

호소 수질모델링 기술 현황과 적용사례

The State of the Art of Lake Water Quality Modeling and Applications



정 세 웅
충북대학교 환경공학과 교수
schung@chungbuk.ac.kr

1. 서론

우리나라는 시·공간적으로 열악한 수자원 부존여건을 극복하기 위해 다양한 규모의 댐을 하천에 설치하였으며, 연간 용수 이용량(약 337억m³)의 50%이상 되는 수자원을 이들 댐 호소로부터 확보하고 있다. 그러나, 하천을 횡방향으로 가로지르는 이들 댐 구조물은 자연상태의 물 흐름특성에 변화를 가져왔으며, 결과적으로 하천의 지형과 생태계의 변화뿐만 아니라 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 과잉성장과 탁수의 장기화와 같은 수체의 이화학적 특성에도 적지 않은 영향을 미치고 있다(김범철 등, 2001; 정세웅 등, 2005; Tharme, 2003).

농업용저수지의 경우, 2009년 수질측정망조사결과(농림수산식품부, 2010)에 의하면 측정망 대상 826개 저수지 중 165개(20%)가 농업용수 수질환경기준(IV등급, COD8mg/L이하)을 초과하는 것으로 조사되었다. 특히 축조된 지 65년 이상 노후화된 저수지의 수질기준

초과율은 44.7%에 달해 앞으로 시간이 갈수록 저수지 수질오염문제는 더욱 심각해 질 전망이다(김호일, 2010). 농업용저수지와 하구담수호의 수질오염은 농촌 지역 중소하천과 인근 연안의 수질과 생태환경에 직접적 영향을 미칠 수 있으며, 생산되는 식물자원의 품질에도 영향을 미칠 수 있으므로 실효성 있는 관리대책이 마련되어야 한다(장정렬, 2010).

수질모델은 기본적으로 수체 시스템에 작용하는 외적 부하(load)에 대한 수체 내부의 반응(response)을 해석하는 도구로서 수식 또는 소프트웨어의 형태를 가진다. 이미 수질모델링 기술은 실험적 방법의 적용이 어려운 환경영향평가, 하천-호소-하구연안 등의 수질관리 방안 수립, 수질오염총량관리와 같은 수질정책 의사결정 과정 등에 광범위하게 적용되고 있으며, 기술의 경제적 파급효과는 매우 크다고 할 수 있다. 사람의 몸이 아플 때 병의 원인을 알아야 정확한 치료가 가능하듯이, 호소의 수질오염문제를 해결하기 위해서는 과학적인 원인분석이 우선되어야 한다.

그동안 호소 수질문제의 원인분석과 대책마련을 위한 분석도구로써 수리·수질모델링기술이 활발히 연구되어 왔다. 호소 수질오염현상을 이해하기 위해서는 우선 상류유역으로부터 부하되는 오염원과 부하량에 대한 정량적인 평가가 필요한데, 이를 위해 다양한 유역모델(watershed model)이 활용되고 있다. 반면, 호소 내에서 일어나는 복잡한 동수역학적 운동(hydrodynamics)과 생지화학적(biogeochemical) 반응특성, 그리고 이로 인한 생태계 상호작용을 이해하기 위해서는 수체모델(waterbody model)이 필요하다. 즉, 유역모델은 유역으로부터 수체(하천과 호소)로 유입되는 오염물질의 이동 메커니즘과 유출부하량을 산정하는데 적용가능하며, 수체모델은 수체로 유입된 오염물질의 이류·확산과 수질반응 기작을 모의하는데 활용될 수 있다. 일부 복잡한 수준의 유역모델은 오염물질의 하도 및 저수지 추적기능이 있으나, 대부분 수질반응 기작이 단순하고 공간적 변동성을 해석하지 못하는 한계가 있어 정밀한 해석을 위해 사용하기에는 부적합하다.

본 글의 목적은 호소 수질관리를 위해 적용되고 있는 대표적 수질모델의 특성을 살펴보고, 이들 모델의 국내 적용사례를 소개하는데 있다. 이 글에서 언급하는 호소는 자연 호소, 인공적 댐 저수지, 하구 담수호를 모두 포함하는 통칭으로 사용되었으며, 소개되는 모델의 적용 사례는 필자의 경험을 토대로 작성되었다.

2. 호소 수질모델의 기초 원리

호소 수질모델은 주로 수문 및 기상, 유역 오염부하, 그리고 저수지 운영방법이 호소 수질에 미치는 영향을 해석하는 목적으로 개발되고 활용되어 왔다. 사용목적

에 따라 매우 다양한 복잡도를 가질 수 있으나, 성층화와 심층 혐기화, 녹조발생, 탁수 장기화 등과 같은 실질적인 수질오염 현상을 해석하고 관리대안을 모색하기 위해서는 물의 동수역학적 운동과 해석하고자 하는 물질의 이류·확산·반응이 모두 적절히 고려되어야 한다. 따라서 호소 수질모델링을 위해서는 동수역학, 유수학, 생물학, 화학, 지구과학, 데이터 처리, 프로그래밍 등의 다양한 이론적 기초가 요구된다.

호소에서 모든 오염물질의 이동은 물을 매체로 하므로 물의 운동역학은 수질오염 현상을 이해하는데 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 물의 동수역학적 해석을 위해서는 고전물리학에 근거한 연속방정식, 운동량방정식, 자유수면방정식, 밀도상태방정식, 물질수송방정식이 필요하다. 그리고 수질 및 생태계 상호작용 해석을 위해서는 생지화학적(biogeochemical) 반응식과 생물대사반응식 등이 물질수송방정식에 포함된다. 호소에서 발생하는 물의 동수역학적 운동(그림 1 참조)은 크게 대기과 수면의 열 교환과 수온 성층화, 바람에 의한 난류 혼합, 유입수 밀도류 거동, 방류수 혼합, 내부파, 경계면 혼합 등이 있다(Imberger and Patterson, 1990). 이 중에서도 수체의 수온 성층화는 호소의 수직혼합과 시·공간적인 이화학적 환경 즉, 수온, 체류시간, 광량, pH, 용존산소(DO)와 영양염류 농도 분포 등에 직접적인 영향을 미치므로 효과적인 수질관리를 위해서는 정확한 이해가 필요하다(Wetzel, 1983). 아울러, 성층 호소에서 밀도가 다른 수체의 경계면에서 발생하는 내부파는 수온약층의 상·하 이동과 이에 따른 취수 수질의 변동(Anohin et al., 2006), 심층수와 표층수의 수직혼합(Imberger and Patterson, 1990), 그리고 호소 내 수평 혼합(Okely and Imberger, 2007) 등에 영향을 미치는

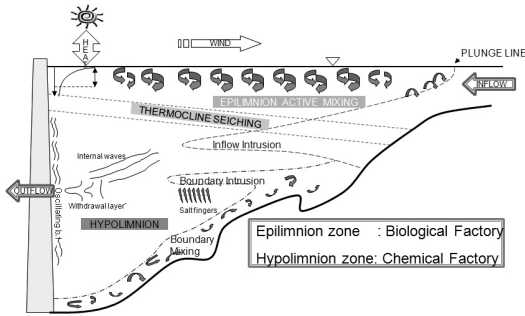


그림 1. 호소에서 일어나는 다양한 육수물리학적 운동 (modified from Fischer et al., 1979)

중요한 육수물리학적 현상이다.

