

실시간 저수지 탁수 감시 및 예측 기술개발 동향



고 의 환 ▶▶▶

한국수자원공사 수자원연구원 연구위원
ihko@kwater.or.kr



정 세 웅 ▶▶▶

충북대학교 환경공학과 부교수
schung@chungbuk.ac.kr

인식되고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위한 수량과 수질의 실시간 감시와 예측기술 (Real-Time Monitoring and Modeling Technology, RTMMT)은 유역단위의 물 공급시스템 운영에 있어서 자연 재해, 용수 부족, 수질 사고 등에 긴급대처하기 위한 핵심 요소기술이다(고의환 등, 2002, 2008). 그동안 수자원 분야에서 이러한 감시/예측 기술이 가장 성공적으로 적용된 홍수 예·경보를 위한 의사결정지원시스템(Decision Support System, DSS)에 비하여 수질측면의 이수 안전도 확보와 비상대응을 위한 RTMMT의 개발 노력은 비교적 적은 편이었으며 성공적인 적용 사례도 드물다.

이 글에서는 유역단위의 물 공급시스템의 통합운동을 지원하기 위한 실시간 저수지 수환경 관리기술의 국내·외 개발 현황의 비교, 진단을 통하여 향후 우리나라가 추구해 나갈 탁수관리 기술개발 방안을 제시하고자 한다. 지면 관계상 국외 기술은 비교적 활용도가 높은 호주의 사례 중심으로 제한하였으며, 국내 기술은 한국수자원공사가 구축 중인 '유역 통합 수자원 환경관리 시스템 개발' 연구사업의 요소기술인 '실시간 저수지 탁수 감시 및 예측 기술'을 중심으로 소개하였다.

1. 서론

연 평균 물 사용량(377억 m^3)의 대부분을 댐 저수지와 하천수 공급에 의존하고 있는 우리나라의 경우 '지표수 물 공급시스템'을 안전망을 갖추고 지속가능하게 운영하려면 홍수와 가뭄과 같은 수량측면의 관리와 함께 오염물질 누출사고, 탁수·냉수발생, 유해 독성 조류 발생, 용존산소 고갈과 같은 수질과 생태계에 대한 고려가 하천유역단위로 통합적으로 이루어져야 한다. 특히 해마다 홍수기에 발생하는 저수지 탁수 장기화 문제는 수생태계를 위협할 뿐만 아니라 수자원 이용의 효율성을 저하시키는 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 유역으로부터 유기화합물, 영양염류, 부유물질(SS), 협잡물 등 많은 양의 비점오염물질을 저수지로 수송하는 탁수는 영양염류의 과잉공급으로 인한 조류의 이상증식, 어류의 서식지파괴와 하류 하천의 심미적 경관 저하, 수처리 비용의 증가 등의 문제를 야기하고 있으며, 댐 하류 하천 구간의 장기간 탁수방류는 지역 사회를 포함한 이해당사자들에게 민감한 문제로

2. 실시간 저수지 탁수 관리 기술의 필요성

홍수는 유역으로부터 무기질 부유물(tripton)뿐만 아니라 높은 농도의 병원성 박테리아와 바이러스도 함께 유입시켜 상수원수의 안전을 위협하므로 유역으로부터 상수원으로 유입하는 각종 유해 오염물질로부터 사람의 건강과 생태계를 보호하고, 물 공급시스템에

조기 예·경보를 지원하는 '실시간 수질 감시·예측 및 제어 기술'이 필요하다.

저수지로 유입된 탁수의 거동은 유입량, 저수지 성층구조, 취수시설의 위치와 규모, 부유성 입자들의 이화학적 특성, 유입수와 주변 수체의 밀도차 등 다양한 인자들에 지배를 받는다. 따라서 탁수의 효과적인 제어를 위해서는 저수지의 기상, 수리, 수문, 유입수와 부유물질의 물리화학적 특성, 저수지 운영 자료 등 다양한 정보와 함께 저수지 수리해석, 부유입자의 이송, 확산, 침강과정을 다차원으로 해석할 수 있는 모델링 기술이 필요하다. 최근 급진전하고 있는 현장 계측 센서기술을 수리·수질 모델링에 접목시키게 되면 저수지내 탁수의 실시간 거동해석이 가능하게 되어, 탁수의 시공간 분포에 대한 실시간 정보 제공과 함께 다양한 조절 시나리오의 효과를 손쉽게 예측할 수 있는 도구의 개발도 가능하다.

