

기후변화자료 생성을 위한 GCM-downscaling 소개

유 승 환

(crom97@snu.ac.kr)

서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원

최 진 용

(iamchoi@snu.ac.kr)

서울대학교 농업생명과학대학
지역시스템공학전공 부교수

■ 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 21세기 전 세계인의 화두이자 국제 사회의 주요 의제로 대두되었다. 기후변화에 대응을 어떻게 하는가에 따라 국가 경쟁력의 확보뿐만 아니라 국가의 지속가능한 발전 여부가 달려 있다. 기후변화 대응을 위하여 기후변화과학, 기후변화 영향·적응 및 취약성 평가, 기후변화 완화에 대한 연구가 수행되고 있으며, 특히 기후변화 과학은 미래 기후변화 대응을 위한 전략수립에 있어서 근본적이지 핵심적인 정보를 담고 있다 (기상청, 2009). IPCC AR4에 따른 기후시스템의 온난화는 명백하며 지구평균 기온과 해수면의 상승, 광범위한 눈과 얼음의 용해 및 지구평균 해수면 상승의 관측 자료에서 분명하게 나타났다. 지난 100년 (1906~2005년)간 전 지구평균온도는 0.74°C 상승했으며, 위성자료에 의하면 북극 해빙 범위는 1978년 이후 10년에 2.7%, 여름에는 7.4% 감소했다. 또한 지구평균해수면은 1961년 이후 연간 1.8mm, 1993년 이후 3.1mm 상승했다 (IPCC, 2007a;

기상청, 2009). 또한 우리나라의 100년 (1912~2008)에 걸친 기후변화의 징후로는 1.7°C 기온 상승 및 강수량의 증가, 극한 저온 일수 감소 및 고온 일수 증가, 호우 일수 증가 및 강수일수 감소, 계절길이의 변화 등을 들 수 있다 (기상청, 2009).

농업은 다른 산업과 달리 원천적으로 기후 조건과 변화에 크게 좌우되는 분야로, 기후변화로 인한 영향에 가장 민감한 분야로, 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고, 이로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 지속적인 연구가 필요하다 (유승환, 2009). IPCC에서는 온실가스 배출 시나리오에 따른 잠재적인 미래 기후변화 시나리오를 개발하고 기후변화 대응 전략을 평가하는 것이다. 즉, 미래 기후의 추세는 매우 불확실하지만, 지구 온난화에 따른 기후변화 대응을 위하여 객관적 자료 생산 및 평가가 필수적이다. 미래 기후변화 평가의 첫 단계는 온실가스 배출 시나리오 개발이며, IPCC는 사회-경제발전 및 기술 변화 등을 고려하여 온실가스 배출 시나리오를 개발하였다 (IPCC, 2000). 이 온실가스 배출 시나리오에

대해, 생지화학모델로부터 대기 중 온실가스 농도가 평가되고, 대기 중 온실가스 농도는 복사 스킵과 모수화로부터 복사강제력으로 전환된다. 복사강제력은 전지구 기후변화모델에 입력되어 전지구 기후변화 시나리오가 개발되며, 미래 기후변화 평가에 이용된다. 또한 기후변화는 기후의 지역적 특성에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 지역적인 영향평가 및 효율적인 대응 전략 마련을 위해서는 보다 상세한 기후변화 전망 자료가 요구된다. 이에 따라 전지구 기후변화 시나리오에 상세화기법을 적용하여 상세 지역 기후변화 시나리오가 산출된다 (기상청, 2009). 상세화 기법이란 큰 스케일의 모델이나 데이터 분석으로 국지적 내지 지역적 스케일의 정보를 도출하는 방법을 의미한다.

본 소고에서는 농업 및 농업수자원의 기후변화에 따른 영향 평가를 위한 미래 기후변화 전망 자료를 생성하기 위하여 필요한 대순환모델 (GCM, General Circulation Model)과 상세화기법 (Downscaling)에 대하여 살펴보았다.

