

An Uncertainty Assessment of Temperature and Precipitation over East Asia

동아시아 기온과 강수의 불확실성 평가

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

신진호*, 김민지**, 이효신***, 권원태****

Abstract

In this study, an uncertainty assessment for surface air temperature(T2m) and precipitation(PCP) over East Asia is carried out. The data simulated by the intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4) Atmosphere-Ocean coupled general circulation Model (AOGCM) are used to assess the uncertainty. Examination of the seasonal uncertainty of T2m and PCP variabilities shows that spring-summer cold bias and fall warm bias of T2m are found over both East Asia and the Korea peninsula. In contrast, distinctly summer dry bias and winter-spring wet bias of PCP over the Korea peninsula is found.

To investigate the PCP seasonal variability over East Asia, the cyclostationary empirical orthogonal function(CSEOF) analysis is employed. The CSEOF analysis can extract physical modes (spatio-temporal patterns) and their undulation (PC time series) of PCP, showing the evolution of PCP. A comparison between spatio-temporal patterns of observed and modeled PCP anomalies shows that positive PCP anomalies located in northeastern China (north of Korea) of the multi-model ensemble(MME) cannot explain properly the contribution to summer monsoon rainfalls across Korea and Japan. The uncertainty of modeled PCP indicates that there is disagreement between observed and MME anomalies. The spatio-temporal deviation of the PCP is significantly associated with lower- and upper-level circulations. In particular, lower-level moisture transports from the warm pool of the western Pacific and corresponding moisture convergence significantly contribute to summer rainfalls. These lower- and upper-level circulations physically consistent with PCP give a insight of the reason why differences between modeled and observed PCP occur.

Key words: Uncertainty assessment, Multi-model ensemble, summer monsoon rainfalls

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 패널인 IPCC는 온실가스 배출에 관한 다양한 시나리오(A2, A1B, B1)를 바탕으로 대기해양결합 대순환모델(AOGCM)의 모의자료를 제공한다. IPCC 4차 평가보고서에 의하면, 2100년의 CO₂ 농도를 예를 들면, B1은 550 ppm, A1B는 720ppm, A2는 830ppm으로 A1B

의 CO₂ 농도는 현재 농도(367ppm)의 약 2배가 된다. CO₂ 등의 온실가스 및 에어러솔로 인해 지구온난화가 가속화되면서 지난 100년간(1906년~2005년) 전지구 평균기온은 약 0.74℃ ± 0.18℃

상승하였다(IPCC, 2007). 그리고, 지구온난화는 계속 될 전망이다. 지구온난화에 따른 기후변화는 미래의 수자원 계획을 수립을 요구케 한다. 미래 기후-수문의 변화를 예측하기 위해서 대기-해양 결합 전지구순환모델(AOGCM)이 이용되고 있다. 그러나, AOGCM의 고유한 특성에 따라 불확실성을 내포하고 있다. 이 불확실성은 미래 온실가스과 에어러솔 배출 시나리오의 불확실성, 배출된 가스과 에어러솔로 인한 복사강제력 변환의 불확실성, 강제력에 대한 기후계의 반응을 모수화하는 과정의 불확실성, 그리고 대순환모델의 결과를 지역규모로 다운스케일과정하는 과정에서의 불확실성에서 기인한다. 본 연구에서는 동아시아 지역(20°-50°N, 100°-150°E)에 대해 모델의 불확실성을 통계적 방법을 적용하여 평가하고, 불확실성을 감소시키기 위해 다중모델앙상블(Multi-model ensemble)을 적용하여 분석하였다. 또한, 다중모델앙상블을 이용하여 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 동아시아의 기후예측을 분석하였다. 사용된 자료는 IPCC Data Distribution Center(DDC)에서 제공하는 시나리오별 23개 기후 모델의 모의 결과와 국립기상연구소에서 모의한 ECHO-G/S 결과이다. 수집된 자료들은 모델별로 다양한 분해능(resolution)을 가지고 생산되었기 때문에 경도와 위도를 2.5°x2.5°(144x73)로 등격자화 하였다. 불확실성 평가를 위해 관측자료로, 기온은 Climate Research Unit(CRU) 월 평균 2m기온(Jones and Moberg, 2003)의 1961-1990년간 30년 월 평균값을, 강수량은 CPC Merged Analysis of Precipitation(CMAP)의 월평균 강수량의 1979-1990년의 21년간의 평균값을 이용하였다.

