

A2 시나리오를 활용한 5대강수계 유출변동성 분석

Analysis of streamflow variability on five large basin using A2 senario

정일원*, 구보영**, 배덕효***

Il-Won Jung, Bo-Young Koo, Deq-Hyo Bae

요 지

본 연구에서는 국내외적으로 이슈화되고 있는 기후변화가 국내 유역에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 기상연구소에서 구축한 고해상도의 A2 기후변화 시나리오를 이용하여 국내 5대강 수계에 대해 유출시나리오를 생산하고 결과를 분석하였다. 국내 유역을 139개의 단위유역으로 구분하고 LARS-WG 모형을 적용하여 유역별 기후변화 시나리오를 생산하였다. 지역화방법을 적용하여 유역별 장기유출분석 체계를 구축하였으며, PRMS 모형을 이용하여 총 120년에 대해 유출시나리오를 생산하고 과거 30년(1971-2000년) 동안에 대해 미래 세 기간(2001-2030년, 2031-2060년, 2061-2090년)에 대한 수자원의 변동성을 분석하였다. 각 유역에서의 기준기간에 대한 유출량의 변화율은 2015s 기간에서는 -12%~14%, 2045s 기간에서는 -23%~16%, 2075s 기간에서는 -14%~20%인 것으로 나타났다. 한강권역에서는 평균적으로 5%(2015s), 0.1%(2045s), 6%(2075s)로 다소 증가될 것으로 분석되었고, 낙동강권역에서는 0.1%(2015s), -10%(2045s), -3%(2075s)로 감소하는 것으로 나타났다. 섬영과 금강도 예측기간에 대해 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : Climate change, A2 기후변화 시나리오, 장기유출분석, PRMS

1. 서 론

전 세계적으로 연평균 재해건수와 피해액은 근래 들어 크게 증가하고 있으며, 우리나라도 예외는 아니어서 수 백년에 한번 발생할 수 있는 빈도의 호우가 발생하여 막대한 재산피해를 야기하기도 하였다. 2005년 8월말 미국 걸프만을 강습하여 미국 남부에 사상 최악의 자연재해로 기록된 허리케인 카트리나도 이러한 최근의 전세계적인 이상기후와 무관하다 할 수 없다. 기상청 발표에 따르면 국내에서 지난 50년간 강수일수는 감소한 반면 일강수량이 80mm 이상인 호우 일수의 발생빈도는 증가하는 추세를 보이고 있다고 한다. 이러한 변화는 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해의 강도를 증가시켜 사회·경제적으로 막대한 피해를 일으킬 수도 있다. 또한 기후변화는 수자원 요소의 변화를 야기해 안정적인 수자원 공급을 저해할 수 있으며, 효율적인 계획 수립에도 불확실성을 증대시킬 수 있다. 이러한 기후변화에 효율적으로 대처하기 위해서는 유역별 수자원의 향후 변동성을 예측하는 것이 선행되어야 하며, 이를 근거한 체계적인 적응방안 수립이 필요할 것이다.

지금까지 국내에서 기후변화에 따른 수자원의 영향에 관한 여러 연구가 진행되었으나 일부 유역에 대해서만 평가하였거나 시나리오의 적분기간의 짧다는 점 등으로 인해 국가 수자원 계획수립이나 여러 분야의 활용성 측면에서 한계가 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 기후변화로 인해 국내 5대강 유역에서 발생할 수 있는 수자원의 영향을 평가하기 위해, 기상연구소(2004)에서 구축한 고해상도의 기후변화 시나리오를 이용하여 국내 139개의 유역에 대해 수자원의 변동성을 평가하였다. 유출시나리오 생산에 필요한 장기유출분석을 위해 준분포형 모형인 PRMS 모형(1983)을 적용하였으며, 유역별 일단위 기후변화 시나리오 생산을 위해 일 기상발생기인 LARS-WG(Semenov and Brooks, 1999)를 이용하였다. 본 연구에서는 분석한 기간은 총 120년

* 정회원.세종대학교 토목환경공학과 박사과정-E-mail : bobilwon@paran.com
** 정회원.세종대학교 토목환경공학과 석사과정-E-mail : boyoungkoo@nate.com
*** 정회원.세종대학교 물자원연구소.토목환경공학과 부교수-E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

(1971-2090년) 동안으로 과거 30년(1971-2000년)을 기준(baseline period)으로 하여 미래 세 기간(2001-2030년, 2031-2060년, 2061-2090년)에 대해 유역별 수자원의 변동성을 분석하고자 하였다.

