

# 역학적 상세화 기법을 활용한 우리나라 미래 수문기상변화 시나리오 전망

## Projection of future hydrometeorological change scenarios over Republic of Korea using a dynamical downscaling technique

신진호\*, 이효신\*\*, 권원태\*\*

Jinho Shin, Hyo Shin Lee, Won-Tae Kwon

### 요 지

지역기후모델 RegCM3 이용하여 역학적 상세화 이중중지격자체계를 구축하고 관측, ECHO-G/S의 20C3M 및 SRES A2 시나리오를 이용하여 동아시아(60km 분해능)와 한반도(20km 분해능)에 대한 현재 및 미래 (1971-2100, 130년)의 기후변화 시나리오 자료를 생산하여 구축하였다. 현재 1971-2000년 기간 동안 상세화된 기온은 관측에 대해 저온 편의와 여름 강수는 건조 편이가 나타나는 계통오차가 있으나, 상세화된 자료는 한반도의 지형적 특성이 잘 반영되었고 관측의 월별, 계절별 변동성을 유사하게 모의하는 등 재분석 자료를 성공적으로 상세화한 것으로 판단된다. 미래 100년 (2001-2100년)에 대해 전반기(2021-2050) 및 후반기(2070-2099)의 시나리오기후변동을 분석한 결과, 상세화된 지역별, 계절별, 연도별 기온 상승의 시·공간적 분포를 잘 보여주며, 기온상승(전반기: 동아시아지역~1.8℃, 남한~1.6℃, 후반기: 동아시아지역~4.7℃, 남한~4.6℃)에 의한 대기 중 수증기 함유량 증가와 여름 몬순의 강화로 전계절에 대해 강수량(전반기: 동아시아~10.5%, 남한~6.7%, 후반기: 동아시아~20.1%, 남한~31.9%)이 증가할 것으로 전망되었다. 수문기상 변화를 살펴보면, 미래 후반기에 남한은 4.6℃가 상승하여 적설깊이는 5.3mm(-92.3%)가 감소할 것이고, 강수량의 연변동성을 크나 전체적으로 증가할 것이며, 토양수분, 증발산 또한 강수량 증가와 연관되어 증가할 것으로 전망되었다. 이렇게 ECHO-G/S SRES A2 시나리오를 기반으로 하여 역학적으로 상세화된 시나리오는 통계적으로 상세화된 시나리오 결과와 비교 검증함으로써 다중모델기법에 의해 불확실성을 제시함으로써 수문기상변화 예측을 위한 신뢰성 있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 지역기후모델, 역학적 상세화, 수문기상변화**

### 1. 서론

온실가스의 배출로 인한 지구 온난화는 전지구적인 기후변화뿐 아니라 지역적인 기후변동을 일으키고 있다. 기후변화 특성을 모의, 전망하기 위해서 전지구 (General Circulation Model, GCM)이 유용하게 이용되고 있다. 대부분 모델들은 적분용량의 부담을 줄이기 위해 저해상도의 공간 분해능을 (sub-grid) 규모의 지형에 의한 강제 효과(예, topography 등)가 크게 영향을 미치는 지역의 기후 현상을 모의하고 분석하기에는 한계가 있다. 최근, Giorgi and Mearns (1991), Liqiang et al. (2006), Xue et al. (2006), Im et al. (2007), Im et al. (2009) 등 많은 과학자는 상세화 기법 (downscaling technique)을 개발하여 저분해능에 따른 문제를 해결하고 있다. 본 연구에서는 RegCM3(Regional Climate Model 3) 지역기후모델을 활용한 역학적 상세화 기법을 적용하여 GCM 기후자료를 한반도의 아격자로 상세화하였다. RegCM3중중지격자

\* 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구원 · E-mail : [jshin0@korea.kr](mailto:jshin0@korea.kr)  
\*\* 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구사 · E-mail : [climate@korea.kr](mailto:climate@korea.kr)  
\*\*\* 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 과 장 · E-mail : [wontk@kma.go.kr](mailto:wontk@kma.go.kr)

체계(one-way double-nested system) 하여 (1) 국립기상연구소에서 모의한 ECHO-G/S 20C3M SRES A2 시나리오를 초기 경계치로 입력하여 동아시아 지역에 대해 60km 분해능을 가지는 기후시나리오 자료를 생산하였다. (2) 생산된 60km 분해능의 한반도에 대해 20km 분해능을 가지는 기후변화 시나리오를 생산하였다. 시나리오의 모의 기간은 현재 (1971-2000) 미래 (2001-2100)의 130년으로 총 4.6TB(테라바이트) 크기의 시나리오자료가 생산되었다. 생산된 기후변화 시나리오를 관측과 비교하여 유효성을 검증하고 한반도 미래 기후변화를 전망하였다.

