

BASINS-HSPF 기후변화가 하천수질에 미치는 영향평가

Impact Assessment of Water Quality in the Yeong-san River under Climate Change

Suk Ho Lee **, Byung Hyun Lee ***, Byung Sik Kim ****, Sun Hong Min *****

Department of Urban & Environmental Disaster Prevention School of Disaster Prevention,
Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Smacheok-si, Gangwon-do, Republic of Korea

Abstract

The future climate projection based on international climate change scenarios expected that changes in hydrological circulation and the ecosystem would be inevitable in the future because of higher temperature and more rainfall events. Moreover, because the rapid urbanization and industrial development led accelerated land development and increased the impermeable layer's size, the river water pollution caused by non point source(NPS) pollutants is expected to worsen(Ministry of Environment, Water Environmental Management Plan). The result of this study showed that, in the future, the number of rainy days would increase and the temperature would be 4°C higher than the current temperature. As a result of these changes, runoff was expected to increase by 54% in the future. In terms of changes in NPS pollution loadings, BOD, T-N, and T-P were expected to increase by 216%, 54%, and 50%, respectively.

Key words: BASINS/HSPF, non point source, RCP 8.5 climate change scenarios, river water quality

국문초록

기후변화 시나리오에 의한 미래 기후변화 전망은 미래는 현재보다 고온현상 및 강수량이 증가하여 수문학적 순환이 변동되고, 생태계 변화가 불가피 할 것이라고 내다보았다. 이에 더불어 급속한 도시화와 산업발달로 토지

* 2014년 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140174).

** The 1st author. Tel. +82-33-570-6838. Fax. +82-33-570-6501. E-mail. esoco@kangwon.ac.kr

*** Tel. +82-2-6105-6644. E-mail. lhb@noaa.co.kr

****Tel. +82-33-570-6819. E-mail. hydrodkbs@kangwon.ac.kr

***** Corresponding author. Tel. +82-33-570-6838. E-mail. sunmin@kangwon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: Jun. 25, 2015 / Revised: Oct. 7, 2015 / Accepted: Oct. 20, 2015

개발이 가속화되고 불투수층 면적이 늘어남에 따라 비점오염원(non-point pollutants source)에 의한 하천 수질 오염에 미치는 영향이 점차 증가 할 것으로 예측하고 있다(환경부, 2006). 따라서, 본 연구에서는 기후변화가 하천수질에 미치는 영향을 평가하고자 RCP8.5 기후변화시나리오와 HSPF(Hydrological Simulation Program-*fortran*)모형을 이용하여 미래 기후변화로 인한 유출량과 비점오염(non-point source(NPS) pollutants) 변화를 추정하였다. 그 결과 미래로 갈수록 습윤일수가 증가하고, 기온역시 미래 후기에는 현재에 비해 4°C 상승하는 것으로 나타났다. 그로인한 미래 유출량은 54%증가하는 것으로 나타났다. 비점오염부하의 변화는 현재에 비해 BOD가 216%, T-N이 54%, T-P가 50% 증가하는 것으로 나타났다.

주제어: BASINS/HSPF, 비점오염원, RCP8.5 기후변화시나리오, 하천수질

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

최근 기후변화로 인해 전 지구적인 기후 현상이 변화하고 있으며, 기후변화는 인간 삶에 있어 수자원 및 환경에 광범위하게 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 이러한 기후변화는 지구온난화와 함께 국내·외에서 큰 이슈가 되고 있으며, 20세기 이후 인류에게 가장 중요한 안건 중 하나이다. 이러한 측면에서 국내에서도 수자원에 대한 관심이 고조되고 있으며 그에 따른 수자원의 효율적인 이용의 필요성과 양질의 물을 요구하고 있다.

우리나라를 포함한 동아시아 지역은 기후변화로 인한 강수량 증가가 예상되지만 동시에 강수강도의 증가 및 연강수일수의 감소로 의해 강도 높은 우기 사이의 건기가 길어지고 기온상승으로 의한 대기 중 수분요구량 증가로 증발산량이 증가할 것으로 전망되었고(NIMR, 2011), 미래로 갈수록 극한강수의 크기가 커지고 극한강수와 가뭄의 심도가 증가하고, 발생빈도 또한 자주 발생하리라 전망하였다(Kim, *et. al.*, 2013).

위와 같이 기후변화 영향으로 기상 및 강우특성이 변화하고 이에 따라 유역에서의 유출특성과 오염물질 발생특성도 변화하고 있다. 그러므로 정교한 유역 수질분석이 요구되고 있다. 특히, 비점오염원 오염물질은 대부분 강우 시에 유출되며 그 경로 또한 다양하고 복잡하므로, 비점오염원의 발생양상을 모의하고 이를 정량적으로 규명하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 우리나라에서 배출되는 비점오염부하(BOD5)의 규모는 하수관거누수, 미처리 가축분뇨의 영향 등을 포함할 때 그 비중은 권역별로 42~69%에 달하여 2015년에는 65~70%까지 증가할 것으로 추정하고 있다(Ministry of Environment, 2006). 2000년 4대강 수계로 흘러드는 오염물질 중 비점오염원이 차지하는 비율은 생물화학적 산소요구량 기준으로 22~37%에 불과했으나 2003년에는 42~69%로 증가했으며 2015년에는 65~70%로 증가할 것으로 전망하고 있다. 따라서 하천과 호소의 수질개선을 위해서는 무엇보다도 비점오염원의 효율적인 관리가 필요한 것으로 판단되며 본 논문에서는 기후변화시나리오의 강우, 온도의 변화에 따른

미래 유출량 및 비점오염원 부하량의 변화를 정량적으로 파악하고자 하였다.

