

용담댐 하류하천의 횡방향 평균 2차원 수리·탁수모델링

김유경 · 정세웅[†]

충북대학교 환경공학과

Laterally-Averaged Two-Dimensional Hydrodynamic and Turbidity Modeling for the Downstream of Yongdam Dam

Yu Kyung Kim · Se Woong Chung[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University
(Received 1 July 2011, Revised 16 August 2011, Accepted 24 September 2011)

Abstract

An integrated water quality management of reservoir and river would be required when the quality of downstream river water is affected by the discharge of upstream dam. In particular, for the control of downstream turbidity during flood events, the integrated modeling of reservoir and river is effective approach. This work was aimed to develop a laterally-averaged two-dimensional hydrodynamic and water quality model (CE-QUAL-W2), by which water quality can be predicted in the downstream of Yongdam dam in conjunction with the reservoir model, and to validate the model under two different hydrological conditions; wet year (2005) and drought year (2010). The model results clearly showed that the simulated data regarding water elevation and suspended solid (SS) concentration are well corresponded with the measured data. In addition, the variation of SS concentration as a function of time was effectively simulated along the river stations with the developed model. Consequently, the developed model can be effectively applied for the integrated water quality management of Yongdam dam and downstream river.

keywords : CE-QUAL-W2, laterally-averaged two-dimensional modeling, Turbidity modeling, Yongdam dam

1. 서론

우리나라는 연간 총 물 이용량의 50% 이상을 15 개의 다목적댐에 의존하고 있다(한국수자원공사, 2007). 그러나 안정적인 수자원의 공급과 홍수조절을 위해 건설 및 운영되고 있는 대형 댐들의 경제적 이점 뒤에는 여러 가지 사회적, 환경적 문제가 야기되고 있다. 댐은 자연하천의 흐름에 변화를 주며 하천의 유황과 생태계 서식환경에 가장 많은 영향을 미치는 수리구조물로서 정체수역을 형성하여 물의 체류시간을 길게 하고 부영양화 및 조류의 과잉 성장을 유발한다(정용락 등, 2008; Stanford et al., 1996). 또한 유수에서 정수생태계로 전환되는 과정을 겪게 되는 하천은 수문학적 조건을 포함한 지형학적 변화를 수반하면서 생태계의 구조적이고 기능적인 측면의 환경변화를 겪게 된다(신재기 등, 2008). 댐에 의해 조절되는 하류 하천은 댐의 방류량과 수질에 많은 영향을 받게 되지만 우리나라 인공호에 대한 연구는 대부분 개별 호수에 대한 것이며, 댐 건설 및 운영이 하천의 유황과 생태계의 기능적, 구조적인 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하였다(박정은과 박석순, 2006). 우리나라 대부분의 하천은

많은 인공 대형 댐에 직접적인 영향을 받기 때문에 저수지와 하천 수질을 통합 관리하는 것이 필요하며 이를 지원할 수 있는 수리·수질예측 모형은 저수지와 하류하천 그리고 하류를 연속하여 해석 할 수 있는 수계단위의 모형을 사용하는 것이 효과적이다(정용락 등, 2008).

일반적인 우리나라의 하천은 길이에 비해 수심과 폭이 아주 작고, 체류시간이 짧으며 빠른 유속으로 확산보다는 이송현상이 지배적인 형태이다. 이 특성은 횡방향과 수심방향이 완전혼합되는 것을 가정하는 1 차원 종방향의 모형을 사용하기에 적절했다. QUAL2E와 같은 1차원 모형은 계산시간이 짧고 입력 자료가 간소하기 때문에 그동안 하천수질 모형으로 주로 사용되었다. 그러나 폭이 넓은 하천에서는 횡방향으로 완전혼합되기까지 수질에 대한 공간적인 편차가 크기 때문에 1 차원 모형은 한계가 있으며, 수심이 깊어지고 있는 우리나라 하천의 적용에는 부적절한 측면이 있다(서동일 등, 2008; 한건연과 이을래, 2002; 홍성민 등, 2004). 2차원(x-z) 횡방향 평균 모델인 CE-QUAL-W2(이후 W2)는 성층현상이 뚜렷하고 폭에 비해 길이가 길고 수심이 깊은 우리나라 저수지 지형에 적합하여 수온성층화와 탁수모의를 탁월하게 수행하였다(김윤희 등, 2001; 이혜숙 등, 2008; 정세웅, 2004; 정세웅 등, 2007, 2008; Chung and Gu, 1998; Sullivan et al., 2007). 주로 저수지 모델로서 사용되

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

던 CE-QUAL-W2(이후 W2)는 버전 3.1부터 운동량방정식에 흐름방향의 중력항을 추가하여 하천의 경사를 고려함으로써 하천모의가 가능해져 하천은 물론 저수지와 댐 하류 하천의 연속 수계시스템의 모의를 수행할 수 있게 되었다(정용락 등, 2008; Berger et al., 2002; Cole and Wells, 2004). 종방향 평균이 아닌 수심방향의 유속변화를 고려해 줄 수 있기 때문에 보다 더 정확하고 실제적인 모의가 가능해진 것이다.

그동안 댐 저수지와 하류하천시스템을 연계한 수질관리 관련 연구는 그리 많지 않다. 최시중 등(2009)은 QUAL2E 모형으로 용담댐 하류의 하천수질보전을 위한 필요유량 산정 방안에 대한 연구를 수행하였고, 허준욱과 김정곤(2009)은 하류의 하천건강성 평가 및 어류 서식처를 고려한 최적 생태유량 산정에 관한 연구를 수행하였다. 신영호(2009)는 하류 하천지형 변화 예측 및 흐름파가 수리 기하 변화에 미치는 영향을 연구하였으며, 이요상 등(2009)은 하류 하천환경을 고려한 바람직한 댐 운영방향에 관해 연구하였다. 정용락 등(2008)은 국내 처음으로 CE-QUAL-W2를 하천에 적용하여 저수지와 하천의 연속 시스템으로 2 차원 수리·수질 모의를 시도하였다. 그리고 정용락 등(2009)은 W2 모델과 1차원 동적 모형인 KORIVI-WIN 모형을 저수지 플러싱 방류에 적용하여 하류 수질에 미치는 영향을 모의하고 수질모델의 성능을 평가한 바 있다.

