A1B기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출량 전망

Outlook of Discharge for Daechyeong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model

박진혁* / 권현한** / 노선희***

Park, Jin Hyeog / Kwon, Hyun-Han / No, Sun-Hee

Abstract

In this study, the future expected discharges are analyzed for Daechyeong and Yongdam Dam Watershed in Geum River watershed using A1B scenario based RCM with 27 km spatial resolutions from Korea Meteorological Agency and SWAT model. The direct use of GCM and RCM data for water resources impact assessment is practically hard because the spatial and temporal scales are different. In this study, the problems of spatial and temporal scales were settled by the spatial and temporal downscaling from watershed scale to weather station scale and from monthly to daily of RCM grid data. To generate the detailed hydrologic scenarios of the watershed scale, the multi-site non-stationary downscaling method was used to examine the fluctuations of rainfall events according to the future climate change with considerations of non-stationary. The similarity between simulation and observation results of inflows and discharges at the Yongdam Dam and Daechyeong Dam was respectively 90.1% and 84.3% which shows a good agreement with observed data using SWAT model from 2001 to 2006. The analysis period of climate change was selected for 80 years from 2011 to 2090 and the discharges are increased 6% in periods of 2011~2030. The seasonal patterns of discharges will be different from the present precipitation patterns because the simulated discharge of summer was decreased and the discharge of fall was increased.

Keywords : RCM, SWAT, discharge, downscaling, GCM, A1B scenario

요 지

본 연구에서는 금강유역 내 대청댐 및 용담댐유역을 대상으로 기상청에서 제공하는 공간해상도 27km 지역규모의 A1B시나리오 기반의 RCM모형과 SWAT모형을 이용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 기본적으로 GCM 및 RCM은 시공간적 스케일의 상이성으로 인해 수자원 영향 평가를 위한 자료로서 직접적인 이용은 현실적으로 곤란하다는 점에서 본 연구에서는 RCM 격자자료를 유역단위에서 강우관측소 지점 단위로 공간적 다운스케일링을 실시하였으며 RCM 월자료에 대해서 일단위 자료로 시간적 다운스케일링을 수행하여 기후모델로부터 발생하는 시공간적 스케일의 문제점을 극복하였다. 또한 유역단위의 상세수문시나리오를 생산하기 위해서 다지점 비정상성 다운스케일링 기법을 활용하여 기존 일강수량 모의기법에서 간과되었던 비정상성을 고려하여 미래 기후변화에 따른 강수사상의 변동성을 다양한 방법으로 검토하였다. 2001~2006년 기간 동안 SWAT모형을 이용하여 용담댐 및 대청댐 지점의 유입량과 SWAT의 최종방류부의 유출량 분석값을

* K-water 수자원연구소 책임연구원 (e-mail: park5103@kwater.or.kr)
Principal Researcher, KIWE, K-water, Daejeon 306-711, Korea.

** 교신저자, 전북대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr)
Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Korea.

*** K-water 수자원연구소 위촉연구원(e-mail: tjsgmish2022@kwater.or.kr)
Researcher, KIWE, K-water, Daejeon 306-711, Korea.

비교한 결과 모의치와 실측치가 각각 90.1%, 84.3% 일치하는 것으로 나타나 적용성이 있음을 확인하였다. 기후변화 분석기간은 2011년부터 2090년까지 80년을 대상기간으로 선정하였으며, 분석결과 2011~2030년 사이 유출량이 6% 증가하는 것으로 전망되었고, 유출량의 계절적 변화는 여름철의 유출량이 감소하고, 가을과 겨울철의 유출량이 증가하는 것으로 나타나 지금과는 강우의 패턴이 변화될 것으로 예상된다.

핵심용어 : RCM, SWAT, 유출량, 다운스케일링, GCM, A1B시나리오

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체인 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)의 제 4차 평가보고서에 의하면 현재 기후변화가 발생하고 있는 것은 자명한 사실이며 기후변화는 자연적 요인이 아닌 인간활동에 의한 것이라고 지목하였으며 금세기에는 심각한 기후변화를 겪게 될 것이라고 발표하였다. 특히 수자원분야에서는 지구온난화에 의한 강수량의 변동으로 홍수와 가뭄의 취약성은 더욱 증가할 것으로 전망되고 있다. 이처럼 기후변화에 따라 심각해지고 있는 수자원문제에 대응하기 위해서는 우선 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 평가하는 것이 필요하다.

