

CMIP5 자료를 활용한 우리나라 미래 해수면 상승

허태경 · 김영미* · 부경은 · 변영화 · 조천호

국립기상과학원 기후연구과

(접수일: 2017년 11월 7일, 수정일: 2018년 1월 1일, 게재확정일: 2018년 1월 22일)

Future Sea Level Projections over the Seas Around Korea from CMIP5 Simulations

Tae-Kyung Heo, Youngmi Kim*, Kyung-On Boo, Young-Hwa Byun, and Chunho Cho

Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 7 November 2017; revised 1 January 2018; accepted 22 January 2018)

Abstract This study presents future potential sea level change over the seas surrounding Korea using Climate Model Intercomparison Project Phase 5 9 model ensemble result from Representative Concentration Pathways (RCPs), downloaded from icdc.zmaw.de. At the end of 21st century, regional sea level changes are projected to rise 37.8, 48.1, 47.7, 65.0 cm under RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 scenario, respectively with the large uncertainty from about 40 to 60 cm. The results exhibit similar tendency with the global mean sea level rise (SLR) with small differences less than about 3 cm. For the East Sea, the Yellow Sea, and the southern sea of Korea, projected SLR in the Yellow Sea is smaller and SLR in the southern sea is larger than the other coastal seas. Differences among the seas are small within the range of 4 cm. Meanwhile, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) data in 23 years shows that the mean rate of sea level changes around the Yellow Sea is high relative to the other coastal seas. For sea level change, contribution of ice and ocean related components are important, at local scale, Glacial Isostatic Adjustment also needs to be considered.

Key words: Sea surface height, CSIRO, Korea, SLR

1. 서 론

산업혁명에 이후 인간의 인위적 활동에 의한 이산화탄소 배출량 증가는 전 지구 평균 기온상승의 원인이 되었을 뿐 아니라 해양온난화를 야기하였다. 대기보다 약 1,000배나 큰 열용량을 가지는 해양은 1960년대 이후 대기보다 약 20배나 많은 열량을 흡수하였다(Levitus et al., 2005). 해양온난화는 해양생태계를 변화시키고 해양산성화를 급속도로 진행시킬 뿐 아니라, 계절적 규모나 장기간의 기후변화에 큰 영향을 미

치며 대기보다 그 영향이 길게 지속된다(IPCC, 2007; Meehl et al., 2005).

지구온난화는 빙하/해빙을 녹여 적설면적을 감소시켰으며 해양온난화에 의한 해양부피의 증가는 해수면 상승을 야기하였다. Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5)는 전 지구 평균해수면이 1901~2010년에 1.7 mm yr^{-1} , 1993~2010년에는 3.2 mm yr^{-1} 로 상승한다고 분석하였다. Hamlington et al. (2011)이 조위계와 위성자료 관측자료를 이용하여 연구한 결과에 따르면 1950년~2009년 동안의 전 지구 평균해수면 상승률은 1.97 mm yr^{-1} 인데 반해 1993년~2009년에는 3.22 mm yr^{-1} 로 나타났다. 지구온난화로 인한 전지구적인 해수면 상승과 더불어 우리나라 주변해역에서도 해수면 상승이 관측되었다. Jung (2014)은 국립해양조사원 조위계 자료를 이용하

*Corresponding Author: Youngmi Kim, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6658, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: kym19@korea.kr

여 서해 연안해역의 평균해수면의 경년 변화를 분석하여 해안개발에 의해 평균해수면이 1980년대 이후 급격하게 변화한 것으로 보고하였다. Kang et al. (2005) TOPEX/Poseidon 해수면자료를 이용하여 분석한 동해의 해수면 변화는 9년 동안 5.4 mm yr^{-1} , 남동해는 6.6 mm yr^{-1} 로 전 지구 평균보다 빠르게 상승한다고 분석하였다. AVISO 해수면자료를 이용하여 분석한 한반도 주변해역의 해수면고도상승률은 1993~2005년 동안 연평균 3.89 mm yr^{-1} 로 전 지구 해수면상승률보다 1.3배 높은 것으로 나타났다(Ha et al., 2006). 조위계를 이용한 한반도 주변의 해수면변화 분석결과도 해안 별로 해수면 상승률에는 차이가 있으나 전 지구 평균해수면 변화보다 한반도의 상승추세가 높은 것으로 나타났다(Yoon and Kim, 2012).

21세기에도 온난화가 지속되어 지구온난화 뿐 아니라 해수면상승도 지속될 것이라 전망하고 있다. 해양의 온난화는 열팽창과 빙하녹음으로 인위적 영향에 의한 유의한 변화를 야기할 것으로 전망된다(Lyu et al., 2014). 해수면은 지역적으로 균일하게 상승하지 않기 때문에 지역적 해수면 변화는 중요한 관심사가 되었다. 오늘날 전 세계 인구의 10% 정도가 10 m 고도 이하의 해안지역에서 살고 있어 지역적인 해수면 변화로 인한 염분침투, 홍수 등의 연안지역 피해가 발생할 가능성이 있다(Nicholls and Cazenave, 2010). 따라서 해수면상승을 예상하고 대비하는 것이 필요하다.

IPCC AR5에 따르면 21세기 말 전세계 연안지역 70%에서 지구평균 해수면 상승치의 20% 이내에서 해수면 상승이 차이가 있다고 보고 하고 있다. Yin et al. (2009)는 GFDL CM2.1 모델을 이용하여 21세기 말 뉴욕, 런던, 샌프란시스코 등 주요 8개 도시의 역학적 해수면 상승을 분석하여 각 도시 별 해수면상승 정도가 차이가 있음을 분석하였다. 아시아 지역에 대해서는 Huang and Qiao (2015)에서 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) 모델을 이용한 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오에 따른 남중국해의 해수면상승을 전망한 바 있다. 우리나라 역시 대륙의 동안에 위치하며 국토의 삼면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 해수면 고도의 변화가 매우 중요하다. 조위계 자료나 위성자료의 분석 결과는 관측기간이나 방법에 따라 상승률의 차이는 있으나 최근 우리나라의 해수면이 전 지구 평균보다 빠르게 증가하고 있으며 삼면(서해, 동해, 남해)에서의 현재 해수면상승률이 차이가 있다고 보고하고 있다(Kang et al., 2005; Ha et al., 2006; Jung, 2014; Yoon and Kim, 2012). 본 연구에서는 최근의 우리나라 해수면 변동뿐 아니라 IPCC AR5에서 사용된 CMIP5 모델 앙상블 자료를 사용하여 20세기말 대비

