韓 國 水 資 源 學 會 論 文 集
第41卷 第12號 · 2008年 12月
pp. 1187~1198

DOI: 10.3741/JKWRA.2008.41.12.1187

ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입탁수의 3차원 모델링

3D Modeling of Turbid Density Flow Induced into Daecheong Reservoir with ELCOM-CAEDYM

정 세 웅* / 이 흥 수** / 류 재 일** / 류 인 구*** / 오 동 근***

Chung, Se Woong / Lee, Heung Soo / Ryoo, Jae Il / Ryu, In Gu / Oh, Dong Geun

Abstract

Many reservoirs in Korea and their downstream environments are under increased pressure for water utilization and ecosystem management from longer discharge of turbid flood runoff compared to a natural river system. Turbidity(C_T) is an indirect measurement of water 'cloudiness' and has been widely used as an important indicator of water quality and environmental "health". However, C_T modeling studies have been rare due to lack of experimental data that are necessary for model validation. The objective of this study is to validate a coupled three-dimensional(3D) hydrodynamic and particle dynamics model (ELCOM-CAEDYM) for the simulation of turbid density flows in stratified Daecheong Reservoir using extensive field data. Three different groups of suspended solids (SS) classified by the particle size were used as model state variables, and their site-specific SS-C_T relationships were used for the conversion between field measurements (C_T) and state variables (SS). The simulation results were validated by comparing vertical profiles of temperature and turbidity measured at monitoring stations of Haenam(R3) and Dam(R4) in 2004. The model showed good performance in reproducing the reservoir thermal structure and propagation of stream density flow, and the magnitude and distribution of turbidity in the reservoir were consistent with the field data. The 3D model and turbidity modeling framework suggested in this study can be used as a supportive tool for the best management of turbidity flow in other reservoirs that have similar turbidity problems.

keywords : Turbidity modeling, Density current, Daecheong reservoir, ELCOM-CAEDYM

요 지

국내 많은 저수지들과 그 하류하천은 높은 탁도를 가진 물의 장기적인 방류로 인해 수자원 이용과 수생태계 관리에 많은 어려움을 겪고 있다. 탁도(C_T)는 물의 탁한 정도를 나타내는 척도로써, 수질과 수환경의 건강을 평가하는 매우 중요한 지표로써 광범위하게 사용되어 왔지만, 모형의 검증에 필요한 실험 자료의 부족으로 인해 탁도 모델링에 대한 연구는 지금까지 매우 부족하였다. 본 연구의 목적은 광범위한 현장 실측자료를 이용하여 성층화된 대청호로 유입한 탁수의 밀도류 거동 모의를 위한 3차원 수리-입자동력학 연동 수치모형인 ELCOM-CAEDYM의 적용성을

* 교신저자, 충북대학교 환경공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Envirn. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
(e-mail: schung@chungbuk.ac.kr)
** 충북대학교 공과대학 환경공학과 박사과정
Doctoral student, Dept. of Env. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
*** 충북대학교 공과대학 환경공학과 석사과정
Master student, Dept. of Env. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

검증하는데 있다. 입자크기에 따라 구분된 3개 그룹의 부유물질 (SS) 농도가 모형의 모의변수로 사용되었으며, 모형변수인 SS와 저수지내 실측값의 C_T의 변환을 위해 저수지 지점별로 측정한 SS-C_T 상관관계를 사용하였다. 모의결과는 2004년에 대청호의 회남과 댐앞 지점에서 수심별로 실측한 수온과 탁도 자료와 비교함으로써 검증하였다. 모형은 저수지의 성층구조, 탁수를 포함한 하천 밀도류의 시간에 따른 진행과정을 잘 재현하였으며, 탁도의 수직분포와 크기도 실측값과 부합하였다. 본 연구에서 제시한 3차원 수치모형과 탁도 모델링 방법론은 유사한 탁도 문제를 가지고 있는 다른 저수지에서도 탁수의 최적관리를 위한 지원 도구로써 사용 가능하다고 사료된다.

핵심용어 : 탁도 모델링, 밀도류, 대청호, ELCOM-CAEDYM

1. 서 론

강우-유출 후 성층화된 저수지로 유입하는 하천수는 수온(T_w), 부유사(SS) 농도, 총용존고형물질(TDS) 농도의 함수로 결정되는 하천수 밀도(ρ)와 저수지 주변수의 밀도(ρ_a) 차에 의해 발생되는 부력과 유입량이 가지는 관성력에 따라 다양한 형태의 밀도류를 형성한다(Fischer *et al*., 1979; Alavian *et al*., 1992; Chung and Gu, 1998). 또한 하천수는 유역으로부터 침식되어 이송된 토사와 하상바닥에서 재부상 또는 탈착한 토사 및 부착조류 등 다양한 입자상 물질을 포함하므로 탁도가 매우 높다. 저수지로 유입하는 부유사는 대부분 입경이 작은 입자들로써, 이 중 10 μm이하의 입자들은 쉽게 침강하지 않고 장기간 수체에 체류하면서 장기 탁수문제를 야기한다.

저수지내에서 탁수의 밀도류 진행경로, 두께, 이동속도 등 수리학적 거동 특성은 유입량의 규모, 저수지 지형, 취수위치와 취수량, 그리고 수온성층구조에 영향을 받는다. 따라서 성층 저수지로 유입한 부유사의 이송, 확산, 침강 현상을 정확히 예측하고 효율적인 관리대책을 수립하기 위해서는 이러한 영향요소들을 모두 고려할 수 있는 수치 모델링 기술이 필요하다. 1970년대 이후 많은 연구자들이 저수지 밀도류 해석을 위한 실험실 규모의 실험과 수치모형개발 등의 노력을 기울여 왔으며, 밀도류의 침강점 수심(Plunging depth), 이탈점 수심(Separation depth), 중층밀도류의 두께와 이동 속도, 그리고 주변수와의 혼합 정도를 계산하는 방법을 제시하였다(Farrell and Stefan, 1988; Umeda *et al*., 2000; Umeda *et al*., 2006; Choi and Garcia, 2002). 그러나 실험실 연구로부터 제시된 해석해들은 정상상태의 조건을 가정하고 있어 홍수가 연속해서 발생하거나 수위변화가 큰 경우 적용에 어려움이 있다. 국내 저수지에서 발생하는 탁수는 대부분 강우-유출시 하천 수온의 강하(반면에 밀도는 증가)로 인해 저수지로 유입된 후 운동에너지가 약해지면서 저수지 표층수와의 밀도 차이 때문에 음부력(negative buoyancy force)에 지배를 받는다(정세웅과 오정국, 2006). 그 이후 탁수는 저수지의 특정한 지점에서 침강밀도류를 형성하고 저수지 바닥을 따라 바닥밀도류로 유입되다가, 동일한 밀도층에서 이탈하여 중층밀도류를 형성한다. 이러한 저수지 밀도류의 흐름특성을 정확히 해석하기 위해서는 저수지 지형, 유입수의 밀도변화, 저수지 성층구조, 바람에 의한 난류혼합, 방류 및 취수에 의한 영향 등 매우 복잡한 물리적 과정을 고려한 정밀한 수리해석이 요구된다(Imberger and Patterson, 1990; Martin and McCutcheon, 1999).

그 동안 국내에서는 탁수거동 해석 모형으로써 수체를 흐름방향과 연직방향으로 해석하는 2차원 횡방향 평균 모형(CE-QUAL-W2, 이후 W2)이 자주 사용되었다(김윤희 등, 2001; 정세웅, 2004; 이상욱 등, 2007; 정세웅 등, 2008). 대부분의 선행연구에서 W2 모델은 저수지의 성층현상과 탁수의 밀도류 거동현상을 비교적 잘 모의하는 것으로 평가되었으나, 저수지 폭이 넓은 수역과 만곡부에서는 횡방향 평균 가정에 따른 수리적 해석의 한계가 지적된 바 있다. 특히 최근들어 저수지 장기탁수 피해 저감을 위한 노력의 일환으로 선택취수시설 개선 사업(임하댐, 용담댐, 소양강댐)이 이루어지고 있으며, 선택취수시설의 최적운영과 탁수저감 효과 분석을 위해 보다 정확한 탁수거동 해석의 필요성이 제기되고 있다. 지금까지 여러가지 3차원 모형이 국내 저수지에 적용된 사례(나은혜와 박석순, 2005; 서동일과 이정우, 2005)는 있지만, 충분한 현장실측자료를 가지고 모델의 성층해석, 밀도류 해석, 부유사의 이송-확산-침강해석의 성능을 검증한 사례는 드물다.

