

APEC기후센터

APCC 계절예측 정보 농업분야 활용기술 개발

신용희 기후변화연구팀

APEC기후센터
연구보고서

APCC 계절예측 정보 농업분야 활용기술 개발

Prediction of Seasonal Crop Yield Using a Global Scale Crop Model

신용희 기후변화연구팀

연구보고서 2015-16

발간사

산업화에 따른 대기 중 온실가스 배출량의 증가는 전 세계적으로 기후변화를 야기하고 있으며 폭염, 가뭄, 호우 등의 이상기후 현상이 급격히 증가하고 있습니다. 이상기후의 빈번한 발생으로 인한 사회경제적 피해는 날로 커져가고 있으며 특히 농업분야에서 심각한 곡물 생산량 감소 피해가 빈번하게 발생하고 있습니다. 곡물의 대부분을 수입에 의존하는 순수 곡물 수입국 입장에서는 이상기후로 인한 주요 곡물 생산지역에서의 생산량 감소가 자국의 식량안보에 커다란 위협으로 작용할 것으로 예상되고 있습니다.

우리나라는 쌀을 제외한 옥수수과 밀 등 대부분의 곡물을 수입에 의존하고 있는 실정이어서 보다 안정적인 곡물 공급을 위해 주요 곡물 수출국에 대한 작황 모니터링 및 곡물 생산량 장기 예측 시스템 구축과 같은 선제적 대응이 필요할 것으로 사료됩니다.

본 연구는 농업 생산성 분야에 APEC 기후센터에서 제공되고 있는 계절예측 자료의 활용성 확대를 위해 시간적 상세화 기법 개발을 통해 작물모형 입력 자료에 대한 맞춤형 예측자료를 생산하고자 하였으며 세계 주요 식량자원인 쌀에 대한 글로벌 수확량 장기 예측 기법을 개발하고자 하였습니다.

본 연구의 결과는 국내 곡물 수입과 관련한 산업계에 시의성 있는 정보 제공 활용 가능성을 제시하고자 하며 정부의 곡물 수급관련 정책수립 및 합리적 의사결정에 기여할 수 있을 것이라 판단됩니다.

끝으로 연구결과가 나오기까지 본 연구를 맡아 수행해주신 본 센터의 신용희 박사, 이은정 연구원의 노고에 감사를 드립니다. 그리고 외부 협력기관에서 도움을 주신 일본 국립환경연구소의 Dr. Takahashi Kiyoshi께 감사의 말씀을 전합니다. 또한 바쁘신 가운데도 조언을 주신 KEI의 정휘철 박사 그리고 본원의 조재필 박사, 김광형 박사께도 감사를 포함합니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

Increased occurrence of abnormal weather caused by climate change has been acting as a big menace especially in the agricultural sector. Crop yields mainly under the influence of agroclimatic factors (e.g., temperature, precipitation and insolation) and technological factors (e.g., improvement of breed, agrichemicals, fertilizer and irrigation system). Reduction of damage scale and frequency of production in the major crops production area due to the recent abnormal weather has emerged as a major issue in the international community. The serious reduction damage of crop production to occur in the major crops production area will lead to regional food supply imbalance led to soaring international grain price. South Korea leans on imports for most of the consuming crop and grain self-sufficiency rate has recorded a record low of 23.1% in 2013. In order to provide a stable supply of grain from abroad in pure grain importing countries, such as South Korea, high accuracy crop monitoring and crop yield forecasting system for major grain exporting countries are required. Recently, Korea Rural Economic Institute (KREI) has built an international grain observation system to help ensure stable grain to livestock farmers and the food industry. KREI began to offer a supply and demand trends and forecast information for major crops. However, since there is no consideration of the meteorological phenomena such as drought, flood, cold weather from prediction time to crop harvest time that directly affect the crop yield, there are considerable difficulties exist in policy decisions regarding the grain supply.

APEC Climate Center (APCC) is producing and offering a multi-model ensemble (MME) seasonal forecasts that is evaluated the predictive performance of world-class, but the utilization of climate prediction information for applications such as agriculture and water resources is still very low. To assess the reliability of hindcast prediction data, comparison of 6 months hindcast data and B.C. NCEP reanalysis data were made during 24 years between 1983 and 2006 for average temperature of July-September in main rice growing periods. As a result of having analyzed

the temperature prediction by prediction model, the uncertainty range in accordance with the prediction model appeared quite large. Uncertainty range is reached in the case of the USA about 6.3°C. In order to take advantage of seasonal climate forecast directly in agricultural applications, bias correction process is essential. Simple bias correction method has been used for about 6 months Hindcast bias correction to take advantage of the seasonal forecasts in agriculture production research. The reliability of the prediction was evaluated through the analysis of RMSE and TCC for bias-corrected temperature forecasts by country. In the case of China, reliability of predictions about the average temperature of July to September is relatively higher in nasa and ncep model. In the case of India, reliability of predictions is relatively higher in can3 model. For crop yield simulation, temperature, precipitation, diurnal temperature, solar radiation and wind speed data that are required by the crop model were reproduced to daily unit and reliability of prediction was evaluated. Results of reliability evaluation of reproduced daily prediction data, reliability for the average temperature in September were relatively high in China. RMSE and TCC analysis results are about 0.4 °C and 0.7 respectively in can3, nasa, ncep model. However, since the reliabilities of other climate were considerably lower than temperature this problem must be solved before applying to application study.

The M-GAEZ model was modified by National Institute for Environmental Study (NIES) based on the Global Agro-ecological Zones (GAEZ) model that is an estimation model for potential crop yields on a global scale developed by the Food and Agriculture Organization (FAO) and the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). The potential crop yields are calculated based on conditions, such as the climate, soil, and input level. Specific climate conditions, such as the daily mean temperature [°C], daily precipitation [mm/day], daily mean irradiation [W/m²], and daily mean windspeed [m/s], are used as the input information. The M-GAEZ model can estimate the potential yield for 8 varieties of rice. Some varieties of rice differ in growth periods depending on the cultivated area; 4 varieties (growing periods of 105, 120,

135 and 150 days) for Japonica, 4 varieties (105, 120, 135 and 150 days) for Indica are treated distinctively. M-GAEZ model requires the daily climate scenarios at a spatial resolution of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ latitude/longitude for each climate conditions as the input data. We created every mesh of a daily climate data using APCC seasonal climate predictions.

Rice yield was calculated by M-GAEZ model inputting the reproduced daily prediction data using bias corrected seasonal forecast data and NCEP reanalysis data and reproduced daily prediction data through anomaly inflation. In the case of China with the most rice amount of production, results of rice yield in the 1990s calculated from B.C. NCEP reanalysis data substantially similar to FAOSTAT agricultural statistics. However, yield prediction results showed significant uncertainty depending on the prediction model. As a result of having carried out RMSE and TCC analysis for the reliability of rice yield, RMSE is generally large to 200-400 kg/ha and TCC appeared between 0.6-0.8 highly. In the case of India, RMSE is less than China to 80-140 kg/ha and TCC showed generally low correlation between 0.1 to 0.6. In the case of South Korea and the USA, RMSE are significantly large to 400-550 kg/ha, 400-700 kg/ha respectively and TCC showed significantly low correlation to -0.2-0.2 and 0.0-0.3 respectively.

목차

APCC 계절예측 정보 농업분야 활용기술 개발

발간사	i
ABSTRACT	iii
1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	4
2.1 기후자료	4
2.1.1 계절예측자료	4
2.1.2 관측기후자료	5
2.1.3 기후자료 보정	8
2.2 작물모형	16
2.2.1 M-GAEZ 모형	16
2.2.2 작물 수확량 산정	25
2.2.3 GIS 입력 자료	35
2.3 실험설정	39
3. 연구내용	41
3.1 계절예측자료 분석 및 재생산	41
3.1.1 관측 및 예측 기후자료 분석	41
3.1.2 계절예측자료 생산	64
3.2 글로벌 쌀 수확량 예측	85
3.2.1 FAO 곡물 통계 분석	85
3.2.2 쌀 수확량 예측성 평가	91
4. 결론 및 토론	105
REFERENCES	117

APPENDIX I. FAO	121
APPENDIX II. FAO	125
APPENDIX III. FAO	127
APPENDIX IV. FAO	127
APPENDIX V. FAO	128
APPENDIX VI. FAO	134

1. 서론

세계 각지에서 발생하고 있는 폭염, 가뭄, 호우, 폭설 등의 이상기후 현상에 의한 자연재해의 발생빈도는 20세기 초(1900-1909년) 28건에서 20세기 말(1990-1999년) 2,034건으로 70배 이상 증가하였고 그에 따른 인명 및 재산피해 역시 급격히 증가하고 있는 추세로 보고되고 있다(Disaster Risk Reduction: 2007 Global Review). 기후변화로 인한 이상기후 현상의 발생 증가는 특히 농업분야에 큰 위협으로 작용되고 있다. 최근 이상기후로 인한 주요 곡물 생산지역에서의 생산량 감소 피해 규모 및 발생 빈도가 증가하고 있어 국제사회의 주요 이슈로 부각되고 있으며 국제 원유가격의 상승과 중국 등 신흥국에 의한 식량 소비량 증가, 글로벌 금융위기, 바이오연료 작물 생산 증가 등과 함께 국제곡물가격 상승의 불안요인으로 작용하고 있다(Trostle, 2008). 국가 간 교역이 활발하지 않았던 과거에는 이상기후로 인해 곡물 생산량이 감소하더라도 국지적인 식량부족 문제에 불과했지만 국가 간 교역이 점점 확대되고 활발해 짐에 따라 주요 곡물 생산지역에서 발생하는 심각한 곡물 생산량 감소 피해는 국제곡물가격의 폭등으로 이어져 지역 간 식량공급 불균형을 초래하게 된다.

우리나라의 곡물자급률은 1960년대에 90%에 달했지만 산업화의 발달로 인한 국제 교역의 증가와 육류소비 증가에 따른 국내 가축사육 확대에 따른 사료용 곡물 수입량의 증가로 이제는 국내에서 소비되고 있는 곡물의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정으로 2013년에는 사상최저 수준인 23.1%를 기록했다. 그나마 자급이 가능한 쌀을 제외한 곡물 자급률은 채 5%도 되지 않으며 옥수수, 밀, 콩의 경우 국내 수요량의 90% 이상을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한 주요 곡물 수입의 80% 이상을 소수 곡물 수출국에만 의지하고 있어 이상기후의 발생으로 곡물 수출국의 생산량이 감소할 경우 자국보호를 우선으로 하는 곡물수출규제 등과 맞물려 국내로의 안정적인 곡물수급이 어려워져 우리의 식량안보가 위협받게 될 가능성이 커진다. 1980년 벼 성장기간 동안 이상저온과 일조부족에 따른 사상 초유의 냉해로 인해 우리나라 쌀 생산량은 평년대비 36% 감소했다. 주요 식량작물인 쌀 수급에 심각한 문제가 발생하자 곡물메이저의 횡포로 인해 쌀 가격이 급등하였고 정부는 전년 국제시세의 2.5배에 달하는 가격으로 225만 톤의 부족

분을 수입하게 되었다.

우리나라와 같은 순수 곡물 수입국 입장에서는 해외로부터 곡물을 안정적으로 공급하기 위해 특정 지역 혹은 특정 국가에 곡물 공급을 의존하지 않고 곡물 수입선을 다변화할 필요가 있으며 주요 곡물 수출국에 대한 지속적이고 정확도 높은 작황 모니터링 및 작물 수확량 예측 시스템 구축 등을 통해 식량위기 상황에 선제적 대응 방안 마련이 필요하다. 최근 위성기술의 발달로 작황 모니터링 및 작물 수확량 예측에 위성영상 자료를 활용한 기법들이 개발되고 있으며 위성영상 자료로부터 얻어지는 식생지수와 같은 식생정보와 기상관측 자료 등을 융합 활용한 통계적 방법을 이용해 작물 수확시기의 생산량을 예측하기도 한다. 하지만 촬영된 위성영상을 이용해 작물 생산량 예측이 이루어진 시기 이후에 발생하는 기상변화에 대한 고려 없이 작물 수확량을 정확도 높게 예측하기란 쉽지 않다. 우리나라는 국제곡물 수급 동향 및 전망자료를 USDA나 FAO 등에서 제공하는 정보에 전적으로 의존하고 있었는데 최근 한국농촌경제연구원(KREI)에서 국내 축산농가와 식품업계의 안정적인 곡물 확보를 지원하기 위해 해외 모니터링 및 국제곡물 수급전망 모형 개발을 통해 자체적인 국제곡물 관측 시스템을 구축하였고 월보 형태로 국제 곡물 생산량 등 주요곡물에 대한 수급동향 및 전망 그리고 국내 파급효과 등의 정보를 제공하기 시작했다. 하지만 곡물 생산량 전망 정보는 현 시점을 기준으로 한 재배면적의 변화와 가뭄, 태풍 등의 기상상태에 대한 관측정보를 바탕으로 통계적 기법에 의해 전망되고 있어 수확시기 이전에 이상기후 현상이 발생할 경우에 대해서는 전망 결과가 달라질 수 있다.

세계 곳곳에서 발생하고 있는 이상기후의 영향으로 인한 글로벌 식량위기 상황에 선제적·능동적으로 대응하기 위한 수단으로 계절 기후예측 정보를 활용한 작물 수확량 예측 기술의 개발이 그 중요성을 더해가고 있다. 그러나 계절 기후예측 정보의 예측 신뢰성에 대한 인식이 아직까지 부족한 상태이고 계절 기후예측 정보를 활용한 작물수확량 예측에 관한 연구 사례는 드문 실정이다. Joint Research Centre(JRC)에서는 DEMETER 기후 모형의 Hindcast Ensembles을 이용해 1995년에서 1998년까지 4년간에 대한 유럽지역 주요 작물의 수확량을 계산하여 EUROSTAT 통계자료와 비교하였

다(Cantelaube and Terres, 2005). JRC는 주로 작물수확량 예측 시스템을 통해 EU 지역 국가를 대상으로 그해 작물수확량에 대한 전망을 매달 발표하고 있으나 아직까지 기후예측 정보를 이용한 전망은 발표하고 있지 않다. 일본 농업환경기술연구소(NIAES)에서는 계절 기후예측 정보를 농업 생산성 분야에 직접 활용하기 위해 글로벌 스케일의 통계적 작물모형에 일본해양과학기술센터(JAMSTEC)의 대기/해양 결합 기후모델인 SINTEX-F의 과거 계절 기후예측자료(1982-2006년)를 적용해 지구 규모의 작물총작 예측 신뢰도를 평가했다(Iizumi et al., 2013).

APEC 기후센터(APCC)에서는 세계적 수준의 예측성능으로 평가 받고 있는 다중모 델앙상블(MME) 계절예측 정보를 생산/제공하고 있지만 아직까지 농업분야에 대한 계절 예측 정보의 활용도는 매우 낮은 편이다. 본 연구에서는 글로벌 스케일의 농업분야 작물 생산성 연구에 APCC의 MME 계절예측 정보를 활용할 수 있도록 6개월 예측정보에 대한 바이어스 보정을 실시하고 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2 관측 자료를 이용해 계절 예측자료에 대한 일 단위 기후자료를 재생산하고자 한다. 또한 세계 주요 식량자원의 하나인 쌀에 대한 계절 작물수확량 예측 기법을 개발하고 전 세계 쌀 생산량의 90% 이상을 차지하고 있는 주요 쌀 생산국 14개국을 대상으로 각 계절예측 모형별로 1990년대 수확량을 예측한 뒤 FAOSTAT 농업통계 자료와 비교를 통해 예측의 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 기후자료

2.1.1 계절예측자료

2.1.1.1 APCC 계절예측자료

APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)는 10개 회원국 16개 기관으로부터 기후예측 모델 자료를 수집하고 계통적 오차(Bias)를 모델 간 앙상블 기법을 통해 보정하여 3개월 및 6개월 계절예측 자료를 APEC 회원국에게 제공하고 있다. 3개월 및 6개월 예측 자료는 강수량(Precipitation)과 850hPa에서의 기온(Temperature), 500hPa에서의 지위고도(Geopotential height)를 포함한다. APCC에서는 매달 예측정보를 평가하고 향상시키기 위해 예측 자료에 대한 검증을 실시하고 있으며 매 계절마다 접합대순환모델(Coupled General Circulation Model, CGCM) 자료들을 사용하여 ENSO/IOD 예측을 포함한 6개월 모델 간 앙상블 예측 자료를 생산하고 있다.

2.1.1.2 개별모형 Hindcast 자료

APCC는 16개의 기관으로부터 생산되는 장기예측 정보를 제공 받아 예측정보의 불확실성을 줄이기 위해 APCC에서 개발된 다중모형앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)기법으로 예측정보를 고도화하여 매월 제공하고 있다. 본 연구에서는 APCC에서 보유하고 있는 3개월 및 6개월 hindcast 예측자료 중에서 6개월 hindcast 예측기간을 갖는 자료를 사용하였다. Table 2.1에서와 같이 예측성 비교를 위하여 동일한 과거기간(hindcast period)인 1983-2006년 사이에 예측정보가 존재하는 6개 모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncp), PNU(pnu1), POAMA(poma))을 사용하였으며 각 모형별로 서로 다른 크기의 앙상블(ensemble) 수를 가지는데 본 연구에서는 모형별 앙상블을 평균하여 활용하였다. APCC에서 제공하는 모든 계절예측 모형의 수평 공간 해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이다. 계절예측 모형에 포함되는

기후변수는 강수량과 해면기압, 해수면온도, 2m와 850hPa에서의 기온, 850hPa과 200hPa 에서의 동서 및 남북 바람장, 500hPa에서의 지위고도로 이루어져 있다. 농업생산성 분야에서 필요로 하는 기후변수 중 계절예측 모형에서 제공되는 변수로는 강수량 (prec)과 지상 2m에서의 평균기온(t2m)이 있으며 평균기온의 경우 단위를 켈빈(K)에서 섭씨(°C)로 변경하여 사용하였다.

Table 2.1 Coupled prediction models collecting by APEC Climate Center

Model name	Institute / Country	Ensemble member	Hindcast period	References
MSC_CANCM3	MSC / Canada	10	1981-2010	Kim et al. 2003
MSC_CANCM4	MSC / Canada	10	1981-2010	Simmons et al. 2004
NASA	NASA GSFC / USA	11	1982-2012	Molod et al. 2012
NCEP	NCEP / USA	20	1983-2009	Saha et al. 2013
PNU	PNU / Korea	5	1980-2012	Ahn and Kim 2013
POAMA	BOM / Australia	30	1983-2006	Lim et al. 2012

2.1.2 관측기후자료

2.1.2.1 NCEP/NCAR 재분석 자료

대기의 재분석 자료는 공간적 혹은 시간적 연속성을 갖고 있어 기후연구 등에 폭넓게 이용되고 있다. 가장 일반적인 재분석 자료로는 미국 국립환경예보센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)/미국 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996)와 유럽의 중기예보센터(ECMWF) (Gibson *et al.*, 1997)의 재분석 자료를 꼽을 수 있다. NCEP/NCAR는 2개의 전구 재분석 프로젝트를 담당하고 있고 NCEP-1 재분석 자료와 NCEP-2 재분석 자료를 제공하고 있다. NCEP-2는 NCEP-1과 같은 입력데이터와 수평연직해상도를

갖고 있으나 NCEP-1의 물리 프로세스에 관한 에러를 수정하였고 모델의 구조, 물리 모수화, 수평연직해상도, 입력데이터의 동화수법이 다르기 때문에 기후값에 편차가 존재한다. 지표면의 각종 관측데이터와 비교해 재해석 데이터는 시간적 공간적으로 연속성이 있지만 이들 데이터는 필연적으로 바이어스를 갖는다. 본 연구에서는 1971년부터 2010년까지의 40년간 장기간 데이터를 제공하는 NCEP-1의 일평균 재분석 자료를 이용했다(Kalnay et al., 1996).

기존의 연구에서는 각종 데이터 셋의 재현성 평가가 실시되고 있지만 전구규모로 많은 데이터 셋에 대해서 보다 사실에 가까운 기후 값을 나타내고 있다고 생각되는 육지역의 관측점을 기준으로 한 재현성 평가나 오차 해석에 대해서는 충분히 이루어지지 않은 것이 현실이다. 본 연구에서는 관측기반으로 생성된 CRU 3.2 자료와의 비교를 통해 NCEP/NCAR 재분석 자료 또한 Bias 보정되어 이용되었다. NCEP/NCAR 재분석 자료 중 본 연구에서 사용된 변수는 Table 2.2와 같다. 기온(평균, 최고, 최저) 자료는 2m 지표 자료를 이용하였다. 강수량자료는 precipitation rate를 이용하여 산출되었다. 연구에 사용된 모든 자료는 시간적으로 일 단위 자료이며 공간적으로는 T42 가우시안 격자(192×94)를 가진다. 계산의 편의를 위해 윤년은 고려하지 않았으므로 모두 365일 자료만을 사용하였다.

Table 2.2 NCEP/NCAR Reanalysis 1 dataset used in this study

Label	Variable	Units
air.2m	Daily air temperature 2m	K
tmax.2m	Monthly average daily minimum temperature	K
tmin.2m	Daily mean temperature	K
prate	Precipitation rate	kg/m ² /s
dswrf	Downward solar radiation flux	W/m ²
wnd	u-wind, v-wind	m/s

Source: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>

2.1.2.2 CRU 관측 자료

NCEP/NCAR 재분석 자료의 편이를 보정하기 위해 사용된 자료는 기후 연구 유닛 (Climate Research Unit, CRU)에서 제공되는 CRU 3.21 버전으로 전 세계 약 4,000 개 이상의 기상관측지점에서 제공하는 월평균기온의 아카이브를 기반으로 고해상도 (0.5° × 0.5°)로 제공된다. 1901년부터 2013년까지 격자화 된 월평균 일 최고기온, 월 평균 일 최저기온, 강수량, 일교차, 구름커버 등의 기후변수에 대한 관측 데이터를 제공한다. CRU는 지상 기상 관측망을 기초로 작성된 기후 데이터이므로 해상 데이터는 존재하지 않는다. 또한 지상에서도 관측점이 없는 지역이나 결측이 발생하는 지점이 다수 존재하고 있어 지역에 따른 오차가 발생할 수 있다. Table 2.3은 CRU 3.21버전에서 제공하는 변수들이며 이 중 연구에 사용된 변수는 월평균 된 최고기온과 최저기온, 평균 기온, 강수이다.

Table 2.3 CRU TS 3.21 dataset used in this study

Label	Variable	Units
tmx	Monthly average daily maximum temperature	°C
tmn	Monthly average daily minimum temperature	°C
tmp	Daily mean temperature	°C
pre	Precipitation	mm
dtr	Diurnal temperature range	°C

Source: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>

2.1.3 기후자료 보정

2.1.3.1 공간 격자 보간(Interpolation)

본 연구에 사용된 모든 자료들은 Table 2.4에서와 같이 서로 다른 수평 공간 해상도를 가진다. APCC 6개월 계절 예측 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 공간 해상도로 제공되며 CRU 관측 자료는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 해상도로 더욱 조밀한 수평장을 나타낸다. 이를 일괄적으로 통일하기 위해 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU 관측자료, APCC 계절 예측자료 모두 CDO(Climat Data Operator)가 이용되었다. CDO는 다양한 기후 및 수치예보 모델에 의해 만들어진 데이터의 처리와 분석을 위해 개발된 커맨드 라인 연산자의 집합으로 기후과학에서 뿐만 아니라 격자로 되어있는 다양한 분야의 데이터에 대해서도 분석이 가능한 도구이다. CDO는 매우 적은 메모리로 큰 용량의 파일을 처리할 수 있으며 파일 조작이나 간단한 통계, 기후지수에 대한 계산 또는 보간(interpolation)이 가능하다. 출력되는 파일 포맷은 GRIB, netCDF 그리고 몇몇 바이너리와 같이 자주 이용되는 포맷으로 제공된다. CDO를 이용한 수평 보간 방법에는 다양한 옵션들이 존재하는데 그 중 사용된 옵션은 remaplaf 옵션으로 가장 큰 면적부분을 재배치하는 옵션이다. 이 옵션의 경우, $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 해상도를 가지는 CRU 자료를 이

용하여 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 로 보간 할 때 일반적인 이중선형 보간법을 이용할 때 보다 육지와 해상의 경계지역인 연안 지역에서 더 많은 격자를 포함하여 보간할 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 모든 자료는 수평 해상도 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 를 가지는 전 지구 360×180 개의 격자 자료로 재생산 되었다. 또한 육지에만 자료가 존재하는 CRU 3.2와의 비교를 위하여 CRU 관측 자료가 존재하지 않는 해상 자료는 마스크 처리되었다.

Table 2.4 Resolution of prediction model and observation data used in this study

Model name	AGCM / Resolution	OGCM / Resolution	Resolution (lat.×lon.)
MSC_CANCM3	AGCM3/T63L31	OGCM4/0.94°lat.×1.41°lon. L40	2.5°×2.5°
MSC_CANCM4	AGCM4/T63L35	OGCM4/0.94°lat.×1.41°lon. L40	2.5°×2.5°
NASA	GEOS-5/288×181L72	MOM4/720×410 L40	2.5°×2.5°
NCEP	GFS/T126L64	MOM4/0.25°(tropics) 0.5° northwards and southwards	2.5°×2.5°
PNU	CCM3/T42L18	MOM3/0.7°(low lat.) 1.4°(mid lat.) 2.8°(high lat.) L29	2.5°×2.5°
POAMA	BAMv3.0/T47L17	ACOM2/0.5°-1.5°lat.×2°lon. L25	2.5°×2.5°
Observation data		Resolution (lat.×lon.)	
NCEP reanalysis		2.5°×2.5°	
CRU TS 3.21		0.5°×0.5°	

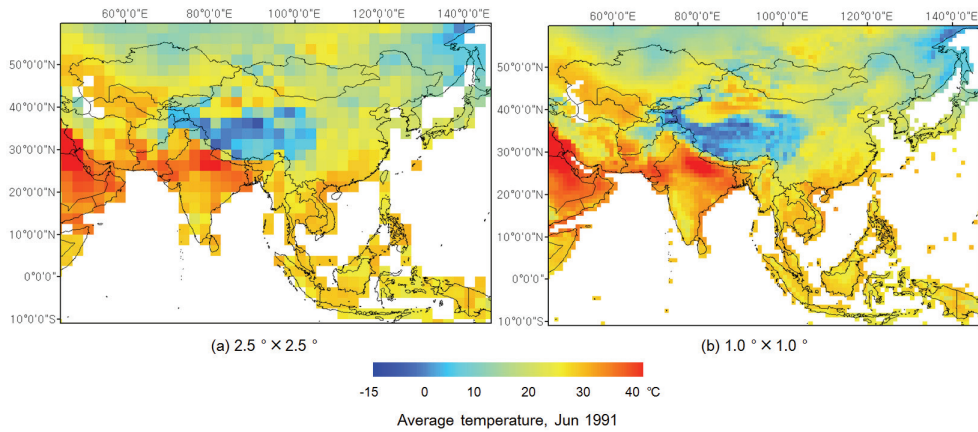


Figure 2.1 Difference of resolution before and after downscaling method

Figure 2.1은 수평 해상도 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 를 가지는 보간 전 자료의 평균 기온 수평 장과 보간 후 평균 기온 수평 장을 나타내고 있다. 위에서 설명하였듯이 CRU 3.2 자료가 존재하는 육상 지역에 대해서만 자료가 존재하며 연안 지역에 위치하는 격자들도 육지 지역을 포함하도록 잘 보존되어 있음을 알 수 있다.

2.1.3.2 재분석 자료의 Bias 보정

단순편이보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법은 기후예측모형의 Anomaly(대상 지역에서의 기후 값과 비교하여 해당 월에 발생하는 변량의 차이)를 관측 자료의 평균에 더하거나 비율을 이용함으로써 동일한 기간 동안의 기후예측모형의 평균과 관측 평균을 동일하게 보정하는 방법이다.

$$DIFF_{CRU-NCEP}(mon) = CLIM_{CRU}(mon) - CLIM_{NCEP}(mon) , mon = 1,12 \quad (2.1)$$

NCEP 재분석 자료의 전구스케일에서 시공간적인 재현성을 조사하기 위해 CRU 3.2와의 비교를 통해 Bias를 계산했다. 각 월별로 과거 40년 동안(1971-2010년)의 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2의 기후 값을 비교하여 그 차이인 $DIFF_{CRU-NCEP}$ 를 구한다. 여기서 일 자료인 NCEP 재분석자료는 월 평균되어 비교되었다.

$$BC_CLIM_{NCEP} = CLIM_{NCEP} + DIFF_{CRU-NCEP} \quad (2.2)$$

NCEP 재분석 자료의 기후 값 $CLIM_{NCEP}$ 에 그 차이 $DIFF_{CRU-NCEP}$ 을 더해준 값이 SBC된 NCEP의 재분석 자료의 기후 값인 BC_CLIM_{NCEP} 이 된다.

$$BC_{NCEP} = BC_CLIM_{NCEP} + ANO_{NCEP} \quad (2.3)$$

SBC된 재분석 자료의 월평균은 BC_CLIM_{NCEP} 에 월별 Anomaly를 더함으로써 얻어진다.

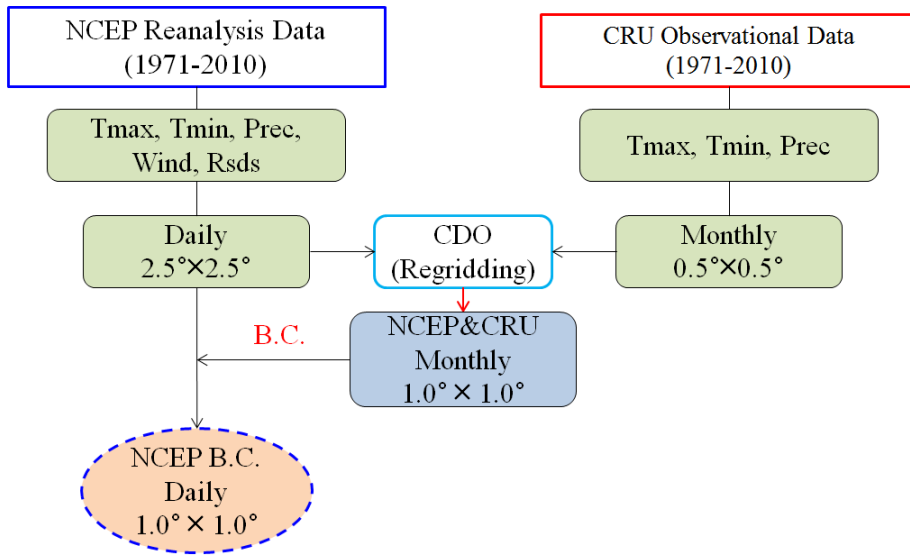


Figure 2.2 Bias correction method of NCEP reanalysis data

Figure 2.2는 위에서 설명한 NCEP 재분석 자료의 Bias 보정 과정을 간단하게 나타내고 있다. NCEP 재분석 자료의 공간해상도와 CRU 3.2 관측 자료의 공간해상도가 각각 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 와 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 로 제공되고 있어 먼저 CDO를 통해 동일한 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 공간해상도로 통일 시키고 NCEP 재분석 자료의 시간해상도가 Daily로 제공되고 있어 두 자료 간 비교를 위해 Monthly로 통일시킨 다음 SBC를 통해 Monthly NCEP 재분석 자료에 대한 Bias를 보정하고 다시 Daily NCEP 재분석 자료에 적용해 일 단위의 Bias 보정된 NCEP 재분석 자료를 얻는다.

2.1.3.3 계절 예측 자료의 Bias 보정

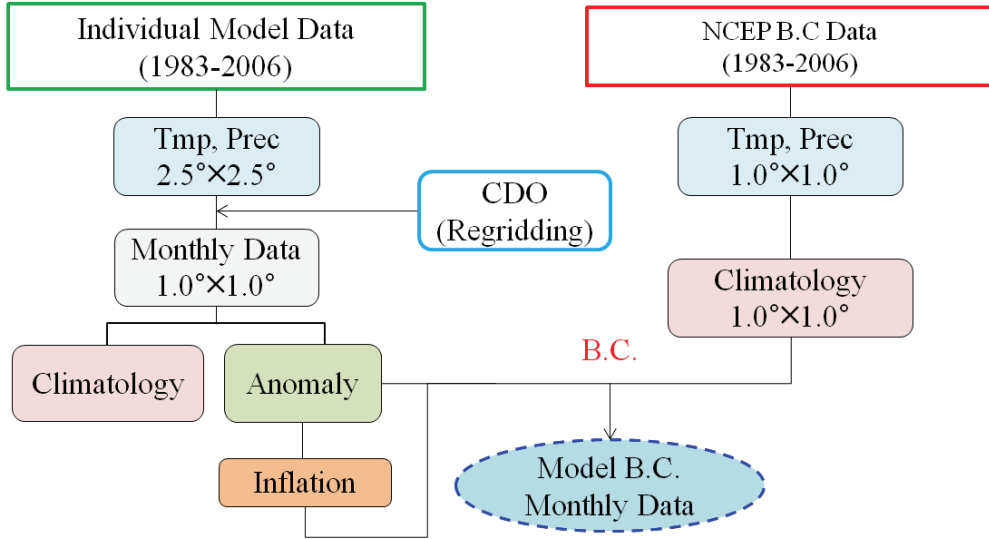


Figure 2.3 Bias correction method of individual hindcast data

APCC 계절 예측 모형은 각 모형별로 나타내는 평균 기후 값이 모두 제각각이므로 이 또한 SBC할 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 계절 예측 모형 자료는 6월의 6개월 예측 자료이므로 7월-12월 자료만 비교되었으며 각 월별로 경년 변동을 살펴보면 기후 값과 Anomaly로 나눌 수 있다.

$$Data_{model} = CLIM_{model} + ANO_{model} \quad (2.4)$$

여기서 각 모형의 월별 Anomaly와 2.1.3.2에서 산출된 재분석 자료의 기후 값 BC_CLIM_{NCEP} 를 더하여 SBC된 모형의 월 자료를 재생산하였다.

$$BC_{model} = BC_CLIM_{NCEP} + ANO_{model} \quad (2.5)$$

2.1.3.4 계절 예측 자료의 Anomaly 증폭

계절예측 모형은 앙상블 멤버 수에 대해 평균이 되었으므로 각각의 앙상블 멤버가 가지는 변동이 상쇄되어 변동성이 작게 나타난다. 이는 관측의 경년변동성에 비해 현저히 작기 때문에 기후 값 근처에서만 조금씩 변동하는 Anomaly를 가지게 된다. 모형의 변동성의 크기를 관측과 유사하게 맞춰주기 위해 Storch(1999)에서와 같이 제시된 Anomaly 증폭(inflation)을 다음 식과 같이 적용하였다.

$$INF_ANO_{model} = ANO_{model} \times \frac{\sigma_{BC_NCEP}}{\sigma_{model}} \quad (2.6)$$

위 식에서 증폭된 Anomaly INF_ANO_{model} 는 기존의 Anomaly ANO_{model} 를 모형의 표준편차 σ_{model} 로 나누고 관측의 표준편차 σ_{BC_NCEP} 을 곱하여 계산되었다.

$$INF_BC_{model} = BC_CLIM_{NCEP} + INF_ANO_{model} \quad (2.7)$$

이렇게 증폭된 월별 Anomaly는 2.1.3.2에서 CRU 관측 자료와 비교하여 SBC된 NCEP 재분석 자료의 기후 값 BC_CLIM_{NCEP} 에 더하여 새로운 월 자료 INF_BC_{model} 로 계산되었다. 본 연구에서는 Anomaly의 변동성을 증폭시키지 않은 월 자료 BC_{model} 과 증폭시킨 월 자료 INF_BC_{model} 를 작물 모형의 입력 값으로 적용하여 모형 결과를 비교하였다.

2.1.3.5 시간적 상세화

NCEP 재분석 자료와 APCC 계절 예측 모형 자료는 공간적으로는 동일한 해상도를 가지나 시간적으로는 NCEP 재분석 자료가 일 자료이고 SBC된 APCC 계절 예측 모형 자료는 월 자료이므로 작물 모형에서 필요로 하는 일 단위 기후자료를 재생산 하기위해

서는 시간적인 상세화가 필수적이다. 장기에측에 있어서 특정 연/월/일에 발생하는 강수 또는 기온의 정보가 큰 의미를 갖지 않지만 모형의 구동에 일 단위 자료가 필수적이므로 월 평균된 6개월 예측 자료를 일 자료로 상세화하는 시간적 상세화를 수행하였다. 시간적 상세화 방법은 전 지구 모든 그리드에 대해 수행되었으며 SBC된 예측자료의 월평균 온도를 과거 40년(1971-2010년) 동안의 동일 월평균 온도와 비교하여 가장 근사한 값을 가지는 연/월의 일 자료를 예측자료의 일 자료로 선정하였다.

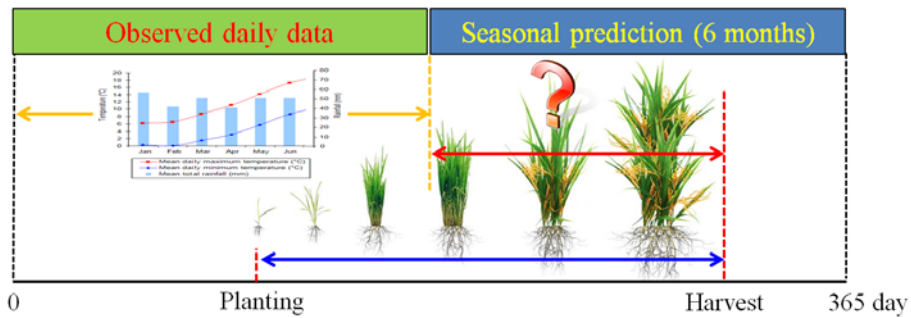


Figure 2.4 Crop growth cycle and seasonal prediction data

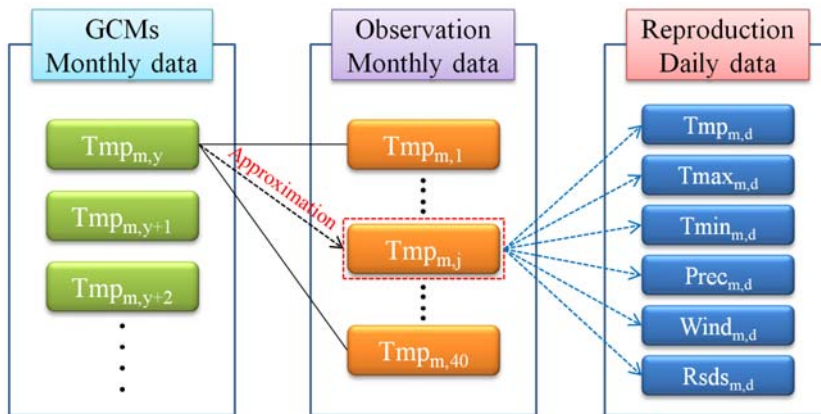


Figure 2.5 Resampling method of seasonal prediction data

본 연구에서 사용한 계절예측 자료는 Figure 2.4와 같이 북반구에서의 작물의 생육 기간을 고려하여 6월에 예측된 6개월 예측자료(7-12월)를 수확량 예측에 활용하고자 했으며 일 자료 생산을 위한 관측자료 또한 동일 월에 대해 과거 40년 동안의 자료가 사용되었다.

시간적 상세화 방법은 모두 SBC된 재분석 자료 BC_CLIM_{NCEP} 와 SBC된 모형 자료 BC_CLIM_{model} 의 비교를 통해 산출된다. Figure 2.5에 도시화된 것과 같이 어떤 해 y , 어떤 월 m 의 계절 예측 모형의 기온 값 $Temp_{m,y}$ 와 동일 월 m 에 대하여 40년 동안의 재분석 자료를 비교하여 모형 값과 가장 근사한 월평균 기온을 가지는 해 j 를 찾는다. 이 때의 BC_{NCEP} 모든 변수의 일 자료를 예측 모형 일 자료로 가져와 계절예측 자료의 일 단위 자료를 재생산한다.

2.2 작물모형

2.2.1 M-GAEZ 모형

2.2.1.1 모형개요

본 연구에서는 작물 수확량 산정을 위해 전 지구 규모로 작물 생육 시뮬레이션이 가능한 프로세스 기반의 작물 생육 모형인 M-GAEZ이 이용되었다. M-GAEZ 모형은 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the UN, FAO)와 국제응용시스템분석연구원(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)의 농지생태학적 토지분류 프로젝트를 통해 개발된 GAEZ(Global Agro-Ecological Zones) 모형을 기후변화 영향평가 연구에 적합하면서 보다 현실적인 작물 수확량 산정이 가능하도록 일본 국립환경연구소(National Institute for Environmental Studies, NIES)에 의해 개선되었다(Masutomi et al., 2009). M-GAEZ 모형에 대한 자세한 설명은 신용희(2013)을 참조하길 바라며 모형의 개요는 다음과 같다.

M-GAEZ 모형은 기후자료와 토양정보, 지형자료, 관개 면적자료, 입력레벨 등의 조

건에 기초해 작물의 성장을 이론적으로 추정하고 나아가 FAO에서 전 지구 경작지를 대상으로 장기간에 걸친 작물별 생육조사를 바탕으로 작성한 다양한 경험적 작물 파라메타를 이용해 전 지구 작물 생산 가능 지역에 대한 잠재 수확량을 산출한다. 여기서 입력 레벨이란 자본, 노동력, 토양비옥도, 기술개발 레벨 등과 같은 작물 수확량에 영향을 미치는 요소의 총체적인 지표를 말하며 Table 2.5와 같이 국가별로 3단계로 분류된다. M-GAEZ 모형에는 기후자료 이외에도 다양한 GIS(Geographic Information System) 정보가 필요하며 이 정보들에 대해서는 Table 2.6에 정리하였다. M-GAEZ 모형은 옥수수, 밀, 쌀 등의 약 23종의 다양한 작물에 대한 잠재 수확량 산정이 가능하며 FAO에서 작성한 작물 성장 파라메타를 지역 특성에 맞도록 수정함으로써 보다 정확도 높은 수확량 산정이 가능하도록 설계되어있다. M-GAEZ 모형에서는 본 연구의 대상작물인 쌀을 크게 건조지대 품종과 습윤지대 품종으로 구분해 수확량을 산정할 수 있는데 전 세계 쌀 생산량의 대부분이 아시아태평양지역을 중심으로 재배되고 있는 습윤지대 품종에 의해 생산되고 있어 본 연구에서는 습윤지대 품종에 대해서만 수확량 산정을 고려했다. 습윤지대 쌀 품종은 크게 Indica 종과 Japonica 종으로 나뉘며 Indica 종은 주로 동남아시아와 인도를 중심으로 재배되고 있으며 Japonica 종은 주로 우리나라와 중국, 일본, 미국을 중심으로 재배되고 있다.

