

## 환경부 8일 간격 유량·수질 관측자료와 분포형 모형을 이용한 연속오염부하곡선의 유도

김철겸<sup>†</sup>·김남원

한국건설기술연구원 수문연구실

### Derivation of Continuous Pollutant Loadograph using Distributed Model with 8-Day Measured Flow and Water Quality Data of MOE

Chul-Gyum Kim<sup>†</sup> · Nam-Won Kim

Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(Received 18 November 2008, Revised 12 January 2009, Accepted 14 January 2009)

#### Abstract

Reliable long-term flows by SWAT-K model were applied to the relationship between stream flow and pollutant load derived from 8-day measured data of Ministry of Environment (MOE) in order to obtain continuous loadograph and evaluate accuracy in water quality modeling for the Chungju dam watershed. The measured flow were compared with flow duration curve from the model, and it showed that measured values corresponded to the almost full range of stream flow conditions except at Odae A. And there was significant relationship ( $R^2=0.60\sim0.97$ ) between measured flow and water quality load at all unit-watersheds. Applying this relationship to simulated flows, continuous loadograph was obtained and compared with modeled pollutant loads. Although there were some differences during some dry and flood seasons, those were not significant and overall trend showed a good agreement. From the results, we would be able to derive a continuous loadograph based on measured data at total maximum daily loads (TMDLs) unit-watersheds on a national scale, in which stream flow and water quality have been measured at 8-day intervals since 2004, and this could be helpful to utilize distributed water quality models with difficulty in calibrating and validating parameters from lack of measured data at present.

**keywords** : Chungju dam, Distributed model, Flow duration curve, Pollutant loadograph, SWAT-K, Total maximum daily loads (TMDLs)

### 1. 서론

하천 또는 유역의 유량과 수질의 해석에 있어서 과거에는 단위유역별로 동일한 입력자료 및 매개변수로 구성된 단순 경험식이나 총괄형 모형을 많이 사용하였으나, 최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 함께 복잡하고 다양한 시공간적인 특성을 고려할 수 있는 공간분포형 모의 모형들이 많이 활용되고 있다. 이러한 분포형 모형들은 유역의 복잡한 특성을 고려할 수 있고, 유역내 유출 및 수질오염현상을 시공간적으로 나타내어 다각도의 해석과 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 다른 한편으로는 모형에서 요구하는 시공간적인 입력자료 및 매개변수에 대한 구축이 충분하지 않거나, 모의 결과를 검증할 수 있는 충분한 모니터링 자료가 없는 경우 모의 결과의 신뢰성을 장담할 수 없는 한계가 있다.

특히나, 국내의 경우 유량에 대해서는 주요 지점에 대한 수위관측망의 구성과 유량측정 등 지속적인 유지관리를 통

해 어느 정도 장기간의 자료를 확보하고 있지만, 수질에 대해서는 비교적 최근에 와서야 지속적인 모니터링이 수행되고 있을 뿐, 축적된 자료량이 충분하지 못하고 대부분 단기간의 연구를 목적으로 수행된 소유역 규모의 대상지역에 대한 강우시 또는 비강우시의 한시적인 자료들이 전부이다.

기존의 여러 연구들에서(나은혜와 박석순, 2003; 박경훈, 2003; 서동일 등, 2004; 유병로 등, 2004; 이은형과 서동일, 2002; 전경수와 강주환, 2004; 전계원과 안상진, 2004; 정상만 등, 2004; 최형섭 등, 2003) 환경부에서 월 1~4회 정도 비연속적으로 관측되고 있는 수질자료들이 모형 결과와의 비교에 많이 활용되어 왔으나, 동일지점이라도 관측일에 따라서 그리고 시간에 따라서 심지어 수심에 따라서 달라지는 수질 특성상 매우 많은 변동성을 내포하고 있기 때문에 이러한 자료를 월평균이나 관측일의 평균값으로 해석하여 적용하기에는 많은 무리가 있을 수 있다. 모형 매개변수 추정을 위해 사용되는 경우에도 관측값과의 오차범위가 크게 작용하여 정확한 값을 추정하는데 쉽지 않으며, 환경부 월 1~4회 자료의 대부분은 농도만 측정되고 있어 유량

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cgkim@kict.re.kr

에 기반한 수질부하량의 산정에는 적합하지 못한 한계가 있다.

최근에 환경부에서는 2004년 낙동강수계를 시작으로 금강, 영산강, 섬진강 및 한강수계 일부지역에 대한 오염총량제의 시행과 함께 오염총량관리 단위유역 출구점별로 8일 간격의 유량 및 수질에 대한 동시 측정을 통해 연중 많은 자료를 확보하고 있다. 하지만, 8일 간격 자료 또한 관측일에 대한 일평균값이 아닌 관측 당시의 유량과 수질농도를 측정된 값이기에 모형의 보정 및 검증에서 직접 일자료와 비교하기에는 많은 변동성을 내포하고 있다. 8일 자료의 활용 측면에서 보면, 한수희 등(2007a)이 비편향 회귀분석 모형을 이용한 관측 수질과 부하량 사이의 관계 해석을 통해 낙동강 본류에 대한 향상된 부유사량 산정방법을 제시한 바 있으며, 김상단 등(2007)과 김재철과 김상단(2007)은 낙동강 유역의 8일 관측자료를 1일 자료로 확장하여 TANK 모형의 유량에 대한 모의 결과와 비교한 바 있고, 한수희 등(2007b)은 8일 관측자료로부터 얻어진 수질-부하량 관계를 수정 TANK 모형의 일 유량에 적용하여 유량 및 부하량에 대한 유황곡선을 유도하여 낙동강수계의 각 단위유역별 목표 수질 달성에 대한 평가를 수행한 바 있다. 그러나, 최근 유역내 시공간적인 유량 및 수질 해석을 목적으로 많이 이용되고 있는 분포형 모형의 보정 및 검증에 8일 자료를 활용한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 한강수계내 충주댐 유역을 대상으로 8일 관측자료를 이용하여 유량-부하량 사이의 관계로부터 연속적인 오염부하곡선을 유도하고, 이로부터 공간분포형 유역수질모형의 모의 결과와 비교·평가함으로써, 8일 간격 유량·수질자료의 활용성을 제고시키고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. SWAT-K 모형 구축

대상유역에 대한 장기간의 공간분포형 유량의 모의와 8일 관측자료의 대표성 검증을 위해 유역수질모형을 활용하고자 하며, 적정 모형으로서 이미 기존 연구들에서 적용성과 모의 결과의 정확성이 검증된 SWAT-K를 이용하고자 한다. 이 모형은 미국 USDA ARS에서 개발된 준분포형 모형인 SWAT(Arnold et al., 1998)을 기반으로, 인위적·자연적인 물순환구조 변화와 지표수-지하수 연계해석, 국내 산림지역·농업지역·도시지역·하천에서의 물순환해석을 개선하여 강우·증발산·토양수분·지표수·지하수 등의 시공간적 분포를 정량적으로 산정할 수 있으며, 유출 해석의 정확성은 물론, 유사 및 비점오염물질의 모의 신뢰성을 제고시킨 한국형 장기유출·수질모형이다(한국건설기술연구원, 2007).

