

수질학적 관점에서의 수문모델 유출량 보정 방법 평가

전지홍 · 최동혁 · 김정진 · 김태동[†]

국립안동대학교 환경공학과

Evaluating Calibration Methods of Stream Flow for Water Quality Management

Ji-Hong Jeon · Donghyuk Choi · Jung-Jin Kim · Taedong Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Andong National University
(Received 6 October 2008, Revised 16 March 2009, Accepted 15 April 2009)

Abstract

The effect of selecting hydrologic item for calculating objective function on calibration of stream flow was evaluated by Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) linked with Model Independent Parameter Optimizer (PEST). Daily and monthly stream flow and flow duration were used to calculate objective function. Automated calibration focused on monthly stream was proper to analyze seasonal or yearly water budget but not proper to predict daily stream flow or percent chance flow exceeded. Calibration result focused on flow duration is proper to predict percent chance flow exceeded but not proper to analyze water budget or predict peak flow. These results indicate that hydrologic item calculated for objective function on calibration procedure could influence calibration results and watershed modeler should select carefully hydrologic item for the purpose of model application. Current, the criteria of stream flow of Korean TMDL is generated based on percent chance flow exceeded, so flow duration should be included to calculate objective function on calibration procedure for the estimation of criteria of stream flow using hydrologic model.

keywords : Calibration, Global optimization, Hydrologic simulation program-fortran (HSPF), Stream flow, PEST

1. 서론

생활수준의 향상과 더불어 시민들은 보다 쾌적한 생활환경을 요구하고 있는 가운데, 정부에서는 오염총량관리제도와 비점오염관리와 같은 다양한 수질 정책 등을 개발 적용하고 있다. 모델은 자연계에서의 수리·수문현상 및 오염물질 거동분석에 사용될 뿐만 아니라, 다양한 대책에 대한 평가에 사용된다. 특히 최근 들어 컴퓨터와 GIS의 발달과 더불어, 보다 복잡하고 상세하게 모의하는 모델의 개발과 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 수문모델은 과거 수문학적인 관점에서의 물수지 해석에 많이 이용되어 왔으나, 최근 들어서는 수질오염총량제 시행과 비점오염원의 중요성이 대두되면서 수질학적 측면에서의 해석을 위하여 수문모델의 이용빈도가 증가되고 있다. 그러나 총유출량이나 오염물질의 총량을 중요시하는 유출량 보정방법이 상대적으로 고농도를 나타내는 저유량을 중요시하는 수질학적 관점에서의 보정시에도 적절한가에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Hydrologic Simulation Program-Fortran(HSPF)은 유역에서의 수문해석(Brun and Band, 2000; Choi and Deal, 2008; Cho et al., 2008)과 토양유실을 포함한 비점오염물질의 거

동분석(Hunter and Walton, 2008; Ribarova et al., 2008), 수질개선과 홍수재해 방지를 위한 다양한 유역오염관리대책 평가(윤춘경 등, 2007a; Donigian et al., 1997; Luo et al., 2006) 등에 있어서 세계적으로 널리 이용되고 있는 유역모델이다. 우리나라의 경우에 있어서는 Jeon 등 (2006)이 금강수계의 만경강과 동진강 유역을 대상으로 BASINS를 이용하여 HSPF의 적용성을 평가하였다. 이 후 한강수계(Jung, 2007)와 낙동강수계(황하선, 2007)와 같은 대유역을 대상으로 하여 적용성을 평가한 바 있으며, 그 외 다양한 중·소 유역규모 대하여 HSPF의 적용성이 입증되었다(신아현, 2008; 윤춘경 등, 2007a, 2007b; 장재호 등, 2006; 정광욱 등 2007). 한편, Jeon 등(2007)은 HSPF를 논을 모의할 수 있도록 수정된 HSPF-Paddy를 개발하여 적용함으로써, 우리나라를 포함하여 논이 중요한 토지이용상태인 유역에도 보다 정확하게 모의할 수 있도록 하였다. HSPF는 유역에서의 수문 및 수질 현상을 자세히 모의할 수 있다는 장점이 있는 반면, 모델 구축을 위한 방대한 자료와 모델 적용을 위한 고도의 전문성, 모델 검·보정을 위한 많은 시간과 노력을 필요로 한다는 한계점을 가지고 있다(Shoemaker et al., 1997). 모델의 보정(Calibration)이란 모델의 인자값을 조정함으로써 실측치와 예측치와의 분산을 최소화하는 과정으로 정의 된다(Jewell et al., 1978). HSPF와 같은 복잡한 모델은 모델의 검·보정과정은 반드시 수행되어야 하며, 그렇지 않은 경우 모델 결과의 정확성에 심각

[†] To whom correspondence should be addressed.
tdkim@andong.ac.kr

한 문제를 발생시킬 수 있다(Shoemaker et al., 1997).

모델 보정에 소비되는 시간과 노력을 최소화하고 모델의 보정결과를 향상시키기 위하여 모델 보정에 있어 최적화 기법이 사용되고 있다. Model- Independent Parameter Optimizer(PEST)는 특정한 모델에 국한되어있지 않고 다양한 유역 및 수질 모델의 최적화에 적용할 수 있도록 개발된 패키지 프로그램이다(Doherty, 2005). Skahill와 Doherty (2006)은 PEST를 이용한 HSPF 유출량의 최적화를 통하여, 개선된 Gauss-Marquardt-Levenberg(GML)기법의 최적화시 효율성을 소개하였으며, Doherty와 Skahill(2006)의 연구결과를 통해 HSPF-PEST의 유출량 보정에 대한 적용을 평가하였다. Kim 등(2007)은 HSPF의 유출량 보정시 시행착오법에 의한 보정결과와 PEST를 이용한 보정결과를 비교하여 PEST의 우수성을 소개한 바 있다.

본 연구에서는 유출량 보정에 있어서 실측치와 예측치의 일별 유출량과 월별 유출량, 유출량 발생빈도를 각각 목적함수 계산의 사용이 유출량 보정결과에 미치는 영향을 파악하고, 수질관리를 위한 유역모형 적용시 가장 적절한 유역모형 보정방법을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

금강수계에 위치한 전주천을 연구대상지역으로 하였다. 전주천은 유역면적이 287.6 km²이며 유로연장 36.8 km인 지방하천으로 관촌평야에서 발원해 전라북도 전주시의 남동쪽에서 북서쪽으로 전주 시가지를 관통하여 흐르는 만경강 제1지류이다.

