한국농림기상학회지, 제8권 제4호(2006)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 8, No. 4, (2006), pp. 209~221

기후변화에 따른 농촌 소유역에서의 비점오염 영향 분석

황세운 · 장태일 · 박승우
서울대학교 지역시스템공학부 농업생명과학연구원
(2006년 9월 4일 접수; 2006년 11월 15일 수락)

Climate Change Impact on Nonpoint Source Pollution in a Rural Small Watershed

Sye Woon Hwang, Tae Il Jang, and Seung Woo Park
Department of Rural Systems Engineering/Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea
(Received September 4, 2006; Accepted November 15, 2006)

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the effects of climate change on the nonpoint source pollution in a small watershed using a mid-range model. The study area is a basin in a rural area that covers 384 ha with a composition of 50% forest and 19% paddy. The hydrologic and water quality data were monitored from 1996 to 2004, and the feasibility of the GWLF (Generalized Watershed Loading Function) model was examined in the agricultural small watershed using the data obtained from the study area. As one of the studies on climate change, KEI (Korea Environment Institute) has presented the monthly variation ratio of rainfall in Korea based on the climate change scenario for rainfall and temperature. These values and observed daily rainfall data of forty-one years from 1964 to 2004 in Suwon were used to generate daily weather data using the stochastic weather generator model (WGEN). Stream runoff was calibrated by the data of 1996~1999 and was verified in 2002~2004. The results were determination coeff. (R^2) of 0.70~0.91 and root mean square error (RMSE) of 2.11~5.71. Water quality simulation for SS, TN and TP showed R^2 values of 0.58, 0.47 and 0.62, respectively. The results for the impact of climate change on nonpoint source pollution show that if the factors of watershed are maintained as in the present circumstances, pollutant TN loads and TP would be expected to increase remarkably for the rainy season in the next fifty years.

Key words : **Climate change, WGEN, GWLF model, Nonpoint source pollution**

I. 서 론

최근 지구온난화 문제가 크게 이슈화되면서 이에 따른 지구전체 평균온도 상승을 비롯한 강수량 증가 및 이상기후 발생에 대한 우려가 커지고 있다. 지구온난화로 인한 기후변화는 강수량, 증발량, 토양수분 등 물 순환의 양상을 변화시켜 궁극적으로 유출량의 변화로 인한 수자원 부존량의 변화로 이어지게 되므로 장기적인 수자원 계획 수립에는 이에 따른 영향이 제대로 고려되어야 한다(유철상과 이동률, 2000). 최근 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)을 비롯한 국제 연구기관에서는 세계의 사회 · 경제적 지향추세와 변화에 따른 배출 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)를 구축하고 이에 따른 기후변화가 미치는 다양한 영향에 대하여 연구하고 있으며, 최근 기후변화에

Corresponding Author : Taeil Jang (uriduri7@snu.ac.kr)

따른 강수량의 예측과 나아가 수문 환경에 미치는 영향에 대한 연구는 크게 관측 및 통계에 의하거나 (Kang *et al.*, 1992; Lim and Jung, 1992; 김승과 신현민, 1992; Jung *et al.*, 1999; Lim *et al.*, 2006) 대순환모델(General Circulation Model, GCM)을 이용한 방법(Oh and Hong, 1995; Yoon *et al.*, 1998)을 통해 이루어져 왔다. 현재까지 지구온난화에 따른 수문 기상인자의 변동에 대한 국내 연구는 강수량에 집중되어 있으며(KEI, 2004), 수자원 평가에 대해서는 강수량 변화에 따른 물수지 변화와 같은 양적 평가가 주를 이루고 있는 반면, 비점오염 영향 분석과 같은 수자원의 질적 영향에 대한 평가는 미비한 실정이다.

비점오염원은 수집 및 처리가 곤란하고 오염물질 발생 지점이 명확하지 않아 계량적 산출을 비롯한 관리가 난해한 오염원이다(환경부, 2004). 그 간 하수처리장, 공장폐수 등 시급하고 가시적인 효과를 얻을 수 있는 점오염원 위주의 수질정책이 추진되어 왔으나, 매년 지속적으로 증가하며 그 비율이 커지고 있는 비점오염원을 관리하지 않고서는 획기적인 수질개선에 한계가 있어, 환경부는 2000년에 마련한 '4대강 물관리 종합대책'에 비점오염원 관리대책을 포함시키고, 이를 4대강 특별법에 수변구역 토지매수, 녹조방지사업 등 단편적 제도화를 추진하는 등 비점오염 관리에 대한 관심을 높이고 있다.

이와 같이, 지구온난화에 따른 기후변화의 심각성과 비점오염에 대한 관심의 증대와 더불어, 강우 시에 우수를 매개로 노면이나 토양 등에 축적되어 있던 오염물질이 일시에 배출되기 때문에 유입부하에 상당한 영향을 미치는 비점오염의 특성(정규연 등, 2003)을 고려해 볼 때, 지구온난화에 따른 강우량과 기온 등의 기후인자 변화가 비점오염에 미치는 영향에 대한 연구는 그 중요성이 증대되고 있다.

본 연구에서는 농촌 소유역에 대한 오염 부하량을 효율적으로 산정하기 위해 대상 유역을 선정하여, 수집한 자료와 GWLF(Generalized Watershed Loading Function) 모형을 이용하여 기상 특성 변화에 따른 비점오염 영향을 분석하고, IPCC에서 발표한 권장 시나리오를 바탕으로 한국환경정책평가연구원(Korea Environment Institute, KEI)에서 2004년 발표한 지구온난화에 따른 남한지역의 강우량과 기온변화에 대한 연구 성과를 시험유역과 구축한 모형에 적용함으로서 이에 따른 비점오염 발생 부하량 변화를 정량적으로 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. WGEN 모형

WGEN(A Model for Generating Daily Water Weather Variables) 모형은 Richardson and Wright (1984)에 의해 개발된 일 기상 발생기(Weather generator)로서 실측 기상자료로부터 자료의 특성을 반영하여 강우량, 최대기온, 최저기온, 태양 복사에너지를 일단위로 모의 발생하며, 수문모델의 입력 자료로 활용하기 위한 일 강우량 발생에 널리 활용되고 있는 모델이다(Zhang, 2005).

WGEN 모형은 강우 발생여부와 강우량 순으로 생성하며, 이에 따라 각 변수 간의 상관관계를 고려하여 최대, 최소 기온과 태양 복사에너지를 산출하게 된다. 본 모형은 대상 지역의 실측 기상자료가 가진 계절적 특성과 변수의 자기상관(Auto-correlation)과 서로 간의 교차상관(Cross-correlation)을 고려하여 실측자료의 성격을 기억하도록 구성되어 있다.

강우량 모형의 기본 구성은 1차 마코브 체인(First-order Markov chain)을 이용하여 해당일의 강우 발생여부를 결정하고 실측자료의 특성을 기억하도록 산정된 2변수 감마분포(2-parameter gamma distribution)를 따르는 강우량이 부여되어 일 강우량 자료가 생성된다. 그리고 기온과 태양 복사에너지 모형은 잔차를 산정하고, 실측 자료의 평균과 표준편차와 계절성을 고려하여 모의치를 발생시킨다.