충주댐 유역에 대한 SWAT 및 SWAT-K의 적용 사례로서 김남원 등(2006)은 모형내 용설 관련 매개변수의 검토를 통해 용설 효과를 분석하였으며, 김철겸 등(2007)은 유사 발생의 시공간적인 특성을 검토하였고, 김철겸과 김남원(2008)은 오염원에 따른 유사 및 질소와 인의 발생 특성에

대해 분석한 바 있다. 또한 김남원 등(2007b)은 비선형 저류방정식에 입각한 일 단위 하도추적법을 개발하여 SWAT-K를 개선하고 이에 대한 효과를 충주댐 유역을 대상으로 검증하였으며, 김남원 등(2007c)은 충주댐 유역의 모의유량 및 관측유량 자료를 이용하여 한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황변동 특성을 검토한 바 있다. 이밖에 충주댐 상류의 수위관측소 지점에 대한 관측유량자료의 검증과 모형으로부터의 모의유량자료를 이용한 갈수량의 거동 특성을 검토한 연구(김남원 등, 2007a)와, 빈도해석개념을 이용하여 충주댐 유역에 대해 지하수 개발가능량을 평가한 연구(이정은 등, 2008)도 수행되었다.

충주댐 상류의 총 유역면적은 6,648 km<sup>2</sup>이고, 모형의 적용을 위해 김철겸 등(2007)을 비롯한 기존 연구들에서 구축한 DEM·토양도·토지이용도 등의 GIS 입력자료들을 활용하였으며, 환경부 8일 간격 관측자료와의 비교를 위해 Fig. 1과 같이 오염총량관리 단위유역의 수질측정망을 기준으로 9개 소유역으로 구분하였다. 또한 유량 및 증발산량 산정에 필요한 강우량과 기상자료들은 국토해양부와 기상청 관할 관측소들의 자료를 면적평균하여 각 소유역별 입력자료로 구축하였다.

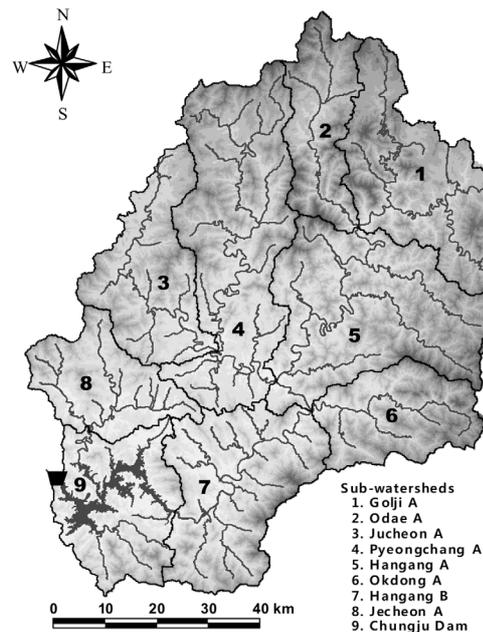


Fig. 1. Sub-watersheds of the study area.

### 2.2. 유량 보정 및 검증

SWAT-K와 같은 공간적인 매개변수 및 입력자료를 기반으로 하는 모형에 대한 보정은 상류로부터의 소유역별 관측자료를 토대로 순차적으로 보정을 수행하는 것이 바람직하나, 기존의 김남원 등(2007a)의 연구에서도 언급한 바와 같이 충주댐 유역의 경우 상류 수위관측소에서 양질의 관측유량자료가 충분하지 않고, 또한 환경부에서 측정하고 있는 8일 간격 유량 또한 일 대표값이 아니고 그 자료수도 충분하지 못하기 때문에, 부득이 비교적 신뢰성이 높은 충주댐의 유입량 자료를 활용하여 보정 및 검증을 수행하였다.

보정 방법에는 여러 방법이 있으나, 비교적 간단한 방법인 시행착오법에 의해 각 매개변수의 민감도 분석 결과를 토대로 단계별 매개변수 변화에 따라 보정을 수행하였다. 효율적인 분석을 위해 총 분석기간(1990~2005년) 중 1990~1997년의 관측유량자료는 보정에 이용하고, 나머지 1998년 이후 자료에 대해서는 검증에 이용하였다. 보정과정은 김남원 등(2007a)의 연구에서 언급한 것처럼 토양증발보상계수(ESCO)를 이용하여 연평균 모의유량과 관측유량과의 상대오차가 5% 이내가 되도록 하였으며, 측방흐름과 관련된 경사길이(SLSOIL), 감수상수(ALPHA\_BF)와 지하수 흐름과 관련된 지체시간(GW\_DELAY)를 조정하여 갈수시의 유량 보정을 수행하였다. 또한 김남원 등(2007b)이 개발한 비선형 저류방정식에 입각한 일 단위 하도추적법을 적용하여 강우시 첨두유량을 기존 SWAT에 비해 관측치에 근접하도록 개선하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 보정 및 검증기간 중 일부기간에 대한 관측 및 모의 일유량의 비교 결과이다. 2003년 이후로 갑자기 최저 관측유량이 10 m<sup>3</sup>/sec 이하로 떨어지면서

모의값과 차이를 보이는 있는데, 이는 김남원 등(2006, 2007a)의 연구결과에서도 언급된 바 있으며 관측치의 이상일 가능성이 높은 것으로 추정된다. 이를 제외하면 전반적인 경향이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 일부 홍수기나 갈수기에 약간의 차이가 나타나기도 하지만, SWAT-K 모형을 통해 단기간의 유량이나 유사량 및 오염부하량을 모의할 목적이 아니기 때문에 모형 적용상 그리고 결과의 분석상 큰 문제는 없을 것으로 생각된다.

Table 1에 제시한 바와 같이 보정 및 검증 결과에 대해 결정계수(coefficient of determination, R<sup>2</sup>), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 상대평균절대오차(relative mean absolute error, RMAE), Nash-Sutcliffe 모형효율지수(model efficient, ME)(Nash and Sutcliffe, 1970) 등의 통계량 산정을 통해 검토한 결과, 전체적으로 높은 정확성을 확인할 수 있었다.

월 유량에 대한 결과도 Fig. 4와 같이 모의기간 전체에 대해 양호하게 나타났으며, 결정계수 0.95, 모형효율지수 0.93으로서, 모형으로부터 대상유역에 대한 신뢰성 높은 유량자료를 모의할 수 있는 것으로 판단된다.

