

유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석

An Analysis of the Effect of Climate Change on Flow in Nakdong River Basin Using Watershed-Based Model

손 태 석* / 이 상 도** / 김 상 단*** / 신 현 석****

Shon, Tae Seok / Lee, Sang Do / Kim, Sang Dan / Shin, Hyun Suk

Abstract

To evaluate influence of the future climate change on water environment, it is necessary to use a rainfall-runoff model, or a basin model allowing us to simultaneously simulate water quality factors such as sediment and nutrient material. Thus, SWAT is selected as a watershed-based model and Nakdong river basin is chosen as a target basin for this study. To apply climate change scenarios as input data to SWAT, Australian model (CSIRO: Mk3.0, CSMK) and Canadian models (CCCma: CGCM3-T47, CT47) of GCMs are used. Each GCMs which have A2, B1, and A1B scenarios effectively represent the climate characteristics of the Korean peninsula. For detecting climate change in Nakdong river basin, precipitation and temperature, increasing rate of these were analyzed in each scenarios. By simulation results, flow and increasing rate of these were analyzed at particular points which are important in the object basin. Flow and variation of flow in the scenarios for present and future climate changes were compared and analyzed by years, seasons, divided into mid terms. In most of the points temperature and flow rate are increased, because climate change is expected to have a significant effect on rising water temperature and flow rate of river and lake, further on the basis of this study result should set enhancing up water control project of hydraulic structures caused by increasing outer discharge of the Nakdong River Basin due to climate change.

Keywords : SWAT, Nakdong river, climate change, flow

요 지

미래기후에 대한 수환경 평가는 기후자료를 입력 값으로 요구하는 강우-유출모형을 이용하거나 유량 이외에 유사, 영양물질과 같은 수질인자를 동시에 모의할 수 있는 유역모형을 이용하여 평가하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 유역 모형으로 SWAT를 선정하고 낙동강 유역을 대상 유역으로 하여 기후변화로 인한 하천 유량의 영향을 분석하였다. 전지구기후모형 (GCM: Global Climate Model)중 비교적 한반도의 기후 특성을 잘 재현하고 있는 호주 (CSIRO: Mk3.0, 즉 CSMK) 모형과 캐나다 (CCCma: CGCM3-T47, 즉 CT47) 모형의 A2, B1, A1B 시나리오를 SWAT 모형의 입력 자료로 활용하였다. 각 시나리오의 미래의 기온과 강우의 증가율을 분석하고 현재와 미래기후변화 시나리오에 따른

* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정 (tsshon1@hanmail.net)

Ph.D., Student Dept. of School of Civil & Environmental Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

** 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 석사과정 (lsdzzang7@nate.com)

Graduate Student, Dept. of School of Civil & Environmental Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

*** 부경대학교 환경·해양대학 환경공학과 교수 (skim@pknu.ac.kr)

Prof., Dept. of Environmental Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea.

**** 교신저자, 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 정교수 (hsshin@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of School of Civil & Environmental Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

유량과 유량변동성을 연, 계절, 중기간으로 나누어 비교, 분석하였으며, 대부분의 지점에서 기온 및 유량이 증가하였으며 기후변화는 하천 및 호소의 수온상승과 유량변화에 큰 영향을 줄 것으로 예상되기 때문에 향후 본 연구의 결과를 토대로 기후변화에 따른 낙동강 유역의 유출량 증대로 인한 수공 구조물의 치수능력 증대 방안을 세워야 할 것이다.

핵심용어 : SWAT, 낙동강, 기후변화, 유량

1. 서론

21세기 변화되는 기후환경에 대응 가능한 물환경 적응 관리 체제 구축 및 녹색성장을 담보할 수 있는 환경유량 확보에 대한 요구와 관심이 증가되어 왔으며, 기후변화로 인한 하천환경에 영향을 최소화 하기 위해서는 기후변화의 영향을 정확히 평가하고, 환경유량 산정기술 및 녹색 성장 창출을 위한 물환경 적응관리기술 개발이 뒷받침되어야 한다. 지금까지의 물환경 자원 계획은 미래의 수문 환경조건이 과거와 같을 것이라는 가정에서 이루어졌지만 기후변화로 인한 물환경 관리에 있어서의 불확실성이 증대되어 기후변화의 영향을 반드시 고려하여야 하는 요소 중의 하나로 인식 되었다. 현재 전 세계적으로 연구된 다양한 기후실험이나 과거기상자료의 분석결과로부터 미래의 기후가 현재에 비해 많이 달라질 것으로 예측하고 있으며 (IPCC, 2008), 이러한 기후변화는 단순히 자연 현상에만 영향을 미치는 요소가 아니라 장기적인 관점에서 살펴보면 수문에 대한 영향으로 인하여 인간의 경제, 사회 그리고 환경에 까지 영향을 끼친다. 이에 기술적인 방법을 이용하여 물과 관련하여 발생하는 재난을 경감시키고 원상태로 자연을 복원할 수 있는 방법을 개발하는 것이 필요하다. 이에 국내외에서 기후변화와 관련된 연구가 최근 활발히 진행되고 있으며 수문분야에서 기후변화에 대한 영향을 파악하기 위하여 연구된 외국의 연구 경향을 살펴보면 단일 혹은 여러 전 지구 기후모형 (Global Climate Models, GCMs)으로부터의 미래기후정보를 바탕으로 이를 직접적으로 사용하거나 적절한 기법을 통하여 규모상세화한 결과를 강우-유출모형에 적용하여 유역의 유출반응을 살펴보는 방향을 취하는 것이 일반적이다 (Gosain et al., 2006). 특히, Bouraoui et al. (2002)에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 수질에 대한 영향을 분석하는 연구 또한 진행되고 있다. 또한 여러 GCM의 결과를 바탕으로 이에 대한 불확실성분석 (Takle et al., 2005) 등도 찾아볼 수 있다. 국내의 경우에도 단일 GCM 결과를 downscaling 한 뒤 이를 유역모형에 적용하여 유역의 수환경 변화에 대한 영향을 분석한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다 (이용준 등, 2008; 이길하 등, 2008; 한수희 등, 2009). 통계학적 Downscaling 기법을 이용하여 미래

기후정보의 불확실성을 감소시켜 미래기후변화에 대한 영향분석 및 유역단위의 수자원 영향평가에 적용한 연구 사례도 있다 (최대규, 2010). 또한 최근 SWAT 모형과 관련된 국내에서의 활발한 연구가 진행되고 있으며, 경기도 발안저수지 유역을 대상으로 SWAT모형을 구축하여 유출량, 유사량 및 영양물질 발생을 추정하여 오염총량관리 모듈로써의 적용을 제시한 바 있다 (김문성 등, 2009). 그리고 SWAT 모형내 댐, 저류지, 하도저류 등 저류시설물 요소에 대한 메커니즘 및 요소 분석을 통해 모형을 개선하고 이들 저류시설물 요소에 의한 하류 장기유출 변동 영향 분석을 다양한 유역에 적용한 바 있다 (신현석 등, 2007).

이에 본 연구는 전지구기후모형 (GCM: Global Climate Model) 중 비교적 한반도의 기후 특성을 잘 재현하고 있는 호주 (CSIRO: Mk3.0, 즉 CSMK, 해상도: 대기 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$, 해양 $0.8^{\circ} \times 1.9^{\circ}$)와 캐나다 (CCCma: CGCM3-T47, 즉 CT47, 해상도: 대기 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$, 해양 $0.5-1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$) 모형의 3가지 시나리오 A2, B1, A1B를 미래기후변화시나리오(2011~2100)로 작성하였으며, 이렇게 작성된 미래기후변화 시나리오의 기온, 강우의 변화를 분석하였으며 미래기후변화 시나리오와 현재 (1971~2004년)의 유량과 유량변동성을 비교하였다. 그리고 낙동강의 주요지점의 현재유량과 계절별, 중기간별로 미래기후변화 시나리오를 비교하여 낙동강유역의 수환경 및 환경 유량에 끼치는 기후변화의 영향을 분석하였다. SWAT 모형을 활용한 기후변화 모델링 연구 사례를 살펴보면 일본 (MIROC3.2), 독일 (ECHAM-OM) GCMs 등을 사용하여 왔는데 (박종윤 등, 2008) 본 연구에서는 캐나다 모형 (CT47)과 호주 모형 (CSMK)를 사용하였다는 것과 낙동강과 같은 대유역에 영향 평가 분석을 하였다는 것에 의의가 있다.

