

변동경향을 보존하는 편의보정기법을 이용한 우리나라의 평균 및 극한기온 모의결과 보정

정현채 · 서명석*

공주대학교 대기과학과

(접수일: 2015년 2월 3일, 수정일: 2015년 2월 27일, 게재확정일: 2015년 3월 10일)

Correction of Mean and Extreme Temperature Simulation over South Korea Using a Trend-preserving Bias Correction Method

Hyun-Chae Jung and Myoung-Seok Suh*

Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Chungnam, Korea

(Manuscript received 3 February 2015; revised 27 February 2015; accepted 10 March 2015)

Abstract In this study, the simulation results of temperature by regional climate model (RegCM4) over South Korea were corrected by Hempel et al. (2013)'s method (Hempel method), and evaluated with the observation data of 50 stations from Korea Meteorological Administration. Among the 30 years (1981~2010) of simulation data, 20 years (1981~2000) of simulation data were used as a training data, and the remnant 10 years (2001~2010) data were used for the evaluation of correction. In general, the Hempel method and parametric quantile mapping show a reasonable correction both in mean and extreme climate of temperature. As the results, the systematic underestimation of mean temperature was greatly reduced after bias correction by Hempel method. And the overestimation of extreme climate, such as the number of TN5% and freezing day, was significantly recovered. In addition to that, the Hempel method better preserved the temporal trend of simulated temperature than other bias correction methods, such as the quantile mapping. However, the overcorrection of the extreme climate related to the upper quantile, such as TX5% and hot days, resulted in the exaggeration of the simulation errors. In general, the Hempel method can reduce the systematic biases embedded in the simulation results preserving the temporal trend but it tends to overcorrect the non-linear biases, in particular, extreme climate related to the upper percentile.

Key words: Bias correction, temperature, mean climate, extreme climate, trend

1. 서 론

최근 기후인자들의 자연적 변동에 인위적인 요인들이 추가되면서 기온, 강수 등 기후요소들의 시공간 변동성이 크게 증가되는 것으로 보고되고 있다(Rhein et

al., 2013). 그 결과 전 지구적인 평균 기후 변화와 함께 집중 호우, 가뭄, 폭염, 한파와 같은 극한 기후 현상의 발생 빈도 및 강도에도 큰 변화가 일어나고 있음이 관측 및 모델링 연구에서 밝혀지고 있다(Groisman et al., 2005; Caesar et al., 2006; Kharin et al., 2007, 2012).

이러한 기후변화의 원인 규명과 미래 기후변화를 전망하기 위해 전 지구기후모델(Global Climate Model)을 이용한 연구가 1970년대 이후부터 현재까지 꾸준히 수행되어 왔다(Charney, 1975; Cao et al., 1992;

*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, 56 Gongjudaeak-ro, Gongju-si Chungcheongnam-do 314-701, Korea.
Phone : +82-41-850-853, Fax : +82-41-856-8527
E-mail : sms416@kongju.ac.kr

Latif et al., 1998; Abe et al., 2011; Baek et al., 2013). 현재 다양한 유형의 전 지구기후모델은 전 지구규모의 장기간 기후 모의 및 전망자료 산출에 있어 신뢰성이 매우 향상되고 있는 것으로 평가되고 있다(Randall et al., 2007; Brown et al., 2010; Flato et al., 2013; Sillmann et al., 2013).

하지만 국지 및 지역규모에서 발생하는 극한 기후는 전 지구규모보다 시공간적 변동성이 매우 크기 때문에 이를 효율적으로 대비하기 위해서는 미래 기후에 대한 보다 상세한 예측 자료가 필요하다(Sung et al., 2012). 따라서 전 지구 모델을 통해 생산된 기후 자료에 통계 및 역학적 규모 축소(Downscaling)법을 사용하여 지역 규모의 상세 기후 자료를 생산하는 연구가 다양하게 이루어지고 있으며, 특히 역학적 규모 축소 방안인 지역기후모델(Regional Climate Model)을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Wilby and Wigley, 1997; Lee and Suh, 2000; Lee et al., 2004; Suh et al., 2012). 그러나 지역기후모델은 모델의 종류와 수행 환경(경계조건, 모의 영역, 수평 해상도 등) 그리고 사용한 물리적 기법에 의해 그 결과가 크게 달라지는 특성을 보이고 있다(Im et al., 2007; Lee et al., 2008; Park et al., 2013; Oh et al., 2014). 지역기후모델들이 갖는 불확실성의 완화 및 신뢰성 향상을 위해 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)와 같은 국제 프로젝트가 활발히 진행되고 있다(CORDEX website, 2009).

또한 대부분의 지역기후모델의 모의결과는 관측 자료와 비교하였을 때 경계조건의 영향, 단순한 물리과정과 부정확한 초기 자료 등으로 인한 계통적 오차(Systematic bias)를 가지고 있다(Tadross et al., 2005; Christensen et al., 2008). 특히 극한 기후 현상에 대한 모의수준이 매우 낮게 나타남(Hempel et al., 2013)에 따라 이와 같은 문제를 해결하기 위해 다양한 유형의 편의보정기법(Bias correction method)들이 개발되어 왔다(Dosio and Paruolo, 2011; Rojas et al., 2011; Teutschbein and Seibert, 2012). 그 결과 최근에는 통계적인 후처리 방법으로 모델의 계통적인 편의(Bias)를 감소시켜 신뢰성 있는 기후 정보를 생산하고 있다(Piani et al., 2010; Gudmundsson et al., 2012; Hempel et al., 2013).

Myoung et al. (2012)는 선형 회귀식을 개발하여 RegCM4로 모의한 남한지역의 월 평균 및 최고/최저 기온에 적용한 결과 모의수준이 향상됨을 보였다. Park et al. (2012)은 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오 기반 HadGEM3-RA로 모의한 강수 결과를 GEV (Generalized Extreme Value) 분포에 사상시켜 미래 극한 강수량에 대한 편의를 보정하고자 하였다. Piani et al. (2010)은 전 지구 모델인 ECHAM5

의 결과에 모수 분위 사상법(Parametric quantile mapping)을 적용한 결과 보정 전보다 후에 통계적으로 신뢰할 만한 결과가 도출되지만 보정수준이 지역별로 상이함을 보였다. Gudmundsson et al. (2012)은 노르웨이 지역의 지역기후모델 결과에 다양한 형태의 모수 분위 사상법과 비모수 분위 사상법(Nonparametric quantile mapping)을 적용하여 보정한 결과 비모수 분위 사상법이 가장 좋은 보정결과를 보임을 밝혔다. 평균 편차보정방법(Delta change approach, Hay et al., 2000)과 중앙값 및 회귀식을 이용한 보정방법은 적용이 쉽고 불확실성이 적으나 극한 기후에 대한 보정수준이 낮은 단점이 있다(Park et al., 2012). 또한 분위 사상법은 극한 기후에 대해 높은 보정수준을 보이지만 모델이 모의한 변동경향을 보존하지 못하는 단점이 있다(Hempel et al., 2013). Hempel et al. (2013)은 모수 분위 사상법을 기반으로 모델이 모의한 장기간의 지구 온난화 경향을 보존함과 동시에 평균 및 극한 기후의 편의도 보정하는 기법을 개발하여 전 지구기후모델에 적용하였다. 그들은 비모수 분위 사상법이 통계적으로 가장 신뢰할 만한 결과를 보여주지만 미래의 모델 결과에 적용할 때는 자유도를 제한하여 미래 기후변화를 지나치게 단순화시키는 문제가 발생함을 지적하였다.

