수 있다. 여름철 원격상관을 이용한 역학-통계모형의 예측은 어느 정도 가능하지만, 사계절을 예측하기 위해서는 여름철의 원격상관을 더 이상 적용할 수 없으므로 다른 원격상관이나 예측인자 연구가 필요하다.

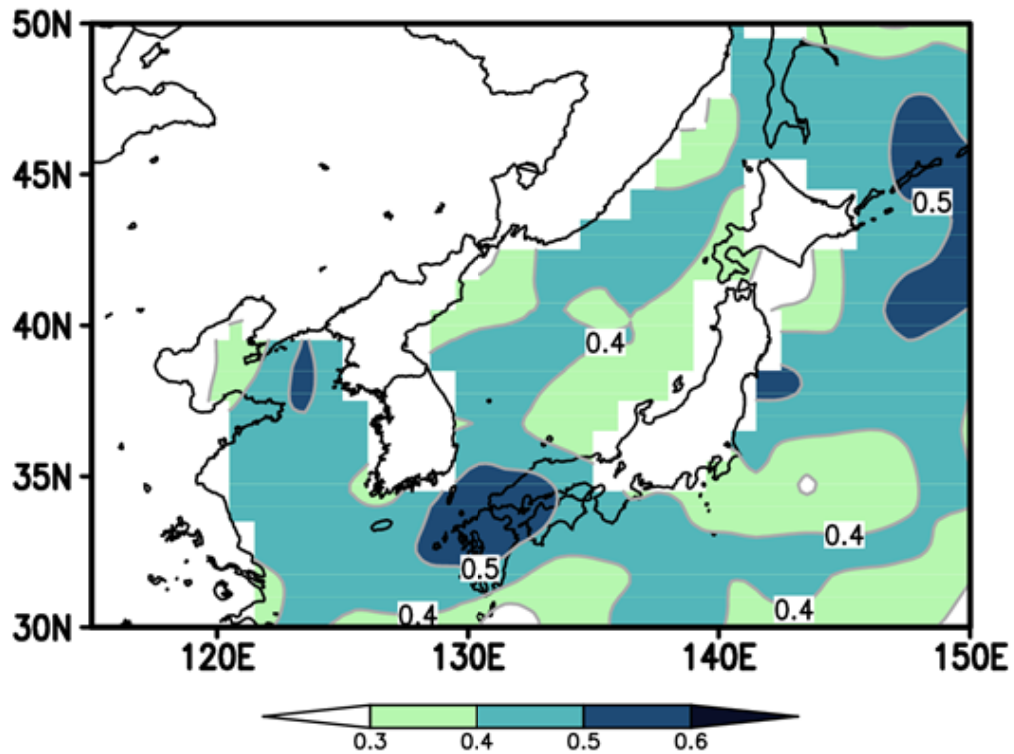


그림 3.2.12. 역학통계모형에 의해 예측된 한반도 주변 해수면온도와 재분석자료와의 상관계수 지도.

3. 사계절예측을 위한 역학통계모형

가. 역학통계모형을 위한 예측인자 분석

앞절에서 한반도 주변해 수온의 계절예측을 위해 여름철 원격상관을 이용하여 역학-통계모형을 구성하고, 그 예측성을 살펴보았다. 그러나 이 예측모형을 오직 여름철에만 적용할 수 있는 모형이므로 사계절 예측을 위해서는 다른 예측인자의 검토가 필요하다. 이를 위해 한반도 주변의 해수면온도와 관련된 대규모 변수의 상관성을 분석하였다(그림 3.2.13). 그 결과 한반도 주변 해수면온도는 하층의 북서태평양 패턴 혹은 PJ 패턴(Pacific-Japan pattern)과 관련이 있으며, 대규모 원격상관은 열대 대기의 깊은 대류(deep convection) 강제력에 따른 정상로스비파(stationary Rossby waves)의 반응으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 적도 부근 강수량 패턴을 알 수 있으면 통계적 방법으로 중위도 원격상관을 어느 정도 파악 할 수 있다.

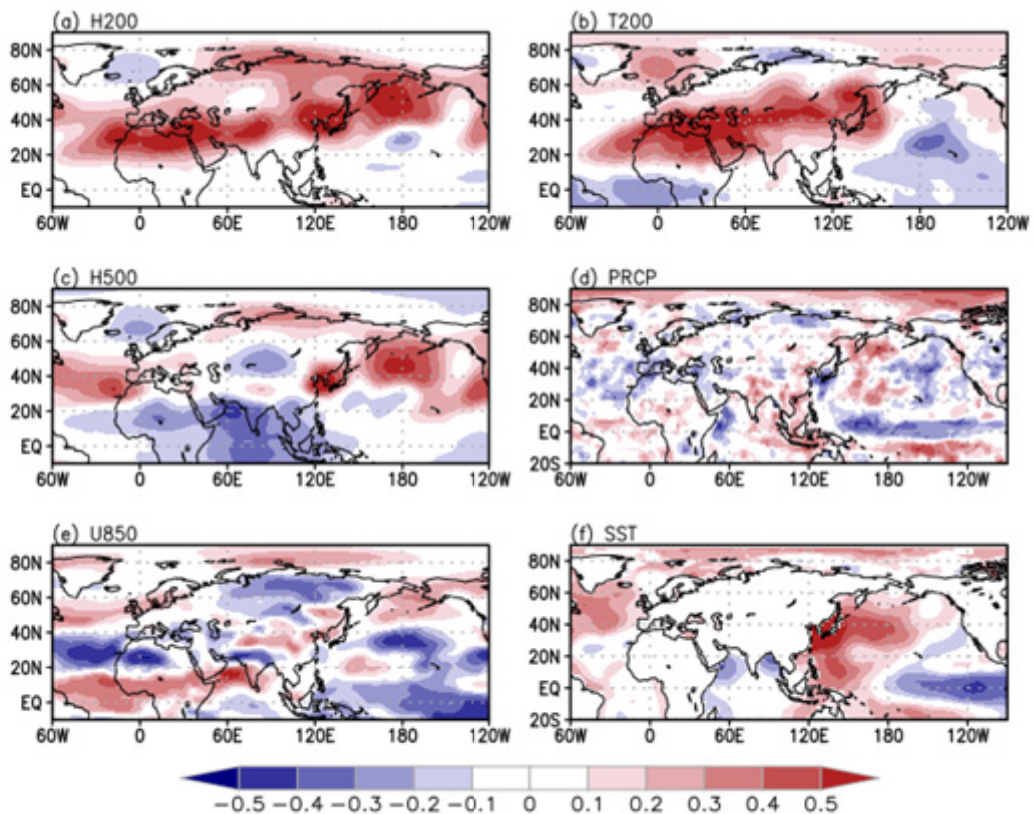


그림 3.2.13. 영역평균(110E-140E, 30N-50N)된 해수면온도 편차와 (a) 200 hPa 지위고도, (b) 200 hPa 기온, (c) 500 hPa 지위고도, (d) 강수량, (e) 850 hPa 동서바람, 그리고 (f) 해수면온도와의 상관계수 지도

열대 강제력에 의한 중위도 원격상관을 살펴보기 위하여 선형경압모형(Linear Baroclinic Model; LBM)을 이용하였다. LBM은 Watanabe and Jin (2003)에 의해 개발된 단순화된 대기대순환 모형으로서 습윤과정이 포함되어 있고, 주어진 기후평균에 대하여 원시방정식계를 선형화한 모형이므로 열대 강제력에 따른 선형 반응을 살펴볼 수 있는 전지구 모형이다. 선형화된 모형이므로 다음과 같이 강제력, F1과 F2의 반응의 합은 강제력 합 F1+F2의 반응과 같다.

$$R(F1) + R(F2) = R(F1 + F2)$$

북서태평양 여름몬순과 관련된 강수 강제력이 그림 3.2.14에 보인다. 북서태평양 여름몬순이 약할 때, 북서태평양 지역의 강수와 인도양 지역의 강수는 각각 음과 양의 편차를 가지며, 적도 대서양 지역의 양의 편차도 함께 가지고 있다. 이 강제력의 조합은 중위도 지역의 조합된 원격상관 패턴을 형성한다.

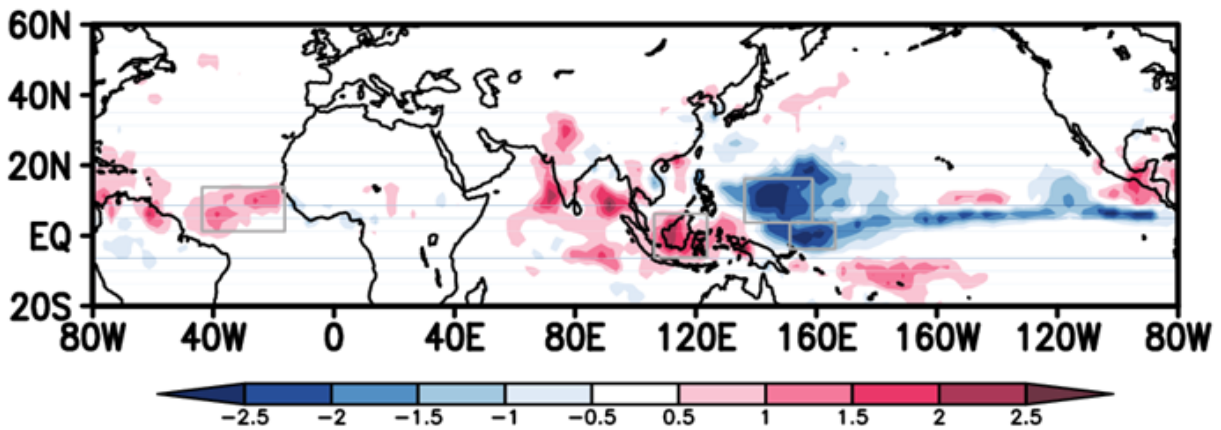


그림 3.2.14. 북서태평양 몬순지수에 대한 강수량 편차의 합성도

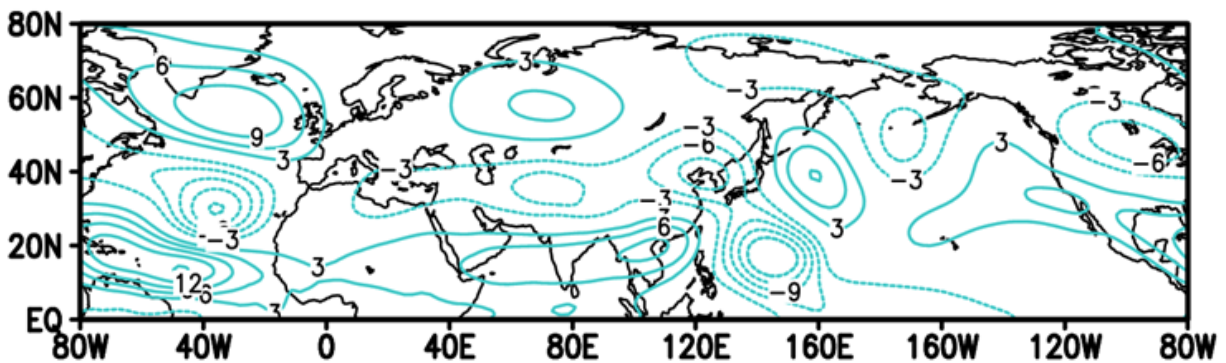


그림 3.2.15. 그림 3.2.13의 강제력에 의한 LBM 모형의 850 hPa 유선함수 편차 결과

원격상관들이 서로 상호작용하지 않는다는 가정 하에 이 강제력들에 의한 중위도 기압패턴은 재분석에서 나타나는 패턴과 유사한 모습을 나타낼 것이다. 그러므로 이 강제력들을 모두 이용하여 LBM 모형을 수행하였다. 그 결과 북서태평양 지역에서 중위도로 향하는 PJ 패턴과 북인도 및 히말라야 지역의 저기압 편차 즉, CGT(Circum-Global Teleconnection) 패턴과 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 적도와 아열대 지역의 강제력을 기후모형을 이용하여 예측하면, 중위도 지역의 해수면온도를 통계적으로 예측할 수 있다. 이미 그림 3.2.8에서 보였듯이 적도 지역 강수량은 역학모형에 의해 비교적 잘 예측할 수 있다.

나. 사계절예측을 위한 역학통계모형의 개발 및 검증

앞절에서 제시되었듯이 정준상관분석 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ik_1} = \sum_m U_{im} \left\{ \sum_k p_{mk} \cdot q_{km} / \sum_k q_{km}^2 \right\} \sum_j V_{mj} H_{jk_1}$$

앞절에서는 예측인자로 북서태평양 지역 하층 바람을 이용하였지만, 사계절 예측을 위하여 예측인자로 적도지역(20S-20N) 강수량 및 해수면온도가 이용되었다. 그림 3.2.16는 GAIA 역학모형을 이용하여 1989년 겨울철 해수면온도를 예측한 결과를 보인다. 초기조건은 1989년 11월 자료를 이용하였으므로 3개월 예측결과를 보인다.

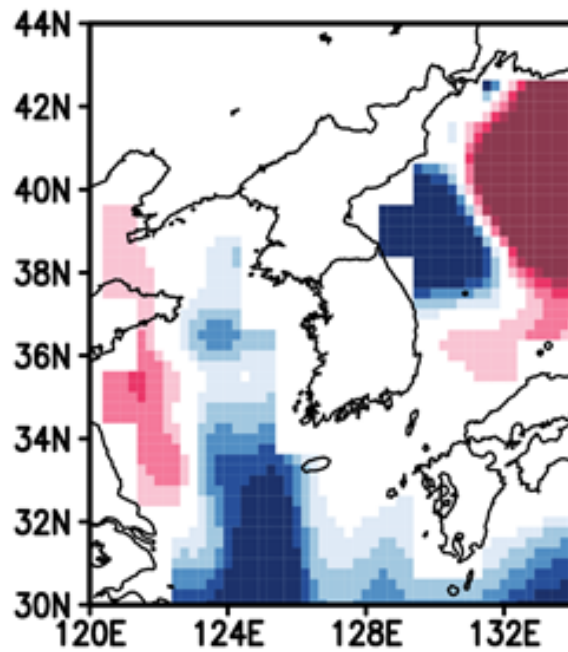


그림 3.2.16. 1989년에 대하여 KIOST 지구시스템 모형에 의해 예측된 겨울철 평균 해수면온도 편차.

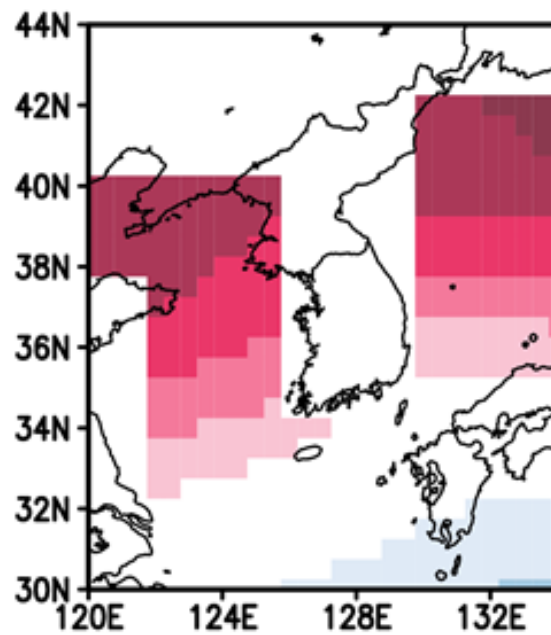


그림 3.2.17. 재분석자료만 다르고 그림 3.2.15와 같음.

그림 3.2.17은 같은 시기 재분석자료의 해수면온도 편차를 보인다. 순전히 역학모형만을 이용한 예측결과를 보면 재분석자료와 상당한 차이를 보인다.

그러나 역학통계모형을 이용하여 예측한 결과를 보면 재분석자료와 유사한 온도 편차를 보인다(그림 3.2.18).

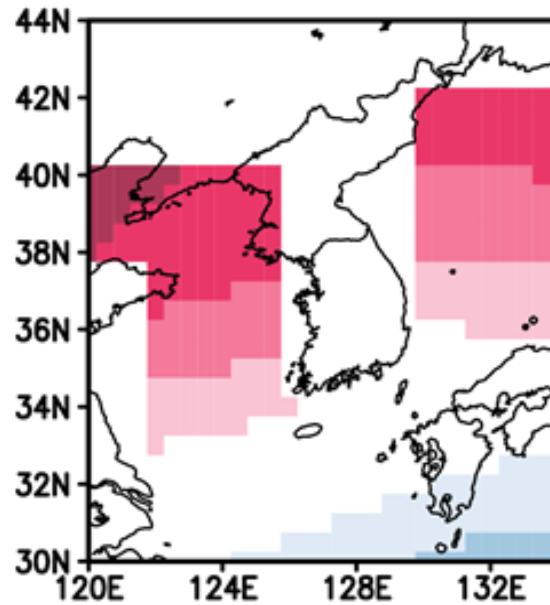


그림 3.2.18. 역학-통계모형인 것만 다르고 그림 3.2.16과 같음.

그림 3.2.19는 다른 시기에 예측된 결과를 보인다. 전체적으로 한반도 주변의 해수면 편차가 모두 음으로 예측함을 볼 수 있다. 재분석자료를 보면 중위도 지역의 해수면온도 편차는 맞지만 남해 남쪽의 해수면온도 편차가 크게 차이가 남을 볼 수 있다(그림 3.2.20). 반면에 역학통계모형의 예측결과를 보면 예측결과가 재분석자료와 상당히 유사하게 나타남을 알 수 있다(그림 3.2.21).

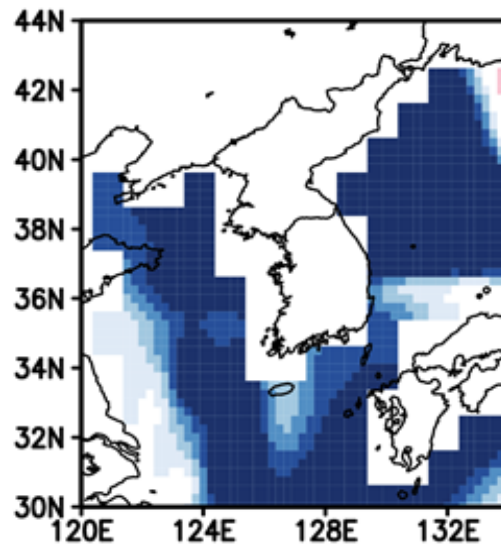


그림 3.2.19. 2000년에 대하여 KIOST 지구시스템 모형에 의해 예측된 겨울철 평균 해수면온도 편차

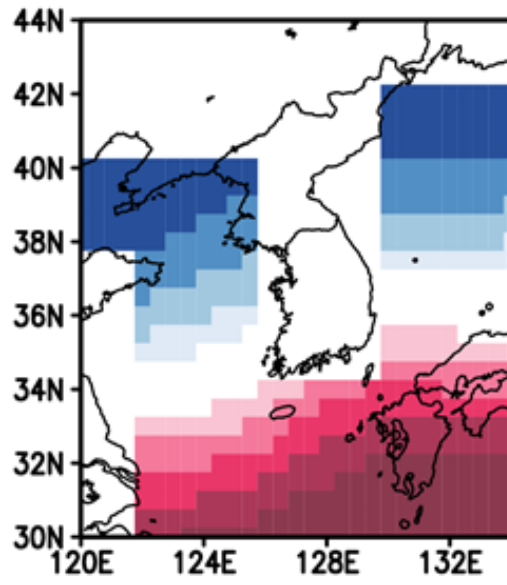


그림 3.2.20. 재분석자료만 다르고 그림 3.2.19와 같음.

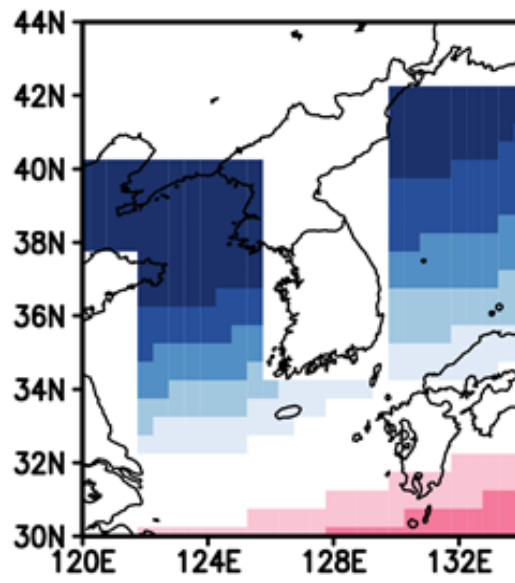


그림 3.2.21. 역학-통계모형인 것만 다르고 그림 3.2.19와 같음.

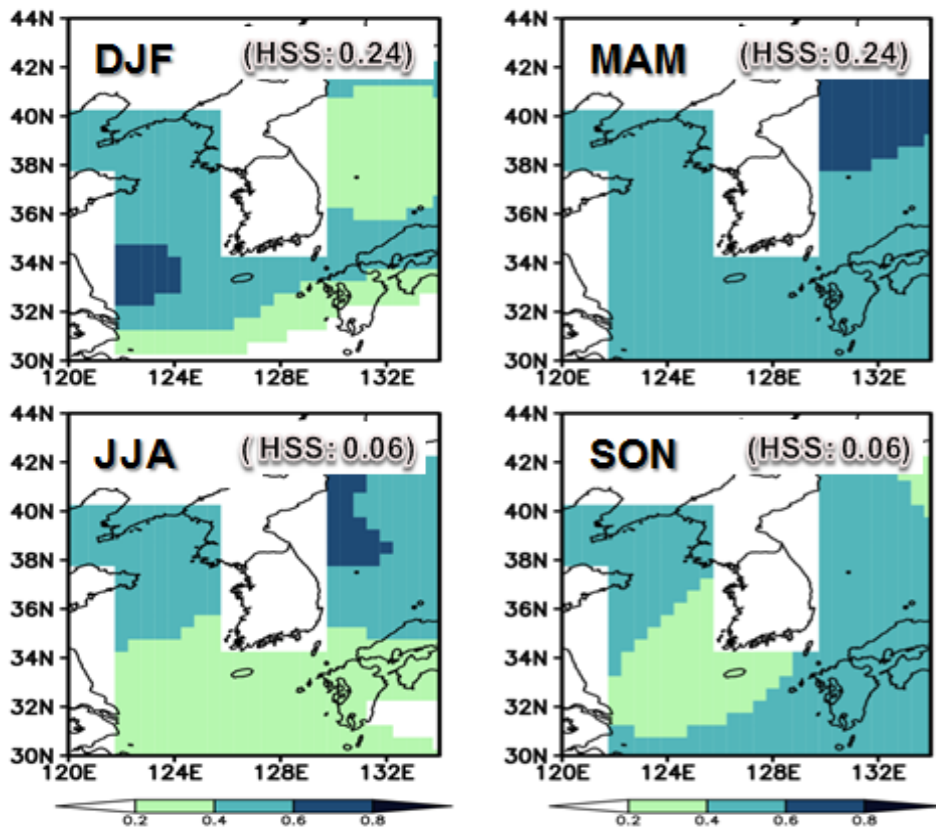


그림 3.2.22. 사계절에 대한 역학통계모형과 재분석자료에 대한 해수면온도의 상관계수 지도. HSS는 예측 영역에서 Heidke skill score를 의미함.

사계절 계절예측을 위한 역학통계모형의 성능을 검증하기 위하여 hindcast한 전 기간에 대하여 예측을 수행하고 재분석자료와 상관도를 구하였다(그림 3.2.22). 많은 영역에서 유의미한 예측성능을 보이며, 일부지역에서는 상관계수가 0.6이 넘는 영역도 보인다. 영역평균된 해수면온도 편차에 대하여 예측성능에 대하여 정량적으로 평가하기 위하여 범주형 성능점수(categorical skill score)를 도입하였다. 본 연구에서는 범주형 성능점수 중 하나인 HSS(Heidke Skill Score)를 이용하였다. HSS는 -1에서 1까지의 값을 가지며, 0보다 크면 기후값 예측보다 높은 성능을 가진다는 것을 의미한다. 이에 대한 자세한 설명은 다음 절에서 하기로 한다. HSS는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$HSS = (f_{ii} - o_i m_i) / (1 - o_i m_i)$$

여기서 f_{ii} 는 관측과 모형에 대한 결합확률분포를 나타내고, o_i 와 m_i 는 관측과 모형에 대한 주변확률분포를 나타낸다. 예를 들어 세 범주에 대한 예측과 모형에 대한 결합확률분포는 Tab. 3.2.1에 보인다. 이를 이용하여 HSS를

계산하면 0.24를 얻는다. 이는 확률적으로 예측한 것보다 높은 예측성능을 나타내는 것을 의미하며, 개발된 역학통계모형이 유의미한 예측성능을 가진다는 것을 의미한다.

표 3.2.1. 겨울철 역학-통계모형의 예측결과와 관측에 대한 결함 빈도 분포

DJF	OBS (+)	OBS (N)	OBS (-)
FCST (+)	5	4	-
FCST (N)	4	6	3
FCST (-)	1	4	5

표 3.2.2. 봄철에 대한 것만 다르고 표 3.2.1와 같음.

MAM	OBS (+)	OBS (N)	OBS (-)
FCST (+)	5	4	2
FCST (N)	4	6	2
FCST (-)	2	2	5

표 3.2.2는 봄철에 대한 결함확률분포를 보이며, 이를 이용하여 HSS를 계산하면, 0.24를 얻는다. 마찬가지로 방법으로 여름철의 HSS를 계산하면 0.06이고, 가을철의 HSS는 0.06이다. 상대적으로 겨울철과 봄철의 예측성능이 좋고, 여름철과 가을철의 예측성능은 떨어진다. 겨울철 영역평균한 해수면온도의 시계열은 그림 3.2.23에 보인다.

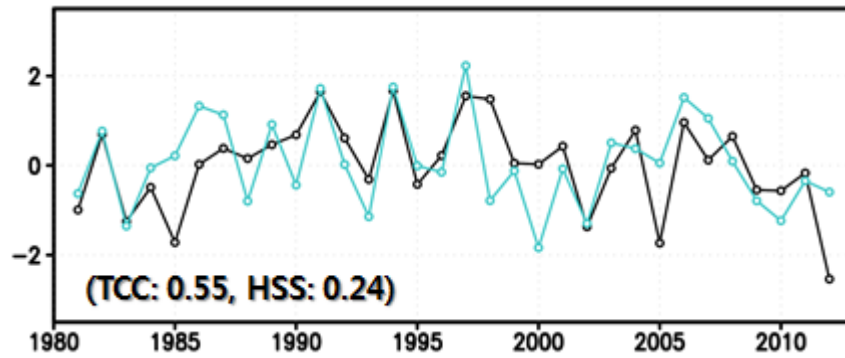


그림 3.2.23. 겨울철에 대한 영역평균된 재분석자료의 해수면온도 편차 (검정색)와 역학통계모형의 해수면온도 편차(하늘색).

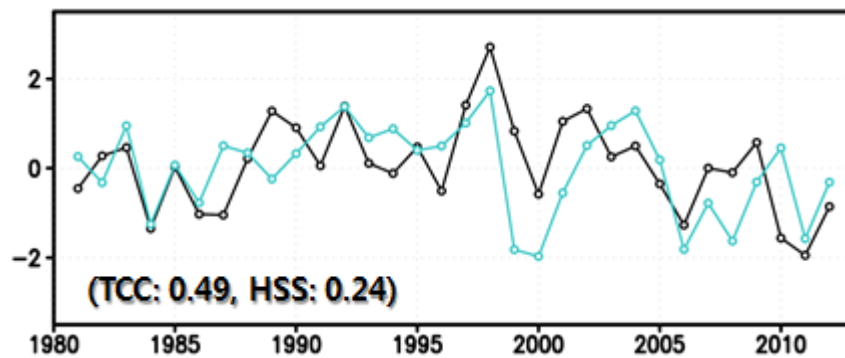


그림 3.2.24. 봄철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음.

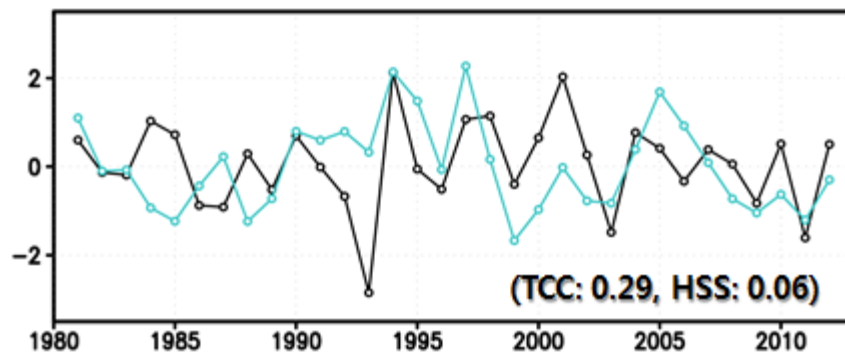


그림 3.2.25. 여름철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음.

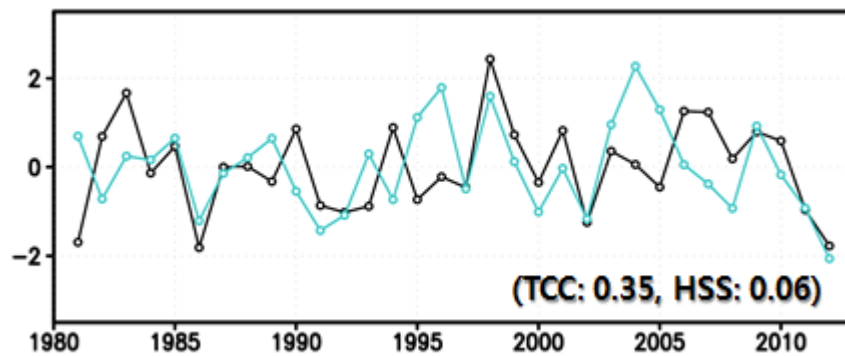


그림 3.2.26. 가을철인 것만 다르고 그림 3.2.23과 같음.