따라서 본 연구의 목적은 광범위한 현장 실측자료를 이용하여 성층화된 대청호로 유입한 탁수의 밀도류 거동 모의를 위한 3차원 수리-입자동력학 연동 수치모형인 ELCOM-CAEDYM의 적용성을 검증하는데 있다. ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 3차원 수리동력학 모형으로써 시공간적인 유속과 수온

변화를 예측하는데 사용되었으며, CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 매 계산시간 마다 동적으로 연결 (Dynamic coupling)되어 부유입자의 이송, 확산, 침강 과정을 모의하였다. 개발된 3D 모형의 예측 성능은 2004년 홍수기 동안 대청호에서 실측한 자료를 사용하여 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 저수지

대상 저수지인 대청호(Fig. 1)는 충청권 약 200만 명의 주민들에게 매일 약 백만 m^3의 생·공용수를 공급하는 중요한 상수원이며, 홍수조절, 관개용수 공급, 수력발전 등의 다목적으로 사용되고 있다. 수심이 깊고(최대수심 50 m) 겨울철 연 1회 완전혼합 되며, 그 외 기간에는 연중 변온층이 나타나는 온단회성(warm monomictic) 호수 특성을 보인다(Wetzel, 2001).

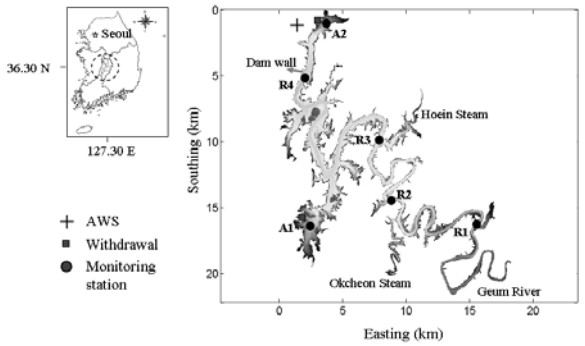


Fig. 1. Layout of Daecheong Reservoir and Locations of Monitoring Stations

한국수자원공사에서는 조류 감시와 강우 시 유입하는 탁수의 거동을 파악하기 위해 2001년부터 홍수기 동안에는 저수지내에서 주간(R3, R4, A1, A2) 또는 월간(R1, R2) 조사를 실시하고 있다(Fig. 1). 측정항목은 수심별 수온, 전기전도도, DO, pH, 탁도를 포함한다. 대청호 상류인 금강 유입수의 탁도와 수온 측정은 2004년 6월 말부터 2006년 10월까지 자동 계측장치(YSI6920)를 이용하여 매 시간마다 수집하였다.

2004년 저수지의 수위는 최소 EL. 64.0 m에서 최대 EL. 76.2 m까지 상승하여 대청호의 전형적인 홍수기 수위변화를 보였다. 홍수기 동안 유입량 규모가 1,000 m^3/s를 초과한 강우사상은 6월 중순, 7월 중순, 그리고 8월 중순에 걸쳐 3번 발생하였으며, 일평균 최대 유입량은 각각 2,431, 2,182 및 1,500 m^3/s 이었다.

2.2 ELCOM-CAEDYM

ELCOM은 서호주대학교 물연구센터(Centre for Water Research)에서 개발한 3차원 수리동력학 모형으로써 호수, 저수지, 하구의 시공간적인 수온과 염분농도의 변화를 예측하는데 주로 사용되고 있다(Hodges *et al.*, 2000). 이 모형은 물질 이송, 확산, 반응 모형인 CAEDYM과 동적으로 연결(Coupling)되어 수질 및 생태계의 모델링을 위한 3차원 수리 해석 결과를 제공한다.

ELCOM의 지배 방정식에는 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송-확산방정식이 포함된다. 운동량 방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하며, 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 가정한다. 그러나 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우(예, 수면경사에 따른 동수압 작용, 내부파 영향 등)에는 non-hydrostatic code 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다. 수평방향 유속의 순간 변동성분에 의한 난류영향의 폐합식(turbulent closure)은 수평와점성계수(horizontal eddy-viscosity, ν_h)를 사용한다.

x-방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z} \tag{1}$$

$$=-g\left\{\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial x}\int_z^{\eta}\rho' dz\right\}$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\nu_h\frac{\partial u}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\nu_h\frac{\partial u}{\partial y}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\nu_v\frac{\partial u}{\partial z}\right\}+fv$$

y-방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z} \tag{2}$$

$$=-g\left\{\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial y}\int_z^{\eta}\rho' dz\right\}$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\nu_h\frac{\partial v}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\nu_h\frac{\partial v}{\partial y}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\nu_v\frac{\partial v}{\partial z}\right\}-fu$$

z-방향 운동량 방정식 (정수압 모형)

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{3}$$

연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4}$$

자유수면 방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\int_{h_0}^{\eta}u\,dz\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\int_{h_0}^{\eta}v\,dz\right]=0 \tag{5}$$

부유물질의 이송-확산 방정식

$$\frac{\partial SS_i}{\partial t}+u\frac{\partial SS_i}{\partial x}+v\frac{\partial SS_i}{\partial y}+w\frac{\partial SS_i}{\partial z}$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left\{\kappa_h\frac{\partial SS_i}{\partial x}\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\kappa_h\frac{\partial SS_i}{\partial y}\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\kappa_v\frac{\partial SS_i}{\partial z}\right\}+\frac{\partial SS_i}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 u는 x방향 유속(m/s), v는 y방향 유속(m/s), w는 z방향 유속(m/s), g는 중력가속도(9.81 m/s^2), η는 표면 수위(m), ρ는 밀도(kg/m^3), ρ_0는 물의 밀도(kg/m^3), ρ'는 밀도차(kg/m^3), ν_h는 운동량의 와확산계수(m^2/sec), p는 압력(N/m^2), SS_i는 입자크기별 부유사 농도(g/m^3), f는 전향력계수($2\omega\sin\phi$)(ω는 지구자전각속도 7.29×10^{-5} rad/s, ϕ는 위도), κ_v는 오염물질의 수직방향 와확산계수(m^2/sec), 그리고 κ_h는 오염물질의 수평방향 와확산계수(m^2/sec)이다.

대기와 수면의 에너지 전달은 단파 복사에너지, 장파 복사에너지, 대기와 수면 수온 차이에 의한 대류 열교환, 증발에 의한 열 손실로 나누어 계산된다. 비 투과성 복사에너지는 수면 혼합 층에서의 에너지원으로 사용되며, 투과성 에너지는 Beer's 법칙에 따라 수심에 따라 지수함수적으로 감쇠하며 수체의 에너지원으로 제공된다.

