

지역기후변화 시나리오를 이용한 분야별 아태지역 기후정보 응용지수 생산 모듈 개발 및 정보 제공

Developing a Production Module for a Climate Data Application Index in the
Asia-Pacific Region Using Regional Climate Change Scenarios

송봉근, 정여민 융합기술팀

발간사

최근 세계 곳곳에서 기상 이변이 빈번하게 발생하고 있으며 이로 인해 수많은 피해를 입게 되어 기후변화에 대한 관심이 높아지고 있습니다. 특히 이상기후, 기후변동, 기후대 변화 등은 가까운 또는 먼 미래의 농업 생산량, 수자원 확보, 건강, 재난대응 등 여러 분야에서 그 영향력이 매우 크며 작용하고 이에 따른 사회경제적 파급효과도 대단히 크게 나타납니다. 이러한 기후변화 영향에 대응하기 위하여 최근에는 전세계 규모에서 국가 단위의 지역 규모로 연구 영역이 옮겨가고 있으며 이와 관련한 기후정보 생산이 중요해지고 있습니다. 우리 센터에서는 지역기후변화와 응용분야의 기후정보 활용성 증대를 위한 사업을 꾸준히 수행하고 있으며 아태 지역뿐만 아니라 우리나라 지역에 대한 기후정보 생산에도 노력을 기울여 왔습니다.

이 연구보고서 “지역기후변화 시나리오를 이용한 분야별 아태지역 기후정보 응용지수 생산 모듈 개발 및 정보제공”은 기후정보 서비스 확대를 위한 응용정보 생산 및 기후정보 활용성 강화를 위한 기반 기술을 개발하고자 하는 취지에서 기획되었습니다. 국립기상과학원을 주축으로 국내 대학들이 참여하여 생산한 CORDEX-EA 지역기후모델 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 격자기반 편이보정 기법 개발과 농업, 보건, 방재, 산림 분야에 대한 9개 응용지수를 산출하였습니다. 이러한 결과는 CORDEX 사업에서 생산되는 전세계 여러 지역기후변화 시나리오의 편이보정에 적용 가능하고 다른 편이보정 방법을 이용한 격자 및 지점별 상세화 과정에 활용가능하다는 점에서 의의를 갖습니다. 또한 향후 기후정보를 활용할 때 사용자가 올바른 자료를 사용하고 이해할 수 있는 가이드라인을 제공할 수 있도록 노력해 나갈 것입니다.

이 연구보고서가 발간되기까지 많은 분들의 도움이 있었습니다. 보고서의 수준을 제고하도록 좋은 논평을 해주신 익명의 검토자들과 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 정여민 연구원, 그리고 이 연구보고서를 총괄하고 최종 집필한 송봉근 박사에게도 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

In this study, a grid-based bias correction method was developed to calculate the climate application index using CORDEX-EA regional climate change scenarios as a part an improvement in the infrastructure of technology used to apply climate data and the expansion of the APCC information service. For this purpose, CORDEX-EA climate change scenario data was converted to a 0.5 degree rectilinear grid. Daily historical, RCP45, and RCP85 for three regional climate models (HadGEM-RA, RegCM4, SNU-MM5) were used. Precipitation, surface temperature, maximum/minimum temperature, and relative humidity were selected to calculate the climate application index. Daily grid observations such as precipitation, temperature, and relative humidity were needed for grid-based bias correction using QM (Quantile Mapping) and calculation of the application index. Global observations in the form of daily grids were generally provided only for variables such as precipitation and temperature. Therefore, we compared the grid-based observations with three different reanalysis datasets and selected one to replace with observations of precipitation, temperature, and other variables. Using the grid-based observations (CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation and CPC daily maximum/minimum temperature) and the MERRA2 reanalysis data for QM, nine climate application indices were produced using the bias-corrected RCP45 and RCP85 regional climate change scenarios.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	2
2.1 자료	2
2.1.1 CPC 관측 및 재분석 자료	2
2.1.2 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료	5
2.2 방법	8
2.2.1 0.5도 격자 자료 변환	8
2.2.2 편이보정	11
2.2.3 기후응용지수	13
3. 연구내용	16
3.1 격자 기반 관측 자료 사용을 위한 재분석 자료 선정	16
3.1.1 CPC 강수 관측과 재분석 자료 비교 분석	16
3.1.2 CPC 최고/최저기온 관측과 재분석 자료 비교 분석	20
3.2 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과	24
3.2.1 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료의 편이보정 결과	24

3.2.2 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 차이-----	30
3.3 편이보정된 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오를 이용한 기후응용지수 산출-----	33
3.3.1 동아시아 지역 ETCCDI 기후지수-----	33
3.3.2 동아시아 지역 분야별 기후응용지수-----	39
4. 결론 및 토론-----	43
Ⅰ REFERENCES-----	45
Ⅰ 부록	
1. CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 결과에 대한 9개 기후응용지수-----	47
2. MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과에 대한 9개 기후응용지수-----	56

그림 목차

Figure 1. MERRA2의 강수 보정 알고리즘 흐름도 (source: Reichle et al. 2017) -----	4
Figure 2. 강수 보정 알고리즘의 2단계에서 육상의 보정된 MERRA2 강수를 산출할 때 1단계에서 주어지는 가중치 w (Figure 1 참고) (source: Reichle et al. 2017) -----	5
Figure 3. 지역기후모델 적분을 위한 CORDEX-EA 영역 -----	6
Figure 4. 곡선격자의 CORDEX-EA 자료를 0.5도 직선격자로 변환(위도: 139 × 경도: 163) -----	9
Figure 5. Quantile Mapping 방법 -----	12
Figure 6. 농업과 산림 분야의 기후응용지수 예시 (a) 작물기간(CP), (b) 최저기온지수(MTCI) -----	15
Figure 7. 전지구 및 동아시아 지역에 대한 CPC 강수 관측 자료와 재분석 자료의 기후값 비교(1980~2005년 기간 동안) -----	16
Figure 8. 동아시아 지역에 대한 CPC 강수 관측 자료와 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교 (1980~2005년 기간 동안) -----	17
Figure 9. CPC 강수 관측 자료와 재분석 강수 자료의 동아시아 지역 TCC 및 RMSE 평균값 비교(1980~2005년 기간 동안) -----	18
Figure 10. 동아시아 지역의 호우 사례 지역 -----	19
Figure 11. 호우 사례 지역 A에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료 -----	19
Figure 12. 호우 사례 지역 B에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료 -----	20
Figure 13. 호우 사례 지역 C에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료 -----	20
Figure 14. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최고기온과 재분석 자료 기후값 비교 (1980~2005년 기간 동안) -----	21
Figure 15. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최고기온과 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교 (1980~2005년 기간 동안) -----	22

Figure 16. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최저기온과 재분석 자료 기후값 비교 (1980~2005년 기간 동안)-----	23
Figure 17. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최저기온과 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교 (1980~2005년 기간 동안)-----	24
Figure 18. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 편이보정 전과 CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이-----	26
Figure 19. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 편이보정 전과 CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이-----	27
Figure 20. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 편이보정 전과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이-----	28
Figure 21. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 편이보정 전과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이-----	29
Figure 22. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 CPC 관측자료를 이용한 편이보정과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 자료의 평균값 차이----	31
Figure 23. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 CPC 관측자료를 이용한 편이보정과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 자료의 평균값 차이----	32
Figure 24. HadGEM3-RA QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값-----	35
Figure 25. RegCM QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값-----	36
Figure 26. SNU-MM5 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값-----	37
Figure 27. HadGEM3-RA, RegCM, SNU-MM5의 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 R10mm 차이값-----	38
Figure 28. HadGEM3-RA QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율-----	40
Figure 29. RegCM QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율-----	41
Figure 30. SNU-MM5 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율-----	42

Figure 1-1. HadGEM3-RA QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	47
Figure 1-2. RegCM QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	48
Figure 1-3. SNU-MM5 QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	49
Figure 1-4. HadGEM3-RA QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	50
Figure 1-5. HadGEM3-RA QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	51
Figure 1-6. RegCM QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	52
Figure 1-7. RegCM QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	53
Figure 1-8. SNU-MM5 QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	54
Figure 1-9. SNU-MM5 QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	55
Figure 2-1. HadGEM3-RA QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	56
Figure 2-2. RegCM QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	57
Figure 2-3. SNU-MM5 QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수 -----	58
Figure 2-4. HadGEM3-RA QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	59
Figure 2-5. HadGEM3-RA QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	60
Figure 2-6. RegCM QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	61
Figure 2-7. RegCM QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	62
Figure 2-8. SNU-MM5 QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	63
Figure 2-9. SNU-MM5 QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수 -----	64

표 목차

Table 1. CPC 강수 및 일별 최고/최저기온 관측자료의 공간 해상도 및 자료기간-----	2
Table 2. 사용된 재분석 자료 현황-----	3
Table 3. CORDEX-EA 자료 리스트-----	6
Table 4. CORDEX-EA 0.5도 격자 자료 현황-----	11
Table 5. ETCCDI의 7개 극한 기후지수(R1mm의 *표시는 ETCCDI의 사용자 설정값으로 여기서는 1mm를 사용)-----	14
Table 6. 기후응용지수 리스트-----	15

1. 서론

일반적으로 QM(Quantile Mapping)과 같은 편이보정 방법은 수문학 등의 응용분야에서 강수 또는 기온 변수에 대한 기후변화 시나리오와 같은 모델 결과값을 관측지점의 관측값과 비교하여 미래 예측 값을 관측지점으로 보정하는 상세화 과정에 많이 사용되어 왔다. 이 과정에서는 관측지점 기반의 편이보정이 이루어지며 이를 위해서는 관측지점의 관측값이 필수적으로 필요하게 된다.

그러나 본 과제에서는 관측지점으로서의 상세화 과정이 아닌 지역기후변화 시나리오 자료를 이용한 격자기반의 미래 동아시아 지역 기후응용지수를 산출하기 위해 격자기반의 관측 자료를 사용하고자 한다. 그러나 이를 위해서는 여러 기상변수가 요구되는데 실제 관측 자료를 얻기가 매우 어려운 실정이다. 격자기반의 기후응용지수 산출 및 향후 응용 분야 활용, 기후변화 시나리오의 편이보정 등을 위해서는 강수 및 기온뿐만 아니라 상대 습도 등의 일별 격자 관측 자료가 필요하다. 일반적으로 일별 격자 형태의 전지구 관측 자료는 강수, 기온 등의 변수에 한해 제공되고 있다. 따라서 격자기반의 관측 자료와 재분석 자료를 비교하여 강수, 기온뿐만 아니라 타 변수의 경우에도 재분석 자료를 관측 자료로 대체 가능한지를 검토하여 격자기반 편이보정을 수행하고자 한다.

본 과제에 사용된 지역기후변화 시나리오는 CORDEX-EA 자료로 국립기상과학원을 주축으로 공주대, 서울대, 연세대 등의 여러 국내 대학들이 참여하여 5개 지역기후모델(HadGEM3-RA, RegCM, SNU-MM5, SNU-WRF, YSU-RSM)을 사용하여 산출된 지역기후변화 전망자료로(<http://cordex-ea.climate.go.kr/cordex>) 모두 공간해상도 0.5도로 변환하여 편이보정을 수행하고, 편이보정된 시나리오를 이용하여 기상청 기후정보포털에서 우리나라를 대상으로 제공하고 있는 농업, 보건, 방재, 산림 분야 9개 지수를 선별하여 동아시아 지역에 대한 지수 값을 산출하게 된다.

본 과제의 목적은 APCC의 기후정보 서비스 확대를 위한 응용정보 생산 및 기후정보 활용성 강화를 위한 기반 기술을 개발하고 적용하는 것으로(예. AIMS(APCC Integrated Modeling System)의 대용량 기후변화 시나리오 편이보정 등의 처리 및 기후응용지수 모듈 추가 등), 향후 응용분야에 필요한 자료 산출 및 평가(예. 응용분야 활용을 위한 기후정보의 불확실성 평가, 대용량 기후변화 자료 처리, 편이보정 방법의 개선 또는 상세화 과정과 연계한 고해상도 기후정보 생산 등) 등에 기여하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 자료

2.1.1 CPC 관측 및 재분석 자료

2.1.1.1 CPC 강수 및 최고/최저기온 관측 자료

격자 형태의 사용가능한 강수 자료의 경우에는 CPC(NOAA Climate Prediction Center) Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation, GPCP(Global Precipitation Climatology Project), CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation) 등이 있다. CPC 강수 자료는 전지구 0.5도 일별 자료, GPCP 강수자료는 전지구 1도 일별 자료, CMAP 강수 자료는 전지구 2.5도 월별 및 5일 자료로 제공된다. 본 연구에서는 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료가 약 50km 공간해상도를 가지기에 CPC 일별 강수 관측 자료를 사용하였다. 또한 일별 최고/최저기온의 경우에는 CPC Global Daily Temperature를 사용하였다(Table 1).

Table 1. CPC 강수 및 일별 최고/최저기온 관측자료의 공간 해상도 및 자료기간

Data Name	Variables	Spatial Resolution (lat × lon)	Period	Time Scale
CPC	Precipitation	0.5 × 0.5 degree (360 × 720)	1979.1 – present	Daily
	Daily Maximum Temperature		1979.1 – present	
	Daily Minimum Temperature		1979.1 – present	

2.1.1.2 재분석 자료

CPC 일별 강수 및 최고/최저기온 관측 자료와 재분석 자료를 비교, 분석하기 위하여 Table 2와 같이 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)의 ERA-Interim, JMA(Japan Meteorological Agency)의 JMA-55, NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 MERRA2 재분석 자료를 사용하였다. 비교

를 위해 공간 해상도가 서로 다른 재분석 자료를 CORDEX-EA 동아시아 지역에 대해 모두 0.5도로 격자화 하였다.

Table 2. 사용된 재분석 자료 현황

Data Name	Variables	Spatial Resolution (lat × lon)	Period	Time Scale
ERA-Interim	Precipitation, Surface Temperature,	0.75 × 0.75 degree (241 × 480)	1979.1 – present	Daily
JRA-55	Daily Maximum Temperature, Daily Minimum Temperature,	0.563 × 0.563 degree (320 × 640)	1958. 1 – present	
MERRA2	Relative Humidity	0.5 × 0.625 degree (361 × 576)	1980. 1– present	

일반적인 재분석 시스템에서 지표의 강수는 대기의 기온, 습도, 바람 등의 관측 자료와 의 자료동화에 따라 AGCM(Atmospheric General Circulation Model)에서 생산된다. 그러나 MERRA2 모델에서 생산된 강수는 지표에 도달하기 이전에 강수 관측 자료들을 사용하여 보정이 된다(Reichle et al. 2017). 관측 자료들을 사용하여 보정된 강수는 CFSR(Climatic Forecast System Reanalysis) 재분석 시스템에도 사용이 되었고(Saha et al. 2010; Meng et al. 2012), MERRA-Land에도 사용되었다(Reichle et al. 2011; Reichle 2012). MERRA2에서의 강수 보정은 대기-지표 결합 재분석 시스템으로 수행되며, 이것은 관측된 강수가 증발산을 통해 지표 근처의 기온과 습도에 영향을 미치게 되고 이에 지표 근처의 기상학 자료를 생산하게 된다.

MERRA2의 강수 보정 알고리즘은 2개의 주요 단계로 구성된다(Figure 1). 알고리즘 1단계에서는 재분석에 있어 지표를 강제하기 위해 요구되는 하루 이하의 변동성과 공간 세부정보를 제공하기 위하여 관측된 강수 자료를 시간별 0.5° 자료로 상세화(downscaling)한다. 이 단계에서 모델 배경장(model background)으로써 MERRA 자료를 2014년까지 사용하고 그 이후에는 GEOS-5 FP-IT version 5.9.1 자료를 사용한다(Lucchesi 2015). 주어진 일별(또는 5일간) 및 0.5°(또는 0.25°) 격자에 대한 상세화에 배경장 강수에 대한 관측 강수의 비율로 계산되는 보정 인자가 사용된다. 보정된 강수 자료는 CPCU(Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation)와 CMAP 관측에 대해 별도로 산출된 이후 합성되게 되는데, 아프리카 대륙에서는

CMAp-corrected 자료, 다른 모든 육지 지역에서는 CPCU-corrected 자료로부터 합성된 파일이 생성된다(Figure 2). 강수 보정 알고리즘 2단계는 1단계에서 합성된 강수 자료와 MERRA2 AGCM에 의해 생성된 강수 자료의 가중평균을 적용하여 최종적으로 보정된 강수가 산출되게 된다(Figure 1).

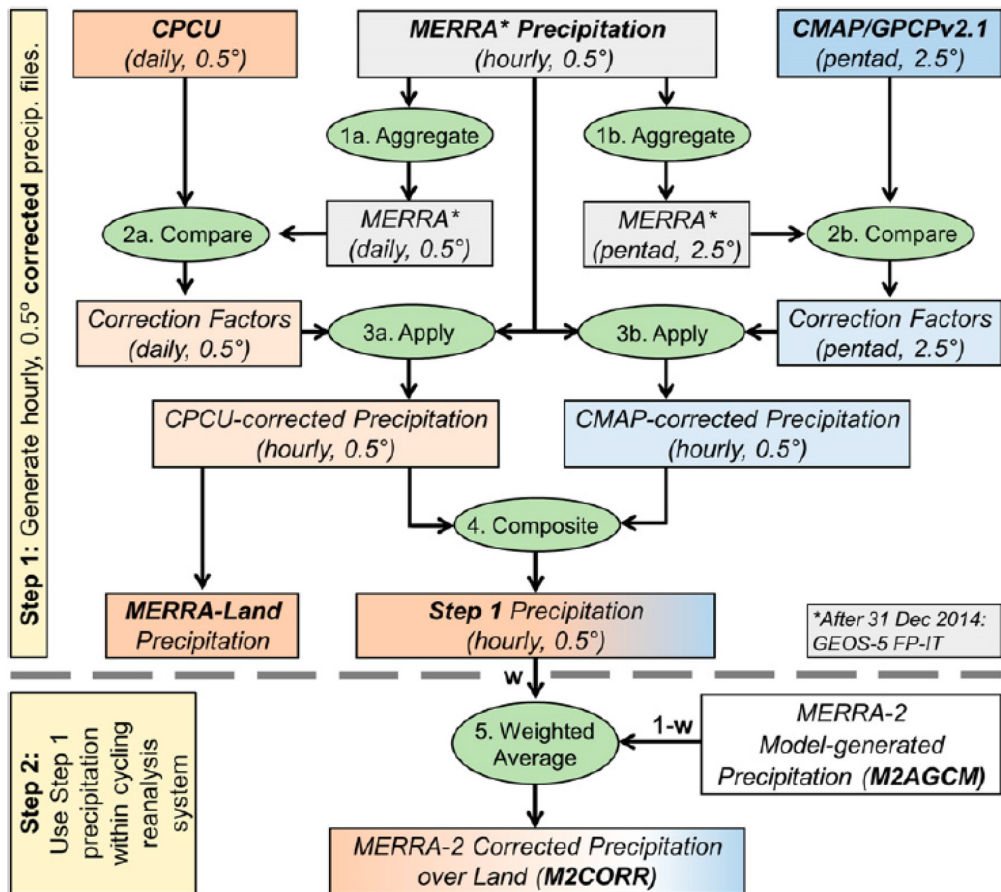


Figure 1. MERRA2의 강수 보정 알고리즘 흐름도 (source: Reichle et al. 2017)

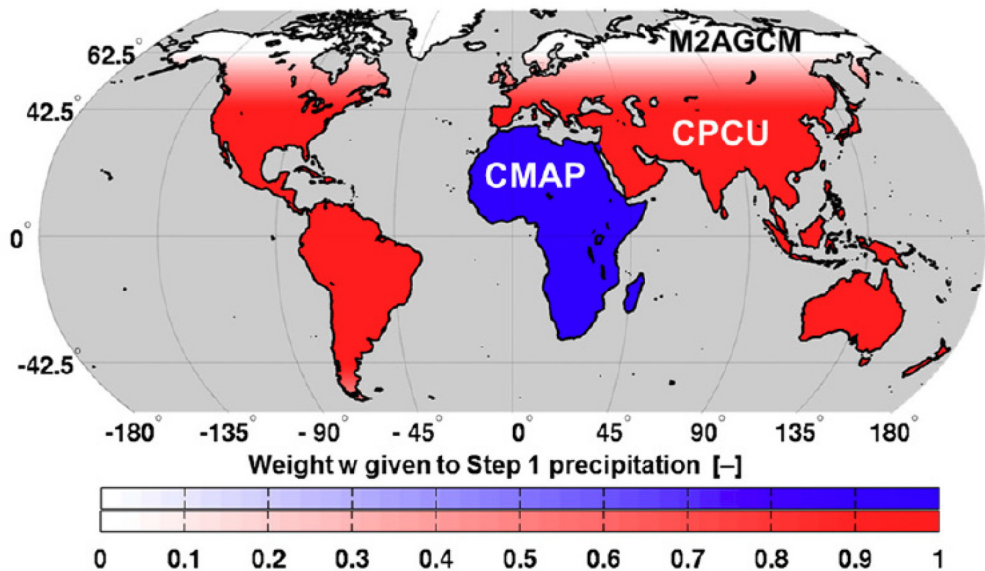


Figure 2. 강수 보정 알고리즘의 2단계에서 육상의 보정된 MERRA2 강수를 산출할 때 1단계에서 주어지는 가중치 w (Figure 1 참고) (source: Reichle et al. 2017)

2.1.2 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료

2.1.2.1 자료 현황

CORDEX(COordinated Regional climate Downscaling EXperiment)는 세계 기후 연구 프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)에서 추진하는 기후 변화 영향평가 및 적응에 활용 가능한 고해상도 지역기후변화 전망자료를 산출하기 위한 국제사업이다. 전세계의 여러 동일한 영역에 대하여 다수의 참여기관들이 고유의 지역기후모델을 이용하여 결과를 생산하고 궁극적으로 이들을 이용한 앙상블을 구성하여 미래 지역 기후에 타당한 상세 예측을 생산하는 것이 목적이다(<http://www.cordex.org>). 현재 CORDEX에서는 14개 지역 영역으로 나누어 해당 영역에 대해 지역기후모델을 사용하여 지역기후변화 전망자료를 산출하여 배포 중이다. 이에 우리나라에서는 국립기상과학원을 주축으로 동아시아 영역인 CORDEX-EA 지역을 대상으로(Figure 3) 공주대, 서울대, 연세대 등의 여러 국내 대학들이 참여하여 동아시아 영역을 연구하였으며, CORDEX-EA 지역기후변화 전망자료를 산출하기 위해 사용된 지역기후모델은 HadGEM3-RA, RegCM,

SNU-MM5, SNU-WRF, YSU-RSM의 5개 모델이다. 본 연구에서는 국립기상과학원에서 배포 중인 CORDEX-EA 일별 Historical, rcp45, rcp85 자료를 사용하였다(Table 3).

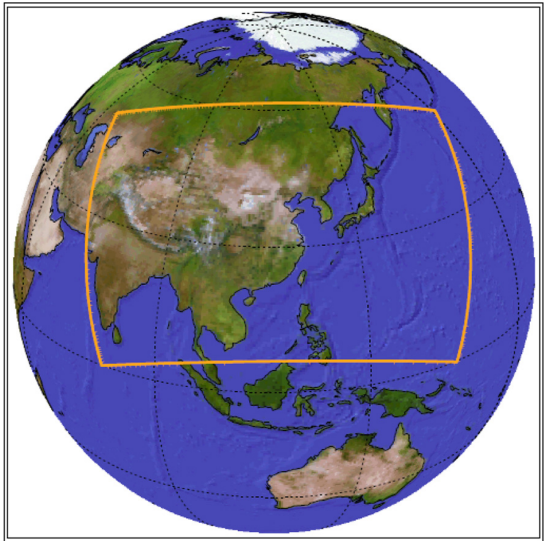


Figure 3. 지역기후모델 적분을 위한 CORDEX-EA 영역

Table 3. CORDEX-EA 자료 리스트

Model	Data	Spatial Resolution (lat × lon)	Period	Time Scale
HadGEM3-RA	Historical	Horizontal 50km (167 × 204)	1950–2005	Daily
	RCP45		2006–2100	
	RCP85		2006–2100	
RegCM	historical	Horizontal 50km (195 × 241)	1979–2005	Daily
	RCP45		2006–2050	
	PCP85		2006–2050	
SNU-MM5	historical	Horizontal 50km (196 × 232)	1979–2005	Daily
	RCP45		2006–2049	
	RCP85		2006–2035	
SNU-WRF	historical	Horizontal 50km (196 × 232)	1979–2005	Daily
	RCP45		2006–2049	
	RCP85		2006–2049	
YSU-RSM	historical	Horizontal 50km (198 × 241)	1980–2005	Daily
	RCP45		2006–2050	
	RCP85		2006–2050	

2.1.2.2 문제점 및 사용 가능한 자료

CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료를 동일한 지역에 대해 0.5도 직선격자(rectilinear grid)로 변환하기 이전에 5개 지역기후모델의 자료에 대한 변수, 값, 기간 등을 확인하여 사용 가능한 자료를 확인하였다.