■ 대순환모델 (GCM, General Circulation Model)

대순환모델 (General Circulation Model: GCM)이란 기후계 구성요소들의 물리적, 화학적, 생물학적 특성, 구성요소 간의 상호작용 과정, 피드백 과정을 토대로 이미 알려진 특성의 전부나 일부를 고려하여 기후계를 수치로 표시한 것을 의미한다 (IPCC, 2007a). 최근에는 기후변화 연구에 초점을 두고 지구 기후 시스템을 구성 요소 뿐만 아니라, 에어로졸, 탄소순환, 대가 화학과정 등 거의 대부분의 기후 시스템 요소를 포함하는 접합대순환 모형 (Coupled General Circulation Model, CGCM)으로 발전하고 있다 (강동현, 2007). GCM은 기후를 결정하는데 중요한 여러 물리과정의 상호작용을 동시에

고려하여 과거, 현재 및 미래의 기후변화를 객관적인 수치로 제공하여 주는 이유로 기후변화 연구의 가장 강력한 수단으로 알려지고 있다 (환경부, 2002). 미래 기후변화시나리오 생산을 위하여 각 배출시나리오에 따라 추정된 대기 복사강제력을 모델에 적용시키고 100년 이상의 장기적분을 수행함으로써 온실가스 농도 증가로 인한 미래 기후변화 자료를 생산한다. 그러나 GCM에서는 다양한 변수에 대한 자료를 제공하고 있는데, 각 모델마다 차이가 있지만 일반적으로 제공하고 있는 변수는 Table 1과 같다. IPCC 4차 보고서에 참여한 모델은 23개로서, 모델별 해상도는 Table 2와 같다¹⁾

¹⁾ IPCC 4차 보고서에 참여한 GCM 산출물은 'The IPCC Data Distribution Centre (<http://www.ipcc-data.org/>)'에서 제공되고 있다.

Table 1. The Climate Variables of GCM Output

Variable	Description
hfls	Surface Latent Heat Flux
hfss	Surface Sensible Heat Flux
hus	Specific Humidity
pr	Precipitation
psl	Sea Level Pressure
rlds	Surface Downwelling Longwave Radiation
rlus	Surface Upwelling Longwave Radiation
rlut	Outgoing Longwave Radiation
rsds	Surface Downwelling Shortwave Radiation
rsus	Surface Upwelling Shortwave Radiation
ta	Temperature
tas	Surface Air Temperature
tasmax	Maximum Daily Surface Air Temperature
tasmin	Minimum Daily Surface Air Temperature
ua	Zonal Wind Component
uas	Zonal Surface Wind Speed
va	Meridional Wind Component
vas	Meridional Surface Wind Speed

Table 2. The Description of IPCC Fourth Assessment Report Models (IPCC, 2007a)

Centre	Country	General Circulation Model	Atmosphere resolution	Ocean resolution
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia	CSIRO-MK 3.0	~1.9° × 1.9°	0.8° × 1.9°
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	CGCM3 (T47)	~3.75° × 3.75°	1.9° × 1.9°
		CGCM3 (T63)	~1.9° × 1.9°	0.9° × 1.4°
Beijing Climate Centre	China	BCC-CM1	1.9° × 1.9°	1.9° × 1.9°
Institute of Atmospheric Physics	China	FGOALS-g1.0	~2.8° × 2.8°	1.0° × 1.0°
Centre National de Recherches Meteorologiques	France	CNRM-CM3	~2.8° × 2.8°	0.5° ~ 2° × 2°
Institute Pierre Simon Laplace	France	IPSL-CM4	2.5° × 3.75°	1° ~ 2° × 2°
Max-Planck Institute for Meteorology	Germany	ECHAM5-OM	~1.9° × 1.9°	1.5° × 1.5°
Model and Data Group at MPI-M / Meteorological Research Institute of KMA	Germany/Korea	ECHO-G	~3.75° × 3.75°	0.5° ~ 2.8° × 2.8°
Meteorological Research Institute, Japan	Japan	MIROC3.2 (hires)	~1.1 × 1.1	0.2° × 0.3°
		MIROC3.2 (medres)	~2.8° × 2.8°	0.5° ~ 1.4° × 1.4°
National Institute for Environmental Studies	Japan	MRI-CGCM2.3.2	~2.8° × 2.8°	0.5° ~ 2.0° × 2.5°
Bjerknes Centre for Climate Research	Norway	BCM2.0	~2.8° × 2.8°	0.5° ~ 1.5° × 1.5°
Institute for Numerical Mathematics	Russia	INM-CM3.0	4° × 5°	2.0° × 2.5°
UK Met. Office	UK	HadCM3	2.5° × 3.75°	1.25° × 1.25°
		HadGEM	~1.3° × 1.9°	0.3° ~ 1.0° × 1.0°
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.0	2.0° × 2.5°	0.3° ~ 1.0° × 1.0°
		GFDL-CM2.1	2.0° × 2.5°	0.3° ~ 1.0° × 1.0°
Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-AOM	3° × 4°	3° × 4°
		GISS-E-H	4° × 5°	2° × 2°
		GISS-E-R	4° × 5°	4° × 5°
National Centre for Atmospheric Research	USA	PCM	~2.8° × 2.8°	0.5° ~ 0.7° × 1.1°
		CCSM3	~1.4° × 1.4°	0.3° ~ 1.0° × 1.0°

