

GIS를 활용한 KMA-RCM의 규모 상세화 기법 개발 및 검증

백경혜¹ · 이명진^{2, 3*} · 강병진⁴

Development of Spatial Statistical Downscaling Method for KMA-RCM by Using GIS

Gyoung-Hye BAEK¹ · Moun-Gjin LEE^{2, 3*} · Byung-Jin KANG⁴

요 약

본 연구의 목적은 IPCC A1B 온실가스 배출 시나리오에 따른 전지구 기후모형(global climate model, GCM)을 바탕으로 구축된 KMA-RCM(Korea meteorological administration-regional climate model)을 GIS를 활용하여 규모 상세화 기법을 개발하고 검증을 통하여 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이는 것이다. 연구지역은 남한 전역이며, 연구 대상 기간은 1971년부터 2100년까지이다. KMA-RCM의 규모 상세화 결과의 최적화를 위해 GIS 공간보간기법 중 기온에는 Co-Kriging, 강우에는 IDW을 활용하여 고도에 따른 기온 감율을 적용하였다. 최종 연구 결과로 총 1971년도부터 2100년의 월별 평균 기온 및 강우량이 도출되었다. 평균기온의 경우 130년 동안 1.39℃ 상승하고, 강우량의 경우 271.23mm가 증가하는 것으로 파악되었다. 본 연구결과의 검증을 위하여 2001년부터 2010년까지 75개 자동기상관측지점(automated weather station, AWS) 실측자료와 동기간의 미래 기후예측값과의 상관관계를 분석하였다. 평균기온의 경우 상관계수가 0.98로 매우 높게 나타났으며 강우량의 경우 0.56으로 기온에 비해 상관관계가 낮게 분석되었다. 본 연구에서는 기존의 기후변화 시나리오 규모 상세화 연구에서 사용되던 GIS 방법론을 고도에 따른 기온감율을 적용하는 기법을 개발하였다. 이를 통하여 보다 현실성 높은 지역적 규모의 미래 기후변화 시나리오를 구축하고 이의 불확실성을 줄이기 위하여 연구를 진행하였다.

주요어 : 전지구 기후모형, 지역 기후모형, 지리정보시스템(GIS), 규모 상세화

2011년 5월 19일 접수 Received on May 19, 2011 / 2011년 8월 11일 수정 Revised on August 11, 2011 / 2011년 8월 30일 심사완료 Accepted on August 30, 2011

1 서울대학교 생태조경지역 시스템공학부 Dept. of Ecological Landscape Architecture-Rural System Engineering, Seoul National University

2 한국환경정책·평가연구원, 국가기후변화적응센터 Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

3 연세대학교 지구시스템과학과 Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University

4 고려대학교 환경 GIS/RS 센터 Environment GIS/RS Center, Korea University

* 연락처 E-mail : leemj@kei.re.kr

ABSTRACT

The aim of this study is to develop future climate scenario by downscaling the regional climate model (RCM) from global climate model (GCM) based on IPCC A1B scenario. To this end, the study first resampled the KMA-RCM(Korea meteorological administration-regional climate model) from spatial resolution of 27km to 1km. Second, observed climatic data of temperature and rainfall through 1971-2000 were processed to reflect the temperature lapse rate with respect to the altitude of each meteorological observation station. To optimize the downscaled results, Co-kriging was used to calculate temperature lapse-rate; and IDW was used to calculate rainfall lapse rate. Fourth, to verify results of the study we performed correlation analysis between future climate change projection data and observation data through the years 2001-2010. In this study the past climate data (1971-2000), future climate change scenarios(A1B), KMA-RCM(Korea meteorological administration-regional climate model) results and the 1km DEM were used. The research area is entire South Korea and the study period is from 1971 to 2100. Monthly mean temperatures and rainfall with spatial resolution of 1km * 1km were produced as a result of research. Annual average temperature and precipitation had increased by 1.39°C and 271.23mm during 1971 to 2100. The development of downscaling method using GIS and verification with observed data could reduce the uncertainty of future climate change projection.

KEYWORDS : *Global Climate Model (GCM), Regional Climate Mode (RCM), Geographic Information System (GIS), Downscaling*

서론

최근 가속화되는 기후변화에 대응 및 적응하기 위하여 기후변화 시나리오의 활용이 확대되고 있다. 현재 IPCC DDC(Data Distribution Center)에서 제공되고 있는 전지구기후모형(Global Climate Model, 이하 GCM)의 공간해상도는 200~400km로 국토면적이 협소한 국가에서의 국지적 기후 변화를 연구하는데 어려움이 있다. 2001년 IPCC 3차 평가보고서가 발간된 이후 지역적 규모의 기후변화에 대한 연구가 본격화되면서 GCM과 지역기후모델(Regional Climate Model, 이하 RCM)을 보다 국지적인 차원으로 규모상세화하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다(IPCC, 2001). 이에 전지구 광역규모의 모델

에서 모의된 대기 순환과 지역 기후간의 통계적 특성을 이용하여 모델의 정보를 규모상세화하여 지역규모의 공간해상도를 가지는 통계적 상세화 기법들이 개발되고 있으며(신진호 등, 2009), 지역차원의 기후변화 시나리오 생산에 활용되고 있다(Benestad, 2002; 김맹기, 2005). 그러나 미래 기후변화 시나리오는 평년 기후자료를 바탕으로 미래를 예측하기 때문에 시나리오 생성 단계부터 미래 예측에 대한 불확실성을 내포하고 있다. 국내외적으로 미래 기후변화 시나리오의 불확실성을 감소시키는 방법으로는 시나리오 구축의 입력자료 보정, 다양한 시나리오를 분석하여 오차범위를 추정하는 방법 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 KMA-RCM자료를 바탕으로 지리정보 자료 처리 기법 중 공간 보간법 및 고도에 따른 기

온 및 강우감률을 적용하여 기후변화 시나리오 공간 규모 상세화 기법을 개발하고, 미래 기후사상의 변화를 분석하였다. 이를 실측값과 비교·검증하는 연구를 수행하여 기후변화 시나리오가 내재하고 있는 불확실성을 줄이고자 한다.