본 연구는 금강수계의 수량과 수질 통합 물관리 운영을 지원하기 위한 범용 수 환경 감시 및 예측시스템(i-RTMMS)의 시범적용 및 평가를 위해 수행되었으며, 용담댐 하류하천을 대상으로 수리 및 수질의 동적 변화를 모의 할 수 있는 2차원 횡방향 평균 모델(W2)을 구축하고, 2005년과 2010년의 서로 다른 수문사상을 대상으로 실측자료를 토대로 모델의 예측 성능을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상유역

금강은 전라북도 동부지역과 충청북도 남서지역을 북서류 하여 충청남도 남동지역을 지나 황해로 흘러드는 강이며, 우리나라에서는 6 번째로 길고, 남한에서는 한강과 낙동강에 이어 3 번째로 긴 강이다. 길이는 발원지에서 하구까지 407.5 km, 금강 하구둑까지 397.25 km, 유역면적은 9,885 km²이다. 유역 내 연평균 강수량은 1,200~1,400 mm로 우리나라의 평균치 정도이나, 지형과 관련하여 지역적 차이가 크다. 대체로 하류지역은 1,100 mm 내외이나, 상류 지역은 1,300 mm 내외로 다우지를 형성한다. 그러나 여름철 강수 집중률이 60%를 넘고, 하천의 경사가 급하여 하천 유출량의 변동이 매우 심하다.

본 연구의 대상유역은 금강 상류 유역으로 용담댐 하류로부터 대청댐 상류지점까지 약 130 km이다. 대청댐 상류 금강 본류로 직접 유입하는 하천은 지방 1 급 하천인 무주남대천, 영동천, 초강천, 보청천인 4 개 하천과 지방 2 급 하천인 봉황천, 조정천, 삼봉천, 석천, 법화천, 이원천의 6

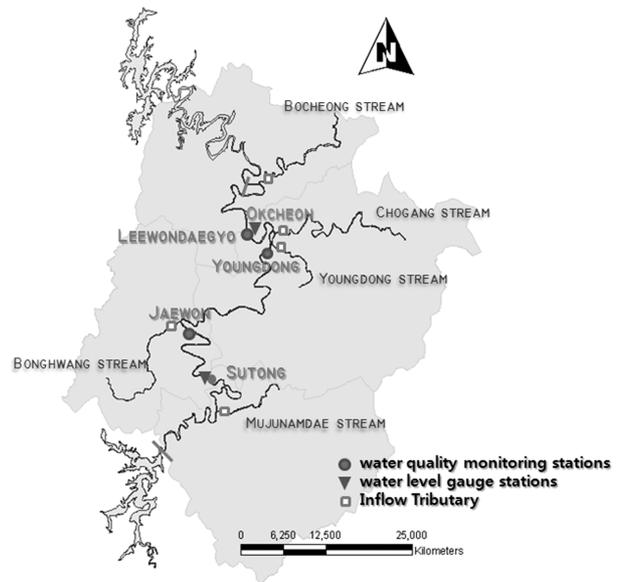


Fig. 1. Location of water quality monitoring stations within the study area.

Table 1. Stream characteristics of the major tributaries

| Tributary | Flow length (km) | Stream length (km) | Watershed area (km ²) |
|-------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Mujunamdae stream | 52.1 | 12.6 | 464.08 |
| Bonghwang stream | 31.2 | 24.0 | 247.38 |
| Youngdong stream | 31.1 | 10.8 | 145.43 |
| Chogang stream | 66.3 | 32.7 | 664.62 |
| Bocheong stream | 72.1 | 27.0 | 553.56 |

개 하천으로 10 개이다. Table 1에 주요유입지류인 5 개 지류에 대한 유역 특성을 나타내었다. 5 개 지류의 총 하천연장은 107.10 km이며, 금강 상류의 총 유역면적은 2075.07 km²이다. 본류의 수위측정망은 용담, 수통, 제원, 호탄, 양강교, 옥천 등이 있으나 본 연구에서는 하류로부터 12.09 km에 위치한 수통과 71.34 km에 위치한 옥천 두 지점에서 수위를 비교하였다. 수질측정망 자료는 용포, 제원, 옥천, 우산 등의 월평균 자료가 존재하나 수질유량측정망시스템의 금본C, 금본D, 금본E 지점의 위치가 본류와 일치하여 8일 간격 자료를 가지고 모의결과와 비교하였다. Fig. 1에 금강 상류로 유입되는 지류와 유량측정망 및 수질측정망의 위치를 나타내었다.

2.2. 수질예측모델

W2 모형은 수체의 흐름방향(x)과 수심방향(z)의 수리 및 수질변동을 고려한 2 차원(x-z) 횡방향(y) 평균(Laterally-averaged) 모형으로 3.1 버전부터는 하상경사를 고려하여 하천수질 모의가 가능해졌으며, 버전 3.2에서는 모델의 실행 displayer가 구현되어 시간변수들과 기상, 유량, 취수 및 수위변화 자료 등의 업그레이드 화면을 볼 수 있게 되었고, 바람에 의한 SS(Suspended solids)의 재부상(Resuspension) 알고리즘과 정지 및 실행 그리고 아직 미 구현 된 restart 기능들도 포함되었다. 버전 3.5에서는 그동안 유기물과 관련된

N과 P의 계수 값을 화학양론에 따라 control file에 고정으로 넣어 주던 것을 지류나 유입유량 및 시간에 따라 각각 넣을 수 있도록 input file에 포함되었다. 1차 퇴적물 모델에 축적되는 퇴적물 침강속도를 추가하여 퇴적물이 바닥의 측면을 충돌한 후에도 하상의 바다 쪽으로 여전히 이동하는 것을 모의할 수 있도록 하였으며 가장 최근 버전인 3.6 버전(Cole and Wells, 2008)은 코드의 컴파일 및 최적화과정을 작은 서버부터 안에서 가능하도록 Intel Visual Fortran 10을 사용함으로써 20~40%의 모델 수행 시간을 단축시켰으며 버전 3.5에 비하여 성능도 훨씬 향상되었다. 실험결과를 토대로 난류 운동에너지와 소멸에 대한 TKE 알고리즘이 업데이트 되었으며, 바람의 속도에 의해 변화되는 물의 거칠기 높이(roughness height)가 입력화일에 고려되었다. 또한 물고기 생체에너지 모델 및 퇴적물 속성작용(Diagenesis), 3D 버전의 W2인 W3, 그리고 지하수-지표수 상호작용(Interaction) 등 앞으로 계획하고 있는 여러 가지 업그레이드될 기능들이 홈페이지(<http://www.cce.pdx.edu/w2>)에 소개되고 있다.