■ 상세화 기법

전지구 규모의 GCM은 공간 분해능이 수백 km 정도로 낮기 때문에 기후변화의 예측에 있어 어려움을 내포하고 있으며, 또한 수자원 연구에서 필요한 유역규모의 기후 현상을 포착할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 낮은 공간분해능의 GCM은 기후요소의 결정에 있어서 중요한 지형효과의 하나인 산맥의 효과를 무시하게 될 수 있다. 또한 저해상도의 GCM에서는 남한지역은 대부분이 바다로 처리되어 좁고 복잡한 지형 조건에 의해 지역적으로 다양한 기후 양상을 보이는 한국의 기후 특성을 고려하지 못하는 문제가 있다 (Bae et al., 2008).

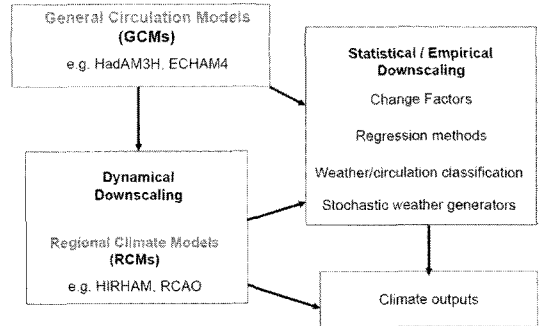


Fig. 1. A Concept of Dynamical and Statistical Downscaling (Wilby and Dawson, 2007).

Table 3. Main Strengths and Weakness of Statistical and Dynamical Downscaling (Wilby and Dawson, 2007)

Method	Statistical downscaling	Dynamical downscaling
Strengths	<ul style="list-style-type: none"> • Station-scale climate information from GCM-scale output • Cheap, computationally undemanding and readily transferable • Ensembles of climate scenarios permit risk / uncertainty analyses • Applicable to 'exotic' predictands such as air quality and wave heights 	<ul style="list-style-type: none"> • 10~50km resolution climate information from GCM-scale output • Respond in physically consistent ways to different external forcing • Resolve atmospheric processes such as orographic precipitation • Consistency with GCM
Weakness	<ul style="list-style-type: none"> • Dependent of the realism of GCM boundary forcing • Choice of domain size and location affects results • Requires high quality data for model calibration • Predictor-predictand relationships are often non-stationary • Choice of predictor variables affects results • Choice of empirical transfer scheme affects results • Low-frequency climate variability problematic • Always applied off-line, therefore results do not feedback into the host GCM 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependent of the realism for GCM boundary forcing • Choice of domain size and location affects results • Requires significant computing resources • Ensembles of climate scenarios seldom produced • Initial boundary conditions affect results • Choice of cloud / convection scheme affects (precipitation) results • Not readily transferred to new regions or domains • Typically applied off-line therefore results do not feedback into the host GCM

상세화 기법은 저해상도의 GCM 산출물을 이용하여 수문모델 등의 입력자료를 산출하는 방법으로, 적용 방법에 따라 Fig. 1과 같이 크게 2가지로 분류할 수 있다. 역학적 물리적 과정을 모두 반영한 지역기후모델 (RCM, Regional Climate Model)을 이용한 동적 상세화 기법 (Dynamical Downscaling)과 광역 기후 자료에서 상대적으로 정확하게 예측한 변수를 이용하는 통계적인 상세화 기법 (Statistical Downscaling)으로 구분할 수 있다. 동적 상세화 기법과 통계적 상세화 기법의 장·단점을 요약하면 Table 2와 같다.