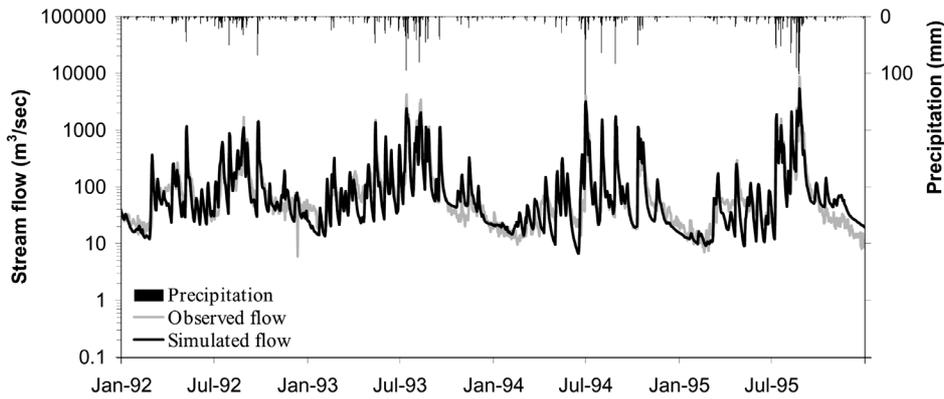


Fig. 2. Observed and simulated flow at Chungju dam (calibration).

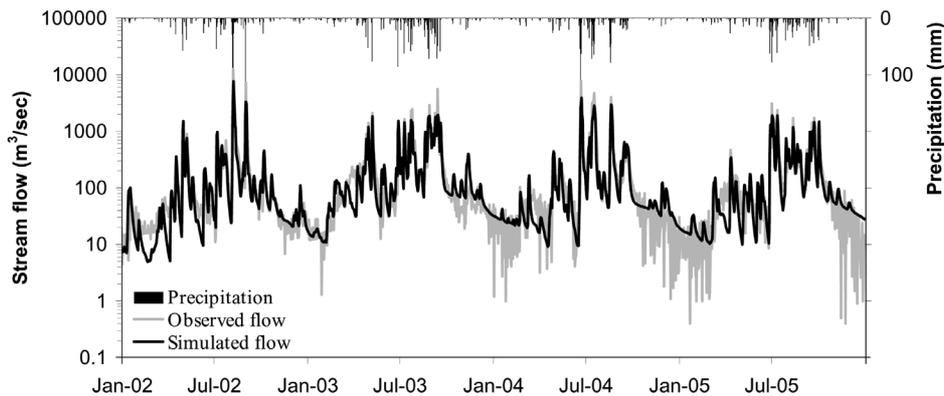


Fig. 3. Observed and simulated flow at Chunju dam (validation).

Table 1. Calibration and validation results for daily stream flow data

Period	Avg. annual precipitation (mm)	Avg. annual flow (mm)		R <sup>2</sup>	MAE (mm)	RMAE	ME	Remark
		Observed	Simulated					
1990~1997	1,253	739	758	0.77	0.92	0.45	0.76	Calibration
1998~2005	1,365	880	853	0.76	1.01	0.42	0.74	Validation

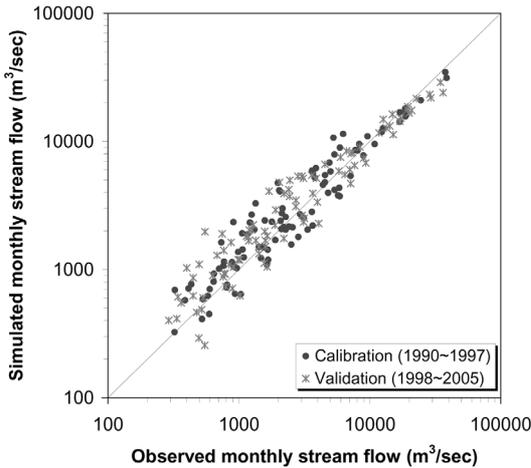


Fig. 4. Observed and simulated monthly flows.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 관측자료의 대표성 평가

환경부에서 2004년부터 관측하고 있는 8일 간격 유량자

료의 대표성을 파악하기 위해 Fig. 5~7과 같이 SWAT-K 모형에 의한 모의유량으로부터 도출된 각 지점별 유황곡선과 8일 간격 관측자료를 비교해 보았다. 유황곡선은 앞서 기술한 모형의 유량 보정 및 검증에 의한 신뢰성을 바탕으로 1990년부터 2005년까지 16년간 모의유량을 이용하여 도출하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 골지A와 한강B 지점에 대한 유황곡선 및 8일 간격 관측유량을 나타낸 것으로서, 그림 안의 'wet', 'normal', 'low', 'drought'로 표기된 값은 각각 유황분석상의 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량을 의미한다. 그림으로부터 두 지점 모두 관측유량이 갈수기 이하부터 풍수기 이상까지 전 유황조건에 대해 부합하고 있음을 알 수 있다. 즉, 8일 간격 관측자료가 해당 지점에서 나타날 수 있는 다양한 유황조건을 반영할 수 있음을 의미한다.

나머지 지점들도 오대A 지점을 제외하고는 전 유황조건에 대해 관측자료가 부합하는 것을 파악하였으며, 오대A 지점은 Fig. 7과 같이 주로 평수량 이상에서 관측되고 있음을 알 수 있었다. 오대A 지점의 경우 8일 관측유량을 검토해 본 결과 주로 최상류 유역이어서 다른 지점들에 비해

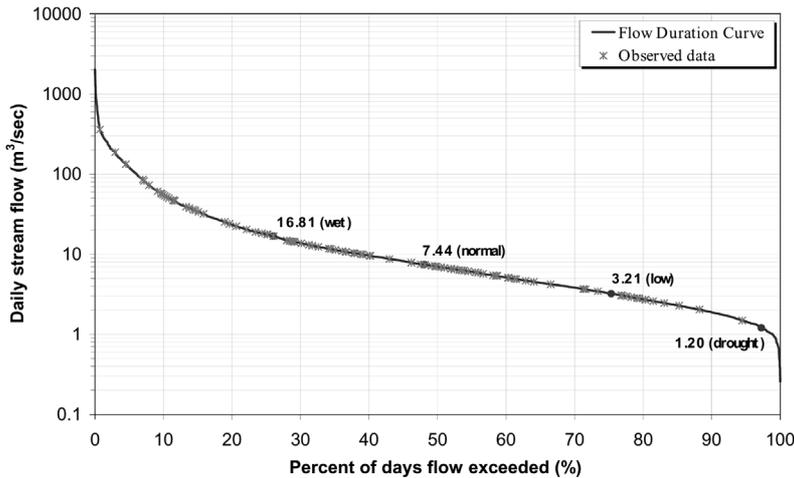


Fig. 5. Flow duration curve and observed stream flow data at Golji A.

