



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

석사학위논문

CMIP5 모델의 북서태평양 21세기 말  
해수면 상승 전망

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

허 태 경

2017년 2월



The CMIP5 projection of sea level rising for  
the end of the 21<sup>st</sup> century over the  
northwestern Pacific

Tae-kyung Heo  
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of  
Master of Science

2016. 12.

This thesis has been examined and approved.

Interdisciplinary Program in Marine Meteorology  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# CMIP5 모델의 북서태평양 21세기 말 해수면 상승 전망

지도교수 문 일 주

허 태 경

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

2016년 12월

허태경의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장 \_\_\_\_\_(인)\_

위 원 \_\_\_\_\_(인)\_

위 원 \_\_\_\_\_(인)\_

제주대학교 대학원

2016년 12월



## 목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iii
Abstract	iv
1. 서론	1
2. 자료 및 분석방법	4
2.1. CMIP5 models	4
2.2. RCP 시나리오	7
2.3. 모델 오차보정 (drift removing) 방법	7
2.4. CSEOF 분석 방법	8
2.5. CMIP5 모델 검증	10
3. 북서태평양 해수면 상승전망	12
3.1. 역학적 해수면 고도(SSH) 전망	12
3.2. 해양 열팽창에 의한 해수면 변화	18
3.3. 열팽창을 고려한 해수면 상승	20
4. 북서태평양 해수면 변화의 원인 분석	28
5. 고찰	45
6. 요약 및 결론	46
7. 참고문헌	48

## List of Figures

Fig. 1 Time series of the CMIP5 models SSH (sea surface height) anomaly change for RCPs (related to 1986-2005). (a)RCP4.5, (b)RCP8.5 (m). .....	13
Fig. 2. Projected sea surface height from 11 CMIP5 models under RCP 4.5 (m/100yr). .....	14
Fig. 3. Same as Fig.2, but for RCP8.5 (m/100yr). .....	15
Fig. 4. The difference of 20-year averaged sea surface height(SSH, m/100yr) between the period 2081-2099 and 1986-2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP4.5, (b) RCP8.5. ....	17
Fig. 5. Same as in Fig1, but for global average thermal expansion sea level anomaly change (m). .....	18
Fig. 6. Same as in Fig.1, but for sea level rising (m) .....	20
Fig. 7. Projected sea level rising change with steric effect from 11 CMIP5 models under RCP 4.5 (m/100yr). .....	23
Fig. 8. Same as in Fig.6, but for RCP 8.5 sea level rising (m/100yr). .....	24
Fig. 9. The difference of 20-year averaged sea level rising (m) between the period 2081-2099 and 1986-2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP4.5, (b) RCP8.5. ....	25
Fig. 10. The difference of 20-year averaged sea surface temperature (SST,oC) between the period 2081-2099 and 1986-2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP4.5, (b) RCP8.5. ....	29
Fig. 11. Same as in Fig.8, but for the sea surface salinity (PSU).*	30
Fig. 12. Same as in Fig.8, but for the currents (m/s). .....	32
Fig. 13. Same as in Fig.8, but for the surface wind (m/s). .....	33

Fig. 14. Same as in Fig.8, but for the sea surface pressure (hPa).•34

Fig. 15. The 1st mode of sea level CSEOF anlysis using CMIP5 model ensemble mean for RCP4.5(a)time series, (b)spatial distribution.  
..... 36

Fig. 16. Same as in Fig.13, but for RCP8.5. .... 37

Fig. 17. Spatial distribution of the regression SST with 1st mode of sea level CSEOF analysis for (a)RCP 4.5 (b)RCP8.5. .... 39

Fig. 18. Same as in Fig. 17, but for sea surface salinity. .... 40

Fig. 19. Same as in Fig. 17, but for currents. .... 42

Fig. 20. Same as in Fig. 17, but for wind. .... 43

Fig. 21. Same as in Fig. 17, but for pressure. .... 44

## List of Tables

Table 1. Characteristics of CMIP5 models. ....	6
Table 2. The correlation for the sea surface level anomaly (1993-2013) of the modelled spatial pattern with the observed spatial pattern. ....	11
Table 3. Sea level rises estimated from CMIP5 models over the northwestern Pacific for RCP 4.5/8.5. ....	22



# Abstract

This study investigates sea level rise based on global warming in the northwestern Pacific using results of eleven CMIP5 climate models for end of the 21st century. The regional projections of sea level change are obtained from the combined global thermal steric expansion plus dynamic topography (sea surface height). At the end of the 21st century (2081 - 2100 relative to 1986 - 2005), the multimodel ensemble mean results projected the sea level rise 0.4 m [0.33-0.47m], 0.55m [0.45-0.61m] under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively, in the northwestern Pacific.

The CMIP5 projections of sea level changes toward the end of the 21st century reveal more higher over the Kuroshio current region in northwestern Pacific. CSEOF analysis reveals that sea level rises are caused by the decreasing sea level pressure over the high latitude as well as variations of pressure system in the northwestern Pacific and by the resultant change of water temperature. It also found that the highest sea level rise in the Kuroshio extension region of the northwestern Pacific was connected with the large increase of water temperature in this area. Changes in ocean currents, ocean density and sea level are coupled such that changes at one location impact local sea level. Although both temperature and salinity changes can contribute significantly to regional sea level change.

## 1. 서론

산업혁명 이후 인간에 의한 인위적으로 배출된 탄소의 증가로 인해 기후변화가 가속화 되고 있다. 기후 변화로 인한 전지구 해수면 상승은 시공간적으로 광범위하게 발생하는 현상이다. 조위 기록 및 1993년부터 시작되는 위성고도계 자료에 기초한 110년 동안의 평균 해수면 자료를 이용하여 계산한 결과, 세계 해면 평균(GMSL)은 1901-2010년까지 0.19 (0.17~0.21)m 상승하였다. 평균 해면 상승률은 1901-2010년 사이에는 1.7 (1.5~1.9)mm/yr, 1993년에서 2010년 사이에 3.2 (2.8~3.6)mm/yr로 증가하였다 (IPCC AR5. 2013). 한국과 일본을 포함한 아시아 해역에서의 1993-2001년 해수면 상승률은 5.4 mm/yr, 전지구의 2배이며 그 중 80%가 열적 요인이라 보고하였으며 기후 변화로 인한 해수면 상승은 점점 더 가속화 되고 있다 (Kang et al., 2005). 해수면 상승은 인구 및 산업시설이 집중되어있는 연안과 저지대지역은 침수될 위험성이 커지고 연안에서의 홍수와 해안 침식과 같은 심각한 영향을 미칠 수 있다. 우리나라를 포함한 아시아 지역은 작은 섬으로 이루어진 국가 들이 많아 해수면 상승에 대한 위험으로부터 대비책 마련이 시급하다 (IPCC AR5. 2013). 이를 위해서는 해수면 상승에 대한 과학적인 연구 및 예측이 선행되어야한다. 특히 해수면 상승에 대한 대응책 마련을 위해서 미래 해수면의 상승을 전망하는 일은 연안재해 대응의 시작점이라 할 수 있다 (회귀분석 et al., 2011).

해수면의 변화에 기여하는 많은 대기/해양/기후/물리 과정들은 공간적으로 다양한 패턴이 존재하기 때문에, 지역적인 해수면 상승의 변화경향은 전지구적인 평균과 다를 수 있다 (Willis and Church. 2012). 지역적인 해수면 변화는 전지구 평균으로부터 비롯되어 달라진다. 이러한 경향은 기후 변동성에 따른 역학적인 해양반응들이 복합적으로 나타난 결과이다 (Moon et al., 2016b). 바람과 해면기압, 대기-해수, 담수 플럭스, 해류로부터 기인된 해수의 변화와 해수의 물리적인 분포과정이 그러한 변동에 영향을 미칠 수 있다. 시간규모에 따라 변화에 영향을 미치는 요인들은 각기 다르게 나타난다. 해수면의 상승속도는 지역적 특성에 따라서 매우 다르게 나타나므로 국가와 도시 등의 국지적인 규모에서의 해수면 상승의 평가에 이목이 집중되고 있다 (Slangen et al., 2014)

우리나라 주변 해역의 해수면 높이 변화에 관한 연구결과들을 살펴보면 Moon et al. (2016a)에서는 인공위성을 이용한 해수면 고도측정과 조위계 결과로 1980년 초부터 동해에서 해수면 상승하였고, 상승 요인으로 바람 변화가 해양의 열적 분포에 영향을 미쳐 수십 년 동안의 해수면 변동성에 미치는 영향을 보고하였다. 김경호 등 (2009)은 1968년부터 2007년까지 약 40년의 조위관측자료를 바탕으로 우리나라 해수면이 평균  $2.16 \pm 1.71$  mm/yr 상승하였음을 보고하였다. 이와 같은 상승률은 비슷한 기간에 측정된 세계 평균 상승률 ( $1.8 \pm 0.5$ mm/yr)보다 높았다. 특히 제주도 북쪽해안의 경우 1964-2008년 사이에 해수면상승률이 5.3 mm/yr로 44년 동안 총 23cm 상승하였다. 조위관측소에서 얻은 1960~2002년의 자료로 해수면 변화를 파악한 결과에서도 우리나라 연안의 해수면이 상승하는 경향이 뚜렷히 나타나고, 특히 제주도 주변 해역의 상승률이 높았다고 Jeon et al.(2008)에서 설명하였다. 제주도 지역의 높은 해수면 상승률은 쿠로시오의 지류의 흐름이 제주도 쪽으로 전향되었기 때문으로 추정한다. 이러한 해류의 변화는 지구 온난화의 결과로 볼 수 있으며, 한반도 주변해역의 해양의 순환과정과 대기 모두 지구온난화의 영향을 받는다 (Yeh and Kim. 2010).

대기와 해양이 결합된 전지구 순환 모델 (Atmosphere-Ocean Global Coupled Model)은 대기 및 해양의 물리과정이 포함되어 대기-해양간의 순환 및 물순환 염분 변화를 포함한다. 전지구 순환 모델은 CMIP3 (The third phase Coupled Model Intercomparison Project)에서 CMIP5 (The fifth phase Coupled Model Intercomparison Project)로 세대교체를 통하여 정교화된 해양순환, 대기 해양간 순환 모형 등의 향상으로 해양 변화에 대한 이해가 향상되었다 (IPCC AR5, 2013). 기후모델 산출물의 활용성이 높아지면서 기후모델을 활용한 미래의 해수면 고도 전망 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 (Slangen et al., 2014; Landerer et al., 2014). 북서태평양 지역에서의 기후모델을 활용한 연구에는 김태윤 등 (2013)에서 대기온도 상승 값을 Vermeer and Rahmstorf. (2009)가 제안한 반경험식을 이용하여 해수면 상승치를 계산한 결과, RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오 (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)의 2100년도 해수면 예상 상승치는 각각

0.87m, 1.21m, 1.02m, 1.35m로 나타났으며, 2100년 이후 해수면 상승의 격차는 더 커질 것으로 예상하였다. 회귀분석 Oh et al. (2011)는 CMIP3 모델 중 MPI ECHAM5, GFDL-CM2.1의 이산화탄소 농도 증가 시나리오 (A1B) 결과를 이용하여 해양의 밀도 변화에 의한 수축 및 팽창으로 발생하는 역학고도를 계산하여 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승을 계산하였다. 이 연구에서 두 모델로부터 추정된 2001년부터 2100년까지의 열팽창에 의한 해수면 상승은 북서태평양에서 각각 24cm 와 28cm 로 나타났다. 그 외에 Huang et al. (2015)은 20세기 말 (1986-2005) 대비 21세기 말 (2081-2100) CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 모델 24종 앙상블 평균 해수면 변화의 분석을 통해 남중국해의 해수면이 RCP 8.5 시나리오에서 64.1cm 증가할 것으로 전망하였다.

CMIP5 모델 활용하여 우리나라를 포함한 북서태평양의 해수면 상승을 예측하는 것은 해수면 상승으로 예측되는 연안지역에서의 재해위험성을 평가하고 효율적 대응방안을 마련하기 위해 장기적인 관점에서의 미래 전망이 반드시 필요하다. 대부분의 국내 연구들은 관측결과를 이용하여 해수면 상승을 분석하고 있으며, 기후 모델을 토대로 한반도를 포함하고 있는 해수면 상승에 대한 미래 전망은 드물게 이루어지고 있다. 국내 선행연구 결과들은 단일 시나리오 또는 단일 모델만 사용하여 미래 전망을 실시 하였다. 단일 모델의 결과는 미래 전망을 제시하는데 불확실성이 크며 한계가 있다. 더욱이 이들 연구에서는 최신 기후모델을 이용하고 새로운 기후변화시나리오를 적용하여 북서태평양 해수면 전망을 보고한 결과가 없다.

본 연구에서는 최신 CMIP5 기후모델들의 산출물을 이용하여 다양한 시나리오에 대해 북서태평양 지역의 해수면 변화 전망을 조사하고자 한다. 또한 기후 모델 결과로부터 미래 해양 환경에 대한 정보를 추출하여 해수면 상승에 기여하는 해양 환경 변화를 살펴보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 위성 관측 자료를 이용하여 모델 성능을 정량적으로 평가하고 그 결과를 바탕으로 해수면 변동을 잘 모의하는 모델을 선택하여 분석에 사용 하였다.

## 2. 자료 및 분석 방법

본 연구는 CMIP5 본 연구에서는 해양과 대기가 접합된 CMIP5 모델을 사용한, 현재 및 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCPs, Moss et al., 2010) 시나리오 2종 (RCP 2.6 / 8.5)에 과거 및 미래전망에 대하여 20세기 말 (1985-2005) 대비 21세기 말 (2080-2100)의 결과를 분석하였다. 분석 범위는 선행연구를 따라 북서태평양이며 위도  $10^{\circ}$  -  $50^{\circ}$  N, 경도  $110^{\circ}$  -  $170^{\circ}$  E 로 설정하였다 (회귀분석 et al., 2011).

### 2.1. CMIP5 models

기후 변화 연구는 관측 자료를 바탕으로 하는 통계 추이분석과 미래기간에 대한 전지구 기후모델 (GCM, General Circulation Model) 산출물을 활용한 미래 기후 전망이 이루어지고 있는 추세이다. 본 연구에서는 전지구 대기-해양이 결합된 기후모형으로 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison; <http://pcmdi9.llnl.gov>)에서 공개된 CMIP5 참여모델 11종을 사용하였다 (Table. 1). 해양의 구성요소들은 해양 순환 모델들마다 서로 다른 구성을 가지고 해양을 모의한다. CanESM2 모델을 제외하고 나머지 10개 모델은 free surface과 freshwater flux 모델이다. CanESM2는 rigid lid 모델로서 3차원 염분과 해수온을 통해서 해수면 고도를 계산한다. 부피 보존의 부시네스크 근사(the volume-conserving Boussinesq scheme)를 사용한 모델은 9종, 질량보존을 보존하는 비 부시네스크 근사식 (the mass-conserving non-Boussinesq scheme)을 적용하는 모델은 2종 (NorESM1-M, NorESM1-ME)이다. 비 부시네스크 모델 (non-Boussinesq scheme)은 부시네스크 근사 (Boussinesq scheme)를 사용하는 모델에 비해 해수온도 및 염분의 변화와 관련된 효과를 포함한다. 그러나 비 부시네스크 모델의 공간적인 효과는 해수면의 대규모 운동에 거의 영향을 미치지 않는다. 해상도가 낮은 기후모형에서 부시네스크 근사에 의해서 발생하는 오차는 기후모델이 가지는 불확실성에 비하여 매우 작아 무시할 수 있다 (Losch et al., 2004).

과거 모의실험 결과와 미래 전망을 위해서 RCP 2종 (4.5/8.5) 시나리오 및 모델 오차 보정을 위한 산업화 이전의 제어적분실험결과 (preindustrial control run)를 사용하였다. 총 11개의 전지구 모델의 모의 결과를 사용하였다. CMIP5 프로젝트에 제출된 모델들은 서로 다른 앙상블 개수를 가지고, RCP시나리오 실험을 진행하였다. 동일한 앙상블 결과를 각각의 변수마다 비교하여 평가하기 위해서 IPCC 5차보고서와 Slangen et al. (2014)에서와 같이 앙상블 1번 결과를 사용하였다.

각각의 모델 들은 서로 다른 격자를 가지고 실험을 수행한다. 따라서 여러 모델을 정량적으로 비교하기 위해서는 공통적으로  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  도의 격자체계로 변환 해주어야 한다. 각각 모델에 따른 해수면 상승 변화, 평균, 변동성을 계산하기 위하여 본 연구에서는 내삽법을 사용하여 분석을 진행하였다.

해수면 상승 전망을 위해서 CMIP5 모델결과 “zos” , “zostoga” 변수를 사용하였다. “zos” 는 지오이드 위에서의 해수면 고도 (sea surface height above geoid)를 나타낸다. “zos” 변수는 시간에 따른 해수면 고도 (sea surface height, 이하 SSH)의 지역적인 변화를 살펴보는 데 사용된다. 해수괴의 (water mass) 이류, 열 염 순환과 바람에 의한 순환에 기인하는 역학반응이 포함되어 있으며 조수효과는 포함하지 않는다. 또한 CMIP5 모델은 빙하 및 빙상이 녹아내리는 해양질량변화를 설명하지는 않는다 (Landerer et al., 2014).

“zostoga” 변수는 해수의 열적 구조 변화에 기인하는 전지구 평균 해수면 상승을 나타낸다. 지역적인 해수면 상승은 CMIP5 모델에서 제공하지 않으며, 일부 모델에 대하여 전지구 해수면 상승 평균을 월평균 자료로 제공한다. IPCC 5차 보고서 13장 해수면 상승에서는 지역적인 해수면 상승을 전망하기 위해서 SSH와 전지구 평균해수면 상승을 합산하여 계산하였다. 본 연구에서는 선행연구를 따라 두 변수를 사용하여 지역적인 해수면 상승의 미래전망을 계산하려 한다. 또한 기후변화에 따른 해양환경의 변화와 해수면 상승과의 관계를 분석하기 위하여 바람, 해수면고도의 기압, 해류, 해수온, 염분의 RCP 시나리오의 미래전망 자료를 활용하였다.

