지구온난화에 의한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승 Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula

오상명* · 권석재** · 문일주*** · 이은일**

Sang Myeong Oh*, Seok Jae Kwon**, Il Ju Moon* and Eun Il Lee**

요 지 : 지구온난화로 인한 북서태평양 및 한반도 근해의 미래 해수면 상승을 IPCC AR4 기후 예측모델들의 결과를 이용하여 조사하였다. 본 연구에서는 대부분의 기후모델에서 제시하지 않은 지역적인 열팽창에 의한 해수면 상승을 3차원 수온과 염분 자료를 이용한 역학고도의 계산을 통해 분석하였다. 해수면 자료의 분석결과, 열팽창을 고려한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승률은 전 지구 평균보다 최대 두 배까지 높게 나타났다. 특히, 쿠로시오 확장지역에서 가장 높은 해수면 상승 경향을 보였다. 열팽창을 고려한 A1B 시나리오에 의한 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 모델 결과에서는 향후 100년 동안 북서태평양에서 각각 24 cm와 28 cm 그리고 한반도 근해에서 27 cm와 31 cm의 해수면이 상승하는 것으로 예측되었다. 통계분석 결과, 이러한 해수면 상승은 겨울철 시베리아 고기압의 약화와 북서태평양 해역의 기압장 변화 그리고 이로 인한 바람장 및 해류의 변화로 발생한 수온변화가 그 원인으로 분석된다. 특히, 쿠로시오 확장지역의 복상에 따른 수온 변화가 북서태평양에서 가장 큰 해수면 상승을 유발한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 지구온난화, 해수면 상승, 열팽창, 쿠로시오, 해수면 온도, 북서태평양

ABSTRACT : This study investigates sea level (SL) rise due to global warming in the Northwestern Pacific (NWP) and Seas around the Korean peninsula (KP) using outputs of IPCC AR4 climate models. Particularly, components of the SL rise induced by a local steric effect, which was not considered in most climate models, were computed using model-projected 3-dimensional temperature and salinity data. Analysis of the SL data shows that the ratio of the SL rise in the NWP and KP was about two times higher than that in global mean and particularly the ratio in the Kuroshio extension region was the highest. The SL rises over 100 years estimated from MPI_ECHAM5 and GFDL_CM2.1 model by A1B scenario considering the thermosteric effect were 24 cm and 28 cm for the NWP and 27 cm and 31 cm for the Seas around the KP, respectively. Statistical analysis reveals that these SL rises are caused by the weakening of the Siberian High in winter as well as variations of pressure system in the NWP and by the resultant change of water temperature. It also found that the highest SL rise in the Kuroshio extension region of the NWP was connected with the large increase of water temperature in this area.

Keywords : global warming, sea level rise, thermosteric, sea surface temperature, Kuroshio, northwestern Pacific

1. 서 론

지구온난화가 인류에 미치는 가장 큰 영향중에 하나로 예측되는 것은 해수면 상승이다(IPCC, 2007). 유엔 산하 기후 변화에 관한 정부간 위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 2007년에 발표한 4차 보고서(The fourth Assessment Report, AR4)에 따르면, 전 지구적으로 1961-2003년까지의 조위자료 분석 결과 평균 1.8 mm/yr 그리고

1993-2003년까지 위성고도계 자료 분석 결과 평균 3.1 mm/yr 해수면이 상승하였으며, 현재와 같이 화석연료를 지속적으로 사용하면 금세기말까지 지구의 해수면은 최고 59 cm가 상승할 것으로 전망하고 있다. 위성고도계 자료를 사용한 다른 연구에서도, 1993-1998년, 1993-2000년, 1993-2003년의 기간 동안 전지구 평균해수면은 각각 3.1 ± 1.3 mm/yr (Nerem, 1999), 3.2 ± 0.2 mm/yr (Cabanes et al., 2001), 2.8 ± 0.4 mm/yr (Cazenave and Nerem, 2004) 상승한 것으로 보고되고 있다.

*제주대학교 해양기상학협동과정 (Graduate program in marine meteorology, Jeju National University, Ara 1 Dong, Jeju, Jeju-do, 690-756, Korea)

**국토해양부 국립해양조사원 해양조사연구실 (Corresponding author, Ocean Research Lab., Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 1-17, 7 Ga Hang-dong, Jung-gu, Incheon 400-800, Korea. sj79kwon@korea.kr, Seok Jae Kwon)

***제주대학교 해양과학대학/해양과환경연구소 (Corresponding author, College of Ocean Science/Ocean and Environment Research Institute, Jeju National University, Ara 1 Dong, Jeju, Jeju-do, 690-756, Korea, ijmoon@jejunu.ac.kr, Il-Ju Moon)

전 지구적인 해수면 상승이 발생하더라도 지역적으로는 많은 차이가 발생한다. IPCC 기후모델 결과를 포함한 미래 해수면 변동 예측한 많은 연구에서 쿠로시오를 포함한 북서태평양, 브라질 남부 연안, 호주 서부 연안, 그리고 북극 지역에서 해수면 상승이 높게 나타날 것으로 예측하고 있다(Landerer et al., 2007; Yin et al., 2009; Choi et al., 2002). 특히, 과거 조위관측과 위성자료에서 나타난 한반도 주변해역의 최근 해수면 상승률은 전 지구 평균 해수면 상승률보다 1.3~2배 높은 것으로 보고되고 있다(국립해양조사원, 2010a; Kang et al., 2005; 하 등, 2006).

국립해양조사원은 2010년까지 운영 중인 조위관측소 중 관측기간이 10년 이상인 자료들 가운데 18개의 조위관측소의 기록을 이용하여 해면기압과 수직 지각변동이 보정된 절대해수면 변동률을 계산하여 한반도 근해에서 해수면이 1년에 평균 4.7 mm 상승하고 있음을 보고 하였다(국립해양조사원, 2010b). 이 보고서에 의하면 해수면 상승률은 해역별로 큰 차이가 있어, 서해 3.7 mm/yr, 동해 4.6 mm/yr, 남해(제주 포함) 5.2 mm/yr 순으로 남쪽으로 갈수록 상승률이 크게 나타났다. 한편, Kang et al. (2005)은 위성자료를 이용하여 1992년부터 2001년까지 9년간 동해지역의 해수면 상승률(5.4 ± 0.3 mm/yr)이 조위관측에 의한 것보다 더 높음을 보였다. 하 등(2006)도 2005년까지의 위성자료를 이용하여 13년간 한반도 주변해역에서 해수면은 평균 3.89 mm/yr 상승(전지구 평균의 약 1.3배)한 것으로 보고하였다.

해수면 상승은 그 특성상 인구 및 산업 시설이 집중되어 있는 연안에 가장 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 해수면 상승은 연안 저지대 및 습지의 범람, 해안침식, 폭풍해일 및 홍수, 그리고 표층수 및 지하수의 염분 침투 등에 의한 직접적인 피해를 증가시키고 이러한 영향들이 다양한 경로를 통하여 이차적으로 자연생태계 및 사회, 경제적으로 부정적인 영향을 미칠 수 있다(국립해양조사원, 2010a; Nicholls, 2002). 따라서 해수면 상승으로 예측되는 연안지역에서의 재해 위험성을 평가하고 효율적인 대응방안을 마련하는 것은 장기적인 연안관리 및 지속 가능한 연안개발을 위해 반드시 필요하다. 이를 위해서는 무엇보다 해수면 상승에 대한 과학적인 연구 및 예측이 선행되어야 한다. 특히, 미래에 해수면이 어느 정도까지 상승할 것인가에 대한 예측은 연안재해 대응을 위한 시작점이라 할 수 있다.