다. 월별 수온구조 예측을 위한 역학통계모형의 개발 및 검증

앞절에서는 해수면온도의 계절예측에 초점을 맞추었다면, 이번 절에서는 앞절에서 개발된 모형을 확장하여 월별 예측도 가능하고, 수온구조도 예측할 수 있는 모형을 소개할 것이다. 우선, 예측변수는 한반도 주변 해수면온도에서 3차원 수온구조로 바뀌었고, 예측인자는 앞절에서 제시한 것과 같은 것을 이용한다. 예측인자는 앞절에서 제시했듯이 다음과 같이 분해한다.

$$H_{jk} = \sum_m V_{jm} Q_{mk}$$

예측인자로서 해수면온도에 대한 주요 모드는 그림 3.2.27에 나타내었다. 첫 번째 모드는 통상적인 엘니뇨 모드이고, 두 번째 모드는 중태평양 엘니뇨 모드이다. 두 번째 모드와 관련된 서태평양의 패턴은 북서태평양 몬순 모드와 유사한 패턴이다. 3차원 수온구조를 예측하기 위하여 3차원 수온에 대한 주성분분석을 수행하였다(그림 3.2.28). 예측변수도 다음과 같이 분해한다.

$$P_{ik} = \sum_m U_{im} D_{mk}$$

그림에서 보이듯이 첫 번째 모드는 연직 수온구조에 대한 순압모드를 나타내며, 두 번째 모드는 경압모드를 나타낸다.

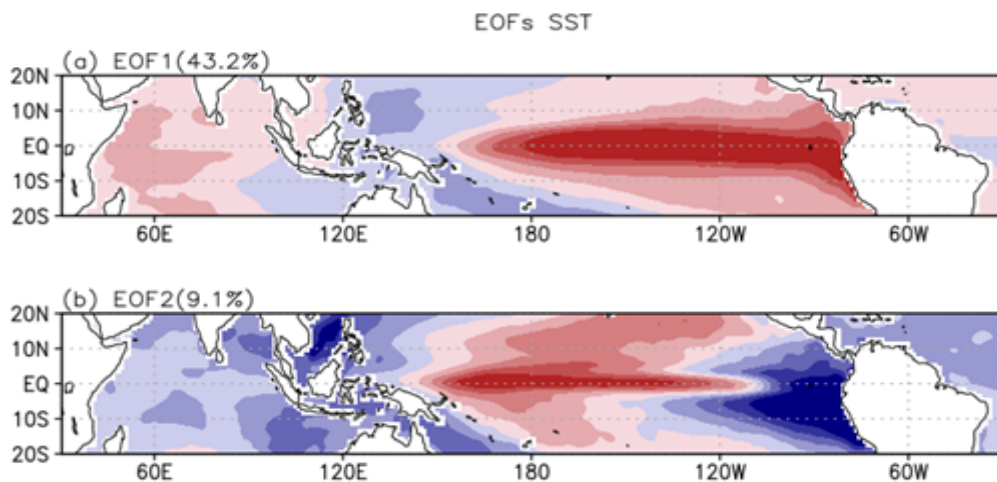


그림 3.2.27. 열대지역에서 월평균 해수면온도에 대한 EOF 주요모드.

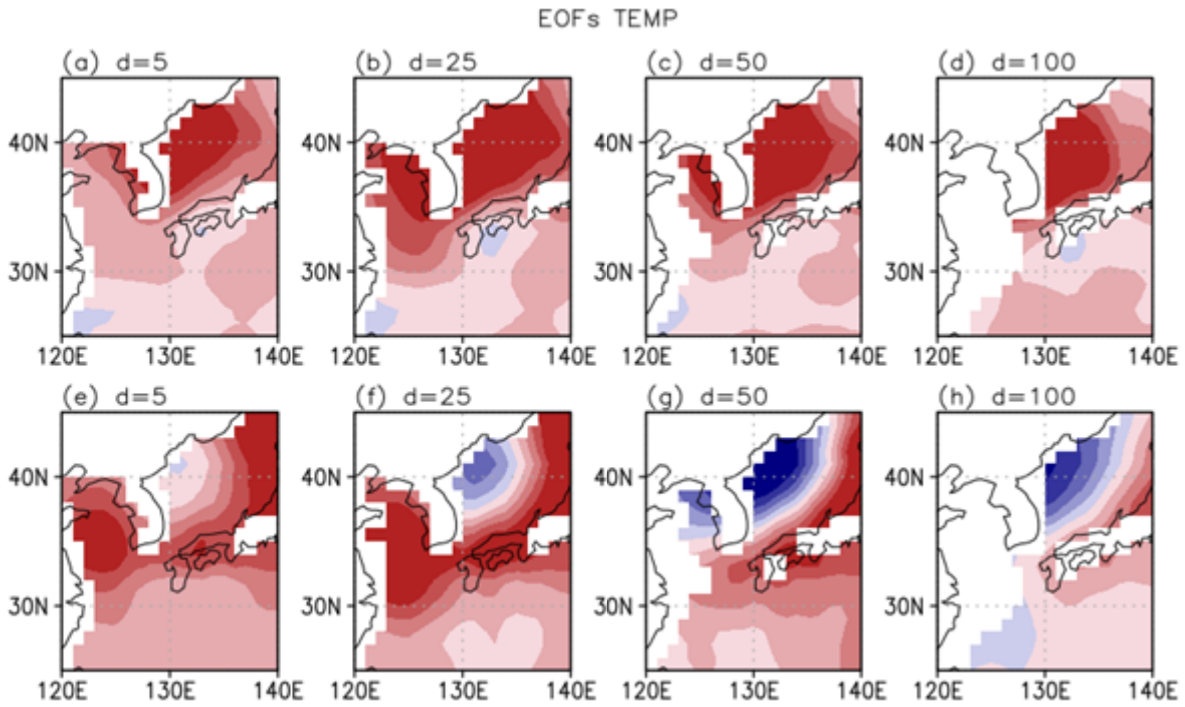


그림 3.2.28. 5, 25, 50, 그리고 100 m 깊이에서 해수온의 EOF 모드. 위 패널과 아래 패널은 각각 첫 번째 그리고 두 번째 EOF 모드를 의미함.

한편, 개발된 역학통계모형을 고도화하기 위하여 지연앙상블 기법(lagged ensemble method)를 이용하였다. 지연앙상블 기법은 서로 다른 초기조건 예측결과의 앙상블을 이용하여 예측성능을 향상시키는 방법이다. 한편, 월별 예측결과의 예측성을 향상시키기 위하여 예측인자로 강수량은 사용하지 않고, 적도/아열대 해수면온도만 이용하였다. 강수량과 함께 예측인자로 활용하면 강수량의 잡음 때문에 예측성능이 불안정하게 나타나기 때문이다. 또한, 관측자료로 EN4와 SODA 자료를 이용하였는데, EN4의 황해 정확도가 현저히 떨어지므로, 모든 예측결과의 비교는 SODA 자료로 대체하였다. 그림 3.2.29은 5m 수온에 대한 3차원 수온구조를 위한 월별 역학-통계모형의 예측성을 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 계절에 따라 다소 차이는 있지만, 많은 영역에서 높은 예측성능을 보인다. 특히 봄철의 예측성은 아주 우수하며, 반면에 여름철의 예측성은 상대적으로 떨어짐을 알 수 있다. 여름철의 예측성을 향상시키기 위해서는 별도의 예측인자로 구성된 예측시스템을 개발하여야 할 것이다. 그러나 모든 계절의 예측을 동일한 시스템으로 예측해야 예측성의 안정성을 추구할 수 있으며, 현업적으로도 수월하게 활용할 수 있을 것이다. 그림 3.2.30는 열용량에 대한 역학통계모형의 예측성을 보인다. 열용량에 대한 계절예측도 모든 계절에 대하여 비교적 좋은 예측성능을 보인다.

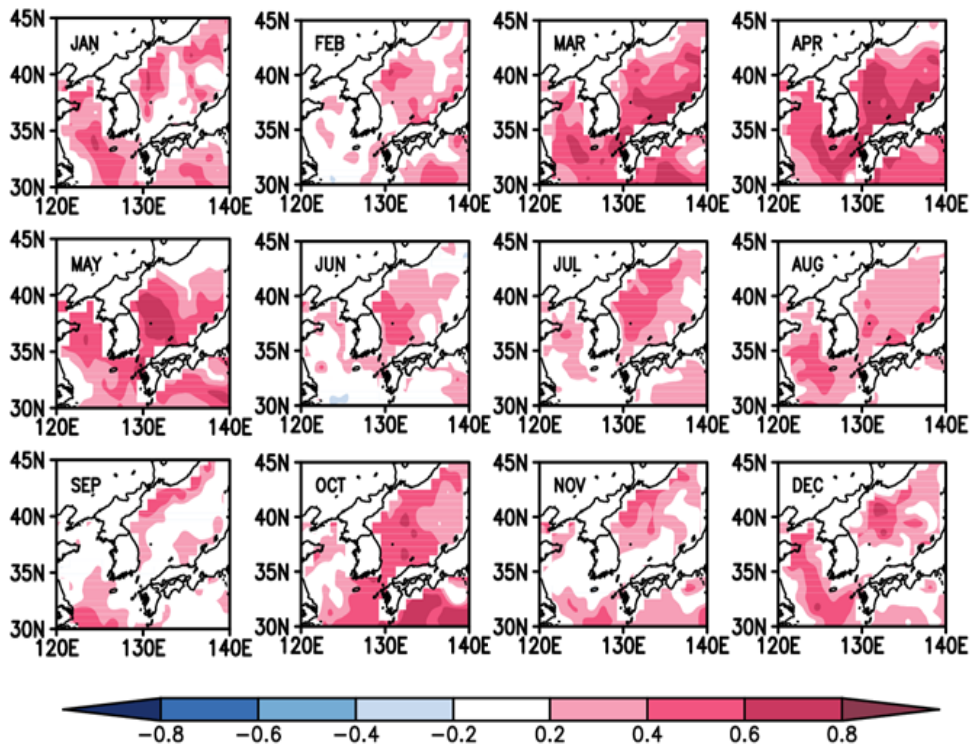


그림 3.2.29. 5 m 깊이에서 월별 해수면에 대한 역학-통계모형의 예측성.

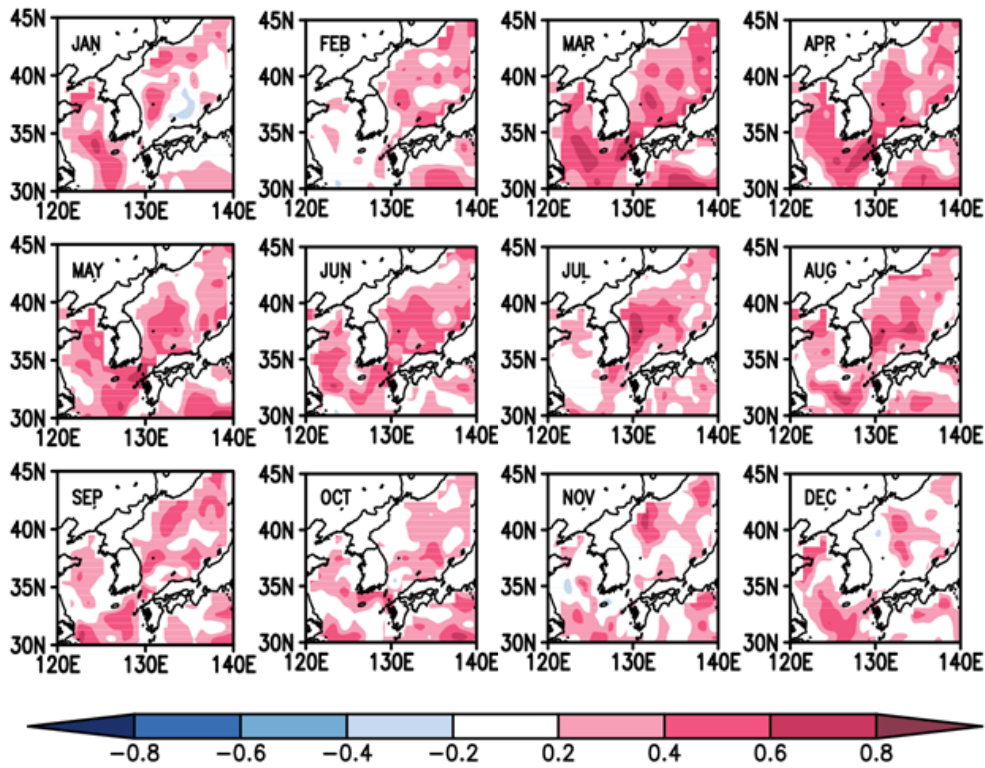


그림 3.2.30. 열용량인 것만 다르고 그림 3.2.29와 같음.

개발된 월별 수온구조에 대한 예측성을 검증 및 진단하기 위하여 성능점수를 도입하였다. 많은 범주형 성능점수가 알려져 있지만, 몇 가지만 살펴보면 다음과 같다. 우선, 적중률(hit rate; HR)은 예측이 적중한 비율을 의미하며, 백분율로 예측성을 나타낸다. 적중률은 간단하고 직관적이지만, 우연히 맞추는 요소가 포함되는 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위하여 Pierce Skill Score (PSS)를 이용할 수 있다. 이는 우연히 맞추는 요소를 제거하기 위하여 적중률에서 오경보율(False Alarm Rate; FAR)을 산술적으로 뺀 값을 나타낸다. 이 성능점수의 장점은 우연히 맞추는 요소를 제거하였지만, 표본수가 다른 자료들의 비교가 어려운 단점을 가지고 있다. 이들을 모두 보완하기 위하여 Heidke Skill Score (HSS)가 이용될 수 있다. HSS는 우연히 맞추는 요소를 정량적으로 제거한 성능점수로서 표본수가 달라도 비교 가능한 정교한 방법이다. 그러나 현업적으로 활용한다면, 매번 기후값을 갱신하여야 하기 때문에 시기에 따른 예측성 비교가 어려운 단점을 가지고 있다. 그래서 NCAR에서는 NCAR Skill Score를 개발해서 활용한다. NCAR Skill Score는 HSS와 같으나 현업적 이용을 위해 기후값을 고정시킨 성능점수이다. 물론 기후값을 고정시켜 예측을 수행할 때마다 기후값을 갱신할 필요는 없지만, 정확한 HSS 값이 아닌 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 현업적으로 활용하는 것이 아니므로 통상적인 HSS를 이용하여 예측시스템을 평가하였다(그림 3.2.31). 0보다 큰 영역은 기후값을 예측하는 것보다 성능이 높다는 것을 의미하는데, 전체적으로 예측성능이 있음을 판단할 수 있다.

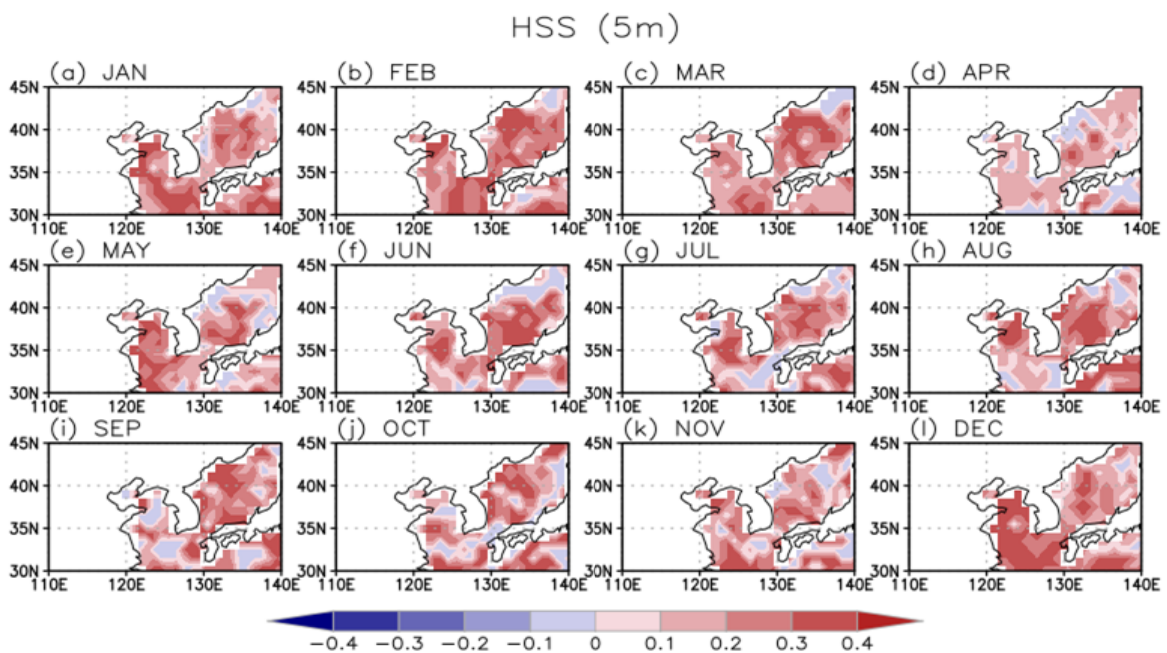


그림 3.2.31. 한반도 주변 수온에 대한 역학통계모형 예측결과의 Heidke 성능점수 지도.

개발된 시스템을 이용하여 2018년 2월 5m 수온예측결과는 그림 3.2.32에 보인다. 역학모형에서는 한반도 주변해역의 수온을 양의 편차로 예측하였지만, 역학통계모형은 음의 편차로 예측하였다. 이러한 예측시스템을 이용하며 현업적으로 한반도 주변해 수온의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

라. 2018년 미래 예측 결과

개발된 역학-통계모형을 이용하여 2018년 봄철에 대한 해수면온도를 예측하였다. 그림 3.2.32부터 그림 3.2.34은 2018년 3월부터 5월까지 월별 역학모형을 이용하여 예측된 해수면온도와 역학-통계모형을 이용하여 예측된 해수면온도를 나타낸 것이다. 3월에는 역학모형과 역학-통계모형 모두 한반도 주변 해역에서 수온이 평년보다 낮은 것으로 나타나고 있으나 역학-통계모형이 역학모형보다 더 낮은 수온을 예측하고 있다. 4월의 경우는 역학모형은 3월과 비교하여 크게 달라지지 않았으나 역학-통계모형의 경우 오히려 크게 수온이 상승할 것으로 예측하고 있다. 이는 적도태평양 등 한반도 외의 지역에서 예측된 수온의 특징이 달라진 것이 통계적인 기법을 통해 한반도 해역에 반영된 결과로 보인다. 5월의 경우도 역학모형에서는 크게 달라지지 않았지만 통계모형에서는 4월에 비해 해수면수온이 다소 낮아져 평년을 유지하는 것으로 나타났다.

역학-통계 모형의 3월 동아시아 수온(5m) 예측 결과

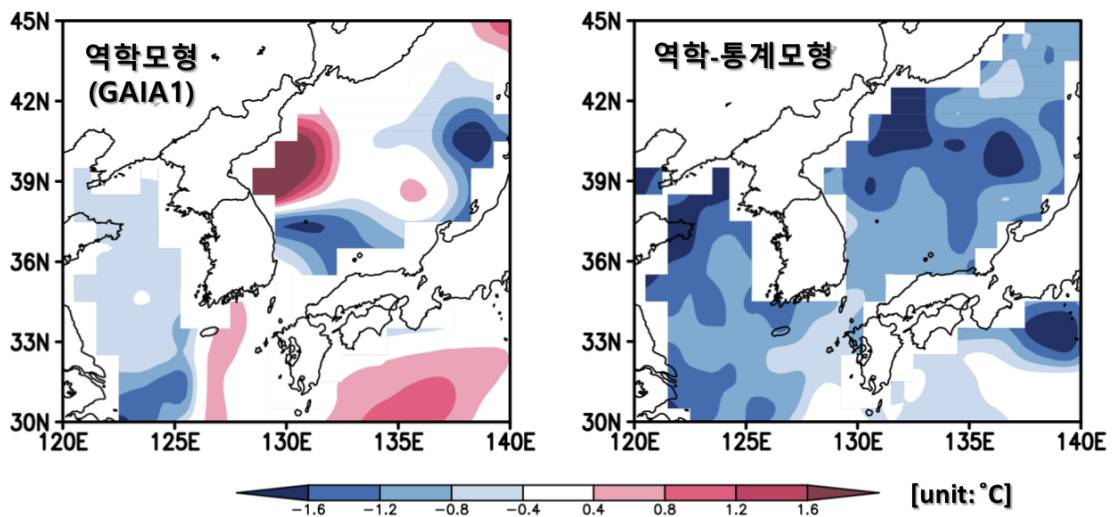


그림 3.2.32. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 3월 동아시아 수온 예측 결과

역학-통계 모형의 4월 동아시아 수온(5m) 예측 결과

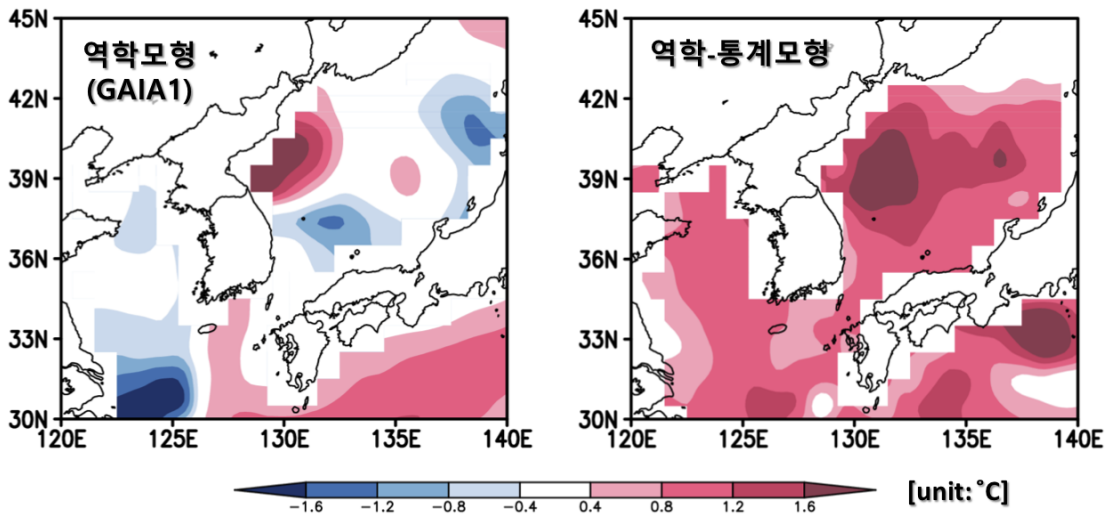


그림 3.2.33. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 4월 동아시아 수온 예측 결과

역학-통계 모형의 5월 동아시아 수온(5m) 예측 결과

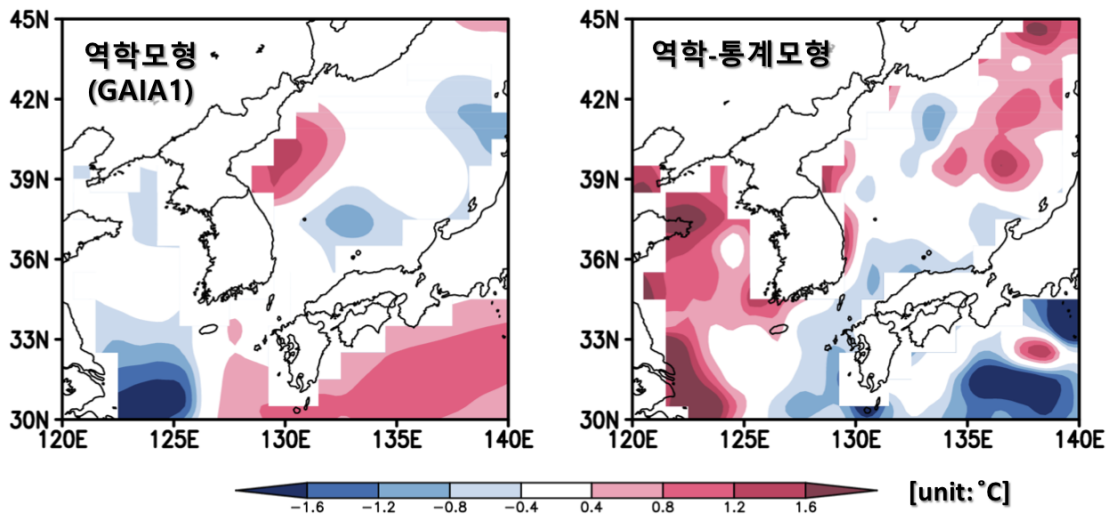


그림 3.2.34. KIOST 지구시스템 모형(왼쪽)과 역학-통계모형(오른쪽)을 이용한 2018년 5월 동아시아 수온 예측 결과

제 3 절 한반도 주변해 증장기 해수면 변동 특성 모의 및 미래 해수면 변화 전망 연구

1. 해수면 변동 모델 수립

가. 해수면 변동 모델 특성

이 연구에서 근간으로 삼은 해수면 변동 모델은 미국지구유체역학연구소(GFDL)에서 개발된 해양-해빙결합기후모델(Modular Ocean Model version 5-Sea Ice Simulator; MOM5-SIS Coupled Climate Model)이다. 본 모델의 특징중 하나는 비부씨네스크(non-Boussinesq) 역학에 기초하고 있으며 질량을 보존한다는 점이다. 최근까지 대부분의 해양모델들은 해양의 유체를 비압축성으로 여기고 체적이 보존되는 부씨네스크 가정(Boussinesq Approximation)에 기초하여 개발되었다. 그러나 실제의 해양 유체는 압축성이며, 따라서 외부로부터의 질량 유입이 없는 한 해양의 처음 질량은 보존되며, 열의 출입에 따라서 해수 밀도가 변함과 관련하여 체적이 변하는 것이다. MOM5-SIS에서는 또한 여러 종류의 서로 다른 연직좌표계가 선택 가능한데, 우리는 비부씨네스크 유체 모델링에 상대적으로 더 유리한 압력좌표계를 기준 연직좌표계로 삼았다. 모델의 영역은 전지구 해양을 대상으로 하며 북극점도 포함한다. 이를 위하여 MOM5-SIS에서는 북극 부근의 지상 두 곳에 원점을 가지는 쌍극 좌표계를 도입하였다. 모델의 공간 해상도는 적도부터 남·북위 10도 지역까지 남북 방향으로 1/3도부터 0.5도까지 격자 간격이 서서히 늘어나며, 위도 10도부터 극지방까지는 모두 0.5도의 간격을 취하고, 동서 방향으로는 모두 0.5도의 동일한 격자 간격으로 이루어져 있다. 연직 방향으로는 50개 층의 격자로 구성되며, 격자 간격은 해양 상층부에서 수 미터 정도로 좁고, 심층으로 가면서 점차 격자 간격이 늘어난다.

나. 해수면 방정식

지구온난화에 따른 장래의 해수면 변화는 주로 해양 표면을 통해 가해지는 부력속(표면 열속과 염속)과 질량속 및 운동량속(바람장)의 변화들로 주어질 것이다. 표면 열속과 염속은 이류와 확산 과정을 거쳐 해양 내부에서 온도와 염분의 공간적인 분포를 변화시키며 해수의 밀도 변화를 가져오게 하는데, 이는 결과적으로 해양의 체적 보존을 가정하지 않는 non-Boussinesq 해양-해빙결합모델에서는 그에 따른 체적의 변화를 가져오게 한다. 여기서 단위

면적당 해양의 체적 변화, 즉, 해면 고도의 국지적인 시간 변화($\eta_{,t}$)는 (1)식과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 연직으로 평균한 국지적 해수 밀도의 시간 변화가 기여하는 밀도변화 성분(steric component; (1)식 우변의 세 번째 항)과 밀도변화 외 성분(non-steric component)으로 나눌 수 있다. 밀도변화 외 성분은 밀도의 시간 변화 이외의 요인에 의한 것으로, 다시 해수의 수렴 또는 발산에 의한 해수면 변화 성분(dynamic component)과 해면을 통해 유입되는 물의 질량속에 의한 성분(water forcing component)으로 구분된다((1)식에서 각각 우변 첫 번째 항과 두 번째 항에 해당됨).

$$\eta_{,t}^{\text{nonBouss}} = \underbrace{-\left(\frac{1}{\bar{\rho}^z}\right)\nabla \cdot \mathbf{U}^\rho}_{\text{dynamics}} + \underbrace{\left(\frac{\rho_w}{\bar{\rho}^z}\right)q_w}_{\text{water forcing}} - \underbrace{D\partial_t \ln \bar{\rho}^z}_{\text{steric}} \quad (1)$$

(1)식에서 $\bar{\rho}^z$ 는 물기둥의 연직 평균 밀도, ρ_w 는 표층을 통해 공급되는 담수의 밀도, D 는 물기둥 높이, \mathbf{U} 는 물기둥의 연직 평균된 수평 유속을 각각 나타낸다. (1)식에서 알 수 있는 바와 같이 한 지점에서 물기둥의 측방을 통해 수렴되는 해수나 해표면을 통한 질량속의 유입, 또는 물기둥의 연직 평균 밀도의 시간에 따른 감소는 각각 그 지점에서 시간에 따라 해수면의 높이를 증가시키는 요인으로 작용한다. 모델의 해표면을 통한 질량속은 기후강제력에서 직접적으로 주어지는 강수(P)와 벌크식을 통해 해표면에서 평가되는 증발(E) 및 육상하천수(R)의 합으로 계산되며, (2)식과 같이 나타낼 수 있다. 그 밖에 모델 표층에서 염분복원조건((3)식)을 채택하는 여부에 따라 가상의 담수속(q_w^{restore} ; (4)식)이 추가적으로 더해지게 된다.

$$\text{해양으로 유입되는 순 담수속} = \sum (P - E + R + q_w^{\text{restore}}) \quad (2)$$

$$F_{(\text{restore})}^{(\text{salt})} = (S^{(\text{data})} - SSS^{(\text{model})}) / Res T_{\text{restoring time}} \quad (3)$$

$$q_w^{\text{restore}} = -F_{(\text{restore})}^{(\text{salt})} / SSS^{(\text{model})} \quad (4)$$

다. 해수면과 유사 용어들에 대한 정의

해양학 분야에서는 일반적으로 해수면(sea level)에 대해 유사한 여러 용어들이 사용되어지고 있다. 여기서는 해양-해빙결합모델에서 산출되는 해수면에 대한

분석을 진행하기에 앞서 관련 용어들을 간략히 검토하고 정의하기로 한다.