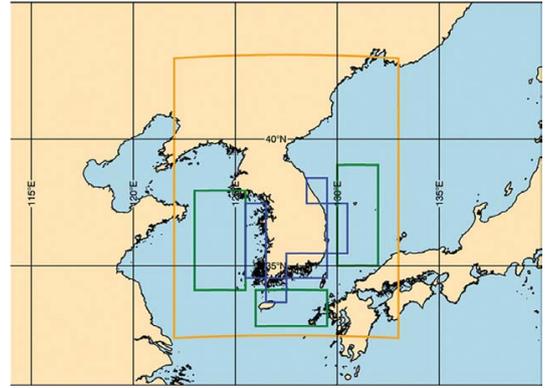


Fig. 1. Analysis area. Orange box indicates Korea in this study ($123^{\circ}\text{E}\sim 132^{\circ}\text{E}$, $33^{\circ}\text{N}\sim 43^{\circ}\text{N}$). Offshore regions (green boxes) are East Sea offshore ($130^{\circ}\text{E}\sim 132^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$), West Sea offshore ($123^{\circ}\text{E}\sim 125.5^{\circ}\text{E}$, $34^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$) and South Sea offshore ($126^{\circ}\text{E}\sim 129.5^{\circ}\text{E}$, $32.5^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$). Coastal regions (Blue boxes) are East Sea coast ($129.5^{\circ}\text{E}\sim 130.5^{\circ}\text{E}$, $35.5^{\circ}\text{N}\sim 37.5^{\circ}\text{N}$, $128.5^{\circ}\text{E}\sim 129.5^{\circ}\text{E}$, $37.5^{\circ}\text{N}\sim 38.5^{\circ}\text{N}$), West Sea coast ($125.5^{\circ}\text{E}\sim 126.5^{\circ}\text{E}$, $34.5^{\circ}\text{N}\sim 37.5^{\circ}\text{N}$), and South Sea coast ($126.5^{\circ}\text{E}\sim 127.5^{\circ}\text{E}$, $33.5^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$, $127.5^{\circ}\text{E}\sim 129.5^{\circ}\text{E}$, $34.5^{\circ}\text{N}\sim 35.5^{\circ}\text{N}$).

21세기 말 우리나라의 해수면의 변화를 분석하고자 한다. 우리나라 주변 해역을 6개 구역으로 분리하여 전 지구 평균 대비 우리나라 미래해수면상승의 특징을 분석해보고자 한다.

2. 자 료

본 연구에서는 IPCC AR5의 미래 해수면 상승 전망연구에 사용된 Total Sea Level Rise (TSLR) 자료를 사용하였다. TSLR 자료는 독일 Integrated Climate Data Center (ICDC) 센터의 홈페이지(icdc.zmaw.de)에서 제공받았다. ICDC는 RCP 4종에 대한 1986~2005년 대비 2081~2100년의 평균 TSLR 자료와 시나리오 2종(RCP4.5, RCP8.5)에 대한 2007~2100년의 연평균 TSLR 자료를 제공한다. 각 자료별 90% 신뢰도 수준의 불확실성 범위를 같이 제공하며 TSLR의 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이다.

TSLR은 해양의 질량과 밀도 변화 등 총 10가지 요소를 고려하여 산출한다. 10가지 요소는 dynamic SSH(역학적 해수면고도), global thermosteric SSH anomaly(전 지구 열적 해수면고도 변화), inverse barometer effect(역기압효과)의 해양관련 3가지 요소, Greenland dynamic ice and surface mass balance(그린란드 빙하에 의한 역학적 지표면균형), Antarctic dynamic ice and surface mass balance, glaciers(남극 빙하에 의한

역학적 지표면균형)의 빙하관련 5가지 요소, 그리고 land water storage(육상 물), 빙하 감소에 따른 전지구적인 균형을 고려한 Glacial isostatic adjustment(빙하 지각균형 조정; GIA)로 구성되어 있다. ICDC에서는 21개 모델 앙상블 값을 제공하는데 21개 모델은 ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ES-M2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME, inmcm4이다. 이 TSLR의 자세한 설명은 Church et al. (2013), Slagen et al. (2014)에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 4종의 RCP의 21세기 말 TSLR 자료와 RCP8.5의 연별 TSLR 값을 분석하여 우리나라의 해수면 상승을 분석하였다. 해수면은 지역에 따라 비대칭으로 상승하기 때문에 6개 지역으로 분석 지역을 상세화하였다. 동해, 서해, 남해로 구역을 나누고 각 구역별로 앞바다, 연안으로 나뉘서 분석하였다(Fig. 1).

미래 전망과 더불어 현재 해수면변화를 분석하기 위해 본 연구에서 사용된 모델자료와 유사한 수평해상도의 격자자료로 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)가 제공하는 Sea Level Height (SLH)를 사용하였다. 자료는 www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html에서 제공한다. 이 SLH 자료는 TOPEX/Poseidon, Jason-1, OSTM/Jason-2의 위성고도계자료를 합성한 것으로 65S~65N, 180E~180W 영역에 대한 1993년 1월부터 2016년 5월까지의 월평균 1° × 1° 해상도를 가진다. 위성고도계는 전파가 돌아오는 속도를 이용하여 SLH를 계산하며 SLH는 지구 지오이드를 기준면으로 해수면까지의 높이로 정의한다. 본 연구에서 CSIRO가 제공하는 8종류의 SLH 중 기압계보정, 계절변동 제거, 빙하평형이 조절된 자료를 사용하였다.

3. CSIRO의 해수면고도변화 추이

CSIRO의 해수면고도 변화방향은, 분석기간에 대해 CSIRO의 전 지구의 평균 상승률은 3.24 mm yr⁻¹이며 IPCC 5차 보고서에 언급한 것과 유사하다(Fig. 2). 우리나라 주변 해역은 본 연구 분석기간인 1993~2015년에 대해 2.53 mm yr⁻¹ (p = 0.009)로 전 지구 상승률에 비해 약간 낮고 특히 전 지구 평균과 달리 해수면 고도의 경년 변동이 크게 나타났다. 해역 별 상승 추이를 보면 서해 앞바다와 해안의 연평균 상승률은 각각 3.79 mm yr⁻¹ (p = 0.02)과 3.61 mm yr⁻¹ (p = 0.03)로 전지구 평균상승률보다 높고 동해 및 남해보다도

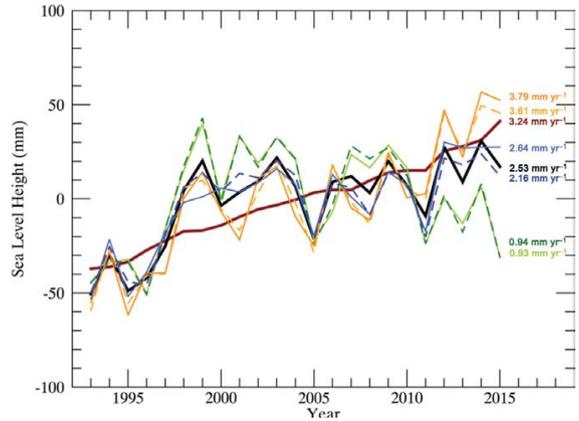


Fig. 2. Variation of CSIRO sea level height (m) over the Global (dark red), Korea (black), East offshore (Yellow green), East coast (green), West offshore (dark orange), West coast (orange), South offshore (royal blue), and South coast (blue) during the period from 1993 to 2015.