Table 1. Characteristics of CMIP5 models.

National	Center	Model name	Atmosphere model resolution (lon° ×lat°)	Ocean model resolution (lon° ×lat°)	Sea level representation
UK	Metoffice	HadGEM2-ES	HadGAM2 1.875° x 1.25°	NEMO 1° x (1°-1/3°)	Boussinesq free surface freshwater flux
Germany	MPI	MPI-ESM-LR	ECHAM6 1.87° ×1.87°	MPIOM 1.5° x 1.5°	Boussinesq free surface freshwater flux
Japan	MRI	MRI-CGCM3	MRI-AGCM3.3 1.125° ×1.121°	MRI.COM3 1° x 0.5°	Boussinesq free surface freshwater flux
Australia	CSIRO	ACCESSS1-0	HadGAM2 1.875° x 1.25°	ACCESS-OM (MOM4p1) 1° x 1°	Boussinesq free surface freshwater flux
Australia	CSIRO	ACCESSS1-3	UM 1.0 1.875° x 1.25°	ACCESS-OM (MOM4p1) 1° x 1°	Boussinesq free surface freshwater flux
Norway	NCC	NorESM1-ME	CAM4-Oslo 1.9° ×2.5°	NorESM-Ocean 1.125° x 1.125°	non-Boussinesq free surface freshwater flux
Norway	NCC	NorESM1-M	CAM4-Oslo 1.9° ×2.5°	NorESM-Ocean 1.125° x 1.125°	non-Boussinesq free surface freshwater flux
USA	USCA	CCSM4	CAM4 0.9° ×1.25°	POP2 (1° ~1.125°) x (1°-0.27°)	Boussinesq free surface freshwater flux
Canada	CCCM	CanESM2	CanCM4 2.813° ×2.79°	GOLD 1.14° ×0.94°	Boussinesq rigid lid virtual salt flux
France	IPSL	IPSL-CM5A-MR	LMDZ5 1.9° × 3.75°	ORCA2 2° x (2°-0.5°)	Boussinesq free surface freshwater flux
France	IPSL	IPSL-CM5A-LR	LMDZ5 1.9° × 3.75°	ORCA2 2° x (2°-0.5°)	Boussinesq free surface freshwater flux

## 2.2. RCP 시나리오

RCP 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서에서 사용된 온실가스대표농도경로로서 인간 활동이 대기에 미치는 복사강제력으로 표현된다. 대표적으로 2.6, 4.5, 6.0, 8.5의 4종이 있으며 2100년까지 각기 다른 온실기체와 에어로졸 배출량으로 구성되어 있다. 이 시나리오는 각기 다른 사회 경제적 시나리오를 기반으로 하며 복사 강제력의 변화를 통하여 배출량의 범위와 CO<sub>2</sub>농도 변화를 포함한다 (Moss et al., 2010).

RCP 2.6 (van Vuuren et al., 2007), RCP 4.5 (Clarke et al., 2007), RCP 6.0 (Hijioka et al., 2008), RCP 8.5 (Riahi et al., 2011)을 간략히 살펴보면 강력한 온실 가스배출 저감 영향이 포함된 RCP 2.6 시나리오의 경우 복사강제력이 최고점인 3.0W/m<sup>2</sup> 이후에 21세기 말 까지 감소한다. RCP 4.5, 6.0은 복사강제력이 최대 6.0W/m<sup>2</sup>, 4.5W/m<sup>2</sup>이며 RCP 8.5는 복사강제력이 8.5 W/m<sup>2</sup>을 전망한다. RCP 8.5 시나리오는 높은 인구증가율과 낮은 기술발전으로 에너지를 많이 사용하여 온실가스 배출량이 많고 배출량 증가가 지속되어, 대기 중의 온실가스 농도가 높은 시나리오이다. 본 연구에서는 이 중 과거재현실험 (1860-2005)과 RCP 4.5, 8.5 시나리오 (2006-2100) 미래 전망을 활용하였다.

## 2.3. 모델 오차 보정 (drift removing) 방법

미래 기상학적 변동성 및 기후변화 영향은 지구시스템 모델 (Earth system model)을 통해 구체화되어 일반적인 기후변화 전망자료로 활용되고 있다. 전지구 기후모형은 전지구의 대기 과학적 역학 관계를 수치적으로 모의하여 대규모 기상장을 묘사한다. 따라서 지구시스템모형에 내재해 있는 시공간적 오차 및 불확실성으로 인해 모델로부터 생산되는 기후변화시나리오의 직접적인 이용에 어려움이 존재한다. IPCC 5 차 보고서 (2013) 13장과 선행연구에서는 해수면 전망과 관련하여, 기후모델결과가 내재하고 있는 불확실성에 대한 보정의 중요성을 강조하였다 (Landerer et al., 2015; Slangen et al., 2015). 해수면관련 변



수에 대한 모델 내 오차를 보정하기 위하여 산업혁명 이전 기후 제어적분 실험 (pre-industrial control run, 이하 PI 제어실험) 결과를 사용하였다 PI 제어실험 오차를 선형적으로 계산하여 각각의 위경도 마다 각각의 모델결과에서 제거하였다. 분석하고자 하는 변수들에 대하여 PI 제어실험결과를 제출한 모델 중 CMIP5 자료 센터를 통해 수집 가능한 모델은 총 12 종 이었으며, 그 중 본 연구에서는 관측과의 검증결과를 토대로 11종 모델을 분석에 활용하였다.

## 2.4 CSEOF 분석 방법

CSEOF (Cyclostationary Empirical Orthogonal Function) 분석은 기후자료가 가지는 순환적 성질을 고려하여 모델 결과의 주된 공간적 변동성을 설명하는 성분을 추출하는데 이용된다. EOF (Empirical Orthogonal Function) 분석과 다르게 CSEOF 분석에서는 추출되는 주요 변수가 시간에 따라 변하는 함수로 주어지며, 이는 자료에 푸리에 급수의 개념을 적용하여 구해진다. 시공간적 주기성을 가지는 자료를  $T(x, t)$ 는 CSEOF분석에서 다음과 같은 식으로 표현된다(Kim and North. 1997).

$$T(x,t) = \sum_n S_n(t)B_n(x,t) \quad (1)$$

식 (1)에서  $B_n(x, t)$ 는  $n$  번째 CSEOF의 시간  $t$ 와 공간  $x$ 에 따른 변화를 나타내며  $S_n(t)$ 는  $n$  번째 CSEOF의 주성분 시계열을 나타낸다. CSEOF는 자료의 주된 변동 특성을 나타내며,  $n$  개의 CSEOF들은 서로 독립인 특성을 가진다. 또한 EOF와 다르게 CSEOF는 주기  $d$ 를 가지고 반복되는 특성을 가지고 있다. 이 특성을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$B_n(r,t) = B_n(r,t+d) \quad (2)$$

CSEOF 분석에서는 자료의 순환적인 특성을 고려하여 자료를 분석하기 때

에 순환적인 특성이 나타나는 변수가 자료에 정확하게 지정되어 있어야 한다. 전 지구 격자형 자료에 대한 CSEOF 분석은 자료의 공간적 순환성을 고려한 경우와 계절적 순환성을 고려한 경우로 나뉜다. 공간적 순환성을 고려한 CSEOF 분석에서는 시간에 따른 자료의 공간 변화를 분석할 수 있다.

## 2.5 CMIP5 모델 검증

CMIP5 모델의 검증을 위하여 위성 관측 자료인 AVISO 자료를 활용하였다. AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>) 자료는 인공위성들의 해면 궤적 (ground track)을 따라 관측한 해수면 높이자료들을 혼합하여 0.25 도 간격의 격자로 월 평균 해수면 고도 편차자료를 생산한다. 1993년부터 2013년까지의 20년 기간의 위성관측 값과 CMIP5 모델 결과의 해수면 상승에 대한 상관도를 계산하였다 (Table. 2).

11 종 모델 대부분 0.9 이상의 높은 상관도를 나타내었으며 CMIP5 앙상블 평균 값도 0.99 이상의 높은 상관도를 보였다. 상관도가 0.99 이상인 모델들은 CanESM2, ACCESS 1-0, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NorESM1-ME, NorESM1-M으로 총 6 개의 모델에서 관측과 유사한 경향을 나타내었다. 반면 IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR 모델이 0.91, 0.94로 상대적으로 낮은 상관도를 보였으나, 대부분의 모델들이 상관도가 높다고 할 수 있다. ACCESS 1-0, ACCESS 1-3 모델은 같은 해양 모델을 사용하고 있으나, 대기 모델과 육상 지면모델이 달라서 해수면상승에 대한 관측과의 상관도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 해양 모듈 뿐 만 아니라, 해양 모듈에 결합된 대기, 지면 모델에 따라서 해양에서의 순환과정에 영향을 미치는 것을 나타낸다.

수집한 12개의 모델 중에 MIROC-ESM 모델은 관측과 상관도가 0.97로 높았지만, Landerer et al. (2015) 및 Melet et al. (2015)에서 MIROC-ESM의 SSH, 열적팽창에 의한 해수면상승에 대해 다른 모델에 비하여 큰 오차로 인하여 분석에서 제외 하였다. 선행연구결과를 따라 본 연구에서도 MIROC-ESM을 분석에서 제외하였다. 선택된 CMIP5 모델 11종과 관측 자료와의 시공간성 상관도가 0.9 이상으로 높게 나타나, CMIP5 모델을 사용한 해수면 상승에 대한 과거모의가 매우 유의미한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구 결과에서는 선택한 모델 11개를 사용하여 미래의 해수면상승을 전망하고자 한다.

Table 2. The correlation for the sea surface level anomaly (1993–2013) of the modelled spatial pattern with the observed spatial pattern.

Model name	관측과의 상관계수 (correlation)
CanESM2	0.99
ACCESS1-0	0.99
ACCESS1-3	0.95
MPI-ESM-LR	0.99
IPSL-CM5A-LR	0.92
IPSL-CM5A-MR	0.95
MRI-CGCM3	0.99
NorESM1-M	0.99
NorESM1-ME	0.99
HadGEM2-ES	0.95
CCSM4	0.99
CMIP5 model mean	0.99

### 3. 북서태평양 해수면 상승 전망

#### 3.1. 역학적 해수면 고도 (SSH) 변화

CMIP5 기후 모델에서 제공하는 해수면 (SSH) 예측자료는 열팽창을 고려하지 않은 변수이며, 수괴 이동, 열 염분 순환 및 풍력 순환에 의한 동적 지형변화의 지역적 다양성을 포함 한다 (Yin et al., 2010). 중력과 하중에서 기인한 해수면에 대한 효과로 해양에서의 질량이 변화되어 지역적으로 SSH의 불 균질한 패턴을 발생시킨다. SSH 변화를 통하여 해수면의 (water mass) 이류, 열 염 순환과 바람에 의한 순환에 기인하는 역학반응을 살펴 볼 수 있다.

본 연구에서는 CMIP5 모델 11종을 활용하여 RCP 4.5/8.5에서 열팽창 효과를 제외한 북서태평양 지역의 해수면 고도 변화를 시간에 따른 아노말리 시계열로 나타내었다 (Fig.1).

북서태평양에서 CMIP5 모델 11종의 20세기 말 (1986-2005년) 대비 21세기 말 (2081-2100년) SSH 아노말리 평균 변화와 모델 편차 (spread)는 RCP 4.5, RCP 8.5에서 각각 0.04m [-0.2~0.26m], 0.08m [-0.26~0.43m]씩 증가하였다. CMIP5 11종 모델 간 편차가 매우 크다. RCP 4.5보다 RCP 8.5에서 모델 간 변동 폭이 더 크게 나타난다. 두 시나리오에 처방된 탄소 배출량의 차이에서 SSH의 아노말리 평균변화가 기인했다. RCP 8.5 시나리오는 고농도의 이산화탄소 시나리오로서 복사강제력의 변화가 더 큰 시나리오이다. 따라서 기후변화의 강도가 더 크게 진행되어, SSH의 미래 전망에서 RCP 8.5에서 RCP 4.5보다 더 높게 해수면 고도가 상승하는 것으로 사료 된다.

두 시나리오에서 동일하게 NorESM1-M, NorESM1-ME 두 모델이 급격히 증가하는 경향을 나타내며 21세기 말 RCP 8.5에서 각각 약 0.4m 이상 증가하였다. 반면, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, ACCESS1-3 등의 모델 셋은 20세기 말 보다 각각 RCP 8.5에서 -0.26m, -0.12m, -0.01m 미래 SSH가 감소하였다. 증가하는 경향을 나타내는 모델과 감소경향을 가진 모델이 평균을 계산할 때 서로 상쇄되어서 CMIP5 모델평균이 작은 변화 전망을 모의하며 CMIP5 모델을 이용한 선행연구결과와 유사하다 (Landerer et al., 2014).

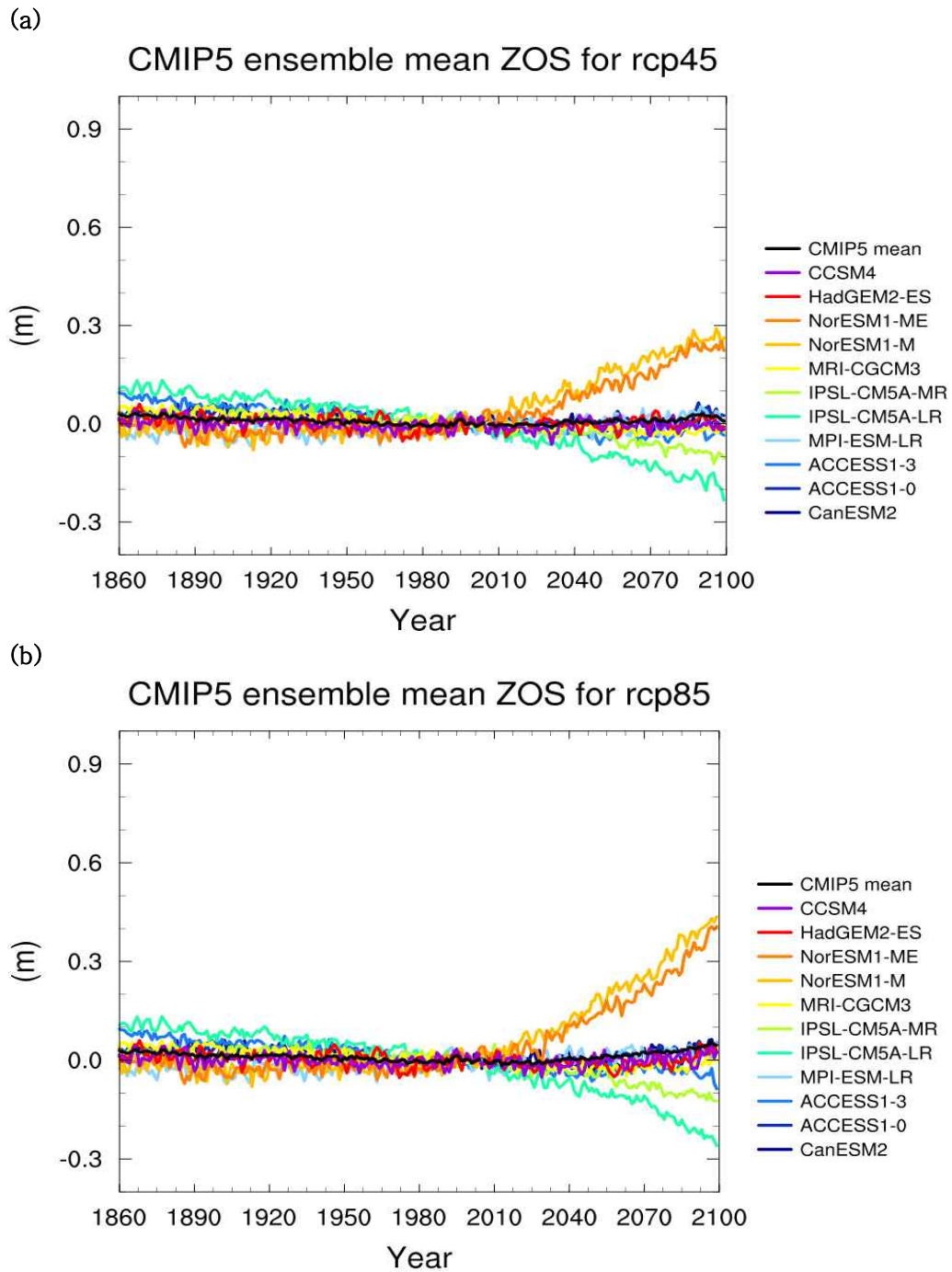


Figure. 1. Time series of the CMIP5 models SSH (sea surface height) anomaly change for RCPs (related to 1986–2005). (a)RCP4.5, (b)RCP8.5 (m).

