

Research Article

Open Access

## 강수조건에 따른 도암호 부유물질 거동 평가

최재완,<sup>1</sup> 신동석,<sup>1</sup> 임경재,<sup>2</sup> 이상수,<sup>3</sup> 강민지<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 수질총량연구과, <sup>2</sup>강원대학교 지역건설공학과, <sup>3</sup>강원대학교 바이오자원환경학과

### Estimation Suspended Solids Concentration of the Doam Reservoir under Dry and Wet Weather Conditions

Jae-Wan Choi,<sup>1</sup> Dong-Seok Shin,<sup>1</sup> Kyoung-Jae Lim,<sup>2</sup> Sang-Soo Lee<sup>3</sup> and Min-Ji Kang<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea, <sup>2</sup>Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, <sup>3</sup>Department of Biological Environment, Kangwon National University Chuncheon 200-701, Korea)

Received: 31 May 2012 / Accepted: 25 June 2012

© 2012 The Korean Society of Environmental Agriculture

#### Abstract

**BACKGROUND:** The Doam watershed in Korea has been managed for the reduction and the prevention of non-point source pollution since 2007. Especially, the water quality of the Doam reservoir is a primary issue related to the Doam dam reoperation. We have carried out the modeling to evaluate the water quality based on suspended solids (SS) of the Doam watershed and the Doam reservoir. Two powerful hydrological and water quality models (HSPF and CE-QUAL-W2) were employed to simulate the combined processes of water quantity and quality both in the upland watershed of the Doam reservoir and the downstream waterbody.

**METHODS AND RESULTS:** The HSPF model was calibrated and validated for streamflow and SS. The CE-QUAL-W2 was calibrated for water level, water temperature, and SS and was validated for the only water level owing to data lack. With the parameters obtained through the appropriate calibration, SS concentrations of inflow into and in the Doam reservoir were simulated for three years (2008, 2004 and 1998) of the minimum, the average, and the maximum of total annual precipitation during recent 30 years. The annual average SS concentrations of the inflow for 2008,

2004, and 1998 were 8.6, 10.9, and 18.4 mg/L, respectively and those in the Doam reservoir were 9.2, 13.8, and 21.5 mg/L.

**CONCLUSION(s):** The results showed that more intense and frequent precipitation would cause higher SS concentration and longer SS's retention in the reservoir. The HSPF and the CE-QUAL-W2 models could represent reasonably the SS from the Doam watershed and in the Doam reservoir.

**Key Words:** Based on suspended solids (SS), CE-QUAL-W2, Doam reservoir, HSPF

#### 서론

최근 농촌지역에서 발생하는 토사유출은 농업의 현대화와 기계화에 따라 긴이랑 형태의 넓은 경작지 조성, 토양개량 목적 보다는 연작피해 복구나 작물의 상품성 향상을 위한 객토, 하천 및 구거변의 식생대나 발두렁, 수로 등을 훼손과 같은 인위적인 경작활동으로 인해 주로 발생된다(Gangwondo, 2010). 특히 수계 상류유역에 위치한 해발 400 m 이상의 고랭지 지역은 토사와 함께 각종 화학물질 및 퇴비 등이 유출될 경우 수질에 악영향을 끼친다(Lee *et al.*, 2011). 이러한 고랭지 농업지대에서 감자·배추 등 채소류 위주의 연작재배가 이루어 질 경우, 밭은 약 7~10개월 정도 나지상태가 되므로 강우유출수에 의한 토양유실 위험이 더욱 높다고 할 수 있다(Joo and Lee, 2011).

밭이나 호소 상류에 위치한 고랭지 밭 등으로부터 강우시

\*교신저자(Corresponding author),

Phone: +82-32-560-7354; Fax: +82-32-560-7486;

E-mail: skyjina@korea.kr

발생되는 다량의 토양유실은 호 내 수질 및 수생태 건전성을 악화시키는데, 이러한 토사 유입은 도암호 수질관리에 있어서도 중요한 문제가 된다. 특히 도암댐 수력발전방류수로 야기된 강릉 남대천의 수질문제로 2001년부터 발전이 중단되면서, 도암호 수질은 한국수력원자력, 강릉시 등의 큰 관심 대상이 되었으며 여전히 발전재개에 대한 논의가 계속 되고 있다. 환경부 역시 도암호 수질관리를 위하여 호 상류지역인 평창군을 비점오염원 관리지역으로 지정하여 관리하고 있다(환경부고시 제2007-127호). 관리 대상물질은 SS로서 5 mg/L 이하로 2017년까지 3년 평균 연속 2회 달성하는 것을 목표로 관리대책의 시행계획을 이행하고 있다. 그러나 더 효율적인 비점오염관리대책의 이행을 위해서는 현재 수립된 대책들을 재검토하고 이에 대한 효과 분석이 필요하다. 이를 통해 유지관리가 어렵거나 효과가 없는 대책들에 대한 개선방안을 마련하여야 한다. 또한 국내 비점오염원 관리에 있어서 관련 지식과 경험의 부족, 기후변화와 같은 자연적 요인 등의 불확실성을 감안하여 효율적인 관리목표와 이행평가방법을 수립하여 추진할 필요가 있다.

