

수자원 영향평가에 활용 가능한 지역기후변화 시나리오 연구

A study on the regional climate change scenario for impact assessment on water resources

임 은 순* / 권 원 태** / 배 덕 효***

Im, Eun-Soon / Kwon, Won-Tae / Bae, Deg-Hyo

Abstract

Our ultimate purpose is to investigate the potential change in regional surface climate due to the global warming and to produce higher quality regional surface climate information over the Korean peninsula for comprehensive impact assessment. Toward this purpose, we carried out two 30-year long experiments, one for present day conditions (covering the period 1971-2000) and one for near future climate conditions (covering the period 2021-2050) with a regional climate model (RegCM3) using a one-way double-nested system. In order to obtain the confidence in a future climate projection, we first verify the model basic performance of how the reference simulation is realistic in comparison with a fairly dense observation network. We then examine the possible future changes in mean climate state as well as in the frequency and intensity of extreme climate events to be derived by difference between climate condition as a baseline and future simulated climate states with increased greenhouse gas. Emphasis in this study is placed on the high-resolution spatial/temporal aspects of the climate change scenarios under different climate settings over Korea generated by complex topography and coastlines that are relevant on a regional scale.

keywords : climate change, scenario, regional climate model

요 지

온실가스 증가로 인한 기후변화를 이해하고, 다양한 영향평가 분야에 상세한 기후정보를 제공하기 위해서 온실가스 배출 시나리오에 근거한 지역기후변화 시나리오 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 역학적 상세화를 위하여 지역기후모델을 이용한 이중중지격자시스템을 구축하고, 과거 30년(1971-2000)과 미래 30년(2021-2050)에 대한 시나리오를 생산하였다. 미래 시나리오에 대한 신뢰도를 확보하기 위하여, 기준 시나리오에 대한 관측과의 검증이 선행되었다. 기준 시나리오는 동지격자의 한반도 영역뿐만 아니라 모격자의 동아시아 영역에 대하여 기온과 강수의 계절 및 경년변동성과 일빈도분포를 성공적으로 모사하였다. 또한 경계조건으로 이용된 전구모델과 비교하여 공간적인 특성뿐만 아니라 면적평균 시계열에서도 뚜렷한 오차의 감소를 나타내었다. 미래 기후변화 전망은 기준 시나리오와 미래 시나리오의 차이로부터 유도되며, 평균적인 변화뿐만 아니라 극한 기후의 빈도와 강도변화에 대한 분석이 수행되었다. 미래 시나리오에 의하면 2050년까지 한반도에서는 2°C 정도의 기온 상승과 겨울철 강수량의 뚜렷한 증가경향이 전망되었다. 본 연구는 한반도의 복잡한 지형적 특성이 반영된 고해상도 시나리오를 생산하

* 기상연구소 기후연구실 기상연구사
(e-mail: esim@metri.re.kr)

** 기상연구소 기후연구실 기후연구실장

*** 세종대학교 토목환경공학과 부교수

기 위한 방법론을 제시하고, 생산된 시나리오를 이용하여 다양한 시공간 규모에 대한 기후특성을 파악하였다는데 의미가 있다.

핵심용어 : 기후변화, 시나리오, 지역기후모델

1. 서론

정부간 기후변화패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 3차 기후변화에 관한 평가 보고서(IPCC, 2001)에서 지난 세기동안 전지구 평균 기온은 약 0.6°C 상승하였으며, 20세기 후반에 나타난 변화는 인위적인 온실가스 증가의 영향이 큰 것으로 보고하였다. 또한 다양한 온실가스 시나리오와 기후모델을 이용한 연구 결과에 근거하여 21세기에 전지구 평균 기온의 상승폭은 1.4-5.8°C가 될 것으로 전망하였다. 우리나라는 지난 20세기에 평균 기온이 약 1.5°C 상승한 것으로 나타나 온난화 추세가 전지구적인 경향을 상회하고 있으며, 20세기 후반부터 기후변화에 따른 강수량 및 집중호우의 증가 추세가 보고되고 있다(권원태, 2005). 이러한 급격한 기후변화에 의한 인간 사회 및 자연 생태계에 대한 부정적 영향을 최소화하기 위해서 향후 기후변화에 따른 다방면의 영향을 평가하고 이에 대응하기 위한 계획을 수립하는 것이 필수적이다(기상연구소, 2004a). 그 중 특히, 수자원 즉 육상의 물순환은 인간활동과 생태계 전반에 대한 직접적인 영향을 미치므로 기후변화 정책 수립시 대단히 중요한 문제로 인식되고 있다(이동률 등, 2004). 이는 지구온난화에 의한 기후변화는 미래 기온 상승뿐 아니라 강수량의 패턴변화, 또 이와 관련하여 증발산이나 토양 수분등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지기 때문이다(김선영 등, 2003; 김웅태 등, 2004; 안재현 등, 2001a; 유철상과 이동률, 2000).

온실가스 증가로 인한 기후변화를 이해하고 전망함과 동시에, 다양한 영향평가 분야에 적합한 기후정보를 제공하기 위해서는 온실가스 증가 시나리오에 근거한 신뢰성 있는 기후변화 장기 시나리오가 필수적이다(IPCC-TGCI, 1999; Raisansen et al., 2004). 미래 기후변화에 따른 영향평가 연구의 신뢰도는 영향평가모델의 주요 입력자료로 사용되는 기후정보의 신뢰도가 가장 근본적인 문제라고 할 수 있다. 따라서 기후변화에 따른 수문환경의 변화를 예측하기 위한 수문 모델을 이용한 연구에서도(안재현 등, 2001b; 신사철 2000; 윤용남 등, 1999) 궁극적으로는 신뢰성 있는 기후변화 시나리오의 확보가 결정적인 부분이다.

지구온난화에 따른 한반도 기후변화의 영향을 수문학적으로 연계하려는 시도가 수문학자들에 의해 지속적으로 이루어지고 있으나, 기후학적인 관점에서 몇가지 문제점이 드러난다. 최근의 대표적인 예를 살펴보면, 김선영 등(2003)과 김병식 등(2004)이 YONU GCM의 CO₂ 배증결과를 이용하여 회귀식이나 일기산출기등의 통계적인 방법으로 상세화하고 수문모델의 입력자료로 사용하였는데, YONU GCM의 5°(경도)×4°(위도)의 격자자료를 이용하여 한반도에서의 복잡한 지형적 특성이 반영될 수 없다. 또한 안재현 등(2001b,c)이 국지규모 수문-대기모델(Integrated Regional Scale Hydrologic/Atmospheric Model, IRSHAM96)을 이용하여 역학적인 상세화를 시도하였는데, 시나리오에 대한 불확실성 평가나 신뢰도 검증이 이루어지지 않았으며, IRSHAM96의 대기 모형은 미국에서 1980년대에 사용된 상세격자(fine-mesh) 모델로써 현재 기상학계에서는 잘 사용되지 않는다.

본 연구에서는 수자원을 포함한 다양한 분야의 영향 평가시에 활용할 수 있도록 한반도의 지형적 영향이 현실적으로 반영된 기후변화 시나리오를 생산하고 이를 통해 한반도의 미래 기후변화를 전망하였다. 기후변화 전망을 위한 연구에서 전지구기후모델(Global Climate Model, GCM)이 가장 광범위하게 이용되고 있으나, 저해상도의 공간 분해능과 물리 과정의 한계로 인해 한반도와 같이 국지기후 특성이 뚜렷한 지역에서의 기후변화를 평가하기에는 문제점이 따른다. 특히 GCM의 결과를 수문모델과 연계하여 사용하고자 할 때, 수자원 운영의 중심이 되는 유역 단위로 적용하는데 발생하는 공간적 불확실성으로 인해 그 사용이 제한되어 왔다(배덕효 등, 2005). 본 연구에서는 이를 극복하기 위한 상세화 기법으로 국제이론물리센터(International Center for Theoretical Physics, ICTP)에서 개발한 가장 최신의 지역기후모델을 도입하여 한반도에서의 상세 시나리오를 생산할 수 있는 이중중지격자시스템(double-nested system)을 구축하였다. 이를 이용하여 IPCC 권장배출 시나리오인 SRES (Special Report on Emission Scenarios) B2 시나리오에 근거한 ECHO-G(독일 MPI의 기후모델) 결과를 과거 30년(1971-2000)과 미래 30년(2021-2050)에 대하여 상세화하였다. 미래 시나리오

에 대한 신뢰도를 제시하기 위해서는 기준이 되는 과거 시나리오의 불확실성을 이해하고 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 과거 30년간의 기준 시나리오를 다양한 시·공간 규모에 대하여 관측과의 검증을 수행하고, 이에 대한 신뢰도를 기반으로 미래 기후변화를 전망하였다.

