동아시아 지역에서의 AOGCM 불확실성 평가 및 기후전망

An Uncertainty Assessment of AOGCM and Future Climate Projection over East Asia

김민지*, 신진호**, 이효신***, 권원태****

Min-Ji Kim, Jin-Ho Shin, Hyo-shin Lee, Won-Tae Kwon

요 지

지구 온난화에 의한 대기 순환의 변화와 이에 따른 수증기 수송 및 강수량의 변화는 전지구 및 지역적인 수문환경의 변화를 초래하므로 장기적인 차원의 수자원 계획 수립에는 반드시 기후변화에 따른 영향이 제대로 반영되어야 한다. 그러나 개별 모델이 사용하는 역학과정과 물리과정의 모수화 및 분해능이 다르고 이에 따른 모의 결과도 다르게 나타나는 등의 상당한 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 패널인 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 참여한 대기해양결합 대순환모델(AOGCMs)이 온실가스 배출 시나리오를 바탕으로 생산한 기온과 강수의 불확실성을 동아시아에 대해 평가하고 이를 바탕으로 미래 기후를 전망하였다. 국립기상연구소 ECHO-G/S 모델과 IPCC 23개 모델의 배출 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios, SRES) 자료는 20세기(1900-1999년)와 21세기(2000-2099년)의 200년 동안이고, 관측자료는 영국 CRU(Climate Research Unit) 월평균 2m 기온의 30년(1961-1990년) 평균값과 CMAP 월 평균 강수량의 21년간(1979-1990년) 평균값을 이용하였다. 동아시아지역 기온과 강수의 불확실성을 평가하기 위해서 모델과 관측간 편이, 평균제곱근오차(RMSE) 등의 통계적인 방법을 사용하였다. 동아시아 지역의 연평균 기온은 대체로 모델의 기온이 관측보다 적게 모의되는 음의 편이를 나타내고, 강수는 모델이 관측보다 더 크게 모의 되는 양의 편이를 나타냈다. 계절적으로는 여름철 강수와 봄철 기온의 편이가 크게 나타났다. 연평균 및 겨울철 강수와 기온의 RMSE는 비례하는데 이는 기온 모의성능이 좋은 모델이 강수 모의성능도 좋게 나타나는 것을 의미한다.

핵심용어 : 기후변화, 대기해양결합 대순환모델, 불확실성 평가

1. 서 론

최근 보고서들은 대기 중 온실가스 농도 증가로 인한 지구 온난화와 이에 따른 강수량의 변동은 불가피한 것으로 전망하고 있다. 이와 같은 기온의 증가와 강수량의 변동은 결과적으로 수문환경을 변화시켜 동아시아 지역뿐 아니라 전지구에 걸쳐 빈번한 가뭄과 홍수 등을 야기한다. 이러한 미래 기후 변화를 전망하기 위한 가장 광범위한 방법은 결합대순환모델(AOGCM)을 이용한 미래의 기후변화 장기 시나리오를 생산하는 것으로, 기후변화에 관한 정부간 패널인 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 이산화탄소, 메탄 등의 배출에 관한 다양한 시나리오를 바탕으로 AOGCM 기후변화 모의자료를 제공하고 있다. 2007년도에 발표한 IPCC 4차

평가보고서에 의하면, 16종의 온실가스 및 황산염 에어러솔의 배출농도에 따라서 B1, A1B, A2 세 개의 시나리오로 분류하였으며, 2100년의 CO2 농도가 B1은 550 ppm, A1B는 720ppm, A2는 830ppm으로 A1B의 CO2 농도는 현재 농도(367ppm)의 약 2배가 된다(IPCC, 2007). AOGCM은 인위적 요인에 의한 복사강제력의 변화에 따른 역학적/물리적 과정에 기초한 대기/해양/지면의 3차원 자료를 객관적으로 제공할 수 있어 지구 기후시스템의 변화를 모의하거나 전망하는데 유용하다. 그러나 기후모델이 발전해오고 있음에도 불구하고 다양한 AOGCM들은 각각 다른 모델역학체계, 격자 크기 및 매개변수화 과정, 물리과정으로 인하여 모의 결과도 다르게 나타나는 등 각 모델의 결과에는 상당한 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 미래 기후변화 시나리오에 대한 동아시아 및 국내 기후 영향을 정량적으로 제시하기 위해서는 이를 위해 사용될 모델의 특성 및 불확실성을 평가하고 줄이려는 노력이 먼저 선행되어야 한다.