잠재 작물 수확량 계산은 모형 입력 자료와 작물 파라메타 정보가 구축되면 Figure 2.6과 같은 흐름으로 이루어진다. M-GAEZ 모형에서는 작물 수확량 계산을 크게 3 단계로 나누어 실시하는데 기후 모듈과 작물성장 모듈 그리고 토양제약 모듈을 통해 차례로 이루어진다. 가장 먼저 기후 모듈에서는 기후자료 만을 이용해 그리드 별로 작물 재배 가능 기간이 계산되고 FAO-56 Penman-Monteith 방법으로부터 작물 수확량 추정에 중요한 파라메타인 잠재 증발산량(mm/day)이 계산된다(FAO, 1998). 작물성장 모듈에서는 기후 모듈에서 계산된 작물 재배 가능 기간과 작물 파라메타를 근거로 작물이 성장 가능한 기온요건을 충족하는 지역을 판단하며 작물 성장이 가능한 지역에 대해서는 농업기후제약만을 고려한 잠재 작물 수확량이 산출되지만 기온요건을 충족하는 일수가 작물 성장기간에 미치지 못할 경우에는 재배 부적합 지역으로 판정돼 작물 수확량

계산이 이루어지지 않는다. 마지막으로 토양제약 모듈에서는 작물성장 모듈에서 산출된 잠재 작물 수확량에 대해 작물 생육이 불가능한 토양 또는 작물 생육은 가능하나 생산성이 낮은 토양 등의 토양환경에 의한 제약이 고려된다.

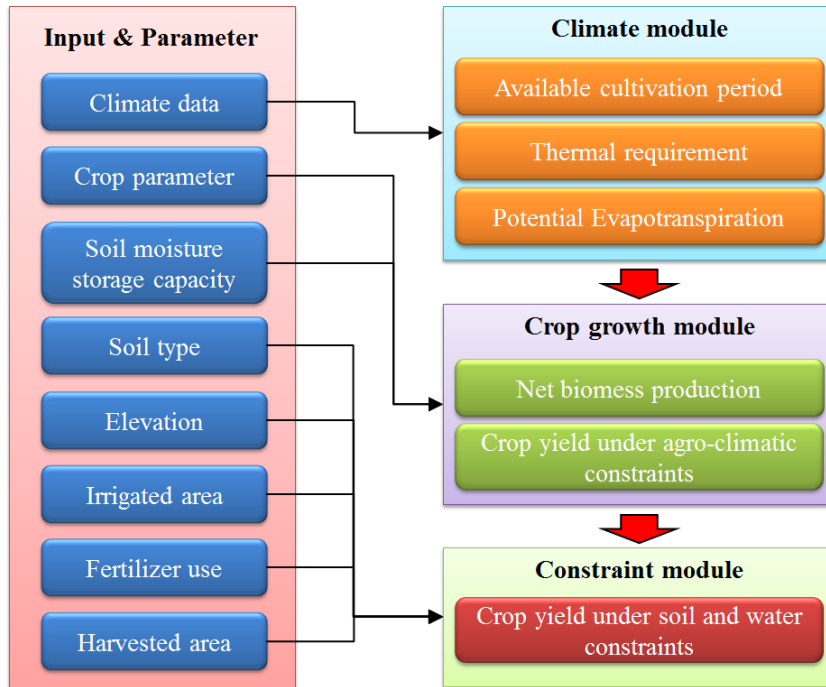


Figure 2.6 Flow chart of yield calculation by M-GAEZ model(Source from Shin(2013))

Table 2.5 Input level of each country(Masutomi et al., 2009)

Country	Region 1	Input level
Bangladesh	Southern Asia	Low level
Brazil	South America	Intermediate level
Cambodia	South-eastern Asia	Low level
China	Eastern Asia	Intermediate level
India	Southern Asia	Low level
Indonesia	South-eastern Asia	Intermediate level
Japan	Eastern Asia	High level
Korea	Eastern Asia	High level
Myanmar	South-eastern Asia	Low level
Pakistan	Southern Asia	Low level
Philippines	South-eastern Asia	Low level
Thailand	South-eastern Asia	Low level
USA	Northern America	High level
Vietnam	South-eastern Asia	Intermediate level

Table 2.6 Input data of M-GAEZ model

Items	Data names	Spatial resolution (lat.×lon.)	References
Soil type	Digital Soil Map of the World	5'×5'	FAO, 1995
Maximum available soil moisture	Digital Soil Map of the World	5'×5'	FAO, 2000
Elevation	GTOPO30	30"×30"	USGS, 1998
Irrigated area	Global Map of Irrigated Area	5'×5'	Siebert et al., 2005
Cultivated area	Major Crop Dataset	5'×5'	Monfreda et al. 2008
Country boundary	Gridded Population of the World	2.5'×2.5'	CIESIN, 2005
Fertilization use	World Development Indicators	Country	World Bank, 2006

2.2.1.2 잠재작물증발산량

작물로부터 발생하는 잠재 증발산량은 M-GAEZ 모형에서 작물 수확량을 추정하는데 중요한 파라메타로 이용되며 본 연구에서는 FAO-56 Penman-Monteith 방법으로부터 잠재 증발산량(mm/day)을 다음과 같이 산출한다(Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.8)$$

여기서, ET_0 는 기준잠재증발산량($mm \ day^{-1}$), R_n 은 작물표면에서의 순 태양복사량(Net radiation, $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$), G 는 토양 열 유속 밀도(Soil heat flux density, $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$), T 는 표고 2m에서의 일평균기온($^{\circ}C$), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제 수증기압(kPa), u_2 는 표고 2m에서의 풍속($m \ s^{-1}$), Δ 는 포화수증기압 곡선의 기울기($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$), γ 는 건습계 계수($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$)를 나타낸다.

포화수증기압 곡선의 기울기 Δ 는 아래 식과같이 나타내지고

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (2.9)$$

건습계수 γ 는 아래 식과같이 나타내진다.

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (2.10)$$

여기서 P 는 대기압을 나타낸다.

또한, 순 태양복사량 R_n 은

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.11)$$

로 나타내지며 여기서 R_{ns} 는 지표면에 흡수되는 순 태양복사 에너지(Net solar radiation, $MJ m^{-2} day^{-1}$), R_{nl} 은 지표면에서 우주로 방사되는 순 장파복사 에너지(Net longwave radiation, $MJ m^{-2} day^{-1}$)를 나타낸다.

또한, 지표면에 흡수되는 순 태양복사 에너지 R_{ns} 는

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (2.12)$$

로 나타내지며 여기서 α 는 태양복사 에너지의 반사율(알베도, 기준작물인 알파파의 경우 0.23)을 R_s 는 지표면에 도달하는 태양복사 에너지(Solar or shortwave radiation, $MJ m^{-2} day^{-1}$)를 나타낸다.

또한, 지표면에 도달하는 태양복사 에너지 R_s 는

$$R_s = 0.16 \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (2.13)$$

로 나타내지며 여기서 T_{\max} 는 일 최고기온(°C), T_{\min} 은 일 최저기온(°C), R_a 는 지구의 성층권에 도달하는 태양복사 에너지(Extraterrestrial radiation, $MJ m^{-2} day^{-1}$)를 나타낸다.

또한, 지구의 성층권에 도달하는 태양복사 에너지 R_a 는

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r \{ \omega_s \sin(\psi) \sin(\delta) + \cos(\psi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \} \quad (2.14)$$

로 나타내지며 여기서 G_{sc} 는 태양상수($=0.0820 MJ m^{-2} min^{-1}$), d_r 은 지구와 태양의 상대거리의 역수(단위: radian), ω_s 는 일몰시 각도(단위: radian), ψ 는 위도(latitude, 단위: radian), δ 는 편각(Solar declination, 단위: radian)을 나타낸다. d_r , δ , ω_s 는 아래 식과같이 산정된다.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2.15)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (2.16)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\psi)\tan(\delta)) \quad (2.17)$$

여기서 J 는 1월 1일을 1로 하는 적산일수를 나타낸다.

또한, 위 식(2.11)의 지표면에서 우주로 방사되는 순 장파복사 에너지 R_{nl} 은 아래 식과 같이 나타내진다.

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (2.18)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($= 4.903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} day^{-1}$), $T_{max,K}$ 는 일 최고절대온도($^{\circ}C + 273.16$), $T_{min,K}$ 는 일 최저절대온도($^{\circ}C + 273.16$), e_a 는 실제 수증기압(kPa), R_{so} 는 맑은 날 지구표면에 도달하는 태양복사 에너지($= (0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z)R_0$), z 는 표고(m)를 나타낸다.

2.2.1.3 작물성장 온도조건

일반적으로 모든 작물에서 성장이 가능한 온도조건을 정의할 때 $5^{\circ}C$ 이상으로 설정하고 있으나 이 값은 작물이 성장을 시작하는 평균적인 값을 의미한다. 실제 작물은 지역에 따라 적합한 재배 온도조건이 다르고 열대지역과 한대지역에서의 성장 가능 온도는 차이를 보이고 있어 모든 작물에 대해 성장 가능 온도조건을 일괄적으로 $5^{\circ}C$ 이상으로 설정하는 것은 적절하지 않다. 본 연구에서는 Table 2.7에 나타내고 있는 온도 프로파일 구분을 통해 Table 2.8과 Table 2.9에 나타내고 있는 조건들을 만족하는 기간을 작물성장에 적합한 기간으로 정의해 이 기간 동안의 적산 기온이 일정 값 이상인 지역에 대해서만 작물이 성장할 수 있다고 판단하고 있다. 예를 들어 Table 2.8의 Indica 품종의 경우 온도조건을 만족하는 기간에 대한 일 적산온도가 $3000^{\circ}C$ 이상인 지역(Optimal condition)에서 최적의 쌀 생산이 이루어진다고 볼 수 있다. Table 2.8과 Table 2.9에서 최적의 조건을 만족하지 못하더라도 그에 준하는 조건을 만족하는 지역(Sub-optimal condition)에 대해서는 최종적으로 얻어진 수확량의 80%에 해당하는 값으로 계산되도록 했다. 만약 작물 성장에 필요한 온도조건을 각 작물 품종의 성장기간에 대해 만족시키지 못할 경우 그 지역에서는 작물 재배가 불가능하다고 판단되어 수확량이 0으로 계산된다.

Table 2.7 Temperature profile interval symbols(Fischer et al., 2002)

기온 (°C)	<-5	-5-0	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
전체 생장기간	L9	L8	L7	L6	L5	L4	L3	L2	L1
여름→겨울	L9a	L8a	L7a	L6a	L5a	L4a	L3a	L2a	L1a
겨울→여름	L9b	L8b	L7b	L6b	L5b	L4b	L3b	L2b	L1b

Table 2.8 Temperature regime requirements of Indica rice(Fischer et al., 2002)

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
Indica Rice (wetland) L = 105/120/135/150	Climates: Tr, STR (SR+WR) L5=L6=0 L3 + L2+ L1 >0.833*L L4a < 0.167*L L4b < 0.167*L TSgc>2400	Climates: Tr, STR (SR+WR) L6=L5=L4 = 0 L3+L2+L1 = 1.000*L L1 < 0.667*L TSgc >3000

Table 2.9 Temperature regime requirements of Japonica rice(Fischer et al., 2002)

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
Japonica Rice (wetland) L = 105/120/135/150	Climates: Tr, STR (SR+WR), Te L5a+L4a < 0.400*L L4 >0 L2a+L2b < 0.667*L L1a+L1b < 0.200*L L4b+L5b < 0.250*L L6=0 TSgc > 1800	Climates: Tr, STR (SR+WR), Te L5a+L4a < 0.400*L L2a+L2b < 0.667*L L1a+L1b < 0.200*L L4b+L5b < 0.250*L L6=0 TSgc > 2200

Climates: Te=Temperate(온대), STR=Sub-tropics(아열대), WR=Winter Rainfall(겨울강수),
SR=Summer Rainfall(여름강수), Tr=Tropics(열대)

TSgc: 온도조건을 만족하는 기간에 대한 기온의 적산

LGP_{t=5}: 일평균기온이 5를 넘는 일수

2.2.2 작물 수확량 산정

2.2.2.1 기후조건만이 고려된 잠재작물 수확량 산정

작물이 성장하는 과정에서 순 바이오매스의 생산은 잎의 광합성 과정에 의한 총 바이오매스 성장과 탄소 호흡과정에 의한 바이오매스 손실의 차로 정의되며 순 바이오매스 생산에 대해서는 일반적으로 아래와 같은 식으로 나타내고 있다(Fischer et al., 2002).

$$B_n = B_g - R \quad (2.19)$$

여기서 B_n 은 단위면적당 작물 순 바이오매스 생산량(kg/ha)을 나타내고 B_g 는 단위면적당 작물 총 바이오매스 생산량(kg/ha)을 R 은 작물의 독립영양 호흡을 통해 손실되는 바이오매스 생산량(kg/ha)을 나타낸다. 또한 하루하루의 순 바이오매스 생산량을 나타내는 순 바이오매스 생산속도(kg ha⁻¹ day⁻¹)는 아래와 같은 식으로 나타낸다.

$$b_n = b_g - r \quad (2.20)$$

여기서 b_n 은 단위면적당 작물 순 바이오매스 생산속도(kg ha⁻¹ day⁻¹)를 나타내고 b_g 는 단위면적당 작물 총 바이오매스 생산속도(kg ha⁻¹ day⁻¹)를 r 은 호흡에 의한 바이오매스 손실속도(kg ha⁻¹ day⁻¹)를 나타낸다.

작물이 정상적인 성장과정을 거쳐 충분히 성장한 상태에서 작물의 잎이 지면을 최고로 피복하고 있을 때의 순 바이오매스 생산속도를 b_{nm} 으로 나타내며 이 때 총 바이오매스 생산속도는 b_{gm} 으로 나타낸다. 여기서 작물 전체 성장기간 동안의 평균 순 바이오매스 생산속도는 $0.5 \times b_{nm}$ 으로 나타낼 수 있으며 작물이 경작지에 이식되어 성숙 과정을 거쳐 수확되기까지의 기간인 표준성장기간 N 일간에 대한 작물 순 바이오매스 생산량 B_n 은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_n = 0.5b_{nm} \times N \quad (2.21)$$

여기서 작물이 충분히 성장했을 때의 총 바이오매스 생산속도 b_{gm} 은 아래 식과 같다.

$$b_{gm} = F \times b_0 + (1 - F) \times b_c \quad (2.22)$$

여기서 F 는 일중 구름 피복률(%)을 나타내고 b_0 는 구름 낀 날에 대한 총 바이오매스 생산속도($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$), b_c 는 쾌청한 날에 대한 총 바이오매스 생산속도($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)를 나타내며 일중 구름 피복률 F 는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = (A_c - 0.5R_g) / (0.8A_c) \quad (2.23)$$

여기서 A_c 는 쾌청일인 경우의 최대 단과복사($\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)를 나타내며 R_g 는 지표면에 도달하는 단과복사($\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)를 나타낸다.

태양으로부터 충분한 빛을 받았을 때의 엽면적당 광합성속도 P_m 는 성장기간 중의 일평균 기온을 이용해 산출이 가능하며 M-GAEZ 모형에서는 Table 1.10과 같이 정리된 품종 별 파라메타를 이용하고 있다. 총 바이오매스 생산속도 b_{gm} 은 P_m 이 20보다 큰 경우와 작은 경우에 대해 아래식과 같이 계산이 이루어진다(Fischer et al., 2002).

$$b_{gm} = \begin{cases} F(0.8 + 0.01P_m)b_0 + (1 - F)(0.5 + 0.025P_m)b_c & \text{for } P_m > 20 \\ F(0.5 + 0.025P_m)b_0 + (1 - F)(0.05P_m)b_c & \text{for } P_m \leq 20 \end{cases} \quad (2.24)$$

일 바이오매스 생산량은 성장기간의 평균 기상정보를 이용해 성장곡선의 변곡점에 대한 광합성속도 및 바이오매스 생산속도 그리고 호흡에 의한 바이오매스 손실속도를 산출한 다음 성장기간의 평균 바이오매스 생산속도가 변곡점에서의 바이오매스 생산속도의 1/2이라고 가정해 계산한다.

단위면적당 작물 순 바이오매스 생산속도 b_n 이 최대일 때의 호흡에 의한 바이오매스 손실속도 r_m 은 아래와 같이 나타낸다.

$$r_m = kb_{gm} + c_t B_{nm} \quad (2.25)$$

여기서 k 는 작물이 성장을 하는데 있어 필요한 에너지를 얻기 위한 호흡 비례 정수로 모든 작물에 대해 $k=0.28$ 이 적용된다. c_t 는 세포 특유의 호흡 비례 정수로 온도에 영향을 받으며 콩과 작물과 비 콩과 작물에 따라 아래와 같은 식으로 나타낸다(Fischer et al., 2002).

$$c_t = \begin{cases} 0.0283(0.0044 + 0.0019T + 0.0010T^2) & \text{콩과 작물} \\ 0.0108(0.0044 + 0.0019T + 0.0010T^2) & \text{비 콩과 작물} \end{cases} \quad (2.26)$$

쌀은 비 콩과 작물에 속하기 때문에 본 연구에서는 식(2.26)의 아래쪽 식을 이용한다.

B_{nm} 은 작물 성장기간 N 일에 대한 순 바이오매스 생산속도를 나타내며 아래와 같이 나타낸다.

$$B_{nm} = 0.25b_{nm} \times N \quad (2.27)$$

식(2.25), (2.26), (2.27)로부터

$$b_{nm} = 0.72b_{gm} / (1 + 0.25c_t \times N) \quad (2.28)$$

작물 성장기간 N 일에 대한 작물의 순 바이오매스 생산량은 아래와 같다.

$$B_n = (0.36b_{gm} \times L) / (1/N + 0.25c_t) \quad (2.29)$$

여기서 L 은 엽면적지수(LAI)가 5일 때의 b_{gm} 에 대한 실제 LAI 때의 b_{gm} 의 비를 나타낸다. LAI는 작물 품종 별 최대 LAI(Table 2.10 참조)에 대해 성장기간과 실제 성장일수의 비로 산출된다.

최종적으로 기상조건만을 고려한 잠재 작물 수확량 Y_p 는 아래식과 같이 산출된다.

$$Y_p = H_i \times B_n \quad (2.30)$$

여기서 H_i 는 작물 수확량 계수를 나타내며 Input level에 따라 품종별로 Table 2.10과 같이 제공된다.

Table 2.10 Crop parameters for biomass and yield calculations (Fischer et al., 2002)

Crop (Rice)	Growth cycle	High Inputs		Intermediate Inputs		Low Inputs		Dependence of Rate of Leaf Photosynthesis (Pm) on Temperature (Deg C)								
		days	HI	Max. LAI	HI	Max. LAI	HI	Max. LAI	5	10	15	20	25	30	35	40
Japonica	105	0.40	5.0	0.35	3.7	0.3	2.5	0	5	15	30	35	35	30	5	0
	120	0.40	5.0	0.35	4.0	0.3	2.5	0	5	15	30	35	35	30	5	0
	135	0.40	5.5	0.35	4.3	0.3	3.0	0	5	15	30	35	35	30	5	0
	150	0.40	6.0	0.35	4.5	0.3	3.0	0	5	15	30	35	35	30	5	0
Indica	105	0.45	5.0	0.38	3.8	0.3	2.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0
	120	0.45	5.5	0.38	4.0	0.3	2.5	0	0	15	30	35	35	30	5	0
	135	0.45	6.0	0.38	4.5	0.3	3.0	0	0	15	30	35	35	30	5	0
	150	0.45	6.5	0.38	4.8	0.3	3.0	0	0	15	30	35	35	30	5	0

2.2.2.2 수분제약이 고려된 잠재작물 수확량 산정

기상조건만을 고려한 잠재 작물 수확량이 2.2.2.1을 통해 산정되었으나 실제 작물 생산에서는 다양한 수분제약으로 인해 작물 수확량에 영향을 미치고 있다. M-GAEZ 모형에서는 기후모듈을 통해 잠재 증발산량을 산출함으로써 다음과 같이 수분제약에 대해 고려하고 있다.

작물의 증발산량은 참조작물에 대한 증발산량에 작물 성장단계에 따른 작물계수 K_c 를 곱해 산정한다.

$$ET = K_c ET_0 \quad (2.31)$$

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2.32)$$

여기서 K_c 는 작물계수, K_{cb} 는 작물의 기공으로부터 방출되는 수분을 나타내는 증산효율, K_e 는 토양으로부터의 증발효율을 나타낸다. 작물계수 K_c 는 참조작물의 증발산량을 1이라고 했을 때 대상 작물의 증발산량과의 비로 구해지며 작물의 품종이나 생육상태, 토양 내 수분량, 풍속 등의 기후조건에 의해 값이 다르게 나타난다. 증산효율 K_{cb} 는 작물의 종류나 작물 성장 단계에 따라 변하기 때문에 본 연구에서는 작물 성장 단계를 initial stage($K_{cb\ ini}$), reproductive stage($K_{cb\ mid}$), maturation stage($K_{cb\ end}$)로 분류하였고 논벼에 대해서는 각 성장 단계에 따라 $K_{cb\ ini} = 1.1$, $K_{cb\ mid} = 1.2$, $K_{cb\ end} = 1.0$ 로 설정하였다(Table 2.11 참조). 토양으로부터의 증발효율 K_e 는 아래식과 같이 산출된다(Fischer et al., 2002).

$$K_e = \min(K_r(K_{c_{\max}} - K_{cb}), f_{ew} \times K_{c_{\max}}) \quad (2.33)$$

여기서 K_r 은 증발 감쇠 계수로 토양 표층에서의 증발로 인한 수분 감소율을 나타내며 $K_{c_{\max}}$ 는 최대 작물계수로 작물 성장기간 중 작물계수 K_c 가 최대인 값을 나타낸다. 또한 f_{ew} 는 작물이 없는 곳에서 젖은 토양의 면적 비를 나타낸다. 벼의 이앙일 부터 수확일 까지 전체 성장기간을 4단계로 나누면 각 성장단계에 대한 참조작물 증발산량 TET_{0_k} 는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$TET_{0_k} = \sum K_{cb_j} ET_{0_j} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2.34)$$

또한 작물성장 단계 전체에 대한 참조작물 증발산량 TET_0 는 아래식과 같다.

$$TET_0 = \sum_{j=1}^{d0} K_{cb_j} ET_{0_j} \quad d0 = d1 + d2 + d3 + d4 \quad (2.35)$$

여기서 작물성장 단계는 Table 2.11과 같이 작물 품종에 따라 전체 성장기간에 대한 비율로 설정되어 있다.

작물의 성장 단계별 실제 작물 증발산량은 아래식과 같이 나타내진다.

$$TET_{a_k} = \sum k_{cb_j} ET_{a_j} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2.36)$$

전체 작물 성장 단계에 대한 실제 작물 증발산량은 아래식과 같이 나타내진다.

$$TET_a = \sum_{j=1}^{d0} k_{cb_j} ET_{a_j} \quad d0 = d1 + d2 + d3 + d4 \quad (2.37)$$

또한 일 단위 물수지 W 와 실제 증발산량 ET_a 는 FAO (1979)에 의해 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{j+1} = \min(W_j + P_j - ET_{aj}, S_{\max}) \quad (2.38)$$

여기서 P 는 일 강수량을 나타내며 S_{\max} 는 가능 토양수분 저장 능력(Figure 2.7)을 나타낸다.

$$ET_{aj} = \begin{cases} ET_{0j} & \text{if } W_j + P_j \geq S_{\max} \cdot d \cdot (1-p) \\ \rho_j ET_{0j} & \text{else} \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\rho_j = \frac{ET_{aj}}{ET_{0j}} = \frac{W_j + P_j}{S_{\max} \cdot d \cdot (1-p)} \quad (2.40)$$

여기서 d 는 뿌리의 깊이(m), p 는 $ET_a < ET_0$ 일 경우의 토양수분 감소분을 나타내며 Table 2.11과 같이 작물 품종 별로 설정되었다.

수분 제약에 대한 감소 승수는 아래와 같이 정의된다.

$$f_0 = 1 - k_0^y \left(1 - \frac{TET_a}{TET_0} \right) \quad (2.41)$$

$$f_1 = \prod_{k=1}^4 \left(1 - k_k^y \left(1 - \frac{TET_{0k}}{TET_{0k}} \right) \right) \quad (2.42)$$

여기서 k_0^y 와 k_k^y 는 작물 수확 감소 계수로 성장단계에 따라 Table 2.12와 같이 작물 및 품종 별로 설정되었다.

최종적으로 수분 제약이 고려된 작물 수확량 Y_a 는 아래식과 같이 나타내진다.

$$Y_a = \min(f_0, f_1) \times Y_p \quad (2.43)$$

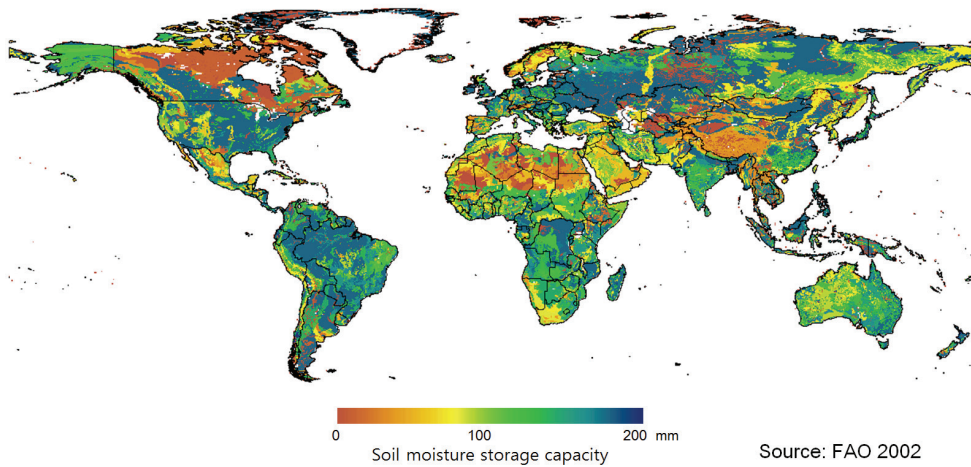


Figure 2.7 Distribution map of soil moisture storage capacity

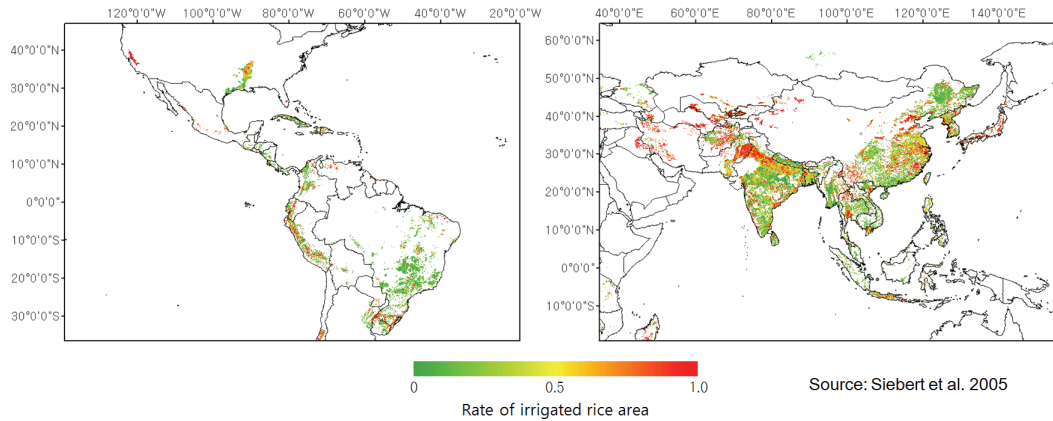


Figure 2.8 Distribution map of irrigated rice area

M-GAEZ 모형에서는 Figure 2.8의 관개 면적률 정보를 이용해 쌀 생산지역에서 관개가 이루어질 경우에 대해서는 수분 스트레스의 영향을 받지 않는 것으로 가정하고 있으며 천수답에 대해서는 기온, 강수량, 일사량 등의 기후정보를 바탕으로 작물 증발산량을 산출하여 성장 단계별로 수분제약을 고려하여 잠재 수확량을 산정한다.

Table 2.11 Parameters for calculation of water limited yield(Fischer et al., 2002)

Crops	K _{cb} ini	K _{cb} mid	K _{cb} end	Length of Crop Stage (% of growth cycle)				Max. Root Depth (m)	Depletion Fraction	Max. Crop Hight (m)
				d1	d2	d3	d4			
Rice(wetland)	1.1	1.2	1.0	10	30	30	30	0.5-1.0	0.20	1
Rice(dryland)	0.5	1.2	0.6	10	30	30	30	0.5-1.0	0.20	1
Wheat(winter)	0.4	1.1	0.4	10	30	35	25	1.0-1.5	0.55	1
Wheat(spring)	0.4	1.1	0.4	10	20	45	25	1.5-1.8	0.55	1
Maize	0.4	1.1	0.6	15	30	35	20	1.0-1.7	0.55	2
Barley(winter)	0.4	1.1	0.4	10	30	35	25	1.0-1.5	0.55	1
Barley(spring)	0.4	1.1	0.4	10	20	45	25	1.5-1.8	0.55	1
Soybean	0.4	1.1	0.5	15	20	45	20	0.6-1.3	0.50	0.5-1.0

Table 2.12 Parameters for calculation of yield loss(Fischer et al., 2002)

Crops	Yield loss factors				
	k ₁ ^y	k ₂ ^y	k ₃ ^y	k ₄ ^y	k ₀ ^y
Rice(wetland)	1.00	2.00	2.50	1.00	2.00
Rice(dryland)	0.40	0.90	1.50	0.50	1.25
Wheat(winter)	0.20	0.60	0.75	0.50	1.05
Wheat(spring)	0.20	0.65	0.80	0.55	1.15
Maize	0.40	0.90	1.50	0.50	1.25
Barley(winter)	0.20	0.60	0.75	0.50	1.05
Barley(spring)	0.20	0.65	0.80	0.55	1.15
Soybean	0.20	0.80	1.00	0.80	0.85

2.2.2.3 토양제약이 고려된 잠재작물 수확량 산정

수분제약이 고려된 잠재 작물 수확량 산정 결과는 기후조건이 만족할 경우 지구상의 모든 토양에서 작물 생산이 이루어지는 것으로 나타내고 있어 현실에 맞는 실제 작물 수확량을 산정하기 위해서는 반드시 토양환경에 대한 제약을 고려해야 한다. M-GAEZ 모형에서는 세계 디지털 토양도(FAO/UNESCO, 1995)로부터 얻어지는 토양의 종류와 토양상에 대한 정보를 바탕으로 제약을 고려한다. 본 연구에서 이용되는 토양도는 전 세계 토양의 생성과 형태, 분포 등에 관한 정보와 농업 식량생산을 위한 토양자원 정보에 기초하여 총 26종의 토양구성단위로 구분되어 있으며 이것을 다시 106 종의 토양구성단위로 세분화하여 분류하고 있다.

본 연구에서는 글로벌 토양도로부터 106 가지 토양구성단위에 대한 제약을 고려한다. 각 토양구성단위의 성질에 대해서는 과거 많은 연구결과로부터 각 작물별 특성이 밝혀져 있으며 본 연구에서는 Fischer et al. (2002)의 연구 결과를 이용하였다. 토양구성단위는 1에서 6까지의 숫자로 이루어져 있으며 숫자 1은 작물재배 적합지역을 나타내고 있어 토양에 의한 제약이 없다고 가정한다. 숫자 2는 최적지는 아니지만 경작이 가능한 지역이라고 가정하여 0.5를 곱한다. 숫자 3은 재배면적의 50%가 작물재배 적합지역이고 나머지가 경작 가능지역이라고 가정하여 0.75를 곱한다. 숫자 4는 작물재배 적합지역이 아니기 때문에 0을 곱한다. 숫자 5는 재배면적의 50%가 작물재배 적합지역이고 50%가 부적합지역이라고 가정하여 0.5를 곱한다. 숫자 6은 재배면적의 50%가 경작가능지역이고 50%가 재배 부적합지역이라고 가정하여 0.25를 곱한다. 토양구성단위에 대한 이상의 정보는 APPENDIX I 과 II를 참조하길 바란다.

토양상은 토지를 이용하거나 관리하는데 있어 중요한 파라메타로 토양구성단위의 분류로는 판단되지 않는 특징으로 분류한다. 세계 토양도에서는 전 세계 토양상을 18종류로 분류하고 있으며 작물별로 제약을 준다. 토양상에 대한 정보는 APPENDIX III과 IV를 참조하길 바란다.

2.2.3 GIS 입력 자료

2.2.3.1 작물수확면적 자료

계절예측 자료를 활용해 글로벌 스케일의 수확량을 예측하기 위해서는 작물 재배면적에 대한 신뢰도 높은 정보가 요구된다. 작물모형을 통해 산출되는 수확량 결과는 잠재적 생산이 가능한 모든 지역에 대해 작물 수확량을 산출하고 있기 때문에 실제 작물 수확량과는 큰 차이를 보인다. Leff et al., 2004 와 Monfreda et al., 2008은 국가별 지역별로 축적된 작물 수확 면적 통계 자료를 바탕으로 전 지구 규모의 작물별 수확면적 분포도를 작성하였다. Figure 2.9와 Figure 2.10의 쌀 수확면적 분포도는 위도경도 5' × 5'의 공간 해상도로 작성되어 있으며 각 그리드별로 작물 수확 면적을 값이 작성되어 있다. 쌀 생산은 동남아시아 지역을 중심으로 2기작 혹은 3기작 까지 이루어지고 있는 지역이 있어 쌀 수확면적 분포도상에 1 이상의 값을 나타내는 지점에서는 2기작 혹은 3기작이 이루어지고 있음을 의미한다. 대표적인 작물 수확면적 분포도인 Leff 등의 자료와 Monfreda 등의 자료를 주요 쌀 생산국 별로 합산하여 FAO의 통계 자료와 비교해본 결과 Leff 등의 자료에서 국가별 수확면적의 차이를 보이고 있으며 특히 China의 경우 1190만 ha의 차이를 보이고 있다. 우리나라의 90년대 평균 수확면적이 107만ha인 점을 감안하면 중국지역의 쌀 수확량 면적 자료에 상당한 오차가 존재하는 것으로 나타나고 있다. Figure 2.11–Figure 2.12는 FAOSTAT 통계 자료로부터 90년대 쌀 수확면적이 가장 넓은 국가인 India에서 30번째로 쌀 수확면적이 넓은 Peru까지 국가별 쌀 수확면적을 비교하고 있다. China와 Indonesia, Thailand, Vietnam, Myanmar, Brazil, Cambodia, Japan 등의 국가에서 Leff 등의 자료가 쌀 수확면적을 넓게 예상하고 있는 반면 Monfreda 등의 자료는 FAOSTAT 통계 자료와 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

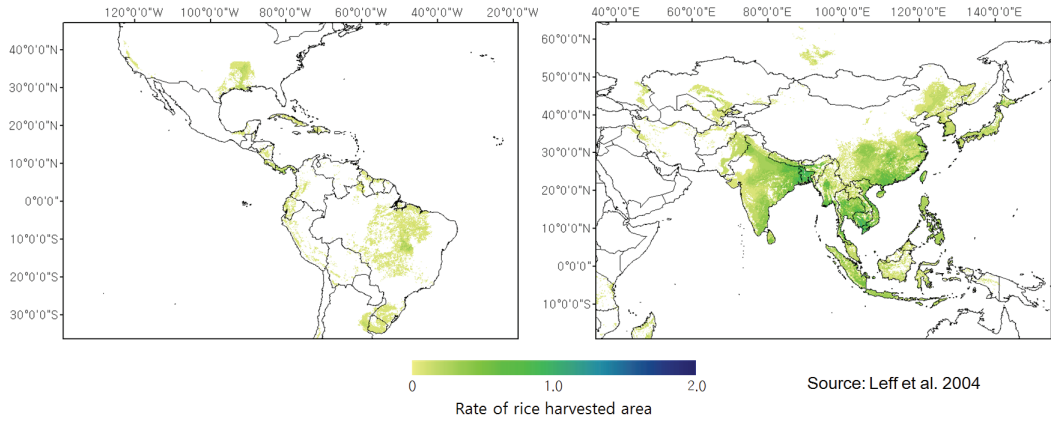


Figure 2.9 Distribution map of global rice harvested area (Leff et al., 2004)

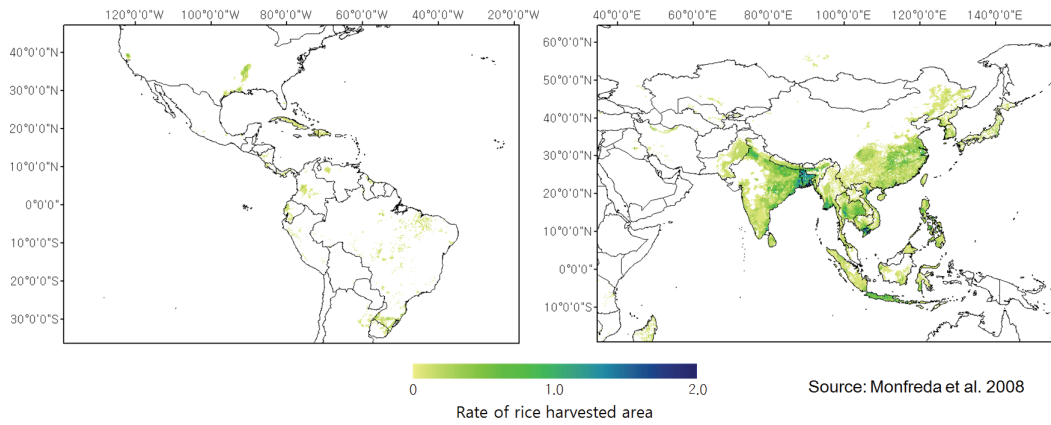


Figure 2.10 Distribution map of global rice harvested area (Monfreda et al., 2008)

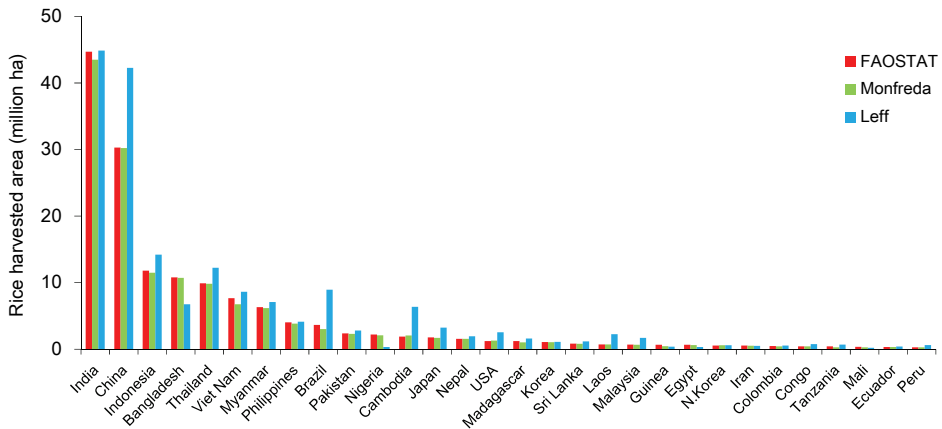


Figure 2.11 Difference of rice harvested area in each country from FAOSTAT, Monfreda and Leff

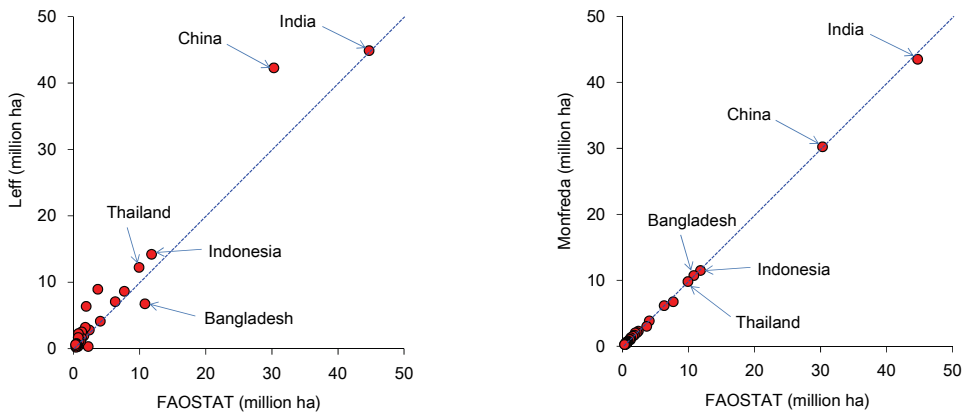


Figure 2.12 Difference of rice harvested area with Monfreda and Leff

2.2.3.2 토양 자료

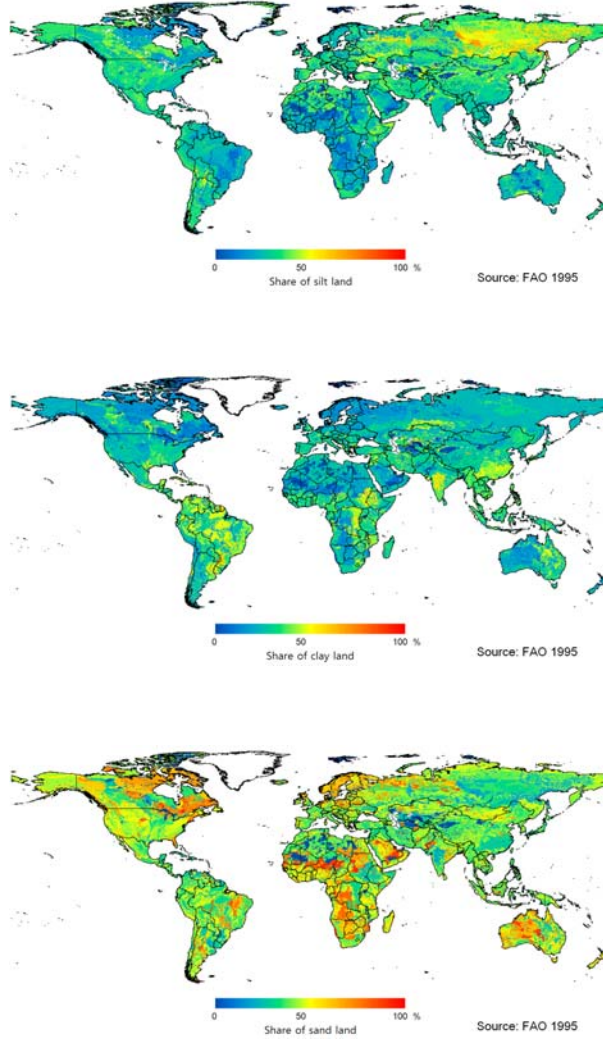


Figure 2.13 Global distribution of FAO soil maps

Figure 2.13은 토양제약을 고려하기 위한 토양 종류별 분포도를 나타내고 있으며 여기서는 전 세계 곳곳에 폭넓게 분포되어 있는 세 가지 주요 토양인 Silt, Clay, Sand에 대한 분포율 정보를 나타내고 있다.