## 2. 역학적 상세화의 개요

RegCM3는 ITCP(국제이론물리센터, International Center for Theoretical Physics)에 개발된 최신편(2009년 3월 공개)의 중규모 기후모델이다 (Giorgi et al., 1993). RegCM3는 Giorgi and Mearns (1999)와 Pal et al. (2007)에 의해 개선되고 발전되었다. 또한 RegCM3는 MM5(Grell et al., 1994)의 3차원 정수 역학과정을 따르며, 물리 모수화는 복사과정에 CCM3.6.6(Kiehl et al., 1996), 대규모 구름 및 강수 방안은 SUBEX(Pal et al., 2000), 그리고 경계층은 Holtslag et al. (1990), 지면 과정은 BATS1e(Dickinson et al., 1993), 트레이서와 에어로졸 방안은 Qian et al. (2001)로 구성되어 있다. 또한 강수과정은 격자와 아격자 강수를 함께 다루는데, 아격자 강수는 적운 모수화 과정에 의해 형성된다.

RegCM3의 대규모 강제력으로는 ECHO-G/S ( $3.75^\circ \times 3.75^\circ$ )의 연직 15개층, 3시간 간격의 예단변수들을 사용하였다. 본 연구에서는 이 예측데이터를 역학적 규모축소 기법에 적용하여 RegCM3의 초기장 및 경계장 (Initial Condition과 Boundary Condition, 이하 ICBC)으로 사용하고 동아시아 지역과 한반도 지역에 대한 이중중지격자 체계를 구축하였다. RegCM3의 모영역에 해당하는 동아시아 지역의 수평격자 간격은 약 60km, 중지영역(nested domain)에 해당하는 한반도는 약 20km의 수평해상도로 상세화 하였다 (Fig. 3.1.6). 연직으로는  $\sigma$ -연직 좌표를 사용하여 16개의 층으로 차별화하였다.

## 3. 모의 결과 검증

### 3.1 계절별 공간 분포 비교

그림1은 남한지역에서 관측과 상세화된 기온과 강수의 계절별 분포를 보여준다. 기온은 모든 계절에서 모영역(동아시아)과 중지영역(한반도)의 모의 결과는 관측에 비해 낮게 모의되는 경향을 가졌다. 그 이유는 저온편의 ECHO-G/S의 모의결과때문이라 판단된다. 모영역에서는 관측에서 나타나는 지형적인 영향에 의한 저온지역(예, 소백산맥)을 잘 모의하지 못하나, 중지영역에서 기온의 상세화된 공간분포는 관측(KMA)의 분포와 유사하게 성공적으로 모의하였다.

강수를 상호비교해 보면, KMA뿐만 아니라 APHRODITE의 0.25도의 강수량을 도식함으로써 중지격자 시스템에서 모의된 강수량을 교차 검증하였다 (그림 2). 관측의 계절별 공간분포는 대체로 남해안지역 강수대와 태백산맥의 동서 강수대 분포를 보여준다. 봄에는 저기압이 남해안을 통과할 때 강수밴드, 여름철에는 몬순시스템의 북상에 따른 남해안과 중북부지방의 두 개의 강수밴드, 가을철에는 태풍과 오호츠크 고기압 장출에 따른 동해안지방의 강수밴드, 겨울철에는 호남지방과 동해안지방의 폭설로 인한 강수밴드가 형성되었다. 중지영역의 계절별 공간분포에서도 관측의 공간적 계절별 특징들이 매우 유사하게 나타났다.

### 3.2 공간평균 비교

그림3는 남한영역에 대하여 면적 평균한 월평균 기온과 강수량의 시계열을 통해 월변동을 보여준다. 기온의 경우, ECHO-G/S를 상세화한 결과와 ECHO-G/S의 시계열은 기상청 관측, NCEP, 및 NCEP을 상세화한 결과보다  $2^\circ\text{C}$  정도 낮았다. 강수는 NCEP를 상세화한 시계열이 NCEP보다 CMAP의 크기와 변동성에 더 잘 설명. 동일하게, ECHO-G/S를 상세화한 시계열이 ECHO-G/S보다 더 나은 결과를 보였다.