연구 이론

우리나라는 지형이 복잡하고 몬순의 영향을 받아 대부분의 기상요소의 시·공간적 변동성이 크게 나타난다. 국지적인 기후특성을 정량적으로 분석하기 위해서는 많은 수의 관측소가 필요하며, 현재 기상청은 한반도 지상 기상관측을 위해 유인 기상관측소와 AWS를 운영하고 있다. 하지만 이들 관측지점들은 지리적으로 특정지역에 집중되어 있거나, 대부분 고도 300m 이하에 분포하고 있어서 국지적인 기후특성을 정량적으로 분석하기에는 어려움이 많다. 따라서 국지기후 특성을 분석할 수 있는 격자형 기후자료 산출을 위해 관측자료와 해발고도, 지면 피복상태, 수륙분포 등의 부가적인 지리적 인자를 고려한 분석기법 개발이 필요하다(홍기욱 등, 2007).

기후변화 연구에 활용되는 공간정보는 공간상 연속적으로 연결되어야 한다. 기상관측소에서 측정된 과거 기후자료의 경우 포인트 형태로 특정 지역 대표값을 나타낸다. 우리나라와 같이 지역내에서 기상요소의 변동폭이 큰 지역에서는 연속적인 기상정보 구축을 통하여 지역별 변이 분석이 필수적으로 이루어져야 한다. 이와 같은 비연속적인 기상자료의 한계성을 보완하기 위하여 기상관측소가 가지고 있는 공간적인 비연속성을 보완하기 위하여 지리정보에서 많이 활용되는 통계적공간보간법을 통하여 관측소 주변지역의 값을 유추하여야 한다. 최근 많이 이용되는 통계적공간보간법은 다음 6가지와 같다: inverse distance weighting(IDW); 다양한 kriging 기법; ANUSPLIN tri-variate splines; 지역 회귀

모델인 Daymet과 PRISM; 지역 회귀 모델; 그리고 general cubic spline theory를 이용한 ANUSPLIN 등이 있다(Daly, 2006). 본 연구에서는 문헌 조사를 통하여 적정 공간보간법을 선정하였다.

우리나라가 가지고 있는 지형적인 특성을 반영하기 위하여 본 연구에서는 온도자료는 Co-kriging, 강수량에는 IDW를 사용하였으며 고도에 따른 기온·강우 감율을 적용하였다. 고도의 상승은 기온 감소의 원인이 되며, 고도 100m 상승에 따라 0.6°C 감소한다(기상청 2008). 따라서 지형학적 인자 중 기후요소의 시·공간 변동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 해발고도이다. 특히, 기후요소 중 기온은 해발고도의 영향을 많이 받는데, 대륙권 내에서는 고도가 상승함에 따라 기온은 하강한다. 기온의 보간에 사용된 Co-Kriging 기법은 보간 자료를 공간 추정 과정에서 고려하는 방식이며 기온의 경우 고도와 선형 상관관계를 가지고 있기 때문에 미관측 지점에서의 기온 값을 추정하는데 있어서 고도 자료가 부가적인 정보를 제공하여 유추되는 측정값의 오차를 줄일 수 있다(박노옥, 2008). 또한 기온의 경우 고도가 기온의 상승 및 하강에 직접적인 영향을 나타내기 때문에 Co-kriging 방법이 적절하다(Erxleben *et al.*, 2002).

강수량은 공간 자료 분포의 국지성과 불변성이 높으며 강수량의 특성을 반영하여 보간할 수 있는 IDW 기법을 적용하였다. IDW는 지역내에서 나타날 수 있는 강수량의 변이성을 훨씬 잘 설명해 줄 수 있는 기법이다(Erxleben *et al.*, 2002). 기온과 강수량의 공간통계적보간법을 다르게 적용한 것은 고도 및 각 기상자료의 특성을 최대한 반영할 수 있는 보간법을 선택하기 위해서이다. 조홍래와 정종철(2006)은 강수량에 대한 공간보간법에서 kriging 기법이 비교적 정확성이 높은 것으로 분석하였지만 kriging의 경우 기후와 고도와의 관계를 일정하게 가정하는(smoothing effects of residual data) 단점

이 존재하며(Daly, 2005), 지역적 규모에 적용할 때 큰 오차를 나타낸다.

1971년부터 2000년도까지 75개 기상관측 지점에서 얻어진 관측값은 각 지점의 해발고도와 온도계 및 우량계의 지상높이가 각각 다르기 때문에 고도에 따른 기온 감율을 고려하여 윤진일 등(2001)이 제안한 기온 감율 보정식을 적용하였다(식1, 2). 강수량자료의 경우 고도에 따른 강수 증감율을 고려하였다(Smith *et al.*, 2007). 식 3-1은 10월에서 4월(Cold Season)은 고도가 1km 증가할수록 강우량이 74% 증가함을 나타내며, 식 3-2는 5월에서 9월(Warm Season)으로 1km 당 46%를 감소하는 것을 나타내는 식이다.

$$T_i = 0.00688 + 0.0015 \cos 0.0172(i - 60) \quad (1)$$

평균기온감율

$| \tau |$: 연중 날짜에 따른 기온감율 절대값
 i : 연중 날짜(1/1일=1, 12/31일=365)

$$T = T_i + Elevation(m) \times \text{기온감율} \quad (2)$$

T : 기온감율 보정이 된 기온

T_i : 일별 기온(기온감율 보정 전 관측 기온)

$$P = P_i \times (1.74)^{\frac{Elevation}{1000}} \quad (3-1)$$

$$P = P_i \times (0.46)^{\frac{Elevation}{1000}} \quad (3-2)$$

그림 1과 그림 2는 1971년 1월을 대상으로 기온감율을 적용하기 전과 후에 구축된 결과를 도면으로 작성한 것이다. 그림 1의 경우는 기온 및 강우감율을 적용하지 않은 방법으로 작성된 것이며, 그림 2는 Co-Kriging 및 기온감율을 적용한 것이다. 기온감율을 적용하기 전보다 후에 태백산맥 및 제주지역의 온도변화가 더 자세히 표현되는 것이 확연히 나타난다.

