

농업부문 기후시나리오 활용의 주의점

김진희* · 윤진일

경희대학교 농업기상연구소

(2016년 9월 1일 접수; 2016년 9월 22일 수정; 2016년 9월 26일 수락)

The Use and Abuse of Climate Scenarios in Agriculture

Jin-Hee Kim* and Jin I. Yun

Agricultural Climatology Lab., College of Life Sciences, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

(Received September 1, 2016; Revised September 22, 2016; Accepted September 26, 2016)

ABSTRACT

It is not clear how to apply the climate scenario to assess the impact of climate change in the agricultural sector. Even if you apply the same scenario, the result can vary depending on the temporal-spatial downscaling, the post-treatment to adjust the bias of a model, and the prediction model selection (used for an impact assessment). The end user, who uses the scenario climate data, should select climate factors, a spatial extend, and a temporal range appropriate for the objectives of an analysis. It is important to draw the impact assessment results with minimum uncertainty by evaluating the suitability of the data including the reproducibility of the past climate and calculating the optimum future climate change scenario. This study introduced data processing methods for reducing the uncertainties in the process of applying the future climate change scenario to users in the agricultural sector and tried to provide basic information for appropriately using the scenario data in accordance with the study objectives.

Key words: Climate scenario, Uncertainty, Downscaling, Bias correction

I. 문제 제기

농업부문의 기후변화 적응을 위한 선결조건은 농작물 생육과 수량에 미치는 기후변화의 영향을 정량적으로 평가하는 일이다. 이를 위해서는 잘 만들어진 작물모형뿐 아니라 과거-미래 간 이음새 없는 기후자료가 필요하다. 아무리 좋은 작물모형이 준비되어있어도 예측된 미래기후의 신뢰성이 부족하다면 그 영향평가 결과는 적응전략 수립에 사용하기 어려울 수 있다. 일반적으로 미래기후는 온실가스 배출시나리오를 선정하고 기후모델을 이용해 과거-미래의 모의전망을 산출하기 때문에 과거 동일기간의 관측된 기후와 상당한 차이를 보이는

것으로 알려져 있다(So *et al.*, 2012). 예를 들어 현재 기상청에서 제공하는 한반도 상세 기후시나리오(12.5km 공간해상도, 1951-2100 간 150년)의 경우 1981-2010 기간 서울관측소에 해당하는 격자의 6월부터 9월까지 일 최고기온 평균값은 26.7°C이지만 서울관측소의 관측기온에 의하면 27.8°C로서 1.1°C만큼 낮게 모의되고 있다. 같은 기간 극한기후의 출현빈도 역시 시나리오에서 103회 확인된 폭염일수는 관측값으로 살펴보면 183회 발생한 것으로 나타나 저평가되고 있다(Kim and Yun, 2015). 만약 이 기후시나리오를 보정 없이 그대로 작물모형 구동에 사용한다면 농작물의 과거 생육 및 수량반응은 실제와 당연히 다르고, 미래전망 역시 현실과



* Corresponding Author : Jin-Hee Kim
(7jhee@naver.com)

동떨어진 것이 될 것이다. 나아가 이 모의결과를 바탕으로 적응대책을 마련한다면 실효성이 떨어질 것은 분명해진다.

분야별 기후변화 영향평가는 꾸준히 진행되어 왔지만 시나리오자료 활용에 대한 방법론이 명확하지 않아 동일한 시나리오자료를 사용하더라도 시공간적 상세화 작업이나 모델이 가지는 편의를 보정하기 위한 후처리 작업, 영향평가에 사용하는 예측모형의 선택에 따라 구동결과는 상이하게 나타난다(Bae *et al.*, 2011; Cho, 2013). 시나리오 기후자료를 활용하는 최종 사용자는 분석하고자 하는 목적에 따라 고려해야 할 기후 인자를 선택하고, 적절한 공간적 범위 및 시간적 범위를 설정해야 할 것이다. 과거기후의 재현성을 포함한 자료의 적합성을 평가하고, 최적의 미래 기후변화 시나리오를 산출하여 불확실성을 최소화한 영향평가 결과를 도출하는 것이 중요하다.

이 논문에서는 농업부문 종사자들에게 미래 기후변화 시나리오를 활용하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 줄이기 위한 자료처리기법들을 소개하고, 연구 목적에 따라 시나리오 자료를 적절히 활용할 수 있도록 기초정보를 제공하고자 한다.