호소에서 성층화는 물의 고유한 특성인 온도와 밀도의 관계 때문에 발생하며, 호소 수면-대기 열 교환, 호소 바다-수체 열 교환, 홍수시 하천 유입량과 방류량, 염도 또는 총용존성물질(TDS) 농도와 부유물질(SS)의 농도에 영향을 받는다. 일반적으로 호소는 평균수심이 7 m를 넘고 연간 평균 체류시간이 20일을 넘는 경우 성층화가 발생 할 수 있다(Martin and McCutcheon, 1999). 호소의 수온성층 현상은 수체에 포함된 에너지와 물질들의 이송과 확산에 영향을 미치게 되며, 그 결과로써 호소에서 식물성플랑크톤 성장의 제한인자인 수온, 광량, 영양염류 농도의 공간적인 편차를 나타내게 하는 원인을 제공한다.

특히, 호소의 수온과 성층강도는 우점하는 조류 종의 천이 특성값과 관계가 깊다. 국내 호소에 자주 출현하는 Cyanobacteria인 *Microcystis*는 세포내 기낭(veiscle)이 있어 광합성과 호흡과정에서 부력조절이 가능하다. 바람에 의한 호소 표층의 난류혼합시간(t_m)과 조류의 부력조절시간(t_b =보통 4~12시간)의 관계가 조류의 수화(algal bloom)발생 예측에 중요한 요소가 된다

(Reynolds et al., 1987). 즉, t_m 이 t_b 보다 큰 경우, *Microcystis*는 부력조절 기능으로 중층의 영양염류와 표층의 광원을 모두 활용 가능하므로 다른 종보다 우세종으로 급속히 성장가능하다. 호소에서 수온이 높고 풍속이 매우 작은 정체수역에서는 이러한 현상이 발생 할 수 있다.

또한 수온성층 구조는 홍수시 유입하는 탁수의 침강점, 중층 밀도류 두께, 주변수체와 혼합 정도, 진행 속도 등 밀도류 거동 특성에도 영향을 준다(Ahlfeld et al., 2003; Gu and Chung, 1998). 그리고 결과적으로 밀도류에 포함된 부유사의 입자크기별 이류, 확산과 침강특성에 영향을 주게 된다.

따라서 성층 호소에서 탁수와 녹조발생과 같은 수질 오염 현상의 정확한 인과관계 해석을 위해 수질모형을 적용하고자 할 경우에는 해당 수체의 육수물리학적 특성에 대한 이해와 신뢰도 높은 모의가 반드시 선행되어야 한다.

3. 호소 수질모델의 종류와 특성

호소 수질모델의 종류는 해석하는 공간적 차원에 따라 연직방향의 1차원(z 모델), 연직-종방향 2차원(x-z 모델), 그리고 3차원(x-y-z) 모델로 구분할 수 있다. 1차원 모델은 수심방향의 수온과 수질변동을 해석하는 목적으로 개발되었으며 WQRRS, CE-QUAL-R1, DYRESM 등이 해당된다. 2차원 모델은 수심과 흐름방향의 수리 및 수질변화를 해석하는 CE-QUAL-W2 (Cole and Wells, 2004)가 국내·외적으로 가장 광범위하게 적용되고 있다. 최근들어 컴퓨터기술의 발달과 함께 3차원모델의 적용이 활발해 지고 있는데, 이중 대표

적 모델로 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Computer Code)와 ELCOM-CAEDYM이 있다.

EFDC 모델은 종종 WASP 모델과 함께 적용되는 hydro 버전과 독립적으로 수리-수질 연동해석을 하는 full 버전으로 구분할 수 있는데, 여기서는 full 버전을 중심으로 소개한다. 수리-수질 연동(coupled) 모델과 비연동(uncoupled) 모델의 차이점은 수리해석과 수질 해석이 동일한 계산시간에 연동해서 이루어지느냐 아니면, 수리해석을 먼저 수행한 후 그 결과를 파일에 저장해서 수질모델에 활용하느냐로 구분할 수 있다. 예로써, EFDC-WASP의 경우 EFDC로 수행한 수리해석 결과를 *.hyd 파일에 저장하여 WASP에서 사용하는 방법을 채택하는 대표적 비연동 모델에 해당한다. 비연동 모델의 장점은 수리모델을 먼저 보정한 후 그 결과를 저장하여 수질모델에 사용함으로써 수질모델의 보정과정에서 불필요한 계산시간을 절약할 수 있다는 것이다. 그러나 수체의 수온 또는 밀도 구조가 물의 수질농도(부유물질, 염분도 등)에 의존하는 경우, 그리고 조류의 수화현상에 의한 광량차단효과(self-shading effect)와 같은 수질-수리 상호작용을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 또한 수체를 완전히 혼합된 여러 개의 박스가 연결된 형태로 구성하는 WASP 모델의 경우, 격자수의 제한 때문에 EFDC 수리해석 결과를 평균화하여 적용하는 경우가 많아 성층화, 밀도류 거동, 수직난류 혼합과 같은 호소 내 수리현상을 정확히 반영하지 못하는 문제점이 있다 (2장에서 살펴본 바와 같이 이러한 현상은 호소 수질의 시공간적 변동에 직접적 영향을 미친다).

ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 서호주대학교 물연구센터(CWR)에서 개발한 범용 3차원 수리동력학 모델로써, 하구, 저수지, 해양과

같은 대규모 수체의 3차원 속도장과 수온 및 염분농도의 변화를 예측하는데 널리 사용되고 있다(Hodges and Dallimore, 2006). ELCOM은 육수물리학 분야의 연구와 병행하여 발전되어 왔으며, 특히 대기-수체 열교환 및 성층화 해석, 바람에 의한 표층 난류혼합, 내부파, 상승류와 하강류, 유입수와 방류수 동력학, 밀도류, 수평 혼합과 경계층 혼합 해석 등에 활발히 적용되고 있다. 수질-생태계 해석 모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연결되어 수리-수질-생태계의 연동 모의가 가능한 모델이다 (Hodges and Dallimore, 2006; Chung et al., 2009; Hipsey, 2010). ELCOM-CAEDYM은 60여개의 나라에 적용된 바 있으며, 호소, 저수지, 하구에서 일어나는 수리-수질 상호작용, 부영양화와 녹조, 탁수거동, 병원균, 수중생물, 그리고 기후변화 영향평가 등의 해석에 광범위하게 활용되고 있다. 우리나라에서도 다목적댐 수질관리를 위해 대청호, 용담호, 소양호, 주암호, 임하호, 보령호 등의 수심이 깊고 성층현상이 뚜렷한 저수지를 대상으로 ELCOM-CAEDYM이 구축되었으며, K-water에서는 15개 다목적댐 저수지에 순차적으로 구축하여 수질관리를 위한 도구로 활용할 계획이다.

특정 호소의 수질오염 관리를 위해 적절한 수질모델을 선정하는 작업은 매우 중요하다. 특히, 수질모델링의 결과가 중요한 정책의 결정이나 시설투자과 관계되어 있을 때에는 더욱더 모델 선정에 신중을 기해야 하며, 모의결과의 불확실성 분석도 포함할 필요가 있다. 적절한 호소 수질모델을 선정하기 위해서는 대상 저수지의 지형적 특성, 수질의 시간적 공간적 변동성, 모델의 수리 및 수질 해석 기능, 관심 수질 항목, 요구되는 입력자료의 수준과 사용자의 전문성, 계산의 효율성, 사용 편

의성, 수치해의 안정성 등을 고려하여야 한다. 대상 저수지의 수심이 얇고 수평방향의 수질변동이 적어 완전 혼합 상태를 가정할 수 있다면 완전혼합 box 모델을 적용할 수 있다. 수심이 깊고 수평방향의 수질변동이 적은 경우에는 성층화 해석이 중요하므로 DYRESM과 같은 연직방향 1차원 모델을 선정할 수 있다. 반면, 우리나라 대부분의 댐 저수지와 같이 폭에 비해 수심이 깊고 흐름 방향의 수질변동은 있으나 횡방향 변동은 적은 경우에는 CE-QUAL-W2와 같은 횡방향 평균 2차원(x-z) 모델을 선정한다. 저수지의 수심이 깊어 성층현상이 있으며, 흐름방향과 횡방향의 수질 변동이 모두 큰 경우에는 ELCOM-CAEDYM과 EFDC와 같은 3차원(x-y-z) 모델을 선정한다. 단, 성층화 현상이 뚜렷하고 저수지로 유입한 하천수의 밀도류 해석이 중요한 경우에는 ELCOM-CAEDYM이 적합하다.

4. 호소 수질모델의 적용사례

가. 소양호 선택취수설비의 탁수제어 효과 평가 (CE-QUAL-W2)

1) 적용목적

2006년 홍수기(7월 중순)에 소양호로 유입한 탁수는 저수지에 7개월 이상 잔류하면서 북한강 하류와 팔당 상수원의 수질에 막대한 영향을 미쳤으며 사회적 이슈로 부각되었다. 소양호 탁수문제는 최근 증가하는 집중 호우와 이로 인한 토석류 발생, 그리고 고령지 밭 경작지, 공사현장, 나대지 증가 등이 원인이다. 반면, 유역에서 강우시 유입한 탁수가 저수지 내에 장기간 체류하는 원인은 자연 침강이 잘 일어나지 않는 입경 10 μm 미만

의 작은 입자들이 중층 밀도류에 부유상태로 잔류하기 때문이다.

국토해양부에서는 소양호의 탁수저감 대책으로 선택취수 설비(SWS) 설치를 추진하고 있다. 선택취수설비는 취수 수심을 가변적으로 조절할 수 있는 구조물로서 기존의 중층 고정 취수설비의 문제점(표층 맑은 물 취수 불가)을 개선하여 탁수의 하류 방류 일수를 저감하는 기능이 있다. 본 연구(정세용 등, 2011)에서는 다양한 수문사상에서 선택취수설비가 탁수 저감에 미치는 효과를 분석하기 위해 CE-QUAL-W2를 구축하고 적용하였다.

2) 모델개요

CE-QUAL-W2는 연속방정식과 x-방향 및 z-방향 운동량 방정식, 자유수면 방정식, 밀도 상태방정식, 물질 이송-확산-반응 방정식의 6개 지배방정식으로 구성되며, 6개의 미지수 즉, x-방향 유속(u), z-방향 유속(w), 수압(P), 밀도(ρ), 저수지 수위(η), 수질농도(C)를 다양한 유한차분 수치해석기법을 사용하여 해석한다(Cole and Wells, 2004; Chung and Gu, 1998). 운동량 방정식에 포함된 x-방향과 z-방향의 순간유속성분은 Reynolds 개념의 시간평균화와 y-방향(횡방향)에 대한 공간 평균화 과정을 거치기 때문에 와확산계수를 갖게 되며, 확산항의 크기는 난류강도와 횡방향 유속분포의 불균등성의 정도에 좌우된다. 흐름의 난류성분 때문에 발생하는 응력항들은 난류폐합식을 이용하여 해석하는데, 본 연구에서는 zero-equation 모델에 해당하는 와점성계수(eddy viscosity)를 사용하였다. 수직 난류 확산계수(ω_z)의 산정 방법은 성층현상에 따른 완충효과(damping effect)를 Richardson수로 고려하는 방법을 사용하였다.

