韓國水資源學會論文集
第45卷 第6號·2012年 6月
pp. 517~529
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.6.517

남강댐 유역에서의 기후변화에 대한 유출 영향

Impact of Climate Change on Runoff in Namgang Dam Watershed

이 종 문* / 김 영 도** / 강 부 식*** / 이 혜 숙****
Lee, Jong Mun / Kim, Young Do / Kang, Boo Sik / Yi, Hye Suk

Abstract

Climate change can impact hydrologic processes of a watershed system. The integrated modeling systems need to be built to predict and analyze the possible impacts of climate change on water environment for the optimal water resource operation and management. In this study, Namgang Dam watershed in the Nakdong River basin was selected as a study area. To evaluate the vulnerability of Namgang Dam watershed caused by climate change, the change in hydrologic runoff were predicted using the watershed model, SWAT. The RCM scenario was analyzed and downscaled using the artificial neural network and the dynamic quantile mapping. The results of this study will be utilized for suggesting an effective counterplan for climate change, and finally to propose the optimal water resource management method.

Keywords : climate change, Namgang Dam, SWAT, artificial neural network, quantile mapping

요 지

기후변화는 유역의 수문과정에 영향을 줄 수 있으며, 최적의 수자원 관리를 위해서는 이와 같은 기후변화로 인한 수환경 영향을 예측 및 분석하기 위한 통합적인 모의체계의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 낙동강 수계의 남강댐 유역을 대상지역으로 선정하여, 기후변화 취약성을 평가하기 위하여 SWAT 모형을 이용하여 유출량 변화를 예측하였다. 기후시나리오 생산을 위하여 지역기후모형(RCM)의 분석 및 인공신경망을 통한 상세화기법을 적용하여 예측인자들에 대한 모의결과로부터 미래 기상자료를 구축하였다. 또한 강우의 경우 총량에 대한 보정을 위해 분위사상법을 적용하였다. 이와 같은 시나리오를 검보정이 완료된 SWAT 모형에 적용하여 기후변화에 따른 유출량 변화를 예측하였다. 본 연구의 결과를 이용하여 기후변화에 대한 효율적인 대책을 제시하여 최적의 수자원관리방안을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 남강댐, SWAT, 인공신경망, 분위사상법

1. 서 론

최근 발간된 '기후변화에 관한 정부간 협의체'(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 기후변화와 물에 관한 기술보고서에 의하면 수자원은 기후변화와의 상관관계가 높으며 기후변화에 상당히 취약하기 때

* 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 / 인제대학교 환경공학부 박사과정 (e-mail: shaper30@lycos.co.kr)
Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea
** 교신저자, 인제대학교 환경공학부(낙동강유역환경연구센터) 조교수 (e-mail: ydkim@inje.ac.kr)
Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Environmental Science and Engineering (Nakdong River Environmental Research Center), Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea
*** 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (e-mail: bskang@dankook.ac.kr)
Associate Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, Gyeonggi 448-701, Korea
**** 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 (e-mail: yihs@kwater.or.kr)
Senior Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea

문에 앞으로 기후변화 영향이 수자원에 더욱 큰 악영향을 미칠 것이라고 제시하고 있다. 이러한 기후변화는 수자원 측면에서 기온 증가에 따른 증발산량의 증가, 강수량의 강도 및 빈도 변화, 유출량의 시공간적 변동을 초래하여 수자원의 효율적 관리 및 안정적인 공급에 어려움을 증대시킬 수 있을 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2001). 기후변화로 나타나게 될 댐 저수지의 수질 및 생태환경 변화에 대한 분석은 국가 수자원관리 측면에서 우선적으로 대비해야할 중요한 문제로써, 수자원을 안정적이고 효과적으로 관리 및 활용하기 위해서 기후변화로 인한 댐 저수지의 수환경 변화의 정확한 분석과 취약성 평가가 필수적이라 할 수 있다. 하지만 아직까지 기후변화에 대응 및 적응을 위한 수자원, 수질 및 생태분야의 통합적 대책방안 수립에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 기후변화에 대한 신뢰성 있는 영향평가를 위해서는 기후변화 시나리오 분석과 이로 인한 댐 유역의 유출변화를 시·공간적으로 해석할 수 있는 유역 모형이 필요하다. 특히 다양한 기후변화 시나리오하에서의 미래 전망과 발생가능한 취약성을 정량적으로 예측 및 평가하는 기술을 필요로 한다. 또한 기후 전망, 수문영향 예측 및 취약성 평가를 통해 도출된 연구결과들은 댐저수지의 수환경 관리를 위한 기술개발 및 계획수립을 위한 자료로 활용될 수 있도록 표준화되고 체계적인 연구추진절차가 매우 중요하다.

기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법으로는 크게 과거 관측 자료를 이용해 변화 경향을 분석하는 방법, 기후모형을 이용하는 방법, 그리고 기후모형과 결정론적 수문모형을 이용하는 방법으로 나눌 수 있는데, 대부분의 연구에서는 기후모형에서 생산되는 기후자료를 수문모형에 입력하여 수자원의 영향을 평가하는 방법을 사용하고 있다(배덕효와 정일원, 2005). 하지만 일반적으로 기후수치모형인 전지구기후모형(GCMs: General Circulation Models)은 모형의 종류가 매우 다양할 뿐만 아니라 모형의 특성과 해상도, 사용된 입력자료에 따라 모의결과가 상이하게 나올 수 있다. 따라서 GCMs 모의결과를 지역규모에 적용하기 위해서는 유역스케일의 고해상도 자료 생성을 위한 상세화기법(downscaling)이 필수적으로 수행되어야 한다(Zhang et al., 2007).

남강댐은 남강본류를 유하하는 본댐과 가화천 방향으로 설치된 제수문을 통해 사천만으로 직접 유하하게 하는 특수한 방식으로 홍수를 조절하고 있으며, 200년 빈도 계획홍수량 10,400 m^3/sec 유입시 계획방류량 중 80%인 3,250 m^3/sec를 사천만으로, 나머지 20%인 800 m^3/sec를 남강댐 직하류로 방류함으로서 진주시뿐만 아니라 낙동강 본류의 홍수량 경감에 크게 기여하고 있다. 그러나 최근 기후변화로 인하여 남강댐 유역의 호우일수가 증가하였을 뿐만 아니라 집중호우의 양상을 나타내고 있는 상황에서 남강댐 직하류 구간내에는 무제부 및 제내지 지대가 낮고 내수배제가 불량하여 상습침수가 발생하는 지역이 많다. 특히 2002년 태풍루사 및 2003년 태풍매미에 의하여 남강댐 직하류에서 현지천 합류점에 이르는 21.8 km 구간이 침수로 인한 재산피해 및 이재민이 발생한 바 있어 내수배제불량이 개선되지 않은 지역이 존재하여 홍수조절을 위한 댐운영의 제약사항이 되고 있다(정인균 등, 2007). 따라서 기후변화에 따른 남강댐 상류유역의 유출량 변화에 대한 정량적인 예측은 댐 하류의 종합적인 치수계획 수립에 있어서 매우 중요하다.