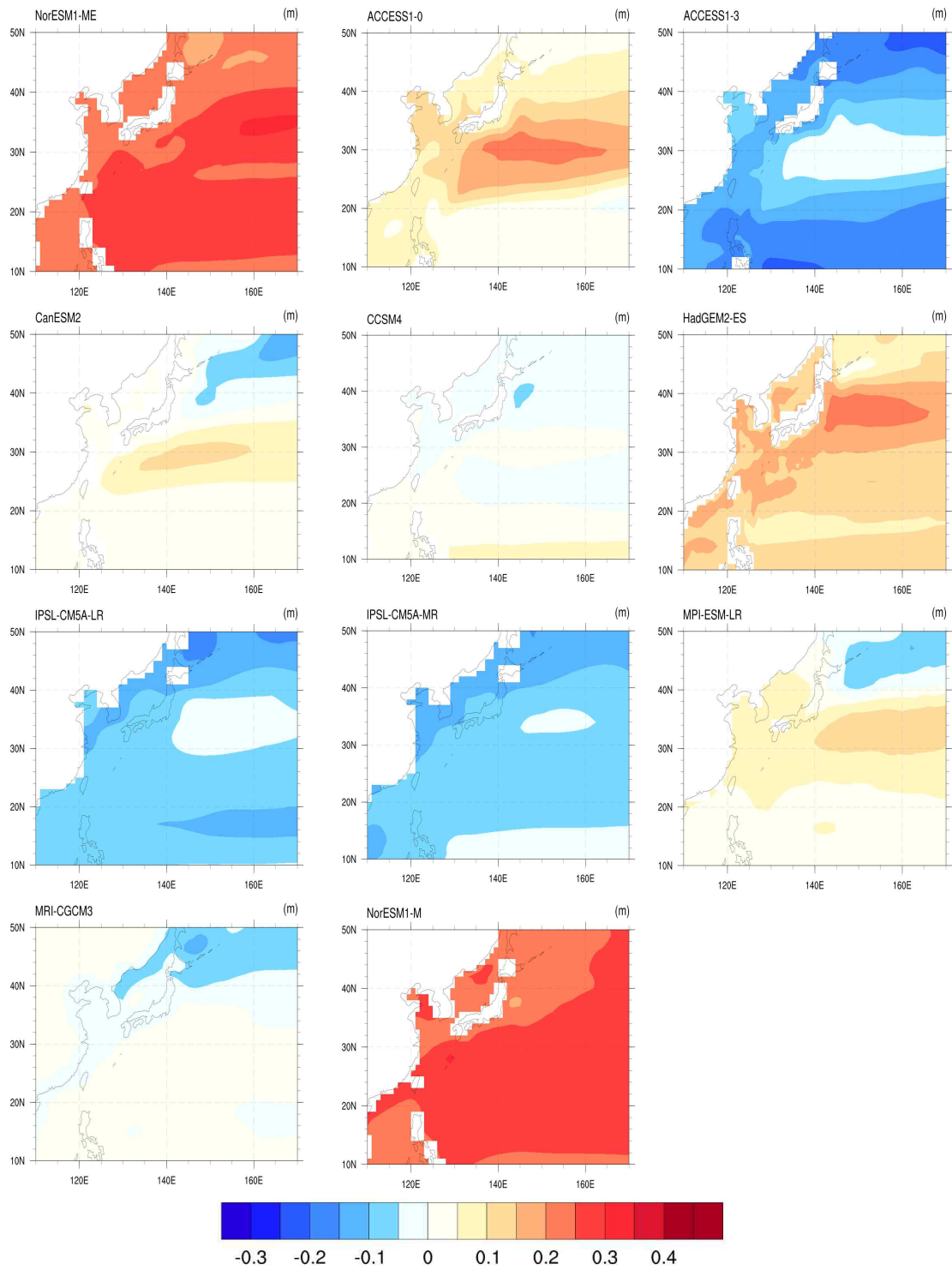


Figure. 2. Projected sea surface height from 11 CMIP5 models under RCP 4.5 (m/100yr).

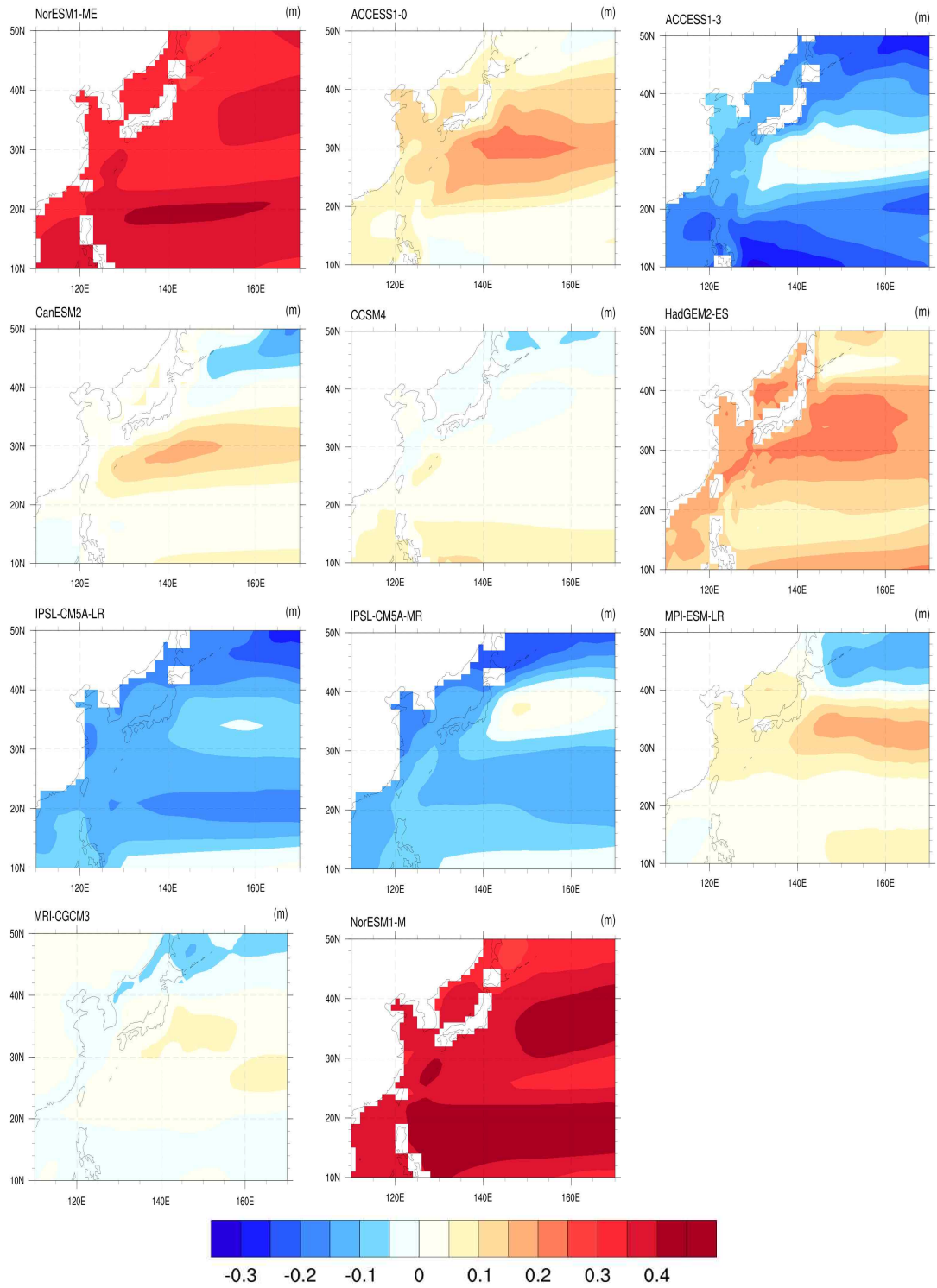
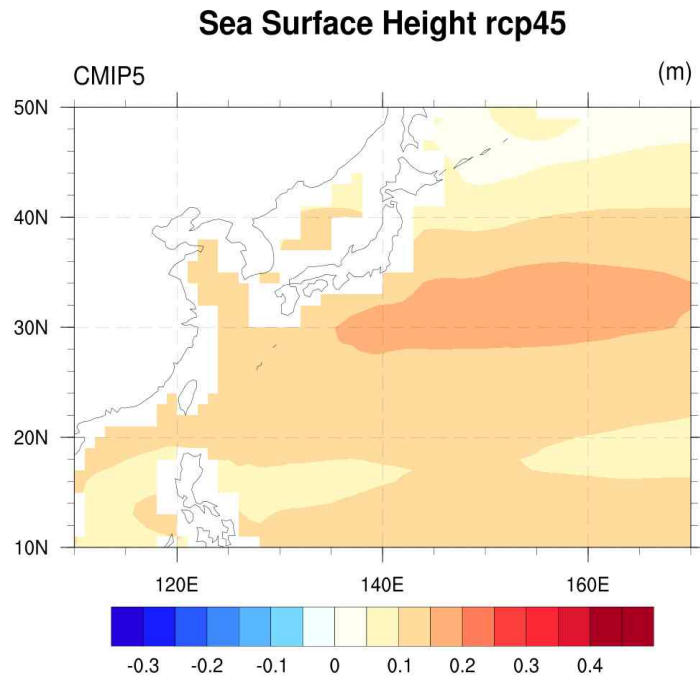


Figure. 3. Same as Fig.2, but for RCP8.5 (m/100yr).



공간 평균을 통해서 지역적 해수면 분석하기 위해 공간에 대한 수평장 분석을 하였다. 지역적인 SSH를 살펴보기 위하여 Fig.2, 3 에서 RCP 4.5/8.5의 21세기 말 (2081년-2100년)의 평균에서 20세기 말 (1986년-2005년) 평균의 차이를 나타내었다. CMIP5 앙상블 평균장은 쿠로시오 해류를 따라서 쿠로시오 해류의 확장역에서 SSH가 증가하는 양상을 두 RCP 시나리오 미래 전망에서 동일하게 나타냈다. 쿠로시오해류를 따라 많이 증가하는 지역과 그 외 지역의 차이가 매우 뚜렷하게 나타난다. 기후변화가 더 많이 진행 될 것으로 전망하는 RCP 8.5에서는 RCP 4.5에서 보다 모델 간 격차가 더 크게 나타나 SSH의 증가 분포 경향은 매우 다르게 나타난다. 쿠로시오해류가 확장하는 지역에서의 SSH 증가 경향은 모델 11종에서, 두 RCP 시나리오 모두 동일하게 전망하였다. 북서태평양 지역에서 해수면 상승에 쿠로시오 해류가 영향을 미칠 수 있다는 이에 따라서 기존 선행 연구에서 보고한 바와 유사함을 알 수 있다 (회귀분석 et al., 2013, IPCC AR5. 2013).

(a)



(b)

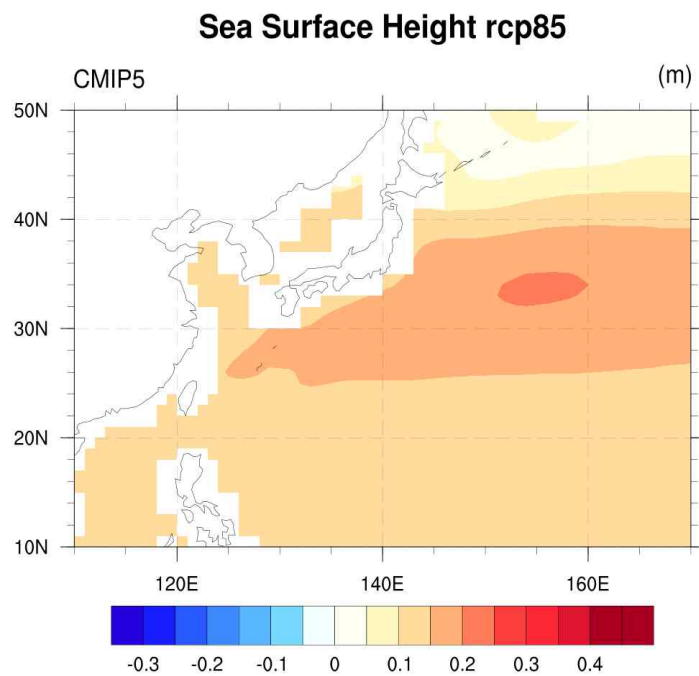


Figure. 4. The difference of 20-year averaged sea surface height (SSH, m/100yr) between the period 2081–2099 and 1986–2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP 4.5, (b) RCP 8.5.

### 3.2. 해양 열팽창에 의한 해수면 변화

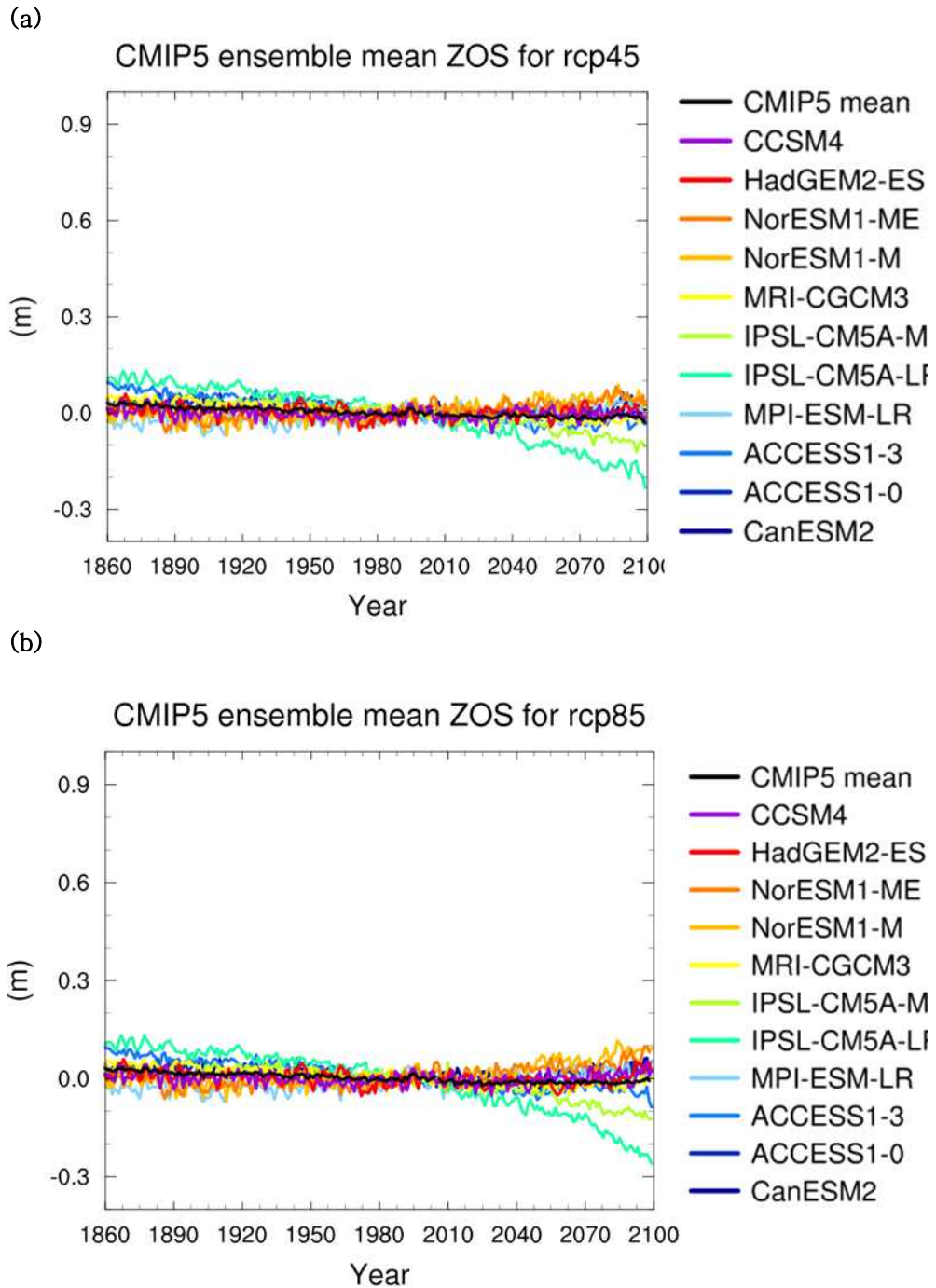


Figure. 5. Same as in Fig1, but for global average thermal expansion sea level anomaly change (m).

CMIP5 기후모델들은 지역적인 열팽창에 의한 해수면 전망자료를 제공하지 않으며, 일부 모델에서 전지구 평균 열팽창에 의한 해수면 상승값을 “zostoga” 변수를 통해 제공한다. 전지구 열팽창에 의한 해수면 상승을 11개 모델에 대하여 1986년-2005년을 기준으로 1860년부터 2100년까지의 아노말리를 RCP 2종 (4.5/8.5)에 대하여 계산하였다 (Fig. 4).

전지구 CMIP5 모델 11종의 20세기 말 대비 21세기 말 열팽창에 의한 해수면 상승 아노말리 평균 변화와 모델편차는 RCP 4.5, RCP 8.5에서 각각 0.37m [0.33~0.42m], 0.49m [0.41~0.51m] 증가를 전망하였다. 두 RCP 시나리오에서 동일하게 21세기 말 가장 낮은 해수면 열팽창을 모의하는 모델은 MRI-CGCM3, 가장 높은 해수면 열팽창을 모의하는 모델은 ACCESS1-0으로 나타났다. 해수의 열팽창효과로 20세기말 대비 21세기 말 CMIP5 앙상블 평균 변화는 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 0.4m, 0.52m 증가하는 것으로 전망된다. 탄소 저감 정책이 포함된 RCP 4.5보다 탄소 저감 정책이 포함되지 않은 RCP 8.5 미래전망에서 해수면상승의 열팽창이 더 높게 나타난다. 2000년 이후 전지구 평균해수면이 지속적으로 상승할 것은 사실상 확실하며, 해수면 상승 정도는 미래 배출량 수준에 따라 달라질 것이다.

본 기후 모델의 전망 결과에서 가장 영향을 많이 미치는 것이 기후 변화 일 것이다. CMIP5 기후모델 결과 전지구 열팽창으로 인한 해수면 상승은 21세기 말로 갈수록 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 기후변화는 인위적으로 발생되는 온실가스에 의해서 21세기에든 계속 될 것이다. 따라서 기후변화로 인한 해수면 열팽창은 더 빠르게, 더 높게 진행될 것을 전망할 수 있다 (IPCC AR5., 2013, Melet and Meyssignac. 2015).

수 십 년간의 시간규모에서 기후시스템의 순 에너지 증가의 90% 이상이 해양에 저장된다. 열팽창으로 인한 전 지구 해수면 상승은 해양 열 함량의 증가에 비례한다 (Korper et al., 2013, Perrette et al., 2013).