2. 연구방법

2.1 연구동향

대기 중의 이산화탄소 농도의 증가로 인한 기후변화는 기온의 증가, 강우량 패턴의 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 물순환 과정이 과거와 다른 패턴으로 변화할 수 있다고 알려져 있다 (IPCC, 2008). Dagnachew et al. (2003)은 토지피복과 기

후변화에 대한 수문학적 영향을 분석한 결과로 강우량의 10% 증가에 대해 유출량은 30% 증가, 기온 1.5°C 증가에 대해서는 유출량이 약 15% 감소한다고 제시하였으며, 또한 Gellens and Roulin (1998), Meehl and Tebaldi (2004), Cunderlik and Simonovic (2007)은 홍수 및 가뭄의 강도와 빈도 증가로 인하여 하천 건천화 등의 문제들이 발생할 가능성이 높다고 경고하고 있다. 현재 온실 가스의 증가로 인한 기후변화가 수환경 자원의 영향에 직접적으로 영향을 미치는 수량 등의 시공간적 변화에 대처하기 위한 현실적인 대응방안이 시급히 요구되고 있다. 이에 독일 Max-Planck 연구소의 ECHAM4/HOPE 기후변화모형을 이용한 IPCC (2008)의 장기 (1860~2100년) A2 (B1) 시나리오 모의실험 결과 CO₂ 농도가 820 ppmv (610 ppmv) 인 2100년에 지구기온은 현재보다 평균 4.6°C (3.0°C) 정도 증가하고, 동아시아 지역은 지구평균보다 높은 6.5°C (4.5°C)가 증가할 것으로 예측하였다. 2100년에 지구의 평균 강우량은 약 4.4% (2.8%)가 증가할 것이며, 동아시아 지역의 강우량은 10.5% (6.0%)가 증가할 것으로 예측하고 있다. IPCC (2008)에서는 다양한 기후변화 시나리오로 2020년대, 2050년대, 그리고 2080년대의 동아시아 지역의 기온, 강우량의 추세변화를 분석한 결과를 보면, 동아시아 평균기온은 A2 시나리오에서 2020년대에 1.2°C, 2050년대에 2.4°C, 2080년대에 4.0°C 상승하고, B1 시나리오에서 각각 1.2°C, 2.3°C, 3.0°C 상승하는 것으로 전망하고 있다. 동아시아 평균 강우량은 A2 시나리오에서 각각 0.6%, 2.4%, 5.4% 증가하고, B1 시나리오에서 각각 1.4%, 2.6%, 4.0% 증가하는 것으로 전망하고 있으며, 동아시아 지역의 기후변화 전망을 계절별로 보면, 겨울과 봄의 기온 상승이 여름에 비하여 약간 높으며, 동아시아의 북서지역에서 기온이 가장 높게 상승하고, 강우량은 유라시아 대륙 연안에서 변화가 클 것으로 전망하고 있다. 장기 기후변화 시나리오인 A2 시나리오는 온실가스 배출량이 급격히 증가하는 경우로서 발전지향적인 경제사회를 가정하였으며, 이에 반해 B1 시나리오는 온실가스 배출량의 증가세가 비교적 완만한 경우로서 기후변화협약이 잘 지켜지는 환경보전지향적인 사회를 가정한 경우이며 A1B는 A1 시나리오 그룹 중 하나로써 미래 세계를 매우 빠른 경제성장, 세기 중간에 최대 인구에 도달한 후 감소, 새롭고 더 효율적인 기술의 빠른 도입으로 묘사된 것 중 모든 에너지원의 균형 상태를 이루고 있는 경우이다.

2.2 유역기반 모형 구축

2.2.1 유역기반 모형의 선정 및 개요

한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역 등과 같은 대유역에서

의 기후변화에 따른 하천 유량 변동을 비롯한 수환경 자원 부존량의 평가를 수행하기 위해서는 장기간의 물순환 분석을 수행할 수 있는 유역모형이 요구된다. 따라서 유역기반의 장기모의가 가능한 SWAT 모형을 본 연구의 유역기반 모형으로 선정하였다.

SWAT 모형은 미국 농무성 산하 농업연구소(ARS, Agricultural Research Service)에서 개발된 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 유역내의 장기 강우-유출, 유사의 이동, 농화학물질을 예측하는 준분포형 유역 모형이다. SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에 대해 장기간에 걸친 다양한 토양도와 토지이용도 그리고 토지이용에 따른 유역의 수문, 토사, 영양물질 등의 거동을 예측하기 위해 개발되었다. Arcview GIS 소프트웨어와 연계되어 수치고도자료 및 하천망 자료를 통하여 전체 유역을 소유역으로 분할하고, 토양도와 토지이용도를 중첩하여 만든 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별로 수문량 및 오염물질 배출량 등을 계산한다.

2.2.2 연구대상 유역

본 연구의 대상 유역인 낙동강유역은 유역면적 23,790 km²으로 남한면적의 25.9%를 차지하고 있으며, 유로연장은 510.36 km이다. 낙동강 유역은 한반도 동남부에 위치하며 북쪽으로는 한강 유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 접하고 동쪽으로는 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있는 우리나라 제2의 하천유역이다. 낙동강유역의 특성은 산지가 많으며 하폭이 넓고 평탄하나 유출이 불규칙하고 홍수와 같은 재해의 피해가 크다.

낙동강 유역의 기상은 대개 극전선의 계절적인 이동으로 결정되며, 북아시아의 대륙성 이동과 태평양의 열대성 다습한 기류 이동으로 인하여 저온 및 고온의 기후가 상대적으로 나타난다. 겨울은 주로 11월부터 3월까지로, 북쪽으로부터의 기류 이동으로 인하여 저온·건조한 북서풍이 불며, 태평양의 열대성 기류가 이동해 오는 여름은 6월부터 9월 중순까지 계속되며 고온다습한 날씨를 나타낸다. 또한 봄 (3~5월)과 가을 (9~11월)에는 여러 방향의 풍향 분포를 나타내며, Table 1에서 낙동강유역의 하천 현황을 나타내었다.

2.2.3 SWAT 구축 및 보정

GIS 기반의 SWAT 모형 구축을 위하여 국립지리원의 1:50,000 지형도를 이용하여 DEM을 생성하고, 토양도는 농촌 진흥청의 유역내 37개의 토양도에 대한 수문학적 토양그룹 (A, B, C, D)의 분류와 토양층의 개수 및 토양층별 깊이를 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며

환경부에서 제공하고 있는 토지피복 분류도를 이용하였다. Usersoil.dbf 자료를 구축할 때 화학적 변수와 물리적 변수 중 HRU의 물의 순환에 주된 영향을 주는 물리적 변수를 고려하여 토양의 최대 깊이를 나타내는 SOL_ZMX와 토양 표면으로부터 층 하부까지의 깊이를 나타내는 SOL_Z, 토양의 수분밀도를 나타내는 SOL_BD 등 50여 가지 변수를 조사, 분석하여 토지이용도를 구축하고, 적용하였다.

SWAT과 같은 수문모형 구축을 통한 강우-유출 해석을 위해서는 우선 적용 강우관측망의 선정 및 유역평균 강우량의 산정이 필요하다(강두기, 2007년). 본 연구에서는 적용 강우관측망의 선정, 강우관측소 지점의 일강우량 자료 수집, 지점 범용크리깅기법을 이용한 지점별 일강우량 자료의 검·보정 및 유역평균강우량의 산정의 순서로 강우분석을 수행하였다. 낙동강 유역 전체에 대하여 지형통계학적(Geostatistics) 기법의 한 종류로서 공간강우의

Table 1. Composition of Nakdong River

River name	Area (km ²)	Extension (km)	Legal river (km)		
			Nation	Country	Total
Total	23,657.1 (23,817.3)	-	829.5	6,630.7	7,460.2
Nakdong river	7,794.3	521.5	400.7	86.8	487.5
Banbuen river	1,891.5	100.7		108.7	108.7
Naesung river	1,808.2	101.8	27.0	73.4	100.4
Byungsung river	434.8	21.0		30.0	30.0
Wi river	1,404.8	110.7		117.0	117.0
Gam river	1,003.7	71.4	41.2	29.0	70.2
Kumho river	2,086.7	116.0	71.8		71.8
Whe river	780.3	70.4		26.3	26.3
Hwang river	1,328.2	111.0	78.8	28.0	106.8
Nam river	3,466.1	186.3	145.4	40.0	185.4
Milyang river	1,425.6	96.2	33.2		33.2
Yangsang river	232.9	31.4	10.0	16.0	26.0
Rest	-	-	21.4	6,075.5	6,096.9

* Korean river index (1991, Ministry of land, transport and maritime affairs)