미래의 해수면 상승을 예측하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉, 과거의 관측자료(수위, 위성고도, 해수온도, 지질 등)를 이용하여 그 변화경향을 분석하여 외삽하는 방법(Woodworth and Player, 2003; Church and White, 2006; Domingues et al., 2008; Lambeck and Chappell, 2001; Kang et al., 2005)과 기후모델의 예측결과를 이용하는 방법(Yin et al., 2009; Landerer et al., 2007)이다. 두 방법은 시공간적인 자료의 해상도 차이로 인해, 전자는 주로 지역적인 해수면 변동 특성을 조사하는데 유용하게 사용되고 후자는 전 지구적인 해수면

변동의 경향을 분석하는데 많이 사용된다. 특히, 과거 조위관측자료로부터 미래 해수면 변동을 예측하는 것은 과거의 변동경향이 미래에도 계속 이어진다는 가정에서 출발하기 때문에 장기적인 예측에 사용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 대부분의 연구가 기후모델을 이용한 장기예측 연구에 초점이 맞추어져 있다.

Landerer et al. (2007)는 IPCC AR4 A1B 시나리오에 따른 기후모델 결과를 이용하여 미래 해수면 변동을 예측한 결과, 해양의 열팽창으로 인하여 전지구 평균 해수면이 2100년까지 26 cm 그리고 2199년까지는 56 cm 증가할 것으로 예측하였다. Yin et al. (2009)도 IPCC AR4 기후모델들을 이용하여 해양순환과 열팽창 그리고 해빙에 의한 담수유입으로 발생한 북대서양에서의 해수면 상승을 연구하였다. 이 연구에 의하면 미국 뉴욕시에서는 2100년까지 A2, A1B, B2 시나리오에 따라 해수면 상승이 각각 51 cm, 47 cm, 36 cm 상승할 것으로 예측하고 있다.

한편, Choi et al. (2002)은 대기-해양 접합모델을 이용하여 CO₂ 농도가 2배와 4배가 될 경우 전지구와 북서태평양에서의 해수면과 대기온도의 변동을 예측하였다. 이 연구에서 전지구와 북서태평양의 해수면은 CO₂ 농도가 현재보다 2배가 되면 표층온도는 약 1.2°C와 1.5°C 상승하고, 해수면은 7 cm와 10 cm가 상승할 것으로 예측하였다. 또한 CO₂ 농도가 4배가 되면, 전지구와 북서태평양에서 표층온도는 약 2.9°C와 3.0°C, 해수면은 각각 19 cm와 25 cm 상승할 것으로 전망하였다.

지금까지 기후모델을 이용한 장기 해수면 예측에 관한 대부분의 연구에서, 해양모델은 밀도 변화에 따른 부피 변화를 고려하지 않는 Boussinesq 가정을 사용하고 있다. 따라서 지역적으로 밀도 변화에 의한 부피 팽창(steric 효과)으로 발생하는 해수면 변동을 직접적으로 모델 내에서 계산할 수 없다. IPCC AR4 모델의 결과물에서도 대부분 해수 열팽창(thermosteric changes)에 의한 부분은 아예 제공하지 않거나 제공하더라도 전지구 평균값만 간접적으로 계산하여 제공하고 있다(Table 1). 실제로 해수의 열팽창에 의한 해수면 상승은 육지빙하(land-ice)의 용해와 함께 전체 해수면 상승에 가장 많은 부분을 차지하는 것으로 알려져 있으며 그 공간적인 분포도 지역적으로 차이가 크다(Stammer, 2008; Milne et al., 2009). 따라서 현재 제공되는 IPCC 기후모델의 해수면 예측 자료만으로는 해수 열팽창을 고려한 지역적인 해수면 변동을 파악하기 힘들다. 더욱이 한반도를 포함하는 북서태평양에서 해수 열팽창을 고려한 미래의 해수면 변동에 대해서 제시된 결과는 거의 없다.

본 연구에서는 IPCC AR4 기후모델의 예측결과를 바탕으로 지구온난화로 인해 북서태평양과 한반도 근해에서 지역적인 열팽창과 해수순환의 변화로 예상되는 해수면 변화를 조사하고 이러한 해수면 변화를 발생시키는 해양 및 기상학적 원인을 규명하고자 한다. 본 논문의 구성은 사용된 자료 및 연구방법(2장), 역학고도 계산을 통해 열팽창에 의한 평균해수면 변동 결과 제시(3장), 통계분석법을 이용한 북서태평양 평균해수면

Table 1. Characteristics of IPCC AR4 climate models

Model ID, Year	Sponsor, Country	Atmos. Model Resolution	Ocean Model Resolution, Coordinates	Fluxes	Sea Level Outputs
BCC-CM, 2005	BCC*, China	T63 L16	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$ L30, depth, free*	H*, M*	
BCCR-BCM2.0, 2005	BCCR*, Norway	T63 L31	$0.5^\circ \sim 1.5^\circ \times 1.5^\circ$ L35, density, free	none	Z1*
CCSM3, 2005	NCAR*, USA	T85 L26	$0.3^\circ \sim 1^\circ \times 1^\circ$ L40, depth, free	none	
CGCM3.1(T47), 2005	CCCMA*, Canada	T47 L31	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$ L29, depth, free	H, F*	Z1,Z2*,Z3*
CGCM3.1(T63), 2005	CCCMA, Canada	T63 L31	$0.9^\circ \times 1.4^\circ$ L29, depth, free	H, F	
CNRM-CM3, 2004	CNRM*, France	T63 L31	$0.5^\circ \sim 2^\circ \times 2^\circ$ L31, depth, rigid*	none	
CSIRO-MK3.0, 2001	CSIRO*, Australia	T63 L18	$0.8^\circ \times 1.9^\circ$ L31, depth, rigid	none	
MPI_ECHAM5, 2005	MPI*, Germany	T63 L31	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$ L40, depth, free	none	Z1
ECHO-G, 1999	MIUB*, KMA, Germany, Korea	T30 L19	$0.5^\circ \sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$ L20, depth, free	H, F	Z1,Z2,Z3
FGOALS-g1.0, 2004	LASG*, China	T42 L26	$1^\circ \times 1^\circ$ L16, eta, free	none	Z1
GFDL-CM2.0, 2005	NOAA*/GFDL*, USA	$2.0^\circ \times 2.5^\circ$ L24	$0.3^\circ \sim 1^\circ \times 1^\circ$ depth, free	none	Z1
GFDL-CM2.1, 2005	NOAA/GFDL, USA	$2.0^\circ \times 2.5^\circ$ L24	$0.3^\circ \sim 1^\circ \times 1^\circ$ depth, free	none	Z1
GISS-AOM, 2004	NASA*/GISS*, USA	$3.0^\circ \times 4.0^\circ$ L12	$3^\circ \times 4^\circ$ L16, mass, free	none	Z1,Z2,Z3
GISS-EH, 2004	NASA/GISS, USA	$4.0^\circ \times 5.0^\circ$ L20	$2^\circ \times 2^\circ$ L16, density, free	none	Z1,Z2,Z3
GISS-ER, 2004	NASA/GISS, USA	$4.0^\circ \times 5.0^\circ$ L20	$4^\circ \times 5^\circ$ L13, mass, free	none	Z1
INM-CM3.0, 2004	INM*, Russia	$4.0^\circ \times 5.0^\circ$ L21	$2^\circ \times 2.5^\circ$ L33, sigma, rigid	local F	Z2,Z3
IPSL-CM4, 2005	IPSL*, France	$2.5^\circ \times 3.75^\circ$ L19	$2^\circ \times 2^\circ$ L31, depth, free	none	Z1
MIROC3.2(hires), 2004	CCSR*, JAMSTEC, Japan	T106 L56	$0.2^\circ \times 0.3^\circ$ L47, sigma, free	none	Z1,Z2,Z3
MIROC3.2(medres), 2004	CCSR, JAMSTEC, Japan	T42 L20	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$ L43, sigma, free	none	Z1,Z2,Z3
MRI-CGCM3.2.3, 2003	MRI*, Japan	T42 L30	$0.5^\circ \sim 2.0^\circ \times 2.5^\circ$ L23, depth, rigid	H, M, F	Z1,Z2,Z3
PCM, 1998	NCAR*, USA	T42 L26	$0.5^\circ \sim 0.7^\circ \times 1.1^\circ$ L40, depth, free	none	Z1
UKMO-HadCM3, 1997	HCCPR/MO*, UK	$2.5^\circ \times 3.75^\circ$ L19	$1.25^\circ \times 1.25^\circ$ L20, depth, rigid	none	Z1
UKMO-HadGEM1, 2004	HCCPR/MO, UK	$1.3^\circ \times 1.9^\circ$ L38	$0.3^\circ \sim 1^\circ \times 1^\circ$ L40, depth, free	none	Z1