5개 지역기후모델의 자료는 모두 NetCDF(Network Common Data Form) 형식으로 되어 있으며 기본적으로 NetCDF CF(Climate and Forecast) Convention을 따르게 되나 국립기상과학원에서 산출한 지역기후변화 시나리오 자료를 제외한 국내 대학에서 산출된 자료는 NetCDF 파일(nc 파일)의 메타데이터가 서로 다르거나 변수명과 실제 값이 잘못 매칭이 되어 있는 등의 문제점이 나타났다. 아래 글상자의 내용은 그 문제점 및 수정사항을 나열하였다.

〈5개 지역기후변화 모델의 자료 확인 내용〉

- (1) HadGEM3-RA
 - 기간 : 2006-2100년, time : '360-day' calendar ⇨ 문제 없음
- (2) RegCM4
 - 기간 : 2006-2050년, time : CF Convention에 맞게 수정
※ '360-day' calendar 삽입, 1부터 순차적으로 되어 있는 time 값을 기준일 이후 값으로 수정
- (3) SNU-MM5
 - 기간 : rcp45(2006-2049년), rcp85(2006-2035년), time : CF Convention에 맞게 수정
※ 'Gregorian' calendar 삽입, 1부터 순차적으로 되어 있는 time 값을 기준일 이후 값으로 수정
 - sea level pressure 값과 surface air pressure 값이 뒤바뀌어 저장되어 있음(변수명 수정)
- (4) SNU-WRF
 - 기간 : 2006-2049년, time : CF Convention에 맞게 수정
※ 'Gregorian' calendar 삽입, 1부터 순차적으로 되어 있는 time 값을 기준일 이후 값으로 수정
 - sea level pressure 값과 surface air pressure 값이 뒤바뀌어 저장되어 있음(변수명 수정)
 - historical 자료 중 tasmax, tasmin 값 오류(편이보정 시 사용불가)
- (5) YSU-RSM
 - 기간 : 2006-2050년, time 정보 오류로 사용 불가(기준일과 time 값 불일치)

따라서 사용한 가능한 자료는 HadGEM-RA, RegCM4, SNU-MM5의 3개 모델 자료로 historical 자료의 경우 MERRA2 재분석 자료와 같은 기간 사용을 위하여 1980-2005년, rcp45와 rcp85 자료는 미래 기간으로 2020-2049년을 선정하였다(SNU-MM5의 rcp85 자료는 기간이 짧아 2020-2035년 자료 사용). 사용된 변수는 응용분야에서 주로 사용하는 변수로 강수(pr), 지상기온(tas), 최고기온(tasmax), 최저기온

(tasmin), 비습(huss), ps(지상기압)이다.

2.2 방법

2.2.1 0.5도 격자 자료 변환

CORDEX-EA 영역에 대한 편이보정 및 결과분석을 위해 3개 지역기후모델 HadGEM-RA, RegCM4, SNU-MM5의 기존 historical, rcp45, rcp85의 곡선격자(Curvilinear) 자료를 3개 모델이 동일한 영역을 가지도록 0.5도 직선격자(Rectilinear) 자료로 변환하였다(Figure 4). 격자 수는 139×163(위도 : -14~78, 경도는 : 55~159)이고 사용된 변수는 강수(pr), 지상기온(tas), 최고기온(tasmax), 최저기온(tasmin), 비습(huss), ps(지상기압)이다. 여기서 지상기온, 비습, 지상기압을 이용하여 상대습도(rh)를 산출하였다. 상대습도 산출방법은 국립기상과학원에서 사용하는 아래와 같은 수식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \text{포화수증기압} &= 6.11 \times \exp \left(\frac{17.67 \times (\text{지상기온} - 273.15)}{(\text{지상기온} - 29.65)} \right) \\ \text{혼합비} &= (0.622 \times \text{포화수증기압}) / (\text{지상기온} - \text{포화수증기압}) \\ \text{상대습도} &= (\text{비습} / \text{혼합비}) \times 100 \end{aligned}$$

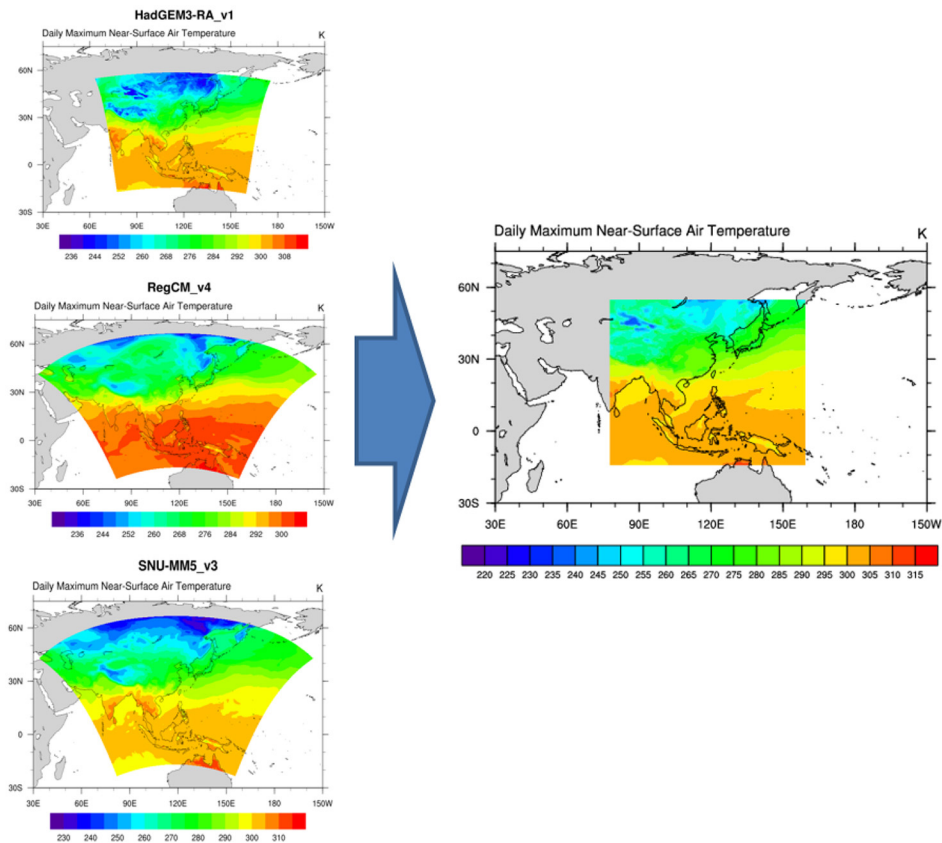


Figure 4. 곡선격자의 CORDEX-EA 자료를 0.5도 직선격자로 변환(위도: 139 × 경도: 163)

아래 글상자는 HadGEM3-RA 지역기후모델의 0.5도 격자 rcp45 강수자료에 대한 NetCDF 파일의 메타데이터 예시를 나타내며 모든 자료는 동일한 메타데이터를 가지도록 파일을 저장하였다. Table 4는 최종적으로 본 연구에 사용된 CORDEX-EA 지역기후 변화 시나리오 자료에 대한 정보를 나타낸다.

〈HadGEM3-RA rcp45 강수(pr) 자료의 NetCDF 메타데이터 정보〉

```

dimensions:
    time = UNLIMITED ; // (1800 currently)
    bnds = 2 ;
    lat = 139 ;
    lon = 163 ;
variables:
    double time(time) ;
        time:axis = "T" ;
        time:bounds = "time_bnds" ;
        time:calendar = "360_day" ;
        time:units = "days since 2006-01-01" ;
        time:long_name = "time" ;
        time:standard_name = "time" ;
    double time_bnds(time, bnds) ;
    float lat(lat) ;
        lat:axis = "Y" ;
        lat:units = "degrees_north" ;
        lat:long_name = "latitude_coordinate" ;
        lat:standard_name = "latitude" ;
    float lon(lon) ;
        lon:axis = "X" ;
        lon:units = "degrees_east" ;
        lon:long_name = "longitude_coordinate" ;
        lon:standard_name = "longitude" ;
    float pr(time, lat, lon) ;
        pr:original_name = "PR" ;
        pr:units = "mm day-1" ;
        pr:comment = "at surface; includes both liquid and solid phases from all types of
        clouds (both large-scale and convective)" ;
        pr:long_name = "Precipitation" ;
        pr:standard_name = "precipitation_flux" ;
        pr:_FillValue = 1.e+20f ;

// global attributes:
    :title = "139x163 rectilinear 0.5 degree regrid from CORDEX-EA HadGEM3-RA_v1
    model output" ;
    :institution = "APEC Climate Center" ;

```

Table 4. CORDEX-EA 0.5도 격자 자료 현황

Model	Data	Spatial Resolution (lat × lon)	Period	Variables
HadGEM3-RA	Historical	0.5 × 0.5 degree (139 × 163)	1950–2005	pr, tas, tasmax, tasmin, rh
	RCP45		2006–2100	
	RCP85		2006–2100	
RegCM	historical	0.5 × 0.5 degree (139 × 163)	1979–2005	pr, tas, tasmax, tasmin, rh
	RCP45		2006–2050	
	PCP85		2006–2050	
SNU-MM5	historical	0.5 × 0.5 degree (139 × 163)	1979–2005	pr, tas, tasmax, tasmin, rh
	RCP45		2006–2049	
	RCP85		2006–2035	

2.2.2 편이보정

CORDEX-EA의 rcp45, rcp85 시나리오를 사용하여 격자기반의 기후응용지수를 산출하기 위하여 QM을 이용하여 편이보정(Bias Correction)을 수행하였다. QM은 어떤 변수값의 분포 형태에 나타나는 에러를 보정하고 따라서 변동성에 대한 에러도 보정할 수 있다. 분위수 기반(Quantile-based)의 접근방법은 Panofsky와 Brier(1968)에 의해 비롯되었고 수문응용 분야에서 성공적으로 적용되었다(Dettinger et al. 2004; Wood et al. 2004). 또한 지역기후모델의 에러 보정을 위해서도 적용되었다(Dobler and Ahrens 2008; Piani et al. 2010).

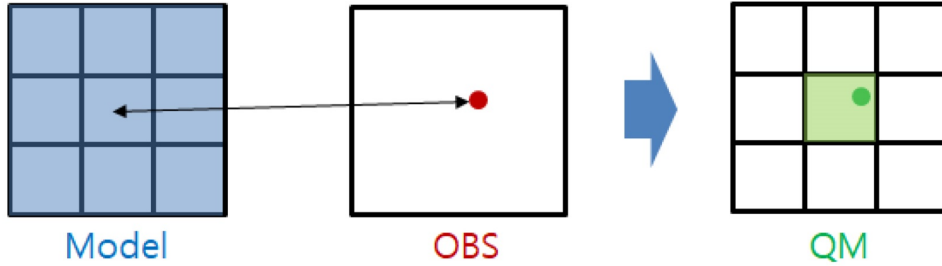
본 연구에서는 QM은 보정 기간에 대해 관측 및 모델 자료의 일별 경험적 누적분포함수(Empirical Cumulative Distribution, $ecdf$)에 기반하여 수행이 된다. 경험적 누적분포함수를 사용한 QM은 일반적으로 대부분의 기상변수에 적용이 가능하다. 지역기후모델로부터 생산된 시나리오 값을 X^{val} 라 할 때 다음 식에 의해 Y^{val} 값으로 보정이 된다.

$$Y_{t,i}^{val} = ecdf_{t,i}^{obs^{-1}}(ecdf^{mod}(X_{t,i}^{val}))$$

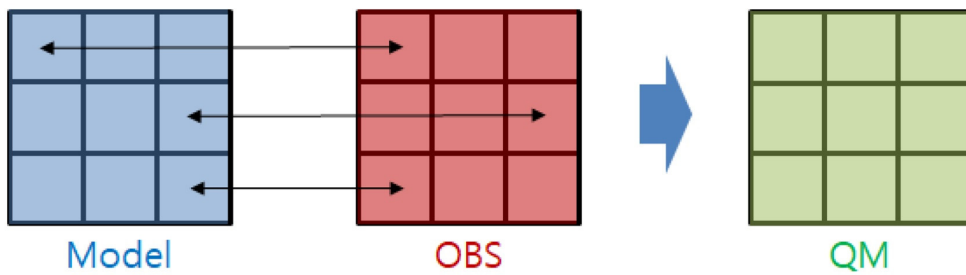
여기서 $ecdf^{-1}$ 은 경험적 누적분포함수 $ecdf$ 의 역변환이고, obs는 관측, mod는 모델을 나타내고, t 는 시간, i 는 하나의 격자점을 나타낸다.

일반적으로 QM을 이용한 편이보정은 관측지점의 값과 모델의 격자값을 이용하여 모

텔의 시나리오 값을 관측지점으로 상세화하는 경우에 주로 사용되지만, 본 연구에서는 격자 각각의 값을 보정하기 위하여 격자로 된 재분석 자료를 관측 값으로 사용하여 지역 기후모델의 시나리오 값을 동일한 격자 형태로 편이보정을 수행하게 된다(Figure 5).



(a) 관측지점 기반 QM



(b) 격자기반 QM

Figure 5. Quantile Mapping 방법

재분석 자료를 관측값으로 하여 CORDEX-EA 지역기후변화 rcp45, rcp85를 2020~2049년까지 강수(pr), 지상기온(tas), 최고/최저기온(tasmax/tasmin), 상대습도(rh)의 5개 변수값에 대해 QM을 이용하여 편이보정 하고(SNU-MM5 rcp85 자료의 경우는 2020~2035년 기간에 대해서만 보정), 편이보정된 rcp45, rcp85 자료를 각각 QM_rcp45, Qm_rcp85로 표기한다. QM은 Python 언어를 이용하여 작성되었으며, NetCDF 파일을 입력자료로 하는 다중차원(multi-dimension) 처리가 가능하도록 영국 기상청(Met Office)에서 개발한 Iris(<https://scitools.org.uk/iris/docs/latest>) Python 패키지와 과학계산을 위한 NumPy(<http://www.numpy.org>) 및 통계계산을 위한 StatsModels(<http://www.statsmodels.org>) Python 패키지를 이용하였다.

2.2.3 기후응용지수

2.2.3.1 ETCCDI 기후지수

ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)는 기온과 강수 통계를 이용하여 극한 기후현상에 대한 포괄적인 개요를 제공하는 기후지수들로 정의되며, 최근 수십년간 이를 활용한 극한 기후현상을 분석이 수행되어 왔고(Karl and Easterling 1999; Klein Tank et al. 2009), 이 지수들은 미래 기후전망뿐만 아니라 관측 자료의 극한 기후현상에 대한 전지구 변화를 분석하는데 폭 넓게 사용되었다(Tebaldi et al. 2006; Sillmann and Roeckner 2008; Orłowsky and Seneviratne 2012). 현재 ETCCDI 홈페이지(<http://etccdi.pacificclimate.org/index.shtml>)에서 27개 지수 계산을 위한 R 소프트웨어와 Fortran 코드를 제공하고 있으나 모두 하나의 시퀀스(sequence) 형태로 한 지점(또는 격자)에 대해서만 산출이 되도록 되어 있다. 본 연구에서는 NCL(NCAR Command Language)를 이용하여 NetCDF 자료를 입력자료로 하는 다중차원(multi-dimension) 격자를 계산할 수 있도록 코드를 작성하였으며, 편이보정된 3개 지역기후모델의 QM_rcp45와 QM_rcp85의 일별 최고/최저기온과 강수 자료를 이용하여 ETCCDI에서 제공하는 27개 기후지수 중 7개 지수를 산출하였다. 7개 지수에 대한 설명은 Table 5와 같으며, 모든 지수는 해당 분석기간 동안 연도별로 산출되었다. 향후 27개 모든 기후지수를 격자기반으로 계산되도록 추가 개선할 예정이다.

Table 5. ETCCDI의 7개 극한 기후지수(R1mm의 *표시는 ETCCDI의 사용자 설정값으로 여기서는 1mm를 사용)

Lable	Index Name	Index Definition	Units
TXx	Max TX	Let TXx be the daily maximum temperatures in month k, period j. The maximum daily maximum temperature each month is then: $TXx_{kj} = \max(TX_{kj})$	℃
TXn	Min TX	Let TXn be the daily maximum temperature in month k, period j. The minimum daily maximum temperature each month is then: $TXn_{kj} = \min(TX_{kj})$	℃
TNx	Max TN	Let TNx be the daily minimum temperatures in month k, period j. The maximum daily minimum temperature each month is then: $TNx_{kj} = \max(TN_{kj})$	℃
TNn	Min Tn	Let TNn be the daily minimum temperature in month k, period j. The minimum daily minimum temperature each month is then: $TNn_{kj} = \min(TN_{kj})$	℃
R1mm*	Number of wet days	Let PR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j. Count the number of days where $PR_{ij} > 1\text{mm}$	days
R10mm	Heavy precipitation days	Let PR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j. Count the number of days where $PR_{ij} > 10\text{mm}$	days
R20mm	Very heavy precipitation days	Let PR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j. Count the number of days where $PR_{ij} > 20\text{mm}$	days

2.2.3.2 분야별 기후응용지수

편이보정된 CORDEX-EA QM_rcp45와 QM_rcp85 시나리오 자료를 이용하여 분야별 기후응용지수를 산출하기 위하여 기상청 기후정보포털(<http://ccs.climate.go.kr>)에서 제공하는 기후응용지수를 기반으로 하여 9개 지수를 선정하였다. 농업분야에서는 생육온도일수(Growing Degree Days, GDD), 유효적산온도(Effective Accumulated Temperature, EAT), 온습도지수(Temperature Humidity Index, THI), 작물기간(Crop Period, CP), 보건분야의 경우 열지수(Heat Index, HI), 불쾌지수(Discomfort Index, DI), 열사병발생위험지수(Humid Heat Stroke Index, HHSI), 산림분야의 경우 최저기온지수(Minimum temperature Index of the Coldest Month, MTCI), 방재분야의 경우 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI) 이다. 수자원분야의 경우에는 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)가 있으나 산출 시 Hargreaves 공식을 적용함에 있어 공식의 매개변수에 대한 지역화가 필요하여 본 연구에서는 제외하였다. 각 지수에 대한 기후요소는 Table 6과 같고, Figure 6은 기상청 기후정보포털에서

제공하는 농업분야 식물기간(CP)과 산림분야 최저기온지수(MTCI)를 예시로 나타내었다. 모든 지수는 앞서 언급한 NCL 코드로 작성되었다.

Table 6. 기후응용지수 리스트

Fields	Index	Climate Variables
Agriculture	GDD(Growing Degree Days)	Daily Tasmax, Tasmin, Tb(=10°C)
	EAT(Effective Accumulated Temperature)	Daily Tas, Tb(=10°C)
	CP(Crop Period)	Daily Tas
	THI(Temperature Humidity Index)	Daily Tas, rh
Health Care	HI(Heat Index)	Daily Ta, rh
	DI(Discomfort Index)	Daily Ta, rh
	HHSI(Humid Heat Stroke Index)	Daily Tasmax, rh
Forestry	MTCI(Minimum Temperature Index of the Coldest Month)	Monthly Mean Tasmin
Disaster Prevention	SPI(Standard Precipitation Index)	Monthly Mean pr

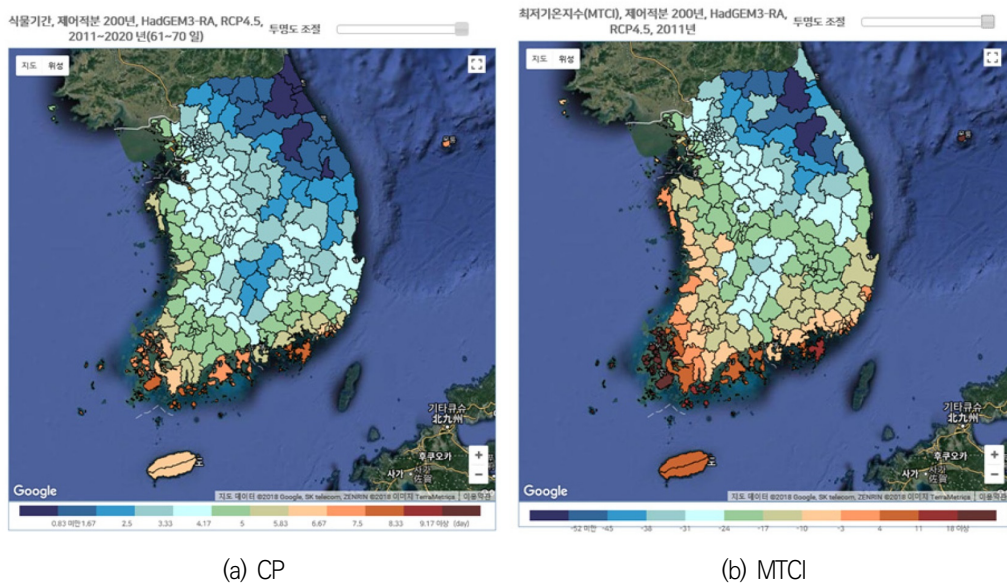


Figure 6. 농업과 산림 분야의 기후응용지수 예시 (a) 작물기간(CP), (b) 최저기온지수(MTCI)

3. 연구내용

3.1 격자 기반 관측 자료 사용을 위한 재분석 자료 선정

3.1.1 CPC 강수 관측과 재분석 자료 비교 분석

3.1.1.1 기후값 및 오차 비교 분석

CPC와 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2의 일별 강수 자료에 대한 기후값을 비교하기 위하여 1980~2005년의 26년 동안에 대해 전구와 동아시아 영역으로 나누어 Figure 7에 나타내었다. 여기서 MERRA2의 자료기간이 1980년부터 시작되기에 동일한 기간을 선정하였고, MERRA2의 육지 강수 값만을 사용하였다. 전구와 동아시아 지역 모두 CPC와 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 강수 기후값은 열대 지역과 특히 열대수렴대(InterTropical Convergence Zone, ITCZ)에서 상대적으로 높게 집중되고 있다. ERA-Interim과 JRA-55의 경우에는 인도차이나 반도와 서태평양 도서국가 지역에서 CPC와 MERRA2 보다 강수 값이 좀 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 CPC 강수 기후값 분포는 MERRA2와 매우 유사하게 나타나고 있으며, 이것은 2.1.1.2절에 기술하였듯이 MERRA2의 강수 보정 알고리즘에 CPC 강수가 적용되기 때문이다.

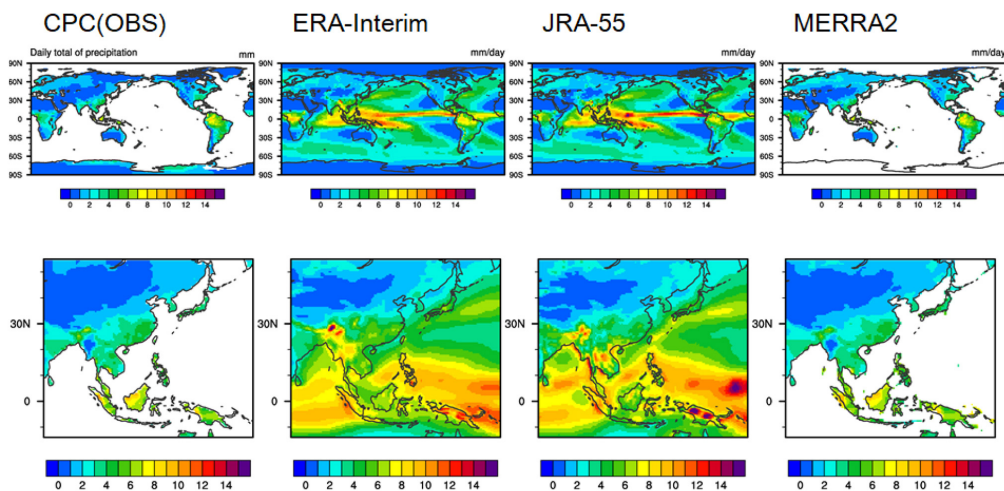


Figure 7. 전지구 및 동아시아 지역에 대한 CPC 강수 관측 자료와 재분석 자료의 기후값 비교(1980~2005년 기간 동안)

Figure 8은 1980~2005년 동안에 대해 동아시아 지역의 CPC 일별 강수량과 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 일별 강수량과의 TCC(Temporal Correlation Coefficient)와 RMSE(Root Mean Square Error) 분포를 보여주고, Figure 9에 TCC와 RMSE의 동아시아 지역 평균값을 나타내었다. 동아시아 지역의 TCC와 RMSE 값 분포에서 ERA-Interim과 JRA-55는 서로 비슷한 분포를 보이고 있으며 TCC의 값은 내륙에서 약 0.6 이상으로 높게 나타나고, 도서국가 지역에서 약 0.3 정도로 상대적으로 낮게 나타났으며, RMSE 값의 경우도 내륙과 도서국가 지역에서 각각 약 4 이하, 약 10 이상으로 나타났었다. MERRA2의 경우는 TCC는 동아시아 전체 영역에서 약 0.9 이상의 높은 상관관을 보여주었고, RMSE 역시 약 2 이하로 낮게 나타났었다. Figure 9의 동아시아 지역 평균 TCC와 RMSE를 보면 MERRA2가 TCC의 경우 약 0.9 이상, RMSE의 경우 약 2 이하로 MERRA2의 일별 강수량이 CPC 일별 강수량과 매우 가까운 것을 알 수 있다.