2. 연구동향

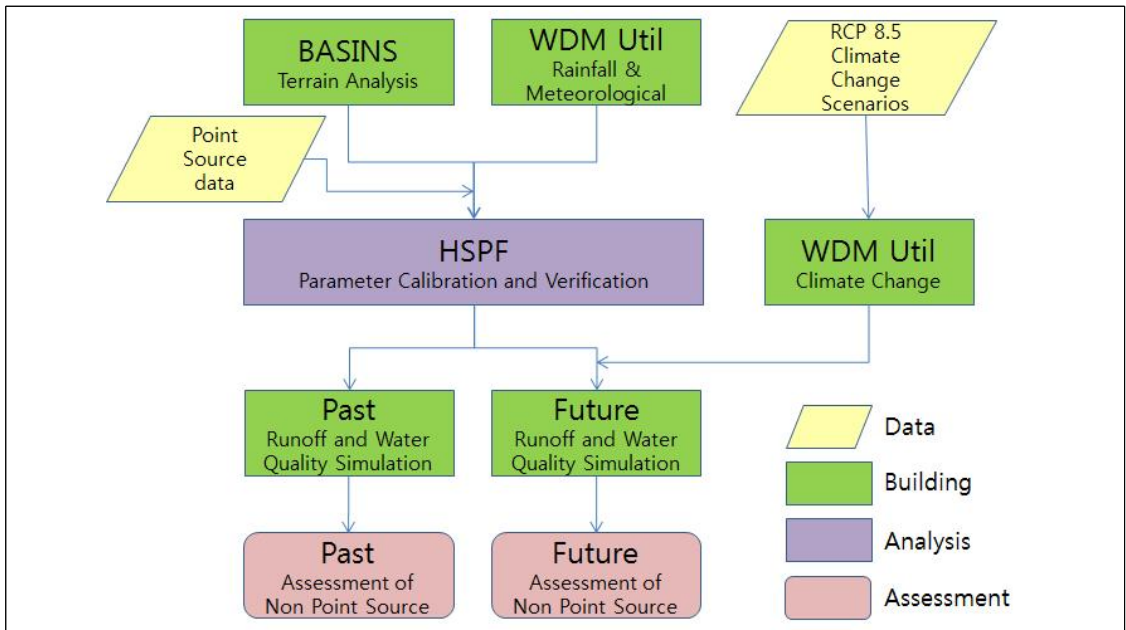
이미 국외에서는 기후변화 시나리오와 다양한 유역환경변화 시나리오를 접목하여 수문학적 영향평가 및 수질변화를 예측, 평가하는 연구를 진행하고 있다. Bouraoui, *et al.*(2002)은 영국 Yorkshire 지방에 위치한 Ouse River 유역(3,500km²)에서 6개의 기후변화 시나리오를 작성하고 SWAT 모형에 적용한 결과, 기후변화에 따른 T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus) 오염부하량이 6%에서 27%까지, 5%에서 34%까지 각각 증가한다고 밝힌바 있으며, Bouraoui, *et al.*(2004)의 연구 결과에서는 기후변화에 따른 연 평균 영양물질 오염부하량과 겨울철 유출량은 증가하며, 적설면적은 감소한다고 분석하였다. 또한 Nearing, *et al.*(2005)은 SWAT모형과 6개의 다른 모형으로부터 유출과 토양 유실량을 추정, 비교분석한바 있다.

현재 우리나라에서 적용되고 있는 수질예측모델은 하천의 경우 QUAL2E, MIKE11, KQUAL98, QUALKO 및 HSPF 등이고 호소의 경우에는 CE-QUAL-R1, CE-QUAL-W2 및 WASP5 등인데, 지금까지 낙동강에 수질예측모델을 적용한 사례를 살펴보면 초기에는 QUAL2E가 대부분이었고, 이어서 QUAL2E의 수정모델인 KQUAL97가 개발 적용되었고, HSPF와 WASP5가 일부 적용되었다. 최근에는 QUAL2E와 KQUAL97을 보완한 QUALKO를 HSPF와 같이 연계하여 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 또한, SWAT모형과 WASP모형을 연계하는 시도가 이루어졌다. 그러나 이들 모델들은 모두 미국, 유럽 등 선진 외국에서 개발되어 근본적으로 외국의 상황에 맞게 구성되어 있어 우리나라 상황을 충분히 반영하지 못하는 경우가 많았으며 비점오염원에 의한 부하량을 고려하지 않거나 점오염원에 의한 부하량을 점오염원에 의한 부하와 동일한 방식으로 산정하여 고려하고 있는 실정이다.

본 연구에서 수행하고자 하는 HSPF모형을 이용한 비점오염원에 관한 연구사례는 다음과 같다. Lim(2001)은 낙동강유역을 대상으로 HSPF를 이용하여 소규모하천 모의를 실시 후 매개변수 검·보정 후 비점오염원으로부터 유입되는 부하량을 산정하고, 결과를 WASP5에 적용하여 본류의 수질변화를 예측하였으며, Jun, *et al.*(2010)은 산림지역 비점오염 유달특성을 분석함에 있어 오염부하곡선(Load Duration Curve)를 이용한 분석을 제시하였고, Choi(2010)는 비점오염원의 유출 특성을 반영하여 유달 부하량을 산정후 저수지 수질예측에 적용하였으며, Bae, *et al.*(2011)은 토지이용변화와 오염저감시설에 대한 시나리오를 설정하여 비점오염원부하량 삭감에 대한 효과를 오염부하곡선(Load Duration Curve)를 이용하여 비교하였으며, Hwang(2011)은 도시유역의 비점오염원 배출부하량을 보다 효과적으로 분석하기위해 SWMM모형과 연계하여 도시내에 관망 및 우수토실에 대한 검토를 실시하였으며, Lee, *et al.*(2012)은 낙동강유역 신뢰성을 확보를 위해 현장 실측된 유량 및 수질 자료를 활용하여 검·보정 후 비점오염원 부하량을 산정하였다.

3. 연구방법

기후변화를 고려하기 위해서는 일반적으로 GCM(Global Climate Model)이나 RCM(Regional Climate Model)과 같은 기후모형을 사용한다. 본 논문의 연구방법은 첫째 미래의 유출량과 수질에 미치는 영향을 평가를 위하여 IPCC 5차보고서에서 제시한 RCP기후변화시나리오를 이용하였다. RCP 시나리오에는 4종이 있으며, RCP 8.5, 6.0, 4.5, 2.6은 인위적 복사강제력 값 8.5, 6.0, 4.5, 2.6 W/m²을 각각 나타낸다. 비점오염원 오염물질은 대부분이 강우와 함께 유출되는 것으로 알려진바 기후변화 RCP 시나리오에서 미래의 가장 극한사상을 예측하고 있는 RCP 8.5시나리오를 선정하여 현재(Current, 1980년~2010년), 미래1(Future 1, 2011년~2040년), 미래2(Future 2, 2041년~2070년), 미래3(Future 3, 2071년~2100년)으로 구분하였고, WGEM 모형을 통해 RCP 8.5시나리오의 강우 및 기상자료를 추출하였다. 그리고 과거관측 자료와 점오염원자료로 하수종말처리장자료를 입력하여 매개변수 검·보정을 수행 하였다. 이를 이용하여 장기유출모의와 수질모의가 가능한 HSPF모형을 선정하여 RCP기후변화 시나리오의 기간별 유출량과 수질모의 실행하였다. HSPF모형은 동적인 시물레이션을 수행할 수 있고, 정상상태의 경우 유역내의 수리수문 및 수질과정을 동시에 모의할 수 있다. 또한 미래의 토지이용현황과 토양상태를 현재와 동일할 것으로 가정하고 기후변화에 따른 미래 강우량 변화로 인한 비점오염물질의 유출모의가 가능한 모형이다. 따라서 HSPF모형 결과를 이용하여 기후변화가 미래 유출량과 비점오염원부하량에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구절차를 흐름도로 정리하면 <Figure 1>과 같다.