직접적인 수자원 영향평가는 수문분야 전문가들에 의해 이루어지겠지만, 기상전문가에 의해 기후학적으로 검증된 상세한 시나리오 자료 생산은 수문모델과의 연계적인 측면에서 활용가능성이 클 것으로 기대한다.

2. 지역 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오를 이용하여 미래기후를 전망 (projection)하는 것은 현기후의 실제 상태에서부터 사실적인 전개(evolution)를 평가하는 기후 예측(prediction)과는 구별하여 사용된다. 기후전망은 미래의 발전 가능성에 대한 가정에 근거하여 작성된 온실가스나 에어로솔 배출 시나리오에 대한 기후시스템의 반응에 중점을 둔 것으로 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출 시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수 밖에 없다 (IPCC-TGCI, 1999). 따라서 기후전망의 목적은 미래 특정 시점의 정확한 기후를 예측하는 것이 아니라, 가능한 미래 기후의 가장 그럴듯한 확률빈도의 형태를 재구성해내는 것이다 (Giorgi, 2005). 이러한 특성상 확률론적인 방법의 접근이 이루어져야하며, 시나리오 자료의 최종 사용자들은 자료 이용시 그 불확실성과 한계를 이해하는 것이 중요하다.

온실가스 증가에 따른 기후변화 시나리오 연구는 GCM을 이용하여 가장 광범위하게 적용되고 있다 (Giorgi et al., 2001). 이는 GCM이 역학적·물리적 과정에 기초한 대기/해양/지면의 3차원 자료를 객관적으로 제공할 수 있어 인위적 요인에 의한 복사강제력의 변화에 따른 지구 기후시스템의 변화를 모의하거나 전망하는데 유용하기 때문이다. 그러나 GCM의 경우 계산상의 부담으로 수평분해능이 100~500 km 정도여서 지구 또는 대륙 규모의 평균적 기후는 잘 모사하지만, 지역 규모나 극한 현상의 모사에 대한 오차는 지역과 모델에 따라 범위가 크게 변동적이다 (Mearns et al., 2001). 특히 우리나라는 지형적 영향에 의한 국지 규모의 다양한 기후 특성이 나타나지만, GCM의 격자 시스템 상에서 몇 개의 격자에 의해 표현되거나 혹은 육지가 바다로 처리되는 경우도 있어서 GCM의 결과를 바로 영향평가모델에 연계하여 사용하기에는 한계가 있

다. 가령 예를 들어, 수자원 영향평가는 한강유역/낙동강유역등과 같은 유역기반으로 이루어져 GCM의 저해상도 격자로부터 생산되는 결과를 수문모델에 효율적으로 연계할 수 있는 시·공간 규모의 기후정보로 상세화하는 기법이 절실히 요구된다 (임은순 등, 2005). 이러한 이유로 현재 선진국에서는 지역기후모델을 이용한 상세화 기법에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 지역기후모델의 경우 고해상도의 지형 처방과 세밀한 격자에 알맞은 물리적 모수화 과정의 개선으로 장기간의 국지기후 모사능력을 어느정도 인정받고 있다 (Giorgi et al., 2001; Christensen et al., 1998). 더불어, 국가적인 재해와 관련된 집중호우나 가뭄 등 극한 현상 (extreme event)의 모사에 있어서도 GCM 보다 향상된 결과를 보여준다 (Bell et al., 2004).

기후모델을 이용하여 온실가스나 에어로솔 등의 인위적 강제력에 대한 기후 시스템의 반응을 살펴보기 위해서 지금까지 주로 CO₂를 배증시키거나 단순 점증시키는 형태의 실험들이 이루어졌는데, 최근에는 IPCC의 배출 시나리오에 대한 특별 보고서 (SRES) (IPCC, 2000)에 기초를 두고 미래 기후변화 시나리오의 생산이 이루어지고 있다. SRES는 인구, 기술, 경제발전 등 미래 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루며 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)의 배출 시나리오를 제시한다. 하지만 SRES 배출 시나리오 역시 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 고려할 수는 없기 때문에 상당한 불확실성이 포함된다. 장기적인 관점에서 미래의 배출 시나리오에서의 불확실성뿐만 아니라, 사용되는 각 기후모델에 대한 불확실성의 범위를 줄이기 위해서 다양한 배출 시나리오와 기후모델에 대한 앙상블 실험이 요구된다 (Mitchell et al., 1999). 하지만 적분에 필요한 방대한 계산량을 고려할 때, 현재의 컴퓨팅 능력으로는 어느 한 연구조직에 의해 수행되기에 한계가 있다. 기후변화에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 유럽지역의 경우, 이에 대한 극복 방안으로 유럽연합의 프로젝트를 통하여 공동 연구를 수행한다. 가령 예를 들어, 유럽연합의 PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) 프로젝트에는 20개 이상의 연구 그룹이 참여하여 유럽 지역의 미래 기후전망에 대한 불확실성을 줄이고 기후변화에 대한 이해를 향상시키기 위해 협력하고 있다 (Wang et al., 2004). 구체적으로 다양한 배출 시나리오에 대한 2개의 GCM 결과를 경계조건으로 처방하여 8개의 지역기후모델을 이용한 앙상블 실험을 수행하고 서로 비교 분석함으로써 유럽지역 기후변화에 대한

불확실성을 좁혀나가려는 노력들이 시도되고 있다 (Giorgi et al., 2004; Raisanen et al., 2004).

지역기후모델을 이용한 기후변화 연구는 보편적으로 세단계로 나누어 이루어진다. 첫 번째는 완벽한 경계조건, 즉 관측자료를 초기 및 경계조건으로 사용하여 실제 기간에 대한 적분을 수행하는 재현실험이다 (Christensen et al., 1997; Im et al., 2006a; Kato et al., 1999). 지역기후모델은 초기 및 경계조건으로 제공되는 대규모 순환장에 의해 크게 구속되는 경향이 있기 때문에, 이러한 재현실험을 통하여 적어도 경계조건으로 제공되는 강제력에 대한 오차는 최소화시켰다고 가정하고 모델에 의한 계통오차 및 모델의 기본적인 성능을 평가한다. 관측 경계조건에 의해 지역기후모델의 기본 품위가 확인되었다면, 두 번째 단계는 GCM에 의한 경계조건을 이용한 기준(reference) 시나리오 실험이다 (Giorgi et al., 2004a; Raisanen et al., 2004; Im et al., 2006b). 일반적으로 최근의 평균 기후를 대표할 수 있고, 많은 유의미한 아노말리를 포함한 30년 이상의 기후장을 생산하고 관측과 비교·검증하여 모델의 기후 모사 성능을 평가한다. 또한 경계조건으로 사용된 GCM과의 비교를 통하여 지역기후모델에서 생산된 상세 기후장의 향상된 측면(added value)을 검증함으로써 대규모 강제력의 현실적 규모 축소 능력을 평가한다. 이를 통해 지역기후모델 사용의 타당성과 미래기후 시나리오 생산에 대한 신뢰성을 제시할 수 있다. 그리고 마지막으로 이러한 검증은 바탕으로 GCM 미래 시나리오를 초기 및 경계조건으로 지역기후모델이 수행된다. 일반적으로 적분기간은 기준 실험과 동일하도록 구성하며, 두 기간의 차이로부터 인위적 강제력에 의한 기후 변화 시그널을 탐지해낸다(Giorgi et al., 2004b; Raisanen et al., 2004).

기후 모델링은 상세 격자로 갈수록 자연적 변동성이 증가하고 기후모델에서 적절하게 다루기 어려운 요소들이 증가하기 때문에(Giorgi, 2005), 기후 전망 또한 전구 규모(global scale)보다 지역규모(regional scale)에서 즉시·공간 규모가 줄어들어 따라 훨씬 많은 불확실성을 동반하게 된다는 사실에 주의해야 한다.

3. 모델 및 실험 방법

3.1 전구기후모델 (ECHO-G)

본 연구에서 지역기후모델의 초기 및 경계조건으로 처방되는 전구기후모델은 독일 MPI (Max-Planck Institute)의 ECHO-G (ECHAM4/HOPE-G)이다. ECHO-G는 대기 모델인 ECHAM4와 해양 모델인

HOPE-G가 OASIS라는 접합자를 통해 자료 교환이 이루어지는 대기-해양 접합모델이다. ECHAM4와 HOPE-G는 각각 약 3.75°와 2.8°의 수평격자 간격으로 구성되어 있다 (Min et al., 2005; Min et al., 2006). 기상연구소에서는 ECHO-G를 도입하여 SRES A2와 B2 시나리오에 대하여 241년(1860-2100)의 장기 기후변화 시나리오를 모의한 결과를 보유하고 있다 (기상연구소, 2004b). 본 연구에서는 ECHO-G B2 시나리오 결과를 이용하여 과거 30년(1971-2000)과 미래 30년(2021-2050)에 대한 상세화를 수행하였다.

