

ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입탁수의 3차원 모델링

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

정세웅*, 이흥수**, 윤성완***

Se Woong Chung, Heung Soo Lee, Sung Wan Yoon

요 지

본 연구의 목적은 3차원 수리 모델인 ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)과 물질 전달 모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)을 이용하여 성층화된 저수지로 밀도류 형태로 유입한 부유사의 이송과 확산 그리고 침강특성을 해석하는데 있다. ELCOM은 3차원 수리동역학 모델로써 시공간적인 유속과 수온변화를 예측하는데 사용되었으며, CAEDYM과 매 계산시간 마다 동적으로 연결(Dynamic coupling)되어 부유입자의 이송, 확산, 침강 과정을 모의하였다. 개발된 3차원 모델의 예측 성능은 2004년 홍수기 동안 대청호에서 실측한 자료를 사용하여 검증하였다. 모델의 모의변수는 입자크기별로 구분된 부유물질(SS) 그룹이며, 현장 실측자료인 탁도(C_T)와 모델 변수인 SS간의 변환을 위해 저수지 지점 별로 측정된 SS- C_T 상관관계를 사용함으로써 부유 입자의 크기분포의 공간적 변동 특성을 반영하였다. 모델은 탁수가 유입하는 환경에서 저수지 성층구조의 변화와 유입 탁수의 밀도류 거동특성, 유입한 부유사의 이송과 확산 그리고 침강특성을 비교적 잘 모의하였다. 저수지로 유입한 부유입자 중 입경이 20 μm 이상인 입자는 매우 빠른 속도로 저수지 바닥에 퇴적된 반면, 10 μm 이하의 입자들은 중층에 오랜 시간 부유하며 장기탁수문제를 유발하는 원인이 되었다.

핵심용어 : ELCOM, CAEDYM, 탁도 모델링, 대청호, 부유사

1. 서 론

강우-유출시 성층화된 저수지로 유입하는 하천수는 수온(T_w), 부유사(SS) 농도, 총 용존 고형물질(TDS) 농도의 함수로 결정되는 하천수 밀도(ρ)와 저수지 주변수의 밀도(ρ_a) 차에 의해 발생하는 부력과 유입량이 가지는 관성력에 따라 다양한 형태의 밀도류를 형성한다(Fischer et al., 1979). 홍수시 밀도류와 함께 저수지로 유입하는 부유사는 대부분 입경이 작은 입자들으로써, 이 중 10 μm 이하의 입자들은 쉽게 침강하지 않고 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 저수지에서 부유사의 이송, 확산, 침강 현상을 정확히 예측하고 효과적인 대책 수립을 위해서는 이러한 영향요소들을 모두 고려할 수 있는 수치 모델링 기술이 필요하다.

1970년대 이후 많은 연구자들이 저수지 밀도류 해석을 위한 실험실 규모의 실험과 수치모델개발 등의 노력을 기울여 왔으나(Imberger and Patterson, 1990; Martin and McCutcheon, 1999), 실험연구로부터 제시된 해석해들은 정상상태의 조건을 가정하고 있어 홍수가 연속해서 발생하거나 수위변화가 큰 경우 적용에 어려움이 있다. 본 연구의 목적은 3차원(3D) 수리 모델인 ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)과

* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : schung@chungbuk.ac.kr

** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : hslee@chungbuk.ac.kr

*** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : rnswhdqud@hanmail.net

물질 전달 모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)을 이용하여 성층화된 저수지로 밀도류 형태로 유입한 부유사의 이송과 확산 그리고 침강특성을 해석하는데 있다. ELCOM은 3차원 수리동력학 모델로써 시공간적인 유속과 수온변화를 예측하는데 사용되었으며, CAEDYM과 매 계산시간마다 동적으로 연결(Dynamic coupling)되어 부유입자의 이송, 확산, 침강 과정을 모의하였다. 개발된 3D 모델의 예측 성능은 2004년 홍수기 동안 대청호에서 실측한 자료를 사용하여 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 저수지

대청호는 충청권 약 200만 명의 주민들에게 매일 약 백만 m³의 생·공용수를 공급하는 중요한 상수원이며, 홍수조절, 관개용수 공급, 수력발전 등의 다목적으로 사용되고 있다. 수심이 깊고(최대 50 m) 겨울철 연 1회 완전혼합되며, 그 외 기간에는 연중 변온층이 나타나는 온단회성 호수 특성을 보인다(Wetzel, 2001). 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.