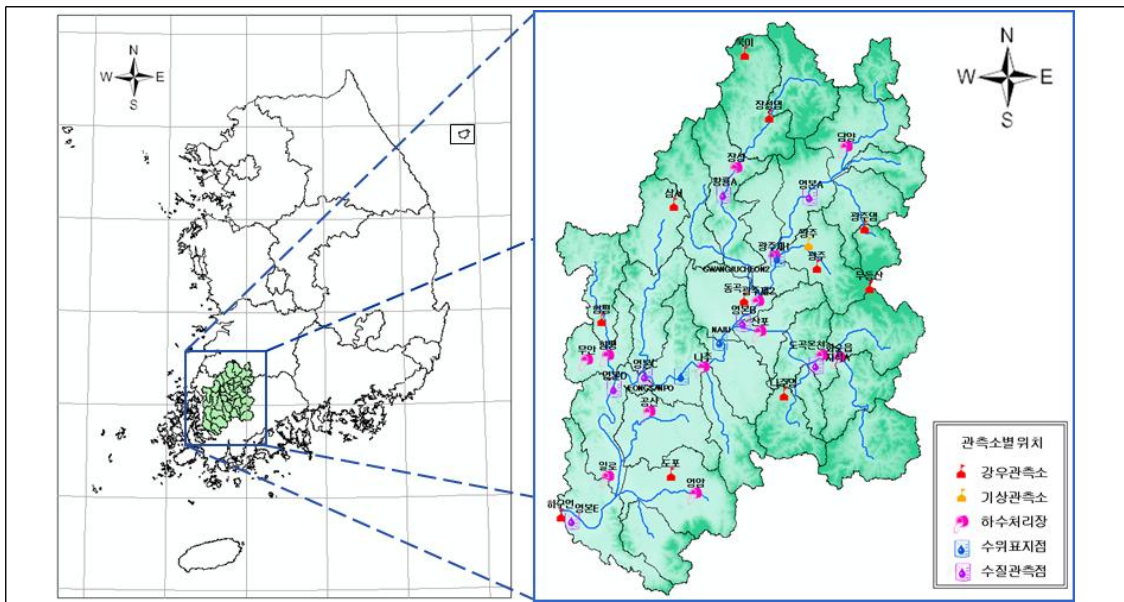
<Figure 1> Flowchart of Study

II. 적용 및 결과

1. 대상구역의 선정

본 연구에서는 장기간의 강우-유출 모의와 수질모의가 가능하기 위해, 신뢰도 높은 장기간의 수문 기상자료와 유출량과 오염량총량의 실측치가 존재하며, 비점오염의 비율이 비교적 높은 지역을 필요로 하였고, 기존의 수자원 계획 관련 보고서 및 자료를 수집하여 검토한 결과 4대강 중 농경지 등의 비점오염원 비율이 가장 높아(수계 전체 오염이 48%) 적절한 저감방안 수립이 필요하다고 판단되는 영산강유역을 대상 유역으로 선정하였다.

영산강 유역은 한반도 남서부에 위치하며, 유역경계는 동경 126°26' 12" ~ 127° 06' 07", 북위 34° 40' 16" ~ 35° 29' 01" 이며, 행정구역상으로는 광주광역시, 전라남도 위치하고 있으며, 유역면적은 3,469.58km², 유로연장은 129.5km, 유역평균고도는 118.9m, 유역평균경사는 20.91% 이다. 강우량은 1966년~2009년의 강우관측자료 분석결과 44개년 평균 면적강우량이 1,313mm이다. <Figure 2>는 영산강유역의 위치 및 강우관측소 11개소, 광주기상관측소, 나주수위관측소, 수질오염총량관측소 7개소, 하수종말처리장 13개소의 위치를 나타낸 것이다.



<Figure 2> Location of Rainfall Station in Yeong-san Basin

2. 입력자료 구축

영산강유역의 강우량 자료는 광주, 광주댐, 나주댐, 장성댐, 도포, 동곡, 무등산, 북이, 삼서, 하구언, 함평으로 총 11개 관측소의 강수량자료를 일 자료 형태로 WAMIS에서 제공받아 WDMutil을 이용하여 각각의 소유역별로 지점강우 형태로 입력 자료를 구축하였다. 기상 자료는 영산강 유역에 해당하는 광주관측소의 평균기온, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 이슬점온도, 일사량, 운량 자료를 일 자료 형태로 WAMIS에서 제공받아 WDMutil의 Compute기능을 이용하여 증발량과 증발산량을 계산하였고, 수집 및 계산된 기상자료는 각각의 소유역별로 일 자료 형태로 입력 자료를 구축하였다. <Table 1>은 분석에 사용된 강우관측소의 현황이다.