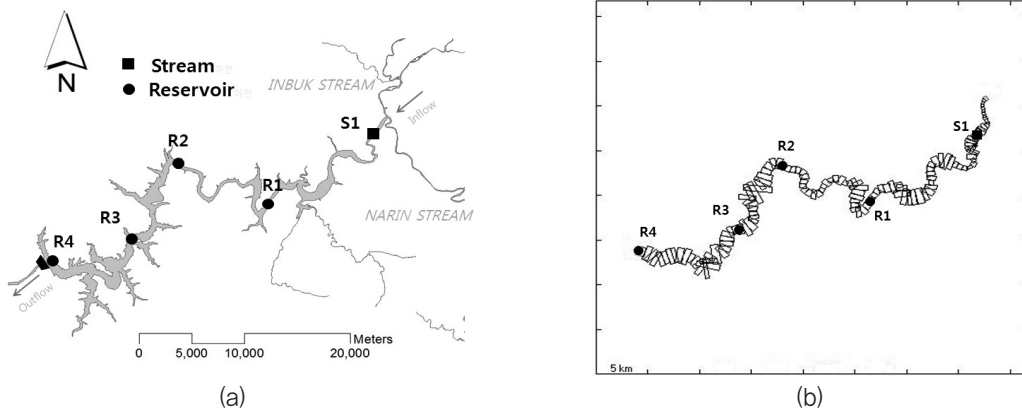


그림 2. 소양호 위치도와 CE-QUAL-W2 유한차분 격자 구조

3) 적용 결과의 시사점

소양호에서 선택취수 설비의 효과는 초기 저수용량과 유입 탁수의 규모에 따라 결정되는 탁수 점유율(θ)에 따라 다르게 나타났다. 1990년 탁수 사상($\theta=0.59$)에서는 선택취수설비를 도입 할 경우, 기존의 중층 취수 방식보다 관리탁도 30 NTU에 대하여 탁수 하류 방류 일수가 각각 52일 저감되는 것으로 나타났다(그림 3). 그러나, 2006년 탁수 사상($\theta=0.83$)에서는 선택취수설비를 도입한 경우가 오히려 역효과를 보였다. 선택취수의 운영이 기존의 중층 취수 방식보다 관리탁도 30NTU를 초과하는 하류 방류 일수를 68일 증가시키는 결과를 초래하였다(그림 4). 즉, 2006년 탁수사상의 경우는 초기저수량이 적은상태에서 대규모 탁수사상이 유입하여 저수지내 탁수점유율이 높았으며, 선택취수설비를 운영하면서 탁수가 가을철 전도현상으로 인해 저수지내에 전체적으로 혼합되는 결과를 초래하였다(그림 4). 1990년 탁수사상이 2006년 탁수사상에 비해 초기 저수량이 많아, 대규모 탁수사상이 유입하였어도 탁수의 댐 내 점유율은 낮

았으며, 선택취수설비를 운영할 경우 탁수방류일수를 저감하는 효과를 보였다.

따라서 소양강댐 하류의 탁수 장기화 저감을 위한 선택취수설비는 실시간 탁수 모니터링과 모델링 기술을 기반으로 과학적으로 운영되어야 하며, 탁수 점유율이 높은 사상에 대해서는 표층취수보다는 중층 탁수층의 신속한 배제가 우선되어야 할 것으로 판단된다.

나. 새만금호 유입 유사의 공간적 퇴적 특성 해석 (EFDC)

1) 적용목적

새만금호로 유입하는 유사의 운송(Transportation)과 퇴적(Deposition) 현상은 유체가 가지는 수리학적 특성(유량, 유속, 밀도류, 난류확산 등)과 하도의 기하학적 특성(수심, 하폭, 하상경사, 하상재료 구성과 형태, 만곡 등), 그리고 부유사(Suspended sediments) 및 하상퇴적토(Bed sediments)의 물리적인 특성(입경분포, 단위중량, 형상 등)에 영향을 받는다. 따라서 새만금호로 유

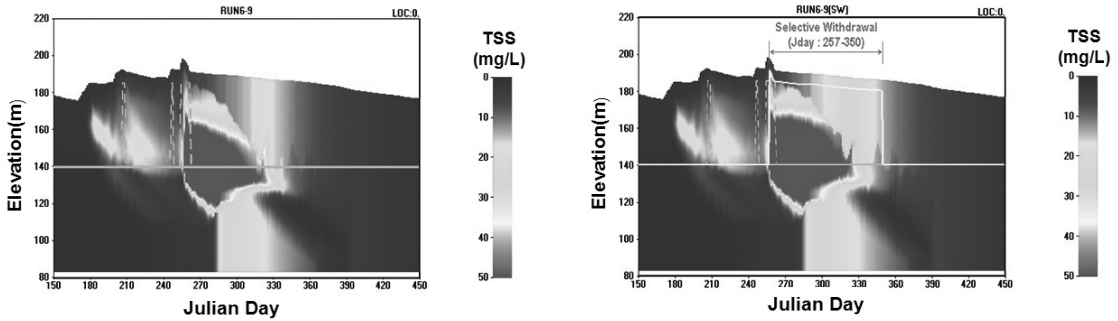


그림 3. 선택취수설비 효과분석을 위한 모델 적용결과(1990년 수문사상)

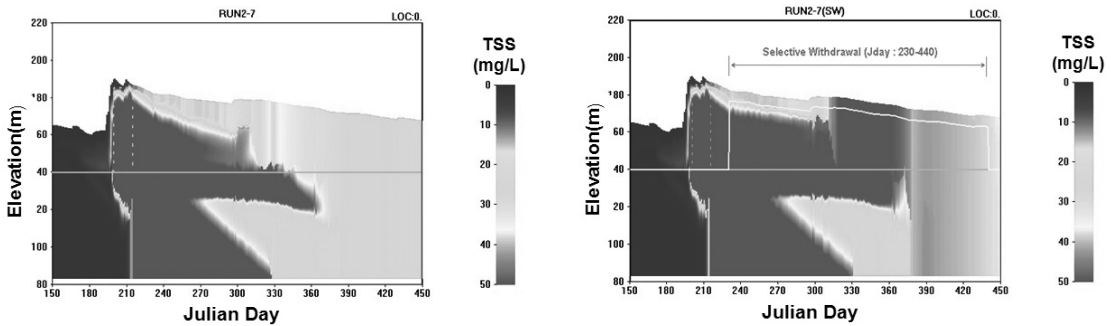


그림 4. 선택취수설비 효과분석을 위한 모델 적용결과(2006년 수문사상)

입한 유사의 퇴적현상은 공간적으로 매우 복잡할 뿐만 아니라 수십 년에 걸쳐 일어나는 장기적인 현상이므로 실험적 연구만을 통해 유사의 유입특성을 종합적으로 해석하고 적절한 관리대책을 수립하는 데는 한계가 있다. 따라서 홍수시 유입한 유사의 공간적 퇴적 양상을 정량적으로 해석하고 호소 지형의 장기적인 변화를 예측하기 위해서는 다차원 수치모델의 적용이 필요하다. 본 연구(정세웅 등, 2010; 전지혜, 2012)에서는 2008년과 2009년을 대상으로 측정된 유입 유사의 물리적 특성을 바탕으로 3차원 유사 거동 및 퇴적 모형을 구축하고

새만금 호의 퇴적 분포 양상을 분석하였다.

