

HadGEM2-AO 기반의 빙상과 빙하에 의한 미래 해수면 변화 전망

김영미* · 구태영 · 문혜진 · 최준태 · 변영화

국립기상과학원 기후연구과

(접수일: 2019년 7월 2일, 수정일: 2019년 9월 22일, 게재확정일: 2019년 11월 6일)

Projection of Future Sea Level Change Based on HadGEM2-AO Due to Ice-sheet and Glaciers

Youngmi Kim*, Tae-Young Goo, Hyejin Moon, Juntae Choi, and Young-Hwa Byun

National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 2 July 2019; revised 22 September 2019; accepted 6 November 2019)

Abstract Global warming causes various problems such as the increase of the sea surface temperature, the change of coastlines, ocean acidification and sea level rise. Sea level rise is an especially critical threat to coastal regions where massive population and infrastructure reside. Sea level change is affected by thermal expansion and mass increase. This study projected future sea level changes in the 21st century using the HadGEM2-AO with RCP8.5 scenario. In particular, sea level change due to water mass input from ice-sheets and glaciers melting is studied. Sea level based on surface mass balance of Greenland ice-sheet and Antarctica ice-sheet rose 0.045 m and -0.053 m over the period 1986~2005 to 2081~2100. During the same period, sea level owing to dynamical change on Greenland ice-sheet and Antarctica ice-sheet rose 0.055 m and 0.03 m, respectively. Additionally, glaciers melting results in 0.145 m sea level rise. Although most of the projected sea level changes from HadGEM2-AO are slightly smaller than those from 21 ensemble data of CMIP5, both results are significantly consistent each other within 90% uncertainty range of CMIP5.

Key words: Sea level change, HadGEM2-AO, SMB, glaciers, ice-sheet

1. 서 론

산업혁명 이후 지구온난화에 의한 전지구 해수면 상승은 지속되고 있으며 최근 들어 그 상승속도가 증가하고 있다(IPCC, 2007). 심지어 이산화탄소의 방출이 감소한다고 하여도 해수면 상승은 상당기간 지속될 것으로 전망한다(IPCC, 2018). 전지구의 상당수 인류가 연안에 살고 있으며 해안 침식, 홍수 등 해수면 상승에 의한 직접적인 영향을 받고 있기 때문에(Nicholls and Cazenave, 2010) 해수면의 변화를 감시하고 전망

하는 것이 매우 중요하다.

해안에서 측정하는 조위계 자료는 육지와 해면의 수직적인 변화를 포함하여 상대적인 해수면 변화를 감지한다. 따라서 전세계 조위계의 평균 변화는 전세계 평균 해수면과 유사하다. 조위계 자료에 따르면 1901년~2010년 동안 전지구 평균 해수면은 19 cm 상승하였으며 전체 관측기간 동안 해수면은 연 평균 1.7 mm yr⁻¹ 속도로 증가한 것으로 나타났다. 1971년에서 2010년 사이의 해수면 상승률은 2.0 mm yr⁻¹였으며 1993년에서 2013년 사이 해수면 상승률은 3.2 mm yr⁻¹로 최근 들어 더 가파르게 증가하는 것으로 나타났다(Church and White, 2011; IPCC, 2013, 2014). 해수면 상승률은 해양순환의 변동에 의해 지역적인 상승률이 전지구 평균 상승률에 비해 높거나 낮을 수 있다. 실제로 1993년까지 서태평양의 해수면 상승률은 전지구

*Corresponding Author: Youngmi Kim, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6658, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: kymil19@korea.kr

평균보다 3배 정도 컸던 반면 동태평양의 해수면 상승은 변화가 없거나 감소하는 경향을 보였다. 표층 바람의 이동, 해수의 팽창 및 빙하의 유입 등은 해류의 변화를 가져오며 지역적인 해수면 변화의 차이를 일으킨다. 엘니뇨나 태평양 십년 진동(Pacific Decadal Oscillation: PDO)과 같은 자연적인 기후변동도 일 년에서 수십 년의 규모에서 해수면 변동에 영향을 줄 수 있으나 장기간의 기후변화에 의한 해수면변동에서 이러한 기후변동성은 상쇄된다(IPCC, 2014). 즉, 장기간 해수면 변화의 지역적인 차이는 해양의 열팽창, 염분과 표층 바람의 변화에 의한 해류의 변화와 해양으로 유입되는 육지의 물(빙하, 빙상 등) 저장량의 변화 등에 의한 것으로 설명한다.

IPCC 5차 평가보고서에 실린 1950~2012년 동안 조위계 시계열을 자료를 보면 해수면 변화의 지역적인 차이를 확인할 수 있다. 미국 샌프란시스코와 캐나다 샬럿 다운의 해수면은 전지구 평균과 유사하게 증가하였고 필리핀 마닐라의 해수면은 전지구 평균의 몇 배 이상으로 증가하였다. 반면 스웨덴의 스톡홀름은 해수면이 감소하는 것으로 관측되었다. 미래 해수면 전망도 지역적으로 차이가 있다. 뉴욕의 경우 기후변화 시나리오에 근거하여 2080년대까지 24~108 cm 증가할 것으로 전망하고 있으며(Gornitz et al., 2001) 네덜란드 바덴해의 경우 RCP8.5 시나리오에서 20세기 말 대비 21세기말에 76 cm 상승할 것이라고 전망했다(Vermeersen et al., 2018). 우리나라의 경우 RCP8.5 시나리오에서 20세기말 대비 21세기에 평균 65 cm 상승할 것으로 전망하고 있으며 최소 33 cm에서 최대 96 cm 상승할 가능성이 있다고 분석하고 있다(Heo et al., 2018). 또한 이 연구는 21세기말의 우리나라 주변의 평균 해수면이 전지구 평균에 비해 2 cm 정도 더 상승할 것으로 전망하고 있다.

해수면은 해양 온난화에 의한 영향, 대륙과 해양의 질량균형, 빙하와 빙상의 감소에 의한 중력의 변화, 인위적인 활동에 의한 육지 물 저장량의 변화 등에 의해 변한다. 1993~2009년 기간의 위성고도계 자료를 이용해 분석한 결과, 해양온도변화에 의한 해양팽창이 전체 해수면 상승의 약 30%를, 빙하(Glacier)의 감소에 의한 해수면 상승이 약 전체의 30%를, 그린란드빙상과 남극빙상(Ice-sheet)의 감소에 의한 해수면 상승이 전체의 15% 이하를, 그리고 자연적 변동 및 인위적 활동에 의한 육지 물 저장량의 변화가 약 10%를 설명한다고 보고하였다(Nicholls and Cazenave, 2010). 또한 남극빙상과 그린란드빙상의 변화와 작은 산악 빙하가 감소하는 것에 따른 중력변화가 해수면 패턴에 변화를 주는 것으로 알려져 있다(Mitrovica et al., 2001). 현재의 모델기술은 해수면 변동에 영향을 미치는 모든 원인을 구현하는데 한계가 있으며, 이를

보완하기 위해 경험적인 방법들이 제안되고 있다. 본 연구에서는 원인별 미래 해수면 상승 전망 기법을 논하고 HadGEM2-AO 자료에 적용 가능한 방법을 사용하여 미래 해수면 상승을 전망하려고 한다. 연변동, 엘니뇨, 라니냐 등 자연 변동성의 영향을 제거하기 위해 20세기 말 20년(1986~2005) 평균 대비 21세기 말 20년(2081~2100) 평균에 대한 변화를 전망하고 그 결과를 기존의 연구와 비교하고자 한다. 2장에서는 본 연구에 사용된 자료를 소개하였고 3장에서는 연구에 사용한 해수면 전망 기법을 설명하였으며 4장에서는 그 결과를 분석하고 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP 5) 21개 앙상블 자료와의 비교하였으며 5장에서는 연구의 결과를 요약하였다.