수치해석 기법은 Casulli and Cheng (1992)이 개발한 TRIM (Tidal, Residual, Inter-tidal Mudflat)모형의 방법을 채택하고 있으나, 수치해석의 정확도 보완, 스칼라 질량 보존, 수치확산 제거, 그리고 수직난류 혼합 모형이 추가되었다. 수치해석을 위한 격자 (grid) 구성은 직교좌표계를 채택하며, 격자망은 Arakawa C-grid를 사용하여 속도장은 셀의 표면에 그리고 자유수면 높이와 스칼라 농도값은 셀의 중앙에서 정의된다. 각 수주(water column) 격자 셀의 자유수면 높이는 자유수면 방정식에 의해 계산된 결과에 따라 수직으로 이동한다. 기존의 TRIM 모형에서 사용한 표준 수직 난류 확산 모형 (vertical turbulent diffusion model) 대신 난류 에너지 이론에 근거한 수직 혼합층 모형(mixed-layer model)을 사용함으로써 TRIM에서 필요로 했던 각 수주 격자에서의 수평 유속 성분과 이송된 스칼라 값의 계산을 위한 3중 대각행렬의 처리가 필요 없어졌다. 혼합층 모형은 계산 효율을 향상시키고 비교적 큰 격자크기를 사용하더라고 스칼라 값의 급격한 경사를 보다 정확히 계산할 수 있는 장점이 있다.

수치해석을 위해 지배방정식은 유한차분 직교좌표로 차분화 한다. 유속성분은 각 계산 셀의 면에 그리고 스칼라 성분은 셀의 중앙에서 계산된다. 운동량방정식은 TRIM 모형에서 사용한 준음해법(semi-implicit)을 사용하며 2차 방정식 Euler-Lagrange 보간법을 사용하여 해를 구한다. Euler-Largrange 보간법을 위한 2차 방정식 적용은 내부파의 인위적인 완화(damping)를 줄여주므로 성층화된 저수지에서 파의 운동을 더 잘 모의하는 장점이 있다. 자유수면 방정식은 준음해법으로 차분화 하며 TRIM 모형에서 사용한 공액경사법으로 해를 푼다(Casulli and Cheng, 1992).

이송-확산방정식의 수평방향의 이송항은 ULTIMATE 기법(Leonard, 1991)과 함께 3차 정확도를 갖는 QUICKEST 방법 (Leonard, 1991)을 사용함으로써 농도의 급격한 변화가 있는 영역에서 해를 안정적으로 구할 수 있다. 수평 확산항은 2차 정도의 양해법을 사용하여 차분화 한다. 수직방향의 난류이송은 각각의 수주에 대하여 1차원 혼합층 모형으로 해석한다. 그 외에 수위에 의한 압력 (bartropic)과 밀도 차에 의한 압력 (baroclinic) 항, 지구자전에 의한 전향력 항, 바람에 의한 응력, 대기-수면 온도차에 의한 대류 항, 그리고 유입수와 유출수 영향 등에 대한 계산이 포함된다.

CAEDYM은 다양한 수리모형과 쉽게 연결될 수 있도록 설계된 수생태계 모델이다(Hipsey *et al.*, 2004; Robson and Hamilton, 2004; Hipesey *et al.*, 2006). CAEDYM과 ELCOM의 연동(coupling)해석은 특히 수체의 태양복사에너지 투과능이 물의 탁도와 수질농도(부유물질, 유기물, 식물성플랑크톤 등)에 의존하는 경우 수질-수리 상호작용을 반영할 수 있어 보다 정확한 해석을 할 수 있다는 장점이 있다. CAEDYM은 탄소(C), 질소(N), 인(P), 규소(Si) 등 다양한 물질의 순환과정, DO 순환, 입자크기별 부유물질 (SS) 그룹의 침강 및 재부상, 그리고 6개의 서로 다른 종에 대한 식물성플랑크톤과 어류 등 수생태계의 동역학 해석을 수행한다. 따라서 CAEDYM은 기존의 이화학적 수질모형보다 훨씬 발전된 모델이며, 종 또는 특정 그룹의 생태적 상호작용 문제를 해석할 수 있는 범용 생물지구화학(biogeochemical) 모형이라 할 수 있다. 조류의 일주기 광합성과 야간 호흡 등의 과정을 해석하기 위해 어떤 시간단위로도 모의할 수 있으며, 일반적으로 수리모형과 같은 계산간격으로 계산이 수행된다.

2.3 부유입자 침강해석

모형 변수는 입자크기별로 3개의 그룹으로 구분된 SS_i이며, 현장 실측자료인 탁도(C_T)와 모형 변수인 SS_i 간의 변환을 위해 저수지 지점별로 측정한 SS-C_T 상관관계를 사용함으로써 부유 입자의 크기분포의 공간적 변동 특성을 반영하였다. 주요지점별 부유입자의 입경

분포와 공간적 SS-C_T관계와 2차원 탁수모델링에 대한 상세한 내용은 선행 논문(정세웅 등, 2008)에 자세히 기술한 바 있어 본 논문에서는 지면 관계상 생략한다.

부유물질의 이송확산 방정식(6)의 마지막 항은 입자의 침강과 재부상을 나타내는 항으로 아래와 같이 해석된다.

$$\frac{\partial SS_i}{\partial t} = V_{s_i}\frac{SS_i}{\Delta z} + \alpha_{s_i}(\tau - \tau_{c_i})\frac{1}{\Delta z_b} \quad (7)$$

여기서 SS_i는 입자크기별 부유사 농도(g/m^3), V_{s_i}는 입자의 침강속도(m/s), Δz는 수직격자 두께(m), α_{s_i}는 입자의 재부상 상수(g/m^2/s), τ는 전단응력(N/m^2), τ_{c_i}는 임계전단응력(N/m^2), 그리고 Δz_b는 최심층 격자 두께(m)에 해당한다.

SS 입자의 침강속도(V_{s_i})는 탁도를 유발하는 부유물질의 공간적 분포와 탁도 크기의 예측 결과에 가장 큰 영향을 미치는 모형의 매개변수에 해당한다. Stokes가 제안한 침강속도식(Eq. 8)에 의하면 독립 침강하는 입자의 침강속도는 구형 입자의 직경, 밀도, 그리고 주변 수체의 수온에 의해 결정되는 물의 점성계수의 함수이다. 그러나 식 8은 입자의 모양을 구형으로 가정하며 입자의 형상과 표면 거칠기를 고려하지 못하는 한계가 있다(Camenen, 2007). 그리고 물속에 존재하는 부유입자의 구성 성분과 존재 형태가 매우 다양하므로 밀도는 침강속도를 산정하는데 불확실한 매개변수로 작용한다(Gibbs, 1985; Manning and Dyer, 1999; Pedocchi and Garcia, 2006). 따라서 본 연구에서는 실험으로 결정하지 않은 입자의 형상과 거칠기, 그리고 밀도의 불확실성을 고려하기 위해 입자의 형상 보정계수값(Υ_s)을 도입하였으며, 실측 탁도와 모의탁도의 수직분포를 일치시키면서 Υ_s를 보정하였다. 본 연구에 사용된 SS 그룹별 입경, 분율, 그리고 보정계수는 Table 1과 같다.

$$v_s = \frac{g d_s^2}{18\mu}(\rho_s - \rho_w) \quad (8)$$

여기서 v_s = 입자의 침강속도(m/s), g = 중력가속도(9.81 m/s^2), d_s = 입자의 직경(m), ρ_s, ρ_w= 입자와 물의 밀도(kg/m^3), μ = 물의 점성계수(kg/m/s).

2.4 입력자료와 매개변수

ELCOM-CAEDYM의 적용을 위해서는 저수지 지형자료, 기상자료, 경계 조건과 초기조건을 필요로 한다. 경계조건으로는 모의기간 동안의 기상자료와 상·하류 유량(또는 수위)자료, 그리고 수온, 수질 농도 자료가 필요하며, 초기조건은 모든 계산 격자요소에 대해 모의하고자 하는 변수의 초기값을 지정해야 한다. 상류 경계조건은 금강본류, 소옥천, 회인천, 주원천, 삼산천, 품곡천이며, 하류 경계조건은 댐 방류지점이며 모두 유량조건을 사용하였다(Fig. 2). SS 농도 초기조건은 모든 수체를 동일한 수온 또는 농도로 가정하거나 수직방향과 수평방향의 변화를 고려할 수도 있다.

