

기후변화 및 도시화에 따른 유황곡선 및 BOD 농도지속곡선 변화

Effect of Climate Change and Urbanization on Flow and BOD Concentration Duration Curves

박 경 신* / 정 은 성** / 김 상 욱*** / 이 길 성****

Park, Kyungshin / Chung, Eun-Sung / Kim, Sang-Ug / Lee, Kil Seong

Abstract

This study developed an integrated approach to climate change and urbanization impact assessment by linking models of SDSM (statistical downscaling model), HSPF (hydrological simulation program - Fortran) and ICM (impervious cover model). A case study of the Anyangcheon watershed illustrated how the proposed framework can be used to analyze the impacts of climate change and urbanization in terms of flood control, water security and water quality. The evaluation criteria were the variations of flow and pollutant concentration duration curves. In this study, nine scenarios including three climate (present condition, A1B and A2) and three urbanization scenarios were analyzed using HSPF model. As a result, climate change is a large influence on the flowrate and the urbanization affects the pollutant concentration. Therefore, the impacts of both climate change and urbanization must be included into the watershed management and water resources planning for sustainable development.

keywords : Climate change, Duration curve, HSPF, ICM, SDSM, Urbanization

요 지

본 연구는 기후변화와 토지이용 변화로 인한 물순환 영향을 분석하기 위해 통계학적 축소모형(SDSM), 연속유출 모형인 HSPF 모형, 불투수면 모형을 결합하는 통합접근법을 제시하였다. 이러한 기법을 안양천 유역에 적용하여 치수, 이수, 수질관리 측면에서 기후변화와 토지이용변화에 대한 영향을 분석하였다. 평가 기준은 유황곡선과 오염물질 농도 지속곡선이며 기후변화 시나리오 3개 (현재, A1B, A2)와 토지이용변화 3개, 총 9개의 시나리오에 대해 HSPF 모형을 이용하여 분석하였다. 그 결과 기후변화는 유출량에 대한 영향력이 크고 토지이용변화는 농도 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 지속가능한 유역관리, 수자원관리를 위해 도시화와 기후변화에 대한 영향을 동시에 고려하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 기후변화, 도시화, 불투수면 모형, 지속곡선, HSPF, SDSM

* (주) 현대산업개발 사원, 공학석사
Hyundai Development Company, MS

** 교신저자, 정회원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원, 공학박사
Corresponding Author, Seoul National University, Engineering Research Institute, Researcher, PhD
(e-mail: cool77@snu.ac.kr)

*** 정회원, 국회입법조사처 국토해양팀 입법조사관, 공학박사
National Assembly Research Service, Land, Transport and Maritime Affairs Team, Legislative Researcher, PhD

**** 정회원, 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수, 공학박사
Seoul National University, Civil and Environmental Engineering, Professor, PhD

1. 서론

기후변화에 대한 연구는 20세기 후반에서야 활발하게 진행되었다. 기후변화 연구의 선진국 격인 미국과 유럽연합은 1980년대에 본격적으로 시작하였지만, 우리나라는 이보다 10여년이 지난 1990년대에 들어서 시작되었다. 우리나라의 경우 다른 선진국에 비해 늦게 시작하였지만 해외 연구사례를 바탕으로 선진국과 어깨를 나란히 할 정도의 우수한 연구 결과를 발표하고 있다. 기후변화와 관련된 연구는 크게 대기순환모형(General Circulation Model, GCM) 결과를 이용하여 우리나라 지역의 기후변화 시나리오를 생성하는 연구(김병식 등, 2003), 강우-유출모형을 적용하여 유출량의 변화를 분석하는 연구(신사철, 2000; 김병식 등, 2004; 김웅태 등, 2004; 임혁진 등, 2006; 정일원 등, 2007; 정상만 등, 2008) 등이 있다. 기후변화와 강우-유출모형을 적용한 연구에서는 기후변화 예측의 특성상 주로 장기유출모형에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 최근에는 수량 예측에서 더 나아가 수질인자를 고려하는 연구와 토지 이용변화에 대한 영향을 동시에 고려하는 연구(이길성 등, 2006; 안소라 등, 2008)도 이루어지고 있다. 이 밖에도 기후변화 시나리오에 따른 GCM 모형들의 결과 비교와 축소화기법, 식생 등 다양한 측면에서 연구되고 있다. 국외의 경우 국내보다 앞서 기후변화와 강우-유출모형을 결합한 연구가 진행되었다(Kuhl and Miller, 1992; Kite *et al.*, 1994; Pitman and Chiew, 1996; Sefton and Boorman, 1997; Solecki and Oliveri, 2004; Cameron, 2006; Kojiri *et al.*, 2008; Leander, 2008; Stahl *et al.*, 2008).

물순환에 영향을 미치는 가장 중요한 두 가지 인자는 기후와 토지이용인데 과거 대부분의 연구들은 기후변화 또는 토지이용 변화에 대한 유출 특성 변화에 대한 분석이 주를 이루었다. 하지만 최근 이를 동시에 고려하기 위한 연구가 전세계적으로 활발하게 연구되고 있다(Ewen and Parkin, 1996; Bronstert *et al.*, 2002; Asselman *et al.*, 2003; Chang, 2003; Legesse *et al.*, 2003; Lee and Chung, 2007; Hejazi and Moglen, 2008; Juckem *et al.*, 2008; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008; Cuo *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2009). 따라서 본 연구는 GCM (General Circulation Model) 모형 중 사용빈도가 높은 CGCM3 (Canadian Global Coupled Model) 결과와 통계학적 축소화 모형인 SDSM (Statistical DownScaling Model; Wilby *et al.*, 2002)을 이용하여

대상지역의 기후변화 시나리오를 생성하고 불투수면 모형 (Impervious Cover Model, ICM)을 이용하여 대상지역의 토지이용변화 시나리오를 생성한 뒤 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA)에서 개발한 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran; Bicknell *et al.*, 2001) 모형을 이용하여 대상 지역의 기후 변화 및 도시화에 따른 물순환을 모의하였다.

