

실시간 저수지 탁수 감시 및 관리를 위한 의사결정지원시스템 개발 및 검증: 대청댐 사례

Development and Validation of A Decision Support System for the Real-time Monitoring and Management of Reservoir Turbidity Flows: A Case Study for Daecheong Dam

정 세 웅* / 정 용 략** / 고 익 환*** / 김 남 일****

Chung, Sewoong / Jung, Yongrak / Ko, Ick Hwan / Kim, Namil

Abstract

Reservoir turbidity flows degrade the efficiency and sustainability of water supply system in many countries located in monsoon climate region. A decision support system called RTMMS aimed to assist reservoir operations was developed for the real time monitoring, modeling, and management of turbidity flows induced by flood runoffs in Daecheong reservoir. RTMMS consists of a real time data acquisition module that collects and stores field monitoring data, a data assimilation module that assists pre-processing of model input data, a two dimensional numerical model for the simulation of reservoir hydrodynamics and turbidity, and a post-processor that aids the analysis of simulation results and alternative management scenarios. RTMMS was calibrated using field data obtained during the flood season of 2004, and applied to real-time simulations of flood events occurred on July of 2006 for assessing its predictive capability. The system showed fairly satisfactory performance in reproducing the density flow regimes and fate of turbidity plumes in the reservoir with efficient computation time that is a vital requirement for a real time application. The configurations of RTMMS suggested in this study can be adopted in many reservoirs that have similar turbidity issues for better management of water supply utilities and downstream aquatic ecosystem.

keywords : Turbidity flow control, Decision support system, Reservoir operation, Real time modeling

요 지

저수지의 탁수 장기화는 몬순기후대의 많은 나라에서 물 공급시스템의 효율성과 지속가능성을 저하시킨다. 본 연구에서는 대청댐 저수지를 대상으로 홍수시 유입하는 탁수의 실시간 감시와 예측을 통해 탁수의 최적조절 대안을 효과적으로 분석할 수 있는 의사결정지원시스템인 RTMMS를 개발하였다. RTMMS는 실시간 계측자료를 수집하여

* 충북대학교 공과대학 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Env. Engrg., Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
(e-mail: chung@chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 공과대학 환경공학과 석사과정

Graduate student, Dept. of Env. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

*** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경시스템연구소 연구소장

Director, Hydrosystem Engineering Center, Korea Institute of Water & Environment, Jeonmin-dong, Yuseong, Daejeon 305-790, Korea

**** 웹솔루스(주) 대표이사

CEO, Websolus, 5th 2-cha Kolon Billant 222-8 Guro-dong, Guro-gu, Seoul Korea

저장, 조회할 수 있는 데이터베이스관리시스템, 모델의 입력 자료를 자동 생성하기 위한 예측모듈, 2차원 저수지 탁수예측 모델, 그리고 모델의 수행결과 분석 및 다양한 시나리오에 따른 의사결정이 가능하도록 설계된 후처리시스템으로 구성되어 있다. RTMMS의 예측 신뢰도를 검증하기 위해 2004년 홍수기 동안 실시간 계측을 통해 수집된 자료를 이용하여 모델을 보정하고, 2006년 홍수사상을 대상으로 실시간 검증 모델링을 실시하였다. 저수지의 수온과 탁도의 시공간적인 변화를 모의하고 실측값과의 오차를 분석하였다. RTMMS는 저수지내 탁수의 밀도류 유동특성과 소멸과정을 비교적 잘 모의하였으며, 특히 시스템의 실시간 적용에 필수적인 조건인 계산효율이 매우 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 RTMMS의 구성은 비슷한 탁수문제를 가지고 있는 많은 저수지에서도 물 공급시설의 최적관리와 하류 수생태계의 향상을 위해 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 탁수조절, 의사결정지원시스템, 저수지 운영, 실시간 모델링