본 연구에서는 지역기후모델의 장점인 변화된 복사 강제력에 대한 기후 시스템의 반응, 즉 기후변화 경향은 보존하면서 모델이 갖는 평균 및 극한 기후 현상에 대한 계통적 오차를 보정하고자 하였다. 이를 위해서 Hempel et al. (2013)이 개발한 편의보정방법을 RegCM4로 모의한 남한지역에서의 기온 모의 결과에 적용하였으며, 월 평균 편차 보정방법과 선형회귀를 사용한 모수 분위 사상법과 비교를 통해 장단점에 대하여 분석하였다. 이후 2장에서는 보정연구에 사용된 모델 및 자료와 보정방법 등에 대하여 기술하였고, 3장에서는 평균 및 극한 기후 현상에 대한 보정결과들을 중심으로 보정 수준을 평가하였으며, 4장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

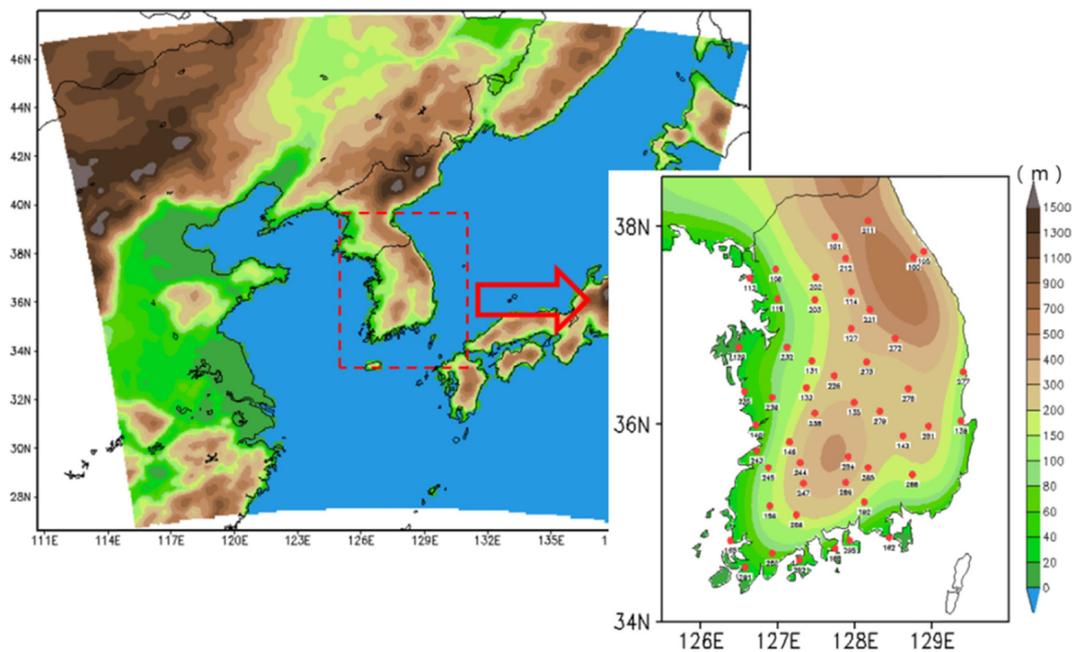
2. 자료 및 연구방법

2.1 모델 및 실험설계

본 연구에서는 Hong et al. (2013)과 Oh and Suh (2013)에서와 같이 ICTP (International Centre for Theoretical Physics)에서 2010년 7월에 공개한 RegCM4를 사용하였으며, 이전 버전인 RegCM3에 비해 지면 모수화와 행성 경계층 및 복사전달 방안이 개선되었다(ICTP Portal, 2010; Giorgi et al., 2012). RegCM4를 이용한 모의과정에서 사용한 물리 모수화 방안 및 모의환경은 Table 1과 같다. 모의영역은 37.50°N,

Table 1. Model configuration used in this study.

Contents	Description
Domain	12.5-km horizontal resolution Central Lat. and Lon. : 37.50°N, 127.50°E 200 (Lon) 180 (Lat)
Map projection	Lambert Conformal
Vertical layers	23 vertical sigma levels
PBL scheme	Holtzlag scheme
Cumulus parameterization scheme	MIT-Emanuel97
Land surface model	NCAR CLM3.5
Boundary data	HadGEM2-AO
Spectral nudging	Yes
Simulation period	Jan. 1979~Dec. 2010
Analysis period	Jan. 1981~Dec. 2010

**Fig. 1.** Model domain and topography (m) for 12.5 km grid spacing and the distribution of 50 observation station in South Korea.

127.50°E를 중심으로 200 × 180 (2,500 km × 2,250 km) 개의 수평격자로 12.5 km의 해상도를 가지며 23층의 시그마 연직 좌표계를 사용하였고, 30초 시간 간격으로 적분을 수행하였다.

2.2 자료

본 연구에서는 국립기상연구소에서 제공하는 HadGEM2-AO를 경계자료로 하여 RegCM4로 모의한 남한 지역에 대한 30년(1981~2010)간의 일 평균 및 최고/최저 기온자료를 사용하였다. 또한 기상청에서

운용중인 50개 지점의 지상 관측소에서 관측한 기온 자료를 사용하였다(Fig. 1). 전체 모의기간 중에서 20년(1981~2000)을 훈련기간으로 선정하여 편의보정에 필요한 계수를 산출한 후, 10년(2001~2010)을 검증기간으로 선정하여 보정수준을 평가하였다. 또한 편의보정이 극한 기후 모의수준에 미치는 영향을 평가하기 위해 선행 연구(e.g., Choi, 2004; Halenka et al., 2006; Im and Kwon, 2007; Liu et al., 2012; Oh et al., 2012; Gregersen et al., 2013)들을 기반으로 하여 기온 관련 극한 기후들을 정의하였다(Table 2). 상대

Table 2. Definitions of the indices of extreme climate for temperature.

Method	Index	Definition	Unit
Percentile threshold	TX5%	Highest 5 th percentile of daily maximum temp. by year (each station)	°C
	TN5%	Lowest 5 th percentile of daily minimum temp. by year (each station)	°C
	ETR5%	Highest 5 th percentile of difference between daily maximum temp. and minimum temp. by year (each station)	°C
Absolute threshold	Hot day	No. of days with daily maximum temp. ≥ 30°C	Days
	Tropical night day	No. of days with daily minimum temp. ≥ 25°C	Days
	Freezing day	No. of days with daily maximum temp. 0°C	Days

임계값 방법은 각 연도별 각 지점에서 모의(관측)한 1년 동안의 일 최고/최저 기온자료 중 상·하위 5%에 해당되는 값을 극한 기후로 정의한 것이며, 절대 임계값 방법은 각 극한 기후 현상별로 특정 임계값을 설정하여 각 연도별 각 지점에서의 임계값 초과 일수로 극한 기후를 정의한 것이다.

2.3 연구방법

본 연구에서는 Hempel et al. (2013)의 보정방법과 월 평균 편차 보정방법(DC, Delta change approach) 그리고 선형 회귀($a + b \cdot X$)를 사용한 모수 분위 사상법(QM, Parametric quantile mapping)의 보정결과에 대한 비교를 통해 각 보정방법의 장단점을 분석하였다.

Hempel et al. (2013)의 보정방법은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기본적인 전처리와 2단계의 편의보정으로 RegCM4가 모의한 기온을 보정한다. 전처리 과정에서는 모델의 격자 자료에 이중 선형 보간법을 적용하여 관측 지점의 위치로 재 산출하였으며 이때 기온의 경우 격자점과 관측점 사이의 고도 차에 의한 영향을 평균 기온 감률($\pm 0.65^\circ\text{C}/100\text{ m}$)을 적용하여 보정하였다. 전처리 이후 1단계에서는 관측과 모델 사이의 월 평균 차를 보정하고 2단계에서는 두 자료 사이의 일 변동 차에 대해 보정을 한다. 기온에 대한 구체적인 보정방법은 다음과 같다.

훈련기간 20년에 대한 관측과 모델의 월 평균 차 C 는 식(1)과 같이 산출하며 일 평균 기온과 월 평균 사이의 차 $\Delta T_d^{OBS(RCM)}$ 는 식(2)로 계산한다. 그리고 각 월마다 관측(ΔT_d^{OBS})과 모델(ΔT_d^{RCM})의 일별 아노말리 자료 사이의 선형 회귀 기울기 B 를 모수 분위 사상법으로 계산한다. 이렇게 계산된 총 12개의 선형 회귀 기울기 B 를 이용하여 식(3)과 같이 보정한다. 각 식에서 N 은 훈련기간의 년도 수(여기서는 20년)를 의미하며, $T_d^{OBS(RCM)}$ 는 관측(모델)의 일 평균 기온을, $\bar{T}_m^{OBS(RCM)}$ 은 관측(모델)의 월 평균 기온을 의미한다.

$$C = (\sum_1^N \bar{T}_m^{OBS} - \sum_1^N \bar{T}_m^{RCM})/N, \tag{1}$$

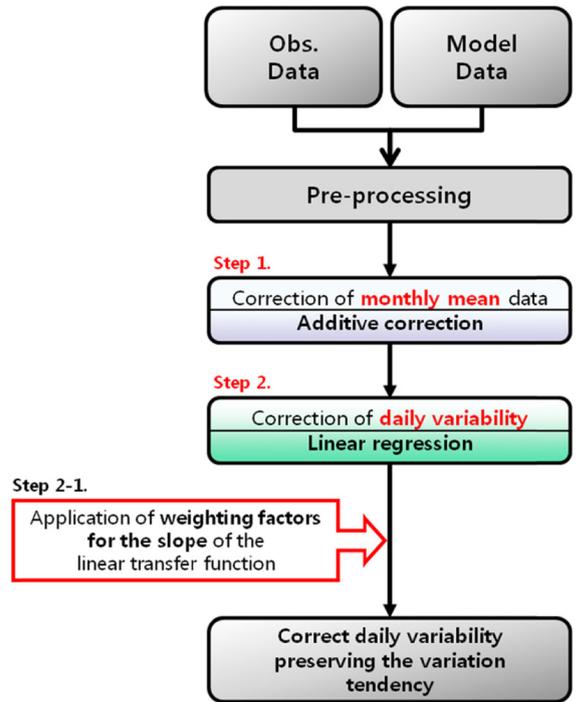


Fig. 2. Flow chart for bias correction method used in this study (Adopted from Hempel et al., 2013).