II. 기후시나리오 제작기술

기후 예측은 먼저 지구표면이 모두 바닷물로 덮여 있다고 가정하여 적도, 중위도, 고위도 및 극지방에 형성되는 기압대를 바탕으로 이들 사이의 바람, 즉 ‘공기주머니의 이동’을 예측하는 대기대순환모형(atmospheric general circulation model, AGCM)으로부터 시작한다. 모델은 실제 대기와 흡사하도록 대기의 속성을 구체화하며, 지구의 대기, 해양, 지면, 빙권 등의 영향을 결합하여 나타낸다. 기본적으로 대기를 수직, 수평 방향으로 여러 개의 층으로 나누면 자연스럽게 육면체 형태의 공기주머니가 생기는데 개별 공기주머니에 담긴 열과 수증기함량 등 속성을 기상관측과 공간내삽에 의해 찾아낸다. 온도, 기압 그리고 비습 등과 같이 각 공기주머니에 지정된 요소 값들은 그 공기주머니의 평균(대표)값을 의미하며, 이 초기상태로부터 시간경과에 따른 변화양상을 운동방정식 등 6개의 원시방정식(primitive equations)에 의해 추정하여 차분방정식으로 표현한다. 각 공기주머니와 관계된 전체 방정식들은 적분시간 간격에 따라 동시에 계산되어 다음 적분시간의 대기상태를 결정할 수 있다.

미래 기후의 예측을 위해서는 온실가스 및 에어로졸

의 배출량 또는 농도, 기타 온난화 원인에 대한 정보가 필요한데, 국제사회는 2007년 9월 미래 기후변화에 대한 IPCC의 제 5차 평가보고를 위해 새로운 배출 시나리오(emission scenario)로 대표농도경로(representative concentration pathways, RCP)를 선정하였다. 이는 복사강제력(radiative forcing) 전망에 따라 매우 낮은 강제력 수준에 도달하는 1개의 완화시나리오(RCP2.6), 2개의 안정화 시나리오(RCP4.5, RCP6.0), 1개의 고농도 온실가스 배출시나리오(RCP8.5)를 포함하며, 객관적이고 과학적으로 미래의 기후를 예측할 수 있는 전구기후 모델(global climate model, GCM)의 입력자료로 사용된다(IPCC, 2013; 2014).

그러나 IPCC가 미래전망을 산출하기 위해 사용하는 다양한 기후모델들은 강제력에 대한 지구의 반응과 자연적 기후변동성을 각기 다르게 표현하기 때문에 동일한 예측결과를 도출할 수 없다. 때문에 IPCC의 제 5차 평가보고서(AR5)에서는 세계기상기구(WMO) 기후연구 프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)의 일환으로 진행된 5단계 기후모델 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Phase 5, CMIP5)의 틀 속에서 다양한 전구기후모델의 예측 결과들을 비교, 평가하여 정보의 불확실성 정도를 함께 밝히고 있다(IPCC, 2013; 2014). 우리나라의 경우 영국기상청의 대기-해양 결합모형인 HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environmental Model version 2-Atmosphere and Ocean)의 사용허가를 받아 CMIP5에 참여하였으며, 국립기상과학원에서 주도하여 현재기후(Historical) 및 미래전망(RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5)을 약 135km 해상도로 2100년까지 생산하였다(NIMS, 2011; 2012).

III. 기후시나리오의 불확실성

기후변화 정보를 자신의 분야에 적용하여 응용정보를 만들어내는 최종 사용자들은 반드시 기후변화 시나리오의 충분한 이해를 통해 불확실한 특성을 고려하여 접근해야 한다. 많은 연구사례에서처럼 접근이 용이한 기상청 제공 국가 기후변화 시나리오 하나만으로 영향평가 및 취약성 분석을 수행하는 경우 ‘불확실성’이라는 덫에 빠지기 쉽다. AR5에서는 과학 기술의 발전에도 불구하고 미래의 기후 전망치에 대한 의견 불일치, 또는 정보 부재로 인해 생기는 일정한 범위의 불확실성을 인정하고 있으며, 크게 세 가지를 그 원인으로 지목하고 있다.

첫 번째는 지구시스템에 내재되어 있는 자연적인 경

년변동성으로 인한 불확실성이다. 이는 자연적으로 발생하는 엘니뇨/남방진동(ENSO)과 북대서양진동 등의 현상과도 연결되며 해양, 대기, 육지, 생물권 및 빙권의 상호작용에 의해 발생할 수 있다. 지구시스템에 내재되어 있는 현상이기 때문에 불확실성을 제거할 수는 없지만 모델의 초기조건을 인위적으로 변화시켜 경년변동성을 계산하거나(Deser *et al.*, 2012; Fischer *et al.*, 2013), 기상발생기(weather generator)의 확률론적 성질을 이용하여 불확실성 범위를 나타낼 수 있다(Kim *et al.*, 2014a).

두 번째는 온실기체와 에어로졸 전구물질의 미래 배출속도를 정확히 예상할 없는 부분에서 기인하는 불확실성이다. 미래의 사회적 및 경제적 여건에 따라 민감하게 달라질 수 있는 부분이기 때문에 불확실성의 범위를 크게 줄이기는 어렵지만 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오로부터 배출량에 따른 미래전망을 용이하게 고려할 수 있도록 제공하고 있다.

마지막 요인은 자연적 변동성과 배출시나리오에 대한 기후 반응을 모의하는 기후모델에서 기인하는 불확실성으로 “반응 불확실성”(response uncertainty) 또는 “모델 불확실성”(model uncertainty)이라고 표현한다(IPCC, 2013). 애당초 기후모델에 따라 미래기후 추정치를 다르게 전망하고 있는데다가 다양한 분야에 적용하는 과정에서 후처리 작업을 거치게 되므로 생산자로부터 수요자에게 전달되는 단계가 길어질수록 불확실성은 급수적으로 증폭되게 된다(Wilby and Dessai, 2010; IPCC, 2013).

