

한반도지역에 대한 미래 기후변화 시나리오의 통계적 상세화

A Statistically Downscaling for Projecting Climate Change Scenarios over the Korean Peninsula

신진호*, 이효신***, 권원태****, 김민지**,
Jin-Ho Shin, Hyo-Shin Lee, Won-Tae Kwon and Min-Ji Kim

Abstract

온실가스 증가에 따른 미래 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전구기후모델(AOGCM)의 기온과 강수 자료를 이용하여 한반도 지역에 대한 통계적 규모 상세화(statistical downscaling, SDS) 기법을 개발하였다. 개발된 기법은 Cyclostationary Empirical Orthogonal Function (CSEOF) 분석과 회귀분석을 결합한 것으로 관측과 AOGCM 시계열의 통계적 상관성을 이용하고 있다. 20세기말(1973-2000) 동안의 광역규모의 기온(ECMWF)과 강수량(CMAP) 및 AOGCM의 기온과 강수량 자료에 통계적 상세화 기법을 적용하고 비교함으로써 이 기법의 유효성을 검증하였는데, 상세화된 기온과 강수량 자료는 관측된 계절변동성과 월변동성을 잘 모사하였다. 특히, 여름철 관측에 비해 저평가된 AOGCM의 강수량 크기와 변동성이 상세화를 통해 관측치에 근접하게 되었다. AOGCM의 미래 강수량 변화는 21세기 후반에 계절적으로 봄과 여름에 증가할 것을 예상되었다. 상세화된 AOGCM의 강수는 겨울을 제외한 모든 계절에서, 특히 여름철에 가장 많이 증가할 것으로 전망되었다. AOGCM의 미래 기온변화는 21세기 후반으로 갈수록 상승하며, 계절적으로 겨울철의 기온 상승폭이 더 클 것으로 전망되는데, AOGCM을 상세화한 결과에서는 겨울과 더불어 여름에도 기온 상승폭이 클 것으로 전망되었다. 개발된 기법은 역학적 결과와 관측과의 통계적 상관성을 이용하기 때문에 광역규모의 기후적 특성뿐만 아니라 한반도 지형 등 지역적 특성도 모두 반영함과 더불어 광역규모의 자료를 빠른 시간내에 효과적으로 상세화시킬 수 있는 장점도 지닌다. 한편 상세화에 사용된 CSEOF의 모드 수 등에 따른 불확실성 등은 통계적 상세화 과정에 개선될 여지가 남아있음을 보여준다.

핵심용어: 기후변화, 수자원, 통계적 상세화

1. 서론

장래의 수자원 계획 수립에 절대적으로 요구되어지는 수문-기상의 변화를 예측하기 위해 정부간기후변화협의체(International Panel on Climate Change, IPCC) 4차 평가보고서(Fourth Assessment Report, AR4)에 참여한 대기해양결합모델들을 이용하여 한반도의 기후 변화 시나리오를 생산하고 그 전망을 분석하였다. 하지만, AOGCM과 같이 수평분해능이 낮은 격자 체계에서 한반도는 충분한 격자점으로 표현되지 못하고 있어 지형적 영향에 따른 기후 예측과 분석에는 한계를 가진다. 이에 따라 전지구 광역규모의 모델에서 모의된 대기 순환과 지역 기후간의 통계적

* 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구원 · E-mail : jshin@metri.re.kr
** 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구사 · E-mail : climate@korea.kr
*** 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 과 장 · E-mail : wontk@kma.go.kr
**** 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구원 · E-mail : minji@metri.re.kr

특성을 이용하여 모델의 정보를 규모 축소화하여 세밀한 공간격자를 가지는 지역기후로의 통계적 상세화 기법이 필요하다. 주성분 분석 (Principal component analysis) 기법 중 가장 최근에 개발된 Cyclostationary Empirical Orthogonal Function (CSEOF) 분석과 회귀방법을 적용한 통계적 상세화 기법을 이용하여 IPCC AOGCM의 월 강수량과 기온을 한반도 지역으로 상세화시켜 자료를 산출하였다.