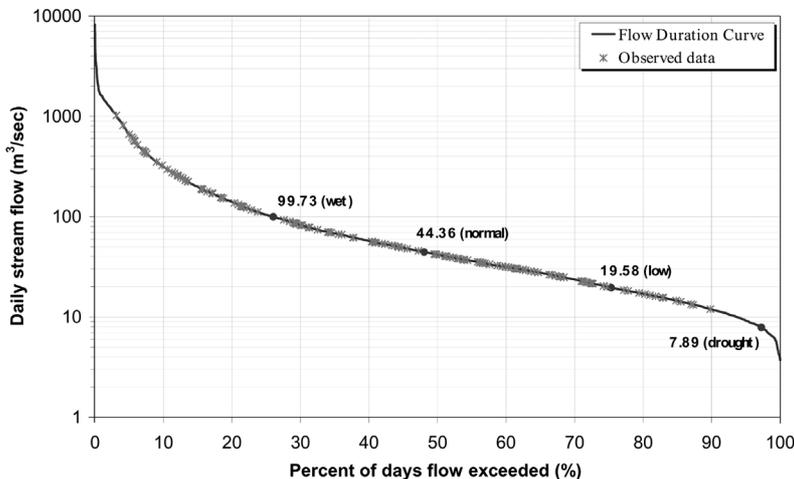


Fig. 6. Flow duration curve and observed stream flow data at Hangang B.

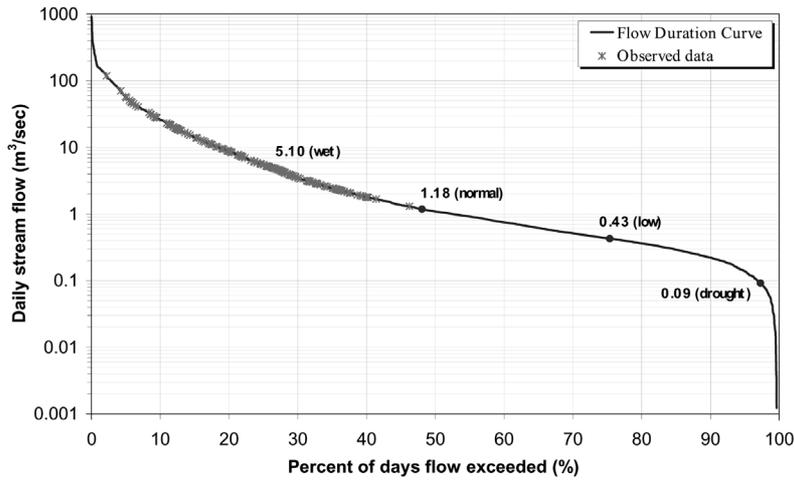


Fig. 7. Flow duration curve and observed stream flow data at Odae A.

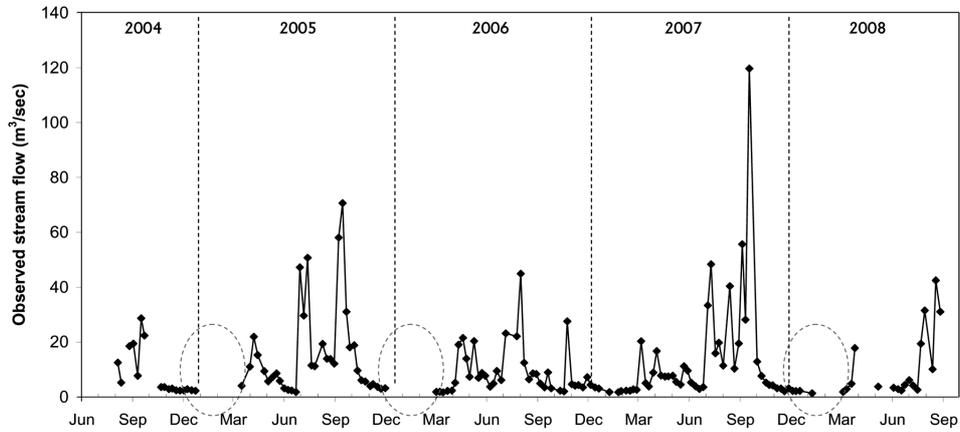


Fig. 8. Observed 8-day observed stream flow at Odae A.

유량이 작으며, Fig. 8에 나타난 바와 같이 갈수기에 속하는 겨울철(12~2월) 기간 동안의 관측이 많지 않음을 확인할 수 있었다.

3.2. 관측자료에 의한 유량-부하량 관계

Fig. 9와 Fig. 10은 2004년부터 환경부에서 관측해오

있는 8일 간격 유량 및 수질 자료를 이용하여 각 지점별로 유량과 수질부하량간의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9는 대상유역의 최상류인 골지A 지점에서의 관계이며, Fig. 10은 비교적 하류측인 한강B 지점에서의 관계를 나타낸 것이다. 8일 간격 관측자료가 없는 최하류 지점인 충주댐을 제외하고 Fig. 9~10과 같은 유량과 수질부하량간의 관계를 분석

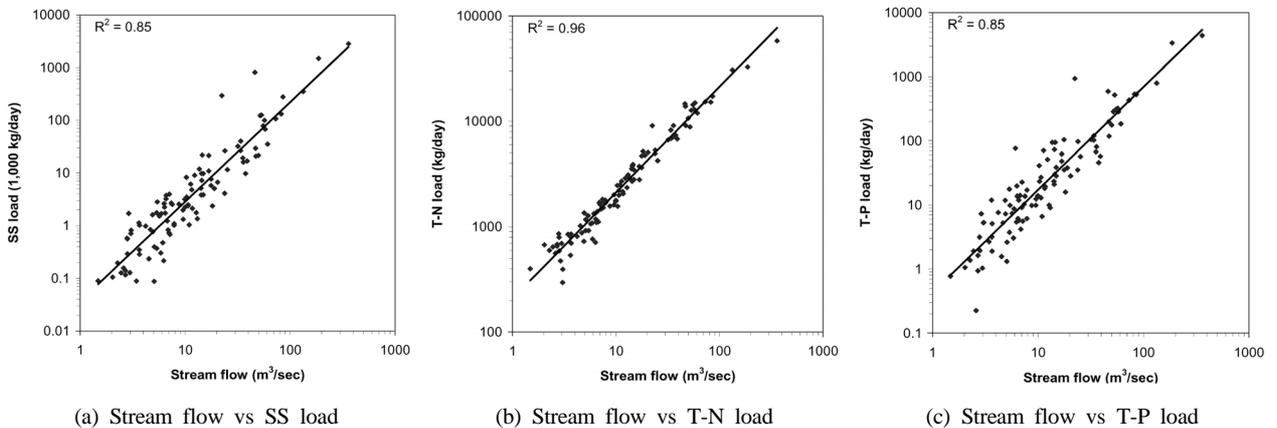


Fig. 9. Relationship between stream flows and pollutant loads at Golji A.