2. 이론적 배경

2.1 SDSM 모형

영국과 웨일즈 환경청의 지원을 받아 꾸준히 연구되고 있는 SDSM 모형은 다중회귀분석을 이용하여 미래의 기상자료를 생성한다. 원하는 지점의 미래 일단위 기상자료를 획득하기 위해 SDSM 모형이 필요한 입력자료는, 1961년부터 2000년까지의 예측하고자 하는 지점의 관측 자료와 미국의 국가 환경 예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 제공하는 관측값을 토대로 작성된 설명변수, GCM을 기반으로 작성된 예측변수가 있다. SDSM 모형의 다중회귀분석은 예측하고자 하는 기상자료가 종속변수가 되고 NCEP의 자료는 보정을 위한 설명변수가 된다. 모형의 보정으로부터 얻은 매개변수를 이용하여 GCM 모형 결과를 기반으로 작성된 예측변수에 의해 기상자료를 생성하게 된다. NCEP와 CGCM3의 예측변수는 모두 일(日)단위의 변수로써 두 자료가 각각 설명하고 있는 기상요소의 분류는 같다.

SDSM 모형의 장점은 웹사이트(<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/software.html>)를 통해 무상으로 배포되고 있다는 점과 종속변수의 적용범위가 크다는 점, 자료를 앙상블로 생성하여 불확실성에 대한 분석이 가능하다는 점을 들 수 있다. 또한 지역의 기후특성을 매우 잘 반영할 수 있으며 사용이 매우 용이하다는 것이 장점이다. 그러나 GCM의 자체적인 오류가 그대로 반영될 수 있고 IPCC에서 월단위의 자료로 배포된 GCM의 결과를 그대로 사용할 수 없으며 일단위로 변환된 GCM의 결과가 반영된 예측변수를 이용하여야 한다. SDSM 모형에 사용되는 NCEP와 CGCM3의 예측변수 항목은 Table 1과 같다. 주된 기능은 변수들간의 상관분석과 매개변수의 추정 및 미래 자료의 생성을 할 수 있으며 잔차의 도시, 100개 까지 지원되는 앙상블 자료군을 비롯해 간단한 통계분석이 가능하다.

Table 1. Predictor Variables of SDSM Model

Predictor file name	Predictor description
msslpas.dat	Mean sea level pressure
p_fas.dat	Surface airflow strength
p_uas.dat	Surface zonal velocity
p_vas.dat	Surface meridional velocity
p_zas.dat	Surface vorticity
p_thas.dat	Surface wind direction
p_zhas.dat	Surface divergence
p5_fas.dat	500 hPa airflow strength
p5_uas.dat	500 hPa zonal velocity
p5_vas.dat	500 hPa meridional velocity
p5_zas.dat	500 hPa vorticity
p500as.dat	500 hPa geopotential height
p5thas.dat	500 hPa wind direction
p5zhas.dat	500 hPa divergence
p8_fas.dat	850 hPa airflow strength
p8_uas.dat	850 hPa zonal velocity
p8_vas.dat	850 hPa meridional velocity
p8_zas.dat	850 hPa vorticity
p850as.dat	850 hPa geopotential height
p8thas.dat	850 hPa wind direction
p8zhas.dat	850 hPa divergence
s500as.dat	Specific humidity at 500 hPa
s850as.dat	Specific humidity at 850 hPa
shumas.dat	Surface specific humidity
tempas.dat	Mean temperature at 2 m

2.2 불투수면 모형

미국의 유역보존센터(Center for Watershed Protection, CWP)에서 제시한 불투수면 모형(ICM; CWP, 2005)은 유역에 존재하는 불투수면(impervious area)과 하천 수질과의 관계를 설명하는 모형으로 토지 이용변화에 따른 하천의 영향 평가를 투수면적(pervious area)과 불투수면적으로 실시하는 모형이라고 할 수 있다(Fig. 1). 본 연구에서 사용된 토지이용변화에 대한 시나리오는 총 세 가지 경우로 현상태의 토지이용을 유지하는 것(C1)과 ICM의 하천 수질 영향 단계가 각각 한 단계 상승하는 경우(C2), 두 단계 상승하는 경우(C3)로 나누어 적용하였다. 한 단계 상승하는 경우는

$$C_i < 10\% \rightarrow C'_i = 10\%$$

$$C_i < 25\% \rightarrow C'_i = 25\%$$

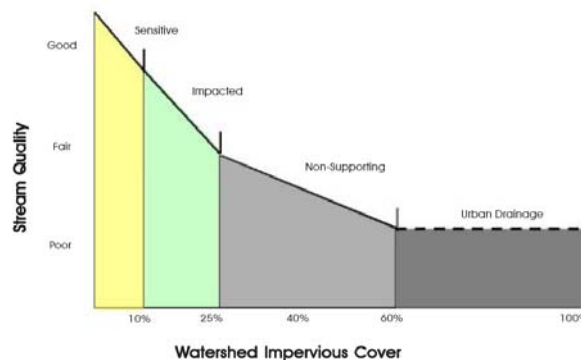


Fig. 1. Representation of the Impervious Cover Model (CWP, 2005)

$$C_i < 60\% \rightarrow C'_i = 60\%$$

로 적용된다. 여기서 C_i 는 현재 상태의 불투수면적 비율이며, C'_i 은 변화된 불투수면적의 비율이다. 두 단계 상승하는 경우는

$$C_i < 10\% \rightarrow C'_i = 25\%$$

$$C_i < 25\% \rightarrow C'_i = 60\%$$

$$C_i < 60\% \rightarrow C'_i = 60\%$$

과 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서 적용한 불투수면적 비율의 한계는 60 %로 가정하였는데 이는 국가의 정책과 각 지자체의 계획이 투수면적의 확보 및 증가로 되어 있고 60 % 이상의 불투수면적 비율에 대해 수질을 모의하는 것은 큰 의미가 없기 때문이다.

