

BASINS/HSPF를 이용한 화성유역 오염부하량의 정량적 평가

Quantitative Estimation of Pollution Loading from Hwaseong Watershed using BASINS/HSPF

정 광 옥* · 윤 춘 경**† · 장 재 호* · 김 형 철*

Kwang-Wook Jung · Chun G. Yoon · Jae-Ho Jang · Hyung-Chul Kim

Abstract

A mathematical modeling program called Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA) was applied to Hwaseong watershed. It was run under BASINS (Better Assessment Science for Integrating Point and Nonpoint Sources) program, and the model was validated using monitoring data of 2002~2005. The model efficiency of runoff ranged from good to fair in comparison between simulated and observed data, while it was from very good to poor in the water quality parameters. But its reliability and performance were within the expectation considering complexity of the watershed and pollutant sources. The nonpoint source (NPS) loading for T-N and T-P during the monsoon rainy season (June to September) was about 80% of total NPS loading, and runoff volume was also in a similar range. However, NPS loading for BOD (55~60%) didn't depend on rainfall because BOD was mostly discharged from point source (more than 70%). And water quality was not necessarily high during the rainy season, and showed a decreasing trend with increasing water flow. BASINS/HSPF was applied to the Hwaseong watershed successfully without difficulty, and it was found that the model could be used conveniently to assess watershed characteristics and to estimate pollutant loading including point and nonpoint sources in watershed scale.

Keywords : BASINS/HSPF, Hwasung Watershed, Runoff, Pollutant load, Nonpoint source pollution

I. 서 론

우리나라 인공호수의 대부분은 하구담수호로 상류에서 유입되는 오염물질로 인한 수질악화가 문제되고 있다. 국내 하구담수호 중 화성호는 화성군의 7개 면과 남양천, 자안천, 어은천 등 3개의 소규모 하천이 담수호로 유입되고 있으며, 수도권에 위치

* 건국대학교 대학원 환경과학과
** 건국대학교 환경과학과
† Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747
Fax: +82-2-446-2543
E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

한 상류유역의 인간 활동 및 다양한 토지이용으로 인해 쉽게 오염될 수 있는 환경으로 구성되어 있다. 시화호사례를 중심으로 하구담수호에 대한 수질문제가 국민적 관심사로 떠오르면서, 화성호의 수질에 관한 점검 및 수질보전을 위한 대책이 요구되고 있다. 최근 화성호의 수질이 유역 내 각종 오염원에 의해 점차 악화됨으로서 농업 용수원의 활용에 제약을 받고, 또한 여론의 관심이 집중되는 점을 감안하여, 화성호의 수질을 관리하기 위해 하수처리장, 마을하수도 및 축산폐수저장탱크의 설치 등 수질개선대책사업이 다각적으로 이루어지고 있다. 담수호 수질보전을 위해서는 수질오염을 유발하는 오염물질의 부하량감소가 필수적이며 호소 내·외측의 적절한 관리가 이루어져야 한다.

유역수질의 적절한 관리를 위해서는 수계에서 발생할 수 있는 물리, 화학 및 생물학적인 현상을 폭넓게 이해해야 하고 유역의 다양한 현상을 잘 묘사할 수 있는 유역모형의 적용이 유용하다. 이를 위해 과학적 연구를 바탕으로 여러 가지 유역모형들이 개발되어왔다. 유역모형으로는 미국 농무성 (U.S. Department of Agriculture, USDA)에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)와 AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model) 모형이, 미국 환경청 (U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)와 SWMM (Storm-Water Management Model) 모형이 각각의 목적에 따라 많이 이용되고 있다. SWAT과 HSPF모형은 통합수질관리 시스템인 BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Non-Point Source)와도 통합·운용되고 있다 (USEPA, 2001). BASINS의 다양한 Tool은 유역을 분할하고 각각의 분할된 유역에 대하여 토지이용상태를 분류하며, 모형구동을 위한 초기값을 손쉽게 생성시켜 줌으로써 모형의 적용을 더욱 용이하도록 구성되어 있다. 특히 모형의 적용에 필요한

방대한 자료와 많은 노력을 최소화 되도록 개발되어 왔다.

HSPF 모형은 준분포형 모형으로서 광범위한 수문·수질과정의 장기모의가 가능하도록 일련의 구조화된 모듈로 구성되어 있다. Application 모듈에는 투수지형 (pervious land)과 불투수지형 (impervious land) 및 수체 내에서의 수문·수질을 모의하는 PERLND, IMPLND 및 REHRES가 각각 포함되어 있으며 이들 모듈의 구조와 기능에 관한 자세한 정보는 참고문헌에서 찾을 수 있다 (Bicknell et al., 1993; Donigan and Crawford, 1976; Donigan et al., 1984; Chen et al., 1998a,b). HSPF 모형은 장기간에 걸쳐 크고 작은 규모와 복잡한 유역의 수리·수질에 관한 다양한 현상들을 모의하기 위해 개발되었고 (Bicknell et al., 1996), 다양한 수문학적 조건 (Albek et al., 2004)과 오염된 퇴적물을 포함한 비점원 오염 (Fontaine and Jacomino, 1997; Donigan and Love, 2003), 토지피복관리와 홍수제어 시나리오 (Brun and Band, 2000), 최적관리기법 또는 오염 총량 (Hashim, 2001)을 모의하기 위해 광범위하게 사용되어왔다. 국내에서는 황룡강 유역의 장기 유출해석 (Park and Kim, 2002)과 양평군 흑천 유역의 격자크기에 따른 유출량 분석 (Jeon et al., 2002) 등 유출관련 해석에 적용된 바 있고, 비점 오염부하량을 추정하기 위해 새만금 유역 (Jeon, 2005; Jeon et al., 2006) 및 발안 유역 (Kim and Park, 2004) 등에서 적용되었으며, 낙동강유역의 하천유량과 비점오염부하량을 모의하기 위해 적용된 바 있다 (Chun et al., 2001). 본 연구에서는 화성유역의 오염부하특성을 정량적으로 분석하기 위해 BASINS/HSPF 모형을 적용하였고, 유역의 주요 하천인 남양천, 자안천, 어은천에서의 소유역 오염현황을 비교·분석하여 유역의 주요 수질관리 대상지역에 대한 적절한 수질개선 대책수립에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