Table 2. Rainfall Observatories of SWAT Model

NAME					
Sangbuk	Jangchun	Iljik2	Buksang	Geochang	Tongroung
Chungdo	Gimchun	Gilan	choungyoun	Habcheon	Masan
Susan	Buhang2	Hyunseo	Samga	Milyang	Youngdeok
Haman	Angae	Goryoung	Taesu	Sancheong	Namhae
Changnyoung	Uiheong	Unbong	Daegu	Chupungroung	Chunyang
Gachang	Sangju	Uichon	Youngju	Jinju	
Youngsung	Nongam2	Goseon	Moonkyoung	Andong	
Hoabuk2	Dongro2	Seokbo	Uisung	Ulsan	
Deaga	Gibo	Bunam	Gumi	Pohang	
Waegwan	Pungsan	Youngyang	Youngcheon	Busan	

Table 3. Weather Observatories of Korea for SWAT

NO.	Name	NO.	Name	NO.	Name
1	Hapchun	8	Pusan	15	Weosung
2	Gumi	9	Sanchung	16	Jinju
3	Namhae	10	Andong	17	Chupung
4	Daegu	11	Youngduk	18	Tongyoung
5	Masan	12	Youngju	19	Pohang
6	Mungyung	13	Youngchun	20	Geochang
7	Milyang	14	Ulsan	21	Chunyang

분석을 통계적으로 유의하게 수행할 수 있으며, 유역평균강우량 산정 오차가 전통적인 기법들 보다는 가장 작게 나타나는 것으로 널리 사용되고 있는 격자범용크리깅(block universal krigging) 기법을 적용하여 유역평균강우량을 산정하였다. 선정된 강우관측망 지점은 30년 이상의 강우자료를 보유하고 낙동강 유역에 또는 근접한 곳에 위치한 상북 등 총 56개 지점이며 (Table 2), 모형 구축 시는 일유량 모의를 위해 유역평균 일강우량을 적용하였다.

SWAT 모형 내 증발산 계산을 위한 기상자료에는 태양복사, 기온, 풍속, 상대습도 자료 등이 요구되며, Table 3은 본 연구에서 적용한 합천 등 총 21개 지점의 기상자료 입력 지점이다.

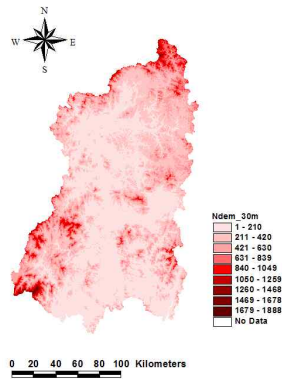
물수지 요소는 단위유역별 하천에서의 생활용수 취수량, 하수처리장 및 폐수처리장 방류량, 회귀율을 고려한 농업용수 및 공업용수 취수량 및 방류량, 영천도수로 등 유역간 물이동 등을 고려하였으며, SWAT 모형에서의 유역내 수문학적 물수지는 다음 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

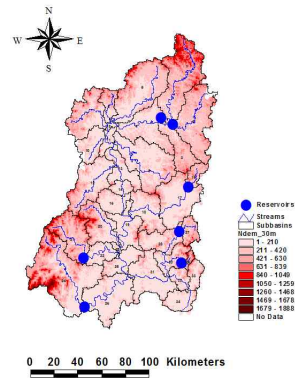
여기서, SW_t 는 최종 토양 수분함유량, SW_0 는 초기 토양 수분함유량, t 는 시간, R_{day} 는 강우량, Q_{surf} 는 지표면 유출량, E_a 는 증발산량, w_{seep} 는 토양층의 침투량, Q_{gw} 는 하천으로의 회귀수량이다. 본 연구에서 적용된 물수지 자료는 낙동강 오염총량관리 기본계획 수립 시 고려된 물수지 요소를 이용하였다.

그리고 댐상류 유역별 모의를 위해 실측 일유입량 자료 및 일 방류량 자료를 수집하고 결측 자료를 보완하여 모의에 적용하였으며, 댐별 제원은 한국수자원 공사에서 제공하고 있는 실제 댐 제원을 입력하였다. Fig. 1에 SWAT 모형의 세부적인 구축과정을 나타내었다.

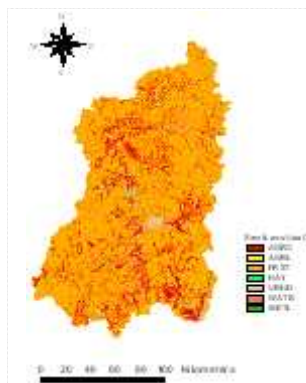
SWAT 모형을 이용한 유출 모의 결과를 실측자료와 검정 오차분석을 수행하였다. 전체 모의 기간은 1995~2004년 (10년)으로, 1995~1996년은 모형의 안정화 기간, 1997~2002년은 모형 보정 (calibration) 기간, 2003~2004년은 모형 검정 (validation) 기간으로 설정하였다. 구축된 모형 타당성 평가를 위해 상대첨두오차 (Relative PeakError), 상대총량오차 (Relative Volume Error), 절대평균편차 (Absolute Mean Bias), 제곱근평균자승오차 (Root Mean Square Error), 상관계수 (Correlation Coefficient)로 검정 오차분석을 실시하여 모형의 적합성을 검정하였다. 안동댐, 임하댐, 합천댐의 경우 년 유량, 월 유량 자료는 상관관계가 0.84~0.97로 매우 양호한 결과를 보이고 있으나, 일 유량의 경우 0.48~0.80의 상관관계를 보이고 있다. 그리고 실측 자료를 이용한 유황분석 결과와 SWAT 모형을 통해 도출된 일 유량 자료의 유황분석 결과를 이용한 검정오차 분석 결과 댐 지점의 경우 안동댐의 경우 상관관계가 0.59~0.91, 임하댐의 경우 0.76~0.82, 합천댐의 경우 0.68~0.91로 상당히 양호한 결과를 보이고 있음을 알 수 있는데, 이는 수문 관측자료 중 비교적 신뢰도 및 그 정도가 높은 댐 유입량 자료를 이용한 모형의 보정이 수행되었기 때문으로 판단된다. 하도 지점에 대한 모형의 보정은 기준 보정 지점을 진동 지점으로 하여 유출 및 유량에 대한 보정, 첨두유량 및 감쇠곡선의 형태에 대한 보정, 관측자료를 이용한 상류에서 하류방향으로의 보정을 통해 수행하였다. 진동지점에서 0.65~0.76으로 비교적 양호한 결과를 보였다. 지표면 유출과 관련된 매개변수로는 OV_N , $CH_N(1)$, $SURLAG$, $CH_K(1)$ 이며, 그 적용범위는 각각 0.01~0.1, 0.01~0.03, 1~4, 0.0~0.5이며, 지표면 유출에 대한 보정은 토양 수분함유량 (SOL_AWC) 및 토양에서의 증발량 관련 계수 (ESCO)를 조정하여 수행하였다. 지표면 유출에 대한 보정을 수행한 후 기저유출에 대한 보정을 위하여 GW_REVAP , $REVAPMN$ 및 $GWQMN$ 등 지하수 유출과 관련된 계수의 조정 과정을 수행하였으



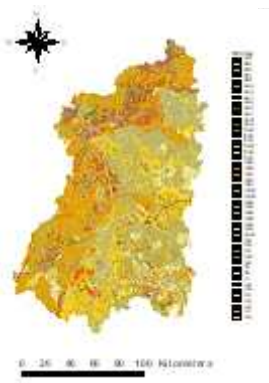
(a) DEM



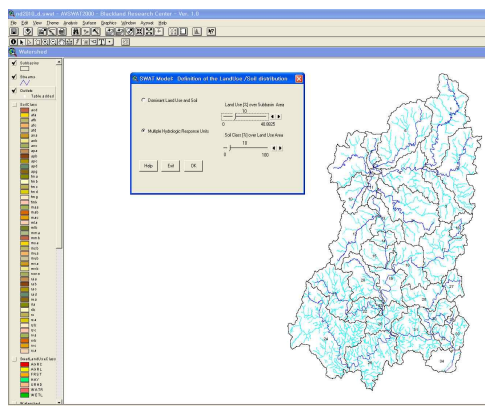
(b) River Network and Dam Spot



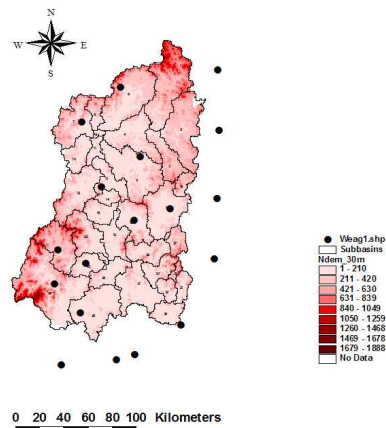
(c) Land Use Coverage



(d) Soil Coverage



(e) HRU



(f) Weather Stations of Nakdong River Watershed

Fig. 1. Detailed Construction Process of SWAT Model

며, 지하수 관련 주요 매개변수는 GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF, REVAPMN, GW_REVAP, RCHARG_DP 이며, 적용범위는 각각 10~50, 10~50, 0.4~0.7, 1~10, 0.1~0.2, 0.0~0.2이다. Table 4에 검정오차분석 결과 중앙동댐 유역의 결과를 나타내었다.