2. A2 시나리오를 이용한 수자원 영향평가 방법

2.1 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계

기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법으로는 크게 과거 관측자료를 이용해 변화 경향을 분석하는 방법과 대기순환모형인 GCM(General Circulation Model)과 수문모형을 이용하여 분석하는 방법으로 나눌 수 있다. 관측자료를 이용하는 방법은 주로 기후변화의 징후나 증거 분석에 이용되는 방법으로 과거의 실제 현상을 통해 기후변화의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있으나, 불확실성이 큰 미래 기후변화에 대한 영향을 분석하기에는 한계가 있다. 따라서 통상 물리적 이론을 기반으로 기후를 모의하는 GCM을 이용하는 방법이 적용하고 있다. 일반적으로 GCM에서 생산되는 기후변화 시나리오는 저해상도 자료로서 유역스케일의 유출분석에 직접적으로 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 GCM에서 생산되는 기후자료를 지역기후모형(RCM)이나 통계적 기법을 적용하여 GCM 결과를 유역규모로 다운스케일(Downscaling)하는 과정이 필요하다. 다운스케일된 자료는 일기상발생기(weather generator)를 통해 유역별 기후변화 시나리오를 생산하게 되며, 이를 유출모형에 입력하여 유출시나리오를 생산하고 수자원의 변동성을 평가하는 것이 일반적인 기후변화 수자원 영향평가 절차이다. 본 연구에서는 유출분석의 신뢰성을 높이기 위해 유출모형의 매개변수 추정에 필요한 수문자료를 수집 및 검·보정하였으며, 미계측유역의 유출분석을 위해 유출특성을 고려한 지역화방법(조복희 등, 2004)을 적용하였다.

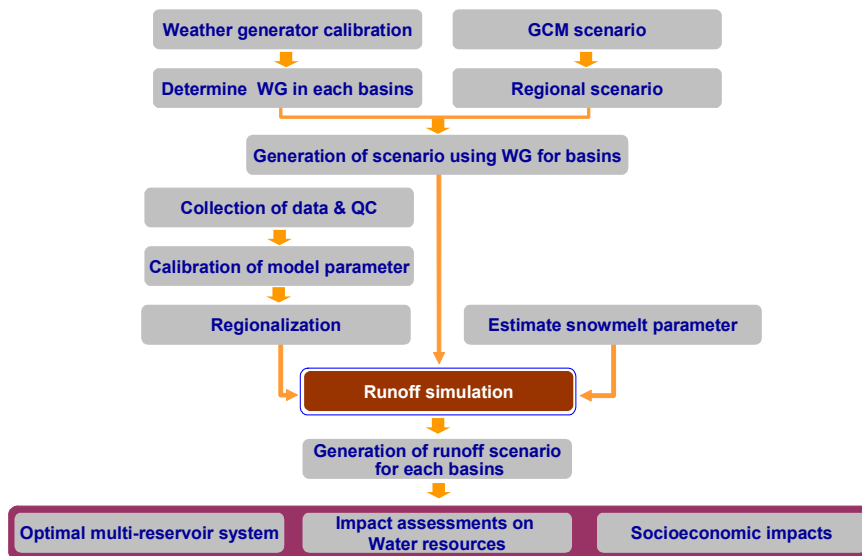


그림 1. 수자원 영향평가 및 분석 체계

2.2 A2 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오란 정부간 기후변화패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 온실가스 농도 증가 시나리오에 따라 전지구 기후변화모형을 장기적분하여 산출되는 자료를 의미한다. IPCC에서는 사회경제적 조건을 고려하여 다양한 온실가스 배출 시나리오를 제시하고 있다. 이 중에서 본 연구에서 적용하고자 하는 A2 시나리오는 높은 인구증가율, 높은 에너지 사용율, 토지피복의 빠른 변화와 점진적인 대안 기술의 개발 등의 가정하에 모의되는 시나리오이다. A2 시나리오 상황에서는 CO_2 배출과 농도가 급격히 증

가하여 2100년에는 이산화탄소 농도가 820 ppm에 이를 것으로 예측되고 있다.