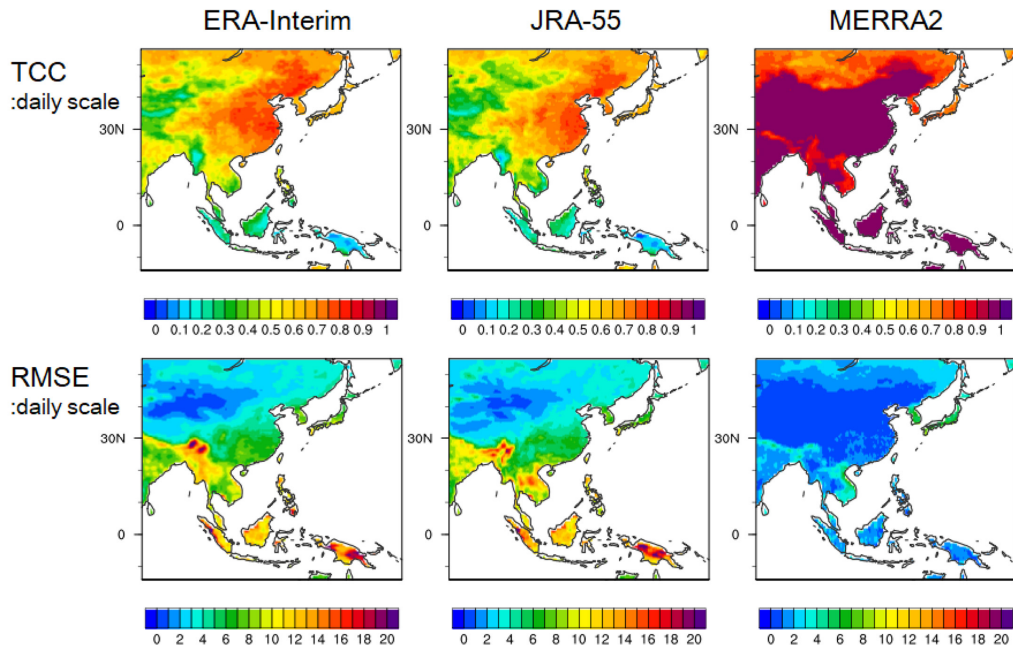


Figure 8. 동아시아 지역에 대한 CPC 강수 관측 자료와 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교(1980~2005년 기간 동안)

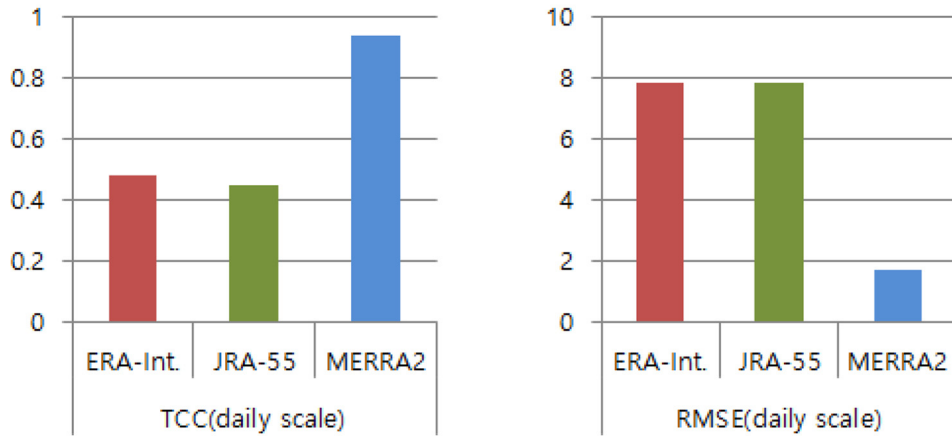


Figure 9. CPC 강수 관측 자료와 재분석 강수 자료의 동아시아 지역 TCC 및 RMSE 평균값 비교(1980~2005년 기간 동안)

3.1.1.2 지역별 호우 사례 조사 및 비교 분석

ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 재분석 자료의 일별 강수 자료에 대한 변동성을 조사하기 위하여 Figure 10과 같이 동아시아 지역의 3개 지역을 선정하여 호우가 발생한 사례 해에 대해 분석하였다. A 지역은 2000년 11월에 인도네시아(수마트라 서부) 지역에서 홍수와 산사태 발생으로 약 110여명의 인명피해를 가져왔고, 또한 말레이시아(북부) 집중호우로 인한 홍수가 발생하여 약 20여명의 인명피해와 약 8천여명의 이재민이 발생한 경우이다. B 지역은 1996년 6월 27일에서 8월 12일 사이 중국 중부, 남부, 서부에서 홍수가 발생한 경우이고, C 지역에서는 2003년 9월 12일부터 13일까지 태풍 매미에 의해 인명피해 131명, 이재민 약 6만명이 발생하였으며 전국적으로 많은 비가 내린 경우이다. Figure 11은 A 지역의 2000년 10월 1일에서 11월 30일까지의 일별 강수 시계열 자료이다. 그림에서 회색 음영부분은 CPC 관측 자료이고, 나머지 파랑, 녹색, 빨강은 각각 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 자료를 나타낸다. 11월 말에 강수가 집중되고 있으며, MERRA2 강수자료가 CPC 관측에 가장 가깝게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Figure 12는 B 지역에서의 1996년 7월 1일에서 8월 31일까지의 일별 강수 시계열 자료를 나타낸다. 3개 재분석 자료 모두 CPC 관측 자료와 유사한 시계열을 나타내고 있으나 MERRA2 강수자료가 CPC 관측과 잘 일치하고 있으며, 8월 초 호우가 내린 날의 경우에

ERA-Interim 자료가 다른 자료들보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Figure 13의 경우는 우리나라 C 지역으로 8, 9월에 비가 자주 내리고 태풍이 발생한 경우로 CPC 관측 시계열 자료와 다소 차이가 나타나고 있으나, 앞선 강수에 대한 기후값 및 오차 비교 분석의 결과와 같이 사례 조사에서도 전반적으로 MERRA2가 CPC 강수 관측과 유사한 값을 나타내고 있다.

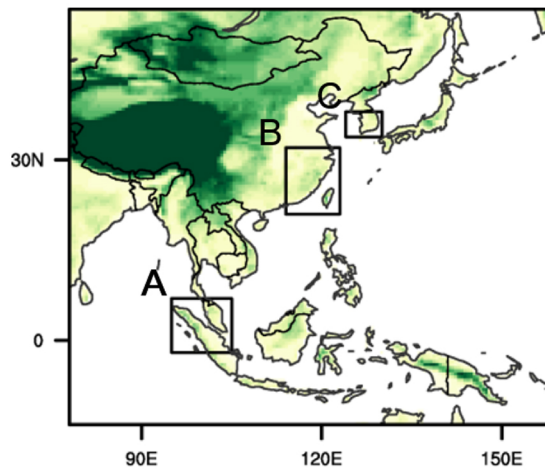


Figure 10. 동아시아 지역의 호우 사례 지역

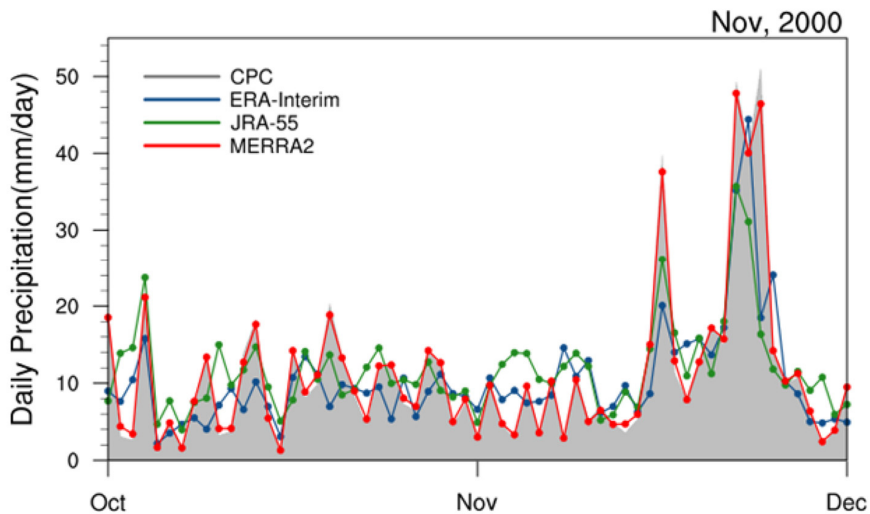


Figure 11. 호우 사례 지역 A에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료

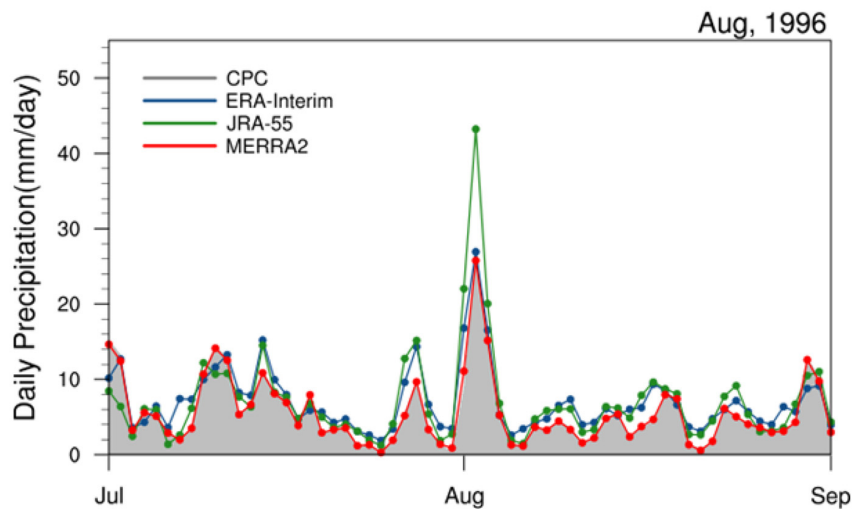


Figure 12. 호우 사례 지역 B에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료

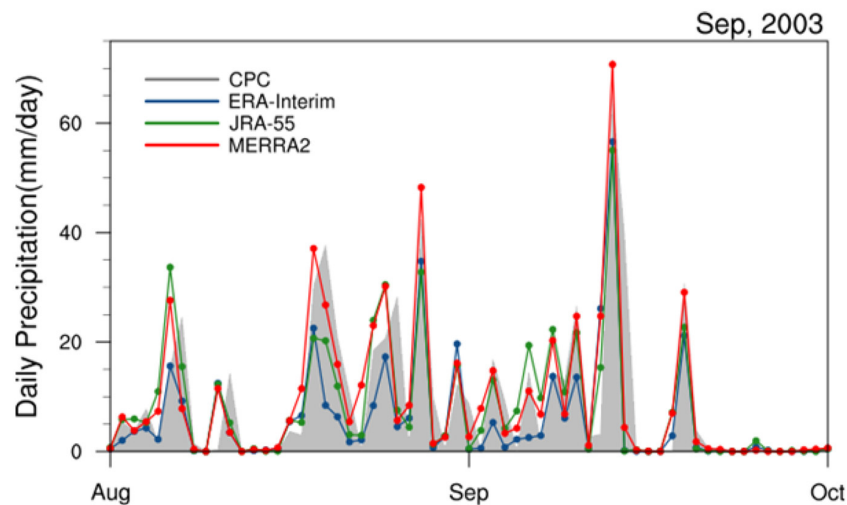


Figure 13. 호우 사례 지역 C에 대한 CPC 강수 자료 및 재분석 강수 자료

3.1.2 CPC 최고/최저기온 관측과 재분석 자료 비교 분석

3.1.2.1 최고기온에 대한 기후값 및 오차 비교 분석

CPC와 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2의 일별 최고기온 자료에 대한 기후값을 비교하기 위하여 1980~2005년의 26년 동안에 대해 동아시아 지역의 기후값과 CPC와의 차이 분포를 Figure 14에 나타내었다. ERA-Interim, JRA-55의 경우 CPC와의 차이값

이 인도차이나 반도, 티베트고원, 서태평양 도서국가 지역에서 음의 값을 보여주고 있어 이 지역에서 CPC 최고기온 관측값 보다 약 -2°C 이상 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 동아시아 지역 전체 평균 차이값은 ERA-Interim은 -1.95°C , JRA-55는 -1.69°C 를 나타내었다. MERRA2 최고 기온의 경우에는 티베트고원과 서태평양 도서국가에서 음의 값을, 중국 내륙과 몽골 서부 지역에서 음의 값을 보여주고 있으나 그 값은 상대적으로 ERA-Interim과 JRA-55 보다 작으며, CPC와의 동아시아 지역 전체 평균 차이값은 -0.17°C 로 재분석 자료 중 가장 낮은 값을 나타내었다.

Figure 15는 동아시아 지역의 CPC 일별 최고기온과 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 일별 최고기온의 TCC와 RMSE 분포를 나타낸다. ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 자료 모두 서태평양 도서국가 지역 이외의 고위도 지역으로 갈수록 TCC의 값이 높게 나타나고 있으며, 동아시아 지역 전체 TCC은 평균 값은 각각 0.83, 0.88, 0.88 이다. RMSE의 경우에는 ERA-Interim과 JRA-55에서 티베트고원 지역과 일부 서태평양 도서국가 지역에서 상대적으로 높은 값을 보여주고, MERRA2의 경우에는 전체적으로 낮은 값을 나타내었다. 동아시아 지역 전체 RMSE 평균값은 각각 4.20, 3.30, 2.95로 MERRA2가 가장 낮게 나타났다.

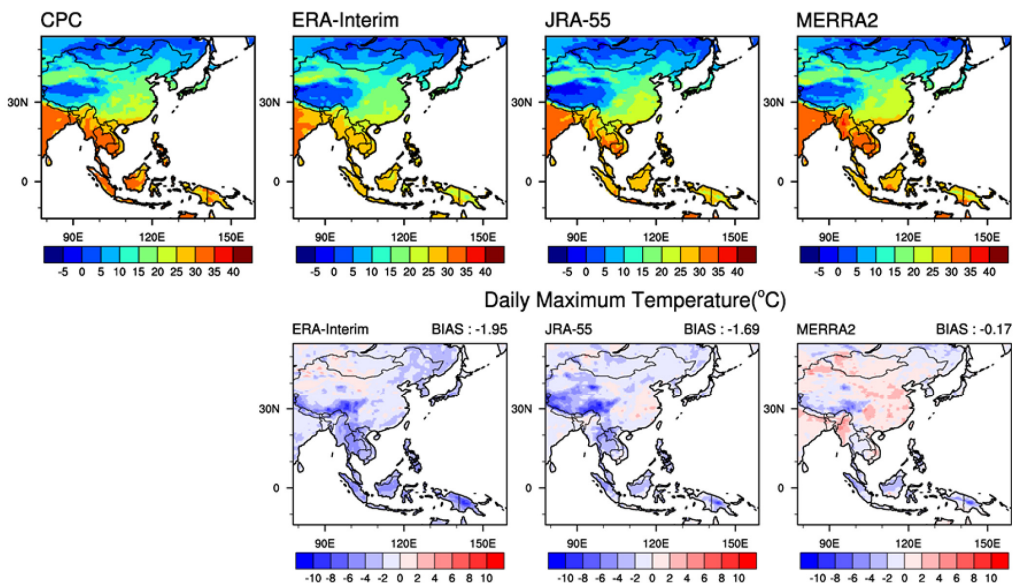


Figure 14. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최고기온과 재분석 자료 기후값 비교(1980~2005년 기간 동안)

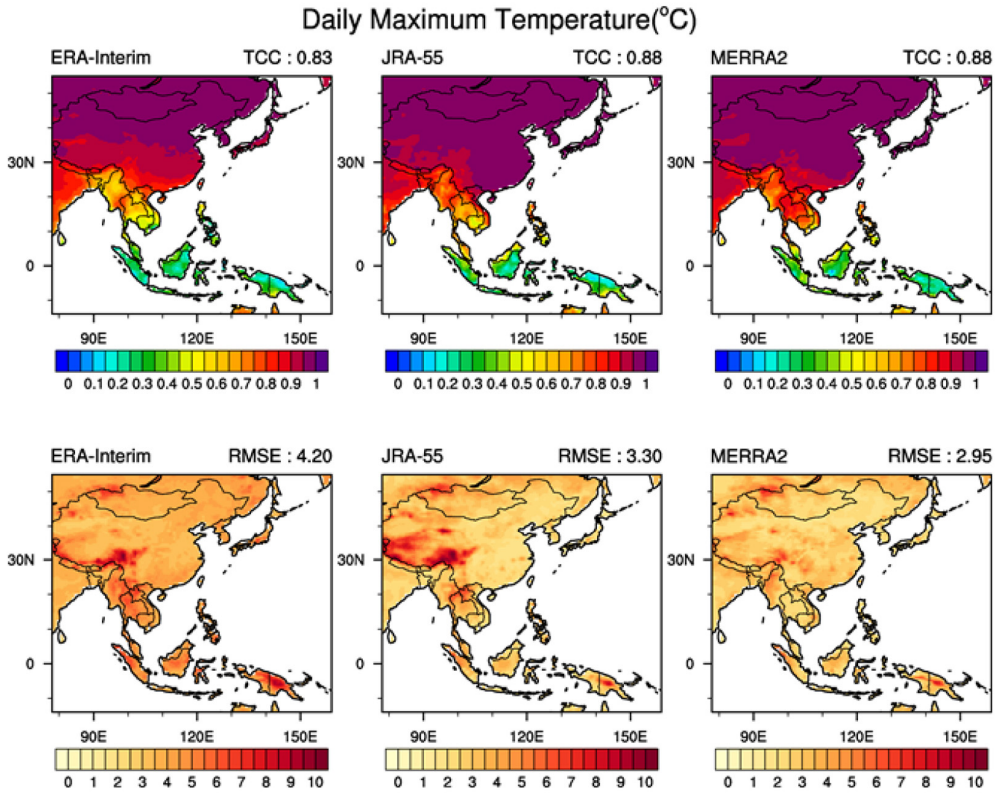


Figure 15. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최고기온과 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교(1980~2005년 기간 동안)

3.1.2.2 최저기온에 대한 기후값 및 오차 비교 분석

CPC와 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2의 일별 최저기온 자료에 대한 기후값과 CPC와의 차이 분포를 Figure 16에 나타내었다. ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 재분석 자료 모두 CPC와의 차이값이 티베트고원에서 음의 값, 몽골 지역 주변 고위도에서 양의 값을 나타내었고, 동아시아 지역 전체 평균 차이값은 각각 0.26°C, 0.89°C, -0.29°C로 ERA-Interim과 MERRA2가 낮은 값을 보였다.

Figure 17은 동아시아 지역의 CPC 일별 최저기온과 ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 일별 최저기온의 TCC와 RMSE 분포를 나타낸다. ERA-Interim, JRA-55, MERRA2 자료 모두 서태평양 도서국가 지역 이외의 고위도 지역으로 갈수록 TCC의 값이 높게 나타나고 있으며, 동아시아 지역 전체 TCC은 평균 값은 각각 0.80, 0.86, 0.87

이다. RMSE의 경우에는 ERA-Interim과 JRA-55에서 티베트고원 지역과 몽골 주변 고위도 지역에서 상대적으로 높은 값을 보여주고, MERRA2의 경우에는 전체적으로 낮은 값을 나타내었다. 동아시아 지역 전체 RMSE 평균값은 각각 4.27, 3.86, 3.39로 MERRA2가 상대적으로 가장 낮게 나타났다.

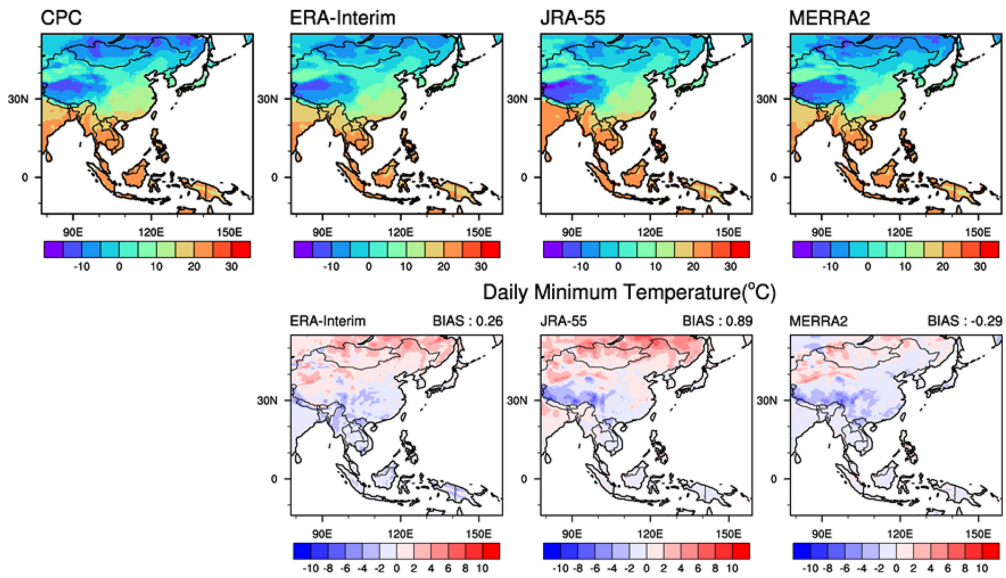


Figure 16. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최저기온과 재분석 자료 기후값 비교(1980~2005년 기간 동안)

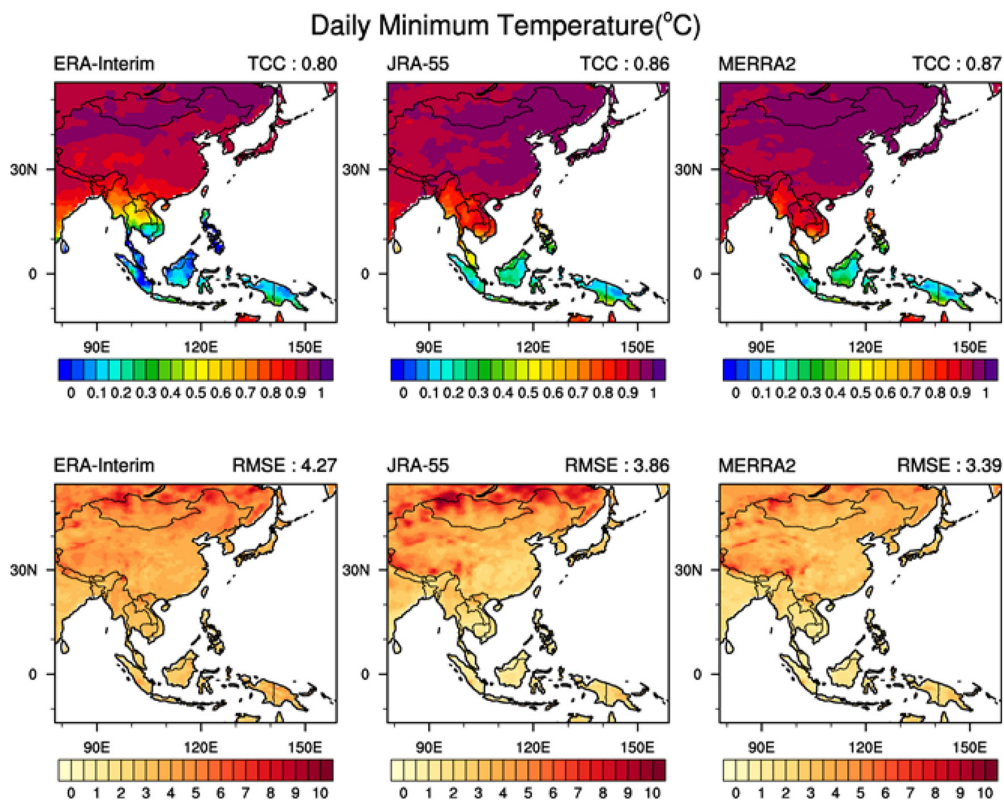


Figure 17. 동아시아 지역에 대한 CPC 일별 최저기온과 재분석 자료의 TCC 및 RMSE 비교(1980~2005년 기간 동안)

3.2 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과

3.2.1 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료의 편이보정 결과

CPC 강수, 최고/최저기온 관측 자료와 앞 절에서 비교분석 한 재분석 자료 중 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과를 알아보기 위하여 2020~2049년 (SNU-MM5 rcp85의 경우는 2020~2035년) 동안의 편이보정 전과 후의 평균값 차이를 Figure 18~21에 나타내었다. 그림에서 빨강계 표시되는 양의 값이 나타나는 지역은 편이보정 전과 비교하여 상대적으로 그 값이 낮게 보정이 되었고, 파랑계 표시되는 음의 값이 나타나는 지역은 상대적으로 높게 보정이 된 것을 의미한다.

