

# 고해상도 시나리오를 활용한 5대강수계 수자원 영향평가

## Climate Change Impacts Assessments on Water Resources at 5 Large River Basin with High Resolution Scenario

배덕효\*, 정일원\*\*, 전태현\*\*\*

Deg Hyo Bae, Il Won Jung, Tae Hyun Jun

### 요    지

기후변화가 국내 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위해 고해상도 기후변화 시나리오를 이용하여 수자원의 변동성을 평가하였다. IPCC SRES A2 시나리오를 이용하여 5대강수계 139개 유역에 대해 기후 및 유출 시나리오를 생산하고 수자원의 변동성을 시공간적으로 분석하였다. 고해상도(27km×27km) 시나리오는 기상 연구소에서 전구기후모델인 ECHO-G의 결과를 지역기후모델인 MM5에 경계조건을 사용하여 역학적으로 상세화한 것이다. 이 시나리오를 이용하여 현실성 있는 유역별 기후시나리오를 생산하기 위해 LARS-WG를 사용하였으며, 유출시나리오 생산을 위해 USGS에서 개발된 PRMS 모형을 이용하였다. 생산된 시나리오를 이용하여 분석한 결과 전반적으로 한강유역이 위치한 북쪽유역에서는 연평균유출량이 증가되고, 남쪽에 위치한 유역들에서는 감소할 것으로 전망되었다. 이것은 기온의 증가에 따른 평균증발산량의 증가에 따른 영향으로 나타났다. 계절별로는 봄과 여름철의 유출량은 감소하고, 가을과 겨울철 유출량은 증가할 것으로 분석되었다. 그러나 여름철 평균유출량의 감소에도 불구하고 고수량( $Q>100\text{mm}$ )의 규모 및 빈도가 증가할 것으로 전망되었다.

**핵심용어 :** 기후변화 영향평가, 수자원, 고해상도 기후변화 시나리오

### 1. 서    론

2007년에 발간된 IPCC 4차 보고서에서는 온실가스 농도가 계속 증가할 경우 2100년경에는 지구 평균기온이  $1.1^{\circ}\text{C}$ 에서  $6.4^{\circ}\text{C}$ 까지도 증가될 것으로 발표하였다. 또한 세계적으로 고온극한과 열파 그리고 호우빈도 증가 및 태풍의 세기가 강화될 것으로 전망하였다. 지역적으로는 고위도 지역에서 강수량이 증가되는 반면 아열대 육지에서는 감소할 가능성이 높다고 보고하였다. 국내의 경우 기상연구소에 따르면 기후변화로 인해 봄 가뭄의 증가와 여름철 집중호우 강도가 심화되고, 가을철 초대형 태풍으로 인한 피해 발생 가능성이 증가될 것으로 전망하였다. 수자원 측면에서 이러한 기후변화는 수자원의 안정적인 공급 및 효율적인 관리를 위한 정책수립에 불확실성을 더욱 가중시킬 것이다. 따라서 이러한 기후변화에 효과적으로 대처하기 위해서는 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 사전에 전망하고, 이를 근거로 신축성 있는 수자원정책을 개발하는 것이 필요할 것이다.

지구온난화로 인한 기후변화는 전지구스케일보다는 지역스케일에서 그 영향과 피해가 더욱 클 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2001). 따라서 전지구스케일에서 발생되는 기후변화뿐 아니라 각 지역에서 발생할 수 있는 국지적인 영향을 평가하는 것은 지역스케일의 현실적인 영향평가 및 정책개발을 위해 중요한 과정이라 할 수 있다. 일반적으로 기후변화에 따른 수자원의 영향을 평가하는데 이용되는 GCM(Global Climate Model)의 경우 수평해상도가 너무 낮아 우리나라와 같이 국토면적은 적으나 좁고 복잡한 지형을 가진 지역에서는 적용성이 떨어진다. 이러한 경우 GCM에서 생산되는 기후변화 시나리오를 상세화(downscaling)하는