본 연구에서는 동아시아 지역에 초점을 맞추어 온실가스와 에어러솔 농도 변화에 기초한 기후변화 시나리오(B1, A1B, A2)에 참여한 결합대순환모델(AOGCM)들의 현재와 미래 시나리오에서의 기온과 강수의 불확실성을 평가하고 이를 바탕으로 미래 기후를 전망하였다.

2. 자료 및 방법

Table 1. List of climate models ,their countries, resolutions for each model.

No.	ID	Model	Country	Resolution	
				Atm.	Ocn.
1	a	BCC_CM1	China	128X96	128X96
2	b	BCCR_BCM2_0	Norway	128X64	360X180
3	c	CCCMA_CGCM3_1	Canada	96X48	192X96
4	d	CCCMA_CGCM3_1_t63	Canada	128X64	256X192
5	e	CNRM_CM3	France	128X64	180X170
6	f	CSIRO_MK3_0	Australia	192X96	192X189
7	g	GFDL_CM2_0	USA	144X90	360X200
8	h	GFDL_CM2_1	USA	144X90	360X200
9	i	GISS_AOM	USA	90X60	90X60
10	j	GISS_EH	USA	72X46	360X180
11	k	GISS_ER	USA	72X46	72X46
12	l	IAP_GFOALS1_0_G	China	128X60	360X170
13	m	INMCM3_0	Russia	72X45	144X84
14	n	IPSL_CM4	France	96X72	180X170
15	o	METRI_ECHO-G/S	Germany/Korea	96X48	128X117
16	p	MIROC3_2_HIRES	Japan	320X160	320X320
17	q	MIROC3_2_MEDRES	Japan	128X64	256X192
18	r	MIUB_ECHO_G/S	Germany/Korea	96X48	128X117
19	s	MPI_ECHAM5	Germany	192X96	360X180
20	t	MRI_CGCM2_3_2a	Japan	128X64	144X111
21	u	NCAR_CCSM3_0	USA	256X128	320X395
22	v	NCAR_PCM1	USA	128X64	360X180
23	w	UKMO_HADCM3	UK	96X73	288X144
24	x	UKMO_HADGEM1	UK	192X144	360X216

불확실성 평가를 위해 수집한 자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) Data Distribution Center(DDC)에서 제공하는 배출 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios, SRES) 모의자료 중에서 B1, A1B 그리고 A2 시나리오 자료를 바탕으로 한 23개의 AOCGMs과 국립기상연구소에서 모의한 ECHO-G/S 결과를 사용하였다. 시나리오별로 제공되는 여러 변수 중에서 기온, 해수면 온도, 강수량, 해면기압, 비습, 바람(u,v) 등의 주요변수를 우선적으로 선택하였고, 20세기(1900-1999년)와 21세기(2000-2099년)의 총 200년 동안 자료를 수집하여 21세기 전반에 대한 기후변화 전망 및 분석이 가능하다. 수집된 시나리오 모의 자료는 사용된 모델의 분해능과 모수화가 각기 다르기 때문에 경도와 위도를 2.5°×2.5°로 등격자로 처리하였고, 등격자화한 AOGCM의 모델명, 기관 및 국가, 수평해상도 등은 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 동아시아 지역(20°N ~ 50°N, 100°E ~ 150°E)의 기온과 강수의 기후변화 전망과 불확실성을 평가하기 위해서 모델과 관측간 편이(Bias), 평균제곱근오차(RMSE) 등의 통계적인 방법을 사용하였다. 불확실성평가에서의 모델 검증을 위한 관측 자료는 영국 CRU(Climate Research Unit) 월평균 2m 기온(Jones et al., 1994)의 30년(1961-1990년) 평균값과 CMAP 월평균 강수량의 21년의(1979-1990년) 평균값(Xie and Arkin, 1997)을 이용하였다.