2.2. GWLF 모형

농촌 소유역의 경우에는 현실적으로 급속한 도시화가 진행되고 있는 반면, 하천관리가 지역 발전 수준에 미치지 못하고 있다. 현재 활발히 적용되고 있는 HSPF, SWAT, ANSWERS와 같은 모형은 세부적인 인자를 정밀하게 고려하기 때문에 지역적으로 적용하기에는 자료가 부족하여 보정을 통한 최적 매개변수 추정으로 이를 해결해야 한다. 본 연구에서 사용한 GWLF 모형은 Haith and Shoemaker(1987)가 제안하였으며, 부하함수를 적용하여 도시와 농촌 및 산림의 복합 유역에 대한 점원 및 비점오염의 영양물질 부하량을 산정평가하기 위한 목적으로 코넬 대학(Cornell University)의 Haith *et al.*(1992)이 개발하

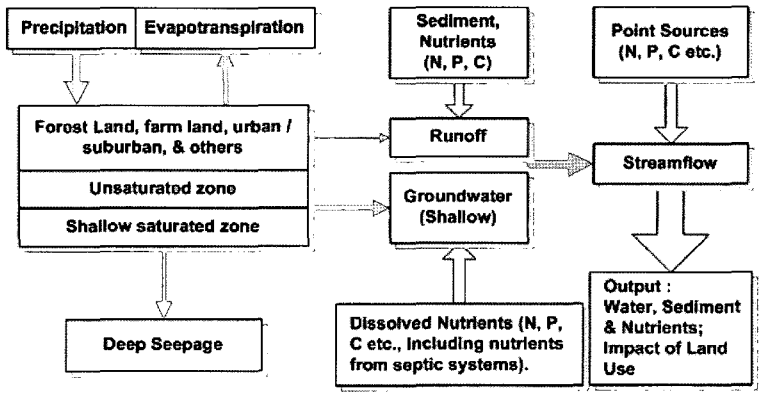

Fig. 1. Structure of the GWLF model.

였다. 본 모형은 보정을 위한 수질 자료 없이 수질 미계측 지역에 대한 오염 부하량을 예측할 수 있다.

본 모델에서 모의하는 질소와 인의 경우, 하천에서의 월별 부하량은 다음 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$LD_m = DP_m + DR_m + DG_m + DS_m \quad (1)$$

$$LS_m = SP_m + SR_m + SU_m \quad (2)$$

여기서, LD_m은 용존상태 영양물질, LS_m은 고형상태 영양물질의 월별 발생 부하량을 의미한다. 그리고 LP_m은 점오염원, DR_m은 농촌 지역의 유출, DG_m은 지하수, DS_m은 정화조와 같은 소규모의 가정용 하수처리장치(septic system)로부터 발생되는 양이다. SP_m, SP_m, SU_m은 각각 고형 점오염원, 농촌지역과 도시지역으로부터 발생하는 영양물질 부하량을 의미한다.

GWLF 모형은 유출(runoff, urban wash off) 및 침식(erosion)에 대한 분포형 모형(distributed model)과 지하수에 대한 총괄 매개변수 선형저수지 모델(lumped parameter linear reservoir model)로서 비점오염을 모의한다. Fig. 1은 GWLF 모형의 구성을 설명하는 그림으로 영양염류 모의를 위한 수문 과정을 보여주고 있다. 모형은 토지이용에 따른 유출 및 증발산 부모형, 유사 부모형, 지하수 유출 부모형, 그리고 오염원에 따른 영양물질 부모형으로 구성되어있다. 유출 부모형은 SCS Curve Number 법을 이용하였고, 증발산 부모형은 토지 이용에 따른 피복과 기상 자료를 이용하여 산정되며, 유사 부모형은 USLE 방법을 사용하였다. 지하수 유출 부모형은 물수지를 이용한 총괄 매개변수로 구하게 되며, 영양물질 부모형은 부하함수를 적용하여 도시와 농촌, 산림의 복합 유역에 대한 점원 및 비점오염의 영양물질 부하량을 산정하게 된다.

2.3. 시험유역의 개요

농촌 소유역에 대한 GWLF 모형의 적용성을 평가하기 위하여 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역면적 29.79 km^{2}의 발안저수지 유역은 농업용 저수지인 기천저수지와 발안저수지를 포함하고 있다. 발안저수지 유역은 토지이용과 저수지 위치를 고려하여 7개의 소유역으로 구분되며, 소유역 구분과 소유역별 수문관측 지점의 위치는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

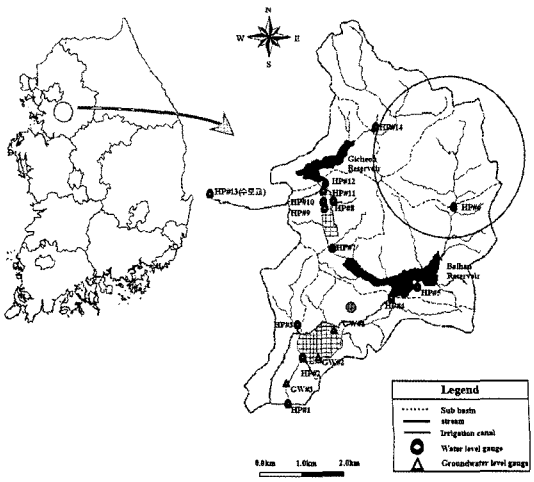

Fig. 2. Monitoring networks of Baran study watershed.

서울대학교 지역시스템공학부는 이 유역에 대해 1996년부터 현재까지 수문과 수질에 대한 모니터링을 실시하고 있다. 본 연구에서는 기상 특성 변화에 따른 비점오염 영향을 분석하고 그에 따른 수질 변화를 예측평가하기 위하여 발안저수지 상단에 위치한 HP#6 소유역을 대상유역으로 하였으며, 유역면적은 3.84 km^2, 유로장은 3.1 km이다.

2.4. 자료구축

GWLF 모형의 기상자료는 강우량(cm)과 기온(°C)이다. 자료기간 1996년부터 2004년까지 발안 시험유역으로부터 약 10 km 거리에 위치한 수원기상대에서 관측하여 제공되는 기상자료를 수집하였다. Fig. 3은 수집된 수위자료를 이용하여 산출한 강우-유출을 도시한 수문 그래프이다. 유량자료는 정기적인 현장 조사와 강우시와 비강우시의 하천 유량 측정을 통하여 실측자료를 구축하고, 수위-유량관계로부터 자료를 확장하였다. Table 1은 하천 단면의 변화를 고려하여 2년을 주기로 수위-유량 관계식을 달리 산정한 결과이며, 결정계수는 0.90~0.98로 매우 높게 나타났다.

수질 자료는 월 1회의 정기적 샘플링과 하천이 고수위일 경우 유량측정과 함께 샘플링을 실시하여 총 월 1회 이상의 하천수 시료를 채취함으로서 구축하였다. 실험은 서울대학교 농업생명과학대학 부속 법정연구지원기관인 농업과학공동기기센터(NICEM)를 통해 기본적인 수질항목(pH, DO, COD, SS, TN, TP)에 대해 공정시험법에 따라 수행하였다. 수집한 수질자료를 확장하여 일 부하량 자료를 구축하기 위해 1996년부터 2004년까지의 샘플링 자료를 이용하여 SS와 TN, TP에 대해 유량-부하량 관계를 구축하였으며, Table 2는 수질 항목별 유량-부하량 관계식과 결정계수를 정리한 것으로, 결정계수는 SS가 0.89, TN과 TP가 각각 0.92, 0.85로 나타났다.