Figure 18과 19는 CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 편이보정 전 자료(rcp45,

rcp85)와 CPC 강수, 최고/최저기온 관측 자료를 이용한 편이보정 후 자료(QM_rcp45, QM_rcp85)의 차이를 각각 나타낸다. HadGEM3 모델 강수(pr)의 경우, 방글라데시, 미얀마, 베트남 지역과 파푸아뉴기니 지역에서 강수 값이 낮게 편이보정 된 것을 볼 수 있고, 인도네시아 지역에서는 높게 편이보정 된 것을 볼 수 있으며, 최고/최저기온(tmax, tmin)의 경우는 동아시아 지역 대부분에서 편이보정이 다소 높게 된 것을 볼 수 있다(Figure 18, 상단). RegCM 모델 강수는 HadGEM 모델과 유사하게 방글라데시, 미얀마, 베트남 지역과 인도네시아와 파푸아뉴기니 일부 지역에서 높게 편이보정 된 것을 보여주며, 최고기온의 경우는 동아시아 지역 전반적으로 낮게 편이보정이 되었고, 최저기온의 경우는 북위 30도 이상의 지역에서 편이보정이 낮게 된 것을 볼 수 있다(Figure 18, 중단). SNU-MM5 모델의 경우에는, 강수는 미얀마, 태국, 베트남 지역과 해양 도서국 지역에서 높게, 인도네시아에서 낮게 보정된 것을 볼 수 있으며, 최고기온의 경우는 인도와 남중국 일부 지역을 제외한 지역에서 다소 높게 보정되었고 최저기온의 경우는 동아시아 지역 전반적으로 다소 높게 보정된 것을 나타내고 있다(Figure 18, 하단). Figure 19는 rcp85 시나리오에 대한 보정 전과 후의 차이로 Figure 18과 거의 유사한 보정 결과를 나타내고 있다. 이는 편이보정 시 과거 기간(1980~2005년) 동안의 관측 자료와 지역기후모델의 과거재현 자료와의 차이를 지역기후모델의 시나리오 자료에 적용하여 보정하기 때문이며, 3개 모델이 각각 내포하고 있는 오차에 따라 보정되는 값의 양이 달리 적용되게 된다.

Figure 20과 21은 CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 편이보정 전 자료(rcp45, rcp85)와 MERRA2 강수, 최고/최저기온 재분석 자료를 이용한 편이보정 후 자료(QM_rcp45, QM_rcp85)의 차이를 각각 나타낸다. Figure 20과 21의 강수의 경우 rcp45와 rcp85 모두 CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 전과 후의 차이 값과 매우 유사하게 나타나고 있는데, 이것은 MERRA2 재분석 시스템에서 CPC 강수를 이용하여 보정을 수행했기 때문으로 생각된다(2.1.1.2절 참고). 그러나 기온의 경우에는 전체적인 패턴은 비슷하다고 할 수 있으나 그 값은 지역에 따라 다르게 나타나고 있어 CPC 최고/최저기온 관측과 MERRA2 최고/최저기온 재분석 자료가 다소 차이가 있음을 의미하고 있다(3.1.2절 참고).

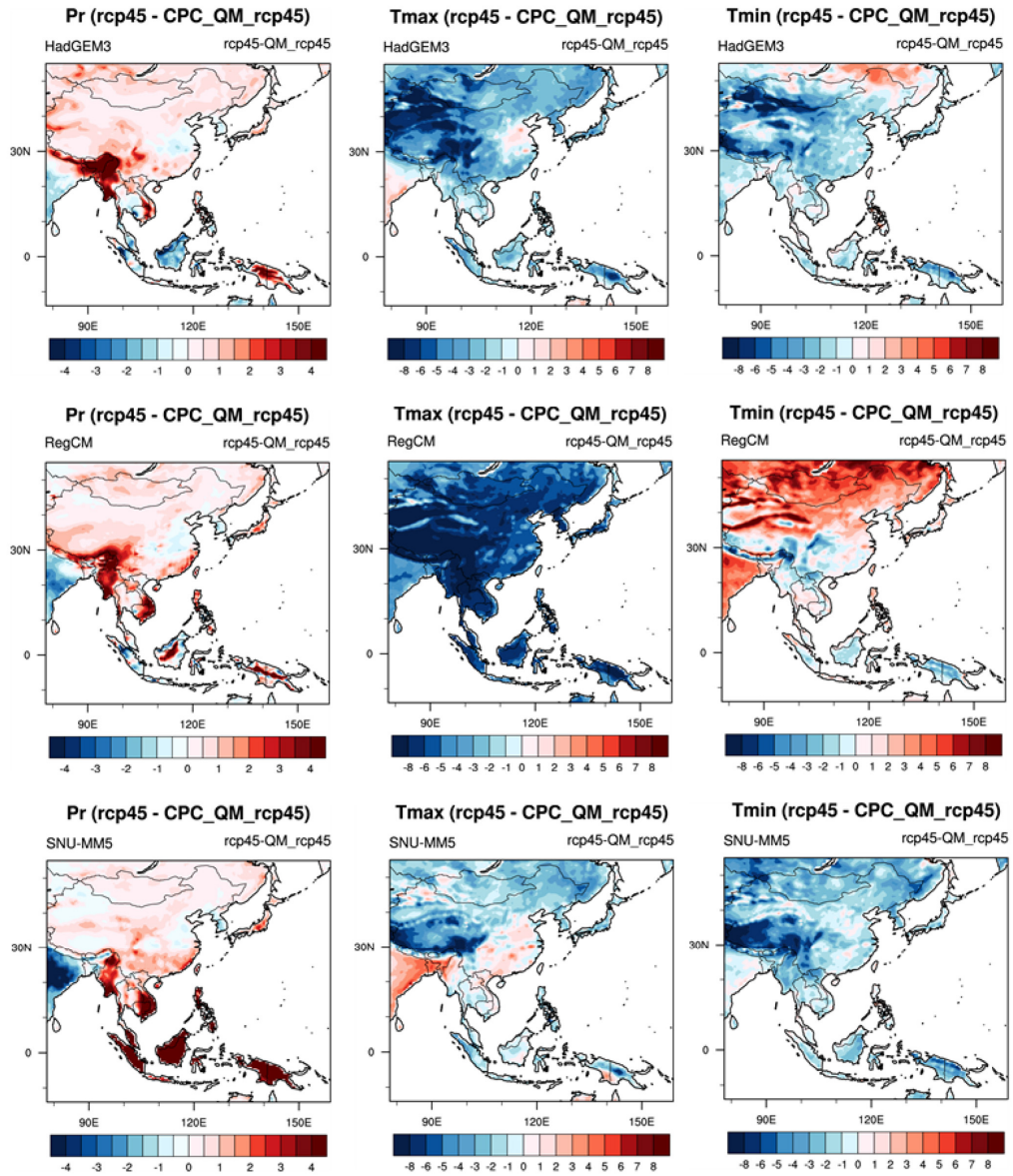


Figure 18. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 편이보정 전과 CPC 관측 자료를 이용한 편이 보정 후 자료의 평균값 차이

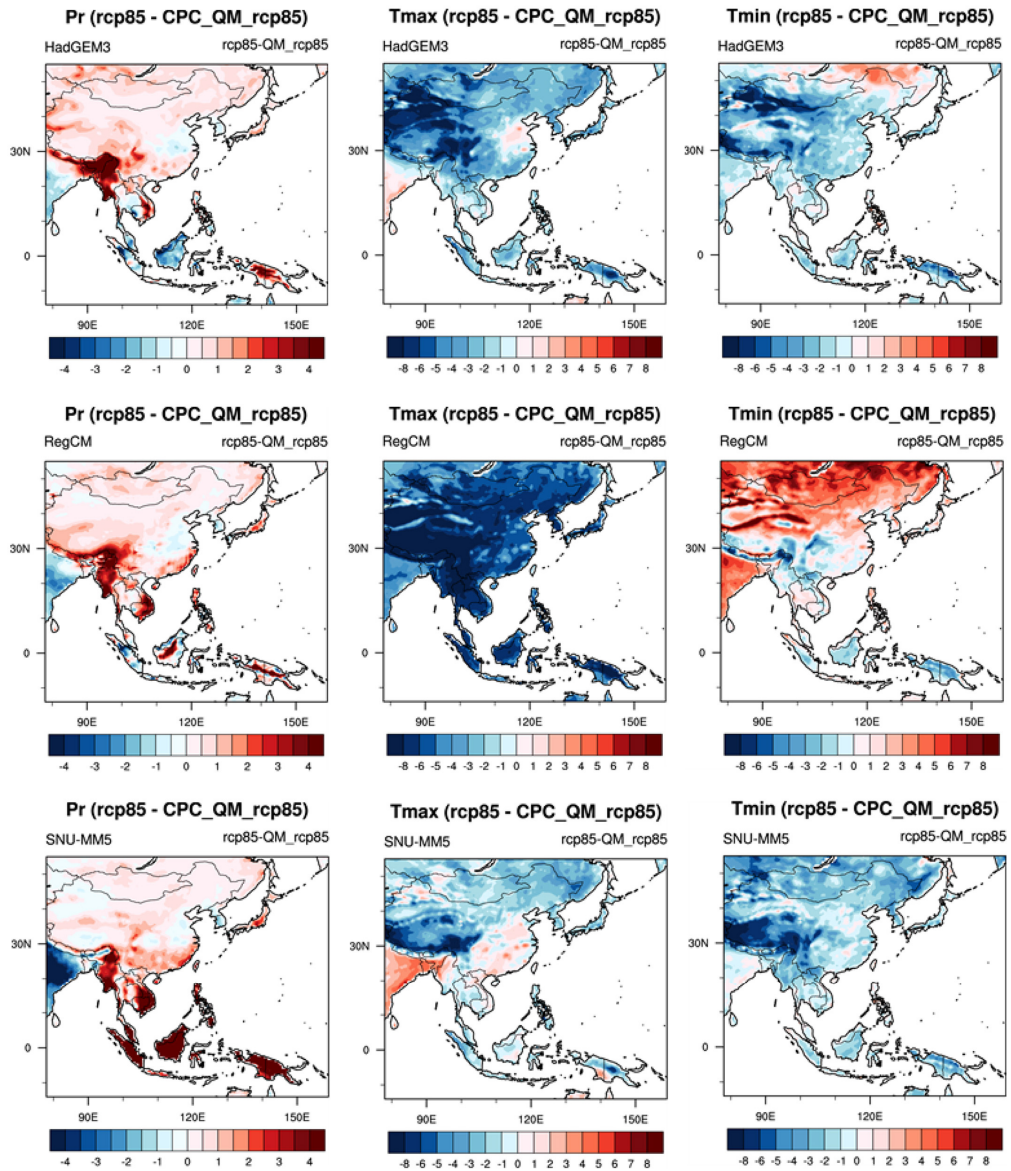


Figure 19. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 편이보정 전과 CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이

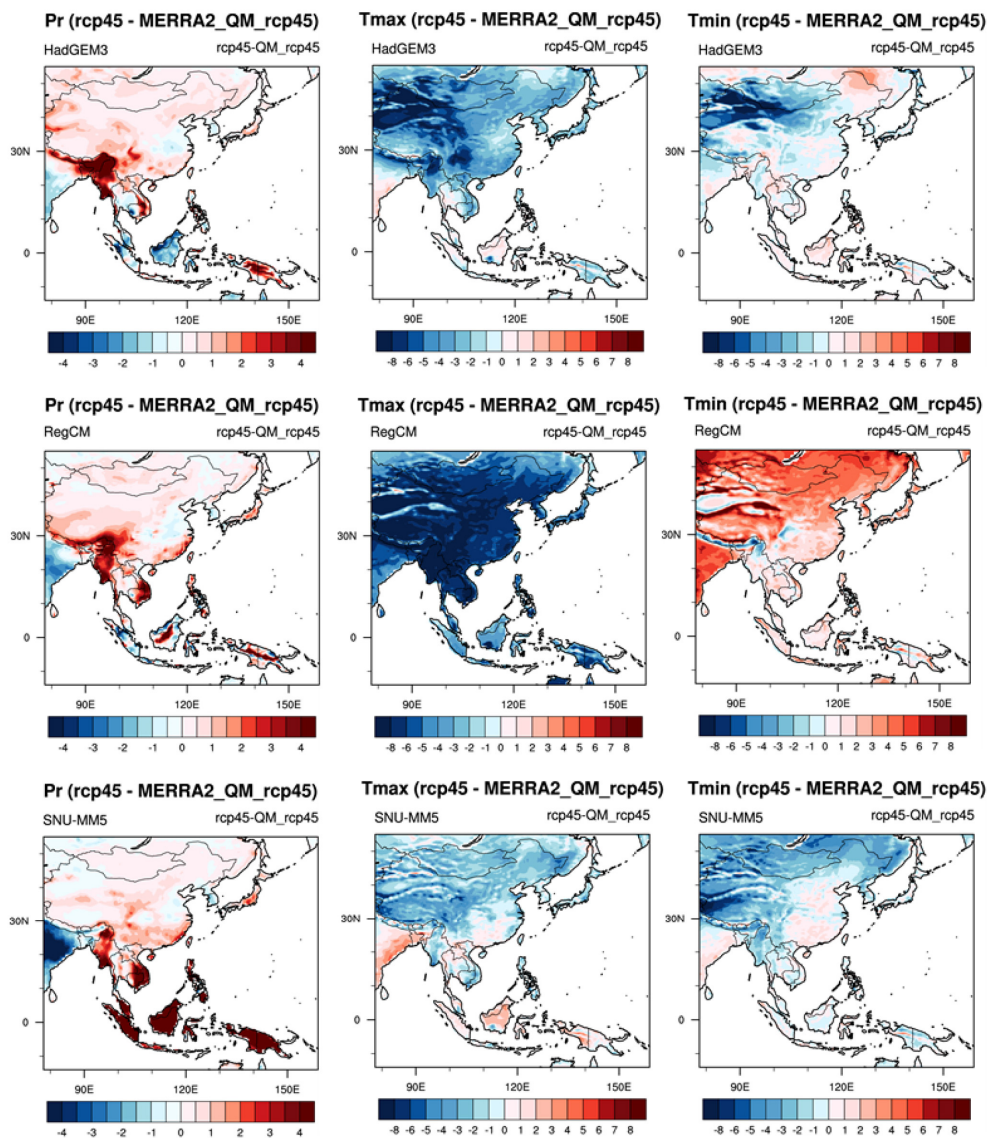


Figure 20. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 편이보정 전과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이

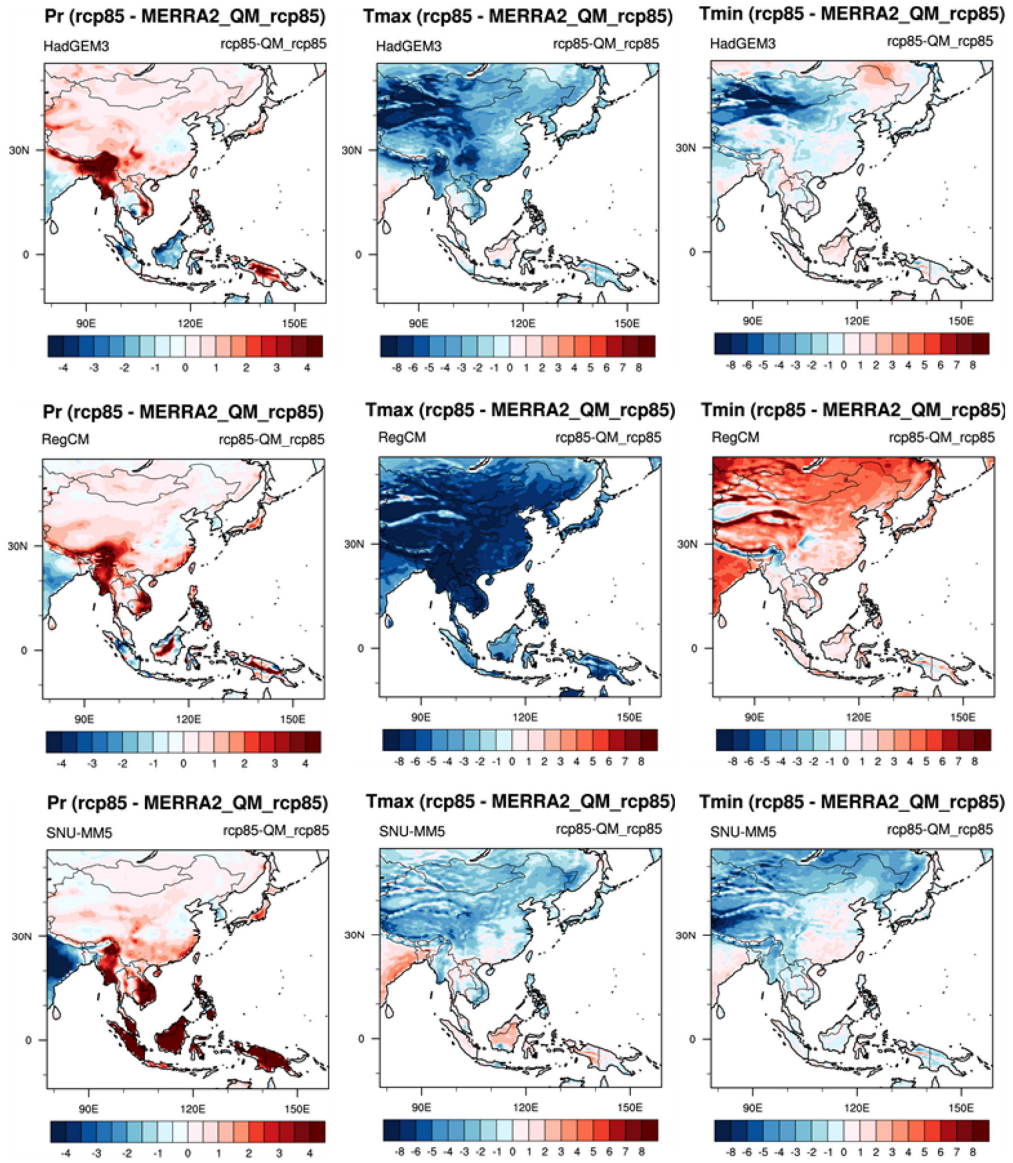


Figure 21. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 편이보정 전과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후 자료의 평균값 차이

3.2.2 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 차이

앞 절에서 CPC 강수, 최고/최저기온 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과가 동아시아 지역에서 모델별로 유사한 패턴을 보여주고 있어 이를 확인하기 위하여 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후의 평균값 차이를 Figure 22와 23에 나타내었다.

강수의 경우, CORDEX-EA 3개 지역기후모델 모두 CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 후의 평균값 차이는 거의 0에 가까운 값을 나타냈다. 최고/최저기온의 경우에는 모델별로 값의 상대적인 차이는 있으나 티베트 고원 지역과 인도네시아 및 파푸아뉴기니 일부 지역에서 양의 값으로 CPC 관측을 이용한 편이보정 값이 높게 나타났고, 그 외 지역은 약 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 정도의 값을 가지며 분포하고 있다. 이는 3.1.2절의 CPC 최고/최저기온과 MERRA2 최고/최저기온 재분석 자료의 오차(bias) 비교분석에서 티베트 고원 지역에서 음의 값으로 나타나는데 즉 CPC 최고/최저기온 보다 MERRA2의 값이 상대적으로 낮기에 이를 이용한 편이보정 후의 모델 시나리오 값도 낮게 산출되어, 편이보정 후의 평균값 차이가 양의 값으로 나타나게 된다.

따라서 본 결과를 통해 살펴볼 수 있는 것은 미래 기후변화 시나리오에 대한 편이보정 수행 시 강수, 기온의 경우 관측자료를 이용하는 것이 일반적이나 MERRA2의 경우 다른 재분석 자료보다 상대적으로 낮은 오차를 가지고 있기에 편이보정을 위한 관측자료로 사용할 수 있을지에 대한 가능성을 확인하는 것이다. 관측 자료를 재분석 자료로 대체하여 사용하고자 하는 이유는 농업, 수자원 등 응용분야 모델링에서는 지점 또는 격자 형태의 일별 관측 자료를 필요로 하며 자료에 따라 관측이 누락되거나 미계측 지역인 경우가 있기 때문이며, 또한 강수, 기온뿐만 아니라 일사량, 상대습도, 지상풍속 등의 다른 기상 변수가 필요하기 때문이다.

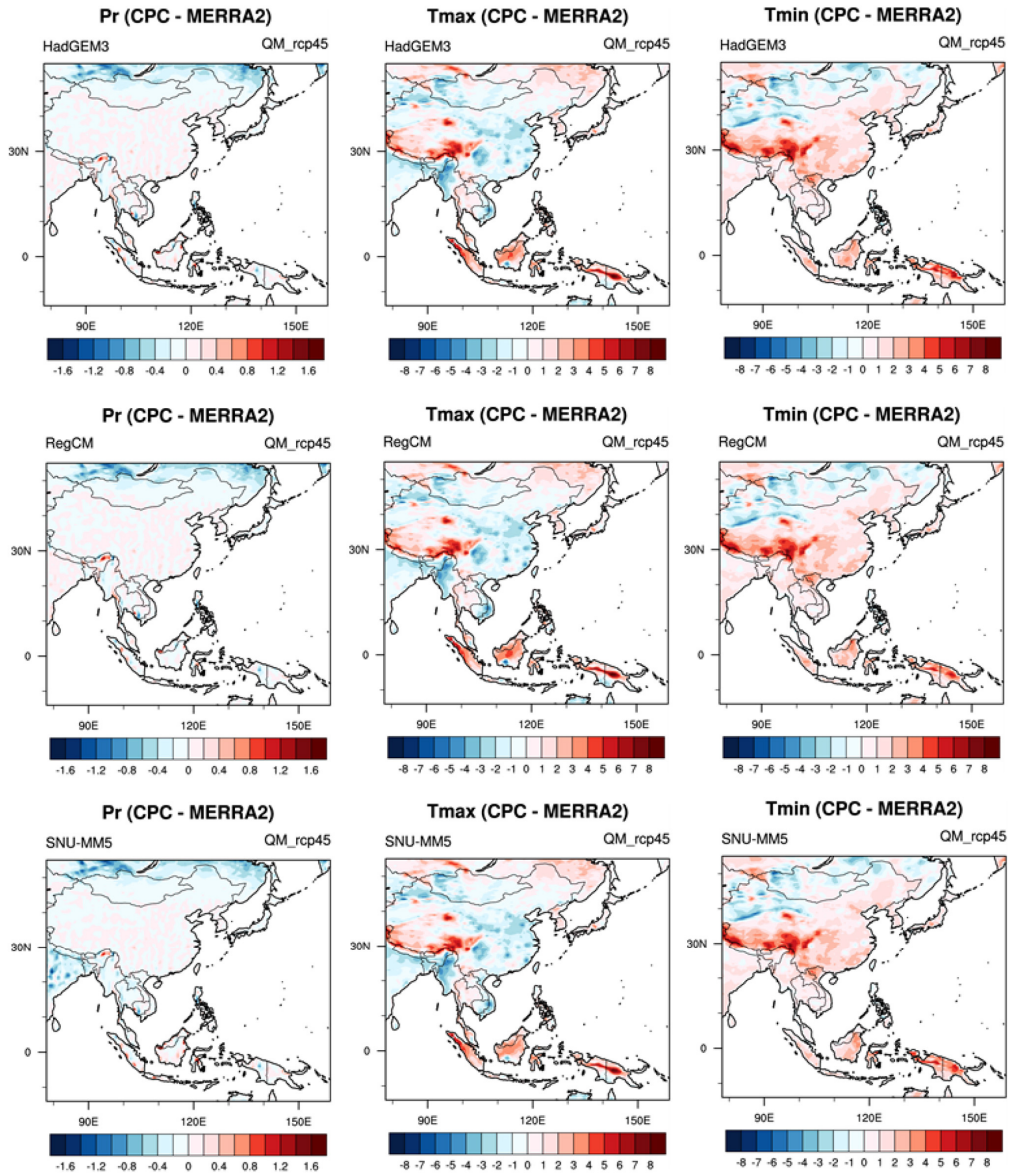


Figure 22. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp45 시나리오에 대한 CPC 관측자료를 이용한 편이보정과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 자료의 평균값 차이

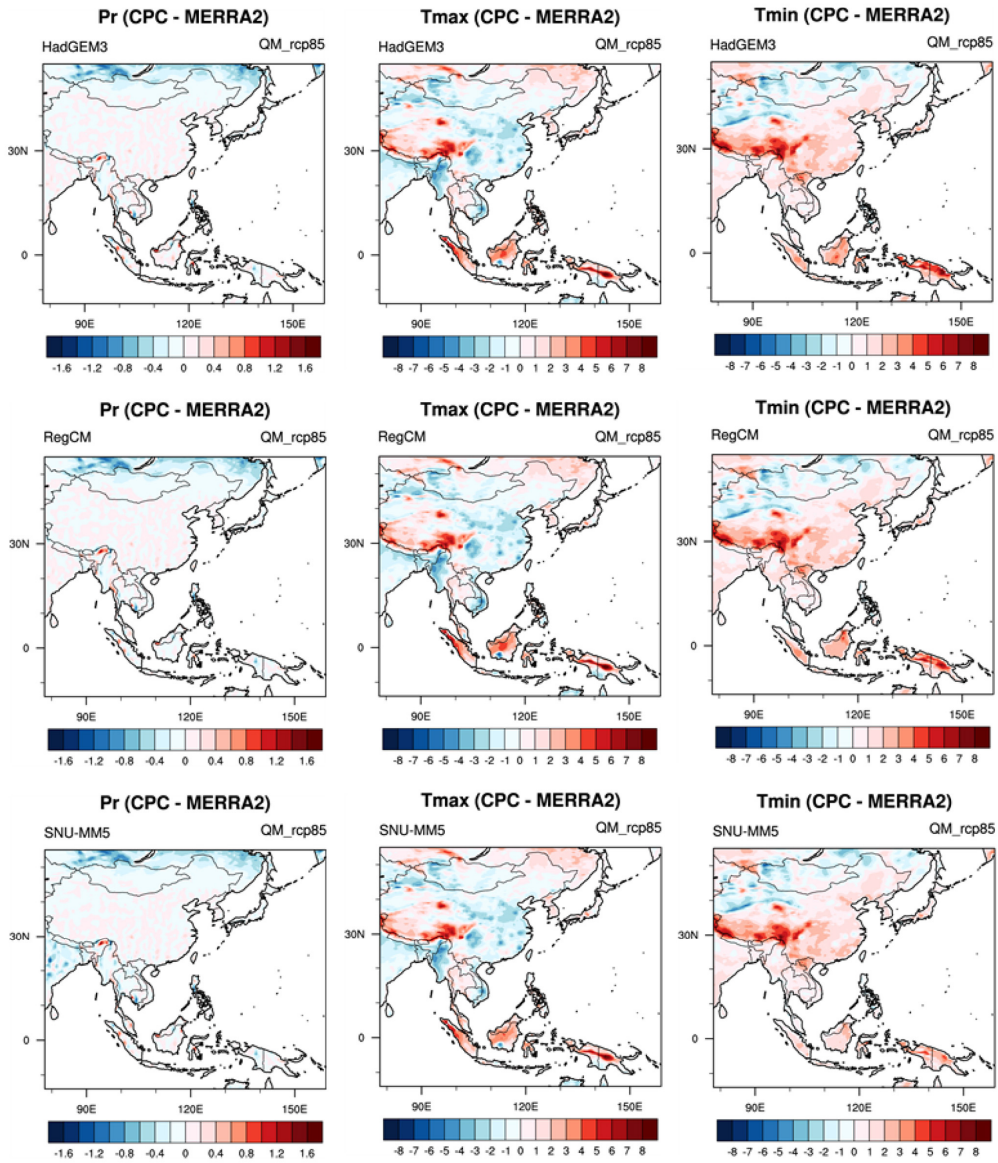


Figure 23. CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 rcp85 시나리오에 대한 CPC 관측자료를 이용한 편보정과 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편보정 자료의 평균값 차이

3.3 편이보정된 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오를 이용한 기후응용지수 산출

3.3.1 동아시아 지역 ETCCDI 기후지수

편이보정된 지역기후변화 시나리오를 이용하여 기후응용지수를 산출하여 과거와 미래 시나리오에 대한 비교를 수행하였는데, 여기서는 MERRA2 재분석 자료를 이용하여 편이보정된 QM_rcp45, QM_rcp85에 대한 결과를 기술하였다. ETCCDI 지수 산출의 경우에는 강수, 최고/최저기온이 사용되었다.

