

CE-QUAL-W2를 이용한 충주호의 부유물질 및 부영양화 모의평가

Evaluation of Suspended Solids and Eutrophication in Chungju Lake Using CE-QUAL-W2

안 소 라* / 김 상 호** / 윤 성 완*** / 김 성 준****

Ahn, So Ra / Kim, Sang Ho / Yoon, Sung Wan / Kim, Seong Joon

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the suspended solids and eutrophication processes relationships in Chungju lake using CE-QUAL-W2, two-dimensional (2D) longitudinal/vertical hydrodynamic and water quality model. For water quality modeling, the lake segmentation was configured as 7 branches system according to their shape and tributary distribution. The model was calibrated (2010) and validated (2008) using 2 years of field data of water temperature, suspended solids (SS), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and algae (Chl-a). The water temperature began to increase in depth from April and the stratification occurred at about 10 m early July heavy rain. The high SS concentration of the interflow density currents entering from the watershed was well simulated especially for July 2008 heavy rainfall event. The simulated concentration range of TN and TP was acceptable, but the errors might occur from the poor reflection for sedimentation velocity of nitrogen component and adsorption-sediment of phosphorus in model. The concentration of Chl-a was simulated well with the algal growth patterns in summer of 2010 and 2008, but the error of under estimation may come from the use of width-averaged velocity and concentration, not considering the actual to one side inclination by wind effect.

Keywords : Chungju lake, CE-QUAL-W2, water temperature, suspended solids, eutrophication

요 지

본 연구의 목적은 충주호 유역을 대상으로 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형인 CE-QUAL-W2를 이용하여 호소내 수온분포, 부유물질 및 부영양화 과정의 변화특성을 모의하고 모형의 적용성을 평가하는 것이다. 지형 및 단면자료 구축을 위해 충주호를 남한강 본류(branch 1)와 유입 경계부(branch 2~7)로 구분하여 격자를 구성하였다. 호소 수질모텔링을 위한 주요 입력 자료로 기상자료, 호소의 수온과 탁도 초기조건, 하천의 유량과 수온, 수질 경계조건 자료를 구축하였다. 이후 실측된 수온, 부유물질(SS), 총질소(TN), 총인(TP), 조류(Chl-a)에 대하여 모형의 보정(2010) 및 검증(2008)을 수행하여 모형의 적용가능성을 평가하였다. 충주호의 수온은 4월부터 표층수온이 증가하여 7월초에 성층현상이 발생되고 12월에는 연직수온분포가 일정하게 유지되었다. 집중호우 발생 후에는 성층구조가 교란되어 수온약층이 약 10 m가량 하강하였다. SS는 수온과 동일한 패턴으로 집중호우 발생 후에 증가하다가 12월에 안정화되었으며, 2008년 7월에 발생한 중층밀도류의

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (e-mail: ahnsora@konkuk.ac.kr)

Doctoral Student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (e-mail: sanghok@konkuk.ac.kr)

Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*** 충북대학교 환경공학과 박사 후 연구원 (e-mail: mnswhdqud@hanmail.net)

Post Doctor, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

**** 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3749)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

분포 현상을 잘 재현하였다. TN, TP의 경우 농도의 범위를 잘 재현하였지만, 모형 내에서 질소성분의 침강속도 및 인의 흡착-침전과정이 적절히 모의되지 않아 오차가 발생하였다. Chl-a의 경우 2010년과 2008년 여름의 조류의 성장패턴을 잘 반영하였지만, 모형이 횡방향 평균 유속과 농도를 사용함에 따른 모형의 한계점이 나타났다.

핵심용어 : 충주호, CE-QUAL-W2, 수온, 부유물질, 부영양화

1. 서 론

호소의 수질에 영향을 미치는 인자는 크게 외부적인 요인과 호소 내부적인 요인으로 구분할 수 있다. 외부적인 요인은 주로 유역의 상황변화에 따른 오염물질의 유입특성과 관련된 요소들이며, 내부적인 요인은 호소 내부에서 오염물질의 이동 및 변화와 관계되는 항목들로 볼 수 있다(Kim et al., 2001). 상류유역 하천에서 발생하는 부유물질은 호소로 유입되어 장기간 체류하며 심각한 오염원으로서 수증생태계에 치명적인 영향을 주며, 호소 수질악화 및 부영양화의 직접적인 요인이 되기 때문에 중요한 환경문제 중의 하나이다. 국내의 대규모 인공 호소는 정도의 차이는 있으나 대부분 부유물질에 의한 탁수가 발생되고 있는 실정이다. 따라서 호소의 수질환경을 위한 장기적이고 체계적인 수질관리 및 운영을 위해서는 호소수질에 영향을 미치는 다양한 환경영향인자들의 상호관계 및 인과관계를 종합적으로 해석하고 사전에 예측할 수 있는 연구가 필요하며 이를 통해 적절한 대응책을 강구해야 한다.

호소의 수질을 예측하기 위하여 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 CE-QUAL-W2 모형은 저수지 수체의 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질해석 모형이다. 저수지의 길이방향과 수직방향 모두 농도 구배가 존재하는 폭이 좁고 길며 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합한 모형이다. 특히 저수지 성층화 현상과 밀도류 해석이 뛰어나며, 하천과 저수지의 연계모의가 가능해져 점차 그 활용도가 증가되고 있는 추세이다(Chung et al., 2007). 그동안 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지내의 수질모델링에 관한 연구는 다수 진행되어왔다. 국내의 경우 Kim et al. (2001)은 소양호를 대상으로 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지내 수온분포 변화 및 탁수로 인한 중층밀도류의 이동특성을 모의하였다. Chung (2004)과 Chung et al. (2005)은 대청호를 대상으로 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 홍수기 동안의 중층탁류의 유입에 따른 저수지내 탁수의 시·공간적인 분포를 예측하였다. Yi et al. (2005)은 임하호를 대상으로 태풍 ‘루사’ 전·후의 저수지내 시간대별 탁수변화를 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 분석하였고, Jeong and Park

(2005)은 강릉 오봉호를 대상으로 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 댐 재개발에 따른 지형에 변화로 인한 저수지내 수온 및 탁수거동 변화를 예측하였다. Chung et al. (2007)은 대청호의 부영양화 현상을 CE-QUAL-W2 모형으로 해석할 수 있는 방법론을 제시하고, 여름철 실제 조류발생에 대하여 저수지내 수리학적 거동 및 오염부하 특성을 분석하였다. 근래에 들어 댐 저수지와 하류하천을 연계하여 수질 모델링을 한 연구로 Jung et al. (2008)은 CE-QUAL-W2 모형을 대청호-하류하천-금강하구 담수호에 적용하여 수리, 수온, 부유물질의 동적 변화를 모의하였고, Kim and Chung (2011)은 용담호 하류하천을 대상으로 수리 및 수질의 동적 변화를 모의한 바 있다. 국외에서도 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 저수지내의 수온 및 수질모델링에 관한 연구(Ostfeld and Salomons, 2005; Kuo et al., 2006; Norton and Bradford, 2009; Deus et al., 2013; Martin et al., 2013)가 활발히 진행되어 왔다.

이처럼 현재까지 많은 연구가 이루어지고 있지만, 대부분의 연구들이 수온 및 탁수분포를 예측하는 연구이며, 부영양화 현상까지 예측한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 호소의 수질관리를 위해서는 호소내 수리학적 거동 및 오염부하 특성과 조류발생 등의 인과관계를 분석하여, 수질 및 생태계 물질순환시스템을 해석하는 연구가 필요하다. 본 연구에서 대상유역으로 선정한 충주호의 수질은 T-N, T-P의 영양염류 농도가 증가추세를 보이며 충주호의 부영양화 현상 발생이 우려되는 호소이다. 그동안 오염의 원인을 점 오염원에 국한하여 중점적으로 수질관리를 실행하여 왔으나, 호소와 하천 등의 오염저감에는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 충주호를 대상으로 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형인 CE-QUAL-W2를 적용하여 호소내 수온분포, 부유물질 및 부영양화 변화특성을 모의하고자 한다. 먼저 모형의 구동을 위해 지형, 기상, 호소 초기조건 및 하천 경계조건자료를 구축한 뒤, 호소내 수질모의를 위하여 실측자료인 수온, 부유물질(SS), 총질소(TN), 총인(TP), 조류(Chl-a)에 대하여 보정(2010년) 및 검증(2008년)을 수행하여 모형의 적용성을 평가하고 충주호의 수질변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 CE-QUAL-W2 모형의 개요