화성호의 유입하천은 모두 지방2급 하천으로 화성호 유입부까지의 거리가 짧아 자정작용을 거칠 시간이 적은 하천이며 자세한 그림은 Fig. 1과 같다. 화성유역의 남양천은 유로연장이 8.05 km로 연중 유량이 매우 적고 오염원이 밀집된 남양면을 거쳐 해역으로 유입되는데, 해역 유입부까지의 거리가 짧아 연중 수질오염도가 높다. 자안천은 유로연장이 13.07 km로 생활하수의 직접적인 유입은 없으나 상류유역에는 공장과 축산단지가 많이 밀집해 있으며 하류유역에는 농경지가 많다. 어은천은

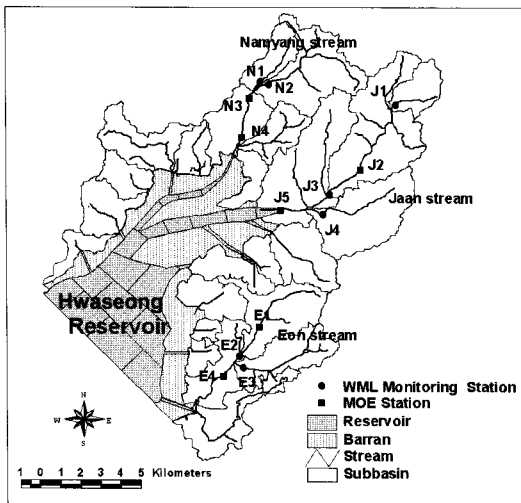


Fig. 1 Hwasong watershed and monitoring stations

유로연장 7.10 km로 우정면 소재지의 생활하수, 산업폐수, 농경배수에 오염되어 하구부에 이르고 있다. 수질평가 및 모형적용을 위한 측정지점은 남양천 유역의 4개 지점 (N1~N4), 자안천 유역의 5개 지점 (J1~J5) 그리고 어은천 유역의 4개 지점 (E1~E4)이다.

실측지점과 환경부 측정망을 포함한 소유역에 대한 토지이용상태는 Table 1과 같으며 우리나라 환경부에서 제공하는 토지피복분류를 분석한 결과이다. 화성유역은 담수호 면적을 포함한 전체면적 중 산림이 35.4%, 논이 28.5%, 밭이 19.6%, 주거지역이 12.0%, 그리고 기타가 4.6%를 차지하고 있다. 하천별로는 남양천은 전반적인 토지 이용이 농경지와 산림으로 구성되어 있으며 하천오염의 주원인인 주거지역은 약 8.1%, 산림이 약 43.3%로 구성되어 있다. 자안천의 경우는 논이 35.6%, 주거지역이 11.6%를 점유하였다. 어은천은 산림이 18.3%로 가장 적은 수준이었으며, 논과 밭의 점유율이 각각 41.0%, 22.0%로 가장 큰 것으로 나타났다. 주거지역의 경우 3개 하천모두 유사한 비율을 나타내었다.

2. BASINS 적용방법

BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)는 USEPA에서 TMDL의 효율적인 운영을 위해 유역과 점오염원 및 비점오염원을 종합하고, 방대한 GIS자료와

Table 1 Land use distribution of subcatchment for main sampling points and tributaries

Sub-basins	Residential		Paddy		Upland		Forest		Etc.		Total area (ha)
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	
NamYang	228.6	8.1	686.2	24.4	523.5	18.6	1,219.9	43.3	157.1	5.6	2,815.3
JaAn	601.2	11.6	1,845.6	35.6	678.1	13.1	1,686.9	32.6	369.9	7.1	5,181.7
EoEun	333.5	13.2	1,037.2	41.0	557.1	22.0	462.2	18.3	142.5	5.6	2,532.5
Total	1,529.2	9.3	6,097.3	37.0	2,954	17.9	4,789.9	29.0	1,119.1	6.8	16,489.5

오염원자료에 쉽게 접근할 수 있도록 개발된 유역 관리 시스템이다. 수치고도모델 (DEM) 자료와 하천도 및 행정경계는 건교부와 수자원공사에서 제작된 자료를 이용하였다. 토지피복분류자료는 환경부에서 제공받아 주거지, 논, 밭, 산지, 기타 등의 형태로 입력하였으며, 기상자료와 점오염원자료는 각각 기상청과 환경부에서 제공받아 wdm file에 작성하였다. 화성유역에 대한 오염정도 파악을 위하여 실측한 오염원자료를 BASINS내에 입력한 후 Assessment Tools의 Target Analysis를 수행하였고 DEM자료와 BASINS Delineate Tool을 이용하여 25개 소유역으로 분할하였으며 각 소유역별 토지이용특성을 중첩하였다. 일반적으로 소유역 분류 및 각각의 소유역에 따른 토지이용분류는 유역모형 적용시 필수 요소이나, 많은 시간과 노력이 필요로 하며 개인의 주관에 포함될 가능성이 있다. 그러나 BASINS는 GIS 자료를 통합하기 때문에 사용이 쉽고 유역모형을 모의하기 위한 자료구축에 있어 보다 객관성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3. HSPF 적용방법

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형은 TMDL의 효과적인 지원을 위하여 USEPA에서 개발하였고, USEPA에서 지속적으로 유지·관리하고 있으며, 농촌과 도시가 혼재된 지역의 수역과 하천에 이르기까지의 수문과정 및 오염물질의 거동을 모의할 수 있다. HSPF는 PERLND와 IMPLND 및 RCHRES의 세 가지 주요 모듈을 포함하며 PERLND의 P WATER 섹션은 surface flow와 interflow, ground-water behavior를 포함한 물수지를 모의하는 프로그램의 주요 요소이다. IMPERLND 모듈은 불투수층의 물수지 및 수질을 모의하며, RCHRES 모듈에서는 HYDR 섹션이 하천의 수리학적 거동을 모의하기 위해 이용되고 있다.