1. 서론

일반적으로 여름철 집중강우로 인해 발생하는 저수지의 탁수는 물 공급시스템의 지속가능한 이용과 효율성을 감소시킨다(Chikita and Okumura, 1990; Umeda *et al.*, 2006). 강우기간 동안 탁수는 유역으로부터 유기화합물, 영양염류, 부유물질(SS), 쓰레기 등 많은 양의 비점오염물질을 저수지로 이송시킨다(허우명 등, 1998). 저수지내 탁수의 유입은 영양염류의 과잉공급으로 인한 조류의 증식, 용존산소(DO)의 감소, 어류의 서식지 파괴와 하류 하천의 심미적 경관 저하, 수처리 비용의 증가 등의 문제를 발생시킨다(정세웅 2004; Gordon and Morris, 1977; Newcombe and Jensen, 1996; Henley *et al.*, 2000). 또한 댐 하류로의 장기간 탁수방류는 저수지 운영자와 지역 사회 모두의 중요한 관심사이다.

저수지로 유입된 탁수의 거동은 저수지 성층구조, 취수시설의 위치와 취수량 규모, 부유성 입자들의 화학적 특성, 유입수와 주변 수체의 밀도차 등 다양한 인자들에 지배를 받는다(Fischer *et al.*, 1979; Kennedy *et al.*, 1982; Alavian *et al.*, 1992; Martin and McCutcheon, 1999). 최근 실시간 현장 계측 기술과 모델링 기술의 진보는 호우 시 발생하는 저수지내 탁수의 시공간적인 거동에 대해 실시간 정보를 제공함으로써 보다 효과적인 저수지 운영을 위한 의사결정지원시스템(DSS)의 구성을 가능하게 하였다(de Kok and Wind, 2003; Glasgow *et al.*, 2004). 또한, DSS는 하류하천과 저수지내 취수원의 탁도에 대한 정보를 예측 및 조기 경보함으로써 후속된 수처리 공정을 최적으로 유지하여 물공급시스템의 안정성과 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 저수지 운영자들은 탁수의 도달시간, 지속일수, 그리고 선택취수와 같은 조절 대안에 따른 효과분석 등 탁수피해 최소화를 위한 저수지 최적운영을 위해서 DSS를 사용할 수도 있다.

본 연구의 목적은 대청댐을 대상으로 호우 시 유입하는 탁수의 최적관리를 위해 실시간 감시 장치와 탁수 거동 예측 모델링, 그리고 탁수 조절 시나리오 분석을 통합 수행할 수 있는 저수지운영 의사결정지원시스템인 RTMMS (Real-time Monitoring and Modeling System)를 개발하고, 대청호를 대상으로 2004년 홍수기간 동안 계측한 실시간 자료를 이용하여 모델을 보정하고 2006년 7월에 발생한 홍수사상을 대상으로 실시간 적용함으로써 시스템의 유효성을 확인하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 DSS의 구성

RTMMS는 실시간 계측자료를 수집하여 저장, 조회할 수 있는 데이터베이스관리시스템, 모델의 입력자료를 자동생성하기 위한 예측모듈(pre-processor), 2차원 저수지 탁수예측 모델, 그리고 모델의 수행결과 분석 및 다양한 시나리오에 따른 의사결정이 가능하도록 설계된 후처리시스템(post-processor)으로 구성되어 있다(Fig. 1). 현장계측자료의 데이터 로거(TCP RT300)는 자동수질측정 장치(YSI6000)로부터 수온(°C), 탁도(NTU), 전기전도도($\mu\text{S}/\text{cm}$), 용존산소(mg/L) 등의 측정자료를 수집하여 일정시간마다 무선통신망을 이용하여 전송한다(Fig. 2). 전송된 자료는 데이터베이스(DB)에 저장되며 HTML(Hypertext Markup Language)이나 WAP(Wireless Application Protocol) 등의 디지털 신호로 전환되어 실시간으로 사용자에게 전달된다. TCP RT300 (DATAPCS, Korea)에 저장된 현장의 계측자료는 CDMA (Code Division Multiple Access) 무선 인터넷 모뎀에 의해 실시간으로 서버컴퓨터로 전송된다.