2.3 GCMs 시나리오 선정

본 연구에서는 CSMK와 CT47의 GCMs과 각 GCMs

의 A2, A1B, B1의 시나리오의 자료를 사용하였다. 선정된 CSMK와 CT47은 17개의 GCMs 모의자료를 우리나라 24개 지점의 30년간의 기온과 강수량 자료와 비교분석하여 강수량과 기온에 대하여 GCMs의 현재기후의 재현성을 편차, 계절성, 변동성의 항목으로 평가하고 추가적으로 우리나라 육지의 표현능력을 분석한 최대규(2010)의 연구결과에서 우리나라의 지형을 적절히 표현하고 통계학적 평가에서도 우수한 순위를 보이고 있는

Table 4. Statistical Error Analysis Results for Model Calibration

Point	Flow	Relative Peak Error	Relative Volume Error	Absolute Mean Bias	Root Mean Square Error	Correlation Coefficient
Andongdam	Annual Average	17.4	14.6	117.1	132.0	1.0
	Monthly Average	22.0	14.6	14.0	21.2	0.9
	Daily Average	66.2	14.6	26.0	96.6	0.6

GCMs이다.

2.4 Downscaling

GCMs는 약 100~500 km의 저해상도의 미래기후 정보를 제공함으로써 상대적으로 유역단위의 소규모지역에 대한 기후정보로는 적절치 않다. 따라서 본 연구를 위하여 GCMs의 미래기후자료에 대해 downscaling을 실시하여 본 연구에 적합한 자료를 생성하였다. downscaling에는 크게 동역학적 downscaling과 통계학적 downscaling을 들 수 있는데 동역학적 downscaling의 여러 가지 단점을 고려하여 본 연구에서는 과거기후특성을 잘 반영하여 재현성이 우수하고 계산부하가 적은 통계학적 downscaling을 사용하고 구체적인 방법은 아래와 같다.

Downscaling의 기후변수는 GCMs의 미래기후변수 중 강수량과 평균기온을 고려하였으며, 대부분의 GCMs의 경우 일자료를 제공하지 않고 제공하더라도 신뢰성이 떨어지므로 월자료를 이용하였다. GCMs의 격자자료에서 우리나라에 해당하는 부분을 추출하여 공간평균자료를 생성하고 아울러 과거 1971~2000년의 30년간의 전국 24개 지점(속초, 춘천, 강릉, 서울, 인천, 울릉도, 수원, 청주, 대전, 추풍령, 안동, 포항, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포)의 공간평균 자료를 수집하였다.

다음 단계로 편의보정(bias correction)된 GCMs 공간평균 현재 및 미래 자료를 산출하였다. 이는 GCMs에서 제공되는 1971~2000년의 평균기온과 강수량 자료를 동 기간의 24개 지점에서 관측된 공간평균자료와 일치시키기 위한 편의보정으로 월 단위로 수행하였다. 사용된 기법은 GCMs별 모의 결과의 누가확률밀도함수를 관측된 공간평균자료의 누가확률밀도함수에 Quantile mapping 하였다. 이 때 누가확률밀도함수는 Eq. (2)의 Kernel smoothing method를 이용하였다. 즉,

$$x = F^{-1}(G(y)) \tag{2}$$

여기서, y 는 GCM 현재 기후조건 모의값, G 는 y 의 누가확률밀도함수, F 는 관측된 공간평균자료의 누가확률밀도

함수, x 는 Eq. (3)의 편의 보정된 현재기후조건 모의값이며 이와 같은 방식으로 GCMs에 의해 예측된 미래자료도 편의보정을 실시한다.

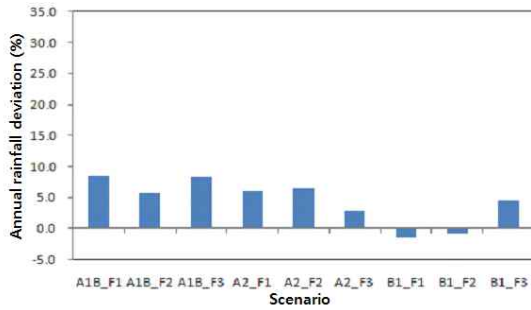
$$x' = F^{-1}(G(y')) \tag{3}$$

여기서, y' 는 GCM 미래 기후조건 모의값, G 는 GCM 현재 기후조건 모의자료의 누가확률밀도함수, F 는 관측된 공간평균자료의 누가확률밀도함수, x' 는 편의 보정된 미래기후조건 모의값이다. 이와 같은 산출한 미래 월 기상자료(2011~2100년)는 과거 30년간 관측된 공간평균 월 기상자료에 대한 anomaly로 표출하는데 강수의 경우는 백분율, 평균기온의 경우는 편차를 이용한다.

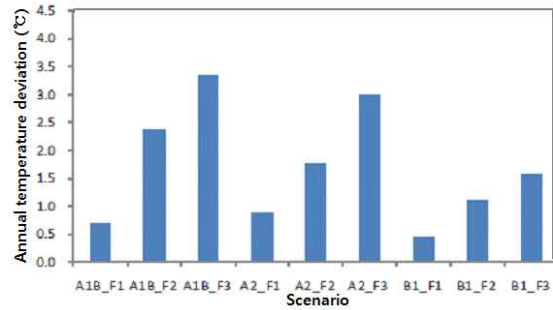
다음으로 편의 보정된 GCMs의 공간평균 자료를 SWAT 구동을 위하여 낙동강의 지점별 미래자료로 산출한다. 낙동강 19개 기상관측소(부산, 대구, 거창, 거제, 구미, 합천, 진주, 문경, 남해, 포항, 산청, 통영, 의성, 울진, 울릉, 울산, 영천, 영덕, 영주)의 30년(1980~2009년) 자료의 공간평균 월 기상자료에 예측된 anomaly를 적용하여 미래 월 공간평균 기상자료(2011~2100년)를 산출한다. 미래 공간평균 30년(2011~2040년) 자료를 내림차순으로 정렬하고, 과거 관측 공간평균자료도 내림차순으로 정렬한다. 강수량은 정렬된 미래 공간평균 자료의 순위에 해당하는 과거 관측 공간평균자료의 공간분포 분율(지점 월자료 / 공간평균 월자료) 및 일 단위 시간분포 분율(지점 일별 자료 / 지점 월자료)를 미래 공간평균 자료에 적용하여 미래 지점별 월 기후자료 생성한다. 다음 Fig. 2는 강수량과 기온의 편의 보정된 CSMK모형의 부산지점을 예로 보여주고 있다.

기온은 강수량과 같은 방법이지만 공간분포 분율 대신 공간분포 편차를 이용한다. 2041~2070년, 2071~2100년 자료도 같은 방법으로 과거 관측 자료의 공간분포와 시간분포를 반영하여 미래 지점별 월 기후자료 생성한다.

상대습도, 풍속, 일사량 등의 기타 기후자료의 경우에는 강수기준 정렬 순위에 부합하는 과거 관측자료가 미래의 특정 해, 특정 월에도 같은 값을 갖는 것으로 가정하여



(a) Rainfall



(b) Temperature

Fig. 2. Annual Average Deviation of the Future (Busan)

미래 지점별 일 기후자료를 생성한다.

2.5 적용

앞서 구축한 낙동강 SWAT 모형은 물수지를 반영한 모형이나 미래기후변화시나리오는 물수지를 고려할 수 없기 때문에 자연유량 개념을 도입하여 기 구축된 SWAT 모형에서 물수지 부분을 제외하고 현재와 미래의 자연유량을 산정한다. 여기서 자연유량이란 현재 유역의 수문조건 하에 다목적 댐의 방류량과 유역의 물이용을 배제한 유량으로 정의된다(김재철과 김상단, 2007) 현재와 미래기후변화 시나리오에 따라 모의한 자연유량을 Fig. 3과 같이 낙동강 유역의 주요지점인 낙본E, 낙본I, 낙본N 지점에서 산정하고, 세 개 지점 대하여 현재 유량과 2011~2100년에 걸친 총 90년간의 예측유량(CSMK와 CT47)을 비교하고, 장기 기후변화 시나리오를 다시 중기간으로 나누어 각각을 시나리오별로 지점의 유량과 유량변동성을 비교·분석한다.