기후변화에 대한 영향평가를 위해서는 기후시나리오, 전지구모형 (GCMs, General Circulation Models), 다운스케일링 (downscaling) 기법, 강우-유출모형의 순으로 매우 많은 과정을 거쳐야 하며, 각 과정을 거치면서 불확실성이 점점 커지고 있다. 이렇게 발생한 불확실성은 미래 기후변화에 따른 적응전략에 영향을 줄 수밖에 없기 때문에 기후변화에서의 불확실성을 인정하고 줄여나가는 연구가 필요하다 (이재경 등 2009). 기후변화에 관한 그 동안의 연구들은 시기적으로 조금씩 다른 관점을 가지고 연구되어 왔다. 1990년대 중반까지는 기후변화에 대한 이해와 미래의 기후변화 발생여부에 관한 연구가, 그 이후로는 기후변화가 우리의 지역이나 물순환에 미치는 영향에 관한 연구가 진행되었으며, 최근에는 기후변화의 불확실성을 줄이고 정량적인 예측을 통한 대처방안에 관한 연구들이 주를 이루고 있다. 현재 국내에서 미래 기후변화에 대한 유역의 수문평가 연구 (과학기술부, 2007, 국토해양부, 2007, 이재경과 김영오, 2010, 배덕효 등, 2007, 황준식 등, 2007)가 진행되고 있지만, 서로 다른 배출시나리오, GCM, 수문모형, 상세화기법을 사용하는 등 기후변화 연구의 불확실성으로 인해 동일유역이라 하더라도 매우 상이한 결과를 제시하고 있어 실제 관련정책에는 반영되지 못하고 있는 실정이다 (K-water 연구원, 2010).

본 연구의 대상유역권을 대상으로 한 과거 기후변화 관련 연구를 보면, 윤용남 등 (1999)은 GCM으로부터 얻은 결과를 중·소규모 대기-수문모형에 적용하여 CO₂ 배증에 따라 금강유역의 봄철 강수량이 감소할 것으로 분석하였으며, 서용원 등 (2000)은 대기 중 이산화탄소의 농도가 2배로 증가한 상태의 기후변화를 가정하여 얻은 금강유역의 유출 시나리오를 적용한 대청댐의 저수지 운영모의에 대하여 기술하였으며, 김용태 등 (2000)은 기존에 실시된 한반도 2CO₂ 상태에서의 GCM자료의 분석결과를 활용하여 2CO₂ 상태의 강수량과 기온의 변화를 파악하였으며 NWS-PC모형을 이용하여 대청댐 유역의 유출특성의 변화를 분석하였다. 안재현 등 (2001)은 GCM결과를 이용하여 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온변화를 분석하여 물수지모형을 이용한 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 수문환경 변화를 분석하였다. 그 결과 증발산량은 평균 14.7% 증가하고 토양함수비는 감소하였으며 대청댐 상류 유역의 유출량은 평균 3.4%정도 증가할 것으로 예측하였다. 또한 유출량의 계절적 변화로는 여름과 가을에 증가하고 겨울에는 감소가 뚜렷할 것으로 분석하였다.

김용태 등 (2004)은 GCM모의 결과를 Markov연쇄 추계모형에 적용하여 장래의 기온과 강수량을 모의발생시킨 후, NWS-PC모형을 이용하여 대청댐 상류 유역을 모의한 결과 봄과 겨울철에서는 유출이 감소하고 여름철에는 시나리오에 따라 -14~8%의 변화를 보일 것으로 전망하였다. 김병식 등 (2004)은 YONU GCM을 이용하여 기후변화 시나리오를 생산하고 통계적인 방법으로 상세화한 다음 용담댐유역에 대하여 SLURP모형을 이용하여 기후변화가 용담댐유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 평가하였는데 연평균 유출량은 감소하였고, 계절별로는 겨울철과 가을철의 유출량은 증가하고 여름철은 감소하는 결과를 도출하였다. 예령 등 (2009)은 대청댐 유역을 대상으로 SWAT모형을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 유출량 및 토양 유실량 변화를 전망하고 이것이 대청댐 저수지에서 탁수 발생 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 금강유역 내 용담댐 및 대청댐유역을 대상으로 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 사용하기 위하여 기후변화정보센터 (2010)에서 제공하는 공간해상도 27 km 지역규모의 A1B 시나리오기반의 RCM (Regional Scale Model)모형과 SWAT모형을 이용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 기본적으로 GCM 및 RCM은 시공간적 스케일의 상이성으로 인해 수자원 영향 평가를 위한 자료로서 직접적인 이용은 현실적으로 곤란하다는 점에서 본 연구에서는 RCM 격자자료를 유역단위에서 강우관측소 지점 단위로 공간적 다운스케일링을 실시하였으며 RCM 월 자료에 대해서 일단위 자료로 시간적 다운스케일링을 수행하여 기후모델로부터 발생하는 시공간적 스케일의 문제점을 극복하였다. 또한 유역단위의 상세수문시나리오를 생산하기 위해서 다지점 비정상성 다운스케일링 기법을 활용하여 기존 일강수량 모의기법에서 간과되었던 비정상성을 고려하여 미래 기후변화에 따른 강수사상의 변동성을 얻, 계절별로 검토하였다.