지역기후모델은 경계조건으로 사용되는 GCM에 크게 영향을 받기 때문에 경계조건으로 처방되는 GCM 시나리오의 불확실성 평가가 중요하다. 박이형 등(2005)은 ECHO-G 시나리오 결과를 IPCC DDC(Data Distribution Center)에서 제공하는 7개의 다른 GCM 시나리오 결과와 비교·분석하여 ECHO-G가 비교적 우수한 현재 기후 모사 능력이 있음을 보인 바 있다. 기온의 경우 8개 모델이 유사한 양상으로, 양상불 평균변화량(시그널)이 모델간변동성(노이즈)보다 3배 이상의 크기로 뚜렷한 증가 경향을 나타내며 2080년대에 4.2/3.6[A2/B2]도까지의 기온증가가 전망되었다. 강수량은 계절별로 그 예측 성능에 모델간 변동성이 큰 것으로 나타났으나, ECHO-G는 8개 모델의 멀티모델양상별 결과와 좋은 일치를 보였다.

3.2 지역기후모델 (RegCM3)

본 연구에서 ECHO-G의 역학적 상세화를 위해 이용된 RegCM3는 이탈리아의 ICTP에서 개발된 가장 최신 버전의 지역기후모델이다 (Pal et al., 2005). 기본적으로 RegCM3는 정역학 기반의 방정식계를 사용하며, 연직적으로 시그마 좌표계, 수평적으로 Arakawa B-grid 좌표계를 사용한다.

Fig. 1은 본 연구에서 구축된 RegCM3를 이용한 이중중지격자시스템을 나타낸 것이다. 모델의 모격자(mother domain)는 60km의 수평 해상도로 동아시아 영역에, 등지격자(nested domain)는 20km의 수평해상도로 한반도 남한 영역에 초점이 맞추어져 있다. 그림에서 알 수 있듯 우리나라의 경우 지형적으로 육지의 70% 정도를 산악지역이 차지할 만큼 좁은 지역 내에 복잡한 지형으로 구성되어 있다. 두 영역의 지형을 비교해보면, 등지격자에서 태백산맥과 소백산맥등의 지형적인 특성과 해안선이 모격자에 비하여 훨씬 현실적으로 처방되어 등지격자시스템의 필요성을 제시한다. 모델 영역의 크기와 위치는 측면 경계자료의 처방으로 인해 모델의 결과에 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에

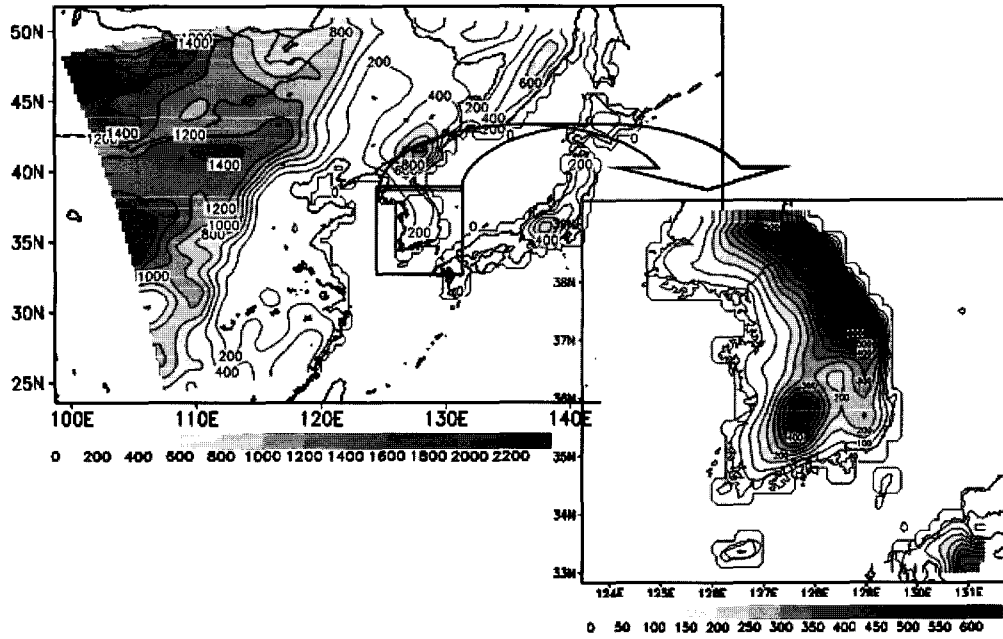


Fig. 1. Model domain and topography (m) for the mother (60 km grid spacing) and nested (20 km grid spacing) simulations.

(Seth and Giorgi, 1998), 여러 가지 민감도 실험을 거쳐 선정되었다 (Im et al., 2006a). 물리적 모수화 과정 또한 모델의 해상도에 직접적인 영향을 받기 때문에 최적의 모수화 방안을 구축하기 위한 민감도 실험을 수행하였다.

이와 같이 본 연구에서 구축된 이중중지격자시스템을 이용하여 과거 30년과 미래 30년에 대한 ECHO-G B2 시나리오가 상세화된다. SRES 배출 시나리오에는 주요 온실가스인 CO₂, CH₄, N₂O를 비롯한 총 19종의 온실가스가 포함되는데, A2 (B2) 시나리오의 경우 2100년에 CO₂가 821 (606) ppm 까지 증가한다. A2 시나리오가 온실가스의 급격한 증가를 보여주는 비관적 전망이라면, B2 시나리오는 환경지향적인 특성을 가지고 완만한 증가를 보여주는 낙관적 전망을 의미한다. 하지만 본 연구에서 전망하고자 하는 2050년까지는 대부분의 배출 시나리오가 유사한 증가 추세를 보이며, 실제로 GCM을 이용한 전망결과에 의하면 거의 유사한 미래기후에 대한 확률빈도분포를 제시한다 (Giorgi, 2005). B2 시나리오의 경우 CO₂, CH₄, N₂O의 농도가 1971-2000년에 비하여 2021-2050년에 각각 29%, 31%, 12% 증가한다.

3.3 관측자료

기존 시나리오에 대한 모델의 검증은 등지격자의 기온과 강수에 초점이 맞추어진다. Fig. 2는 등지격자 모사결과의 검증에 사용된 한반도의 관측망 분포를 나타

낸 것이다. 우리나라의 경우 지형적으로 복잡한 구조를 보이지만, 동시에 다른 나라에 비하여 비교적 조밀한 관측망을 구축하고 있어 상세모델의 밀도있는 검증에 적합하다는 장점이 있다. 57개 지점의 측후소 및 관측소는 조밀하고 고르게 분포하고 있어 국지적인 지형의 상세 구조를 잘 표현한다.

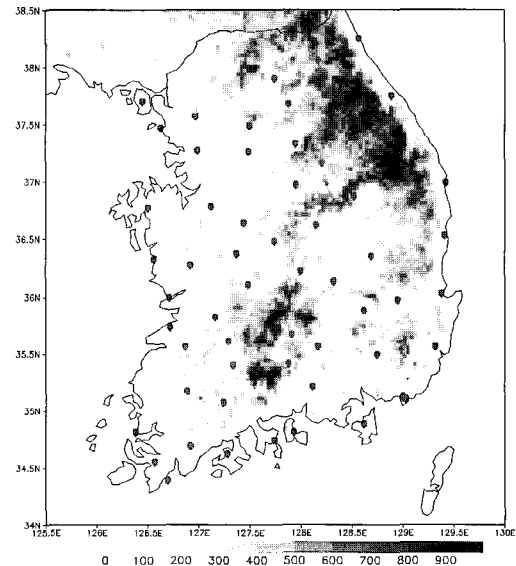


Fig. 2. Topography (m) and location of climate stations used for the assessment of the model performance.

모격자에서 생산된 기온과 강수는 25년간(1979-2004)의 NCEP/NCAR 재분석 자료와 CMAP (CPC Merged

Analysis of Precipitation) 자료를 이용하여 각각 검증된다. 두 자료 모두 위·경도 2.5도 격자의 전구자료로서, 기후모델의 검증에 있어 강수의 경우 CMAP, 강수 이외의 기온이나 바람장은 NCEP/NCAR 재분석 자료가 가장 보편적으로 이용되고 있다.

