

국내 댐 저수지에 대한 3차원 수리·수질 예측 모델의 적용성 평가



안 기 홍 |

한국수자원공사 댐·유역관리처 위촉연구원
khahn@kwater.or.kr



이 규 탁 |

한국수자원공사 댐·유역관리처 처장
ktleee@kwater.or.kr



반 양 진 |

한국수자원공사 댐·유역관리처 수질환경팀장
banyang@kwater.or.kr



손 병 옹 |

한국수자원공사 댐·유역관리처 처장
sonby@kwater.or.kr

1. 서론

물 수요가 급증하면서 용수의 안정적 공급이 더욱 절실히 요구되고 있는 현대 사회는 양질의 수자원 확보와 효율적 이용이라는 당면 과제에 많은 노

력을 기울이고 있다. 특히 우리나라는 강우의 계절적 특성이 편중되어 있어 용수공급에 근본적인 어려움을 겪고 있다. 그리고 산업발달의 고도화 및 생활수준의 급격한 향상은 공업용수 및 생활용수를 폭발적으로 증가하게 하여 댐 건설과 같은 인위적인 수자원 확보가 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 이와 같은 인위적인 방법은 다량의 수자원확보와 함께 수질의 부영양화 현상과 같은 양면성을 갖고 있다. 더구나 최근 들어 범지구적인 기후온난화로 인해 강우일수는 감소하고 강우량은 증가하는 등의 집중강우가 많이 발생하고 있어 집중강우에 따른 탁수발생, 국지적인 부영양화 현상 및 이에 따른 조류의 이상증식 등에 대한 우려를 증폭시키고 있다.

대청댐의 경우 '97년 조류 예보제가 시행된 이래 거의 매년 조류주의보가 발령되고 있고, '01년 조류 대발생을 비롯하여 '00, '01, '03, '06, '09년의 조류 경보발령 등 조류발생에 의한 수질문제가 크게 대두되고 있는 상황이다. 그리고 소양강댐의 경우 '06년 7월 태풍 '에위니아' 상륙시 고령지 발을 중심으로 다량의 토사가 하천과 저수지로 유입되어 고탁수 방류가 장기화되는 문제가 발생한 바 있다. 당시 방류수 최고 탁도는 328NTU(Nephelometric Turbidity Unit)로서 '05년까지 30NTU 이상의 방류가 연중 1~2개월 정도였고 최고탁도도 79NTU 정도였음을 감안할 때 매우 심각한 상황이었음을 알 수 있다.

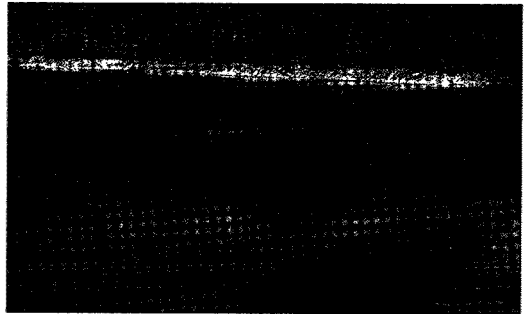


그림 1. 탁수 방류 및 조류 발생 사례

이러한 댐 저수지내 탁수 및 부영양화 현상의 직접적인 원인으로는 이상강우, 도시화·농업생산성 증대를 위한 토지이용 변경 및 훼손 등으로 인한 토양 교란 등을 들 수 있다. 댐내 조류 및 탁수의 발생은 하천과 호소의 수질악화 및 생태계 훼손, 하류지역의 상수도 정수 처리비용 증가, 시설불량 초래, 이취미 발생 등 자연경관 훼손, 그리고 어족자원 감소 등을 가져온다는 점에서 댐관리 업무의 중요한 영향요소라 할 수 있어 과학적 수리·수질모델링을 통한 예측·예방적 저수지 수질관리에 대한 필요성이 대두되고 있다.

지금까지 국내 댐 저수지 수질관리 의사결정지원을 위한 수리·수질모의는 수심방향만을 고려하는 1차원 혹은 수심과 종방향을 고려하는 2차원적으로 수행되었다. 하지만 우리나라 저수지는 수심이 깊고 폭이 넓으며 지천을 통해 오염원이 유입되는 경우가 많아 수심 및 횡방향으로 농도가 일정한 1차원 혹은 2차원 모델로는 수체의 거동을 정확하게 모의할 수 없다. 특히 저수지 수질개선 노력의 일환으로 선택취수시설 개선 사업, 조류차단막 등이 이루어지고 있어 보다 정확한 수체거동 해석의 필요성이 제기되고 있다. 또한 컴퓨터 기술의 발달과 수질, 환경, 생태 및 문화 등에 대한 국민들이 질적 욕구의 증대로 인해 3차원 수리·수질해석 모델의 실제 적용이 그 실효성을 갖게 되었다.

