

장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

Development of Seasonal Forecast Utilization System for
Long-term Crop Yield Outlook

신용희

장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

Development of Seasonal Forecast Utilization System for
Long-term Crop Yield Outlook

신용희

발간사

현대사회를 살아가고 있는 우리 인류는 과학기술의 경이로운 발달에 힘입어 대체로 풍요로운 삶을 누리고 있다고 말할 수 있겠습니다. 하지만 그 이면에는 산업화에 따른 대기 중 온실가스 배출량의 지속적인 증가로 다양한 형태의 기후변화 현상들이 전 세계적으로 나타나고 있으며 가뭄, 홍수, 폭염과 같은 이상기후 현상의 증가는 현 인류사회의 가장 큰 위협으로 다가오고 있습니다. 최근 들어 전 세계 농업생산 지역은 이상기후 현상의 발생으로 인한 심각한 곡물 생산량 감소 피해를 경험하고 있으며 주요 곡물 생산지역에서의 이러한 피해는 글로벌 식량공급의 안정성을 위협하는 가장 큰 요인의 하나가 되고 있습니다. 쌀을 제외한 대부분의 곡물을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 보다 안정적인 곡물 공급을 위해 주요 곡물 생산지역에 대한 지속적인 작황 모니터링과 함께 곡물 생산량 장기 예측 시스템 구축을 통해 선제적으로 대응해 나갈 필요가 있습니다.

본 연구에서는 전 세계 곡물 수확량 전망에 APEC 기후센터에서 제공하고 있는 장기 기후예측 정보를 활용하기 위해 적합한 기후예측 자료 생산 시스템을 개발하고자 했으며 우리나라 주요 사료용 곡물인 옥수수에 대한 국가별 수확량 전망 기술 개발 및 적용 기술을 개발하였습니다.

본 연구 결과는 국내 사료용 곡물 수입 단체 및 정부의 양곡정책 수립과 관련한 곡물 수입 의사결정 지원에 활용될 수 있고 나아가 선제적 대응 방안 제시를 통해 안정적인 곡물확보에 기여할 수 있을 것으로 기대됩니다.

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 Kiyoshi, 서울대학교 김준교수, 前 농진청 KOPIA 필리핀센터소장 이정택 박사께도 감사의 말씀을 전합니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

In recent years, climate change phenomena caused by global warming have been emerging in various forms. Due to the impacts of climate change, abnormal weather phenomena, such as droughts, floods, typhoons, and heavy snow, are becoming stronger. The frequent occurrence of these abnormal weather phenomena will act as a major threat. For example, it could cause a decrease in major food crop productivity and quality in agricultural crop producing areas. Reduction of crop production caused by abnormal weather in major crop producing areas is acting as a stressor on the increase of international grain prices. Other factors in the increasing grain price include increase of food consumption; high transportation costs; usage for bioenergy; and intervention of speculative funds into grain markets. The sudden change in grain price tends to cause a food crisis and can sometimes ruin governments of grain importing countries that heavily rely on grain imports. In order to ensure a stable and adequate grain supply from major export countries in a precarious international grain market, the domestic feed and food industries in Korea are demanding reliable and frequent information on the trends in the international grain market from the government and research institutes. The Korea Rural Economic Institute (KREI) has built an international grain observation system and publishes a monthly observation report on the international grain trend to help ensure stable grain supplies to livestock farmers and the food industry. However, the reports do not consider meteorological phenomena such as droughts, floods, and cold weather between yield prediction time and crop harvest time, that directly affect the crop yield.

The APEC Climate Center (APCC) produces and offers multi-model ensemble (MME) seasonal forecasts by collecting long-term climate prediction data produced by 16 research institutions in 10 APEC member countries. However, the application of this long-term climate prediction data in the agriculture and water resources sectors is still very low. In order to improve the reliability of the prediction results, APCC performs verification of the forecast data every month. 3-month and 6-month lead time forecast data provided by APCC are generated in $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ spatial units and monthly time units. In order to take advantage of the long-term grain yield forecast, it is necessary to develop the temporal and spatial refinement (downscaling) technique. Different climate models produce different predictions due to the systematic error of each model in the long-term climate prediction data. In order to reduce the difference in predictions, we developed the Simple Bias Correction (SBC) method for the long-term climate prediction data. We applied SBC to the Hindcast (1983-2006) and Forecast (2013-2015) prediction periods.

Daily weather data is necessary in order to simulate crop yields in to the crop model. Since APCC currently offers long-term climate prediction data in a monthly mean data format, a temporal downscaling process is needed to offer data in a daily mean data format. First, we selected the top 5 years from NCEP/NCAR observed monthly temperature data (1951-2014) that are the closest to the forecast monthly temperature data. Next, we selected top year from NCEP/NCAR observed monthly precipitation data (top 5 years) that is the closest to the forecast monthly precipitation data. Forecast daily data were resampled from the selected year's daily data. We performed Temporal Correlation Coefficient (TCC) and Root Mean Square Error (RMSE) analysis to estimate correlation and accuracy of the observed and predicted values of the climate prediction model. As a result, predictability for the temperature was higher in Mexico, a region in a low-latitude area, than in the United States and China. The Modified Global Agro-ecological Zones (M-GAEZ) model is an

estimation model for potential global crop yields. The potential crop yields are calculated based on conditions, such as the climate, soil, and input levels. The M-GAEZ model can estimate the potential yield for 19 varieties of maize. Some varieties of maize differ in growth periods depending on the cultivated area. Daily climate data is used in the M-GAEZ model at a spatial resolution of 1°×1° latitude/longitude. In order to evaluate the reliability of the maize yield prediction, we predicted the yield according to the country, using Hindcast climate prediction data (1991-2000) from six climate prediction models (MSC_CANCM3, MSC_CANCM4, NASA, NCEP, PSNU, POAMA) as inputs to the M-GAEZ model. In the United States and China, the TCC values of the climate prediction models were distributed mainly around 0.4; in Mexico, the TCC values were distributed between 0.4-0.8; and in Brazil, the TCC values were distributed between 0.0-0.6. Maize yield predictability in Mexico was the best in four countries. We also carried out the maize yield prediction using the forecast climate prediction data (2013-2015), according to country.

목 차

1. 서론-----	1
1.1 연구 배경 및 필요성-----	1
1.2 연구 목적-----	3
2. 세계 곡물 통계 자료-----	5
2.1 세계 옥수수 통계 자료-----	5
2.2 국내 옥수수 통계 자료-----	10
2.3 국내 사료용 옥수수 수입-----	12
3. 연구 자료 및 방법-----	15
3.1 기후자료 Bias 보정 및 상세화 기법 개발-----	16
3.1.1 NCEP/NCAR 재분석 자료 Bias 보정-----	16
3.1.2 장기 기후예측 자료 Bias 보정-----	19
3.1.3 공간/시간적 상세화-----	25
3.1.4 장기 기후예측 자료 예측성 평가-----	27

3.2 장기 작물 수확량 예측 기법 개발 -----	28
3.2.1 M-GAEZ 작물 수확량 예측 모형-----	28
3.2.2 장기 옥수수 수확량 전망 기법 개발-----	37
4. 연구내용-----	40
4.1 기후자료 분석-----	40
4.1.1 NCEP/NCAR 재분석 자료 분석-----	40
4.1.2 옥수수 생산지역 기후환경 분석-----	48
4.1.3 과거기후 예측자료 (Hindcast 자료) 예측성 평가---	53
4.1.4 장기 기후예측 자료 (Forecast 자료) 재생산-----	60
4.1.5 장기 기후예측 자료 (Forecast 자료) 분석-----	73
4.1.6 가뭄지수와 옥수수 수확량-----	82
4.2 장기 옥수수 수확량 전망-----	84
4.2.1 세계 옥수수 수확량 증가 추세-----	84
4.2.2 세계 옥수수 파종일 추정-----	88
4.2.3 작물 수확량 예측모형 적용 및 검증-----	93
4.2.4 옥수수 수확량 민감도 분석-----	100
4.2.5 옥수수 수확량 예측성 평가-----	101
5. 결론 및 토론-----	117
5.1 결론-----	117
5.2 연구결과의 활용-----	122
Ⅱ 참고 문헌-----	124

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 지구 온난화로 인해 기후가 따뜻해지면서 전 지구적으로 기후변화 현상이 다양한 형태로 나타나고 있으며 기후변화의 영향으로 그림 1.1과 같이 폭염, 가뭄, 홍수, 우박, 폭설 등의 이상기후 현상의 발생이 점차 빈번해지고 그 강도 또한 세지고 있다. 이러한 이상기후 현상의 전 지구적이고 빈번한 발생은 주요 식량작물에 대한 생산성 감소나 품질 하락과 같은 농업생산 분야에 있어 큰 위협으로 작용하게 된다. 또한 이상기후로 인한 주요 곡물 생산지역에서의 생산량 감소는 신흥국의 경제성장에 따른 식량 소비량 증가 및 국제원유가격 상승으로 인한 운송비 부담 증가, 바이오 에너지 생산을 위한 옥수수 사용량 증가, 국제금융 불안에 따른 곡물시장으로의 투기 자본 개입 등과 함께 국제곡물가격 상승의 불안요인으로 작용하고 있어 우리나라와 같은 순수 곡물수입국 입장에서는 안정적으로 곡물을 공급하는데 어려움이 발생한다 (Trostle, 2008). 2010년 세계 3위의 밀 수출국인 러시아에서는 폭염과 가뭄의 영향으로 밀 생산량이 전년 대비 무려 33 %나 감소했으며 국내 재고량 유지를 통한 자국내 가격 안정과 사료용 곡물 확보를 위해 수출량을 제한하면서 세계 주요 곡물가격이 동시에 폭등하였고 미국 시카고상품거래소(CBOT)에서 거래되는 밀 가격은 7월 한 달에만 무려 42 %나 급등하는 등 최대 폭의 상승세를 나타냈다. 이러한 곡물가격의 급격한 변동은 소비되는 곡물의 상당부분을 수입에 의존하고 있는 곡물 수입 국가에 상당한 부담으로 작용하며 심각한 경우에는 식량파동으로까지 이어져 급기야 정권이 붕괴되는 일도 발생했다.

2 | 장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

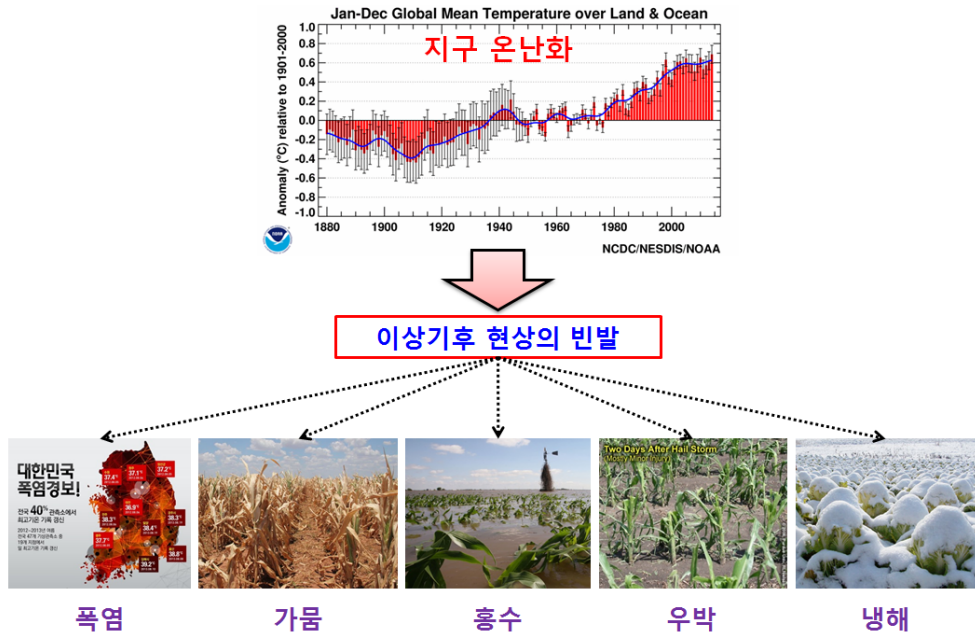


그림 1.1 지구온난화에 따른 이상기후 현상의 빈발과 농업적 피해

국내 사료업계 및 식품업계에서는 최근 불안해지고 있는 국제곡물시장 상황에서 주요 곡물 수출국으로부터 안정적인 가격으로 곡물공급을 확보하고자 관련 정부기관 및 연구기관에 국제곡물 동향에 대한 지속적이고 신뢰성 높은 정보 제공을 요구해오고 있다. 현재 미국농무부(USDA)를 비롯한 일부 선진국과 경제협력개발기구(OECD), 세계식량농업기구(FAO) 등에서 국제곡물 관측 전망에 관한 보고서가 발행·제공되고 있지만 여전히 국내 실정에 맞는 시의 적절한 정보가 부족하다는 문제점을 안고 있다. 한국농촌경제연구원(KREI)에서는 관련 산업계의 요구에 부응하기 위해 한국형 국제곡물 관측 시스템 개발을 통해 국제곡물 동향에 대한 관측 보고서를 매월 발행하고 있다. 국제곡물 관측 시스템은 해외 모니터링 및 국제곡물 수급 전망 모형으로 구성되어 있으며 국내 자급률이 낮은 밀, 옥수수, 대두에 대한 수급 동향 및 전망 등의 정보를 제공한다. 하지만 곡물 생산량에 대한 장기 전망은 전망 시점까지의 재배면적 모니터링 정보와 기상관측 정보 등을 바탕으로 이루어지고 있을 뿐이며 전망 시점부터 작물 수확시기까지 발생하는 가뭄이나 냉해, 홍수 등 곡물 생산량에 직접적인 영향을 미치는 기상현상에 대해서는 아직까지 고려되고 있지 못하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 효과적인 수단으로 주목되고

있는 장기 기후예측에 관한 정보는 보다 현실성 있는 곡물 생산량을 전망하는데 있어 무엇보다 중요하며 장기 기후예측 정보를 활용한 작물 수확시기에 대한 곡물 생산량 예측 기술 개발 및 적용에 대한 필요성이 점차 확대되어 가고 있다.

APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)에서는 2015년 현재 APEC 회원국 중에서 자체적으로 기후예측 모형을 이용해 기후예측자료를 생산하고 있는 국가의 16개 기후연구 기관으로부터 3개월-6개월의 장기 기후예측 정보를 매달 제공 받고 있으며 APCC에서 자체적으로 개발한 Multi-Model Ensemble(MME)기법을 이용해 통일된 형태로 가공 생산한 3개월 및 6개월 선행예측기간(lead time)의 장기 기후예측 정보를 전 지구 규모로 제공하고 있다(Min et al., 2009, 김형진, 2014). 현재 APCC에서 제공되고 있는 MME 계절예측 정보는 세계적 수준의 예측성능으로 평가 받고 있지만 장기 기후예측 정보의 예측 신뢰성에 대한 인식이 아직까지 부족한 상태 이고 농업분야에 대한 장기 기후예측 정보의 활용도 역시 매우 낮은 편이서 장기 기후예측 정보를 활용한 응용분야 적용 연구가 아직까지는 새로운 개척분야라 할 수 있겠다. APCC에서 제공되고 있는 3개월 및 6개월 선행예측기간의 기후예측 정보는 위 경도 2.5도의 격자로 통일되어 작성되고 있으며 월 단위의 기후예측 정보를 제공하기 때문에 장기 곡물 생산량 전망에 직접적으로 활용하기 위해서는 우선적으로 시·공간 적 상세화(downscaling) 기법의 개발이 필요하다. 본 연구를 통해 시·공간 상세화된 장기 기후예측 정보를 활용한 APCC의 장기 곡물 생산량 전망 기술의 개발은 한국형 국제곡물 관측 시스템의 문제점을 보완하는데 활용될 수 있으며 나아가 국내 곡물 수입관련 산업계에 시의성 있고 활용도 높은 정보를 제공함으로써 곡물 수입량 및 수입 시기, 주요 수입선을 선정하는데 있어 의사결정에 도움이 될 것으로 기대된다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 곡물 생산량 전망에 APCC의 MME 계절예측 정보를 활용할 수 있도록 맞춤형 기후자료 생산 시스템을 개발하고 글로벌 작물모형을 이용해 우리나라 주요 사료용 곡물인 옥수수에 대한 국가별 생산량 전망 기술 개발 및 적용 기술 개발 을 통해 국내 사료용 곡물 수입을 담당하고 있는 단체 및 양곡정책 수립 관련 정책담당자에게 시의 적절한 정보를 제공하고자하며 아래와 같은 연구 목적을 갖는다.

4 | 장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

- 1) 장기 곡물 수확량 전망을 위한 APCC 계절예측 정보 활용 시스템 구축
- 2) 곡물 수확량 예측을 위한 맞춤형 시·공간 상세화 예측 자료 재생산
- 3) 맞춤형 장기 기후예측 정보를 활용한 주요 옥수수 생산국에 대한 수확량 전망 기술 개발 및 적용 기술 개발
- 4) 장기 기후예측 정보를 활용한 시의성 있는 국제곡물 생산량 전망을 통해 곡물 수입에 대한 의사결정을 지원하여 선제적 대응 방안 제시 안정적 곡물확보에 기여

2. 세계 곡물 통계 자료

2.1 세계 옥수수 통계 자료

농업관련 국제 통계 자료를 제공하고 있는 국제연합(UN)의 식량농업기구(Food and Agriculture Organization, 이하 FAO)에서는 ‘FAOSTAT’이라는 전 세계 농업 통계 데이터베이스(<http://faostat3.fao.org/home/E>)를 구축하여 세계 각지에서 생산되고 있는 각종 곡물에 대한 생산량(production: ton), 수확면적(harvested area: ha), 수확량(yield: ton/ha) 등의 정보를 제공하고 있다. FAOSTAT의 자료를 이용해 1971년부터 2010년까지 과거 30년 동안의 옥수수 생산량 통계 자료를 분석한 결과 미국과 중국을 비롯한 10개 옥수수 생산국에서 생산하고 있는 옥수수 생산량이 전 세계 총 옥수수 생산량의 80 %를 차지하고 있다(그림 2.1). 특히 미국과 중국의 옥수수 생산량이 각각 40.9 %와 17.9 %로 나타나 두 나라에서 생산되는 옥수수 생산량은 전 세계 옥수수 생산량의 절반 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 미국과 중국의 뒤를 이어 브라질의 옥수수 생산량이 전체 옥수수 생산량의 5.6 %를 차지하고 있으며 멕시코에서 2.9 %, 프랑스 2.4 %, 아르헨티나 2.2 %, 인도 1.9 %, 남아프리카 공화국 1.7 %, 이탈리아 1.4 %, 인도네시아 1.3 % 순으로 옥수수 생산량이 많은 것으로 나타나고 있다.

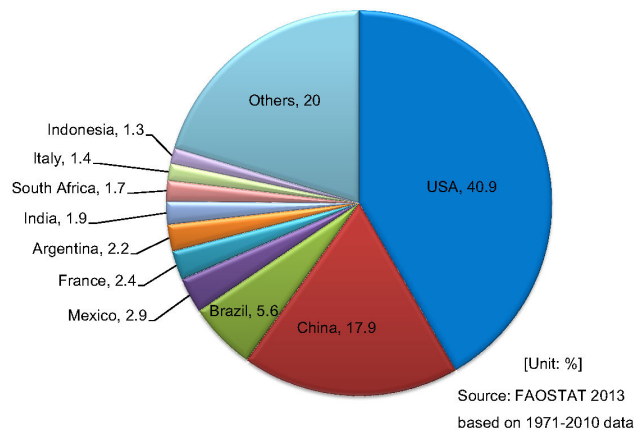


그림 2.1 전 세계 옥수수 생산량에 대한 국가별 점유율

6 | 장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

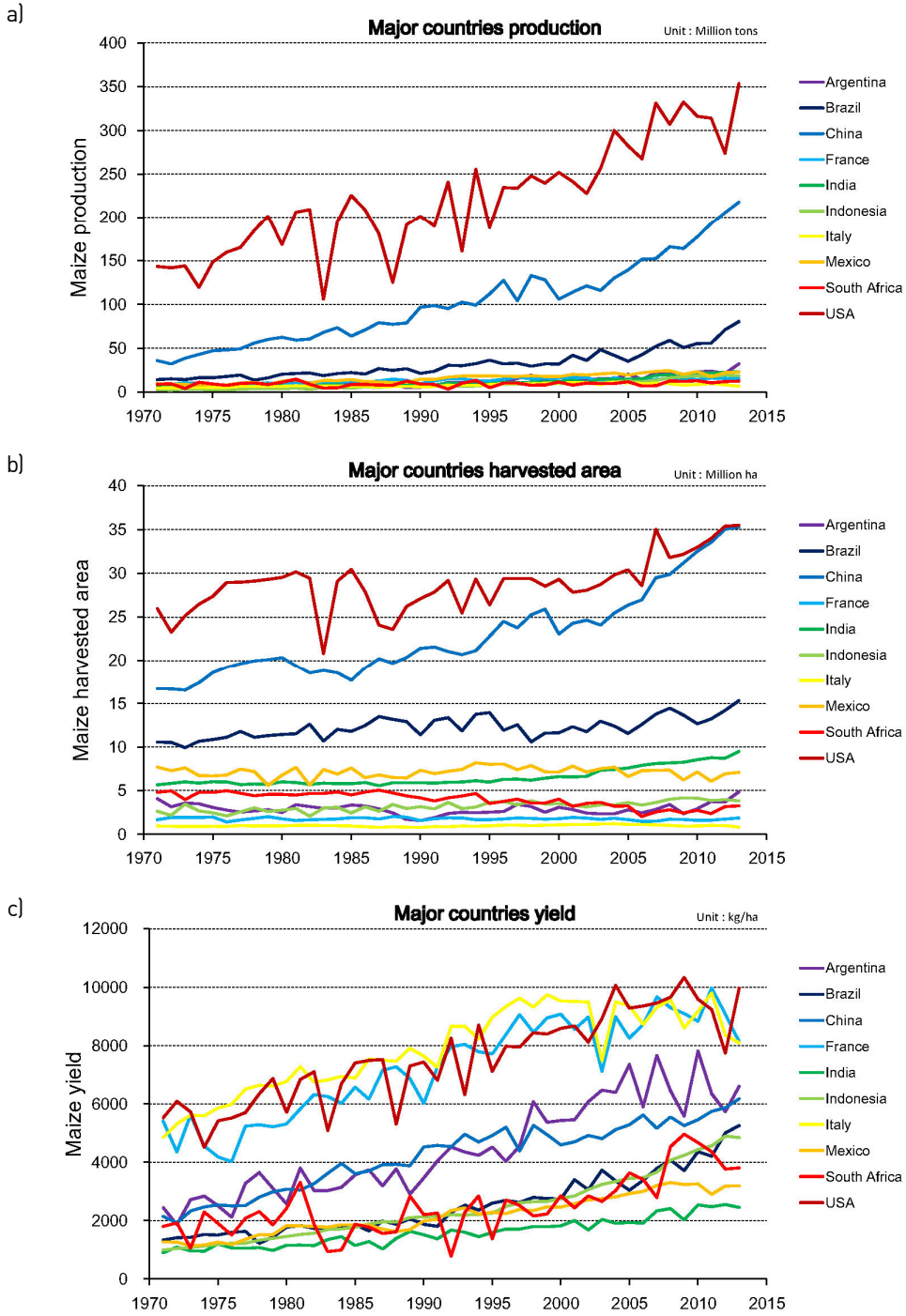
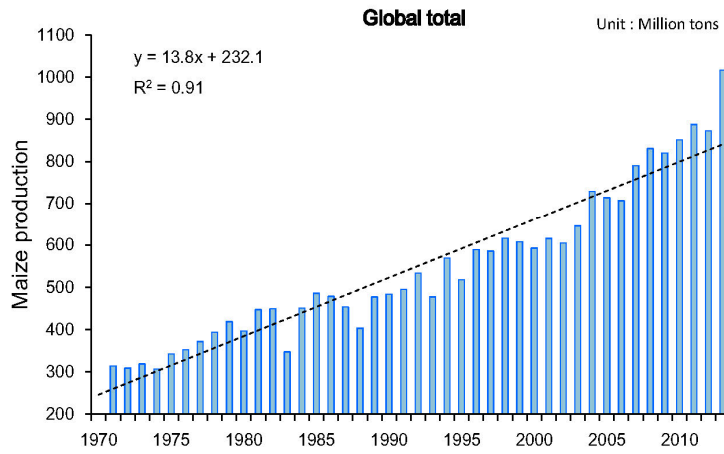


그림 2.2 FAOSTAT 자료를 통해 본 전 세계 옥수수 생산량 상위 10 개국에 대한 과거 옥수수 a) 총 생산량, b) 수확면적, c) 단위면적당 생산량(수확량)의 변동 추이

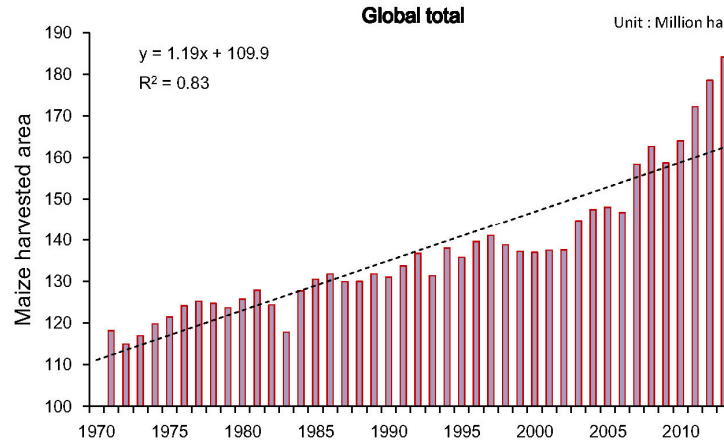
주요 옥수수 생산국에 대한 과거 1971년부터 가장 최근인 2013년까지의 국가별 옥수수 총 생산량, 수확면적, 단위면적당 생산량(수확량)의 경년 변동 자료를 정리하여 그림 2.2에 나타냈다. 가장 옥수수 생산량이 많은 미국의 경우 재배 농가의 경제성 논리에 따른 파종 곡물 선택으로 인한 옥수수 재배면적의 변동과 가뭄 및 홍수와 같은 이상기후 현상의 발생에 따른 옥수수 생산 환경의 변화 등으로 옥수수 생산량은 그 증가와 감소를 반복하고 있으며 농업 생산 기술력의 지속적인 발달로 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 1983년 미국 옥수수 생산량은 전년도와 비교해 50 %에 가까운 감소를 보였는데 이는 1982년 12월에서 1983년에 걸쳐 발생한 엘니뇨 현상으로 인한 극심한 가뭄이 원인인 것으로 밝혀졌다. 그 외에도 가뭄으로 인한 옥수수 생산량의 감소는 1988년, 1995년, 2002년, 2012년에 발생한 것으로 조사되었고 1993년에는 미국 중서부에서 발생한 대홍수로 인해 옥수수 생산량이 전년대비 약 33 % 감소한 것으로 조사되었다. 2013년 미국의 옥수수 총 생산량은 가장 많은 3억 5천만 톤을 기록했는데 이는 1971년의 1억 4천만 톤에 비해 무려 146 %나 증가한 양이다. 미국 다음으로 옥수수 생산량이 많은 중국은 대체로 생산 환경 변화에 따른 큰 변동이 없이 지속적으로 생산량이 증가하고 있는 것으로 나타났으나 1997년에는 동북 3성 지역에서 발생한 가뭄으로 중국 전체 옥수수 생산량이 전년대비 약 18 % 감소한 것으로 나타났다. 2013년 중국 옥수수 총 생산량은 2억 1천만 톤으로 1971년의 3500만 톤에 비해 무려 500 % 이상의 증가를 보이고 있는데 이는 농업 생산 기술력의 발달에 따른 영향도 있지만 중국내 옥수수 소비량 증가에 따른 수요를 충족시키기 위해 국가 차원에서 옥수수 재배면적을 꾸준히 증가시킨 영향이 크다고 볼 수 있으며 최근에는 미국의 옥수수 재배면적과 비슷한 수준까지 증가하게 되었다. 최근 2000년대에 들어서 브라질의 옥수수 생산량이 급격히 증가하기 시작하였는데 여름에 1기작 옥수수를 수확한 이후 겨울에도 2기작 옥수수 파종을 점차 늘리고 있어 앞으로 생산량이 더욱 증가할 것으로 전망되고 있다. 브라질의 옥수수 총 생산량은 2000년대를 전후로 크게 변화하였는데 1971년 1400만 톤에서 2000년에 3100만 톤으로 120 % 이상 증가하였지만 2013년에는 8000만 톤을 기록하여 무려 470 %의 증가를 보이고 있으며 농업 기술력의 발달이 더해지면 전 세계 옥수수 생산량에서 브라질의 옥수수 생산량이 차지하는 비중이 더욱 커질 것으로 전망된다.

전 세계 옥수수 총 생산량은 그림 2.3에서 나타내지는 것과 같이 가뭄 및 홍수 등의 이상기후 현상의 영향으로 생산량이 감소하는 해도 있었지만 전체적으로 연간 1380만 톤의 증가율로 생산량이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 전 세계 옥수수 재배 면적은 전체적으로 연간 120만 ha의 증가율로 증가하고 있는 것으로 나타나고 있으며 옥수수를 이용한 바이오에너지의 수요가 증가함에 따라 2002년 이후 재배면적이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 단위면적당 생산량을 나타내는 수확량은 선진국을 중심으로 1970년대 중후반 급격히 증가하는 추세를 보이다 1980년대 이후로는 증가 추세가 약간 둔화되기도 했지만 개발도상국들의 농업생산 기술력 향상으로 연간 64.3 kg/ha의 증가율로 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다.

a)



b)



c)

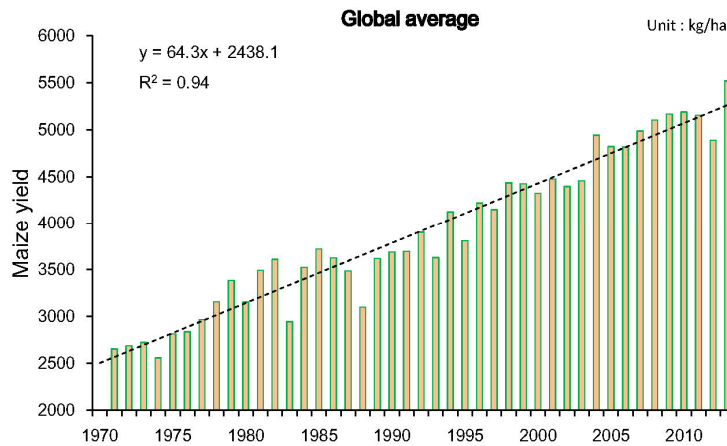


그림 2.3 FAOSTAT 자료를 통해 본 전 세계 옥수수에 대한 a) 총 생산량, b) 수확면적, c) 단위면적당 생산량(수확량)의 경년 변동 및 변동 추이

2.2 국내 옥수수 통계 자료

우리나라 옥수수 생산량은 1970년대만 하더라도 농업생산 기술력의 부족으로 수확면적에 비해 생산량이 상당히 적었지만 1980년대에 들어서 고수확 품종의 개발과 비료 투입량 증가 등의 영향으로 생산량이 급격히 증가했다(그림 2.4). 하지만 1980년대부터 쌀 자급률이 증가하면서 식용 옥수수의 생산량은 줄고 축산업의 발달과 함께 일부 사료용으로 이용되고 있으며 국내 생산보다는 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다.

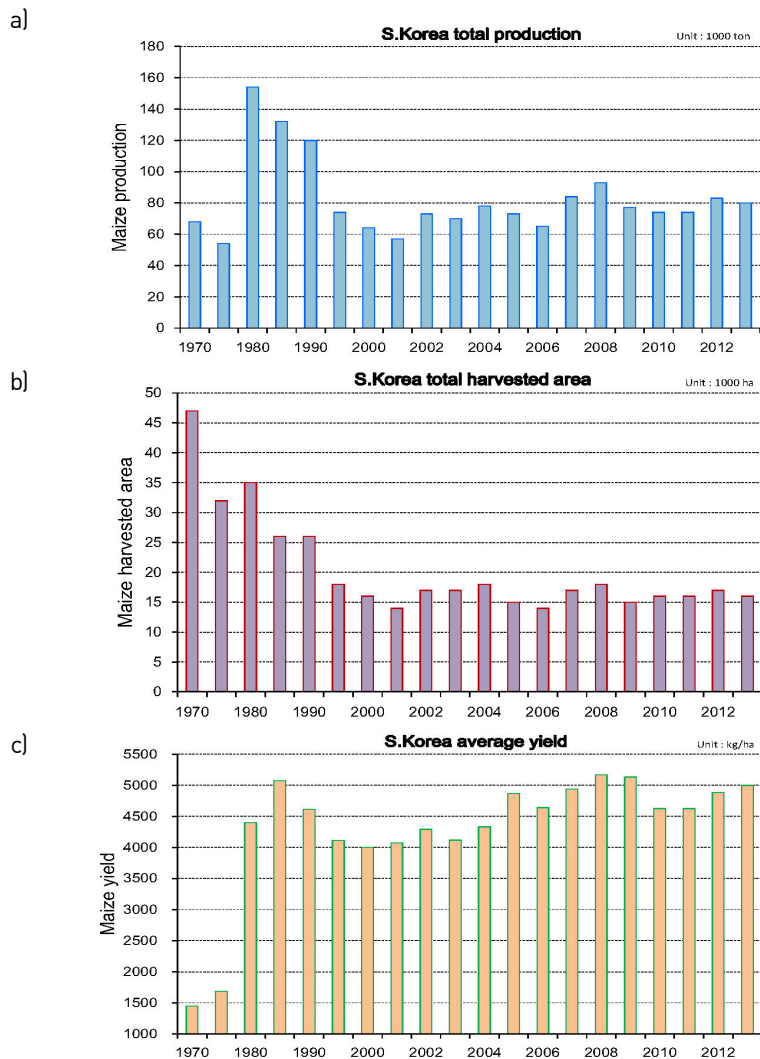


그림 2.4 우리나라 옥수수 a) 총 생산량, b) 수확면적, c) 단위면적당 생산량(수확량)의 변동 추이

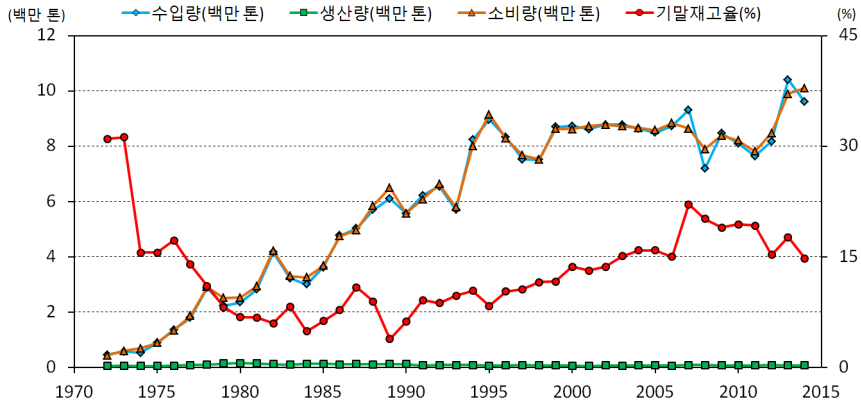


그림 2.5 국내 옥수수 생산량 및 수입량, 소비량 그리고 기말재고율의 변동 추이

국내 옥수수 재배 면적은 1970년대 초반 약 4만 7천 ha에서 점차 줄어들어 2000년에 약 1만 6천 ha 까지 줄어들었고 그 이후로는 큰 변동 없이 비슷한 수준을 유지하고 있다. 옥수수 수확량은 1980년대 후반 5077 kg/ha까지 급격히 증가한 뒤로 서서히 감소해 2000년에 4000 kg/ha까지 떨어졌지만 현재는 5000 kg/ha의 수준을 유지하고 있다.

과거 우리나라에서 생산된 옥수수 총 생산량과 수입량, 소비량에 대한 변동 추이를 살펴보면 1972년부터 2014년까지 옥수수 총 생산량은 거의 변동이 없는 반면 소비량은 지속적으로 증가하여 1970년대 대비 현재 약 5배 증가하였고 소비량 증가와 더불어 수입량도 소비량 증가와 같은 패턴으로 증가해 왔다(그림 2.5). 우리나라 옥수수 소비량의 약 75% 이상은 사료용으로 사용되고 있으며 약 22% 정도는 가공식품용으로 사용되고 있어 국내 축산업의 규모 확장에 따른 사료용 옥수수의 소비량 증가가 수입량의 증가를 불러온 것을 알 수 있다. 국내 옥수수 기말재고율은 1970년대 초 30% 이상이였지만 점차 감소해 1989년에는 5% 이하까지 떨어지기도 했지만 현재는 다시 회복하여 약 15% 대를 유지하고 있다. 하지만 이상기후 현상의 빈번한 발생으로 인한 곡물 생산량 감소의 영향으로 국제 곡물시장의 가격 변동성이 점차 확대되고 있는 상황이어서 곡물 자급률이 30%가 채 되지 않는 우리나라는 국제 곡물 가격의 변동에 시장이 상당히 민감하게 반응할 수밖에 없는 구조를 갖고 있다. 특히 옥수수의 경우 2010년 기준 곡물 자급률이 0.8%에 불과해 주요 옥수수 수출국에서 이상기후 발생으로 인한 생산량 감소가 발생하게 되면 사료 생산업체의 사료 원료용 옥

수수 가격의 상승으로 인한 사료가격의 상승으로 이어지고 이는 다시 축산업계에 영향을 미쳐 육류가격의 상승을 불러오며 최종적으로는 소비자에게 부담으로 작용하게 된다.

2.3 국내 사료용 옥수수 수입

현재 국내에서 사료용 곡물을 구매하는 창구로는 크게 한국사료협회(사협)과 농협으로 나눌 수 있다(그림 2.6). 농협은 농협사료에서 사료곡물의 수입을 담당하고 있으며 사협은 다시 3개 그룹으로 나뉘어 사료곡물을 수입하고 있다. 표 2.1은 사협과 농협의 회원사 현황과 2014년 사료 생산량 및 곡물원료 사용량을 비교하고 있다. 곡물원료 사용량을 보면 사협에서 전체 곡물 사용량의 약 70 %를 차지하며 농협에서 약 29 %를 차지하고 있다. 사협 내에는 원료구매 운영위원회라는 것이 있는데 여기서는 우리나라 전체 사료업계의 구매 관련 문제를 협의하며 구매와 관련된 시장 상황 및 원료 수급, 구매 규정 및 품질 문제 등 제반 문제를 논의하고 결정하는 역할을 하고 있다(한국사료협회 50년사). 최근 곡물가격의 급변동성이 빈번해지면서 우리나라와 같은 순수 곡물 수입국 입장에서는 국제곡물 수급동향과 가격 변동성을 분석하는 일이 매우 중요한 과제가 되었다. 사협은 매월 미국 농무성(USDA)에서 발표하는 세계 농산물 수급전망 보고서(World Agricultural Supply and Demand Estimates)를 분석하여 향후 곡물 가격의 변동을 예측하고 시카고 상품거래소(Chicago Board Of Trade: CBOT) 및 캔사스 상품거래소(Kansas City Board of Trade: KCBT)에서 거래되는 옥수수, 소맥, 대두, 대두박 등의 일일시세를 국내 도착가격으로 환산하여 원료구매위원회에 제공하고 있으며 이는 사료원료를 구매하는데 있어 기초자료로 활용되고 있다. 미국은 현재 우리나라에서 사료용 옥수수를 가장 많이 수입하고 있는 국가지만 최근의 이상기후 발생으로 인한 생산량 감소와 에탄올 등 바이오연료로서의 미국 내 수요 증가로 인해 수출여력이 감소하게 될 경우 사료용 옥수수의 안정적인 확보가 어렵게 된다. 따라서 장기 기후예측 정보를 활용한 주요 옥수수 수출국에 대한 수확량 전망 기술을 통해 사료용 옥수수의 수출여력이 있는 국가들에 대해 수확량 정보를 전망해 나갈 필요가 있으며 급변하는 국제곡물 시장 변동에 능동적이고 선제적으로 대처해 나가야 할 것이다.



그림 2.6 국내 주요 사료용 곡물 수입 및 사료 생산 단체 (한국사료협회, 농협사료)

표 2.1 사협과 농협사료의 2014년 사료 생산량 및 사료용 곡물 사용량

	사협	농협	기타	계
공장개수 (회원사수)	67 (39)	28 (17)	10 (10)	105 (66)
일산능력	21,335	9,080	431	30,846
'14 생산량	12,640,240	5,936,309	121,771	18,698,320
곡물원료 (옥수수)	7,081,291 (5,644,049)	2,903,168 (2,214,342)	65,196 (36,406)	10,049,655 (7,894,797)

* 일산능력 : 8시간 가동기준 생산능력 (톤)

출처: 한국사료협회 2015년 배합사료제조업체현황

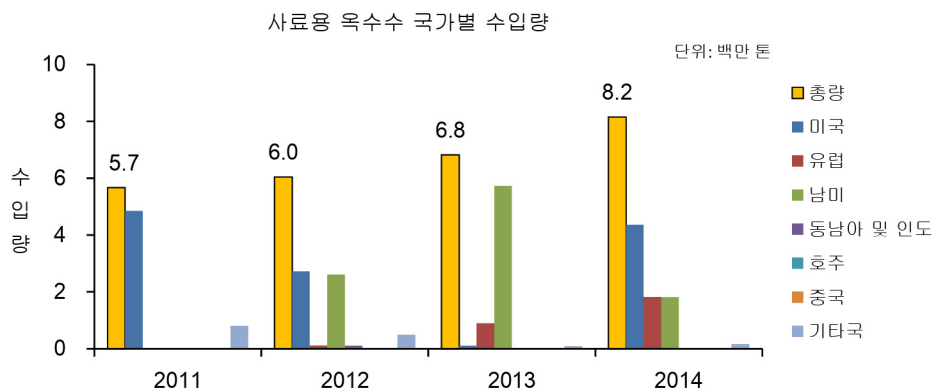


그림 2.7 최근 4년간 주요 수출 국가로부터 수입된 사료용 옥수수 수입량 현황 (출처: 농림축산식품부, 한국사료협회 2014년 사료편람)

최근 4년간의 국내 사료용 옥수수 수입량에 대한 수출국의 현황을 그림 2.7을 통해 확인해 보면 4년 동안 총 옥수수 수입량은 꾸준히 증가했으며 국가별 수입량 분포를 보면 2011년에는 옥수수 수입량의 대부분이 미국으로부터 이루어졌으나 점차 다양화 되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 2013년의 경우 미국으로부터의 수입량은 10만 톤 수준에 불과하며 남미지역으로부터 573만 톤을 수입하였다. 그래프를 통해 최근 사료용 옥수수의 수입선이 점차 다변화 되고 있음을 알 수 있고 이는 옥수수 수출국에서 기상이변에 의한 옥수수 생산량 감소 피해가 발생할 경우에 대비해 보다 안정적인 공급물량 확보를 위해 바람직한 현상이라고 볼 수 있겠다.

3. 연구 자료 및 방법

전 지구 규모의 장기 작물 수확량 전망을 위해서는 먼저 작물모형의 입력 기후자료로 이용되는 장기 기후예측 자료에 대한 맞춤형 기후 정보 생산이 필요하다. 본 연구에서는 장기 작물 수확량 전망에 APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)를 통해 제공되고 있는 6개월 선행예측기간의 장기 기후예측 자료를 활용한 장기 작물 수확량 전망 기법을 개발하고 개발된 전망 기법에 대한 검증과 작물 수확량 예측에 대한 신뢰성을 평가하고자 한다. 그림 3.1은 연구의 개략적인 흐름도를 나타내고 있으며 장기 기후예측 자료를 작물모형의 입력 자료로 이용하기 위해서는 우선적으로 장기 기후예측 자료에 대한 Bias 보정과 공간적/시간적 상세화 방법의 개발과 이것을 통한 농업생산성 분야 맞춤형 장기 기후예측 자료의 생산이 선행되어야 한다.