HSPF를 이용한 유역모델링에서 보다 중요한 것

은 유역의 수학적 표현과 기상자료의 준비, 수리학적 time series와 인자의 평가, 보정과 검정절차이다. Time series는 EPA에서 개발된 WDM (Watershed Data Management)라고 불리는 독립형 자료관리 프로그램을 통해서 입력되며, 이 인자들은 UCI (User's Control Input) 파일을 통해서 HSPF에 제공되어 진다. HSPF 적용을 위해서 기상자료가 Watershed Data Management (WDM) 파일형태로 저장되어야 하며, 1997년~2005년도 시별 기상자료 (강수량, 기온, 이슬점온도, 운량, 풍속, 일사량 등)를 제공받아 WDM 파일형태로 변환시켜 UCI (User's Control Input) 파일을 통해 입력하였다.

점오염부하량 산정은 '1999-2003년 화성지구 환경영향조사보고서'를 바탕으로 인구현황과 축산현황, 배출업소 현황, 환경기초시설 현황 등을 이용하였으며, 환경부 수계오염총량관리기술지침에 의해 산정하여 각 소유역별 유입오염부하량으로 입력하였다. 모형의 검·보정을 위한 실측 하천수위 및 수질은 Fig. 1에서와 같이 주요 하천 내 13개 지역에서 측정된 자료이며, 2004년부터 2005년까지 일단위로 현장 측정된 자료를 사용하였다. 유출량에 대한 매개변수 산정과 HSPF 모형의 효율을 평가하기 위해 식 1)과 2)처럼 R2 (Nash and Sutcliffe, 1970)와 % difference (ASCE, 1993)를 산정하였고, 모형의 검·보정 후 주요 3개 하천의 점원과 비점원 오염부하량을 산정하여 비교분석하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2} \dots (1)$$

$$\%Diff. = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \dots (2)$$

여기서, P_i 는 예측값, O_i 는 실측값, n 은 데이터 수, 그리고 \bar{P} 는 예측값의 평균이다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 화성유역의 수질환경

화성유역의 주요 하천과 HSPF 모형의 수질검·보정지점과 관련하여 조사한 오염현황은 다음과 같다. N1 지점은 남양천 본류와 합류하기 직전의 전형적인 건천으로 하천을 따라 각종 오폐수배출업소가 위치하여 있고 대규모 택지개발과 도시화가 진행되고 있으며, 이들 업소와 집단취락지에서 배출된 폐수가 별다른 정화작용 없이 하천으로 그대로 유입돼 화성호 오염의 주된 오염하천으로서 파악되고 있다. N1 지점의 악화된 하천에서 DO는 매우 낮은 수준이었으며, BOD 또한 높은 경우에는 100 mg/L 이상으로 조사되어 매우 높은 오염 수준을 나타내었다. N3 지점은 환경부 유역환경청에서 측정하는 지점으로서 N1과 N2 지점이 합류한 후 약 2 km를 유하 후의 지점이며, 주변에 많은 축사가 위치하고 있기 때문에 추가적인 오염이 발생할 가능성이 많은 지역이다. J2 지점은 자안천 상류에서 발원한 물이 내려오다가 동방저수지로 일정부분 흘러 들어가서 농업용수로 사용되고 있다. 이때 동방저수지에서 하천으로 다시 방류하는 방류구 바로 아래에 있으며 비교적 수질이 양호하였다. J4 지점의 수원은 상류에 위치한 동방저수지의 수질에 가장 많이 영향을 받는 지점이며, 또한 관개용수로 이용하기 위해 J4 지점에 위치한 석포교 하단에 임시 보를 만들어 물을 저류하고 있기 때문에 조류발생이 심하며 이로 인한 영향이 수질악화로 이어지는 지점이다. 영양물질의 경우 뚜렷한 오염원이 없는 특징을 가지고 있지만, 하천수질이 비교적 악화된 상태를 나타내는 것은 동방저수지의 수질과 하천 내에 보의 역할로 인한 내부생산에 의한 영향으로 판단된다. E3 지점은 어은천이 조암읍을 통과하면서 가정오폐수 및 산업오폐수 등 많은 양의 오염물질들이 유입되어 하천의 수질이 악화된 지점으로서 BOD의 농도가 높을 경우에는 60 mg/L를 나타

내었다. 또한 하천변을 둘러싸고 논이 넓게 자리잡고 있어 환경농업 및 수질 정화형 논으로 전환하여 수질개선에 활용할 수 있는 지형적 특성을 가지고 있으나 강우시 농경배수의 유입 등 비점오염원에 취약한 특성을 보이고 있다. E4 지점은 E2 지점에서 유입되는 비교적 수질이 양호한 물과 E3지점에서 유입되는 오염이 심각한 물이 합류하여 흐르고 있다.

화성유역의 주요 하천의 대부분은 자연형 하천에 가까우나 유로연장이 짧고 주변 생활·공장 오폐수 및 축산농가의 무분별한 폐수 방류 등 오염원이 아무 저항성 없이 하천으로 유입되기 때문에 전반적으로 화성호의 수질오염도가 증가하고 있는 추세이다.

2. 유출량 보정

모형의 유출량에 대한 보정은 남양천의 N1과 N2지점, 어은천의 E2지점을 대상으로 수행하였으며, 보정기간은 2003년 9월부터 2005년 12월까지 총 2년 4개월에 걸쳐 모의하였다. 민감도 분석결과, 총유출량과 침투유량에 대하여 변위가 큰 변수인 LZSN(Lower zone nominal storage), INFILT(Soil infiltration capacity index), AGWRC(Groundwater recession coefficient), UZSN(Upper zone nominal storage), DEEPER(Fraction of groundwater inflow to deep recharge), INTFW(Interflow inflow parameter), 그리고 IRC(Interflow recession parameter) 등을 보정인자로 이용하였다. 4개 지점에 대한 유출량 보정 결과는 Fig. 2와 같으며, HSPF모형의 효율을 평가하기 위해 일별 및 시별 유출량에 대해 R^2 와 % difference를 산정하였다. Table 2에는 지난 10년간 HSPF 교육 워크숍에서 제시한 R^2 와 % difference의 범위 및 목표치에 대한 일반적인 가이드라인이 표기되어 있다(Donigian, 2000). % difference는 N1의 경우 "Good" (10~15%)을 나타냈고, N2와 E2의 경우 "Fair" (15~25%)를 나타내었으며 R^2 의 경우에도 각 지점에서 "Very