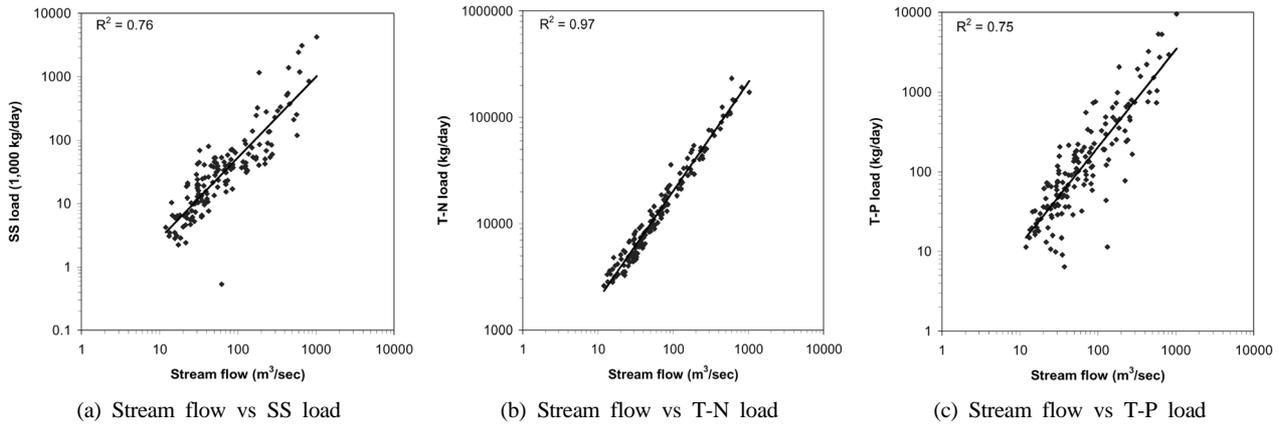


Fig. 10. Relationship between stream flows and pollutant loads at Hangang B.

Table 2. Regression equation between stream flows and pollutant loads

Sub-watershed	Item	Regression equation	R <sup>2</sup>
1. Golji A	SS	$L_S = 0.0368 Q^{1.8885}$	0.85
	T-N	$L_N = 207.92 Q^{1.0053}$	0.96
	T-P	$L_P = 0.4242 Q^{1.6058}$	0.85
2. Odae A	SS	$L_S = 0.1798 Q^{1.662}$	0.60
	T-N	$L_N = 299.89 Q^{0.9250}$	0.94
	T-P	$L_P = 1.6933 Q^{1.378}$	0.62
3. Jucheon A	SS	$L_S = 0.0668 Q^{1.7083}$	0.83
	T-N	$L_N = 269.65 Q^{0.9404}$	0.96
	T-P	$L_P = 0.4853 Q^{1.5002}$	0.84
4. Pyeongchang A	SS	$L_S = 0.0201 Q^{1.9203}$	0.85
	T-N	$L_N = 278.16 Q^{0.9785}$	0.96
	T-P	$L_P = 0.2642 Q^{1.5654}$	0.84
5. Hangang A	SS	$L_S = 0.0124 Q^{1.8404}$	0.86
	T-N	$L_N = 227.44 Q^{1.0007}$	0.97
	T-P	$L_P = 0.1407 Q^{1.5821}$	0.82
6. Okdong A	SS	$L_S = 0.0629 Q^{1.399}$	0.81
	T-N	$L_N = 141.24 Q^{0.9833}$	0.97
	T-P	$L_P = 0.8189 Q^{1.1104}$	0.75
7. Hangang B	SS	$L_S = 0.149 Q^{1.2748}$	0.76
	T-N	$L_N = 183.37 Q^{1.0226}$	0.97
	T-P	$L_P = 0.71 Q^{1.2274}$	0.75
8. Jecheon A	SS	$L_S = 0.1545 Q^{1.551}$	0.75
	T-N	$L_N = 484.76 Q^{0.833}$	0.88
	T-P	$L_P = 26.812 Q^{0.6518}$	0.64

Q : daily stream flow (m<sup>3</sup>/sec)  
 L<sub>S</sub> : SS load (1,000 kg/day)  
 L<sub>N</sub> : T-N load (kg/day)  
 L<sub>P</sub> : T-P load (kg/day)

하였고, Table 2에 나타난 바와 같이 유도된 관계식들에서 결정계수(R<sup>2</sup>) 0.60~0.97의 상관성 높은 관계를 얻었으며, F-검정 결과에 의한 Significance F가 모두 0.05보다 작은 값을 보임에 따라, 유도된 모든 회귀식은 유의수준 5% 이내

(즉, 신뢰수준 95% 이상)에서 적합한 것으로 나타났다.

### 3.3. 연속오염부하곡선 유도 및 모의 수질 평가

도출된 Table 2의 유량-부하량 관계를 이용하여 유량자료

로부터 각 수질항목별 부하량을 산정하여 연속오염부하곡선을 구하였다. 유량은 앞서 기술한 바와 같이 충주댐 지점을 제외한 상류지역의 관측유량자료가 충분하지 못하고 신뢰성에 문제가 있어, 2.2절의 유량 보정 및 검증 과정을 통해 일유량 및 월유량 산정에 있어 충분히 신뢰성이 확보된 SWAT-K 모의유량자료를 이용하였다. 다만, 관측자료의 대표성 검증에서 나타난 바와 같이 오대A 지점의 경우는 주로 평수기 이상에 대한 관측만 수행되어왔기 때문에 평수기 이하의 유량에 대한 부하량을 산정시에는 주의가 요구되며, 나머지 지점들에 대해서는 유량-부하량 관계가 특정 유황조건에서 도출된 것이 아니기 때문에 모든 유량에

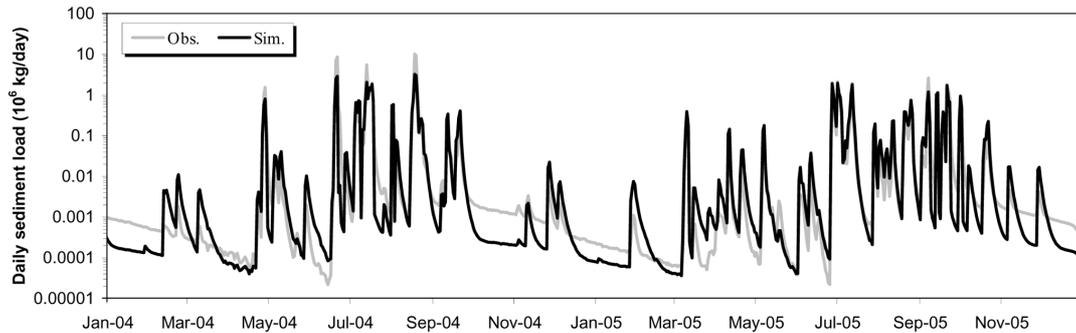
대해 적용할 수 있다고 판단된다.