입력자료 예측모듈(pre-processor)은 실시간 측정 자료로부터 모델의 경계조건과 초기조건을 생성하기 위해

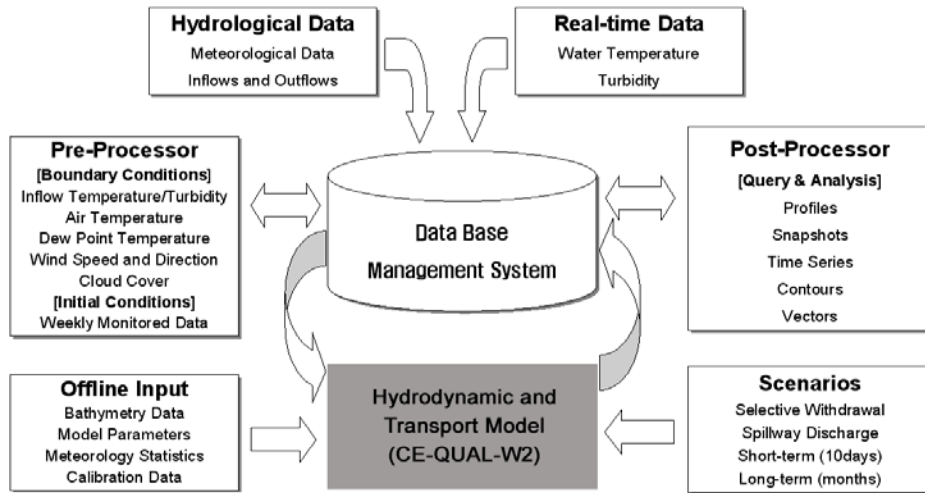


Fig. 1. Configurations of RTMMS Designed for Monitoring, Modeling, and Management of Reservoir Turbidity Flow

개발되었다. 모델의 경계조건으로는 유입수의 수온과 탁도 그리고 기온과 이슬점온도, 풍향, 풍속, 운도 등의 기상자료가 요구된다. 모델의 초기화를 위해 과거 관측 자료를 DB에서 추출하여 사용할 수 있으며, 실황예보(nowcasting)를 위해서는 실시간 자료를 사용한다. 또한, RTMMS를 장·단기 예측 목적으로 사용할 때는 입력자료 예측모듈(pre-processor)에서 제공하는 기능을 이용하여 특정 지역에 대한 통계적 모델로 경계조건을 생성할 수 있다. 현재 유입수의 수온을 예측하기 위해 기온, 이슬점 온도, 하천유량을 이용한 다중회귀모델이 사용되고 있다(Neumann *et al.*, 2003). 탁도 예측 모델은 강우기간 동안 유량과 총부유물질(TSS) 부하량이 밀접한 관계를 가지고 있다는 가정을 기초로 개발하였다. 탁도는 TSS와 매우 높은 선형관계가 있다는 가정하에 모델내에서 TSS로 모의된다. 그러나 탁도는 TSS와 물리적 의미가 다르므로 탁수에 포함된 부유입자의 크기분포와 광학적 특성, 그리고 입자상 유기물 함량을 고려할 수 있는 보다 개선된 탁도 예측 모델을 현재 개발 중에 있다. 저수지의 유입량과 방류량 자료는 한국

수자원공사(K-Water)에서 개발한 홍수분석모형(저류함수모형) 결과를 업로드 해서 사용할 수 있으며, 사용자가 직접 입력할 수도 있다.

RTMMS의 사용자 인터페이스(Graphical User Interface ; GUI)는 시스템의 모든 부 모듈들을 통합하여 순차적으로 실행하도록 설계되었다(Fig. 3). 사용자는 경계조건과 초기조건 입력 후 모델의 입력자료와 모의기간, 모의 계산 간격, TSS의 침강속도, 취수 수심 등의 매개변수를 변화함으로써 저수지 수리-탁도 모델을 실행할 수 있다. 모델의 다른 매개변수는 대칭호를 대상으로 보정되었으며, 전문가 또는 시스템 관리자만 수정할 수 있도록 하였다. 다른 저수지에 RTMMS를 도입하고자 할 경우, 해당 저수지의 수리 및 탁도 모델 구축이 필요하며 실시간 계측 장치 개수와 자료 종류에 따라 시스템의 DB 구조 변경이 필요하다. 후처리시스템(post-processor)은 모델의 결과를 시계열 및 수심별 변화, 벡터, snapshot, 애니메이션 등의 다양한 형태로 나타낼 수 있어서 모델링 과정과 시나리오 분석의 효율을 극대화 시킬 수 있다.