2. 기후변화 시나리오 작성

2.1 GCM 및 시나리오 선정

GCM은 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자시스템으로 구성하고 각 격자점에서의 대기 상태를 지배하는 방정식 (운동량, 연속, 정역학, 열역학, 상태 방정식 등)을 시간적분하여 지구의 대기상태를 재현 및 예측하는 모형이다 (안재현 등, 2001). GCM을 이용한 수문기상학적 분석을

실시하기 위해서는 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의 유역에 대한 분석을 실시하거나, GCM결과를 경계조건으로 한 후 RCM모형을 사용하여 국지규모에 대한 분석을 실시하는 방법 등이 주로 이용되고 있다.

기상청 국립기상연구소는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 도입한 대기-해양 결합모형인 전지구 기후모형인 ECHO로부터 전지구 규모의 기후예측을 산출하였는데, ECHO-G는 대기모형과 해빙-해양모형 그리고 두 모형의 결합을 위하여 OASIS라는 소프트웨어를 이용하였다 (권현한 등, 2009a). 대기모형과 해양모형의 해상도는 각각 약 400 km와 300 km이며 전지구 기후모형에서 산출된 결과를 이용, 동아시아지역 및 한반도의 미래기후를 예측하게 되는데 이 때 사용되는 지역기후모형으로는 미국 펜실베이니아 대학에서 개발한 MM5로 역학적 규모축소법이 적용되며 전지구 약 400 km를 약 27 km로 상세화하여 한반도 미래 기후 예측자료를 작성하게 된다 (Fig. 1).

본 연구에서는 기후변화시나리오의 신뢰성을 위하여 국립기상연구소 기후연구팀에서 “기후변화 협약 대응 지역기후시나리오 활용기술개발” (2005~2007)의 일환으로 생산한 A1B 시나리오자료를 사용하였다. A1B시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하는 시나리오로 대기 중 이산화탄소의 농도는 2100년경 720 ppm까지 도달할 것으로 예상되는 시나리오로써, 화석에너지 및 고효율 에너지원이 균형 있게 사용된다고 가정하며 현실에 가장

Fig. 1. GCM and RCM of NIMR (National Institute of Meteorological Research)

잘 부합되는 시나리오이다 (권영아 등, 2007).

2.2 비정상성 Markov Chain 모형

기후변화에 따른 수자원 영향에 실질적인 평가를 위해서는 기후변화 시나리오가 가지는 편의문제, 불확실성문제, 시공간적 스케일의 상이성 등을 고려한 상세기후변화 시나리오 기법의 적용이 필수적이다. 현재까지 개발된 GCM이나 RCM 등의 기후변화 시나리오는 실제 관측된 강수의 특성을 재현하지 못하는 문제점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있으며 수자원 분야에 직접 적용하기 위해서는 일반적으로 통계학적 다운스케일링을 통해서 기후변화 영향을 유역단위의 상세수문시나리오로 재생산이 필요하다. 본 연구에서는 댐별 상세강수시나리오를 생산하기 위해서 다지점 비정상성 Markov Chain 모형을 활용한 다운스케일링기법을 도입하였다. 비정상성 다운스케일링기법은 기후변화와 같은 외부인자를 동적으로 받아들일 수 있도록 고안된 모형으로서 강수지점 단위로 강수시계열을 재현할 수 있으며 이를 활용하여 실질적인 기후변화 영향을 검토할 수 있다.

일반적으로 무작위 시계열 자료간의 계열 상관성과 미래의 상태를 현재와 과거의 상태들과의 상관관계 분석만으로 추계학적으로 추출하는 과정을 Markov과정이라고 하고 한정적인 상태공간에서의 Markov 과정을 Markov Chain이라 한다. 본 연구에서 다룰 일강수량 자료계열은 유출량 자료계열에 비하여 유연성이 크고 수문학적인 지속성이 결여된 시계열 자료로써 이와 같은 경우 Markov Chain을 적용하면 그 특성을 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다 (Nord, 1975). 시계열의 바로 이전의 상태에만 상관성이 있다고 보는 경우를 1차 Markov Chain이라고 하며 일반적으로 Markov Chain이라고 하면 1차 Markov Chain을 말하는 것이다. Markov Chain의 기본개념 (권현환과 김병식, 2009b)은 어떠한 계의 움직임을 예측하고자 할 때 그 계의 과거이력을 통해 미래 상태를 예측하는 것이다 (Hann et al., 1976). 따라서 미래상태의 확률은 과거에 의존하므로 조건부 확률은 다음과 같다.

$$p(X_{n+1}|X_n, X_{n-1}, \dots, X_1) \quad (1)$$

여기서, 상태 X_{n+1} 은 현재의 상태, $X_n, X_{n-1}, \dots, X_1$ 은 과거의 상태를 나타내며 미래의 상태는 과거의 상태와는 독립이며 단지 시스템의 가장 근접한 현재의 상태에 의해서만 영향을 받는다면 이때 Markov Chain의 성질은 다음과 같은 조건부 확률로 아래와 같다. 이러한 과정을 1차 Markov Chain이라 한다.

$$p(X_{n+1}|X_n) \quad (2)$$

습윤 기간 내의 강수량 간에는 종종 작은 값의 계열상관이 존재하고 있으나 종속성이 있다고 보기에는 무리가 많다. 따라서 습윤일의 강수량 거동을 모형화하기 위하여 연속하는 사상 간의 독립성을 가정하여 이론적인 분포를 적합 시키는 방법이 있다.