$$\Delta T_d^{OBS(RCM)} = T_d^{OBS(RCM)} - \bar{T}_m^{OBS(RCM)}, \tag{2}$$

$$\Delta \bar{T}_d^{RCM} = C + \bar{T}_m^{RCM} + \bar{B} \cdot \Delta T_d^{RCM}. \tag{3}$$

각 월에서 보정하고자 하는 날 사이의 시간 차를 반영하기 위하여 각 월의 중간일을 기준으로 식(4)를 이용하여 각 일별 가중치를 계산한다. 그리고 월별로 보정하는 과정에서 발생하는 월간 시간적 불연속성을 최소화하기 위해서 선형 회귀 기울기 B 에 이전 월(d_p), 현재 월(d_c) 그리고 다음 월(d_f)에 대한 가중치(1 : 2 : 1)

Table 3. Statistical summary of bias correction according to the correction methods: (a) daily temperature and (b) monthly temperature for 10-year (2001~2010).

(a)								
	Bias (°C)				RMSE (°C)			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Tmean	-1.52	0.08	0.06	0.03	4.41	3.98	4.11	3.95
Tmax	-1.73	0.36	0.35	0.33	5.39	4.99	5.04	4.97
Tmin	-0.97	-0.05	-0.06	-0.12	5.10	4.63	4.85	4.61
Ave.	-1.41	0.13	0.12	0.08	4.97	4.53	4.67	4.51
	QRMSE (°C)				Spatial correlation			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Tmean	1.60	0.54	0.59	0.54	0.49	0.64	0.64	0.65
Tmax	1.93	0.60	0.62	0.57	0.41	0.47	0.47	0.47
Tmin	1.55	0.61	0.74	0.60	0.43	0.68	0.66	0.68
Ave.	1.69	0.58	0.65	0.57	0.44	0.60	0.59	0.60
(b)								
	Bias (°C)				RMSE (°C)			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Tmean	-1.53	0.07	0.05	0.01	2.32	1.72	1.72	1.67
Tmax	-1.74	0.35	0.34	0.32	2.75	1.96	1.96	1.93
Tmin	-0.97	-0.06	-0.06	-0.13	2.48	1.96	1.97	1.89
Ave.	-1.41	0.12	0.11	0.07	2.52	1.88	1.88	1.83
	QRMSE (°C)				Spatial correlation			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Tmean	1.66	0.73	0.74	0.75	0.77	0.91	0.91	0.91
Tmax	2.05	0.85	0.85	0.83	0.80	0.88	0.88	0.88
Tmin	1.61	0.77	0.78	0.78	0.69	0.92	0.92	0.93
Ave.	1.77	0.78	0.79	0.79	0.75	0.90	0.90	0.91

를 적용하여 식(8)과 같이 계산하였다. 또한 식(8)에서 12개의 기온기 중 현재 월의 기온기는 B_c , 이전 월의 기온기는 B_p , 다음 월의 기온기는 B_f 로 표현하였다. 아래 식에서 i_{day} 는 보정을 하는 날짜를 의미하며 n_{day} 는 해당 월의 총 날짜 수를 의미한다.

$$d = \frac{i_{day} - 1}{n_{day} - 1} - 0.5, \quad (4)$$

$$d_p = 0.5 \cdot (|d| - d), \quad (5)$$

$$d_c = 1 - |d|, \quad (6)$$

$$d_f = 0.5 \cdot (|d| + d), \quad (7)$$

$$\bar{B} = d_p B_p + d_c B_c + d_f B_f. \quad (8)$$

마지막으로 보정일을 기준으로 3개월에 대한 가중치가 적용된 선형 회귀 기온기(\bar{B})를 식(3)에 적용하여 기온에 대한 보정을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 평균 기온 보정

Hempel et al. (2013) 방법(Hemp)의 보정수준을 평가하기 위하여 일반적으로 많이 이용되고 있는 월 평균 편차 보정방법(DC)과 선형 회귀를 사용한 모수 분위 사상법(QM)의 보정결과를 함께 분석하였다. Table 3의 (a)는 일 평균 기온에 대해 검증기간 10년 동안 각 보정방법별로 보정한 것을 나타낸 것이다. 모델이 계통적으로 기온을 과소 모의하고 있는데 보정 후에는 편의보정방법에 관계없이 대부분 음의 편의가 해소되고 있다(Hemp: 0.13°C, DC: 0.12°C, QM: 0.08°C). 또한 공간 상관관계(Spatial correlation)도 모든 방법에서 보정 후에 상관성이 크게 향상되었음을 볼 수 있다. 하지만 평균 제공근 오차(RMSE)에서는 보정효과가 크게 나타나지 않고 있으며, QM (4.51°C), Hemp (4.53°C) 그리고 DC (4.67°C) 방법 순으로 나타났다.

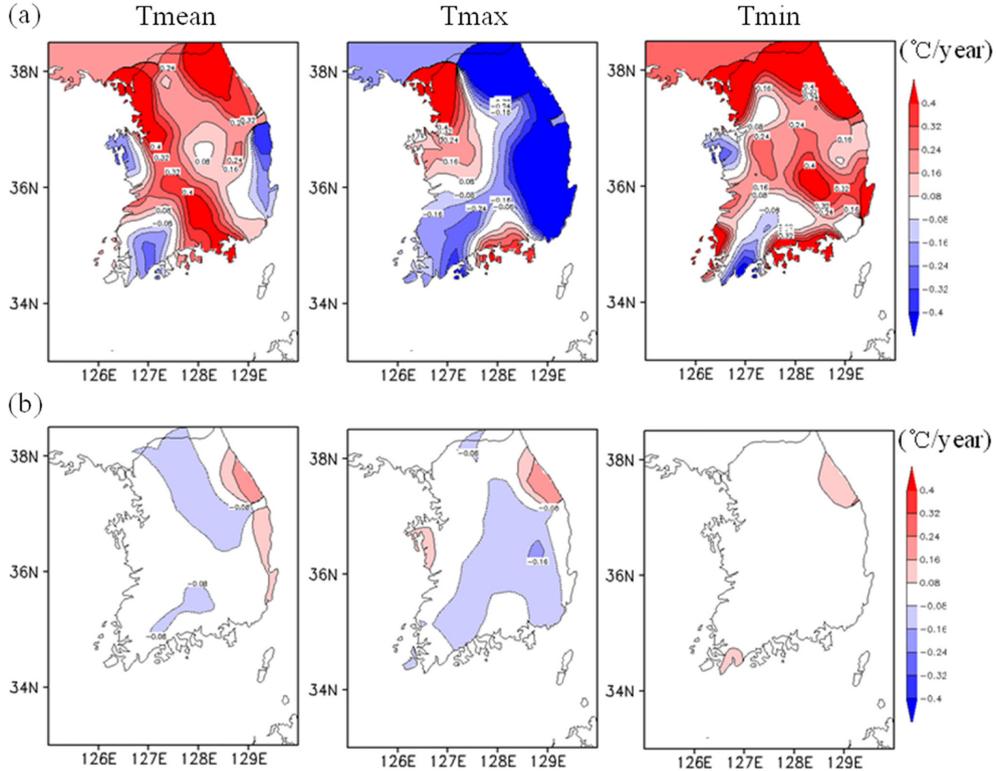


Fig. 3. Spatial distribution of trend differences for 10-year (2001~2010) between bias corrected data by (a) QM and (b) Hemp methods, and model (bias corrected data - model). Daily mean temperature (left), daily maximum temperature (middle) and daily minimum temperature (right) data are shown.