3. 대상유역

3.1 일반현황

본 연구의 대상유역은 Fig. 2와 같이 안양천 유역이다. 안양천은 국가하천이며 한강의 제1지류로서 경기도 의왕시 지지대고개에서 발원하여 북류하면서 경기도와 서울시를 경유하고 한강에 유입되는 대표적인 도시하천이다. 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~ 127° 04', 북위 37° 18' ~ 37° 33'이며 유역 면적은 286.55 km²이고 유로연장은 32.5 km이며 서울시의 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)와 경기도 7개시(과천시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)에 걸쳐있다. 또한 11개의 지방하천 제1지류와 9개의 지방하천 제2지류가 포함되어 있다. 본 연구에서는 하천망과 하수관망, 지형

3.3 토지이용현황

안양천 유역의 연도별 Landsat 영상을 이용하여 토지이용현황을 분석한 결과, 1975년 유역 면적 286.55 km² 중 녹지 145.34 km²로 50.6%, 도시지역 47.69 km²로 16.6%, 농업지 88.71 km²로 30.9%, 기타 5.36 km²로 1.9%를 차지하던 비율이 2000년 유역 면적 286.55 km² 중 녹지 119.69 km²로 41.7%, 도시지역 124.25 km²로 43.3%, 농업지 37.37 km²로 13.0%, 기타 5.84 km²로 2.0%로 각각 변화되었다. 즉, 1975년 16.6%에 불과했던 도시지역이 2000년에는 유역 전체 면적의 절반 가까이 차지하는 전형적인 도시하천으로 변모했음을 알 수 있다.

4. 결 과

4.1 기후변화 시나리오

기후변화가 수자원에 미치는 영향을 파악하기 위해서 정부간 기후변화 협의회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 제공하고 있는 GCM 중 전세계적으로 폭넓게 사용되고 있는 CGCM3의 결과를 이용하였다. 온실가스 배출시나리오는 IPCC의 온실가스 배출에 관한 특별 보고서(Special Report on Emission Senario, SRES)의 시나리오 중 A1B, A2 시나리오를 선택하였다. A1B는 최근 IPCC AR4에서 제시하고 있는데 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로 그 적용사례가 늘고 있다. 2100년까지 CO₂ 가 720 ppm에 도달할 것으로 예상하며 에너지 공급원이 균형을 이루게 된다(안소라 등, 2009). A2 시나리오는 CO₂ 배출농도가 급격히 증가하여 2100년에는 820 ppm에 이르는 배출시나리오로 온실가스가 급격히 증가할 경우 수자원에 미치는 영향을 평가하는 것은 안정성 측면에서 의미가 있는 것으로 판단되어 선정하였다(배덕효 등, 2007).

기후변화 시나리오를 HSPF 모형에 적용시키기 위하여 다중회귀분석을 기반으로 한 통계학적 축소기법 모형인 SDSM을 이용하여 월(月)단위 자료로 제공되고 있는 GCM 결과값을 일단위 자료로 축소화하였다. 기후변화 시나리오를 작성한 대상 지점은 서울과 수원 관측소로 2001년부터 2100년까지의 강수와 기온 자료를 생성하였다. 생성된 기후변화 시나리오의 경향성을 분석하기 위해 Mann-Kendall 검정을 통하여 경향성을 분석하였다. Mann-Kendall 검정은 비모수 검정으로 시계열의 경향성 여부를 판단할 수 있는 방법이다. Mann-Kendall 검정을 실시한 결과 서울과 수원의 기

Fig. 2. Map of the Anyangcheon Watershed

도 등을 고려하여 Fig. 2와 같이 왕곡(WG), 오전(OJ), 당정(DJ), 산본(SB), 학의(HU), 수암(SA), 삼성(SS), 삼봉(SB1), 시흥(SH), 목감(MG), 도림천(DR) 유역, 총 11개의 지천 중유역과 안양천 전체 유역(AY)으로 구분하였다.

3.2 기상현황

안양천 유역 내에는 기상관측소가 위치하고 있지 않아 유역인근에 위치한 기상청 관할 서울 및 수원관측소의 1973년부터 2002년까지 30개년과, 최근 5개년(2003 ~ 2007년)의 안양천 유역의 기온 및 강우량을 분석하였다. 서울관측소의 30개년의 평균기온은 12.3°C이지만 최근 5개년의 평균기온은 12.9°C로 0.6°C가 높은 것으로 나타났다. 수원관측소의 30개년 평균기온은 11.6°C이며, 최근 5개년 평균기온은 12.8°C로 평균 1.2°C가 높았다. 즉, 서울지역과 수원지역의 기온이 지난 30년 평균보다 최근 5년 평균 기온이 0.9°C 큰 것으로 나타났다. 서울 관측소의 30개년 평균 연강수량은 1,332.4 mm이고, 최근 5개년 평균 연강수량은 1,554.3 mm이다. 또한 수원관측소의 30개년 평균 연강수량은 1,241.4 mm이고, 최근 5개년 평균 연강수량은 1,369.4 mm를 기록하였다. 서울관측소는 지난 30년간 우리나라 평균치인 약 1,300 mm보다 많고 편차가 커지고 있으며, 수원 관측소는 값의 차이가 서울에 비하여 크진 않지만 서울과 같이 편차가 커지고 있다. 따라서 안양천 유역의 경우 최근 평균기온과 평균 연강수량이 크게 증가하였음을 알 수 있다.

Table 2. Result of Mann-Kendall Test

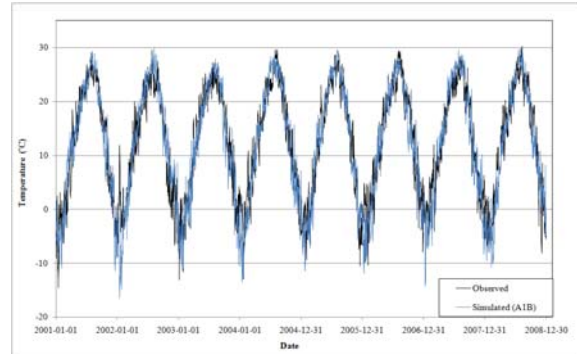
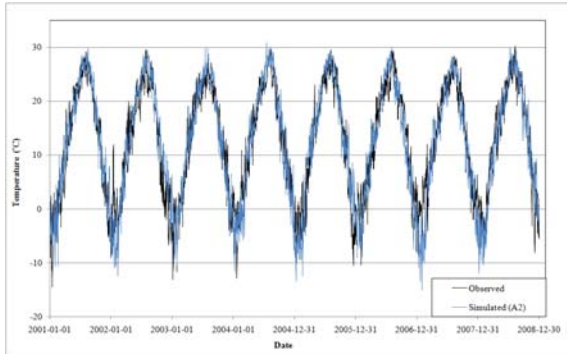
Station	Seoul station				Suwon station			
	Air temperature		Precipitation		Air temperature		Precipitation	
Scenarios	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
S	26,148,200	41,115,776	5,134,131	7,655,988	25,294,670	40,107,748	3,178,771	6,964,016
$V(S)$	4.080 E+12	4.080 E+12	3.792 E+12	2.803 E+12	4.080 E+12	4.080 E+12	2.879 E+12	2.920 E+12
u_c	12.946	20.356	2.637	4.573	12.523	19.857	1.873	4.075
p -value	2.220 E-16	2.220 E-16	0.002	4.820 E-16	2.220 E-16	2.220 E-16	0.060	4.600 E-15

온 및 강수량 자료가 모두 경향성을 갖고 있는 것으로 나타났다(Table 2).

