

역학적 상세화 기법을 활용한 우리나라 극한 강수사상 전망: 일최대강수량 변화 분석

Projection of future extreme precipitation events over Republic of Korea using a dynamical downscaling technique: Analysis on change of daily maximum precipitation

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 생산하였다. 미래 동아시아와 한반도지역은 기온상승에 의해 대기 중 수증기 함유량 증가와 여름 몬순의 강화로 전 계절에 걸쳐 강수량이 증가하고 토양수분, 증발산도 증가할 것으로 전망되었다. 상세화된 일(daily)강수량 자료를 일반극치(general extreme value, GEV)분석을 활용하여 20세기 동안 한반도의 일최대강수량의 공간 분포를 분석하고 미래 강수의 일최대강수량 변화를 전망하였다. 20세기 (1971-2000)에는 남해안과 경기 내륙지방에서 일최대강수량의 빈도와 평균값이 나타났다. 21세기에는 일최대강수량의 평균은 현재보다 약 10 mmday^{-1} , 20년 빈도 강수량은 60 mmday^{-1} 정도 증가할 것이고, 남해안과 서해안과 충청내륙일부지방, 39°N 이북에서 뚜렷이 나타날 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 역학적 상세화, GEV 분석, 일최대강수량

1. 서론

온실가스의 배출로 인한 지구 온난화와 기후변화 특성을 모의, 전망하기 위해서 전지구 (General Circulation Model, GCM)이 유용하게 이용되고 있다. 저분해능의 수평격자로 모의된 GCM의 기후자료를 지역기후모델에 초기경계치자료로 입력하여 상세화시켜 아격자의 기후자료를 생산하고 지역적인 기후변화를 전망하게 된다 (Giorgi and Mearns, 1991; Liqiang et al., 2006; Xue et al., 2006; Im et al., 2007; Im et al., 2009 등). 본 연구에서는 RegCM3(Regional Climate Model 3) 지역기후모델을 활용한 역학적 상세화 기법을 적용하여 GCM 기후자료를 한반도의 아격자로 상세화하였다. RegCM3중중지격자 체계(one-way double-nested system) 하여 국립기상연구소에서 모의한 ECHO-G/S 20C3M SRES A2 시나리오를 초기 경계치로 입력하여 동아시아 지역에 대해 60km 분해능을 가지는 기후시나리오 자료를 생산하였다. 생산된 60km 분해능의 한반도에 대해 20km 분해능을 가지는 기후변화 시나리오를 생산하였다. 시나리오의 모의 기간은 현재 (1971-2000)와 미래 (2001-2100)의 130년으로 총 4.6TB(테라바이트) 크기의

* 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구원 · E-mail : jshin0@korea.kr
** 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 연구사 · E-mail : climate@korea.kr
*** 정회원 · 기상청 국립기상연구소 기후연구과 과 장 · E-mail : wontk@kma.go.kr

시나리오자료가 생산되었다. 생산된 기후변화 시나리오는 한반도 미래 기후변화를 전망하는데 사용되었다.

기온과 강수의 계절적, 장기 시계열 분석과 더불어 강수의 극한사상변화도 살펴보았다. 일최대강수량 변동은 가뭄과 홍수의 척도가 되기 때문에 농업이나 수자원 분야를 비롯한 영향평가에 상당히 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 일반극치(General extreme value, GEV) 분석을 이용하여 강수에 대한 극한 현상(연중 1일 최대강수량)의 공간 분포를 살펴보았다.

2. GEV analysis 개요

GEV 분석은 입력 자료의 극한사상을 분석하는데 최적화된 분포를 찾아내어 입력 자료의 평균값에 상당하는 location 값과 return value를 계산한다 (Zwiers and Viatcheslav, 1998, Viatcheslav et al., 2005). 다음은 GEV 분석 중에서 누적분포함수(cumulative distribution function)의 계산식이다.

$$F(x; \mu_t, \sigma_t, \xi_t) = \begin{cases} \exp \left[-\exp \left\{ -\frac{x-\mu_t}{\sigma_t} \right\} \right], & \xi_t = 0 \\ \exp \left[-\left\{ 1 + \xi_t \frac{x-\mu_t}{\sigma_t} \right\}^{-\xi_t^{-1}} \right], & \xi_t \neq 0, \quad 1 + \xi_t \frac{x-\mu_t}{\sigma_t} > 0. \end{cases}$$