2. 자 료

본 연구는 국립기상과학원에서 생산하고 IPCC 5차 평가보고서에 참여한 전지구 대기-해양결합모델인 HadGEM2-AO (Hadley Center Global Environment Model version 2 - Atmosphere Ocean)의 RCP8.5 시나리오 자료를 사용하였다. RCP8.5 시나리오는 지구온난화가 가장 극단적으로 진행되어 2100년에 CO₂ 농도가 940 ppm 이상 될 것을 가정한 것이다. HadGEM2-AO의 수평해상도는 1.875° × 1.25° (192 × 145 grids)이다. HadGEM2-AO의 과거모의 능력 검증 결과 관측 자료와의 상관관계가 기온은 1, 강수는 0.79였으며 표준편차도 기온은 0.99, 강수는 1.07였다(Baek et al., 2013). 모델평가 틀인 NRMS (Normalized Root Mean Square errors)를 이용하여 HadGEM2-AO의 기온과 강

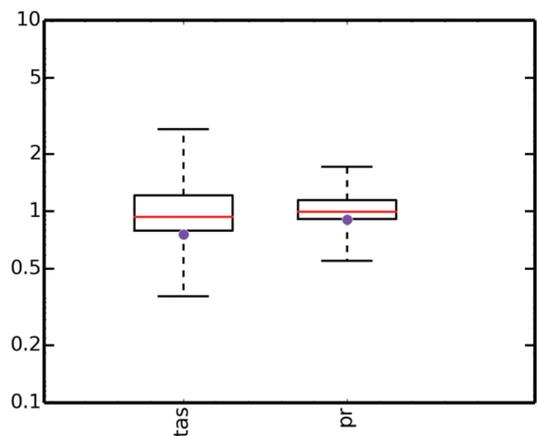


Fig. 1. The performance index of temperature (tas) and precipitation (pr) of HadGEM2-AO. The bars indicate spread of CMIP5 models and the boxes indicate at a 25~75% performance of CMIP5 models.

Table 1. Characteristics of CMIP5 models.

Model	Institute	Atmosphere	Ocean	Main Reference
ACCESS1-0	CSIRO & BOM	HadGEM2 (r1.1)	ACCESS-OM (MoM4p1)	Bi et al., 2013b; Dix et al., 2013
ACCESS1-3	CSIRO & BOM	UK Met office	ACCESS-OM (MoM4p1)	Bi et al., 2013b; Dix et al., 2013
CCSM4	NCAR	CAM4	POP2 with modifications	Gent et al., 2011
CNRM-CM5	CNRM & CERFACS	ARPEGE-Climat	NEMO	Volodre et al., 2013
CSIRO-Mk3-6-0	QCCCE & CSIRO	Included	Modified MOM2.2	Rotstayn et al., 2012
CanESM2	CCC	Included	Included	Arora et al., 2011; von Salzen et al., 2013
GFDL-CM3	NOAA GFDL	Included	MOM4.1	Delworth et al., 2006; Donner et al., 2011
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL	Included	GOLD	Dunne et al., 2012; Dunne et al., 2013
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	Included	MOM4.1	Dunne et al., 2012; Dunne et al., 2013
HadGEM2-ES	MOHC	HadGEM2	Included	Collins et al., 2011; Martin et al., 2011
IPSL-CM5A-LR	IPSL	LMDZ5	Included	Dufresne et al., 2013
IPSL-CM5A-MR	IPSL	LMDZ5	Included	Dufresne et al., 2013
MIROC-ESM	NIES & JAMSTEC	MIROC-AGCM	COCO3.4	Watanabe et al., 2011
MIROC-ESM-CHEM	NIES & JAMSTEC	MIROC-AGCM	COCO3.4	Watanabe et al., 2011
MIROC5	NIES & JAMSTEC	CCSR/NIES/ FRCGC AGCM6	COCO4.5	Watanabe et al., 2010
MPI-ESM-LR	MPI-M	ECHAM6	MPIOM	-
MPI-ESM-MR	MPI-M	ECHAM6	MPIOM	-
MPI-CGCM3	MRI	MRI-AGCM3.3	MPI.COM3	Yukimoto et al., 2011; Yukimoto et al., 2012
NorESM1-M	NCC	CAM4-Oslo	NorESM-Ocean	Iversen et al., 2013
NorESM1-ME	NCC	CAM4-Oslo	NorESM-Ocean	Iversen et al., 2013
INM-CM4	RINM	Included	Included	Volodin et al., 2010

수를 평가한 결과, HadGEM2-AO의 기온과 강수 모두 1보다 작았으며 CMIP5 모델의 중앙값 보다 작게 나타났다. 기후모델 평가지수가 1보다 작으면 현재기후를 잘 모의한다고 설명하기 때문에 HadGEM2-AO는 현재기후를 잘 모의하고 있으며 다른 모델에 비해 상대적으로 우수하다는 것을 의미한다(Fig. 1). 본 연구에서는 해수면 전망에 HadGEM2-AO의 기온자료와 강수 자료를 사용하였다.

비교 자료로는 IPCC 5차 평가보고서의 미래 해수면 상승 전망분석에 사용된 TSLR (Total Sea Level Rise) 자료를 사용하였다. 이 자료들은 독일 ICDC (Integrated Climate Data Center) 센터 홈페이지(icdc.zmaw.de)에서 제공받았다. 이 자료는 CMIP5에 참여한 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, INMCM4 이상 총 21개 모델의 앙상블 값으로 1° × 1° 수평해상도를 가진다(Table 1). 이 자료에 대한 자세한 설명은 IPCC (2013)에서 확인할 수 있다. 1986~2005년 대비 2081~2100년의 평균 TSLR와 해수면 변화 원인별 자료를 사용하였으며 90% 신뢰도 수준의 불확실성 범위도 추가적으로 사용하였다. CMIP5 자료와 비교를 위해 HadGEM2-AO 자료는 1° × 1°로 내삽하여 사용하였다.

3. 미래 해수면 전망 방법

해수면 고도는 해양의 열팽창 정도, 육지-해양 물 저장량의 변화에 의해 영향을 받는다. 지구온난화에 의한 해양온도 상승은 해수의 부피를 팽창시키고, 염

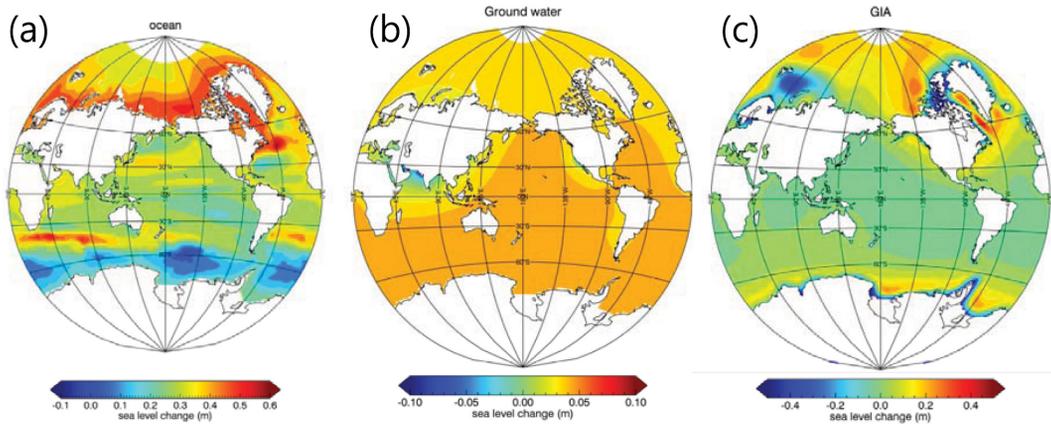


Fig. 2. (a) Ensemble mean regional relative sea level change from 21 CMIP5 model for the RCP8.5 scenario between 1986~2005 and 2081~2100. Relative sea level change due to (b) ground water, and (c) glacial isostatic adjustment (GIA) during the same period.

분 및 해류의 흐름을 변화하게 하며 전지구적인 해수면 상승 및 지역적인 해수면의 변화를 야기시킨다. 기온 상승에 의한 빙하의 감소 뿐 아니라 댐 건설, 지하수 사용과 같은 인위적인 활동에 의한 해양의 질량 변화 역시 해수면 변화에 영향을 미친다. IPCC 5차 평가 보고서는 이러한 해수면 변화의 원인을 해양의 열팽창, 빙상의 감소, 빙하의 감소 등 8개로 나누었으며 각 원인 별 전망 값을 합하여 미래 해수면 변화를 전망하였다. 본 연구에서는 8개 원인 중 그린란드빙상의 SMB (Surface Mass Balance), 그린란드빙상의 역학적 변화, 남극빙상의 SMB, 남극빙상의 역학적 변화에 의한 해수면 변화와 빙하의 감소에 의한 해수면 변화를 HadGEM2-AO 자료를 이용하여 전망하였다. 그 외에 3개의 원인은 다른 연구에서 산출한 자료를 사용하여 미래 해수면을 전망하였다.