본 연구는 도암호 유역에서 이행되고 있는 비점오염원 관리대책 평가의 선행 연구로서 우선 도암호 유역과 도암호의 탁수를 평가하기 위한 모델을 구축하였다. 실질적으로 도암호 유역에서 강우시 유출되는 토사 유출 해석에 필요한 유량 및 수질자료가 부족하기 때문에 자료 분석만으로 도암호 탁수거동에 대한 이해가 어려우므로 유역 및 수질 모델을 이용하였다. 기존의 많은 연구에서 유역의 토양유실과 그 영향 분석 등을 위하여 다양한 모델들을 활용되고 있는데, 본 연구에서는 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran; Bicknell *et al.*, 1997)와 CE-QUAL-W2(Cole *et al.*, 1999)를 고려하였다. HSPF는 유역의 강우-유출해석(Brun and Band, 2000; Cho *et al.*, 2008; Choi and Deal, 2008), 토양유실을 포함한 비점오염물질의 거동분석(Hunter and Walton, 2008; Ribarova *et al.*, 2008), 수질개선과 홍수 재해 방지를 위한 다양한 유역오염관리대책평가(Donigian *et al.*, 1997; Luo *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2007) 등과 관련하여 세계적으로 널리 이용되고 있는 유역모델이다(Jeon *et al.*, 2009). 또한 CE-QUAL-W2는 미국공병단에서 개발된 횡방향 2차원 수리·수질 해석 수치모델로서, 한국에 있는 대부분의 저수지는 길이와 폭에 비해 상대적으로 길며 수심이 깊어 수온성층화가 수체의 수리 및 수질에 미치는 영향이 크기 때문에 한국 저수지에 대한 모델링에 주로 적용되었다(Chung and Gu, 1998; Kim *et al.*, 2001; Chung, 2004; Chung *et al.*, 2007; Sullivan *et al.*, 2007).

이에 본 연구에서는 도암호 유역에 대한 HSPF와 CE-QUAL-W2를 이용하여 유역 및 호소 수질 모델을 구축하여 도암호 유역의 수계와 호 내 SS 거동을 평가하였다. 또한 강우특성이 다른 연도에 대한 모델링을 통하여 상이한 기상조건 하에서 SS 거동의 변동을 파악하여 도암호 유역의 효과적인 토양유실 관리대책의 이행과 평가방법 등을 논의하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 연구대상지역

연구 대상 지역은 강원도 평창군 대관령면에 속하는 도암호 유역으로 동경 128° 37'~128° 47', 북위 38° 35'~38° 47'에 위치해 있다(Heo *et al.*, 2006). 도암호 유역의 면적은 149.42 km<sup>2</sup>이며, 5,441명('10년)이 거주하고 있다. 도암호 유역은 해발 772.4 m의 고산지대에 위치하고, 동절기에는 북동기류의 영향으로 기상변화가 심하고 대설현상이 많다. 해발 400 m 이상인 고랭지 경작지는 무, 배추 등 하절기 채소재배의 적지로 전 경작지(24.7 km<sup>2</sup>)가 해당된다. 도암호 유역은 해발 600~800 m의 경작지가 65.2%(16.1 km<sup>2</sup>)로 대부분을 차지하고 1000 m 이상의 경작지도 0.12%(0.031 km<sup>2</sup>) 분포하고 있다.

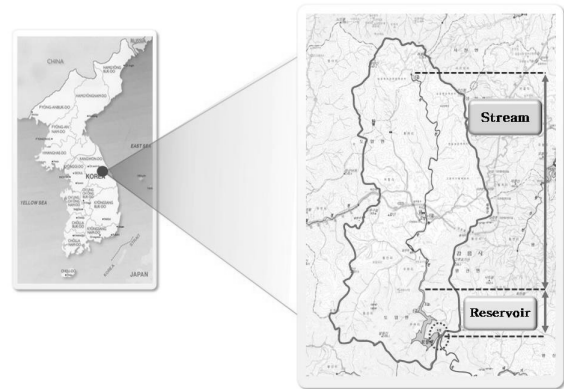


Fig. 1. Doam reservoir watershed, Korea.

### 도암호 유역모델(HSPF) 구축

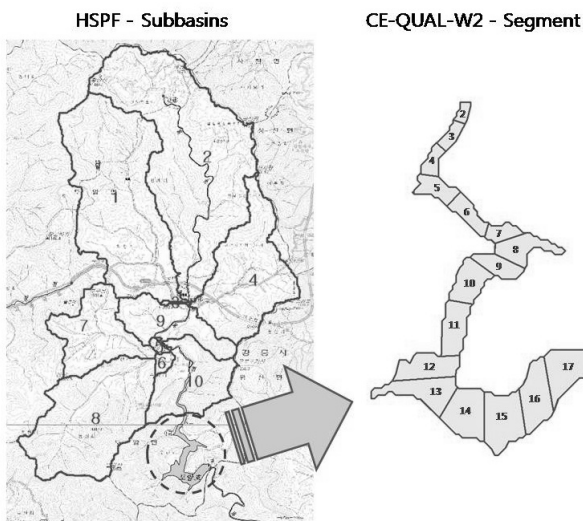
HSPF 모형의 수문성분은 지표수유출(surface runoff), 복류수(interflow) 그리고 지하수(baseflow)로 구성된다. 각각의 수문은 불투수면과 투수면으로 구분되어 유출되는데, 불투수면 지역은 지표유출과 증발산량을 통해 배출되고, 투수면 지역은 surface, upper, lower, ground water로 구분하여 3개의 지표유출수, 복류수, 지하수로 구성된다. HSPF 모형을 구축하기 위해서는 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM), 하천도, 토지피복도가 필요하다. DEM은 수치지도를 이용하여 5m×5m로 구축하였고, DEM과 하천도를 이용하여 총 11개의 소유역으로 구분하였다. 토지피복도는 1:25000의 중분류 토지피복도를 HSPF에서 사용되는 방식으로 변환하여 사용하였다. 기상데이터 구축을 위해 기상청에서 제공하는 대관령 기상관측지점의 6가지(강수량, 대기온도, 이슬점온도, 운량, 풍속, 일사량) 시간별 기상자료를 이용하였으며, 증발량과 증발산량은 WDMUtil(기상데이터 구축 프로그램)을 이용하여 생성하였다. 구축된 도암호 유역 HSPF는 11개의 소유역중 6개의 소유역에 Hoe 등(2010)이 조사한 자료를 참고하여 9개의 BMP가 적용되었다. 저감시설의 종류는 식생수로와 침사지를 적용하였다. 식생수로는 1, 4, 7, 9번 소유역에 총

24.6 km<sup>2</sup>가 적용되었고, 침사지는 1, 2, 4, 7, 9번 소유역에 총 3.2 km<sup>2</sup>가 적용되었다. SS 저감효율은 HSPF에서 제공되는 수치(식생수로:75%, 침사지:85%)를 사용하였다.