CE-QUAL-W2 모형은 미공병단(U.S Army Corps of Engineers)에서 1986년 개발된 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형이다. 이 모형은 하천, 저수지, 하구 또는 이들이 결합된 시스템에 적용되어 왔으나, 폭 방향의 수질이 균일하다고 가정하므로 우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 수심이 깊고 흐름방향에 비해 상대적으로 폭이 좁은 수체에 가장 적합하다고 알려져 있다. CE-QUAL-W2 모형은 저수지 수위변동, 흐름방향 및 수심방향의 유속분포, 수온 그리고 28가지 수질항목의 모의가 가능하며, 지류 유입, 점 및 비점오염원, 하류방류(Releases), 취수(Withdrawal) 등 다양한 유입 및 방류조건에 대한 모의 기능이 포함되어 있다. 그리고 하천과 저수지의 연계모의 기능, 수리동력학 지배방정식에 저수지 바닥 경사항 고려, 입력자료의 선형 보간(Interpolation) 기능, 사용자 편의 프로그램(GUI) 등 다양한 기능이 포함되어 있다. 현재 W2 모형은 미 육군 공병단(US Army Corps of Engineers), 미 개척국(USBR), 테네시 유역 관리청(TVA) 등 미국의 주요 저수지 관리 기관에서 댐 저수지의 수질관리를 위한 모형으로 광범위하게 활용되고 있다(Cole and Tillman, 2001).

CE-QUAL-W2의 수리해석은 자유수표고(η), 압력(P), 횡방향 유속(U), 종방향 유속(W), 구성성분 농도(ϕ), 밀도(ρ) 등 6가지 변수에 대한 운동방정식, 연속방정식, 이류 확산방정식, 수표면 고도 방정식, 수압 방정식, 상태방정식의 6개의 지배방정식(Eqs. (1a)~(1f))을 사용하여 다양한 유한차분수치해석법을 사용하여 계산한다.

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial BP}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (1a)$$

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

$$\frac{\partial U\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_p B + S_p B \quad (1c)$$

$$\frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_n^h qB dz \quad (1d)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (1e)$$

$$\rho = f(T_w, \Phi, TDS, \Phi_{ISS}) \quad (1f)$$

여기서, U 는 x 방향, 횡 방향으로 평균화된 유속($m \cdot sec^{-1}$), W 는 z 방향 유속($m \cdot sec^{-1}$), ρ 는 밀도($kg \cdot m^{-3}$), A_x 는 x 방향 운동 확산계수($m^2 \cdot sec^{-1}$), τ_x 는 수평방향 전단력($m^2 \cdot sec^{-1}$), q 는 유입 또는 유출유량($m^3 \cdot sec^{-1}$), η 는 자유수표면 위치(m), g 는 중력가속도($m \cdot sec^{-2}$), B 는 수체의 폭(m), t 는 시간(sec), P 는 압력($N \cdot m^2$), Φ 는 물질농도($g \cdot m^{-3}$), D_x 는 x 방향의 확산 계수($m^2 \cdot sec^{-1}$), S_p 는 반응에 의한 유입 또는 유출량($g \cdot m^{-3} \cdot sec^{-1}$), h 는 총 수심(m)이다.

2.2 대상유역

본 연구의 대상유역은 충주호를 포함하는 충주댐 상류 유역으로 유역면적은 6,661.8 km^2 이다. 충주댐 유역의 평균 표고는 609.1 m, 유역 평균경사는 36.9%로 우리나라 북동부 산악지역에 위치해 있으며, 산림면적은 5,573.1 km^2 로서 유역면적의 84.6%에 이르는 산림유역이다. 행정구역 상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9%, 28.4%, 1.7%를 차지하고 있다. 주요 유입하천으로는 본류인 남한강, 지류인 제천천과 동달천이 합류되며, 연평균 강수량은 1,359.5 mm이며, 평균기온은 9.4°C이다. 충주호는 한강유역의 홍수조절 및 한강유역의 용수난을 해결하기 위해 건설된 다목적댐 저수지로 1985년 10월에 완공되어 담수가 시작되었고, 최대저수용량은 2,750 $10^6 m^3$, 저수면적은 97 km^2 , 총 길이는 75 km, 최대 수심은 83 m이다. 충주댐 유역은 지난 수십 년 동안 벌채, 개간 등에 의한 산림의 변화, 도시개발, 단지 및 주거지 조성, 논 경지정리, 밭 개간 등에 의한 토지이용의 변화, 논 내 비닐하우스 재배 등에 의한 물이용 형태의 변화 등 꾸준한 변화가 지속되어 왔다. 이로 인한 비점오염원의 증가와 기후변화에 따른 수문순환체계의 변화는 충주댐 유역의 치수대책 및 하천정비계획뿐만 아니라 충주호의 수질에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다(Park et al. 2009). Fig. 1에는 대상유역의 위치와 연구에 사용된 기상관측소, 유량관측소, 저수지 및 하천의 수질관측소 현황을 나타내었다.

2.3 지형 및 단면자료 구성

본 연구에서는 CE-QUAL-W2 모형을 충주호에 적용하기 위하여 1:5000 수치지형도 정보를 바탕으로 격자를 구성하였다. 충주호의 유한차분 격자는 남한강 본류와 주요 지천인 제천천 및 동달천을 고려하여 7개의 가지(branch)로 구분하였고, 남한강 본류(branch 1)와 유입 경계부(branch 2~7)로 구분하였다. 흐름방향으로는 댐 축으로부터 약 75 km 상류지점까지 261개의 구획(segment), 수심방향으로는 1 m 간격으로 83개의 수층(layer)으로 구성

하였다. Fig. 2는 남한강 본류(branch 1)의 격자구성과 본류로 유입되는 경계부의 위치를 나타내었다.

2.4 기상자료, 호소 초기조건 및 하천 경계조건 입력자료 구성

CE-QUAL-W2의 주요 입력 자료로 앞서 구축한 저수지 지형 및 단면자료 외에 기상자료, 호소의 수온과 탁도 초기조건, 저수지 상류 및 하류하천의 유량과 수온, 수질 경계조건 등이 요구된다. 여기서 호소의 초기조건은 수심별로 측정된 수온 및 탁도의 실측자료를 이용하게 되는데, 충주호의 호소 실측자료는 2008년, 2010년을 보유하고 있

기 때문에 본 연구에서 CE-QUAL-W2의 모형의 보정(2010) 및 검증(2008) 기간을 2개년으로 결정하고 자료를 구축하였다. 호소 수온 및 탁도의 초기조건은 보정 및 검증 모의 기간에 맞춰 각각 2010년 1월 1일, 2008년 1월 1일에 댐 앞 지점에서 측정된 수심별 실측자료를 이용하였다. 기상자료로는 기온(°C), 이슬점온도(°C), 풍속(m/s), 풍향(phi), 운도(1/10) 자료가 필요하며, 충주 기상관측소의 2010년, 2008년 자료를 수집하여 이용하였다(Table 1).

하천 경계조건은 본류와 지류로 유입하는 유량(유입량, 방류량), 유입수 수온 및 수질 자료가 필요한데, 여기서 수질은 부유물질(SS), 질소 계열(NO_3 , NH_4), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$),

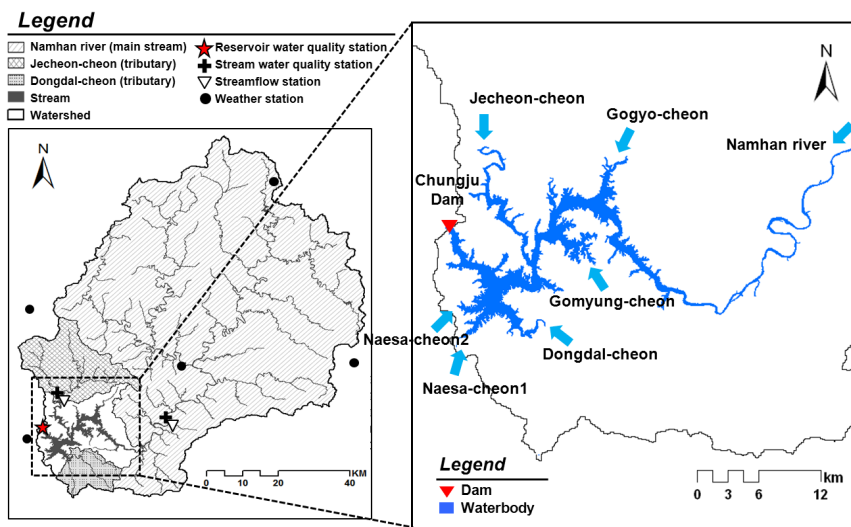


Fig. 1. Location of Study Watershed, Showing Main Stream, Waterbody and Gaging Stations