2. 자료와 방법

2.1 자료

관측자료와 AOGCM가 모의한 자료사이의 유사한 통계적 상관성을 이용하여 AOGCM의 기후 자료를 상세화시켰다. 관측 자료는 기상청 57개의 종관 지상 관측소에서 관측된 월 기온 (1973-2000년)과 강수량 (1979-2000년)자료가 지역 기후 자료로 사용되었다. IPCC 4차 평가보고서 (AR4)에 인용된 AOGCM 중 13개 AOGCM이 모의한 시나리오 A1B 월 기온과 강수량 자료가 사용되었다 (Table 1 참조). 20세기에 대해 광역관측의 기온과 강수 자료와 비교하기 위해 13개 모델 결과를 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 으로 등격자로 처리하였다. 전체 자료기간은 자연강제력과 인위강제력을 근거로 기후를 재현한 20세기 기후모의(20th Century Climate Coupled Model; 20C3M)의 100년(1900년-1999년)과 미래기후를 전망하기 위한 A1B 시나리오의 100년(2000년-2099년)이다.

Table 1 List of climate models, their versions, simplified 3-letter abbreviations for each model.

No.	Model(agency: version)	Abb.	Country	Resolution	
				Atm.	Ocn.
1	BCCR: BCM2	BCR	Norway	128X64	360X180
2	CCCMA: CGCM3_1-T47	CCM	Canada	96X48	192X96
3	CNRM: CM3	CNR	France	128X64	180X170
4	CSIRO: MK3	CSR	Australia	192X96	192X189
5	GFDL: CM2	GF0	USA	144X90	360X200
6	GFDL: CM2_1	GF1	USA	144X90	360X200
7	INM: CM3	INM	Russia	72X45	144X84
8	IPSL: CM4	IPS	France	96X72	180X170
9	NIES: MIROC3_2_MED	MIM	Japan	128X64	256X192
10	CONS: ECHO-G	MIU	Germany/Korea	96X48	128X117
11	MPIM: ECHAM5	MPI	Germany	192X96	360X180
12	MRI: CGCM2_3_2	MRI	Japan	128X64	144X111
13	UKMO: HADCM3	UKC	UK	96X73	288X144

2.2 통계적 상세화 방법

현재 이용되고 있는 통계적 상세화 기법중 가장 최근에 개발된 CSEOF 분석(Kim and North, 1997)을 이용하였다. CSEOF 분석은 순환 정상상태를 가정함으로써 주기성을 가지고 변화하는 대기 현상의 물리적 성분들을 서로 분리하여 이해하는데 매우 유용하다. 시공간을 가지는 관측과 광역규모 강수량, $PCP(r,t)$ 에 대해 CSEOF 분석 방법을 각각 하였다. CSEOF 분석은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$PCP(r,t)=\sum_n P_n(r,t)\times PC_n(t) \quad (1)$$

여기서 $P_n(r,t)$ 는 모드의 시공간의 변화이며 $PC_n(t)$ 는 각 모드의 크기의 시간에 따른 변동하는가를 나타낸다. 분석된 두 변수 사이의 통계적으로 유사한 모드를 찾기 위해, 한반도 관측 강수량의 주성분 시계열, $PCR(t)$ 을 독립변수로, 광역규모 강수량의 주성분 시계열, $PCL(t)$ 을 종속변수로 정의해 다중선형회귀식(Multiple-Linear Regression, MLR)을 결정하였다. 그 회귀계수, a_{ni} 를 얻기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$PCL_n(t)=\sum_i^n a_{ni}PCR_i(t)+\varepsilon(t) \quad (2)$$

여기서, PCL_n 는 종속변수의 주성분시계열의 n 번째 모드, PCR 은 독립변수의 i 번째 모드이다. 독립변수의 모드 수는 총 변동의 99%를 설명하는 10개를 사용하였다. 이때, 에러, $\varepsilon(t)$ 를 최소화시킬 때 회귀계수를 구할 수 있다. 식 (2)에서 구하여진 회귀계수, a_{ni} 를 관측 강수의 CSEOF 패턴, $T_i(r,t)$ 과 곱하여 새로운 강수량의 CSEOF 패턴, $T'_n(r,t)$ 을 구해야 한다.

$$T'_n(r,t)=\sum_i^{10} a_{ni}T_i(r,t) \quad (3)$$

최종적으로 각 모드별 광역규모 CMAP의 주성분 시계열과 회귀계수를 곱하여 얻어진 관측 강수량의 CSEOF 패턴을 모드별로 곱해서 더하면 한반도지역으로 상세화된 기온자료를 생성할 수 있다. 그 통계적 상세화의 관계식은 다음과 같다.