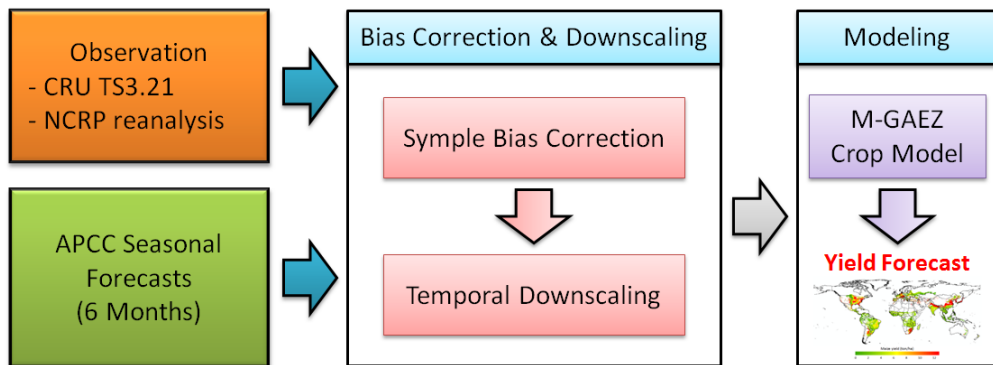


그림 3.1 장기 작물 수확량 전망 기법 개발 및 평가를 위한 연구 흐름도

3.1 기후자료 Bias 보정 및 상세화 기법 개발

3.1.1 NCEP/NCAR 재분석 자료 Bias 보정

재분석(Reanalysis)이란 전 세계 이용 가능한 모든 관측자료로부터 과거기상에 대해 분석하는 과정을 말하며 재분석 자료는 과거기상 분석을 통해 생산된 기온, 풍속 등의 다양한 기상변수에 대한 자료로 기후분야에서 일반적으로 이용되고 있는 재분석 자료로는 NCEP/NCAR의 재분석 자료와 ECMWF의 재분석 자료가 있다. 본 연구에서는 미국 국립환경예보센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)와 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 제공하는 NCEP/NCAR Reanalysis 1의 1951년부터 2014년까지의 64년간의 일평균 재분석 자료를 관측 기후자료로서 이용하고자 한다(Kalnay et al., 1996). 재분석 자료는 지상의 각종 기상 관측자료와 비교해 시간적/공간적으로 연속성이 있지만 자료생산에 사용되는 수치모형과 자료동화기법 적용 과정에서 발생하는 편이(Bias)가 존재하게 된다. 표 3.1은 NCEP/NCAR 재분석 자료에서 제공하는 기후변수들 중에서 장기 작물 수확량 전망에 사용된 일평균의 최고기온과 최저기온, 평균기온, 강수량, 일사량 그리고 풍속을 나타낸다. 기후 연구 유닛 (Climate Research Unit, CRU)에서 제공되는 관측기반의 CRU TS3.21 자료는 전 세계 약 4,000개 이상의 기상 관측지점에서 제공하는 일 자료 또는 하루 이하의 자료로부터 계산된 월 자료를 기반으로 1901년부터 2014년까지 전 지구 육지지역에 대한 월평균 일 최고기온, 월평균 일 최저기온, 월평균 강수량, 월평균 일교차, 구름의 양 등의 기후변수에 대해 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 공간해상도 격자 자료를 제공한다. 표 3.2는 CRU TS3.21 자료에서 제공하는 기후변수들 중에서 장기 기후예측 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료의 편이 보정에 사용된 월평균의 최고기온과 최저기온, 평균기온 그리고 강수량을 나타낸다.

표 3.1 작물모형에 이용된 NCEP/NCAR Reanalysis 1의 제공 변수

항목	변수	단위
air.2m	Daily mean temperature at 2 m	K
tmax.2m	Daily maximum temperature at 2 m	K
tmin.2m	Daily minimum temperature at 2 m	K
prate	Precipitation rate	kg/m ² /s
dswrf	Downward solar radiation flux	W/m ²
wnd	U-wind at 10 m, V-wind at 10 m	m/s

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

표 3.2 기후예측 모형 보정에 이용된 CRU TS3.21의 제공 변수

항목	변수	단위
tmx	Monthly average daily maximum temperature	°C
tmn	Monthly average daily minimum temperature	°C
tmp	Daily mean temperature	°C
pre	Precipitation	mm

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

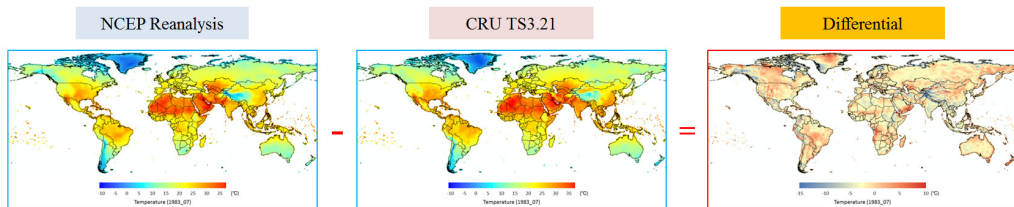


그림 3.2 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 관측 자료의 차

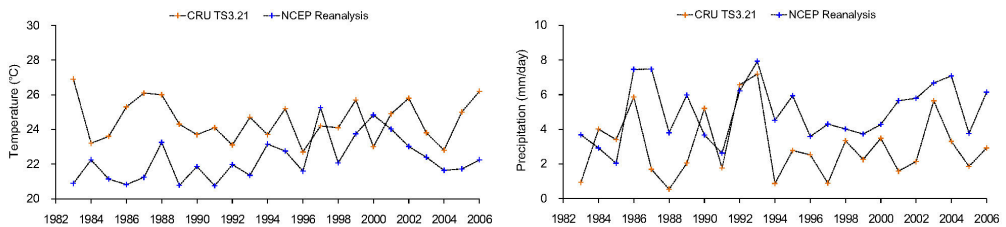


그림 3.3 미국 일리노이 주 중북부지역(N=41, S=40, E=-89, W=-90)에서의 7월 평균 기온과 강수량에 대한 NCEP 재분석 자료와 CRU TS3.21 관측 자료의 차

NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료 두 자료간의 차이를 분석하기 위해 우선 NCEP/NCAR 일평균 재분석 자료를 월평균으로 변환하였고 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 1983년 7월 월평균 기온 자료를 이용해 그림 3.2와 같이 전 지구 육지지역에 대한 두 자료간의 값의 차이를 분포도로 나타냈다. 오른쪽 두 자료간의 기온 차이 분포도에 나타난 것과 같이 지역에 따라서는 두 자료간의 차이가 10 °C 이상 나타나는 곳이 존재하는데 위치적으로 분석해 본 결과 기온차이가 큰 곳은 주로 높은 산맥이 있는 고지대나 고위도 지역 또는 사막지역에 분포하는 것으로 나타났다.

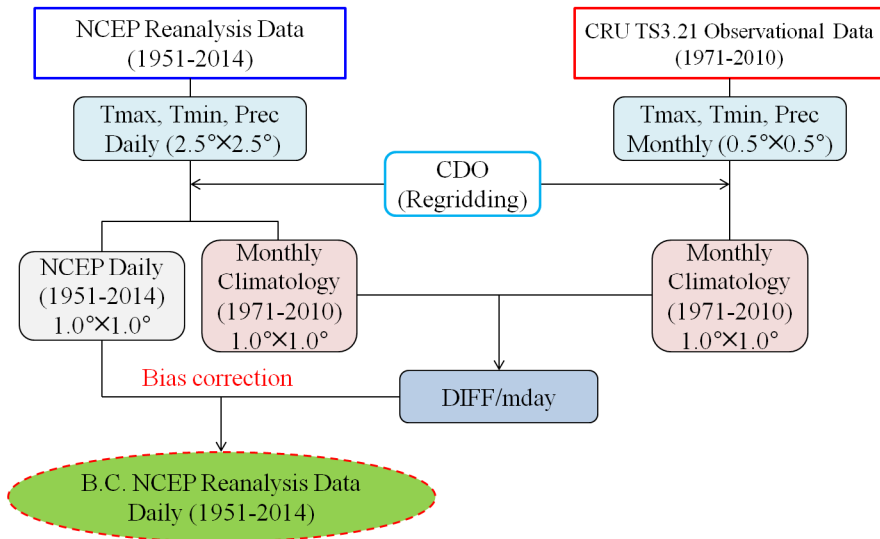


그림 3.4 NCEP/NCAR 재분석 자료에 대한 Bias 보정 흐름도

그림 3.3은 미국의 주요 옥수수 생산지역인 일리노이 주 중북부지역의 한 지점에 대한 1983년부터 2006년까지의 두 자료간의 7월 평균 기온과 강수량의 차이를 나타낸 것이다. 기온과 강수량에 대한 24년간의 평균값을 비교해본 결과 기온의 경우 두 자료간에 약 2.2 °C의 차이가 있었으며 강수량의 경우 약 1.9 mm/day의 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 관측기반의 CRU TS3.21 자료를 좀 더 관측에 가깝다고 판단하여 CRU TS3.21 월 자료를 기준으로 NCEP/NCAR 재분석 일 자료에 대해 그림 3.4와 같이 단순 편이보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법을 이용하였다. SBC 방법은 관측자료의 평균 기후값(Climatology)에 편이 보정하고자 하

는 자료의 평균 기후값과 편이 보정하고자 하는 값의 차(Anomaly)를 더해주거나(기온) 비율을 보정(강수량)함으로써 간단하게 보정하는 방법이다. NCEP/NCAR 재분석 자료의 경우 1951년부터 2014년까지의 64년간의 일 최고기온, 일 최저기온 그리고 일평균 강수량에 대한 편이 보정을 위해 우선 CDO(Climate Data Operator)라는 공간 스케일 재배열 소프트웨어를 이용해 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 공간해상도를 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 공간해상도로 통일시킨다. 그리고 NCEP/NCAR 재분석 일 자료를 월평균 자료로 변환한 다음 1971년부터 2010년까지의 40년간의 NCEP/NCAR 재분석 월 자료의 Climatology($CLIM_{NCEP}$)와 CRU TS3.21 월 자료의 Climatology($CLIM_{CRU}$)를 구해 두 자료 Climatology 간의 차이인 $DIFF_{CRU-NCEP}$ 를 구한다. 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 일 자료(BC_{NCEP_Daily})는 NCEP/NCAR 재분석 일 자료에 $DIFF_{CRU-NCEP}$ 를 해당 월의 일수(mday)로 나눈 값을 더함으로써 구해진다.

$$DIFF_{CRU-NCEP} = CLIM_{CRU} - CLIM_{NCEP} \quad (3.1)$$

$$BC_{NCEP_Daily} = NCEP_{Daily} + DIFF_{CRU-NCEP}/mday \quad (3.2)$$

3.1.2 장기 기후예측 자료 Bias 보정

3.1.2.1 6개월 선행예측기간 기후예측 자료 현황

APCC는 현재 10개 회원국 16개 기관으로부터 생산되고 있는 장기 기후예측 정보를 매월 제공 받아 예측정보의 불확실성을 줄이기 위해 APCC에서 개발된 다중모형 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)기법으로 예측정보를 고도화하여 3개월 및 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료를 APEC 회원국에게 제공하고 있다. APCC에서는 예측정보에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 매달 예측정보에 대한 검증을 실시하고 있으며 계절마다 접합대순환모델(Coupled General Circulation Model, CGCM) 자료들을 사용하여 ENSO/IOD 예측을 포함한 6개월 모델 간 앙상블 예측 자료를 생산하고 있다. 본 연구에서는 작물의 생육기간이 가급적 포함될 수 있도록 그림 3.5에서와 같은 6개월 선행예측기간을 갖는 6개 기후예측 모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncp), PNU(pnu1), POAMA(poma))을

이용하였으며 모형별 앙상블(Ensemble) 개수를 통일시키기 위해 각 모형의 앙상블 중에서 5개 앙상블을 선택하였다.

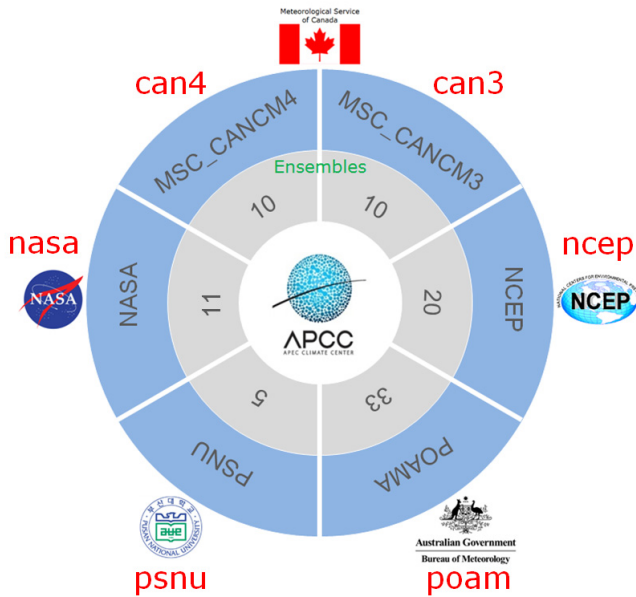


그림 3.5 APCC에서 수집되고 있는 6개월 선행예측기간 개별모형 및 앙상블 개수

APCC에서 제공되는 기후예측 모형의 기후변수에는 강수량과 해면기압, 해수면온도, 2m와 850hPa에서의 기온, 850hPa과 200hPa에서의 동서 및 남북 바람장, 500hPa에서의 지위고도에 대한 정보가 포함되어있으며 이중에서 농업생산성 분야에서 직접 이용 가능한 변수로는 월평균 강수량(prec)과 지상 2m에서의 월평균 기온(t2m) 정보가 있다. APCC에서 수집되고 있는 장기 기후예측 정보의 수평 공간 해상도는 기후예측 모형별로 서로 다르기 때문에 APCC에서는 제공되는 자료의 통일성을 위해 모든 기후예측 모형의 예측자료에 대해 2.5°×2.5°의 수평 공간 해상도 자료로 변환하였다. 6개월 선행예측기간의 기후예측 모형은 표 3.3과 같이 서로 다른 Hindcast 예측기간과 Forecast 예측기간을 갖기 때문에 기후예측 모형의 정량적인 예측성 비교를 위해 동일한 Hindcast 예측기간인 1983년부터 2006년까지의 24년간의 과거기간 예측자료와 동일한 Forecast 예측기간인 2013년부터 2015년 9월까지의 예측자료를 이용하였다. Forecast 예측자료에는 협력기관으로부터 제공받지 못한 자

료가 존재하는데 표 3.4는 기후예측 모형에 대한 예측자료의 누락 여부를 나타내고 있다. PSNU 모형의 경우 2013년 5월의 앙상블 멤버 5개의 예측자료와 2015년 3월의 전체 앙상블 멤버의 예측자료가 누락되어 있는 것으로 나타났으며 NASA 모형의 경우 2014년 5월의 전체 앙상블 멤버의 예측자료가 누락되어 있는 것으로 나타났다.

표 3.3 6개월 선행예측기간의 기후예측모형별 특성

모형	기관 (국가)	Hindcast 기간	Forecast 기간
MSC_CANCM3	Meteorological Service of Canada (Canada)	1981-2010	2012-현재
MSC_CANCM4	Meteorological Service of Canada (Canada)	1981-2010	2012-현재
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)	1982-2012	2012-현재
NCEP	Climate Prediction Center/ National Center for Environmental Prediction (USA)	1983-2009	2008-현재
PSNU	Pusan National University (Korea)	1980-2012	2010-현재
POAMA	Center for Australian Weather and Climate Research / Bureau of meteorology (Australia)	1983-2006	2008-현재

표 3.4 Forecast 공통기간(2013-2015년 9월에 대한 6개월 선행예측기간 기후예측 모형의 자료 누락 여부

모형	모형 코드	누락여부		
		2013	2014	2015
MSC_CANCM3	can3	All	All	All
MSC_CANCM4	can4	All	All	All
NASA	nasa	All	All	All
NCEP	ncep	All	May	All
PSNU	psnu	May(e05)*	All	March
POAMA	poma	All	All	All

* 앙상블 넘버(e05)의 자료가 누락 됨

3.1.2.2 장기 기후예측 자료에 대한 Bias 보정

APCC에서 제공되고 있는 장기 기후예측 정보에는 각 기후예측 모형의 계통오차에서 발생하는 모형 간 예측의 차이가 존재한다. 그림 3.6은 6개월 선행예측기간의 6개 기후예측 모형으로부터 Hindcast 기간(1983-2006년)에 걸쳐 예측된 전 지구 육지지역에 대한 기후예측 모형별 7월 평균 기온의 변동과 7월 평균 강수량의 변동을 나타내고 있다. 모형별 기온 예측 결과를 보면 nasa 모형의 24년 평균 7월 기온 예측 값은 22.0 °C로 6개 모형 중에서 가장 높게 나타났으며 psnu 모형의 경우 17.8 °C로 가장 낮게 예측하고 있었다. 이 두 모형간의 기온 예측의 차이는 약 4.2 °C로 모형의 연간 변동성 보다 훨씬 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 강수량의 경우를 살펴보면 nasa 모형의 24년 평균 7월 강수량 예측 값은 3.23 mm/day로 가장 크게 예측되었고 poam 모형에서 2.01 mm/day로 가장 작게 예측되어 두 모형간의 강수량 예측의 차이가 약 1.22 mm/day로 모형의 연간 변동성 보다 크게 나타났다. 이와 같이 기후예측 모형간 예측의 차이가 큰 것이 확인되었고 각 기후예측 모형의 계통오차에 의한 차이를 줄이기 위해 장기 기후예측 자료에 대해 SBC 방법이 적용되었다.

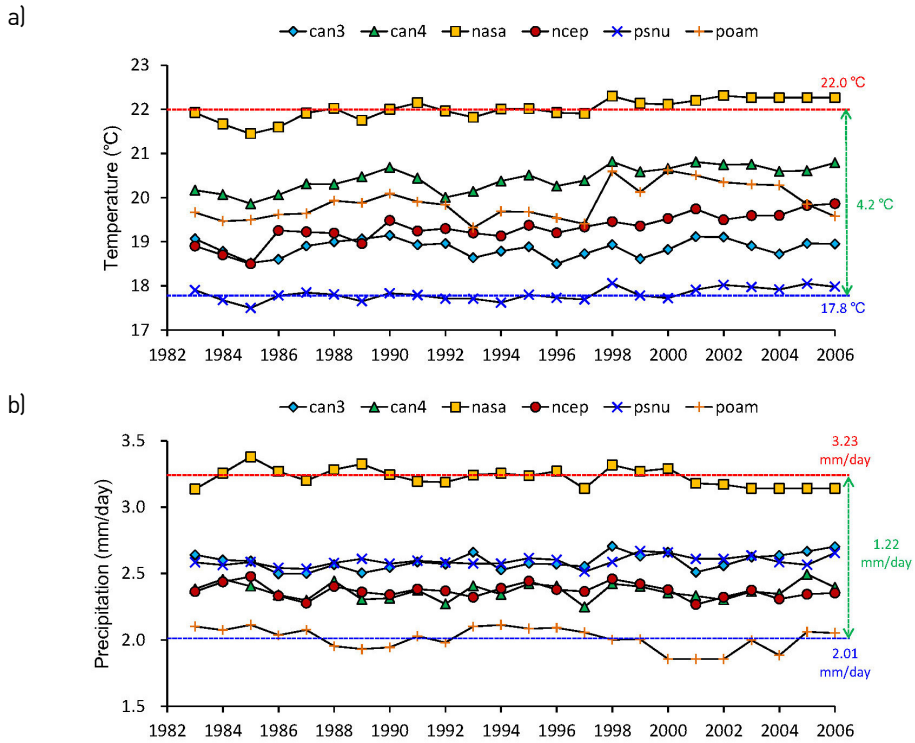


그림 3.6 6개월 선행예측기간의 기후예측 모형으로부터 과거기간(1983-2006년)에 걸쳐 예측된 모형별 a) 7월 평균 기온, b) 7월 평균 강수량 예측의 차이

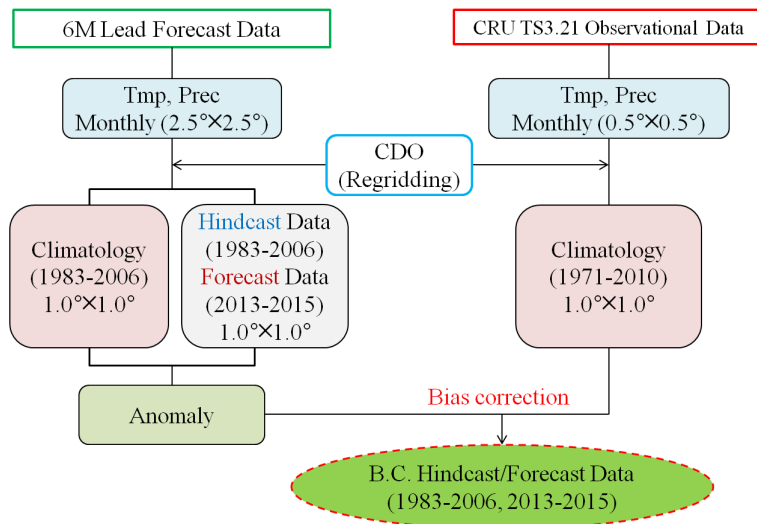


그림 3.7 장기 기후예측 자료(Hindcast data, Forecast data)에 대한 Bias 보정 흐름도

Hindcast 기간과 Forecast 기간에 걸쳐 예측된 6개월 선행예측기간 기후예측 자료의 월평균 기온과 월평균 강수량에 대한 편이 보정을 위해 그림 3.7과 같이 먼저 CDO를 이용해 기후예측 자료와 CRU TS3.21 자료의 공간해상도를 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 로 통일시켰다. 그리고 1983년부터 2006년까지 24년간의 기후예측 자료의 Climatology ($CLIM_{HINDCAST}$)와 1971년부터 2010년까지 40년간의 CRU TS3.21 자료의 Climatology($CLIM_{CRU}$)를 구했다. 다음으로 $CLIM_{HINDCAST}$ 와 Hindcast 기간의 기후예측 자료($GCM_{HINDCAST}$)의 차이인 Hindcast 기간의 기후예측 자료의 Anomaly ($ANO_{HINDCAST}$)를 구하고 $CLIM_{HINDCAST}$ 와 Forecast 기간의 기후예측 자료($GCM_{FORECAST}$)의 차이인 Forecast 기간의 기후예측 자료의 Anomaly ($ANO_{FORECAST}$)를 구했다.

$$ANO_{HINDCAST} = CLIM_{HINDCAST} - GCM_{HINDCAST} \quad (3.3)$$

$$ANO_{FORECAST} = CLIM_{FORECAST} - GCM_{FORECAST} \quad (3.4)$$

편이 보정된 Hindcast 기간의 기후예측 자료($BC_{HINDCAST}$)는 $CLIM_{CRU}$ 에 $ANO_{HINDCAST}$ 를 더함으로써 구해지고

$$BC_{HINDCAST} = CLIM_{CRU} + ANO_{HINDCAST} \quad (3.5)$$

편이 보정된 Forecast 기간의 기후예측 자료($BC_{FORECAST}$)는 $CLIM_{CRU}$ 에 $ANO_{FORECAST}$ 를 더함으로써 구해진다.

$$BC_{FORECAST} = CLIM_{CRU} + ANO_{FORECAST} \quad (3.6)$$

3.1.3 공간/시간적 상세화

APCC에서 제공되고 있는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 수평 공간 해상도로 작성되어 있으며 CRU TS3.21 자료는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 좀 더 높은 해상도로 제공되고 있다. 글로벌 스케일의 작물모형에 입력되는 기후자료는 공간 해상도의 제약을 받지 않지만 국가별 작물 수확량을 추정해 농업통계 자료와 비교하기 위해서는 최소한 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 공간 해상도를 갖는 기후정보가 필요하다. 본 연구에서는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료 그리고 CRU TS3.21 관측 자료에 대해 CDO를 이용해 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 수평 공간 해상도로 통일하였다. 작물 수확량을 계산하는데 있어 해상지역에 대한 기후자료는 필요 없기 때문에 컴퓨터 계산 처리 시간의 단축을 위해 해상 자료는 마스크 처리되었다.

장기 기후를 예측하는데 있어 특정 연/월/일에 발생하는 강수 또는 기온에 대한 정보는 사실 큰 의미를 갖지 않지만 작물모형에서 수확량을 시뮬레이션하기 위해서는 일 단위의 기후자료가 필요하다. APCC에서 제공되는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료는 월 자료이기 때문에 작물모형의 입력 자료로 사용하기 위해서는 월 평균의 6개월 선행예측기간 기후예측 자료를 일 자료로 상세화하는 시간적 상세화가 필수적이다. 작물 수확시기 이전에 작물의 수확량을 예측하기 위해서는 그림 3.8에서와 같이 작물 성장기간을 포함하는 일 단위의 기후예측 자료가 필요하다. 예측하고자 하는 시점을 기준으로 예측시점 이전의 일 단위 기후자료는 NCEP/NCAR 재분석 자료로부터 얻을 수 있지만 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료는 월 단위로 되어 있어 일 단위의 시간적 상세화 과정이 필요하다. 그리고 예측 기후자료가 없는 예측시점보다 6개월 이후의 자료에 대해서는 1971-2010년의 40년간의 일평균 기후값을 이용한다.

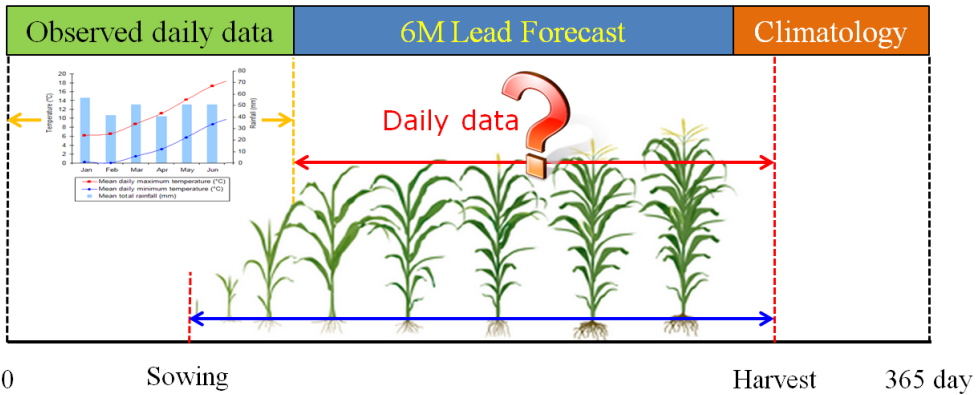


그림 3.8 옥수수 성장기간을 고려하기 위해 관측 기상자료와 6개월 선행예측 기후예측 자료 그리고 기후 평년값을 결합한 일 단위 기후예측 자료 작성 모식도

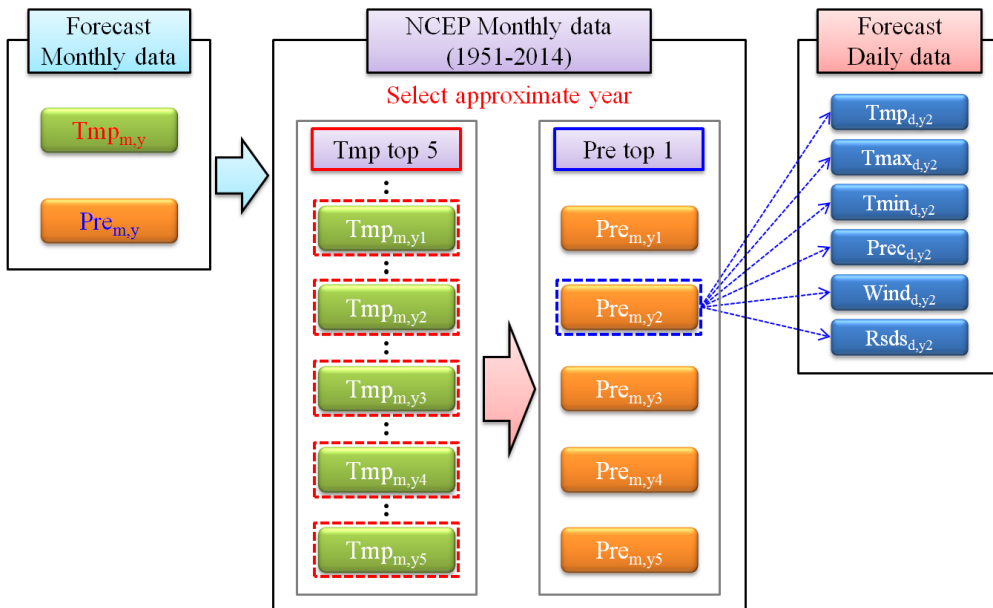


그림 3.9 장기 기후예측 자료에 대한 시간적 상세화 방법 흐름도

시간적 상세화 방법은 그림 3.9에서와 같이 먼저 상세화 하고자 하는 어떤 해 y , 어떤 월 m 의 예측 월의 평균 기온 값($Tmp_{m,y}$)과 SBC 된 NCEP/NCAR 재분석 월 자료의 과거 64년(1951-2014년) 동안의 월 평균 기온 값이 근사한 해 Top 5($Tmp_{m,y1}$, $Tmp_{m,y2}$, $Tmp_{m,y3}$, $Tmp_{m,y4}$, $Tmp_{m,y5}$)를 선정한다. 다음으로 상세화 하고자 하는

예측 월의 평균 강수량 값($Pre_{m,y}$)과 Top 5에 해당되는 해의 월 평균 강수량 값이 가장 근사한 해 Top 1($Pre_{m,y2}$)을 선정해 해당되는 해의 월 자료에 포함되어 있는 모든 변수의 일 자료를 상세화 하고자 하는 예측 월의 일 자료로 선정하였다.

3.1.4 장기 기후예측 자료 예측성 평가

SBC 방법에 의해 편이 보정된 6개월 선행예측기간 기후예측 자료의 예측성을 평가하기 위해 1983년부터 2006년까지 24년간의 기후예측 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 비교하였다. 예측성 평가 방법에는 예측자료와 관측자료의 시계열의 그래프 비교를 통한 시각적인 평가와 다양한 통계방법을 이용해 정량적으로 평가하는 방법이 있다. 본 연구에서는 기후예측 자료에 대한 정량적인 신뢰도 평가를 위해 B.C. NCEP 재분석 자료를 바탕으로 한 시계열 상관계수(Temporal Correlation Coefficient, 이하 TCC) 분석과 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, 이하 RMSE) 분석을 실시했다. TCC는 식(3.7)에서와 같이 기후예측 자료와 B.C. NCEP 재분석 자료의 Anomaly의 제곱의 합을 이용했고 RMSE는 식(3.8)에서와 같이 기후예측 자료와 B.C. NCEP 재분석 자료의 차에 대한 제곱의 합을 이용했다. TCC는 값이 1에 가까울수록 예측성이 높은 것을 의미하며 RMSE는 값이 작을수록 예측의 정확도가 높은 것을 의미한다.

$$TCC = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.8)$$

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

3.2 장기 작물 수확량 예측 기법 개발

3.2.1 M-GAEZ 작물 수확량 예측 모형

M-GAEZ 작물 수확량 예측 모형은 프로세스 기반의 작물 생육 모형으로 국제연합 식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the UN, FAO)와 국제응용시스템분석연구원(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)에서 개발된 GAEZ(Global Agro-Ecological Zones) 모형을 개선한 것으로 전 지구 규모에서 작물 생육 시뮬레이션이 가능하다(Masutomi et al., 2009). M-GAEZ 모형은 작물 성장에 대한 이론적인 추정과 전 세계 각 지역에서 경작된 작물의 생육정보를 바탕으로 얻은 다양한 경험적 작물 파라메타를 이용해 수확량을 산출하며 모형의 주요 입력 자료로는 기온, 강수량, 일사량, 풍속 등의 기후자료와 토양종류, 토양상, 최대 토양수 저장능력 등의 토양정보 그리고 관개 면적률, 국가별 입력레벨 등이 있다. 국가별 입력레벨은 GDP, 노동력, 농업기술개발 레벨, 비료투입량 등과 같이 작물 수확량에 영향을 미치는 요소들의 총체적인 지표를 말하며 주요 옥수수 생산국 10개국에 대해서 표 3.5와 같이 3 단계(Low level, Intermediate level, High level)로 분류했다. M-GAEZ 모형은 옥수수, 밀, 쌀 등 다양한 작물에 대한 수확량을 산정하며 지역 특성에 맞는 작물 성장 파라메타를 입력함으로써 보다 정확도 높은 수확량 산정이 가능하도록 설계되어있다.

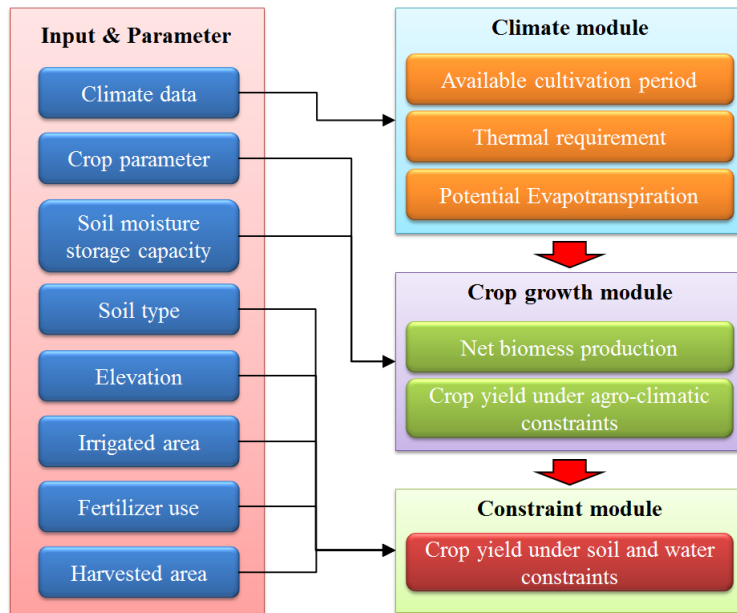


그림 3.10 M-GAEZ 모형의 입력 자료 및 수확량 예측 흐름도 (Shin, 2014)

표 3.5 주요 옥수수 생산국 국가별 입력레벨 (Masutomi et al., 2009)

Country	Region	Input level
Argentina	Southern America	Low level
Brazil	Southern America	Intermediate level
China	Eastern Asia	Intermediate level
France	Europe	High level
India	Southern Asia	Low level
Indonesia	South-eastern Asia	Intermediate level
Italy	Europe	High level
Mexico	Northern America	Intermediate level
South Africa	Southern Africa	Low level
USA	Northern America	High level

작물 수확량에 대한 계산은 그림 3.10과 같이 진행되며 다양한 입력 자료와 작물에 따른 파라메타 자료가 요구된다. 수확량 계산은 크게 기후 모듈(Climature module), 작물성장 모듈(Crop growth module), 제약모듈(Constraint module)로 나뉘어 진행된다.

기후 모듈

기후 모듈에서는 기온, 강수량, 일사량, 풍속 등의 기후 정보를 통해 각 격자별 작물 재배 가능 기간이 계산된다. 작물 재배 가능 기간은 생장도일(Growing Degree Days, GDD)을 통해 계산되는데 옥수수의 생육영점온도인 10 °C를 기준으로 계산된다. 표 3.6은 온도 프로파일 간격에 따른 기호(L1-L9)를 나타내고 있으며 작물의 생장특성에 따라 겨울 휴면기 이전 생장에 대해서는 La로 겨울 휴면기 이후 생장에 대해서는 Lb로 구분된다. 표 3.7은 옥수수 품종별 온도 충족요건을 나타내고 있으며 품종별 온도 요구량의 충족요건을 만족하는 기간에 대해 작물성장이 적합한 기간으로 정의된다. 또한 품종에 따라 적산 온도가 일정 값 이상인 지역에 대해서만 작물 수확량이 발생할 수 있다고 판단한다. 예를 들어 온대 품종의 작물성장기간(L)이 135일인 경우 일 적산온도가 1900 °C 이상인 지역(Optimal condition)에서 L5 즉, 온도가 10 °C에서 15 °C 사이인 날이 $0.667 * L(135일) = 90$ 일보다 적고 L6 즉, 온도가 10 °C보다 낮은 날이 없다는 조건에서 최적의 옥수수 생산이 이루어진다고 볼 수 있다. 최적의 조건을 만족하지 못하더라도 그에 준하는 조건을 만족하는 지역(Sub-optimal condition)에 대해서는 수확량의 80 %에 해당하는 값으로 계산된다. 작물의 품종별로 설정되어 있는 온도조건을 만족시키지 못할 경우 작물 재배가 불가능하다고 판단되어 수확량이 0으로 계산된다.

표 3.6 온도 프로파일 간격에 따른 성장 특성별 기호 (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

표 3.7 옥수수에 대한 온도 상황 충족조건 (Fischer et al., 2002)

Crop/Growth Cycle	Sub-optimal Conditions	Optimal Conditions
Lowland Maize (Maize I) L = 90/105/120/135	Climates: Tr L4a+L4b < 0.167*L TSgc > 2200	Climates: Tr L4 = 0 TSgc > 2500
Highland Maize (Maize II) L = 105/180/300	Climates: Tr L1 = 0 L2 = 0 L5 < 0.500*L L6 = 0 L3a+L3b < 0.333*L TSgc > 2200	Climates: Tr L1 = 0 L2 = 0 L5 < 0.333*L L6 = 0 L3a+L3b < 0.333*L TSgc > 2500
Maize (sub-tropics) (Maize III) L = 105/120/135/150/165/180	Climates: STR(SR+WR), Te L5a+L5b < 0.200*L L6 = 0 TSgc > 1900	Climates: STR(SR+WR), Te L5 =< 0.200*L L6 = 0 TSgc > 2400
Maize (temperate) (Maize IV) L = 105/120/135/150/165/180	Climates: STR(SR+WR), Te L5 < 0.667*L L6 = 0 TSgc > 1700	Climates: STR(SR+WR), Te L5 < 0.667*L L6 = 0 TSgc > 1900

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

또한 FAO-56 Penman-Monteith 방법으로부터 작물 수확량 추정 of 중요한 파라미터인 잠재 증발산량(mm/day)을 다음과 같이 산출한다(Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.9)$$

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. 잠재증발산량에 추정 방법에 대한 설명은 신용희(2014)에서 보다 자세하게 다루고 있으므로 참조하길 바란다.

작물성장 모듈

기후 모듈에서 계산된 작물 재배 가능 기간과 작물 파라메타를 근거로 농업기후제약만을 고려한 잠재 작물 수확량이 산출된다. 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).

$$B_n = B_g - R \quad (3.10)$$

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.

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(신용희, 2014).

$$B_n = (0.36b_{gm} \times L) / (1/N + 0.25c_t) \quad (3.11)$$

$$L = -0.03218LAI^2 + 0.359LAI \quad (3.12)$$

여기서 L 은 엽면적지수(LAI)가 5일 때의 b_{gm} 에 대한 실제 LAI 때의 b_{gm} 의 비, c_t 는 호흡 비례정수를 나타낸다. 생육기간에 따른 LAI는 작물 품종 별 최대 LAI(표 3.8 참조)에 대해 성장기간과 실제 성장일수의 비로 산출된다.

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

$$Y_p = H_i \times B_n \quad (3.13)$$

여기서 H_i 는 작물 수확량 계수를 나타내며 Input level에 따라 품종별로 표 3.8와 같이 제공된다.

표 3.8 바이오매스 계산에 필요한 옥수수 품종별 파라메타 (Fischer et al., 2002)

작물 (옥수수)	생육 기간	High Inputs		Intermediate Inputs		Low Inputs		기온(°C)에 따른 잎 광합성 속도(Pm) 의존성								
		일수	HI	Max. LAI	HI	Max. LAI	HI	Max. LAI	5	10	15	20	25	30	35	40
Lowland	90	0.40	3.0	0.30	2.3	0.20	1.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5
	105	0.40	3.5	0.30	2.8	0.20	2.0	0	0	5	45	65	65	65	45	5
	120	0.45	4.0	0.35	3.3	0.25	2.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5
	135	0.45	4.5	0.35	3.3	0.25	2.5	0	0	5	45	65	65	65	45	5
Highland	105	0.35	3.5	0.25	2.5	0.15	1.5	0	0	40	50	50	50	40	5	0
	180	0.35	4.0	0.27	3.0	0.20	2.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	300	0.35	4.0	0.27	3.0	0.20	2.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
Sub tropics	105	0.40	3.0	0.30	2.3	0.20	1.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	120	0.40	3.5	0.30	2.5	0.20	2.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	135	0.45	4.0	0.33	3.0	0.20	2.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	150	0.45	4.5	0.33	3.5	0.20	2.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	165	0.45	5.0	0.35	3.8	0.25	2.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	180	0.45	5.5	0.35	4.3	0.25	3.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
Temperate	105	0.60	6.0	0.50	4.5	0.40	3.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	120	0.60	6.0	0.50	4.5	0.40	3.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	135	0.60	6.0	0.50	4.5	0.40	3.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	150	0.65	6.5	0.55	5.0	0.45	3.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	165	0.65	6.5	0.55	5.0	0.45	3.5	0	5	40	50	50	50	40	5	0
	180	0.65	7.0	0.55	5.0	0.45	4.0	0	5	40	50	50	50	40	5	0

제약 모듈

제약 모듈에서는 작물성장 모듈에서 산출된 잠재 작물 수확량에 수분제약이 고려되고 작물 생육이 불가능한 토양 또는 작물 생육은 가능하나 생산성이 낮은 토양 등의 토양환경에 의한 제약이 고려된다.

실제 작물 생산에서는 다양한 수분제약으로 인해 작물 수확량이 영향을 받는다. 수분제약은 전체 작물 성장 단계에 대한 참조작물 증발산량과 실제 작물 증발산량의

비율을 고려한 수분 제약 감소 승수를 통해 작물 수확량에 고려된다. 작물 성장 단계 전체에 대한 참조작물 증발산량 TET_0 는 아래식과 같다.

$$TET_0 = \sum_{j=1}^{d_0} K_{cb_j} ET_{0_j} \quad d_0 = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad (3.14)$$

작물의 성장은 크게 생육초기 단계(initial stage: d_1), 영양성장 단계(vegetative stage: d_2), 생식성장 단계(reproductive stage: d_3), 성숙 단계(maturation stage: d_4)로 나뉘며 옥수수 성장 단계별 기간 및 수분제약파라메타는 그림 3.11, 표 3.9와 같다.

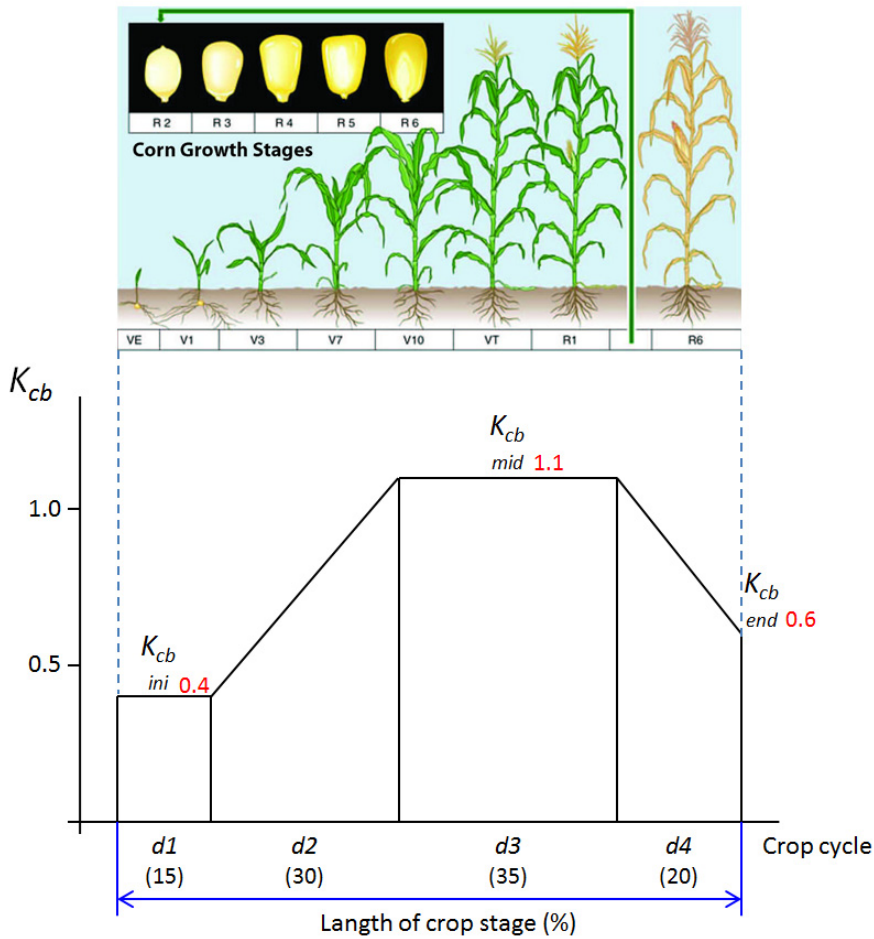


그림 3.11 옥수수 성장단계별 성장기간 및 증산효율

표 3.9 주요 식량작물에 대한 수분제약 파라메타 (Fischer et al., 2002)

작물	Kcb ini	Kcb mid	Kcb end	작물성장단계 길이 (성장단계비율)				최대뿌리 깊이 (m)	감소율	최대작물 높이 (m)
				d1	d2	d3	d4			
Maize	0.4	1.1	0.6	15	30	35	20	1.0-1.7	0.55	2
Rice(wetland)	1.1	1.2	1.0	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
Soybean	0.4	1.1	0.5	15	20	45	20	0.6-1.3	0.50	0.5-1.0

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

$$TET_a = \sum_{j=1}^{d0} k_{cb_j} ET_{a_j} \quad d0 = d1 + d2 + d3 + d4 \quad (3.15)$$

수분 제약에 대한 감소 승수는 아래와 같이 정의된다.

$$f_0 = 1 - k_0^y \left(1 - \frac{TET_a}{TET_0} \right) \quad (3.16)$$

$$f_1 = \prod_{k=1}^4 \left(1 - k_k^y \left(1 - \frac{TET_{a_k}}{TET_{0k}} \right) \right) \quad (3.17)$$

여기서 k_0^y 와 k_k^y 는 작물 수확 감소 계수로 성장단계에 따라 표 3.10과 같이 작물 및 품종 별로 설정되었다.