모델 내부에서의 수치해석은 수위, 압력, 수평방향 유속, 수심방향 유속, 물질의 농도, 밀도 등 6 가지 변수를 연속 방정식(1), x-z방향 운동량방정식, 자유수면방정식, 밀도상태방정식, 물질수지방정식 등 6 개의 지배방정식을 사용하며, 운동량 방정식(2)과 z방향 운동량 방정식(3)에서 하상경사를 고려해 주고 있다(Cole and Wells, 2004). 유한차분 수치해석방법은 자유수면방정식에 대해서는 수치해의 안정성 확보를 위해 음해법을 사용하며, 연속방정식과 운동량방정식은 기본적으로 양해법인 Leapfrog scheme을 사용하지만 수치확산 항은 음해법을 사용한다. 그리고 이류확산방정식에서 흐름방향(x) 이류항은 양해법인 ULTIMATED-QUICKEST scheme을 사용하고, 수직방향(z) 확산항은 완전 음해법을 사용하며 이류항은 시간 가중치에 따라 양해법과 음해법의 선택이 가능한 Crank-Nicolson scheme을 사용한다. 운동량 방정식에서는 x-방향과 z-방향 유속을 y-방향에 대하여 평균화하기 때문에 확산항을 갖게 된다. 흐름의 난류성분 때문에 발생하는 응력항은 난류폐합식을 이용하여 해석하는데 모델 내부에서는 Prandtl의 혼합길이 이론(Mixing length theory, NICK)에 의한 eddy viscosity(Zero-equation model)를 사용함으로써 속도경사와 와점성 계수의 함수로 난류의 전단응력항(식 (4), (5), (6))을 표현한다.

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB, \quad (1)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = qB \sin \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = q \cos \alpha \quad (3)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho} = \nu_t \frac{\partial U_1}{\partial z} = A_z \frac{\partial U_1}{\partial z}, \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = A_z \frac{\partial V}{\partial z} \quad (4)$$

$$\nu_t = \ell_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| e^{-CRi} \quad (5)$$

$$\ell_m = H \left[0.14 - 0.08 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 - 0.06 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^4 \right] \quad (6)$$

여기서, B = width (m), u = longitudinal velocity (m/s), w = vertical velocity (m/s), q = lateral inflow (m³/s), a = slope, p = pressure (N/m²), ρ = density (kg/m³), τ = shear stress (m³/sec²), ν_t = turbulent eddy viscosity, v = lateral velocity (m/s), U₁ = shear velocity (m/s), ℓ_m = mixing length, Ri = Richardson number, H = depth of the channel (m), ν = viscosity, u = shear velocity (m), z = vertical coordinate measured from the bottom of the channel (m⁻¹).

2.3. 입력자료 구성

W2 모델의 주요 입력 자료는 지형자료, 본류와 지류로 유입하는 하천수의 유량 및 수질자료, 기상자료 그리고 하류단의 방류량 등의 경계조건과 초기수온, 수질, 수위 등의 초기조건으로 구성된다. 하천의 지형자료는 대전지방국토관리청에서 2006년 측정된 HEC-RAS의 종단 및 횡단면 자료를 토대로 용담댐 하류로부터 보청천 유입 후 0.5 km 이후까지 약 114 km를 주요 구간으로 구성하였다. 하천구간별 하상기울기는 회귀분석을 통해 결정계수가 최대가 되도록 산정하였다(Fig. 2). 유한차분 격자 구성을 위하여 하천의 수리 및 수질 변화와 수면경사를 고려하여 3 개의 구획(Branch)으로 나누고, 흐름방향으로는 0.5~1.0 km 간격으로 194 개의 요소(Segment), 수심방향으로는 0.2 m 간격으로 32 개의 수층(Layer)으로 나누어 각각 구성하였다(Fig. 3).

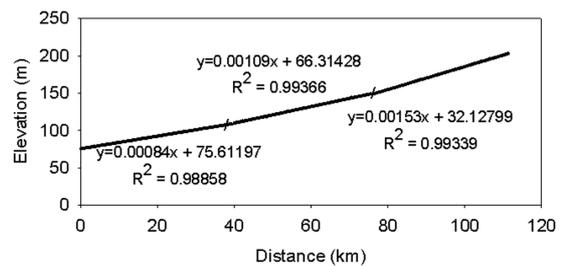


Fig. 2. Linear regression of the channel slope for eye fitting.

최상류단인 용담댐 직 하류의 유량자료와 수질자료는 용담댐 w2 구축자료의 방류량 자료를 사용하였으며, 본류로 유입하는 지류는 무주남대천, 봉황천, 초강천, 영동천, 보청천으로 5 개의 지류를 선정하였다. 모델에 사용한 지류의 유량 자료는 실측자료가 없어 국가수자원관리종합시스템(WAMIS) 데이터베이스의 수위유량곡선식을 사용하여 산정하고, 수위 유량곡선식이 없는 지류는 용담댐 하류 유역의 일별 총유입량을 유역면적 비로 환산하여 산정하였다. 각 지류의 수질 자료는 물환경정보시스템의 월평균 자료를 사용하였으며, 기상 자료는 금산기상대 및 금산 AWS 자료를 사용하였다.

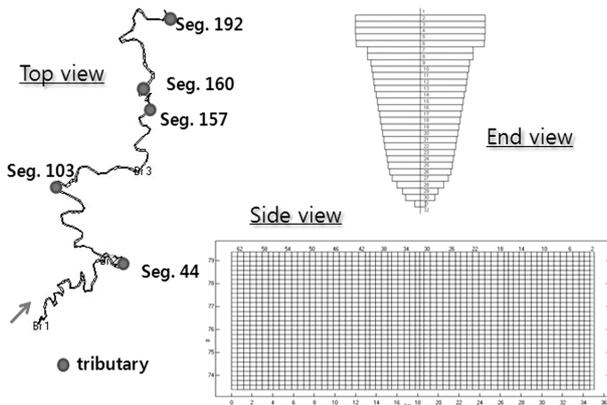


Fig. 3. Two-dimensional finite difference segmentation for downstream of Yongdam Dam.

