

# 기후변화에 의한 한반도 기후와 유출량의 변화

지역기후모델과 수문모델을 이용하여 미래 한반도 지역기후 변화와 금강유역의 유출량 변화를 예측한다.

이 동 규

서울대학교 지구환경과학부 (dklee@snu.ac.kr)

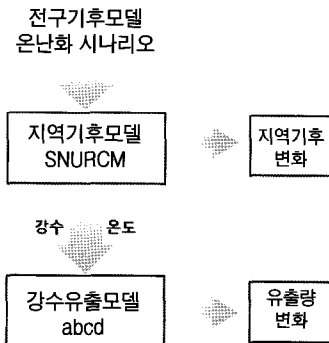
지구온난화로 인하여 지난 100여 년 동안 지구의 평균 기온은 약 0.74℃ 정도 증가하였고 (IPCC, 2007), 우리나라의 경우, 지난 75여 년 동안 연 평균 기온이 약 1.1℃ 정도 상승하였으며, 그 중 지구온난화로 인한 기온 상승은 약 0.7℃ 정도로 추정하고 있다 (Kim and Kang, 1997). 최근에는 빈번한 악기상의 발생, 어느 때보다 강한 엘니뇨 및 라니냐의 출현 등, 기후변화에 기인하는 것으로 추정되는 기상학적 또는 기후학적 징후가 뚜렷하게 나타나고 있다. 인위적 요인에 의하여 가속되는 지구온난화 등의 기후 변화에 대처하지 못하면 인류가 어려운 상황에 직면하게 될지도 모른다는 보고가 끊임없이 나오고 있다 (IPCC, 2001; IPCC, 2007).

지구 규모의 기후변화와 더불어 나타나게 될 한반도 주변의 지역기후와 물순환의 변화를 이해하고 예측하는 것은 향후 가까운 미래에 다가올 심각한 물 부족 문제에 적극적으로 대처하기 위한 물 관리 정책에 필수적인 기술이라 할 수 있다. 지금까지 대부분의 기후변화 연구는 전구기후모델에 의존하였다. 하지만 한반도의 기후변화를 연구하기 위하여 전구기후모델을 사용하는 경우 한반도는 저해상도의 전구기후모델에 의해서 해석되기 어렵다. 또한 수문모델을 이용하여 물순환의 변화를 예측하기 위해서는 고해상도 강수 예측 자료가 필요하기 때문에 한반도 기후 변화와 유출량 변화를 예측하기 위해서는 전구모델의 한계를 극복할 수 있는 고해상도 지역기후모델을 이용하여야 한다. 지역기후모델은 전구기후모

델에 비하여 상대적으로 높은 해상도와 상세한 물리 과정을 갖기 때문에 동아시아 및 한반도의 지역기후를 해석하는데 적합하다. 따라서 본 연구는 지역기후모델과 수문모델을 이용하여 미래 한반도의 지역기후와 유출량 변화를 예측하는 것을 목표로 한다.

## 연구방법

미래 한반도 지역기후와 유출량의 변화를 예측하기 위하여 그림 1과 같이 지역기후모델과 수문모델을 사용하는 연구방법을 도입하였다. 전구기후모델의 온난화 시나리오를 이용하여 상세한 물리과정을 가진 지역기후모델로 한반도 상세 기후변화 시나리오를 산출하고, 이 결과를 수문모델의 배경장으로 사용하여 금강유역의 유출량의 변화를 예측한다.