M-GAEZ 모형에서는 그림 3.12의 관개 면적률 정보를 이용해 옥수수 생산지역에서 관개가 이루어질 경우 수분 스트레스의 영향을 받지 않는 것으로 가정하며 천수답에 대해서는 기온, 강수량, 일사량 등의 기후정보를 바탕으로 작물 증발산량을 산출하여 성장 단계별로 수분제약을 고려하여 잠재 수확량을 산정한다.

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

$$Y_a = \min(f_0, f_1) \times Y_p \quad (3.18)$$

표 3.10 주요 작물에 대한 성장단계별 수확량 감소 계수 (Fischer et al., 2002)

작물	수확량 감소 계수				
	k_1^y	k_2^y	k_3^y	k_4^y	k_0^y
Maize	0.40	0.90	1.50	0.50	1.25
Rice(wetland)	1.00	2.00	2.50	1.00	2.00
Wheat(winter)	0.20	0.60	0.75	0.50	1.05
Soybean	0.20	0.80	1.00	0.80	0.85

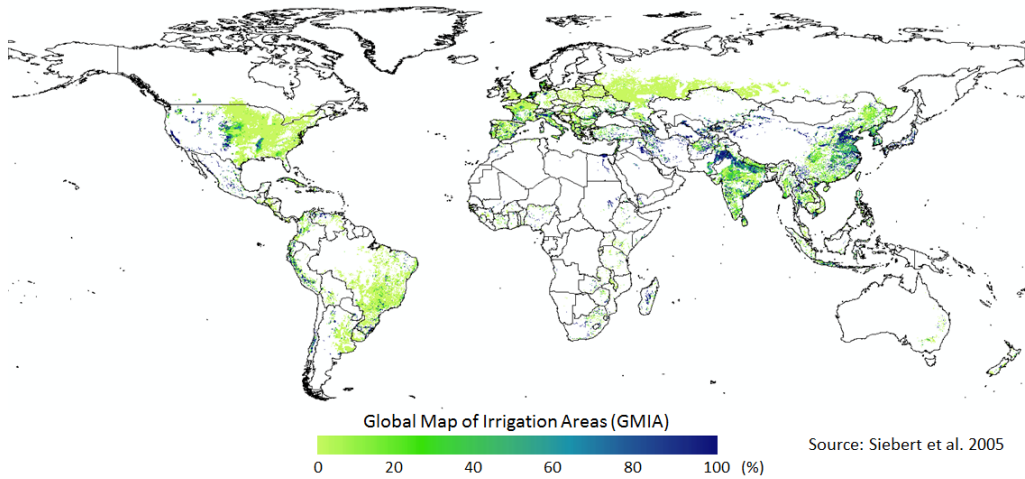


그림 3.12 전 세계 경작지에 대한 관개 면적률 분포도

수분제약이 고려된 잠재 작물 수확량 산정 결과는 기후조건이 만족할 경우 지구상의 모든 토양에서 작물 생산이 이루어지는 것으로 나타나고 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. 토양상은 토지를 이용하거나 관리하는데 있어 중요한 파라메타로 토양구성단위의 분류로는 판단되지 않는 특징으로 분류한다. 세계 토양도에서는 전 세계 토양상을 18종류로 분류하고 있으며 작물별로 제약을 준다.

3.2.2 장기 옥수수 수확량 전망 기법 개발

본 연구에서는 6개월 선행예측기간의 장기 기후예측 자료를 활용한 전 세계 옥수수 수확량 전망 기법을 개발했다. 옥수수 수확량 예측에는 3.2.1에서 소개된 글로벌 스케일의 작물모형인 M-GAEZ 모형이 이용되었다. 작물모형의 입력 기후 자료인 6개 기후예측 모형의 일 단위 기후 자료는 SBC 단순편이보정 기법과 시간적 상세화 기법을 통해 글로벌 스케일로 작성되었다. 과거기간 예측 자료인 Hindcast 자료는 6개월 선행예측기간을 갖는 기후예측 자료로 현재 APCC에서 제공되고 있는 6개 기후예측 모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncep), PNU(pnu1), POAMA(poma))의 자료가 이용 가능하며 1983년부터 2006년까지의 24년 기간에 대해 공통으로 자료가 존재한다.

기후예측 자료를 이용한 장기 옥수수 수확량 전망의 예측성을 평가하기에 앞서 M-GAEZ 모형의 옥수수 수확량 추정 결과의 신뢰성을 평가하기 위해 1991년부터 2013년까지의 23년 기간에 대해 전 세계 옥수수 생산량의 80 % 이상을 차지하는 주요 옥수수 생산국 10개국에 대한 수확량 추정 결과와 FAOSTAT 농업통계 데이터베이스의 각 국가별 옥수수 수확량 통계 자료와의 비교를 통해 작물모형의 신뢰성을 검증했다. 작물모형에 입력되는 기후 자료는 NCEP/NCAR 재분석 일 자료로 3.1.1에서 관측기반의 CRU TS3.21 자료를 기준으로 편이 보정이 실시된 자료가 사용되었다. 또한 M-GAEZ 모형의 기온과 강수량 변화에 따른 옥수수 수확량에 대한 민감도를 분석하기 위해 1971년부터 2010년까지의 40년간의 NCEP/NCAR 재분석 일 자료의 기후값(Climatology)을 이용했으며 기온에 대해서는 0.5 °C 간격으로 기후값보다 -2 °C에서 +4 °C까지(13개 시나리오) 값을 변화 시켰고 강수량에 대해서는 25 % 간격으로 기후값보다 -50 %에서 +150 %까지(6개 시나리오) 값을 변화 시켜 총 78개 기후 민감도 시나리오를 작성했다.

6개월 선행예측기간의 기후예측 자료를 이용한 장기 옥수수 수확량 전망의 예측성을 평가하기 위해 Hindcast 기간에 포함되는 1991년부터 2000년까지 10년 기간에 대해 주요 옥수수 생산국의 옥수수 수확량을 예측했으며 FAOSTAT 농업통계 데이터베이스의 각 국가별 옥수수 수확량 통계 자료와의 비교를 통해 TCC 분석 및 RMSE 분석을 실시했다. 작물모형에 입력된 과거 예측 Hindcast 기간에 대한 6개월 선행예측

기간의 기후예측 자료는 7월부터 12월까지의 자료가 이용되었으며 각 기후예측 모형의 앙상블 멤버들이 평균된 Single Model Ensembles(SME) 자료가 이용되었다. 즉 작물모형의 입력 자료로 새롭게 작성된 일 단위 기후예측 자료는 1월 1일부터 6월 31일까지는 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료가 적용되었고 7월 1일부터 12월 31일까지는 6개월 선행예측기간을 갖는 각 기후예측 모형의 일 단위 기후예측 자료가 적용되어 1년 기간에 대한 일 단위 기후 입력 자료가 구성되고 있다.

Forecast 기간(2013년-2015년)에 대한 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료는 옥수수 수확량 예측 시점에 따라 다르게 선택할 수 있도록 설정되어 있으며 본 연구에서는 예측 시점을 3월, 5월, 7월, 9월로 정해 작물모형의 입력 기후 자료를 작성했다. APCC에서 제공되는 6개 기후예측 모형은 다양한 앙상블 멤버 실험을 통해 예측 자료를 생산하고 있지만(그림 3.5 참조) PSNU 모형의 앙상블 멤버가 5개로 가장 적어 모형간의 정량적인 비교를 위해서나 앙상블 멤버 전체에 대해 시뮬레이션 했을 경우에 발생하는 계산기 서버 리소스의 부담을 줄이기 위해 각 기후예측 모형별로 5개 앙상블 멤버를 선택하였다. M-GAEZ 모형은 전 지구 규모에서 작물 수확량을 시뮬레이션하기 때문에 지역별로 작물의 생육시기가 달라 모형을 구동하기 위해서는 365일의 기후자료가 필요하다. 옥수수 수확량 예측 시점이 3월인 경우 1월부터 2월까지의 자료는 NCEP/NCAR 재분석 일 자료가 이용되고 3월부터 8월까지의 6개월 선행예측기간의 일 기후예측 자료가 이용되며 기후예측 자료가 존재하지 않는 9월부터 12월까지의 과거 40년(1971년-2010년) 동안의 일 단위 기후값이 이용된다. 옥수수 수확량 예측 시점이 7월인 경우에는 1월부터 6월까지 NCEP/NCAR 재분석 일 자료가 이용되고 7월부터 12월까지의 6개월 선행예측기간의 일 기후예측 자료가 이용된다. 현재 APCC의 장기 기후예측 자료 데이터베이스에는 Hindcast 기후예측 자료와 최신의 NCEP/NCAR 재분석 자료가 업로드 되어 있으며 매달 Forecast 기후예측 자료인 3개월 및 6개월 선행예측기간의 예측 자료가 업데이트 되고 있다. 본 연구에서 개발된 농업생산 분야 맞춤형 장기 기후예측 자료 생산 기법은 향후 시스템화를 통해 관측자료와 기후예측 자료가 업데이트되면 자동으로 예측자료의 편이 보정 작업 및 일 단위 상세화 자료를 생산 할 수 있는 장기 기후예측 자료의 자동화 생산이 가능할 것으로 기대된다.

표 3.11 옥수수 수확량 시뮬레이션 설정

항목	설정
Crop model	M-GAEZ model
Crop studied	Maize(4 varieties: Lowland, 3 varieties: Highland, 6 varieties: Subtropical, 6 varieties: Temperate)
Simulation periods	1983-2006(Hindcast period), 2013-2015(Forecast period)
Climate models	MSC_CANCM3, MSC_CANCM4, NASA, NCEP, PNU, POAMA
Climate observations	CRU TS3.21 datasets, NCEP/NCAR 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	USA, China, Brazil, Mexico, Argentina, India, France, Indonesia, South Africa, Italy

4. 연구내용

4.1 기후자료 분석

4.1.1 NCEP/NCAR 재분석 자료 분석

본 연구에서 이용된 NCEP/NCAR 재분석 자료는 1951년부터 2015년 8월까지의 64년 8개월간의 일평균 재분석 자료로 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료에 대한 편이 보정 및 일 단위의 맞춤형 기후예측 정보를 생산하는데 있어 관측 자료로서 이용되었다. NCEP/NCAR 재분석 자료가 전 지구 규모의 기후 관측 자료로서 이용되고 있지만 지상 관측 자료를 기반으로 한 수치모형과 자료동화 기법에 의해 작성되고 있어 어느 정도 오차를 포함하고 있는 것이 사실이다. 또 다른 전 지구 규모의 기후 관측 자료로서 전 세계 약 4,000개 이상의 기상 관측지점의 관측 자료를 기반으로 작성되고 있는 CRU TS3.21 자료가 있는데 이 자료는 월평균 자료로 제공되고 있다. NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 관측기반 자료 중에서 어떤 것이 더 정밀한지에 대한 논의는 차제하더라도 두 자료가 현존하는 전 지구 규모의 기후 관측 자료 중에서 가장 신뢰할 수 있는 자료라 할 수 있겠다. NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료를 비교하기 위해 우선 일 단위의 NCEP/NCAR 재분석 자료를 월 단위로 평균했다. 그림 4.1은 1983년 7월에 대한 a) NCEP/NCAR 재분석 자료와 b) CRU TS3.21 자료의 기온 분포도 그리고 c) 두 자료간의 차이를 나타내고 있다. a)와 b)의 기온 분포도는 육안으로 볼 때 큰 차이가 없는 것처럼 느껴지지만 실제 두 자료간의 차이는 c)를 통해 알 수 있듯이 큰 것으로 나타났다. 특히 높은 산맥이 존재하는 고지대나 극지역에 가까운 고위도지역 그리고 사막지역 등에서 큰 기온 차이를 보이고 있다. 남미 안데스 산맥이나 중앙아시아의 히말라야 산맥 등 고지대의 경우 푸른색 계열이 많이 분포하고 있어 NCEP/NCAR 재분석 자료가 CRU TS3.21 자료보다 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다.

현재 옥수수 재배가 활발히 이루어지고 있는 지역을 대상으로 전 지구 관측 기후자료로 활용되고 있는 NCEP/NCAR 재분석 자료와 장기 기후예측 자료에 대한 정량적인 분석을 위해 주요 옥수수 생산국가인 미국, 중국, 멕시코, 브라질 내에서 대체적으로 생산량이 많은 지역을 선정하였다. 먼저 미국 내에서는 콘벨트 에어리어에 포함되어 있으며 미국 제 2의 옥수수 생산 지역인 일리노이 주의 중북부 지역(N=41, S=40, E=-89, W=-90)을 선정하였고 중국 내에서는 중국 옥수수 총 생산량의 40 % 이상을 차지하고 있는 동북(東北)지역의 길림(吉林)성 북부 지역(N=45, S=44, E=129, W=125)을 선정하였다. 그리고 멕시코의 차아파스 주 북부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)과 브라질의 고이아스 주 남부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)을 각각 선택하였으며 그림 4.2에 붉은색 정사각형으로 위치정보를 나타냈다.

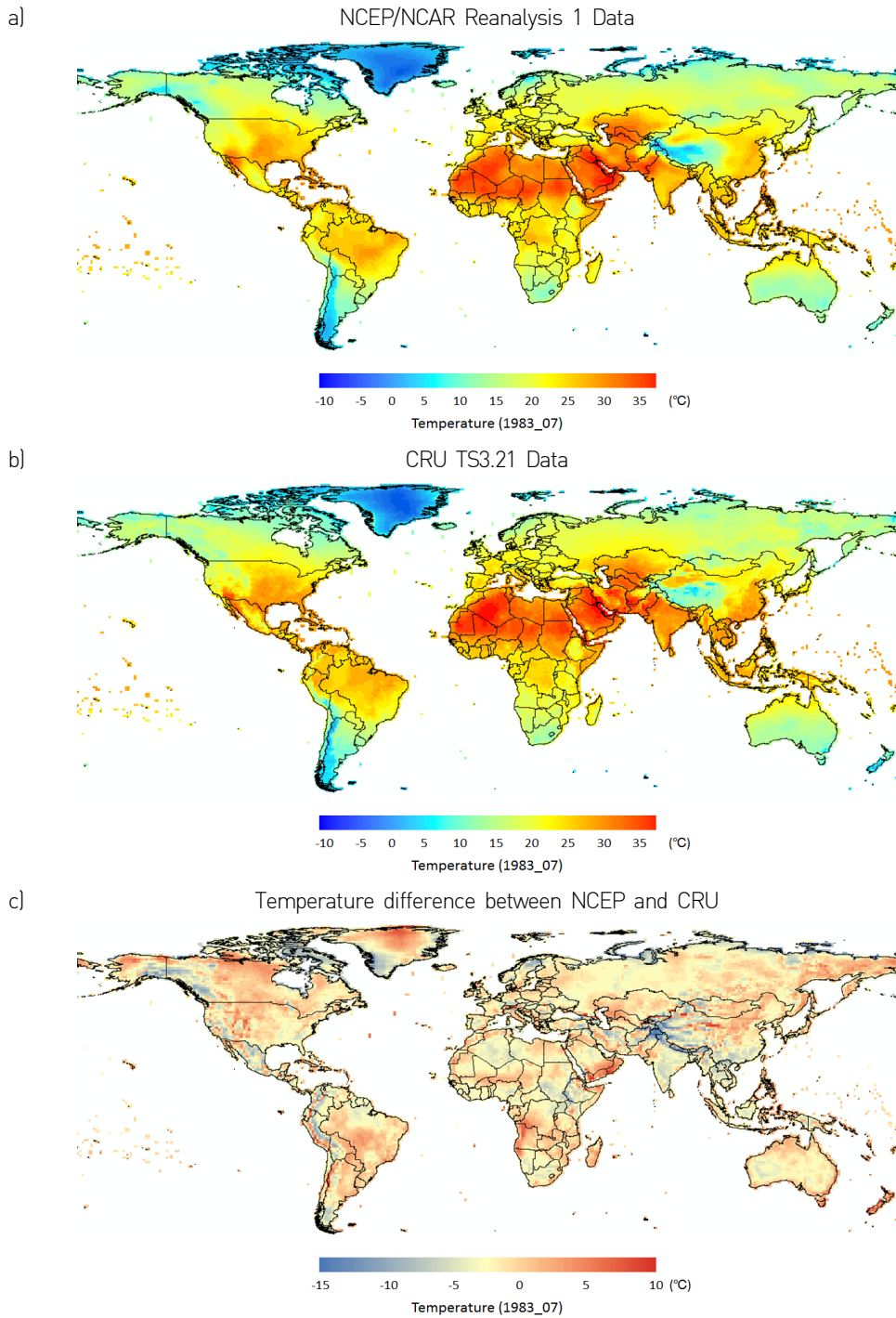


그림 4.1 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 1983년 7월 기온 분포 특성 및 두 자료간의 지역적 차이

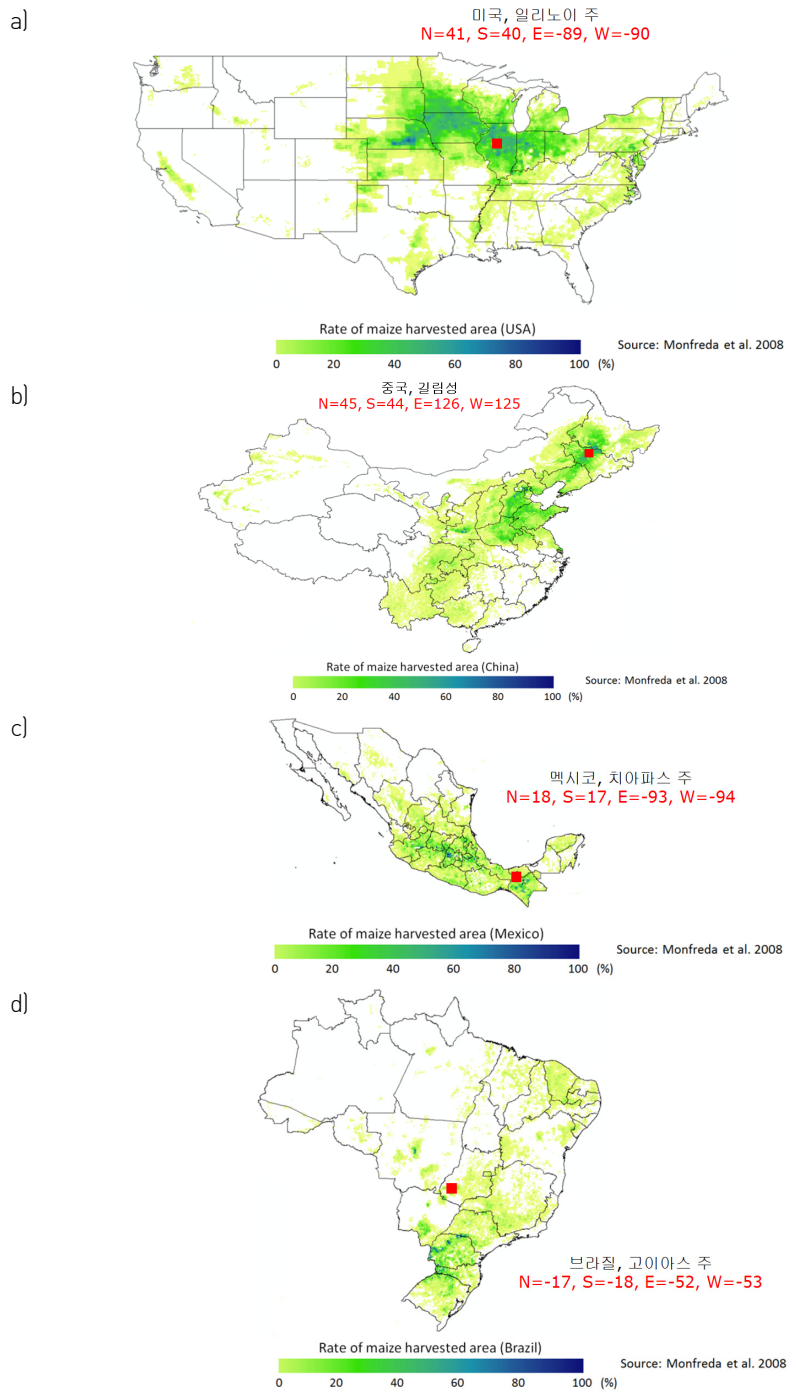


그림 4.2 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 옥수수 재배면적 분포도(Monfreda et al., 2008) 및 기후정보 분석이 이루어진 각국 주요 옥수수 생산지역 위치 정보

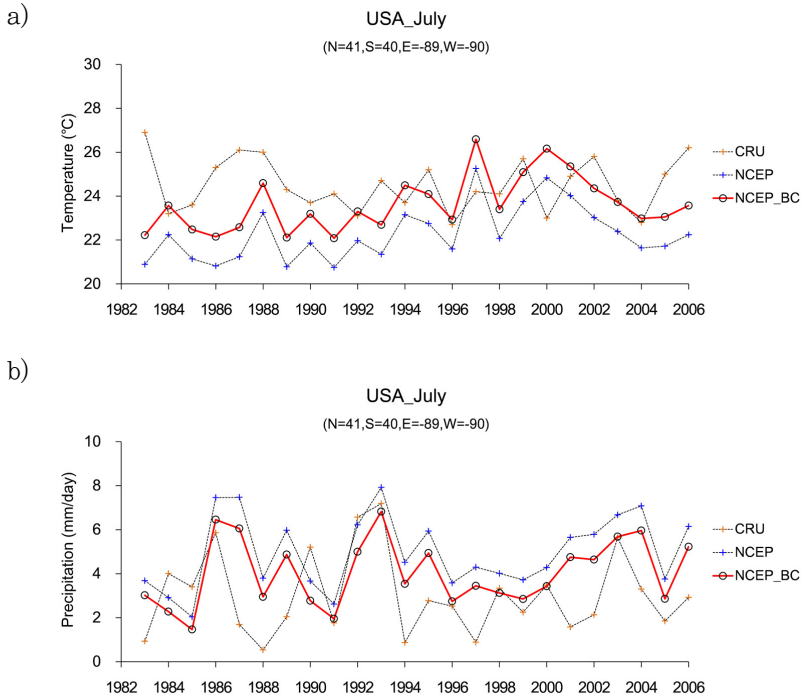


그림 4.3 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 차 (미국 일리노이 주)

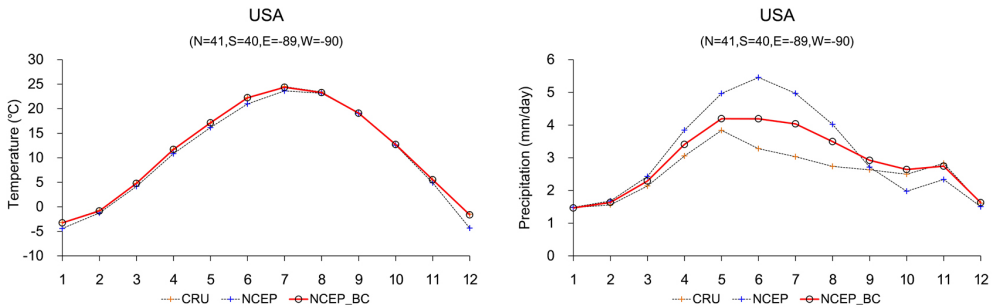


그림 4.4 NCEP과 CRU 자료의 1983-2006년 월평균 비교 (미국 일리노이 주)

그림 4.3은 미국 일리노이 주 중북부 지역(N=41, S=40, E=-89, W=-90)의 7월에 대한 1983년부터 2006년까지의 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21자료 그리고 편이 보정된 NCEP/NCAR 자료의 변동을 나타내고 있다. NCEP과 CRU 간 24년 평균값의 차이는 a) 기온의 경우 약 2.2 °C로 CRU가 대체로 높았고 b) 강수량의 경우

1.9 mm/day로 NCEP이 대체로 높게 나타났다. 그림 4.4는 24년 평균의 월 기온과 월 강수량에 대한 비교를 나타낸다. NCEP과 CRU 간 차이는 기온의 경우 12월에 2.8 °C로 가장 컸으며 전체적으로 CRU의 기온이 높았고 강수량의 경우 6월에 2.2 mm/day로 가장 크게 나타났으며 10월, 11월, 12월을 제외하고는 NCEP의 강수량이 많았다.

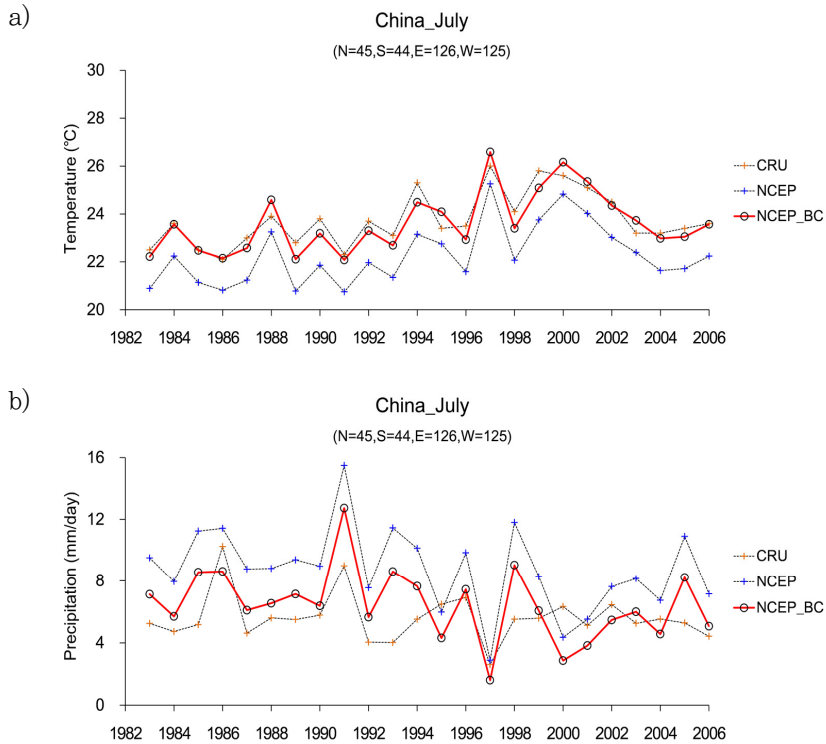


그림 4.5 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 차 (중국 길림성)

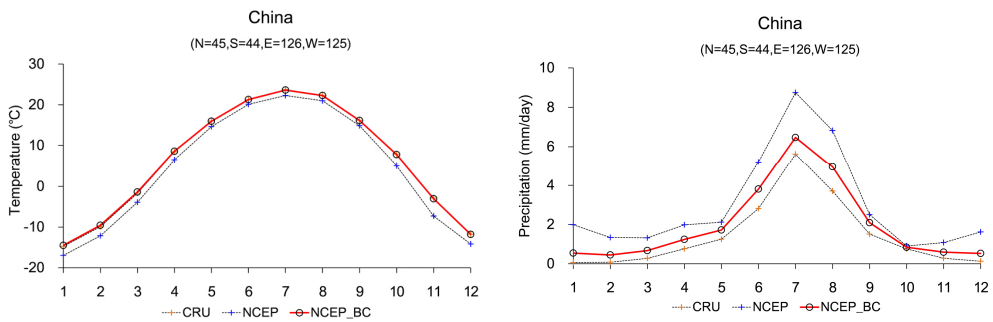


그림 4.6 NCEP과 CRU 자료의 1983-2006년 월평균 비교 (중국 길림성)

그림 4.5는 중국 길림(吉林)성 북부 지역(N=45, S=44, E=126, W=125)의 7월에 대한 1983년부터 2006년까지의 NCEP, CRU, NCEP_BC 자료의 변동을 나타내고 있다. NCEP과 CRU 간 24년 평균값의 차이는 a) 기온의 경우 약 1.5 °C로 CRU가 대체로 높았고 b) 강수량의 경우 3.1 mm/day로 NCEP이 대체로 높게 나타났다. 그림 4.6은 24년 평균의 월 기온과 월 강수량에 대한 비교로 NCEP과 CRU 간 차이는 기온의 경우 11월에 4.4 °C로 가장 크고 6월에 1.1 °C로 가장 작았으며 전체적으로 CRU의 기온이 높았다. 반면 강수량의 경우 7월에 3.1 mm/day로 가장 크고 10월에 0.1 mm/day로 가장 작게 나타났으며 전체적으로 NCEP의 강수량이 많게 나타났다.

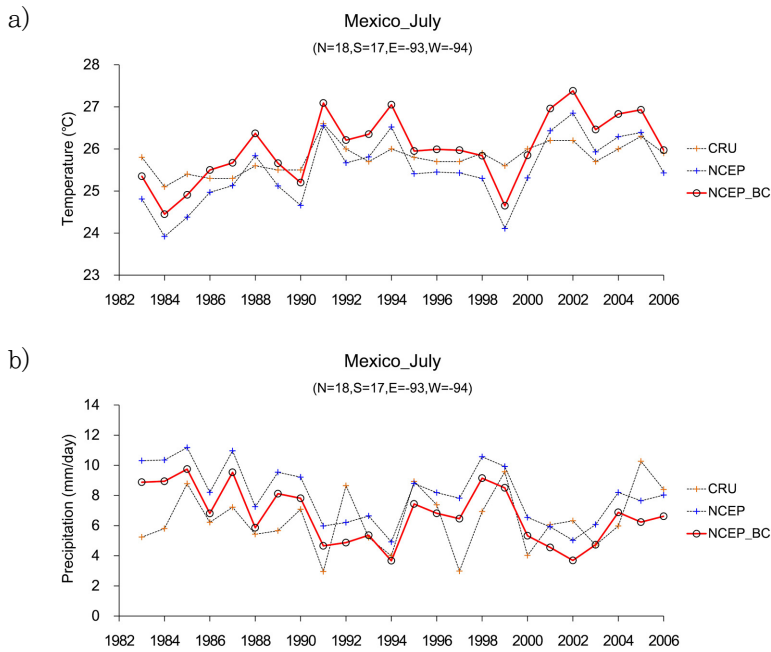


그림 4.7 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 차 (멕시코 치아파스 주)

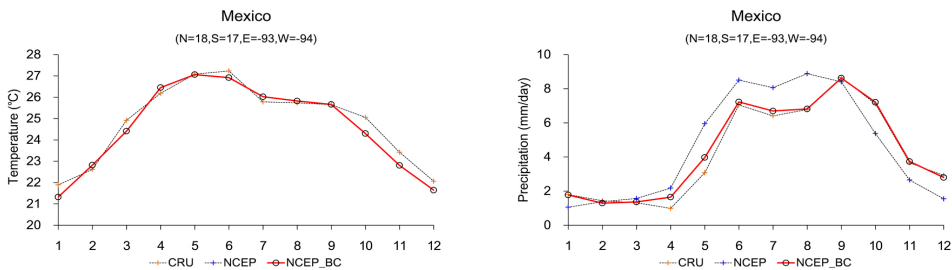


그림 4.8 NCEP과 CRU 자료의 1983-2006년 월평균 비교 (멕시코 치아파스 주)

그림 4.7은 멕시코 차아파스 주 북부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)의 7월에 대한 1983년부터 2006년까지의 NCEP, CRU, NCEP_BC 자료의 변동을 나타내고 있다. NCEP과 CRU 간 24년 평균값의 차이는 a) 기온의 경우 약 0.3 °C로 CRU가 약간 높았고 b) 강수량의 경우 1.7 mm/day로 NCEP이 대체로 높게 나타났다. 그림 4.8은 24년 월평균 값에 대한 비교로 NCEP과 CRU 간 차이는 기온의 경우 4월에 2.4 °C로 가장 크고 11월에 0.2 °C로 가장 작았으며 12월-5월은 NCEP이 높았고 6월-11월은 CRU가 높게 나타났다. 강수량의 경우 5월에 2.9 mm/day로 가장 크고 2월에 0.1 mm/day로 가장 작았으며 3월-8월은 NCEP이 많았고 9월-2월은 CRU가 많게 나타났다.

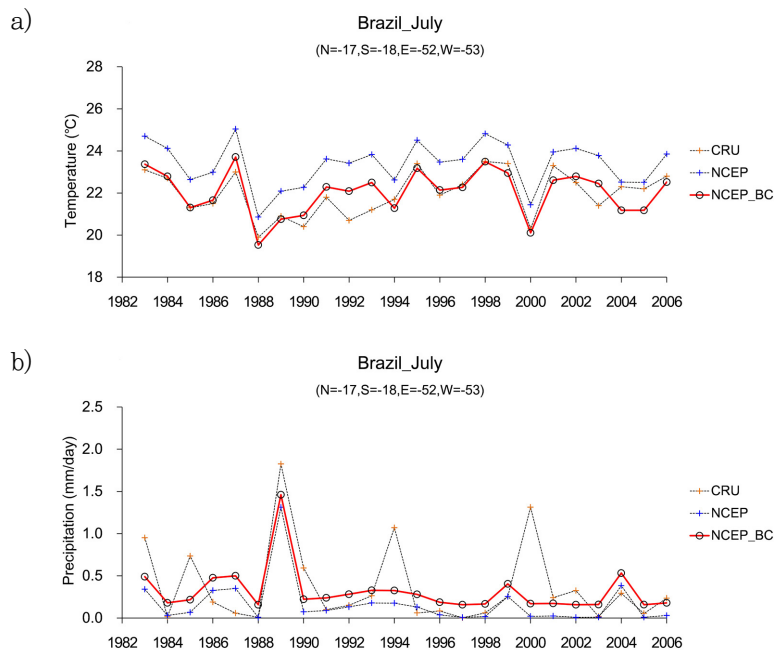


그림 4.9 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CRU TS3.21 자료의 차 (브라질 고이아스 주)

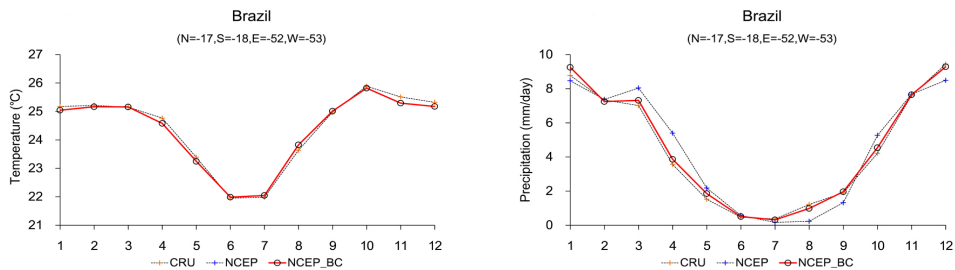


그림 4.10 NCEP과 CRU 자료의 1983-2006년 월평균 비교 (브라질 고이아스 주)

그림 4.9는 브라질 고이아스 주 남부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)의 7월에 대한 1983년부터 2006년까지의 NCEP, CRU, NCEP_BC 자료의 변동을 나타내고 있다. NCEP과 CRU 간 24년 평균값의 차이는 a) 기온의 경우 약 1.4 °C로 미국, 중국, 멕시코와 달리 NCEP이 전체적으로 높았고 b) 강수량의 경우 0.2 mm/day로 큰 차이가 없었다. 그림 4.10은 24년 월평균 값에 대한 비교로 NCEP과 CRU 간 차이는 기온의 경우 8월에 2.6 °C로 가장 크고 10월에 0.03 °C로 가장 작았으며 11월-5월은 CRU가 높았고 6월-10월은 NCEP이 높게 나타났다. 강수량의 경우 4월에 1.8 mm/day로 가장 크고 2월에 0.04 mm/day로 가장 작게 나타났다.

4.1.2 옥수수 생산지역 기후환경 분석

작물 수확량은 기후환경의 변화에 직접적으로 영향을 받으며 생육기간 중 발생하는 이상기후의 영향은 수확량 감소를 야기한다. 여기서는 주요 옥수수 생산지역에 대한 기온, 강수량, 일사량의 변화를 분석하고 옥수수 수확량이 감소했던 해의 월별 기후특징을 분석했다. 또한 옥수수 수확량과 월별 기후요소의 상관관계를 분석하였다. 그림 4.11은 미국 일리노이 주 중북부 지역에 대한 2001년-2013년 월 평균 기온, 강수량, 일사량과 옥수수 수확량 감소가 컸던 2012년의 각 기후요소를 비교한 결과와 월 평균 기후요소와 수확량의 상관관계를 나타낸다. 6월-7월의 평균 기온과 수확량 사이에 $r=0.64$ 의 상관성을 나타내고 있으며 6-7월의 기온과 일사량이 높고 강수량이 적을수록 수확량이 감소하는 것으로 나타났다.

미국 일리노이 주 중북부 지역 (N=41, S=40, E=-89, W=-90)

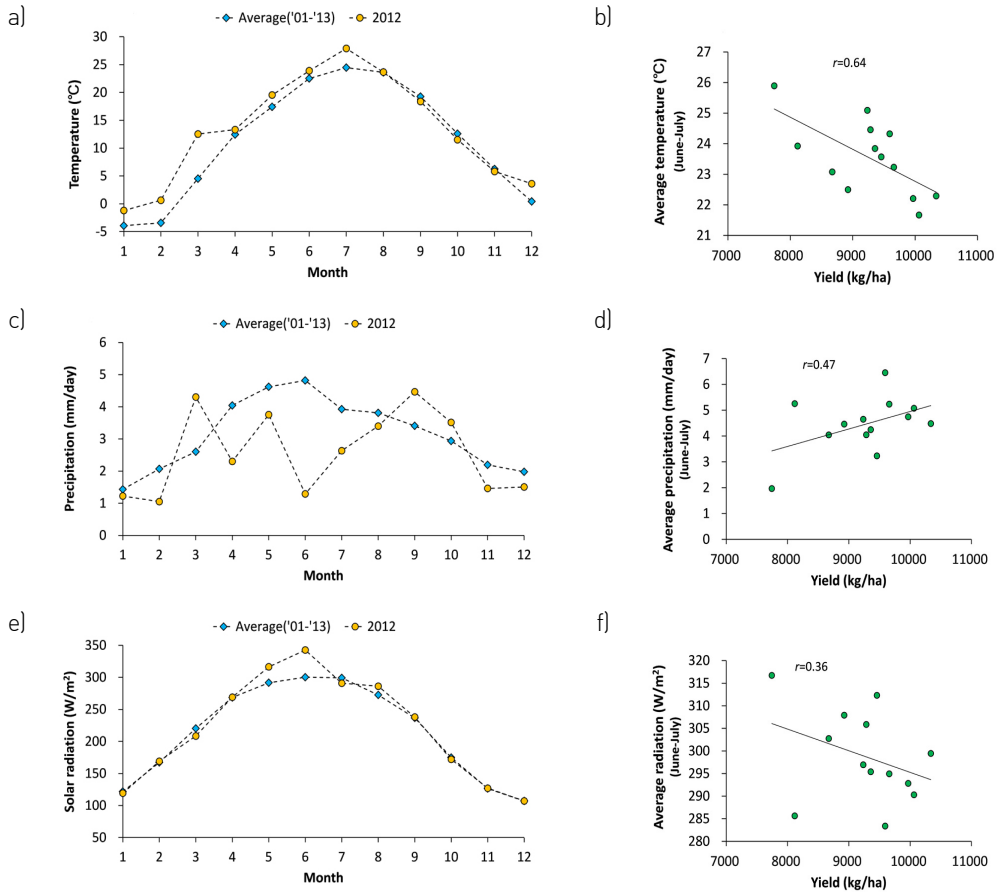


그림 4.11 미국 일리노이 주 중북부 지역의 옥수수 수확량 감소해에 대한 a)기온, c)강수량, e)일사량의 월변화 특징 및 옥수수 생육시기 기후요소와 수확량의 상관관계 분석 (b)기온-수확량, d)강수량-수확량, f)일사량-수확량 상관관계]

중국 길림성 북부 지역 (N=45, S=44, E=126, W=125)

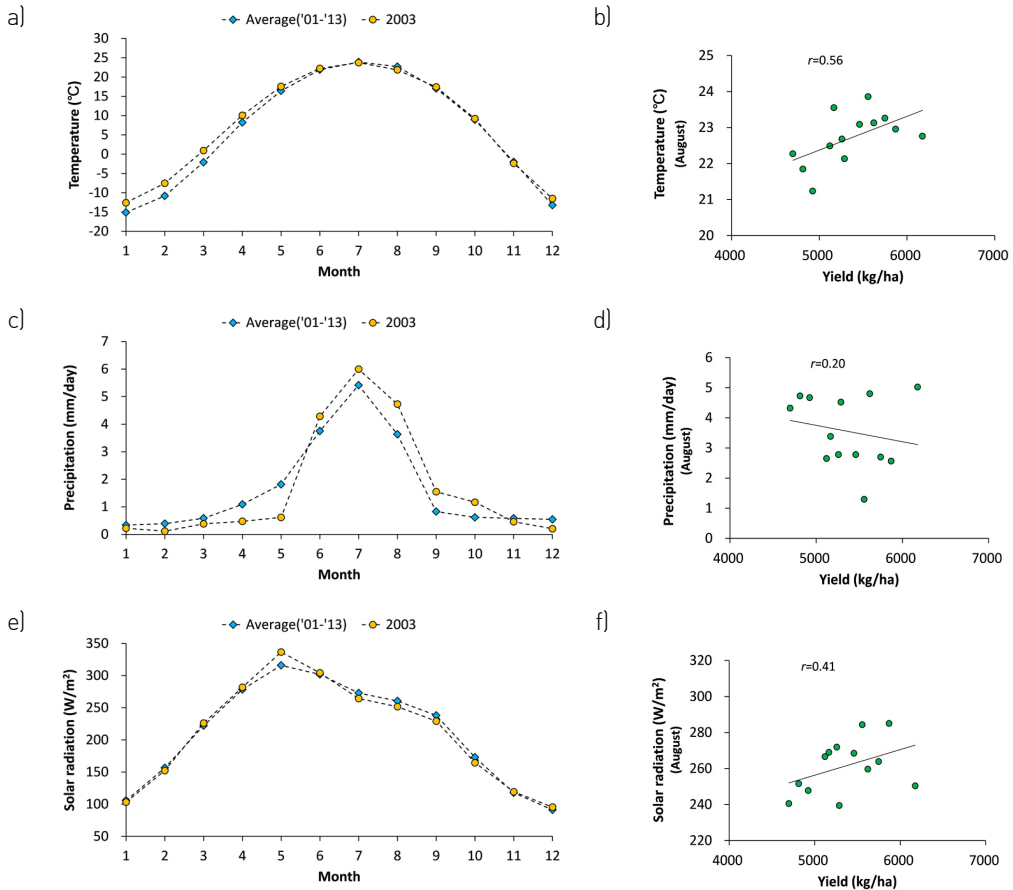


그림 4.12 중국 길림성 북부 지역의 옥수수 수확량 감소해에 대한 a)기온, c)강수량, e)일사량의 월변화 특징 및 옥수수 생육시기 기후요소와 수확량의 상관관계 분석 (b)기온-수확량, d)강수량-수확량, f)일사량-수확량 상관관계)

중국 길림성의 경우 8월의 기온과 옥수수 수확량 사이에 $r=0.56$ 의 상관성을 나타내고 있으며 8월의 강수량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.20$ 의 상관성을 8월의 일사량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.41$ 의 상관성을 나타내고 있어 대체로 8월의 기온과 일사량이 증가할수록 수확량이 증가하는 것으로 나타났으며 8월의 강수량과 수확량 사이에는 상관성이 작은 것으로 나타났다.