4. 기준 시나리오 검증

제 2장에서 설명하였듯이 지역기후모델을 이용한 기후변화 시나리오 연구시에, 미래 기후변화전망에 앞서 기준 시나리오의 성능을 검증하는 것은 중요하다. 기준 시나리오를 통한 모델의 기후모사 능력의 불확실성 평가를 통해서 미래 기후변화 시나리오에 대한 신뢰도를 제시할 수 있기 때문이다.

지금부터 제시하는 결과는 본 연구에서 구축한 RegCM3 이중동지격자시스템을 이용하여 1971-2000년까지의 ECHO-G B2 시나리오를 상세화한 결과이다.

Fig. 3은 모격자(동지격자)에서 생산된 결과를 동아시아(한반도) 영역에 대하여 면적 평균한 월평균 기온과 강수량의 시계열 분포를 관측(모격자 검증: NCEP/NCAR 재분석 및 CMAP 자료, 동지격자 검증: 한반도 관측소 자료)과 비교한 것이다. 기온의 경우 RegCM3는 모격자, 동지격자 모두 관측 자료와 비교하여 계절에 관계없이 cold bias가 계통적으로 나타나지만, 그 범위가 2도 미만으로 다른 지역기후모델에서 보이는 일반적

인 범주에서 벗어나지 않는다. 모격자에서 생산된 월별 강수량 분포를 살펴보면, 기본적으로 ECHO-G의 경우 겨울은 CMAP에 비하여 과다모사, 여름은 과소모사되어 계절적 변동성이 작게 나타나는 문제점을 드러낸다. RegCM3는 전체적인 계절패턴과 정량적인 측면에서 ECHO-G 보다 상당히 향상된 결과를 보여준다. 동지격자의 모사 결과를 관측소 자료와 비교한 결과를 살펴보면, 여름철 강수량이 과소 모사되는 계통오차가 뚜렷하지만, 계절적 변동성의 패턴을 현실적으로 모사한다.

Fig. 4는 동지격자에서 모사된 기온과 강수의 사계절(DJF, MAM, JJA, SON) 및 연평균에 대한 평균과 변동성을 관측과 비교한 것이다. 기온의 경우 모델에서 모사된 계절 평균이 관측에 비하여 체계적으로 과소모사 되지만, 관측과 유사한 계절변동의 패턴과 겨울철 연변동성이 크게 나타나는 특성을 현실적으로 모사한다. 강수량의 경우, 겨울철(DJF) 강수량은 변동성과 평균값이 관측과 유사하지만, 여름철(JJA) 강수량의 경우 관측에 비해 과소모사된다. 한반도 여름철 강수량은 태풍이나 몬순 시스템과 같은 복합적인 요소에 의해 지배되며, 공간적 분포의 편차와 경년 변동성이 큰 특징을 보인다 (Im et al., 2006a). 또한 가을철(SON) 강수량도 관측에 비해 과소모사되는데, 이에 대한 주요 원인은 9월에 발생하는 태풍에 의한 극한적인 강수량을 제대로 모사하지 못하는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 경계

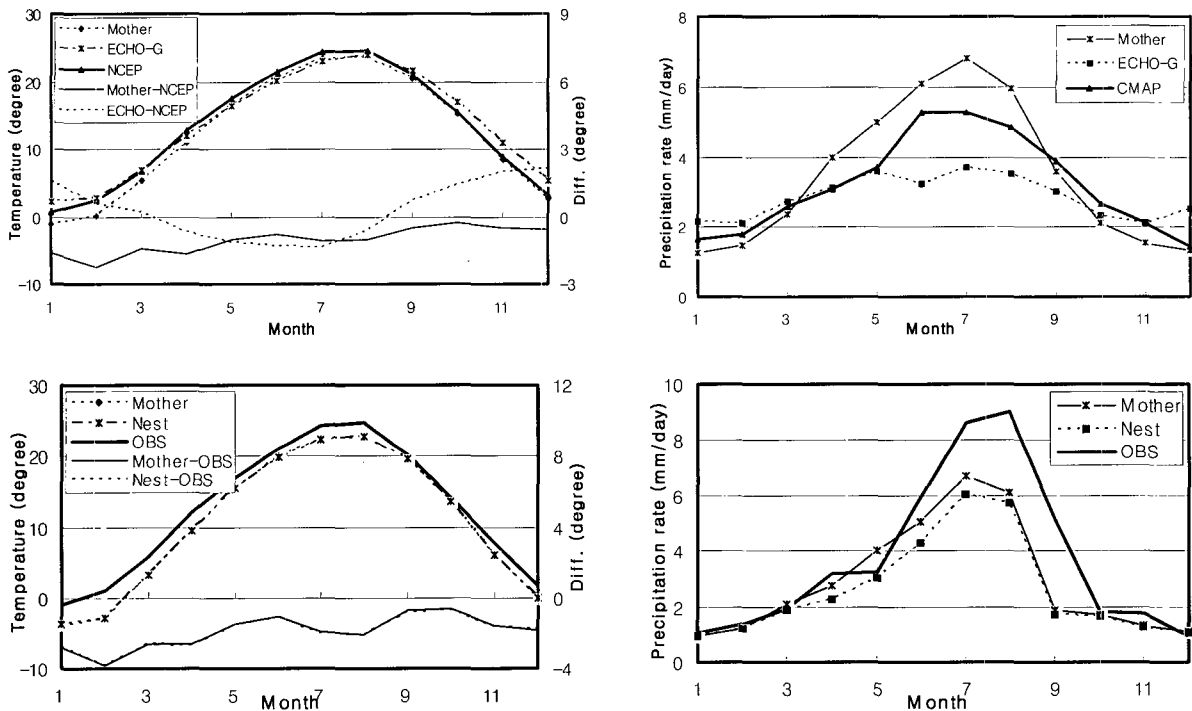


Fig. 3. Time series of area-averaged surface air temperature (left) and precipitation (right) over East Asia (upper) and Korean peninsula (lower).

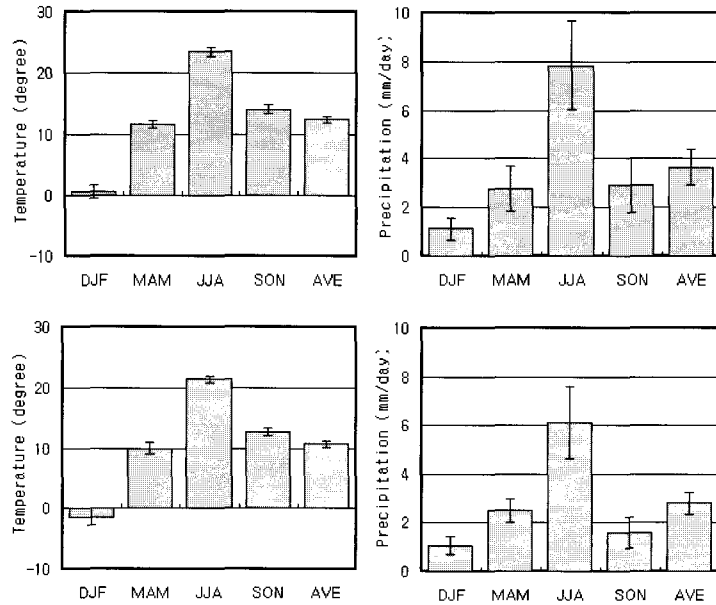


Fig. 4. Observed (upper panels) and simulated (lower panels) seasonal mean area-averaged temperature (left) and precipitation (right) over Korea and their inter-annual variability (error-bar).

조건으로 이용된 ECHO-G 전구모델의 수평해상도가 350 km로 태풍을 모사하기에는 한계가 있어, 지역기후 모델의 경계조건으로 이용되는 전구기후모델의 고해상도화에 대한 필요성을 제시한다. 몬순의 영향권에 놓여 있는 동아시아 지역이 전통적으로 기후모델(특히 전구 모델)에서 강수량 모사의 한계를 드러내고 있음을 고려할 때(Gao et al., 2006), 본 연구에서 제시한 상세화된 기후장은 위에서 언급한 계통적 오차에도 불구하고 이전의 유사 연구(e.g. Hirakuchi and Giorgi, 1995; Kato et al., 1999; Kato et al., 2001)와 비교하여 고무적인 결과로 평가된다.