분위 평균 제곱근 오차(QRMSE)에서는 3가지 방법 모두에서 개선수준(약 70%)이 크게 나타나고 있으나 DC 방법(0.65°C)에서 상대적으로 보정효과가 작았다. 분위 평균 제곱근 오차는 기후모델의 모의결과에 대해서 분위 사상법으로 편의보정을 수행할 때, 평균 제곱근 오차보다 기후모델에 대한 보정수준을 정확하게 평가할 수 있는 척도로써 자료를 순위별로 나열한 후 분위별로 평균 제곱근 오차를 구하는 방식으로 계산한 것이다(Suh and Kim, 2014). Table 3의 (b)는 월 평균 기온에 대해 검증기간 동안 각 보정방법별로 보정한 것을 나타낸 것이다. (a)에서와 같이 모델이 계통적으로 과소 모의했던 결과가 모든 방법에서 적절하게 보정되었으며 보정 후 평균 제곱근 오차와 분위 평균 제곱근 오차 모두 감소되었다. 보정 전후에 관계없이 월 평균 기온의 공간 상관관계는 일 평균 기온보다 높게 나타났다. 특이한 것은 보정방법, 평가측도 및 사용자료에 관계없이 일 최고 기온의 보정수준이 일 평균이나 최저 기온보다 낮게 나타나는 점이다.

미래의 기후변화 전망 수준을 향상시키기 위해서는 각 시나리오별로 모델이 모의한 장기간의 변동경향을

보존하면서 편의를 보정해야 한다. Figure 3은 검증기간에 대해 RegCM4가 모의한 일 평균, 최고 및 최저 기온에 QM 및 Hemp 방법을 적용하여 보정한 자료들과 모델자료 사이의 변동경향 차를 나타낸 것이다. QM 방법은 지역에 따라 차이는 있지만 일 평균 기온과 일 최저 기온의 변동경향은 과대하게, 일 최고 기온의 변동경향은 과소하게 보정하는 등 기온종류에 관계없이 모델이 모의한 변동경향을 크게 변경시키고 있다. 하지만 Hemp 방법은 기온종류 및 지리적 위치에 관계없이 변동경향을 적절히 유지하며 보정하고 있다. 특히 일 최저 기온의 경우 모델이 모의한 변동경향이 보정 후에도 모든 지역에서 보존되고 있다.

Figure 4는 모델의 모의자료에 Hemp 방법을 적용하여 각 기온종류별로 보정한 것을 관측자료와 함께 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 지역기후모델 RegCM4는 기온의 종류 및 지리적 위치에 관계없이 과소하게 모의하고 있다. 평균과 일 최저 기온의 편위의 공간분포와 일 최고 기온의 편위의 분포가 상이하게 나타나는 점은 편의가 온도에 따라 선형적이지 않음을 제시한다. Hemp 방법은 기온종류 및 지리적

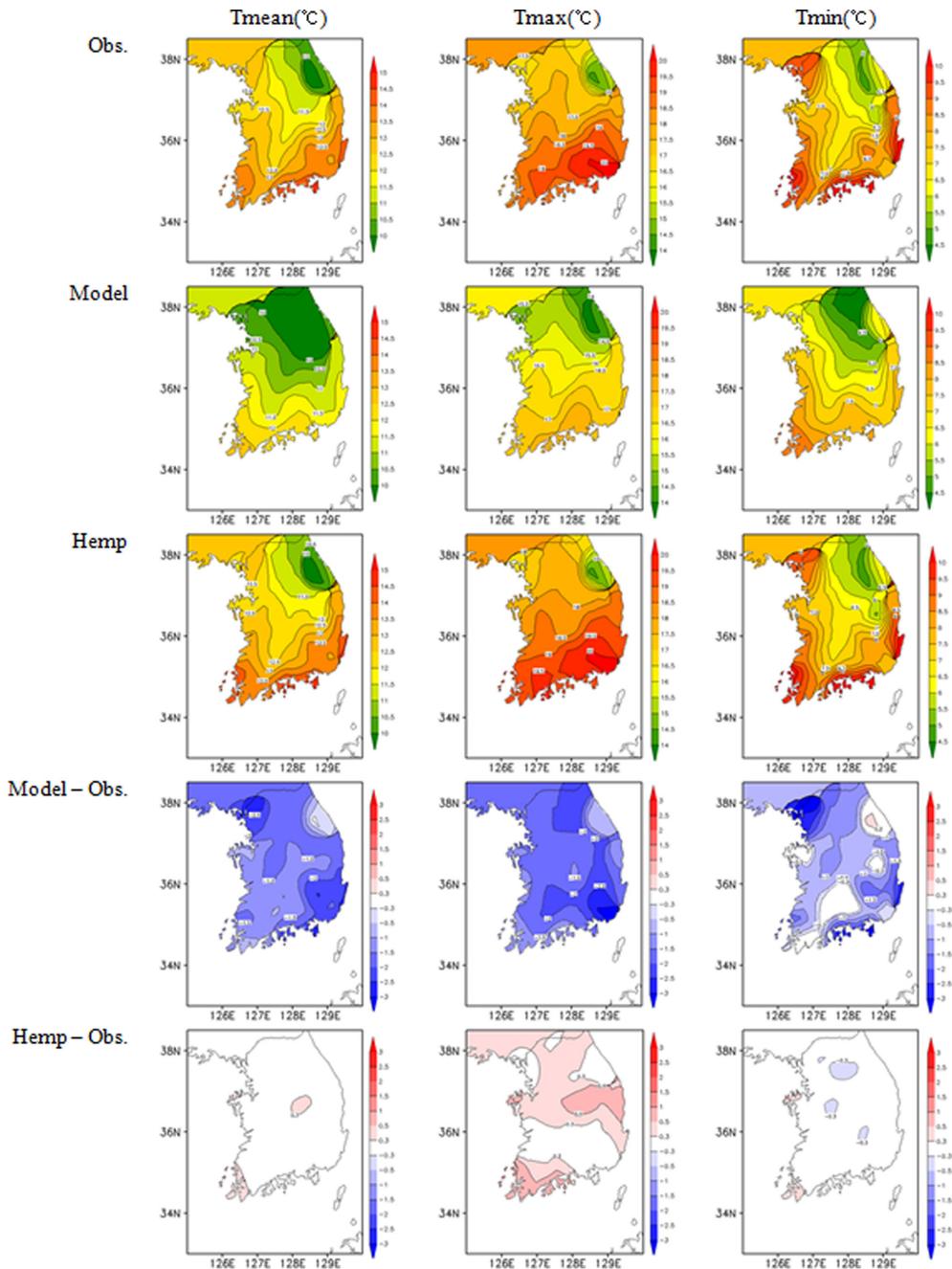


Fig. 4. Spatial distributions of 10-year averaged (2001~2010) surface air temperature for observation, simulation, bias corrected and their differences over South Korea.

위치에 관계없이 모델이 갖는 계통적 오차를 대부분 보정하고 있다. 하지만 일 최고 기온의 경우 몇몇 지역에서 과대 보정이 발생하여 양의 편의(약 $+0.3^{\circ}\text{C}$ ~ $+0.5^{\circ}\text{C}$)가 나타나고 있다.

3.2 극한 기후 보정

평균 기온에서와 같이 모델이 모의한 일 최고 및 최저 기온에 대해 편의 보정을 적용한 후에 상대 임계값 방법과 절대 임계값 방법으로 정의한 극한 기후

Table 4. Statistical summary of bias correction for extreme climate related to temperature according to the bias correction methods: (a) extreme events defined by percentile method and (b) extreme events defined by absolute threshold method.

	Bias (°C)				RMSE (°C)			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
TX5%	-0.65	1.16	1.35	1.04	1.45	1.72	1.85	1.62
TN5%	-2.03	-0.75	-1.49	-0.81	3.42	2.33	2.81	2.28
ETR5%	-1.23	-0.34	-0.16	-0.34	2.51	1.38	1.45	1.38
Ave.	-1.30	0.02	-0.1	-0.04	2.46	1.81	2.04	1.76
	Variance ratio				Spatial correlation			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
TX5%	0.96	1.02	1.02	1.01	0.74	0.80	0.80	0.79
TN5%	1.38	1.27	1.37	1.23	0.81	0.94	0.92	0.94
ETR5%	0.90	0.93	0.95	0.92	0.49	0.92	0.88	0.92
Ave.	1.08	1.07	1.11	1.05	0.68	0.89	0.87	0.88

	Bias (days)				RMSE (days)			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Hot day	-10.01	10.84	11.08	10.58	14.14	15.79	15.83	15.54
Trop. day	-3.85	1.38	3.32	0.44	5.16	5.64	6.88	5.00
Freez. day	13.53	-1.35	-0.62	-1.06	15.06	5.73	5.73	5.69
Ave.	-0.11	3.62	4.59	3.32	11.45	9.05	9.48	8.74
	Variance ratio				Spatial correlation			
	Model	Hemp	DC	QM	Model	Hemp	DC	QM
Hot day	0.68	0.84	0.82	0.79	0.65	0.73	0.74	0.74
Trop. day	0.19	1.43	1.83	1.15	0.25	0.64	0.68	0.66
Freez. day	1.70	0.86	0.95	0.84	0.88	0.94	0.94	0.94
Ave.	0.86	1.04	1.20	0.93	0.59	0.77	0.79	0.78

인자를 산출하여 결과를 분석하였다.

