

MME(Multi-Model Ensemble)를 활용한 국가 수자원 기후변화 영향평가

Climate Change Impact Assessments on Korean Water Resources using Multi-Model Ensemble

배덕효*, 정일원**, 이병주***, 전태현****

Deg Hyo Bae, Il Won Jeong, Byung Ju Lee, Tae Hyun Jun

요 지

기후변화는 강수와 기온을 변화시켜 수자원에 지대한 영향을 미칠 것으로 알려져 있다. 따라서 이에 대한 안정적인 수자원 관리를 위해서는 기후변화 영향을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 기본적으로 기후변화에 대한 수자원의 영향을 연구할 때 ‘온실가스 배출시나리오, GCMs을 통한 기후모의, 시공간적 편차보정을 위한 상세화, 유출모형 적용을 통한 유출시나리오 생산’의 과정을 거친다. 그러나 유출시나리오를 얻기까지 과정에는 각각 불확실성을 가지고 있기 때문에 최종결과의 불확실성은 각 과정을 거치면서 매우 커진다고 할 수 있다. 다양한 배출시나리오, GCM 결과, 유출모형에 대해 단순평균 혹은 가중치를 주는 multi-model ensemble 기법은 각 경우에 따른 값의 범위를 제시할 수 있다는 점 때문에 불확실성 평가에서 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 우리나라 5대강 유역 109개 중권역에 대해 multi-model ensemble을 적용하여 기후변화에 의한 수자원 영향을 평가하였다. 1971년에서 2100년까지 120년 기간에 대해 3개의 온실가스 배출시나리오, 13개의 GCMs 결과들을 수집하여 총 39개의 기후시나리오를 이용하였고, 이를 8개의 유출모형에 적용하여 총 312개의 유출시나리오를 생산하였다. 생산된 유출시나리오를 기준시간(1971~2000)에 대한 미래의 세 기간(2020s, 2050s, 2080s)으로 나누어 변화율을 분석한 결과 여름철 유출량과 겨울철 유출량이 증가될 것으로 나타났으나 겨울철 유출량 전망은 여름철에 비해 불확실성이 큰 것으로 나타났다. 공간적으로는 한강유역이 위치한 북쪽유역이 남쪽에 비해 불확실성이 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 유출의 시공간적 편차에 의해 우리나라 수자원은 홍수피해 증가가 예상되었으며, 월별유출량의 변화로 인해 용수확보와 관리에 어려움이 증가할 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 기후변화, 유출시나리오, multi-model ensemble

1. 서론

기후변화는 강수와 기온을 변화시켜 수자원에 지대한 영향을 미칠 것으로 알려져 있다. 따라서 이에 대한 안정적인 수자원 관리를 위해서는 기후변화 영향을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 다만 기후변화에 따른 수자원 영향평가의 불확실성을 정량화하는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 다양한 불확실성 소스를 모두 고려하는 것이 불가능하기 때문이다. 그러나 안정적인 수자원공급과 관리를 위해서는 기후변화의 영향을 고려한 수자원 관리기술의 개발이 필요하다. 따라서 기후변화의 영향을 지역 수자원 관리에 반영할 수 있도록 하는 것은 매우 중요하면서 의미있는 연구이다. 이에 본 연구에서는 한국의 수자원이 기후변화로 인해 과연 어떠한 영향을 받을 것인지 그리고 그 결과에서 나타나는 불확실성은 어느 정도인지를 평가하고자 하였다. 이를 위해 온실가스 배출 시나리오, 기후모델, 유출모형에 따른 영향을 고려하여 수자원의 영향을 평가하였다.