2.4. SS 모델의 입력자료

SS의 모의에 있어서 가장 중요한 요소는 실측자료가 없는 지류의 유입 SS 농도 산정과 침강속도(Settling velocity)이다. 하천에서 미세측 연속 SS 농도를 산정하는 방법으로 유량과 SS 농도의 멱함수(Power function) 관계가 자주 이용된다(Oeumg et al., 2011; Vongvixay et al., 2010; Walling, 1977). 따라서 본 연구에서의 강우시 SS 농도는 2006년 강우시 실측한 유량과 SS 농도 관계식(Fig. 4)을 개발하여 산정하였으며, 비강우시는 수통, 제원, 이원대교의 세 지점에 대하여 환경부의 수질유량측정망의 8 일 간격 측정 자료를 2005년부터 2010년까지 유량과 SS농도 관계식(Fig. 5)을 사용하여 비강우시 SS 농도를 산정하였다. 부유사의 입도분포는 강우시 조사한 누적입도분포곡선으로부터 입자크기별로 3개의 SS그룹으로 구분하여 비율을 적용하였으며(Table 2), 비강우시에 대해서는 SS1 90%, SS2 10%, SS3 0%로 큰 입자의 유입은 없는 것으로 가정하였다. 수체로 유입한 SS 그룹별 침강속도는 강우시 5번에 걸쳐 실측한 각 지류의 탁수 내 부유물의 입도분포 자료로부터 평균 입경을 산정한 후 Stokes 식에 대입하여 산정하였다. 그러나, Stokes가 제안한 독립 침강속도는 층류상태에서의 침강속도로 입자의 모양을 구형으로 가정하며, 입자의 형상과 표면적질기를 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다. 또한 물속에 존재하는 부유입자의 성분과 형태는 매우 다양하여 밀도로 침강속도를 산정하는 것은 불확실한 매개변수로 작용하게 된다(Camenen, 2007; Gibbs, 1985; Manning and Dyer, 1999; Pedocchi and Garcia, 2006). 정세웅 등(2008)은 실험으로 결정하지 않은 입자의 형상과 거칠기,

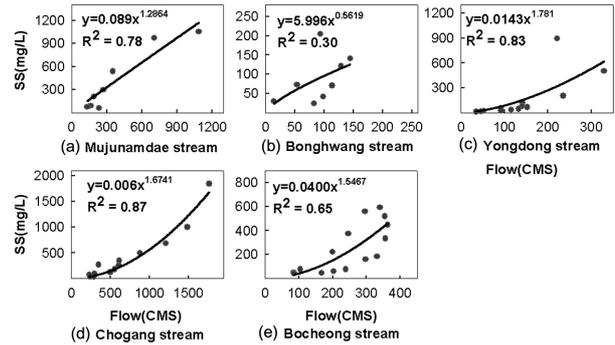


Fig. 4. Correlations between flow and SS concentrations at the major tributaries (rainfall period).

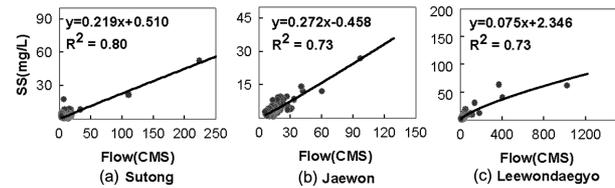


Fig. 5. Correlations between Flow and SS concentrations at the main stream (non-rainfall period).

Table 2. Classification of SS particles and fractions for each tributary

| Stream | Class | | |
|------------|---|--|--|
| | SS ₁ (%) (d = 4.24 μ m) | SS ₂ (%) (d = 23.76 μ m) | SS ₃ (%) (d = 79.37 μ m) |
| Mujunamdae | 10 | 30 | 60 |
| Bonghwang | 10 | 40 | 50 |
| Youngdong | 20 | 50 | 30 |
| Chogang | 10 | 40 | 50 |
| Bocheong | 20 | 40 | 40 |

밀도의 불확실성을 고려하기 위해 보정계수를 도입하여 만족할만한 결과를 얻었다(Chung et al., 2009; Umeda et al., 2006). 따라서 본 연구에서도 Stokes 식으로 산정한 침강속도를 초기값으로 사용하여 실측값과의 오차를 최소화하도록 시행착오법으로 보정하여 모델에 적용하였다.

2.5. 모델에 사용된 매개변수

민감도 분석을 통하여 유효한 범위 내에서 매개변수를 보정하여 모델에 적용하였다. 모델의 보정에 사용된 주요한 매개변수 7개의 보정값을 Table 3에 나타내었다. 흐름방향의 유속차이 때문에 작용하는 난류응력의 크기를 나타내는

Table 3. Calibrated parameter values of the model

| Descriptions | Parameters | Default | Value |
|---|------------|-----------|-------------|
| Horizontal eddy viscosity (m ² s ⁻¹) | AX | 1 | 10.0 |
| longitudinal dispersion coefficient (m ² s ⁻¹) | DX | 1 | 10.0 |
| Bottom friction factor (m ^{0.5} s ⁻¹) | CHEZY/MANN | CHEZY | MANN(0.035) |
| Wind sheltering coefficient | WSC | 0.5-0.9 | 0.85 |
| Fraction solar radiation absorbed at water surface | BETA | 0.45 | 0.6 |
| Light extinction for pure water (m ⁻¹) | EXH20 | 0.25-0.35 | 0.3 |
| Coefficient of bottom heat exchange (Wm ² /s ⁻¹) | CBHE | 0.3 | 0.3 |

비로 사용되는 AX는 10.0을 사용하였고, 유체의 유속, 수온 그리고 온도 등 횡방향 평균화하는 과정에서 난류의 혼합효과를 반영하기 위해 포함된 상수 즉, 난류혼합효과의 크기를 반영하는 DX는 10.0을 사용하였다. 저수지에 비해 유속이 빠른 하천은 난류혼합효과의 크기가 저수지보다 훨씬 크다. 주변지형과 바람의 차단효과를 나타내며, 관측풍속을 보정해주는 역할을 하는 WSC는 0.5와 0.9 사이의 값인 0.85를 사용하였다. 또한 하천 표면에 도달한 태양복사 에너지 중 수면으로부터 0.6 m 깊이까지 흡수되는 에너지의 비율을 나타내는 BETA는 수위가 낮은 하천의 특성을 고려하여 0.6으로 사용하였다. 물속에 존재하는 용존물질 때문에 태양복사에너지의 전달이 방해받는 정도를 나타내는 매개변수인 EXH20은 0.3을 사용하였고, 저수지 바닥과 상부 수체의 경계면에서 열교환 비율을 나타내는 매개변수인 CBHE는 0.3을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수위예측 결과