**CE-QUAL-W2 모형 구축**

우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 길이가 폭에 비해 상대적으로 길며 수심이 깊은 경우, 수온층화가 수체의 수리와 수질에 미치는 영향이 크기 때문에 일반적으로 종방향과 수심방향을 모의할 수 있는 횡방향 평균 2차원 모델(CE-QUAL-W2)이 주로 적용되었다(Chung and Gu, 1998; Kim *et al.*, 2001; Chung, 2004; Sullivan *et al.* 2007). CE-QUAL-W2 모형의 입력자료는 지형 자료, 초기 조건, 경계 조건, 수리학적 매개변수, 반응 매개변수 그리고 보정 및 검증자료 등으로 구성 되어 있다. 먼저 지형자료(bathymetry)는 Lee(2005)가 측정 한 수심측량자료를 이용하여 구축하였다. 기상자료(대기온도, 이슬점, 풍속, 풍향, 운량)는 기상청에서 제공하는 대관령 관측지점에서 측정 한 시자료를 사용하였다. 호 내 일유입·방류량은 한전수력원자력에서 측정하여 국가 수자원관리 정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 사용하였고, 유입수질은 HSPF에서 모의한 자료를 이용하였다. 유입수온은 실측자료를 사용해야 하나 도암호 유입수온에 대한 측정자료가 부재하여 Stefan and Preud'homme(1993)가 개발한 식을 사용하여 산정하였다. 식 1에서  $T_{water}$  는 수온이고,  $T_{av}$  는 평균기온이다. Fig. 2는 HSPF에 구축된 subbasins와 CE-QULA-W2에 구축된 segment를 나타낸다.

$$T_{water} = 5.0 + 0.75 T_{av} \quad (1)$$



**Fig. 2. HSPF catchments map of the Doam reservoir watershed and CE-QUAL-W2 segment definition map of the Doam reservoir.**

**모형의 정확성 평가방법**

HSPF 및 CE-QUAL-W2 모형 비교시 %Diff. (ASCE,

1993), 평가시 결정 계수( $R^2$ )와 유효 지수(Effective Index)를 이용하였다. 유효지수 산정은 Nash-Sutcliffe model efficiency(NSE; Nash and Sutcliffe, 1970). 식 (2)은 결정 계수( $R^2$ ), 식 (3)는 %Diff., 식 (4)은 NSE 산정 공식이다.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\% \text{ diff.} = \left| \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right| / \sum_{i=1}^n O_i \times 100 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (4)$$

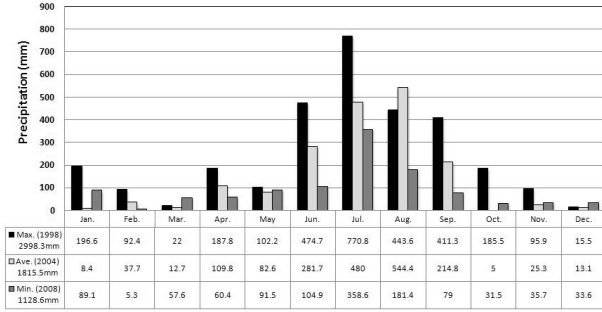
여기서  $O_i$ 는 실측 유출량(m<sup>3</sup>),  $P_i$ 는 모형에서 산정된 일별 유출량(m<sup>3</sup>),  $\bar{P}$ 는 모형에서 산정된 유출량(m<sup>3</sup>)의 평균,  $\bar{O}_i$ 는 실측 유출량(m<sup>3</sup>)의 평균이다. %Diff.의 값이 0에 가까울수록, NSE의 값이 1에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다. Table 1은 Donigian(2000)이 제시한 목적함수 평가 기준이다.

**Table. 1 General Calibration/Validation Targets or Tolerances for HSPF Applications (Donigian, 2000)**

		Very Good	Good	Fair	Poor
%Diff.	Flow	<10	10~15	15~25	>25
	Sediment	<20	20~30	30~45	>45
$R^2$		>0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	<0.6

**SS 거동해석을 위한 강우 시나리오**

토양 및 토지이용 뿐 아니라 기상특성에 영향을 받는 토양 유실은 특히 강우에 많은 영향을 받으며, Ye *et al.*(2009)는 기후변화에 따른 강우강도의 증가, 유출량 및 침투유량의 증가로 표층토양의 유실이 증가할 수 있음을 지적했다. 본 연구에서는 강우조건에 따른 도암호 유역 및 도암호의 SS 거동 변화를 파악하기 위하여, 대관령 기상관측소의 최근 30년간('81~'10년) 연강수량 자료로부터 연최소, 연평균, 연최대 강수년을 선정하였다. 30년간 발생된 최대 연강수량은 1998년의 2998.3 mm, 최소 연강수량은 2008년의 1128.6 mm이며, 연강수량의 30년 평균값은 1815.1 mm로서 이는 2004년에 발생한 1815.5 mm와 가장 유사하였다. 연강수량의 최대·최소·평균값이 발생한 연도에 대한 월별 강수량은 Fig. 3과 같다. 월별 강수량에 대한 3개년 자료의 표준편차는 7월이 211.8 mm로 가장 크고 6월(185.0 mm), 8월(187.4 mm), 9월(167.1 mm)이 높은 편차를 나타내었다. 이는 6월에서 9월 사이에 발생한 큰 강우사상이 연강수량의 크기에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



\*: the water year with the maximum total annual precipitation  
 \*\*: the water year with the average total annual precipitation between thirty years (1981~2010)  
 \*\*\*: the water year with the minimum total annual precipitation

Fig. 3. Monthly precipitation for 1998\*, 2004\*\* and 2008\*\*\*.

