

저수지 플러싱 방류가 하류 수질에 미치는 영향 모의를 위한 수질모델의 성능 평가

정용락 · 정세웅[†] · 윤성완 · 오동근 · 정희영

충북대학교 환경공학과

Evaluation of the Performance of Water Quality Models for the Simulation of Reservoir Flushing Effect on Downstream Water Quality

Yong Rak Jung · Se Woong Chung[†] · Sung Wan Yoon · Dong Geun Oh · Hee Young Jeong

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 6 August 2008, Revised 28 October 2008, Accepted 10 November 2008)

Abstract

A two-dimensional (2D), laterally-averaged hydrodynamic and water quality model, CE-QUAL-W2 was applied to evaluate the performance on simulating the effect of flushing from Daecheong Reservoir on the downstream water quality variations during the flushing events held on November, 2003 and March, 2008. The hydraulic and water quality simulation results were compared with field measurement data, as well as a one-dimensional (1D), unsteady model (KORIV1) that revealed limited capability in the previous study due to missing the resuspension process of river bottom sediments. The results showed that although the 2D model made satisfactory performance in reproducing the temporal variations of dissolved matters including phosphate, ammonia and nitrate, it revealed poor performance in simulating the increase of biological oxygen demand and suspended sediment (SS) concentrations during the passage of the flushing flow. The reason of the error was that the resuspension process of the 2D model is only the function of shear stress induced by wind. In reality, however, as shown by significant correlation between bottom shear stress (τ) and observed SS concentration, the resuspension process can be significantly influenced by current velocity in the riverine system, especially during flushing event. The results indicate that the resuspension of river bottom materials should be incorporated into the water quality modeling processes if τ is greater than a critical shear stress (τ_c) for better simulation of flushing effect.

keywords : CE-QUAL-W2, KORIV1, Reservoir flushing, Sediment resuspension, Water quality modeling

1. 서론

우리나라의 주요 4대강 하천은 하상계수가 크고 강우가 여름철에 집중되어 가을과 봄 사이에 하천유량의 감소로 자정능력이 떨어지며, 하천의 수리학적 수송능력이 떨어져 오염물질의 하상퇴적이 증가하여 주기적인 수질악화 문제를 겪고 있다(안광국과 양우미, 2007; 유선재 등, 1999; Chung and Kim, 2004). 따라서 갈수기 동안 하천 수질을 보존하기 위해서는 적절한 하천유지유량의 확보가 필요하며, 일반적으로 하천유지유량은 하천수질뿐만 아니라 자연 갈수량, 생태계 서식환경, 수상위락, 경관 등 다양한 항목들을 고려하여 결정한다(김선미 등, 1997; 장연규, 2004). 그러나, 대부분의 하천은 자연유량이 부족하여 수질보전에 필요한 유량을 보장하지 못하고 있는 실정이며, 환경부에서 추진 중인 수질오염총량관리제도도 10년 평균 저수량을 기준유량으로 채택하여 유역의 부하량 삭감에만 초점이 맞춰져 있어 수량이 부족한 기간에 하천의 목표수질을 달성하

기란 어려워 보인다.

저수지 운영자들은 갈수기 동안 하류하천에 일정한 유지유량을 공급해주는 것 이외에 일시적으로 방류량을 증가시킴으로써 하천의 수질을 개선할 수 있다. 특히 갈수기 동안 하천 유량이 일정하게 유지되는 것은 오히려 수생태계 서식환경에 불리한 여건이 될 수 있다(Tanaka et al., 2004). 따라서 갈수기 동안 댐에서 일시에 많은 양의 물을 방류(플러싱 또는 인공홍수라 함)하여 하류하천의 수질과 생태계 서식환경을 개선하는 운영방법이 도입되기도 한다. 국내·외의 다양한 연구에서 댐 하류하천의 수질은 플러싱 유량에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다(정세웅, 2004b; Barillier et al., 1993; Chung et al., 2008; Green, 1998; Malatre and Gosse, 1995). 플러싱 방류 초기에는 하천 유량이 급격히 증가하면서 인공적인 홍수파가 발생된다. 홍수파의 전단이 지날 때 하천에서는 바닥의 저니층이 일시적으로 재부상하여 영양염류와 고형물질의 농도가 증가하는 경향이 나타나며, 플러싱 방류가 유지되는 동안 용존상 물질은 저수지의 방류수에 의해 희석되어 농도가 급격히 저감되는 효과가 나타난다(Barillier et al., 1993; Chung et al., 2008). 플러싱 기간 동안 하천의 수위와 수질은 시

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

간에 따라 급격하게 변화하기 때문에 하류하천의 수질 개선을 목적으로 플러싱 방류를 댐 운영에 적용하기 위해서는 하천수질의 변화를 정확하게 예측하고 평가할 수 있는 동적 수질모델링 기술이 필요하다.

한국수자원공사는 플러싱 방류가 하류하천의 수질에 미치는 영향을 조사하기 위해 2003년 11월 22일에 조정지 댐의 방류량을 30 m³/s에서 200 m³/s로 증가시켜 6시간 동안 운영한 바 있다. 선행연구에서 정세웅(2004b)은 1차원 비정상상태 하천수질모형인 CE-QUAL-RIV1 모형을 윈도체계의 그래픽 입출력프로세스로 보완한 KORIV1-WIN(이후 KORIV1)을 개발하여 대청댐 하류구간에서 플러싱 방류가 하천의 수리 및 수질변화에 미치는 영향을 모의하였다. KORIV1 모델은 하천의 수위와 홍수파의 도달 시간을 잘 예측하였고, 유량 증가에 따른 용존산 물질의 희석효과를 잘 예측하는 것으로 평가되었다. 그러나, KORIV1은 단면평균 1차원 모델로써 수심방향의 난류성분에 의한 입자의 재부상을 고려할 수 없기 때문에 플러싱 방류에 의한 하천 바닥의 세척효과를 모의하지 못하는 한계를 보였다. 수체내에서 입자상 물질의 거동은 입자의 침강과 유체의 난류성분에 의해 발생하는 재부상에 의해 결정된다(Garcia, 2004). 플러싱에 따른 하천 수질변화를 정확히 예측하기 위해서는 입자상 물질의 재부상 현상을 적절히 모의할 수 있는 모델이 필요하다.