1980~2005년 과거 기간 동안의 MERRA2 재분석 자료와 CORDEX-EA 3개 지역기후모델의 MERRA2 재분석 자료를 이용하여 편이보정된 QM_rcp45와 QM_rcp85의 일별 최고/최저기온과 강수 자료를 이용하여 7개 기후지수를 산출하였으며(Table 5), 비교를 위해 연도별로 산출된 값을 분석기간 동안 평균하였다. 본 과제에서는 기온의 경우에는 TNn과 TXx, 강수의 경우에는 R10mm를 제시하였다. TNn은 분석기간 동안 일별 최저기온이 해당 연도의 각 월에서 최소가 되는 값을 말하며, TXx는 일별 최고기온이 해당 연도의 각 월에서 최대가 되는 값을 나타낸다. 즉 분석기간 동안의 연도별 월별에서의 일별 최저기온의 최소값과 일별 최고기온의 최대값을 찾는 것을 말하는 것으로, 분석기간에 대해 평균하면 월별 일최고/일최저기온의 평균값을 얻게 된다. R10mm는 분석기간의 연도별 일별 강수가 10mm 이상이 되는 일수를 세어서 한 해에 강수가 10mm 이상인 일수를 얻게 되고 이것을 분석기간에 대해 평균하면 그 기간 동안의 강수가 10mm 이상인 평균일수를 산출하게 된다.

Figure 24~26은 3개 지역기후모델의 QM_rcp45, QM_rcp85 자료를 이용하여 산출한 TNn, TXx와 MERRA2 자료를 이용하여 산출한 TNn, TXx와의 차이를 나타낸다. 미래 시나리오의 기간은 2020~2049년까지이며(SNU-MM5 rcp85의 경우는 2020~2035년), MERRA2 재분석 자료의 과거기간은 1980~2005년까지이다. HadGEM3-RA의 TNn 일수는 rcp45, rcp85 모두 북위 약 30도 이상 지역에서 약 2℃ 이상 증가하는 경향을 보이고 있으며, TXx의 경우에는 티베트고원 지역에서 약 2℃ 이상, 우리나라와 일본 지역에서 약 2℃ 정도 증가하고 서태평양 일부 도서국가에서도 증가 추세를 보이고 있다(Figure 24). RegCM의 경우에는 rcp45 보다는 rcp85에서 우리나라와 일본 지역

에서 TNn 일수가 약 2℃ 이상 증가하는 나타내며, TXx 온도는 약 북위 40도 이상과 인도차이나 반도 남부와 서태평양 도서국가의 열대 지역에서 증가하는 경향을 보여준다 (Figure 25). SNU-MM5의 TNn 온도는 HadGEM3-RA와 유사하게 북위 약 30도 이상 지역에서 약 2℃ 이상 증가하는 경향을 보이고 있으며, TXx는 인도 동부 지역에서 뚜렷한 증가가 나타나고 있다(Figure 26). 지역기후모델들의 미래 일별 최고/최저기온의 변동성이 서로 달라 TNn 온도의 증가 원인을 판단하기는 어려우나, TXx 온도의 증가는 지구온난화와 관련이 있을 것으로 추측되며 향후 평균기온 분석을 통해 비교분석이 필요할 것으로 생각된다.

Figure 27은 3개 지역기후모델의 QM_rcp45, QM_rcp85 자료를 이용하여 산출한 R10mm와 MERRA2 자료를 이용하여 산출한 R10mm와의 차이를 나타낸다. 3개 지역기후모델 모두 공통적으로 rcp45와 rcp85의 경우 중국 중동부 지역에서 강수가 10mm 이상 내리는 일수가 약 6일 이상 증가하는 것을 보여주고 있다. rcp45와 rcp85 모두 R10mm 일수 값이 양의 값으로 과거기간 보다 강수가 많아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

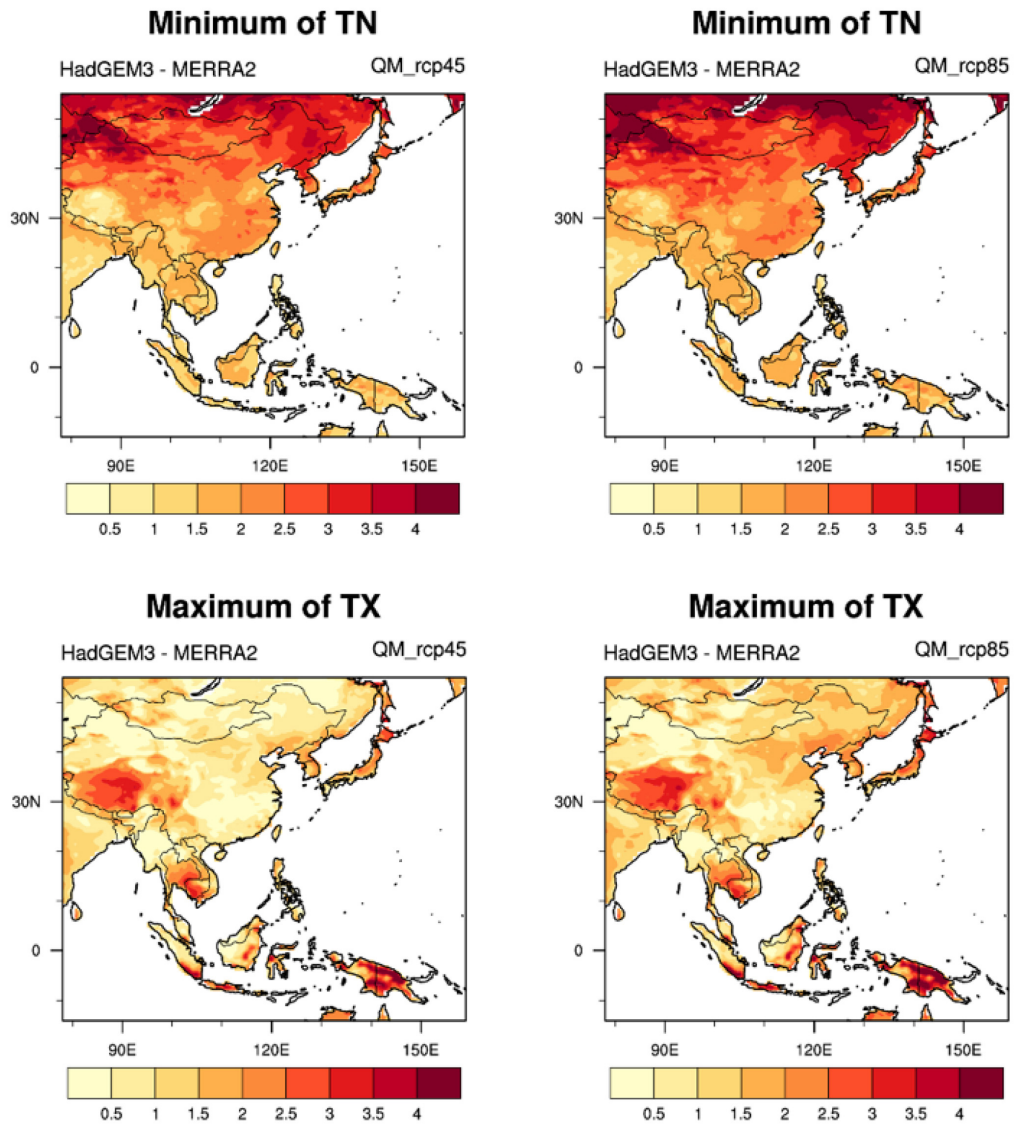


Figure 24. HadGEM3-RA QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값

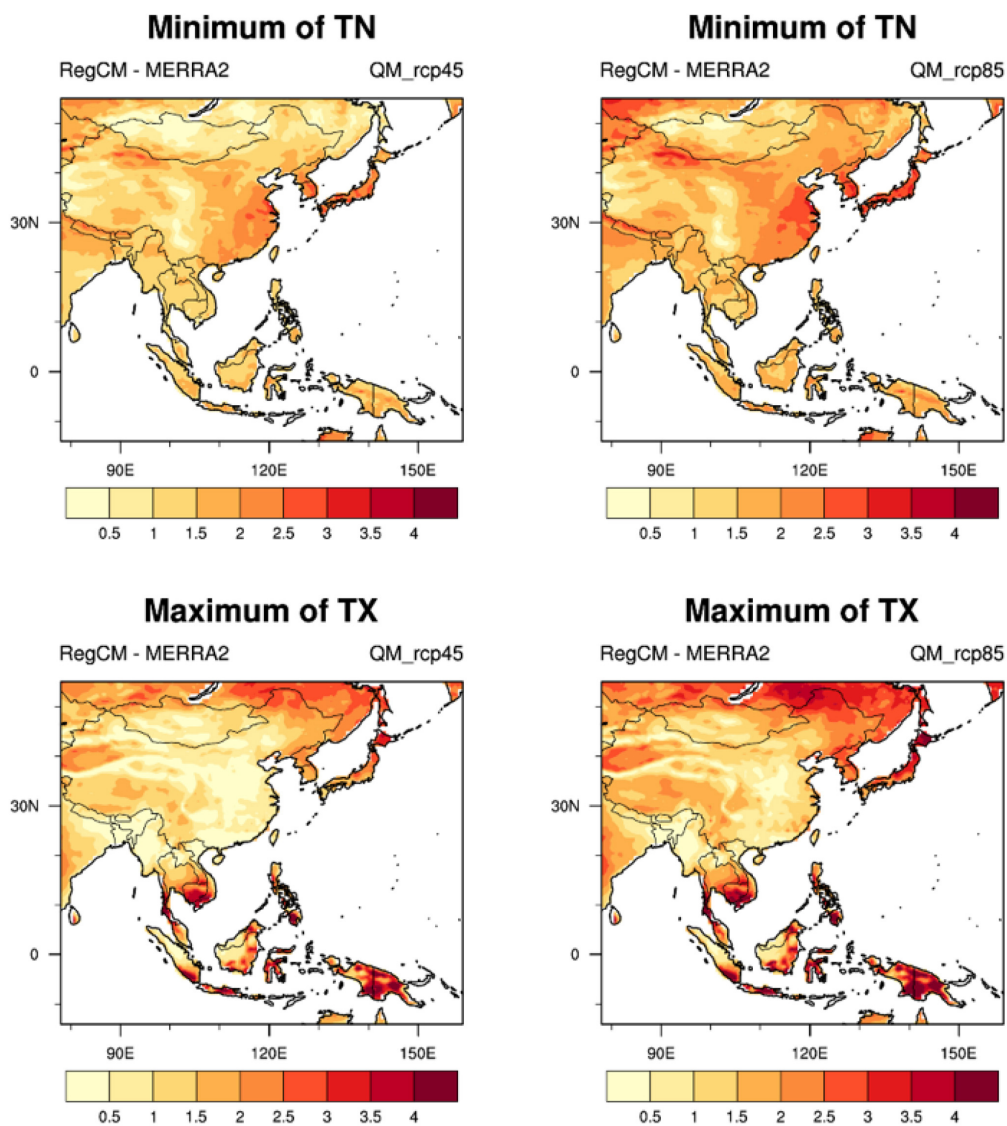


Figure 25. RegCM QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값

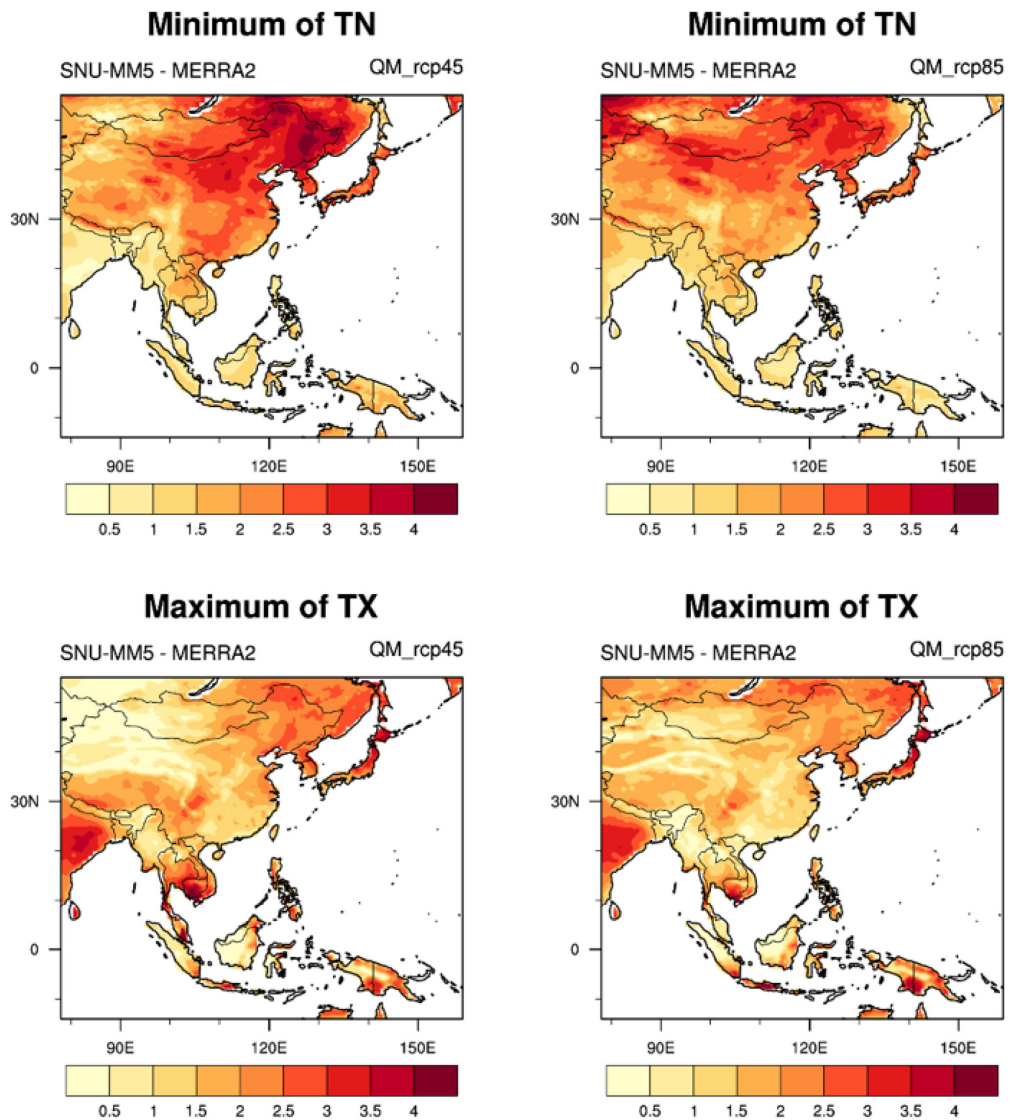


Figure 26. SNU-MM5 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 TNn, TXx 차이값

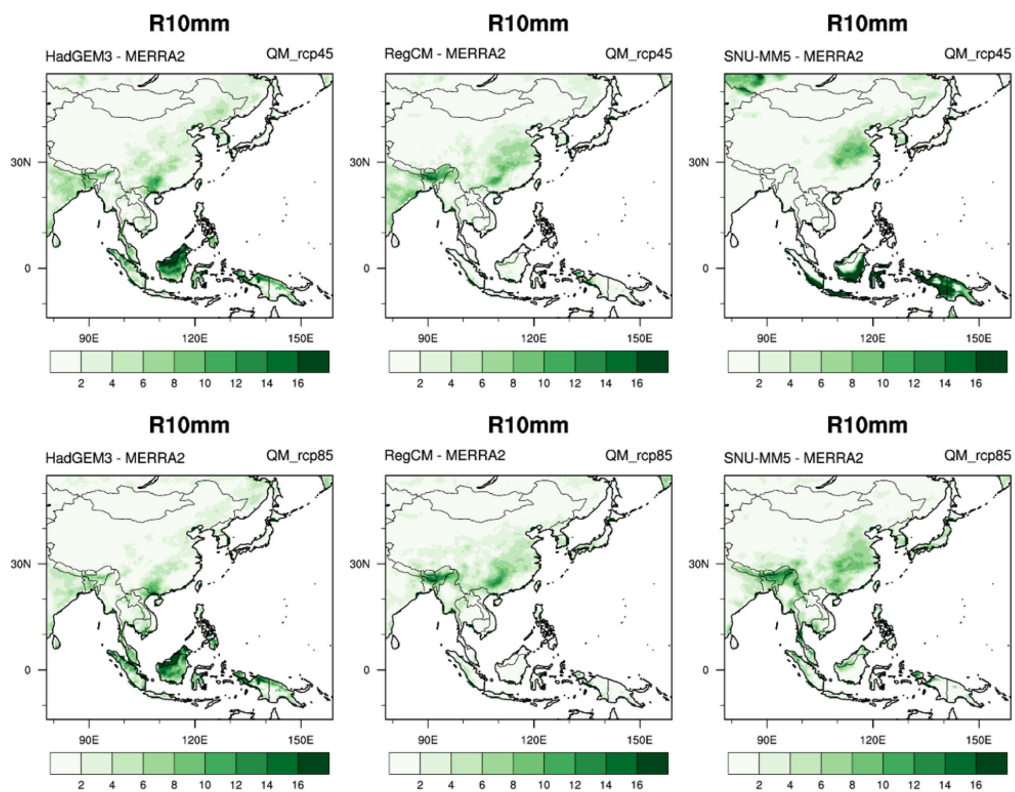


Figure 27. HadGEM3-RA, RegCM, SNU-MM5의 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간)의 R10mm 차이값

3.3.2 동아시아 지역 분야별 기후응용지수

CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용하여 편이보정된 미래 시나리오 자료를 이용하여 2020~2049년까지(SNU-MM5 rcp85 자료의 경우는 2020~2035년 기간) 동안의 응용분야별 9개 지수를 모델별로 산출하여 해당 그림을 부록 1과 2에 첨부하였다. CPC 관측을 이용한 편이보정 결과를 이용한 기후응용지수 산출에서는 상대습도의 관측 값이 없기 때문에 MERRA2의 상대습도 재분석 자료를 이용하였다(부록 1의 경우). 편이보정된 지역기후변화 시나리오를 이용하여 분야별 기후응용지수를 산출하여 과거와 미래 시나리오에 대한 비교를 수행하였는데, 여기서는 MERRA2 재분석 자료를 이용하여 편이보정된 QM_rcp45, QM_rcp85에 대한 결과를 기술하였다. 분야별 기후응용지수 산출을 위해서는 강수, 평균기온, 최고/최저기온, 상대습도가 사용되었다.

미래 시나리오에서 나타나는 기후변화를 알아보기 위하여 2020~2049년(SNU-MM5의 경우는 2020~2035년) 미래기간 동안의 지역기후모델 자료를 이용한 GDD 평균값과 1980~2005년 과거기간 MERRA2 재분석 자료를 이용한 GDD 평균값과의 차이 및 비율을 Figure 28~30에 나타내었다. HadGEM3-RA rcp45의 경우, 우리나라와 일본을 포함한 북위 40도 이상에서 과거기간 동안 보다 약 600도일 이상 증가하는 것을 볼 수 있으며 과거와 미래 GDD의 비율에서는 우리나라와 일본을 비롯한 약 북위 약 30~40도 사이 부근에서 50% 이상으로 미래 GDD가 증가하고 있는 것을 나타냈고, rcp85의 경우에도 rcp45와 유사한 분포를 나타내고 있으며 GDD 평균값 차이는 내륙지역에서 대부분 약 600도일 이상으로 나타났다(Figure 28). GDD는 최고/최저기온과 생육영점온도를 이용하여 누적일수를 계산하는 것으로 여기서 생육영점온도는 10℃를 이용하였고 일반적으로 작물의 경우에 해당된다. 따라서 미래 시나리오에서 GDD가 증가하였다는 것은 10℃ 이상되는 지역과 일수가 증가하였다는 것을 볼 수 있으며 rcp85 시나리오에서 온난화가 더 진행되었다는 것을 내포하고 있다. RegCM rcp45와 rcp85의 경우에도 HadGEM3-RA와 유사한 분포를 볼 수 있으며(Figure 29), SNU-MM5에서는 GDD 평균값 차이 분포가 rcp45와 rcp85에서 지역적으로 다르게 나타났으나 비율은 북위 약 30~40도 사이 부근에서 50% 이상 증가하는 것으로 앞 두 모델 결과와 비슷하게 나타났다(Figure 30).