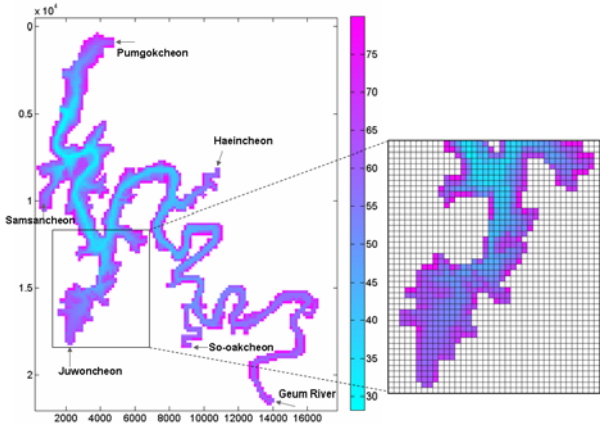


Fig. 2. Discretized Daecheong Reservoir Grid (150×150 m) used for ELCOM Simulation. Color Bar Scale is in Units of EL. m.

본 연구에서 유한차분 격자는 2006년 퇴사량조사에서 실측한 수치자료를 이용하여 수평방향 150 m, 수직방향 1 m 간격으로 총 128,402개의 셀(wet cell)로 구성하였다(Fig. 2). 기상자료는 대청 AWS(풍향, 풍속)와 대전기상청(기온, 태양복사에너지, 운도, 상대습도) 자료를 수집하여 사용하였다(Fig. 3). 금강본류 경계조건 유량과 댐 방류량 자료는 한국수자원공사의 댐 운영자료를 수집하여 사용하였으며, 미계측 유역의 유입량은 본류 유입량에 대한 유역면적비법으로 산정하였다. 모

Table 1. Classification of SS Particles and Relevant Fraction, Density, and Particle from Correction Factor

Class	Diameter (μm)	Fraction (%)	ρ_s (kg/m^3)	Υ_s
SS_1	1.0	20	2,650	0.41
SS_2	5.0	50	2,650	0.41
SS_3	20.0	30	2,650	0.47

의기간인 2004년 6월 1일~9월 30일 중 실시간 유입수 수온과 탁도 관측이 이루어진 6월 28일부터 자료는 금강본류 상류 옥천지점에서 1시간 단위로 실측한 자료를 사용하였으며, SS농도는 실측 탁도를 SS-탁도 관계로 변환하여 산정하였다. 실측자료가 없는 기간(6월 1일~6월 27일)의 수온은 실측수온과 기상자료의 회귀식(정세웅과 오정국, 2006)을 사용하여 산정하였으며, SS 농도는 유입량(Q, ㎥/d)과 SS 부하량(L_{SS}, kg/d) 관계식(Eq. 9)을 이용하여 산정하였다.

$$L_{SS} = 2.258 \times 10^{-7} Q^{1.747} \quad (9)$$

(자료수 n = 24, 결정계수 r^2 = 0.9507)

ELCOM 모형의 대기-수체 열 교환 계산과 수온예측, 그리고 부유물질의 이송과 확산에 영향을 미치는 주요 매개변수는 Table 2와 같다. D_x는 오염물질 스칼라의 수평방향 확산계수이며, C_D는 수체와 바닥 경계면에 작용하는 마찰저항의 정도를 나타내는 항력계수이다. ELCOM의 수온해석은 열역학적 이론에 근거한 물리적 모형이므로 수온 매개변수는 보정을 하지 않고 초기값을 그대로 사용하였다. 물에 의한 태양의 단파복사에너지(파장범위 280-2,800 nm)의 광수멸계수(K_w)는 근적외선인 NIR(Near infrared radiation, 700-2,000 nm), 식물플랑크톤의 1차 생산에 사용가능한 광합성에 유용한 에너지인 PAR(photosynthetically active radiation, 400-700 nm), 그리고 자외선 A (UVA, 320-400 nm) B (UVB, 300-320 nm)로 나누어 입력된다. PAR는 Beer-Lambert Law에 의해 수체내로 감쇠하며 침투하는 것으로 가정한다. 수중에서 총 광소멸 계수(K_d)는 조류의 농도, 무기 및 입자상 물질, 그리고 용존 유기탄소 농도 수준에 따라서 동적으로 계산되지만, 본 연구에서는 SS만 모의항목에 포함되므로 아래 Eq. (10)과 같이 계산되었다(Hipsey *et al.*, 2006).

$$K_d = K_w + \sum_{i=1}^{N} K_{e_i} SS_i \quad (10)$$

여기서 k_w(m^3/g/m)는 물에 의한 광소멸 계수, k_{e_i}(m^3/g/m)는 부유물질 그룹 SS_i의 농도(mg/L)에 의한 광소멸 계수이다.

그리고 물의 밀도는 수온과 SS 농도의 함수로 표현되며, SS 농도에 따른 물의 밀도변화($\triangle\rho_{ss}$)는 아래 Eq. (11)으로 계산된다.

$$\triangle\rho_{ss} = \sum_{i=1}^{N} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_{ss_i}}\right) \frac{SS_i}{1000} \quad (11)$$

여기서 ρ_w와 ρ_{ss_i}는 각각 물과 SS 그룹 i의 밀도(kg/m^3)이다.

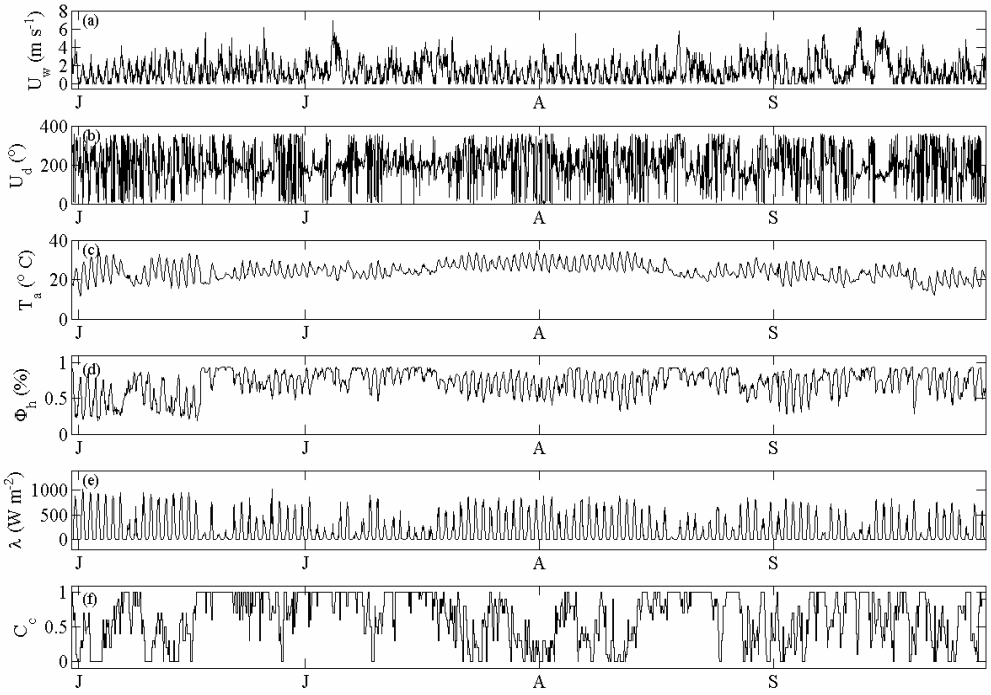


Fig. 3. Meteorological Data during the Simulation Period: (a) Wind Speed (U_w, ms^{-1}), (b) Wind Direction (U_d, degree), (c) Air Temperature (T_a, ℃), (d) Relative Humidity, (e) Solar Radiation (λ, W m^{-2}), and (f) Cloud Cover (C_c)

Table 2. Model Parameters used for Hydrodynamic and Water Temperature Calibrations