- 상대해수면(Relative Sea Level, RSL)

Griffies et al.(2014)을 참조하면 상대 해수면(RSL)은 해저면과 해표면간의 거리를 말한다. 그럼으로 지각 변동 등에 의해 해저면이 하강하거나 상승하는 경우, 또는 해표면에 해수 질량이 더해지거나 해양 내부의 밀도가 달라지는 경우에 이 상대해수면이 변화될 수 있다. 보통 조위관측소에서 관측되는 해수면(Sea Level)으로서 지각 변동 속도가 보정되지 않은 해수면은 이 상대해수면에 해당된다.

- 해표면고도(Sea Surface Height, SSH)

거의 모든 전지구 해양기후모델들에서는 육지와 해양의 고정된 지형과 고정된 중력 효과와 일정한 회전 각속도를 취하고 있기 때문에 그러한 모델들에서 계산된 해양 표면의 높낮이를 해표면고도(SSH)라 부른다. 그러나 원칙적으로 SSH는 일정한 지오폠펜셜면(지위면)으로부터의 해표면 편차를 말한다. 위성해양학에서는 위성으로부터 기준타원체(reference ellipsoid)까지의 거리와 위성으로부터 해양 표면까지의 거리의 차를 해표면고도(SSH)로 정의하고, 이 SSH에서 지오이드면을 빼준 높이를 역학고도(Dynamic Topography)라 부른다. 이 연구에서는 편의상 해양-해빙결합모델에서 산출된 해표면고도를 한 지점에서 고찰할 때 해수면(Sea Level)으로, 지역적으로 평균된 해표면고도를 지역 평균해수면(Regional Mean Sea Level)으로, 위성고도계 관측에 의한 해표면고도를 해면고도(Sea Level Height)로 각각 정의하기로 한다.

- 전지구 평균해수면(Global Mean Sea Level, GMSL)

전지구 평균해수면(GMSL)은 해양 각 지점의 SSH를 전세계 해양 표면 전체에 걸쳐 적분하고 해양 전체 표면적으로 나누어준 값으로 정의한다. 전지구 평균해수면이 의미하는 바는 해양의 밀도 구조와 그 질량에 대한 변화들이 미치는 영향들을 전지구적으로 평균한 것을 나타내준다(Griffies et al. 2014).

2. 기후평균 해수면 모의

가. 실험 방법

일련의 해수면 모의실험 가운데 먼저 기후평균적인 해수면 분포를 모의하기 위하여 모델 해양이 정상상태에 이르도록 전지구 해양-해빙결합모델에 초기조건과 경계조건을 부여하고 장기간의 시간 적분을 시행하였다. 해양 내부의 초기조건으로서 WOA 98(World Ocean Atlas 98 dataset)의 1월 수온과 염분 기후치를 사용하였다. 해표면경계조건으로서 CORE 기후평균강제력자료(CORE-NYF.v2; Coordinated Ocean-ice Reference Experiments Normal Year Forcing dataset version 2, Large and Yeager(2004))를 사용하였다. 모델에 입력되는 해양과 해빙 및 대기층의 상태변수들은 기후연평균 육상하천수 유입량, 월별 강수량, 일별 단과복사와 장과복사, 10 m 기온, 습도, 공기밀도, 바람, 해면기압 등이다(표 3.3.1). 표면 열속은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제시한 벌크식에 기초하여 기후강제력의 대기층 변수들과 모델에서 예측되어지는 SST로써 계산된다(Large and Yeager; 2004). 표면 담수속은 대기강제력에서 직접적으로 주어지는 강수와 더불어 벌크식을 통해 해면에서 평가되는 증발로 산정되어지지만, 해빙이 녹을 때 극지방 표층이 과도하게 저염화 되는 것을 방지하기 위하여 60일의 시간 규모를 가지고 WOA 98의 염분기후치에로 완화되도록 하는 염분 복원조건(restoring condition)을 추가적으로 더해 주었다. 이 연구에서 행한 해수면 변화 모의실험 전체에 걸쳐, 모델 경계면을 통해 주어지는 질량속에 대하여는 사용한 각각의 기후 자료에 따라 강수량과 증발량의 변화가 고려되지만, 육상하천수 유입량은 각 하천의 매년 변동량 자료 확보에 어려움이 있어 CORE-NYF 자료의 기후평균값으로 주었고, 산악빙하와 남극대륙 및 그린란드 빙상 등과 같은 육지 빙하의 기후변화에 따른 녹음 효과도 포함하지 못하였다. 또한 이 연구의 각 실험들에서는 강수량과 증발량, 하천수 유입량 및 가상 담수속의 총합의 전지구 평균값을 매 시간스텝마다 모든 격자점에서 빼주어 제로로 정규화하였다. 그러므로 적분 기간 동안 모델에 주어지는 전지구 순 담수 유입량은 항상 제로이며, 전지구 평균해수면의 증가는 표면 열속을 통한 밀도 변화 효과에 의해서만 나타나게 된다. 그러나 지역적인 해수면 변동에는 해수의 수렴/발산에 의한 역학적 효과와 더불어 강수, 증발, 하천수 유입, 해빙 녹음의 상대적인 효과가 나타날 수 있다.

나. 결과

CORE 기후평균강제력을 사용하여 전지구 해양-해빙결합모델을 총 500년 기간 동안 적분하였다. 그림 3.3.1은 모형의 적분 시간에 따른 전지구 평균해수면(그림 3.3.1 상단, 파란 색 실선; 단위 cm)과 수심 평균된 전지구 평균수온(그림 3.3.1 하단, 파란 색 실선; 단위 °C)을 나타낸다. 비교를 위해 위·경도 1도 규모의 격자 해상도 이외에는 모수화방안과 입력 조건에서 0.5도 대표 해상도 모델과 모두 동일하게 구성된 전지구 해양-해빙결합모델에서 1000년간 적분된 전지구 평균해수면과 전지구 평균수온의 시간 변화 과정을 같이 나타냈다(각각 그림 3.3.1 상단과 하단의 검은 색 실선). 전지구 1도 해상도 모델의 평균해수면은 적분 초기에 상승하기 시작하여 적분후 약 280년경에 이르러 최대에 도달하며 이후에는 서서히 감소한다. 전지구 평균해수면은 약 800년-1000년에는 2 cm 정도의 매우 미미한 변동을 보이며 준정상 상태에 다다르고 있다. 이에 비해 전지구 0.5도 모델은 적분 초기에 전지구 1도 모델보다 좀 더 빠르게 상승하는 모습을 보이는데, 220년경에 최대에 이르고, 다시 400년경까지 가파르게 감소하며 그 후로는 이전 기간보다 더 느리게 감소하는 형태를 보인다. 전지구 평균수온은 두 모델 모두 전지구 평균해수면과 매우 비슷한 형태의 변화 양상을 나타낸다. 전지구 평균해수면과 전지구 평균수온간의 이와 같은 좋은 비례 관계는 연직 평균된 수온의 시간 변화가 전지구 평균해수면의 변화를 거의 설명해 줌을 시사한다. 이 그림에는 나타내지 않았으나 전지구 평균염분의 적분에 따른 시간 변화는 전지구 1도 모델이나 전지구 0.5도 모델 모두 적분 시작부터 각각의 적분 종료 시점까지 거의 나타나지 않았다. 즉, 모델 해양에 들어 있는 전체 염의 양은 극지방 해빙의 녹음과 형성에 따라 해빙 내의 일부 염의 양이 해양으로 방출되거나 또는 해빙으로 흡수되는 부분 이외에는 적분 기간중 거의 일정하게 보존되는 것이다. 따라서 전지구 총 염분의 시간 변화가 전지구 평균해수면에 미치는 효과는 무시할 정도인 것을 알 수 있다.

그림 3.3.2는 모델에 의한 적분 491-500년 기간의 평균해표면고도(좌)와 인공위성 관측에 의해 얻어진 전지구 평균역학고도 분포(우) (Rio et al., 2011; 단위 cm)를 각각 보여준다. 모델의 평균해표면고도는 위성관측에 의한 평균역학고도 분포와 매우 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 즉, 각 대양의 아열대 해역에서 높은 해표면고도를 이루며, 아한대 해역과 고위도 해역, 특히 남대양의 남극대륙 주위를 따라 낮은 해표면고도를 이루는 점이다. 또한 대양 분지에서 동서 방향으로 해표면고도의 경사를 가지며, 특히 서안경계류 근방에서 강한 해면 경사를 보이고, 대서양에 비해 태평양의 해표면고도가

훨씬 더 높은 모습과 쿠로시오 재순환역 부근에 가장 높은 해표면고도가 위치하는 특징도 위성관측에 의한 역학고도 분포와 잘 부합되고 있다. 그러나 태평양의 아열대 해역에서 나타나는 해표면고도 극값의 중심 위치가 위성관측에서는 일본 남동방의 쿠로시오 재순환역내에 나타나는 반면, 모델에서는 좀 더 남쪽의 필리핀 동방에서 나타나는 점 등의 차이점들도 존재한다.

표 3.3.1. 전지구 해양-해빙결합모델에 경계조건으로 사용되는 CORE 기후평균강제력의 해양, 해빙, 대기측 입력 변수들.

변수	설명	단위	시간간격
Ocean, sea-ice			
SSS	Sea Surface Salinity	psu	month
SST	Sea Surface Temperature	℃	month
Runoff	continental runoff	kg/(m ² s)	year
snow	water flux due to snow	kg/(m ² s)	month
rain	water flux due to rain	kg/(m ² s)	month
shortwave	downwelling shortwave	W/m ²	day
longwave	downwelling longwave	W/m ²	day
atmosphere			
U wind	x direction speed	m/s	6 hours
V wind	y direction speed	m/s	6 hours
Specific Humidity	specific humidity	kg/kg	6 hours
Air temp	air temperature	K	6 hours
Sea level pressure	sea level pressure	Pa	6 hours

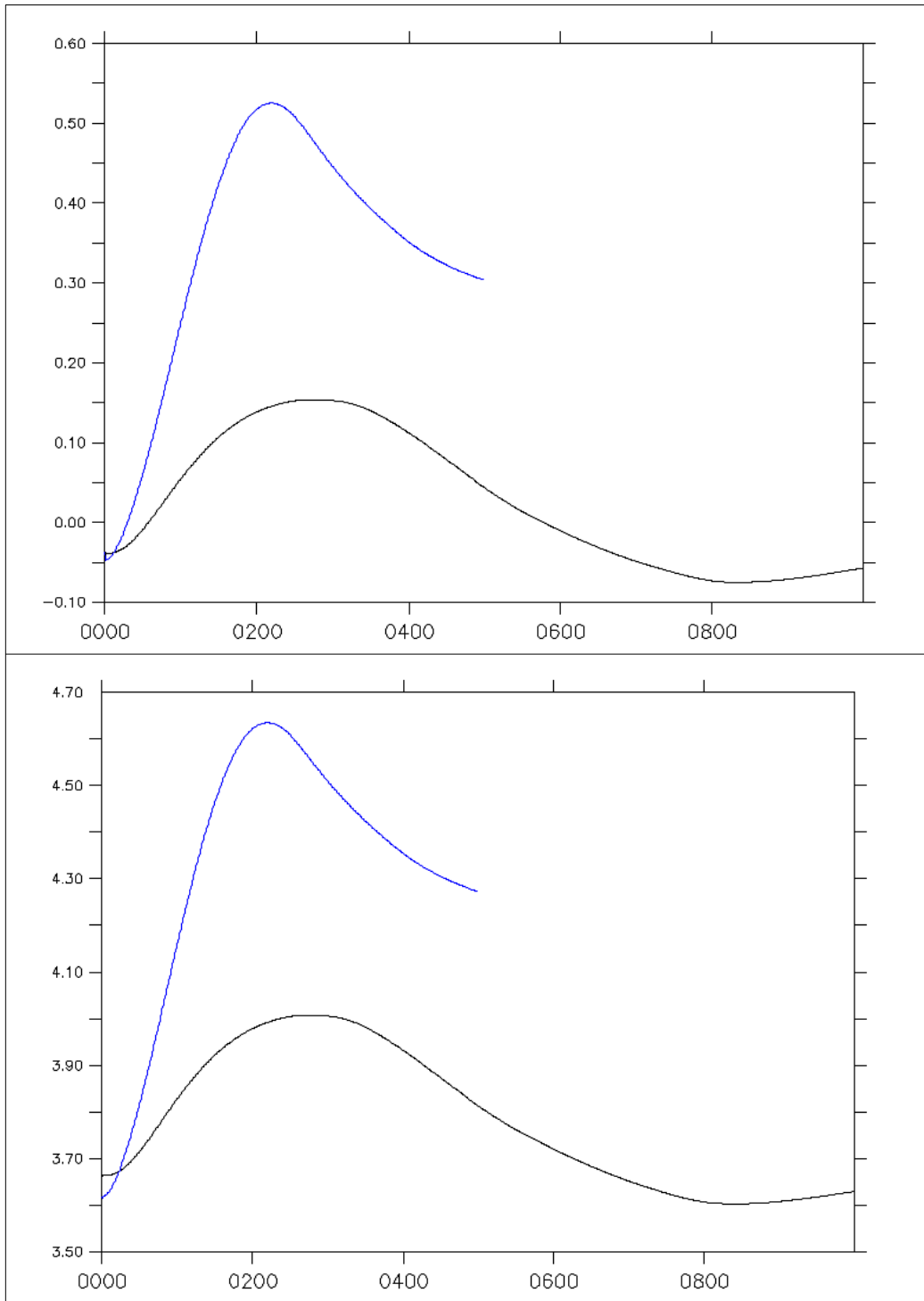


그림 3.3.1. 모델 적분 시간에 따른 전지구 평균해수면(상단: cm)과 평균수온(하단: °C) 변화. 파란색 실선은 전지구 0.5도 모델 결과이며 비교를 위해 전지구 1도 모델의 적분 결과(검은 색 실선)를 함께 나타냄. 가로축은 초기 0년부터 1000년까지의 모델 수치 적분 시간. 그림에서 모든 곡선의 값은 각 년도에 연평균과 수심 평균을 거쳐 전체 해양 면적으로 평균된 값을 나타냄.

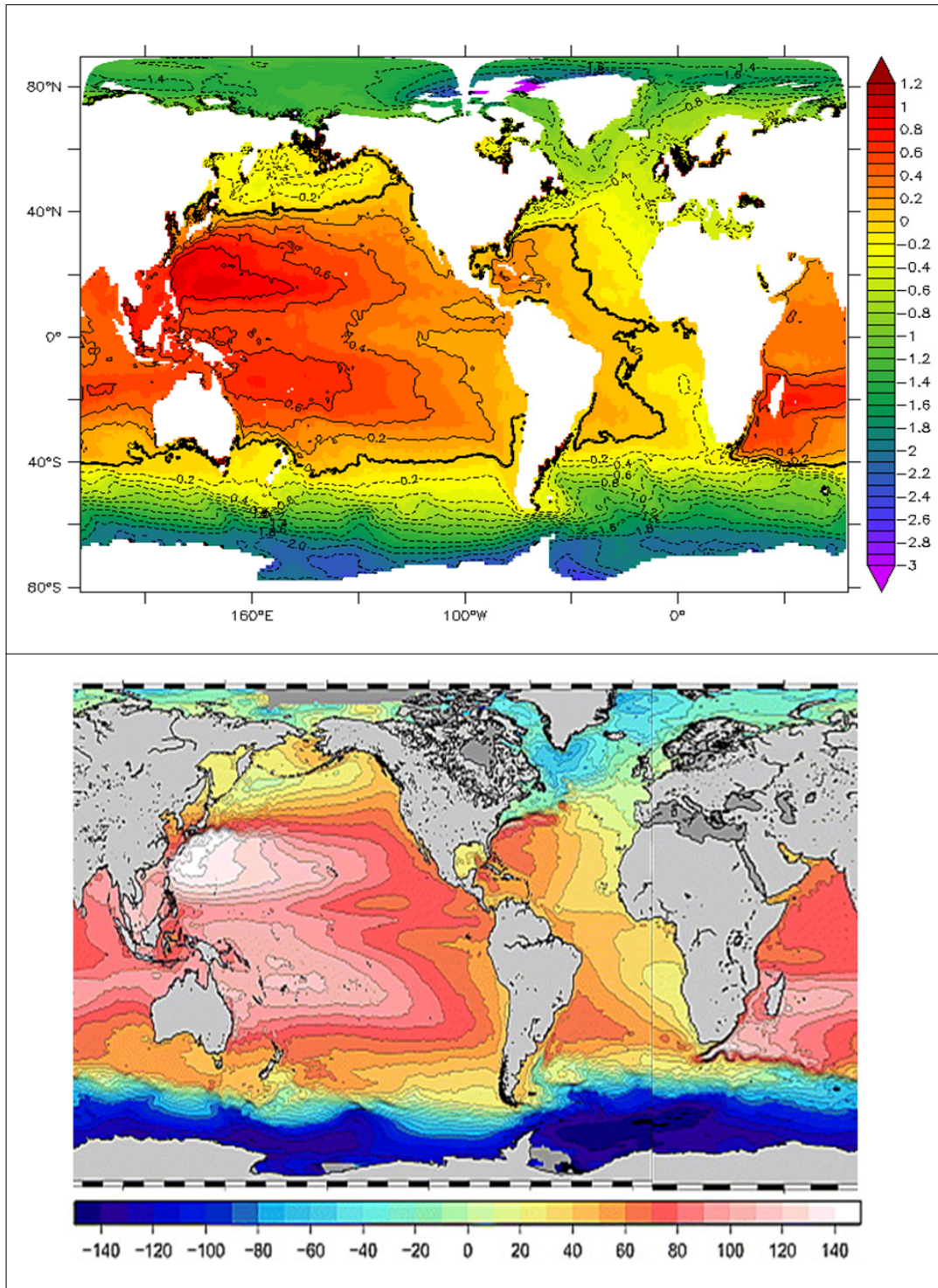


그림 3.3.2. 기후평균강제력으로 모의된 해표면고도(상단; 적분 491-500년 기간 평균, 단위 m)와 위성관측 전지구 평균역학고도 (하단; Rio et al., 2011, 단위 cm).

3. 과거 해수면 변화 재현 실험

가. 실험 방법

한반도 주변해역의 지난 수 십 년 기간의 해수면 변동을 조사·분석하기 위하여 본 연구에서는 전지구 0.5도 해상도의 해양-해빙결합모형(MOM5-SIS)과 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)의 재분석자료(reanalysis data)를 이용하여 해수면 변화 실험을 수행하였다. ECMWF의 경년변동기후강제력 자료는 1958-2015년 기간(58년)의 자료로서 ERA-40 Daily 자료(1958-1978)와 ERA Interim Daily 자료(1979-2015)로 구성되었다. 또한 모델에서 재현된 해수면과 관측과의 비교를 위하여 복원해수면자료(Reconstructed sea level)로서 Hamlington et al.(2011)의 1950년-2009년 기간의 7일 간격 전구 0.5도 해상도 해수면 아노말리자료와 위성고도계 관측의 해면고도자료로서 AVISO에서 제공하는 1993-2014년 기간의 해면고도자료(merged Global Ocean Gridded sea Absolute Dynamic Topography SSALTO/Duacs L4 product)를 이용하였다. 해수면 경년변동 실험의 초기치로서 기후평균 해수면 실험을 통해 500년간 적분하여 구한 최종 상태의 해양순환장을 적용하였다. 이 때 CORE 기후평균강제력으로 구동되어진 초기 해양순환장이 ECMWF 기후강제력으로 갑자기 전환될 때 생겨나는 적분 초기의 충격과 모델 불안정을 줄이기 위해 모델의 초기 순환장은 500년 적분된 순환장의 수온과 염분만을 사용하였고, 유속과 해수면은 제로의 값으로 하여 실험을 시작하였다. 모델에 적용한 ECMWF 기후강제력의 모든 변수들은 표 3.3.1에 제시된 CORE 기후강제력의 변수들과 동일하게 단위와 시간 간격을 변환시켜 입력하였다.

나. 결과

(1) 월평균해수면 연주 변화

해양-해빙결합모델에서 재현된 과거 해수면은 모델에 입력된 지형과 실제 지형과의 차이, 모델의 공간 해상도, 모델에 주어지는 기후강제력의 정확도, 모델에서 모의된 지역해의 수온·염분 특성의 재현 정확도, 해류시스템의 모사 정확도, 육빙 녹음 효과, 지각 변동 효과 등의 요인에 의해 관측에 의한 평균해수면과 반드시 일치하지는 않으며 둘 사이에 시공간적 차이가 발생할 수 있다. 우리는 해양-해빙결합모델의 과거 해수면 변화 실험을 통해 모의된 해수면에 대해 모델의 재현 성능을 평가하기 위해서 먼저 한반도 주변해역의 장기 월평균해수면의 연주기 변화에 대해 분석을 실시하고 관측과 비교하였다.

이를 위해 한반도 주변해역을 동해와 황해와 동중국해의 3개 지역해로 나누고, 각 지역해의 영역을 그림 3.3.3에서와 같이 정의하였다.

그림 3.3.4는 모델에서 1958-2015년 기간 동안 모의된 지역 및 장기 월평균 해수면과 위성고도계 자료에 의한 지역 및 장기 월평균 해면고도의 연주 변화들을 각각 보여준다(모델 해수면 - 빨간색, 위성관측 해면고도 - 파란색). 전체적으로 모델은 위성관측 해면고도와 비슷하게 해수면의 계절변화를 잘 모의하고 있다. 동해는 모델(그림 3.3.4 상단)의 계절변화 진폭이 6.7 cm이고, 3월에 최저, 9월에 최고를 보이며, 위성관측 해면고도는 진폭 7.9 cm, 3월에 최저, 10월에 최대를 보인다. 황해는 모델의 진폭이 13.4 cm이고, 2월에 최저, 9월에 최고를 보이며, 위성관측 해면고도는 진폭 10.8 cm, 3월에 최저, 9월에 최고를 보인다. 한편, 동중국해는 모형의 진폭이 11.7 cm, 3월에 최저, 9월에 최고를 보이며, 위성관측 해면고도는 진폭이 9.6 cm, 모형과 마찬가지로 3월에 최저, 9월에 최고를 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 모델의 평균해수면 자체는 실제의 관측 해수면과 여러 요인들로 인해 차이가 나게 되는데, 모델이 황해와 동중국해에서 위성관측 해면고도보다 다소 더 큰 연진폭을 보이는 것은 이 연구에서 수립된 해양-해빙결합모델이 현재 적용한 기후강제력에 대해 실제보다 더 큰 해양의 밀도장 변화 또는 질량 변화를 모의함을 시사한다.

(2) 월평균해수면 중장기 변동

모형과 위성관측 해면고도의 월평균 해수면 변동을 전 기간에 걸쳐 각 지역해별로 비교하였다(그림 3.3.5). 각 지역해의 위성관측 해면고도 시계열에서 경년 변동하는 형태가 모두 뚜렷이 나타나며, 이러한 특징은 다소 완화된 모습이기도 하지만 더 장기적인 모델 해수면 시계열에서도 살펴볼 수 있다. 또한 모델 해수면 시계열에서는 십년 규모 변동과 중장기적인 해수면 상승 경향도 복합적으로 나타나는 듯이 보인다. 연 변화 이상의 시간 규모를 가지는 해수면 변화를 좀 더 명확히 고찰하기 위하여 각각의 월평균해수면 시계열에서 연주 변화를 제거하여 월평균해수면 아노말리를 산출하였다(그림 3.3.6). 또한 복원해수면자료(Hamlington et al.(2011)에 의한 각 지역해의 월평균해수면 아노말리도 같이 나타냈다. 각각의 월평균해수면 아노말리 시계열들은 경년 변동 및 십년 규모 변동과 함께 선형의 기울기로 표시한 중장기적인 해수면 상승 경향도 더욱 명료하게 나타냄을 관찰할 수 있다. 각 지역해 전체적으로 모형과 복원해수면의 월평균해수면 아노말리의 경년변동 규모는 약 5 cm 정도 크기이나, 위성고도계자료의 월평균해수면 아노말리는 7~10 cm 정도로서 그 보다 큰 값을 보인다.

각 지역해별로 모델 해수면과 복원해수면 및 위성고도계 해수면의 각 기간에 대해 선형적 해수면 상승률을 산정하고 비교했다(표 3.3.2). 관측과 모델 모두 모든 분석 기간들에 걸쳐 한반도 주변해에서 양의 해수면 상승률을 나타냈다. 1958-2009년 기간 모델과 복원해수면에 의한 해수면 상승률은 동해와 황해에서 모두 2.1~2.2 mm/yr, 동중국해에서 1.9~2.6 mm/yr를 각각 나타냈다. 한편 1993-2014년 기간에 대해 모델과 위성고도계 자료에 의한 해수면 상승률은 동해에서 2.8~3.1 mm/yr, 황해에서 3.4~3.8 mm/yr, 동중국해에서 2.6~4.1 mm/yr를 각각 나타냈다. 이러한 한반도 주변해의 해수면 상승률을 전지구 평균해수면 상승률과 비교해보면, IPCC AR5에서 추정된 전지구 평균해수면 상승률은 1901-1990년 기간에 1.5 mm/yr, 1971-2010년 기간에 2.0 mm/yr, 1993-2010년 기간에 3.2 mm/yr로서 90년대 초반 이후 한반도 주변해의 지역평균해수면 상승률은 전지구 평균과 비슷한 정도이거나 약간 더 높은 추세를 보이는 것으로 평가된다.

한반도 주변해에서 각 기간 동안의 해수면 차이의 공간 분포를 그림 3.3.7에 나타냈다. 모델에서 93-02년 기간 동안의 평균해수면에 대비한 05-14년 기간의 평균해수면 변화(좌상단)는 한반도 주변해 전역에서 두 기간 사이에 2~4 cm의 해수면 상승이 있었음을 나타내며, 위성고도계에 의한 해수면 변화 분석(우상단)에서도 비슷한 크기의 해수면 상승 폭을 보여준다. 그러나 위성고도계 해수면의 분포는 모델보다 좀 더 좁은 공간 범위에 걸쳐 좀 더 큰 상승이 있는 특징을 보이는데, 이는 위성관측 해면고도가 모델에 의한 것보다 관측의 공간해상도가 더 높아서 해양의 중규모에디에 의한 영향까지 포함되어진 때문이라 여겨진다. 그림 7의 하단은 모델의 58-67년 대비 05-14년의 해수면 상승으로서 더 긴 기간을 취했을 때의 해수면 상승 정도를 보여준다.

모델 해수면 변동에서 나타난 두 기간 사이의 해수면 상승 원인을 파악하기 위하여 먼저 93-02년 기간 대비 05-14년 기간의 모델 해수면의 상승폭을 각 기여 성분별로 분리하였다(각 기간의 10년 평균을 해당 기간의 대푯값으로 취함). 그림 3.3.8에서 상단은 93-02년 대비 05-14년 기간의 전체 해수면 차이이며 좌하단은 밀도변화성 해수면 변화 성분(steric sea level)을, 그리고 우하단은 밀도변화외의 해수면 변화 성분(non-steric sea level)을 각각 나타낸다. 두 기간 동안 북서태평양과 쿠로시오해역의 해수면 상승에는 밀도변화 성분(물기동내 열과 염분의 변화에 의한 밀도 변화와 그에 동반하는 체적 및 해수면 변화 성분)이 주를 이루고, 황해와 동중국해 및 동해 지역은 주로 밀도변화외 성분(해수의 수렴/발산과 육상과 대기로부터의 담수 유입에

의한 해수면 변화 성분)이 기여한 것으로 나타났다.

이 두 해수면 변동 기여 성분들이 시간에 따라 어떻게 변화했는지를 보기 위하여 모델의 각 해수면 변동 성분들의 영역 평균된 시계열을 살펴보았다. 그림 3.3.9의 상단과 중단 및 하단은 각각 동해와 황해 및 동중국해의 영역 평균된 밀도변화 성분(연두색)과 밀도변화외 성분(빨간색) 및 전체 월평균 해수면(파란색)의 시계열로서, 두 해수면 기여 성분에 각각 1958년 1월의 전체 해수면 값을 더하여 나타났다. 그림 3.3.9에서 밀도변화 성분은 각 해역 모두 열과 염의 계절변동 특성을 잘 드러내 보인다. 즉, 한반도 주변해역은 여름철에 표층해수의 가열과 저염화로 인해 해수의 밀도가 낮아져서 체적의 증가와 더불어 수층이 늘어나며 그와 관련된 해수면 성분이 증가하고, 겨울철에는 냉각 효과와 표층 저염분 해수의 쇠퇴로 인하여 하계보다 해수 밀도가 증가하고 수층이 감소하며 그 해수면 성분은 감소한다. 한편, 밀도변화외 기여성분은 밀도변화 성분과는 달리 계절안 변동 특성을 강하게 나타내는데, 수 주 ~ 수 개월 이내의 이벤트성 변동 특성을 보이는 듯하다. 지역해별로 보면, 동해는 1960년대 중반 이후로 가면서 밀도변화외 성분이 밀도변화 성분보다 더 커지며 또한 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 황해는 전 기간에 걸쳐 밀도변화외 성분이 밀도변화 성분을 상회하며, 동중국해는 밀도변화외 성분이 밀도변화 성분보다 상대적으로 더 작은 변동폭을 가진다. 황해와 동중국해도 동해와 마찬가지로 1960년대 중반 이후부터 최근 시기까지 밀도변화외 성분의 지속적인 증가 경향이 뚜렷하게 나타난다. 밀도변화외 해수면 성분의 증가 요인으로서 대상 해역으로 담수가 유입되는 경우나 또는 해류에 의한 해수 수송량이 증가하는 경우를 고찰할 수 있는데, 한반도 주변해에서 지속적인 담수 유입량의 증거가 별로 보고되지 않는 점을 고려할 때, 동중국해상으로 유입되는 아열대 난류수의 증가 가능성이 해수면 상승의 유력한 요인 중 하나로 여겨진다. 기후변동에 따른 이러한 난류수의 증가 가능성은 쿠로시오 해류와 PDO와의 상관성 및 쿠로시오 해류의 약화와 동중국해 해수면의 상승과의 역학 관계 등에 대한 근래의 연구들(Gordon and Giulivi, 2004; Han and Huang, 2008; Andres et al., 2009)을 통해 점차 제기되고 있다.