*Z1 : sea surface height above geoid (ZOS)

*Z2 : global average sea level change (ZOSGA)

*Z3 : global average thermosteric sea level change (ZOSTOGA)

*H : heat flux, M: momentum flux, F: fresh water flux

*T63 : $1.9^\circ \times 1.9^\circ$, T85 : $1.4^\circ \times 1.4^\circ$, T47 : $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, T30 : $3.9^\circ \times 3.9^\circ$, T42 : $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, T106 : $1.1^\circ \times 1.1^\circ$

*L : number of vertical layer

*free : free surface model, rigid: rigid-lid approximation

*BCC : Beijing Climate Center

*BCCR : Bjerknes Centre for Climate Research

*NCAR : National Center for Atmospheric Research

*CCCMA : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis

*CNRM : Centre National de Recherches Meteorologiques

*CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

*MPI : Max Planck Institute for Meteorology

*MIUB : Meteorological Institute of the University of Bonn

*KMA : Korea Meteorological Administration

*LASG : National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics

*NOAA : National Oceanic Atmospheric Administration

*GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

*NASA : National Aeronautic and Space Administration

*GISS : Goddard Institute for Space Studies

*INM : Institute for Numerical Mathematics

*IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

*CCSR : Center for Climate System Research

*JAMSTEC : National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change

*MRI : Meteorological Research Institute

*HCCPR/MO : Hadley Centre for Climate Prediction and Research/ Meteorological Office

상승과 관련된 환경요일의 변화 분석(4장), 그리고 결론 및 요약(5장)으로 되어있다.

2. 자료 및 연구방법

2.1. 자료

지구온난화로 인한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 상승을 조사하기 위하여 먼저 IPCC AR4 기후 예측모델들의 특성을 조사하였다. Table 1은 총 23개의 기후모델에 대한 이름, 지원기관, 나라, 대기모델과 해양모델의 해상도, 모델특성, 플럭스항, 그리고 해수면자료 결과물의 형태에 대해 설명한다.

대기모델의 해상도는 MIROC3.2(medres)가 수평적(위도 × 경도)으로 $1.1 \times 1.1^\circ$ (T106) 그리고 수직적으로 56층(L56)으로 가장 높으며, 해양모델의 해상도는 UKMO-HadGEM1 모델이 $0.3^\circ \sim 1^\circ$ 와 40층(L40)으로 가장 높다. 빠르게 움직이는 외부중력과(external gravity waves)를 무시하여 계산시간을 절약하는 rigid-lid 가정을 사용하는 모델은 CNRM-CM3, MRI-CGCM3.2, UKMO-HadCM3이며, 그 외 대부분의 모델은 자유표면(free surface)을 사용한다. IPCC에서 제공하는 모델들은 모두 해수 밀도 변화에 의해 부피가 변하지 않는다는 가정(Boussinesq approximation)을 사용하여 열팽창에 의한 해수면 상승효과(steric effect)를 고려할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 기후모델의 수온·염분 3차원 예측자료를 이용하여 역학고도를 추정하여 이로부터 간접적으로 열팽창에 의한 해수면 변화를 계산하였다(2.2절에 상세 설명함). 담수 유입에 의한 변동을 직접적으로 고려한 모델은 CGCM3.1, ECHO-G, INM-CM3.0, MRI-CGCM3.2이다. 열팽창에 의한 해수면 변화를 전 지구 평균값(Table 1에서 Z2 표시)으로 제시한 모델은 CGCM3.1, ECHO-G, GISS-AOM, GISS-EH, INM-CM3.0, MIROC3.2_HIRES, MIROC3.2_MEDRES, MRI-CGCM3.2 이다.

본 연구에서는 신뢰성이 높고 검증이 잘 이루어진 6개의 모델(MIROC3.2_HIRES, MIROC3.2_MEDRES, CCCMA_CGCM3.1, MRI-CGCM3.2, MPI_ECHAM5, GFDL_CM2.1)을 선정하여(Yin et al., 2009; Landerer et al., 2007), 2100년까지 이산화탄소(CO_2) 농도가 현재의 약 2배 수준인 720 ppm까지 상승하게 되는 A1B 시나리오에 따른 열팽창을 고려한 전 지구적(Global, G)인 해수면 상승률과 열팽창을 고려하지 않은 지역적(북서태평양 및 한반도 근해)인 해수면 상승률을 제시하였다(Table 2). 특히, MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 모델에 대해서는 역학고도 계산을 통해 지역적인 열팽창에 의한 해수면 상승 경향과 이러한 해수면 변동과 관련된 환경변수들에 대한 분석을 추가하였다. 또한 MPI_ECHAM5에 대해서는 A1B 시나리오 결과 이외에 CO_2 가 현재보다 4배가 된다는 CO_2 quadrupling 시나리오의 결과를 추가적으로 제시하였다.