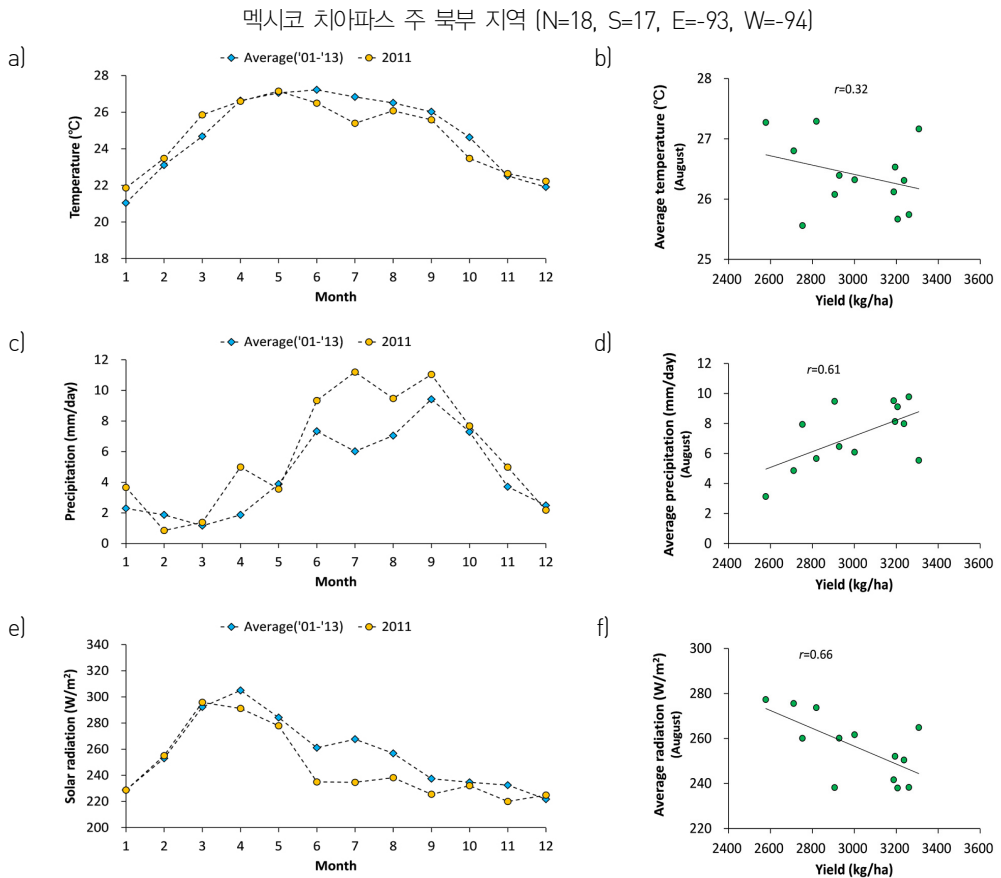


그림 4.13 멕시코 치아파스 주 북부 지역의 옥수수 수확량 감소에 대한 a)기온, c)강수량, e)일사량의 월변화 특징 및 옥수수 생육시기 기후요소와 수확량의 상관관계 분석 (b)기온-수확량, d)강수량-수확량, f)일사량-수확량 상관관계)

그림 4.13은 멕시코 치아파스 주 북부지역에 대한 2001년-2013년 월 평균 기온, 강수량, 일사량과 옥수수 수확량 감소가 컸던 2011년의 각 기후요소를 비교한 결과와 월 평균 기후요소와 수확량의 상관관계를 나타낸다. 멕시코 치아파스 주의 경우 8월의 기온과 옥수수 수확량 사이에 $r=0.32$ 의 상관성을 나타내고 있으며 8월의 강수량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.61$ 의 상관성을 8월의 일사량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.66$ 의 상관성을 나타내고 있다. 대체로 8월의 일사량과 기온이 증가할수록 옥수수 수확량이 감소하는 것으로 나타나고 있어 높은 일사량으로 인한 옥수수 생육 부진이 그 영향인 것으로 판단되며 반면 8월의 강수량 증가는 옥수수 수확량 증가에 긍정적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

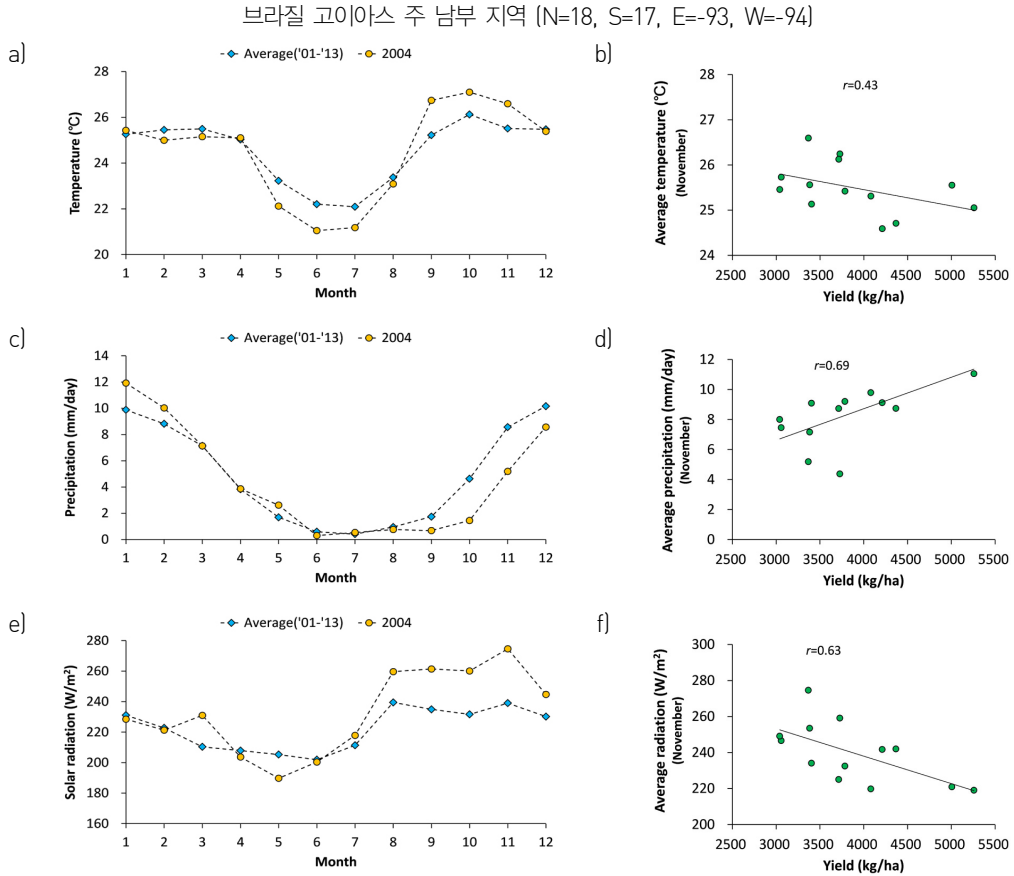


그림 4.14 브라질 고이아스 주 남부 지역의 옥수수 수확량 감소에 대한 a)기온, c)강수량, e)일사량의 월변화 특징 및 옥수수 생육시기 기후요소와 수확량의 상관관계 분석 (b)기온-수확량, d)강수량-수확량, f)일사량-수확량 상관관계

그림 4.14는 브라질 고이아스 주 남부지역에 대한 2001년-2013년 월 평균 기온, 강수량, 일사량과 옥수수 수확량 감소가 컸던 2004년의 각 기후요소를 비교한 결과와 월 평균 기후요소와 수확량의 상관관계를 나타낸다. 브라질 고이아스 주에서는 제 1기작(여름작)과 제2기작(겨울작)의 연 2회 옥수수 경작이 이루어지고 있으며 11월의 기온과 옥수수 수확량 사이에 $r=0.43$ 의 상관성을 나타내고 있으며 11월의 강수량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.69$ 의 상관성을 11월의 일사량과 옥수수 수확량 사이에는 $r=0.63$ 의 상관성을 나타내고 있다. 대체로 11월의 강수량이 증가할수록 옥수수 수확량이 증가하는 경향을 보이고 있으며 기온과 일사량이 증가할수록 옥수수 수확량은 감소하는 것으로 나타나고 있다.

4.1.3 과거기후 예측자료 (Hindcast 자료) 예측성 평가

본 연구에서는 1983년부터 2006년까지 24년 동안에 대한 기후예측 시뮬레이션을 실시한 6개월 선행예측기간을 갖는 6개 GCM 모형의 Hindcast 자료를 이용해 그림 4.2에 위치한 주요 옥수수 생산지역의 기온과 강수량에 대한 과거기간 예측 결과를 분석하였다. Hindcast 자료는 7월-12월 예측정보를 포함하는 6개월 예측정보가 이용되었으며 각각의 모형별로 복수의 앙상블 값이 존재하지만 여기서는 모형별 앙상블 평균된 값을 이용했다. 참고로 미국 일리노이 주 중북부 지역에서는 4월 초에서 6월초 사이에 옥수수 파종이 이루어지고 있어 7월의 기후정보는 출사기(silking stage)와 같이 옥수수 생육에 중요한 시기를 포함한다. 각 GCM 모형의 Hindcast 자료에 대한 예측 신뢰성을 평가하기 위해 먼저 Hindcast 예측 기간인 1983년-2006년에 대한 기온 및 강수량의 Climatology를 NCEP 재분석 자료로부터 구한 다음 GCM 모형의 연도별 Anomaly를 구해 그림 4.16와 같이 나타냈고 예측값과 관측값의 상관성과 정확성을 평가하기 위해 식 (3.7), (3.8)에서 설명된 TCC와 RMSE를 구해 그림 4.17과 같이 나타냈다.

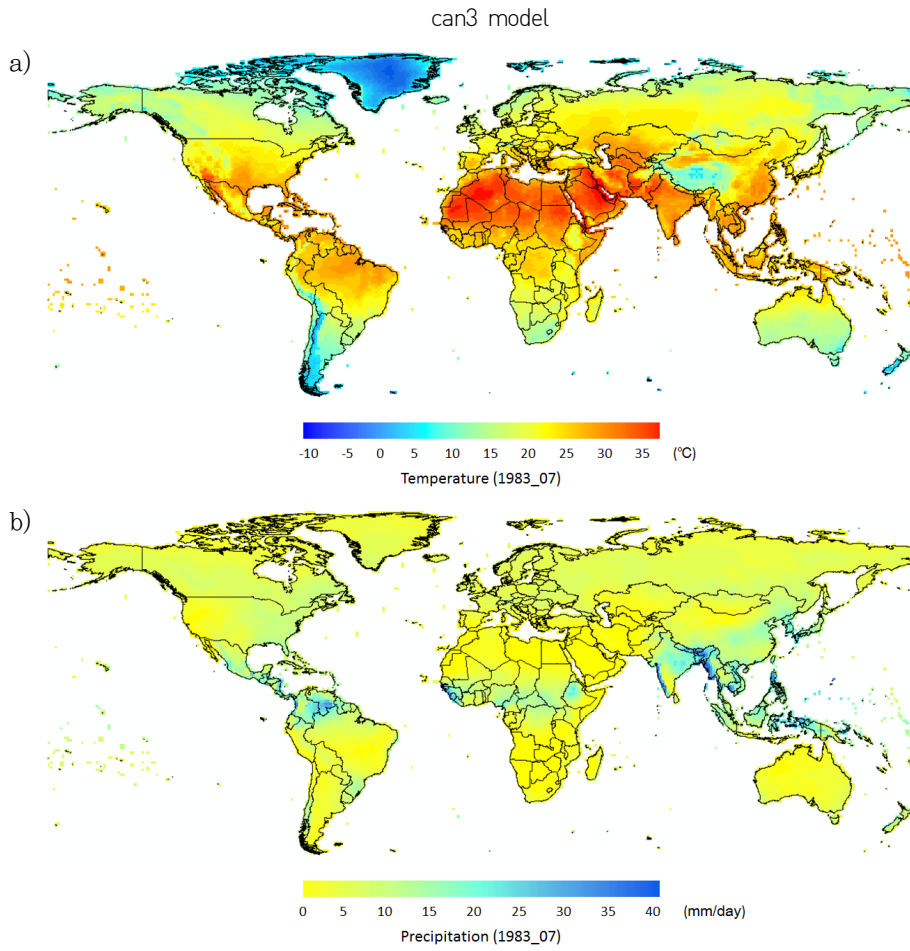


그림 4.15 can3 기후예측 모형의 Hindcast 기간 a)기온, b)강수량 예측 (1983년 7월)

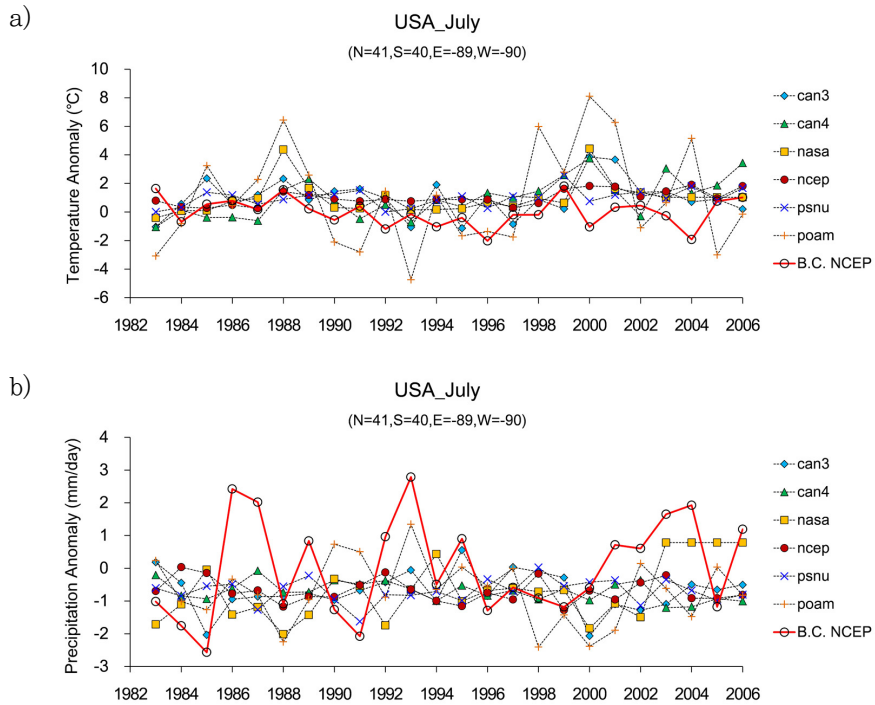


그림 4.16 미국 일리노이 주 중북부 지역의 과거기간(1983-2006년)에 대한 기온 및 강수량의 7월 예측 결과와 NCEP 관측 자료를 이용한 Anomaly 분석

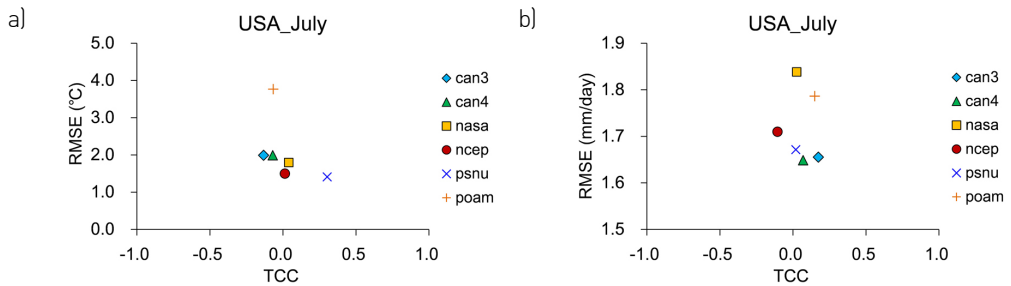


그림 4.17 TCC와 RMSE 분석을 통한 미국 일리노이 주 중북부 지역의 기온 및 강수량에 대한 과거 재현성 평가

APCC의 6개월 선행예측기간 Hindcast 기후예측 자료를 분석하기 위해 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료의 Climatology를 기준으로 6개 기후예측 모형의 1983-2006년 24년간의 일리노이 주 지역 7월 기온 및 강수량 예측 결과의 Anomaly를 구해 그림 4.16와 같이 나타냈다. 기후예측 자료는 기온의 경우 NCEP보다 높게 예측되고

있으며 poam 모형의 변동폭이 12.8 °C로 가장 크게 나타났으며 강수량의 경우 NCEP 보다 낮게 예측되었다. 모형의 신뢰성을 평가하기 위해 그림 4.17과 같이 TCC와 RMSE로 나타낸 결과 TCC는 기온, 강수량 모두 0을 중심으로 분포하고 있으며 기온의 경우 psnu 모형에서 TCC 0.3, RMSE 1.41로 가장 나은 예측성능을 보였다.

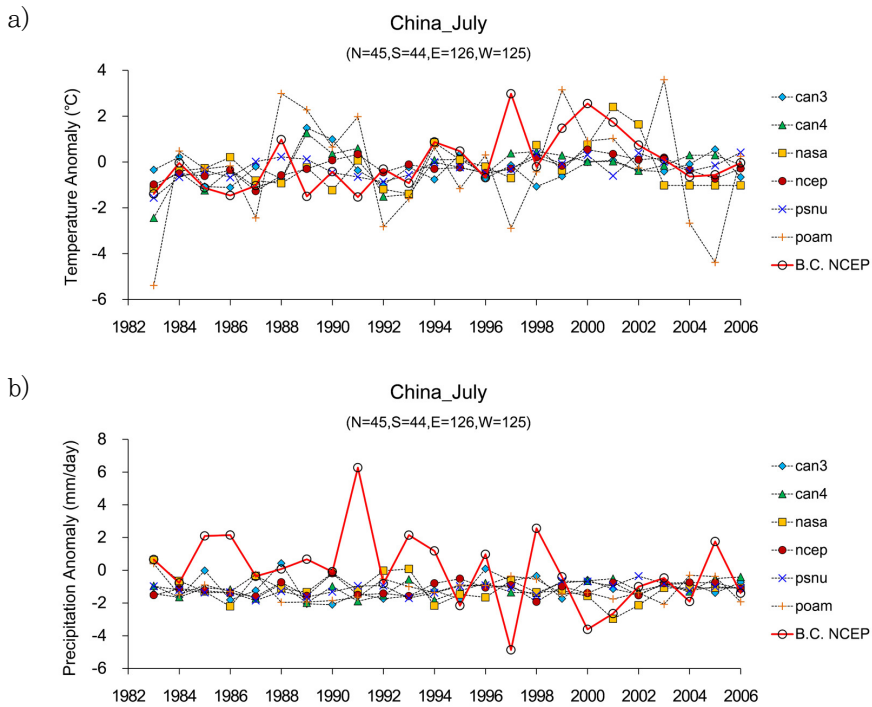


그림 4.18 중국 길림성 북부 지역의 과거기간(1983-2006년)에 대한 기온 및 강수량의 7월 예측 결과와 NCEP 관측 자료를 이용한 Anomaly 분석

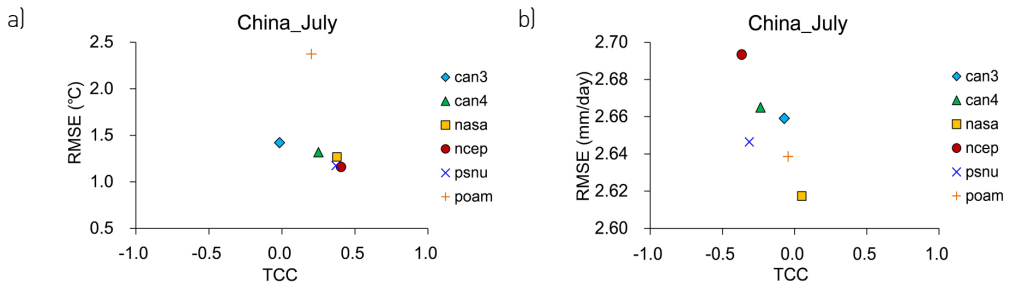


그림 4.19 TCC와 RMSE 분석을 통한 중국 길림성 북부 지역의 기온 및 강수량에 대한 과거 재현성 평가

그림 4.18는 중국 길림성 북부 지역에 대한 기후예측 모형과 NCEP 자료의 7월 기온 및 강수량 Anomaly 변동을 나타내고 있으며 a) 기온의 경우 poam 모형의 변동폭이 9.0 °C로 크게 나타났지만 나머지 모형에서는 유사한 변동폭을 보이고 있으며 평균적으로 기후예측 값이 NCEP보다 조금 낮게 예측되었다. 예측성 분석에서는 기온의 경우 ncep 모형에서 TCC 0.4, RMSE 1.16으로 가장 나은 예측성을 보였으며 nasa와 psnu 모형에서도 비슷한 예측성을 보였다. b) 강수량의 경우 NCEP의 변동폭이 큰데 반해 기후예측 값들은 대체로 변동폭이 작게 나타나고 있어 1991년의 큰 강우와 1997년의 작은 강우에 대한 예측성은 낮게 나타났으며 TCC의 경우 nasa 모형을 제외한 나머지 모형에서 0이하의 값을 보이고 있어 강수량의 예측성이 낮은 것으로 나타났다.

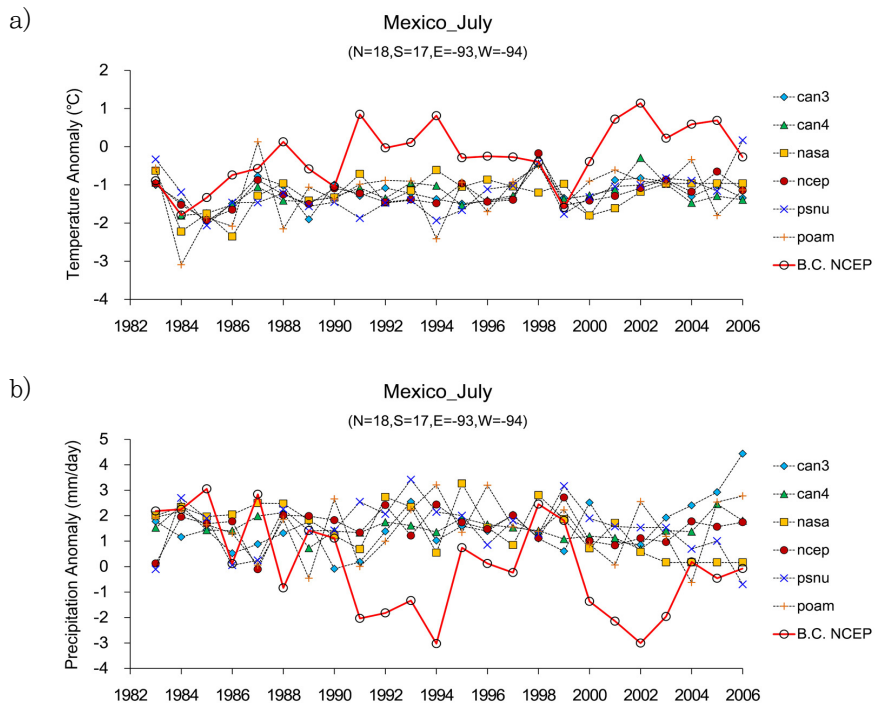


그림 4.20 멕시코 치아파스 주 북부 지역의 과거기간(1983-2006년)에 대한 기온 및 강수량의 7월 예측 결과와 NCEP 관측 자료를 이용한 Anomaly 분석

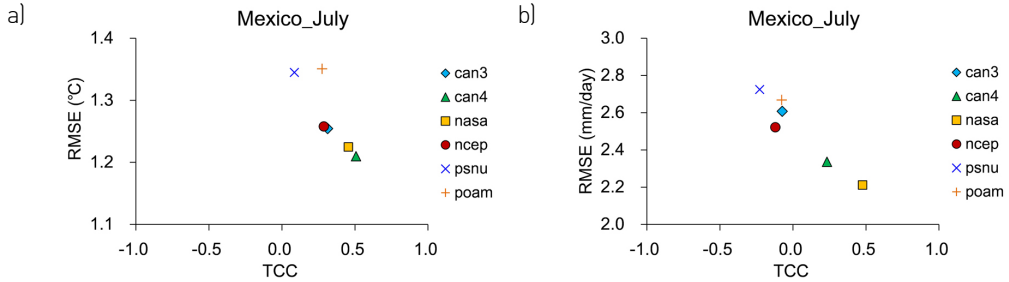


그림 4.21 TCC와 RMSE 분석을 통한 멕시코 치아파스 주 북부 지역의 기온 및 강수량에 대한 과거 재현성 평가

그림 4.20은 멕시코 치아파스 주 북부 지역에 대한 기후예측 모형과 NCEP 자료의 7월 기온 및 강수량 Anomaly 변동을 나타내고 있으며 a) 기온의 경우 poam 모형의 변동폭이 3.2 °C로 크게 나타났지만 나머지 모형에서는 NCEP보다 작은 변동폭을 보이고 있으며 평균적으로 기후예측 값이 NCEP보다 1.0 °C정도 낮게 예측되었다. 예측성 분석에서는 기온의 경우 can3 모형에서 TCC 0.5, RMSE 1.2로 가장 나은 예측성을 보였으며 나머지 모형에서도 TCC 0.1 이상의 예측성을 보였다. b) 강수량의 경우 NCEP의 변동폭이 6.1 mm/day로 크게 나타났으며 기후예측 값들은 대체로 NCEP보다 1.5 mm/day정도 높게 예측하고 있다. 예측성 분석 결과 nasa 모형에서 TCC 0.5, RMSE 2.2로 가장 나은 예측성을 나타냈으며 can4 모형에서도 나은 예측성을 보였다.

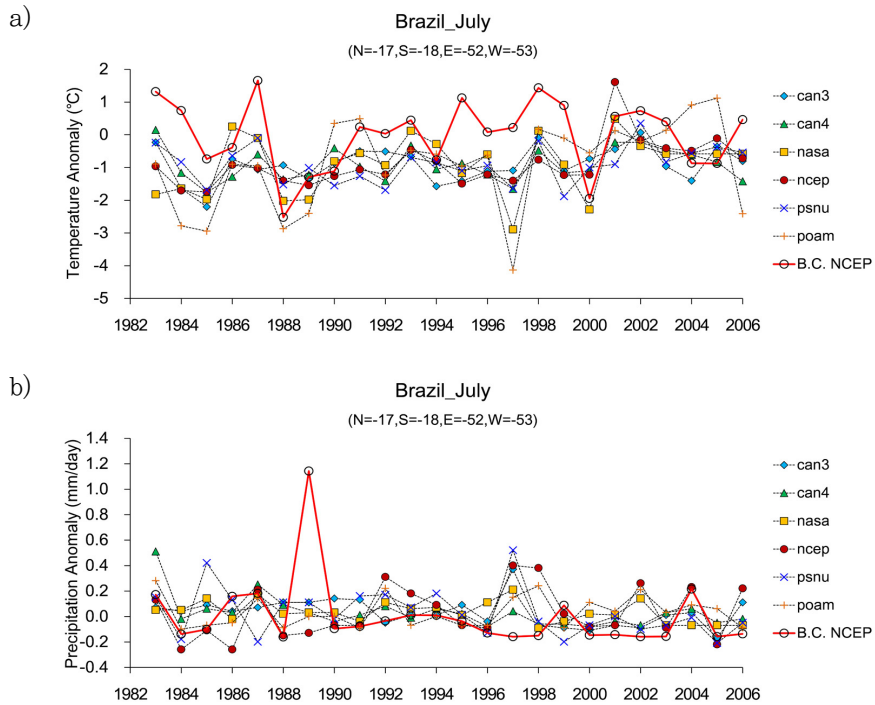


그림 4.22 브라질 고이아스 주 남부 지역의 과거기간(1983-2006년)에 대한 기온 및 강수량의 7월 예측 결과와 NCEP 관측 자료를 이용한 Anomaly 분석

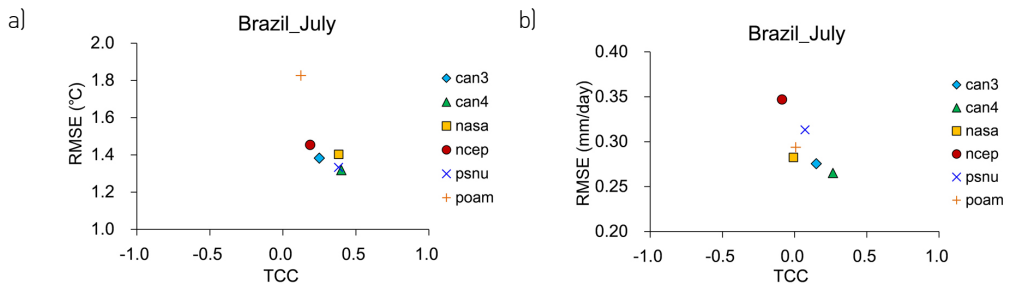


그림 4.23 TCC와 RMSE 분석을 통한 브라질 고이아스 주 남부 지역의 기온 및 강수량에 대한 과거 재현성 평가

그림 4.22은 브라질 고이아스 주 남부 지역에 대한 기후예측 모형과 NCEP 자료의 7월 기온 및 강수량 Anomaly 변동을 나타내고 있으며 a) 기온의 경우 poam 모형의 변동폭이 5.2 °C로 위 세 지역과 마찬가지로 가장 크게 나타났다. 평균적으로 기후예측 값은 NCEP보다 0.9 °C정도 낮게 예측되었으며 예측성 분석에서 기온의 경우

can4 모형에서 TCC 0.4, RMSE 1.3으로 가장 나은 예측성을 보였으며 poam을 제외한 나머지 모형에서도 TCC 0.2 이상, RMSE 1.45 이하의 대체로 나은 예측성을 보였다. b) 강수량의 경우 브라질의 7월 강우는 위 세 지역보다 상당히 적은 건기로 기후 예측 모형 대부분 Anomaly가 0.5 이하로 나타나고 있다. 예측성 분석 결과 can4 모형에서 TCC 0.3, RMSE 0.26의 가장 나은 예측성을 보였지만 대체로 모형의 예측성이 낮았다.

4.1.4 장기 기후예측 자료 (Forecast 자료) 재생산

본 연구에서는 전 지구 규모의 옥수수 수확량 예측을 위해 예측시점까지의 관측 자료와 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료 그리고 예측시점이 7월 이전인 경우에는 기후예측 자료 이후의 기후자료가 없는 관계로 과거 1971년-2010년의 40년간의 일평균 기후자료를 결합한 맞춤형 장기 기후예측 자료를 재생산했다. APCC에서 제공되는 6개월 선행예측기간의 Forecast 기후예측 자료는 표 3.3과 표 3.4에서 나타내진 것과 같이 Forecast 예측 시작 시점이 모형에 따라 다르다. 공통의 예측기간을 갖는 기간은 2012년부터이지만 6개월 선행예측기간의 예측 정보가 존재하는 것은 6월, 9월, 12월 자료 밖에 없는 관계로 본 연구에서 수행하고자 하는 3월, 5월 자료가 누락되어 있어 부득이 2013년 1월부터 2015년 9월까지의 매월 생산된 예측정보를 이용하였다. 본 연구에서는 전 지구 규모로 작물 수확량을 예측하기 때문에 지역에 따라 각기 파종시기가 다른 것을 고려해 작물 수확량의 예측 시점을 3월, 5월, 7월, 9월로 설정해 시뮬레이션을 실시했다. 1월부터 12월까지의 매월 예측 시점으로 하는 기후자료를 생산할 수도 있으나 전 지구 규모의 자료를 처리하기 위해서는 상당한 저장공간이 필요하고 전체 월을 예측 시점으로 할 경우 전 지구의 작물 수확량을 시뮬레이션 하는데 있어 상당한 처리 시간이 소요된다는 문제점이 있어 북반구의 봄의 시작 시점인 3월을 시작으로 5월, 7월, 9월의 순으로 작물 수확량 시뮬레이션을 실시했다.

작물 수확량 시뮬레이션을 위해 요구되는 일 기후자료는 3.2.2와 3.2.3의 방법에 의해 작성된 예측 기후자료가 이용되었다. 또한 Forecast 예측 모형은 모형에 따라 앙상블 멤버가 다르게 존재하는데 장기 기후예측 자료 재생산에는 각 기후예측 모형의 5개 앙상블이 이용되었다. 작물 모형에 최종적으로 입력되는 예측 기후자료는 6개 기후예측

모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncp), PSNU(psnu), POAMA(poma))으로부터의 각 5개 앙상블에 의해 작성되는 총 30개의 일 기후자료 시나리오로 작성된다. 작물 수확량 예측 시점이 3월인 경우 1월 1일부터 2월 28일 까지의 일 기후자료는 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 일 기후자료가 관측자료로서 이용되고 3월 1일부터 8월 31일까지의 일 기후자료는 Forecast 기후예측 모형을 시간 상세화한 30개 기후예측 시나리오가 이용된다. 기후예측 자료가 존재하지 않는 9월 1일부터 12월 31일까지의 일 기후자료에는 일평균 기후자료가 이용된다. 나머지 예측 시점이 5월, 7월, 9월인 경우에도 같은 방법으로 기후입력 자료를 재생산했다.

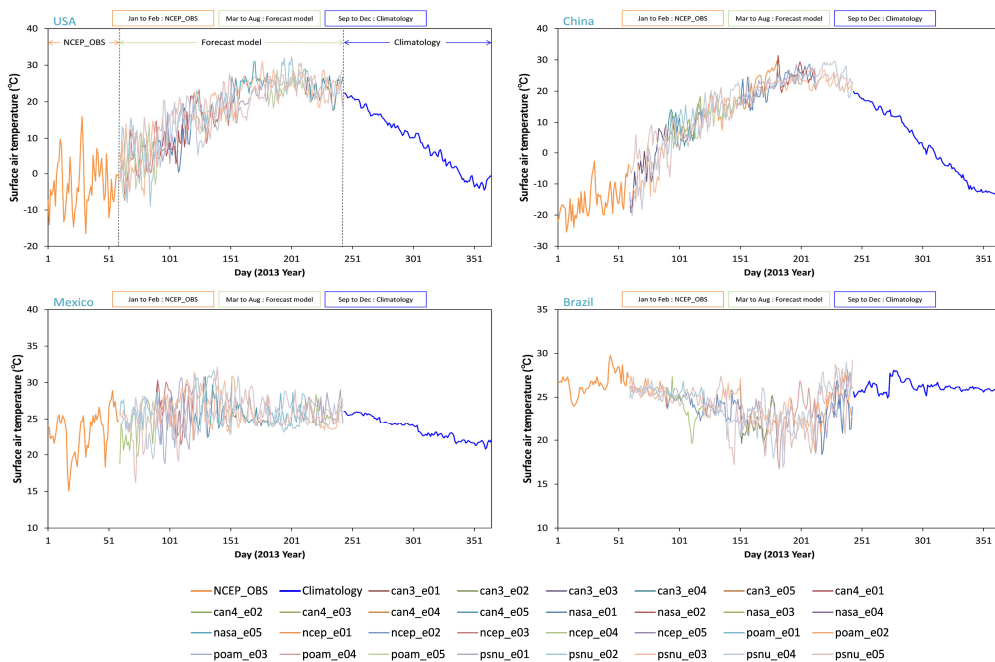


그림 4.24 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표적 옥수수 재배지역에 대한 2013년도 3월 예측 시점 작물모형 입력 기온자료 생산 결과 (1-2월: NCEP_OBS, 3-8월: Forecast models, 9-12월: Climatology)

작물 모형의 기후입력 자료는 관측자료(NCEP_OBS)와 6개월 선행예측기간 예측자료(Forecast model) 그리고 과거 40년 평균 기후값(Climatology)의 결합으로 재생산되었다. 그림 4.24는 2013년 3월 예측 시점을 기준으로 전 지구 규모로 재생산된 1월 1일부터 12월 31일까지 365일의 기후자료로부터 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표적인 옥수수 생산지역에 해당하는 격자의 일 기온자료를 추출하여 시계열로

나타낸 그래프이다. 미국의 경우 일리노이 주 중북부 지역(N=41, S=40, E=-89, W=-90)에 대한 2013년도의 시계열 일 기온 자료로 1월부터 2월까지의 NCEP_OBS 자료는 일 변동이 크게 나타나고 있으며 가장 기온이 높은 날과 가장 낮은 날의 차이가 32.5 °C나 되었다. 3월부터 8월까지의 Forecast models 자료는 30개 기후자료 시나리오로 구성되어 있지만 각 월별로 보면 기후예측 모형 앙상블의 예측된 값들이 중첩되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 3.2.3에서 월 단위 예측자료의 시간적 상세화 과정에서 30개 기후예측 모형 앙상블의 예측 값이 과거 64년 관측자료 중에서 가장 가까운 값을 선택할 때 같은 값을 불러오므로서 발생하는 현상이라고 볼 수 있다. 하지만 기후예측 모형 앙상블의 매월 예측 값이 과거 64년 관측자료로부터 다른 값을 선택해 불러오기 때문에 3월에서 8월까지 6개월을 통해 생산되는 기후자료 시나리오는 6개월 동안 같은 값을 불러오는 경우를 제외하면 30개로 구성된다. 9월부터 12월까지의 Climatology 자료는 과거 40년 평균 일 자료로 구성되기 때문에 NCEP_OBS나 Forecast model 자료의 변동성과 비교하면 변동폭이 상당히 작게 나타나고 있다. 중국의 경우 동북(東北)지역의 길림(吉林)성 북부 지역(N=45, S=44, E=129, W=125)에 대한 2013년도 시계열 자료가 작성되었다. 이 지점은 고위도에 위치해있어 기온이 0 °C 이하인 날이 3월까지 이어지는 것으로 나타나고 있으며 1-2월 평균 기온이 -15.5 °C로 나타났다. 3월부터 8월까지의 Forecast model 자료를 보면 미국과 마찬가지로 기후예측 모형 앙상블의 예측된 값들이 중첩되는 것으로 나타났다. 멕시코의 경우 치아파스 주 북부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)에 대한 2013년도 시계열 자료가 작성되었다. 1월부터 2월까지의 NCEP_OBS 자료는 23.2 °C의 평균기온을 나타내고 있다. 3월부터 8월까지의 Forecast model 자료를 보면 5월까지의 기온 변동폭이 크게 나타나고 6월부터 8월까지는 중첩되는 기후예측 모형 앙상블의 예측된 값들이 많은 것으로 나타났다. 브라질의 경우 고이아스 주 남부 지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)에 대한 2013년도 시계열 자료가 작성되었다. 대상 지점이 남반구에 위치한 이유로 1월부터 2월까지 NCEP_OBS 자료의 평균기온은 26.7 °C로 높게 나타나고 있다. 3월부터 8월까지의 Forecast model 자료를 보면 3월부터 4월까지 기온의 변동폭이 작은 반면 5월부터 8월까지의 기온 변동폭은 크게 나타났다.

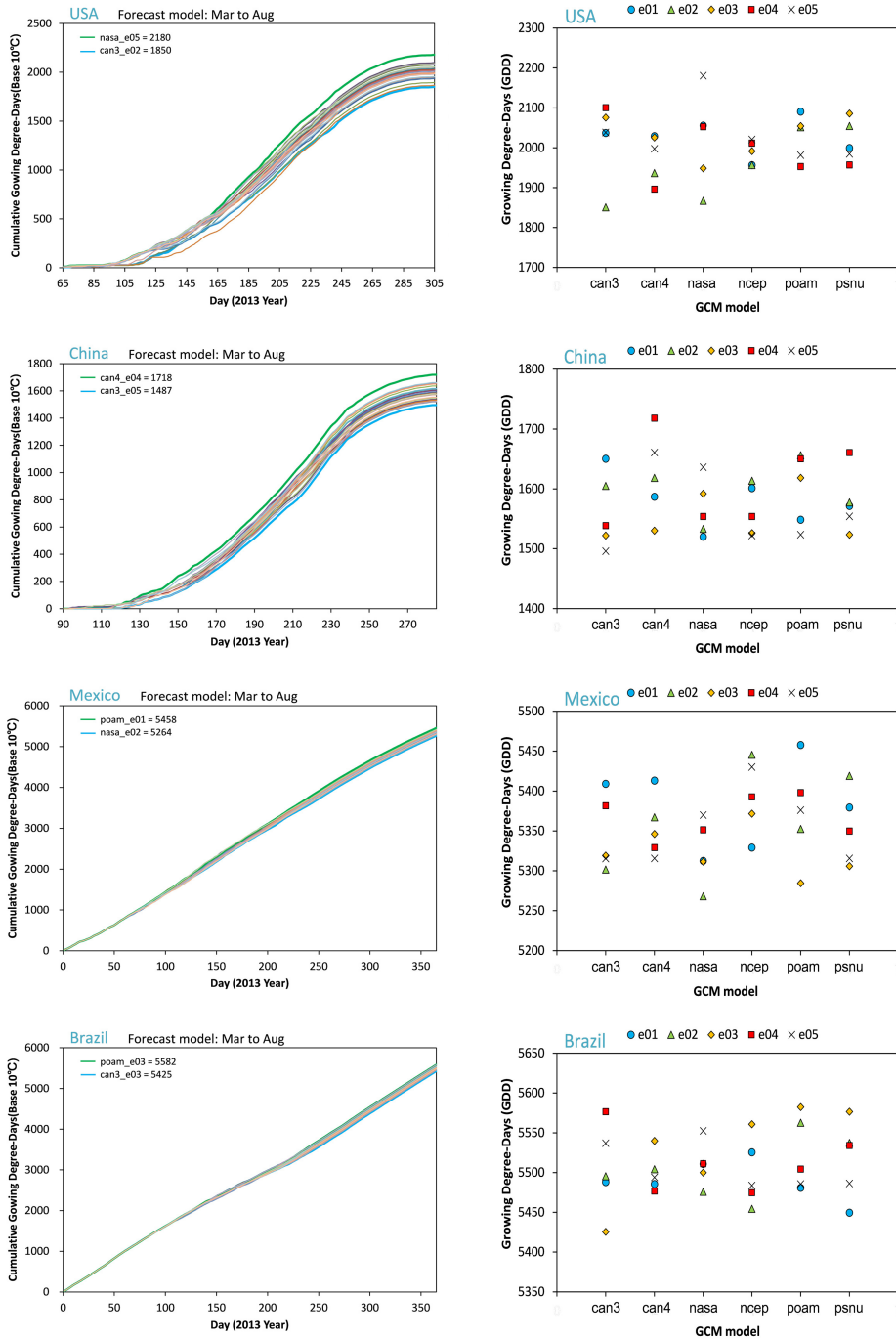


그림 4.25 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표 옥수수 재배지역에 대한 2013년 3월 예측시점 기온자료를 이용한 GDD 분석 결과 (왼쪽: 누적 GDD, 오른쪽: 총 GDD)

NCEP_OBS 자료와 Forecast model 자료 그리고 Climatology 자료의 합으로 작성된 2013년도 기온자료를 이용해 작물의 생장온도일수(Growing degree days, GDD)를 계산하였다. 생장온도일수는 유효적산온도라고도하며 작물의 생육가능온도를 적산한 값으로 지역에 따른 작물의 재배 가능성을 판단하거나 현재 재배되고 있는 작물의 생육단계를 예측하는데 활용되는 지수이다. 옥수수의 생육 가능한 온도는 10 °C 이상으로 여기서는 10 °C 이상의 기온을 적산하여 GDD를 계산하였다. 그림 4.25는 작물 모형의 입력 기후자료로 재생산된 2013년도 기온자료로부터 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 GDD의 누적 그래프를 나타내고 있다. 왼쪽 그래프는 GDD가 0 이상인 날부터 더 이상 GDD가 증가하지 않는 날 즉 기온이 10 °C 이하로 떨어지는 날까지 30개 기후자료 시나리오별로 누적된 GDD를 나타내고 있으며 오른쪽 그래프는 누적 GDD가 더 이상 증가하지 않는 날의 최대 누적 GDD를 6개 기후예측 모형별로 나타낸 것이다.

미국 일리노이 주 지역의 경우를 보면 GDD 값은 65일(3월 6일)부터 발생하여 305일(11월 1일)까지 누적되었고 170일(6월 19일) 부근부터 210일(7월 29일) 부근까지 GDD의 증가율이 가장 크게 나타났다. 이 지역의 옥수수 파종 시작일은 4월 초부터 시작되고 있는데 GDD 값으로부터 옥수수를 파종하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 최종 누적 GDD를 보면 nasa 모형의 앙상블 5(e05)에서 2180 °C로 가장 높았고 can3 모형의 앙상블 2(e02)에서 1850 °C로 가장 낮게 나타났다. 오른쪽 그래프를 통해 기후 모형별로 보면 nasa 모형의 앙상블별 GDD 차이가 313 °C로 가장 크게 나타났고 ncep 모형은 앙상블별 GDD 차이가 64 °C로 크지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 nasa 모형의 앙상블 멤버들이 예측한 기온의 폭이 다른 모형에 비해 큰 것을 의미한다.

중국 길림성 지역의 경우를 보면 90일(3월 31일)부터 GDD 값이 발생하여 285일(10월 12일)까지 누적되었고 215일(8월 3일) 부근부터 230(8월 19일) 부근까지 GDD의 증가율이 가장 크게 나타났다. 이 지역에서는 전형적으로 4월 중순부터 옥수수가 파종되고 있는데 GDD 값으로부터 이 지역 역시 옥수수를 파종하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 최종 누적 GDD를 보면 can4 모형의 앙상블 e04에서 1718 °C로 가장 높았고 can3 모형의 앙상블 e05에서 1487 °C로 가장 낮게 나타났다. 오른쪽 그래프를 통해 기후모형별로 보면 대체적으로 앙상블별 GDD의 차이가 100 °C 이상으로 나타났다.

멕시코 치아파스 주 지역의 경우를 보면 연중 일 기온이 10 °C 이상으로 나타나고 있어 GDD 값은 1일부터 발생하여 365까지 누적되었다. 이것은 이 지역에서 연중 옥수수 생산이 가능하다는 것을 의미한다. 최종 누적 GDD를 보면 poam 모형의 앙상블 e01에서 5458 °C로 가장 높았고 nasa 모형의 앙상블 e02에서 5264 °C로 가장 낮게 나타났으나 미국, 중국과 비교해 2배 이상 높은 것을 알 수 있다. 오른쪽 그래프를 통해 기후모형별로 보면 대체적으로 앙상블별 GDD의 차이가 100 °C 이상으로 나타났다.

브라질 고이아스 주 지역의 경우를 보면 멕시코와 마찬가지로 연중 일 기온이 10 °C 이상으로 나타나고 있어 GDD 값은 1일부터 발생하여 365까지 누적되었다. 최종 누적 GDD를 보면 poam 모형의 앙상블 e03에서 5582 °C로 가장 높았고 can3 모형의 앙상블 e03에서 5425 °C로 가장 낮게 나타나 4개 국가 중 누적 GDD가 가장 큰 것으로 나타났다. GDD 값이 큰 브라질에서는 연중 옥수수 생산이 가능하여 2월 중순에 파종을 시작해서 7월에 수확이 끝나면 다시 9월부터 파종을 시작해 이듬해 2월 초부터 수확을 시작하는 2기작 생산이 늘어나고 있다. 오른쪽 그래프를 통해 기후모형별로 보면 can3 모형의 앙상블별 GDD 차이가 151 °C로 가장 크게 나타났고 can4 모형은 앙상블별 GDD 차이가 63 °C로 상대적으로 크지 않은 것을 알 수 있다.

그림 4.26은 2013년 3월 예측 시점을 기준으로 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표적인 옥수수 생산지역에 해당하는 격자의 일 강수량자료를 추출하여 시계열로 나타낸 그래프이다. NCEP_OBS 자료와 Forecast model 자료는 강수량의 변동폭이 크게 나타나고 있는 반면 Climatology는 값은 작지만 늘 비가 오는 것으로 나타나고 있다.