모델 결과의 유의성을 확인함과 동시에 상세화된 시나리오가 경계조건으로 이용된 ECHO-G보다 정량적·정성적 측면에서 얼마만큼 향상되었는지 평가하기 위해, 한반도 지역에 대한 모격자 및 ECHO-G 모사결과와 관측(관측소 및 측후소 자료) 분포 사이의 공간적 상관관계수(Correlation coefficient)와 절대적인 오차량(Bias)를 계산하였다 (Table 1). 상세화된 기온의 분포

는 ECHO-G와 비교하여 계절에 관계없이 공간적 상관도가 향상되고, 절대적인 바이어스도 크게 감소하였다. 겨울철 강수량은 관측과 유의한 관계를 보이며 지역기후 모델에서 공간패턴의 향상과 바이어스의 감소가 나타났다. 여름철 강수량의 공간분포는 두 모델 모두 관측과 유의한 상관을 보이지 않지만, 바이어스는 지역기후 모델에서 상당부분 감소하였음을 확인할 수 있다. 한반도 영역의 검증시, 비교적 좁은 영역이기 때문에 강수밴드가 약간만 빗나가도 대단히 큰 에러를 가져올 수 있다는 점에 주목해야 한다. 동아시아 영역의 여름철 강수량에 대하여 2.5도 격자의 CMAP 자료와 비교하면 0.52의 유의한 상관계수를 얻을 수 있다.

기후학적으로 월(month) 시간 규모 이상의 평균장에 대한 분석도 중요하지만, 실제적으로 영향평가 부분에 시나리오 자료를 연계하거나, 극한현상에 대한 분석을 위해서는 일(daily) 시간 규모의 지역적 시나리오가 요구되고 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 모델에서 모사된 일평균 기온과 강수량에 대한 빈도분포를 관측과 비교한 것

Table 1. Spatial pattern correlation and bias between model results and observed station data.

		Corr		Bias	
		RegCM3	ECHO-G	RegCM3	ECHO-G
Temp.	DJF	0.88	0.80	-1.71	4.32
	JJA	0.63	0.28	-0.96	-1.2
Prec.	DJF	0.57	0.53	0.14	0.78
	JJA	-0.05	-0.08	-2.47	-5.04

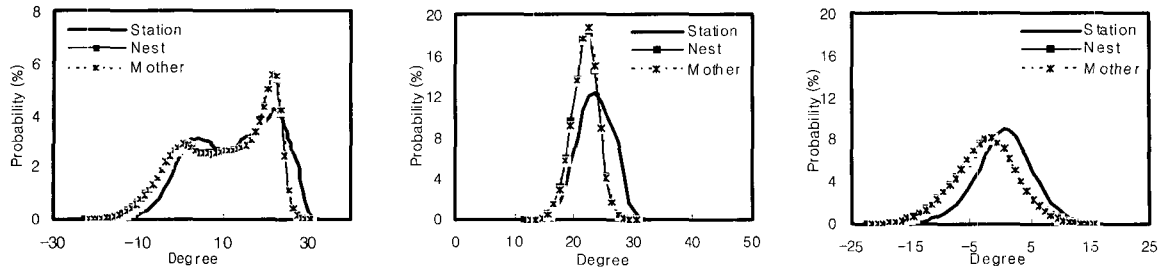


Fig. 5. Probability density function of the distribution for daily mean temperature in Korea. Left, middle, and right panel is annual, summer, and winter distribution, respectively.

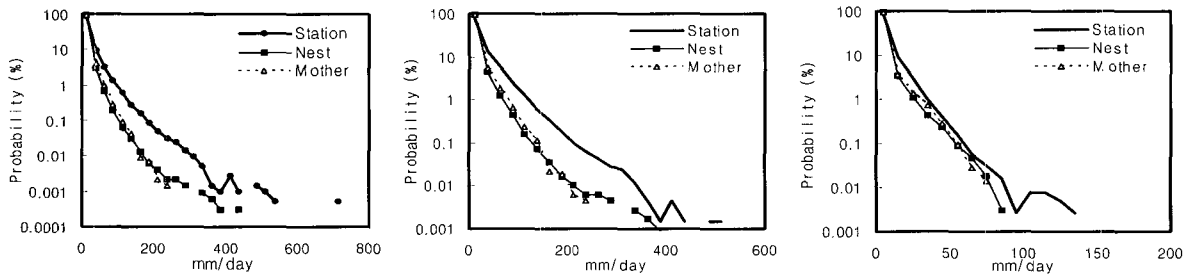


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for precipitation.

이다. 모격자와 등지격자의 모사결과는 57개 관측지점으로 전환된 후 빈도분포가 구해진다. 기온의 경우 면적평균 시계열에서 나타났듯이, 모영역과 등지영역의 모사결과가 거의 일치하는 분포를 보여준다(Fig.5). 이는 해상도 증가로 인한 상세한 지형적인 효과는 공간분포의 향상에만 기여함을 의미한다 (그림 미제시). 기온의 연평균 빈도분포는 계절적 특성에 의해 여름철과 겨울철에 서로 다른 형태의 피크(peak)를 가지는 비대칭적 구조의 형태를 보인다. 여름철은 겨울철보다 작은 변동성으로 인해 좁고 비대칭적 구조를 보이는 반면, 겨울철은 좀 더 넓게 퍼지고 대칭적인 구조를 나타낸다. 모델의 결과는 이러한 계절에 따라 달라지는 분산특징을 현실적으로 모사하지만, 계통적으로 과소모사는 오차에 의해 왼쪽으로 일정하게 치우치는 경향이 있다. 일강수량에 대한 빈도 분포에서는 겨울철은 관측에 매우 근접한 분포를 보여주는 반면, 여름철의 경우 전반적인 범위에 대하여 과소모사되는 특징이 나타난다 (Fig. 6). 연강수량 빈도분포에서 보이는 과소모사는 주로 여름철 오차에 기인한 것으로 판단된다. 모영역과 등지영역의 모사결과는 유사한 분포를 보이지만, 겨울철 80 mm/day 이상, 여름철 250 mm/day 이상의 극한 강수에 대해서는 등지격자에서만 현실적 모사 가능성을 제시함으로써 본 연구에서 구축된 이중등지격자시스템의 필요성을 명시적으로 지지하고 있다.

Fig. 7은 일강수량을 80 mm/day 기준으로 그 이상

과 미만인 경우에 대한 공간분포를 모격자와 등지격자에 대하여 나타낸 것이다. 80 mm/day 미만의 강수의 경우 등지격자의 공간분포가 관측과 유의한 상관을 보이며 (상관계수 0.42), 모격자에 비하여 향상된 공간적 특징을 보인다. 하지만 80 mm/day 이상의 극한 강수에 대해서는 두 경우 모두 관측과 유의한 상관을 보이지 못하는 한계를 드러낸다.

5. 미래 지역기후변화 전망

온실가스 증가에 따른 미래 기후변화의 시그널은 미래 시나리오와 기준 시나리오의 차이로부터 유추해낸다. 지금부터 제시하는 결과는 4장에서 분석한 1971-2000년의 기준 시나리오와 2021-2050년의 미래 시나리오의 차이이다. 이를 통해 온실기체 증가에 따른 한반도에서의 미래 기후변화를 전망하였다.

Fig. 8은 등지격자에서 모사된 기온, 강수, 근입깊이 (root zone) 토양수분에 대한 계절별 공간분포이다. 겨울철 기온 상승은 뚜렷한 남북 경사(gradient)의 형태를 띠고 고위도로 갈수록 상승폭이 증가하며 약 2.5°C까지 상승한다. 겨울철 온난화의 증폭은 적어도 부분적으로는 적설의 감소와 관련된 적설-알베도의 피드백 메커니즘과 상관있다 (Giorgi et al., 1997). 여름철 기온은 겨울철에 비하여 지역적인 차이와 상승폭이 적게 나타나는 경향을 보인다. 이러한 특징은 IPCC (2001)에서 제시된 다른 선행연구와 일치하는 결과이다. 강수의 경우,

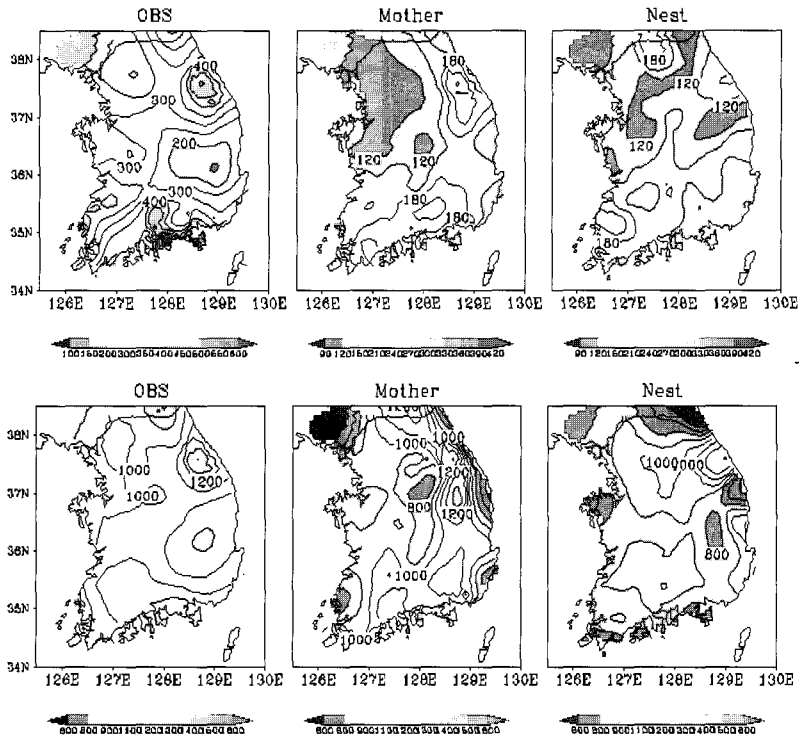


Fig. 7. Spatial distribution of the annual total amount daily precipitation over 80 mm/day (upper panels) and below 80 mm/day (lower panels).