지역적인 역학고도 분석을 위해서는 북서태평양(Northwestern Pacific, NWP)은 $10\text{--}50^\circ\text{N}$ 와 $110\text{--}170^\circ\text{E}$ 의 범위, 그리고 한반도

Table 2. Sea level rises estimated from outputs of IPCC AR4 climate models

Model, Scenario	Sea Level Rise [cm/100yr]					
	Without Steric Effect			Inclusion of Steric Effect		
	G*	NWP*	KP*	G	NWP	KP
MIROC3.2_HIRES A1B	-1.18	6.74	5.73	35.45		
MIROC3.2_MEDRES A1B	1.38	8.41	8.09	31.55		
CCCMA_CGCM3.1 A1B	-0.04	2.37	2.73	22.88		
MRI_CGCM2.3.2 A1B	-0.49	3.40	2.64	14.79		
MPI_ECHAM5 A1B	2.14	2.59	5.83	22.84	23.56	27.24
GFDL_CM2.1 A1B	0.59	8.57	9.19	16.97	27.56	31.34
MPI_ECHAM5 Quadrupling	-3.78	6.66	6.67	21.64	30.60	28.54

*G : Global, NWP : Northwestern Pacific, KP : Korean Peninsula

근해(Korean Peninsula, KP)는 $30\text{--}42^\circ\text{N}$, $120\text{--}135^\circ\text{E}$ 의 영역으로 정의를 하였다. 지역적인 해수면 상승과 대기·해양 환경변수와의 상관성은 CSEOF (Cyclostationary Empirical Orthogonal Function) 분석법을 이용하여 조사하였다(2.3절 참고).

2.2. 역학고도 계산

본 연구에서는 밀도 변화에 의한 부피 팽창 및 수축으로 발생하는 해수면 변동을 고려하기 위하여 역학고도(dynamic topography)를 계산하였다. 역학고도는 3차원 수온·염분 자료를 이용하여 (1) 식에 의해 구해졌다.

$$\Delta Z = \int_{1000}^0 g^{-1}(\alpha - \alpha_0) dp \quad (1)$$

여기서 ΔZ 는 역학고도를 나타내며, α 는 비용적(specific volume), α_0 는 273.15 K 와 35 psu 에서의 기준 비용적(specific volume as a function of pressure), g 는 중력가속도, 그리고 p 는 압력을 나타낸다. 역학고도는 기준깊이까지를 적분하여 계산되었다.

이 식은 표층 기압이 해수 상층의 밀도변화에 의해 전적으로 결정(compensate)되고 현재 실험의 시간규모가 심해의 열역학 평형상태에 도달되는 시간보다 훨씬 짧다는 가정을 포함한다. 전 지구의 역학고도 계산을 위하여 사용된 기준깊이(reference depth)는 1000 m 이다. 여기서 기준깊이를 2000 m 로 변경하더라도 결과에는 큰 변동이 없었다. 이것은 해양에서 따뜻한 해수는 대부분의 상층 수백 미터 이내에 한정되어 있기 때문이다(Choi et al., 2002). 천해역 계산을 위해서는 심해역에서 계산된 기준 역학고도를 정역학 방정식(hydrostatic equation)을 이용하여 천해역으로 확장을 시켜 사용하였다(Kim, 1998). 천해역 확장을 위한 기준 역학고도가 되는 기준점은 125.5°E , 24.5°N 이다.

2.3. CSEOF을 이용한 해수면 변동 통계분석

CSEOF(Cyclostationary Empirical Orthogonal Function)는 자료에서 주기적인 변동성이 예측될 경우, 전통적인 EOF 방법에서 사용하는 자료의 통계적인 특성이 한 지점에서 시간에

따라 변하지 않는다는 가정(stationary)을 벗어나 시간에 따른 변동성(cyclostationary)을 고려하여 자료에 포함된 물리적인 양상(physical mode)과 이것의 시간적인 변화(principal component time series, PC-Time series)를 경험적고함수로 분리하는 방법이다(Kim and North, 1997).

$$P(r, t) = \sum_n B_n(r, t) T_n(t) \quad (2)$$

$$B_n(r, t) = B_n(r, t + d) \quad (3)$$

여기서 $P(r, t)$ 는 우리가 알고자 하는 시공간에 따른 물리양상(physical mode)의 변동을 나타내며, $B_n(r, t)$ 는 물리 양상, $T_n(t)$ 는 각 물리 양상의 변화를 가져오는 시간 변동(PC time)을 나타낸다. 또한 n 은 모드를 나타내는 지수이고 d 는 자료의 고유한 주기(여기서는 12개월 사용)를 나타낸다. 물리 양상은 독립적이며 해석을 위해서는 상대적인 개념으로 접근을 하여야 한다. 또한 이러한 물리 양상이 시간적인 변화(PC-time series)의 변동과 결합하게 되면 시간에 따른 공간적인 변화 분포로 해석될 수 있다(Kim and North, 1997).

본 연구에서는 IPCC AR4 MPI_ECHAM5 A1B 기후모델 시나리오에 의해 계산된 역학고도 자료를 CSEOF 분석에 적용하였다. 분석결과로부터 지구온난화에 의한 해수면 상승 모드를 찾고 이것을 해양 및 대기 변수에 대해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에 사용된 해양·대기 환경변수는 수온, 염분, 해류, 바람, 해면기압이다.

3. 전지구, 북서태평양, 한반도 근해의 평균해수면 변화 비교

3.1. 열팽창을 고려하지 않은 해수면 변화

IPCC 기후모델에서 기본적으로 제공하는 대부분의 해수면 예측자료는 열팽창에 의한 해수면 상승은 고려되지 않고 있다(Table 1). Fig. 1은 선택된 6개의 모델(MPI_ECHAM5, GFDL-CM2.1, MIROC3.2_HIRES, MIROC3.2_MEDRES, CCCMA_CGCM3.1, MRI_CGCM2.3.2)에 대해 A1B 시나리오에서 열팽창을 효과를 제외한 향후 100년간(2001-2100년) 해수면 변동률을 공간적으로 나타낸 그림이다. 대부분의 기후모델들은 북반구에서는 그린랜드를 포함한 북극해, 북서태평양의 일본 동부 연안, 북대서양의 미국 북서부 연안, 북서인도양 그리고 남반구에서는 브라질과 호주의 동부연안, 남아프리카에 호주에 이르는 남극해 북쪽해역에서 높은 해수면 상승을 예측하였다. 그러나 대부분의 모델들이 남극해 및 일부 북서 대서양에서 매우 높은 해수면 하강을 예측하여 전 지구적인 평균 해수면 변동은 100년간 $-1.18 \text{ cm} \sim 2.14 \text{ cm}$ 에 불과하다(Table 2). 6개의 모델 중에 MIROC3.2_HIRES가 해수면 상승을 평균적으로 가장 낮게(-1.18 cm), MPI_ECHAM5는 가장 높게(2.14 cm) 모의하였다. 이러한 차이는 Table 1에서 설명된 바와 같이 각 모델의 수치계산에 적용되는 미물리, 해상도, 경계조건, 좌표계, 플럭스, 모델접합 등의 차이로 발생된다.

여기서 흥미로운 사실은 모든 모델의 결과에서 한반도를 포함한 북서태평양 쿠로시오 확장지역에서 공통적으로 높은 해

Fig. 1. Spatial distributions of sea level change (cm/100 yr) without considering steric effect projected by 6 IPCC AR4 climate models; (a) MPI_ECHAM5, (b) GFDL_CM2.1, (c) MIROC3.2_HIRES, (d) MIROC3.2_MEDRES, (e) CCCMA_CGCM3.1, and (f) MRI_CGCM2.3.2.