Fig. 3. Analysis Points of Nakdong River Basin

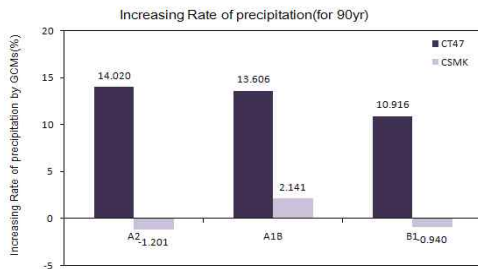
3. 연구결과

3.1 미래기후변화 시나리오의 수문기상자료 분석

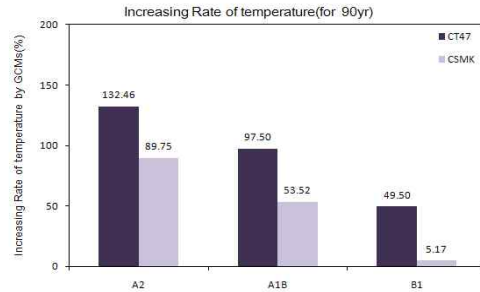
CT47과 CSMK 모형의 장기 기후변화 시나리오인 A2, A1B, B1에 대하여 전기간(90 yr)과 중기간으로 30년씩 2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년으로 나누고, 계절별로 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월로 나누어 기온과 강우의 증가율을 비교·분석하였다.

전체기간(90 yr)에서는 Fig. 4에서와 같이 CT47 모형에 의한 강우의 증가율은 A2의 경우가 14.0%로 가장 높게 나타났고, CSMK 모형은 A1B의 경우가 2.1%로 가장 높게 나타났다. 기온의 증가율은 두 가지 모형 CT47과 CSMK 모두 A2 시나리오가 각각 132.46%과 89.8%로 가장 높게 나타났으며, 기온의 증가율은 CT47와 CSMK 두 모형 모두 A2 > A1B > B1의 순서를 보였고, 강우의 증가율은 CT47 모형의 경우 A2 > A1B > B1의 순서를 보였으나, CSMK 모형의 경우는 A1B > B1 > A2의 순서를 보였다.

강우증가율에 대한 시나리오별 계절분석에서 CSMK 모형 중 A2 시나리오는 여름에 9.7%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 -13.8%로 가장 낮은 증가율을 보였으며, A1B 시나리오는 여름에 11.03%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 -6.8%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 그리고 B1 시나리오는 겨울에 5.4%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 -9.7%로 가장 낮은 증가율을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오는 봄에 24.3%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 0.8%로 가장 낮은 증가율을 보였으며, A1B 시나리오는 봄에 22.1%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 3.7%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 그리고 B1 시나리오는 겨울에는 15.7%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 6.7%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 두 가지 모형 모두 여름과 겨울의 강우증가율이 크게 보

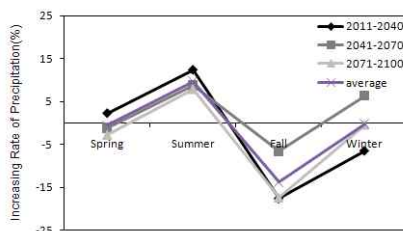


(a) Increasing Rate of Precipitation

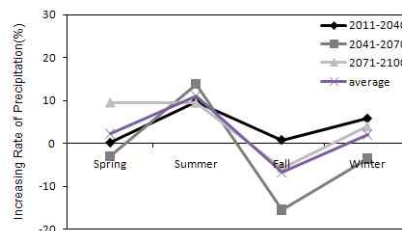


(b) Increasing Rate of Temperature

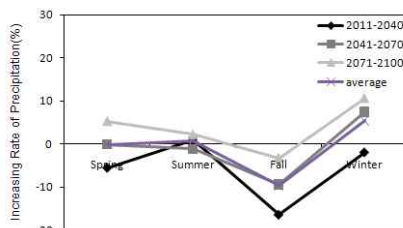
Fig. 4. Analysis of GCMs (CSMK, CT47) Scenarios



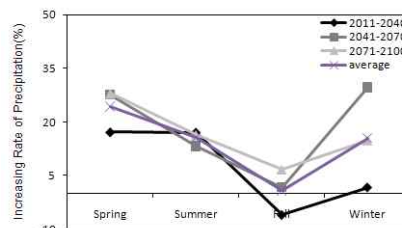
(a) CSMK_A2



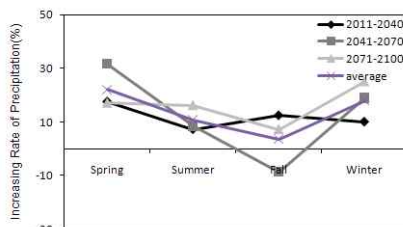
(b) CSMK_A1B



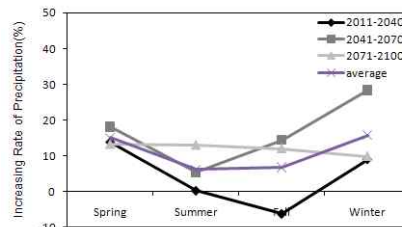
(c) CSMK_B1



(d) CT47_A2



(e) CT47_A1B



(f) CT47_B1

Fig. 5. Seasonal Increasing Rate of Precipitation by Scenario of GCMs in 2011~2100

이고 가을의 강우증가율이 가장 낮게 나타났으며 강우증가율에 대한 시나리오별 계절분석의 결과는 Fig. 5에 도시하였다.

기온증가율에 대한 시나리오별 계절분석에서 CSMK 모형 중 A2 시나리오는 봄에 119.6%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 70.3%로 가장 낮은 증가율을 보였으며, A1B 시나리오는 겨울에 90.9%로 가장 높은 증가율을 보였고, 가을에 32.4%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 그리고 B1 시나리오의 경우 봄에 34.7%로 가장 높은 증가율을

보였고, 겨울에 -20.5%로 가장 낮은 증가율을 보였다. CT47 모형의 경우 A2 시나리오는 겨울에 141.4%로 가장 높은 증가율을 보였고, 여름에 117.2%로 가장 낮은 증가율을 보였으며, A1B 시나리오는 겨울에 116.1%로 가장 높은 증가율을 보였고, 여름에 72.8%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 그리고 B1 시나리오의 겨울에 74.9%로 가장 높은 증가율을 보였고, 여름에 28.6%로 가장 낮은 증가율을 보였으며, 기온증가율에 대한 시나리오별 계절분석의 결과는 Fig. 6에 도시하였다.

