

# 기후변화 영향평가 방법론과 과정의 불확실성



황 세 운  
Water Institute, University of Florida  
aceace111@ufl.edu



강 문 성  
서울대학교 조경/지역시스템공학부 부교수  
mskang@snu.ac.kr

## 1. 서언

지구 온난화와 이에 따른 기후 변화는 한동안 기상과 학 및 환경공학 분야의 화두로 거론되어 왔으며, 21세기에 들어서는 기후변화 저감 및 적응전략 수립을 위한 실질적인 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Ludwig et al., 2009; IPCC, 2007). 국내에서도 이미 기후변화 완화와 대응을 위한 법적 근거를 마련하고 녹색 성장·혁명을 통해 “저탄소 그린 한반도” 구현을 위한 노력을 꺾하고 있다 (기상청, 2012). 이는 장기적 미래 지구·지역 환경에 대한 관심과 이에 대한 사회의 능동적인 반응이 정계와 학계의 움직임으로 전달된 것이다. 기후변화에 대한 수 많은 연구가 이루어지면서 이상기후 현상의 과학적 이해와 이에 대한 농업 및 수자원에 대한 영향 평가는 이미 생소한 연구주제가 아니다. 전지구 및 특정 지역을 대상으로 하는 대기 모형의 개선을 비롯하여 미래 기후 정보에 대한 분석과 효과적 적용을 위한 방법론은 실로

다양하며 현재에도 지속적으로 개발되고 있다.

하지만 많은 노력에도 불구하고, 이상기후 현상의 과학적 원인 규명과 그 잠재적 영향 평가 과정에 내재하는 불확실성은 여전히 크며 이는 연구 결과의 실효성에 대한 의문으로 이어진다. 학계 내에서도 첨단 연구 결과들에 대한 기상학자와 수공학자 간의 해석이 상충되는 등 전반적 사회기반시설의 개선을 요구하는 방재 사업을 뒷받침하기에는 여전히 역부족인듯 하다 (Galloway, 2011). 이를 극복하기 위해서는 우선적으로 평가 과정의 불확실성을 정량화하고 연구의 신뢰도를 높이는 것이 필요할 것이다. 더불어 연구기관과 의사 결정권자 및 최종 소비자와의 소통을 통해 현재 생산되고 있는 연구 정보의 이해를 돕고 신뢰를 쌓는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다 (Lorenzoni and Pidgeon, 2006). 이에 본 고에서는 기후변화에 대한 영향평가의 일반적 방법론과 그 과정에 내재해 있는 불확실성에 대해 짚어 보고 이를 최소화하기 위한 노력들을 소개하고자 한다.

## 2. 기후변화 영향 평가 방법론

기후변화 영향평가를 위한 일반적 과정은 크게 1) 시나리오 및 기후모델 선정, 2) 기상 정보 후처리 (편이 보정, 시공간 해상도 조정), 3) 응용분야에 대한 영향 평가로 구성된다. 그림 1은 그 대표적인 방법론을 공간 해상도 상세화 방법을 중심으로 구분하여 각 과정별 불확실성 요소와 함께 도식한 것이다.

일반적인 기후변화 관련 연구는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 에서 발표하는 미래 온실 가스 배출 시나리오를 전제로한 전

지구 기후 모델 (GCM, Global Circulation Model/ Global Climate Model) 활용을 기초로 한다. GCM은 전지구에 대한 대기 현상 모의에 사용되는 모델로서 시나리오 적용을 통해 기후변화에 따른 미래 기상 정보를 제공하는 기술이다. 양적·질적으로 관측 기록을 갱신하는 최근의 기상 이변 현상은 과거 관측 자료의 통계적 추의 분석을 통한 미래 예측에 한계를 증명하며 인류사 회적 요소를 고려하는 역학적 물리 모델의 적용 필요성에 무게를 실어주고 있다 (Milly et al., 2008). 최근까지 미국내 기후변화 연구에 활용되는 GCM의 대부분은 ‘기후변화에 대한 정부간 협의체’ 4차 평가 보고서