유역면적의 약 58%가 임야로 가장 많은 면적으로 차지하고 있으며, 도시지역이 전체면적의 약 14%를 차지하여

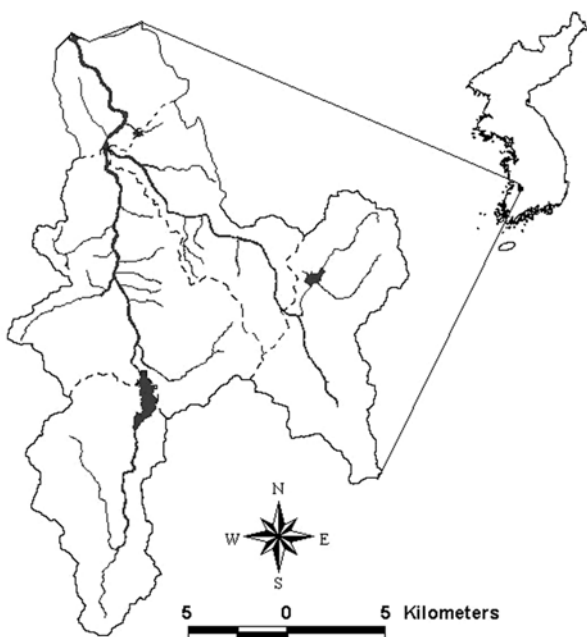


Fig. 1. Study area.

두 번째로 많은 면적을 나타내고 있다. 전주하수처리장이 유역의 말단에서부터 약 4.1 km 지점에 위치하고 있으며, 하수처리장의 처리수는 전주천으로 방류되고 있다.

2.2. PEST 개요

PEST 프로그램은 기능적으로 크게 3개의 다음과 같은 요소로 구성되어 있다.

Parameter definition and recognition: 모델의 입력파일에 최적화할 인자값을 문자형태로 표시하여 별도의 확장자 (*.tpl)로 저장된 template file을 읽어들이고, 최적화될 인자의 명칭과 모델입력파일에서의 위치 등을 인식한다. 또한 사용자 지정의 최적화될 인자값의 최대값과 최소값 등을 읽어들이므로써, 최적화될 인자값의 신뢰성을 높임과 동시에 인자값의 이상치에 의한 모델의 실행시의 에러를 방지할 수 있다.

Observation definition and recognition: 방대한 모델의 결과값 중 일부를 선택하여 최적화에 필요한 목적함수를 계산할 때, 이때의 모델의 값을 관측값(Observation)이라고 한다. 예를 들어, 모델의 결과는 일별 연속적으로 모의하는 반면, 실측값은 월별 하나의 불연속적인 값일 때, 목적함수에 사용되는 모델의 결과값만을 별도로 추출해야 한다. 이때 결과값을 추출할 시간을 지정하는 instruction file을 읽어들이므로써 모델 결과값중 목적함수에 사용될 값을 추출한다.

Nonlinear estimation and predictive analysis algorithm: PEST는 비선형 예측 기술(nonlinear estimation technique) 중의 하나인 Gauss-Marquardt-Levenberg(GML)기법을 사용하여 인자를 최적화하며, GML기법은 다른 최적화 방법에 비해서 모델의 실행횟수가 적기 때문에 최적화에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다(Doherty, 2005).

2.3. HSPF 구축

모델구축에 필요한 자료는 유역도와 하천도, 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM), 토지이용도, 전주하수처리장 방류유량실측자료, 기상자료, 유출량 실측자료 등이다. 유역도와 하천도는 건교부에서 제공하는 shape파일 형태의 GIS자료를 사용하였다. DEM자료는 환경부 환경지리정보(<http://egis.me.go.kr/egis/main.asp>)에서 제공하는 격자간격 30 m의 grid파일 형태의 GIS자료를 활용하였다(Fig. 2(a)). 토지이용도 역시 환경부 환경지리정보에서 제공하는 중분류(1:25,000)의 shape파일 형태의 토지피복도를 활용하였다(Fig. 2(b)). 전주하수처리장 방류유량 실측자료는 전주하수처리장에서 일별 측정된 유량자료를 취득하여 사용하였다. 기상자료는 유역내에 존재하는 전주기상자료를 사용하였는데, 시간별 강수량, 대기온도, 일사량, 풍속, 운량 등을 취득하여, HSPF의 기상자료를 관리하는 WDM Util 프로그램을 이용하여 저장하였다. 증발량과 증발산량은 WDM파일에 저장된 기상자료와 WDMUtil의 모듈을 이용하여 계산 후 저장하였다. 유출량 실측자료는 농촌공사에서 운영 중인

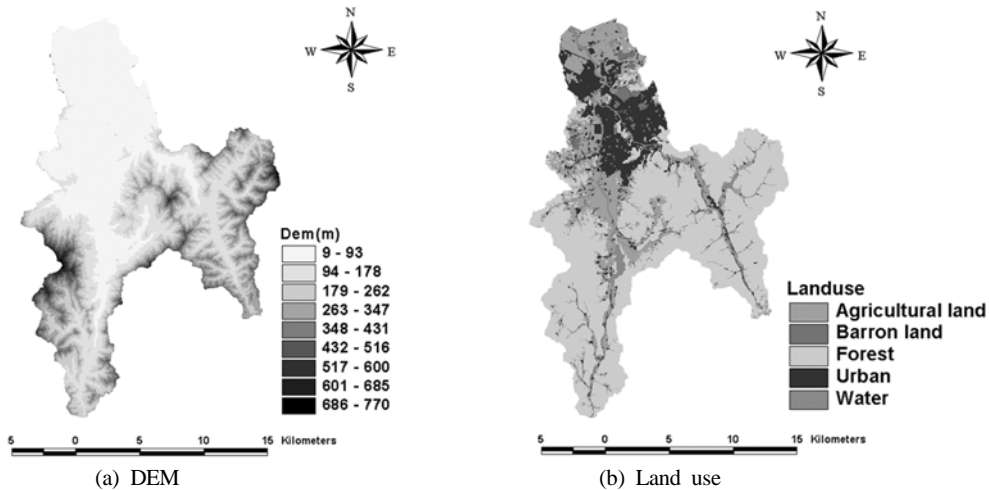


Fig. 2. GIS data for HSPF application.

유역 말단의 전주지점에 대하여 농어촌 연구원에서 공식적으로 제공하는 수문보고서의 유출량을 이용하였다(농어촌 연구원, 2001; 2002).