Table 4는 검증기간 동안 기온 관련 극한 기후 현상들에 대해 각 보정방법으로 보정한 결과를 나타낸 것으로 (a)는 상대 임계값으로 정의한 극한 현상들이고 (b)는 절대 임계값으로 정의한 극한 현상들이다. 지역기후모델은 계통적으로 TX5%는 -0.65°C , TN5%는 -2.03°C , ETR5%는 -1.23°C 정도 과소하게 모의하고 있다. 보정 후에는 TN5%와 ETR5%의 경우 음의 편의가 보정되었으나, TX5%는 과대 보정되어 평균 약 $+1.18^{\circ}\text{C}$ 로 양의 편의가 나타났다. 평균 제공근 오차도 TN5%와 ETR5%는 모든 방법에서 오차가 감소하였지만, TX5%의 경우 Hemp 방법은 약 0.27°C , DC 방법은 약 0.40°C , QM 방법은 약 0.17°C 정도 오차가 오히려 증가되었다. 하지만 공간 상관관계는 보정방법에 관계없이 모든 극한 기후 현상들에서 개선되었다. 기온관련 극한 기후현상에 대해서는 보정방법 간에 큰 차이는 없지만 전체적으로 Hemp 방법이 우

수한 보정을 하는 것으로 보인다.

Table 4의 (b)는 절대 임계값으로 정의된 극한 기후 현상에 대해 보정방법별로 보정수준을 나타낸 것이다. 폭염 일과 열대야 일의 경우 모델이 모의한 음의 편 의(폭염 일: -10.01 days, 열대야 일: -3.85 days)가 과 대 보정되어 보정 후에 평균적으로 편의가 약 $+10.83$ days, $+1.71$ days로 나타나고 있다. 하지만 결빙 일은 편의가 $+13.53$ days에서 평균적으로 약 -1.01 days로 감소하였다. 평균 제공근 오차는 폭염 일과 열대야 일 에서 과대 보정의 영향으로 모든 방법에서 약 0.6 days~ 1.6 days 정도 오차가 증가하였다. 하지만 결빙 일은 보정방법에 관계없이 오차가 크게 감소하였다. 공간 상관관계와 변동계수(Variance ratio)는 극한 기후현상 에 관계없이 모든 보정방법에서 개선되고 있다.

Figure 5는 상대 임계값으로 정의한 기후 현상에 대해 Hemp 방법을 이용하여 보정한 것을 나타낸 것이다. Hemp 보정방법은 지역에 따라 차이는 있으나

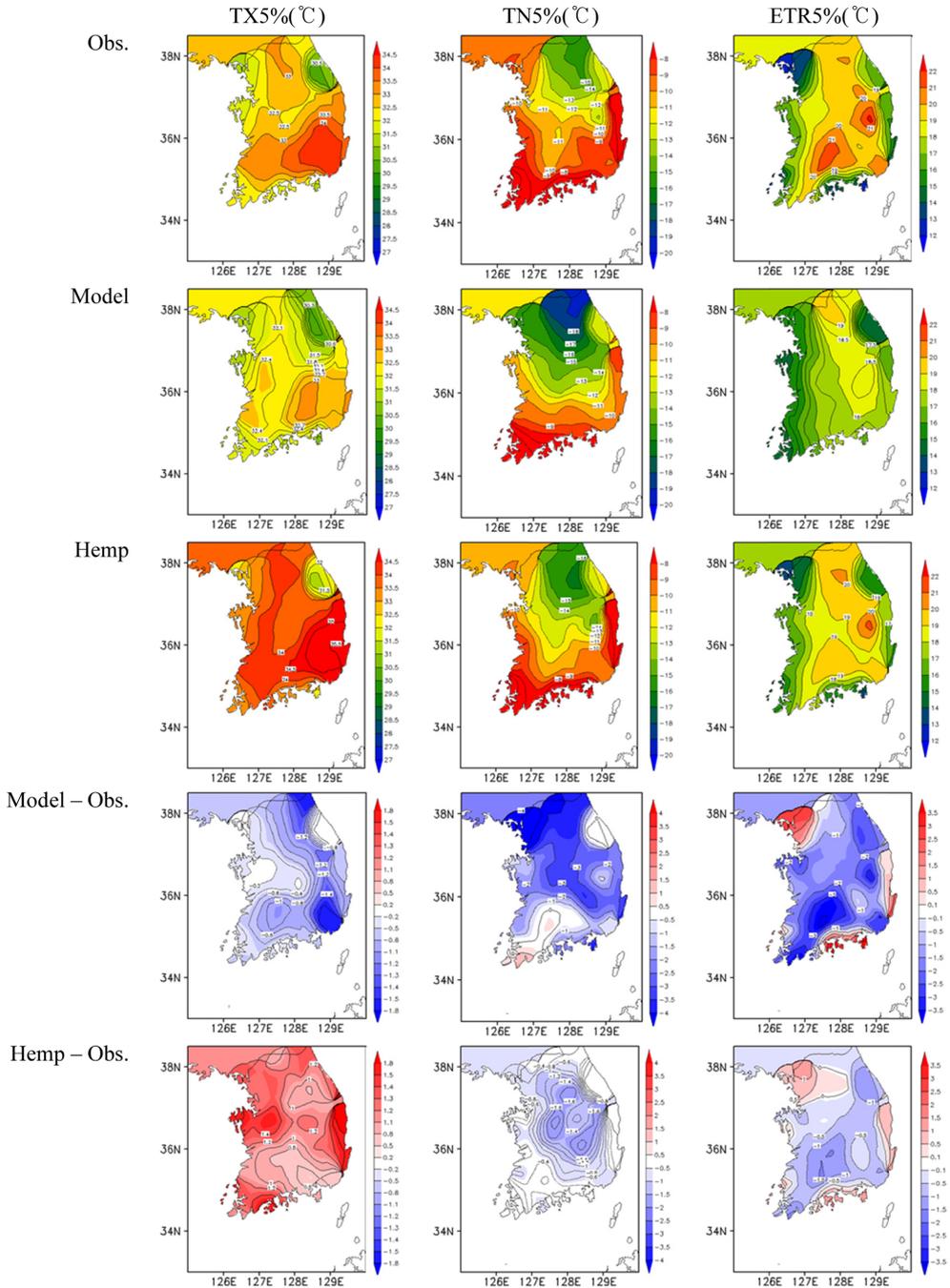


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for TX5%, TN5% and ETR5%.

TX5%를 남한 전 지역에서 과대 보정하고 있다. 경남과 강원북부 지역을 중심으로 모델이 계통적으로 과소 모의한 TX5%를 과대 보정하고 있으며 특히 충남 서부지역, 동해안 지역 그리고 전남 남해안 지역에서

과대 보정이 강하게 이루어지고 있다. 그러나 TN5%의 경우에는 모델이 경기북부 및 충청-경상도 내륙지역에서 과소하게 모의한 것을 관측과 매우 유사하게 보정하고 있으며 특히 내륙 지역보다 해안 지역에서