남강댐 하류의 남강D와 남강E 단위유역은 수질오염총량관리 시행지역으로 오염원 관리가 이루어지고 있으나, 지속적으로 BOD 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 월평균 유량이 기준유량이하인 경우는 2004년과 2005년은 25%정도였지만, 2006년 이후에는 25%를 초과하였으며, 특히 2009년에는 60% 이상인 것으로 나타났다(경남발전연구원, 2010). 이렇게 기준유량을 만족하지 못하는 원인은 남강댐의 발전방류는 하루 중의 일정시간 동안만 이루어지고 있으므로 방류량 자체가 부족했기 때문으로 볼 수 있다. 남강댐 하류구간은 연간 총강우량이 적으면 BOD 농도가 증가하는 양상이 나타나고 있으며, 총강우량이 많아도 하계절에 집중적인 경우보다는 상대적으로 균일한 경우가 BOD 농도 관리에 유리한 것으로 판단된다. 특히 남강댐 하류 BOD 농도 변화는 남강댐 방류량 변화에 민감한 것으로 나타났으며, 총방류량보다는 발전방류량과의 관계가 더욱더 명확한 것으로 판단된다. 남강댐 방류량의 하류 BOD 농도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 수질모델링 결과, 남강댐에서 계획한 하천유지용수는 남강댐 하류의 수질을 관리하기에는 부족한 유량인 것으로 나타났다(경남발전연구원, 2010). 따라서 기후변화에 따른 남강댐 상류유역의 유출량 변화는 하류하천의 수질에도 영향을 줄 수 있으므로, 이에 대한 최적 운영안을 마련하기 위한 정량적인 영향 예측을 필요로 한다.

본 연구에서는 유역모형을 이용하여 댐 상류유역의 수문학적 영향평가와 더불어 미래 기후변화가 하천 유출에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 남강댐 유역을 대상으로 기후시나리오 생산을 위하여 지역기후모형(RCM)의 분석 및 인공신경망 기법을 적용한 상세화를 통하여 예측인자(강우, 상대습도, 최고기온, 최저기온)에 대한 모의결

과로부터 미래 기상자료를 구축하고 유역모형을 선정하여 미래 기후변화에 따른 유역의 수문학적 거동 변화를 전망하고, 각 수문요소 변화에 따른 유출에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

본 연구에서는 진양호를 포함하는 남강댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 남강댐 유역의 유역면적은 2,293.42 km^2이며, 유역평균표고는 426.3 m, 유역평균경사는 35.36%이다. 덕유산과 지리산을 포함하고 있는 고봉이 많은 산지 지형으로 하천의 경사가 급하여 홍수기에는 강우로 인한 수위의 상승이 급하게 나타나며 유속이 커서 하천의 침식이 많이 발생하는 하상변동이 심한 유역이다. 그리고 남강댐 유역은 하계의 저기압과 태풍 등의 진행방향에 위치하여 향사면과 배사면의 경우 강우분포에 대한 편차가 심하다. 유역내 평균 강수량은 1,434 mm로 우리나라 연평균강수량 1,274 mm의 112%에 해당하는 다우지역에 속한다(배민식, 2008).

2.2 인공신경망(ANN) 상세화기법

인공신경망은 인간의 두뇌를 구성하고 있는 뉴런의 복잡한 인식과정을 도입하여 수학적 모형으로 일반화시키기 위하여 개발된 병렬정보처리시스템이다. 인공신경망과 같은 비선형모형은 비선형관계들을 표현할 때 전형적인 선형방법들 보다 뛰어나다(Cannon, 2007). 지도학습은 예측인자를 이용하여 예측변수사이의 관계를 학습하게 됨으로써 새로운 예측인자를 입력값으로 받으면 학습한 결과를 토대로 예측변수를 예측하는 학습방법이다. 이와는 반대로 자율학습은 예측변수에 대한 어떠한 사전정보를 가지고 있지 않기 때문에, 예측인자만을 이용하여 출력을 계산하게 된다. 인공신경망은 신경망의 계층구조에 따라 입력층과 출력층만 존재하는 단층신경망과 입력층, 하나의 이상의 중간층(은닉층), 출력층이 존재하는 다층신경망으로 구분된다(이봉기, 2008). 일반적으로 하나 이상의 은닉층을 가지고 있는 다층신경망이 많이 사용되어 오고 있으며, 다층신경망의 일반적인 구조는 Fig. 2와 같다. 각각의 뉴런들은 서로 연결되어 있는데 이것은 각각의 뉴런들이 생물학적인 뉴런에서의 시냅스의 역할을 하며, 인공신경망에서는 연결강도 혹은 가중치 벡터라 일컫는다. 본 연구에서 사용한 인공신경망 구조는 다층신경망 구조를 사용하였으며, 학습 알고리즘으로는 역전파알고리즘을 이용하였으며, 전 방향 신경망의 계산은 Eqs. (1)~(4)와 같다(Rojas, 1996).

$$S_{hi} = \sum_k w_{hi} x_i \tag{1}$$

$$f(S_{hi}) = \frac{e^{S_{hi}} - e^{-S_{hi}}}{e^{S_{hi}} + e^{-S_{hi}}} = y_h \tag{2}$$