Parameters	Variable	Unit	Default
Horizontal eddy diffusivity	D_X	m^2/s	1.0
Bottom drag coefficient	C_D	-	0.005
Extinction coefficient for NIR	λ_{NIR}	/m	1.00
Extinction coefficient for PAR	λ_{PAR}	/m	0.25
Extinction coefficient for UVA	λ_{UVA}	/m	1.00
Extinction coefficient for UVB	λ_{UVB}	/m	2.50
Mean albedo for short wave radiation	α_{SW}	-	0.08
Mean albedo for long wave radiation	α_{LW}	-	0.03

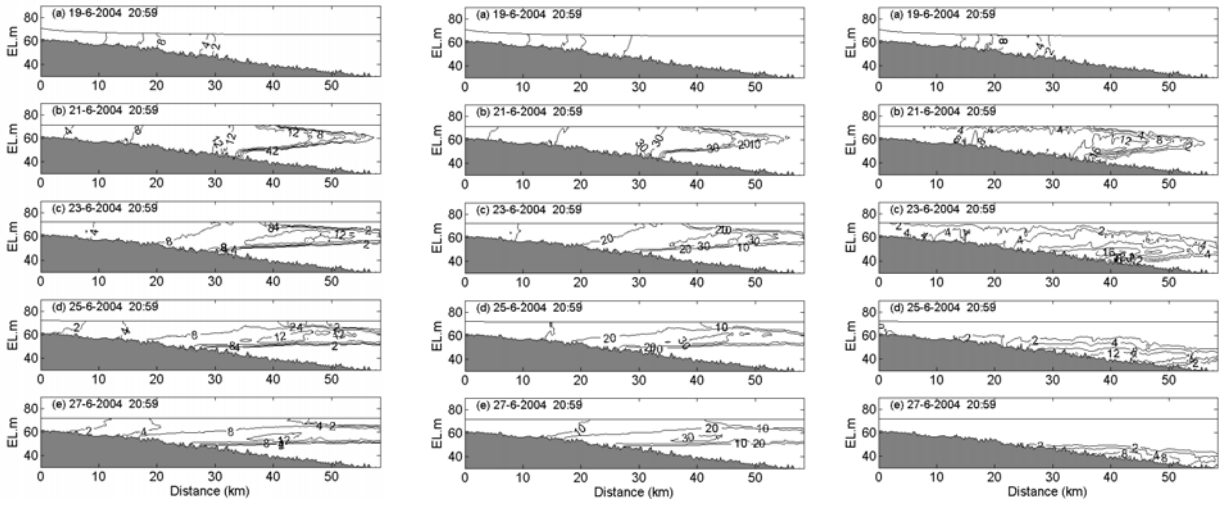
3. 결과 및 고찰

3.1 밀도류 거동 및 입자크기별 침강특성

6월과 7월에 발생한 탁수 사상 동안 저수지내 탁수의 밀도류 거동특성과 입자별 공간적 침강 특성을 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 가장 수심이 깊은 최심선(Thalweg)을 따라 SS의 등농도선으로 나타내었다. 6월에 유입한 탁수는 하천수의 관성력에 의해 댐으로부터 약 25 km 지점까지 저수지 표층수를 밀고 들어오다가 회남수역 인근에서 밀도차에 의한 음의 부력에 지배를 받아 저수지 수면 아래로 침강하였다. 그 이후 탁수는 중층 밀도류를 형성하며 댐축으로 진행하였다. 이 과정에서 대표입경 20 μm의 입자들은 대부분 저수지 바닥으로 침강하였으나, 10 μm 미만의 작은 입자들은 가라앉지 않고 계속 중층에 부유하면서 저수지 장기 탁수화의 원인이 되는 것을 확인할 수 있다.

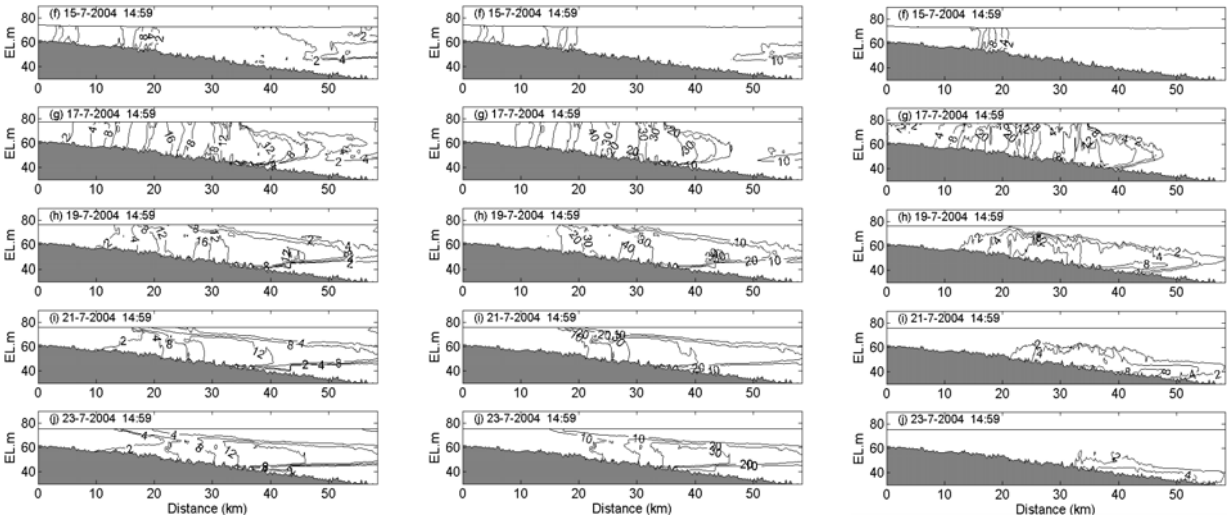
7월 홍수사상시 유입한 탁수도 역시 대정리와 회남수역 구간에서 관성력이 부력에 지배되어 침강하여 중층 밀도류를 형성하였으며, 역시 20 μm 이상의 입자들은 대부분 저수지 바닥으로 침강하였으나, 10 μm 이하의 입자들은 가라앉지 않고 중층에 계속 체류하는 것으로 모의되었다. SS_3는 1주일 후 대부분 침강하여 저수지 바닥에서만 관찰된다(Fig. 5c).

저수지 수면에서 SS_2 농도와 수심평균 농도의 시간별 변화는 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 제시되었다. 6월과 7월의 서로 다른 강우 사상별 탁수의 침강점을 확인할 수 있으며, 탁수가 중요한 수돗물 취수구역인 추동수역(대전권 공급)과 문의수역(청주권 공급)의 원수수질에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 탁수는 회남수역 인근에서 수면아래로 침강하는 과정에 저수지 물과 혼합되어 급격히 SS 농도가 낮아지며(Fig. 7), 만곡이 심한 저수지 형상 때문에 대전취수탑이 위치한 추동수역으로 일부 우선 유입하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구(정세웅, 2004)에서 대전(추동 취수)과 청주(문



(a) SS_1 (1㎛) (b) SS_2 (5㎛) (c) SS_3 (20㎛)

Fig. 4. Simulated Iso-concentration Contours of SS (mg/L) for Different Particle Size by ELCOM-CAEDYM during the June Flood Event (2004)



(a) SS_1 (1㎛) (b) SS_2 (5㎛) (c) SS_3 (20㎛)

Fig. 5. Simulated Iso-concentration Contours of SS (mg/L) for Different Particle Size by ELCOM-CAEDYM during the July Flood Event (2004)