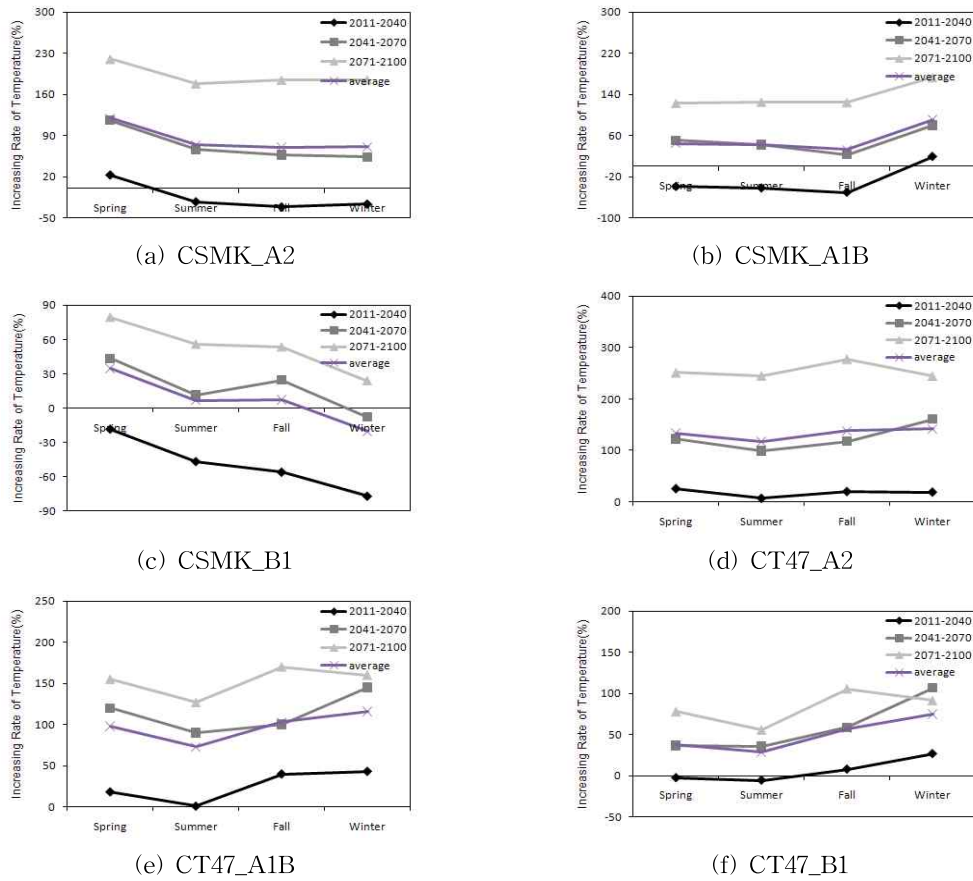


Fig. 6. Seasonal Increasing Rate of Temperature by Scenario of GCMs in 2011~2100

3.2 미래기후변화 시나리오에 따른 하천유량 모의 결과

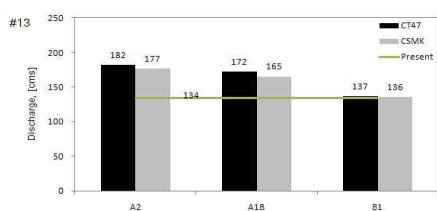
전기간으로 시나리오별 지점에 대한 유량과 유량변동성을 비교·분석한 결과, 낙본E 지점에서는 CT47 모형 A2 시나리오가 206 cms로 54% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, CSMK 모형 B1 시나리오가 136 cms로 1% 증가하여 가장 작은 유량을 보였다. 낙본I 지점에서는 CT47 모형 A2 시나리오가 396 cms로 34% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, CSMK 모형 B1 시나리오가 303 cms로 3% 증가하여 가장 작은 유량을 보였다. 그리고 낙본N 지점에서는 CT47 모형 A2 시나리오가 468 cms로 34% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, CSMK 모형 B1 시나리오가 359 cms로 3% 증가하여 가장 작은 유량을 보였다. 이렇게 현재의 유량에 비하여 두 가지 모형의 모든 시나리오에서 현재 유량이 현재보다 크게 나타나고 유량변동성이 더 커짐을 알 수 있다. 강수 증가율에 따른 유량변동성의 관계를 살펴보면 CT47 모형 A2 시나리오가 강수증가율 14.0%일 때 낙본 E는 54%, 낙본 I는 34%, 낙본 N은 34% 증가하였으며, A1B 시나리오가 강수증가율 13.6%일 때 낙본 E, 낙본 I, 낙본 N 세 지점 모두 34% 증가하였고, B1

시나리오가 강수증가율 10.92%일 때 낙본 E는 29%, 낙본 I는 19%, 낙본 N은 28% 증가하였다. 그리고 CSMK 모형 A2 시나리오가 강수증가율 -1.2%일 때 낙본 E는 9%, 낙본 I는 28%, 낙본 N은 27% 증가하였으며, A1B 시나리오가 강수증가율 2.1%일 때 낙본 E는 23%, 낙본 I는 21%, 낙본 N은 21% 증가하였고, B1 시나리오가 강수증가율 -0.9%일 때 낙본 E는 1%, 낙본 I는 3%, 낙본 N은 3% 증가하였다. 이러한 결과를 봤을 때 CT47 모형의 경우는 강우량 증가율에 2~4배의 차이를 보여 기존 연구에 부합하는 결과를 보였으나, CSMK 모형의 경우는 강우량 증가율이 미세하지만 음의 값을 가지는 A2와 B1 시나리오에서도 유량 변동성이 증가경향을 보였고, A1B 시나리오에서도 10배의 차이를 보여 기존 연구에 부합하지 않는 결과를 보였다. 이는 CSMK 모형 미소한 강우 증가율에 기온 증가율의 영향을 받아 유량 변동성에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. Table 5와 Fig. 7에 현재 유량과 총 90년간의 시나리오별 유량을 비교하여 나타내었다.

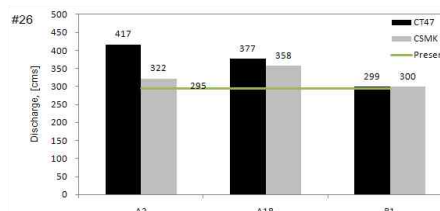
Table 6에서 낙본E 지점에 대하여 GCMs 시나리오를 계절별-기간별로 유량과 유량변동성을 비교·분석한 결과를 나타내었다. CSMK 모형 중 A2 시나리오는 가을에 258 cms로 70% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 겨울에

Table 5. Analysis of Yearly Flow and Flow Variation at the Analysis Points

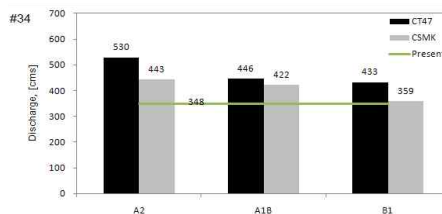
Year	GCM	Scenario	Nakbon E		Nakbon I		Nakbon N	
			Q (cms)	Q (%)	Q (cms)	Q (%)	Q (cms)	Q (%)
Present			134	-	295	-	348	-
All (90 yr) 2011~2100	CSMK	A2	146	9	377	28	443	27
		A1B	165	23	358	21	422	21
		B1	136	1	303	3	359	3
All (90 yr) 2011~2100	CT47	A2	206	54	396	34	468	34
		A1B	172	28	377	28	446	28
		B1	173	29	350	19	413	19
2011~2040	CSMK	A2	146	9	321	9	379	9
		A1B	175	30	376	27	444	27
		B1	130	▼-3	293	▼-1	347	0
	CT47	A2	146	9	383	30	452	30
		A1B	180	34	386	31	456	31
		B1	130	▼-3	307	4	362	4
2041~2070	CSMK	A2	149	11	330	12	388	11
		A1B	154	15	337	14	399	15
		B1	133	▼-1	297	1	352	1
	CT47	A2	149	11	405	37	480	38
		A1B	163	21	361	22	428	23
		B1	133	▼-1	376	27	442	27
2071~2100	CSMK	A2	143	7	317	8	376	8
		A1B	167	24	359	22	423	21
		B1	145	8	311	5	365	5
	CT47	A2	143	7	399	35	471	35
		A1B	173	29	382	29	453	30
		B1	145	8	368	25	436	25



(a) Nakbon E



(b) Nakbon I



(c) Nakbon N

Fig. 7. Comparison Present Flow with Flow Estimated by Climate Change Scenarios at the Analysis Points

Table 6. Seasonal Flow and Flow Variation at Nakbon E

Nakbon E	GCMs	Scenario	Spring		Summer		Fall		Winter	
			Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)
present			51	0	304	0	152	0	30	0
CSMK	A2	2011-2100	75	46	345	14	258	70	32	7
	A1B		54	6	291	▼-4	282	85	34	13
	B1		57	11	219	▼-28	235	55	32	9
CT47	A2	2011-2100	119	132	404	33	173	14	32	7
	A1B		76	49	299	▼-2	272	79	40	36
	B1		94	82	294	▼-3	136	▼-11	23	▼-24
CSMK	A2	2011-2040	78	52	347	14	250	64	32	8
		2041-2070	70	36	350	15	271	78	36	21
		2071-2100	77	50	338	11	253	66	27	▼-9
	A1B	2011-2040	51	▼-1	306	1	305	100	37	25
		2041-2070	50	▼-3	288	▼-5	253	66	25	▼-16
		2071-2100	62	21	278	▼-8	287	89	39	31
	B1	2011-2040	48	▼-7	213	▼-30	229	50	29	▼-2
		2041-2070	62	21	219	▼-28	220	45	31	5
		2071-2100	61	19	224	▼-26	257	69	37	25
CT47	A2	2011-2040	122	137	395	30	167	10	26	▼-12
		2041-2070	130	153	405	33	180	18	29	-2
		2071-2100	106	106	413	36	172	13	40	35
	A1B	2011-2040	80	56	321	6	278	83	40	35
		2041-2070	84	64	261	▼-14	263	73	43	45
		2071-2100	65	27	314	3	276	81	38	28
	B1	2011-2040	96	87	285	▼-6	134	▼-12	16	▼-46
		2041-2070	94	83	285	▼-6	128	▼-16	24	▼-19
		2071-2100	91	77	312	3	145	▼-5	28	▼-6

32 cms로 7% 증가하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 가을에 282 cms로 85% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 291 cms로 4% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 가을에 235 cms로 55% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 219 cms로 28% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오는 봄에 119 cms로 132% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 겨울에 32 cms로 7% 증가하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 가을에 272 cms로 79% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 299 cms로 2% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 봄에 94 cms로 82% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 294 cms로 3% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다.

