

수자원 영향평가에 활용 가능한 지역기후변화 시나리오 연구

A Study on the Regional Climate Change Scenario for Impact Assessment on Water Resources

임은순*, 권원태**, 배덕효***

Eun-Soon Im, Won-Tae Kwon, Deq-Hyo Bae

요 지

온실가스 증가로 인한 기후변화를 이해하고 전망함과 동시에, 다양한 영향평가 분야에 적합한 기후정보를 제공하기 위해서는 온실가스 증가 시나리오에 근거한 신뢰성 있는 기후변화 장기 시나리오가 필수적이다. 미래 기후변화에 따른 영향평가 연구의 신뢰도는 영향평가모델의 주요 입력자료로 사용되는 기후정보의 신뢰도가 가장 근본적인 문제라고 할 수 있다. 본 연구에서는 국제이론물리센터(International Center for Theoretical Physics, ICTP)에서 개발한 가장 최신의 지역기후모델인 RegCM3(Regional Climate Model Ver.3)을 도입하여 한반도에서의 상세 기후변화 시나리오를 생산할 수 있는 이중둥지격자시스템(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. 과거 시나리오의 검증은 통하여 다양한 시·공간 규모에 대한 불확실성을 평가하고, 이에 대한 신뢰도를 기반으로 미래 기후변화를 전망하였다.

핵심용어 : 기후변화, 시나리오, 지역기후모델

1. 서 론

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 통계적인 방법으로 상세화하고 수문모델의 입력자료로 사용하였는데, YONU GCM의 5°(경도)×4°(위도)의 격자자료에 한반도에서의 복잡한 지형적 특성이 반영될 수 없다. 또한 안재현 등(2001a,b)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 영향평가에 활용할 수 있도록 한반도의 지형적 영향이 현실적으로 반영된 기후변화 시나리오를 생산하고 이를 통해 한반도의 미래기후변화를 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

* 정회원.기상연구소 기후연구실 기상연구사-E-mail : esim@metri.re.kr
** 정회원.기상연구소 기후연구실 기후연구실장-E-mail : wontk@metri.re.kr
*** 정회원.세종대학교 물자원연구소.토목환경공학과 부교수-E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

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 위해 지역기후모델을 이용한 역학적 상세화 기법을 개발하였다. 이를 이용하여 ECHO-G B2 시나리오를 과거 30년(1971-2000)과 미래 30년(2021-2050)에 대하여 상세화하였다.

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

2. 지역기후 시나리오 생산

2.1 전지구기후모델 (ECHO-G)

본 연구에서 지역기후모델의 초기 및 경계조건으로 사용되는 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 수평격자간격으로 구성되어 있다(Min et al., 2005). 기상연구소에서는 ECHO-G를 도입하여 SRES A2와 B2 시나리오에 대하여 241년(1860-2100)의 장기 기후변화 시나리오를 모의한 결과를 보유하고 있다(기상연구소, 2004).

2.2 지역기후모델 (RegCM3)

본 연구에서 ECHO-G B2 시나리오의 역학적 상세화를 위해 이용된 RegCM3는 ICTP에서 개발된 가장 최신버전의 지역기후모델이다(Pal et al., 2005). RegCM3는 정역학 기반의 방정식계를 사용하며, 연직적으로 시그마 좌표계, 수평적으로 Arakawa B-grid 좌표계를 사용한다.

그림 1은 본 연구에서 구축된 RegCM3를 이용한 이중동지격자시스템을 나타낸 것이다. 모델의 모(mother) 격자는 60km의 수평 해상도로 동아시아 영역에, 동지(nested) 격자는 20km의 수평 해상도로 한반도 남한 영역에 초점이 맞추어져 있다. 그림에서 알 수 있듯 우리나라의 경우 지형적으로 육지의 70% 정도를 산악지역이 차지할 만큼 좁은 지역 내에 상당히 복잡한 지형으로 구성되어 있다. 두 영역의 지형을 비교해보면, 동지격자에서 태백산맥과 소백산맥등의 지형적인 특성과 해안선이 모격자에 비하여 훨씬 현실적으로 처방되어 동지격자시스템의 필요성을 제시한다.

모델의 적분은 60년간 수행되며, B2 시나리오의 경우 CO₂, CH₄, N₂O의 농도가 1971-2000년에 비하여 2021-2050년에 각각 30%, 31%, 12% 증가한다.