Fig. 2. Configurations of Real Time Data Acquisition and Wireless Communication System of RTMMS

2.2 모델의 특성

RTMMS의 탁도 예측 모델로써 2차원 횡방향평균 수리-수질모델인 CE-QUAL-W2 (이후 W2 ; Cole and Wells, 2004)를 사용하였다. 2차원 모델은 수심이 깊고 폭이 좁은 저수지에 적합하며, 국내·외 많은 저수지에 적용하여 적합함을 증명하였다(김윤희 등, 2001; 정세웅 등, 2005; Bath and Timm, 1994; Martin, 1988; Bartholow *et al.*, 2001). W2 모형의 지배방정식은 연속 방정식과 흐름방향 및 수심방향 운동량 방정식, 자유수면 방정식, 밀도 상태방정식, 물질수지 방정식의 6개식으로 구성되어 있으며 다양한 유한차분 수치해석법을 사용하여 푼다(Chung and Gu, 1998). 현재 탁도 모델은 부유입자의 침강속도(v_s)가 상수로 가정되어 있다(Eq. 1). 수심방향 난류혼합 효과는 혼합길이이론(Mixing length theory)을 이용한 와확산 계수(Eddy viscosity, E_z)로 고려되며, 속도경사와 수심, 수체의 점성 또는 저수지 성층의 구조, 바람에 의한 전단응력에 의해 계산된다. 안정화된 성층구조는 물과 물질의 수직 혼합을 방해하므로, 모델은 이러한 영향을 유속과 밀도의 구배로 정의된 local Richardson number를 사용하여 E_z 를 수정한다.

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - v_s \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, B는 저수지 폭[m], U, W은 횡방향 평균 종방향과 수심방향 유속 [m/s], Φ 은 ISS의 농도 [g/m³], E_x , E_z 은 종방향과 수심방향 와확산 계수 [m²/s], v_s 는 침강속도상수 [m/s]를 나타낸다.

2.3 모델의 매개변수

저수지 수리와 수온에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 대기-수면 열교환, 바람에 의한 난류 혼합, 바닥 조도에 의한 경계면 난류혼합, 유입수와 유출수 등이다. 모델에서 이러한 물리적 현상을 해석하는데 관계된 매개변수는 유속방향 와점성계수(AX)와 와확산계수(DX), 바닥과 수체간의 마찰계수(CHEZY), 저수지 주변 지형에 의한 바람의 차단 영향을 고려해 주기 위한 계수(WSC), 태양복사 에너지 중 수심 0.6 m에서 흡수되는 비율(BETA), 순수한 물에 의한 복사에너지 감쇠 계수(EXH20), 그리고 저수지 바닥의 열교환 계수(CBHE) 등이 있다. 그리고 탁도 예측에 필요한 매개변수는 부유입자의 침강속도 상수(SSS)이다. 이들 매개변수에 대한 민감도 분석과 보정과정에 대한 상세한 내용은 선행연구(정세웅 등, 2005; Chung *et al.*, 2006)에 제시되었으며, 본 연구에 사용된 매개변수 값은 Table 1과 같다.

2.4 연구 대상지역

RTMMS의 적용 대상지역인 대청호는 우리나라에서 3번째로 큰 인공저수지로써 금강 본류에 위치하고 있다.