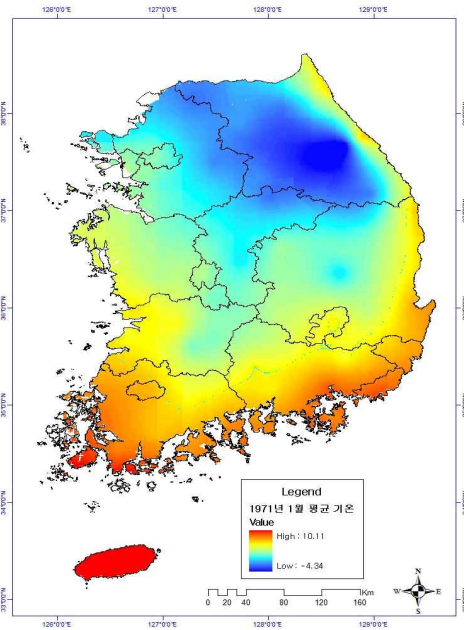


FIGURE 1. 1971년 1월 평균 기온(IDW 적용)

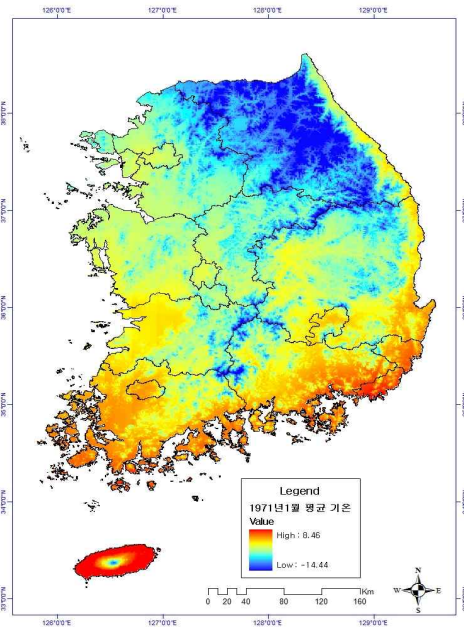


FIGURE 2. 1971년 1월 평균 기온(Co-Kriging 및 기온 감율 적용)

우리나라는 국지적 차원의 계절 순환 특성이 매우 복잡하여 광역규모 또는 지역규모의 모델로부터 국지적 차원의 관측값과 연관성을 찾기 어려울 수가 있다. 이 경우 지역기후모델의 규모 상세화에 의한 미래 기후 변화 추정 신뢰도가 낮아질 수 있다. 본 연구에서는 이로 인해서 발생할 수 있는 국지적 규모의 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이기 위하여 과거 참고 자료로 입력된 기상자료 이후에 관측된 실측값과 규모 상세화된 미래 예측치 간의 상관관계를 분석하였다. 상관관계 분석을 통하여 도출된 미래 기후 예측치의 정확성을 검증하고 1km 공간해상도를 보유하고 있는 미래 기후변화 시나리오의 활용성을 제고하고자 한다.

연구지역

연구지역은 대한민국 전역을 대상으로 하며, 지리적 범위는 경위도 $124^{\circ} 54' \sim 131^{\circ} 6'$, $33^{\circ} 9' \sim 38^{\circ} 45'$ 에 해당된다. 전국 75개 기상관측소에서 관측된 1971~2000년도의 관측치가 입력되었다. 입력된 과거 자료는 기상청 홈페이지에서 (http://www.kma.go.kr/weather/observation/past_cal.jsp) 제공하고 있는 과거 자료를 활용하였으며, 일반적으로 과거 기준 입력자료로 선정된 75개 기상관측소는 임의의 결측지점을 보간하기 위해 계산에 참여시킬 주변 관측지점을 반경 100km 이내에서 가장 인접한 순으로 최대 3개까지 관측지점을 선택하는 거리-개수 혼용방식을 적용하였다. 그리고 본 연구에서는 환경부에서 작성한 토지피복분류도를 참조하여 육지영역의 경계로 사용하였다. 또한 모든 기상요인별 보간치들을 동일한 육지영역만큼 추출하도록 하였다.

본 규모 상세화 결과의 검증을 위하여 전국 75개 지상기상관측소와 가장 근접하며 데이터가 존재하는 AWS지점을 GIS를 이용하여 추출하였다. 75개 관측 지점의 과거 관측값은 미래 기후변화 시나리오의 규모상세화의 입력

자료로 활용되었으며, 현재 전국에 400개 이상의 AWS가 분포하지만, 75개 관측 지점과 인접한 지점의 AWS를 대상으로 우선 선정하였다. 선정된 75개 AWS 관측소 중에서 2001년 1월부터 2010년까지 지속적으로 실측자료가 있는 58개 AWS를 최종적으로 추출하여 상관관계 분석에 이용하였다. 과거입력 자료를 1971년부터 2010년까지 총 40년을 사용할 수 있지만, 미래 기후변화 시나리오 기간(2001년 ~ 2100년) 기간 중 2001년부터 2010년 기간을 실측자료와 검증하기 위하여 과거 기상자료를 1971년부터 2000년까지로 사용하였다.