높다. 특히 경기만 부근의 해수면 상승률이 높았다. 남해 앞바다와 해안의 연 평균 상승률은 2.64 mm yr⁻¹ (p = 0.04), 2.16 mm yr⁻¹ (p = 0.03)이다. 분석기간 동안 해수면고도의 상승추세가 뚜렷한 것은 서해, 남해이다. 동해 앞바다 및 동해안의 상승률은 각각 0.93 mm yr⁻¹ (p = 0.05), 0.94 mm yr⁻¹ (p = 0.07)로 낮고 연별 변동폭이 크고 선형적 추세는 뚜렷하지 않다. 각 해역 별 상승추세에서 앞바다와 해안의 차이는 거의 없는 것으로 계산되었다.

서해, 동해, 남해의 연간변동이 크고 상승추이가 국지적으로 다르기는 하나 전 지구적 해수면 상승의 영향이 일부로 생각된다. CSIRO를 분석한 결과(Fig. 2)는 기존 국내 연구들과 차이를 보인다. 국립해양조사원 조위자료 및 위성자료를 이용한 우리나라 해수면 연구에 따르면 지역 및 분석기간이 다양하여 해수면 상승률의 차이는 있는데 대체적으로 전 지구 평균에 비해 우리나라 주변의 해수면상승률이 높다고 언급하였다(Kang et al., 2005; Ha et al., 2006; Yoon and Kim, 2012). 기존 연구와의 차이는 분석자료가 다르다는 점이 가장 큰데, 본 연구에서는 전지구적 규모와 지역규모를 비교하고자 모델자료를 사용하고 이와 유사한 해상도의 CSIRO 자료를 사용하였다. 향후 CSIRO와 국내 관측자료간의 차이에 대해서는 추가 조사가 필요하다.

Figure 2의 해역 별로 그 선형적 추세와 함께 나타나는 자연적 해양순환에 따른 큰 연간 변동성은 엘니뇨 및 PDO의 영향(Church et al., 2004; White et al., 2005)과 더불어 해류를 생각해 볼 수 있다. 동해는 쿠

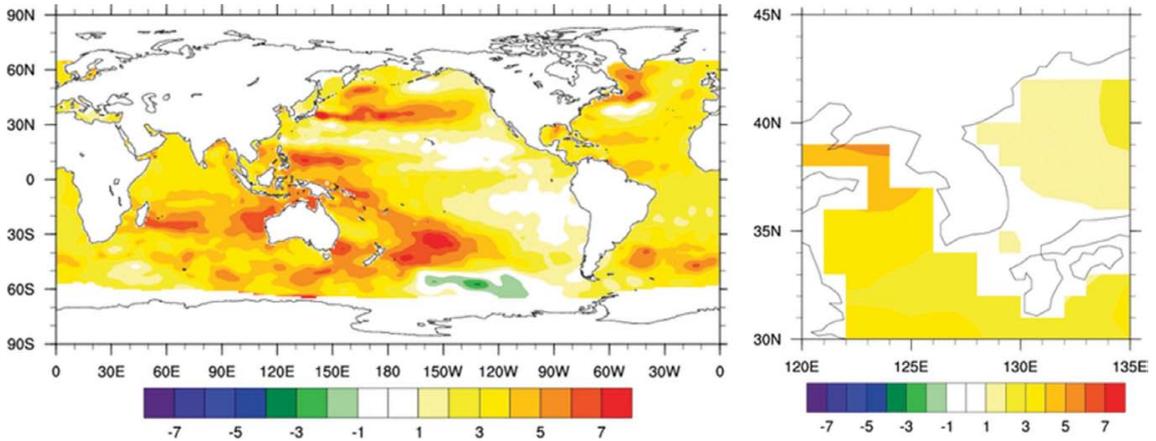


Fig. 3. The spatial distribution of CSIRO sea level change trend (mm yr^{-1}) during the period from 1993 to 2015.

로시오 해류와의 연관성이 높으며 쿠로시오 해류가 강할 때 동해 해수면고도가 낮아지고 해류가 약할 때 고도가 높아지는 경향이 있다(Gordon and Giulivi, 2004; Ha et al., 2006). AVISO 자료 역시 동해의 해수면이 감소했던 2005년과 2015년에 강한 쿠로시오 해류를 관측하였으며 우리나라 서해, 동해, 남해 해수면고도의 연별 변동에 대해서는 이러한 해양순환에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 White et al. (2005)에 따르면 장기간의 상승률은 연안과 전 지구평균의 차이가 크지 않지만, 연안의 해수면 상승이 전 지구평균보다 빠르거나 느리게 상승하는 것은 해수면 변동 요인들의 기여가 해안선에 따라 지역적으로 복잡하게 얽혀있기 때문으로 언급되었다.

CSIRO의 1993년~2015년 동안 해수면고도 변화의 수평분포(Fig. 3)를 보면 벨링스하우젠 해 부근을 제외하고 해수면고도가 상승하는 것으로 나타났다. 특히 북서태평양, 적도 태평양 서쪽, 남서 태평양, 중부 인도양, 레브라도 해역의 연평균 해수면상승률이 5 mm yr^{-1} 이상으로 높게 나타났다. 우리나라 주변의 해수면고도 역시 상승하였다. Fig. 2에서 언급한 바와 같이 서해가 특히 높은 상승률을 보였다.

Church et al. (2004)은 위성고도계자료 및 조위계 자료를 이용하여 1950~2000년 동안의 해수면 변동을 분석한 결과 평균해수면 상승률은 $1.8 \pm 0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ 로 나타났으며 지역적인 특성이 있는 것으로 나타났다. 이 연구는 적도 태평양 동쪽 지역에서 해수면이 빠르게 상승하는 것으로 나타났으며 영국과 스칸디나비아 반도에 비해 북아메리카 동부해안의 상승률이 높다는 결과를 보였다. 또한 태평양 서쪽 및 동부 인도양에서 해수면상승률이 최저인 것으로 나타났다. 이러한 지역적 차이의 원인은 육지빙하의 녹음, 육지에

서의 물 유입, 육지의 물 수용 능력, 해안의 지형 등의 차이에 의한 것으로 알려졌다(Nicholls and Cazenave, 2010; Fadil et al., 2011).

