

대청호와 하류하천 연속시스템의 2차원 수리·수질 모의

정용락·정세웅[†]·류인구·최정규

충북대학교 환경공학과

Two-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Simulations for a Conjunctive System of Daecheong Reservoir and Its Downstream

Yong Rak Jung · Se Woong Chung[†] · In Gu Ryu · Jung Kyu Choi

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 27 June 2008, Accepted 7 August 2008)

Abstract

Most of our rivers are fragmented by the presence of at least one large dam. Dams are often the most substantial controller of the flow regimes and aquatic environments of natural river system. The quality of downstream water released from a stratified reservoir is highly dependent on upstream reservoir water quality. Thus, an integrated modeling approach is more efficient, compared to fragmented modeling approach, and necessary to better interpret the impact of dam operation on the down stream water quality. The objectives of this study were to develop an integrated reservoir-river modeling system for Daecheong Reservoir and its downstream using a two-dimensional laterally averaged hydrodynamic and water quality model, and evaluate the model's performance against field measurement data. The integrated model was calibrated and verified using filed data obtained in 2004 and 2006. The model showed satisfactory performance in predicting temporal variations of water stage, temperature, and suspended solid concentration. In addition, the reservoir-river model showed efficient computation time as it took only 3 hours for one year simulation using personal computer (1.88 Ghz, 1.00 GB RAM). The suggested modeling system can be effectively used for assisting integrated management of reservoir and river water quality.

keywords : CE-QUAL-W2, Dam release water quality, Reservoir-river system, Suspended sediment, Water temperature

1. 서론

수자원의 안정적인 공급과 홍수조절 등을 위해 우리나라 대부분의 하천에는 대형 댐들이 건설되어 운영 중에 있다. 2007년 현재 전국 15개 다목적댐에서 공급 가능한 수량은 177억 m³/년으로써 연간 총 물 이용량의 53%를 차지할 정도로 댐 저수지는 중요한 상수원이다(한국수자원공사, 2007). 그러나 댐은 자연하천의 흐름을 단절시켜 생태계의 종 다양성을 감소시키며(Stanford et al., 1996), 하천의 유황과 생태계 서식환경에 가장 많은 영향을 미치는 수리구조물이다. 또한 댐에 의해 형성된 인공 저수지는 하천과 달리 정체수역을 형성하여 물의 체류시간이 길어져 성층화, 영양염류의 축적, 조류의 과잉 성장 등의 수질문제가 발생된다. 따라서 댐에 의해 조절되는 하류 하천의 수질은 댐 방류 수량과 수질에 많은 영향을 받게 된다(Bartholow et al., 2001; Byren and Davies, 1989; Martin, 1986; Palmer and O'Keefe, 1990; Pozo et al., 1997; Stanford and Hauer, 1992; Ward and Stanford, 1984). 특히, 우리나라 대부분의 하천과 같이 댐에 의해 하천수질이 직접적인 영향

을 받는 경우 저수지와 하천 수질을 통합 관리할 필요가 있으며, 이를 지원하기 위한 수질예측 모델은 성층화된 저수지와 하류하천을 연속하여 해석할 수 있는 수계단위(river basin scale)의 모델을 사용하는 것이 효과적이다.

수질모델은 수체의 공간적 차원을 고려하는 수준에 따라 종방향 1차원(x), 수심방향 1차원(z), 수심평균 2차원(x-y), 횡방향 평균 2차원(x-z), 그리고 3차원(x-y-z) 모델로 구분되며, 수체의 특성에 맞는 모델의 선정은 수리 및 수질의 공간적인 변동성이 기준이 된다(Martin and McCutcheon, 1999). 일반적으로 하천은 수심과 폭에 비해 길이가 길고 유속이 빠르기 때문에 흐름방향의 유속에 의한 오염물질의 이송현상이 지배적이므로, 수심방향과 횡방향으로 완전혼합된 것으로 가정하는 종방향 1차원 모델이 주로 사용되었다(서동일과 이은형, 2003; 서동일 등, 2004; 정세웅, 2004b). 그러나 폭이 넓은 대하천에서는 지류나 점오염원 유입 후 완전 혼합이 일어나기까지 수질은 공간적인 편차를 보이므로 1차원 가정은 부적합하며 수심평균 2차원 모델이 필요하다(서동일 등, 2008; 한건연과 이올래, 2002; 홍성민 등, 2004). 반면 우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 길이가 폭에 비해 상대적으로 길며 수심이 깊은 경우, 수온성층화가 수체의 수리와 수질에 미치는 영향이 크기 때문에 일반적으로 종방향과 수심방향을 모의할 수 있는 횡방향 평균

[†] To whom correspondence should be addressed.
schung@chungbuk.ac.kr

2차원 모델(CE-QUAL-W2, 이후 W2)이 자주 적용되었다 (김윤희 등, 2001; 정세웅, 2004a; Chung and Gu, 1998; Sullivan et al., 2007).

주로 저수지 수리·수질 모델에 적용되었던 W2 모델은 버전 3.1부터 운동량방정식에 하천의 경사 항을 고려함으로써 저수지와 하천 연속시스템의 모의가 가능하게 되었다 (Berger et al., 2002; Cole and wells, 2004). W2 모델을 저수지와 하천 연속시스템에 적용할 경우 수계단위의 수질예측 효율성을 높일 수 있으며, 성층 저수지의 방류수가 하류 하천의 수온과 수질에 미치는 영향을 해석하는데 매우 효과적이다. 아울러 수심방향의 유속변화를 고려해 줄 수 있기 때문에 홍수시 또는 댐에서 플러싱 방류를 할 경우 홍수파로 인한 하천 바닥 저니층 재부상 효과를 더 잘 반영할 수 있다(Barillier et al., 1993). 그리고 한강을 제외한 대부분 하천에는 하구둑이 건설되어 있기 때문에 수심이 깊고 하천이 정체되어 성층화와 조류성장에 따른 내생부하가 발생한다. 따라서 정확한 하천 수질예측을 위해선 하구 지역의 유기물 내생부하에 대한 고려가 반드시 필요하다 (신재기와 조경제, 2000; 유선재 등, 1999; 조경제와 신재기, 1998). W2 모델은 기존의 1차원 모델로써는 한계가 있었던 하구 수체의 성층화와 내생부하를 보다 더 정확히 모의할 수 있는 장점이 있다.

본 연구의 목적은 대청댐저수지-하류하천-금강하구담수호 연속시스템을 대상으로 수리, 수온, 그리고 부유물질(SS) 농도의 동적 변화를 모의할 수 있는 2차원 횡방향 평균 W2 모델을 구축하고, 실측자료를 이용하여 모델의 예측 성능을 평가하는데 있다. W2 모델을 저수지와 하천 연속시스템의 해석에 적용하는 것은 국내 최초이며, 본 연구 결과는 수질오염총량관리, 저수지-하천운영, 인공운하 수질 해석 등에 활용가능하다고 사료된다. 모델의 성능을 검증하기 위해 2004년 수문사상을 대상으로 매개변수를 보정하였으며, 2006년 홍수기 수문사상을 대상으로 모델을 검증하였다.