CMIP5에서 제공하는 수많은 GCM 자료의 미래전망 결과는 동일하지 않으며, 정도의 차이는 있어도 오차가 없는 완벽한 모델은 없기 때문에 많은 연구에서 GCM의 결과들을 평균하여 사용하는 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)을 사용하고 있다. MME는 모델에서 기인하는 불확실성을 최소화 시키고 신뢰성 있는 기후자료를 생산할 수 있도록 하는 자료처리방법으로, 국내 연구사례들을 보면 미래 시나리오에 따른 변화전망을 GCM 모델들의 평균값으로 설명하고, GCM의 결과값 차이로부터 배출시나리오나 기후요소별, 계절별, 미래기간 등에 따라 불확실성의 정도를 설명하고 있다(Bae *et al.*, 2011; Shin and Jung, 2015).

MME 기법은 단일 GCM을 이용하는 경우보다 모델들의 평균화로 인해 계절내 변동성이 작게 나타나기 때문에, MME 결과는 모델 내 극값을 나타내는 최소 및 최대값의 범위를 함께 제시해주는 것이 중요하다. Cho

(2013)와 Chung *et al.*(2015)은 개별 GCM과 MME, 그리고 국가 기후변화시나리오의 지역기후모형(regional climate model, RCM)에 따른 계산결과를 비교하였는데, 단순평균에 의한 MME 결과가 개별 GCM보다 재현성이 우수하다고 보고하였다. 모델의 오차 및 불확실성을 최소화하는데 MME 기법이 효율적이긴 하지만 사용되는 GCM의 개수가 늘어난다고 오차가 지속적으로 감소하지는 않으며 통계적 오차가 일정한 값으로 수렴한다고 설명하였다.

MME 기법은 방법에 따라 모든 모델에 동일한 가중치를 부여하는 단순평균 MME와 모의성능에 따라 모델에 상이한 가중치를 부여하는 가중평균 MME로 나뉜다. 가중평균은 낮은 성능을 가진 모델에 의한 영향을 최소화하고 기후모델의 불확실성을 줄이는데 보다 효과적인 방법으로 알려져 왔다(Giorgi and Mearns, 2002; Tebaldi and Knutti, 2007; Suh *et al.*, 2012). 많은 논문에서 단순평균, 다중선형회귀식(HMR: Homogeneous Multiple linear Regression, EMOS: Ensemble Model Output Statistics), 가중평균(REA: Reliability Ensemble Average, BMA: Bayesian Model Averaging, skill score) 등 다양한 MME 기법의 성능을 비교하고 평가하는 연구도 다양하게 수행되고 있다(Lee and Kim, 2009; Suh *et al.*, 2012; Kim and Suh, 2013; Oh and Suh, 2016; Sung, 2016).

IV. 공간규모 상세화

이렇게 생산된 GCM 정보는 공간적으로는 지구와 대륙 규모, 시간적으로는 연 평균과 계절 평균의 기후에 있어서 비교적 정확도 높은 전망자료를 생산하는 것으로 평가되고 있다(Im *et al.*, 2011). 하지만 CMIP5에서 사용된 GCM의 해상도는 100km 이상으로 특정 지역의 정보를 얻기에는 공간해상도가 상대적으로 낮다는 단점이 존재하며, 한반도와 같이 해안에 인접한 산악지형에 대한 모의는 해양을 포함한 공간평균의 의미를 가지고 있어서 ·공간적으로 상세화된 국지적인 기후정보를 필요로 하는 농업분야에서 GCM 자료의 직접적인 활용은 명백한 한계가 있다.

GCM이 가지는 낮은 해상도의 단점을 보완하기 위한 방안으로써 특정 지역을 고분해능으로 표현하고 기후시스템의 역학 및 물리과정을 고려할 수 있는 지역기후모형(regional climate model, RCM)을 이용한 역학적 규모 축소 연구가 활발히 이루어지고 있다(Ahn *et al.*,

Table 1. Classification of downscaling methods

Classification		Model/Method
Dynamical downscaling	Regional Climate Models	HadGEM3-RA, RegCM4, SNURCM, GRIMs, WRF, MME (5 models)
	Transfer Function	Regression, Neural networks, Canonical correlation, Kriging
Statistical downscaling	Weather Type	Cluster analysis, Analogue method, Monte-Carlo method
	Weather Generator	LARS-WG, WGEN, WXGEN

2013; Kim *et al.*, 2014b). RCM은 복잡한 지형 효과가 반영되어 높은 해상도의 지역기후정보를 산출하는데 효과적이다. 실제로 연 평균 및 계절 평균 기온값과 변동성을 적절히 반영하여 GCM보다 상세하고 신뢰성 있는 자료의 생산을 가능하게 한다(Ahn *et al.*, 2010). 그러나 RCM을 이용한 역학적 상세화는 방대한 컴퓨터 용량과 계산시간을 필요로 하며 격자 간격 10km 이내로 상세화하기에는 제한이 따른다. 나아가 GCM을 경계장으로 사용하기 때문에 모델 자체에서 기인하는 불확실성을 그대로 지니게 되며 RCM 시스템과의 역학과정 및 물리과정의 차이로 인해 불확실성이 증폭될 우려가 있다(Suh *et al.*, 2012; Kim and Suh, 2013; KMA, 2014).