4. 미래 해수면 고도 변화 전망

20세기말부터 21세기 말까지의 전 지구 및 우리나라의 평균 해수면 상승을 Fig. 4에 나타냈다. 회색 영역은 90% 신뢰구간 범위이고 빨간 선은 CSIRO의 해수면 상승변화를 나타낸다. IPCC 5차 평가보고서에 따르면 21세기에는 해양 온난화와 빙하녹음 등으로 1971~2010년 동안의 관측된 추이보다 상승추이가 높아질 가능성이 있다고 언급되고 있다. Figure 4를 보면 21세기 말까지 변화에서 우리나라 해역의 해수면 상승추이는 전 지구 평균과 유사한 경향을 보이고 해역 별 차이도 근소하다. 전 지구 평균과는 달리 우리나라 해역의 전망 시계열에서는 경년 변화도 보이고 불확실성의 범위도 더 크다. 모델간 편차에 따른 불확실성은 21세기 말로 가면서 점차 증가하여 21세기 말에는 60 cm를 넘을 만큼 커진다. Little et al. (2015)에서도 지역규모로 갈수록 미래 전망의 불확실성이 높아지는데, 지역 규모에서의 불확실성의 주요 원인은 내부변동성이나 RCP 시나리오보다도 모델간 편차가 지배적임을 뉴욕의 사례를 통해 연구한 바 있다.

RCP 시나리오 별 과거 1986~2005년 대비 미래 2081~2100년의 전 지구 해수면의 수평적인 변화는 Fig. 5와 같다. IPCC AR5에 따르면 RCP 시나리오 별 전 지구 기온 상승은 21세기 말 각각 0.3~1.7°C, 1.1~2.6°C, 1.4~3.1°C, 2.6~4.8°C로 전망된다. 이에 대해 전 지구 평균 해수면은 RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5에 대해 21세기 말

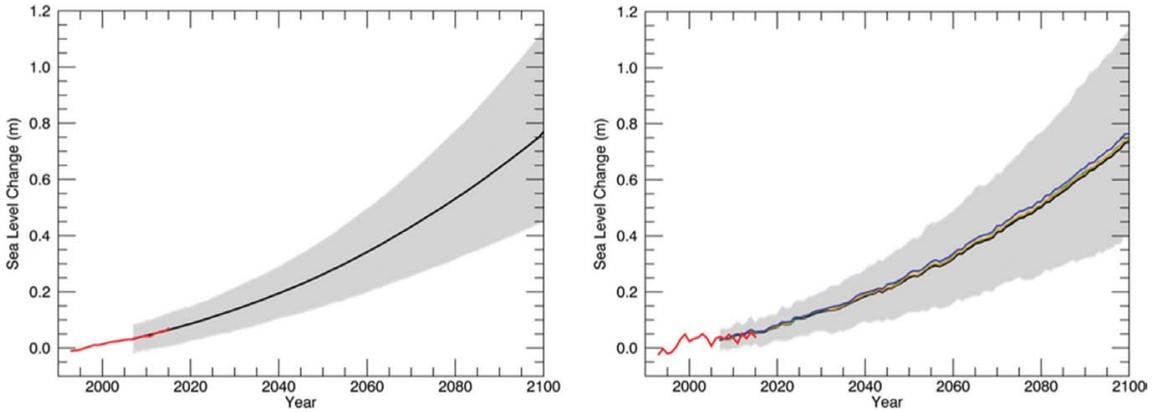


Fig. 4. Observed and projected relative sea level change over the global (left panel) and the Korea peninsular (right panel). The observed sea level change from CSIRO is plotted in red. The projected range from 21 CMIP5 RCP8.5 scenario runs (90% uncertainty) is shown by the shaded region for the period 2007 to 2100 with the bold black lined showing the ensemble mean. Color lines represent over the East Sea (green), the Yellow Sea (orange), and the South Sea (blue).

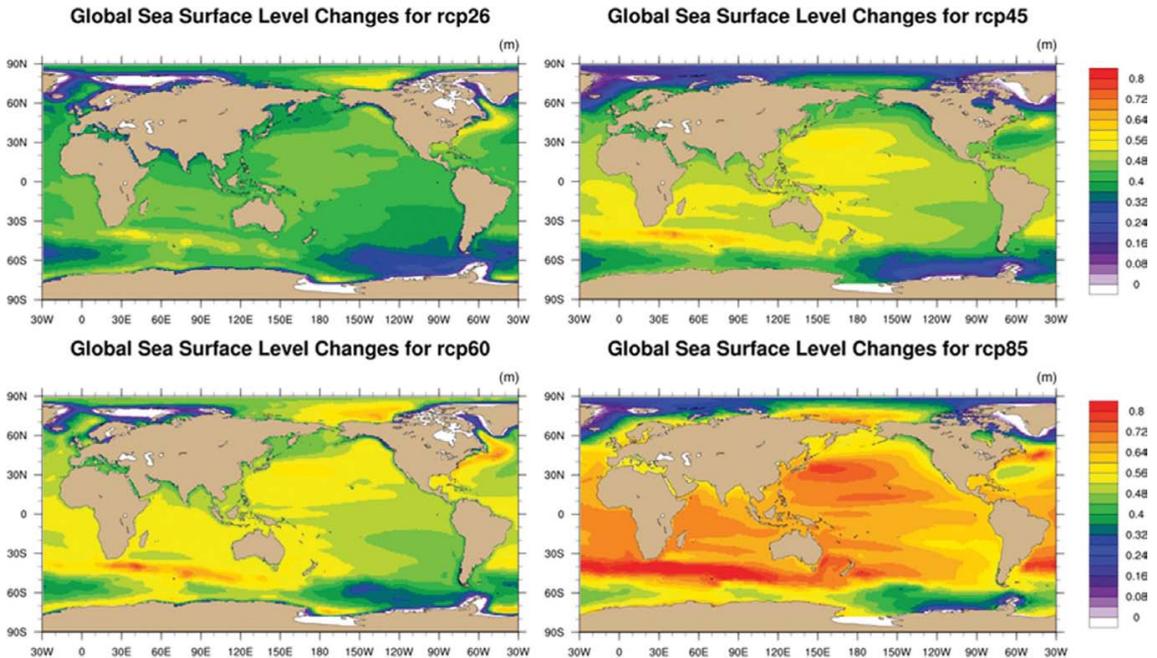


Fig. 5. The spatial distribution of ensemble mean sea surface level changes (m) for the period 2081~2100 relative to 1986~2005.