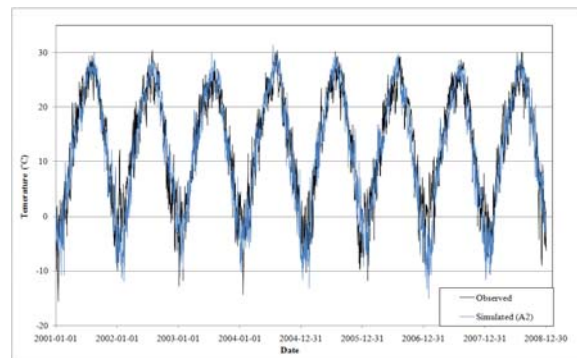
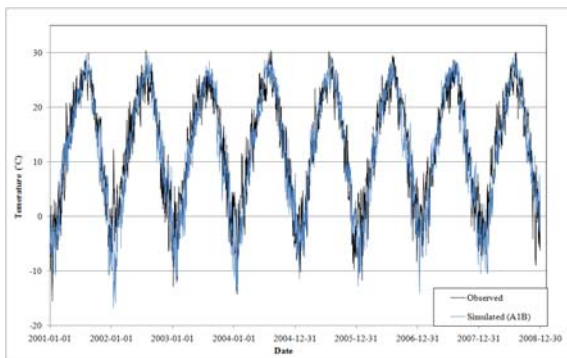
1961년부터 2000년까지의 기온과 강수 실측값을 이용하여 SDSM 모형을 구축하였고 2001년부터 2008년까지의 자료를 이용하여 검증해 보았다. R-squared 값이 서울관측소의 경우 두 시나리오에 대해 0.82로 계산되었고 수원관측소의 경우 A1B에 대해 0.83, A2시나리오에 대해 0.82로 나타났다. 모형의 검증을 위해 모의된 2001년부터 2008년까지의 일별 기온과 같은 기간 동안 관측된 일별 기온자료를 제시하면 Fig. 3과 같다. 상대적으로 겨울을 제외한 대부분의 계절에서는 잘 부합하

는 것으로 나타났다. 겨울의 경우 모의된 값들이 실측 값에 비해 두 관측소 모두 낮게 나타났다.

강수의 경우 아직까지 기온을 일단위 자료로 축소하는 기법에 비해 일자료에 대한 정확성이 떨어진다. 이에 기존 연구자들은 강우를 크기순으로 정렬하여 초과확률에 대한 강수의 크기로 이를 검증하였다 (Hay *et al.*, 1991, Wilby, 1994). 검증을 위하여 8년간의 일 강수 366개를 가장 큰 강수부터 가장 작은 강수까지 나열하여 각각 평균한 관측값과 모의값을 비교하는 방법을 이용하였다. 서울관측소를 기준으로 생성된 A1B 시나리오와 A2 시나리오의 초과확률에 대한 강수의



(a) Seoul Station



(b) Suwon Station

Fig. 3. Comparison of Monthly Observed and Simulated Temperature Data

크기를 Fig. 4와 같이 비교하였다. 이때 강수량이 0으로 나타난 약 30 % 이상의 값들은 제외하였다. 서울과 수원관측소 모두 5~7 %부터 30 %까지 강수량이 전반적으로 과대 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 2001년부터 2008년까지의 일평균 강수량을 이용하여 생성된 시나리오와 관측값의 R-squared 값을 비교한 결과 서울관측소의 경우 두 시나리오 모두 0.97로 계산되었고 수원관측소의 경우 0.99로 계산되었다.

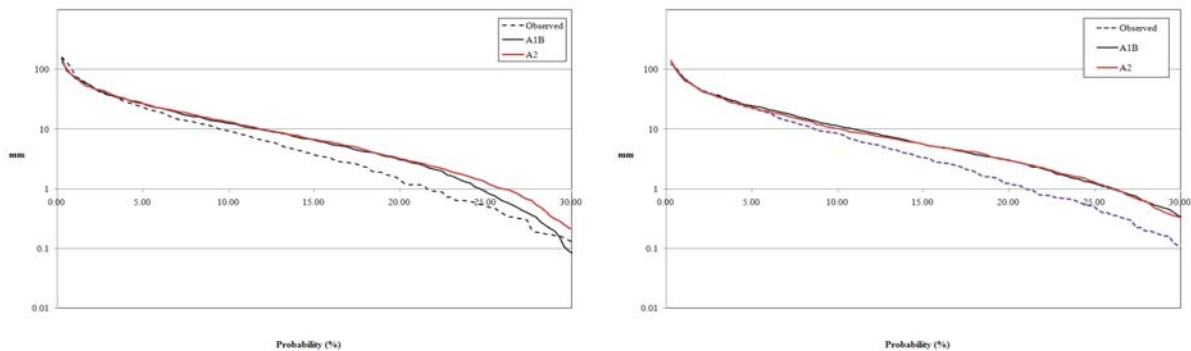
서울관측소의 모의 자료를 분석한 결과 대상기간동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 1.5°C 증가한 13.7°C를 나타냈고 A2 시나리오에서는 약 1.9°C 상승한 14.1°C로 나타났다. 강수량의 경우 과거의 평균 연총강수량이 1,401.3 mm에 비해 A1B 시나리오는 약 500 mm가 증가한 1,896.9 mm이며, A2 시나리오는 약 630 mm가 증가한 2,029.5 mm로 나타났다. 수원관측소의 연평균 기온은 대상기간동안 A1B 시나리오에서 약 2.0°C 증가한 13.7°C, A2 시나리오는 약 2.4°C가 증가한 14.1°C로 나타났다. 수원관측소의 과거 평균 연총강수량이 1,312.5 mm이었다. A1B 시나리오는 과거에 비해 약 360 mm가 증가한 1,679.5 mm이며, A2 시나리오는 약 500 mm가 증

가한 1,803.6 mm로 나타났다.