강우일에서 강우일 또는 무강우일에서 강우일로 전개되는 과정을 강수의 천이과정이라 하며 이를 정의하는 확률을 천이확률 (transition probability)이라 한다. 모의되는 강수일의 하루전날의 강수의 상태만을 고려하는 모형을 상태-2 1차 Markov Chain모형이라 하며 각 상태공간에 존재하는 강수사상의 수인 벡터 (S)와 사상의 발생과 비발생의 확률을 나타내는 천이확률 (P_{tr})은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P_{tr,i,j} = \frac{[S_{i,j}]}{\sum_{j=1}^2 S_{i,j}} \quad (3)$$

여기서, 행렬의 원소 $P_{tr,i,j}$ 는 상태 i 에서 상태 j 로 천이되는 확률을 나타내며 상태 S_i 에서는 반드시 $S_{1,1}, S_{1,2}, S_{2,1}, S_{2,2}$ 중 한 곳으로 천이되므로 천이확률의 각 행의 합은 반드시 1이 된다. Eq. (3)으로 표현되는 천이확률 (transition probability)의 각 원소는 모두 0보다 크거나 같으며, 각 행의 원소의 합이 1일 때의 행렬을 확률행렬 (probability matrix)이라 정의 한다. 각각의 확률행렬은 하나의 Markov 과정을 정의하며, 강우 발생여부를 판단하게 된다. 따라서 천이확률 P_{tr} 을 추정하게 되면 Markov Chain의 초기 상태만을 통해 강수발생을 모의할 수 있다.

본 연구에서는 일강수량 모의모형에서 시간에 따라 변화하며 대규모 기상순환과 같은 외부인자에 영향을 받는 일강수량의 특성을 고려하여 비정상성 Markov Chain모형 (권현환과 김병식, 2009b)을 이용하였다. 이 모형은 추계학적 모형인 Markov Chain과 통계학적 다운스케일링모형을 결합한 방법으로 비조건부 Markov Chain모형의 매개변수 (4개)를 외부 인자와 연결하기 위하여 회귀분석이 이용된다. 이 매개변수들은 무강수에서 강수로 진행되는 천이확률, 강수에서 강수로 진행되는 천이확률, 강수량을 모의하기 위한 Gamma 확률분포의 축적매개변수와 형상매개변수로 구성되며 이들은 물리적으로 일강수량모의시 계절적 강수량의 총량은 외부인자로부터 그리고 천이확률과 강수일 등 일강수량 자체 특성은 강수지점의 원자료로부터 유도된다.

Fig. 2. Concept of the Multi-site Non-stationary Downscaling Model

3. 강우-유출 모형

수자원영향평가를 위한 유출분석은 고해상도 기후변화 시나리오를 유출모형에 적용하여 유역별 유출 시나리오를 생산하고 분석하여 수자원의 변동성을 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위해서는 장기유출분석을 수행할 수 있는 유출모형의 선정 및 입력 자료의 구축이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 A1B시나리오에서의 일단위 유출모의를 위해 기존 국내외의 연구성과나 유출모형의 인지도, GIS자료의 활용성, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하여 준분포형모형인 최신 버전의 ArcSWAT모형을 선정하였다.

SWAT모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 유역모형으로서 일단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 강우-유출모형으로 대규모 유역에서 장기간에 걸친 토지이용에 따른 물과 유사, 비료 및 농약 등 오염물질의 거동에 대한 해석과 토지관리 방법에 따른 영향을 예측하기 위해 개발되었다. SWAT모형은 1990년대 초에 개발되어 현재도 기능이 계속 확장 중인 모형으로서 초기 버전인 AVSWAT96.2 버전에서는 기후변화에 따른 농업생산성을 평가하기 위해 CO₂ 항목이 추가되었으며, SWAT2000 버전에서는 기상발생기능이 추가되었다. 본 연구에 사용한 ArcSWAT2005는 기존의 ArcView 3.x 기반에서 확장

되어 구동되었던 AVSWAT에서 벗어나 GIS 최신버전인 ArcGIS 9.x에서 구동되어 좀 더 쉬운 사용자 인터페이스를 구현한다 (Olivera et al., 2006, 예령 등, 2009). SWAT 모형의 입력자료는 유역 전반에 걸쳐 적용되는 유역 매개변수와 각각의 소유역별로 입력되는 자료 및 각 소유역에 대하여 HRU (Hydrologic Response Units)별로 입력되는 자료로 구성되어 있다. 크게 GIS와 수동입력을 병행하여 작성되는 기상자료, 소유역자료, 하천특성자료, 지하수자료 등으로 구분할 수 있다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 HRU별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다.