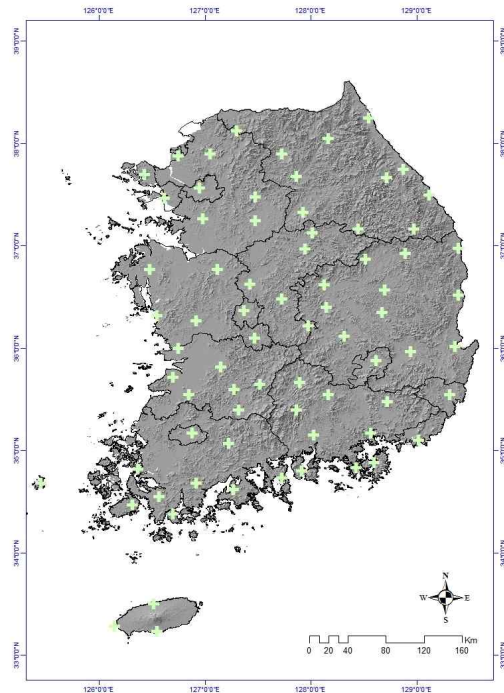


FIGURE 3. 연구지역 및 75개 지상기상관측소

연구방법

- 지역기후모델의 규모 상세화 수행을 위해
- 1) 1971년부터 2000년까지 전국 75개 기상

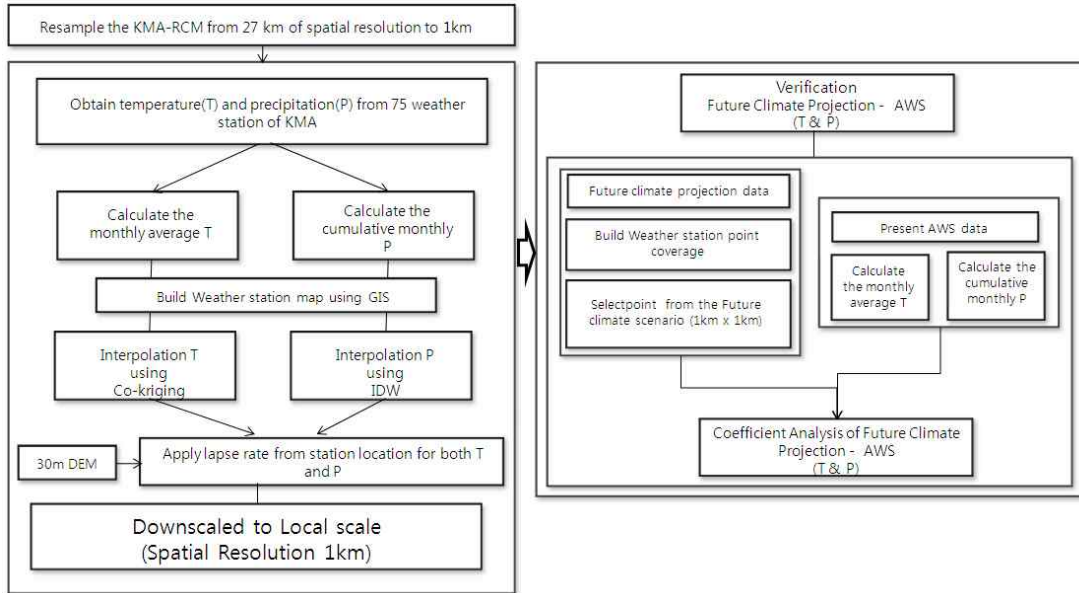


FIGURE 4. 연구흐름도

관측소에서 획득된 월별 기상관측자료(평년기 후자료), 2) KMA-RCM의 2001년부터 2100년까지 기후예측자료, 3) 공간해상도 30m의 DEM(Digital Elevation Model)이 입력되었다(그림 2). 특히, 75개 기상관측지점에서 수집된 기상관측자료에는 고도에 따른 기온 및 강우 감율을 적용하였다. 본 연구결과의 검증을 위하여 전국 75개 기상관측소에 인접하며 데이터가 존재하는 AWS를 선정하여 2001년 1월부터 2010년 8월까지 평균기온과 강우량 데이터를 수집하였다. 이를 이용하여 2001년부터 2010년까지 미래 기후 예측자료와 AWS를 통한 실측 기상관측 자료 간의 검증을 시도하였다.

미래 기후변화 시나리오는 기상청의 기후변화정보센터로부터 제공받았다. KMA-RCM은

IPCC의 A1B SRES(Special Report on Emission Scenarios) 기반의 GCM이 입력되어 MM5 (Mesoscale Model version 5th) Hydrostatic 모형을 기반으로 개발되었다. KMA-RCM의 미래 기후 예측기간은 2001년부터 2100년까지이며, 남북한 전역에 걸쳐 약 27km의 공간해상도를 나타낸다. 지역기후 시나리오는 1971년부터 2000년을 참조기간(reference period)으로 모형이 구축되었다. GCM 자료에는 온실기체와 에어러솔 강제력이 포함되는 반면, RCM 모형에서는 복잡한 지형특색, 지표특성, 대기순환과 기후변수들이 모의 능력을 증대하는 역할을 하고 있다.

KMA-RCM의 규모 상세화를 통하여 도출된 미래 기후 시나리오의 검증을 위하여 기상관측소 75개 지점과 가장 인접하며 데이터가

TABLE 1. 시나리오 규모 축소화를 위해 구축된 공간데이터

데이터	형식	기간	자료 출처
미래 기후 예측		2001~2100	
과거 기후 관측 자료	포인트	1971~2000	기상청
최근 AWS 자료		2001~2010	

존재하는 75개 AWS 관측지점을 선정하여 월별 평균기온과 강수량과 비교·검증을 시행하였다.

분석 결과

KMA-RCM의 규모 상세화를 통하여 구축된 연구결과와 기간은 1971년 ~ 2100년이며 월별 평균 기온과 강수량이 도출되었다. 기후모델의 결과물 중 기온과 강수량을 선정한 이유는 미래 기후 변화를 단편적으로 또한 대표적으로 나타낼 수 있는 인자이며 실질적으로 활용성이 매우 높은 인자이기 때문이다.

과거 30년간 연평균 기온은 1971년 10.68℃에서 2000년 11.12℃로 약 0.43℃ 상승하였다. 강수량은 1971년 947.38mm에서 2000년 886.02mm로 61.35mm 감소하였다. 미래 기후변화 자료 처리의 결과는 기온의 경우 2001년 11.44℃에서 2100년 12.07℃로 0.64℃ 상승한 것으로 나타났다. 강수량의 경우 2001년 1002.12mm에서 2100년 1218.60mm로 216.48mm가 증가한 것으로 나타났다. 과거 및 미래 기상 변화를 시나리오 결과와 연계하여 연평균 기온 변화를 분석해 보면 기온의 경우 1970년을 기준으로 2100년 까지 1.39℃ 상승하는 것으로 나타났으며, 강수량의 경우 1970년을 기준으로 2100년 까지 271.23mm 증가하는 경향을 보였다(그림 5, 6). 그림 5와 6은 X축은 연도, Y축은 평균 기온 및 강수량을 나타낸 것으로 직선형의 증가를 나타내고 있다.

전체 130년 연평균 기온 중 가장 높은 온도는 12.98℃(2039 및 2079년)이며, 가장 낮은 온도는 10.17℃(1985년)로 약 2.81℃의 차이가 있다. 두 번째로 높은 온도는 12.76℃(2025 및 2065년)이며, 두 번째로 낮은 온도는 10.21℃이다. 동일 온도 분포를 나타내는 연도를 정리 하면 전체 59개의 동일 기온 발생 연도로 구분된다. 과거 기상자료를 바탕으로 구축된 분포도의 경우는 12.47℃ 3번, 12.37℃ 5번 및 11.13℃ 7번 등과 같이

단일 온도를 나타낸다. 연구결과 일정한 온도가 반복되어 나타나며, 동시에 온도 상승 현상이 분석되었다. 연구결과 일정한 온도가 반복되어 나타나며, 동시에 온도 상승 현상이 분석되었다. KMA-RCM을 바탕으로 스케일 상세화를 수행한 본 연구의 결과, 미래의 기후사상 중 기온은 40년을 주기로 같은 기온 분포를 반복하여 나타내는 것으로 파악되었다(강병진, 2011).