해수면 상승의 가장 큰 원인 중 하나는 온난화에 따른 해양의 열팽창이다. 해양 열팽창에 따른 해수면 변화는 대기-해양기후모델의 물리과정에 의해 계산된다. 해양물리과정은 열팽창과 해양의 혼합, 해양 수송과정으로 설명하며 라그랑지안 형태의 연직 적분 질량보존방정식을 이용하여 전지구 평균 해수면의 변화를 추정한다. 해양의 표면가열은 부력을 변화시켜 해수면의 상승을 유도하는데, 주로 저위도 가열이 크고 열팽창계수가 고위도보다 열대에서 훨씬 크기 때문에 저위도 지역의 부력 증가가 해수면 변화를 야기한다. 반면 극향와동열수송과 해양혼합은 해수면을 낮추는 역할을 한다(Griffies and Greatbatch, 2012). HadGEM2-AO는 시나리오 생산과정에서 해양 열팽창에 의한 해수면 자료를 생산하지 않았다. 미래 총 해수면 변화량을 전망하기 위해 열팽창에 의한 해수면

자료가 반드시 필요하기 때문에 본 연구에서는 CMIP5 21개 앙상블 평균 자료를 사용하였다(Fig. 2a). CMIP5 21개 앙상블 평균은 RCP8.5 시나리오에서 해양에 의한 해수면이 북극해 주변에서 높게 상승하는 것으로 나타났으며 남극해 주변에서는 해수면 상승의 낮거나 감소하는 경우도 나타났다. 또한 북서 태평양 지역이 북동 태평양 지역에 비해 해수면 상승이 높았으며, 뉴질랜드 인근에서 인도양 남부, 남미대륙 남서쪽 해안의 해수면 상승이 높게 나타났다.

인간활동 역시 해수면 변화에 영향을 미친다. 총 인구 수 증가, 관개농업지역의 확대, 경제적 발달은 전 세계적인 물 수요의 증가를 가져왔다. 이러한 수요를 충족시키기 위해 지하수를 추출하여 사용하거나 댐을 건설하였으며 이로 인해 지반 침하, 삼각주의 퇴적물 감소, 염분 침투와 같은 현상이 발생했을 뿐 아니라 해수면 변화에도 영향을 미쳤다(Nicholls and Cazenave, 2010; Wada et al., 2012). Wada et al. (2012)는 수문학 모델을 이용하여 미래 육지 물 저장량에 의한 해수면 변화를 전망하였다(Fig. 2b). 이 모델은 기후변화 시나리오에 독립적으로 계산하며 미래에는 표층수와 지하수의 재 충전이 감소할 것이고 관개사업을 위한 물 수요가 증가할 것으로 가정하고 있다. 따라서 육지의 물 저장량은 감소하고 해양의 물 질량이 증가함에 따라 해수면도 증가할 것으로 전망한다. 공간적으로 보면 아라비아반도, 인도대륙과 미국서부연안 등 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 해수면이 증가한다. 이 자료는 IPCC 5차 평가보고서 및 Slagen et al. (2014)에서도 사용하였기 때문에 본 연구에서도 그대로 사용하였다.

지구온난화에 의해 빙하와 빙상 감소는 해양의 질

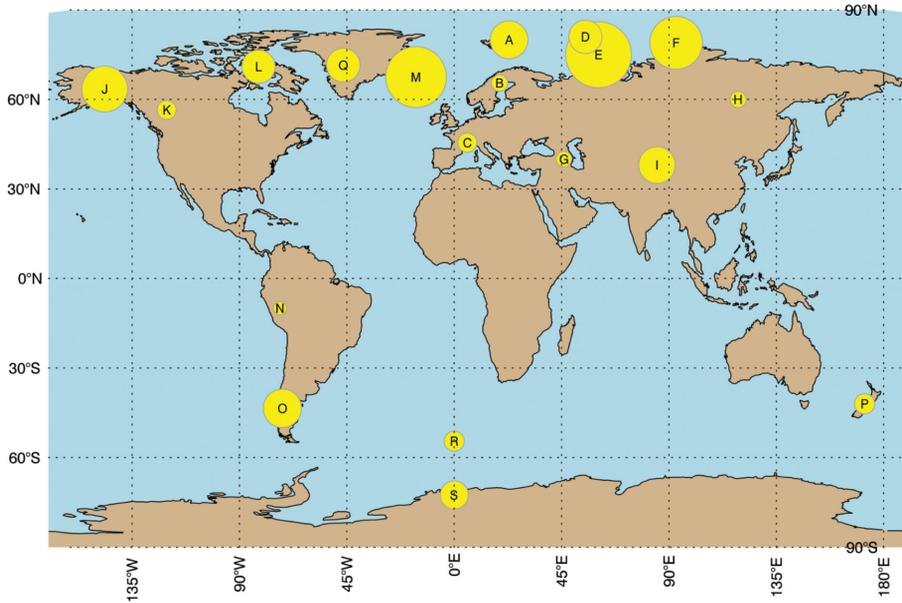


Fig. 3. Global distribution of 19 glacier regions. Circle means the area of glacier. Greenland and Antarctica include all mountain glaciers and ice caps apart from ice sheets. A: Svalbard, B: Scandinavia, C: Central Europe, D: Franz Josef Land, E: Novaya zemlya, F: Severnaya Zemlya, G: Caucasus, H: North and East Asia, I: High Mountain area, J: Alaska, K: West Canada and West U.S., L: Arctic Canada, M: Iceland, N: South America I, O: South America II, P: New Zealand, Q: Greenland, R: Sub-antarctic islands, S: Antarctica.

량 증가뿐 아니라 지구표면의 수직적 변화를 야기한다. 빙하가 있던 지역은 빙하에 의해 눌리던 힘이 약해지고 해양지역은 질량이 증가하면서 눌리던 힘이 강해지면서 지구표면이 변화하며 해수면 높이가 영향을 미친다. 빙하가 감소한 지역의 지면은 상승하고 주변 지역의 지면은 상대적으로 하강한다(Clark and Lingle, 1979). 이러한 효과를 빙하지각균형조정(Glacial Isostatic adjustment: GIA)라고 한다. 본 연구에서는 캐나다 토론토 대학에서 ICE-5G (VM2) 모델을 이용하여 산출한 GIA 자료를 사용하였다. 여기서 ICE는 빙하퇴빙모델인 Ice model을 의미하며 5G는 모델이 개선됨에 따라 붙는 버전 표시이다. VM2는 대륙권 맨틀의 탄성구조모델이다(Peltier, 2004). 이 모델은 위성의 발달과 관측자료의 축적, 대륙권 탄성구조모델의 개선 등에 의해 지속적으로 개선 중이다. IPCC 5차 평가보고서를 비롯하여 Slangen et al. (2014) 등 해수면전망연구에서 ICE-5G 자료를 사용하였기 때문에 본 연구에서도 미래해수면 전망을 위해 ICE-5G를 사용하였다. Figure 2c는 지면의 상승과 감소에 의한 20세기 말 대비 21세기말의 GIA에 의한 해수면 변화 분포이다. GIA는 북극해와 남극해 일부 지역을 제외하고 전지구으로 해수면을 하강시키는 역할을 한다.

빙상과 빙하의 해빙에 의한 해수 질량의 증가도 해

수면 상승의 주된 원인 중 하나이다. 빙상과 빙하가 감소하는 역학적인 원리는 매우 복잡하며 이를 모델로 구현하는데 아직까지 한계가 있다. 많은 연구에서는 관측 자료에 기반한 경험적인 방법을 이용하여 빙상과 빙하에 의한 해수면 변화를 진단적으로 전망한다. 본 연구에서도 경험적인 방법을 기초로 HadGEM2-AO 자료를 이용하여 20세기 말 대비 21세기 말의 빙상 및 빙하에 의한 해수면 상승을 추정하였다. 빙상은 50,000 km² 보다 큰 규모를 가진 빙하 덩어리로 현재 지구에는 남극과 그린란드에 존재한다. 빙상은 햇빛의 유무, 강수량 등에 영향을 받으며 증가 또는 감소한다. 여름철 빙상을 비추는 태양에너지는 빙상을 녹이는 역할을 하게 되며, 이때 내리는 강수는 빙상이 녹는 것을 가속시킨다. 태양에너지에 의해 녹아 내리는 빙상과 강수에 의해 녹은 빙상이 해양으로 흘러가면서 빙상의 질량이 감소한다. 또한 빙상 표면에서 발생하는 증발과 승화에 의해서도 질량은 감소한다. 빙상에 내리는 강설은 빙상의 부피와 면적을 증가시키고 빙상을 단단하게 한다. 이렇게 빙상이 소멸하고 생성되는 과정이 균형을 이룬 상태를 표면질량균형(SMB)이라고 한다. SMB를 모델로 구현하기 위한 방법들이 개발단계에 있으며 현재까지는 관측자료를 이용한 경험적인 방법이 사용되고 있다. Fettweis et al.