결과 및 고찰

도암호 유역 수질모의를 위한 HSPF 모형의 보·검정 결과 2009년에 관측된 도암호 유입 일유량 자료를 이용하여 HSPF 모형의 매개변수를 보정하고 2010년 1월부터 2011년 8월까지의 일유량을 모의하여 모형을 검증하였다. 유량 보정 시 INFILT(0.02 in/hr, 토양의 침투용량), DEEPEP(0.4, 불활성 지하수층으로의 유입비율), IRC(0.62 1/day, 합류의 역류 변수)가 주된 매개변수로 사용되었다. 모형 보정 결과 R<sup>2</sup>는 0.86, %Diff.는 4.5, NSE는 0.85로서 Donigian(2000)의 기준에 따르면 R<sup>2</sup>와 %Diff. 모두 '매우 좋음'으로 나타났다. 모형 검증 결과 R<sup>2</sup>는 0.63, %Diff.는 15.5, NSE는 0.62로 산정되어 R<sup>2</sup>와 %Diff. 모두 '보통'으로 나타났다. HSPF 모형의 유량 적용성 평가 결과 실측 유량을 적절히 반영할 수 있는 것으로 판단되었다.

수질항목인 SS는 환경부 수질측정지점인 송천1 지점의 월 1회 측정자료를 이용하여 모형을 검·보정하였다. SS 보정시 주로 사용된 매개변수는 KRER(0.1, 토양 특성에 따른 분리 계수), KSAND(1.3, HSPF 토양부하공식 계수), EXPSND (HSPF 토양부하공식 지수)이다. 모형 보정 결과 R<sup>2</sup>는 0.7, %Diff.는 17.7, NSE는 0.63이었으며, 검증 결과 R<sup>2</sup>는 0.76, %Diff.는 33.7, NSE는 0.40이었다(Fig. 5, 6). 즉, 보정 결과 R<sup>2</sup>는 '좋음', %Diff.는 '매우 좋음'으로 나타났고 검증 결과 R<sup>2</sup>는 '좋음', %Diff.는 보통으로 나타났다.

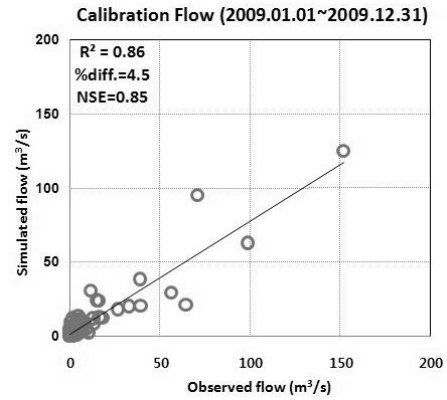


Fig. 4. HSPF model calibration for the streamflow from January to December, 2009.

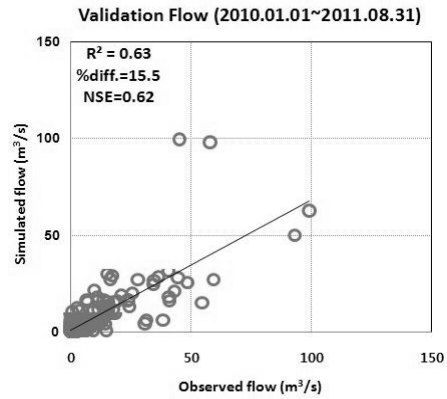


Fig. 5. HSPF model validation for the streamflow from January, 2010 to August, 2011.

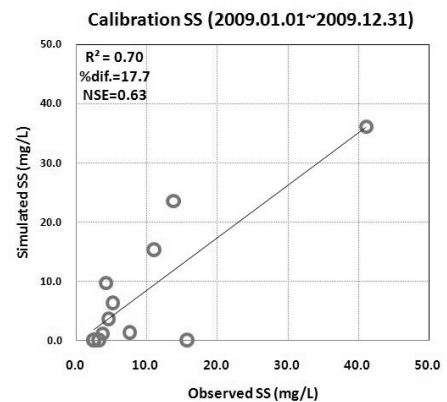


Fig. 6. HSPF model calibration for the suspended solids from January, 2009 to December, 2009.



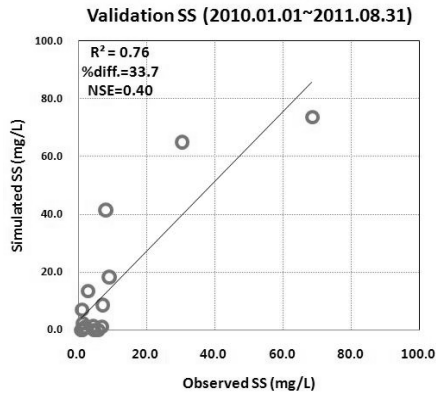


Fig. 7. HSPF model validation for the suspended solids from January, 2010 to August, 2011.

CE-QUAL-W2 모형의 정확성 평가 결과

도암호 수질모의를 위하여 먼저 CE-QUAL-W2 모형의 수위, 수온, SS에 대한 정확성 평가를 수행하였다. 수위 보정시 CE-QUAL-W2에서 제공하는 waterbalance 프로그램을 이용하였다. 모형 보정 결과  $R^2$ 는 0.94, %Diff.는 0.005, NSE는 0.93으로 산정되었으며, 검증 결과  $R^2$ 는 0.92, %Diff.는 0.001, NSE는 0.92로서 수위에 대한 모의는 아주 잘 수행된 것으로 나타났다(Fig. 8, 9).