2) 모델개요

새만금호에 적용된 유사 거동 모형은 버지니아 해양 과학 연구소(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되어 3차원 수리동역학 해석, 유사 수송 해석, 온냉수 배출 해석, TMDL 수질 해석 등에 광범위하게 사용되고 있는 3차원 범용 수리/수질 모형인 EFDC 모형이다. EFDC 모형의 구조는 4개의 기본 모듈(수리동역학, 수질, 유사 이송, 독성 모듈)로 구분할 수 있으며,

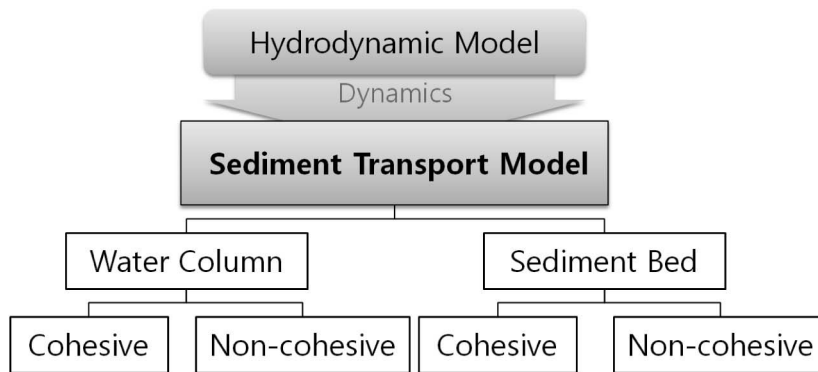


그림 5. EFDC 유사이송 모델의 구조

수리 동력학 모듈의 모의 결과는 수질모의, 유사 이동, 독성물질 모의에 연동(coupling)되어 사용된다. 유사 이송 모듈은 수체와 퇴적층으로 나누어 각각 모의 되며 각각의 수체와 퇴적층에서는 점착성과 비점착성으로 나누어 계산되어 진다(그림 5).

기본 지배방정식은 연속방정식, 수평방향(x, y) 운동량방정식, 정수압을 가정한 수직방향(z) 운동량 방정식, 밀도 상태방정식, 물질수송 방정식, 그리고 열수지 방정식을 사용한다. 특히, EFDC-Sediment 모듈은 입자크기별로 구별된 점착성과 비점착성 부유사에 대한 수송 방정식을 계산한다. EFDC-Sediment 모듈의 특징은 다중 입자 크기별 비점착성 유사의 소류사 수송 모의가 가능하며 점착성 및 비점착성 유사의 침강, 퇴적, 재부상, 포획 등의 모의가 가능하다. 또한, 퇴적층은 수직방향의 입경분포, 공극률, 체적밀도 분포를 나타낼 수 있도록 가변 두께의 몇 개의 층으로 나누어 해석가능하며, 경화(armored) 퇴적층 형성의 모의, 점착성 유사로 된 퇴적층의 압밀 모의, 1차 경험식을 사용한 제방침식 모의를 수행할 수 있다(TetraTech, 2002).

점착성 퇴적물의 침강 속도식은 Hwang and Mehta, Shrestha and Orlob, Ziegler and Nisbet 식을 선택적으로 적용할 수 있다. Hwang and Mehta식은 유사 농도의 증가와 감소에 비례하여 침강속도가 나타나며 흐름 특성에 의존하지 않으며 강력한 흐름이나 빈번한 표면파가 있을 때 쓰이게 된다. Shrestha and Orlob 식은 침강 속도가 유사 농도에 영향을 받는다는 점에서 비슷하지만 수평유속 경사 때문에 발생하는 수직 전단력의 영향을 받는다는 것이 특징이다. Ziegler and Nisbet 식은 침강속도가 플록(floc)의 직경에 영향을 받는다. 플록의 직경은 실험적으로 결정된 상수, 유사 농도, 그리고 수체에서 난류성 전단응력(turbulent shear stress)에 의해서 결정된다.

비점착성 퇴적물은 Van Rijnd의 침강 속도식을 사용한다. 비점착성 퇴적물은 입자의 크기가 비교적 크기 때문에 독립적인 침강이 이루어지며, 방정식에서 침강속도는 입자의 직경, 중력, 입자의 밀도와 레이놀즈 수에 영향을 받는다.

3) 적용 결과의 시사점

구축된 EFDC 모델을 적용하여 2008년과 2009년에 측정된 유입 유사의 물리적 특성을 바탕으로 새만금호 내 유사 거동 및 퇴적 양상을 모의하였으며, 모델은 상당한 수준의 신뢰도를 보여주었다. 유입 유사의 공간적 퇴적분포와 퇴적 두께를 예측한 결과 2008년(가뭄년)의 경우 유입 유량과 유사량이 많지 않았으며 대부분의 유사는 유입부 쪽에 퇴적되었다. 2009년의 경우 홍수기에 1~2 차례의 큰 강우가 내렸기 때문에 퇴적두께가 두껍고 퇴적 분포 또한 광범위하게 나타났다.

퇴적물의 입경 분포 비교의 경우, 실측값과 모의값이 정확하게 일치하지는 않았으나 대체적으로 경향성이 비슷하게 나타났다. 각 지점별로 입자의 직경이 50 μm 이하인 점착성 퇴적물이 대부분을 차지하며 상류 지점에서 하류 지점으로 갈수록 점착성 퇴적물이 차지하는 비율이 커지는 것을 확인하였다. 수평격자 해상도에 따른 유사의 공간적 분포와 퇴적두께의 민감도를 분석한 결과, 유입량이 큰 경우(즉, 유속이 큰 경우)에는 격자 해상도가 높을수록 하류부까지 퇴적영역이 확장되었다.

또한 매개변수의 민감도 분석 결과 유사 밀도에 따른 퇴적 두께 변화가 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

따라서 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 정밀 실측 자료에 근거한 최적 격자구성이 필요하며, 장기적인 유사 모니터링 자료를 바탕으로 모델의 매개변수와 입력 변수의 불확실성을 최소화 하는 것이 중요하다.