우리나라는 RCM이 가지는 불확실성을 개선하고 다중 RCM의 결과를 공유하여 적합한 미래 지역기후를 생산할 수 있도록 한반도 지역을 중심으로 한 동아시아 영역의 CORDEX (COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment)에 참여하고 있으며, GCM으로부터 동아시아 영역을 50km, 한반도 영역을 12.5km 해상도로 상세화하여 지역기후정보를 산출하였다(Myoung *et al.*, 2012). 대표적인 RCM에는 HadGEM3-RA, GRIMs, RegCM4, SNURCM, WRF 등이 있으며 모델의 성능평가와 개선을 위한 다양한 연구가 지속되고 있다(Suh *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2014b).

So *et al.*(2012)은 RCM으로부터 산출된 미래전망 자료에서 과거기간의 관측값을 기반으로 재현성을 평가하였고, 실제 사용에 따른 문제점들을 제시하였다. RCM 자료를 사용하기 위해서는 연구목적에 맞는 적절한 편의보정 작업이 반드시 수행해야 되어야 하며 최근에는 역학적 상세화에 편의보정을 포함한 통계적 상세화를 조합한 기술을 제안하는 연구사례도 늘고 있다(Yoon *et al.*, 2012; Guyennon *et al.*, 2013).

또 다른 대표적 상세화 방법 중 하나인 통계적 상세화는 역학적 방법에 비해 계산이 경제적이고, 비교적 간단하며 신속한 자료생산이 가능하다. 관측지점의 장기 관측된 자료로부터 통계적 관계분석을 수행하여 상관성을

정량화하므로, 관측소 단위의 기후자료를 얻기가 수월하다. 그러나 이 방법은 과거 및 현재의 시공간적 변화가 미래에 그대로 유지된다는 가정이 수반되어야 미래 전망자료 산출이 가능하며, 특정 기상 변수에 의해 독립적으로 적용되므로 다른 기후요소 간의 상관성은 고려되지 않는다는 단점을 갖는다.

통계적 상세화는 적용방법에 따라 전지구 규모에서 지역 혹은 국지규모로 축소하는 공간적 상세화(spatial downscaling)와 월 단위 자료를 일별 혹은 시간 단위로 변환하는 시간적 상세화(temporal downscaling)로 분류할 수 있다(Table 1). 공간적 상세화는 기후인자와 기상변수의 통계학적 상호관계를 시계열로 분석하는 전이함수(transfer function), 기후인자와 대기순환양상과의 상관성을 분석하는 일기분류(weather type) 등이 대표적이다(GNU, 2014; Kim, 2015). 작물모형 입력을 위한 기상자료는 대개 일 단위(일 최고기온, 일 최저기온, 일 적산일사량, 일 적산강수량 등)가 요구되는데 만약 기후시나리오에서 월 단위 자료만 제공한다면 시간규모 상세화도 필요하다. 이를 위해 장기간 관측된 기상자료의 통계적 특성치를 이용하여 월 단위 기상자료를 일 단위로 상세화하는 기상발생기(weather generator)가 쓰인다. 기상발생기는 특정 지점에 대해 원하는 만큼의 일 기상시나리오를 무한히 생성할 수 있지만 극한사상이나 자연적 변동성이 큰 기후를 모의하는 데는 한계가 있으며, 모델에 따라 영향평가 결과에 차이가 발생할 수 있는 여지가 있어 사용시 주의가 필요하다(Wilby *et al.*, 2000; Bae *et al.*, 2011). 다행히 기상청에서 제공하는 기후시나리오는 일 단위 기상자료이므로 시간규모 상세화에 대해서는 신경 쓰지 않아도 된다.

V. 편의보정

상세화 과정을 수행함에 따라 기후모델의 공간 해상도는 개선될 수 있어도 모델 자체에 기인한 근본적인 편의(bias)는 제거하기 힘들다. 이것이 바로 글의 도입부에

서 제기했던 과거-미래 기후자료의 연결부위 어긋남에 해당한다. 따라서 기후모델에서 산출된 기후전망 자료를 연구대상 지역에 적용하기 위해 편의보정(bias correction)이 후처리 과정으로 사용되어 왔다(Gudmundsson *et al.*, 2012; Jung and Suh, 2015). 편의보정은 관측된 과거 자료와 동일기간의 모델 예측값의 오차를 통계적 방법에 의해 보정하는 것으로서 관측값을 지역규모나 지점자료로 사용하는 경우에는 통계적 상세화와 동시에 고려되기도 한다(Bae *et al.*, 2011; Cho, 2013; Lee and Kim, 2015). 일반적으로 과거기간의 모의결과를 토대로 미래 기후값의 오차를 경험적으로 추정하여 제거하는 편의보정 과정에서 미래전망 결과는 크게 달라질 수 있으며, 과거기간 예측값의 오차가 클수록 미래 전망 자료의 불확실성은 더욱 커질 수밖에 없다.