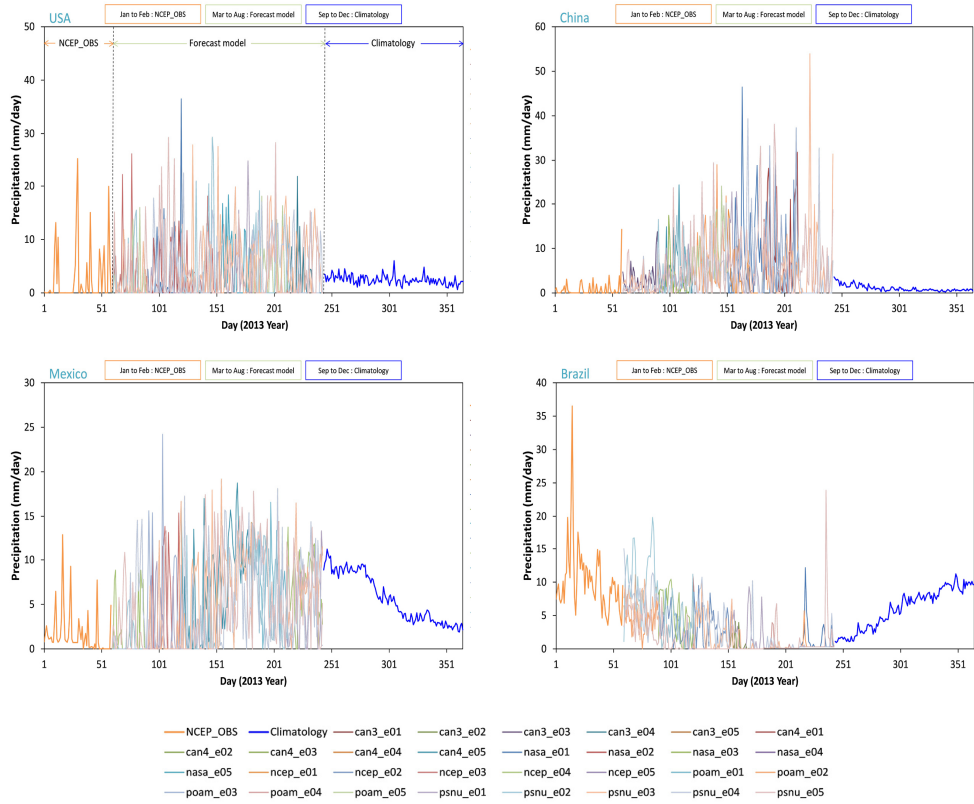


그림 4.26 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표적 옥수수 재배지역에 대한 2013년도 3월 예측 시점 작물모형 입력 강수량자료 생산 결과 (1-2월: NCEP_OBS, 3-8월: Forecast models, 9-12월: Climatology)

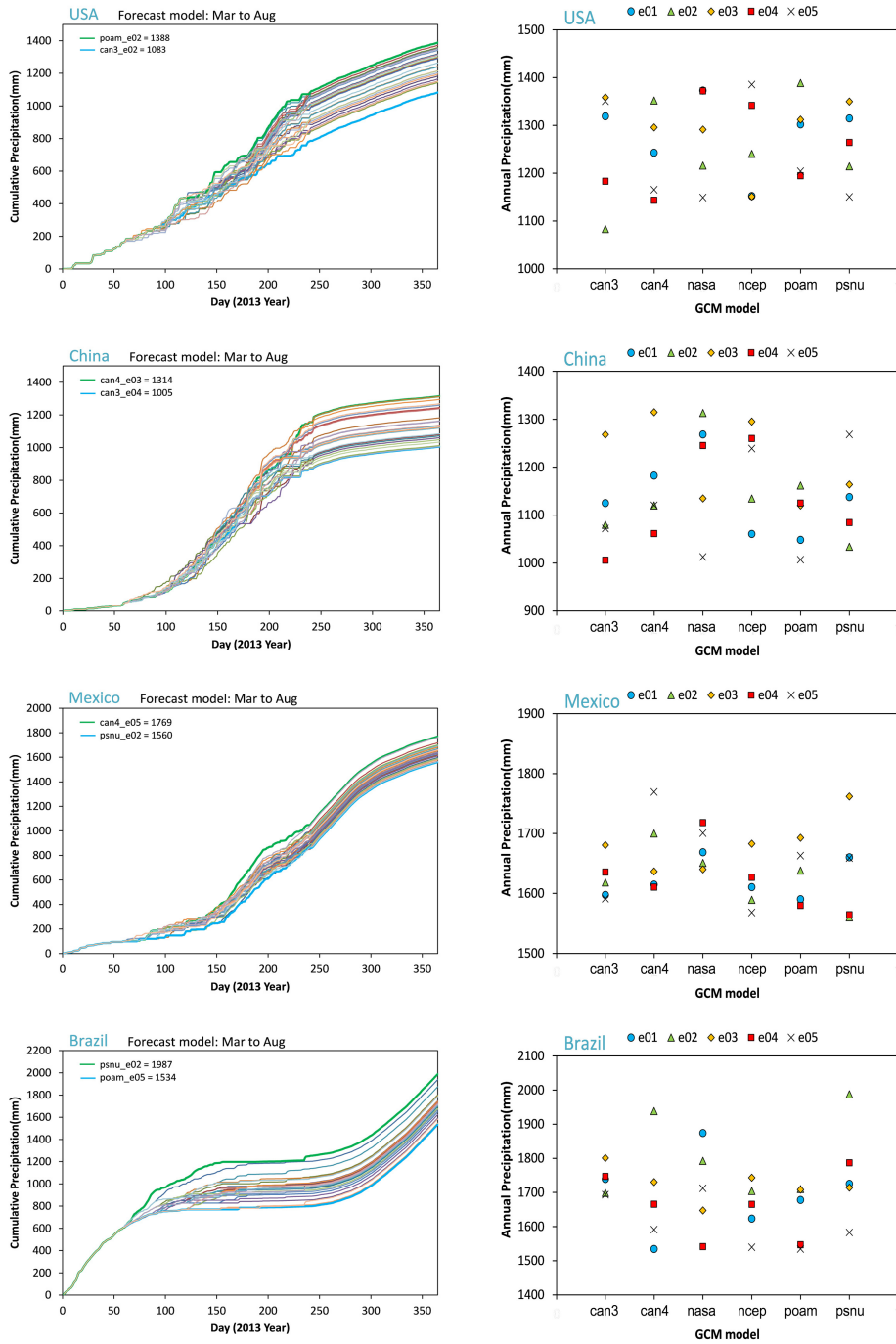


그림 4.27 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표 옥수수 재배지역에 대한 2013년 3월 예측시점 기온자료를 이용한 누적 강수량 분석 결과 (왼쪽: 누적 강수량, 오른쪽: 모형별 연간 총 강수량)

NCEP_OBS 자료와 Forecast model 자료 그리고 Climatology 자료의 합으로 작성된 2013년도 강수량자료를 이용해 누적 강수량을 계산하였다. 그림 4.27은 작물 모형의 입력 기후자료로 재생산된 2013년도 강수량자료로부터 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 30개 기후자료 시나리오별 누적 강수량을 나타낸다. 왼쪽 그래프는 1년간의 기후자료 시나리오에 따른 강수량의 누적을 나타내는데 1월부터 2월까지의 NCEP_OBS 관측자료로서 하나의 선으로 나타나고 있으며 3월부터 8월까지 기후예측 모형에 따라 누적 강수량이 점차 차이를 나타낸다. 오른쪽 그래프는 1년 동안의 총 누적 강수량을 나타낸 것으로 6개 기후예측 모형별로 앙상블에 따른 누적 강수량의 차이를 나타내고 있다. 미국의 경우 대체적으로 꾸준한 강수 특성을 보이지만 중국과 멕시코에서는 봄까지는 강수량이 많지 않다가 6월에 접어들면서 강수량이 급격히 증가하고 겨울철에 다시 강수량이 감소하는 것으로 나타났다. 반면 브라질의 강수량은 11월부터 이듬해 4월까지 강수량이 많고 5월부터 10월까지의 강수량이 적은 것으로 나타나고 있다. 연간 총 누적 강수량은 멕시코와 브라질에서 높게 나타났다.



그림 4.28 미국과 브라질의 대표적 옥수수 재배지역에 대한 2013년도 7월 예측 시점 작물모형 입력 기온 및 강수량자료 생산 결과 (1-6월: NCEP_OBS, 7-12월: Forecast models)

그림 4.28은 2013년 7월 예측 시점을 기준으로 재생산된 일 기후자료로부터 미국과 브라질의 대표적인 옥수수 생산지역에 해당하는 격자의 일 기온자료와 일 강수량 자료를 추출하여 시계열로 나타낸 그래프이다. 1월부터 6월까지의 NCEP_OBS 관측 자료를 이용하고 7월부터 12월까지는 Forecast model 자료를 이용한다. 미국의 경우 7-8월에 기온이 가장 높고 12-1월에 기온이 가장 낮게 나타났지만 브라질에서는 7월에 기온이 가장 낮고 3월에 기온이 가장 높은 것으로 나타났다. 강수량의 경우 미국에서는 연중 강수량이 고르게 나타나는 반면 브라질에서는 1-2월에 강수량이 많고 5월에는 무강수인 날이 많은 것으로 나타났다.

그림 4.29는 2013년 7월 예측 시점을 기준으로 재생산된 2013년도 기온자료와 강수량자료로부터 미국과 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 30개 기후자료 시나리오별 GDD의 누적 그래프와 강수량 누적 그래프를 나타낸다. 미국의 경우 GDD 값은 90일부터 발생하여 310일까지 누적되었고 최종 누적 GDD는 ncep 모형의 앙상블 e02에서 2187 °C로 가장 높았고 can4 모형의 앙상블 e05에서 1988 °C로 가장 낮게 나타났는데 3월 예측 시점을 기준으로 재생산된 기온자료와 비교해 보면 같은 ncep 모형의 앙상블 e02에서 1956 °C의 GDD를 보여 7월 예측 시점의 기온자료가 231 °C 높게 예측되었다. 오른쪽 그래프를 통해 기후모형별로 보면 ncep 모형의 앙상블별 GDD 차이가 199 °C로 가장 크게 나타났고 psnu 모형은 앙상블별 GDD 차이가 34 °C로 가장 작게 나타났다. 누적 강수량의 경우 6월까지의 NCEP_OBS 관측자료가 이용되고 있어 하나의 선으로 중첩되어 증가해 오다가 7월부터는 Forecast model 자료가 이용되어 30개의 기후 시나리오에 따라 차이가 발생한다. 기후 시나리오에 따른 연강수량의 차이는 ncep 모형의 앙상블 e01에서 1409 mm로 가장 크게 나타났고 can4 모형의 앙상블 e04에서 1030 mm로 가장 작게 나타나 모형에 따른 누적 강수량의 차이가 379 mm로 크게 나타나고 있어 이러한 연 강수량의 차이가 작물 수확량에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

브라질의 경우 최종 누적 GDD는 can4 모형의 앙상블 e02에서 5711 °C로 가장 높았고 ncep 모형의 앙상블 e01에서 5485 °C로 가장 낮게 나타났는데 3월 예측 시점을 기준으로 재생산된 기온자료와 비교해 보면 같은 can4 모형의 앙상블 e02에서 5504 °C의 GDD를 보여 7월 예측 시점의 기온자료가 207 °C 높게 예측되었다. 누적 강수량의 경우 105일까지는 누적 강수량이 증가하다가 210일까지 변화가 적고 그 후로

다시 증가하는 특성을 나타내고 있다. 기후 시나리오에 따른 연강수량의 차이는 poam 모형의 앙상블 e04에서 1956 mm로 가장 크게 나타났고 3월 예측 시점을 기준으로 재생산된 강수량자료와 비교해 보면 같은 poam 모형의 앙상블 e04에서 1547 mm로 나타나 7월 예측 시점의 강수량자료가 409 mm 많게 예측되었다.

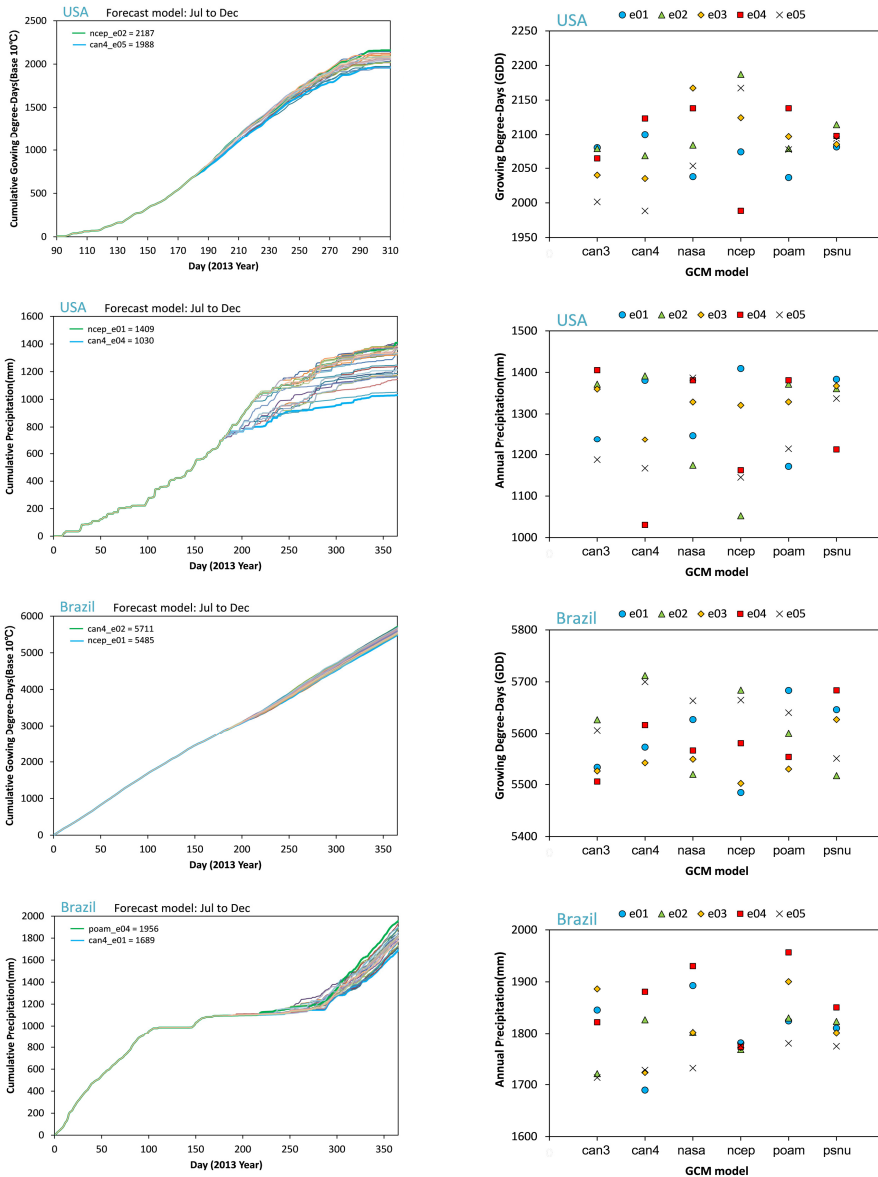


그림 4.29 미국과 브라질의 대표 옥수수 재배지역에 대한 2013년 7월 예측시점 기온 및 강수량자료를 이용한 누적 GDD, 누적 강수량 분석 결과

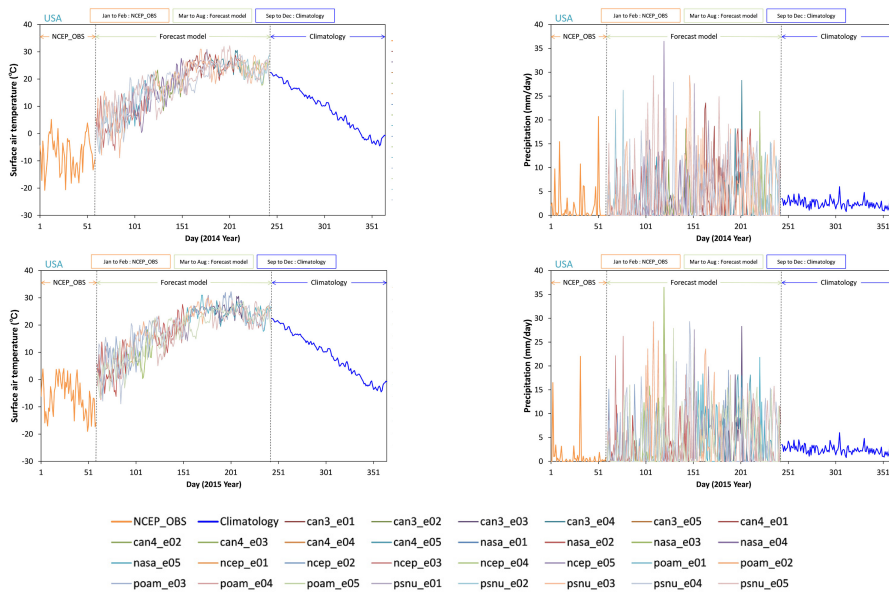


그림 4.30 미국의 대표적 옥수수 재배지역에 대한 2014년도와 2015년도의 3월, 7월 예측 시점 작물모형 입력 기온 및 강수량자료 생산 결과

2014년도와 2015년도에 대해서도 2013년도와 같은 방법으로 작물 모형의 입력 기 후자료가 재생산되었다. 그림 4.30은 미국 일리노이 주 중북부 지역에 대한 2014년 과 2015년의 3월 예측 시점을 기준으로 작성된 일 기온자료와 일 강수량 자료의 시계 열 그래프를 나타낸다. NCEP_OBS 관측자료가 이용된 1월-2월 평균 기온을 보면 2013년도에 -2.9°C 를 보였고 2014년도에 -7.7°C , 2015년도에 -6.4°C 로 나타났다. 1월-2월 평균 강수량을 보면 2013년도에 2.8 mm/day 를 보였고 2014년도에 1.8 mm/day , 2015년도에 1.1 mm/day 로 나타났다. 그림 4.31은 2014년과 2015년의 3월 예측 시점을 기준으로 작성된 기후자료로부터 미국에 대한 누적 GDD와 누적 강수량 을 계산해 나타낸 그래프이다. 2014년의 최종 누적 GDD 값은 can3 모형의 앙상블 e04에서 2157°C 로 가장 높았고 ncep 모형의 앙상블 e05에서 1842°C 로 가장 낮게 나타났다. 2015년에는 can4 모형의 앙상블 e02에서 2146°C , poam 모형의 앙상블 e04에서 1773°C 로 나타났다. 2014년의 누적 연강수량은 psnu 모형의 앙상블 e01에서 1414 mm 로 가장 높았고 ncep 모형의 앙상블 e01에서 1038 mm 로 가장 낮게 나타 났으며 2015년에는 ncep 모형의 앙상블 e05에서 1386 mm , ncep 모형의 앙상블 e02에서 926 mm 로 나타났다.

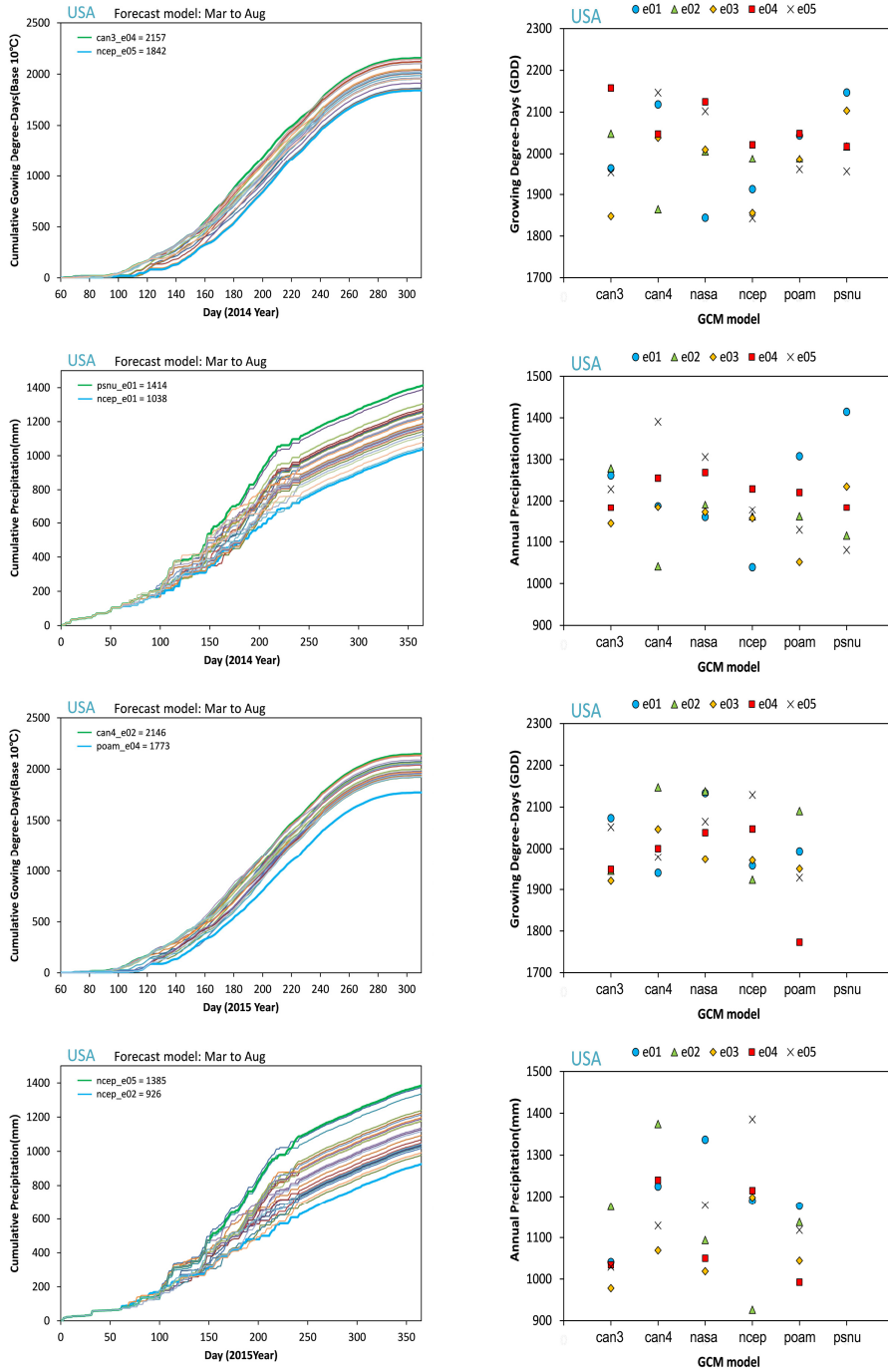


그림 4.31 미국의 대표적 옥수수 재배지역에 대한 2014년도와 2015년도의 3월, 7월 예측 시점 기온 및 강수량자료를 이용한 누적 GDD, 누적 강수량 분석 결과

4.1.5 장기 기후예측 자료 (Forecast 자료) 분석

장기 기후예측 자료가 포함되는 작물 모형의 입력 기후자료를 작성하기 위해 3.1.2의 편이 보정 방법과 3.1.3의 공간적/시간적 상세화 방법을 통해 Forecast 공통기간(2013년, 2014년, 2015년)에 대한 예측시점(3월, 5월, 7월, 9월)별 6개월 선행예측 자료가 재생산되었다. 본 절에서는 재생산된 기후예측 모형의 앙상블별 예측 결과에 대한 차이를 평가하고 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료와 비교 분석을 실시했다. 작물 모형 입력 자료로 재생산된 기후자료는 일 단위 자료로 작성되어 있기는 하지만 일 자료간의 비교는 분석에 한계가 있어 효율적인 분석을 위해 월 평균 자료로 변환하였다. 그림 4.32는 2013년 3월 예측시점을 기준으로 재생산된 6개월 선행예측 기온자료로부터 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 기후예측 모형의 30개 앙상블 예측 결과를 나타낸 그래프이다. 국가별 기온 예측결과 분석 그래프에서 검은색 원으로 표현된 것은 6개 기후예측 모형의 각 5개 앙상블별 예측결과를 나타낸 것이며 붉은 색으로 채워진 원은 총 30개 앙상블 예측결과의 MME (Multi Model Ensembles)를 그리고 녹색으로 채워진 원은 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료를 나타낸다. 미국 일리노이 주 중북부 지역의 경우 3월의 앙상블 기온 예측결과는 전체적으로 NCEP_OBS보다 높게 예측되었으며 MME와 NCEP_OBS의 차이는 5.2 °C로 크게 나타났다. 4월-6월, 8월의 앙상블 예측결과의 예측 폭은 대체로 NCEP_OBS를 포함하고 있으며 특히 6월과 8월에 대한 MME와 NCEP_OBS의 차이는 각각 0.3 °C와 0.5 °C로 나타나 예측 성능이 좋은 것으로 생각된다. 중국 길림성 북부 지역의 경우 3월의 앙상블 예측 폭은 다른 월에 비해 크게 나타나고 있으나 MME와 NCEP_OBS의 차이는 0.1 °C로 가장 작게 나타났다. 4월의 앙상블 기온 예측결과가 NCEP_OBS보다 높게 예측되고 있으나 그 외 월에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 멕시코 차아파스 주 북부지역의 경우 3월에서 8월사이의 월 평균 기온은 23 °C 이상으로 높은 기온을 보이고 있다. 3월의 앙상블 기온 예측결과는 NCEP_OBS보다 높게 예측되고 있으며 MME와 NCEP_OBS의 차이는 1.2 °C로 나타났다. 4월과 5월에는 MME와 NCEP_OBS의 차이가 0.3 °C로 작게 나타났으며 앙상블 예측결과의 폭이 NCEP_OBS를 포함하고 있다. 브라질 고이아스 주 남부지역의 경우 3월부터 6월까지 앙상블 기온 예측결과는 NCEP_OBS보다 낮게 기온을 예측하고 있으며 5월에는 MME와 NCEP_OBS의 차이가 2.3 °C로 가장 큰 차이를 보였다. 이 지역에서는 7월을 제외한

모든 월에서 앙상블 예측결과와 NCEP_OBS의 차이가 크게 나타났다. 그림 4.33은 2013년 7월 예측시점 기후예측 자료에 대한 분석 결과를 나타낸 그래프이다. 미국의 경우 8월부터 11월까지의 앙상블 기온 예측 폭은 NCEP_OBS를 포함하고 있으며 MME와 NCEP_OBS의 차이 또한 작게 나타났다. 중국의 경우 7월과 10월에서 MME와 NCEP_OBS의 차이가 작게 나타났으며 겨울로 갈수록 앙상블 기온 예측 폭이 컸다. 멕시코에서는 7월-10월에 브라질에서는 11월-12월에 앙상블 기온 예측이 NCEP_OBS보다 낮게 나타났다.

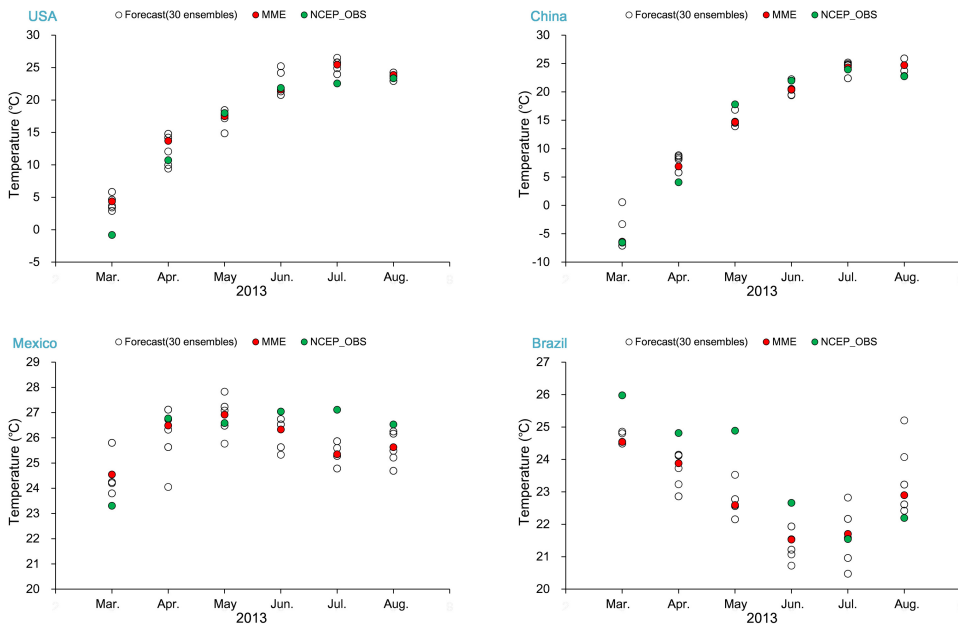


그림 4.32 2013년 3월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 기온 예측 결과 분석

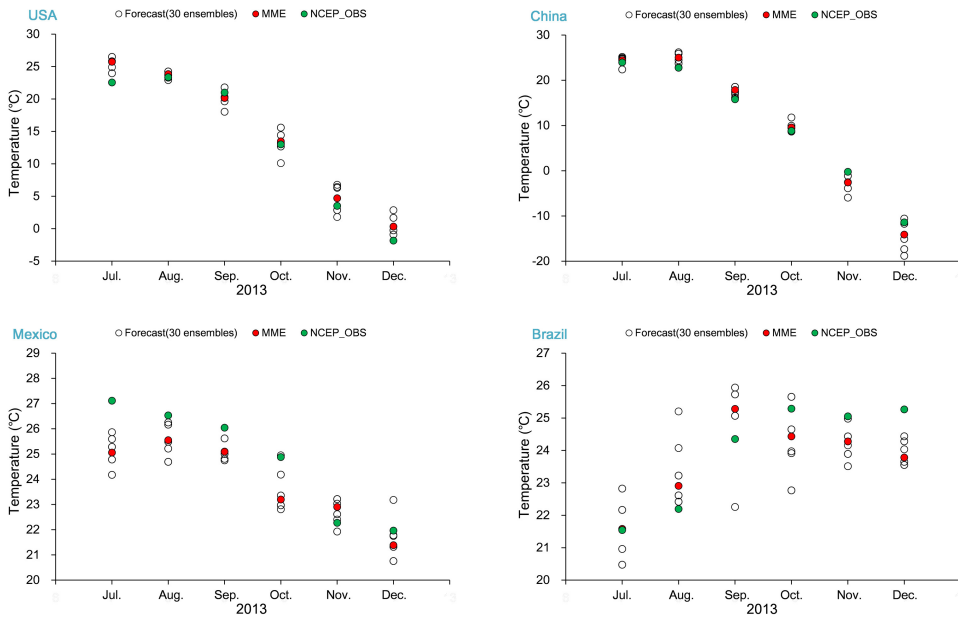


그림 4.33 2013년 7월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 기온 예측 결과 분석

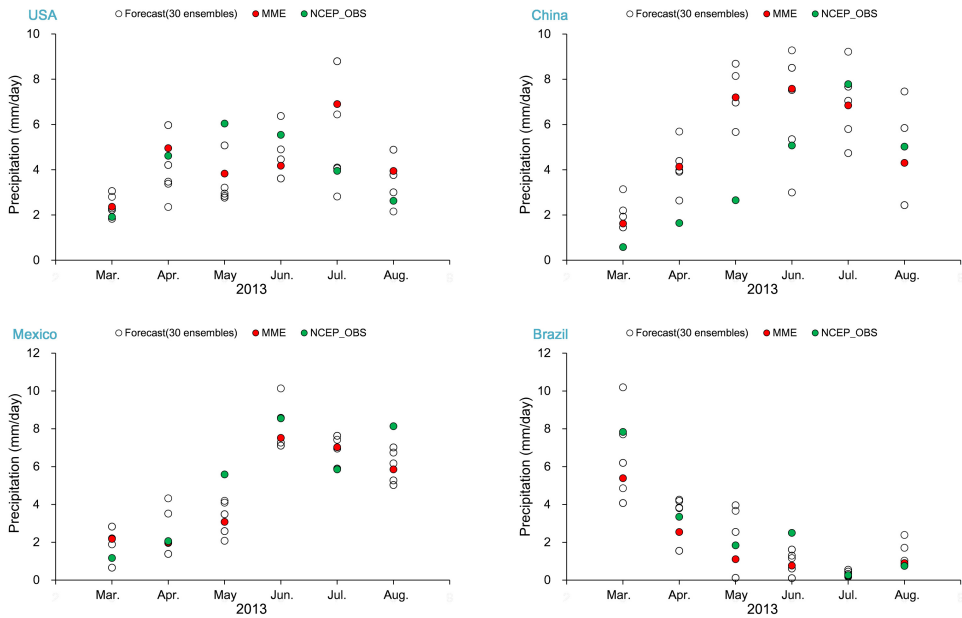


그림 4.34 2013년 3월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 강수량 예측 결과 분석

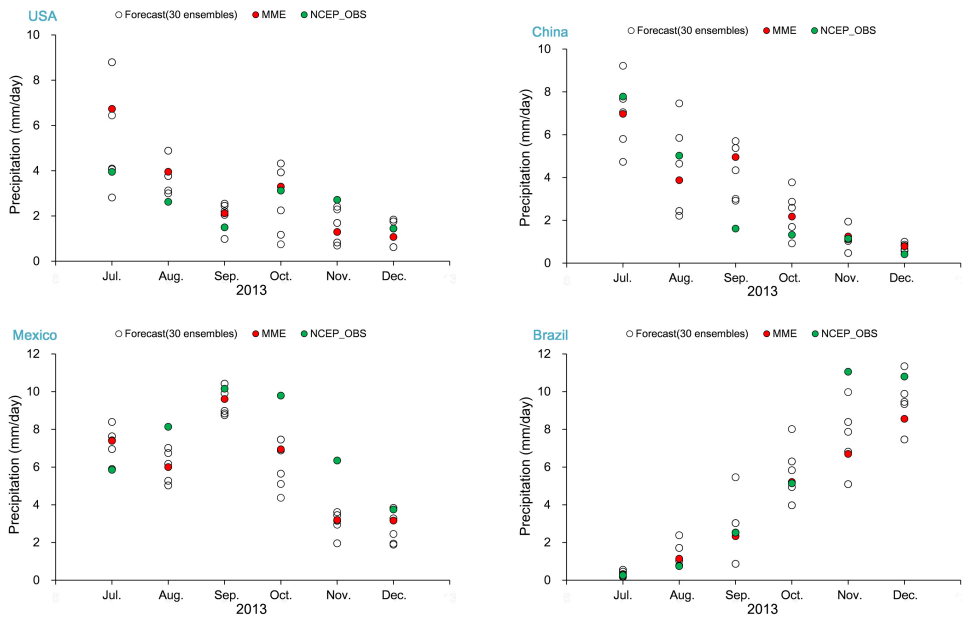


그림 4.35 2013년 7월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 강수량 예측 결과 분석

그림 4.34는 2013년 3월 예측시점을 기준으로 재생산된 강수량 예측 자료로부터 주요 옥수수 생산지역에 대한 기후예측 모형의 앙상블 예측결과를 나타낸 그래프로 30개 앙상블 예측 결과의 MME와 NCEP_OBS의 비교를 통해 분석이 실시되었다. 미국의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 3월부터 5월까지 강수량이 증가하고 5월 이후로 강수량이 감소하는 것으로 나타났다. 3월의 평균 강수량은 1.9 mm/day였고 5월의 평균 강수량은 6 mm/day로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 3월과 4월에는 NCEP_OBS와 비슷했으나 5월과 6월에는 NCEP_OBS보다 작게 나타났고 7월과 8월에는 NCEP_OBS보다 크게 예측되었다. 앙상블 예측 폭은 7월에 최대 8.8 mm/day, 최소 2.8 mm/day로 나타났으며 5월을 제외한 모든 월에서 NCEP_OBS 값이 앙상블 예측 폭 안에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 중국의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 3월부터 7월까지 강수량이 증가하고 7월 이후로 강수량이 감소하는 것으로 나타났다. 3월의 평균 강수량은 0.6 mm/day였고 7월의 평균 강수량은 7.8 mm/day로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 3월부터 6월까지 강수량이 증가하고 6월 이후 강수량이 감소하는 것으로 나타났다. MME 값은 NCEP_OBS와 비교해 3월부터 6월까지의 과대 예측되었으며 7월-8월에는 조금 적게 예측되었다. 앙상블 예측 폭은 6월에 최대 9.3 mm/day, 최소 3.0 mm/day로 나타났다. 전체적으로 보면 3월부터 5월까지의 앙상블 예측 결과는 NCEP_OBS 보다 강수량을 과대하게 예측하고 있으며 6월부터 8월까지의 앙상블 예측 폭 안에 NCEP_OBS 값이 포함되고 있었다. 멕시코의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 3월부터 6월까지 강수량이 증가하는 것으로 나타났으며 3월의 평균 강수량은 1.2 mm/day였고 6월의 평균 강수량은 8.6 mm/day로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 3월에 2.2 mm/day로 NCEP_OBS보다 높게 예측되었고 4월에는 2.0 mm/day로 NCEP_OBS의 2.2 mm/day와 비슷하게 나타났다. 앙상블 예측 폭은 4월에 최대 4.3 mm/day, 최소 1.4 mm/day로 나타났지만 다른 월과 큰 차이를 보이지는 않았다. 브라질의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 3월부터 7월까지 대체로 강수량이 감소하는 것으로 나타났으며 3월의 평균 강수량은 7.8 mm/day였고 7월의 평균 강수량은 0.3 mm/day로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 3월부터 7월까지 강수량이 감소하고 7월 이후 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. MME 값은 NCEP_OBS와 비교해 3월부터 6월까지의 과소 예측되었으며 7월에는 MME와 NCEP_OBS 모두 0.3 mm/day로 같았다. 앙상블 예측 폭을 보면 3월에 최대 10.2

mm/day, 최소 4.1 mm/day로 나타났다. 전체적으로 보면 3월에서 5월까지의 앙상블 예측 폭 안에 NCEP_OBS 값이 포함되고 있으며 6월에는 앙상블 예측 결과가 NCEP_OBS보다 작게 예측되었다.

그림 4.35는 2013년 7월 예측시점을 기준으로 재생산된 강수량 예측 결과를 지역별로 나타내고 있다. 미국의 경우 7월에서 8월의 자료는 그림 4.34의 2013년 3월 예측시점을 기준으로 생산된 7월에서 8월의 자료와 거의 같은 값을 보이는데 이는 30개 앙상블 예측 결과가 과거 64년 중에서 선택되는 과정에서 중복 선택이 되어 나타나는 현상이라고 할 수 있다. 육안으로 보면 앙상블 예측 결과의 개수가 7월에 4개로 보이지만 실질적으로는 30개의 앙상블 결과가 중복되어 있다. 3월 예측시점의 강수량 자료와 7월 예측시점의 7월 MME 값을 비교해 보면 3월 예측시점의 강수량은 6.9 mm/day, 7월 예측시점의 강수량은 6.7 mm/day로 나타나고 있어 완전히 같은 값이라고 볼 수 없다. 두 예측시점의 8월 MME 값을 비교해 보면 3월 예측시점의 강수량은 3.9 mm/day, 7월 예측시점의 강수량은 4.0 mm/day로 나타나고 있다. 7월부터 12월까지의 MME와 NCEP_OBS의 값을 비교해보면 전체적으로 강수량의 변화 패턴은 유사하게 나타나고 있으며 7월에서 10월까지의 MME 값이 NCEP_OBS 값보다 크게 예측되었고 11월-12월에는 MME 값이 NCEP_OBS 값보다 작게 예측되었다. 중국의 경우 마찬가지로 3월 예측시점의 7월-8월 MME 값과 7월 예측시점의 7월-8월 MME 값이 각각 6.8 mm/day, 4.3 mm/day 그리고 7.0 mm/day, 3.9 mm/day로 다른 것을 알 수 있다. 7월부터 12월까지의 MME와 NCEP_OBS의 값을 비교해보면 전체적으로 강수량이 감소하는 것으로 나타나고 있으나 9월에는 MME 값이 8월보다 1.1 mm/day 증가한 것으로 나타났다. 앙상블 결과 폭을 보면 여름에는 크게 나타나고 겨울로 갈수록 폭이 작아지는 것으로 나타났다. 대체로 강수량이 적은 11월-12월에는 어느 정도 예측이 잘 맞는 것으로 판단된다. 멕시코의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 7월부터 9월까지 강수량이 증가하고 9월 이후 강수량이 감소하는 것으로 나타났으며 9월의 평균 강수량은 10.2 mm/day였고 12월의 평균 강수량은 3.8 mm/day로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 8월부터 12월까지 전체적으로 NCEP_OBS보다 적게 예측되었고 앙상블 예측 폭은 10월에 최대 7.5 mm/day, 최소 4.4 mm/day로 나타났다. 브라질의 경우 NCEP_OBS의 강수량 변동을 보면 7월부터 11월까지 강수량이 증가하고 12월에 조금 감소한 것으로 나타났지만 전체적으

로 보면 연도 말로 갈수록 강수량이 증가하는 경향이 크다고 할 수 있다. 앙상블 예측 결과의 MME를 보면 NCEP_OBS와 마찬가지로 연도 말로 갈수록 강수량이 증가하는 것으로 나타났으며 7월부터 10월까지 MME와 NCEP_OBS의 값 차이는 0.2 mm/day 이하로 어느 정도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 앙상블 예측 결과의 폭은 12월에 최대 10 mm/day, 최소 5.1 mm/day로 나타났으며 8월과 11월을 제외하면 대체로 앙상블 예측 폭 안에 NCEP_OBS 값이 포함되는 것으로 나타났다.

그림 4.36와 그림 4.37은 각각 2014년 3월 예측시점과 7월 예측시점을 기준으로 재생산된 기온 예측 자료로부터 주요 옥수수 생산지역에 대한 기후예측 모형의 앙상블 예측결과를 나타낸 그래프이고 그림 4.38와 그림 4.39는 각각 2014년 3월 예측시점과 7월 예측시점을 기준으로 재생산된 강수량 예측 결과를 지역별로 나타내고 있다.