각각 40.7, 47.5, 49.5, 63.3 cm 상승할 것으로 전망된다(Table 1). RCP 4종 모두에서 태평양의 서쪽, 인도양, 남대서양이 해수면 상승이 크고 북극, 남극은 상승이 매우 작다. 이러한 수평적 분포는 RCP4종에서 동일하고 상승률 값은 RCP2.6에서 RCP8.5로 가면서 점차 증가한다. RCP8.5는 대부분의 지역에서 50 cm

이상 증가하고 특히 북서태평양 지역과 남인도양 해역에서는 70 cm 이상의 상승을 보였다. RCP2.6에서 나타나는 해수면 상승은 평균 41 cm 이하로 가장 낮으며 보퍼트 해역 및 북서대서양 일부 지역에서는 56 cm 정도의 상승되는 것으로 전망되었다. RCP8.5는 63.3 cm로 해수면 상승을 가장 높게 모의하였으나, 불확

실성의 범위가 37~94 cm로, 미래에 최소 37 cm, 최대 94 cm 상승할 가능성이 있음을 이야기하고 있다(Table 1). 여기서 불확실성의 범위값은 90% 신뢰구간에서 결정되었다. RCP2.6과 RCP8.5 시나리오상에서의 전 지구 평균해수면 상승은 약 1.5배 차이가 났다. RCP2.6 시나리오의 불확실성은 21~62 cm로 RCP2.6 시나리오에서 해수면이 가장 상승했을 때의 해수면은 RCP8.5의 평균해수면 상승보다 낮았다. 이는 시나리오에 따른 해수면 상승 정도의 차이를 짐작하게 한다.

21세기 말 우리나라의 평균해수면은 RCP8.5, 6.0, 4.5, 2.6에 대해 각각 65.0, 47.7, 48.1, 37.8 cm 상승하는 것으로 전망되었다(Table 1). 이는 전 지구 평균값과 약 3 cm 이내에서 근소한 차이를 보인다. 상승값은 온실가스 배출량 증가에 비례하여 커진다. 우리나라 해역의 결과는 Huang and Qiao (2015)의 CMIP5 모델을 이용한 남중국 해의 해수면상승 변화 전망과도 유사하다. 해역 별 차이를 보면 모든 시나리오에서 남해지역이 다른 지역에 비해 해수면 상승이 높고 서해안 지역이 다른 지역에 비해 해수면 상승이 낮다(Fig. 6). RCP8.5에서는 전 지역에서 전 지구 평균보다 해수면 상승이 높고 다른 시나리오에서는 지역별로 21세기 말 해수면 상승값이 전 지구 평균값보다 낮거나 높다. 모든 시나리오에서 전지구보다 우리나라 주변 해역의 불확실성의 범위가 다소 크게 나타났다(Table 1). RCP8.5 기반의 미래 전망의 불확실성 범위는 33~96 cm로 미래에 최소 33 cm, 최대 96 cm 상승할 가능

성이 있으며 이는 전구에 비해 지역규모에서 6 cm 정도 불확실성이 더 커짐을 암시한다. 동해안의 해수면 상승은 RCP 4종 시나리오에 대해 21세기 말 각각 37.8, 48.5, 47.6, 65.4 cm로 동해 앞바다와 1 cm 미만에서 거의 유사하다. 동해안이 해수면 상승은 우리나라 평균과 매우 유사하였으나 불확실성의 범위는 크게 나타났다. 서해 앞바다의 해수면상승은 각각 37.8, 47.8, 47.8, 64.6 cm로 우리나라 평균해수면 상승 및 다른 분석 지역에 비해서도 낮았으며 불확실성의 범위도 작았다. 서해안은 각각 36.3, 47.2, 45.7, 63.7 cm로 다른 지역에 비해 낮게 나타났다. 특히 RCP6.0의 경우 서해안은 전 지구 평균보다 3 cm 이상, 서해 앞바다보다 2 cm 이상 해수면상승이 작았다. 남해 앞바다의 해수면 상승은 각각 39.5, 49.9, 49.8, 67.3 cm로 우리나라 평균해수면 상승보다 높았다. 특히 RCP8.5 시나리오의 경우 우리나라 평균뿐 아니라 전 지구 평균보다도 약 4 cm 높게 상승이 전망된다. 불확실성의 범위는 우리나라 평균과 유사하였다. 21세기 말 남해안의 미래 해수면 상승전망은 각각 39.4, 49.8, 49.5, 67.1 cm로 남해 앞바다의 해수면 상승보다 낮았으나 우리나라 평균보다는 높게 상승했다. 남해안 역시 RCP8.5 시나리오에서 전 지구 평균보다 약 4 cm 높게 상승하였다. 지역 간에 21세기 말 해수면 상승 정도의 차이는 4 cm 이내로 RCP6.0에서 서해안과 남해 앞바다의 차이가 4 cm로 가장 큰 차이를 보였다. 모든 시나리오에서 남해 앞바다의 미래 상승 전망값이 가장 높은

Table 1. Projections of CMIP5 ensemble mean surface sea level rise (m) for the period 2081~2100 relative to 1986~2005. The values in parentheses indicate the uncertainty ranges of standard deviation (90% confidence interval) from the data of <http://icdc.zmaw.de>.

Area	Longitude (°E)	Latitude (°N)	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Global			0.407 [0.21-0.62]	0.475 [0.27-0.71]	0.495 [0.27-0.73]	0.633: [0.37-0.94]
Korea	123-132	33-43	0.378 [0.17-0.59]	0.481 [0.23-0.70]	0.477 [0.23-0.74]	0.650 [0.33-0.96]
East Sea offshore	130-132	35-39	0.386 [0.18-0.60]	0.488 [0.24-0.70]	0.485 [0.24-0.75]	0.660 [0.34-0.97]
West Sea offshore	123-125.5	34-38	0.378 [0.18-0.59]	0.478 [0.23-0.70]	0.478 [0.24-0.74]	0.646 [0.34-0.95]
South Sea offshore	126-129.5	32.5-34	0.395 [0.19-0.61]	0.499 [0.25-0.71]	0.498 [0.26-0.76]	0.673 [0.36-0.97]
East Sea coast	129.5-130.5 128.5-129.5	35.5-37.5 37.5-38.5	0.378 [0.16-0.61]	0.485 [0.21-0.71]	0.476 [0.21-0.76]	0.654 [0.31-0.97]
West Sea coast	125.5-126.5	34.5-37.5	0.363 [0.18-0.56]	0.472 [0.23-0.67]	0.457 [0.24-0.69]	0.637 [0.34-0.91]
South Sea coast	126.5-127.5 127.5-129.5	33.5-34.5 34.5-35.5	0.394 [0.18-0.62]	0.498 [0.23-0.72]	0.495 [0.24-0.77]	0.671 [0.33-0.99]