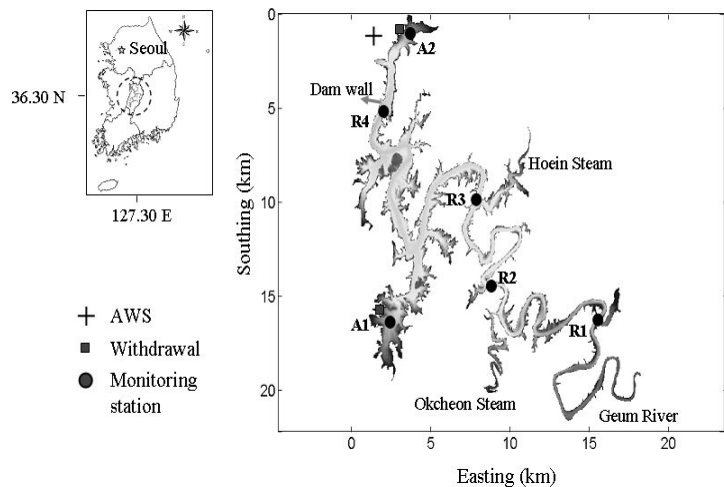


Fig. 1. Daechong Reservoir and monitoring stations.

2.2 ELCOM-CAEDYM 모델

ELCOM은 서호주대학교 물연구센터(Centre for Water Research)에서 개발한 3차원 수리동력학 모델로써 호수, 저수지, 하구의 시공간적인 수온과 염분농도를 예측하는데 주로 사용되며(Hodges and Dallimore, 2007), CAEDYM과 동적으로 연결(Coupling)되어 수질 및 생태계 모델링을 위한 수리 해석 결과를 제공한다. 지배 방정식에는 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송-확산방정식이 포함된다. Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용하며, Boussinesq 가정과 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. 수직방향에 대해서는 난류 에너지 이론에 기초한 혼합층모델(mixed-layer model)을 사용한다.

수치해석을 위해 지배방정식은 유한차분 직교좌표로 차별화 한다. 운동량방정식은 준음해법을 사용하며 2차 Euler-Lagrange 보간법을 사용하여 해를 구한다. 자유수면 방정식은 준음해법으로 차별화 하며 공액경사법으로 해를 푼다. 이송-확산방정식의 수평방향의 이송항은 ULTIMATE-QUICKEST 방법을 사용함으로써 농도의 급격한 변화가 있는 영역에서 해를 안정적으로 구할 수 있다. 수평 확산항은 2차 정도의 양해법을 사용하여 차별화 하며 수직 난류이송은 각각의 수주에 대하여 1차원 혼합층 모델로 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.

2.3 부유입자 침강해석

모델 변수는 입자크기에 따라 3개 그룹으로 구분하였으며, 현장 실측자료인 탁도(C_T)와 모델 변수인 SS 간의 변환을 위해 저수지 지점별로 SS- C_T 상관관계를 사용함으로써 부유 입자 크기분포의 공간적 변동 특성을 반영하였다. 침강속도는 부유물질의 공간적 분포 예측 결과에 가장 큰 영향을 미치는 모델의 매개변수에 해당한다. Stokes가 제안한 침강속도식에 의하면 독립 침강하는 입자의 침강속도는 구형 입자의 직경, 밀도, 그리고 주변 수체의 수온에 의해 결정되는 물의 점성계수의 함수이다. 그러나 Stokes식은 입자의 형상과 표면 거칠기를 고려하지 못하는 한계가 있다. 그리고 물속에 존재하는 부유입자의 구성 성분과 존재 형태가 매우 다양하므로 밀도는 침강속도를 산정하는데 불확실한 매개변수로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 실험으로 결정하지 않은 입자의 형상과 거칠기, 그리고 밀도의 불확실성을 고려하기 위해 입자의 형상 보정계수 값(Υ_s)을 도입하여 침강속도를 보정하였다. 본 연구에 사용된 SS 그룹별 입경, 분율, 그리고 보정계수는 Table 1과 같다.

Table 1. Classification of SS 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

3. 결과 및 고찰

3.1 밀도류 거동 및 입자크기별 침강특성

2004년 저수지 수위는 최소 64.0 m에서 최대 76.2 m까지 변화를 보였으며, 일평균 유입량이 1,000 m³/s 초과하는 강우사상은 6월, 7월, 8월에 각각 1번씩 발생하였다. 6월에 발생한 탁수 사상 동안 저수지내 탁수의 밀도류 거동특성과 입자별 공간적 침강 특성을 Fig. 2에 SS의 등농도선으로 나타내었다. 6월에 유입한 탁수는 회남수역 인근에서 음의 부력에 지배를 받아 수면아래로 침강하였으며, 중층 밀도류를 형성하며 댐축으로 진행하였다. 이 과정에서 20 μm 이상의 입자들은 대부분 저수지 바닥으로 침강하였으나, 10 μm 이하의 입자들은 가라앉지 않고 중층에 계속 체류하는 것을 볼 수 있다. 7월에 유입한 탁수는 대정리와 회남수역 구간에서 침강하여 중층 밀도류를 형성하였으며, 역시 20 μm 이상의 입자들은 대부분 저수지 바닥으로 침강하였으나, 10 μm 이하의 입자들은 가라앉지 않고 중층에 계속 체류하는 것으로 모의되었다. SS₃는 1주일 후 대부분 침강하여 저수지 바닥에서만 관찰된다.