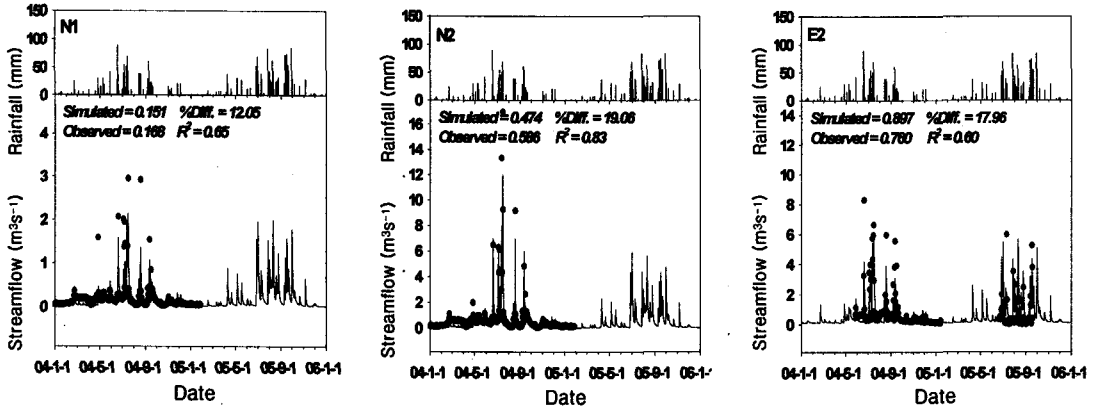


Fig. 2 Calibration of daily mean streamflow

Table 2 General calibration and verification targets or tolerances for HSPF application

	Very good	Good	Fair	Poor
% difference				
Water flow	< 10	10~15	15~25	-
Water quality	< 15	15~25	25~35	-
R ²				
Daily water flow	0.90~0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	0.60~0.50

Good"~"Fair"를 나타내었다.

3. 수질의 검·보정

수질에 대한 HSPF 모형의 검·보정은 Fig. 1에 표시되어 있는 13개 전 측정지점에 대하여 실시하였다. 모형의 보정은 본 연구팀에서 2003년 9월부터 2005년 12월까지 실측한 자료를 이용하여 수행하였고, 검정은 환경부 수질측정망 2002년에서 2005년 자료를 이용하여 수행하였는데, Fig. 3와 Fig. 4에는 보정 및 검정과정의 일부를 보여주고 있다. 모의 항목은 BOD, T-N, T-P 등이었다. 각 수질인자에 대한 보정은 변위가 큰 매개변수부터 수정하였고 BOD에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 KBOD20 (the unit BOD decay rate at 20

degrees C) 과 KODSET (the rate of BOD settling) 및 REAK (the empirical constant in the equation used to calculate the reaeration coefficient) 등으로 나타났고, 영양물질의 경우 PERLND 모듈의 ACCUM, IFLW, GRND 등의 인자들을 월별로 수정하였다. Fig. 3과 Fig. 4에는 일부 수질측정의 검·보정한 결과가 나타나 있다.

N1지점의 경우 BOD의 전체적인 변화패턴을 적절하게 반영하였으며 T-N과 T-P의 경우도 전체적으로 하천 수질 변화 패턴을 반영하는 것으로 모의되었다. N3 지점은 환경부 유역환경청에서 측정하는 지점으로서 4년간의 실측자료를 이용하여 모의한 결과, BOD의 변화는 실측값의 농도변화를 적절하게 반영하고 있는 것으로 나타났고, T-N과 T-P 모의 결과 또한 실측 수질의 변화 패턴을 적절하게 묘사하는 것으로 나타났다.

J2지점은 BOD의 모의 결과, 일부 이상 값을 나타내기는 하지만 수질의 변화 패턴을 적절하게 묘사하였으며, T-N과 T-P의 경우도 수질 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. J4 지점의 모의결과, BOD 및 영양물질의 수질 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

E3 지점의 경우 각 항목에 대한 모의 결과, 일부 이상 값을 보이기는 하나 대체적으로 실측값을 적절히 표현하는 것으로 나타났다. E4 지점도 전반적

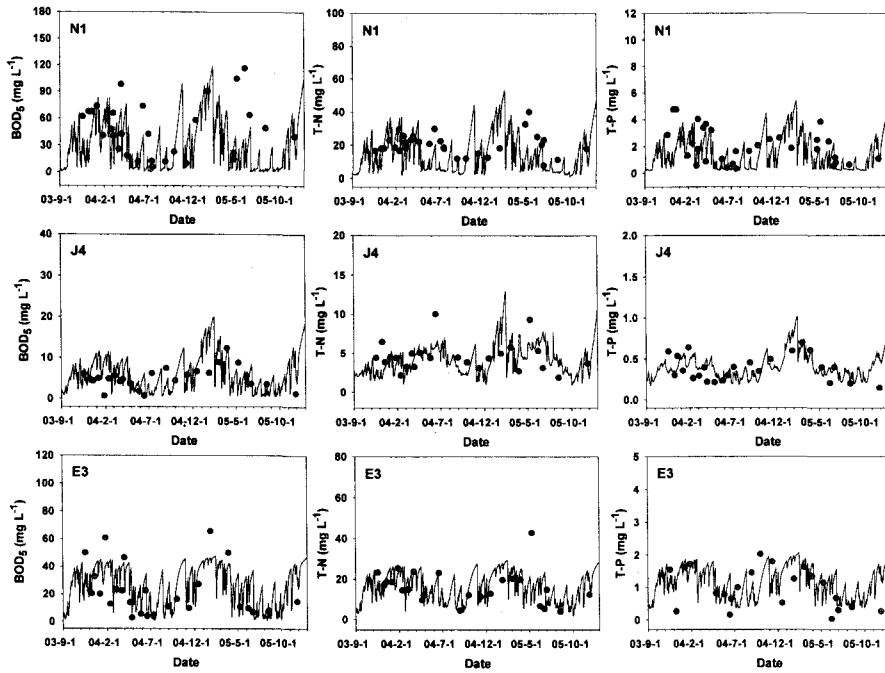


Fig. 3 Comparison of observed and simulated water qualities with field monitoring data (calibration)