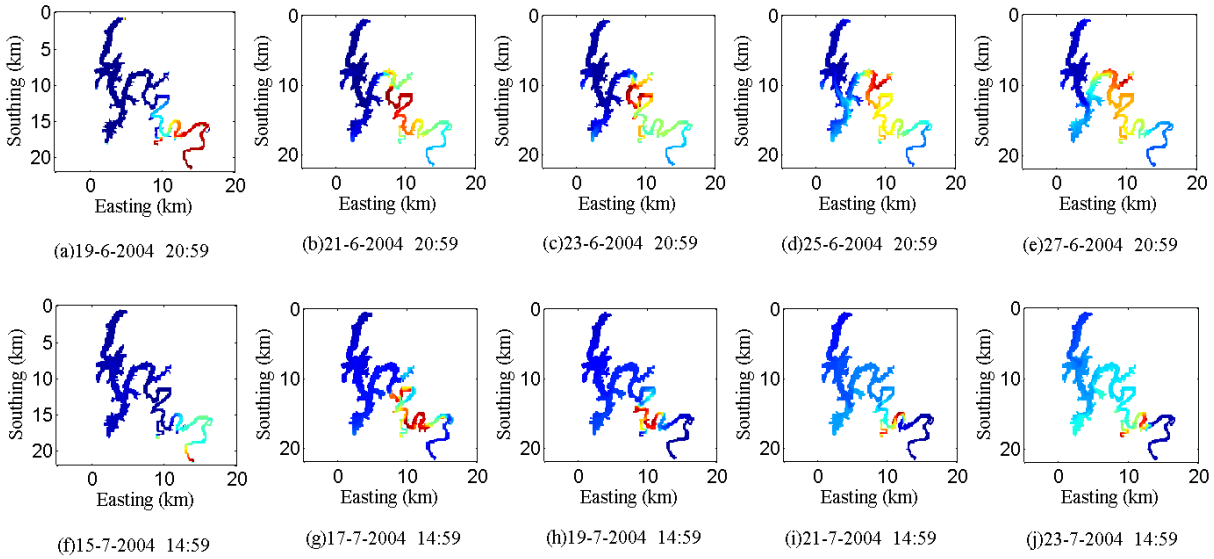


Fig. 6. Top View of Simulated SS_2 Concentrations (mg/L): Plunging Points are Identified

의 취수) 정수장의 홍수시 탁도 시계열 자료를 비교한 결과와 일치한다. 따라서 대청호의 복잡한 지형특성은 취수원의 탁도에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 금강 본류 유입수의 영향으로 추동 취수탑의 탁도가 문의 취수탑보다 더 빨리 그리고 높게 나타나는 원인이 되고 있다.

3.2 실측수온과 모의값 비교

성층 저수지의 수온 구조는 밀도류의 두께, 저수지 주변수체와의 혼합정도, 진행속도 등에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 탁수거동해석에 앞서 우선 검증되어야 한다(Gu and Chung, 1998; Ahlfeld *et al.*, 2003). ELCOM 모형의 수온예측 성능을 검증하기 위해 댐 앞 지점에서 YSI로 주간단위로 측정한 수심별 실측 수온 자료와 모의결과를 비교하였다(Fig. 8).

6월말에 탁수층이 저수지 중층으로 유입하면서 수온약층은 EL. 50 m이하로 하강하였으며, 시간이 경과함에 따라 표층에는 새로운 수온약층이 형성되는 2단 구조를 보이고 있다. 6월말 홍수 사상 유입시점(6월 23일, 6월 30일)의 표층수온과 7월 중순(7월 12일, 7월 18일) 홍수 유입시 수온약층 구간을 제외한 대부분의 측정일에 대하여 ELCOM은 저수지 수온 성층구조를 매우 잘 모의하는 것으로 평가된다. 오차의 주요원인은 유입수온 실측자료가 6월 28일부터 가용하여 그 이전 수온자료를 기상자료로부터 산정함으로써 발생한 것으로 판단된다.

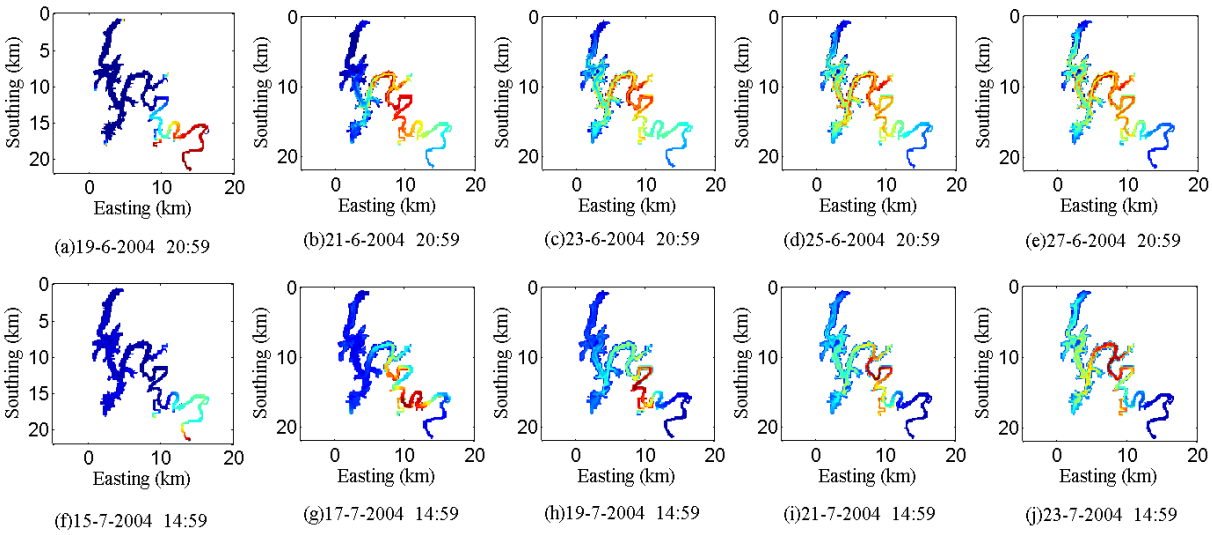


Fig. 7. Plan View of Simulated Depth-averaged SS_2 Concentrations (mg/L)