Table 1. Stage-discharge relationships for the HP#6 gauging station

Station	Period	Rating Curve	R^2
HP#6	1996~1998	$Q=12.475\times h^{4.187}$	0.898
	1999~2000	$Q=13.356\times h^{3.063}$	0.979
	2001~2002	$Q=19.867\times h^{4.181}$	0.972
	2003~2004	$Q=10.834\times h^{2.950}$	0.983

Table 2. Load-discharge relationships at HP#6 station (1996~2004)

Station	Item (kg/day)	Load-discharge relationship	R^2
HP#6	SS	$SS=0.0003\times Q^{1.4778}$	0.885
	TN	$TN=0.0367\times Q^{0.8104}$	0.923
	TP	$TP=0.0009\times Q^{0.8901}$	0.847

오염원 자료는 답사 및 문헌 참고를 통하여 대상유역 행정기관(봉담읍 사무소)으로부터 수집하고 정리하여 사용하였다. 인구는 2004년도 읍면별 인구통계자료(통계청, 2004)를 이용하여 산정하였으며, 구축되어있지 않은 HP#6 소유역의 해당 인구를 산정하기 위해 봉담읍 인구와 소유역이 차지하는 대지의 면적비율을 적용하였다. 오염원별 원단위는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 값을 이용하였으며, '공장폐수의 발생과 처리(환경부, 2003)'에서 제시된 폐수 발생

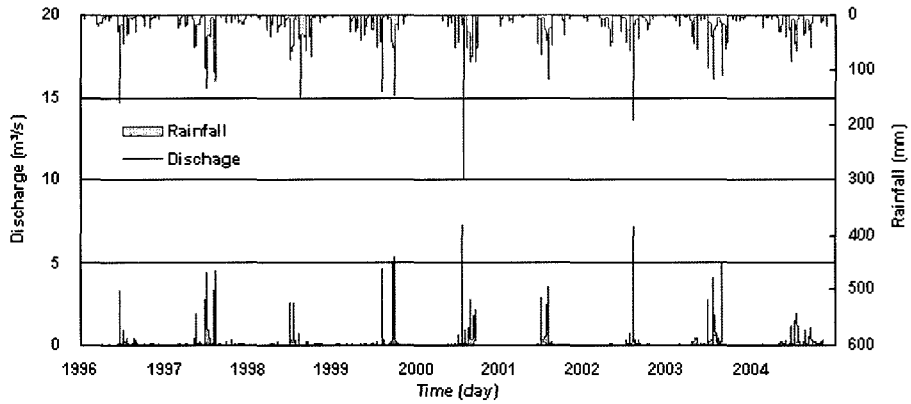

Fig. 3. Daily streamflow hydrograph at the HP#6 station.

Table 3. Calculation of annual pollutant loading for each source

Item		Unit generation load		Number	Annual pollutant load	
		TN	TP		TN	TP
Population		(g/capita/day)		(capita)	(kg/year)	
		13	1.45	2,096	9,946	1,109
Live-stock	(Unit)	(g/head/day)		(head)	(kg/year)	
	Dairy Cow	161.8	56.7	58	3,666	1,285
	Swine	27.7	12.2	35	379	167
	Poultry	1.1	0.4	1693	723	263
Industry	(Unit)	(g/m^3)		(ea)	(kg/year)	
	manufact	40	4	42	7,429	724
	Construct	50	5	3	176	18
	Others	59.9	6	18	1,586	159

량과 오수발생농도를 이용하여 각 산업별 오염발생 부하량을 산출한 후, 최종적으로 대상 유역 산업계 오염발생 부하량을 산정하였다. 다음 Table 3은 원단위와 오염원별 년 발생 부하량 산정 결과를 정리한 것이다.

토지이용별 유출곡선지수는 토양도를 이용하여 산출한 수문학적 토양군도와 토지 이용도를 이용하여 산정하였다. Lim and Park(1997)은 논에서의 CN은 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC) 결정에 있어 5일 선행 강우량보다는 초기담수심과 물꼬높이에 기인한다고 발표한 바 있고, 논을 제외한 토지이용에 대한 CN값은 Cho(1998)와 Park (2003) 등의 연구결과를 참고하여 결정하였다. Table 4는 이를 이용하여 토지 이용별로 각 수문학적 토양군에 해당하는 면적비율과 AMCII에 대한 CN값을 산정하여 정리한 표이다.

모형의 입력 자료로 활용되는 유역의 특성 자료로서 농업지역의 월별 식생피복 정도를 의미하는 증발산 피복 계수와 월별 평균 일조시간, 작물 경작 여부, 그리고 USLE 강우 가식성 인자를 결정하기 위한 월별 계수 등을 GWLF 모형 매뉴얼(Haith *et al.*, 1992)

Table 4. Curve number values for each land uses (AMCII)

Land use	Hydrologic Soil Group (%)				CN
	A	B	C	D	
Paddy	4.0	11.9	9.6	0.4	78
Upland	0.4	1.9	1.5	0.1	83
Forests	22.0	20.5	3.7	0.8	67
Farmstead	3.7	9.4	9.3	0.7	75
Water			0.2		100

에서 제시한 유역의 지형 특성에 맞는 값을 적용하였으며, 유출 특성에 관여하는 지하수 감수 계수(groundwater recession coeff./day)와 침윤 계수(seepage coeff./day)는 보정을 통해 산정하여 적용하였다.

또한, GWLF 모형에서는 토지이용별 배출수에 대한 총질소와 총인의 농도로부터 비점오염 부하량의 일부를 산출하게 되는데, 논 배출수의 경우는 시험유역내 일반논을 선정하여 2004년과 2005에 걸쳐 샘플링한 결과를 사용하였으며, 평균 농도는 총질소가 0.57 mg/L, 총인은 0.05 mg/L로 산정되었다.

III. 결 과

3.1. GWLF 모형

3.1.1. 모형의 보정 및 검정

모형의 보정을 위해 시행착오법을 통하여 매개변수를 추정하였으며, 보정기간은 1996년에서 1999년까지로 4년간의 수문 자료를 이용하였다. 모형의 매개변수는 RMSE(Root Mean Square Error)와 RMAE (Root Mean Absolute Error)의 최소 통계치에 의해 결정되며, RB(Relative Bias), RMSE, RMAE, Nash-Sutcliffe Efficiency Index(EI)(Nash and Sutcliffe, 1970), 그리고 결정계수(R^2)의 통계적 측정은 모형의 모의 평가에 쓰인다(Kang, 2002; Kang and Park, 2003; Kang *et al.*, 2006). Fig. 4는 보정 결과를 보여주고 있으며 R^2는 0.47~0.91, RMSE는 2.11~5.72, RMAE는 0.04~0.44 범위의 값을 보였다. Table 5는 유출에 대한 보정에 관여한 매개변수를 정리한 것이며, Table