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

** 정회원·포틀랜드 주립대학교 박사후 연구원·공학박사·E-mail : bobilwon@paran.com

*** 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사수료·E-mail : bjlee0704@paran.com

**** 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사과정·E-mail : chapter2@paran.com

2. 연구방법 및 자료

그림 1은 본 연구에서 적용한 multi-model ensemble 평가 방법이다. 전체 프로세스는 크게 기후전망, 다운스케일링, 수문모델링, 영향평가 순이다. 기후전망은 IPCC SRES 시나리오를 바탕으로 GCM을 이용하여 기후변화를 모의한 결과이다. GCMs은 역학적, 물리적 과정에 기초하여 온실가스 배출시나리오에 따른 대기/해양/지표에서의 변화를 객관적으로 제공할 수 있는 유용한 도구이다. 그러나 GCMs는 각기 다른 역학체계와 격자크기 및 매개변수화 과정, 물리과정으로 인해 모의결과가 모델별로 차이가 발생한다(IPCC, 2001). 따라서 하나의 GCM 결과를 이용하는 것은 모형의 bias가 지배적으로 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 다양한 GCMs 결과를 활용하여 GCMs에 따른 불확실성을 정량화 하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 3개 시나리오에 대해 13 GCMs 결과를 이용하여 배출시나리오와 GCM에 따른 불확실성을 평가하고자 하였다. Downscaling은 GCMs 결과의 bias를 보정하는 것으로 본 연구에서는 weather generator를 이용하였다. 일반적으로 수문모델링 부분에서 입력자료, 매개변수, 모형구조에 따른 불확실성이 발생한다. 이에 본 연구에서는 유출모형 구조에 따른 불확실성을 고려하기 위해 물리적 기반의 준분포형 유출모형인 PRMS, SWAT, SLURP 모형을 이용하였다. 또한, 기온변화에 영향을 받는 증발산량 산정방법에 따른 영향도 고려하기 위해 각 모형별로 2~3개의 증발산량 산정방법을 적용하였다. 마지막으로 본 연구에서는 영향평가 결과를 앙상블 평균뿐 아니라 그림 1에서 보는 바와 같이 확률분포로 제시함으로써 평가 결과가 가진 불확실성을 분석하고자 하였다.

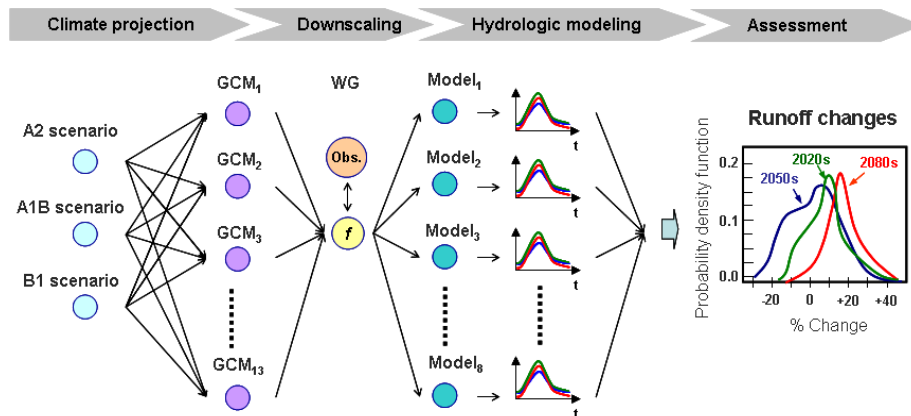


그림 1. GCMs와 수문모형앙상블을 이용한 기후변화 영향평가 이론

3. 적용 및 결과분석

3.1 GCMs 및 통계적 다운스케일링 적용

본 연구에서는 IPCC AR4 (Fourth Assessment Report)에 적용된 A2, A1B, B1 세 개의 시나리오에 대해 공통적으로 결과를 제공하는 13개 GCMs을 선택하여 이용하였다. A2 시나리오는 온실가스 배출에 관한 규제가 적용되지 않았을 경우의 시나리오(2100년 CO₂ 880ppm)이고, B1은 2100년까지 온실가스의 감축이 진행되었을 경우의 시나리오(2100년 CO₂ 550ppm)이다. A1B는 A2와 B1 사이의 시나리오로 IPCC AR4에서 기준 배출 시나리오(2100년 CO₂ 720ppm)로 이용되었다.