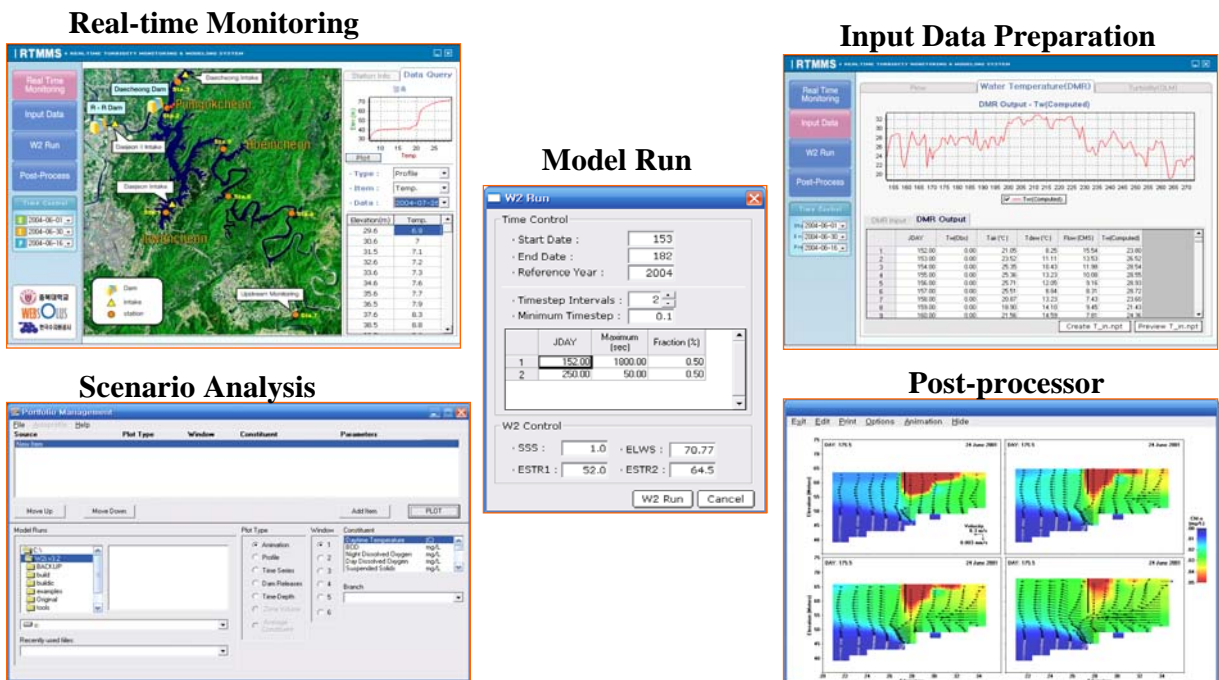


Fig. 3. GUI of RTMMS that Aids Real Time Monitoring, Modelling, and Management of Reservoir Turbidity Flow

Table 1. Model Parameters used for Hydrodynamic, Water Temperature, and Turbidity Calibrations.

Parameters (Unit)	Variable	Default	Calibrated
Horizontal eddy viscosity ($m^2 s^{-1}$)	AX	1.0	1.0
Horizontal eddy diffusivity ($m^2 s^{-1}$)	DX	1.0	1.0
Chezy bottom friction factor ($m^{0.5} s^{-1}$)	CHEZY	70	70
Wind sheltering	WSC	0.85	0.5~1.0
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	0.45	0.60
Light extinction for pure water (m^{-1})	EXH20	0.25	0.30
Coefficient of bottom heat exchange ($W m^{-2} s^{-1}$)	CBHE	0.3	0.65
Suspended solids settling rate ($m day^{-1}$)	SSS	1.0	0.2

대청호는 금강유역의 최대 상수원으로서 약 200만 명의 주민들에게 매일 약 100만 m^3 의 생·공용수를 공급해 주고 있다. 또한 홍수조절, 관개 및 수력발전 등의 목적으로 사용되고 있다. 대청호는 수심이 깊고(최대수심 50 m) 겨울철 연 1회 완전혼합 되며, 그 외 기간에는 연중 변온층이 나타나는 온단회성(warm monomictic) 저수지에 해당한다. 용수공급을 위한 취수탑은 저수지 내에 2개가 있고 대청호 방류구의 하류 조정지점에 2개가 있다(Fig. 4).

한국수자원공사에서는 여름철 조류 감시와 강우 시 유입하는 탁수의 거동을 관측하기 위해 2001년부터 정기적으로 저수지내 측정을 실시하고 있다(Fig. 4). 유입 수 탁도와 수온의 측정을 위한 실시간 감시 장치는 2004년 6월부터 댐 측으로부터 89 km 상류 지점에 설치하였다. 다항목자동수질계측장치(YSI 6000 series)를 이용하여 하천에서는 연속적인 모니터링을 하였으며, 저수지에서는 수심별 수온, 전기전도도, DO, pH, 탁도를 월간 또는 주간 측정하고 있다.