2. 연구방법

2.1. W2 모델의 수리·수온예측 알고리즘

W2 모델의 수리해석은 수위, 압력, 수평방향 유속, 수심 방향 유속, 물질의 농도, 밀도 등 6가지 변수를 연속방정식(1), x방향 운동량 방정식(2), 정수압 방정식(3), 자유수면 방정식(4), 밀도상태방정식(5), 물질 수지방정식(6) 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분수치해석법(Finite different Method, FDM)을 사용하여 푼다. 하천 구간에 대해 적용할 경우 x방향 운동량 방정식과 정수압 방정식은 하상경사(channel slope)를 고려해 준다. 운동량과 정수압 및 자유수면 방정식을 포함하는 수리해석은 음해적 유한차분법(implicit FDM)을 사용하고, 물질 이송항은 ULTIMATE-QUICKEST 법을 사용하여 해석함으로써 급격한 수온과 농도변화 모의에서 발생할 수 있는 수치확산과 수치진동 문제를 해결하였다. 또한 y-방향에 대해 평균

화하기 때문에 x-방향 운동량 방정식은 횡방향에 대한 확산항을 가지게 되며, z-방향 운동량 방정식은 정수압 방정식으로 가정한다. 흐름에 의해 발생하는 난류의 응력항들은 Prandtl의 혼합길이 이론(mixing length theory)에 의한 eddy viscosity를 사용하여 속도경사와 와점성 계수의 함수로 표현된다.

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Bu}{\partial t} = & -\frac{\partial(Buu)}{\partial x} - \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + Bg\sin\alpha + g\cos\alpha B \frac{\rho_\xi}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ & - B \frac{g\cos\alpha}{\rho} \int_\xi^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(BA_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \cos\alpha \tag{3}$$

$$\frac{\partial B\xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\xi^H uBdz - \int_\xi^H qBdz \tag{4}$$

$$\rho = f(C_{SS}, C_{TDS}, T) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial BC}{\partial t} = & -\frac{\partial(BuC)}{\partial x} - \frac{\partial(BwC)}{\partial z} + Bq_s + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(BE_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, B = 저수지 폭(m), u = x방향 유속(m/s),
 w = z방향 유속(m/s), q = 측방 유입량(m³/sec),
 α = 하천경사, P = 압력(N/m²),
 ρ = 밀도(kg/m³), τ = 전단응력(m³/sec²),
 A = 와점성계수(m²/sec), H = 수심(m),
 ξ = 자유수면 위치(m), C = 물질의 농도(mg/L),
 C_{TDS} = 총용존부유물농도(mg/L), T = 수온(°C),
 E = 와확산계수(m²/sec)이다.

수체의 수온은 유입수의 수온과 표층에서 교환되는 열에 의해 계산된다. 표층에서의 열교환(식 (7))은 태양 복사에너지와 바람에 의해 결정되는데 태양 복사에너지 중 단파에너지(short wave radiation)와 대기 중에서 복사되는 장파에너지(long wave radiation)는 수체에 열에너지를 공급하고, 수체 표면에서 반사되는 단파와 장파 에너지, 바람에 의해 발생하는 증발, 전도에 의한 열 손실 등에 의해 열교환이 일어난다.

$$H_n = H_s + H_a - (H_{sr} + H_{tr} + H_{br} + H_e + H_c) \tag{7}$$

여기서, H_n = 수표면을 통한 순수 열 교환량(W/m²),

- H_s = 입사하는 단파광선의 열량(W/m²),
- H_a = 입사하는 장파광선의 열량(W/m²),
- H_{sr} = 반사하는 단파광선의 열량(W/m²),
- H_{ar} = 반사하는 장파광선의 열량(W/m²),
- H_{br} = 수표면으로부터 발생하는 장파광선의 열량(W/m²),
- H_e = 증발에 의한 손실 열량(W/m²),
- H_c = 전도에 의한 손실 열량(W/m²)

W2 모델에서 탁수 거동 예측의 신뢰도는 유입수 밀도류의 수리동력학 해석과 수중에 포함된 SS의 침강 알고리즘에 크게 좌우된다. SS의 물질수지 방정식(8)은 x방향과 z방향의 이송과 난류확산, 침강속도의 항으로 표현된다. W2 모델에서는 입자의 침강속도를 상수로 가정한다. 또한 SS 입자를 여러 그룹으로 나누어 각각의 침강속도를 다르게 모의할 수 있다.

$$\frac{\partial BSS_i}{\partial t} + \frac{\partial UBSS_i}{\partial x} + \frac{\partial WBSS_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial SS_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BE_z \frac{\partial SS_i}{\partial z} \right) - v_{s_i} \quad (8)$$

- 여기서 SS_i = SS 그룹의 농도(g/m³),
- E_x = x 방향의 외확산계수(m²/sec),
- E_z = 수심방향 외확산계수(m²/sec),
- v_s = SS 그룹의 침강속도(m/d)

2.2. 수리, 수질 관측지점

본 연구의 대상지역은 금강 하구언으로부터 약 132 km 상류에 위치한 대청다목적댐 조정지와 본댐 저수지를 포함한다. 대상 하천 구간으로 유입하는 주요 오염원은 대전권에서 유입하는 갑천, 청주권에서 유입하는 미호천, 그리고 논산과 부여권에서 유입하는 논산천이 있다(Fig. 1). 하천 구간 내 8개의 국토해양부 수위관측소와 7개의 환경부 수질측정망이 운영되고 있다. 하천에서 수리모델의 적합성을 평가하기 위해 금강홍수통제소(www.geumriver.go.kr)에서 관리하는 수위표지점의 실측 수위자료를 사용하였다. 모델의 경계조건과 보정 및 검증을 위한 수온 및 수질 자료는 국립환경과학원(http://smat.nier.go.kr)에서 8일 간격으로 연속 측정된 자료를 수집하여 사용하였다(Fig. 1, Table 1). 또한 일별 모의결과의 신뢰도를 확인하기 위해 금강 본류에서 취수하는 부여 취수장의 일별 수온 측정 자료를 수집하여 예측 결과와 비교하였다.

2.3. 모델의 구성

W2 모델의 입력자료는 경계조건과 초기조건으로 구성된다. 경계조건으로는 지형자료, 모델의 유입량, 방류량, 기상자료, 유입수온, 유입농도 등이 있으며, 수체의 초기 수온과 수위, 수질 농도 등이 초기조건으로 구성된다. 모의영역은 수체의 특성을 고려해 대청댐, 조정지댐, 금강본류, 하구언 등 4개의 수체(Waterbody, WB)로 나누어 구성하였다. WB_1은 대청댐 상류 지점인 가덕교에서부터 댐축까지 금

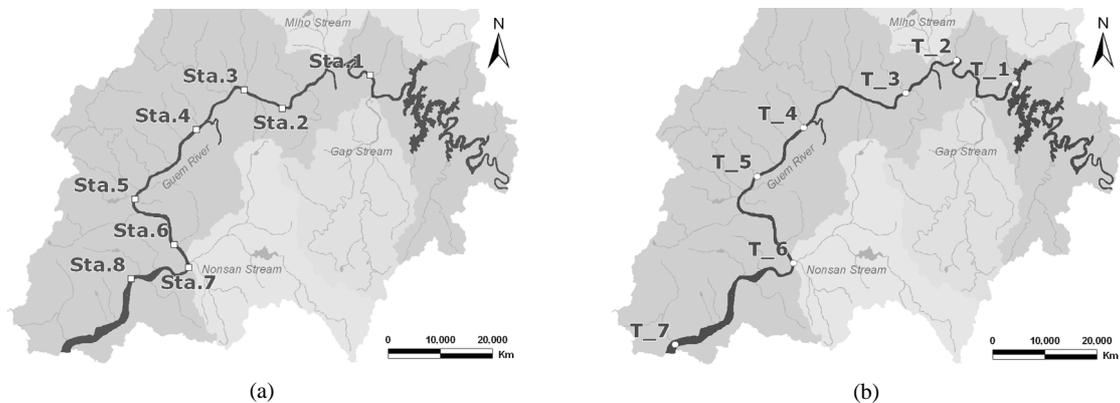


Fig. 1. Locations of (a) river gauge station and (b) water quality monitoring sites.