본 연구에서 평가하고자 하는 A2 시나리오는 기상연구소 기후연구실에서는 “기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발” (2002-2004)의 일환으로 생산된 것이다. 자료 기간은 100년(2001-2100년)이며, 자료 형태는 30년(1971-2000년) 평균 월별값에 대한 편차자료로서 기온과 강수변화를 제공하고 있다. 자료 영역은 32.9684°N-43.426°N, 122.9348°E-131.4468°E이며, 격자 간격은 약 0.2432°(약 27 km)이다. 총 격자점수는 1584 개(36×44)로 구성되어 있다. 이 자료는 IPCC SRES(IPCC 온실가스 배출 시나리오에 관한 특별보고서)중에서 A2 시나리오를 ECHO-G 모델에 입력하여, 온실가스 증가에 따른 장기간 (1860-2100) 전지구 기후 변화 시나리오 자료를 생산한 것이다.

2.3 LARS Weather Generator

일기상발생기(Weather Generator)는 원래 미계측유역이나 결측치가 있는 유역의 기후자료를 생산하기 위한 목적으로 개발된 것으로 기후변화 영향평가에 많이 적용되고 있다. 이를 적용하는 가장 큰 이유는 현재까지 GCM에서 생산되는 기후자료의 신뢰성이 낮아 이를 직접적으로 적용해서는 다각적이고 신뢰성 있는 수자원 영향평가를 수행할 수 없기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 기상 관측지점에 대해 과거의 관측자료를 이용하여 일기상발생기의 매개변수를 검보정한 다음 GCM에서 예측한 미래 기후의 변동성을 입력하여 실제 유역별 기후특성을 반영하는 일단위 시나리오를 생산하는 과정이 필요하다.

본 연구에서 적용한 일기상발생기는 LARS-WG (Semenov and Barrow, 2002)이다. 기후변화 영향평가에 주로 적용되는 일기상발생기는 Richardson(1981)이 개발한 WGEN과 LARS-WG이다. Semenov 등(1998)은 두 모델을 많은 유럽 및 미국지역에 적용하여 모의 정확성을 평가한 결과 LARS-WG가 WGEN에 비해 적용성이 높다는 결론을 내렸다.

LARS-WG의 입력자료로는 강수량, 최고기온, 최저기온, 태양복사량 또는 일조시간이 요구된다. 모델은 입력자료를 분석하여 강수와 무강수일의 연속(wet and dry series)의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 월별 강수량의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 월최대·최소강수량, 월최고기온 및 최저기온, 일최고·최저기온, 지속적으로 최저기온이 0°C 보다 적은 날의 분포, 최대기온이 30°C 이상인 날의 분포 등의 인자를 산정하게 된다. 이렇게 산정된 인자들을 통해 기후자료를 생산하게 되는데, 우선적으로 인자들이 적절하게 산정되었는지를 분석하여야 한다. 이를 위해 LARS-WG에서는 Qtest 기능이 내장되어 있다. Qtest는 LARS-WG를 통해 모의되는 기후자료가 관측치에 얼마나 적합한지를 판단하는 것으로 t-test와 F-test를 통해 모의된 기후자료의 평균과 분산이 관측치 값과 동일한 모집단에서 생성된 자료인지를 분석하게 된다.

3. 5대강 수계 유출시나리오 생산 및 분석

기후변화 수자원 영향평가를 수행하기에 앞서 A2 시나리오 자료를 분석하였다. 평균강수량의 변화는 유역별로 차이는 있지만 대부분의 유역에서 기준기간에 비해 2015s(2001-2030년)에서는 증가, 2045s(2031-2060년)에서는 감소, 2075s(2061-2090년)에서는 증가하는 것으로 나타났다. 평균기온은 뚜렷한 증가경향을 보였으며, 2090년경에는 태백산맥지역을 제외한 모든 수계의 평균기온이 현재에 비해 약 6°C까지 증가할 것으로 예측되었다. A2 시나리오 자료의 계절별 특성을 분석한 결과, 봄철에는 강수량의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 금강일부유역에서 감소를, 한강 북쪽에서는 증가하는 것으로 나타났다. 여름철의 경우 2045s 기간에서 낙동강유역과 섬진강유역에서 강수량이 감소하는 것으로 나타났으며, 2075s 기간에서는 증가하였다. 가을철에서는 전체유역에서의 기간별 증가가 예측되었다. 겨울철 강수의 경우도 증가가 예상되었으며, 특히 2045s 기간에 많이 증가될 것으로 분석되었다.