W2 수위 모델의 적합성 평가를 위하여 2005년과 2010년을 대상으로 보정과 검정을 실시하여 모의수위와 실측수위를 Fig. 6에 시계열로 나타내었다. 또한 2005년과 2010년의 수문사상을 강우량과 용담하류하천의 본류로 유입하는 유입유량으로 나누어 Fig. 6에 같이 나타내었다. 2005에 비해 2010년의 강우량이 다소 적으며 본류로 유입하는 유량도 2010년에 감소한 것을 확인할 수 있다. 모델을 구축하고 나서 가장 먼저 수행하는 수위의 비교는 그 모델의 정확성과 적합성을 판단하는 기준이 되며, 그 비교결과는 모의에 사용되는 유량과 지형자료에 의해 좌우된다. W2 모델을 하천에 적용할 때 저유량 조건의 초기 모의기간에 수치발산 및 하도 중간지점의 Dry out 현상이 발생하여 모델 구축이 쉽지 않다. 모델에서는 수치확산을 최소화하기 위한 조건으로 Courant Number ($CN = u\Delta t/\Delta x < 1$)가 사용된다. 모델에서 구간(segment), 즉 거리(x)가 고정되면 시간은 해의 안정조건을 만족하는 범위까지 변화를 줄 수 있다. 수치발산을 방지하기 위해서는 계산시간 간격을 줄여주거나, 경계조건 유량을 큰 유량으로 시작하여 점차 저유량으로 줄여주는 방법이 있으며, 마찰계수를 조절하는 방법들이 있다. 본 연구에서는 이러한 수치해의 발산을 해결하기 위해 계산시간 간격을 짧게 조절하였으며, 발산이 일어나는 지점에 대해 지형자료에 대한 수동 보정을 수행하였다.

2005년과 2010년의 서로 다른 수문사상을 대상으로 구축한 모델에서 유량의 산정은 수위유량곡선식(WAMIS)과 유

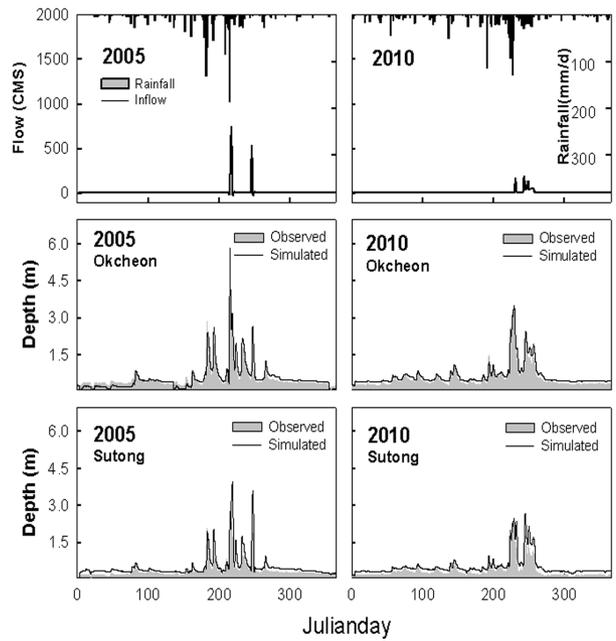


Fig. 6. Hydrological conditions and comparison of simulated and observed water surface elevations for 2005 and 2010.

역면적비를 적용하여 모의에 반영하였다. 그 결과 하류로부터 12.09 km에 위치한 옥천과 71.34 km에 위치한 수동 두 지점에서 모의수위는 관측수위의 추세를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 실측값과 모의값의 오차를 평가하기 위한 통계치로 널리 사용되고 있는 MAE (절대평균오차, mean absolute error)와 RMSE (평균제곱오차의 평방근, root mean square error)를 산정해 본 결과 2005년 옥천에서는 MAE 0.154, RMSE 0.229, 수동에서는 MAE 0.172, RMSE 0.299로 수위비교의 오차가 적절한 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 2010년 또한 옥천에서는 MAE 0.141, RMSE 0.167, 수동에서는 MAE 0.184, RMSE 0.229로 구축한 모델이 수위변동을 잘 예측하는 것으로 나타났다(Table 3). MAE와 RMSE의 단위는 실제 변량과 같고, 그 값이 0에 가까울수록 모의결과의 정확도가 높고 모델의 성능이 우수하다는 것을 의미한다. 또한 R^2 는 0.77~0.95의 범위로 2005년과 2010년 모두 하천의 수위변동을 모델이 잘 재현하는 것으로 나타났다. 이 값은 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 모델의 정확도가 높게 평가된다.

3.2. 수온 모의 결과

2005년과 2010년의 모의 수온을 실측 수온과 비교하여

Table 4. Statistical indices used to evaluate the model accuracy of water surface elevation in Yongdam downstream

| Statistical index | Desired value | 2005 | | 2010 | |
|--|---------------|---------|--------|---------|--------|
| | | Okcheon | Sutong | Okcheon | Sutong |
| Coefficient of determination (R^2) | 1 | 0.77 | 0.89 | 0.95 | 0.91 |
| Mean absolute error (MAE) | 0 | 0.154 | 0.172 | 0.141 | 0.184 |
| Root mean square error (RMSE) | 0 | 0.229 | 0.299 | 0.167 | 0.229 |

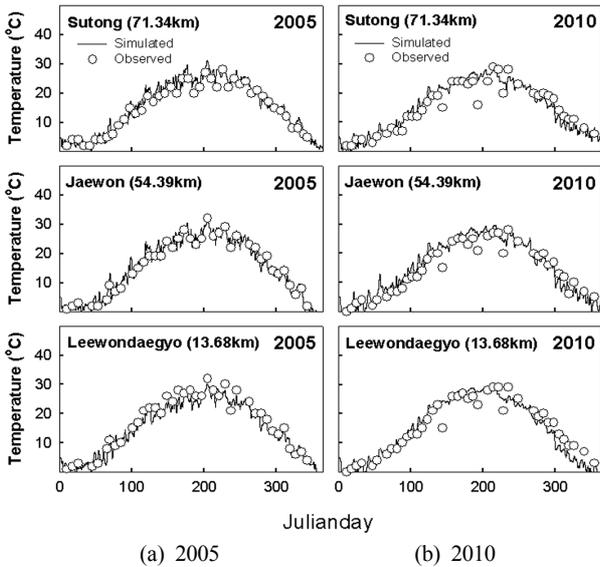


Fig. 7. Comparison of simulated and observed water temperature for 2005 and 2010.