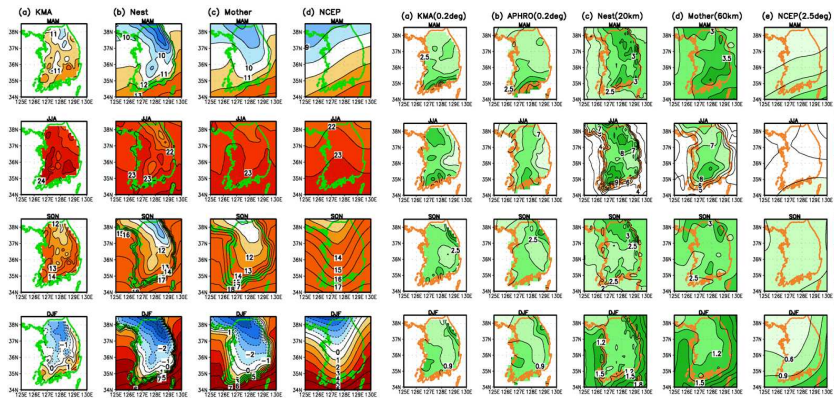


그림 1. 계절별 기온 분포

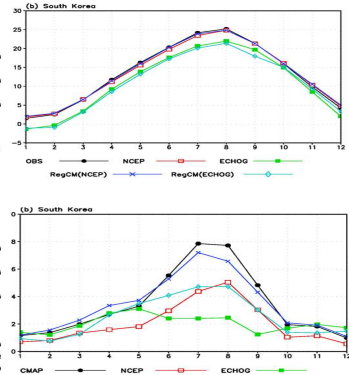


그림 2. 계절별 강수 분포

그림 3. 기온과 강수의 시계열

#### 4. 미래 수문기상변화 시나리오

##### 4.1 계절별 공간 분포

미래 한반도의 물순환과 물수지의 변화를 파악하기 위해 토양수분, 증발산, 유출량의 변화를 분석하였다 (그림 4-5). 강수와 토양수분은 밀접한 시공간적인 연관성을 가지기 때문에 강수량의 증가는 토양수분의 증가로 이어질 것이다. 봄에는 호남지방과 중부내륙지방에서, 여름은 내륙지방, 가을에는 남부지방을 중심으로, 겨울에는 남해안지방에서 증발산이 더 크게 증가할 것으로 전망되었다. 기온이 높아짐에 따라 증발산 속도가 가속화되기 때문에 21세기 전반기보다 후반기의 기온 상승의 정도에 따라 증발산은 더 증가할 것으로 전망되었다. 또, 유출량도 증발산의 변화가 큰 지역에서 더 클 것으로 예상되었다.

##### 4.2 전후반기 계절평균 변화

기온은 겨울(전반기 2.04°C, 후반기 5.15°C)과 가을 (전반기 1.89°C, 후반기 5.02°C)로 가장 크게 상승할 것으로 전망되었다 (그림 6). 강수는 전반기에 봄(12.86%), 여름(6.29%), 가을(6.09%) 겨울(1.53%) 순으로 증가하나 후반기에 여름(36.44%)이 제일 크고 타 계절은 30%내외로 비슷할 것으로 전망되었다. 전반기보다 후반기의 기온 상승의 정도에 따라 증발산이 더 증가하고 후반기 여름과 봄에 증발산이 가장 크게 증가할 전망이다. 전반기보다 후반기에 크게 증가하고 강수량 증가가 큰 여름에 유출량이 클 것이다.

##### 4.3 장기 시계열 변화

21세기 전반기와 후반기의 기준시나리오와 차이를 비교해 보면, 동아시아지역에서는 기온과 강수가 모두 증가하였다 (그림 8). 동지영역으로 모의된 한반도의 남한지역은 전반기에 비해 후반기에 2.5~3배 이상 증가하여 동아시아보다 조금 더 기온이 상승폭이 클 것으로 예상되었다. 이것은 동지영역의 경우 비교적 좁은 영역이기 때문에 스톱트랙이나 강수밴드의 위치와 시기에 따라 큰 차이를 가져올 수 있기 때문으로 판단된다. 강수량의 변동에 따라 토양수분 및 증발산도 남한지역에서 증가하며, 특히 증발산은 21세기 후반기에 증가폭이 두드러지게 클 것으로 전망되었다.