$$SDS(r,t)=\sum_n PCL_n(t)\cdot T'_n(r,t) \quad (4)$$

여기서 $T'_n(r,t)$ 는 새로운 한반도 강수량의 CSEOF 패턴, $PCL_n(t)$ 는 광역규모 강수량의 주성분 시계열, 그리고 $SDS(r,t)$ 는 분석된 기간 동안 지역규모로 통계적으로 상세화된 공간과 시간의 차원을 가지는 강수량 자료이다. 위의 상세화 과정을 기온에 대해서도 적용하여 상세화된 기온자료를 생성할 수 있다. 상세화된 자료는 지점자료인데, Cressman 객관 분석을 이용하여 $0.2^\circ\times 0.2^\circ$ 간격 (~ 20 km)으로 격자화하였다. 위와 유사한 방법을 이용하여 Lim et al. (2007)은 미국 남동부지역에 대한 기온의 단기 계절 예측에 적용하였다. 이 연구에서는 한반도에 대해 AOGCM이 모의한 미래 강수량과 기온자료를 상세화하였다.

3. 상세화된 결과 비교

3.1 20세기 상세화된 결과 비교

Fig. 1은 상세화 과정 전후의 광역규모의 기후자료(강수량, 지표기온)와 한반도 관측의 계절 평균장을 보여준다. 총 4개의 패널 중에서 왼쪽부터 첫 번째와 두 번째의 패널은 여름과 겨울철 강수량의 결과이고 세 번째와 네 번째는 여름과 겨울철 기온의 결과이다. 각 패널에서 위의 두 그림은 재분석자료(CMAP의 강수량 또는 ECMWF의 기온)와 13개 모델 앙상블 (MME13), 아래 그림들은 관측, 상세화(Statistical downscaling, SDS)된 재분석자료와 MME13 순이다. 먼저, 한반도 관측 강수량의 계절 평균장은 여름엔 산맥의 풍상측에서, 그리고 겨울엔 강설패턴에 따른 서해안과 호남지방 및 동해안 지방에 뚜렷한 다우지역 분포를 보였다. 상세화 과정을 통해 광역규모의 기후자료는 상세화 과정을 통해 시공간적인 세밀한 패턴을 보여준다. 또한, 여름철엔 CMAP과 MME13이 가장 큰 차이를 보이는 건조 편의(dry bias)였지만 상세화 과정을 통해 그 크기가 감소

하였다. 겨울철은 습윤 편(wet bias)이 상세화 이후에도 크게 줄어들지 않고 동해안과 호남지방에서 습윤 편을 유지했다. 광역규모 강수 자료인 CMAP과 MME13의 불확실성은 상세화 과정을 통해 줄어들었다.

기온의 경우, MME13와 ECMWF의 계절 평균장을 비교하면, MME13가 ECMWF보다 봄철과 여름철에는 3~4℃ 이상 낮게, 가을에는 2℃ 정도 높게, 겨울에는 유사하게 각각 모의하였다. 즉, 모델은 여름에는 저온 편(cold bias)을 가지는 불확실성이 있다. 상세화된 MME13의 평균장은 지형적인 영향으로 인한 해안의 온난역과 산맥의 저온역을 보였다. 상세화된 MME13와 관측의 차이는 대각선 방향으로 남해안에서 동해안쪽으로 북상할수록 커졌다. 관측보다 상세화된 MME13의 기온이 낮았다. 상세화된 ECMWF의 공간장에서는 이런 온난역과 저온역이 뚜렷하게 나타나지 않은 반면, 상세화된 MME13에서는 잘 나타났다. 여름철 관측과 상세화된 ECMWF와 MME13과의 차이를 각각 잘 보여주었다.