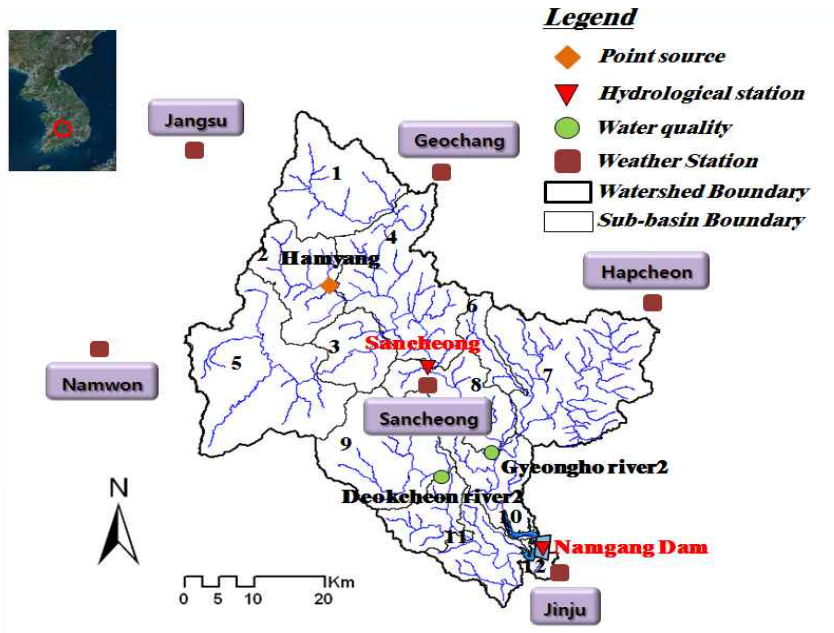


Fig. 1. Location of Study Area

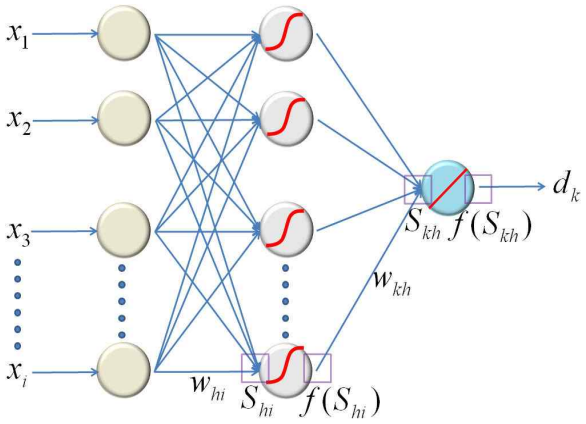


Fig. 2. Conceptual Diagram of Three-layer Neural Network Model

$$S_{hi} = \sum_k w_{kh} y_h \tag{3}$$

$$f(S_{kh}) = S_{hi} = y_k \tag{4}$$

여기서, x_i는 예측인자, w_{hi}(or w_{kh})는 입력층(또는 은닉층)과 은닉층(또는 출력층)사이의 가중치 벡터, $f(S_{hi})$(or $f(S_{kh})$)는 은닉층(또는 출력층)에서의 출력값, d_k는 예측변수이다.

2.3 유역모형(SWAT) 개요

기후변화에 따른 유출량 변화를 모의하기 위한 유역모형으로 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다(Arnold et al., 1998). 이 중 수문 부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS (Soil Conservation Service) 유출곡선법(Curve Number, CN)과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다. SWAT 모형에서 강우와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)에 의해 계산된다(Williams, 1975). MUSLE는 Wischmeier and Smith (1965, 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식(USLE : Universal Soil Loss Equation)을 수정한 것이다. USLE에서는 강우에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 이로서 유사량 예측을 개선하고, 운송비가 불필요하게 되며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해진다. 영양물질 추적을 위해 SWAT에서 사용되는 하천 내 동역학은 QUAL2E 모형으로부터 채택되었다(Brown and Barnwell, 1987). 이를 통하여 하천 내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적한다.

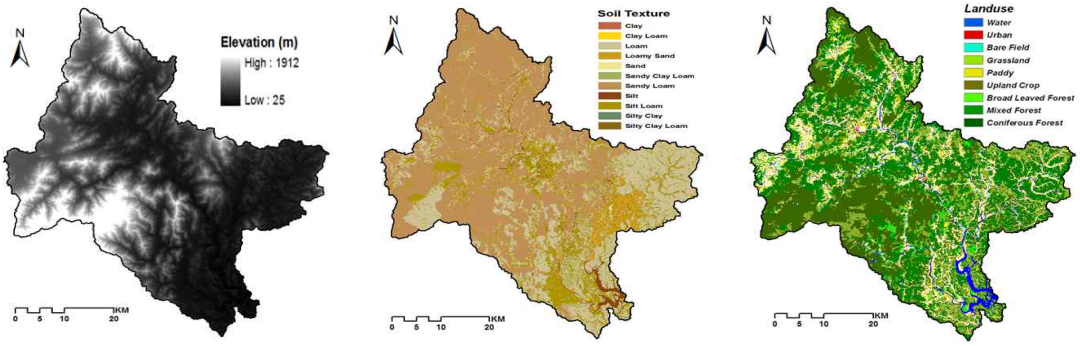
2.4 입력자료 구축

2.4.1 기상자료

SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 일 강우(Precipitation), 일 풍속(Wind Speed), 일 일사량(Solar Radiation), 일 최고온도(Maximum Temperature), 일 최저온도(Minimum Temperature), 일 습도(Humidity)이다. 남강댐 유역의 관측소 현황은 장수, 남원, 산청, 거창, 합천, 진주 총 6개의 기상관측소가 위치해 있으며, 1995~2010년까지의 일별 자료를 기상청으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다.

2.4.2 지형자료

본 연구에서는 유역모형의 지형자료로서 NGIS(National Geographic Information System)의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 100 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하였다. 토지이용도는 2000년 4월 Landsat TM 위성영상으로부터 감독분류 방법 중 각 분류항목의 평균과 공분산을 이용하는 최대우도방법(Maximum Likelihood Classification)을 적용하여 총 7개의 토지이용항목(수역, 도심지, 나지, 초지, 논, 밭, 산림)으로 분류하였다. 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 미국 NRCS (Natural Resource Conservation Service)의 토양분류 기준(Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹 A, B, C, D로 분류하였다(Fig. 3). 토양층의 개수 및 토양층별 깊이 등은 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며, 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들



(a) DEM (b) Soil (c) Landuse

Fig. 3. Construction of Watershed Characteristics in Namgang Dam

은 Saxton et al. (1986)의 연구결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다 (박종윤 등, 2009).

2.4.3 유출량 자료

본 연구의 대상유역과 같이 대규모 댐유역의 경우, 유역 최말단 출구점의 실측자료를 바탕으로 유역전체를 대표할 수 있는 매개변수를 선정하기에는 무리가 있다고 판단된다. SWAT 모형과 같은 물리적 기반의 준분포형 모형의 장점은 집중형 모형과는 달리 각각의 소유역별, 반응단위별 매개변수의 정의 및 조정이 가능함에 따라 다지점 검보정이 가능하다는 것이다(박종윤 등, 2009). 이에 본 연구에서는 모형의 적용성 평가를 위해 관측지점(Fig. 1 참조)을 고려하여 댐유입수의 유량과 수질결과의 신뢰성을 확보하기 위한 소유역 분할 및 관측자료를 수집하였다. 먼저, 유출량 자료는 남강댐 지점 및 남강 상류의 산청 관측소 지점에 대하여 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 일별 유출량 자료를 사용하였으며, 댐유입량 자료는 한국수자원공사에서 제공하는 일별 댐수문자료를 이용하였다.