2.3 실험설정

본 연구에서는 Table 2.13과 같은 실험설정으로 계절예측 자료를 활용한 아시아태평양 지역의 쌀 수확량 예측을 실시했고 예측 모형의 신뢰성을 평가하고자한다. 쌀 수확량 예측에는 2.2.1에서 소개된 글로벌 스케일의 작물모형인 M-GAEZ 모형이 이용된다. 글로벌 스케일의 작물모형을 이용해 수확량을 산정하기 위해서는 공간 해상도가 통일된 글로벌 스케일의 일 단위의 기후입력 자료가 필요하다. 현재 APCC에서 제공되고 있는 계절예측 자료는 월 단위로 제공되고 있어 우선 월 단위 계절예측 자료에 대한 일 단위 자료로의 자료 재생산을 실시한다. 계절예측 Hindcast 자료는 6개월 예측자료로 6개 예측 모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncp), PNU(pnu1), POAMA(poma))의 자료가 이용 가능하다. 6개 모형의 공통 Hindcast 예측 기간은 1983년-2006년이며 이 기간에 대해 각 예측 모형의 Bias 보정이 실시되었고 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2 관측 자료를 이용해 2.1.3을 통해 각 계절예측 모형 별로 일 단위 계절예측 자료가 재생산된다. 쌀 수확량 예측은 1991년부터 2000년까지 10년 기간에 대해 실시되었다. 2011년 기준 전 세계 쌀 생산량의 90% 이상을 차지하는 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국가 14개국에 대해 국가별 쌀 수확량을 산정하였고 세계 쌀 생산량 상위 2개 국가(China, India)와 우리나라 그리고 USA에 대한 쌀 수확량 예측의 신뢰성 평가를 위해 상기 6개 예측 모형의 계절예측 자료와 Bias 보정된 NCEP 재분석 자료를 이용해 산정된 수확량 결과와 FAOSTAT 농업통계에서 제공되는 국가별 수확량 정보를 비교 분석하였다.

국가별 쌀 수확량 예측은 2.2.2의 작물수확량 산정 과정을 통해 최종적으로 계산된 5'×5' 스케일의 각 격자별 쌀 수확량 예측결과에 2.2.3.1의 5'×5' 스케일 글로벌 쌀 수확면적 자료(Monfreda et al., 2008)를 마스킹 처리하여 격자별 면적가중 된 쌀 수

확량을 산정한다. 쌀 생산이 이루어지는 지역에 대한 격자별 면적가중 쌀 수확량은 GRASS GIS의 aggregation 틀에 의해 국가 경계 자료(CIESIN, 2005)를 참조하여 국가 별 수확량으로 산정된다.

Table 2.13 Simulation settings of this study

Items	Settings
Model	M-GAEZ model
Crop studied	Rice(4 varieties: indica, 4 varieties: japonica)
Simulation periods	1991-2000
GCM	MSC_CANCM3, MSC_CANCM4, NASA, NCEP, PNU, POAMA
Climate observations	CRU TS 3.21 datasets, NCEP reanalysis datasets
Climate conditions	Daily mean temperature(°C), Daily maximum temperature(°C), Daily minimum temperature(°C), Precipitation(mm/day), Solar radiation(W/m ²), Wind speed(m/s)
Major producing countries	China, India, Indonesia, Bangladesh, Viet Nam, Thailand, Myanmar, Philippines, Brazil, Pakistan, Cambodia, Japan, USA, Korea

3. 연구내용

3.1 계절예측자료 분석 및 재생산

3.1.1 관측 및 예측 기후자료 분석

3.1.1.1 NCEP 재분석 자료 분석

본 연구에서는 계절예측자료의 Bias 보정과 일 단위 기후예측정보 재생산을 위해 1971년부터 2010년의 40년간의 일 평균된 NCEP 재분석 자료를 이용했다. Figure 3.1은 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2 관측 자료의 공간 해상도를 위경도 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 로 통일한 40년 평균 월 기온 분포도(위쪽 분포도)와 두 자료 간 차이(아래쪽 분포도)를 전 구규모로 비교하고 있으며 CRU 3.2 관측 기온보다 NCEP 재분석 자료의 기온이 클 경우 음(-)의 값으로 나타나고 그 반대의 경우 (+)값으로 나타나고 있어 두 자료의 지역별 특성을 확인 할 수 있다. 본 절에서 CRU 3.2 관측 자료를 바탕으로 Bias 보정을 실시한 NCEP 재분석 자료(이하 B.C. NCEP)와 Bias 보정 전의 NCEP 재분석 자료(이하 Before B.C. NCEP) 그리고 CRU 3.2 관측 자료에 대해 쌀 생산에 미치는 기후의 영향을 파악하기 위해 쌀 생산지역에 해당하는 기온자료만을 추출하여 주요 쌀 생산 국가별로 평균하여 분석을 실시하였다.

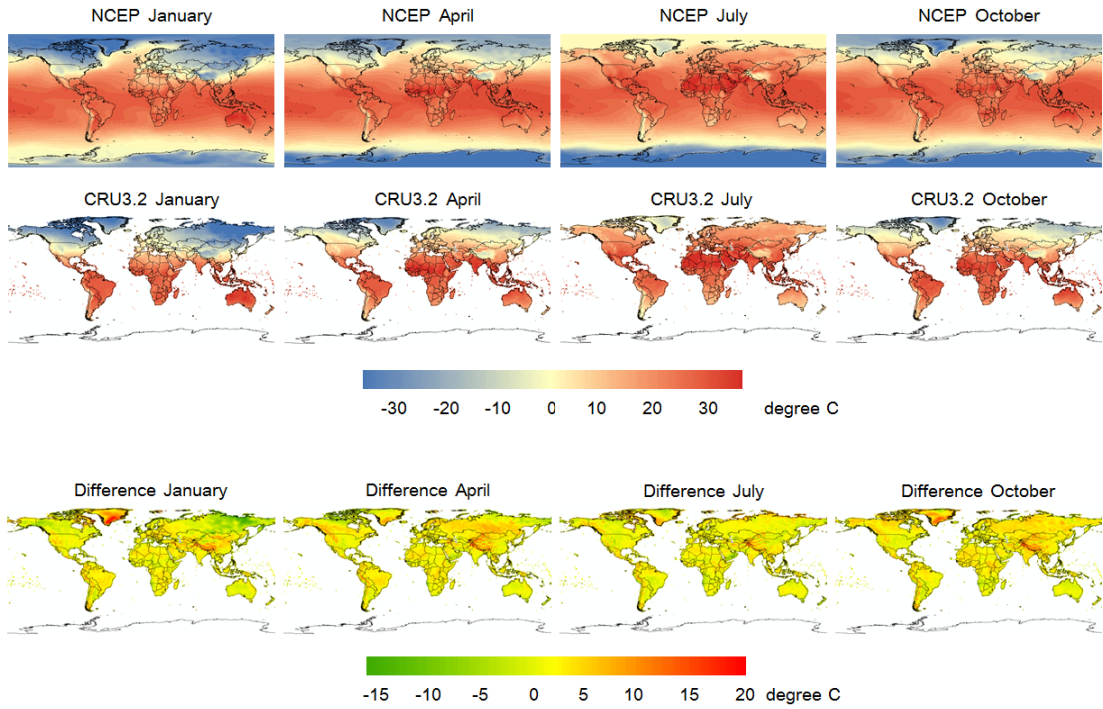


Figure 3.1 Average temperature of NCEP reanalysis data and CRU 3.2 data

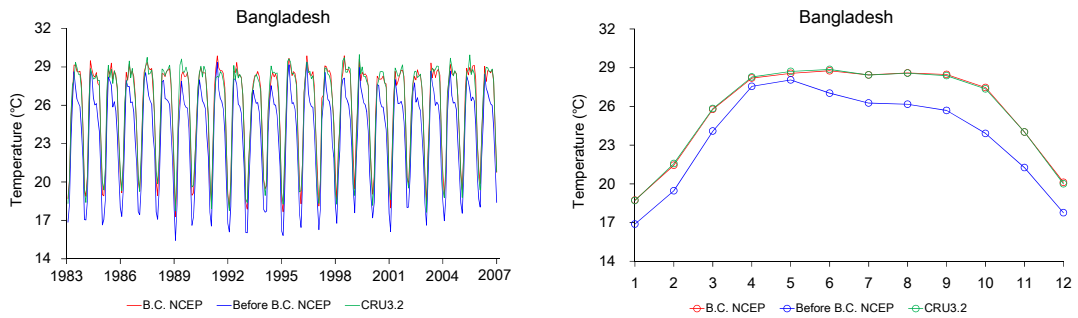


Figure 3.2 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Bangladesh

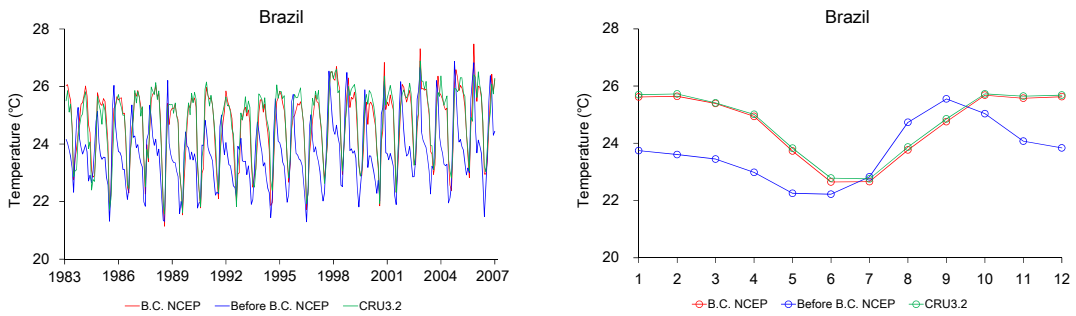


Figure 3.3 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Brazil

Figure 3.2–Figure 3.15 는 전 세계 주요 쌀 생산국 14개국에 대한 B.C. NCEP과 Before B.C. NCEP 그리고 CRU 3.2의 기온자료 분석결과를 정리한 것으로 왼쪽 그래프는 1983년부터 2006년까지의 각 국가별 쌀 생산지역에 대한 월 평균 기온의 경년변동을 나타내며 오른쪽 그래프는 24년간의 월별 평균 기온의 변화를 나타내고 있다. Bangladesh의 경우(Figure 3.2) CRU 3.2 관측 자료에 의하면 쌀 생산지역의 24년간 월 평균기온은 4월에서 9월까지 28℃ 이상을 기록하고 있으며 6월의 평균기온이 약 28.9℃로 가장 높게 나타나고 있다. Before B.C. NCEP은 CRU 3.2와 비교해 전체적으로 낮은 기온 자료를 제공하고 있으며 월별로 비교했을 때 10월의 경우 약 3.5℃로 가장 큰 차이를 보였으며 5월의 경우 약 0.6℃로 가장 작은 차이를 보이고 있다. Brazil의 경우(Figure 3.3) 남반구의 특성상 6월에서 7월까지의 기온이 낮고 1월에서 2월까지의 기온이 높게 나타나고 있다. Before B.C. NCEP과 CRU 3.2를 비교해보면 2월에 약 2.1℃로 가장 큰 차이를 보였으며 7월에는 약 0.1℃로 가장 작은 차이를 보이고 있다.

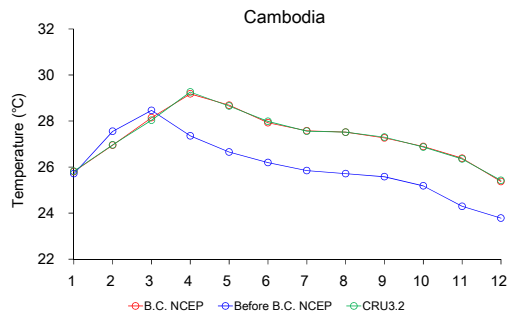
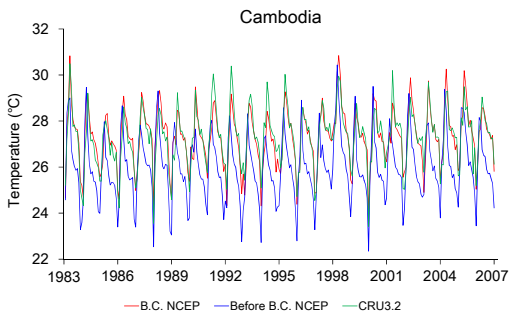


Figure 3.4 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Cambodia

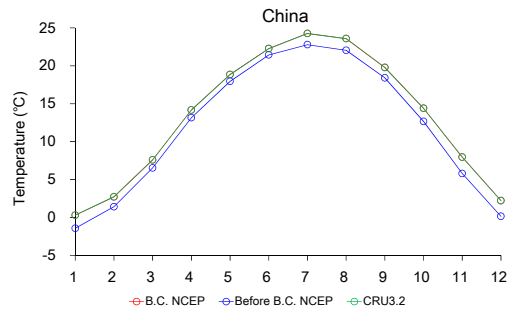
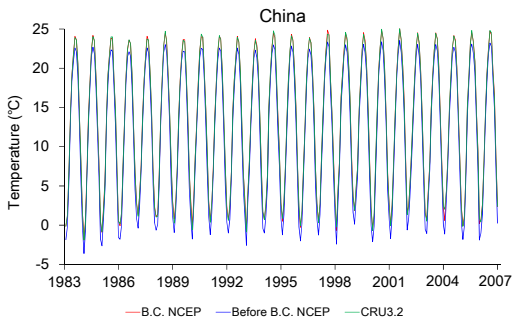


Figure 3.5 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in China

Cambodia의 경우(Figure 3.4) CRU 3.2 관측 자료는 1월부터 기온이 증가하여 4월을 정점으로 12월까지 지속적으로 기온이 감소하는 특성을 나타내고 있다. 월 평균기온은 4월에 약 29.3°C로 가장 높게 나타나고 있으며 12월에 약 25.4°C로 가장 낮게 나타나고 있지만 그 차이는 3.9°C로 연중 기온의 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. Before B.C. NCEP의 경우 CRU 3.2 관측 자료와 달리 3월에 연중 최고기온을 보이고 있으며 4월에서 12월까지 평균적으로 약 1.8°C의 차이를 보이고 있다. China의 경우

(Figure 3.5) 전체적으로 Before B.C. NCEP의 기온이 CRU 3.2 보다 약 1.4°C 낮은 값을 보이고 있으며 CRU 3.2의 월 평균기온은 7월에 약 24.3°C 로 가장 높게 나타나고 있으며 1월에 약 0.3°C 로 가장 낮게 나타나고 있다. 또한 24년간 가장 더웠던 달은 2001년 7월로 평균기온이 약 25.02°C 이었고 가장 추웠던 달은 1984년 1월로 평균기온이 약 -1.90°C 이었다.

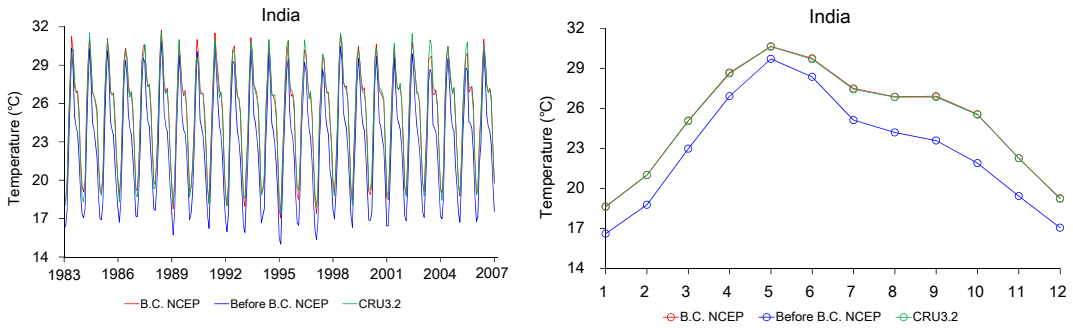


Figure 3.6 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in India

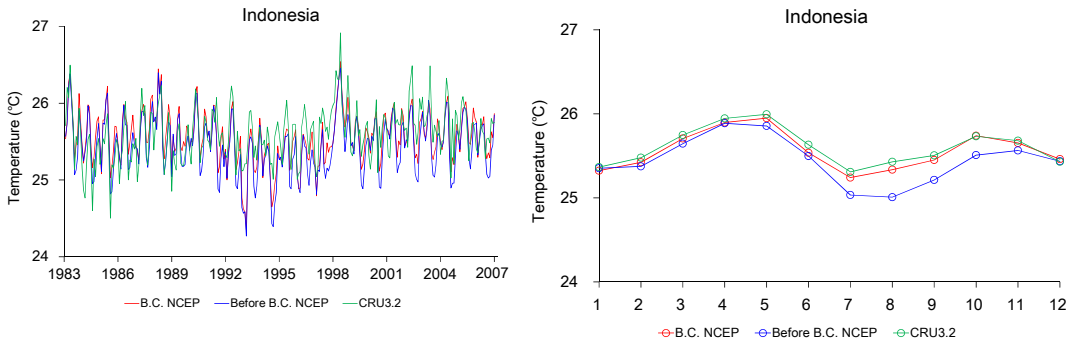


Figure 3.7 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Indonesia

India의 경우(Figure 3.6) CRU 3.2 관측 자료에 의하면 5월의 평균기온이 약 30.6°C로 가장 높게 나타나고 있으며 1월에 약 18.6°C로 가장 낮게 나타나고 있다. 또한 24년간 가장 더웠던 달은 1988년 5월로 평균기온이 약 31.54°C이었고 가장 추웠던 달은 1995년 1월로 평균기온이 약 17.45°C 이었다. Before B.C. NCEP의 기온은 CRU 3.2 관측 자료와 비교해 전체적으로 2.3°C 작게 나타나고 있다. Indonesia의 경우(Figure 3.7) 왼쪽 그래프의 경년변동이 상당히 불규칙하게 나타나고 있는 가운데 연중 기온변화가 0.7°C를 넘지 않고 있어 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있다. CRU 3.2 관측 자료에 의하면 5월의 평균기온이 약 26.0°C로 가장 높게 나타나고 있으며 7월의 평균기온이 약 25.3°C로 가장 낮게 나타나고 있다. Before B.C. NCEP과 CRU 3.2 관측 자료의 전체적인 기온차이 역시 약 0.2°C로 큰 차이를 보이고 있지 않다.

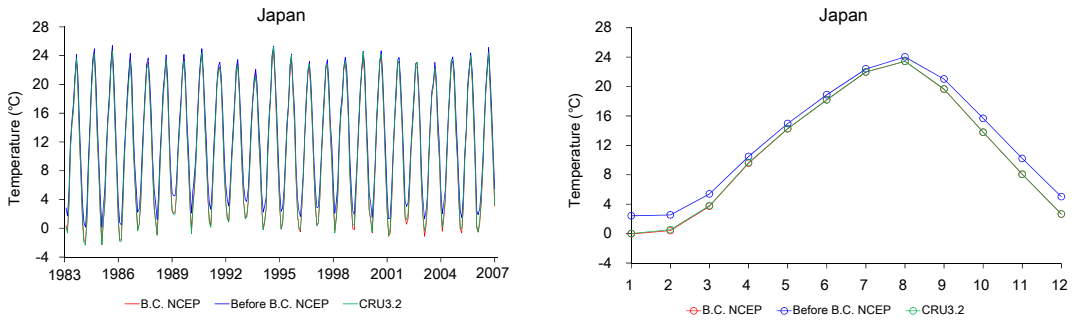


Figure 3.8 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Japan

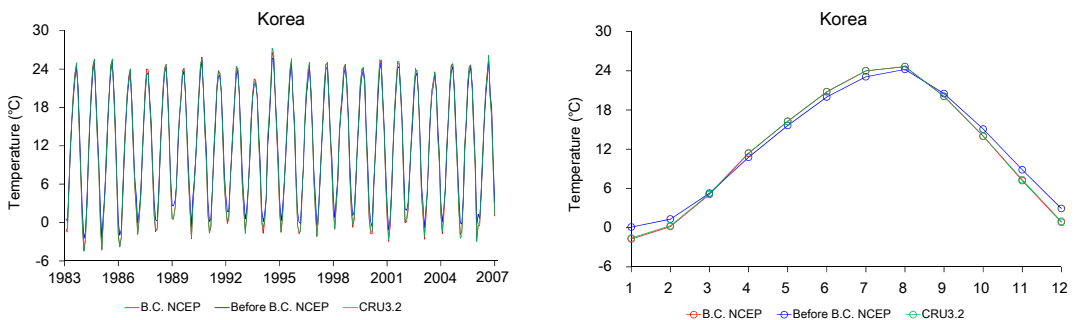


Figure 3.9 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Korea

근접하게 위치하고 있는 Korea와 Japan의 경우 CRU 3.2 관측 자료에 의하면 8월의 평균기온이 각각 약 24.6°C와 23.4°C로 가장 높게 나타나고 있으며 1월의 평균기온이 각각 약 -1.6°C와 0.0°C로 가장 낮게 나타나고 있다. 24년간 가장 더웠던 달은 Korea의 경우 1994년 7월로 평균기온이 약 27.26°C이었고 Japan의 경우 1994년 8월로 평균기온이 약 25.17°C 이었다. 반면 24년간 가장 추웠던 달은 Korea의 경우 1983년 1월로 평균기온이 약 -4.47°C이었고 Japan의 경우 1983년 2월로 평균기온이 약 -2.34°C 이었다. Before B.C. NCEP의 기온은 CRU 3.2 관측 자료와 비교해 Japan에서는 전체적으로 약 1.4°C 높게 나타나고 있으나 Korea에서는 4월에서 8월까지 약 0.7°C 낮게 나타나고 있으며 9월에서 3월까지 약 1.0°C 높게 나타나고 있다.

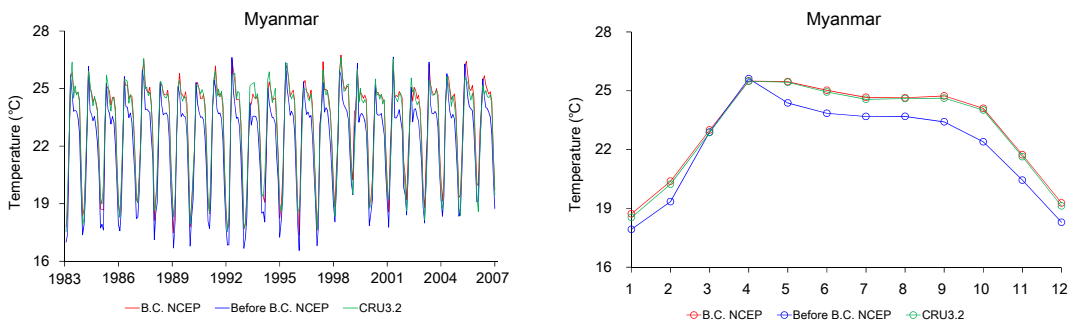


Figure 3.10 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Myanmar

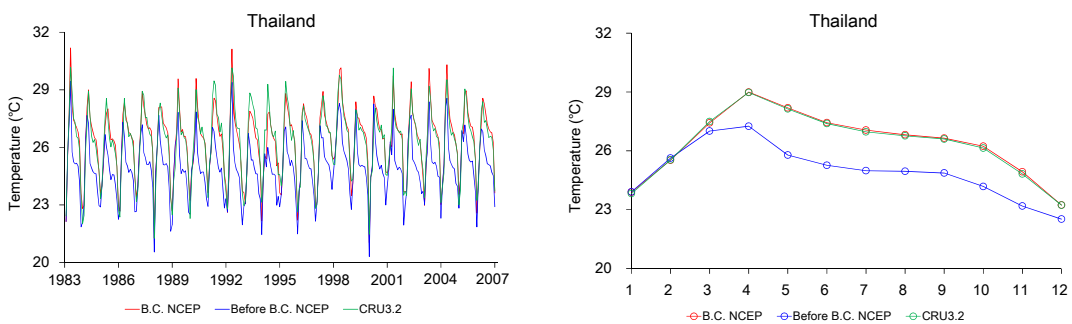


Figure 3.11 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Thailand

Myanmar와 Thailand의 경우 CRU 3.2 관측 자료에 의하면 1월에서 4월까지 기온이 증가하고 4월을 정점으로 12월까지 감소하는 특징을 나타내고 있다. 4월의 평균기온은 각각 약 25.5℃와 29.0℃로 가장 높은 값을 보이며 1월의 평균기온은 약 18.5℃와 23.8℃로 가장 낮은 값을 보이고 있다. 24년간 가장 더웠던 달은 Myanmar의 경우 1998년 5월로 평균기온이 약 26.63℃이었고 Thailand의 경우 1983년 4월로 평균기온이 약 30.17℃ 이었다. Before B.C. NCEP의 기온은 CRU 3.2 관측 자료와 비교해 Myanmar에서는 3월에서 4월까지 약 0.1℃ 높게 나타나고 있으며 Thailand에서는 1월에서 2월까지 약 0.1℃ 높게 나타나고 있다. 하지만 그 외 기간에 대해서는 각각 약 1.0℃와 1.7℃ 낮게 나타나고 있다.

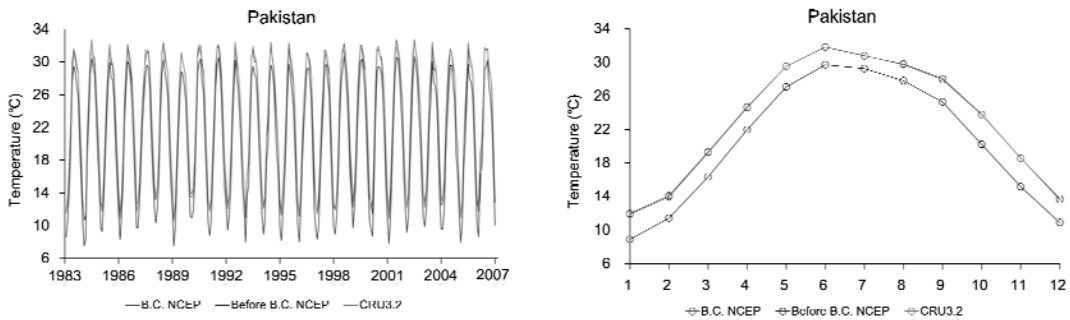


Figure 3.12 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Pakistan

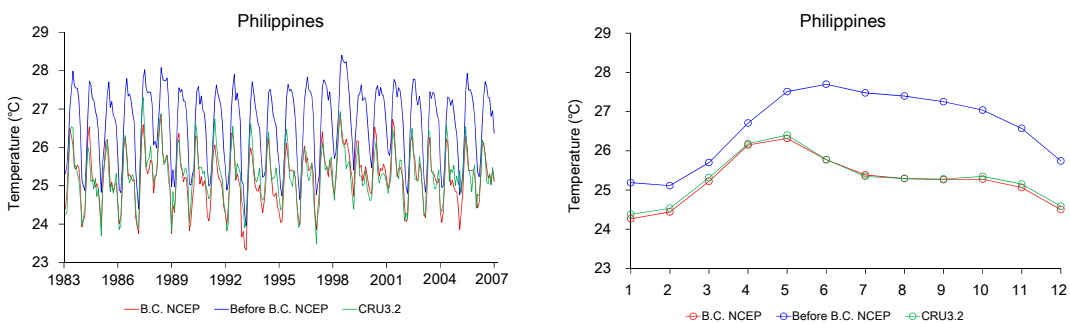


Figure 3.13 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP data in Philippines

Pakistan의 경우(Figure 3.12) Before B.C. NCEP의 기온은 CRU 3.2 관측 자료와 비교해 전체적으로 약 2.6°C 낮게 나타나고 있으며 CRU 3.2 관측 자료에 의하면 6월의 평균기온이 약 31.9°C로 가장 높고 1월의 평균기온이 11.9°C로 가장 낮게 나타나고 있다. Philippines의 경우(Figure 3.13) 1983년부터 2006년까지 Before B.C. NCEP의 월 평균 기온에 대한 경년변동을 보면 전체적으로 CRU 3.2 관측 자료에 비해 상당히 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 24년 평균의 월별 기온 값에서도 CRU 3.2 관측 자료의 월 최고 기온과 최저 기온의 차이가 약 2.0°C로 연중 기온변화가 크지 않음에도 불구하고 Before B.C. NCEP의 기온과 CRU 3.2 관측 자료의 차이가 평균적으로 약 1.3°C로 크게 나타나고 있다.

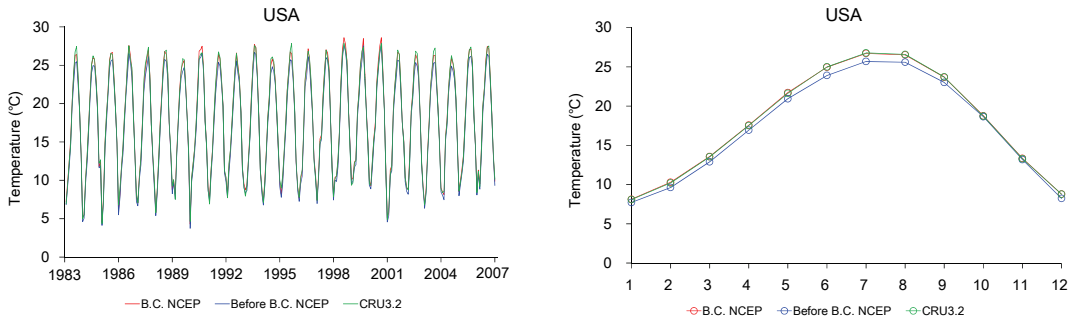


Figure 3.14 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP reanalysis data in the USA

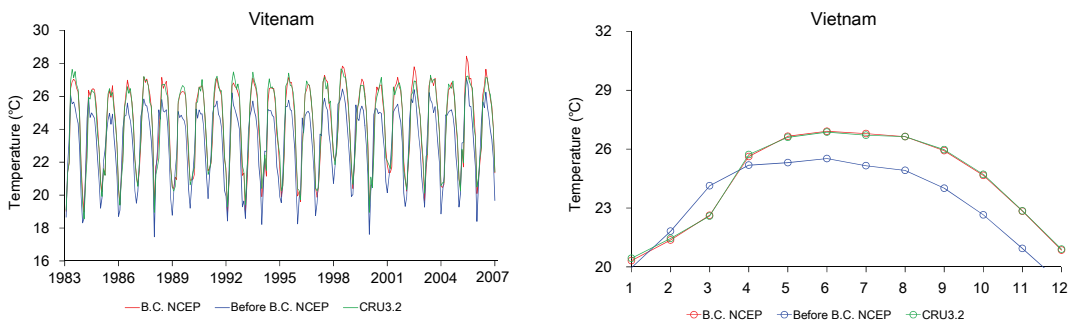


Figure 3.15 Annual temperature changes of before and after B.C. NCEP reanalysis data in Vietnam

USA의 경우(Figure 3.14) 전체적으로 Before B.C. NCEP의 기온 값이 CRU 3.2 관측 자료보다 약 0.6°C 작게 나타나고 있으며 CRU 3.2 관측 자료에 의한 7월의 평균 기온은 약 26.8°C로 가장 높고 1월의 평균기온은 8.1°C로 가장 낮게 나타나고 있다. 마지막으로 Vietnam의 경우(Figure 3.15) Before B.C. NCEP의 기온은 CRU 3.2 관측 자료와 비교해 2월에서 3월에 약 1.0°C 높게 나타나고 있으나 그 외 기간에는 약 1.5°C 높게 나타나고 있다. CRU 3.2 관측 자료에 의한 7월의 평균기온은 약 26.9°C로 가장 높게 나타나고 있으며 1월의 평균기온은 20.4°C로 가장 낮게 나타나고 있어 연중 월 최고 기온과 최저기온의 차이가 약 6.4°C 정도 나타나는 것을 확인할 수 있다.

CRU 3.2 관측 자료가 반드시 NCEP 재분석 자료보다 정확도가 높다고는 말하기 어렵지만 본 연구에서는 일 단위 NCEP 재분석 자료의 신뢰성 재고를 위해 전지구 규모의 기후관측 자료로 사용되고 있는 CRU 3.2 자료를 바탕으로 bias 보정을 실시했다. NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2의 기온 관측 자료를 비교 분석한 결과 지역에 따라 상당한 차이가 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.1.2 계절예측자료 분석

APCC에서 제공되는 6개월 Hindcast 자료의 신뢰성을 평가하기 위해 B.C. NCEP 재분석 자료와 비교를 통해 아래와 같이 분석을 실시하였다. 여기서는 전 세계적으로 쌀 생산량이 가장 많은 국가인 China와 India에 대해 분석을 실시하였고 우리나라와 미국에 대해서도 분석을 실시해 그 결과를 정리하였다. 분석에는 총 6개 기후예측모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncep), PNU(pnu1), POAMA(poma))의 Hindcast 자료가 이용되었으며 공통의 예측기간인 1983년부터 2006년까지의 24년간에 걸친 예측자료에 대한 분석이 이루어졌다. Figure 3.16은 can3 기후예측모형의 1983년에서 2006년까지의 24년에 대한 월평균 기온 분포도로 본 연구에서 작물수확량 예측을 위해 이용되는 6개월(7월-12월)의 기후예측 자료 중 북반구의 쌀 생산에 영향이 큰 7월에서 9월까지의 기온 분포를 나타내고 있으며 can3 모형에 대한 bias 보정전과 보정후의 지역에 따른 차이를 보여주고 있다.

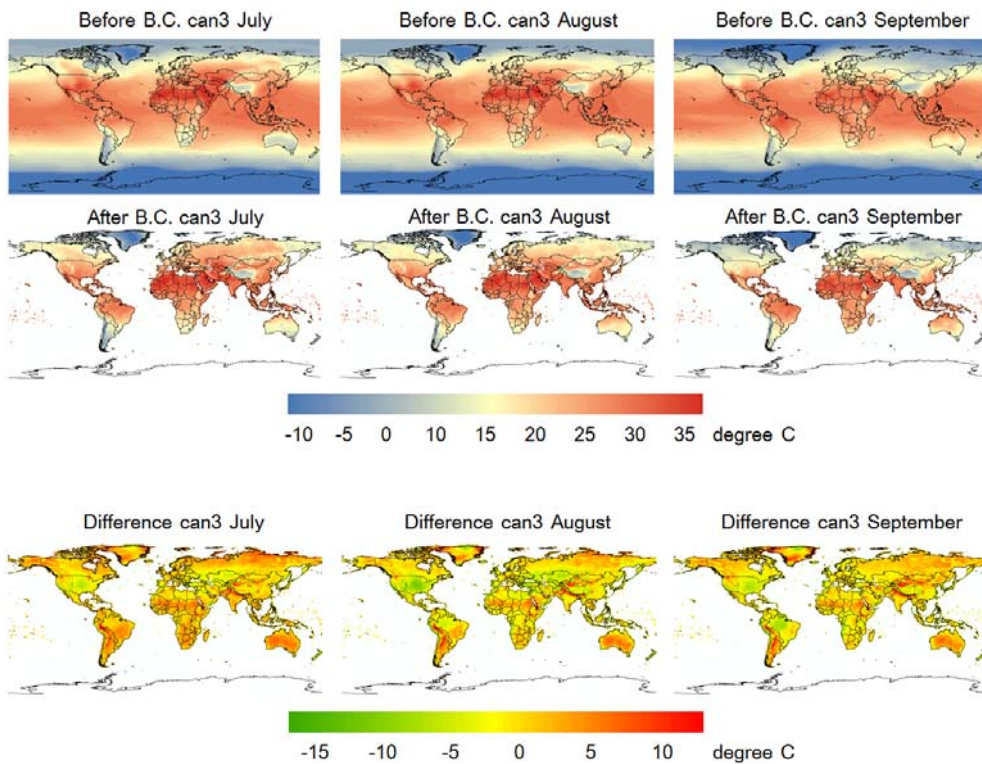


Figure 3.16 Average temperature of before and after B.C. can3 model and differences

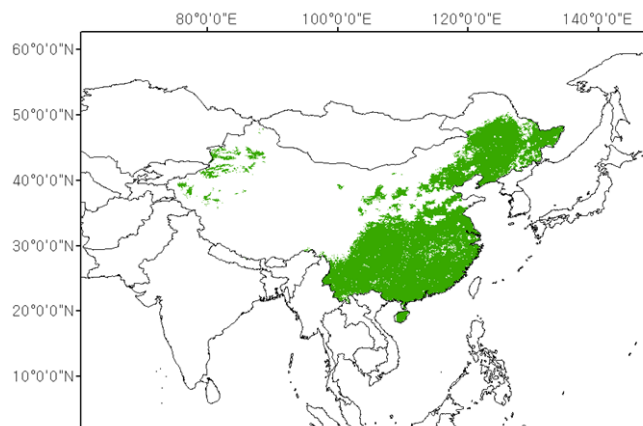


Figure 3.17 Harvested area of rice in China

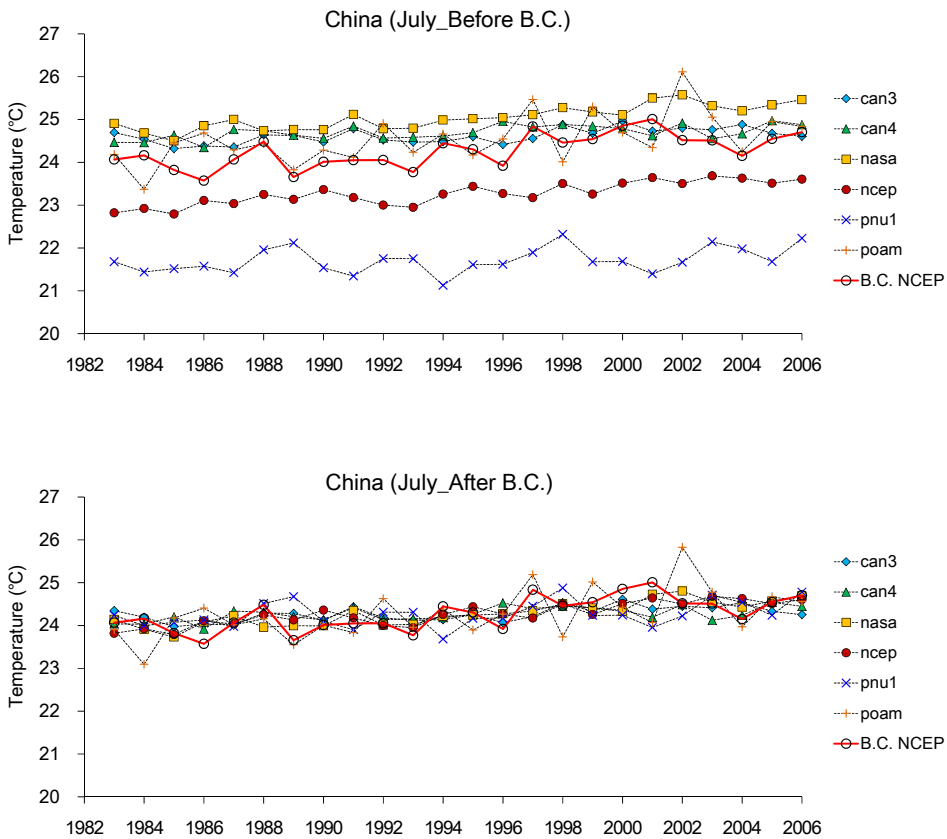


Figure 3.18 Annual temperature changes of before and after B.C. GCM in July in China

본 연구에서는 최종적으로 계절예측자료를 활용해 쌀 수확량 예측의 불확실성 및 신뢰성을 평가하고자 하기 때문에 쌀 생산이 실제로 이루어지고 있는 지역에 대해서만 기후예측모형의 결과 값을 추출하였다. China나 India, USA 등 영토면적이 넓은 국가는 기후예측자료를 국가단위로 평균해 분석하는 것이 큰 의미가 없기 때문에 쌀 생산지역에 대한 분석이 필요하다. 전 지구 쌀 생산면적에 대한 정보는 2.2.3.1에서 소개된 Monfreda et al. 2008의 글로벌 쌀 수확 면적 자료를 이용했다. Figure 3.17은 China에서 쌀 생산이 이루어지고 있는 지역을 나타내고 있으며 공간 해상도 5'×5'의 격자 안

에서 5% 이상 쌀 생산이 이루어질 경우 해당 격자는 쌀 생산이 이루어지는 지역으로 판단되도록 설정되었다. China 지역에 대한 계절예측 자료는 쌀 수확 면적 자료를 바탕으로 한 Masking 작업을 통해 China 평균 기후예측 값으로 산출되어 기후모형 간 비교가 실시되었다. 각각의 기후예측 모형의 Hindcast 예측 결과에 어느 정도 Bias가 포함되어 있는지 분석하기 위해 3.1.1.1에서 CRU 3.2 관측 자료를 기준으로 재생산된 B.C. NCEP 재분석 자료와 비교를 실시했다. Figure 3.18의 위쪽 그래프는 Bias 보정 전 각 기후예측 모형의 China 쌀 생산지역에 대한 7월 평균기온 경년변동을 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료를 보면 1983년에서 2006년까지 24년 간 7월 평균기온은 약 24.3℃ 였으며 최고 25.0℃와 최저 23.6℃ 사이에서 변화를 반복하면서 약 0.87℃ 상승한 것으로 나타났다. 6개 기후예측 모형 중 can3와 ncep, pnu1 모형에서는 B.C. NCEP 재분석 자료보다 기온이 낮게 예측됐고 나머지 세 모형에서는 높게 예측됐다. 특히 pnu1 모형은 약 2.56℃ 낮게 예측된 것으로 나타났다. Figure 3.18의 아래 그래프는 Bias가 보정된 기후예측 모형과 NCEP 재분석 자료를 나타내고 있으며 can3, can4, nasa, ncep, pnu1 모형의 변동 폭은 B.C. NCEP 재분석 자료의 1.43℃보다 작게 나타나고 있으나 poam 모형의 변동 폭은 2.73℃로 변동이 크게 나타나고 있다.