SWAT에서 모의되는 수문순환은 물수지 방정식에 근거하며, 물수지 방정식은 Eq. (4)와 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

여기서, SW_t 는 최종의 토양수분량 (mmH₂O), SW_0 는 i 일의 초기토양수분량 (mm), t 는 시간 (일), R_{day} 는 i 일에서의 강수량 (mm), Q_{surf} 는 i 일에서의 지표유출량 (mm), Ea 는 i 일에서의 증발산량 (mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로 투수되는 총량 (mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀량 (mm)이다.

SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확하게

예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 HRU 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서는 지표면 유출을 평가하기 위해 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있다. 본 연구에서는 SCS 유출곡선법을 선택하여 유출모의에 이용하였다. SCS 유출곡선법은 다양한 토지이용과 토양형태 하에서 유출량을 추정하기 위한 일관성 있는 기준을 제공하기 위하여 개발되었으며, SCS 유출곡선식은 Eq. (5)와 같다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (5)$$

여기서, Q_{surf} 는 누가유출량 또는 초과강우(mmH₂O), R_{day} 는 일 강우량(mmH₂O), I_a 는 유출 이전의 지면 저류 차단과 침투를 포함하는 초기손실(mmH₂O), S 는 저류 매개변수(mmH₂O)이다.

저류 매개변수는 토양, 토지이용, 관리와 경사의 변화에 따라 공간적으로 변화하며, 토양수분함량의 변화에 따라 시간적으로 변화한다.

한편, 증발산 비율은 식생 표면특성에 따라 영향을 크게 받으며, SWAT 모형에서는 증발산량을 산정하기 위해 Penman-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법 및 Hargreaves 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 SWAT 모형에 포함된 세 가지 방법 중 Penman-Monteith 방법을 사용하였다.

Penman-Monteith 방법에서는 증발산을 유지하기 위한 에너지, 수증기를 제거하기 위한 기작의 강도, 공기역

학저항, 표면저항을 설명하기 위한 요소들로 구성되어 있으며 방정식은 Eq. (6)과 같다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot [e_z^0 - e_z] / \gamma_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \gamma_c / \gamma_a)} \quad (6)$$

여기서, λ 는 잠열강도(MJm⁻²d⁻¹), E 는 증발율의 깊이(mm/d), Δ 는 포화수증기압 온도 곡선의 기울기 de/dT(kPa/°C), H 는 순복사량(MJm⁻²d⁻¹), G 는 지열플럭스(MJm⁻²d⁻¹), ρ_{air} 는 공기밀도(kg/m³), C_p 는 일정 압력에서의 비열(MJm⁻²d⁻¹), e_z^0 는 높이 z 에서의 포화수증기압(kPa), e_z 는 높이 z 에서의 수증기압(kPa), γ 는 습도상수(kPa/°C), γ_c 는 식생피복저항(s/m), γ_a 는 대기층의 확산저항(s/m)이다.

4. 대상유역의 선정 및 유출량 전망

4.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 대청댐 및 용담댐 유역을 포함하고 있는 금강유역은 금강본류 구간에 대청 다목적댐과 용담 다목적댐이 설치되어 홍수조절에 활용되고 있고, 하구에 금강 하구둑이 설치되어 운영되고 있다. 금강유역은 북위 35°35′~37°05′, 동경 126°41′~128°25′에 걸쳐 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하고 있고, 유역면적은 9,914.013 km², 유로연장은 388.45 km으로 한강, 낙동강에 이어 3번째로 큰 유역이다. 본 유역은 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 대권역의 유역둘레는 737.89 km이고, 유역평균폭은 25.52 km, 유역평균표고는 EL.85.31 m, 유역평균 경사는

Fig. 3. Study Site

16.74%이다. 연평균 기온은 11.5℃이며 축후소별 증발량은 1,070~1,292 mm 정도이다. 금강 유역내의 행정구역으로는 대전광역시, 충청남도, 충청북도, 전라북도, 경상북도, 경상남도, 경기도의 1광역시 6도 8시 17군 5구를 포함하고 있다(K-water연구원, 2010). 한편, 용담댐유역의 면적은 930 km²이고, 용담댐유역을 제외한 대청댐 자체 유역면적은 3,204 km²이다. Fig. 3은 용담댐유역을 포함한 대청댐유역의 모형 구축에 사용된 소유역 구분 및 각 관측소의 위치 등 현황을 나타내었다.