### 3.3. 열팽창을 고려한 해수면 상승

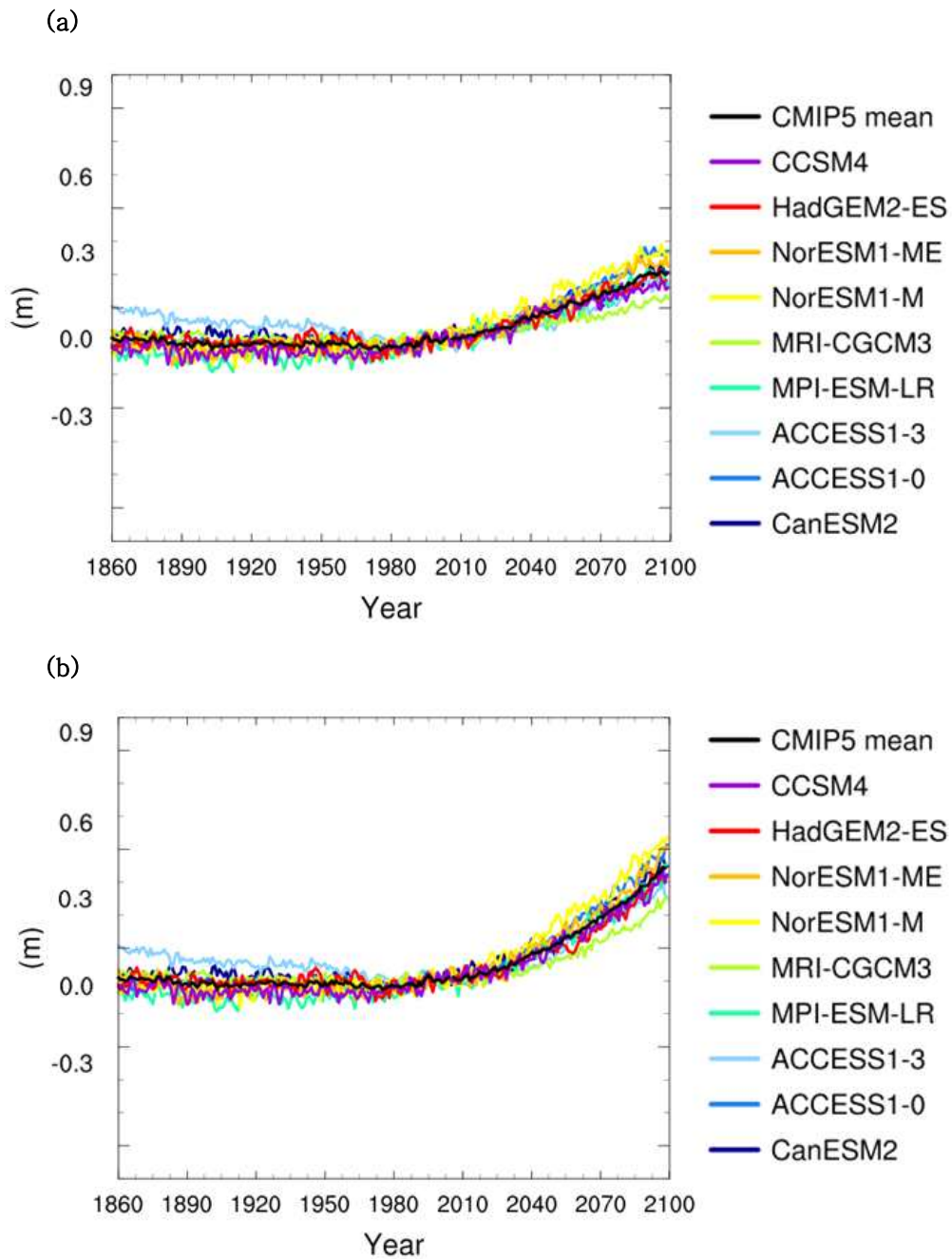


Figure. 6. Same as in Fig.1, but for sea level rising (m)

CMIP5 모델 11종을 RCP 4.5/8.5에서 SSH 결과와 열팽창 효과를 합산하여 북서태평양 지역의 해수면 고도 변화를 시간에 따른 아노말리 시계열로 나타내었다 (Fig. 6). 20세말 말 대비 21세기 말의 RCP 4.5/8.5 시나리오에 따른 해수면 상승에 대한 정량적인 변화를 Table. 3으로 정리하였다. CMIP5 모델 평균 미래 북서태평양의 해수면 상승과 모델편차는 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 0.4 m [0.15-0.68m], 0.57m [0.25-0.98m] 증가할 것을 전망하였다. IPCC 5차 보고서에서는 전 지구 해수면이 고농도 배출 시나리오인 RCP 8.5 결과로 20세기 말 대비 21세기 말 약 0.45-0.82m 상승할 것이라 전망한 결과와 유사하다. 탄소 저감 정책이 포함된 RCP 4.5에 비하여 저감 정책이 포함되지 않아 탄소배출량이 많은 RCP 8.5시나리오에서 기후변화에 따른 해수면 상승을 높게 전망하였다. 기후피드백효과로 인하여 기후변화가 지속될수록 기온이 더 많이 상승하고 대기와 해양에서의 기후변화도 가속화 된다. 기후변화의 가속화는 해수면을 더 빠르게 상승시킬 것을 의미한다. 해수면 상승 정도는 미래 배출량 수준에 따라 달라질 것이라는 선행연구결과와 일치 한다 (IPCC AR5, 2013).

해수면 상승의 공간적인 변동을 살펴보기 위하여 20세기 말 대비 21세기 말의 차이를 수평적인 평균장으로 CMIP5 11개 모델에 대해 제시하였다 (Fig. 7, Fig. 8). 또한 CMIP5 11종 모델의 앙상블 평균 공간적인 변화를 RCP2종에 대하여 제시하였다 (Fig. 9). 같은 RCP 시나리오 환경이라도 온난화에 대한섭씨 1도당 해수의 팽창은 고온 및 고압환경에서 더 커지기 때문에, 해양에서의 온난화의 수직 및 위도분포에 의존하며 모델 간 공간적인 상승률이 달라진다. (Korper et al., 2013, Perrette et al., 2013).

20세기 말 대비 21세기 말 우리나라 해역을 포함한 북위 30-40도, 경도 130-160도 부근에서 원형의 띠 형태의 해수면 상승역이 선명히 나타난다. 이 해역은 쿠로시오해류가 사행하는 부분과 일치하며, 해류가 북태평양으로 동진하여 확장하는 구역에서 해수면이 높게 상승하는 것을 CMIP5 11 종 모델에서 동일하게 전망했다. 쿠로시오 해역에서 가장 많이 해수면이 상승할 것으로 모든 모델이 같은 전망을 모의하였으나, 북서태평양 지역적인 해수면 증가 성향은 모델마다 각기 다르게 나타났다. ACCESS1-0, HadGEM2-ES 모델이 해수면 상승역에 대한 분포가 CMIP5 앙상블 평균값과 유사한 경향을 나타내었으며 그 외

NorESM1-ME, NorESM1-M 모델은 과대모의 하는 경향이 나타났다. 이러한 차이는 대기-해양이 결합된 기후모델의 구성과 모수화 과정에서 해수면 변화를 예상하는데 있어서 불확실성과 관련된 부분이 물수지 계산과 연관되어 있다. 물수지 계산이 포함되었는지, 해양모델에 빙하모듈이 포함되어 빙하녹음이 해양순환에 계산되는지에 대해서도 결과가 달라진다 (Slangen et al., 2012). 그 외에도 대기-해양 순환 모델의 특성에 따라서 대기의 에어로졸, 복사강제력의 계산 과정에 따라서도 해양의 해수면 상승 결과가 다르게 나타날 수 있다 (Huang et al., 2015).

Table 3. Sea level rises estimated from CMIP5 models over the northwestern Pacific for RCP 4.5/8.5.

Model name	Sea Level Rise (m/100yr)	
	Scenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
CanESM2	0.41	0.55
ACCESS1-0	0.47	0.61
ACCESS1-3	0.38	0.45
MPI-ESM-LR	0.37	0.55
IPSL-CM5A-LR	0.15	0.25
IPSL-CM5A-MR	0.28	0.39
MRI-CGCM3	0.33	0.45
NorESM1-M	0.68	0.98
NorESM1-ME	0.64	0.94
HadGEM2-ES	0.38	0.59
CCSM4	0.36	0.52
CMIP5 mean	0.40	0.57

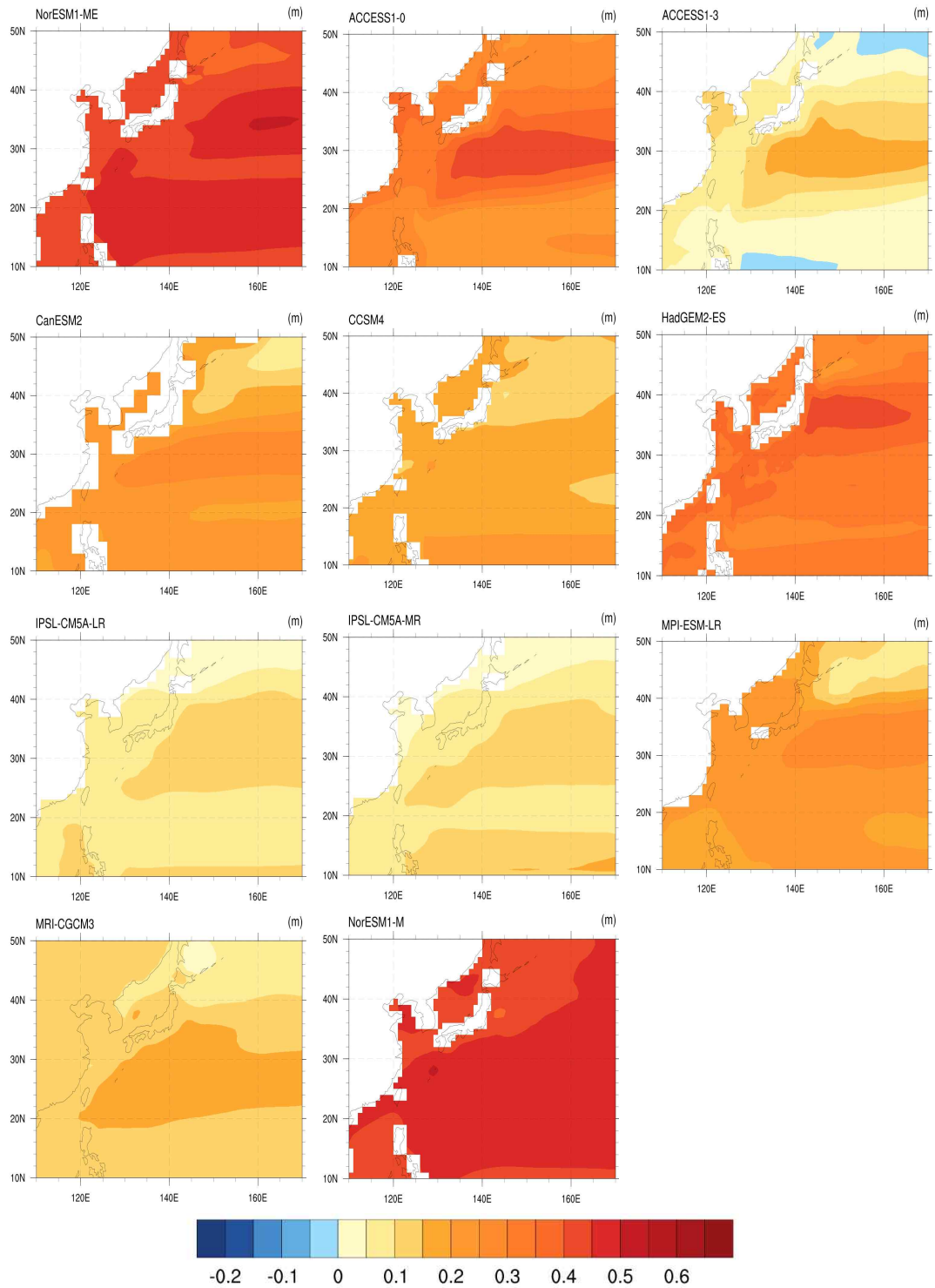


Figure. 7. Projected sea level rising change with steric effect from 11 CMIP5 models under RCP 4.5 (m/100yr).



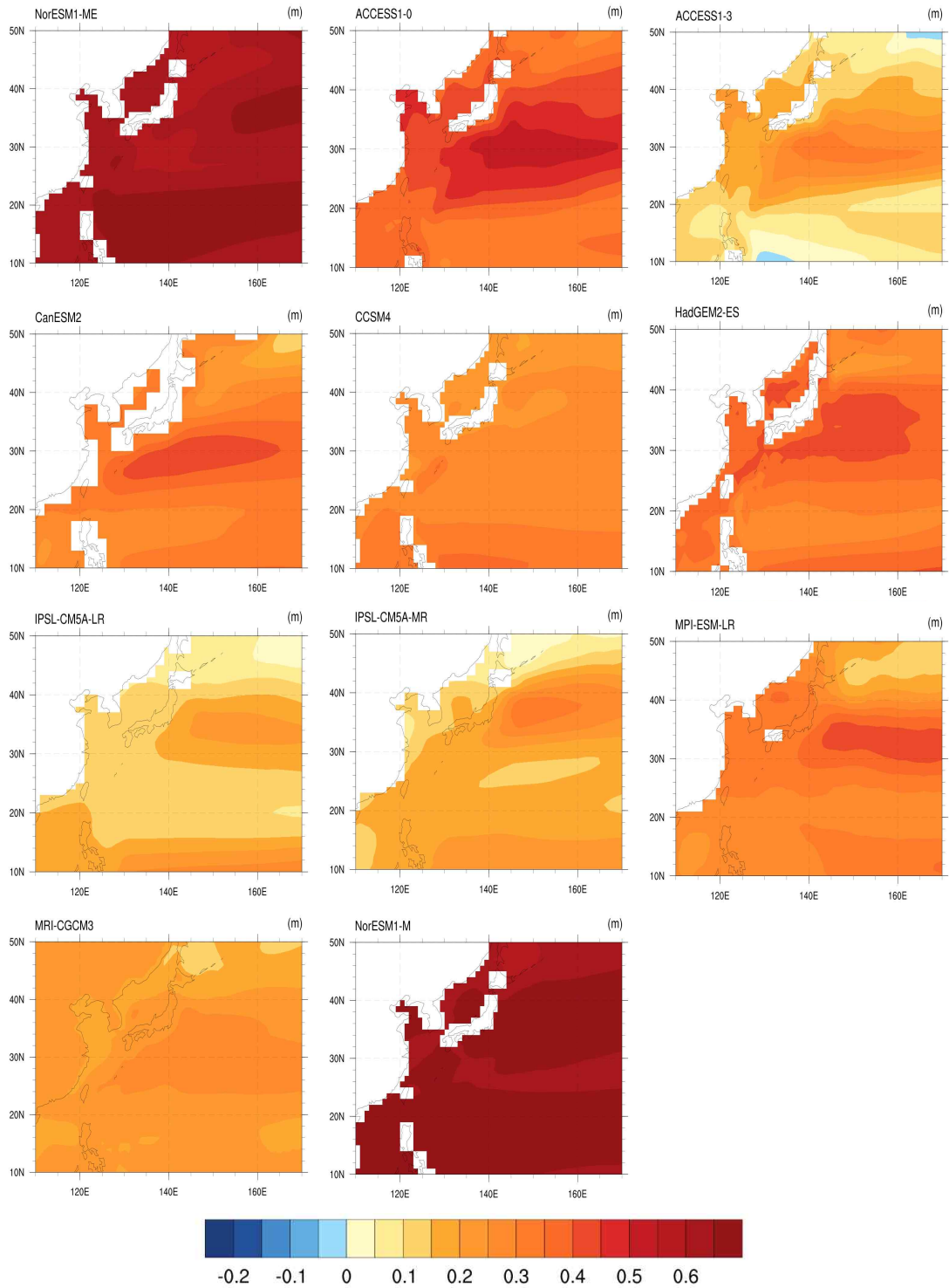
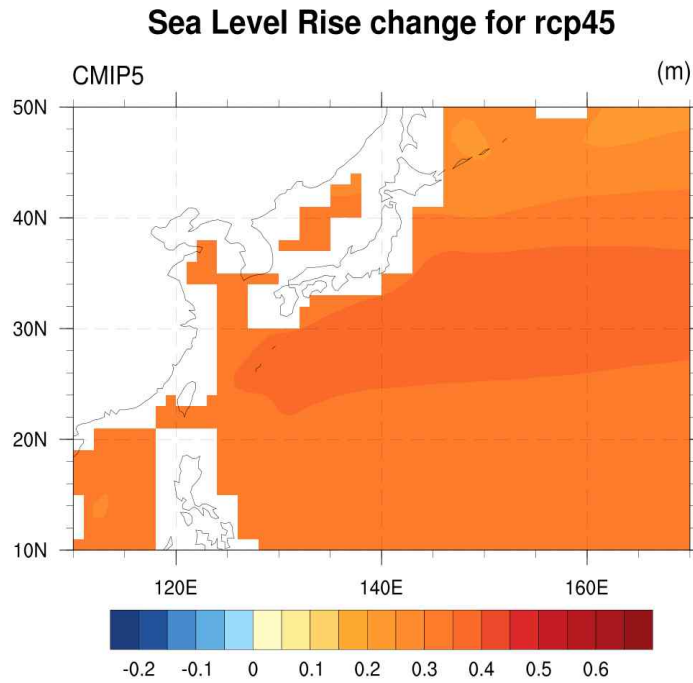


Figure. 8. Same as in Fig.6, but for RCP 8.5 sea level rising (m/100yr).

(a)



(b)

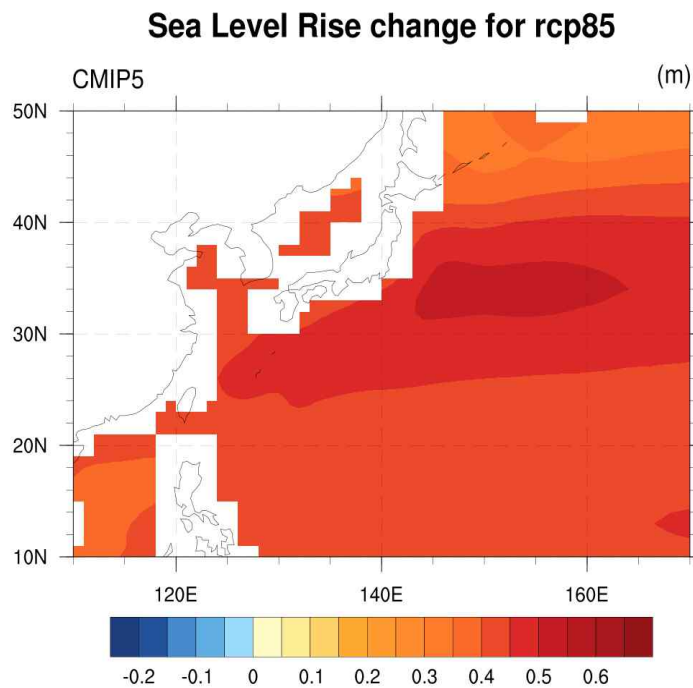


Figure. 9. The difference of 20-year averaged sea level rising (m) between the period 2081–2099 and 1986–2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP 4.5, (b) RCP 8.5.