우리나라의 경우 근래에 건설된 대부분의 신규 댐에는 탁수문제를 고려하여 선택취수 설비가 도입되었으며, 임하댐, 용담댐, 소양강댐 등 기존 댐에도 댐 하류 지역의 탁수 피해 저감을 위해 취수설비 개선 사업이 이루어지고 있다. 아울러 댐 저수지로 유입하는 탁수의 신속한 파악과 거동해석을 위해 2008년 4월 현

재 9개 다목적댐에 27개소의 실시간 수온, 탁도 계측 시설이 설치되었으며, 4개 다목적댐에 13개소의 신규 설치가 계획 중에 있다. 그러나 이러한 시설투자에도 불구하고 생산되는 실시간 자료의 품질관리와 정보화를 바탕으로 한 효과적인 활용은 아직 미흡한 실정이므로 서둘러서 실시간 계측자료의 품질관리와 모델링 기술을 도입하여 이를 수계별 실시간 수환경 감시 및 예측시스템으로 통합해 나갈 필요가 있다.

3. 선진국의 기술개발 현황

ARMS(Aquatic Real-time Management System)는 서호주대학교 물연구센터(Center for Water Research, CWR)에서 개발한 웹기반의 실시간 수환경 관리시스템이다. ARMS는 실시간 계측자료와 3차원 수리 및 수질모델을 통합한 시스템으로써 특별히 홍수, 오염물질 누출사고, 유해한 조류발생 등에 대응하기 위한 단기 의사결정지원시스템으로 설계되었다. 현재 호주의 시드니 유역환경청(Sydney Catchment Authority)이 이 기술을 저수지의 실시간 수질감시와 취수설비 운영을 위한 의사결정지원시

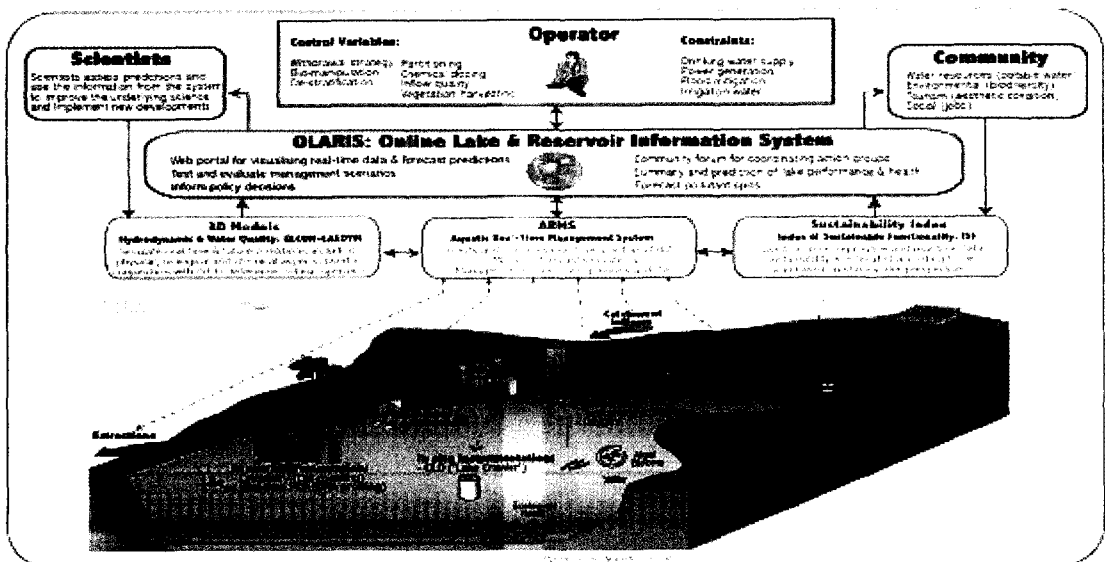


그림 1. ARMS 실시간 수환경 관리 개념도(Hipsey et al., 2007)

시스템으로 활용하고 있으며, 싱가포르의 수자원공사인 싱가포르 PUB (Public Utilities Board)에서도 유역모델과 결합하여 저수지 수질관리를 위한 통합 의사결정 지원 도구로 ARMS를 활용하고 있다.

