발 간 등 록 번 호
11-1360620-000139-10

기상업무지원기술개발연구

Research and Development for KMA Weather, Climate, and Earth system Services

기후변화 예측 지원기술 개발 및 활용연구(XI)

Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (XI)

2019

기후연구과

국 립 기 상 과 학 원

National Institute of Meteorological Sciences

Korea Meteorological Administration

기상청

국립기상과학원 책임운영기관

연구 보고서

1. 제목: 기후변화 예측 지원기술 개발 및 활용연구(XI)

Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction(XI)

2. 연구부서: 국립기상과학원 기후연구과

3. 연구기간: 2019. 1. 1. ~ 2019. 12. 31.

4. 연구책임자: 변영화

5. 참여연구원:

구태영 임윤진 정주용 최준태 김영미
김진욱 성현민 심성보 오영석 전선옥
김진원 이선란 이재희 Samuel Takele Kenea
Lev Labzovskii 권상훈 김도현 김동희
김병현 김지선 김태준 문혜진 서정빈
선민아

목 차

목차 ····· i
표 목차 ····· iv
그림 목차 ····· vi
국문 요약문 ····· xi
영문 요약문 ····· xvi

제 1 장 서론 ····· **1**

제 2 장 기후변화 예측모델을 활용한 신규 미래전망정보 산출 ····· **3**
제 1 절 기후변화 시나리오 산출 프레임워크 개선 ····· 3
1. 시나리오 산출 모니터링 시스템(BANMOS) 개선 ····· 3
2. 기후모델자료 DB 개선 ····· 5
(1) 사용자 권한 기능 세분화 ····· 5
(2) 세부검색 기능 강화 ····· 5
(3) 검색어 형태 정의 및 검색 방법 ····· 6
3. 시나리오 표출을 위한 가시화 시스템(Viz-ESM) 개선 ····· 8
(1) 신규 시나리오에 대한 Viz-ESM 표출 ····· 8
(2) 인터페이스 개선 - 변수별 출력형태 선택 및 표출 개선 ····· 9
제 2 절 기후변화 예측모델을 활용한 신규 미래전망정보 산출 ····· 11
1. 국제표준 기반의 기후변화 시나리오 산출 ····· 11
(1) K-ACE 지구시스템 모델을 활용한 시나리오 산출 ····· 11
(2) UKESM1 지구시스템 모델을 활용한 시나리오 산출 ····· 13
(3) 기후민감도와 피드백 분석 ····· 15
2. 신 기후체제 대응을 위한 미래전망 ····· 16
(1) 신규 시나리오 기반의 「전지구 기후변화 전망보고서」 발간 ····· 17

(2) 1.5/2℃ 지구온난화 시나리오 기반의 동아시아 기후변화 분석 ····· 20
3. 에어로졸-대기화학 기후실험 프로젝트를 통한 과학정보 산출 확대 ····· 24
(1) 에어로졸-대기화학에 대한 국제프로젝트 참여 ····· 24
(2) 근 미래 강제력(Near-Term Climate Forcers)이 기후에 미치는 영향 ·· ····· 26
제 3 절 사용자 활용도 증진을 위한 자료제공체계 개선 ····· 31
1. 체계적인 대응을 위한 사용자 설문 조사 ····· 31
2. 데이터노드 구축을 통한 국제자료센터 시나리오 등재 ····· 34

제 3 장 기후변화 특성 및 기후변화 감시정보 분석 ····· 37
제 1 절 지역기후 시나리오 생산과 기후변화 특성 분석 ····· 37
1. ERA-Interim 강제력의 CORDEX-EA 지역기후자료 성능 평가 ····· 37
2. CMIP6 강제력의 동아시아 지역 과거기후 모의실험 ····· 42
3. Atmospheric river의 한반도 강수 영향 분석 ····· 47
(1) Atmospheric river 정의 및 탐지 방법 ····· 47
(2) 한반도의 AR 및 강수의 기후적 특성 ····· 48
(3) AR이 극한 강수에 미치는 영향 ····· 50
4. 빙상과 빙하변화에 따른 미래 지역적 해수면 상승 전망 ····· 51
제 2 절 동아시아 및 한반도 기후변화 감시정보 분석 ····· 57
1. 지역 및 환경 영향에 따른 FTS CO_2 단기변동 특성 평가 ····· 57
2. Comparison of regional simulation of biospheric CO_2 flux from the updated version of CarbonTracker Asia with FLUXCOM and Other Inversions over Asia ····· 61
(1) Introduction ····· 61
(2) Assessment of Consistency and Discrepancy of Spatial and Domain Aggregated NEE Flux ····· 63
(3) Comparisons of Temporal Distributions of Aggregated Mean NEE Flux across Biomes ····· 67
(4) Spatio-Temporal Distribution of NEE Flux ····· 68

(5) Conclusions ····· 69
3. ATMOSPHERIC CO_2 VARIABILITY OVER EAST ASIA AND KOREA CONTRASTS THE GLOBAL CO_2 GROWTH PATTERNS. ····· 71
(1) Introduction ····· 71
(2) Results ····· 73
(3) Discussion and conclusions ····· 78

제 4 장 결론 ····· **79**

참고 문헌 ····· **81**

LIST OF TABLES

Table 2.1.1. Specification of a file properties ····· 6
Table 2.1.2. Definition of keyword types ····· 7
Table 2.2.1. Climatology anomalies of the global mean temperature and precipitation from RCP and SSP scenarios in the period between 2081 and 2100 that compared with present climatology (1995-2014). ····· 18
Table 2.2.2. List of HAPPI AGCM used in this study. All ensemble members provide 10 years' simulation data for the HIST, Plus15, and Plus20 experiments ····· 21
Table 2.2.3. List of the fixed sea surface temperature effective radiative forcing (ERF) experiments carried out with UKESM1, to diagnose the pre-industrial to present-day ERFs from changes in emissions, concentrations. Each simulation was 45 years in length, with analysis based on the last 30 years. ····· 27
Table 2.2.4. PD effective radiative forcings (ERFs) of climate relative to PI in W/m2, and including and estimate of the standard error (Forster et al., 2016). ····· 30
Table 2.3.1. Priority of utilization on climate variables according to time interval of survey respondents. ····· 32
Table 3.1.1. List of regional climate models (RCMs) used in this study and their configurations and details. ····· 38
Table 3.1.2. Model configuration of HadGEM3-RA used in this study. ····· 42
Table 3.2.1. The time series of FTS and GAW observed CO_2. ····· 59
Table 3.2.2. List of the inverse modeling systems used in this work. Note that inversions account for interannually varying (IAV) prior fluxes (Yes or No) and transport (Yes or No) ····· 63
Table 3.2.3. Annual NEE flux (natural + fire flux) integrated over the global

scale and Asia for 2001–2013, except for Jena CarboScope (2004–2013), is provided. Unit is given in PgC yr^{-1}. ····· 66

Table 3.2.4. Summary of the statistical relationships of NEE flux averaged over individual biomes between CTA2017 and CT2017 with FLUXCOM in Asia. Note that all the correlation coefficients are statistically significant (< 0.05) and * indicates insignificance. Pearson's correlation coefficients (r1) and slope (m1) represent for CTA2017 vs. FLUXCOM, while r2 and m2 for CT2017 vs. FLUXCOM. Unit for NEE flux is gC m^{-2} d^{-1}. ····· 68

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1.1. BANMOS monitoring system of scenario production framework for CMIP6 simulation with K-ACE model. ····· 4
Fig. 2.1.2. Flowchart of Viz-ESM data processing ····· 8
Fig. 2.1.3. Flowchart of post-processing for JSON format ····· 9
Fig. 2.1.4. Manual interface for variables and scenarios selection in Viz-ESM. ···· 10
Fig. 2.2.1. Future GHG emissions according to social and economic scenarios. ·· 11
Fig. 2.2.2. Anomaly time series of future global average near-surface temperatures (left) and precipitation (right) from 1850-1900. The green line denotes SSP2-4.5 and the orange line denotes SSP3-7.0 scenario. ····· 12
Fig. 2.2.3. The outlook for future (2081-2100) near-surface temperature (top) and precipitation (bottom) relative to the present climate (left, 1995-2014). The middle panels are SSP2-4.5 scenario and the right panels are SSP3-7.0 scenario. ····· 12
Fig. 2.2.4. Temporal evolution of global mean temperature (upper) and precipitation (bottom) anomaly for the historical and future climate scenarios. ····· 13
Fig. 2.2.5. Surface air temperature (upper panel) and precipitation (bottom panel) distribution of historical (left) and difference of two future climate scenarios for 20-year period 2081-2100 relative to the 1995-2014 base period. ····· 14
Fig. 2.2.6. Global mean radiative feedback components derived from the Abrupt 4xCO2 and PI experiments for K-ACE, UKESM1-0-LL, and HadGEM3-GC3.1-LL and compared to the CMIP5 multi-model ensemble mean. ····· 15
Fig. 2.2.7. Global mean radiative feedback components derived from the Abrupt 4xCO2 and PI experiments for K-ACE, UKESM1-0-LL, and HadGEM3-GC3.1-LL

and compared to the CMIP5 multi-model ensemble mean. ····· 16
Fig. 2.2.8. The time series of the global mean surface air temperature (left, ℃) and precipitation anomalies (right, %), respectively in the period between 2000 and 2100. Each change is compared with climatological state averaged present period (1995-2014). Black, blue, and red lines are those of historical climate, SSP1-2.6, and SSP5-8.5, respectively. ····· 18
Fig. 2.2.9. Spatial distribution of sea ice extent over arctic (left) and antartic (right) region in the period late 21th century (2081-2100) compared with present period (1995-2014). ····· 19
Fig. 2.2.10. The anomalies of daily max and min temperature in the period early (2021-2040), mid (2041-2060), and late (2081-2100) 21st century compared with with present period (1995-2014). ····· 20
Fig. 2.2.11. Spatial distribution of the future changes of annual mean surface air temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation in HAPPI scenarios (Plus15 – Hist, Plus20 – Hist) and the impact of 0.5 increase (Plus20 – Plus15). Gray dotted grids represent the area where 80% of the used AGCMs agree with the change sign. ····· 22
Fig. 2.2.12. Changes of extreme climate events avoided over East Asia and its sub-regions (box in figure 1) in 1.5 ℃ compared with 2.0 ℃ global warming future (unit: %). The hatched lines represent more than 80 % of AGCM agreement on the change sign. ····· 23
Fig. 2.2.13. Experiments for AerChemMIP and ScenarioMIP (CMIP6). ····· 25
Fig. 2.2.14. Spatial distribution of Present-day(PD; Year 2014) (a) ERF, (b) SW and (c) LW relative to pre-industrial(PI; Year 1850) in W/m^2. The global-mean value is shown in the right corner. ····· 27
Fig. 2.2.15. Spatial distribution of PD ERF relative to PI in W/m^2 derived from calculating the mean difference in the TOA radiative fluxes, (a) SWcs,

(c) LWcs, (e) SWcre, (g) LWcre, and the changes (PD-PI) in (b) AOD at 550 nm, (d) surface temperature, (f) total cloud fraction, (h) high-level cloud fraction. The spatial pattern correlation between the left and right panel is shown in the right corner. ····· 28

Fig. 2.2.16. Spatial and zonal distribution of PD precipitation relative to PI in mm/day. ····· 29

Fig. 2.2.17. The spatial distribution of the PI-to-PD change in surface O3 volume mixing ratio [ppbv] in (a) piClim-NTCF (b) the sum (piClim-Aer + piClim-O3) relative to piClim-control, (c) nonlinear interaction effects [piClim-NTCF – (piClim-Aer + piClim-O3)] between the aerosol and ozone forcing. The global average has been shown in the right corner. ····· 30

Fig. 2.3.1. Radar chart for customer availability of climate elements according to each isobaric surface. ····· 33

Fig. 2.3.2. Survey results about preference for climate data service by NIMS. ···· 34

Fig. 2.3.3. The procedure for installation or update an ESGF data node ····· 35

Fig. 2.3.4. The NIMS/KMA scanario data in ESGF node site ····· 36

Fig. 3.1.1. The performance index for CORDEX-EA Phase2 models. (red) HadGEM3-RA, (yellow) RegCM4, (green) WRF, (skyblue) SNU-MM5, (blue) CCLM, (black) Ensemble mean. ····· 39

Fig. 3.1.2. Regional performance index for CORDEX-EA Phase2 models and their ensemble mean. ····· 40

Fig. 3.1.3. The performance index of climate variables for CORDEX-EA Phase2 models. (red) HadGEM3-RA, (yellow) RegCM4, (green) WRF, (skyblue) SNU-MM5, (blue) CCLM, (black) Ensemble mean (black square) RCM Average. ····· 41

Fig 3.1.4. Spatial distribution of surface air temperature (left) and precipitation (right) during 36 years (1979-2014) period: observation (top), difference between GCM and observation (middle), and difference between RCM

and observation (bottom). ····· 44
Fig. 3.1.5. Seasonal variation of surface air temperature (left) and precipitation (right) during 36 years(1979-2014) period in observation, GCM, and RCM: East Asia (top), land (middle), and ocean (bottom). ····· 45
Fig. 3.1.6. Spatial distribution of summer (JJA) precipitation (left) and 850hPa wind and specific humidity (right) during 36 years (1979-2014) period: observation (top), difference between GCM and observation (middle), and difference between RCM and observation (bottom). The red line means boundary of the north pacific high. ····· 46
Fig. 3.1.7. The fraction (%) of AR precipitation to total precipitation for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON. ····· 48
Fig. 3.1.8. The precipitation intensity (mm/day) for all wet days (left panels), AR wet days (middle panels), and non-AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels). ····· 49
Fig. 3.1.9. The 95%ile precipitation intensity (mm/day) for all wet days (left panels), AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels). ····· 51
Fig. 3.1.10. Global distribution of relative sea level change from the Greenland ice-sheet surface mass balance (SMB) (top panels) and the Antarctic ice-sheet SMB (bottom panels) from HadGEM2-AO (left panels), 21 CMIP5 model ensemble mean (middle panels) and difference between HadGEM2-AO and 21 CMIP5 model ensemble mean (right panels) over the period 1986-2005 to 2081-2100. ····· 53
Fig. 3.1.11. Same as Fig. 3.1.10. but relative sea level change due to ice-sheet dynamics. ····· 54
Fig. 3.1.12. Same as Fig. 3.1.10. but relative sea level change due to glaciers. ··· 55
Fig. 3.1.13. Same as Fig. 3.1.10. But total relative sea level change. ····· 55
Fig. 3.2.1. FTS observation techniques to improve results. A) is equipment accuracy. The accuracy of 0.99, B) is the signal precision of the ILS of

93 point, C) is a simulated spectrum matches value of 99.998 % ····· 58
Fig. 3.2.2. The sensitivity of CO_2 concentrations (ppm(μmol(m2s)$^{-1}$)$^{-1}$) computed from the FLEXPART model using the Anmyeondo FTS station in 2014. ····· 60
Fig. 3.2.3. Annual net ecosystem exchange of CO2 (NEE) flux spatial distribution (gC m-2 d-1) from CT2017 prior (a), CTA2017 posterior (b), FLUXCOM (c), and correlation between CTA2017 and FLUXCOM (d) for the 2001–2013 period. Pearson's correlation coefficient (R) values shown are significant at a 95 % confidence interval. ····· 64
Fig. 3.2.4. The time series of yearly posterior NEE flux integrated over the global scale (a) and Asia (b) derived from CT2017, CT2016, CT2015, CTA2016, CTA2017, JENA, CAMS, MACC inversions. ····· 65
Fig. 3.2.5. Upper panels: IAV of XCO2 from CAMS (left subplot) and CTA (right subplot) for EA. Bottom panels: median bias between CTA and CAMS in 2005-2015 period (left subplot) and grid cell correlation between IAV of XCO2 for CTA vs CAMS (right subplot). ····· 73
Fig. 3.2.6. Correlation between DIAV (from CTA) and side parameters in EA in 2005-2015 years. Top panels: NPPb, FFCO2b and Tb (from left to right) versus DIAV. Bottom panels: IAV of NPP, IAV of FFCO2 and IAV of Tb (from left to right) versus DIAV. ····· 75
Fig. 3.2.7. Same as Fig. 3.2.6 but from CAMS. ····· 76

요약문

Ⅰ. 제목

기후변화 예측기술 지원 및 활용 연구

Ⅱ. 연구의 필요성

IPCC 제6차 기후변화 평가보고서(Assessment Report, AR6)에 대응하고 정부가 준비 중인 제 3차 국가기후변화적응대책('21～'25) 수립 지원을 위해서는 새로운 국제표준을 준수하는 전지구 기후변화 전망과 동아시아/한반도 영역까지 상세화한 기후변화 분석 정보가 필수적이다. 또한, 1.5도 지구온난화 보고서 등 국제적인 기후변화 이슈에 대응하기 위한 기후변화 과학정보에 대한 시기적절한 활용 및 영향분석에 대한 요구도 증가하고 있다. 이와 더불어, 연일 최고치를 경신하고 있는 지구온난화 가속화의 주범인 온실가스 산정의 불확실성을 줄이기 위해 탄소 배출/흡수원의 시공간분포에 대한 정량 분석 기술 및 동아시아 지역의 지역적인 특성 분석도 필요한 시점이다.

Ⅲ. 연구개발 목표

- 기후변화예측모델 기반 전지구/지역기후 시나리오 산출 및 전지구 기후변화 전망 분석
- 기후변화 시나리오 다원화를 위한 앙상블 시나리오 산출 및 분석
- 탄소 입체 관측・감시 정보 산출 및 분석

Ⅳ. 연구 내용 및 결과

기후변화 시나리오 생산·모니터링·관리·표출 프레임워크를 개선하였다.

- 시나리오 산출 모니터링 시스템(BANMOS)의 표출 변수를 증가(기존 12개→개선 81개)하였으며 모니터링 업데이트 표출시간을 향상하였다.
- 기후모델자료 DB (CEDS)의 사용자 권한 기능을 최상위관리자/일반관리자/일반사용자로 세분화하고 사용자 정의 속성 정보와 특수연산자에 대한 검색명령어를

추가하여 세부검색기능을 고도화하였다.

- 시나리오 표출을 위한 가시화 시스템(Viz-ESM)에 IPCC AR6 신규 시나리오 2종(SSP1-2.6, SSP5-8.5) 표출 적용하고 변수별 출력형태 선택 및 표출정보(고도별 변수, 시계열 정보 등)를 개선하였다.

IPCC AR6 대응을 위해 국립기상과학원이 자체개발한 지구시스템모델(K-ACE)과 한·영 과학협력을 통해 공동 운영 중인 UKESM1을 활용하여 새로운 온실가스 농도 경로(SSP) 기반으로 기후변화 시나리오 5종을 산출하여 분석하였다. 또한, CMIP6에 처음 제출되는 K-ACE 모델의 기후민감도 및 기후피드백과 연관된 요소들의 분석을 수행하였다.

- K-ACE를 활용한 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 온실가스 시나리오 기반의 미래 기후 전망정보 산출결과, 2100년에는 현재기후(1995~2014)대비 기온은 2.5 K/3.7 K (SSP2-4.5/SSP3-7.0) 상승하였으며, 강수량은 6 %/7 %(SSP2-4.5/SSP3-7.0) 증가한 것으로 전망하였다.
- UKESM1 활용한 SSP1-2.6와 SSP5-8.5 온실가스 시나리오 기반의 미래 기후전망정보 산출결과, 2100년에는 현재기후(1995~2014)대비 기온은 2.2 K/6.0 K (SSP1-2.6/SSP5-8.5) 상승하였으며, 강수량은 6%/11%(SSP1-2.6/SSP5-8.5) 증가한 것으로 전망하였다.
- K-ACE모델의 평형기후민감도(ECS)와 점증기후반응(TCR)은 각각 4.83 K와 2.07 K로 CMIP5 모델들에 비해 크게 나타났다. 기후민감도 분석 결과, 복사 피드백에 대한 구름복사효과의 영향력이 중요하며 이는 구름모수과정 개선과 지표면 알베도 등 구름모의관련 주요 요소들의 영향이 큰 것으로 되었다.

IPCC AR6 와 연계된 SSP 기반의 신규 기후변화 시나리오를 분석한 「전지구 기후변화 전망보고서」를 발간하여 향후 기후변화 적응과 관련된 다양한 정책 및 연구를 지원하기 위한 체계적이고 과학적인 미래 전망 정보를 제공하였다.

- 신규 시나리오는 기존 RCP 시나리오와 비교하여, 전지구 평균기온과 강수량의 증가폭에 대한 미래 전망이 더 크게 나타났으며(Table 1), 기온과 강수에 대한 전지구 극한값도 큰 폭의 변화를 전망하였다.

Table 1. Climatology anomalies of the global mean temperature and precipitation from RCP and SSP scenarios in the period between 2081 and 2100 that compared with present climatology (1995-2014).

	기존 결과 (1971~2000년 대비 2071~2100년)	신규 결과 (1995~2014년 대비 2081~2100년)
기온	1.3~3.7℃ 상승	1.9~5.2℃ 상승
강수량	3~6% 증가	5~10% 증가

- 해양의 경우, 21세기 말의 전지구 평균 해수면 온도는 현재 대비 +1.4~3.7 ℃ 상승하고, 해수면 고도는 +52~91 cm 정도 상승할 것으로 전망하였다. 또한, 두 시나리오에서 모두 21세기 말의 해빙면적이 현재 대비 크게 감소하는 것으로 나타났다.

IPCC의 「지구온난화 1.5도 특별보고서」 대응을 위해 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 1.5/2.0 ℃ 지구온난화 시나리오를 분석하였다.

- 동아시아 평균기온은 현재 대비 1.5/2 ℃에서 각 0.86 ± 0.14 ℃와 1.47 ± 0.12 ℃가 상승하여 전지구 기온상승(시나리오별 각 0.85 ± 0.06 ℃, 1.47 ± 0.05 ℃)과 비교하여 유사한 수준으로 증가하는 경향을 보였다. 전지구에 비해 동아시아와 우리나라에서는 분석 모델 간 편차가 컸다. 강수량의 경우에도 동아시아/한반도에서 전지구적인 증가 경향보다 많은 강수량 증가를 나타내고 있었다.
- 1.5 ℃에서 2.0 ℃로 추가 상승 시에는 90퍼센타일 이상의 높은 기온 및 강수의 강도와 발생 빈도가 증가하였다. 강한 강수의 경우 특히 전지구, 동아시아, 우리나리 순서로 발생 확률이 높아지는 것으로 확인했다.

한·영 과학협력프로그램을 통해 UKESM1을 활용한 CMIP6 AerChemMIP 프로젝트에 참여하여 국제표준에 입각한 에어로졸 화학실험을 수행하고 동아시아 지역의 에어로졸-기후 영향을 분석하였다.

- 산업화 이전 과거(1850년) 대비 현재(2014년) 기후에서 근미래강제력(NTCFs)에 의해 유효복사강제력(ERF)이 1.12 W/m^2 감소하였으며, 이는 주로 에어로졸에 의한 단파복사변화로부터 기인한 것이다. 이에 따른 대기의 빠른 적응과정을 통해 북반구 전반에 걸친 기온/강수의 감소가 나타났다.

신규 기후변화 시나리오 자료의 국내 활용도 증진을 위한 전문가 설문 조사를 실시하였으며 자체 데이터 노드 구축을 통해 CMIP6 국제자료센터에 시나리오를 등재하였다.

- 기후변화 시나리오의 전문사용자들을 대상으로 실시한 설문 조사 결과, 설문 응답자의 대부분은 강수량, 기온 자료에 대해 우선적으로 제공받기를 원했으며, 자료관련된 문의 등 피드백 효율화를 위해 산출자로부터 직접 제공받는 것을 선호하는 것으로 나타났다.
- 산출한 기후변화 시나리오 자료는 데이터 품질 검증과 적합성 검사 후 데이터 노드 구축을 통해 CMIP6 ESGF 분산 데이터저장소에 등재를 완료하였다.

새로운 지역 기후 시나리오 생산을 위해 참여 모델들의 모의성능을 평가하고 CMIP6 강제력을 이용한 동아시아 지역 과거 기후 시나리오를 산출하였다. 한반도 지역의 AR에 의한 강수 영향을 분석하였으며 빙상과 빙하변화에 따른 미래 해수면 상승을 전망하였다.

- CORDEX-EA 2단계에 참여하는 지역기후모델들의 모의성능을 평가하기 위해 RMSE 기반의 진단툴을 동아시아 영역에 적용하였다. 모든 모델이 우리나라를 포함한 극동아시아는 잘 모의하는 반면, 티베트고원을 포함한 동아시아 서쪽 지역은 잘 모의하지 못하였다.
- 지역기후모델(HadGEM3-RA)을 이용하여 CORDEX 동아시아 지역의 과거 기후 모의실험을 수행하였다. 이 때 CMIP6 전지구실험(UKESM1) 강제력을 이용하였다. 지역기후모델은 관측보다 한랭·다습하게 모의하였으며, 대체로 기온은 육지, 강수는 해양에서 더 큰 오차를 보였다.
- 한반도 지역의 Atmospheric river (AR)는 여름철에 약 15 %로 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 여름철 전체 강수량의 약 35 % 이상은 AR이 상륙했을 때 발생했다. AR 상륙 시, 모든 계절에서 평균 강수와 극한 강수의 강도가 모두 증가하였다.
- HadGEM2-AO의 자료를 이용하여 빙상과 빙하에 의한 미래 해수면 상승을 전망하고 21개 CMIP5 앙상블 평균과 비교하였다. HadGEM2-AO의 미래해수면 전망 분석결과는 CMIP5의 불확실성 범위 내에 모의되었다.

기후변화 감시정보는 온실가스 플럭스 산정의 불확실성을 줄이고자 지상원격관측

기반의 고품질 탄소 감시 자료를 생산하고 있으며, 탄소 배출·흡수원의 시·공간과 정량적 변동량 정보를 얻기 위하여 “환경 영향에 따른 FTS CO_2 단기변동”, “동아시아 지역 식생 플럭스 특성” 및 “CO_2 농도에 대한 영향요소 분석”을 하였다.

- 안면도 탄소 지상관측(FTS) 환경 및 자료처리 개선을 통하여 고품질 탄소 감시 자료 생산 기반을 구축하고, CO_2 단기변동성에 대한 민감도 및 상대 강도의 변동 특성 평가 정보를 생산하였다.
- 2017 동아시아지역 탄소추적시스템(CTA 2017)의 NEE 자료와 FLUXCOM, CAMS 등의 NEE를 비교하여 동아시아 지역의 NEE 불확실성이 토지피복에 영향을 받은 것으로 나타났다.

Ⅴ. 기대 효과 및 활용 방안

- 기후변화 종합감시를 위한 탄소 관측·감시 기술 확보, 새로운 기후변화 시나리오 개발 및 한반도 기후변화 분석 등 국정과제 61-3 “기후변화 적응능력 제고”의 이행
- 「전지구 기후변화 전망보고서」 발간으로 새로운 기후체계에서 국가 차원의 기후변화 대응 정책 수립의 과학적 근거 지원
- 우리원에서 생산한 기후변화 시나리오 전 세계 연구기관에 제공하여 IPCC 제6차 평가보고서 기여 및 국제 활동 참여로 기후변화 연구에 대한 국제적 위상 제고

Summary

Ⅰ. Title

Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction(Ⅹ)

Ⅱ. Background

It is necessary to produce the global climate change scenarios complying with new international standards and to analyze climate change in the East Asia and Korean Peninsula for responding to the IPCC 6th Assessment Report (AR6) and supporting the establishment of the 3rd National Climate Change Response Plan ('21 - '25). The demand for the climate change information and the analysis of its impact is also increasing like the special report on Global warming of 1.5 ℃. To reduce the uncertainty of estimated greenhouse gas, the quantitative analysis technology for spatial-temporal distribution of carbon emission and absorption is needed in the East Asia.

Ⅲ. Objectives

- Develop and analyze up-to-date global/regional climate change scenarios using climate models on the basis of the CMIP6 experimental guidelines
- Produce and analyze the up-to-date ensemble global/regional climate change scenarios
- Develop a technology for observation-based integrated monitoring and analysis of the carbon budget

Ⅳ. Research and Results

The framework for producing, monitoring, managing and displaying climate change scenario data has been improved in its performance and stability by

increasing and expanding of the efficiency and functionality, respectively, of each component such as BANMOS, postprocessing, and climate DB, and others. A new graphical display program, Viz-ESM, has been developed and implemented for improved sharing and presentation of the climate change scenarios.

- Improvement of the monitoring system for producing climate change scenarios (BANMOS): 1) Increase the number of displayed variables from 12 in the old system to 81 in the updated system, 2) Reduction of the calculation time for displaying updated model integration data.
- Improvement of CEDS: 1) Refine the user classifications and associated level of access allowance into root, administrator and user, 2) Upgrade the search function by adding user-defined attribute information and the search command for specialized logical operators.
- Improvement of Viz-ESM: 1) Launch the service for the IPCC AR6 climate change scenario (SSP1-2.6, SSP5-8.5) through the Vis-ESM homepage, 2) Addition of displayed information (variables with altitudes, time series, and so on)

To contribute the IPCC AR6 and to provide the scientific information about climate change for responding to New Climate Regime, climate change scenarios have been developed using K-ACE and UKESM1 on the basis of the new greenhouse gas concentration path SSP-RCP. Also, the sensitivity and feedback characteristics of the K-ACE model have been analyzed using idealized CO_2 experiments for reporting the model characteristics to CMIP6.

- Results of the SSP2-4.5 and SSP3-7.0 based future climate change scenarios using K-ACE project, compared to the present-day period 1995-2014, increases of the global mean surface air temperature in late 21st century by 2.5 K for the SSP2-4.5 and 3.7 K for the SSP3-7.0 and increases of the global mean precipitation by 6 % for the (for the SSP2-4.5 and 7 % for the SSP3-7.0 in the late 21st century 2081-2100.
- Climate projections using the UKESM1 in conjuncton with the SSP1-2.6

and SSP5-8.5 scenarios yields for the late 21st century 2081-2100 period: Global-mean surface air temperature increases by 2.2 K for the SSP1-2.6 and by 6.0 K for the SSP5-8.5 and the global mean precipitation increase by 6 % for the SSP1-2.6 and by 11 % for th SSP5-8.5 compared to the present-day period 1995-2014.

- The ECS and TCR of the K-ACE are 4.83 K and 2.07 K, respectively, mainly due to stronger positive SW cloud radiative effective (CRE) feedback and stronger negative LW CRE feedback compared to the CMIP 5 models.

NIMS/KMA has published "Future Projection Report of Global Climate Change", which analyzes future climate change data based on the new SSP scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) for IPCC AR6 using two climate models K-ACE and UKESM1.

- The results show that the increasing trend in the global mean temperature and precipitation in the future is larger than those of the previous RCP scenarios; the projected global extreme values also increase is also larger than with the previous RCP scenarios.
- The global mean sea surface temperature in the late 21st century period 2081-2100 is projected to increase by 1.4 K/3.7 K (SSP1-2.6/SSP5-8.5) and the sea surface level is projected to increase by 52 cm/91 cm (SSP1-2.6/SSP5-8.5) compared to the present-day period 1995-2014. In addition, in both scenario runs, the sea ice extent in the late 21st century period is projected to be substantially smaller than in the present-day period.

The change of the mean and extreme temperatures and precipitation in East Asia (EA) under the stabilized 1.5 ℃ and 2 ℃ warming above the preindustrial levels has been analyzed in response to the Global Warming of 1.5 ℃.

- It is found that the magnitude of the mean temperature increase over EA and Korea under the 1.5 ℃/2 ℃ conditions is similar to the global mean;

however, the inter-model spread for EA is larger than for the globe. The precipitation increase in EA and Korea is larger than the global mean under the corresponding warming conditions.

- Additional increases of the global-mean temperature from 1.5℃ to 2℃ increase the episodes of intense heat and precipitation events that are above the 90 percentile values. The increase in the probability of intense precipitation events is largest for the entire globe, followed by EA and Korea.

We joined the CMIP6 Aerosol and Chemistry Model Intercomparison Project (AerChemMIP) using the UKESM1 in the framework of KMA-UKMO science cooperation program and analyze, in particular, the aerosol-climate interaction in East Asia.

- The global mean effective radiative forcing (ERF) of near-term climate forcers (NTCFs) in 2014 has been decreased by 1.12 W/m^2 from a pre-industrial period (1850) primarily due to the reduced shortwave radiation by increased aerosols. The response of the atmosphere to the reduced shortwave radiative forcing has resulted in Northern Hemisphere-side decreases in the temperature and precipitation.

Surveys have been performed to improve the application of climate change scenario data at domestic institutions. The scenario data are registered to the CMIP6 international data center via our own data node.

- The survey results show that most of the responders are interested in precipitation and temperature data and preferred to obtain the scenario data directly from NIMS.
- CMORization (including quality control processes) has been done with the all produced CMIP6 climate change scenario using K-ACE, and data publication to CMIP ESGF has been completed by building ESGF data node for data transfer. → You can download through the CMIP6 ESGF data portal.