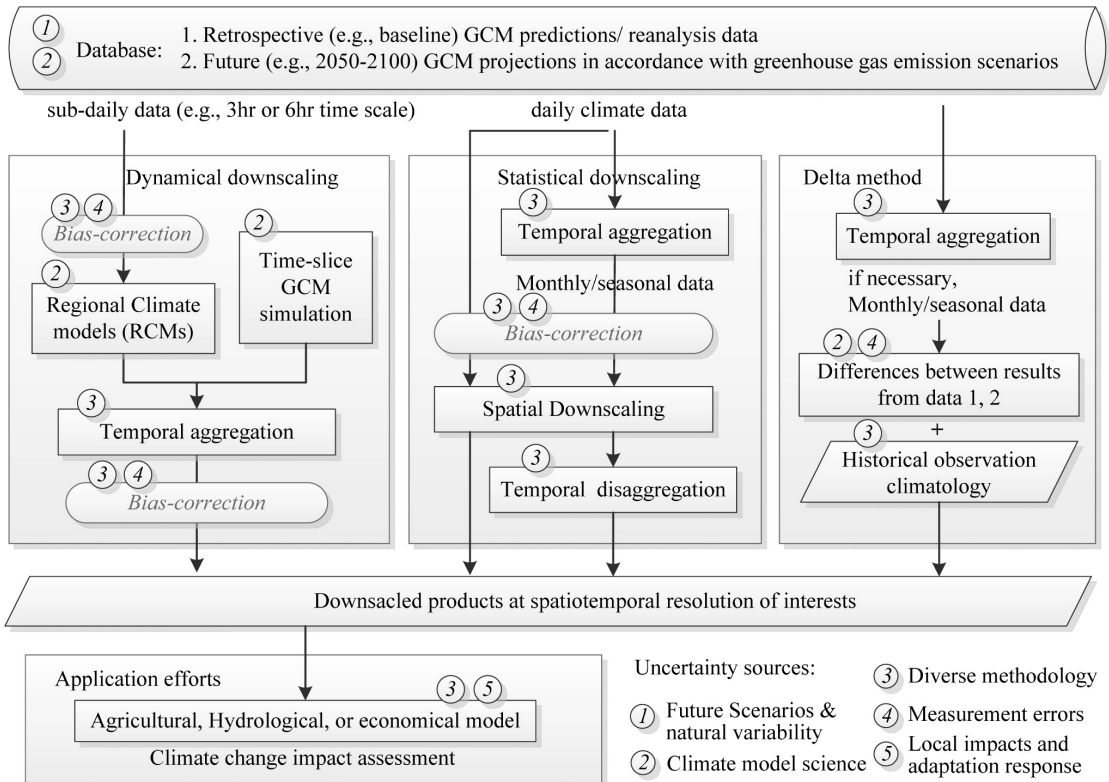


그림 1. 기후 변화에 따른 지역 영향 평가를 위한 연구 방법론과 과정별 불확실성 요소

(IPCC AR4)에 사용된 CMIP3 (Climate Model Inter-comparison Project, phase 3)로부터 제공되며 금년 발표 예정인 5차 평가 보고서 (IPCC AR5)에서 소개될 차세대 CMIP5 GCM 자료도 현재 부분적으로 활용 가능하다.

한편 재해석 자료 (reanalysis data)는 다양한 기상 변수에 대해 기후 모델과 지상관측 자료를 이용한 자료 동화 기법 (data assimilation)을 통해 격자단위 전지구 관측자료로서 구축된 자료이다. 이는 실제 관측자료와의 오차를 최소화하고 기후 모델링 산출물과 유사한 형태를 가지므로 '최적 기후모델 결과'로 가정하여 GCM의 불확실성을 배제한 상태에서 지역 기후 모델 (RCM, Regional Climate Model) 등의 성능을 평가하는데 유용하게 사용된다 (Hwang et al., 2011).

지역단위 수자원 관리와 농업 재해 (예: drought, flood, structure failure)에 대한 기후변화 영향 평가를 위해서는 소유역 (<math>500\text{km}^2</math>)에 대한 기상 정보는 물론 나아가 특정 지점에 대한 기상정보를 필요로 하는 경우가 많다. GCM 자료의 큰 해상도 (>math>150 \times 150\text{km}</math>)는 이와 같은 기후변화의 지역적 영향 평가에 불충분하므로 공간 해상도 상세화 기법이 필수적으로 고려되며, 이는 크게 지역 기후 모델 (RCM)을 이용한 역학적 방법 (dynamical downscaling)과 공간 해상도에 따른 기후 변수의 상관성을 이용한 통계적 방법 (statistical downscaling)으로 나뉘어 진다. 역학적 방법의 경우, 해상도 설정이 자유로우나 10km 이내의 고해상도로 상세화할 경우 모델 성능이 감소하는 경향이 있으며, 통계적 상세화의 경우 해상도의 제한은 없으나 고해상도 관측 자료를 필요로 한다는 특징이 있다.