3. 연구결과

3.1 인공신경망(ANN) 상세화기법 적용 결과

2011년부터 2100년까지 인공신경망 적용 결과를 통해 변수에 대한 예측을 실시하여 예측결과의 홍수기(1, 2, 3, 4, 10, 11, 12월)와 비홍수기(5, 6, 7, 8, 9월)의 월평균 모의값, 월별, 계절별 추세분석을 실시하였다(Figs. 4~5). 추세 분석 결과 Baseline을 기준으로 2100년으로 갈수록 예측인자들의 값이 대체적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 강우의 경우 홍수기시에 2011년 보다 37%나 증가하는 수치를 나타내고 있으며 Fig. 4의 월별 그래프 패턴을 보더라도 2100년으로 갈수록 강우량이 증가하고 있으며 강우의 양이 많은 시기인 7월과 8월에 그래프의 증가치가 큰 것을 알 수 있다. 반면 비홍수기시에는 2100년에 -9%로 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5의 계절별 추세분석 결과를 살펴보면 강우의 경우 특히 여름철에 강우량이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며 그 외의 계절에는 증가는 하지만 그 차이는 크지 않았다. 다른 인자인 습도, 최고온도, 최저온도는 월별, 계절별 추세분석 결과 미래로 갈수록 증가는 하나 그 차이가 강우와 비교했을 때 보다는 그렇게 크지는 않았다. 남강댐 유역의 예측결과에 대한 추세분석 결과는 Table 1과 같다.

3.2 모형의 보정 및 검증

남강댐 유역과 같이 대규모 유역의 경우, 유역 최말단 출구점의 실측자료를 바탕으로 유역전체를 대표할 수 있는 매개변수를 선정하기엔 무리가 있기 때문에 본 연구에서는 소유역별, HRU별 매개변수 조정에 따른 다지점 보정을 실시하였다. 모의기간은 모형의 안정화 기간을 고려하여 1997~2010년까지 모의하였다. 모형의 보정과 검증은 실측자료의 양과 질이 충분한 2003~2006년, 2007~2010년 각각 4개년으로 설정하여 Fig. 1의 각 보정 지점별 관측자료를 이용하였다. 보정방법은 LH-OAT(Latin Hypercube-One-factor-At-a-Time) 민감도 분석을 통해 선정된 매개변수를 이용하여 실시하였다. 일반적으로 SWAT 모형에서 지표수흐름관련 매개변수로는 CN2, ESCO, SOL_AWC 순으로 민감하게 반응하며, 지하수흐름은 GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN 등이, 감쇠곡선 매개변수로는 ALPHA_BF 등이 민감한 것으로 알려져 있다. Table 2는 본 연구에서 보정에 사용한 유출에 민감

Table 1. Trend Analysis of Prediction Parameters

	Season Classification	2011 yr	2100 yr	Diff
Precipitation (mm/month)	Dry season	41.9	37.9	-4.0 (-9.6%)
	Wet season	237.4	325.8	88.4 (37.2%)
Humidity (%)	Dry season	62.8	67.0	4.2 (6.7%)
	Wet season	72.5	79.2	6.7 (9.2%)
Maximum Temperature (℃)	Dry season	13.2	15.9	2.7
	Wet season	27.1	29.0	1.9
Minimum Temperature (℃)	Dry season	0.1	2.5	2.4
	Wet season	17.0	20.0	3.0

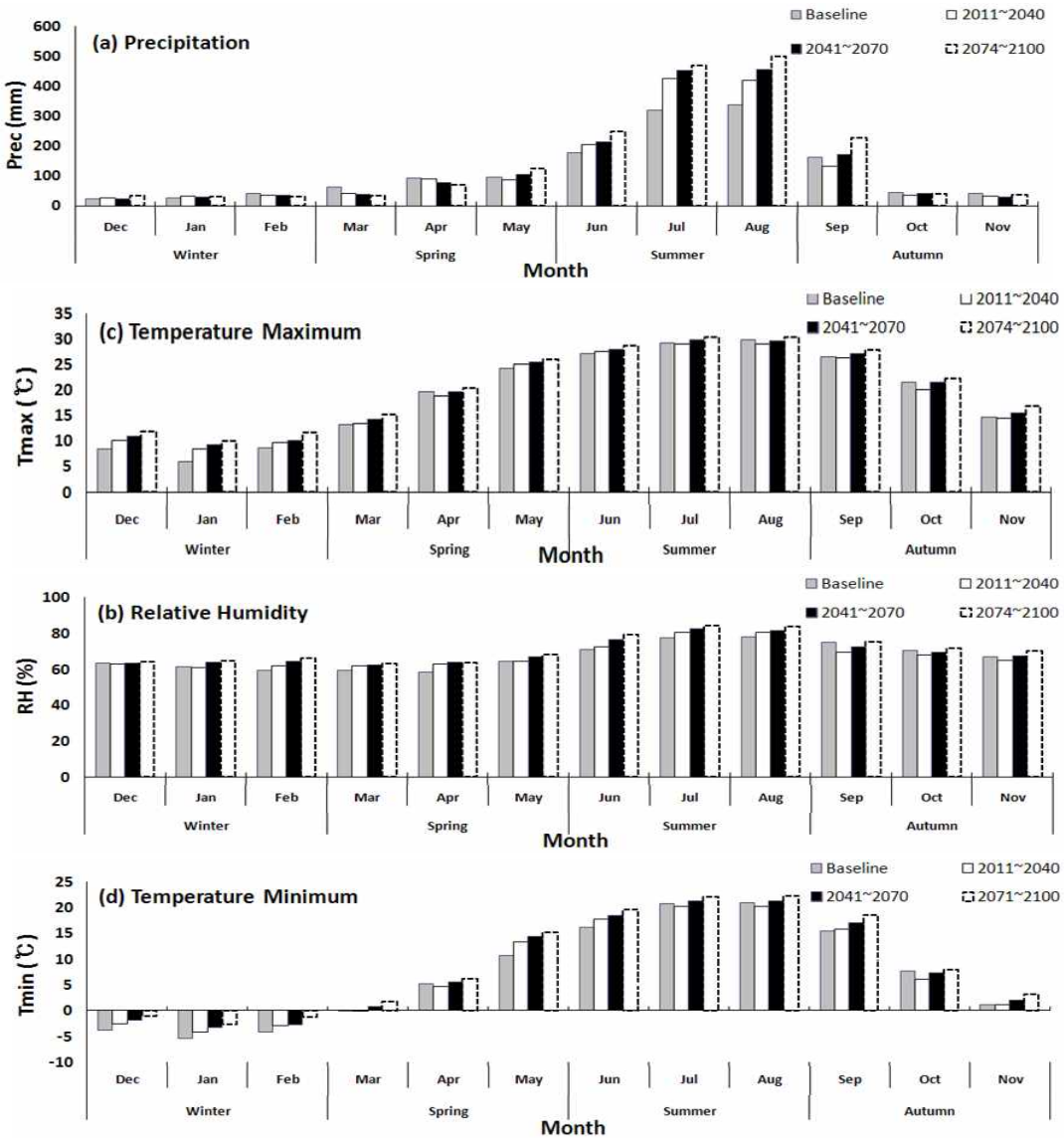
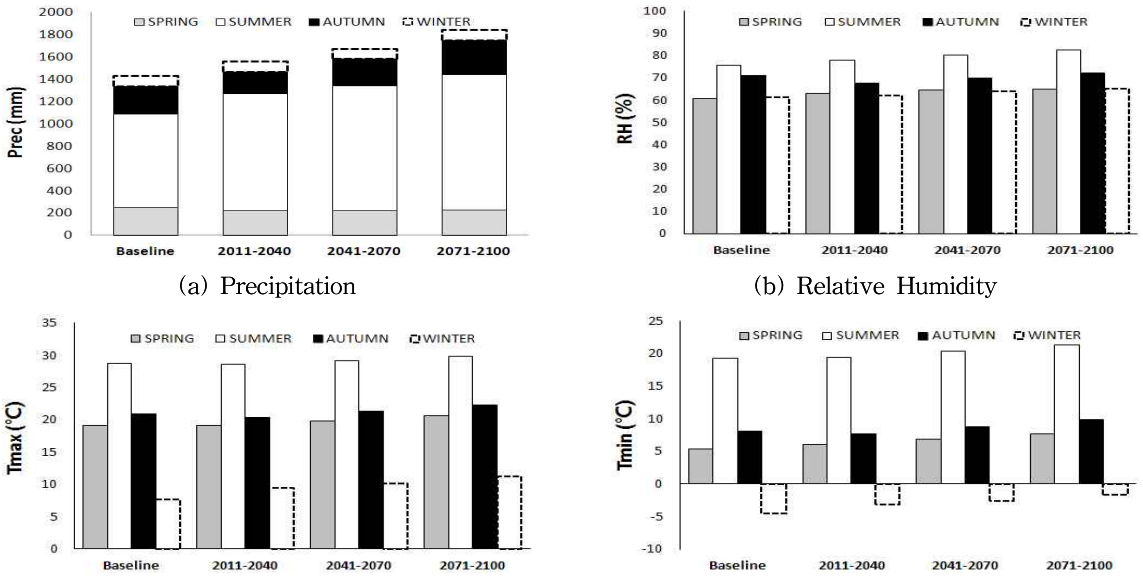