Evaluatons of the regional climate models and CMIP6-based historical regional climate simulations have been completed for the preparation of the reional climate change projectons based on the CMIP6 data. The effects of atmospheric rivers on the precipitation characteristics over EA and the sea-level changes related to the changes in glaciers sea ice are also analyzed.

- Performance of the East Asian group models participating in the CORDEX has been evaluated. Performance index is useful in intercomparing RCMs. Regional models' performance varies for regions;. the models generally perform better in the eastern part of EA including East China, Korea and Japan, than in the western part of EA.
- Using HadGEM3-RA, the UKESM-based historical regional climate simulation was performed over the CORDEX EA region. HadGEM3-RA results show cold and wet biases compared to the observation data; generally, temperature (precipitation) biases are larger over the at land (ocean) than over the ocean (land)..
- The AR frequency over the Korean Peninsula is highest in summer (15 %) and lowest in winter. Over 35 % of the summer precipitation in the Korean peninsula is associated with ARs. The occurrence of ARs result in above-both average and extreme local precipitation intensity in the Korean peninsula. Thus, ARs are likely to induce more extreme hydrologic events in Korea and the EA coastal region.
- The sea-level rise due to the changes in ice sheets and glaciers is estimated using the HadGEM2-AO data and compared against the ensemble mean values based on 21 CMIP5 model data. It has been found that the amount of sea-level rise from the HadGEM2-AO data is within the range of uncertainty of the 21-model ensemble mean.
- The climate change monitoring produces high quality carbon monitoring data at the surface remote sensing stations to reduce the uncertainties in calculating carbon fluxes. For estimating the spatial and temporal variations

in the carbon sources and sinks, analyses are performed on 'the short-term variations in the FTS CO_2 associated with environmental effects', 'the carbon-flux characteristics over East Asia', and 'the elements that affect the CO_2 concentration over East Asia'.

- Established a high quality carbon monitoring data production capability by improving the FTS environment of the Anmyundo station and associated data processing.
- The NEE data from the 2017 East Asia Carbon Tracker (CTA 2017), CAMS, and FLUXCOM reveal that the uncertainty in the NEE over East Asia is affected by the land-cover data.

Ⅴ. Expected outcome and application plan

- Establish the technology for the observation/monitoring of the carbon budget towards comprehensive monitoring of climate change.
- Carry out the tasks for the major government project 61-3 including the development of up-to-date climate scenarios and the analysis of the climate change over the Korean Peninsula.
- Developments of climate scenarios and associated analysis toolkit in support of the 2019 "Global Climate Change Projection Report (전지구 기후변화 전망 보고서)" for developing policies for the mitigation of/adaptation to future climate change.
- Improve the nation's international status in climate change studies by participating in international activities such as the contribution to the IPCC AR6 and providing climate projection data to international communities.
- Support the climate prediction service for the operational long-range forecasting and stakeholder through the establishment of the Seamless Climate Prediction System.

제 1 장 서론

2019년 인도네시아에서 두 달이 넘게 산불이 발생한 데 이어, 호주에서는 9월에 발생한 산불이 4개월이 지나도록 꺼지지 않고 있다. 미국 우주항공국은 호주 산불로 발생한 연기가 최고 17 km 상공까지 치솟아 이미 지구 반 바퀴를 돌았고 4억 톤이 넘은 이산화탄소가 뿜어져 나온 것으로 추정한다. 지구온난화의 탓으로 기후가 고온·건조해지면서 대형 산불이 빈번히 발생하고, 산불에 의해 방출된 이산화탄소는 지구온난화를 가속하는 악순환 지속되고 있다. 세계기상기구(World Meteorological Organization : WMO)의 최근 발표에 따르면, 2015~2019년 전지구 평균기온은 산업화 이전 시기(1850~1900년)보다 1.1 ℃ 상승하였고, 최근 5년이 역사상 가장 더운 5년으로 기록하리라 전망하였다. 또한, 온난화의 주범인 이산화탄소의 대기 중 평균농도가 2019년 말에는 410 ppm에 도달하거나 초과할 것으로 보여 역사상 가장 가파른 상승세가 예상된다.

인위적 영향에 의한 기후변화는 국제사회가 공동으로 대응·대처해야 할 문제로 1997년 온실가스 배출의 법적 규제를 명시한 교토 프로토콜에 이어 2015년 모든 국가의 온실가스 의무 감축 이행을 합의한 파리협약까지 협력방안을 마련하기 위해 노력하고 -있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovermmental Panel on Climate Change : IPCC)는 기후변화평가보고서를 발간하여 기후변화를 과학적으로 입증하고 있으며 정책결정자의 기후변화 완화·적응 정책 수립을 위한 과학적 근거자료를 지속해서 제공하고 있다. IPCC는 1990년 처음 기후변화 평가보고서를 발간한 것을 시작으로 2013년 IPCC 제5차 평가보고서(Fifth Assessment Report : AR5)를 발간하였으며 2021년 제6차 평가보고서(Sixth Assessment Report : AR6)를 발간을 목표로 노력 중이다.

세계기상기구 산하의 세계기후연구프로그램(World Climate Research Program : WCRP)는 결합모델상호비교프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project : CMIP)를 통해 IPCC 평가보고서의 과학적 근거자료를 제공한다. IPCC AR6 대응을 위한 CMIP6는 기존의 온실가스농도 경로에 사회경제적 경로까지 반영한 새로운 기후변화 시나리오 경로(Shared Socioeconomic Pathway : SSP)를 설정하였다(Eyring et al., 2016). 국립기상과학원은 독자적으로 구축한 지구시스템모델인 K-ACE (KMA Advanced

Community Earth model)와 영국기상청과의 국제협력 및 시나리오 다원화를 목적으로 UKESM1 (United Kingdom Earth System Model version 1) 모델을 사용하여 CMIP6에 참여하고 있다.

이번 연도에는 CMIP6의 ScenarioMIP 참여를 통해 K-ACE기반의 SSP2-4.5, SSP3-7.0 시나리오와 UKESM1 기반의 SSP1-2.6, SSP5-8.5 결과를 산출하였다. 또한, 구축된 기반기술을 토대로 산출된 AR6 대응을 위한 신규 전지구 기후변화 전망정보를 분석하고 국내·외 기후변화 커뮤니티에 기여하기 위한 자료제공체계를 개선하였다. 산출한 시나리오는 데이터 품질 검증과 적합성 검사 후 국제적인 승인을 얻어 CMIP 자료센터(Earth System Grid Federation : ESGF)에 등재해 전 세계에 서비스 할 예정이다. CMIP6에 처음 제출되는 K-ACE 모델의 특성정보를 제공하기 위해 기후민감도 및 기후피드백 관련 요소를 분석하였으며, CMIP6의 AerChemMIP 프로젝트에 참여하여 에어로졸 화학실험을 수행하고 동아시아 지역의 에어로졸-기후 영향을 알아보고자 하였다. 또한, 2018년 승인된 IPCC의 「지구온난화 1.5도 특별보고서」와 관련하여 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 1.5/2.0 ℃ 지구온난화 시나리오를 분석하였다.

우리나라의 지역기후변화 특성 및 기후변화 감시 정보 분석을 위한 연구도 진행하였다. CORDEX-EA (COordinated Regional Downscaling EXperiment-East Asia) 2단계에 참여하는 지역기후모델들의 모의성능을 평가하였으며 CMIP6 전지구 실험(UKESM1) 강제력을 이용하여 HadGEM3-RA (Hadley Centre Global Environmental Model, version3-regional Atmosphere) 과거 기후 모의실험을 수행하였다. AR (Atmospheric River) 자료를 분석하여 AR 상륙 시의 한반도에서의 강수 영향을 분석하였으며 HadGEM2-AO (HadGEM, version2 – Atmosphere Ocean)기반의 빙상과 빙하에 의한 미래 해수면 상승을 전망하였다. 동아시아 및 한반도 지역의 고품질 탄소 감시 정보를 생산하고 환경 영향에 따른 FTS (Fourier Transform Spectrometer : 고분해 태양흡수분광간섭계) CO_2 관측 자료의 단기 변동과 동아시아 지역 식생 플럭스의 특성 및 CO_2 농도에 대한 영향요소를 분석하였다.

제 2 장 기후변화 예측모델을 활용한 신규 미래전망정보 산출

제 1 절 기후변화 시나리오 산출 프레임워크 개선

국립기상과학원은 IPCC 제6차 평가보고서 및 국가 기후변화 대응정책 지원을 위해 국제표준규격에 부합하는 기후변화 시나리오를 산출하기 위한 프레임워크 체계를 구축하였다. 이를 통해 시나리오 자료 산출 모니터링, 효율적인 대용량 자료 DB 관리, 3차원 표출 시스템을 운영 중이며, 본보고서는 2019년에 개선된 사항을 기술하였다.

1. 시나리오 산출 모니터링 시스템(BANMOS) 개선

16년부터 구축되어 운영 중인 산출된 시나리오 모니터링 시스템 BANMOS (Backup and Monitoring System)의 2019년 개선된 사항은 다음과 같다.

1) 모니터링 변수가 대폭 증가하였다. 기존의 방법은 사용자가 원하는 변수 리스트만 선택적으로 구성하는 방법이었으나, 한·영 협력기반으로 시나리오 실험을 공동적으로 수행하고 있기 때문에 모니터링 변수의 일관화의 필요성이 요구되었다. 이에 따라, 81개의 대기 성분모델의 월 또는 연 자료를 시계열로 모니터링 할 수 있도록 시스템을 개선하였다. 변수의 추가뿐만 아니라, 동일 변수에 대해서는 남반구, 북반구, 적도 등 다양한 영역으로 구분하여 변수의 특성에 따라 전지구 평균 또는 전지구 총합 자료를 확인할 수 있도록 분류를 세분화하였다(Fig. 2.1.1).

2) 업데이트 되는 모니터링 정보를 표출하는 시간을 효율적으로 개선하였다. 이전 버전에서는 모니터링 시스템이 수행되는 매 단계마다 모든 결과 자료를 로드하는 알고리즘을 가지고 있었기 때문에 모델의 적분 기간이 길어지면 시스템 수행 시간이 상당히 길어지는 문제가 있었다. 이 문제를 해결하고자 wiki_name+“_check_file_path.txt” 파일을 생성시켜서 모니터링 시스템을 표출하는 과정을 효율적으로 개선하였다. n번째 모니터링 자료 표출 이후에는 읽어들인 파일들의 이름이 기록되어, 다음 수행에서는 이 파일들을 제외한 자료만을 읽어들여 n+1번째의 작업시간을 현저히 단축시켰다.

3) 최종적으로 시계열로 표출되는 자료에 대해서는 모델과 변수별로 텍스트 파일을

생성하는데, 이 파일에는 모델 시간에 따른 시계열 값이 저장되어 있다. 이전 버전의 시스템에서는 시계열을 그리기 위한 산출물이 NetCDF 파일(.nc)이였고, 이번 개선을 통해 텍스트 파일(.txt)로 전환되었다. 이 텍스트 파일들은 자동으로 백업이 되지는 않는다. 그러나 간혹 발생할 수 있는 시스템 오류를 방지하기 위해 정상 수행된 이후 텍스트 파일 백업을 권장한다.

슈퍼컴퓨터 로그인 서버에서 BANMOS 소스는 다음 명령어를 통해 다운로드가 가능하다.

git clone http://red.kma.go.kr:1080/sainy/banmos.git

또한, 소스 코드 업데이트는 다음 명령어를 사용한다.

/banmos/> git pull

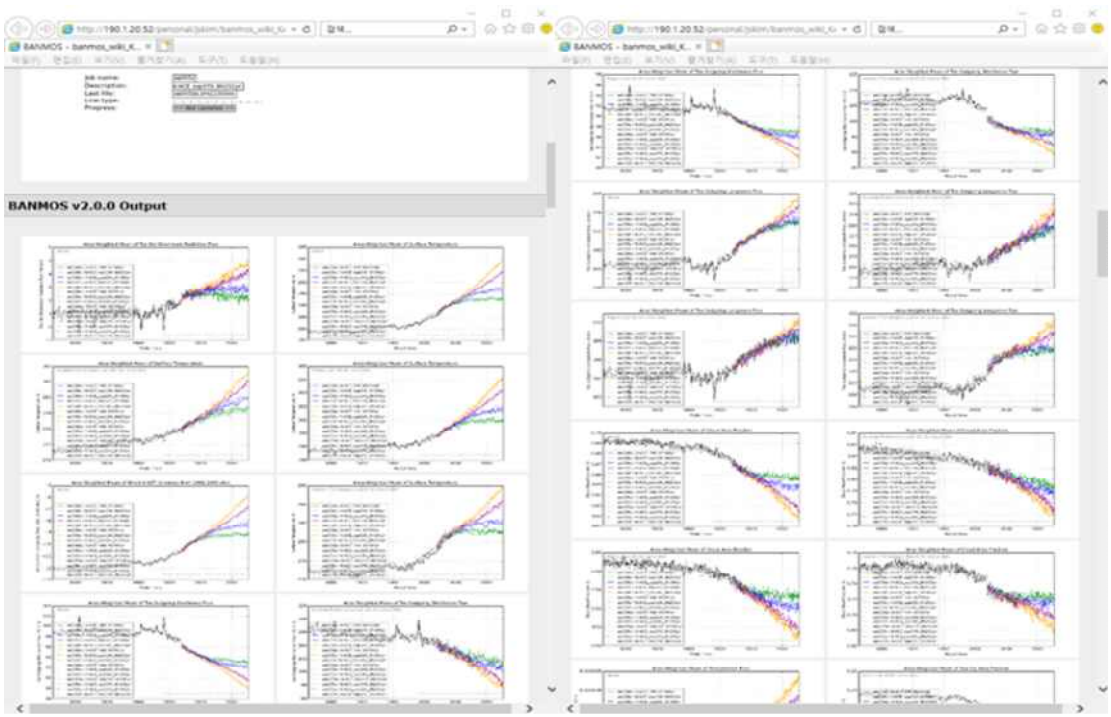


Fig. 2.1.1. BANMOS monitoring system of scenario production framework for CMIP6 simulation with K-ACE model.

2. 기후모델자료 DB 개선

(1) 사용자 권한 기능 세분화

CMIP6기후변화 시나리오 자료는 이전의 CMIP5에 비해 100배 이상의 대용량 자료이고, 산출목적에 따라 실험의 종류가 다양하기 때문에 산출자료의 체계적인 관리가 필요하다. 이에 따라, 자료산출과 활용과 관련된 사용자 구성을 토대로 사용자 권한을 세분화하여 자료에 대한 보안 기능을 강화하였다. 사용자는 최상위관리자(root)와 일반관리자(admin) 및 일반사용자(user)로 구분하였으며, 최상위관리자는 모든 사용자에게 권한을 부여하거나 삭제할 수 있다. 일반관리자는 최상위관리자와 마찬가지로 일반사용자에 대한 추가, 변경, 비밀번호 설정을 할 수 있으며, Authkey의 생성, 제거, 추가 및 변경에 대한 권한을 갖도록 개선하였다. 시스템에 대한 관리 기능은 최상위관리자, 세부 파일에 대한 권한은 최상위관리자와 파일을 생성한 소유자(Owner)만이 모든 권한을 갖고, 나머지 사용자는 제한을 함으로써 산출자료의 보안기능을 강화하였다.

(2) 세부검색 기능 강화

산출되는 자료가 대용량, 다원화됨에 따라 자료의 효율적 활용을 위해 강력한 검색기능의 필요성이 증가하였다. 검색 수행 시 단순하게 검색어만 입력하거나 특정 속성만을 검색하는 등의 여러 가지 검색 기능들이 있다/ 이를 구현하기 위해 기본적으로 파일 속성에 대한 구분정보가 필요하다. 파일 속성은 파일이 갖는 기본 속성과 사용자 정의 속성으로 구분할 수 있다. 사용자 정의 속성은 기본 속성을 보완하기 위해 사용자가 임의로 추가/삭제 하는 정보를 가리키며, KEY:VALUE 형태로 이루어진다. 사용자 정의 속성을 설정하기 위한 명령어의 형태는 아래와 같다.

- 사용자 정의 속성 설정 : attrkey add [속성 이름] [데이터 형식] [용도 기술]
  (사용예시) attrkey add exp_date date “Date when experiment started
- 사용자 정의 속성을 파일에 삽입 : attr [파일 경로] [속성 이름] [속성 값]
  (사용예시) attr exp/ens/var exp_date 2019

사용자 정의 속성에 사용할 데이터 형식은 “string(문자열), number(숫자), date(날짜)”로 분류할 수 있고, 이 내용을 특정 파일에 추가/삭제를 할 수 있다. 이러한 속성정보는 CMOR과정을 거친 시나리오 산출자료에 저장된다. 이러한 정보를 바탕으로 세부 검색 기능을 강화하였으며 대용량 자료로부터 원하는 자료의 효율적인 추출이 가능하도록 개선하였다.

Table 2.1.1. Specification of a file properties

분류	속성 이름	설명
기본 속성	name	이름
	id	현 파일의 고유 인식자
	parent	상위 디렉터리 고유 인식자
	ftype	파일 타입 (dir or file)
	size	크기
	created	생성 날짜
	created-by	디렉터리 혹은 파일을 업로드 혹은 생성한 사용자
	file-header	파일 헤더
	computed-attributes.tags	파일 업로드 혹은 생성 시 모든 상위 디렉터리들을 기록한 속성
사용자 정의 속성	user-attributes	Key:Value 형태를 가지며, 기본 속성 이외에 사용자가 임의로 추가/삭제를 할 수 있는 속성.

(3) 검색어 형태 정의 및 검색 방법

검색어 형태는 파일 속성과 검색어는 쌍점(“:”)으로 구분 짓도록 구성되어 있으며, Table 2.1.2에 제시한 세 가지 형태의 정보를 가질 수 있다. 이 정보는 이전의 버전보다 개선된 고급 검색에 필요한 정보이다. 검색어의 예시는 다음과 같다.

- find ocean
  - name, file-header, user-attributes, computed-attributes의 속성에서 'ocean' 검색
- find name:ocean
  - 특정 속성(name)에서만 'ocean' 검색
- find user-attribues.exp-id:ocean
  - 사용자 지정 속성 중 exp-id 항목에서만 'ocean' 검색

특히 개선된 버전은 특수한 연산자를 검색명령어에 포함함으로써 대용량 자료의 효율적인 검색을 가능하게 한다. 특수연산자는 검색어 앞에 삽입하며 그 기능은 다음과 같다.

- “@” : 일치

  기본 검색은 문장 혹은 단어에서 검색어가 포함된 모든 경우를 검색결과로 반환한다. “@”는 검색자가 원하는 검색어와 정확히 일치하는 결과만을 검색할 때 사용한다.

- “#” : 정규식

  다양한 정보를 검색할 때 검색어에 규칙이나 패턴이 있으면 사용한다. 검색을 단순화할 수 있다.

  find name calmet0 calmet1 .... calmet9 → **find name:#calmet[0-9]**

- 비교 및 범위

  검색어 앞에 비교(<, >, <=, >=) 연산자 혹은 중간에 범위(~) 연산자를 삽입한다. 이는 파일 속성이 숫자, 날짜 데이터 형식일 경우에 사용할 수 있다.

Table 2.1.2. Definition of keyword types

형태	설명
value	검색어(value)만 있는 형태. 파일 속성 중 “name, file-header, user-attributes, computed-attributes”에 정합
field:value	기본 파일 속성(field)과 검색어(value)가 있는 형태. 특정 속성에 대해서만 검색어 정합
parent-field.field:value	다중 속성(parent-field.field)와 검색어(value)가 있는 형태 다중 속성으로는 computed-attributes, 사용자 정의 속성(user-attribues) 두 가지가 있음. computed-attributes는 “tags”라는 하부 속성만을 가짐. 사용자 정의 속성은 임의 생성이 가능하므로 여러 개의 하부 속성을 가질 수 있음.

3. 시나리오 표출을 위한 가시화 시스템(Viz-ESM) 개선

(1) 신규 시나리오에 대한 Viz-ESM 표출

기후변화 시나리오 표출시스템(VisualiZation of Earth System Model; Viz-ESM)은 기후변화에 대하여 교육, 홍보, 연구용 자료로 활용하기 위하여 개발된 표출시스템이다. 2018년 1월부터 현재까지 국립기상 과학원 홈페이지(http://www.nims.go.kr:8080)을 통해 서비스되고 있다. 이번 연도에는 IPCC AR6 기반의 새로운 시나리오 산출에 따라, 기후모델 자료 DB와 연계된 표출 환경을 구축하고 신규자료에 대해 변환 및 출력하였다.

기후변화 시나리오 표출 시스템(Viz-ESM)은 시나리오 포맷 변환과 자료 전송을 담당하는 서버와 전송된 자료를 웹브라우저에 표출하는 클라이언트 모듈로 구성되었으며 기본 구조는 아래 Fig. 2.1.2과 같다. CMIP5/RCP8.5에 신규 시나리오 2종(K-ACE, UKESM1 모델별 SSP5-8.5, SSP1-2.6)을 추가하여 총 3개 시나리오를 사용하며, 대기변수 4종(바람, 기온, 강수, 해빙)에 대한 선택적 표출이 가능하다. 자료전송 서버는 변수, 시간, 고도별 모델 자료를 수집하고, 수집된 자료를 API 형태로 제공하여 처리한다. 자료표출 클라이언트는 자료전송 서버로부터 자료를 탐색하고 수신된 자료를 렌더링 후 표출한다. 내삽 및 맵 프로젝션을 거쳐 브라우저에 표출한다. 그래픽 가속 라이브러리는 표출성능이 필요한 자료에 선택적으로 사용한다.

신규 시나리오에 대한 자료변환 스크립트는 Python (버전3.7.3) 언어를 베이스로 하며, 지구과학 데이터 분석 및 가시화 모듈인 Iris (버전2.2.1)와 다차원 수치계산용 모듈인 Numpy (버전1.16.3)를 이용하였다. 표출시스템 자료포맷인 JSON 변환은 모델 아웃풋 포

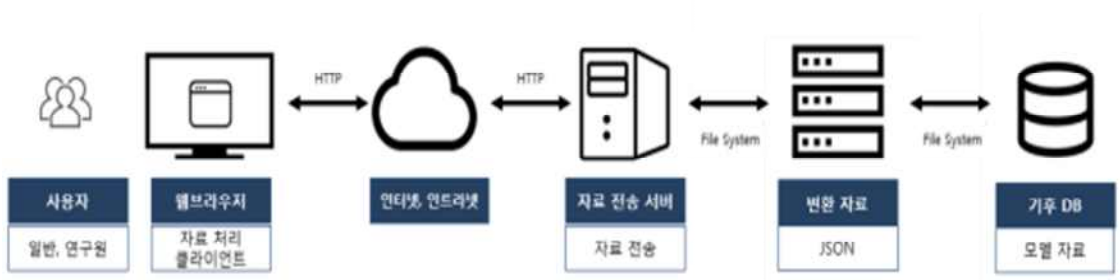


Fig. 2.1.2. Flowchart of Viz-ESM data processing

맷 2종(PP, NetCDF)에 대해 진행하였다. 변환 스크립트는 향후 반복 처리될 수 있는 변수별 데이터 구성, 공통 처리기능, 변환처리 실행, 표출 변수 선택 등의 기능을 함수화하여 재사용할 수 있도록 구성했다. 또한 자료처리 과정을 Thread 방식이 아닌 프로세스 관리 방식을 사용함으로써, GIL (Global Interpreter Lock)을 피하고, CPU를 병렬로 사용할 수 있어 변환 소요시간 단축을 기대할 수 있게 되었다.

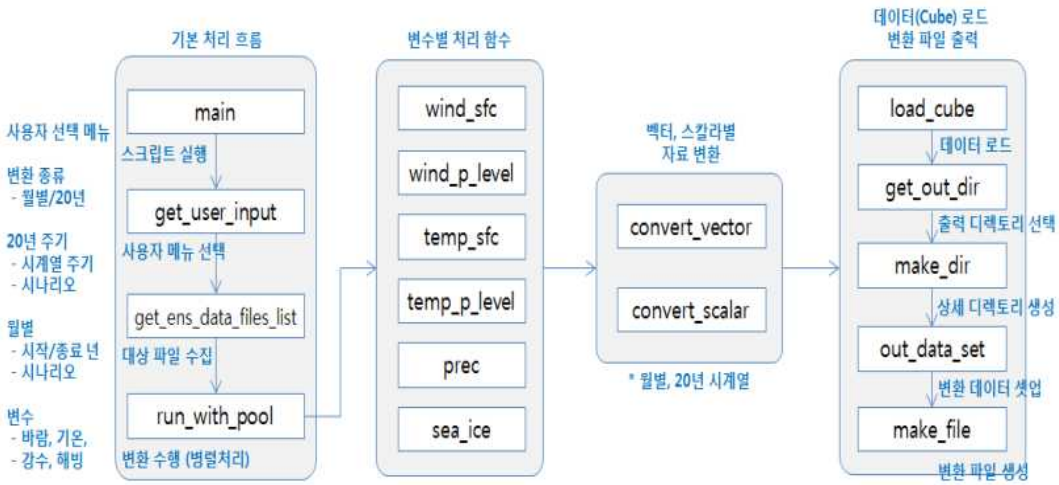


Fig. 2.1.3. Flowchart of post-processing for JSON format

(2) 인터페이스 개선 - 변수별 출력형태 선택 및 표출 개선

기존에 서비스 되고 있던 CMIP5/RCP8.5 시나리오와 신규로 도입된 CMIP6/SSP5-8.5 및 SSP1-2.6 등 3종의 시나리오를 메뉴에서 선택 표출이 가능하도록 인터페이스의 개선이 이뤄졌다. 각 변수별 주요 출력형태 및 기능은 다음과 같다.

- 주요 출력형태: 스트림라인, 쉐이딩, 등치선
- 고도별 출력값 표출
- 맵 프로젝션 표출 및 회전, 확대, 축소
- 시간 흐름에 따른 변수별 출력 재생

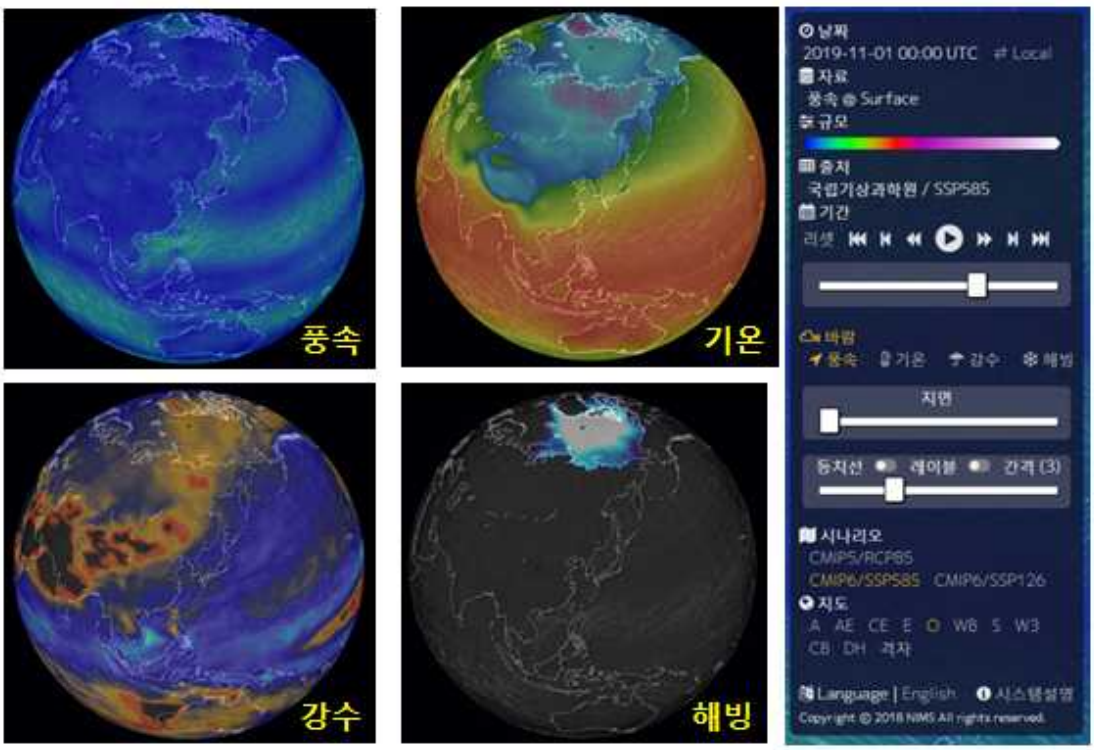


Fig. 2.1.4. Manual interface for variables and scenarios selection in Viz-ESM.

또한, 시계열 자료의 표출을 위해 클라이언트 화면에서 클릭한 지점의 위·경도 좌표와 현재 표출 화면의 조회 조건을 서버로 전송하며, 서버에서는 해당 조건의 기후 데이터를 불러와서 해당 좌표에 해당하는 변수에 대하여 내삽을 수행하고 생성된 시계열 자료를 클라이언트에 전송한다.

본 연구에서는 신규 시나리오 2종에 대한 자료변환을 수행하고, 기존 시나리오를 포함 총 3종의 시나리오에 대한 선택적 가시화 과정을 진행하였다. 자료변환 과정은 모델의 PP 또는 NetCDF 파일에 대해 표출시스템에 적합한 자료 형태인 JSON으로 변환하는 스크립트를 생성하였으며 이를 위해 Python iris 모듈을 사용하였다. 개선된 표출시스템은 기존 시나리오 외 신규 2종의 시나리오를 추가하여 변수별로 출력할 수 있으며, 임의 지점의 기간별 평균 시계열 표출 기능 또한 가능하도록 하였다.

제 2 절 기후변화 예측모델을 활용한 신규 미래전망정보 산출

1. 국제표준 기반의 기후변화 시나리오 산출

국립기상과학원은 IPCC 제6차 평가보고서 대응을 위해 자체 개발한 K-ACE 기후예측모델과 한·영 공동협력을 통해 운영 중인 UKESM1을 활용하여 국제 표준 기후변화 시나리오 산출하고 있다. 이번 연도에는 K-ACE 기반의 미래 2종(SSP2-4.5, SSP3-7.0) 시나리오와 UKESM1 기반의 3종(Hindcast, SSP1-2.6, SSP5-8.5) 시나리오를 산출하였다. 또한, CMIP6에서 시나리오 산출 모델의 특성 분석을 위해 요구되는 엔트리카드 DECK (Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima) 실험용 규준실험(Pre-Industrial 실험)과 CO_2 실험(1pctCO2/yr, Abrupt 4xCO2) 결과를 이용하여 CO_2 강제력에 따른 기후민감도 및 기후피드백과 연관된 요소들을 분석하였다.

(1) K-ACE 지구시스템 모델을 활용한 시나리오 산출

Fig. 2.2.1은 기후변화에 대한 완화·적응 정책과 더불어 경제, 사회발전 방향 등의 영향요소가 중간단계로 이루어지는 사회경제 구조인 SSP2-4.5와 기후변화 대응을 위한 완화·적응 정책이 소극적이며, 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회경제 구조인 SSP3-7.0 시나리오의 온실가스 경로를 나타낸 그림이다. 기후변화 정책과 경제사회 발전방향에 따라 온실가스 배출의 증감을 확인할 수 있다.

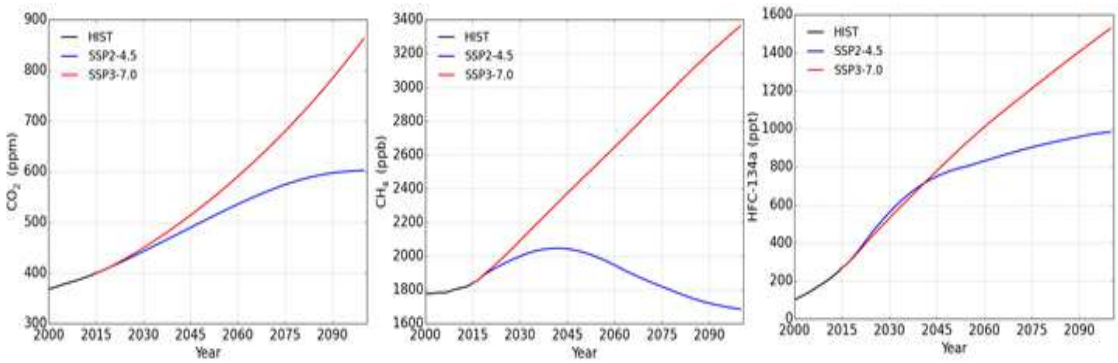


Fig. 2.2.1. Future GHG emissions according to social and economic scenarios.