기후모델의 편의보정에 쓰이는 가장 간단한 방법은 과거기간 관측값에 대한 동일기간 모델 예측값이 가진 오차를 평균과 표준편차를 이용해 보정하거나, Delta Change 또는 회귀식을 이용하는 것이다. Delta Change에 의한 기온보정은 과거기간 대비 미래기간의 차이를 모델 예측값으로부터 계산하여 이를 과거기간의 관측값에 더해주는 방식이며(Fig. 1(A)), 강수는 과거기간 관측값과 예측값의 비를 미래기간 자료에 곱하여 보정할 수 있다(Myung *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2012; Lee and Kim,

2015).

최근에는 확률분포함수(Probability Distribution Function, PDF), 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function, CDF) 등을 이용하여 관측값과 예측값의 분포를 비교하여 차이를 제거하는 방법이 이용되고 있다. 이 중 분위사상법(分位寫像法, Quantile Mapping)은 관측값과 예측값이 동시에 확보된 과거기간에 대해 모델의 특정 예측값으로부터 누적확률값을 구하고, 이와 동일한 관측자료의 누적확률값에 대응하는 관측값을 찾아 예측값을 변환해주는 방법이다. 과거기간 관측값과 예측값 간의 편이(bias)를 미래 예측값에 각각 반영하여 보정된 미래 예측값을 산출할 수 있으며, 앞의 방법들에 비해 극한기후를 보정하는데 적합한 것으로 알려져 있다(Fig. 1(B), Hashino, 2006; Gudmundsson, 2012; Park *et al.*, 2012).

Jung and Suh(2015)는 모수 분위사상법을 기반으로 모델의 변동경향을 보존하면서도 평균 및 극한 기후의 오차도 보정하는 Hempel *et al.*(2013)의 기법을 RegCM4로 모의한 남한지역의 기온모의 결과에 적용하였고, 이를 Delta Change와 선형회귀를 사용한 모수 분위사상법과 각각 비교하여 보정수준을 평가하였다.

Lee and Kim(2015)은 단순 편차보정기법에서 과거 관측값의 패턴이 미래에 그대로 유지된다는 단점과, 분

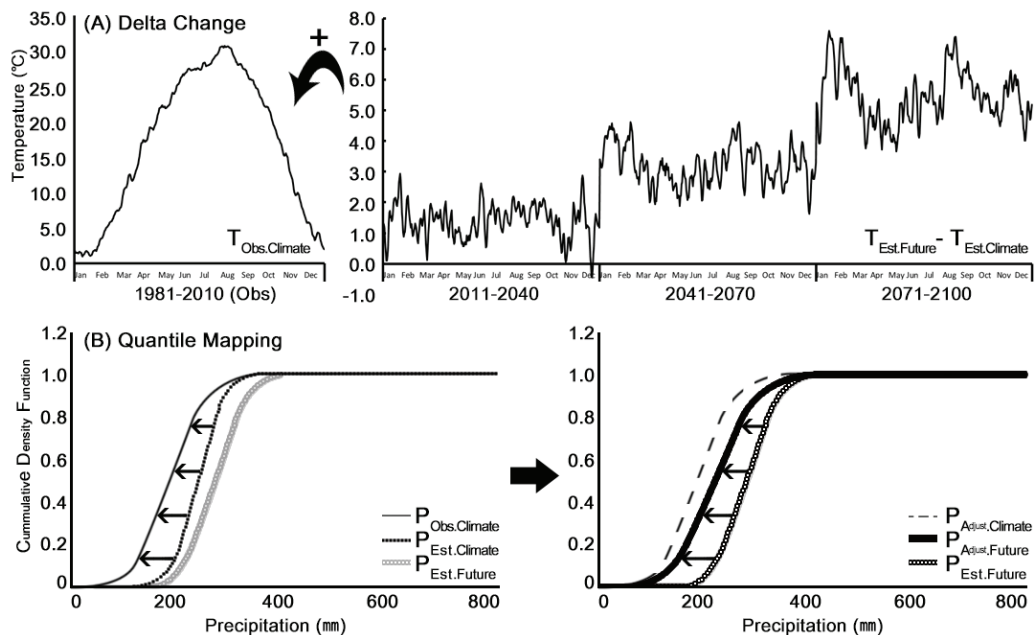


Fig. 1. Schematics of a delta change method and a quantile mapping.

위사상법은 모델의 변동경향을 반영하지 못한다는 단점을 보완하기 위한 Nested Bias Correction 기법 외에 다양한 편의보정 기법들을 소개하고 변수특성에 따라 선택할 수 있는 방안을 제시하였다.