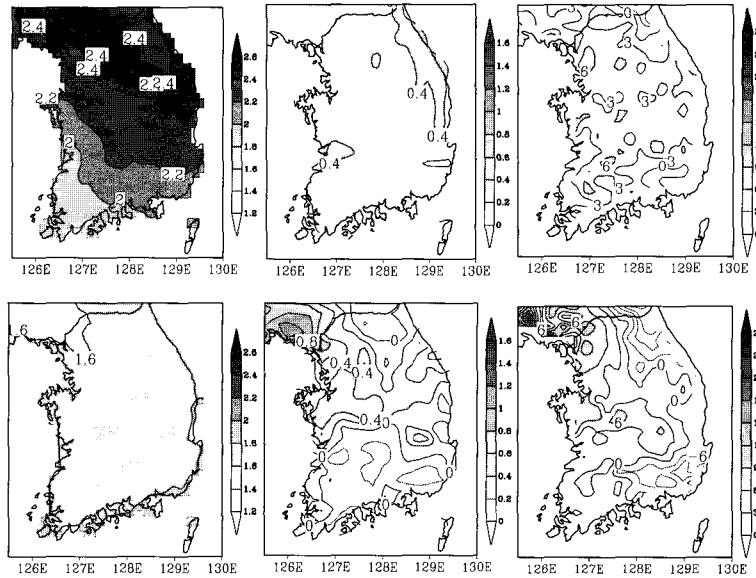


Fig. 8. Difference between future and reference scenario of surface air temperature (left), precipitation (middle) and root zone soil moisture (right) for winter (upper) and summer (lower) season. Units are degree, millimeter per day, and equivalent millimeter of water in a root zone.

겨울철은 전체적으로 증가하는 경향을 보이는데, 특히 동해안을 따른 최대 분포는 태백산맥에 의한 풍하층의 영향을 반영한 것으로, 상세한 지형효과에 의한 고해상도 모델의 필요성을 잘 부각시키는 결과이다. 여름철 강수는 지역별 변동성이 심해서 뚜렷한 증감의 일관된

경향성을 발견하기 어려우며, 지역적인 홍수와 가뭄의 가능성을 제시한다. 토양수분은 강수와 공간적인 상관성을 보이며 강수변화에 대한 정보를 보유하고 있다.

토양수분의 변화는 강수와 증발산 수치로부터 유도할 수 있기 때문에 미래의 증발산 변화 패턴은 매우 중

요하다. Fig. 9는 증발산의 계절별 변화분포를 나타낸 것이다. 예상하였듯이 기온이 상승함에 따라 증발산을 가속화시켜 전체적인 증발산의 증가 패턴이 나타나며, 계절별·지역별 변동성이 큰 특징을 보인다. 증발산은 토양수분의 함유량을 변화시켜 가뭄에 직접적인 영향을 미친다. 그 변화량에 있어서 지역적 편차가 크지만, 여름철 강수량과 토양수분의 감소가 전망되는 지역에서, 전체적인 증발산의 증가추세가 더해져 가뭄의 강도가 심해질 가능성을 제시한다. 이와 같이 기온, 강수, 토양수분, 증발산을 종합적으로 살펴보는 것은 미래 대기상태의 변화 뿐 아니라 극한 현상 발생에 대한 가능성을 파악할 수 있다는 점에서 의미있는 분석이다.

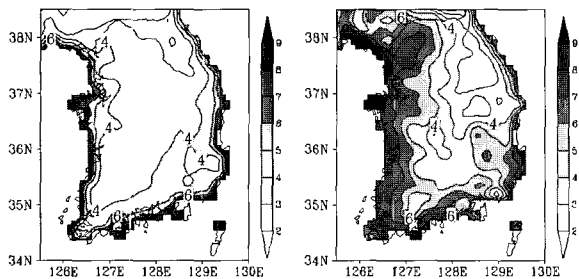


Fig. 9. Difference between future and reference scenario of evapotranspiration for winter and summer season over Korea. Unit is millimeter per month.

지표기온 상승을 유도하는데 기여하는 또 하나의 변수가 지표 알베도 변화를 초래하는 적설량이나 적설면적의 변화이다. Fig. 10은 모델에서 모사하는 적설깊이의 겨울철 평균 분포와 미래 변화량의 공간 분포를 나타낸 것이다. 적설은 고도에 직접적으로 영향을 받기 때문에 지형적 특성이 그대로 반영된 공간분포를 보이며, 온난화에 의해 고도가 높은 지역을 따라 감소 경향이 뚜렷이 나타난다.

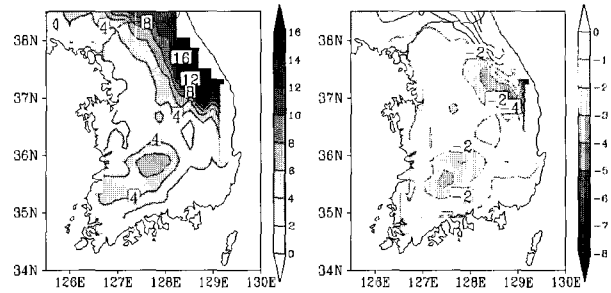


Fig. 10. DJF averaged snow depth in the reference simulation (left) and difference between future and reference scenario of DJF snow depth (right). Unit is millimeter of water equivalent.

Fig. 11은 전망된 기온과 강수 변화의 계절별, 지역별 변동성을 살펴보기 위해서 동아시아 영역(모격자)과 한반도 영역(둥지격자)에 대하여 면적 평균한 계절

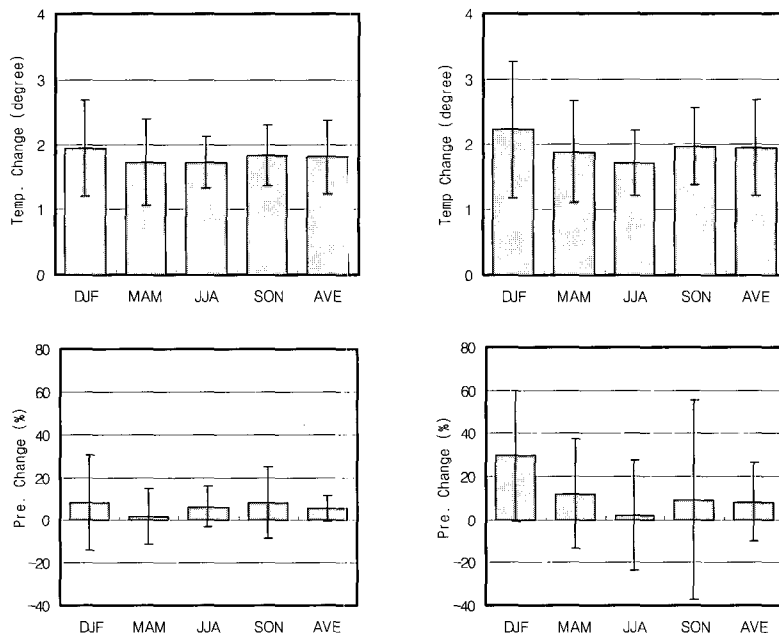


Fig. 11. Seasonal mean change of East Asian (left) and Korean (right) area-averaged temperature (upper) and precipitation (lower) and their inter-annual variability (error-bar) for the future (2021-2050) relative to 1971-2000 mean. The units of temperature and precipitation change are degree and %, respectively.