Fig. 2.2.2는 지상 기온과 강수 변수에 대해서 두 SSP시나리오의 1850~1900년 기간에 대한 아노말리 시계열을 나타낸 것이다. Fig. 2.2.3은 현재 기후(1995~2014년) 대비 먼 미래(2081~2100년)의 지상 기온과 강수의 공간 분포를 나타낸 것이다. 2100년에는 현재 기후대비 약 2.5도/3.7도 (SSP2-4.5/SSP3-7.0) 상승할 것으로 전망되었고, 해양보다 육지에서(특히 고위도 지역) 기온 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 전지구 강수도 증가 경향이 나타났고, 지역적으로는 ITCZ (Intertropical Convergence Zone) 강수 밴드 지역에서 강수증가 경향이 뚜렷하게 나타났고, 동아시아 몬순 지역 및 북태평양에서도 강수증가 경향이 나타났다.

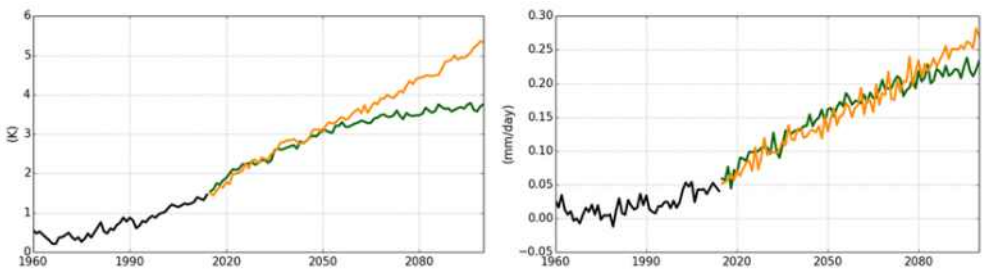


Fig. 2.2.2. Anomaly time series of future global average near-surface temperatures (left) and precipitation (right) from 1850-1900. The green line denotes SSP2-4.5 and the orange line denotes SSP3-7.0 scenario.

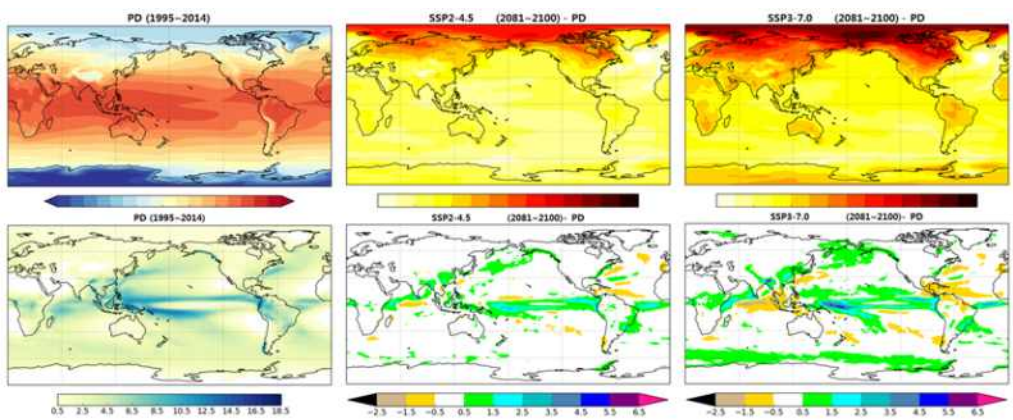


Fig. 2.2.3. The outlook for future (2081-2100) near-surface temperature (top) and precipitation (bottom) relative to the present climate (left, 1995-2014). The middle panels are SSP2-4.5 scenario and the right panels are SSP3-7.0 scenario.

(2) UKESM1 지구시스템 모델을 활용한 시나리오 산출

산출하는 전지구 기후변화 시나리오의 다원화를 위해 한·영 협력기반으로 영국기상청 지구시스템모델인 UKESM1을 이용한 시나리오를 산출하고 분석하였다. 산출한 시나리오는 총 3건으로 과거 기후시나리오 1건, 미래 기후변화 시나리오 2건이다. 과거 기후의 기간은 1850년부터 2014년까지 총 165년이며 미래 기간은 2015년부터 2100년까지 총 86년이다. 미래 기후변화 시나리오는 SSP1-2.6과 SSP5-8.5로 각각 재생에너지 기술의 발달로 화석연료의 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속 가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정한 시나리오와 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두고 있으며 화석연료의 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정한 시나리오이다. 전지구적으로 SSP1-2.6은 2060년 이후 기온 증가 완화 경향이 나타났으나, SSP5-8.5의 경

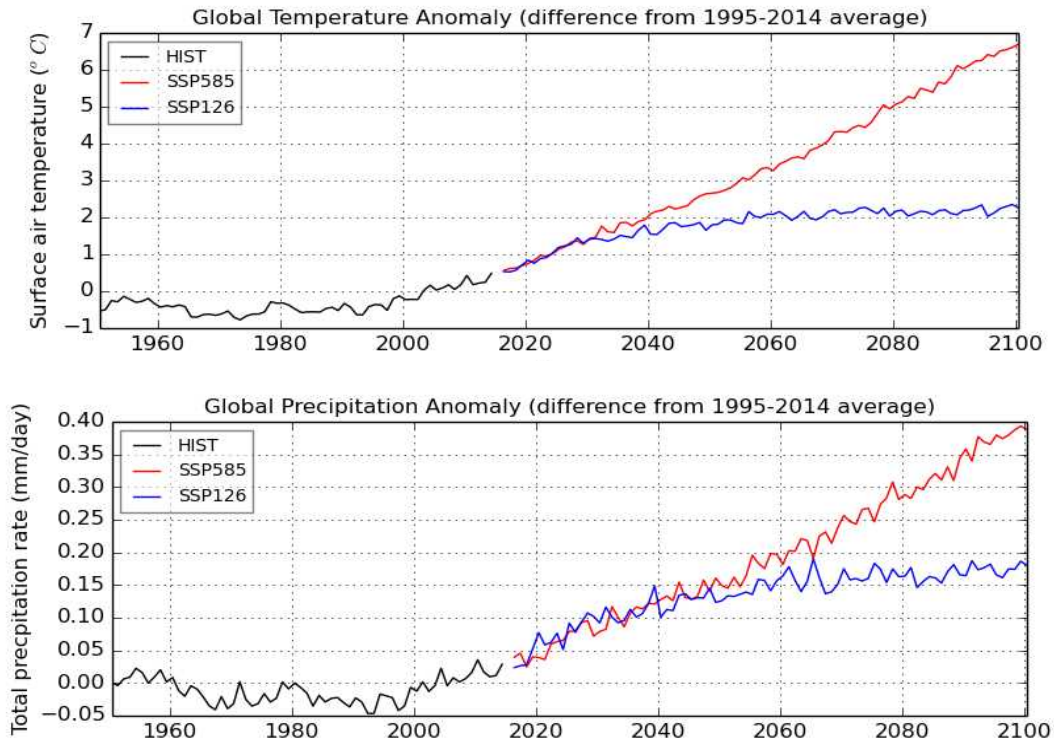


Fig. 2.2.4. Temporal evolution of global mean temperature (upper) and precipitation (bottom) anomaly for the historical and future climate scenarios.

우 지속적으로 증가하였다(Fig. 2.2.4). 또한, SSP1-2.6 시나리오에서 미래 2081년부터 2100년까지 평균기온은 현재 기후(1995년부터 2014년까지 평균) 대비 약 2.2 ℃ 상승할 것으로, SSP5-8.5 시나리오에서는 약 6.0 ℃가 상승할 것으로 전망되었다(Fig. 2.2.4). 동아시아 지역은 전지구 평균 결과와 유사하게 SSP1-2.6 시나리오에서 약 2.1 ℃, SSP5-8.5 시나리오에서 약 5.9 ℃의 기온상승이 나타났다. 지역적으로 해양보다는 육지에서 기온 증가 경향이 뚜렷하게 나타났으며 이러한 특징은 특히 고위도 지역에서 두드러지게 나타났다. 전지구 강수 아노말리 시계열은 기온과 유사한 증가 경향이 나타났다. 기온 증가에 따른 대기 중 수증기량 증가로 현재 기후 대비 SSP1-2.6 시나리오에서는 약 0.17 mm/day, SSP5-8.5 시나리오의 경우 약 0.35 mm/day 증가가 전망되었다(Fig. 2.2.5). 동아시아 지역의 경우, SSP1-2.6 시나리오에서 약 0.35 mm/day, SSP5-8.5에서 약 0.56 mm/day 증가하였으며, 이는 전지구 평균에 비해 큰 증가 경향이다. 지역적으로는 두 시나리오 모두 ITCZ 강수 밴드 지역에서 강수 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, SSP5-8.5 시나리오에서는 인도네시아와 호주 주변으로 강수가 뚜렷하게 감소하고 동태평양지역에서는 강수가 증가하는 등 엘니뇨 시기와 유사한 패턴이 나타났다.

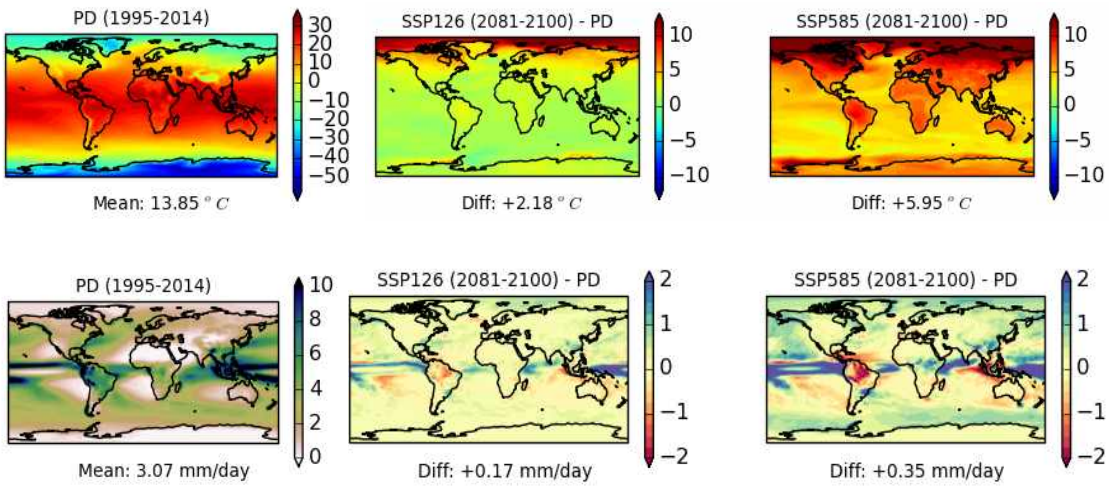


Fig. 2.2.5. Surface air temperature (upper panel) and precipitation (bottom panel) distribution of historical (left) and difference of two future climate scenarios for 20-year period 2081-2100 relative to the 1995-2014 base period.

(3) 기후민감도와 피드백 분석

CMIP에 처음으로 제출되는 국립기상과학원 지구시스템모델 K-ACE의 외부 강제력에 대한 반응을 정량화하고 비교·분석하기 위해 평형기후민감도(Equilibrium Climate Sensitivity : ECS)와 점증기후반응(Transient Climate Response : TCR)을 계산하였고, K-ACE와 CMIP5앙상블 및 CMIP6 모델 간 비교를 수행하였다. K-ACE의 ECS와 TCR은 각각 4.83 K, 2.07 K로 각각 계산되었다. 이는 CMIP5 앙상블 범위(TCR: 1.1~2.6 K, ECS: 2.2~4.7 K)보다 다소 높은 것으로 확인되었으며, CMIP6에 참여한 모델들('19년 11월 기준으로 ESGF에 등록된 3개의 모델)의 값(TCR: 1.6~2.9 K, ECS: 4.3~5.5 K)과 비교했을 때에는 약간 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 전반적으로 CMIP6에 참여한 모델들은 CMIP5 보다 기후민감도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

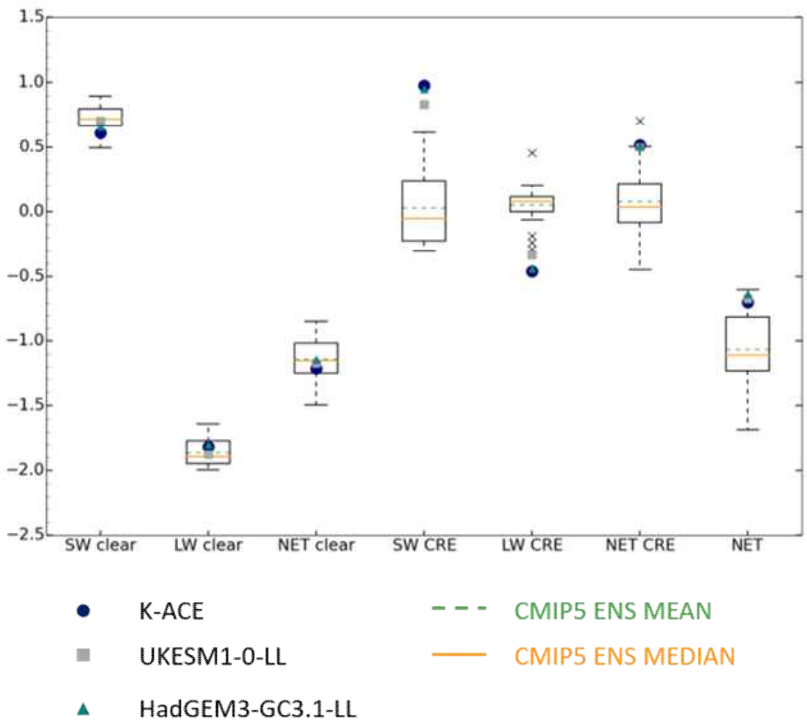


Fig. 2.2.6. Global mean radiative feedback components derived from the Abrupt 4xCO2 and PI experiments for K-ACE, UKESM1-0-LL, and HadGEM3-GC3.1-LL and compared to the CMIP5 multi-model ensemble mean.

Fig. 2.2.6은 구름의 유무에 따른 복사피드백을 SW, LW, NET으로 구분한 K-ACE, HadGEM3-GC3.1, UKESM1의 계산결과를 CMIP5 모델들과 비교한 그림이다. 각 모델 간 복사피드백의 값은 성분별로 유사하게 나타났고, clear sky경우에는 CMIP5 모델들의 75% 범위 안에 포함되었다. 하지만, Cloud Radiative Effect (CRE)의 경우에는, 모든 복사성분에서 CMIP5 모델범위를 벗어난 결과를 보였다. 선행연구 결과(Senior et al. 2012; Andrews et al., 2019)들을 바탕으로 원인을 분석해 본 결과, 상·하층운의 모의운량 변화가 피드백에 영향을 미치는 것으로 파악하였고, CMIP5 대비 지구시스템 모델의 개선(역학코어, 연직 해상도, 구름모수화 스킴 등)요소들의 영향도 있는 것으로 파악하였다. 이와 관련하여 같은 HadGEM 계열인 3개의 모델의 복사피드백을 육지와 해양으로 구분하여 특성을 분석하였다(Fig. 2.2.7). 해양에서 복사피드백은 육지에서보다 민감하게 나타났으며, 3개의 모델 간 큰 차이는 없었다. 하지만, 육지에서는 K-ACE의 복사피드백이 다른 2개 모델보다 크게 나타났으며, 이는 모의에 사용한 식생강제력의 차이로부터 유도된 지표 캐노피 알베도의 차이에 따른 것으로 보인다(Andrews et al., 2019).

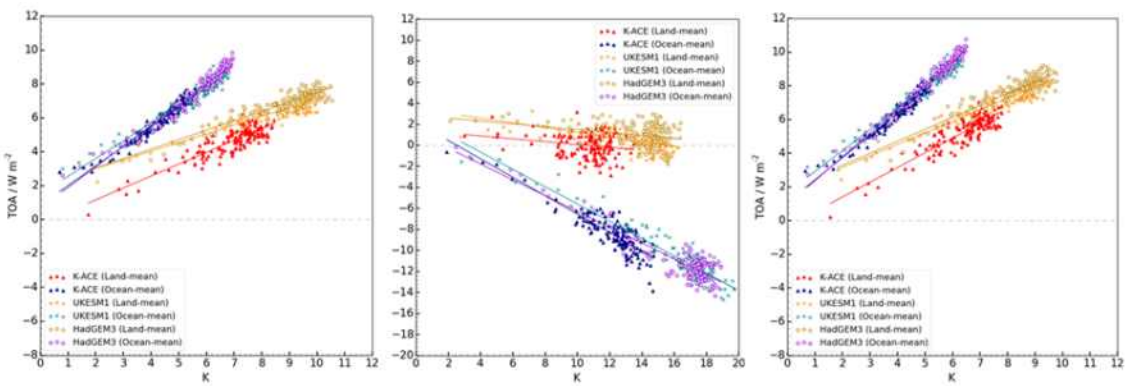


Fig. 2.2.7. Global mean radiative feedback components derived from the Abrupt 4xCO2 and PI experiments for K-ACE, UKESM1-0-LL, and HadGEM3-GC3.1-LL and compared to the CMIP5 multi-model ensemble mean.

2. 신 기후체제 대응을 위한 미래전망

국립기상과학원은 날로 심각해지는 지구온난화에 대한 과학적 이해와 대응을 위해, 국제사회는 IPCC 제6차 평가보고서 발간과 연계되어 신규 온실가스 변화 경로(SSP)를

설정하고 이를 사용한 신규 기후변화 시나리오를 산출하였으며, 이를 토대로 전지구 미래 기후변화 정보를 분석하여 「전지구 기후변화 전망보고서」를 발간하였다. 본 절에서는 「전지구 기후변화 전망보고서」의 내용을 소개하고, 국제 기후변화 이슈 중 하나인 「지구온난화 1.5도 특별보고서」에 대응의 일환으로 1.5℃, 2℃ 상승에 따른 동아시아 기후변화를 알아보고자 하였다. 이를 통해, 신(新)기후 체제에 따른 체계적이고 과학적인 미래전망정보를 제공하고, 향후 기후변화적응과 관련된 다양한 정책 및 연구들에 참고자료로 활용되기를 희망한다.

(1) 신규 시나리오 기반의 「전지구 기후변화 전망보고서」 발간

2019년에 발간한 「전지구 기후변화 전망보고서」는 신규 온실가스 경로 4종 중에서 온실가스 감축이 적정하게 실현된 경우(SSP1-2.6)와 온실가스 배출이 현재와 같이 지속되는 경우(SSP5-8.5)의 두 가지 경로에 대한 미래 기후변화 전망의 분석결과를 담고 있다. 미래전망의 분석에 사용된 자료는 기후변화 예측모델 2종(K-ACE, UKESM1)로 산출한 총 6개의 앙상블(모델 당 앙상블 3개)의 평균값이며, 분석을 위해 AR6의 구분 기준을 적용하여 현재기후(1950～2014년)와 미래 전반기(2021～2040년), 중반기(2041～2060년), 후반기(2081～2100년)로 구분하여 분석한 정보를 전망보고서에 수록하였다.

신규 시나리오의 분석에 의하면, 21세기 전반까지는 약 0.6 ℃/10yr의 기온상승을 보이고, 21세기 중반부터는 온실가스 감축 정책에 의해서 SSP1-2.6의 경우는 기온 유지, SSP5-8.5의 경우에는 지속적인 기온 상승이 분석된다(Fig. 2.2.8). 미래 각 기간 별 전지구 평균기온은 전반기에 +1.2～1.3 ℃, 중반기에 +1.7～2.4 ℃, 후반기에 +1.9～5.2 ℃의 기온상승 폭이 분석되었고, 이는 온실가스 감축 정책 없이는 산업혁명 이전 수준 대비 전지구 평균기온 상승을 2 ℃로 제한하자는 신(新)기후 체제의 국제적 공동목표는 달성되기 어렵다는 것을 말해주는 결과이다.

21세기 말의 기온 상승폭은 육지(+2.5～6.9 ℃)가 해양(+1.6～4.3 ℃)보다 크며, 특히 북극의 기온 상승은 육지에 비해 2배 정도 클 것으로 전망된다. 또한, 주요 도시의 기온 상승은 SSP1-2.6 시나리오에서 +0.8～4.5 ℃, SSP5-8.5 시나리오에서는 +3.3～10.2℃의 기온상승폭을 보일 것으로 전망되어 온실가스 배출저감 정책이 필수적임을 시사해

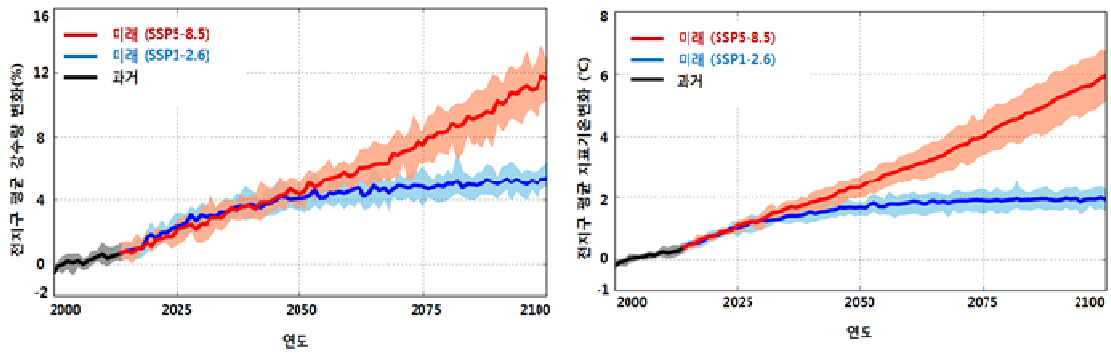


Fig. 2.2.8. The time series of the global mean surface air temperature (left, ℃) and precipitation anomalies (right, %), respectively in the period between 2000 and 2100. Each change is compared with climatological state averaged present period (1995-2014). Black, blue, and red lines are those of historical climate, SSP1-2.6, and SSP5-8.5, respectively.

주는 결과라고 볼 수 있다. 비슷하게, 강수량의 증가 폭도 지역별로 차이를 나타냈으나, 적도와 60도 이상의 북반구 고위도 지역에서 특히 증가 경향(+7~17 %)이 크게 나타났으며, 현재와 같이 온실가스 배출 경향이 지속한다면(SSP5-8.5 시나리오) 동아시아 지역의 5~9월 몬순 기간의 평균 강수량이 20 %정도 까지 크게 증가하는 것으로 전망한다.

이를 기존 IPCC AR5 (2013)에서 사용된 기존의 RCP 시나리오 결과와 비교해보면, AR6 대응을 위해 산출된 신규 시나리오에서 전지구 평균 기온과 강수량의 증가 폭에 대한 미래 전망이 더 크게 나타난다(Table 2.2.1).

Table 2.2.1. Climatology anomalies of the global mean temperature and precipitation from RCP and SSP scenarios in the period between 2081 and 2100 that compared with present climatology (1995-2014).

	기존 결과 (1971~2000년 대비 2071~2100년)	신규 결과 (1995~2014년 대비 2081~2100년)
기온	1.3~3.7 ℃ 상승	1.9~5.2 ℃ 상승
강수량	3~6 % 증가	5~10 % 증가

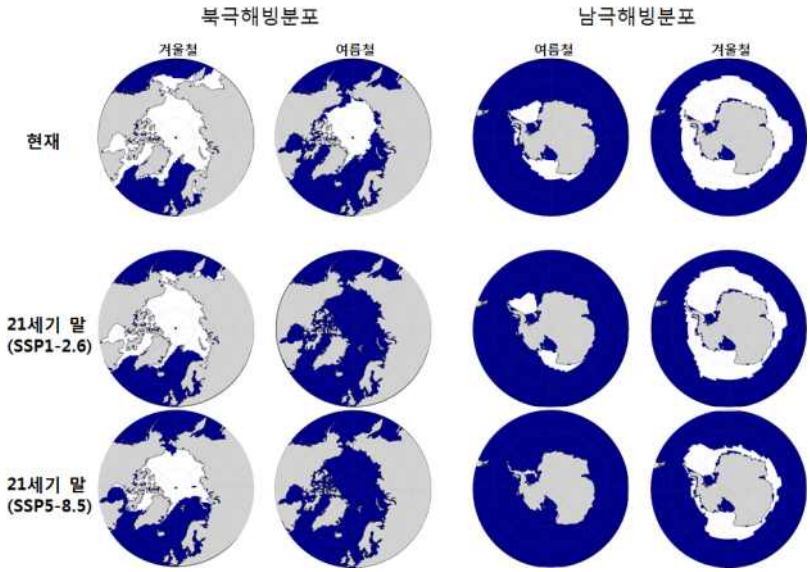


Fig. 2.2.9. Spatial distribution of sea ice extent over arctic (left) and antarctic (right) region in the period late 21th century (2081-2100) compared with present period (1995-2014).

해양의 경우, 21세기 말의 전지구 평균 해수면 온도는 현재 대비 +1.4~3.7 ℃ 상승하고, 해수면 고도는 +52~91 cm 정도 상승할 것으로 전망하였다. 또한, SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오 모두에서 21세기 말의 해빙 면적은 현재 대비 크게 감소할 것으로 전망하였으며, 온실가스 감축 없이 현재와 같이 증가추세가 지속하는 경우 21세기 말에는 북극과 남극의 여름철 해빙은 완전히 사라질 가능성이 있다는 미래전망이 분석하였다.

그뿐만 아니라, 기온과 강수에 대한 전지구 극한값도 큰 폭의 변화전망이 분석되었다. 전망보고서에서 사용한 극한기후지수는 세계기상기구의 ETCCDI (CCI/ CLIVAAR /JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices; WMO 1983)의 극한지수산출방법을 바탕으로 절댓값 기준이 아닌 퍼센타일을 기준으로 판별하는 지수를 선별하여 육지 지역에 대해서만 극한지수를 분석하였다. 미래 전지구 육지의 온난일/온난야 일수는 급격히 증가하고, 한랭일/한랭야 일수는 감소할 것으로 전망되며, 이러한 경향은 온실가스 배출이 지속되면 더욱 크게 나타날 것으로 전망된다. 21세기 말 전지구 육지 지역의 일 최고기온 및 일 최저기온에서 연중 최대/최솟값이 모두 상승할 것으로 전망되었고, 특히, SSP5-8.5 시나리오에서 21세기 말의 일 최고기온 연중 최대/최솟값은

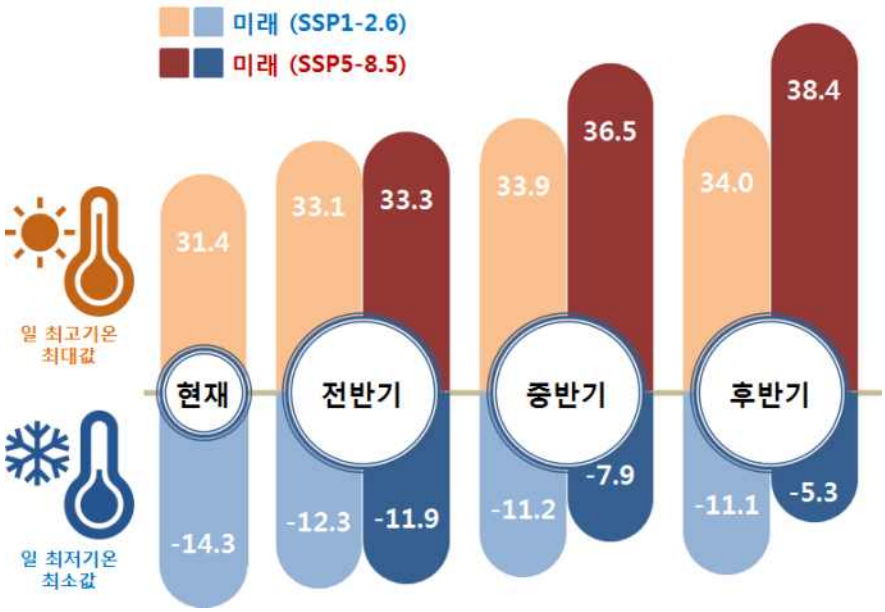


Fig. 2.2.10. The anomalies of daily max and min temperature in the period early (2021-2040), mid (2041-2060), and late (2081-2100) 21st century compared with present period (1995-2014).

현재 대비 +7.0/8.0 ℃, 일 최저기온의 연중 최대/최솟값은 현재 대비 +6.5/9.0 ℃까지 상승할 것으로 전망되었다(Fig. 2.2.10). 강수극한지수의 경우는 온실가스 감축이 없으면 5일, 상위 5 %의 극한강수일수도 1.5배 이상 증가, 최대강수량이 약 29 % 증가할 것으로 전망되었다.

(2) 1.5/2 ℃ 지구온난화 시나리오 기반의 동아시아 기후변화 분석

2015년 “유엔기후변화회의”에서 체결한 파리협정은 전지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2 ℃ 보다 상당히 낮은 수준(well below 2℃)으로 유지하고, 기온 상승을 1.5 ℃로 제한하도록 노력할 것을 규정하였다. IPCC는 ‘지구온난화 1.5도 특별 보고서’를 발간하여 목표치인 1.5 ℃에서 0.5 ℃만 더 증가할 경우 폭염, 가뭄, 극한기상 현상의 발생빈도가 증가할 것이며 생물 다양성 감소, 농업과 어업의 생산량 감소 등으로 인한 지역적인 기후 취약성이 크게 증가할 것이라고 경고하고 있다(IPCC, 2018).

Table 2.2.2. List of HAPPI AGCM used in this study. All ensemble members provide 10 years' simulation data for the HIST, Plus15, and Plus20 experiments

Model name	Horizontal resolution (longitude x latitude)	Ensemble Members
CanAM4	128 x 64	100
CAM4-2degree	144 x 96	500
MIROC5	256 x 128	100
ECHAM6-3-LR	192 x 96	100
NorESM1-HAPPI	288 x 192	125

본 연구는 1.5 ℃ 및 2 ℃ 온난화에 평형을 이루는 100개 이상의 기후 모델 앙상블 자료를 생산하여 제공하는 Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts (HAPPI) (Mitchell et al., 2017) 모델을 이용하여 신(新) 기후체제 아래 동아시아 및 우리나라 지역을 중심으로 전지구 대비 동아시아 및 우리나라 지역의 기후와 극한기상 변화를 분석하였다. 또한, 목표치인 1.5 ℃ 보다 0.5 ℃ 추가 상승에 따른 기후 취약성 분석을 수행였고, 이를 통해 신 기후 체제 대비 기후변화 적응대책 수립 지원을 위한 과학적 자료를 제공하고자 한다. 분석에 사용된 자료는 HAPPI 프로젝트의 5개 기후모델의 925개 앙상블 멤버이다(Table 2.2.2). 분석 기간은 과거 기후 시나리오의 1995~2014년과 1.5/2 ℃의 2091~2100년이며, 사용된 변수는 월 평균기온, 월 최저/최고기온, 월 강수량이다. 또한, 1.5 ℃에서 2.0 ℃ 상승에 따른 요소별 기후 취약성(C1.5와 C2.0은 현재 기후 대비 1.5/2 ℃ 시나리오의 변화량을 나타내며, 0.5 ℃ 추가 온난화에 따른 현재 기후 대비 변화량을 의미)을 보기 위해 식 2.2.1로 이용하여 추가영향(Fraction of Additional Impact; FAI)을 분석하였다.

$$FAI = \frac{C2.0 - C1.5}{C2.0} \times 100\,(\%) \qquad (2.2.1)$$

($C2.0$: 2.0시나리오 – 현재, $C1.5$: 1.5시나리오 – 현재)

현재 기후 대비 두 온난화 시나리오의 월평균 지표 기온 월최고/최저 기온 및 강수변화를 Fig. 2.2.11에 나타내었다. 동아시아 평균기온은 현재 대비 1.5/2℃에서 각 0.86 ± 0.14 ℃와 1.47 ± 0.12 ℃가 상승하여 전지구 기온상승(온난화 시나리오별 각 0.85 ± 0.06 ℃, 1.47 ± 0.05 ℃)과 비교하여 유사한 수준으로 증가하였다. 전지구에 비해 동아

시아와 우리나라에서 모델 간 편차는 컸다. 동아시아 기온의 월 최댓값의 변화는 온난화 시나리오별로 각각 0.9 ± 0.2 ℃와 1.5 ± 0.2 ℃로 전지구보다 약 7 % 더 높은 수준으로 증가하지만, 월 최소기온 변화는 전지구에 비해 약하게 증가하는 것으로 나타났다. “전지구 0.5 ℃에 대한 추가 온난화”는 동아시아 및 한반도 평균 기온을 약 0.6 ℃ 상승시켰으며, 지역적으로는 한반도, 몽골, 중국 화북 및 동북에서 뚜렷한 증가 경향을 보였다. 강수 변화는 동아시아 및 한반도 영역에 대해 20.7 ± 4.1 mm, 25 ± 6.6 mm의 증가 경향이 나타났으며, 지역적으로는 한반도, 중국 화동, 화북지역 및 일본에서 뚜렷한 증가 경향을 보였다(Fig. 2.2.11).