수면 상승을 예측하고 있다는 것이다. 북서태평양에서 평균 해수면 상승률은 100년간 2.59 cm~8.41 cm, 한반도 근해에서는 2.64 cm~8.09 cm로 나타나 전지구 평균에 비해 최대 약 8 cm 이상 높게 모의되었다. MIROC3.2_MEDRES는 6개 모델 중에 북서태평양과 한반도 근해에서 가장 높은 해수면 상승률(각각 8.41 cm, 8.09 cm)을 모의하였다. 대부분의 모델에서 북서태평양과 한반도 근해에서 높은 해수면 상승률을 보이는 이유에 대해서는 4장에서 상세히 설명한다.

3.2. 열팽창을 고려한 해수면 변화

대부분의 IPCC AR4 기후모델들은 지역적인 열팽창에 의한 해수면 예측자료를 제공하지 않지만 일부 모델은 전지구 평균값은 제공하고 있다(Table 1). Fig. 2는 4개의 모델(MIROC3.2_HIRES, MIROC3.2_MEDRES, CCCMA_CGCM3.1, MRI_CGCM2.3.2)에 대해 2001년부터 2100년까지 A1B 시나리오에 의한 열팽창에 의한 전지구 평균 해수면 변동을 나타낸다. 4개의 모델 중에 MRI_CGCM2.3.2는 100년 후에 수온상승에 의한 열팽창으로 해수면이 약 14 cm가 상승할 것으로 가장 낮게 전망하고 있고, MIROC3.2_HIRES는 열팽창으로 약 36 cm가 상승할 것으로 가장 높게 예상하고 있다. 앞에서 6개 모델의 열팽창을 고려하지 않은 해수면 상승이 최대 8.41 cm였던 것을 감안하면 해수의 열팽창이 해수면 상승에 기여하는

Fig. 2. Time series of sea level rise due to thermal expansion effect during the period 2001-2100 projected by 4 IPCC AR4 climate models.

바가 매우 큼을 알 수 있다.

전지구에 대해 평균된 열팽창에 의한 해수면 예측자료는 지역적인 변동값을 제공하지 못하기 때문에 북서태평양과 한반도 근해에서의 지역적으로 발생하는 열팽창에 의한 해수면 상승값을 알 수가 없다. Fig. 3은 3차원 수온·염분 자료를 이용하여 계산한 지역적인 열팽창에 의한 해수면 상승을 고려한 100년간 해수면 상승값(2091-2100년 10년 평균과 2001-2010년 10년 평균값의 차이)을 나타낸다. 사용된 모델과 시나리오는 MPI_ECHAM5의 A1B와 Quadrupling 그리고 GFDL_CM2.1의 A1B이다.

Fig. 3. The difference of 10-year averaged sea level (SST) between the period 2090-2099 and 2000-2009 for global (a, c, e) and northwestern Pacific (b, d, e) estimated considering steric effect for MPI_ECHAM5 A1B (a, b), GFDL-CM2.1 (c, d), and MPI_ECHAM5 Quadrupling (e, f).

A1B 시나리오의 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 결과를 보면, 역학고도 계산을 통해 열팽창이 고려된 북서태평양 해수면 변동(Fig. 3(a), (c))은 열팽창이 고려되지 않은 해수면 변동(Fig. 1(a), (b))과 공간적인 분포 경향이 매우 유사하게 나타난다. 즉, 쿠로시오 확장(extension) 지역을 포함한 북서태평양, 북극해, 호주 동쪽 해역, 그린란드 해역 등에서 높은 해수면 상승을 보이고 남극해에서는 낮은 상승률을 보이고 있다. 그러나 두 자료에서 전체적인 해수면 상승률의 크기는 큰 차이를 보인다. 즉, 열팽창을 고려한 경우 두 모델에서 평균적으로 해수면이 약 16-20 cm 더 상승한 것을 알 수 있다(Table 2). 한편, 열팽창을 고려할 경우 지역적으로 해수면 상승 차이가 더욱 크게 나타나는 경향이 보인다. 예를 들면, GFDL_CM2.1 A1B 결과에서 북서태평양(27.56 cm)과 한반도 근해(31.34 cm)의 평균 해수면 상승값은 전지구 평균(16.97 cm)보다 최대 거의 두 배까지 크게 나타났다(Table 2). 이 결과는 열팽창의 고려가 지역적인 해수면 변동을 더욱 유발시킴을 의미한다.

본 연구에서 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 모델에 대해 추정된 열팽창에 의한 전지구 해수면 상승값(Table 2에서 G-G*)은 각각 16.38 cm와 20.7 cm로 Table 2에 제시된 다른 모델의 상승값(35.45 cm, 31.55 cm, 22.88 cm, 14.79 cm)과 크게 차이가 나지 않는다. 이것은 본 연구에서 추정된 열팽창에 의한 해수면 상승값을 어느 정도 신뢰할 수 있음을 간접적으로 나타낸다. 모델별로 나타난 해수면 상승값의 차이는 각 모델에 사용된 모수와 방법, 해상도, 경계조건 등의 차이로 인해 유발된 것으로 사료된다.

MPI_ECHAM5 경우, A1B 시나리오 외에 CO₂ Quadrupling 결과를 추가적으로 비교하였다(Fig. 3(e), (f)). 여기서 두 시나리오 결과의 가장 큰 차이점은 북극해와 그린란드 주변해의 해수면 상승 경향이다. 이들 해역에서 A1B 시나리오는 50 cm 이상의 매우 급격한 해수면 상승을 예측한 것과는 달리 Quadrupling 결과에서는 남극해와 비슷한 매우 낮은 상승률을 보였다. 또한 후자의 경우 태평양과 인도양 전역에서 전자보다 매우 높은 해수면 상승을 모의하였다. 북서태평양과 한반도 근해에 대해서도 자세히 살펴보면, 쿠로시오 확장 지역에서 Quadrupling 경우에 A1B 보다 약 10 cm 높은 최대 51 cm까지 해수면 상승이 나타났으며, 한반도 연안에서도 약 9 cm 높은 최대 30 cm의 해수면 상승이 나타났다(Fig. 3(e), (f)).

이러한 해수면 상승 경향을 전지구, 북서태평양 그리고 한반도 근해에 대한 연평균 시계열로 분석한 결과, 전체 기간 동안 한반도 근해의 평균 해수면 상승률이 북서태평양이나 전지구의 평균 해수면 상승률보다 크게 나타났다(Fig. 4). 실제로 세 가지 결과에서 공통적으로 해수면 상승 극값은 일본 동부 연안인 쿠로시오 확장지역에서 나타났지만 북서태평양 전체의 해수면 상승률을 평균한 결과는 한반도 근해의 평균 해수면 상승률보다 작은 것으로 나타났다. 다음 장에서는 이러한 해수면 변동을 유발한 해양·대기 환경요인에 대해 분석하고자 한다.

Fig. 4. Time series of sea level rise considering steric effect during the period 2001-2100 projected by 3 IPCC AR4 climate models; (a) MPI_ECHAM5 A1B (b) GFDL_CM2.1 (c) MPI_ECHAM5 Quadrupling.