별 평균 및 변동성을 나타낸 것이다. 여기서 에러바는 표준편차로써 경년변동성을 나타내며 변화에 대한 불확실성의 정도를 의미한다. 기온의 경우, 동아시아보다 한반도에서 겨울철이 0.5°C의 높은 상승폭을 보이며 계절에 따른 차이가 큰 것으로 나타났으며, 여름보다 겨울철의 변동성이 큰 특징은 두 영역에서 일치한다. 강수량의 변화는 0-30%의 범위 안에서 증가하는 경향을 보이지만 모든 경우에 있어, 증가 시그널보다 경년 변동성이 더 크게 나타남으로써 불확실성이 시그널보다 큰 것을 의미한다. 이러한 불확실성은 한반도로 옮겨가면, 즉 공간적 규모가 작아지면 더욱 증폭되어 나타난다.

미래 변화 경향에 대해서도 일자료의 빈도분포를 살펴해보았다. Fig. 12와 Fig. 13은 미래 시나리오의 일평균 기온과 강수량의 빈도분포를 기준 시나리오와 비교한 것이다. 기온의 경우 표준편차나 분포형태의 변화는 미

미한 채 중심만 오른쪽으로 약 2°C 정도 치우쳐 나타나는 경향이 있다. 즉 지구온난화에 따른 더 온화한 기후 조건이 증가하고, 이에 상응하는 한랭한 조건이 줄어드는 것을 의미한다. 이러한 특징은 일 최저/최고 기온의 임계값을 이용한 간단한 지수를 이용하여 정량적으로 나타낼 수 있다. Fig. 14는 30년간의 기준 시나리오와 미래 시나리오에서 최고기온이 32°C 이상인 날의 연평균 변화 경향(왼쪽)과 최저기온이 0°C 이하인 날의 변화 경향(오른쪽)을 나타낸 것이다. 두 시나리오에서 최고기온이 32°C 이상인 날은 증가하고, 최저기온이 0°C 이하인 날은 감소하는 추세가 나타나지만, 그 정도에 있어 미래 시나리오의 기울기가 더 가파르다. 두 시나리오의 평균값을 구해 과거와 미래의 차이를 살펴보면, 최고기온이 32°C 이상인 날은 약 12일 증가하였으며, 최저기온이 0°C 이하인 날은 약 18일 감소한 것으로 나타났다.

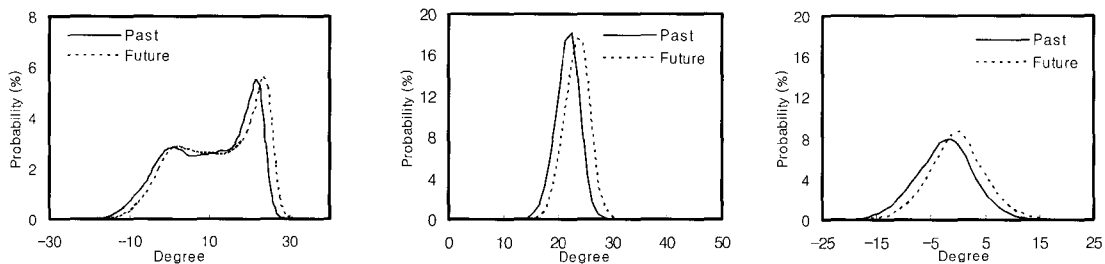


Fig. 12. Frequency distribution of daily mean temperature in Korea. Left, middle, and right panel is annual, summer, and winter distribution, respectively.

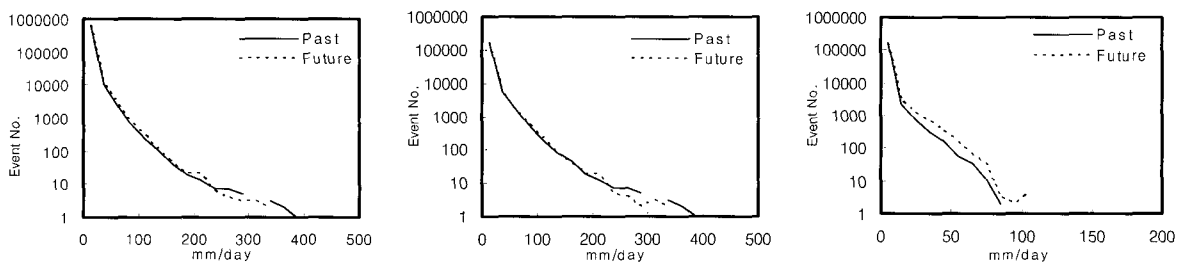


Fig. 13. Same as Fig. 12, except for precipitation.

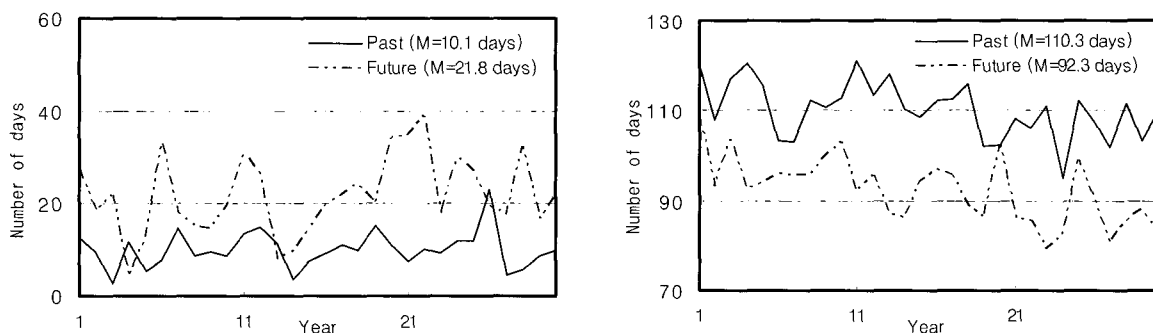


Fig. 14. Changes in the annual average number of event above 32°C (left) and below 0°C (right) over Korea.

일강수량의 빈도분포를 살펴보면(Fig. 13), 겨울철은 뚜렷하게 증가된 분포를 보이지만, 여름철은 뚜렷한 증감의 형태가 나타나지 않는다. 이는 우리나라의 여름철과 겨울철 강수 메커니즘이 완전히 다르기 때문인데, 겨울철은 대규모 강수가 우세하고, 여름철은 대류에 의한 강수나 태풍에 의한 강수가 우세하다. 겨울철 뚜렷한 강수의 증가는 온난화에 의한 대기 중 수증기 함유량의 증가와 연관되어 있다.

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 현재 최신의 지역기후모델을 이용한 등지격자시스템을 구축하고 GCM 결과를 역학적으로 상세화하였다. 미래기후 전망의 신뢰성을 확보하기 위해 기준 시나리오의 밀도있는 검증이 선행되었으며, 기준 시나리오(1971-2000)와 미래 시나리오(2021-2050)의 차이로부터 온실기체 증가에 따른 기후변화 시그널을 평가하였다.

과거 30년간의 기준 시나리오는 관측에서 보이는 과거 기후의 특성을 비교적 현실적으로 모사하고 있어, 상세한 기후 정보를 생산할 수 있는 유용한 도구로서의 가능성과 미래 기후 시나리오 생산에 대한 신뢰성을 제시하였다. 기준 시나리오는 등지격자의 한반도 영역뿐만 아니라 모격자의 동아시아 영역에 대하여 기온과 강수의 계절 및 정년변동성과 일빈도분포를 성공적으로 모사하였다. 그러나 기온의 경우 cold bias가 계통적으로 나타나고, 여름철 강수의 경우 태풍이나 몬순 시스템과 같은 좀 더 복합적인 요소에 의해 넓은 범위에 걸쳐 과소모사되는 문제점을 드러냈다. 등지격자의 모사 결과는 겨울철 80 mm/day 이상, 여름철 250 mm/day 이상의 극한 강수의 모사 가능성을 제시함으로써 본 연구에서 구축된 이중등지격자시스템의 필요성과 타당성을 명시적으로 지지하고 있다.

이에 대한 신뢰도를 기반으로 미래 시나리오와 기준 시나리오의 차이로부터 미래 기후변화 시그널을 분석한 결과 겨울철 고위도 지역의 기온 상승과 겨울철 강수의 증가경향이 뚜렷하게 나타났으며, 기온 상승에 따른 증발산의 증가 및 적설의 감소가 나타났다. 그러나 여름철 강수와 토양수분의 변화는 지역에 따른 편차가 심하게 나타나 기온에 비하여 불확실성이 큰 특징을 보였다. 미래 시나리오의 일평균 기온의 빈도분포에서는 기준 시나리오에 비하여 변동성과 분포형태의 변화없이 평균값만 2°C 정도 높은 쪽으로 치우쳐 나타남으로서, 극한적 온난 기후조건 증가와 이에 상응하는 극한적 한랭 기후조건 감소의 가능성을 제시하였다.