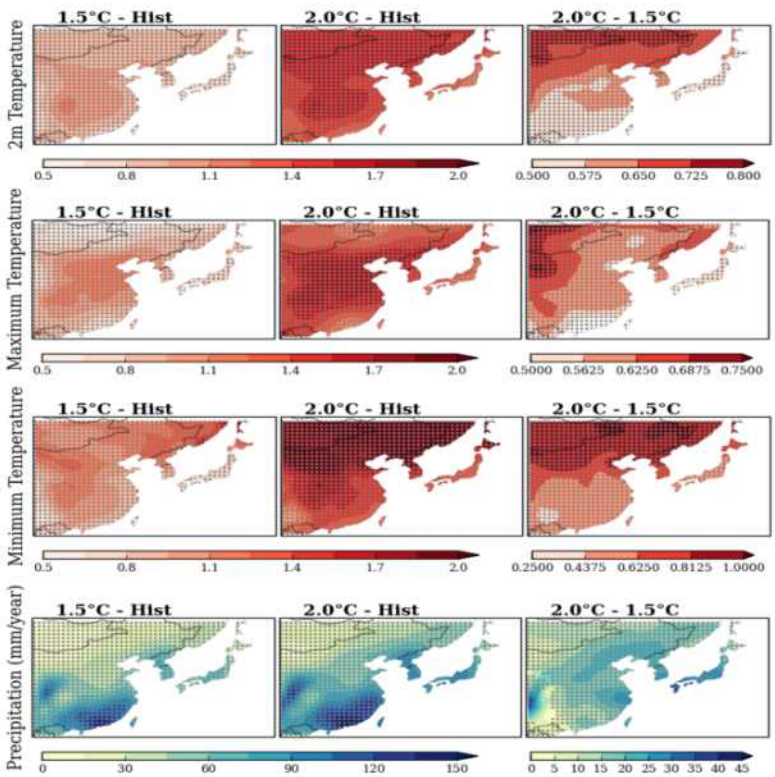


Fig. 2.2.11. Spatial distribution of the future changes of annual mean surface air temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation in HAPPI scenarios (Plus15 - Hist, Plus20 - Hist) and the impact of 0.5 increase (Plus20 - Plus15). Gray dotted grids represent the area where 80% of the used AGCMs agree with the change sign.

극한 현상기후 역시 크게 상승할 것으로 전망되기에(IPCC 2018), 지구온난화 억제 목표인 1.5 ℃를 달성하지 못하고 0.5 ℃가 추가로 상승하는 경우, 월최고(TX), 월최소(TN) 지표기온 및 연평균강수(PR) 및 각 변수들의 90퍼센타일 이상의 강도와 빈도에 대한 지역적인 취약성이 얼마나 증가하는지 알아보았다.

분석변수에 대하여 식 2.2.1을 이용하여 전지구 2℃ 온난화 시나리오 대비 1.5℃ 온난화 시나리오의 변화량 차이로 계산하였다(Fig. 2.2.12). MEAN은 평균값, 10은 10퍼센타일 이하, 90은 90퍼센타일 이상의 값을 나타낸 것이다. HAPPI 5개 모델 중 4개 이상 동일한 경향이 나타난 경우 사선을 표시하였다. 전지구 기온이 0.5 ℃ 추가 상승한다면, 동아시아 연 강수량은 억제 목표인 1.5 ℃에 비해 27.4 % 증가하는 것으로 전망되었다. 특히 90퍼센타일의 강한 강수 강도에서 21.8 %로 뚜렷한 변화를 확인할 수 있었으며, 우리나라가 동아시아에 비해 상대적으로 더 크게 증가할 것으로 나타났다. 10퍼센타일의 약한 강수 강도에 대한 취약성은 동아시아 및 우리나라 영역 모두 모델 간 동의 수준이 낮게 나타났으나, 불확실성이 높은 것으로 판단되어 따로 표시하지 않았다. 연 최고기온의 평균 강도는 39.2 % 증가하며, 90퍼센타일의 높은 기온의 강도 또한 유사한 수준인 약 40 % 수준으로 증가할 것으로 전망되었다. 월 최소기온의 평균 강도는 42.9 %로 높게 나타났으며, 10퍼센타일의 낮은 지표 기온에서의 유사한 수준의 변화를 보였다. 연강수량은 평균적인 강수의 변화는 크지 않았지만, 최대강수량의 경우 특히 크게 상승하는 경향이 나타났다. 빈도와 관련해서는 0.5 ℃ 추가 온난화가 일어나는 경우, 현

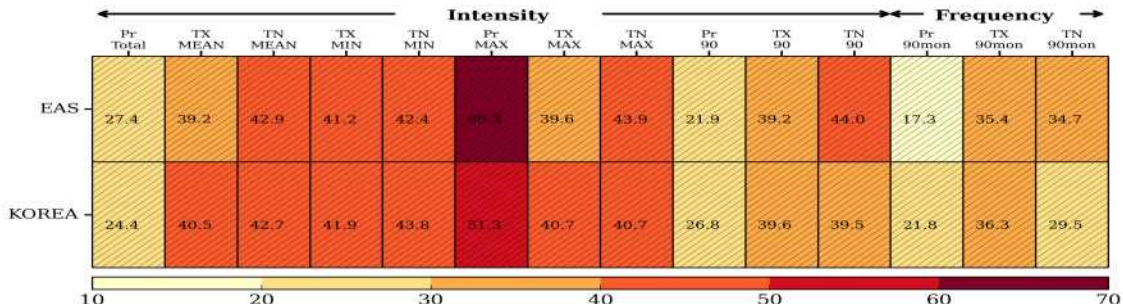


Fig. 2.2.12. Changes of extreme climate events avoided over East Asia and its sub-regions (box in figure 1) in 1.5 ℃ compared with 2.0 ℃ global warming future (unit: %). The hatched lines represent more than 80 % of AGCM agreement on the change sign.

재 기후의 90퍼센타일 수준의 높은 기온의 출현 빈도(TX90mon, TN90mon)가 약 35 % 이상 높아질 뿐만 아니라, 강한 강 (Pr 90mon)의 경우에도 동아시아에서 17.3 %, 우리나라에서는 21.8 % 출현할 확률이 높아지는 것으로 나타났다.

3. 에어로졸-대기화학 기후실험 프로젝트를 통한 과학정보 산출 확대

최근 서울의 에어로졸 고농도 사례가 빈번히 발생함에 따라 정부와 국민들의 관심이 높아지고 있다. 특히 최근에 심각하게 에어로졸 농도가 높아진 현상은 대기 정체 등 국내 기상여건의 악화 뿐 만 아니라 중국으로부터 유입된 초미세먼지 증가 때문으로 분석되고 있다. 세계보건기구(WHO)는 이러한 미세먼지의 증가는 천식, 만성기관지염 등 호흡기 질환이나 혈관에 흡수되어 뇌졸중과 같은 심장질환을 유발할 수 있으며, 세계적으로 92 % 이상이 대기오염에 영향을 받고 있다고 보고하였다. 이로 인해 해마다 600만 명 이상이 목숨을 잃고 있다고 경고하고 있다. 기후변화 측면에서도 IPCC 평가보고서에서는 인위적으로 발생한 에어로졸에 의한 전지구 차광 효과(Global Dimming)가 온실가스에 의해 야기된 지구온난화를 부분적으로 감소시킨다고 보고하고 있다. 화석연료 사용과 같은 인위적 활동으로 배출되는 에어로졸은 태양복사를 흡수 또는 산란시켜 지표에 도달하는 태양복사량을 직접적으로 감쇄시킬 뿐만 아니라, 구름응결핵으로 작용하여 구름의 물리적 특성인 구름 밝기, 강수 효율을 감소시키는 등 간접적 효과 또한 크다고 알려져 있다(Miller et al., 1998; Lau et al., 2006). 이러한 인위적 에어로졸의 직간접 효과는 지표에 도달하는 태양복사량을 감소시켜 대기 온도구조를 변화시킬 뿐만 아니라, 물 순환에 영향을 주는 등 지역적인 기후에 미치는 영향이 크다(Ramanathan et al., 2001). 하지만, 기후변화에 있어 미세먼지의 영향은 여전히 과학적 이해가 낮아 불확실성이 크게 나타나고 있어, 이에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

(1) 에어로졸-대기화학에 대한 국제프로젝트 참여

WCRP는 CMIP을 운영하여 다양한 국제 기후모델 실험과 결과를 조율하고, IPCC 평가보고서 지원을 위해 다양한 기후모델 실험 결과를 제공하고 있다. 이번 CMIP6 프

로젝트에서는 근미래강제력(에어로졸, 메탄, 오존 등)이 복사강제력에 기여하는 정도, 미래 정책에 따른 에어로졸과 대기화학성분의 변화 전망과 불확실성 이해, 에어로졸 배출에 따른 기후적 영향과 피드백 등에 대한 과학적 질문에 답을 얻기 위해 “에어로졸-대기화학(AerChemMIP)”에 대한 개별 프로젝트가 구성되었다. 국립기상과학원은 영국기상청, 뉴질랜드 기상청, 옥스퍼드대학교, 캠브리지 대학교 등의 연구그룹들과 공동으로 UKESM1모델을 활용한 AerChemMIP 프로젝트에 참여하여 국제표준에 입각한 에어로졸 화학실험을 수행하고, 동아시아 지역에서의 에어로졸-기후 영향을 분석 중이다. 관련하여 41회의 텔레컨퍼런스 회의를 진행하였고, 공동연구 논문을 작성 중이다. Fig. 2.2.13은 UKESM1을 활용한 공동 참여 실험의 개수를 나타나며, 회색으로 국립기상과학원 기후연구과에서 수행한 실험을 표시하였다. UKESM1 지구시스템모델은 대기 상태에 따른 구름응결핵 생성과정, 흡습성장, 구름반응, 침착과정 등의 물리과정이 이전의 기후모델에 비해 크게 향상되었으며, 메탄, 오존, 에어로졸, 질소순환 등이 포함된 대기화학 과정이 결합되어 있고, 성분별 화학반응을 통해 미세먼지의 질량과 수 농도를 예단할 수 있는 장점이 있다.

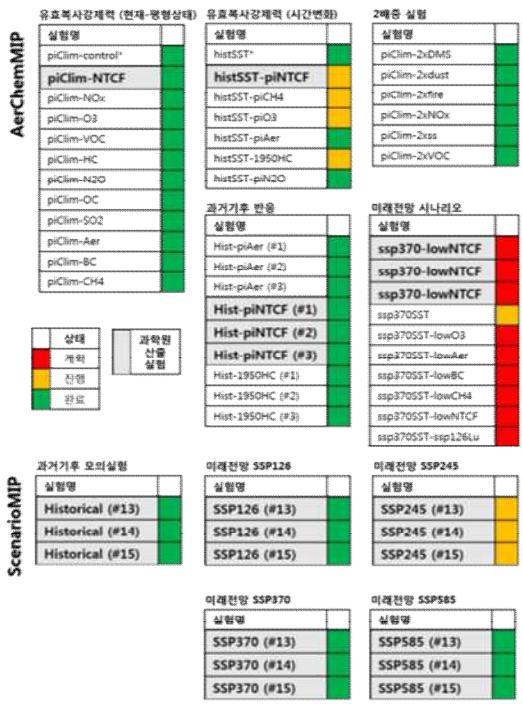


Fig. 2.2.13. Experiments for AerChemMIP and ScenarioMIP (CMIP6).

(2) 근미래강제력(Near-Term Climate Forcers)이 기후에 미치는 영향

20세기 산업화 이후로부터 급증한 에어로졸과 오존은 근미래강제력(NTCFs)으로써 방출된 이후 10년 이내의 짧은 기간 내에 기후변화에 영향을 미칠 수 있으며, 그 영향력 또한 온실가스로 인한 지구온난화를 일부 상쇄시킬 수 있을 만큼 적지 않다고 알려져 있다. 대기 중에 잔류하는 시간이 짧음에도 불구하고 직접 대기 중으로 들어오는 단·장파 복사를 흡수/산란시키거나 간접적으로 구름 생성과정에 영향을 미침으로써 지구 복사 에너지 수지를 변화시킨다(Denman et al., 2007). 이와 같은 기후강제력에 의한 복사량 변화는 지표면 온도, 구름, 강수량 변화 등과 같은 다양한 기후 반응을 통해 홍수, 가뭄(Dankers et al., 2014; Schewe et al., 2014), 대기 질(Doherty et al., 2016) 등에도 영향을 미칠 수 있으므로 그 영향을 정확히 이해하는 것은 미래의 대기 질 정책에 따라 나타날 수 있는 변화들을 예측하는 데 매우 중요하다.

본 연구에서는 강제력이 기후변화에 미치는 영향을 가늠하기 위한 지표로써 IPCC AR5에서 소개된 유효복사강제력(Effective Radiative Forcing, ERF)을 활용하여 과거 기간 동안 NTCFs이 기후에 미친 영향을 분석하였다. 또한, 에어로졸-오존 성분 간 상호작용 등을 통해 나타나는 비선형적 반응을 이해함으로써 다양한 대기 질 정책에 따라 나타날 미래의 기후변화 정도 및 현상의 예측 정확도를 향상하고자 한다.

분석 자료는 기상청 국립기상과학원에서 CMIP6-AerChemMIP 참가를 위해 UKESM1을 이용하여 산출하고 있는 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다. 과거 해수면 온도를 고정한 대기 모델에서 NTCFs 농도를 각각 산업화 이전/현재 기후로 처방한 time-slice 실험(piClim-control/piClim-NTCF)을 이용하여 ERF 및 이에 따른 대기의 빠른 적응과정을 통해 나타나는 반응(지표면 온도, 강수, 구름 등)을 분석하였다. 에어로졸과 오존 등 각 강제력 간의 비선형적 반응 분석을 위해 개별 강제력이 처방된 실험(piClim-Aer, piClim-O3) 또한 분석에 활용하였다(Table 2.2.3).

Table 2.2.3. List of the fixed sea surface temperature effective radiative forcing (ERF) experiments carried out with UKESM1, to diagnose the pre-industrial to present-day ERFs from changes in emissions, concentrations. Each simulation was 45 years in length, with analysis based on the last 30 years.

Experiment ID	CO_2	N_2O	HCs	CH4	Aerosol precursors	Trop. O_3 precursors	Land use
piClim-control	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850
piClim-NTCF	1850	1850	1850	1850	2014	2014	1850
piClim-aer	1850	1850	1850	1850	2014	1850	1850
piClim-O3	1850	1850	1850	1850	1850	2014	1850

현재 기후에서 NTCFs의 영향으로 아프리카, 중동, 인도, 동아시아 일부 지역에서 ERF이 증가하는 반면에, 그 외의 대부분 지역에서 감소하여 산업화 이전 대비 평균 약 1.12 W/m^2 정도의 감소가 나타났다. 이러한 유효복사강제력의 변화 패턴 및 크기는 단파복사변화(-1.30 W/m^2)에서 기인하였다. 장파복사(+0.18 W/m^2)의 경우, 대부분 지역에서 단파복사와 반대로 증가하는 패턴을 보이며 전체적인 ERF의 감소를 일부 상쇄시키는 역할을 하였다(Fig. 2.2.14).

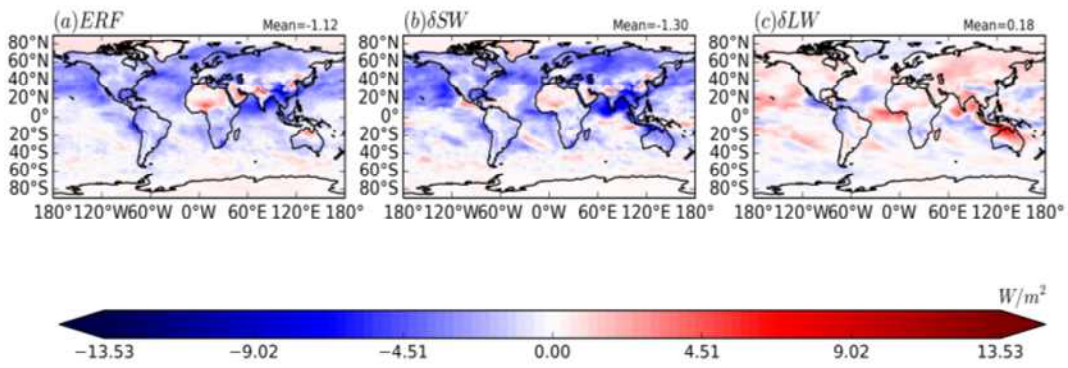


Fig. 2.2.14. Spatial distribution of Present-day(PD; Year 2014) (a) ERF, (b) SW and (c) LW relative to pre-industrial(PI; Year 1850) in W/m^2. The global-mean value is shown in the right corner.

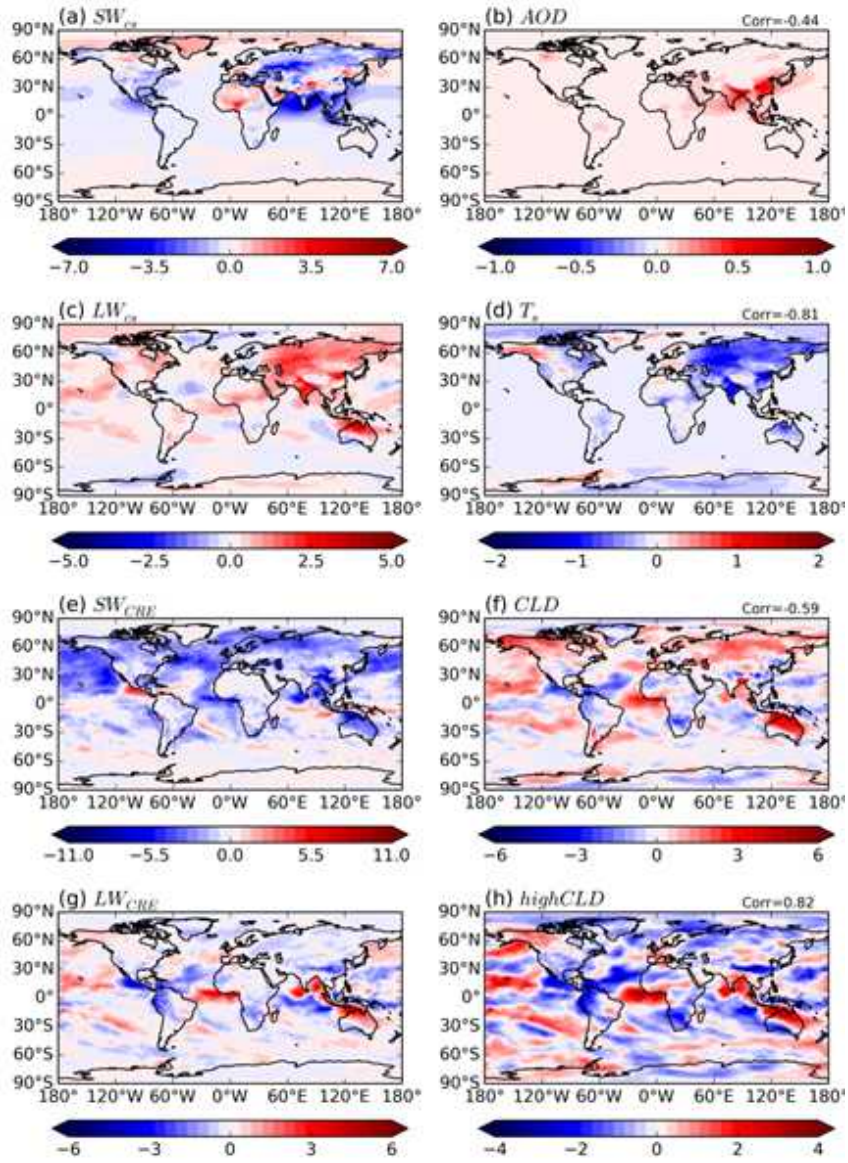


Fig. 2.2.15. Spatial distribution of PD ERF relative to PI in W/m^2 derived from calculating the mean difference in the TOA radiative fluxes, (a) SWcs, (c) LWcs, (e) SWcre, (g) LWcre, and the changes (PD-PI) in (b) AOD at 550nm, (d) surface temperature, (f) total cloud fraction, (h) high-level cloud fraction. The spatial pattern correlation between the left and right panel is shown in the right corner.

NTCFs에 의해 감소하는 ERF는 주로 단파복사(SW) 변화로부터 기인하며, 에어로졸의 직접 효과로써 대기 중으로 들어오는 태양 에너지를 직접 흡수하거나 산란시키는 효과에 의한 감소(Fig. 2.2.15(a), -0.78 W/m^2)와 간접효과로 알려진 구름-에어로졸 상호작용에 의한 구름 변화로부터 기인한 감소(Fig. 2.2.15(e), -0.53 W/m^2)가 비슷한 비율을 차지한다. 이러한 에어로졸의 직접/간접효과는 각각 에어로졸 방출량(Fig. 2.2.15(b)과 구름변화량(Fig. 2.2.15(f))과 밀접한 관련이 있다. 반면에 장파복사(LW)의 경우, 에어로졸 효과에 따른 지표면 온도 감소(Fig. 2.2.15(d))가 맑은 하늘에서 나가는 장파복사 에너지를 감소시킴(Fig. 2.2.15(c))으로써 결과적으로 NTCFs에 의한 단파복사의 변화로 인한 ERF의 감소를 상쇄시키는 방향의 증가 패턴을 보인다.

복사량 감소에 따라 전 지구에 걸친 지표면 온도 감소가 나타나지만, 남반구보다 에어로졸 방출량이 많은 북반구 지역에서 훨씬 큰 감소 크기를 보였다(Fig. 2.2.15(d)). 강수량의 경우, 에어로졸 농도가 높은 동아시아와 인도지역에서 감소/증가의 서로 대비되는 변화 패턴이 나타나는 특징이 있었다. 또한, 멕시코 서쪽 해안지역에서 강한 감소와 호주지역에서의 증가 등 비교적 복잡한 공간적 변화 패턴을 보였지만, 위도별 변화 패턴에서 볼 수 있듯이 북반구 전반에 걸친 강수량 감소가 나타났다(Fig. 2.2.16).

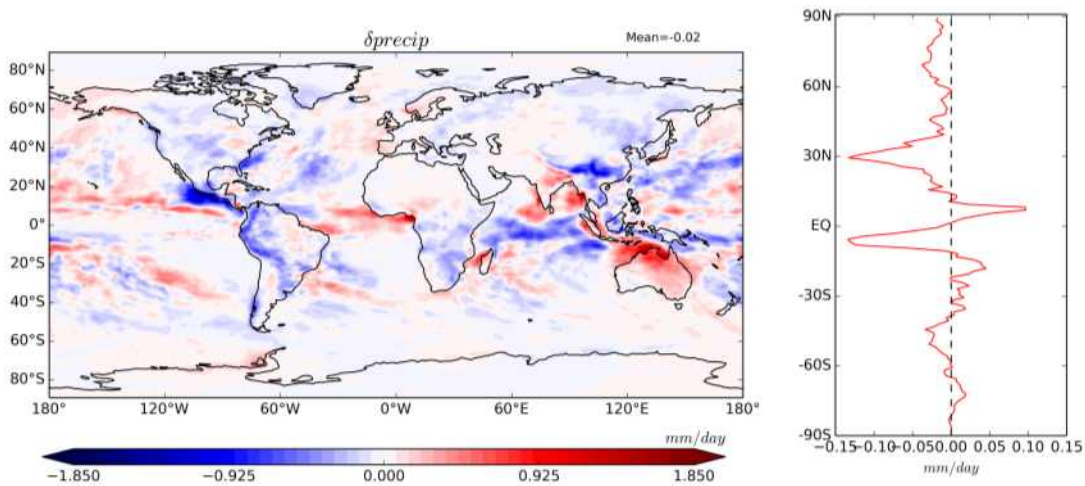


Fig. 2.2.16. Spatial and zonal distribution of PD precipitation relative to PI in mm/day.

Table 2.2.4. PD effective radiative forcings (ERFs) of climate relative to PI in W/m^2, and including and estimate of the standard error (Forster et al.,2016).

PI-to-PD Perturbation	Effective radiative forcings from 1850 to 2014(W/m^2)						
	ERF	LWcs	SWcs	LWcre	SWcre	Netcs	Netcre
Aer	-1.13 ±0.04	+0.17 ±0.02	-0.28 ±0.02	-0.02 ±0.01	-1.00 ±0.03	-0.11 ±0.02	-1.02 ±0.03
O3	+0.15 ±0.04	+0.11 ±0.02	+0.05 ±0.02	-0.10 ±0.02	+0.10 ±0.03	+0.16 ±0.03	-0.01 ±0.03
NTCF	-1.12 ±0.03	+0.24 ±0.02	-0.29 ±0.02	-0.06 ±0.02	-1.02 ±0.03	-0.04 ±0.03	-1.08 ±0.02

에어로졸과 오존 강제력 간의 비선형적 반응 분석을 위해 개별 강제력이 처방된 실험(piClim-Aer, piClim-O3)과 함께 처방된 실험(piClim-NTCF)을 비교 분석하였다(Table. 2.2.4). 에어로졸과 오존이 함께 처방된 실험에서 오존에 의한 효과가 작게 나타남을 알 수 있었으며, 이는 에어로졸의 영향으로 지면에 도달하는 단파복사량이 감소함으로써 오존의 생성을 억제하는 성분 간 비선형적 효과로부터 기인하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2.2.17).

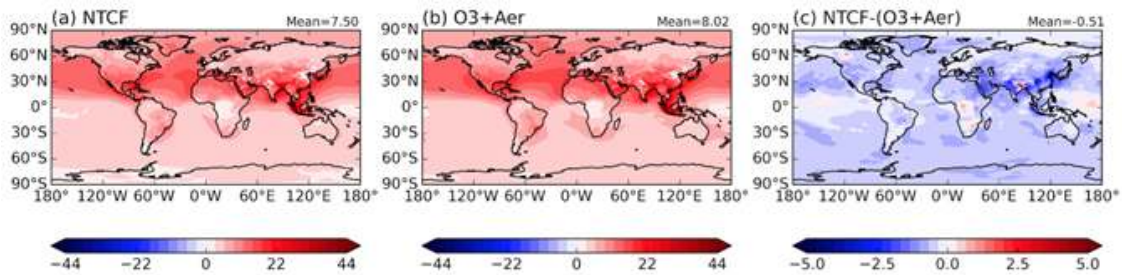


Fig. 2.2.17. The spatial distribution of the PI-to-PD change in surface O3 volume mixing ratio [ppbv] in (a) piClim-NTCF (b) the sum (piClim-Aer + piClim-O3) relative to piClim-control, (c) nonlinear interaction effects [piClim-NTCF - (piClim-Aer + piClim-O3)] between the aerosol and ozone forcing. The global average has been shown in the right corner.

제 3 절 사용자 활용도 증진을 위한 자료제공체계 개선

본 절에서는 이번 연도에 산출한 SSP 기반 신규 기후변화 전망정보의 국내 활용도 증진을 위해 국내 전문사용자 대상의 설문 조사를 통해 서비스 활용 체계 개선 방안을 도출하고자 하였다. 또한, 자체 데이터 노드 구축을 통한 CMIP6 ESGF 국제자료센터에 시나리오 등재를 추진하였다. 신규 전지구 시나리오 자료는 기상청에서 운영 중인 기후정보포털(http://www.climate.go.kr)을 통해 간단한 신청정보 입력 및 이메일 인증 후 자료를 다운로드가 가능하다.

1. 체계적인 대응을 위한 사용자 설문 조사

기후변화로 의해 미래에 일어날 수 있는 현상들을 전망하기 위해 많은 연구진은 기후변화 시나리오 자료를 활용한다. 최근 IPCC 제6차 평가보고서 대응을 위해 새로운 기후변화 시나리오가 산출됨에 따라 학계, 연구기관 등 전문사용자들에게 효과적으로 자료를 제공해 주기 위해 전문사용자들의 의견을 수렴하고자 설문 조사를 진행하였다. 설문 조사 항목은 기후변화 시나리오 요소에 관한 질문 19문항, 자료제공 방법에 대한 질문 8문항, 자료 활용 분야에 대한 질문 7문항으로 구성하였다. 기후변화 시나리오 자료를 사용하였거나 사용할 의향이 있는 전문사용자 그룹을 대상으로 2019년 3월 6일에서 3월 22일까지 15일간 온라인 설문 조사 툴을 이용하여 설문 조사를 시행하였다. 총 209명이 참여하였으며 이 중 완료 응답자는 119명, 유효 응답자는 102명이었다. 설문참여자의 활동 분야는 기상/기후 분야와 환경 분야가 대부분이었으며 정책 분야, 국토 분야, 해양 분야에 활동하는 응답자도 소수 있었다.

첫 번째 항목인 기후변화 시나리오의 요소에 대한 질문에서는 우선으로 제공해야 할 요소와 시간 간격, 시간 간격별 우선순위를 조사하였다. 사용자들이 먼저 제공받기 원하는 요소는 강수량 자료인 것으로 나타났으며, 선호하는 시간 간격은 일평균자료였다. 응답자의 80% 이상이 모든 시간 간격에서 강수량의 활용도가 가장 높다고 선정하였으며 기온 정보가 상위권에 선정되었다. 시간 간격별로 요구하는 요소들의 우선순위에는 다소 차이가 있었으며, 이를 Table 2.3.1에 요약하였다.

Table 2.3.1. Priority of utilization on climate variables according to time interval of survey respondents.

	1순위	2순위	3순위	4순위	5순위
3시간/6시간	강수량 (80.45%)	평균지상기온 (75.5%)	지상바람 (46.1%)	비습/상대습도 (39.2%)	해수면온도 (18.6%)
일평균	강수량 (84.3%)	일 최고/최저기온 (68.6%)	평균 지상기온 (63.7%)	지상바람 (25.5%)	비습/상대습도 (19.6%)
월 평균	강수량 (87.3%)	평균 지상기온 (70.6%)	일 최고/최저기온 (51%)	해수면온도 (36.3%)	비습/상대습도 (15.7%)
연 평균	강수량 (82.4%)	평균 지상기온 (64.7%)	일 최고/최저기온 (44.1%)	해수면온도 (34.3%)	해수면고도 (15.7%)

Fig. 2.3.1은 각 등압면 고도별 기후요소의 활용도를 나타낸 그림이다. 등압면 자료의 활용도를 조사한 결과, 설문참여자의 60 % 정도가 등압면 자료의 연구 활용도가 보통 이상으로 높다고 응답하였다. 850 hPa 등압면의 활용도가 가장 높았으며 50 hPa에서의 수요가 낮았다. 1000 hPa에서는 기온의 활용도가 높았고 850 hPa에서는 습도가, 500 hPa에서는 지위고도가, 200 hPa에서는 바람의 활용도가 높은 것으로 조사되었다.

응답자들은 CMIP5 온실가스 강제력 실험 중 RCP8.5 시나리오 자료를 가장 많이 사용하였으며, 그 다음으로 RCP4.5, 과거 기후, RCP2.6 순으로 사용하였다. CMIP6 실험의 경우 CMIP5와 마찬가지로 SSP5-8.5의 활용도가 가장 높을 것으로 응답하였다. 국립기상과학원에서 산출하는 2개 모델(K-ACE, UKESM1) 각 3개 앙상블 자료에 대한 선호도는 모델별 개별 자료가 41.2 %로 가장 높았으며, 모델별 앙상블 평균자료가 36.3 %, 전체 6개 멤버의 앙상블 평균자료가 22.5 %인 것으로 나타났다.

시나리오 자료형식에 대한 사용자 선호도는 NetCDF 가 50 %, CSV 가 40.2 %로 높게 나타났으며, 그림파일 형식은 7.85 %, 일반이진 형식은 1%로 상대적으로 낮았다. 과학 분야 응답자의 58.5 % 가 NetCDF를, 36.6 % 가 CSV 형식을 선호하였으며, 정책 분야 응답자의 62.5 % 가 CSV를 선호하고 18.8 %가 그림형식을 선호하였다. 기후변화 시나리오가 그림 파일 형식으로 별도 제공되는 것이 도움이 된다는 의견이 전체의 60 %였으며, 이는 정책 분야, 과학 분야 응답자 모두 비슷한 의견이었다. 기후변화 시나

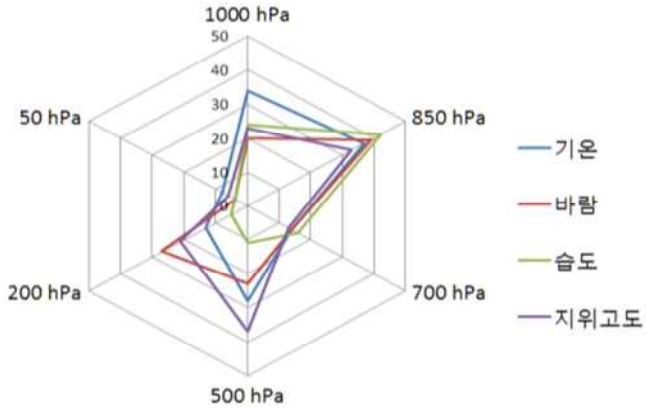


Fig. 2.3.1. Radar chart for customer availability of climate elements according to each isobaric surface.

리오 자료에서 선호하는 영역은 우리나라 지역이 69.6 %로 가장 높았으며, 동아시아 지역과 전지구영역도 각각 56.9 %와 49 %로 높게 나타났다. 정책 분야와 민간단체는 우리나라 영역을 선호하는 경향이 뚜렷하였으며, 과학 분야의 사용자는 세 영역에 비슷한 선호도를 보였다.