4. 북서태평양 해수면 상승과 관련된 환경요인 분석

미래 해수면 상승을 발생시킨 원인을 찾기 위하여 열팽창을 고려한 MPI_ECHAM5 A1B 결과(Fig. 3(a), (b))에 대해 북서태평양에서 해수면 상승과 관련된 해양·대기 환경요인(environmental variables)를 분석하였다. 사용된 환경변수는 해양 표층에서의 수온(Sea Surface Temperature, SST), 염분(Sea Surface Salinity, SSS), 해류, 그리고 1000 hPa 바람과 해면기압이다. 분석은 두 가지 방법으로 이루어 졌다. 첫째, 각 환경변수에 대해 2091-2100년 10년 평균과 2001-2010년 10년 평균값의 차이를 계산하여 100년간의 변동률을 계산하고 이것을 해수면 상승률과 비교하는 방법이다. 두 번째는 CSEOF 통계분석법을 이용하여 해수면 자료로부터 지구온난화 모드를 추출하고 이 자료를 기준(Target)으로 환경변수들을 회귀(regression)하는 방법이다.

먼저 첫 번째 방법을 이용하여 표층수온에 대해 100년간 수온의 변동값을 구하였다(Fig. 5). 여기서 계절에 따른 해수면 상승 경향을 비교하기 위하여 1년 평균 결과(ALL) 외에 여름(summer)과 겨울(winter)의 평균값도 함께 구하였다. Fig. 5에서 가장 먼저 눈에 띄는 것은 일본 동부연안 쿠로시오 확장 지역에서 큰 온도 상승이다. 이 지역에서 표층수온은 최대 5.5°C까지 상승하였다. 여름과 겨울은 큰 차이를 보이지 않았다. 이 결과로부터 앞서 북서태평양에서 가장 높은 해수면 상승률을 보인 것은 이 지역에서 미래에 수온이 크게 상승했기 때문으로 분석된다.

Fig. 5. The difference of 10-year averaged sea surface temperature (SST) between the period 2090-2099 and 2000-2009 during (a) all seasons, (b) summer (JAS), and (c) winter (DJF) projected by MPI_ECHAM5 A1B.

Fig. 6. Same as in Fig. 5, but for sea surface salinity (SSS).

수온 이외에 해수의 부피팽창에 기여하는 요인은 염분이다. 향후 100년간 표층염분 변화를 예측한 결과를 보면(Fig. 6), 전체적으로 북서태평양에서 큰 변화는 보이지 않지만 동중국해에서 여름철에 1 psu 이상의 상승경향과 북위 15-20도의 열대해역에서 0.5 psu의 감소 경향이 나타난다. 전자는 동중국해에 위치한 양자강의 영향으로 분석된다. 양자강 하구에서 염분이 높아졌다는 것은 미래에 이 지역에 강수가 줄었다는 것으로 해석이 가능하다. 이 결과는 지구온난화가 수온 상승을 유발시키고 이로 인해 대기 중에 수증기가 더욱 많아져 전 지구적으로 강수가 더 많아질 것이라는 예측과는 상반된다. 그러나 강수의 변동은 지역적인 요인이 더 많이 작용할 뿐 아니라 사용된 기후모델의 공간해상도가 매우 낮기 때문에 좀

신중한 분석이 요구된다. 열대해역에서 염분의 감소는 전 지구적인 강수패턴 및 해양순환의 결과를 분석되지만 현재의 자료로는 해석의 한계가 있다.

쿠로시오 확장 지역에서 급격한 수온의 상승 원인을 찾기 위하여 이 지역의 표층해류의 변화를 살펴보았다(Fig. 7). 가장 큰 해류의 변화는 일본 연안을 따라 나타나는 북쪽 방향의 해류 차이(anomaly)이다. 또한 북위 약 40°-45° 근처에서 동쪽으로 해류가 강화되는 것도 뚜렷이 보인다. 한편 북위 30°-35° 근처에서는 서쪽으로 해류가 강화됨을 알 수 있다. 이러한 현상들을 종합해보면 북위 30°-35° 근처에서 흐르던 쿠로시오 해류가 40°-45° 근처로 북상한 것임을 알 수 있다. 이러한 결과는 쿠로시오 해류가 지구온난화로 그 위치가 북상한다는 다른 연구의 결과와 잘 일치하고 있다(Choi et al., 2002; Kim, 1998).

쿠로시오 위치가 고위도로 이동하는 특징 외에 대만 동쪽 및 인도네시아 서쪽 해역에서는 북상하는 쿠로시오의 지류가 약화(남쪽으로 해류 차이 발생)되고 중국해를 거쳐 한반도로 북상하는 해류는 더 강해지는 경향이 보인다(Fig. 7(a)). 이러한 경향은 주로 여름철에 지배적으로 나타난다(Fig. 7(b)). 한편, 북서태평양 중심 부근(23°N, 148°E)에는 반시계 방향으로 회전하는 해류가 나타난다(Fig. 7(a)). 이것은 여름철 해류의 변동이 반영된 것으로 사료된다(Fig. 7(b)).

표층해류의 변동 원인은 1000 hPa 바람의 변화를 보면 어느 정도 이해가 가능하다. 쿠로시오 확장 지역의 북상은 중위도 지역에서 강화된 남풍의 영향으로 보인다(Fig. 8(a)). 이러한 남풍(또는 남서풍)의 강화는 북서태평양의 겨울철 바람 분포에서 더욱 뚜렷이 관찰된다(Fig. 8(c)). 특히, 우리나라 겨울철에 남동풍 바람이 강화(즉, 북서풍의 약화) 현상이 뚜렷이 보인다. 이것은 동중국해를 거쳐 한반도로 북상하는 해류가 강화되는 것과 관련이 깊은 것으로 사료된다. 한편, 앞서 북

Fig. 7. Same as in Fig. 5, but for surface current (m/sec).

Fig. 8. Same as in Fig. 5, but for surface wind (m/sec).

Fig. 9. Same as in Fig. 5, but for sea level pressure (Pa).

서태평양에서 나타난 시계방향의 해류 성분은 여름철 바람자료에서 보이는 일본 동쪽 해역을 중심으로 한 시계방향의 바람순환 강화와 관련이 깊다(Fig. 8(b)).

바람의 변동은 기압패턴의 변화에 의해 주로 발생한다. 북서태평양의 전반적인 기압 변화를 보면 미래에는 시베리아 대륙 쪽에는 기압이 크게 낮아지는 것이 특징적이다(Fig. 9(a)). 이러한 특징은 겨울철의 기압 변동과 매우 유사하다. 즉, 겨울철 대륙에 위치한 찬 시베리아 고기압이 크게 약화되는 것이 북서태평양의 전체적인 기압변동을 지배하는 것으로 보인다. 북서태평양 해역에서는 대륙보다는 평균적으로 크게 기압변동이 나타나지 않는다. 이것은 여름철에는 이 해역에서 기압이 크게 감소하지만 겨울철에는 크게 상승하여 서로 상쇄되기 때문이다. 크지는 않지만 필리핀 근처 열대해역에서 기압의 상

승은 여름과 겨울에 함께 관찰되는 북태평양 고기압의 강화와 관련이 깊은 것으로 사료된다.