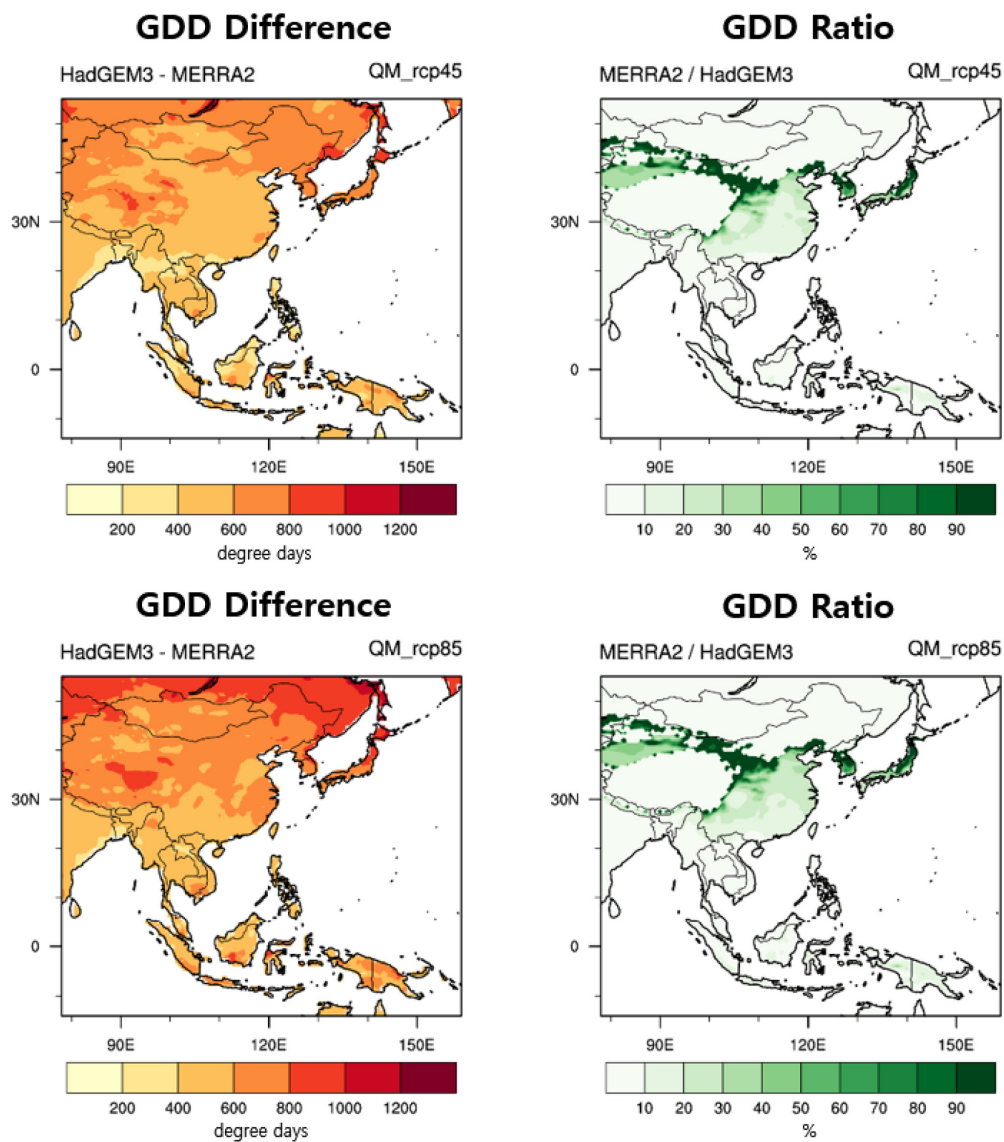


Figure 28. HadGEM3-RA QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율

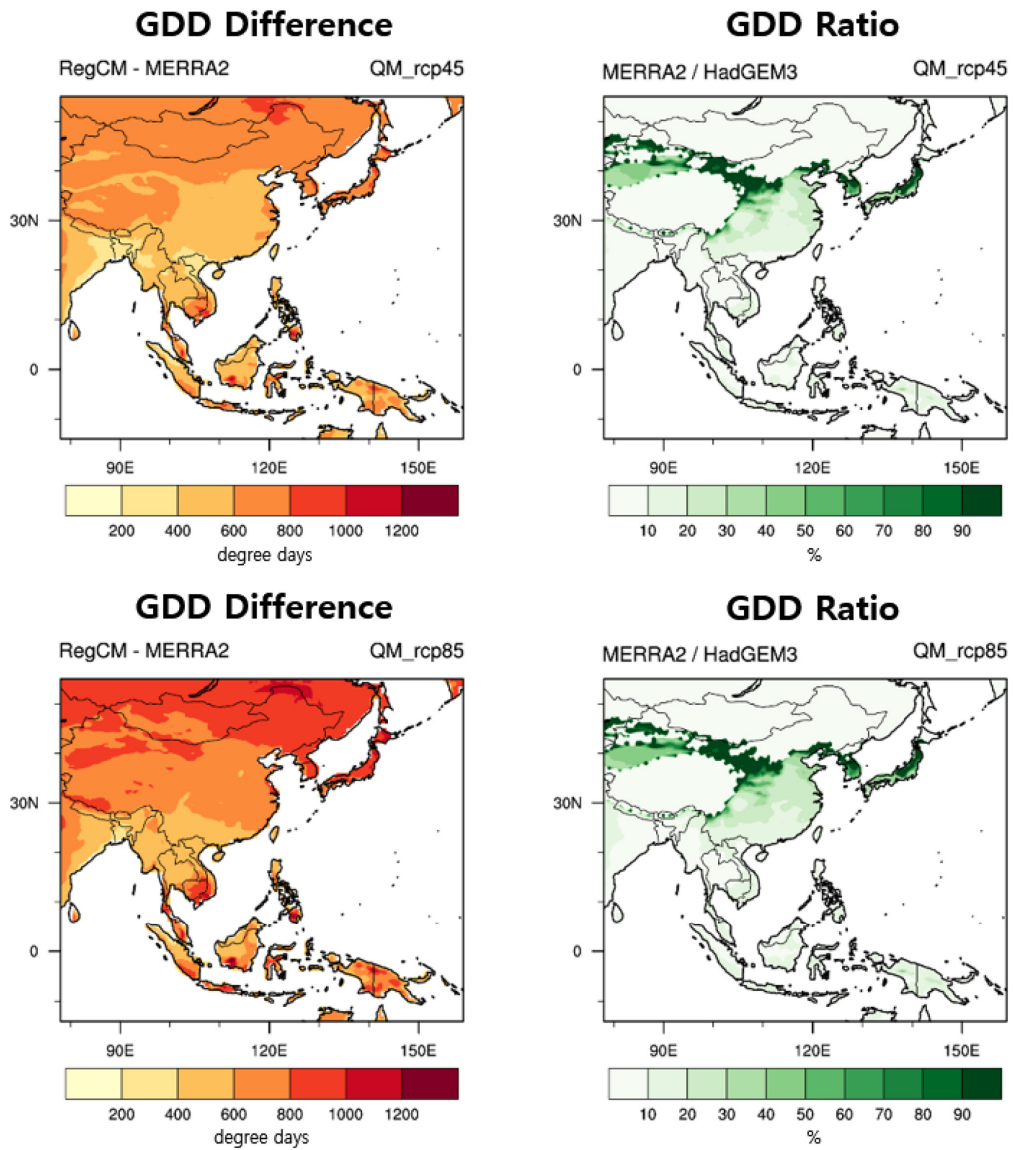


Figure 29. RegCM QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율

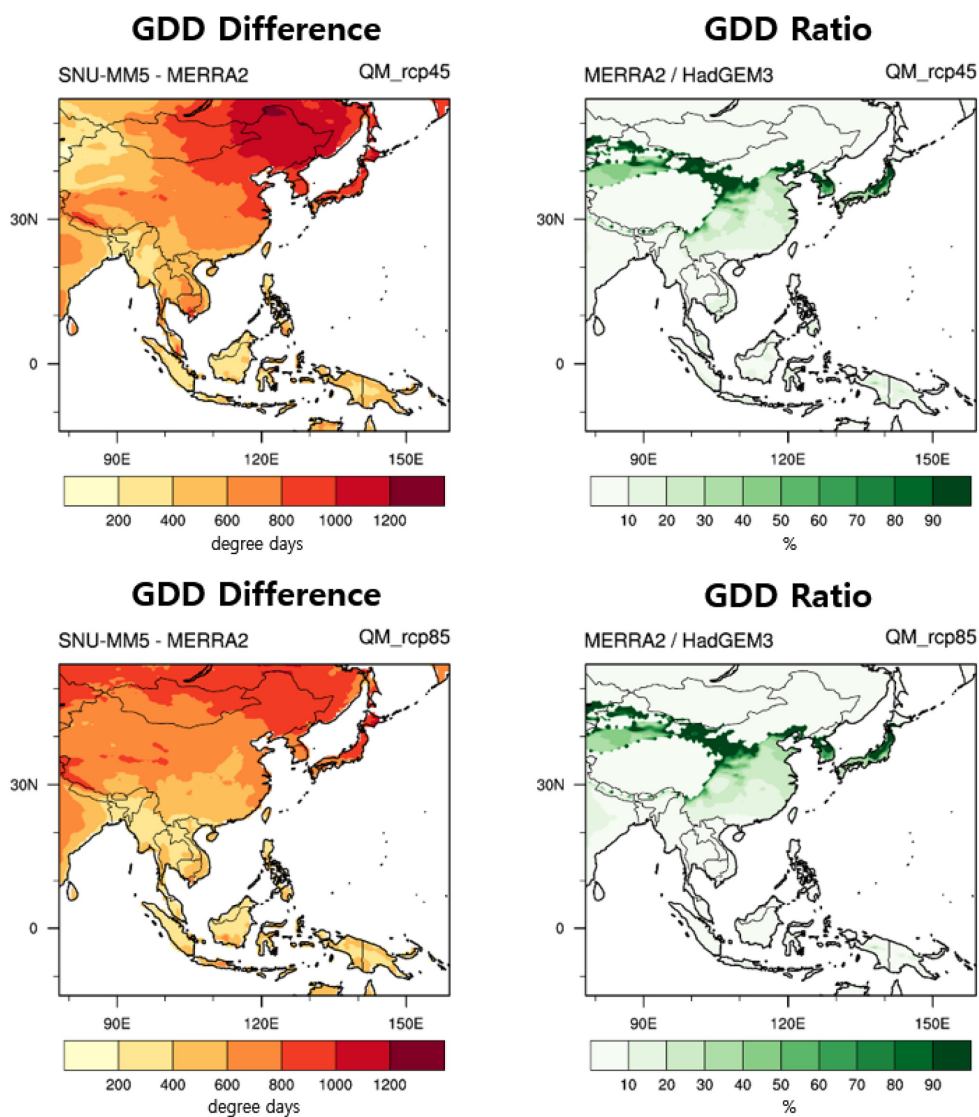


Figure 30. SNU-MM5 QM_rcp45 및 QM_rcp85(미래기간)와 MERRA2(과거기간) GDD의 차이값 및 비율

4. 결론 및 토론

본 연구에서는 응용분야 기후정보 활용성 증대와 APCC의 정보서비스 확장을 위한 기반 기술 개선의 일환으로 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오를 이용한 기후응용지수 산출을 위한 격자기반 편이보정 기법 개발과 응용지수 산출 모듈 개발을 수행하였다.

이를 위해 우선 CORDEX-EA 지역기후변화 시나리오 자료의 품질 검사를 통해 곡선 격자를 0.5도 직선격자로 변환하여 자료를 구축하였다. 최종적으로 사용가능한 자료는 3개 지역기후모델 HadGEM-RA, RegCM4, SNU-MM5의 historical, rcp45, rcp85이고 응용분야에 주로 사용되는 변수로써 기후응용지수 산출을 위해 강수(pr), 지상기온(tas), 최고기온(tasmax), 최저기온(tasmin), 상대습도(rh)를 선정하였다. 그리고 관측자료 누락 또는 미계측 지역에 대한 지역기후변화 시나리오의 활용성 증대를 위해 재분석 자료를 이용한 편이보정 적용 가능성을 분석하여, CPC 관측과 MERRA2 재분석 자료를 이용하여 편이보정된 rcp45(QM_rcp45), rcp85(QM_rcp85) 자료를 이용하여 2020~2049년까지(SNU-MM5 rcp85 자료의 경우는 2020~2035년 기간) 동안의 응용분야별 9개 지수를 지역기후변화 모델별, 연도별로 산출하였다(본 보고서에는 분석기간 평균값 그림만 제시).

QM을 이용한 격자기반 편이보정 및 응용지수 산출을 위해서는 강수 및 기온뿐만 아니라 상대습도 등의 일별 격자 관측 자료가 필요하다. 일반적으로 일별 격자 형태의 전지구 관측 자료는 강수, 기온 등의 변수에 한해 제공되고 있다. 따라서 격자기반의 관측 자료와 재분석 자료를 비교하여 강수, 기온의 경우 재분석 자료를 관측 자료로 사용할 수 있을지에 대해 검토하였다. MERRA2 재분석 자료는 강수 보정 알고리즘을 이용하여 관측 자료와 보정이 이루어지고 보정된 강수 자료는 MERRA2의 대기-지표 접합 재분석 시스템으로 수행되며, 이것은 관측된 강수가 증발산을 통해 지표 근처의 기온과 습도에 영향을 미치게 되고 이에 지표 근처의 기상학 자료를 생산하게 된다. 따라서 상대습도와 같은 관측 자료가 없거나 누락된 경우 이러한 재분석 자료는 격자기반 편이보정에 매우 유용하게 이용될 수 있다. 그러나 기온의 경우 MERRA2 일별 최고/최저기온 자료의 값이 타 재분석 자료보다 상대적으로 오차가 작다고 하더라도, CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 결과와 MERRA2 재분석 자료를 이용한 결과의 차이를 보면 티베트 고원 지역

과 열대 해양 도서국가 지역에서 기온의 차이가 있어 기온변수가 들어간 응용지수 산출에서도 그 차이가 약하게 나타나고 있다. 미래 기후변화를 분석하는데 있어 이러한 차이가 지구온난화 등의 기후변화 현상을 해석하는데 미치는 영향은 작을지 모르나 관측자료(격자 또는 지점 자료)가 확보가 된다면 그 자료를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 다만 지점별 관측자료를 이용한 다운스케일링의 경우에는 관측자료가 누락되었거나 지점 관측 자료가 없는 미계측 지역이 존재하기에 MERRA2와 같은 재분석 자료를 활용할 것으로 생각된다.

본 과제의 결과는 향후 다른 편이보정 방법을 이용한 격자 및 지점별 다운스케일링에 활용가능하며, CORDEX 사업에서 생산되는 타 지역 시나리오의 편이보정에 적용하여 APCC 홈페이지에 정보 제공 또는 AIMS에 탑재 등을 논의하여 기후정보를 활용할 수 있도록 할 것이며, 이와 더불어 응용분야에서 기후정보 활용 시 관측자료와 재분석 자료 등에 관한 가이드라인을 제공하여 사용자가 올바른 자료를 사용하고 이해할 수 있도록 노력해 나갈 것이다. 참고로 국립기상과학원에서는 CORDEX 사업의 일환으로 향후 AR6 전지구 기후변화 시나리오를 이용하여 2020년까지 동아시아 영역에 대해 지역기후변화 전망자료를 산출할 계획으로(<http://cordex-ea.climate.go.kr/cordex>), 편이보정, 상세화 등에 관한 지속적인 기술 개선 및 개발이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Dettinger MD, Cayan DR, Meyer MK, Jeton AE. 2004. Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American river basins, Sierra Nevada, California, 1900–2099. *Climatic Change* 62: 283–317.
- Dobler A, Ahrens B. 2008. Precipitation by a regional climate model and bias correction in Europe and South Asia. *Meteorologische Zeitschrift* 17: 499–509.
- Karl, T., and D. Easterling (1999), Climate extremes: Selected review and future research directions, *Clim. Chang.*, 42, 309–325.
- Klein Tank, A. M. G., F. W. Zwiers, and X. Zhang (2009), Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, *Climate data and monitoring WCDMP–No. 72, WMO–TD No. 1500*, 56 pp.
- Lucchesi, R., 2015: File specification for GEOS–5 FP–IT. NASA GMAO Office Note 2 (version 1.4), 58 pp. [Available online at <http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/>]
- Meng, J., R. Yang, H. Wei, M. Ek, G. Gayno, P. Xie, and K. Mitchell, 2012: The land surface analysis in the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *J. Hydrometeor.*, 13, 1621–1630, doi:10.1175/JHM-D-11-090.1.
- Orlowsky, B., and S. I. Seneviratne (2012), Global changes in extreme events: Regional and seasonal dimension, *Clim. Chang.*, 110, 669–696, doi:10.1007/s10584-011-0122-9.
- Panofsky HW, Brier GW. 1968. *Some Applications of Statistics to Meteorology*. The Pennsylvania State University Press: Philadelphia.
- Piani C, Haerter JO, Coppola E. 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology* 99: 187–192, DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9.
- Reichle, R. H. and Q. Liu, R. D. Koster, C. S. Draper, S. P. P. Mahanama, and G. Partyka, 2017: Land surface precipitation in MERRA-2, *J. Climate*, 30, 1643–1664, doi:10.1175/JCLI-D-16-0570.1
- Reichle, R. H. and R. D. Koster, G. J. M. De Lannoy, B. A. Forman, Q. Liu, S. P. P. Mahanama, and A. Touré, 2011: Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *J. Climate*, 24, 6322–6338, doi:10.1175/JCLI-D-10-05033.1.
- Reichle, R. H., 2012: The MERRA–Land Data Product. NASA GMAO Office Note 3 (version 1.2), 38 pp. [Available online at https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes/]

- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 1015-1057, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Sillmann, J., and E. Roeckner (2008), Indices for extreme climate events in projections of anthropogenic climate change, Clim. Chang., 83-104, doi:10.1007/s10584-007-9308-6.
- Tebaldi, C., K. Hayhoe, J. Arblaster, and G. Meehl (2006), Going to extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events, Clim. Chang., 79, 185-211, doi:10.1007/s10584-006-9051-4.
- Wood AW, Leung LR, Sridhar V, Lettenmaier DP. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscale climate model outputs. Climatic Change 62: 189-216.