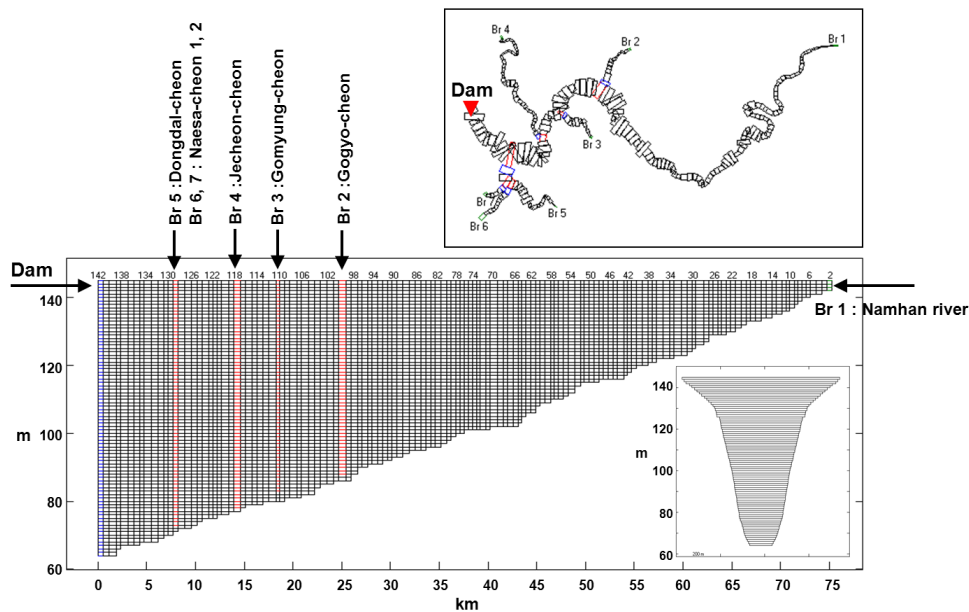


Fig. 2. CE-Qual-W2 Model Grid of Chungju Reservoir for the main Branch (Br 1)

조류(Chl-a), 용존산소(DO), 난분해성 용존상 유기물(R-DOM), 분해성 용존상 유기물(L-DOM), 난분해성 입자상 유기물(R-POM), 분해성 입자상 유기물(L-POM) 자료가 요구된다. 먼저 유량 경계조건으로 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 충주댐 운영 자료를 바탕으로 유입량과 방류량 자료를 구성하였다. 유입량은 충주댐의 일별 총유입량으로부터 branch별 유역면적에 의한 비유량법으로 산정하였고, 방류량은 여수로 방류량과 소수력 발전량으로 나누어 모형에 입력하였다. Fig. 3에는 2010년과 2008년의 충주댐 운영 자료를 나타내었고, Table 2에는 2010년과 2008년의 댐 유역 강수량, 유입량과 방류량, 저수위 수위변화를 정리하였다. 2008년은 갈수년으로 풍수년인 2010년에 비해 강수량은 74% 수준으로 나타났고, 평균 유입량도 57% 수준으로 분석되었지만 저수지 수위는 큰 차이를 보이지는 않았다.

유입수 수온 경계조건의 경우 충주댐 유입부에서 일별로 실측된 수온 자료가 없기 때문에 다중회귀식을 산정하였으며, 독립변수로 기온 및 이슬점온도, 유량을 사용하여 일별 수온을 예측하였다(Table 3). 수질 경계조건은 부유물질(SS)의 경우 일별로 실측된 수질 자료가 없기 때문에 하천에서 미세측 연속 부유물질(SS) 농도를 산정하는 방

법으로 유량과 부유물질(SS) 농도의 멱함수 관계로부터 회귀식을 산정하여 자료를 보완하였다(Table 3).

나머지 경계조건 수질항목인 질소 계열(NO_3 , NH_4), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$), 조류(Chl-a), 용존산소(DO)의 경우에는 환경부 월간 측정망 자료를 입력하였다. 수질항목을 입력하는데 있어 유량 경계조건과 동일한 방법으로 branch별 유역면적에 의한 비유량법으로 산정하여 모형에 입력하였다. CE-QUAL-W2 모형은 모의대상 수질항목이 국내 호소수질 측정망 자료와 다소 차이가 있어 난분해성 용존상 유기물(R-DOM), 분해성 용존상 유기물(L-DOM), 난분해성 입자상 유기물(R-POM), 분해성 입자상 유기물(L-POM)과 같은 상세한 입력 자료를 구축하기에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 제한된 저수지 수질측정망 자료를 이용하여 망간법으로 측정된 화학적 산소 요구량(COD_{Mn})과 총유기탄소(TOC)비를 이용하였다(Choi et al., 2000). TOC를 구한다면 환경부 월간 수질 측정망 자료인 COD_{Mn} 로부터 TOM을 구하였다(Eq. (2)).

$$\text{TOM} = (\text{COD}_{\text{Mn}} \div 1.09) \quad (2)$$

용존상 유기물(DOM)과 입자상 유기물(POM)을 구분하는데 DOM과 POM의 분율을 국내 하천과 호수의 실험

Table 1. Weather Conditions in 2010 and 2008

Weather conditions	2010					2008				
	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Temperature (°C)	10.3	25.1	13.0	-2.3	11.6	12.2	24.1	13.6	-1.7	12.1
Dew point temperature (°C)	1.5	19.4	7.5	-8.2	5.1	2.1	17.2	7.7	-7.1	5.0
Wind speed (m/s)	3.8	3.4	3.6	3.8	3.6	4.8	3.9	3.5	3.6	4.0
Wind direction (phi)	184.0	135.3	220.5	221.1	189.9	266.5	375.1	280.5	217.0	285.3
Cloud	5.7	6.8	4.6	4.4	5.4	4.6	6.5	4.9	3.8	5.0

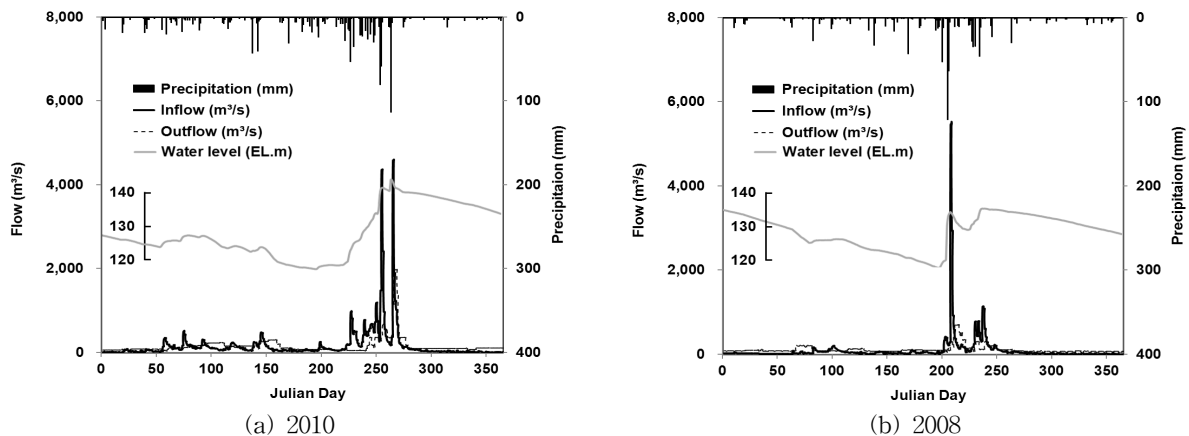


Fig. 3. Operation Data of Chungju Reservoir

결과(Kim et al., 1998)를 참조하여 각각 75%와 25%로 구분하였다. 이를 다시 미생물에 의해 쉽게 분해되는 유기물과 쉽게 분해되지 않는 난분해성 유기물로 분류하여야 하는데, Yoo et al. (2005)의 실험결과를 근거로 L-DOM (30%), R-DOM (70%), L-POM (30%), R-POM (70%)으로 구분하여 모형에 입력하였다(Eqs. (3a)~(3d)).