4.2 기후변화 시나리오 작성

앞서 언급한 바와 같이 비정상성 Markov Chain 모형을 통해서 용담댐 및 대청댐 유역의 기후변화에 따른 강우시나리오를 구축하였다. 본 연구에서는 대전, 추풍령, 금산, 보은 4개의 관측소의 일강수량 자료와 계절강수량 자료를 기본적으로 활용하였다. 비정상성 Markov Chain 모형을 구축하기 위해서는 종속변수 Y의 해당하는 일강수량과 독립변수 X의 해당하는 계절강수량이 입력된다. 즉 계절강수량이 일강수량으로 상세화되는 과정이 모형을 통해 구축되며 월강수량과 일강수량의 천이확률과 강우량을 결정하는 확률밀도함수의 매개변수가 과거자료를

통해서 추정된다. 이들 추정된 매개변수는 미래 기후변화 시나리오를 상세화하는데 직접적으로 이용된다.

따라서 모형을 구축하는데 있어서 가장 기본적으로 검토해야하는 작업으로서 모형을 통해 구축된 일강수량을 계절단위로 누적하였을 때 입력된 월강수량으로 보존되는가에 대한 여부이다. 이를 위해서 4개의 계절로 강수계열을 분리한 후 모형을 구축하였으며 모의된 일강수량과 계절강수량을 비교하였다. Fig. 4는 대청댐 유역에 적용된 비정상성 Markov Chain 모형 구축 결과를 나타낸다. 1~3월의 계절강수량을 통하여 모형의 적합성을 평가하였으며 모의된 일강수량을 누적하여 실제 입력된 계절강수량과 비교해보면 일치하는 결과를 확인할 수 있다. 이를 토대로 미래의 기후변화 시나리오를 작성할 수 있으며 Fig. 4에 나타내었다.

계절강수량의 보존과 함께 모의된 강수계열이 실제강수계열을 효과적으로 모의할 수 있는지에 대한 여부도 중요한 평가항목 중 하나이다. 이를 위해서 일강수의 천이확률, 강우일수, 강우량을 지점별로 비교하였으며 1~3월 강수량을 대상으로 본 논문에서는 평가하여 Fig. 5에 나타내었다. 대부분의 통계지표에서 관측치와 일치하는 결과를 보여주고 있으며 천이확률에서 차이를 보이고 있지

Fig. 4. A Comparison of Seasonal Rainfall for Daechong Watershed

Fig. 5. A Comparison of Daily Rainfall Statistic for Daecheong Watershed

만 0.02 정도의 오차로서 매우 작은 편차를 보이고 있다. 이들 추정된 결과를 토대로 미래의 변동성을 평가할 수 있다. 즉, P00 천이확률은 미래에 변동성이 거의 존재하지 않았으며, P11의 경우 현재에 비해서 증가하는 결과로 전망되었다. 즉, 비가 온 후 다음날 비가 올 확률(P00)이 커질 수 있다는 것이다. 강수일의 경우 현재에 비해 증가할 것으로 전망되며 강수량의 경우에도 현재에 비해서 증가할 것으로 전망되고 있다.

4.3 SWAT모형을 이용한 A1B 시나리오 유출량 모의

기상자료는 유출량 산정에 사용되는 기본적인 데이터로 강우, 최고·최저 기온, 태양복사량, 상대습도, 풍속 자

료를 기상청과 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Management Information System)으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 이 자료들은 토양에 대한 다양한 증발산을 반영하기 위하여 유역을 분할하는 SWAT 모형에서 각 소유역의 입력 자료로 사용된다. 분할한 소유역 각각의 수문 및 기상자료가 구축되지 않은 경우에는 소유역의 출구지점에서 인접한 기상관측소 자료를 적용하여 산정하였다(Table 1, Fig. 6).

SWAT모형을 이용해서 미래 유출량 전망을 하기 위해서는 우선 과거 관측값을 이용해서 계산된 유출량과의 비교를 통해 신뢰할만한 결과를 제시해 주는지에 대한 모형의 적용성 검토가 필요하다. 강우유출해석의 결과로부터 모형의 적합성을 평가하기 위하여 총 유출량 오차 외에

Table 1. Watershed Status for the SWAT Model Application

Division of input data	Yondam Watershed	Daecheong Watershed
Threshold area	1800 ha	8000 ha
River stage station	2	3
Division number of small river	33	42
Number of HRU	621	925

체적오차의 백분율 (VER)과 침투유량 오차의 백분율 (QER)을 산정하였다. 각각의 계산식은 다음과 같다.

$$VER = \left| \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})}{\sum Q_{obs}} \right| \times 100 < 15 \quad (7)$$

$$QER = \left| \frac{Q_{pobs} - Q_{pcal}}{Q_{pobs}} \right| \times 100 < 15 \quad (8)$$

여기서, Q_{obs} : 관측유량(CMS), Q_{cal} : 계산유량(CMS), Q_{pobs} : 관측침투유량, Q_{pcal} : 계산침투유량이다.