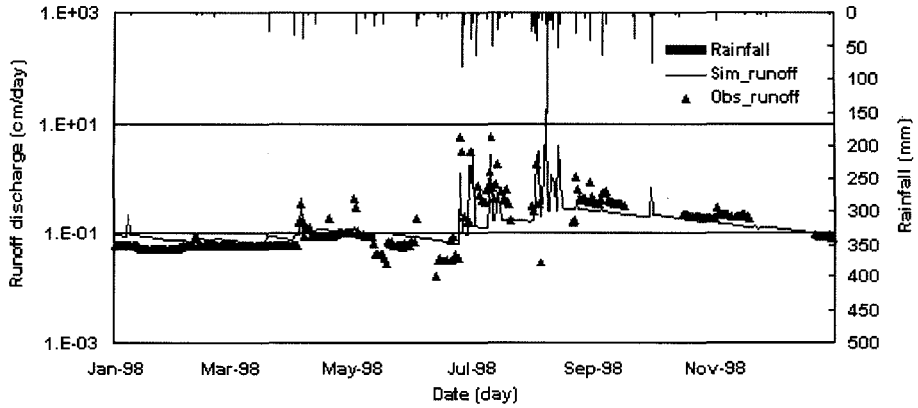

Fig. 4. Observed and simulated runoff (1998).

Table 5. Transport parameters

Parameter	Description	Unit	Variable	Initial value	Calibrated value	Literature range / comments
Sediment delivery ratio	Annual sediment yield/annual erosion	None	SDR	0.08	0.27	Site-dependent
Baseflow recession	Ground water recession coefficient	/day	r	0.052	0.0461	0.01-0.2
Seepage	Deep seepage coefficient(loss)	/day	s	0.000	0.0191	Calibration
IUS	Initial unsaturated available water capacity	cm	IUS	10	10	Only affects first few month
UAWC	Unsaturated available water capacity	cm	UAWC	10	11	Calibration
ISS	Initial saturated storage	cm	ISS	0	0	Only affects first few months

Table 6. Simulated runoff for calibration period

Year	Rainfall (mm)		Obs. span (day)	Runoff (mm)			Runoff ratio			R^2	Bias	c	d	EI
				obs.	sim.		obs.	sim.						
	a	b			a	b		a	b					
1996	883	780	274	345	239	236	0.44	0.31	0.30	0.91	0.38	2.11	0.44	0.69
1997	1204	1204	348	788	672	653	0.65	0.56	0.54	0.87	0.37	3.30	0.20	0.65
1998	1621	955	273	564	886	429	0.59	0.55	0.45	0.67	0.53	3.68	0.33	0.51
1999	1515	1254	299	719	836	713	0.57	0.55	0.57	0.70	0.10	5.72	0.04	0.66

a: For total span b: For observed span c: RMSE (mm/day) d: RMAE (mm/day)

6은 실측치와 모의 결과를 자료기간에 대한 유출율과 오차통계량을 비교 · 정리한 것이다.

검정기간은, 계측기 결함과 기상이변 등으로 인한 결측이 많은 2000년과 2001년을 제외한 2002년에서 2004년까지 3년간이며, Fig. 5는 검정 결과를 보여주고 있다. Table 7은 실측치와 모의 결과를 통계량을 이용하여 비교 · 정리한 것으로, 모의된 유출량과 실측치의 R^2는 0.81~0.86, RMSE는 3.26~4.03, RMAE는 0.15~0.47의 범위 값을 보였다.

3.1.2. GWLF 모형의 평가

유역 유출에 대한 보정과 검정을 통하여 매개변수를 보정하고 부하함수를 이용한 수질 모의를 실시하여 자료기간의 실측자료와 모의한 월별 부하량을 비교하였다. Table 8에서와 같이 각각에 대한 R^2를 산정한 결과, 유사량은 0.40~0.98, TN은 0.50~0.94, 그리고

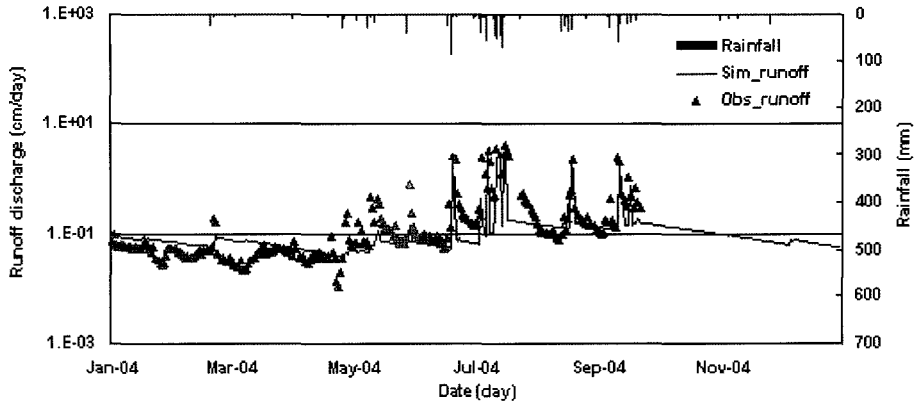

Fig. 5. Observed and simulated runoff (2004).

Table 7. Simulated runoff for verification period

Year	Rainfall (mm)		Obs. span (day)	Runoff (mm)			Runoff ratio			R^2	Bias	c	d	EI
				obs.	sim.		obs.	sim.						
	a	b			a	b		a	b					
2002	1247	1191	298	657	563	510	0.55	0.47	0.43	0.86	0.32	4.03	0.15	0.68
2003	1515	1117	238	677	775	457	0.61	0.69	0.41	0.85	0.91	3.70	0.47	0.66
2004	1192	1155	312	731	591	478	0.65	0.51	0.41	0.81	0.70	3.26	0.38	0.61

a: For total span b: For observed span c: RMSE (mm/day) d: RMAE (mm/day)

Table 8. Sediment, TN and TP simulation comparison

Year	Obs. (kg/ha/year)			Sim. (kg/ha/year)			R^2			EI		
	Sediment	TN	TP	Sediment	TN	TP	Sediment	TN	TP	Sediment	TN	TP
1996	109.96	20.57	1.02	110.34	21.30	1.22	0.95	0.53	0.94			
1997	365.89	40.21	2.17	243.58	29.84	2.36	0.66	0.60	0.59	0.23	0.38	0.46
1998	188.19	29.24	1.61	305.40	37.00	2.70	0.40	0.76	0.66			
1999	441.24	33.77	1.91	267.97	39.11	2.83	0.96	0.90	0.97			
2002	385.50	32.32	1.78	234.16	32.94	2.33	0.98	0.94	0.94			
2003	403.38	36.70	2.09	215.92	31.25	2.22	0.50	0.77	0.90	0.84	0.48	0.65
2004	313.55	50.28	2.71	157.45	20.88	1.52	0.83	0.50	0.87			

TP는 0.59~0.97로 나타났으며, 특정 연도를 제외한 자료기간 전체에 대하여 0.6 이상의 양호한 값을 나타내었다. 모형의 효율을 평가하기 위해서 사용한 효율지수 EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI가 0 보다 작으면 모형의 추정결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다. 본 연구 결과, 모형의 EI는 유출이 0.51~0.69, 유사량이 0.23~0.84, 그리고 영양염류의 경우는 0.38~0.65로 나타났다. GWLF 모형의 경우 유출은 일단위로 모의가 되는 반면, 영양염류의 경우는 월단위로 모의 출력된 값을 사용하였기 때문에 유출에 비하여 영양염류의 EI가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 사료되며, 전체 자료기간에서 양호한 결과를 나타내었다.