저수지 수면에서 SS₂ 농도와 수심평균 농도의 시간별 변화는 각각 Fig. 3, 4와 같다. 6월과 7월의 서로 다른 강우 사상별 탁수의 침강점을 확인할 수 있으며, 추동수역과 문의 수역 등 주요한 용수 취수구역의 영향을 파악할 수 있다. 탁수는 회남수역 인근에서 수면아래로 침강하는 과정에 저수지 물과 혼합되어 급격히 SS 농도가 낮아지며(Fig. 4), 만곡이 심한 저수지 형상 때문에 대전취수탑이 위치한 추동수역으로 일부 유입하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구(정세웅, 2004)에서 대전(추동 취수)과 청주(문의 취수) 정수장의 홍수시 탁도 자료를 비교한 결과와 일치한다. 따라서 대청호의 지형특성은 취수원의 탁도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

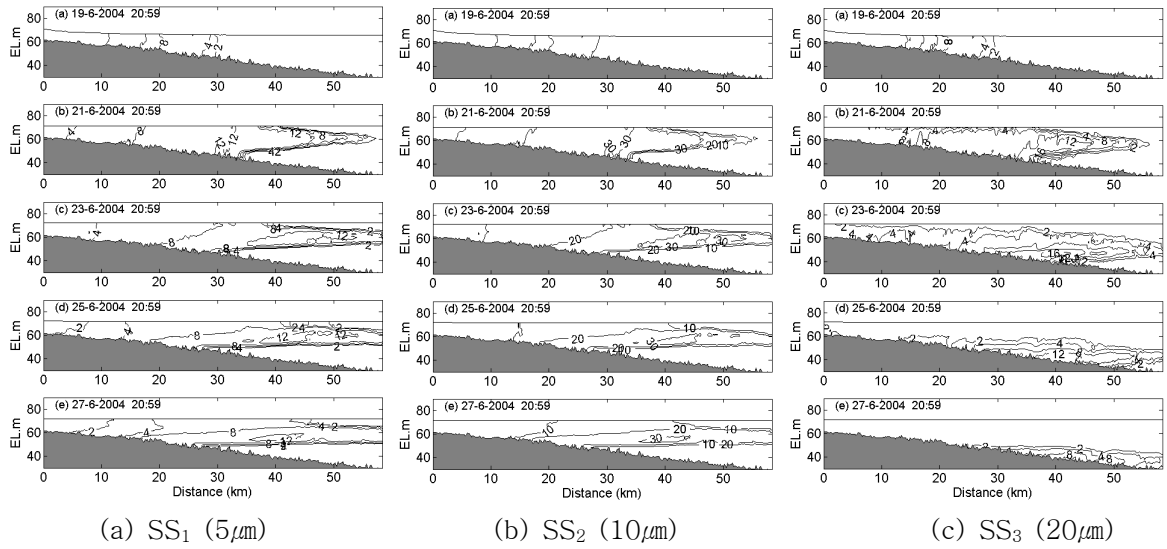


Fig. 2. Simulated transects of SS(mg/L) by ELCOM-CAEDYM during the June flood event

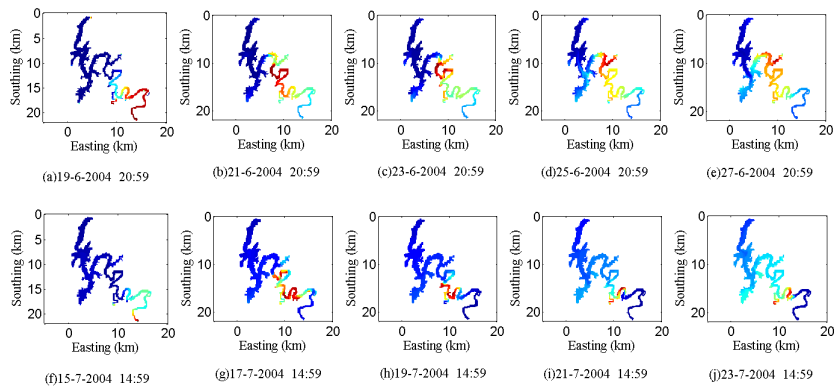


Fig. 3. Top view of simulated SS₂ concentrations (mg/L): plunging points are identified