3. 결 과

3.1 불확실성 평가

미래의 기후변화를 전망하기에 앞서 각 AOGCM들의 현재기후 모사능력을 평가하였다. 그림 1 은 총 24개 모델들의 20C3M 평균값을 관측 자료와 비교한 값으로, 기온은 CRU 1961-1990년 평균자료를 사용하였으며 강수량은 CMAP 1979-1990년 평균자료를 사용하여 동아시아 지역의 연평균(ANN), 여름철(JJA), 겨울철(DJF)의 기온과 강수의 편이(Bias)와 RMSE를 동시에 나타내었다. 여기서 MME24는 AOGCM의 24개 모델 전체의 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble)이고, MME9는 RMSE가 3 이하인 9개 모델의 다중모델앙상블로 여기에는 고분해능 모델이 주로 포함되어 있다. 연평균 기온(Fig. 1a)은 대부분 음의 편이를 나타내는데 이는 모델이 관측보다 기온을 낮게 모의함을 의미하고, 강수는 주로 양의 편이를 나타내는데 이는 모델이 관측보다 과다 강수를 모사함을 나타낸다. 여름철에는 대부분 모델

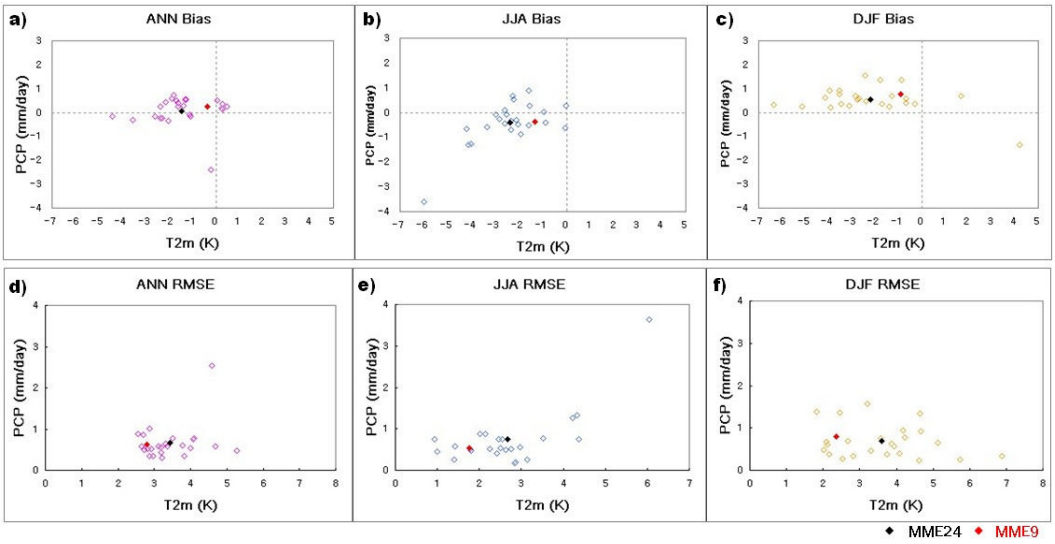

Fig. 1 Bias and RMSE distributions of ANN, JJA and DJF of mean temperature(T2m, ℃) and mean precipitation(PCP, mm/day) for East Asia.

이 기온과 강수에서 음의 편이를 나타내었다(Fig. 1b). 여름철 기온 RMSE는 연평균 기온 RMSE보다 약 22%가 감소하였으나 강수는 오히려 약 10%가 증가하였다(Fig. 1e). 겨울철의 기온은 대부분 음의 편이를 나타내고 강수는 양의 편이를 보인다(Fig. 1c). 겨울철 기온 및 강수의 RMSE는 연평균에 비해서 각각 5%, 3%의 약한 증가를 보였다(Fig. 1f). 따라서 강수는 여름철이, 기온은 겨울철이 모델간 편이가 더 크게 나타남으로써 여름철 강수와 겨울철 기온이 불확실성이 더 큼을 보여준다. 또한 RMSE의 경우, 강수보다 기온의 RMSE가 더 크고 여름철은 기온과 강수가 양의 상관을 가지는데 이는 기온 모의성능이 좋은 모델이 강수 모의성능도 좋게 나타나는 것을 의미한다. MME9는 MME24에 비해서 기온에서는 편이와 RMSE가 줄었지만 강수에서는 큰 차이가 없다.