결과를 계절별로 분석하여 정리하면 Table 3과 같다. 서울관측소의 경우 A2 시나리오는 여름철 온도와 강수량 증가율이 다른 계절에 비해 높은데 반해 A1B 시나리오는 상대적으로 특정 계절에 집중하지 않았다. 수원관측소의 경우 A1B, A2 시나리오 모두 온도와 강수량이 계절별로 골고루 증가하였다.

4.2 토지이용변화 시나리오

물이 순환하는데 있어 투수면적은 상당히 중요한 요소로 작용한다. 지하수의 함양과 이로 인한 유량의 확보는 수질에도 영향을 주게 된다. 더욱이 도시화로 인한 불투수면적의 증가는 도로에 쌓여있는 오염물질을 하천으로 유입시켜 하천수질에 좋지 않은 영향을 준다. 이에 본 연구에서는 미국의 유역보존센터의 불투수율이 수질에 영향을 주는 정도를 나타낸 불투수면 모형(CWP, 2005)을 이용하여 안양천 유역의 제1지류 유역별로 불투수면을 증가시키는 시나리오를 적용하였다. 불투수면의 비율에 따라 수환경의 상태를 구분함으로써 개략적인 하천상태를 판단할 수 있게 개발되었다.



(a) Seoul Station

(b) Suwon Station

Fig. 4. Duration Curves of Observed and Simulated Precipitation Data (verification)

Table 3. Summary of Seasonal Results

Stations	Seoul						Suwon					
	Temperature (°C)			Precipitation (mm)			Temperature (°C)			Precipitation (mm)		
Scenario	PC	A1B	A2	PC	A1B	A2	PC	A1B	A2	PC	A1B	A2
Spring	11.6	13.2	13.6	229.1	299.9	308.3	10.9	13.1	13.5	224.9	334.6	347.5
Summer	24.0	25.9	28.2	845.9	1226.5	1317.3	23.8	25.9	26.3	767.3	962.6	1037.6
Fall	14.1	15.4	15.7	259.2	304.3	329.9	13.4	15.2	15.5	250.3	282.5	316.6
Winter	-1.04	0.41	1.02	67.1	66.2	74.1	-1.6	0.2	0.8	70.0	89.7	102.0
Total	12.2	13.8	14.2	1401.3	1896.9	2029.5	11.7	13.7	14.1	1312.5	1679.5	1803.6

Table 4. Classification of Stream According to Imperviousness

Imperviousness	1~10 %	10~25 %	25 %~
Classification	Stable	Impacted	Totally degraded
Stability of stream	Stable	Unstable	Very unstable
Water quality	Very good	Good	Poor
Varieties of life	Very good	Good	Poor

이 모형은 많은 지역의 유역계획, 하천 분류, 토지이용 규제에 큰 영향을 미쳤고, 도시유역 환경관리에 널리 적용되어 왔다(한국환경정책평가연구원, 2007). 불투수면 모형은 일반적으로 하천을 분류하고 관리하는데 유용한 도구로 하천의 소유역을 관리하기 위한 통합적인 틀을 제공한다. 여기서 “통합적”이라함은 불투수면 비율의 임계치를 제시함으로써 개별적인 개발행위나 토지 이용을 유역차원에서 조정할 수 있는 틀을 제공한다는 의미이다. 또한 Schueler (1994)는 Table 4와 같이 불투수면에 근거하여 하천의 특징을 설명하였다. 불투수면 모형에서 분류한 4가지의 단계에 따라 다음과 같이 시나리오를 분류하였다.

Case I: 현재상태 유지

Case II: 각 소유역별 불투수면적 단계 1단계 상승

Case III: 각 소유역별 불투수면적 단계 2단계 상승

대상유역인 안양천 유역 내 소유역과 분류 구간을 포함하여 시나리오 적용대상 구간은 Fig. 2와 같이 총 12개 중유역이다. 본 연구에서 불투수면의 변화에 따른 토지이용변화 시나리오를 작성하게 된 이유는 토지이용 변화는 인간의 활동이기 때문에 시계열자료를 바탕으로 한 예측이 불확실하고, 이를 극복하기 위한 국가 및 지

방자치단체의 계획이 구체적으로 제시되어 있지 않으며, 현재 계획된 개발계획 역시 수환경에 영향을 미치는 불투수면에 대한 변화를 야기하는 계획이 존재하지 않기 때문이다(Fig. 5).

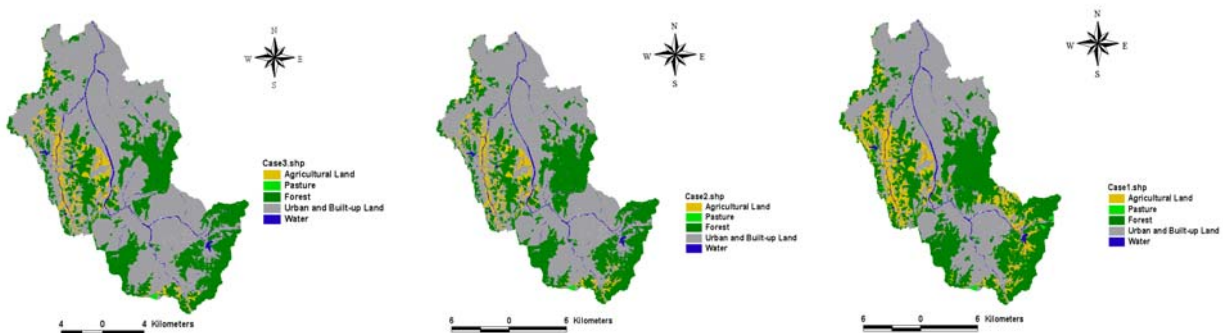
4.3 HSPF 모형의 구축

본 연구에서는 안양천 유역의 유량 및 BOD 농도에 대해 여러 차례 적용되어 정확성을 검증받은 연속유출 모의모형인 HSPF 모형을 이용하였다(정은성 등, 2007; 2008). 작성된 기후 및 토지이용변화 시나리오를 HSPF 모형에 입력하여 수량 및 BOD 농도모의를 실시하였다. 모형의 매개변수는 김정태 등(2009)이 갈수량에 맞춰 제시한 값을 입력하여 모의를 수행하였으며 수량의 검증은 우투물교의 실측값을 이용하여 수행하였다. BOD 농도의 검증은 안양천 유역 내의 5개 환경부 수질측정 지점의 자료를 이용하였다. 검증 결과 수량에 대한 모형의 효율계수가 0.62(2005년 1월 1일~2005년 4월 8일), 0.72(2006년 10월 6일~2006년 11월 2일)로 나타났으며 BOD 농도의 경우 5개 지점에서 모두 모형의 효율계수가 0.66 이상인 것으로 나타났다.