다. 대청호 남조류 수화현상 원인해석 (ELCOM-CAEDYM)

1) 적용목적

호소와 하구 같은 정체수역에서 식물플랑크톤이 과잉 번식하여 수면에 막(scum)을 형성하는 수화현상(water bloom)은 상수원 수질관리뿐만 아니라 수생태계의 건강성 측면에서도 매우 중요한 문제이다. 대청호는 매년 하절기가 되면 남조류(cyanobacteria) 수화현상이 자주 발생하고 있어 수자원공급에 지장을 초래하고 있다(천세억 등, 2006). 특히 적은 강우로 댐 유입량이 급감한 2001년에는 평균 체류시간이 약 499일로 장기화됨에

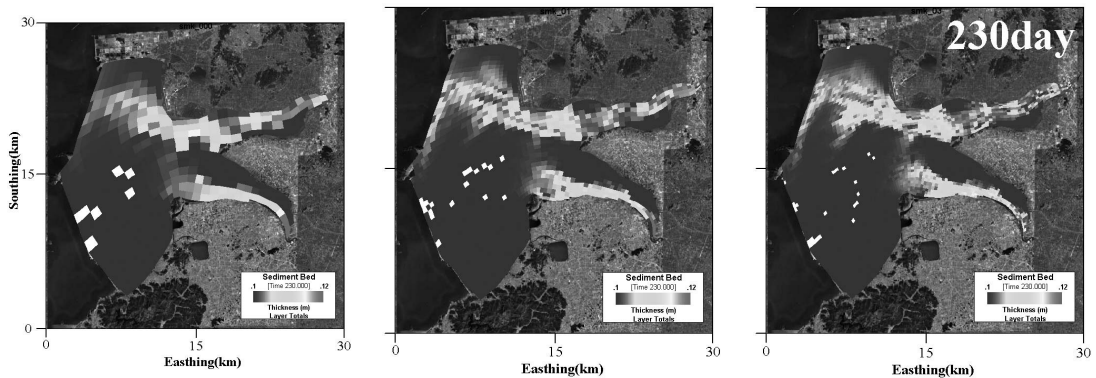


그림 6. 새만금호 격자해상도에 따른 유입유사의 공간적 퇴적분포 모의결과

따라 회남수역(R3 지점, 그림 7 참조)에 *Microcystis*가 대량 번식하여 조류주의보(Chl-a 농도 15~25 $\mu\text{g/L}$ 및 남조류 세포수 500~5,000 cell/mL 수준)가 35일, 조류 경보(Chl-a 농도 25 $\mu\text{g/L}$ 이상 및 남조류 세포수 5,000 cell/mL 이상)가 47일, 조류 대발생(Chl-a 농도 100 $\mu\text{g/L}$ 이상 및 남조류 세포수 1,000,000 cell/mL 이상)이 7일간 발령되어 수질오염의 심각성이 본격적으로 대두되었다(국립환경과학원, 2005).

일반적으로 남조류 수화발생의 원인은 영양염의 과도한 유입과 체류시간 장기화, 높은 표층 수온과 성층화, 그리고 부력조절 능력과 같은 조류의 생리적 특성 등으로 알려져 있다(Chaneva and Furnadzhieva, 2007; Reynolds, 2006; Robarts and Zohary, 1987; Wetzel, 1983). 한편, 저수지에서 영양염류의 시공간적인 분포와 남조류의 부력조절 기능은 난류혼합과 같은 다양한 물리적 기작과도 매우 밀접한 관계가 있다(Chan et al., 2002; Donaghay and Osborn, 1997; Robson and Hamilton, 2004; Spigel and Imberger, 1987).

따라서 본 연구(정세웅과 이홍수, 2010)에서는 대청호에서 남조류의 수화발생 시기에 일어나는 수리학적 현상과 생지화학적인 인자의 상호작용에 대한 정밀 해석을 위해 ELCOM-CAEDYM 모형을 적용하였다. 모형을 이용하여 2001년에 발생한 저수지의 수문·수리 현상을 재현하고, 수리현상과 연계하여 남조류의 수화 현상에 영향을 미치는 각 인자(수온, 광량, 영양염류, 난류혼합, 부력조절)의 역할과 상호작용을 규명하였다.

2) 모델개요

ELCOM의 지배 방정식에는 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이류-확산방정식이 포함

된다. 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 ELCOM의 비정수압 코드 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다. ELCOM에서 수평방향 유속의 순간 변동성분에 의한 난류영향의 폐합식(turbulent closure)은 수평와점성계수(horizontal eddy-viscosity)를 사용한다. 수직방향에 대해서는 확산모델의 수직와점성계수(vertical eddy-viscosity) 또는 혼합층 모델(mixed-layer model)을 사용할 수 있다.

CAEDYM은 다양한 수리모델과 쉽게 연결될 수 있도록 설계된 수질 및 수생태계 해석모델이다. 이 모델은 C, N, P, Si의 다양한 순환과정, DO(dissolved oxygen) 순환, 입자크기별 6개까지의 부유물질(SS), 7개 종의 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 수서식물, 어류 등을 모의 변수에 포함할 수 있다. CAEDYM은 조류의 일주기 광합성과 야간 호흡 등의 과정을 해석하기 위해 어떤 시간 단위로도 사용될 수 있으며, 일반적으로 수리모델과 같은 계산간격으로 모델계산이 수행된다.

3) 적용 결과의 시사점

대청호에서 발생한 *Microcystis* 수화현상의 원인해석을 위해 ELCOM-CAEDYM을 적용하여 저수지 수리현상과 연계하여 수화현상에 영향을 미치는 환경인자와 영양염류의 공간적 분포특성을 분석하였다. 모델은 조류 대발생 당시 저수지 내에서 수온과 DO 농도의 수직

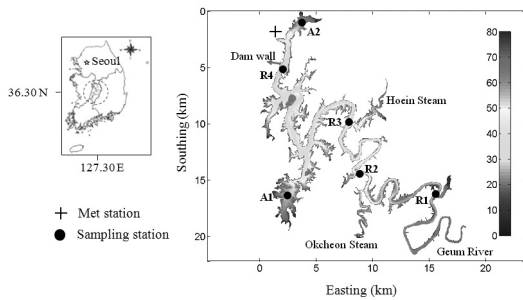


그림 7. 대청호 지형도 및 모니터링 위치

분포, 그리고 영양염류 농도의 시공간적 변화를 적절히 재현하였으며, 회남수역(R3)에서 발생한 국부적인 남조류 녹조현상을 적절히 모의하였다.