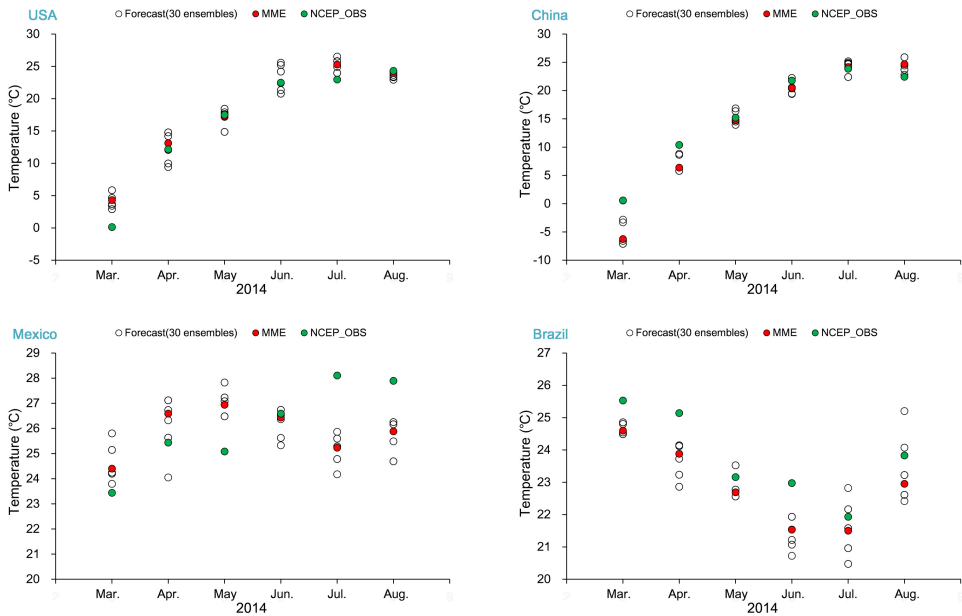


그림 4.36 2014년 3월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 기온 예측 결과 분석

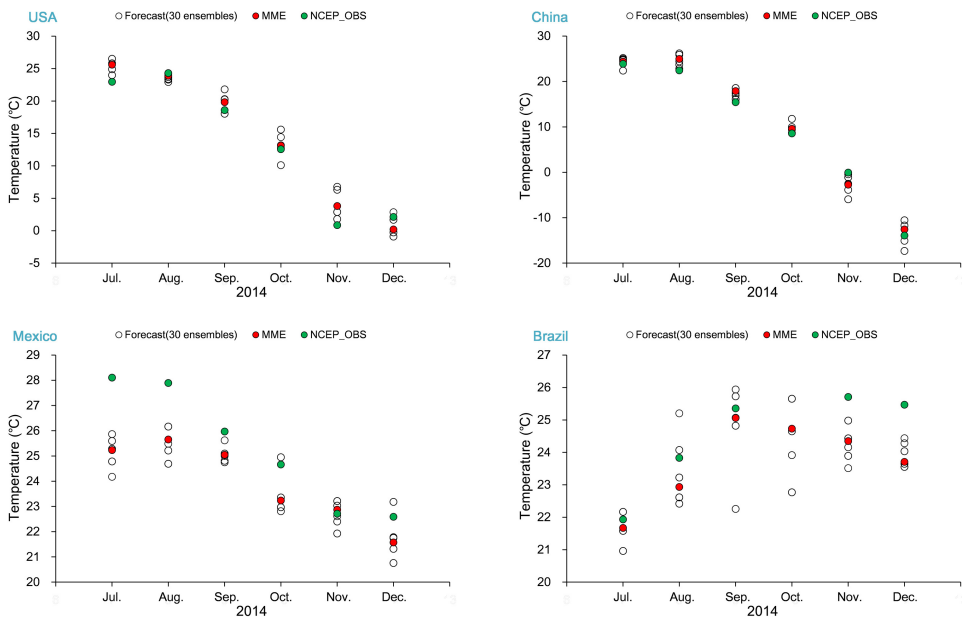


그림 4.37 2014년 7월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 기온 예측 결과 분석

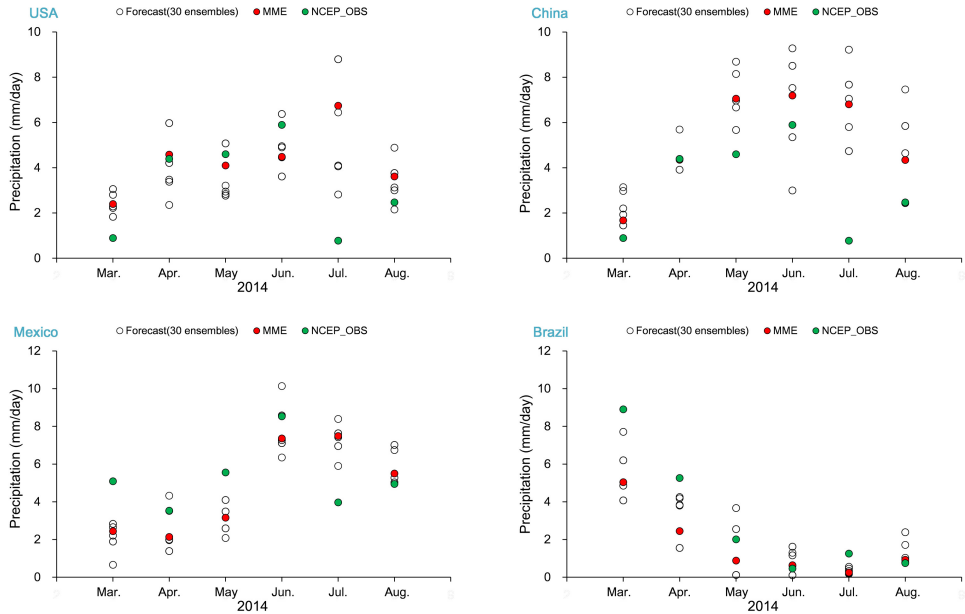


그림 4.38 2014년 3월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 강수량 예측 결과 분석

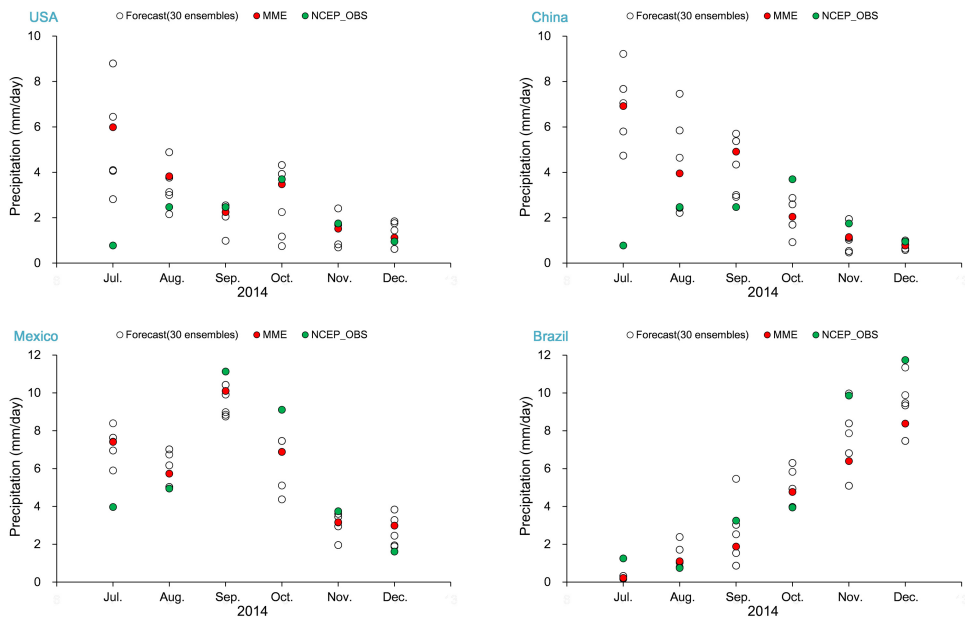


그림 4.39 2014년 7월 예측시점 6개월 선행예측기간 앙상블의 강수량 예측 결과 분석

4.1.6 가뭄지수와 옥수수 수확량

2012년 여름 미국 일리노이 주 북부지역에서는 옥수수 생육시기에 심각한 가뭄이 발생하여 옥수수 수확량이 크게 감소하였는데 그림 4.40에 나타난 SPI 가뭄지수를 보면 6월: -2.0 (exceptionally dry), 7월: -1.8 (extremely dry), 8월: -1.7 (extremely dry)로 3개월 동안 심각한 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 1991년부터 2014년까지 과거 일리노이 주 북부지역에서 발생 했던 가뭄 중 가장 심각한 가뭄은 1999년 가을에 있었고 그 당시의 SPI 가뭄지수를 보면 9월: -2.5, 10월: -3.7, 11월: -3.7로 상당히 높은 값을 나타내고 있다. 다행히 옥수수 생육에 영향을 미치는 여름에는 심각한 가뭄이 나타나지 않아 옥수수 수확량은 전년도 수준을 유지할 수 있었다. 이처럼 여름철에 발생하는 가뭄은 옥수수 생육에 부(-)의 영향을 미쳐 수확량 감소를 야기하고 있어 계절예측정보를 활용한 가뭄발생 예측을 통해 가뭄에 대한 사전 대책마련의 중요성 및 그 기대감은 더 커지고 있는 실정이다. 중국의 경우 SPI 가뭄지수를 통해 1991년부터 2014년까지 24년 동안 길림성 북부지역에서 옥수수 생육기간인 6월부터 9월 사이에 발생한 가뭄을 분석해 보면 1997년과 2007년에 SPI 가뭄지수가 -1.0 이하인 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 1997년의 SPI 가뭄지수를 보면 7월: -1.49, 8월: -1.27, 9월: -1.02로 3개월 연속으로 가뭄이 나타났고 2007년에는 6월: -2.1, 7월: -1.96, 8월: -1.72, 9월: -1.03으로 4개월 연속으로 심각한 가뭄이 이어졌다. 이 가뭄으로 중국 전체 옥수수 생산량의 약 30 %를 차지하는 동북삼성(흑룡강, 길림, 요녕)의 1997년, 2007년의 옥수수 수확량이 크게 감소하여 중국 전체 옥수수 수확량 감소에 영향을 준 것으로 나타났다(그림 2.2). 멕시코 치아파스 주에서는 2001년 6월부터 11월까지 장기간 가뭄이 발생한 것으로 SPI 가뭄지수는 나타내고 있으며 특히 8월부터 11월 사이 -2.0 이하인 가뭄이 연속적으로 나타났다. 2001년의 SPI 가뭄지수를 보면 8월: -2.75로 가장 낮았고 9월: -2.54, 10월: -2.64, 11월: -2.02로 심각한 가뭄이 발생한 것으로 나타나고 있으나 FAOSTAT의 멕시코 전체 옥수수 수확량 정보에서는 가뭄 피해로 인한 심각한 옥수수 수확량의 감소는 나타나지 않았다. 한편 2001년 하반기부터 시작된 가뭄은 2003년 옥수수 파종기까지 이어져 멕시코 전체적으로 옥수수 재배 면적이 약 9 % 감소한 것으로 나타났다. 브라질 고이아스 주에서는 2004년 10월부터 이듬해 2월까지 SPI 가뭄지수가 -1.0 이하로 가뭄이 이어졌으며 2005년 4월: -1.48, 6월: -1.52, 7월: -1.52, 8월: -1.37로 나타나 1년 중 SPI 가뭄지수가 양수인 달이

없을 정도로 심각하지는 않지만 지속적으로 가뭃현상이 나타났으며 그로 인해 2003년의 수확량에 비해 2004년에 옥수수 수확량이 약 10 % 감소하였고 2005년에는 약 18 % 감소한 것으로 FAOSTAT 자료로부터 확인할 수 있었다.

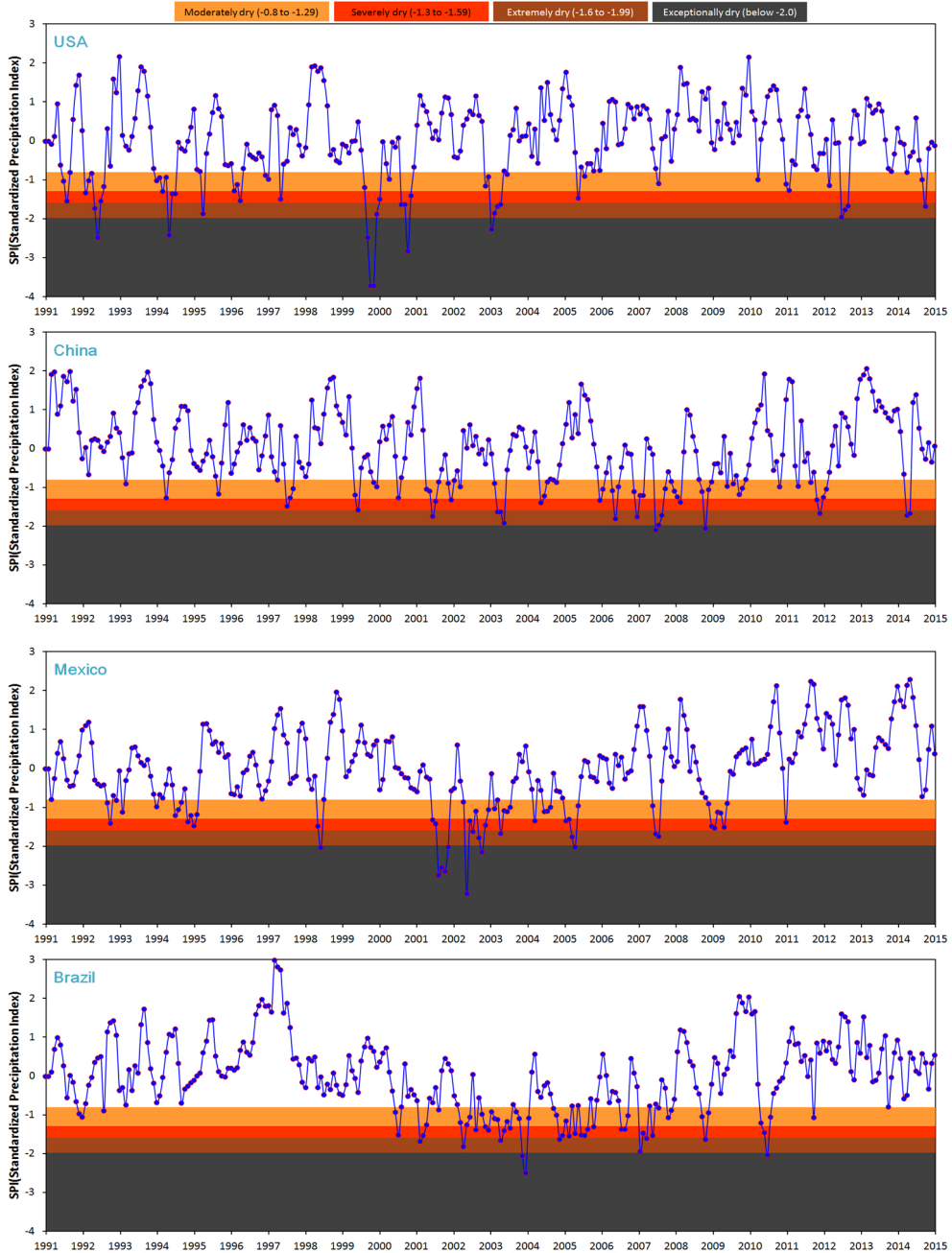


그림 4.40 NCEP/NCAR 재분석 월평균 강수량 자료를 이용한 SPI 가뭃지수 분석

4.2 장기 옥수수 수확량 전망

4.2.1 세계 옥수수 수확량 증가 추세

전 세계 주요 옥수수 생산국들에 대한 옥수수 수확량의 변화 경향을 나타내기 위해 1971년부터 2013년까지 국가별 옥수수 수확량의 변화를 선형방정식으로 정량화 하였다. 그림 4.41은 주요 옥수수 생산국 10개국에 대해 수확량 증가율이 큰 국가 순으로 나열되어 있으며 범례를 통해 각국의 증가율 선형방정식과 결정계수(R^2)를 나타내고 있다. 지난 43년 간 전 세계에서 옥수수 수확량이 가장 많이 증가한 나라는 프랑스로 옥수수 수확량이 연간 평균 123 kg/ha 씩 증가한 것으로 나타났으며 다음으로 아르헨티나: 118.5 kg/ha, 미국: 109.3 kg/ha, 이탈리아: 97.5 kg/ha, 중국: 89.3 kg/ha, 인도네시아: 85.6 kg/ha, 브라질: 78.2 kg/ha, 남아프리카 공화국: 57.9 kg/ha, 멕시코: 51.9 kg/ha, 인도: 36.7 kg/ha 순으로 연간 수확량 증가가 큰 것으로 나타났다. 옥수수 수확량 증가율이 큰 프랑스나 미국, 이탈리아 등의 선진국에서는 일찍이 산업발달의 영향으로 농업 생산 기술이 개발도상국가들 보다 앞서서 발달되었으며 1970년대 이미 5000 kg/ha의 수확량을 얻고 있었다. 그림 4.38을 보면 이탈리아는 1970년대에 연간 평균 208 kg/ha 씩 수확량이 증가한 것으로 나타나 전 세계에서 가장 높은 수확량을 보였으며 고 수확량에 다다르자 2000년대에는 수확량의 증가가 나타나지 않았다. 대부분의 선진국에서 1990년대 옥수수 수확량 증가율이 컸던 반면 개발도상국가에서는 대체로 2000년대 급격히 옥수수 수확량이 증가한 것으로 나타났다. 특히 남아프리카 공화국에서는 선진국들로부터 농업생산 기술을 원조 받아 연간 평균 263 kg/ha 씩 옥수수 수확량이 증가한 것으로 나타났다. 이와 같이 옥수수 수확량 증가율은 국가별 농업생산 기술력의 발달 속도에 따라 차이를 보이며 가뭄 및 홍수 그리고 병해충 발생과 같은 자연재해 발생에 대한 국가별 대응능력의 차이가 옥수수 생산성에 영향을 미치게 된다.

FAOSTAT의 농업통계 자료로부터 순수 농업생산 기술력의 발달에 의한 옥수수 수확량 증가율을 구하기 위해 1971년부터 2013년까지 43년 동안의 국가별 연평균 옥수수 수확량 자료를 이용해 옥수수 수확량이 전년 대비 10 % 이상 급격히 감소한 해와 연속 누적 수확량 감소가 10 % 이상인 해에 대해서는 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해로 인한 피해가 발생한 것으로 가정해 해당연도의 수확량 정보를 전체 수확량 자료에

서 제외한 다음 수확량 증가율을 추정하였다. 그림은 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 과거 43년간의 수확량 증가율을 나타낸 것으로 미국의 경우 a)는 전체 수확량 자료를 이용해 산정한 수확량 증가율로 연간 평균 수확량 증가율은 109.3 kg/ha이었고 선형 방정식에 대한 결정계수(R^2)는 0.787로 나타났다. b)는 가뭄(1974년, 1980년, 1983년, 1988년, 1995년)이나 홍수(1993년) 등의 자연재해가 발생한 해의 수확량 정보를 제외하고 산정한 수확량 증가율로 연간 평균 수확량 증가율은 107.9 kg/ha이었고 R^2 는 0.916으로 나타났다.

M-GAEZ 모형에서는 자본 및 노동력, 토양비옥도, 기술개발 레벨 등을 고려할 수 있도록 국가별 입력레벨을 표 3.5와 같이 설정하여 수확량 산정에 이용하고 있다. 그렇지만 그림 4.41, 그림 4.42에서와 같이 국가별 연대별로 차이가 있는 농업생산 기술력의 발달 속도에 대해서는 고려하고 있지 않다. 본 연구에서는 그림 4.43과 같이 자연재해로 인해 수확량이 감소한 해의 정보를 제외해 산정한 국가별 옥수수 수확량 증가율을 표 3.5의 국가별 입력레벨에 가중치로 설정함으로써 농업생산 기술력 발달에 따른 수확량 증가를 고려할 수 있었다.

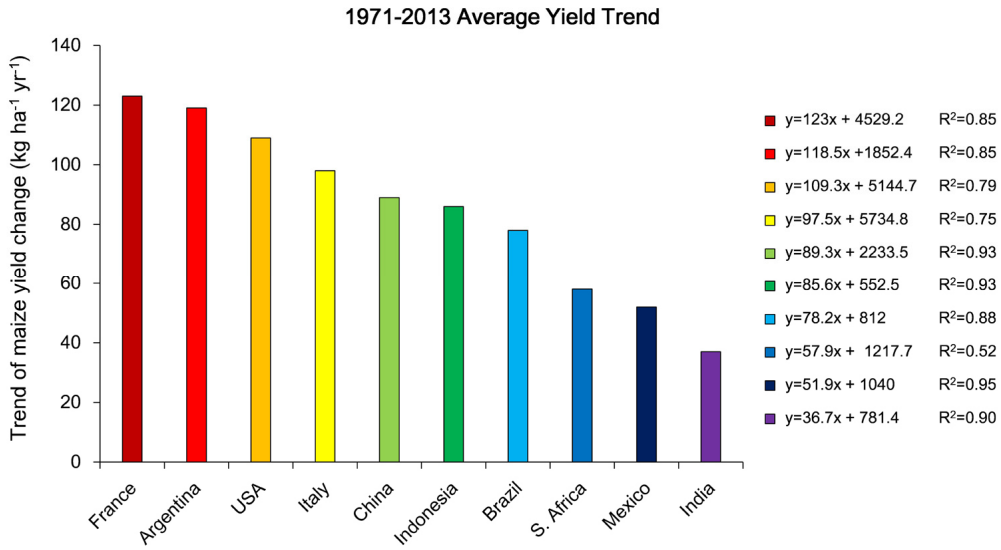


그림 4.41 주요 옥수수 생산국 1971년-2013년 평균 수확량 증가 추세 및 상관성 분석

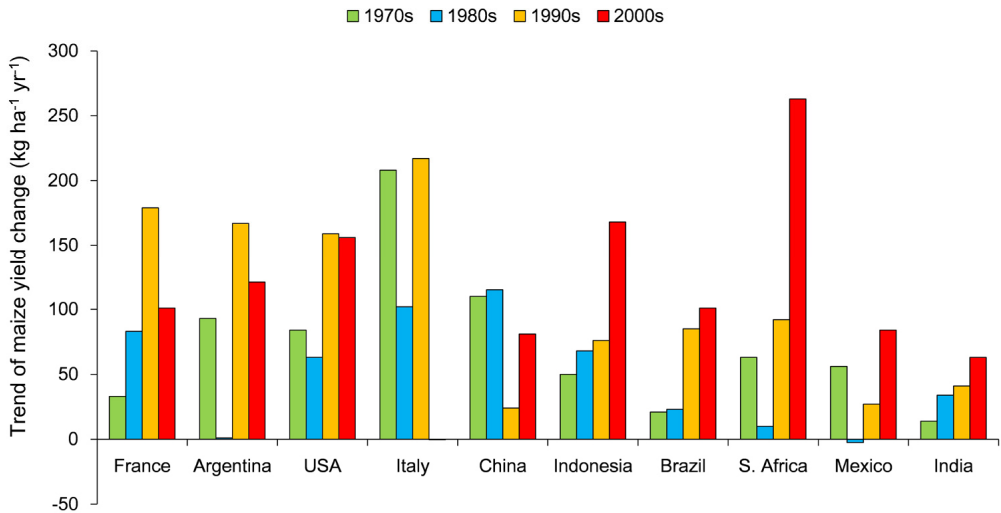


그림 4.42 주요 옥수수 생산국에 대한 연대별 평균 수확량 증가 추세 분석

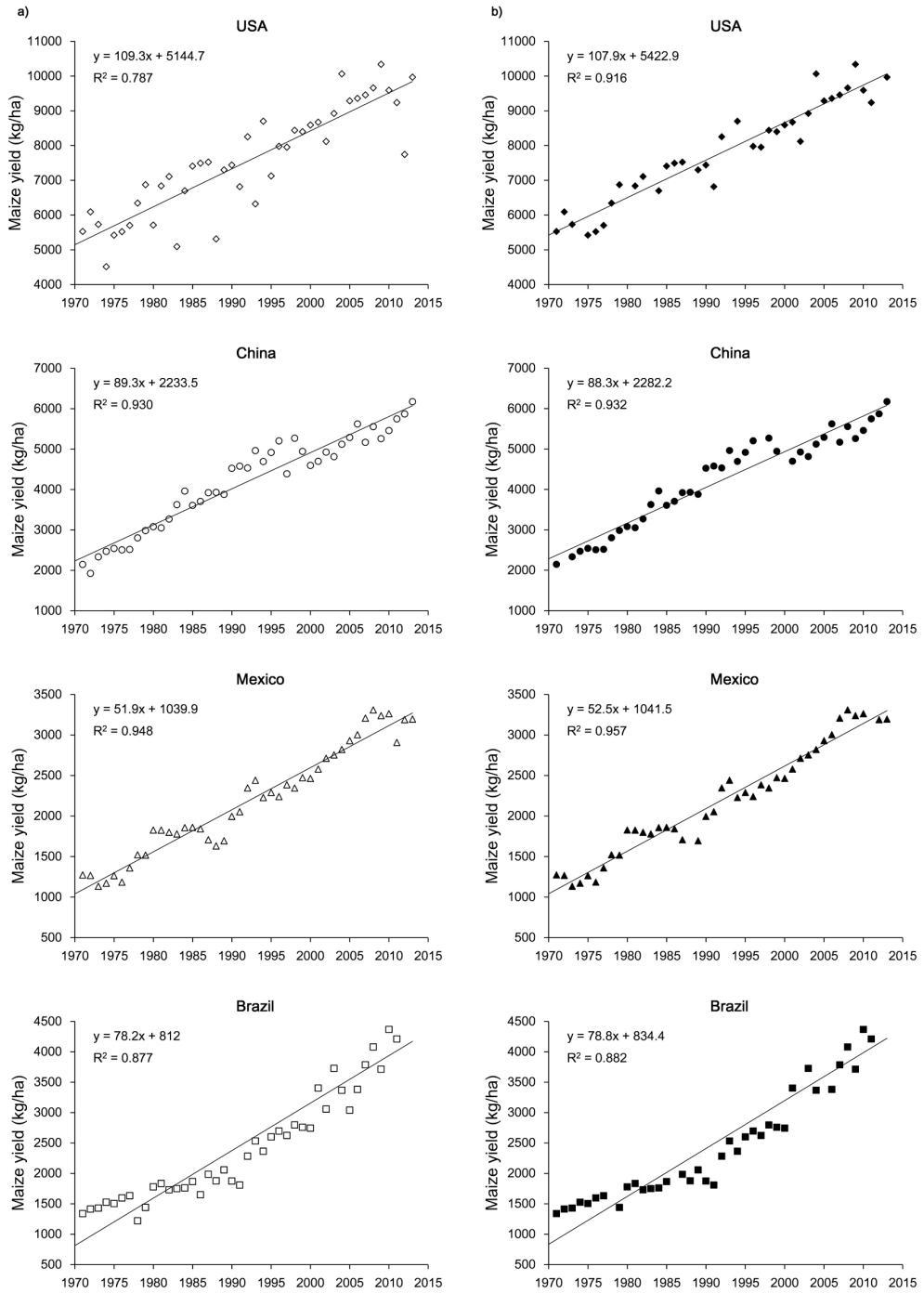


그림 4.43 주요 옥수수 생산국에 대한 과거 43년간의 평균 옥수수 수확량 증기를 추정 a) 43년 전체 수확량 자료 이용, b) 자연재해로 수확량이 크게 감소한 연도 제외

4.2.2 세계 옥수수 파종일 추정

미국 Wisconsin-Madison 대학의 Center for Sustainability and the Global Environment(SAGE)에서는 전 세계 농업 관측 지점으로부터 수집된 19개 주요 작물에 대한 파종일 정보를 디지털화한 다음 기후 관측 자료인 CRU CL2.0의 30년 평균 기후 값을 이용해 작물의 파종일과 기온, 강수량, 잠재증발산량 사이의 관계로부터 전 세계 주요 작물에 대한 파종일을 추정하여 작물별 파종 시작일과 파종 종료일 정보를 생산하였다. 그림 4.44는 옥수수에 대한 a) 전 세계 파종 시작일 분포도와 b) 파종 종료일 분포도를 나타내고 있으며 지역 혹은 국가 규모의 대표 값으로 분류되어있다. 예를 들어 한반도의 옥수수 파종은 91일부터 시작되어 132일에 종료되는 것으로 나타났고 중국 동북지역에서는 98일에 파종이 시작되어 162일에 파종이 끝나는 것으로 나타났다.

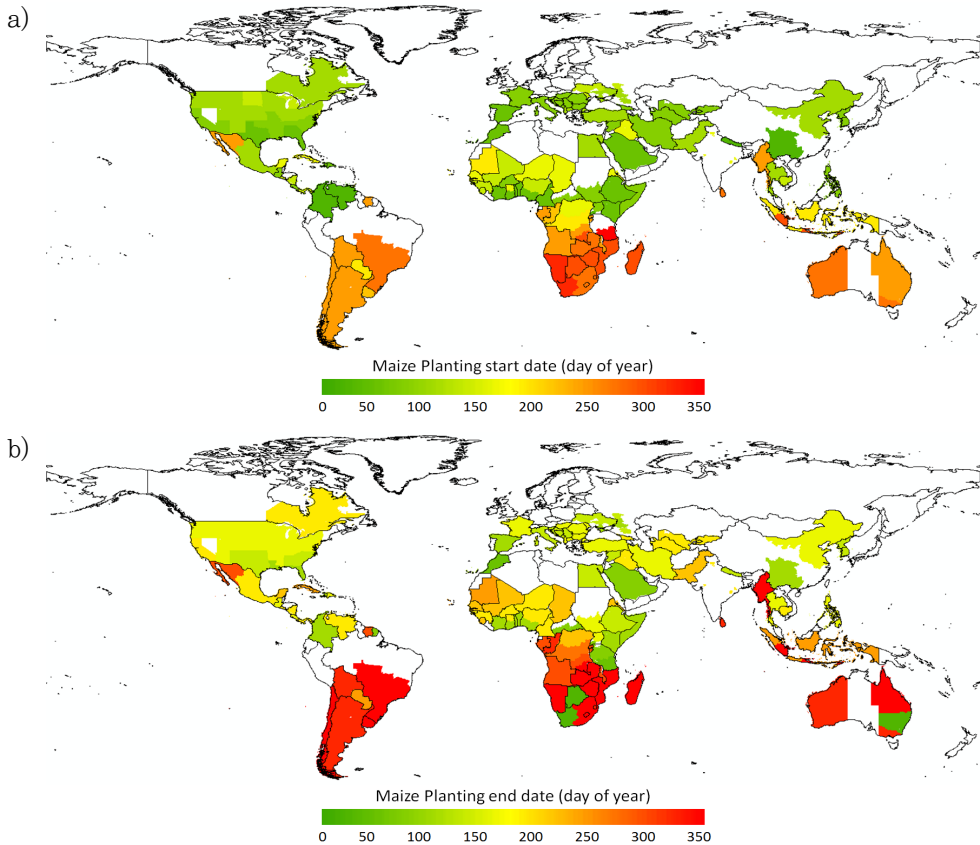


그림 4.44 SAGE에서 추정한 전 세계 옥수수 파종일 정보 a) 파종 시작일 b) 파종 종료일 (Sacks et al., 2010)
 Source: <https://nelson.wisc.edu/sage/data-and-models/crop-calendar-dataset/index.php>

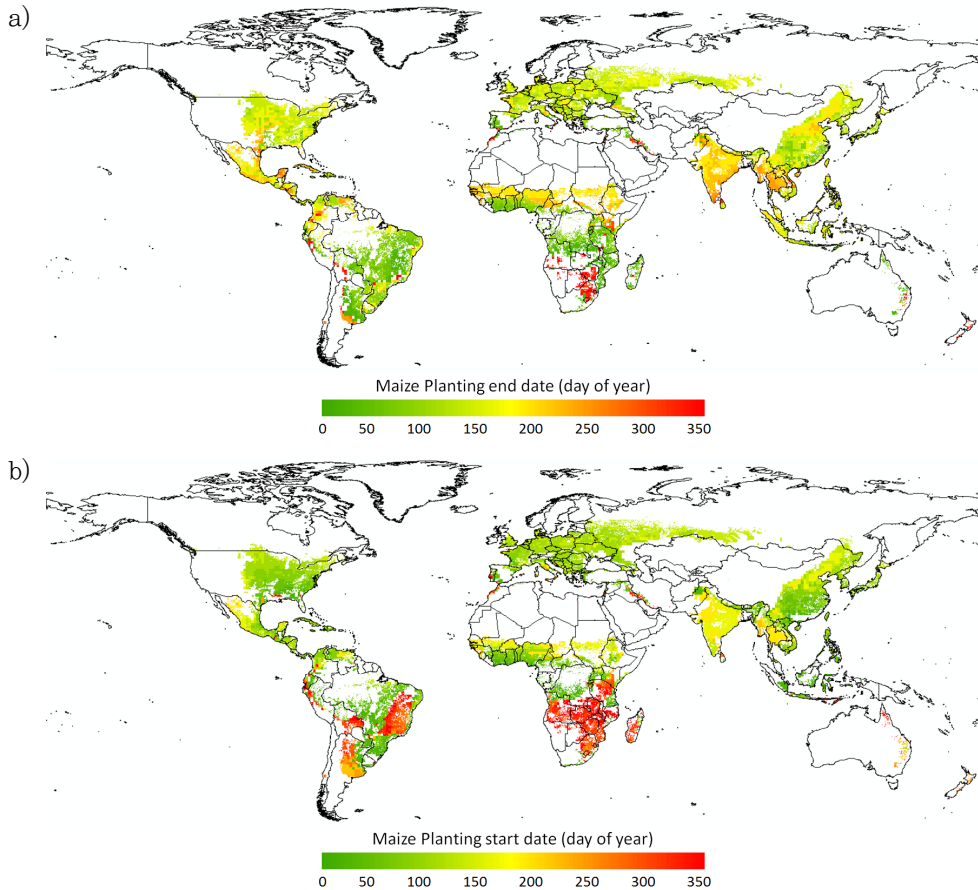


그림 4.45 작물모형으로부터 추정된 2001-2010년 평균 전 세계 옥수수 파종일 분포도 a) 파종 시작일, b) 파종 종료일 분포도

하지만 실제 옥수수 파종일은 같은 한반도 지역이라 할지라도 위도에 따라 다르며 어떤 품종을 선택하느냐에 따라서도 다르게 된다. M-GAEZ 작물모형의 작물 파종일 추정 모듈에서는 옥수수 생산 가능지역에 대해 최적의 옥수수 품종이 선택되도록 설계되어 있으며 선택된 품종 정보와 기후자료를 이용해 각 지점별 옥수수 파종 시작일과 파종 종료일을 추정한다. 그림 4.45는 작물모형의 파종일 추정 모듈에 의해 추정된 전 세계 옥수수 재배지역에 대한 a) 파종 시작일과 b) 파종 종료일 분포도를 나타내고 있으며 남한지역의 경우 남부지방에서는 옥수수 파종 시작일이 88일(3월 29일), 파종 종료일이 133일(5월 13일)로 추정되었으며 중부지방에서는 101일(4월 11일)에 파종이 시작되어 137일(5월 17일) 파종이 종료되는 것으로 추정되고 있다. 실

제로 우리나라 남부지방의 옥수수 파종 시작일은 남부지방에서 4월 상순, 중부지방에서 4월 중순이다(백성범 외, 2013).

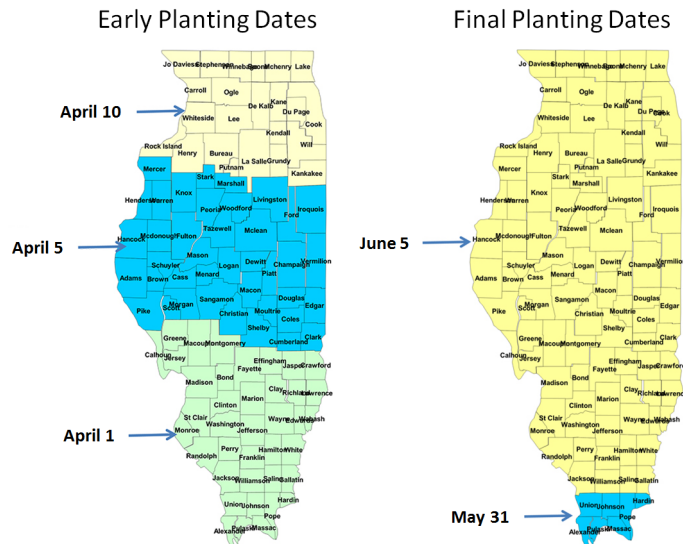
표 4.1 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역의 옥수수 파종 시작일과 종료일에 대한 SAGE 자료와 M-GAEZ의 추정결과 비교

국가 (위치)	SAGE		M-GAEZ	
	시작일	종료일	시작일	종료일
USA (N=41, S=40, E=-89, W=-90)	112	148	100	125
China (N=45, S=44, E=126, W=125)	98	162	148	174
Mexico (N=18, S=17, E=-93, W=-94)	118	180	104	149
Brazil (N=-18, S=-19, E=-49, W=-50)	291	365	32	69

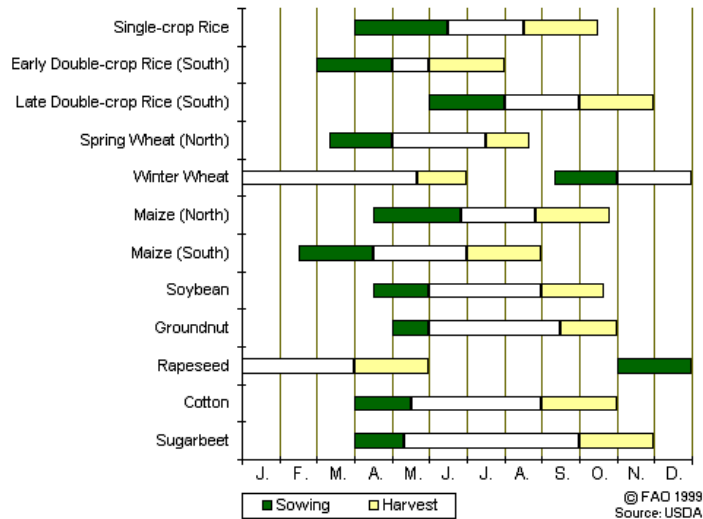
SAGE에서 제공하고 있는 옥수수 작물계절(Crop calendar) 정보와 M-GAEZ 작물모형에서 추정된 2000년대(2001-2010년) 평균 전 세계 옥수수 파종일 분포도를 분석하여 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 옥수수 파종 시작일과 파종 종료일을 표 4.1과 같이 비교했으며 각국의 옥수수 파종일 통계자료와도 비교를 실시했다. 미국 중서부에 위치한 일리노이 주는 미국 제 2의 옥수수 생산 지역으로 주 전역에서 옥수수 생산이 이루어지고 있으며 특히 북부지역을 중심으로 옥수수 생산량이 크게 나타나고 있다. 일리노이 주의 전형적인 옥수수 파종은 주 남부지역에서 4월 1일 경에 시작되고 주 북부지역에서 4월 10일 경에 시작되며 옥수수 파종 종료일은 주 남부지역에서 5월 31일 경 그리고 주 중북부지역에서 6월 5일 경에 대부분의 옥수수 파종이 끝나는 것으로 나타났다(그림 4.46 a). M-GAEZ 작물모형에서는 미국 중서부 일리노이 주 중부지역(N=41, S=40, E=-89, W=-90)의 2000년대 최적 옥수수 파종 시작일을 100일(4월 10일)로 추정하였고 파종 종료일을 125일(5월 5일)로 추정하고 있다. 모형에서 추정된 옥수수 파종 시작일은 일리노이 주립대학에서 조사된 옥수수 파종일 정보와 유사하게 나타났으며 파종 종료일의 경우 모형의 추정 값이 전형적인 파종 종료일 보다 약 한달 정도 빠른 것으로 추정되었다. 하지만 모형에서 추정된 옥수수 파종 시작일과 종료일은 일리노이 주에서의 안정적인 옥수수 파종일 범위 안에 포함되고 있어 모형에 의한 옥수수 파종일 추정이 대체로 잘 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 중국의 북부지역에서 옥수수 파종은 4월 중순에 시작되어 5월 상순경에 대부분 끝나는 것으로 나타나고 있으며 수확은 약 4개월 뒤인

8월 중순부터 10월 중순까지 이루어지는 것으로 나타났다. 중국의 남부지역에서는 좀 더 빠른 2월 중순부터 옥수수 파종이 시작되어 4월 중순경에 끝이 나고 7월 초순부터 수확이 이루어져 8월 말이면 대부분 수확이 끝나는 것으로 나타났다(그림 4.46 b)). 작물모형에서는 중국 북부 길림성 지역(N=45, S=44, E=126, W=125)의 2000년대 평균 옥수수 파종 시작일을 148일(5월 28일)로 추정하였고 파종 종료일을 174일(6월 23일)로 추정하였다. 작물모형에서 추정된 옥수수 파종 기간은 USDA에서

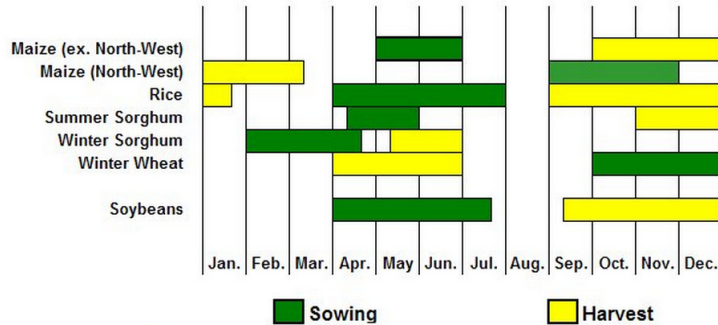
a) USA



b) China



c) Mexico



d) Brazil

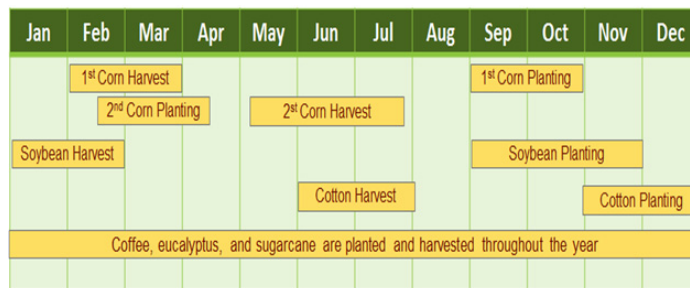


그림 4.46 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 전형적인 옥수수 파종일
<http://farmdocdaily.illinois.edu/2013/03/early-final-planting-date-crop-insurance.html>
http://www.pecad.fas.usda.gov/rssiws/al/china_crocal.htm
http://www.pecad.fas.usda.gov/rssiws/al/ca_crocal.htm?country=Mexico
<http://www.verdepotash.com/About-us/brazil/brazils-agribusiness/default.asp>

조사된 옥수수 파종 기간보다 짧은 것으로 추정되고 있는데 이는 M-GAEZ모형에서 추정한 파종시기가 실제 옥수수 품종의 특성을 고려하지 못해서 발생한 문제라고 생각된다. 향후 이러한 문제점 해결을 위해서는 실제 재배되고 있는 다양한 옥수수 품종의 생육특성 정보를 모형에 고려할 수 있도록 개선해 나가야 할 것이다. 또한 USDA의 농업통계 자료에 따르면 멕시코 남부지역에서의 옥수수 파종은 5월 초순에 시작되어 6월 말까지 이어지며 10월부터 수확이 시작되어 12월 말까지 수확이 이루어지는 것으로 나타났다(그림 4.46 c)). 작물모형에서는 멕시코 치아파스 주 북부지역(N=18, S=17, E=-93, W=-94)의 2000년대 평균 옥수수 파종 시작일을 104일(4월 14일)로 추정하였고 파종 종료일을 149일(5월 29일)로 추정하고 있어 USDA에서 조사된 옥수수 파종 시작일 보다 보름정도 일찍 파종이 이루어지는 것으로 추정하였고 한 달 정도 빨리 파종이 마무리 되는 것으로 추정하고 있다. 브라질에서는 2월 초순에서 3월 말 사이에 옥수수를 파종하여 여름 기간 동안 수확한 이후 9월 초순에서

10월 말 사이에 두 번째 옥수수를 파종하여 이듬해 겨울 동안에 수확하는 2기작 재배가 점차 확대되고 있다(그림 4.46 d)). 작물모형에서는 브라질 고이아스 주 남서부지역(N=-17, S=-18, E=-52, W=-53)의 2000년대 평균 옥수수 파종 시작일을 32일(2월 1일)로 추정하였고 파종 종료일을 69일(3월 10일)로 추정하고 있어 작물모형의 파종 종료일 추정일이 보름정도 빠른 것으로 나타났지만 대체로 관측 통계 정보 기간 안에 포함되었다.

작물모형의 파종일 추정 모듈을 통해 추정된 2010년대 전 지구 옥수수 파종 시작일과 파종 종료일 정보는 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 대표적인 옥수수 생산지역을 중심으로 파종일 관측 통계자료와 비교해 본 결과 대체적으로 관측 통계 범위 안에서 포함되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 작물모형의 파종일 추정 모듈을 통해 추정된 2010년대 평균 전 지구 옥수수 파종일 정보를 장기 옥수수 수확량 전망 시뮬레이션의 입력 파종일 정보로 적용했다.

4.2.3 작물 수확량 예측모형 적용 및 검증

글로벌 스케일의 작물 수확량 예측모형인 M-GAEZ 모형에 장기 기후예측 정보를 적용하여 전 세계 주요 옥수수 생산국에 대한 옥수수 수확량 장기 전망을 실시하기에 앞서 작물 모형에 대한 검증 작업이 필요하다. 본 연구에서는 3.1.1을 통해 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료를 작물 수확량 예측모형의 입력 기후자료로 적용하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료는 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 공간해상도로 작성되어 있으며 작물 수확량 예측에 필요한 일 단위의 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량, 풍속 등의 기후요소를 포함하고 있다. M-GAEZ 모형에 대한 옥수수 수확량 예측성 검증을 위해 1991년부터 2013년까지의 NCEP/NCAR 재분석 일 기후자료를 M-GAEZ 모형에 적용하여 전 지구 규모의 옥수수 수확량을 계산하였고 예측성 분석을 위해 FAOSTAT 곡물 통계 데이터베이스에서 제공하는 국가별 옥수수 수확량 통계자료를 이용했다. M-GAEZ 모형을 통해 계산된 옥수수 수확량 자료는 최종적으로 $5.0^{\circ} \times 5.0^{\circ}$ 의 공간해상도로 작성되며 주요 옥수수 생산국별로 평균하여 FAOSTAT의 국가별 옥수수 수확량 통계자료와 비교를 통해 M-GAEZ 모형의 예측성을 검증했다.

그림 4.48은 M-GAEZ 모형에 NCEP/NCAR 재분석 일 기후자료를 적용해서 계산된 미국, 중국, 멕시코, 브라질에 대한 2000년도 옥수수 수확량 분포도를 나타내고 있으며 전 지구 옥수수 수확면적 정보를 이용해 실제 옥수수 생산이 이루어지고 있는 지역에 대해서만 수확량 정보가 추출되었다. 미국의 경우 농업생산 기술의 발달로 중국이나 멕시코, 브라질에 비해 월등한 수확량을 나타내고 있으며 그림에서는 수확량 분포도의 범례 컬러가 같지만 미국의 범례 스케일은 다른 국가에 비해 크게 정의되고 있다.