<Table 1> Status of Rainfall Station in Yeong-san Basin

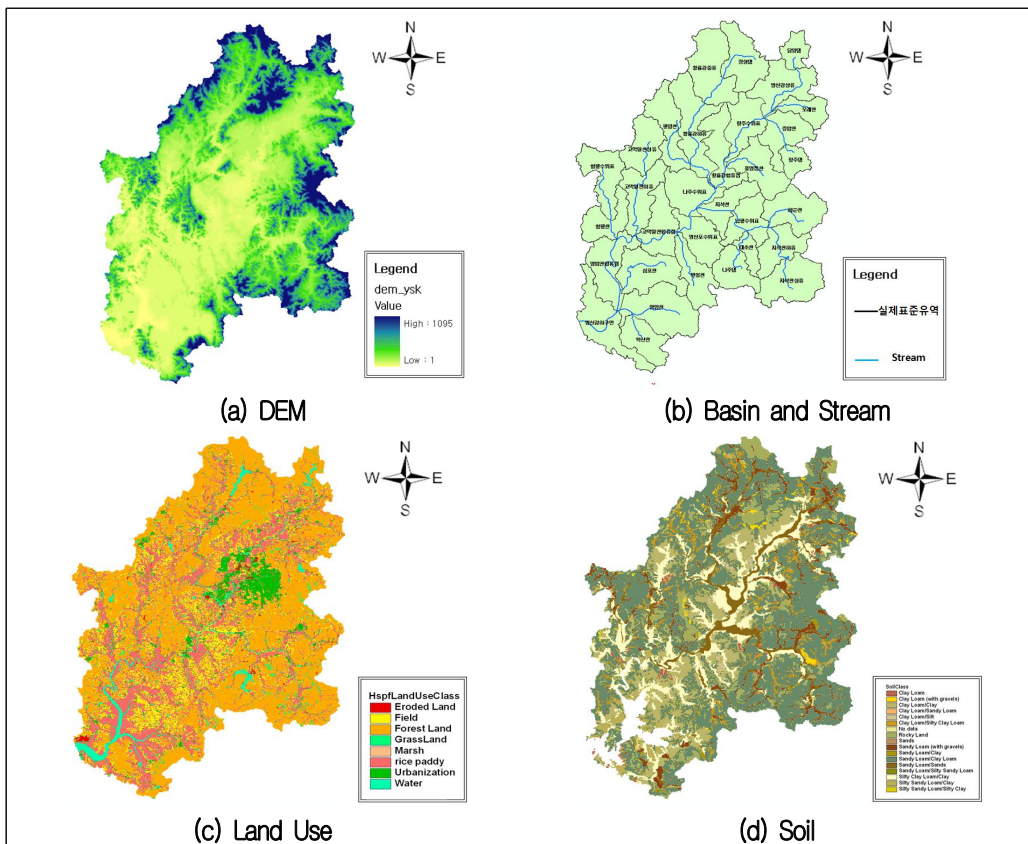
Station	River	Class	Manage	El.(m)	Observation start(day)
Gwangju		T/M		60	1992-04-01
GwangjuDam		T/M		80	1992-04-01
Najudam		T/M		50	1992-04-01
Jangseongdam		Normal		240	1992-04-01
Dopo		T/M		20	1992-04-01
Donggok	Yeong-san	T/M	Ministry of Transportation	20	1992-04-01
Mudeungsan		T/M		520	1992-04-01
Bukyi		T/M		240	1962-07-01
Samseo		T/M		20	1961-08-01
Hagueon		T/M		10	1992-04-01
Hampyeong		T/M		10	1992-04-01

<Table 2>는 영산강 유역 내 수위관측소인 나주수위표의 수위-유량관계곡선식으로, 나주수위표는 1915년에 수위 관측을 개시한 이래 WAMIS에서 수위 자료를 제공하고 있으며, 본 논문에서는 유출모의에 검·보정자료로 활용하기 위해서 나주수위표의 2001년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지의 관측 자료를 수집하였다. 나주 수위관측소의 수위-유량관계곡선식(Ministry of Transportation, 2010)을 통해 수위 관측 자료를 유량으로 환산하여 분석에 활용하였다.

지형자료는 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM), 유역도, 하천도, 토지이용도, 토양도는 WAMIS에서 제공하는 자료를 활용하였다. 격자크기는 유역규모가 큰 특성에 따라 모의에 효율성을 고려하여 30m×30m의 격자크기에서 100m×100m의 격자크기로 Arc-View를 이용하여 변환하였고 BASINS모형을 이용하여 지형 입력 자료로 구축하였다(<Figure 3>).

<Table 2> Rating Curve(Naju Station)

Rating curve equation(Stage-Discharge)		Data	Extrapolation
H(h) : m	Q : m ³ /sec	Year/Number	
0.08 ≤ h ≤ 0.25	Q = 75.019 × (h + 0.185) ^{1.74}	2004	
-0.20 ≤ h ≤ 0.25	Q = 95.912 × (h + 0.200) ^{2.059}		
0.25 < h ≤ 1.20	Q = 125.651 × (h - 0.100) ^{1.009}	2007/5	Below 0.14m
1.20 < h ≤ 2.00	Q = 70.772 × (h + 0.110) ^{2.482}	2007/6	Over 5.53m
2.00 < h ≤ 10.75	Q = 392.002 × (h - 0.830) ^{0.901}		
0.80 ≤ h ≤ 1.20	Q = 42.706 × (h - 0.800) ^{1.369}	2007/10	
1.20 < h ≤ 3.00	Q = 127.280 × (h - 0.998) ^{1.467}	2008/2	Below 1.11m
3.00 < h ≤ 6.00	Q = 60.001 × (h + 0.062) ^{1.682}	2009/4	Over 7.99m
6.00 < h ≤ 11.69	Q = 23.220 × (h + 1.530) ^{1.882}	2009/9	



<Figure 3> Terrain Data of Yeong-san Basin

수질측정자료의 경우 영산강유역내에 위치한 총량측정망자료 중 나주수위표 부근에 위치한 영본 B에 해당하는 자료를 2001년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지의 10년치 자료에 대하여 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 1일 배출농도 자료를 수집하였으며, 오염총량제 실시 이전자료에 해당하

는 2001년부터 2002년에 해당하는 자료는 영본 B의 이전 지점명인 광산지점의 자료를 수집·활용하였다. 오염총량추정량 영본 B지점의 연간 평균유량 및 농도는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Average Annual Flow Rate and Concentration in Yeong-bon B

	T (°C)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Yeong-bon B	17.36	8.73	6.92	7.32	19.29	9.37	0.70

영산강유역내에 위치한 하수종말처리장은 광주1, 광주2, 나주, 공산, 산포, 담양, 도곡, 화순, 영암, 무안, 일로, 함평, 장성으로 총 13개이다. 각 하수종말처리장에서 방류하는 유량과 수질자료는 일별자료로써 수질오염총량제에서 연간 조사되고 있는 오염원 기초자료를 활용하였다. 본 연구의 연구지점에 해당하는 13개의 하수종말처리장의 일별 방류 유량, BOD, T-N, T-P의 농도를 점오염원자료로 입력 활용하였다(<Table 4>).

<Table 4> Discharge and concentration of terminal disposal plant of sewage in Yeong-san Basin

Facility Name	FLOW(m³/day)	BOD(mg/L)	T-N(mg/L)	T-P(mg/L)
Gwangju 1	551,790.54	3.43	9.32	0.31
Gwangju 2	89,288.84	2.73	12.30	0.17
Naju	16,804.27	1.39	12.45	0.13
Gongsan	433.30	1.21	11.94	0.14
Sanpo	1,977.05	1.69	19.48	0.16
Damyang	4,825.24	1.22	12.68	0.09
Dogok	661.91	3.66	9.59	0.60
Hwasun	18,569.84	3.83	8.55	0.35
Yeongam	4,451.95	2.11	7.51	0.07
Muan	2,731.13	2.58	10.16	0.11
Yillo	2,167.36	2.43	9.36	0.07
Hampyeong	4,981.42	2.18	9.87	0.11
Jangsang	8,567.31	6.56	9.22	1.28