CE-QUAL-W2(이후 W2) 모델은 수심방향과 흐름방향의 이류 및 난류성분을 고려할 수 있는 2차원 모델로서 주로 국내외의 다양한 저수지 수질모의에 사용되어 왔다(김윤희 등, 2001; 정세웅, 2004a; 정세웅 등, 2005; Chung et al., 2006; Chung and Gu, 1998; Sullivan et al., 2007). 그러나 3.1 버전부터 하상경사를 고려하여 하천수질 모의가 가능해졌으며, 해외에서는 저수지와 하천, 하구를 연속적으로 모의할 수 있는 수계단위(river-basin scale) 모델로 사용되고 있다(Berger et al., 2002; Cole and Wells, 2004; Rounds and Wood, 1998). W2 모델은 국내에서도 저수지 수질관리 모델 활용도가 가장 높을 뿐만 아니라, 최근에는 저수지-하천의 통합 예측 모델로 활용되고 있다(정용락 등, 2008). 그러나 W2 모델은 대부분의 수질모델과 같이 저수지 플러싱 방류에 따른 하류하천의 수질 변화를 예측하는 목적으로 사용된 사례는 드물다. 본 연구의 목적은 갈수기 동안 대청댐의 플러싱 방류에 따른 하류하천 주요 지점의 수리 및 수질변화를 예측하기 위해 횡방향 평균 2차원 수리 및 수질모델인 W2를 적용하고 그 예측 성능을 평가하는데 있으며, 아울러 하천 수질모델로써 W2 모델의 이론적 한계와 개선방안을 제시하는데 있다. 모델의 평가를 위해 2003년 11월과 2008년 3월에 실시된 플러싱 방류 시 연속 수집한 하천 수위와 수질자료를 사용하였으며, 모의결과는 실측자료와 선행연구(정세웅, 2004b)에서 적용한 KORIV1 모델의 모의결과와 비교·분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 모델의 원리

KORIV1 모델은 미공병단에서 개발한 CE-QUAL-RIV1

모델의 수리 및 수질해석 모듈을 기본모형으로 채택하고 있다(정세웅, 2004b). 이 모델은 댐 하류하천의 수질모의를 목적으로 개발되어 댐 방류량에 따른 하천의 수위와 수질변화를 모의할 수 있다. KORIV1 모델은 수리해석을 위한 RIV1H와 수질해석을 위한 RIV1Q, 입력자료 구성 Pre-Processor 및 출력결과 조회 Post-Processor로 구성되어 있다. RIV1H는 부정류 해석을 위해 St. Venant의 연속방정식과 x-방향 운동량방정식을 사용하며, 4점 음해적(implicit) 유한차분법으로 해석한다. RIV1Q는 RIV1H나 다른 수리모델의 결과를 이용하여 수온, CBOD, 유기질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 용존 산소, 유기 인, 용존 인, 조류, 용존 철, 용존 망간 및 대장균의 12가지 수질항목을 해석할 수 있다. 특히 조류와 부착식물에 의한 광합성과 호흡, 내생부하를 고려할 수 있다(Environmental Laboratory, 1995).

이에 반해 W2 모델은 연속방정식과 x방향 운동량 방정식, 정수압 방정식, 자유수면 방정식, 밀도상태 방정식, 물질수지 방정식 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분수치해석법(Finite different Method, FDM)을 사용하여 푼다. 하천 구간에 대해 적용할 경우 x방향 운동량 방정식과 정수압 방정식은 하상경사를 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 평균화하기 때문에 x-방향 운동량 방정식은 횡방향에 대한 확산항을 가지게 되며, z-방향 운동량 방정식은 정수압 방정식으로 가정한다. 흐름에 의해 발생하는 난류의 응력항들은 난류폐합식을 이용하여 해석하며, Prandtl의 혼합 길이 이론(mixing length theory)에 의한 eddy viscosity를 사용하여 속도경사와 와점성 계수의 함수로 표현된다(Cole and Wells, 2004).

또한 W2 모델은 선택적으로 무기성 부유물질(ISS)의 재부상 효과를 고려할 수 있다. W2 모델에서 재부상 알고리즘은 바람에 의해 발생하는 궤도속도(orbital velocity)를 산정하여 바닥에 발생하는 전단응력(τ_b)을 계산하며, τ_b 값이 한계전단응력(τ_c)보다 크면 재부상이 일어난다는 것으로 모의한다(Chapra, 1997; Kang et al., 1982). 바람에 의해 발생하는 와류(eddy)의 궤도속도(식 (1))는 파도의 높이(식 (2))와, 주기(식 (3)), 파장(식 (4))의 함수로 계산된다. 바닥에 발생하는 전단응력의 크기는 비교적 유속이 작은 호소에서 실험을 통해 얻은 경험식 (5)으로 산정되며, SS의 재부상율(ϵ)과 수심별 농도(c)는 경험식 (6)과 (7)에 의해 계산된다(Chapra, 1997; Cole and Wells, 2004).

$$U_{orb} = \frac{\pi H_s}{T_s} \frac{100}{\sinh(2\pi H/L)} \quad (1)$$

$$H_s = \frac{W^2}{g} 0.283 \tanh \left[0.53 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left[\frac{0.0125 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0.42}}{\tanh \left[0.53 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.75} \right]} \right] \quad (2)$$

$$T_s = \frac{2\pi W}{g} 1.2 \tanh \left[0.833 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.375} \right] \tanh \left[\frac{0.077 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0.25}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.375} \right]} \right] \quad (3)$$

$$L = \frac{g T_s^2}{2\pi} \tanh \left[\frac{2\pi H}{L} \right] \quad (4)$$

$$\tau_b = 0.003 U_{orb}^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0 \quad \tau \leq \tau_c \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha_o}{t_d^2} (\tau - \tau_c)^3 \quad \tau > \tau_c$$

$$c = 10000 \frac{\varepsilon}{H} \quad (7)$$

여기서, H_s = 유의파고(significant wave height : m), W = 풍속(m/s), F = 취송거리(fetch : m), H = 수심(m), T_s = 유의주기(significant wave period : sec), L = 파장(wave length : m), U_{orb} = 궤도속도(orbital velocity : cm/s), τ_b = 바닥의 전단응력(dynes/cm²), τ_c = 한계전단응력(dynes/cm²), $\alpha_o = 0.008$, $t_d = 7$ (empirical constant), ε = 재부상율(g/m²), c = SS 농도(mg/L)이다.