통계적 다운스케일링은 predictor variables의 GCMs 결과와 관측자료 사이의 통계적 관계를 이용하여 기후모델결과의 bias를 보정하는 것이다. 본 연구에서는 GCMs 결과의 bias를 보정하기 위해 weather generator인 WXGEN (Sharply and Williams, 1990)을 이용하였다. WXGEN은 관측기상자료의 통계적 특성을 이용하여 강수, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속 등의 일자료를 생산할 수 있다. 본 연구에서는 유출 모형의 입력자료를 생산하기 위해 먼저 WXGEN은 30년 이상의 관측자료를 보유한 57개 기상관측소 자료를 이용하여 검증하였다. 그 다음 월단위 GCMs 결과를 이용하여 기준기간에 대한 미래 3기간에서의 월평균 변

화량을 유역별로 산정하였다. 최종적으로 각 유역별 기간별 변화량을 WXGEN에 입력하여 기후를 모의하였다. 각 유역별 대표 기상관측소는 유역중심에서의 인접성을 고려하여 결정하였다(정일원 등, 2007).

3.2 유출모형 매개변수 검보정 및 지역화

본 연구에서는 계측유역에서 유출모형들의 매개변수를 추정하기 위해 다음과 같은 순서로 진행하였다. 먼저 GIS 자료를 이용하여 추정가능한 매개변수들을 추정하였다. 그 다음 나머지 매개변수들은 default 값을 적용하여 initial run을 한 다음 증발산량에 관련된 변수들을 조절하여 연평균 물수지와 월별 물수지를 조절하였다. 마지막으로 지표수, 중간, 지하수유출에 관련된 매개변수들을 보정하였다. 유출모형들의 매개변수를 추정하기 위해 댐별 유출량 자료기간을 보정기간과 검정기간으로 구분하여 보정기간에서 매개변수를 보정하고, 검정기간에서 매개변수의 적합성을 평가하였다. 유출모형의 지형관련 매개변수를 추정하기 위해 DEM, soils, vegetation types, land cover 자료를 Water management information system of Korea (<http://www.wamis.go.kr>)에서 수집하여 이용하였다. 섬진강유역을 제외한 나머지 유역에서 모든 모형들이 보정기간에서는 상관계수 0.85 이상, Nash-Sutcliffe efficiency 0.72 이상, 검정기간에서는 상관계수 0.85 이상, Nash-Sutcliffe efficiency 0.70 이상의 값을 보여 관측유량에 근사하게 모의하는 것으로 나타났다. 섬진강댐유역의 경우 갈수기인 겨울철에 유입량이 0 값을 가진 기간이 많아 통계치가 좋지 않게 나타났으나 전체적으로 관측치에 근접하게 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 6개 댐유역(괴산댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 섬진강댐, 용담댐)에서 보정된 매개변수를 3개 댐유역(소양강댐, 충주댐, 대청댐)으로 지역화하여 적용성을 평가하였다. 모든 모형들이 3개 유역에서 관측치에 근접한 유출분석이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구에서 적용한 PRMS, SWAT, SLURP는 지형자료를 이용하여 많은 매개변수들을 객관적으로 결정할 수 있으므로, 일부 매개변수의 지역화를 통해서도 신뢰성 있는 분석이 가능한 것으로 판단된다(정일원 등, 2008).

WXGEN의 기후모의 적합성을 검증하기 위해 각 57개 관측소별로 월평균 maximum & minimum temperature, precipitation, number of rainy day, wet/dry spell, wet/wet spell, solar radiation, and wind에 대한 t-test와 F-test를 수행하였다. 월평균값에서는 모든 지표들에서 유의수준 90% (p-value = 0.10) 내에서 유의한 것으로 나타났다.