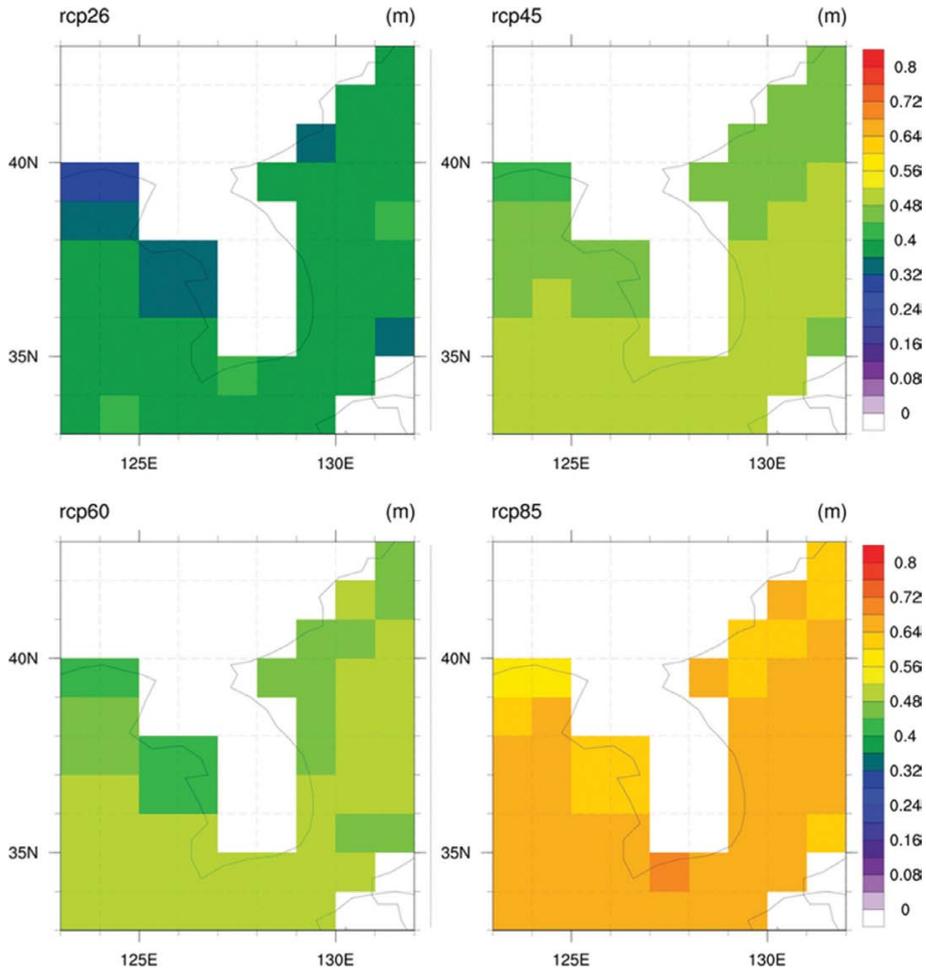


Fig. 6. The spatial distribution of ensemble mean sea surface level changes (m) over the Korea for the period 2081~2100 relative to 1986~2005.

것으로 나타났으며 RCP8.5의 경우는 전 지구 평균보다 약 4 cm 높게 전망된다. 해수면의 상승 전망값이 가장 적었던 지역은 서해안으로 분석되었다.

5. 요인별 기여도

Figure 5는 21세기 말 해수면 상승이 전지구적으로 균일하지 않고 지역인 차이가 있음을 보여준다. IPCC AR5 (Church et al., 2013)에 따르면 21세기 말 전세계 연안의 70% 지역이 전 지구 평균해수면 변화량의 20% 수준에서 차이를 보이며 변동한다고 보고한다. 이러한 해수면 상승의 차이는 해양에서의 열적 팽창의 정도, 대기의 영향 정도, 빙하의 영향, GIA 등이 영향이 지역적으로 차이가 있기 때문이다(Slangen et al., 2014). IPCC AR5 (2013)에 따르면 21세기 말 전

지구 평균 해수면 상승의 30~55%가 열적 팽창에 영향을 받으며 15~35%가 빙하의 녹음에 영향을 받은 것으로 보고하고 있다. 본 절에서는 ICDC에서 제공하는 해수면 상승의 10가지 요소를 해양과정, 빙하과정, GIA 과정으로 분류하여 각 원인 별 전 지구 및 우리나라 해역 별 상승의 기여 정도를 분석하였다. 해양과정은 열적 팽창, 기압을 포함한 역학적 3요소를 포함하며 Greenland, Antarctic, Glaciers의 5가지 요소의 빙하관련 영향, GIA의 영향으로 나누어 분석하였다.

전 지구 해수면 상승에 빙하관련, 해양과정, GIA의 영향은 RCP 4종(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오 대해 55~63%, 36~44%, 1% 미만으로 빙하관련 요소와 해양과정의 기여가 가장 크다. 이산화탄소의 배출이 증가하는 시나리오로 갈수록 해양효과가 해수면상승에 기여하는 비율이 증가하고 상대적으로 빙하관련 요소의