부록 1 CPC 관측 자료를 이용한 편이보정 결과에 대한 9개 기후응용지수

※ 상대습도가 필요한 지수 산출의 경우 MERRA2를 이용한 편이보정 결과 사용

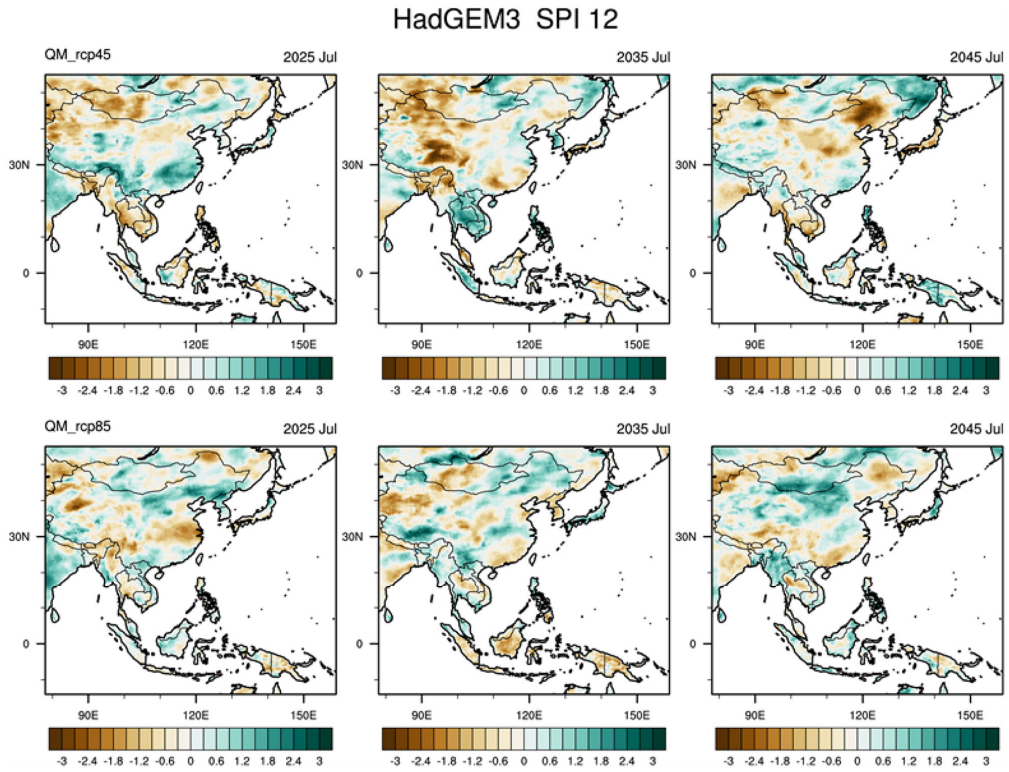


Figure 1-1. HadGEM3-RA QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

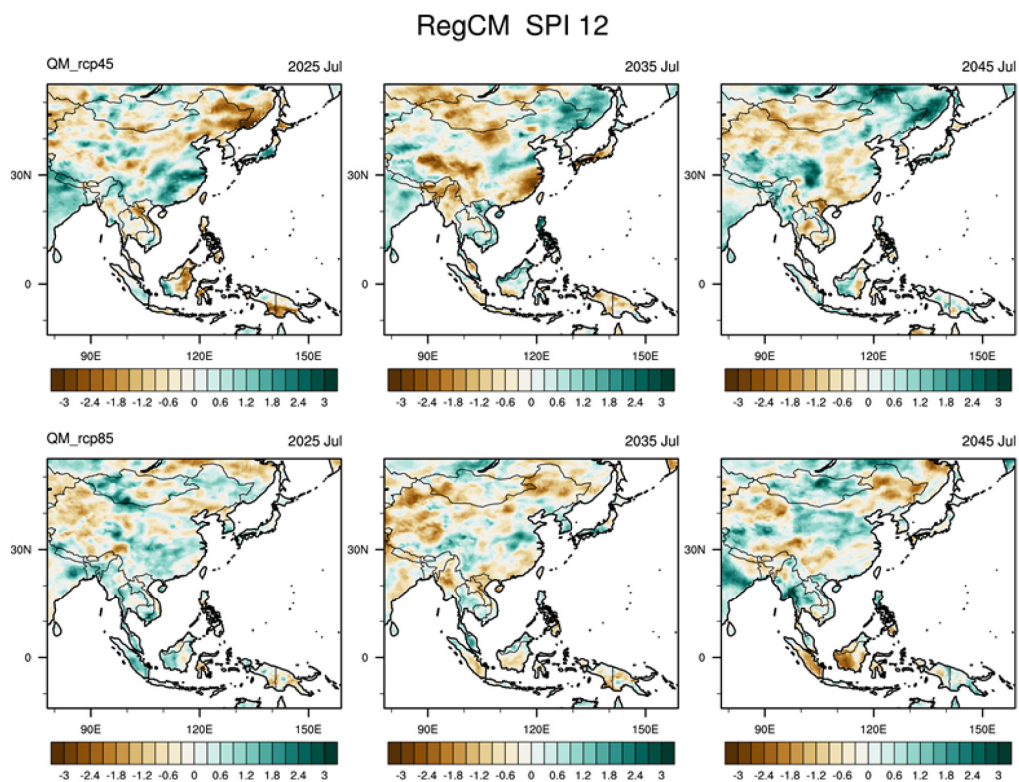


Figure 1-2. RegCM QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

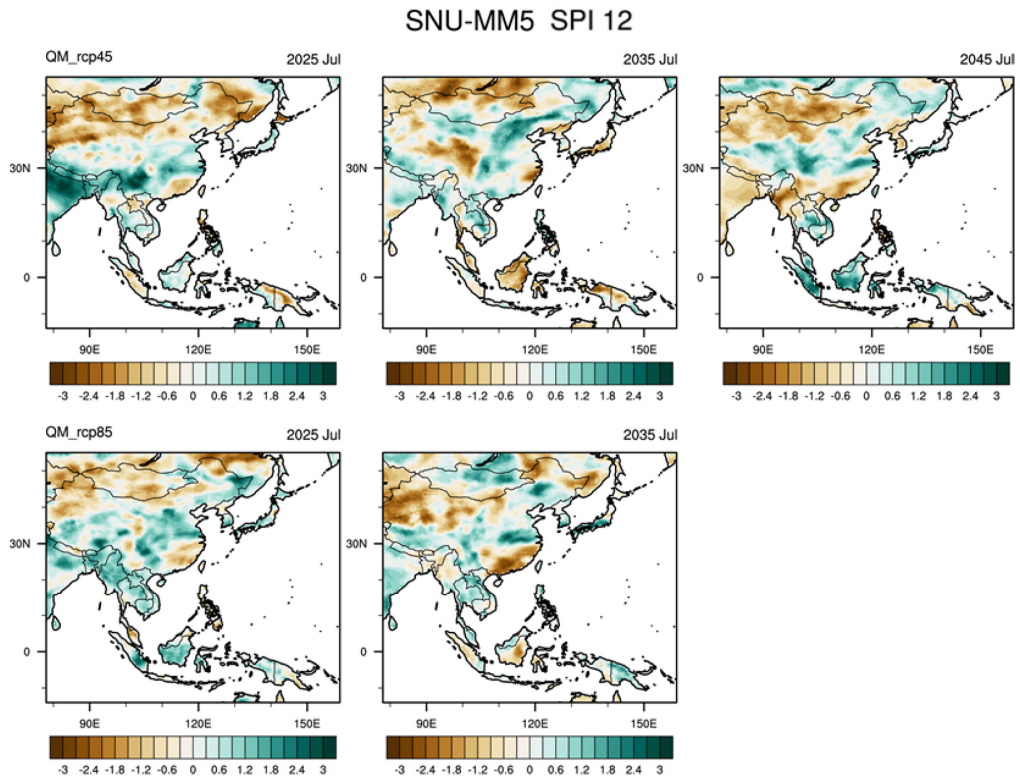


Figure 1-3. SNU-MM5 QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

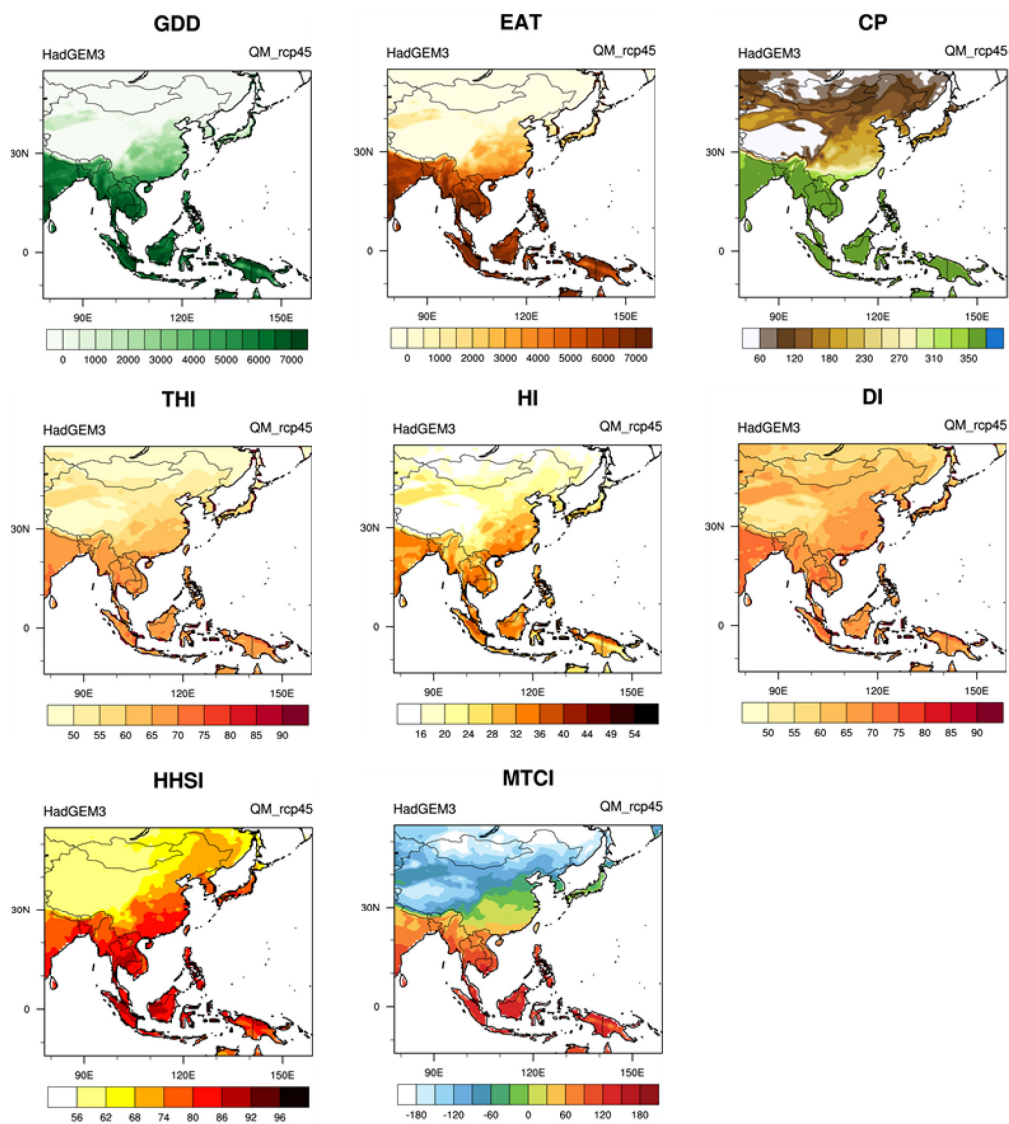


Figure 1-4. HadGEM3-RA QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

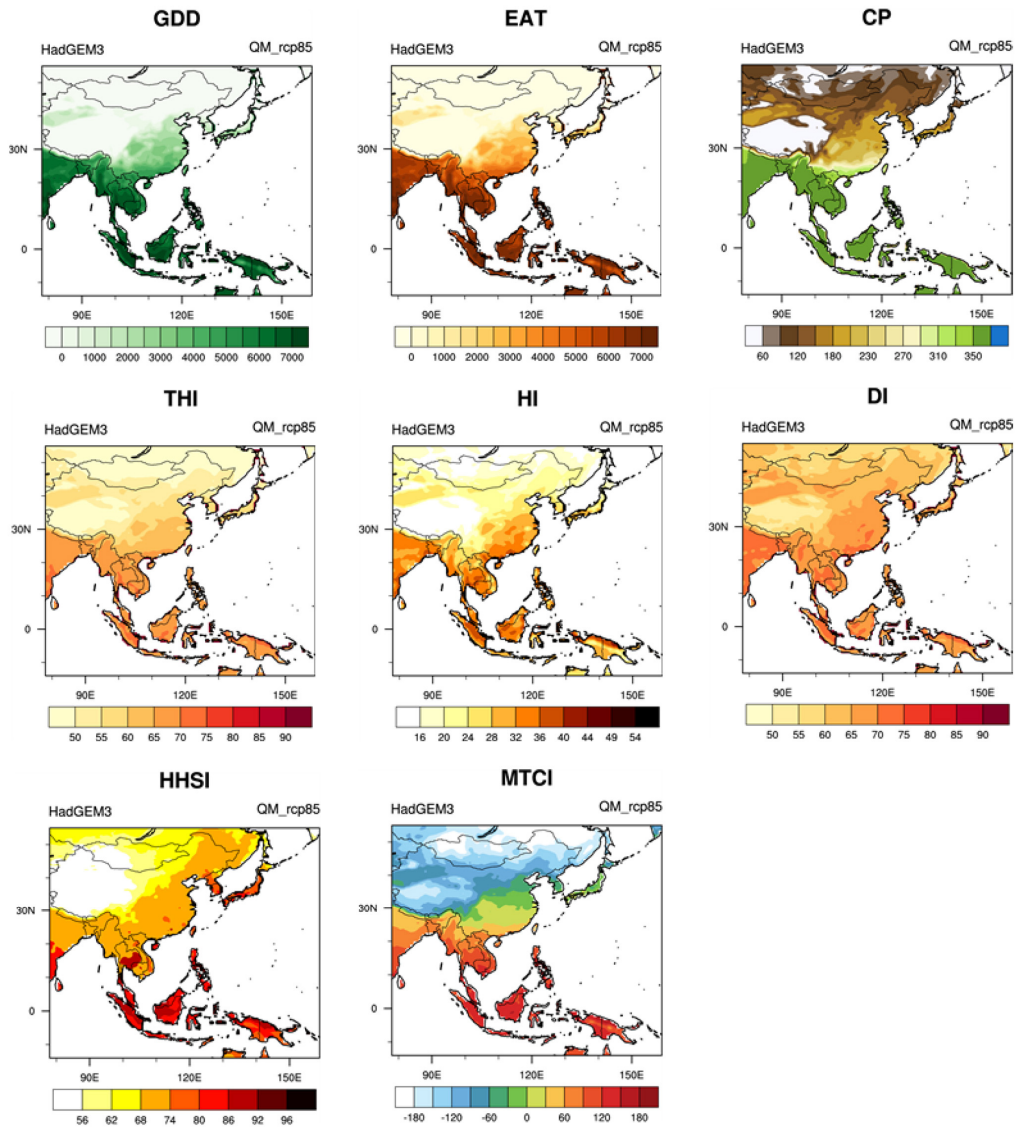


Figure 1-5. HadGEM3-RA QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

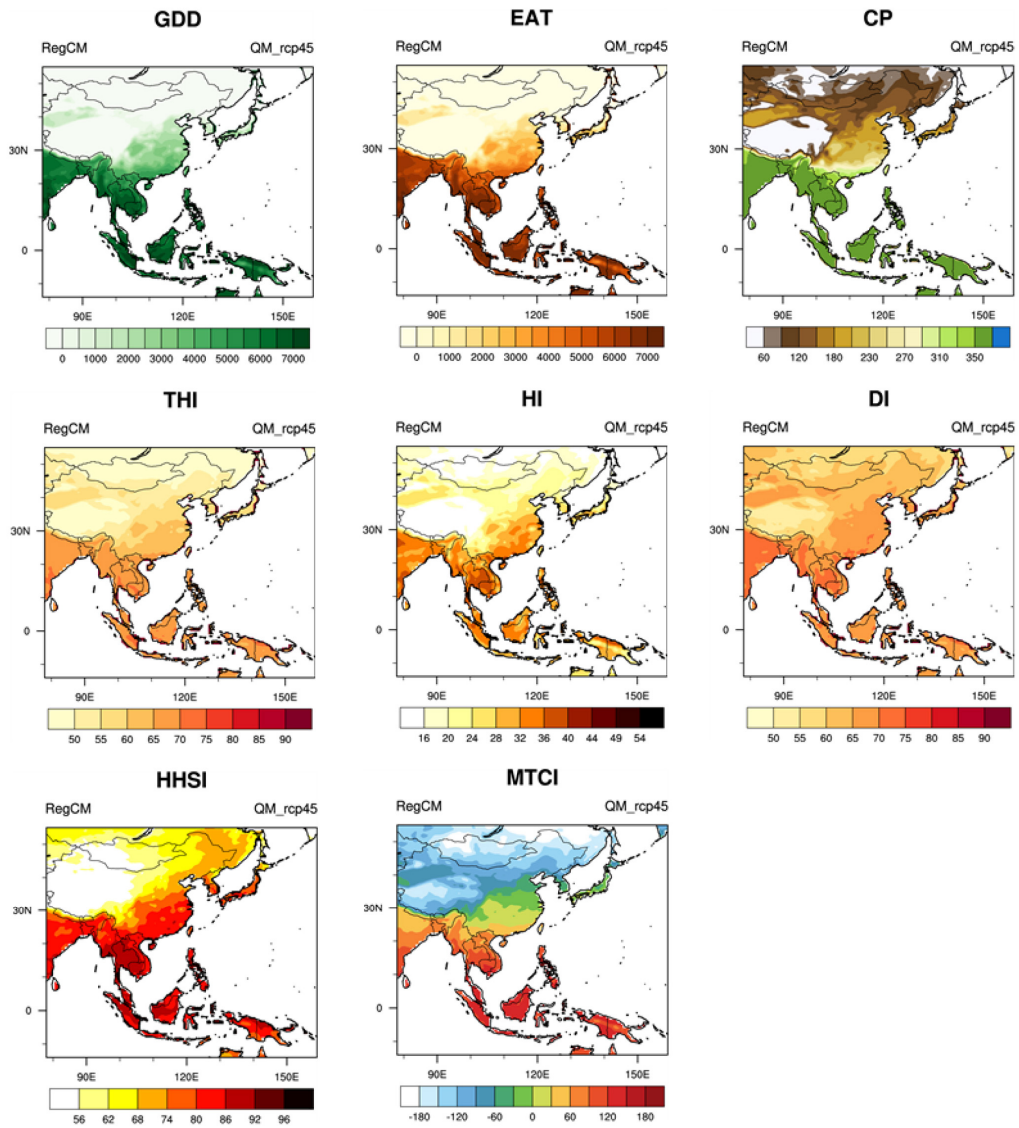


Figure 1-6. RegCM QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

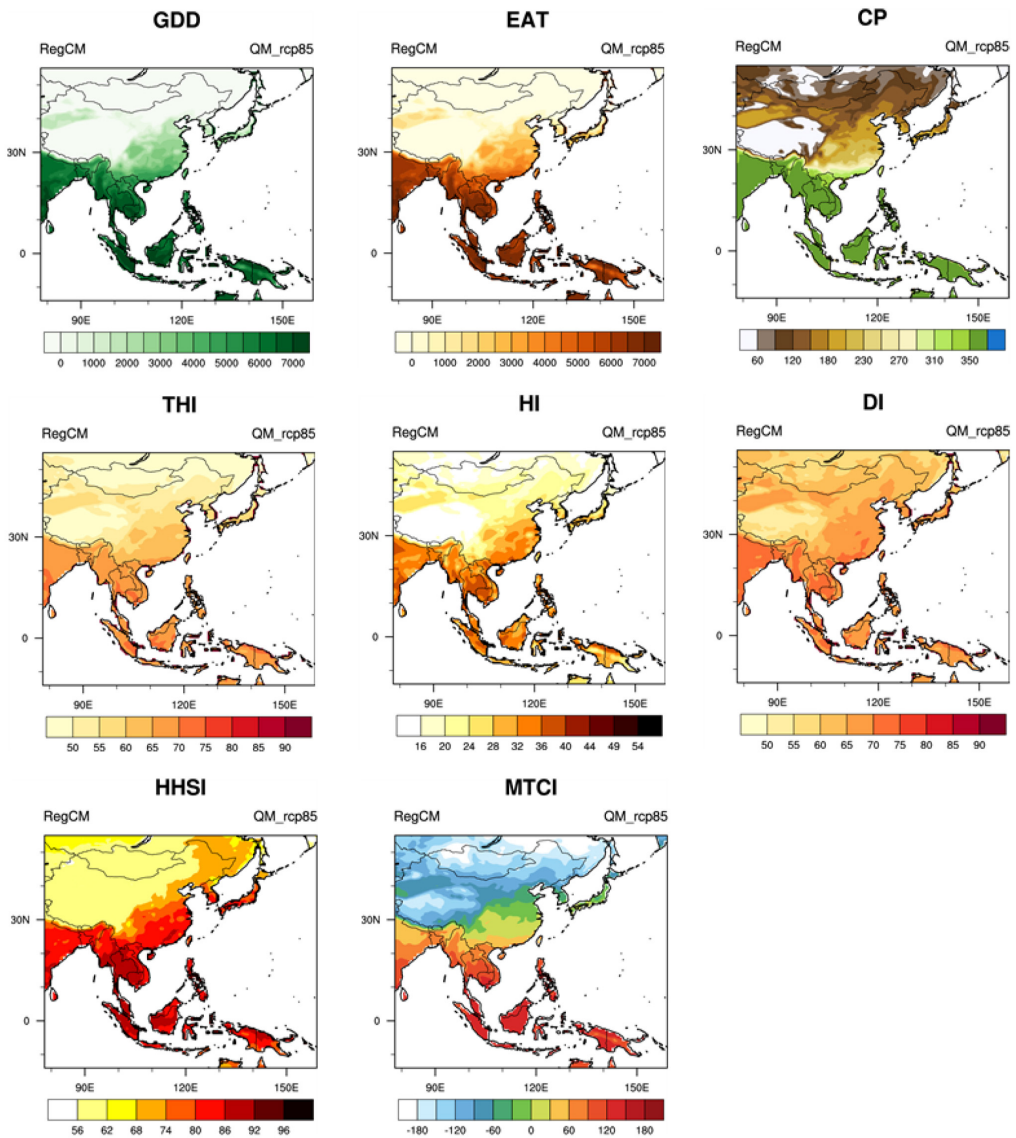


Figure 1-7. RegCM QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

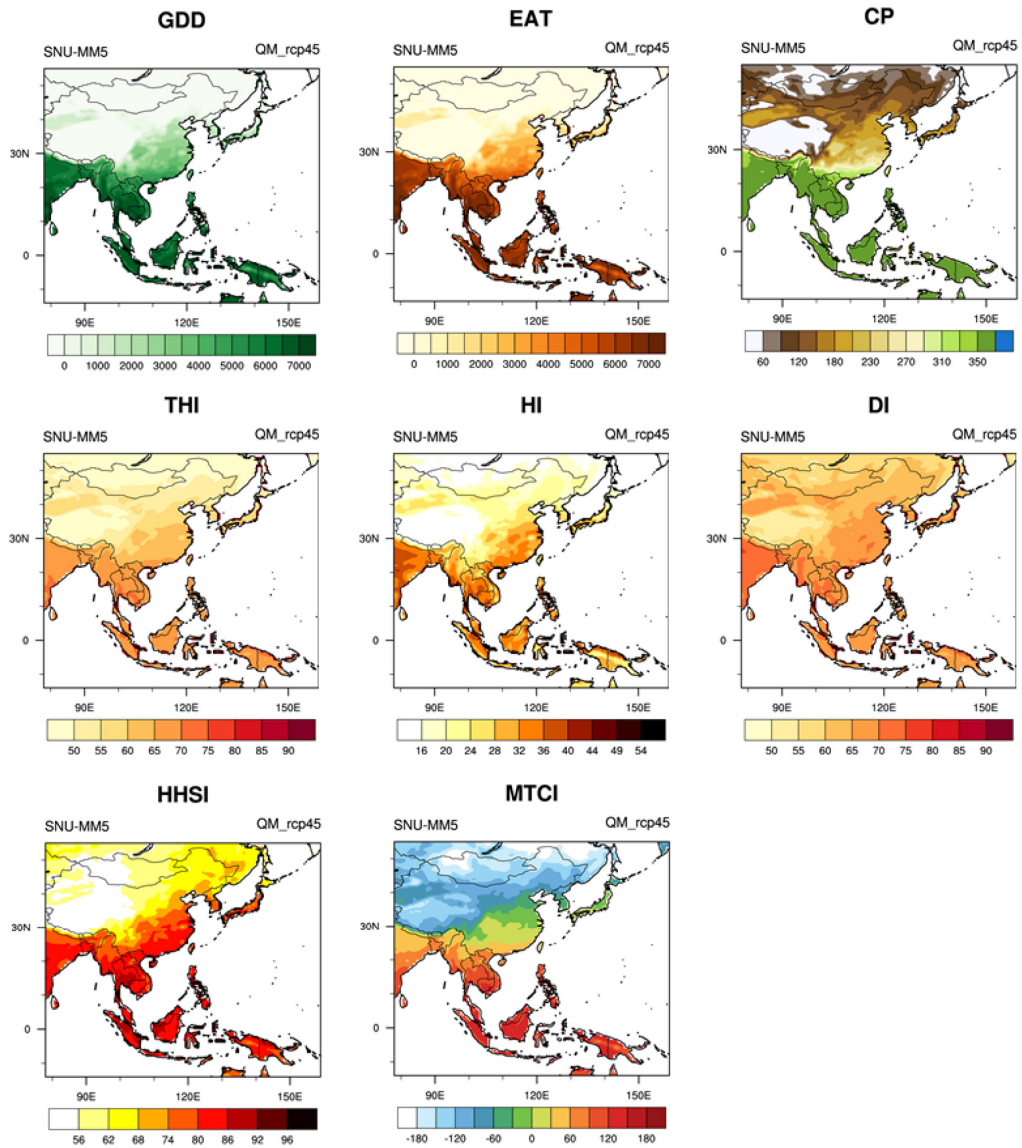


Figure 1-8. SNU-MM5 QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

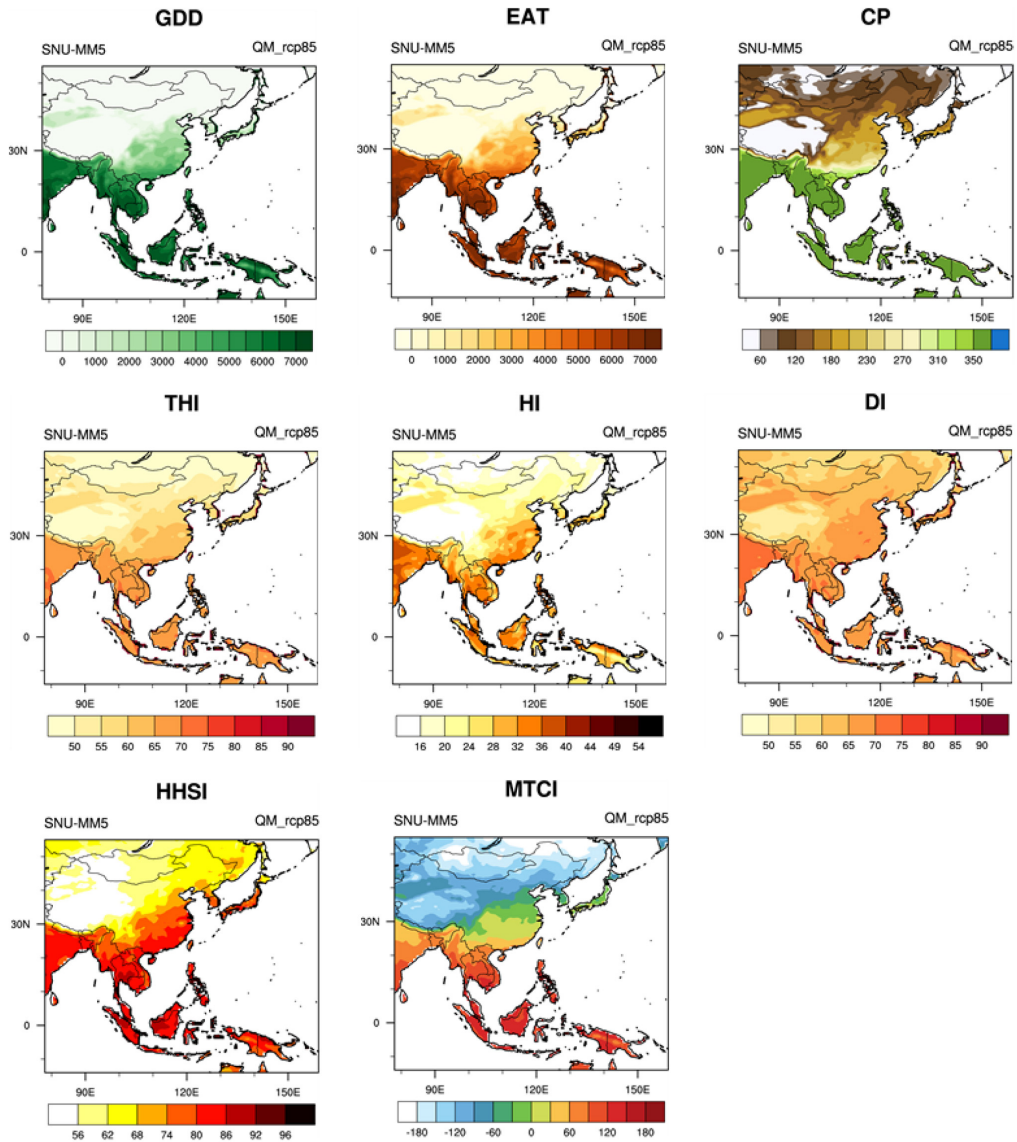


Figure 1-9. SNU-MM5 QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

부록 2 MERRA2 재분석 자료를 이용한 편이보정 결과에 대한 9개 기후응 용자수