21세기 말 북서태평양 해수면 상승전망에서 해수면이 가장 적게 상승할 것으로 모의 한 모델은 두 시나리오에서 동일하게 IPSL 계열의 IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR 모델이다. 반면 NorESM 계열의 NorESM1-M, NorESM1-ME 모델에서 해수면이 가장 많이 상승할 것을 모의하였다. Dufresne et al. (2013)에서 보고한 바에 따르면 IPSL-CM5A 계열 모델들은 에어로솔, 화산, 오존의 강제력의 평형상태가 이루어지지 않은 상태로 실험을 진행한 결과 과거기간에 대해서 관측보다 약 1도 (K) 정도 낮은 해양에서의 저온 편향 (cold bias)을 나타낸다. 이에 따라 해수면 온도에 역학적으로 영향을 받는 해수면 상승에서 IPSL-CM5A 계열의 모델이 다른 모델에 비하여 적은 해수면 상승을 모의한다. 따라서 본 연구에서는 바이어스가 큰 모델이라 해수면 상승 전망에서 제외하였다.

NorESM1-M, NorESM1-ME 모델이 다른 모델에 비하여 높은 해수면 상승을 모의하였다. 이 두 모델은 질량보존을 보존하는 비 부시네스크 근사식 (the mass-conserving non-Boussinesq scheme)을 적용하는 모델이다. 비 부시네스크 모델 (non-Boussinesq scheme)은 부시네스크 근사 (Boussinesq scheme)를 사용하는 모델에 비해 해수온도 및 염분의 변화와 관련된 효과를 포함한다. 따라서 기온 및 해수면 상승 등 해양 환경조건의 변화가 해수면 상승에 함께 계산되므로 기후변화에 따른 해수면 상승이 다른 모델과 비교하여 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 따라서 해수면 상승을 계산할 때, 부시네스크 근사식을 사용한 NorESM1 계열의 모델은 열적인 팽창 (zostoga)만을 고려하여 해수면 상승을 고려하였다. 이는 해수면이 기후 변화에 따라 해수의 열팽창을 고려한 해수면 상승의 결과라고 사료되기 때문이다.

고농도의 RCP8.5의 경우, 해수면 상승에 대한 모델 간 차이가 RCP4.5보다 크다. 해수면 상승의 미래전망은 21세기 말로 갈수록 모델별 변동성이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 모델 간 사용한 해양, 대기 모델이 서로 상이하기 때문에 기후변화에 따른 지역적인 반응이 서로 다르게 계산하여 모델결과 값의 편차가 RCP 4.5/8.5에서 0.1, 0.28 (m) 크게 나타난다. 이러한 결과는 전지구 및 지역적인 해수면 상승전망에서 시나리오에 따른 불확실성은 20세기 말 보다 21세기말 증가한다는 선행연구 결과와 일치한다 (Little et al., 2014). 앙상블 평

균값은 관찰된 기후 변화의 원인에 대한 전반적인 신뢰 수준이 높이고, 단일 기후 모델을 기반으로 한 평가와 관련된 불확실성이 감소한다 (IPCC AR5, 2013). 불확실성을 줄이기 위하여 CMIP5 11개 모델의 앙상블 평균값을 사용하여 해수면 상승을 전망했다.

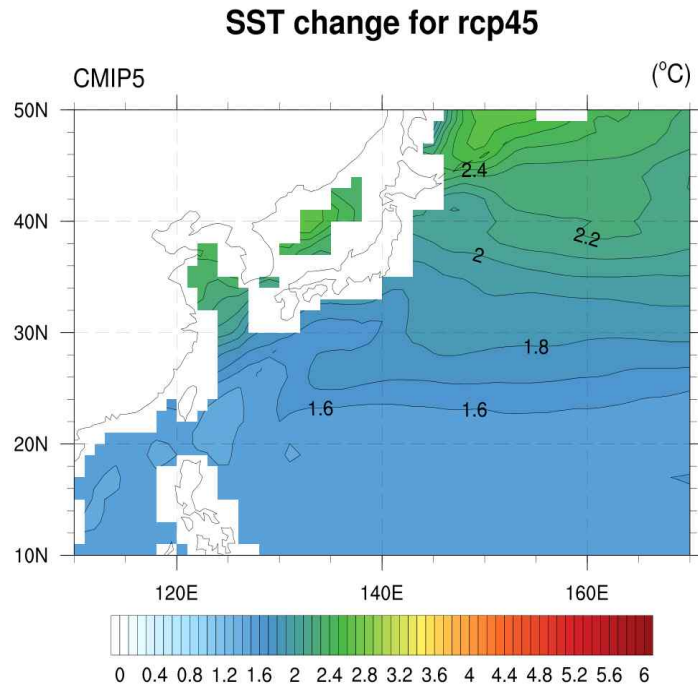
#### 4. 북서태평양 해수면 변화의 원인분석

해수면 상승의 공간적인 분포는 지역적인 해수온 증가에 따른 팽창과 염분에 따라 달라진다. CMIP5 모델 11종을 이용하여 21세기 말의 해양환경변화를 통하여 해수면 상승에 미친 영향을 분석하였다. 해수면 상승과 관련된 해양·대기 변수는 해수면온도 (Sea surface temperature, SST), 해수면 염분 (Sea surface salinity, SSS), 해류 (current), 해수면 바람, 해면기압이다. 우리나라와 일본을 포함하여 지역적으로 해류 특성의 변화와 이와 연관된 바람, 해면기압, 지역적인 수온 및 염분의 미래 변화를 살펴보고 해수면 상승과의 회귀분석하여 해수면 상승의 원인분석을 실시하였다.

기후 변화에 따른 해양환경 변화를 살펴보기 위하여, 20세기 말 20년 기후 값과 21세기 말 20년 기후 값의 차이를 통하여 100년간의 각 변수들의 변화를 분석하였다. 또한 CSEOF 통계 분석법을 사용하여 해수면 자료로부터 온난화 모드를 추출하고 환경변수들과의 회귀분석하였다.

인간 영향은 기후 시스템의 주요 평가 요소 중 거의 모든 요소에서 발견되었다. CMIP5 앙상블 평균으로 인간의 영향력이 지구 기후 시스템을 따뜻하게 한다는 것이 거의 확실하다 (IPCC AR5, 2013). 인위적 영향은 지구 표면, 대기 및 해양에서의 온도 변화, 그리고 물 순환 및 해수면의 변화에서 확인할 수 있다. 해수면 온도의 기후변화에 대한 영향을 살펴보기 위하여 20세기 말 대비 21세기 말 변화를 RCP 4.5/8.5 시나리오에 따라 계산하였다 (Fig.10). 해수면 온도는 저위도보다 고위도에서 급격히 상승한다. RCP4.5와 RCP8.5 해수면온도 변화를 비교하였을 때, RCP 8.5에서 약 2배 높은 해수면 상승을 나타내어, 탄소 배출량에 따른 기후변화가 해수온 변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 탄소 배출량이 많은 고농도 시나리오인 RCP 8.5 결과 북위 40도 이상의 고위도 지역에서 약 4 °C이상의 높은 해수면온도 상승을 나타내었다. 또한 쿠로시오해류의 확장역을 따라서 해수온이 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 1.6 °C, 3.2 °C 이상 증가한다. 해수면 상승이 높게 전망된 쿠로시오 해역에서의 해수온의 증가가 높게 나타난 것은 해수의 열적 팽창 해수면 상승에 영향을 미치는 것을 의미한다.

(a)



(b)

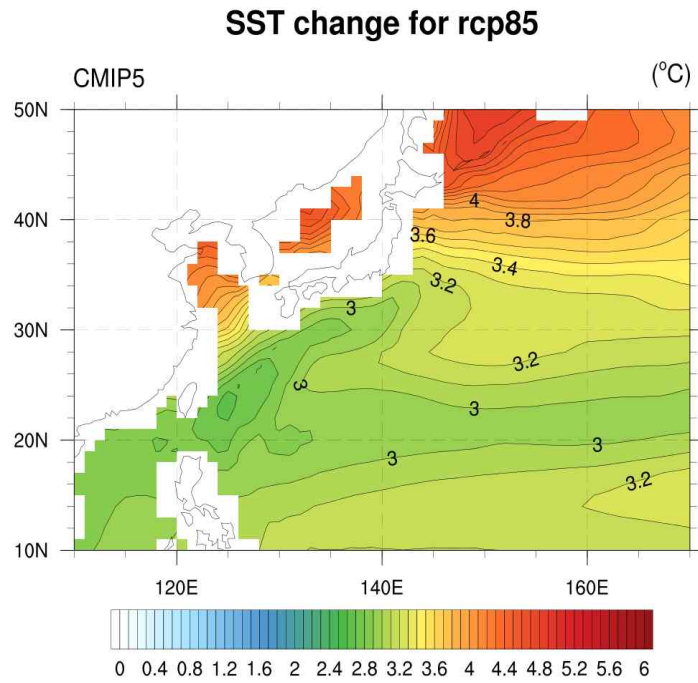
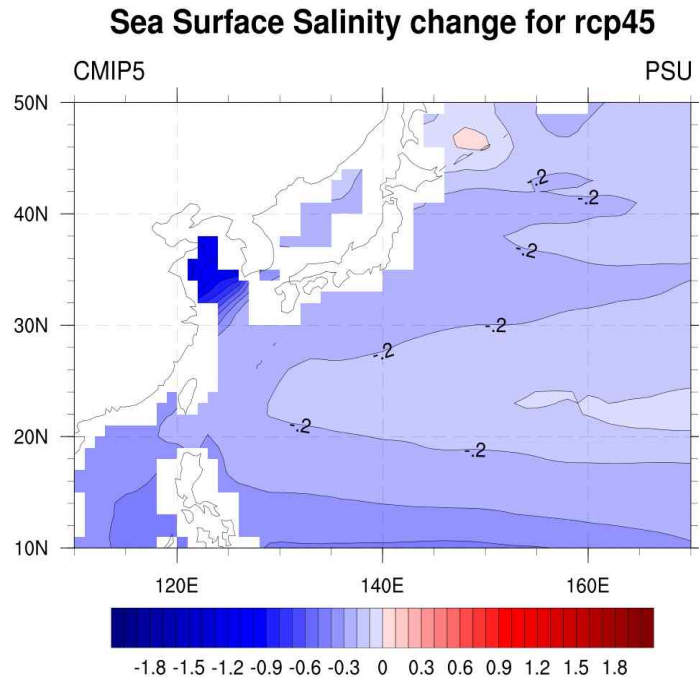


Figure. 10. The difference of 20-year averaged sea surface temperature (SST, °C) between the period 2081–2099 and 1986–2005 using the CMIP5 models ensemble mean for (a) RCP4.5, (b) RCP 8.5.

(a)



(b)

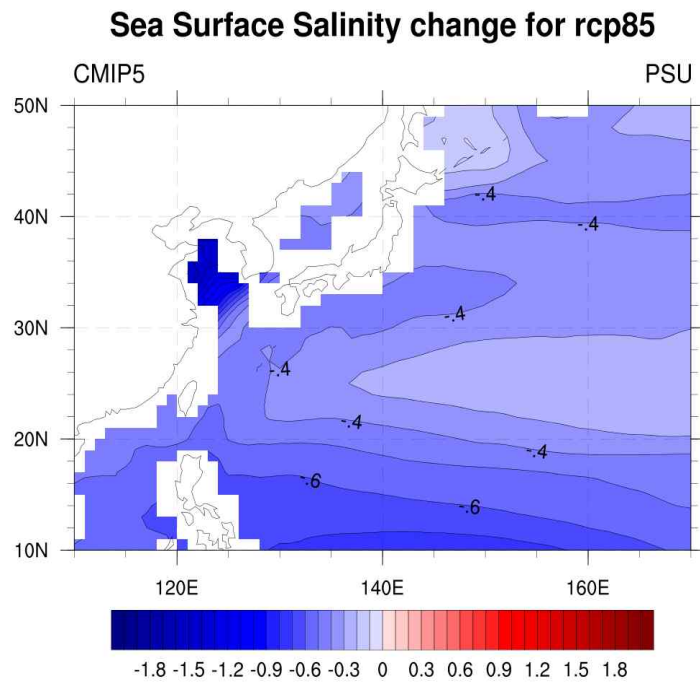
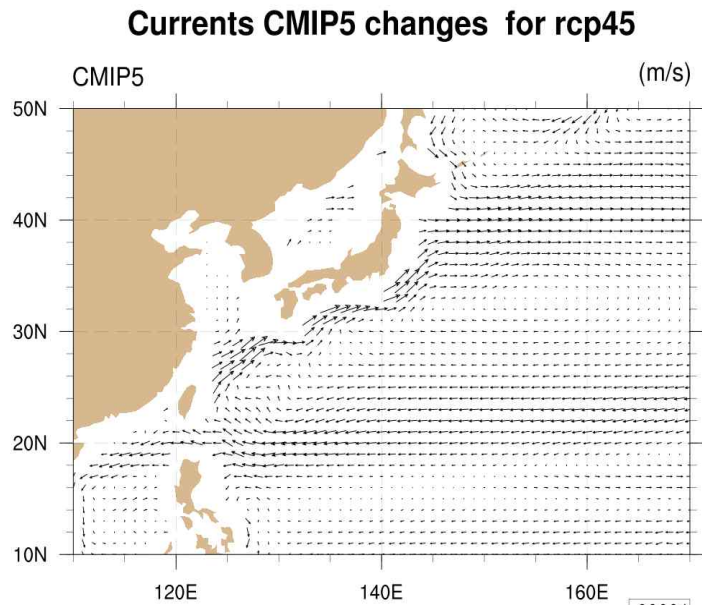


Figure. 11. Same as in Fig.8, but for the sea surface salinity (PSU).

장기적인 해수면 변화에 기여하는 많은 과정 중에서 염분에 의한 변화를 살펴 보았다. 20세기 말 대비 21세기 말 염분은 두 RCP 시나리오 모두 감소를 전망 하였다. RCP 4.5보다 RCP 8.5에서 각각 -2, -4 PSU 감소하며, 고농도 시나리오인 염분의 감소량이 두 배정도 많았다. 해수 염분이 많이 감소한 양쯔강 유역과 쿠로시오 해역은 해수온이 상승한 공간적인 분포가 유사하다. 이는 해수 팽창과 염분의 변화는 서로 영향을 미치는 것이다. 염분변화와 열팽창의 변화는 상반되는 경향을 나타내며, 열과 염분의 변화는 지역적인 해수면 변화에 영향을 미친다 (Durack et al., 2014). 북서태평양에서의 염분 감소는 해수팽창과 동시에 해수면의 밀도감소로 이어진다. CMIP5 모델의 21세기 말 북서태평양에서의 염분감소는 열대와 태평양지역의 미래 강수증가에 기인한다는 선행연구 결과와 일치 한다 (Levang and Schmitt, 2015). 21세기말 육상을 포함한 북서태평양 지역의 강수의 증가는 해양으로의 담수유입을 활발하게 하여 해양표면의 염분감소의 원인이 된다. 염분의 감소와 해수온의 증가는 해양의 밀도를 감소시켜 해수의 열팽창에 영향을 미친다.



(a)



(b)

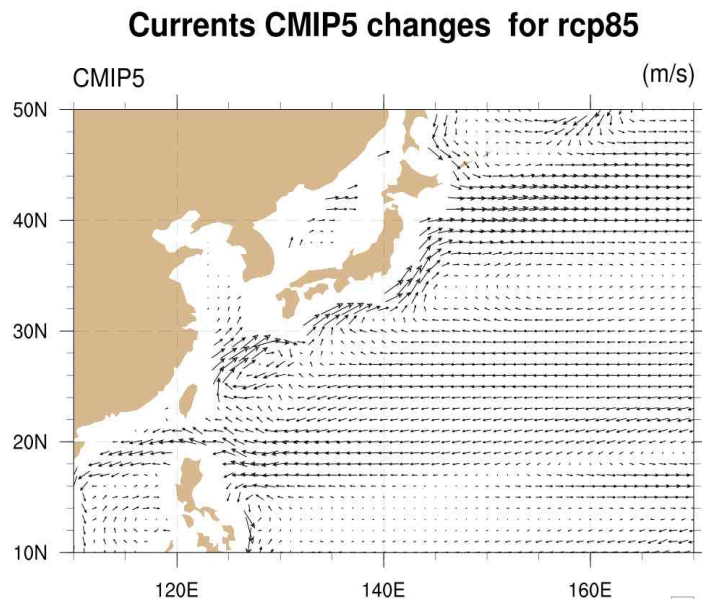
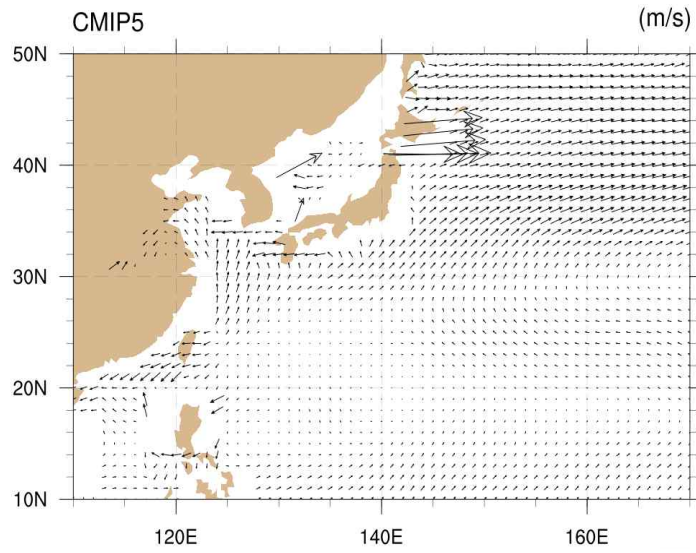


Figure. 12. Same as in Fig.8, but for the currents (m/s).