$$L-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.30 \quad (3a)$$

$$R-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.70 \quad (3b)$$

$$L-POM = \{(TOM - algae) \times 0.25\} \times 0.30 \quad (3c)$$

$$R-POM = \{(TOM - algae) \times 0.25\} \times 0.70 \quad (3d)$$

일반적으로 Algae와 Chl-a의 질량비는 조류의 종류에 따라 다른 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Cole and Tillman, 2001). 그러나 실측자료의 한계로 본 연구에서는 선행연구(Chung et al., 2007)에서 사용되었던 환산계수 적용식을 참고하여 Chl-a 농도(mg/m³) 자료로부터 유입수의 조류(algae) 농도를 산정하였다(Eq. 4).

$$\frac{\mu g \text{ Chl.a}}{1} \times \frac{mg}{10^3 \mu g} \times \frac{g}{10^3 mg} \times \frac{10^3 l}{m^3} \times 145 \frac{g \text{ OM}}{g \text{ Chl.a}} = \frac{0.145g \text{ OM}}{m^3} \quad (4)$$

2.5 수리 및 수질 매개변수

CE-QUAL-W2의 저수지 수리해석과 수온예측에 관계되는 매개변수 7개의 보정값을 Table 4에 나타내었다. 운동량 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와점성계수 AX, 질량 또는 열보존 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와확산계수 DX, 바닥과 수체간의 마찰계수 CHEZY, 바람의 차단효과를 정량적으로 반영하는 WSC, 물에 의한 광전달 감쇠효과를 나타내는 EXH20, 태양복사에너지 중 저수지 수면으로부터 6.0 m 깊이에 흡수되는 비율을 나타내는 매개변수 BETA, 마지막으로 저수지 바닥층과 수층의 열교환 계수 CBHE 등이다(Chung et al., 2007). 조류와 영양염류, 유기물모의와 관계되는 60여개의 매개변수 중 본 연구에 적용된 주요한 매개변수를 Table 5에 나타내었다.

Table 2. Hydrological Conditions in 2010 and 2008

Hydrological conditions	2010					2008				
	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Precipitation (mm)	270.5	476.2	427.2	131.5	1305.4	170.7	609.2	110.5	74.2	964.6
Total Inflow (m ³ /s)	155.0	141.7	344.5	36.6	169.0	57.3	265.6	40.9	18.8	96.5
Total outflow (m ³ /s)	167.9	97.7	279.6	82.0	156.2	106.5	175.8	85.2	78.9	111.9
Water level (EL.m)	125.0	119.9	138.6	128.7	128.1	125.3	125.0	132.9	131.2	128.6

Table 3. Regression Equation for Water Temperature and SS

Boundary condition	Equation	R ²
Water temperature	$T_w = 3.195 + 1.077 T_a + 0.221 T_d - 0.021 Q$	0.960
SS	$Y = 0.9517x^{0.6028}$	0.504

Table 4. Parameters Used for Hydrodynamic and Water Temperature Calibrations

Parameters	Variable	Unit	Default	Adjusted Value	Value Used in Literature	
					Chung et al. (2007)	Kim and Chung (2011)
Horizontal eddy viscosity	AX	m ² s ⁻¹	1.0	1.0	1.0	10.0
Horizontal eddy diffusivity	DX	m ² s ⁻¹	1.0	1.0	1.0	10.0
Chezy bottom friction factor	CHEZY	m ^{1/2} s ⁻¹	70	85	70	-
Wind-sheltering	WSC	-	0.85	0.85	0.1 ~ 0.5	0.85
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	-	0.45	0	0.6	0.6
Light extinction for pure water	EXH20	m ⁻¹	0.9	0	0.3	0.3
Coefficient of bottom heat exchange	CBHE	W m ² s ⁻¹	0.3	0.45	0.5	0.3

Table 5. Parameters Used for Water Quality and Algae Calibrations

Parameters	Variable	Unit	Default	Adjusted Value	Value Used in Literature
					Chung et al. (2007)
Algae					
Growth rate	AG	day ⁻¹	2.0	2.5	1.0
Mortality rate	AM	day ⁻¹	0.1	0.01	0.08
Excretion rate	AE	day ⁻¹	0.04	0.04	0.02
Respiration rate	AR	day ⁻¹	0.04	0.04	0.04
Settling rate	AS	m day ⁻¹	0.1	0.01	0.01
Phosphorous half-saturation for algal growth	AHSP	gm ⁻³	0.003	0.003	0.006
Nitrogen half-saturation for algal growth	AHSN	gm ⁻³	0.014	0.01	0.014
Light saturation intensity	ASAT	W m ⁻²	75	75	55
Fraction of algae to POM	APOM	-	0.8	0.8	0.8
Lower temperature for minimum algal rates	AT1	°C	5	5	10
Lower temperature for maximum algal rates	AT2	°C	25	15	25
Upper temperature for maximum algal rates	AT3	°C	35	25	35
Upper temperature for minimum algal rates	AT4	°C	40	30	40
Lower temperature rate multiplier for minimum algal rates	AK1	-	0.1	0.01	0.1
Upper temperature rate multiplier for minimum algal rates	AK2	-	0.99	0.9	0.99
Lower temperature rate multiplier for maximum algal rates	AK3	-	0.99	0.99	0.99
Upper temperature rate multiplier for maximum algal rates	AK4	-	0.1	0.1	0.1
Phosphorous to biomass ratio	BIOP	-	0.005	0.005	0.005
Nitrogen to biomass ratio	BION	-	0.08	0.08	0.08
Carbon to biomass ratio	BIOC	-	0.45	0.45	0.45
Algae to chlorophyll a ratio	ACHLA	-	145.0	145.0	100.0
Phosphorous					
Sediment release rate (fraction of SOD)	PO4R	day ⁻¹	0.001	2	0.005
Ammonium					
Ammonium decay rate	NH4DR	day ⁻¹	0.12	0.12	0.12
Sediment release rate (fraction of SOD)	NH4R	-	0.001	0	0.001
Lower temperature for ammonium decay	NH4T1	°C	5	1.5	5
Upper temperature for ammonium decay	NH4T2	°C	25	0.04	25
Lower temperature rate multiple for ammonium decay	NH4K1	-	0.1	0.02	0.1
Upper temperature rate multiple for ammonium decay	NH4K2	-	0.99	0.1	0.99
Nitrate					
Nitrate decay rate	NO3DK	day ⁻¹	0.03	0.03	0.03
Lower temperature for nitrate decay	NO3T1	°C	5	10	5
Upper temperature for nitrate decay	NO3T2	°C	25	35	25
Lower temperature rate multiple for nitrate decay	NO3K1	-	0.1	40	0.1
Upper temperature rate multiple for nitrate decay	NO3K2	-	0.99	50	0.99
Organic matter					
Labile DOM decay rate	LDOMDK	day ⁻¹	0.10	0.10	0.10
Refractory DOM decay rate	RDOMDK	day ⁻¹	0.001	0	0.001
Labile to refractory DOM decay rate	LRDDK	day ⁻¹	0.01	0	0.01
Labile POM decay rate	LPOMDK	day ⁻¹	0.08	0	0.08
POM settling rate	POMS	ms ⁻¹	0.1	0.1	0.1
Lower temperature for organic matter decay	OMT1	°C	5	5	5
Upper temperature for organic matter decay	OMT2	°C	25	20	25
Lower temperature rate multiplier for organic matter decay	OMK1	-	0.1	0.05	0.1
Upper temperature rate multiplier for organic matter decay	OMK2	-	0.99	0.99	0.99
Zero-order sediment oxygen demand	SOD	g m ⁻² day ⁻¹	0.1~5.8	1.0	2.0

지금까지의 CE-QUAL-W2의 조류관련 반응속도와 매개변수는 초기값을 사용하여도 매우 만족할 만한 결과를 보여주고 있기 때문에(Chung et al., 2007), 보정에 사용된 주요 매개변수는 영양염류의 경우 퇴적토로부터의 인 용출률(PO4R)과 암모니아성 질소(NH4DR) 및 질산성 질소(NO3DK)의 분해율, 그리고 생분해성 용존 유기물의 분해율(LDOMDK) 등이다. 조류와 관련된 매개변수로는 조류의 성장속도(AG), 침강속도(AS) 및 성장온도범위(AT1~AT4)가 있으며 사용자 매뉴얼을 참조하였다. 매개변수의 선택범위는 사용자 매뉴얼과 기존의 연구(Kim et al., 1998; Chung et al., 2007; Cole and Tillman, 1999; Cole and Tillman, 2001)를 참고하여 결정하였으며 모든 매개변수의 보정은 2010년을 대상으로 관측값과 모의값이 최대한 일치할 때까지 시행착오법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 저수지 수위 예측결과