GIS자료 및 WDM파일의 기상자료와 Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources(BASINS)를 이용하여 모델을 구축하였다. BASINS는 미환경부에서 TMDL적용을 목적으로 개발된 통합관리시스템으로써, 현재의 오염상태를 손쉽게 파악할 수 있고, 다양한 모델적용 및 분석을 위한 전·후 처리과정을 지원해 준다.

현재 BASINS에서 지원하는 다양한 모델 중 하나가 HSPF이다. Jeon 등(2006)은 BASINS의 적용과 BASINS를 이용한 HSPF의 유출량 및 수질모의시 우리나라의 높은 적용성에 대하여 평가한 바 있다. 본 연구에서도 BASINS를 이용하여 HSPF 구축을 실시하였다. BASINS의 Automatic Delineate Tool과 DEM자료를 이용하여 모델 적용을 위한 유역분할을 실시하였으며 그 결과 총 7개의 소유역으로 구분하였다. 이 과정을 통해서 모델의 입력자료에 필요한 다양한 소유역별 지형학적인 인자들이 추출되었다. BASINS의 LandUse and Soil definition를 이용하여 소유역도에 토지이용도를 중첩시켰다. 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도를 HSPF에 적용시키기 위하여 Table 1과 같이 재분류하

였으며, 우리나라의 토지이용 특성상 논지역과 기타 농경지의 유출특성이 상이하기 때문에 이를 구분하여 분류하였다.

그 결과 산림이 가장 큰 면적(58.2%)을 차지하였고 도시가 14.1%로 비교적 많은 면적을 차지하고 있었다(Table 2). 논과 밭이 각각 12.8%, 9.0%를 차지하였으며, 나지와 물이 각각 3.6%, 2.5%를 차지하였다. BASINS에 의해 유역이 분할되고 토지이용도가 중첩된 후 BASINS의 Model을 이용하여 HSPF의 입력파일을 자동적으로 생성하였다.

2.4. PEST를 이용한 HSPF 최적화 방법

PEST를 이용한 HSPF의 최적화에는 관측치의 일평균 유출유량(m³/sec), 월 총유출유량(m³/month), 유황분석자료 등을 이용하여 목적함수를 계산한다. 유출량 보정에 있어 목적함수 계산시 어떠한 유출관련 항목을 사용하느냐에 따라 그 보정결과가 다르게 나타나기 때문에 다양한 경우에 대하여 보정을 한 후, 일별 유출량과 월별 유출량, 유황에 대한 보정결과를 비교해 보았으며, 수질오염총량제 적용에 있어 유출량 미측정유역에 대한 유출량 발생빈도 도출에 가장 적합한 경우를 평가해 보았다. 본 연구에서 사용된 case는 Table 3과 같이, 일별 실측유출량과 예측유출량을 최적화한 경우(case1), 월별 실측유출량과 예측유출량을 최적화한 경

Table 1. Land use reclassification for HSPF application.

Reclassification for HSPF	Original land use classification
Urban	Residential, Industrial, Commercial, Leisure, Transportation, Public area
Paddy filed	Paddy field
Upland	Upland, Greenhouse, Orchard, Other crop, Pasture, Golf course, Other grass
Forest	Deciduous forest, Coniferous forest, Mixed forest
Barron land	Mining area, Other barren
Water	Water

Table 2. Land use classification for HSPF application

	Urban	Upland	Paddy	Forest	Barren	Water	Total
Area (km ²)	40.5	25.9	36.3	167.6	7.3	9.9	287.6
	14.1%	9.0%	12.8%	58.2%	2.5%	3.6%	100%

Table 3. Hydrologic items for model calibration and its evaluation in this study

	Item to be used for calibration	Item to be used for model accuracy
Case 1	Daily stream flow	Daily stream flow, monthly total flow, flow duration
Case 2	Monthly total flow	
Case 3	Flow duration	
Case 4	Daily-monthly flow, and flow duration	

우(case2), 실측 유출량발생확률과 예측 유출량발생확률을 최적화한 경우(case3), 세 항목 모두 최적화한 경우(case4)를 평가하였다. 각각의 경우에 있어서, 보정결과의 정확성을 평가하기 위하여 실측치와 관측치의 일별유출량, 월별 유출량, 유출량발생빈도에 대한 통계분석을 실시하였으며, 유출량발생빈도가 가장 정확하게 보정된 방법이 수질오염총량제의 유출량 예측에 있어 가장 적합한 방법으로 간주하였다.

일별 유출량에 대한 관측치와 예측치의 정확성을 평가하기 위하여 평균오차(average error, AE), 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE, %), 결정계수(determine coefficient, R²), Nash-Sutcliff coefficient(NSC)를 계산하여 비교하였다. 결정계수는 통계프로그램인 SPSS를 이용하여 산정하였고, 나머지 통계치는 아래의 식 (1)에서 (3)에 의해 계산하였다. AE와 RMSE는 0에 가까울수록 NSC는 1에 가까울수록 예측치와 실측치가 유사한 값을 나타내는 것을 의미한다.

$$AE = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{1/2}}{\bar{O}} \times 100 \quad (2)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \quad (3)$$

여기서, P_i와 O_i는 각각 일별 유출량에 대한 예측치와 관측치이며, \bar{O} 는 실측치의 평균값이며, n은 일 유출량에 대한 총 개수이다.

월별 유출량에 대한 관측치와 예측치의 정확성을 평가하기 위하여, 시간에 따른 월별 관측치와 예측치의 그래프와 1:1 분산도 그리고 예측치와 관측치와의 결정계수를 산정하였다. 추가적으로 계절별 유출총량을 봄철(3월~5월), 여름철(6월~8월), 가을철(9월~11월), 겨울철(12월~2월)에 대한 실측총량과 예측총량에 대하여 상대오차를 계산하였다. PEST는 유출량 발생빈도를 고려하여 HSPF의 유출량을 보정할 수 있다. 이때 사용자는 실측치의 일별 유출량을 WDM 파일에 입력하고 사용자 정의의 특정 유량(최대 30개)을 PEST 입력파일에 입력하면 PEST는 사용자 정의에 해당하는 실측 유출량의 발생빈도와 HSPF에 의해 예측된 예측 유출량

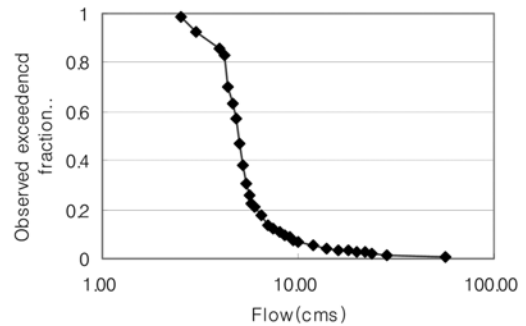


Fig. 3. Flow duration of observed data.