A2 시나리오를 이용하여 기간별로 증가율을 산정한 다음 기상관측소에서 보정된 일기상발생기를 이용하여 유역별 기후시나리오를 생산하였다. 각 기간별로 월별 강수와 기온의 변화율을 산정하여 일기상발생기의 시나리오 조건을 적용하였다. 신뢰성 있는 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 수행하기 위해서는 강수일과 무강수일 연속(wet and dry series)의 변화뿐 아니라 월별 최고·최저기온의 평균과 표준편차의 변화 등도

고려되어야 한다. 그러나 본 연구에서 평가한 A2 시나리오는 월별 자료만을 제공하고 있어 현실적으로 이러한 인자들의 변화를 고려할 수 없어 월별 강수와 기온의 변화만을 고려하였다. 또한, 평균기온의 증가율을 최고·최저기온의 증가율과 동일한 것으로 가정하였다.

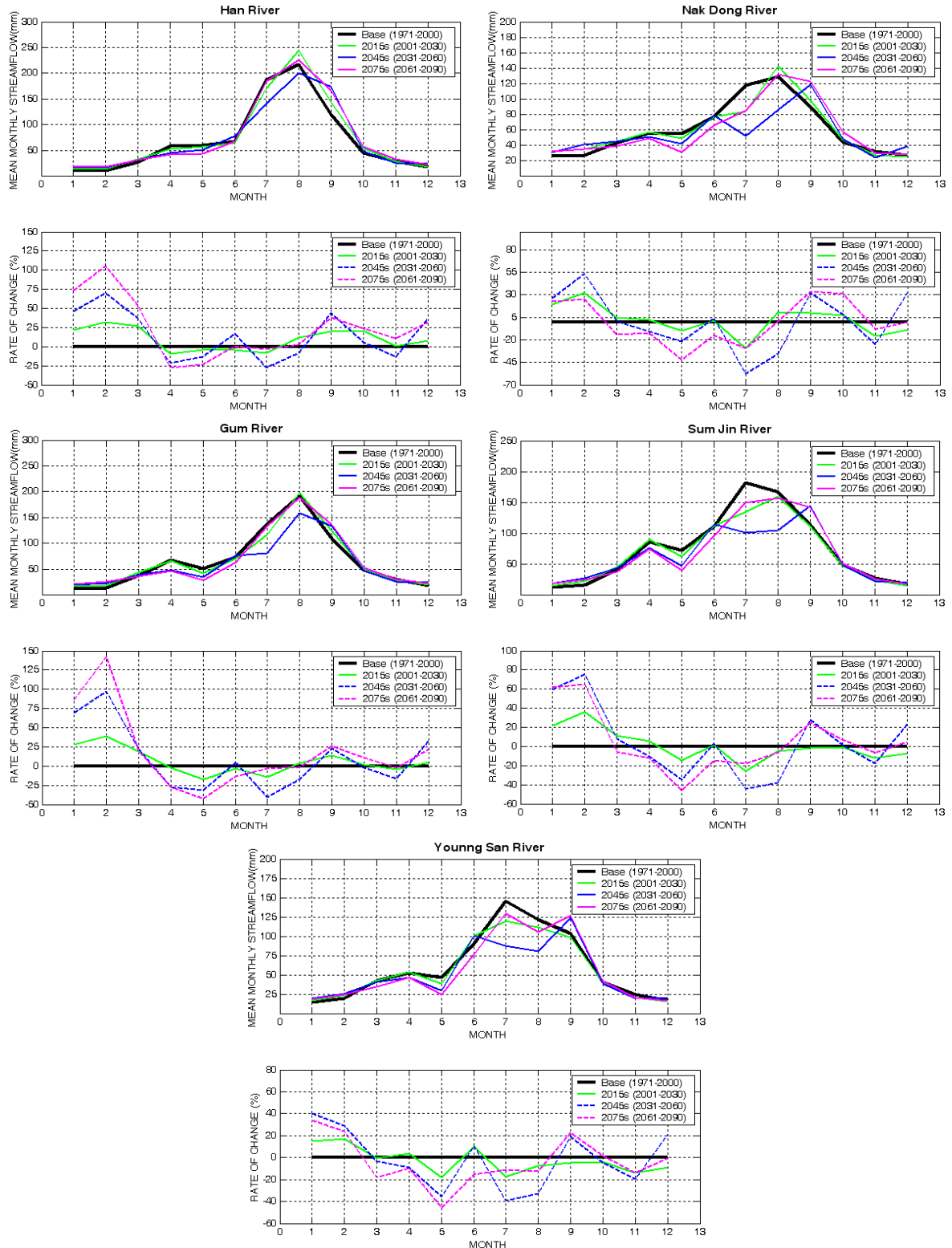


그림 2. 5대강 유역별 월평균유출량(위쪽) 및 기준기간에 대한 변화율(아래쪽)