지금까지 살펴본 해수면 변동과 관련된 대기 및 해양 요소들의 변동 특성은 지구온난화에 의해 나타나는 변동 외에도 계절별, 수년간, 그리고 수십년의 주기를 가지는 다양한 변동들이 합쳐져 나타난 것이다. 따라서 이러한 단순한 분석방법은 지구온난화에 의한 변동만을 조사하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 CSEOF 통계분석법을 이용하여 해수면 자료로부터 지구온난화에 의한 변동만을 추출하고 이것을 이용하여 해수면 변동을 발생시킨 해양·대기의 원인을 조사하였다. 이를 위하여 먼저 CSEOF의 여러 가지 모드(mode)에 대한 공간적인 분포와 PC(Principal Component) 시계열 자료를 분석하였다.

분석결과, 전체변동의 48%를 차지하는 제 1모드는 PC 시계열이 0을 기준으로 음에서 양으로 선형적인 증가를 보이는 온난화 모드임이 밝혀졌다(Fig. 11). 제 1모드의 공간패턴은 계절에 따른 큰 변동이 거의 없으며 쿠로시오 확장 지역에서 강한 양의 값을 보인다(Fig. 10). 여기서는 제시되지 않았지만 전 지구적인 분포를 보면 북극지역에서 강한 양의 값을 나타내고 북대서양, 쿠로시오를 포함하는 북서태평양, 브라질 남부 연안에서 호주에 이르는 지역에서 양의 값(즉 높은 해수면 상승)을 나타낸다. 이것은 기존연구에서 나타난 온난화로 인한 해수면 상승 경향과 잘 일치한다(Yin et al., 2009). CSEOF 1모드에 따른 공간패턴과 시계열을 조합하면, 전 계절에 걸쳐(여기서는 여름과 겨울만 제시) 한반도 근해를 포함한 북서태평양에서 해수면 상승이 뚜렷함을 알 수 있다. 특히 일본 동부 연안의 큰 해수면 상승은 앞서 분석한 결과와 잘 일치한다.

Fig. 10. Spatial distributions on the 1st mode of sea level CSEOF analysis for (a) August and (b) February.

Fig. 11. Time series of Principal Component (PC) for 1st mode of sea level CSEOF analysis.

CSEOF을 이용하여 지구온난화에 따른 해수면 변동(Fig. 11)을 일으킨 원인을 조사하였다. 이를 위해 표층의 수온, 염분, 해류 그리고 1000 hPa 바람과 해면기압에 대하여 해수면 변동을 기준(Target)으로 회귀(regression) 분석을 실시하였다. 그 결과, 여름철 해수면 변동은 수온의 변동과 가장 관련이 큰 것으로 나타났다. 즉 일본 동쪽 쿠로시오 확장 지역에서 큰 온도 상승이 이 지역의 해수면을 크게 상승 시킨 것으로 분석된다. 그러나 Fig. 12(a)와 Fig. 10(a)를 자세히 비교해 보면, 해수면이 최대 상승한 지역(위도 37°N 부근)과 수온이 최고로 상승한 지역(43°N 부근)은 약 5° 가량 차이가 난다. 이것은 해수 온도 이외에 다른 요소가 해수면 상승에 기여했다는 것을 의미한다.

일반적으로 시계방향의 순환이 발생하는 난류 에디(warm eddy)에서 해수면 고도가 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Lin et al., 2008). 해수면 자료에 회귀된 표층해류의 분포를 보면(Fig. 12(c)), 해수면이 최대 상승한 지역(위도 37°N 부근)에서 시계방향의 순환이 뚜렷이 보인다. 이러한 시계방향의 순환은 북쪽의 쿠로시오 지류와 남쪽에 발달된 서향의 해류(30°N 부근) 사이에서 발생하였다. 따라서 위도 37°N 부근에서 해수면 상승은 이러한 시계방향의 순환이 만든 에디에 의해 발생된 것으로 사료된다. 한편, 수온이 최고로 상승한 지역(43°N

부근)과 쿠로시오의 위치가 북상한 지역은 잘 일치한다. 이 지역은 원래 한류가 흐르는 지역이었기 때문에 따뜻한 쿠로시오의 북상은 이 지역의 온도를 크게 상승시킨 것으로 사료된다.

여름철 쿠로시오 확장 지역의 북상 이 외에 북서태평양에서 가장 특징적인 해류변화 중에 하나는 일본 오키나와 동쪽을 중심으로 한 반시계 방향의 저기압성 흐름이다. 해류, 바람, 기압 분포에서 잘 나타난 이 흐름으로 인해 앞서 설명한 북위 30° 근처에서 서향의 해류가 발생하였고 오키나와 동쪽과 필리핀 근해에는 남하하는 흐름이 발생하였다. 이 흐름은 쿠로시오 지류의 약화를 의미한다. 한편, 염분은 여름철에 양자강이 위치한 동중국해에서 증가하고 북서태평양 외해에는 전반적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 12(b)). 이러한 염분분포는 동중국해에서 밀도의 상승으로 인한 해수면 상승에 기여한 것으로 사료된다.

겨울철 해수면, 수온, 염분 분포는 전반적으로 여름철과 유사하다(Fig. 13). 특징적인 것은 북태평양의 북쪽에서 뚜렷이 보이는 반시계 방향의 저기압성 순환과 대만을 중심으로 한 고기압성 순환이다(Fig. 13(d), (e)). 전자로 인해 쿠로시오 확장지역은 여름철과 달리 위도 37°N 부근에서 남하하는 흐름이 발생하였고(Fig. 13(c)) 이것으로 인해 이 지역의 해수면 상승을 더욱 유발 시킨 것으로 해석된다. 후자는 대만 동쪽 해역에서 남하하는 흐름을 발생시켜 쿠로시오를 약화시키는 원인이 된다(Fig. 13(c)).

Fig. 12. Spatial distribution of the regressed (a) SST (b) SSS (c) SC (d) 1000 hPa wind (e) sea level pressure to 1st mode of sea level CSEOF analysis in August.

Fig. 13. Same as in Fig. 12, but in February

5. 결론 및 요약

해수면 상승은 지구온난화로 유발되는 가장 큰 영향중에 하나로 대두되고 있다(IPCC, 2007). 본 연구에서는 IPCC AR4 기후모델 예측결과를 이용하여 미래 북서태평양과 한반도 근해에서 열팽창이 고려된 해수면 변동을 예측하고 그 원인을 분석하였다. 총 23개의 IPCC AR4 기후모델의 특성과 예측된 해수면 자료를 분석하였고, 이 중에 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 모델에 대해 3차원 수온과 염분 자료를 이용한 역학 고도의 계산을 통해 열팽창에 의한 지역적인 해수면 변화를 추정하였다. 기후변화 시나리오는 2100년까지 이산화탄소(CO₂) 농도가 현재의 약 2배 수준인 720 ppm까지 상승하게 되는 A1B와 CO₂가 현재보다 4배가 된다는 CO₂ Quadrupling 을 사용하였다.