Fig. 4. Monthly Trend Analysis of Prediction Parameters



(a) Precipitation (b) Relative Humidity

(c) Temperature Maximum (d) Temperature Minimum

Fig. 5. Seasonal Trend Analysis of Prediction Parameters

Table 2. List of Adjusted Hydrologic Parameters of SWAT

Input file	Parameter	Definition	Range	
			min.	max.
*.gw	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0	1
	GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	-10	10
	GW_REVAP	Revap coefficient	-0.036	0.036
	GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	-1000	1000
	REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap	-100	100
.hru	EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1
	ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1
	SLSUBBSN	Average slope length	-25	25
.mgt	CN2	SCS runoff curve number	-25	25
.rte	CH_K2	Effective hydraulic conductivity of channel	0	150
	CH_N	Manning coefficient for channel	0	1
.sol	SOL_AWC	Availabel water capacity of the soil layer	-25	25
	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	-25	25

한 매개변수의 적정 범위를 정리한 것이다.

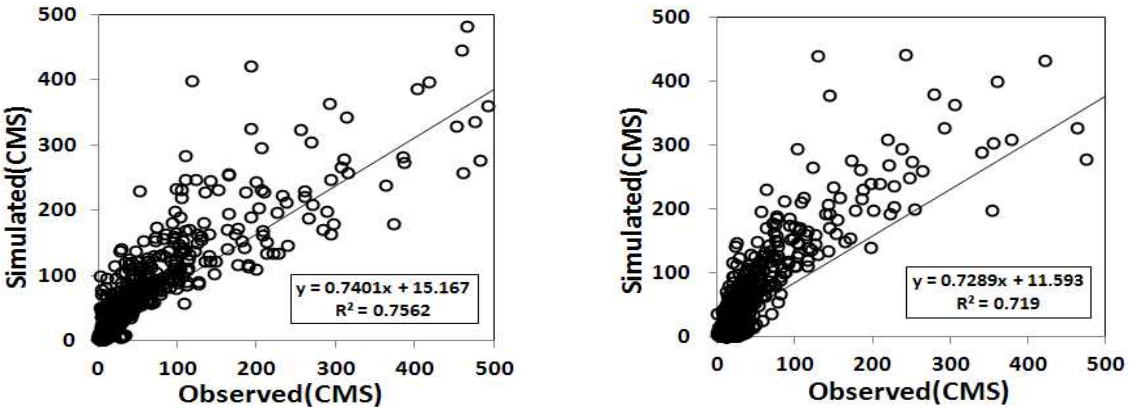
모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(determination coefficient, R^2)와 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE), 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형 효율성 계수(NSE)를 사용하였다(Table 3).

검·보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성 판단 결과는 Table 4~5와 같다. Green et al. (2006)은 R^2가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상, Chung et al. (1999)은 R^2가 0.5 이상, Ramanarayanan et al. (1997)과 Santhi et al. (2001a, 2001b)은 R^2가 0.6 이상이고 NSE가 0.5 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 NSE가 0.5 이상, R^2가 0.6 이상이면 남강댐 유역의 유출을 잘 모의하는 것으로 판단하였다(예 령 등, 2009). 유출량에 대한 SWAT 모형의 보정과 검증은 공간적으로 최상류부터 순차적으로 실시하였다. 남강댐 유역의 상류지점인 산청지점에 대하여 먼저 보정한 후, 유역출구지점에 대하여 보정을 실시하였다. 검·보정 기간 동안 남강댐 상류 산청 수위관측소와 남강댐 유입부의 유출량을 일별 관측값과 모의값으로 선형회귀분석한 결과는 Figs. 6~7에 나타내었으며 Figs. 8~9는 검·보정 기간의 유출량을 관측값과 모의값에 대해 비교한 것이다.