편의상 유량-부하량 관계로부터 도출된 부하곡선을 관측치라 가정하고, 이를 기반으로 SWAT-K 모형으로부터 모의되는 유사량과 오염부하량을 보정하였다. 보정 과정은 앞선 2.2절의 유량 보정 결과를 바탕으로, 유사 관련 매개변수를 보정하고, 이후 다시 오염물질(질소와 인)과 관련된 매개변수를 순차적으로 보정하였다. 모형내 유사량 모의는 크게 유역에서 발생하는 유사량과 이것이 하천을 통해 운송되는 과정에서 침식과 퇴적을 통해 가감되는 유사량으로 구분되어 이루어지고 있으며(김철겸 등, 2007), 이를 고려하여 관련된 매개변수를 보정하였다. 또한 임경재 등(2007)

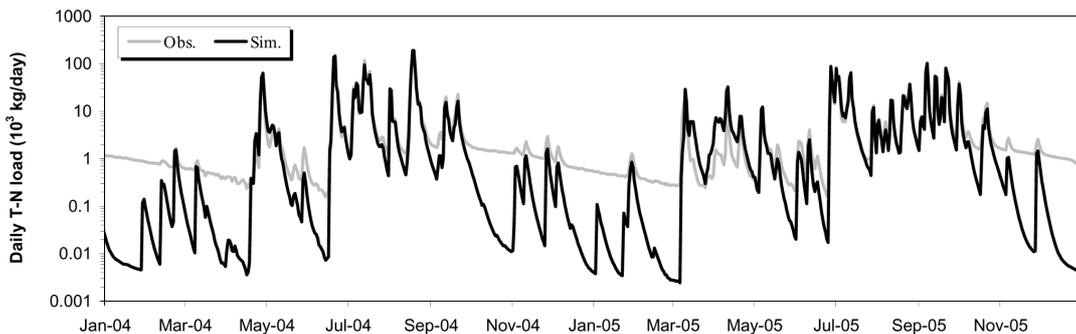
**Table 3.** Parameters calibrated for sediment and N, P in this study

Input File	Parameter	Definition	Range
crop.dat	USLE_C	Minimum value of USLE_C factor for water erosion applicable to the land cover/plant (0.013 metric ton · m <sup>2</sup> · hr/(m <sup>3</sup> · metric ton · cm))	0.001~0.5
.bsn	SPCON	Coefficient in sediment transport equation	0~0.01
.bsn	SPEXP	Exponent in sediment transport equation	1~15
.bsn	PRF	Peak rate adjustment factor	0~1
.bsn	PHOSKD	Phosphorus soil partitioning coefficient (m <sup>3</sup> /Mg)	100~200
.rte	CH_EROD	Channel erodibility factor (cm/hr/Pa)	-0.05~0.6
.rte	CH_COV	Channel cover factor	-0.001~1
.hru	SLSUBBSN	slope length (m)	10~150
.hru	ERORGP	Phosphorus enrichment ratio	0~3.5
.chm	SOL_ORGN	Initial humic organic nitrogen in soil layer (mg/kg)	0~10000
.chm	SOL_NO <sub>3</sub>	Initial NO <sub>3</sub> concentration in soil layer (mg/kg)	0~5
.chm	SOL_ORGP	Initial humic organic phosphorus in soil layer (mg/kg)	0~4000
.chm	SOL_LABP	Initial soluble P concentration in soil layer (mg/kg)	0~100

Source: Neitsch et al. (2001)



(a) Sediment load



(b) T-N load

**Fig. 11.** Pollutant loadograph at Golji A.

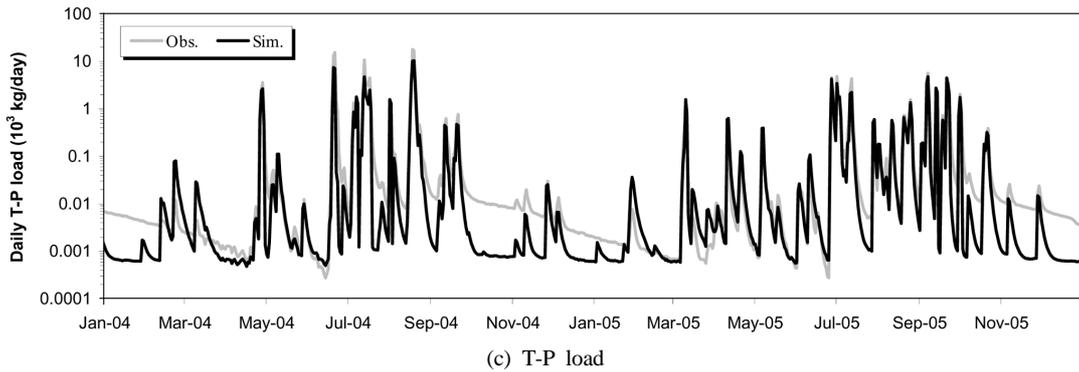


Fig. 11. Pollutant loadograph at Golji A (continued).

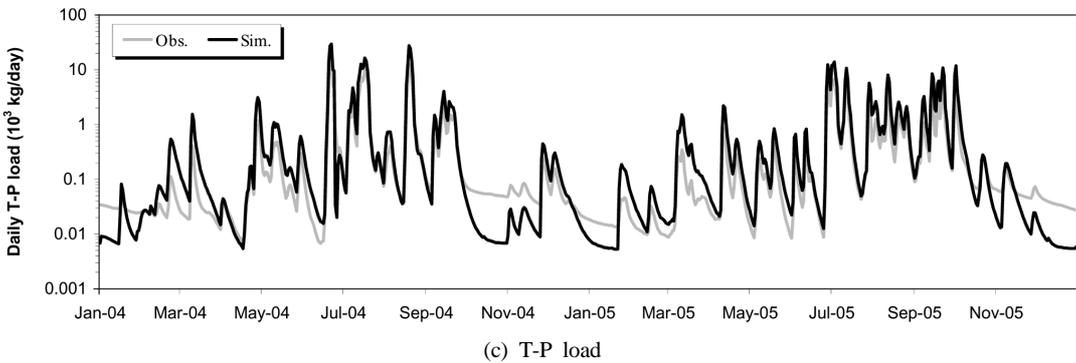
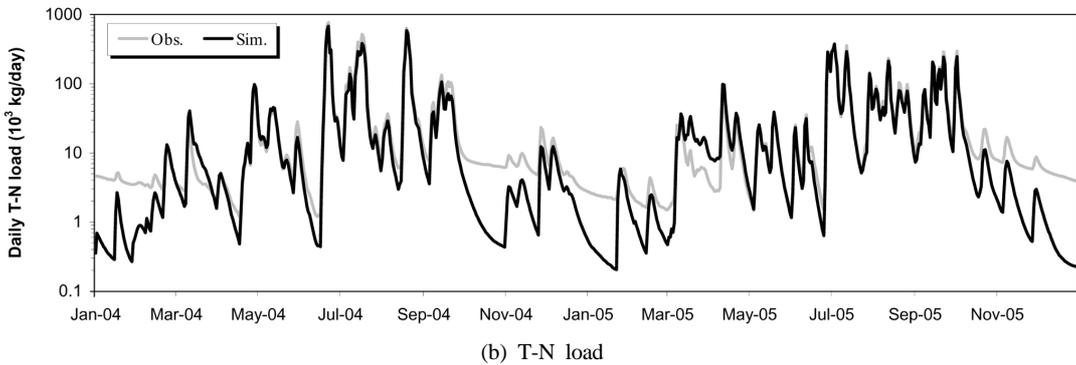
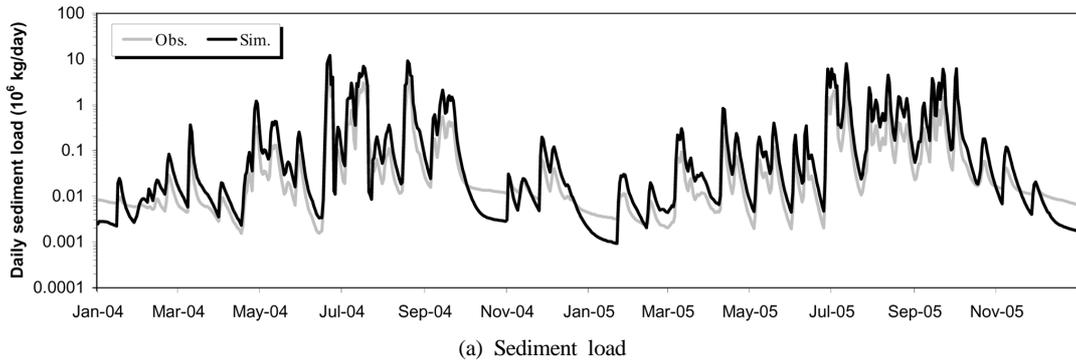