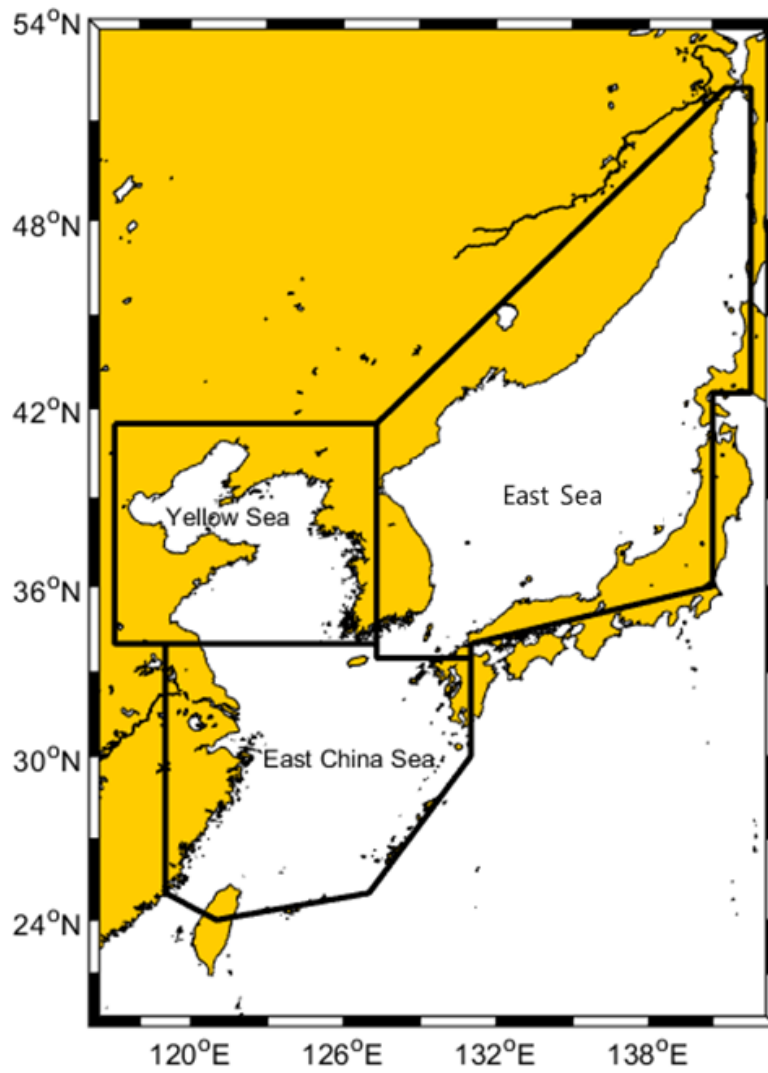


그림 3.3.3. 지역해 평균해수면 모의·분석을 위한 동해와 황해와 동중국해에 대한 지역 구분.

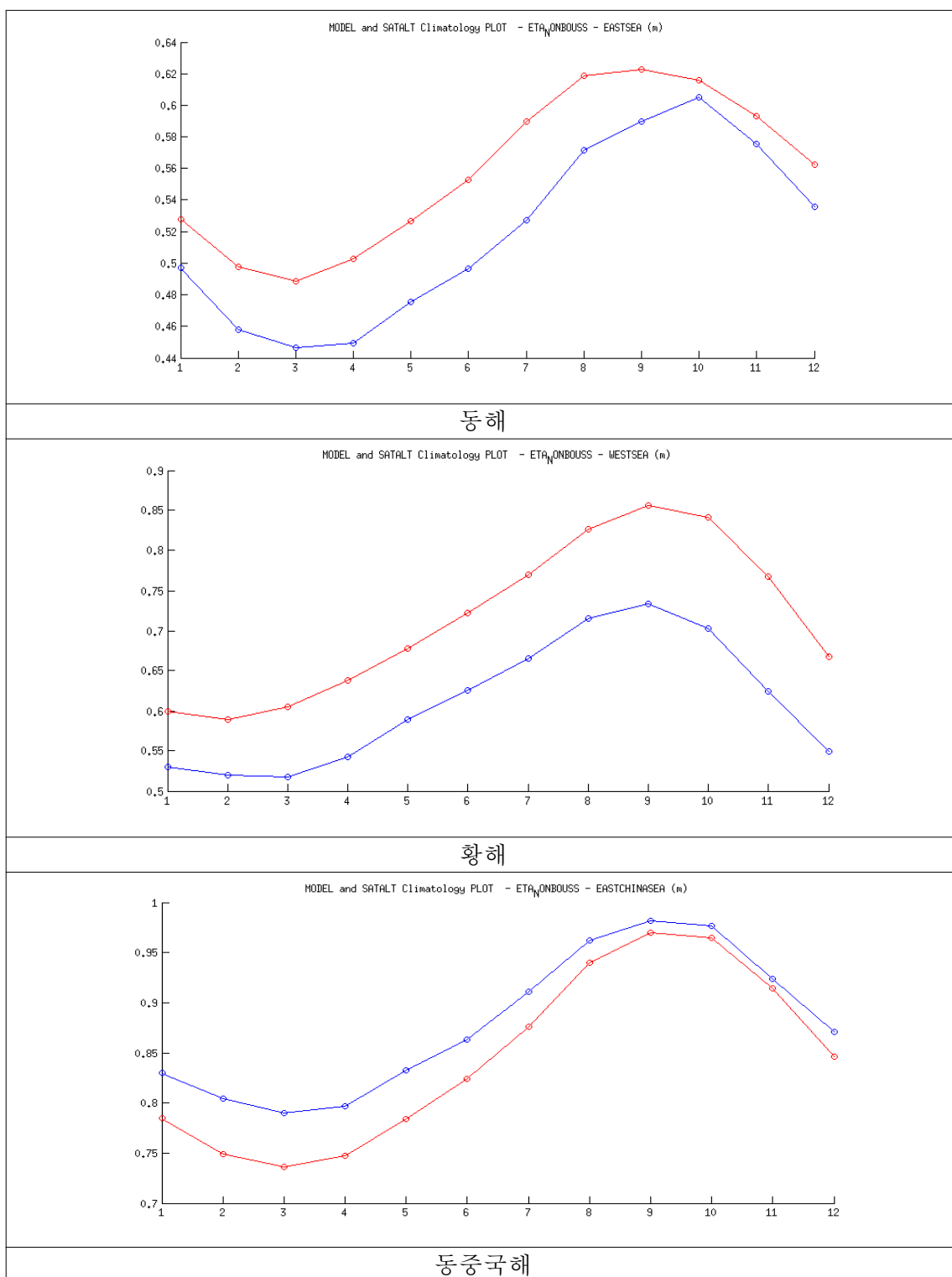


그림 3.3.4. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 지역 평균 및 장기 월평균 모델 해수면 변동(빨간색)과 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 장기 월평균 해면고도(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. (단위; m).

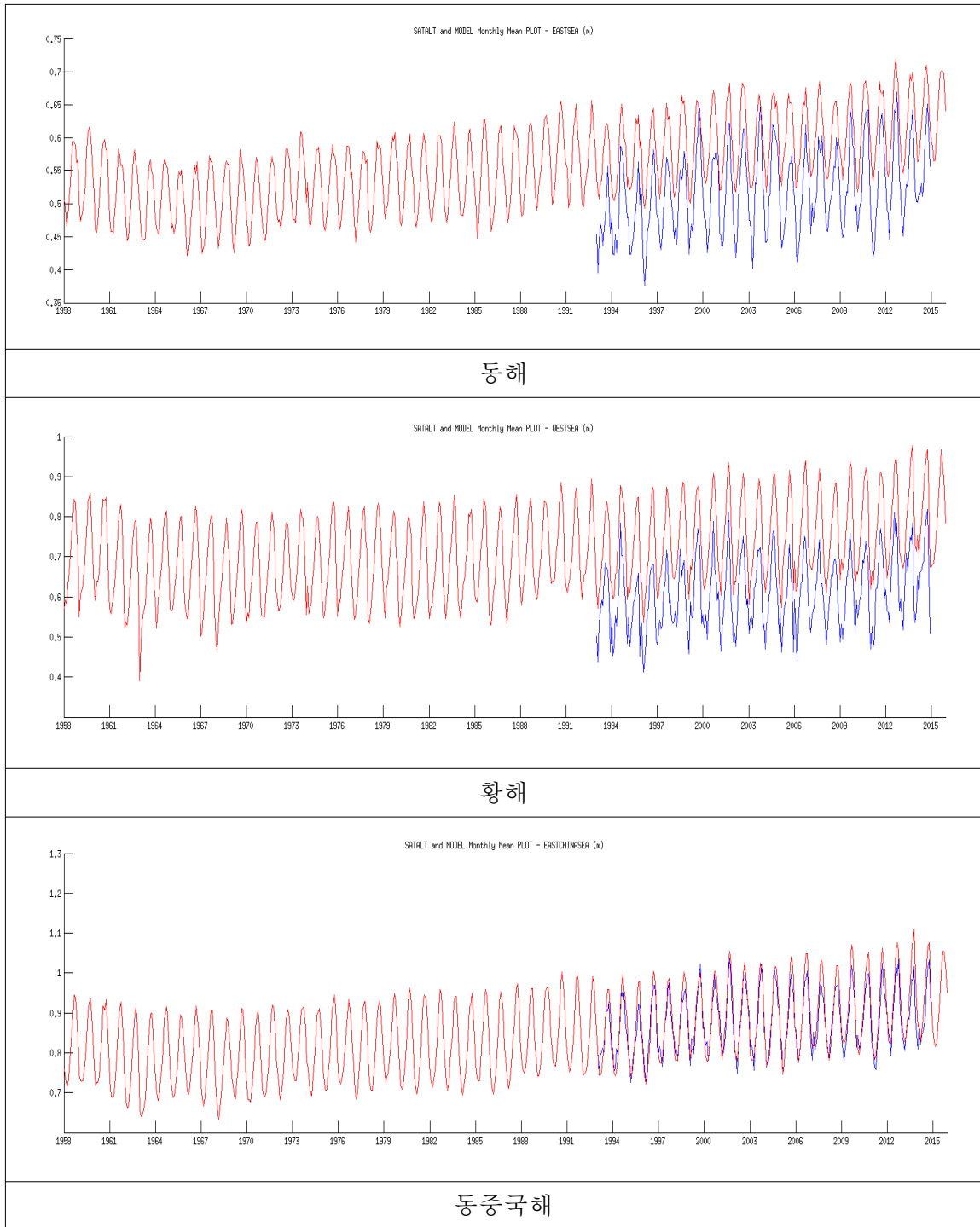


그림 3.3.5. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 지역 평균 및 월평균 모델 해수면 변동(빨간색)과 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 해면고도 변동(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. (단위: m).

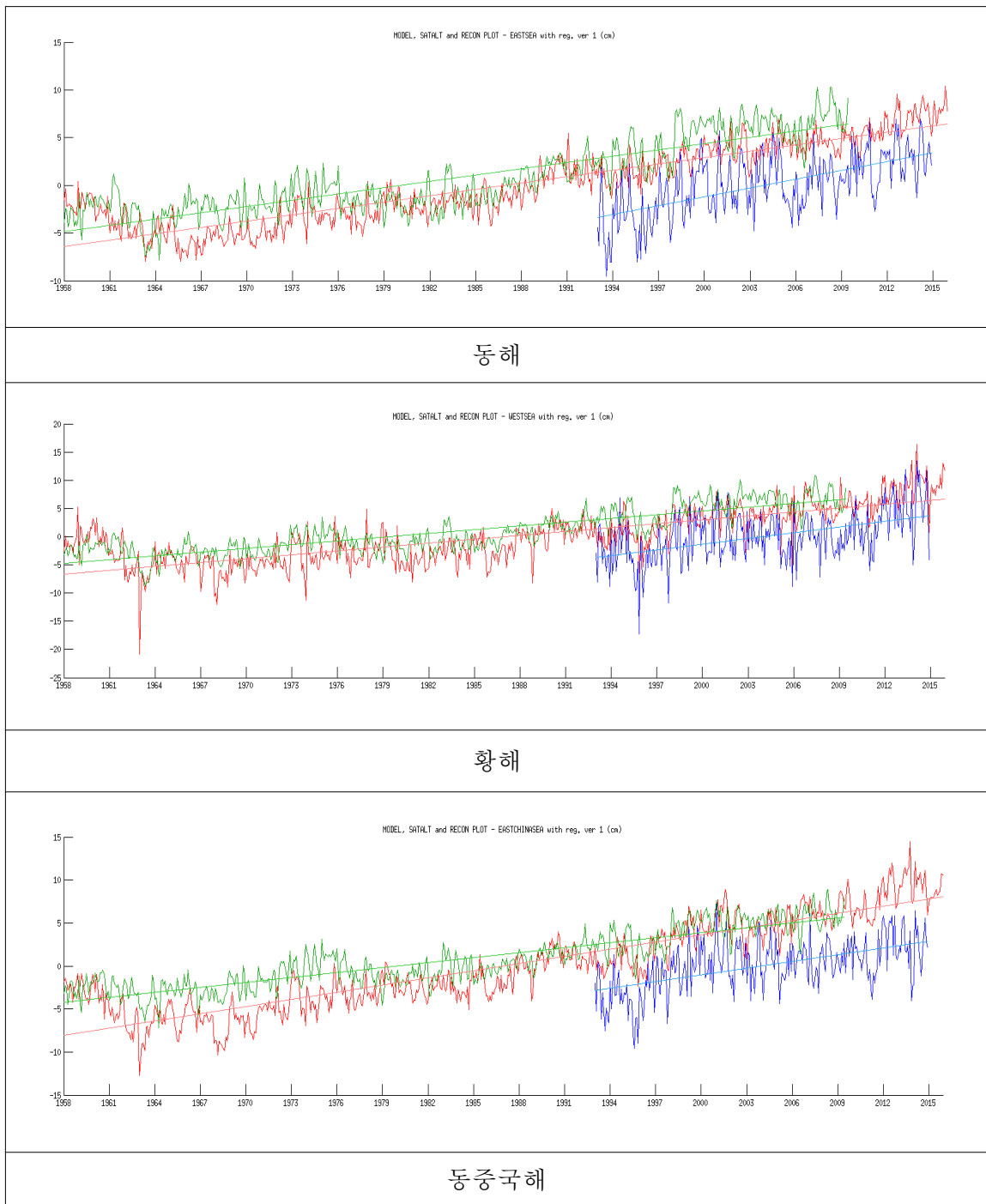


그림 3.3.6. ECMWF 기후강제력으로 모의된 1958-2015년 기간의 각 지역해별 월평균해수면 아노말리(빨간색)와 1958-2009년 기간의 복원해수면 월평균 아노말리(연두색) 및 1993-2014년 기간의 위성 고도계 자료에 의한 해면고도의 월평균 아노말리(파란색). (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해. 그림 내 직선들은 각각의 기간 동안 해수면 변화의 선형적 추세를 나타냄. (단위; cm).

표 3.3.1. 각각의 자료 전체 기간 및 공통 기간의 지역해별 해수면 상승률(단위; mm/yr).

해수면 자료	모델 해수면	복원해수면	위성고도계 해수면
동해 (기간/상승률)	(1958-2015) 2.2	(1958-2009) 2.2	(1993-2014) 3.1
	(1958-2009) 2.1	(1958-2009) 2.2	
	(1993-2014) 2.8		(1993-2014) 3.1
황해 (기간/상승률)	(1958-2015) 2.3	(1958-2009) 2.2	(1993-2014) 3.4
	(1958-2009) 2.1	(1958-2009) 2.2	
	(1993-2014) 3.8		(1993-2014) 3.4
동중국해 (기간/상승률)	(1958-2015) 2.8	(1958-2009) 1.9	(1993-2014) 2.6
	(1958-2009) 2.6	(1958-2009) 1.9	
	(1993-2014) 4.1		(1993-2014) 2.6

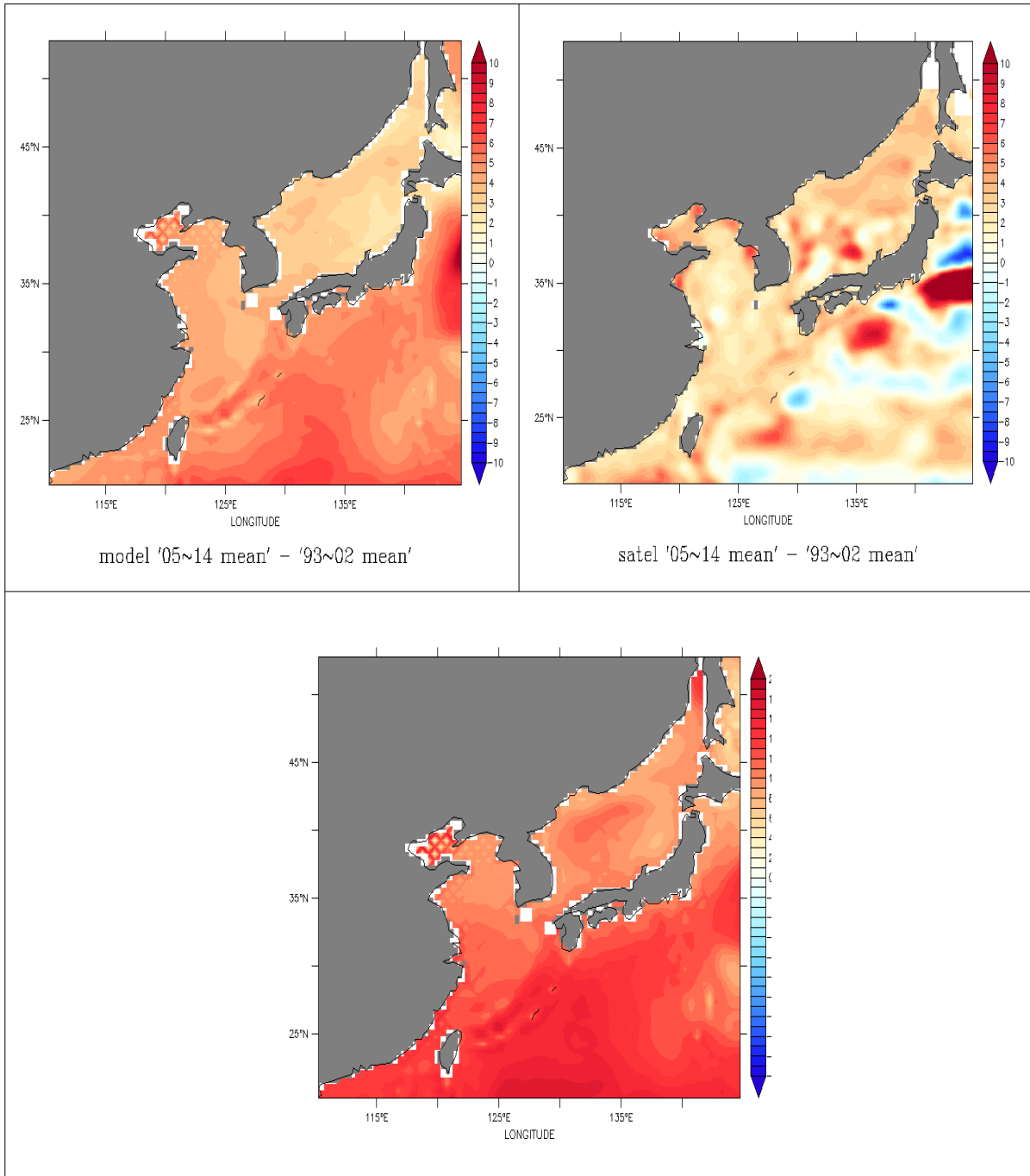
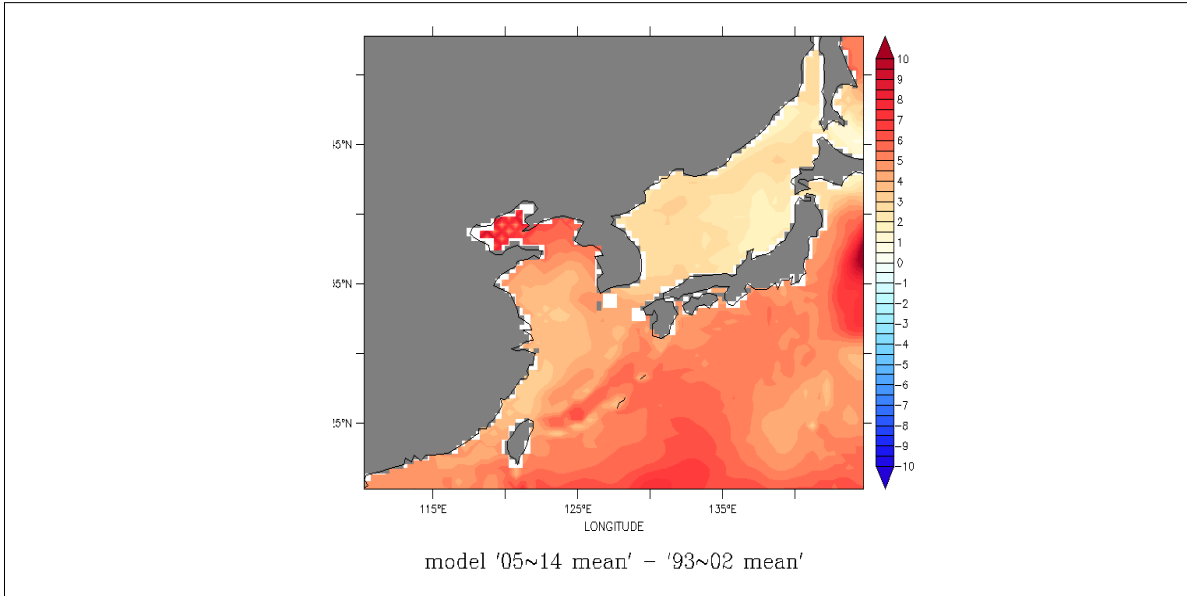
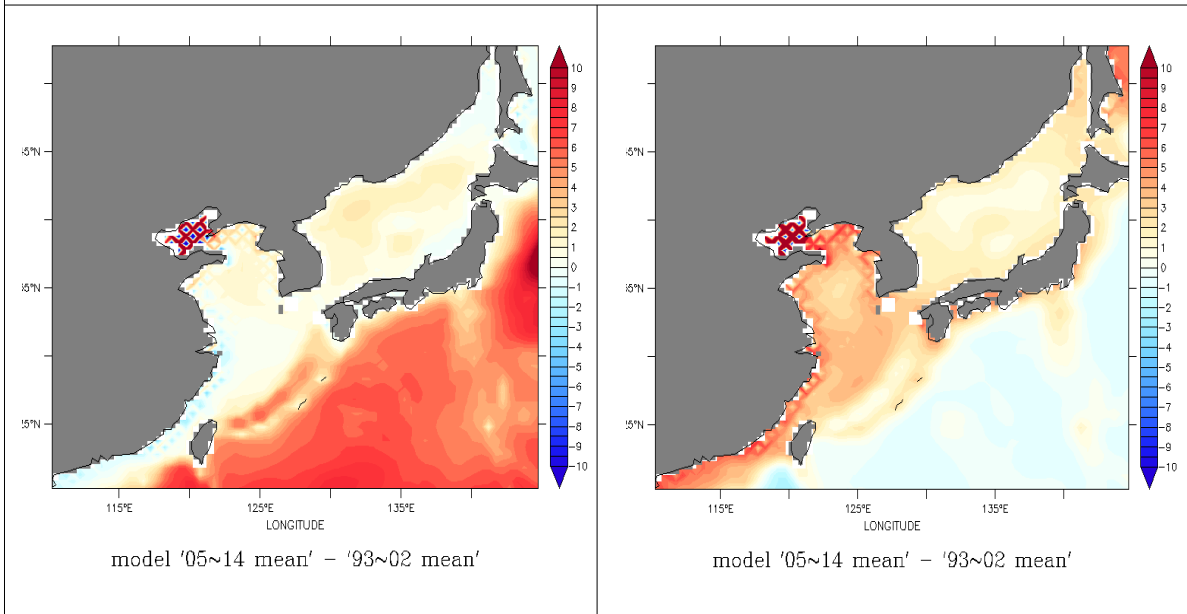


그림 3.3.7. 한반도 주변해의 각 기간 동안의 해수면 차이 공간 분포(단위; cm). 93-02년 대비 05-14년의 모형 해수면 차이(좌상단)와 위성관측 해수면 차이(우상단) 및 58-67년 대비 05-14년의 모형 해수면 차이(하단). 각각 10년 동안의 월평균해수면의 전체평균을 취하고 그 차이를 나타냈음.

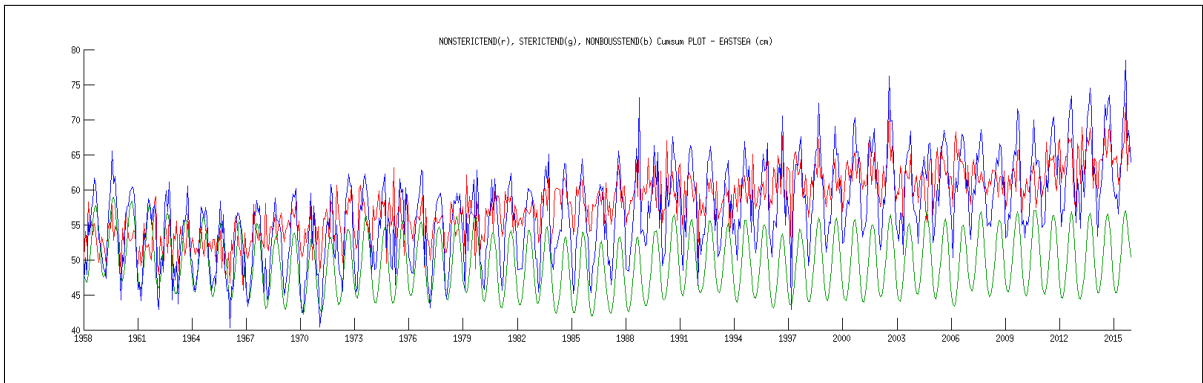


93~02년 대비 05~14년 기간의 전체 해수면 상승폭

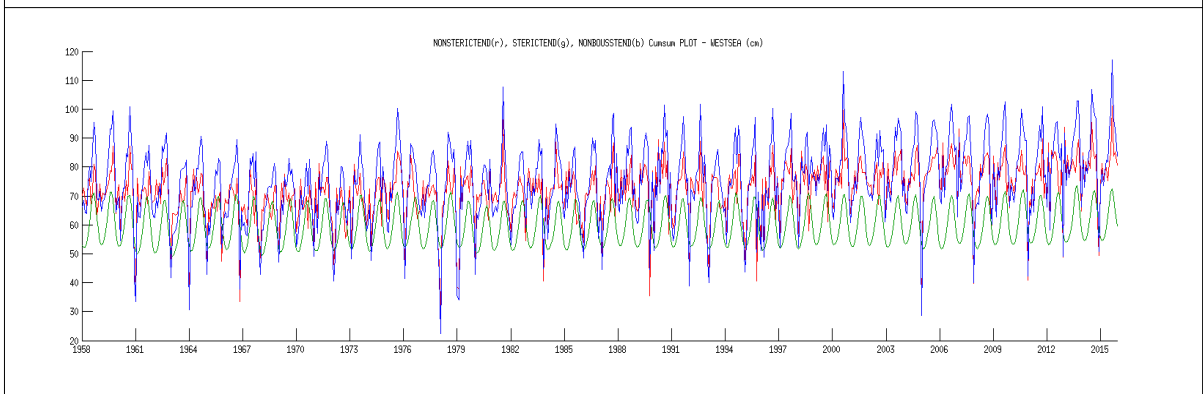


93~02년 대비 05~14년 기간의 밀도변화성 해수면 변화폭(좌)과 밀도변화의 해수면 변화폭(우)

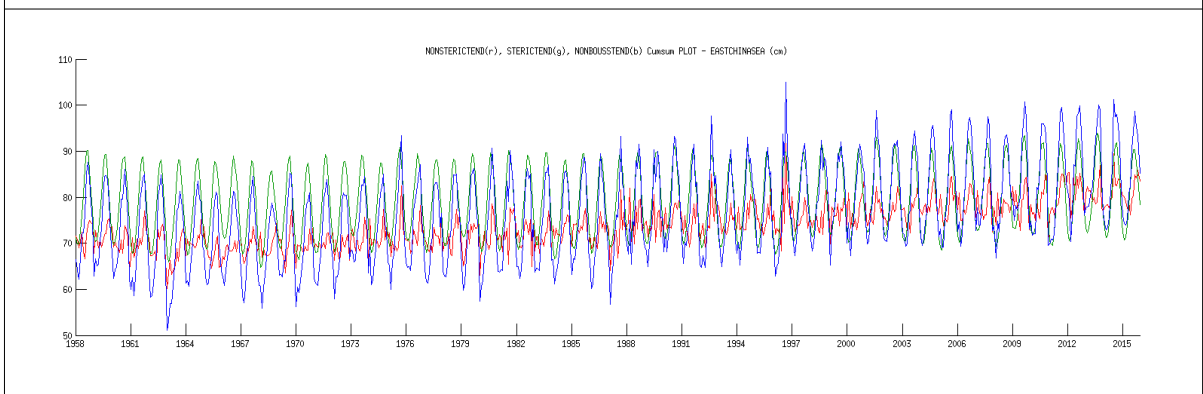
그림 3.3.8. 한반도 주변해의 93-02년 대비 05-14년 기간의 해수면 변동과 각 기여성분의 공간 분포(단위: cm). 각각 전체 해수면 차이(상단)와 밀도변화성 해수면 변화 성분(steric sea level, 좌하단) 및 밀도변화의 해수면 변화 성분(non-steric sea level, 우하단). 각 기간의 10년 평균을 취하였음.



동해의 각 성분별 해수면 변동과 전체 해수면 변동



황해의 각 성분별 해수면 변동과 전체 해수면 변동



동중국해의 각 성분별 해수면 변동과 전체 해수면 변동

그림 3.3.9. 동해(상단), 황해(중단)와 동중국해(하단)의 지역 평균된 월평균 해수면(파란색)과 밀도변화 성분(steric sea level, 연두색) 및 밀도변화의 성분(non-steric sea level, 빨간색)의 시계열. 두 해수면 기여 성분에 각각 1958년 1월의 전체 해수면 값을 더하여 표시하였음. (단위; cm).