(2013)은 여름철 기온의 아노말리와 전지구 연평균 강수량의 아노말리에 대한 경험식으로 그린란드 빙상 변화에 의한 SMB 변화를 추정하는 방법을 제시하였다. Fettweis et al. (2013)은 지역기후모델 MAR (Modèle Atmosphérique Régional)를 사용하여 그린란드 빙상의 감소에 따른 전지구 SMB의 변화를 대략적으로 추정하였다. 이 방법은 전지구 기온 아노말리에 의한 삼차 방정식에 적용하여 계산한다. Meyssignac et al. (2017)은 전지구 연평균 강수량의 아노말리와 여름철 600 hPa 기온의 아노말리를 이용하여 전지구 SMB를 추정하는 방법을 제시하였다. Slangen et al. (2014)은 전지구 평균기온 변화에 의한 일차 방정식을 제안하였으며 본 연구에서는 이를 적용하였다.

$$\Delta SMB_{Antarctica} = -0.0105 - 0.01759 \times \delta T_{atm} - 0.0412 \quad (1)$$

$$\Delta SMB_{Greenland} = 0.0153 + 0.01493 \times \delta T_{atm} - 0.00094 \quad (2)$$

이 식은 CMIP3 전지구 평균 기온의 앙상블과 SMB 관측값을 이용하여 유도되었으며 빙상의 흐름은 고려하지 않았다. 여기서 δT_{atm} 은 전지구 평균 기온의 변화이고 ΔSMB 의 단위는 'm'이다. 이 식에 HadGEM2-AO 기온자료를 적용한 결과 20세기말 대비 21세기말의 그린란드 SMB에 의해 전지구 평균 해수면은 0.045 m 증가했으며 남극빙상의 SMB에 의해 전지구 평균 해수면은 0.053 m 감소하였다(Fig. 4).

빙상에 의한 해수면 변화는 SMB 뿐 아니라 빙붕(ice shelves)의 붕괴, 해양에 의한 빙상의 불안정성 및 다른 원인에 의해 질량의 균형이 깨져 발생한다. 이러한 역학적 변화에 의한 빙상감소의 주된 메커니즘은 남극과 그린란드 빙상에 따라 다소 차이가 있다. 그린란드빙상은 빙상 하부로 해수가 침입하면서 빙붕의 면적이 증가하고 빙붕 하부에서 해수에 의해 빙붕이 점점 얇아진다. 얇아진 빙붕이 붕괴되며 빙상의 질량이 감소한다(Phillips et al., 2010; Nick et al., 2013; Goelzer et al., 2013). 남극은 입사하는 태양에너지가 빙붕을 녹이면서 빙붕 표면에 물웅덩이를 만든다. 이 물웅덩이가 빙붕을 얇게 만들어 부서지게 한다. 대륙붕 위로 유입한 따뜻한 물의 순환에 의해 빙붕 하부의 균형이 변형되면서 빙붕이 부서진다(Cook and Vaughan, 2010; Pritchard et al., 2012). 이렇게 역학적 영향에 의해 붕괴된 빙상이 해양으로 유입되면서 해수면의 변화가 발생한다. 빙상의 역학적 과정에 대한 이해 향상에도 불구하고 이를 모델로 구현하는 것은 현재 초기 단계에 있다. 따라서 본 연구는 IPCC 5차 평가보고서에서 사용되었던 IPCC (2007)의 경험적인 방법을 이용하여 산출하였다. 이 방법은 21세기 평균 기온과 과거의 특정시기의 평균 기온 차이를 이용하여 경험적으로 계산한다. 계산 결과 전지구 평균 해

수면은 그린란드의 빙상의 역학적 붕괴에 의해 0.055 m 상승하였다. 남극빙상의 역학적 붕괴에 의해서는 0.03 m 증가하였다(Fig. 5).

빙하는 빙상보다 작은 얼음덩어리로 높은 산에 있는 만년설을 비롯하여 빙상 주변의 작은 얼음 덩어리를 통칭하며 세계 여기저기에 분포한다. 지구온난화에 의한 빙하의 감소는 세계 곳곳에서 일어나고 있으며 이러한 감소는 빙상보다 해수면 상승에 더 큰 영향을 미친다(Radic et al., 2014). 빙하의 감소를 추정하는 것은 매우 어렵다. 빙하가 위치한 기저지형의 특징, 고도, 빙하의 두께 및 그 지역의 미기후적 영향을 모두 고려해야 한다. 빙하지역에 겨울철 낮은 온도에서 내린 강설은 빙하를 두껍게 하고 강화하는 역할을 한다. 반면 여름철에 내린 강우는 빙하를 녹이는 역할을 한다. 그 외에도 하층부의 빙하가 녹아 상층부의 빙하가 붕괴하는 경우 등 빙하 감소의 원인은 다양하고 복잡하다. 관측을 통해 각 빙하의 변화를 계산할 수 있으나 몇 천 개가 넘는 모든 빙하를 일반화하는데 무리가 있다. 빙하에 의한 해수면 변화량을 전망하기 위해 Meier et al. (2007)과 Bahr et al. (2009)는 최근 빙하의 감소경향을 바탕으로 미래 감소량을 추정하였으며 Marzeion et al. (2012), Huss and Hock (2015) 등은 기온과 강수의 기후자료로부터 질량균형을 유도하여 빙하감소량 추정방법을 제안하였다. Van de Wal and Wild (2001)과 Slangen and Van de Wal (2011)는 다양한 시공간에서의 기온과 강수의 민감도를 고려하여 질량의 변화를 유도하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 다양한 시공간을 고려하는 Slangen and Van de Wal (2011)의 방법을 채택하여 사용하였다.

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m A(j, k, t) \times \left\{ \Delta T_s(j, t) \frac{dB_{P(j,t)}}{dT_s} + \Delta T_{ns}(j, t) \frac{dB_{P(j,t)}}{dT_{ns}} + \Delta P(j, t) \right\} \quad (3)$$

위 식은 Slangen and van de Wal (2011)에서 제안한 식이다. dV 는 빙하부피의 변화이고 T 는 기온이며 P 는 강수이다. s 는 여름을 ns 는 여름이 아닌 계절을 의미한다. 북반구의 여름철은 6, 7, 8월이고 남반구의 여름철은 12, 1, 2월로 정의한다. dB 는 빙하감소에 의한 질량균형의 민감도를 의미한다(Slangen et al., 2012). dB 는 기온과 강수량의 변화와 상관이 있으며 Zuo and Oerlemans (1997)이 정의한 $\frac{dB}{dT} = a\Delta P^b$ 관계를 이용하여 계산하였다.

이 식은 전지구에 빙하가 존재하는 지역을 19개 지역별로 적용한다. 여기서 n 은 19개 지역이고, m 은 격자크기다. A 는 빙하의 면적으로 알라스카, 스발바르