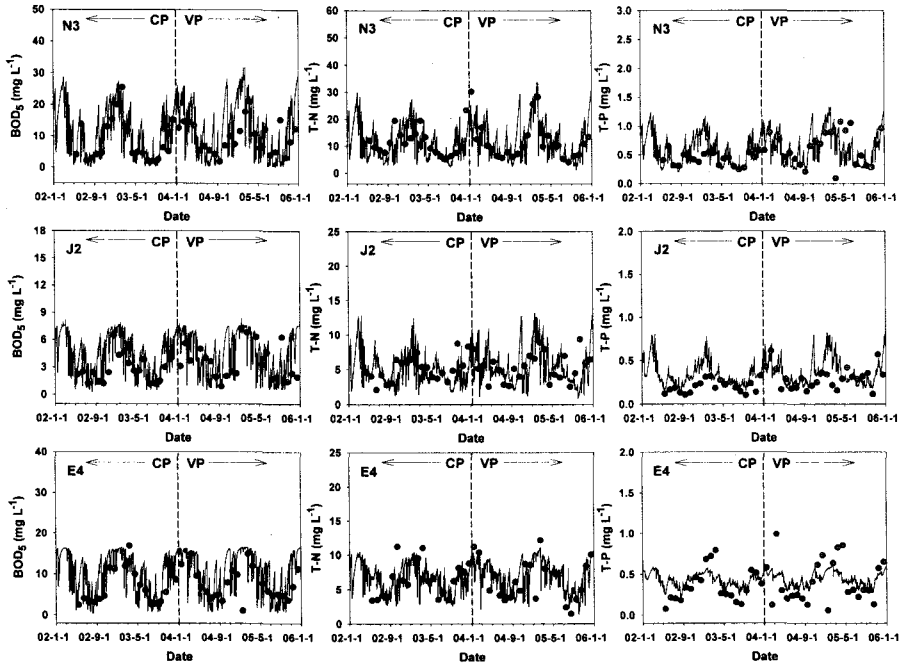


Fig. 4 Comparison of observed and simulated water qualities with MOE data (calibration & verification) : CP: calibration period, VP: verification period

으로 수질변화 패턴을 잘 표현하고 있으나, T-P의 경우 모의값과 실측값이 다소 과대 및 과소평가 되었는데, 이는 오염원자료의 보다 정밀한 조사를 통해 매개변수를 지속적으로 보정하는 작업이 필요할 것으로 판단되었다.

HSPF모형은 하천의 수질이 매우 좋지 않은 N1 지점과 비교적 수질이 양호한 J2 및 J4 지점에서도 그 변화 패턴을 적절히 반영하여 적용가능성이 큰 것으로 나타났다. 전반적으로 유역 내 복잡한 토지이용 및 오염부하 형태를 고려해 볼 때 허용할 수 있는 범위 내에서 적절히 수질을 묘사한 것으로 판단되었다. Table 3에서는 각 측정지점의 수질에 대한 모형효율 및 % difference를 산정한 결과, 대

부분의 측정지점과 항목에서 "Very good"~"Fair"로 적절히 모의되었으나, 특정지점 및 항목에서는 "Fair"이하의 값을 나타내었다. 그 이유는 모형으로 반영되지 않은 유역환경변화나 현장측정과정에서 오차가 발생했을 가능성이 있으며, 이러한 오차를 줄이기 위해서는 수질 매개변수에 대한 지속적인 보정 및 검증작업이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5은 전체 검·보정지점에서의 실측값과 모의값의 산포도이다. 산포도는 분산도라고도 하며 변량 x 와 그 분포 $F(x)$ 가 주어졌을 때, 그 분포의 중심적 위치의 측도를 m 이라 할 때 $F(x)$ 의, m 주위에서 흩어져 있는 정도를 나타내는 기술적 지표이다. 본 연구에서는 실측값과 모의값의 관계를 분

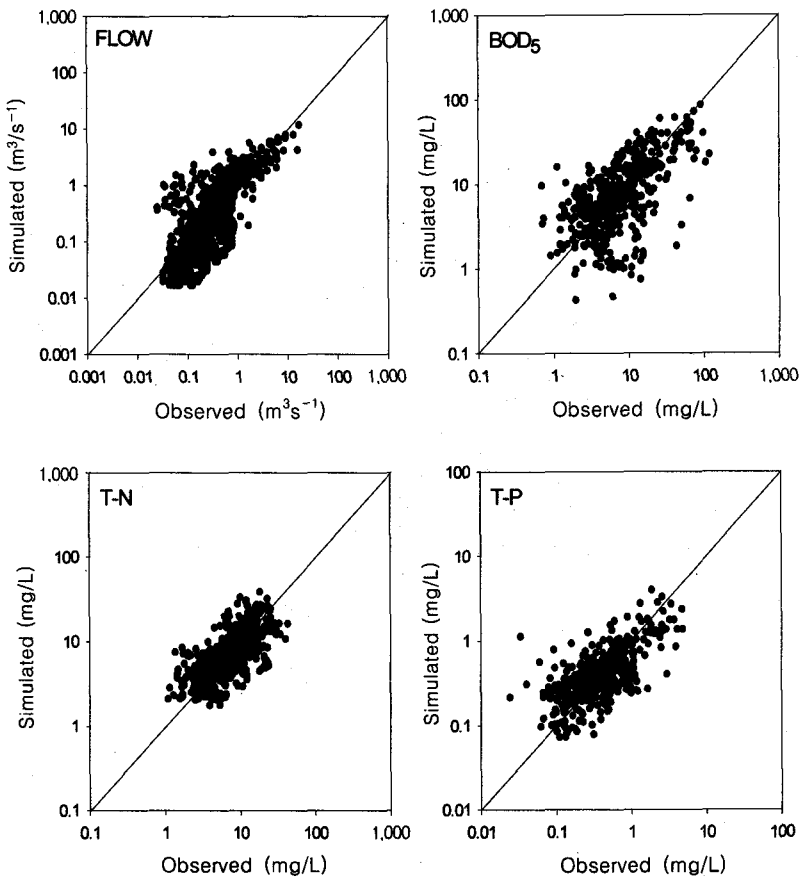


Fig. 5 Scatter plots of observed versus simulated data from all monitoring stations

Table 3 Comparison of observed and simulated data in calibration and verification processes