수온변화는 호 내 부유물질 거동에 영향을 미치기 때문에 수온에 대한 정확성 평가가 필요하다. 수온 보정시 AX( $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , 흐름방향 외점성율), DX( $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ , 횡방향 외확산율), BETA (1.3, 태양복사에너지 중 수표면에 흡수되는 에너지의 비율) 등이 주된 매개변수로 사용되었다. 2010년 6월 22일에 실측한 수온과 비교한 결과  $R^2$ 가 0.84로 나타났고, 2010년 7월 20일에 실측한 수온과 비교한 결과  $R^2$ 가 0.95로 나타나 수온 보정결과가 실측치를 적절히 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 10, 11).

한국수력원자력은 도암호 말단에 방류수 수질개선 시설을 설치하였는데, 수질개선효과를 파악하기 위하여 실시간으로 탁도(turbidity)를 측정하고 있다. 또한 한국수력원자력에서 자체적으로 SS 농도를 측정하고 있으나 자료 수가 부족하기 때문에, 본 연구에서는 탁도와 SS의 상관관계를 이용하여 2010년 11월 1일부터 2011년 7월 31일까지 측정된 탁도를 SS로 환산하여 모형을 보정하는데 사용하였다. Fig. 12는 SS와 탁도의 상관관계를 나타낸다. CE-QUAL-W2 모형 보정시 부유물질 침전율을  $0.3 \text{ m/day}$ 로 적용하였다. Fig. 13과 14는 SS 보정 후 실측자료와 비교한 그래프이다. 보정결과  $R^2$ 는 0.80, %Diff.는 13.8, NSE는 0.78로 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 산정된 SS 농도가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

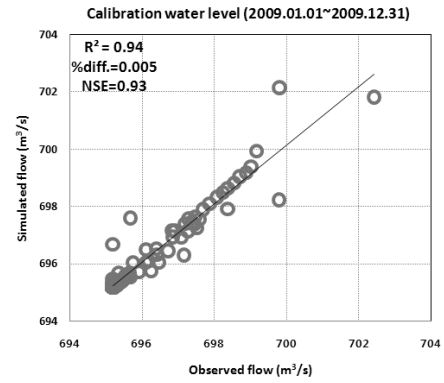


Fig. 8. CE-QUAL-W2 model calibration for the water level from January, 2009 to December, 2009.

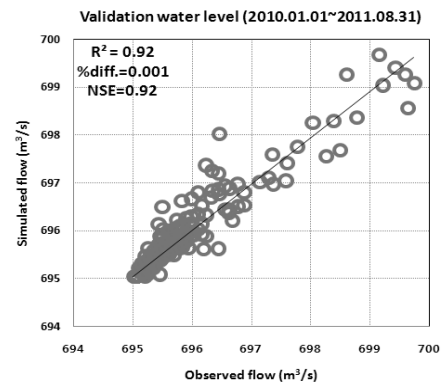


Fig. 9. CE-QUAL-W2 model validation for the water level from January, 2010 to August, 2011.

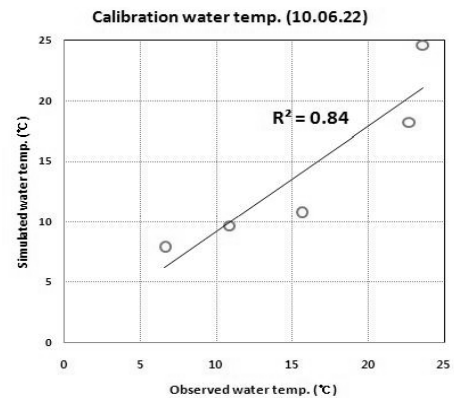


Fig. 10. CE-QUAL-W2 model calibration for the water temperature on June 22, 2010.

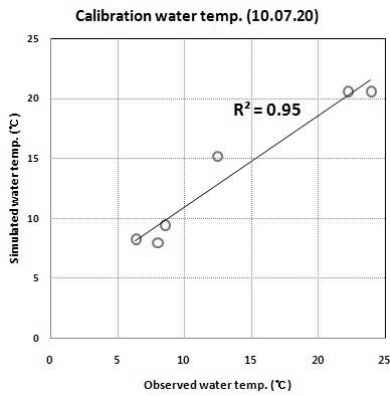


Fig. 11. CE-QUAL-W2 model validation for the water temperature on July 20, 2010.

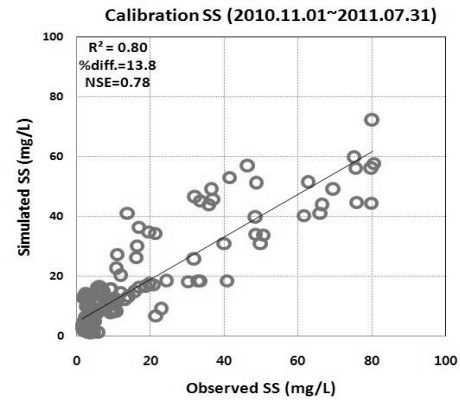


Fig. 14. CE-QUAL-W2 model calibration for the suspended solids from November, 2010 to July, 2011.

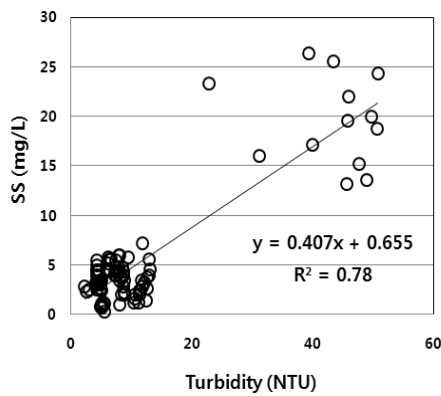


Fig. 12. Relationship between SS and turbidity.