[그림 1] 연구 방법



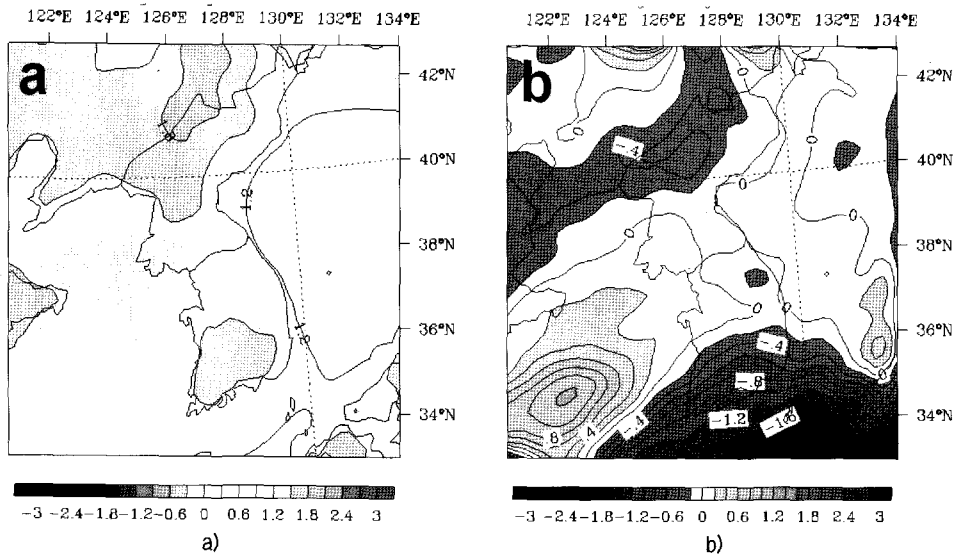
미래 한반도 지역기후 변화를 예측하기 위하여 70년(1980 ~ 2049) 동안의 동아시아 지역기후를 서울대학교 지역기후모델(Seoul National University Regional Climate Model, SNURCM)을 이용하여 기상자료를 생산하였다. 서울대학교 지역기후모델은 서울대학교에서 개발한 모델로서 미국 국립대기과학연구소(NCAR)의 MM5 중규모모델 기반에 새로운 지면모델인 NCAR CLM 3.0을 접합하여 한반도 물순환 예측이 가능한 서울대학교 지역기후모델을 개발하였다. 고해상도 자료 생산을 위하여 일방 동지적자 체계를 사용하였는데, 동아시아 영역을 포함하는 60 km 수평 해상도의 예측 자료를 먼저 수행한 후 이 결과를 강제력으로 이용하여 다시 한반도 영역의 고해상도(20 km 수평해상도) 예측 자료를 생산하였다. 60 km 수평 해상도 자료 생산을 위해 대규모 강제 자료로 1.4° 수평 간격을 갖는 6시간 간격의 CCSM3(Community Climate System Model 3) B1 시나리오를 사용하였다. CCSM3의 B1 시나리오는 2000년까지는 20C3M 실험 가정에 의하여 CO<sub>2</sub> 농도가 330 ppm이지만, 2000년부터 증가하여 2100년에는 550 ppm까지 도달하는 시나리오다(Meehl et al., 2006). SNURCM의 경우 복사 물리 과정에서 계산되는 CO<sub>2</sub> 농도를 대규모 강제 자료로 사용한 CCSM3

와 같은 농도로 증가시켜주었다.

금강 유역의 유출량 변화를 예측하기 위하여 사용한 수문모델은 abcd 물수지 모델이다(Thomas, 1981). 이는 역학모델이 아닌 물리적 모델로서 4개의 매개변수를 하천 유역의 환경에 맞도록 조절하여 물수지를 예측하는 모델이다. 현재 관측 강수량, 지상온도, 유출량 자료를 이용한 보정을 통하여 4개의 매개변수를 결정하였다.

### 미래 한반도 지역기후와 유출량의 변화

온실기체의 증가로 인한 지구온난화에 따라 한반도 지역기후가 어떻게 변하는지를 확인하기 위하여 그림 2에 지역규모모델에서 생산된 지상온도와 강수량의 미래 20년(2030 ~ 2049)과 현재 20년(1980 ~ 1999) 연평균 차이를 보였다. 미래 한반도의 연평균 지상온도는 현재에 비하여 약 1.5°C 상승하고, 연평균 강수량은 80 mm가 감소하게 된다. 지상온도의 경우 미래 지구 온난화에 의하여 한반도 전반적으로 상승하게 된다. 한반도의 전라도와 평안도 지역에서 온도 상승과 강수량 감소가 다른 지역보다 두드러지게 나타난다. 상대적으로 동해에서 온도증가가 적고 황해에서 강수량 증가가 있다. 이 결과에 따르면 미



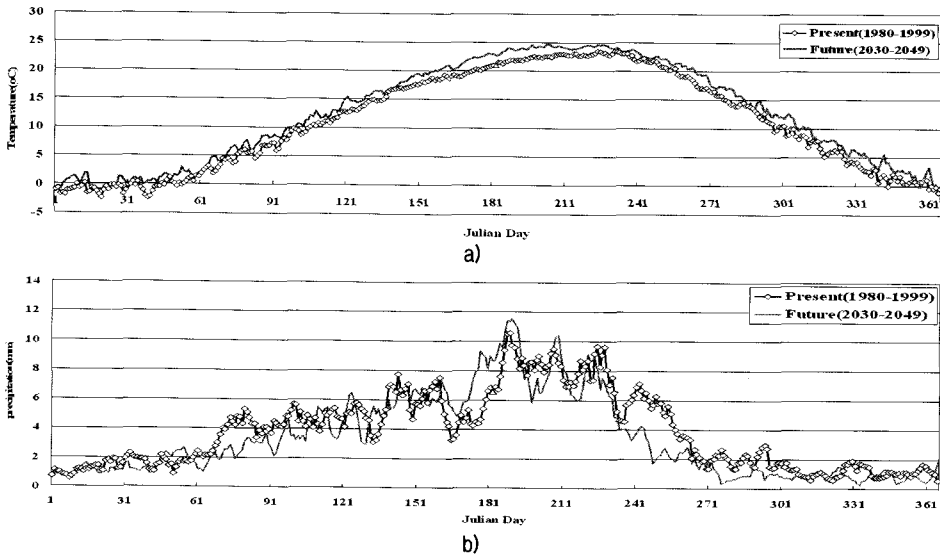
[그림 2] 20년 연평균 미래(2030~2049)와 현재(1980~1999)의 a) 지상온도(°C)와 b) 강수량(mm day<sup>-1</sup>)의 차이

