

## 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성

김철겸<sup>†</sup> · 김남원

한국건설기술연구원 수문연구실

### Characteristics of Pollutant Loads according to Types of Sources for the Chungju Dam Watershed

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

Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(Received 28 May 2008, Accepted 3 July 2008)

#### Abstract

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was selected as a tool for assessing the effect of pollutant sources on the total loads from the Chungju Dam upstream watershed. The model was constructed through calibration of parameters related to nitrogen (N) and phosphorus (P), which was based on the runoff and sediment modeling performed in the previous research. Using this, the spatial and temporal pollutant loadings by source type were investigated. Results of this study indicated that in most forested upstream sub-watersheds, pollutant loadings from point sources were very low, and total loadings by point and non-point sources were also insignificant. On the other hand, in #14 sub-watershed including Jecheon city, the loadings by point source were relatively considerable. For the whole watershed, non-point sources accounted for 99% of sediment, 97% of N, and 93% of P loads. And monthly non-point source loadings were concentrated on rainy summer season, while point source loadings of N and P kept nearly constant throughout the year and were high on dry winter season relative to non-point source.

**keywords** : Chungju Dam, Nitrogen (N), Phosphorus (P), Pollutant source, Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

## 1. 서론

『수질 및 수생태계 보전에 관한 법률』 제2조에 의하면, 점오염원은 폐수배출시설, 하수발생시설, 축사 등으로서 관거·수로 등을 통하여 일정한 지점으로 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말하고, 비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말하고 있다.

그동안의 우리나라의 수질보전정책은 도시지역 하수처리장 설치 및 산업폐수처리 의무 부과 등 주로 점오염원 위주로 추진된데 비해 비점오염원에 대한 관심 부족과 관리 소홀로 인해 최근에는 비점오염원에 의한 오염부하량이 해마다 증가하고 있는 추세이다. 팔당상수원의 경우 전체 BOD 배출량의 44.5%가 비점오염원에서 배출되고 있으며, 2020년에는 54.3%까지 증가할 것으로 예측되고 있다(환경부, 2000). 따라서, 수질오염에 미치는 영향이 큰 비점오염원에 대한 관리 없이는 4대강 상수원의 수질개선 목표 달성에 한계가 있음을 알 수 있다.

이러한 비점오염원은 강우시 유출과 함께 이동하여 유역 전반에 걸쳐 많은 오염 현상을 일으키고 있으며, 전체 비점오염물질의 약 80% 정도가 5~9월 사이에 유출되는 것

으로 보고되고 있어(국립환경과학원·금강물환경연구소, 2006) 시기별 변화가 크게 나타나며, 유역의 기상·수문·지형특성 등에 따라 많은 영향을 받기 때문에 정량적인 파악을 위해서는 비강우시는 물론 강우시 다양한 유역조건에 따른 수질·유량의 관측자료가 필요하다. 그러나, 강우시 유량측정과 비점오염물질의 관측이 쉽지 않으며, 막대한 예산과 노력, 기술과 경험이 필요한 과업이고, 실제 관측이 이루어진다고 해도 관측된 자료가 다양한 조건을 반영하기 어렵기 때문에 비점오염물질의 배출 및 유달 특성 등을 정량화하기에는 많은 한계가 있다.

이에 대한 해결책으로 모델링에 의한 해석이 많이 연구되고 있다. 모델링 기법은 강우-유출 관계의 해석뿐만 아니라, 유출 또는 유사 이동에 따른 비점오염물질의 거동을 해석하고, 유역의 다양한 물리적 특성과 그 변화를 반영함으로써, 실측 자료에서 반영할 수 없는 다양한 강우사상과 유역조건에 따른 오염물질 유출 현상을 규명할 수 있다. 이를 위해서는 충분한 실측 자료에 기반하여 모형을 보정하고 검증함으로써 모형에 의한 결과의 신뢰성을 확보하여야 한다. 이러한 검증된 모형으로부터 도출된 다양한 결과를 통해 현 상태에서의 오염물질 거동 특성의 규명은 물론, 향후 유역 수문·수질환경의 변화에 따른 영향을 평가할 수 있고, 비점오염 저감에 필요한 여러 처리시설의 효율성 평가에도 활용될 수 있을 것이다.

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

최근 10여년간 국내 연구자에 의한 유역수질모델링에 활용되고 있는 모형으로서, 산림지나 농업유역을 포함하는 일반적인 하천유역에 대해서는 AGNPS 모형이나 Ann-AGNPS 모형의 활용이 가장 많으며(강문성 등, 2003; 김만식과 정승권, 2000; 김민경 등, 2001; 김진택과 박승우, 1997; 심창석, 2004; 유병로 등, 2004; 최경숙, 2005; 최경식 등, 2000), 도시지역의 경우는 하수관망의 해석이 용이한 SWMM 모형과 ILLUDAS 모형의 적용 예가 많은 것으로 나타났다(김태화와 이종태, 2005; 박연희와 박석순, 2004; 방기웅 등, 1997; 이종태, 1998; 조재현과 조남홍, 2003). 이 밖에 SLAMM 모형(김계현, 1993), TANK 모형(엄명철과 권순국, 1996), STORM 모형(김도연과 이흥근, 1996), L-THIA/NPS 모형(임경재 등, 2003), SWAT 모형(권병준 등, 2003) 등이 활용되어 왔다. 또한 한재석 등(2000)은 유출량과 수질인자간의 회귀모형을 구성한 바 있으며, 전지홍 등(2003)은 논지역에 대한 수질 예측 모형을 개발하기도 하였다.