Station	Constituent	Calibration Period			Verification period		
		<i>Obs.</i> mg L ⁻¹	<i>Sim.</i> mg L ⁻¹	<i>Diff.</i> %	<i>Obs.</i> mg L ⁻¹	<i>Sim.</i> mg L ⁻¹	<i>Diff.</i> %
N1	BOD	46.39	31.16	32.84	-	-	-
	T-N	20.80	15.39	26.01	-	-	-
	T-P	2.06	1.48	28.32	-	-	-
N2	BOD	6.92	8.05	16.38	-	-	-
	T-N	13.01	15.39	18.22	-	-	-
	T-P	0.68	0.62	7.99	-	-	-
N3	BOD	8.25	11.33	37.36	9.63	12.44	29.26
	T-N	11.48	11.30	1.58	11.65	12.53	7.59
	T-P	0.43	0.56	31.22	0.62	0.63	1.49
N4	BOD	17.69	11.36	35.79	20.16	13.27	34.19
	T-N	13.80	9.45	31.56	12.10	10.75	11.15
	T-P	0.71	0.49	30.14	0.80	0.57	27.83
J1	BOD	3.72	4.79	28.47	-	-	-
	T-N	5.94	6.15	3.62	-	-	-
	T-P	0.25	0.20	18.82	-	-	-
J2	BOD	3.06	4.50	47.13	4.19	4.55	8.44
	T-N	5.10	4.98	2.30	5.39	5.67	5.09
	T-P	0.20	0.31	54.61	0.32	0.38	18.93
J3	BOD	5.30	4.85	8.58	-	-	-
	T-N	7.95	6.51	18.11	-	-	-
	T-P	0.50	0.38	25.10	-	-	-
J4	BOD	6.10	6.20	1.61	-	-	-
	T-N	5.21	4.72	9.31	-	-	-
	T-P	0.51	0.41	19.70	-	-	-
J5	BOD	8.18	6.14	24.89	9.27	6.80	26.69
	T-N	4.53	4.93	8.93	6.29	5.66	10.06
	T-P	0.22	0.29	29.31	0.32	0.34	6.57
E1	BOD	5.70	5.42	4.80	5.61	5.31	5.35
	T-N	2.77	2.75	0.58	3.66	3.02	17.51
	T-P	0.11	0.14	28.53	0.21	0.18	16.70
E2	BOD	3.97	3.59	9.43	-	-	-
	T-N	3.89	3.91	0.45	-	-	-
	T-P	0.29	0.25	16.38	-	-	-
E3	BOD	22.12	28.37	28.22	-	-	-
	T-N	16.17	17.66	9.22	-	-	-
	T-P	1.02	1.23	20.71	-	-	-
E4	BOD	7.96	10.49	31.90	10.08	10.41	3.25
	T-N	6.91	6.60	4.45	7.57	7.04	6.96
	T-P	0.36	0.41	13.34	0.41	0.45	8.05

석하기 위해 두 변량간의 분포를 나타내었다. BOD와 T-P의 경우는 Flow와 T-N의 경우와 비교하여 outlier들이 많이 있기는 하지만 대체적으로 분포의 흩어진 폭이 비교적 좁게 나타나 모의치가 실측치에 근접함을 확인할 수 있었다.

4. 화성유역의 오염부하량과 수질개선 대책

Fig. 6은 화성유역의 남양천, 자안천, 그리고 어은천의 오염부하량을 2003년부터 2005년까지 3년간의 월평균 수질과 함께 월별 변화를 나타내었다. 화성 담수호로 유입되는 오염부하량은 자안천, 남양천, 어은천 순으로 높은 것으로 나타났다. 하천의 오염은 남양천과 어은천에 비해 자안천이 깨끗한 수준이나, 유역면적이 넓고 유로연장이 커서 담수

호로 유입되는 유량이 많기 때문에 자안천에서 배출되는 부하량은 큰 것으로 나타났다. 남양천과 어은천의 경우 자안천보다 점오염의 비율이 상대적으로 높게 나타났는데, 하천을 따라 각종 오수배출업소와 대규모 택지개발과 도시화의 원인으로 판단된다 (Table 4). 특히 남양천의 경우에는 강우량에 따라 부하량의 차이가 크지 않았는데, 이유는 강우시 하천수질의 농도가 희석효과에 의해서 급격히 낮아졌기 때문으로 판단된다. 부하량은 강우가 집중되는 6, 7, 8, 그리고 9월에 크게 증가하며, 강우 유출량에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전반적인 수질변화 경향은 비가 많이 오는 6월부터 8월까지의 수질오염 농도가 다른 기간보다 낮은 것으로 나타났다. 따라서 강우가 많은 시기에 부하량은 높을지라도 하천 수질은 오히려 깨끗한