3.2. WGEN 모형

3.2.1. 기후변화 시나리오

KEI에서는 서울대학교, 교토대학교, 일본국립환경연구원이 참여하여 '기후변화영향평가모형 개발'이라는

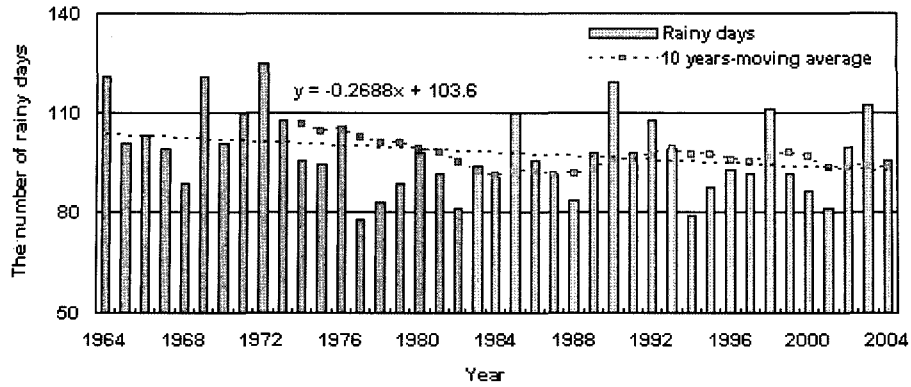

Fig. 6. Histogram of the observed rainy day in Suwon (1964~2004).

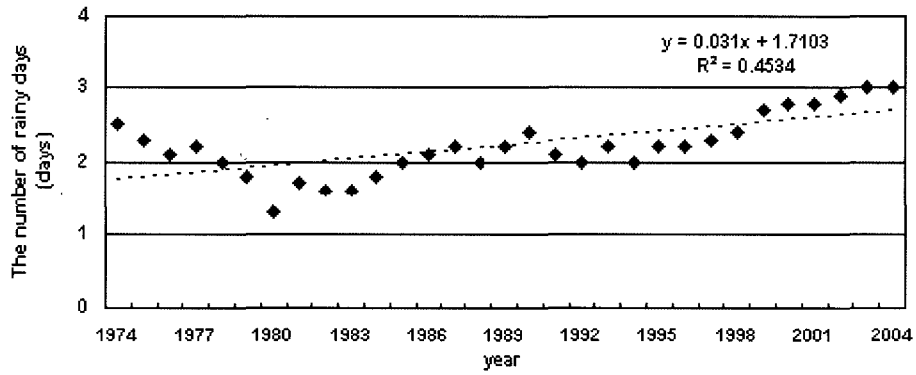

Fig. 7. 10-years moving average of the number of rainy days (>80 mm).

제목의 프로젝트를 진행하여 국내 물순환에 미치는 기후변화의 영향에 대한 연구를 수행 중에 있다. 이 연구에서는 이 시나리오에 기초한 기후 데이터베이스를 구축하였으며, 2001년 SRES의 다양한 지구기후모델(Global Climate Model, GCM) 결과들과 지역 영향 연구에서 요구하는 높은 공간해상도의 기후모형 결과인 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM) 자료를 수집하여 시나리오에 따른 다양한 영향예측 및 대책 수립에 필요한 월단위 기후 데이터베이스를 구축하였다.

3.2.2. 수원 일강수량 변화 추세 분석

수원 기상청으로부터 수집한 1964년부터 2004년까지의 수원 지방 일강수량 자료를 적용하여 기후변화에 따른 변화를 이동평균을 이용한 추세분석을 실시하였다. 자료기간동안의 월 강수량 평균치는 12월이 21.8 mm로 최저였으며, 7월이 331.2 mm로 최대를 보였다. 월 강수량 최대치는 967.9 mm로 1995년 8월에 나타났다.

수원 일강수량 자료에 대한 선형 추세분석 결과에서도 특정 월에 대해 이와 같은 추세가 나타났으며, t-test를 이용하여 선형 추세의 유무에 대한 가설검정을 실시하였다. 신뢰수준 95%에서 선형추세가 있다고 판단할 수 있는 것은 4월이 유일했으나, 신뢰도는 낮지만 회귀식의 기울기는 기후변화에 따른 월별 강수량 변화를 반영하고 있음을 확인하였다. Fig. 6은 년 강우 발생 일수와 회귀식, 그리고 10년-이동평균을 정리한 것이다. Fig. 7은 80 mm 이상의 호우 발생일수에 대

Table 9. Testing of precipitation frequency change trends for each month

Case	R	T_c	Linear trends
a	0.204	1.285	y = 0.0092x + 1.1766
b	0.272	1.742	y = -0.2688x + 103.6

a: The number of rainy days (>80 mm), b: The number of total rainy days
R: Cross-correlation coefficient, Tc: Hypothesis test statistic

한 10년-이동평균을 보여주고 있으며, Table 9는 강우일수 변화 추세에 대한 t-검정 결과를 정리한 것이다.

3.2.3. 시나리오별 기상자료(강수량, 온도) 발생

시나리오별 강수량과 기온 변화에 대한 특성과 강우일수 감소를 고려하여 WGEN 모형으로 발생된 기상자료(1964~2004)를 이용하여 마코브 체인의 월별 요소들과 밀도함수의 매개변수들을 산정하였으며 이를 이용하여 발생시킨 50년간의 자료와 시나리오별 강수량 변화율을 적용하여 발생시킨 강수량 자료를 분석하여 비교하였다(Fig. 8). 평균 연 강수량은 IPCC의 SRES 기후변화 시나리오인 A1, A2, B2, B1 순으로, 수원 관측 자료와 30 mm에서 220 mm까지 차이를 보여주었다. 여기서 A와 B는 경제지향인가, 환경지향인가를 타나내고, 1과 2는 지구주의지향인지, 지역주의 지향인가를 나타내는 것으로, 이들의 조합으로 네 개의 시나리오가 작성된다.

수문 모형 적용을 위하여 평균기온을 WGEN 모형의 출력 자료로부터 얻기 위해 수원 기상청 자료를 이용하여 최대기온과 최소기온을 산술평균하여 산정한 값과 실측 평균기온과 비교한 결과 0.99의 높은 상관성을 가지는 것으로 나타나 산술평균값을 일 평균 기온으로 산정하였다. Fig. 9는 일강수량 발생과 같은 방법으로 시나리오별 기온 변화율을 적용하여 발생시킨 기온 자료를 분석한 결과이다.