▶ 동적 상세화 기법

동적 상세화 기법은 지역기후모델 (Regional Climate Model, RCM)을 이용하여 GCM의 결과를 상세화하는 것으로 대상지역에 대해 공간적으로 자세한 정보를 얻을 수 있다. 지역기후모델링 기법은 고분해 RCM에는 초기조건, 시간에 따라 변하는 측면 기상 조건 그리고 지표 경계조건을 사용하는 것을 포함하고 있다. 이 기법에서의 한 변화는 전 영역에 걸쳐서 RCM 해(Solution)의 대규모 성분에 강제력을 주는 것이다 (Cocke and LaRow, 2000). 동적 상세화 기법에 이용되는 RCM은 기본적으로 GCM과 동일한 역학적인 구조를 지니고 있다. 그러나 RCM을 이용하여 기후를 모의하기 위해서는 초기 및 바닥 경계 조건 이외에 공간차원을 위한 측면 경계조건이 요구된다. 또한 RCM의 모의를 위해서는 바닥의 경계 조건으로 고해상도 수평 분해능에 적합한 지형 및 지면 자료가 필요하다. 따라서 RCM은 지형고도와 해안선이 GCM보다 현실에 가깝게 고려될 수 있다. RCM의 초기 및 경계조건으로는 GCM의 결과인 3차원

수평바람, 온도, 습도, 2차원 해면 기압 및 해면온도 등이 RCM 해상도에 맞게 수평·수직으로 내삽하여 사용된다. 온실가스 농도가 고려된 GCM의 결과는 초기 및 측면 경계조건으로만 사용되므로 RCM에서도 배출시나리오에 따른 온실가스 농도가 포함되어야 한다 (정일원, 2008). 현재 기상청에서는 ECHO-G 모델을 동적 상세화 시킨 MM5를 제공하고 있다. MM5는 해상도가 27 km로써, A1B 시나리오에 대하여 1971년부터 2100년까지의 일평균 및 월평균 자료 (최고, 최저, 평균 기온, 강수, 상대습도)를 제공하고 있다 (기후변화정보센터, <http://www.climate.go.kr/>).

▶ 통계적 상세화 기법

통계적 상세화 기법은 대규모의 대기 순환패턴이 지역기후의 대기 순환패턴과 관계가 있다는 것에 착안하여 대규모의 GCM에서 모의한 값과 지역기후요소 사이의 통계적 관계를 찾아내어 상세화하는 방법이다 (정일원, 2008). 이러한 통계적인 상세화는 지역기후는 두 가지 요인: 대규모 기후상태, 그리고 지역/국지 지형 특색 (지형, 육지-바다 분포 그리고 토지 이용 등)에 의하여 제약을 받을 수도 있다는 견해를 바탕으로 하고 있다 (한국건설기술연구원, 2004). 이러한 관점에서, 대규모 기후 변수들 (또는 예측인자)을 지역 그리고 국지 변수들 (또는 예측량)에 연결시켜 주는 통계모델을 처음으로 결정함으로써 지역 또는 국지 기후정보가 얻어진다 (강동현, 2007). 따라서, GCM으로부터 얻어진 예측인자들은 통계모델의 입력 자료로 들어가 대응되는 국지 그리고 지역기후 특성들을 산출하게 된다 (김병식, 2005).

이 기법들의 주요 장점들의 하나는 계산할 때 경제적인 점이다. 따라서 이 기법들을 다른 GCM 실험들로부터 얻어진 출력자료에 쉽게 응용할 수 있다. 또 다른 장점은 많은 기후변화 영향 응용에서 가장 필요로 할 수 있는 지역 정보를 산출할 때 이 기법들이 이용될 수 있다는 점이다. 통계적인 상세화 기법의 타당성은 지역, 공간 그리고 시간규모, 예측인자와 예측량의 형태, 그리고 기후 통계에 따라 광범위하게 달라진다 (한국건설기술연구원, 2004).

대표적인 통계적 상세화 기법에는 전이함수(Transfer Function)를 이용한 방법, 일기분류(Weather Type)에 의한 방법, 그리고 기상발생기(Weather Generator)를 이용한 방법이 있다 (IPCC, 1996). 각각의 방법은 국지 기후 예측량의 시간적인 분산의 범위를 표현하는데 있어 상대적인 장단점을 가지고 있다. 대부분의 상세화 기법은 주로 온도와 강수량을 대상으로 실시되어 왔지만 다양한 형태의 연구들에서 이것과는 다른 변수들이 조사되어지기도 하였다. 각각의 방법에 대해 자세한 설명은 다음과 같다.