\* 정회원·정회원·세종대학교 토목환경공학과 부교수·물자원연구소·E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

\*\* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사과정·E-mail : bobilwon@paran.com

\*\*\* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 석사과정·E-mail : chapter2nend@nate.com

과정이 요구된다. 상세화 방법에는 크게 통계적인 방법과 역학적인 방법이 있는데, 통계적 상세화는 지상관측소의 기후인자와 GCM에서 모의된 기후인자와의 관계를 도출하여 상세화하는 것이고, 역학적 상세화는 GCM의 결과를 RCM(Regional Climate Model)의 경계자료로 입력하여 상세화하는 것이다. 대부분의 GCM에서는 한반도 남반부가 바다로 표현되어 우리나라의 지형적인 특성이 반영되지 못한다. 따라서 이러한 GCM의 결과를 통계적으로 상세화하기 보다는 RCM을 이용하여 역학적으로 상세화하는 방법이 국내 기후변화 수자원 영향평가의 불확실성을 감소시킬 것으로 사료된다. 본 연구에서는 이와 같은 취지에서 기상연구소(2004)에서 생산된 고해상도( $20\text{km} \times 20\text{km}$ ) 기후변화 시나리오를 이용하여 국내 5대강수계 139개 유역에 대해 수자원의 변동성을 분석하고자 하였다. 소유역별 기후시나리오를 생산하기 위해 일기상발생기인 LARS-WG를 이용하였으며, 유출시나리오 생산을 위해 미국 USGS에서 개발된 PRMS 모형(Leavesley et al., 1983)을 이용하였다.

## 2. 기후 및 유출시나리오 생산

본 연구에서는 그림 1에서 제시된 바와 같이 139개의 소유역에 대해 기후변화 영향을 평가하고자 하였다. 유역구분은 수자원단위지도상의 단위유역을 기준으로 이용하였다.