Fig. 7에 나타내었다. 하류로부터 13.68 km에 위치한 이원대교와 54.39 km에 위치한 제원, 그리고 71.34 km에 위치한 수통, 세 지점을 선정하여 비교하였다. 이 세 지점은 물환경정보시스템의 금본C, 금본D, 금본E 지점에 해당하는 지점으로 8일 간격의 측정 자료가 존재하는 지점이다. 하천의 수온은 기온, 지류유입 및 방류수의 수온변화에 따라 급변하며, 제한된 하천 경계조건의 입력 자료를 사용했음에도 불구하고 모델은 수통과 제원 그리고 이원대교 세 지점에서 갈수기 및 홍수기 하천의 수온변화를 매우 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 2010년 세 지점의 동절기 모의결과는 실측값보다 다소 낮게 모의되었는데 이는 월평균 자료를 토대로 구축된 입력 자료와의 오차로 판단된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 유입지류의 연속적인 수온 모니터링이 필요할 것이다.

3.3. SS 모의결과

SS 농도의 모의 결과를 하류로부터 71.34 km 지점인 수통과 54.39 km 지점인 제원, 그리고 13.68 km 지점인 이원대교에서 실측값과 비교하였다. Fig. 8에 실측 SS와 모의 SS의 시계열 비교결과를 나타내었다. 모의값이 실측값보다 다소 낮게 나타났으나 대체적으로 강우시와 비강우시의 추세를 잘 반영하는 것으로 보인다. 각각의 지류에 대한 SS 농도의 실측값이 존재하지 않는 상태에서 강우시와 비강우시의 유량과 SS 농도 관계식을 적용하여 산정한 값을 유입지류의 SS 농도 값으로 적용하였기 때문에 모의 결과는 어느 정도의 가정을 안고 있다. 또한 SS의 농도에 가장 영향이 큰 침강속도의 산정 또한 우기 시에 실측한 값을 토대로 산정된 값으로 보정을 통해 적용하였으므로 침강속도의 값에도 한계를 가지고 있다. 그럼에도 모델은 2005년과 2010년 모두 세 지점에서 적절히 시계열 변화를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 2005년 갈수기(Julian Day 100 ~ 200)에 제원과 이원대교에서는 실측 SS 농도가 모의결과

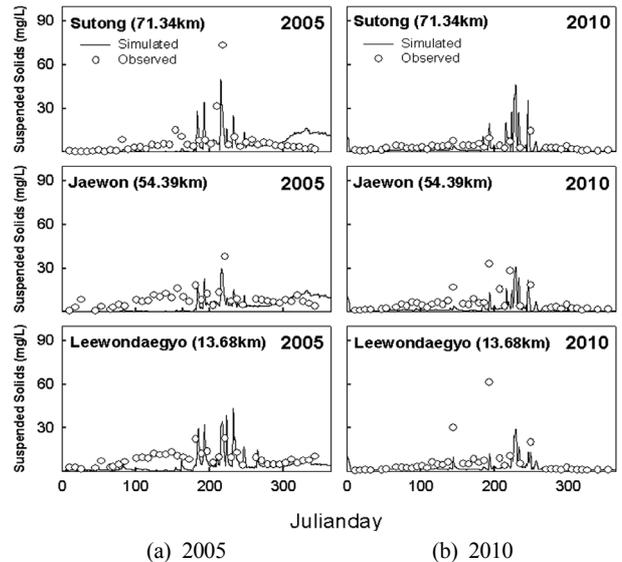


Fig. 8. Comparison of simulated and observed suspended solids for 2005 and 2010.

보다 다소 높게 나타났는데, 이는 강우시와 비강우시를 나누는 과정에서 소량의 강우는 적용이 되지 않았기 때문에 사료된다. SS 모의결과의 오차를 최소화하기 위해서는 하천에 대한 연속적인 탁도, SS 모니터링이 필요하며, 다양한 강우사상에 대한 부유사의 입경분포의 실측 자료가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 9에 용담 하류 하천의 SS 모의 결과를 Snapshot으로 나타내었다. Fig. 9에서 (a)의 그림은 Branch를 3개로 나누어 기울기를 주었기 때문에 상류로부터 하류까지 3개의 경사가 지어진 것을 볼 수 있다. (c)그림은 비가 가장 많은 8월 7일의 SS 농도를 하천 전 구간에 걸쳐 보여주고 있다. 4 가지의 색으로 SS가 구분된 것은 4개 각각의 위치에서 지류가 유입되기 때문으로 그에 따라 변화되는 SS 농도를 쉽게 확인할 수 있다. 원래 5개의 지류로 모의가 되었으나 영동천과 초강천의 거리가 멀지 않아 하나의 지류가 유입되는 것처럼 표현되어 Snapshots에 보이는 것이다. 그림 (b)와 그림 (d)는 julian day 1일과 219일의 SS농도가 강 밀바닥부터 수표면까지의 수직적인 농도가 어떻게 달라지는 가를 보기 위해 확대한 그림이다. 하천의 수위가 낮음에도 SS 농도의 수직적인 차이가 있음을 나타내주고 있다.

Fig. 10은 하도에서 SS의 시공간적 농도변화를 보여주고 있다. Fig. 10의 그림 (a)인 Julian Day 218.75일에 강우-유출이 시작되면서 하천의 수위가 상승하고 SS 농도가 10 mg/L 내외로 전반적으로 높게 나타났다. 강우량이 점차 감소하면서 219.00일, 219.25일, 219.50일 시간이 지남에 따라 SS 농도가 감소하는 경향을 수심에 따라서 나타내 주고 있다. 4개의 그림에서 모두 수심별 SS 농도의 차이를 확인할 수 있다. 이는 하도 상에 수송되는 부유사 입자의 입경별 침강특성과 관계된 것으로 판단된다. 2차원 횡방향 평균 모델은 중방향과 수심방향의 수리현상과 물질 수송현상을 해석하는 특징이 있으며, 부유사의 수송해석에 있어서도 수심별 SS 농도차이를 재현할 수 있는 장점이 있는 것을