델타 방법은 비교적 구현이 간단한 이점으로 기후 변

화 영향 평가를 위해 널리 적용되고 있으며 흔히 통계적 상세화 기법의 하나로 구분되기도 하지만 방법론적으로 다른 통계적 기법과 차이를 두고 있어 본 고에서는 따로 구분하기로 한다. 일반적으로 상세화 기법은 저해상도 자료로부터 고해상도 정보를 추정하는 방법을 의미하는 반면, 이와 구분하여 도식한 델타 방법 (Delta method)은 GCM의 현시점과 미래시점에 대한 모의 결과의 통계적 차이 (Change factor)를 잠재 변화량 예측치로서 관측 자료에 적용하여 시나리오를 재생산하는 방법이다. 델타 방법은 고해상도 자료를 생산하기 위한 기법이라기 보다, 기후 모델링 결과로부터 추정된 미래의 기후변화량을 이용하여 관측 자료를 수정함으로써 특정 지역 및 지점에 대한 미래 시나리오를 생산하는 방법이다. 이 방법은 현재와 미래에 대한 기후 모의 결과의 오차와 시나리오에 대한 모델의 불확실성이 불변한다는 가정을 기본적으로 가지고 있다는 점은 적용시 유념해야 할 것이다. 이 방법은 현재까지 다른 상세화 기법들과의 비교 연구를 위한 기본적인 방법으로 주로 활용되고 있으며, 구현 과정에서 기후 변화량 (Change factor)을 산정하는 방법에 대한 연구 등, 불확실성을 개선하기 위한 노력이 이루어지고 있다.

현재까지의 기술로 개발된 기후 모델 (GCM과 RCM)의 정확도는 모의 결과를 응용 연구에 직접적으로 활용하기에 부족하다는 견해가 일반적이다. 이에 기후모델 결과의 지역 단위 적용을 위해서는 편이 보정 (bias-correction)이 기후 모델의 후처리 과정으로 필수적이다 (Stefan et al., 2011). 편이 보정 기법으로는 현 시점에 대한 모의 결과의 오차를 통계적 방법으로 보정하고 나아가 미래 예측치의 오차를 경험적으로 추정하여 제거하는 방법이 주로 쓰이며, 이는 현 시점에 대한 모델

의 모의 오차가 클수록 미래 시나리오에 대한 적용에 있어 큰 불확실성을 보이게 된다. 델타 방법을 제외한 공간 해상도 상세화 기법은 편이 보정을 포함하고 있으며 (그림 1) 그 방법으로는 모의된 기상 변수에 대한 평균과 분산 등의 기본 통계치에 대한 간단한 보정에서부터 변수의 모의치와 관측치의 분포를 추정하거나 (transform function of distribution) 경험적 누적분포함수 (CDF mapping)를 비교함으로써 그 직접적 차이를 제거하는 방법에 이르기까지 다양하다 (그림 2). CDF 비교법을 이용하는 방법은 다시, CDF로부터 오차를 추출하는 방법과 CDF를 생성하는 방법에 따라 세분

될 수 있다.

마지막으로 분야별로 유의한 최종 결과를 생산하기 위한 응용 모델 (예: 농업, 경제, 수문·수질 모델) 과 적용 과정에서의 불확실성 요소도 다양할 것이나, 이는 기후변화에 무관하게 모델 자체 개선 및 평가를 통해 이루어져 오고 있기 때문에 본 고에서는 다루지 않는다.