2.2. 모델의 구성 및 현장실험

2.2.1. 모델의 입력자료 구성

모델의 입력자료는 지형자료, 유입 및 유출 경계자료, 수질자료, 기상자료 등의 경계조건과 초기수온 및 수질, 수위 등의 초기조건으로 나눌 수 있다. 금강본류의 지형자료는 건설교통부(2002)의 하천정비기본계획에서 구축한 HEC-RAS 자료로부터 횡단면 자료를 추출하여 사용하였다. 모델은 대청 조정지댐 하류부터 금강 하구둑까지 총 132 km를 대상으로 구축하였다. 길이방향으로는 약 1 km 간격으로 총 135개의 segment와 수심방향으로 0.5~1.0 m 간격으로 30개의 layer로 구성하였다. 금강 본류에 영향을 미치는 지류하천은 갑천, 미호천, 논산천만 고려하였으며 모델에서는 지류유입(tributary)으로 구성하였다. 금강 하구언은 하구둑이 건설되어 하류로 갈수록 유속이 느려져 정체성 구간이 발생한다. W2 모델에서는 수체의 수리학적 및 수질적인 특성에 따라 여러 개의 수체(Waterbody, WB)로 나눌

수 있다. 금강은 유속이 빠른 하천과 정체된 하구언을 내부수위 경계조건으로 구분하였다. 하천구간의 하상경사를 산정하기 위해 하천 바닥의 표고를 결정계수가 최소가 되도록 시행오차법으로 산정하였다. 모델에서 고려한 수체의 구성과 하상경사는 Table 1과 같다. 하구언 구간인 WB_2는 segment에 따른 수위의 변동이 거의 없는 저수지와 같은 특성을 가지기 때문에 경사가 없는 것으로 가정하였다.

2003년 플러싱 방류에 대한 유량경계조건은 한국수자원공사(<http://www.kwater.or.kr>)의 시간별 방류량을 추출하여 사용하였고, 수질 경계조건은 선행연구(정세웅, 2004b)에서 수집한 조정지댐에서 실측한 시간별 수질자료를 사용하였다. 갑천과 미호천의 유량과 수질 경계조건도 동일한 시기에 측정한 실측 자료를 사용하였으나, 갈수기인 점을 고려하여 정상상태로 가정하였다. 2008년 플러싱 방류의 유량 경계조건은 한국수자원공사에서 제공하는 대청 조정지댐 방류량을 추출하여 사용하였다. 지류의 유량은 국립환경과학원(<http://smat.nier.go.kr>)의 8일 간격 측정 자료 중 해당 기간의 유량을 일정하게 주었다. 모델의 방류수 수질 경계조건은 플러싱 방류 1일전에 대청 조정지에서 실측한 값을 사용하였으며 지류의 수질 경계조건은 국립환경과학원의 8일 간격 측정 자료를 사용하였다.

모델의 매개변수는 크게 수리와 수질 매개변수로 구분되며 각각의 매개변수는 민감도 분석을 통해 유효한 범위 내에서 보정하였다. 모델의 예측값에 큰 영향을 미치는 수리 매개변수로는 종방향 와점성계수(AX)와 와확산계수(DX), 바닥과 수체간의 조도계수(CHEZY/MANN), 바람의 차단영향을 고려해주기 위한 계수(WSC), 태양복사 에너지 중 수심 0.6 m에서 흡수되는 비율(BETA), 순수한 물에 의한 복사에너지 감쇠계수(EXH20) 등이 있다(Table 2). 하천의 경우 저수지나 하구언에 비해 유속이 크기 때문에 흐름방향 확산계수인 AX와 DX의 값을 하구언에 비해 크게 입력해 주었다(Chapra, 1997; Cole and Wells, 2004). 또한 하천구간인 WB_1은 Manning 조도계수, 저수지구간인 WB_2는 Chezy 계수를 사용하였다. 바람차폐계수인 WSC는 계절과 풍향에 따라 주변 지형지물의 영향이 다르기 때문에 0.1~0.85의 범위로 입력해 주었다. 모델의 수리·수온에 대한 검증은 대청댐과 하류하천을 연속적으로 모의한 선행연구(정용락 등, 2007)에서 2004년과 2006년 홍수기를 대상으로 검·보정하였으며, 하천의 수위와 수온의 변화를 비교적 잘 예측하는 것으로 평가되었다.

본 연구에 사용된 수질 매개변수를 Table 3에 정리하였다. W2 모델은 내생부하에 따른 유기물을 고려하기 때문

Table 1. Constituents of each water body and channel slope

Waterbody	Section	Branch	Slope	Bottom elevation (EL. m)
WB_1	Guem river	Branch 1	0.00039	-6.0
		Branch 2	0.00016	
WB_2	Guem estuary	Branch 3	0	-9.0
Tributary	Gap stream	Tributary 1	-	-
	Miho stream	Tributary 2	-	-
	Nonsan stream	Tributary 3	-	-

Table 2. Hydraulic parameters used for W2 model

Parameters (unit)	Variable	WB_1	WB_2
Horizontal eddy viscosity ($m^2 s^{-1}$)	AX	20.0	1.0
Horizontal eddy diffusivity ($m^2 s^{-1}$)	DX	50.0	1.0
Bottom friction factor ($m^{0.5} s^{-1}$)	CHEZY / MANN	MANN (0.027)	CHEZY (70)
Wind sheltering	WSC	0.1~0.85	
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	0.60	0.60
Light extinction for pure water (m^{-1})	EXH20	0.30	0.30
Coefficient of bottom heat exchange ($W m^2 s^{-1}$)	CBHE	0.30	0.30

Table 3. Water quality parameters used for W2 model

Parameters (unit)	Variable	WB_1	WB_2
5-day BOD decay rate (day^{-1})	KBOD	0.15	0.15
Sediment release rate of phosphorus ($g m^{-2} day^{-1}$)	PO ₄ -PR	0.0015	0.0015
Ammonium decay rate (day^{-1})	NH4DK	0.05	0.05
Nitrate decay rate (day^{-1})	NO ₃ -NDK	0.15	0.15
Suspended solids settling rate ($m day^{-1}$)	SSS	0.11	0.11
Critical shear stress for resuspension ($dyne cm^{-2}$)	TAUCR	1.0	1.0

에 유기물을 용존성과 입자성, 난분해성과 생분해성 물질로 구분한다(정세웅 등, 2007; Cole and Wells, 2004). 그러나 본 연구에서는 단기간 동안 하천수질을 예측하기 때문에 내생부하를 고려하지 않았으며, 유기물에 대해서도 외부 기원 유기물인 BOD로 모의하였다. W2 모델에서 수질에 관련된 매개변수는 60여개 이상이지만 대부분은 수온에 따른 반응속도 보정과 화학양론 관련 매개변수로서 본 연구에서는 W2 모델의 초기값을 사용하였다.