ARMS는 실시간 저수지 기상, 수온, 수질 자동관측 장치인 Lake Diagnostic Systems (LDS)을 통해 계측한 자료를 수집, 저장하여 모델의 입력자료로 사용하며, OLARIS(Online Lake and Reservoir Information System)라는 웹기반 정보시스템을 통해 실시간으로 인터넷 사이트(<http://www.cwr.uwa.edu.au/webtools/index.php>)에 자료를 제공하고 있다(그림 1). 현재 LDS는 7개국 32개소에 설치되어 운영 중에 있다.

ARMS는 3차원 수리해석 모델인 ELCOM (Estuary Lake and Coastal Ocean Model)과 수질/생태순환 해석모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model)을 이용하여 저수지의 동적 수질예측을 수행한다. 3차원 수치모델은 사용자 입장에서 보면 매우 복잡할 뿐만 아니라 계산시간이 많이 소요되므로 ARMS는 실시간 자료를 사용하여 주기적(daily 또는 sub-daily)으로 시황모의(nowcasting)를 수행하여 초기조건을 준비하고, 수질사고, 부영양화 확산 등 유사시 즉시 예측모의(forecasting)를 수행한다. 모델은 준 실시간으로 운영되고 예상되는 기상상태, 호우, 홍수, 그리고 인위적인 저수지 운영조건 등 다양한 시나리오에 따른 저수지 수질변화를 모의할 수 있다.

ARMS의 주요 기능은 (1)계측자료의 갱신·품질관리·결측 자료 보완을 포함하는 데이터관리 기능, (2) 모델의 입력자료 생성·현재모의·예측모의를 수행하는 모델관리 기능, (3)실측 및 예측 자료의 웹공개, 위험알림, 고객센터를 제공하는 통신관리 기능이 포함된다. 현장의 실시간 기상, 수리, 수질 계측자료는 유·무선의 다양한 통신방식을 통해 서버 컴퓨터로 전송된다. 이러한 자료는 검증 및 보완 절차를 거쳐 DB에 저장되며, 실시간 모델링 및 위험 예보를 위해 사용된다.

4. 국내 기술개발 현황

우리나라에서는 한국수자원공사 수자원연구원이 충북대학교, (주)웹솔루스와 공동으로 지속가능한 수자원 확보를 위한 프론티어 2단계 사업기간(2004~2006) 동안 '실시간 저수지 탁수 감시 및 예측시스템'(Real-time Turbidity Monitoring and Management System, RTMMS)을 개발하였으며, 현재 수행 중인 3단계 연구(2007~20010)를 통하여 개발된 RTMMS를 한 단계 업그레이드한 범용 실시간 수환경 감시 및 예측 시스템(i-RTMMS) 구축을 추진 중에 있다.

4.1 RTMMS의 DSS 구성

RTMMS는 실시간 계측자료를 수집, 저장, 조회할 수 있는 데이터베이스(DB)관리시스템, 모델의 입력 자료를 자동생성하기 위한 전처리 모듈(pre-processor), 2차원 저수지 탁수예측 모델, 그리고 모델 수행결과 분석 및 다양한 시나리오에 따른 의사결정이 가능하도록 설계된 후처리시스템(post-processor)으로 구성되었다(그림 2). 현장계측자료의 데이터 로거(TCP RT300)는 자동수질측정 장치로부터 수온, 탁도, 전기전도도, 용존산소 등의 측정자료를 수집하여 일정시간마다 무선통신망을 이용하여 전송한다. 전송된 자료는 DB에 저장되며 HTML(Hypertext Markup Language)이나 WAP (Wireless Application Protocol) 등의 디지털 신호로 전환되어 실시간으로 사용자에게 전달된다. 데이터 로거(TCP RT300)는 CDMA 무선 인터넷 모뎀에 의해 실시간으로 현장의 계측자료를 저장할 수 있는 장치이다.