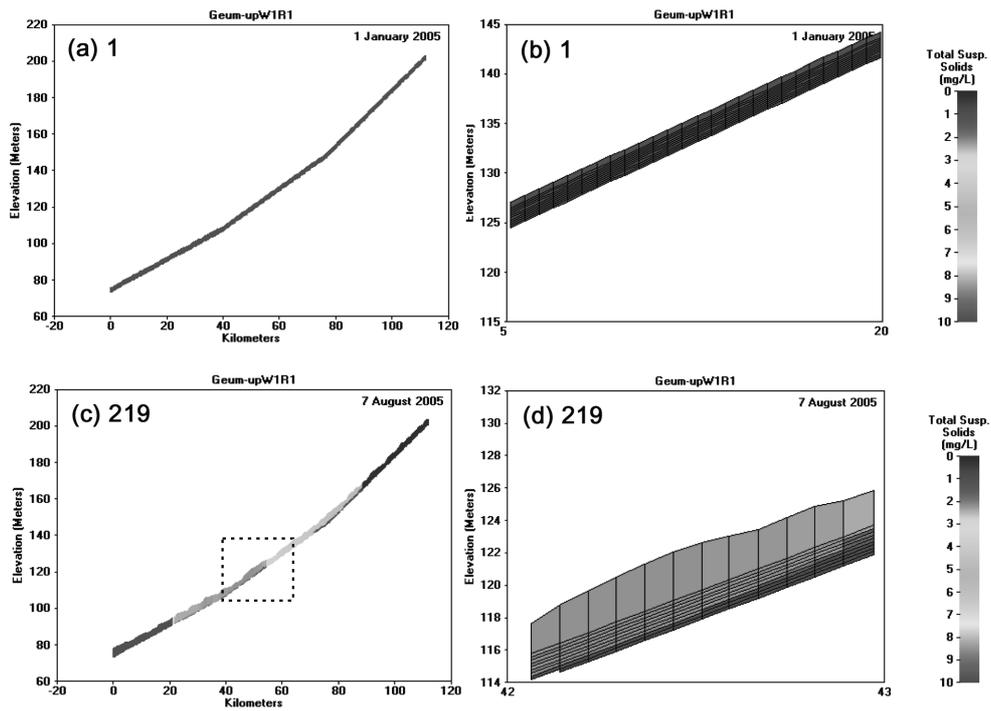


Fig. 9. Snapshots showing simulation results of SS (2005).

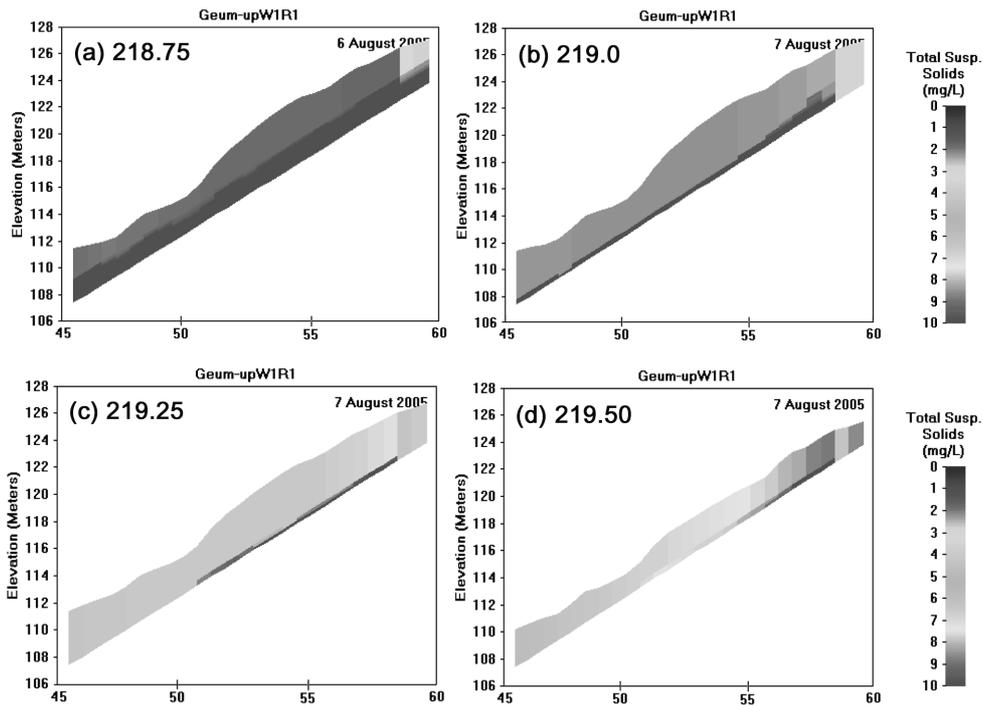


Fig. 10. Snapshots showing spatial distribution of SS on August 7, 2005.

알 수 있다. 그러나 하천의 유량이 적은 평갈수기에는 지류 하천 유입 이후 횡방향 완전 혼합이 이루어지기 전까지의 하천 구간에서는 횡방향 평균 모델은 모델의 구조적 한계로 인해 모의결과의 정확성이 감소한다는 점에 유의해야 한다. 반면, 강우-유출이 발생한 이후 탁수가 유입한 하천 환경에서는 유속이 빠르기 때문에 지류와 본류의 완전 혼합거리(Mixing length)가 짧기 때문에 횡방향 평균 가정

으로 인한 오차는 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 지금까지 하천에 주로 사용하는 1차원 완전혼합을 가정하는 다른 모델들과 비교해 훨씬 우수한 성능을 보여주는 결과라고 판단되며 향후 2차원 모델로 주요 하천들을 모의함으로써 좀 더 정확하고 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 용담댐과 연계된 하류하천 수질관리를 지원하기 위해 용담댐 하류하천을 대상으로 수리 및 수질의 동적 변화를 모의할 수 있는 2차원 횡방향 평균 모델(W2)을 구축하고, 실측자료를 토대로 모델의 예측 성능을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 아래와 같다.