3.3 강수와 기온 변화 분석결과

그림 2는 총 39 GCMs 결과를 이용하여 전체유역에 대한 기준기간에 대한 10년 단위의 연평균 강수량과 기온의 변화를 시계열 Box-Whisker 그래프로 나타낸 것이다. 연평균강수량은 뚜렷한 경향성을 보이지 않고 기준기간에 비해 평균 3-5% 정도 증가될 것으로 전망되었다. 그러나 기온은 꾸준히 증가하여 2090년경에는 기준기간에 비해 평균 2.8°C 증가될 것으로 전망되었다. GCMs 결과의 변동성 차이에서는 연강수량의 경우 2030-2050년에서 가장 작고 2090년경 가장 크게 나타났다. 그러나 기온에서는 기온증가와 더불어 미래로 갈수록 GCMs 결과의 차이도 증가하였다. 이것은 온실가스 배출시나리오의 차이가 미래로 갈수록 증가함에 따른 영향으로 판단된다. 결과적으로 한국에서는 기온에 비해 강수는 상대적으로 시나리오에 적게 영향을 받는 것으로 나타났다.

또한, 계절별 강수와 기온에 대한 시계열 Box-Whisker 그래프를 분석하여 계절별 강수량 변화에서도 연강수량에서와 유사하게 뚜렷한 trend는 나타나지 않음을 확인하였다. 그러나 계절별로는 변화시그널과 GCMs 결과 차이에서 뚜렷한 차이를 보였다. 특히 여름철 강수량의 뚜렷한 증가가 전망되었는데, GCMs 결과 차이도 가장 적게 나타났다. 여름철 강수량은 2010년경에서는 약 +12%, 2090년경에는 약 +17% 증가될 것으로 전망되었다. 이에 비해 겨울철 강수량에서는 변화시그널과 GCMs 결과 차이에서 큰 차이를 보였다. 겨울철 강수량은 2010년경에서는 약 +11%, 2090년경에는 약 +1% 증가될 것으로 전망되었다. 여름철 강수량의 변화가 겨울철 강수량 변화에 비해 상대적으로 일관되게 전망되었다. 봄철과 가을철은 겨울보다는 적고 여름철 강수 변화량보다는 적은 범위를 보였다. 기온에서도 계절별로 변화량과 GCMs 결과에서 차이를 보였다. 계절별 기온변화에서는 봄철과 가을철의 변화가 여름과 겨울철의 변화에 비해 상대적으로 적고 GCMs

별 결과 차이도 적게 나타났다. 앙상블평균에서는 2090년경 여름철 기온은 +3.6℃ 증가, 겨울철 기온은 +3.3℃ 증가할 것으로 제시되었는데, 이에 비해 봄철(가을)은 +1.5℃ (+2.4℃) 증가될 것으로 전망되었다.

본 연구에서는 5대강 유역의 월평균강수량과 기온의 변화량을 평가기간별로 분석하였다. 그 결과, 월별 강수량과 기온 모두 미래기간으로 갈수록 GCMs 결과들의 차이가 증가하였다. 또한, 월에 따라 GCMs 결과들의 차이가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 영향평가 결과에서 나타나는 불확실성이 월별로 다를 수 있다는 것을 나타낸다. 월강수량의 앙상블 평균값은 월별로 다른 경향을 보인 반면 기온은 모든 월에서 증가경향을 나타내었다. 월별강수량은 7월, 8월의 증가와 10월의 감소가 두드러지게 전망되었다. 이에 비해 기온은 1월이 가장 크게 증가할 것으로 전망되었으며, 4월이 가장 적게 증가될 것으로 나타났다. 유역별로는 뚜렷한 차이를 보이지는 않았지만 한강유역이 영산강, 섬진강유역에 비해 여름철 강수량과 겨울철 기온변화에서 다소 큰 변화량을 보였다.