Pre-processor는 실시간 측정 자료로부터 모델의 경계조건과 초기조건을 생성하기 위해 개발되었다. 모델의 경계조건으로는 수온과 탁도 그리고 기온과 이슬점온도, 풍향, 풍속, 운도 등의 기상자료가 요구된다. 모델의 초기화를 위해 과거 관측 자료를 DB에서 추출하여 사용할 수 있으며, nowcasting에 실시간 자료를

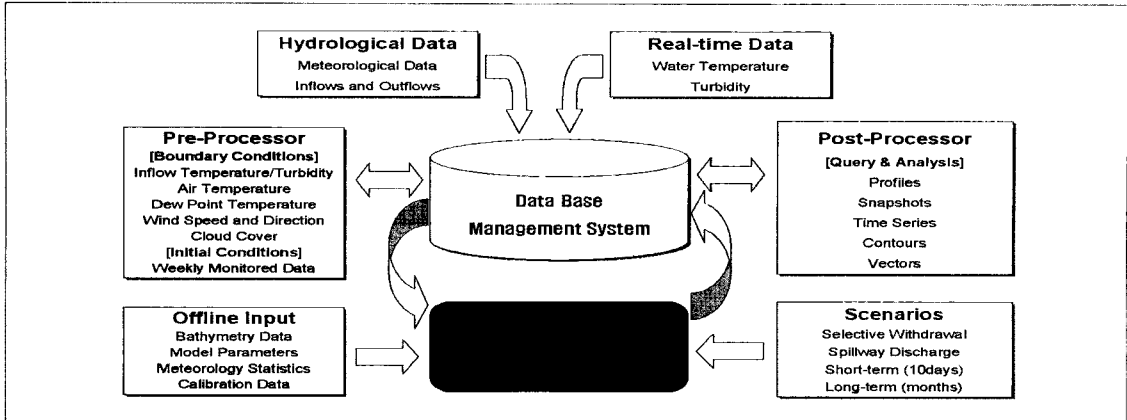


그림 2. 실시간 저수지 탁수 감시, 예측, 관리를 위한 RTMMS의 구성

사용한다. 또한 RTMMS를 장·단기 예측 목적으로 사용할 때는 pre-processor에서 제공하는 기능을 이용하여 특정 지역에 대한 통계적 모델로 경계조건을 생성할 수 있다. 현재 유입수 수온 예측은 대청댐 상류 급강의 실측자료로부터 개발한 다중회귀모델이 사용되고 있다. 탁도 예측 모듈은 강우기간 동안 유량과 총부유물질(TSS) 부하량이 밀접한 관계를 가지고 있다는 가정을 기초로 개발하였다. 탁도는 TSS와 매우 높은 선형관계가 있다는 가정 하에 모델 내에서 SS로 모

의된다. 저수지의 유입량과 방류량 자료는 사용자가 직접 입력하거나 수자원공사에서 개발한 홍수분석모형의 모의결과를 사용할 수 있도록 설계되었다.

RTMMS는 실시간 계측자료를 효율적이고 체계적으로 저장, 관리하기 위해 SQL DDL 문법을 이용한 탁수모니터링 데이터베이스를 포함하고 있다. 사용자 인터페이스(GUI)는 시스템의 모든 부 모듈들을 통합하여 순차적으로 실행하도록 설계되어 경계조건과 초기조건의 입력 후 모델의 입력자료와 모의기간, 모의