기후변화 시나리오 자료를 제공하는 방법에 대한 질문에서는 온라인으로 제공받기를 원하는 응답자가 93. 1%로 압도적으로 높았다. 전 기간 자료를 한 번에 제공받기를 원하는 응답 비율이 32.4 %로 가장 높았으며, 1년, 10년 단위 제공에 대한 선호도는 각각 25.5 %, 23.5 %였다. 온라인으로 제공할 경우 1회 제공하는 파일의 크기는 1 Gbyte 이하가 적당하다고 응답한 경우가 43.1 % 였으며, 10 Gbyte 이하가 30.4 % 이었다. 사용자의 네트워크 수신 속도는 1~5 Mbyte/s가 30.4%, 5 Mbyte/s가 28.4%였으며, 모른다는 응답자의 비율도 35.3%였다. 미국의 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison), 프랑스 IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) 등 국제자료센터보다 국립기상과학원이 직접 시나리오 자료를 제공하는 것이 사용자들의 업무에 도움이 된다는 응답이 84.3 %로 매우 높았으며, 그 이유로 자료에 대한 질의가 쉽고 다운로드 속도와 다양한 요소를 받을 수 있다는 점을 꼽았다.

설문 조사를 요약하면, 응답자의 상당수는 국립기상과학원에서 시나리오 자료를 직접 받는 것을 선호하였으며 강수량・최고/최저기온・평균기온 자료를 우선으로 제공받길 원하였다. 등압면 자료에 대한 수요가 있었으며 요소별 활용도는 기압면 고도에

따라 차이가 있었다. 우리나라 영역의 수요가 다소 높았으며 선호하는 자료형식은 과학 분야에서는 NetCDF, 정책 분야에서는 CSV의 선호도가 높았다. 설문 조사를 통해 기후변화 시나리오 전문사용자들의 수요를 파악할 수 있었으며 본 결과는 향후 과학원의 기후변화 시나리오 자료제공 서비스에 반영할 예정이다.

<과학원 자료제공업무의 효용성> <과학원에서 직접 시나리오를 제공받는 이유>

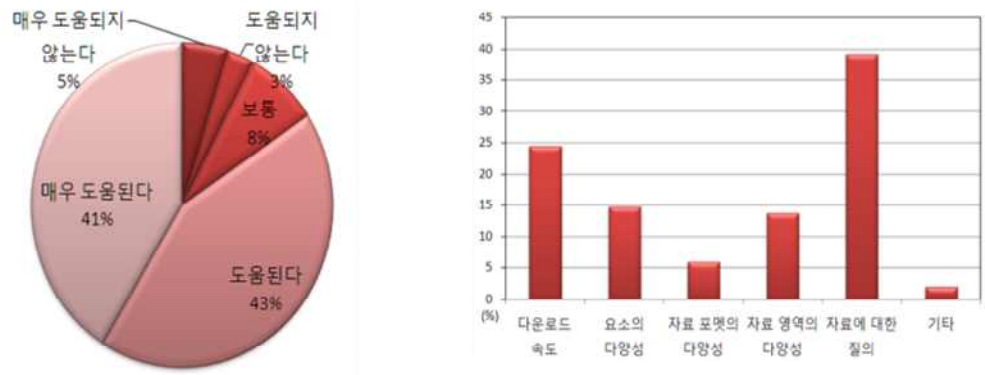


Fig. 2.3.2. Survey results about preference for climate data service by NIMS.

2. 데이터노드 구축을 통한 국제자료센터 시나리오 등재

IPCC에서는 기후변화 영향요소들을 고려하여 온실가스 배출에 의한 잠재적인 미래 기후변화 시나리오를 산출하고 이를 평가보고서에 활용하고 있다. IPCC 제6차 평가보고서를 위한 CMIP6에 참여하는 각 연구기관에서 생산·제출한 기후변화 시나리오 자료는 ESGF 분산 데이터저장소에 저장된다. 여기에 저장된 시나리오 자료는 다양한 목적을 위해서 참여한 기관에 공유하게 된다. 국립기상과학원에서는 CMIP6에 참여하여 데이터를 제공하는 데 필요한 ESGF 데이터 노드를 구축하고, 생산된 기후변화 시나리오 자료를 등재하였다. ESGF에서는 데이터를 등재하기 위해서는 데이터에 대한 적합성 검사를 시행하고, 메타데이터를 다른 데이터 노드에서 접속할 수 있는 카탈로그에 기록하며, 버전 관리를 하고 있다. ESGF에 데이터를 등재하기 위해서는 아래의 주요 절차와 요구 사항을 준수해야 한다.

- CMIP6 자료의 규준사항 준수 여부 확인 : 데이터 노드에 데이터를 등재하기 전에 모든 데이터가 출력 요구 사항을 준수하는지 확인해야 한다.
- ESGF 데이터 노드 선택 : 모델링 센터에서는 자체 ESGF 데이터 노드를 설정 및 호스팅하거나 기존 ESGF 노드를 사용할 수 있다.
- 데이터 전송 및 ESGF 데이터 관리 : CMIP6 데이터를 원활하게 전송 및 게시하기 위한 절차를 시행하는 것 외에도 결함이 있는 데이터에 대한 수정을 처리하기 위해 명확하게 정의된 프로세스가 수립되어야 한다.
- 데이터 게시: ESGF 데이터 노드 관리자는 ESGF 데이터 공개 및 저장을 책임진다. CMIP6 데이터 품질 요구 사항을 충족하지 못하는 경우 데이터를 게시할 수 없다.
- 데이터 복제 : Tier1 노드는 다른 노드의 데이터를 복제한다. 한 노드에서 치명적인 스토리지 장애 발생 시 데이터의 손실을 최소화하기 위함이다 노드 하나가 일시적으로 오프라인 상태일 때 백업노드에서 데이터를 제공한다.
- 데이터 액세스: 데이터 게시 후 CMIP6 데이터는 PCMDI, DKRZ, IPSL, CEDA 등의 지정된 CMIP6 데이터 포털을 통해 확인 및 액세스할 수 있다.
- 데이터 장기 보관: IPCC 제6차 평가 보고서의 마감일까지 존재하는 CMIP6 데이터는 IPCC 데이터 센터(IPCC DDC, http://ipcc-data.org)에 보관한다.

국립기상과학원에서는 기존 ESGF 노드를 이용하지 않고 아래의 프로세스에 따라서 자체 ESGF 데이터 노드를 구축하였다.

데이터 노드에 국립기상과학원에서 생산한 규준실험 시나리오(Pi-control, Amip), 과거 기후시나리오(Historical), 미래 기후시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)의 변수를 품질 검증한 후 등재하였다. 등재한 시나리오 자료는 CMIP6 자료 제공 포털(https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/)을 통하여 이용할 수 있다.



Fig. 2.3.3. The procedure for installation or update an ESGF data node



Fig. 2.3.4. The NIMS/KMA scanario data in ESGF node site

제 3 장 기후변화 특성 및 기후변화 감시정보 분석

제 1 절 지역기후 시나리오 생산과 기후변화 특성 분석

1. ERA-Interim 강제력의 CORDEX-EA 지역기후자료 성능 평가

국립기상과학원은 IPCC AR5에 참여한 HadGEM2-AO 전지구 기후모델의 성능을 Reichler and Kim(2008)의 NRMSE (Normalized Root Mean Square Errors)를 사용하여 평가하였다(Baek et al., 2013). 또한 향후 발간될 IPCC AR6에 대응하기 위하여 CMIP6 전전구 기후모델 성능 평가를 위한 툴을 보완하였다(국립기상과학원, 2017). 한편, 국립기상과학원은 국가 기후변화 정책 수립에 기여하기 위하여 동아시아 지역기후 상세화 국제프로젝트(CORDEX-EA)에 참가하여 동아시아 지역기후변화 시나리오를 산출하고 있다. 2012년도에 CORDEX-EA 1단계 자료(50 ㎞ 해상도)를 산출 완료하였으며, CORDEX-EA 자료센터(http://cordex-ea.climate.go.kr)에서 제공하고 있다. 2019년 현재는 AR6에 기여하기 위하여 2단계 자료(25 ㎞ 해상도)를 새롭게 산출하고 있다. 새로운 동아시아 지역기후변화 시나리오가 AR6에 기여하기 위해서는 전지구 기후변화 시나리오와 마찬가지로 정량적인 성능 평가가 필요하다.

이번 연구는 AR5 때와 마찬가지로 동아시아 지역기후변화 시나리오의 성능 평가를 위한 툴인 이 NRMSE를 활용하였으며, 동아시아 영역에 적용할 수 있도록 구축하였다. 이 방법을 전지구 기후변화 시나리오에 적용하기에 앞서, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA-Interim 재분석 자료를 측면경계조건으로 처방한 CORDEX-EA 2단계의 평가 실험 결과에 활용하였다.

이 연구에서는 CORDEX-EA에 참여하고 있는 지역기후모델(Regional Climate Model; RCM)의 과거 기후 모의성능을 평가하였다. 사용모델은 Table 3.1.1에 보인 바와 같이 5개 모델이며, 1981년부터 2013년까지 총 33년의 월평균 자료를 사용하여 모델의 성능을 평가하였다. 검증자료로는 ECMWF의 ERA-Interim 수평해상도 0.25° 자료를 사용하였으며 기온, 강수 등 총 17개 기후변수를 사용하였다. 모델평가툴인 NRMS를 통한 전지구 기후모델의 모의성능 평가의 구체적인 계산과정은 다음과 같다.

1) 17개 기후 변수들에 대하여 모델-관측 간 편차를 10개 영역별로 계산

$$E^2 = \sum_{n=1}^{N} w_n d_n^2 / \sigma_n^2 \qquad (3.1.1)$$

N: 총 모델 수, w: 가중치, d: 모델 – 관측 편차, σ: 표준편차

2) 영역별로 모델-관측 간 편차(Er)를 구한 후, 전체 영역의 평균 편차(Egm, 모델-관측 간 편차의 5개 모델 평균)로 나누어 각 모델의 성능을 계산

$$I_n^2 = \frac{E_r^2}{\overline{E_g^{2^m}}} \qquad (3.1.2)$$

E_r : 지역별 관측 값과의 편차, E_g : 전지구 관측 값과의 편차, $\overline{m}$: 모델평균

3) 계산된 편차를 모든 변수에 대하여 평균하여, 17개 기후 변수의 모의 성능을 모두 반영하여 최종적으로 각 모델과 모델 앙상블의 모의 성능(I2)을 계산

$$\overline{I^2} = \overline{I^{2v}}, \qquad (3.1.3)$$

$\overline{v}$: 모든 기후변수의 평균

Table 3.1.1. List of regional climate models (RCMs) used in this study and their configurations and details.

	HadGEM3-RA	RegCM4[1)]	CCLM[2)]	WRF[3)]	SNU-MM5[4)]
Grids (Lon. × Lat.)	396 × 251	394 × 249	396 × 251	395 × 250	405 × 260
Vertical layers	63 eta levels	23 sigma	40 hybrid	30 eta	24 sigma
Convection	Revised mass flux	MIT-Emanuel	Tiedtke	Betts-Miller-Janjic	Kain-Fritch
Microphysics	single moment bulk	SUBEX	extended DM	WSM3	Reisner2
Radiation	General2	NCAR CCM3	Ritter and Geleyn	CAM	CCM2 package
Land surface model	JULES	NCAR CLM3.5	TERRA ML	NOAH-LSM	NCAR CLM3 /NOAH LSM

1) The Regional Climate Model version 4
2) Cosmo Climate version of Local Model
3) Weather Research and Forecasting
4) Seoul National University Meso-scale Model version 5

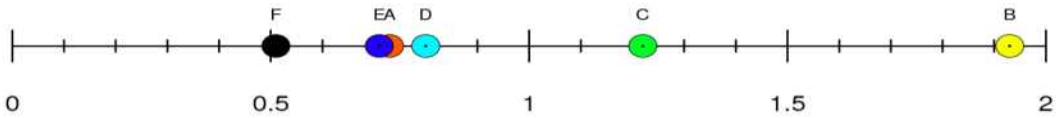


Fig. 3.1.1. The performance index for CORDEX-EA Phase2 models. (red) HadGEM3-RA, (yellow) RegCM4, (green) WRF, (skyblue) SNU-MM5, (blue) CCLM, (black) Ensemble mean.

모델 성능 지수(performance index) I2는 5개 RCM의 평균적인 모의성능에 대한 상대적인 성능을 나타내며, 1보다 작으면 우수한 성능, 1보다 크면 미흡한 성능을 의미한다. Fig. 3.1.1은 각 모델과 모델 앙상블의 모의성능을 나타낸 것이다. 동아시아 전체에서 모델의 모의성능 순위는 Ensemble mean (0.51) > CCLM (0.71) > HadGEM3-RA (0.73) > SNU-MM5 (0.80) > WRF (1.22) > RegCM4 (1.93)의 순서를 보였다.

Fig. 3.1.2는 5개 RCM과 Ensemble mean의 지역별 모의성능을 보여준다. RCM의 지역별 성능 지수(Ir2)는 전반적으로 우리나라(KOR)를 포함한 일본(JPN), 태평양 지역(NP, TP) 등 동아시아의 동쪽 지역과 북쪽 지역(NAS)에서는 모의성능이 좋고, 서쪽은 상대적으로 성능이 낮은 경향을 보였다. 인도(SAS)와 티베트 고원(TIB) 지역은 대부분 Ir2가 1 이상을 보이며, 특히 티베트 고원의 모의성능은 CCLM을 제외하고 모든 모델에서 가장 낮고, RegCM4와 WRF에서 각각 5.64, 3.35로 다른 RCM에 비해 현저히 낮은 모의 성능을 보였다. 동쪽에서는 우리나라와 일본지역에서 비교적 성능이 높으며, RegCM4를 제외하면 모든 모델에서 Ir2가 1 이하로 나타난다.

CORDEX-EA 2단계 전체 영역에서 변수별로 모의성능을 살펴보면 tasmax (최고기온), ta850 (850 hPa 기온), ts (지면 온도) 등은 비교적 낮은 모의성능을 보이고, ps (해면기압), va850 (850 hPa 남북방향 바람), va200 (200 hPa 남북방향 바람)은 상대적으로 좋은 성능을 보인다(Fig. 3.1.3). Ensemble mean은 대부분의 기후변수에서 가장 높은 모의성능을 보이나, zg500 (500 hPa 지위고도), ta200 (200 hPa 기온) 등 대기 중·상층의 기후변수는 CCLM 단일모델의 결과가 가장 좋은 결과를 보인다. 반면에 pr (강수량)은 CCLM의 모의 성능이 가장 낮다. 평균적인 모의성능이 가장 낮은 RegCM4는 대기 하층, 상층의 기후 변수들을 전반적으로 가장 나쁘게 모의한다. tasmax, va850과 hfls (잠열)는 RCM간 성능 차이가 가장 적다. 반면 zg500, va200은 RCM간 성능 차이가 가장 크며, 이는 CCLM과 RegCM간 성능 차이가 크기 때문이다.

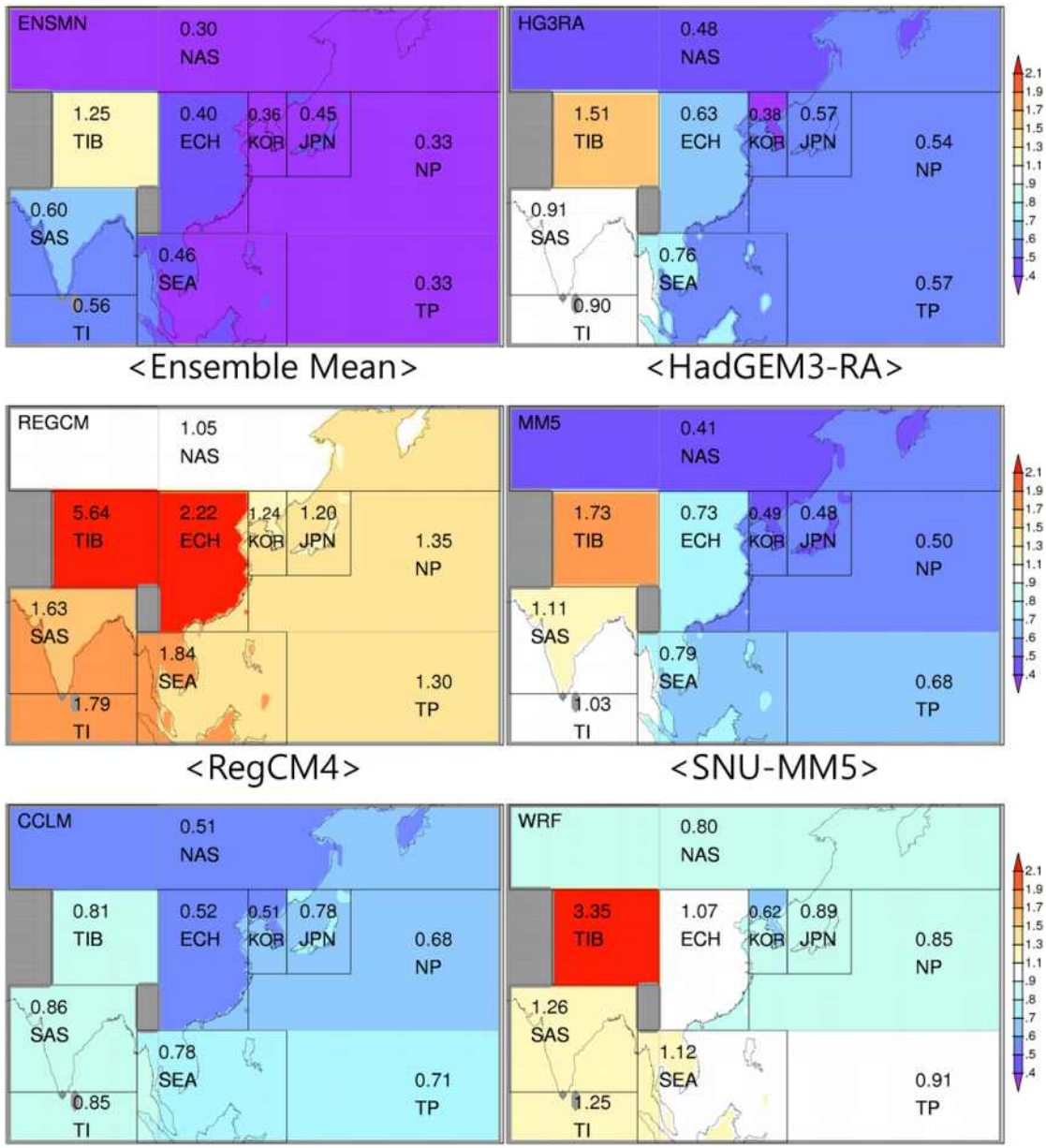


Fig. 3.1.2. Regional performance index for CORDEX-EA Phase2 models and their ensemble mean.

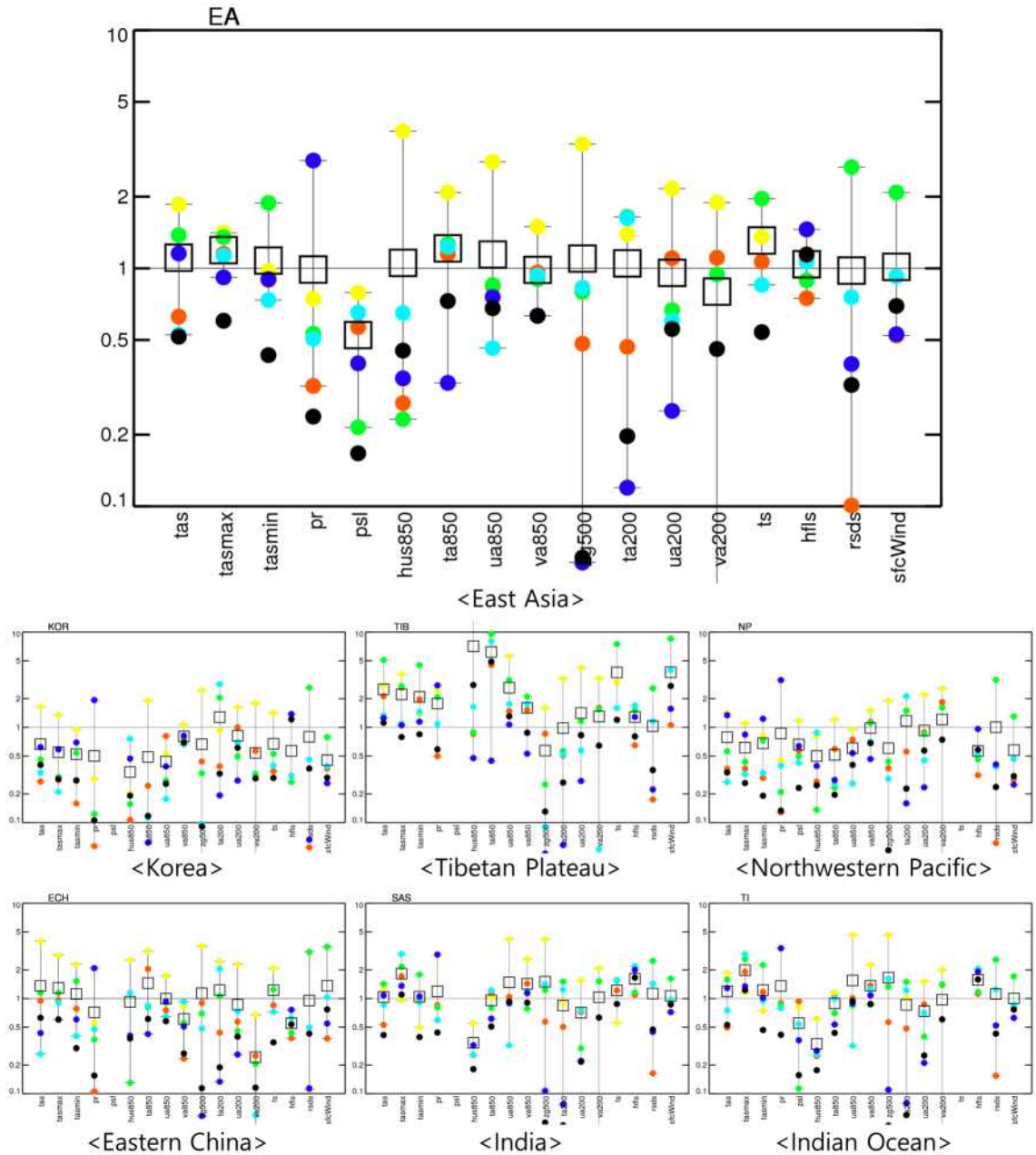


Fig. 3.1.3. The performance index of climate variables for CORDEX-EA Phase2 models. (red) HadGEM3-RA, (yellow) RegCM4, (green) WRF, (skyblue) SNU-MM5, (blue) CCLM, (black) Ensemble mean (black square) RCM Average.

2. CMIP6 강제력의 동아시아 지역 과거기후 모의실험

국립기상과학원은 IPCC의 기후변화 평가보고서 및 국가 기후변화 정책 수립에 기여하기 위해, 국제적인 지역기후 상세화 프로젝트인 CORDEX에 참여하여 동아시아 지역의 상세 기후변화정보를 생산해오고 있다. 최근 사회·경제의 영향을 고려하는 새로운 온실가스 시나리오의 CMIP6 전지구기후모델 기후변화 자료들이 생산됨에 따라, CMIP6 자료를 강제력으로 이용한 지역기후 실험을 진행할 필요가 있다.

본 연구에서는 HadGEM3-RA 지역기후모델(RCM)에 CMIP6 UKESM1 (GCM) 자료를 측면 경계 자료로 이용하여, 동아시아 지역에 대한 과거기후 모의실험을 수행하였다. 실험개요는 Table 3.1.2와 같다.

Table 3.1.2. Model configuration of HadGEM3-RA used in this study.

Contents	Description
Model	HadGEM3-RA
Boundary data	UKESM1
Domain	(Equatorial) 76.91-156.08 °E / (pole) 51.59-181.50 °E
Horizontal resolution	25 km
Evaluation data	ERA-Interim (Temperature / 0.25°×0.25°) GPCPv2.2 (Precipitation / 2.5°×2.5°)
Period	Simulation : 1968-2014 Analysis : 1979-2014

동아시아 모의 영역에 대한 36년(1979~2014)간의 기온과 강수 관측자료 공간분포 및 GCM 및 RCM에 대한 관측 자료와의 편차를 Fig. 3.1.4에 나타내었다. GCM은 대체로 관측보다 기온을 낮게(약 0.9 ℃) 모의하였으나, 인도와 티베트고원, 히말라야산맥 등 일부 지역에서 기온을 높게 모의하였다. RCM은 관측보다 약 1.5 ℃ 과소 모의하여 전반적으로 GCM보다 더 뚜렷한 과소모의 경향을 보였으며, 인도와 히말라야산맥 일부 지역에서 과대모의가 나타났다. 강수의 경우, GCM과 RCM은 관측에서 보이는 적도 태평양과 일본 남부, 동남아시아 해안지역에서의 강한 강수 발생과 고위도 육지 지역에서의 약한 강수 발생과 같은 지역적인 특성을 유사하게 나타내었다. 하지만 강수를

적도 태평양과 동남아시아 지역에서 과다하게, 인도 지역에서 과소하게 모의하였다.

관측과 비교하여 GCM은 약 0.6 mm d^{-1}, RCM은 약 1 mm d^{-1} 과대모의 하였으며, 두 모델 모두 육상의 강수는 과소 모의하고 해양에서 과다 모의하는 특징을 보였다. RCM은 GCM에서 나타난 강수의 인도 지역 과소 모의와 중국 중남부 지역 과다 모의를 개선하여 육지 강수를 비교적 잘 나타냈지만, 우리나라와 중국 화남지역의 강수를 적게, 해양 지역의 강수를 대체로 과다하게 모의하였다.

Fig. 3.1.5에 동아시아 지역의 전체 영역, 육지, 해양에 대한 기온, 강수의 36년 평균 월 변화를 나타내었다. GCM과 RCM은 전반적으로 기온에 대한 관측의 월 변화 패턴을 유사하게 모의하였다. 하지만 기온을 관측보다 낮게 모의하는 특징을 보였으며, 특히 여름(GCM: 약 0.4 ℃, RCM: 약 0.6 ℃)보다 겨울(GCM: 약 1.3 ℃, RCM: 약 2.2 ℃)에, 해양(GCM: 약 0.5 ℃, RCM: 약 0.75 ℃)보다 육지(GCM: 약 1.3 ℃, RCM: 약 2.1 ℃)에서 뚜렷하였다. 그리고 육지 및 해양과 관계없이 GCM보다 RCM에서 기온을 더 낮게 모의하였다. 강수의 경우는 육지와 해양에서 모델과 관측의 월 변화에 차이를 보였다. 전체 영역에서 GCM과 RCM은 전반적으로 강수를 관측보다 과다하게 모의하였으며, 이러한 과다모의에는 해양의 영향이 크게 작용하였다. 전체 영역 및 해양에서 RCM은 봄, 여름과 가을 강수를 GCM보다 더 많이 모의하였으며, 겨울에는 두 모델 간에 큰 차이가 없었다. 육지에서는 두 모델이 봄과 겨울에 관측보다 많은 강수를 모의하였고, 여름과 가을에 관측보다 강수를 적게 모의하였다. 육지에서는 대체로 RCM이 GCM 보다 강수를 적게(약 0.1 mm d^{-1}) 모의하였으며, 특히 여름에 강수를 과소하게(약 0.14 mm d^{-1}) 모의하였다.

Fig. 3.1.6에서는 여름철 강수 공간장 및 850 hPa 바람벡터와 수분 합성장을 통해, Fig. 3.1.5에서 나타난 모델이 여름철 육지 강수를 적게 모의하는 원인을 알아보고자 하였다. 여름철에 두 모델 모두 인도와 우리나라, 중국 화남지역의 강수를 과소 모의하며, 특히 RCM이 더 과소하게 모의하였다. 관측 자료의 여름철 850 hPa 합성장에서는 적도 부근의 대기 하층 수분이 북태평양 고기압의 가장자리를 따라서 남서풍을 타고 중위도로 상승하는 동아시아 여름 몬순이 잘 나타났다. 하지만 두 모델은 대기 하층 수분의 상승 지역을 관측보다 동쪽으로 치우치게 모의하여, 우리나라와 중국 화남지역의 대기 하층 수분을 적게 모의하였다. 특히 RCM의 경우는 북태평양 고기압의 확장을 약하게 모의하였기 때문에, 약화된 여름 몬순에 의해 적도에서 중위도로 상승하는 해양 수분이

GCM보다도 더 감소하였다. 따라서 RCM이 우리나라와 중국 화남지역의 강수를 GCM 보다 더 과소하게 모의하였다.

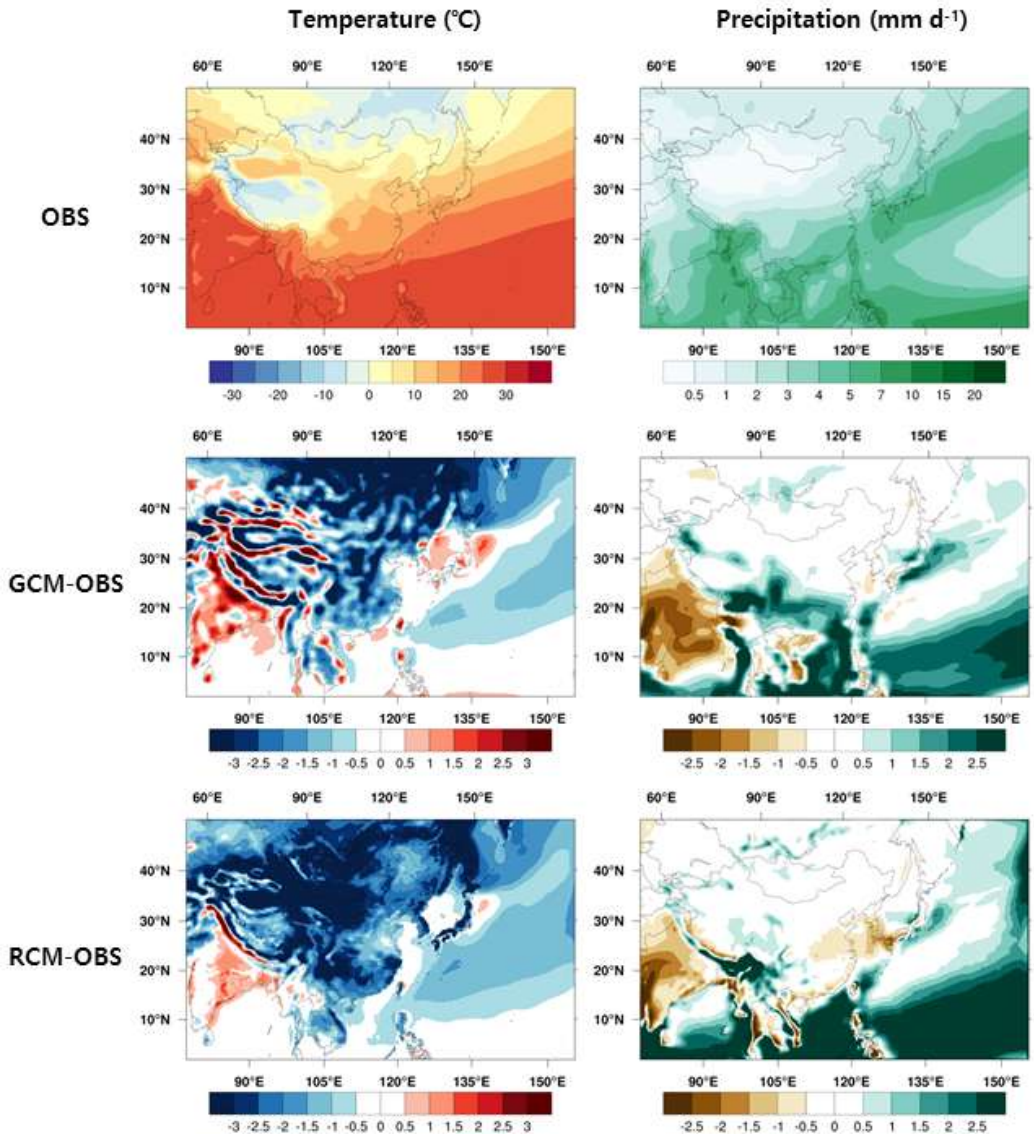


Fig 3.1.4. Spatial distribution of surface air temperature (left) and precipitation (right) during 36 years (1979-2014) period: observation (top), difference between GCM and observation (middle), and difference between RCM and observation (bottom).