여기서, μ_t 는 위치매개변수(location), σ_t 은 규모매개변수(scale), 및 ξ_t 는 형상매개변수(shape parameter)이다. 주어진 확률 p 에서 위수(quantiles)는 다음과 같이 표현된다.

$$X_p(t) = \begin{cases} \mu_t - \sigma_t \ln [-\ln(p)], & \xi_t = 0, \\ \mu_t - \frac{\sigma_t}{\xi_t} \ln \left[1 - (-\ln(p))^{-\xi_t} \right], & \xi_t \neq 0. \end{cases}$$

3. 미래 수문기상변화 시나리오

미래 한반도의 물순환과 물수지의 변화를 파악하기 위해 토양수분, 증발산, 유출량의 변화를 분석하였다 (그림 1-2). 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.

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 3). 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

21세기 전반기와 후반기의 기준시나리오와 차이를 비교해 보면, 동아시아지역(검정 실선)에서는 기온과 강수가 모두 증가하였다 (그림 4). 동지영역으로 모의된 한반도의 남한지역(녹색 실선)은 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.

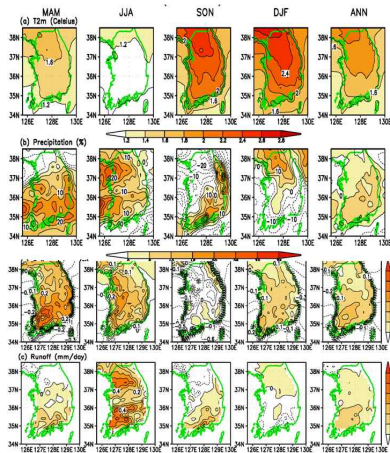


그림 1. 21세기 전반기의 계절별 기온, 강수, 증발산, 유출량

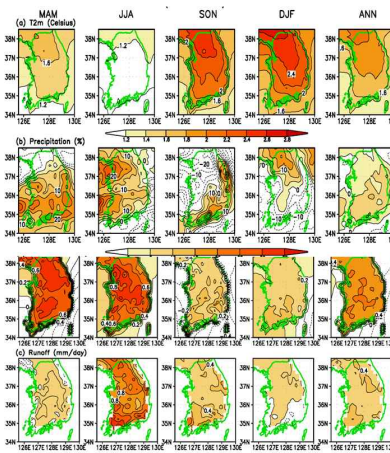


그림 2. 21세기 후반기의 계절별 기온, 강수, 증발산, 유출량

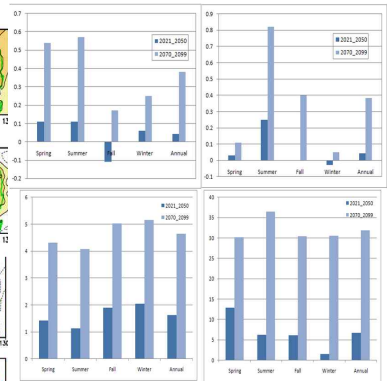


그림 3. (왼쪽 위로부터 시계방향으로)기온, 강수, 증발산, 유출량의 계절별 막대그래프

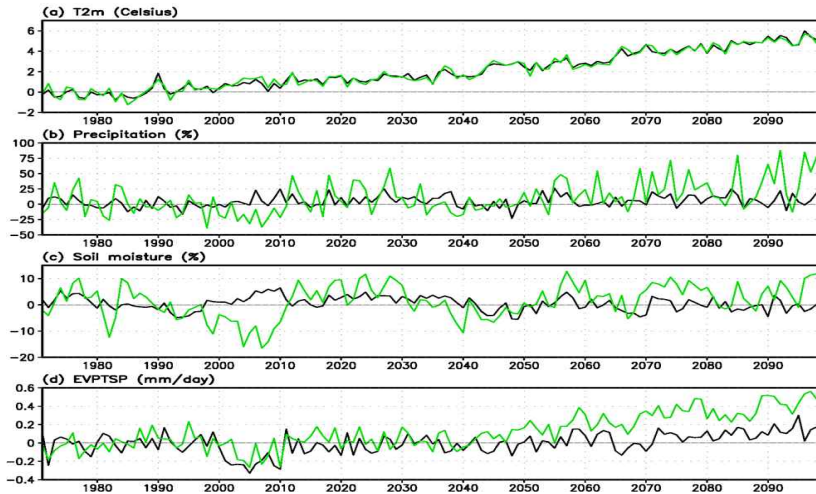


그림 4. 20세기 대비 21세기 남한의 기온, 강수, 증발산, 유출량의 장기 시계열

4. 강수의 극한사상 분석

그림 5은 기준기간(1971-2000) 중 (a) 관측 APHRODITE (0.25 degree) 1일 최대강수량 자료, (b) NCEP의 60km 모의 강수 자료. (c) ECHO-G/S의 60km 모의 강수, (d) 60km 모의된 두 강수의 차이, (e) NCEP의 20km 모의 강수, (f) ECHO-G/S의 20km 모의 강수, (d) 20km 모의된 두 강수의 차이의 location의 공간분포를 나타낸 것이다. 단위는 mmday⁻¹이다. APHRODITE의 location값의 공간패턴은 평균 강수량패턴인 남해안과 중부내륙지방에서의 강수대 분포와 유사하다. APHRODITE와 NCEP의 60km 모의된 강수를 비교해 보면, location의 값의 범위는 유사하나, APHRODITE에 비해 연해주, 북한 39°N부근과 일본 큐슈에서 값이 크게 나타난다. NCEP과 ECHO-G/S를 비교해 보면, 북한 개마고원 부근에서 큰 값들은 RegCM3 모델의 계통적 오차로 보인다. 