래 호남평야의 곡창 지대에서는 가뭄으로 인하여 물 부족 현상이 발생할 가능성이 있다.

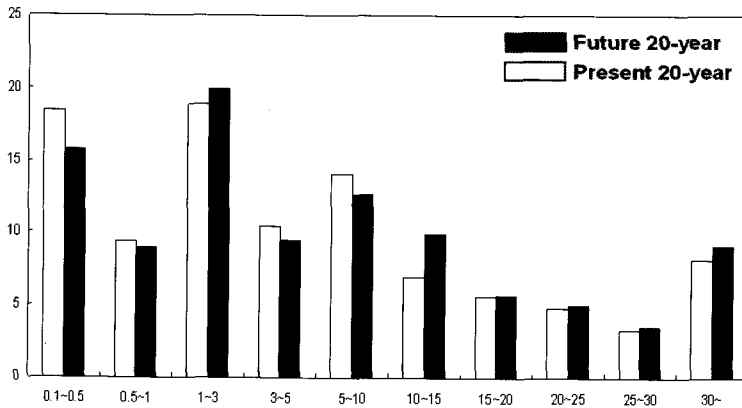
남한지역에 대하여 현재와 미래 20년 평균 일강수량과 일지상온도의 시계열을 각각 그림 3에 분석하였다. 모델에서 생산된 결과를 남한의 73개 관측소 격자로 내삽한 뒤 평균하여 남한 영역 평균값을 계산하였다. 미래의 지상온도는 현재에 비하여 모든 계절에 상승하는데 여름과 가을철의 온도 상승폭이 다른 계절에 비하여 크다. 강수량의 경우 6월부터 7월

중반까지의 시기를 제외하면 대부분의 시기에 미래 강수량이 현재보다 감소한다. 특히 초봄(3월)과 초가을(9월)의 감소가 현저하다. 따라서 초여름의 강수 증가로 홍수 피해가 증가할 수 있고, 이수기의 강수량 감소로 물부족이 야기될 수 있다.

기후변화에 의한 강수 강도의 변화를 조사하기 위하여 남한지역에 대하여 20년 평균 여름철(JJA) 강수 강도를 분석하였다(그림 4). 강수 강도는 일강수량을 10개의 구간으로 나누고, 각 강수 구간에 대한 빈



[그림 3] 미래와 현재의 20년 일평균 a) 지상온도와 b) 강수량 시계열(남한 평균)



[그림 4] 미래와 현재의 20년 평균 여름철(JJA) 일 강수 강도(남한 평균)



도수를 구하여 계산하였다. 미래의 강수 강도는 현재에 비하여 다소 강해지는 경향이 있는데 10 mm day<sup>-1</sup> 이하의 강수강도에서는 감소하고, 10 mm day<sup>-1</sup> 이상의 강수강도에서는 증가하는 결과를 보인다. 또한 현재에 비하여 미래 연평균 강수량은 0.4 mm day<sup>-1</sup> 감소하지만 100 mm day<sup>-1</sup> 이상의 집중호우 발생 일수는 연평균 1일정도 증가하였다.