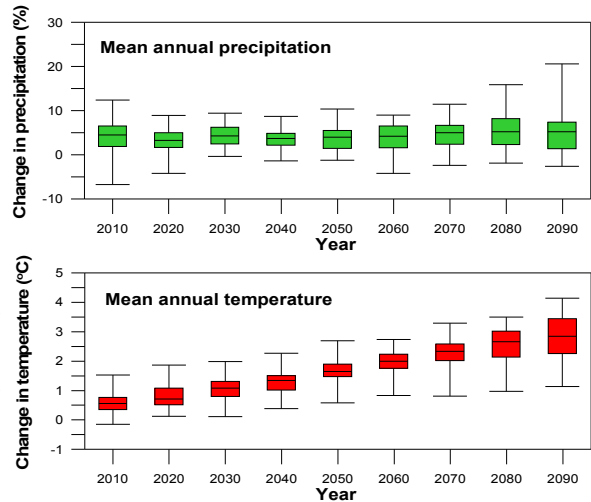


그림 2. 남한 유역의 기준기간(1971-2000)에 대한 10년 단위의 연평균 강수량과 기온의 변화에 대한 시계열 Box-and-whisker 그래프

3.4 증발산량과 유출량 변화 분석결과

본 연구에서는 5대강 유역의 월평균 실제증발산량과 유출량의 변화를 시기별로 분석하였다. 월평균 유출량 변화에서 나타난 뚜렷한 특징은 강수의 변화에 비해 결과의 범위가 크게 증가하였다는 점이다. 이것은 유출량의 변화에 강수량과 기온 변화뿐 아니라 유출모형에 따른 차이가 추가적으로 영향을 미쳤기 때문이다. 유출량에서 앙상블 평균값은 평가기간별로 큰 차이를 보이지 않았지만 결과차이는 더 먼 미래로 갈수록 증가되었다. 유역별로는 북쪽에 위치한 한강과 금강유역에서 다른 유역에 비해 결과차이가 다소 크게 나타났다. 모든 유역에서 크기의 차이는 있지만 공통적으로 5월과 10월 유출량의 감소 그리고 1월, 2월, 7월, 8월의 유출량의 증가가 전망되었다. 6월 유출량은 유역에 따라 차이를 보였는데, 섬진강과 영산강유역에서는 증가 나머지 유역에서는 감소할 것으로 전망되었다.

그림 3과 그림 4는 소유역의 연평균 실제증발산량과 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 각 유역별 결과는 312 (3scenarios × 13GCMs × 8 hydrological model) 결과를 앙상블 평균한 것이다. 평가기간별로 연평균 실제증발산량은 +1.7% (2020s), +3.7%(2050s), +6.2%(2080s), 연평균 유출량은 +13.1% (2020s), +13.2%(2050s), +14.3%(2080s)의 변화를 보였다. 공간적으로는 한강유역이 유역에서 가장 큰 변화(+29.2%, 2080s)를 보였으며 이에 비해 낙동강 하구쪽에서 가장 적은 변화(+0.1%, 2080s)를 나타내었다. 또한, 계절별, 월별 유출량에서도 연유출량에서와 유사한 공간적 변화를 보였으며, 유역별 차이는 더 크게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 한국의 수자원이 기후변화로 인해 받는 영향과 그 결과에서 나타나는 불확실성 정도를 평가하고자 온실가스 배출 시나리오, 기후모델, 유출모형에 따른 영향을 고려하여 수자원의 영향을 평가하였다. 본 연구에서는 온실가스 배출시나리오와 GCMs의 불확실성을 고려하기 위해 IPCC AR4에 적용되었던 3개 시나리오 (A2, A1B, B1)에 대한 13 GCMs 결과를 이용하였다. 또한, 유출모형 구조 및 증발산량 산정방법에 따른 영향을 고려하기 위해 PRMS, SWAT, SLURP 모형을 선정하고 각 모형별로 2-3개의 증발산량 방법을 고려하였다. 결과적으로 각 유역에 대해 312개의 결과가 제시되었으며, 이를 이용하여 확률밀도함수를 산정함으로써 앙상블 평균과 불확실성을 동시에 제시하였다. 한국의 109개 유역에 대해 미래 3기간에 대해 분석한 결과 여름철 유출량과 겨울철 유출량이 증가될 것으로 나타났으나 겨울철 유출량 전망은 여름철에 비해

불확실성이 큰 것으로 나타났다. 공간적으로는 한강유역이 위치한 북쪽유역이 남쪽에 비해 연유출량이 더 크게 증가될 것으로 전망되었다. 그러나 연유출량의 증가가 전망되었지만 이는 대부분이 여름철 유출량 증가에 기인한 것이다. 결과적으로 기후변화로 인해 한국의 수자원은 홍수피해 증가가 예상되었으며, 월별 유출량의 변화로 인해 용수확보와 관리에 어려움이 증가할 것으로 전망되었다.