현재 한국수자원공사에서는 국내 최초로 3차원 수리·수질모델을 이용한 저수지 의사결정지원시스템을 구축 중에 있다. 본고에서는 과학적 예측·예

방대책을 수립하여 댐 저수지 수질관리에 대한 효율적 업무추진을 위해 한국수자원공사의 “물산업 핵심분야 연구개발비 지원사업”으로 충남대학교(서동일교수), 충북대학교(정세웅교수)에서 시행한 3차원 수리·수질예측 모델의 적용성 평가에 대해 소개하고자 한다.

2. 모델 적용성 평가체계 수립

적용성 평가의 정확하고 정밀한 수행을 위해서는 효율적인 체계 수립이 필수적이다. 그림 2는 모델의 적용성 평가를 위해 수립된 평가체계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 먼저 국내·외 기준에 수행되었던 연구결과 및 적용사례를 토대로 한국수자원공사에서 관리하고 있는 전 댐에 모두 적용이 가능한 2가지 모델을 선별하였다. 해당 모델로는 미국 EPA의 지원을 받으며 오염총량제의 지원도구 역할을 수행하고 있는 EFDC-WASP 모델과 서호주대학 물연구센터(CWR:Centre for Water Research)에서 개발되어 세계 각국의 저수지 수질관리 의사결정에 사용되고 있는 ELCOM-CAEDYM 모델이 선정되었다. 그리고 저수지 수질관리 의사결정 지원시스템 구축을 위한 테스트베드(Test bed) 실시를 위해 두 모델에 대한 적용성 평가를 실시하였다. 이를 위해 용담댐에 대한 3차원 수리·수질모델링을 실시하였고 대내·외 전문가의 자문을 통해 모델 평가기준을 정립하였다. 모델

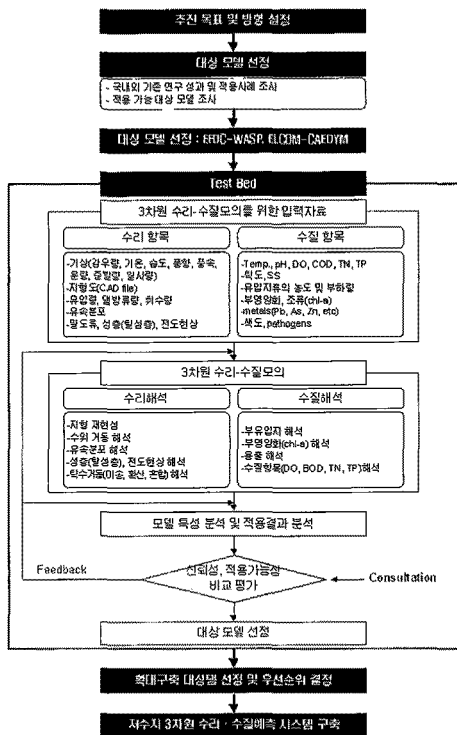


그림 2. 3차원 수리·수질예측 모델 적용성 평가 체계도의 적용성 평가기준은 각 모델의 수리 및 수질모의 측면에서의 장·단점, 수리 및 수질항목에 대한 예측능력 정도, 저수지 의사결정 지원시스템에 대한 적용성 등을 평가하기 위해 모델의 기능 및 성능 부분과 적용성 및 결과 부분으로 구분하여 총 50개 항목에 걸쳐 수립하였다. 모델의 특성분석 및 적용 결과는 신뢰성 및 적용가능성 등을 비교 평가하여 대상모델을 선정하게 된다.

3. 3차원 수리·수질예측 모델

앞서 언급한 바와 같이 적용성 평가에 실시된 저수지 3차원 수리·수질예측모델로는 미국의 EFDC-WASP과 호주의 ELCOM-CAEDYM 모델이다. 두 모델에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

3.1 EFDC-WASP

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델은 Virginia Institute of Marine Science의 Hamrick에 의해 90년대 초에 개발되었고 현재는 USEPA와 Tetra Tech, Inc.에 의해 개발·관리되고 있으며, full version 에서는 수질모델, 부유사 이동 및 독성물질 모델을 포함하고 있다.