의 발생빈도를 계산하여 최적화를 실시한다. 유황분석에 대한 관측치와 예측치의 정확성을 평가하기 위하여, 시행착오법에 의해 적절한 유량의 발생범위내에서 총 30개의 유량에 대한 초과발생빈도를 PEST프로그램에 의해 추출하고 이를 도시화한 유황분석그래프와 그리고 예측발생확률과 관측발생확률에 대한 1:1 분산도 그리고 결정계수를 산정하여 비교하였다. 본 연구에서 사용된 실측치의 유량별 초과발생확률은 Fig. 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

시간에 따른 일평균 유출량의 보정에 대한 통계분석결과와 관측치와 예측치의 1:1 분산도는 Table 4와 Fig. 4와 같다. 일 유출량을 기준으로 보정을 실시한 Case 1에서 가장 높은 모델효율 0.80과 결정계수 0.80, 가장 낮은 RMSE 3.56을 나타내었다. 월 유출량을 기준으로 보정을 실시한 Case 2가 단일항목을 기준으로 보정을 실시한 경우들 중 다음으로 높은 정확성을 나타내었으며, 유황을 기준으로 보정을 실시한 Case 3이 가장 낮은 정확성을 나타내었다. 일별·월별 유출량과 유황자료 모두를 고려하여 보정한 결과는 AE 0.18, RMSE 3.71, 결정계수 0.80, 모델효율 0.78을 나타내어 일별 유출량을 기준으로 한 경우 다음으로 높은 모델의 정확성을 나타내었다.

시간에 따른 월별 수문유출곡선과 월유출량에 대한 관측치와 예측치의 1:1 분산도는 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

Table 4. Statistical analysis of model performance for daily stream flow at Junju Watershed

	AE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	NSC
Case 1	-0.19	3.56	0.80	0.80
Case 2	-0.21	3.76	0.78	0.78
Case 3	0.05	4.50	0.68	0.68
Case 4	0.18	3.71	0.80	0.78

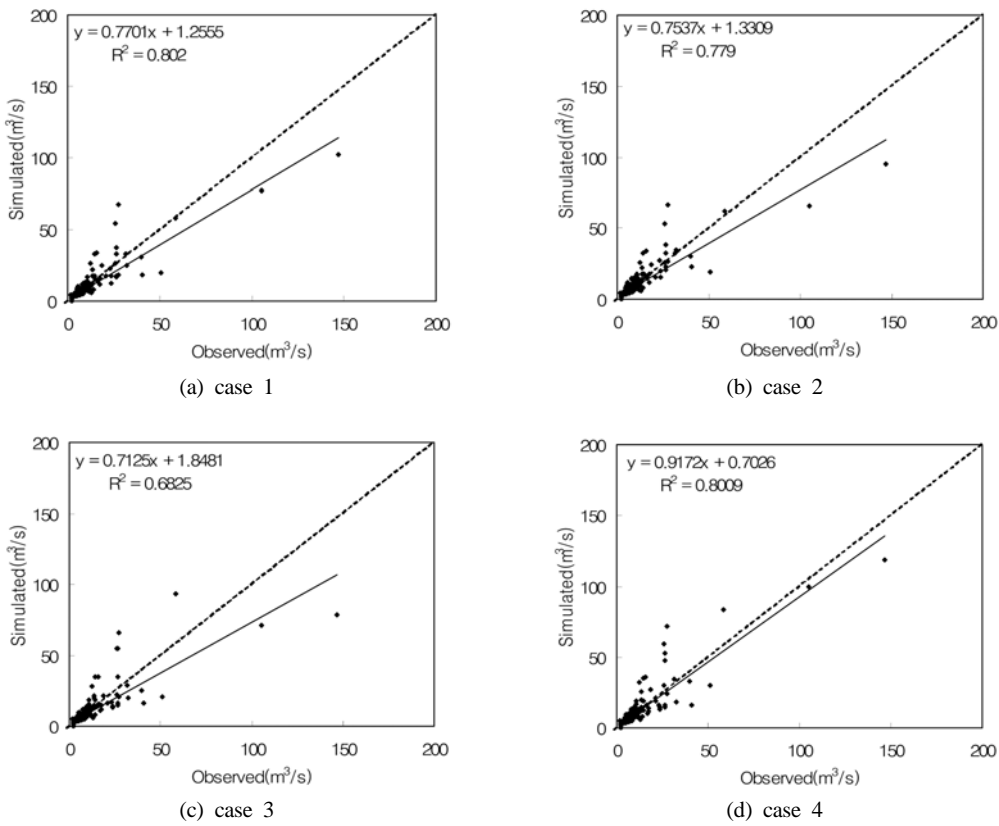


Fig. 4. Scatter plots between daily observed and simulated stream flow for each case.