2.2.2. 현장실험

대청댐 관리단은 2008년 3월 10일 자정부터 30 CMS에서 50 CMS로 아침 9시에는 80 CMS로 방류량을 단계적으로 증가시켜 자정까지 플러싱 방류를 하였다. 관측 지점은 수위를 확인할 수 있고, 채수가 용이하도록 교량이 있는 부강과 공주지점을 선택하였다(Fig. 1). 현장 채수시점은 W2 모델을 사용해 홍수파의 도달 시간을 사전에 예측

하여 결정하였다. 모의결과 매포, 부강, 공주 지점까지 홍수파가 도달하는 데는 각각 1시간, 3시간, 6시간이 소요되었으며(Fig. 2), 매포지점의 수위가 정상상태에 도달할 때까지 약 4시간, 부강은 6시간, 공주는 14시간이 소요되었고 하류로 갈수록 수위의 변동 폭은 작은 것으로 나타났다. 부강지점은 홍수파의 도달시간이 빠르고 수위가 정상상태에 도달하는 시간이 짧기 때문에 플러싱 방류 3시간 후부터 1시간 단위로 채수를 하였고, 공주지점은 수위가 정상상태가 될 때까지 오랜 시간이 걸리기 때문에 2시간 간격으로 채수하였다. 채수 기간은 수위가 정상상태에 도달할 때까지 실시하였으며 현장 실험에서는 YSI-6600을 사용하여 수온과 탁도를 측정하였다. 채수한 시료는 수질 오염공정시험에 준하여 BOD, SS, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P, TN, TP 등 7개 항목을 측정하였다. 2003년 플러싱 실험 방법에 대한 상세 설명은 선행연구(정세웅, 2004b)를 참고할 수 있다.

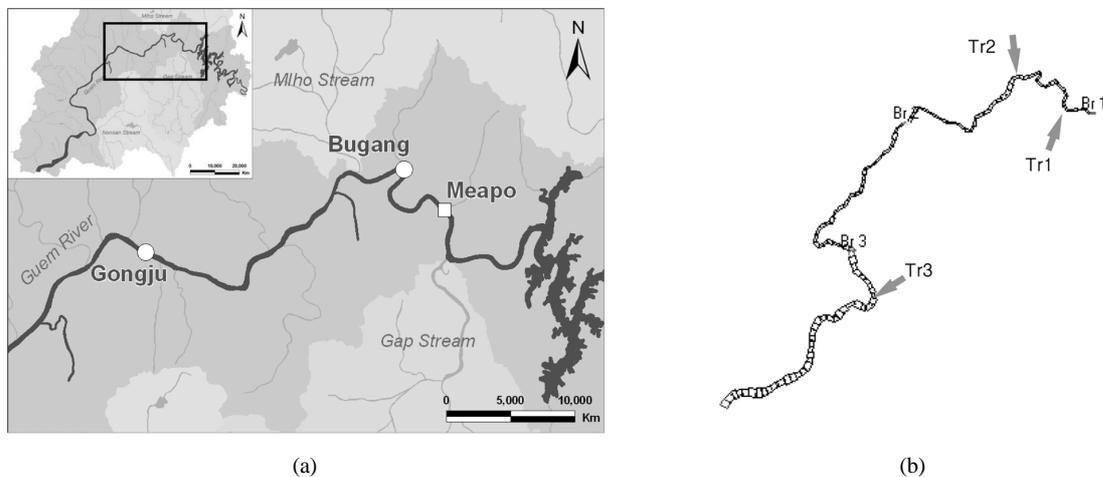


Fig. 1. (a) Map of the study site and sampling stations during flushing events (○: water stage and water quality measurement sites, □: water stage observation sites), and (b) partitioning of model branches and segments.

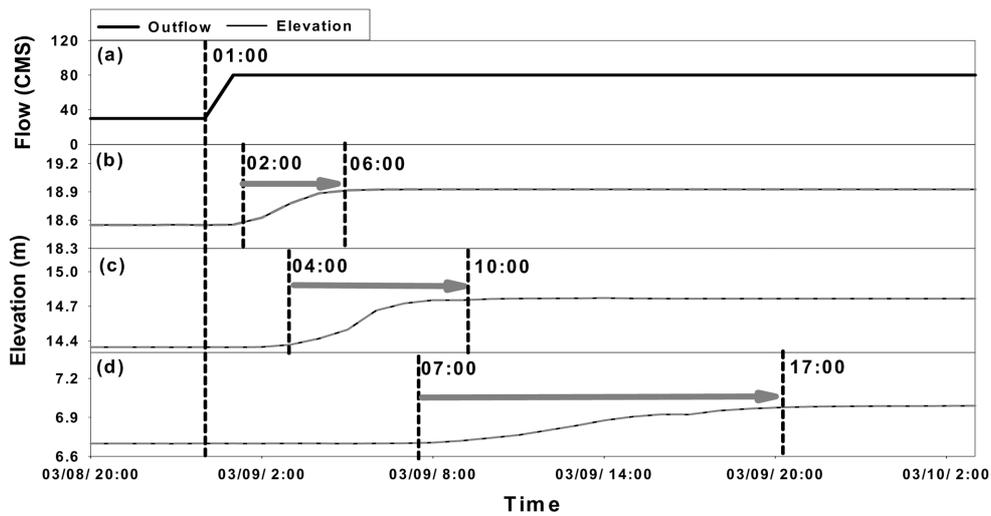


Fig. 2. (a) Dam outflow and simulated hydro-graphs to predict the arrival time of flushing flow at selected stations: (b) Maepo, (c) Bugang, (d) Gongju

2.2.3. 모델의 평가

통계분석을 통해 모델의 오차크기와 신뢰도를 평가하였다(Table 4). MAE(mean absolute error)는 실측값과 모의값 편차의 절대값을 산술평균한 값으로서 단위는 실제변량과 같고 0에 가까울수록 모델의 성능이 우수하다는 것을 나타낸다. RMSE(root mean square error)는 실측값과 모의값의 제곱오차를 산술평균한 값의 제곱근으로 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다. 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 모의값과 실측값의 선형 회귀관계의 적합도를 결정

하는 계수로써 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 적합도 및 모델의 정확도가 높게 평가된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 2003년 모의결과 비교

2003년 플러싱 방류에 따른 하천 주요지점의 수위변화 실측값과 모델의 예측값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 두 모델 모두 매포와 공주 지점에서 홍수파의 선단과 첨두 유량이 도달하는 거동을 적절히 모의하였다. 그러나, 하천

Table 4. Statistical indices used to evaluate the model accuracy

Statistical index	Equation	Desired value
Mean absolute error	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_s - Q_o $	0
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_s - Q_o)^2}$	0
Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{ave})^2}$	1