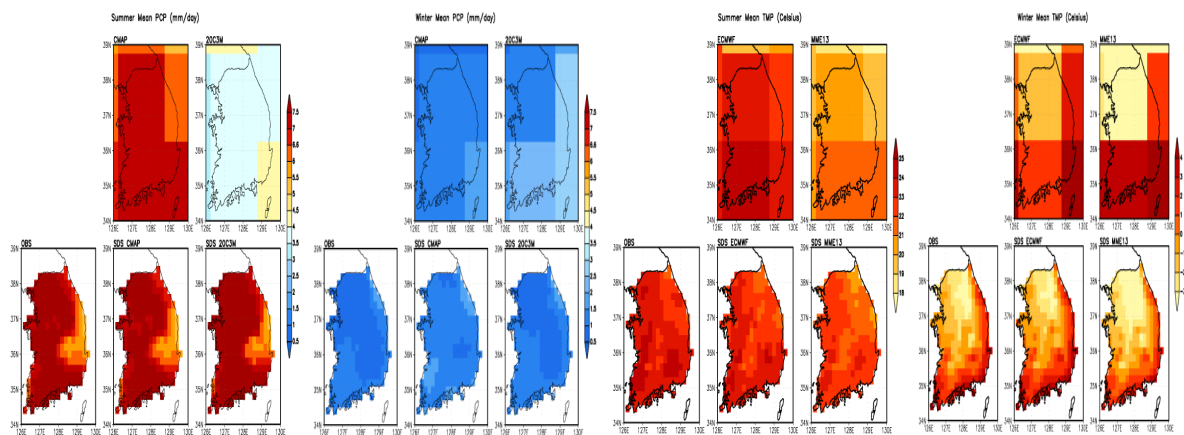


Fig. 1 Geographical distribution of monthly averaged precipitation and surface temperature for summer and winter for the 20th century. Each column from the left represents the monthly mean field derived from (a) CMAP (or ECMWF) and (b) MME13 on upper panels and the monthly mean field derived from (c) observation (OBS), (d) statistically downscaled (SDS) CMAP (or ECMWF), (e) statistically downscaled (SDS) MME13.

3.2 상세화된 미래기후 전망 비교

Fig. 2은 상세화 과정 전후의 AOGCM MME13의 기후자료(강수량, 지표기온)와 상세화(SDS)된 MME13의 연도별 계절 평균장을 보여준다. 총 4개의 패널 중에서 왼쪽부터 첫 번째와 두 번째의 패널은 여름과 겨울철 강수량의 결과이고 세 번째와 네 번째는 여름과 겨울철 기온의 결과이다. 각 패널에서 왼쪽 그림은 AOGCM MME13, 오른쪽 그림은 상세화된 MME13, 그리고 위에서부터 2020년대(2010-2039년), 2050년대(2040-2069년), 2080년대(2070-2099) 평균한 순이다. 여름철 AOGCM MME13과 상세화된 MME13의 강수량은 21세기 후반으로 갈수록 강수량이 증가하였다. AOGCM MME13의 경우, 2020년대에는 남부지방이 21세기 후반에는 중부지방에서 강수량이 더 증가할 것으로 예측하였다. 상세화된 강수량 MME13은 경기북부지방과 남부지방, 특히 해안지역에서 강수량의 증가가 클 것으로 전망하였다. AOGCM MME13의 겨울철은 강수량은 증가하고 중부지방에서 더 증가할 것으로 예측되었다. 상세화된 MME13는 남해안과 경기북부지방에서 강수량이 감소할 것으로 전망하였다. 기온의 경우, AOGCM MME13과 상세화된 MME13의 여름과 겨울철 기온은 유사하게 상승하며 21세기 후반으로 갈수록 더욱 상승할 것으로 예상되었다. 21세기 중반과 말에 여름철의 기온변화는 상세화된 MME13의 결과가 AOGCM MME13의 기온보다 크게 상승함을 보였다. 2020년대의 상세화된 MME13 기온변화는 약간의 지역적인 편차를 보이

지만, AOGCM MME13과 상세화된 MME13의 기온이 약 1°C 정도 비슷하게 상승할 것으로 전망되었다. 2050년대와 2080년대에는 AOGCM MME13의 기온이 대부분의 남부지방이 중부지방보다 더 상승할 것으로 전망하였다. 상세화된 MME13 기온변화는 2050년대 이후 남해안 지역과 중부내륙이 다른 지역에 비해 기온 상승 정도가 낮으나 AOGCM MME13 보다 클 것으로 전망되었다. 겨울철 기온변화는 다른 계절에 비교할 때 상세화된 MME13의 결과가 AOGCM MME13보다 21세기 연대별로 가장 크게 증가할 것으로 전망하였다.