2. 불확실성 평가

IPCC 4차 보고서에 참여한 AOGCM들에서 모의된 기온, 강수를 관측과 비교 분석하여 그 불확실성을 평가하였다. 또한, 다중모델앙상블 기법을 적용하여 모의된 강수의 불확실성을 분석하였다.

2.1 분석방법

통계적 기법을 이용하여 모델을 검증하였다. 사용된 방법은 관측과 모델간의 편이(Bias), 평균 제곱근오차(Root Mean Squared Error, RMSE)이다. 또한, 다중모델앙상블 기법을 적용하기 위해 주성분(Principal component) 분석 기법인 CSEOF(cyclostationary empirical orthogonal function, Kim and North 1997)분석 기법이 사용되었다. CSEOF 분석기법은 시간과 공간을 가지는 자료를 물리적 모드와 그 시간적 변동성으로 분리시켜줌으로써 복잡하고 이해하기 힘든 물리현상을 의미 있는 시그널별로 나누어 설명케 도와준다. 24개 AOGCM 중 월별 강수량 모의가 결손이 있는 4개의 모델을 뺀 20개 모델만을 사용하였다. 이 기법을 이용하여 모델에서 모의된 강수와 관측된 강수의 시그널을 분리시켰다. 추출한 시그널중 변동성이 가장 큰 연주기(annual cycle)만을 분석하였다. 모의된 강수의 연주기중 통계적 기준(상관관계 계수, 월별 변동성 등)을 적용하여, 4개의 best 모델을 선정한 다음, 다중 모델앙상블(MME4)을 구성하였다.

2.2 기온과 강수의 불확실성 평가

24개 AOGCM은 관측 기온에 비해 계절별로 cold와 warm bias를 모의하였다(그림은 보여주지 않음). 봄, 여름, 겨울은 cold을, 가을은 warm bias로 모의하였다. 연평균은 cold bias로 모의되었다. 한반도 지역(-0.94℃)은 동아시아(-0.79℃)보다 약간 더 큰 bias를 모의되었다. 강수 bias는 기온의 bias보다 조금 더 복잡하게 나타난다. 동아시아의 봄, 가을, 겨울철에 wet bias를, 여름에 dry bias를 모의한다. 한반도 지역은 봄과 겨울에 wet bias를, 여름과 가을에 dry bias를 모의한다. 특히 한반도의 여름철 dry bias는 약 -2.0mm/day로 계절 중에서 가장 크다. 연평균적으로 동아시아는 wet bias(+0.12 mm/day), 한반도는 dry bias(-0.45mm/day)로 모의되었다. 기온과 강수의 RMSE를 비교해 볼 때, 모델간 오차는 동아시아에서 기온, 한반도지역에서 강수의 RMSE가 크다.

아래 그림1은 CSEOF분석 기법에서 추출된 연주기 물리적 모드로, 여름철 5-8월의 동아시아 강수의 공간적 패턴의 월별 변화를 나타낸 그림이다. 왼쪽은 20개 모델의 단순 다중모델앙상블(MME20), 가운데는 관측(OBS), 그리고 오른쪽은 MME4 강수량의 아노말리(월강수량에서 연평균값을 뺀 값)이다. 붉은색 계열은 양의 강수 아노말리(연 평균보다 더 비가 옴), 파란색 계열은 음의 아노말리(연평균보다 비가 덜 옴)를 나타낸다. MME20은 강한 양의 아노말리가 만주지방에 형성되어 한반도부근에서 큰 아노말리가 형성되는 관측(OBS)과 차이를 나타낸다. MME4에서는 양의 아노말리가 북한과 연해주 지역을 중심으로 형성됨으로 관측(OBS)과 유사한 패턴을 보여준다. 따라서, 단순 다중앙상블보다 통계적 기법을 적용하여 모델들을 선정하여 다중모델앙상블을 구성하는 것이 더 나은 결과를 가져옴을 보여준다.