3.2.4. 강우일수 감소를 고려한 일 강수량 자료 발생

지구온난화현상에 의한 강수량 증가와 기온의 상승과 더불어 우리나라는 연간 비가 오는 연 강우 일수는 감소하였으나 연강수량은 증가하여 결과적으로 강수의 강도가 증가하는 특성을 보인다(Choi, 2002). 이러한 특성은 본 연구에서 사용한 수원 기상청 자료에서도 확인할 수 있었으며, 최근 50년간(1954~2003) 기상청의 14개 주요 관측지점에 대한 연구(Kwon,

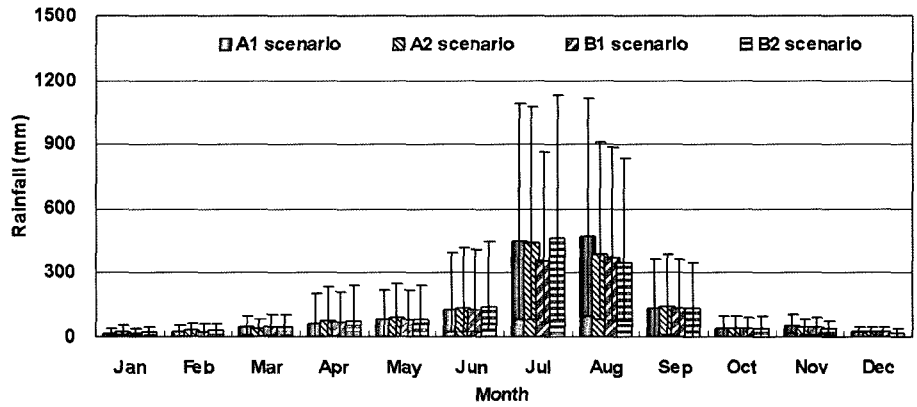

Fig. 8. Comparisons of generated monthly rainfall data for each scenario.

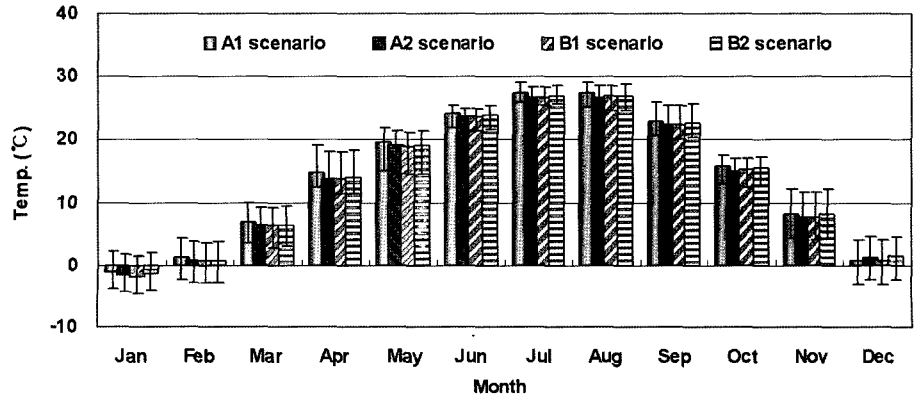

Fig. 9. Comparison of generated monthly average temperature data for each scenario.

Table 10. Number of annual rainy days of generated data set

Climate Change Scenario	A1	A1-1	A1-2	B1	B1-1	B1-2	A2	A2-1	A2-2	B2	B2-1	B2-2
a	168	176	219	122	131	159	151	162	192	141	155	187
b	1530.2	1509.8	1532.0	1457.2	1433.5	1454.7	1335.6	1321.4	1342.1	1447.4	1414.7	1434.7

a: The number of rainy (>80 mm) days, b: The total annual rainfall (mm)

2005)에서 전체 강우일수가 감소한 반면, 일강수량이 80 mm 이상인 호우의 발생빈도가 증가하고 있음을 보인 바 있다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 기상요소의 양적인 변화에 대한 영향과 함께 WGEN의 강우발생 여부를 결정하는 마코브 체인에 대한 매개변수를 재산정하여 적용함으로서 강수일수 감소로 인한 강수강도 증가에 영향 분석을 실시하였다. 비강우일 다음날 강우 발생 확률과 연속 강우 발생 확률을 동시에 10%와 20% 감소시킴으로서 두 자료집합(Set 1, Set 2)을 발생시켰다. Fig. 6에서 산출한 수원 지방의 연 강우일수에 대한 회귀식을 적용하였으며, 향후 2041년~2050년에는 연강우일수가 10일~12일이 감소하는 것으로 나타나고, Set 1과 Set2의 평균 연 강우일수는 원 자료 집합과 비교할 때 각각 10일과 22일이 감소한 결과를 보였다. 평균 기온에 대해서는 기존의 시나리오별 일 기상자료 발생을 위해 산정한 매개변수를 그대로 사용하였으므로 변함이 없었다.

Table 10은 강우 일수를 조정한 자료집합의 성격이 전체 강우일수의 감소와 더불어 앞에서 분석한 수원 강수량 실측 자료에서 나타난 80 mm이상 호우 발생 일수에 대한 경향을 고려할 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 고 찰

4.1. 일강수량 특성에 따른 영향 분석

본 연구에서는 일단위 강수량의 특성과 오염물질 부하량과의 관계를 분석하기 위해 일강수량 자료집합의 특성을 강수량의 크기와 강우일수에 대해 정의하고 수원 기상청 자료를 다음의 기준에 따라 변형한 네 개의 집합으로 재구성하여 각각의 경우 오염 발생량을 모의하여 결과를 비교해 보았다. 우선 각 경우에 대하여 임의의 A, B, C, D 네 개의 집합으로 칭하였으며, 자료집합 A는 일강수량(>0.2 mm)이 3일 이상 연속 기록된 강우 사상에 대해 강우 발생 첫날의 강수량과 마지막 날의 강우를 그 사이 일강수량에 재분배하여 전체 강수량의 변화는 없되 강우사상별 일 최대 강수량을 높이고 강우 일수를 줄이는 효과를 반영한 집합이며, 집합 B와 C는 50 mm 이상의 일강수량을 각각 10%와 20% 증가시켜 전체 강수량이 증가하는 효과를 반영한 집합이다. 마지막으로 집합 D는 강우가 발생한 전체 일강수량을 20% 증가시킨 집합이다. 다음 Table 11은 원 자료의 모의 결과에 대한 증감을 백분율로 정리한 것이다.

Table 11. The ratio of simulated results of each case to original (%)

		Rainfall	Stream flow	Sediment	TN	TP
Case	A	-	2.0	21.0	2.7	12.2
	B	4.0	9.7	12.8	5.4	10.1
	C	8.0	19.7	26.6	11.1	20.9
	D	20.0	64.5	76.1	32.5	60.4

총강수량의 변화는 없으나, 강우일수가 감소하면서 사상별 최대 일강수량이 증가하는 A 경우에 대한 모의 결과는 유사량이 평균 21%정도 증가하는 것으로 나타났으며, TN과 TP 부하량은 각각 2.7%와 12.2% 증가하였다. A의 경우는 다른 강수량 증가를 가정한 집합에 대한 모의 결과에 비해 유사량이 비교적 민감하게 증가하였다. 일강수량이 50 mm이상을 기록한 날에 대해 강수량을 각각 10%와 20%씩 증가한 B와 C에 대한 결과는 A 집합과 비교할 때 유출량이 유사량에 비해 변화가 컸으며, 이에 따라 TN의 증가가 각각 5.4%와 11.1%로 큰 폭으로 나타났으며, 원 자료에 대한 증가폭은 C가 B의 약 2배 정도로 모의되었다. 일강수량 자료 전체를 20% 증가시킨 D 경우에 대한 결과는 유출량이 64.5%, 유사량이 76.1%, TN이 32.5%, TP가 60.4%로 큰 증가폭을 보이는 것으로 나타났다.