4. 해표면수온 및 해표면염분 변동 특성 모의

가. 실험 방법

한반도 주변해역의 지난 수 십 년 기간의 해표면수온과 해표면염분의 변동을 모의하고 고찰하였다. 이 모의 결과는 앞서 실험한 과거 해수면 변화 재현실험에서 해수면과 함께 모의된 전지구 해표면수온과 해표면염분이며, 따라서 사용한 입력자료와 실험 방법도 과거 해수면 변화 재현 실험의 경우와 동일하다.

나. 결과

그림 3.3.10은 위로부터 각각 1958-2015년 기간의 영역 평균된 월평균 표면수온과 연평균 표면수온의 시계열, 표면수온 연주 변화 및 월평균 표면수온 아노말리의 시계열로서 동중국해를 한 예로 하여 모델(빨간색)과 관측자료(파란색)를 비교한 것이다. 관측자료는 영국 기상청 제공 EN4(<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>)를 사용했다. 동중국해의 경우 관측과 비교하여 모델의 장기 월평균 표면수온은 약 1.5도의 차이를 보이나 전반적으로 표면수온의 연주 변화를 잘 모의하고 있으며, 연평균 표면수온의 연별 변동도 관측에서 나타나는 변동 패턴을 매우 잘 모사하고 있다. 모델의 표면수온 아노말리는 관측보다 크기가 다소 작게 모의되었지만 전반적으로 각각의 이벤트들을 잘 포착하고 있다. 연평균 표면수온과 표면수온 아노말리 모두에서 동중국해에서 중장기적인 상승 경향이 있음을 관찰할 수 있다.

그림 3.3.11은 위로부터 각각 1958-2015년 기간의 영역 평균된 월평균 표면염분과 연평균 표면염분의 시계열, 표면염분 연주 변화 및 월평균 표면염분 아노말리의 시계열로서 역시 동중국해를 예로 하여 모델(빨간색)과 관측(EN4 자료, 파란색)을 비교한 것이다. 모델에서 표면염분의 경우, ECMWF 재분석자료의 염분을 표층에 60일의 완화 시간을 주고 복원조건으로 부여해주었는데, 모델에서 실제 모의된 결과는 EN4 관측과 비교하여 그 계절변화 폭이 반 정도로 작게 나타나는 상이점을 보였다. 장기 월평균 표면염분의 경우도 모델의 진폭이 관측에 비해 상당히 완화된 값을 보여주며, 관측의 아노말리에서 보이는 경년변동 특성도 모델에서는 더 완화된 형태로 모의되었다. 그러나 모델의 연변동 패턴은 관측의 연변동 특징을 양호하게 모의하고 있는 것으로 보인다.

각 지역해별로 모델과 관측의 표면수온과 표면염분의 각 기간에 대한 선형적 변화율을 산정하고 비교했다(표 3.3.3). 동중국해에서 관측과 모델 모두

표면수온의 상승이 나타난데 비해 동해와 황해에서는 모델의 표면수온이 관측과 달리 하강하는 변화율을 나타냈다. 이는 동해와 황해의 모델 모의 결과에서 지역적으로 표면수온이 상승하는 변화율을 나타낸 곳들이 있음과 함께 하강하는 지역들도 존재하여 지역해 전체 평균으로는 음의 변화율로 대표되어진 때문이다. 또한 기존 연구들로부터 계절적으로 표면수온의 상승 혹은 하강 추세가 달리 나타나는 것으로 알려져 있기 때문에 추후 분석시에는 각 계절별로 구분하여 추세 분석을 수행할 필요가 있다. 한편, 표면염분에 있어서는 모델 결과가 모든 지역해에서 음의 변화율을 나타낸 반면 관측에서는 동중국해에서만 모델과 같은 음의 변화율을 나타냈다. 한반도 주변해역의 해수 특성에 대한 모델의 전반적인 모의 성능을 고찰해 볼 때 현재의 해양-해빙결합모델의 0.5도 해상도로는 각 지역해의 과거 수온과 염분 변동을 정도 높게 재현하기에는 여러 제약이 따르는 것으로 판단된다. 이는 지금의 모델 내에 황해 내측의 발해만 부근에 2 격자 불안정이 발생하는 점과 동해의 중규모 에디 모사가 충분하지 못한 점 및 대마난류 분지류들의 사실적인 묘사 한계성 등의 문제점들이 존재하기 때문이다. 그러나 이에 비해 모델의 지역 평균 해수면 변동에는 수온과 염분이 수심 적분되고 중장기적으로 누적되는 효과가 들어가기 때문에 관측 해수면과의 비교에서 수온과 염분의 경우보다는 더 좋은 모의 성능을 보이는 것으로 판단된다.

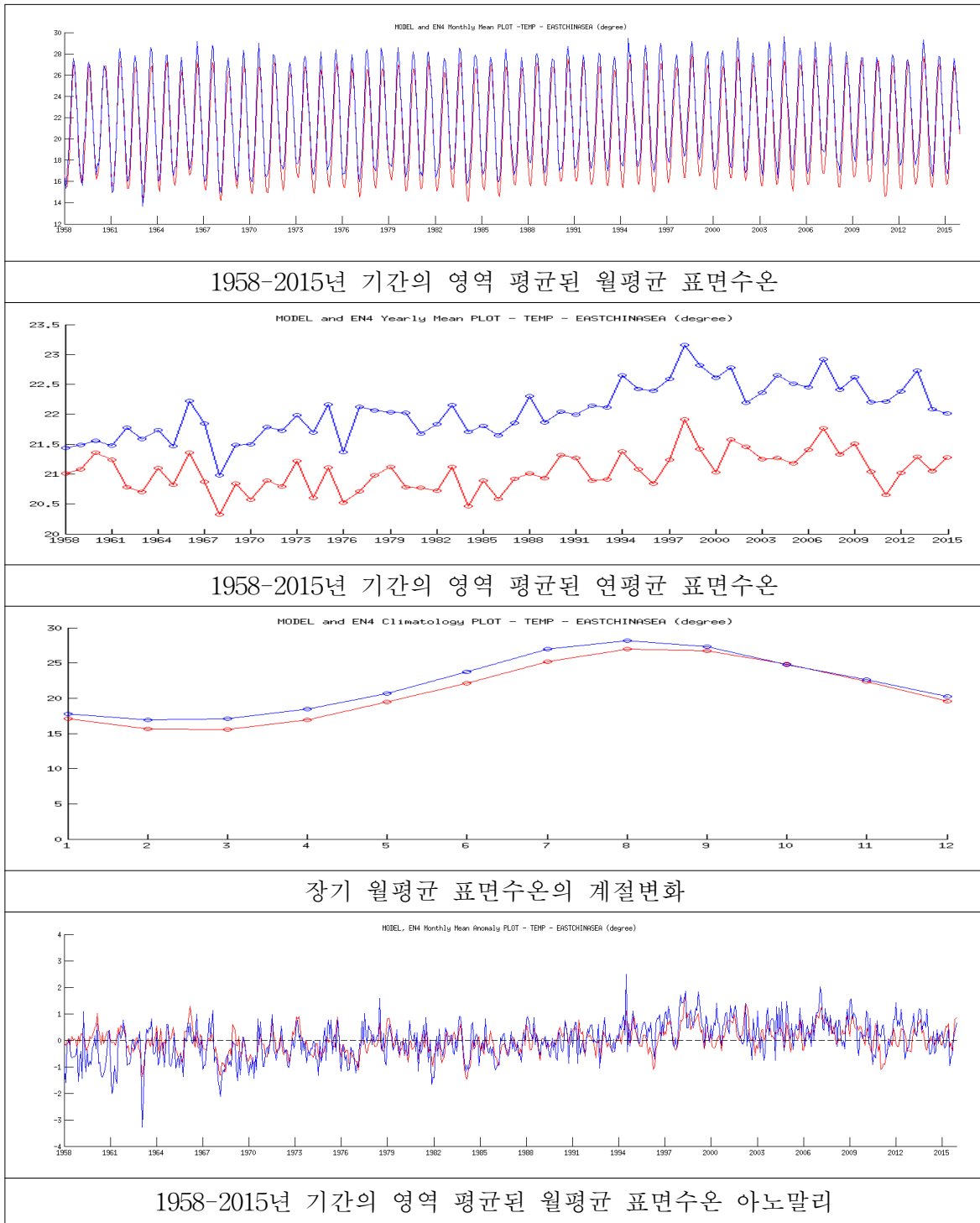
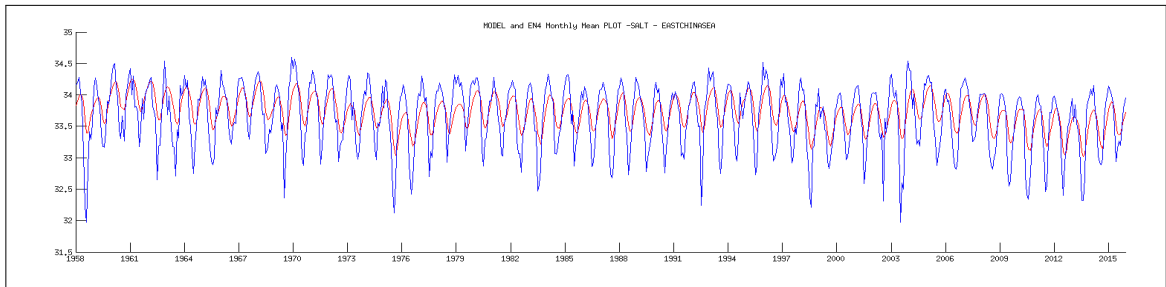
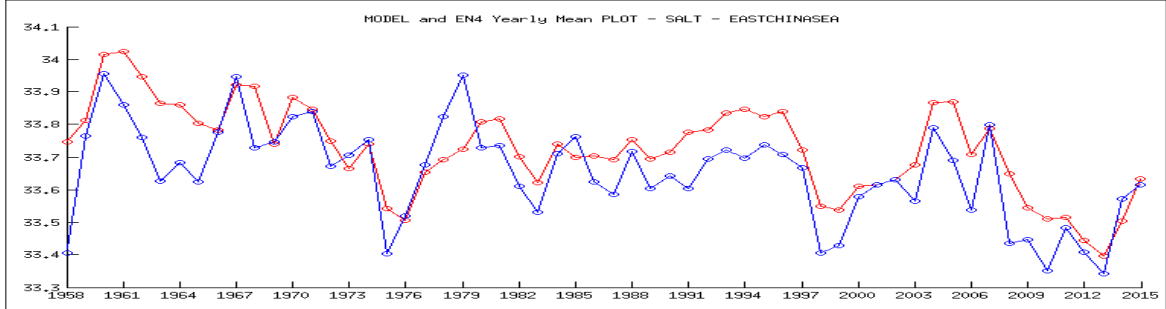


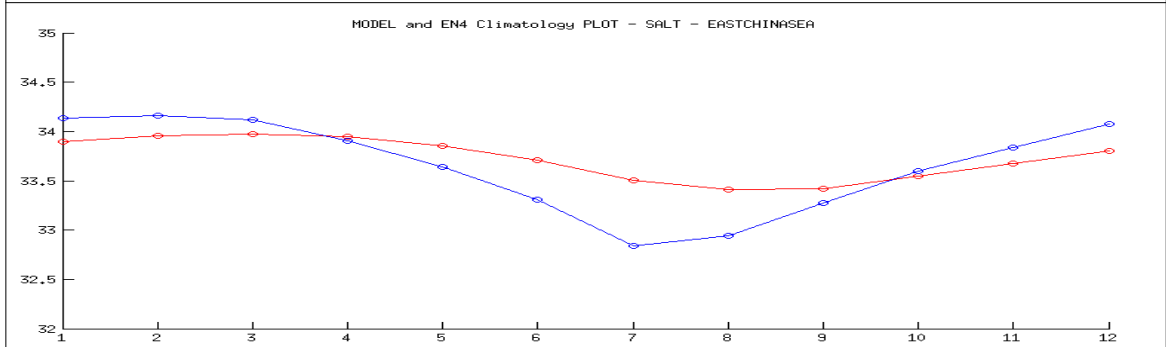
그림 3.3.10. 동중국해의 영역 평균된 월평균 표면수온과 연평균 표면수온, 장기 월평균 표면수온 및 표면수온의 월평균 아노말리(모델-빨간색, 관측-파란색, 단위: °C).



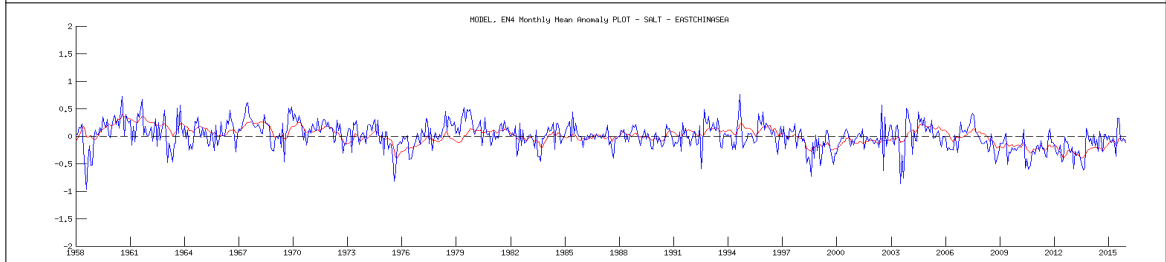
1958-2015년 기간의 영역 평균된 월평균 표면염분



1958-2015년 기간의 영역 평균된 연평균 표면염분



장기 월평균 표면염분의 계절변화



1958-2015년 기간의 영역 평균된 월평균 표면염분 아노말리

그림 3.3.11. 동중국해의 영역 평균된 월평균 표면염분과 연평균 표면염분, 장기 월평균 표면염분 및 표면염분의 월평균 아노말리(모델-빨간색, 관측-파란색).

표 3.3.3. 1958-2015년 기간의 각 지역해별 모델과 관측의 표면수온과 표면염분 변화율.

지역해	표면수온(°C/yr)		표면염분	
	모델	관측(EN4)	모델	관측(EN4)
동해	-0.0003	0.0132	-0.0019	0.0003
황해	-0.0060	0.0096	-0.0035	0.0001
동중국해	0.0082	0.0204	-0.0049	-0.0045

5. 미래 해수면 변화 예측실험

가. 실험 방법

지구온난화에 따른 한반도 주변해역의 미래 해수면 변화를 예측하기 위하여 본 연구에서는 전지구 해양-해빙결합모델(MOM5-SIS)과 미래 기후변화강제력을 사용하여 해수면 변동 실험을 수행하였다. 전지구 해양-해빙결합모델은 기후평균 해수면 모의와 과거 해수면 변화 재현실험 등에서 사용한 모델과 동일한 구성의 모델이며, 다만 사용한 외부강제력 측면에서 앞서의 실험들과 차이가 있다. 즉, 질량 보존형 비부씨네스크 모델로서 전지구 해양을 포함하며 공간적으로 0.5도 해상도의 격자간격을 가진다. 초기조건으로 WOA98의 1월 수온과 염분을 사용하고, 표면경계조건으로 CORE 기후평균강제력(Large and Yeager, 2004)을 적용하여 500년간 적분한 후, 이 500년 적분된 최종 결과를 미래 기후변화 예측 실험을 위한 모델 초기순환장으로 사용하였다.

해수면의 미래 예측실험은 두 부분으로 이루어졌는데, 먼저 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project 5) 기후변화실험의 기후강제력 조건을 적용하여 1951년-2005년 기간 동안 과거 해수면 재현실험을 수행하고, 이어 2006년-2100년 기간 동안 RCP 4.5 시나리오에 기반하여 미래 변화 예측실험을 수행하였다. 이 연구에서는 미래 해수면 예측 결과의 양상불 평균을 위하여 CMIP5 지구시스템모델들 가운데 복수의 모델들을 택하였고, 그 지구시스템 모델들의 해양-대기 출력 상태변수들을 각각 본 실험의 기후강제력으로 삼았다. 우리가 선택한 지구시스템모델들은 GFDL ESM2M과 MPI-ESM-LR로서 이 지구시스템모델들은 테일러 다이어그램 분석을 통해 각각 해표면수온과 염분의 재현 성능이 관측과 비교해 양호한 것으로 평가된 모델들 가운데 선정한 것이다. CORE 기후평균강제력으로 500년간 적분되어진 초기 해양순환장이 GFDL ESM2M과 MPI-ESM-LR의 기후강제력으로 갑자기 전환되어 구동될 때 생겨날 수 있는 적분 초기의 충격과 모델 불안정을 줄이기 위해 과거 해수면 재현실험에서와 같이 모델의 초기 순환장은 500년 적분된 해양순환장의 수온과 염분만을 사용하였고, 유속과 해수면은 제로의 값으로부터 시작하였다. 모델에 적용한 두 지구시스템모델들의 기후강제력 변수들은 표 1에 제시된 CORE 기후강제력 변수들과 동일한 단위와 시간 간격으로 변환되어 입력되었다. 모델의 표면염분에 대하여는 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR에서 각각 모의된 매월의 표면염분을 60일의 시간규모로 완화되도록 하는 복원조건을 사용하고 각 시간스텝으로 보간하여 주었다. 모델 표층을 통한 담수속은 앞서의 과거 해수면 변동 모의실험에서와 같이 ‘강우-

증발+하천수 유입+염분 복원조건에 의한 가상 담수속'으로 주어지며, 이 담수속의 전지구 평균값이 제로가 되도록 매 시간스텝마다 각 격자점에서 정규화하였다.

나. 결과

(1) 지구시스템모델의 기후강제력에 기반한 과거와 미래 해수면 변화 모의 분석
1951-2005년 기간의 과거 실험과 RCP 4.5 기후변화 시나리오에 따른 2006-2100년의 미래 예측실험을 통해 산출된 지구시스템모델의 기후강제력을 외력으로 하여 전지구 해수면 변화를 모의하고 한반도 주변해역의 해수면 변화에 대하여 분석하였다. 이 때 모델 해양이 초기 충격으로부터 안정화되는 시간을 고려하여 1958년부터의 모의 결과를 가지고 분석에 사용하였다.

그림 3.3.12는 GFDL-ESM2M의 기후강제력으로 모의된 1951-2100년 기간의 각 지역해 평균해수면의 월평균 아노말리를 나타낸 것이다. 계절변화가 제거되었으나 수년 규모의 짧은 경년 변동과 더불어 10년 규모의 변동 시그널도 내재되어 있음을 볼 수 있다. 직선으로 나타낸 것은 선형의 추세선으로, 1958-2005년 기간 동안 동해와 황해, 동중국해 모두 해수면이 상승한 경향을 나타낸다. 2006년 이후의 RCP 4.5 시나리오에 기반한 해수면 상승 경향을 살펴보면 1958-2005년 기간의 해수면 상승에 비해 2006-2100년 기간의 해수면 변화가 더 가파른 상승 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

GFDL-ESM2M에서 모의된 해수면 변화를 각각의 기여 성분으로 나누어 고찰하였다(그림 3.3.13). 황해와 동중국해의 경우 전체 해수면 상승(그림에서 파란색 선)을 주도하는 성분은 밀도변화의 해수면 변화 성분(빨간색 선)으로서 이 성분은 질량의 수렴과 해면을 통한 담수의 유입이 해수면의 증가를 가져옴을 나타낸다. 반면, 밀도변화성 해수면변화 성분(연두색 선)은 상대적으로 그 변화 경향이 매우 작다. 그러나 동해의 경우는 황해 및 동중국해와 달리 밀도변화성 해수면변화 성분의 기여가 밀도변화의 해수면 변화 성분의 기여보다 훨씬 더 크다. 이 밀도변화성 해수면 변화는 수온의 증가나 염분의 감소에 따른 해수 밀도의 감소와 그로 인한 해수 체적과 해수면의 증가를 나타낸다.

그림 3.3.14는 MPI-ESM-LR의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 각 지역해 평균해수면의 월평균 아노말리를 나타낸다. GFDL-ESM2M과 비교해 볼 때 1958-2005년 기간 동안 동해와 황해, 동중국해 모두 마찬가지로 해수면이 상승한 경향을 나타냈다. 미래 해수면 변화도 RCP 4.5 시나리오에 기반한 2006-2100년 기간의 해수면 상승률이 1958-2005년 기간의 과거 해수면

상승률에 비해 마찬가지로 더 높게 나타났다.

MPI-ESM-LR에서 모의된 각 지역해 평균해수면의 변화를 각각의 기여 성분으로 나눈 결과를 보면(그림 3.3.15), GFDL-ESM2M과 마찬가지로 미래 해수면 변화에서 황해와 동중국해의 해수면은 밀도변화외 해수면변화 성분(빨간색 선)이, 동해에서는 밀도변화성 해수면 변화 성분(연두색 선)이 각각 전체 해수면의 증가에 주요하게 기여하는 것으로 나타난다. 그러나 1958-2005년 기간의 과거 해수면 변화에서 동해의 해수면 증가에는 GFDL-ESM2M의 경우와 달리 밀도변화의 성분이 더 많이 기여한 것으로 나타났다.

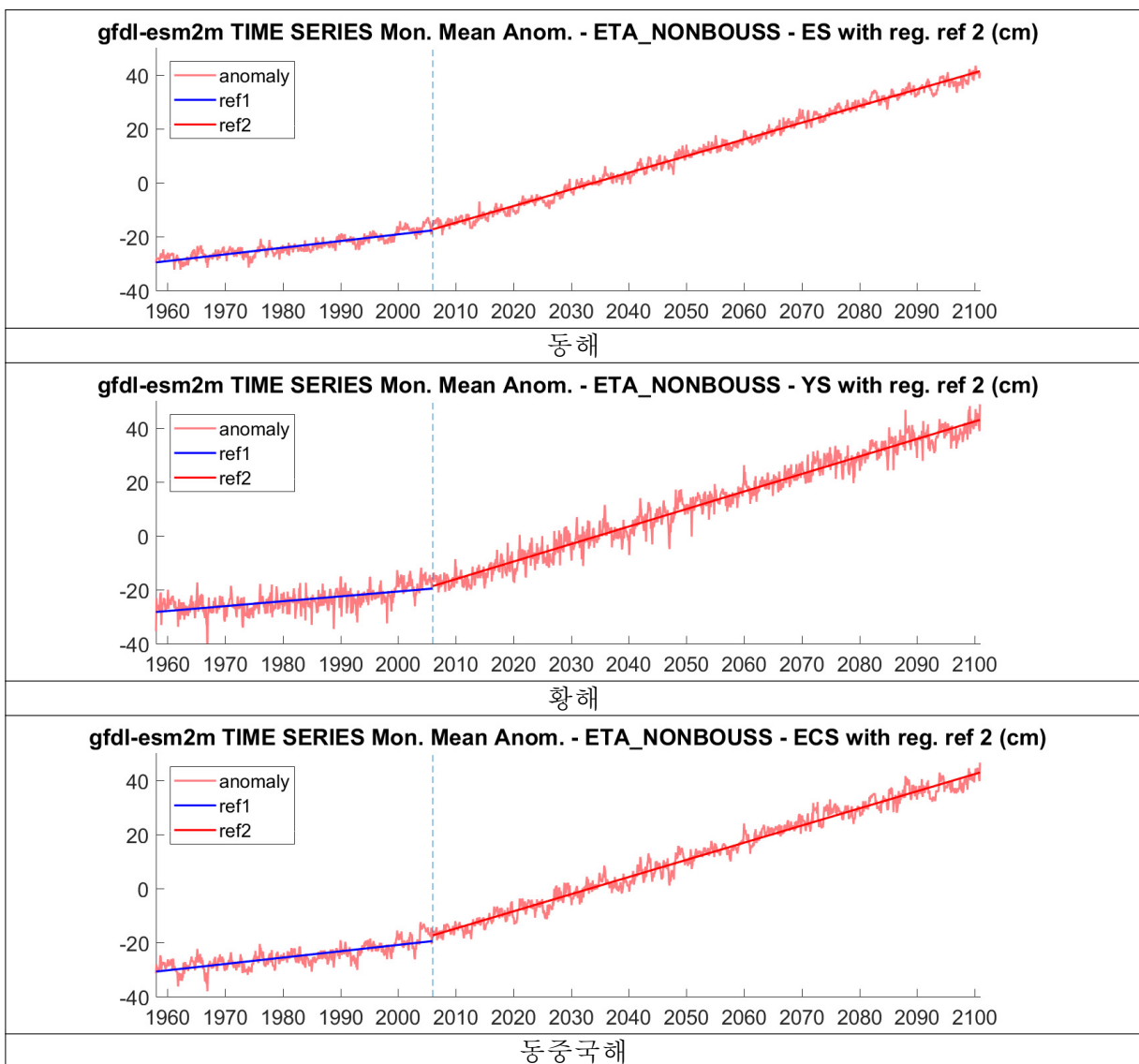


그림 3.3.12. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균 해수면의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선을 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm).

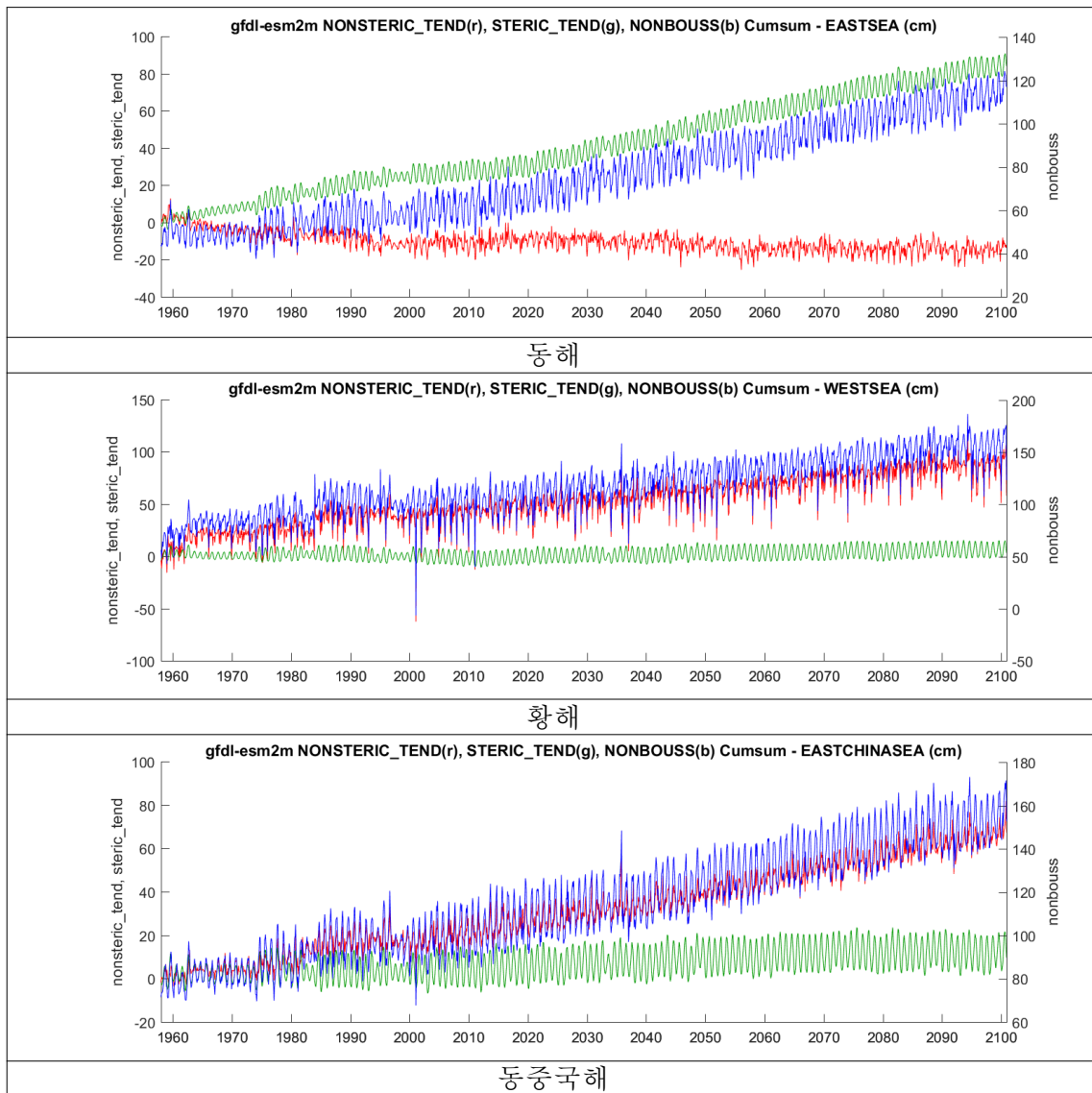


그림 3.3.13. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면에 대한 각 기여성분들. 빨간색- 밀도변화의 성분, 연두색- 밀도 변화 성분, 파란색- 전체 해수면. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm).