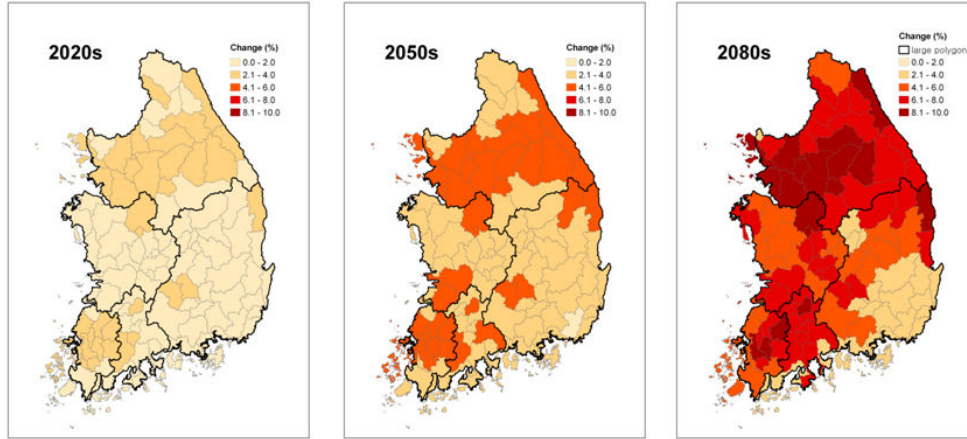


그림 3. 2020s, 2050s, 2080s별 소유역의 연평균 실제증발산량 변화

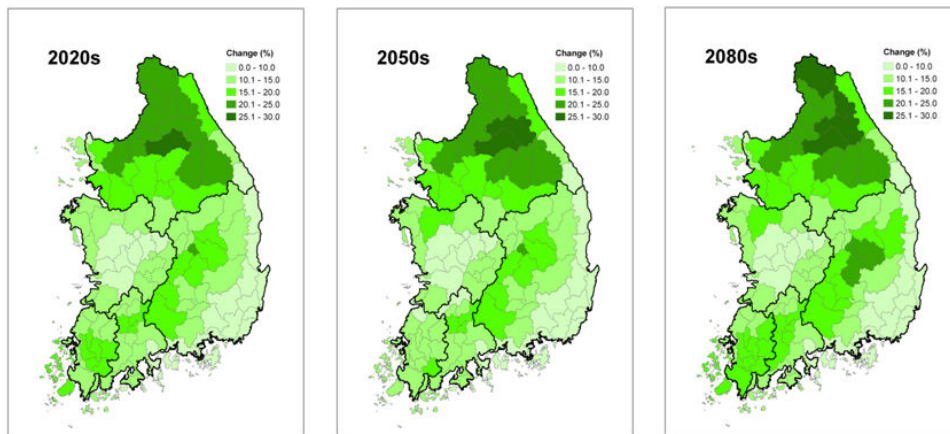


그림 4. 2020s, 2050s, 2080s별 소유역의 유출량 변화

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- 정일원, 배덕효, 임은순 (2007). “기후변화 수자원 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II); 유역별 유출 시나리오 구축”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp.205-214
- 정일원, 이병주, 전태현, 배덕효 (2008). “유출모형이 수자원의 기후변화 영향평가 결과에 미치는 영향분석, 한국수자원학회 논문집”, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp.907-917, 2008. 9.
- IPCC, 2001. Climate change (2001). The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Sharpley, AN, Williams, JR., 1990. Erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. U.S.Dept.ofAgric.,Washington,DC,Tech.Bul.1768.