그림 2a)는 관측치의 표준편차에 대한 모델의 표준편차로 정의되는 표준편차율($\sigma_{모델}/\sigma_{관측}$)로써 기온 변동성은 관측보다 모델이 큰 반면, 강수변동성은 모델이 관측보다 작게 나타나는 경향이 있다. 또한 기온과 강수의 표준편차율이 비례하는데 이는 기온의 변동성이 큰 모델은 강수의 변동성도 상대적으로 크게 모의함을 의미한다. 상관계수는 관측치와 모델결과간의 공간상관계수를 나타내는 계수로 유용하게 사용되는데, 그림 2b)에서 대부분의 기온과 강수의 공간상관은 비례함으로써 관측의 기온과 모델의 상관계수가 높은 모델이 더 나은 강수의 상관관계를 보인다. 그림 2c)는 관측에 대한 공간상관과 표준편차율을 동시에 표현할 수 있는 Taylor diagram으로 모델들이 연평균 기온(알파벳)과 강수(숫자)는 변수별로 비슷한 모사능력을 가짐을 알 수 있다.

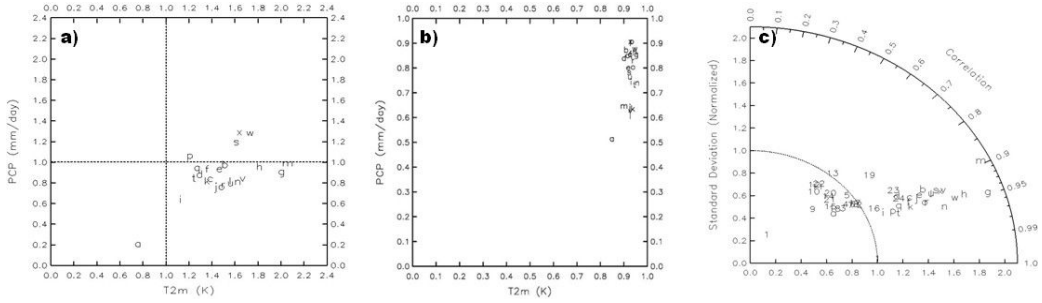

Fig. 2 a)The ratio of standard deviation, b)correlations between model and observation and c)Taylor diagram analysis for annual mean T2m(℃) and PCP(mm/day) for East Asia.

3.2 미래기후전망

IPCC DDC에서 제공하는 AOGCM 기후자료는 SRES A2, A1B 및 B1 시나리오에 따라서 제공되는 자료의 수가 다르기 때문에 미래기후를 예측하기 위해 모든 시나리오에 대해 이용 가능한 13개의 AOGCM과 13개 모델의 다중모델앙상블(MME13)을 이용하여 미래기후를 전망하였다. 그림 3은 1990년부터 2100년까지 동아시아에서의 SRES A2, A1B 및 B1 시나리오에 따른 AOGCM과 MME13의 평균 기온과 강수변화 시계열이다. 미래 기온변화 시계열에서는 모든 기후모델들이 온실가스의 증가로 인한 기온 상승을 잘 나타내며 특히 2040년 이후 모든 시나리오에서 급격한 기온 상승을 모의하고 있다. 21세기 후반으로 갈수록 미래기온의 불확실성이 점차 증가하는데 이는 배출 온실가스의 복사강제력 변환과정과 모수화과정에서 비롯된 불확실성으로 판단된다. 미래 강수변화는 기온변화에 비해서는 약한 증가 추세가 나타나지만 모델간 내부 변동성이 매우 크게 나타나고 있다.