지형자료의 신뢰도 평가를 위해 앞서 구성된 수치격자가 충주댐의 지형과 저수지 물수지를 잘 재현하는지 확인하기 위해 보정기간과 검증기간의 실측수위와 모의수위를 비교하였다(Fig. 4). CE-QUAL-W2 모형의 구축 후 저수지의 수위비교를 가장먼저 수행하게 되는데 이는 모형 구축의 정확성을 판단하는 기준이 되며, 구축된 지형자료와 모의에 사용되는 유량에 의해 좌우된다. 모의값과 실측값에 대한 비교에 사용된 통계지표는 절대평균오차인 AME (Absolute Mean Error), 평균제곱근오차인 RMSE (Root Mean Square Error), 결정계수인 R^2 를 사용하였다. AME와 RMSE는 실제 변량과 같은 단위를 사용하며, 0에 가까울수록 모의결과의 정확도가 높다는 것을 의미하고, R^2 는 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 모의

결과의 정확도가 높다는 것을 의미한다.

물수지 비교결과, 보정기간인 2010년의 AME는 0.412 m, RMSE는 0.480 m, R^2 는 0.999로 분석되었고, 검증기간인 2008년의 AME는 0.425 m, RMSE는 1.120 m, R^2 는 0.949로 나타나 충주댐의 모의수위는 관측수위의 추세를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 발생한 오차는 지형자료의 처리과정과 유입량 산정의 불확실성, 그리고 지하수의 유입과 유출과 같은 미세측 유량에 의해 발생된 것으로 판단된다.

3.2 수온 모의결과

호소의 연직방향 수온분포는 일반적으로 겨울철에 전수심에 대하여 동일하게 발생하며, 봄철에는 기온의 상승으로 인해 수면부근의 수온이 증가하면서 성층현상(stratification)이 발생한다. 여름철에는 높은 기온과 바람의 영향으로 성층화가 최고조에 달하여 표층(epilimnion), 수온약층(thermocline), 심층(hypolimnion)으로 구분되는데 이러한 성층현상은 호소내 오염을 가중시킨다. 가을철에는 대기온도의 하상으로 수면에서부터 수온이 내려가면서 전도현상(turnover)이 발생하여 수온 또는 밀도분포가 연직방향으로 동일하게 된다(Fischer et al., 1979). 호소내 탁도 및 수질의 변화특성을 분석하기 위해서는 이러한 수온 성층현상을 정확하게 예측해야 한다.

2010년과 2008년의 댐 앞 지점에서 실측된 수심별 수온과 모의된 연직 수온분포를 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2010년의 월별 수온변화를 보면 4월부터 수면부근의 수온이 증가하기 시작하여 7월초부터는 표층, 수온약층, 심층 등으로 층이 형성되어 여러 개의 층으로 분리되는 성층현상이 발생되어 9월까지 유지된다. 10월초부터는 수면부근의 수온이 감소하기 시작하여 전도현상이 발생하고, 이후 12월부터는 다시 연직방향 온도가 동일해지

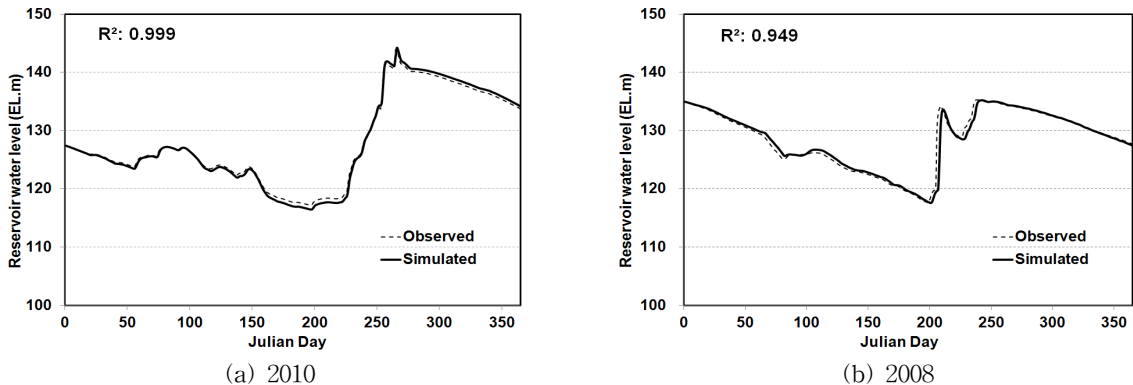
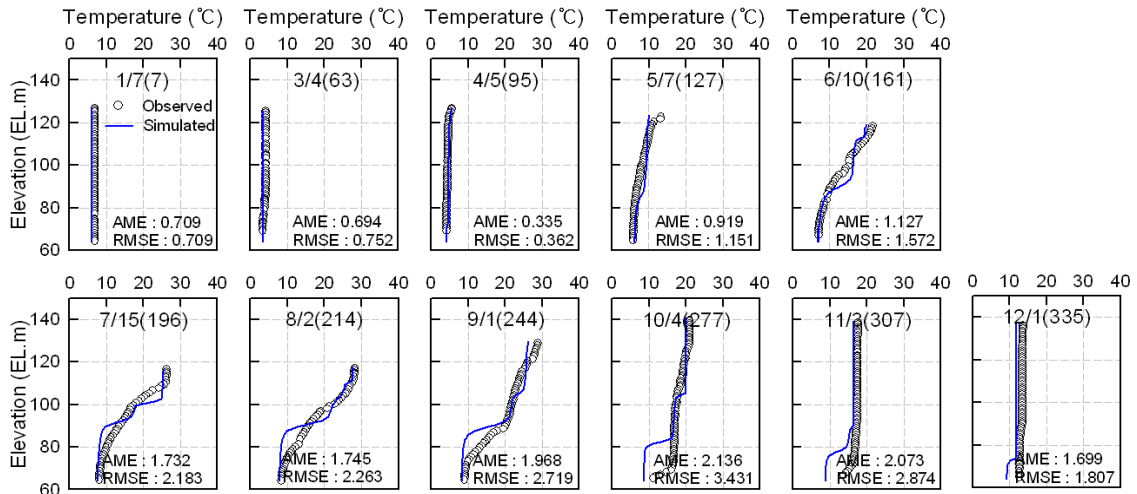
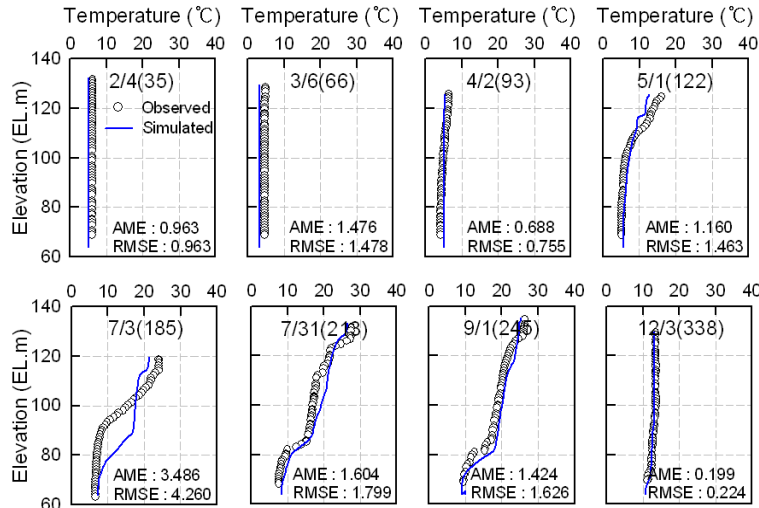


Fig. 4. Comparison of Observed and Simulated Reservoir Water Level in 2010 and 2008