모델링에 있어서 현재까지는 모형의 적용성 평가 및 대상유역에 대한 적정 매개변수의 산정 등 외국에서 개발된 모형들의 국내 적용에 따른 초보적인 수준에 머물고 있으며, 모형 적용 또한 장기보다는 단기적인 강우사상에 집중되고 있고 최근에 와서야 장기적인 영향 평가에 관심이 모아지고 있다. 모의 결과의 검증에 필요한 실측 수질자료 또한 월 1회 또는 주 1회 정도의 자료가 거의 대부분이고 그 자료수도 충분하지 않아 모의치와의 비교에 어려움이 많으며, 분포형 모형들의 대부분이 모든 입력값들에 대한 물리적 특성치를 얻을 수 없거나, 매개변수들의 상당수가 경험적이고 통계적인 값들이므로 보정과 검증에 있어 불확실성이 높고, 신뢰성 있는 매개변수의 추정과 모의 안정성을 확보하는데 어려움이 많다.

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 유역내 점·비점 오염원에 의한 오염부하량의 기여도를 평가하고자 한다. 이를 위해서는 앞서 제기한 바와 같이 다양한 조건하에서의 장기적이고 정교한 모니터링이 수반되어야 할 것이나 현실적으로 곤란하므로, 모델링을 통해 그 특성을 파악하고자 한다. 모델링 방법으로는 미국 USDA ARS에서 개발된 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하고, 대상유역에 대한 관측 수질자료 및 수질오염 관련 자료를 최대한 활용하여 모형 보정과 검증을 수행하고자 하며, 충분히 신뢰성이 검증된 모형 결과를 바탕으로 유역내 점·비점오염원에 따른 오염물질 발생 특성을 시공간적인 측면에서 규명하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. SWAT 모형 구축

SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리상태에 따른 물과 유사·화학물질의 거동을 예측하는 모형으로(Neitsch et al., 2001), 전세계 수문·환경·생태학자들에 의해 연

구·적용되고 있는 공개된 통합 유역모형이다. SWAT 모형의 국내 적용은 김철겸 등(2007)이 기술한 바와 같이, 1990년대 후반 이후 유출량 해석을 중심으로 연구가 시작되어, 최근에는 비점오염 관리를 위한 수질 모의와 모형내 알고리즘의 개선 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 연구 대상지역도 소하천 유역에서 다목적댐 상류를 대상으로 하는 대규모 유역에 이르기까지 다양한 유역 규모를 대상으로 한 연구가 수행되고 있다.

대상유역인 충주댐 상류의 유역면적은 약 6,648 km<sup>2</sup>로서, SWAT 모형 적용을 위해 환경부에서 관할하고 있는 월 1회 수질 관측지점을 기준으로 Fig. 1과 같이 14개의 소유역으로 구분하였다. GIS 기반의 공간입력자료로서, 환경부 DEM(100 m×100 m)과 토지피복도(1/50,000), 농업과학기술원의 정밀토양도(1/25,000)를 구축하였으며, 모델링에 필요한 가장 중요한 입력자료인 토양 속성자료는 농업과학기술원에서 구축한 토양 DB의 자료를 활용하였다(http://asis.rda.go.kr/). 모형 적용 기간은 1988~2001년으로, 이 기간에 대한 일별 강우자료는 유역내의 국토해양부와 기상청 관측소 자료를 이용하였으며, 증발산량 산정을 위해 필요한 일별 기온, 습도, 풍속, 태양복사량 등은 기상청 자료를 활용하였다. 모의 결과의 안정화를 위해 앞의 3개년(1988~1990년)에 대해서는 워밍업 기간으로 두고, 분석기간은 1991년 이후를 대상으로 하였다.

또한, 수질 모델링을 위한 자료로서, 비점오염 모의뿐만 아니라 점오염원에 대한 고려를 위해 유역내 오염원 총괄 현황(Table 1) 및 각 환경기초시설(하수종말처리시설, 마을하수처리시설, 분뇨처리시설, 공단 및 축산폐수처리시설)에 대한 시설 용량 등을 조사하였다. 충주댐 관리연보(한국수자원공사, 2003)에 기준하여, 유역내 환경기초시설은 총 61개소(하수종말처리시설 3개소, 마을하수처리시설 52개소, 분뇨처리시설 5개소, 공단/축산폐수처리시설 1개소)로서, 규모가 작은 경우 조사 대상에서 누락될 수도 있고, 발생된 부하량 중 일부는 미처리되고 직접 하천으로 방류되기도

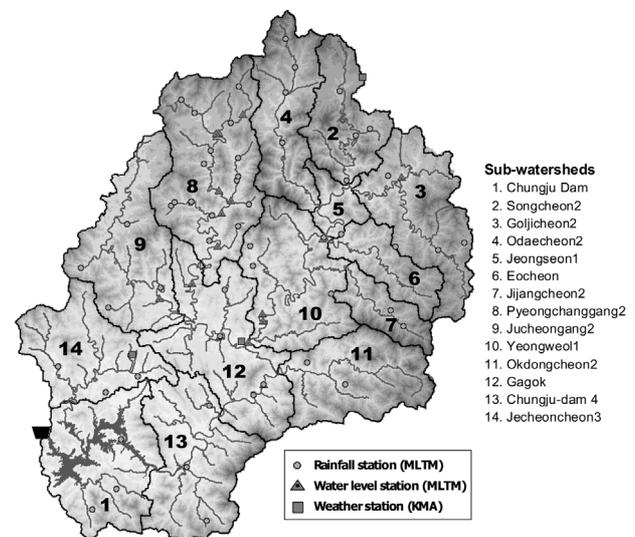


Fig. 1. Sub-watersheds of the watershed.