### 3. 과정별 불확실성에 대한 고찰

기후 변화 연구에서 사용되는 미래 시점에 대한 시나리오 적용, 역학적 기후모델, 그리고 각 분야에 대한 적

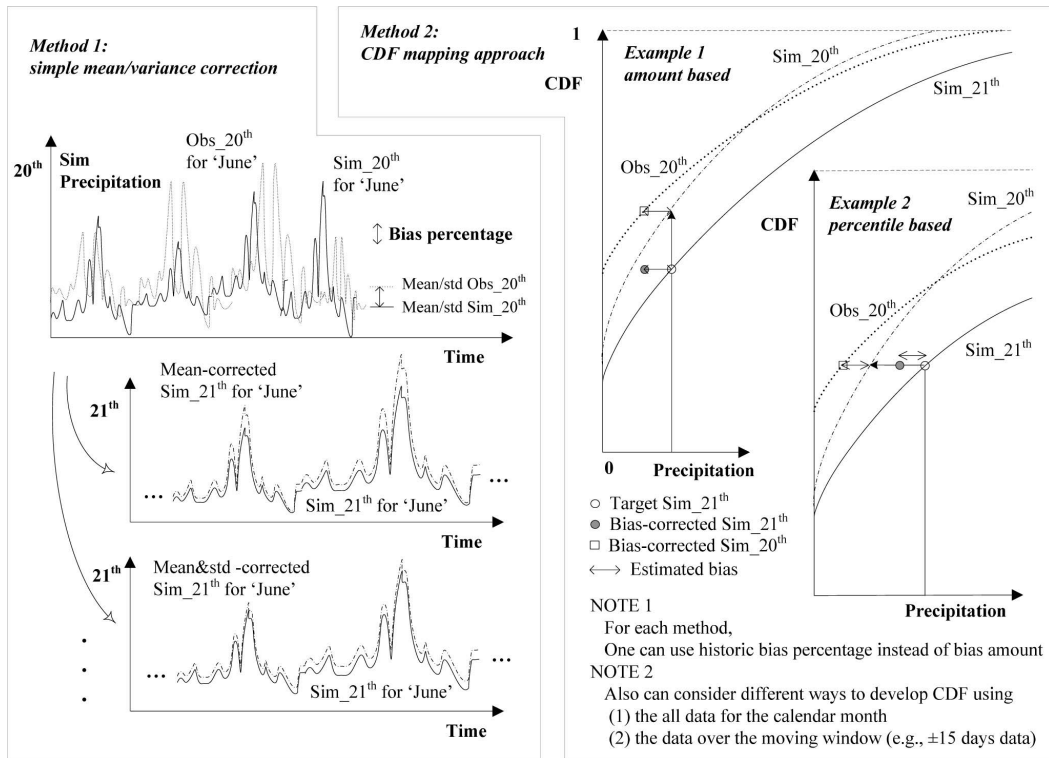


그림 2. 일반적 편이 보정 방법: (method 1) 모의된 기상 변수에 대한 평균과 분산에 대한 오차 제거; (method 2) 모의치와 관측치의 누적분포함수 (CDF mapping)를 이용한 편이 보정.

용을 위한 후처리 작업들 (예: 편이 보정, 시공간 해상도 상세화), 응용 모델의 적용은 순차적으로 이루어 지기때문에 각각에 내재된 불확실성 요소들은 과정을 거치면서 그 크기가 급수적으로 증폭된다 (Wilby and Dessai, 2010).

### 3.1 온실가스 배출 시나리오

최근 까지 사용된 IPCC SRES 시나리오는 인구 및 사회·경제 정책의 변화 등 인류의 전반적인 미래 활동을 가정하여 모의된 온실가스 배출 시나리오이며 총 4개의 시나리오 (A1, A2, B1, B2) 중 A1 시나리오는 다시 대체 에너지 기술에 따라 세가지로 세분되어 제공된다. IPCC 5차 평가 보고서 (IPCC AR5)에 사용되는 새로운 시나리오인 RSPs (Representative Concentration Pathways) 는 기후 정책과 같은 기후 변화에 대한 사회적 반응을 추가로 고려한 차세대 시나리오이다. 이들 시나리오는 현 시점의 사회적 변화를 고려하지 않고 전적으로 가상의 조건을 토대로 모의되었으므로 확률론적 접근은 합리적이지 않으며 각각을 독립적으로 발생 가능한 시나리오로 고려해야한다 (IPCC, 2000). 주어진 시나리오들은 기후 모델의 초기 경계 조건 및 입력 자료로 사용되어 장기적인 대기순환을 모의하게 된다. 기후 변화를 고려한 모든 기상 시나리오 개발은 결국 온실가스 배출 시나리오에 기인하는 불확실성을 내재하고 있는 것이다 (Stainforth et al., 2005).

### 3.2 전지구 및 지역 기후 모델 (GCM 과 RCM)

다양한 응용 분야에 대한 GCM 결과의 활용시 가장 큰 걸림돌은 모델의 불확실성에 기인하는 1) 큰 오차와

2) 불충분한 공간 해상도이다. 특히 기온과 함께, 농업 재해와 미래 수자원 관리에 주요 기상인자로 고려되는 강수량에 대해 어느정도 정확도와 해상도를 가지는 정보를 생산하는 것은 그 중 난제로 손 꼽힌다. 특히 한반도와 같이 몬순 기후에 해당하는 해안 인접 산악 지형에 대한 기상 모의는 그 중에서도 큰 불확실성을 포함한다. 해상도 상세화를 위한 RCM의 적용은 고해상도 상세 지형 및 토지 피복과 같은 정보를 활용하므로 산악지역에 대한 기상 정보의 공간 분포를 합리적으로 산출하는데 도움이 되기도 한다. 하지만, 이론적으로 GCM 모의 결과가 RCM의 초기·경계 조건으로 활용되므로 해상도 상세화 이전 과정인 시나리오 적용과 GCM의 불확실성 및 모의 오차는 하위 과정으로 전이된다. 또한 RCM은 물리적 이론과 모수화 (parameterization) 기법이 다양하게 적용되기 때문에 동일한 GCM 산출물을 경계 조건으로 사용할 경우에도 그 결과가 상이하다. 그림 3은 GCM과 RCM의 다양한 조합을 통해 이러한 RCM의 불확실성을 고려하고자한 미국의 지역 기후변화 모델링 프로젝트 (NARCCAP, North American Regional

