

지구온난화에 따른 한반도 및 동아시아 지역의 평균기온 및 이상기온 현상의 변화

오재호, 민영미, 우수민
부경대학교 환경해양과학대학 환경대기과학과
(jhoh@climate.pknu.ac.kr)

1. 서론

2001년 발간된 제 3차 기후변화에 관한 정부간 협의회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에 따르면, 19세기 후반 전지구 평균 기온은 약 0.6°C 상승하였고, 한반도 및 동아시아 지역은 지난 40년 동안 약 1.7°C 의 기온 증가를 보이고 있다. 이러한 기후변화는 인류의 생존과 직결되는 문제를 초래할 수 있기 때문에 특히 중요한 문제라고 할 수 있다. 20세기 후반에 들어서면서 지구 평균 기온의 지속적인 상승, 가뭄 및 홍수의 빈도 증가 등 다양한 이상기상 현상이 출현하고 있으며, 이러한 기후변화에 따른 기상재해로 피해가 해마다 급증하고 있다. 기후변화 예측에 관한 대부분의 연구는 주로 과거와 현재의 기상 및 기후상태로 미래의 가상현실이 예측 가능한 전구순환모델(General Circulation Models, GCMs)을 이용한 장기간의 전지구 평균 기온 변화에 집중되었다.

최근까지 이러한 수치모델로 대기대순환모델(Atmosphere-Ocean General Circulation Models, AOGCMs)이 주로 사용되어 왔으나, 대기대순환 모델이 제공해주고 있는 유용한 정보에도 불구하고, 대부분의 모델이 공간 분해능과 물리과정의 한계점으로 인해 지역적인 기후 특성이나 기후 변화를 예측하기에는 어려운 실정이다. 대기대순환모델의 한계점을 극복하고 세밀한 규모의 기후 정보를 얻기 위한 하나의 방법은 아격자 규모의 강제 효과를 반영할 수 있는 역학적 다운스케일링 기법을 활용한 지역기후모델(Giorgi, 1990:

Jones et al., 1995; Christensen et al., 1997)을 이용하는 방법이다. 본 연구의 목적은 IPCC SRES(Special Report on Emission Scenarios) A2 온실 가스 증가 시나리오에 따른 전지구 기후 변화 모의 자료를 바탕으로 역학적 다운 스캘링 기법을 적용하여 한반도 및 동아시아 지역의 상세한 미래 기후변화 자료를 분석함으로써 평균 기온 뿐만 아니라 일 최고 기온 및 일 최저 기온의 변화, 이상 기후 현상의 변화 특성을 살펴보고자 한다.

2. 실험 방법 및 자료

본 연구에서 사용된 지역 기후 모델 (Regional Climate Model, RCM)은 미국 국립기상연구센터 (National Center for Atmospheric Research, NCAR)의 중규모 예측 그룹(Anthes and Warner, 1978)과 펜실베이니아 주립대학 (Pennsylvania State University, PSU)에서 공동 개발한 중규모 기후 모델 MM5(Mesoscale Model version 3.4)이다. 모델 영역은 한반도 및 동아시아 지역을 포함하는 $109^{\circ}\text{E}\sim 148^{\circ}\text{E}$, $24^{\circ}\text{N}\sim 48^{\circ}\text{N}$ 로 격자 간격은 27 km 이다. 한반도 및 동아시아 지역의 복잡한 지형을 고려하기 위해서는 고해상도의 지역기후 모델의 수평 해상도에 알맞은 지형 자료와 지표 특성 자료가 필수적이다. 따라서 본 연구에서 사용된 지형 자료는 미국 국립 지리 조사원(U. S. Geological Survey, USGS)에서 제작한 전 지구 5분 간격(9.25 km)의 고해상도 자료이다. 그리고 본 연구에서는 측면경계에서 지형의 불일치로 유발되는 잡음을 최소화하기 위해 대기대순환 모델과 지역기후 모델의 지형을 서로 일치시키는 방법(Hong and Juang, 1998)을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 온실가스 증가 시나리오는 SRES A2 이다. 지역기후 모델의 초기·경계 자료는 독일 막스 플랑크 기상연구소(Max Planck Institute of Meteorology, MPI)의 최신 대기-해양 집합 모델인 ECHAM4/HOPE-G(이후, ECHO-G)를 이용하여 생산한 4시간 간격의 전지구 기후변화 자료이다. ECHO-G의 모의 결과를 한달 간격으로 MM5에 초기화 시