**Table 1.** Summaries of pollutant sources

Type		Status	Type		Status	
Population (person)	Urban	205,249	Land (km <sup>2</sup> )	Paddy	134	
	Rural	144,901		Upland	541	
	Subtotal	350,150		Field	40	
Livestock (head)	Cattle	37,684		Forest	5,505	
	Cow	6,220		Pasture	40	
	Horse	45		Golf course	4	
	Pig	97,404		Others	384	
	Poultry	891,468		Subtotal	6,648	
	Goat	118,598		Industrial waste water (m <sup>3</sup> )		41,186
	Deer	5,741				
	Subtotal	1,157,160				

source: Korea water resources corporation (2003)

**Table 2.** Effluent water quality standards of treatment plants

Treatment plants	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Related laws
Industrial wastewater treatment plant	30	60	8	Rules of Water Quality and Ecosystem Conservation Act (Article 26)
Municipal wastewater treatment plant	10	20	2	Rules of Sewerage Act (Item 1 of Clause 1 of Article 3)
Night soil treatment plant	30	60	8	Rules of Sewerage Act (Item 2 of Clause 1 of Article 3)
Livestock manure treatment plant	30	60	8	Rules of Act on the Management and Use of Livestock Manure (Clause 1 of Article 11)

하지만, 그 양이 크지 않기 때문에 본 연구에서는 토지에서 발생하는 비점오염원에 대한 것을 제외한 나머지 오염원들로부터의 부하량이 모두 환경기초시설에서 처리되는 것으로 가정하였다.

모형에서 필요한 각 시설별 점오염원 배출 현황은 기존의 관측 수질 자료가 거의 없기 때문에, 『충주댐 관리연보 (한국수자원공사, 2003)』의 자료 현황에 따라 환경기초시설이 모두 가동되는 것으로 보고 그 가동효율은 기존 가동현황을 참고하여 70%로 가정하였으며, Table 2에 나타난 각 처리시설별 방류수 수질 기준을 적용하여 각 시설별 배출되는 부유물질, 총질소, 총인의 배출부하량을 계산하였다. 그리고, 다시 관측 수질자료에서 나타나는 질소(유기질소, 질산염, 아질산염, 암모늄)와 인(인산염, 유기인)의 각 항목들의 비율을 고려하여 모형 적용을 위해 필요한 항목별 배출부하량을 소유역별로 산정하였다.

**2.2. 모형 보정 및 검증**

비점오염 영양물질인 질소와 인은 물 또는 유사와 함께 이동되고, 다시 유사는 물의 이동에 의해 좌우된다. 따라서 모형 보정을 위해 먼저 유출과 관련된 매개변수를 보정하고, 이후 유사 관련 매개변수, 영양물질 관련 매개변수의 순으로 보정하였다. 이때 영양물질에 관련된 매개변수는 유사 및 유출에도 영향을 미칠 수 있으므로, 유출 관련 매개변수의 보정 후 유사 관련 매개변수를 보정할 때에는 앞선 유출 매개변수를 제외한 유사에 관련된 매개변수에 대해서만 보정을 수행하고, 마찬가지로 영양물질에만 관련된 매개

변수만을 이용하여 모형을 보정함으로써 보정 결과가 유사 또는 유출 모의값에 영향을 주지 않도록 하였다.

매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법, 최적화기법에 의한 자동보정법, 그리고 이 두 가지를 병행한 방법이 있지만, SWAT과 같이 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형에서는 여전히 시행착오법이 유용하게 적용되고 있다 (Feyen et al., 2000).

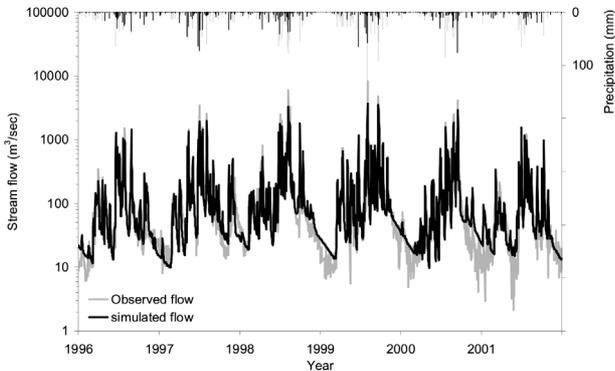
따라서, 시행착오법에 따라 각 매개변수의 민감도 분석 결과에 의해 단계별 매개변수 값을 변화시켜가며 보정을 수행하였으며, McCuen(2003)이 제시한 분할표본절차에 따라 1991~2001년의 11개년에 대한 유출 및 수질자료를 대상으로, 1991~1995년 자료는 보정에 적용하고, 이후 1996~2001년의 자료에 대해서는 모형 검증에 이용하였다. 또한 모형내 매개변수의 초기화를 위해 1988년부터 모형을 구동하였다.

유출과 유사에 대해서는 기존 김철겸 등(2007)의 연구 결과를 활용하였으며, 이를 기반으로 본 연구에서는 질소와 인에 대한 보정과 검증을 수행하였다. 또한 각 항목에 대한 모의 결과의 적용성 평가를 위해 결정계수(coefficient of determination, R<sup>2</sup>), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 상대평균절대오차(relative mean absolute error, RMAE), Nash-Sutcliffe 모형 효율(model efficiency, ME) 등의 통계치를 산정하여 검토하였다.

Fig. 2는 검증기간(1996~2001년)에 대한 관측 및 모의 유출수문곡선을 비교한 것으로, 일부 갈수기간에 대해 차이가 보이지만 대체적인 경향은 비슷한 것으로 나타났고,

**Table 3.** Calibration and validation results for daily stream flows

Period	Avg. annual precipitation (mm)	Avg. annual flow (mm)		R <sup>2</sup>	MAE (mm)	RMAE	ME
		Obs.	Sim.				
Calibration (1991~1995)	1,213	681	700	0.81	0.84	0.45	0.81
Validation (1996~2001)	1,210	684	675	0.78	0.85	0.45	0.77



**Fig. 2.** Validation result for the stream flows at the main outlet.

Table 3은 보정과 검증기간에 대한 통계치 결과로서, 연평균 유출량이나 평균절대오차 및 모형효율 등을 볼 때, 매우 높은 모의 정확성을 나타낸다고 볼 수 있다.