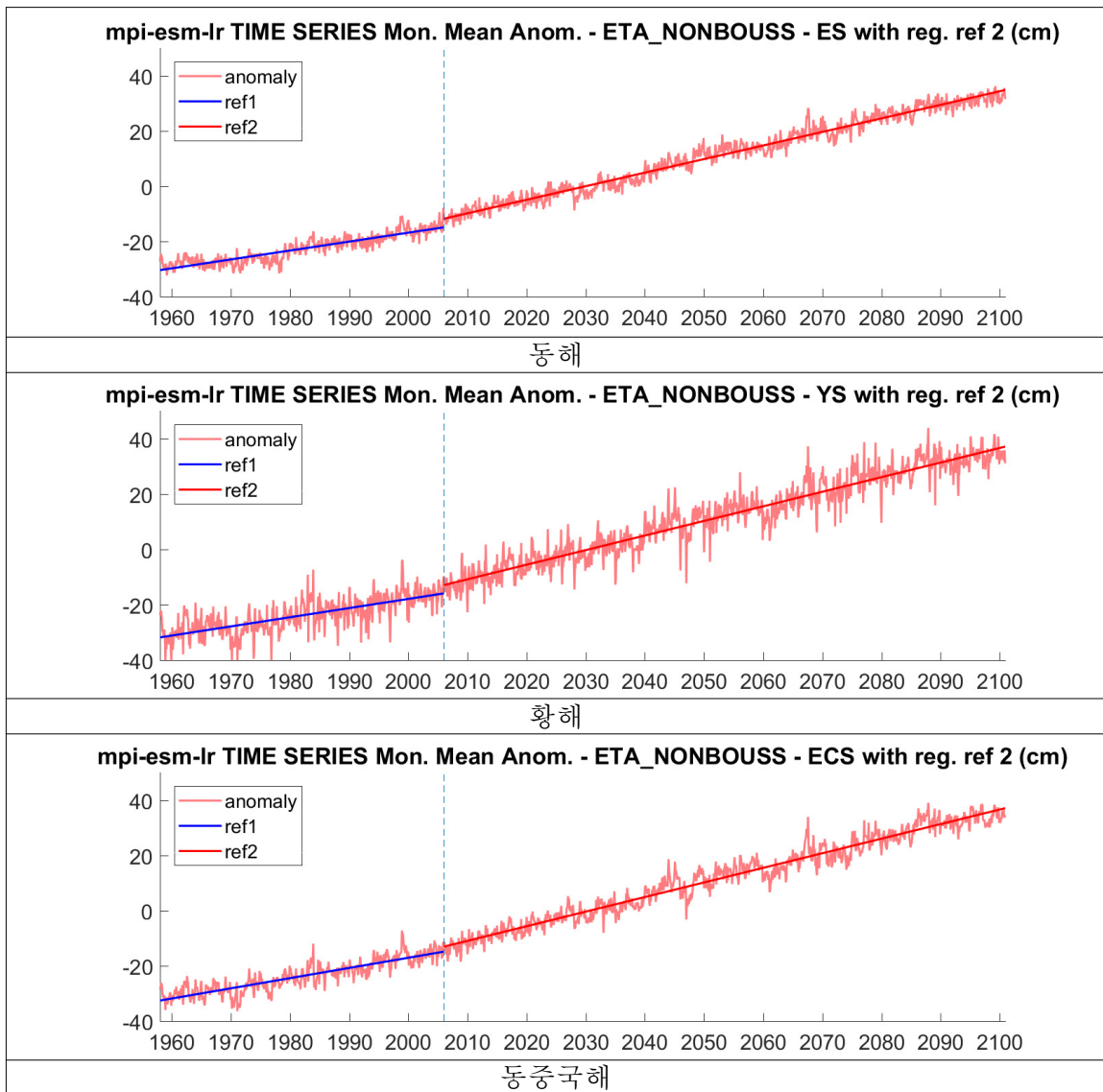


그림 3.3.14. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선을 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위; cm).

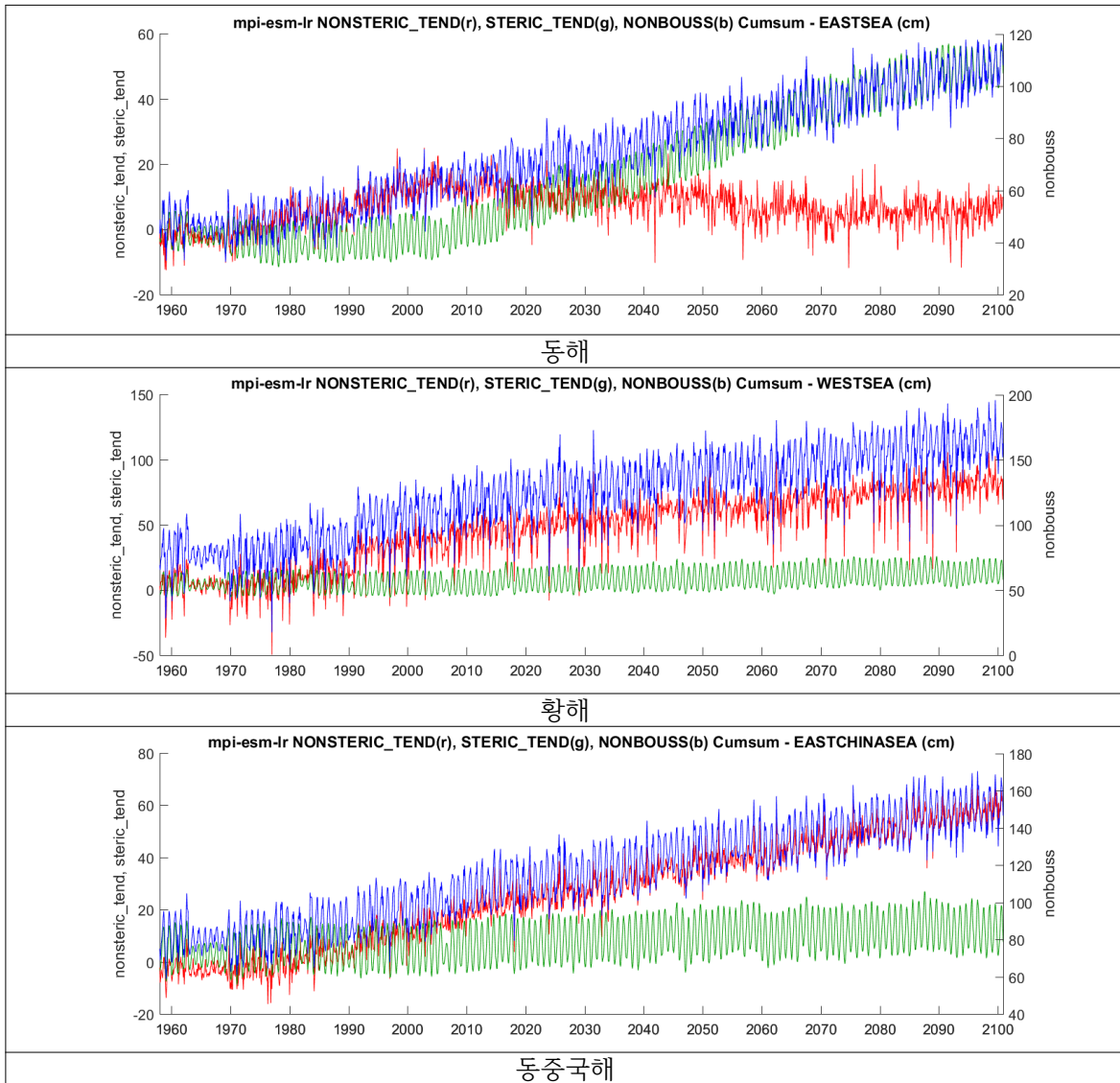


그림 3.3.15. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 평균해수면에 대한 각 기여성분들. 빨간색- 밀도변화의 성분, 연두색- 밀도변화 성분, 파란색- 전체 해수면. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위: cm).

(2) 미래 해수면변화 전망

앞 절에서 구한 각 지역해의 해수면 변화 선형 추세(그림 3.3.12, 그림 3.3.14)에 기초하여, 한반도 주변해역에서 RCP 4.5 시나리오에 기반한 미래 해수면 상승률(mm/yr)을 표 3.3.4에서와 같이 제시하였다. 비교를 위하여 1958-2005년 기간 동안의 과거 해수면 변화율도 같이 나타냈다. GFDL-ESM2M의 경우, 지역해 전체적으로 2006-2050년 기간과 2006-2075년 기간의 해수면 상승률은 6.2~6.7 mm/yr이며, 2006-2100년 기간에는 그보다 약간 더 낮아진 6.2~6.5 mm/yr의 크기를 나타낸다. 그에 비해 MPI-ESM-LR의 경우는 2006-2050년 기간과 2006-2075년 기간에 4.9~5.6 mm/yr의 해수면 상승률 범위를, 2006-2100년 기간에는 5.0~5.3 mm/yr의 상승률을 나타내며 GFDL-ESM2M보다 전반적으로 1 mm/yr 정도 더 작은 값을 모의하는 것으로 나타났다. 미래 기간의 해수면 상승률은 두 예측실험의 경우 모두 과거 기간(1958-2005년)보다 현저히 높아진 값으로 기후변화에 따라 미래 시기에 해수면 상승이 가속화될 것임을 시사한다.

표 3.3.5는 표 3.3.4의 각 지역해 평균해수면 상승률에 기초한 해수면 상승폭(cm)을 나타낸다. GFDL-ESM2M의 경우, 2006-2100년 기간 동안 우리나라 주변해의 평균해수면 상승폭은 59~62 cm에 이르며, MPI-ESM-LR의 경우는 GFDL-ESM2M에 비해 11~12 cm 정도 더 작은 값으로서 47~51 cm의 상승을 제시한다.

그림 3.3.16과 그림 3.3.17은 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 미래 기후변화 강제력을 기반으로 하여 예측된 2006-2050, 2006-2075, 2006-2095년 기간 동안의 우리나라 주변해의 해수면 상승을 각각 나타낸다. 두 모델의 경우 모두 황해와 동중국해에서 한반도 연안과 중국대륙 연안 및 발해만 내측이 황해 중부 및 동중국해 대륙붕 해역보다 해수면 상승폭이 조금 더 큰 것을 볼 수 있다. 동해에서는 대화퇴와 일본 열도 연안측에서 상대적으로 해수면 상승이 작고, 울릉분지와 대화분지 및 일본분지의 대륙사면측을 따라서 상대적으로 더 큰 상승을 보인다.

표 3.3.4. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 평균해수면 상승률 (mm/yr).

지역 (상승률: mm/yr)	Historical		RCP 4.5					
	(1958-2005)		(2006-2050)		(2006-2075)		(2006-2100)	
	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI
동해	2.47	3.23	6.23	4.91	6.25	5.00	6.18	4.98
황해	1.81	3.30	6.67	5.27	6.68	5.51	6.49	5.34
동중국해	2.35	3.68	6.38	5.28	6.59	5.59	6.33	5.33

표 3.3.5. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 평균해수면 상승폭 (cm).

지역 (상승폭: cm)	Historical		RCP 4.5					
	(1958-2005)		(2006-2050)		(2006-2075)		(2006-2100)	
	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI
동해	11.866	15.490	28.026	22.086	46.890	37.530	58.710	47.310
황해	8.698	15.840	30.024	23.706	50.130	41.310	61.674	50.730
동중국해	11.290	17.683	28.728	23.760	49.410	41.940	60.306	50.616

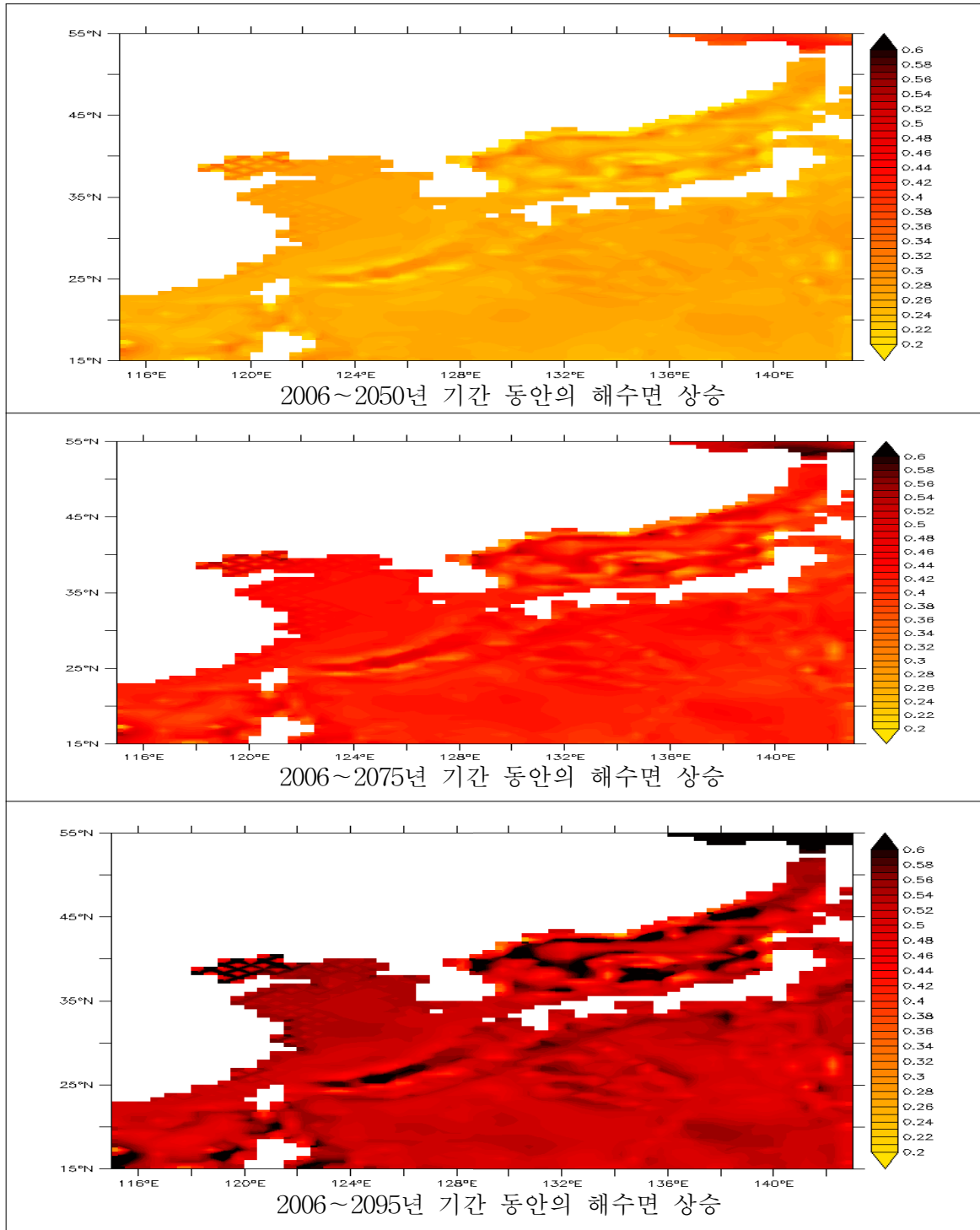


그림 3.3.16. GFDL-ESM2M의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 해수면 상승폭 (여기서 2006년은 2001-2010년 기간의 평균, 2050년은 2046-2055년 기간의 평균, 2075년은 2071-2080년 기간의 평균, 2095년은 2091-2100년 기간의 평균으로 정의하였음) (단위: m).

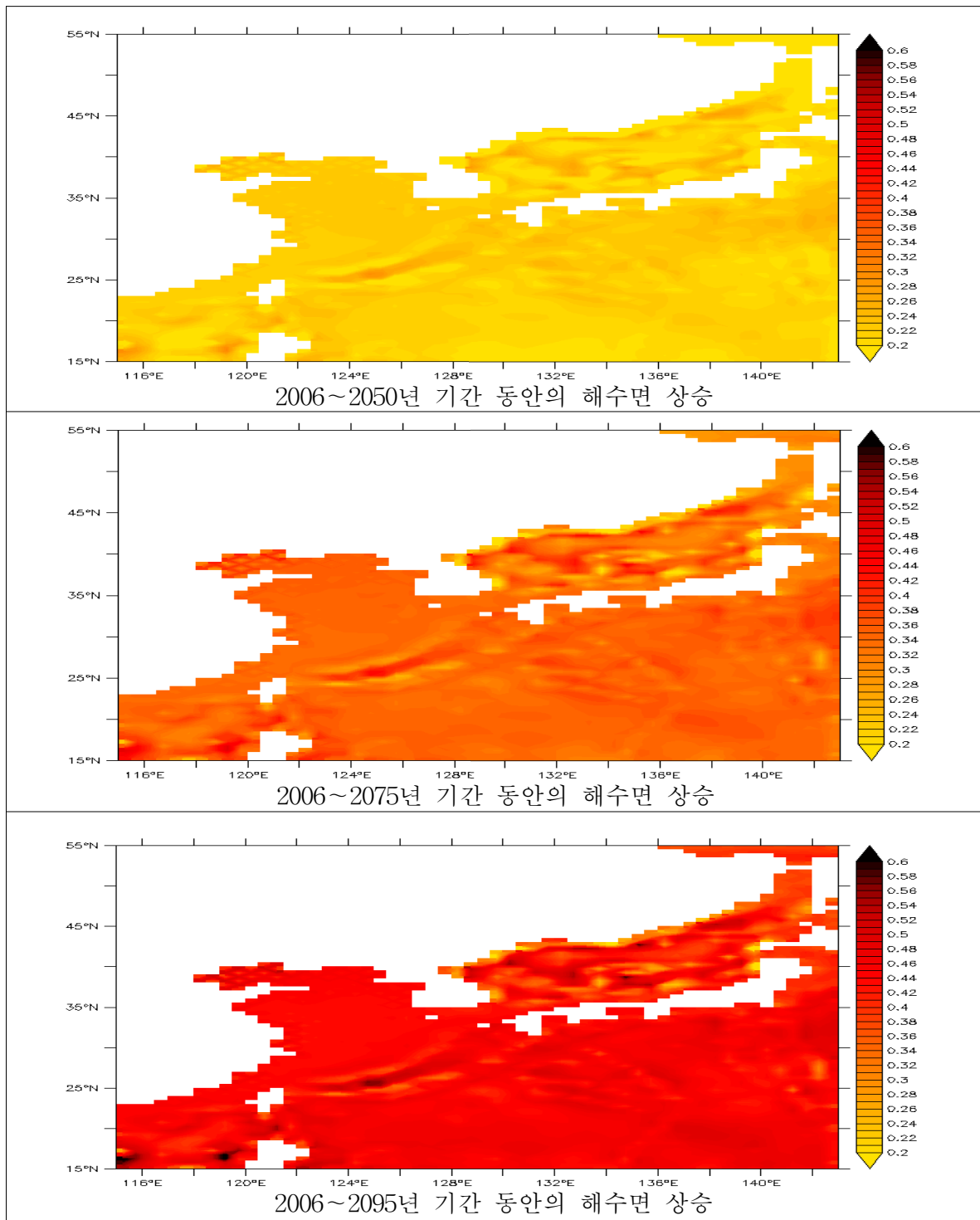


그림 3.3.17. MPI-ESM-LR의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 해수면 상승폭 (여기서 2006년은 2001-2010년 기간의 평균, 2050년은 2046-2055년 기간의 평균, 2075년은 2071-2080년 기간의 평균, 2095년은 2091-2100년 기간의 평균으로 정의하였음) (단위: m).

6. 미래 표층수온과 수송량 변화 예측실험

가. 실험 방법

지구온난화에 따른 한반도 주변해역의 미래 표층수온과 수송량 및 해류 변화를 예측하기 위하여 전지구 해양-해빙결합모델(MOM5-SIS)과 미래 기후변화강제력을 사용하여 해양 미래변화 예측 실험을 수행하였다. 미래 표층수온과 해류 모의 결과는 앞서 실험한 미래 해수면 변화 예측실험에서 해수면과 함께 모의된 전지구 해표면수온과 해류장이며, 따라서 사용한 입력자료와 실험 방법도 미래 해수면 변화 예측 실험의 경우와 동일하다.

나. 결과

- (1) 지구시스템모델의 기후강제력에 기반한 과거 표층수온 모의와 미래 표층수온변화 전망

그림 3.3.18과 그림 3.3.19는 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR 지구시스템 모델들의 기후강제력을 기반으로 하여 모의된 한반도 주변해의 표층수온 월평균 아노말리의 변동을 각각 나타낸다. 두 개의 기후 강제력 실험 모두 월평균 표층수온의 아노말리에는 짧은 주기의 경년변화와 10년 규모 변동성들이 과거 시기뿐만 아니라 미래 시기에도 나타나고 있다. 이와 더불어 선형의 추세선으로 표시한 바와 같이 중장기적인 수온 상승 추세도 내재되어 있음을 볼 수 있다. GFDL-ESM2M의 경우, 표층수온의 미래 변화 시기에서 황해와 동중국해의 중장기적인 수온 상승 추세가 2060~2070년대 이후로 줄어들거나 멈추는 듯한 경향을 보이며, 동해에서도 역시 비슷한 경향이 관찰된다. MPI-ESM-LR에서는 GFDL-ESM2M의 경우보다 수 십 년 규모 변동성의 신호가 더 크게 나타나며 대략 2070년대 이후로 수온의 상승 추세가 감소되는 경향이 관찰되는데, 그러한 감소 경향에는 자연변동성의 추세가 크게 영향을 미치는 것 같다. 두 실험에서 각각의 기간에 대해 추산된 선형의 수온 상승률을 표 3.3.6에 보였다. 2006-2100년 기간에 대한 표층수온 변화에서 두 모델 실험은 0.012~0.017 °C/yr의 증가율 산포를 보여준다.

그림 3.3.20과 그림 3.3.21은 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 미래 기후변화 강제력을 기반으로 하여 예측된 2006-2050, 2006-2075, 2006-2095년 기간 동안의 우리나라 주변해의 공간적인 표층수온 변화를 각각 나타낸다. 두 모델 모두 우리나라 주변해 전지역에서 2100년까지 분석 기간 전체에 걸쳐 표층수온의 상승이 일어나는 것으로 예측되는데, 특히 GFDL-ESM2M에서는 황해 중부 이북과 동해 북서부 해역, 일본분지 및 소야해협 근방에서 수온

상승이 더 크게 나타나고, MPI-ESM-LR에서는 황해 중국 연안측과 동해 중북부 및 동해 소야해협 북서방에서 더 크게 나타나는 차이를 보인다.

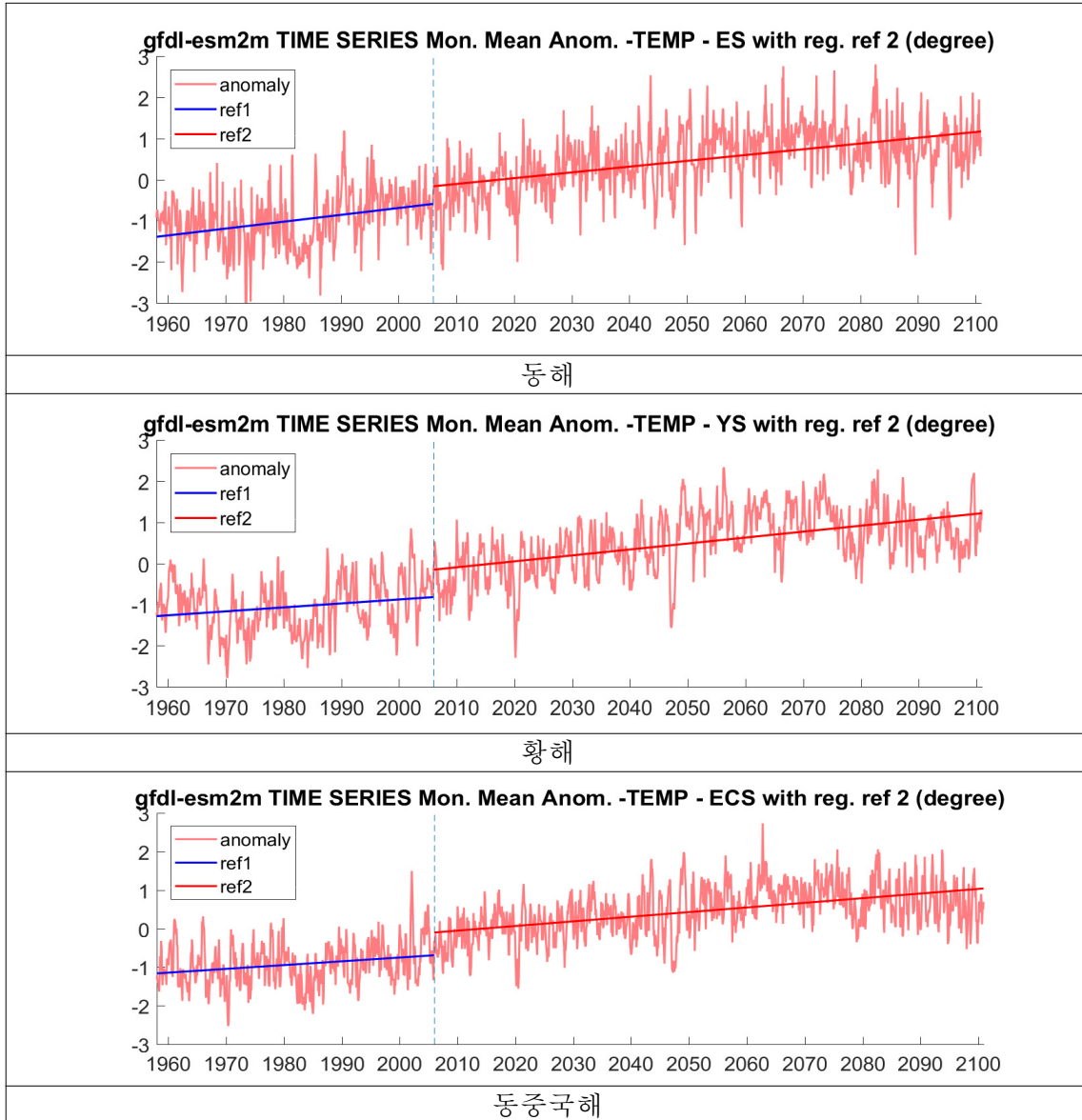


그림 3.3.18. GFDL-ESM2M 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 표층수온 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선으로 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위: cm).

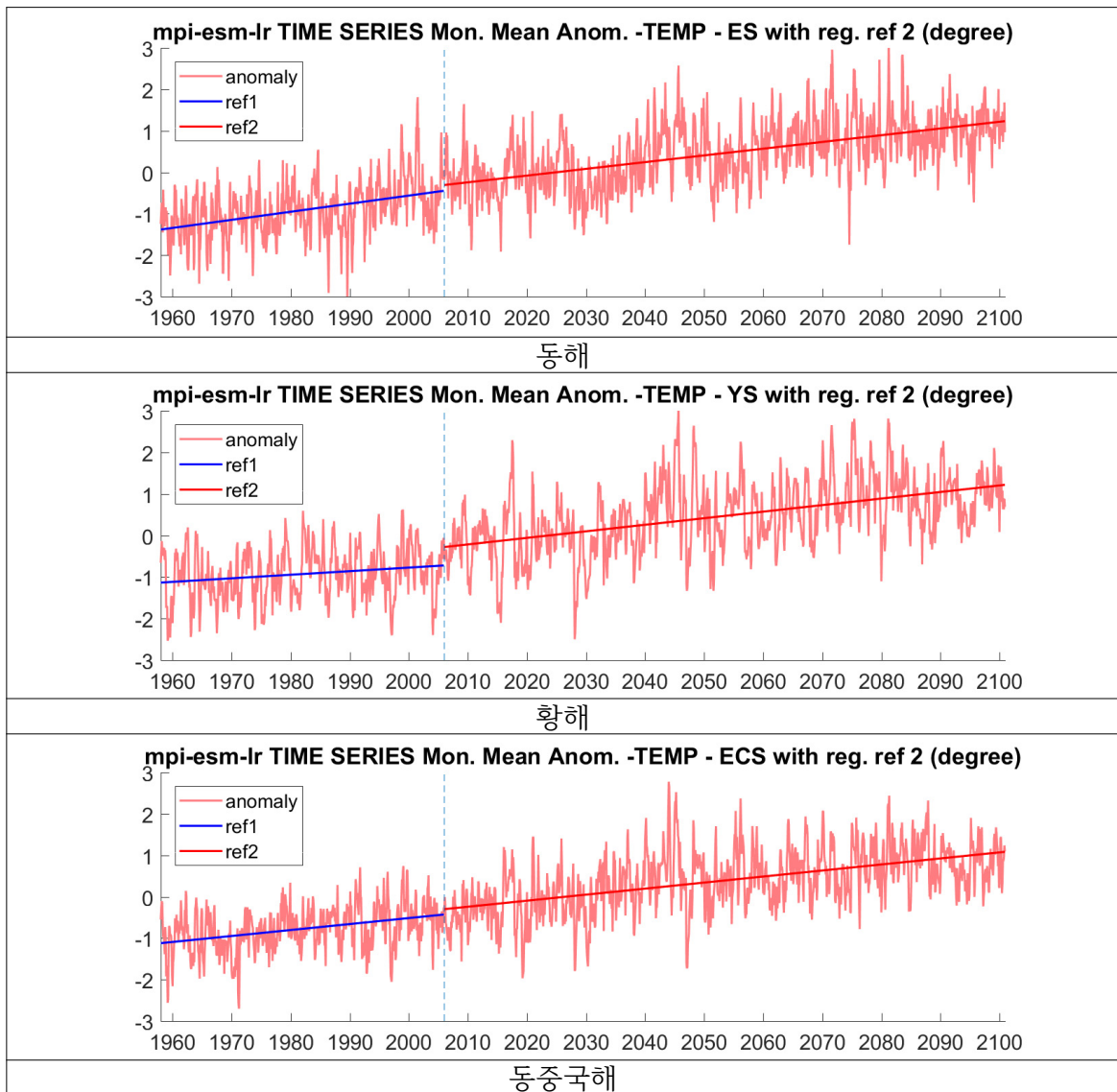


그림 3.3.19. MPI-ESM-LR 지구시스템모델의 기후강제력으로 모의된 1958-2100년 기간의 지역해 표층수온의 월평균 아노말리. 과거 변화와 미래 변화 예측에 대해 각각 선형의 추세선으로 나타냈음. (상단) 동해, (중단) 황해, (하단) 동중국해 (단위: cm).

표 3.3.6. 각 지역해의 1958-2005년과 2006-2100년 기간의 표층수온 변화율 (°C/yr).