* Q_o = observations, Q_s = simulations, Q_{ave} = mean of observations, N = total number of observations

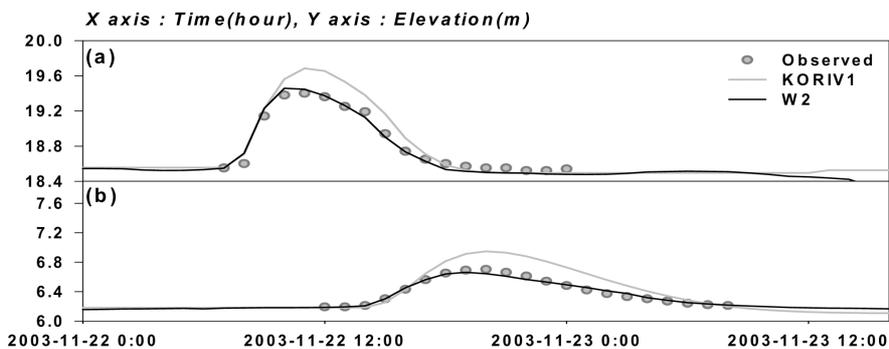


Fig. 3. Comparison of water surface elevations simulated by KORIV1 and CE-QUAL-W2, and field data (2003). (a) Maepo, (b) Gongju

의 단면을 사다리꼴 단면으로 정형화해서 해석한 KORIV1 모델에 비해 하천의 수심별 하폭변화를 고려해 준 W2 모델이 실측수위의 변화를 더 잘 모의하는 것으로 보인다.

선행연구(정세웅, 2004b)에서 예측한 매포와 금남 지점의 수질을 W2의 모의결과와 비교하였다(Fig. 4). 그림에서 보는 바와 같이 두 모델은 매포와 금남 지점에서 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 같은 용존성 물질의 댐 방류수에 의한 희석현상을 모두 적절히 반영하였다. 그러나 W2 모델은 KORIV1 모델과 마찬가지로 희석에 의해 BOD 농도가 감소하는 것으로 예측하고 있으며(Fig. 4(d)), 이러한 현상은 SS의 모의 결과에서도 확연하게 나타난다(Fig. 4(e)). 즉, 플러싱 유량의 선단이 지나가면서 급격히 상승하는 BOD와 SS의 농도 변화를 W2 모델이 제대로 반영하지 못하고 있는 것이다. 이에 대한 원인분석과 모델의 개선 방안은 3.3에 상세히 기술하였다.

두 모델의 성능을 비교하기 위해 실측값과 모델의 예측값에 대한 MAE와 RMSE를 비교하였다(Table 5). 매포지점

에서 KORIV1 모델은 용존성 물질인 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 에 대해 MAE값이 각각 0.31, 0.27, 0.03 mg/L로 매우 낮은 값을 나타내었다. W2 모델의 MAE 또한 KORIV1 모델과 거의 유사한 0.24, 0.26, 0.03 mg/L로 나타났다. 플러싱 방류에 따른 재부상이 나타났을 것으로 예상되는 BOD의 MAE에 대해 KORIV1 모델은 0.75 mg/L, W2 모델은 1.32 mg/L의 값을 가졌다. BOD의 관측범위인 2.22~6.68 mg/L를 기준으로 본다면 큰 오차는 아니나, BOD의 결정계수(R^2)가 다른 항목에 비해 매우 작아 모델의 예측값이 적절치 못한 것으로 판단된다.

3.2. 2008년 플러싱 방류 모의

2008년 3월 10일에 실시한 플러싱 방류 실험에서 홍수과의 선단은 매포와 부강, 공주 지점에 각각 1시간, 3시간, 8시간 후에 도착하였다. 홍수과에 의한 수위 변화는 2003년과는 달리 유량이 작기 때문에 하류로 갈수록 명확하게 나타나진 않았다. 따라서 하류로 갈수록 플러싱 효과 또한

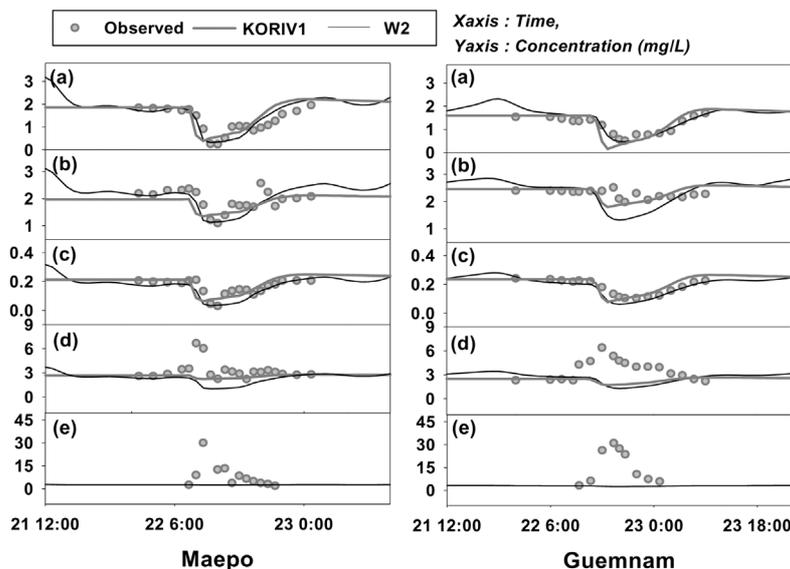


Fig. 4. Comparison of CE-QUAL-W2 and KORIV1 results with the field data during 2003 flushing event at Maepo (left) and Guemnam (right). (a) $\text{NH}_3\text{-N}$, (b) $\text{NO}_3\text{-N}$, (c) $\text{PO}_4\text{-P}$, (d) BOD, (e) SS

Table 5. MAE and RMSE of KORIV1 and CE_QUAL-W2 model in Guem river in 2003

Maepo	KORIV1				CE-QUAL-W2		
	Range (mg/L)	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R^2	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R^2
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.25~1.96	0.31	0.39	0.65	0.24	0.30	0.79
$\text{NO}_3\text{-N}$	1.09~2.57	0.27	0.34	0.39	0.26	0.34	0.52
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.03~0.21	0.03	0.05	0.42	0.03	0.05	0.52
BOD	2.22~6.68	0.75	1.36	0.15	1.32	1.85	0.02
SS	2.00~37.00	-	-	-	6.78	11.97	0.43
Guemnam	KORIV1				CE-QUAL-W2		
	Range (mg/L)	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R^2	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R^2
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.51~1.69	0.23	0.28	0.82	0.16	0.20	0.90
$\text{NO}_3\text{-N}$	1.98~2.52	0.20	0.26	0.08	0.39	0.50	0.19
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.10~0.24	0.03	0.03	0.76	0.02	0.03	0.93
BOD	2.20~6.38	1.53	2.04	0.66	1.77	2.23	0.47
SS	3.20~31.00	-	-	-	13.07	16.80	0.58