상류 다른 지점들에서의 유출은 양질의 관측자료가 불충분하여 비교하기 곤란하였지만, 대상유역에 대한 지형조건·토양조건·기상조건 등 유역 특성을 나타내는 물리적 입력자료와 매개변수로부터 모델링을 수행하였기 때문에, 유역 전체의 수문순환을 포괄하는 최하류 충주댐 지점에서의 보정과 검증을 통해 유역내 여러 지점들에서의 수문순환 또한 충분히 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 기존 김남원 등(2007)의 연구에서도, 충주댐 상류 16개 수위관측소 지점들에서의 유량 관측자료가 충분하지 못하며, 영월이나 상안미 등에서는 갈수기 비유량이 충주댐 지점보다 2~6배 크게 발생하는 문제점이 있음을 지적하고, SWAT 모형에 의해 공간적인 유량 자료를 확충하여 갈수

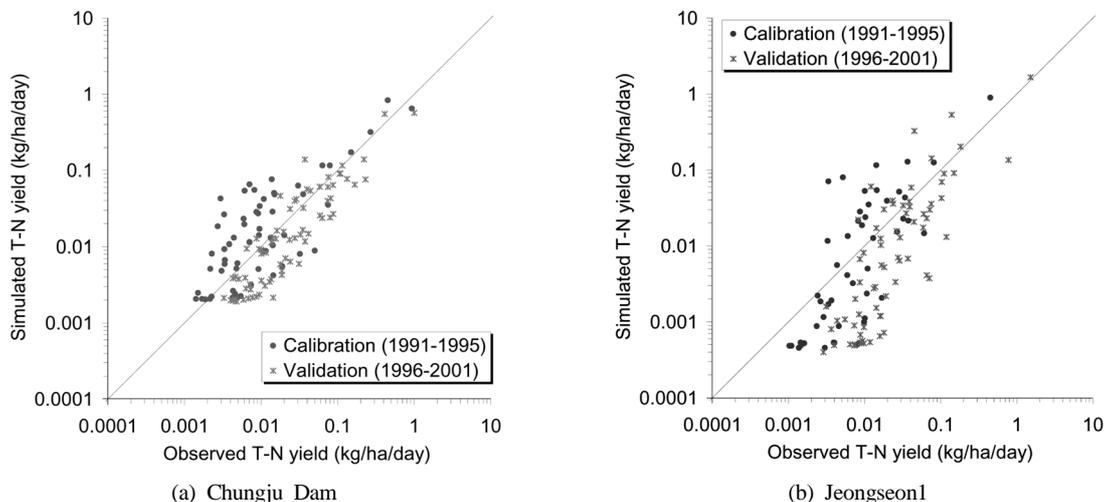
량 분석을 수행한 바 있다.

유사와 영양물질에 대해서는 기존의 관측이 주로 월 1~4회의 비연속적으로 수행되고 있으며, 관측치의 대부분이 농도 단위이고 이에 대한 관측 유량이 없는 경우가 많아 정확한 관측부하량을 환산하는데 어려움이 많다. 따라서, 앞서 충분히 검증된 모의 유출결과를 이용하여 각 지점별 모의유량에 관측농도를 곱하여 관측부하량으로 가정하였으며, 모의된 부하량과의 비교를 통해 보정 및 검증을 수행하였다(김철겸 등, 2007).

유사의 경우, 김철겸 등(2007)의 연구에 따르면, 하류인 충주댐에서 보다는 중류인 가곡과 영월1, 상류인 골지천2 등에서 모의치의 결과가 더 좋은 것으로 나타났으며, 모의치와 관측치가 일대일로 일치하지는 않지만, 변화 경향은 비슷한 것으로 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 충주댐과 정선1 지점을 대상으로 한 총질소와 총인의 보정 및 검증 결과를 일대일 그래프로 나타낸 것이다. 또한, Fig. 5와 Fig. 6은 충주댐과 정선1 지점을 대상으로 검증기간인 1996~2001년 사이의 관측 부하량과 모의 부하량의 변화를 비교한 것으로서, 김철겸 등(2007)에 나타난 유사량 결과와 마찬가지로 환경부에서 관리되고 있는 영양물질 관측값들의 대부분이 비강우시 위주로 수집되기 때문에, 강우시 발생하는 높은 부하량에 대해서 관측치와 모의치의 비교는 곤란하였다.

Table 4는 유역 최종 출구인 충주댐 지점에서의 질소와 인에 대한 보정 및 검증 결과를 나타낸 것이다. 총질소에 대해서는 대부분의 통계치 결과가 양호하게 나온 반면에 총인에 대해서는 상대편향이나 모형효율 등의 결과치에서 다소 차이를 나타내는데 이는 Fig. 4(a)과 Fig. 6(a)에 나타