지역	Historical		RCP 4.5					
	(1958-2005)		(2006-2050)		(2006-2075)		(2006-2100)	
	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI	GFDL	MPI
동해	0.0168	0.0192	0.0240	0.0228	0.0228	0.0192	0.0144	0.0168
황해	0.0096	0.0084	0.0240	0.0264	0.0264	0.0204	0.0144	0.0156
동중국해	0.0096	0.0144	0.0168	0.0252	0.0204	0.0180	0.0120	0.0144

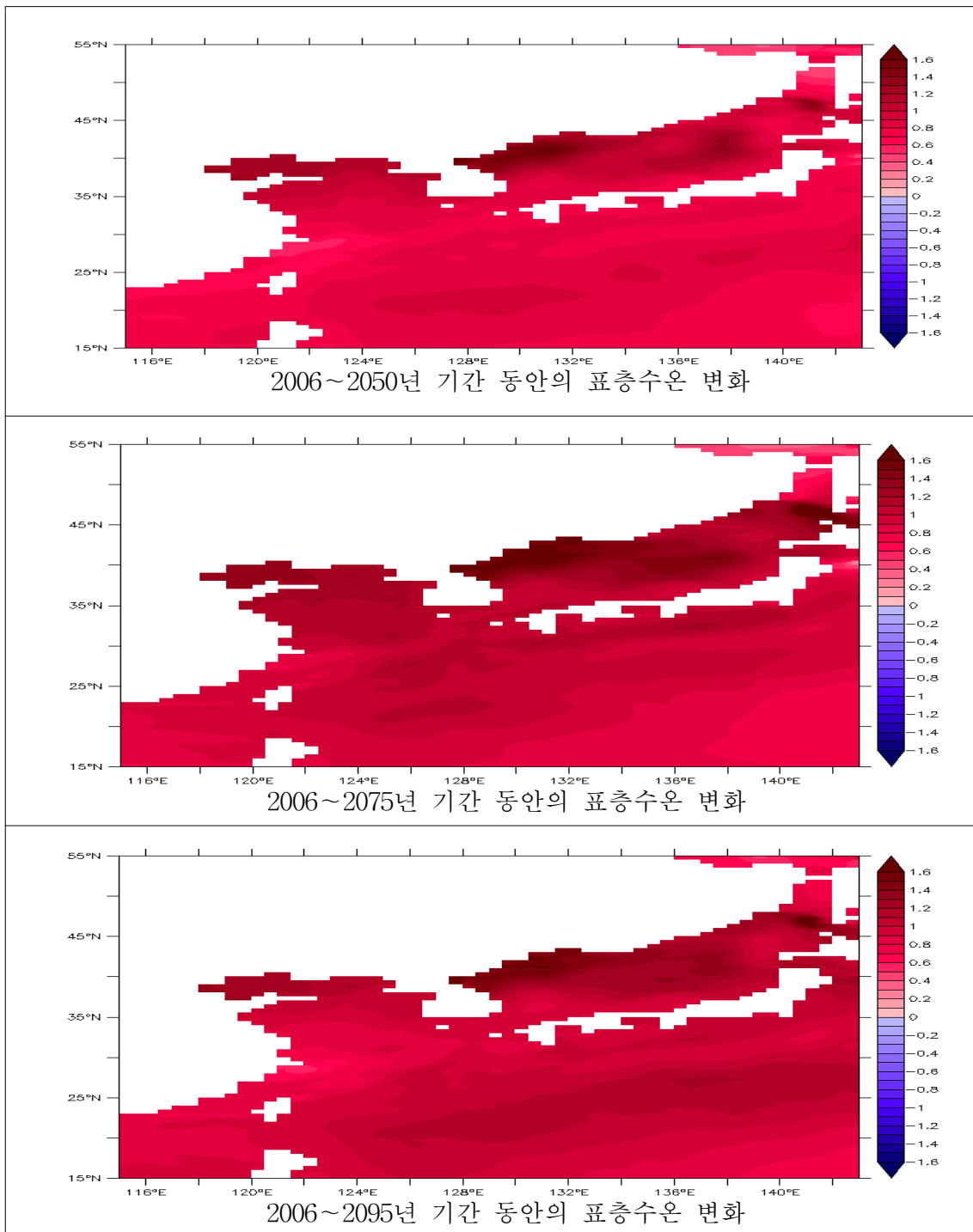


그림 3.3.20. GFDL-ESM2M의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 표층수온 변화 (2006년은 2001-2010년의 평균, 2050년은 2046-2055년의 평균, 2075년은 2071-2080년의 평균, 2095년은 2091-2100년의 평균을 대표함) (단위: °C).

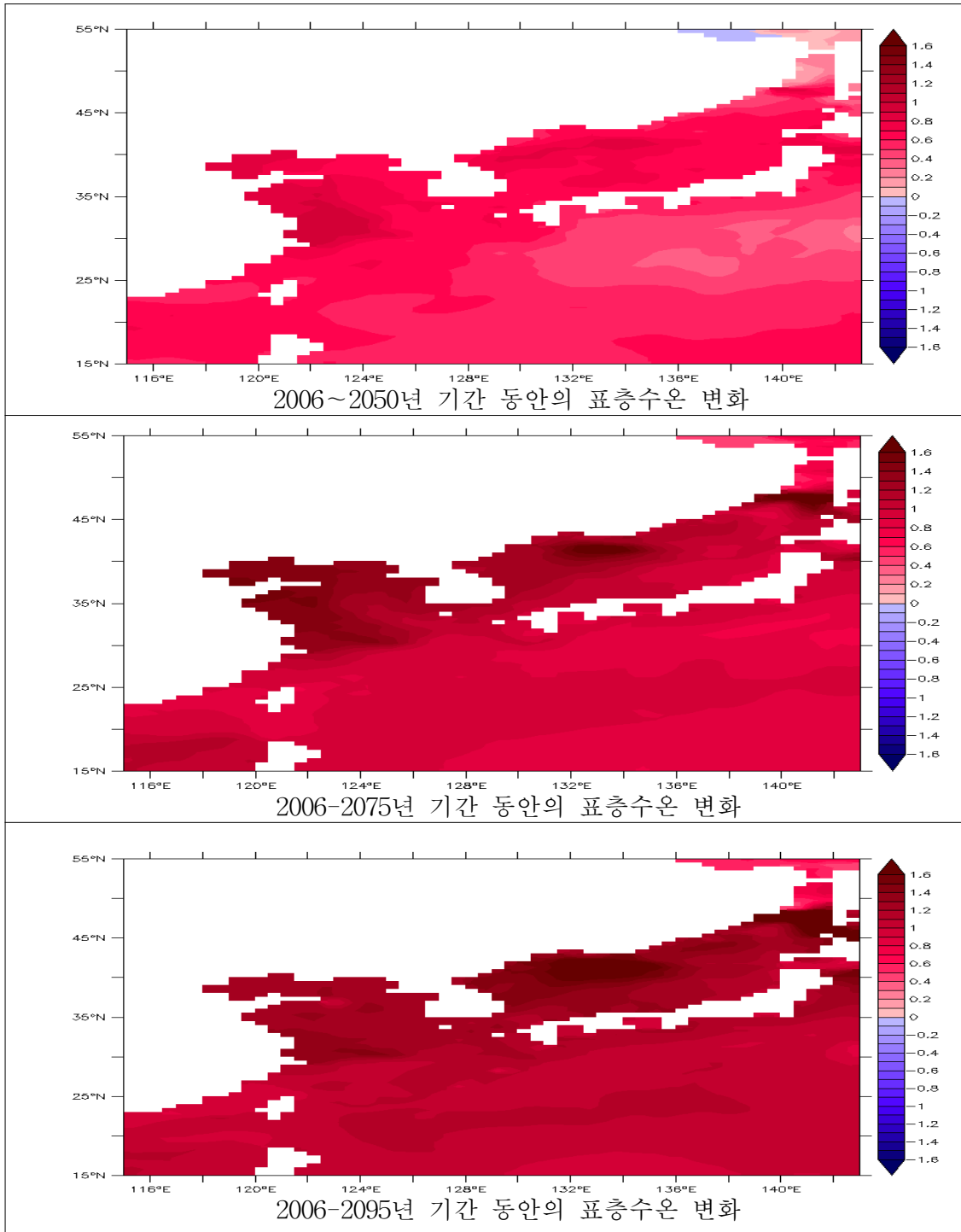


그림 3.3.21. MPI-ESM-LR의 기후변화강제력에 의한 2006-2050년 (상단), 2006-2075년 (중단), 2006-2095년 (하단) 기간 동안의 표층수온 변화 (2006년은 2001-2010년의 평균, 2050년은 2046-2055년의 평균, 2075년은 2071-2080년의 평균, 2095년은 2091-2100년의 평균을 대표함). (단위; °C).

(2) 지구시스템모델의 기후강제력에 기반한 대한해협 수송량 및 해류 변화 전망
 그림 3.3.22의 윗쪽 두 그림은 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR 지구시스템모델들의 기후강제력을 기반으로 하여 모의된 대한해협 수송량의 1951-2005년 기간의 변동을 나타낸다. 관측된 대한해협 수송량의 장기 평균값이 약 2.6 Sv인 것과 비교할 때 (Takikawa and Yoon, 2005), 두 모델 실험의 수송량은 모두 1 Sv 이상 관측값보다 작게 모의하였다. 이는 본 모델의 공간 해상도가 실제 대마난류가 통과하는 동해의 해협들(대한해협, 추가루해협, 소야해협)의 지형적인 특성을 사실적으로 모사하기에는 충분히 상세하지 못한 때문이라 생각된다. 주목할 만한 점은 두 모델의 경우 모두 1977년경과 1994년경에 수송량의 피크를 보이며, 그 두 해 사이의 기간과 1995-2005년 기간에 비교적 낮은 수송량을 보인다는 점이다.

그림 3.3.22의 아래 두 그림은 2006-2100년 기간에 대해 두 모델 강제력 실험에서 각각 예측된 수송량 변동을 보여준다. 월평균 수송량의 최저를 보이는 해와 최고를 보이는 해에서 각각 수 년~10년 이상 규모의 변동이 존재하는 듯하며, 5년 이동 평균 추세선에서도 수 십 년 규모의 변동성을 엿볼 수 있다.

그림 3.3.23은 장기 평균된 대한해협 수송량의 계절변화를 보여준다. 과거 기간(1951-2005년)의 수송량 계절변화는 2월 혹은 3월에 최저를 보이며, 8-11월경에 최고를 보인다. 그리고 미래 기간(2006-2100)에도 수송량의 최고와 최저 시기에는 큰 변동이 없는 것으로 나타난다. 그러나 과거 기간에 대한 미래 기간의 대한해협 수송량 변화폭(표 3.3.7)을 보면 GFDL-ESM2M의 경우에 평균 0.19 Sv, MPI-ESM-LR의 경우에는 평균 0.16 Sv 정도씩 증가하여 과거 기간의 연평균 수송량에 비해 10~15 % 정도 더 늘어난 값을 나타낸다. 또한 이 증가폭들은 GFDL-ESM2M 강제력 실험의 연진폭인 0.26 Sv에 대해서는 약 74 %, MPI-ESM-LR 강제력 실험의 연진폭 0.37 Sv에 대해서는 43 % 증가하는 것에 해당된다. 이러한 결과는 이 실험에서 전망된 미래 기간의 대한해협 수송량의 평균적인 증가가 과거 기간의 계절적으로 변동하는 수송량 (동계의 최소 수송량 발생과 하-추계의 최대수송량 발생) 규모에 변화를 가져와 수송량 계절변동의 변화가 한반도 주변해 특히 동해의 물리적 특성의 계절 변동에도 향후 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 예로서 미래 시기의 동계 수송량이 과거 기간의 하계 수송량 크기 정도로 유입되는 경우에 동한난류의 계절적 거동에 변화가 있을 가능성을 생각해 볼 수 있다.

그림 3.3.24과 3.3.25는 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR 기후강제력에 의한

한반도 주변해의 2001-2010년 8월 평균 표층해류와 2091-2100년 8월 평균 표층해류 및 그 두 기간 간의 해류벡터 차를 각각 나타낸 것이다. 동아시아 각 지역해의 해류시스템을 모사하기에는 모델의 공간 해상도가 충분하지 않은 관계로 쿠로시오 해류와 대마난류, 한반도 연안해류, 중국연안류 등이 각각 관측에서 보이는 위치에서 벗어나 있거나 그 세기가 과대 혹은 과소 모의되어 있다. 두 기간의 해류벡터 차이를 보면 GFDL-ESM2M의 경우에는 동중국해 대륙붕을 따른 쿠로시오 해류와 그로부터 분기되어 북상하는 대마난류가 2001-2010년 시기보다 2091-2100년 시기에 북향 성분이 다소 약해진 경향을 보이며, MPI-ESM-LR의 경우는 그와 반대로 이전 시기에 비해 더 강해진 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 동아시아 지역해의 순환장에 나타나는 자연변동성의 영향이라 판단되는데, 이러한 자연변동성은 지구 온난화가 해양 순환과 해양 특성(수온, 염분, 해수면 등)에 미치는 장기적인 영향에 중첩되어 나타나므로 예측에 사용하는 모델 기후강제력들의 기후적 특성에 따라 미래 특정 기간의 해양 순환과 해수 특성은 서로 그 양상을 달리할 수 있다. 따라서 미래 예측 실험에 있어서 어느 특정 시기의 해양 특성을 살펴봄에는 내재되어 있는 경년 변동과 함께 수 십 년 규모의 변동을 지구온난화 신호와 구분하여 고찰하여야 한다.

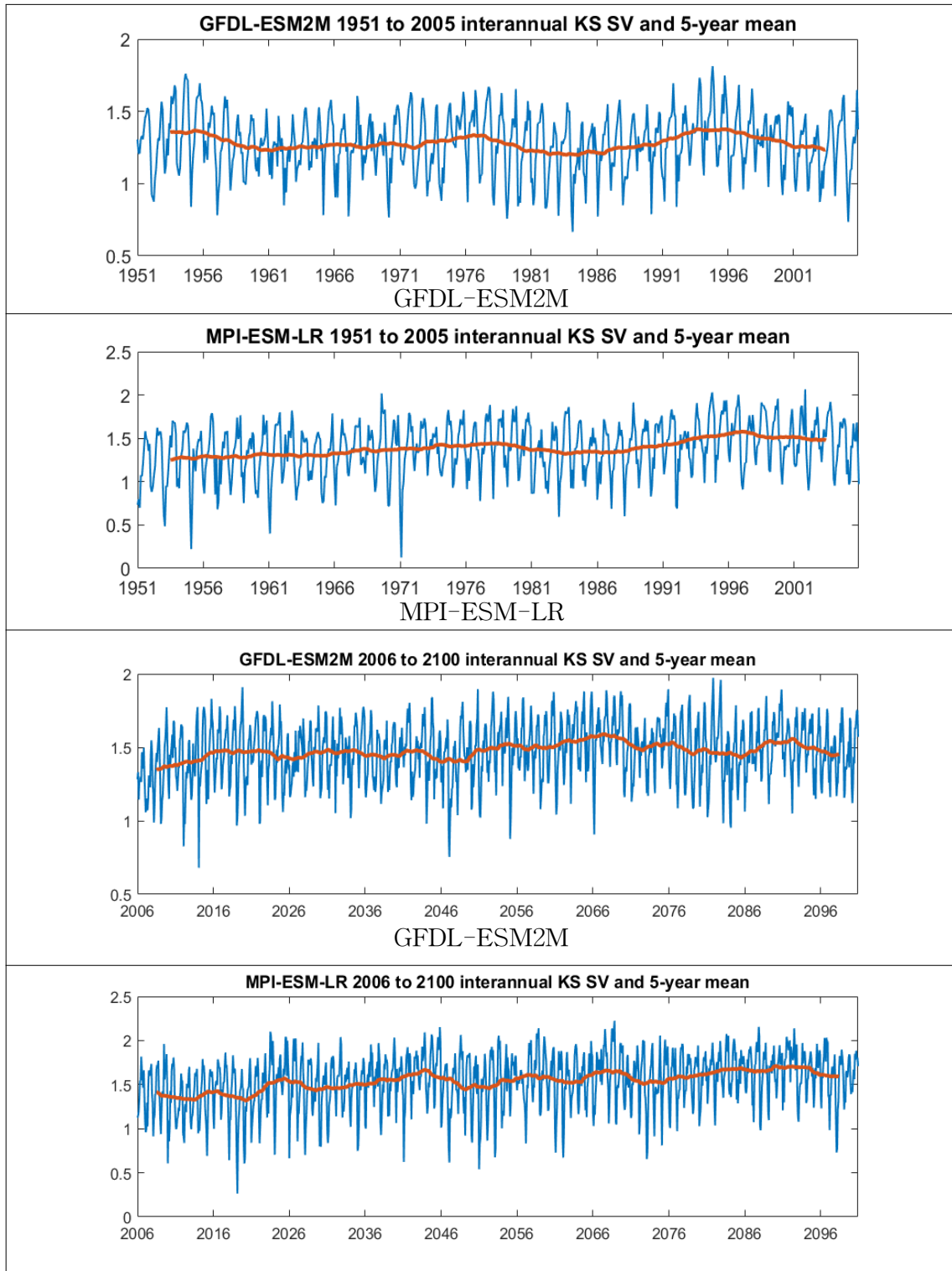


그림 3.3.22. 대한해협 월별 수송량의 시계열. 위로부터 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 기후 강제력에 의한 1951-2005년 기간 수송량 변동과 2006-2100년 기간의 수송량 변동 예측 (단위; Sv).

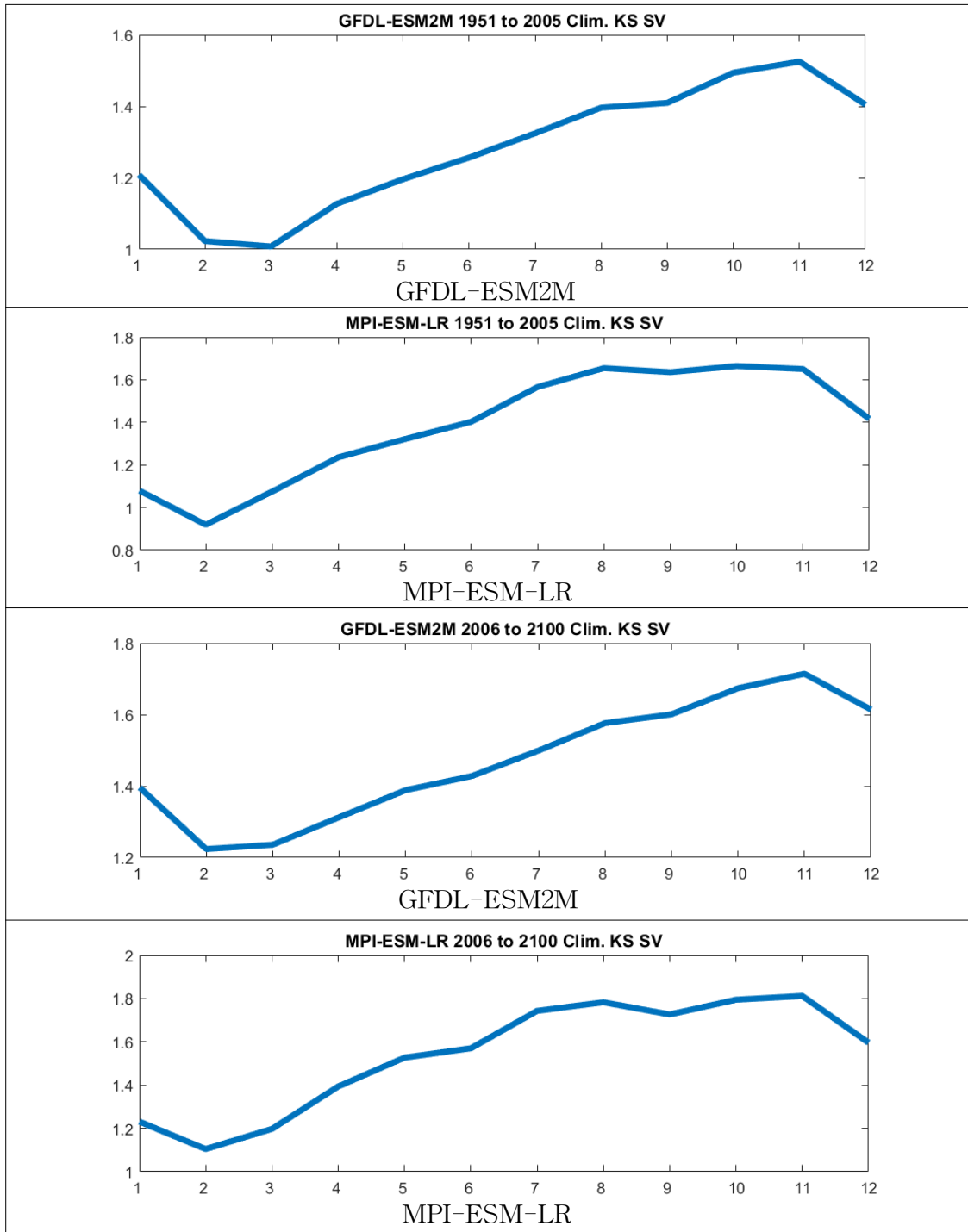


그림 3.3.23. 장기 평균 대한해협 수송량. 위로부터 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR의 기후강제력에 의한 1951-2005년 기간 수송량 변동과 2006-2100년 기간의 수송량 변동 예측 (단위: Sv).

표 3.3.7. 과거 기간(1951-2005년)과 미래 기간(2006-2100)의 대한해협 수송량 변동 (단위; Sv).

Month	GFDL-ESM2M			MPI-ESM-LR		
	Period A (1951-2005)	Period B (2006-2100)	B-A	Period A (1951-2005)	Period B (2006-2100)	B-A
1	1.209	1.396	0.187	1.079	1.231	0.152
2	1.023	1.224	0.201	0.919	1.105	0.185
3	1.008	1.236	0.228	1.075	1.198	0.123
4	1.128	1.313	0.185	1.236	1.394	0.158
5	1.196	1.389	0.192	1.321	1.527	0.206
6	1.257	1.428	0.172	1.403	1.570	0.168
7	1.325	1.499	0.175	1.566	1.743	0.177
8	1.397	1.576	0.180	1.654	1.783	0.129
9	1.410	1.601	0.191	1.635	1.726	0.091
10	1.494	1.674	0.180	1.664	1.795	0.130
11	1.525	1.714	0.19	1.650	1.812	0.162
12	1.405	1.614	0.209	1.416	1.596	0.180
avg.	1.281	1.472	0.191	1.385	1.540	0.155

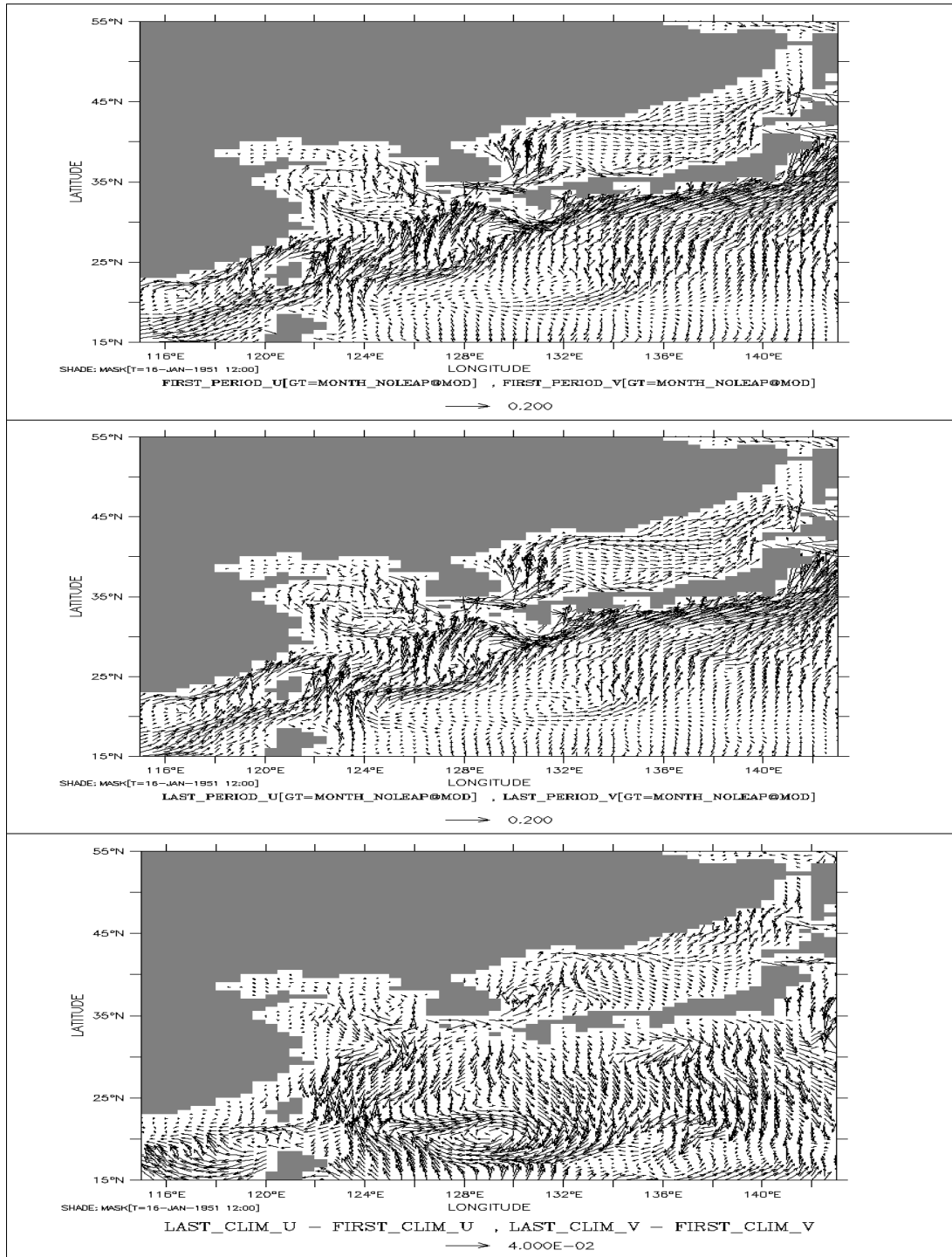


그림 3.3.24. GFDL-ESM2M 기후강제력에 의한 한반도 주변해의 표층해류 변동. (상단) 2001-2010년 8월 평균, (중단) 2091-2100년 8월 평균, (하단) (2091-2100년 8월 평균) - (2001-2010년 8월 평균). (벡터 단위; m/sec).

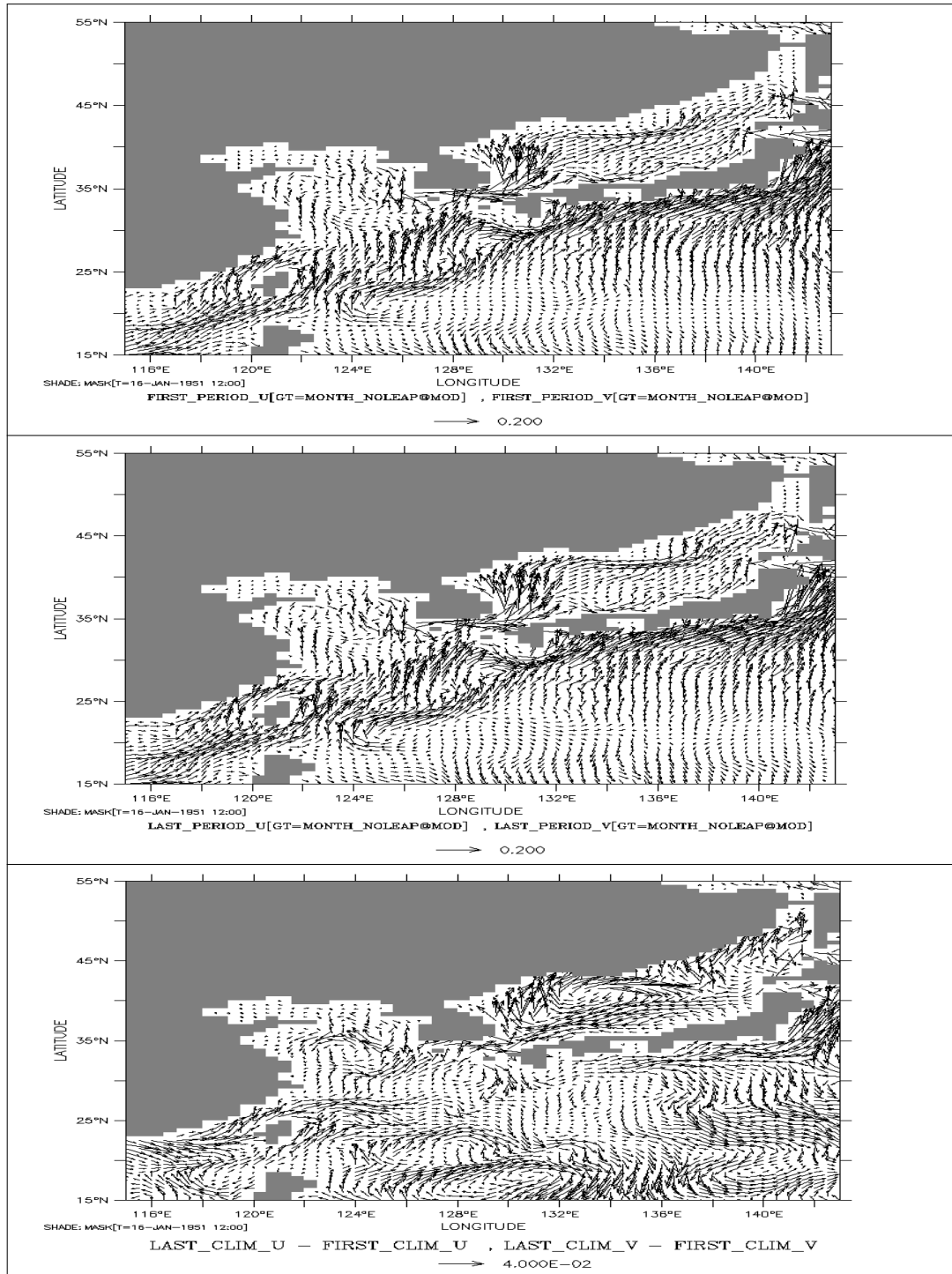


그림 3.3.25. MPI-ESM-LR 기후강제력에 의한 한반도 주변해의 표층해류 변동. (상단) 2001-2010년 8월 평균, (중단) 2091-2100년 8월 평균, (하단) (2091-2100년 8월 평균) - (2001-2010년 8월 평균). (벡터 단위: m/sec).