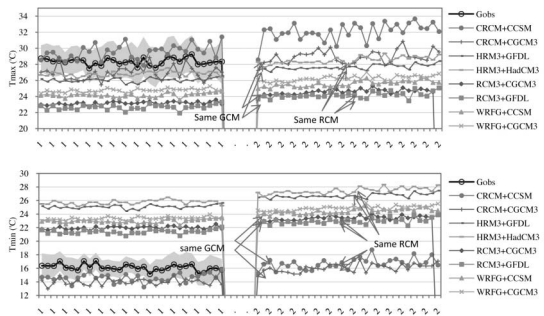


그림 3. 일 최대·최저 기온에 대한 GCM과 RCM의 연계 모델링 결과 다양성의 예 (NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program) 자료 비교).

Climate Change Assessment Program)의 최근 과거 기간 (1971-2000)과 미래 기간 (2041-2070)에 대한 결과를 비교하고 있다. 그림에서 나타난 8개 모델 조합에 대한 결과의 다양성과 그 오차는 기후 모델 자체의 불확실성과 역학적 공간 상세화 기법의 불확실성을 동시에 보여준다.

한편으로 기후변화 평가에 있어 현시점과 미래 시점에 대한 모의 결과의 변화량만을 고려할 경우 (예: 델타 방법) 이 불확실성은 상쇄되어 고려되지 않게 된다. 그림 4은 그림 3의 NARCCAP 기후변화 결과로서 현재와 미래의 일 최대·최저 기온 모의치의 평균 변화량을 산출하여 비교하고 있다. 기후 모델의 정확도와 성능을 떠나 현재와 미래에 대해 모의된 평균기온의 변화량은 1.5°C~2.5°C로 대동소이하다. 이 정보를 여과 없이 기후변화 시나리오 형성에 사용할 경우 (델타 방법의 경우), 현재의 기후시스템 모의로부터 평가되어야 할 모델의 정확도와 불확실성을 무시하게 된다는 것을 간과해서는 안될 것이다.

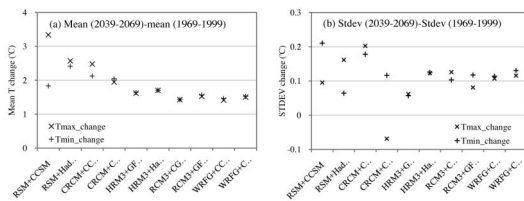


그림 4. 현재(1969-1999)와 미래기간(2039-2069)에 대한 NARCCAP 일 최대·최저 기온 모의 결과의 (a) 평균과 (b) 표준편차의 변화량 비교.

더불어 기후 모델의 경우, 일반적인 응용 모델의 활용 시 필수 과정으로 고려되는 모델의 검/보정 또는 민감도 및 불확실성 평가가 현실적으로 불가능한 것이 사실이다. 이는 전지구 대기에 대한 3차원 격자단위 계산을 기

본으로 하는 기후 모델의 방대한 계산량은 현재 컴퓨터 기술로 모델 평가를 수행하기에 한계가 있기 때문이다. 그 대안으로 다양한 물리적 해석 방법과 모수화, 또는 모델링의 초기/경계 조건 (initial/boundary condition) 을 조정·적용함으로써 동일한 기후 모델과 시나리오에 대한 앙상블 자료를 공급하여 불확실성을 고려할 수 있다. 이 밖에도 실험적 모델링을 통해 토지 피복과 같은 기후변화와 병렬적 관계를 가지는 인자에 대한 모델 불확실성을 정량화하는 연구도 의미 있는 과제일 것이다 (예: Hernandez et al., 2012).