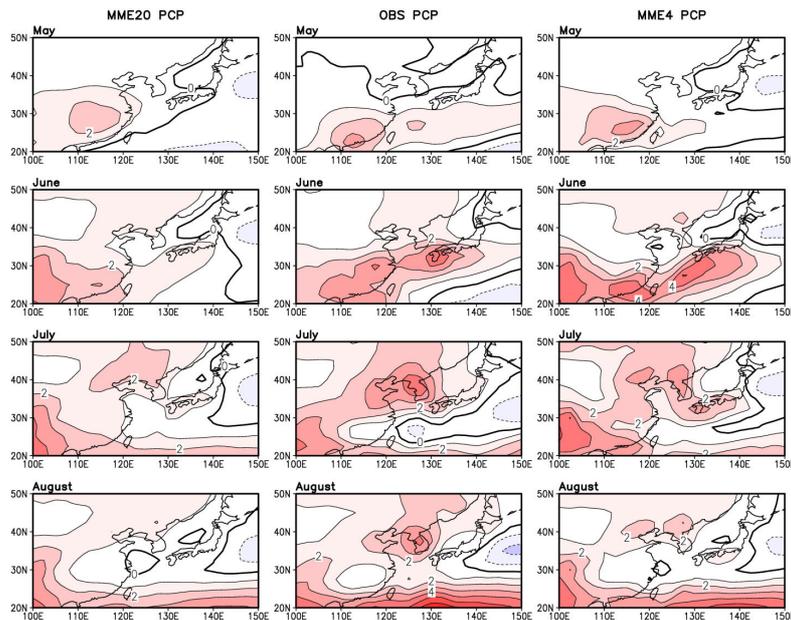


그림1. CSEOF 분석기법을 이용한 관측(OBS), 다중모델앙상블 (MME20, MME4) 강수의 비교.

3. 미래기후예측

IPCC의 AOGCM은 모든 시나리오 A2, A1B 및 B1에 따른 모의 결과를 제공하지 못하고 있다. 따라서, 시나리오별 미래기후를 예측하기 위해, 시나리오에 따른 연속된 모의결과를 제공하는 13개 AOGCM을 선별하고 각 AOGCM과 그 다중모델앙상블(MME13)을 분석하였다.

3.1 기온 전망

그림 2는 20세기(1961-1990년)에 대비하여 21세기에 각 시나리오 A2, A1B, 및 B1에 따라 다중 모델앙상블, MME13의 상승된 기온의 공간적 분포를 보여준다. 대체적으로, 고위도로 감에 따라 기온상승 폭이 크며, 해양보다는 육지에서 기온상승 폭이 크다. 특히, 한반도 주변의 기온변화는 미래 기간에 따라 심화되는 경향을 보인다. 한반도의 남북간 온도경도가 증가하고, 온도-기압-바람 관계를 고려할 때 남북방향의 지표면 바람이 강해질 수 있음을 시사한다. 이것은 한반도 부근의 지표부근의 남북순환이 강해짐을 의미한다. 이런 경향성은 A2에서 가장 크다. 표1은 동아시아 지역에서 20세기(1961-1990년)에 대비하여 A2, A1B, B1에 따라 13개의 AOGCM과 그 다중모델앙상블, MME13의 2020년대(2010-2039년), 2050년대(2040-2069년), 2080년대(2070-2099) 평균 기온 변화이다. 온실가스 배출량이 가장 큰 시나리오 A2가 생산한 MME13의 기온 변화는 2020년대

1.07℃, 2050년대 2.12℃, 2080년대 3.66℃의 기온상승이 모의되었다. A1B(B1)의 경우는 2020년대 1.09℃(1.00℃), 2050년대 2.31℃(2.03℃), 2080년대 3.18℃(2.30℃)의 기온 상승을 각각 보여준다. 온실가스 배출 증가로 인해 동아시아지역의 기온은 꾸준히 상승하여 21세기말에는 20세기에 비해서 2.3~3.7℃가 상승할 것이다.