예측 모형의 Bias 보정 전후에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 B.C. NCEP 재분석 자료를 바탕으로 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, 이하 RMSE)와 시계열 상관관계수(Temporal Correlation Coefficient, 이하 TCC) 분석을 실시했다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.1)$$

$$TCC = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

여기서 $n = 24$ 년, y_i = 계절예측 자료, x_i = B.C. NCEP 재분석 자료, \bar{x}, \bar{y} = 24년 평균값

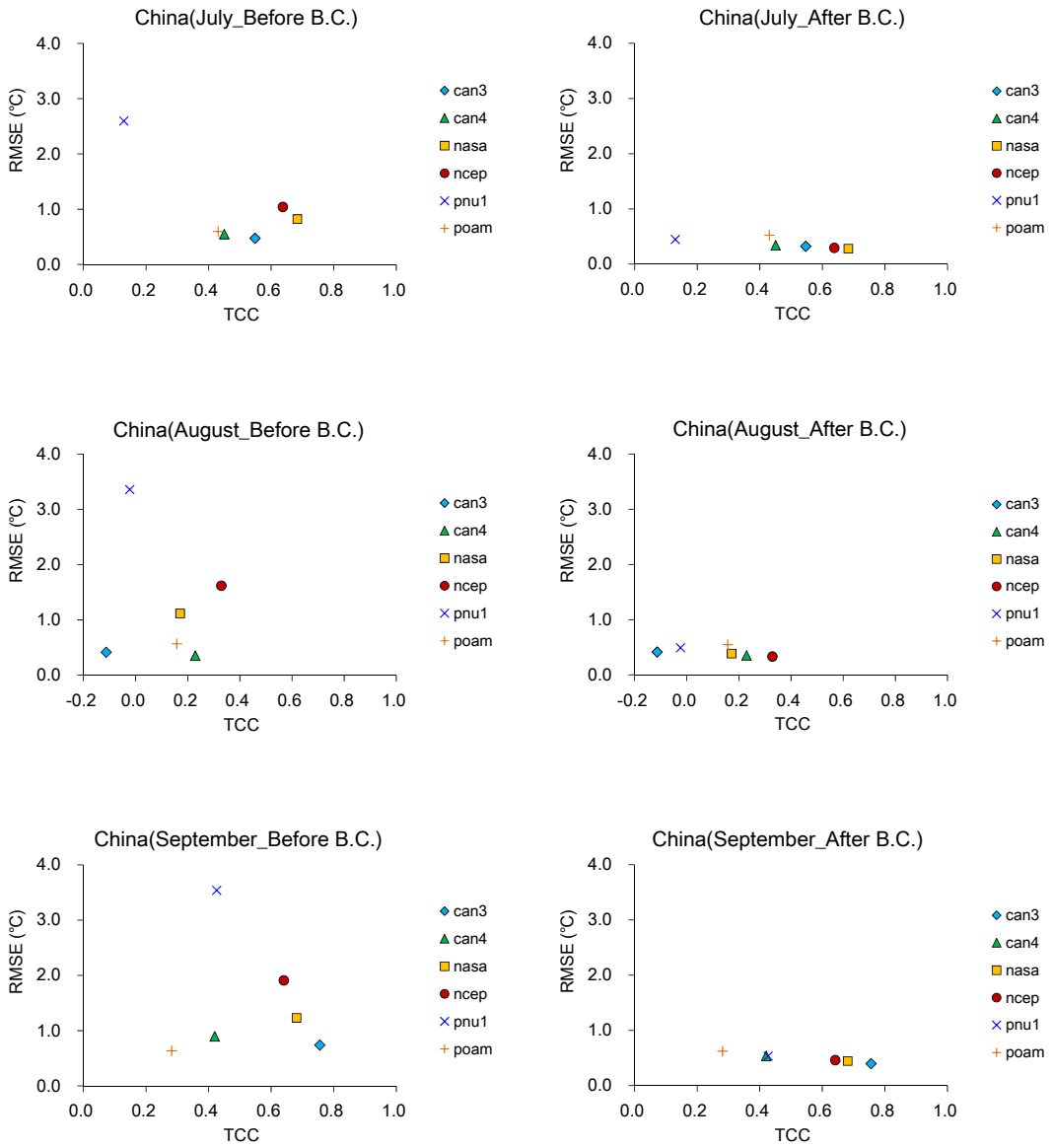


Figure 3.19 RMSE and TCC analysis before and after B.C. GCM from July to September in China

Figure 3.19는 기후예측 모형의 Bias 보정 전(왼쪽 그래프)과 후(오른쪽 그래프)의 China의 7월, 8월, 9월 평균기온 예측 결과에 대한 RMSE 분석과 TCC 분석 결과를 나타내고 있다. Bias 보정을 실시함으로써 RMSE가 전체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며 pnu1 모형의 경우 Bias 보정 전의 다른 모형과 비교해 상당히 크게 감소한 것을 알 수 있다. TCC 분석 결과를 보면 7월에 nasa와 ncep 모형이 0.6 이상으로 상대적으로 높은 상관성을 보이는 반면 8월에는 모든 모형에서 0.5 이하의 상관성을 보였으며 마이너스(-)의 상관성을 보이는 모형도 있었다. 9월에는 can3, nasa, ncep 모형에서 0.6 이상의 상대적으로 높은 상관성을 나타내고 있다.

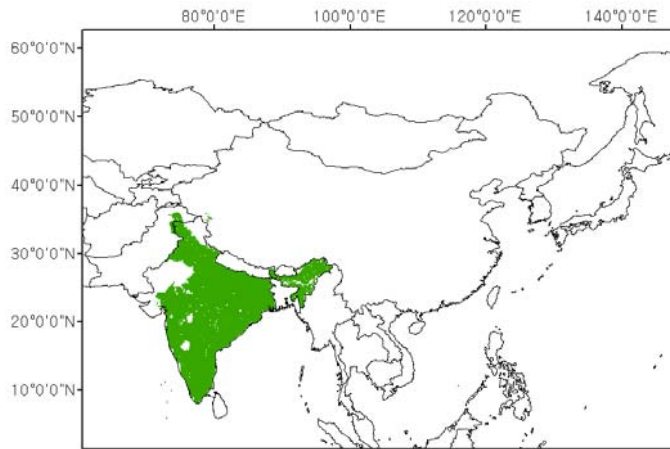


Figure 3.20 Harvested area of rice in India

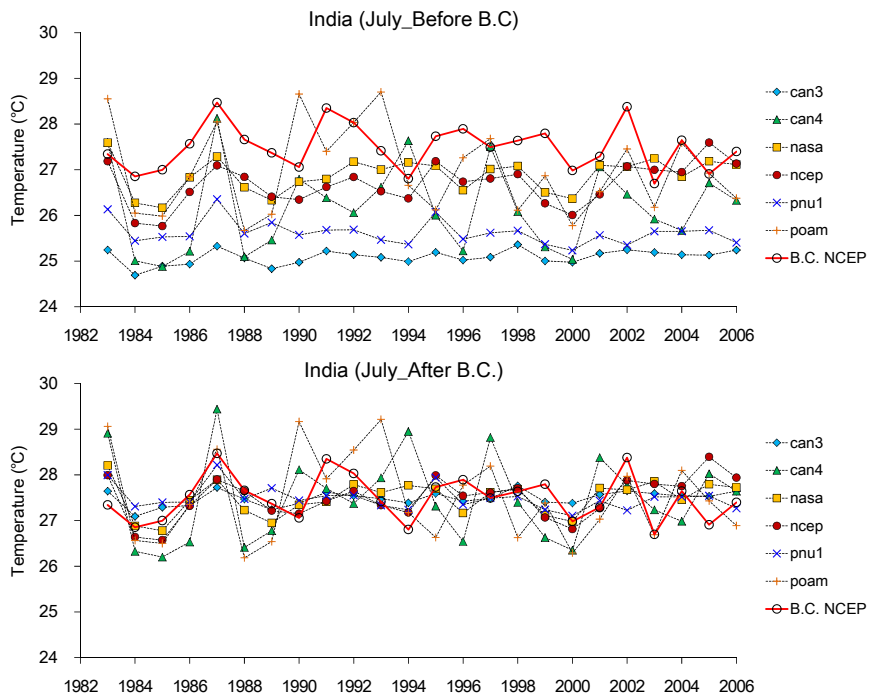


Figure 3.21 Annual temperature changes of before and after B.C. GCM in July in India

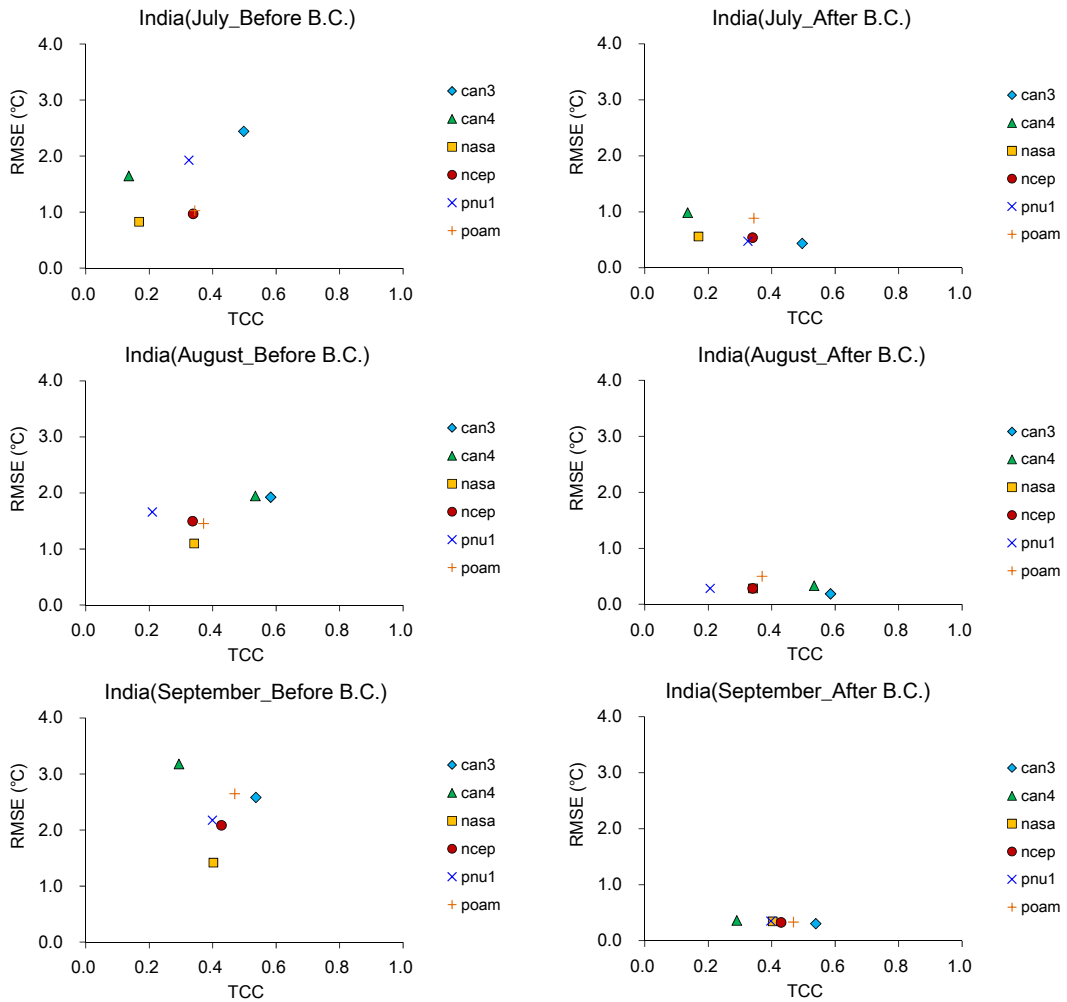


Figure 3.22 RMSE and TCC analysis before and after B.C. GCM from July to September in India

India는 전 세계에서 쌀 생산면적이 가장 넓은 국가로 Figure 3.20을 통해 India의 상당 부분에서 쌀 생산이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. Figure 3.21은 Bias 보정 전과 보정 후의 India 쌀 생산지역에 대한 7월 평균기온 경년변동을 나타내고 있다. Bias 보정 전 기후예측 모형 중 can3 모형에서 약 2.4℃ 낮게 예측되었고 모든 모

형이 낮게 예측되고 있는 것을 확인할 수 있었다. Figure 3.22의 RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 Bias 보정 전과 비교해 Bias 보정 후 8월과 9월의 RMSE가 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났으나 TCC는 전체적으로 0.6보다 작게 나타났다. RMSE 분석과 TCC 분석을 동시에 고려했을 때 India의 쌀 생산지역에 대한 계절예측모형의 신뢰도는 can3 모형이 가장 높은 것으로 나타났으며 7월과 9월에 can4 모형이 가장 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

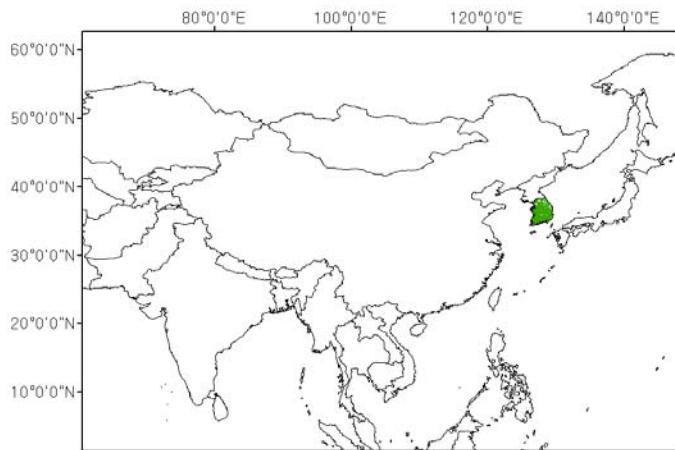


Figure 3.23 Harvested area of rice in Korea

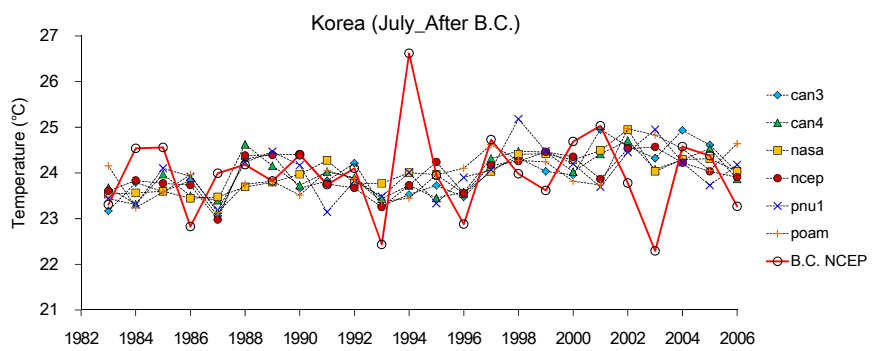
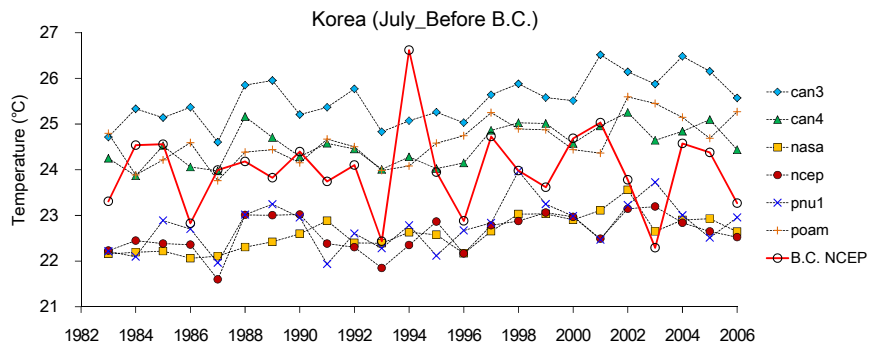


Figure 3.24 Annual temperature changes of before and after B.C. GCM in July in Korea

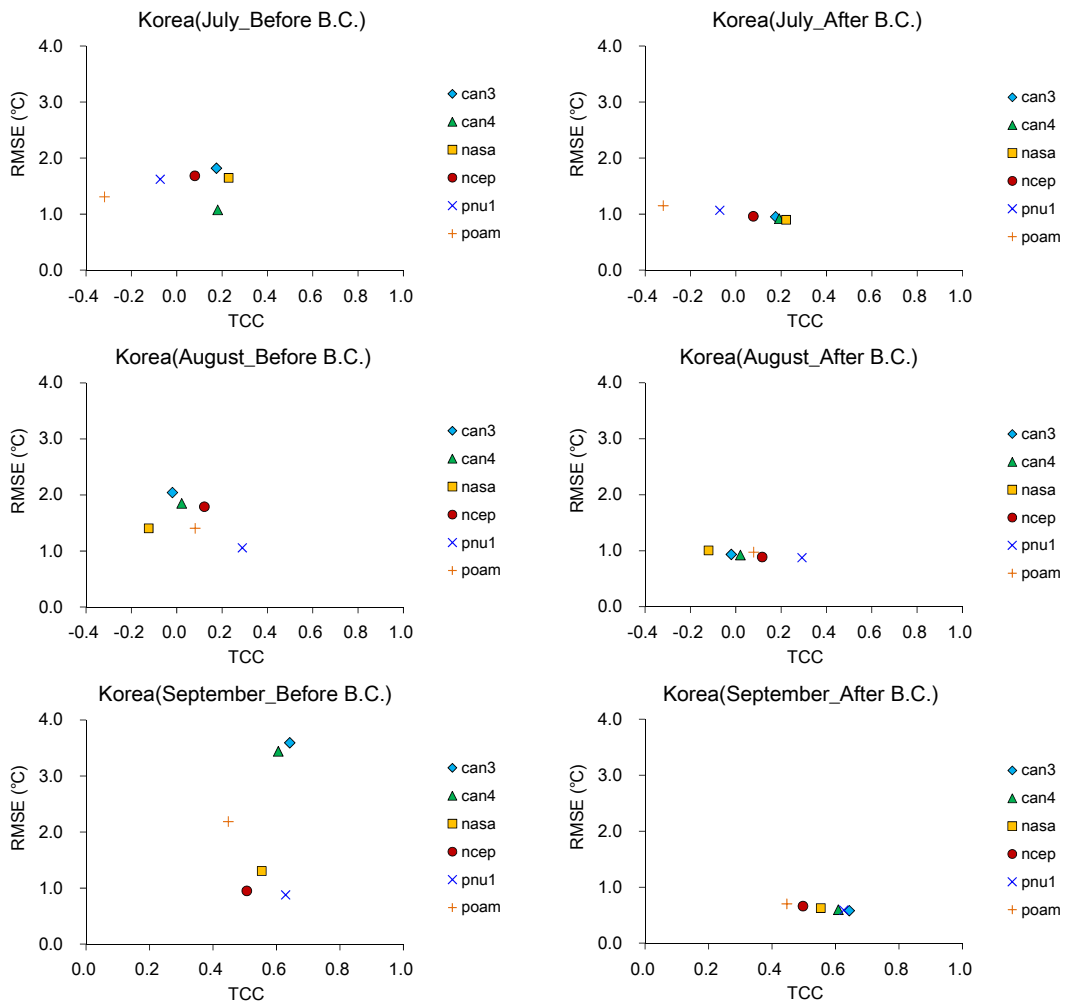


Figure 3.25 RMSE and TCC analysis before and after B.C. GCM from July to September in Korea

우리나라는 14개 주요 쌀 생산 국가 중 쌀 생산면적이 가장 작은 나라지만 도시지역과 산림지역을 제외한 대부분의 국토에서 쌀 생산이 이루어지고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료를 보면 쌀 생산지역에 대한 7월 평균기온은 24°C를 나타내고 있으며 Bias 보정 전 can3, can4, poam 모형에서 기온이 높게 예측되었고 나머지 모형에서는 낮게 예

측되었다. 특히 can3 모형은 평균적으로 1.6°C 높게 예측되고 있었다. Bias 보정 후 모든 예측 모형의 변동폭은 B.C. NCEP 재분석 자료보다 작게 나타나고 있으며 1994년 7월 우리나라에 26.6°C의 고온현상이 발생했으나 기후예측 모형에서는 예측하지 못한 것으로 나타났다. 또한 RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 7월과 8월에 대한 예측성이 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

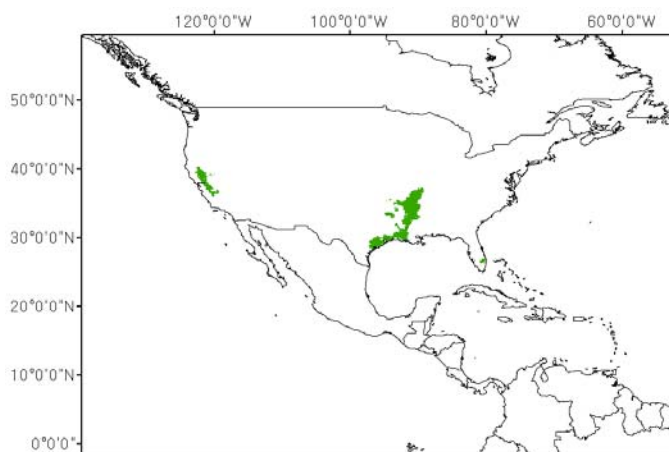


Figure 3.26 Harvested area of rice in USA

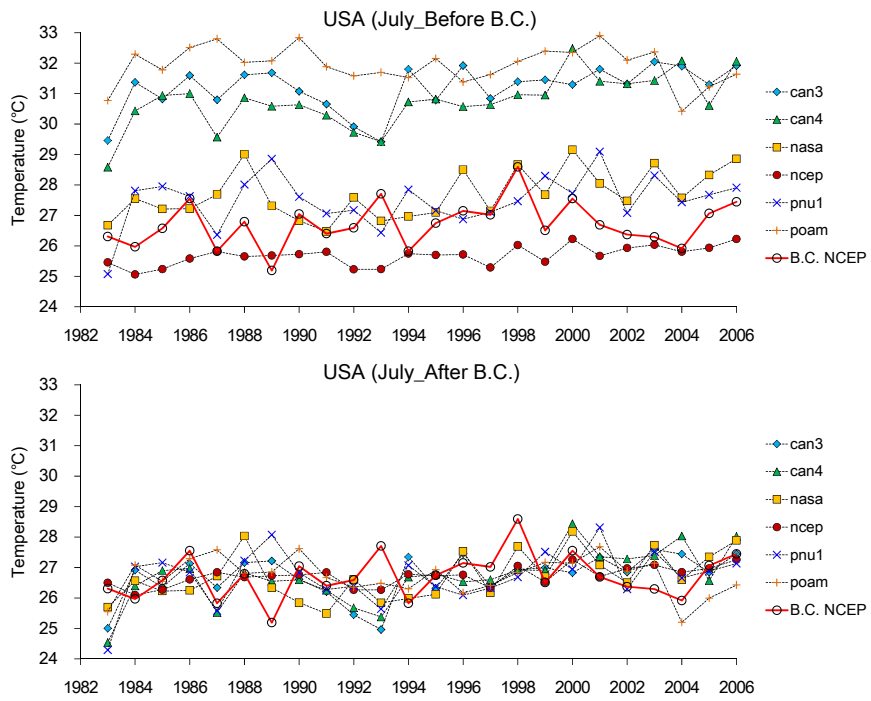


Figure 3.27 Annual temperature changes of before and after B.C. GCM in July in USA

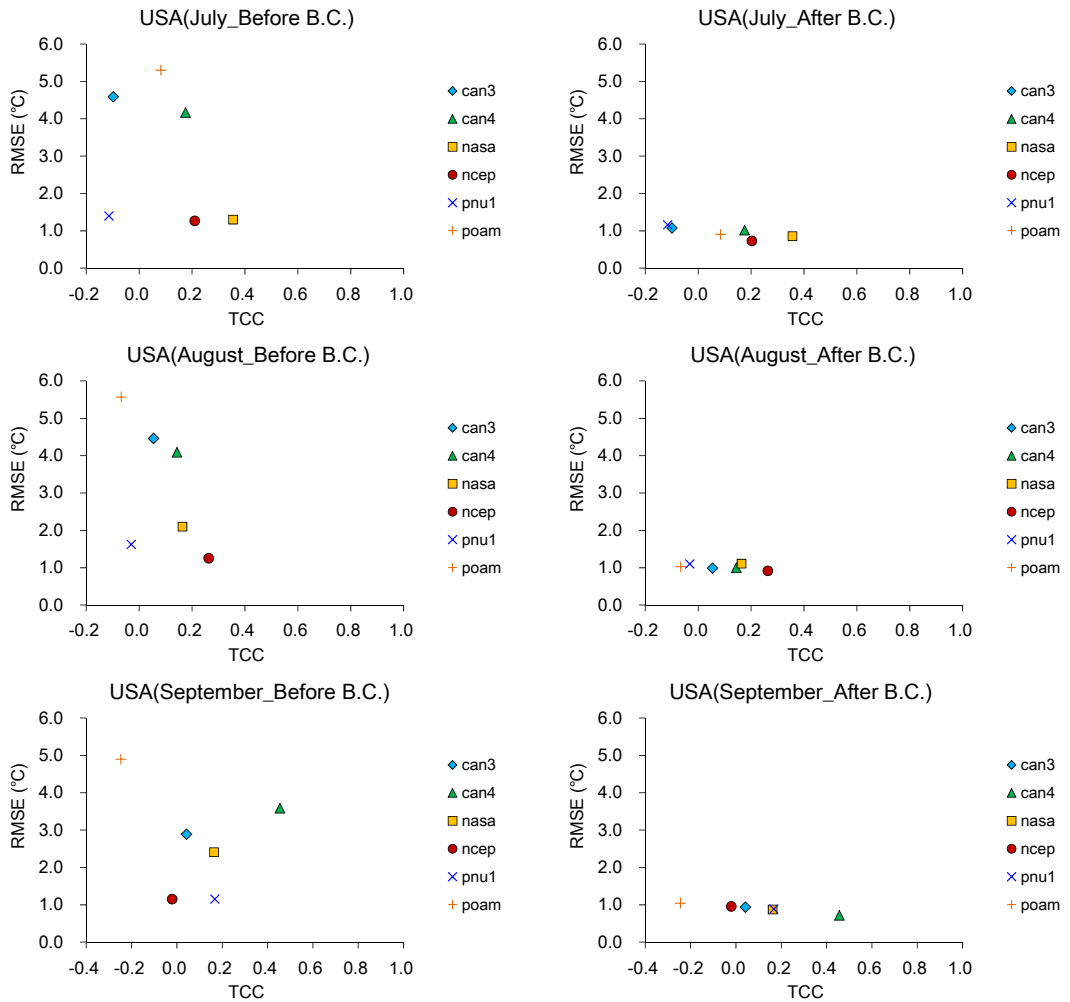


Figure 3.28 RMSE and TCC analysis before and after B.C. GCM from July to September in USA

USA의 쌀 생산은 주로 Arkansas 지역과 Texas 남부지역 그리고 California와 Florida의 일부 지역에서 이루어지고 있으며 국토면적에 비해 쌀 생산면적은 넓지 않지만 세계에서 가장 높은 쌀 생산성을 보이고 있다. 쌀 생산지역에 대한 7월 평균기온은 26.7°C를 나타내고 있으며 Bias 보정 전 6개 모형 중 ncep 모형을 제외한 5개 모형에

서 기온이 높게 예측되었다. 특히 poam 모형에서는 평균적으로 5.2 °C 높게 예측되었다. RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 Bias 보정 후 RMSE는 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났으나 TCC는 모든 모형에서 0.4 이하로 나타났으며 모형에 따라 음(-)의 상관성을 보이기도 해 쌀 생산지역이 멀리 떨어져 있는 문제도 존재하지만 계절예측모형의 신뢰성이 다른 세 국가에 비해 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다.

3.1.2 계절예측자료 생산

3.1.2.1 Bias 보정 일 단위 예측자료 생산

작물모형에 입력되는 기후자료는 기본적으로 일 단위 정보가 요구되고 있으나 본 연구에서 활용하고자하는 계절예측자료는 월 단위 자료로만 제공되고 있어 일 단위 기후자료의 재생산 과정이 필요하다. 기존 연구에서는 월 단위 자료에 대해 단순 선형 회귀식을 적용하는 방식으로 간단하게 일 단위 기후자료를 생산해 사용하기도 하지만 보다 정확도 높은 작물 수확량 시뮬레이션을 위해서는 과학적 근거에 기반 한 일 단위 기후자료의 생산이 요구된다. 본 연구에서는 기초적인 단계이기는 하지만 과거 40년간(1971년-2010년)의 일 단위 관측 자료를 이용하는 방법이 제안되었다. 먼저 Bias 보정된 각 기후모형의 월 단위 기온 예측자료와 가장 근사한 값을 갖는 과거 40년간의 월 기온 자료를 선택하여 해당 월 자료에 포함되어있는 다양한 기후변수의 일 단위 자료를 글로벌 스케일의 일 단위 예측자료로 재생산했다. Figure 3.29 는 China 쌀 생산지역에 대해 Bias 보정된 계절예측 모형의 6개월(7월-12월) 예측 자료 중 7월에 대한 예측 결과를 나타내고 있으며 각 계절예측 모형의 7월 평균 기온과 가장 근사한 B.C. NCEP 재분석 자료 추출을 통해 작성되었다. 그래프에 나타나고 있는 계절예측 모형의 값은 지난 40년간의 관측 자료로부터 추출되어 작성된 것으로 실제 B.C. NCEP 재분석 자료의 경년변동과 비교해 모형에 따라 그 폭이 다양하게 나타나고 있다. 경년변동 폭이 작은 것은 Bias 보정하는 과정에서 B.C. NCEP 재분석 자료의 기후값(Climatology)에 편차가 더해지더라도 계절예측 모형의 편차(Anomaly)가 작아 기후값에서 크게 벗어나지 못한 것으로 해석할 수 있다.

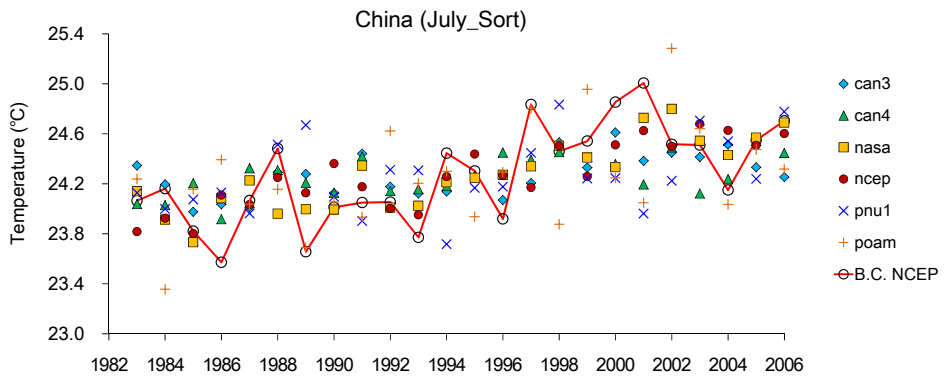


Figure 3.29 Average temperature changes of seasonal predictions in July in China

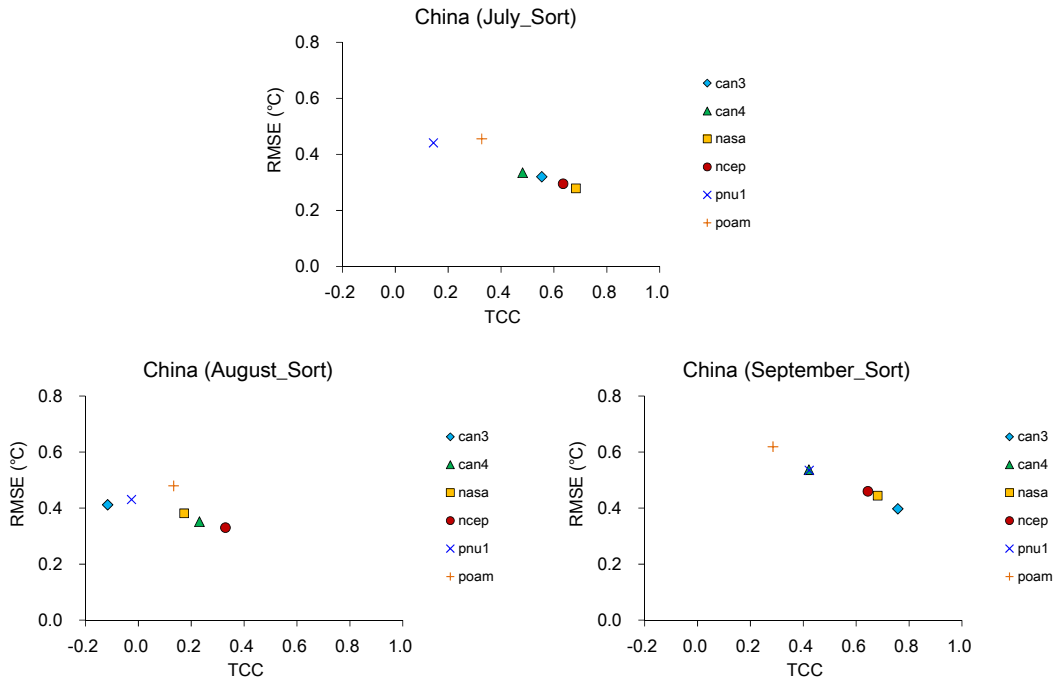


Figure 3.30 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions from July to September in China

과거 40년간의 B.C. NCEP 재분석 자료로부터 재생산된 각 계절예측 모형의 기후예측 결과에 대한 신뢰성 통계 분석이 RMSE 분석과 TCC 분석을 통해 실시되었다. Figure 3.30은 China 쌀 생산지역의 7월-9월 기온에 대한 6개 계절예측 모형의 신뢰성 통계 분석 결과를 나타내고 있다. 7월의 경우 RMSE는 전체적으로 0.28-0.45 사이에 분포하고 TCC는 0.14-0.68 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 예측결과의 신뢰성이 가장 높은 계절예측 모형은 nasa 모형으로 RMSE가 0.28이었고 TCC가 0.68이었다. 8월의 경우 RMSE는 0.33-0.48 사이에 분포하고 TCC는 -0.12-0.33 사이에 분포하고 있다. 신뢰성이 높은 모형은 ncep 모형으로 RMSE와 TCC가 각각 0.33, 0.32였다. 9월의 경우 RMSE는 0.39-0.62 사이에 분포하고 TCC는 0.29-0.76 사이에 분포하고 있다. 신뢰성이 높은 모형은 can3 모형으로 RMSE와 TCC가 각각 0.39, 0.76이었다. China 쌀 생산지역의 7월-9월 기온 예측에 대한 신뢰성 통계 분석 결과를 정리해보면 nasa와 ncep 모형이 다른 4개 모형과 비교해 상대적으로 높은 예측 신뢰도를 보이는 것으로 나타나고 있어 China 쌀 생산지역에 대한 기온 예측자료를 활용하는데 있어 좋은 참고 자료가 될 것으로 기대된다.

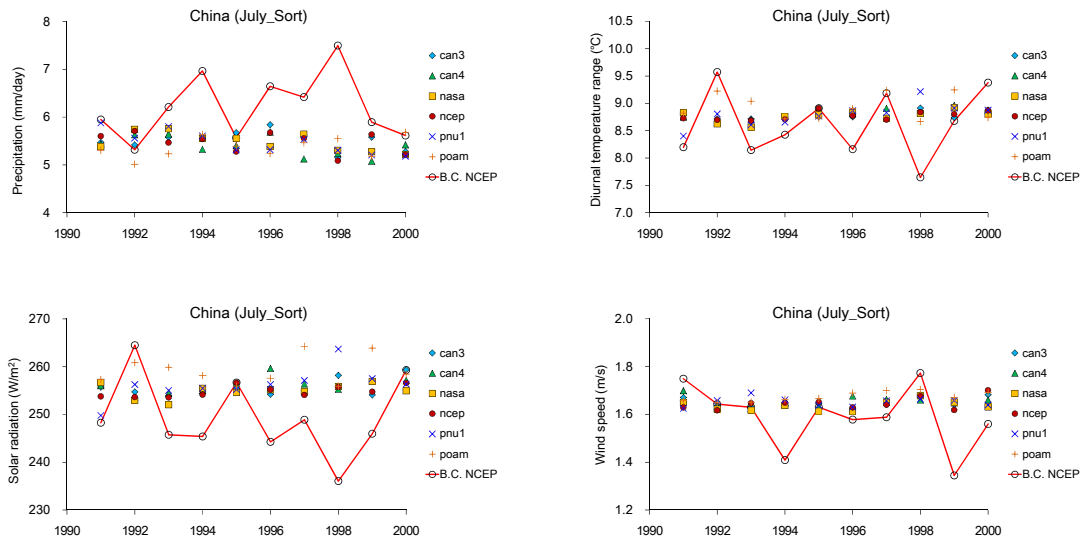


Figure 3.31 Average climate changes of seasonal predictions in July in China

Bias 보정 된 계절예측자료의 기온자료와 가장 근사한 B.C. NCEP의 기온자료를 바탕으로 재생산된 강수량 및 일교차, 일사량, 풍속의 각 계절예측 모형 별 기후예측 결과와 각 기후요소에 대한 예측의 신뢰성 통계 분석이 실시되었다. Figure 3.31은 China 쌀 생산지역의 1990년대 7월에 예측기후자료에 대한 모형별 변동 특성을 나타내고 있다. 강수량의 경우 B.C. NCEP의 10년간 7월 평균 강수량은 6.2mm/day로 나타났고 예측모형의 강수량은 5.4mm/day 에서 5.5mm/day의 값을 나타내 예측모형에서 전반적으로 강수량이 작게 나타나고 있다. 특히 B.C. NCEP의 경년변동성이 5.3mm/day에서 7.5mm/day로 변동 폭이 큰 반면 예측모형의 변동성은 모형간 차이는 있지만 대체로 변동 폭이 0.7mm/day 보다 작게 나타났다. 일교차의 경우 B.C. NCEP의 10년간 7월 평균 일교차는 8.6℃로 나타났고 예측모형의 일교차는 8.7℃에서 8.9℃의 값을 나타내 큰 차이가 없었지만 변동 폭을 보면 B.C. NCEP이 1.9℃로 큰 반면 예측모형에서는 전반적으로 1℃ 이하로 변동 폭이 작게 나타나고 있다. 일사량의 경우 B.C. NCEP의 10년간 7월 평균 일사량은 249W/m²으로 나타났고 예측모형의 일사량은 254W/m²에서 260W/m²의 값으로 B.C. NCEP보다 크게 나타나고 있으나 변동 폭을 보면 B.C. NCEP이 28W/m²로 큰 반면 예측모형에서는 전반적으로 15W/m² 이하로 변동 폭이 작게 나타나고 있다. 풍속의 경우 B.C. NCEP의 10년간 7월 평균 풍속은 1.59m/s로 나타났고 예측모형의 풍속역시 1.64m/s에서 1.67m/s의 값으로 B.C. NCEP보다 크게 나타나고 있으나 변동 폭을 보면 B.C. NCEP이 0.4m/s로 큰 반면 예측모형에서는 전반적으로 0.1m/s 이하로 변동 폭이 작게 나타나고 있다.

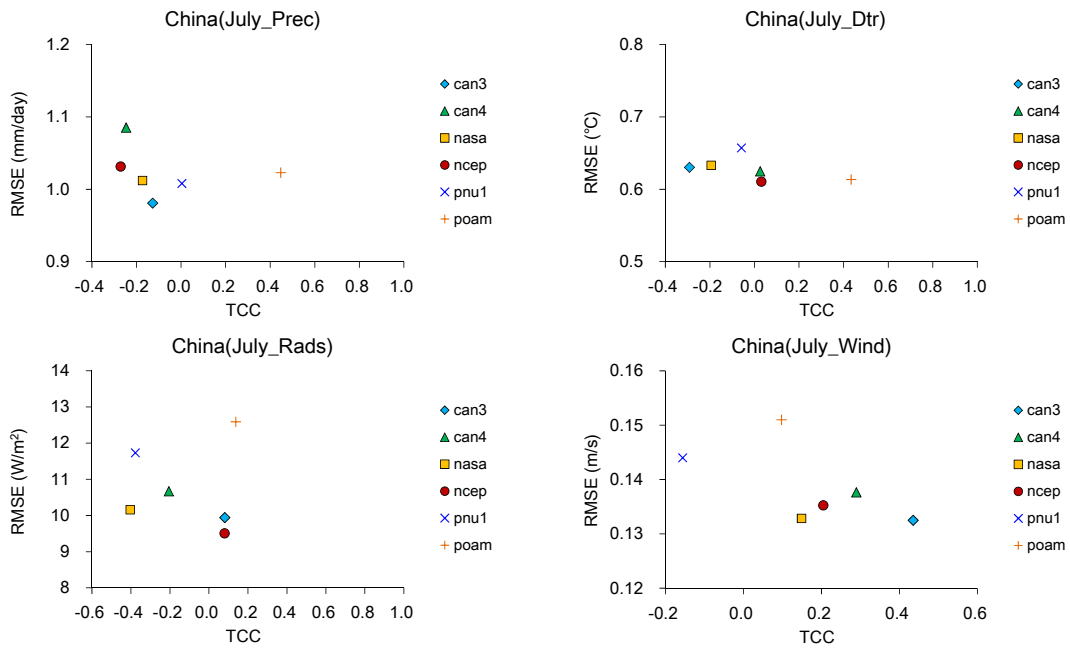


Figure 3.32 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions in July in China

Figure 3.32는 이상의 네 가지 기후요소에 대한 RMSE와 TCC 분석결과를 나타내고 있으며 강수량과 일교차, 일사량의 경우 TCC 분석에서 음(-)의 상관을 보이는 모형이 3개 이상 존재하는 것으로 나타나 신뢰성이 낮게 평가되고 있다. 이는 일 단위 계절 예측자료를 재생산 하는 과정에서 계절예측 자료의 기온자료와 가장 근사한 B.C. NCEP 기온자료에 해당하는 연/월의 기후자료를 그대로 가져왔기 때문에 기온자료 이외의 기후 자료에 대한 상관성이 떨어지는 것으로 판단된다. 이러한 문제점들은 계절예측자료의 일 단위 기후자료를 필요로 하고 있는 기후응용분야 연구에 적용하기에 앞서 해결되어야 할 것이고 본 연구의 후속연구를 진행하는 과정에서 날씨 생성기(Weather generator) 등을 이용한 좀 더 발전된 방법을 찾아 해결해 나가고자한다.

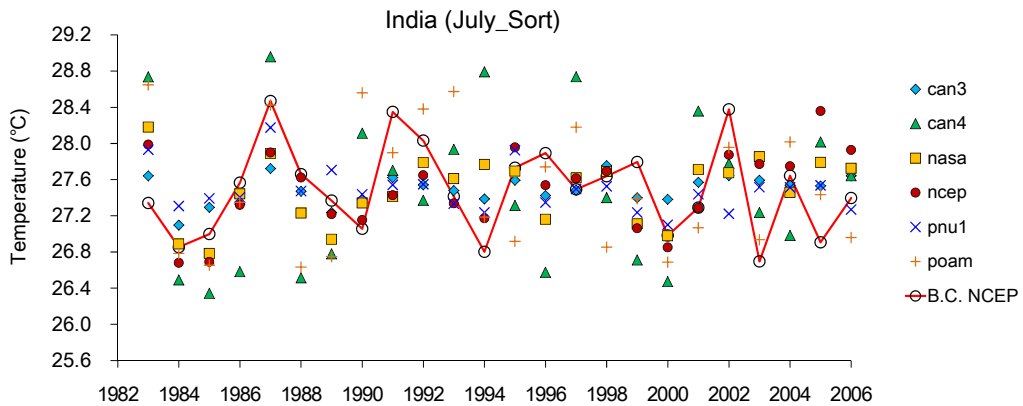


Figure 3.33 Average temperature changes of seasonal predictions in July in India

Figure 3.33는 India 쌀 생산지역에 대해 재생산된 계절예측 모형의 7월 평균기온의 예측 결과를 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료의 경년변동 폭은 26.7°C에서 28.5°C 사이로 약 1.8°C의 변동 폭을 보이고 있으며 계절예측 모형 중에서는 can3 모형의 경년변동 폭이 27.1°C에서 27.8°C 사이로 약 0.7°C로 가장 작았고 can4 모형의 경년변동 폭이 26.3°C에서 28.9°C 사이로 약 2.6°C로 가장 크게 나타났다. can3 모형 이외에 B.C. NCEP 재분석 자료보다 경년변동 폭이 작은 모형으로는 pnu1 모형에서 약 1.0°C(27.1°C–28.1°C), nasa 모형에서 약 1.4°C(26.8°C–28.2°C), ncep 모형에서 약 1.7°C(26.7°C–28.4°C)의 경년변동 폭을 보였다. 반면 can4 모형 이외에 B.C. NCEP 재분석 자료보다 경년변동 폭이 큰 모형으로는 poam 모형에서 약 2.0°C(26.6°C–28.6°C)의 경년변동 폭을 보였다.