VI. 농업분야 기후시나리오 활용

ME(2014)에 따르면 2012년 이후 농업분야의 기후 변화 시나리오 활용 논문이 총 100편을 넘고 보고서도 7편이나 발행되었다. 지금까지의 연구동향을 살펴보면 단일 배출시나리오나 단일 기후모델을 사용하는 경우, 모델에 내재된 오차를 보정하지 않고 자료를 그대로 사용하거나 기상변수들 간의 상관성 혹은 시공간적 개념을 충분히 고려하지 않고 활용하는 경우 등, 미래전망의 불확실성을 증폭시킬 수 있는 여지를 내포한 연구사례들을 쉽게 볼 수 있다. 최종 사용자의 연구목적에 따라 불확실성을 최소화하여 미래를 전망하는 것이 가장 이상적이겠지만 체계적으로 설계된 명료한 방법론이 없기 때문에 몇 가지 사례를 들어 최상의 결과를 도출할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

우선 공간해상도에 큰 제약 없이 전지구 규모에서 장기간의 기후 모의 및 전망자료를 산출하고자 한다면 다양한 GCM 자료를 활용하여 앙상블과 함께 불확실성 범위를 나타내는 방법이 적당하다. CMIP5에 참여하고 있는 GCM 자료는 Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi-cmip.lnl.gov/index.html>)에서 제공하고 있으며 GCM에 따라 제공하는 기후요소나 시간해상도, 격자크기가 다양하기 때문에 연구 목적에 알맞은 기후 모델을 선택하는 것이 중요하다. 자료 활용을 위해서는 앙상블, 다양한 GCM 격자 해상도의 통일, 적절한 편의 보정 등 시나리오 자료처리가 추가적으로 필요하다.

기상청 기후정보포털(<http://climate.go.kr/>)에서 제공하는 ‘국가표준’ 미래기후 시나리오는 사용자가 원하는 자료형태에 따라 전지구 규모의 GCM 자료, 역학적 으로 상세화된 지역기후규모의 RCM 자료(한반도 전역), 통계적 상세화 기법에 의한 남한상세 기후자료로 이루어진다. 그러나 기상청 미래기후전망은 수많은 GCM 중 HadGEM2-AO 단일 모델 결과만을 제공한다는 것을 염두에 두어야 한다.

12.5km 해상도의 한반도 기후변화 시나리오는 전지구 기후모델에서 표현할 수 없는 복잡한 지형효과가 잘 반영되어 있으며, 200년 제어적분 기준으로 1950년부터 2100년까지 연속된 기후전망 자료를 제공하기 때문

에 국지 및 지역규모에서 과거부터 미래까지 장기간의 미래전망을 살필 경우 유용하다. 다만 HadGEM2-AO의 모의결과를 경제조건으로 처방하여 상세화된 시나리오를 생산하기 때문에 GCM에 내재된 불확실성을 그대로 지니게 되며, RCM 역시 입력자료와 모델의 물리과정에 따라 불확실성을 내포하게 되므로 과거 기간의 관측값을 이용해 편의보정을 따로 수행해야 한다. RCM이 가지는 불확실성을 감소시키는 방안으로 국립기상과학원에서 생산한 HadGEM3-RA 외에 공주대, 서울대, 연세대의 각기 다른 지역기후모델(RegCM4, SNURCM, GRIMs, WRF)의 전망 결과와 이들의 앙상블을 기후정보포털에서 함께 제공하고 있다.

남한상세 전망자료는 2000-2010년의 관측자료를 바탕으로 통계적 상세화기법 및 편의보정에 의해 1km 간격 격자점의 기후값을 제공한다. 구체적으로 RCM 자료에서 2000-2010년 기간을 기준으로 미래 2011-2100년의 각 격자점별 계절변동(seasonal cycle)을 제거한 편차(anomaly)를 계산하고, 관측값 기반의 기후값에 계산된 미래편차를 반영함으로써 RCM이 가지고 있는 편이가 제거된 고해상도 시나리오가 산출된다. 앙상블을 포함한 6종의 RCM이 남한전역에 대해 각각 고해상도로 상세화되었으며 자료는 기후정보포털에서 받을 수 있다.

남한상세 전망자료 사용자는 별도의 상세화나 편의 보정 등 후처리 작업 없이 바로 사용이 가능하기 때문에 농업 및 수자원 분야에서 많이 활용되고 있다. 하지만 이 자료 역시 수많은 기후모델 중 하나의 GCM으로 전망한 결과이다. 또한 동일한 GCM으로부터 산출된 결과일지라도 상세화, 편의보정 등 후처리 작업으로 인해 전지구, 한반도, 남한상세 전망자료의 기후요소 간 상관성이 달라졌음을 인지해야 한다. 예를 들어 같은 기간의 자료라고 해서 기온과 강수는 남한상세 전망자료를 사용하고, 여기서 제공하지 않는 습도나 풍속 등의 기후요소들을 전지구 또는 한반도 전망자료로부터 활용하면 잘못된 방법인 것이다. 남한상세 전망자료는 산악지형에서의 낮은 기온과 지형효과에 따른 강수량 효과를 잘 반영하고 있으나 관측소가 분포하지 않는 지역에서는 추정오차가 크게 나타날 수 있어 이를 보완할 필요가 있다(Kim *et al.*, 2013).