### 3.3 통계적 해상도 상세화 기법

통계적 상세화 기법은 현 시점에 대해 추정된 통계적 요소가 미래 시점에도 적용된다는 가정 (stationarity assumption)이 필수적이다. 또한 사용가능한 다양한 통계 기법은 공간 상세화의 목적에 따라 적절하게 선정되어야 하며 그에 따른 추가적인 가정과 그 결과의 정확도 및 다양성도 상이하다 (Wilby and Wigley, 1997). 비교적 간단한 통계적 상세화 기법으로, 편이 보정과 통계적 내삽 기법을 연계한, BCSD (Bias-Correction and Spatial Disaggregation) 방법, 내삽된 고해상도 정보를 동해상도 관측치를 이용하여 추가 편이 보정 방법 (SDBC: Spatial Downscaling and Bias-Correction), 그리고 정규 분포 변환을 이용하여 추계학적으로 공간 분포를 생산하여 편이 보정된 GCM 일강우량 패턴에 맞게 선정하는 방법 (Stochastic Analog method using normal score transformation) 등이 있으며 이들은 기상 인자의 시공간 다양성 (Spatiotemporal Variability)에 대한 성능에서 확연한 차이를 보인다 (Hwang, 2011). 이 밖에도 각종 기상 발

생기 (Weather Generator) 를 이용한 방법들이 널리 사용되고 있으나 이는 특정 지점 및 지역에 대한 시나리오를 무한 생성할 수 있다는 장점과 함께 기상 현상의 공간 상관성을 고려할 수 없다는 한계를 가지고 있어 공간 분포 기상자료를 필요로 하는 중규모 이상 유역에 대한 수문 해석에 있어 그 사용을 제한적으로 고려하여야 한다. 더불어 대부분의 통계적 해상도 상세화 기법은 특정 기상 변수에 대해 독립적으로 적용되기 때문에 기상 변수간 상호 상관성 (예: 강수량, 기온, 일사량간의 상관관계) 은 고려되지 않는 경우가 많으며 이는 다양한 기상 변수를 입력자료로 요구하는 응용 모델에 있어 또 다른 불확실성의 요소가 될 수 있다.

### 3.4 편이 보정

기존까지 이에 대한 불확실성은 앞서 소개한 기후모델 불확실성에 내재하는 것으로 고려해 왔지만, 그 방법론과 미래 시나리오에 대한 잠재적 오차에 대한 해석이 다양해지면서 편이 보정 과정 자체의 불확실성도 중요한 요소로 부각되고 있다 (Choi et al. 2009; Stefan et al., 2011).

이론적으로 보정된 모의 결과의 통계량은 방법에 따라 약간의 정확도 차이를 보일수 있으나 대체로 목적 함수로 사용되는 관측자료 (baseline observation) 의 통계적 특성을 잘 따르기 마련이다. 하지만 미래 시나리오에 경험적으로 만들어진 보정 방법들이 적용될 경우 모델의 성능에 따라 그 결과가 크게 다를 수 있다. 그림 5는 앞서 소개한 NARCCAP 의 CCSM 결과 중 하나를 예로 그림 2에서 소개한 편이 보정 방법들을 적용하여 현시점과 미래 시점에 대한 보정 결과를 비교하고 있다. 사용된 편이 보정 방법은 3개의 다른 CDF 생성방법과 4개의 오차 수정 방법을 조합한 12가지 방법으로서 방

법론은 유사하나, 오차에 대한 해석면에서 차이를 가지고 있다. 그림에서 범위로 표시된 미래 시나리오의 다양성은 편이 보정 방법의 선택에 따른 큰 불확실성을 잘 보여준다.

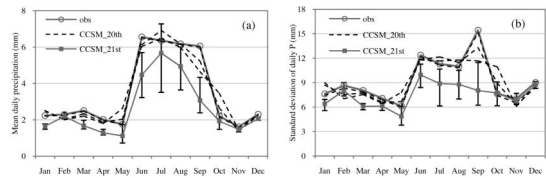


그림 5. (a) 월별 평균일강우량과 (b) 월별 일강우량 표준편차에 대한 편이 보정된 CCSM 모델 결과비교.

경험적 편이 보정 방법은 기후 변화에 대해 현재와 특정 미래 기간에 대한 모델 오차의 특성이 양적 질적으로 유사하다는 가정에서 출발한다. 다변하는 미래 지구 시스템에 대한 시나리오를 입력자료로 하는 기후 모델링에 대해 초기 경계조건에 비교적 가까운 현시점과 향후 100년 가량을 모의하게 되는 미래시점에 대한 모의 결과의 오차를 동일하게 가정하는 것이 합리적인 해석인지는 논의해 볼 대목이다.