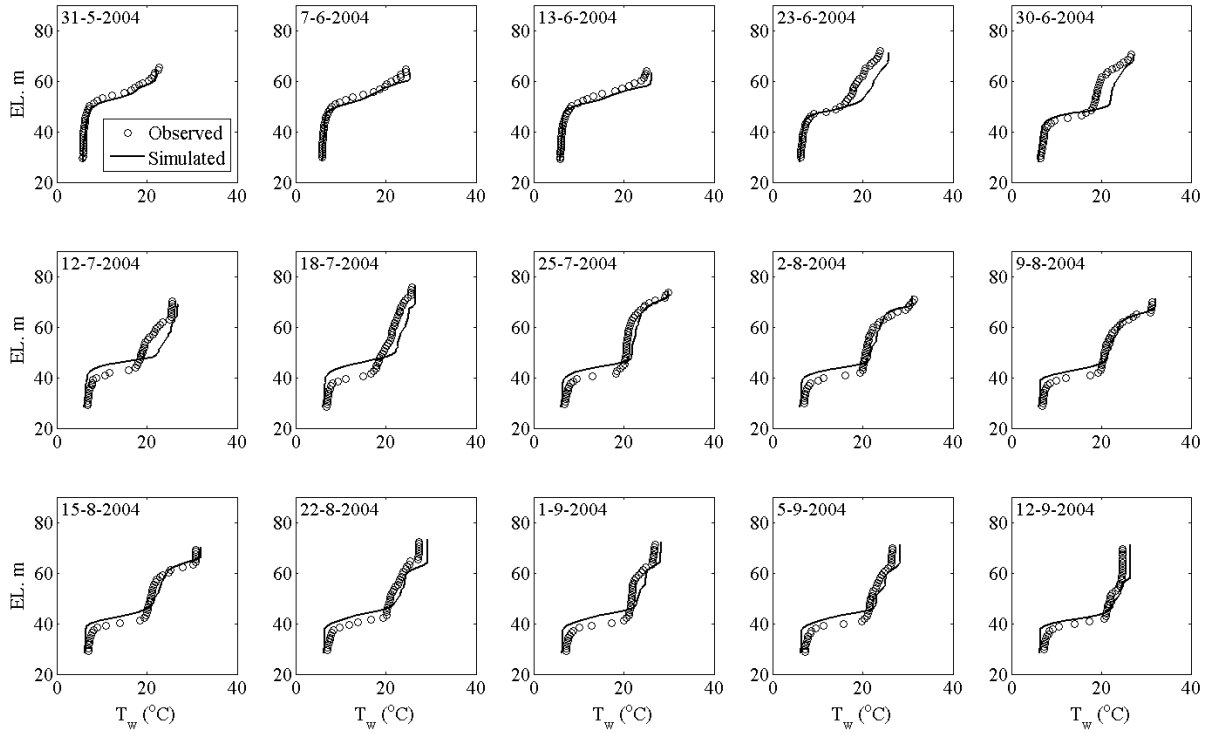


Fig. 8. Comparisons of Observed and Simulated Water Temperatures at Station R4

3.3 실측SS와 모의값 비교

모형의 예측 성능을 평가하기 위해 회남수역(R3)과 댐앞지점(R4)에서 총부유물질 농도 모의값($\sum_{i=1}^{3} SS_i$)을 수심별로 연속 측정한 값과 비교하였다(Figs. 9, 10). 그림에서 실측 TSS농도는 YSI로 실측한 탁도를 그 지점에서의 SS-CT 상관관계식으로 변환한 것이다. 첨두탁도가 유입하는 시점에 TSS의 최고 농도값의 크기는 실측값과 유의할 만한 편차를 보였으나, 모형은 탁수의 수직분포와 중층 관입두께를 비교적 잘 모의하였다. 모의기간 동안 모의값(C_i)과 실측값(C_o)의 절대평균오차 AME(Eq. 12)는 R3 지점에서 평균 8.2 mg/L (실측범위 0~120 mg/L), R4 지점에서 5.0 mg/L (실측범위 0~55 mg/L)로 산정되었다. 오차의 원인은 SS 입자크기별 분율과 침강속도 매개변수의 불확실성, SS-탁도 관계의 불확실성, 그리고 장기적으로는 부유물질에 포함된 유기물 함량의 불확실성 등이 포함된 것으로 판단된다.

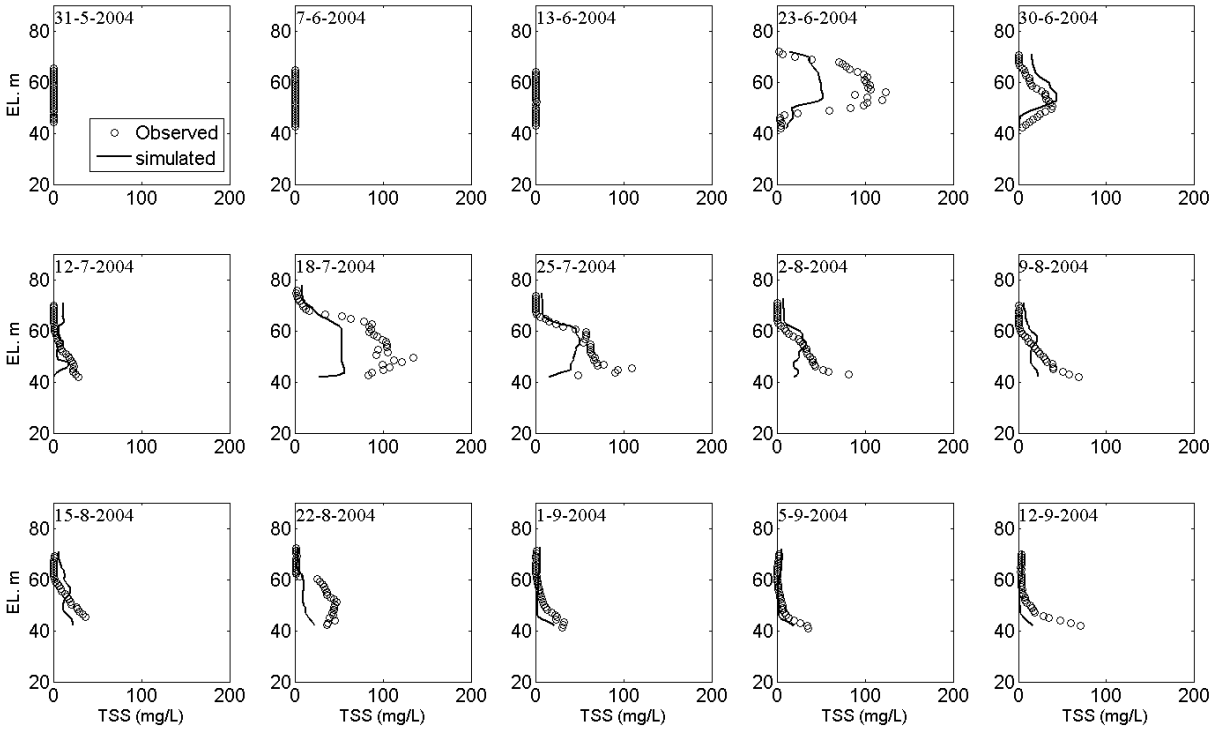


Fig. 9. Comparisons of Observed and Simulated TSS(SS_1+SS_2+SS_3) at Station R3

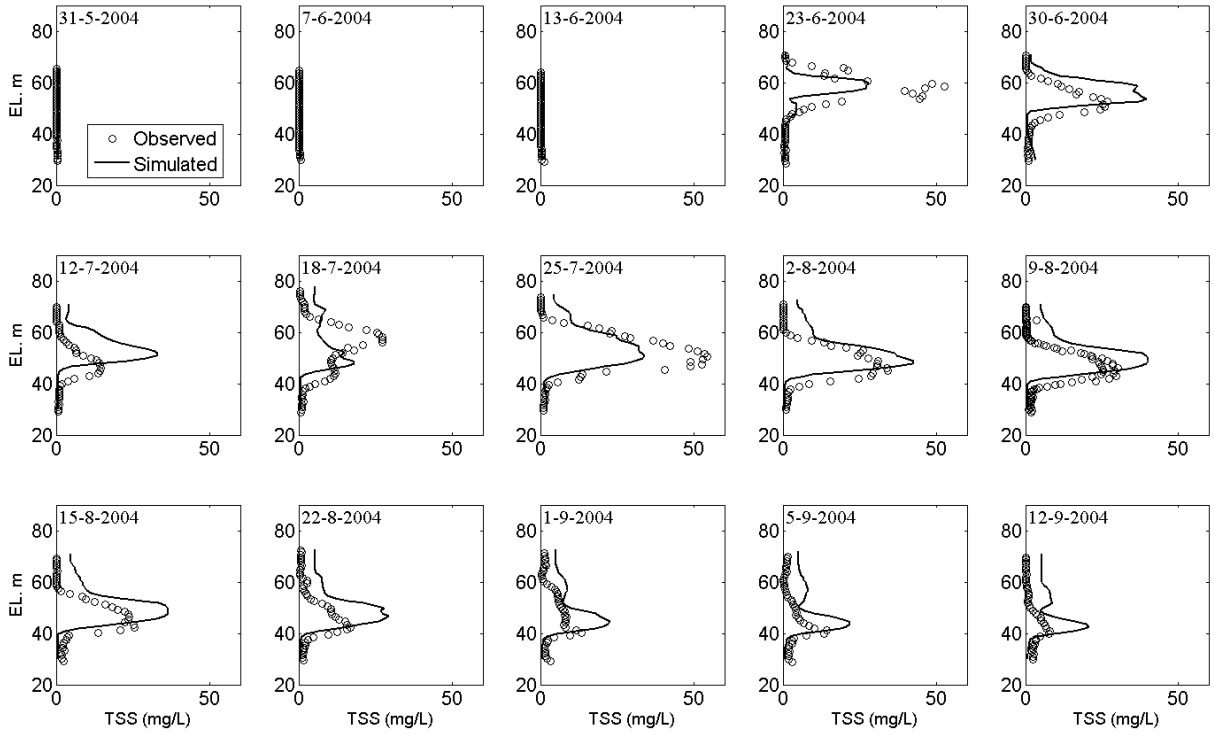


Fig. 10. Comparisons of Observed and Simulated TSS(SS_1+SS_2+SS_3) at Station R4

$$AME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|C_f - C_o| \tag{12}$$

탁수 밀도류는 저수지 수온 약층보다 약간 위를 중심으로 두께 20~30 m로 댐축으로 진행하였으며, R3에서 R4 지점으로 진행하는 과정에 최고 SS 농도는 120 mg/L에서 절반이하 수준인 55 mg/L로 희석되었다. 모의결과를 이용한 물질수지 분석결과, 2004년 홍수

기 동안 대청댐 저수지로 유입한 총 부유사량은 약 76,360 tons로 산정되었으며 반면, 댐 하류로 방류된 양은 31,800 tons로써 저수지 SS 포획율은 58.4%에 해당하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 수리 및 수질 연동 해석모형인 ELCOM-CAEDYM을 이용하여 성층화된 저수지로 밀도류 형태로 유입한 부유사의 이송과 확산 그리고 침강특성을 해석하였으며, 도출된 연구결론은 아래와 같다.