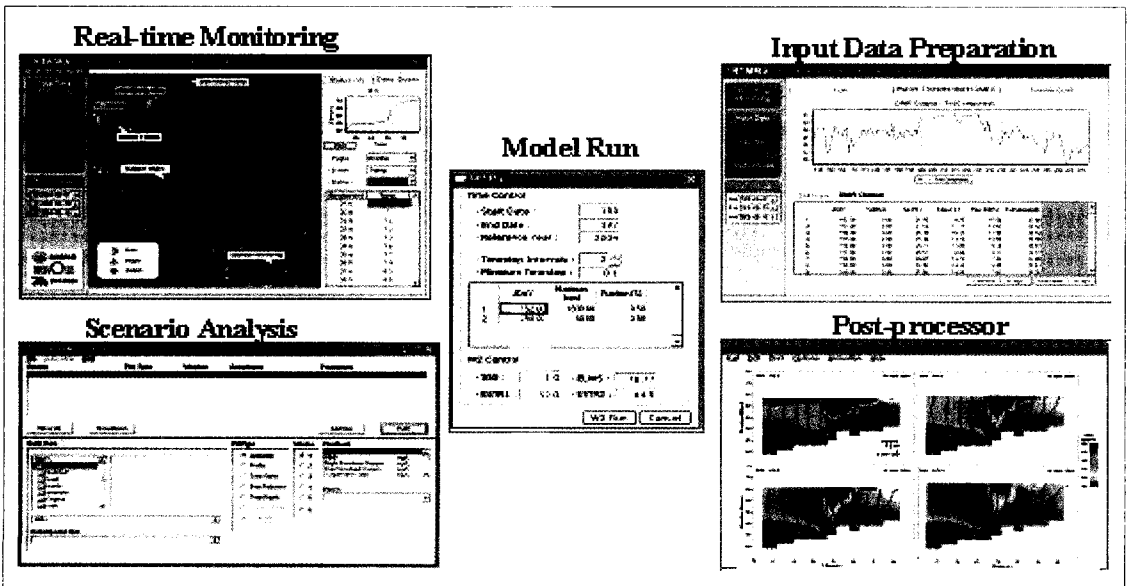


그림 3. 실시간 탁수 감시와 예측을 위한 RTMMS의 사용자 인터페이스 화면

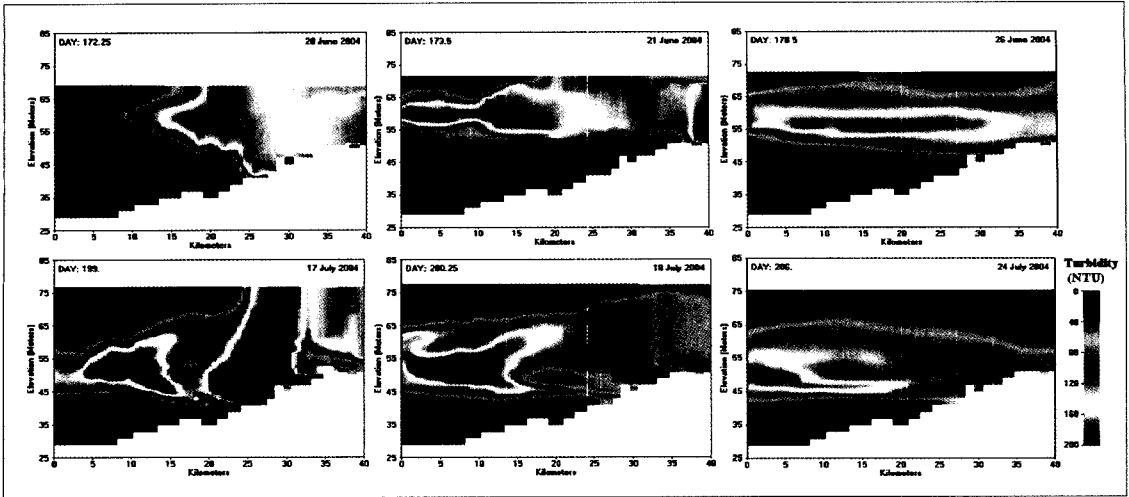


그림 4. 2004년 홍수기 동안 발생한 탁수 사상에 대한 RTMMS 적용 결과

계산 간격, TSS의 침강속도, 취수 수심 등의 매개변수를 입력함으로써 저수지 수리-탁도 모델을 실행할 수 있다.