4.4 시나리오 분석

Hejazi and Moglen (2008)은 기후변화와 토지이용변화가 물 순환에 미치는 영향을 분석하기 위해 건기의 변화를 위해 99 %, 95 %, 90 % 유향을, 우기의 변화를 위해 10 %, 5 %, 1 % 유향을 이용하였다. 본 연구에서도 물 순환 분석을 위해 유향곡선(flow duration curve)과 BOD 농도지속곡선(concentration duration curve)을 이용하였다. 치수를 위해 고수량인, 10 %, 5 %, 1 % 유향을 분석하였고, 이수를 위해 저수량인, 99 %, 95 %, 90 % 유향과 수질관리를 위해 농도 지속곡선에서 30 %, 10 %, 1 %의 농도값을 이용하였다.

기후변화에 따른 영향을 비교하기 위해 현재 상태(Present Condition, P)를 기준으로 과거 30년인 1979년



(a) Case I (b) Case II (c) Case III

Fig. 5. Landuse Maps of All Scenarios

Table 5. Pervious and Impervious Ratios of All Urbanization Scenarios

Name of Sub-watershed	C1		C2		C3		Total Area (km ²)
	Pervious Area	Impervious Area	Pervious Area	Impervious Area	Pervious Area	Impervious Area	
Total	47.4 %	50.7 %	36.0 %	62.1 %	33.7 %	64.4 %	286.55
AY	28.0 %	69.4 %	27.8 %	69.6 %	27.8 %	69.6 %	91.4
DR	31.1 %	68.0 %					41.6
MG	60.0 %	37.8 %	37.6 %	60.3 %			56.07
SH	49.5 %	50.4 %	39.7 %	60.2 %			3.26
SBI	17.6 %	82.3 %					4.58
SS	84.8 %	13.8 %	73.5 %	25.0 %	38.5 %	60.0 %	13.18
SA	73.7 %	25.4 %	39.1 %	60.0 %			8.06
HU	67.0 %	30.4 %	36.3 %	61.1 %			44.76
SB	50.0 %	49.9 %	39.3 %	60.7 %			10.29
DJ	37.3 %	62.3 %					5.32
OJ	88.1 %	11.4 %	74.5 %	25.0 %	39.5 %	60.0 %	4.26
WG	89.5 %	9.6 %	89.1 %	10.0 %	74.1 %	25.0 %	3.77

Table 6. Summary of Low Flow, High Flow and Quality of Climate Change and Urbanization

Climate Change Scenario	C1			C2			C3		
	Low	High	Quality	Low	High	Quality	Low	High	Quality
P → A1B	34.1 %	29.9 %	-3.8 %	51.0 %	29.6 %	-6.0 %	53.9 %	29.1 %	-5.0 %
P → A2	39.9 %	37.1 %	-6.9 %	57.0 %	36.3 %	-10.0 %	59.8 %	35.8 %	-8.5 %
Urbanization Scenario	P			A1B			A2		
	Low	High	Quality	Low	High	Quality	Low	High	Quality
C1 → C2	-10.9 %	1.7 %	15.6 %	-11.5 %	1.5 %	19.0 %	-11.4 %	1.0 %	19.2 %
C1 → C3	-33.6 %	5.6 %	25.8 %	-25.6 %	4.4 %	44.6 %	-23.7 %	2.0 %	43.0 %

부터 2008년까지의 평균 유황곡선을 작성하고 2011년부터 2040년까지 미래 30년 동안의 평균 유황곡선을 작성하였다. 각 유역별로 결과 값을 9개 시나리오에 대해 정리하여 제시하면 Table 5와 같고 치수, 이수, 수질관리를 위한 각각의 자료들을 평균하여 도시하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 세로축은 저수량, 풍수량에 대해서는 cms 단위이며 농도는 mg/L 단위이다.

현재 상태와 A1B, A2 시나리오에서 도시화가 저수량을 감소시켰고 고수량을 증가시켰다. A1B 시나리오는 고수량을 더 증가시켰지만 저수량에는 특별한 특성을 보이지 않았다. 다만 유역면적이 큰 HU, MG, DR, AY 유역에서는 A1B 시나리오에서도 저수량이 큰 비율

로 증가하였다. A2 시나리오의 경우 저수량과 풍수량 모두 현재 상태보다 증가하였고 유역면적이 큰 HU, MG, DR, AY 유역의 저수량의 경우에는 더 많은 증가를 보였다. 전체적으로 A2 시나리오로 인한 유량의 증가가 A1B 시나리오보다 높은 증가율을 보였다.

BOD 농도는 어떠한 기후변화 시나리오에서도 도시화로 인해 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 기후변화 효과를 동시에 고려할 경우 유출량의 증가로 인해 농도가 낮아지는 결과를 보였다. 특히 유역면적이 큰 HU, MG, DR, AY 유역의 경우 농도의 감소폭이 상대적으로 컸다. A2 시나리오의 경우 유출량의 증가가 더 크게 나타났으므로 농도 역시 A1B 시나리오보다 많이 감소하였다.