기상청으로부터 받은 국가표준 기후시나리오를 농업부문에 맞게 가공하는 농촌진흥청에서는 농경지 규모의 소기후(30-270m 해상도)를 보여주는 농업용 미래 상세 전자기후도를 산출하여 배포하고 있다(<http://www.agdcm.kr/index.do>). 이것은 기상청의 한반도 기후변화 시나리오

(12.5km)를 기반으로 기온은 냉기효과-온난대 모형 및 과열지수 보정에 의해 집수역의 지형 및 지표특성이 반영된 상세분포를 표현하며, 강수는 고해상도 DEM에 근거한 지표면 경사방향(지향면)에 따라 고도-강수량 회귀계수를 달리하여 지형효과를 반영한 상세분포를 추정하는 기술을 사용한다(Yun, 2010). 농업용 미래 상세 전자기후도는 현재기후에 대한 미래 변화량이 불변이라는 가정하에 관측값 기반의 현재기후(기준)를 1981-2010년 기간으로 두고, 2011년부터 2100년까지 남한 전역에 대하여 월 단위 자료를 제공하고 있다. 이 방법은 신뢰성이 검증된 소기후 추정기술을 기반으로 지형에 따른 국지기후 특성을 잘 반영하는 것으로 평가되고 있다. 하지만 고해상도의 격자형 분포도이기 때문에 자료용량이 크고 데이터를 중첩분석 하거나 연산할 때 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 전국규모보다는 소규모 연구지역(예, 집수역) 내에서 지리적 이동경향을 상세하게 살피는 적지분석이나 생산성 영향평가에 사용하는 것이 좋다. 또한 농업용 미래 상세 전자기후도는 기상청의 한반도 기후전망자료를 기반으로 하기 때문에 단일 GCM 전망에 따른 불확실성을 포함하며, 일 단위 분석을 위해서는 시간규모 상세화 작업이 추가로 필요하다.

적 요

농업부문의 기후변화 적응은 농작물의 생육과 수량에 미치는 기후변화 영향의 정량평가로부터 시작된다. 이를 위한 조건으로서 작물모형 외에 과거-미래 간 이음새 없는 기후자료가 필요하지만, 기후시나리오에서 산출된 과거 기간의 자료는 실측 기후와 차이가 난다. 이것을 보정 없이 작물모형 구동에 사용한다면 농작물의 생육과 수량예측이 현실과 동떨어진 것이 되어 모의결과를 바탕으로 마련된 적응대책은 실효성이 낮아진다. 또한 동일한 기후시나리오를 사용자에 따라 서로 다른 시공간적 상세화 작업이나 기후모델의 편의보정을 위한 후처리 작업을 수행한다면 작물모형 구동결과는 달라질 수 있다. 농업부문에 불확실성을 최소화한 영향평가 결과를 도출하기 위해서는 먼저 최종 사용자의 목적에 적합한 공간적 및 시간적 규모를 설정하는 일이다. 나아가 과거기후의 재현성을 포함한 시나리오기후의 불확실성을 정확히 파악하여 영향평가결과의 불확실성을 정량적으로 제시할 수 있어야 한다. 이 논문에서는 기후시나리오의 농업분야 활용과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 요인별로 추적하고, 이를 줄이기 위한 자료처리기

법을 소개하며, 연구목적에 따른 최적 시나리오 자료를 추천함으로써 기후변화 적응을 위한 기초정보를 제공하고자 하였다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ010007)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Ahn, J. B., J. N. Hur, and K. M. Shim, 2010: A simulation of agro-climate index over the Korean Peninsula using dynamical downscaling with a numerical weather prediction model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **12**(1), 1-10.
- Ahn, J. B., J. Y. Hong, and M. S. Seo, 2013: Present-day climate of the Korean Peninsula centered Northern East Asia based on CMIP5 historical scenario using fine-resolution WRF. *Atmosphere*, **23**(4), 527-538.
- Bae, D. H., I. W. Jung, B. J. Lee, and M. H. Lee, 2011: Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models. *Journal of Korea Water Resources Association* **44**(5), 389-406.
- Cho, J., 2013: APCC Research Report 2013-05: 불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가. Apec Climate Center, 55-104.
- Chung, U., J. Cho, and E. J. Lee, 2015: Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **17**(2), 108-125.
- Deser, C., A. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng, 2012: Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate Dynamics*, **38**(3-4), 527-546.
- Fischer, E. M., U. Beyerle, and R. Knutti, 2013: Robust spatially aggregated projections of climate extremes. *Nature Climate Change*, **3**(12), 1033-1038.
- Giorgi, F. and L. O. Mearns, 2002: Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "reliability ensemble averaging" (REA) method. *Journal of Climate*, **15**(10), 1141-1158.
- GNU, 2014: *Development of Mitigation Strategies for Agricultural Infrastructure Against Climatic Hazard*. 농촌진흥청 최종보고서(과제번호: PJ008335), GyeongSang