Table 3. Hydrological Evaluation Indices

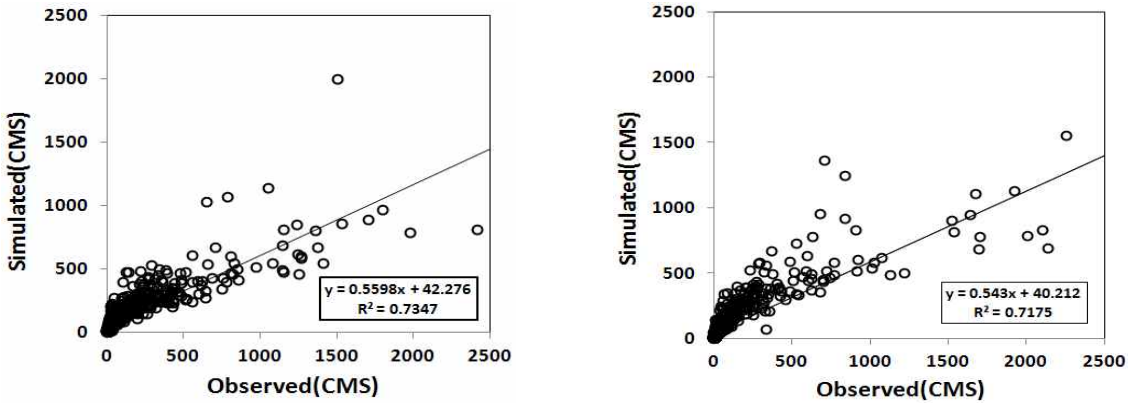
Definition	Reference	Comments
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}$	Nash and Sutcliffe (1970)	The optimal statical value occurs when the value does reach 1.
$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}$	Legates and McCabe (1999)	The optimal statical value occurs when the value does reach 1.
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[P_i - O_i]^2}$	Romanowicz et al. (2005)	The optimal statical value occurs when the value does reach 0.

O_i=observed value, P_i=simulated value, $\overline{O}$=mean observed value, n=number of the data.



(a) Calibration (b) Validation

Fig. 6. A Scatter Plot between Observed and Simulated Daily Runoff Flow at Sancheong Gauging Station



(a) Calibration (b) Validation

Fig. 7. A Scatter Plot between Observed and Simulated Daily Runoff Flow at Namgang Dam

Table 4에 나타낸 바와 같이 상관성 판단결과 상류의 산청 지점에 대해 검·보정기간 동안의 년 평균 일 유출량을 비교한 결과 NSE는 각각 0.73, 0.63로 R^2는 각각 0.76, 0.72로 각각 분석되었다. RMSE는 각각 3.36 mm/day, 2.96 mm/day로 나타났다. 상류지점에 대한 보정결과를 이용하여 하류지점에 대한 보정을 실시하였다. 그에 따른 일별 댐 유입량 자료와 모의결과를 비교한 결과, 상류의 모형 오차가 다소 개선된 것으로 나타났다. Table 5에 나타낸 바와 같이 남강댐 지점에 대해 검·보정 기간 동안의 NSE는 각각 0.71, 0.69로 분석되었으며, R^2는 각각 0.75,

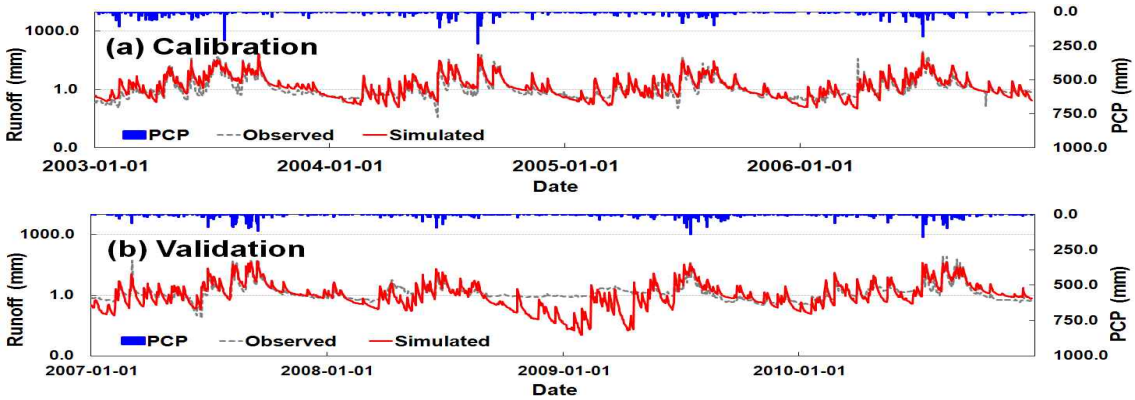


Fig. 8. Runoff Result of Sancheong Gauging Station

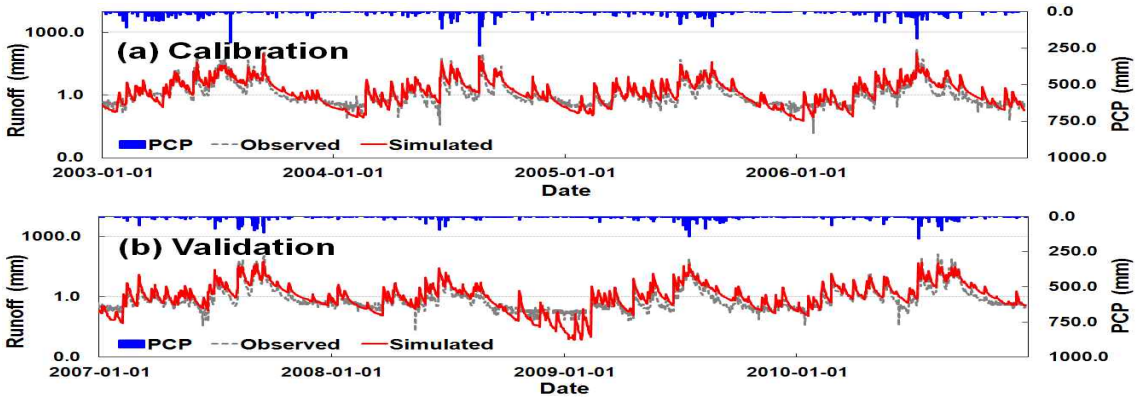


Fig. 9. Runoff Result of Namgang Dam Gauging Station

Table 4. Hydrologic Statistical Results in Sancheong Gauging Station

Year	Precipitation (mm)	Discharge (mm)		Runoff Ratio (%)		R^2	RMSE (mm/day)	NSE
		Obs	Sim	Obs	Sim			
Calibration								
2003	2,006.8	1,402.8	1,570.3	69.9	78.2	0.79	3.99	0.78
2004	1,702.9	956.5	1,185.8	56.2	69.6	0.71	3.57	0.66
2005	1,268.4	695.8	856.4	54.9	67.5	0.73	2.18	0.71
2006	1,575.7	1,043.8	1,075.1	66.2	68.2	0.81	3.68	0.78
Average	1,638.5	1,024.7	1,171.9	61.8	70.9	0.76	3.36	0.73
Validation								
2007	1,708.1	1,247.8	1,306.4	73.0	76.5	0.76	4.04	0.62
2008	795.3	518.7	492.8	65.2	62.0	0.60	1.44	0.48
2009	1,757.3	677.2	766.6	38.5	43.6	0.82	1.91	0.73
2010	1,570.1	1,201.5	1,355.1	76.5	86.3	0.70	4.43	0.69
Average	1,457.7	911.3	980.2	63.3	67.1	0.72	2.96	0.63