- 1) 용담댐과 연계된 하류하천을 대상으로 W2 수리 모델을 구축하고 수문사상이 다른 2005년과 2010년을 대상으로 하천의 수위변화를 모의하고 관측값과 비교한 결과 모델은 하천 수위의 시계열 변화를 적절히 잘 모의하는 것으로 나타났다.
- 2) 주요지점인 수통과 제원 그리고 이원대교에서 수온과 SS의 시계열 모의결과를 환경부 수질유량관측망의 8일간격 실측값과 비교한 결과, 2005년 갈수기를 제외한 대부분의 기간 동안 모델은 실측 SS 농도 변화를 잘 반영하는 것으로 나타났다.
- 3) SS 모의결과에 오차를 최소화하기 위해서는 주요 지류 하천에 대한 강우시와 비강우시의 연속적인 탁도 모니터링과 탁도-SS 농도 관계 정립이 필요하며, 다양한 강우사상에 대한 부유사의 입경분포에 대한 조사도 필요하다.
- 4) SS의 모의 결과에서 하도의 수심별 SS 농도의 차이를 확인할 수 있었다. 이는 2차원 횡방향 평균 모델은 종방향과 수심방향의 수리현상과 물질 수송현상을 해석하는 특징이 있으며, 부유사의 수송해석에 있어서도 수심별 SS 농도차이를 재현할 수 있는 장점이 있는 것을 확인시켜 주는 결과이다.
- 5) 2차원 횡방향 평균 모형은 지류와 본류의 혼합구간에서는 횡방향 농도차이로 인해 오차가 발생할 수 있으나, 강우-유출이 발생한 하천 환경에서는 유속이 빠르기 때문에 지류와 본류의 완전 혼합거리가 짧아 횡방향 평균 가정으로 인한 예측 오차는 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 댐 저수지와 하천이 연속된 국내 하천환경에서 탁수 해석과 조절을 위해 횡방향 평균 모형을 적용할 경우, 하나의 모델로써 성층화된 저수지로 유입한 탁수의 밀도류 해석과 하류하천 탁수 거동해석을 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 댐 하류 탁도 조절을 위한 선택취수 설비 운영 등에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

참고문헌

김윤희, 김법철, 최광순, 서동일(2001). 2차원 수리 수질 모델

(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링. *상하수도학회지*, **15**(1), pp. 40-49.

박정은, 박석순(2006). 연속적 댐 건설이 하류하천 수온 변화에 미치는 영향 예측을 위한 모델 연구. *공동 추계 학술발표회논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 855-860.

서동일, 윤종욱, 이재운(2008). QUAL2E, QUAL2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질모델링 결과 비교 분석. *상하수도학회지*, **22**(1), pp. 121-129.

신영호(2009). 합천댐 하류 하천지형 변화 예측 및 흐름파가 수리거하 변화에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **42**(7), pp. 579-589.

신재기, 이혜숙, 이승윤(2008). 댐 하류하천의 어류기생충 발생현황 및 해결방안 연구. *공동 추계 학술발표회논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 554-555.

이요상, 이광만, 이을래, 박진혁(2009). 하류 하천환경을 고려한 바람직한 댐 운영방향. *학술발표회 초록집*, 한국수자원학회, pp. 1989-1993.

이혜숙, 정선아, 박상영, 이요상(2008). HSPF와 CE-QUAL-W2 모델의 연계적용을 이용한 용담댐 저수지 탁수현상의 모델연구. *대한환경공학회지*, **30**(1), pp. 69-78.

정세웅(2004). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포특성 및 연직 2차원 모델링. *대한환경공학회지*, **26**(90), pp. 970-978.

정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완(2007). 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 52-63.

정세웅, 이흥수, 정용탁(2008). 입자크기를 고려한 부력침강 저수지 밀도류의 탁도 모델링. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 365-377.

정용탁, 정세웅, 류인구, 최정규(2008). 대청호와 하류하천 연속시스템의 2차원 수리·수질 모의. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 581-591.

정용탁, 정세웅, 윤성완, 오동근, 정희영(2009). 저수지 플러싱 방류가 하류 수질에 미치는 영향 모의를 위한 수질 모델의 성능 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1), pp. 48-57.

최시중, 서재승, 이동률, 강성규(2009). 용담댐 하류의 하천 수질보전을 위한 필요유량 산정 방안. *학술발표회 초록집*, 한국수자원학회, pp. 2148-2152.

한건연, 이을래(2002). 한강하류부에서의 2차원 수질모형의 개발 및 적용. *한국수자원학회논문집*, **35**(3), pp. 161-274.

한국수자원공사(2007). *다목적댐 실무편람*.

허준욱, 김정곤(2009). 용담댐 하류의 하천건강성 평가 및 어류 서식처를 고려한 최적 생태유량 산정. *한국수자원학회논문집*, **42**(6), pp. 481-491.

홍성민, 정인균, 이준우, 김성준(2004). SMS를 이용한 경안천 하류구간의 하천흐름 분석. *한국지리정보학회지*, **7**(1), pp. 94-104.

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.

Camenen, B. (2007). Simple and general formula for the settling velocity of particles. *J. Hydr. Eng.*, **133**(2), pp. 229-233.

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., Hipsey, M. R., and Imberger, J. (2009). Modelling the propagation of turbid density in flows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea. *Environ. Modell. Softw.*, **24**, pp. 1467-1482.
- 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 of Engineers. USA.
- Cole, T. M. and Wells, S. A. (2008). CE-QUAL-W2: *A Two-dimensional, laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6*, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.
- Gibbs, R. J. (1985). Settling velocity, diameter, and density for flocs of illite, kaolinite, and montmorillonite. *J. of Sedimentary Petrology*, **55**(1), pp. 65-68.
- Manning, A. J. and Dyer, K. R. (1999). A laboratory examination of flock characteristics with regard to turbulent shearing. *Mar. Geol.*, **160**, pp. 147-170.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Coynel, A., Maneux, E., Etcheber, H., and Sánchez-Pérez, J. (2011). Fluvial transport of suspended sediment and organic carbon during flood events in a large agricultural catchment in southwest France. *Hydrol. Process*, **25**, pp. 2365-2378.
- Pedocchi, F. and Garcia, M. H. (2006). Evaluation of the LISST-ST instrument for suspended particle size distribution and settling velocity measurements. *Continental Shelf Research*, **26**, pp. 943-958.
- Standford, 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., Sovieszczyk, S., and Bragg, H. M. (2007). *Modeling hydrodynamics, water temperature, and suspended sediment in Detroit Lake, Oregon* : U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-2005, VA, USA.
- Umeda, M., Yokoyama, K., and Ishikawa, T. (2006). Observation and simulation of floodwater intrusion and sedimentation in the Shichikashuku Reservoir. *J. Hydr Eng.*, **132**(9), pp. 881-891.
- Vongvixay, A., Grimaldi, C., Gascuel-odoux, C., Laguionie, P., Fauchoux, M., Gilliet, N., and Mayet, M. (2010). Analysis of suspended sediment concentration and discharge relations to identify particle origins in small agricultural watersheds. *Proc. of the ICCE Symposium*, Warsaw University of Lifesciences, IAHS Publishing, pp. 76-83.
- Walling, D. E. (1977). Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin. *Water Resources Research*, **13**(3), pp. 531-538.