4.2 탁수 예측 모델의 특성

RTMMS는 저수지 탁도 예측 모델로서 2차원 횡방향 평균 수리-수질모델인 CE-QUAL-W2(이후 W2)를 사용한다. 2차원 모델은 수심이 깊고 폭이 좁은 저수지에 적합하며, 국내·외 많은 저수지에 성공적으로 적용함으로써 충분히 검증된 모델이다. 지배방정식은 연속방정식과 흐름방향 및 수심방향 운동량 방정식, 자유수면 방정식, 밀도 상태방정식, 물질수지 방정식의 6개 식으로 구성되어 있으며 다양한 유한차분 수치 해석법을 사용하여 푼다. 현재 탁도 모델은 부유입자의 침강속도가 상수로 가정되어 있다.

4.3 RTMMS 적용 사례

RTMMS는 금강수계에 위치한 대청댐 저수지를 프로토타입 개발되었으며, 현재 대청호-하류하천(금강)-하구언을 연속해서 해석할 수 있는 시스템으로 확장되고 있다. RTMMS 저수지 모델의 예측 성능은

2004년 홍수사상을 대상으로 검증되었으며, 2006년 홍수기에는 실시간으로 적용함으로써 그 실용성을 입증한 바 있다(정세용 등, 2008). 이러한 RTMMS의 시스템 구성과 탁수예측 알고리즘은 한국수자원공사의 실무진들이 낙동강과 한강수계의 임하댐과 소양강댐 저수지의 탁수 거동 해석과 제어대책 수립 등에도 활용되고 있어 본 연구 성과의 성공적인 실용화에 따른 기술 파급효과가 매우 큼을 알 수 있다.

5. 향후 탁수관리 기술개발 방향

우리나라에서 저수지 탁수 문제 해결을 위한 학문적·기술적 인식이 대두된 것은 불과 10여년에 불과하여 우리와 비슷한 수문상황 때문에 탁수 문제가 심각한 일본과 비교할 때 저수지 탁수의 거동해석과 조절기술에 대한 연구는 10년 이상 뒤 늦은 수준에 있다. 표 1은 국내에서 자체 개발한 RTMMS와 호주에서 개발한 범용 수환경 감시 및 예측 시스템인 ARMS의 주요 특성을 비교한 것이다.

현 단계까지의 RTMMS는 실시간 수온과 탁도 감시 및 예측을 통한 탁수 조기경보와 댐 운영 의사결정 지원을 위한 단일목적 시스템이다. 국내에서 자체 개

표 1. 국내 기술(RTMMS)과 선진기술(AMRS)의 비교

구분	국내기술 (RTMMS)	선진기술 (AMRS)
목적	실시간 탁수 감시 및 예측	범용 종합 수환경 감시
개발기간	3년	10년
개발자	수공, 충북대학교, 웹솔루스	CWR, UWA
시스템 구성	실시간계측, 통신, DB, 모델, 전후처리 GUI	실시간계측, 통신, DB, 모델, 전후처리 GUI
사용모델	CE-QUAL-W2 (2D)	ELCOM(3D) + CAEDYM
계측장치	상용 YSI 센서	자체개발 LDS (센서는 상용)
계측항목	수온, 탁도	기상, 수온, 수질(용선)

발한 RTMMS를 이에 대응한 선진기술과 비교할 때 드러나는 기술적 취약성은 우선 모델에 필요한 기초 자료 (기상 및 유입수 수질) 수집을 위한 모니터링 장치에 있다. 홍수예경보시스템이 실시간 강우와 수위자료가 필요하듯이 실시간 탁수 예측시스템의 실용화를 위해서는 실시간 계측 수온과 탁도 자료 및 신뢰성 있는 기상자료(풍향, 풍속, 기온, 태양복사에너지 등)의 확보가 필요조건이다. 둘째, 자동모니터링과 연계한 실시간 모델링 시스템이 미흡한 점이다. 다차원 수리 및 수질 모델링 기술과 현장 계측 센서기술은 급격히 발전하고 있으나, 이들의 통합 적용이 미흡하고 실제 저수지 운영 및 수질관리에 제대로 활용되지 못하고 있다. 셋째, 저수지의 육수 물리학적·생태학적 순환관계와 영향인자의 인과관계에 대한 종합적 연구 미흡을 들 수 있다. 저수지 수질과 생태계는 물의 순환과 이에 따른 오염물질의 혼합을 포함한 물리적, 생물학적, 화학적 반응의 총체적 결과이다. 정확한 수리해석은 탁수의 거동과 녹조발생을 해석하는 데 선행되어야 할 부분이며, 저수지 수질예측과 최적 조절대책 수립을 위해서는 수리현상과 수질/생태계의 상호관계에 대한 정확한 진단이 요구된다.