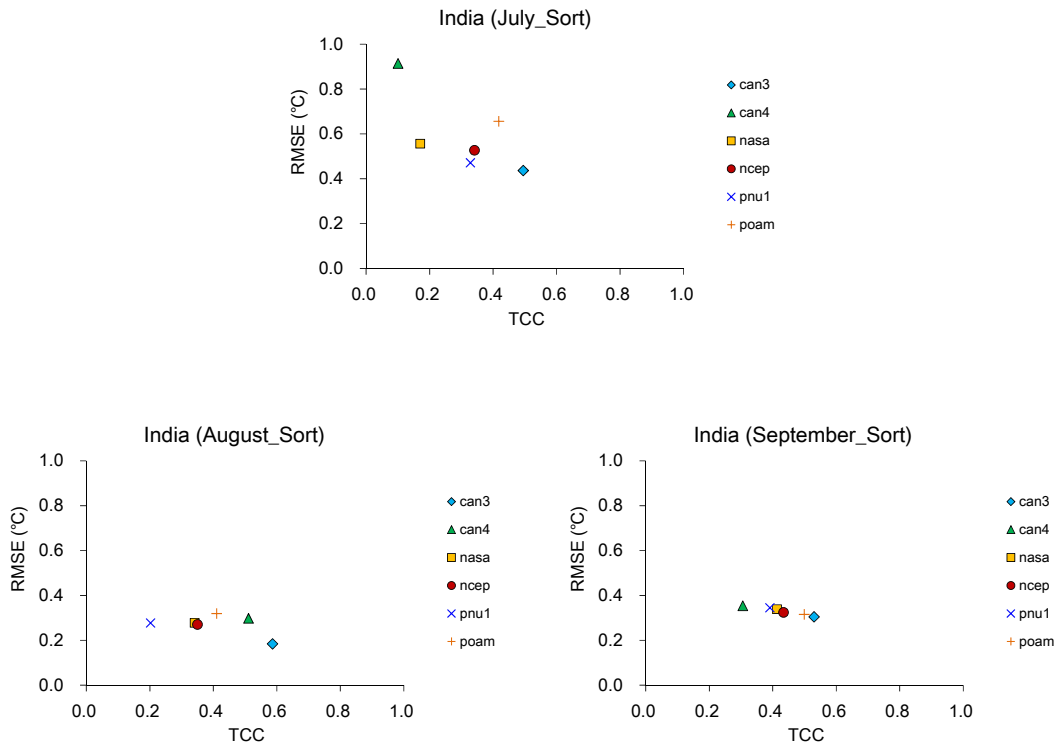


Figure 3.34 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions from July to September in India

Figure 3.34는 India 쌀 생산지역의 7월에서 9월까지의 3개월 기온에 대한 각 계절 예측 모형의 신뢰성 통계 분석 결과를 나타내고 있으며 7월의 경우 RMSE는 0.44°C–0.91°C 사이에 분포하고 있어 8월, 9월에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내고 있으며 TCC는 0.10–0.50 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 7월 예측결과의 신뢰성이 가장 높은 계절예측 모형은 can3 모형으로 RMSE가 0.44°C이었고 TCC가 0.5이었다. 8월의 경우 계절예측모형의 RMSE는 0.18°C–0.32°C 사이에 분포하고 TCC는 0.20–0.59 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은 can3 모형으로 RMSE가 0.18°C이었고 TCC가 0.59이었다. 9월의 경우 RMSE는 0.30°C–0.35°C 사이에 분포하고 TCC는 0.31–0.53 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은

7월, 8월과 같은 can3 모형으로 RMSE가 0.30°C이었고 TCC가 0.53이었다. India 쌀 생산지역의 7월-9월 기온 예측에 대한 신뢰성 통계 분석 결과를 정리해보면 can3 모형이 나머지 5개 모형과 비교해 상대적으로 높은 예측 신뢰도를 보였으며 9월에 대한 예측 신뢰도가 7월과 8월보다 높은 것으로 나타났다.

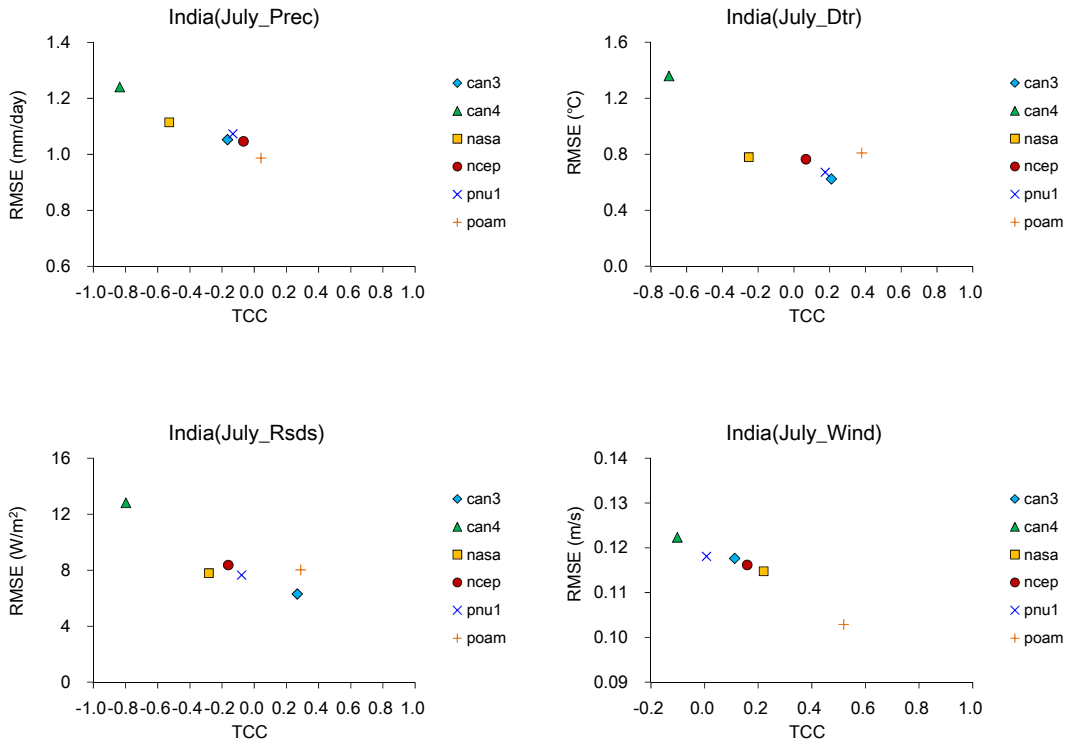


Figure 3.35 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions in July in India

기온 이외의 네 가지 기후요소에 대한 RMSE와 TCC 분석결과를 보면(Figure 3.35) can4 모형이 모든 기후요소에 대해 RMSE가 가장 높게 나타나고 있으며 TCC는 가장 낮게 나타나고 있어 신뢰성이 가장 낮은 것으로 평가되고 있다. 특히 강수량과 일사량의 경우 TCC가 0보다 작은 값을 보이는 모형의 개수가 각각 5개와 4개로 나타난 반면 poam 모형의 경우 모든 기후요소에서 TCC가 가장 높게 나타나고 있으며 강수량과 풍속에서는 RMSE도 가장 낮게 나타나고 있어 India 쌀 생산지역에서는 poam 모형의 예측 신뢰성이 다른 모형들보다 높게 평가되었다.

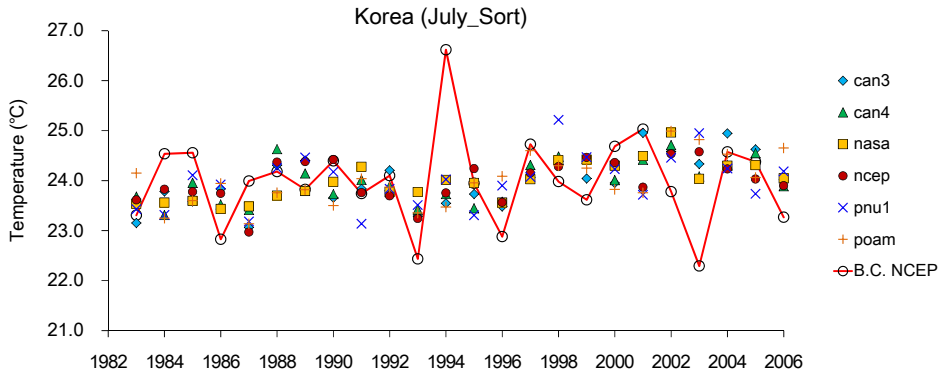


Figure 3.36 Average temperature changes of seasonal predictions in July in Korea

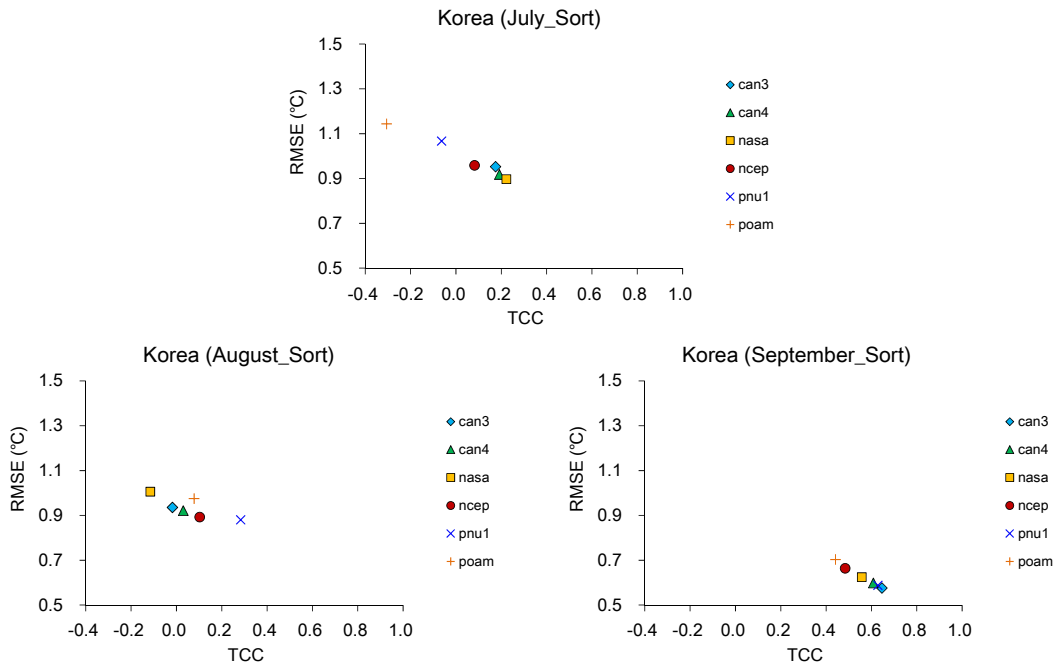


Figure 3.37 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions from July to September in Korea

Figure 3.36은 우리나라 쌀 생산지역에 대해 재생산된 계절예측모형의 기온 예측 결과를 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료의 경년변동 폭은 22.3°C에서 26.6°C로 4.3°C의 변동폭을 보이고 있으며 계절예측모형 중에서는 can4 모형의 경년변동 폭이 1.4°C로 가장 작았고 pnul 모형의 경년변동 폭이 2.1°C로 가장 크게 나타났다. Figure 3.37은 우리나라 쌀 생산지역의 7월에서 9월까지의 3개월 기온에 대한 각 계절예측 모형의 신뢰성 통계 분석 결과를 나타내고 있으며 7월의 경우 RMSE는 0.90–1.14°C 사이에 분포하고 있어 China의 0.28–0.45°C와 India의 0.44–0.91°C과 비교해 RMSE 값이 크게 나타나고 있으며 TCC는 -0.31–0.22 사이에 분포하고 있어 상관성이 낮게 나타나고 있다. 6개 모형 중 7월 예측결과의 신뢰성이 가장 높은 계절예측 모형은 nasa 모형으로 RMSE가 0.90°C이었고 TCC가 0.22이었다. 8월의 경우 계절예측모형의

RMSE는 0.88–1.01°C사이에 분포하고 TCC는 -0.12–0.28 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은 pnu1 모형으로 RMSE가 0.88°C이었고 TCC가 0.28이었다. 9월의 경우 RMSE는 0.58–0.70°C사이에 분포하고 TCC는 0.44–0.65 사이에 분포하고 있어 모든 모형에서 7월과 8월보다 신뢰성이 높게 평가되었다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은 can3 모형으로 RMSE가 0.58°C이었고 TCC가 0.65이었다. 우리나라 쌀 생산지역의 신뢰성 통계 분석 결과를 정리해보면 9월에 대한 예측 신뢰도가 7월과 8월보다 모든 모형에서 높은 것으로 나타났다.

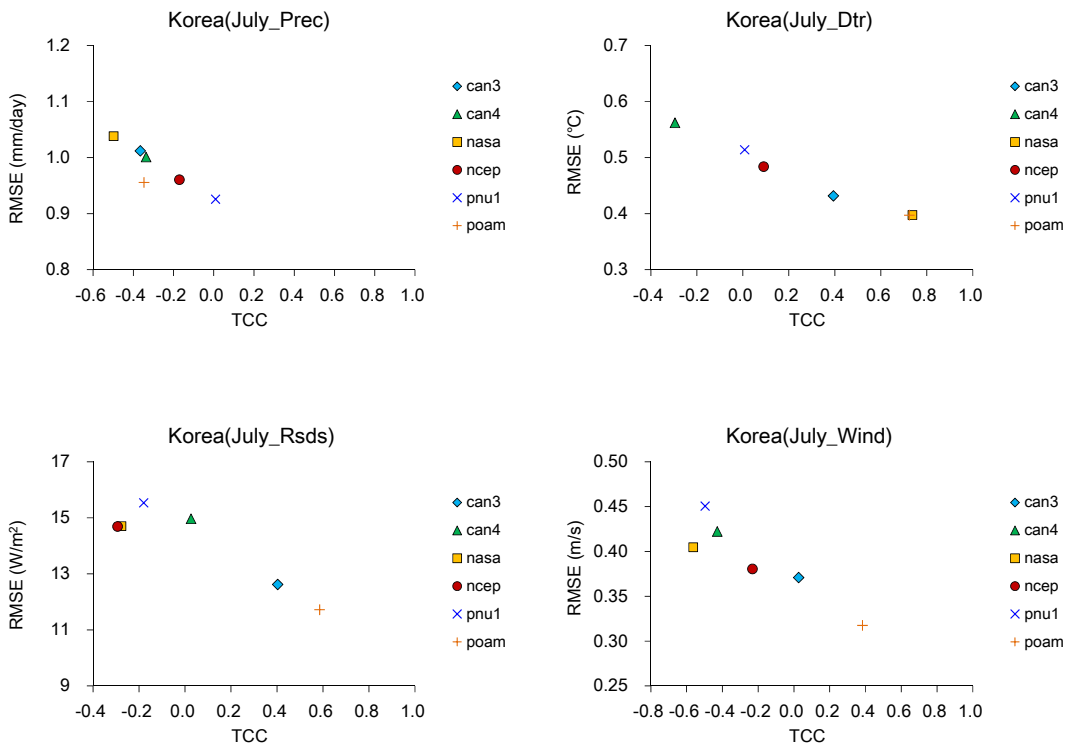


Figure 3.38 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions in July in Korea

기온 이외의 네 가지 기후요소에 대한 RMSE와 TCC 분석결과를 보면(Figure 3.38) 강수량의 경우 pnu1 모형을 제외한 모든 모형에서 음(-)의 상관성을 보이고 있어 재생산된 일 단위 강수량 자료는 B.C. NCEP 재분석 자료와 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 일교차의 경우 RMSE는 0.4–0.56°C 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.3–0.74 사이에 분포해 예측 모형에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 특히 nasa 모형의 경우 6개 예측 모형 중에서 일교차 예측에 대한 신뢰성이 가장 높게 나타나고 있지만 강수량이나 일사량, 그리고 풍속에서 보면 다른 예측 모형에 비해 신뢰성이 크게 떨어지는 것으로 나타나고 있다. 일사량의 경우 RMSE는 11.72–15.54W/m² 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.29–0.59 사이에 분포해 일교차와 마찬가지로 예측 모형에 따라 상관성이 크게 차이를 보이고 있다. 풍속의 경우 RMSE는 0.32–0.45m/s 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.56–0.38 사이에 분포하고 있다. poam 모형은 강수량을 제외한 나머지 기후요소에서 다른 모형과 비교해 상대적으로 신뢰성이 높게 평가되었다.

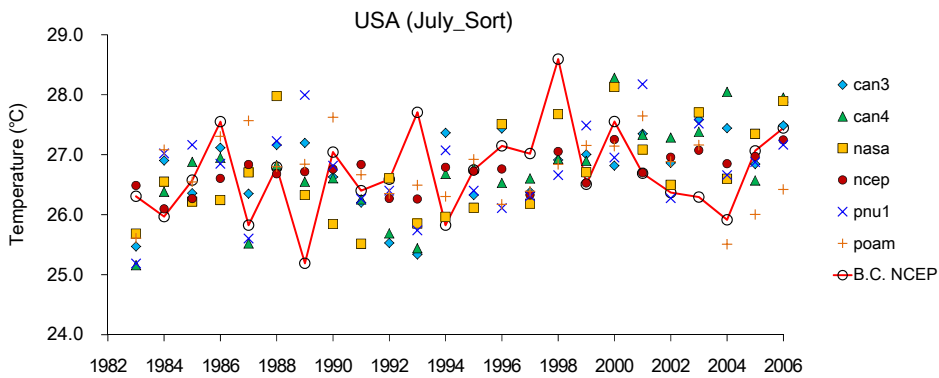


Figure 3.39 Average temperature changes of seasonal predictions in July in the USA

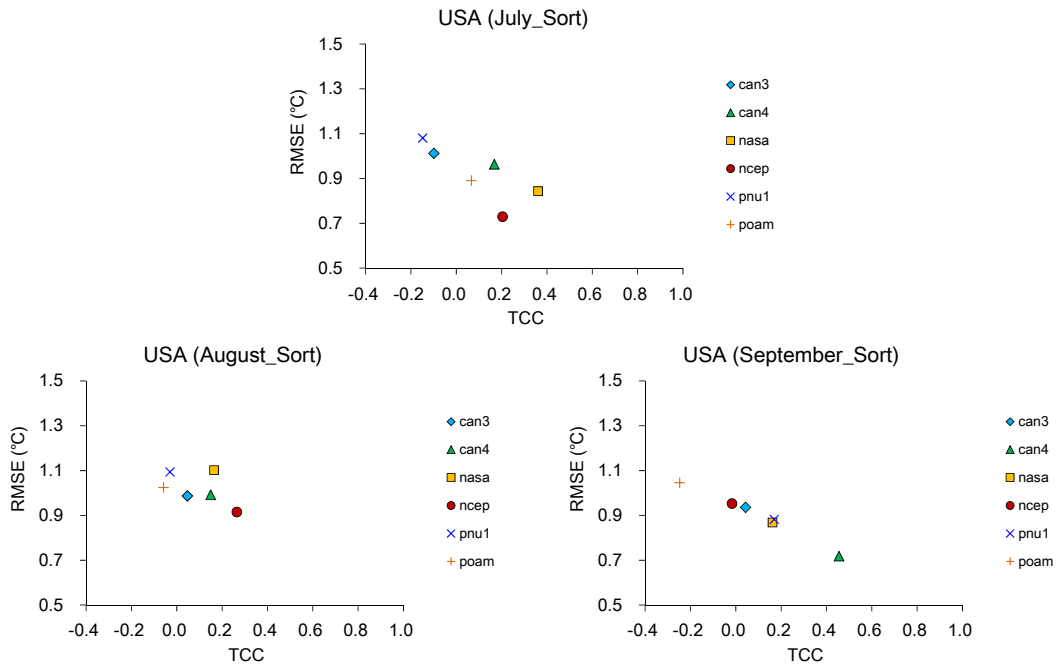


Figure 3.40 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions from July to September in the USA

Figure 3.39 는 USA 쌀 생산지역에 대해 재생산된 계절예측모형의 기온 예측 결과를 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료의 경년변동 폭은 25.2°C에서 28.6°C로 3.4°C의 변동 폭을 보이고 있으며 계절예측모형 중에서는 ncep 모형의 경년변동 폭이 1.2°C로 가장 작았고 pnu1 모형의 경년변동 폭이 3.0°C로 가장 크게 나타났다. Figure 3.40는 USA 쌀 생산지역의 7월에서 9월까지의 3개월 기온에 대한 각 계절예측 모형의 신뢰성 통계 분석 결과를 나타내고 있으며 7월의 경우 RMSE는 0.84–1.08 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.15–0.36 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 RMSE가 가장 작은 모형은 ncep으로 0.73이었고 TCC가 가장 큰 모형은 nasa로 0.36이었다. 8월의 경우 계절예측모형의 RMSE는 0.92–1.10 사이에 분포하고 TCC는 -0.06–0.26 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은 ncep 모형으로 RMSE가 0.92이었

고 TCC가 0.26이었다. 9월의 경우 RMSE는 0.72-1.05 사이에 분포하고 TCC는 -0.25-0.46 사이에 분포하고 있다. 6개 모형 중 신뢰성이 가장 높은 모형은 can4 모형으로 RMSE가 0.72이었고 TCC가 0.46이었다. USA 쌀 생산지역의 7월-9월 기온 예측에 대한 신뢰성 통계 분석 결과를 정리해보면 RMSE는 China와 India보다 크게 분포하고 있으며 TCC도 음(-)의 값이 존재하는 등 대체적으로 신뢰성이 낮게 평가되었다.

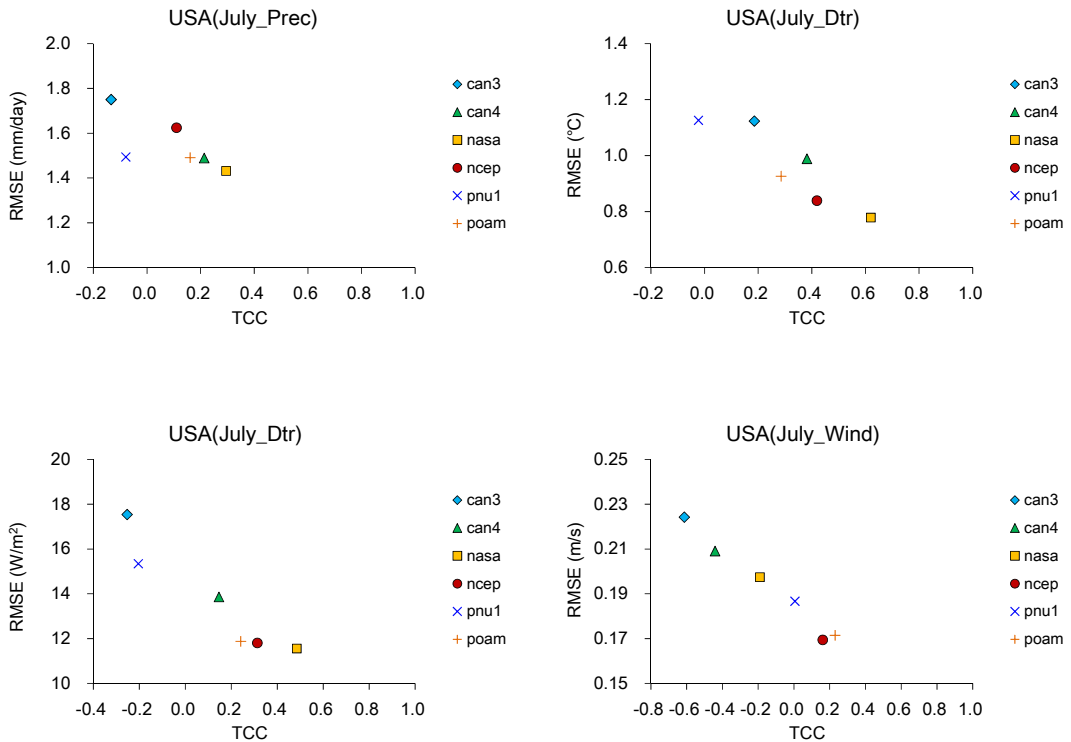


Figure 3.41 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions in July in the USA

기온 이외의 네 가지 기후요소에 대한 RMSE와 TCC 분석결과를 보면(Figure 3.41) can3 모형과 pnu1 모형이 풍속을 제외한 모든 기후요소에 대해 RMSE가 높게 나타나고 있으며 TCC는 낮게 나타나고 있어 신뢰성이 낮은 것으로 평가되고 있다. 반면 nasa 모형의 경우 풍속을 제외한 모든 기후요소에서 RMSE가 낮고 TCC가 높게 나타나고 있어 USA의 쌀 생산지역에 대해서는 예측 신뢰성이 다른 모형들보다 높게 평가되었다. 강수량의 경우 RMSE는 1.43-1.75 mm/day 사이에 분포하고 있으며 TCC는-0.13-0.3 사이에 분포하고 있다. 일교차의 경우 RMSE는 0.78-1.13℃ 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.02-0.62 사이에 분포하고 있다. 일사량의 경우 RMSE는 11.55-17.54 W/m² 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.25-0.49 사이에 분포해 예측 모형에 따라 상관성이 크게 차이를 보이고 있다. 풍속의 경우 RMSE는 0.17-0.22m/s 사이에 분포하고 있으며 TCC는 -0.61-0.23 사이에 분포하고 있다.

3.1.2.2 Anomaly 확장 계절예측자료 생산

계절예측자료에 대한 Bais 보정 후 기온자료의 국가별 분석결과 예측 모형에 따라 기온의 변동 폭이 B.C. NCEP 재분석 자료보다 확연히 작게 나타나거나 크게 나타나는 모형이 있으며 이들 모형에 대해서는 계절예측자료의 Anomaly 값을 확장시켜 줌으로서 B.C. NCEP 재분석 자료로부터 선택되는 계절예측자료의 선택 폭이 커져 각 그리드별로 재생산되는 일 단위 기후예측자료의 중복을 피할 수 있다. 본 연구에서는 각 계절예측모형의 Anomaly에 대한 확장을 실시하여 확장 전과 확장 후의 계절예측자료가 작물 수확량에 미치는 영향에 대해서 분석해 보고자 했다. Figure 3.42는 can3 모형에 대해 Anomaly 확장 전과 확장 후의 1983년에 대한 7월-9월의 기온분포도를 나타내고 있으며 아래쪽 그래프를 통해 Anomaly 확장에 따른 기온변화 정도를 확인할 수 있다. Anomaly 확장 전후의 차이 그래프를 통해 몽골과 러시아 지역에서 Anomaly 확장이 기온을 증가시키는 양(+)의 확장이 발생된 것과 호주와 남미지역에서 Anomaly 확장이 기온을 감소시키는 음(-)의 확장이 발생된 것을 확인할 수 있다.

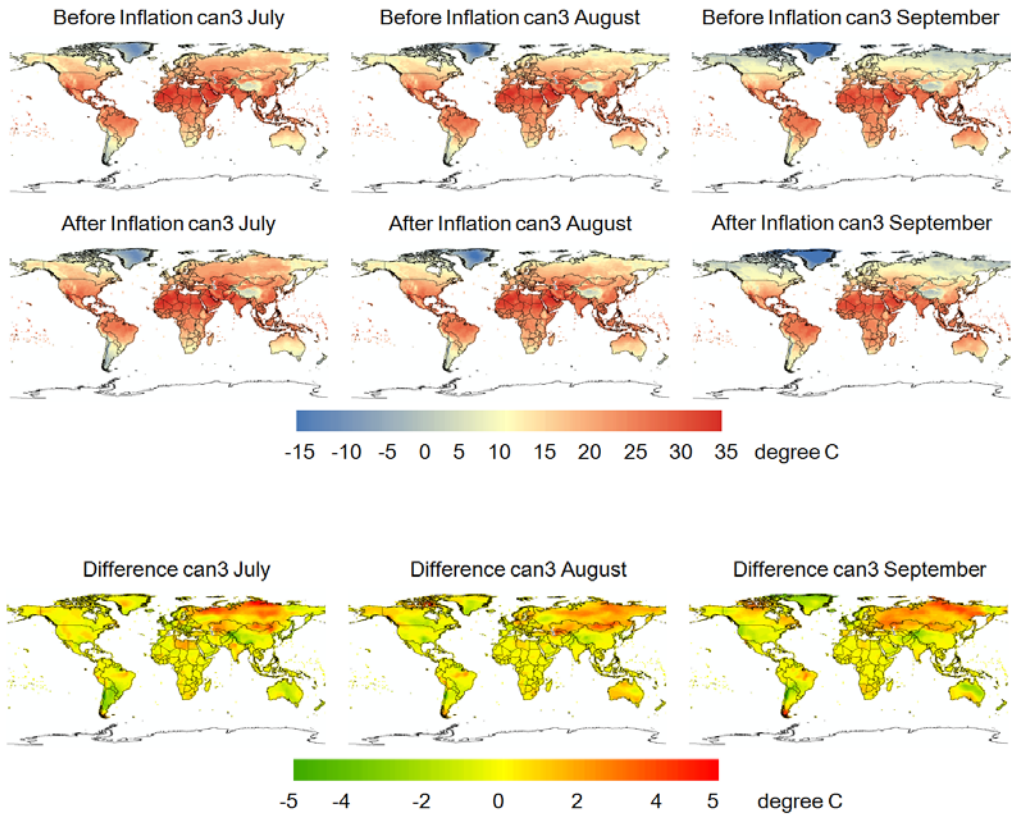


Figure 3.42 Average temperature of before and after anomaly inflation on can3 model and differences

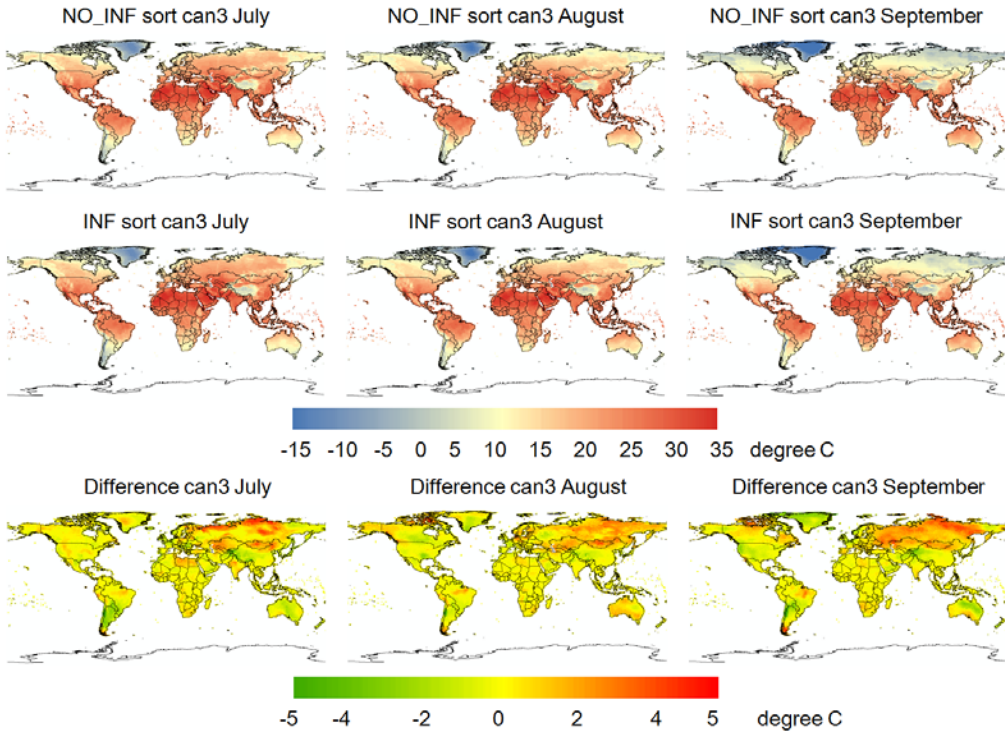


Figure 3.43 Average temperature reproduced seasonal prediction before and after anomaly inflation on can3 model and differences

Figure 3.43은 Anomaly를 확장시킨 계절예측 기온자료에 가장 근사한 값을 갖는 B.C. NCEP 재분석 자료를 선택하여 재생산된 예측자료와 Bias 보정만 실시한 계절예측 기온자료에 가장 근사한 값을 갖는 B.C. NCEP 재분석 자료를 선택하여 재생산된 예측자료를 비교한 것으로 can3 모형의 1983년 7월-9월에 대한 기온분포와 Anomaly 확장 전후의 전 지구 기온차 분포도를 나타낸다. 재생산된 Anomaly 확장 전후의 계절예측 기온자료는 월별 차이도 나타나지만 지역에 따른 차이가 더 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

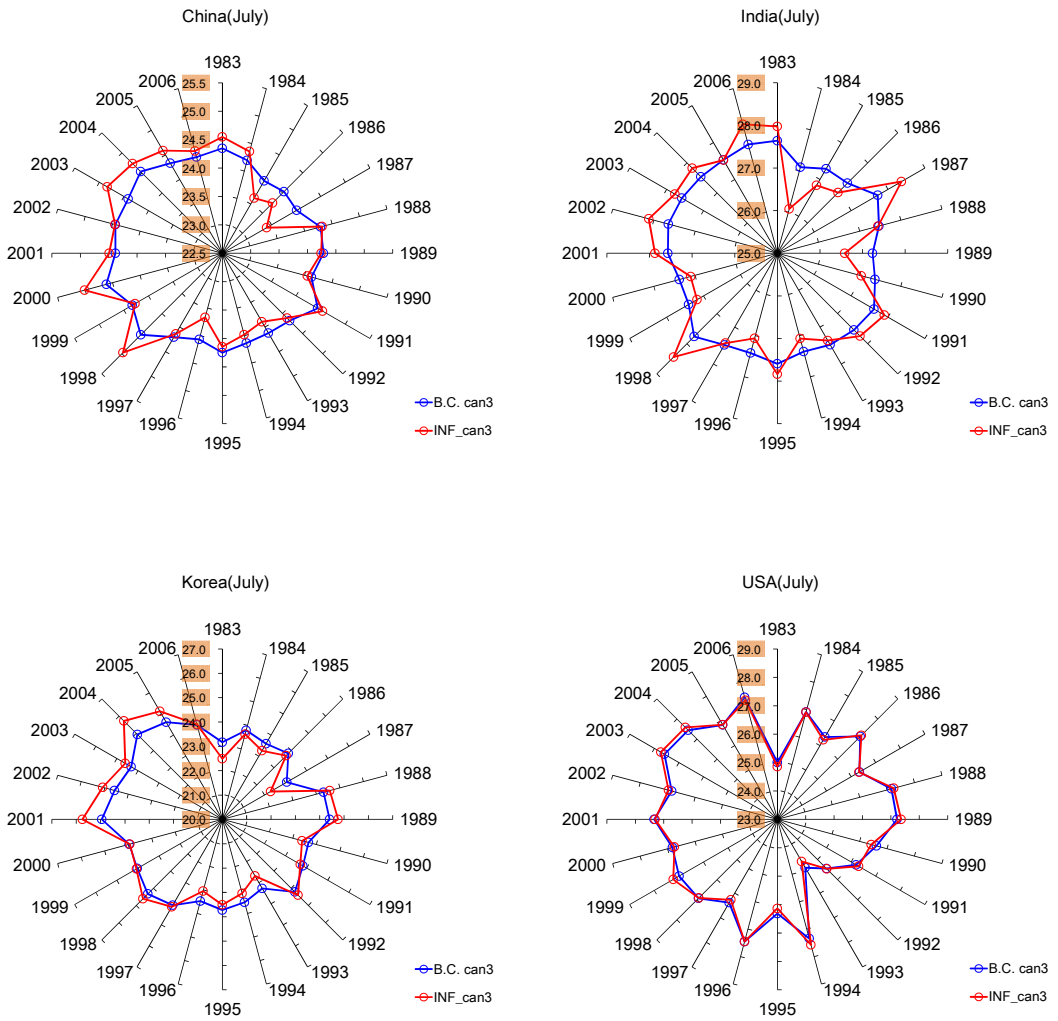
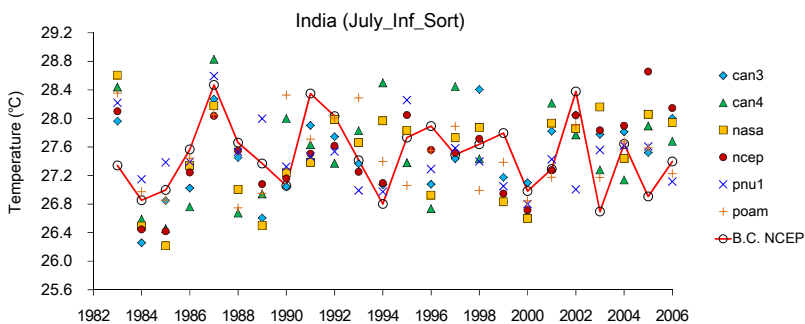
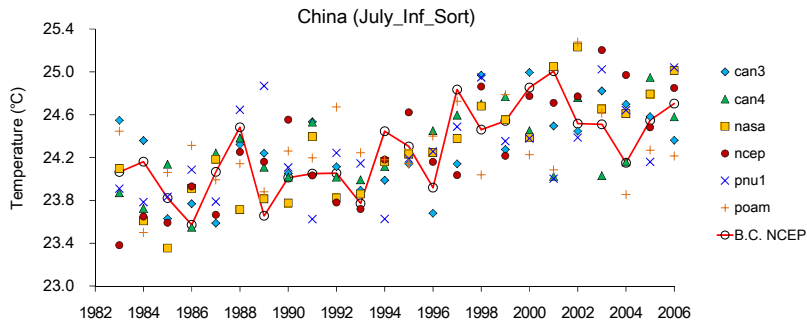


Figure 3.44 Difference of average temperature of seasonal prediction before and after anomaly inflation on can3 model

Anomaly 확장을 통해 재생산된 계절예측자료가 지역에 따라 어느 정도 차이가 발생 하는지 확인하기 위해 China, India, 우리나라, USA에 대해 Figure 3.44와 같이 분석 을 실시하였다. China의 경우 can3 모형의 Anomaly 확장으로 인한 7월 기온 증가는 1998년 0.44℃로 가장 컸던 반면 1987년에는 0.61℃ 감소된 것으로 나타났다. India 의 경우 Anomaly 확장으로 인한 7월 기온 증가는 1998년 0.68℃로 가장 컸던 반면 1984년에는 1.01℃ 감소된 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 Anomaly 확장으로 인한 7월 기온 증가는 2001년 0.8℃로 가장 컸던 반면 1987년에는 0.77℃ 감소된 것으로 나타났다. USA의 경우 Anomaly 확장으로 인한 7월 기온 증가는 1999년 0.24℃로 가 장 컸던 반면 1993년에는 0.25℃ 감소된 것으로 나타났다.