그림 4는 SRES A2, A1B 및 B1 시나리오에 따른 동아시아의 2020년대(2010-2039년), 2050년

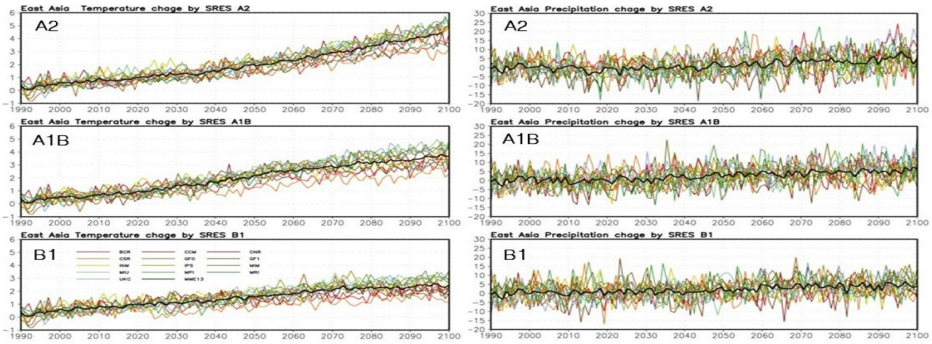

Fig. 3. Time series of temperature (°C; left) and precipitation (%; right) change for SRES A2, A1B and B1

대(2040-2069년), 2080년대(2070-2099년)에 대한 기온변화의 공간 분포이다. 미래기온은 고위도일수록 기온 상승폭이 크며 해양보다는 육지에서 상승폭이 더 크게 나타난다. 기온 변화가 가장 심한 A2 시나리오에서의 한반도 남단과 북단의 기온차이는 2020년대 0.2℃, 2050년대 0.4℃, 2080년대 0.8℃로 점차 증가한다. 미래강수는 30°-40°N의 중국 동해안과 한반도 서해안 부근의 강수가 점차 증가하는데 이는 기온 상승에 따른 강수대의 활성화로 인한 것으로 판단되는데 좀 더 정밀한 분석이 요구된다.

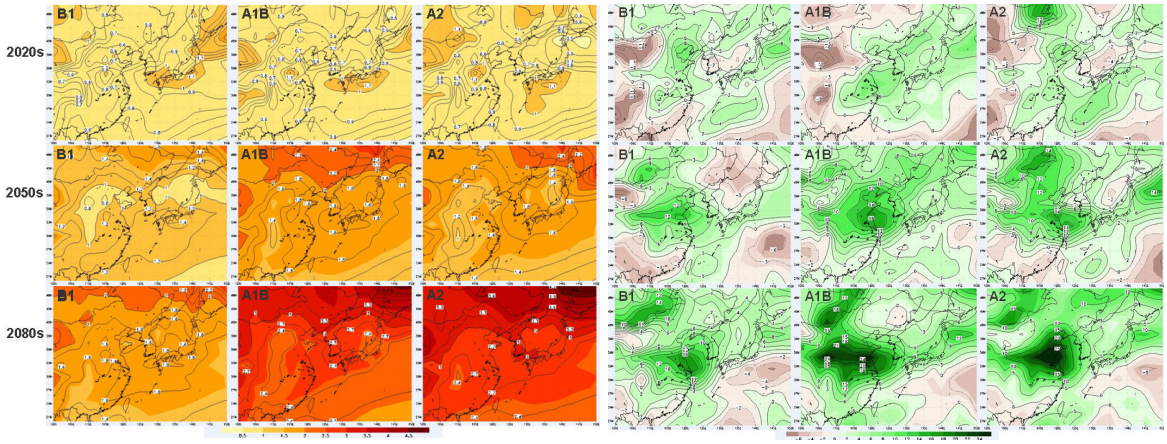

Fig. 4 The mean T2m change(℃; left) and the mean PCP change(%) from MME13 for 2020s, 2050s and 2080s with respect to 1961-1990

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers. Cambridge University Press, Cambridge.
2. Jones, P. D. 1994: Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update t0 1993. J. Climate, 7, 1794-1802.
3. Xie, P. and P. A. Arkin, 1996: Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. J. Climate, 9, 840-858.