Table 2는 SWAT모형을 이용하여 용담댐 및 대청댐유역을 대상으로 VER, QER, 그리고 계산유량의 합계와 관측유량의 합계를 나눈 총유출량 오차를 비교하여 나타낸 것이다. 적합성 평가결과 VER, QER 및 총유출량오차 지표의 평균 오차가 20% 미만으로 나타났으며, 모의치와 실측치에 대한 상관관계도 각각 90.1%, 84.3% 일치하는 것으로 나타나 SWAT모형의 적용가능성은 충분한 것으로 판단되었다 (Figs. 7 and 8). 한편, SWAT 모형의 매개변수는 유역 전반에 걸쳐 적용되는 유역 매개변수와 각각의 소유역별로 입력되는 자료 및 각 소유역에 대하여 HRU 별로 입력되는 자료로 구성되어 있는데 매개변수 보정은

Fig. 6. Division of the Small Basin

Table 2. Assessment of Applicability for SWAT Model

Division	VER (%)	QER (%)	Total Discharge Error (%)
Yongdam	15.37	11.29	9.9
Daecheong	17.88	4.38	15.7
Average	16.63	7.84	12.80

Fig. 7. Comparison between Simulated and Observed Hydrograph (Yongdam Watershed)

Fig. 8. Comparison between Simulated and Observed Hydrograph (Daecheong Watershed)

Table 3. Future Rainfall and Discharge

Division	Rainfall (mm) / Discharge (CMS)			
	1981 ~ 2010(year)	2011 ~ 2030	2031 ~ 2060	2061 ~ 2090
Yongdam	1,187/25.18	1,288/26.8	1,356/28.7	1,392/29.6
Daecheong	1,297/84.08	1,197/104.15	1,328/115.16	1,361/119.29

Fig. 9. Outlook of Future Discharge

기존 연구(황태하, 2005, 문희일, 2010)의 결과를 참고로 민감도분석을 통하여 추정하였다.

한편 용담댐 유역내의 천천수위관측소 지점의 유량을 모형결과로 비교분석 한 결과 91.3%일치하는 것으로 나타났다으며, 동향수위관측소 지점의 유량은 82.8% 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 기후변화에 따른 미래 유출량 전망

본 연구에서는 앞서 제시한 기상청 A1B시나리오를 기본 기후변화 시나리오로 선정하여 유역단위의 상세수문 시나리오를 구축하였다. 유역단위의 상세수문시나리오를 구축하기 위해서 본 연구에서는 다지점 비정상성 다운스케일링기법을 활용하였으며 시공간적 다운스케일링을 실시하여 기후변화 영향이 반영된 일강수 및 기온 시계열을

금강유역 주요지점을 대상으로 분석하였다. 기후변화 분석기간은 2011년부터 2090년까지 80년을 대상기간으로 선정하였다. A1B시나리오에 의한 미래 강우량 및 유출량을 비교한 결과 Table 3과 같으며 연대별 유출량을 그래프로 나타내었다 (Fig. 9).

분석결과, 2011년에서 2030년까지 용담댐유역의 경우는 현재를 기준으로 유출량이 6% 정도 증가하고, 2031년에서 2060년까지는 14%, 2060년 이후 18%로 지속적으로 소폭 증가하는 것으로 전망되었다. 한편 대청댐유역은 2011년에서 2030년까지 6%, 2031년에서 2060년까지는 14%, 2060년 이후는 18%정도로 갈수록 증가하는 것으로 나타나는 등 전반적인 유출량의 증가경향이 예측되었다.

유출량의 계절별 변화 경향성 분석을 한 결과 (Fig. 10), 가을철의 유출량은 관측 유출량에 비해 상대적으로 증가

Fig. 10. Seasonal Outlook of Future Discharge

하고 여름철 유출량은 지금보다 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나는 등 지금과는 강우의 패턴이 변화될 것으로 예상된다. 이러한 경향이 미래에 현실화된다면 여름철에 물을 가두어서 갈수 시에 물을 이용하는 패턴에서 연중 물의 저수량을 확보함으로써, 필요한 시점에 효율적으로 배분할 수 있는 체계로의 전환과 홍수관리 체계에 대한 전면적인 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 금강 유역 내 용담댐 및 대청댐 유역을 대상으로 공간해상도 27km 지역규모의 A1B 기후변화시나리오 기반의 RCM모형과 최신 ArcSWAT모형을 이용하여 미래의 유출량을 전망하였으며 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유역단위의 상세수문시나리오를 생산하기 위해서 RCM격자자료를 유역단위에서 강우관측소 지점 단위로 공간적 다운스케일링을 실시하였으며 RCM월 자료에 대해서 일단위자료로 시간적 다운스케일링을 수행하여 기후모델로부터 발생하는 시간공간적 스케일의 문제점을 극복하여 기존의 일강수량 모의기법에서 간과되었던 비정상성을 고려하였다.
- 2) ArcGIS기반의 최신 ArcSWAT모형을 이용하여 2001년부터 2006년까지의 과거 일 유출모의를 실시하여 관측 유출량과 비교해 본 결과 SWAT모형의 모의 유출량이 용담댐 및 대청댐유역 각각 90.1% 및 84.3%로 일치하는 등 관측치를 비교적 잘 재현하여 모형의 적용성을 확인하였다.
- 3) SWAT모형을 이용하여 A1B시나리오 상황에서의 미래 80년간의 유출량을 전망하였으며, 분석결과,