Table 1. Description of river gauging stations and water quality monitoring sites

River gauging stations			Water quality monitoring sites		
Site	Name	Location (km)	Site	Name	Location (km)
Sta. 1	Maepo	123.2	T_1	Deacheong bridge	137.0
Sta. 2	Maeogu	97.9	T_2	Bugang	115.5
Sta. 3	Gongju	89.5	T_3	Guemnam	106.0
Sta. 4	Jindu	76.0	T_4	Gongju	76.0
Sta. 5	Gyuam	56.8	T_5	Buyeo	61.5
Sta. 6	Banjowon	43.3	T_6	Ganggyeong	38.0
Sta. 7	Ganggyeong	37.8	T_7	Estuary	0.0
Sta. 8	Ippo	25.6			

강분류와 지류하천을 6개의 branch로 구성하였다. 각각의 지류는 회인천, 주원천, 삼산천, 품곡천, 소옥천을 대상으로 하였다. WB_2는 대청조정지댐, WB_3는 조정지댐 하류로부터 금강분류 47 km(하구둑 기준)까지를 대상으로 하였으며, WB_4는 금강분류 47 km부터 하구둑까지를 대상으로 하여 모의 격자를 구성하였다(Fig. 2).

하천이 정체되어 있는 하구구간인 WB_4는 수리 구조물에 의해 구분된 것이 아니기 때문에 하천수위의 변화를 기준으로 나누었다. 금강 분류에 영향을 미치는 지류로는 갑천, 미호천, 논산천만 고려하였으며 모델에서는 tributary로 구성하였다. 모델의 유한차분 격자는 종방향으로 하천과 저수지의 형상을 반영하여 1~0.5 km 간격으로 총 240개의 Segments, 수심방향으로는 0.5~1.0 m 간격으로 69개의 Layers로 구성하였다. 저수지의 지형자료는 선행연구(정세웅, 2004a)에서 보정한 자료를 장계교 상류부와 소옥천을 포함하여 확장하였고, 금강분류의 지형자료는 건설교통부의 하천정비기본계획에서 구축한 HEC-RAS 자료로부터 횡단면 자료를 추출하여 사용하였다.

모델에서 저수지(WB_1), 조정지댐(WB_2), 하구담수호(WB_4) 영역은 수면경사가 없는 것으로 가정하여 초기수위를 일정하게 주었고, 하천구간(WB_3)은 수면 경사를 고려해 2개의 branch로 나누었다. 모델에 입력하는 하천 경사값은 수면경사를 산정하는 것이 어렵기 때문에 하천 바닥표고를 최소자승법으로 기울기를 산정하여 사용하였다(Fig. 3). 모델의 구성과 각 branch별 하상 기울기를 Table 2에 정리하였다.

모델의 상류단과 하류단 수리 경계조건은 각각 유량과 수위로 구성하였다. 저수지의 유입량과 방류량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, www.wamis.go.kr)에서 추출하였으며, 하구둑의 수위자료는 금강홍수통제소(www.geumriver.go.kr)의 실시간 관측 자료를 사용하였다. 하구에서 경계조건으로 수위를 사용하기 위해서는 수심별 수온 경계조건이 필요하다. 그러나 하구언에서 수심별로 실측한 수온자료가 없기 때문에 국립환경과학원에서 측정한 하구둑 방류 수온 자료를 모든 수심에 동일하게 적용하였다. 이것은

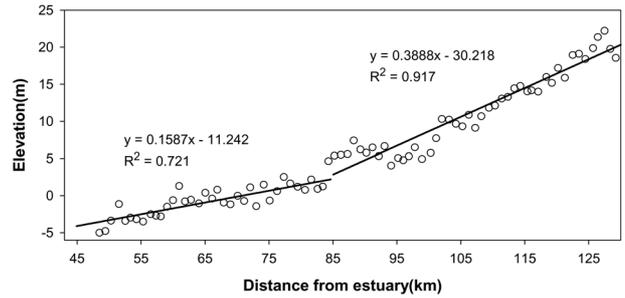


Fig. 3. Linear regression of the channel slope for eye fitting.

모델 입력자료의 불확실 요소로 작용하며, 하구 수체의 수온과 수질예측에 오차를 야기할 수 있다. 저수지의 유입유량은 대청댐의 일별 유입유량과 홍수기 시간별 자료를 사용하였으며, 저수지로 직접 유입하는 지류 유량은 유역면적비법으로 산정하였다. 기상자료는 대청댐에서 직선거리 8 km 떨어진 대전기상대의 관측자료를 사용하였으며, 대청댐 저수지에 대한 풍향과 풍속 자료는 문의면사무소에 설치된 대청 AWS 자료를 사용하였다. 유입수의 수온은 실측자료를 사용하였으며, 일부 결측 자료는 기상자료로부터 산정하였다. 갑천, 미호천, 논산천의 유량 자료는 금강홍수통제소의 실시간 수위 자료를 수위-유량 곡선식을 이용하여 산정하였고, 수온 자료는 국립환경과학원에서 8일 간격으로 측정한 지류합류지점의 자료를 사용하였다.

2.4 모델 매개변수

모델의 매개변수는 WB_1의 경우 선행연구(Chung et al., 2006)에서 보정한 매개변수를 그대로 사용하였으며, 나머지 구간에 대해서는 민감도 분석을 통해 유효한 범위 내에서 보정하였다. 하천구간인 WB_3의 경우 유속이 크기 때문에 흐름방향 확산계수인 AX와 DX의 값을 저수지에 비해 크게 입력해 주었다(Chapra, 1997; Cole and Wells, 2004). 또한 저수지구간인 WB_1과 WB_2, WB_4는 Chezy 계수, 하천구간인 WB_3에서의 Manning 조도계수를 사용하였다. 바람차폐계수인 WSC는 계절과 풍향에 따라 주변 지형지물의 영향이 다르기 때문에 0.1~0.85의 범위로 입력해 주

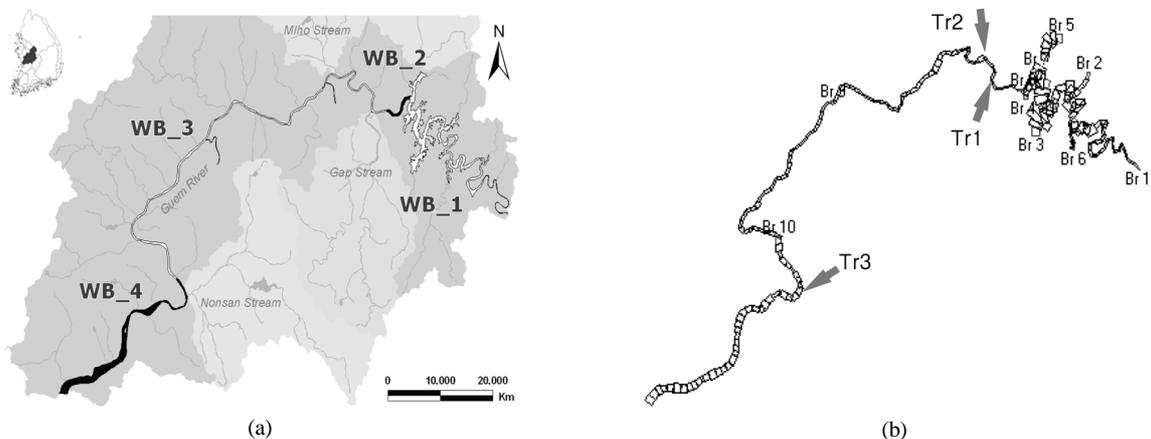


Fig. 2. Compartment of water bodies and segments for the reservoir-river system. (a) water bodies, (b) segments