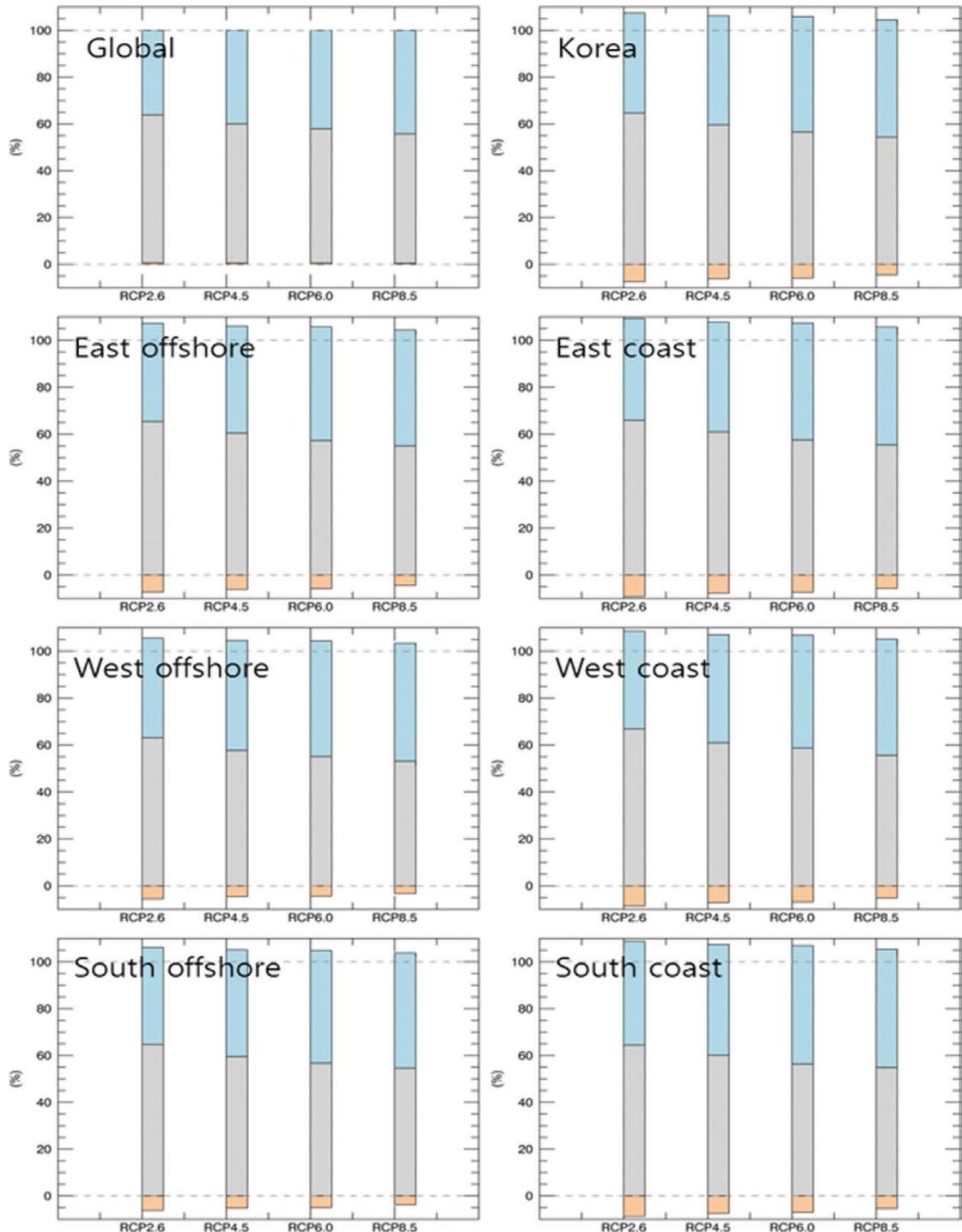


Fig. 7. SLR contributed by ice components (light gray), ocean-related components (light blue) and global isostatic adjustment (light salmon) over the regions. Ice component consists of Greenland dynamic ice and surface mass balance, Antarctic dynamic ice and surface mass balance, and glaciers. Ocean-related components includes dynamic SSH, global thermosteric SSH anomaly, and the inverse barometer effect from the atmosphere.

영향은 감소함을 알 수 있다. 이는 우리나라의 경우도 동일하게 RCP8.5로 갈수록 열적 팽창이 포함된 해양의 영향이 해수면 상승에 기여도가 커지고 빙하관련 요소의 영향은 반대로 감소한다.

우리나라 연안해역의 해수면 고도 변화는 빙하와 해양과정의 영향이 중요하다. 빙하관련 영향이 54~65%로 전 지구 평균값과 유사하고, 해양과정 기여도는 43~50%로 전 지구 평균에 미치는 해양과정의 영향보다 높다. 전 지구평균에서는 거의 나타나지 않던 GIA의 영향은 -5~7%로 분석되었다. 우리나라의 해수면 변화는 모든 시나리오에서 전 지구 평균에 비해 해양의 영향이 크다. 특히 RCP8.5에서는 해양에 의한 해수면 상승이 전체의 50%에 육박하였다.

동해, 서해, 남해 각 해역은 우리나라 평균과 약 2% 이내의 근소한 차이로 유사한 결과를 보인다. 해양과정의 영향은 각 해역에서 연안으로 갈수록 1~3% 증가하는 경향이 있고 빙하관련 요소의 영향은 동해, 남해는 연안으로 갈수록 3% 미만으로 감소하고 서해는 1% 증가한다. 마지막으로 전 지구 평균 해수면 상승에서는 나타나지 않으나 우리나라 연안 해역분석에서 나타나는 것이 GIA 값이다. 이는 얼음질량의 하중 변동에 따른 육지와 바다의 연직운동으로 전지구적으로 GIA가 상승한 지역과 감소한 지역이 상쇄되어 전 지구 평균은 거의 '0'이다. 우리나라는 GIA에 해수면변화가 음의 영향을 보였다. 앞바다와 연안으로 갈수록 GIA에 의한 음의 효과는 해역 별로 다르게 나타나는데 연안으로 갈수록 영향이 증가하는 경향을 보인다.

6. 결과 및 토의

인간활동에 의한 온실가스 배출의 증가는 지구 온난화를 야기하였으며 이는 해빙·빙하의 녹음, 해양의 열적 팽창 등 해수면 상승을 가져왔다. 위성관측은 지난 23년 동안 3.2 mm yr^{-1} 로 전 지구 해수면이 상승하고 있음을 밝혔다. 21세기에도 온난화에 따라 전세계 연안의 많은 지역에서 유의한 변화를 경험할 수 있고(IPCC, 2013; Lyu et al., 2014) 이는 대륙 동안에 위치한 우리나라 연안에서도 매우 중요하다. 우리나라 해역에서의 많은 관측 연구(Kang et al., 2005; Yoon and Kim 2012; Jung 2014)들이 있어왔는데 본 연구에서는 전지구적 규모와의 비교를 위해 CMIP5 모델 자료와 이와 동일한 해상도의 전 지구 격자자료인 CSIRO를 사용하였다. 또한 독일 ICDC에서 제공하는 IPCC AR5에 사용된 CMIP5 앙상블 자료에서 미래 우리나라 해역의 해수면변화를 전망하였다. 현재 미래 해수면 상승전망에 대한 불확실성이 빙하, 해양순환을 다루는 모델링의 차이에 기인하므로 단일 모델보다는 많은 모델의 앙상블 결과값에 기반한 분

석의 신뢰도를 높일 수 있기에 앙상블 자료를 활용하였다.

CMIP5 21개 모델 앙상블에 따르면 우리나라의 미래 해수면상승은 전 지구 평균 해수면 상승 전망 추세와 유사하다(Fig. 4). 동해, 서해, 남해의 해역 별 차이도 작다. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5에 대해 각각 37.8, 48.1, 47.7, 65.0 cm 상승하여 온실가스 배출량 증가에 비례하여 증가한다. 이 미래 전망결과는 전 지구 평균 해수면 상승값과 수 cm의 근소한 차이를 보였다(Table 1). Huang and Qiao (2015)의 남중국해의 21세기 말 40~64 cm 전망결과와도 유사한 값을 보인다.