중기간 분석에서 CSМК 모형의 A2 시나리오는 봄에

2011~2040년이 78 cms로 52% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 가을, 겨울에 2041~2070년이 각각 350, 271, 36 cms로 15, 78, 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 봄에 2071~2100년이 62 cms로 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 가을에 2011~2040년이 각각 306, 305 cms로 1, 100% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 겨울에 2071~2100년이 39 cms로 31% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 봄에 2041~2070년이 62 cms로 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을, 겨울에 2071~2100년이 각각 257, 37 cms로 69, 25% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 여름에는 2071~2100년이 224 cms로 26% 하락하여 가장 큰 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오는 봄, 가을에 2041~2070년이 각각 130, 180 cms로 153, 18% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 겨울에 2071~2100년이 각

Table 7. Seasonal Flow and Flow Variation at Nakbon I

Nakbon I	GCMs	Scenario	Spring		Summer		Fall		Winter	
			Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)
Present			120	0	475	0	524	0	62	0
CSMK	A2	2011-2100	108	▼-10	575	21	541	3	65	4
	A1B		128	7	624	31	608	16	71	15
	B1		129	7	512	8	491	▼-6	70	12
CT47	A2	2011-2100	264	120	672	41	647	23	85	37
	A1B		179	49	649	37	596	14	83	33
	B1		187	56	535	13	388	▼-26	87	41
CSMK	A2	2011-2040	105	▼-13	556	17	552	5	63	2
		2041-2070	117	▼-3	602	27	526	0	76	23
		2071-2100	103	▼-14	567	19	545	4	55	▼-11
	A1B	2011-2040	126	5	644	36	654	25	81	31
		2041-2070	109	▼-9	625	32	561	7	55	▼-11
		2071-2100	149	24	603	27	609	16	78	26
	B1	2011-2040	110	▼-8	488	3	510	▼-3	63	2
		2041-2070	143	19	495	4	480	▼-8	70	13
		2071-2100	133	11	553	16	482	▼-8	76	23
CT47	A2	2011-2040	259	116	656	38	642	23	79	27
		2041-2070	296	147	692	46	649	24	82	32
		2071-2100	238	98	668	41	649	24	94	52
	A1B	2011-2040	185	54	684	44	598	14	79	27
		2041-2070	198	65	582	23	577	10	88	42
		2071-2100	154	28	681	43	614	17	81	31
	B1	2011-2040	150	25	521	10	380	▼-27	76	23
		2041-2070	200	67	552	16	393	▼-25	94	52
		2071-2100	210	75	532	12	390	▼-26	92	48

각 413, 40 cms로 36, 35% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 봄, 겨울에 2041~2070년이 각각 84, 43 cms로 64, 45% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 가을에 2011~2040년이 각각 321, 278 cms로 6, 83% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 봄에 2011~2040년이 96 cms로 87% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 2071~2100년이 312 cms로 3% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을, 겨울에 2071~2100년이 각각 145, 28 cms로 5, 6% 하락하여 가장 큰 유량을 보였다.

전체 시나리오별 각각 계절의 강우증가율을 비교하였을 때 봄은 CT47 모형 중 A2 시나리오의 2041~2070년이 130 cms로 153% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름은 CT47 모형 중 A2 시나리오의 2071~2100년이 413 cms로 36% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을은 CSMK

모형 중 A1B 시나리오의 2011~2040년이 305 cms로 100% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 겨울에 CT47 모형 중 A1B 시나리오의 2041~2070년이 43 cms로 45% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다.

Table 7에서 낙본I 지점에 대하여 GCMs 시나리오를 계절별-기간별로 유량과 유량변동성을 비교·분석한 결과를 나타내었다. CSMK 모형 중 A2 시나리오는 여름에 575 cms로 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 봄에 108 cms로 10% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 여름에 624 cms로 31% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 봄에 128 cms로 7% 상승하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 겨울에 70 cms로 12% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 491 cms로 6% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오는 봄에 264 cms로 120% 증가하여 가장 큰

Table 8. Seasonal Flow and Flow Variation at Nakbon N

Nakbon N	GCMs	Scenario	Spring		Summer		Fall		Winter	
			Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)	Q (cms)	ΔQ (%)
Present			146	0	562	0	613	0	72	0
CSMK	A2	2011-2100	130	▼-11	903	61	663	8	75	4
	A1B		155	6	927	65	522	▼-15	83	15
	B1		155	6	772	37	427	▼-30	81	13
CT47	A2	2011-2100	217	49	1038	85	764	25	99	38
	A1B		216	48	964	72	507	▼-17	96	33
	B1		198	36	894	59	539	▼-12	101	40
CSMK	A2	2011-2040	127	▼-13	670	19	647	6	73	1
		2041-2070	140	▼-4	619	10	706	15	89	24
		2071-2100	124	▼-15	681	21	635	4	63	▼-13
	A1B	2011-2040	155	6	761	35	764	25	95	32
		2041-2070	131	▼-10	743	32	658	7	65	▼-10
		2071-2100	180	23	715	27	707	15	90	25
	B1	2011-2040	133	▼-9	586	4	595	▼-3	74	3
		2041-2070	173	18	589	5	566	▼-8	82	14
		2071-2100	158	8	570	1	646	5	87	21
CT47	A2	2011-2040	189	29	777	38	748	22	92	28
		2041-2070	242	66	824	47	759	24	95	32
		2071-2100	219	50	772	37	784	28	109	51
	A1B	2011-2040	220	51	711	27	798	30	93	29
		2041-2070	241	65	693	23	677	10	101	40
		2071-2100	185	27	733	30	800	31	95	32
	B1	2011-2040	153	5	619	10	564	▼-8	87	21
		2041-2070	193	32	623	11	458	▼-25	95	32
		2071-2100	178	22	604	7	462	▼-25	100	39

유량을 보였고, 가을에 647 cms로 23% 증가하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 봄에 179 cms로 49% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 596 cms로 14% 증가하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 봄에 187 cms로 56% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 388 cms로 26% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다.

중기간 분석에서 CSMK 모형 중 A2 시나리오의 봄에 2041~2070년이 117 cms로 3% 하락하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 2041~2070년이 602 cms로 27% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을에 2011~2040년이 552 cms로 5% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 겨울에 2041~2070년이 76 cms로 23% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. A1B 시나리오의 봄에 2071~2100년이 149 cms로 24% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 가을, 겨울에

2011~2040년이 각각 644, 654, 81 cms로 36, 25, 31% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 B1 시나리오의 봄에 2041~2070년이 143 cms로 19% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 겨울에 2071~2100년이 각각 553, 76 cms로 16, 23% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을에는 2011~2040년이 510 cms로 3% 하락하여 가장 큰 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오의 봄, 여름에 2041~2070년이 각각 296, 692 cms로 147, 46% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 2041~2070년, 2071~2100년이 649 cms로 24% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 겨울에 2071~2100년이 94 cms로 52% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오의 봄, 겨울에 2041~2070년이 각각 198, 88 cms로 65, 42% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 2011~2040년이 684 cms로 44% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을에 2071~

2100년이 614 cms로 17% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오의 봄에 2071~2100년이 210 cms로 75% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 겨울에 2041~2070년이 각각 552, 94 cms로 16, 52% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을에 2041~2070년이 393 cms로 25% 하락하여 가장 큰 유량을 보였다.

전체 시나리오별 각각 계절의 유량변동성을 비교하였을 때 봄, 여름은 CT47 모형 중 A2 시나리오의 2041~2070년이 각각 296, 692 cms로 147, 46% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을은 CSMK 모형 중 A1B 시나리오의 2011~2040년이 654 cms로 25% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 겨울에 CT47 중 A2 시나리오의 2071~2100년이 94 cms로 52% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다.

Table 8에 낙본N 지점에 대하여 GCMs 시나리오를 계절별-기간별로 유량과 변동성을 비교·분석한 결과를 나타내었다. CSMK 모형 중 A2 시나리오는 여름에 903 cms로 61% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 봄에 130 cms로 11% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 여름에 927 cms로 65% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 522 cms로 15% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 여름에 772 cms로 37% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 427 cms로 30% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오는 여름에 1038 cms로 85% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 764 cms로 25% 증가하여 가장 낮은 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오는 여름에 964 cms로 72% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 507 cms로 17% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오는 여름에 894 cms로 59% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 40 cms로 12% 하락하여 가장 낮은 유량을 보였다.