3.2. 강수 전망

20세기에 대비하여 각 시나리오별로 MME13의 미래 강수변화의 공간 분포는 기온변화와 유사하다(그림2와 3). 30°-40°N의 중국 동해안과 한반도 부근에서 강수가 증가하는 경향이 있다. 온실가스 증가로 인한 대륙-해양간 기온 상승의 차이는 남북간 온도경도를 심화시켜 남북순환이 증가시킨다. 강화된 남서기류는 더 많은 수증기 유입을 동반하고 그 수렴대가 황해와 한반도에서 형성되어 강수량을 증가시킬 것이라 예상된다. 표2는 동아시아 지역의 미래 2020년대, 2050년대, 2080년대에 대한 강수변화를 보여준다. 20세기에 대비하여 A2는 2020년대 -0.65%, 2050년대 1.40%, 2080년대 4.10%의 강수의 증가를 각각 보여준다. A1B(B1)에 대한 강수변화는 기간별로 2020년대 0.44%(0.80%), 2050년대 3.08%(2.17%), 2080년대 4.83%(4.15%)이다. 기온상승이 가장 컸던 A2보다 A1B가 강수변화가 크며 강수량도 더 증가함을 보여준다. 21세기 동아시아 평균 강수는 조금씩 증가하여 21세기말에는 20세기에 비해서 4.10~4.83%가 증가할 것이다. 그러나, 모델간 모의하는 미래 강수의 변동성은 기간대별로 더욱 커진다. 이것은 미래에 전망되는 강수의 불확실성이 큼을 나타낸다.

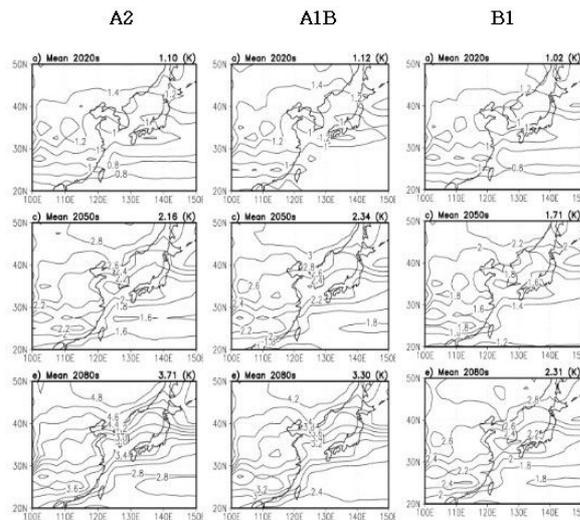


그림2. 시나리오별 미래 동아시아 평균 기온

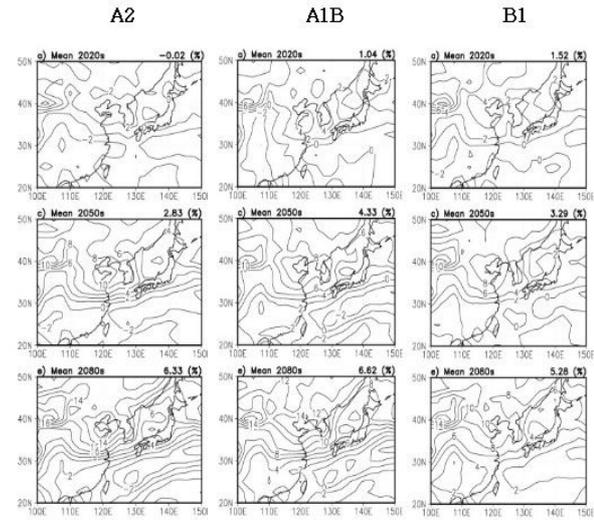


그림3. 시나리오별 미래 동아시아 평균 강수

3. 결론

CSEOF분석 기법과 다중모델앙상블을 적용한 강수 불확실성 평가는 모델들이 동아시아 여름철 장마를 불완전하게 모의함을 보여준다. 미래 동아시아는 20세기에 비해 기온은 더욱 상승하고 특히, 한반도 주변의 남북방향 온도경도의 증가와 관련된 수증기 수렴대의 활성이 여름철 몬순을 강화시키고 강수량을 증가시킬 것으로 전망된다. 하지만, 모델에 의해 모의된 강수 변동성이 크기 때문에 미래 강수 불확실성의 개선의 여지가 남는다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원