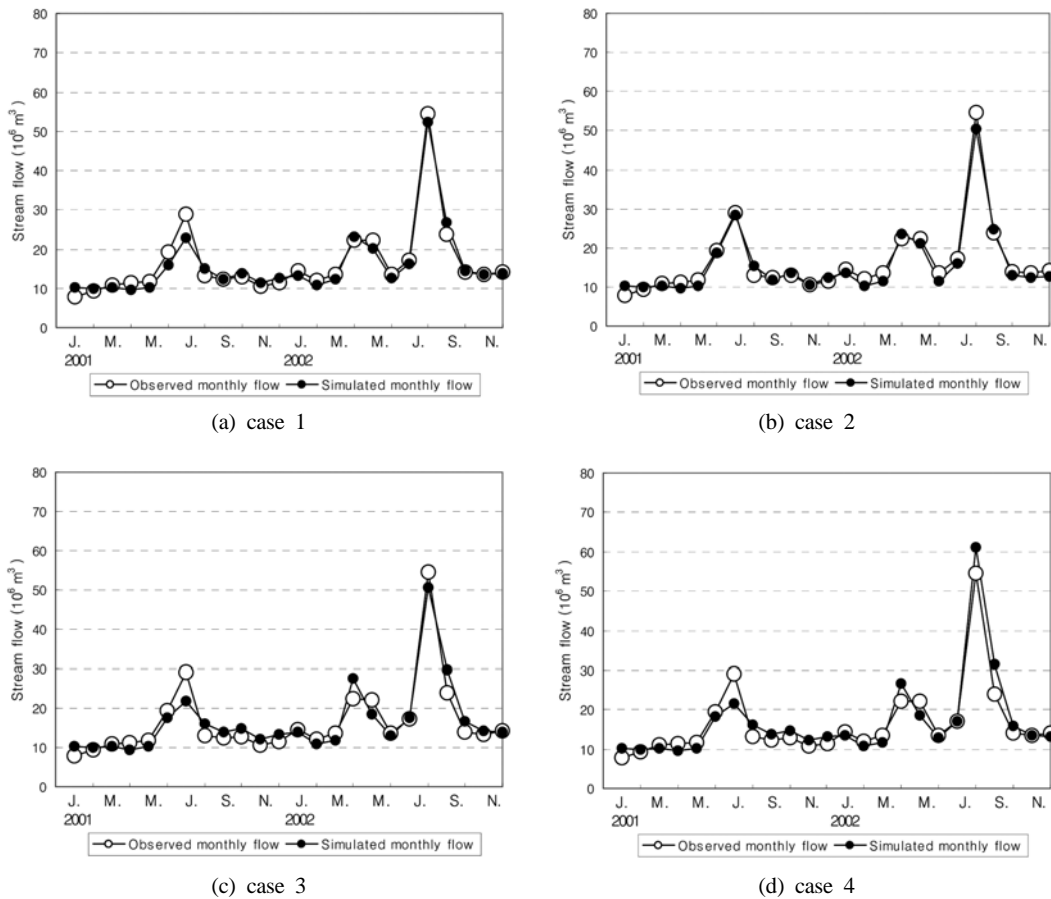


Fig. 5. Comparison between simulated and observed monthly stream flow at Junju Watershed.

단일 항목을 기준으로 한 보정결과를 살펴보면, 월별 유출량의 경우 월 유출량을 기준으로 보정을 실시한 결과가 역시 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다. Fig. 5의 case 2 그래프를 살펴보면 대부분의 값이 관측치와 예측치가 일치하는 것으로 나타났으며, Fig. 6(b)의 경우 대부분의 값이 1:1 선에 밀집해 있으며, 높은 결정계수를 나타내었으며, 다른 그래프의 회귀분석에 비해 1에 가장 가까운 기울기와 0에 가장 가까운 절대값을 나타내었다. 단일 항목 중 월별 유출량을 기준으로 했을 경우가 다음으로 높은 정확성을 나타내었으며, 유황분석자료만으로 기준으로 했을 경우에는 월별 유출량에 대한 가장 낮은 정확성을 나타내었다. 세 가지 항목을 모두 고려했을 경우의 결정계수는 0.92로써, 월별 유출량의 경우, 월별 유출량기준과 일별 유출량 기준 다음의 모델 보정 정확성을 나타내었다.

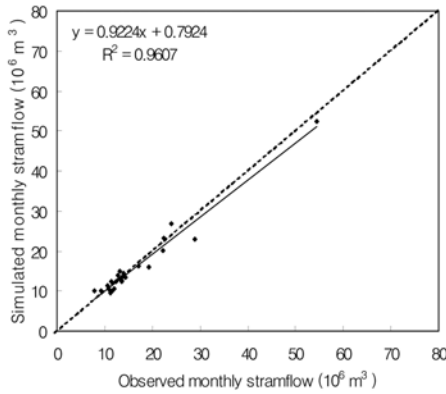
Table 5는 계절별 총 유출량에 대한 관측치와 예측치를 비교 분석한 결과이다. Donigian(2002)은 유출량의 경우,

상대오차가 10% 이하의 경우 매우 좋음(very good), 10~15%의 경우 좋음(good), 15~25%의 경우 보통(fair)로 구분하고 있다. 계절별 유출량 역시 단일 항목으로는 월별 유출량을 기준으로 보정한 결과가 가장 작은 상대오차를 나타내었으며, 일별 유출량을 기준으로 했을 경우가 그 다음으로 작은 상대오차를 나타내었다. 월별 유출량을 기준으로 보정한 결과는 모두 상대오차 10%이하를 나타내어 계절별 유출량 보정에 있어서 매우 좋음을 나타내었다. 단일 항목의 경우 유황분석자료를 기준으로 한 보정결과는 모두 상대 오차 10% 이하로 매우 좋음을 나타내었으나 상대오차의 크기는 가을을 제외하고 다른 경우에 비해 상대적으로 높았다. 모든 항목을 고려한 case 4의 경우 전반적으로 매우 좋음을 나타내었으나, 가을철의 유출량은 보통을 나타내었다.

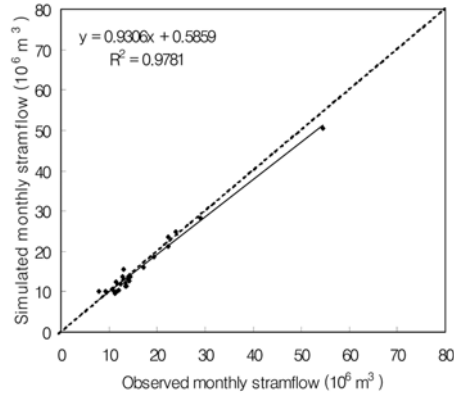
각 경우별 보정에 따른 관측치와 예측치의 유황분석결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 8은 Fig. 3의 특정 유출량에 대한 관측치와 예측치의 발생빈도에 대한 1:1 분산도를 나타내

Table 5. Model performance for seasonal discharge volume at Junju Watershed (10^9 m^3)

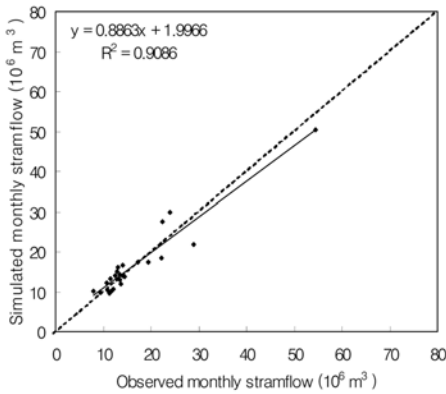
	Obs.	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
		Sim.	Error	Sim.	Error	Sim.	Error	Sim.	Error
Spring	3.25	3.11	4.52	3.04	6.65	3.03	7.00	3.07	5.65
Summer	5.18	4.82	6.98	4.96	4.30	4.78	7.75	5.21	-0.60
Fall	3.08	3.59	-16.58	3.05	1.16	3.26	-5.63	3.59	-16.39
Winter	2.44	2.54	-4.20	2.44	-0.11	2.49	-1.80	2.50	-2.47



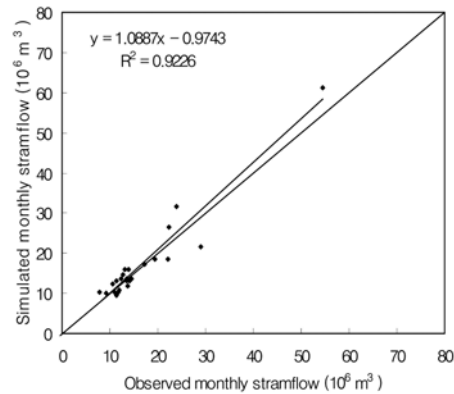
(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4

Fig. 6. Scatter plots between monthly observed and simulated discharge volume for each case.