Table 2. Channel slopes and bottom elevations for each branch and water bodies

Water body	Section		Branch	Slope	Bottom elevation (m)
WB_1	Deacheong reservoir	Geum river	Branch 1	0	23.0
		Hoein stream	Branch 2		
		Juwon stream	Branch 3		
		Samsan stream	Branch 4		
		Poomgok stream	Branch 5		
		So-oak stream	Branch 6		
WB_2	Re-regulation reservoir		Branch 7	0	20.0
WB_3	Guem river		Branch 8	0.00039	-6.0
			Branch 9	0.00016	
WB_4	Guem estuary		Branch 10	0	-9.0
Tributary	Gap stream		Tributary 1	-	-
	Miho stream		Tributary 2	-	-
	Nonsan stream		Tributary 3	-	-

Table 3. Calibrated parameter values of the model

Parameters (Unit)	Variable	WB_1	WB_2	WB_3	WB_4
Horizontal eddy viscosity ($m^2 s^{-1}$)	AX	1.0	1.0	20.0	1.0
Horizontal eddy diffusivity ($m^2 s^{-1}$)	DX	1.0	1.0	50.0	1.0
Bottom friction factor ($m^{0.5} s^{-1}$)	CHEZY / MANN	CHEZY (70)	CHEZY (70)	MANN (0.020 ~ 0.030)	CHEZY (70)
Wind sheltering coefficient	WSC	0.1 ~ 0.85			
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	0.60	0.60	0.60	0.60
Light extinction for pure water (m^{-1})	EXH20	0.30	0.30	0.30	0.30
Coefficient of bottom heat exchange ($Wm^2 s^{-1}$)	CBHE	0.50	0.30	0.30	0.30

었다(Chung et al., 2006). 그러나 수심이 깊은 저수지와는 달리 하천구간에서 매개변수의 수온에 대한 민감도는 크지 않았기 때문에 대부분의 매개변수는 저수지와 동일한 값을 사용하였다(Table 3).

기존의 연구에서는 SS를 모의하기 위해 경계지점에서 연속 측정된 탁도를 모델의 입력자료로 사용하였다. 탁도와 SS는 일반적으로 높은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Gippel, 1995; Lewis, 1996). 그러나 빛에 의한 산란정도를 나타내는 탁도가 SS를 나타내는 간접지표로 사용될 수 있지만, SS는 탁도와 물리적 특성이 다르기 때문에 기존의 탁도를 사용하여 모의하던 연구에서는 한계가 있었다(정세웅 등, 2005, 2008b). 본 연구에서는 저수지 유입지점에서 연속 측정된 탁도를 측정지점의 탁도-SS 상관관계(Fig. 4)를 이용하여 모델의 입력값을 SS로 변환하여 SS로써 모의하였다(정세웅 등, 2008a; Sullivan et al., 2007). 모의된 SS는 방류수와 하천에서 실측한 SS 농도와 비교하였다. 또한 입자의 크기에 따른 침강속도를 고려하기 위해 SS의 그룹을 나누었다. SS 그룹은 대청댐 내의 입도분석 결과를 바탕으로 입자의 크기를 1, 5, 20 μm 로 나누고 구성 분율을 각각 20, 50, 30%로 하였다(정세웅 등, 2007, 2008a). 대청호에서 각 입자의 침강속도는 Stoke's 방정식에 입자의 형상과 표면 거칠기를 고려하여 모의값과 실측값의 차이가 최소가 되도록 시행오차법으로 보정하였다(Table 4). 금강지류에서 유입 SS농도는 8일 간격으로 측정된 자료를 사용하였다. 그러나 갑천, 미호천, 논산천에서는 SS 입도분석 자료가 없어서 강우시 대청댐 상류 하천에서 측정된 SS 입

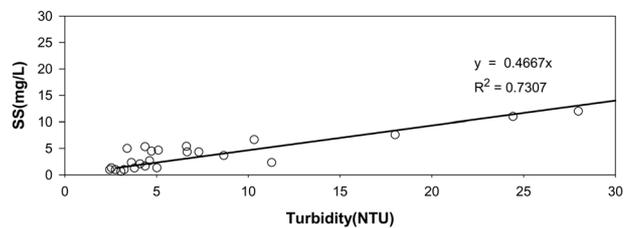


Fig. 4. Correlation of turbidity and SS concentration measured at inflow boundary of Daechong reservoir.

Table 4. Classification of SS particles, relevant fraction and settling velocity

Class	Diameter (μm)	Fraction (%)	Velocity (m/d)
SS ₁	1.0	20	0.05
SS ₂	5.0	50	0.10
SS ₃	20.0	30	2.00

도분포와 유사하다고 가정하였다. 강우시 대청댐 상류 하천인 무주남대천, 봉황천, 주원천, 영동천, 삼상천, 초강, 보청천 등에서 채수한 SS의 입자 크기(정세웅 등, 2007)는 대부분 20 μm 이상이였기 때문에 미세측 하천의 강우 기간 동안 SS 대표입경은 20 μm , 그리고 비강우 기간은 1 μm 로 가정하였다. 그러나 이것은 모의 결과의 오차원인으로 작용할 수 있으므로, 모델 신뢰도를 높이기 위해서는 실측자료를 사용할 필요가 있다.

3. 결과 및 고찰

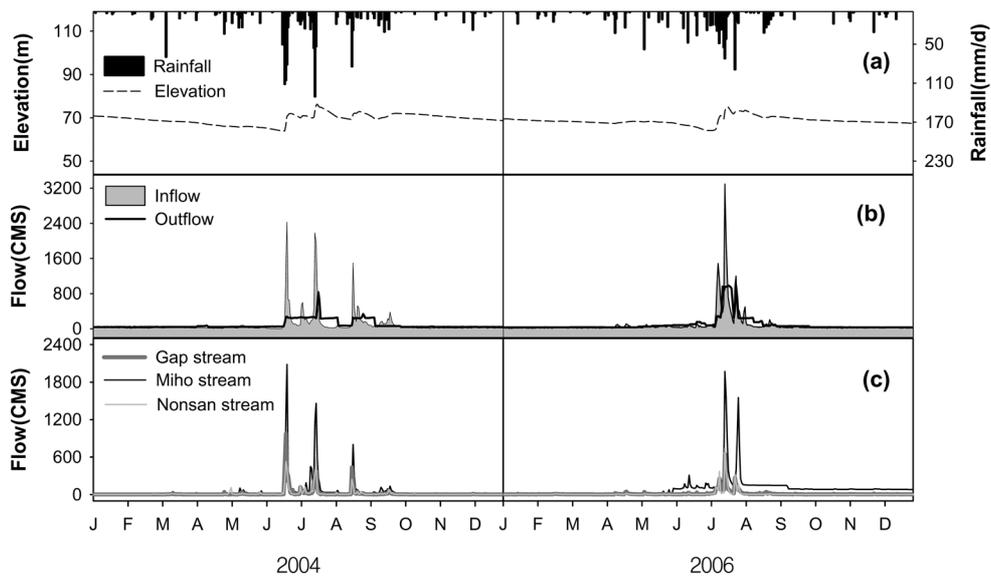


Fig. 5. Hydrological conditions of Deacheong reservoir and Guem river. (a) rainfall and water level, (b) dam inflow and discharge, (c) tributary inflows