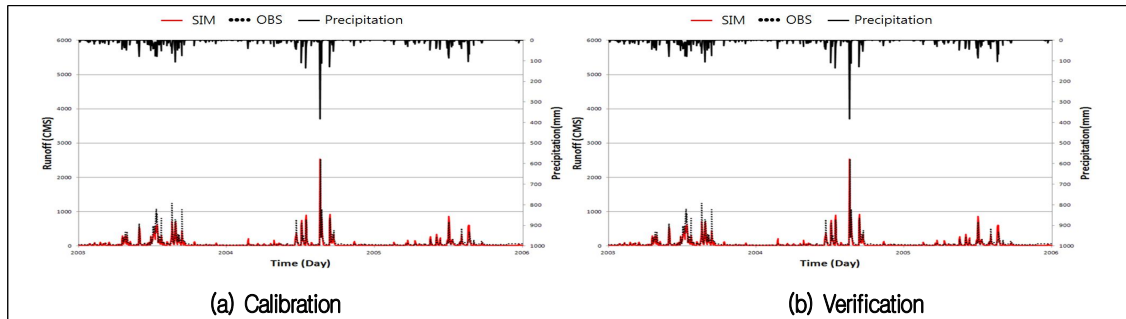
3. 매개변수 보정 및 검증

본 연구에서는 영산강 유역에 위치한 강우 및 기상관측자료, 지형자료, 점오염원자료를 HSPF모형에 적용하여 영산강 유역을 대상으로 장기유출 및 수질모의를 수행하였다. 영산강유역의 유출 검·보정 지점으로 나주 수위관측소를 최종 유출모의 지점으로 선정하였고, 수질 검·보정지점으로 영본B지점을 최종 유출모의 지점으로 선정하였다.

유출량관련 매개변수 보정 및 검증 결과는 그림 4와 같다. 나주 수위관측소의 2003년~2005년 사상을 대상으로 실측 유출량과 모의 유출량을 비교 분석하고 시행착오법을 통하여 매개변수 보정을 수행

하였으며, 보정된 매개변수를 이용하여 2001년~2010년 사상을 대상으로 검증을 수행하였다.

매개변수의 보정 전·후의 값은 Table 5와 같고, 보정 전·후의 매개변수의 효율은 Table 6과 같다. 매개변수의 효율을 계산하기 위해서 Nash-Sutcliffe의 효율계수와 Kling-Gupta의 효율계수를 각각 비교하였다. 비교 결과 Nash-Sutcliffe 효율계수는 0.78에서 0.82로 보정 후에 보정 전보다 약 5%효율성이 증가하였고, Kling-Gupta의 효율계수는 0.65에서 0.71로 보정 후에 보정 전보다 약 9%효율성이 증가하였으며 평균오차는 28% 감소했다(<Figure 4(a)>).



<Figure 4> Compare Runoff (Simulated vs Observations)

<Table 5> Calibration of Parameter(Runoff)

Parameter	Range	Before	After
LSZN	0.0001 ~ 100	0.16	1
INFILT	0.01 ~ 100	4 ~ 6.5	7
KVARY	0.001 ~ 0.999	0.98	0.9
AGWRC	0 ~ 5	0	1
USZN	0.01 ~ 10	1.128	1
DEEPER	0 ~ 100	0.75	40
INFTW	0 ~ 0.999	0.1	0.5
IRC	1.00E-30 ~ 0.999	0.5	0.4

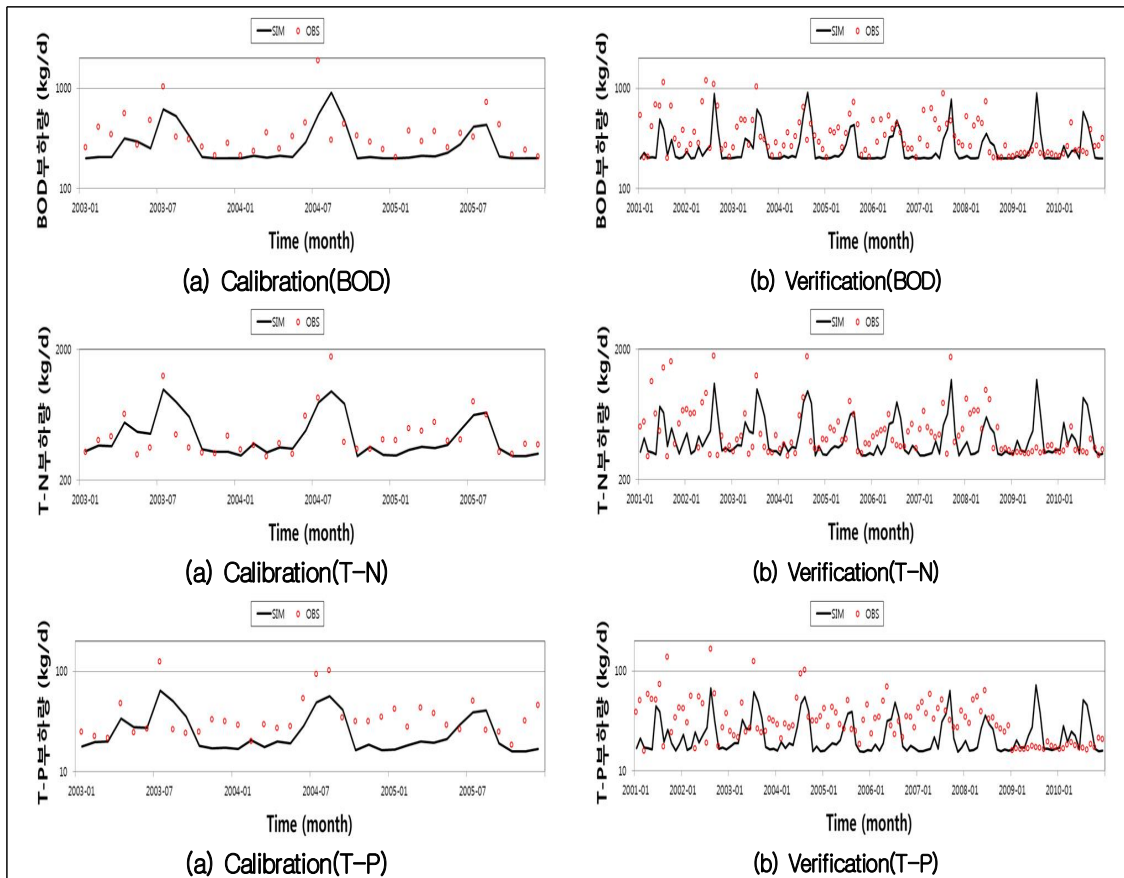
<Table 6> Efficiency of the parameter(Runoff)

Class	Naju Station		
	(a) Simulated	(b) Calibration	(c) Verification
Analysis Period(yr)	2003 ~ 2005		2001 ~ 2010
Average Error	-24.98	-17.96	-10.34
Efficiency factor(Nash-Sutcliffe)	0.78	0.82	0.65
Efficiency factor(Kling-Gupta)	0.65	0.71	0.73

수질 관련 매개변수의 보정 및 검증 결과는 그림 5와 같다. 수질 항목은 BOD, T-N, T-P에 대하여 검보정을 실시하였으며, 유출량과 같은 방법으로 영본B 지점의 2003년~2005년 사상을 대상으로 실측 농도(mg/l)를 발생 부하량(kg/d)으로 산정한 값과 모의 부하량 값을 비교 분석하고 시행 착오법을 통

하여 매개변수 보정을 수행하였다.