**Fig. 3.** Calibration and validation results for T-N.

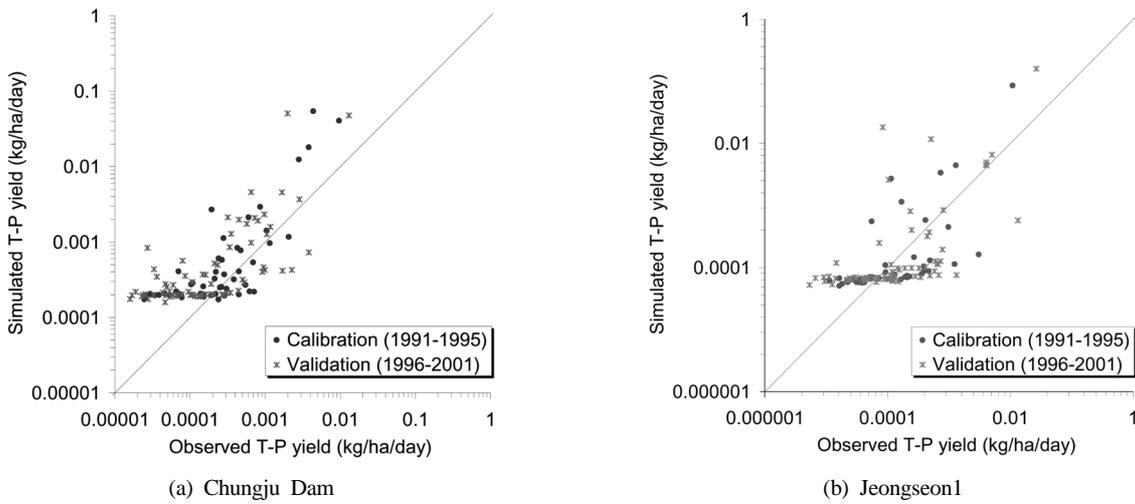


Fig. 4. Calibration and validation results for T-P.

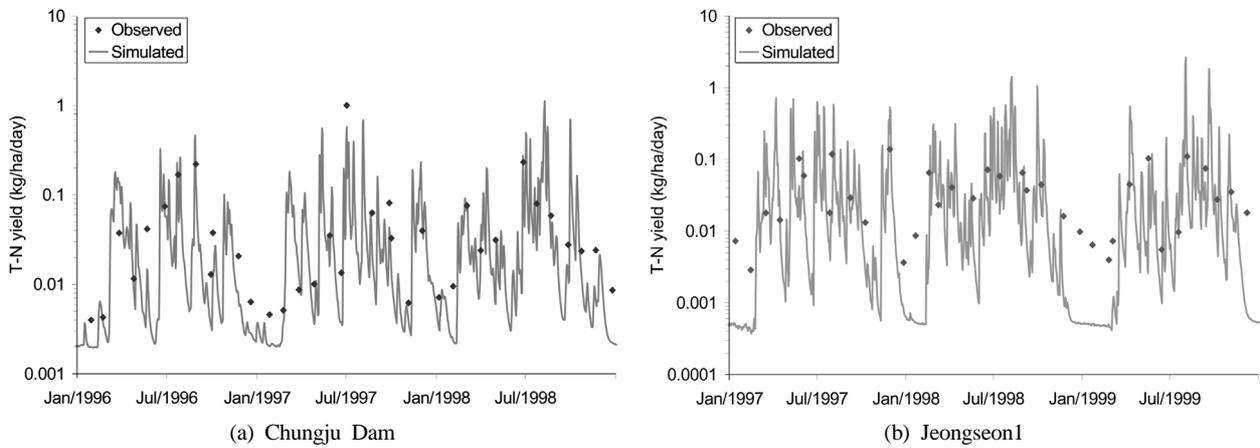


Fig. 5. Observed and simulated daily T-N yields.

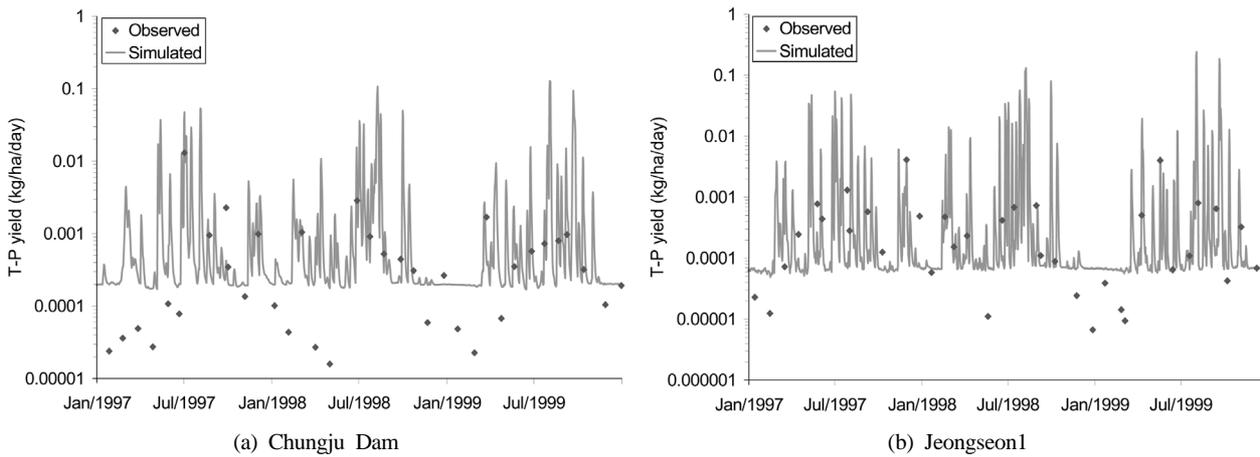


Fig. 6. Observed and simulated daily T-P yields.

난 바와 같이 약 0.0002 kg/ha/day 이하의 모의 부하량에서 나타난 관측치와의 차이에서 발생한 것으로 보인다. 즉 충주댐의 경우 모의된 총인 부하량이 0.0002 kg/ha/day 이하로 떨어지지 않는데 이것은 점오염원 자료치가 다소 크게 입력되었기 때문인 것으로 판단되며, Fig. 4(b)와 Fig. 6(b)

에 나타난 정선1 지점을 비롯하여 다른 소유역 지점에서도 질소에 비해 인의 모의 결과가 저 부하량에서 다소 일정하잖으로 나타나는 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용된 점오염원 자료는 앞선 입력자료 구축부분에서 기술한 바와 같이 유역내 환경기초시설의 조사를 통해 기

**Table 4.** Statistical results of calibration and validation for T-N and T-P simulation

Item	Period	No. of data	Load (kg/ha)		RB	RMSE (kg/ha/day)	MAE (kg/ha/day)	ME	R <sup>2</sup>
			Obs.	Sim.					
T-N	Calibration	60	2.528	3.228	0.28	0.066	0.027	0.76	0.79
	Validation	72	4.119	2.969	-0.28	0.062	0.026	0.77	0.81
T-P	Calibration	59	0.037	0.151	3.09	0.008	0.002	-29.68	0.73
	Validation	71	0.045	0.145	2.26	0.007	0.002	-18.02	0.51

존의 가동 상황과 각 시설별 배출되는 수질 기준에 따라 추정하여 입력된 것으로서, 향후 각 시설별 배출되는 실제 관측수질을 기반으로 재검토되어야 할 것이다.