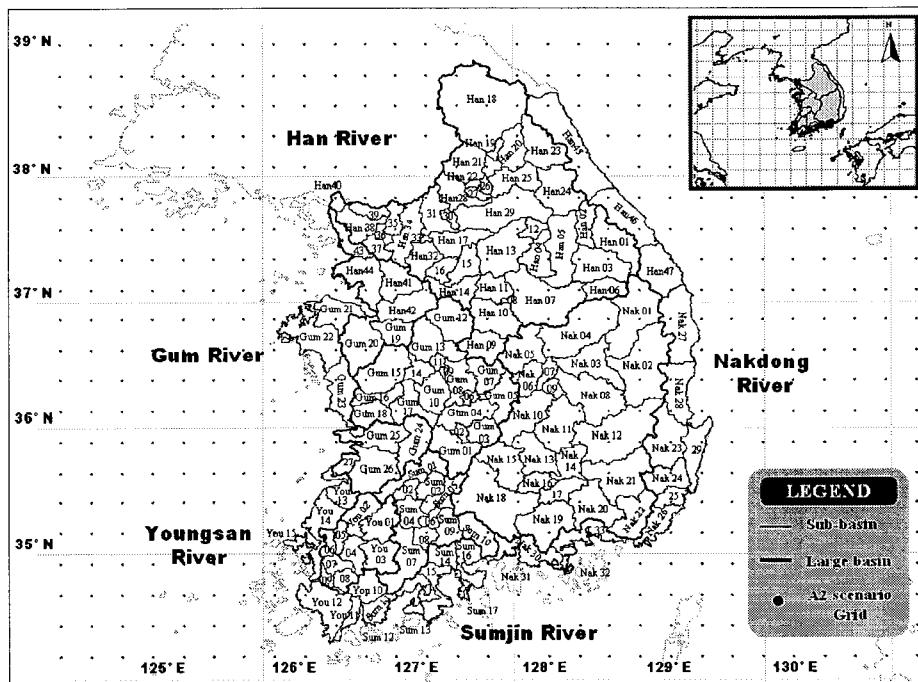


그림 1. 5대강 권역별 소유역 구분 현황

### 2.1 고해상도 기후변화 시나리오

전구기후모델(GCM)에서 남한 영역은 육지가 아닌 바다로 표현되거나, 저해상도에 따른 물리적 모수화(parameterization) 방안의 한계로 그 불확실성이 크기 때문에 국내의 기후변화를 적절히 평가하기 위해서는 상세한 시·공간 규모의 기후정보로의 전환이 요구된다(기상연구소, 2004). 기상연구소에서는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발된 전구기후모델(ECHAM4/HOPE-G, 이하 ECHO-G)을 도입하여 장기간(1860~2100년, 240년) 시나리오 모의실험을 수행하고 모사능력을 검증하였다. 이렇게 산정된 ECHO-G 모델의 결과를 지역기후모델인 NCAR/PSU MM5의 초기 및 경계조건으로 사용하여 고해상도의 기후변화 시나리오를 생산하였다. 이 기후변화 시나리오의 온실가스 배출 강제 조건은 IPCC의 SRES(Special Report on Emission Scenario)에서 제시된 A2 온실가스 배출시나리오이다.

## 2.2 소유역별 기후 시나리오 생산

지역기후모델(NCAR/PSU MM5)에서 생산된 고해상도 기후변화 시나리오는 ECHO-G 모델의 결과에 비해 국내의 시공간적인 기후특성을 잘 모의하나 아직까지 수자원 영향평가에 필요한 현실성 있는 기후모의에는 어느 정도의 한계를 지니고 있다(배덕효 등, 2007). 이러한 한계를 극복하고 현실성 있는 영향평가를 위해 일반적으로 일기상발생기(Weather Generator)가 이용된다. 본 연구에서는 LARS-WG(Semenov and Barrow, 2002)를 이용하여 유역별 기후시나리오를 생산하였다. LARS-WG는 국내 유역의 강수 및 기온 모의에 적용성이 있는 것으로 분석되었다(배덕효 등, 2007).

## 2.3 소유역별 유출시나리오 생산

생산된 유역별 기후시나리오를 이용하여 유출시나리오를 생산하기 위해 PRMS 모형이 이용되었다. PRMS 모형은 국내 유역에서의 장기유출분석에 적용성이 높은 것으로 알려져 있다(정일원과 배덕효, 2005). PRMS 모형은 유역을 수문학적 반응이 동질한 HRU(Hydrologic Response Unit)로 구분하고, 각 HRU별 유출분석 결과를 합하여 유역 유출량을 계산한다. 이 모형은 많은 매개변수를 GIS 자료를 이용하여 추정하므로, 미계측유역에서도 비교적 안정적인 장기유출분석이 가능할 것으로 사료되었다. 본 연구에서는 GIS 자료를 이용하여 추정가능한 매개변수는 추정하고, 추정이 어려운 매개변수들은 지역화방법(Jung and Bae, 2005)을 이용하여 결정하였다. 139개 유역에 대해 PRMS 모형을 구축하고 각 유역별 120년(1971년-2090년) 동안의 유출시나리오를 생산하였다.

## 3. 수자원의 시공간 변동성 분석

본 연구에서는 과거 30년(1971년-2000년) 동안에 대해 미래 세 기간(2001년-2030년, 2031년-2060년, 2061년-2090년)에 대한 수자원의 변동성을 분석하였다.