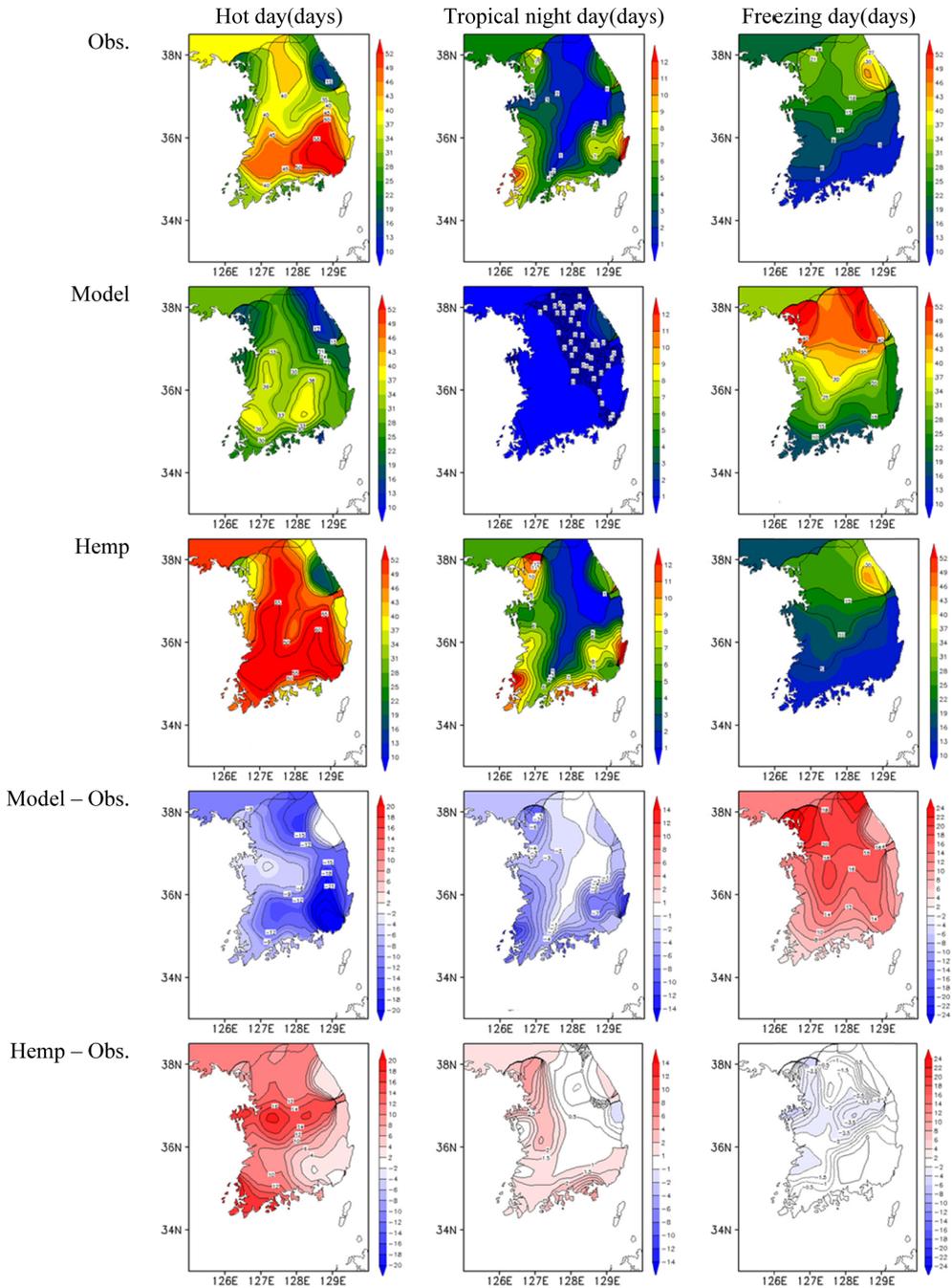


Fig. 6. Same as in Fig. 4 except for Hot day, tropical night day and freezing day.

더 높은 보정수준을 보이고 있다. 또한 ETR5%의 경우 모델이 인천과 남해안 일부에서는 과대하게, 그 외 지역에서는 과소하게 모의한 것을 모의특성 및 지역에 관계없이 대부분 계통적 편의를 완화시키는 방향

으로 보정하고 있다.

Figure 6은 절대 임계값으로 정의한 극한 기후에 대해 Hemp 방법을 이용하여 보정한 것을 나타낸 것이다. 폭염 일은 경상도 및 강원도 지역을 중심으로 과

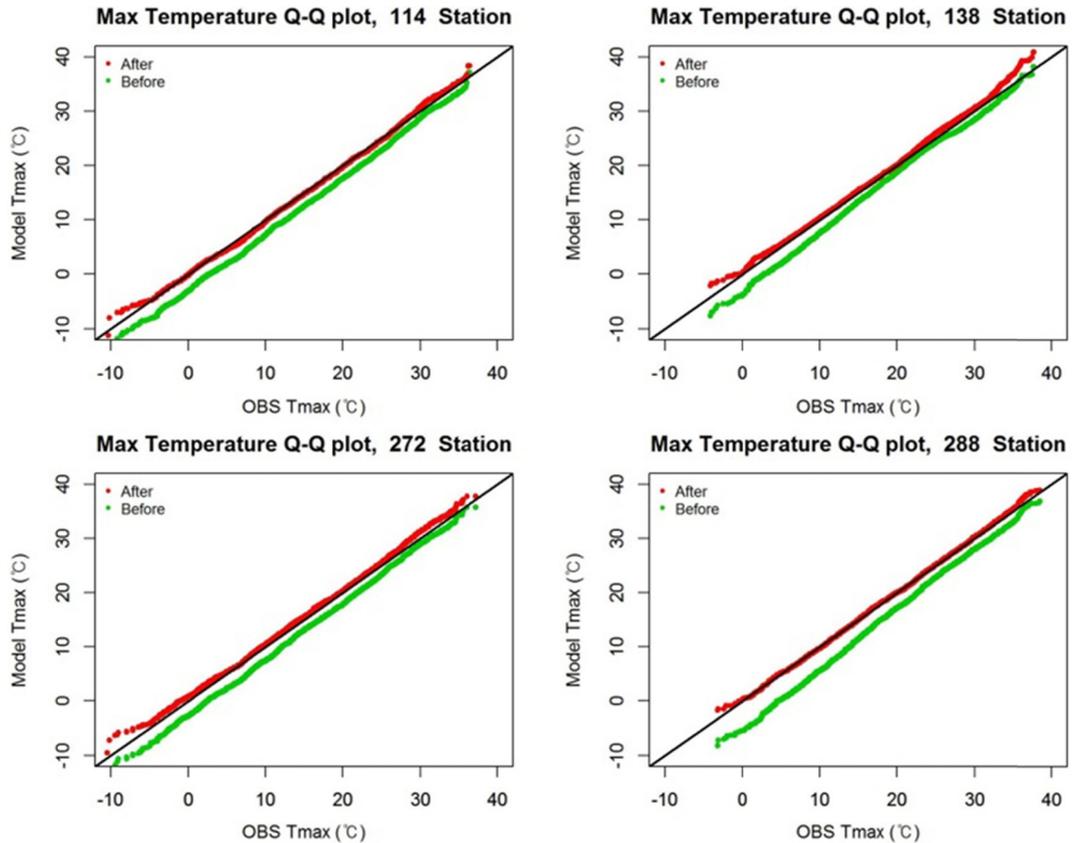


Fig. 7. Quantile-Quantile plots for observed and simulated daily maximum temperature (Tmax) for 10-year (2001~2010) at the selected stations (114, 138, 272, 288). The uncorrected model data are shown in green and the bias-corrected model data are plotted in red.

소하게 모의되었는데 Hemp 방법은 남한 전 지역에서 과대하게 보정하고 있으며 특히, 중부 내륙지역과 남서해안지역에서 과대하게 보정하고 있다. 열대야 일의 경우 모델은 주로 해안지역을 중심으로 과소하게 모의하여 열대야 일의 공간분포를 적절히 모의하지 못하였다. 보정 후에는 열대야 일의 공간분포가 적절하게 재현되었으나 중서부 해안 지역 등에서는 오히려 과대하게 보정되고 있다. 결빙 일은 강원도 산악 지역에서 많고 남부 해안지역에서 적은 공간분포를 적절히 모의하였으나 특히 중부 내륙지역을 중심으로 과대하게 모의하고 있다. 이렇게 과대하게 모의된 결빙 일을 Hemp 방법은 지리적 위치에 관계없이 적절하게 보정하여 남한 전 지역에서 보정효과가 우수하게 나타났다.

극한 기후에 따라 차이는 있으나 고온과 관련된 극한 기후(TX5%, 폭염 일, 열대야 일)는 전체적으로 과대 보정되고 있으나 저온과 관련된 극한 기후(TN5%, 결빙 일)는 대체적으로 높은 보정수준을 보이고 있다.