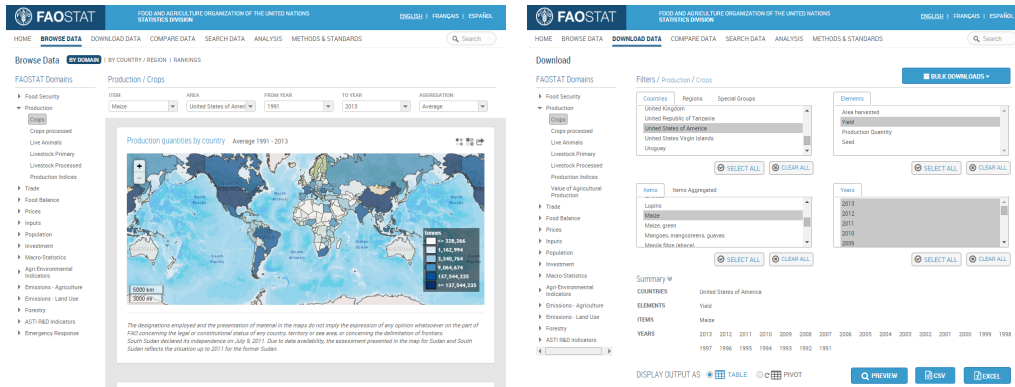
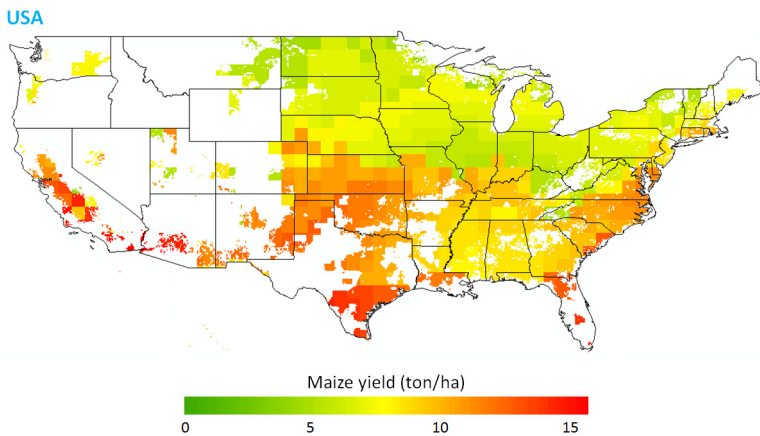


그림 4.47 FAO STAT(유엔식량농업기구 통계 데이터베이스)의 자료제공 화면



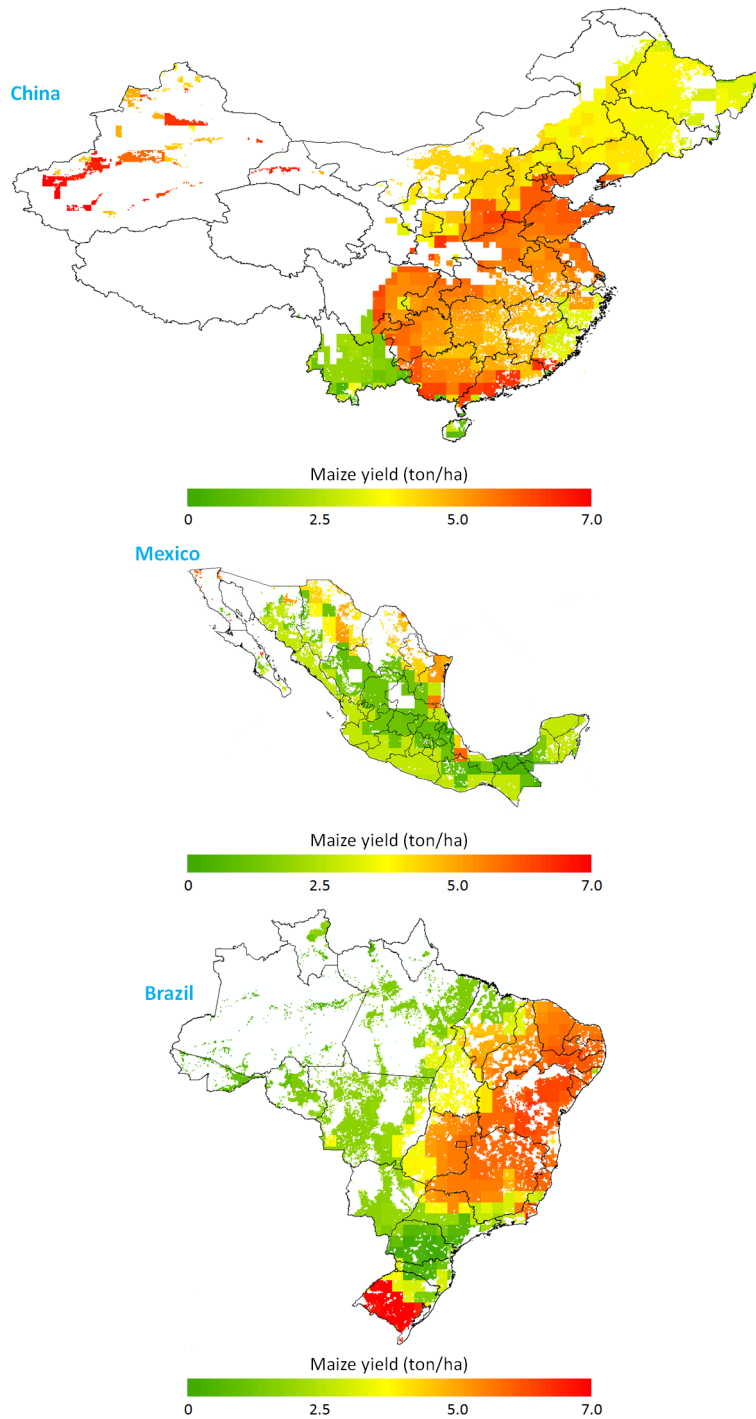


그림 4.48 미국, 중국, 멕시코, 브라질에 대한 2000년도 옥수수 수확량 분포도 입력 기후자료: 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료

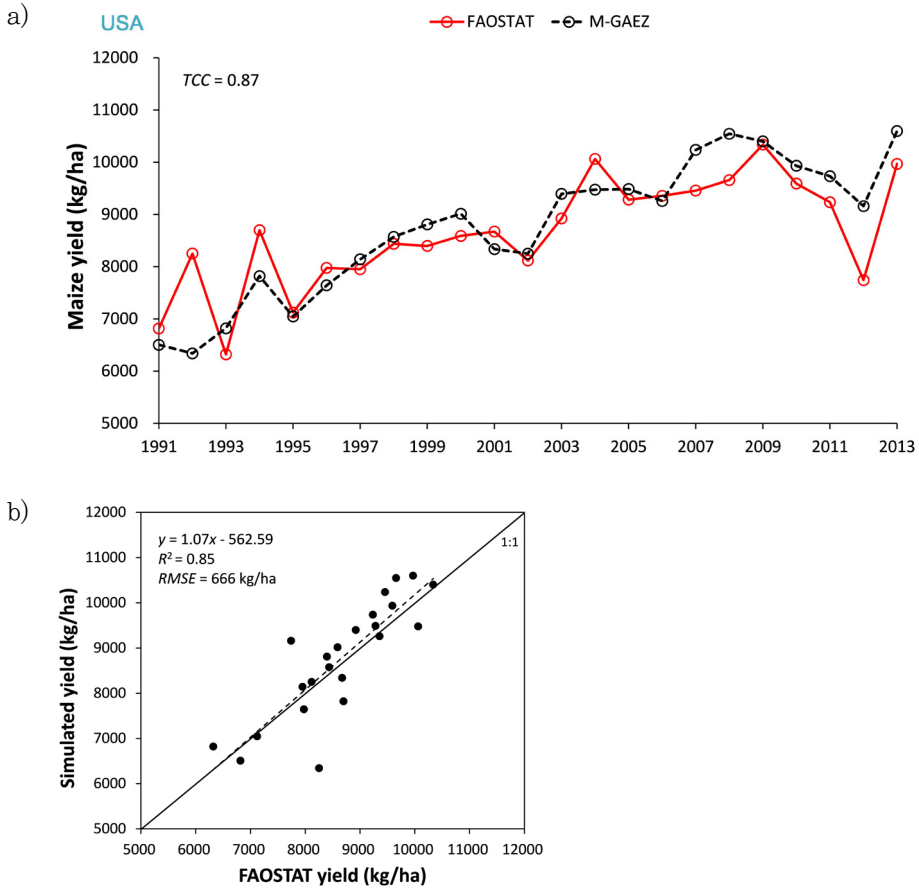


그림 4.49 미국에 대한 옥수수 수확량 산출 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교 검증

NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용해 계산된 미국의 옥수수 수확량 산출 결과는 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와 비교해 대체로 유사한 변동을 보이는 것으로 나타났다. M-GAEZ 모형에 의한 옥수수 수확량 산출 결과와 FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료 사이의 시계열 상관성을 계산한 결과 TCC 값이 0.87로 나타나고 있어 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 M-GAEZ 모형의 수확량 산출에 대한 신뢰성이 확인되었다고 할 수 있다. 1990년대 초반의 경우 FAOSTAT의 수확량이 크게 변동하는데 반해 모형 결과 값이 그 변동성을 따라가지 못하는 것으로 나타났는데 이는 1993년 대홍수로 인한 수확량 감소를 재현하지 못한 결과가 한 원인으로 판단된다. 반면 2012년의 가뭄으로 인한 수확량 감소는 어느 정도 재현하고 있는 것으로 나타났다.

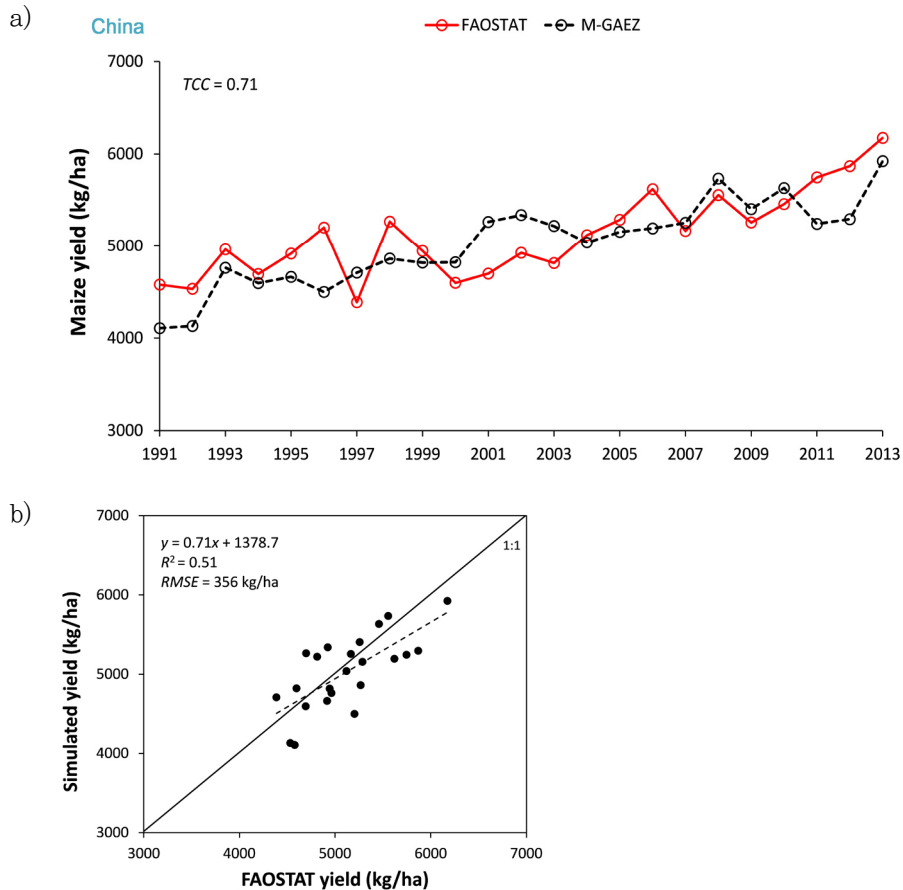


그림 4.50 중국에 대한 옥수수 수확량 예측 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교 검증

NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 M-GAEZ 모형의 수확량 산출 결과의 신뢰성에 대해 TCC와 RMSE 분석을 실시한 결과 중국의 경우 M-GAEZ 모형에 의한 옥수수 수확량 산출 결과와 FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료 사이의 TCC 값은 0.71로 나타났고 RMSE는 356 kg/ha로 나타나 M-GAEZ 모형의 시뮬레이션 결과에 어느 정도 신뢰성이 있다고 판단된다. FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료를 보면 1997년 옥수수 수확량이 전년대비 약 18% 감소한 것으로 나타났는데 이는 동북 3성 지역에서 발생한 가뭄이 원인인 것으로 조사되었다. 하지만 M-GAEZ 모형에서는 통계 자료보다 320 kg/ha 증가하는 것으로 나타나 2012년 미국지역의 가뭄을 어느 정도 재현한 것과 비교해 반응하지 못한 것으로 나타났다.

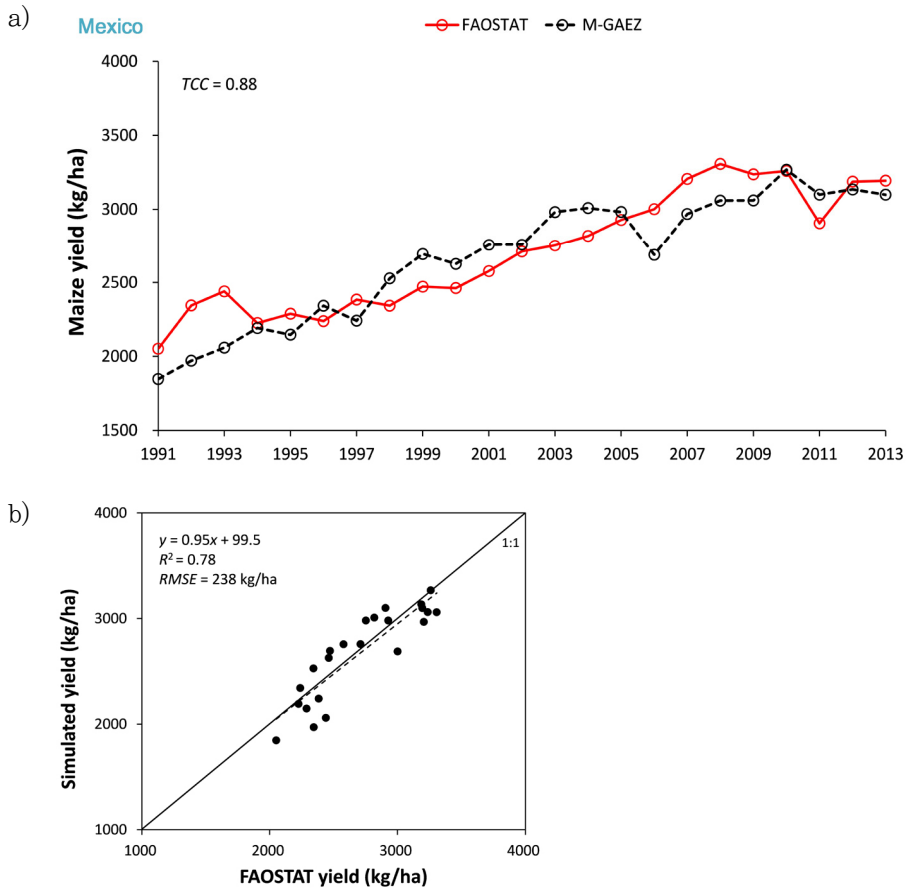


그림 4.51 멕시코에 대한 옥수수 수확량 예측 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교 검증

멕시코 지역에 대한 FAOSTAT 옥수수 수확량 통계 자료의 변동을 보면 2011년도
 의 수확량 감소를 제외하면 옥수수 수확량은 꾸준하게 증가한 것으로 나타나고 있다.
 M-GAEZ 모형에서는 2011년의 감소를 어느 정도 재현한 것으로 나타나고 있어
 M-GAEZ 모형에 의한 옥수수 수확량 산출 결과와 FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계
 자료 사이의 TCC 값은 0.88로 높게 나타났고 RMSE는 238 kg/ha로 미국과 중국에
 비해 작게 나타났다. M-GAEZ 모형에서는 2006년에 전년 대비 9.8 % 수확량이 감
 소하는 것으로 나타나고 있으나 FAOSTAT의 통계자료에서는 수확량 감소는 나타나
 지 않고 수확량 증가율이 주춤해진 것으로만 나타났다.

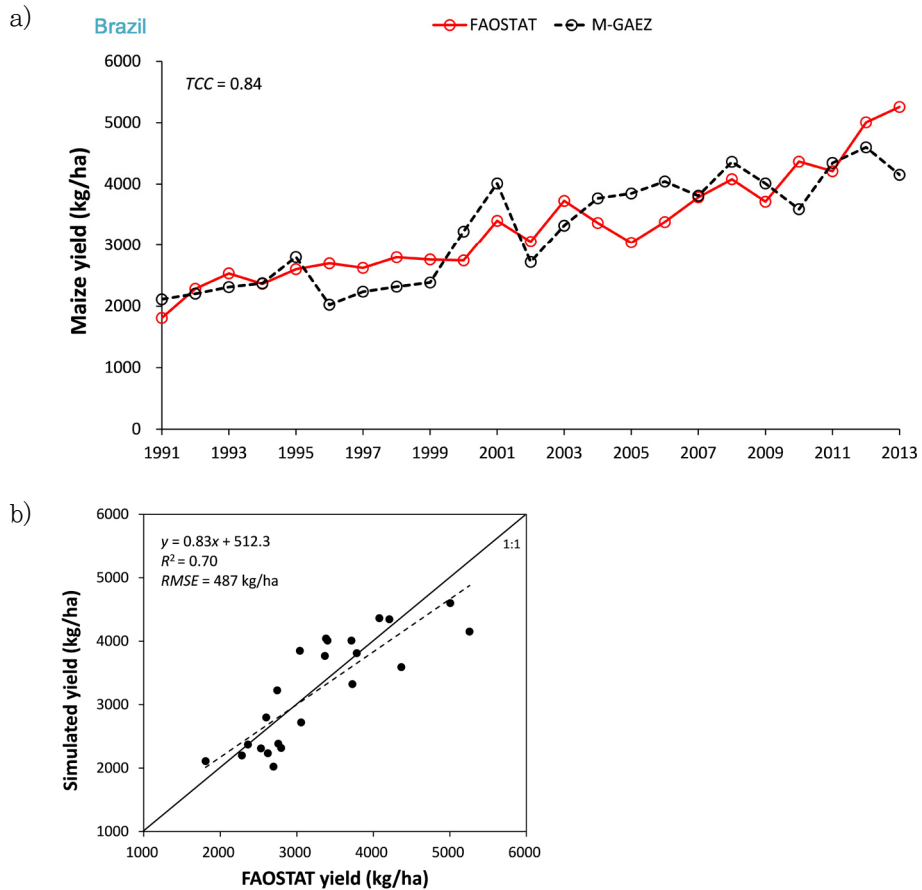


그림 4.52 브라질에 대한 옥수수 수확량 예측 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교 검증

브라질의 경우 M-GAEZ 모형에 의한 옥수수 수확량 산출 결과와 FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료 사이의 TCC 값은 0.84로 나타났고 RMSE는 487 kg/ha로 나타났다. FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료에서는 2002년과 2004년-2005년, 2009년 수확량 감소가 있었고 M-GAEZ 모형에서는 2002년과 2009년의 수확량 감소는 어느 정도 재현했다. 다만 2004년-2005년에 대해서는 재현하지 못한 것으로 나타났다. 1991년부터 2013년까지의 전체적인 수확량 변동을 보면 2004년-2005년과 2010년의 몇 해를 제외하면 대체적으로 비슷한 변동성을 보이면서 수확량이 증가하고 있는 것으로 나타나 M-GAEZ 모형의 시뮬레이션 결과에 어느 정도 신뢰성이 있다고 판단된다.

4.2.4 옥수수 수확량 민감도 분석

현재 기후 상황에서 옥수수 재배가 가능한 지역이라 할지라도 기후변화와 이상기후와 같은 기후환경의 변화로 지역에 따라서는 앞으로 옥수수 재배가 불가능해질 수도 있다. 기온과 강수량은 옥수수 생장에 있어 가장 중요한 기후요소라고 할 수 있으며 이 두 기후요소가 변함으로 인해 현재 옥수수 재배지역이 어떻게 변할 것인지에 대해 알아보기 위해 기온과 강수량 변화에 따른 옥수수 수확량 변화의 민감도 실험을 실시했다(그림 4.53). 과거 1971년-2010년의 기후 값에 대해 기온의 변화는 0.5 °C 간격으로 강수량의 변화는 25 % 간격으로 변화를 주어 옥수수 수확량의 변화를 예측하였다. 미국 일리노이 주와 중국 길림성 지역의 경우 강수량이 증가할수록 옥수수 수확량이 증가하는 것으로 나타났으며 기온 변화에는 크게 반응하지 않는 것으로 나타났다. 멕시코에서는 기온과 강수량이 증가할수록 수확량이 증가하는 것으로 나타난 반면 브라질에서는 기온과 강수량이 감소할수록 수확량이 증가하는 것으로 나타났다.

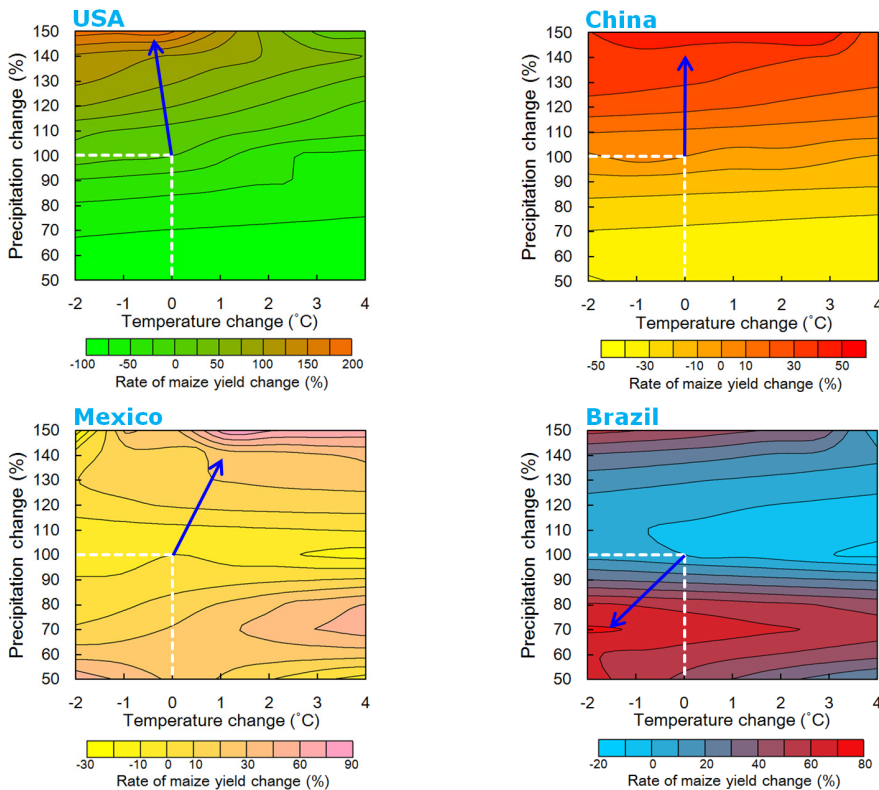


그림 4.53 기온과 강수량 변화에 따른 옥수수 수확량 민감도

4.2.5 옥수수 수확량 예측성 평가

4.2.5.1 Hindcast 정보를 활용한 옥수수 수확량 예측성 평가

Hindcast 기후예측 자료인 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료와 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 일 기후자료를 통해 일 단위 장기 기후예측 자료가 재생산되었고 APCC에서 제공되고 있는 6개 기후예측 모형의 예측 값은 각 모형의 앙상블 값을 평균한 값이 이용되었다. 전 지구 규모의 작물 수확량 시뮬레이션에 적합하도록 재생산된 일 단위 장기 기후예측 자료를 M-GAEZ 모형에 입력하여 1991년부터 2000년까지 10년간에 대한 전 세계 옥수수 수확량을 계산하였다. M-GAEZ 모형으로부터 산출된 옥수수 수확량 결과는 Monfreda et al. 2008에 의해 작성된 전 지구 옥수수 수확면적률 자료를 바탕으로 실제로 옥수수 재배가 이루어지고 있는 지역에 대해서만 옥수수 수확량 예측 결과가 추출되었다. 실제 옥수수 재배지역으로 추출된 수확량 자료는 주요 옥수수 생산국(미국, 중국, 멕시코, 브라질)에 대해 국가별 평균값으로 작성되어 FAOSTAT 농업통계 자료의 국가별 옥수수 수확량 통계 자료와 비교되고 통계적 분석을 통한 신뢰성 평가를 실시했다. 국가별 옥수수 수확량 예측 결과와 FAOSTAT 국가별 수확량 통계 자료에 대해서는 TCC와 RMSE 통계분석을 실시해 옥수수 수확량 예측 결과에 대한 예측의 신뢰성을 평가했다.

그림 4.54는 6개월 선행예측기간의 6개 기후예측 모형에 대한 Hindcast 예측정보를 M-GAEZ 모형에 입력하여 산출한 1991년부터 2000년까지의 미국과 중국의 옥수수 수확량 예측 결과를 나타내고 있으며 FAOSTAT 농업생산 통계자료와의 비교를 통해 옥수수 수확량 예측의 신뢰성을 평가하고자 했다. 그래프 안에서 검정색의 원은 6개 기후예측 모형(can3, can4, nasa, ncep, psnu, poam)의 옥수수 수확량 예측 결과를 나타내고 있으며 붉은 색으로 채워진 원은 FAOSTAT 농업생산 통계자료의 옥수수 수확량 통계 자료를 나타낸다. 미국의 경우 FAOSTAT의 수확량 통계자료를 보면 1990년 초반에 수확량 변동이 크게 나타났으며 1993년의 수확량은 전년 대비 약 23 % 감소한 것으로 나타났는데 이때의 수확량 감소 원인은 침수로 조사되었다. 1994년의 옥수수 수확량은 8700 kg/ha로 1990년대 중에서 가장 큰 것으로 나타났으며 이듬해인 1995년에 다시 수확량이 전년 대비 약 18 % 감소한 것으로 나타났다. 1995년의 수확량 감소 원인은 가뭄으로 조사되었다. 기후예측 모형에 의한 옥수수 수

확량 예측 결과를 보면 1992년에 가장 낮게 예측되었고 시간이 지날수록 증가하는 것으로 나타났다. 중국의 경우 FAOSTAT의 수확량 통계 자료에서 1997년 수확량이 전년 대비 약 18 % 감소한 것으로 나타났는데 그 원인으로는 동북지역의 가뭄에 의해 수확량이 감소한 것으로 조사되었다. 기후예측 모형에 의한 옥수수 수확량 예측 결과를 보면 1997년과 2000의 예측결과를 제외하면 어느 정도 잘 예측되고 있는 것으로 나타났다. 특히 1991년, 1992년, 1995년, 1998년, 1999년에 대한 기후예측 모형의 수확량 평균 값과 FAOSTAT의 수확량 값의 차이가 100 kg/ha 이하로 상당히 작게 나타났다. 미국과 중국 두 국가에 대해 TCC와 RMSE값으로 기후예측 모형에 의한 옥수수 수확량 예측의 신뢰성을 평가한 결과 미국에서는 6개 기후예측 모형의 TCC 값이 0.36에서 0.44 사이로 나타났고 RMSE 값은 936에서 865로 나타났으며 ncep 모형의 예측의 신뢰성이 가장 좋게 나타났다. 중국에서는 6개 기후예측 모형의 TCC 값이 0.32에서 0.44 사이로 나타났고 RMSE 값은 303에서 324로 나타났으며 poam 모형의 예측의 신뢰성이 가장 좋게 나타났다.

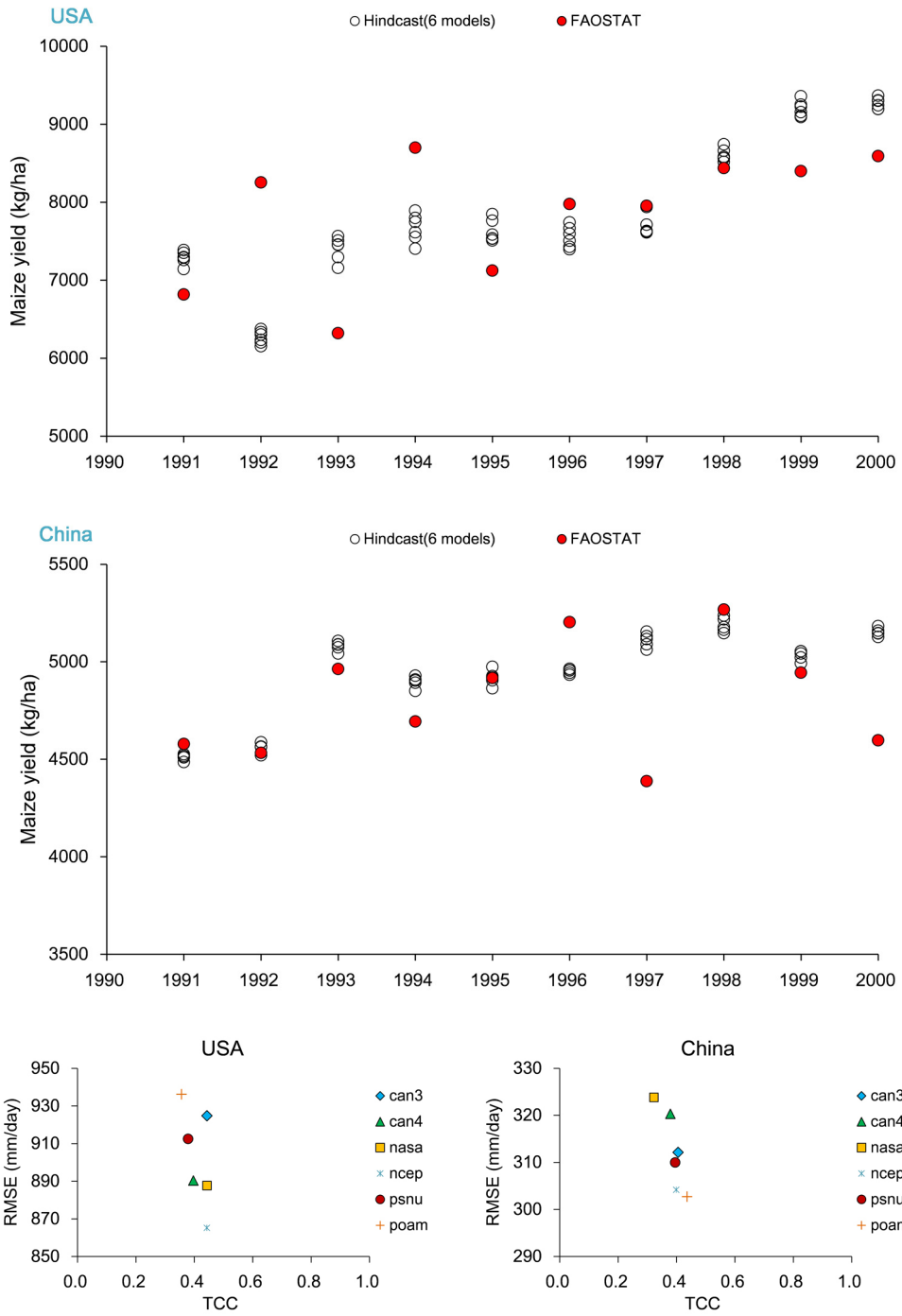


그림 4.54 Hindcast 예측정보를 활용한 미국과 중국의 옥수수 수확량 예측 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교를 통한 예측 신뢰성 분석

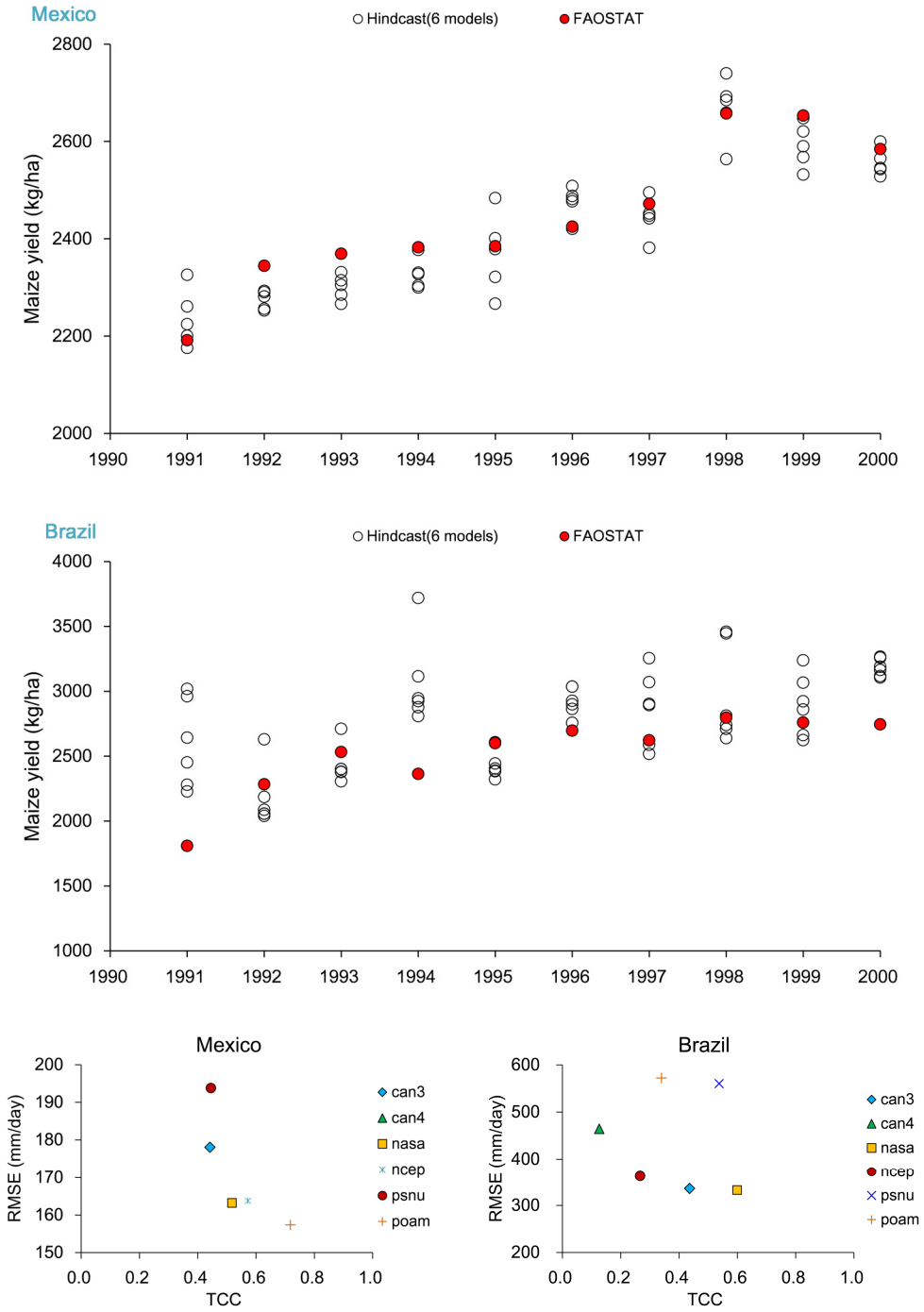


그림 4.55 Hindcast 예측정보를 활용한 멕시코와 브라질의 옥수수 수확량 예측 결과 및 FAOSTAT 농업생산 통계 자료와의 비교를 통한 예측 신뢰성 분석

그림 4.55는 멕시코와 브라질의 옥수수 수확량 예측 결과를 나타내고 있으며 멕시코의 경우 FAOSTAT의 수확량 통계자료를 보면 1992년에 전년 대비 약 6%의 수확량 증가가 있는 후 1995년까지 수확량 변동이 거의 없었으며 1998년에 2659 kg/ha로 1990년대 중에서 수확량이 가장 컸다. 기후예측 모형에 의한 수확량 예측 결과는 1992년에서 1994년까지 FAOSTAT의 수확량 통계자료 보다 작게 예측하는 것으로 나타났으며 1992년에 대한 기후예측 모형의 수확량 예측 평균값과 FAOSTAT의 수확량 값의 차이가 59 kg/ha로 상당히 작게 나타났다. 브라질의 경우 FAOSTAT의 수확량 통계자료를 보면 1991년부터 1993년까지의 수확량 증가 이후 수확량 변동이 거의 없었다. 기후예측 모형에 의한 수확량 예측 결과는 1991년, 1994년, 2000년에 FAOSTAT의 수확량 통계자료보다 크게 예측하는 것으로 나타났으며 1992년과 1993년에 대한 기후예측 모형의 수확량 예측 평균값과 FAOSTAT의 수확량 값의 차이가 각각 107 kg/ha와 103 kg/ha로 상당히 작게 나타났다. 멕시코와 브라질 두 국가에 대해 TCC와 RMSE값으로 기후예측 모형에 의한 옥수수 수확량 예측의 신뢰성을 평가한 결과 멕시코에서는 6개 기후예측 모형의 TCC 값이 0.44에서 0.72 사이로 나타났고 RMSE 값은 194에서 135로 나타났으며 TCC 0.72, RMSE 157인 poam 모형의 예측의 신뢰성이 가장 좋게 나타났다. 브라질에서는 6개 기후예측 모형의 TCC 값이 0.13에서 0.6 사이로 나타났고 RMSE 값은 572에서 333로 나타났으며 TCC 0.6, RMSE 333인 nasa 모형의 예측 신뢰성이 6개 모형 중에서 가장 좋게 나타났다.

4.2.5.2 Forecast 정보를 활용한 옥수수 수확량 예측성 평가

현재 APCC에서 제공되고 있는 6개월 선행예측기간의 Forecast 기후예측 자료는 6개 기후예측 모형으로부터 생산되며 공통기간은 2013년부터 현재까지다. Forecast 기후예측 자료의 활용성을 높이기 위해 옥수수 수확량 예측시점을 3월, 5월, 7월, 9월로 하는 일 단위 장기 기후예측 자료를 4.1.4에서와 같이 재생산하였다. 본 연구에서는 Forecast 기후예측 자료가 포함된 전 지구 규모의 농업생산성 분야 맞춤형 기후자료를 이용해 수확량 예측시점인 2013년에서 2015년까지의 3월, 5월, 7월, 9월에 대해 옥수수 수확량 시뮬레이션을 실시했다. 총 실시된 수확량 예측 시뮬레이션은 360개 케이스로 6개 Forecast 기후예측 모형 × 각 모형별 5개 앙상블 멤버 × 예측기간(3년) × 예측시점(4개월)으로 구성된다. 옥수수 수확량 예측 결과에 대한 신뢰성

검증은 FAOSTAT의 농업생산 통계 자료를 이용해 실시된다. 하지만 현재까지 FAOSTAT 데이터베이스로부터 제공되고 있는 전 세계 국가별 옥수수 수확량 정보는 2013년도까지만 제공되고 있어 본 연구에서는 2013년 옥수수 수확량 예측 결과에 대해서만 예측의 신뢰성을 평가하였고 2014년도와 2015년도에 대해서는 옥수수 수확량에 대한 전망 결과만을 제시하였다.

그림 4.56은 총 30개 앙상블의 기후시나리오로 작성된 Forecast 기후예측 자료(6개 기후예측 모형 × 각 모형별 5개 앙상블 멤버)로부터 계산된 미국과 중국에 대한 2013년 옥수수 수확량 예측 결과의 FAOSTAT 과거 5년간 수확량 평균 자료 대비 변화율을 나타내고 있다. 그래프에서는 총 4번의 예측시점(3월, 5월, 7월, 9월)에 대한 수확량 변화율을 나타내고 있으며 예측시점마다 30개 기후시나리오에 의한 수확량 변화율 값을 나타내고 있다. 또한 FAOSTAT의 2013년 옥수수 수확량 통계 자료에 대해서도 마찬가지로 과거 5년간 평균 대비 변화율 값을 파란색 파선과 함께 그래프에 나타냈다. 미국의 경우 2013년 3월 예측시점의 30개 앙상블에 대한 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 15.9 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 20.8 % 증가, 최소 13.1 % 증가로 나타났다. 5월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 13.6 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 18.1 % 증가, 최소 10.8 % 증가로 나타났다. 7월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 9.0 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 11.4 % 증가, 최소 6.0 % 증가로 나타났다. 9월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 10.1 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 12.5 % 증가, 최소 8.1 % 증가로 나타났다. Forecast 기후예측 자료를 이용해 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 전체적으로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났으며 FAOSTAT의 2013년 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 과거 5년 평균 대비 변화율 역시 7.0 % 증가한 것으로 나타나 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2013년의 옥수수 수확량 증가가 양적으로는 예측시점에 따라 차이가 있을 수 있으나 증가 경향은 예측된 것으로 나타났다. 중국의 경우 2013년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 7.1 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 9.8 % 증가, 최소 6.2 % 증가로 나타났다. 5월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거

5년 평균 대비 약 1.0 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 5.0 % 증가, 최소 0.1 % 증가로 나타났다. 7월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 6.6 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은 최대 8.9 % 증가, 최소 6.1 % 증가로 나타났다. 9월 예측시점의 앙상블 평균 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 7.3 % 증가하는 것으로 나타났으며 앙상블별 예측의 폭은

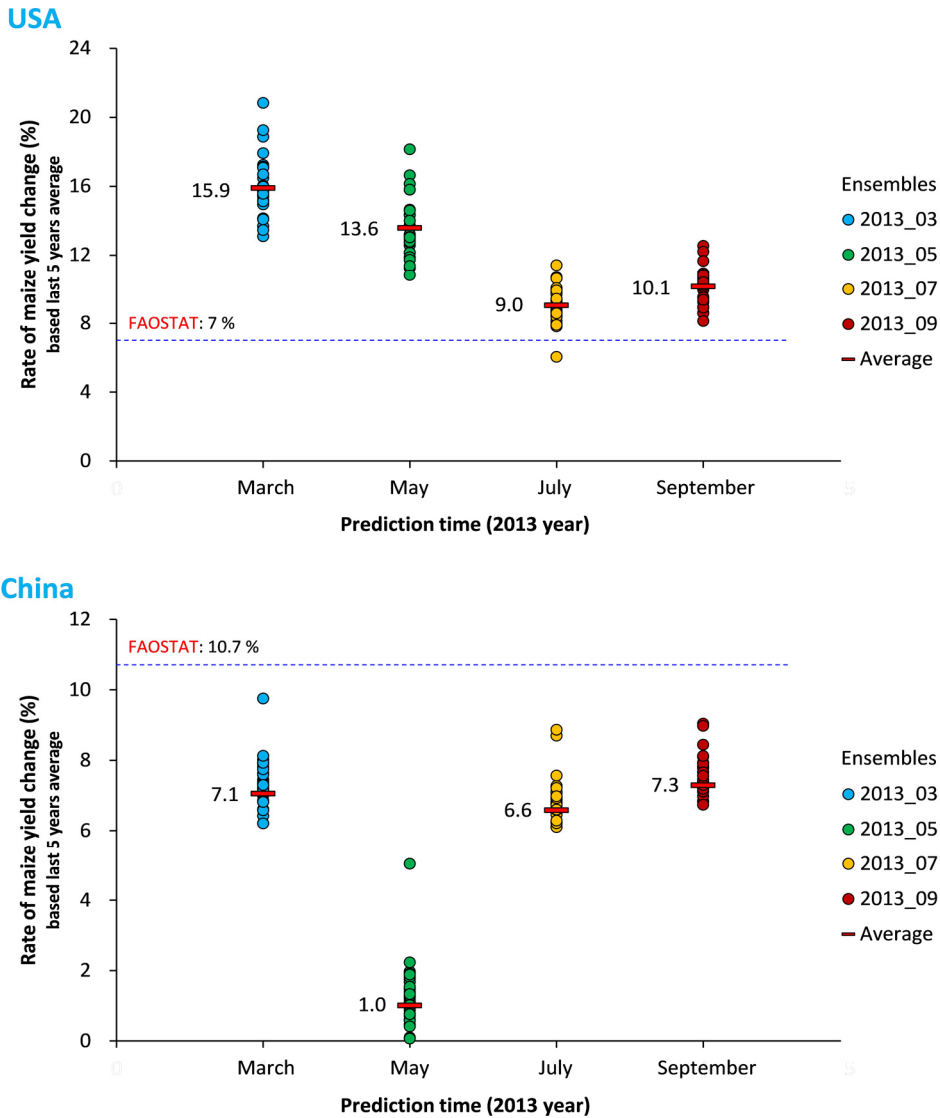


그림 4.56 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2013년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (미국, 중국)

최대 9.0 % 증가, 최소 6.7 % 증가로 나타났다. Forecast 기후예측 자료를 이용해 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 5월 예측시점에서 다른 예측시점보다 수확량 증가가 작게 나타났지만 전체적으로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났다. FAOSTAT의 2013년 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 과거 5년 평균 대비 변화율은 10.7 % 증가한 것으로 나타나 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2013년의 옥수수 수확량 증가는 FAOSTAT보다 작은 증가를 예측했다.