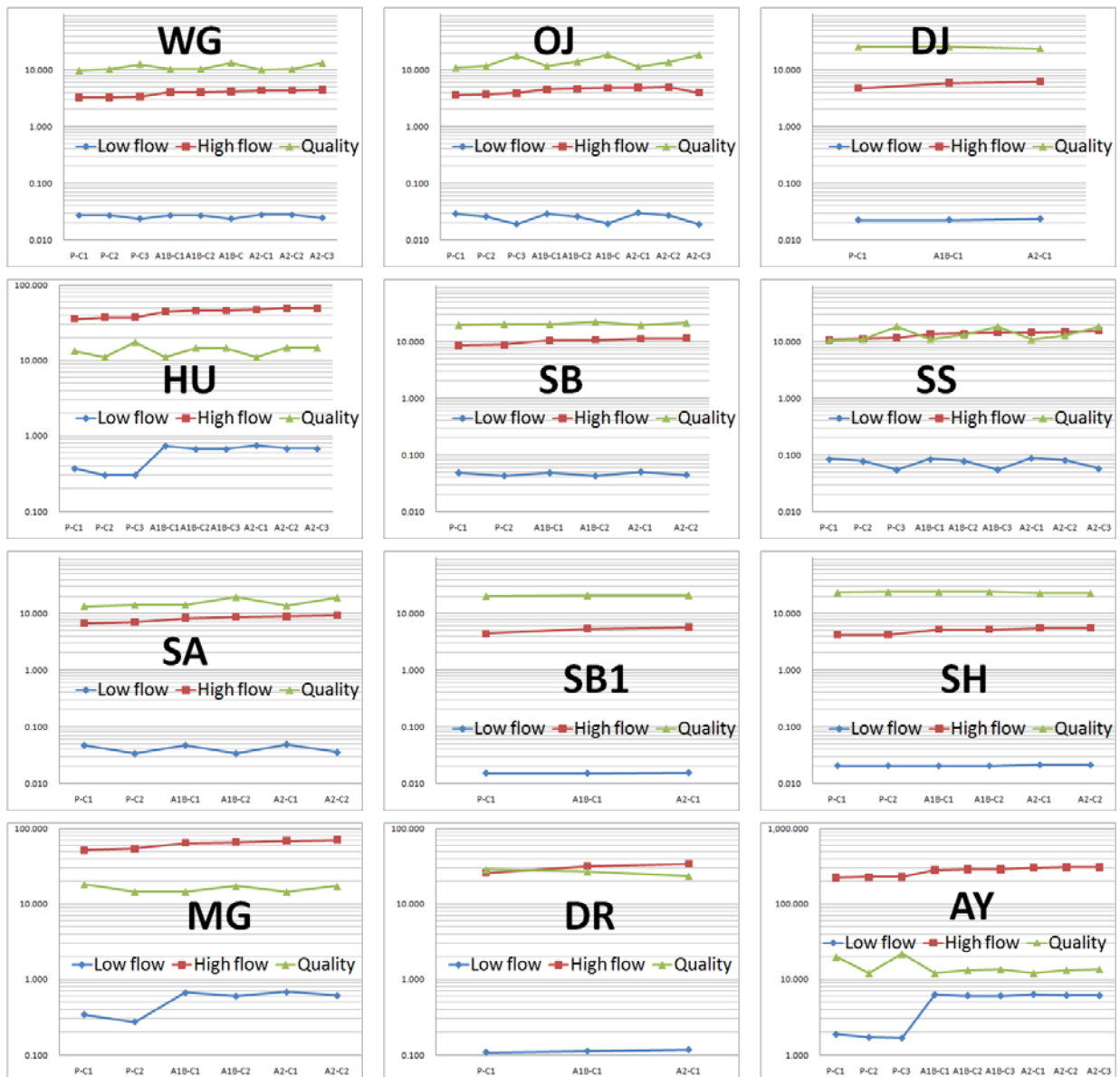


Fig. 6. Changes of Indices of All Sub-watersheds for Low Flow, High Flow and Water Quality Under All Scenarios

Table 6에서 기후변화의 경우 (P→A1B, P→A2) 유출량의 변화 비율(저수량 평균 49.3 %, 고수량 평균 33.0 %)이 농도 변화 비율(-6.7 %)보다 상당히 높고 토지이용변화의 경우(C1→C2, C1→C3) 농도의 변화 비율(27.9 %)이 유출량의 변화 비율(저수량 -19.4 %, 고수량 2.7 %)보다 월등히 높은 결과를 보였다. 따라서 도시화는 BOD의 농도 변화에 크게 영향을 미치며 기후변화는 유출량 변화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 기후 및 토지이용변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연속유출모형, GCM 모형의

결과, 불투수면모형(ICM)을 이용하여 안양천 유역에 대해 수량 및 BOD 농도를 모의하였다. 기후변화 시나리오에 정무간 기후변화 협의회에서 제공하고 있는 대기순환모형의 결과 중 CGCM3의 결과를 이용하였다. 온실가스 배출시나리오는 IPCC의 온실가스 배출에 관한 특별 보고서의 시나리오 중 A1B, A2 시나리오를 선택하여 분석하였다. 물 및 BOD 농도를 모의하기 위해 HSPF 모형을 이용하여 모의를 실시하였다. 모형에 입력자료로 이용되는 기상자료는 GCM 결과를 통계학적 축소기법을 적용하여 일자료로 입력하였으며 토지이용변화는 미국의 유역보존센터의 불투수율이 수질에 영향을 주는 정도를 나타낸 불투수면 모형을 이용하여 시나

리오를 작성하여 모형에 적용하였다.

1979년부터 2008년까지의 평균 유황곡선과 2011년부터 2040년까지의 평균유황곡선을 비교한 결과 강수량의 편중을 갖고 있는 GCM의 결과에 따라 유출량도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 특히 A1B 시나리오의 경우 계절적 편중이 A2에 비해 심했지만 전체적인 증가는 A2 시나리오가 더 컸다. BOD 농도는 어떠한 기후변화 시나리오에서도 도시화로 인해 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 기후변화 효과를 동시에 고려할 경우 유출량의 증가로 인해 농도가 낮아지는 결과를 보였다. 도시화는 BOD의 농도 변화에 크게 영향을 미치며 기후변화는 유출량 변화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

본 연구의 결과를 이용하여 하천에 대한 계획을 수립할 때에 기후 및 토지이용변화를 고려한 합리적인 계획의 수립이 가능할 것으로 판단된다. 더 나아가 우리나라에 적합한 GCM 모형과 가능한 SRES 시나리오를 선택하여 적용하는 연구와 다른 GCM 모형과 RCM (Regional Circulation Model) 모형과 결합하여 분석한 결과를 비교 검토하는 작업은 기후변화 모형의 불확실성을 줄이는데 반드시 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(90%)과 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반시설) 사업단의 연구비 지원(10%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

김경태, 정은성, 김상욱, 이길성, 성진영 (2009). “우리나라 오염총량관리제도의 개선 및 적용: 1. 안양천 유역의 오염부하량 산정.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제6호, pp. 972-978.