유역별 평균유출고의 변화율을 분석한 결과 유역에 따라 기준기간에 대해 2015s 기간에서는 0.88~1.14, 2045s 기간에서는 0.77~1.16, 2075s 기간에서는 0.86~1.20인 것으로 나타났다. 한강권역에서는 1.05(2015s), 1.00(2045s), 1.06(2075s)로 꾸준히 증가하는 것으로 분석되었고, 낙동강권역에서는 1.00(2015s), 0.90(2045s), 0.97(2075s)로 감소하는 것으로 나타났다. 섬영과 금강도 예측기간에 대해 감소하는 것으로 분석되었다. 2075s에서는 거의 모든 유역에서 강수량이 증가함에도 불구하고 기온이 증가함에 따른 증발산량의 증가로 평균유출량이 감소하는 현상이 나타났다. 지역별로는 2015s 기간에서 한강유역의 대부분 유역과 동해안쪽에 위치한 유역에서 유출고 증가를 나타내었다. 2045s 기간에서는 한강하류와 한강동해안 유역을 제외한 나머지 유역에서 감소하는 것으로 나타났으며, 2075s 기간에서는 강수량의 증가에 따라 유출량도 대부분의 유역에서 증가하였다. 그림 2는 5대강 수계의 평균적인 월평균유출량의 변화와 기준기간에 대한 변화율을 도시한 것이다. 모든 유역에서 겨울철(12월-2월)과 가을철(9월)의 유출량이 증가할 것으로 분석되었으며, 봄(3-5월)과 여름철(7-8월)의 유출량은 감소할 것으로 분석되었다. 이것은 수계내에 포함된 단위유역별 결과들의 평균으로 실제 단위유역별 분석에서는 이와 상이한 결과도 분석되었다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위해 기상연구소에서 구축한 고해상도의 A2 기후변화 시나리오를 이용하여, 국내 5대강 수계에 대해 유출시나리오를 생산하고 결과를 분석하였다. 국내 유역을 139개의 단위유역으로 구분하고 LARS-WG 모형을 적용하여 유역별 기후변화 시나리오를 생산하였다. 지역화방법을 적용하여 유역별 장기유출분석 체계를 구축하였으며, PRMS 모형을 이용하여 총 120년에 대해 유출시나리오를 생산하고 과거 30년(1971-2000년) 기간에 대해 미래 세 기간(2001-2030년, 2031-2060년, 2061-2090년) 동안의 수자원 변동성을 분석하였다. 각 유역에서의 기준기간에 대한 유출량의 변화율은 2015s 기간에서는 -12%~14%, 2045s 기간에서는 -23%~16%, 2075s 기간에서는 -14%~20%인 것으로 나타났다. 한강권역에서는 평균적으로 5%(2015s), 0.1%(2045s), 6%(2075s)로 다소 증가될 것으로 분석되었고, 낙동강권역에서는 0.1%(2015s), -10%(2045s), -3%(2075s)로 감소하는 것으로 나타났다. 섬영과 금강도 예측기간에 대해 감소하는 것으로 분석되었다. 이 자료는 향후 신뢰도 검증과 다양한 분석을 통해 유역별 기후변화에 따른 수자원 요소의 변동성 평가에 활용될 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소 기후연구실 (2004). 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발. 조북회, 정일원, 배덕효 (2004). "PRMS 모형의 매개변수 지역화에 관한 연구", 대한 토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집, pp. 743-747.
- Leavesley, G.H., Lichty, 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.
- Richardson, C.W. (1981). "Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation", *Water Resources Research*, vol. 17, pp. 182-190.
- Semenov M.A. and Brooks R.J. (1999). "Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain", *Climate Research*, Vol. 11, pp. 137-148.
- Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M. and Richardson C.W. (1998). "Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates", *Climate Research*, vol. 10, pp. 95-107.