매개변수의 보정 전·후의 값은 <Table 7>과 같고, 보정 전·후의 매개변수의 효율은 <Table 8>과 같다. 비교 결과 BOD의 경우, Nash-Sutcliffe 효율계수는 0.37에서 0.63으로 보정 후에 보정 전보다 약 70%효율성이 증가하였고, Kling-Gupta의 효율계수는 0.41에서 0.68로 보정 후에 보정 전보다 약 65%효율성이 증가하였으며 평균오차는 44% 감소했다. T-N의 경우, Nash-Sutcliffe 효율계수는 0.49에서 0.73로 보정 후에 보정 전보다 약 49% 효율성이 증가하였고, Kling-Gupta의 효율계수는 0.61에서 0.81로 보정 후에 보정 전보다 약 33% 효율성이 증가하였으며 평균오차는 49% 감소했다. T-P의 경우, Nash-Sutcliffe 효율계수는 0.51에서 0.71로 보정 후에 보정 전보다 약 39%효율성이 증가하였고, Kling-Gupta의 효율계수는 0.49에서 0.65로 보정 후에 보정 전보다 약 32%효율성이 증가하였으며 평균오차는 32% 감소하였다. 검증 결과 전반적으로 보정 전보다 보·검정 후 모형의 효율이 높게 나타났다.



<Figure 5> Compare Water Quality(Simulated vs Observations)

<Table 7> Calibration of Parameter(Water Quality)

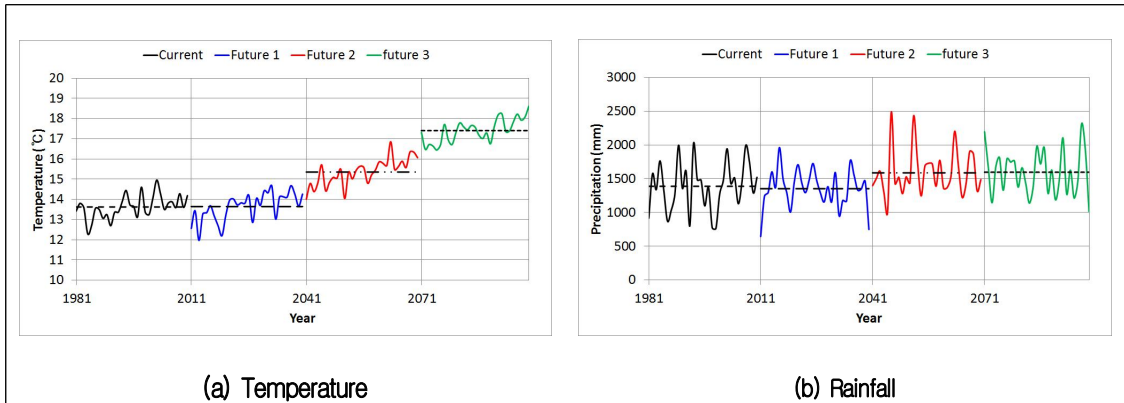
Class	Parameter	Before	After
BOD	KBOD20	0.1	0.05
	TCBOD	1.06	1
	KODSET	8.5	8
T-N	BRNIT(1)	0.6	0.1
	BRNIT(2)	0.01	0.1
	KTAM20	none	0.015
	KTAM320	none	0.002
	TCNIT	1.0	1.1
	TCDEN	1.0	1.05
	DENOXT	2.0	5.0
T-P	BRPO4(1)	0.01	0.5
	BRPO4(2)	0.01	0.5
	ANAER	0.005	0.9

<Table 8> Efficiency of the parameter(Water Quality)

Class		Yeong-bon B		
		(a) Simulated	(b) Calibration	(c) Verification
BOD	Analysis Period(yr)	2003 ~ 2005		2001 ~ 2010
	Average Error	-30.64	-16.98	-11.52
	Efficiency factor(Nash-Sutcliffe)	0.37	0.63	0.61
	Efficiency factor(Kling-Gupta)	0.41	0.68	0.64
T-N	Analysis Period(yr)	2003 ~ 2005		2001 ~ 2010
	Average Error	-26.01	-13.04	-15.12
	Efficiency factor(Nash-Sutcliffe)	0.49	0.73	0.71
	Efficiency factor(Kling-Gupta)	0.61	0.81	0.76
T-P	Analysis Period(yr)	2003 ~ 2005		2001 ~ 2010
	Average Error	-25.81	-9.81	-11.37
	Efficiency factor(Nash-Sutcliffe)	0.51	0.71	0.64
	Efficiency factor(Kling-Gupta)	0.49	0.65	0.62

4. 기후변화가 미래 하천 수질에 미치는 영향 전망

기후변화가 영산강 유역의 유출량과 비점오염(BOD, T-N, T-P)부하량에 미치는 영향을 분석하기 위해 RCP 8.5기후변화시나리오 8.5를 WGEM 모형을 통해 일 강수량 자료 및 기온자료를 생성하였다. RCP기후변화시나리오 강수량자료는 극치값을 묘사하기에 한계가 있기 때문에 일기발생기모형을 통해 기후변화시나리오 자료를 축소시켰다. 추출된 결과는 Fig 6과 같다. 온도변화 분석 결과 현재기간에 비해 미래3 기간에는 3.8℃ 증가하는 경향을 보였으며, 강우량의 경우 미래3 기간 평균 1595.2mm로 현재기간에 비해 약 15% 증가하는 것으로 나타났다.