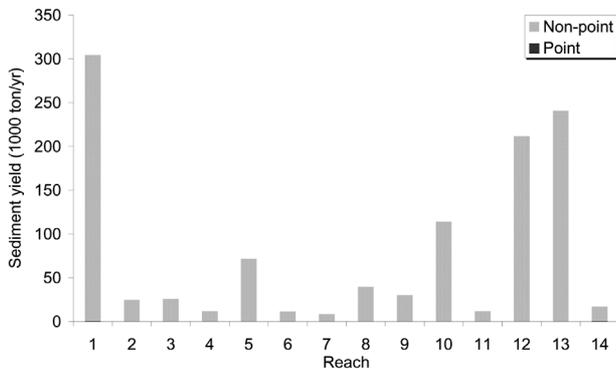
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 하도구간별 유사량 및 오염부하량

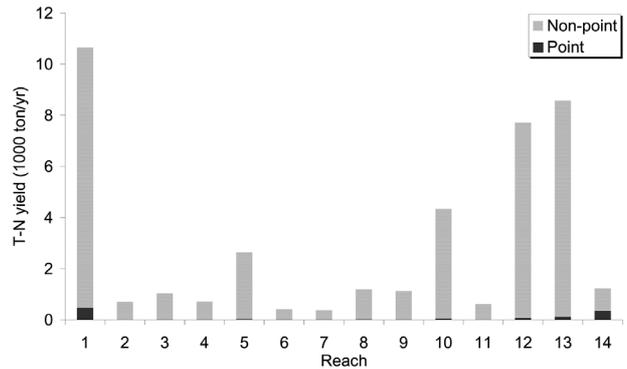
유역내 오염원별 유사량 및 오염부하량 특성을 살펴보기 위하여 충주댐 유역의 각 하도구간별 오염원에 따른 유사량과 오염부하량을 비교하였다. 여기서의 하도구간은 해당 하도구간의 상류유역을 모두 포함하는 것으로서, 충주댐이 위치한 1번이 대상 유역 전체에 대한 결과를 나타내고 있음을 의미한다.

Fig. 7은 하도별 오염원에 따른 유사량을 비교한 것으로, 대부분의 소유역 하도구간에서 점오염원에 의한 유사량은 거의 없는 것으로 나타났고, 특히 상류인 4번 오대천, 6번 어천, 7번 지장천, 11번 옥동천 유역에서의 유사량은 점원, 비점원 모두 매우 작은 값으로 모의되었다. 상류유역 중에서는 8번 평창강 유역과 9번 주천강 유역에서의 유사량이 많은 것으로 나타났으며, 하류측에서는 상류로부터의 영향을 받아 5번→10번→12번→13번→1번 유역에서의 유사량이 크게 모의되었다. 유역 전체에 대해 점오염원에 의한 영향은 0.1%로서 매우 작은 것으로 나타났다.

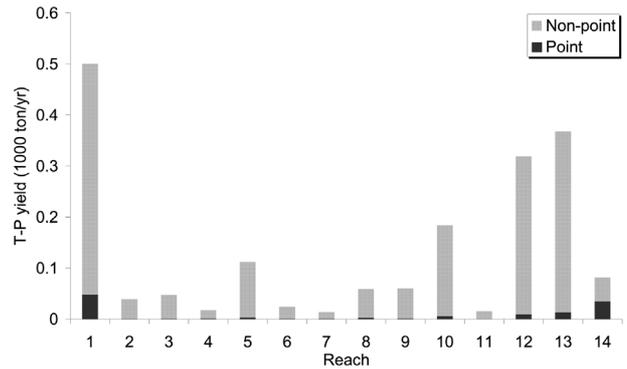
Fig. 8은 총질소 부하량을 나타낸 것으로, 역시 대부분 산림지로 구성된 상류부인 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11번 소유역에서의 점오염원에 의한 부하량이 매우 작게 모의되고 있는 반면, 제천시가 위치한 14번 소유역에서는 다른 소유역에 비해 점오염원에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타나, 도시지역에서의 점오염원 부하량 관리의 상대적 중요성을



**Fig. 7.** Sediment yield of each reach with pollutant source type.



**Fig. 8.** T-N yield of each reach with pollutant source type.



**Fig. 9.** T-P yield of each reach with pollutant source type.

파악할 수 있었다. 나머지 하류부에서는 대체적으로 비점오염원의 영향이 더 크게 나타났다.

Fig. 9는 하도별 총인 부하량을 비교한 것으로, 총질소와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 상류지역 중에서도 2번 송천, 11번 옥동천 유역에서의 점오염원에 의한 부하량은 거의 없는 것으로 나타났으며, 반면에 제천시가 위치한 14번 소유역에서는 점오염원에 의한 총인 부하량이 42%로서 이 지역에 대한 점오염원의 관리가 필요한 것으로 판단된다.

위의 결과로부터 하도별 오염원에 따른 유사 및 오염물질 부하량은 도시지역인 14번 소유역에서의 점오염원에 의한 부하량이 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 유역 전체로는 총질소의 경우 약 3%, 총인의 경우 7% 정도가 점원에 의한 오염부하량으로 나타났다.