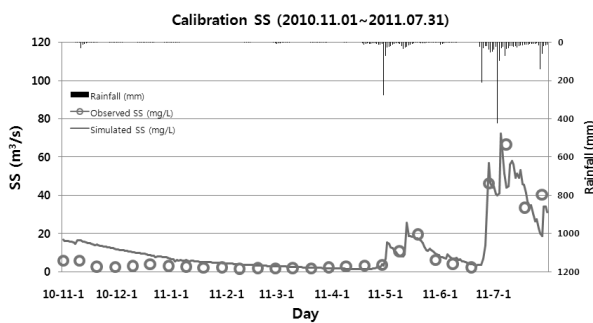


Fig. 13. CE-QUAL-W2 model calibration for the suspended solids from January, 2010 to July, 2011.

호 내 수온 및 SS 분포

CE-QUAL-W2를 이용한 도암호 내 SS 및 수온의 수평·수직 분포 모의를 Fig. 15과 16에 제시하였다. 2009년 9월 7일에 132 mm의 강우사상이 발생하는 동안 200 mg/L 이상의 SS가 유입되어 약 10일간 표층부터 수심 15 m까지 고탁수 상태를 유지한다. 이후 2009년 8월 11일 51 mm의 강우사상이 발생하기 전까지 수심 5 m~20 m에서 탁수가 정체되어있는 것으로 나타났다. 2009년 4월 30일의 유입수 수온은 7.8 °C이며, 표층부터 수심 10 m까지는 수온의 변화가 나타나지만 수심 10 m 이하의 수심에서는 거의 수온변화가 없는 것으로 나타났다. 2009년 5월 26일의 경우 표층부터 서서히 수온이 상승하기 시작하며 수층별로 수온이 변화하기 시작한다. 여름철에는 표층부터 수심 10 m 까지 25 °C 이상 상승하나 수심 25 m 이하는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(Fig. 15, 16).

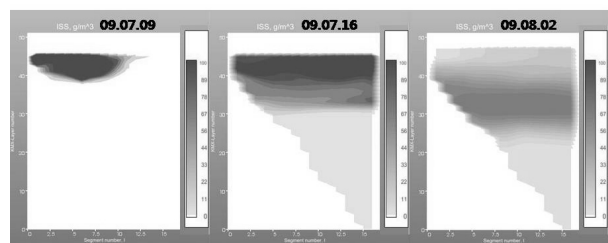


Fig. 15. Suspended solids concentration profiles in the Doam reservoir.

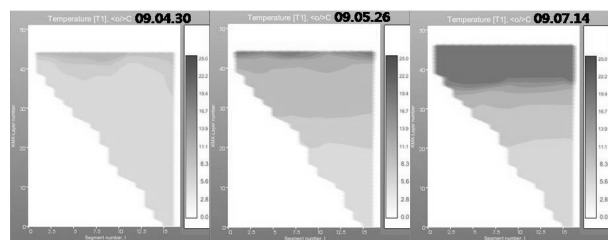


Fig. 16. Water temperature profiles in the Doam reservoir.

강우 시나리오별 SS 거동 모의

구축된 HSPF 및 CE-QUAL-W2모형을 이용하여 다른 강우조건(최대·최소·평균 연강수량)에 대한 도암호의 유입수의 유량 및 SS 농도, 도암호 내에서의 SS 농도를 모의하였다. Fig. 17~19에 제시한 3개년의 시간에 대한 SS의 농도 곡선으로부터 HSPF로 모의된 도암호 유입수와 CE-QUAL-W2로 모의된 호 내 SS 농도는 높은 상관성을 확인할 수 있으며, SS의 농도 곡선의 감쇄속도를 살펴보면 유입수의 SS 농도에 비해 호 내 SS 농도가 천천히 감소되고 있음을 확인할 수 있다. 30년간 연강수량이 최소인 2008년에는 7월 24일에 발생한 오직 하나의 대규모 강우사상이 호 내 탁수 문제를 발생시키고 있는데, 도암호 유입수의 SS 농도는 약 700 mg/L, 호 내 농도는 약 250 mg/L까지 증가하여 다소 정체된 후 감소하였다. 그 외 다른 소규모 강우사상은 호 내 SS 농도에 큰 영향을 미치고 있지 않다. 평균 연강수량에 유사한 2004년의 경우, 7월에서 9월 사이에 연속적으로 발생한 강우사상이 도암호 수질에 영향을 미치고 있다. 해당 기간 동안 연속적으로 유입된 SS는 호 내에서 정체되어 고농도 상태로 지속되는 것으로 모의되었다. 연강수량이 최대인 1998년의 강우사상을 살펴보면 강우량이 많을 뿐 아니라 강우빈도가 높음을 알 수 있다. 이로 인해 도암호 유입수와 호 내의 SS 농도는 다른 해에 비해 높으며 호 내 SS 농도가 25 mg/L를 초과하는 일수가 105일로 1998년 대부분의 기간에 걸쳐 호소의 수질 및 수생태계에 악영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 유입수의 연평균 유량 및 SS 농도와 호 내 말단지점 연평균 SS 농도는 Table 2에 제시하였다. 최소·평균·최대 연강수년에 해당하는 도암호 유입수의 평균유량은 각각 3.6, 6.4, 11.1 m<sup>3</sup>/s로서 강수량이 많이 발생할 수록 상류유역에서 유출되는 유량이 증가함을 알 수 있다. 이 때 도암호 유입수의 연평균 SS 농도는 8.6, 10.9, 18.4 mg/L로 유역의 강수량 및 유출량이 증가할수록 농도가 높아짐을 알 수 있다. 호 내 연평균 SS 농도는 9.2, 13.8, 21.5 mg/L로서 유입수의 농도보다 높은 것으로 나타났다. 이 역시 호소에서 SS가 체류되는 현상을 잘 보여주고 있다.