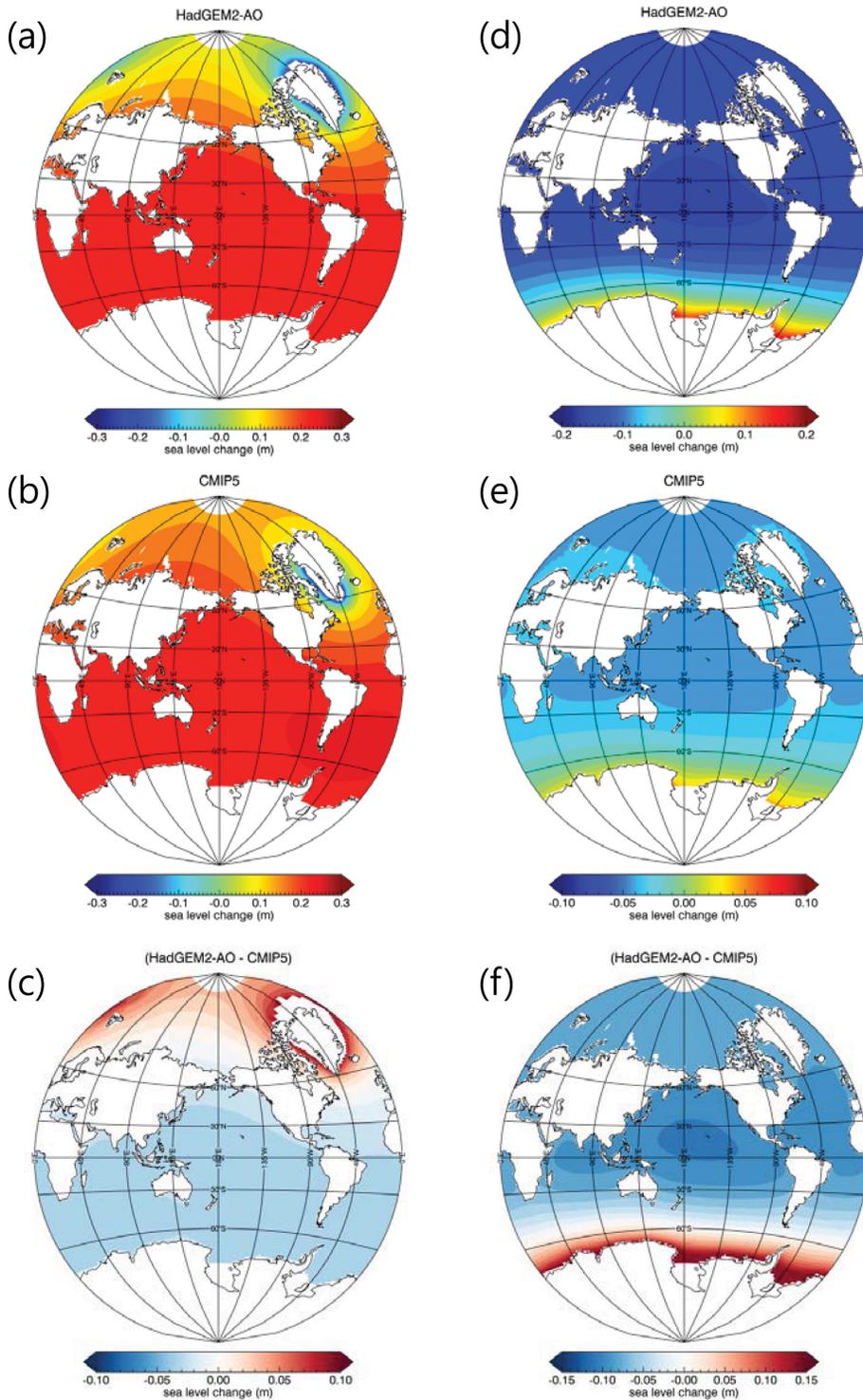


Fig. 4. Global distribution of relative sea level change from the Greenland ice-sheet surface mass balance (SMB) (left panels) and the Antarctic ice-sheet SMB (right panels) from HadGEM2-AO (top panels), 21 CMIP5 models (middle panels) and difference between HadGEM2-AO and 21 CMIP5 models over the period 1986~2005 to 2081~2100.

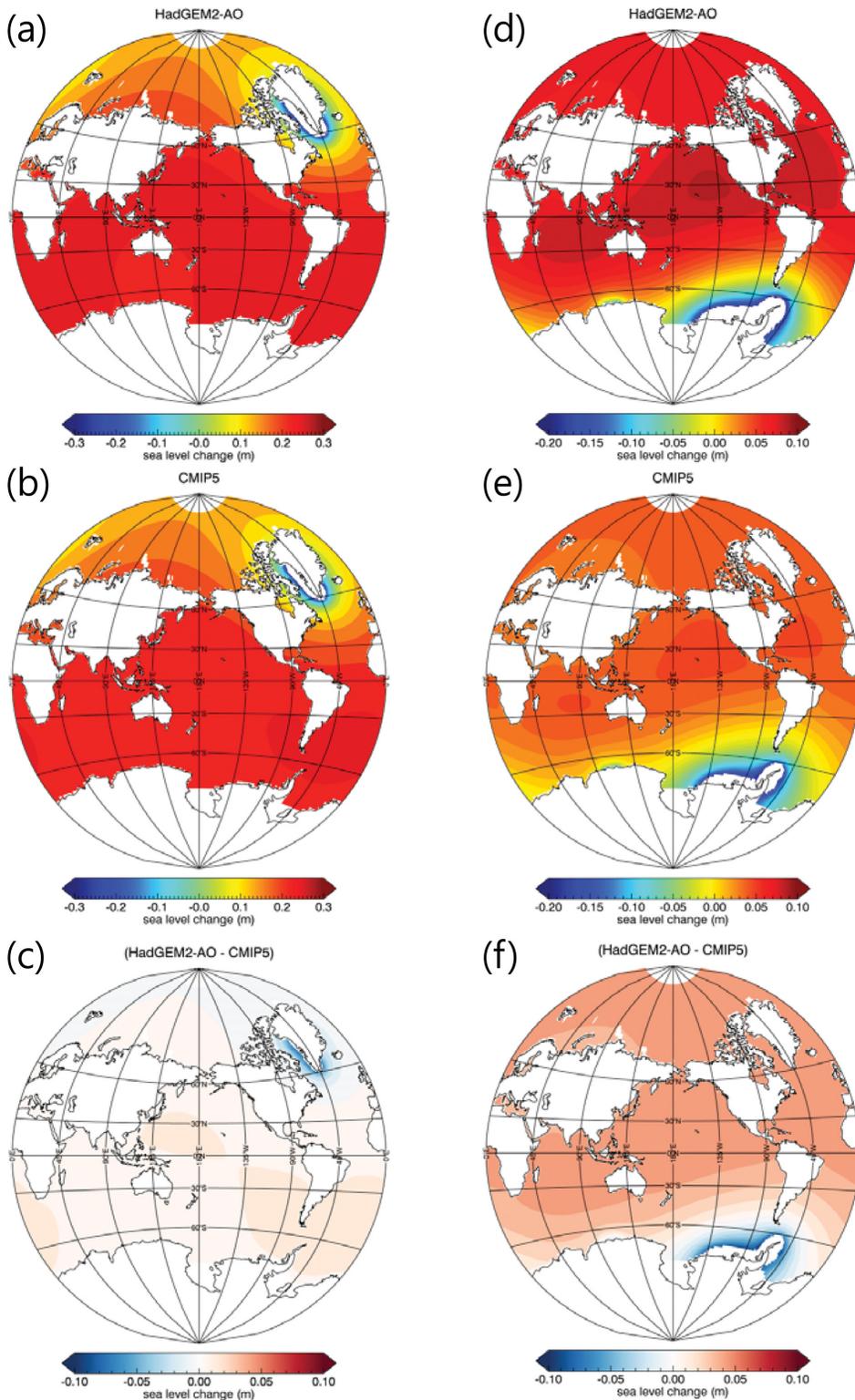


Fig. 5. Same as Fig. 4 but relative sea level change due to ice-sheet dynamic.

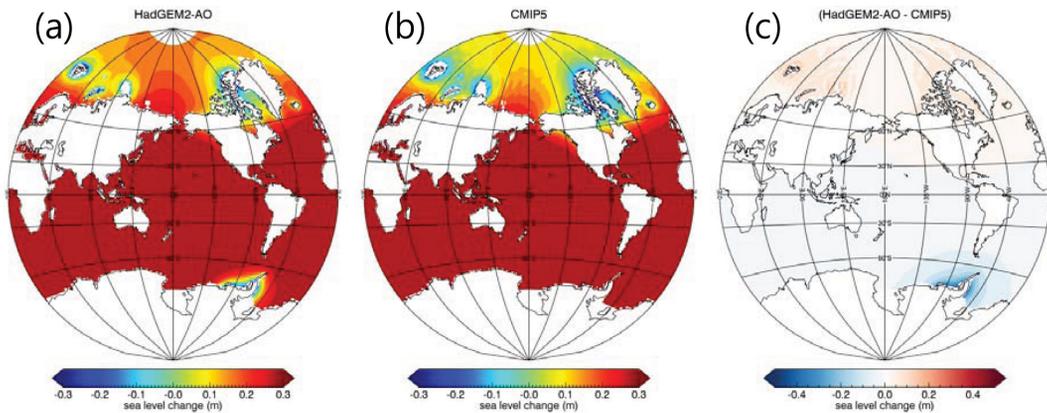


Fig. 6. Same as Fig. 4 but relative sea level change due to glaciers.