3.1 모의 기간의 수문사상

모델의 적합성을 확인하기 위해 2004년과 2006년 홍수기를 대상으로 보정과 검증을 실시하였다. Fig. 5는 2004년과 2006년의 대청호와 금강본류로 유입되는 지류하천의 수문사상을 나타낸 것이다. 2004년 홍수기에는 저수지 일평균 유입유량이 1000 m³/s가 넘는 중요 강우사상이 3개가 있었다. 각각의 강우사상에 대한 저수지 최대 일평균 유입유량은 2,431, 2,182 그리고 1,500 m³/s이었다. 이로 인해 2004년 저수지의 수위는 최소 EL. 64.0 m에서 최대 EL. 76.2 m까지 상승하였다. 또한 동일 기간에 금강 본류로 유입하는 지류하천 중 유량이 가장 큰 미호천의 일평균 최대 유량은 2081, 1458, 801 m³/s이었다. 강우기간 동안 대청댐과 조정지댐은 일평균 180 m³/s로 방류를 하였으며 두 번째 강우사상 때에는 수문방류를 포함하여 최고 831 m³/s로 방류하였다. 2006년 대청호에는 강우기간 동안 일평균 유입유량이 3,000 m³/s가 넘는 강우 사상이 발생하였으며, 금강

본류로 유입하는 미호천에서도 유입유량이 1000 m³/s가 넘는 두 번의 중요 강우사상이 발생하였다. 이 기간 동안 저수지의 수위는 최소 EL. 64.07 m에서 EL. 75.21 m까지 상승하였다. 또한 강우기간 동안 댐 최대 방류량은 975 m³/s였다.

3.2. 수위 예측

모델의 저수지 수위 및 수온예측 성능은 이미 선행연구 (Chung et al., 2006)에서 검·보정을 하여 잘 맞는 것으로 평가되었기 때문에 본 논문에서는 생략하였다. 댐 하류 하천에 대한 수리해석의 적합성을 확인하기 위해 하천의 수위관측 지점에서 실측 수위와 모의수위를 비교하였다(Fig. 6). 보정기간인 2004년과 검증기간인 2006년 모두 모델은 강우-유출에 따른 하천의 홍수와 전달속도와 수위 변화를 적절히 모의하고 있다. 모델의 오차 분석을 위해 MAE(mean absolute error)와 RMSE(root mean square error), R²(coeffi-

Table 5. Comparison of MAE and RMSE of water surface elevation in Guem river

	2004				2006			
	Range (m)	MAE ^a (m)	RMSE ^b (m)	R ^{2c}	Range (m)	MAE (m)	RMSE (m)	R ²
Sta. 1	18.24 ~ 21.90	0.11	0.18	0.90	18.44 ~ 22.75	0.28	0.46	0.70
Sta. 2	9.72 ~ 16.29	0.09	0.14	0.97	10.07 ~ 14.02	0.25	0.39	0.90
Sta. 3	6.00 ~ 14.59	0.29	0.40	0.96	6.47 ~ 11.18	0.33	0.46	0.92
Sta. 4	2.29 ~ 11.72	0.28	0.39	0.94	2.69 ~ 8.46	0.38	0.61	0.94
Sta. 5	1.03 ~ 8.25	0.19	0.34	0.84	0.20 ~ 6.00	0.24	0.46	0.86
Sta. 6	-0.70 ~ 4.12	0.14	0.26	0.79	-0.68 ~ 4.70	0.32	0.60	0.52
Sta. 7	-0.82 ~ 3.60	0.28	0.32	0.75	-0.75 ~ 4.21	0.45	0.59	0.65
Sta. 8	-1.03 ~ 2.75	0.20	0.26	0.56	-0.96 ~ 3.25	0.21	0.26	0.92

^aMAE(mean absolute error) = 1/n ∑_{i=1}ⁿ |y_{oi} - y_{si}|, where y_o and y_s are observed and simulated values, respectively.

^bRMSE(root mean square error) √(1/n ∑_{i=1}ⁿ (y_{oi} - y_{si})²)

^cCoefficient of determination

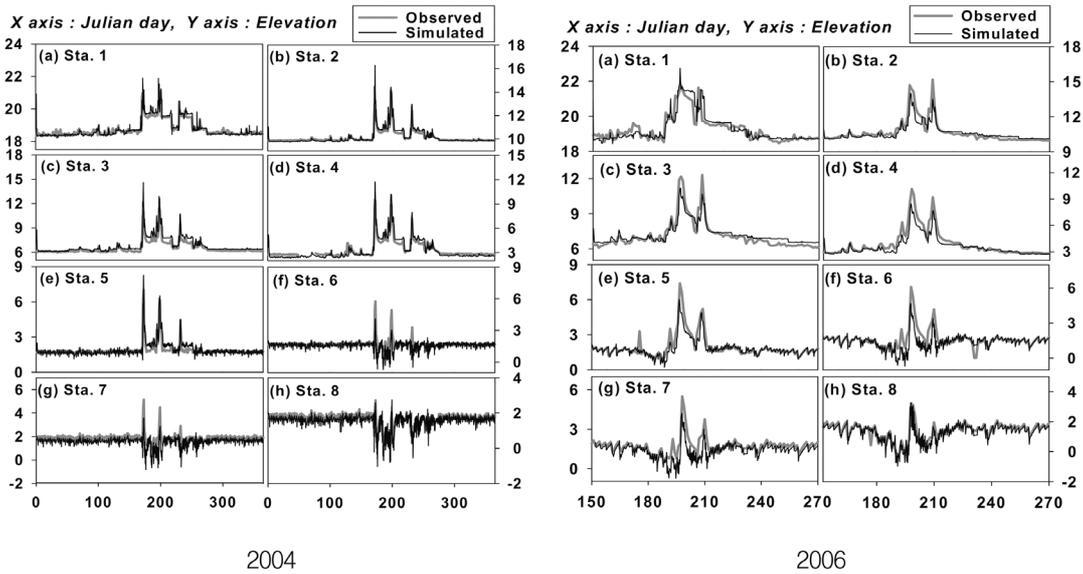


Fig. 6. Comparison of observed and simulated water surface elevations at (a) Maepo, (b) Maeogu, (c) Gongju, (d) Jindu, (e) Gyuam, (f) Banjowon, (g) Ganggueong, (h) Ippo.

cient of determination)를 사용하였다. MAE와 RMSE는 모의값과 실측값의 오차를 나타내는 지표로 단위가 실제 변량의 단위와 같고, 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

2004년 모델과 실측수위의 MAE와 RMSE는 각각 0.11 ~ 0.29 m, 0.14 ~ 0.40 m의 범위를 보였으며, 하천의 수위 변동 폭은 각 지점에 따라 다르게 나타났지만 3.66 ~ 9.62 m의 범위를 가져 하천수위의 MAE와 RMSE가 매우 작음을 확인할 수 있었다. 2006년 하천 수위의 MAE와 RMSE는 각각 0.21 ~ 0.45, 0.26 ~ 0.61 m로 수위의 범위인 3.95 ~ 5.80 m에 비해 비교적 작은 범위를 나타내었다. 또한 R²값이 평균적으로 약 0.82로 나타나 모델은 하천의 수위변동을 잘 예측하는 것으로 평가되었다.