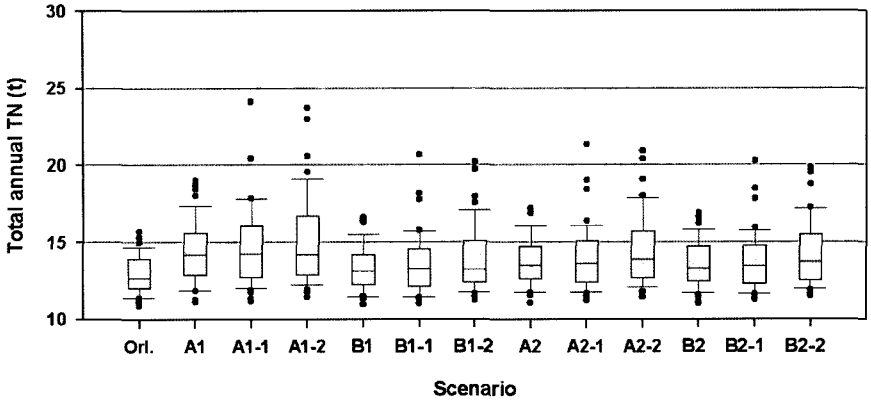

Fig. 10. Comparison of simulated annual TN load for each scenario.

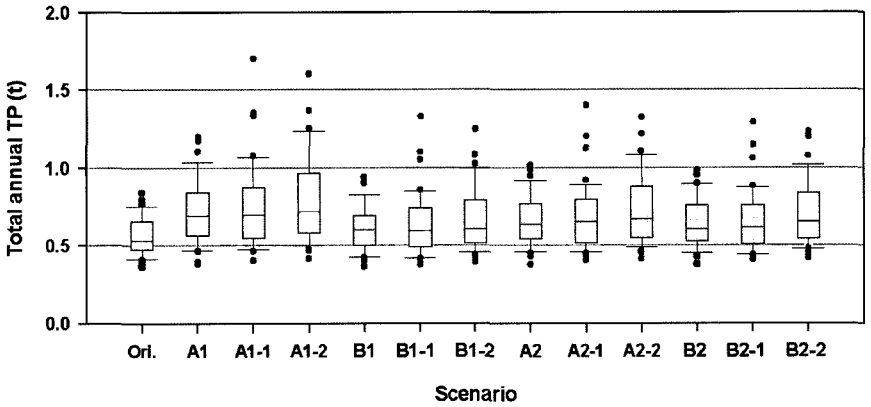

Fig. 11. Comparison of simulated annual TN load for each scenario.

Table 12. Comparison of climate change effects for each scenario

Scenario	Stream runoff		Precipitation		Runoff ratio	sediment		TN		TP	
	a (cm)	b	a (mm)	b	%	a (ton)	b %	a (ton)	b	a (ton)	b
Obs.	64.8	-	1277.0	-	50.7	108.4	-	13.19	-	0.62	-
Ori.	67.6	-	1303.0	-	51.9	98.6	-	12.94	-	0.57	-
A1	84.3	24.6	1530.2	17.4	55.1	157.9	60.1	14.41	11.4	0.73	27.7
A1-1	83.9	24.0	1509.8	15.9	55.6	163.7	66.0	14.71	13.7	0.75	32.2
A1-2	88.3	30.5	1532.0	17.6	57.6	182.8	85.4	15.09	16.6	0.80	39.8
A2	78.2	15.6	1457.2	11.8	53.7	136.9	38.8	13.82	6.8	0.67	17.0
A2-1	77.4	14.5	1433.5	10.0	54.0	138.9	40.9	14.01	8.3	0.68	19.7
A2-2	81.5	20.5	1454.7	11.6	56.1	157.7	59.9	14.39	11.2	0.73	27.2
B1	67.4	-0.4	1335.6	2.5	50.4	113.0	14.6	13.33	3.0	0.61	7.2
B1-1	67.6	-0.1	1321.4	1.4	51.1	117.0	18.7	13.57	4.8	0.63	10.8
B1-2	71.5	5.6	1342.1	3.0	53.2	132.0	33.9	13.91	7.5	0.67	17.4
B2	76.7	13.4	1447.4	11.1	53.0	133.7	35.6	13.65	5.4	0.65	14.3
B2-1	75.1	11.1	1414.7	8.6	53.1	133.6	35.5	13.78	6.5	0.66	15.9
B2-2	79.1	16.9	1434.7	10.1	55.1	152.1	54.3	14.14	9.3	0.70	23.2

Obs.: Observed average data from 1999 to 2004
Ori.: Generated data of 50 years that are characteristic of observed data
a: Annual simulated or observed values
b: Annual increment over the output of original data (%)

4.2. 시나리오별 강수량 변화에 따른 비점오염 영향 분석

각 시나리오별로 대상 유역에서 발생하는 연유출량과 유사량, TN, TP 부하량을 모의하였으며, Fig. 10과 Fig. 11은 TN과 TP의 시나리오별 모의 결과를 나타낸 것이고, Table 12는 시나리오별 수문 및 수질의 변화를 정리한 것이다. 연 강수량이 17.4% 증가해 월별 평균 강수량 변화가 가장 큰 시나리오 A1은 연 유출량이 24.6% 증가하고, 유사량과 TN, TP 부하량은 각각 60.1%, 14.4%, 27.7% 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 비하여 연 강수량 증가가 2.5%로 가장 작은 시나리오 B1의 연 유출량 변화는 -0.4% 감소하였다. 이는 기온상승으로 인한 증발산량 증가의 영향에 의한 결과로 판단되며, 유사량과 TN, TP 부하량은 각각 14.6%, 3.0%, 7.2% 증가하는 것으로 모의되었다. 한편, 강우 발생 일수 변화를 가정한 모의 결과로는 연강우일수가 약 10일 감소한 경우에 대하여 임의의 A1-1, A2-1, B1-1, B2-1로 나타낼 경우, 강우 일수 감소 이전과 연 유출량 변화는 거의 없었으나, 유사량과 영양물질 부하량은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 연강우일수를 약 20일 감소시킨 A1-2, A2-2, B1-2, B2-2의 경우는 강우일수를 감소시키기 이전에 비해 유출량이 4~6% 정도 더 증가하였으며, 유사량은 20~25%, TN 부하량은 4~5%, TP 부하량은 9~12%가 더 증가하여 발생하는 것으로 나타났다.

적 요

본 연구에서는 향후 강수량의 변화가 유역의 비점오염 발생 부하량에 미치는 영향에 대한 정량적 분석을 목적으로, 발안유역의 HP#6 소유역을 대상유역으로 선정하여 자료를 구축하고 유역규모의 수문수질 모델인 GWLF 모형의 시험유역에 대한 적용성 검토를 수행하였으며, WGEN 모형을 이용하여 일 기상자료를 발생시켜 대상유역의 향후 기후변화를 고려한 발생 오염부하량 변화를 예측하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기상 변화에 따른 유역의 비점오염 영향 분석을 위하여 대상유역을 선정하고 기상, 수문, 수질자료와 오염원 현황을 비롯한 유역 특성 자료를 조사하고 수집하였으며, 수문모형으로는 GWLF 모형을 선정하였다.