##### 4.4 적설의 비례변화

겨울의 강수량은 증가할 전망이지만, 기온의 상승으로 눈보다 비로 것으로 예측되었다. 이런 적설량의 변화는 지표 알베도 변화를 야기하여 지구 복사수지에 영향을 주기 때문에 중요하다. 그림 8은 기준시나리오

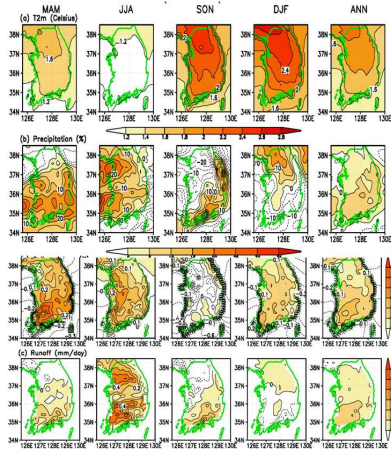


그림 4. 21세기 전반기의 기온, 강수, 증발산, 유출량

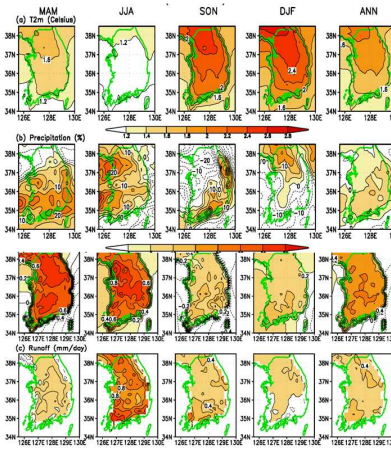


그림 5. 21세기 후반기의 기온, 강수, 증발산, 유출량

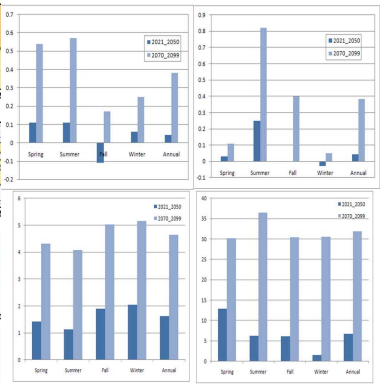


그림 6. 기온, 강수, 증발산, 유출량의 계절별 막대 그래프

오(20세기)의 겨울철 평균 적설깊이, 21세기 전·후반기에서 기준시나리오의 평균적설과의 차이를 각각 보여주었다. 적설은 겨울철 등온선 (~0°C) 분포와 직접적으로 연관이 있기 때문에 지형적 특성을 그대로 반영된 공간분포를 보인다. 기온상승으로 인해 태백산맥과 소백산맥에서 뚜렷한 용설의 증가 경향이다. (막대그림) 12~2월 기온 상승과 용설의 증가는 선형적으로 비례함. 전반기의 기온과 적설깊이는 12월(2.06°C, -1.33 mm), 1월(2.95°C, -5.04 mm), 2월(1.6°C, -4.2 mm)의 분포를 보여줌으로써 기온상승이 큰 월에 더 많은 눈이 녹을 것으로 전망되었다. 후반기는 12월(-2.17 mm), 1월 (8.712 mm), 2월 (-10.95 mm)로 전반기의 거의 2배가 될 것으로 예상되었다.