연평균유출량은 2015s(2001년-2030년) 기간에서 -12 ~ 14%, 2045s(2031년-2060년) 기간에는 -23 ~ 16%, 2075s 기간은 -14 ~ 20%의 변화 범위를 나타내었다. 2015s 기간에는 한강과 동해안, 낙동강하류 그리고 금강 북쪽에 위치한 유역에서 연평균유출량이 증가하고 나머지 유역에서는 감소할 것으로 분석되었다. 특히 한강 중하류와 한강동해안유역에서는 연평균강수량이 5 ~ 10% 증가됨으로 인해 연평균유출량이 6 ~ 14% 증가하였으며, 섬진강과 영산강유역에서 연평균강수량이 평균 약 5% 감소하여 -12 ~ -5% 정도 연평균유출량이 감소하였다. 2045s 기간에서는 한강하류와 한강동해안 일부유역을 제외한 대부분의 유역에서 연평균유출량이 감소하였다. 낙동강 중상류유역과 섬진강 및 영산강유역에서는 감소율이 -16 ~ -23%로 큰 감소를 보였는데, 이는 연평균기온이 2.7°C 증가함에 따른 증발산량의 증가와 연평균강수량의 감소에 따른 영향이다. 2075s(2061년-2090년) 기간에서는 연평균강수량이 전체적으로 증가함에도 불구하고 연평균기온이 평균 4.0°C 이상 증가함으로 인해 강수량의 증가율이 큰 한강중하류와 한강동해안 그리고 낙동강하류 일부 유역을 제외한 나머지 유역에서는 평균유출량이 최대 -14%까지 감소될 것으로 전망되었다.

한국과 같이 계절별 유출량의 변화가 큰 지역에서는 유출량의 계절적 변화로 인해 이수 및 치수를 위한 수자원관리에 어려움을 가중시킬 수 있다. 특히 봄철과 여름철의 유출량의 변화는 가뭄과 홍수에 밀접하게 관련되어 있으므로, 기후변화로 인한 계절변화를 평가하는 것은 중요하다. 계절별 유출량의 변화에서는 대부분의 유역에서 가을(9월-11월)과 겨울철(12월-2월) 유출량의 증가와 봄(3월-5월)과 여름철(6월-8월)의 감소 현상을 나타내었다.

유역별 증발산량은 모든 유역에서 기온 증가에 따른 영향으로 3 ~ 7%(2015s), 7 ~ 20%(2045s), 12 ~ 36%(2075s)로 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 기온의 증가율이 높은 내륙에 위치해 있는 유역일수록 증발산량이 클 것으로 전망되었으며, 봄과 여름철 유출량의 감소의 원인으로는 강수량 감소와 증발산량 증가에 따른 것으로 분석되었다.