켰으며, 경계 자료는 6시간 간격으로 입력하였다. 지역기후 모델의 총 모델 수행시간은 ECHO-G의 240년(1860~2100) 모의 자료 중에서 2001년부터 2100년까지 100년을 수행하였다. 원시자료에는 3차원 수평 바람장 (u/v-wind, m/s), 온도장 (temperature, K), 수분장 (specific humidity, kg/kg), 고도장 (geopotential height, m), 2차원 해면 기압장 (sea-level pressure, Pa) 및 해면 온도장 (sea-level temperature, K)의 자료가 포함되어 있으며, 이 원시 자료는 경도 3.75°간격, 위도는 Gaussian 간격으로 96(동서)x48(남북)으로 구성되어 있다. 이러한 원시 자료를 MM5의 격자점에 맞게 내삽하여 사용하였다.

3. 결론

한반도 및 동아시아 지역의 향후 100년 (2001~2100) 미래 기후를 예측/분석하기 위해 지역기후모델 MM5를 이용하여 IPCC SRES A2 온실가스 증가 시나리오에 따른 기후변화 자료를 생산하였다. 본 연구에서는 평균 기온의 변화 뿐만 아니라, 일 최고 기온, 일 최저 기온의 변화 등과 같은 이상 기후 현상의 변화 특성을 살펴보았다. 이상 기후 현상으로는 서릿날(Frost Day, FD), 여름날(Summer Day, SD), 그리고 일 최고 기온 및 일 최저 기온의 상위/하위 5%, 95%에 해당하는 기온 극값 등이 포함되며 극 기상 현상의 변화 특성 분석한 결과는 다음과 같다.

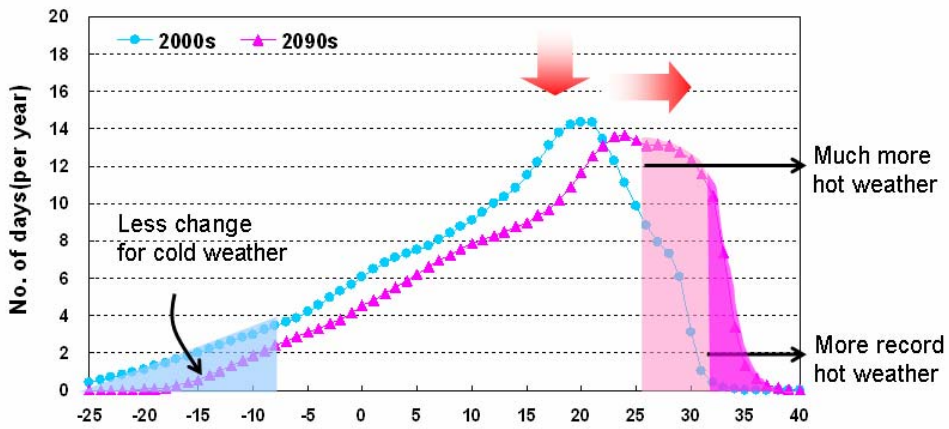


Fig. 1 Change in daily mean temperature distribution both 2000s and 2090s over East Asia.

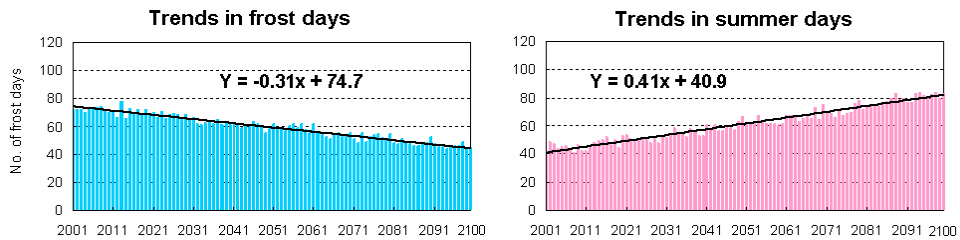


Fig. 2 Trends of frost days and summer days from 2001 to 2100 over East Asia.