전체 130년의 연도별 누적 강수량 중 가장 높은 강수량은 1839.36mm(2003, 2043 및 2083년)이며, 가장 낮은 누적 강수량은 847.37mm(2018, 2058 및 2098년)으로 약 991.99mm의 차이가 있다. 두 번째로 높은 강수량은 1817.03mm(1991년)이며, 두 번째로 낮은 강수량은 853.5mm(1998년)이다. 동일 온도 분포를 나타내는 연도를 정리 하면 전체 71개로 구분되며 과거 기상자료를 바탕으로 구축된 1817.03mm, 1701.14mm등과 같이 단일 강수량을 나타낸다. KMA-RCM을 바탕으로 스케일 상세화를 수행한 본 연구의 결과는 미래의 기후사상 중 누적 강수량 변화는 기온의 경우와 동일하게 40년을 주기로 같은 분포를 반복하여 나타내며 동시에 강수량이 증가하는 것으로 분석되었다(강병진, 2011).

기존 KMA-RCM을 분석한 연구 결과에서도 온도 및 강수량이 40년 주기를 반복하며 증가하는 것으로 분석되었다(강병진, 2011). 본 연구결과는 그림5와 6과 같이 40년 주기의 그래프가 반복하여 나타나는 것을 알 수 있으며, 또한 동일 온도가 40년을 주기로 3회 ~ 7회까지 반복하여 나타나고 있다. 기존 연구결과 및 본 연구 결과를 고려하였을 때 KMA-RCM 미래 기후변화 시나리오는 온도 및 강수량이 주기 반복성을 가지며 증가하는 것으로 사료된다.

국지적 차원의 미래 기후변화 시나리오를 도출하는 과정에서 발생하는 불확실성을 줄이기 위해 연구 결과물과 실측값간의 상관관계 분석을 시행하였다. 참고년도로 입력된 2000

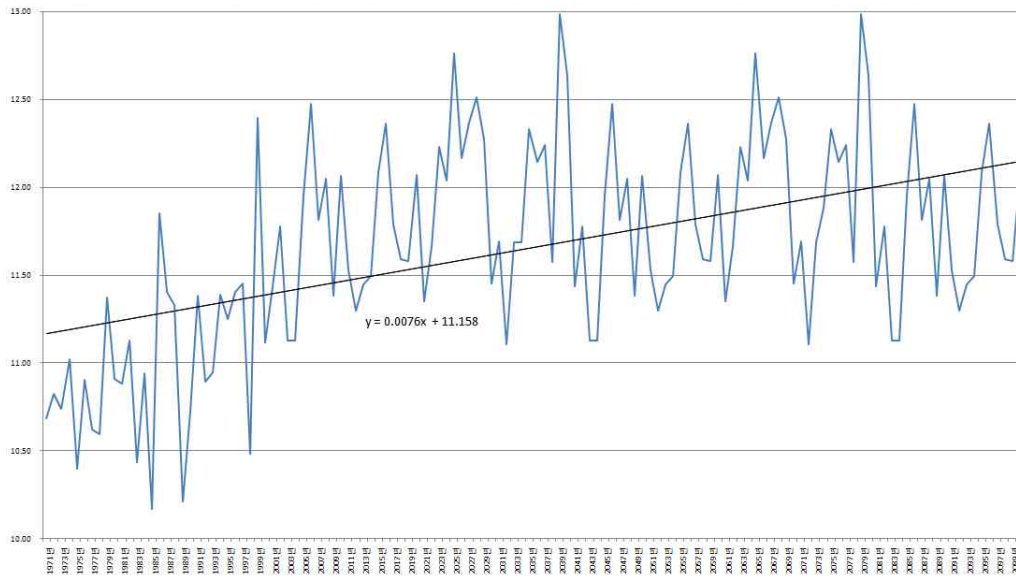


FIGURE 5. 1971~2100 연평균 온도 변화 (x 축: 연도, y 축: 평균기온 (°C))

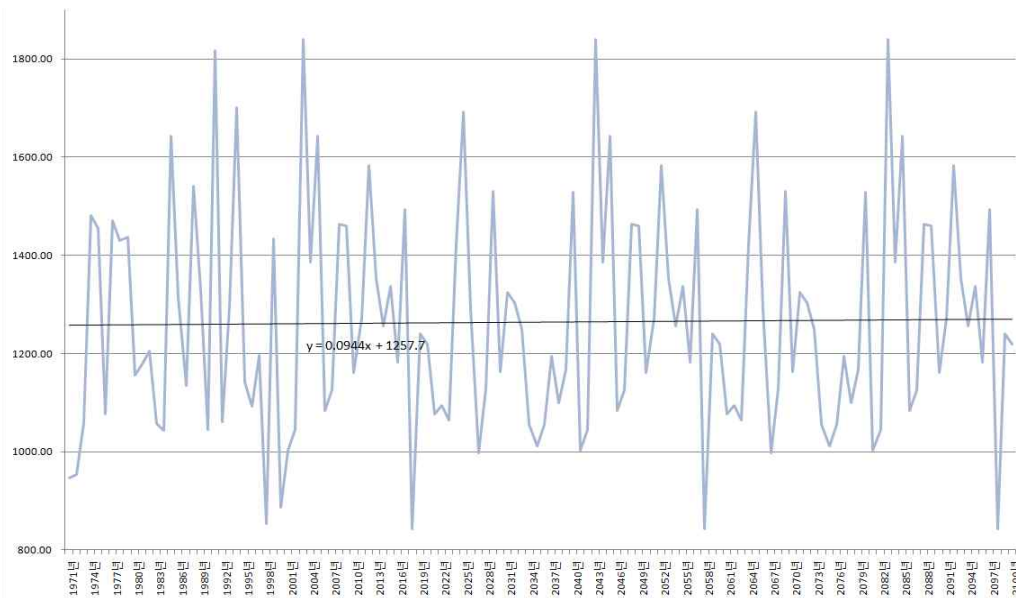


FIGURE 6. 1971~2100 연강수량 변화 (x 축: 연도, y 축: 강우량(mm))

년도 이후의 기상자료, 2001년도 1월부터 2010년 8월까지 75개 지상관측지점과 가장 근접하며 데이터가 존재하는 75곳의 자동기상관측소(AWS, Automatic Weather Station)

를 선정하여 기온 및 강우량 자료와 미래 기후 예측을 통하여 도출된 2001년도부터 2010년도 데이터와 상관관계분석을 시행하였다. 미래 기후 예측자료와 자동기상관측지점

에서 수집된 실측자료간의 상관계수는 기온의 경우 평균 0.98 이상으로 매우 높게 분석되었고, 강우량의 경우 0.56로 기온에 비해 낮게 도출되었으나 기후변화 시나리오 중 강우예측의 불확실성을 고려하였을 때 높은 상관관계가 분석되었다.