1) 전이함수 (Transfer Function)

전이함수를 이용한 상세화 기법은 GCM 격자 값을 국지온도와 같은 지표변수들에 대한 예측인자로 하여, 다중 회귀 모형을 만드는 것이다 (김병식, 2005). 이때 회귀모형을 전이함수 (Transfer Function) 라고 부르며 (Sailor and Li, 1999), 전이함수의 형태로는 선형 회귀방정식, 구분적 선형방정식, 비선형 방정식 및 인공신경망 기법 등이 있다 (Brandsma and Buishand, 1999). 한국건설기술연구원 (2004)는 YOUNG GCM 모형을 이용하여 전이함수 모형인 SDSM 방법을 이용하여, 일별 강수량, 최고기온, 최저기온을 모의하여 용담댐 유역에 미치는 영향을 분석하였다.

2) 일기분류

대순환 패턴 (Atmospheric Circulation Pattern)을 이용하여 GCM 자료를 지점단위의 강수량으로 상세화 (Downscaling)하기 위해 개발된 것이다. 관측 일기압분포의 자료가 순환패턴을 이해하기 위해 이용되었다. 기후변화 하에서의 강수량을 산정하기 위해 GCM 산출물 중 하나인 일 기압자료로부터 유도된 대기순환패턴을 추계학적 강수모형의 제한조건으로 이용한다 (Wilby and Dawson, 2007). GCM은 기압 (Air Pressure)같은 대기변수는 정확히 모의하는데, 강수량은 기압이송과 관계가 있기 때문이다. 그러므로 넓은 지역에 대한 기압분포와 국소 강수량과의 관계성이 존재한다. 즉 단일한 GCM의 격자로부터 얻은 정확성이 낮은 값을 사용하는 것 대신 격자로부터 추출된 일기압 분포 등의 대기순환패턴을 이용하여 기상자료를 산출하는 방법이다. 이 기법의 개념은 Bardossy와 Caspary (1991)에 의해서 제시하였는데, 기압, 풍향, 구름 등을 이용하여 날씨의 타입을 정의하였다.

3) 기상발생기 (Weather Generator)

기상발생기 방법은 연속적으로 관측한 일기 변수들에 대한 통계적인 모델들이다 (Wilks and Wilby, 1999). 많은 영향평가모델이 요구하는 것처럼, 그것들의 대부분은 1일 시간규모에 초점이 맞춰져있으나, 반일 모델들도 이용이 가능하다 (Katz and Parlange, 1995). 매일의 강수발생을 모델링하는 연구 방법에 근거를 둔, 다양한 형태의 일별 기상발생기의 이용이 가능하고 이것들은 항상 통계적인 과정에 의존한다. 보다 일반적인 두 가지는 Markov Chain 연구방법과 Spell Length 연구 방법이다. 이 연구에서 분석된 통계모델의 타당성은 그 지역의 기후적인

특색에 따라 달라질 수 있다.

강수 빈도와 강도를 위한 통계모델뿐만 아니라, 기상발생기도 가장 일반적인 최고와 최저온도, 태양 복사와 같은 다른 변수들의 시계열을 항상 포함하고 있다 (Parlange and Kalz, 2000). 강수 이외의 변수들을 포함하는 가장 흔한 방법들은 대부분, 복합적인 가변 1-계 자기-회귀적인 과정을 거쳐, 강수발생의 유무에 따라 그들에게 조건을 지우는 것 (Richardson, 1981)이고, 대규모 상태를 근거로 하여 일별 기상발생기의 매개변수들에게 조건을 지울 수 있으며,, 또는 일련의 대규모 매개변수와 국지규모 매개변수의 관계식들을 개발할 수 있다 (Katz and Parlange, 1995; Wilks and Wilby, 1999). 현재 가장 많이 적용되고 있는 일별 기상발생기는 LARS-WG (The Long Ashton Research Station Weather Generation)와 WGEN (Weather GENerator)방법이다.