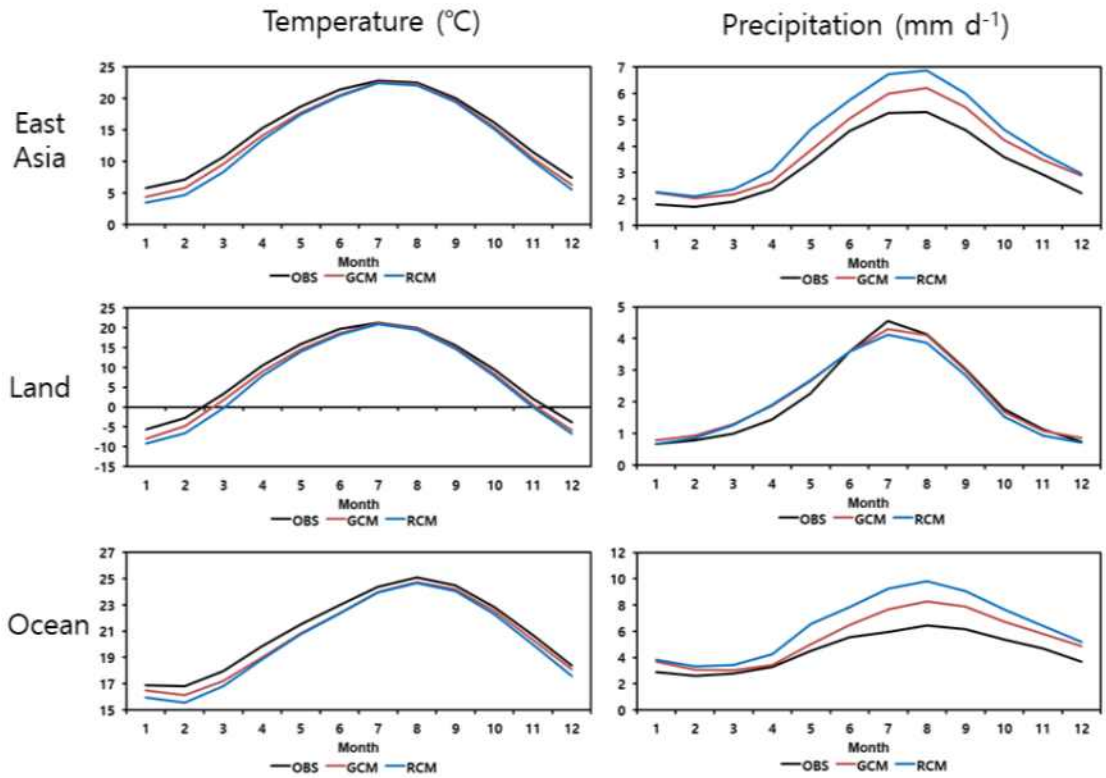


Fig. 3.1.5. Seasonal variation of surface air temperature (left) and precipitation (right) during 36 years(1979-2014) period in observation, GCM, and RCM: East Asia (top), land (middle), and ocean (bottom).

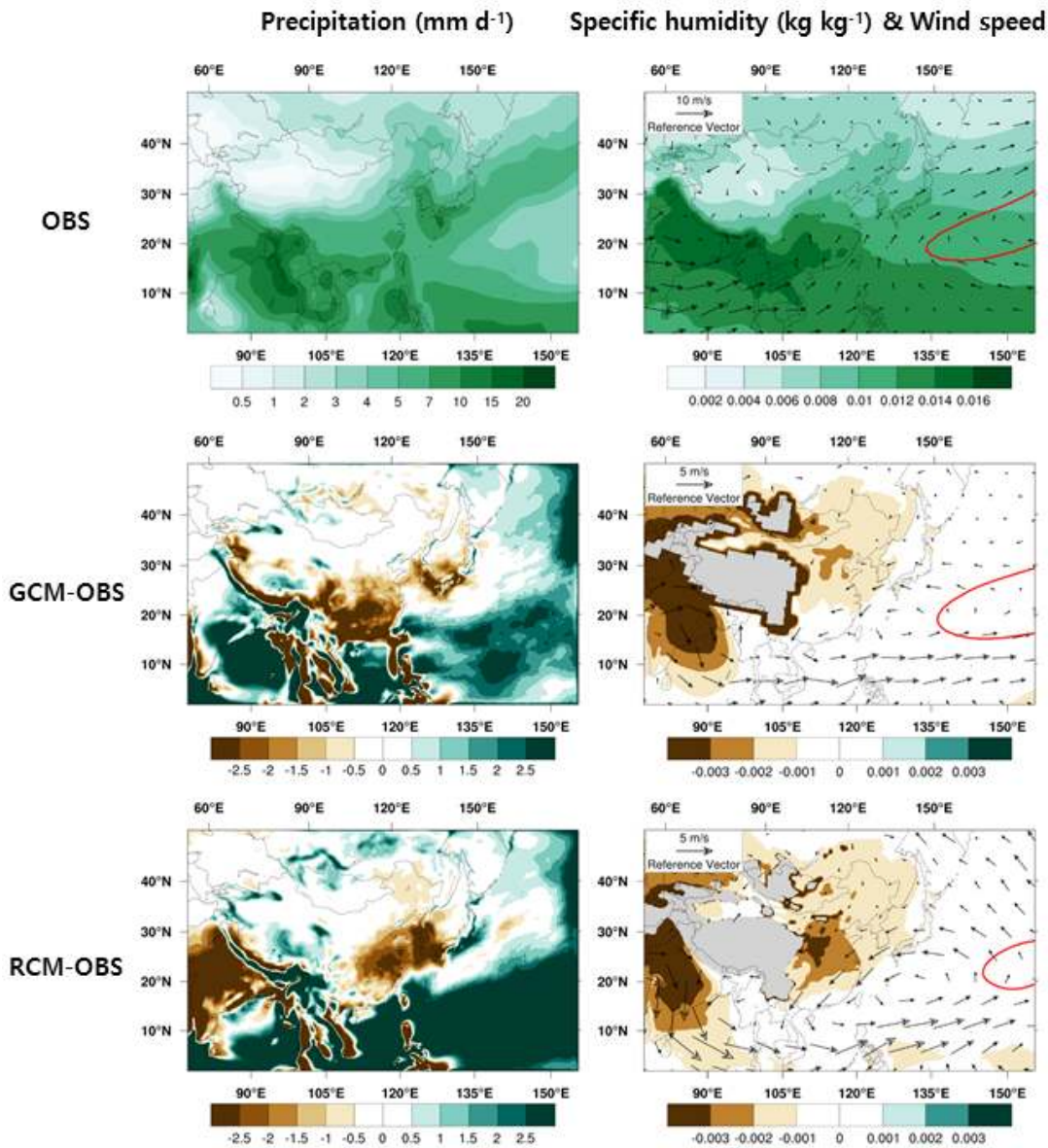


Fig. 3.1.6. Spatial distribution of summer (JJA) precipitation (left) and 850 hPa wind and specific humidity (right) during 36 years (1979-2014) period: observation (top), difference between GCM and observation (middle), and difference between RCM and observation (bottom). The red line means boundary of the north pacific high.

3. Atmospheric river의 한반도 강수 영향 분석

(1) Atmospheric river 정의 및 탐지 방법

Atmospheric river (AR)은 강한 수증기 수송이 가늘고 긴 형태로 나타나는 현상으로 주로 중위도 저기압의 따뜻한 지역에서 나타난다. 전지구적으로 중위도 지역 중 10 % 이하의 일부 지역에 AR이 존재하지만, 중위도에서 고위도로 수송되는 전체 수증기량의 약 90 % 이상을 AR이 감당한다(Zhu and Newell, 1998; Guan and Waliser, 2015). AR은 전지구 수증기 수지뿐만 아니라 지역적인 극한 수문 현상의 발생에도 큰 영향을 미치기 때문에 AR 연구는 매우 중요하다.

기존의 연구에 따르면 태평양과 대서양의 동쪽 해안지역에서 발생하는 AR은 겨울철에 집중되며, 육지에 상륙하면서 북아메리카와 유럽의 서쪽 해안지역에 강한 홍수 피해를 유발한다고 알려져 있다(Neiman et al., 2008; Lavers et al., 2012). 그러나 한반도를 포함한 동아시아 지역에 대한 AR 연구는 거의 이뤄지고 있지 않다. 이 연구에서는 AR이 계절별 한반도의 강수에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

AR은 위성 등의 관측 자료 및 재분석 자료에서 제공하는 수증기 수송 또는 수분 플럭스 자료 등을 통해서 확인할 수 있다. 이 연구에서는 격자 자료를 이용하여 산출된 수증기 수송 자료로 AR을 정의하는 방법을 사용하였다(Guan and Waliser, 2015). 먼저 각 격자의 모든 시간 간격마다 연직 적분된 수증기 수송(IVT, Integrated water Vapor Transport)을 계산한 후, IVT 평균의 85 %를 초과하는 경우를 뽑아낸다. 이 조건을 만족하는 연속된 IVT 무리의 길이가 2000 km 이상이고, IVT 무리의 길이가 폭보다 2 배 이상 큰 경우 AR로 정의한다. 분석에는 유럽중기예보센터(ECMWF)의 재분석자료인 ERA-Interim (공간간격: 1.5 도, 시간간격: 6 시간)의 바람과 비습 자료로 AR를 산출하였으며, 격자화된 일 강수자료인 APHRODITE (Asian Precipitation - Highly-Resolved Observation Data Integration Towards Evaluation, 공간 간격: 0.25° × 0.25°, 시간 간격: 1 일) 자료를 사용하여 AR이 한반도 강수에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 기간은 1979년부터 2015년까지 37 년이다.

(2) 한반도의 AR 및 강수의 기후적 특성

한반도 지역의 계절별 AR 발생 빈도는 계절과 지역에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다. AR 발생 빈도는 여름철에 가장 높으며, 그 다음으로 봄, 가을, 겨울의 순서로 발생 빈도가 높았다. 겨울부터 해안 지역에서 발생 빈도가 증가하기 시작하여 봄, 여름 동안에 점점 내륙지역까지 빈도가 높아지다가 가을에 다시 감소하는 연 변동성을 보였다. AR이 육지에 상륙할 경우 폭우, 홍수 등과 같은 극한 수문 현상으로 인해 극심한 피해가 발생할 수 있기 때문에 AR 연구가 매우 중요하다.

AR 상륙이 한반도 지역(124~132 °E, 33~43 °N)의 강수에 미치는 영향을 보기 위해 공간 격자별, 계절별 AR의 상륙 유무에 따른 강수량을 분석하였다. AR 상륙이 계절별 전체 강수량에 미치는 영향을 분석하기 위해, 계절별 전체 강수량에 대한 AR이 발생한 날의 강수량에 대한 비율(이하 AR fraction으로 명명)을 산출하였다(Fig. 3.1.7). 겨울철의

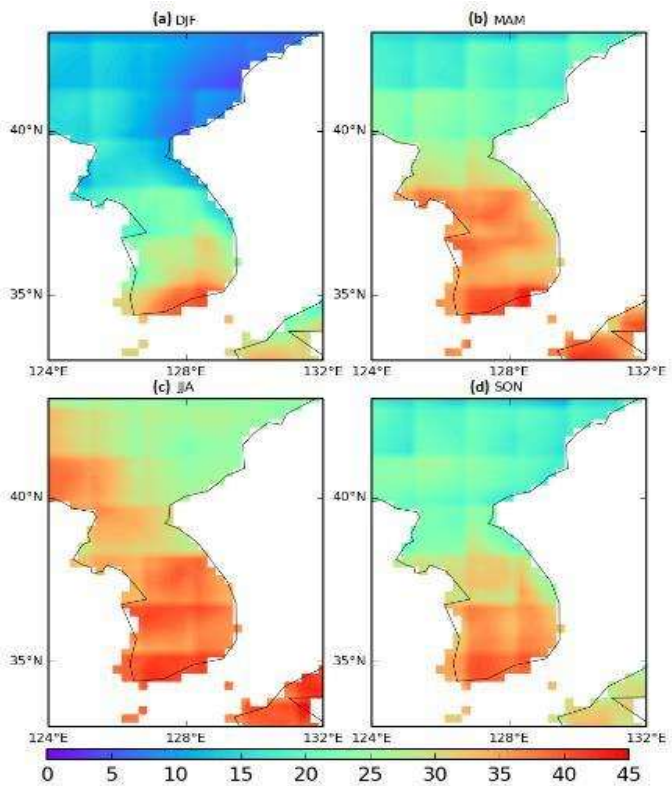


Fig. 3.1.7. The fraction (%) of AR precipitation to total precipitation for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON.

AR fraction은 다른 계절에 비해 낮은 경향을 보였고, 여름철의 경우 평안도 지역을 포함한 한반도 전반적으로 AR fraction이 높았다. 봄과 가을철은 남한 지역에서 AR fraction이 높았으며, 봄철에는 중부 및 남해안 지역에서, 가을철에는 남부 및 남해안 지역에서 특히 높은 AR fraction을 보였다.

한반도 지역에서 AR 발생 빈도와 AR fraction은 강한 계절 변동성을 가지며, 여름철에 가장 높고, 겨울철에 가장 낮았다. 그리고 한반도 지역의 계절별 전체 강수량에 있어서 AR이 상륙하는 날에 발생한 강수량이 차지하는 비율이 높게 나타났으며, 특히 총 강수량이 많은 여름에 AR이 상륙한 날의 강수량이 차지하는 비율이 한반도 전체적으로 높았다. 그러므로 AR 상륙은 한반도 지역의 전반적인 수자원에 큰 영향을 미치는 현상으로 볼 수 있다.

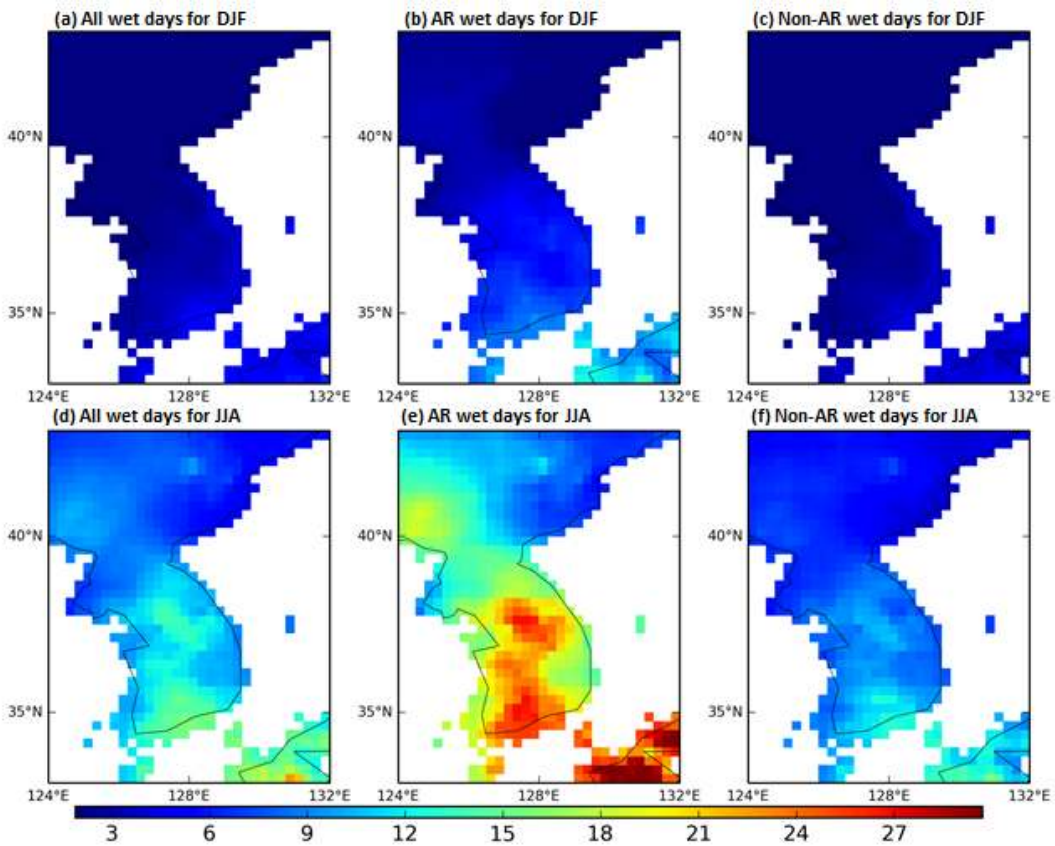


Fig. 3.1.8. The precipitation intensity (mm/day) for all wet days (left panels), AR wet days (middle panels), and non-AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels).

AR이 겨울과 여름철의 평균 강수 강도에 미치는 영향을 이해하기 위해, 분석 기간 중 일 강수량이 0.1 mm/day 이상인 강수가 발생한 날의 누적일수(이하 전체강수일), AR 발생강수일과 비-AR 강수일에 대한 각각의 강수강도를 분석하였다(Fig. 3.1.8). 공간과 시간격자마다 AR이 존재한 경우를 AR 발생강수일, 존재하지 않은 경우를 비-AR 강수일로 정의하였다. 전체강수일에 대한 강수강도는 분석기간 전체에 대해서 강수가 발생한 날에 대한 평균 강수량을 의미한다. 겨울과 여름철, 모두 AR 발생강수일에 대한 강수강도가 전체강수일에 대한 강수강도보다 증가하였다. 남한 지역에 AR이 상륙하였을 때 강수강도가 가장 크게 증가되었으며, 특히 여름에 중부 및 남부 내륙의 산악지역과 남해안 지역의 강수강도가 크게 증가되었다. 비-AR 강수일의 강수강도는 여름철에 대부분의 지역에서 전체강수일의 강수강도보다 감소하였고, 강수강도의 공간적인 패턴은 비슷한 모양을 보였다. 이러한 차이는 상대적으로 AR이 발생하였을 때 강수강도가 강하기 때문인 것으로 판단된다. AR에 의해 강한 강수강도를 보이는 지역은 앞서 설명한 AR fraction이 높은 지역과 관계가 있었다. 이는 AR이 상륙하면 전체 강수량을 증가시키고, 평균 강수강도 또한 증가시킨다는 것을 의미한다.

(3) AR이 극한 강수에 미치는 영향

전체 강수의 상위 5% 강수(95%ile 강수)를 사용하여 AR과 극한 강수의 관련성을 분석하였다(Fig. 3.1.9). 95%ile 강수는 일 강수량이 0.1 mm/day 이상인 강수가 발생한 날에 대해서 계산되었다. 한반도 지역의 95%ile 강수의 강도 분포는 전체 강수일에 대해서 겨울철에는 2~25 mm/day, 여름철에는 10~70 mm/day이었다. AR 발생일에 대한 95%ile 강수의 강도는 겨울철에는 2~35 mm/day, 여름철에는 20~90 mm/day로 전반적으로 전체강수일에 비해 증가하였다. 지역적으로 보았을 때 두 계절 모두 남부 지역에서 약 10 mm/day 정도 크게 증가하였으며, 특히 여름철에는 한반도 남쪽의 산지형에서 강수강도가 크게 증가하였다. 따라서 한반도 강수강도는 AR 발생과 함께 지형적인 요인도 영향을 미치는 것으로 보인다.

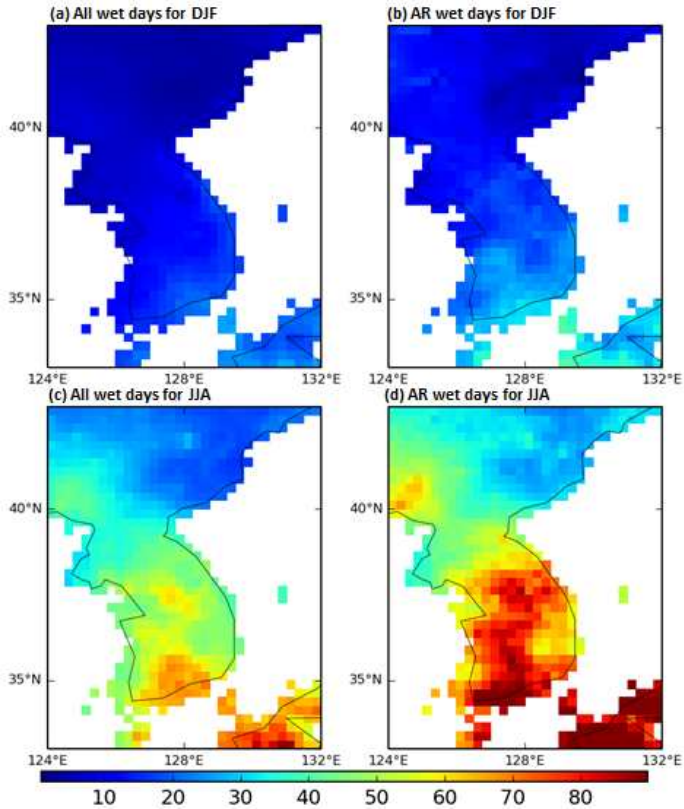


Fig. 3.1.9. The 95%ile precipitation intensity (mm/day) for all wet days (left panels), AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels).

4. 빙상과 빙하변화에 따른 미래 지역적 해수면 상승 전망

지구온난화는 해양의 부피팽창 뿐 만 아니라 빙상과 빙하를 감소시켜 해양의 질량을 증가시킨다. 이로 인한 해수면 상승은 연안과 섬 지역에 살고 있는 인류에 직접적인 영향을 미친다(Nicholls and Cazenava, 2010). 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 해수면 상승 민감 지역으로 기후변화에 대한 적응과 대비를 위해 미래 해수면 상승 전망이 중요하다. 국립기상과학원에서는 2018년도에 HadGEM2-AO RCP8.5 자료를 이용하여 20세기 말 대비 21세기 말 빙하와 빙상에 의한 미래 해수면 전망기법을 개발하였다. 이번 연도 해수면 전망기법을 개선하고 이를 CMIP5 21개 모델 앙상블 자료와

비교하였다. 개선한 부분은 20세기 말 대비 21세기 말의 해수면 변화량 산출을 최적화한 것이다.

해수면 상승의 원인은 크게 해양의 부피 변화와 질량변화로 나눈다. 해양온도 상승에 의한 부피변화는 대기-해양결합모델에서 산출되지만, 빙상 및 빙하 감소에 의한 질량변화는 모델로 모의하는데 한계가 있다. 따라서 관측 자료에 기반을 둔 경험적인 방법을 사용하여 미래변화량을 전망한다. 빙상은 50,000 ㎢ 보다 큰 규모를 가진 빙하 덩어리로 현재 지구에는 남극과 그린란드에 존재한다. 빙상은 햇빛의 유무, 강수량 등에 영향을 받으며 증가 또는 감소한다. 빙상에 내리는 강수량에 의해 소멸하고 생성하는 과정이 균형을 이룬 상태를 표면질량균형(Surface Mass Balance; SMB)이라고 한다. 본 연구에서는 Slangen et al.(2014)이 제안한 전지구 평균기온 변화에 의한 경험식을 적용하였다. 그린란드 빙상과 남극 빙상에 대해 각각 다른 경험식을 적용하였으며, 이를 적용한 해수면고도 변화량은 Fig. 3.1.10과 같다. 그린란드 빙상의 SMB에 의한 전지구 평균 해수면은 0.045 m 상승했다. 그린란드 주변은 최대 0.4 m 정도 해수면이 감소하였으나 그린란드를 제외한 대부분의 지역에서 0.05 m 이내 정도에서 상승하였다. CMIP5 앙상블 평균은 그린란드 빙상의 SMB에 의해 전지구 평균 해수면이 0.072 m 상승하는 것으로 전망하였다. HadGEM2-AO는 그린란드 주변에서 CMIP5 앙상블 평균보다 높게 모의하였으나 그 외 지역에서는 낮게 모의하였다. HadGEM2-AO를 이용하여 전망한 남극 빙상의 SMB에 의한 전지구 평균 해수면은 0.053 m 하강하였다. 남극 주변은 최대 0.1 m 정도 상승하였으나 남극을 제외한 대부분의 지역에서 0.06 m 하강하는 것으로 나타났다. CMIP5 앙상블 평균은 남극 빙상의 SMB에 의해 0.037 m 하강하는 것으로 전망하였다. HadGEM2-AO는 CMIP5에 비해 남극 주변에서 해수면 상승을 높게 모의하였으며 남위 60도 위쪽 지역에서 낮게 모의하였다. 남극 빙상의 SMB는 그린란드와 달리 주변 해빙에 영향을 미친다. 남극 빙상의 감소는 남극 주변의 해빙을 증가시켜 해빙이 있는 지역의 해수면은 상승하고 그 외 지역은 해수면은 하강한다(Slangen et al., 2014). 빙상은 표면 뿐 아니라 빙붕의 붕괴, 해양에 의한 빙상의 불안정성 등 질량균형의 붕괴로 인해서도 감소한다. 이러한 변화를 역학적 변화라고 하며 본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서에서 사용했던 Meehle et al.(2007)의 방법을 사용하였다. 이 방법은 21세기 평균기온과 과거 특정시기의 평균기온의 차이를 이용하여 산출하며, 그린란드와 남극에 각각 다른 경험식을 사용한다. HadGEM2-AO는 그린란드 빙상의 역학적 붕괴에 의해 전지구

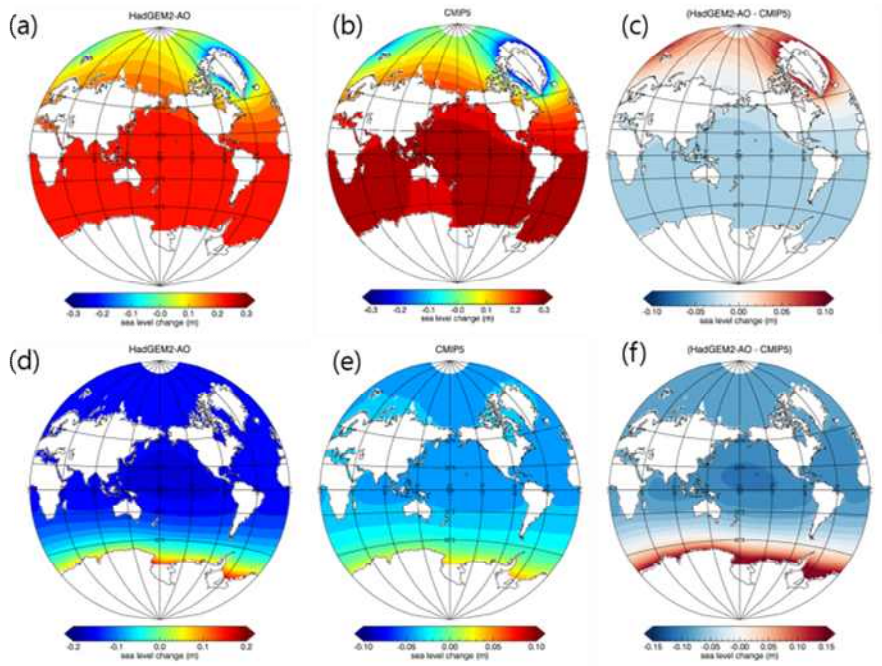


Fig. 3.1.10. Global distribution of relative sea level change from the Greenland ice-sheet surface mass balance (SMB) (top panels) and the Antarctic ice-sheet SMB (bottom panels) from HadGEM2-AO (left panels), 21 CMIP5 model ensemble mean (middle panels) and difference between HadGEM2-AO and 21 CMIP5 model ensemble mean (right panels) over the period 1986-2005 to 2081-2100.

해수면이 0.055 m 상승하는 것으로 전망하였으며, CMIP5 앙상블 평균은 0.047 m 상승하는 것으로 전망하였다(Fig. 3.1.11). HadGEM2-AO는 CMIP5 앙상블 평균에 비해 그린란드 주변 지역에서 해수면 상승을 낮게 모의하였으며 그 외 지역에서는 해수면 상승을 높게 모의하였다. 남극 빙상의 역학적인 붕괴에 의한 해수면 변화는 남극 빙상의 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. CMIP5 앙상블은 전지구 평균 해수면이 0.071 m 상승한다고 전망하였다. HadGEM2-AO는 남극 주변에서 CMIP5 보다 약간 높았으며 그 외 대부분의 지역에서 낮게 전망하였다.

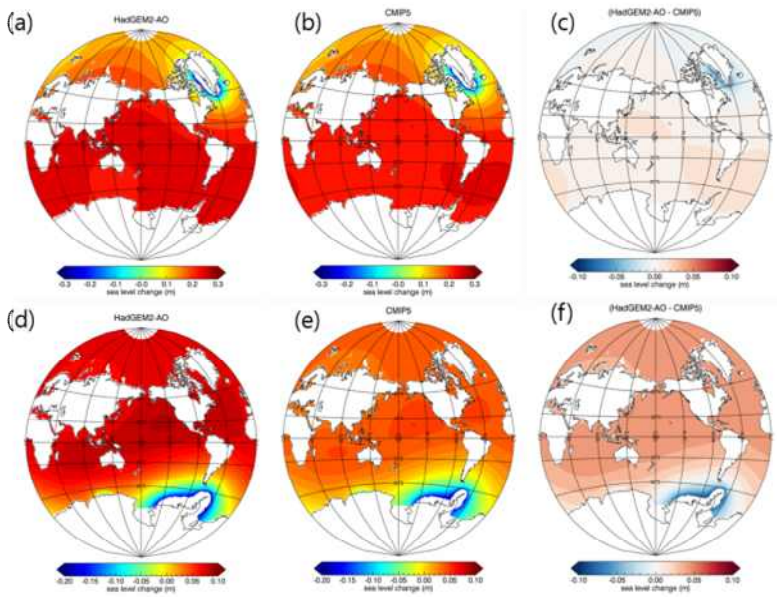


Fig. 3.1.11. Same as Fig. 3.1.10. but relative sea level change due to ice-sheet dynamics.

빙하는 빙상보다 작은 얼음덩어리로 높은 산에 있는 만년설을 비롯하여 빙상 주변의 작은 얼음 덩어리를 통칭하며 세계 여러 곳에 분포한다. 빙하의 감소는 세계 곳곳에서 일어나고 있으며 빙상보다 해수면 상승에 더 큰 영향을 미친다(Radic et al., 2014). 빙하의 감소는 빙하가 위치한 기저지형의 특징, 고도, 빙하의 두께 및 그 지역의 미기후적 영향을 모두 고려해야 한다. 관측을 통해 각 빙하의 변화를 계산할 수 있으나 몇 천 개가 넘는 모든 빙하를 일반화 하는 것에는 무리가 있다. 본 연구에서는 빙하의 다양한 시공간 변화를 고려하는 Slangen et al.(2011)의 방법을 채택하여 사용하였다. 이 방법은 전지구를 19개 지역으로 나누고, 각 지역의 기온과 강수변화를 이용하여 빙하부피의 변화를 계산한다. 본 연구에서는 WGI (World Glacier Inventory)-XF에서 제공하는 빙하인벤토리를 사용하였다. WGI는 19개 지역의 빙하면적정보를 제공한다(Radic and Hock, 2010).

Fig. 3.1.12에 보인 바와 같이, HadGEM2-AO 자료를 이용하여 전망한 빙하 감소에 의한 전지구 평균 해수면 상승은 0.145 m이다. 스발바르 제도와 아이슬란드, 남극반도 근처의 해수면이 감소하는 경향을 보였으며, 이 지역을 제외한 대부분의 지역에서는

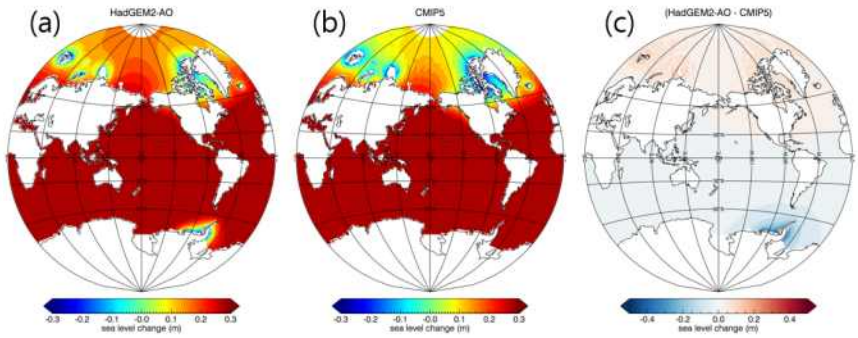


Fig. 3.1.12. Same as Fig. 3.1.10 but relative sea level change due to glaciers.

해수면이 0.1 m 이상 증가하였다. CMIP5 앙상블은 전지구 평균 해수면이 0.155 m 상승하는 것으로 전망하였다. 남극반도 주변에서 두 자료의 차이가 뚜렷하게 나타났다. HadGEM2-AO는 남극반도 주변의 해수면이 하강하는 것으로 전망한 것에 비해 CMIP5는 상승하는 경향을 보였다. 이와 같은 남극주변의 해수면 변화경향의 차이는 빙하인벤토리에 의한 것으로 사료된다. 인벤토리 별로 빙하구역과 빙하면적 정보에 차이가 있으며, CMIP5는 Randolph Glacier Inventory (Arendt et al, 2012) 자료를 사용하였다.