제도 등 19개 지역은 WGI (World Glacier Inventory)-XF의 빙하인벤토리 자료를 사용하였다. WGI는 전세계 131,000개의 빙하의 정보를 가지고 있다(Radic and Hock, 2010). 19개 지역과 빙하면적은 Fig. 3에서 확인 가능하다. HadGEM2-AO의 기온과 강수량을 위 식에 적용한 결과 RCP8.5 시나리오 하에서 20세기 말 대비 21세기 말에 빙하의 감소로 전지구 평균 해수면이 0.145 m 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 6).

4. 결 과

Figure 4은 HadGEM2-AO RCP8.5 시나리오를 이용하여 전망한 빙상에 의한 20세기말 대비 21세기 말의 해수면 변화이다. 그린란드 SMB에 의한 전지구 평균 해수면은 0.045 m 상승했다(Fig. 4a). 공간적 변화경향은 그린란드 주변은 최대 0.4 m 정도 해수면이 감소하였으나 그린란드를 제외한 대부분의 지역에서 0.05 m 이내 정도의 해수면 상승이 있었다(Fig. 4a). CMIP5 21개 앙상블의 전지구 평균 해수면은 0.072 m 상승하였으며 지역적으로 보면 그린란드 부근에서는 최대 0.8 m 정도 감소하였으나 대부분의 지역은 약 0.1 m 이내로 해수면이 증가하였다(Fig. 4b). HadGEM2-AO는 그린란드 주변에서 CMIP5 21개 앙상블 평균보다 높게 모의하였으나 그 외 지역에서는 낮게 모의하였다(Fig. 4c). HadGEM2-AO 시나리오를 이용하여 전망한 남극빙상의 SMB에 의한 전지구 평균 해수면은 0.053 m 감소하였다. 남극 주변은 최대 0.1 m 정도 증가했으나 남극 주변을 제외한 대부분의 지역에서는 0.06 m 정도 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4d). 지역적으로 보면 남극 주변에서는 최대 0.06 m 정도 상승하였으며 북쪽으로 갈수록 위도와 평행한 패턴으로 해수면이 감소하였다. 남위 30도 이상의 지역에서는 0.04 m 정

도 감소하였다. CMIP5 앙상블 결과는 전지구 평균 해수면은 0.037 m 감소하였다(Fig. 4e). CMIP5 역시 남극 주변에서 해수면이 다소 상승하였으며 북쪽으로 갈수록 해수면이 감소하였다. HadGEM2-AO는 CMIP5에 비해 남극주변에서 해수면 상승이 높게 나타났으며 남위 60도 위쪽 지역에서는 낮게 모의하였다(Fig. 4f). 남극빙상의 SMB는 그린란드와 달리 주변 해빙에 영향을 미친다. 남극 주변의 해빙을 증가시키며 해빙이 있는 지역의 해수면을 증가하고 그 외의 지역은 해수면을 감소한다(Slangen et al., 2014).

HadGEM2-AO는 그린란드빙상의 역학적 붕괴에 의한 전지구 평균 해수면은 0.055 m 증가하는 것으로 전망하였으며 CMIP5 앙상블 평균은 0.047 m 증가하였다(Figs. 5a, b). HadGEM2-AO와 CMIP5 앙상블 평균은 그린란드빙상의 역학적 붕괴에 의해 그린란드 주변 해수면은 감소하고 그 외 지역은 증가하는 것으로 나타났다. HadGEM2-AO는 CMIP5 앙상블 평균에 비해 그린란드 주변 지역에서 해수면 상승을 낮게 모의 하였으며 그 외 지역에서는 높게 모의하였다(Fig. 5c). 남극빙상의 역학적인 붕괴에 의한 해수면 변화는 남극빙상의 SMB와 반대의 결과를 보였다. HadGEM2-AO가 전망한 전지구 평균 해수면은 0.03 m 상승하였으며 남극반도 주변은 최대 0.2 m 가량 하강하였으나 그 외 지역은 0.05 m 이내로 상승하였다(Fig. 5d). 지역적으로는 남극반도 주변은 최대 0.5 m 가량 하강하였으나 다른 지역에서는 0.1 m 내외로 상승하는 경향을 보였다. CMIP5 앙상블은 전지구 평균 해수면이 0.071 m 증가한다고 전망하였다(Fig. 5e). HadGEM2-AO는 남극주변에서 CMIP5 보다 약간 높았으며 그 외 대부분의 지역에서 낮게 전망되었다(Fig. 5f).

HadGEM2-AO RCP8.5 자료를 이용하여 전망한 빙하감소에 의한 전지구 평균 해수면 상승은 0.145 m

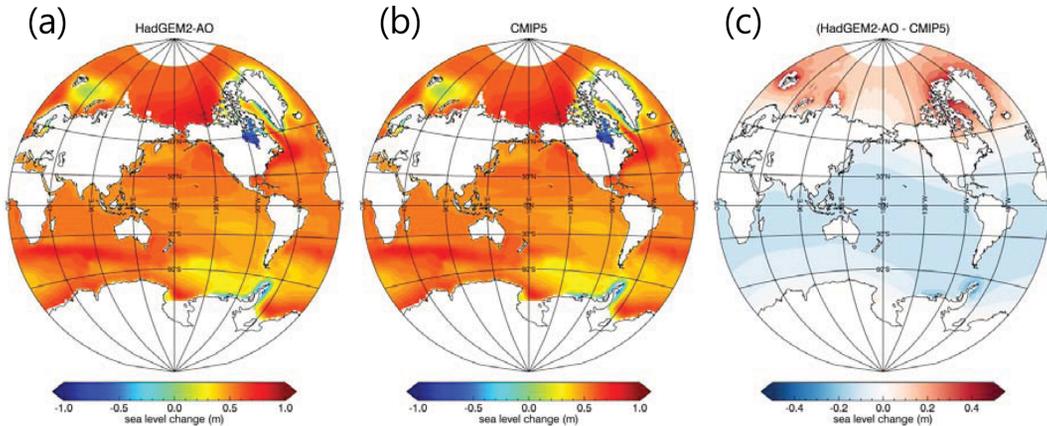


Fig. 7. Same as Fig. 4. But total relative sea level change.

이다. 지역적으로 보면 스발바르 제도과 아이슬란드, 남극반도 근처의 해수면이 감소하는 경향을 보였으며 이 지역을 제외한 지역에서는 해수면이 0.1 m 이상 증가하였다(Fig. 6a). CMIP5 앙상블은 전지구 평균 해수면이 0.155 m 상승한 것으로 전망하였다(Fig. 6b). 두 자료 모두 대부분의 지역에서 해수면이 상승한 것에 비해 그린란드 서쪽지역, 스발바르 제도, 아이슬란드 근교 지역에서는 해수면이 감소하였다. 그러나 남극반도 주변에서 두 자료의 차이가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6c). HadGEM2-AO는 남극반도 주변의 해수면이 감소하는 것으로 전망한 것에 비해 CMIP5는 감소하는 경향을 보였다. 식(3)의 A 항은 빙하면적정보로 빙하에 의한 해수면 전망에는 빙하면적정보가 필요하다. 전지구 빙하의 면적, 부피, 위치 등의 정보를 구축해 놓은 빙하 인벤토리 자료가 있으며 이를 사용하였다. CMIP5는 Randolph Glacier Inventory (RGI) (Arendt et al., 2012) 자료를 사용하였으나 본 연구에서는 WGI-XF 자료를 사용하였다. 인벤토리 별로 빙하구역과 빙하면적정보에 차이가 있다. 인벤토리의 차이가 남극반도 주변의 해수면 변화경향의 차이에 반영된 것으로 사료된다.