모형의 격자구성은 실측된 저수지 지형자료를 바탕으로 5개의 branch와 64개의 segment, 69개의 layer로 구성하였다(Fig. 4). 지형자료의 정확도를 검증하기 위해 저수지 수위-용량 곡선과 수위의 관측값과 모의값을 비교하였다. 모형의 경계조건인 저수지 유입량과 방류량, 기상자료는 수자원종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 추출하여 RTMMS의 DB에 저장한 자료를 사용하였다.

Fig. 5는 2004년부터 2006년까지 대청호의 강우와 유입·유출량, 저수위를 나타낸 것이다. 6월부터 9월까지 여름기간동안 강우가 집중되는 전형적인 양상이 나타났고, 이와 함께 저수지 수위는 큰 변동을 보이고 있다. 2004년에는 일 평균 유입량이 1,000 m^3/s 를 초과하는 중요 강우사상이 6월, 7월, 8월에 걸쳐 3번 발생하였으며, 각각의 최대 일평균 유입유량은 2,431, 2,182 그리고 1,500 m^3/s 이었다. 이로 인해 2004년 저수지의 수위는 최소 EL. 64.0 m에서 최대 EL. 76.2 m 까지 상승하였다.

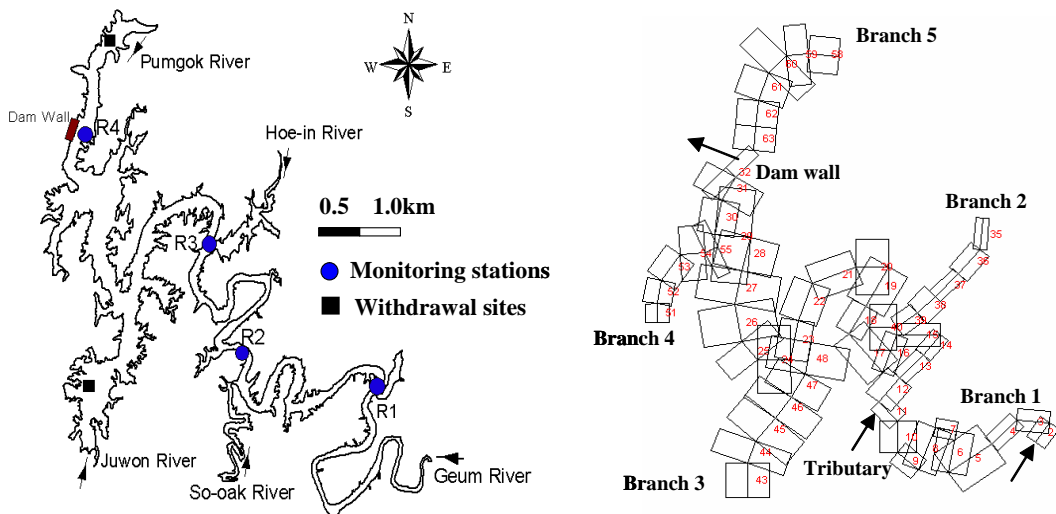


Fig. 4. Layout of Daechong Reservoir, Locations of Monitoring Stations, and Segmentation for Simulations