3.3. 수온 예측

각 수질 측정망 지점에 대한 실측수온과 모의값을 Fig. 7

에 비교하여 나타내었다. 또한 수온의 오차분석을 위해 모의 수온과 실측수온의 MAE와 RMSE를 계산하였다(Table 6). 2004년과 2006년 홍수기 하천의 수온 범위는 각각 19 ~ 30, 7.0 ~ 16°C의 범위를 가졌다. 2004년 수온의 MAE는 1.29 ~ 2.31°C의 범위를 가지며 RMSE는 1.55 ~ 3.07°C의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 부강지점(T₂)의 수온이 다른 지점에 비해 오차가 크게 나타났는데 댐 방류수(T₁) 수온의 예측결과는 실측값을 잘 반영하는 것으로 보아 갑천에서 유입하는 수온의 영향이 큰 것으로 판단된다. 지류의 수온 자료는 8일 간격으로 측정된 것이기 때문에 강우-유출시 급격하게 변하는 하천수온을 제대로 반영하지 못한 것이 오차의 원인으로 사료된다. 2006년 홍수기 동안 MAE는 0.74 ~ 1.63°C, RMSE는 0.83 ~ 3.92°C의 범위를 나타내어 하천의 수온 범위에 비해 매우 작은 오차를 나타내므로, 제한된 하천 경계조건 입력자료에 사용하였음에도 불구하고 모델은 하천의 수온을 비교적 잘 예측하는 것으로 평가

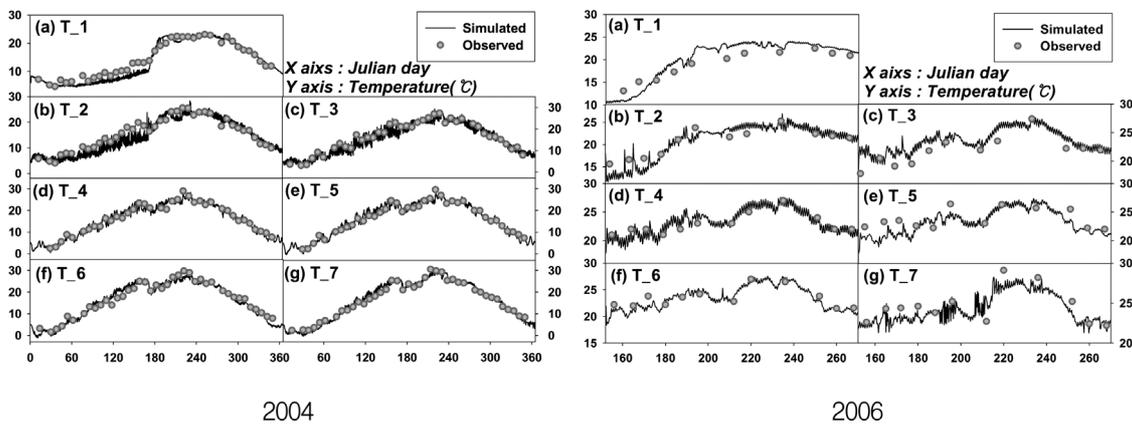


Fig. 7. Comparison of observed and simulated data for water temperature at (a) Deacheong bridge, (b) Bugang, (c) Guemnam, (d) Gongju, (e) Buyeo, (f) Ganggyeong, (g) Estuary.

Table 6. Comparison of MAE and RMSE of water temperature in Guem river

	2004				2006			
	Range (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ²	Range (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ²
T_2	3.84 ~ 28.31	2.31	3.07	0.86	11.61 ~ 26.89	1.63	3.92	0.86
T_3	2.30 ~ 29.29	1.42	1.89	0.94	18.00 ~ 27.65	1.39	2.96	0.72
T_4	0.45 ~ 28.36	1.30	1.60	0.95	17.86 ~ 27.56	0.86	1.13	0.78
T_5	-0.40 ~ 28.22	1.29	1.55	0.95	17.86 ~ 27.35	1.14	1.82	0.68
T_6	-0.99 ~ 28.56	1.45	1.81	0.95	18.35 ~ 27.56	0.74	0.83	0.83
T_7	-0.39 ~ 29.93	1.30	1.58	0.97	21.28 ~ 28.25	0.90	1.06	0.90

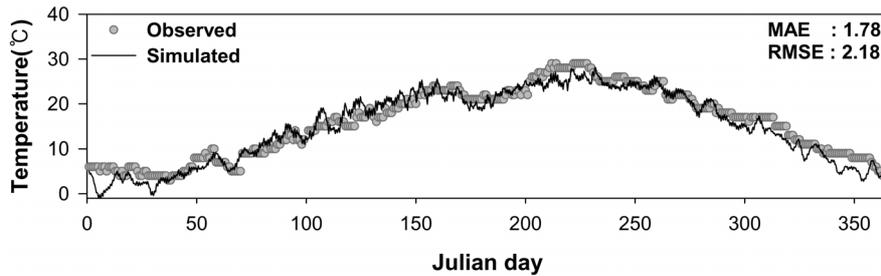


Fig. 8. Comparison of observed and simulated water temperatures at Buyeo intake (2004).

되었다. 이는 W2 모델의 수온예측 지배 방정식이 기상과 태양복사에너지 등 상세한 자료를 사용하고 대청댐 저수지에서 충분히 보정된 것이 원인으로 판단된다.

하천의 수온을 비교하기 위해 사용된 실측자료는 8일 간격으로 측정된 값이다. 하천의 수온은 기온, 지류유입 및 댐 방류수의 수온변화에 따라 시간별로 급변하기 때문에 좀 더 정밀한 시계열 변화를 비교해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 금강 본류에 위치하고 있는 부여 취수장의 취수원수에 대한 일 측정 수온 자료와 모델의 결과를 비교하였다. W2 모델은 하천과 저수지에서의 취수를 모의할 수 있으며 취수원수에 대한 수온과 수질을 결과파일로 나타낼 수 있다. 부여취수장의 실측 수온과 모델에 의해 예측된 수온의 시계열 비교는 Fig. 8과 같다. 모델은 2004년 수온의 시계열 변화를 적절히 반영하였고, MAE와

RMSE가 각각 1.78, 2.18°C로 비교적 낮게 나타나 수온 예측 성능이 매우 높음을 알 수 있었다.

3.4. SS 모의 결과

대청댐 직하류인 대청교와 하류하천에서의 모의값과 실측 SS 농도를 비교하여 Fig. 9에 제시하였다. 비교한 결과 모델은 강우에 의해 급변하는 SS 농도를 비교적 잘 모의하였다. 특히 저수지의 입도분석 결과를 바탕으로 SS 그룹을 나누어 모의한 대청댐 방류수의 SS 모의결과는 실측값과 매우 잘 부합하였으며, 하천에서도 지천에서의 침투유량 유입에 따른 SS의 농도 변화를 비교적 잘 모의하는 것으로 보인다.