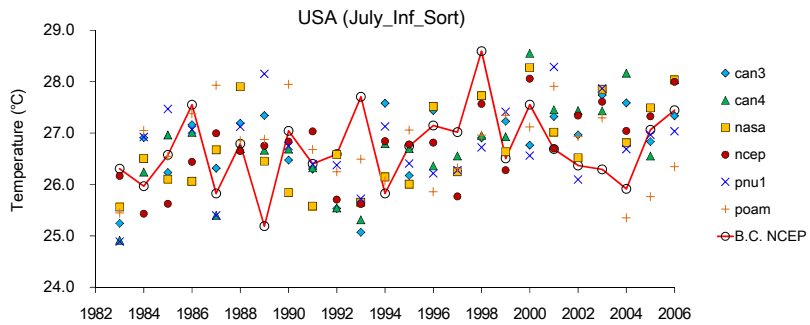
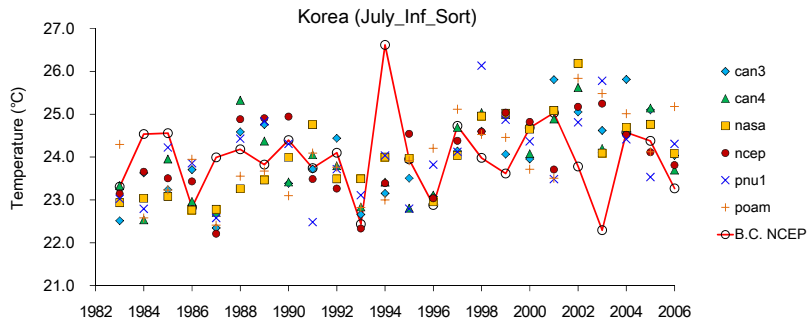
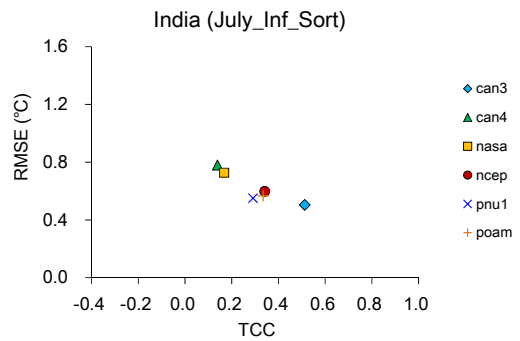
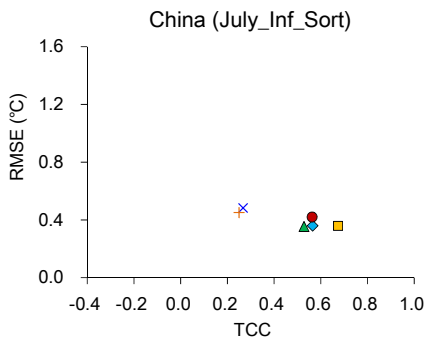


Figure 3.45 Temperature changes of seasonal predictions after anomaly inflation



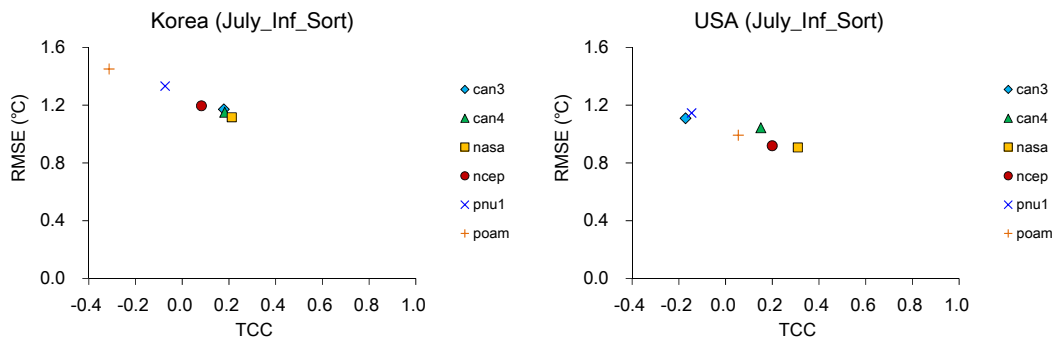


Figure 3.46 RMSE and TCC analysis of seasonal predictions after anomaly inflation in July

Anomaly 확장을 통해 재생산된 6개 계절예측모형의 예측결과를 분석하기 위해 China, India, 우리나라, USA에 대한 1983년부터 2006년까지의 7월 기온자료의 경년 변동을 Figure 3.45와 같이 나타냈다. B.C. NCEP 재분석 자료에 의하면 지난 24년간 쌀 생산지역에 대한 7월 평균기온은 China에서 약 0.87°C 상승한 반면 India에서는 약 0.1°C 감소했고 우리나라에서는 거의 변화가 없었으며 USA에서는 약 0.63°C 상승한 것으로 나타났다. 계절예측모형의 경년변동 폭에 대해 살펴보면 China의 경우 B.C. NCEP은 최저 23.6°C에서 최고 25.0°C로 1.4°C의 변동 폭에서 7월 기온이 변동하고 있었고 계절예측모형 중에서는 nasa 모형이 1.8°C의 가장 큰 변동 폭을 보였고 can4 모형이 1.4°C의 가장 작은 변동 폭을 보였다. India의 경우 B.C. NCEP은 최저 26.7°C에서 최고 28.5°C로 1.8°C의 변동 폭을 나타내고 있으며 nasa 모형이 2.4°C의 가장 큰 변동 폭을 보였고 poam 모형이 1.6°C의 가장 작은 변동 폭을 보였다. 우리나라의 경우 B.C. NCEP은 최저 22.3°C에서 최고 26.6°C로 4.3°C의 변동 폭을 나타내고 있으며 poam 모형이 3.6°C의 가장 큰 변동 폭을 보였고 ncep 모형이 3.0°C의 가장 작은 변동 폭을 보였다. USA의 경우 B.C. NCEP은 최저 25.2°C에서 최고 28.6°C로 3.4°C의 변동 폭을 나타내고 있으며 can4 모형이 3.6°C의 가장 큰 변동 폭을 보였고 poam 모형이 2.6°C의 가장 작은 변동 폭을 보였다. Figure 3.46 는 RMSE와 TCC 분석 결과로 모형간 차

이가 있을 수 있으나 대체적으로 China에 대한 예측의 신뢰도가 높게 평가되고 있으며 우리나라에 대한 예측의 신뢰도는 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다.

3.2 글로벌 쌀 수확량 예측

3.2.1 FAO 곡물 통계 분석

국제연합(UN)의 식량농업기구(Food and Agriculture Organization, 이하 FAO)에 서는 1961년부터 최근까지의 전 세계 농업통계 자료를 제공하고 있으며 FAOSTAT 사이트(<http://faostat3.fao.org/home/E>)를 통해 세계 각지에서 생산되고 있는 곡물의 생산량(ton), 수확면적(ha), 수확량(t/ha) 정보를 얻을 수 있다. Figure 3.47은 전 세계 주요 쌀 생산국 14개국(2011년 기준 전 세계 쌀 생산량의 90% 이상을 차지하는 국가)에 대한 쌀 생산량의 변화를 과거 1961년부터 가장 최근의 2013년까지 나타내고 있다. China와 India의 쌀 생산량은 전 세계 쌀 생산량의 약 50%(2011년 기준)를 차지하고 있으며 농지면적의 감소와 자연재해 발생 등의 생산 환경 변화에 따른 증가와 감소를 반복하면서 점차적으로 증가하는 추세를 나타내고 있다. 그 외 주요 쌀 생산국으로는 Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Thailand 등의 동남아시아 국가에서 쌀 생산이 활발히 이루어지고 있으며 생산량도 점차적으로 증가 추세를 보이고 있다. 우리나라의 쌀 생산량은 1961년부터 점차적으로 증가하여 1978년에 853만 ton을 정점으로 계속 감소하는 추세를 보이고 있으며 2011년에는 약 603만 ton으로 14개 주요 쌀 생산국 중에서 가장 적은 생산량을 나타냈다. 전 세계 쌀 수확면적 통계자료를 분석해 보면 가장 넓은 쌀 수확면적을 차지하는 나라는 India로 생산 환경에 따라 증가감소를 반복하면서 2000년까지 증가하는 추세를 보이다가 최근 들어 증가 추세가 둔화되고 있는 것으로 나타나고 있다(Figure 3.48). China에서는 1961년부터 수확면적이 증가해오다 1976년 약 3700만 ha를 정점으로 2003년까지 큰 폭의 감소 추세를 보였으나 최근 들어 조금씩 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. Indonesia, Thailand, Bangladesh 등의 동남아시아 국가에서는 India와 China에 비해 상대적으로 쌀 수확면적이 작지만 조금씩 지속적으로 수확면적이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 반면 Brazil과 우리나라에서는

1970년대를 기점으로 쌀 수확면적이 조금씩 감소하고 있는 것으로 나타났다.

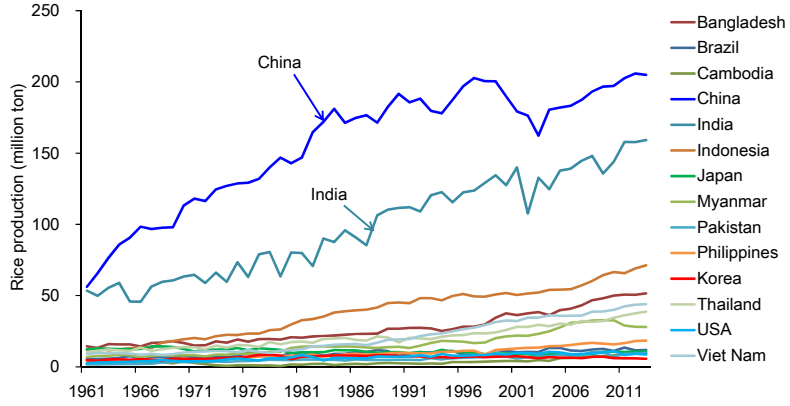


Figure 3.47 Rice production change in the main rice production countries

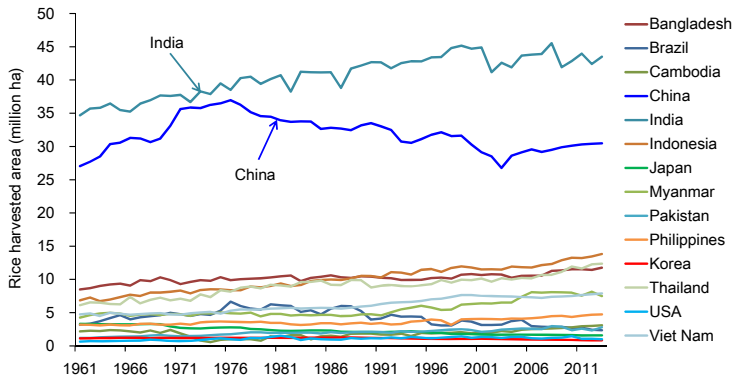


Figure 3.48 Rice harvested area change in the main rice production countries

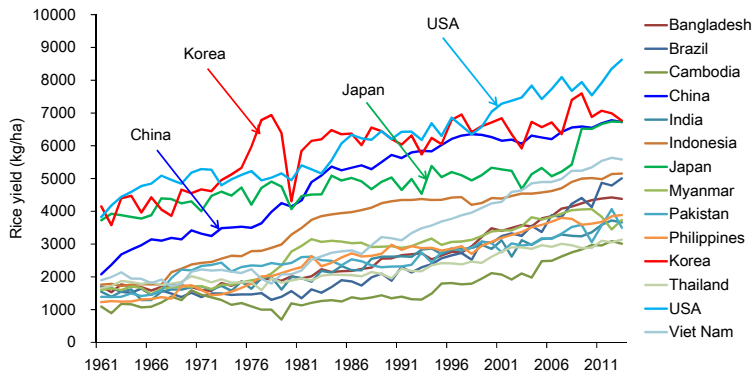


Figure 3.49 Rice yield change in the main rice production countries

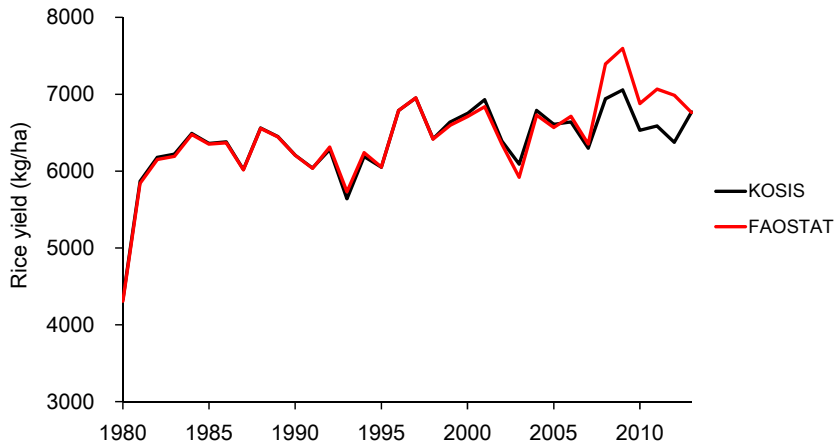


Figure 3.50 Comparison of FAOSTAT and KOSIS on rice yield change in Korea

단위 생산면적당 생산량을 나타내는 수확량(kg/ha 혹은 ton/ha)은 품종 개발 및 비료와 농약의 사용 등과 같이 농업기술의 발달에 큰 영향을 받는다. 쌀 수확량이 높은 국가로는 USA와 우리나라, China, Japan 등의 순으로 나열할 수 있으며 우리나라의 경우 1970년대 후반에 약 6,900kg/ha로 전 세계에서 쌀 수확량이 가장 높았고 지금도 정상

의 수준을 나타내고 있다(Figure 3.49). 우리나라 통계청의 국가통계포털(Korean Statistical Information Service, KOSIS)에서는 농작물 생산 조사를 통해 해마다 국내 쌀 수확량 정보를 제공하고 있다. KOSIS와 FAOSTAT에서 제공하는 1980년부터 2013년까지의 쌀 수확량 정보를 비교해 본 결과 1980년부터 2007년까지의 쌀 수확량 변동은 두 기관에서 거의 일치하였으나 2008년부터 2012년까지 FAOSTAT에서 제공하는 쌀 수확량 값은 약 7,180kg/ha로 KOSIS의 6,700kg/ha보다 약 480kg/ha 크게 조사된 것으로 나타나고 있다(Figure 3.50). USA는 1961년부터 현재까지 꾸준한 수확량 증가 추세를 보이고 있으며 2013년에 약 8,600kg/ha로 역대 최대 쌀 수확량을 기록했다. 반면 대부분의 동남아시아 국가에서는 1960년대 상당히 낮은 쌀 수확량을 나타냈으며 1970년대 들어 조금씩 증가하는 추세를 보이다 최근에 Vietnam 및 Indonesia 등의 몇몇 국가에서 큰 수확량 증가 추세를 나타내고는 있으나 아직까지 선진국에 비해 낮은 수확량을 보이고 있는 것이 사실이다.

Figure 3.51은 주요 쌀 생산국들에 대한 쌀 수확량의 변화 경향을 정량적으로 나타낸 것으로 1961년부터 2013년까지 수확량 증가가 큰 국가 순으로 나열되어 있다. 14개 국가 중 쌀 수확량 증가가 가장 큰 국가는 China로 지난 53년간 연평균 약 89.4kg/ha씩 수확량이 증가한 것으로 나타났다. 다음으로 Vietnam이 연평균 약 77.8kg/ha USA가 연평균 76.2kg/ha씩 증가한 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 쌀 수확량이 연평균 57.2kg/ha씩 증가한 것으로 나타나고 있으며 Cambodia와 Thailand에서는 각각 34.4kg/ha 27.8kg/ha씩 증가한 것으로 나타났다. Figure 3.52는 국가 별 수확량 변화 경향을 1960년대, 1970년대, 1980년대, 1990년대, 2000년대로 구분하여 나타낸 것으로 China의 경우 1960년대에 연평균 127kg/ha로 급격하게 증가한 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 1970년대에 연평균 149kg/ha로 가장 급격하게 증가했으며 1980년대 수확량 증가 속도가 35kg/ha까지 떨어졌다 1990년대 87kg/ha, 2000년대 94kg/ha로 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. Figure 3.53은 1990년대의 쌀 생산에 대한 FAOSTAT 통계 자료를 정리한 것으로 쌀 생산량(왼쪽 위), 쌀 수확면적(오른쪽 위), 쌀 수확량(왼쪽 아래), 쌀 수확량 증가 경향(오른쪽 아래)에 대해 해당항목에 큰 순서대

로 주요 쌀 생산국이 나열되어있다. India 지역에서 쌀 수확면적이 가장 넓은 것으로 나타나고 있으나 생산량 측면에서는 China가 India보다 많이 나타나고 있어 China의 수확량이 India보다 2배 이상 큰 것으로 나타나고 있다. 우리나라의 1990년대 쌀 생산량은 약 700만 톤으로 14개 국가 중 12번째에 해당하며 쌀 수확면적은 약 109만 ha로 가장 작은 것으로 나타났으나 쌀 수확량은 6,384kg/ha로 USA의 6,545kg/ha 다음으로 높은 수준을 보이고 있다. 국가별 수확량 변화 경향을 살펴보면 Vietnam에서 연평균 수확량이 100kg/ha이상 증가한 것으로 나타나고 있으며 Brazil과 우리나라, Cambodia, China 그리고 Pakistan에서 80kg/ha 이상 증가한 것으로 나타났다. 반면 Indonesia에서는 연평균 수확량이 4kg/ha 감소한 것으로 나타나고 있는데 이는 1991년에 발생한 극심한 가뭄의 영향과 같은 자연재해의 영향에 의한 것으로 판단된다. 이와 같이 수확량 변화 경향은 국가별로 차이를 보이고 있는데 그 원인으로는 국가별 농업기술 발달 속도의 차이를 들 수 있겠고 병해충 및 가뭄, 홍수 등의 자연으로부터의 영향에 따른 생산성 감소를 들 수 있겠다. M-GAEZ 모형에서는 Table 2.5와 같이 국가별로 입력레벨을 설정하여 수확량을 산정하는데 있어 자본 및 노동력, 토양비옥도, 기술개발 레벨 등을 고려할 수 있도록 하였다. 그렇지만 농업기술의 발달 속도는 모형에서 직접 고려할 수 없어 Figure 3.51-52와 같이 FAOSTAT의 국가별 수확량 정보로부터 수확량 변화 경향을 추정한 다음 Table 2.5의 국가별 입력레벨에 따라 가중치를 설정하여 농업기술 발달에 따른 수확량 증가를 고려하였다.

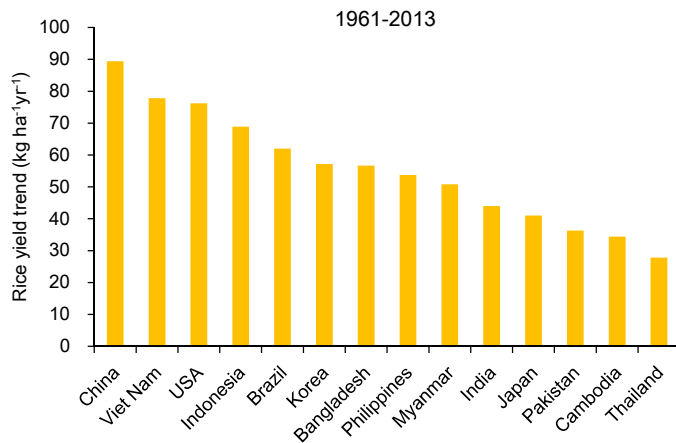


Figure 3.51 Rice yield trend in the main rice production countries

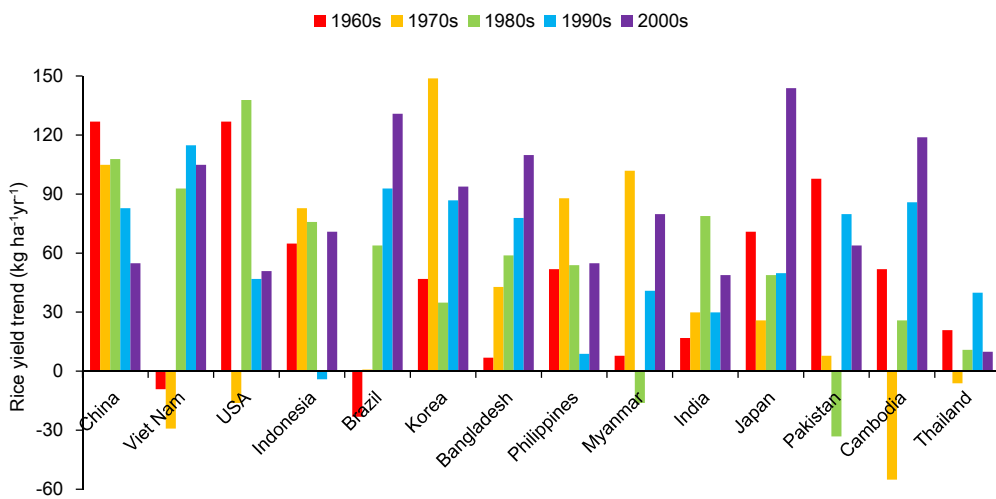


Figure 3.52 Rice yield trend change in the main rice production countries

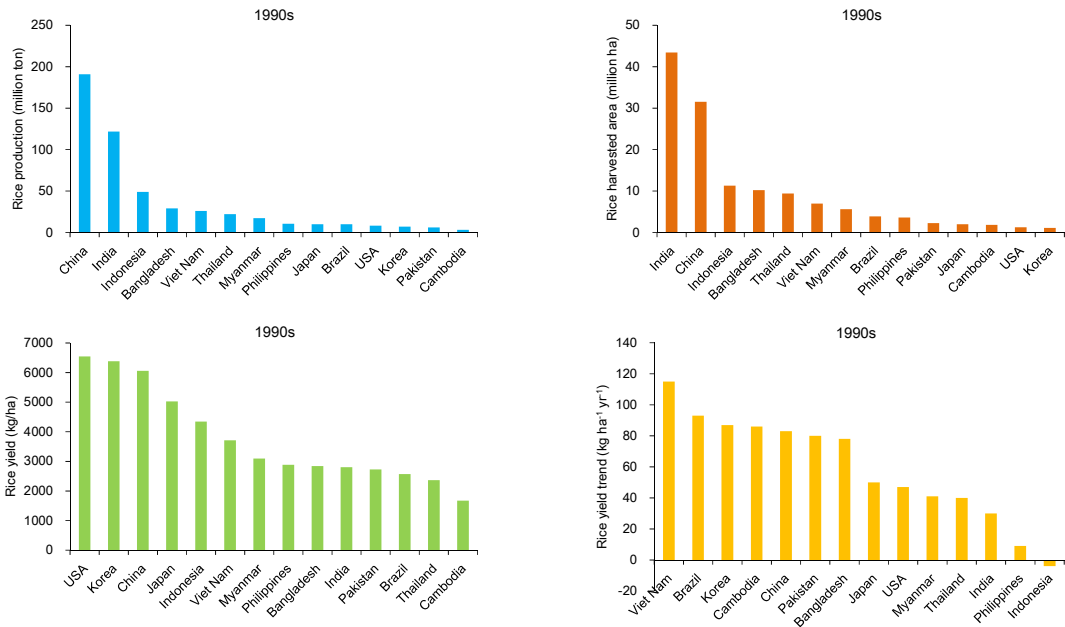


Figure 3.53 Rice production, harvested area, yield and yield trend in the main rice production countries in 1990s

3.2.2 쌀 수확량 예측성 평가

3.2.2.1 계절예측 정보를 활용한 쌀 수확량 예측성 평가

계절예측자료와 B.C. NCEP 재분석 일 단위 기후자료를 이용해 재생산된 일 단위 계절예측 결과를 글로벌 작물모형에 입력하여 1991년에서 2000년까지의 10년에 대한 전 세계 쌀 수확량을 계산하였고 그 결과를 주요 쌀 생산국 별로 평균하여 FAO의 국가별 쌀 수확량 통계 자료와 비교를 실시하였다. Figure 3.54는 B.C. NCEP 재분석 일 단위 기후자료를 이용해 산출한 1990년대 평균 쌀 수확량의 분포도를 나타내고 있으며 글로벌 쌀 수확면적 정보를 이용해 실제 쌀 생산이 이루어지고 있는 지역만을 추출하였다. 또한 M-GAEZ 모형으로부터 격자별 최적의 이앙일 분포에 대한 정보 제공이 가능하다.

Figure 3.55는 B.C. NCEP 자료를 입력으로 얻어진 1991년의 최적 이앙일 분포를 나타내고 있다.

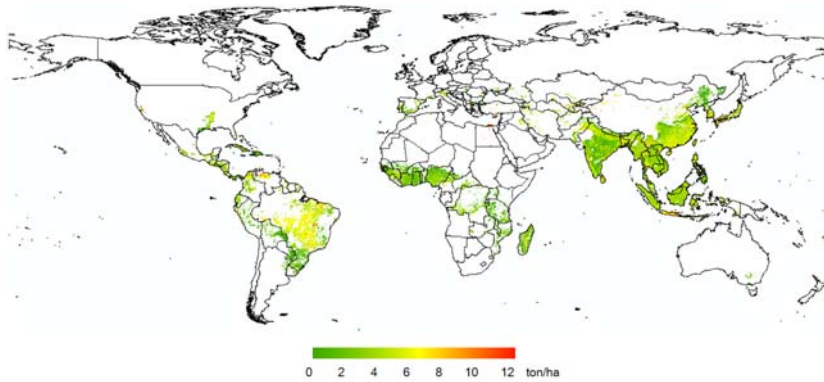


Figure 3.54 Distribution map of rice yield in 1990s [B.C. NCEP reanalysis]

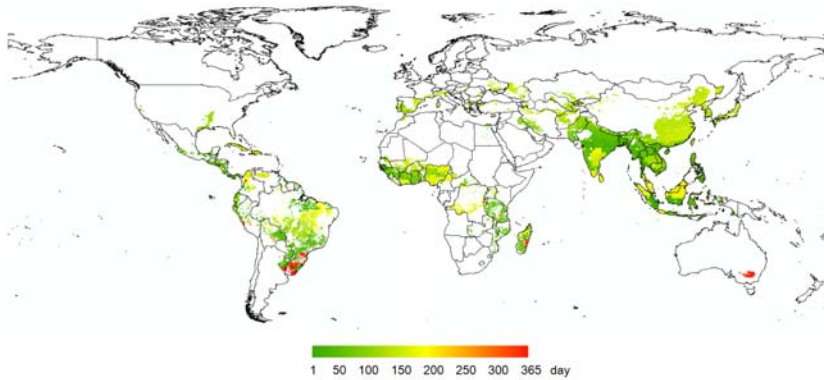


Figure 3.55 Distribution map of optimal rice planting day in 1991 [B.C. NCEP reanalysis]

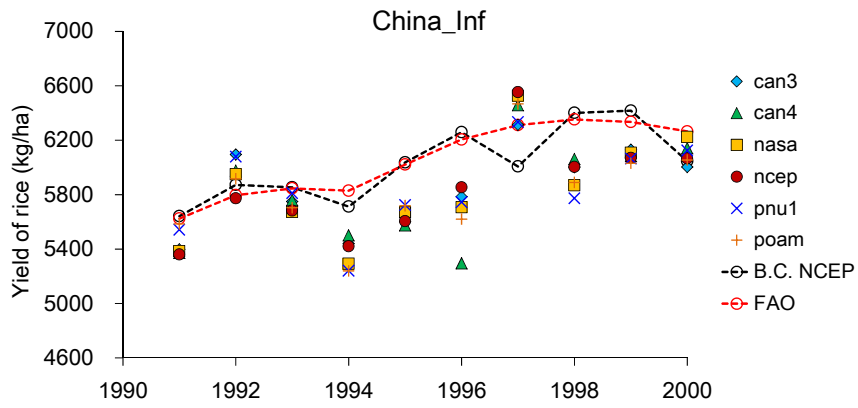
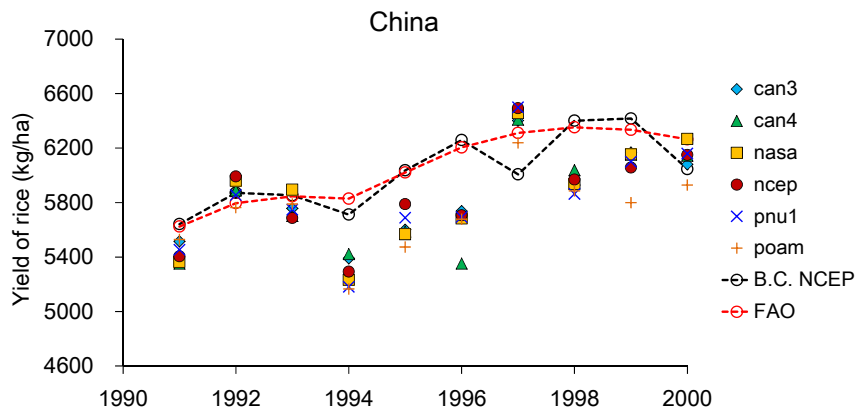


Figure 3.56 Rice yield in 1990s in China [before anomaly inflation: upper, after anomaly inflation: lower]

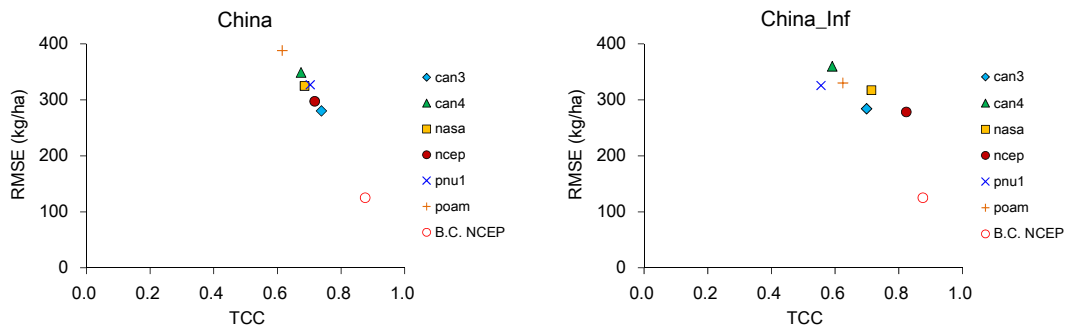


Figure 3.57 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in China

Figure 3.56의 상위 그래프는 China에 대한 FAO의 쌀 수확량 통계 자료와 B.C. NCEP 재분석 자료 및 B.C. 계절예측자료를 이용해 산출된 쌀 수확량 결과를 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 계산된 쌀 수확량 산출 결과는 FAO 통계 자료와 대체로 유사한 변동을 보이고 있다. 작물모형에서는 1994년과 1997년에 수확량이 감소하는 것으로 예측되었으나 FAO 통계 자료에서는 감소경향이 나타나지 않았다. 계절예측자료에 의한 수확량은 모형에 따라 예측의 불확실성이 나타나고 있으며 1996년의 경우 불확실성 폭이 384kg/ha로 가장 크게 나타난 반면 1998년에는 175kg/ha로 가장 작게 나타났다. Figure 3.56의 하위 그래프는 Anomaly 확장을 통해 재생산된 계절예측자료를 이용해 산출된 쌀 수확량 결과를 나타내고 있다. Anomaly 확장을 통해 재생산된 예측자료를 이용해 계산된 쌀 수확량 산출 결과는 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 계산된 쌀 수확량 산출 결과와 전체적으로는 큰 차이를 보이고 있지 않으나 예측 모형에 따라서는 Anomaly 확장된 영향이 쌀 수확량 산출 결과에 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다. poam 모형의 경우 Anomaly 확장된 예측자료를 이용한 수확량이 B.C. NCEP 자료를 이용한 수확량 보다 약 97kg/ha 증가한 것으로 나타난 반면 ncep 모형의 경우 Anomaly 확장된 예측자료를 이용한 수확량이 15kg/ha 감소한 것으로 나타나고 있어 Anomaly 확장의 영향이 반드시 수확량 예측의 신뢰성을 높여 준다고는 말할 수 없다.

Anomaly 확장 전후의 계절예측자료를 이용한 수확량 예측 결과의 신뢰성에 대해서는 RMSE와 TCC분석을 통해 실시했다. Figure 3.57은 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 계산된 쌀 수확량 산출 결과와 Anomaly 확장을 통해 재생산된 예측자료를 이용해 계산된 쌀 수확량 산출 결과에 대한 RMSE와 TCC분석 결과를 나타내고 있다. 6개 계절예측모형 중 수확량 예측의 신뢰성이 상대적으로 높은 모형은 Anomaly 확장 전에는 can3 모형에서 RMSE와 TCC가 각각 280kg/ha와 0.74였고 Anomaly 확장 후에는 ncep 모형에서 278kg/ha와 0.82로 나타났다. pnu1 모형의 경우 Anomaly 확장으로 인해 TCC가 감소한 반면 ncep 모형의 경우 TCC가 증가한 것으로 나타나고 있어 예측 모형에 따라 Anomaly 확장 효과가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

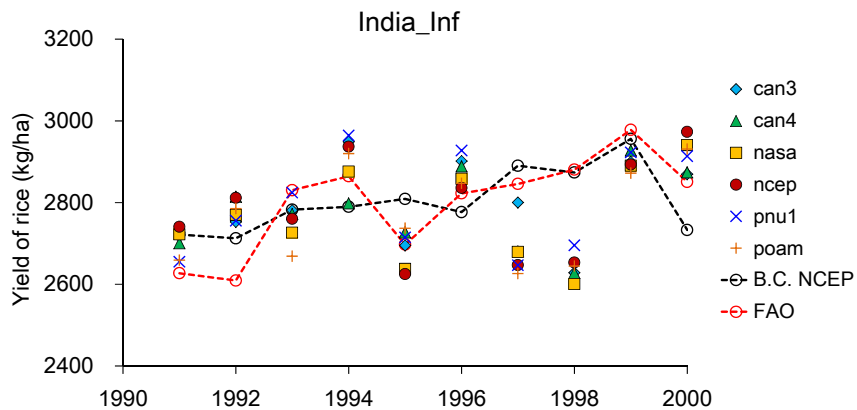


Figure 3.58 Rice yield in 1990s in India [after anomaly inflation]

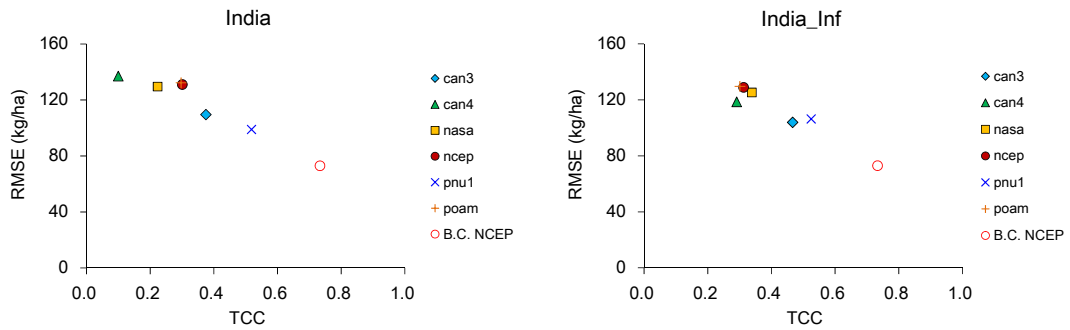


Figure 3.59 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in India

India의 경우 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 산출된 1990년대 평균 수확량은 2805kg/ha로 FAO의 곡물통계 자료와 유사하게 나타났으나 Figure 3.58에서 알 수 있듯이 FAO의 경년 변동성을 잘 따라가지 못하는 것으로 나타났다. Figure 3.59에서 RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 China와 비교해 RMSE는 평균적으로 약 200kg/ha 낮게 나타나고 있으며 TCC 또한 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. Anomaly 확장 전 후의 수확량 예측 결과를 비교해 보면 pnu1 모형과 can3 모형의 예측 신뢰성이 다른 모형에 비해 높게 평가되고 있으며 pnu1 모형에서 확장 전 RMSE와 TCC가 각각 99kg/ha와 0.52였고 확장 후 106kg/ha와 0.53으로 나타났다.

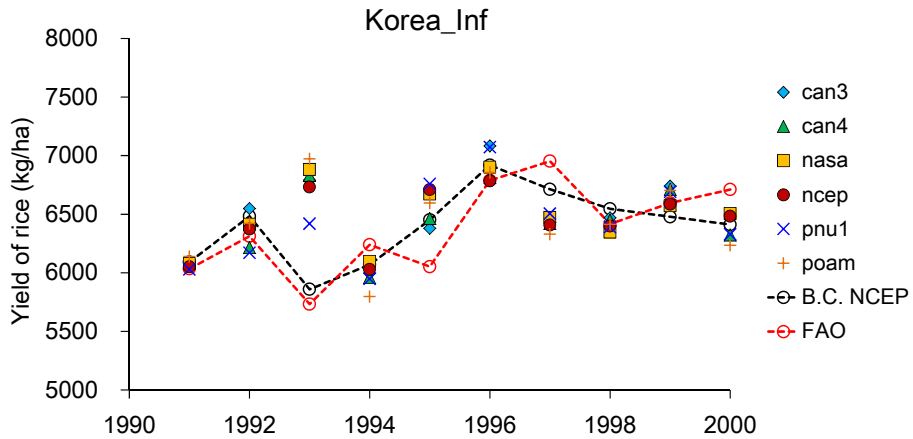


Figure 3.60 Rice yield in 1990s in Korea [after anomaly inflation]

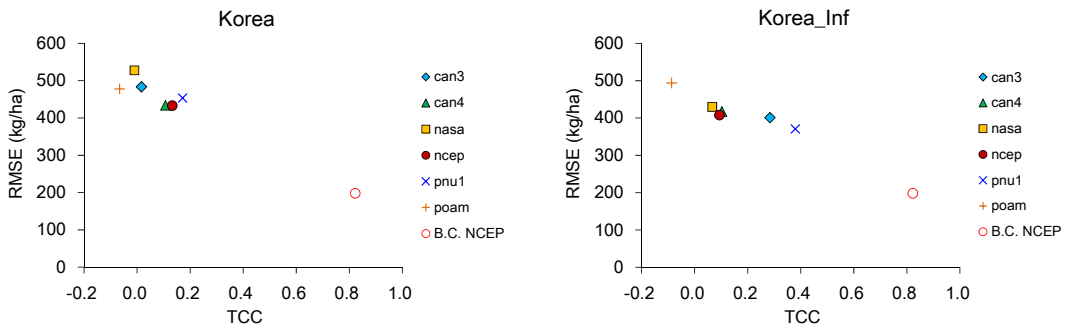


Figure 3.61 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in Korea

우리나라의 경우 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 산출된 1990년대 평균 수확량은 6402kg/ha로 FAO의 곡물통계 자료와 유사하게 나타났다. 반면 계절예측모형을 이용한 수확량 산출 결과는 Figure 3.60에서 알 수 있듯이 예측의 불확실성 폭이 크게 나타나

고 있으며 FAO의 경년 변동성을 잘 따라가지 못하는 것으로 나타났다. 또한 RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 Anomaly 확장 후 can3 모형과 pnu1 모형의 예측 신뢰성이 향상된 것으로 나타나고 있지만 China와 India와 비교해 RMSE가 약 420kg/ha로 높은 값을 보이고 있으며 TCC는 음(-)의 상관 값을 보이거나 값이 상대적으로 작게 나타나고 있어 전반적으로 계절예측 자료에 의한 쌀 수확량 예측의 신뢰성이 낮게 평가되고 있다.

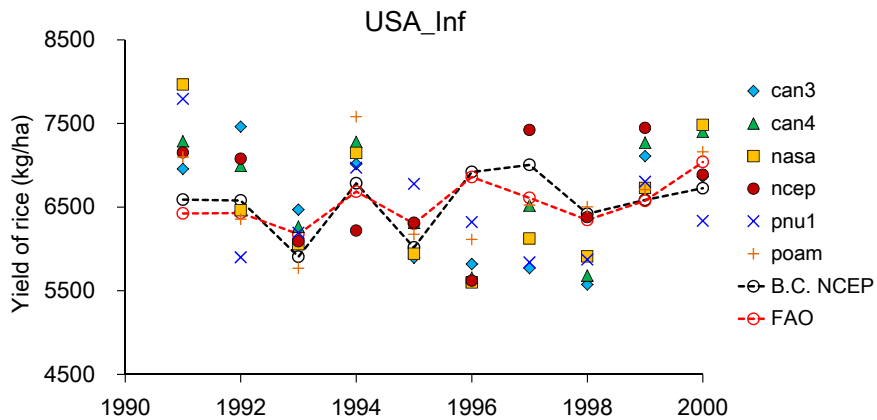


Figure 3.62 Rice yield in 1990s in the USA [after anomaly inflation]

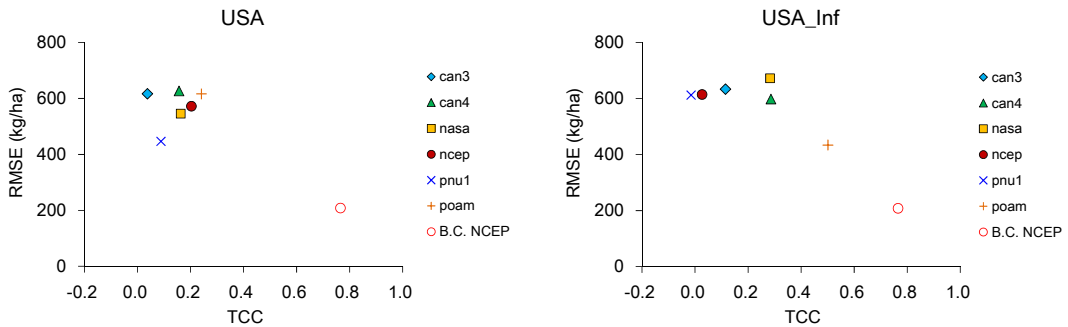
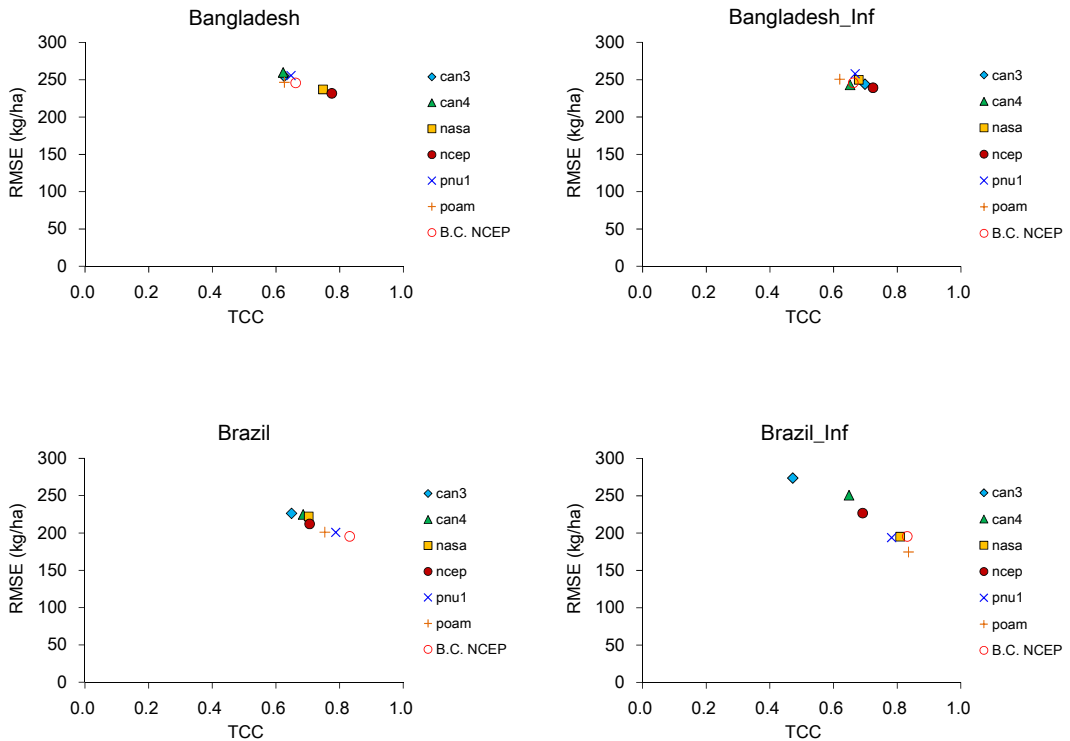


Figure 3.63 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in the USA

USA의 경우 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 산출된 1990년대 수확량 변동을 보면 FAO의 곡물통계 자료와 유사하게 나타나고 있으며 특히 1993년과 1995년의 수확량 감소 패턴을 어느 정도 따라가는 것으로 나타났다. 반면 계절예측모형을 이용한 수확량 산출 결과는 예측의 불확실성 폭이 크게 나타나고 있으며 특히 pnu1 모형의 경우 경년 변동성이 다른 모형에 비해 크게 나타났다. RMSE와 TCC 분석 결과를 보면 Anomaly 확장 후 poam 모형의 예측 신뢰성이 크게 향상된 것으로 나타나 RMSE는 확장 전과 비교해 약 183kg/ha 줄어들었고 TCC는 0.26 증가한 것으로 나타났다. 반면 pnu1 모형과 ncep 모형은 Anomaly 확장으로 인해 예측의 신뢰성이 낮아진 것으로 나타나고 있어 Anomaly 확장 방법을 적용할 때 주의가 요구된다.