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

김병식, 서병하, 김남원 (2003). “전이함수모형과 일기발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 345-363.

김웅태, 이동률, 유철상 (2004). “기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석.” **한국수자원학회 논문집**,

한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 305-314.

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

신사철 (2000). “기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 623-634.

안소라, 이용준, 박근애, 김성준 (2008). “미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 215-224.

안소라, 박민지, 박근애, 김성준 (2009). “기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 33-50.

이길성, 정은성, 신문주 (2006). “기후, 지하수 취수 및 토지이용 변화의 건기 총유출량에 대한 영향.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 923-934.

임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준 (2006). “CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 453-466.

정상만, 서형덕, 김형수, 한규하 (2008). “기후인자의 변화에 따른 대청댐유역의 유출민감도 모의평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제11호, pp. 1095-1106.

정은성, 이준석, 이길성, 김상욱, 김경태 (2007). “HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 건전화 대안기술 효과분석.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제6호, pp. 973-984.

정은성, 김경태, 김상욱, 이길성 (2008). “하천유지유량을 이용한 일최대 오염허용부하량 산정 방안.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제3호, pp. 325-335.

정일원, 배덕효, 임은순 (2007). “수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II): 유역별 유출시나리오 구축.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 205-214.

한국환경정책평가연구원 (2007). **수계별 유역의 불투수율조사 및 저감방안 연구**. 국립환경과학원 한강물환경연구소.

Asselman, N.E., Middelkoop, H., and van Dijk, P.M. (2003). “The impact of changes in climate and land

- use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine.” *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 3225-3244.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, T.H., and Donigian, A.S. Jr. (2001). *Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Bronstert, A., Niehoff, D., and Burger, G. (2002). “Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modeling capabilities.” *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 509-529.
- Cameron, D. (2006). “An application of the UKCIP02 climate change scenarios to flood estimation by continuous simulation for a gauged catchment in the Northeast of Scotland, UK (with Uncertainty).” *Journal of Hydrology*, Vol. 328, pp. 212-226.
- Center for Watershed Protection (2005). *Urban Subwatershed Restoration Manual Series: 1. An Integrated Framework to Restore Small Urban Watersheds Version 2.0*. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD.
- Chang, H. (2003). “Basin hydrologic response to changes in climate and land use: The Conestoga River basin, Pennsylvania.” *Physical Geography*, Vol. 24, pp. 222-247.
- Cuo, L., Lettenmaier, D.P., Alberti, M., and Richey, J.E. (2009). “Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin.” *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 907-933.
- Ewen, J., and Paarkin, G. (1996). “Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts.” *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 583-594.
- Hay, L.E., McCabe, G.J., Wolock, D.M., and Ayers, M.A. (1991). “Simulation of precipitation by weather type analysis.” *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 493-501.
- Hejazi, M., and Moglen, G.E. (2008). “The effect of climate and land use change on flow duration in the Maryland Piedmont region.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 4710-4722.
- Juckem, P.F., Hunt, R.J., Anderson, M.P., and Robertson, D.M. (2008). “Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin.” *Journal of Hydrology*, Vol. 355, pp. 123-130.
- Kite, G.W., Dalton, A., and Dion, K. (1994). “Simulation of streamflow in a macro-scale watershed using GCM Data.” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 1546-1559.
- Kojiri, T., Hamaguchi, T., and Ode, M. (2008). “Assessment of global warming impacts on water resources and ecology of a river basin in Japan.” *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 1, pp. 164-175.
- Kuhl, S.C., and Miller, J.R. (1992). “Seasonal river runoff calculated from a global atmospheric model.” *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 8, pp. 2029-2039.
- Leander, R., Buishand, T.A., Hurk, B.J.J.M., and Wit, M.J.M. (2008). “Estimated changes in flood quantiles of the River Meuse from resampling of regional climate model output.” *Journal of Hydrology*, Vol. 351, pp. 331-343.
- Lee, K.S., and Chung, E.S. (2007). “Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and landuse in the small Korea watershed.” *Hydrological Processes*, Vol. 21, No. 22, pp. 3046-3056.
- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., and Gasse, F. (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. 63-85.
- Li, Z., Liu, W., Zhang, X., and Zheng, F. (2009). “Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China.” *Journal of Hydrology* (on-line published).
- Ma, X., Xu, J., Luo, Y., Aggarwal, S.P., and Li, J. (2009). “Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China.” *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 1179-1191.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, part 1 - A

- discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Pitman, A.J., and Chiew, F.H. (1996). “Testing a GCM land surface scheme against catchment-scale runoff data.” *Climate Dynamics*, Vol. 17, pp. 182-190.
- Sefton, C.E.M., and Boorman, D.B. (1997). “A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows.” *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 26-44.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L. (2008). “The impact of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater.” *Journal of Hydrology*, Vol. 350, pp. 114-125.
- Schueler, T. (1994) “The importance of imperviousness.” *Watershed Protection Techniques*, Vol. 1, No. 3, pp. 100-111.
- Solecki, W.D., and Oliveri, C. (2004). “Downscaling climate change scenarios in an urban landuse change model.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 72, pp. 105-115.
- Stahl, K., Moore, R.D., Shea, J.M., Hutchinson, D., and Cannon, A.J. (2008). “Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios.” *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 2, W02422.
- Wang, S., Kang, S., Zhang, L., and Li, F. (2008). “Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2502-2510.
- Wilby, R.L. (1994). “Stochastic Weather Type Simulation for Regional Climate Change Impact Assessment.” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 3395-3403.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M. (2002). “SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts.” *Environmental and Modelling Software*, Vol. 17, pp. 145-157.

논문번호: 09-111	접수: 2009.09.22
수정일자: 2009.10.13	심사완료: 2009.10.13