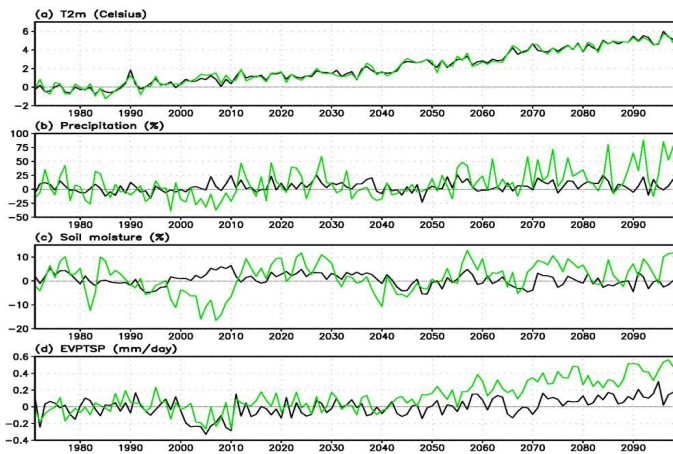


그림 7. 21세기 남한의 기온, 강수, 증발산, 유출량의 장기 시계열

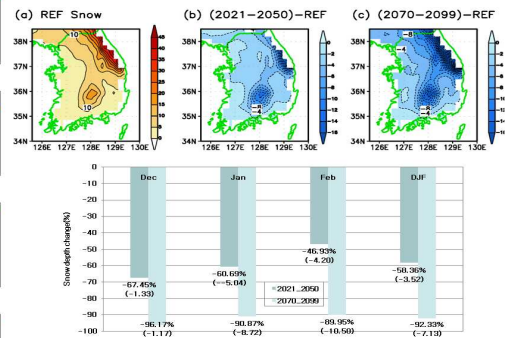


그림 8. 20세기 남한의 평균 적설(왼쪽 위), 21세기 전반기변화(가운데 위), 후반기 변화(오른쪽 위)와 21세기 전후반기 계절변화

## 5. 결과

미래 100년(2001-2100년)에 대해 전반기(2021-2050) 및 후반기(2070-2099)의 기후변화 시나리오를 분석한 결과, 20km 분해능으로 상세화된 한반도 기후자료는 지역별, 계절별, 연도별 기온 상승의 시·공간적 분포를 잘 모의하였다. 기온은 전반기에 1.6°C, 후반기에는 4.6°C가 증가하고 기온상승으로 대기 중 수증기 함유량 증가와 여름 몬순의 강화로 전 계절에 대해 강수량은 전반기에 6.7%, 후반기에 31.9%가 증가할 것으로 전망되었다. 강수량의 연변동성을 크나 전체적으로 증가할 것으로 예상되었다. 강수량 증가함에 따라 토양수분, 증발산도 증가할 것으로 전망되었다. 후반기에 기온의 상승이 커서 용설이 92.3%가 증가하여 겨울철 강수가 강설이 아닌 강우 형태로 내리거나 빠른 용설로 인해 적설이 생성되지 않을 것으로 예측되었

다. 향후 ECHO-G/S SRES A2 시나리오를 기반으로 하여 역학적으로 상세화된 시나리오와 통계적으로 상세화된 시나리오 결과와 비교 검증을 통하여 불확실성을 제시하고 다중모델기법을 이용하여 불확실성을 감소시킴으로써 미래 기후변화 전망을 위한 신뢰성 있는 시나리오 자료를 생산하는데 활용될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy (1993). Biosphere-atmosphere transfer scheme(BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model, *Tech. rep., National Center for Atmospheric Research*.
2. Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates (1993). Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I. Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, PP 2794-2813.
3. Giorgi, F., and L. O. Mearns (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 104, pp 6335-6352.
4. Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer (1994). Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5), *Tech. Rep. TN-398+STR*, NCAR, Boulder, Colorado, pp.121.
5. Holtslag, A. A. M., E. I. F. de Bruijn, and H.-L. Pan (1990). A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, *Mon. Wea. Rev.*, 118, pp 1561-1575.
6. Im, E.-S., W.-T. Kwon, J.-B. Ahn, and F. Giorgi (2007). Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part I: Recent climate simulation (1971-2000). *Climate Dynamics*, 28, pp 759-780.
7. Im, E.-S., I. W. Jung, H. Chang, D.-H. Bae, and W.-T. Kwon (2009). Hydroclimatological Response to Dynamically Downscaled Climate Change Simulations for Korean basins. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584-009-9691-2.
8. Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Breigleb, D. Williamson, and P. Rasch (1996). Description of the NCAR community climate model(CCM3), *Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR*, National Center for Atmospheric Research.
9. Liqiang Sun, D. F. Moncunill, H. Li, A. D. Moura, F. D. A. D. S. Filho, and S. E. Zebiak (2006). An operational dynamical downscaling prediction system for Nordeste Brazil and the 2002-04 real-time forecast evaluation, *J. Climate*, 19, pp 1990-2007.
10. Pal J. S., E. E. Small, and E. A. B. Eltahir (2000). Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J. Geophys. Res.*, 105, pp 576-594.
11. Pal J. S., F. Giorgi, X. B. N. Elguindi, F. Solmon, X. Gao, M. Ashfaq, R. Francisco, J. Bell, N. Duffenbaugh, L. Sloan, A. Steiner, J. Winter and A. Zakey (2007). The ICTP RegCM3 and RegCNET: Regional climate modeling for the development world. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, pp 1395-1409.
12. Qian, J.-H., A. Seth, and S. Zebiak (2003). Reinitialized versus continuous simulations for regional climate downscaling. *Mon. Wea. Rev.*, 131, pp 2857-2874.
13. Xue Y., R. Vasic, Z. Janjic, F. Mesinger, and K. E. Mitchell (2007). Assessment of dynamic downscaling of the continental U.S. regional climate using the Fta/SSiB regional climate model. *J. Climate*, 20, pp 4172-4193.