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. 3.1.13). HadGEM2-AO 모의 결과를 반영한 전지구 해수면은 0.573 m 상승하였으며 이 값은 CMIP5 앙상블의 0.635 m에 비해 다소 낮았다. 이는 본 연구가 CMIP5에 비해 빙상과 빙하에 의한 해수면 상승을 낮게 모의한 것이 반영된

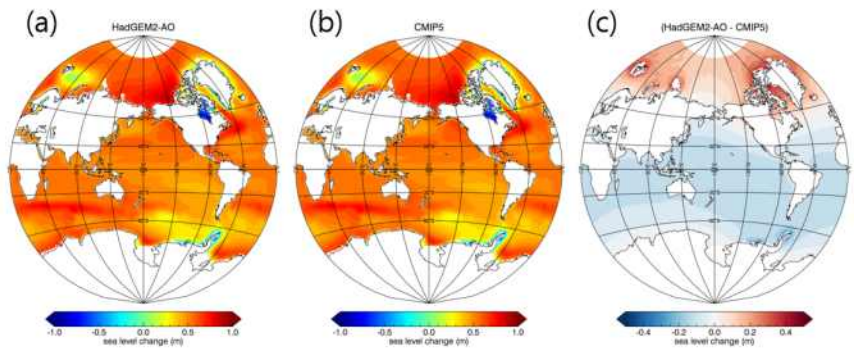


Fig. 3.1.13. Same as Fig. 3.1.10. But total relative sea level change.

결과이다. 남위 30~60도 사이의 인도양 남쪽 지역, 북위 30도 부근의 서태평양 지역과 동태평양 지역, 북미동쪽 지역과 보퍼트 해 지역에서 해수면 상승이 다른 지역에 비해 높게 나타났으며, 북극 지역의 바렌츠-카라해, 그린란드 주변 해역에서 해수면 상승이 다소 낮게 전망되었다.

본 연구 결과의 타당성을 분석하기 위해 CMIP5 21개 자료의 불확실성 범위와 비교해보았다. 그린란드 빙상의 지표질량균형에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO, CMIP5는 각각 0.045 m, 0.073 m이었다. 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, CMIP5가 각각 0.055 m, 0.047 m였다. HadGEM2-AO는 CMIP5 보다 높게 전망하였다. 불확실성의 범위는 0.020~0.074 m로 HadGEM2-AO의 결과가 불확실성 범위 안에서 전망한 것으로 나타났다. 남극빙상의 경우도 비슷한 양상을 보였다. 남극 빙상의 지표질량균형에 의한 해수면 변화량은 HadGEM2-AO와 CMIP5가 각각 -0.053 m, -0.037 m이었으며 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 모의하였다. 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 CMIP5보다 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. HadGEM2-AO의 결과가 CMIP5 21개 앙상블 자료와 다소 차이가 나는 것은 모델 자체의 모의성능 및 적용한 방법에 차이에서 오는 것으로 사료된다.

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.

제 2 절 동아시아 및 한반도 기후변화 감시정보 분석

국립기상과학원은 다양한 기후변화 정보 산출을 위하여 기후변화 입체감시 연구를 진행 중이다. 특히 꾸준히 증가하고 있으며, 지구 온난화의 주요 원인으로 간주되는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 등 온실가스의 감시는 대단히 중요하다. 대기 중으로 배출된 온실가스의 절반은 육지와 바다의 다양한 과정에 의해 흡수되고 있지만 흡수와 배출의 정량적인 시공간 정보와 변동성은 여전히 많은 불확실성을 가지고 있다.

이러한 불확실성을 줄이고 입체적인 관측정보 산출을 위하여 지상원격관측 기반의 고품질 탄소 감시 자료를 생산 하고 있으며, 탄소 배출·흡수원의 시•공간과 정량적 변동량 정보를 얻기 위하여 “환경 영향에 따른 FTS CO_2 단기변동”, “동아시아 지역 식생 플럭스 특성” 및 “CO_2 농도에 대한 영향요소 분석”을 하고 있다. 이는 동아시아 및 한반도 기후변화 정보의 한계점을 보완하고, 더욱 정확한 탄소 변동성에 대한 민감도 및 상대 강도의 정량화를 도모하는데 기여할 것으로 사료된다.

1. 지역 및 환경 영향에 따른 FTS CO_2 단기변동 특성 평가

온실가스인 CO_2와 CH_4은 기후변화의 원인인 지구온난화의 주요한 원인으로 여겨지고 있다. CO_2와 CH_4에 대한 발생과 소멸 과정은 지속적인 감시와 관측이 요구되고 있으며, 전지구적 규모뿐만 아니라 국지적 규모의 시•공간 특성이 정량적으로 반영된 자료를 필요하고 있다. 국립기상과학원은 안면도 FTS 사이트 운영 및 자료처리 개선을 통하여 고품질 탄소 감시 자료를 생산하고, CO_2 단기변동성에 대한 민감도(Dmitry. A. Belikov et al., 2017) 및 상대 강도의 변동 특성을 평가하고자 한다. 이는 국지 및 전지구적 시•공간 규모의 정량적 특성을 파악하고, 지역적 탄소 순환을 이해하는데 기여할 것으로 판단된다.

FTS 환경개선은 태양강도·기상자료의 수집 체계와 연속관측·자료검증의 안정성 개선으로 구성된다. 실시간 관측되는 태양강도와 기상자료는 대기농도 분석을 위한 초기 입력 자료로 통합·개선되었다. 그리고 연속관측과 자료수집의 자동화 및 탄소관측자료 품질 검사 개선을 통해 스펙트럼 생산 체계의 고품질화를 유도하였으며, 향후 온실가

스 연직 프로파일 생산의 기반이 될 것으로 판단된다.

FTS 환경개선 결과는 여러 관측요소의 검증 수치로 나타났다. ① 관측정확도=0.99. 이는 전 지구 온실가스 위성검증 네트워크(Total Carbon Column Observing Network; TCCON)의 권고 기준인 0.98보다 0.01 높은 수치이다. 여기서 0.99의 의미는 FTS 광학계의 광학 이동 경로 차이(Optical Path Difference; OPD)의 측정 오차가 1 % 이하를 나타내며, CO_2 농도로 환산할 경우 0.013 ppm 이하의 오차 수준을 의미한다. ② 수감부 신호강도 정밀도=93. 이는 TCCON 권고 값인 83 보다 112 % 이상의 정밀도를 나타낸다. 여기서 93은 대기 중 측정 가능한 흡수 스펙트럼이 100개라고 가정할 때, 93개를 분석할 수 있다는 의미이며, 이 수치가 높을수록 관측과 모델의 일치성 또한 높아진다.

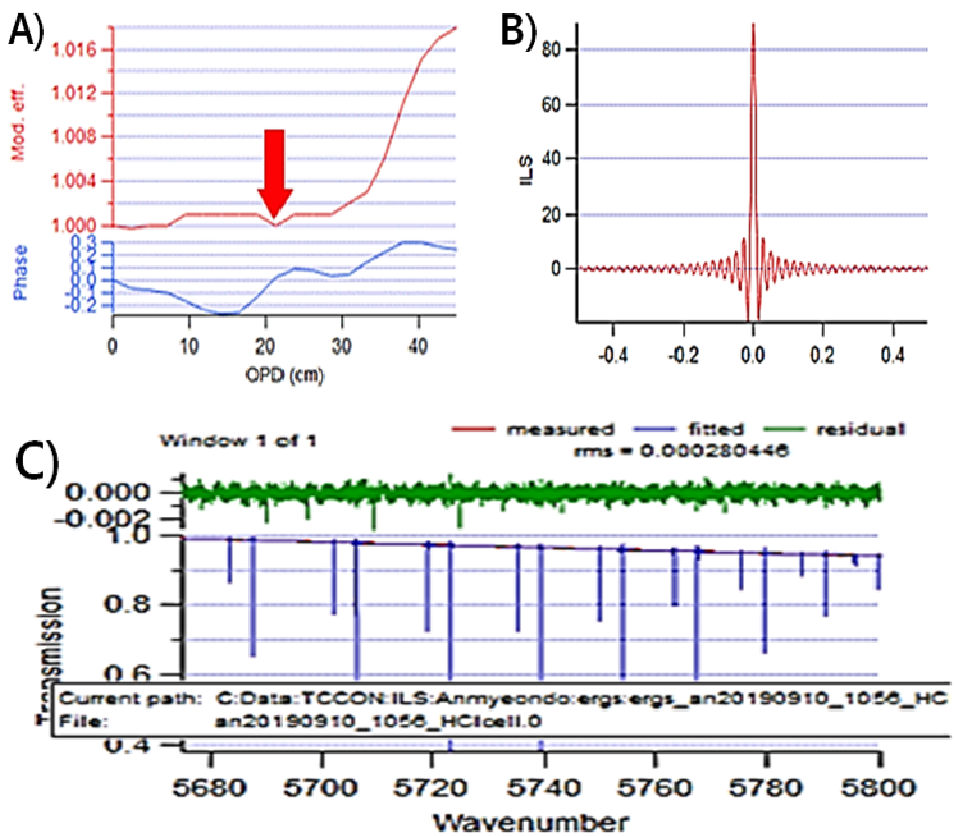


Fig. 3.2.1. FTS observation techniques to improve results. A) is equipment accuracy. The accuracy of 0.99, B) is the signal precision of the ILS of 93 point, C) is a simulated spectrum matches value of 99.998 %

실제 FTS에서 관측된 스펙트럼과 모델로 모의된 스펙트럼 일치성은 99.998 %로 나타났으며, 이는 TCCON 상위 5개 사이트(캘리포니아 공대, 토론토 대학 등)를 능가하는 성능이다(Fig. 3.2.1.).

CO_2 단기변동성에 대한 민감도 및 상대강도의 변동 특성은 전 세계 탄소 배출량의 30 %를 차지하고 가장 강력한 CO_2의 변동성을 보이는 동아시아 지역 탄소순환 이해에 상당히 중요하다. 안면도 FTS 관측소는 편서풍 방향에 위치하고 있으며, 계절변동 특성이 뚜렷하다. 또한 서쪽 황해와 동쪽 내륙에서 유입되는 기류에 따라 잠재적 발생원의 영향에 대한 상대적 민감도를 분석 할 수 있다.

Table 3.2.1는 안면도 FTS와 지구대기감시(Global Atmosphere Watch; GAW) 사이트에서 관측된 CO_2의 연 평균 농도를 나타낸 것이다. FTS는 연직 농도를 GAW는 지표 근처 농도를 각각 대표하므로 상대적으로 FTS CO_2 농도가 낮게 나타난다. 두 관측 자료 모두 지속적으로 농도 경향을 보이고 있으며, 연평균 증가율은 2.4~3.0 ppm/yr로 서로 유사하게 나타났다.

안면도 FTS와 GAW 관측 CO_2와 배출·흡수원의 연관성을 파악하고 변동 특성의 과학적 이해 제고를 위해 안면도 FTS 관측 CO_2의 계절 변동 및 공간 대표성을 연구하였다(Fig. 3.2.2.). 분석에 사용된 모델은 FLEXPART이며, 자료 기간은 2014년 1월에서 12월이다. 모든 계절에 대한 공간 대표성의 유효 범위는 $-1.0 \sim 1.0(\mathrm{ppm}(\mu\mathrm{mol}(\mathrm{m^2s})^{-1})^{-1})$이다. 봄철에 높고 여름철에 낮은 CO_2의 계절 변동 특성과 일치하게 FTS 관측 CO_2의 공간 대표성이 변동하는 특성을 보였다. FTS 관측소의 CO_2 대표영역은 일본해, 일본, 한국, 북한, 극동러시아, 중국 동부지역을 포함하고 있으며, 한반도에 대한 인접 국가들의 영향성을 확인할 수 있다. 특히 가까운 배출 지역인 중국 동부 산업지역에 대한 한반도 영향의 상관관계를 살펴볼 수 있다.

Table 3.2.1. The time series of FTS and GAW observed CO_2.

Station	2014 year	2015 year	2016 year	2017 year	2018 year
FTS CO_2	396.91 ppm	399.32 ppm	402.97 ppm	406.04 ppm	409.08 ppm
GAW CO_2	404.60 ppm	407.00 ppm	409.90 ppm	412.20 ppm	415.20 ppm

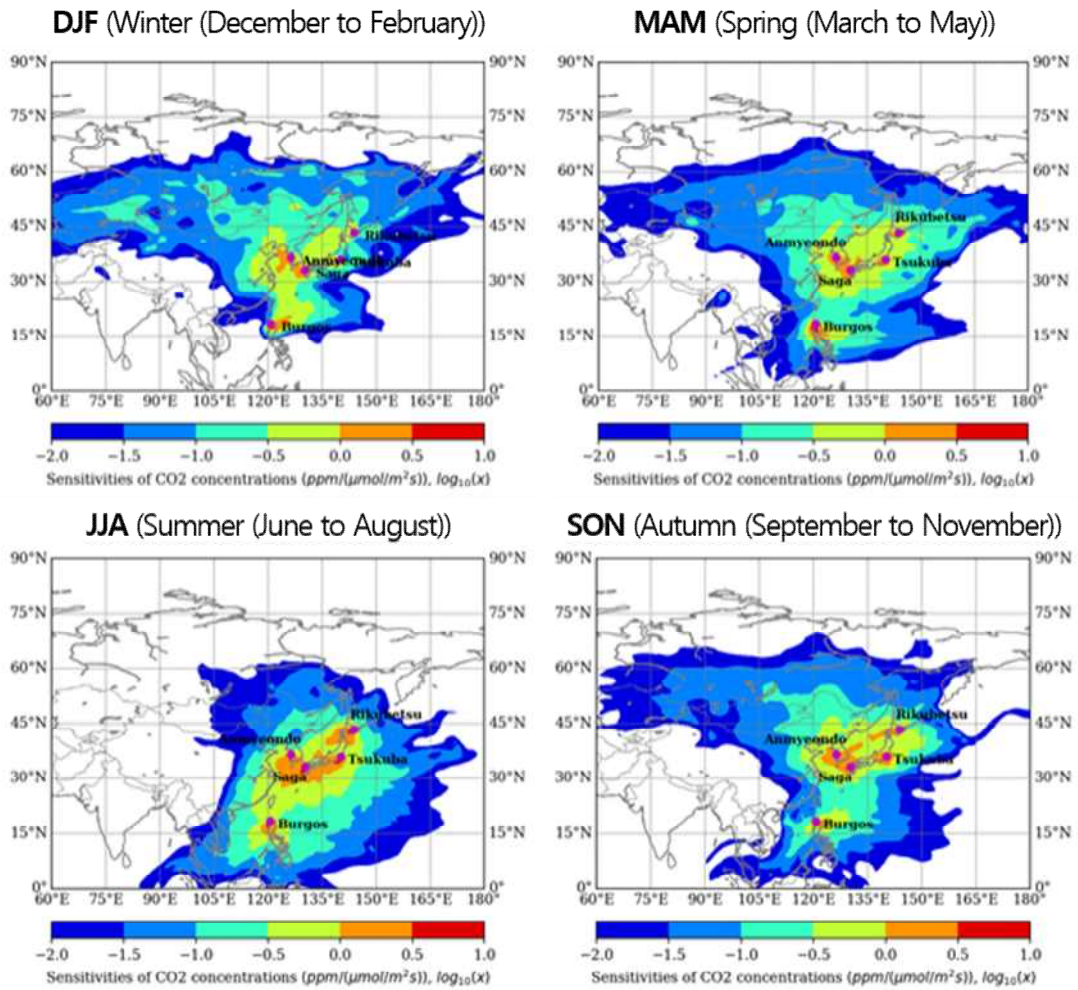


Fig. 3.2.2. The sensitivity of CO_2 concentrations (ppm(μmol(m^2s)$^{-1}$)$^{-1}$) computed from the FLEXPART model using the Anmyeondo FTS station in 2014.

CO_2의 계절변동은 육상 생태계 교환의 불균형에 의해 제어될 가능성이 가장 높기 때문에 봄철에 가장 높은 CO_2 값을 설명 할 수 있다. 또한 여름철 가장 낮은 CO_2 농도의 발생은 식물성장과 관련된 생물권의 탄소 흡수 영향으로 설명 된다. 안면도 대표영역의 특징은 겨울철 낮은 고도의 행성경계층(Planetary Boundary Layer; PBL)과 활발한 수평 이류로 인한 넓은 공간 대표성이다. 그리고 계절풍의 영향으로 풍향에 따른 대표영역의 변화가 뚜렷하며, 주변국가의 영향성 또한 차이가 난다.

보다 상세한 분석을 위하여 다음의 두 가지 향후 연구를 추진할 계획이다. 첫 번째,

풍향의 변화로 인한 대표영역의 계절 변화이다. 계절에 따른 PBL 고도 변화를 정량화하고, 이를 통하여 공간 해상도가 낮은 대류권의 층별 특성을 분류하는 것이다. 이 분류는 공간 민감도의 정보를 제공하며 지역 CO_2 변화의 상대강도를 정량화 하는데 유용할 것이다. 두 번째, 주변 배출 및 흡수원에 대한 상대강도 정량화이다. 이는 해안 및 육지 등의 영향을 계절별로 분류하고 일시적 또는 연속적 특성에 따라 강도를 수치화하여 계절변동에 따른 탄소변화를 정량화하는 것이다.

2. Comparison of regional simulation of biospheric CO2 flux from the updated version of CarbonTracker Asia with FLUXCOM and Other Inversions over Asia

(1) Introduction

Asia is one of the regions with large uncertainties in the estimates of net ecosystem exchange (NEE) of CO_2 . The uncertainties are driven by the sharp growth of fossil fuel emissions in most Asian countries. This growth has substantially affected the CO_2 balance of Asia and led to an increased variability of the regional carbon cycle (Francey et al., 2013; Patra et al, 2013). Asia plays a key role in changing the global carbon cycle given its massive fossil fuel CO_2 emissions that are unlikely decrease in the near future (Labzovskii et al., 2019). Uncertainty in the fossil fuel emissions significantly contributes (32 %) to the uncertainty in the land biosphere sink change as well (Thompson et al, 2015). Thus, the lack of a robust and precise quantification of the natural CO2 fluxes in Asia limits our understanding about the links between the NEE flux and external forcing, such as meteorological variability, including the impact of extreme events, like droughts and cold spells, and trends in land-use change. Subsequently, forecasting the evolution of the land sink in Asia is also severely hindered. Moreover, all these factors affect

the accuracy of the global budget of NEE estimates.

The inverse modeling estimates of CO_2 fluxes need an accurate simulation of observed atmospheric CO_2 concentrations since systematic model biases tend to directly translate into biased flux estimates. There have been many regional inverse modeling studies (e.g., Europe, North America) and many reported discrepancies in flux estimates and in their spatial distributions (Gurney et al., 2002; Gurney et al. 2003; Basu et al., 2018). The discrepancies are mainly attributed to differences in modeling approaches. The other important aspect is that, in most inversions, the land cover classes do not fully encompass the ecosystem variability that results in the uncertainty of the flux estimates. Recently, Kenea et al. (2019) assessed the accuracy of the CarbonTracker Asia version 2016 (CTA2016) model simulation of CO_2 concentrations using in-situ surface observations in East Asia and found that a better agreement is observed in most places during daytime than nighttime.

We present the CTA2017 simulated NEE flux run by the National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Republic of Korea, along with the global inversion models CT2015 to CT2017, Copernicus Atmospheric Monitoring Services (CAMS), Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC-III), Jena CarboScope inversion system developed at the MPI for Biogeochemistry Jena, and FLUXCOM. The following updates were made in CTA2017: The assimilation window was extended to 12 weeks while in the previous version, the assimilation window was chosen to be 5 weeks long; the vertical diffusion scheme was changed to the Yonsei University planetary boundary layer (YSU PBL) scheme; land biosphere prior uncertainty was larger than the previous release; and the horizontal transport resolution was 1° × 1° degrees of latitude and longitude while in CT2017, the resolution is 2° × 3° degrees of latitude and longitude. Therefore, the analysis focuses on analyzing and comparing CTA2017-simulated NEE flux with FLUXCOM and other global inversions in terms of spatial and temporal distribution over Asia. In short, the following questions are addressed in this work:

What is the consistency and discrepancy of NEE flux of CTA2017 compared to

MACC, CAMS, Jena CarbonScope, and FLUXCOM in terms of monthly, seasonal, and annual time scales?

What is the impact of the nesting approach on the strength of the carbon sink and source over Asia at seasonal and annual timescales?

Table 3.2.2. List of the inverse modeling systems used in this work. Note that inversions account for interannually varying (IAV) prior fluxes (Yes or No) and transport (Yes or No)

Model	Lat × lon	Fossil Fuel Priors	Biosphere and Fire Priors	Ocean Priors	Transport Model	No. Vertical Layers	Meteorological fields	Time Span	IAV Priors	IAV Wind
CT2017	2°×3° global 1°×1° over Asia	ODIAC2016 and Miller	CASA (GFED 4.1s & GFED_CMS)	Jacobson et al. (2007) and Takahashi et al. (2009)	TM5	25	ERA-Interim	2001 - 2013	Yes	Yes
Jena (s04_v22)	3.8298°×5°	CDIAC			TM3	19	NCEP	2004 - 2013	No	Yes
CAMS (v18r1)	1.8947°×3.75°	CDIAC/GCP 2016	ORCHIDEE (climatology) +GFEDv4	Takahashi et al. (2009)	LMDZ	39	ERA-Interim	2001 - 2013	Yes	Yes
MACC (v14r2)	1.8947°×3.75°	CDIAC/GCP 2016	ORCHIDEE (climatology) +GFEDv4	Takahashi et al. (2009)	LMDZ	39	ERA-Interim	2001 - 2013	Yes	Yes

(2) Assessment of Consistency and Discrepancy of Spatial and Domain Aggregated NEE Flux

Here, we compared the spatial distributions of annual and summer means of NEE of CTA2017 with FLUXCOM estimates (Fig. 3.2.3). The overall pattern of the annual mean NEE indicates that the inversion model underestimated the carbon uptake against FLUXCOM across the entire region of the domain. The NEE values from CTA2017 varied within -0.5 to $0.5\,\mathrm{gC\,m^{-2}\,d^{-1}}$ while values from FLUXCOM range from -2.5 to $0\,\mathrm{gC\,m^{-2}\,d^{-1}}$, with the maximum carbon sink observed over the southeast part of the region. Furthermore, a spatial Pearson's correlation coefficient

was computed between CTA2017 and FLUXCOM based on the monthly mean values. The result offers a maximum negative correlation of －0.63, over Southeast Asia, as shown in Fig. 1d. In summer, the CTA2017 (prior and posterior) exhibited a prevalent carbon source in south and Southeast Asia, whereas the FLUXCOM showed a contrasting pattern in this part of the region. In this sub-region, the posterior flux from the inversion is strongly influenced by the prior flux, since the posterior NEE estimation has a small departure from the prior estimation. The land cover inconsistency is one of the main drivers for the discrepancy of the NEE estimates. We discerned some mismatches on individual pixel-wise biomes that were assumed by CTA2017 and MODIS observations in a region where a strong negative correlation obtained. A negative correlation shown in Japan and northeastern China was mostly confined in forest fields, which are based on the land cover classification category used by the inversion. According to the MODIS land cover classification, those forest field covers were not shown in those regions; rather, it depicted mixed forest, cropland, and grassland.

Fig. 3.2.4 depicts the time series of yearly aggregated NEE flux over the global

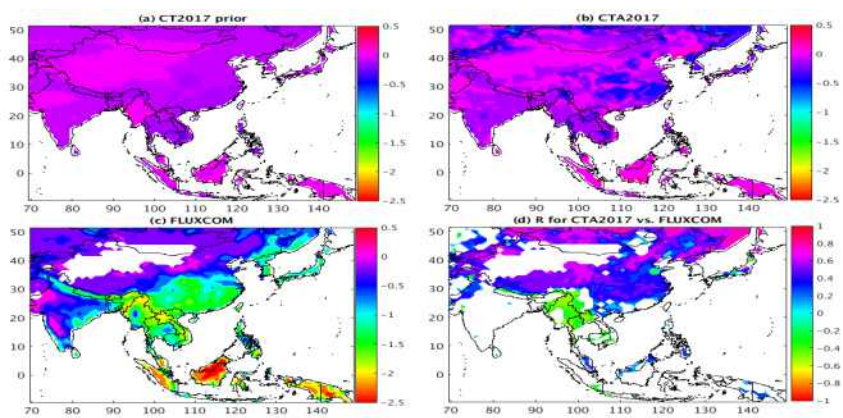


Fig. 3.2.3. Annual net ecosystem exchange of CO_2 (NEE) flux spatial distribution ($gC\,m^{-2}\,d^{-1}$) from CT2017 prior (a), CTA2017 posterior (b), FLUXCOM (c), and correlation between CTA2017 and FLUXCOM (d) for the 2001－2013 period. Pearson's correlation coefficient (R) values shown are significant at a 95% confidence interval.

scale (a) and Asia (b) from CT2015, CT2016, CT2017, CTA2016, CTA2017, JENA, CAMS, and MACC along with the FLUXCOM. Globally, all models revealed an increasing trend of the carbon sink between 2001 and 2011 and a decreasing trend from 2011 onwards (Fig. 3.2.3 (a)). In addition, the interannual variability of the land carbon sink is evident in all models, but the magnitude is different. Note that the inverted interannual variability of (IAV) NEE flux presented here was constrained by observations, priors, and wind. The land carbon sink was the lowest in 2002 and was the highest in 2011. The weaker land carbon sinks in 2002, 2005, 2007, and 2010 correspond to strong El Niño events while the stronger land sink in 2008 and 2011 corresponds to strong La Niña events. The IAV of the land carbon sink is mainly driven by the ENSO, which is dominated by tropical land fluxes (Gurney et al., 2012). Globally, in each individual year, the estimates of carbon sink from all versions of CarbonTracker are smaller than CAMS and MACC, which might be mostly explained by the use of different prior flux. As seen from Fig. 3.2.4(b), such an IAV of the yearly aggregated NEE estimates from Asia is also explicitly observed by the models. For example, both CTA2017 and CT2017 captured the IAV, but their magnitudes are different, and this leads to divergence of the annual aggregated NEE results.

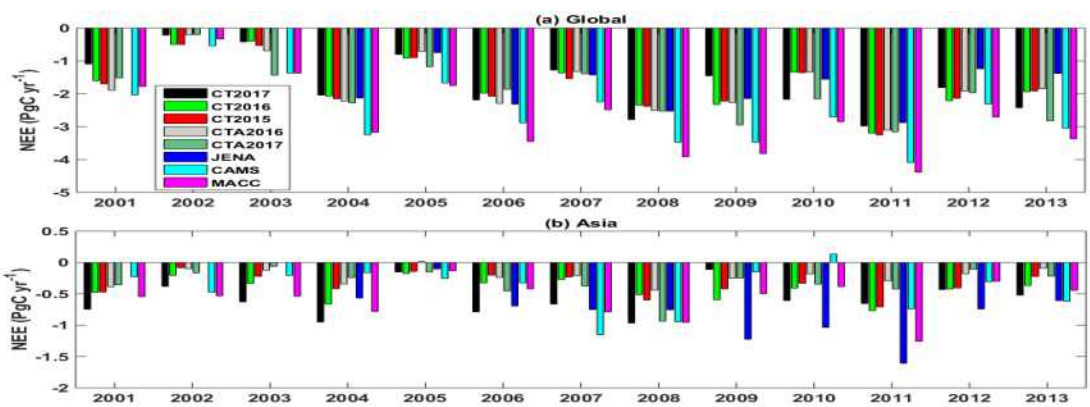


Fig. 3.2.4. The time series of yearly posterior NEE flux integrated over the global scale (a) and Asia (b) derived from CT2017, CT2016, CT2015, CTA2016, CTA2017, JENA, CAMS, MACC inversions.

At our domain scale, CTA2017 estimated the annual average aggregated carbon sink to be −0.32 PgC yr^{-1}, which is smaller than CT2017, CAMS, MACC, Jena, and FLUXCOM. The annual average of CT2017, CAMS, MACC, Jena, and FLUXCOM estimates were −0.58, −0.42, −0.58, −0.81, and −5.86 PgC yr^{-1}, respectively (Table 3.2.3). A difference with FLUXCOM was mainly due to differences in the forest in the tropics. Errors in the transport model, inverse model set-up, and lack of data for assimilation are contributors for the disagreement in estimates of NEE among the inversion models. For example, the resulting discrepancy between MACC and CAMS might be driven by the differences in the number of data used for assimilation, since they have the same transport model and inverse set-up. As we have seen for the IAV, quantified as the standard deviation of annual NEE, the CT2017 are higher than the earlier version of the CarbonTracker, and less than CAMS, MACC, and Jena CarboScope by 63.6 %, 36.4 %, and 86.4 %, respectively. Very recently, Hu et al. [12] discussed the difference in the North American NEE response to ENSO from different resolutions of CarbonTracker models, which used

Table 3.2.3. Annual NEE flux (natural + fire flux) integrated over the global scale and Asia for 2001–2013, except for Jena CarboScope (2004–2013), is provided. Unit is given in PgC yr^{-1}.

Models/ Upscale data	NEE flux (PgC yr^{-1})		
	Asia Posterior	Prior	Global Posterior
CTA2017	−0.32 ± 0.22	0.25 ± 0.13	−1.96 ± 0.82
CTA2016	−0.22 ± 0.13	0.25 ± 0.13	−1.72 ± 0.83
CT2017	−0.58 ± 0.26		−1.71 ± 0.80
CT2016	−0.43 ± 0.18		−1.71 ± 0.80
CT2015	−0.34 ± 0.18		−1.74 ± 0.78
CT2013B	1.01 ± 1.50		−2.36 ± 4.84
CAMS	−0.42 ± 0.36	−0.08 ± 0.007	−2.55 ± 0.98
MACC-III	−0.58 ± 0.30	−0.08 ± 0.007	−2.72 ± 1.15
Jena CarboScope	−0.81 ± 0.41		−1.84 ± 0.66
FLUXCOM	−5.86 ± 0.03		
Thomson et al. (2016)	−0.46 (Asia,1996–2012)		

a similar suite of atmospheric CO_2 observations and the same prior fluxes. They pointed out that the difference in the estimated NEE response to ENSO may result from the difference in the transport models' resolutions.

(3) Comparisons of Temporal Distributions of Aggregated Mean NEE Flux across Biomes

Here, we analyzed the time series of aggregated mean NEE flux across biomes in Asia between CTA2017, and CT2017 versus FLUXCOM. The overall results revealed good consistency of the seasonal variations over conifer forest, broadleaf forest, mixed forest, grass/shrub, and fields/woods/savanna; poor agreement in croplands and shrub/woods; and the worst agreement in tropical forest land. The croplands and scrub/woods land of different climate zones might be the drivers of poor agreement for seasonal variations between the CarbonTracker models and FLUXCOM. We also indicated the Pearson's correlation coefficient of NEE of CTA2017 and CT2017 with FLUXCOM across biomes and the result suggested that both were well correlated in conifer forest (Table 3.2.4), with a correlation coefficient of 0.87. Besides, we obtained a linear regression slope of 0.82 (Table 3.2.4). In mixed forest lands, all depicted a clear seasonal cycle of NEE, and further confirmed the level of agreement between CTA2017 and CT2017 with FLUXCOM, with correlation coefficients of 0.79 and 0.70, respectively. The inverse models exhibited an evidently decreasing carbon uptake, particularly for 2002 – 2007.

The annual mean NEE of broadleaf forest showed some differences between the estimates of CTA2017 (– 0.04 ± 0.50 gC m^{-2} d^{-1}) and CT2017 (– 0.16 ± 0.60 gC m^{-2} d^{-1}) than the rest of the ecosystem types, which is caused by the nesting effect. For example, in conifer forest, the peak carbon uptake and source occurred in summer (about – 4.20 gC m^{-2} d^{-1} in 2001 and 2002) and in winter (around 2.0 gC m^{-2} d^{-1} in 2004), respectively, as observed by both inversions and FLUXCOM. Moreover, both CarbonTracker models portrayed a decreasing trend in carbon

uptake for the period of 2001 – 2008, and an increasing trend for 2009 – 2013. On the one hand, a strong drawdown of carbon across all ecosystem types was exceptionally determined by the FLUXCOM, which was not observed by the inversion models.

Table 3.2.4. Summary of the statistical relationships of NEE flux averaged over individual biomes between CTA2017 and CT2017 with FLUXCOM in Asia. Note that all the correlation coefficients are statistically significant (< 0.05) and * indicates insignificance. Pearson's correlation coefficients (r1) and slope (m1) represent for CTA2017 vs. FLUXCOM, while r2 and m2 for CT2017 vs. FLUXCOM. Unit for NEE flux is $gC\,m^{-2}\,d^{-1}$.