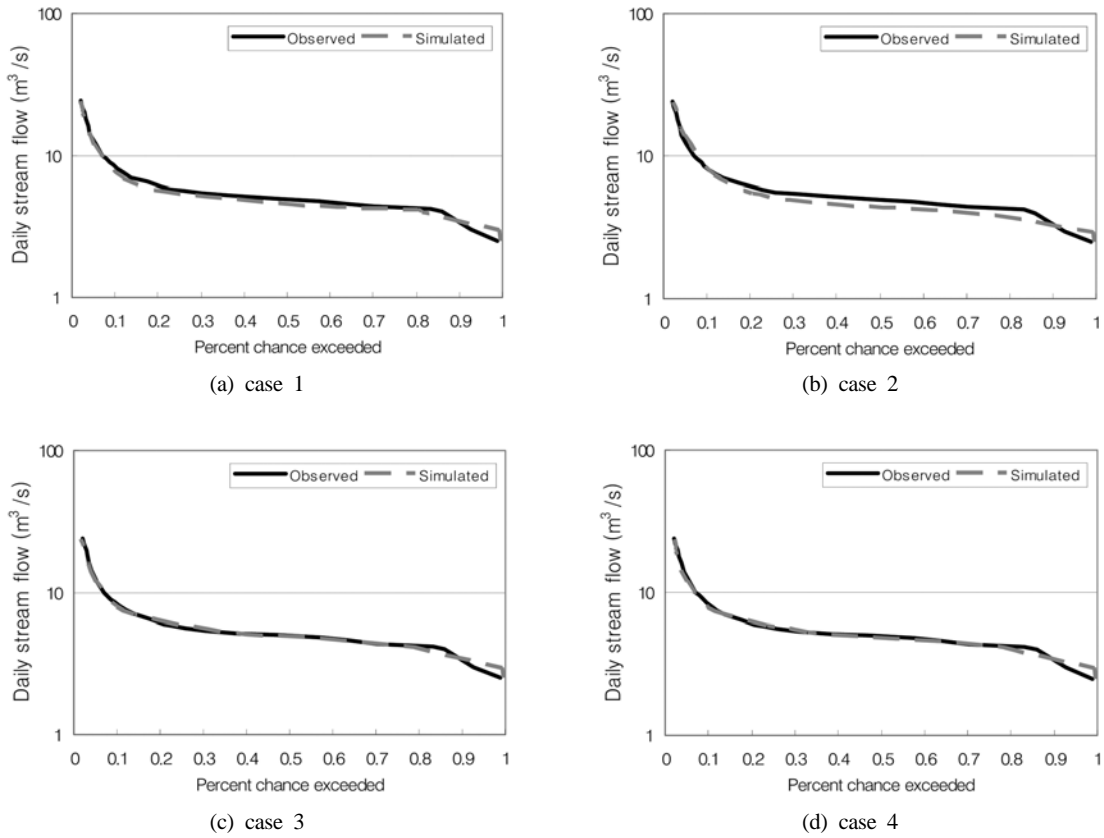


Fig. 7. Flow duration for observed and simulated stream flow.

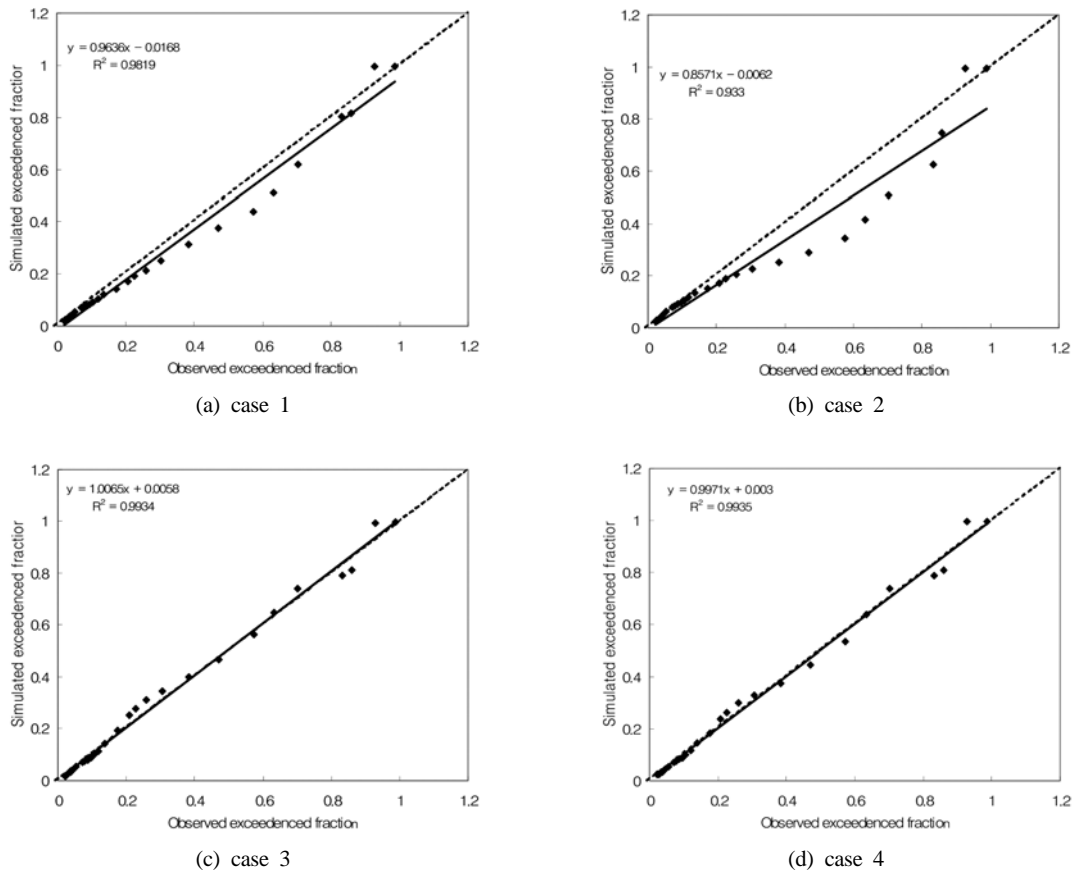


Fig. 8. Scatter plots between observed and simulated exceeded fraction for daily flow.