Fig. 12. Pollutant loadograph at Hangang B.

이 개발한 경사장과 경사도 관계를 수정한 패치를 적용함으로써, 소유역 분할에 따른 모의 결과의 오류 원인을 제거하였다. 질소와 인에 대한 모의를 위해 김철겸과 김남원 (2008)의 연구와 같이 각 소유역별 환경기초시설에서 배출되는 점오염원 양을 고려하였으며, 초기 토양내 질소 및 인

의 농도, 인 농축비 등을 조정하여 연간 오염부하량 및 오염부하곡선의 형태 등을 관측치에 근접하도록 보정하였다.

Table 3은 유사 및 오염물질의 보정에 사용된 매개변수를 나타낸 것이다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 골지A 지점과 한강B 지점에서

**Table 4.** Averaged annual load and statistical criteria for daily loads

Sub-watershed	Item	Avg. annual load <sup>1)</sup>		R <sup>2</sup>	MAE <sup>2)</sup>	RMAE	ME
		Obs.	Sim.				
1. Golji A	Sediment	52	30	0.84	0.09	0.63	0.41
	T-N	2,118	2,359	0.91	2.19	0.38	0.84
	T-P	106	80	0.88	0.14	0.47	0.68
2. Odae A	Sediment	18	14	0.88	0.02	0.48	0.66
	T-N	942	795	0.88	1.03	0.40	0.87
	T-P	40	17	0.92	0.07	0.61	0.56
3. Jucheon A	Sediment	11	15	0.84	0.02	0.69	0.79
	T-N	1,367	1,353	0.90	1.68	0.45	0.67
	T-P	28	49	0.83	0.07	0.93	0.71
4. Pyeongchang A	Sediment	78	56	0.71	0.12	0.56	0.41
	T-N	4,487	3,590	0.95	3.75	0.31	0.94
	T-P	111	135	0.90	0.13	0.45	0.88
5. Hangang A	Sediment	115	135	0.69	0.23	0.72	0.58
	T-N	9,340	8,959	0.93	8.80	0.34	0.90
	T-P	219	302	0.87	0.34	0.57	0.86
6. Okdong A	Sediment	2	3	0.25	0.01	1.39	<b>0.23</b>
	T-N	599	738	0.89	0.68	0.42	0.84
	T-P	6	15	0.91	0.03	1.57	<b>-4.19</b>
7. Hangang B	Sediment	45	140	0.94	0.26	2.14	<b>-3.00</b>
	T-N	11,071	11,103	0.95	7.49	0.25	0.95
	T-P	157	362	0.98	0.57	1.34	<b>-1.18</b>
8. Jecheon A	Sediment	6	9	0.92	0.01	0.74	0.92
	T-N	1,269	950	0.90	1.95	0.56	0.46
	T-P	42	33	0.75	0.12	1.08	<b>-9.44</b>

1) unit: 10<sup>6</sup> kg/yr for sediment and 10<sup>3</sup> kg/yr for T-N and T-P

2) unit: 10<sup>6</sup> kg/day for sediment and 10<sup>3</sup> kg/day for T-N and T-P

의 항목별 오염부하곡선을 나타낸 것이며, 두 지점 모두 겨울철을 중심으로 한 갈수시에 다소 차이를 보이고 있으나 그 양이 크지 않고 비점오염 부하량이 많이 발생하는 강우 시에는 변화 경향 및 부하곡선이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Table 4는 1990~2005년에 대해 유량-부하량 관계로부터 유도된 오염부하량과 모형에 의한 오염부하량의 연평균값, 그리고 일별 오염부하량에 대한 통계치를 산정한 결과이다. 연간 부하량의 비교에서는 전반적으로 T-N의 부하량이 매우 잘 일치하고 있으며, 유사와 T-P의 부하량도 다소 차이가 있긴 하지만, 경험적인 매개변수와 복잡한 프로세스를 통해 모의되는 모델링의 특성과 같은 날 같은 지점이라도 샘플링 시간, 방법, 수심 등에 따라 변화가 큰 관측 수질의 특성을 고려할 때 충분히 수용가능한 차이로 판단된다. 다만, 다른 지점들에 비해 한강B 지점에서의 차이가 크게 나타난 이유로는 한강B 지점은 충주호 유입부의 장회나루터에 위치한 곳으로서, 상류 유입량보다 하류인 댐 저수량에 따라 영향을 크게 받기 때문에 실제 수량에 비해 유량이 작게 나타날 수 있다. 하지만 모형에서는 댐 영향을 고려하지 못하고 하천수로 인식되기 때문에 상류로부터 유입되는 부하량에 의해 실제보다 많은 부하량이 산정되는 문제가 나타난 것으로 판단된다. 이는 기존의 김철겸 등(2007)의 연구 결과에서도 충주댐 지점에서 관측수질보다 모의수질이 크게 나타난 이유로 언급한 바와 같다. 관측치와 모

의치의 일대일 비교로부터 판단되는 Nash-Sutcliffe 모형효율지수(ME) 또한 일부를 제외하고는 대부분 양호(0.75 이상)나 만족(0.35 이상)을 나타내어(Van Liew and Garbrecht, 2003), 모형을 통한 장기 오염부하량의 산정에 있어 충분한 신뢰성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2004년부터 8일 간격으로 관측되고 있는 유량·수질 자료의 활용성을 제고시키는 측면에서, 충주댐 유역을 대상으로 SWAT-K 모형을 적용하여 신뢰성 있는 장기간의 유량자료를 확보하고, 이를 관측자료의 분석으로부터 얻어진 유량-부하량 관계에 적용함으로써 연속오염부하곡선을 유도하는 한편, 모형에 의한 수질 모의의 신뢰성을 평가하였다.