EFDC 모델의 물리학과 수치계산적 측면은 Blumberg-Mellor 모델과 미국공병단의 Chesapeake Bay 모델과 유사하다. EFDC 모델은 가변 밀도 흐름에 대한 수직적으로 정수압 가정을 하며, 자유표면, 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식의 해를 구한다. 운동방정식에 동력학적으로 연결된 난류, 염도, 그리고 온도 이송방정식 또한 함께 풀어진다. 난류관련 변수 2개의 이송방정식은 Mellor-Yamada level 2.5 난류 closure 방법을 사용한다.

EFDC 모델은 유체의 이동, 염분 및 수온모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성오염물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다. 특히 EFDC 유동부분 모의에 있어서 댐 또는 압거 등의 치수 구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얇은 수체에 대한 젖음/마름(wet/dry) 현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서의 유동을 모의할 수 있다. 또한 유동 및 확산 등의 물리적인 이동 기작에 대한 정보는 비반응성 또는 반응성 수질변수들의 모의를 위해 사용될 수 있다. 식생이 많은 지역의 흐름을 해석하기 위해 EFDC 모델은 2개의 3차원 마찰 방정식을 사용한다. 또한 모델은 WASP이나 CE-QUAL-ICM과 같은 수질 모델에 사용될 수 있도록 흐름장 출력결과를 제공한다.

그리고 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program) 모델은 하천과 호수, 하천의 하구 및 해안 등에 적용가능한 수질 모델로 Di Toro (1983)등에 의해서 처음으로 개발되었으며

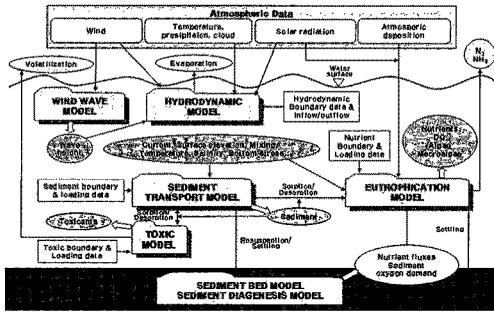


그림 3. EFDC 프로세스 및 적용 예

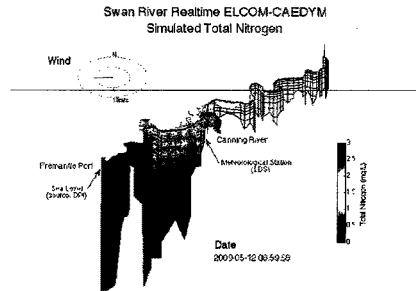
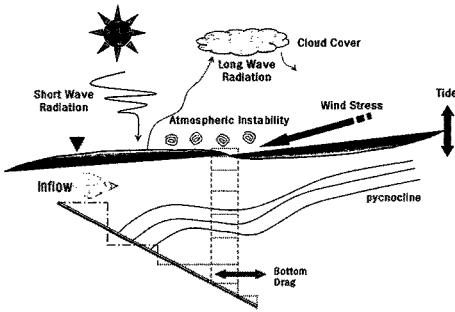
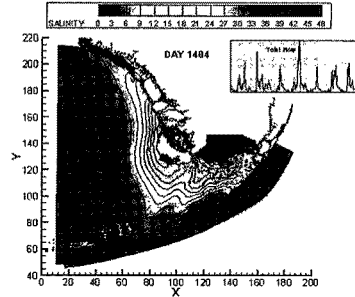


그림 4. ELCOM 프로세스 및 적용 예

현재는 현재 US EPA에 의해 공식적으로 관리되고 있다. 현재 WASP 모델은 EFDC 모델과 연계하여 미국의 오염총량제도의 지원도구로서 활용되고 있다. 그림 3은 EFDC 모델의 프로세스와 플로리다만의 적용결과를 보여주고 있다.

3.2 ELCOM-CAEDYM

ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 호수와 저수지를 위한 3차원 수리동역학 모델로서 시·공간적인 수온과 염분농도의 변화를 예측하는데 사용되고 있다. 이 모델은 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연동(Coupling)되어 호수와 저수지의 수질 및 생태계의 동적 모델링을 위한 3차원 수리 해석결과를 제공한다. ELCOM 모델의 지배방정식은 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송·확산방정식이 포함된다. Reynolds-

Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하며, 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용하지만, 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우에는 non-hydrostatic code 옵션을 사용하여 수직 방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다.

CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)은 ELCOM과 연동되어 다양한 물질요소의 순환과 최소 하나 이상의 조류그룹을 포함한 생태계 구성을 쉽게 할 수 있게 한다. 따라서 이 모델은 C, N, P, Si의 다양한 순환 과정, DO 순환, 입자크기별 6개까지의 무기 부유 물질(SS), 그리고 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등의 생태모의 항목을 포함한다. 조류의 일주기 광합성과 야간 호흡 등의 과정을 해석하기 위해 어떤 시간단위로도 보의할 수 있으며, 일반적으로 수리모델과 같은 계산간격()으로 모델계산이 수행된다. 그림 4는 ELCOM-CAEDYM 모델에서 고려하

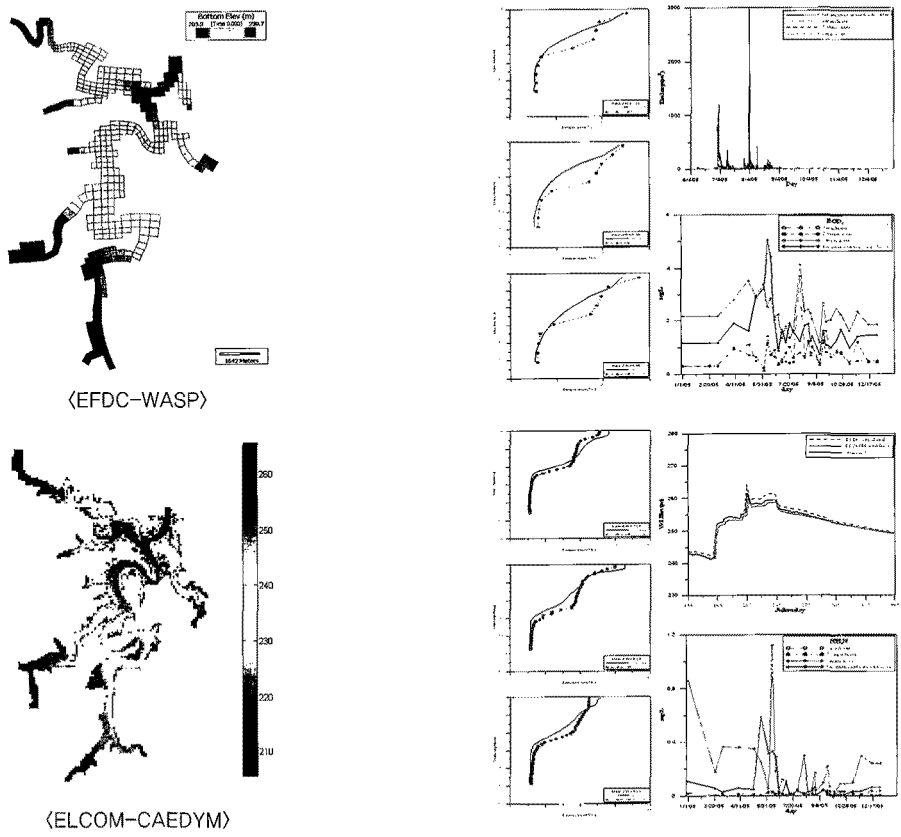


그림 5. 모델의 입력조건 및 수행 결과 비교

는 물리적 프로세스와 적용 예를 보여주고 있다.

ELCOM-CAEDYM은 호수와 저수지에 특화된 모델로서 이스라엘 Kinneret 호수, 호주의 Burragorang 호, Sugarloaf 저수지, 미국의 Coeur d'Alene 호, Erie 호 등 다수의 해외 구축 사례를 가지고 있으며 국내에는 대청호 적용사례가 있다(정세웅 등, 2008).

4. 3차원 수리·수질예측 모델의 적용성 평가

저수지 수질관리 의사결정 지원시스템 구축을 위한 테스트베드(Test bed) 신시를 위해 EFDC-WASP과 ELCOM-CAEDYM 두 모델에 대해 적용성 평가를 실시하였다. 모델의 기능적 측면은 모

델의 사용자 매뉴얼과 Science 매뉴얼, 관련서적 등을 참고하였고 모델의 해석결과적 측면은 용담댐에 대한 해석결과를 토대로 평가하였다. 모의기간은 2005년 6월부터 12월까지 수행되었으며 모의항목으로는 수위, 수온 등 수리학적 항목과 탁도 및 수질항목에 대해 수행하였다.

그림 5는 ELCOM-CAEDYM과 EFDC-WASP 모델의 적용성 평가에 사용된 지형격자망, 입력조건, 수행 결과를 보여주고 있다. 두 모델 모두 실제 저수지의 물수지를 재현하는데 있어서 양호한 결과를 보여주었다. 그리고 수온모의의 경우 제한된 유입수온자료를 사용하였음에도 불구하고 성층구조를 재현함에 있어 양호한 결과를 보여주었다. 발생한 작은 오차는 지형자료의 처리과정과 유입자료 산정시 불확실성으로 인해 발생되었을 것으로 판단

된다. 특히 EFDC-WASP 모델의 경우 WASP 모델과의 연계 모의시 셀 개수에 대한 제한성(3700개)을 가지고 있어 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다. 모델 적용성 평가결과는 효율적인 호소내 수질관리를 위해 필요한 정확한 물수지 재현성과 계절의 변화에 따라 발생하는 수온 성층현상 및 이에 따른 영향들을 이해하는데 있어 매우 유용한 도구가 될 것으로 판단된다.