빙상과 빙하에 의한 해수면의 변화와 대기-해양모델, 인위적 활동에 의한 육지 물 저장량의 변화, 지각균형에 의한 효과를 합하여 전체 20세기 말 대비 21세기 말의 해수면 변화를 전망하였다(Fig. 7). HadGEM2-AO 모의 결과를 반영한 전지구 해수면은 0.573 m 증가하였으며 이 값은 CMIP5 앙상블의 0.635 m에 비해 다소 낮았다. 이는 본 연구가 CMIP5에 비해 빙상과 빙하에 의한 해수면 상승을 낮게 모의한 것이 반영된 결과이다. 남위 30~60도 사이의 인도양 남쪽 지역, 북위 30도 부근의 서태평양 지역과 동태평양 지역, 북미동쪽 지역과 보퍼트 해 지역에서 해수면 상승이 다

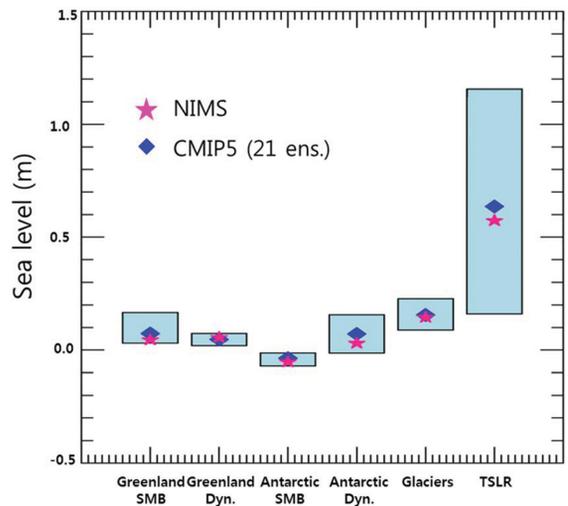


Fig. 8. Mean sea level change due to Greenland SMB, Greenland Dynamic, Antarctic SMB, Antarctic Dynamic, and Glaciers. TSLR indicates total sea level rise. Symbols of pink star and blue diamond describe sea level change using HadGEM2-AO and CMIP5 data, respectively. Light blue box illustrates a range of 90% uncertainty of CMIP5.

른 지역에 비해 높게 나타났으며 북극 지역의 바렌츠-카라 해, 그린란드 주변 해역에서 해수면 상승이 다소 낮게 전망되었다.

본 연구 결과의 타당성을 분석하기 위해 CMIP5 21개 자료의 불확실성 범위와 비교해보았다. Figure 8에서 분홍색 별은 HadGEM2-AO의 결과이고 파란 마름모는 CMIP5의 평균값, 박스는 CMIP5의 불확실성 범위를 의미한다. 그린란드빙상의 지표질량균형에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO, CMIP5는 각각 0.045 m,

0.073 m였다. CMIP5의 불확실성 범위는 0.030~0.166 m로 HadGEM2-AO가 CMIP5 보다 0.028 m 낮았으나 불확실성 범위 안에 포함되었다. 그린란드빙상의 역학적 영향에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO, CMIP5는 각각 0.055 m, 0.047 m였다. HadGEM2-AO는 CMIP5 보다는 높게 전망하였다. 불확실성의 범위는 0.020~0.074 m로 HadGEM2-AO의 결과가 불확실성 범위 안에서 전망한 것으로 나타났다. 남극빙상의 경우도 비슷한 양상을 보였다. 남극빙상의 지표질량 균형에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO와 CMIP5 각각 -0.053 m, -0.037 m였으며 불확실성의 범위는 -0.071~0.37 m로 본 연구의 전망은 불확실성 범위 내에서 있다. 남극빙상의 역학적 변화에 의한 해수면 변화량은 각각 0.03 m, 0.071 m로 전망하였다. HadGEM2-AO가 CMIP5 보다 0.041 m 적게 모의하였다. CMIP5의 불확실성 범위는 -0.014~0.157 m로 HadGEM2-AO 결과는 불확실성 범위 내에 모의되었다. 빙하에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO, CMIP5 각각 0.145 m, 0.155 m로 전망하였다. CMIP5의 불확실성의 범위는 0.089~0.228 m로 HadGEM2-AO는 CMIP5 보다 0.010 m 낮게 전망하였으나 불확실성 범위 안에 포함되었다. 전체 해수면 상승의 경우, CMIP5는 불확실성 범위 0.45~0.82 m, 평균 0.635 m로 전망하였다. HadGEM2-AO는 0.573 m로 CMIP5 보다 0.062 m 낮았으나 불확실성 범위 내로 전망하였다.

5. 요약 및 결론

상당수의 인류가 연안에 살고 있기 때문에 미래 해수면 변화를 전망하고 이를 대비하는 것이 필요하다. 해수면 변화는 해양의 열적인 팽창과 질량의 변화에 영향을 받는다. 대기-해양 결합모델은 해양의 열적 팽창에 대해 모의를 하고 있으나 빙하 감소에 의한 해양의 질량 증가 등에 대한 영향을 모의하는데 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 관측자료 기반의 진단적인 예측 방법이 개발되고 있다. 본 연구에서는 국립기상과학원에서 생산한 전지구시스템모델 HadGEM2-AO 자료를 이용하여 빙상과 빙하에 의한 20세기 대비 21세기의 해수면 변화량을 전망하였다.

그린란드빙상과 남극빙상에 의한 해수면 변화는 전지구 평균 기온을 이용하여 전망하였다. 전지구 해수면은 그린란드빙상의 SMB 효과에 의해 0.045 m, 역학적인 효과에 의해 0.055 m, 남극빙상의 SMB 효과에 의해 -0.053 m, 역학적인 효과에 의해 0.030 m 변화한 것으로 전망하였다. 빙하에 의한 해수면 변동은 0.145 m, 전체 해수면 변동은 0.573 m로 전망하였다. 본 연구는 경험식에 의한 방법으로 빙상과 빙하의 질량 감소에 의한 해수면 상승을 전망하였다. 본 연구

에서 사용한 방법은 경험식으로 과거 관측자료들의 상관관계에 의존한다는 한계를 가지고 있다. 예를 들어 본 연구에서 적용한 Slangen et al. (2014)는 빙상에 의한 해수면 변화를 전지구 평균 기온 아노말리의 일차방정식을 제안한 반면 CMIP5에 적용된 IPCC (2007)은 전지구 평균 기온 아노말리의 이차방정식을 사용한다. 이러한 방법에는 관측자료의 질과 양, 관측자료의 오차 등의 불확실성을 가지고 있기 때문에 미래 해수면 전망의 불확실성의 원인이 된다. 최근 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성, GPS 및 조위계 관측소 등 해수면 자료의 축적과 자료품질의 향상으로 빙하 및 빙상의 변화에 대한 이해가 증진되고 있으며 이는 향후 미래 해수면 전망의 불확실성을 줄이는 역할을 할 것으로 기대하고 있다.

HadGEM2-AO 결과는 CMIP5 21개 앙상블 자료와 비교하였다. 대부분 HadGEM2-AO의 결과가 CMIP5 앙상블 평균보다 낮게 모의하였으나 CMIP5의 불확실성 범위 내에 포함되었다. HadGEM2-AO의 결과가 CMIP5 21개 앙상블 자료와 다소 차이가 나는 것은 모델자체의 모의성능 및 적용한 방법에 차이에서 오는 것으로 사료된다.

HadGEM2-AO의 미래해수면 전망 분석결과, 빙하에 의한 해수면 변동이 전체 변동의 25%, 빙상에 의한 해수면 변동은 전체의 13%를 설명하였고 해양의 열적 팽창에 의한 효과가 49%를 설명했으며, 인위적 활동에 의한 육지 물 저장량의 변화와 GIA 효과가 전체의 12%를 설명하였다. 이는 Nicholls and Cazenave (2010)의 결과와 유사하다.

본 연구는 HadGEM2-AO 자료를 이용하여 미래 해수면 결과를 전망하였으며 다른 자료와의 비교를 통하여 전망 결과의 타당성을 제시하였다. 향후 CMIP6 시나리오 산출에 본 연구내용을 적용하고 미래 우리나라의 해수면 변화를 전망하는 것이 필요하다. 자료의 활용성을 높이기 위해 한반도 중심의 상세한 미래 해수면 전망기법 개발 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

감사의 글

본 논문은 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 기후변화 예측기술지원 및 활용연구 (KMA2018-00321)*의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Arendt, A., and Coauthors, 2012: Randolph glacier inventory [v2.0]: A dataset of global glacier outlines. Global Land Ice Measurements from Space initiative (GLIMS)