또한, ECHO-G/S에서 장마밴드의 북상을 제대로 모의하지 못하는 영향이 그대로 반영되었다. 따라서, 한반도 육지에서는 과소, 남해상에서는 과대 모의한다. NCEP과 ECHO-G/S 20km 모의 결과는 모격자 60km의 공간 구조를 더 자세히 보여 준다.

그림 6은 기준기간(1971-2000) 중 20년 빈도의 연중 1일 최대강수량으로 표현되는 20-year return value를 나타낸다. (a) 관측 APHRODITE (0.25 degree) 강수 자료, (b) NCEP의 60km 모의 강수 자료.

(c) ECHO-G/S의 60km 모의 강수, (d) 60km 모의된 두 강수의 차이, (e) NCEP의 20km 모의 강수, (f) ECHO-G/S의 20km 모의 강수, (d) 20km 모의된 두 강수의 차이의 20-year return value의 공간분포를 각각 나타낸 것이다. 관측 APHRODITE의 20-year return value는 1일 최대강수량이 나타나는 남해안과 경기지방으로 나타난다. NCEP의 60km 모의 강수 자료에서는 충청지방과 강원도에서 최대값이 나타나지만, ECHO-G/S의 60km 모의 강수자료에서는 남해안에서 최대값이 나므로 관측에 더 가깝게 나타난다. 모의된 두 강수자료의 return value는 경기지방에서 음의 값의 최대가, 남해안과 그 이남에서 양의 최대값이 나타난다. 이것은 ECHO-G/S의 모의된 강수의 1일 최대값을 더 잘 모의함을 보여준다. 20km 모의된 1일 최대값은 60km 모의된 return value과 유사하며 상세화된 return value를 자세히 보여준다. 남해안, 경기북부와 동해안에서 최대 강수량이 나타난다.

그림 7는 20세기 대비하여 21세기중 연중 1일 최대강수량이 나타나는 location과 20-year return value의 변화분포를 나타내었다. 21세기 1일 최대강수량의 location은 남해안과 개마고원에 나타난다. 20세기 location의 공간 분포의 차이를 살펴보면, 60km 모의 강수량에서는 위도 36-38°N의 내륙에서 나타나는 반면, 20km 모의 강수량에서는 남한 전역에 산개되어 나타난다. 개마고원에서 나타나는 값은 모델의 오차를 제외하고 20년 빈도 1일 최대강수량의 공간분포에서 최대값은 우리나라 남해안에서 나타난다. 20세기 return value의 공간 분포의 차이를 살펴보면, 60km 모의 결과는 서해안과 충청지방, 경남지방에서, 20km 모의 결과는 서해안과 충청지방 및 남해안지방에서 나타난다. 결론적으로 미래에는 남한에서 연중 1일 최대강수량의 평균값이 약 10 mmday^{-1} , 20년 빈도 강수량은 60 mmday^{-1} 정도 증가할 것으로 분석되었으며, 특히 남해안과 서해안 및 충청내륙일부지방, 39°N 이북에서 뚜렷이 나타난다.