1) 대청호에서 3차원 ELCOM-CAEDYM 모형은 홍수가 유입하는 환경에서 저수지 성층구조의 변화와 부력침강 밀도류 형태로 유입하는 탁수의 유동특성, 그리고 저수지내로 유입한 부유사의 이송과 확산, 침강특성을 비교적 잘 모의하였다.
2) 2004년 홍수기 동안 대청호로 유입한 탁수는 유입부~대정리 구간까지 하천흐름 특성을 보였으나, 유입수와 저수지 표층수의 수온차이 때문에 저수지 수면 아래로 침강한 후 바닥 밀도류를 형성하였다. 이후 탁수는 대정리와 회남수역 구간에서 동일한 밀도층을 만나 저수지 바닥으로부터 분리되어 중층 밀도류를 형성하였으며, 적용된 3차원 모형은 탁수의 밀도류 유동특성을 비교적 잘 반영하였다.
3) 저수지로 유입한 부유입자 중 입경이 20 μm 이상인 입자들은 하천과 저수지 수체의 전이대에서 침강류와 저층밀도류 형성 과정에서 대부분 바닥에 가라앉고, 중층에서 밀도류 형태로 장기 부유하는 SS 입자의 75% 이상은 입경 10 μm미만인 것으로 나타났으며, 이것이 저수지 장기탁수문제를 유발하는 원인이 되고 있다.
4) 2004년 홍수기 동안 저수지로 유입한 총 부유사량은 약 76,360 tons로 산정되었으며 반면, 댐 하류로 방류된 양은 31,800 tons로써 저수지 SS 포획율은 58.4%에 해당하였다.
5) 성층저수지에서 탁수예측모형의 신뢰도를 향상하기 위해서는 복잡한 저수지 지형과 유입하천수의 밀도류 유동에 대한 상세한 해석이 필요하며, 아울러 탁도를 유발하는 부유물질의 구성성분과 탁도-SS관계의 실험적 규명이 충분히 이루어져야 한다.
6) 수리-수질 연동 해석이 가능한 ELCOM-CAEDYM 모형은 대청호뿐만아니라 여름철 성층현상이 뚜렷하고 수위변화가 큰 국내 저수지의 수리해석과 탁수거동 해석을 위한 3차원 모형으로써 적합한 것으로 판단되며, 선택취수설비의 최적운영과 효과분석을 위한 지원 도구로써 사용가능하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-3)과 서부호주대학교 Gledden Senior Fellowship 재정지원에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김윤희, 김범철, 최광순, 서동일 (2001). “2차원 수리수질모델을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제15권, 제1호, pp. 40-49.

나은혜, 박석순 (2005). “팔당호 수온, 유속, 체류시간의 시·공간적 분포 및 유입지류 흐름에 관한 3차원 모델 연구.” **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제27권, 제9호, pp. 978-988.

서동일, 이정우 (2005). “3차원 수리 모델 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 이용한 준설에 의한 부유사 확산영향에 관한 연구.” **한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집**, 한국물환경학회·대한상하수도학회, 국립금오공과대학교, pp. 360-363.

이상욱, 김정곤, 노준우, 고익환 (2007). “CE-QUAL-W2 모델을 이용한 임하호 선택배제시설의 효과분석.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제2호, pp. 228-235.

정세웅 (2004). “성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링.” **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제26권, 제90호, pp. 970- 978.

정세웅, 오정국 (2006). “대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 79-88.

정세웅, 이홍수, 정용락 (2008). “입자크기 분포를 고려한 부력침강 저수지 밀도류의 탁도 모델링.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제3호, pp. 365-377.

Ahlfeld, D., Joaguin, A., Tobiason, J., and Mas, D. (2003). “Case Study: Impact of Reservoir

Stratification on Interflow Travel Time." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 12, pp. 966-975.

Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C., and Stefan. H.G. (1992). "Density currents entering lakes and reservoirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, pp. 1464-1489.

Camenen, B. (2007). "Simple and general formula for the settling velocity of particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, pp. 229-233.

Casulli, V., and Cheng, R.T. (1992). "Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow." *International Journal of Numerical Methods Fluids*, Vol. 15, pp. 629-648.

Choi, S.U., and Garcia, M.H. (2002). "κ-ε turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, pp. 55-63.

Chung, S.W., and Gu, R. (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, pp. 704-711.

Farrel, G.J., and Stefan, H. (1988). "Mathematical modeling of plunging reservoir flows." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, pp. 525-537.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, NY.

Gibbs, R.J. (1985). "Settling velocity, diameter, and density for flocs of illite, kaolinite, and montmorillonite." *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 55, pp. 65-68.

Gu, R., and Chung, S.W. (1998). "Reservoir flow sensitivity to inflow and ambient parameters." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 3, pp. 119-128.

Hipsey, M.R., Antenucci, J.P., Brookes, J.D., Burch, M.D., and Regel, R.H. (2004). "A three dimensional-model of Cryptosporidium dynamics in lakes and reservoirs: a new tool for risk management." *Intl. J. River Basin Mngt*, Vol. 2, No. 3, pp. 1-17.

Hipsey, M.R., Romero, J.R., Antenucci, J.P., and Hamilton, D. (2006). *Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model: CAEDYM v2.3 Science Manual*. Centre for Water Research, University of Western Australia.

Hodges, B.R., Imberger, J., Saggio, A.A., and Winters, K.B. (2000). "Modeling basin scale internal waves in a stratified lake." *Limnology and Oceanography*, Vol. 45, NO. 7, pp. 1603-1620.

Imberger, J., and Patterson, J.C. (1990). *Physical Limnology*. In Wu, T. [ed.] Advances in Applied Mechanics. 27, pp. 302-475.

Leonard, B.P. (1991). "The ultimate conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 88, pp. 17-74.

Manning, A.J., and Dyer, K. R. (1999). "A laboratory examination of flock characteristics with regard to turbulent shearing." *Marine Geology*, Vol. 160, pp. 147-170.

Martin, J.L., and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. CRC Press, Inc. 335-384.

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*, Vol. 26, pp. 943-958.

Robson, B.J., and Hamilton, D.P. (2004). "Three-dimensional modelling of a Microcystis bloom event in the Swan River estuary, Western Australia." *Ecological Modelling*, Vol. 174, pp. 203-222.

Umeda, M., Yokoyama, K., and Ishikawa, T. (2000). "A numerical simulation of turbidity current and sedimentation in the Shichikashuku Reservoir." *J. Hydrosci. Hydr. Eng.*, 18: 153-163.

Umeda, M., Yokoyama, K., and Ishikawa, T. (2006). "Observation and simulation of floodwater intrusion and sedimentation in the Shichikashuku Reservoir." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 881-891.

Wetzel, R.G. (2001). *Limnology: Lake and reservoir ecosystems*. Academic Press, New York, NY.

(논문번호:08-95/접수:2008.08.31/심사완료:2008.11.07)