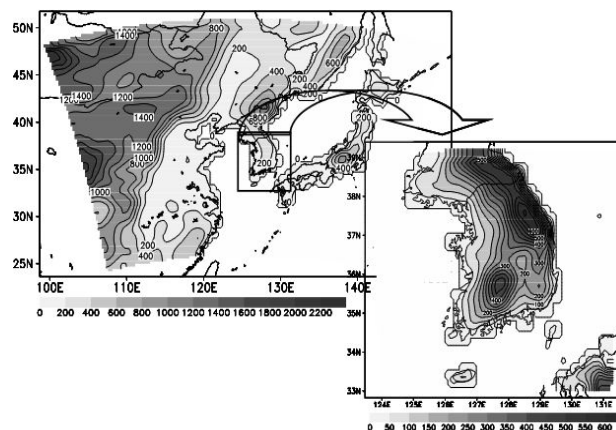


그림 1. RegCM3 이중동지격자시스템의 구조

3. 기준시나리오 검증

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

그림 2는 모격자에서 생산된 월평균 기온과 강수량을 한반도 영역에 대하여 면적 평균한 시계열 분포이다. 기온의 경우 RegCM3는 NCEP/NCAR 재분석 자료에 비하여 계절에 관계없이 cold bias가 계통적으로 나타나지만, 그 범위가 2도 미만으로 다른 지역기후모델에서 보이는 일반적인 범주에서 벗어나지 않는다. 강수량의 경우, 기본적으로 ECHO-G는 겨울철은 CMAP에 비하여 과다모사되고, 여름철은 과소모사되어 계절적 변동성이 작게 나타나는 문제점을 보인다. 특히 ECHO-G는 최대값이 나타나는 여름철 강수량이 분리되는 경향을 보이는 반면, RegCM3는 전체적인 계절패턴과 정량적인 측면에서 ECHO-G 보다 상당히 향상된 결과를 보여준다.

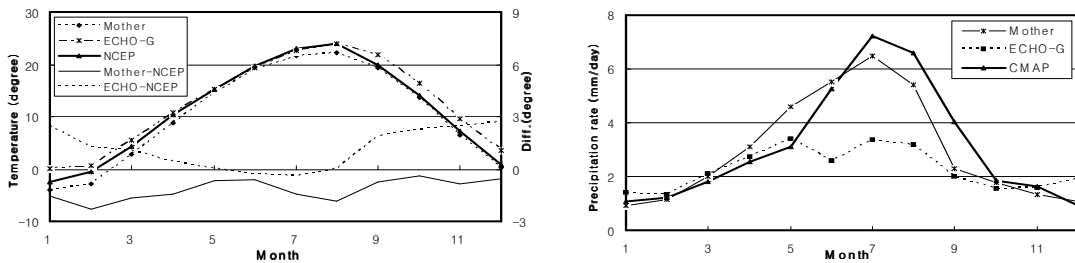


그림 2. 한반도 영역의 월평균 기온과 강수량의 시계열 분포

그림 3은 모델에서 모사된 일평균 기온과 강수량에 대한 빈도분포를 계절별로 관측과 비교한 것이다. 모영역과 동지영역의 모사결과는 57개 관측지점으로 전환된 후 빈도분포가 구해진다. 기온의 경우 모영역과 동지영역의 모사결과가 거의 일치하는 분포를 보여, 해상도 증가로 인한 상세한 지형적 효과는 공간 분포의 향상에만 기여하는 것으로 판단된다. 기온의 경우, 여름철은 겨울철보다 작은 변동성으로 인해 좁고 비대칭적 구조를 보이는 반면, 겨울철은 분산이 크고 대칭적인 구조를 나타낸다. 모델의 결과는 이러한 계절적 특징을 현실적으로 모사하지만, 계통적으로 과소모사되는 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. 모영역과 동지영역의 모사결과는 유사한 분포를 보이지만, 겨울철 80 mm/day 이상, 여름철 250 mm/day 이상의 극한강수에 대해서는 동지격자에서만 현실적 모사가능성을 제시함으로써 본 연구에서 구축된 이중동지격자시스템의 필요성을 명시적으로 지지하고 있다.