우리나라 해수면 상승은 21세기 말 RCP8.5에서 전 지구 평균보다 상승값이 약 2 cm 크고 RCP2.6의 경우 약 3 cm 낮으며 RCP4.5에서는 1 cm 이내에서 상승 값이 유사하다. 해역 별로도 상승값의 차이는 3 cm 이내로 해역 별 차이도 작은데, 동해, 남해, 서해를 비교하면 남해 앞바다의 해수면 상승이 가장 크며 서해안의 해수면 상승이 가장 낮은 것으로 전망된다.

CMIP5 앙상블평균 모델의 해역별 상승추이전망은 CSIRO의 위성관측자료를 이용한 현재 상승 추이와 다른 결과이다. 21세기 말 모델은 서해의 해수면상승이 동해, 남해보다 낮는데 1993~2015년간 CSIRO 자료는 서해가 전 지구 평균보다 큰 3.79 mm yr^{-1} 로 해수면이 상승하였고 남해 2.64 mm yr^{-1} , 동해가 0.93 mm yr^{-1} 의 상승추이였다. 모델과 관측결과의 차이에 대해서는 분석기간의 차이 외에도 해양순환 및 해양해빙 모델의 불확실성에 대한 추가 연구가 필요하다.

전 지구 평균해수면 상승 전망과 비교해볼 때 우리나라 연안지역의 미래 해수면고도의 변화전망은 전 지구 평균과 절대값에서 수 cm 범위에서 차이를 보이고 RCP2.6에서 RCP8.5로 갈수록 지역 해수면상승 변화 전망이 더 커지고 불확실성 역시 커진다. 우리나라 연안해역에서 미래 전망의 불확실성은 약 40~60 cm로 매우 크다(Fig. 4, Table 1). 이는 IPCC AR5에서도 이미 언급한 바 있으며 이 불확실성의 원인에 대해 Slagen et al. (2014)은 빙하, 빙상의 모델링과정의 차이를 모델간 편차와 연관 지었다. 이는 Little et al. (2015)의 21세기 중반까지 해수면 상승전망의 불확실성의 주요 원인이 내부변동성이나 RCP 시나리오보다도 모델간 편차에 기인한다는 결과에서도 확인된다. 따라서 앞서 언급된 관측에 기반한 현재 추이와 모델에 기반한 미래 추이에 대한 해역 별 차이는 이 불확실성을 감안하여야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 지역규모에서 전 지구와 달리 고려될 것은 지역변화에 미치는 영향 요인들이다. 우리나라 해수면상승에 빙하관련 영향과 열적 팽창을 포함한 해양과정이 기여도가 큰데 RCP2.6에서 RCP 8.5로 가

면서 해양과정의 영향이 증가하고 빙하관련 영향이 상대적으로 감소한다. 전 지구 평균 해수면변화와 우리나라 연안과의 차이는 6~7% 정도 해양과정의 영향이 좀더 중요하고 전 지구평균에서는 보이지 않던 GIA는 -5%를 넘는 영향을 나타내었다. 이에 전 지구 평균과 달리 지역 해수면 연구를 위해서는 원인 별 기여도에 대한 추가 연구 역시 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상업무지원기술훈발연구(NIMS-2016-3100)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Church, J. A., N. J. White, R. Coleman, K. Lambeck, and J. X. Mitrovica, 2004: Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. *J. Climate*, **17**, 2609-2625, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2609:EOTRDO>2.0.CO;2.
- _____, and Coauthors, 2013: Sea Level Change. In T. F. Stocker et al. Eds., *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1137-1216.
- Fadil, A., L. Sichoix, J.-P. Barriot, P. Ortéga, and P. Willis, 2011: Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records. *C. R. Geosci.*, **343**, 331-341, doi:10.1016/j.crte.2011.02.002.
- Gordon, A. L., and C. F. Giulivi, 2004: Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East sea. *Deep-Sea Res. Pt. I*, **51**, 653-663, doi:10.1016/j.dsr.2004.02.005.
- Ha, K.-J., G.-Y. Jeong, S.-R. Jang, and K.-Y. Kim, 2006: Variation of the sea surface height around the Korean peninsula with the use of multi-satellite data (Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat) and its association with sea surface temperature. *Kor. J. Remote Sens.*, **22**, 519-531 (in Korean with English abstract).
- Hamlington, B. D., R. R. Leben, R. S. Nerem, W. Han, and K.-Y. Kim 2011: Reconstructing sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions. *J. Geophys. Res.*, **116**, C12015, doi:10.1029/2011JC007529.
- Huang, C., and F. Qiao, 2015: Sea level rise projection in the South China Sea from CMIP5 models. *Acta Oceanol. Sin.*, **34**, 31-41, doi:10.1007/s13131-015-0631-x.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Solomon, S. et al. Eds., Cambridge University Press, 1009 pp.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1552 pp.
- Jung, T. S., 2014: Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean peninsula. *J. Korean Soc. Coast Ocean Eng.*, **26**, 120-130, doi:10.9765/KSCOE.2014.26.3.120 (in Korean with English abstract).
- 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. Oceans*, **110**, C07002, doi:10.1029/2004JC002565.
- Levitus, S., J. Antonov, and T. Boyer, 2005: Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Little, C. M., R. M. Horton, R. E. Kopp, M. Oppenheimer, and S. Yip, 2015: Uncertainty in Twenty-First-Century CMIP5 sea level projections. *J. climate*, **28**, 838-852, doi:10.1175/JCLI-D-14-00453.1.
- Lyu, K., X. Zhang, J. A. Church, A. B. A. Slagen, and J. Hu, 2014: Time of emergence for regional sea-level change. *Nat. Climate Change*, **4**, 1006-1010, doi:10.1038/nclimate2397.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, W. D. Collins, J. M. Arblaster, A. Hu, L. E. Buja, W. G. Strand, and H. Teng, 2005: How much more global warming and sea level rise?. *Science*, **307**, 1769-1772, doi:10.1126/science.1106663.
- Nicholls, R. J., and A. Cazenave, 2010: Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, **328**, 1517-1520, doi:10.1126/science.1185782.
- Slangen, A. B. A., M. Carson, C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, A. Köhl, 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.
- White, N. J., J. A. Church, and J. M. Gregory, 2005: Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01601, doi:10.1029/2004GL021391.
- Yin, J., M. E. Schlesinger, and R. J. Stouffer, 2009: Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States. *Nat. Geosci.*, **2**, 262-266,

doi:10.1038/NGEO462.

Yoon, J. J., and S. I. Kim, 2012: Analysis of long period sea level variation on tidal station around the Korea

peninsula. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **12**, 299-305, doi:10.9798/KOSHAM.2012.12.3.299 (in Korean with English abstract).