지금까지 기후변화에 대한 연구가 “기온이 증가하고 강수량이 증가한다”는 형태의 정성적인 개념으로 치우쳐 왔으며, 특히 다양한 영향평가모델의 주요 입력자료로 사용되는 기온과 강수량에 대해서조차 한반도에서의 상세한 공간분포를 제시하지 못했다. 본 연구에서 제시된 시나리오는 위에서 언급한 계통적 오차가 여전히 존재함에도 불구하고, 현 기후모델의 수준에서 이전의 유사연구와 비교하여 고무적인 결과로 판단된다. 더불어 자료 생산에 이용된 역학적 상세화 시스템은 한반도에서의 지형적 특성을 반영한 기후 정보를 생산할 수 있는 유용한 도구임이 재현실험을 통해 제시된 바 있다(Im et al., 2006a). 한반도의 지형적 특성의 고려가 중요한 영향평가 모델의 입력자료로 본 논문에서 제시한 고해상도의 격자점 자료가 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 측면에서, 기후변화에 대한 세계적인 권위를 확보한 IPCC 권장 배출시나리오에 근거하여 한반도에 초점을 맞춰 역학적으로 상세화된 기후변화 장기 시나리오는 외국의 연구사례와 비교할 수 있는 의미있는 결과이다.

향후 시나리오의 불확실성 범위를 줄이기 위하여 다양한 배출 시나리오별 기후변화 시나리오 생산이 이루어질 것이며, 태풍 및 여름철 강수의 모사 정확도 향상을 위해 지역기후모델의 경계조건으로 이용되는 전구기후모델의 고해상도화에 대한 연구를 진행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-9-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 권원태 (2005). “기후변화의 과학적 현황과 전망”, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, pp. 325-336.
- 기상연구소 (2004a). 기후변화협약 대응을 위한 적응부문 시책 수립 방안 연구. **기상연구소 연구보고서**, pp. 210.
- 기상연구소 (2004b). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발(III). **기상연구소 연구보고서**, pp. 502.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향”, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
- 김선영, 김병식, 김형수, 서병하 (2003). “WGEN 모형

- 과 2변수 물수지 모형을 이용한 기후변화 영향 분석", **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 747-750.
- 김웅태, 이동률, 유철상 (2004). "기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석", **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.
- 박이형, 임은순, 권원태, 이은정 (2005), "수자원 영향평가를 위한 기후변화 시나리오의 불확실성 평가", **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 138-142.
- 배덕효, 정창삼, 권원태 (2005). "수자원 활용 측면에서의 고해상도 GCM 모의의 효용성", **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제40권, pp. 409-418.
- 신사철 (2000). "기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석", **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권 제5호, pp. 623-634.
- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001a). "GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석", **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
- 안재현, 윤용남, 유철상 (2001b). "지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석", **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 511-519.
- 안재현, 윤용남, 이재수 (2001c). "지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석". **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 347-356.
- 유철상, 이동률 (2000). "기후변화와 수자원: 국내의 연구동향", **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 42-47.
- 윤용남, 이재수, 유철상, 안재현 (1999). "지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구", **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 165-170.
- 이동률, 김웅태, 유철상 (2004). "기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향", **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 37(4), 315-328.
- 임은순, 권원태, 안중배 (2005). "신경망 모델을 이용한 겨울철 유역평균 강수량 규모축소 연구", **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, pp. 89-99.
- Bell, J. L., L. C. Sloan, and M. A. Snyder (2004). "Regional changes in extreme climate events: A future climate scenario", *J. Climate*, Vol. 17, pp. 81-87.
- Christensen, J.H., B. Machenauer, R.G.Jones, C.Schar, P.M.Ruti, M.Castro, and G.Visconti (1997). "Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions", *Climate Dynamics*, pp. 489-506.
- Christensen, O.B., J.H. Christensen, B. Machenauer and M. Botzet (1998). "Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia - Present climate", *J. Climate*, Vol. 11, pp. 3204-3229.
- Gao, X., Y. Xu, Z.-C. Zhao, J. S. Pal, and F. Giorgi (2006). "On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation.", *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 86, pp. 169-182.
- Giorgi, F. (2005). "Climate change prediction", *Climate Change*, Vol. 73, pp. 239-265.
- Giorgi, F., B. Hewitson, J. H. Christensen, M. Hulme, H. von Storch, P. Whetton, R. G. Jones, L. O. Mearns, and C. Fu (2001). "Regional Climate Information Evaluation and Projections", In: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. von der Linden, D. Xiaoxu (eds) Chapter 10 of *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 583-638.
- Giorgi, F., J. W. Hurrell, and M. R. Marinucci (1997). "Elevation dependency of the surface climate change signal: A model study", *J. Climate*, Vol. 10, pp. 288-296.
- Hirakuchi, H., and F. Giorgi (1995). "Multi-year present day and 2XCO2 simulations of monsoon-dominated climate over eastern Asia and Japan with a regional climate model nested in a general circulation model", *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, pp. 21,105-21,126.
- Im, E.-S., E.-H. Park, W.-T. Kwon, and F. Giorgi (2006a). "Present climate simulation over Korea with a regional climate model using a one-way double-nested system", *Theor. Appl. Climatol.* Vol. 86, pp. 187-200.
- Im, E.-S., J.-B. Ahn, W.-T. Kwon, and F. Giorgi

- (2006b). "Multi-decadal scenario simulation over Korea using a RegCM3 one-way double-nested system. Part I: Present climate simulation (1971-2000)", *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-006-0203-z.
- IPCC (2000). "Special Report on Emissions Scenarios", A Special Report of Working Group III of the intergovernmental Panel on Climate Change (Nakicenovic, N and lead authors). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 599pp.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson, Cambridge Univ. Press, pp. 881.
- IPCC-TGCI (1999). "Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment", Version 1. Prepared by Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, pp. 69.
- Kato, H., H. Hirakuchi, K. Nishizawa and F. Giorgi (1999). "The performance of NCAR RegCM in the simulation of June and January climates over eastern Asia and the high resolution effect of the model", *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, pp. 6455-6476.
- Kato, H., K. Nishizawa, H. Hirakuchi, S. Kadokura, N. Oshima and F. Giorgi (2001). "Performance of RegCM2.5/NCAR-CSM nested system for the simulation of climate change in East Asia caused by global warming", *J. Meteorol. Soc. Japan.*, Vol. 79, pp. 99-121.
- Mearns, L.O., M. Hulme, T.R. Carter, R. Leemans, M. Lal, P.H. Whetton (2001). "Climate scenario development", In : Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (eds). Chapter 13 of *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 739-768.
- Min, S.-K., S. Legutke, A. Hense, U. Cubasch, W.-T. Kwon, J.-H. Oh., and U. Schlese (2006). "East Asian Climate Change in the 21st Century as Simulated by the Coupled Climate Model ECHO-G under IPCC SRES Scenarios", *J. Meteorol. Soc. Japan*. Vol. 84, pp. 1-26.
- Min, S.-K., S. Legutke, A. Hense, W.-T. Kwon (2005). "Internal variability in a 1000-year control simulation with the coupled climate model ECHO-G. Part I: near surface temperature, precipitation, and mean sea level pressure", *Tellus*, Vol. 57A, pp. 605-621.
- Mitchell, J.F.B., T.C. Johns, M. Eagles, W.J. Ingram and R.A. Davis (1999). "Towards the construction of climate change scenarios", *Climate change*, Vol. 41, pp. 547-581.
- Pal J.S., F. Giorgi, X. Bi, N. Elguindi, F. Solmon, X. Gao, M. Ashfaq, R. Francisco, J. Bell, N. Diffenbaugh, L. Sloan, A. Steiner, J. Winter and A. Zakey (2005). "The ICTP RegCM3 and RegCNET: Regional climate modeling for the Developing World", *Bulletin of the American Meteorological Society*. (In press).
- Raisanen J., U. Hansson, A. Ullerstig, R. Doscher, L. P. Graham, C. Jones, H. E. M. Meier, P. Samuelsson, and U. Willen (2004). "European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios", *Climate Dynamics*, Vol. 22, pp. 13-31.
- Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding, and F. Kimura (2004). "Regional climate modeling: Progress, Challenges, and Prospects", *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 82, pp. 1599-1628.

(논문번호:06-39/접수:2006.03.21/심사완료:2006.11.15)