Figures 7과 Fig. 8은 일 최고 기온과 최저 기온에 대해 보정 전·후의 평균 제곱근 오차 차이의 절대값이 가장 큰 지점을 선택하여 관측과 모델 사이의 Quantile-Quantile plot을 나타낸 것이다. 초록색 선은 관측과 보정 전 모델의 모의결과와의 관계를, 붉은색 선은 관측과 보정된 모의결과와의 관계를 나타낸 것이다. 일 최고 기온의 경우 저온보다 고온에서 상대적으로 관측과 유사한 모의수준을 보이고 있다. 보정 후에는 지리적 위치에 관계없이 대부분 값에서 보정이 잘 이루어지고 있으나 일 최고 기온이 매우 높거나 낮을 때 과대하게 보정되고 있다. 일 최저 기온의 경우 지역에 따라 차이는 있으나 전체 기온구간에서, 특히 최저 기온이 낮을 때 현저히 과소하게 모의하고 있다. 일 최고 기온에서와 같이 대부분 범위에서 보정이 잘 이루어지고 있으나 일 최저 기온이 현저히 낮거나 높은 때에는 과대하게 보정되고 있다. 이러한 문제점이 발생하는 것은 본 연구에서 사용한 방법이 선형형태의 보정이기 때문에 일부 비 선형적 분포를 갖는 부

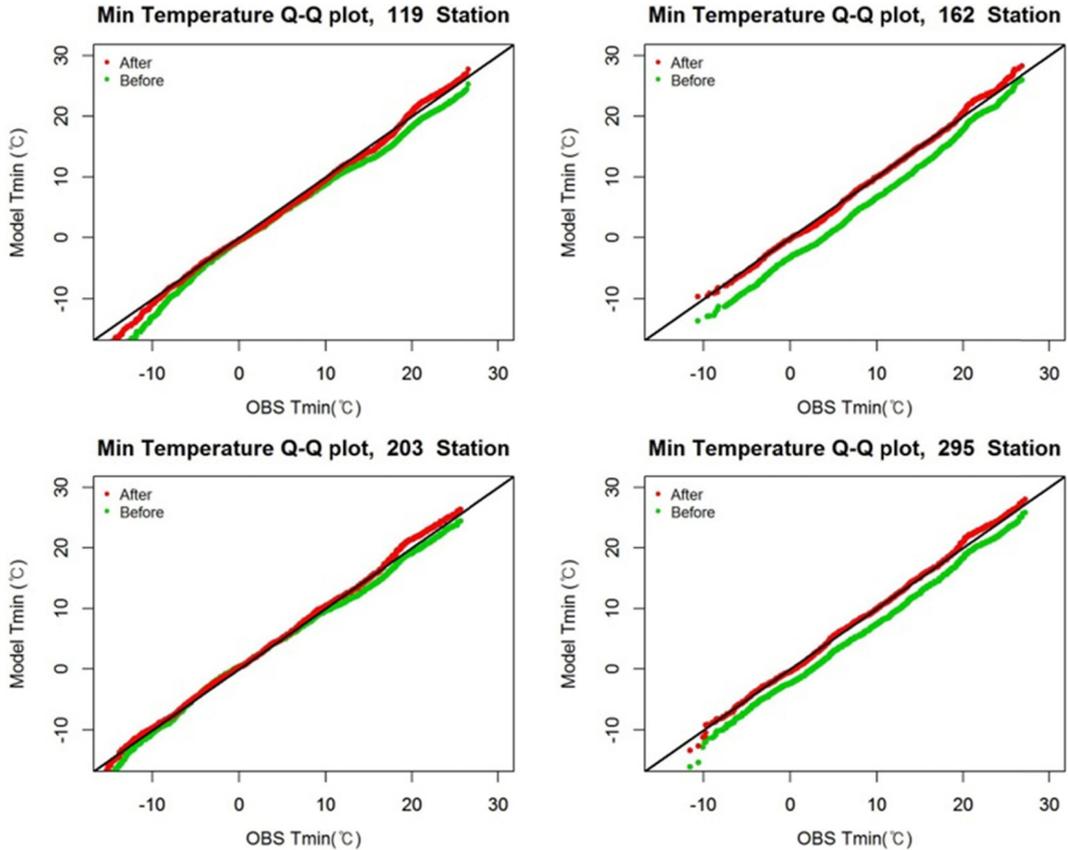


Fig. 8. Same as in Fig. 7 except for daily minimum temperature (Tmin) and stations (119, 162, 203, 295).

분에 대해서는 전체 사상(Total matching)을 통한 균 일한 보정만으로는 보정을 적절히 할 수 없기 때문이 다. 또한 Hempel et al. (2013)은 관측과 모의 자료 사 이에 해상도 차이가 클수록, 훈련 기간이 짧을수록 극 한 기후를 과대하게 보정하는 것으로 알려져 이와도 관련이 있는 것으로 보인다. 그러므로 고온 부분은 보 정 전에 모의수준이 좋았지만 보정 후에는 과대 보정 으로서 인하여 오차가 증가한 것이고, 저온 부분은 보 정 전에도 모의수준이 낮았기 때문에 과대 보정되어 도 보정 후에 오차가 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 원인으로 일 최고, 최저 기온의 매 우 높거나 낮은 기온과 관련된 극한 기후들의 보정효 과가 상이하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지역기후모델 결과가 가지는 계통적 오차와 극한 기후 현상에 대한 낮은 모의수준을 극복 하기 위해, 국립기상연구소에서 제공하는 HadGEM2-

AO를 경계조건으로 처방한 RegCM4 12.5 km 자료의 편의를 보정하여 기상청 50개 지점 관측 자료와 비교 하였다. 편의보정방법은 Hempel et al. (2013) 보정방 법과 월 평균 편차 보정방법 그리고 선형 회귀를 사 용한 모수 분위 사상법과의 상호비교를 통하여 평가 하였다. 또한 평균 및 극한 기후 현상 그리고 변동경 향의 보존성에 대해서도 평가를 통해 추후 연구에서 우리나라에서의 신뢰성 높은 미래 평균 및 극한 기후 전망 자료를 제시하는 데 도움이 되고자 하였다.

지역기후모델 RegCM4가 모의한 30년간의 남한 기 온 모의자료에서 20년을 훈련자료로 남은 10년을 평 가자료로 하여 각 보정방법의 보정수준을 평가하였다. Hemp 방법은 기온의 종류에 관계없이 편의, 평균 제 공급 오차, 분위 평균 제공급 오차 그리고 공간 상관 관계에서 선형 회귀를 사용한 모수 분위 사상법(QM) 및 월 평균 편차 보정방법(DC)과 유사한 수준의 편 의보정을 보이고 있다. 큰 차이는 없으나 QM과 Hemp 방법이 상대적으로 높은 보정수준을 보이고 있으며, 모델이 모의한 변동경향을 보존하는 측면에서는 Hemp

방법이 더 나은 결과를 보여주고 있다.

평균 기온과 달리 극한 기온에 대한 보정 수준은 극한 기온의 종류에 따라 매우 상이하게 나타나고 있다. TN5%와 ETR5%의 경우에는 3가지 보정방법 모두에서 유사하게 평균 제공근 오차는 감소되고 공간 상관관계는 크게 향상되는 데 반해 TX5%에서는 오히려 평균 제공근 오차가 증가되고 공간 상관관계는 약간 향상되고 있다. 또한 결빙 일에서는 계통적 오차가 크게 감소되는 반면 폭염 일과 열대야 일에서는 편의 보정 방법에 관계없이 공간 상관관계는 향상되었으나 평균 제공근 오차는 증가되고 있다.

평균 제공 오차(MSE)는 평균 제공근 오차에 제곱을 한 값과 같으며, 식(9)와 같이 전개할 수 있다(Ryoo and Park, 2012). 이 식에서 SD_{RCM} 과 SD_{OBS} 은 각각 모델과 관측의 표준편차를, r 은 모델과 관측 간의 피어슨 상관계수를, N 은 자료의 총 개수를 나타내며 나머지 기호는 연구방법에서 의미한 바와 같다.

$$MSE = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N T_d^{OBS} - \frac{1}{N} \sum_1^N T_d^{RCM} \right)^2 + (2SD_{RCM} + SD_{OBS}^2 - 2 \cdot SD_{RCM} \cdot SD_{OBS} \cdot r) \quad (9)$$

우변의 첫 번째 항은 평균 제공 오차에 대한 편위의 기여를 나타내고, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 모델과 관측의 분산이며 변하지 않는다. 마지막 항은 평균 제공 오차에 대한 모델과 관측의 선형 상관성의 기여를 나타내며 평균 제공 오차와 반비례 관계를 가진다(Ryoo and Park, 2012). 즉, DC 방법은 첫 번째 항인 편의만 보정하지만 QM과 Hemp 방법은 편위와 분위 사상법을 통한 선형 상관성 부분도 보정하기 때문에 더 좋은 보정수준을 보인 것으로 사료된다.