아래 표 2와 표 3에는 75개 관측지점 중 2001년도 1월부터 2010년 8월까지 기상자료가 존재하는 58개의 AWS를 추출하여 정리하였다. 표 2에 정리된 기온의 상관관계의 경우 대부분의 기상관측소에서 매우 높은 상관관계를 나타냈으나, 표 3의 강우량의 경우 관측소에 따라 상관관계의 변동 폭이 매우 높게 나타났다.

강우량 상관관계 분석 중 강화는 상관관계가 0.70으로 매우 높았으나 부산의 경우 0.29으로 다른 지역에 비해 낮게 도출되었다. 전반적으로 미래 기후 예측자료와 실측자료의 상관관계가 매우 높게 분석되었으나 강우량의 경우 연도별, 계절별 변이성이 크게 나타났다.

우리나라는 여름철의 강우량이 많으며 여름철 강우의 표준편차는 지역에 따라서 크게는 2배 이상으로 나타나며, 지역별 변동성도 매우 크게 나타난다. 또한 우리나라는 강우량의 변동폭이 내륙보다는 해안 주변에서 더 크며 서해안보다는 동해안에서 더 큰 변동성을 갖는다(김맹기, 2005). 강우량과 미래 기후자료 간의 상관관계 결과에서 상관관계가 가장 낮은 하위 10%는 상관관계가 0.40 이하로 분석되었으며, 해당지역은 부산, 울진, 통영 및 남해이다. 해당지역의 상관관계를 보다 정밀하게 분석하기 위하여 계절별 상관관계 분석을 추가적으로 시행하였다. 상관관계가 낮은 지역을 선정한 이유는 낮은 지역의 계절적 변화가 강우량의 변화와 보다 밀접한 관계가 있기 때문이다(김맹기, 2005). 분석결과 울진을 제외한 3개 지역에서는 기상인자 변동폭이 큰 여름과 겨울동안의 상관관계가 더 낮게 분석되었다(표 4).

TABLE 2. 2001-2010년의 미래 기후 예측값과 AWS 관측값과 상관관계 분석(평균기온)

area	Correlation Coefficient	area	Correlation Coefficient	area	Correlation Coefficient
강릉	0.97	부안	0.98	장흥	0.98
강화	0.98	산청	0.98	전주	0.98
거창	0.98	서산	0.98	정읍	0.98
고흥	0.98	서울	0.98	제천	0.98
광주	0.98	속초	0.97	진주	0.98
구미	0.98	수원	0.98	천안	0.98
군산	0.98	순천	0.98	철원	0.98
금산	0.98	안동	0.98	추풍령	0.98
남원	0.98	양평	0.98	춘천	0.98
남해	0.98	영덕	0.98	충주	0.98
대관령	0.97	영월	0.98	태백	0.98
대구	0.97	영주	0.98	통영	0.98
대전	0.97	영천	0.98	포항	0.98
마산	0.97	울산	0.98	합천	0.98
문경	0.98	울진	0.98	해남	0.98
백령도	0.97	의성	0.98	홍천	0.98
보령	0.97	이천	0.98	흑산도	0.98
보은	0.97	인천	0.98	여수	0.98
봉화	0.98	임실	0.98		
부산	0.97	장수	0.98		

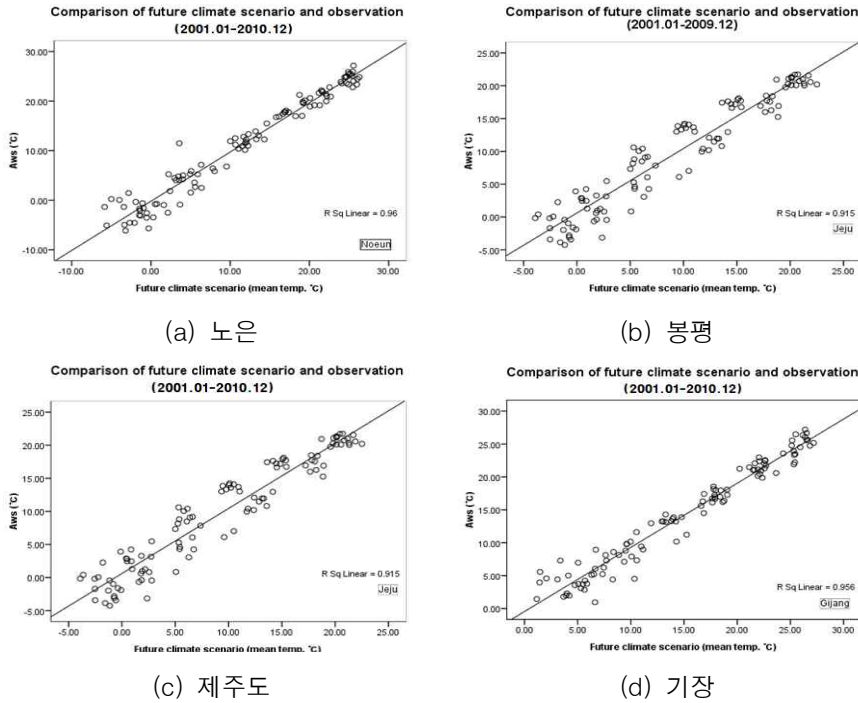


FIGURE 7. 미래기후예측값과 AWS 관측값의 산점도 (평균기온)

TABLE 3. 2001~2010년의 미래 기후 예측값과 AWS 관측값과 상관관계 분석(강우량)

area	Correlation Coefficient	area	Correlation Coefficient	area	Correlation Coefficient
강릉	0.41	부안	0.63	장흥	0.49
강화	0.70	산청	0.53	전주	0.65
거창	0.52	서산	0.50	정읍	0.65
고흥	0.49	서울	0.64	제천	0.64
광주	0.46	속초	0.45	진주	0.48
구미	0.62	수원	0.62	천안	0.65
군산	0.61	순천	0.61	철원	0.68
금산	0.60	안동	0.63	추풍령	0.67
남원	0.57	양평	0.62	춘천	0.67
남해	0.40	영덕	0.45	충주	0.58
대관령	0.59	영월	0.60	태백	0.57
대구	0.49	영주	0.64	통영	0.39
대전	0.73	영천	0.50	포항	0.45
마산	0.45	울산	0.46	합천	0.49
문경	0.70	울진	0.35	해남	0.49
백령도	0.50	의성	0.60	홍천	0.60
보령	0.59	이천	0.57	흑산도	0.50
보은	0.76	인천	0.64	여수	0.42
봉화	0.66	임실	0.66		
부산	0.29	장수	0.65		