이러한 기술적 취약성을 극복해 나갈 수 있도록 현 단계의 RTMMS를 현장 자동수질계측 센서기술과 실시간 통신 및 모델링 기술을 보다 적극적으로 활용하여 물 공급 단계에서 발생할 수 있는 다양한 수질문제와 관련한 조기경보(Early Warning), 시설물 운영의 사결정 지원(Operational Guide), 환경영향평가(Impact Assessment) 등의 기능을 포함하는 통합 실

시간 수질 감시 및 예측시스템(I-RTMMS)으로 확장해 나갈 필요가 있다.

향후 탁수관리 기술은 첫째, 홍수시 저수지로 유입하는 탁수와 오염물질의 단기예측, 유해 독성조류 발생, 수질사고 등이 상수원 수질과 생태계에 미치는 영향 등을 실시간으로 감시하고 조기 경보하는 기능 포함. 둘째, 취수시설, 댐 방류시설, 폭기시설, 정수시설 등 용수공급과 수질개선을 위한 각종 수리시설물의 운영에 필요한 수질정보를 실시간으로 제공하여 시설물 운영의 의사결정을 지원하는 기능 추가 셋째, 하천시스템 내에 새로운 수리시설의 건설, 기존 수리시설물의 개조/복원과 하천유지유량 또는 환경개선용수 공급이 하천 및 저수지 수질에 미치는 영향 평가 기능 추가를 고려하여 발전시켜 나갈 필요가 있다.

6. 맺음말

하천, 저수지, 상수관망으로 이어지는 복잡한 유역 물공급 시스템은 수질오염사고, 유해 조류발생, 홍수시 탁수와 병원균 범람, 어류 폐사 등 다양한 위험요소에 노출되어 있으므로 예기치 않은 수질사고와 위협에 대비한 사회적인 안전장치도 확보되어야 한다. 즉, 지속가능한 수자원 확보와 안전한 용수공급을 위해서는 수량뿐만 아니라 수질과 생태환경을 모두 고려하는 댐 저수지 시스템과 하천 망이 연계된 유역단위의 통합 물 공급시스템 운영이 필요한 것이다.

최근 날로 발전하는 현장계측 센서기술과 정보통신

기술, 그리고 수치모델링 기술은 기존의 직접 채수에 의한 수질관리의 한계를 뛰어넘어 유역의 수질상태 정보를 보다 동적이고 가시적으로 제공할 수 있게 한다. 현재 업그레이드 중인 범용 실시간 수환경 감시 및 예측 시스템(i-RTMMS)은 유역의 현재 수질상태 뿐만 아니라 가상 모의실험(Virtual simulations)을 통해 다양한 외부조건 변화에 따른 하천과 저수지의 수질변화를 가시적이고 입체적으로 보여줌으로써 물 공급시스템 운영자의 합리적인 의사결정을 도울 수 있다.

이제는 환경부와 수자원공사 등에서 구축한 수질자동관측시스템의 기능과 활용도를 한 단계 높일 수 있도록 실시간 모델링기술과 접목된 의사결정지원시스템을 하천유역 단위로 구축해 가는 일도 시급히 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호:1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고익환, 정세웅 (2002). “통합수자원관리 기반기술 구축방안(II)-우리나라의 하천유역 통합물관리 기반 기술 구축방안.” 한국수자원학회지, 35(6), pp. 71-78.
- 고익환, 김남일 (2008). “유역통합 물관리 Toolkit 개발전망과 활용방안.” 한국수자원학회지, 41(1), pp. 10-17.
- 정세웅, 정용락, 고익환, 김남일 (2008). “실시간 저수지 탁수 감시 및 관리를 위한 의사결정지원시스템 개발 및 검증: 대청댐 사례.” 한국수자원학회논문집, 41(3), pp. 293-303. 📄