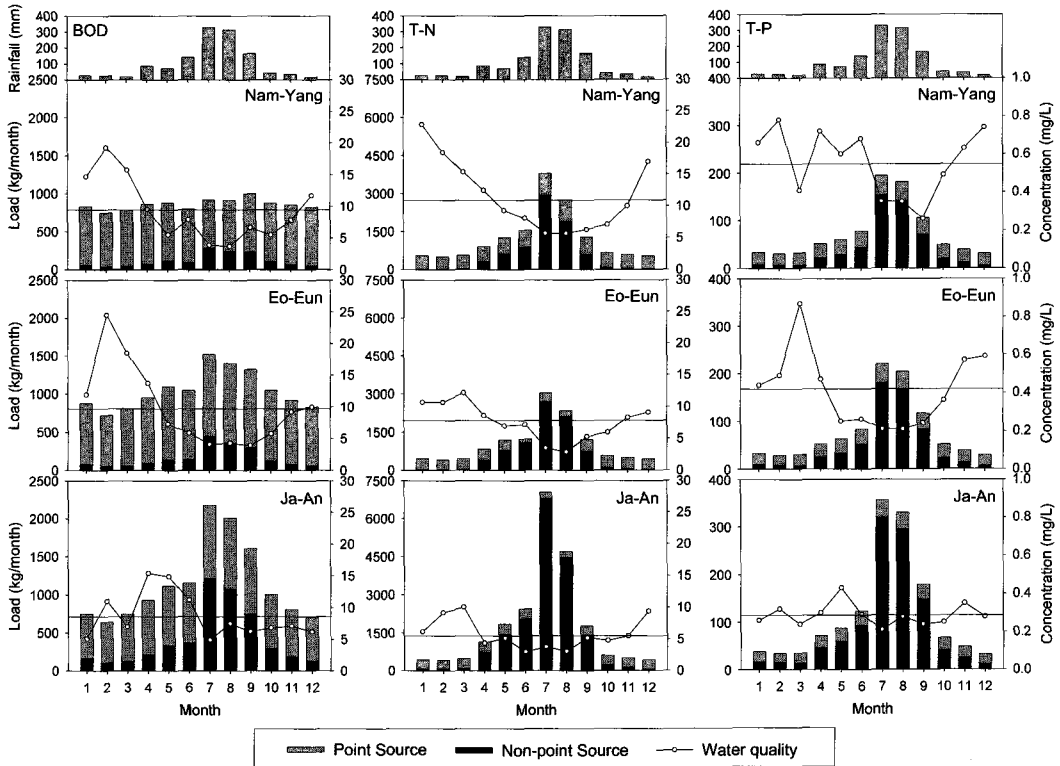


Fig. 6 Monthly pollutant load and pollutant source composition

Table 4 Point and nonpoint source pollution load assessment

	N4 (NamYang)		J5 (JaAn)		E4 (EoEun)	
	Total load	NPL/PL(%)	Total load	NPL/PL(%)	Total load	NPL/PL(%)
BOD (kg/yr)	11,733	12.3 / 87.7	18,662	26.7 / 73.3	14,516	13.5 / 86.5
T-N (kg/yr)	22,514	33.5 / 66.5	39,464	44.7 / 55.3	20,949	39.3 / 60.7
T-P (kg/yr)	1,406	36.9 / 63.1	2,494	43.7 / 56.3	1,566	38.9 / 61.1

NPL: Nonpoint pollutant load; PL: Point pollutant load

수준이며, 부하량과 하천수질이 동일한 경향으로 증감하지 않는다는 것이 확인되었다. BOD의 경우 T-N과 T-P 보다 강우에 의한 영향을 덜 받는 것으로 나타났으며, 이는 BOD 발생원의 대부분이 점오염원 (70% 이상)에서 유출되기 때문인 것으로 판단되었다. BOD의 비점원오염부하량은 강우기 (6~9월)에 55~60%정도 배출되는 것으로 나타났고, T-N과 T-P의 경우는 약 80% 이상의 비점원오염부하량이 이 시기에 배출되는 것으로 나타났다. 하천의 수질은 인구와 산업체, 축산 등 비교적 오염원이 많은 남양천과 어은천에서 높은 수준이었으며, BOD의 경우 어은천이 가장 높았으나, T-N과 T-P의 경우에는 남양천이 가장 높게 조사되었다.

KMOE (2002)에 의하면 화성유역은 2000년에 비해 2012년에 인구 및 산업단지의 증가로 배출부하량이 증가할 것으로 보고한 바 있으며, 화성호 유역의 농경지 및 임야에서 발생하는 비점오염물질을 처리를 위해 하천에 대한 직접정화시설을 설치하여 강우시 및 평상시 배출되는 비점오염물질을 처리하는 것으로 계획하였다. 화성유역의 수질개선은 상류유역과 호내 대책이 동시에 이루어져야 한다. 상류유역에 대한 대책으로 화성호 유입하천 중 청천시 호내로 유입되는 하천유량 및 오염물질 등의 기여도가 높고 타 하천에 비해 하천 직강화 등으로 초기 강우시 하천오염물질의 체류시간이 상대적으로 짧은 남양천과 어은천을 대상으로 하수처리 시설, 마을하수처리시설, 산업폐수 저장액비 탱크

등과 같은 점원오염물질을 처리할 수 있는 시설을 설치하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 또한 비점오염물질 기여도가 높은 주요 배출지점에 대하여 수변완충지대나 습지 및 저류지 등의 자연형 시설을 설치한다면 비점오염물질을 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 집중 강우시 비점오염부하량 및 총오염부하량이 많은 자안천유역의 경우 인공습지 및 식생형 시설 등의 비점오염물질 저감시설을 적절하게 설계 및 시공하는 것과 우선적인 친환경 하천정비 사업을 시행하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 각 주요 하천을 대상으로 처리시설을 설치할 경우 풍수기를 기준으로 하천수 전량처리에 필요한 시설용량을 산정하여 설치한다면 상류유역에서 배출되는 오염부하량을 효과적으로 삭감할 수 있을 것이라 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 화성유역의 유입부하량을 산정하기 위해 BASINS/HSPF 모형을 적용하였고 남양천, 자안천, 어은천 등 주요 하천에서의 부하량을 산정하였으며, 화성유역의 수질관리를 위해 적절한 수질개선 대책을 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

1. BASINS는 유역의 오염현황을 신속하고 용이하게 파악가능하고 예측모형의 입력자료를 자동적으로 생성해 주기 때문에, HSPF와 같은 유역종합

수질모형을 사용자의 목적에 맞게 적용할 수 있었다. BASINS 적용을 위한 핵심 GIS 자료인 유역도와 하천도, DEM, 토지이용도, 수질측정자료 등을 BASINS 형식에 맞게 변환·입력하여 그 적용성을 확인하였다.

2. 유역단위 오염 부하량을 추정하기 위하여 HSPF 모형을 이용해서 모형의 보정 기간인 2002~2005년까지의 유출량 및 수질을 모의 분석하였다. 유출량과 수질의 검·보정과 모형 효율 및 산포도를 통해 모의 결과를 판단할 수 있었으며, 수질 경우 특정지점 및 특정항목에서 나타난 이상 값들이 있기는 하였으나 유역이라는 광범위하고 복잡한 특성을 고려해 볼 때 허용할 수 있는 범위의 수질을 묘사한 것으로 판단되었다. 그러나 결과의 정확한 해석과 적용을 위해서는 보다 상세한 측정자료 확보 및 검·보정 작업이 필요할 것으로 판단되었다. HSPF 모형은 하천의 수질이 매우 좋지 않은 N1 뿐만 아니라 비교적 수질이 양호한 자안천 내 측정지점(J1~J5)에서도 적용가능성이 큰 것으로 나타났다.