## 4. 미래 기후 정보의 신뢰성

미래 정보 예측의 경우 그 정확성을 평가하는 것은 이론적으로 불가능하며, 현 기간에 대한 모델 및 후처리 과정의 성능에 대한 평가를 통해 미래 예측의 신뢰도를 제시하는 것이 일반적인 방법이다 (Hwang et al., 2011). 특정 미래 시나리오 적용에 대한 지식 축적 차원의 응용 연구들은 양산되고 있는 반면 이를 견제하는 객관적인 기후 변화 연구의 신뢰도 평가는 비교적 부족하

다. 하지만 이는 미래 기후 정보를 영향 평가에 사용함에 있어 선행되어야 할 필수 과제이며 그 불확실성을 정량화하고 연구 결과의 신뢰와 실효성을 높이는데 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

기후 변화 연구는 그 성과를 수용하는데 따르는 책임과 적용 범위가 방대하기 때문에 최근 학계 (예: 기상학자, 기후 모델러, 수공학자 등)와 최종 소비자 (예: 수자원 관리 및 공급에 관여하는 실무자 등)가 함께 과학적 이해와 공학적 견해를 공유하는 노력을 기울이고 있다. 그 예로 미국 중서부 지역 기관을 중심으로 전역에 걸친 수자원 관리국 (Water Management District), 수자원 공급 실무자 (Water Utilities)를 비롯한 학계 (Universities, Research Institutes) 인사들이 연합하여 장기 수자원 계획에 기후변화를 고려하기 위한 과학적 지원 방향에 대해 논의하는 WUCA 프로젝트 (Water Utility Climate Alliance, <http://www.wucaonline.org>)를 들 수 있다. 이들의 논의는 일방향 정보 전달이 아닌 양방향 소통의 성향을 가지며, 기후변화를 고려한 정책 집행에 요구되는 연구의 질적 수준 및 결과의 형식 (시 공간 해상도), 그리고 관심 인자 (연강수량, 연속 강우 일수, 강우 강도 변화 등) 등에 대한 논의와 이에 대한 현재 과학 기술과의 부합 정도를 공유하고 있다. 더불어 본 연구 기관 (Water Institute, University of Florida) 에서도 미국 동남부 지역의 6개 수자원 연구 기관과 8개 수자원 관리 운용을 위한 지자체 기관 연합을 구성하여 주기적인 연수회와 수요와 공급을 고려한 연구 방향에 대한 지속적인 양방향 논의를 통해 기후 변화 연구의 장기 수자원 계획 수립에 실질적 적용을 도모하고 있다 (FWCA 프로젝트: Florida Water and Climate Alliance, <http://www.floridawca.org>).

그림 6은 WUCA 와 FWCA 프로젝트 홈페이지 메인화면이며 프로젝트의 동기 및 참여 기관을 소개하고 있으며 다양한 콘텐츠로 정보를 공유하고 있음을 보여준다.



그림 6. (a) WUCA 프로젝트와 (b) FWCA 프로젝트 홈페이지 메인화면

### 5. 향후 연구 과제

지난 수십 년간의 수많은 연구를 통한 기후모델 개선에도 불구하고 여전히 미래 예측은 물론 현 시점에 대한



모델의 일관성 있는 모의 결과를 도출하는데 실패를 거듭하고 있으며 앞으로도 이는 성취가능성이 불투명하다. 하지만 기후모델 결과의 다양성과 불확실성에 대한 이해와 신뢰도가 개선되고 있다는 점에서 지속적인 연구의 성과를 찾고 있다 (IPCC, 2007). 현재 미국의 수자원에 대한 의사 결정권을 가진 기관에서는 기후 변화 평가에 대한 결정론적 접근을 피하고 “시나리오 앙상블”을 이용한 확률적 접근에 대한 관심을 보이며 이를 받아들이고 있다 (예: WUCA). 더불어 온실가스 배출 시나리오와 다양한 기후 모델들의 결과를 동시에 고려하되 극치 값들을 제외하고 앙상블의 평균이나 중앙값을 채택하거나 각 모의 결과의 정확도를 추정하여 가중치를 주어 시나리오의 범주를 줄이고 불확실성을 최소화하는 노력이 이루어지고 있다.

기후 모델의 불확실성을 최소화하기 위해 사용되는 대부분의 통계적 기법에 활용되는 관측 자료에 있어, 기존의 특정 지점에 대한 기상 정보들을 비롯하여 위성 영상 정보들은 그 해상도나 자료 형식이 기후 모델 산출물과 차이가 있다. 이에 효율적 기후 모델의 편이 보정을 위한 Reanalysis 자료와 위성 및 지상 관측 자료를 활용한 격자단위 고해상도 자료 개발과 그 적용성 평가 (황, 2012) 또한 중요할 것이다.

기후변화 영향 평가는 과학과 공학, 그리고 정책의 융합 분야로서 광범위한 학문적 배경을 바탕으로 한 전문성을 요구하는 만큼 각 전문 분야의 협동 연구를 통해서만이 진전 있는 성취를 이룰 수 있을 것이다. 나아가 가시적 결과 제시에 대한 사회적 요구와 이에 발맞추는 연구보다 세부 심층과제 지원과 기초 연구 기회를 확대함

으로써 향후 연구를 위한 디딤돌을 놓아가는 것이 실질적 기후변화 영향 평가의 지름길이라 할 것이다.