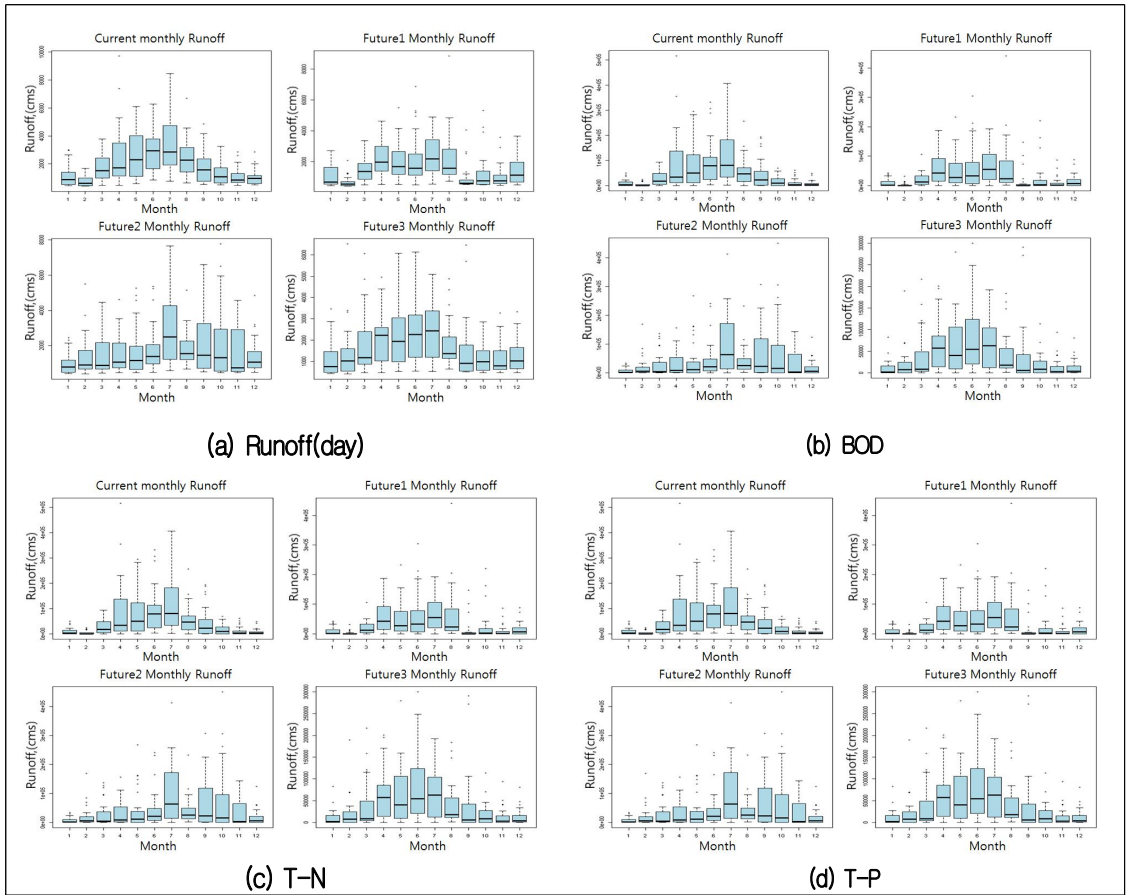


<Figure 6> Climate Data Analysis

추출된 기온자료와 강우자료를 HSPF모형에 적용하여 미래의 유출량과 비점오염부하량을 모의하였다. 이 결과를 이용하여 기후변화가 영산강 유역의 유출량과 비점오염(BOD, T-N, T-P)부하량에 미치는 영향을 평가하기 위해 각각의 인자 별로 분석을 수행하였다.

유출량 변화 분석 결과는 그림 6(a)와 같으며, 현재기간에 비해 미래1 기간에는 31%, 미래2 기간에는 67%, 미래3 기간에는 54% 증가하는 것으로 분석되었다.

수질 분석결과는 그림 6(b)~(d)와 같으며 BOD의 경우 현재기간에 비해 미래1기간에는 177%, 미래2기간에는 252%, 미래3기간에는 216% 증가하는 것으로 분석되었다. T-N의 경우 현재기간에 비해 미래1기간에는 22%, 미래2기간에는 76%, 미래3기간에는 54% 증가하는 것으로 분석되었다. T-P의 경우 현재기간에 비해 미래1기간에는 30%, 미래2기간에는 70%, 미래3기간에는 50% 증가하는 것으로 분석되었다.



<Figure 7> Box-Plot(Average per Month)

III. 결론 및 고찰

본 연구에서는 영산강유역의 기후변화에 따른 수자원 및 비점오염원부하량을 평가하기 위해서 HSPF모형을 선정하여 영산강 유역에 위치한 강우 및 기상 일 단위 관측자료(강우, 온도, 풍속, 운량, 이슬점온도, 일사량), 격자크기 100m×100m의 지형자료(DEM, 유역도, 하천도, 토지피복도, 토양도), 점오염원자료(13개소 하수종말처리장 일 방류량)를 HSPF모형에 적용하여 32개 소유역으로 분할하여 입력 자료를 구축하였다. 유출 분석지점으로 나주 수위관측소, 수질 분석지점으로 영본B지점을 최종 유출모의 지점으로 선정하였고 유출량 매개변수는 나주수위표의 유량자료와 비점오염(BOD, T-N, T-P) 부하량 매개변수는 오염총량지점인 영본B지점의 비점오염원 농도를 부하량으로 환산 후 비교하여 3년(2003~2005년)사상을 대상으로 보정을 수행 하였고 10년(2001~2010년)사상을 대상으로 검정을 수행하였다.

기후변화자료를 적용하기 위해서 RCP 8.5시나리오를 영산강 강우 및 기상관측소에 해당하는 자료를 추출하였다. 추출된 기후변화자료를 4개의 기간자료(현재, 미래1, 미래2, 미래3)로 분할하여 강우자료와 기온자료의 월평균으로 기간별 변동성 분석을 수행하였다. 강우자료의 경우 현재에 비해 미래3의 경우 약 207.6mm 증가하는 것으로 나타났으며, 기온자료의 경우 3.8℃ 증가하는 것으로 나타났다.

이 결과를 이용하여 기후변화가 영산강 유역의 유출량과 비점오염(BOD, T-N, T-P)부하량을 산정하였다.