2. GWLF 모형의 보정과 검정 과정에서 모의된 일 유출량은 R^2가 0.40~0.98로 GWLF 모형은 농촌 소유역에 대해 적용성이 있는 것으로 판단되며, 모의한 오염부하량과 실측치를 비교한 결과, R^2가 유사량은 0.40~0.98, TN은 0.50~0.94, TP는 0.59~0.97로 높게 나타났으며, 모형의 효율지수도 유출이 0.51~0.69, 유사량이 0.23~0.84, 그리고 영양염류의 경우는 0.38~0.65로 비교적 양호한 값을 나타내었다.

3. 수원 기상청으로부터 1964년~2004년의 강수량 자료를 수집하여 대상유역을 포함하는 지역의 일 강수량과 강우 발생빈도에 대한 10년-이동평균과 회귀식을 이용하여 추세분석을 실시함으로서 기후변화에 따른 기상인자의 영향을 확인하였으며, 10년-이동평균을 이용하여 강우 발생 빈도에 대한 추세를 살펴본 결과, 0.2 mm 이상의 강수량을 기록한 연간 일수는 감소하나, 80 mm 이상의 강수량을 기록한 호우 발생 연간 일수는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. IPCC에서 제시한 미래 배출 시나리오에 따른 한반도 기후변화를 고려하여 WGEN 모형을 응용함으로서 향후 2041~2050년의 남한 지역 월 강수량과 월 평균기온의 변화율을 적용한 강수량과 평균 기온에 대한 일 기상자료를 발생시켰으며, 수원 지방의 강우 일수 변화 추세를 고려하기 위해 WGEN 모형의 마코브체인 매개변수를 수정하여 시나리오별 기상자료 집합을 구축하였다.

5. 강수량 증가에 따른 유출량을 비롯한 영양물질 부하량의 변화는 선형적 상관성을 보였으나, 유사량의 경우는 강수량 변화가 없고 강우일수가 감소하면서 사상별 최대 일강수량이 증가하는 경우에 대한 모의 결과가 평균 21%정도 증가하는 것으로 나타나, 강우 강도와 관련성이 큰 것으로 분석되었다.

6. 연 강수량이 17.4% 증가해 월별 평균 강수량 변화가 가장 큰 시나리오 A1은 연 유출량이 24.6% 증가하고, 유사량과 TN, TP 부하량은 각각 60.1%, 14.4%, 27.7% 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 비하여 연 강수량 증가가 2.5%로 가장 작은 시나리오 B1의 연 유출량 변화는 -0.4% 감소하는 것으로 나타났고, 유사량과 TN, TP 부하량은 각각 14.6%, 3.0%, 7.2% 증가하는 것으로 모의되었다.

7. 강우 발생 일수 변화를 가정한 시나리오에 대한 모의 결과, 연강우일수가 약 10일 감소한 A1-1, A2-1, B1-1, B2-1의 경우, 강우 일수 감소 이전과 연 유

출량 변화는 거의 없었으나, 유사량과 영양물질 부하량은 다소 증가하는 것으로 나타났고 연강우일수를 약 20일 감소시킨 A1-2, A2-2, B1-2, B2-2의 경우는 강우일수를 감소시키기 이전에 비해 유출량이 4~6% 정도 더 증가하였으며, 유사량은 20~25%, TN 부하량은 4~5%, TP 부하량은 9~12%가 더 증가하여 발생하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Cho, J. P., 1998: Application of AGNIPS model with rural watersheds having complex landuse characteristics. M S. thesis, Seoul National University.

Choi, Y., 2002: Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in Korea. *Journal of the Korean Data Analysis Society* **4**(3), 269-282.

Haith, D. A., and L. L. Shoemaker, 1987: Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resources Bulletin* **23**(3), 471-478.

Haith, D. A., Ross Mande, and R. S. Wu, 1992: *Generalized Watershed Loading Functions Ver. 2.0 User's Manual.* Department of Agricultural & Biological Engineering, Cornell university.

Jung, H. S., K. H. Lim, and H. O. Jai, 1999: Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul. *Journal of the Korean Meteorological Society* **35**(3), 354-371.

Kang, I. S., C. H. Ho, and K. D. Min, 1992: Long-range forecast of summer precipitation in Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society* **28**(3), 283-292.

Kang, M. S., 2002: Development of total maximum daily loads simulation system using artificial neural networks for satellite data analysis and nonpoint source pollution models. Ph. D. thesis, Seoul National University.

Kang, M. S., and S. W. Park, 2003: Development and application of total maximum daily loads simulation system using nonpoint source pollution model. *Journal of Korea Water Resources Association* **36**(1), 117-128.

Kang, M. S., S. W. Park, J. J. Lee, and K. H. Yoo, 2006: Appling SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* **79**, 72-92.

Korea Environment Institute (KEI), 2004: *Development of Impact Assessment Model by Climate Change in Water Resources.*

Kwon, W. T., 2005: Special Issue : The second national climate change workshop; Articles : Current status and perspectives of climate change sciences. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**(2-1), 325-336.

Lim G. H, and H. S. Jung, 1992: Interannual variation of the annual precipitations at Seoul, 1771-1990. *Journal of the Korean Meteorological Society* **28**(2), 125-132.

Lim, H. J., H. J. Kwon, D. H. Bae, and S. J. Kim, 2006: Analysis of hydrological impact using climate change scenarios and the CA-Markov technique on Soyanggang-dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* **39**(5), 453-466.

Lim, S. J., and S. W. Park, 1997: Estimating runoff curve number for rice paddies. *Journal of Korea Water Resources Association* **30**(4), 379-387.

Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models: 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282-290.

Oh, J. H., and S. G. Hong, 1995: Precipitation change in Korea due to atmospheric CO_2 increase. *Journal of Korea Water Resources Association* **28**(3), 143-157.

Park, J. M., 2003: Development of GIS based farmland flooding damage simulation system. Ph. D. thesis, Seoul National University.

Richardson, C. W., and D. A. Wright, 1984: *WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables*, United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service, ARS-8.

Yoon, Y. N., C. S. Yoo, J. S. Lee, and J. H. Ahn, 1998: On the change of flood and drought occurrence frequency due to global warming : 2. Estimation of the change in daily rainfall depth distribution due to global warming. *Journal of Korea Water Resources Association* **32**(6), 627-636.

Zhang, X. C., and W. Z. Liu, 2005: Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the loess plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology* **131**, 127-142.

김승, 신현민, 1992: 서울지점 강수의 장기간 변동성향에 대한 통계학적 검증. 수공학연구발표회논문집, 264-272.

유철상, 이동률, 2000: 기후변화와 수자원 : 국내의 연구동향. 한국수자원학회지 **33**, 42-47.

정규연, 이동률, 정성원, 2003: 설마천과 안양천에서의 강우사상에 따른 오염물질 유출특성, 한국수자원학회 학술발표회논문집(1), 125-128.

통계청, 2004: 화성시통계연보.

환경부, 2003: 공장폐수의 발생과 처리.

환경부, 2004: 4대강 비점오염관리 종합대책.