Huang et al.(2015)에서 역학적인 해수면 고도는 해수면의 수평적인 경도를 재현하므로 해수면 바람장과 해류와 밀접한 연관이 있다고 보고하였다. 따라서 대기와 해양이 결합된 순환 모델에서 바람과 해류에 의한 해수면의 역학적인 고도의 변화가 발생할 수 있다 (Griffines and Greatbatch. 2012).

(a)

### Wind changes CMIP5 for rcp45



(b)

### Wind changes CMIP5 for rcp85

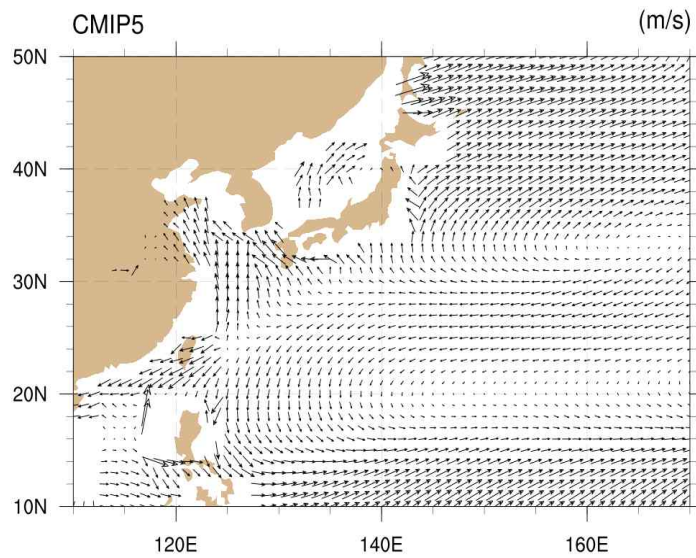
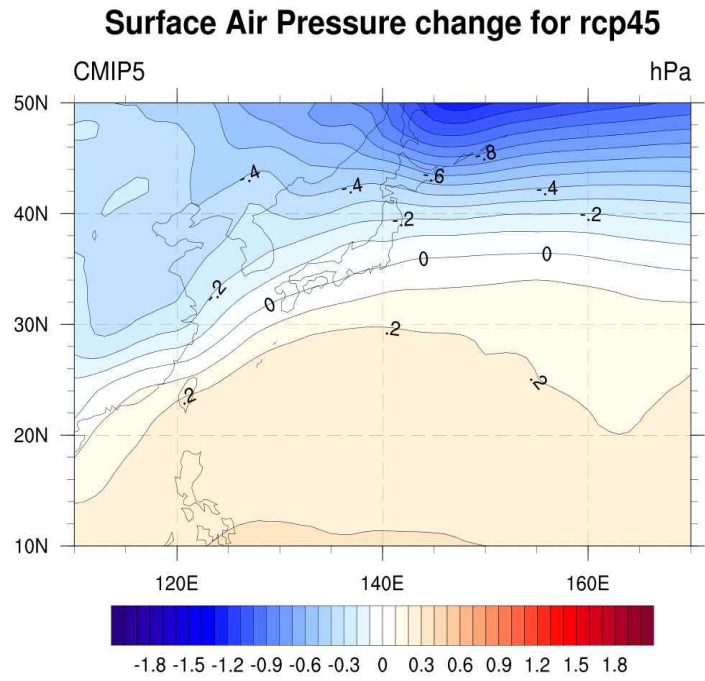


Figure. 13. Same as in Fig.8, but for the surface wind (m/s).

(a)



(b)

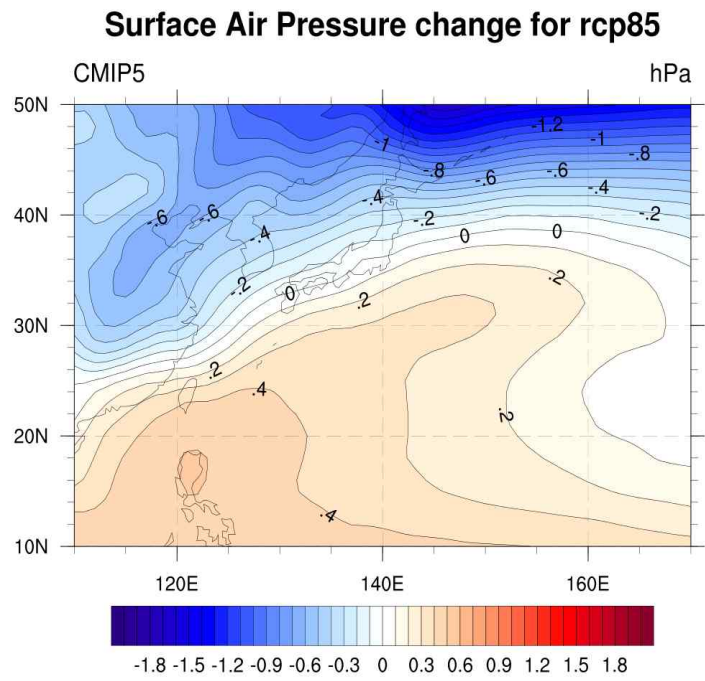


Figure. 14. Same as in Fig.8, but for the sea surface pressure (hPa).

21세기 말 북서태평양 해류의 미래전망에서 가장 큰 변화는 쿠로시오해류의 북상이다. RCP 4.5보다 RCP 8.5에서 더 강한 해류의 변화가 보인다 (Fig. 10). 쿠로시오 해류가 저위도에서 북상하여 동태평양으로 뻗어나가는 중심기점이 북위 30도 이상의 북쪽으로 이동한 것이 나타난다. 북위 40-45도 부근의 해류가 동쪽으로 강화되는 현상이 RCP 8.5에서 뚜렷이 나타난다. 선행연구에서는 CMIP5 모델의 미래 해류 전망에서, 중위도 태평양 쿠로시오의 사행 부분 (meandering parts of Kuroshio)과 확장역에서 해수면의 최대 변동이 나타난다고 보고한 바 있다 (Lander et al., 2014).

해류에 영향을 미치는 중요한 변수로서 바람장의 미래 변화를 살펴보았다. 21세기 말 북서태평양에서의 바람의 변화를 살펴보면, 북위 30도 이상에서는 남풍이, 40도 이상에서는 서풍이 강화된다 (Fig. 11). 이는 온난화에 의한 대기대순환에서의 무역풍의 변동과 연관 지을 수 있다. 선행연구에 의하면 무역풍의 강화는 북서태평양 해양 온난화에 호조건으로 작용한다 (Luo et al., 2012). 강화된 무역풍은 21세기 말 중위도 지역에서 남풍의 강화에 영향을 미치는 것으로 보인다. 강화된 남풍은 RCP 8.5 시나리오에서 뚜렷이 나타나며, 남풍의 강화가 표층 해류의 변동원인임을 알 수 있다. 이는 기존 선행연구에서 무역풍 강화가 해양 물리반응에 영향을 미쳐 북서태평양의 해수면 상승과 연관되어 있다는 결과와 유사하다 (Timmermann et al., 2010, Merrifield and Maltrud, 2011, Nidheesh et al., 2012). 북위 40도 이상에서의 강한 서풍계열의 바람은 쿠로시오 해류가 동쪽으로 이동하는 경향과 관련이 깊다. 태평양에서 유도된 바람의 변화는 동서의 SST 기울기와 무역풍 사이의 태평양에서 해양 - 대기 양의 되먹임을 통해 증폭된다 (Luo et al., 2012).

바람의 변동은 기압패턴의 변화에 의해 주로 발생한다. 북서태평양의 전반적인 기압 변화를 보면 21세기 말에는 시베리아 대륙 및 고위도 지역의 해면기압이 크게 낮아지는 것이 특징이다 (Fig. 12). 대륙에 위치한 시베리아 고기압이 크게 약화되는 것이 북서태평양의 전체적인 기압변동을 지배하는 것으로 보인다. 전지구 기온상승에 따라 고위도에서의 해면기압 감소와 아열대 지방에서의 기압 증가 패턴은 이전 CMIP5 선행 결과와 유사하다. RCP 8.5에서 중위도 제트가 북쪽방향으로 1-2도 이동하며 북반구에서는 약하게 이동한다 (IPCC AR5.

2013). 대기 순환의 변화로 무역풍이 강해져 북서태평양의 해류이동에 영향을 미친다.

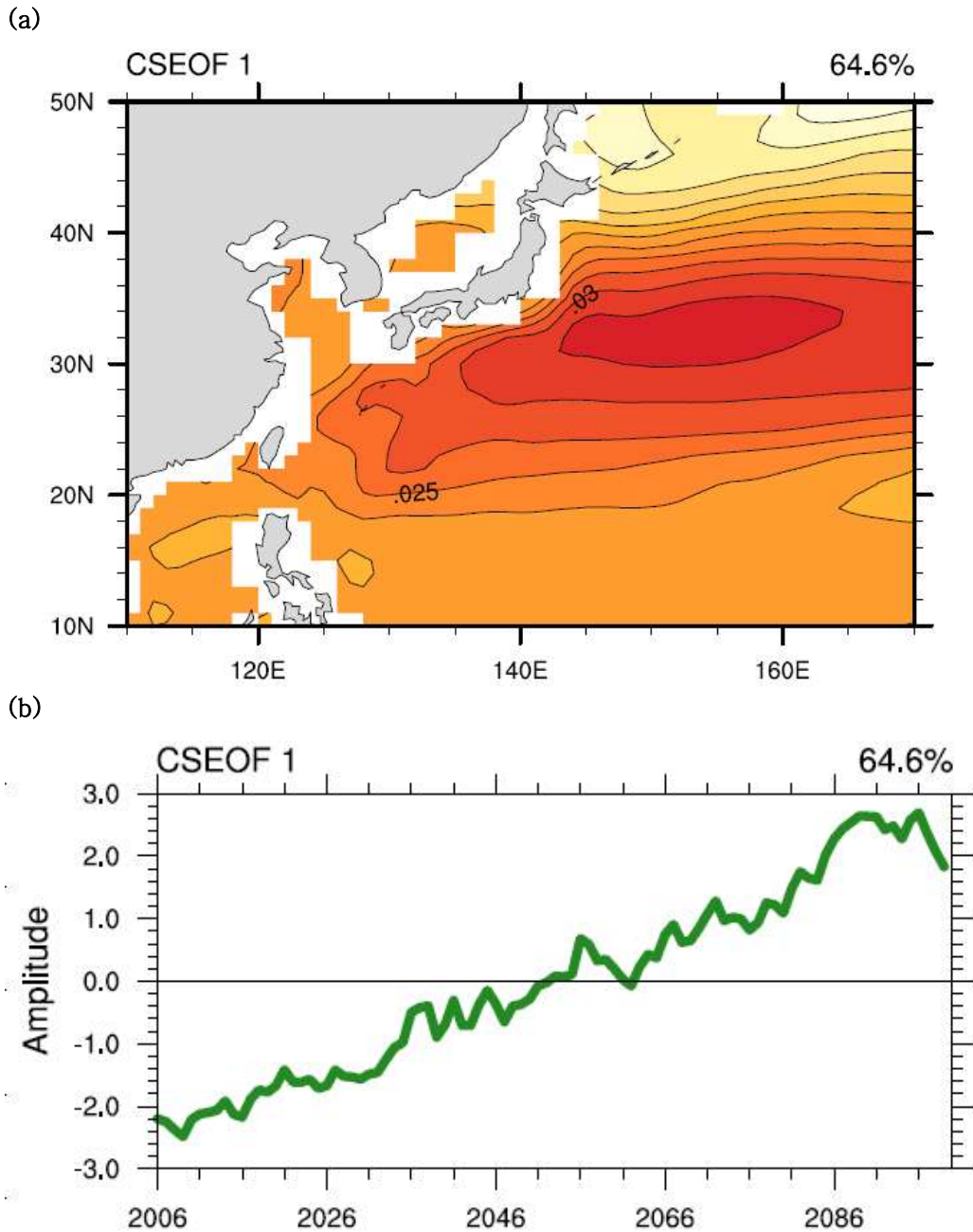


Figure. 15. The 1<sup>st</sup> mode of sea level CSEOF analysis using CMIP5 model ensemble mean for RCP 4.5(a)time series, (b)spatial distribution.

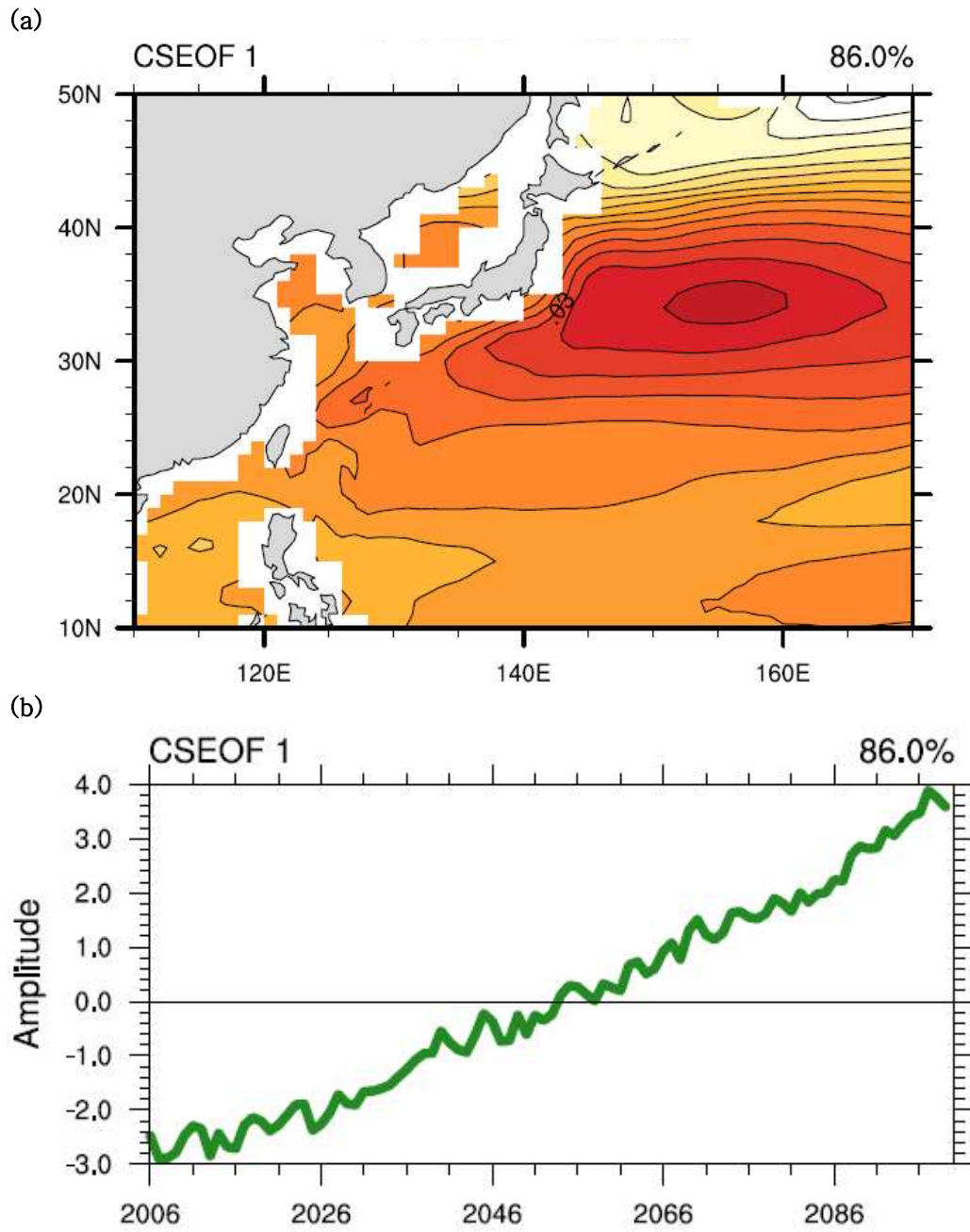


Figure. 16. Same as in Fig.13, but for RCP 8.5.

해수면 변화와 관련된 해양 환경요인들의 변동 특성은 지구온난화 영향뿐 아니라, 계절 등 다양한 주기를 가진 변동들이 함께 나타난 결과이다. 따라서 본 연구에서는 CSEOF 통계 분석법을 이용하여 해수면 자료로부터 지구온난화에 의한 변동만을 추출하고, 이를 이용하여 해수면 변화를 발생시키는 해양 및 대기 인자에 대해 조사하였다.

CSEOF 분석을 이용하여 2006년부터 2100년까지의 RCP 4.5와 8.5에 따른 해수면 상승패턴을 분석하였다. CSEOF 의 1모드에 대한 공간적인 분포와 PC (Principal Component) 시계열 자료를 RCP 4.5/ 8.5 에 대하여 나타내었다 (Fig. 15,16). CSEOF 1모드에서는 전체변동의 각각 64%, 86%를 설명할 수 있다. PC 시계열을 살펴보면 2006년부터 2100년까지 -2에서 4까지 선형적으로 꾸준히 증가하는 양상을 나타낸다.

CSEOF의 북서태평양 지역에서의 해수면 상승 패턴은 전지구 기온증가에 의한 지구온난화모드이며, 선행연구결과에서와 같이 지구온난화 패턴과 흡사하다 (Hamlington et al., 2014; 회귀분석 et al., 2013). PC 시계열에서 배출량이 많은 RCP 8.5 시나리오에서의 온난화 경향이 기후변화에 의한 변동성이 약 2배 많은 것으로 나타났다. 이는 탄소 배출량에 따른 온난화 경향이 해수면 상승에 기여하는 바가 매우 크다는 것을 의미한다. IPCC 5차 보고서 (2013)에서는 기후변화가 21세기 전반에 미치는 열팽창에 기여하는 바는 RCP 4.5/8.5에서 각각 40, 44% 기여한다는 보고한 바 있다. 가장 큰 요인인 해수 열팽창 외에도 해수면에 영향을 미치는 해양환경요인들에 대한 분석이 필요하다.