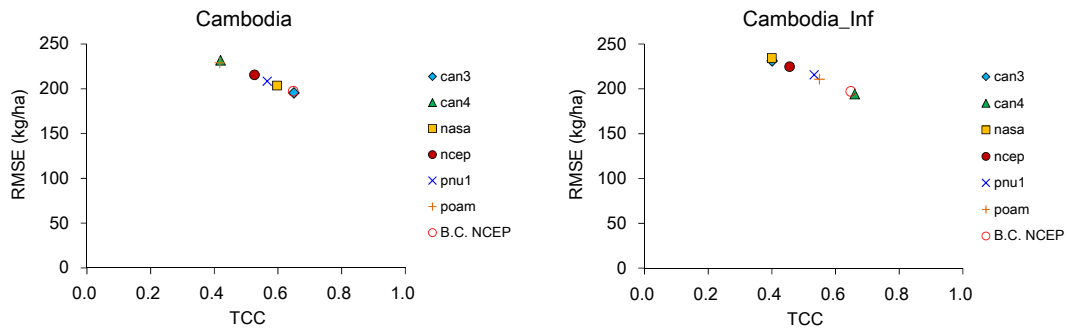
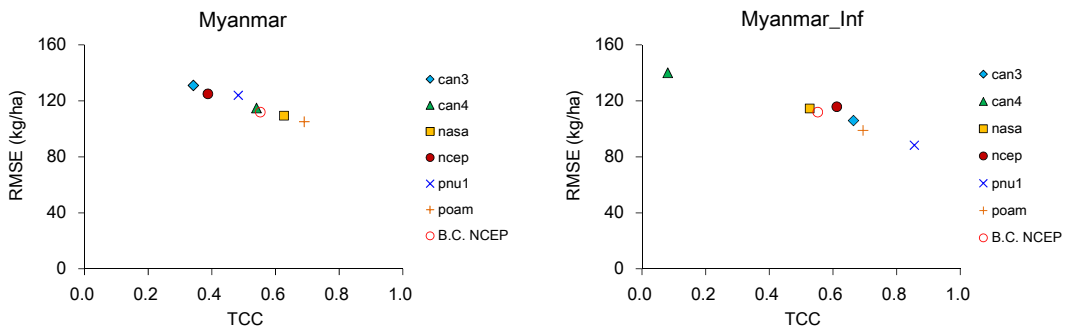


Figure 3.64 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in Bangladesh, Brazil and Cambodia

Figure 3.64–Figure 3.66는 14개 주요 쌀 생산국 중 China, India, 우리나라, USA를 제외한 나머지 10개국에 대한 계절예측모형을 이용한 쌀 수확량 예측의 신뢰성에 대한 모형별 RMSE와 TCC 분석 결과를 나타내고 있다. Bangladesh와 Brazil, Cambodia의 경우 B.C. NCEP을 이용해 산출된 수확량의 신뢰성이 계절예측자료를 이용한 결과와 비슷하게 나타났으며 전반적으로 RMSE가 300kg/ha 이하이고 TCC가 0.4 이상 나타나고 있다. Brazil의 경우 poam 모형은 RMSE와 TCC가 각각 174kg/ha와 0.84로 B.C. NCEP보다 신뢰성이 높게 나타났다.



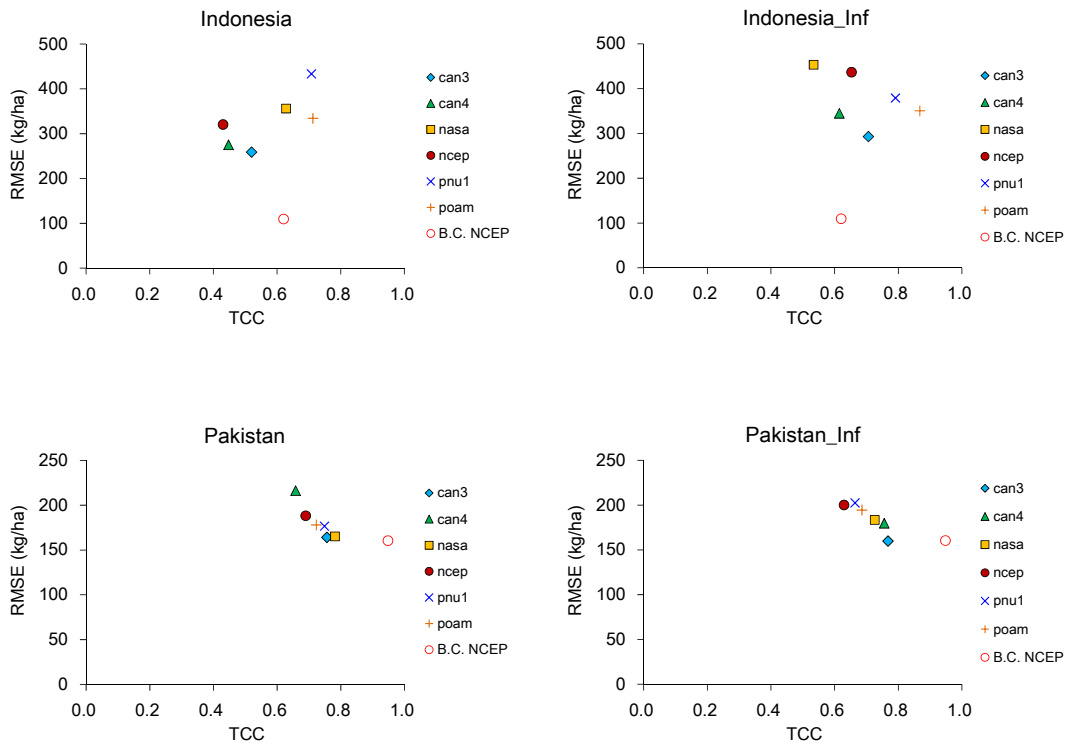


Figure 3.65 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in Myanmar, Indonesia and Pakistan

Myanmar의 경우 B.C. NCEP의 수확량 예측결과의 신뢰성이 높지 않은 것으로 나타났으며 Anomaly를 확장함에 따라 can4 모형에서는 TCC가 떨어지고 pnu1 모형에서는 TCC가 증가하는 것으로 나타났다. Indonesia의 경우 전체적으로 RMSE가 200kg/ha에서 500kg/ha 사이에 존재하고 있으며 TCC의 경우 0.4 이상으로 나타나고 있다. Pakistan의 경우 전체적으로 RMSE가 250kg/ha 이하이고 TCC가 0.6 이상으로 나타나고 있으며 Anomaly 확장 후 can3 모형의 수확량 예측 결과는 RMSE와 TCC가 각각 159kg/ha와 0.77로 나타나 신뢰성이 높게 평가되었다.

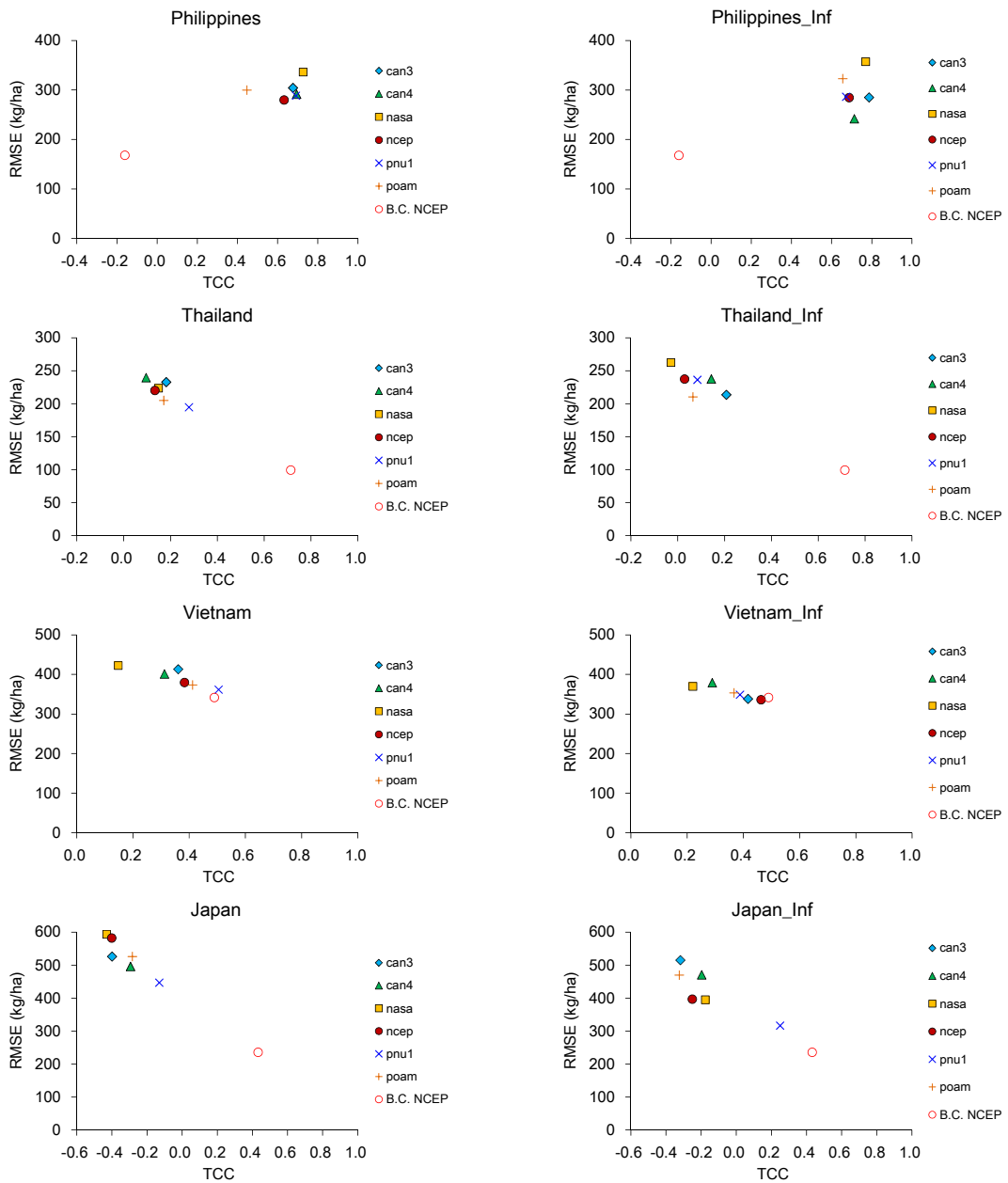


Figure 3.66 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation in Philippines, Thailand, Vietnam and Japan

Philippines의 경우 B.C. NCEP을 이용한 수확량 예측결과의 RMSE와 TCC가 각각 167 kg/ha와 -0.16으로 나타나 신뢰성이 낮게 평가되었다. 계절예측 모형을 이용한 수확량 예측결과는 RMSE가 평균적으로 약 300 kg/ha 이었으나 TCC가 0.6 이상으로 나타났다. 3.1.1.1 에서 Philippines의 NCEP 재분석 기온자료를 분석한 결과 다른 주요 쌀 생산국 보다 CRU 3.2 관측 자료와 큰 차이를 보였었는데 Philippines에서의 기후자료의 재현성이 떨어져 쌀 수확량 예측 결과에도 어느 정도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Thailand의 경우 B.C. NCEP을 이용한 수확량 예측결과의 RMSE와 TCC가 각각 99kg/ha와 0.71로 나타나 신뢰성이 높게 평가되었다. Anomaly를 확장 전 계절예측 자료를 이용한 쌀 수확량 예측결과는 RMSE가 194-239kg/ha 사이에 분포하고 있으며 TCC는 0.1-0.28 사이에 분포하고 있어 예측의 신뢰성이 상대적으로 낮게 나타나고 있다. Anomaly를 확장 후 계절예측 자료를 이용한 쌀 수확량 예측결과는 RMSE가 평균적으로 약 220 kg/ha 이었으며 TCC는 nasa 모형에서 음(-)의 상관을 보이는 등 전체적으로 0.21 이하로 나타나 예측의 신뢰성이 Anomaly 확장 전보다 낮아진 것으로 확인되었다.

Vietnam의 경우 B.C. NCEP을 이용한 수확량 예측결과의 RMSE와 TCC가 각각 341kg/ha와 0.49로 나타나 신뢰성이 높게 나타나지는 않았다. Anomaly를 확장 전 계절예측 자료를 이용한 쌀 수확량 예측결과는 RMSE가 361-422kg/ha 사이에 분포하고 있으며 TCC는 0.15-0.50 사이에 분포하고 있어 예측의 신뢰성이 상대적으로 낮게 나타나고 있다. Anomaly를 확장 후 계절예측 자료를 이용한 쌀 수확량 예측결과는 RMSE가 335-378kg/ha 사이에 분포하고 있으며 TCC는 0.22-0.46 사이에 분포하고 있어 Anomaly를 확장함에 따라 대체적으로 RMSE가 감소하는 것으로 나타났으며 ncep 모형의 신뢰성이 증가한 것으로 나타나고 있다.

Japan의 경우 Anomaly를 확장하기 전에는 계절예측모형의 쌀 수확량 예측결과 RMSE가 446kg/ha에서 582kg/ha 사이에 분포하고 TCC가 모두 음(-)의 상관을 나타

내고 있지만 Anomaly를 확장한 후에는 RMSE가 316kg/ha에서 514kg/ha 사이로 감소하는 것으로 나타났고 TCC 또한 전체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 pnu1 모형의 수확량 예측결과의 RMSE와 TCC가 130kg/ha 감소하고 0.38 증가한 것으로 나타나 Anomaly 확장에 따라 수확량 예측의 신뢰성이 향상된 것으로 나타났다.

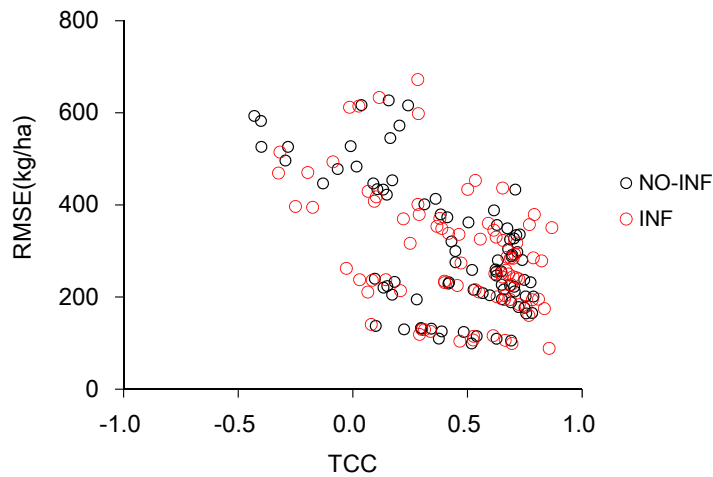


Figure 3.67 Analysis of RMSE and TCC under the before and after anomaly inflation

Figure 3.67은 14개 주요 쌀 생산국에 대한 6개 계절예측모형의 수확량 예측결과의 RMSE와 TCC 분석결과로 Anomaly를 확장하기 전(NO_INF)과 후(INF)에 대해 분포도를 나타내고 있다. NO_INF의 경우 전체 84개 분포 값 중에서 TCC가 0.5 이상이며 RMSE가 200kg/ha 이하인 값이 10개로 나타났으며 주로 Pakistan과 Myanmar에서 신뢰성이 높게 평가되었다. INF의 경우 마찬가지로 TCC가 0.5 이상이며 RMSE가 200kg/ha 이하인 값이 14개로 나타났으며 주로 Pakistan과 Myanmar 그리고 Brazil에

서 신뢰성이 높게 평가되고 있어 Anomaly 확장을 통해 계절예측모형의 쌀 수확량 예측 결과의 신뢰성이 이들 국가에서 향상된 것으로 나타나고 있다.

4. 결론 및 토론

본 연구에서는 APEC Climate Center에서 전 세계 9개 회원국 17개 기후연구 기관으로부터 수집하고 있는 3개월 및 6개월 예측 자료에 대한 농업생산 분야에의 활용성 확대를 위해 글로벌 스케일 작물 모형인 M-GAEZ을 이용해 계절예측 자료 활용에 따른 작물 수확량 예측의 예측 모형 간 불확실성과 예측의 신뢰성에 대해 평가를 실시했다. 우선 계절예측 자료를 이용한 작물 수확량 산정에 앞서 APCC에서 제공되고 있는 6개월 Hindcast 예측 자료에 대한 신뢰성 검증이 이루어졌으며 글로벌 스케일 작물 모형의 기후입력 자료로 일 단위 기후자료가 요구되고 있어 월 단위 계절예측 자료를 일 단위 예측 자료로 재생산하는 기법을 개발했다. 재생산된 일 단위 계절예측 자료는 글로벌 스케일의 작물 모형에 입력되어 전 세계 주요 쌀 생산국에 대한 쌀 수확량이 예측되었고 FAOSTAT의 농업통계 자료와의 비교를 통해 예측 모형별 쌀 수확량 예측의 신뢰성이 평가되었다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

글로벌 스케일의 관측 기후자료로 주로 이용되고 있는 NCEP 재분석 자료는 시간적 공간적으로 연속성이 있으나 모형이 구조적으로 갖고 있는 Bias가 존재하고 있어 본 연구에서는 관측기반으로 생성된 CRU 3.2 자료와의 비교를 통해 1971년부터 2010년의 40년간의 일 단위 NCEP 재분석 자료에 대해 Bias 보정을 실시했으며 Bias 보정된 일 단위 NCEP 재분석 자료는 계절예측모형의 일 단위 예측정보 재생산 과정에 이용되었다. Bias 보정 전의 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2 관측 자료에 대해 쌀 생산지역에 해당하는 기온자료만을 추출하여 국가별로 분석한 결과 Philippines과 Japan을 제외한 대부분의 국가에서 NCEP 재분석 자료는 CRU 3.2 관측 자료보다 낮은 기온 특성을 나타냈으며 특히 도서국인 Philippines에서는 NCEP 재분석 자료의 기온이 CRU 3.2 관측

자료보다 연평균 1.32°C 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 우리나라의 경우 4월에서 8월까지의 NCEP 재분석 자료의 기온이 CRU 3.2 관측 자료보다 약 0.7°C 낮게 나타난 반면 9월에서 3월까지의 약 1.0°C 높게 나타나고 있어 여름철과 겨울철의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이처럼 지역에 따라 정도와 패턴의 차이는 있지만 NCEP 재분석 자료와 CRU 3.2 관측 자료 사이에 기온 차가 존재하고 있는 것이 확인되고 있어 본 연구에서는 일 단위 NCEP 재분석 자료의 신뢰성 재고를 위해 기후변화 영향평가 연구에서 기후관측 자료로 주로 사용되고 있는 CRU 3.2 자료를 바탕으로 Bias 보정을 실시했다.

APCC에서 제공되는 6개월 Hindcast 예측 자료의 예측 신뢰성을 평가하기 위해 1983년에서 2006년까지 24년간의 아시아지역 주요 쌀 생육 기간인 7월-9월 평균기온에 대한 예측 모형과 B.C. NCEP 재분석 자료 간 비교를 실시했다. 쌀 생산량이 가장 많은 China의 경우 7월 평균기온은 pnu1 모형에서 B.C. NCEP 재분석 자료보다 약 2.6°C 낮게 예측되어 가장 큰 차이를 보이고 있었으며 India의 경우 can3 모형에서 약 2.4°C 낮게 pnu1 모형에서 약 1.9°C 낮게 예측되었다. 우리나라의 경우에는 nasa 모형에서 약 1.4°C 낮게 예측된 반면 can3 모형에서는 약 1.6°C 높게 예측되었다. USA의 경우 poam 모형에서 약 5.2°C 높게 예측되어 가장 큰 차이를 보이고 있었다. 이상의 예측모형별 기온예측 자료를 국가별로 분석한 결과 예측 모형에 따른 기온 예측의 불확실성 폭이 상당히 크게 나타나고 있으며 USA의 경우 불확실성 폭이 약 6.3°C에 달하는 것으로 나타나고 있어 계절예측 자료를 농업생산 분야를 비롯한 기후응용 분야에 직접 활용하기 위해서는 반드시 Bias 보정 과정이 필요하다는 것을 시사하고 있다.

본 연구에서는 계절예측 자료를 농업생산 분야 연구에 활용하기 위해 단순편이보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법을 이용해 6개월 Hindcast 예측 자료에 대한 Bias 보정을 실시했으며 Bias 보정된 지역 및 국가별 기온 예측 자료에 대한 RMSE와 TCC 분석을 통해 예측의 신뢰성이 평가되었다. China의 경우 7월-9월 평균기온에 대한 예측의 신뢰성은 nasa 모형과 ncep 모형에서 상대적으로 높게 나타났으며 India에서는 can3 모형이 상대적으로 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 7월과 8

월에 TCC가 음(-)의 상관을 보이는 모형이 있어 대체로 예측의 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났으며 USA의 경우 7월과 8월에 모든 예측모형에서 TCC가 전체적으로 0.4보다 작았으며 모형에 따라서는 음(-)의 상관을 보이기도 했다. 이상과 같이 주요 쌀 생산국가에 대해 예측모형별 기온예측의 신뢰성을 분석한 결과 지역에 따라 신뢰성에 큰 차이가 나타나고 있었으며 본 연구의 지역별 신뢰성 분석결과는 해당 지역에 가장 적합한 예측모형을 선택하는데 기여할 수 있을 것이다.

M-GAEZ 작물모형을 이용해 작물 수확량을 산정하기 위해서는 일 단위 기후입력 자료가 요구된다. 하지만 모형의 입력 자료로 활용하고자 하는 계절예측 자료는 아직까지 월 단위 자료만이 제공되고 있으며 이용 가능한 기후요소는 월평균 기온과 월평균 일강수량 자료뿐이다. 본 연구에서는 작물 수확량 시뮬레이션을 위해 작물 모형에서 요구되고 있는 기온, 강수량, 일교차, 일사량, 풍속에 대한 일 단위 자료를 글로벌 스케일로 재생산하고 그 신뢰성에 대해 평가하였다. 일 단위 계절예측 자료 재생산에는 NCEP 재분석 자료의 과거 40년간(1971년-2010년) 일 단위 관측 자료를 이용하는 방법이 제안되었다. Bias 보정 된 계절예측 자료의 월 단위 기온 자료와 가장 근사한 값을 갖는 B.C. NCEP 재분석 자료의 월 단위 기온 자료를 선택한 다음 해당 연/월에 포함된 일 단위 기후자료를 글로벌 스케일로 재생산했다. 월 단위 계절예측 자료로부터 재생산된 일 단위 예측 자료에 대해 국가별로 신뢰성을 평가한 결과 China 지역의 9월 평균기온에 대한 신뢰성이 상대적으로 높게 평가되었으며 can3, nasa, ncep 모형에서는 RMSE가 약 0.4°C에 TCC가 약 0.7로 나타났다. 하지만 기온 이외의 기후자료에 대해서는 신뢰성이 상당히 낮게 평가되고 있어 기후응용분야 연구에 적용하기에 앞서 해결되어야 할 문제점으로 남는다. 이러한 문제는 후속연구를 진행하는 과정에서 과거 관측 자료로부터 가장 근사한 값을 갖는 연/월을 선택할 때 기온 자료만이 아닌 복수의 기후변수에 대해 고려할 수 있는 방법을 개발하거나 날씨 생성기(Weather generator) 등을 이용한 좀 더 발전된 방법을 찾아 해결해 나가고자한다.

계절예측 자료에 대한 Bias 보정 후 예측 모형에 따라 기온의 경년변동 폭은 B.C. NCEP 재분석 자료의 변동 폭보다 확연히 작거나 반대로 크게 나타나기도 한다. 만약

변동 폭이 작은 모형에서 가장 근사한 값을 과거 40년간의 B.C. NCEP 재분석 자료로부터 선택할 경우 같은 연/월의 자료가 다수 선택되어 재생산된 계절예측 자료의 변동성이 작게 나타나게 되며 변동 폭이 너무 큰 모형에서도 특정 연/월의 자료가 다수 선택되는 문제점이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 계절예측 자료의 Bias 보정 시 Anomaly 값을 확장시켜 B.C. NCEP 재분석 자료의 경년 변동 폭과 유사한 변동 폭을 갖도록 조정해 일 단위 예측자료를 재생산했다. 계절예측 자료에 대한 Anomaly 확장 전과 확장 후의 예측 자료를 이용해 재생산된 일 단위 예측 자료를 비교한 결과 Anomaly를 확장했다고 해서 반드시 신뢰성이 높아지는 것은 아니고 모형에 따라 조금씩 차이가 발생했으며 7월 기온예측 자료는 China에서 신뢰성이 높게 평가되었다. 농업생산 분야에서 기후자료에 대한 Anomaly 확장 방법은 아직까지 생소하게 받아들여질 수 있으며 Anomaly 확장 결과가 작물 수확량 예측 결과에 미치는 영향에 대해서도 논의가 필요하겠으나 현 단계에서는 예측자료의 재생산을 위한 다양한 시도의 하나인 점에 의의를 두고자한다.

FAOSTAT 농업통계 자료에 의하면 China와 India의 쌀 생산량이 전 세계 쌀 생산량의 약 50%를 차지하고 있으며 이 두 국가를 포함한 14개 국가에서 전체 쌀 생산량의 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 쌀 수확면적은 India에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며 증가추세를 보이고 있는 반면 China는 두 번째로 넓은 면적을 차지하고 있지만 산업화의 영향으로 1970년대 이후 감소추세를 보이고 있다. 단위 생산면적당 생산량을 나타내는 수확량은 농업생산기술의 발달 정도를 나타내며 USA와 우리나라, China, Japan 등의 순으로 높게 나타났다. 최근 Vietnam 및 Indonesia 등의 몇몇 국가에서 큰 수확량 증가 추세를 나타내고는 있으나 아직까지 선진국에 비해 낮은 수확량을 보이고 있다. 인구증가로 인한 곡물수요량의 증가와 빈번해진 이상기후로 인한 곡물공급량의 감소 등으로 국제 곡물수급이 불안해지고 있는 상황에서 안정적인 식량 공급을 위해 수확량 증대 가능성이 충분한 동남아시아 국가들에 대한 선진국들의 적극적인 농업생산기술 지원이 필요하다.

Bias 보정된 계절예측 자료와 B.C. NCEP 재분석 자료를 이용해 재생산된 일 단위

예측 자료와 여기에 Anomaly 확장을 더해 재생산된 예측 자료를 작물 모형의 기후입력 자료로 이용해 쌀 수확량을 산출했다. 쌀 생산량이 가장 많은 China의 경우 B.C. NCEP 재분석 자료에 의해 산출된 1990년대 쌀 수확량 결과는 FAOSTAT 농업통계 자료와 대체적으로 유사한 결과를 보이고 있으나 계절예측자료에 의한 수확량 예측 결과는 예측모형에 따라 불확실성이 크게 나타났다. 쌀 수확량 예측 결과의 신뢰성에 대해 RMSE와 TCC 분석을 실시한 결과 RMSE는 200-400kg/ha로 대체로 컸으며 TCC는 0.6-0.8 사이로 어느 정도 상관성이 높게 나타났다. India의 경우 RMSE는 80-140kg/ha로 China 보다 작았으나 TCC는 0.1-0.6 사이로 상관성이 대체로 낮게 나타났다. 우리나라와 USA의 경우 RMSE는 각각 400-550kg/ha, 400-700kg/ha로 상당히 컸으며 TCC는 각각 -0.2-0.2, 0.0-0.3 사이로 상관성이 상당히 낮게 나타났다. Anomaly 확장 효과는 지역 및 예측모형에 따라 다르게 나타나고 있어 수확량 예측지역에 적합한 모형 선택을 통해 수확량 예측의 신뢰성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어 China 지역에서 ncep 모형의 Anomaly 확장 전 RMSE와 TCC는 각각 297kg/ha와 0.72 이었으나 확장 후 278kg/ha와 0.82 로 예측의 신뢰성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 대상지역인 주요 쌀 생산국 14개국 전체에 대해 RMSE와 TCC 분석을 통해 쌀 수확량 예측성을 평가한 결과 RMSE가 200kg/ha 이하이며 TCC가 0.5 이상인 값을 기준으로 Pakistan과 Myanmar 그리고 Brazil에서 신뢰성이 상대적으로 높게 평가되었다.

본 연구에서는 APEC Climate Center에서 제공되고 있는 다양한 예측모형의 계절예측 자료를 농업생산 분야에 직접 활용할 수 있도록 맞춤형 기후자료 생산 기술을 개발했다. 또한 이 기술을 통해 생산된 예측모형별 기후예측 자료를 글로벌 스케일 작물 모형에 적용해 전 세계 쌀 수확량을 예측하고 지역에 따른 예측모형별 수확량 예측의 신뢰성 정보를 제공했다. 하지만 작물 모형에 입력되는 계절예측 정보는 아직 응용분야에 적용하는데 있어 만족할 만한 수준의 예측 성능을 보이고 있지 않기 때문에 계절예측 정보에 대한 정확성 문제는 현대 과학에서 해결해야 할 과제로 남아있다. 이렇듯 계절예측 정보를 농업생산 분야에 직접 활용하기에는 아직 한계가 있으며 계절예측 모형에서

제공되는 다양한 기후요소들 사이의 시간적·지역적 상관성에 대해 통계적 기법 등을 통해 분석함으로써 농업생산 분야에 필요한 신뢰성이 향상된 기후정보를 간접적으로 추출 가능할 것이다. 최근 APCC에서는 계절예측 자료를 응용분야에 활용할 수 있도록 다양한 방법을 시도 하고 있으며 농업 및 수자원 분야에 대한 계절예측 자료의 활용성 확대를 위한 연구가 진행되고 있다.

작물 수확량 예측 기법을 통해 제공되는 장기(6개월) 작물 수확량 예측 정보는 작물 재배면적 통계자료와 위성영상 기반의 작물 재배면적 추정 자료와 결합되어 지역별 수확시기에 대한 작물 생산량을 전망하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이번 연구에서는 과거 40년 동안의 일 단위 전 지구 기온 자료를 바탕으로 월 단위 계절예측 자료로부터 일 단위 계절예측 자료를 재생산해 작물모형에 활용하였으나 재생산된 계절예측 자료 중 기온 이외의 강수나 일교차, 일사량, 풍속 등의 자료는 예측의 신뢰성이 상당히 낮게 나타나고 있어 농업생산성 분야 맞춤형 기후자료를 재생산하는 과정에서 좀 더 논리적이고 과학적 기반에 근거한 방법 개발을 통해 재생산되는 일 단위 계절예측 자료의 활용가치를 높여야 할 것이다. 또한 이번 연구에서는 각 계절예측 모형의 Single Model Ensemble 자료를 작물모형의 입력 자료로 이용하고 있어 개별모형의 다양한 Ensemble run에 의한 기온 및 강수량의 변동성이 약하게 나타났다. 각 계절예측 모형의 다양한 Ensemble numbers를 작물모형에 적용한다면 각 모형에 따른 수확량 예측 결과로부터 수확량의 증가 및 감소에 대한 확률예측이 가능할 것이다. 다양한 Ensemble numbers의 계절예측 자료를 이용한 수확시기 작물 수확량에 대한 확률예측에 대해서는 차년도 연구를 통해 그 가능성을 확인해보고자 한다.

농업생산 분야 계절예측 정보 활용성 확대

국제 곡물시장에서 곡물 교역량은 생산량에 비해 매우 작은 특성을 갖고 있기 때문에 만일 우리나라와 같이 곡물의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국가는 충분한 곡물을 확보하지 못한 상황에서 이상기후의 발생으로 곡물 수출국의 생산량이 감소할 경우 자국보호를 우선으로 하는 곡물수출규제 등과 맞물려 국내로의 안정적인 곡물공급이 어려

위저 관련 식품업계 및 사료업계에 큰 타격 예상되며 이는 곧바로 국민 생활경제에 영향을 미치게 된다. 산업의 발달로 물자에 대한 공급이 풍요로워짐에 따라 지금까지는 곡물을 구입할 수 있는 자금만 충분하면 언제든지 수입이 가능할 것이라는 생각이 지배적이었으나 인구증가와 에너지 자원으로로서의 곡물 소비량 증가 등에 따라 곡물확보 경쟁이 치열해 질 것으로 예상되고 있어 앞으로는 이러한 생각의 패러다임이 바뀌어야 할 것이다. 해외로부터의 안정적 곡물공급에 심각한 문제가 발생하기 전에 미리 대처할 수 있는 방안으로 주요 곡물 수출국에 대한 수확시기 생산량 장기 전망기법 개발이 제안될 수 있다. 관심 곡물에 대한 생산량을 수확시기 4-5개월 전에 예측할 수 있다면 곡물공급에 대한 위협을 사전에 파악하여 안정적 곡물재고를 확보함으로써 예상되는 충격을 완화시킬 수 있다.

최근 한국농촌경제연구원(KREI)에서는 국내 축산농가와 식품업계의 안정적인 곡물확보를 지원하기 위해 해외 모니터링 및 국제곡물 수급전망 모형 개발을 통해 국내 수요량의 90% 이상을 수입에 의존하고 있는 옥수수과 밀, 콩에 대한 국제곡물 관측 시스템을 구축하였고 지역별 수확시기 생산량을 전망하고 있다. 하지만 여기서 제공되는 생산량 정보는 현재까지의 재배면적 모니터링 정보와 기상관측 정보 등을 바탕으로 전망되고 있어 전망 시점부터 작물 수확시기까지 발생하는 가뭄이나 냉해, 홍수 등 곡물 생산량에 직접적인 영향을 미치는 기상현상이 고려되고 있지 않아 곡물수급에 관한 정책적 의사결정에 상당한 어려움이 존재한다. 계절예측 정보를 활용한 장기 곡물 생산량 전망 기술 개발 및 적용은 이러한 문제점을 해결할 수 있는 효과적인 수단이 될 수 있다. APCC에서 현재 개발 중에 있는 계절예측 정보를 고려한 곡물 생산량 장기 전망 기술을 국제곡물 관측 시스템에 적용한다면 예측의 신뢰성이 향상된 국제곡물 수급 전망 정보를 국내 관련 산업계에 시의성 있고 활용도 높게 제공 할 수 있으며 농식품산업의 정책 수립 및 합리적 의사결정지원이 가능할 것이다.

우리정부는 WTO 농업협상에 의해 내년부터 관세화를 통해 쌀 시장을 개방한다고 지난 7월 18일 발표했다. 정부는 수입되는 쌀에 해해 높은 관세부과 정책을 통해 쌀 수입으로 인한 국내 쌀 산업의 피해를 최소화 시키겠다고 약속하고 있지만 장기적으로는

FTA 추진 등의 영향으로 국내로의 쌀 수입량이 점차 증가할 것으로 예상된다. 특히 중국 동북 3성(요녕성, 길림성, 흑룡강성)에서 생산되고 있는 자포니카 계통의 중·단립종 쌀은 한국 및 일본 소비자 기호에 맞는 품종개발을 통해 가격뿐만이 아닌 품질 측면에서도 높은 경쟁력을 갖추고 있어 쌀 시장 관세화 이후 국내 쌀 산업에 가장 큰 위협이 될 것으로 분석되고 있다. 한국농촌경제연구원(KREI)의 정책연구보고서 ‘중국 동북 3성의 중·단립종 쌀산업 구조변화와 생산계열화 실태 조사연구’ (전형진 등, 2009)에 따르면 우리나라에 대한 동북 3성의 쌀 수출 물량이 2002년 7만 8000톤에서 2009년 16만 3400톤으로 두 배 이상 증가한 것으로 보고되고 있으며 이 지역에서의 쌀 생산량은 Table 4.1을 통해 알 수 있듯이 1980년에 423만 톤에 불과했지만 점차적으로 증가해 2008년에는 2천 603만 톤으로 28년 동안 6 배가 넘는 생산량 증가를 보이고 있으며 특히 흑룡강성에서의 생산량이 급격히 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 앞으로도 동북 3성 지역에서의 쌀 생산량은 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있으며 이 지역으로부터의 쌀 수출 잠재력은 2009년에서 2015년 사이에 약 40만 톤 이상으로 추정되고 있어 국내 쌀시장에 미치는 영향이 점차 증가할 것으로 예상되고 있다. 국내 쌀 산업을 보호하기 위해서는 먼저 중국 동북 3성 지역과 같은 쌀 수출 지역에 대한 쌀 생산 상황을 지속적으로 모니터링하고 장기 쌀 생산 예측을 통해 사전 대응책 마련이 필요할 것이다. 본 연구에서 개발된 글로벌 스케일의 장기 기후예측정보를 이용한 전지구 쌀 수확량 예측기술이 동북 3성 지역에 적용된다면 이 지역에서의 수확량 예측 결과를 바탕으로 국내 쌀시장에서의 수입쌀에 대한 선제적 대응이 가능하게 되어 국내 곡물 수급 정책을 수립하는데 있어 적극적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Figure 4.1의 위쪽 분포도는 중국 동북 3성(빨간색 경계 왼쪽부터 요녕성, 길림성, 흑룡강성) 지역에 대한 지리적인 위치와 쌀 생산이 이루어지고 있는 지역을 나타내고 있으며 아래쪽 그래프는 B.C. NCEP 재분석 자료와 6 개 계절예측모형의 6개월 Hindcast 예측자료를 이용한 1991년부터 2000년까지의 동북 3성 지역에 대한 쌀 수확량 예측 결과를 나타내고 있다. B.C. NCEP 재분석 자료를 이용한 수확량 산정 결과는 1994년을 제외하고 전체적으로 과소평가되고 있으나 어느 정도 연 변동 패턴을 따라가

는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 글로벌 스케일의 작물 수확량 계산에 적합한 작물 모형이 적용되고 있어 아무래도 지역규모의 수확량 예측에 있어서는 정확성이 낮게 나타날 수 있으며 동북 3성의 경우 작물 생산가능 지역과 재배 한계지역이 인접해 있기 때문에 수확량 예측의 정확성이 낮게 평가될 가능성이 있다. 또한 수확량 예측 그래프에서 각 계절예측

Table 4.1 Trends of cultivation area and production of medium and short grain rice over the three northeastern provinces in China

단위: 면적(천 ha), 생산량(만 ton)

구분		1980	1985	1990	1995	2000	2005	2008
재배면적	동북3성	853	1,200	1,643	1,737	2,680	2,873	3,708
	-요녕성	388	483	546	550	490	568	659
	-길림성	254	326	420	436	585	654	659
	-흑룡강성	211	392	677	751	1,606	1,650	2,391
생산량(조곡)	동북3성	423	610	973	1,029	1,794	2,011	2,603
	-요녕성	236	263	369	262	377	417	506
	-길림성	108	184	289	297	375	473	579
	-흑룡강성	80	163	314	470	1,042	1,122	1,518

Source: (전형진 등, 2009)

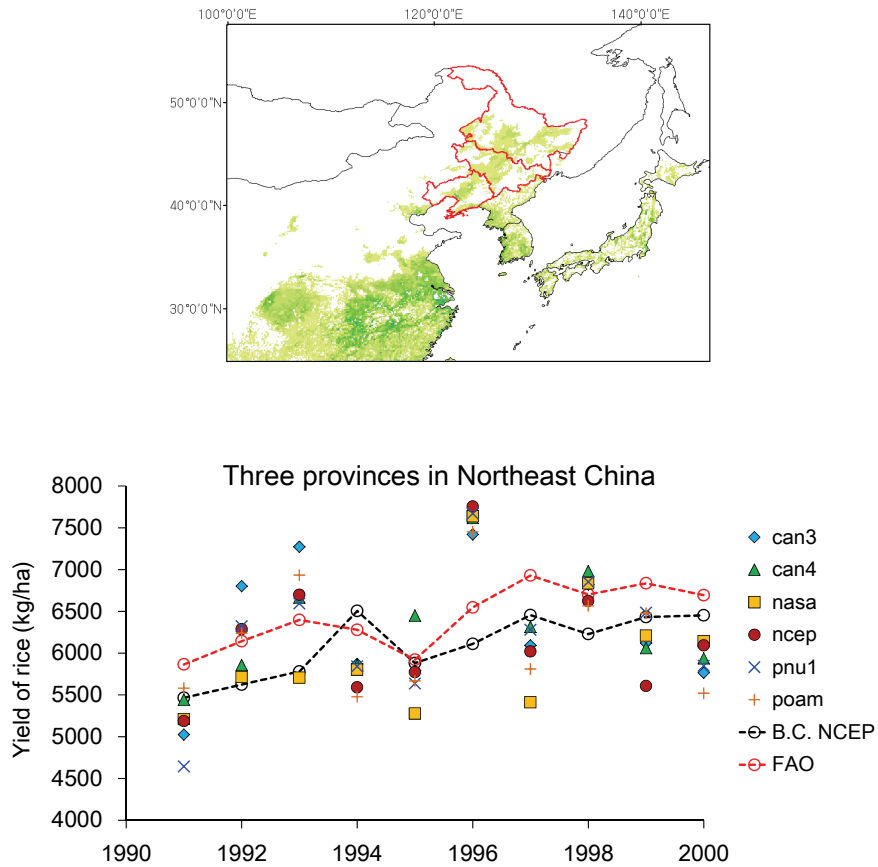


Figure 4.1 Rice cultivation area(upper) and yield(lower) in 1990s over the three Northeast provinces in China

모형의 기후예측의 불확실성에 따라 수확량 예측 결과에 차이를 보이고 있는데 작물모형의 경우 기후예측정보의 예측 성능에 의해 작물 수확량 예측의 정확성이 좌우되고 있어 작물모형에 의한 정확도 향상에는 어느 정도 한계가 존재한다. 농업생산 분야에 대한 바람직한 농업정책 수립 지원을 위해서는 대기과학기술의 발달과 과학적 통계기술의 발달을 통해 정확도 향상된 계절예측 정보의 생산과 농업생산 분야에 대한 활용기술의 개발이 병행되어야 할 것이다.

국제 곡물시장에서 쌀 교역시장은 생산량에 비해 교역량이 차지하는 비중이 상당히 낮은 얇은 시장구조를 갖고 있기 때문에 일부 쌀 생산국가에서 태풍과 홍수와 같은 기상조건의 영향으로 작황에 변동이 발생하면 국제 쌀 가격이 큰 폭으로 상승하게 되어 쌀 수입국에서는 수급조절에 어려움을 겪게 된다. 특히 중·단립종 쌀의 경우 중국 동북 3성, 한국, 일본, 미국 등 생산이 이루어지는 지역이 적고 전체 쌀 교역량에서 차지하는 비중이 5-10%에 불과해 가격 불안정성이 높게 나타나며 가격파동이 심하게 발생한다. 국제적으로 쌀 소비량은 꾸준히 증가 추세는 보이고 있는 반면 생산량은 지역별 기상조건의 영향으로 변동성이 크게 나타나고 있어 쌀 수급여건 변화 가능성에 대한 국가적 차원의 수급대책 마련이 필요하다.