## 6. 결론

국내의 경우 기상청은 현재 AR5 시나리오와 영국 해들리센터의 전지구 모델과 지역기후 모델, 그리고 통계적 상세화 기법을 이용하여 1km<sup>2</sup>해상도의 한반도 상세 기후 정보를 제공하고 있다. 기후 모델의 추가 선정 및 다양한 상세화 방법을 통하여 한반도 미래 기후변화 정보에 대한 불확실성 또한 향후 연구될 계획이다. 또한 각종 워크숍을 통해 소비자 및 일반 대중의 이해과 관심을 높이기 위한 소통의 노력도 기울이고 있다.

이제 지구 온난화와 기후변화에 따른 기상 이변이 인류에 대해 미친 영향은 이미 대중들에게도 익숙한 듯하다. 하지만 이에 대응하기 위해 얼마나 움직이고 투자할 수 있겠느냐는 질문에 있어서는 누구도 쉽게 대답하지 못할 것이다. 하지만 기후변화에 대한 대응은 단기간에 이루어지는 과정이 아니며 그 파급 영향은 ‘재해’에 그치지 않고 ‘재앙’에 이를 수 있으므로 불확실성의 위험요소를 감안하더라도 장기적인 투자를 통해 체계적으로 이루어져야 하는 것 또한 사실이다.

이를 위해서는 기후 변화 해석에 대한 과학적 노력을 통해, 연구의 불확실성을 정량화하여 공유하고 정보의 신뢰도를 높이기 위한 노력과 함께 대중의 관심과 사회적 투자를 유도하기 위한 보다 적극적인 양방향 소통이 필수적 과제일 것이다.

## 참고문헌

1. 기상청, 2012. 2012년 이상기후 보고서.
2. 황세운, 2012. 기후 모델 결과의 통계적 오차 보정과 수문 모델링 적용을 위한 격자 단위 자료의 유용성 평가, 한국농공학회논문집, 54(5), 91-102.
3. Choi W., P.F. Rasmussen, A.R. Moore, S.J. Kim, 2009. Simulating streamflow response to climate scenarios in central Canada using a simple statistical downscaling method, *Climate Research*, 40, 89-102.
4. Galloway, G. E., 2011. If Stationarity Is Dead, What Do We Do Now? *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 47(3), 563-570. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.00550.x.
5. Stefan, H., C. Chen, J.O. Haerter, J. Heinke, D. Gerten, C. Piani, 2011. Impact of a Statistical Bias Correction on the Projected Hydrological Changes Obtained from Three GCMs and Two Hydrology Models, *Journal of Hydrometeorology*, 12, 556-578.
6. Hernandez, L.J., S. Hwang, F. Escobedo, A. H. Davis, and J. W. Jones, 2012. Land use change in central Florida and sensitivity analysis based in agricultural to Urban Extreme conversion, *Weather, Climate, and Society*, 4(3), 200-211.
7. Hwang, S., 2011. Dynamical and statistical downscaling of climate information and its hydrologic implications over west-central Florida. Ph.D. Thesis, University of Florida.
8. Hwang, S., W. Graham, J. Hernandez, A. Adams, C. Martinez, J. Jones, 2011. Quantitative spatiotemporal evaluation of the dynamically downscaled MM5 precipitation predictions over the Tampa Bay region, Florida, *Journal of Hydrometeorology*, 12(6), 1447-1464.
9. IPCC, 2000. Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
10. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
11. Lorenzoni, I. and F.N. Pidgeon, 2006. Public views on climate change: European and USA perspectives. *Climatic Change*, 77, 73-95.
12. Ludwig, F., P. Kabat, H. Schaik, and M. Valk, 2009. Climate change adaptation in the water sector. Earthscan, UK, pp 79-108.
13. Milly, P.C.D.J. Betancourt M. Falkenmark R.M. Hirsch Z.W. Kundzewicz D.P. Lettenmaier R.J. Stouffer 2008 Stationarity Is Dead – Whither Water Management? *Science*, 319, 573-574.
14. Stainforth, D.A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D.J. Frame, J.A. Kettleborough, A. Knight, A. Martin, J.M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L.A. Smith, R.A. Spicer, A.J. Thorpe, and M.R. Allen, 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases, *Nature*, 433, 403-406.
15. Wilby, R. L. and S. Dessai, 2010. Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65, 180-185. doi: 10.1002/wea.543.
16. Wilby, R.L. and T.M.L. Wigley, 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, , 21(4), 530-548.

기획: 강문성(mskang@snu.ac.kr)