2011년에서 2030년까지 용담댐유역의 경우는 현재를 기준으로 유출량이 6% 정도 증가하고, 2031년에서 2060년까지는 14%, 2060년 이후 18%로 지속적으로 소폭 증가하는 것으로 전망되었다. 한편 대청댐유역은 2011년에서 2030년까지 6%, 2031년에서 2060년까지는 14%, 2060년 이후는 18%정도로 갈수록 증가하는 것으로 나타나는 등 용담댐 유역과 마찬가지로 전반적인 유출량의 증가경향이 예측되었다.

- 4) 유출량의 계절별 변화 경향성 분석을 한 결과, 가을철의 유출량은 관측 유출량에 비해 상대적으로 증가하고 여름철 유출량은 지금보다 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나는 등 지금과는 강우의 패턴이 변화될 것으로 전망되었다.

본 연구의 결과는 기본적으로 기상청에서 제공하는 RCM의 모의결과에 기초하여 수행된 것이다. 따라서 예측의 신뢰도는 RCM의 결과와 이를 분석한 모형이 가지는 물리적 과정의 정확성에 좌우되게 된다. 그러나 현재까지의 기술수준으로는 GCM 및 RCM자체의 불확실성이 너무 큰 것이 사실이며, 본 연구의 결과도 이러한 한계를 감안하면서 이해되어야 할 것이다.

참고문헌

- 국토해양부 (2007). 이상홍수 평가기술 개발 연구보고서. 인하대학교.
- 과학기술부 (2007). 수자원의 지속적 확보기술개발사업: 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축: 21세기 프론티어 사업. 과학기술부.
- 권영아, 권원태, 부경은, 최영은 (2007). "A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망." **대한지리학회**

논문집, 대한지리학회, 제42권, 제3호, pp. 355-367.

권현한, 김병식, 김보경, 윤석영 (2009a). “기후변화에 따른 극치강수량의 시공간적 특성 변화 분석.” **2009 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1152-1155.

권현한, 김병식 (2009b). “비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제3호, pp. 213-225.

기후변화정보센터 (2010). “www.climate.go.kr.”

김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 185-193.

김웅태, 유철상, 이동률, 이준열 (2000). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **2000 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 472-479.

김웅태, 이동률, 유철상 (2004). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.

문희일 (2010). SWAT모형을 이용한 토지이용변화에 따른 유량 및 유사량 변화에 대한 연구. 석사학위논문, 한경대학교.

배덕효, 정일원, 권원태 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.

서용원, 이승현, 김영오, 이동률 (2000). “대청댐 운영에 대한 기후변화 영향평가.” **2000 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 427-430.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.

예령, 정세웅, 오동근, 윤성완 (2009). “기후변화에 따른 대청호 유역의 물순환 및 토양유실량 영향.” **한국물환경학회 논문집**, 한국물환경학회, 제25권, 제6호, pp. 821-831.

윤용남, 이재수, 유철상, 안재현 (1999). “지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구.” **1999 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 165-168.

이재경, 김영오, 이정택 (2009). “기후변화 시나리오의 조합기법에 관한 연구.” **2009 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 621-626.

이재경, 김영오 (2010). “기후변화 표준 시나리오 선정에 관한 연구.” **한국기후변화학회 논문집**, 한국기후변화학회, 제1권, 제1호, pp. 59-73.

황준식, 정대일, 이재경, 김영오 (2007). “기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp. 147-158.

황태하 (2005). SWAT모형을 이용한 토양수분지수 산정과 가뭄감시. 석사학위논문, 인하대학교.

Hann, C.T., Allen, D.M., and Street, J.O. (1976). “A Markov chain model of daily rainfall.” *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 3, pp. 443-449.

IPCC (2007). “Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for Policymakers.” Cambridge University Press.

K-water연구원 (2010). 미래 물관리를 위한 기후변화 대응방안 도출연구 (1차년도). 1차년도 보고서.

Nord, J. (1975). “Some application of Markov chains.” *Proceedings Fourth Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Science*. Tallahas, pp. 125-130.

Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., Choi, J., Cho, H., Koka, S., and Agrawal, A. (2006). “ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface for SWAT.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 295-309.

논문번호: 11-054	접수: 2011.05.25
수정일자: 2011.09.20/10.18	심사완료: 2011.10.18