Semenov 등 (1998)은 대표적인 추계학적 기상발생기인 LARS-WG와 WGEN의 두 모델을 유럽 미국, 아시아 등 상이한 기후지역에 적용하여 모의 정확성을 평가한 결과 LARS-WG가 WGEN에 비해 적용성이 높다고 제시하였다. 또한 배덕호 등 (2007)은 우리나라 56개 기상관측소를 대상으로 적용하여 기후 모형에서 모의하지 못하는 지역적인 기후특성을 잘 반영하는 것으로 분석하였다. 홍은미 등 (2009)은 기상자료와 국립기상연구소에서 제공하는 A2 시나리오에 따른 기후변화 예측 결과를 바탕으로 LARS-WG를 이용하여 미래 기후변화 추이를 분석하고, FAO Blaney-Cridle 방법을 이용하여 관개 기간 동안의 논벼의 작물증발산량을 산정하였다.

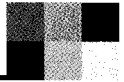
4) Change Factor (CF) Method

Change Factor (CF) 기법은 현재 기후의 공간패턴이

미래에는 변화가 없다고 가정하고, 특정년도를 기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지며 기후변화영향평가에 대한 많은 연구에 적용되어 왔다. 박근애 (2008)는 CF 기법에 의한 상세화 기법을 수행하기 위하여 먼저 기상관측소별 30년 (1977-2006)간의 관측 기상자료들을 관측소별로 월평균자료로 추출하고 GCM 시나리오별 미래 기상자료를 2010년부터 2099년까지의 월평균 자료를 추출하고, 월평균 과거자료와 미래자료간의 차이 값을 비율로 분석하여 기준년도 (2005년)의 기상자료에 대해 이 비율을 각각 적용하여 GCM 시나리오별 미래 기상자료를 구축하였다. 이러한 CF 기법의 지역기후변화 시나리오가 지역기후모델의 결과 변화와 직접적인 관계가 있다는 장점이 있으며, 또한 계산이 간단하고 적용이 빠르다. 그러나 변화 요인으로 제공되는 기후 모델의 지역성에 의존적이라는 단점도 있다 (Jacqueline and Robert, 2005).

■ 기후변화 시나리오 작성

현재 수자원 및 농업수자원 등의 연구에 있어서 GCM 산출물을 바탕으로 통계학적 상세화 기법을 이용한 방법이 많이 이용되고 있는 실정이다. 이는 통계학적 상세화 기법이 동적 상세화 기법보다 상대적으로 손쉽게 적용이 가능하고, 다양한 GCM 산출물을 바탕으로 한 영향 평가와 상호 비교가 가능하기 때문이다. 통계학적 상세화 기법을 적용하기 위해서는 기후변화 시나리오를 작성하여야 한다. 즉, GCM 산출물 중 필요한 변수를 추출하여 현재 기후 (Baseline 또는 20c3m)와 기후 시나리오 (예. A1, A2, B1 또는 B2)와의 차이를 나타내는 기후변화 시나리오를 작성이 필요하다. 신뢰성 있는 기후



변화 시나리오를 작성하기 위해서는 적합한 기후 시나리오와 GCM을 선택이 반드시 선행되어야 한다. 기후 시나리오의 선정 기준은 다음과 같다 (IPCC, 2007b)

Criterion 1: Consistency with global projections.

Criterion 2: Physical plausibility.

Criterion 3: Applicability in impact assessments.

Criterion 4: Representative.

Criterion 5: Accessibility.

또한, GCM 선택에 있어서 고려해야 될 사항은 다음과 같다 (IPCC, 2007b).

- Vintage
- Resolution
- Validity
- Representativeness of results

■ 결 론

본 소고에서는 미래 기후변화 기상 자료를 생성하기 위하여 필요한 대순환모델 (GCM)의 개념과 종류, 상세화기법 (Downscaling)의 종류와 각 방법, 기후변화 시나리오에 작성에 필요한 내용에 대해서 살펴보았다. 현재 IPCC에서는 23개의 GCM의 산출물을 제공하고 있으며, 이를 바탕으로 다양한 상세화 기법을 통하여 미래 기상자료를 생성하여 다양한 농업수자원 분야를 포함한 다양한 분야에 적용하여 기후 변화에 따른 그 영향을 평가하고 있다. 하지만 GCM은 몇 개의 방정식과 모수화를 통해 실제 기후시스템을 단순화 시킨 프로그램으로, 생산된 자료의 불확실성이 존재할 수밖에 없고, GCM 산출물을 바탕으로 상세화된 미래 기후 자료 역시