작을 것으로 예상하였다. 2008년에 실시한 플러싱 방류 효과는 W2 모델만으로 모의하였다. 모델에 의해 예측된 수위와 수위관측지점인 매포, 부강, 공주의 수위를 비교하여 Fig. 5에 비교하였다. 모델은 매포 지점의 수위변화를 적절히 모의하였다. 부강 지점은 2007년부터 수위관측을 실시하여 모델의 검·보정 기간인 2004년과 2006년에는 실측 자료가 없어 정확한 수위보정을 할 수 없었다. 홍수통제소에서 제공하는 부강지점의 실제 해발표고는 모델의 수위보다 매우 높아서 부강지점의 영점표고를 17.951 m에서 13.721 m로 수정하여 수위변화에 대한 경향을 확인해 본 결과 모델은 부강지점의 수위변화를 적절히 모의하는 것으로 판단하였다. 부강 지점의 영점수위와 지형 변화에 대한 조사가 더 필요할 것으로 생각된다.

반면 공주지점의 수위는 실제 수위와 큰 차이를 보이고 있다. 플러싱 방류 실험을 한 2008년 3월 10일에는 공주 수위관측소 지점에서 하천 복개 공사를 실시하면서 인공적으로 우회수로를 만들어 하천이 흐르도록 하였다. 우회수로

의 폭은 실제 하천보다 작았으며 플러싱 방류에 따른 하천 유량이 증가함에 따라 기존 자연하천보다 수위의 상승폭이 더 커진 것으로 판단된다.

모델의 수질 모의결과 부강지점에서 2003년과 마찬가지로 용존성 물질인 NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P의 농도 변화를 모델은 적절히 모의하였다(Fig. 6). 그러나 관측된 BOD와 SS 농도 변화에서는 플러싱 효과에 의한 바닥 유기물과 SS의 재부상효과가 나타난 것으로 판단되지만, 모델은 여전히 이를 반영하지 못하고 있다. 공주 지점에서는 2003년에 비해 플러싱 방류량이 작아서 용존성 물질의 수질 개선 효과가 크게 나타나지는 않았으나 입자상 물질의 농도가 소폭 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

모델의 예측 수질과 관측값에 대한 용존성 물질의 MAE와 RMSE는 부강지점에는 매우 낮은 값을 나타내었으나 하류인 공주지점에서는 훨씬 크게 나타났다(Table 6). 공주 지점은 플러싱 방류의 영향이 크지 않아 수질의 변화가 거의 없었으나 하상단면의 변화와 구조물에 의한 영향으로

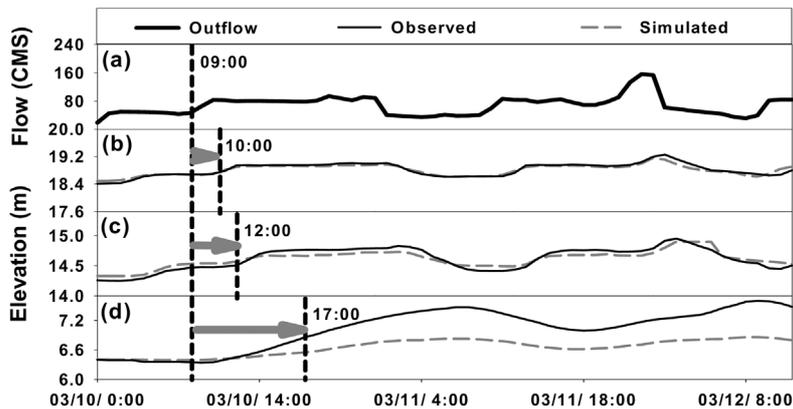


Fig. 5. Comparisons of observed and simulated elevation in Guem river during 2008 flushing event. (a) Dam discharge, (b) Maepo, (c) Bugang, (d) Gongju

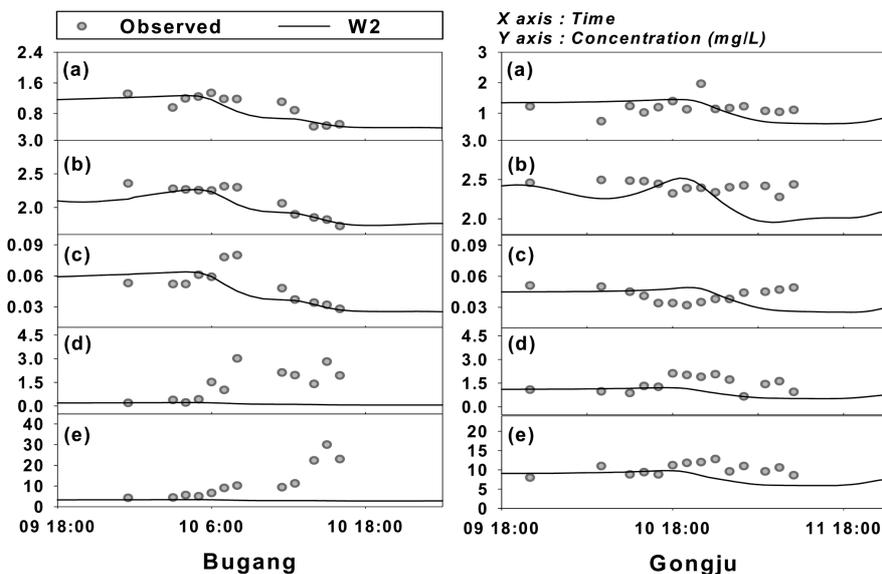


Fig. 6. Observed and simulated water quality variations during 2008 flushing event. (a) NH₃-N, (b) NO₃-N, (c) PO₄-P, (d) BOD, (e) SS

Table 6. Statistics showing the model performance for flushing simulations of 2008

	Bugang				Gongju			
	Range (mg/L)	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R ²	Range (mg/L)	MAE (mg/L)	RMSE (mg/L)	R ²
NH ₃ -N	0.47 ~ 1.34	0.17	0.21	0.65	0.74 ~ 1.97	0.31	0.35	0.04
NO ₃ -N	1.72 ~ 2.36	0.08	0.12	0.80	2.28 ~ 2.49	0.20	0.25	0.02
PO ₄ -P	0.03 ~ 0.08	0.01	0.01	0.36	0.03 ~ 0.05	0.01	0.01	0.28
BOD	0.20 ~ 3.02	1.27	1.61	0.58	0.66 ~ 2.12	0.56	0.71	0.02
SS	4.20 ~ 30.00	8.63	12.05	0.73	8.00 ~ 12.80	2.47	2.88	0.00

정확한 예측이 힘들었다.