모델의 적용성 평가는 저수지 수체의 주된 관심사인 수리동역학적 거동 및 수질항목 해석 등을 위주로 실시하였고, 모델의 기능과 해석결과를 구분하여 평가를 실시하였다. 두 모델 모두 국내 댐호에 강점을 나타내었고, 국외의 다수의 적용사례 및 연구결과를 통해 공신력을 갖추고 있었다. 보다 세부적으로 살펴보면 EFDC-WASP의 경우 국내에서의 적용 및 활용사례가 많고 Free-ware이기 때문에 가용자료 확보, 범용성 등에서 강점을 보였다. 또한 Curvilinear 좌표계를 이용한 사행하도의 격자망 구성이 가능하여 보다 세밀한 수리계산 능력을 보여주었고 GUI 프로세서의 제공을 통해 사용자 편리성을 보유하고 있었다. 그리고 ELCOM-CAEDYM의 경우 저수지에 특화된 모델로서 호내 수온 성층해석 및 선택적 탁수배제와 같은 결과해석 측면에서 강점이 나타났고 GIS 자료와의 호환성으로 인해 지형구축의 편리성을 보여주었다. 이는 모델의 개발 방향과 적용하는 목적에 따라 특화된 결과가 반영된 것으로 판단되며, 향후 해당 모델을 이용시 모델구축의 목적과 기술 변화 추세 등을 고려해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

본고에서는 한국수자원공사에서 댐 저수지 수질관리 선진화방안의 일환으로 시행중인 저수지 의사결정 지원시스템을 위한 3차원 수리·수질예측 모델의 적용성 평가에 대해 살펴보았다. 적용성 평가의 정확하고 정밀한 수행을 위해 대내·외 전문가의 검토를 걸쳐 모델의 기능 및 성능과 해석결과를 포함하는 총 50개 항목의 평가기준을 수립하였다. 그리고 이를 기준으로 두 모델의 기능 및 해석결과를 비교·검토하였다. 3차원 수리·수질모델을 바탕으로 하는 저수지 수질관리 의사결정지원시스템의 구축을 통해 과학적 방법을 기초로 하는 정확한 수질모의가 가능해 질 것이며 댐 상류 환경기초시설과 유역내 점·비점오염저감사업 등 SOC 투자사업의 기여효과를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 탁수, 조류 등 댐내 수질문제에 대한 사전 대응을 통해 양질의 원수를 확보할 수 있으며 수질예측 정보 서비스 제공을 통한 대국민 만족도를 제고하는 등 그 파급효과가 매우 클 것으로 판단된다.

하지만 이러한 저수지 의사결정 지원시스템의 안정적 운영을 위해서는 3차원 수리·수질예측 모델의 지속적 안정화 노력이 필수적이다. 이는 3차원 수리·수질모델의 입력 및 검·보정자료 확충을 위한 모니터링, 모델의 확대구축, 모델링 결과에 대한 타당성 검증, 모델 사후 점검 등에 대한 인적, 물적 자원을 필요로 하고 있어 이에 대한 지속적 관심이 요구된다. ☞

참고문헌

1. 국립환경과학원 금강불환경연구소 (2007). 대청호 조류상습 발생수역이 분류 수질에 미치는 영향 분석.
2. 서농일, 서미진, 구명서, 우재균, "EFDC-Hydro와 WASP 7.2 를 이용한 금강하류의 수리-수질 연계 모델링", 대한상하수도학회지, 제 23권, 1호, pp 15-22.

3. 염경택, 반양진, 김용운 (2008). “국내 댐 저수지 탁수관리 현황 및 개선방안”, 한국수자원학회지, Vol. 41, No. 7, pp. 35-42.
4. 정세웅, 이홍수, 류재일, 류인구, 오동근 (2008). “ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입탁수의 3차원 모델링”, 한국수자원학회논문집, Vol. 41, No. 12, pp. 1187-1198.
5. 한국수자원공사 (2009). 저수지 3차원 유체거동 및 수질모의 모형 적용성 평가.
6. Hodges, B. and Dallimore, C. (2007). "Estuary, Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM, v2.2 User Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.
7. Tetra Tech, Inc. (2007). The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation. http://ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDoclistRecord&doclistID=26