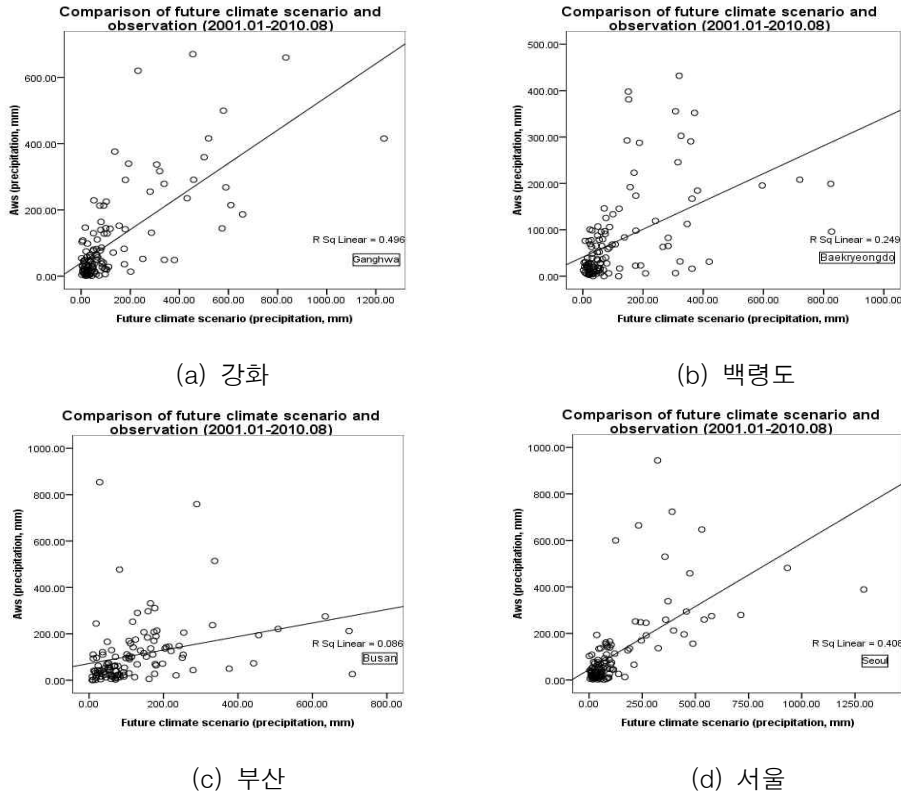


FIGURE 8. 미래기후예측값과 AWS 관측값의 산점도 (강수량)

TABLE 4. 2001~2010년 강우량의 미래 기후 예측값과 AWS 관측값 계절별 상관관계 분석결과

area	Correlation Coefficient	Correlation Coefficient (summer and winter)	Correlation Coefficient (spring and fall)
부산	0.29	0.24	0.45
울진	0.35	0.30	0.16
통영	0.39	0.37	0.50
남해	0.40	0.39	0.43

결론 및 토의

본 연구에서는 KMA-RCM에 근거한 기후 모델 자료 분석을 통하여 1971년부터 2100년까지의 평균기온과 강수변화를 분석하였다. 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 지리정보 공간보간법 중 Co-Kriging 와 IDW 기온 및 강우량 감을 기법을 활용한 규모 상세화 기법을 개발하였다. 이의 연구결

과로 1971년부터 2100년까지의 평균 온도와 강수량을 도출하였다. 평균기온의 경우 130년 동안 1.39℃ 상승 하고, 강우량의 경우 271.23mm 증가하는 것으로 파악되었다.

둘째, 지역 규모의 기후변화 시나리오 중 2001년도부터 2010년도 평균기온 및 강우량 과 전국 75곳의 자동기상관측소의 실측값의 상관관계 분석을 수행하였다. 기후 예측 자료 와 동기간의 실측값과의 상관관계를 분석한

결과 기온은 상관관계가 0.98, 강우량은 0.56으로 분석되었다.

본 연구에서는 공간해상도 27km의 KMA-RCM을 국지적인 차원의 기후변화를 표현할 수 있는 1km 공간해상도의 기후변화 시나리오로 규모 상세화하는 연구를 수행하였다. 이 과정에서 발생하는 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이기 위하여 시나리오에 입력된 참고 년도 이후의 실측값과 연구결과간의 상관관계를 분석하였다. 이는 KMA-RCM을 통한 규모 상세화 결과의 유의성이 높음을 검증함과 동시에 평년(과거 30년)의 기후 패턴과 2001년부터 2010년의 기상패턴이 비슷함을 나타내는 결과이다. 그 중 강우량은 기온에 비해 상관관계가 낮게 도출되었다. 기온의 경우 관측소에 따른 변동 폭이 거의 없는 반면 강우량의 경우 기온에 비하여 상대적으로 관측소별로 상관관계의 변동 폭이 크게 나타났다. 기온의 경우 고도에 따른 감율 적용의 영향으로 상관관계가 높은 것으로 사료된다. 강우량의 경우 실제로 기온 및 습도 등과 국지적인 특성(예: 지형과 지표 성질 등)이 강수과정에 복합적으로 상호작용하여 비선형적 관계를 나타내며(김맹기, 2005), 본 연구의 결과에도 동일한 영향을 받은 것으로 사료된다. 본 연구과정에서 강우량에 적합한 보간법을 적용하고 강우감율을 적용했음에도 강우 발생의 특성상 국지성 반영 방법론이 보충되어야 할 것으로 사료된다. 또한 기후 변화가 심화됨에 따라 기상 패턴이 급격하게 변화하며 이에 따라 온도 및 강우량의 변화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 기후 변화에 따른 극한현상을 반영하지 못하고 있으며 본 연구결과와 실측값간의 상관관계가 매우 높게 도출되었음에도 미래 기후를 예측하는 방법론의 개선이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 추후 진행될 연구에서는 미래 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이기 위한 극한강우 및 극한 기후사상에 대한 방법론이 보충되어야 할 것이다.