고 있다. 단일항목을 보정으로 했을 경우를 비교하여 볼 때, 유황분석자료를 기준으로 보정한 결과가 가장 높은 정확성을 나타내었다(Fig. 7(c)와 Fig. 8(c)). 일별 유출량을 기준으로 보정한 결과가 단일항목 중 그 다음을 차지하였으며, 월별 유출량을 기준으로 한 보정결과가 가장 낮은 정확성을 나타내었다. 또한 일별 유출량과 월별 유출량은 그 해당항목을 단일 기준으로 보정했을 경우가 가장 높은 정확성을 나타내었으나, 유황분석항목에 있어서는 세항목 모두를 고려한 결과와 유황자료만을 고려한 결과가 거의 유사한 정확성을 나타내었다. 특히 Fig. 8의 (c)와 (d)의 경우, 분산도가 중앙의 45°선에 밀집해 있으며, 1에 가까운 기울기와 0에 가까운 절대값은 예측된 유황분석 결과가 관측치를 잘 반영하는 것을 보여준다.

이상으로 유역모델의 유출량 보정시 목적함수 계산시 선택항목이 유출량의 보정결과에 미치는 영향을 파악하였다. 수문모델을 이용한 유출량 보정시 모델의 보정정도에 대한 평가를 위하여 관측치와 예측치간의 결정계수(R^2)와 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 NSE(Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency), RMSE 등이 널리 사용되었다(Chanasyk et al., 2003). 특히 NSE값은 유출량 보정시 모델효율을 결정짓는 지수이다(Geza and McCray, 2008). 그러나, 식 (2)~(3)에서 보는 바와 같이 결정계수와 NSE, RMSE 모두 관측치와 예측치간의 분산정도를 기반으로 하여 계산되기 때문에, 저수위보다는 고수위의 정확성이 NSE, R^2 , RMSE 값에 더 큰 영향을 주며 고수위를 중심으로 보정이 이루어진다. 이는 총 유출량이나 첨두유량이 중요한 수문학적 측면이나 오염부하의 총량에 관점을 둘 때, 적합한 접근방법이지만, 갈수기에서의 수질농도 역시 중요하게 고려해야 하는 측면에서는 적절하지 못하다. 특히, 수질오염총량제의 기본계획 및 시행계획 수립시 기준유량을 과거 10년 평균저수량을 기준으로 시행되고 있으며, 과거 10년 평균저수량이 확보되지 않았을 경우 인접한 하류지점에서 측정된 자료를 이용하거나 수문모형에 의해서 추정하도록 되어 있다(국립환경연구원, 2004). 이는 앞으로 수질오염총량제에 있어 유역모델 적용시 유출량 보정을 위한 목적함수 계산 방법론과 저유량에 대한 모델의 모델효율 향상에 대한 논의가 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구결과 Fig. 4(a)의 일유출량을 기준으로 한 일유출량 보정결과와 Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)의 월유출량을 기준으로 하여 보정된 월유출량 보정결과는 그 정확성이 매우 높은 것으로 나타난 반면에, Fig. 8의 (a)와 (b)의 발생빈도에 대한 보정정도에서는 그 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히, 월 유출량을 기준으로 보정한 결과는 유출발생빈도에서 현저한 오차를 나타내었다. 이는 수질학적 측면에서의 유출량 보정이나 수질오염총량제에서의 유역모델에 의한 10년평균 저유량 예측시, 일 유출유량의 기준으로는 어느정도 오차를 발생할 수 있으며, 월 유출량의 기준으로 모델을 보정했을 시 현저한 오차 유발에 대한 가능성을 보여주고 있다. 이에 반해, Fig. 8(c)와 (d)에서 보는 바와 같이 유황분석자료를 고려하여 수문모델을 보정하였을 경우,

유황분석에 있어서 매우 높은 정확성을 나타내었다. 그러나, 유황분석자료만을 기준으로 할 경우에는 일별 유출량 및 월별 유출량에서 상대적으로 정확성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 유황분석자료를 포함한 일별, 월별 유출량을 고려하였을 경우, 모든 항목에 있어서 높은 정확성을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 할 때, 수질오염총량제 적용에 있어서 미측정지역의 10년 평균 저유량을 모델에 의해 예측할 경우에는 대상지역을 포함하는 하류의 측정지점이나 인근 측정지점에 대한 유출량 보정과정의 필요하며, 유출량 보정시에는 일별 유출량이나 월 유출량의 예측치와 관측치의 직접적인 비교만으로 모델을 보정하기보다는 유황분석자료를 포함하여 모델을 보정하는 것이 수질오염총량제에 있어도 보다 신뢰성 있는 예측과 대안 평가가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 가용할 수 있는 모니터링 자료의 제한과 보정 방법에 따른 최적화의 정확성을 평가하고자하는 연구목적으로 인하여 모델의 보정결과만을 이용하였다. 추후 특정 지역에 대한 수문학적 분석에 있어서는 모델의 검보정이 과정이 필요하며, 이를 통한 HSPF-PEST적용성에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 모델의 최적화 프로그램인 PEST를 이용하여 HSPF의 유출량 보정시 관측치와 예측치의 보정항목에 따른 보정결과를 평가함으로써, 수질학적 측면에서의 유출량 보정 방법론에 대하여 고찰하기 위하여, 금강수계에 존재하는 전주천을 대상으로 하여 일별 유출량만 보정에 고려한 경우와, 월별 유출량만 고려한 경우, 유황분석자료만 고려한 경우, 세가지 모두 고려한 경우에 대하여 관측치와 예측치의 일별유출량과 월별 유출량, 그리고 유황분석 등과 같은 3가지 항목에 대한 보정결과를 평가하였다.