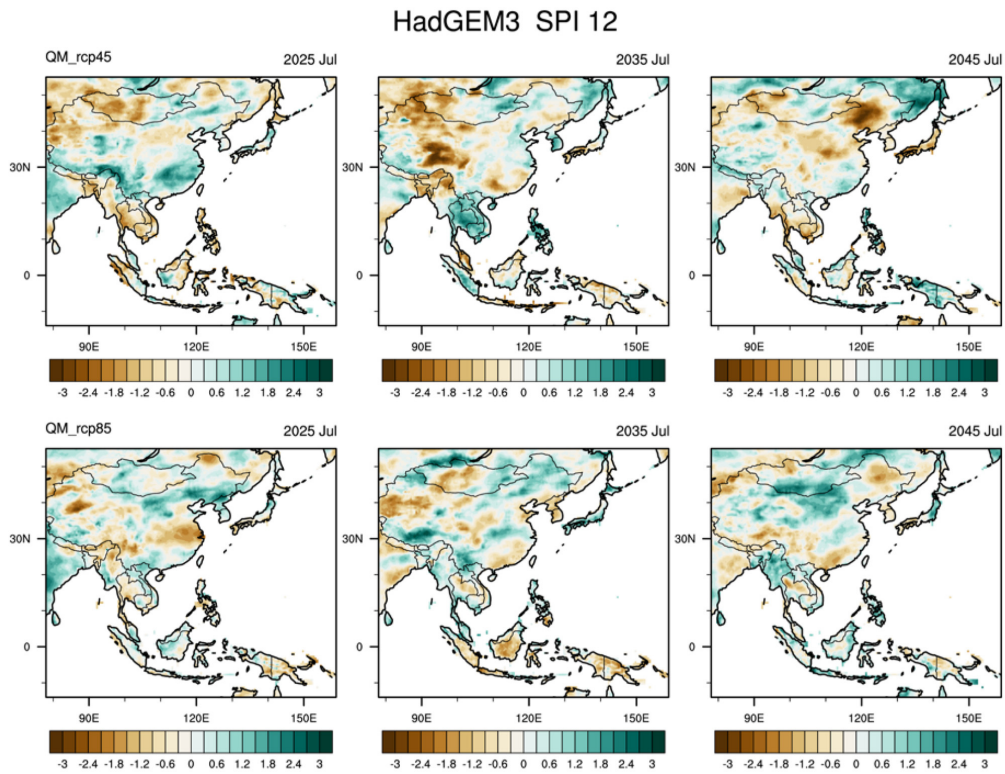


Figure 2-1. HadGEM3-RA QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

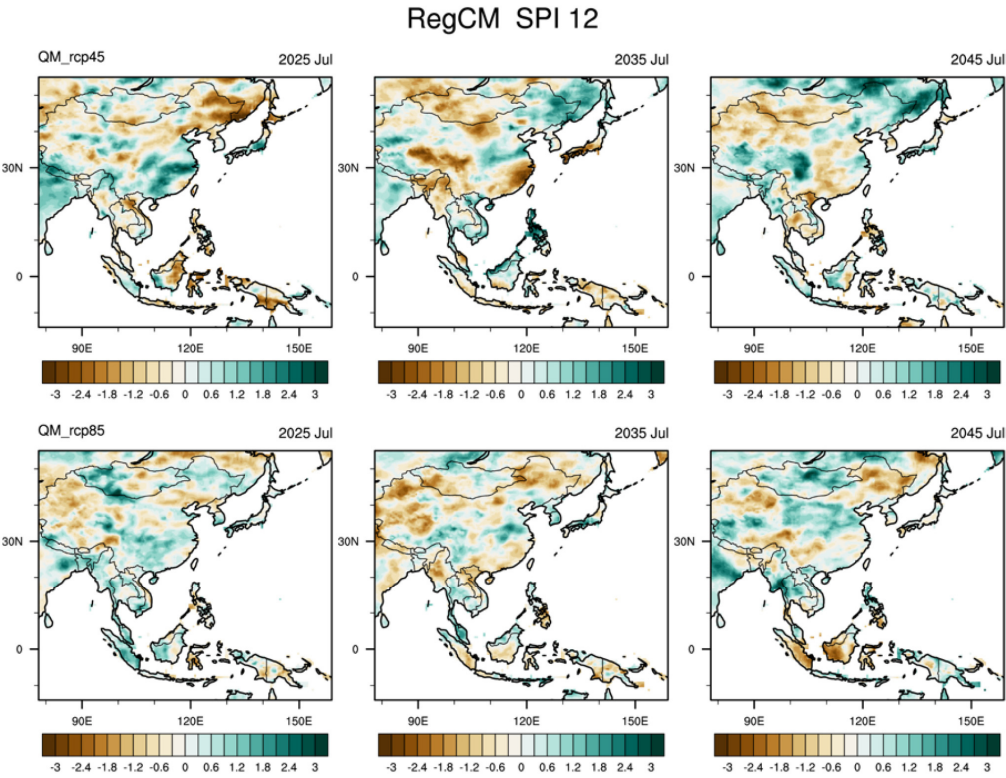


Figure 2-2. RegCM QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

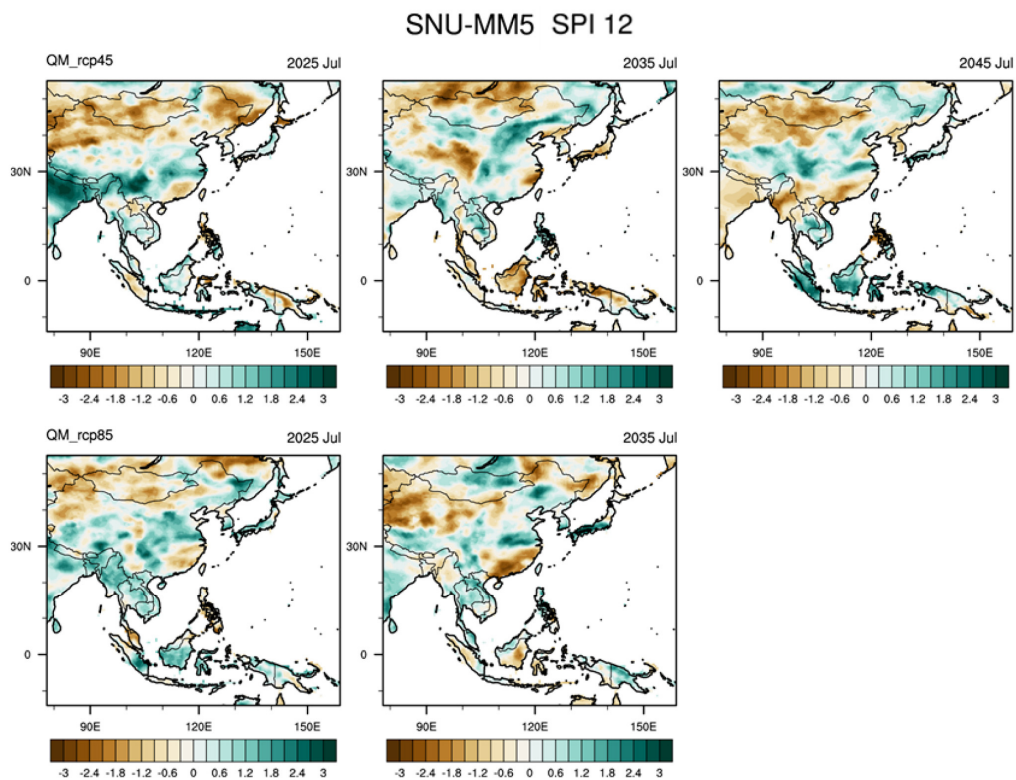


Figure 2-3. SNU-MM5 QM_rcp45, QM_rcp85를 사용하여 산출한 SPI 지수

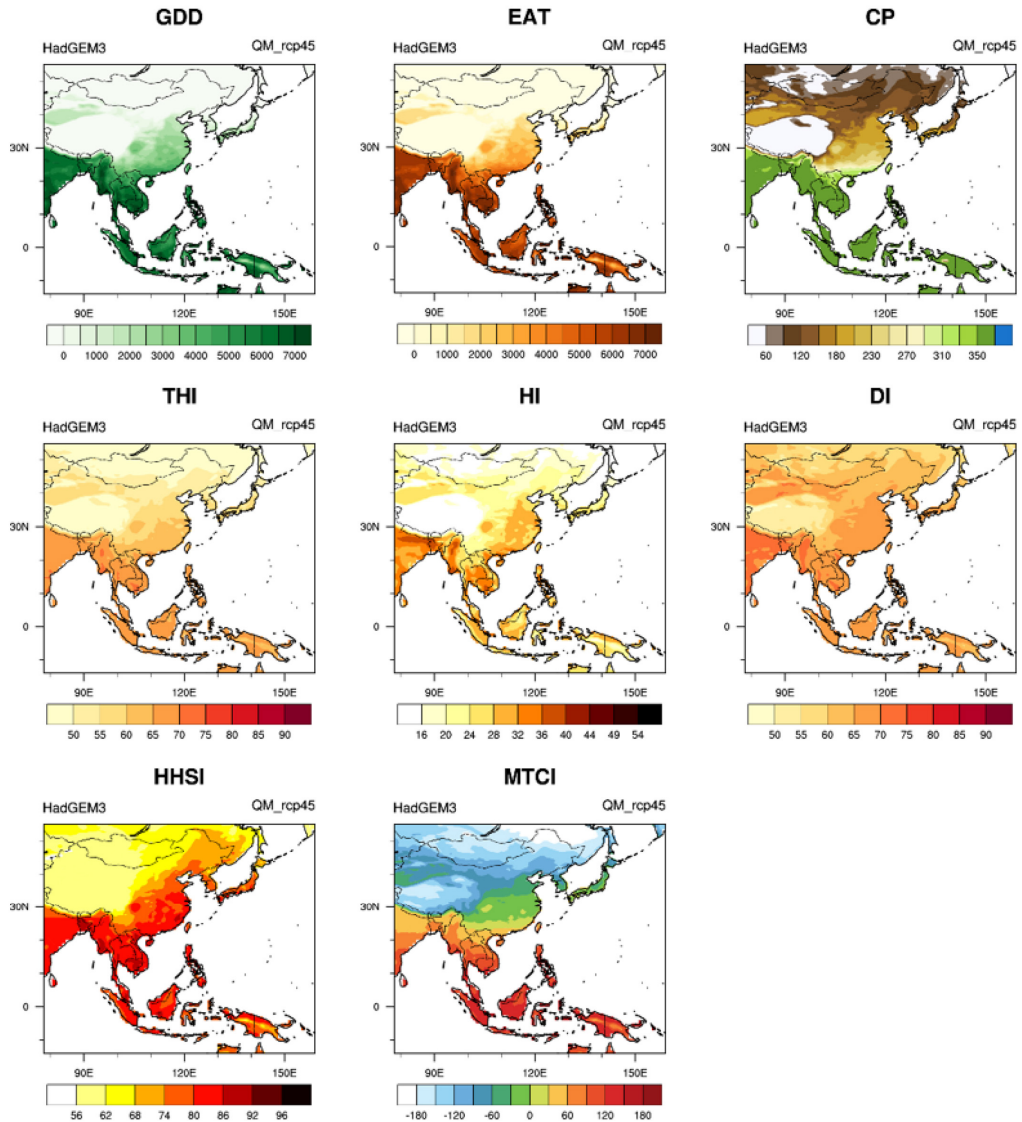


Figure 2-4. HadGEM3-RA QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

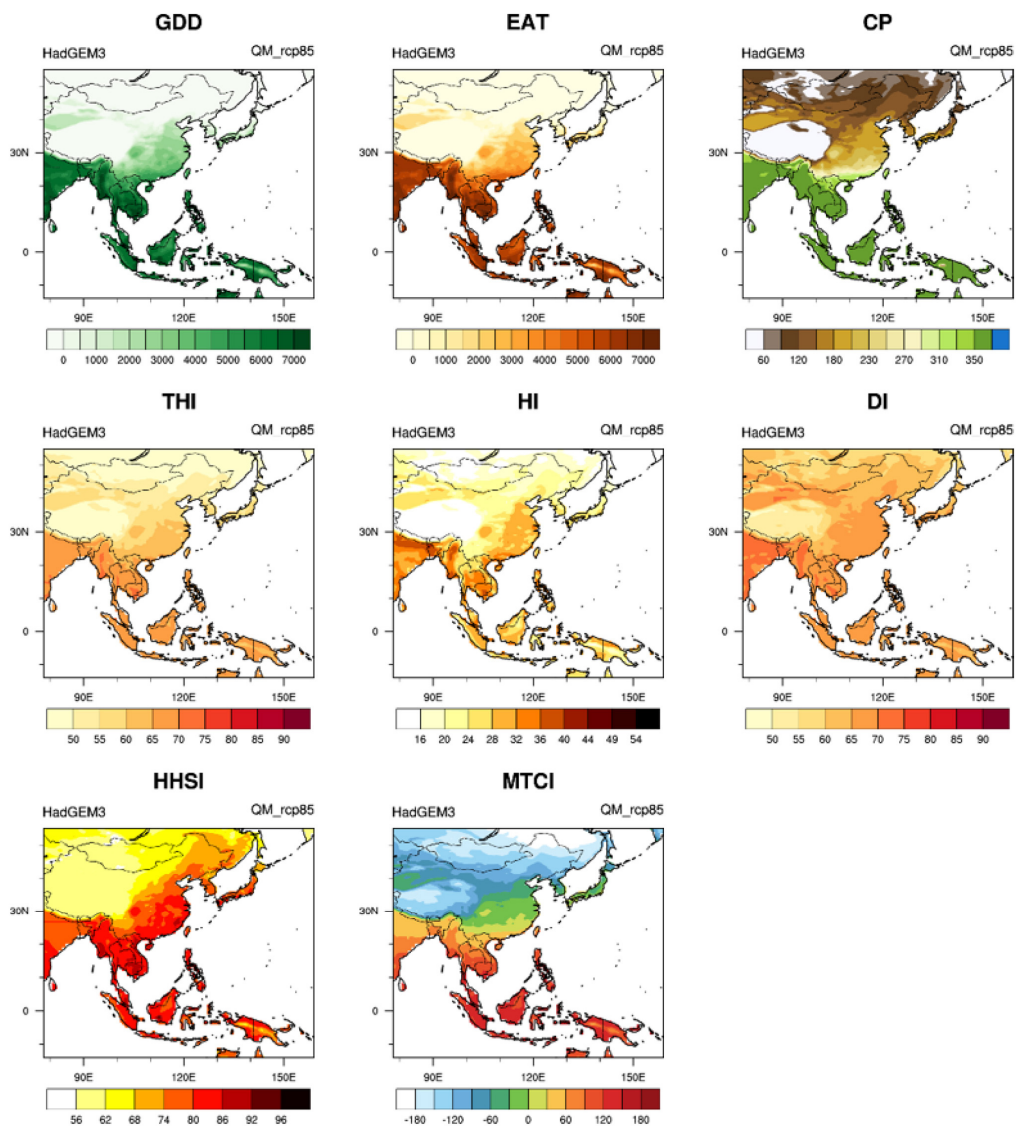


Figure 2-5. HadGEM3-RA QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

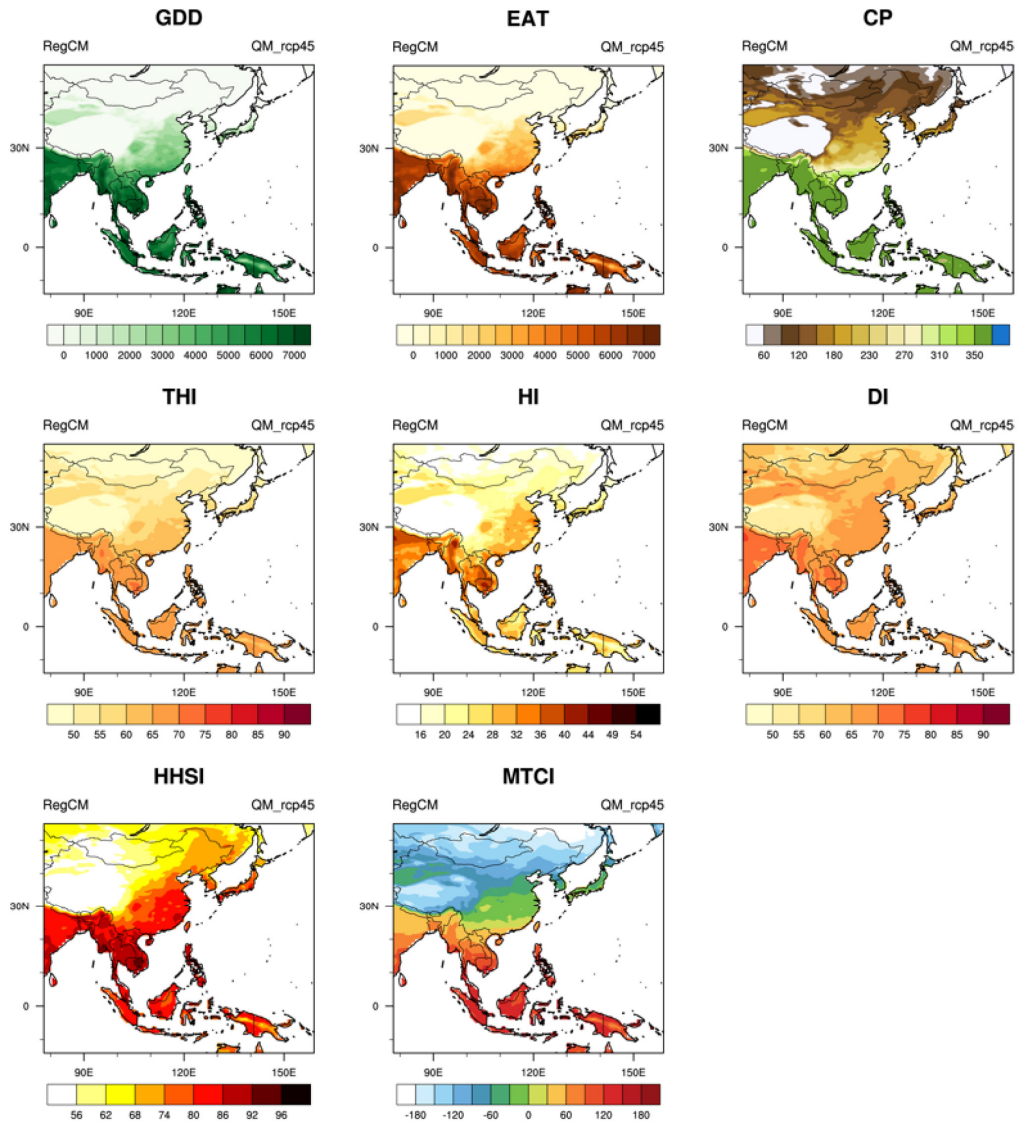


Figure 2-6. RegCM QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

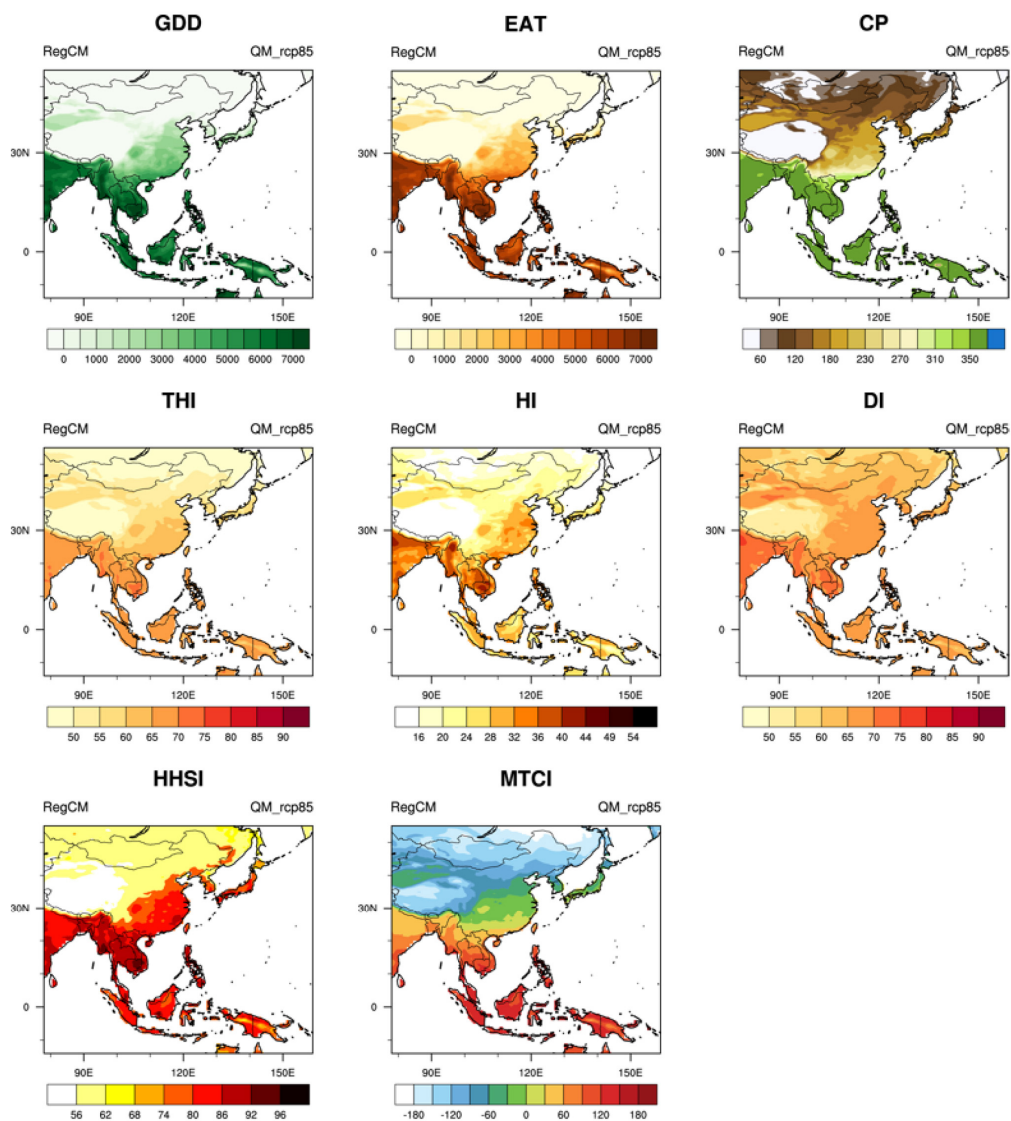


Figure 2-7. RegCM QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

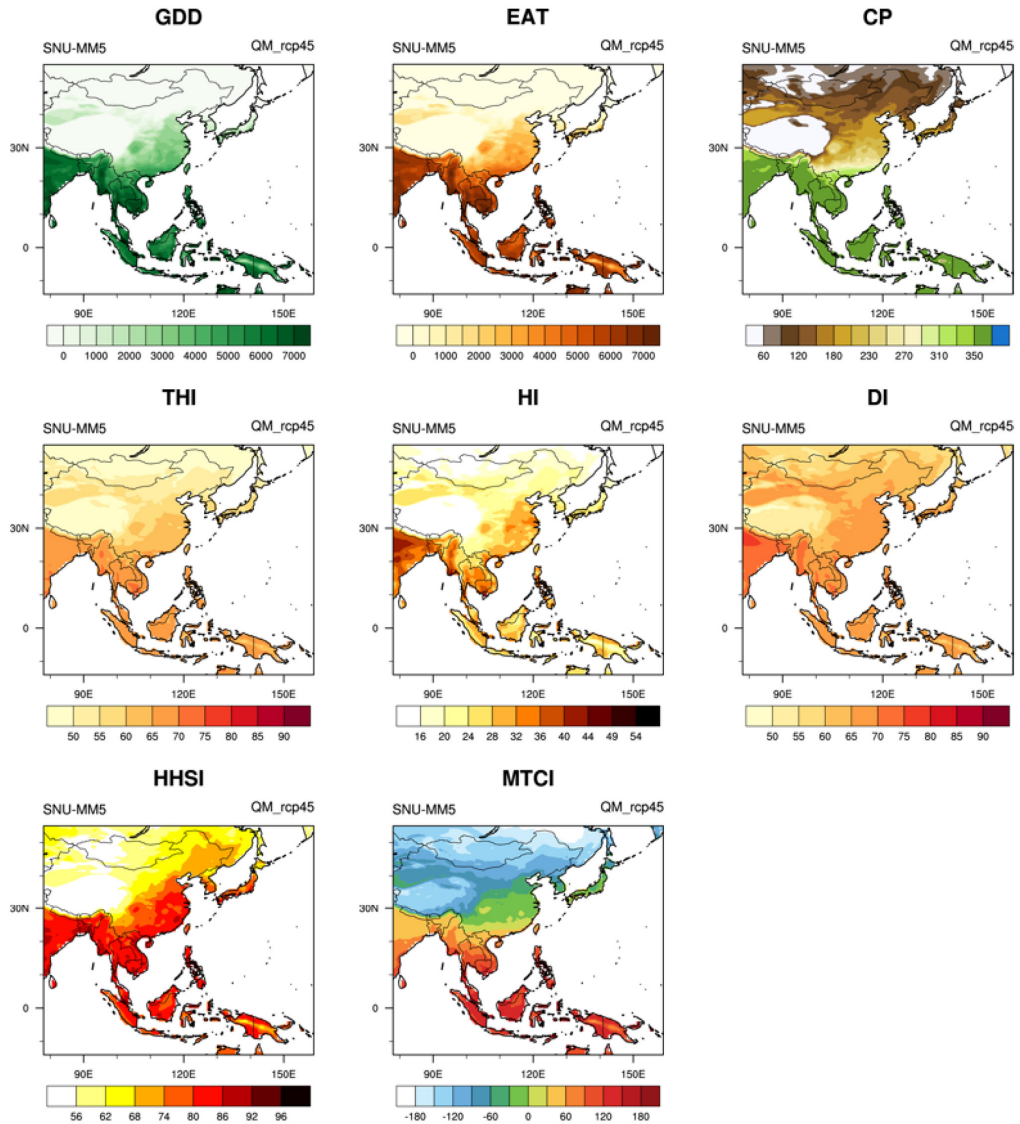


Figure 2-8. SNU-MM5 QM_rcp45를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

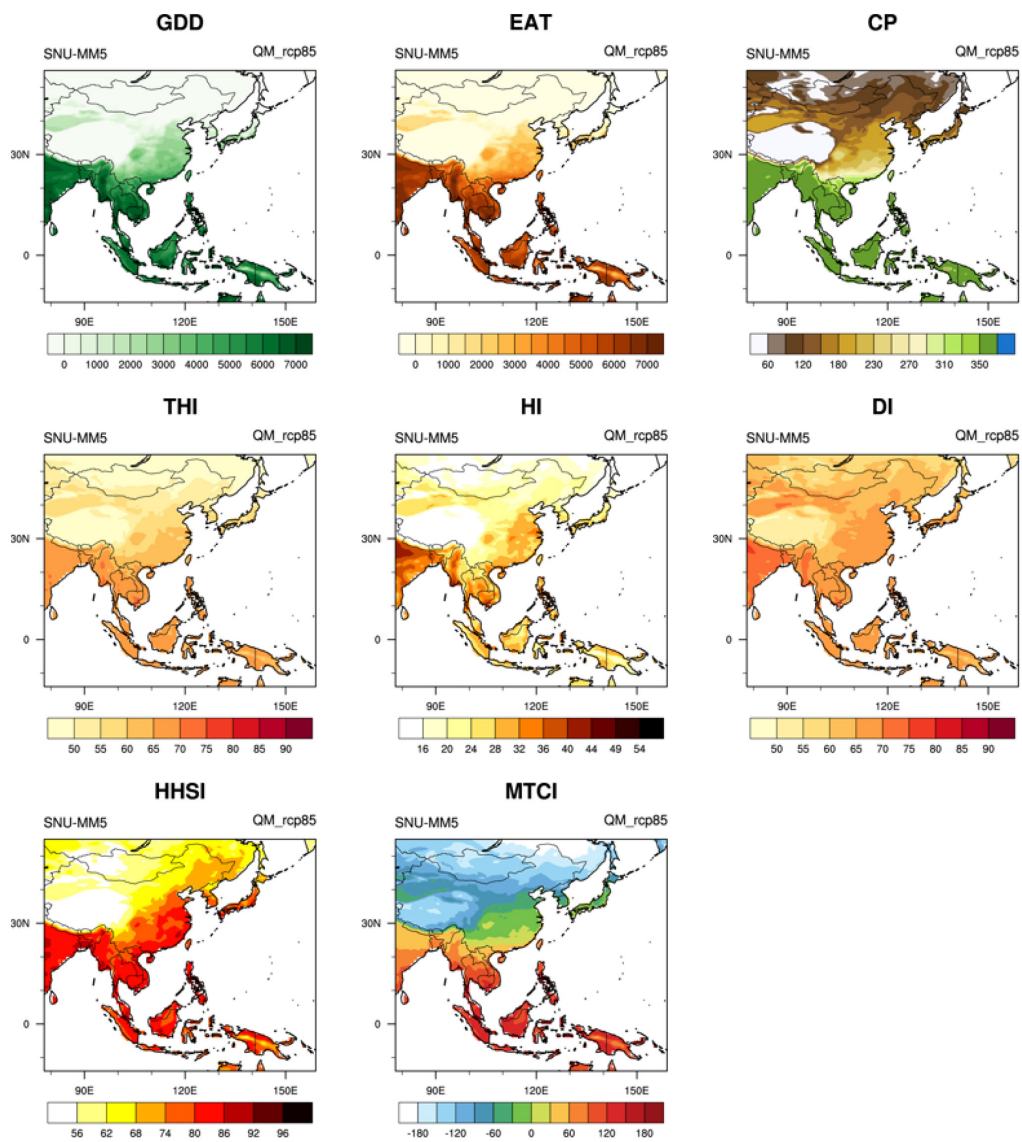


Figure 2-9. SNU-MM5 QM_rcp85를 사용하여 산출한 8개 기후응용지수

【연구자】

송봉근 선임연구원

정여민 연구원

연구보고서 2018-15

**지역기후변화 시나리오를 이용한 분야별 아태지역 기후정보
응용지수 생산 모듈 개발 및 정보 제공**

I S B N 979-11-5698-247-0

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.