종합하자면 평균 제공근 오차 또는 평균 제공 오차를 기준으로 볼 때 DC 방법보다는 QM과 Hemp 방법의 보정수준이 높다고 볼 수 있다. 방법의 복잡성을 고려한 적용 및 응용 면에서는 QM 방법이 Hemp 방법보다 유리하지만, 앞서 증명한 바와 같이 Hemp 방법은 모델이 모의한 변동경향을 보존하는 측면에서 장점을 가지고 있다. 그러나 Hemp 방법도 다른 보정 기법과 유사하게 매우 높거나 낮은 기온과 관련된 극한 기후가 과대 보정되는 경향이 있다. 이는 모델이 계통적으로 저온보다 고온 부분을 관측과 유사하게 모의한 특성이 선형 보정방법으로 보정함에 따라 나타나는 결과라고 판단된다. 또한, 본 보정 방법이 기본적으로 극한 기후에 대해 과대 보정하는 속성의 영향도 있는 것으로 판단한다(Hempel et al., 2013). 따라서 향후 연구에서는 극한 기후 보정결과에 대한 신뢰성을 더 높이기 위해 RegCM4의 모의 특성과 극한 기후의 특성에 따른 보정방법을 개발하고 매우 높거나

낮은 기온에서 과대 보정이 발생하는 문제를 해결해야 할 것이다. 그리고 본 연구에서 극한 기후는 여름과 겨울을 대표하는 지수으로써 계절성을 고려하고 있지만 평균 기후는 고려하고 있지 않다. 그러므로 평균 기후와 극한 기후의 보정결과 차이에 대한 심도 있는 분석을 위해 편위의 계절성을 고려한 연구 또한 진행해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업”의 일환으로 한국기상산업진흥원(KMIPA2015-2084)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Abe, M., H. Shiogama, T. Nozawa, and S. Emori, 2011: Estimation of future surface temperature changes constrained using the future-present correlated modes in inter-model variability of CMIP3 multimodel simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, D18104.
- Baek, H. J., and Coauthors, 2013: Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618.
- Brown, J. R., C. Jakob, and J. M. Haynes, 2010: An evaluation of rainfall frequency and intensity over the Australian region in a global climate model. *J. Climate.*, **23**, 6504-6525.
- Caesar, J., L. Alexander, and R. Vose, 2006: Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D05101.
- Cao, H. X., J. F. B. Mitchell, and J. R. Lavery, 1992: Simulated diurnal range and variability of surface temperature in a global climate model for present and doubled CO2 climates. *J. Climate.*, **5**, 920-943.
- Charney, J. G., 1975: Dynamics of deserts and drought in Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **101**, 193-202.
- Choi, Y. E., 2004: Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **39**, 711-721.
- Christensen, J. H., F. Boberg, O. B. Christensen, and P. Lucas-Picher, 2008: On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20709doi:10.1029/2008GL035694.
- CORDEX website, 2009, <http://www.meteo.unican.es/en/projects/CORDEX>.

- Dosio, A., and P. Paruolo, 2011: Bias correction of the ensembles high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate. *J. Geophys. Res.*, **116**, D16106, doi:10.1029/2011JD015934.
- Flato, G., and Coauthors, 2013: Evaluation of climate models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Giorgi, F., and Coauthors, 2012: RegCM4: Model description and preliminary test over multi CORDEX domains. *Clim. Res.*, **52**, 7-29.
- Gregersen, I. B., H. J. D. Sorup, H. Madsen, D. Rosbjerg, P. S. Mikkelsen, and K. A. Nielsen, 2013: Assessing future climatic changes of rainfall extremes at small spatio-temporal scales. *Climatic Change*, **118**, 783-797.
- Groisman, P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl, and V. A. N. Razuvayev, 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, **18**, 1326-1350.
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 3383-3390.
- Halenka, K., J. Kalvova, Z. Chladoca, A. Demeterova, K. Zemankova, and M. Belda, 2006: On the capability of RegCM to capture extremes in long term regional climate simulation comparison with the observation for Czech republic. *Theor. Appl. Climatol.*, **86**, 125-145.
- Hay, L. E., L. R. Wilby, and H. G. Leavesley, 2000: A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **36**, 387-397.
- Hempel, S., K. Frieler, L. Warszawski, J. Schewe, and F. Piontek, 2013: A trend-preserving bias correction - the ISI-MIP approach. *Earth Syst. Dynam.*, **4**, 219-236.
- Hong, S. Y., S. G. Oh, M. S. Suh, D. K. Lee, J. B. Ahn, and H. S. Kang, 2013: Future climate changes over North-East Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios. *Clim. Res.*, **8**, 27-44.
- ICTP Portal, 2010, RegCM4. <http://www.ictp.it/research/esp/models/regcm4>.
- Im, E. S., and W. T. Kwon, 2007: Characteristics of extreme climate sequences over Korea using regional climate change scenario. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **3**, doi:10.2151/sola.2007-005.
- _____, M. H. Kim, W. T. Kwon, and D. H. Bae, 2007: Sensitivity of recent and future regional climate simulations to two convection schemes in the RegCM3 nesting system. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 411-427.
- Kharin, V. V., F. W. Zwiers, X. B. Zhang, and G. C. Hegerl, 2007: Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J. Climate*, **20**, 1419-1444.
- _____, _____, _____, and M. Wehner, 2012: Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-013-0705-8.
- Latif, M., D. Anderson, T. Barnett, M. Care, R. Kleeman, A. Leetmaa, J. Obrien, A. Rosati, and E. Schneider, 1998: A review of the predictability and prediction of ENSO. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14375-14393.
- Lee, D. K., and M. S. Suh, 2000: Ten-year East Asian summer monsoon simulation using a Regional Climate Model (RegCM2). *J. Geophys. Res.*, **105**, 29565-29577.
- _____, D. H. Cha, and H. S. Kang, 2004: Regional climate simulation of the 1998 summer flood over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **82**, 1735-1753.
- Lee, Y. H., D. H. Cha, and D. K. Lee, 2008: Impact of horizontal resolution of regional climate model on precipitation simulation over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **18**, 387-395.
- Liu, J. W., B. Li, T. J. Zhou, X. F. Zeng, and L. Feng, 2012: The extreme summer precipitation over East China during 1982-2007 simulated by the LASG/IAP regional climate model. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **5**, 62-67.
- Myoung, J. S., S. G. Oh, and M. S. Suh, 2012: Improvement of simulated air temperature of regional climate model using linear regression method. *Clim. Res.*, **3**, 255-270.
- Oh, S. G., and M. S. Suh, 2013: Projection of fine-scale climate changes over South Korea based on the RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) scenarios using RegCM4. *Clim. Res.*, **8**, 291-307.
- _____, _____, and D. H. Cha, 2012: Relationship of simulation performance of RegCM4 and lateral boundary condition for extreme climate of South

- Korea in the CORDEX East Asia domain. *Korean Meteor. Soc.*, **49-50**.
- _____, J. H. Park, S. H. Lee, and M. S. Suh, 2014: Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *J. Geophys. Res.*, **119**, 2913-2927.
- Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2012: Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; for 20-weather stations of South Korea. *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **54**, 133-142.
- Park, J. H., S. G. Oh, and M. S. Suh, 2013: Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1652-1667.
- Piani, C., G. P. Weedon, M. Best, S. M. Gomes, P. Viterbo, S. Hagemann, and J. O. Haerter, 2010: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J. Hydrol.*, **395**, 199-215.
- Randall, D. A., and Coauthors, 2007: Climate models and their evaluation. In: *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, pp. 589-662.
- Rhein, M., and Coauthors, 2013: Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Rojas, R., L. Feyen, A. Dosio, and D. Bavera, 2011: Improving Pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-Driven climate simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 2599-2620.
- Ryoo, S. B., and J. S. Park, 2012: *Meteorological Statistics*, Chonnam National University Press, 142-143.
- Sillmann, J., V. V. Kharin, X. Zhang, and F. W. Zwiers, 2013: Climate extreme indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 1: Model evaluation in the present climate. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2012JD018390.
- Suh, M. S., and C. S. Kim, 2014: Comparison of statistical bias correction method for monthly mean temperature in the Korea Peninsula simulated by the regional climate model. Proceeding of the Autumn Meeting of Korean Meteorological Society, 2014, 65-66.
- _____, S. G. Oh, D. K. Lee, D. H. Cha, S. J. Choi, C. S. Jin, and S. Y. Hong, 2012: Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *J. Climate*, **25**, 7067-7082, doi:10.1175/JCLI-D-11-00457.1.
- Sung, J. H., H. S. Kang, S. Park, C. H. Cho, D. H. Bae, and Y. H. Kim, 2012: Projection of extreme precipitation at the end of 21st century over South Korea based on Representative Concentration Pathways (RCP). *Atmosphere*, **22**, 221-231.
- Tadross, M., C. Jack, and B. Hewitson, 2005: On RCM-based projection of change in Southern African summer climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23713, doi:10.1029/2005GL024460.
- Teutschbein, C., and J. Seibert, 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrol.*, **456-457**, 12-29.
- Wilby, R. L., and T. M. Wigley, 1997: Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Prog. Phys. Geog.*, **21**, 530-548, doi:10.1177/030913339702100403.