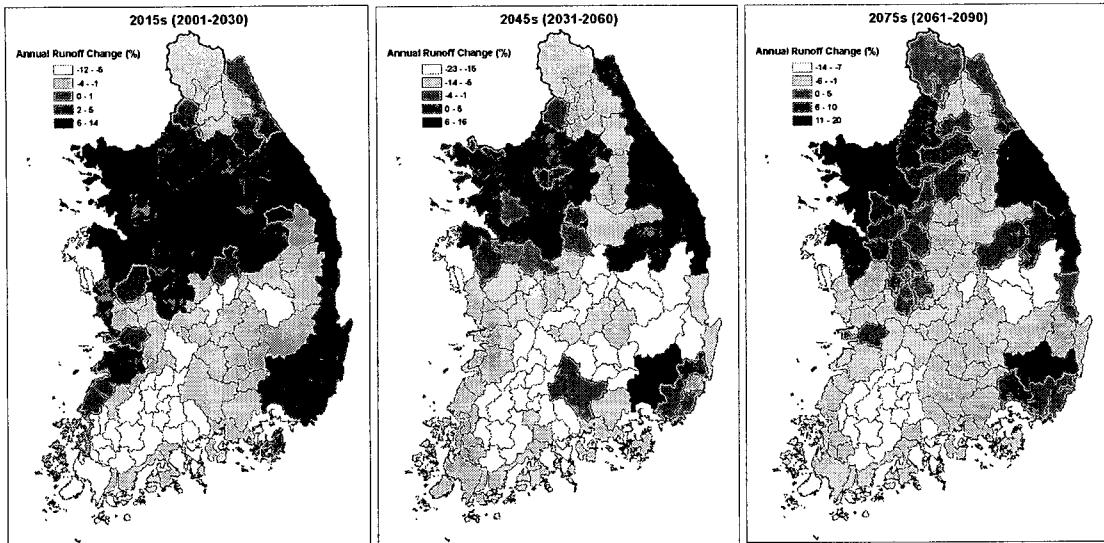


그림 2. 소유역별 연평균유출량의 변화율

#### 4. 극한사상의 변동성 분석

본 연구에서 분석한 결과 A2 시나리오 상황에서 봄과 여름철 평균유출량이 감소할 것으로 전망됨에 따라 여름철 홍수피해를 야기하는 큰 홍수사상의 규모 및 빈도가 감소하는지를 분석하였다. 소유역별로 유출량을 유출고로 변환하여 저수량( $Q \leq 5\text{mm}$ ), 평수량( $5\text{mm} < Q < 100\text{mm}$ ), 고수량( $Q \geq 100\text{mm}$ )으로 구분하여 발생빈도 변화를 분석하였다. 저수량의 경우 총 80개 유역(58%)에서, 2045s 기간에서는 총 124개 유역(89%)에서, 2075s 기간에서는 총 107개 유역(77%)에서 증가될 것으로 전망되었다. 이것은 저수유량이 지배적인 겨울철(12월~2월) 유출량의 증가로 인한 영향으로 분석된다. 고수량의 경우 전체 유역 중에서 2015s 기간에서는 70개(50%), 2045s 기간에서는 73개(53%), 2075s 기간에서는 106개(76%) 유역에서 빈도가 증가될 것으로 나타났다. 특히 2075s 기간에서 고수량의 발생빈도와 크기가 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 이것은 여름철의 평균유출량이 감소함으로 인해 홍수의 위협이 감소하는 것이 아니라 더욱 증가할 수 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다.

#### 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기후변화가 국내 수자원에 미치는 영향을 시공간적으로 분석하기 위해 고해상도 기후변화 시나리오를 이용하여 139개 소유역에 대해 수자원의 변동성을 평가하였다. IPCC SRES의 A2 온실가스 배출 시나리오에 근거하여 국내 수자원의 변동성을 분석한 결과 전반적으로 한강유역이 위치한 북쪽유역에서는 연평균유출량이 증가되고, 남쪽에 위치한 유역들에서는 감소할 것으로 전망되었다. 이것은 기온의 증가에 따른 평균증발산량의 증가에 따른 영향으로 나타났다. 계절별로는 봄과 여름철의 유출량은 감소하고, 가을과 겨울철 유출량은 증가할 것으로 분석되었다. 그러나 여름철 평균유출량의 감소에도 불구하고 고수량( $Q > 100\text{mm}$ )의 규모 및 빈도가 증가할 것으로 전망되었다.

기후변화에 따른 수자원의 영향을 평가하는 것은 많은 불확실성을 내포하고 있으므로, 향후 이러한 불확실성을 정량화하고 더 나아가 최소화할 수 있는 연구가 꾸준히 수행되어야 할 것이다. 이를 통해 장기수자원 계획에 직접적으로 활용 가능한 영향평가 결과가 수행된다면 안정적인 수자원 공급과 관리를 위한 기후변화 대응 및 적응 정책이 수립될 수 있을 것이다.

## 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)*.
- 배덕효, 정일원, 권원태 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역 별 기후시나리오 구축”, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.
- 정일원, 배덕효 (2005). “국내유역에서의 PRMS 모형의 적용성에 관한 연구”, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 713-725.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jung, I.W. and Bae, D.H. (2005). “Regionalization of a Continuous Runoff Model Parameters Based on Basin Physical Characteristics”, *XXXI IAHR Congress*, pp. 302-309.
- Leavesley, G.H., Lichly, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System : User's Manual*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 83-4238, pp. 1-207.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (2002). *A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies : User Manual*.