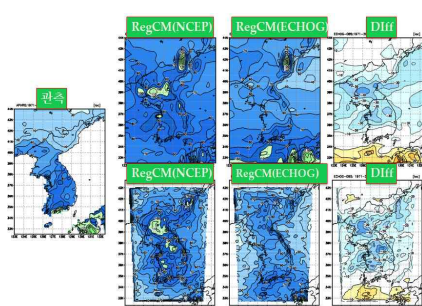


그림 5. 20세기 일최대 강수량의 위치(location)

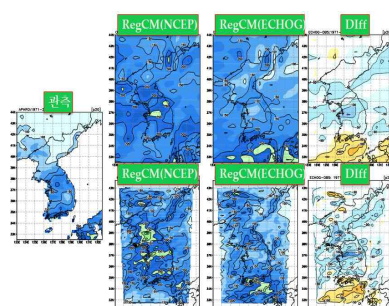


그림 6. 20세기 일최대 강수량의 20년빈도 분포(20yr return value)

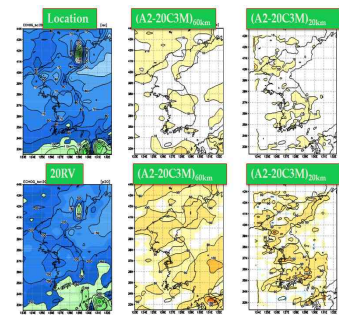


그림 7. 21세기 일최대 강수량의 위치 20년빈도 분포

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°C 가 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. 토양 수분, 증발산, 유출량은 기온과 강수량의 시공간적인 분포와 밀접하게 연관성이 있다. 21세기 후반기로 갈수록 강수량의 증가의 증가는 더 많은 증발산을 일으키며 대기 중으로 수증기의 유입은 더 많은 강수를 유발할 수 있으며 강수의 증가로 지표면에서 유출량의 증가로 이어진다. 전반기의 유출량의 큰 월변동은 후반기에서 줄어들지만 여전히 변동성을 보여준다. 강수량의 극한사상의 공간분포와 미래 발생빈도에서는 연중 1일 최대강수량을 GEV 분석을 통해 보면, 기준기간 (1971-2000) 중 남해안과 경기 내륙지방에서 1일 최대강수량의 빈도와 평균

값이 나타난다. 21세기에는 우리나라 전역에서 location과 20-year return value가 증가하며, 특히 남해안과 서해안과 충청내륙일부지방, 39°N 이북에서 뚜렷이 나타날 것으로 전망된다. 지구온난화에 따라 미래의 1일 최대강수량의 평균은 현재보다 약 10 mmday⁻¹, 20년 빈도 강수량은 60 mmday⁻¹ 정도 증가할 것으로 분석되었다.

이 연구에서 생산된 기상학적 자료인 일, 월, 년의 (평균, 최고, 최저)기온, (총, 대류성) 강수 자료 및 수문생태학적 자료인 토양수분, 유출량, 증발산, 적설 깊이, 열교환 플러스, 경계치높이 등을 이용하여 기상-농업-수문-생태 관측 자료와 비교함으로써 자료의 신뢰성을 제공할 수 있다. 또한, 다양한 기상-농업-수문-생태 모델의 입력 자료로 사용되어 미래 기후변화에 따른 농업-수문-생태 변화를 모의하는데 기여할 수 있다. GEV 분석을 통해 우리나라의 유역별 및 수계별 최대홍수 등을 전망함으로써 수공설계에 기초적인 자료로 사용될 수 있다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Giorgi, F., and L. O. Mearns (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 104, pp 6335-6352.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Viatcheslav, V. K., F. W. Zwiers, and X. Zhang (2005). Intercomparison of near surface temperature and precipitation extremes in AMIP-2 simulations. *J. Climate*. Vol. 18(24). pp 5201-5223.
6. 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.
7. Zwiers, F. W. and V. K. Viatcheslav (1998). Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO2 Doubling. *J. Climate*. DOI: 10.1175/1520-0442.