본 연구는 27km의 공간해상도를 가지고

있는 KMA-RCM을 1km의 공간해상도로 규모 상세화를 시행하여 지역규모의 미래 기후변화를 예측하고, 이의 불확실성을 줄이기 위하여 검증을 시행하였다. 기후변화 현상이 국지적으로 상당한 변이성을 나타내며 미래 기후변화 시나리오의 규모 상세화를 통하여 기후변화를 공간적으로 상세히 표출하고자 하였으며 추후 시나리오가 내재하고 있는 불확실성을 줄이기 위한 연구가 진행된다면 이의 활용성이 매우 높을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원 2010년 녹색성장정책연구 중 「기후변화 연동 4대 강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발 2」 및 환경부 2010년 기후변화 역무대행 중 「기후변화 적응 정보전달체계 구축」의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드린다. **KAGIS**

참고문헌

- 강병진. 2011. KMA 및 SNU-RCM을 통한 기상자료 공간분포의 예측정확성 비교. 고려대학교 기후환경학과 석사학위 논문.
- 권원태, 현동식, 백희정, 강남협, 이경미, 현유경, 오경숙, 박혜정. 2010. 기후변화 이해하기 VI. 국립기상연구소 기후연구과, 제주지방기상청.
- 국립기상연구소. 2002. 한반도 및 동아시아지역 기후변화 시나리오기법 개발. 기상연구소 연구보고서.
- 국립기상연구소. 2005. 기후변화협약대응 지역 기후시나리오 활용기술 개발(I). 국립기상연구소 연구보고서 MR050C03 408쪽.
- 국립기상연구소. 2006. 기후변화 협약 대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(II). 국립기상연구소 연구보고서 MR060C42 611쪽.

- 국립기상연구소. 2007. 기후변화 협약 대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(III). 국립기상연구소 연구보고서 MR070C70 559쪽.
- 기상청. 2008. 기상연보 2008. 기상청 11-1360000-000016-10.
- 기상청. 2010. 일별 지상관측자료를 제공. <http://www.kma.go.kr/>.
- 기후변화정보센터. 2009. 미래 기후 시나리오 자료 제공. <http://www.climate.go.kr/index.html>.
- 김맹기. 2005. 한반도 기후변화 시나리오를 위한 통계적 규모축소법의 적용성. 한국기상학회지 41(2):217-227.
- 김지연, 이승호. 한국의 열과분포와 그 원인에 관한 연구. 대한지리학회지 42(3):332-343.
- 박노옥, 장동호. 2008. 수치표고모델과 다변량 크리깅을 이용한 기온 및 강수 분포도 작성. 대한지리학회지 43(6):1001-1015.
- 신진호, 이효신, 권원태, 김민지. 2009. 한반도 미래 기온 변화 예측을 위한 ECHO-G/S 시나리오의 통계적 상세화에 관한 연구. 대기 19(2):107-125.
- 윤진일, 최재연, 안재훈. 2001. 일별 국지기온 결정에 미치는 관측지점 표고영향의 계절변동. 한국농림기상학회지 3(2):96-104.
- 이근상, 김정열, 안소라, 심정민. 2010. 기후변화에 따른 안동·임하호 유역의 부유사량 분석. 한국지리정보학회지 13(1):1-15.
- 이민아, 이우균, 송철철, 이준학, 최현아, 김태민. 2007. 기온 및 강수량의 시공간 변화에 측 및 변이성. 한국 GIS 학회지 15(3):267-278.
- 이승호. 1999. 제주도 지역의 강수분포 특성. 대한지리학회지 34(2):123-136.
- 홍기욱, 서명석, 나득균, 장동호, 김찬수, 김맹기. 2007. GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 기온자료 추정. 대기 17(3):255-268.
- Benestad, R.E. 2002. Empirically downscaled multimodel ensemble temperature and precipitation Scenarios for Norway. Journal of Climate 15:3008-3027.
- Brown, D.P. and A.C. Comrie. 2002. Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. Clim Res. 22:115-128.
- Craig, D.S. 2008. The Relationship between Monthly Precipitation and Elevation in the Alberta Foothills during the Foothills Orographic Precipitation Experiment, Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience.
- Creutin, J.D., G. Delrieu and T. Lebel. 1998. Rain measurement by raingage-radar combination: a geostatistical approach. Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies 5:102-115.
- Daly, C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. International Journal of Climatology 26:707-721.
- Daly, C., E.H. Helmer and Q. Maya. 2003. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra. International Journal of Climatology 23:1359-1381.
- Erxleben, J., K. Elder and R. Davis. 2002. Comparison of spatial interpolation methods for estimating snow distribution in the Colorado Rocky Mountains. Hydrological Processes, 16: 3627-3649. doi: 10.1002/hyp.1239.

- Hevesi, J., A. Alan, L. Flint and J.D. Istok. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis. *Journal of Applied Meteorology* 31:661-676.
- Hewitson, B.C. and R.G. Crane. 2006. Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *International Journal of Climatology* 26:1315-1337.
- IPCC-TGICA. 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2.
- Mearns, L.O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme and M. Lal. 2003. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. Data Distribution Centre of the International Panel of Climate Change, p.38.
- Nalder, I.A. and R.W. Wein. 1998. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 92(4):211-225.
- Rockel, B., C.L. Castro, R.A. Pielke Sr., H. von Storch, and G. Leoncini. 2008. Dynamical downscaling: assessment of model system dependent retained and added variability for two different regional climate models. *Journal of Geophysical research* vol. 113, D21107, doi:10.1029/2007JD009461.
- Schimidli, J., C.M. Goodess, C. Frei, M.R. Haylock, Y. Hundeha, J. Ribalaygua and T. Schmith. 2007. Statistical and dynamical downscaling of precipitation: an evaluation and comparison for the European Alps. *Journal of Geophys Res.*, 112, D04105, doi: 10.1029/2005JD07026.
- Smith, C.D. 2008. The relationship between monthly precipitation and elevation in Alberta Foothills during the Foothills orographic precipitation experiment. In: M.K. Woo(ed.). *Cold Region Atmospheric and Hyclrologic Studies*. Springer, USA. pp.167-185.
- Wilby R.L. and T.M.L. Wigley. 2000. Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology* 20:641-661.
- Wilby, R.L., J. Troni and Y. Biot. 2009. A review of climate risk information for adaptation development planning. *International Journal of Climatology* 29:1193-1215. 