- National University.
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**(9), 3383-3390.
- Guyennon, N., E. Romano, I. Portoghese, F. Salerno, S. Calmanti, A. B. Petrangeli, G. Tartari and D. Copetti, 2013: Benefits from using combined dynamical-statistical downscaling approaches—lessons from a case study in the Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 705-720.
- Hashino, T., A. A. Bradley, and S. S. Schwartz, 2006: Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **3**(2), 561-594.
- Hempel, S., K. Frieler, L. Warszawski, J. Schewe, and F. Piontek, 2013: A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, **4**(2), 219-236.
- Im, E. S., I. W. Jung, and D. H. Bae, 2011: The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection. *International Journal of Climatology*, **31**(1), 72-86.
- IPCC, 2013: *The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 1535pp.
- IPCC, 2014: Climate change 2014: synthesis report contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland, 151pp.
- Jung, H. C., and M. S. Suh, 2015: Correction of mean and extreme temperature simulation over south Korea using a trend-preserving bias correction method. *Atmosphere*, **25**(2), 205-219.
- Kim, C., and M. S. Suh, 2013: Prospects of using Bayesian model averaging for the calibration of one-month forecasts of surface air temperature over South Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **49**(3), 301-311.
- Kim, G. Y., J. E. Kim, C. J. Kim, C. S. Jin, D. H. Cha, M. S. Suh, and S. C. Park, 2014b: Climate change projections over CORDEX East Asia domain using multi-RCMs. *KU Climate Research*, **9**(4), 257-268.
- Kim, J. H., and J. I. Yun, 2015: Projections of future summer weather in Seoul and their impacts on urban agriculture. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **17**(2), 182-189.
- Kim, J. H., H. R. Cho, and Y. S. Cho, 2014a: Projection of climate change with uncertainties: 1. GCM and RCP uncertainties. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **14**(5), 317-327.
- Kim, M. K., D. H. Lee, and J. Kim, 2013: Production and validation of daily grid data with 1 km resolution in South Korea. *Weather Research*, **8**(1), 13-25.
- Kim, M., 2015: *Development of weather generator for statistical downscaling*. APCC, Busan, South Korea.
- KMA, 2014: *Korean Climate Change Assessment Report 2014: The Physical Science Basis*. Korea Meteorological Administration.
- Lee, J. K., and Y. O. Kim, 2009: Reducing uncertainties in climate change assessment. *Journal of Hydro Environment Research*, 345-351.
- Lee, J. K., and Y. O. Kim, 2015: Verification of bias corrected simulations of climate models using entropy. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **15**(5), 25-35.
- ME, 2014: *Korean Climate Change Assessment Report 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Ministry of Environment.
- Myoung, J. S., S. G. Oh, and M. S. Suh, 2012: Improvement of simulated air temperature of regional climate model using linear regression method. *Journal of Climate Research*, 255-270.
- NIMS, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후 변화 시나리오 보고서 2011. National Institute of Meteorological Research, 1-112.
- NIMS, 2012: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 전지구 기후변화 보고서 2012. National Institute of Meteorological Research, 1-97.
- Oh, S. G., and M. S. Suh, 2016: Comparison of projection skills of deterministic ensemble methods using pseudo-simulation data generated from multivariate Gaussian distribution. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-20.
- Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2012: Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; For 20-weather stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **54**(6), 133-142.
- Shin, Y., and H. Jung, 2015: Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios. *Journal of Environmental Impact Assessment*, **24**(3), 205-216.
- So, B. J., M. J. Kim, and H. H. Kwon, 2012: Forecast and assessment of the next generation climate change scenarios of Korea Meteorological Administration.

- Magazine of Korea Water Resources Association*, **45**(8), 56-70.
- Suh, M. S., S. G. Oh, D. K. Lee, D. H. Cha, S. J. Choi, C. S. Jin, and S. Y. Hong, 2012: Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *Journal of Climate*, **25**(20), 7067-7082.
- Sung M. K., 2016: Intercomparison of prediction skills of ensemble methods using monthly mean temperature simulated by CMIP5 Models, MS thesis, Kongju University. 1-39.
- Tebaldi, C., and R. Knutti, 2007: The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365**(1857), 2053-2075.
- Wilby, R. L., and S. Dessai, 2010: Robust adaptation to climate change. *Weather*, **65**(7), 180-185.
- Wilby, R. L., L. E. Hay, W. J. Gutowski, R. W. Arritt, E. S. Takle, Z. Pan, G. H. Leavesley, and M. P. Clark, 2000: Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. *Geophysical Research Letters*, **27**(8), 1199-1202.
- Yoon, J. H., L. Ruby Leung, and Jr. Correia, 2012: Comparison of dynamically and statistically downscaled seasonal climate forecasts for the cold season over the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117**(D21).
- Yun, J. I., 2010: Agroclimatic maps augmented by a GIS technology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 63-73. (In Korean with English abstract)