세계 쌀 생산량의 약 90%는 아시아 지역을 중심으로 생산되고 있으며 Table 4.2에서 확인할 수 있듯이 생산량, 소비량, 교역량이 점차적으로 증가하는 추세를 나타내고 있다. 아시아 지역에서 쌀을 수출하는 국가로는 태국, 베트남, 파키스탄, 캄보디아 등이 있으며 쌀 수입국으로는 필리핀, 말레이시아, 방글라데시, 스리랑카 등이 있다. 태국은 세계 최대 쌀 수출국이며 다른 아시아 국가들과 달리 수출제한 조치를 취하지 않고 있어 연간 약 900만 톤에 달하는 수출량을 보이고 있다. 반면 필리핀은 세계 최대 쌀 수입국으로 국내 쌀 자급률이 85% 수준이고 나머지 15%는 태국 등으로부터 수입을 통해 부족분을 조달하고 있으나 불안정한 공급 시스템으로 인해 쌀 가격이 급등하여 쌀 파동으로 인한 사회적 불안을 불러오기도 했다. 최근 필리핀에서는 태풍 및 홍수 피해

Table 4.2 Trends of world rice production, consumption and trade

단위: 백만 톤

곡물연도	전 세계			아시아		
	생산량	소비량	교역량	생산량	소비량	교역량
1960/61	150.8	156.1	6.4	138.6	143.6	4.5
1970/71	213.0	209.9	8.5	195.9	191.7	5.3
1980/81	269.9	270.1	12.4	244.9	241.8	7.9
1990/91	351.4	343.8	12.1	321.7	308.4	8.0
2000/01	399.4	393.8	24.1	362.7	346.8	18.3
2008/09	448.0	437.8	29.1	403.6	378.1	22.5

Source: FAO, USDA

로 인한 식량부족 문제를 해결하기 위해 본격적으로 쌀 수입에 나서고 있으나 수입관세 문제로 인해 태국과의 미묘한 신경전이 벌어지고 있는 상황이다. 필리핀과 같이 쌀을 주식으로 하고 있으면서 자급률이 낮아 부족한 부분을 해외로부터 수입해야 하는 국가에서는 불안정한 식량수급 문제에 선제적으로 대응하기 위해 우선 경작면적 확대 및 농업 기술 개발을 통해 자국 내 쌀 생산 환경을 개선하고 생산량을 증대시키기 위한 실용적인 정책 수립이 필요하며 자국의 쌀 생산량 예측뿐만이 아닌 주요 수출국의 쌀 생산량에 대한 사전 전망도 필요하다. 본 연구에서 개발된 계절예측 정보를 활용한 글로벌 쌀 수확량 예측 기술은 자국 및 상대국에 대한 작물 수확량 예측 정보 제공에 유용한 수단이 될 것으로 기대되며 기상 및 기후 예측기술의 발달에 따른 계절예측 정보의 예측 정확도 향상을 바탕으로 계절 쌀 생산량 예측의 신뢰도 향상을 통해 안정적인 식량공급 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 신용희, 2013. 아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가. APEC 기후센터 연구보고서.
- 전형진, 남민지, 李寧輝, 2009. 중국 동북 3성의 중·단립종 쌀산업 구조변화와 생산계열화 실태 조사 연구. 한국농촌경제연구원 정책연구보고서.
- Ahn JB, and HJ Kim, 2013. Improvement of one-month lead predictability of the wintertime A0 using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteorol. Appl.* 21(2), 415-418.
- Allen, R.G., L.S., Pereira and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No 56, FAO, Rome.
- Cantelaube, P., and Terres J.M., 2005. Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus* 57A:476-487.
- CIESIN, 2005. Gridded Population of the World (Version 3); Center for International Earth Science Information Network, Palisades. (available at <http://sedac.ciesin.org/gpw/>)
- FAO, 1978. Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1. Methodology and results in Africa. *World Soil Resources Report*, Rome 48, pp. 150-164.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO, 1995. Digital Soil Map of the World (Version 3.5). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO, 2002. Maximum available soil moisture. Food and Agriculture Organization of

the United Nations, Rome, Italy. (available at <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>)

Fischer, G., van Veldhuizen, H., Shah, M. and Nachtergaele, F., 2002. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results (Research Report RR-02-02). IIASA, Laxenburg, Austria.

Gibson, J.K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Nomura, A. Hernandez, E. Serrano, 1997. ERA Description. In: ECMWF ERA-15 Project Report Series, Nr. 1. – ECMWF

Iizumi, T.H., Sakuma, M., Yokozawa, M., Luo, J.I., Challinor, A.J., Brown, M., Sakurai, G., Yamagata, T. 2013. Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate1945.

ISDR, Disaster Risk Reduction : 2007 Global Review, 2007.3 <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/1130>

Hans von Storch, 1999. On the Use of “Inflation” in Statistical Downscaling. *J. Climate*. 12, 3505-3506.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, Mo. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne and Dennis Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 77, 437-471.

Kim, S.J., G.M. Flato, G.J. Boer, 2003. A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium Climate Dynamics. 20, 635-661.

- Leff, B., Ramankutty, N. and Foley, J.A., 2004. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB1009.
- Lim E.P., H.H Hendon, S., Langford, O., Alves, 2012. Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall. CAWCR Tech. Rep. No. 051. Available from <http://www.cawcr.gov.au/pulincations/technicalreports.php>
- Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y., 2009. Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric. Ecos. Environ.* 131, 281-291.
- Molod, A., L. Takacs, M. Suarez, J. Bacmeister, I.S. Song, and A. Eichmann, 2012. The GEOS-5 atmospheric general circulation model: Mean climate and development from MERRA to Fortuna. NASA Tech. Memorandum 104606 Volume 28, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- Monfreda, C., N. Ramankutty and J.A. Foley, 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*. 22, 1-19.
- Saha S., S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.T. Hou, H. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M.P. Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, and E. Becker, 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Climate*. 27, 2185–2208.
- Simmons, H., L. St. Laurent, S. Jayne and A. Weaver, 2004. Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation. *Ocean Modelling*. 109, 784-812.

- Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.M., Frenken, K. and Feick, S., 2005. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9, 535-547.
- Trostle, R. 2008. Global Agricultural Supply and Demand: Factors contributing to the Recent Increase in Food Commodity Prices, WRS-0801, Economic Research Service, USDA.
- USGS, 1998. GTOPO30 United States Geological Survey. (available at <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>) World Bank, 2006: World Development Indicators 2006. World Bank, Washington D.C.

APPENDIX I . FAO Soil Unit Ratings for Rain-fed Conditions
(at High Input Levels)

Soil		Crops																											
Unit	Code	wh	wr	dr	mz	by	sg	ry	pm	fx	wp	ca	sp	su	sb	pb	ch	cw	gn	sy	sf	rp	ct	ba	op	ol	al	gr	
G	1	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	1
Ge	2	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	1
Gc	3	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	1
Gd	4	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	1
Gm	5	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	1
Gh	6	6	1	6	4	6	6	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	1
Gp	7	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Gx	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
R	9	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Re	10	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rc	11	1	3	3	3	1	1	1	1	1	2	6	3	1	3	3	3	2	1	3	2	1	1	2	6	1	3	1	
Rd	12	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rx	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
I	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
Q	15	6	4	4	2	2	2	6	1	2	3	2	6	6	2	2	2	2	1	2	2	6	6	6	2	3	2	6	
Qc	16	6	4	4	2	2	2	6	1	2	3	2	6	6	2	2	2	2	1	2	2	6	6	6	2	3	2	6	
Ql	17	6	4	4	2	2	2	6	1	2	3	2	6	6	2	2	2	2	1	2	2	6	6	6	2	3	2	2	
Qf	18	4	4	4	6	2	6	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	6	6	2	
Qa	19	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	2	
E	20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	1
U	21	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1
T	22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	
To	23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	
Tm	24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	
Th	25	2	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	1	
Tv	26	4	4	4	4	4	6	4	6	6	6	2	6	4	4	4	4	4	6	4	4	6	4	6	4	4	4	6	
V	27	1	1	4	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	3	3	6	2	3	6	1	1	6	4	4	1	6	
Vp	28	1	1	4	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	3	3	6	2	3	6	1	1	6	4	4	1	6	
Vc	29	1	1	4	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	3	3	6	2	3	6	1	1	6	4	4	1	6	
Z	30	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zo	31	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zm	32	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zt	33	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Zg	34	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
S	35	6	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
So	36	6	4	4	4	6	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Sm	37	6	4	4	4	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	2	

Lf	82	3	6	3	3	3	3	3	3	3	6	6	6	3	3	3	3	6	1	3	6	3	3	6	1	2	3	1
La	83	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	4	1	1	4	2	1	3	2	4	1	1
Lp	84	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	6	2
Lg	85	6	1	6	6	6	6	6	6	6	4	4	6	2	6	6	6	6	4	6	6	2	4	6	6	4	6	1
D	86	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
De	87	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dd	88	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1
Dg	89	6	1	6	6	6	6	6	6	6	4	6	4	6	6	6	6	6	4	6	6	6	4	6	6	4	6	1
P	90	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Po	91	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Pl	92	2	4	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	4	2	2
Pf	93	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Ph	94	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Pp	95	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
Pg	96	4	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
W	97	2	1	2	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	3	2	1
We	98	2	1	2	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	3	2	1
Wd	99	6	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	2	6	6	6	6	6	6	6	2	6	6	6	2	6	1
Wm	100	2	1	2	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	3	2	1
Wh	101	6	1	2	2	2	6	6	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	6	2	2	1
Ws	102	4	6	6	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	6	4	4	4	4	4	2
Wx	103	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
A	104	3	1	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2	3	1
Ao	105	3	1	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2	3	1
Af	106	3	6	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	4	3	1
Ah	107	3	1	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2	3	1
Ap	108	6	3	5	6	6	5	6	5	5	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	4	6	2
Ag	109	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	4	4	1
N	110	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ne	111	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nd	112	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Nh	113	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
F	114	2	2	1	2	2	3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	1	
Fo	115	2	2	1	2	2	3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	1	
Fx	116	2	2	1	2	2	3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	2	1	
Fr	117	3	3	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	1
Fh	118	3	3	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2	3	1
Fa	119	4	4	6	6	4	2	4	2	2	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	6	2	
Fp	120	6	2	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	6	2	
O	121	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	1
Oe	122	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	1
Od	123	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4	2
Ox	124	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
IA	125	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

APPENDIX II. FAO Soil Unit Ratings for Gravity Irrigation
(at High Input Levels)

Soil			CROPS																											
Unit	Text.	Code	wh	wr	dr	mz	by	sg	ry	pm	fx	wp	ca	sp	su	sb	pb	ch	cw	gn	sy	sf	rp	ct	ba	op	ol	al	gr	
R	1	9	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Re	1	10	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rc	1	11	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rd	1	12	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rx	1	13	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q	all	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qc	all	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ql	all	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qf	all	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Qa	all	19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
E	1	20	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tv	all	26	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Yy	all	42	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Yl	all	43	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Xy	all	48	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Xl	all	49	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
K	1	50	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kh	1	51	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kk	all	52	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Kl	all	53	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
C	1	54	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ch	1	55	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ck	all	56	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cl	all	57	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cg	1	58	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H	1	59	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hh	1	60	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hc	1	61	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hl	1	62	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hg	1	63	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M	1	64	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mo	1	65	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mg	1	66	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	1	67	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Be	1	68	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bd	1	69	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bh	1	70	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bg	1	71	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bx	1	72	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

APPENDIX III. FAO Soil Phase Ratings for Rain-fed Conditions (at High Input Levels)

Soil Phase	Crops																										
	wh	wr	dr	mz	by	sg	ry	pm	fx	wp	ca	sp	su	sb	pb	ch	cw	gn	sy	sf	rp	ct	ba	op	ol	al	gr
STONY	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	6	4	4
LITHIC	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PETRIC	3	1	6	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	3	3	3	1
PETROCALCIC	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROGYPSIC	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROFERRIC	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PHREATIC	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1	1
FRAGIPAN	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
DURIPAN	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	3	3	1
SALINE	10	6	4	4	6	3	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3
SODIC	11	3	3	4	3	3	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3
SHIFTING	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ROCK DEB	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OUTCROPS	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DUNES	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SALT/FLS	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LAKES	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ICE CAPS	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

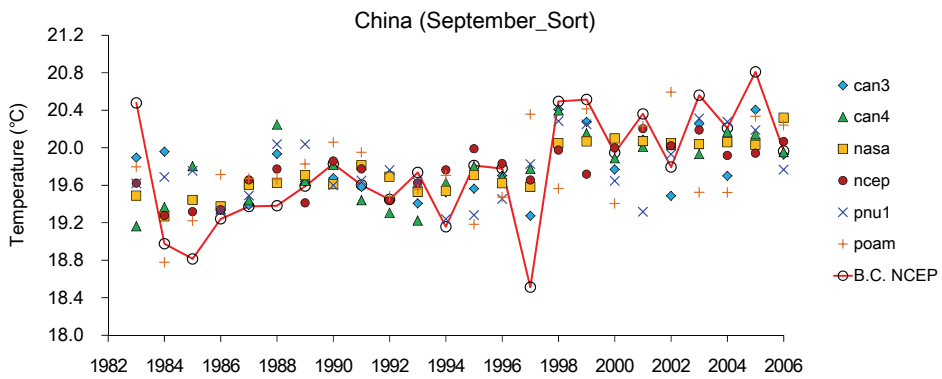
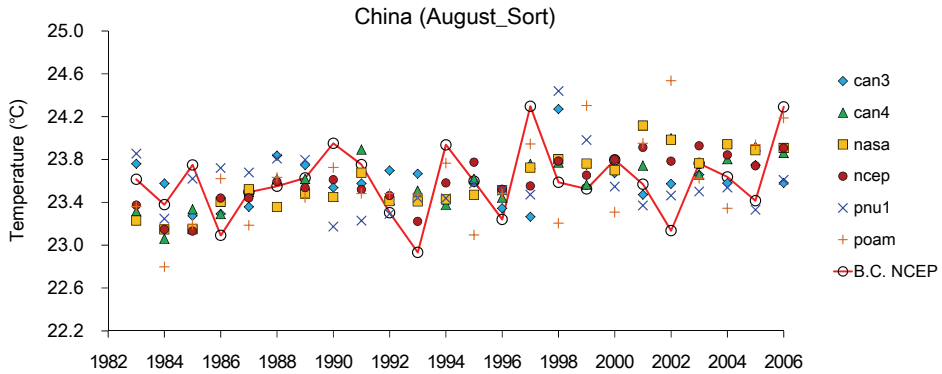
Note: 1=100%S1, 2=100%S2, 3=50%S1, 50%S2, 4=100%NS, 5=50%S1 50%NS, 6=50%S2
50%NS

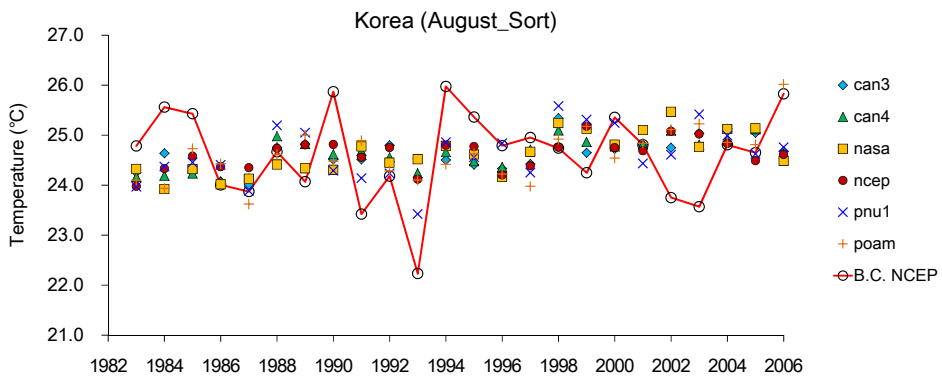
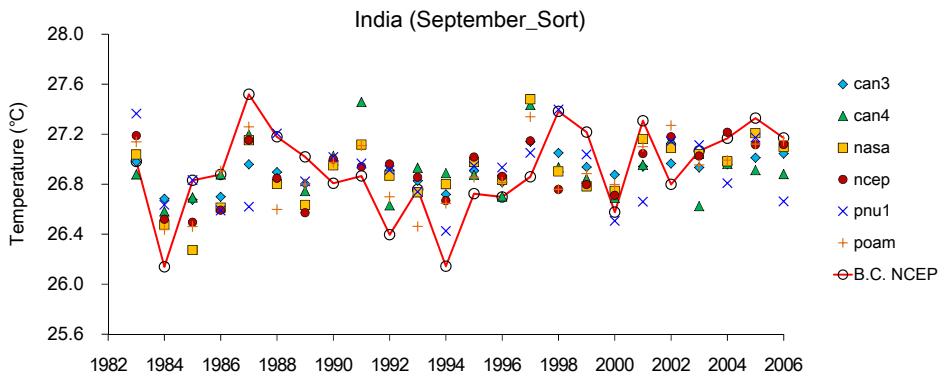
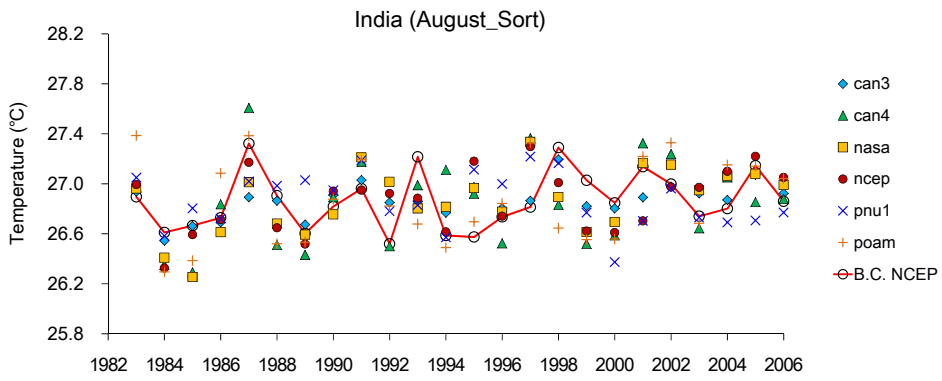
APPENDIX IV. FAO Soil Phase Ratings for Gravity Irrigation (at High Input Levels)

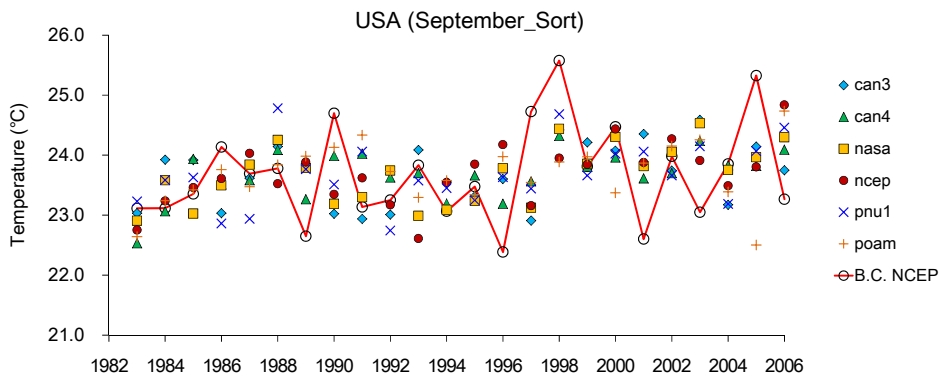
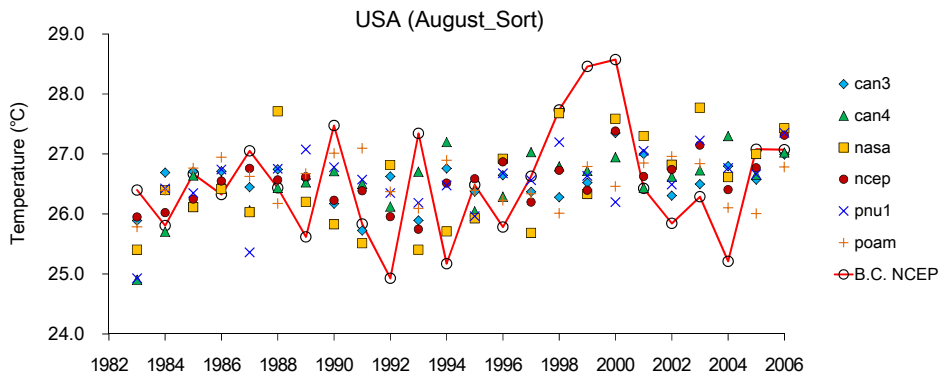
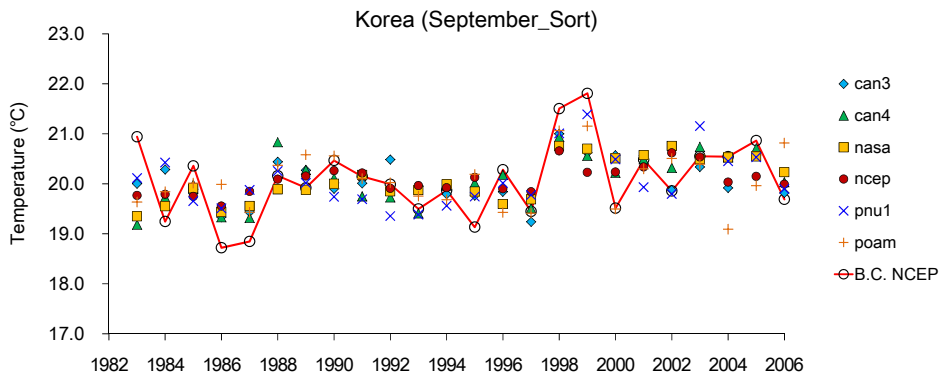
Soil Phase	Crops																										
	wh	wr	dr	mz	by	sg	ry	pm	fx	wp	ca	sp	su	sb	pb	ch	cw	gn	sy	sf	rp	ct	ba	op	ol	al	gr
STONY	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LITHIC	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PETRIC	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	1
PETROCALCIC	4	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PETROGYPSIC	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
PETROFERRIC	6	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
PHREATIC	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1	1
FRAGIPAN	8	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	1
DURIPAN	9	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	1
SALINE	10	6	4	4	6	2	6	4	6	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	3
SODIC	11	2	3	4	2	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	3
SHIFTING	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ROCK DEB	13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OUTCROPS	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
DUNES	15	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SALT/FLS	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
LAKES	17	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ICE CAPS	18	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

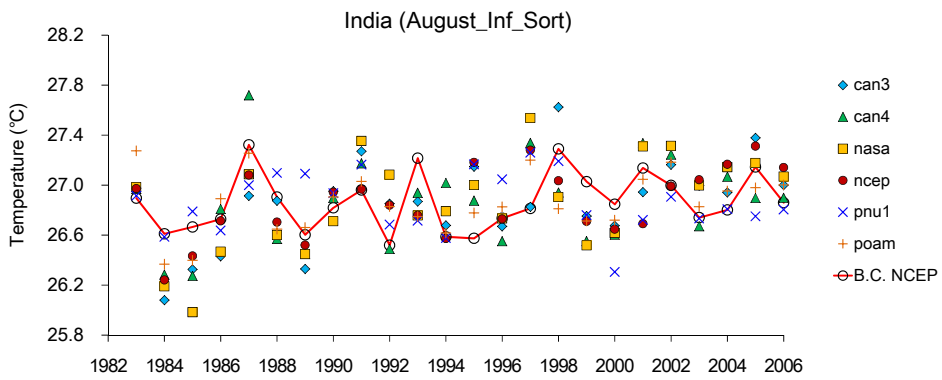
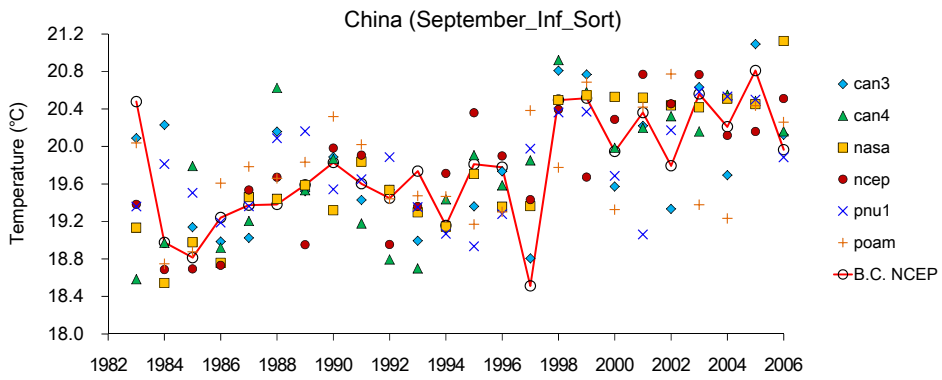
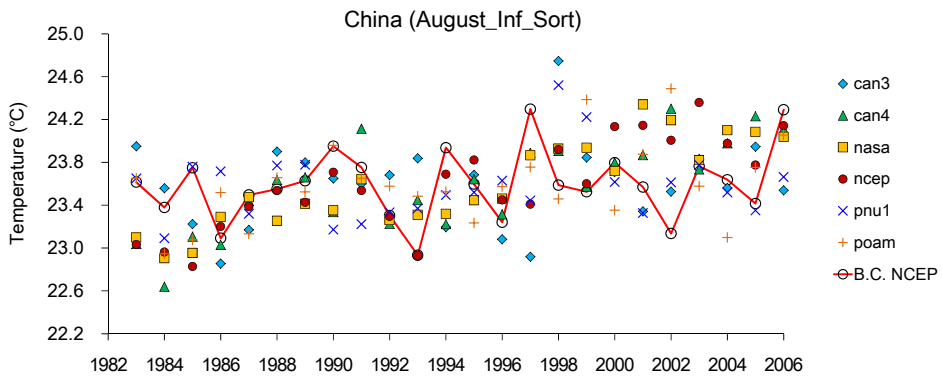
Note: 1=100%S1, 2=100%S2, 3=50%S1, 50%S2, 4=100%NS, 5=50%S1 50%NS, 6=50%S2
50%NS

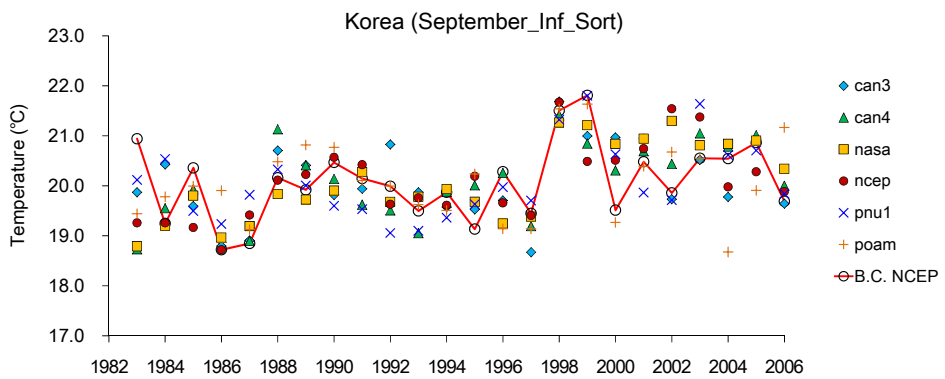
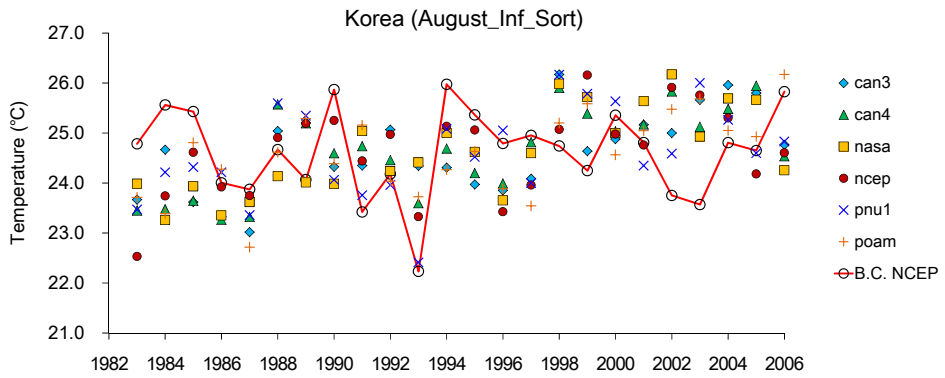
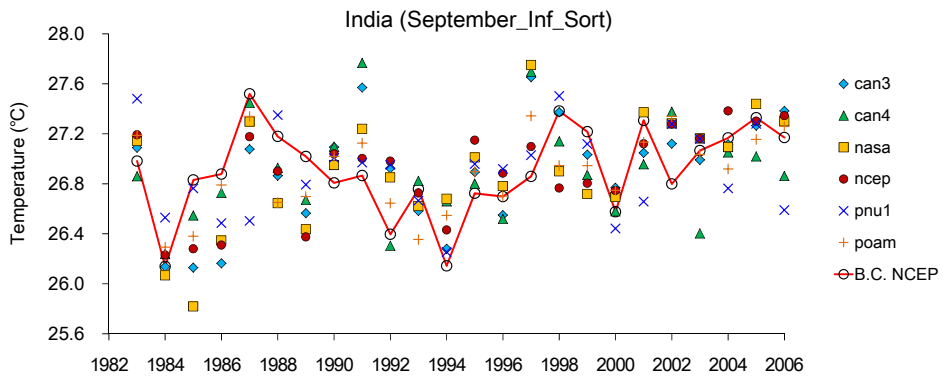
APPENDIX V. 주요 쌀 생산국가 별 계절예측 기온자료의 8월-9월 경년 변동

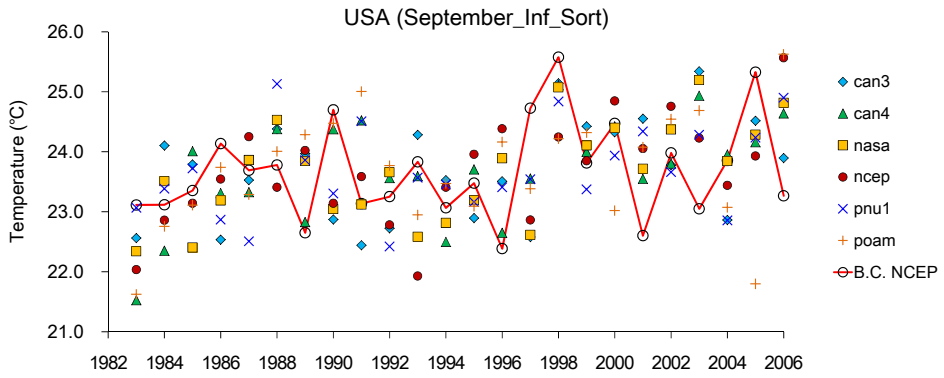
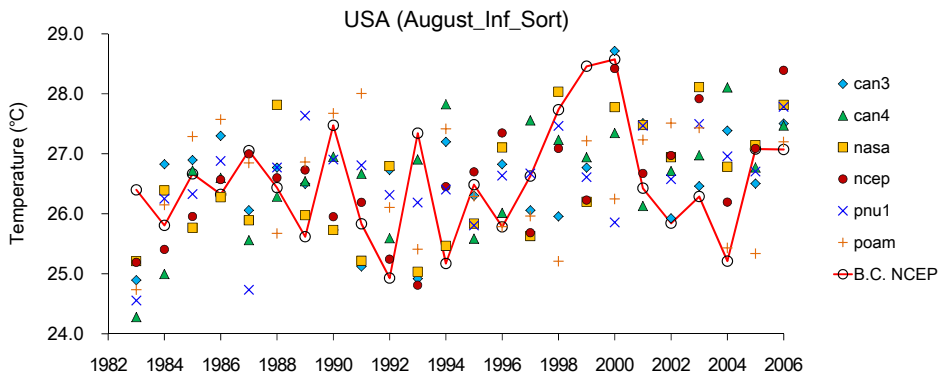




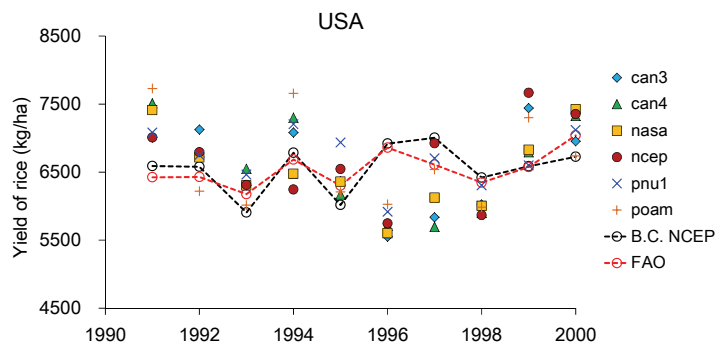
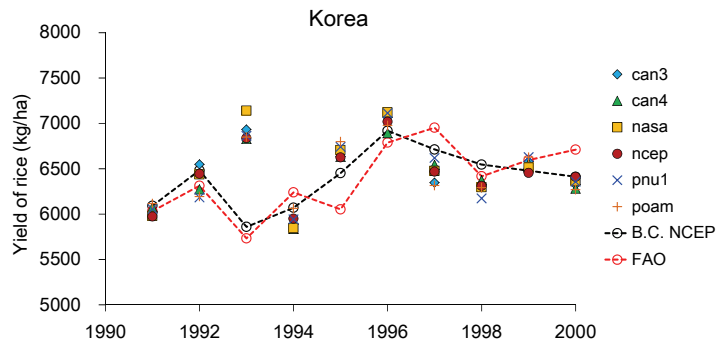
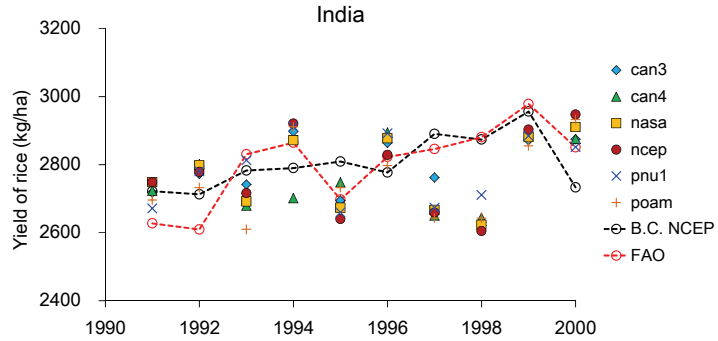


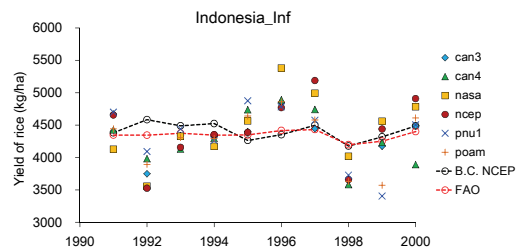
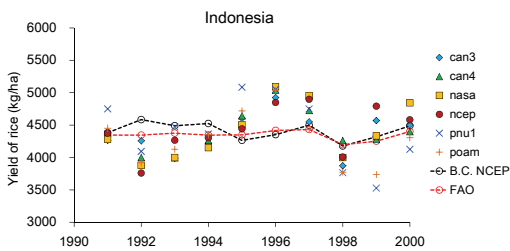
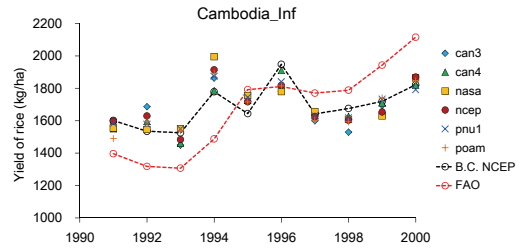
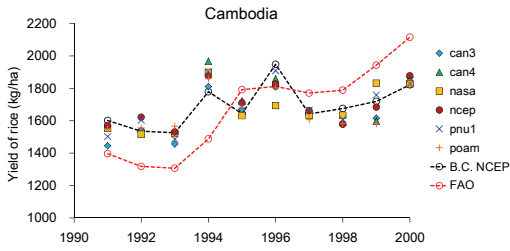
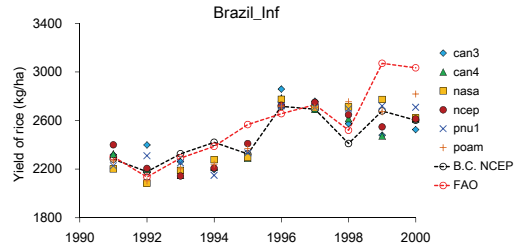
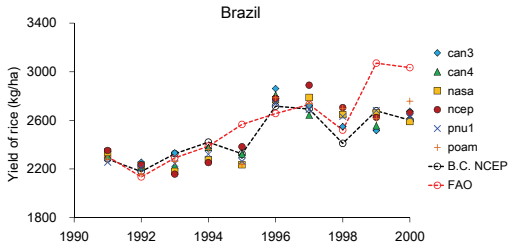
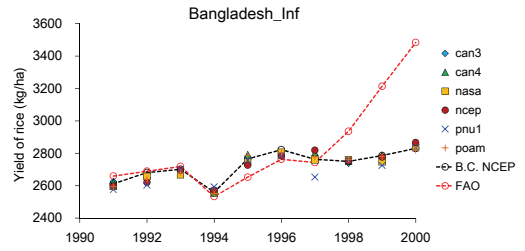
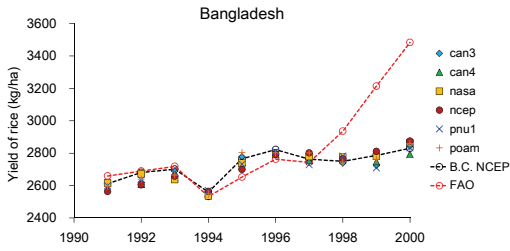


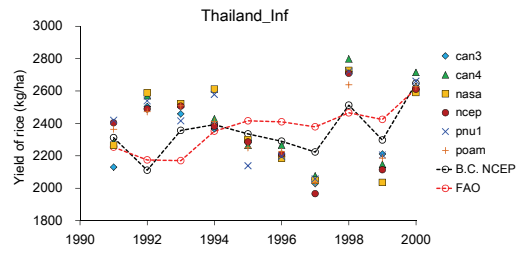
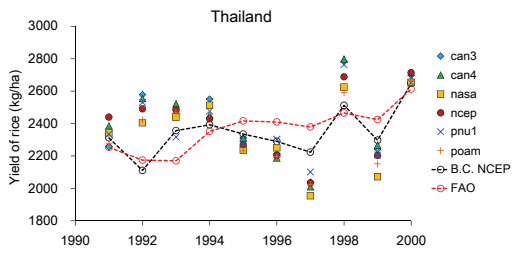
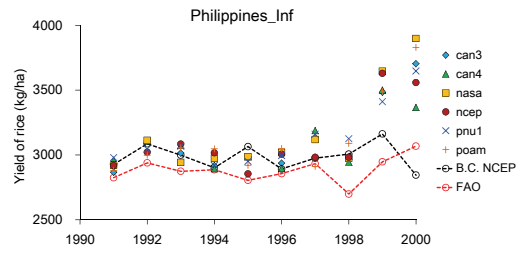
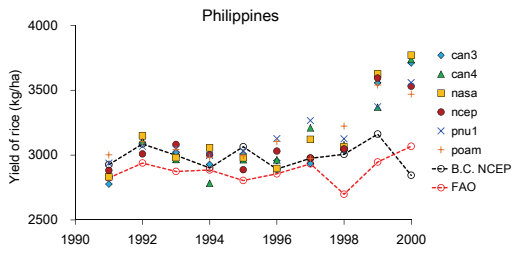
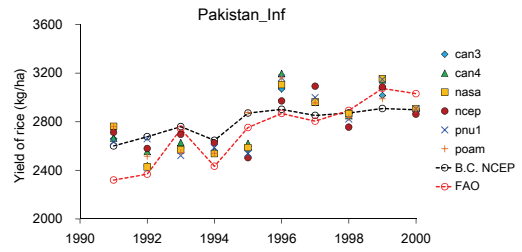
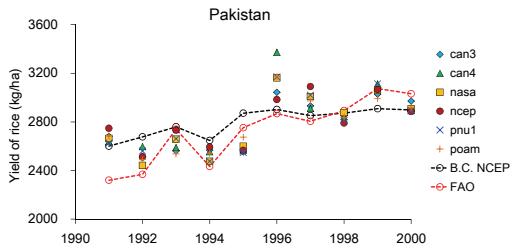
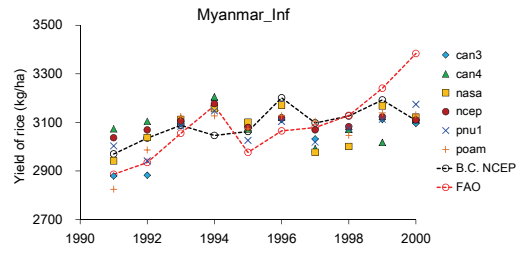
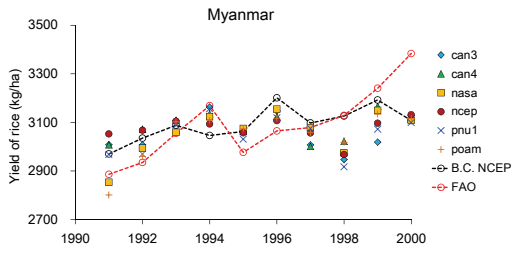


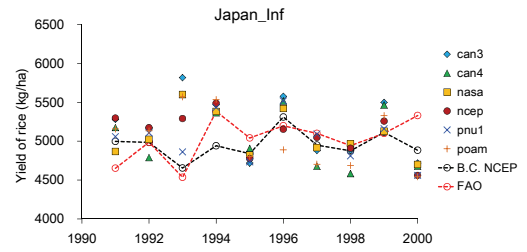
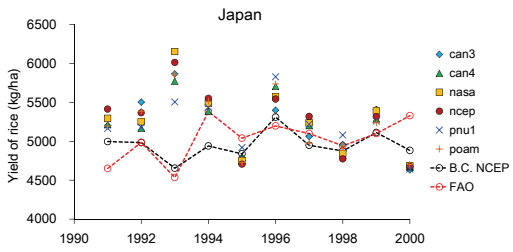
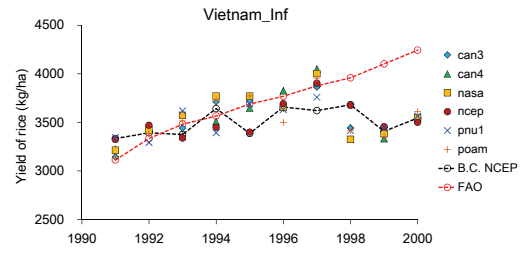
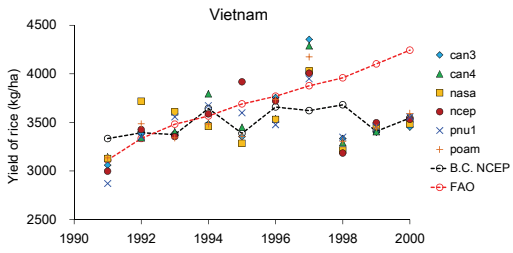


APPENDIX VI. 주요 쌀 생산국가 별 수확량 변화









연구보고서 2015-16

APCC 계절예측 정보 농업분야 활용기술 개발

Prediction of Seasonal Crop Yield Using a Global Scale Crop Model

신용희 기후변화연구팀



APEC Climate Center

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21