유출량 변화 분석 결과 현재기간에 비해 미래1, 미래2, 미래3 기간에서 31%, 67%, 54% 증가하였으며, BOD의 경우 177%, 252%, 216%, T-N의 경우 22%, 76%, 54%, T-P의 경우 30%, 70%, 50% 증가하는 것으로 분석되었다. T-N과 T-P의 경우 유출량 증가경향과 비슷하게 나타났으나 BOD의 경우는 다른 오염물질에 비해 부하량이 크게 증가하는 것으로 나타나, 기후변화에 따른 온도 상승과 강우량 증가는 유출량과 BOD의 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

References

- Bae, DaeHye, SungRyong Ha. 2011. Assessing Impact of Reduction of Non-Point Source Pollution by BASINS/HSPF. *Environmental Impact Assessment*. 20(1): 71-78.
- Bouraoui F, B. Grizzetti, K. Granlund, S. Rekolainen, and G. Bidoglio. 2004. Impact of Climate Change on the Water Cycle and Nutrient Losses in a Finnish Catchment. *Climate Change*. 66: 109-126.
- Bouraoui, F, L. Galibiati, and G. Bidoglio. 2002. Climate Change Impacts on Nutrients Loads in the Yorkshire Ouse Catchment (UK). *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(2): 197-209.
- Choi, Jae-Hun. 2010. A Study on Estimation of Nonpoint Pollution Loads Using HSPF Watershed Model. Chungnam National University Department of Environmental Engineering doctorate thesis.
- Hwang, Seong-Hwan. 2011. A Study on Discharge Load Change of Non point Pollution Source by Watershed Management Using Long Term Runoff Model of Urban Area. University of Seoul Department of Civil Engineering Doctorate thesis.
- Jeon, Ji-Hong, Dong Hyuk Choi, and Tae-Dong Kim. 2010. Analysis of Characteristics of Delivered Nonpoint Source Pollution at Forested Watershed. *Journal of Korean Society Urban Environment*. 10(3): 279-280
- Jeung, Se-Jin. 2014. Impact Assessment of Climate Change on Extreme Event and Long Term

- Runoff Based on RCP 8.5 Climate Change Scenario. Kangwon National University Department of Master's thesis.
- Kim, ByungSik, Jang Hyun Sung, Byung Hyun Lee, and Do Jung Kim. 2013, Evaluation on the Impact of Extreme Droughts in South Korea using the SPEI and RCP8.5 Climate Change Scenario. *Korean Society of Hazard Mitigation*. 13(2): 97-109.
- Kim, ByungSik and SungRyong Ha. 2013, The Impact Assessment of Climate Change on Design Flood in Mihochen Basin Based on the Representative Concentration Pathway Climate Change Scenario. *Journal of Wetlands Research*. 15(1): 105-114.
- Lee, Jae-Woon, Hun-Gak Kwon, Youn-Jeong Yi, Jong-Su Yoon, Kun-Yeun Han, and Se-Uk Cheon. 2012. Quantitative Estimation of Nonpoint Source Load by BASINS/HSPF. *Journal of the Environmental Sciences*. 21(8): 965-975.
- Lim, Sang-Jun. 2001. Estimation of Nonpoint Source Loading Using HSPF Model; Case Study for the Kap sStream in Keum River. Chungnam National University Department of Environmental Engineering Master's thesis.
- Ministry of Environment. Water Information System. www.water.nier.go.kr
- Ministry of Environment. 2006. Water Environmental Management Plan.
- Ministry of Land, 2010. *Transport and Maritime Affairs*. Annual hydrological report on Korea.
- National Institute of Meteorological Research. 2011. Climate Change Scenarios for the Corresponding Report for the IPCC 5 Assessment Report.
- Nearing MA, V. Jetten, C. Baffaut, O. Cerdan, A. Counturier, M. Hernandez, Y. Le Bissonnais, M.H. Nichols, J.P. Nunes, C.S. Renschler, V. Souchere, and K. van Oos. 2005. Modeling Response of Soil Erosion and Runoff to Changes in Precipitation and Cover. *Catena*. 61: 131-154.

Korean References translated from the English

- 국립기상연구소. 2011. IPCC 5차 평가보고서 대을을 위한 기후변화 시나리오 보고서. 국립기상연구소 기후연구과 연구보고서.
- 국토해양부. 2010. 한국수문조사연보.
- 김병식, 성장현, 이병현, 김도정. 2013. 표준강수 증발산량지수(SPEI)와 대표농도경로를 이용한 남한지역 미래 가뭄의 변화전망. *한국방재학회논문집*. 13(2): 97-109.
- 김병식, 하성룡. 2013. RCP 기후변화시나리오를 이용한 기후변화가 미호천 유역의 설계홍수량에 미치는 영향평가. *한국습지학회지*. 15(1): 105-114.
- 배다혜, 하성룡. 2011. HSPF를 이용한 비점오염원 삭감에 따른 효과 분석. *환경영향평가*. 20(1):

71-78.

이재운, 권헌각, 이윤정, 윤종수, 한건연, 천세역. 2012. BASINS-HSPF 모형을 활용한 비점오염부하의 정량적 평가. 한국환경과학회지. 21(8): 965-975.

임상준. 2001. HSPF 모델을 이용한 비점오염부하량 산정에 관한 연구(금강의 갑천). 충남대학교 환경공학과 석사학위논문.

전지홍, 최동혁, 김태동. 2010. 산림유역 비점오염 유달특성 분석. 한국도시환경학회지. 10(2): 273-280.

정세진. 2014. RCP8.5 기후변화시나리오 기반의 기후변화가 극한사상과 장기유출에 미치는 영향 평가. 강원대학교 석사학위논문.

최재훈. 2010. 유역모델(HSPF)을 이용한 댐유역 비점오염부하량 산정방법의 개선에 관한 연구. 충남대학교 환경공학과 박사학위논문.

환경부. 물환경정보시스템. water.nier.go.kr.

환경부. 2006. 물환경관리기본계획.

황성환. 2011. 도시유역 장기유출 배출부하량산정모형의 유역관리에 따른 비점오염배출부하량 저감효과분석. 서울시립대학교 토목공학과 박사학위논문.

이석호: 건국대학교에서 공학박사학위(논문: 개선된 수위-하강고-유량 관계를 이용한 배수영향 하천의 유량산정 기법)를 취득하였다. 현재 강원대학교 연구교수로 재직중이며, 토사재해, 수문해석 분야를 연구한다(esoco@kangwon.ac.kr)

이병현: 강원대학교에서 공학석사학위(논문: BASINS-HSPF 모형을 이용한 기후변화가 하천수질에 미치는 영향 평가)를 취득하였다. 현재 노아솔루션(주)에 재직중이며, 주 관심분야는 수리수문 모델링이다(lbh@noaa.co.kr)

김병식 : 인하대학교에서 공학박사학위(논문제목 : 기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가)를 취득하였다. 또한 최근“Evaluation of Flash Flood Severity in Korea Using the Modified Flash Flood Index(2013, SCD)”논문을 등재, 현재 강원대학교 교수로 재직 중이며 주로 수문해석 및 기후변화 영향평가 분야를 연구한다(hydrokbs@kangwon.ac.kr).

민선홍: 인하대학교에서 공학박사학위(논문: 교류형광을 이용한 하천수의 급성금속독성 평가)를 취득하였다. 또한 집중강우에 따른 토석류 유출의 수치계산 논문을 등재, 강원대학교 교수로 재직 후 퇴임 하였으며 주로 상하수도/토목환경시공/토목환경설계를 연구하였다(sunmin@kangwon.ac.kr).