(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

표1. 1961-1990년 대비하여 시나리오별 13개 AOGCM과 MME13의 동아시아 평균기온 변화

Model	2020s(2010-2039)			2050s(2040-2069)			2080s(2070-2099)		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
BCR	0.83	0.82	0.82	1.57	1.70	1.20	2.91	2.64	1.67
CCM	1.24	1.37	1.14	2.29	2.20	1.70	3.59	2.72	1.99
CNR	1.08	1.21	1.29	2.30	2.53	1.58	3.88	3.25	2.15
CSR	0.87	0.67	0.41	1.55	1.31	0.95	2.66	2.09	1.34
GF0	0.97	0.90	1.07	2.11	2.57	1.92	3.89	3.46	2.29
GF1	0.94	1.00	1.04	2.12	2.45	1.70	3.44	3.31	2.18
INM	1.56	1.57	1.35	2.35	2.42	1.90	3.91	3.08	2.42
IPS	1.13	1.26	1.16	2.44	2.60	1.96	4.05	3.91	2.86
MIM	1.27	1.24	1.15	2.35	2.50	2.03	4.19	3.71	2.59
MIU	1.43	1.17	1.08	2.46	2.47	1.97	4.21	4.02	2.91
MPI	0.89	0.82	0.74	2.07	2.54	1.66	3.95	3.74	2.75
MRI	0.72	0.86	0.93	1.62	2.07	1.51	2.95	2.82	2.06
UKC	1.05	1.30	0.88	2.28	2.69	1.89	4.01	3.93	2.70
MME13	1.07	1.09	1.00	2.12	2.31	1.69	3.66	3.28	2.30

표2. 1961-1990년 대비하여 시나리오별 13개 AOGCM과 MME13의 동아시아 평균 강수 변화

Model	2020s(2010-2039)			2050s(2040-2069)			2080s(2070-2099)		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
BCR	1.81	1.08	1.08	2.56	4.00	0.95	4.43	4.81	2.78
CCM	2.93	3.69	2.15	6.49	4.48	3.89	9.81	7.06	4.51
CNR	-2.26	-1.93	-1.39	0.60	0.51	0.51	0.42	3.28	1.81
CSR	-0.43	1.92	-1.29	1.48	2.17	-0.07	2.21	0.28	2.13
GF0	-0.57	-0.88	1.54	0.12	5.32	2.41	3.21	5.57	6.75
GF1	-5.81	-3.39	-1.93	-4.77	-1.99	0.14	-0.24	0.04	1.22
INM	1.11	0.63	2.95	2.49	2.35	3.35	3.19	3.35	2.41
IPS	0.95	-0.13	1.57	2.19	4.85	3.99	3.67	5.65	5.94
MIM	1.25	2.68	3.55	4.07	5.11	4.39	8.06	7.59	6.56
MIU	-0.99	0.59	0.28	-0.23	0.20	0.33	1.40	4.16	2.80
MPI	-1.83	0.66	2.83	-0.11	4.60	1.88	4.05	4.55	3.64
MRI	-3.96	-2.32	-0.57	-0.06	3.05	4.05	3.68	6.22	6.94
UKC	-0.68	3.14	-0.31	3.43	5.40	2.36	9.41	10.26	6.51
MME13	-0.65	0.44	0.80	1.40	3.08	2.17	4.10	4.83	4.15

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., and A. Moberg(2003) "Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001". Journal of Climate, Vol. 16, pp. 206-223.
3. Kim, K.Y. and G.R. North(1997) "EOFs of Harmonizable Cyclostationary Processes." Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 54, No. 19, pp. 2416-2427.