3.3. 오차분석 및 고찰

1차원 동적 모델인 KORIV1과 횡방향 평균 2차원 모델인 CE-QUAL-W2를 비교해 본 결과 1차원 모델의 한계로 지적되었던 입자상 물질의 재부상 효과를 W2 모델에서도 고려해 주지 못하였다. 이러한 결과의 원인은 W2 모델의 SS 재부상 알고리즘에서 찾을 수 있었다. W2 모델에서는 SS를 제외한 다른 입자상 물질에 대해서는 재부상 알고리즘이 고려되지 않는다. 또한 재부상을 일으키는 요인으로 바람에 의해 발생하는 와류의 궤도속도만을 고려하고 있다. 그러나 실제 하천에서 바닥의 전단응력(bottom shear stress)을 발생시키는 원인은 바람에 의한 와류의 궤도속도와 흐름방향의 유속이 모두 작용한다. 특히 폭이 길이방향에 비해 좁고 수심이 낮으며 유속이 빠른 하천 환경에서는 바람에 의한 영향보다는 유속에 의한 영향이 지배적이다. 기존의 재부상 알고리즘에서는 바람에 의해 발생된 난류의 궤도속도를 계산해 저수지에서의 경험적인 수식을 사용하여 바닥의 전단응력을 산정하였다. 이러한 식은 수심이 얇은 저수지에서 전단응력을 산정하는 방법으로는 적절하지만, 유속이 빠른 하천에서는 한계가 있다. 따라서 W2 모델에

서 하천의 입자상 물질의 재부상 효과를 고려해 주기 위해서는 기존의 재부상 알고리즘에 유속 변화에 의한 전단응력 항을 추가해 주어야 한다.

흐름방향의 평균유속 U 로 인해 하천의 바닥과 측면 경계면에 작용하는 전단응력은 식 (8)과 같이 계산될 수 있다 (Cole and Wells, 2004). 2003년과 2008년 플러싱 방류 전후 기간 동안 하천 주요 지점에서 유속에 의해 발생하는 전단응력(τ)과 입자의 부상률(ϵ)을 산정한 결과는 Fig. 7과 같으며, 동일한 기간에 실측한 SS의 농도를 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 플러싱 선단이 도달하는 시기에 τ 와 ϵ 값이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으며, 그 이후 곧 바로 SS의 농도값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 $\tau > \tau_c$ 조건의 하천 흐름 상태에서 정확한 수질예측을 하기 위해서는 하천 바닥에 퇴적된 오염물질의 재부상 효과를 반드시 고려해야 한다는 것을 시사한다.

$$\tau = \frac{\rho_w g}{C^2} U |U| \quad (8)$$

여기서, C =Chezy 마찰계수, U =흐름방향 평균유속(m/s), ρ_w

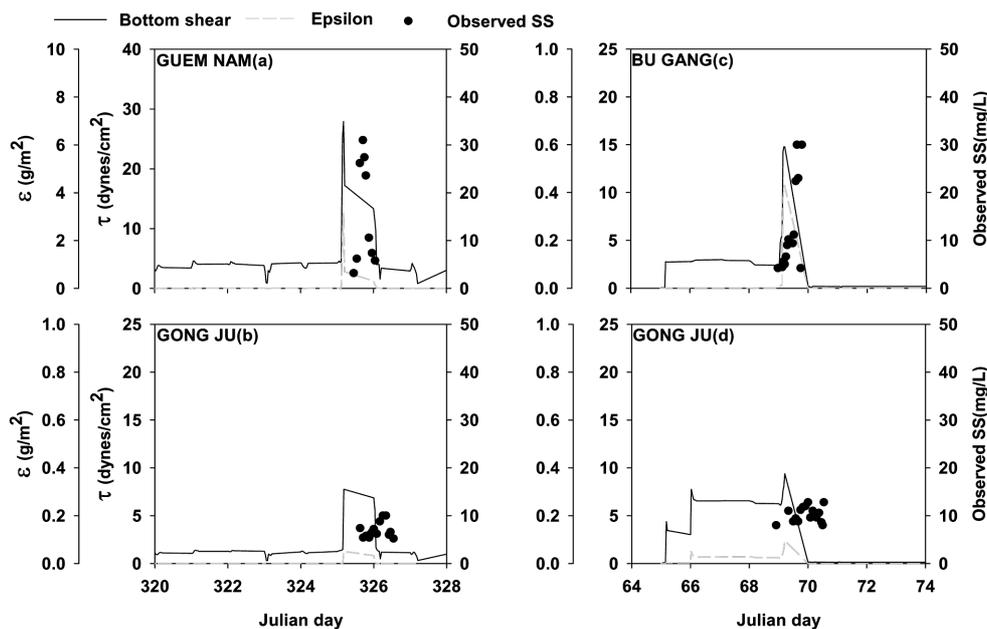


Fig. 7. Comparisons of bottom shear stress (τ) and observed SS. (a) Geumnam (2003), (b) Gongju (2003), (c) Bugang (2008), (d) Gongju (2008)

= 물의 밀도(kg/m^3)이다.

3.4. W2 모델의 재부상 알고리즘 개선 방안

W2 모델에서는 바닥의 전단응력을 궤도속도를 이용한 경험식으로 산정하였으나, 바람과 유속에 의한 전단응력(식 (9))을 산정하기 위해서는 각각에 대한 전단속도를 산정해야 한다(Hipsey et al. 2007). 유속에 의한 전단속도(식 (10))는 평균유속과 바닥의 거칠기의 함수로 나타낼 수 있다. 바람에 의한 전단속도(식 (11))는 궤도속도와 바닥의 거칠기 함수로 표현된다. 바닥의 거칠기는 SS 입자의 대표 입경으로 산정하도록 할 수 있으며, SS 재부상 알고리즘은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\tau = \rho_w (u_{*c}^2 + u_{*w}^2) \quad (9)$$

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{f_c U^2}{8}}, \quad f_c = \frac{0.24}{\left[\log\left(\frac{12H}{k_s}\right)\right]^2}, \quad k_s = 2.5D \quad (10)$$

$$u_{*w} = \sqrt{0.5f_w U_{orb}^2}, \quad f_w = \exp\left[5.213\left(\frac{k_s}{a}\right)^{0.194} - 5.977\right], \quad (11)$$

$$a = \left[\frac{H}{2\sinh\left(\frac{2\pi H}{L}\right)}\right]$$

여기서, τ = 전단응력(N/m^2), ρ = 밀도(kg/m^3), U = 평균유속(m/s), U_{orb} = orbital velocity(m/s), H = 수심(m), k_s = 바닥 거칠기(m), D = 바닥 입자의 대표입경(m), u_{*c} = 유속에 의한 전단속도(m/s), u_{*w} = 풍속에 의한 전단속도(m/s)이다.