SS의 MAE와 RMSE는 대청교와 부강지점에서는 각각 3.20, 4.85 mg/L와 7.60, 12.10 mg/L로 SS 농도의 범위에

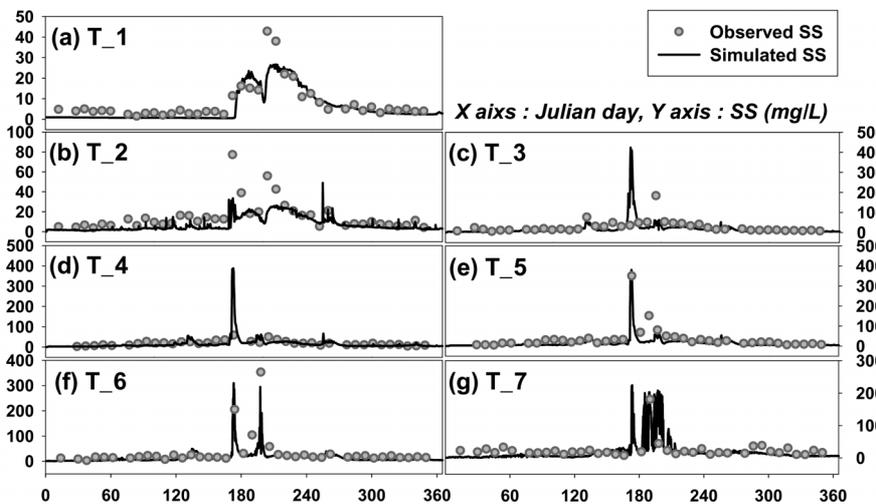


Fig. 9. Comparison of observed and simulated suspended sediment (SS) at (a) Deacheong bridge, (b) Bugang, (c) Guemnam, (d) Gongju, (e) Buyeo, (f) Ganggyeong, (g) Estuary.

Table 7. Comparison of MAE and RMSE of suspended sediment (SS) in Guem river

	2004			
	Range (mg/L)	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R ²
T_1	0.49 ~ 26.51	3.20	4.85	0.76
T_2	0.00 ~ 55.86	7.60	12.10	0.66
T_3	0.00 ~ 423.99	18.24	38.37	0.12
T_4	0.00 ~ 387.46	16.63	50.48	0.36
T_5	0.00 ~ 380.13	15.68	26.43	0.85
T_6	0.69 ~ 309.47	17.04	44.11	0.59
T_7	0.95 ~ 223.83	16.88	35.45	0.78

비해 매우 낮은 값을 나타내었다(Table 7). 그러나 미호천 합류 이후 지점에서는 MAE 값이 평균적으로 약 17 mg/L로 나타나 오차가 증가하였다. 이러한 결과는 SS농도의 유입특성에 기인하는 것으로 평가된다. 일반적으로 SS와 같은 입자상 물질은 유량과 매우 높은 상관성을 가진다(한국농촌공사, 2006; 한국수자원공사, 2004; Lewis, 1996). 첫 번째 강우 시 미호천에서는 약 2000 m³/sec 높은 유입이 있었고 초기세척효과에 의해 SS의 농도가 시간 단위로 급격히 변화했을 것으로 생각된다. 모델은 이러한 SS의 급격한 농도변화를 잘 나타내고 있다. 그러나 모의값은 침투농도에서 실측값과 큰 편차를 보이고 있는데, 그 이유는 실측값이 8일 간격으로 측정된 자료이기 때문에 실제 급변하는 SS의 농도변화를 제대로 반영해 주지 못한 것으로 추측된다. 또한 지류에서 유입하는 SS 그룹을 하나의 입경으로 가정할 오차가 매우 클 것으로 판단된다.

SS 농도의 적절한 시계열 변화를 비교하기 위해 부여 취수장의 탁도와 SS 측정자료를 사용하였다. 부여취수장에서

SS의 농도는 주 1회 측정하고 탁도는 매일 측정하기 때문에 탁도-SS 상관관계를 이용해 모의 SS 농도를 탁도로 변환하여 일 측정 탁도와 비교하였다. 부여취수장의 2004년 탁도와 SS의 상관관계는 Fig. 10과 같다. 상관관계는 30 NTU를 기준으로 고탁도와 저탁도로 나누었다. 부여취수장의 일 측정 탁도와 변환된 탁도의 시계열 자료를 비교해본 결과, MAE와 RMSE는 각각 12.20, 27.80 NTU였으며 모델은 탁도의 시계열 변화를 적절히 반영하였다. 그러나, 큰 강우시 모의값과 실측값의 침투 탁도는 다소 큰 편차를 보였는데, 이는 갑천과 미호천에서 유입하는 부유사의 입경분포 자료가 실측자료 부족으로 갈수기와 홍수기에 각각 하나의 입경으로 가정한 것이 중요한 원인이라 판단된다. 또한 취수구조물이 하천 가장자리에 위치하고 있으며 모의값(하천의 횡방향평균농도)과 실측값(착수정 시료 분석)의 공간적 차이도 오차의 원인으로 사료된다(Fig. 11).

저수지와 하천 그리고 하구까지 연속된 시스템 해석에 고려되어야 할 또 다른 사항은 계산의 효율성이다. 본 연구에서 2004년 한 해 동안 대청댐 저수지로부터 하구까지 수리와 수온 및 탁도를 예측하는데 개인용 컴퓨터(1.88 Ghz, 1.00 GB RAM)로 3시간이 소요되는 것으로 나타나, 시간과 비용측면에서 2차원 모델적용의 효율성은 비교적 높은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 저수지와 하천 하구를 연속적으로 모의할 수 있는 통합시스템을 구축하고 이를 검증하기 위해 2004년과 2006년 대청댐과 금강을 대상으로 수리, 수온 및 SS를 모의하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

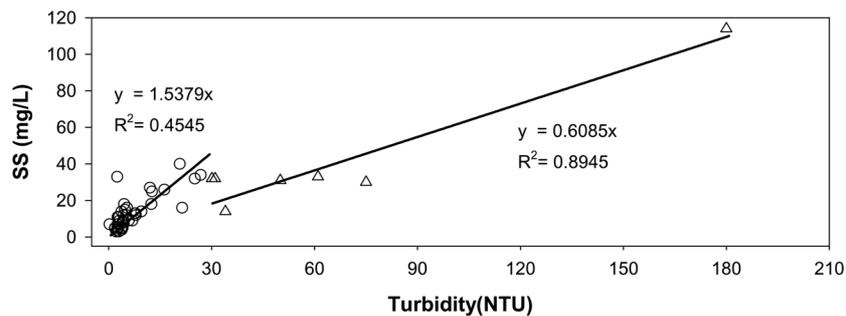


Fig. 10. Correlation of turbidity and SS concentration at Buyeo intake.

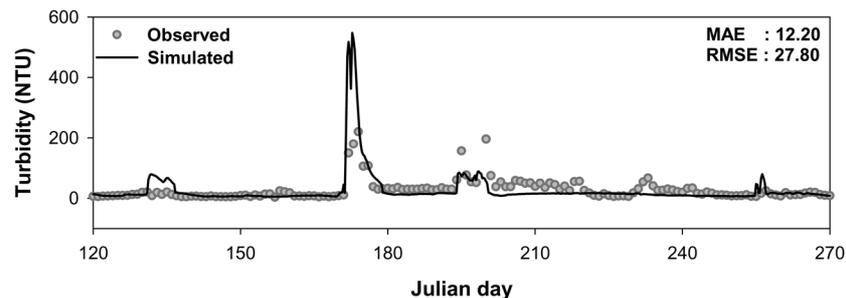


Fig. 11. Comparison of observed and simulated turbidity at Buyeo intake (2004).