호수역(Lacustrine zone)은 여름철에 강우에 의해 외부로부터 인이 공급되지 않으면 대체로 PO_4-P 농도가 매우 낮은 빈영양 상태를 보였다. 그러나 강우시 유입한 하천수에 포함된 높은 인이 표층의 유광층으로 공급될 경우, 즉시 조류가 급성장하는 경향을 보이며 조류의 성장과 함께 표층의 PO_4-P 농도는 다시 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 2001년의 경우 조류성장의 제한요소인 인은 강우시 상류 유역으로부터 부하되었으며, 유입

하천수의 수리학적인 밀도류 유동특성 때문에 회남수역에서 수직혼합되면서 유광층에 인이 공급되었고, 그 결과로써 회남수역에서는 남조류 농도가 급격히 증가하였다. 반면, 강우-유출 후 회남수역에서 나타난 부영양상태와 대조적으로 담양 수역은 상대적으로 인 농도가 매우 낮은 빈영양상태를 보였다.

*Microcystis*의 부력조절 기능은 난류강도가 약한 경우(즉, 풍속이 4.0 m/s 이하로 유지될 때), 수화현상에 직접적인 영향을 미쳤으나, 풍속이 4.0 m/s 이상인 경우에는 난류 수직혼합에 의해 부력조절 기능이 제한을 받았다(그림 9 참조).

모델의 적용결과는 저수지의 수리학적 현상과 국부적인 수질환경이 매우 밀접하게 관계되어 있음을 보여준다. 대청호에서 남조류의 수화현상은 저수지로 유입하는 하천수의 밀도류 거동과 확산, 바람에 의한 수직난류 혼합, 그리고 조류의 생리적 특성에 의해 지배됨을 확인할 수 있었다.

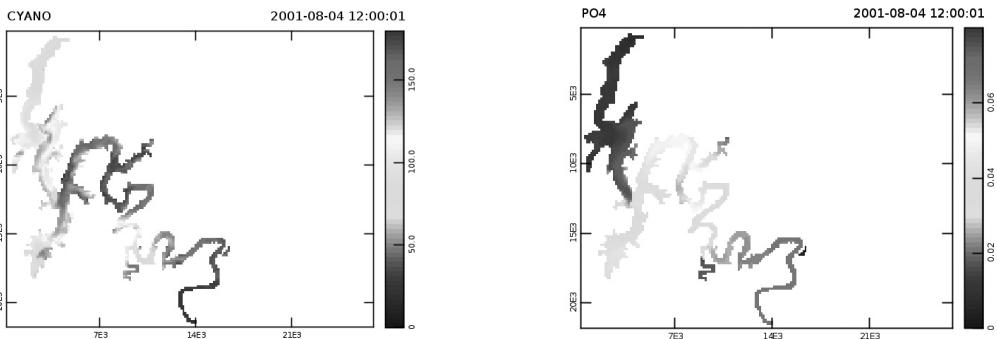


그림 8. 대청호 수화 발생시 *Microcystis*(좌)와 PO_4-P 농도(우)의 공간적 분포 모의결과

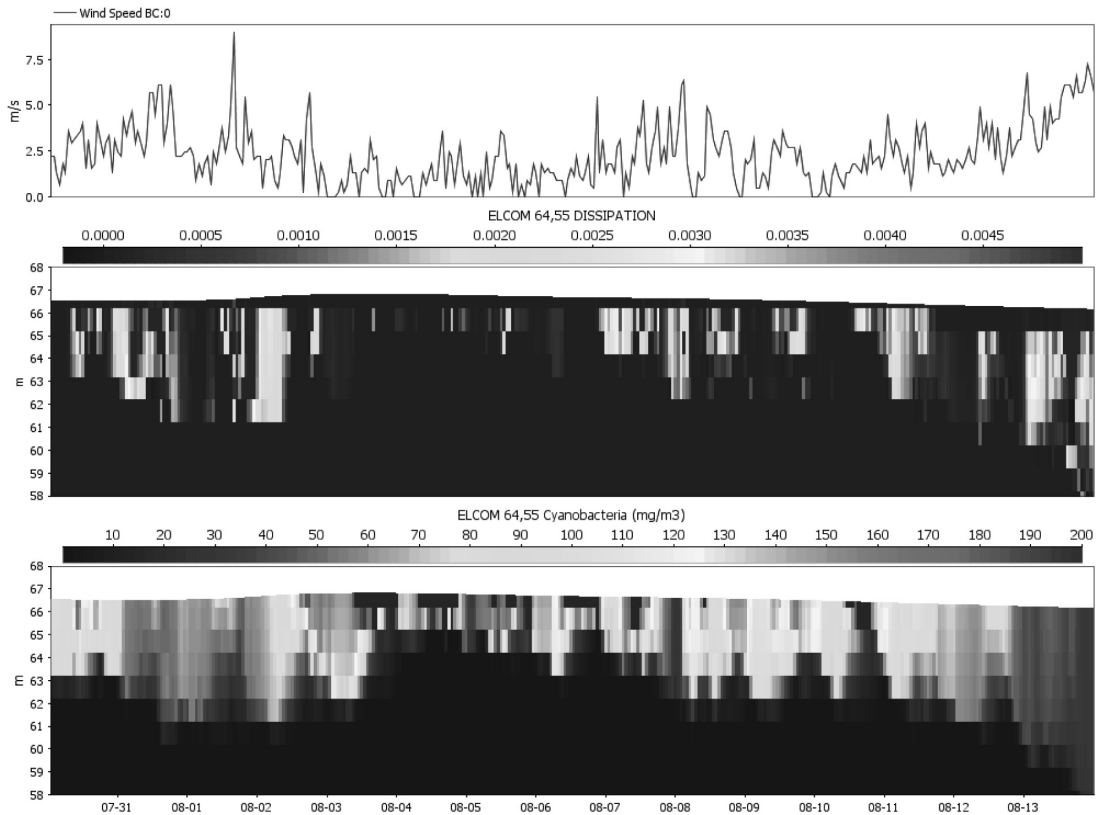


그림 9. 대청호 수화 발생시 풍속(상)과 난류혼합강도(중) 및 Microcystis 농도(하)의 시간-수심 분포 모의결과

5. 맺음말

본 글에서는 호소 수질모델링 기술에 대해 개괄적으로 소개하고, 국내 담수호에서 자주 발생하고 있는 탁수, 녹조, 유사 문제와 관련한 모델의 적용사례를 몇 가지 소개하였다. 댐 저수지와 하구담수호는 국내 수자원 공급원으로서 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 하류 하천과 연안의 수질과 생태계에 직접적인 영향을 미침에도 불구하고 그 동안 호소 수질문제를 해결하기 위한 조