#### 3.2. 월별 유사량 및 오염부하량

다음은 시기별로 오염부하량 발생 정도 및 오염원별 영향 정도를 파악하고자 충주댐 유역에 대해 1991년부터 2001년의 총 11개년을 대상으로 월별 평균 유사량 및 오염

부하량을 검토하였다.

먼저 시기별 유사량 변화를 살펴보면, Fig. 10과 같이 전체 유역에서 발생하는 유사량 중에서 점원에 의한 영향은 비점원에 비해 상대적으로 매우 작음을 알 수 있으며, 발생량의 대부분은 강우가 집중되는 7~9월에 많이 나타나는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 오염원에 따른 총질소와 총인의 부하량 변화를 월별로 나타낸 것이다. 모형 입력시 점오염원 입력값을 일정하게 고려하였기 때문에 그림에 나타난 바와 같이 점오염원에 의한 부하량이 연중 일정하게 나타났으며, 반면에 비점오염원에 의한 부하량은 유사와 마찬가지로 여름철에 많이 발생하였다. 특히, 겨울철인 1월, 11월, 12월에는 총인의 부하량 중 점오염원에 의한 영향 정도가 비점오염원보다 더 크게 나타났으며, 이는 강우 유출과 매우 높은 상관성을 갖는 비점오염 부하량의 발생 특성을 나타낸다고 볼 수 있다.

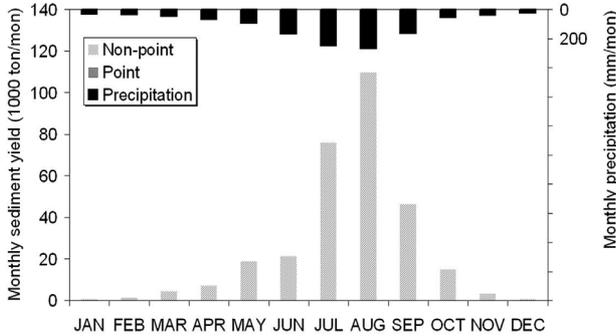


Fig. 10. Monthly sediment yield with pollutant source type.

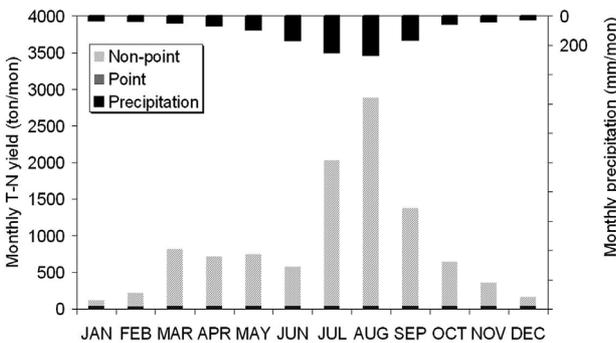


Fig. 11. Monthly T-N yield with pollutant source type.

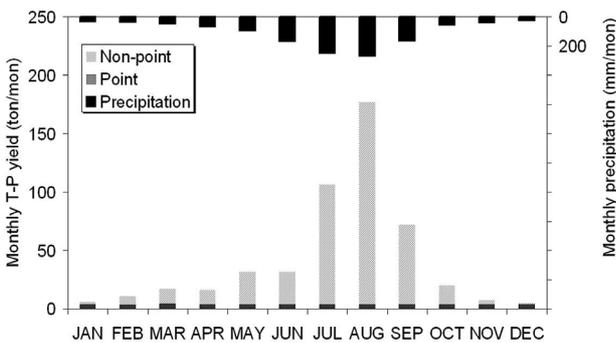


Fig. 12. Monthly T-P yield with pollutant source type.

#### 4. 결론

최근 수질오염관리에 있어서 비점오염원에 대한 관심이 증가하고, 적절한 대책 마련이 시급해지고 있는 현실에도 불구하고, 비점오염원의 특성상 발생에서부터 하천 유출에 이르기까지의 과정에 대한 정량적 규명이 곤란하고, 이에 대한 관측 및 해석에 어려움이 많다. 이에 대한 해결책으로 본 연구에서는 유역 수문수질 해석모형인 SWAT 모형을 이용하여 남한강 본류의 충주댐 상류를 대상으로 유역 내 점오염원 및 비점오염원에 따른 수질 영향을 평가해 보았다.

수질 모델링을 위한 자료로서, 비점오염 모의뿐만 아니라 점오염원에 대한 고려를 위해 유역내 오염원 총괄 및 환경기초시설에 대한 조사로부터 각 처리시설별 기존의 가동현황과 방류수 수질 기준을 적용하였으며, 항목별 배출 부하량을 산정하고 이를 소유역별 점오염원 발생부하량으로 적용하였다. 또한, 기존 연구에서 수행된 유출·유사 보정 결과를 바탕으로 비점오염 물질인 질소와 인에 대한 모형 매개변수를 보정하여 유역 수문수질 해석시스템을 구축하였으며, 구축된 시스템을 통하여 유역내 오염원에 따른 오염물질 발생 특성을 시공간적으로 분석하였다.