중기간 분석에서 CSMK 모형 중 A2 시나리오의 봄에 2041~2070년이 140 cms로 4% 하락하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름에 2071~2100년이 681 cms로 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였으며, 가을, 겨울에 2041~2070년이 각각 706, 89 cms로 15, 24% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오의 봄에 2071~2100년이 180 cms로 23% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 가을, 겨울에 2011~2040년이 각각 761, 764, 95 cms로 35, 25, 32% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오의 봄, 여름에 2041~2070년이 각각 173, 589 cms로 18, 5% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을, 겨울에 2071~2100년이 각각 646, 87 cms로 5, 21% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. CT47 모형 중 A2 시나리오의 봄, 여름에

2041~2070년이 각각 242, 824 cms로 66, 47% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을, 겨울에 2071~2100년이 각각 784, 109 cms로 28, 51% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 A1B 시나리오의 봄, 겨울에 2041~2070년이 각각 241, 101 cms로 65, 40% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 여름, 겨울에 2071~2100년이 각각 733, 800 cms로 30, 31% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 또한 B1 시나리오의 봄, 여름에 2041~2070년이 각각 193, 623 cms로 32, 11% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을에 2011~2040년이 564 cms로 8% 하락하여 가장 큰 유량을 보였으며, 겨울에 2071~2100년이 100 cms로 39% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다.

전체 시나리오별 각각 계절의 유량변동성을 비교하였을 때 봄, 여름은 CT47 모형 중 A2 시나리오의 2041~2070년이 각각 242, 824 cms로 66, 47% 증가하여 가장 큰 유량을 보였고, 가을은 CT47 모형 중 A1B 시나리오의 2011~2040년이 798 cms로 30% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다. 그리고 겨울에 CT47 중 A2 시나리오의 2071~2100년이 109 cms로 51% 증가하여 가장 큰 유량을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 미래기후변화에 따른 하천의 영향을 분석하기 위하여 분석 모형으로 SWAT를 선정하고 대상유역은 낙동강 유역으로 하여 미래기후변화시나리오를 적용하여 하천유량 변동성을 분석하였다. 먼저 미래기후변화시나리오 중 전지구기후모형 (GCM: Global Climate Model)에서 비교적 한반도의 기후 특성을 잘 재현하고 있는 호주 (CSIRO: Mk3.0, 즉 CSMK) 모형과 캐나다(CCCma: CGCM3-T47, 즉 CT47) 모형의 3가지 시나리오 A2, B1, A1B를 강우와 강우증가율, 온도와 온도증가율에 대하여 각각의 시나리오별로 비교, 분석하였다. 다음으로 낙동강 유역의 SWAT 모형을 구축하여 각각의 시나리오를 모의하여 미래기후변화 (2011~2100년)에 따른 하천유량을 중기간으로 나누어 계절별 소유역별 시나리오별로 비교 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) CSMK 모형과 CT47 모형을 A2, A1B, B1 시나리오에 대하여 강우증가율과 기온증가율을 분석한 결과 CSMK 모형의 강우증가율을 제외한 모든 부분에서 A2 시나리오가 가장 높게 나타났다. 이는 CO₂의 농도가 극대화되어 있는 A2 시나리오의 경우 기온의 증가율이 상대적으로 크며, 강우의 증가율 또한 다른 시나리오에 비하여 이산화탄소의 농도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.
- (2) 시나리오를 계절별로 강우와 기온을 분석하였다.

강우증가율은 CSMK 모형 중 A2, A1B 시나리오에는 여름에, B1 시나리오는 겨울에 가장 큰 증가율을 보였고 CT47 모형 중 A2 시나리오는 봄에, A1B 시나리오는 봄에, B1 시나리오는 겨울에 가장 큰 증가율을 보였다. 기온증가율은 CSMK 모형 중 A2 시나리오는 봄에, A1B 시나리오는 겨울에, B1 시나리오의 경우 봄에 가장 큰 증가율을 보였고, CT47 모형의 경우 전체 시나리오가 겨울에 가장 큰 증가율을 보였다.

- (3) 미래기후변화 시나리오를 SWAT 모형으로 모의하여 낙본E, 낙본I, 낙본N 지점에서 전기간(2011~2100년)과 중기간으로 시나리오별, 계절별, 지점별의 유량과 유량변동성을 현재와 비교·분석하였다. 전체 시나리오에서 유량이 현재보다 크게 나타나고, 변동성이 더 커짐을 알 수 있으며 이는, 미래에는 집중호우나 가뭄의 영향이 더 커질 것으로 예측할 수 있다. 강수 증가율에 따른 유량변동성의 관계를 살펴보면 CT47 모형의 경우는 강우량 증가율에 2~4배의 차이를 보여 기존 연구에 부합하는 결과를 보였으나, CSMK 모형의 경우는 강우량 증가율이 음의 값을 가지는 A2와 B1 시나리오에서도 유량 변동성이 미세하지만 증가경향을 보였고, A1B 시나리오에서도 10배의 차이를 보여 기존 연구에 부합하지 않는 결과를 보였다. 이는 CSMK 모형 미소한 강우 증가율에 기온 증가율의 영향을 받아 유량 변동성에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 그러나 CSMK 모형의 미소한 기온 증가의 영향을 제외하고는 강우가 커지면 대부분의 모형에서 유출량이 증가를 보였고, 강우가 감소하면 대부분의 모형에서 유출량이 감소하였으므로 여러 가지 변수들 중 강우의 증감에 따른 영향이 유출량에 가장 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 토대로 향후 기후변화에 따른 낙동강 유역의 유출량 증대로 인한 수공 구조물의 치수능력 증대 방안과 해당유역 기후변화에 따른 물환경 적응방안 연구에 활용할 수 있을 것이다. 그리고 물환경 자원의 환경 변화에 적극적으로 적응하기 위한 국가 표준 기후변화 시나리오 구축, 기후변화 적응을 위한 환경유량 산정이 필요하며, 이를 위해서는 무엇보다도 신뢰성 있는 국지적 기후변화 예측 시스템의 구축과 이를 바탕으로 한 수문영향 분석에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업

의 「기후변화에 의한 수문 영향분석 및 전망기술」 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

강두기 (2007). “통합 유역관리를 위한 수환경 모형 구축 기법 및 오염총량관리에의 적용 연구.” 박사학위논문, 부산대학교.

건설교통부 (2008). 기후변화 대비 국가 물 안보 확보 방안.

김문성, 고익환, 김상단 (2009). “CGCM의 미래기후 정보를 이용한 기후변화가 낙동강 유역 유황에 미치는 영향분석.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제6호, pp. 833-871.

김재철, 김상단 (2007). “오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석.” **수질보전 환경물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제3호, pp. 332-338.

신현석, 강두기, 김상단 (2007). “낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 251-263.

이용준, 안소라, 강부식, 김성준 (2008). “SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 653-663.

이길하, 이근상, 조홍연 (2008). “기후변화에 따른 임하댐 유역의 GIS 기반 토양침식 추정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제3호, pp. 423-429.

최대규 (2010). 미래기후변화에 대한 영향분석 및 유역단위의 수자원 영향평가. 석사학위논문, 부경대학교.

한수희, 유가영, 김상단 (2009). “식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제4호, pp. 507-514.

Bouraoui, F., Galbiati, L., and Bidoglio, G. (2002). “Climate change impact on nutrient loads in the Yorkshire Ouse Catchment.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, No. 2, pp. 197-209.

Cunderlik, J.M., and Simonovic, S.P. (2007). “*Hydrologic models for inverse climate change impact modeling.*” CSCE.

Dagnachew, L., Christine, V.C., and Francoise, G. (2003). “Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa : case study south central ethiopia.” *Journal of Hydrology*, Vol. 275, pp. 67-85.

Gellens, D., and Roulin, E. (1998). “Streamflow response

- of belgian catchments to IPCC climate change scenarios." *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258.
- Gosain, A.K., Sandhya, Rao., and Debajit Basuray. (2006). "Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basin." *Current Science*, Vol. 90, No. 3, pp. 346-353.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2008). "*Climate Change and Water. IPCC Technical Paper IV.*"
- IPCC. (1998). "*IPCC Emissions Scenarios Database*".
- Meehl, G.A., and Tebaldi, C. (2004). "More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century." *Science Webinar Series*, Vol. 305, pp. 994-997.
- Takle, E.S., Manoj, Jha., Christopher, J.A., and Philip W.G. (2005). "9.9 Climate Change Impacts on the Hydrology of the Upper Mississippi River Basin as Determined by An Ensemble of GCMs." *18th Conference on Climate Variability and Change*.

논문번호: 10-063	접수: 2010.07.19
수정일자: 2010.08.25/09.03	심사완료: 2010.09.03