대부분의 기후모델에서 열팽창을 고려하지 않은 해수면 상승률(100년간)은 전지구 평균이 -1.18 cm~2.14 cm로 매우 낮게 나타났다. 반면, 열팽창을 고려한 해수면 변동은 전지구 평균이 100년간 최대 36 cm(MIROC3.2_HIRES 모델의 경우)까지 증가하였다. 이것은 해수의 열팽창이 해수면 상승에 기여하는 바가 매우 큼을 시사한다. 열팽창을 고려한 A1B 시나리오에 의한 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1 모델 결과에서 쿠로시오 확장(extension) 지역을 포함한 북서태평양, 북극해, 호주 동쪽 해역, 그린랜드 해역 등에서 높은 해수면 상승을 보이고 남극해서는 낮은 상승률을 보이고 있다. 특히, GFDL_CM2.1 A1B 결과에서 한반도 근해(31.34 cm)의 평균 해수면 상승값은 전지구 평균(16.97 cm)보다 거의 두 배까지 크게 나타났다. 이 결과는 열팽창의 고려가 지역적인 해수면 변동을 더욱 유발시킴을 의미한다. 한편, MPI_ECHAM5 모델의 Quadrupling 시나리오 경우에는 북서태평양에서 A1B 보다 약 10 cm 높은 최대 51 cm까지 해수면 상승이 나타났으며, 한반도 연안에서도 A1B 보다 약 9 cm 높은 최대 30 cm의 해수면 상승이 나타났다.

미래 해수면 상승을 발생시킨 원인을 찾기 위하여 열팽창을 고려한 MPI_ECHAM5 A1B 결과에 대해 북서태평양에서 해수면 상승과 관련된 해양·대기 환경요인을 분석하였다. 그 결과, 한반도를 포함한 북서태평양이 다른 해역에 비해 해수면 상승이 크게 나타난 것은 온난화에 따른 표층 해류의 변화로 쿠로시오 확장 지역이 북상하였기 때문으로 조사되었다. 수온이 최고로 상승한 지역(43°N 부근)은 원래 한류가 흐르는 지역이었기 때문에 따뜻한 쿠로시오의 북상은 이 지역의 온도를 크게 상승시켜 결과적으로 큰 해수면 상승을 발생시킨 것으로 사료된다. 해류의 변화는 시베리아 고기압을 포함한 북서태평양의 기압패턴의 변화로 이로 인한 바람장의 변화로 발생한 것으로 분석된다. 특히, 지구온난화로 겨울철 시베리아 고기압의 약화와 북태평양 해역에서 고기압성 순환의 발달이 쿠로시오 확장 지역의 북상과 관련이 깊은 것으로 나타났다. CSEOF 분석에서는 겨울철에 북태평양의 북쪽에서 뚜렷이 보

이는 반시계 방향의 저기압성 순환과 대만을 중심으로 한 고기압성 순환이 특징적으로 나타났다. 전자로 인해 쿠로시오 확장지역은 여름철과 달리 위도 37°N 부근에서 남하하는 흐름이 발생하였고 이것으로 인해 이 지역의 해수면 상승을 유발시킨 것으로 해석된다. 후자는 대만 동쪽해역에서 남하하는 흐름을 발생시켜 여름철과 같이 쿠로시오를 약화시키는 원인이 된 것으로 사료된다.

본 연구에서는 IPCC AR4 기후모델이 예측결과를 이용하여 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면 변화를 살펴보았다. 그러나 IPCC 기후모델은 공간 해상도가 낮아(1.1°~3.9° 범위), 수심이 얇고 지형이 복잡한 한반도 근해의 해수면 변화를 조사하는 데에는 한계가 있다. 또한 기후모델에 접합된 해양모델은 밀도 변화에 따른 부피 변화를 고려하지 않는 Boussinesq 가정을 사용하고 있어 지역적으로 밀도변화에 의한 부피팽창(steric 효과)으로 발생하는 해수면 변동을 직접적으로 모델 내에서 계산할 수 없다. 본 연구에서 이러한 단점을 보완하기 위하여 역학고도를 이용한 부피팽창에 의한 해수면 상승 효과를 고려하였지만 이것에 사용된 여러 가지 가정들 때문에 정확한 해수면 변화를 추정하는 데에는 한계가 있다. 따라서 향후에는 Boussinesq 가정을 사용하지 않은 고해상도의 모델을 이용하여 한반도 근해의 해수면 변동을 조사할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단(KRF-2007-331-C00255)과 국토해양부 시험연구비(일반 2000-2033-307-210-13) 및 “종합 해양 과학기초 구축 및 활용 연구(PM55520)”의 지원으로 수행되었습니다. 논문을 완성하는데 도움을 주신 심사위원들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립해양조사원 (2010a). 지구온난화에 의한 해수면 변화 연구(II).
- 국립해양조사원 (2010b). 해수면 변동 정밀분석 및 예측(2차).
- 하경자, 정기용, 장새롬, 김기영 (2006). 복합위성자료(Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat)를 이용한 한반도 주변해역에서의 해수면 고도 변화와 해수면 온도의 상관성 연구. *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(6), 519-531.
- Cabanes, C., Cazenave, A. and Provost, C. L. (2001). Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science*, 294, 840-842.
- Cazenave, A. and Nerem, R. S. (2004). Present-day sea level change: Observations and causes. *Rev. Geophys.*, 42, RG3001.
- Choi, B. H., Kim, D. H. and Kim, J. W. (2002). Regional responses of climate in the northwestern Pacific Ocean to gradual global warming for CO₂ quadrupling. *Journal of Meteorological Society*, 80, 1427-1442.
- Church, J. A. and White, N. J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.* L01602.

- Domingues, C. D., Church, J. A., White, N. J., Gleckler, P. J., Wijffels, S. E., Barker, P. M. and Dunn, J. R. (2008). Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453, 1090-1093.
- IPCC, Climate Change (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Solomon, S. et al.). 747-845 (Cambridge Univ. Press, 2007).
- Kang, S. K., Cherniawsky, J. Y., Foreman, M. G. G., Min, H. S., Kim, C. H. and Kang, H. W. (2005). Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data. *J. Geophys. Res.*, 110.
- Kim, D.H. (1998). Sea Level Change due to Global Warming in the Northwestern Pacific Ocean. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University.
- Kim, K.Y. and North, G. R. (1997). EOFs of harmonizable cyclostationary processes. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2416-2427.
- Lambeck, K. and Chappell, J. (2001). Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 292, 679-686.
- Landerer, F.W., Jungclauss, J.H. and Marotzke, J. (2007). Regional dynamic and steric sea level change in response to the IPCC-A1B scenario. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 296-312.
- Lin, I.I., Wu, C.C. and Pun, I.F. (2008). Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons. Part I: Ocean Features and the Category 5 Typhoons' Intensification. *Mon. Wea. Rev.* 136, 3288-3306.
- Milne, G. A., Gehrels, W. R., Hughes, C. W. and Tamisiea, M. E. (2009). Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience* 2, 471-478.
- Nicholls, R. J. (2002). Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 1455-1466.
- Nerem, R. S. (1999). Measuring very low frequency sea level variations using satellite altimeter data. *Global and Planetary*, 20, 157-171.
- Stammer, D. (2008). Response of the global ocean to Greenland and Antarctic ice melting. *J. Geophys. Res.*, 113.
- Woodworth, P. L. and Player, R. (2003). The permanent service for mean sea level: an update to the 21st century. *J. Coastal Res.* 19, 287-295.
- Yin, J., Schlesinger, M. E. and Stouffer, R. J. (2009). Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States. *Nature Geoscience*, 2, 262-266.

원고접수일: 2011년 5월 19일

수정본채택: 2011년 6월 7일(1차)

2011년 6월 8일(2차)

게재확정일: 2011년 6월 8일