- 1) 저수지와 하류하천을 연속하여 모의한 2차원 수리모델은 강우사상이 비슷한 2004년과 2006년의 하천 수위의 시계열 변화를 적절히 모의하였다.
- 2) 금강 하류에 위치한 부여 취수장의 일별 측정 수온과 비교한 결과 모델의 하천수온 예측 성능은 매우 높은 것으로 평가된다.
- 3) 저수지와 하천의 SS를 연속모의 한 결과 대청교와 부강지점의 MAE는 3.20, 7.60 mg/L로 낮게 나타났으나, 미호천 유입 이후 지점에서는 평균적으로 MAE의 값이 약 17 mg/L로 증가하였다.
- 4) SS 예측 오차를 최소화하기 위해서는 갑천과 미호천에서 유입하는 부유사의 입경분포 실측자료가 확보되어야 하며, 모델의 정확한 성능 평가를 위해서는 강우시 연속 측정된 SS 농도와 비교가 필요하다.
- 5) 2004년 한 해 동안 대청댐 저수지-하류하천-하구를 하나의 시스템으로 해석하여 수리, 수온, SS 농도를 예측하는데 개인용 컴퓨터(1.88 Ghz, 1.00 GB RAM)로 약 3 시간이 소요되어 모델의 효율성은 비교적 높은 것으로 평가되었다.
- 6) 본 연구에서 구축한 모델링시스템은 댐 방류수 수온과 탁도의 동적인 예측과 함께 저수지와 하류하천을 연계한 수리 및 수질해석 도구로 활용 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-3)에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일(2001). 2차원 수리모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링. *상하수도학회지*, **15**(1), pp. 40-49.
- 서동일, 윤종욱, 이재운(2008). QUAL2E, QUAL2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질 모델링 결과 비교 분석. *상하수도학회지*, **22**(1), pp. 121-129.
- 서동일, 이은형(2003). 불연속적으로 흐르는 소하천을 위한 CAP 수질 모델의 개발. *상하수도학회지*, **17**(3), pp. 372-377.
- 서동일, 이종현, 이은형, 고익환(2004). QUAL2E를 이용한 금강 하류의 수질 모델링 및 오차 원인 분석. *대한환경공학회지*, **26**(8), pp. 933-940.
- 신재기, 조경제(2000). 금강 하구호에서 수질의 계절 변동과 오염도. *한국유수학회지*, **33**(3), pp. 251-259.
- 유선재, 김중구, 권태연, 이석모(1999). 금강의 부영양화 현상에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **8**(2), pp. 155-160.
- 정세웅(2004a). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링. *대한환경공학회지*, **26**(90), pp. 970-978.
- 정세웅(2004b). 저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모델의 적용. *한국수자원학회논문집*, **37**(10),

- pp. 857-868.
- 정세웅, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모델을 이용한 저수지 탁수의 시공간 분포 모의. *한국수자원학회논문집*, **38**(8), pp. 655-654.
- 정세웅, 이흥수, 윤성완, 예령, 이준호, 추창오(2007). 홍수시 대청호 유역에 발생하는 탁수의 물리적 특성. *한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 934-944.
- 정세웅, 이흥수, 정용락(2008a). 입자크기 분포를 고려한 부력침강 저수지 밀도류의 탁도 모델링. *한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 365-377.
- 정세웅, 정용락, 고익환, 김남일(2008b). 실시간 저수지 탁수 감시 및 관리를 위한 의사결정지원시스템 개발 및 검증: 대청댐 사례. *한국수자원학회논문집*, **41**(3), pp. 293-303.
- 조경제, 신재기(1998). 낙동강 하류에서 동·하계 무기 N·P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태. *korean J.Limnol.*, **31**(1), pp. 67-75.
- 한건연, 이을래(2002). 한강하류부에서의 2차원 수질모델의 개발 및 적용. *한국수자원학회논문집*, **35**(3), pp. 261-274.
- 한국농촌공사(2006). 남양호 오염물질 유달을 산정 및 퇴적물 용출특성 연구.
- 한국수자원공사(2004). 2004년 대청댐 일원 수문기초조사 보고서.
- 한국수자원공사(2007). *다목적댐 실무편람*.
- 홍성민, 정인균, 이준우, 김성준(2004). SMS를 이용한 경안천 하류구간의 하천흐름 분석. *한국지리정보학회지*, **7**(1), pp. 94-104.
- Bartholow, L., Hanna, R. B., Saito, L., Lieberman, D., and Horn, M. (2001). Simulated Limnological effects of the Shasta lake temperature control device. *Environmental management*, **27**(4), pp. 609-626.
- Barillier, A., Garnier, J., and Coste, M. (1993). Experimental reservoir water release: impact on the water quality on a river 60 km downstream(upper seine river, France). *Water Research*, **27**(4), pp. 635-643.
- Berger, C. J., Robert, L., Annear, Jr., and Wells, S. A. (2002). *Upper Spokane River Model : Model Calibration, 1991 and 2000*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Byren, B. A. and Davies, B. R. (1989). The effect of stream regulation on the physico-chemical properties of the palmiet river, South Africa. *Regulated Rivers: Research & Management*, **3**(1), pp. 107-121.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water quality modeling*. McGraw-Hill, New York.
- Chung, S. W. and Gu, R. (1998). Two dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir. *J. Hydr. Eng.*, **124**(7), pp. 704-711.
- Chung, S. W., Oh, J. K., and Ko, I. H. (2006). Calibration of CE-QUAL-W2 for a monomictic reservoir in monsoon climate area. *Water Sci. & Tech.*, **54**(12), pp. 29-37.
- Cole, T. M. and Wells, S. A. (2004). *CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2 User Manual*, Instruction Report EL 03 1, U.S. Army Corps of Engineers. USA.
- Gippel, C. J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrol. Process.*, **9**, pp. 83-97.
- Lewis, J. (1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Re-*

- search, **32**(7), pp. 2299-2310.
- Martin, J. L. (1986). *Water quality study of proposed regulation dam downstream of Wolf Creek Dam, Cumberland River, Kentucky*. Miscellaneous Paper EL-86-4, US Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, MS, USA.
- Martin, J. L. and McCutcheon, S. C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc.
- Palmer, R. W. and O'Keefe, J. H. (1990). Downstream effects of impoundments on the water chemistry of the Buffalo River (Eastern Cape), South Africa. *Hydrobiologia*, **202**, pp. 71-83.
- Pozo, J., Orive, E., Fraile, H., and Basaguren, A. (1997). Effect of the Cernadilla-Valparaiso reservoir system on the River Tera. *Regulated Rivers*, **13**, pp. 57-73.
- Stanford, J. A. and Hauer, F. R. (1992). Mitigating the impacts of stream and lake regulation in the Flathead River catchment, Montana, USA: An ecosystem perspective. *Aquatic conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **2**(1), pp. 35-63.
- Stanford, J. A., Ward, J. V., Liss, W. J., Friddell, C. A., Williams, R. N., Lichatowich, J. A., and Coutant, C. C. (1996). A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regulated Rivers: Research & Management*, **12**, pp. 391-413.
- Sullivan, A. B., Rounds, S. A., Sobieszczyk, S., and 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.
- Ward, J. V. and Stanford, J. A. (1984). The regulated stream as a testing ground for ecological theory. *Regulated Rivers*, pp. 23-38.