질소와 인에 대한 보정 및 검증을 통해 각 통계치를 산정한 결과, 질소의 경우 정량적, 정성적인 모의 특성이 양호하게 나타났으며, 인에 대해서는 일부 저 부하량에서 다소 일정하게 모의되는 경향이 나타났지만 전반적인 모의 경향은 양호하게 나타나 유역 전반에 걸친 정성적인 평가는 충분히 가능한 것으로 생각되며, 향후 점오염원 배출현황에 대한 실측 자료의 검증을 통해 저 부하량에서의 모의 정확성도 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

하도구간별 오염원 영향은 충주댐 상류유역의 경우 산림지가 83%, 논 2%, 밭 8%로서 일반적인 댐 상류의 자연상태 유역이기에 점오염원에 의한 영향이 매우 작게 나타났으며, 특히 유사의 경우에는 거의 99% 이상이 비점오염원에 의한 영향으로 추정되었다. 질소와 인의 경우도 각각 97%, 93% 정도가 비점오염원에 따른 것으로 나타나 유역 전체에 대해 점오염원의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 다만 제천시가 위치한 14번 소유역의 경우는 질소의 29%, 인의 42%가 점오염원에 의한 것으로 나타나, 이 지역에 대한 점오염원 관리가 상대적으로 중요한 것으로 판단된다.

월별 부하량은 연중 일정하게 나타나는 점오염원의 특성에 반해, 비점오염원에 의한 부하량은 강우가 집중되는 여름철에 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 질소와 인의 점오염원에 의한 영향은 건기인 겨울철에 상대적으로 영향이 크게 나타났다.

이상의 결과를 통해 대상유역 전반적으로는 점오염원의 영향이 크지 않지만, 일부 지역에 대해서는 점오염원의 관리가 중요함을 알 수 있으며, 시기적으로는 여름철보다는 겨울철에 상대적 중요성이 더 큰 것으로 검토되었다.

## 사 사

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

## 참고문헌

- 강문성, 박승우, 전종안(2003). RS와 GIS-AGNPS 모형을 이용한 소유역에서의 비점원오염부하량 추정. *한국농공학회지*, **45**(1), pp. 102-114.
- 국립환경과학원, 금강물환경연구소(2006). *비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석 최종보고서*. 금강수계관리위원회.
- 권명준, 권순국, 홍성구(2003). 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영. *한국농공학회지*, **45**(2), pp. 116-125.
- 김계현(1993). 지리정보체계를 이용한 도시 비점원오염의 대축적 모형화. *한국지형공간정보학회논문집*, **1**(1), pp. 171-180.
- 김남원, 이병주, 이정은(2007). 공간모의유량을 이용한 갈수량 저동 특성에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, **27**(4B), pp. 431-440.
- 김도연, 이홍근(1996). STORM 모형을 이용한 비점오염원 부하의 규모와 특성에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **22**(1), pp. 5-11.
- 김만식, 정승권(2000). 지리정보시스템을 이용한 유역의 토지이용별 비점오염부하량 분석. *환경관리학회지*, **6**(3), pp. 411-421.
- 김민경, 최윤영, 김복진, 임준영, 정종배(2001). 소규모 농업유역에서 질소와 인의 하천 부하에 대한 AGNPS 모형의 적용. *한국환경농학회지*, **20**(3), pp. 192-200.
- 김진택, 박승우(1997). 농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용(I): 모형의 구성. *한국농공학회지*, **39**(1), pp. 41-47.
- 김철겸, 이정은, 김남원(2007). 충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성. *한국수자원학회논문집*, **40**(11), pp. 887-898.
- 김태화, 이종태(2005). 도시유역의 유출·수질해석을 위한 ILLUDAS-NPS 모형. *한국수자원학회논문집*, **38**(9), pp. 791-800.
- 농업과학기술원(2008). 한국토양정보시스템. <http://asis.rda.go.kr>.
- 박연희, 박석순(2004). 강우강도에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정 함수 연구. *대한환경공학회지*, **26**(10), pp. 1070-1078.
- 방기웅, 이준호, 유명진(1997). 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구. *한국수질보전학회지*, **13**(1), pp. 79-99.
- 심창석(2004). AGNPS 모델에 의한 비점오염원으로부터 하천으로 유입되는 오염부하량 예측. *수처리기술*, **12**(1), pp. 39-50.
- 엄명철, 권순국(1996). 탱크모형을 이용한 일별 오염부하량의 산정. *한국농공학회지*, **38**(3), pp. 92-100.
- 유병로, 정승권, 전계원(2004). 공간정보를 이용한 분포형 유역 수질 모의. *한국수자원학회논문집*, **37**(11), pp. 897-913.
- 이종태(1998). 도시유역에서의 유출 및 수질해석 모형. *한국수자원학회논문집*, **31**(6), pp. 709-725.
- 임경재, 버나드엔젤, 김영석, 최증대, 김기성(2003). 도시화에 따른 유출과 비점원 오염 영향을 평가하기 위한 L-THIA/NPS. *한국농공학회지*, **45**(4), pp. 78-88.
- 전지홍, 윤춘경, 황하선, 윤광식(2003). 논에서의 오염부하예측을 위한 범용모형 개발. *한국육수학회지*, **36**(3), pp. 344-355.
- 조재현, 조남홍(2003). SWMM을 이용한 황구지천유역의 비점원오염부하량 평가. *환경영향평가*, **12**(5), pp. 349-358.
- 최경숙(2005). AnnAGNPS 모형을 이용한 관목림지의 비점오염 모의. *한국농공학회논문집*, **47**(4), pp. 65-74.
- 최경식, 나은혜, 박석순(2000). 토지이용도에 따른 수질변화예측을 위한 비점오염원 모델 적용. *한국물환경학회지*, **16**(5), pp. 565-572.
- 한국수자원공사(2003). *충주댐 관리연보*.
- 한재석, 김주훈, 김만식(2000). 유역의 비점오염부하량 산정에 관한 연구. *환경관리학회지*, **6**(1), pp. 147-157.
- 환경부(2000). *팔당상수원 비점오염원 최적관리방안 타당성조사 및 기본계획 용역보고서*.
- Feyen, L., Vazquez, R., Christianens, K., Sels, O. and Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, **4**(1), pp. 47-63.
- McCuen, R. H. (2003). *Modeling hydrologic change: statistical methods*, Boca Raton, Fla., Lewis Publishers.
- 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.