Table. 2 Annual average of simulated results for different precipitation conditions (1998, 2004, and 2008)

Year	Total annual precipitation (mm)	Inflow of the Doam reservoir		SS concentration in the Doam reservoir (mg/L)
		discharge (m <sup>3</sup> /s)	SS concentration (mg/L)	
2008	1128.6	3.6	8.6	9.2
2004	1815.5	6.4	10.9	13.8
1998	2998.3	11.1	18.4	21.5

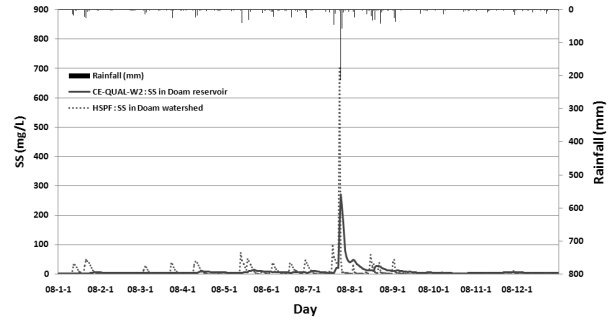


Fig. 17. Comparison of suspended solids concentration at the outlet of the Doam watershed and in the Doam reservoir in 2008.

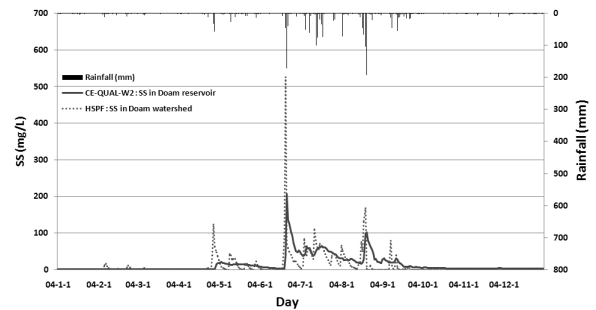


Fig. 18. Comparison of suspended solids concentration at the outlet of the Doam watershed and in the Doam reservoir in 2004.

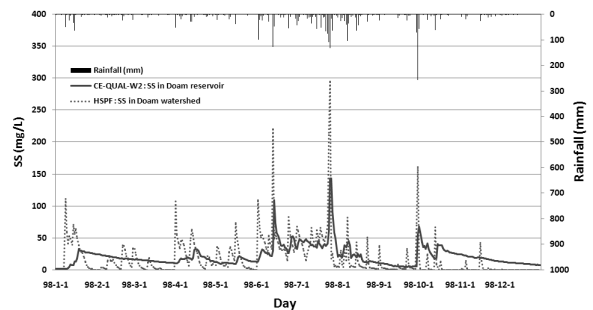


Fig. 19. Comparison of suspended solids concentration at the outlet of the Doam watershed and in the Doam reservoir in 1998.

결론

본 연구에서는 비점오염원 관리지역인 도암호 유역에 대한 논의에 필요한 도암호 수질 거동을 살펴보기 위하여, HSPF와 CE-QUAL-W2 모형을 구축하여 검·보정하고 최근 30년간 발생한 연강수량의 최소치·최대치·평균치를 갖는 2008년, 1998년, 2004년에 대한 도암호 유역과 호 내의 SS 거동을 모의하였다.

도암호 유역 유출구의 유량(도암호 유입량)에 대한 HSPF 모형 보정 결과 R<sup>2</sup>와 %Diff.는 ‘매우 좋음’, 검정 결과 두 지

수 모두 '보통'으로 평가되었다. SS 보정에서  $R^2$ 은 '매우 좋음', %Diff.는 '좋음'으로 나타났으며 검정에서  $R^2$ 은 '좋음', %Diff.는 '보통'으로 나타났다. 도암호 수위에 대한 CE-QUAL-W2의 보·검정에서  $R^2$ 와 %Diff.는 모두 '매우 좋음'으로 평가되었으며, SS에 대해서는 보정시  $R^2$ 은 '좋음', %Diff.는 '매우 좋음'으로 평가되었다. 본 연구에서 구축된 HSPF와 CE-QUAL-W2는 도암호 유역 및 도암호의 수질을 평가하는데 적절하게 보정된 것으로 판단되지만, 모형 검정결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 SS의 관측횟수를 늘려야 하며 특히 강우발생시에 자료를 확보하기 위한 방안이 필요하다고 사료된다.

구축된 CE-QUAL-W2 모형에서 도암호 내 SS 거동을 평가하기 위하여 SS 및 수온의 수평·수직 분포를 모의하였다. SS의 호 내 장기 체류현상과 수온의 성층현상(봄철 수심 10 m까지, 여름철 25 m까지)이 잘 모의되고 있었다. 또한 최근 30년간 연강수량의 최소치·평균치·최대치를 갖는 2008년, 2004년, 1998년에 대한 도암호 유역 및 호 내 SS 농도를 모의하였으며, 그 결과 일정 규모 이상에서 호 내 SS의 정체 현상과 후속 강우사상으로 인해 연속하여 SS가 유입될 경우 정체가 더욱 심해짐을 확인할 수 있었다.