Table 5. Hydrologic Statistical Results in Namgang Dam Station

Year	Precipitation (mm)	Discharge (mm)		Runoff Ratio (%)		R^2	RMSE (mm/day)	NSE
		Obs	Sim	Obs	Sim			
Calibration								
2003	2,006.8	1,814.3	1,616.0	90.4	80.5	0.64	7.53	0.61
2004	1,702.9	1,188.8	1,303.5	69.8	76.5	0.72	4.85	0.71
2005	1,268.4	689.3	915.5	54.3	72.2	0.76	2.24	0.74
2006	1,575.7	1,136.3	1,209.6	72.1	76.8	0.89	5.38	0.77
Average	1,638.5	1,207.2	1,261.2	71.7	76.5	0.75	5.00	0.71
Validation								
2007	1,708.1	1,377.2	1,369.7	80.6	80.2	0.75	6.41	0.56
2008	795.3	350.5	518.4	44.1	65.2	0.79	1.24	0.80
2009	1,757.3	637.4	871.1	36.3	49.6	0.81	2.69	0.79
2010	1,570.1	1,488.6	1,560.6	94.8	99.4	0.67	7.02	0.62
Average	1,457.7	963.4	1,080.0	64.0	73.6	0.76	4.34	0.69

0.76으로 각각 분석되었다. 또한 검·보정기간 동안의 RMSE는 각각 5.00 mm/day, 4.34 mm/day로 분석되었다. 또한 Tables 4~5에 나타낸 바와 같이 검·보정 기간 동안의 산청 관측소와 남강댐 유입부의 강우에 따른 유출률을 분석해보면, 두 개의 관측지점 모두 연강우량에 대비하여 실측치의 유출량보다 모의치의 유출량이 평균적으로 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.3 기후변화 시나리오에 따른 유출 변화 예측

본 연구에서 남강의 기후변화 시나리오 적용에 따른 유출변화 및 수질 전망을 위해 ANN 방법에 의해 상세화된 기후자료를 검·보정된 SWAT 모형에 적용하였다. 미래 전망결과에 대한 분석은 각 30년 일별 모의결과에 대한 월 평균 및 계절 평균으로 분석하였으며, 미래 유역의 토지이용 및 식생변화와 같은 유역환경변화는 고려되지 않았다. 미래 기후변화에 따른 수문환경의 변화는 유역의 유출특성 뿐만 아니라 비점오염물질의 유출특성에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 연구에서는 앞서 모의한 유역의 수문학적 거동 분석 결과를 토대로 기후변화가 하천유출에 미치는 영향을 분석하였다. Figs. 10~11은 미래 기후변화 시나리오 적용에 따른 댐 유입량의 월별 변화량 및 변화율을 나타낸 것으로 미래 유역유출특성 변화에 따라 댐 유입량 변화와 비슷한 경향을 보이는 것으로 분석된다. 특히, 현재(Baseline)를 기준으로 여름과 겨울철 증가가 두드러지게 나타났으며, 특히 여름철에 댐 유입량이 2100년으로 갈수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 기후변화 시나리오 예측결과 홍수기시 강우의 증가로 저수지에 유입되는 고탁수의 증가로 인한 수질문제가 발생하고, 평갈수기시에는 강우의 감소로 인해 유량이 감소되어 호소 내 유입하천의 수질이 악화될 것으로 예상된다. Table 6은 현재 유출량에 대비한 월별 유출 변화율을 정량적으로 나타낸 것으로 홍수기 최대 63%까지 댐 유입량이 증가되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 유역 모델링을 통해 미래 기후변화가 남강댐 유역의 유출량에 미치는 영향을 평가하고자 RCM 모형의 결과로부터 인공신경망(ANN) 상세화기법에 의한 미래 기상자료를 생산하고 SWAT 모형을 이용하여 미래 수문학적 유출거동 특성을 모의하였다. 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

1) 2011년부터 2100년까지 인공신경망 및 분위사상법 적용 결과를 통해 남강댐 유역별 티센평균에 대한 예측결과를 홍수기와 비홍수기로 구분해 월평균 모의값, 월별, 계절별 추세분석을 실시하였는데, 예측인자인 강우, 상대습도, 최고기온, 최저기온의 값이 강우의 비홍수기를 제외하고는 전체적으로 증가하