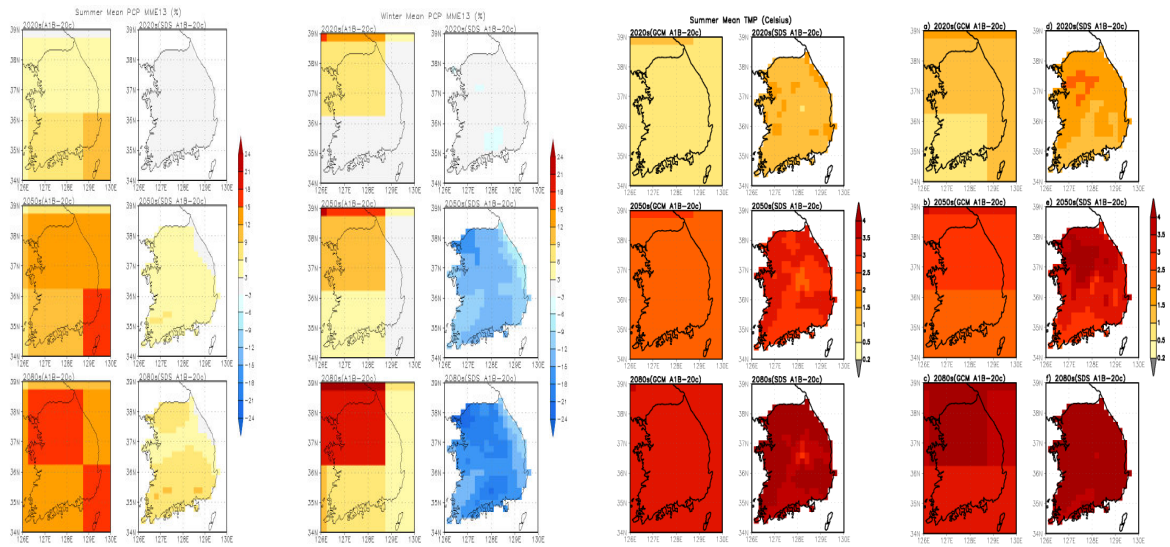


Fig. 2 Precipitation (%) and surface temperature change (°C) of MME13 of summer, and winter for three 30-year periods of 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), and 2080s(2070-2099) for the scenario A1B. Changes are relative to the 30-year mean 1961-1990. The left column at each panel represents the monthly mean field derived from AOGCM MME13 and the right the monthly mean field derived from SDS MME13.

3. 결론

시나리오 A1B에 따른 상세화된 MME13 기온과 강수 자료는 지역마다 독특한 관측의 기후 특성을 포함할 뿐만 아니라 모델에 의해 모의된 21세기 미래 기후 변화의 계절적, 연대별 특성을 내포하고 있다. AOGCM MME13의 미래 기온변화는 뚜렷한 계절적 편차가 없이 기온이 모두 상승하며 21세기 후반으로 갈수록 더욱 상승할 것으로 예상되었다. 상세화된 MME13의 미래 기온변화는 이와 동일하였으나, 계절별, 지역적으로 차이를 보였다. 또한, AOGCM MME13의 미래 강수변화는 기온의 상승과 함께 봄과 여름철에 증가하나 가을과 겨울에는 상대적으로 변화가 상대적으로 미미하였다. 상세화된 MME13 강수량은 겨울을 제외하고 대체로 증가할 것으로 예상되었다. 남해안과 경기북부지역에서 강수가 크게 증가할 것으로 전망되었다.

상세화된 MME13의 경우, 겨울철 강수량이 감소하는 전망은 20세기의 관측소에서 관측된 겨울철 강수량이 감소하는 경향과 관련지을 수 있다. 이 연구에서 사용된 통계적 상세화 기법은 20세기의 한반도 관측 강수량의 통계적 특성 (여름철 다우와 겨울철 소우, 강수의 지역적 편중성 등)이 21세기에 유지될 것으로 가정하기 때문이다. 20세기에 대해 AOGCM가 모의하는 강수의 계절적 양상이 한반도의 강수의 계절적 양상이 일치하지 않는 불확실성은 통계적 상세화 과정에서 어느 정도 줄일 수 있지만, 이런 특성은 미래에 더욱 커지기 때문에 통계적 기법을 이용한 상세화는 한계를 가진다. 그럼에도 불구하고 CSEOF 분석과 다중회귀기법을 이용하여 개발된 통계적 상세화 기법은 관측 강수와 모델간의 통계적 특성을 잘 반영하여 모델의 강수량과 기온 공간패턴을 재생성하여 모델 자료를 상세화시키는 점이 장점이다. 또한 역학적 상세화에 비해 계산시간을 크

계 단축시킬 수 있어 매우 경제성이 뛰어나다. 단, 회귀식을 결정할 때, 관측과 모델간의 기후민감도를 고려하여 적절한 CSEOF 모드수를 결정해야 한다. 기후 변화에 대한 지역 기후 시나리오의 구축할 때, 기후 자료의 통계적 특성을 파악하여 통계적 상세화 기법을 사용해야 한다. 상세화된 기후자료는 향후 역학적 상세화와 인공지능망을 이용한 상세화의 결과와 비교하여 자료의 불확실성 파악과 신뢰성을 제공할 수 있다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 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.
2. Lim, Y., Shin, D.W., Coker, S., LaRow, T.E., Schoof, J.T., O'Brien, J.J., and Chassignet, E.P. (2007). "Dynamically and statistically downscaled seasonal simulations of maximum surface air temperature over the southeastern United States." *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, No. D24, D24102