먼저, 대상유역을 오염총량관리 단위유역 수질측정망을 기준으로 9개 소유역으로 구분하여 SWAT-K 모형을 구축하고 유량에 대한 보정 및 검증을 수행함으로써 일유량 및 월유량 모의에 대한 신뢰성을 확보하였으며, 모형으로 얻어진 유량자료를 기반으로 각 소유역 지점별 유허곡선을 유도하고 이를 8일 간격 관측유량과 비교함으로써 관측자료의 대표성을 검토한 결과, 오대A 지점을 제외하고는 모든 지점에서 관측되고 있는 8일 간격 관측자료가 갈수량 이하

에서 풍수량 이상의 전 유황조건을 고르게 반영하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 관측 유량 및 수질자료를 이용하여 유량과 수질부하량과의 상관성 높은 회귀관계를 도출하였으며, 이를 이용하여 연속오염부하곡선을 유도하고 모형에 의한 부하곡선과 비교한 결과, 일부 갈수기와 홍수기에서 차이가 좁으나 전체적인 변화 경향이 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 모형효율지수 및 평균절대오차 등의 통계량에 의해 판단할 때 장기 오염부하량의 산정에 충분히 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

이상으로부터 2004년 이후 전국적으로 수집되고 있는 각 지점별 8일 간격 유량·수질 자료를 이용하여 관측자료에 기반한 연속오염부하곡선의 도출 뿐 아니라, 기존에 관측자료의 부족으로 인해 많은 어려움을 겪었던 공간분포형 수질모의모형의 보정과 검증에도 많은 도움이 될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 과거로부터 지금까지 일반 실무에서 간편하게 많이 사용되고 있는 여러 경험식이나 TANK 모형에서도 정도 높은 유량만 보장된다면, 본 연구에서 제시한 바와 같은 유량·부하량 사이의 회귀관계를 이용하여 충분히 신뢰성 있는 연속 수질부하량을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

아울러, 8일 간격 자료의 활용성을 제고시키기 위해서는, 각 지점별 유황분석을 통해 오대A 지점과 같이 일부 유황조건에 부합되지 못하는 경우 차후 이를 고려한 관측이 보완 수행되어야 할 것으로 생각되며, 이를 위해서는 무엇보다 시공간적인 정교한 유량을 모의할 수 있는 유역모형이 뒷받침되어야 할 것이다. 또한, 현재 8일 간격 자료 또한 강우시의 침투유량 및 시간별 변화하는 유량과 수질농도의 변화(즉, 부하량의 변화)를 파악하기에는 많은 한계가 있기 때문에, 향후 강우시의 실시간 관측자료의 충분한 확보를 통해, 보다 다양한 유황조건을 고려한 연속오염부하곡선의 유도 및 이에 대한 평가가 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구비(과제번호 2-2-3) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

김남원, 이병주, 이정은(2006). SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가. *한국수자원학회논문집*, **39**(10), pp. 833-844.

김남원, 이병주, 이정은(2007a). 공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, **27**(4B), pp. 431-440.

김남원, 이정우, 이병주, 이정은(2007b). 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법. *대한토목학회논문집*, **27**(5B), pp. 533-542.

김남원, 이정은, 이병주(2007c). 한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황변동 특성 분석 및 평가. *대한토목학회논문*

*집*, **27**(1B), pp. 53-63.

김상단, 강두기, 김문수, 신현석(2007). 유역모형 구축을 위한 8일간격 유량측정자료의 일유량 확장 가능성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 64-71.

김재철, 김상단(2007). 오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 332-338.

김철겸, 김남원(2008). 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 465-472.

김철겸, 이정은, 김남원(2007). 충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성. *한국수자원학회논문집*, **40**(11), pp. 887-898.

나은혜, 박석순(2003). 로그선형모형을 이용한 팔당호 유입지류 수질의 연속성 시뮬레이션과 경향 분석. *한국육수학회지*, **36**(3), pp. 336-343.

박경훈(2003). 금호강 유역의 환경특성이 하천수질에 미치는 영향. *한국지리정보학회지*, **6**(4), pp. 85-98.

서동일, 이종현, 이은형, 고익환(2004). QUAL2E를 이용한 금강 하류의 수질 모델링 및 오차 원인 분석. *대한환경공학회지*, **26**(8), pp. 933-940.

유병로, 정승권, 전계원(2004). 공간정보를 이용한 분포형 유역 수질 모의. *한국수자원학회논문집*, **37**(11), pp. 897-913.

이은형, 서동일(2002). 용담댐의 영향분석을 위한 금강의 수질 모델링. *한국수자원학회논문집*, **35**(5), pp. 525-539.

이정은, 김남원, 정일문, 이정우(2008). 유역수문모형과 빈도 해석을 이용한 충주댐 상류유역 지하수 개발가능량의 평가. *자원환경지질*, **41**(4), pp. 443-451.

임재태, 허성구, 박윤식, 김중건, 박준호, 최대현, 강현우(2007). SWAT ArcView GIS Extension Patch 개발. 강원대학교 농업공학부 GIS 환경시스템 연구실, No. 0708, <http://www.EnvSys.co.kr/~swat>.

전경수, 강주환(2004). 하천 수질모형에 의한 비점 오염 부하량과 모형 매개변수의 동시 추정. *한국수자원학회논문집*, **37**(12), pp. 1009-1018.

전계원, 안상진(2004). Web기반 홍수유출 및 수질예측 시스템의 개발: 1. 모형의 구축. *대한토목학회논문집*, **24**(4B), pp. 321-331.

정상만, 박정규, 박영기, 김이현(2004). 모형을 이용한 미호천 유역의 하천수질 예측. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(3), pp. 223-230.

최형섭, 조인철, 변종환, 문병현, 허종수(2003). 합천호 수질 및 영양단계에 대한 평가. *한국환경농학회지*, **22**(1), pp. 1-6.

한국건설기술연구원(2007). *수자원의지속적확보기술개발사업: 지표수 수문성분 해석시스템 개발*. 과학기술부.

한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단(2007a). 비편향 회귀분석모형을 이용한 낙동강 본류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(2), pp. 251-259.

한수희, 신현석, 김상단(2007b). 낙동강 유역관리를 위한 부하량 유황곡선의 적용 가능성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 620-627.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrological modelling and assessment, Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, **34**(1), pp. 73-89.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I-A: Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool; The theoretical documentation (Version 2000)*, U.S. Agricultural Research Service.

Van Liew, M. W. and Garbrecht, J. (2003). Hydrologic simulation of the Little Washita river experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, **39**(2), pp. 413-426.