3. 화성유역의 오염부하량은 2003년부터 2005년까지 3년간의 월평균 수질과 함께 월별 변화를 각 주요 유입하천에 대하여 분석하였다. 하천의 오염은 남양천과 어은천에 비해 자안천이 깨끗한 수준이나, 유역면적이 넓고 유로연장이 커서 담수호로 유입되는 유량이 많기 때문에 자안천에서 배출되는 부하량이 큰 것으로 판단되었다. 부하량은 강우가 집중되는 6, 7, 8, 그리고 9월에 크게 증가하며 강우유출량에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으나, 하천수질의 경우 유량증가에 따라 비례하여 증가하지 않았고 오히려 감소하는 경향이 나타났다.

4. 하천의 수질은 인구와 산업체, 축산 등 비교적 점오염원이 많은 남양천과 어은천에서 높은 수준이었으며 BOD의 경우 어은천이 가장 높았으나, T-N과 T-P의 경우에는 남양천이 가장 높게 조사되었다. BOD 부하량은 T-N과 T-P 부하량 보다 강우에 의한 영향을 덜 받는 것으로 나타났으며

이는 BOD 발생원의 대부분이 점오염원에서 유출되기 때문인 것으로 판단되었다.

5. 화성유역의 수질개선대책으로 화성호 유입하천 중에서 평상시 호내로 유입되는 오염물질 기여도가 높고 하천 직강화 등으로 하천 체류시간이 상대적으로 짧은 남양천과 어은천을 대상으로 점원오염물질을 처리할 수 있는 시설과 동시에 비점오염물질 처리시설을 적절히 설치하는 것이 하천 오염 제어에 효과적일 것으로 판단된다.

6. 본 연구에서는 화성유역에 대한 BASINS/HSPF의 적용성을 검증하였으며, 현재 수질오염총량계산에 있어서 원단위방법에 의한 오염부하량산정의 개선필요성이 제기되고 있는 상황에서 BASINS/HSPF를 이용한 오염부하량 산정 및 장래 예측에 대한 적극적인 검토가 필요하다고 생각된다.

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 "BASINS 및 WASP을 이용한 화성유역과 호소의 통합 수질예측시스템개발"에 지원에 의해 이루어진 것임.

References

1. Albek, M., U. B. Ogutveren and E. Albek. 2004. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *Journal of Hydrology* 285: 260-271.
2. ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models. 1993. Criteria for Evaluation of Watershed Models. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*. 119(3): 429-442.
3. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigan and R. C. Johanson. 1993. Hydrological Simulation Program-FORTRAN User's Manul for Release 10, Environmental Research Laboratory Office of Research and Development US Environmental Protection

- Agency, Athens, GA., EPA/600/R-93/174.
4. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigian and R. C. Johanson. 1996. Hydrologic simulation program-FORTRAN user's manual, v.12, Athens, GA., USEPA.
 5. Brun, S. E. and L. E. Band. 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computer, Environment and Urban Systems*. 24: 5-22.
 6. Chen, Y. D., R. F. Carsel, S. C. Mccutcheon and W. L. Nutter. 1998a. Stream temperature simulation of forested riparian areas: Watershed-scale model development. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*. 124: 304-315.
 7. Chen, Y. D., S. C. Mccutcheon, D. J. Norton and W. L. Nutter. 1998b. Stream temperature simulation of forested riparian areas: II. Model application. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*. 124: 316-328.
 8. Chun, K. C., R. W. Chang, G. P., Williams, Y. S. Chang, D. Tomasko, K. LaGory, J. Ditmars, H. D. Chun and B. K. Lee. 2001. "Water quality issues in the Nakdong river basin in the Republic of Korea". *Environmental Engineering and Policy*. 2: 131-143.
 9. Donigian, A. S. and N. H. Crawford. 1976. Modelling Nonpoint Pollution from the Land Surface, Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia, EPA/600/3-EP76 -083.
 10. Donigian, A. S., J. C. Imhoff, B. R. Bicknell and J. L. Kittle. 1984. Application Guide for Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF), EPA.
 11. Donigian, Jr., A. S. 2000. *HSPF Training Workshop Handbook and CD*. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000. Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
 12. Donigian, A. S. and Love, J. T. 2003. Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling. WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM. November 16 - 19, 2003. Chicago, Illinois, USA.
 13. Fontaine, T. A. and V. M. F. Jacomino. 1997. Sensitivity analysis of simulated contaminated sediment transport. *Journal of the American Water Resource Association*. 33: 313-326.
 14. Hashim, N. B. 2001. Watershed, Hydrodynamic, and Water Quality Models for Total Maximum Daily Load St.Louis Bay Watershed Mississippi. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Mississippi State University.
 15. Jeon, J. H. 2005. *BASINS/HSPF-Paddy DEVELOPMENT FOR WATERSHED MANAGEMENT IN KOREA*, Ph.D. dissertation, Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea.
 16. Jeon, J. H., J. H. Ham, C. G. Yoon, and S. J. Kim. 2002. Effects of DEM Resolution on Hydrological Simulation in BASINS-HSPF Modeling, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 44(7): 25-35.
 17. Jeon, J. H., C. G. Yoon, J. H. Ham, and K. W. Jung. 2006. Evaluation of BASINS/WinHSPF applicability for pollutant loading estimation for Korean watershed. *Water Science & Technology*. 53(1): 25-32.
 18. Kim, S. M. and S. W. Park. 2004. Calibration and Validation of HSPF Model to Estimate the Pollutant Loads from Rural Small Watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*. 37(8): 643-651.
 19. K.M.O.E., 2002. *Water quality protection Measurers for Hwaong Reservoir*. (in Korea)
 20. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. "Riverflow forecasting through conceptual model." *Journal of Hydrology*. 10(3), 282-

- 290.
21. Park, N. H. and C. Kim. 2002. A Study on HSPF Model for Long-Term Runoff Analysis in Whangyong River Basin. 2002. *Annual Conference Korea Water Resources Association*. 170-175.
22. USEPA. 2001. *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS) v.3.0 User's Manual*, EPA-823-B01-001, Washington, D.C., Office of Water, USEPA.