단일항목만 보정에 고려한 경우에는 평가항목 3가지 중 고려된 항목에서 보정에 대하여 가장 높은 정확성을 나타내었다. 따라서, 물수지 분석 등을 포함한 수자원 관점이나 오염부하총량에 대한 수질학적 관점에서는, 월별 혹은 계절별·년별 유출량을 기준으로 하여 모델을 보정하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 이에 반해서, 수질오염총량제에서의 기준유량으로 설정하고 있는 저유량에서의 수질관리에 대한 수질학적 관점에서 볼 때, 유황분석자료를 기준으로 모델을 보정하는 것이 정확한 유출량 예측이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 월별 유출량을 기준으로 모델을 보정하였을 경우, 예측치와 관측치의 월별 유출량에 대한 보정결과가 매우 높은 것으로 나타났으나, 예측치와 관측치의 유황분석결과에서는 현저한 오차를 발생시킨 것으로 나타나 수질오염총량제에서의 기준유량 산정시 월별 유출량만을 기준으로한 보정은 적절하지 않은 것으로 나타났다. 또한 일별 유출량과 월별 유출량, 그리고 유황분석자료 모두를 고려하여 유출량을 보정한 결과는 세항목 모두 높은 정확성을 나타내어 수질학적측면 수문학적 측면에서 모두 만족

한 결과를 나타내었다. 이는 동일한 수질학적 측면에서의 수문모델 보정에 있어서 어떠한 관점에서 수질을 평가할 것인가에 따라, 보정에 사용되는 관측치의 항목을 고려해서 적용해야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

이러한 측면에서 볼 때, HSPF와 PEST를 이용한 유출량 보정은 HSPF 모델 보정에 필요한 많은 시간과 노력을 단축시킬 수 있으며, 수질오염총량제에 있어서 미측정지점의 기준유량 산정에 있어 적용성이 매우 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립환경연구원(2004). 수계오염총량관리기술지침. 행정간행물 등록번호 11-1480083-000148-01. 국립환경과학원. 환경부.
- 농어촌연구원(2001). 새만금유역 수문연구 보고서. 농어촌연구원. 한국농촌공사.
- 농어촌연구원(2002). 새만금유역 수문연구 보고서. 농어촌연구원. 한국농촌공사.
- 신아현(2008). BASINS/WinHSPF를 이용한 충주댐 유역의 댐 모의 및 비점오염 저감방안 연구. 석사학위논문, 건국대학교.
- 윤춘경, 신아현, 정광욱, 장재호(2007a). BASINS/WinHSPF를 이용한 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율 평가. 수질보전 한국물환경학회지, **23**(6), pp. 951-960.
- 윤춘경, 한정윤, 정광욱, 장재호(2007b). 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위한 BASINS/WinHSPF 적용. 한국유수학회지, **40**(2), pp. 201-213.
- 정광욱, 윤춘경, 장재호, 김형철(2007). BASINS/HSPF를 이용한 화성유역 오염부하량의 정량적 평가. 한국농공학회지, **49**(2), pp. 61-74.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 전지홍(2006). BASINS/HSPF를 이용한 용담댐유역의 오염부하량 산정. 한국유수학회지, **39**(2), pp. 187-197.
- 황하선(2007). 우리나라 수질오염총량관리제에 있어 유역특성을 고려한 BASINS/WinHSPF의 적용성 연구-낙동강 수계를 중심으로. 박사학위논문, 건국대학교.
- Brun, S. E. and Band, L. E. (2000). Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, **24**(1), pp. 5-22.
- Chanasyk, D. S., Mapfumo, E., and Willms, W. (2003). Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agricultural Water Management*, **59**, pp. 137-153.
- Choi, W. and Deal, B. M. (2008). Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA). *Journal of Environmental Management*, **88**(4), pp. 1119-1130.
- Cho, J., Barone, V. A., and Mostaghimi, S. (2008). Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed. *Agricultural Water Management*, (In Press), Available online 23 August 2008.
- Doherty, J. (2005). PEST: Model Independent Parameter Estimation. fifth edition of user manual. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- Doherty, J. and Skahill, B. E. (2006). An advanced regularization methodology for use in watershed model calibration. *Journal of Hydrology*, **327**, pp. 564-577.
- Donigian, Jr. A. S., Chinnaswamy, R. V., and Jobes, T. H., (1997). Conceptual Design of Multipurpose Detention Facilities for Flood Protection and Nonpoint Source Pollution Control. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California, USA.
- Donigian, Jr. A. S. (2002). Watershed model calibration and validation: The HSPF Experience. *WEF Speciality Conference Proceedings*. November 13-16, 2002. Phoenix, AZ. WEF National TMDL Science and Policy 2002.
- Gaza, M. and McCray, J. E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, **88**, pp. 393-406.
- Hunter, H. M. and Walton, R. S. (2008). Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Hydrology*, **356**(1-2), pp. 131-146.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Donigian, Jr., A. S., and Jung, K. W. (2007). Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agricultural Water Management*, **90**, pp. 75-86.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., and Jung, K. W. (2006). Evaluation of BASINS/WinHSPF applicability for pollutant loading estimation for a Korean watershed. *Water Science and Technology*, **53**(1), pp. 25-32.
- Jewell, T. K., Nunno, T. J., and Adrian, D. D. (1978). Methodology for calibrating stormwater models. *Journal of the Environmental Engineering Division*, **104**, pp. 485.
- Jung, K. W. (2007). Development of 3D Intergrated Water Quality Simulation System by Applying Basins/WinHSPF And EFDC in Han River Basin and Paldang Reservoir. Ph.D. Dissertation, Konkuk University, Korea.
- Kim, S. M., Benham, B. L., Brannan K. M., Zeckoski, R. W., and Doherty, J. (2007). Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water Resource Research*, **42**(11), pp. 1561-1570.
- Luo, B., Li, J. B., Huang, G. H., and Li, H. J. (2006). A simulation-based interval two-stage stochastic model for agricultural nonpoint source pollution control through land retirement. *Science of The Total Environment*, **361**(1-3), pp. 38-56.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, pp. 282-290.
- Ribarova, I., Ninov, P., and Cooper, D. (2008). Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria. *Ecological Modelling*, **211**(1-2), pp. 241-246.
- Sheomaker, L., Lahlou, M., Bryer, M., Kumar, D., and Kratt, K. (1997). *Compendium of tool for watershed assessment and TMDL development*. EPA841-B-97-006. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA.
- Skahill, B. E. and Doherty, J. (2006). Efficient accommodation of local minima in watershed model calibration. *Journal of Hydrology*, **329**, pp. 122-139.