7. 요약 및 결론

한반도 주변해의 해수면과 수온 등에 대해 과거의 중장기적인 변동을 파악하고 지구온난화에 따른 미래의 변화를 전망하기 위하여 해양모델을 수립하고 일련의 실험을 수행하였다. 수립한 모델은 GFDL MOM5-SIS를 기반으로 한 전지구 해양-해빙결합기후모델로서 모델의 대표적인 공간해상도로 0.5도의 격자 간격을 가지며, 질량을 보존하는 비부씨네스크 역학을 기초로 한다. 실험은 전체적으로 3 단계로 구성되었다. 먼저 기후평균적인 해양순환 상태를 모의하기 위하여 500년간의 장기적분을 수행하였고, 두 번째 단계로서 기후평균 순환장을 초기 상태로 하여 1958-2015년 기간의 재분석자료를 기후강제력으로 부여한 과거 기간의 수온·해수면 변동 모의 실험을 수행하였다. 마지막 단계로 지구시스템모델들의 RCP 4.5 기후변화 시나리오 실험의 해양-대기 상태를 기후강제력으로 부여하여 1951-2005년의 과거 모의와 2006-2100년의 미래 변화 예측 실험을 각각 수행하였다.

재분석자료에 기초한 과거 기간 모의에서 모델은 전반적으로 위성관측 해면고도와 일치하는 해수면 계절변화를 모의하였다. 동해는 모델의 계절변화 진폭이 6.7 cm, 위성관측 해면고도가 7.9 cm로서 모델과 관측이 3월에 최저, 9-10월에 최고를 보이며, 황해는 모델이 13.4 cm, 위성관측이 10.8 cm로서 모델과 관측이 2-3월에 최저, 9월에 최고를 보였다. 동중국해는 모델이 11.7 cm, 관측이 9.6 cm로서 모두 3월에 최저, 9월에 최고를 보였다. 관측과 모델 모두 모든 분석 기간에 걸쳐 한반도 주변해에서 양의 해수면 상승률을 나타냈다. 즉, 1958-2009년 기간에 모델과 복원해수면에 의한 해수면 상승률은 동해와 황해에서 2.1~2.2 mm/yr, 동중국해에서 1.9~2.6 mm/yr로 추정되고, 1993-2014년 기간에 대한 모델과 위성고도계 자료의 해수면 상승률은 동해에서 2.8~3.1 mm/yr, 황해에서 3.4~3.8 mm/yr, 동중국해에서 2.6~4.1 mm/yr로 각각 추정되었다.

한반도 주변해에서 93~02년 기간 대비 05~14년 기간에 모델과 위성고도계 모두에서 2~4 cm의 평균해수면 상승이 있었는데, 이를 해수면 상승에 기여하는 각 성분별로 분리하였을 때 북서태평양과 쿠로시오해역에서는 밀도변화 성분(steric component; 물기둥내 열과 염분의 변화에 의한 밀도 변화와 그에 동반하는 체적 및 해수면 변화 성분)이 주를 이루는데 비해, 황해와 동중국해 및 동해 지역에서는 밀도변화 이외의 성분(non-steric component)이 주를 이루는 것으로 나타났다. 또한 각 기여 성분들의 시계열에서도 밀도변화의 성분이 1960년대 중반 이후로 최근까지 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 밀도변화의 성분은 해수의 수렴과

육상과 대기로부터의 담수 유입에 의해 해수면이 변화하는 기여 성분을 나타내는데, 한반도 주변해에서는 쿠로시오 해류의 기후변동에 따른 동중국해 상으로의 난류수 수송량 증가 가능성이 해수면 상승의 중요한 요인 중 하나로 고찰된다.

RCP 4.5 시나리오에 기반한 한반도 주변해의 미래 해수면 상승률(mm/yr)은 GFDL-ESM2M의 경우, 2006-2050년 기간과 2006-2075년 기간에 6.2~6.7 mm/yr, 2006-2100년 기간에는 6.2~6.5 mm/yr로 예측되었다. MPI-ESM-LR에서는 2006-2050년 기간과 2006-2075년 기간에 4.9~5.6 mm/yr, 2006-2100년 기간에는 5.0~5.3 mm/yr로 예측되었으며, GFDL-ESM2M보다 약 1 mm/yr 정도 더 작게 모의되었다. 미래 기간의 해수면 상승률은 두 예측실험의 경우 모두 과거 기간(1958-2005년)보다 현저히 높아진 값으로 기후변화에 따라 미래 시기에 해수면 상승이 가속화될 것임을 시사한다. 미래 기간의 해수면 상승을 주도하는 기여 성분은 GFDL-ESM2M과 MPI-ESM-LR 모두 황해와 동중국해에서는 밀도변화 이외의 해수면변화 성분, 동해에서는 밀도변화성 해수면 변화 성분으로 나타났다. 각 지역해 평균해수면 상승률에 기초한 한반도 주변해의 미래 해수면 상승폭(cm)은 GFDL-ESM2M의 경우, 2006-2100년 기간 동안 59~62 cm에 이르며, MPI-ESM-LR의 경우는 GFDL-ESM2M에 비해 11~12 cm 정도 더 작은 값인 47~51 cm의 상승이 예측되었다. 또한 미래 예측 실험을 통하여 대한해협 수송량이 미래 기간에 연평균 10~15 % 증가될 가능성도 전망되었다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 계획대비 연구수행의 적절성

□ 추진체계 및 수행방법의 적정 수행 여부

- 기후역학모델에 해양 초기화를 적용하여 계절 예측을 수행하여 해양-대기 기후 예측 장을 통계모델에 제공하며 원격상관성을 분석하여 예측 성능을 향상시키는 연구를 추진체계의 계획대로 진행하였다.
- 기후역학모델에 의해 예측된 해양 기후 예측장은 해양역학모델에 입력됨으로 수온·해수면 증장기 변동 예측을 위한 모델 초기자료와 경계 자료로 활용이 가능하게 되었다.
- 정준상관분석(CCA) 기법을 적용하여 역학모형에서 예측된 예측장을 보정하여 한반도 근해 수온의 계절예측성을 확보하여 현업적으로 활용할 수 있는 수준까지 향상시켰다.
- 구축된 한반도 근해 수온예측시스템의 예측성을 추진계획대로 진단하고 평가하였다.
- 3개년도 연구개발 계획에 따라 RCP 기후변화 시나리오 기반의 해수면, 수온, 염분 미래 변화 예측실험을 수행하였고 한반도 주변해역의 2100년 변화를 전망하였다.

○ 연도별 주요 추진 일정

구분	세부연구목표	추진 실적 및 계획												계획대비 추진실적 (%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1차년도 (‘15년)	1. 한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발														100
	2. 한반도 해역 해면고도의 시공간 분포 모델 수립 및 재현 실험														100
2차년도 (‘16년)	한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발														100
	한반도 해역 해면고도 증장기 변동 재현 모델링														100
3차년도 (‘17년)	한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발														100
	한반도 해역 미래 해수면 변화 예측 모델링														100

※ 파란색 : 계획 / 붉은색 : 실적

제 2 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

1. 연차별 목표 대비 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2015)	1. 한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발	1-1. 한반도 주변해 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 시범 개발	0.7	- 한반도 부근 해수면 온도 예측을 위한 역학/통계모형이 개발되었음	100
		1-2. 한반도 주변해 수온구조 예측성 평가		- 해면수온에 대한 예측성을 평가함	
	2. 한반도 주변해 해면고도의 시공간 분포 모델 수립 및 재현 실험	2-1. 해수면 변동 모델 수립 및 변동 재현 실험 - 비부씨네스크 모델 수립 - 한반도 주변해 해면고도 변동 특성 모의	0.3	- 동아시아해역을 포함하는 서태평양 영역 모델을 수립함 - 지난 10년 규모의 해수면 변화를 모의함	100
	계		1.0	-	100
2년차 (2016)	1. 한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발	1-1. 한반도 주변해 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형 고도화	0.4	- 한반도 부근 해수면 온도의 사계절예측을 위한 역학-통계모형의 개발 - 최적의 앙상블 기후 초기장 생성	100
		1-2. 한반도 주변해 수온구조 예측성 평가 기법 수립	0.3	- 4계절 예측 수행 - 기존 예측 결과들을 이용하여 예측성 평가	100
	2. 한반도 주변해 해면고도 중장기 변동 재현 모델링	2-1. 동아시아해역 수온·해수면 중장기 변동 재현 - 한반도 주변해 해면고도 변동 특성 모의	0.25	- 50년 규모의 수온과 해수면 중장기 변동 특성을 모의하고 관측자료(위성 SSHA, 복원해수면, EN4 등)와의 비교 분석을 수행함	100
		2-2. 모델 해상도 향상 실험	0.05	- 20~30km 규모로 모델 해상도를 향상하고 10년 적분실험을 수행함	100
	계		1.0	-	100

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
3년차 (2017)	1.한반도 주변해 수온구조 계절 예측 시스템 개발	1-1. 한반도 주변해 수온구조 예측을 위한 역학/통계 모형의 현업화	0.7	<ul style="list-style-type: none"> - 월별 계절예측 수행을 위한 30년 과거 예측 수행 및 예측성 평가 - 실시간 계절예측 시스템 구축을 위한 관측자료 품질관리 시스템 구축 - 2017년 월별 계절 예측 수행 - 지연 앙상블을 이용한 역학/통계모형 구축 - 관측 및 타기관의 예측 결과와의 비교 검증 	100
	2.한반도 주변해 미래 해수면 변화 예측 모델링	2-1.한반도 주변해 미래 수온·해수면 변화 전망	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - RCP 4.5 기후변화 시나리오에 기반하여 미래 해수면 변화 예측실험 수행함 - Steric 및 non-steric sea level 성분을 분석하고 관련 연구 결과와 비교 분석함 - 한반도 해역의 지역별(황해, 동중국해, 동해) 미래 해수면, 수온, 염분, 해류 변화를 전망함 (2050, 2075, 2100년) - 모형과 관측의 주요 단면 통과 수송량 변동을 비교·분석함 - 수온·해수면 전망치의 격자점 자료를 제공함 	100
	계		1.0		100

2. 연구성과 우수성

우수성과 -1.	역학모형을 이용한 한반도 해역 월별 계절 예측 시스템 개발
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 역학모형을 이용하여 한반도 해역에 대한 월별 계절 예측 시스템을 개발함 - 실시간 계절 예측을 위하여 과거 33년에 대한 과거 예측을 수행함 - 실시간 관측자료 수집 및 품질관리 시스템을 구축함
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 계절 예측 역학 시스템 개발 - 실시간 관측 자료의 처리가 가능해짐 - 역학모형을 이용하여 매월 기후 예측이 가능해짐
<p>1980년부터 2012년까지 33년간 과거예측 자료로부터 북위 30도에서 40도까지 평균된 수온의 예측성 평가. SODA와의 상관성 검증</p>	
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> ○ GAIA 지구시스템 모델 개발과 활용 연구 (2017년 11월 30일-12월 1일, 울산과학기술원, 한국기후변화학회 2017년 하반기 학술대회)

우수성과 -2.	계절예측을 위한 월별 역학통계모형의 구축
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 역학 모형 예측 결과와 CCA 통계 모형을 이용하여 월별역학/통계 모형을 개발함 - 개발된 역학통계 모형을 바탕으로 월별 계절예측이 수행되었음 - 월별 예측 결과에 대한 진단 및 평가가 수행되었음
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현업 적용이 가능한 계절 예측 성능의 확보 - 수행된 월별 예측 결과를 평가해본 결과 월에 따라 예측 성능은 차이가 있으나 전반적으로 현업적 활용이 가능한 한반도 근해 3차원 수온구조의 계절 예측성을 확보하였음
<p>HSS (5m)</p> <p>(a) JAN (b) FEB (c) MAR (d) APR (e) MAY (f) JUN (g) JUL (h) AUG (i) SEP (j) OCT (k) NOV (l) DEC</p> <p>-0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4</p>	
5m 수온에 대한 역학통계모형의 3개월 예측과 SODA 재분석자료의 Heidke Skill Socre	
증빙자료	

우수성과 -3.	한반도 주변해역 미래 해수면 상승 상세 전망
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기후변화 RCP 시나리오 기반의 한반도 주변해역(동해, 황해, 동중국해) 미래 해수면 상승 예측실험 성공 (국내 최초) <ul style="list-style-type: none"> - RCP 4.5 시나리오 기반, 2006-2100년 기간의 한반도 해역 미래 해수면 상승 전망 제시 - 2006-2100년 기간 해수면 상승률; 동해 5.0~6.2 mm/yr, 황해 5.3~6.5 mm/yr, 동중국해 5.3~6.3 mm/yr - 2006-2100년 기간 해수면 상승폭; 동해 47~59cm, 황해 51~62 cm, 동중국해 51~60 cm - RCP 4.5 시나리오 기반, 2006-2100년 기간의 미래 표면수온 변화 전망 - 2006-2100년 기간 수온 변화율; 동해 0.014~0.017 °C/yr, 황해 0.014~0.016 °C/yr, 동중국해 0.012~0.014 °C/yr
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해수면 상승 예측 모델 구축 완료 <ul style="list-style-type: none"> - 공간해상도 0.5도 전지구 해양-해빙 기후예측모델 수립 - 1958-2015년까지 과거 해수면 변동 재현 및 해수면 상승률과 원인 파악 - 기후변화 시나리오에 기반한 전지구 해양 각 지역의 미래 해수면 예측에 수시 활용 가능
<p>과거기간(1958-2005)과 미래시기(2006-2100)의 RCP4.5 기반 동해 해수면 아노말리 월변동 시계열(cm)과 해수면 상승률</p>	
<p>동해의 RCP4.5 기반 2006-2095년 기간 동안의 해수면 상승폭 (m)</p>	
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> ○ 'Numerical simulation of long-term sea level change in the East Asian Sea Region' (2017. 7. 6, 서울대학교, International Workshop : Sea Level Change: Past and Future) ○ '동아시아 지역해 장기 해수면 변화 모의 연구' (2017. 11. 2, 경주, 한국해양학회 추계학술대회)

3. 3개년 연구결과(실적)

구분	주요 내용
자체 종합 평가	<ul style="list-style-type: none"> □ 한반도 주변해역 수온의 계절예측을 위한 역학-통계모형이 개발됨 - 실시간 예측시스템 구동을 위한 관측자료 수집 및 품질관리 시스템 구축 - 중위도 계절예측 성능 향상을 위한 역학모형 개선 - 2017년 12개월에 대한 계절예측 수행 - 한반도 주변해역 3차원 수온 구조 예측을 위한 현업적 적용 가능 계절예측시스템이 최초로 개발됨 - 개발된 역학-통계모형의 예측성이 진단되어 예측결과에 대한 신뢰성이 평가되었음 □ 해수면 변동 모델을 수립하고 한반도 주변해역의 중장기적 해수면 변동성을 재현하고 예측함 - 한반도 주변해역의 지난 수 십 년간의 해수면 변동을 재현하고 해수면 상승률과 상승 원인을 파악하였음 - RCP 4.5 시나리오에 기초하여 한반도 주변해역의 2006-2100년 기간의 해수면 상승률과 수온 변화율 및 그 변화 정도를 전망하였음 - 제시된 미래 해수면과 수온의 전망 결과는 우리나라 기후변화 대응책의 수립에 과학적이고도 정량적인 자료로서 활용되어질 수 있음
1차년 (2015년) 성과 및 의의	<ul style="list-style-type: none"> □ 한반도 주변해역 해수면온도의 여름철 평균 계절예측을 위한 역학-통계모형이 개발됨 - 역학모형의 예측성을 향상시킬 수 있는 역학-통계모형이 개발되어 예측시스템 구축의 발판을 마련함 - 한반도 기후에 대한 원격상관 관련 연구의 필요성이 제기됨 □ 해수면 변동 모델 수립 및 변동 재현 실험 - 공간 해상도가 0.5도이며 전지구 해양을 영역으로 하는 비부씨네스크 해양-해빙결합모델을 수립하였음 - 기후평균적 해양순환 상태를 모의하기 위하여 500년간 장기적분을 성공적으로 수행하였음

구분	주요 내용
	<ul style="list-style-type: none"> - 이를 기반으로 최근 10년 규모의 해수면 변화 재현 실험을 수행하였음
<p>2차년 (2016년) 성과 및 의의</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 한반도 주변해역 수온의 사계절 계절예측을 위한 역학-통계모형이 개발됨 - 역학-통계모형을 일반적으로 모든 계절에 적용 가능하도록 확장시켜 일반화 예측시스템을 개발함 - 예측성을 평가하기 위하여 성능점수가 도입하여 예측성의 유무를 보다 객관적으로 평가할 수 있는 기반을 마련함 □ 동아시아해역 수온·해수면 중장기 변동 재현 - 지난 50여년 (2058-2015년)의 수온과 해수면 중장기 변동 특성을 모의하였음 - 관측자료(위성 SSHA, 해수면복원자료 등)와 비교 분석함으로써 지난 수 십 년간 한반도 해역의 해수면 상승 경향과 원인을 파악하였음
<p>3차년 (2017년) 성과 및 의의</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 한반도 주변해역 수온의 월별 계절예측을 위한 역학-통계모형이 개발됨 - 2차년도에 개발된 일반화된 역학-통계모형의 예측성 한계를 획기적으로 개선하여 현업적으로 적용 가능한 한반도 주변해역 3차원 수온을 위한 월별 계절예측 모형을 개발함 - 개발된 예측시스템을 다른 기관의 예측성과 비교 검증하여 예측시스템의 신뢰성을 확보함 - 매월 예측이 가능하도록 실시간 관측자료 처리 시스템과 과거예측을 수행하여 월별 예측의 기반 시스템이 구축됨 □ 한반도 해역의 미래 해수면·수온 변화 전망 달성 - 기후변화 시나리오에 기반한 미래 해수면 변화 예측 실험을 수행함 - CMIP5 지구 시스템 모델의 RCP 4.5 시나리오에 기초한 기후 강제력 자료에 근거하여 앙상블 실험을 수행하였음 - 과거실험(1951-2005년)과 미래 2006-2100년까지 예측 실험을 각각 수행함

구분	주요 내용
	<ul style="list-style-type: none"> - 동해, 황해, 동중국해의 미래 해수면 변화와 수온 변화를 전망하고, 2006년 대비 2050년, 2075년, 2100년까지 해수면과 표층수온의 상승률과 상승폭 및 그 지역적 변화를 각각 제시하였음 - 한반도 주변해역의 해수면 상승 요인을 파악하고, 미래 해수면 상승 가속화 가능성에 대해 검토하였음 - 대한해협 통과수송량의 미래 변화를 전망하였음 - 한반도 주변해역의 해류 시스템의 미래 변화를 전망하였음 - 수온·해수면 전망치의 격자점 자료를 제공함

제 3 절 관련분야에의 기여도

□ 기술적 측면

- 해양 환경에 대한 계절 예측 능력을 향상시켰으며, 연구 결과는 기후 예측 모형의 개선에 활용될 수 있다.
- 한반도 해역과 관련된 기후시스템의 역학적 이해의 증대에 기여할 수 있게 되었다. 한반도 주변해 수온구조와의 원격상관을 이해하는 것은 관련된 기후시스템의 역학적 이해를 증대시킨다.
- 수온구조 계절예측에 대한 현업적 지원이 가능하게 되었다.
- 국내 장기 예보의 기술적 수준을 국제적 수준으로 제고시킬 수 있게 되었다.
- 기후변화에 따른 한반도 주변해의 해수면 상승에 대한 중장기적 전망이 가능하게 되었다.
- 정량적인 수온·해수면 상승 예측 결과와 한반도 해역에 대한 상세한 공간 분포 제시를 통해 효율적인 국토 활용 계획 및 국가 기후변화 적응 정책 수립에 기여할 수 있게 되었다.
- 국가표준 기후변화 시나리오 작성에서 해수면 상승 예측 부분의 해수면 변동 모델링 기술 확보 및 기술 제공이 가능하게 되었다.

□ 경제·산업적 측면

- 한 계절 앞서 수온구조 계절 예측 자료를 활용함으로써 안정적인 수산 자원 확보 및 어장 환경에 따른 피해 저감에 기여하며, 장기적인 수자원 대책 마련에 도움을 줄 수 있다.
- 계절 예측 시스템 개발은 기상 정보 활용과 관련된 산업의 이익을 견인할 수 있으며, 자연 재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하는데 기여할 수 있다. 또한 방재, 산업, 보건 등 다양한 분야의 효과적 의사 결정에 영향을 줄 수 있다.
- 계절 예측/방재 시스템 개발은 국민 여가 활동에 효과적 정보를 제공함
- 해수면 상승이 영향 미치는 우리나라 연안, 도서, 항만 제 분야의 경제, 사회적 기후변화 대응 정책 수립에 과학적 근거자료를 제공할 수 있게 되었다.
- 중장기적 수온·해수면 상승 전망에 근거하여 효율적인 국가 및 지자체 연안개발과 활용을 위한 장기 발전 계획의 수립이 가능하게 되었다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

□ 연구결과의 기술적, 경제적, 사회적 파급 효과

- 본 연구의 성과로 실시간 계절예측 시스템을 구축할 수 있게 되었으며 한반도 기후에 대한 계절예측 성능을 높이는데 기여할 수 있게 되었다. 본 한반도 계절예측 시스템을 기업 활동의 보조 자료로 활용할 경우 기업의 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- 한반도 계절예측 시스템은 또한 기후재해 저감 정책 수립 등의 정부 정책에 활용될 수 있다.
- 한반도 주변해역의 해수면 변동 예측 기초 자료로서 활용시 기존의 가상적 기후변화 시나리오 적용 방안(향후 50cm 해수면 상승 또는 향후 1m 해수면 상승 등을 가정하는 방식의 시나리오 접근 방안)에 비해 과학적 신뢰도를 더욱 향상시킬 수 있다.
- 이 연구에서 수립된 한반도 연안역의 해수면 및 해양수온 미래 예측 기술과 미래 변화 전망 결과는 구체적인 지자체 연안 장기발전 계획 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

□ 연구결과의 활용계획

- 개발된 수온구조 계절 예측 시스템은 직접적으로 현업에 활용 가능하며, 계절 예측 결과는 기상청 계절 예측 자문 회의에 KIOST 고유의 수온구조 계절 예측 결과로서 현업적으로 제공될 수 있다. 또한 계절 예측 결과는 기후 변화 적응 정책 수립과 자연 재해 저감 방안 도출에 활용될 수 있다.
- 수온 계절예측시스템을 구축하면서 발굴된 예측인자들은 한반도 주변 수온구조의 역학적 이해 뿐 아니라 역학모형의 개선에 활용될 수 있다.
- 향후 KIOST 기후 모형의 활용도와 KIOST 관측 자료의 활용도를 높이며 관측자료의 질을 향상시키는데 기여할 수 있도록 후속 과제의 개발을 힘쓰고자 한다.
- 미래 해수면 변화 전망 결과는 국가 기후변화 적응대책 추진과제 중 해수면 상승 대책 마련을 위한 해양 시나리오 작성 부문에 제공함으로써 해당 연구결과의 활용이 가능하다. 향후 한반도 지역의 해양부문 표준

기후변화 시나리오 작성과 한국기후변화 평가 보고서 작성에서 한반도 해역의 수온과 해수면 변화 전망 분야에 기여할 수 있도록 연구 결과의 정교화와 현장 적용 용이도를 높이고자 한다.

- 금후 이 연구개발과제에서 개발된 예측 기술과 수립된 예측모듈들을 국내 관련 기관과 대학 및 기업에 개방하여 교육 및 산업 활용의 기회를 제공함으로써 국내의 해양 중기-장기 예측 기술을 향상시키는데 기여하고자 한다.

제 6 장 참고문헌

- 기상청, 2012, 한반도 기후변화 전망 보고서.
- 오상명, 권석재, 문일주, 이은일, 2011. 지구온난화에 의한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승. 한국해양·해양공학회논문집, 제 23 권 제 3 호, pp. 236~247.
- 한국연구재단, 2016, 통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측
- 해양수산부, 2014. 해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발. 655p.
- Andres, M., Park, J.-H., Wimbush, M., Zhu, X.H., Nakamura, H., Kim, K. and Chang, K.-I., 2009. Manifestation of the Pacific decadal oscillation in the Kuroshio. *Geophysical Research Letters*, 36, L16602, doi:10.1029/2009GL039216.
- Behringer, D.W., 2007. The Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) at NCEP. In: 11th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 87th Annual Meeting, San Antonio, TX, pp. 14 - 18.
- Bretherton, C. S. and Sungsu Park, 2009: A new moist turbulence parametrization in the Community Atmosphere Model. *J. Climate*, 22, 3422-3448
- Chang, C.-P., Y. Zhang, and T. Li, 2000: Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge, *Journal of Climate*, 13, 4310-4325.
- Chang, C.-P., Y. Zhang, and T. Li, 2000: Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon, *Journal of Climate*, 13, 4326-4340.
- Carton, J.A., Chepurin, G.A., Cao, X., Giese, B.S., 2000. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950 - 95. Part I: methodology. *J. Phys. Oceanogr.* 30, 294 - 309.
- Chang, Y.S., Zhang, S., Rosati, A., Delworth, T.L., Stern, W.F., 2013. An assessment of oceanic variability for 1960 - 2010 from the GFDL ensemble coupled data assimilation. *Clim. Dyn.* 40, 775 - 803.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer D. and Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley P.M. (eds.)].

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gordon, A.L. and Giulivi, C.F., 2004. Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East Sea. *Deep Sea Research Part I*, 51, 653–663.
- Grenier, H. and C. Bretherton, 2001: A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 357–377.
- Griffies, S.M. and Greatbatch, R.J., 2012. Physical processes that impact the evolution of global mean sea level in ocean climate models. *Ocean Modelling*, 51, 37–72.
- Hamlington, B.D., Leben, R.R., Nerem, R.S., Han, W. and Kim, K.Y., 2011. Reconstructing sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C12.
- Han, G. and Huang, W., 2008. Pacific decadal oscillation and sea level variability in the Bohai, Yellow, and East China Seas. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 12, 2772–2783
- Ingleby, B., Huddleston, M., 2007. Quality control of ocean temperature and salinity profiles - historical and real-time data. *J. Marine Syst.* 65, 158 - 175.
- Jeon, D., 2008. Relative sea-level change around the Korean Peninsula. *Ocean and Polar Research*, 30, 373–378.
- Kang, I. S., C. H. Ho, and K. D. Min, 1992: Long-range forecast of summer precipitation in Korea. *Journal of Korean Meteorological Society*, **28**, 283–292.
- Kang, Y. Q., and B. D. Lee (1985), On the annual variation of mean sea level along the coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20, 22 - 30.
- Kang, S. K., J. Y. Cherniawsky, M. G. G. Foreman, H. S. Min, C.-H. Kim and H.-W. Kang, 2005. Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data, *J. Geophys. Res.*, 110, C07002, doi:10.1029/2004JC002565.
- Kang, S. K., J. Y. Cherniawsky, M. G. G. Foreman, J.-K. So and S. R. Lee, 2008. Spatial variability in annual sea level variations around the Korean peninsula, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03603, doi:10.1029/2007GL032527.
- Kim, D.Y., Park, S.H., Woo, S.B., Jeong, K.Y. and Lee, E.I., 2017. Sea level rise and storm surge around the southeastern coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 79, 239–243.
- Kim, Y.J. and Cho, K.W., 2016. Sea level rise around Korea: Analysis of tide gauge station data with the ensemble empirical mode decomposition method. *Journal of Hydro-environment Research*, 11, 138–145.
- Kirtman, B., D. Min, J. Infanti, J. Kinter, D. Paolino, Q. Zhang, H. van den Dool,

- S. Saha, M. Mendez, E. Becker, P. Peng, P. Tripp, J. Huang, D. DeWitt, M. Tippett, A. Barnston, S. Li, A. Rosati, S. Schubert, M. Rienecker, M. Suarez, Z. Li, J. Marshak, Y. Lim, J. Tribbia, K. Pegion, W. Merryfield, B. Denis, and E. Wood, 2014: The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 Seasonal-to-Interannual Prediction; Phase-2 toward Developing Intraseasonal Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 585 - 601, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00050.1.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2015. Analysis and Prediction of Sea Level Change. Busan, Republic of Korea: KHOA, 252p (in Korean).
- Kwon, M., 2013, Diagnosis of Northeast Asian summer precipitation using the western North Pacific subtropical high index. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 34, 102-106.
- Kwon, M.-H., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophysical Research Letters*, **32**, L16709, doi:10.1029/2005GL023026.
- Kwon, M., and K.-J. Lee, 2014: A prediction of Northeast Asian summer precipitation using the NCEP climate forecast system and canonical correlation analysis. *J. Korean Meteor. Soc.*, 35, 88-94.
- Large, W.G. and Yeager, S.G., 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. CGD Division of the National Center for Atmospheric Research, NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR.
- Large, W.G., J.C. McWilliams, and S.C. Doney, 1994: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization, *Reviews of Geophysics*, 32, 363-403
- Lee, E. J., J. G. Jhun, and C. K. Park, 2005: Remote connection of the east-Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *Journal of Climate*, **17**, 4381-4393.
- Lee, S. M., J.-G. Jhun, M. H. Kwon, and W. M. Kim, 2008: Changes in the western North Pacific summer monsoon circulation due to the CO₂ increase in IPCC AR4 CGCMs. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **44**, 351-368.
- Noh et al., 2016: Parameterization of Langmuir Circulation in the Ocean Mixed Layer Model Using LES and Its Application to the OGCM, 46, 57-78
- Moon, J.-H. and Lee, J., 2016. Shifts in multi-decadal sea level trends in the East/Japan Sea over the past 60 years. *Ocean Science Journal*, 51, 87-96.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the North-ern Hemisphere summer circulation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **65**, 373-390.

- Rio, M. H., S. Guinehut and G. Larnicol, 2011. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116, C07018, doi:10.1029/2010JC006505.
- Takikawa T. and Yoon, J.-H. 2005, Volume Transport through the Tsushima Straits Estimated from Sea Level Difference. *Journal of Oceanography*, 61, pp 699 - 708.
- Wang, B., B. Xiang, and J.-Y., Lee, 2012: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 2718-2722.
- Wang, B., R. Wu, and K.-M. Lau, 2001: Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons. *Journal of Climate*, **14**, 4073-4090.
- Watanabe, M. and F.-F. Jin, 2003: A moist linear baroclinic model: coupled dynamical convective response to El Nino. *Journal of Climate*, 16, 1121-1138.
- Weare, B., 1982: Examples of additionally constrained multiple linear regression. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 216-221.
- Yamaura, T., and T. Tomita, 2011: Spatiotemporal differences in the interannual variability of Baiu frontal activity in June. *International Journal of Climatolology*, **31**, 57-71, doi:10.1002/joc.2058.