4. 결론

본 연구에서는 횡방향 2차원 수리·수질 모델인 CE-QUAL-W2를 사용하여 2003년과 2008년 실시된 대청댐의 플러싱 방류에 따른 하류하천의 수질변화를 모의하고 모델의 성능과 한계점을 평가하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 2003년 플러싱 방류($30 \rightarrow 200 \text{ m}^3/\text{s}$)에 따른 하류하천의 수질변화 모의 결과를 선행연구에서 사용한 1차원 동적 모델(KORIV1)의 모의결과와 비교한 결과, 두 모델은 모두 용존성 물질인 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 희석효과는 비교적 잘 모의하였으나, BOD와 SS는 실측값과 매우 큰 차이를 보였다.
- 2) 2008년 플러싱 방류($30 \rightarrow 80 \text{ m}^3/\text{s}$)에서는 2003년보다 방류 규모가 작아 하류인 공주지점에서 수질개선 효과가 뚜렷하지 않았으나, 부강 지점에서는 용존성 물질의 희석현상이 잘 나타났다. 2008년 모의 결과에서도 W2 모델은 2003년과 마찬가지로 용존성 물질의 수질변화는 비교적 잘 예측하였으나, BOD와 SS는 실측값과 매우 큰 편차를 보였다.
- 3) 이러한 모델 오차의 가장 큰 원인은 플러싱 유량이 통과

하는 기간 동안 하상에서 급격히 증가하는 전단응력과 이로 인한 하상으로부터의 입자성 퇴적물의 재부상 효과가 모델에 제대로 반영되지 않은 것으로 분석되었다.

- 4) 본 연구결과는 플러싱 방류와 같이 $\tau > \tau_c$ 조건인 하천 흐름 상태에서 정확한 수질(특히 입자성 물질) 변화를 예측하기 위해서는 하천 바닥에 퇴적된 오염물질의 재부상과 침강 효과를 반드시 고려해야 한다는 것을 시사한다.
- 5) W2 모델을 포함한 모든 하천수질모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 하상퇴적물의 오염물질 성상별 재부상 특성을 고려해야 하며, 아울러 풍속과 유속에 의해 발생하는 전단응력이 모두 오염물질의 재부상율(ϵ) 산정에 고려되어야 한다.

사 사

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

참고문헌

- 건설교통부(2002). 금강수계 하천정비기본계획.
- 김선미, 김규호, 홍일표, 서동일(1997). 금강 본류의 갈수시 수질관리를 위한 하천유지유량의 산정. *대한환경공학회지*, **19**(11), pp. 1347-1360.
- 김유희, 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.
- 안광국, 양우미(2007). 금강 수계의 수질 특성. *한국하천호수학회지*, **40**(1), pp. 110-120.
- 유선재, 김종구, 권태연, 이석모(1999). 금강의 부영양화 현상에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **8**(2), pp. 155-160.
- 장연규(2004). 도심하천 복원에 따른 하천유지유량 산정 연구. 석사학위논문, 인천대학교.
- 정세용(2004a). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링. *대한환경공학회지*, **26**(90), pp. 970-978.
- 정세용(2004b). 저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모형의 적용. *한국수자원학회논문집*, **37**(10), pp. 857-868.
- 정세용, 박재호, 김유경, 윤성완(2007). 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 52-63.
- 정세용, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간 분포 모의. *한국수자원학회논문집*, **38**(8), pp. 655-654.
- 정용락, 유환, 정세용(2007). 저수지-하천 연속시스템의 수리, 수온 예측을 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. *공동추계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회, pp. 445-454.
- 정용락, 정세용, 류인구, 최정규 (2008). 대청호와 하류하천 연속시스템의 2차원 수리·수질 모의. *수질보전 한국물환경학회지*, **41**(1), pp. 110-120.

- 경학회지, **24**(5), pp. 581-591.
- 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 Mode: Model Calibration, 1991 and 2000*. U.S. Army Corps of Engineers.
- 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. and Kim, J. H. (2004). Development of water quality models for supporting NH₃-N control in a dam regulated river. *Water Sci. & Tech.*, **52**(12), pp. 83-90.
- 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.
- Chung, S. W., Oh, J. K., Ko, I. H., and Kim, Y. K. (2008). Effect of reservoir flushing on downstream river water quality. *Journal of Environmental Management*, **86**, pp. 139-147.
- 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.
- Environmental Laboratory (1995). *CE-QUAL-RIVI: A Dynamic, One-dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Streams User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, MS, USA.
- Garcia, M. H. (2004). *HYDRAULIC DESIGN HANDBOOK Chapter 6 : Sedimentation and Erosion Hydraulics*. McGraw-Hill, <http://www.digitalengineeringlibrary.com>.
- Green, W. R. (1998). Relations between reservoir flushing rate and water quality. <http://aslo.org/phd/dialog/1998January-13.html>.
- Hipsey, M. R., Antenucci, J. P., Romero, J. R., and Hamilton, D. (2007). *Computational aquatic ecosystem dynamics model: CAEDYM v3.1 science manual*. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Kang, S. W., Sheng, Y. P., and Lick, W. (1982). Wave action and bottom shear stresses in Lake Erie. *J. Great Lakes Res.*, **8**(3), pp. 482-494.
- Malatre, K. and Goose, P. (1995). Is it possible to influence water temperature and quality in the river Seine upstream of Paris in summer by managing the upstream reservoir? *Water Sci. and Tech.*, **31**(8), pp. 67-77.
- Rounds, S. A. and Wood, T. M. (1998). *Using CE-QUAL-W2 to assess the ammonia assimilative capacity of the Tualatin River, Oregon*. in Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada, April 19-23, 1998: U.S. Geological Survey, pp. 2-133-2-140.
- 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.
- Tanaka, N., Osugi, T., Nanami, Y., and Okano, M. (2004). Methods of environmental restoration for downstream of dams. *Proc. Environmental Considerations for Sustainable Dam Projects, ICOLD 72nd Annual Meeting*, May 16-22, 2004, Seoul, Korea. 45.