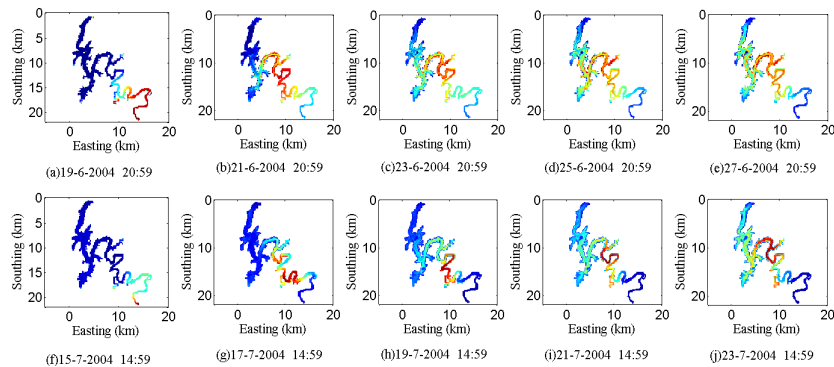


Fig. 4. Plan view of simulated depth-averaged SS₂ concentrations(mg/L)

3.2 실측값과 모의값의 비교

모델의 예측 성능을 평가하기 위해 댐 앞지점에서 모의값($\sum_{i=1}^3 SS_i$)을 수심별로 연속 측정된 값과 비교하

였다(Fig. 5). 그림에서 실측 SS농도는 탁도자료를 그 지점에서의 SS-C_T 상관관계식으로 변환한 것이다. SS의 최고 농도값의 크기는 실측 값과 유의할 만한 편차를 보였으나, 모델은 탁수의 수직 분포와 두께는 비교적 잘 모의하였다. 오차의 원인은 SS 입자크기별 분율과 침강속도 매개변수의 불확실성, SS-탁도 관계의 불확실성, 그리고 장기적으로는 부유물질에 포함된 유기물 함량의 불확실성 등이 포함된 것으로 판단된다.

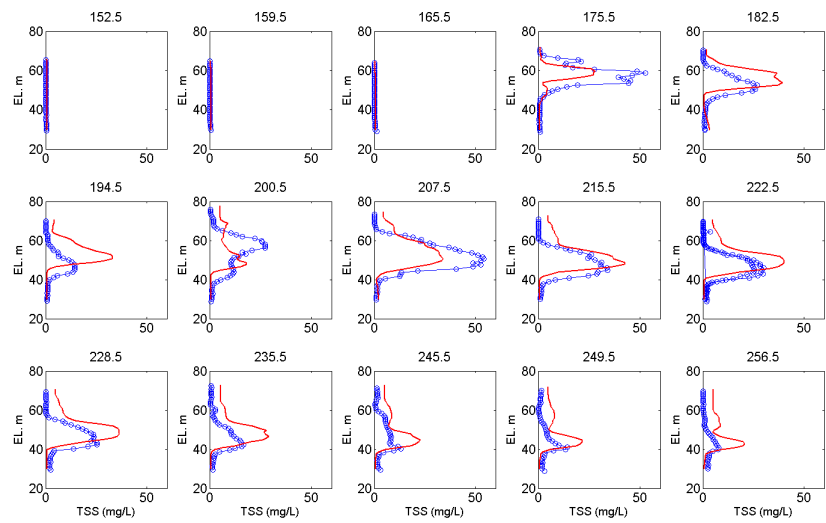


Fig. 5. Comparisons of observed (symbol) and simulated (line) total SS concentrations

4. 결론

탁수는 대청호에서 부력침강 밀도류를 형성하였으며, 3차원 ELCOM-CAEDYM 모델은 탁수가 유입하는 환경에서 저수지 성층구조의 변화와 유입 탁수의 밀도류 거동특성, 유입한 부유사의 이송과 확산 그리고 침강특성을 비교적 잘 재현하였다. 저수지로 유입한 부유입자 중 입경이 20 μm 이상의 입자는 1 주일 이내 저수지 바닥에 퇴적된 반면, 10 μm 이하의 입자들은 탁수층에 오랜 시간 부유하며 장기탁수문제를 유발하는 원인이 되었다.

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.

참고문헌

1. 정세웅(2004). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, 대한환경공학회지, 제26권, 제90호, pp. 970-978.
2. 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, NY.
3. Hodges, B. R. and Dallimore, C.(2007). Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2.2 User Manual, Centre for Water Research, University of Western Australia.
4. Imberger, J. and Patterson, J. C.(1990). Physical Limnology. Advances in Applied Mechanics, T. Wu (*ed*). Academic Press, Boston, **27**, pp. 302-475.
5. Martin, J. L. and McCutcheon, S. C.(1999). Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling. CRC Press, Inc., pp. 335-384.
6. Wetzel, R. G.(2001). Limnology, Lake and reservoir ecosystems. Academic Press, New York.