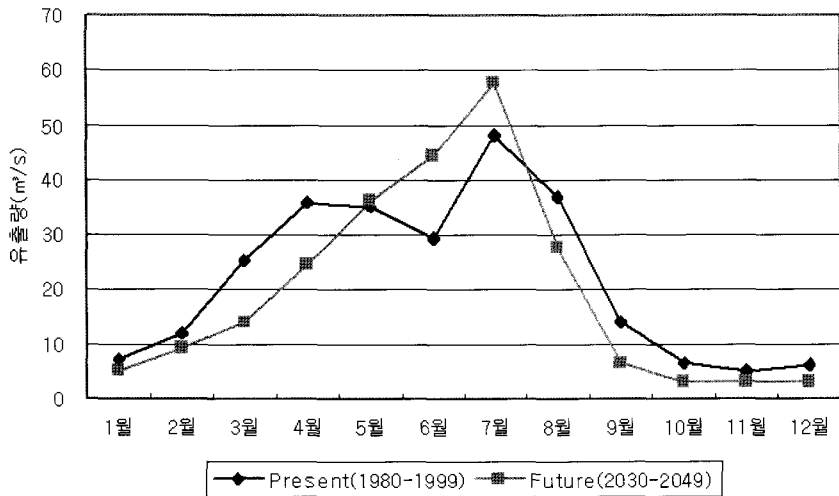
미래 지상온도의 증가가 계절의 특성을 변화시킬 수 있기 때문에 지역기후 모델 결과를 토대로 현재와 미래의 계절 길이와 시종일의 변화를 계산하였다(표 1). 계절을 구분하기 위하여 겨울은 지상온도가 5℃ 이하인 기간, 여름은 20℃ 이상인 기간, 봄과 가을은 그 중간 기간으로 정의하였다. 현재보다 미래에 겨울과 봄의 기간은 줄어들고, 여름의 기간은 늘어난다. 현재보다 미래에 봄의 시작은 5일 빨라지고 기간은 11일이 줄어든다. 여름의 시작일은 16일 빨

라지고, 기간은 24일이 증가한다. 가을의 경우는 시작일이 8일 늦어지지만 기간은 2일 증가해 거의 변화가 없다. 겨울은 시작일이 10일 늦어지고, 기간은 15일이 감소하게 된다. 이와 같이 봄철이 빨라지는 현상으로 미래 한반도는 개화시기가 변하게 되고, 온도 상승으로 식생군도 변할 수 있다.

그림 5는 지역기후모델이 생산한 강수량과 지상온도를 abcd 수문모델의 입력 자료로 사용하여 산출한 금강유역의 월 유출량 변화를 보이고 있다. 강수량의 변화와 유사하게 현재에 비하여 미래에는 여름철 유출량만 증가하고, 이외의 계절에서는 유출량이 감소한다. 미래 연평균 유출량은 현재에 비하여 감소하지만 우려할 만한 용수부족이 발생할 정도로 크지는 않다. 하지만 봄철의 유출량 감소가 다른 계절에 비하여 현저하기 때문에 이수기 용수부족 감소에 대비하는 효율적인 적응전략이 필요하다.

<표 1> 미래와 현재의 20년 평균 사계절의 시종일

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Present 20-year (Season length)	18, Mar.~21, June (96)	22, Jun.~13, Sep. (84)	14, Sep.~21, Nov. (69)	22, Nov.~17, Mar. (116)
Future 20-year (Season length)	13, Mar.~5, June (85)	6, Jun.~21, Sep. (108)	22, Sep.~1, Dec. (71)	2, Dec.~12, Mar. (101)



[그림 5] 미래와 현재의 20년 평균 금강유역의 월평균 유출량

## 요약

기후변화가 한반도 지역기후와 유출량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 지역기후모델과 수문모델을 이용하여 고해상도 한반도 70년 장기 지역기후와 유출량을 생산하였다. 생산된 자료에 따르면 한반도의 미래 지상온도는 현재에 비하여 1.5℃ 상승하고, 강수량은 0.2 mm day<sup>-1</sup> 만큼 감소한다. 지상온도는 모든 계절에 상승하고, 강수는 초여름을 제외한 모든 계절에 감소한다. 미래의 연평균 강수량이 감소함에도 불구하고, 강수 강도는 증가하고, 집중호우일수는 증가하였다. 봄과 겨울의 길이가 감소하고, 여름은 증가하며, 봄의 시작이 빨라진다. 금강유역의 유출량은 이수기에는 감소하고, 홍수기에는 증가하는 경향이 나타난다. 이와 같은 한반도의 미래 지역기후 변화로 인하여, 이수기의 물부족, 호우로 인한 재해 피해 증가, 개화시기와 식생군의 변화가 야기될 수 있다.

## 참고문헌

1. 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, Houghton et al., (Eds.) Cambridge University Press, UK.
2. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. Kim, M. K., I. S. Kang, C. H. Kwak, 1997: The estimation of urban warning amounts due to urbanization in Korea for the recent 40 years. Journal of the Korean Meteorology Society, 35, 118-126.
4. Meehl Gerald A., Warren M. Washington, Benjamin D. Santer, William D. Collins, Julie M. Arblaster, Aixue Hu, David M. Lawrence, Haiyan Teng, Lawrence E. Buja, and Warren G. Strand, 2006: Climate Change Projections for the Twenty-First Century and Climate Change Commitment in the CCSM3. Journal of Climate, 19, 2597-2616
5. Thomas, H. A. 1981: Improved methods for national water assessment. report, contact WR15249270, U.S Water Resource. Council, Washington, D. C. 