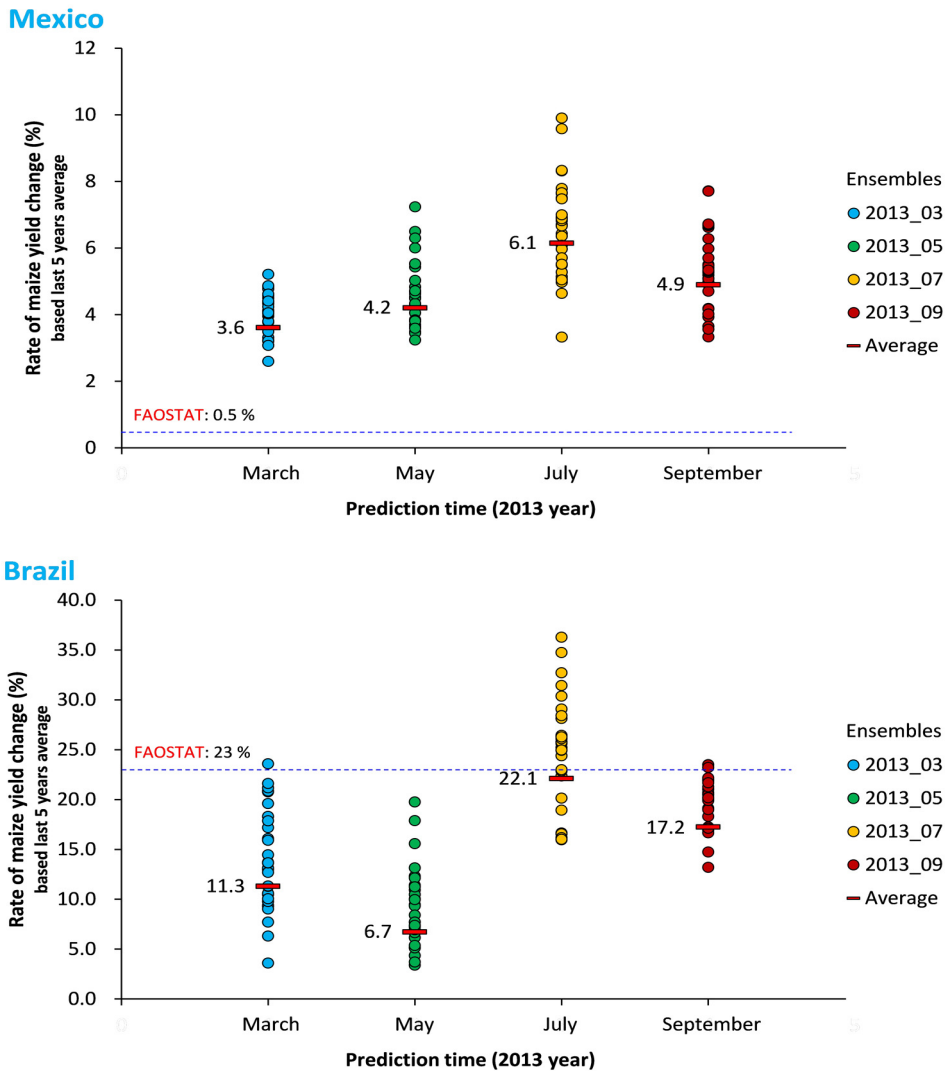


그림 4.57 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2013년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (멕시코, 브라질)

그림 4.57은 총 30개 앙상블의 Forecast 기후예측 자료로부터 계산된 멕시코와 브라질에 대한 2013년 옥수수 수확량 예측 결과의 FAOSTAT 과거 5년간 수확량 평균 대비 변화율을 나타내고 있다. 멕시코의 경우 2013년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 3.6 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 4.2 % 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 6.1 % 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 4.9 % 증가하는 것으로 나타났다. 앙상블별 예측의 폭은 7월 예측시점에서 가장 크게 나타나 최대 9.9 % 증가, 최소 3.3 % 증가로 나타났다. Forecast 기후예측 자료를 이용해 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 전체적으로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났으며 실제로 FAOSTAT의 2013년 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 과거 5년 평균 대비 변화율은 0.5 % 증가한 것에 그치고 있어 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2013년의 옥수수 수확량은 FAOSTAT보다 크게 증가할 것으로 예측했다. 브라질의 경우 2013년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 11.3 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 6.7 % 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 22.1 % 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 17.2 % 증가하는 것으로 나타났다. 앙상블별 예측의 폭은 7월 예측시점에서 가장 크게 나타나 최대 36.3 % 증가, 최소 16.0 % 증가로 나타났다. Forecast 기후예측 자료를 이용해 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 전체적으로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났으며 실제로 FAOSTAT의 2013년 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 과거 5년 평균 대비 변화율은 23 % 증가한 것으로 나타나고 있어 7월 예측시점의 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2013년의 옥수수 수확량은 FAOSTAT의 통계 자료와 유사하게 예측되었다.

그림 4.58은 총 30개 앙상블의 Forecast 기후예측 자료로부터 계산된 미국과 중국에 대한 2014년 옥수수 수확량 예측 결과의 FAOSTAT 과거 5년간 수확량 평균 대비 변화율을 나타내고 있다. 미국의 경우 2014년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 14.8 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 11.4 % 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 7.0 % 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 9.1 % 증가하는 것으로 나타났다. Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 전체적으

로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났다. 현재 시점에서 FAOSTAT의 옥수수 수확량 통계 자료는 2013년까지만 제공되고 있어 USDA에서 제공하는 옥수수 수확량 통계 자료를 이용하였으나 미국에 대한 자료만 얻을 수밖에 없었다. USDA의 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 FAOSTAT의 과거 5년 평균 대비 변화율은 14.5% 증가한 것으로 나타나고 있어 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2014년의 옥수수 수확량은 3월 예측시점에는 0.3%의 차이로 비슷했고 나머지 예측시점에는 USDA의 통계보다 작게 증가할 것으로 예측했다. 중국의 경우 2014년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 4.3% 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 0.5% 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 2.4% 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 4.0% 증가하는 것으로 나타났다. 앙상블별 예측의 폭은 5월 예측시점에서 가장 크게 나타났으며 최대 3.3% 증가, 최소 1.1% 감소로 나타나고 있으며 25개 앙상블 중에서 10개 앙상블의 Forecast 기후예측 자료에 의한 수확량이 과거 5년 평균 보다 감소하는 것으로 나타났다. 중국에 대한 옥수수 수확량 통계 자료는 아직 업데이트 되어 있지 않아 예측성에 대해서는 평가할 수 없었다.

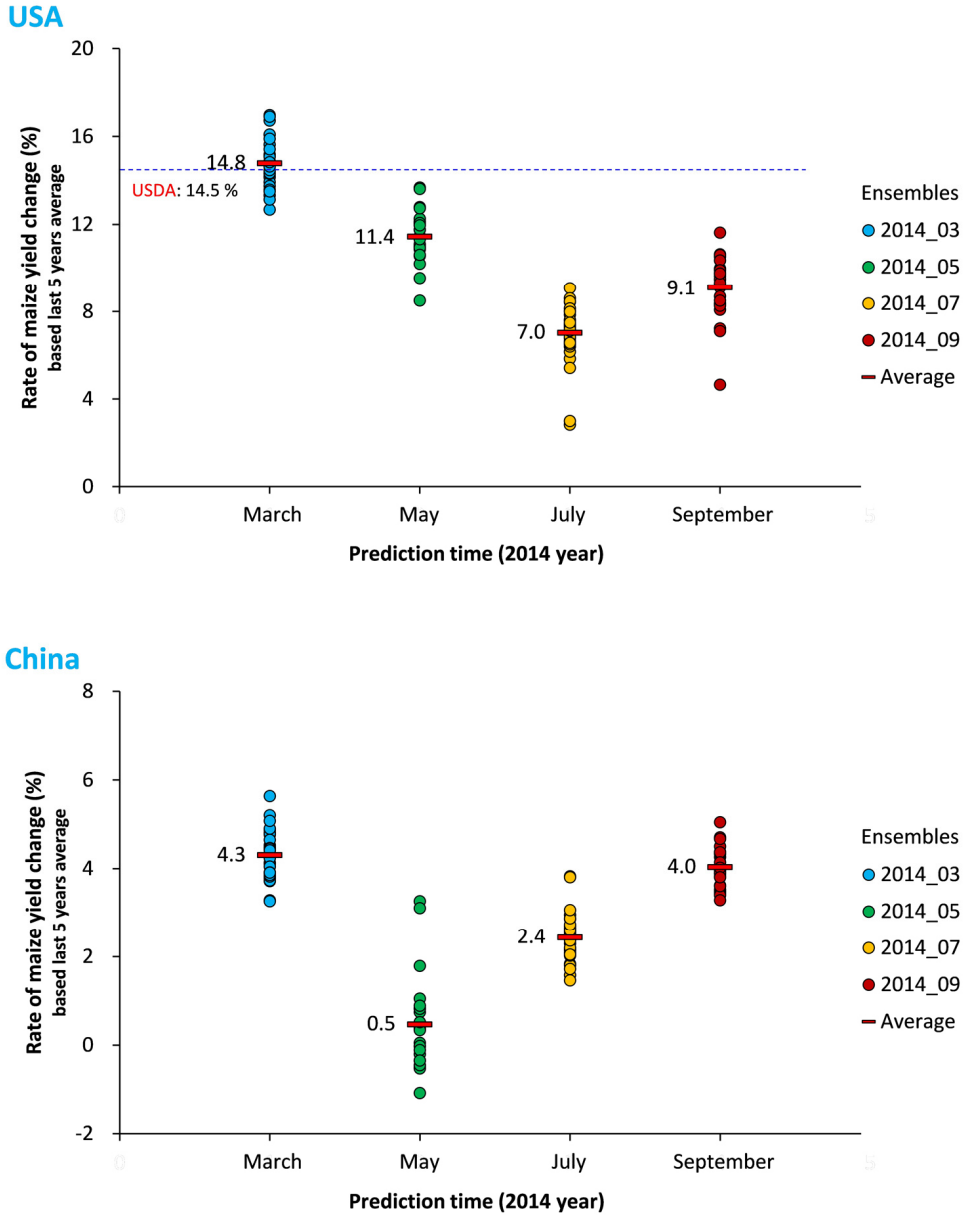
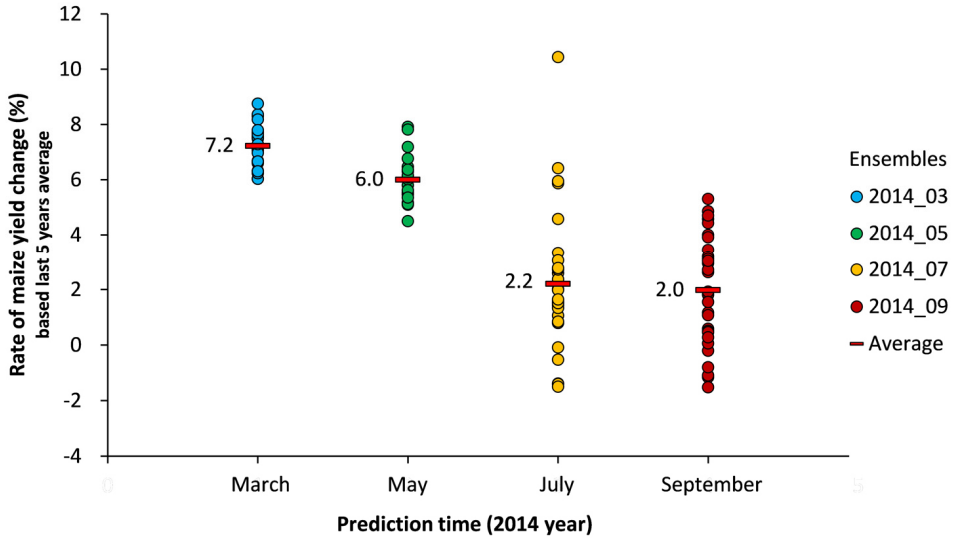


그림 4.58 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2014년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (미국, 중국)

Mexico



Brazil

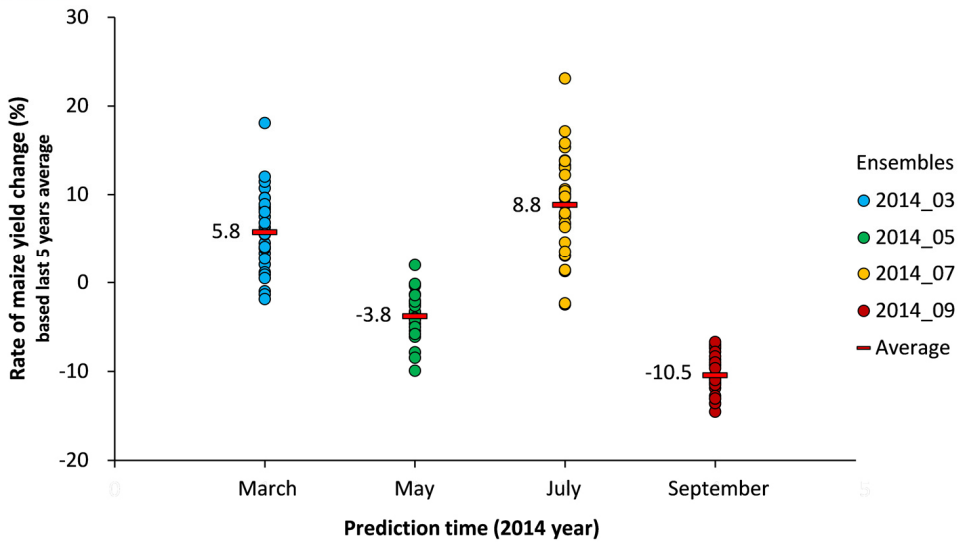


그림 4.59 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2014년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (멕시코, 브라질)

그림 4.59는 Forecast 기후예측 자료로부터 계산된 멕시코와 브라질에 대한 2014년 옥수수 수확량 예측 결과의 FAOSTAT 과거 5년간 수확량 평균 대비 변화율을 나타내고 있다. 멕시코의 경우 2014년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 7.2 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 6.0 % 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 2.2 % 증가하는 것으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 2.0 % 증가하는 것으로 나타났다. 7월 예측시점의 앙상블별 예측의 폭은 최대 10.4 % 증가, 최소 1.5 % 감소로 나타났으며 30개 앙상블 중 5개 앙상블에서 과거 5년 평균 대비 수확량이 감소한다고 예측되었다. 브라질의 경우 2014년 3월 예측시점의 앙상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 5.8 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 3.8 % 감소하는 것으로 7월 예측시점에는 약 8.8 % 증가하는 것으로 9월 예측시점에는 약 10.5 % 감소하는 것으로 나타났다. 5월 예측시점의 앙상블별 예측 결과를 보면 25개 앙상블 중 24개 앙상블에서 과거 5년 평균 보다 감소하는 것으로 예측되었고 9월 예측시점에서는 모든 앙상블에서 감소하는 것으로 예측되고 있다.

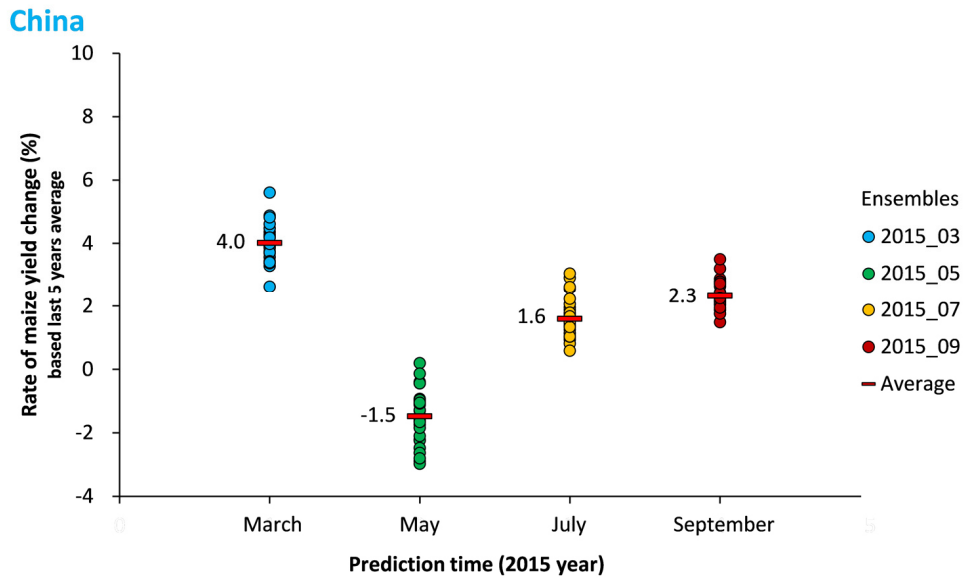
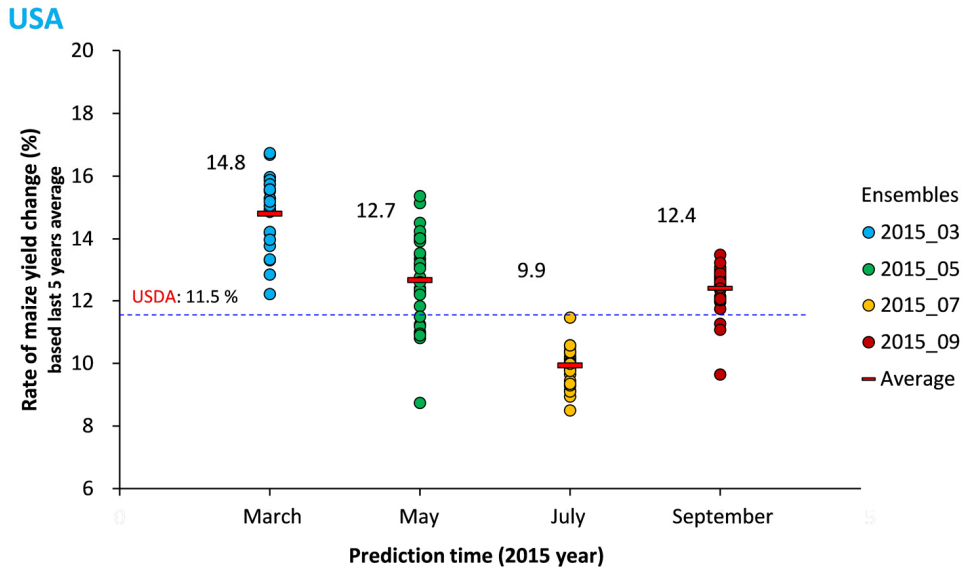


그림 4.60 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2015년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (미국, 중국)

그림 4.60은 미국과 중국에 대한 2015년 옥수수 수확량 변화율을 나타내고 있다. 미국의 경우 2015년 3월 예측시점의 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 14.8 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 12.7 % 증가하는 것으로 7월 예측

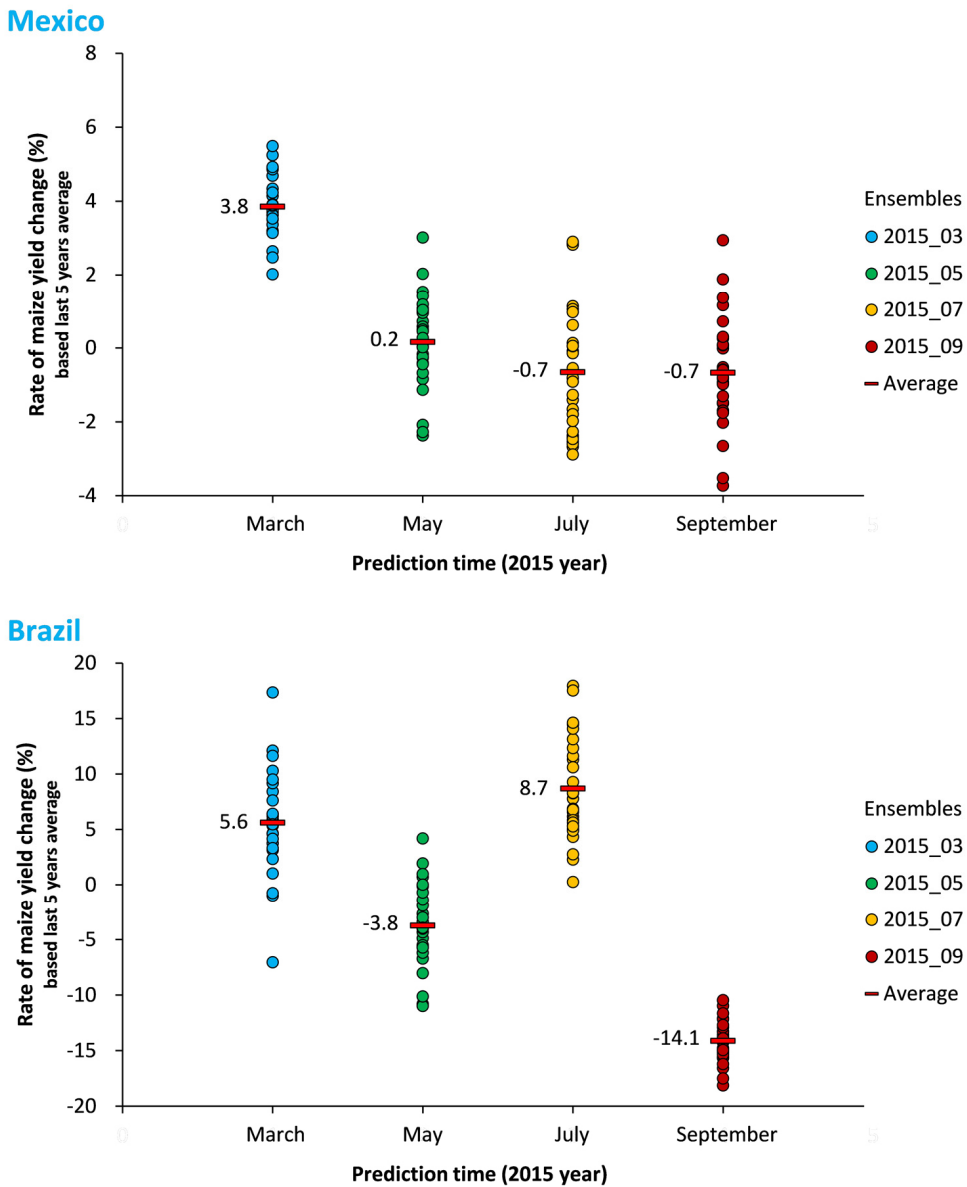


그림 4.61 Forecast 예측정보를 활용한 수확량 예측시점 별 FAOSTAT 자료 과거 5년 평균 대비 2015년 옥수수 수확량 변화율 예측 결과 (멕시코, 브라질)

시점에는 약 9.9 % 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 12.4 % 증가하는 것으로 나타났다. Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 각 예측시점별 옥수수 수확량은 전체적으로 과거 5년 평균과 비교해 증가하는 것으로 나타났다. USDA의 2015년 옥수수 수확량 통계 자료에 대한 FAOSTAT의 과거 5년 평균 대비 변화율은 11.5 % 증가한 것으로 나타나고 있으며 Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2015년의 옥수수 수확량은 9월 예측시점 결과와 0.9 %의 감소 차이를 7월 예측시점 결과와 1.6 %의 증가 차이를 나타냈다. 중국의 경우 2015년 3월 예측시점의 양상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 4.0 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 1.5 % 감소하는 것으로 7월 예측시점에는 약 1.6 % 증가하는 것으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 2.3 % 증가하는 것으로 나타났다. 양상블별 예측의 폭은 5월 예측시점에서 가장 크게 나타났으며 최대 0.2 % 증가, 최소 3.0 % 감소로 나타나고 있으며 30개 양상블 중에서 29개 양상블에서 과거 5년 평균 보다 수확량이 감소하는 것으로 예측되고 있다. 그림 4.61은 멕시코와 브라질에 대한 2015년 옥수수 수확량 변화율을 나타내고 있다. 멕시코의 경우 2015년 3월 예측시점의 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 3.8 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 0.2 % 증가하는 것으로 7월 예측시점에는 약 0.7 % 감소하는 것으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 0.7 % 감소하는 것으로 예측되고 있다. Forecast 기후예측 자료로부터 전망된 2015년의 옥수수 수확량은 7월과 9월의 예측시점에서 0.7 %의 감소를 예측했다. 9월 예측시점의 경우 30개 양상블 중 20개 양상블에서 옥수수 수확량의 감소를 예측했다. 브라질의 경우 2015년 3월 예측시점의 양상블 평균 옥수수 수확량 전망은 과거 5년 평균 대비 약 5.6 % 증가하는 것으로 나타났으며 5월 예측시점에는 약 3.8 % 감소하는 것으로 7월 예측시점에는 약 8.7 % 증가하는 것으로 마지막으로 9월 예측시점에는 과거 5년 평균 대비 약 14.1 % 감소하는 것으로 나타났으며 30개 양상블 모두에서 옥수수 수확량이 과거 5년 평균보다 감소하는 것으로 예측되었다.

5. 결론 및 토론

5.1 결론

기후변화에 따른 이상기후 현상의 빈번한 발생은 농업생산성 분야에 직접적인 영향을 미쳐 작물의 생산량 감소 및 품질 하락을 야기하게 되며 이러한 농업생산성 분야에의 부정적인 영향으로 국제곡물 가격의 변동성이 확대되고 있다. 쌀을 제외한 곡물 소비량의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 안정적인 곡물 공급을 위해 다양한 국제곡물 전망 정보를 필요로 하고 있으나 국내 실정에 맞는 정보가 부족하고 시의성이 떨어진다는 문제점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 APEC Climate Center에서 전 세계 기후연구 기관으로부터 수집하고 있는 6개월 선행예측기간을 갖는 6개 기후예측 모형(MSC_CANCM(can3), MSC_CANCM4(can4), NASA(nasa), NCEP(ncep), PSNU(psnu), POAMA(poam))의 예측 자료를 글로벌 스케일의 작물 모형인 M-GAEZ에 적용하여 장기 작물 수확량을 예측하고 예측 모형 간 불확실성 및 예측의 신뢰성에 대해 평가를 실시했다. 장기 기후예측 자료를 이용한 옥수수 수확량 전망에 앞서 APCC에서 제공되고 있는 6개월 선행예측기간의 Hindcast 예측 자료와 Forecast 예측 자료에 대한 분석 및 신뢰성 검증을 실시했다. 작물 모형의 입력 기후 자료인 일 단위 기후자료 생산을 위해 장기 기후예측 자료에 대한 시·공간 상세화기법이 개발되었으며 관측자료와 장기 기후예측자료 그리고 과거 40년간의 기후값이 결합되어 새롭게 작성된 기후예측 자료는 M-GAEZ 모형에 입력되어 전 세계 주요 옥수수 생산국에 대한 옥수수 수확량 예측에 이용되었고 FAOSTAT의 국가별 옥수수 수확량 통계 자료와 비교를 통해 국가별 예측 모형의 양상불에 따른 옥수수 수확량 예측의 신뢰성이 평가되었다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ▶ **NCEP/NCAR 재분석 자료 편이 보정:** 장기 기후예측 자료에 대한 편이 보정 및 농업생산성 분야 맞춤형 일 단위 기후예측 정보를 생산하기 위해 1951년부터 2015년 8월까지 64년 8개월간의 NCEP/NCAR 재분석 자료를 일평균 관측 기후자료로 이용하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료는 시간적 공간적으로 연속성이 있으나 지상 관측 자료를 기반으로 한 수치모형과 자료동화 기법에 의해 발생하는 오차를 포함하고 있어 전 세계 약 4,000개 이상의 기상 관측점의 관측

자료를 기반으로 작성된 CRU TS3.21 자료와 비교를 통해 일 단위 NCEP/NCAR 재분석 자료에 대한 편이 보정을 실시했다.

- ▶ **Hindcast 및 Forecast 예측자료 편이 보정:** APCC에서 제공되고 있는 장기 기후예측 정보에는 각 기후예측 모형의 계통오차(편이)에서 발생하는 모형 간 예측의 차이가 존재하는 것이 확인 되었고 각 기후예측 모형의 계통오차에 의한 차이를 줄이기 위해 장기 기후예측 자료에 대한 Simple Bias Correction(SBC) 방법을 개발해 Hindcast(1983-2006년) 및 Forecast(2013-2015) 예측기간에 적용하였다.
- ▶ **Hindcast 및 Forecast 예측자료 시간적 상세화:** APCC에서 제공되고 있는 장기 기후예측 자료는 월 평균 자료로 작성되어 있기 때문에 작물 모형의 입력 자료로 사용하기 위해서는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료를 일 자료로 시간적 상세화과정이 필요하다. 시간적 상세화는 상세화 하고자하는 예측 기후자료의 월 평균 기온 값과 과거 64년(1951-2014년) 동안의 SBC 된 NCEP/NCAR 재분석 자료의 월 평균 기온 값이 가장 근사한 Top 5의 해를 선정하고 선정된 해 중에서 예측 기후자료의 월 평균 강수량 값이 가장 근사한 Top 1의 해를 선정하여 해당되는 해의 월 자료에 포함되어 있는 일 단위 NCEP/NCAR 재분석 자료의 모든 변수를 예측 월의 일 자료로 사용함으로써 시간적 상세화 작업을 수행한다.
- ▶ **Hindcast 예측자료 예측성 평가:** 1983년부터 2006년까지 24년 기간에 대해 과거기후 예측 시뮬레이션을 실시한 6개월 선행예측기간의 기후예측 모형의 예측결과를 분석하기 위해 미국, 중국, 멕시코, 브라질의 주요 옥수수 생산지역에 대한 7월의 기온과 강수량의 Hindcast 기간 예측 결과를 추출하였다. 각 기후예측 모형의 예측 신뢰성을 평가하기 위해 먼저 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석 자료로부터 Hindcast 예측 기간에 대한 기온과 강수량의 Climatology를 구하고 기후예측 모형의 연도별 Anomaly를 계산해 비교했고 기후예측 모형의 예측값과 관측값의 상관성 및 정확성을 평가하기 위해 TCC와 RMSE를 계산해 분석을 실시했다. 분석결과 미국에서는 기온과 강수량에 대한 TCC 값이 0을 중심으로 ± 0.3 의 범위에 나타나 대체로 낮은 상관성을 보였으며 저위도 지역인

멕시코와 브라질에서는 기온에 대한 TCC 값이 대체로 0.1-0.5 사이에 나타났으며 RMSE도 미국과 중국에 비해 작게 나타났다.

- ▶ **작물 모형 입력 기후예측 자료 생산:** 작물 모형에 입력되는 기후자료는 일 단위 자료로서 작물 수확량 예측 시뮬레이션이 이루어지는 시점에 따라 예측시점 이전에 대해서는 편이 보정된 NCEP/NCAR 재분석자료가 관측자료 값으로 이용되고 예측시점부터 6개월간에 대해서는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료가 이용되며 예측시점보다 6개월 이후의 예측 기후자료가 없는 기간에 대해서는 1971-2010년의 40년간의 일평균 기후값이 이용되어 작물 모형의 입력 기후예측 자료로 결합된다.
- ▶ **세계 옥수수 파종일 추정:** M-GAEZ 모형내의 작물 파종일 추정 모듈에서는 옥수수 생산 가능지역에 대해 최적의 옥수수 품종이 선택되도록 설계되어 있으며 선택된 품종 정보와 기후자료를 이용해 각 지점별 옥수수 파종 시작일과 파종 종료일을 추정한다. 모형에서 추정된 옥수수 파종일과 국가별 관측 파종일 통계자료를 비교해 본 결과 추정된 파종일이 대체적으로 관측 통계 범위 안에 포함되는 것으로 나타났다.
- ▶ **작물모형 검증:** M-GAEZ 모형에 대한 옥수수 수확량의 예측성을 검증하기 위해 NCEP/NCAR 재분석 일 기후자료를 이용해 전 세계 옥수수 수확량을 계산하였고 FAOSTAT의 국가별 옥수수 수확량 통계자료와 비교 분석을 실시했다. 국가별 TCC와 RMSE 분석을 실시한 결과 미국에서 TCC 값이 0.87, RMSE 값이 666 kg/ha, 중국에서 TCC 값이 0.71, RMSE 값이 356 kg/ha, 멕시코에서 TCC 값이 0.88, RMSE 값이 238 kg/ha 그리고 브라질에서 TCC 값이 0.84, RMSE 값이 487 kg/ha로 나타났다. NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 M-GAEZ 모형의 옥수수 수확량 예측성이 대체적으로 높게 나타나고 있어 장기 옥수수 수확량 전망 기술 개발에 M-GAEZ 모형의 적용이 적합하다고 판단되었다.
- ▶ **옥수수 수확량 민감도 분석:** 기온과 강수량의 변화에 따라 현재 옥수수 재배지역에서 옥수수 수확량이 어떻게 변할 것인지에 대해 알아보기 위해 기온과 강수량 변화에 따른 옥수수 수확량 변화의 민감도 실험을 실시했다. 그 결과 지역

에 따라 기온과 강수량의 민감도가 다르게 나타났으며 미국과 중국과 같은 중위도 지역에서는 대체로 강수량의 변화에 옥수수 수확량이 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며 강수량이 증가할수록 수확량이 증가하는 것으로 나타났다. 멕시코와 브라질 같은 저위도 지역에서는 기온과 강수량 모두에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며 멕시코에서는 기온과 강수량이 증가할수록 수확량이 증가하지만 브라질에서는 기온과 강수량이 감소할수록 수확량이 증가하는 것으로 나타났다.

- ▶ **옥수수 수확량 예측성 평가:** 장기 기후예측 정보를 활용한 옥수수 수확량 예측 결과의 신뢰성을 평가하기 위해 우선 6개 기후예측 모형의 Hindcast 기후예측 정보(1991-2000년)를 M-GAEZ모형에 입력하여 국가별 옥수수 수확량을 예측하였고 FAOSTAT의 국가별 옥수수 수확량 통계자료와 비교를 실시했다. 미국과 중국의 경우 기후예측 모형의 TCC 값이 대체로 0.4를 중심으로 분포했으며, 멕시코의 경우 TCC 값이 0.4-0.8 사이에 분포했고, 브라질의 경우 TCC 값이 0.0-0.6 사이에 분포했다. 상기 4개국 중에서는 멕시코의 옥수수 수확량 예측성이 가장 좋게 나타났다. 다음으로 Forecast 기후예측 정보(2013-2015년)를 활용한 국가별 수확량 예측을 실시하였다. FAOSTAT의 국가별 옥수수 수확량 통계자료가 2013년까지 제공되고 있어 FAOSTAT의 과거 5년간 평균 옥수수 수확량 대비 M-GAEZ 모형에 의한 옥수수 수확량 예측결과의 변화율을 계산해 통계 값의 변화율과 비교하였는데 2013년에 4개국에서 수확량 예측시점에 따라 양상블 간에 변화율의 차이가 존재하지만 전체적으로 과거 5년 평균 대비 증가한다고 예측하였고 통계자료에서도 예측값과 정도의 차이는 있지만 전체적으로 옥수수 수확량이 증가한다고 예측했다. 2014년에 대한 옥수수 수확량 전망은 미국과 중국, 멕시코에서는 전체적으로 증가하는 것으로 예측되고 있지만 브라질에서는 양상블에 따라 수확량이 감소할 것으로 예측하는 모형이 나타나며 예측시점에 따라라도 차이가 나타난다. 미국의 경우 USDA의 통계정보와 비교할 수 있었는데 통계자료에서도 모형과 마찬가지로 옥수수 수확량이 증가하는 것으로 전망했다. 2015년에 대한 옥수수 수확량 전망은 미국에서는 예측시점에 관계없이 모든 양상블에서 옥수수 수확량이 증가할 것이라고 전망하고 있으며 USDA의 통계자료에서도 수확량이 증가할 것으로 전망했다. 하지만 중국

과 멕시코, 브라질에서는 앙상블에 따라 수확량이 감소할 것으로 예측하는 모형이 2014년과 비교해 증가하고 있어 대체적으로 이들 세 국가에서 특히 브라질에서 옥수수 수확량의 감소 확률이 증가할 것으로 전망했다.

본 연구에서는 농업생산성 분야에 대한 맞춤형 기후예측 자료 생산을 위해 시공간 상세화 기법을 개발하였고 개발된 상세화 기법을 통해 APCC에서 제공되고 있는 6개월 선행예측기간의 기후예측 자료에 대해 상세화를 적용해 작물 모형의 입력 기후예측 자료로 활용하였다. 글로벌 스케일의 작물모형 맞춤형 기후예측 자료는 작물 수확량 예측시점에 따라 자료의 구성이 다르게 나타나며 입력 기후자료 안에서 관측 자료와 계절예측 자료 그리고 과거 기후값이 작물 생육기간 중 차지하는 비중이 얼마인가에 따라 옥수수 수확량 예측 결과에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 예측모형별 기후예측 자료를 이용해 전 세계 옥수수 수확량을 예측하고 지역에 따른 예측모형별 수확량 예측의 신뢰성이 평가되었지만 작물 모형에 입력되는 계절예측 정보를 농업생산 분야에 적용하는데 있어 아직 만족할 만한 수준의 예측성능에 다다르지 못하고 있는 것이 사실이다. 작물 모형에 입력되는 보다 신뢰성이 담보된 기후예측 자료를 작성하기 위해 다양한 방법들이 시도되고 있지만 아직까지 안정적이고 정형화된 방법이 성립되지는 못한 상태다. 본 연구에서는 과거 64년 동안의 일 단위 전 지구 기온 자료와 강수량 자료를 바탕으로 월 단위 계절예측 자료로부터 일 단위 계절예측 자료를 재생산했으나 재생산된 계절예측 자료 중 일교차, 일사량, 풍속 등의 자료는 예측의 신뢰성이 낮게 나타나고 있어 농업생산성 분야 맞춤형 기후자료를 재생산하는 과정에서 좀 더 논리적이고 과학적 기반에 근거한 방법 개발이 필요하다. 기후예측 자료의 예측성이 아직 만족할 만한 수준에 도달하지 못한 상태에서 기후예측 자료를 농업생산성 분야에 직접 활용하는 데에는 많은 제약과 어려움이 남아있으며 신뢰성이 담보되지 않은 상태에서 활용성을 높이는 것 역시 어려운 문제라고 할 수 있다. 그렇다 하더라도 기후예측 정보의 활용에 대한 기대감은 점차 확대되어 가고 있으며 다양한 과학적인 접근방법을 통해서 이러한 문제들을 조금씩 해결해 나가려는 시도들이 이루어지고 있다. 최근 APCC에서는 장기 기후예측 자료를 응용분야에 직접 혹은 간접적으로 활용할 수 있도록 다양한 과학적이고 통계적인 방법을 이용한 접근을 시도 하고 있으며 기후정보 활용 방안을 마련하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

5.2 연구결과의 활용

우리나라는 현재 경제협력개발기구(OECD) 회원국 가운데 식량 자급률이 가장 낮은 국가로 2013년 전체곡물자급률(사료용 곡물 포함)이 23.1%로 사상 최저 수준을 기록했으며 이는 1980년의 절반에도 미치지 못하는 수준이다. 최근 국내 소비량이 점차 늘고 있는 밀, 옥수수, 콩에 대한 자급률은 사료용을 포함해서 각각 0.5%, 1.0%, 9.7%로 나타나 사실상 곡물 조달의 대부분을 해외 수입에 절대적으로 의존하고 있는 실정이다. 만약에 2008년과 2010년 세계를 강타한 국제 곡물가격 상승이 재현될 경우 우리나라는 식량위기 상황에 노출될 수밖에 없으며 정치, 경제, 사회적으로 큰 타격을 입게 될 가능성이 높다. 이와 같이 우리나라는 곡물에 대한 대외의존도가 상당히 높은 상황에서 이상기후 현상의 빈번한 발생으로 인한 전 세계 곡물시장의 공급 불안정 요인이 커져가고 있어 향후 곡물의 안정적인 확보를 위한 대응책 마련이 식량 안보 차원에서 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

우리나라 사료용 곡물 수입은 1967년 농협과 사료협회로 이원화되어 수입이 시작되었고 1984년부터는 사료용 곡물의 구매물량 증가와 급변하는 국제곡물 시장에 능동적으로 대처하기 위해 사료 제조업체가 직접 수입할 수 있도록 자유화 되었다. 사료협회는 회원공장 39개 업체가 편의상 지역별 규모별로 구분되어 공동구매를 한다. 구매 결정 과정은 사료협회에서 주관하는 공개입찰을 통해 수입선을 결정하고 회원사 실무자로 구성된 원료구매운영위원회에서 수입 물량을 조정하고 배정한다. 사료협회 및 농협의 경우 곡물 수입물량의 전량을 국내 수입대행사 또는 곡물메이저로부터 구매한다. 현지에서의 물량확보(구매가격의 결정)는 국내에서 낙찰을 받은 공급자(주로 곡물메이저)가 현물시장에서 구매하여 물량을 확보한다(성명환 외 2008). 사료협회에서는 사료용 곡물의 경제적이고 안정적인 확보를 위해 다양한 국제곡물 전망 정보를 수집하고 있으며 사료원료의 수급 불안정에 대비한 사전 경보 시스템 구축을 통해 구매제도를 개선해 나간다는 계획을 세우고 있다. 사료원료에 대한 구매효율성 제고를 위해서는 국제곡물가격의 변동 및 수급상황을 고려한 구매시점의 파악이 중요하고 가격 경쟁력 확보를 위해 사료협회 등을 통한 공동구매 방법이 추천된다.

본 연구를 통해 개발된 APCC의 장기 곡물 수확량 예측 기술은 사료협회 원료구매 운영위원회의 곡물 구매에 관련한 의사결정에 있어 시의적절한 맞춤형 예측정보로서

그 활용성이 기대되고 있다. APCC에서는 계절예측 정보를 이용한 장기 곡물 수확량 예측 기술을 활용해 주요 사료작물(옥수수)에 대한 생산국별 수확량 예측정보를 생산했으며 실질적으로 수요자(사료협회 원료구매운영위원회)가 원하는 예측정보를 제공하기 위해 직접 실무자간 업무협의를 진행해 왔다. 그림 5.1은 사료협회의 원료구매 운영위원회 구성과 APCC의 계절예측 정보를 활용한 장기 곡물 수확량 예측 시스템으로부터 제공되는 주요 곡물 수출국의 수확량 예측 정보 등에 대한 구매결정 참조 정보 제공에 대해 나타내고 있다. 이처럼 국내 사료업계 등에 주요 옥수수 생산국에 대한 장기 옥수수 수확량 전망 정보를 제공함으로써 보다 안정적인 곡물 공급 운영에 활용성이 기대된다. 또한 APCC에서 생산되는 장기 옥수수 수확량 정보는 예측시점에 따라 다양한 의사결정 지원을 할 수 있을 것으로 기대된다.

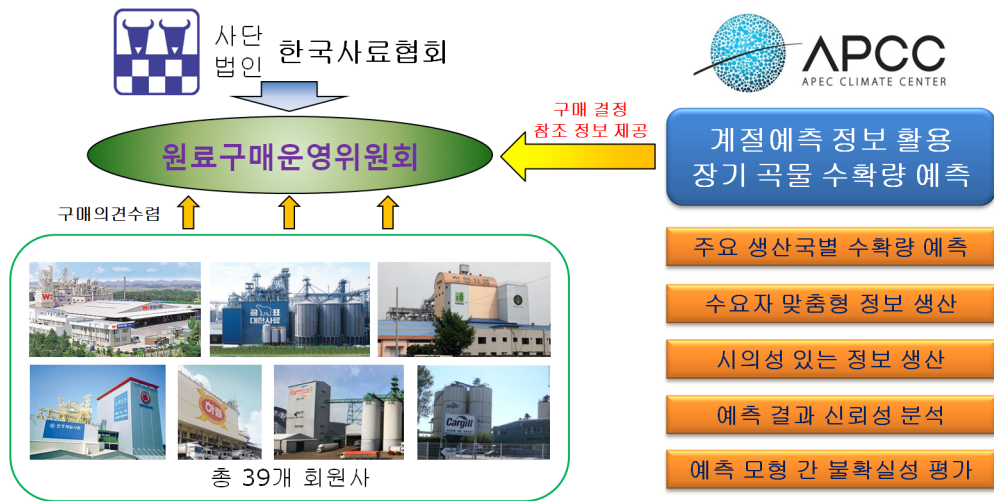


그림 5.1 한국사료협회(원료구매운영위원회)의 곡물구매 의사결정 지원을 위한 APCC의 장기 곡물 수확량 예측 기술 활용 방안

참고 문헌

- 김형진, 2014. APEC 기후센터 다중모델 앙상블 계절예측 시스템의 현환과 전망, 한국기상학회 가을학술대회 초록집.
- 농촌진흥청, 2013: 농업기술길잡이 35 옥수수
<http://203.241.55.171/smartmylibrary/data/contents/f69ff09f-37e4-416d-8d78-8ef4eff0e729/3370.html>
- 성명환, 김태훈, 우병준, 채상현, 승준호, 박지은, 2008. 사료곡물의 안정적 확보 및 곡물가격 조기경보 시스템 도입 방안. 한국농촌경제연구원 연구보고서.
- 신용희, 2013. 아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가. APEC 기후센터 연구보고서.
- 신용희, 2014. APCC 계절예측 정보 농업분야 활용기술 개발. APEC 기후센터 연구보고서.
- 한국농촌경제연구원, 2008: 사료곡물의 안정적 확보 및 곡물가격 조기경보 시스템 도입 방안
- 한국사료협회, 2012: 한국사료협회 50년사
- 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.
- 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.
- 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.
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, and C.-K. Park, 2009. A probabilistic multimodel ensemble approach to seasonal prediction. *Weather and Forecasting*, 24, 812-828.
- 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.
- Sacks, W.J., D. Deryng, J.A. Foley, and N. Ramankutty (2010). Crop planting dates: an analysis of global patterns. *Global Ecology and Biogeography* 19, 607-620. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00551.x.
- 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. <http://faostat3.fao.org/home/E>

연구보고서 2015-13

장기 곡물생산 전망을 위한 계절예측 정보 활용 시스템 구축

Development of Seasonal Forecast Utilization System for
Long-term Crop Yield Outlook

신용희



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

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

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-110-7