그림 1은 온실가스 증가 시나리오에 따른 한반도 및 동아시아 지역의 2000년대 (2001~2100년 평균)과 2090년대 (2091~2100년 평균)의 일 평균 기온 분포를 나타낸 것이다. 그림 1을 통해 일 평균 기온의 평균과 극 기온 현상 (hot/cold extremes)의 변동성 모두 변화는 것을 알 수 있다. 즉, 2000년대에

비해 2090년대는 cold weather 현상의 발생 빈도가 점점 줄어들고 반면, warm weather 현상은 2000년대에 비해 그 발생 빈도가 증가한다. 특히, 극 고온 이상 기상 현상의 발생 빈도는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 온난화가 진행되면서 일 평균 기온은 증가하고 특히 극 고온 기상 현상은 그 발생 빈도가 크게 증가한다. 이상 기후 현상 여름날은 일 최고 기온이 25°C 이상인 날로 정의되며 온실가스 증가 시나리오에 따른 여름날의 발생 빈도 경향은 향후 100년 동안 약 41일 증가를 보였다(그림 2). 반면, 일 최저 기온 0°C인 날로 정의되는 서릿날의 경우 약 31일의 감소를 보였다. 공간적으로 고위도에 비해 35° 이하 저위도에서 서릿날의 감소가 크게 나타났으며, 특히 일본에서는 2000년에 비해 2100년에는 80일 이상으로 서릿날이 크게 감소하는 것을 보였다. 반면, 여름날의 경우 증가 현상은 한국, 일본, 중국 대륙 지역에서 전반적으로 크게 나타났다.

기온 극값 분석을 위해 본 연구에서는 WMO/CLIVAR에서 제공하는 기후변화 지수(<http://www.knmi.nl/samenw/eca>)를 사용하였다. 우선 warm temperature extremes 지수 warm day와 warm night은 일 최고 기온과 일 최저 기온의 각각 상위 95% 이상인 경우로 정의된다. 한반도 및 동아시아 지역을 평균한 warm day의 warm night의 발생빈도는 2000년에 비해 2100년에는 각각 72일, 59일의 증가를 보인다. warm night의 경우 저위도에서 일반적으로 발생 빈도가 크게 증가하는 반면, warm day는 전 영역에서 약 50일 이상의 고른 증가를 보였다. 또한 cold temperature 지수인 cold day, cold night 분석하였다. 각 지수의 정의는 일 최고 기온과 일 최저 기온의 하위 5%를 의미하며 warm temperature 지수와 달리 둘 다 감소하는 경향을 보였다. 공간적으로 일본에서 가장 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 100년 동안 cold day는 약 44일, cold night는 50일 정도의 발생빈도 감소를 보였다.

참고문헌

- Anthes, R. A. and T. T. Warner, 1978: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045–1078.
- Christensen, J., B. Marchengauer, R. G. Jones, C. Scher, P. M. Ruti, M. Castro and G. Bisconti, 1997: Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Climate Dyn.*, **13**, 489–506.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **3**, 941–963.
- Hong, S.-Y., H.-M., Juang, 1998: Orography blending in the lateral boundary of a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1714–1718.
- IPCC (2001) Climate Change 2001: IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change (IPCC) J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.) Cambridge University Press, UK. Pp 944.
- Jones, R. G., J. M. Murphy and M. Noquer, 1995: Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. Part I: assessment of control climate including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 1413–1449.
- Min, S.-K., Legutke, S., Hense, A., and W.-T. Kwon, 2004 : Climatology and internal variability in a 1000-year control simulation with the Coupled Climate Model ECHO-G. M&D Tech. Rep. 2, Max-Planck Unst. Fur Meteorol., Hamburg, Germany, 67pp.,
- Oh, J.-H., T. Kim, M.-K. Kim, S.-H. Lee, S.-K. Min, and W.-T. Kwon, 2004 :

Regional climate simulation over Korea using dynamic downscaling and statistical adjustment. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **82(6)**, 1629-1643.

Zorita, E., Gonzalez-Rouco, F., and S. Legutke, 2003 : Testing the Mann et al.(1998) approach to paleoclimate reconstructions in the context of a 1000-yr control simulation with the ECHO-G Coupled Climate Model. *J. Climate*, **16**, 1378-1390.