- Tech. Rep., 35 pp.
- Arora, V. K., J. F. Scinocca, G. J. Boer, J. R. Christian, K. L. Denman, G. M. Flato, V. V. Kharin, W. G. Lee, and W. J. Merryfield, 2011: Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2010GL046270.
- Baek, H.-J., and Coauthors, 2013: Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618, doi:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Bahr, D. B., M. Dyurgerov, and M. F. Meier, 2009: Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03501, doi:10.1029/2008GL036309.
- Bi, D., and Coauthors, 2013: The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Aust. Meteor. Oceanogr. J.*, **63**, 41-64.
- Church, J. A., and N. J. White, 2011: Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surv. Geophys.*, **32**, 585-602, doi:10.1007/s10712-011-9119-1.
- Clark, J. A., and C. S. Lingle, 1979: Predicted relative sea-level changes (18,000 Years B.P. to Present) caused by late-glacial retreat of the Antarctic ice sheet. *Qua. Res.*, **11**, 279-298.
- Collins, W. J., and Coauthors, 2011: Development and evaluation of an Earth-system model-HadFEM2. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 1051-1075, doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Cook, A. J., and D. G. Vaughan, 2010: Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. *The Cryosphere*, **4**, 77-98, doi:10.5194/tc-4-77-2010.
- Delworth, T. L., and Coauthors, 2006: GFDL's CM2 Global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *J. Climate*, **19**, 643-674.
- Dix, M., and Coauthors, 2013: The ACCESS coupled model: documentation of core CMIP5 simulations and initial results. *Aust. Meteor. Oceanogr. J.*, **63**, 83-99.
- Donner, L. J., and Coauthors, 2011: The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *J. Climate*, **24**, 3484-3519, doi:10.1175/2011JCLI3955.1.
- Dufresne, J.-L., and Coauthors, 2013: Climate change projections using the IPSL-CM5 earth system model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dyn.*, **40**, 2123-2165, doi:10.1007/s00382-012-1636-1.
- Dunne, J. P., and Coauthors, 2012: GFDL's EMS2 Global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, **25**, 6646-6665, doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- _____, and Coauthors, 2013: GFDL's ESM2 Global coupled climate-carbon earth system models. Part II: carbon system formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, **26**, 2247-2267, doi:10.1175/JCLI-D-12-00150.1.
- Fettweis, X., B. Franco, M. Tedesco, J. H. van Angelen, J. T. M. Lenaerts, M. R. van den Broeke, and H. Gallée, 2013: Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489, doi:10.5194/tc-7-469-2013.
- Gent, P. R., and G. Danabasoglu, 2011: Response to increasing southern hemisphere winds in CCSM4. *J. Climate*, **24**, 4992-4998, doi:10.1175/JCLI-D-10-05011.1.
- Goelzer, H., P. Huybrechts, J. J. Fürst, F. M. Nick, M. L. Andersen, T. L. Edwards, X. Fettweis, A. J. Payne, and S. Shannon, 2013: Sensitivity of Greenland ice sheet projections to model formulations. *J. Glaciol.*, **59**, 733-749, doi:10.3189/2013JoG12J182.
- Griffies, S. M., and R. J. Greatbatch, 2012: Physical processes that impact the evolution of global mean sea level in ocean climate models. *Ocean Model.*, **51**, 37-72, doi:10.1016/j.ocemod.2012.04.003.
- Gornitz, V., S. Couch, and E. K. Hartig, 2001: Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area. *Glob. Planet. Change*, **32**, 61-88.
- Heo, T.-K., Y. Kim, K.-O. Boo, Y.-H. Byun, and C. Cho, 2018: Future sea level projections over the seas around Korea from CMIP5 simulations. *Atmosphere*, **28**, 25-35 (in Korean with English abstract).
- Huss, M., and R. Hock, 2015: A new model for global glacier change and sea-level rise. *Front. Earth Sci.*, **3**, 54, doi:10.3389/fearth.2015.00054.
- IPCC, 2007: *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 385-432.
- _____, 2013: *Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 1137-1216.
- _____, 2014: *Climate Change 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team et al. Eds.*, Cambridge

- University Press, 151 pp.
- _____, 2018: *Summary for Policymakers. Global Warming of 1.5°C*. World Meteorological Organization, 32 pp.
- Iversen, T., and Coauthors, 2013: The Norwegian Earth system model, NorESM1-M-Part 2: Climate response and scenario projections. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 389-415, doi:10.5194/gmd-6-389-2013.
- Martin, G. M., and Coauthors, 2011: The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 723-757, doi:10.5194/gmd-4-723-2011.
- Marzeion, B., A. H. Jarosch, and M. Hofer, 2012: Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, **6**, 1295-1322, doi:10.5194/tc-6-1295-2012.
- Meier, M. F., M. B. Dyurgerov, U. K. Rick, S. O'Neel, W. T. Pfeffer, R. S. Anderson, S. P. Anderson, and A. F. Glazovsky, 2007: Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, **317**, 1064-1067.
- Meyssignac, B., X. Fettweis, R. Chevrier, and G. Spada, 2017: Regional sea level changes for the twentieth and the twenty-first centuries induced by the regional variability in Greenland ice sheet surface mass loss. *J. Climate*, **30**, 2011-2028, doi:10.1175/JCLI-D-16-0337.1.
- Mitrovica, J. X., M. E. Tamisiea, J. L. Davis, and G. A. Milne, 2001: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *Nature*, **409**, 1026-1029.
- 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.
- Nick, F. M., A. Vieli, M. L. Andersen, I. Joughin, A. Payne, T. L. Edwards, F. Pattyn, and R. S. W. van de Wal, 2013: Future sea-level rise from Greenland's main outlet glaciers in a warming climate. *Nature*, **497**, 235-238, doi:10.1038/nature12068.
- Peltier, W. R., 2004: Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, **32**, 111-149.
- Phillips, T., H. Rajaram, and K. Steffen, 2010: Cryo-hydrologic warming: A potential mechanism for rapid thermal response of ice sheets. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L020503, doi:10.1029/2010GL044397.
- Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, and L. Padman, 2012: Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502-505, doi:10.1038/nature10968.
- Radić, V., and R. Hock, 2010: Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *J. Geophys. Res.*, **115**, F01010, doi:10.1029/2009JF001373.
- _____, A. Bliss, A. C. Beedlow, R. Hock, E. Miles, and J. G. Cogley, 2014: Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dyn.*, **42**, 37-58, doi:10.1007/s00382-013-1719-7.
- Rotstayn, L. D., S. J. Jeffrey, M. A. Collier, S. M. Dravitzki, A. C. Hirst, J. I. Syktus, and K. K. Wong, 2012: Aerosol- and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the Australasian region: a study using single-forcing climate simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 6377-6404.
- Slangen, A. B. A., and R. S. W. van de Wal, 2011: An assessment of uncertainties in using volume-area modelling for computing the twenty-first century glacier contribution to sea-level change. *The Cryosphere*, **5**, 673-686, doi:10.5194/tc-5-673-2011.
- _____, 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. *Climate Dyn.*, **38**, 1191-1209, doi:10.1007/s00382-011-1057-6.
- _____, 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.
- Van de Wal, R. S. W., and M. Wild, 2001: Modelling the response of glaciers to climate change by applying volume-area scaling in combination with a high resolution GCM. *Climate Dyn.*, **18**, 359-366.
- Vermeersen, B. L. A., and Coauthors, 2018: Sea-level change in the Dutch Wadden sea. *Neth. J. Geosci.*, **97**, 79-127, doi:10.1017/njg.2018.7.
- Voldoire, A., and Coauthors, 2013: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dyn.*, **40**, 2091-2121, doi:10.1007/s00382-011-1259-y.
- Volodin, E. M., N. A. Dianskii, and A. V. Gusev, 2010: Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **46**, 414-431, doi:10.1134/S000143381004002X.
- von Salzen, K., and Coauthors, 2013: The Canadian fourth

- generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: Representation of physical processes. *Atmos.-Ocean*, **51**, 104-125, doi:10.1080/07055900.2012.755610.
- Wada, Y., L. P. H. van Beek, F. C. S. Weiland, B. F. Chao, Y.-H. Wu, and M. F. P. Bierkens, 2012: Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09402, doi:10.1029/2012GL051230.
- Watanabe, M., and Coauthors, 2010: Improved climates simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312-6335, doi:10.1175/2010JCLI3679.1.
- _____, M. Chikira, Y. Imada, and M. Kimoto, 2011: Convective control of ENSO simulated in MIROC. *J. Climate*, **24**, 543-562, doi:10.1175/2010JCLI3878.1.
- Yukimoto, S., and Coauthors, 2011: Meteorological Research Institute Earth system model Version 1 (MRI-ESM1)-Model description. Tech. Rep. MRI, no. 64, 83 pp.
- _____, and Coauthors, 2012: A new global climate model of the meteorological research institute: MRI-CGCM3-Model description and basic performance. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **90A**, 23-64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02.
- Zuo, Z., and J. Oerlemans, 1997: Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation. *Climate Dyn.*, **13**, 835-845.