비점오염원 관리지역으로 관리되고 있는 도암호 유역에 대한 유역기반의 수질모형을 구축함으로써 도암호 유역 및 호 내 SS 거동을 살펴보았다. 상이한 강우조건에 대한 모의 결과로부터 1998년과 같이 대규모 강우가 높은 빈도로 발생하는 경우, 도암호 유역에서 발생하는 토양유실을 관리하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 더욱이 현재 토양유실 저감 시설은 강우조건에 대한 고려가 미흡한데, 일정 강우 규모 및 조건에 대해서 토양유실이 발생하지 않도록 현실적인 관리체계를 설정할 필요가 있다고 사료된다. 본 연구에서 구축된 모형을 기반으로 향후 상류유역에서 이행되고 있는 관리대책을 평가하고 보완하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

## 참고문헌

- ASCE, 1993. ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models, *Irrig. Drain. Eng.* 119(3), 429-442.
- Brun, S.E., Band L.E., 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environ. Urban Sys.* 24(1), 5-22.
- Bicnell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Donigian, A.S. Jr., Johanson, R.C., 1997. Hydrological Simulation Program-Fortran, user's manual for version 11, USEPA Publication No.600-R-97-080, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Cho, J., Barone, V.A., Mostaghimi S., 2009. Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a virginia watershed, *Agric. Water Manage.* 96, 1-11.
- Choi, W., Deal, B.M., 2008. Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kisuwaukee River basin (USA), *J. Environ. Manage.* 88(4), 1119-1130.
- Chung, S.W., Gu, R., 1998. Two dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir., *J. Hydrol. Eng.* 124(7), 704-711.
- Chung, S.W., 2004. Density Flow Regime of Turbidity Current into a Stratified Reservoir and Vertical Two-dimensional Modeling, *J. KSEE* 30(8), 970-978.
- Chung S.W., Park, J.H., Kim, Y.K., Yoon, S.W., 2007. Application of CE-QUAL-W2 to Daechong Reservoir Eutrophication Simulation, *Korean J. Soc. Water Qual.* 25(1), 52-63.
- Cole, T.M., Tilman, D.H. 1999, Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2. U.S. Army Engineer Publication No.EL-99-1, Louisville District, Louisville, Kentucky.
- Donigian, Jr., A.S., 2000. HSPT Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19, Calibration and Verification Issues. Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
- Donigian, Jr. A.S., Chinnaswamy, R.V., Jobs, T.H., 1997. Conceptual Design of Multipurpose Detention Facilities for Flood Protection and Nonpoint Source Pollution Control. AQUA TERRA Consultants, California.
- Gangwon Province. 2010. Management action plan for the nonpoint source pollution of the Doam reservoir watershed.
- Heo, S.G., Kim, K.S., Ahn, J.H., Yoon, J.S., Lim, K.J., Choi, J.D., Shin, Y.C., Lyoo, C.W., 2006. Evaluation of Water Quality Impacts of Forest Fragmentation at Doam-Dam Watershed using GIS-based Modeling System, *Korean J. Geo. Inf. studies* 9(4), 81-94.
- Hoe, W.M., Park, C.G., Sa, S.H., Gwak, S.J., Choi, S.G., Baldev, Kim, E.J., Kim, H.H., Park, S.H., Shin, W.W., Yoon, Y.C., Yang, S.B., Bae, H.M., Song, J.B., Kim, G.G., Lee, S.H., Min, J.Y., 2010. Monitoring and Evaluation of Doam reservoir Nonpoint Pollutant Source Managing Area. Wonju Regional Environmental Office.
- Hunter, H.M., 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, *J. Hydrol.* 356(1-2), 131-146.
- Jeon, J.H., Choi, D.H., Kim, J.J., Kim, T.D., 2009. Evaluating Calibration Methods of Stream Flow for Water Quality Management, *Korean J. Soc. Water Qual.* 25(3), 432-440.
- Joo, J.H., Lee, S.B., 2011. Assessment of Nutrient Losses in Different Slope Highland Soils Amended with Livestock Manure Compost, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3), 361-367.
- Kim Y.H., Kim, B.C., Choi, K.S., Seo, D.I., 2001. Modelling of Thermal Stratification and Transport of Density Flow in Soyang Reservoir Using the 2-D Hydrodynamic Water Quality Model, CE-QUAL-W2, *Korean Soc. Water Wastewater* 15(1), 40-49.
- Lee, B.G., 2005. A Study for Doam-dam Ploblem Solving. Korea Hydro and Nuclear Power.
- Lee, J.T., Lee, G.J., Ryu, J.S., Park, S.H., Han, K.H., Zhang, Y.S., 2011. Evaluation of Surface Covering Methods for Reducing Soil Loss of Highland Slope in Radich Cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5), 667-673.
- Luo, B., Li, J.B., Huang, G.H., Li, H.J., 2006. A simulation-based interval two-stage stochastic model for agricyltural nonpoint source pollution control through land retirement, *Sci. Total Environ.* 361(1-3), 38-56.
- Nash J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I : Adiscussion of principles, *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Ribarova, I., Ninov, P., Cooper, D., 2008. Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria, *Ecological Modeling* 211(1-2), 241-246.
- Stefan, H.G., Preud'homme, E.B., 1993. Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resour. Bull.* 29(1), 27-45.
- Sullivan, A.B., Rounds, S.A., Sobieszczyk, S., Bragg, H.M., 2007. Modeling hydrodynamics, water temperature, and suspended sediment in Detroit Lake, Oregon. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5008, VA, USA.
- Yoon, C.G., Shin, A.H., Jung, K.W., Jang, J.H., 2007. A Study on BASINS/WinHSPF for Evaluation of Non-point Source Reduction Efficiency in the Upstream of Nam-Han River Watershed, *Korean J. Soc. Water Qual.* 23(6), 951-960.
- Ye, L., Chung, S.W., Yoon, S.W., Oh, D.G., 2009. Impact of Climate Change on Water Cycle and Soil Loss in Daechong Reservoir Watershed, *Korean J. Soc. Water Qual.* 25(6), 821-831.