지구온난화 모드에서의 공간적인 분포는 두 RCP 시나리오 간 차이가 크지 않다. 쿠로시오해류의 확장역에서의 강한 양의 값을 나타내며, RCP 8.5에서 강한 양의 값을 나타내는 중심이 RCP 4.5 보다 북상해 있는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 온난화에 의한 쿠로시오 해류의 북상과 관련이 있다. 한반도 근해를 포함한 일본 동북부지역의 북서태평양에서 해수면 상승이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

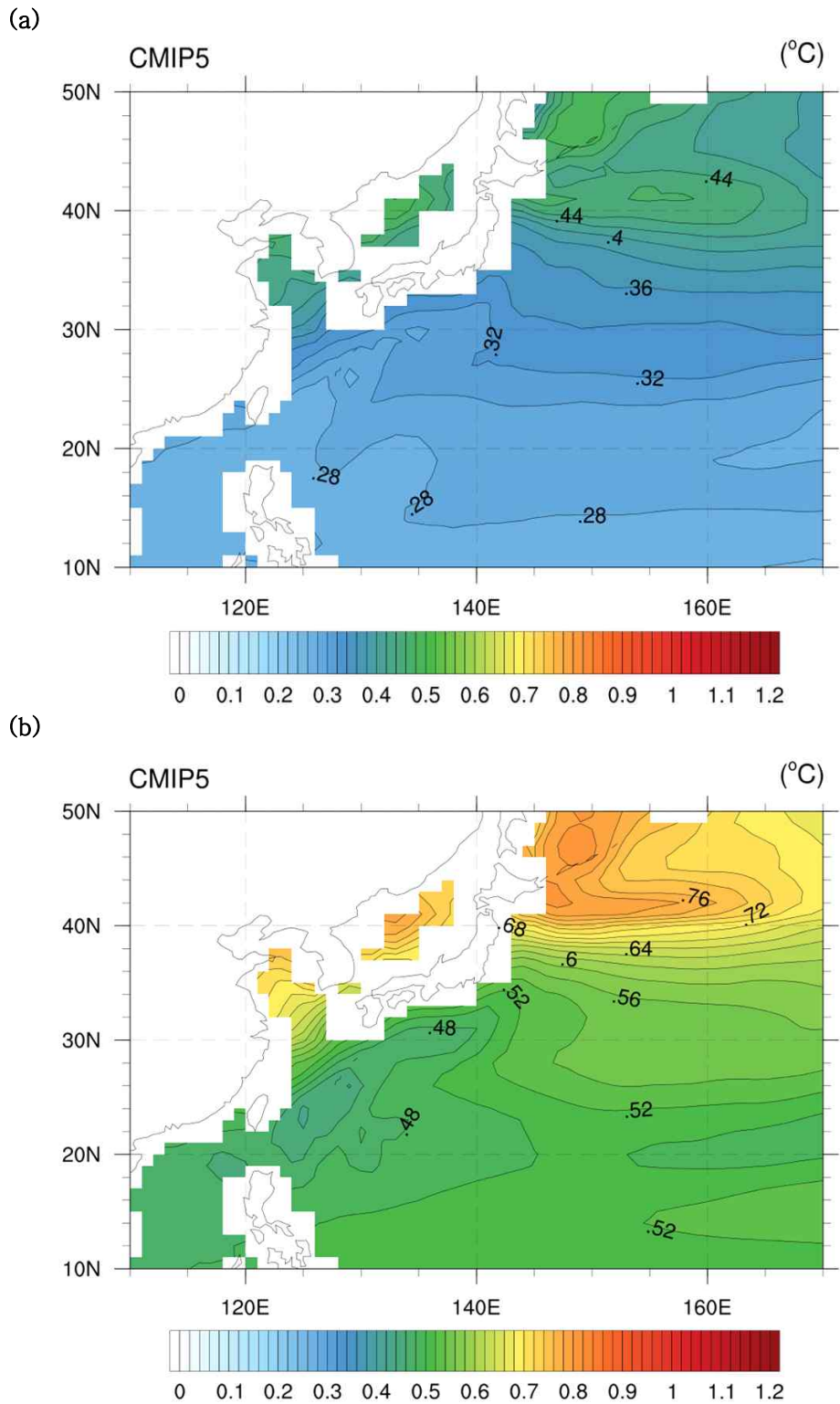


Figure. 17. Spatial distribution of the regression SST with 1<sup>st</sup> mode of sea level CSEOF analysis for (a)RCP 4.5 (b)RCP8.5.



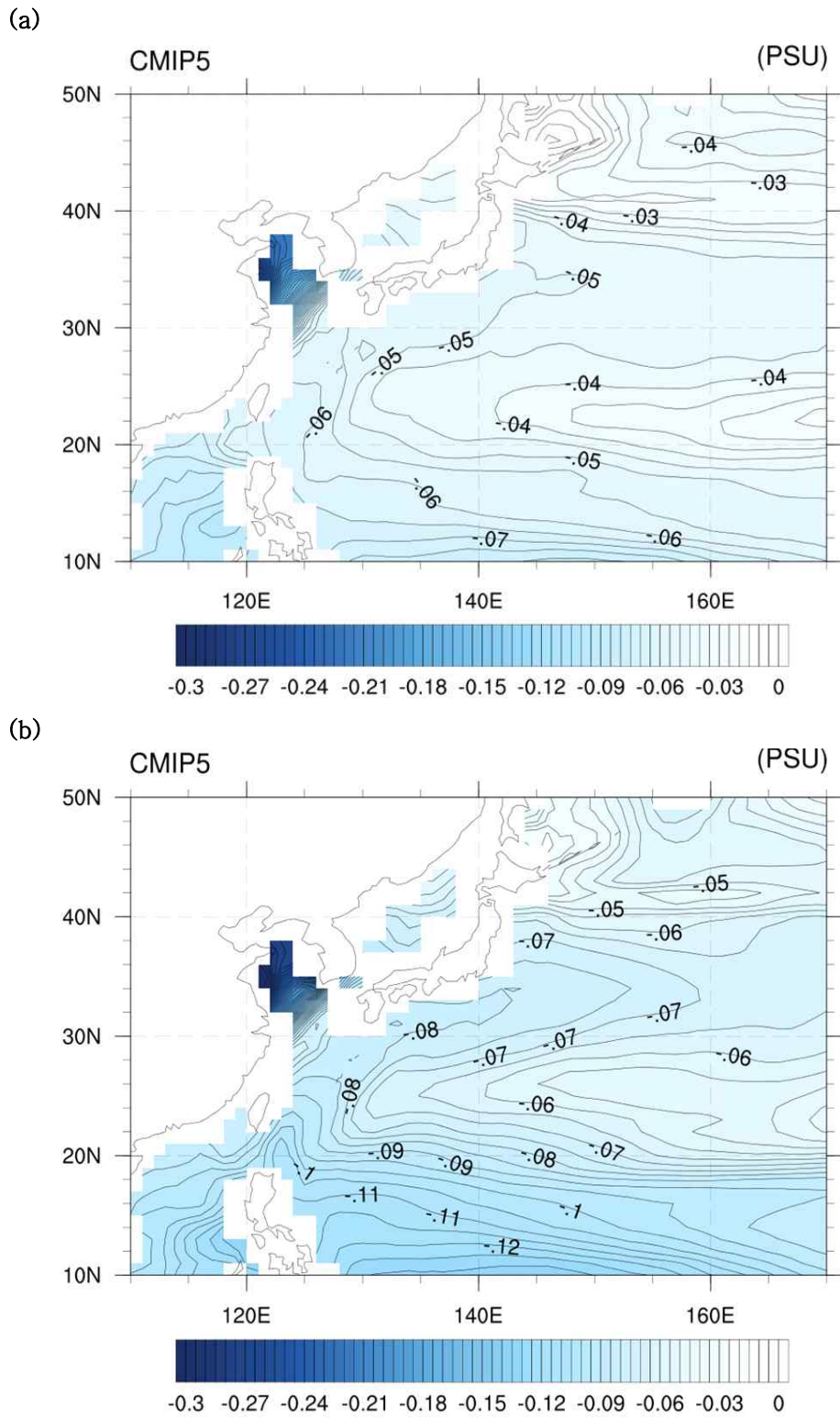


Figure. 18. Same as in Fig. 17, but for sea surface salinity.

해수면변동의 원인을 찾기 위하여 해수면 변동 CSEOF 1모드와 해수면온도, 염분, 해류, 바람, 해면기압에 대하여 각각의 회귀분석을 실시하였다. 북서태평양 전역에서 해수면 상승에 대한 해수이 대부분의 지역에서 증가하는 경향이 나타났다 (Fig. 17). RCP 4.5에서는 쿠로시오 해류가 서쪽으로 흘러오던 해류가 동쪽으로 사행하는 해역에서 중심에서는 낮게 해류 확장역이 넓게 퍼지는 경향이 나타난다. 이는 오야시오 해류와 쿠로시오해류가 위도 40도에서 만나 중앙태평양으로 흘러가는데 영향을 받는다. RCP 8.5에서는 북서태평양 북위 30도부터 40도 이상까지 쿠로시오 해류가 북상하며 확장한다. 기후변화로 인한 해수면 온도의 상승이 북서태평양 지역의 해수면 상승에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 해수면이 최대 상승한 북위 30-40도와 해수면 온도가 증가한 지역은 대체로 지역적인 분포는 유사하지만, 차이가 있다. 이는 해수온 이외의 다른 요소들도 북서태평양 해수면 상승에 기여했다는 것을 의미한다. 즉, 해수온이 증가하고, 염분이 낮아져 해수의 열팽창에 호조건으로 작용함으로써, 북서태평양의 해수면 고도를 상승시킨 것으로 분석된다.

해수면 고도와 해류의 회귀분석 결과 해수면 고도가 최대 상승한 북위 30-40도에서 시계방향을 순환이 나타난다. RCP 4.5보다 RCP 8.5 에서 전반적인 해류의 속도나 매우 빠르고 크게 나타나며, 북위 30-40도 부근에서의 시계방향흐름은 북쪽으로 45도까지 확장하여 나타난다. 북위 40도 이상의 고위도로 따뜻한 쿠로시오 해류가 유입하여 고위도의 해수의 온도가 상승시킨 것으로 사료된다. Lin et al. (2008)에서는 시계방향의 순환이 발생하는 따뜻한 난류 에디 (warm eddy)에서 일반적으로 해수면 고도가 높게 나타난다고 보고하였다. 북쪽의 쿠로시오 지류와 북위 30도에서 발달된 서향하는 해류 때문에 발생한 시계방향 순환이 만든 난류 에디에 의하여 북위 30-45도에서 해수면이 상승한 것으로 사료된다. 해수면 상승과 바람 상관분포를 살펴보면 북위 40도에서의 강한 서풍이 나타나고 북위 20도에서의 남서풍이 강하게 나타나서 쿠로시오 해류의 북상에 기여한 것으로 사료된다. 북서태평양의 해면기압이 저위도 부근에서 증가한다. 온난화에 의한 북태평양 고기압의 확장이 북서태평양에서의 고기압성 순환을 강화시킨다. 북서태평양에서의 강화된 남풍은 쿠로시오 해류가 북상에 영향을 미쳐 해수면 상승에 기인하는 것으로 사료된다.

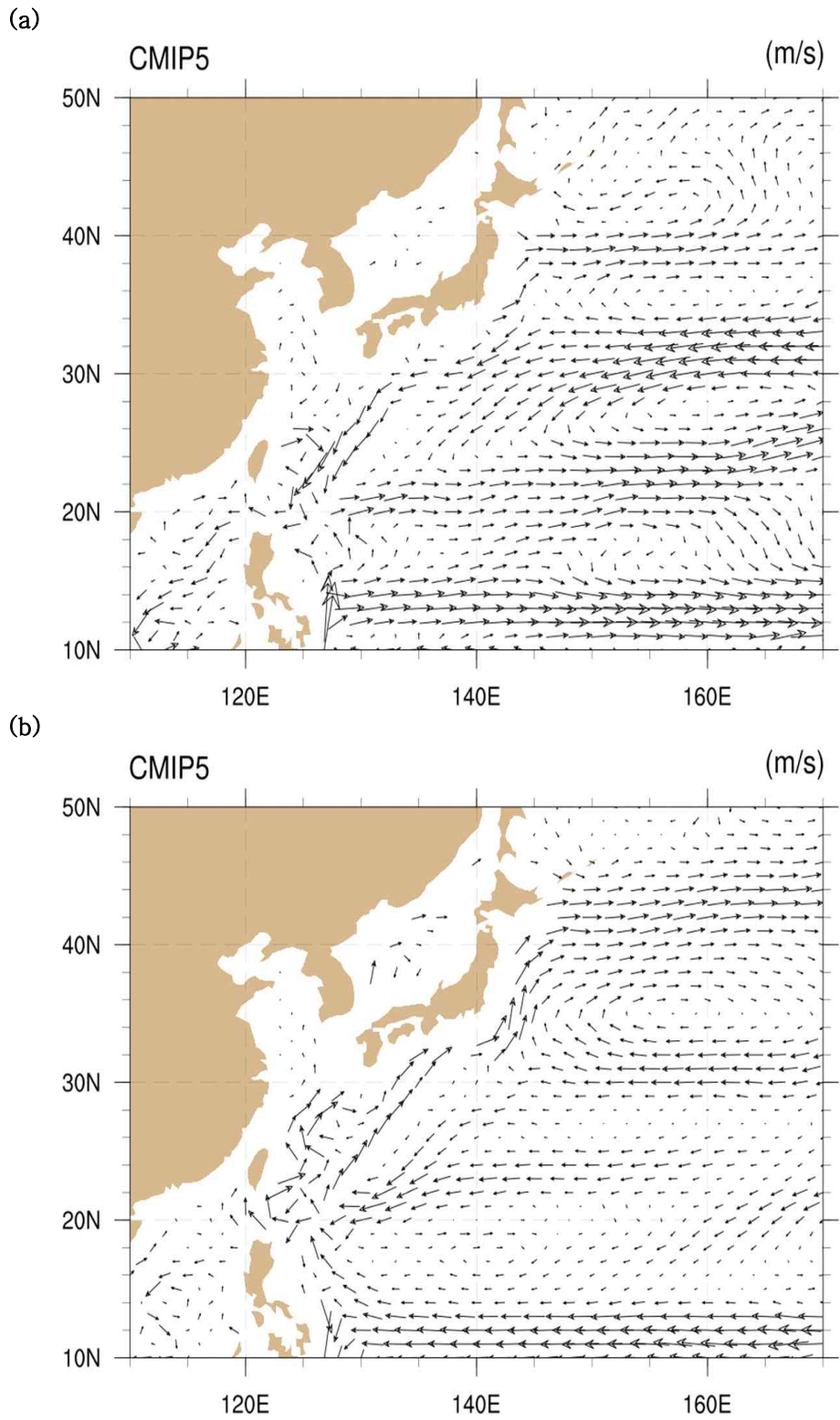


Figure. 19. Same as in Fig. 17, but for currents.

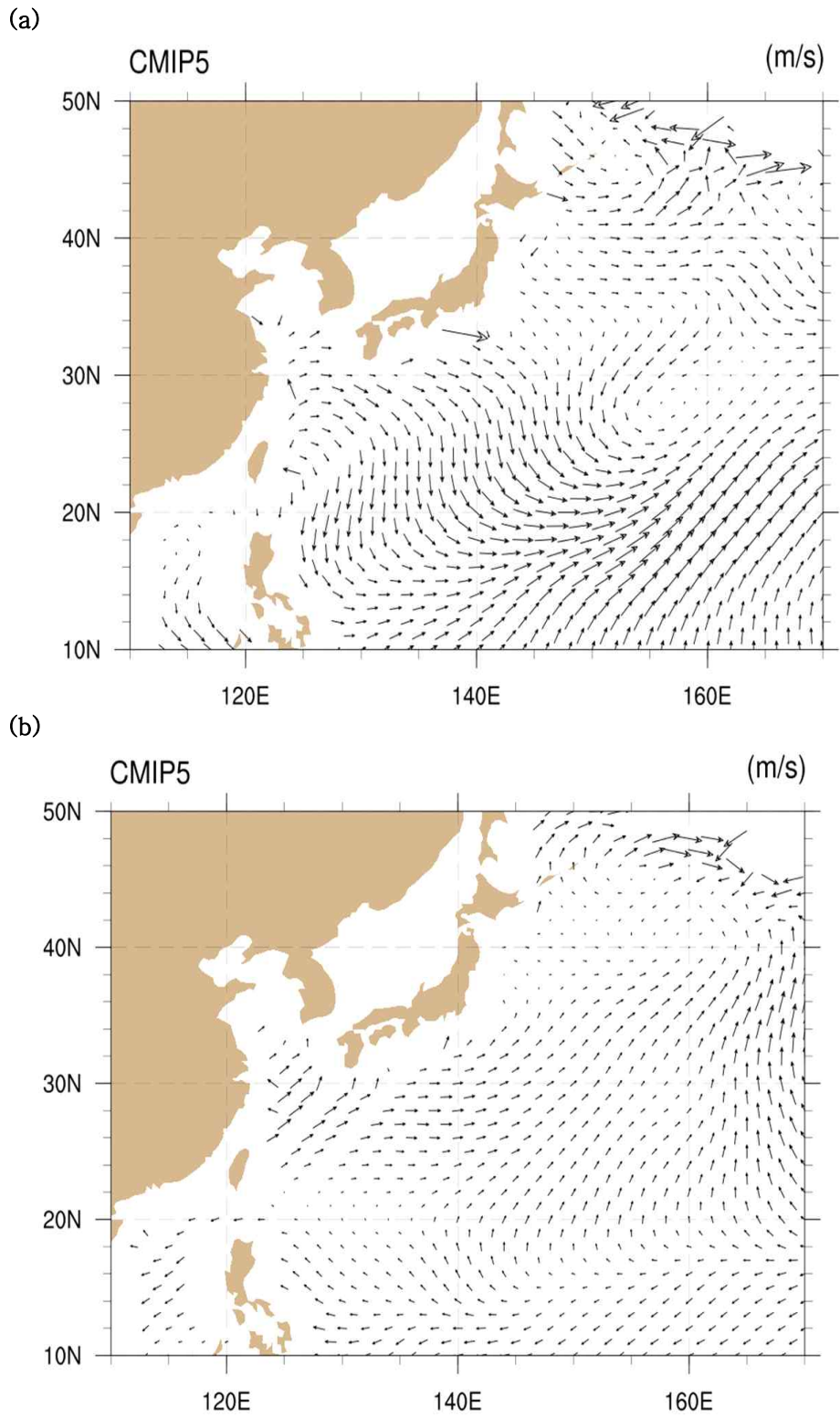


Figure. 20. Same as in Fig. 17, but for wind.