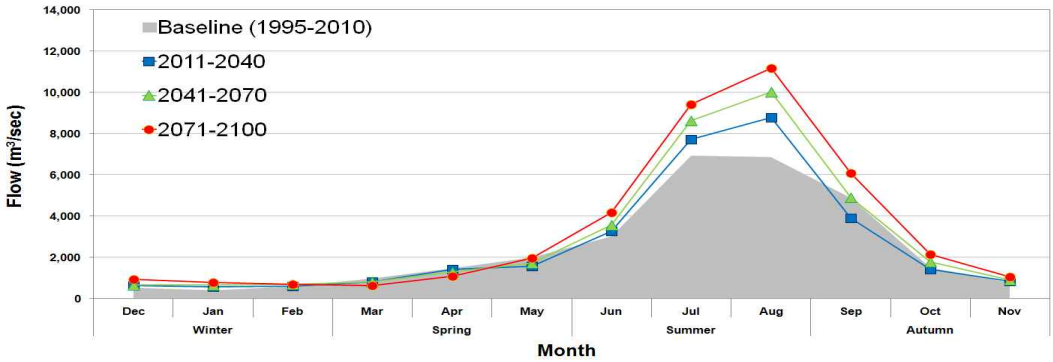


Fig. 10. Monthly Change of Dam-inflow for Climate Scenario

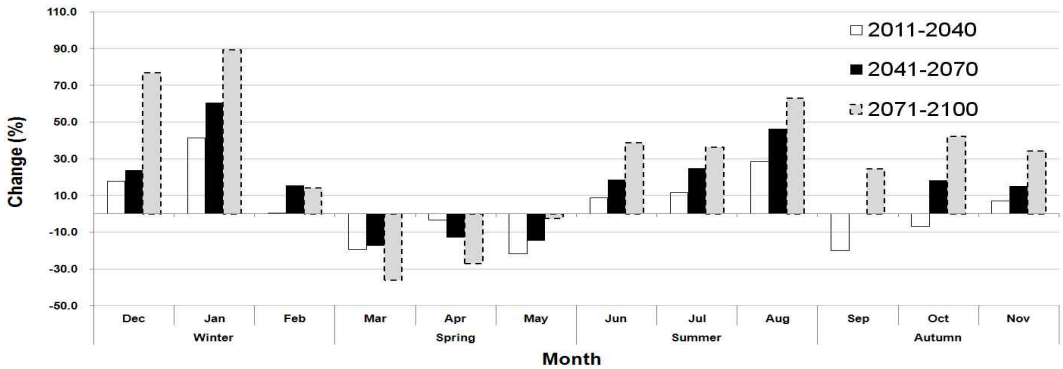


Fig. 11. Monthly Change Rate of Dam-inflow

Table 6. Monthly Change of Dam-inflow for Climate Change Scenario

Month		1990~2010 (Baseline)	2011~2040		2041~2070		2071~2100	
		Inflow (m^3/s)	Inflow (m^3/s)	Change (%)	Inflow (m^3/s)	Change (%)	Inflow (m^3/s)	Change (%)
Winter	12	532	627	+17.8	659	+23.8	941	+76.8
	1	406	575	+41.5	653	+60.7	769	+89.4
	2	589	590	0.0	680	+15.3	671	+13.9
Spring	3	985	793	-19.5	812	-17.6	628	-36.2
	4	1,472	1,424	-3.3	1,284	-12.8	1,074	-27.0
	5	1,997	1,562	-21.8	1,707	-14.5	1,945	-2.6
Summer	6	3,013	3,273	+8.6	3,570	+18.5	4,173	+38.5
	7	6,919	7,718	+11.5	8,640	+24.9	9,430	+36.3
	8	6,851	8,789	+28.3	10,017	+46.2	11,170	+63.0
Autumn	9	4,885	3,903	-20.1	4,886	0.0	6,076	+24.4
	10	1,504	1,403	-6.7	1,779	+18.3	2,139	+42.2
	11	778	833	+7.1	895	+15.1	1,044	+34.3
Annual		29,931	31,488	+5.2	35,582	+18.9	40,061	+33.8

는 경향을 보였다.

2) SWAT 모형의 검·보정은 상류지점인 산청 지점에 대해 먼저 보정한 후 유역 출구지점의 댐 유입량에 대한 보정을 실시하였는데, 모형의 정확성을 높이기 위해 매개변수 조절을 통해 검·보정 결과를 도출하였다.

3) 남강댐 유역의 유출량은 조도계수(Cn)와 토양증발보상계수(ESCO)와 지하수관련(GW) 매개변수에 대하여 민감하였다.

4) 상관성 판단결과 검·보정 기간의 NSE는 산청지점의 경우 각각 0.73, 0.63의 값을 나타내고 남강댐의 경우에는 각각 0.71, 0.69의 값을 나타내었다. 계산된 NSE의 경우 0보다 작으면 모델의 모의결과가 나쁘거나 실측자료와의 일관성이 없음을 의미한다. 모형의 효율성 판단 결과 산청관측소와 남강댐의 NSE의 값은 0.5 이상으로 만족하는 값을 보이는 것으로 나타났으며 결정계수인 R^2의 경우 두 지점의 검·보정기간의 평균값이 모두 0.6 이상으로 만족하는 결과를 나타내는 것을 알 수 있었으나, 향후 매개변수에 대한 추가적인 보정이 이루어져야 할 것이다.

5) 기후시나리오 예측결과 홍수기시 강우의 증가로 저수지에 유입되는 총량이 증가되고, 갈수기시에는 강우의 감소로 인해 유량이 감소되어 가뭄현상이 지속되어 수질이 악화될 것으로 예상된다.

6) 향후 남강댐 유역을 기후시나리오를 이용해 유역모델인 SWAT에 적용함으로써 남강댐 유역의 오염물질 유출을 시·공간적으로 해석할 수 있으며 추후 지속적인 댐 저수지의 수환경 관리를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사 K-water 연구원의 기후변화 대응 기후시나리오 및 모델구축 용역의 일환으로 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

참고문헌

경남발전연구원 (2010). 남강댐 하류 수질개선 방안, 2010년 중점정책연구 보고서, 경남발전연구원, pp. 19-45.

박종윤, 박민지, 안소라, 김성준 (2009). “기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제10호, pp. 877-889.

배덕효, 정일원 (2005). “기후변화에 따른 수자원 영향평가.” **방재정보**, 한국방재협회, 제21호, pp. 16-22.

배민식 (2008). 크리킹 방법을 적용한 남강댐 유역의 유출해석. 석사학위논문, 경상대학교, pp. 43-44.

이봉기 (2008). 인공신경망을 이용한 유역단위 기후변화 상세시나리오 추정. 석사학위논문, 단국대학교, pp. 9-22.

예 령, 정세웅, 이홍수, 윤성완, 정희영 (2009). “SWAT모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제1호, pp. 7-17.

정인균, 김성준, 박진혁, 황필선 (2007). “남강댐하류유역 분포형 강우유출모형 개발.” **대한토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 2035-2039.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.” *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Brown, L.C., and Barnell, T.O. Jr. (1987). The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA.

Cannon, A.J. (2007). “Nonlinear analog predictor analysis: A coupled neural network/analog model for climate downscaling.” *Neural Networks,* Vol. 20, Issue 4, pp. 444-453.

Chung, S.W., Gassman, P.W,. Kramer, L.A., Williams, J.R., and Gu, R. (1999). “Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa.” *Journal of Environmental Quality*, Vol. 28, No. 3, pp. 971-979.

Green, C.H., Tomer, M.D., Di Luzio, M., and Arnold, J.G. (2006). “Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa.” *Transactions of the ASAE,* Vol. 49, No. 2, pp. 413-4220.

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. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). “Evaluating the use of 'goodness of fit' measures in hydrologic and

hydro climatic model validation." *Water Resource Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 233-241.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Rojas, R. (1996). Neural Netwroks, Springer-Verlag, Berlin.

Ramanarayanan, T.S., Williams, J.R., Dugas, W.A., Heuck, L.M., and McFarland A.M.S. (1997). Using APEC to identify alternative practiced for animal waste managementm, Minnea-polis, *MN. ASAE*, pp. 97-2209.

Romanowicz, A. A., Vanclooster, M., Rounsevell, M., and Junesse, L. I. (2005). Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecology Modelling*, Vol. 187, pp. 27-39.

Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L. (2001a). "Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp. 1169-1188.

Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Hauck, L., and Dugas, W.A. (2001b). "Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution." *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, No. 6, pp. 1559-1570.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986). "Estimating generalized soil-water characteristics from texture." *Soil Science Society of America Journal,* Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.

Soil Survey Staff (1996). *National Soil Survey Handbook.* title 430-VI, USDA Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Williams, J.R. (1975). *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.* In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Roky Mountains.* Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.* Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.

Zhang, X., Srinivassan, R., and Hao, F. (2007). "Predicting Hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT model." *American Society of Agricultural and Biological Engineers,* ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.

논문번호: 12-013	접수: 2012.02.12
수정일자: 2012.03.08	심사완료: 2012.03.08