사와 연구에 대한 투자는 매우 제한적이였다. 특히, 하천 또는 해양과 다른 지형적, 물리적 특성을 갖는 호소의 육수물리학적 혼합현상에 대한 실험적 연구는 실험 장비와 예산의 부족으로 전무한 실정이었으며, 수질모델의 적용 목적도 단순히 유역의 오염부하량 변화에 따른 수용 수체의 수질변화를 예측하는 경우가 대부분이였다. 그러나 많은 호소에서 나타나고 있는 중요한 수질 문제인 탁수의 장기화와 유해 조류의 수화현상 등에 대한 정밀한 원인해석과 경제적인 조절변수를 찾기 위해

서는 보다 신뢰도 높은 수질모델링기술이 요구된다. 본 글에 소개된 모델과 그 적용사례는 이러한 노력의 초보적인 결과에 해당한다. 향후 새만금호를 비롯한 다목적댐 저수지와 농업용 저수지의 과학적인 수질관리 대책 마련을 위해서는 육수물리화학적 현상과 연계한 수질-생태계 해석이 필수적이며, 이를 위해서는 실시간 현장 계측 기술, 원격감시(remote sensing) 기술, 다차원 수리·수질모델링 기술, 그리고 공간통계기법이 통합된 보다 발전된 기술의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 국립환경과학원. 2005. *대청호 수질 및 조류발생 실태조사*.
2. 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최홍수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호, *Korean J. Limnol*, **34**(1): 30-44.
3. 김호일. 2010. 농업용 호소 수질현황과 개선계획, *전원과자원*, **52**(2): 10-22.
4. 농림수산식품부, 한국농어촌공사. 2009. 농업용수 수질측정망보고서.
5. 장정렬. 2010. 농업용수 수질개선대책 및 추진현황, *전원과자원*, **52**(2): 23-31.
6. 전지혜. 2012. EFDC 모형 수치격자 해상도가 새만금호 수리 및 수질모의 결과에 미치는 영향. 충북대학교 석사학위논문.
7. 정세웅, 류인구, 이흥수, 정희영. 2010. EFDC를 이용한 새만금 유입유사 퇴적해석. *전원과 자원*, **52**(2): 53-62.
8. 정세웅, 오정국, 고익환. 2005. CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의, *한국수자원학회논문집*, **38**(8): 655-664.
9. 정세웅, 박형석, 윤성완, 류인구. 2011. 탁수조절을 위한 소양호 선택취수설비 설치 효과분석. *수질보전*, **27**(6): 743-753.
10. 정세웅, 이흥수. 2010. ELCOM-CAEDM을 이용한 대청호 *Microcystis* Bloom 해석. *수질보전*, **27**(1): 73-87.
11. 천세억, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재. 2006. 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(2): 342-348.
12. Ahlfeld, D., Joaguin, A., Tobiasson, J., and Mas, D. 2003. Case Study: Impact of Reservoir Stratification on Interflow Travel Time. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **129**(12): 966-975.
13. Anohin, V. V., Imberger, J., Romero, J. R., and Ivey, G. N. 2006. Effect of Long Internal Waves on the Quality of Water Withdrawn from a Stratified Reservoir. *J. Hydr. Eng.*, **132**(11): 1134-1145.
14. Centre for Water Research. 2010. DYNAMIC RESERVOIR SIMULATION MODEL DYRESM v4.0 User Guide.
15. Chan, T. U., Hamilton, D. P., Robson, B. J., Hodges, B. R., and Dallimore, C. 2002. Impacts of Hydrological Changes on Phytoplankton Succession in the Swan River, Western Australia. *Estuaries and Coast*, **25**(6): 1406-1415.
16. Chaneva, G. and Furnadzhieva, S. 2007. Effect of light and temperature on the cyanobacterium *Arthronema africanum* - a prospective phycobiliprotein-producing strain. *Phycology*, **19**: 537-544.
17. Chung, S. W., Hipsey, M. R., and Imberger, J. 2009.

- Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea. *Environmental Modeling and Software*, **24**: 1462–1482.
18. Cole, T.M. and Wells, S.A. 2004. CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.2 User Manual, Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Corps of Engineers, USA.
19. Donaghay, P. L. and Osborn, T. R. 1997. Toward a theory of biological-physical control of harmful algal bloom dynamics and impacts. *Limnol. Oceanogr.*, **42**(5): 1283–1296.
20. 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, Inc.
21. Gu, R. and Chung, S. W. 1998. Reservoir flow sensitivity to inflow and ambient parameters. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **124**(3): 119–128.
22. Hipsey, M. R (2010). Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3. v3.2 User Guide. Centre for Water Research, University of Western Australia.
23. Hodges, B. R. and Dallimore, C. 2006. *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM*. Users Guide, Centre for Water Research, University of Western Australia technical Publication.
24. Imberger, J. and Patterson, J. C. 1990. Physical *Limnology*. In Wu, T. (ed.), *Advances in Applied Mechanics*, **27**: 302–475.
25. Martin, J. L. and McCutcheon, S. C. 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. CRC Press, Inc.
26. Okely, P. and Imberger, J. 2007. Horizontal transport induced by upwelling in a canyon-shaped reservoir. *Hydrobiologia*, **586**: 343–355.
27. Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press.
28. Robarts, R. D. and Zohary, T. 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and freshwater Research*, **21**: 391–399.
29. Robson, B. J. and Hamilton, D. P. 2004. Three-dimensional modelling of a Microcystis bloom event in the Swan River estuary, Western Australian. *Ecological Modelling*, **174**: 203–222.
30. Spigel, R. H. and Imberger, J. 1987. Mixing processes relevant to phytoplankton dynamics in lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **21**: 361–377.
31. TetraTech, Inc. 2002. Theoretical and Computational Aspects of Sediment contaminant transport in the EFDC Model.
32. Tharme, R. E. 2003. A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trend in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Res. Applic.*, **19**: 397–441.
33. Wetzel, R. G. 1983. *Limnology*. Saunders College Publishing, Philadelphia, PA

기획: 강문성 mskang@snu.ac.kr