S.N	Land cover type	r1	r2	m1	m2
1	Conifer forest	0.87	0.87	0.87	0.82
2	Broadleaf forest	0.67	0.68	0.42	0.50
3	Mixed forest	0.79	0.70	0.69	0.65
4	Grass/shrub	0.72	0.58	0.77	0.61
5	Tropical forest	−0.15	−0.12*	−0.15	−0.14
6	Scrub/woods	0.20	0.49	0.14	0.41
7	Fields/woods/savanna	0.60	0.52	0.45	0.45
8	Croplands	0.43	0.63	0.22	0.4

(4) Spatio-Temporal Distribution of NEE Flux

Here, we presented annual and seasonally averaged posterior NEE flux from CTA2017 and CT2017 during 2001 – 2013 in order to examine the impact of the nesting approach on the spatial pattern of carbon sink and source strength. In general, the CTA2017 revealed a decrease of the annual mean carbon sink prevailing over the northeast region of the domain. This decrease of the carbon uptake was estimated about $0.20\,gC\,m^{-2}\,d^{-1}$ predominantly across the ecosystem types of broadleaf forest, croplands, and semitundra over the Eurasia temperate region of the domain as compared to CT2017. On the other hand, in Eurasia boreal, the uptake was declined in mixed forest by about $0.40\,gC\,m^{-2}\,d^{-1}$, and increased in confer forest by around $-0.15\,gC\,m^{-2}\,d^{-1}$. Interestingly, the feature of NEE flux shown from both

experiments across the croplands in the northern Indian and Southeast tropical region is somewhat different. Particularly in northern India, CTA2017 exhibited less carbon release, a maximum of 0.34 gC m^{-2} d^{-1}, than CT2017. During summer, carbon release is predominant in the south and Southeast Asia, where the estimation made by the nested grid was lower again. In autumn, the carbon release estimate from CTA2017 was reduced, on average by 0.22 gC m^{-2} d^{-1}, in the croplands in eastern China, but it was higher, by about 1.04 gC m^{-2} d^{-1}, in the broadleaf forest in northeast Asia. Some differences are observed in the strength of the carbon sink and source, which is linked to the transport model resolution differences.

(5) Conclusions

We analyzed the consistency and discrepancy of the optimized NEE flux over Asia from CTA2017 through a comparison with FLUXCOM and other global inversions results to better understand the uncertainties of NEE in the region during the period of 2001 - 2013. While comparing CTA2017 with the global inversions, the carbon uptake obtained from CTA2017 was smaller than CAMS, MACC, Jena, and FLUXCOM. The annual average of CTA2017, CAMS, MACC, Jena CarboScope, and FLUXCOM estimates were −0.32, −0.42, −0.58, −0.81, and −5.86 PgC yr^{-1}, respectively. The inversion result revealed a large discrepancy with FLUXCOM, and this was mainly due to the FLUXCOM estimates of NEE over the tropical forest. Furthermore, we showed the level of agreement for the temporal aggregation of NEE for individual biomes between CTA2017 and FLUXCOM at a monthly resolution. The overall results demonstrated good consistency of the time series of monthly NEE over conifer forest, broadleaf forest, mixed forest, grass/shrub, and fields/woods/savanna; poor agreement in croplands and scrub/woods; and the worse agreement in tropical forest land. The key problems are underrepresentation of FLUXCOM NEE estimates by limited eddy covariance flux measurements, the role

of CO2 emissions from land use change not accounted for by FLUXCOM, sparseness of surface observations of CO_2 concentrations used by the assimilation systems, and land cover inconsistency between top-down and bottom-up systems.

We examined the impact of nesting on the spatial pattern of the strength of the carbon sink and source by comparing the CTA2017 and CT2017 optimized NEE fluxes in terms of seasonal and annual time scales over the region of interest. Within the experiments, we noted some differences in the magnitude of the carbon sink and source emerge both spatially and temporally. For the annual average, CTA2017 indicated a carbon uptake reduction by a magnitude of $\sim 0.20\,\mathrm{gC\,m^{-2}\,d^{-1}}$ largely across broadleaf, cropland, and semitundra ecosystems over the Eurasia temperature region. Furthermore, all magnitudes of the carbon sink and source varied within the experiments. For example, during summer, carbon release prevailed in tropical Asia, where the estimation shown by CTA2017 was lower than CT2017. The annual aggregated NEE estimates of CTA2017 and CT2017 were -0.32 and $-0.58\,\mathrm{PgC\,yr^{-1}}$, respectively. Both models unveiled IAV of NEE flux, but their magnitudes were different and this led to differences in the annual aggregated results. Differences in the estimated IAV of NEE in response to ENSO may stem from the differences in transport model resolutions.

This finding suggests that a detailed investigation on the FLUXCOM and inverse estimates is most likely required not only in temperate regions of Asia but also in the tropics. In addition, this report also recommends further investigation on how the updates made in CarbonTracker affect the interannual variability of the aggregate and spatial pattern of NEE flux in response to the ENSO effect over Asia.

3. ATMOSPHERIC CO2 VARIABILITY OVER EAST ASIA AND KOREA CONTRASTS THE GLOBAL CO2 GROWTH PATTERNS.

(1) Introduction

During the last 50 years the world has witnessed permanent growth in the atmospheric CO_2 concentration, a principal driver of the global warming. Often, CO_2 atmospheric growth is defined as the global Interannual Variability (IAV) of XCO_2 that may fluctuate within a range of 1.7-3.2 ppm/yr. The main drivers of the global IAV of XCO_2 are El-Nino Southern Oscillation (ENSO), fossil fuel CO_2 emissions and the dynamics of the terrestrial carbon sink. The mechanism of the interaction between fossil fuel CO_2 emissions (FFCO2) and the IAV of XCO_2 is fairly simple as emissions load extra carbon to the atmosphere, thus increasing the atmospheric CO_2 concentration. In contrast, the role of ENSO in controlling the IAV of XCO_2 is more complex because ENSO indirectly controls the IAV of XCO_2 by altering the temperature-water regime of ecosystems that affect the ecosystem productivity and associated land carbon sink. Enhancements or weakening of the ecosystem productivity would depend on the type and strength of an ENSO event.

If local drivers for the spatial fluctuations of the IAV of XCO_2 are important, the difference between the local and global IAVs of XCO_2 (DIAV from hereafter) will also be significant. From this standpoint, we suggest that EA is a proper choice for studying the DIAV phenomenon. Nowadays, EA is arguably the most rapidly developing region in the world and the strongest (30 % of all global FFCO2) net source of FFCO2 emissions . More importantly, EA is one of the strongest terrestrial carbon sinks in the Northern Hemisphere, connoting the potential presence of sink-driven signals in the DIAV in the region. Because studying only a large geographic region may overlook the significance of local factors in determining DIAV, we also selected the second local domain within EA. Korea was selected as a local domain since it is relatively well observed (from carbon cycle

perspective) compared to other countries in EA. We try to detect and understand the short-run drivers of DIAV over EA and Korea and the difference between the regional and the global atmospheric CO2 growth. This study (a) determines the statistical significance of DIAV for the spatial domains of EA and Korea (b) analyzes spatiotemporal relationship of DIAV with associated factors including net primary productivity, FFCO2, ENSO and temperature, and (c) uses this relationship to find the predictors for DIAV over EA and Korea.

For addressing to XCO_2 data we used two data assimilation systems including CTA (CarbonTracker-Asia) and Copernicus Atmospheric Service (CAMS) models. For inferring Net Primary Production (NPP) information, we used TRENDY experiment data. For temperature (T) data we sed NOAA NCEP-NCAR reanalysis. As FFCO2 data we used ODIAC emissions. For quantifying ENSO strength we used widely-used Oceanic Nino Index (ONI) from the Golden Gate Weather Service.

The study aims to investigate the contrasts in the IAVs of XCO_2 between local and global scales ('local scales' refers to the regional domains for EA and Korea). We calculate the global IAV of XCO_2 using the Buchwitz et al. (2018) approach that follows a conventional method for the IAV calculation. IAV simply represents the difference between XCO_2 in the last month of the year (i) and the first month of the same year (i-11) as Equation 1: "**IAV (XCO_2)year = XCO_2(i) - XCO_2(i-11)**". If December and January datasets are available, these months are automatically selected for i and i+11 elements in Eq 1.0 (of the same year), respectively. If December data were not available (a case of CTA in 2015 year), November data were used instead. It should be noted that IAV was initially calculated for each grid cell with 1 × 1 degree resolution (see Fig. 3.2.4). Thus, the local IAV of XCO_2 (EA or Korea) stands for the median IAV of XCO_2 across all the grid cells within the considered spatial domain. We could use only the IAV of XCO_2 constrained over the regions of interest (EA and Korea) in this work but the shape of the locally constrained IAV signal would be accurately determined by the global XCO_2 growth rate. Thus, we calculate and analyze DIAV that represents the difference between

IAV in a given spatial domain (IAVloc retrieved from CTA and CAMS) and the global scale (IAVglo taken from GCB). DIAV is primarily used for three types of spatial domain in this study (a single grid cell, EA and Korea) and the type of DIAV is always specified. DIAV is calculated as "**DIAV (XCO_2) = IAVloc - IAVglo**".

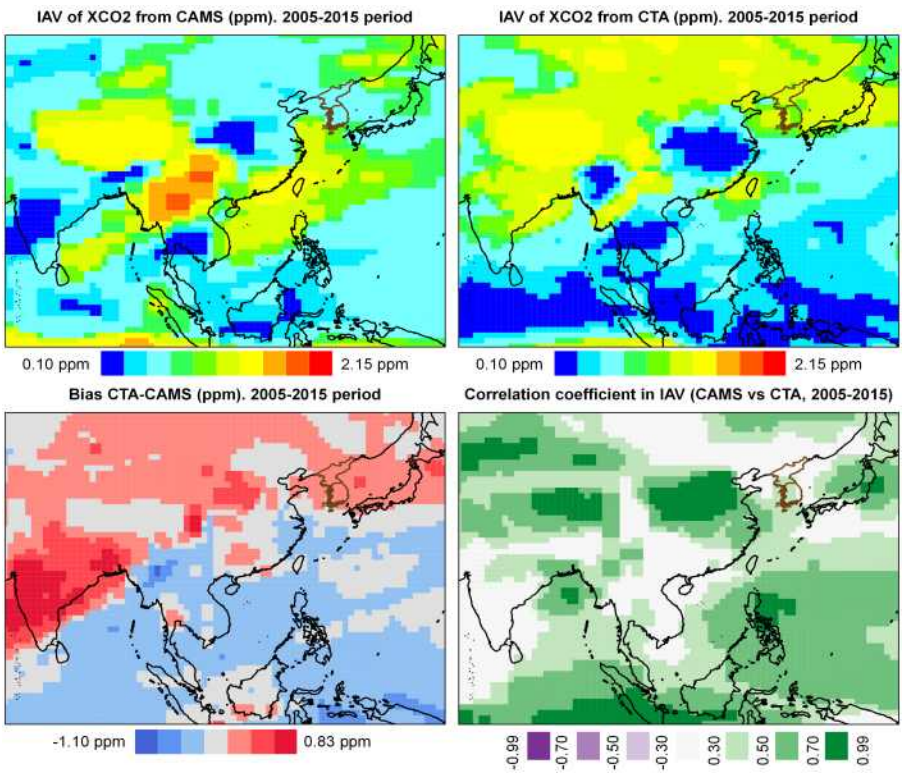


Fig. 3.2.5. Upper panels: IAV of XCO_2 from CAMS (left subplot) and CTA (right subplot) for EA. Bottom panels: median bias between CTA and CAMS in 2005-2015 period (left subplot) and grid cell correlation between IAV of XCO_2 for CTA vs CAMS (right subplot).

(2) Results

We determined that the differences between the local and global IAVs of XCO_2 are always statistically significant for the period 2005-2015 for both CTA and

CAMS. This is valid for both EA and Korea and the differences between the local and global parameters are always negative. The statistical significance of the difference between local scales IAVs (Korea minus EA) was also determined. Korea-to-EA comparison reveals that in the three consecutive years 2006, 2007 and 2008, the differences in IAVs between Korea and EA are not significant for CTA (p-value > 0.01). Seemingly, the factors that determined XCO_2 interannual growth over Korea and EA were identical. When CAMS is applied, the IAVs of XCO_2 over Korea and EA are statistically identical in 2006, 2008 and 2009 given the large p-values during these years (> 0.01) as indicators of statistical insignificance.

Further, we determine the factors driving DIAV in EA and Korea by addressing the associated parameters (NPP, temperature, FFCO2). Since we have noticed irregularities in both temporal and spatial correlations between CAMS and CTA (when DIAV is calculated) we also analyze "grid cell correlation". Grid cell correlation analysis is shown in Fig. 3.2.6 (CTA) and Fig. 3.2.7 (CAMS). Since our analysis is dedicated to the parameters of XCO_2 reflecting interannual dynamics (both IAV and DIAV concept), the associated parameters (NPP, T and FFCO2) are calculated in the form of IAV as well. We also remind that the IAV of XCO_2 of a certain year (year "a") can be often impacted of the carbon-related conditions prior to the year when growth is analyzed (year "a-1"). Therefore, we should analyze not only the relationship between DIAV and interannual dynamics of the related factor (i.e. IAV) but also with the related factor of preceding year "a-1" (presented with subscript "b" hereafter).

At first, we analyze the grid cell agreement of CAMS-retrieved DIAV with the associated parameters (Fig. 3.2.7). For CAMS we discover mostly sporadic and weak relationship between DIAV and other factors in 1 × 1 grid cells (both EA and Korea). There are few very minor clusters with fair-to-high positive agreement (r = 0.60-0.79) between DIAV and NPP (both NPPIAV and NPPb) in EA. We also analyze the DIAV-to-FFCO2 agreement and find no relationship between DIAV and FFCO2IAV in EA. However, for the DIAV-to-FFCO2b relationship, we discovered

a regional cluster of a very high positive correlation (r > 0.80) located to the north of the Korean peninsula including some part of Inner Mongolia and Heilongjiang provinces of China. The relationship between DIAV and T is more complex as we register three different regional clusters with fair-to-high correlation. In a northern cluster (almost precisely corresponds to aforesaid cluster located in the north-east direction from Korea) correlation between DIAV and Tb is negative and ranges from good (r = -0.60) to high (r = -0.79).

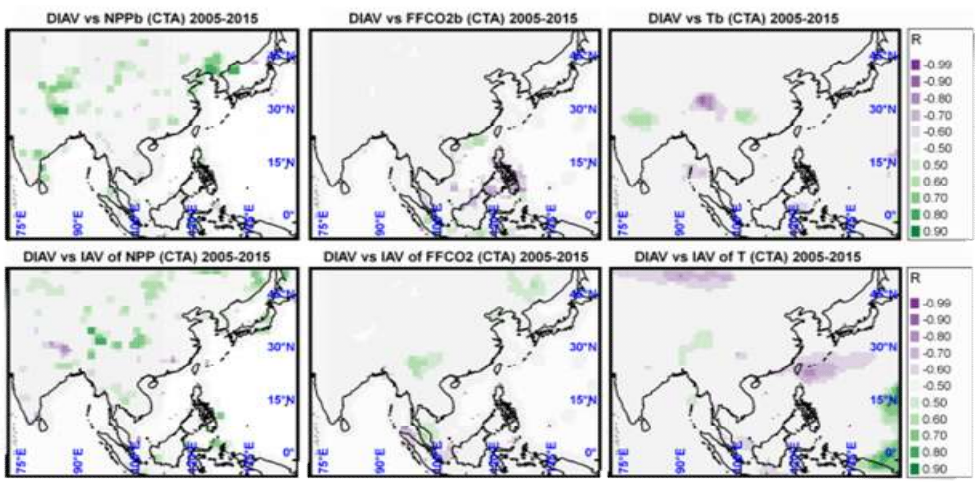


Fig. 3.2.6. Correlation between DIAV (from CTA) and side parameters in EA in 2005-2015 years. Top panels: NPPb, FFCO2b and Tb (from left to right) versus DIAV. Bottom panels: IAV of NPP, IAV of FFCO2 and IAV of Tb (from left to right) versus DIAV.

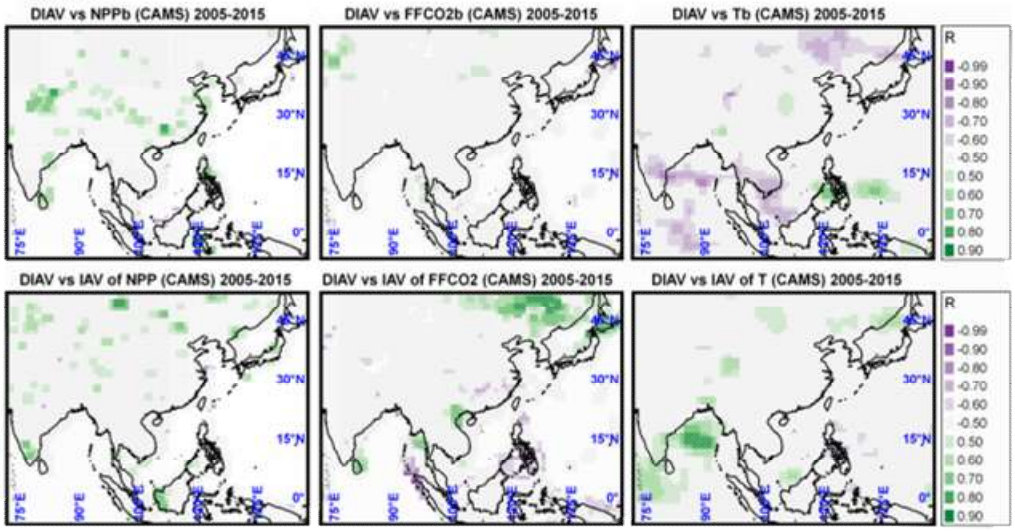


Fig. 3.2.7. Same as Fig. 3.2.6 but from CAMS.

We have learned that the correlation between DIAV and associated parameters indeed exists but exhibits with uneven patterns across different areas in EA. The most remarkable stable agreement between DIAV and the other factors (within grid cell correlation analysis) was registered in the northeastern EA cluster. We also analyze the spatial agreement between DIAV and associated parameters for every single year in 2005-2015. Thr uneven pattern of agreement between DIAV and other parameters at a single grid cell is explained by different responses of DIAV to the associated parameters specific for the year. It is noteworthy that the agreement between DIAV and medians of any parameter (NPP, FFCO2, T) for Korea is always higher than for EA (both CAMS and CTA). For instance, only a single parameter during a year has acceptable agreement with DIAV from CAMS ($r = -0.62$ between Tb and DIAV in 2010) in EA. Meanwhile for Korea, DIAV from CAMS exhibits more frequent and robust agreement with associated factors (NPP and T). The agreement with Tb exists (absolute $r > 0.50$) in 8 out of 11 cases (6 negative correlations and 2 positive correlations). The prominent agreement with NPPb is registered (absolute $r > 0.50$) in three cases, 2006 (positive), 2009 (negative) and

2010 (positive). We notice that the agreement of DIAV with NPP is reported only during the years when the DIAV-to-Tb agreement is very high (absolute r = 0.85 - 0.95). Another notable feature is the existence of counter-phased agreements of DIAV with Tb and NPPb (in most years T has negative relationship with DIAV, then NPP has positive relationship with DIAV). In some years, this pattern is inverted. For instance, in 2009, the relationship between DIAV-to-Tb is high and positive (r = 0.77) while DIAV-to-NPPb relationship turns to good negative (r = -0.68). Analysis of CTA approves all aforesaid findings (from CAMS) as DIAV has stronger relationship with associated parameters over Korea compared to EA. FFCO2 does not play prominent role in spatial correlation (which is explainable given the cumulative effect of FFCO2 in IAV of XCO_2 signal). The counter-phased agreement of DIAV with T and NPP is also observed using CTA. In this instance, if we calculate two spatial correlation coefficients r(DIAV-NPPb) and r(DIAV-Tb) for every year, we would obtain very high agreements between these coefficients using both CAMS (r = 0.89) and CTA (r = 0.94) in 2005-2015 over Korea.

The finding about counter-phasing of DIAV agreement with NPPb and Tb suggests a presence of strongly coupled effects between NPP and T that are uniquely pronounced over Korea. This phenomenon can be possibly driven by the ENSO phasing that may strongly influence temperature anomalies depending on the ENSO type. We check this suggestion using both CAMS and CTA but could not approve it since the DIAV-to-T-to-NPP counter-phased correlation did not show any stable agreement with ENSO phases. Explanation is the role of dense broad leaf cluster (DBC) in Korea (and its vicinity) in forming NPP. When the DBC cluster is considered, we discover fair agreement between DIAV and NPPf (r = 0.51) over factor where the agreement of the cluster NPP with DIAV over Korea is higher than Korea NPP with DIAV over Korea.

(3) Discussion and conclusions

We detected and identified the short-term drivers of the interannual variability of XCO_2 over EA and Korea and compared them against the global atmospheric CO_2 growth. For this, the DIAV parameter was calculated as the difference between the IAV of XCO_2 over Korea and EA (using CAMS and CTA) and the IAV of XCO_2 from global scales (using GCB) for 2005-2015. The annual median air temperature over Korea exhibits mainly negative spatial correlation with DIAV of the following year (r = 0.80 for both CAMS and CTA for 6 negative agreement cases). During the years when DIAV-to-T negative correlation was registered, NPP shows only positive correlation with the DIAV of the following year over Korea (r = 0.60 for CAMS and r = 0.51 for 2 and 1 positive case, respectively). However, in 2007, 2009 and 2013 years (2007 and 2013 represent decadal maxima of temperatures over DBC) the relationship between temperature and the DIAV of the next year turned positive. During these years, NPP exerted negative correlation with DIAV of the next year. NPP and temperature were literally counter-phased in regards to agreement with DIAV. Spatial correlation coefficients expressing agreement of DIAV with NPP and with temperature (rDIAV-NPPb) and rDIAV-Tb) approved the presence of the mutual counter-phase by both CAMS (r = 0.89) and CTA (r = 0.94) for Korea. The DIAV-to-T correlation was stronger and more frequently observed than the DIAV-to-NPP correlation. The weaker correlation between DIAV and NPP over Korea was explained in terms of the impact of the ecosystems located in the regional cluster to the north of Korea where a very strong link between DIAV and associated factors is registered. Grid correlation analysis indirectly points to the uniqueness of DBC cluster in controlling local IAV of XCO_2 signal as well. Most grid cells where the DIAV-to-NPPb correlation was high in Korea correspond to the cells shared with DBC cluster. For the cells that do no overlap with DBC, much weaker correlation is found.

제 4 장 결론

이 사업은 새로운 온실가스 농도경로에 따른 미래 기후변화 시나리오 산출을 통해 기후변화에 대한 과학적, 정책적 수요를 대응하기 위한 과학적인 기후정보를 생산하고 우리나라 지역의 탄소 입체관측을 활용하여 온실가스 정보의 시공간 분포에 대한 정량적 분석 기술을 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해 국립기상과학원이 자체 개발한 지구시스템모델인 K-ACE와 한영과학협력을 통해 공동 활용 중인 UKESM1을 활용하여 IPCC AR6가 채택한 신규 온실가스 농도경로를 따르는 전지구 시나리오를 생산하고 동아시아/한반도 지역까지 상세화한 지역기후 시나리오를 개발하였다. 또한, 동아시아 및 한반도 지역의 고품질 탄소감시 정보를 생산하고 관측기기 별 CO_2 비교 분석 및 동아시아 지역 식생에 따른 CO_2 농도에 대한 영향요소를 분석하였다. 각 주제별로 이번 연도 수행된 주요 개발 내용을 정리하면 아래와 같다.

BANMOS와 Viz-ESM을 개선하고 기후모델자료 DB의 사용자 권한을 세분화 및 세부검색기능을 고도화하는 등 자료 산출과 관리를 위한 프레임워크를 개선하여 업무의 효율성을 높였다. K-ACE와 UKESM1 기반의 신규 시나리오를 산출하였으며 이를 기반으로 「전지구 기후변화 전망보고서」 발간하였다. 새로운 SSP 시나리오는 기존 RCP 시나리오에 비해 미래 전지구 평균기온과 강수량의 증가폭이 증가하였으며 기온과 강수에 대한 극한값도 큰 폭으로 변화할 것이라고 전망하였다. 「지구온난화 1.5도 특별보고서」와 관련하여 동아시아 지역을 분석한 결과, 동아시아 평균기온은 전지구 기온상승과 유사한 수준으로 증가하는 경향을 보였으나 우리나라에서는 분석모델 간 편차가 크게 나타났다. 전지구의 강수량 상승에 비해 동아시아 지역과 한반도 지역의 강수량 증가가 큰 것으로 나타났다. 1.5 ℃에서 2.0 ℃로 기온이 상승할 때 90퍼센타일 이상의 높은 기온과 강수의 강도 및 빈도가 증가하였다. 특히 전지구, 동아시아 우리나라 순으로 강한 강수의 발생 확률이 높아지는 것을 확인했다. CMIP6 AerChemMIP 프로젝트 참여와 관련하여 에어로졸 화학실험을 수행하였으며 동아시아 지역에서 산업화 이전 대비 현재 기후에서의 근미래강제력에 의한 유효복사강제력이 감소하는 것으로 나타났으며 이는 에어로졸에 의한 단파복사변화에 의한 것이다.

신규 시나리오의 국내 활용증진을 위해 국내 전문가 설문 조사를 실시하였으며 국립

기상과학원의 시나리오 자료제공의 당위성과 수요자 요구사항을 확보하였으며, 신규 시나리오의 세계적인 활용을 위해 데이터노드를 구축하고 CMIP6 ESGF 분산 데이터 저장소에 출판을 완료하였다.

신규 지역기후 시나리오 생산을 위해 CORDEX-EA 2단계에 참여하는 모델들의 모의성능을 평가하였고 모든 모델이 우리나라를 포함한 극동아시아를 잘 모의하는 반면 티베트고원을 포함하는 동아시아 서쪽 지역에서 모의 성능이 떨어지는 것을 확인하였다. CMIP6 전지구 실험 강제력을 이용하여 과거 기후 모의실험을 수행하였으며 관측에 비해 한랭·다습하게 모의하였다. 한반도 지역에서 AR과 강수량의 상관성을 분석한 결과 여름철 전체 강수량의 약 35%이상이 AR이 상륙하였을 때 발생하는 것으로 나타났으며 AR 상륙 시 평균 강수와 극한 강수의 강도가 모두 증가하였다. HadGEM2-AO자료를 이용한 빙상과 빙하에 의한 미래해수면을 전망하고 CMIP5 21개 앙상블 결과와 비교한 결과 HadGEM2-AO의 미래해수면 전망결과가 CMIP5의 불확성 범위 내에 모의되는 것을 확인하였다.

안면도 탄소 지상관측 장비(FTS)의 관측환경과 자료처리 개선을 통해 고품질 탄소 감시 자료 생산기반을 구축하였고 CO_2 단기변동성에 대한 민감도 및 상대강도의 변동 특성 평가 정보를 생산하였다. 동아시아 지역 탄소추적시스템(CarbonTracker east Asia: CTA) 2017의 NEE (net ecosystem Exchange)와 FLUXCOM, CAMS, MACC 등의 NEE를 비교하여 동아시아 지역의 NEE 불확실성에 대한 이해를 높였다. 토지피복이 자료 간의 일치성에 영향을 주었으며 열대림 지역에서 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. 동아시아 지역과 우리나라 지역의 XCO_2의 연간변동성과 전지구 CO_2의 변화와 비교하였다. 우리나라의 XCO_2 변동성은 일차순생산량(Net Primary Production; NPP)에 비해 전년도 연평균기온과의 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

당해연도 연구결과는 신기후체제 및 새로운 주기의 국가 기후변화 대응정책 수립의 과학적 근거로 활용가치가 높으며, 국제표준규격에 맞는 신규 시나리오 생산 및 국제서비스를 통해 IPCC 제6차 평가보고서 및 기후변화 연구에 대한 기상청의 국제적 위상 제고에 기여할 것으로 기대한다.

참고 문헌

Beak H.J., J. Lee, H.S. Lee, Y.K. Hyun, C.H. Cho, W.T. Kwon, C. Marzin, S.Y. Gan, M.J. Kim, D.H. Choi, J. Lee, J. Lee, K.O. Boo, H.S. Kang, and Y.H. Byun, 2013, Climate Change in the 21st Century Simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. Asia-Pacific J. Atmos. 49(5), 603-618.

Andrews, T., J. M., Gregory, M. J., Webb, and K. E., Taylor, 2012, Forcing, feedbacks and climate sensitivity in CMIP5 coupled atmosphere-ocean climate models, Geophys. Res, 39, L09712.

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., 35pp.

Chen, X. L., Z. Guo, T. Zhou, J. Li, X. Rong, U. Xin, H. Chen, and J. Su, 2019, Climate sensitivity and feedbacks of a new coupled model CAMS-CSM to idealized CO2 forcing: A comparision with CMIP5 models. J. Meteor. Res., 33(1), 31-45.

Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P., Dickinson, R., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., Silva Dias, P., Wofsy, S., and Zhang, X.: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., Cambridge Univ. Press.

Eyering, V., S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, 2016, Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937-1958.

Feichter, J., Roeckner, E., Lohmann, U., Liepert, B., 2004, Nonlinear aspects of the climate response to greenhouse gas and aerosol forcing. J. Clim, 17, 2384 - 2398.

Forster, P. M., T. Richardson, A. C. Maycock, C. J. Smith, B. H. Samset, G. Myhre, T. Andrews, R. Pincus, and M. Schul, 2016, Recommendations for diagnosing effective radiative forcing from climate models for CMIP6, J. Geophys. Res. Atmos, 121, 12460 - 12475.

Gavrilov. N. M., et al, 2014, Comparisons of CH4 ground-based FTIR measurements near Saint Petersburg with GOSAT observations. Atmos. Meas. Tech. 7, 1003-1010.

Geibel. M. C. et al, 2012, Calibration of column-averaged CH4 over European TCCON FTS sites with airborne in-situ measurements. Atmos. Chem. Phys. 12, 8763-8775.

Guan, B., and D. E. Waliser, 2015, Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies, J. Geophys. Res. Atmos., 120, 12514 - 12535.

Ham, Y.-G., and H.-Y. Na, 2017, Marginal sea surface temperature variation as a pre-cursor of heat waves over the Korean Peninsula. Asia-Pac. J. Atmos. Sci, 53, 445-455.

Houweling, S. et al, 2000, Simulation of preindustrial atmospheric methane to constrain the global source strength of natural wetlands. J. Geophys. Res. 105, 17243 - 17255.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kritjansson, J., Iverson, T., Kirkevag, A., Seland, O., 2005, Responses of the climate system to aerosol direct and indirect forcing: Role of cloud feedbacks. J. Geophys. Res, 110.

Lavers, D. A., G. Villarini, R. P. Allan, E. F. Wood, and A. J. Wade, 2012, The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation, J. Geophys. Res., 117, D20106, doi:10.1029/2012JD018027.

Lee, J., M.-A. Sun, B.-H. Kim, H. Moon, H. M. Sung, J. Kim, and Y.-H. Byun, 2019, Evaluation of the Korea Meteorological Administration Advanced Community Earth-System model (K-ACE). Asia-Pac. J. Atmos. Sci, online publishe

Lee, W.-S., and M.-I. Lee, 2016, Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. Int. J. Climatol, 36, 4815-4830.

Min, S.-K., Y.-H. Kim, M.-K. Kim, and C. Park, 2014, Assessing human contribution to the summer 2013 Korean heat wave. Bull. Amer. Meteor. Soc, 95(9), S48-S51.

Neiman, P. J., F. M. Ralph, G. A. Wick, J. D. Lundquist, and M. D. Dettinger, 2008: Meteorological Characteristics and Overland Precipitation Impacts of Atmospheric Rivers Affecting the West Coast of North America Based on Eight Years of SSM/I Satellite Observations, J. Hydrometeorol., 9, 22-47.

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

NIMS, 2017, Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (Ⅸ), 110pp. (in Korean)

Oh, Y.-S. et al: Characteristics of greenhouse gas concentrations derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea. Atmos. Meas. Tech. 11(1 - 14) (2018)

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:1029/2009JF001373.

R. Dankers, N.W. Arnell, D.B. Clark, P.D. Falloon, B.M. Fekete, S.N. Gosling, et al., 2014 : First look at changes in flood hazard in the inter-sectoral impact model intercomparison project ensemble Proc. Natl. Acad. Sci, 111(9), 3257-3261.

R.M. Doherty, M.R. Heal, F.M. O'Connor, 2017: Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality Environ. Health (Lond.), 16, 33-44.

Schewe J, Heinke J, Gerten D, Haddeland I, Arnell NW, Clark DB, Kabat P, 2014 : Multimodel assessment of water scarcity under climate change. Proc Natl Acad Sci, 111(9), 3245 - 3250.

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.

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.

Sun, Y., T. Hu, X. Zhang, H. Wan, P. Stott, and C. Lu, 2018: Anthropogenic influence on the eastern China 2016 super cold surge. Bull. Amer. Meteor. Soc, 99, S123-S127.

Sun, Y. X. Zhang, F. W. Zwiers, L. Song, H. Wan, T. Hu, H. Yin, and G. Ren, 2014: Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. Nat. Clim. Change, 4, 1082-1085.

Wunch, D. et al, 2011, The Total carbon column observing network. Philos. T. R. Soc. A. 369, 0872112 - 20872112. doi.org/10.1098/rsta.2010.0240

Zhu, Y., and R. E. Newell, 1998, A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers. Mon. Wea. Rev., 126, 725-735.