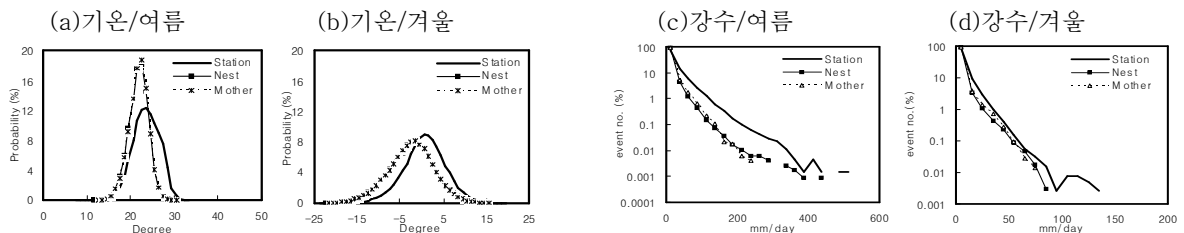


그림 3. 일평균 기온과 강수에 대한 계절별 빈도분포

4. 미래시나리오 전망

온실가스 증가에 따른 미래 기후변화의 시그널은 미래 시나리오와 기준 시나리오의 차이로부터 유추해낸다. 지금부터 제시하는 결과는 과거 30년과 미래 30년 평균의 차이로써, 이를 통해 온실기체 증가에 따른 한반도에서의 미래 기후변화를 전망하였다.

그림 4는 등지격자에서 모사된 기온, 강수, 근입깊이(root zone) 토양수분에 대한 계절별 공간 분포이다. 겨울철 기온 상승은 뚜렷한 남북 경사(gradient) 형태를 띠고 고위도로 갈수록 상승폭이 증가하며 약 2.5℃까지 상승한다. 겨울철 온난화의 증폭은 적어도 부분적으로는 적설의 감소와 관련된 적설-알베도의 피드백 메커니즘과 상관있다(Giorgi et al., 1997). 여름철 기온은 겨울철에 비하여 지역적이 차이와 상승폭이 적게 나타나는 경향을 보인다. 이러한 특징은 IPCC(2001)에서 제시된 다른 선행연구와 일치하는 결과이다. 강수의 경우, 겨울철은 전체적으로 증가하는 경향을 보이는데, 특히 동해안을 따른 최대 분포는 태백산맥에 의한 풍하측의 영향을 반영한 것으로, 상세한 지형효과의 필요성을 잘 부각시키는 결과이다. 여름철 강수는 지역별 편차가 심해서 뚜렷한 증감의 일관된 경향성을 보이지 않는데, 이는 지역적인 홍수와 가뭄의 발생 가능성을 제시한다. 토양수분은 강수와 공간적인 상관성을 보이지만, 계절안(intraseasonal) 변동성을 살펴보면(그림 미제시) 강수보다 메모리가 커서 그 이전 월의 강수변화에 대한 정보를 보유하고 있다.

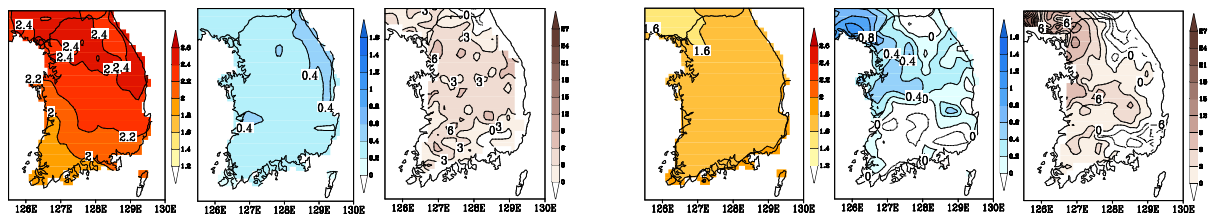


그림 4. 기온, 강수, 토양수분에 대한 계절별 공간 분포(겨울-왼쪽, 여름-오른쪽)

그림 5는 전망된 기온과 강수 변화의 계절별, 지역별 변동성을 살펴보기 위해서 동아시아 영역(모격자)과 한반도 영역(등지격자)에 대하여 면적 평균한 계절별 평균 및 변동성을 나타낸 것이다. 여기서 에러바는 표준편차로써 경년변동성을 나타내며 변화에 대한 불확실성의 정도를 의미한다. 먼저 기온의 경우, 동아시아보다 한반도에서 겨울철이 0.5℃의 높은 상승폭을 보이며 계절별 차이가 높은 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 경년변동성이 더 크게 나타남으로써 불확실성이 시그널보다 큰 것을 의미한다. 이러한 불확실성은 한반도로 옮겨가면, 즉 공간적 규모가 작아지면 더욱 증폭되어 나타난다.