(a) 2010



(b) 2008

Fig. 5. Comparison of Observed and Simulated Water Temperature in 2010 and 2008

는 것으로 나타났다. 특히 9월초에 성층현상이 가장 뚜렷하게 나타나는데 표층 바로 밑에서 수온이 급격하게 감소하는 수온약층은 EL.90~120m에 형성되고, 심층 바로 위의 수온약층은 EL.80~90m에 형성된 것을 확인하였다. 2008년의 월별 수온변화도 2010년과 마찬가지로 4월부터 수면부근의 수온이 증가하기 시작하여 7월초부터 표층, 수온약층, 심층으로 층이 분리되어 성층현상이 발생되어 9월까지 유지된다. 2008년은 10월부터 11월의 실측자료가 존재하지 않아 전도현상을 뚜렷이 볼 수는 없었지만, 이후 12월부터는 수온이 하강하고 다시 연직방향 온도가 동일해지는 것으로 나타났다. 성층현상이 가장 뚜렷하게 나타나는 9월을 보면 표층 바로 밑의 수온약층은 EL.85~130m에 형성되고, 심층 바로 위의 수온약층은 EL.75~85m에 형성된 것을 알 수 있었다. 2010년의 경우 9월에

내린 집중호우로 인해 높은 탁도를 포함한 홍수가 수온성층구조를 교란함으로써 EL.80~90m 구간에 형성되던 수온약층이 10월초에 EL.70m 이하로 하강하였고, 2008년의 경우 7월에 내린 집중호우로 인해 수온성층구조가 교란되어 EL.95~115m 구간에 형성되던 수온약층이 7월말에 EL.85m 이하로 하강하였다. 모의결과를 통계지표로 정리하면, 보정기간인 2010년의 수온 예측 오차는 AME 0.335~2.136°C, RMSE는 0.362~3.431°C, 검증기간인 2008년의 수온 예측 오차는 AME 0.199~3.486°C, RMSE 0.224~4.260°C로 나타나 비교적 실측값을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

3.3 부유물질(SS) 모의결과

부유물질이란 수체 내 존재하는 입자 지름이 2mm 이

하로 물에 용해되지 않는 물질을 일컫는 말로 오염된 물의 수질을 표시한 지표로, 물의 탁도를 유발시키는 원인이 되며 수생태계에 악영향을 초래한다. 부유물질의 농도를 측정하는 것은 시간이 많이 소요되고 현장에서 측정하기 어렵기 때문에 부유물질의 농도는 간접적인 방법으로 측정된다. 대표적인 방법으로는 탁도계를 이용하여 측정된 탁도를 탁도-SS 상관관계식을 이용하여 SS로 변환하는 것이다(Yi et al. 2005). 본 연구에서는 2010년과 2008년의 실측된 수심별 탁도와 모델에서 모의되는 SS의 비교를 위해, 탁도-SS의 상관관계식을 적용하여 탁도를 SS로 변환한 후 모의된 SS 농도와 비교하였다. 2010년과 2008년에 대하여 1~12월까지 충주호에서 실측된 72개의 자료를 이용하여 선형회귀분석 한 결과 R^2 는 각각 0.640, 0.888로 분석되었다(Fig. 6).

보정년도인 2010년의 SS의 연직분포 모의결과, 수온예측 결과와 같이 9월에 내린 집중호우로 인해 9~10월 SS의 농도가 20 mg/L 가량 증가하다가 11월 운동에너지가 소멸됨에 따라 부력의 영향을 받아 침강한 후 점차 부유물질 층이 안정화되는 것으로 나타났다. 9월 1일은 SS의 과다모의에 의해 모의값이 실측값을 잘 재현하지 못하였지만, 10월 4일 모의된 SS의 농도는 실측치의 경향을 잘 반영하였다. 검증년도인 2008년의 경우에도 수온예측 결과와 같이 7월에 내린 집중호우로 인해 7월말 45 mg/L 가량의 SS가 유입되어 9월부터는 부유물질 층이 침강되기 시작하여 12월에는 많이 안정화 것으로 나타났다. 부유물질이 최고치에 달한 7월말 호소의 EL.80~120 m 구간에 중층밀도류(interflow density currents)를 형성하고 있는 SS분포와 최고 SS 발생수심(EL.100 m 구간)은 실측자료와 비교적 잘 부합하였다. 전반적으로 모의된 수심별 SS는 1~5월까지의 모의값이 실측값의 변동패턴을 비교적

잘 반영하는 것으로 나타났으나, 9월 이후 하층부에서 다소 과대평가하는 경향을 나타냈다(Fig. 7). 이러한 오차는 실측자료의 한계로 인해 댐 유입량으로부터 유역면적비를 활용하여 각 지류하천의 유량을 산정함으로써 강우의 공간적 편차를 반영하지 못하였기 때문에 각 지류하천별 침투유량 발생시간 및 실제 유입량과의 편차가 있을 수 있으며, 이로 인해 Q-SS 상관관계식을 이용한 지류하천별 SS 부하량 산정에서 발생한 오차로 인한 것으로 판단된다(Chung et al. 2011). 또한 모형에서 부유물질의 침강속도를 호소 전체에서 하나의 상수로 사용함으로써 중층의 탁수와 저수지 심수층의 물이 서로 다른 밀도층을 형성하여 계면에서 부유물질의 침강속도가 매우 작아짐에도 불구하고 모형에서는 이를 제대로 반영하지 못하기 때문에 판단된다(Chung et al., 2005).

3.4 영양염류 및 조류 모의결과

질소와 인은 조류 성장의 필수 영양요소이며, 부영양화 예측에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 특히, 성층화된 호소내에서 유역으로부터의 외부 부하가 큰 경우 제한 영양염인 인의 부하특성과 시공간적인 농도 변화를 정확히 예측하는 것이 중요하다(Chung et al. 2007). 2010년과 2008년의 질소 계열($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$), 조류(Chl-a)에 대한 CE-QUAL-W2 모의 결과를 이용하여, 댐 앞 지점 상층에서에서의 총질소(TN), 총인(TP), 조류(Chl-a)에 대하여 모의값과 실측값을 시계열로 비교한 결과는 Fig. 8과 같다.

질소 계열($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)의 모의결과는 2010년과 2008년에서 홍수기 이전 기간에서는 대체적으로 실측치를 잘 재현하고 있으나, 홍수기 이후 기간에서는 모두 실측값에 비해 과소추정 되었다. 이는 조류의 증식 및 탈질