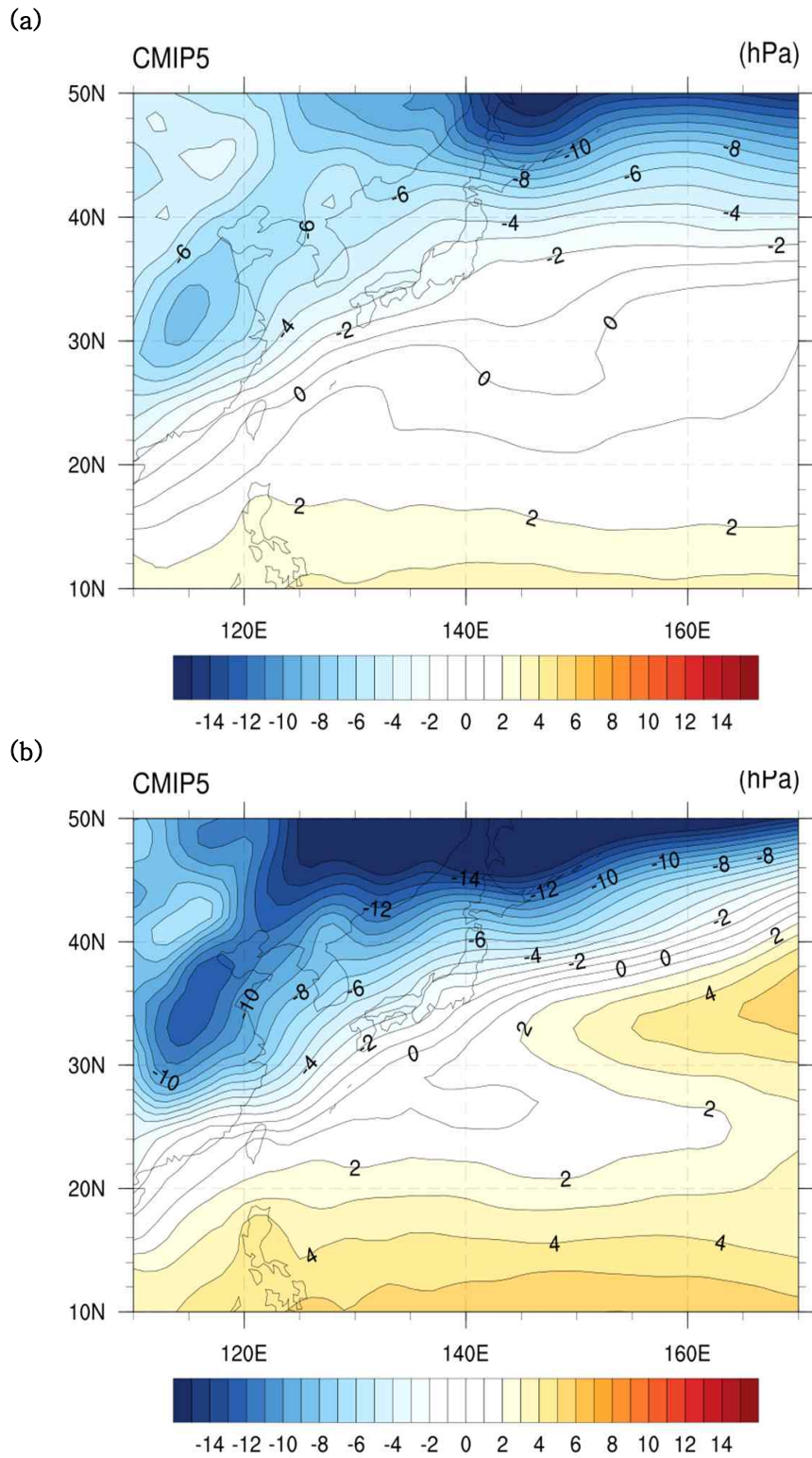


Figure. 21. Same as in Fig. 17, but for pressure.

## 5. 고찰

본 연구 결과는 해수의 전지구 열팽창만을 고려하여 지역적인 해수면 열팽창을 전망한 연구이다. 지역적인 해수면 변화는 전지구 평균으로부터 비롯되어 달라진다. 지역적인 해수면 상승과 전지구 해수면 열팽창 사이에 크지 않다는 결과를 선행 연구결과에서 보고 한 바 있다. Huang et al. (2015)에서 CMIP5 24개 모델 앙상블 평균을 사용하여 남중국해의 열적팽창에 기인한 해수면 상승을 전지구 해수면 팽창 (zostoga)와 비교한 결과 RCP 4.5/ 8.5 에서 각각 1.6, 1.1cm 남중국해의 열팽창이 높은 것으로 나타났다. 이처럼 전지구 기후 모형으로 예측한 전지구 및 지역적 열팽창의 차이는 크지 않는 것을 보고하였다. 본 연구에서 전지구 열팽창만을 고려하여 지역적인 해양 특성에서 발생하는 불확실성을 잠재하고 있다. 따라서 추후에 지역적인 규모에서 나타나는 열팽창의 불확실성을 줄이기 위해서는 지역적인 규모에서의 열팽창을 계산하는 방법이 추가로 진행 될 필요가 있다.

해수면상승에 영향을 미치는 해양환경요인분석에서 기후 시스템의 변화가 해양에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 대기 변수를 살펴보았다. 대기와 해양은 서로 결합되어 있어 각각의 상태변화에 서로 영향을 미친다. 선행 연구에서는 관측과 재분석 자료를 활용하여 20세기 중후반 해양의 열적팽창의 패턴은 ENSO, NAS, PDO 등 대기와 해양이 결합된 형태로 나타난다고 보고 한 바 있다 (Lozier et al., 2010; Zhang and Church, 2012). 따라서 지역적인 해수면 변동성은 바람과 해양순환의 변화와 관련이 있다 (Kohl and Stammer, 2008). 본 연구에서는 바람과 해면기압 결과를 이용하여 전지구적 관점에서의 해양과 대기 순환 변화가 해양에 미치는 영향을 고려하여 해수면 상승원인을 분석하였다.

## 6. 요약 및 결론

IPCC 5차 보고서에 따르면 인위적인 온실가스의 증가로 인한 전지구적인 기온 상승으로 해수의 열팽창과 대륙 빙하의 용해 등이 발생하였고 이로 인해 전지구적으로 광범위하게 해수면이 상승한 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 대기와 해양의 역학과정이 포함된 전지구 기후모델 11종 결과를 두 개의 서로 다른 미래 탄소 농도 시나리오에 대해 21세기 말 북서태평양 해수면 상승을 전망하였다. 또한 해수면 상승에 영향을 미치는 해양환경요인 5가지 (해수면 온도, 해류, 염분, 바람, 해류)의 변화를 분석하여 북서태평양에서 해수면 상승의 원인을 분석하였다. 분석방법은 1860년부터 2005년까지 과거모의 실험과 2006년부터 2100년까지 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 실험에 대해 두 실험을 비교하는 방식으로 진행되었다.

21세기 전망 결과에서는 대부분의 모델들이 해수면고도가 상승하는 것으로 예측하였다. 탄소 배출량이 많은 고농도의 RCP 8.5전망에서 RCP 4.5보다 급격하고 더 빠르게 해수면이 상승하는 것을 전망하였다. 북서태평양에서 CMIP5 모델 11종의 20세기 말 (1986-2005년) 대비 21세기 말 (2081-2100년)에 대한 SSH 아노말리 평균 변화는 RCP 4.5, RCP 8.5에서 각각 0.04m [-0.2~0.26m]와 0.08m [-0.26~0.43m] 증가하는 것으로 나타났다. IPCC 5차 보고서 해수면 상승 계산법에 따라 해수의 열팽창을 고려한 해수면 상승은 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 0.4m [0.15-0.68m]와 0.57m [0.25-0.98m]로 나타나 해수면 상승에서 해수 열팽창이 기여하는 바가 매우 크다. 해수면의 공간적인 변화는 우리나라 해역을 포함한 쿠로시오 해역에서 크게 나타났다. 또한 두 시나리오에서 모두 쿠로시오 해류가 남북으로 넓게 확장하며, 오야시오 해류와 만나는 해역이 북상하는 것으로 전망하였다. 이것은 온난화의 영향으로 위도에 따른 온도차가 작아짐에 따라서 따뜻한 쿠로시오 난류가 차가운 고위도 지역까지 확장하면서 나타난 결과로 사료된다.

CSEOF 분석방법을 이용하여 해수면 변화에 대한 지구온난화 모드를 추출하였다 (Hamlington et al., 2014; Oh et al., 2011). 이 모드는 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 전체 해수면 변동의 각각 64%와 86%를 설명하고 있으며 2006

년부터 2100년 까지 꾸준히 해수면이 증가하는 경향을 나타낸다. 온난화 모드에 따른 해양 환경요인의 분석결과, 북서태평양 해수면 온도의 증가와 염분은 감소로 해수 열팽창이 크게 발생한 것으로 나타났다. 온난화 환경에서의 남북 기온차이의 감소가 쿠로시오 해류를 북쪽으로 확장시키고 오야시오 해류와 만나는 북위 30-40도에서 시계방향의 워에디를 발생시킨 것으로 나타났다. 즉 따뜻한 난류의 북상은 해수의 열을 고위도까지 이동시켜, 쿠로시오 해류를 따라서 해수면 상승이 크게 발생한 것으로 사료된다.

대기인자의 변화를 살펴보면, 고위도에서 해면기압 하강과 저위도에서의 기압 감소 경향이 IPCC 5차 보고서의 결과와 유사하게 나타난다. 이러한 대기 대순환의 변화는 북서태평양에서 남풍을 강화시키고 쿠로시오 해류를 북상하는데 기여한다.

본 연구에서는 CMIP5 기후모델의 미래 전망 결과를 사용하여 북서태평양 및 한 반도 근해의 해수면 변화를 살펴 보았다. 그러나 전지구 기후모델은 지역모델에 비하여 공간해상도가 낮기 때문에 수심이 얇고 지형이 복잡한 한반도 근해 해수면 변화를 조사하는 데 한계가 있다. 또한 기후모델에 접합된 해양 모델은 NorESM1-M와 NorESM1-ME 모델을 제외하고 밀도 변화에 따른 부피변화를 고려하지 않은 부시네스크 근사를 사용하고 있어 지역적으로 밀도 변화에 의한 부피팽창으로 발생하는 해수면 변동을 직접적으로 모델 내에서 계산 할 수 없다. 불확실성을 줄이고 장주기적인 해수면 변화를 살펴보기 위해서는 추후 역학고도를 이용한 지역적인 해수 열팽창에 의한 해수면 상승 계산 등의 추가 분석이 필요하다. 빙하 용해와 관련된 물리과정을 포함하고 향후 보다 정확도 높은 지역규모에서의 해수면 변화를 예측하기 위해서는 지역적인 지각 및 육지 운동에 의한 상대적인 해수면 변화까지 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



## 참고문헌

- 김경호, 신지연, 고은희, 고기원, 이강근, 2009: 지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화, 한국지하수토양환경학회지, 14(3), 68-79.
- 김태윤·조광우, 2013, 환경협식법을 이용한 미래 해수면 상승 예측. 해양환경안전학회지, 19(1), 1-8.
- Carson, M., A. K회귀분석 and D. Stammer, 2015 : The Impact of Regional Multidecadal and Century-Scale Internal Climate Variability on Sea Level Trends in CMIP5 Models. J Clim. 28, 853-862, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00359.1
- Church, J., and Coauthors, 2013 : Sea level change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, T. F. Stocker et al., Cambridge University Press, 1137-1216.
- Clarke, L., 2007: Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations (Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1, US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington DC, 2007).
- Durack. P. J., S. E. Wijffels, P. J. Gleckler, 2014 : Long-term sea level revisited: the role of salinity. Environ. Res., 9, DOI: 10.1088/1748-9326/9/11/114017
- Hamlington, B. D., M. W. Strassburg, R. R. Leben, W. Han, R. S. Nerem, and K.-Y. Kim, 2014: Uncovering the anthropogenic sea level rise signal in the Pacific Ocean. Nature Climate Change, doi:10.1038/nclimate2307.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, 2008: Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. J. Glob. Environ. Eng. 13, 97-108.

Huang C., Q. Fangli, 2015 : Sea level rise projection in the South China Sea from CMIP5 models. *Acta Oceanol. Sin.*, 2015, Vol. 34, No. 3, 31-41, doi: 10.1007/s13131-015-0631-x

IPCC. 2007. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2013. *Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jeon D., 2008: Relative sea-level change around the Korean Peninsula, *Ocean and Polar Research*, 30(4), 373-378.

Kohl, A., and D. Stammer, 2008: Decadal sea level changes in the 50-year GECCO. ocean synthesis. *J. Clim.*, 21, 1876-1890.

Körper, J., et al., 2013 : The effect of aggressive mitigation on sea level rise and sea ice changes. *Clim. Dyn.*, 40, 531-550.

Kuhlbrodt, T., and J. M. Gregory, 2012 : Ocean heat uptake and its consequences for the magnitude of sea level rise and climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L18608.

Kim, K.Y., and North, G.R., 1997 : EOFs of Harmonizable Cyclostationary Processes. *J. Atmos. Sci.*, AMS, Vol. 54, No.19, pp. 2416-2427.

Landerer, F.W., P.J. Gleckler, 2014 : Evaluation of CMIP5 dynamic sea surface height multi-model simulations against satellite observations. *Clim Dyn*, 43:1271-1283 DOI 10.1007/s00382-013-1939-x

Levang. S. J. and Schmitt R. W, 2015 : Centennial changes of the Global

water cycle in CMIP5 models. J Clim. 28, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-00143.1

Lin, I.I., Wu, C.C. and Pun, I.F., 2008 : Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons.

Little, C.M., R. M. Horton, R. E. Kopp, M. Oppenheimer, S. Yip, 2015 : Uncertainty in Twenty-First-Century CMIP5 Sea Level Projections. J Clim. 28, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00453.1

Lozier, M. S., V. Roussenov, M. S. C. Reed, and R. G. Williams, 2010: Opposing decadal changes for the North Atlantic meridional overturning circulation. Nature Geosci., 3, 728-734.

Luo, J. J., W. Sasaki, Y. Masumoto, 2012 : Indian Ocean warming modulates Pacific climate change. PNAS, 109, doi/10.1073/pnas.1210239109

Melet, A. and Meyssignac, B, 2015 : Explaining the Spread in Global Mean Thermosteric Sea Level Rise in CMIP5 Climate Models. J Clim. 28, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0200.1

Merrifield, M. A., and M. E. Maltrud, 2011: Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. Geophys. Res. Lett., 38, L21605.

Moon, J.-H., Y. T. Song, P. D. Bromirski, A. J. Miller, 2013 : Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958-2008. J. Geophys. Res. 118, 7024-7035, doi:10.1002/2013JC009297.

Moon, J.-H., J. Lee, 2016 (a) : Shifts in multi-decadal sea level trends in the East/Japan Sea over the past 60 years. Ocean Sci.J., 51(1), 1-10.

Moon, J.-H., Y. T. Song, 2016 (b) : Decadal sealevel variability in the East China Sea linked to the North Pacific Gyre Oscillation. Continental Shelf Research, 1-8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.05.003>

Nidheesh, A. G., M. Lengaine, J. Vialard, A. S. Unnikrishnam, and H. Dayan, 2013: Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean. *Clim. Dyn.*, 41, 381-402.

회귀분석, S.M., S. J. Kwon, I. J. Moon and E. I. Lee, 2011 : Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula. *Korean Society of Coastal Ocean Engineers*, 23(3),236-247.

Perrette, M., F. W. Landerer, R. Riva, K. Frieler, and M. Meinshausen, 2013: A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties. *Earth Syst. Dyn.*,4, 11-29.

Slangen, A. B. A.,M. Carson, C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, A. Khl,L. L.A. Vermeersen, and D. Stammer, 2014 : Projecting twenty first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, 317-332, doi:10.1007/s10584-014-1080-9.

Slangen, A. B. A., C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, L. L. A. Vermeersen, and R.E. M. Riva, 2012: Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. *Clim. Dyn.*, 38, 1191-1209.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2009 : A summary of the CMIP5 experiment design. PCMDI Tech. Rep., 33 pp. [Available online at [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor\\_CMIP5\\_design.pdf](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf).]

Timmermann, A., S. McGregor, and F. F. Jin, 2010: Wind effects on past and future regional sea level trends in the Southern Indo-Pacific. *J. Clim.*, 23, 4429-4437.

Van Vuuren, D. P., Lucas, P. & Hilderink, H., 2007: Downscaling drivers of global environmental change. Enabling use of global SRES scenarios at the national and grid levels. *Glob. Environ. Change* 17, 114-130.

Yang, D., O. A. Saenko, 2012 : Ocean Heat transport and Its Projected change in CanESM2. J Clim. 25, 8148–8163. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00715.1

Yeh, S.-W., and C.-H. Kim, 2010: Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation, Continental Shelf Research, 30(13), 1428–1434

Yin J, Griffies SM, Stouffer RJ, 2010 : Spatial variability of sea level rise in twenty-first century projections. J Clim 23(17):4585. doi:10.1175/2010JCLI3533.1

Zhang, X. B., and J. A. Church, 2012: Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. Geophys. Res. Lett., 39, L21701.