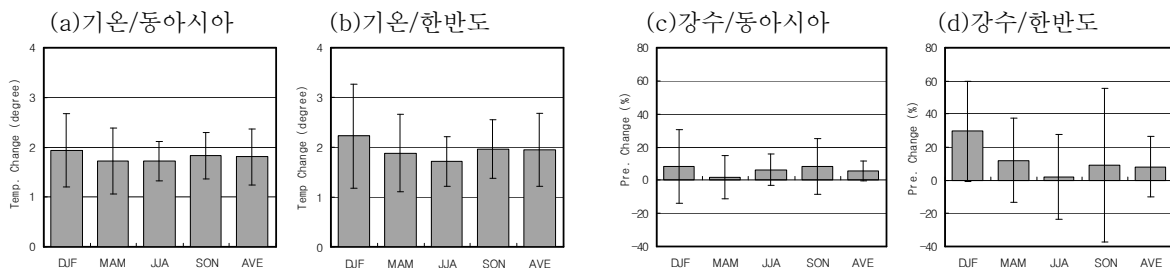


그림 5. 기온과 강수 전망에 대한 계절별 및 지역별 변동성

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 지역기후모델을 이용한 동지격자체계를 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 탐지하였다. 과거 30년간의 기준 시나리오는 관측에서 보이는 과거 기후의 특성을 비교적 현실적으로 묘사하고 있어, 상세한 기후 정보를 생산할 수 있는 유용한 도구로서의 가능성을 제시하였다. 미래 기후는 겨울철 고위도 지역의 기온 상승과 겨울철 강수의 증가경향이 뚜렷하게 나타났으나, 여름철 강수와 토양수분의 변화는 지역에 따른 편차가 심하게 나타나 기온에 비하여 불확실성이 큰 특징을 보였다.

지금까지 기후변화에 대한 연구는 “기온이 증가하고 강수량이 증가한다”는 형태의 정성적이고 포괄적으로 이해되어 왔으며, 특히 다양한 영향평가모델의 주요 입력자료로 사용되는 기온과 강수에 대해서조차 우리나라에서의 상세한 공간분포를 제시하지 못했다. 이에 비추어 볼 때 기후변화에 대한 세계적인 권위를 확보한 IPCC 권장 배출시나리오에 근거하여 한반도에 초점을 맞춰 역학적으로 상세화된 장기 기후변화 시나리오 자료는 외국의 연구사례와 비교할 수 있는 의미있는 결과이다.

향후 시나리오의 불확실성 범위를 줄이기 위한 시도로 배출 시나리오와 초기조건에 대한 앙상블 적분을 수행할 것이다. 또한 아무리 역학적으로 상세화된 결과라고 하더라도 모델의 계통오차가 나타나므로, 통계적인 보정을 통해서 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- 기상연구소, 2004: 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발(Ⅲ). 기상연구소 연구보고서, 502pp
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원, 2004: 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. 한국수자원학회논문집, 37(2), 185-193.
- 김선영, 김병식, 김형수, 서병하, 2003: WGEN 모형과 2변수 물수지 모형을 이용한 기후변화 영향 분석. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 747-750.
- 배덕효, 정창삼, 권원태, 2005: 수자원 활용 측면에서의 고해상도 GCM 모의의 효용성. 한국기상학회지, 40, 409-418.
- 안재현, 윤용남, 유철상, 2001a: 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석. 한국수자원학회논문집, 34(5), 511-519.
- 안재현, 윤용남, 이재수, 2001b: 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석. 한국수자원학회논문집, 34(4), 347-356.
- Giorgi, F., J. W. Hurrell, and M. R. Marinucci, 1997: Elevation dependency of the surface

- climate change signal: A model study. *J. Climate*, 10, 288-296.
- 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, 881pp.
- 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*, 57A, 605-621.
- Pal J.S., F. Giorgi, X. Bi, N. Elguindi, F. Solmon, X. Gao, M. Ashfaq, R. Francisco, J. Bell, N. Dittenbach, 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*. To be submitted.