불확실성을 내포하게 된다. 따라서 기후변화가 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 연구 목적과 가장 적합한 GCM 선정과 기후변화 시나리오 작성이 필요하다. 또한 공통된 배출시나리오를 활용한 GCM 간 상호비교 연구를 통해 미래 기후변화의 일관된 신호를 찾고 변화 가능 범위를 정량화하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 향후 기후변화로 인한 영향에서 가장 민감한 분야 중 하나인 농업수자원에 있어서도 다양한 GCM과 상세화 기법을 통한 다각적인 연구가 이루어져야 한다. 이를 통하여 향후 예상될 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 다각적인 분석과 농업수자원 정책 및 대응 전략이 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 강동현, 2007. 기후변화에 따른 금강유역의 수자원 영향 평가. 석사학위논문, 서울대학교.
2. 기상청, 2009. 기후변화 이해하기 (Ⅱ) -한반도 기후변화: 현재와 미래-.
3. 김병식, 2005. 기후 변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가, 박사학위논문, 인하대학교.
4. 박근애, 2008. 미래 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향 연구, 박사학위논문, 건국대학교.
5. 배덕효, 정일원, 권원태, 2007a. 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산 (I): 유역별 기후시나리오 구축, 한국수자원학회논문집, Vol. 40 (3), pp.191~204.
6. 유승환, 2009. 기후변화에 따른 농업 가뭄 특성 분석, 박사학위 논문, 서울대학교.
7. 정일원, 2008. 혼합 상세화 기법을 적용한 국내 수자원의 기후변화 영향평가, 박사학위논문, 세종대학교.
8. 한국건설기술연구원, 2004. 지표수 수문성분 해석기술 개발, 과학기술부.
9. 홍은미, 최진용, 이상현, 유승환, 강문성, 2009. LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정, 한국농공학회논문집, Vol. 51 (3), pp.25~35.
10. 환경부, 2002. 기후변화 감시, 예측 및 영향평가 기술: 대기 대순환 모형에 의한 기후변화 예측기술 개발 지역 기후 모형의 개발.
11. Bae, D. H., I. W. Jung and H. Chang, 2008. Potential changes in Korean water resources estimated by a high resolution climate simulation, Climate Research.
12. Bardossy, A. and H. J. Caspary, 1991. Conceptual model

- for the calculation of the regional hydrologic effects of climate change, 20th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Vienna, Austria, pp.73~82.
13. Brandsma, T. and T. A. Buishand, 1997. Statistical linkage of daily precipitation in Switzerland to atmospheric circulation and temperature, *Journal of Hydrology*, Vol. 198, pp.98~123.
 14. Brandsma, T. and T. A. Buishand, 1999. Dependence of precipitation on temperature at Florence and Livorno (Italy), *Climate Research*, Vol. 12, pp.53~63.
 15. Cocke, S. and T. E. LaRow, 2000. Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model, *Monthly Weather Review*, Vol. 128, pp.689~708.
 16. IPCC, 1996. *Climate Change 1995: Impacts, adaptation, and vulnerability*, contribution of working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
 17. IPCC, 2000. *Special report on emissions scenario*.
 18. IPCC, 2007a. *Climate Change 2007: The Physical science basis*.
 19. IPCC, 2007b. *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*.
 20. Jacqueline, D. and L. W. Robert, 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on lowflows in the River Thames, United Kingdom, *Climatic Change*, Vol. 69, pp.245~268.
 21. Katz, R. W. and M. B. Parlange, 1995. Generalizations of chain-dependent processes: Application to hourly precipitation, *Water resource research*, Vol. 31, pp.1331~1341.
 22. Parlange, M. B. and R. W. Katz, 2000. Extended version of the Richardson model for simulating daily Weather variables, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39, pp.610~622.
 23. Richardson, C. W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation, *Water Resources Research*, Vol. 17, pp.182~190.
 24. Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow and C. W. Richardson, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Climate Research*, 10, pp.95~107.
 25. Wilby, R. L. and C. W. Dawson, 2007. *Statistical downscaling model SDSM Version 4.2 User manual*, <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM>.
 26. Wilks, D. S. and R. L. Wilby, 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models, *Progress in Physical Geography*, Vol. 23, pp.329~357.