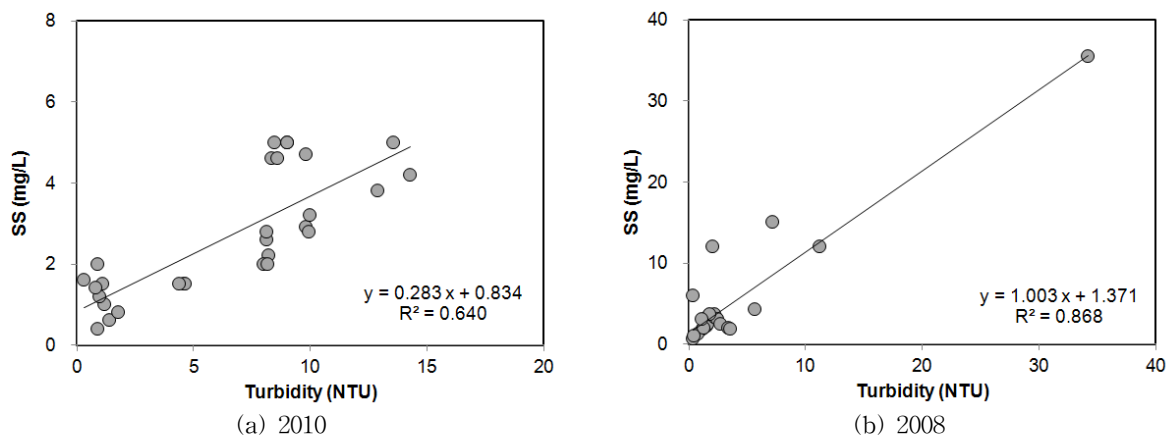
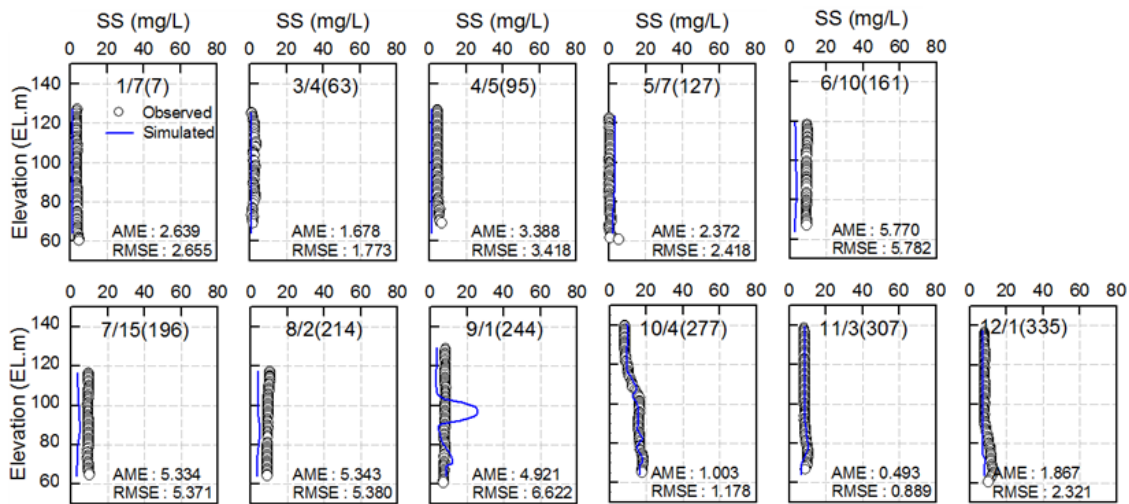
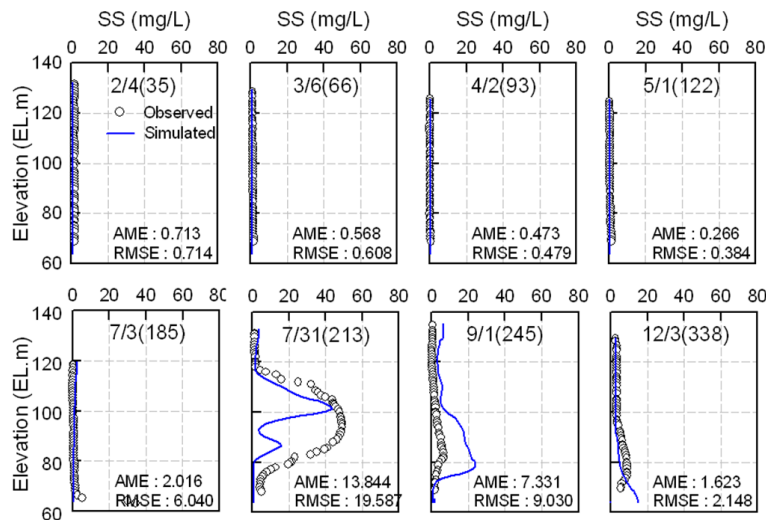


Fig. 6. Correlation of Turbidity and SS in 2010 and 2008



(a) 2010



(b) 2008

Fig. 7. Comparison of Observed and Simulated Turbidity in 2010 and 2008

작용에 의한 질소의 감소현상이 모형에서 과다하게 반영된 것으로 보이며, 입자상 질소성분의 침강속도를 모형에서 제대로 반영하지 못하기 때문에 판단된다. 인 계열($PO_4\text{-P}$)의 경우에도 2010년과 2008년 모두 비교적 인의 농도범위를 잘 반영하고 있으나, 2010년은 9월 이후부터, 2008년은 8월 이후부터 모의값이 이전 모의값에 비해 계속 증가하는 경향을 보였고, 2008년은 10월 이후부터 모의값이 실측값에 비해 뚜렷하게 과대 산정되는 경향을 보였다. 이는 산소 결핍 상태에서 저니층에서 용출되는 이온성분이 인과 흡착하여 침전되는 기작이 모의과정에 적절히 반영되지 않은 것으로 보인다(Chung et al., 2007). 또한 본 연구에서 유입수 수질 경계조건으로 이온성분의 농도가 포함되어 있지 않은 월간 측정 자료를 사용함으로

써 강우-유출에 의한 부하량의 대부분을 차지하는 인 계열 영양염류의 유입특성을 정확히 반영해주시지 못했기 때문인 것으로 판단된다. Chl-a의 경우 2010년과 2008년에서 여름철 조류농도의 성장패턴은 실측값과 유사하게 반영하고 있으나, 2008년 8~9월에 과대평가하는 경향을 보이고 있다. 2008년은 여름 강수량이 800 mm로 예년 평균(1,400~1,500 mm)에 크게 밀돌고, 8~9월 수온이 상승함에 따른 부영양화로 모형은 녹조가 많이 발생하는 것으로 모의된 것으로 보인다. 이러한 Chl-a의 오차원인으로 CEQUAL-W2는 2차원 횡방향 평균 흐름으로 가정하여 흐름의 폭 방향으로 평균하여 값은 값으로 모의하기 때문에 조류의 특성을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

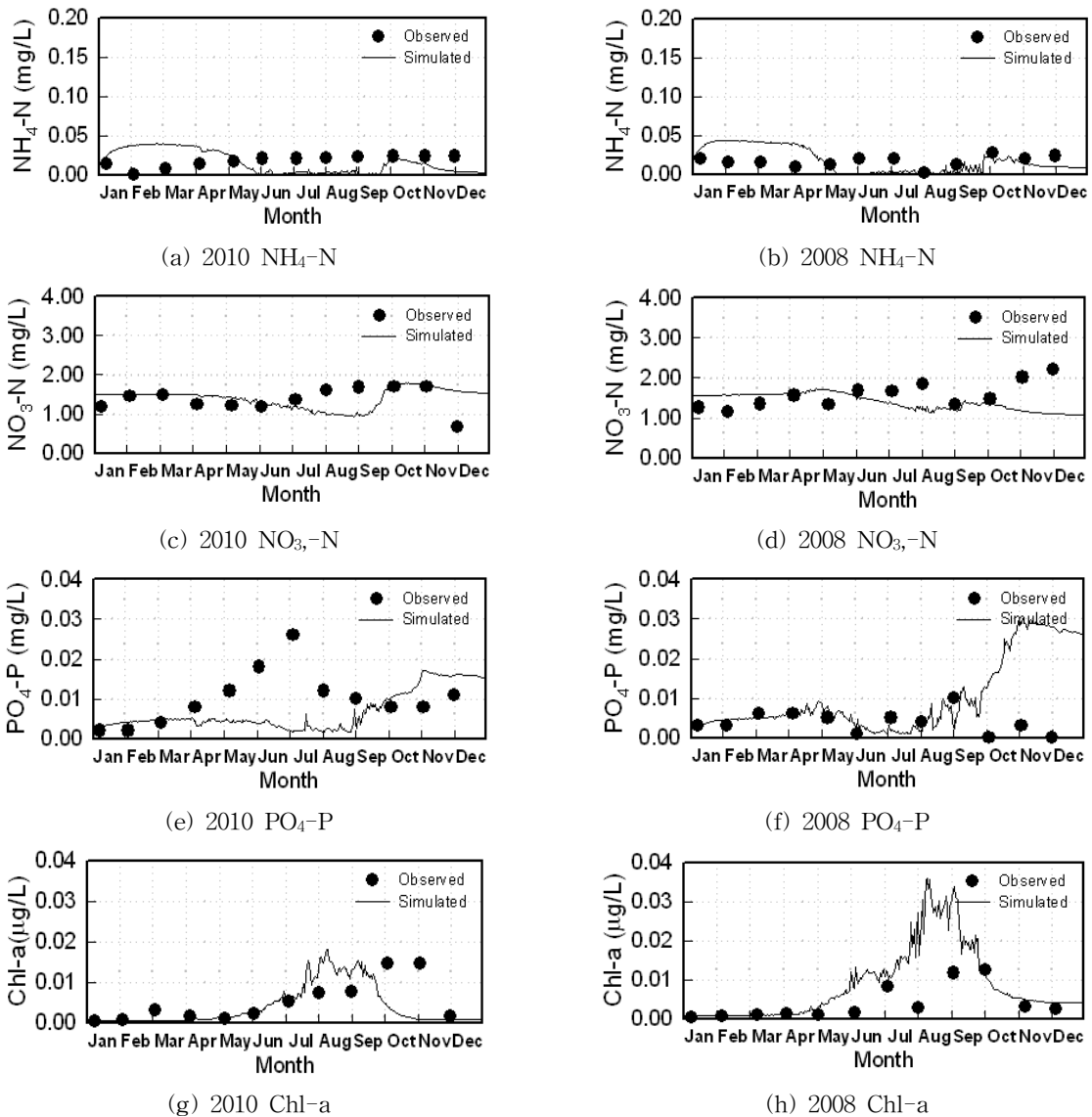


Fig. 8. Comparison of Observed and Simulated TN, TP and CHI-a in 2010 and 2008

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 충주호 유역을 대상으로 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질 모형인 CE-QUAL-W2를 적용하여 호소 내 수온분포, 부유물질 및 부영양화 변화특성을 모의하였다. 모형의 구동을 위해 지형, 기상, 호소 초기조건 및 하천 경계조건자료를 구축하였고, 호소내 수질모의를 위하여 실측자료인 수온, 부유물질(SS), 질소 계열($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$), 조류(Chl-a)에 대하여 보정(2010년) 및 검증(2008년)을 수행하여 충주호의 수질 변화현상을 예측하였다.

1) CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지모델링을 위해

여 저수지 지형단면을 남한강 본류와 주요 지천인 제천천 및 동달천을 고려하여 남한강 본류(branch 1)와 유입 경계부(branch 2~7)로 총 7개의 가지(branch)로 구분하였다. 지형자료의 신뢰도를 평가하기 위한 저수지 수위를 모의한 결과 R^2 가 2010년과 2008년에 각각 0.999, 0.9449로 모의된 수위가 관측수위를 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

2) 모형의 구동을 위한 입력 자료인 기상자료 및 호소 초기조건은 2010년, 2008년의 실측된 자료를 수집하여 구축하였다. 하천 경계조건인 유량(유입량, 방류량)자료는 충주댐 운영 자료를 수집하여 이용하였고, 수질 경계조건 자료(NO_3 , NH_4 , $\text{PO}_4\text{-P}$, Chl-a,

DO, OM group)는 환경부의 월간 실측자료를 이용하였으며, 실측자료가 없는 유입수의 수온과 SS 경계조건은 회귀식을 이용하였다.

- 3) 충주호의 연직수온분포는 4월부터 수면부근의 수온이 증가하기 시작하여 7월초부터는 표층, 수온약층, 심층으로 층이 형성되어 성층현상이 발생되어 9월 까지 유지되고, 12월부터는 수온이 하강하고 다시 연직방향 온도가 동일해지는 것으로 나타났다. 특히, 2010년과 2008년 모두 각각 9월과 7월에 집중호우 발생 뒤 수온성층구조가 교란되어 수온약층이 약 10m 가량 하강하는 것으로 분석되었다.
- 4) SS의 연직분포 모의결과 수온과 동일하게 집중호우 발생 뒤 SS농도가 증가하다가 12월에 안정화되는 것으로 분석되었고, 특히 2008년 부유물질이 최고치에 달하였던 7월에 중층밀도류를 형성하고 있는 SS 분포와 최고 SS 발생수심(EL.100m 구간)을 잘 재현하였다.
- 5) 영양염류 및 부영양화 시계열 모의결과 질소 계열($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$), 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$) 모두 농도의 범위를 비교적 잘 재현하였지만, 질소 계열($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)의 경우 홍수기 이후 과소평가, 인 계열($\text{PO}_4\text{-P}$)의 경우 홍수기 이후 과대평가되었으며, 그 원인은 모형 내에서 질소성분의 침강속도 및 인의 흡착-침전과정이 적절히 모의되지 않았기 때문으로 사료된다. Chl-a의 경우 2010년과 2008년 여름의 조류의 성장패턴을 잘 반영하였으며, 다소 오차가 발생한 원인은 모형의 2차원 횡방향 평균 흐름가정에 의한 모형의 한계점으로 사료된다.

본 연구에서는 실측자료가 충분하지 않은 충주호의 전반적인 수환경 변화를 예측하기 위한 합리적인 연구방법론과 결과를 제시하였다. 또한 본 연구를 통해 충주호의 오염물질 변화를 파악할 수 있었으며, CE-QUAL-W2 모형의 국내 댐 적용성을 확인하였다. 이후 체계적인 모니터링 및 추가적인 연구를 통해 CE-QUAL-W2 모형의 정확도를 높일 수 있는 자료가 축적된다면 국내 호소의 수질관리 및 운영에 활용도가 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 ‘기후변화에 따른 댐저수지 수환경 취약성 평가 및 대응방안 수립’ (한국수자원공사) 과제 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Choi, K.S., Kim, B.C., Kim, H.B., and Sa, S.H. (2000). “Relationships Between Organic Carbon and CODMn in a Deep Reservoir, Lake Soyang, Korea.” *Korean Journal of Limnology*, Vol. 33, No. 4, pp. 328-335.
- Chung, S.W. (2004). “Density Flow Regime of Turbidity Current into a Stratified Reservoir and Vertical Two-dimensional Modeling.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 26, No. 9, pp. 970-978.
- Chung, S.W., Oh, J.K., and Ko, I.H. (2005). “Simulations of Temporal and Spatial Distributions of Rainfall-Induced Turbidity Flow in a Reservoir Using CE-QUAL-W2.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.
- Chung, S.W., Park, J.H., Kim, Y.K., and Yoon, S.W. (2007). “Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation.” *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 23, No. 1, pp. 52-63.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (1999). Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (2001). Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoir Using CE-QUAL-W2, U.S. Army Corps of Engineers.
- Deus, R., Brito, D., Mateus, M., Kenov, I., Fornaro, A., Neves, R., and Alves, C.N. (2013). “Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 487, pp. 1-12.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C., Y. Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, New York.
- Jeong, S.A., and Park, S.S. (2004). “A Modeling Study of Lake Thermal Dynamics and Turbid Current for an Impact Prediction of Dam Reconstruction.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 27, No. 8, pp. 813-821.
- Jung, Y.R., Chung S.W., Ryu, I.G., and Choi, J.K. (2008). “Two-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Simulations for a Coinjunctive System of Daecheong Reservoir and Its Downstream.” *Journal of Korean*

- Society of Water Quality*, Vol. 24, No. 5, pp. 581-591.
- Kim, B.C., Choi, K.S., Kim, C.G., Lee, Y.H., Kim, D.S., and Park, J.C. (1998). "The Distribution of Dissolved and Particulate Organic Carbon in Lake Soyang." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 31, No. 1, pp. 17-24.
- Kim, Y.H., Kim, B.C., Choi, K.S., and Seo, D.I. (2001). "Modeling of Thermal Stratification and Transport of Density Flow in Soyang Reservoir Using the 2-D Hydrodynamic Water Quality Model, CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-49.
- Kim, Y.K., and Chung, S.W. (2011). "Research Paper : Laterally-Averaged Two-Dimensional Hydrodynamic and Turbidity Modeling for the Downstream of Yongdam Dam." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 27, No. 5, pp. 710-718.
- Kuo, J.T., Lung, W.S., Yang, C.P., Liu, W.C., Yang, M.D., and Tang, T.S. (2006). "Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 21, pp. 829-844.
- Martin, N., McEachern, P., Yu, T., and Zhu, D.Z. (2013). "Model development for prediction and mitigation of dissolved oxygen sags in the Athabasca River, Canada." *Science of The Total Environment*, Vol. 443, pp. 403-412.
- Norton, G.E., and Bradford, A. (2009). "Comparison of two stream temperature models and evaluation of potential management alternatives for the Speed River, Southern Ontario." *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 866-678.
- Ostfeld, A., and Salomons, S. (2005). "A hybrid genetic-instance based learning algorithm for CE-QUAL-W2 calibration." *Journal of Hydrology*, Vol. 310, pp. 122-142.
- Park, J.Y., Park, M.J., Ahn, S.R., and Kim S.J. (2009). "Watershed Modeling for Assessing Climate Change Impact on Stream Water Quality of Chungju Dam Watershed." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889.
- Yi, Y.K., Kim, Y.D., Park, K.Y., and Kim, W.G. (2005). "Two Dimensional Numerical Modeling of Turbidity Variation in Imha Reservoir." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 4B, pp. 257-266.
- Yoo, S.J., Kim C.S., Ha, S.Y., Hwang, J.Y., and Chae, M.H. (2005). "Analysis of Natural Organic Matter (NOM) Characteristics in the Geum River." *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-131.

논문번호: 13-050	접수: 2013.05.20
수정일자: 2013.10.04/10.15	심사완료: 2013.10.15