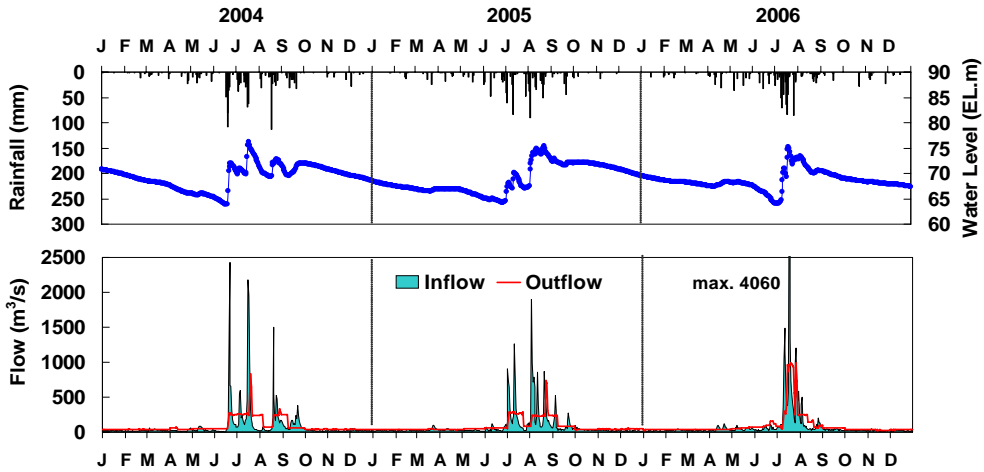


Fig. 5. Hydrological Conditions of Daechong Reservoir during the System Applications

3. 연구결과

3.1 수온예측

2004년 첫 번째 (6월)와 두 번째 (7월) 강우사상에 의한 수온 변화를 길이방향과 수심방향으로 Fig. 6에 나타내었다. 강우초기 홍수의 유입은 관입류(plug flow)를 형성하며 저수지의 하천구간(Riverine zone)에서 주변수를 밀어내나, 그 후 유입수와 주변수의 수온차(5~10°C)에 의한 음의 부력이 생성되면서 탁수층은 침강하여 중층밀도류를 형성하였다. 홍수전에 EL. 55 m에 형성되었던 변온층은 탁수 유입 후 EL. 45 m까지 하강하였으며, 중층은 홍수 유입으로 인해 20~22°C의 물이 25 m 두께로 채워졌다. 탁수 유입이후 저수지의 수온 성층 구조는 2개의 변온층이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

RTMMS 수리모델의 정확도를 검증하기 위해 관측

값과 예측값에 대한 절대평균오차(Absolute Mean Error; AME)와 평균제곱오차의 평방근(Root Mean Square Error; RMSE)를 사용하여 Fig. 7에 나타내었다. 시스템은 홍수의 유입 후 저수지 성층 변화에 대한 오차가 매우 적어 수온예측에 적합함을 보였다. 수온의 AME와 RMSE는 각각 0.220~1.639°C와 0.332~2.304°C의 범위를 나타내고 있다.

$$AME = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \right),$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

여기서 N은 자료수, O_i 는 관측값, P_i 는 예측값을 나타낸다.

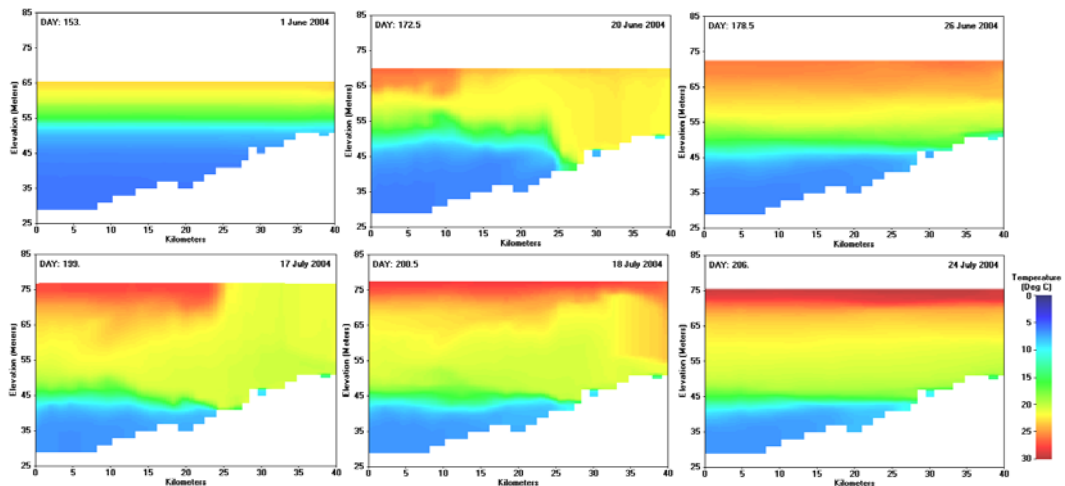


Fig. 6. Simulated Temporal Variations of Water Temperature Structure during First (upper) and Second (lower) Flood Events in 2004

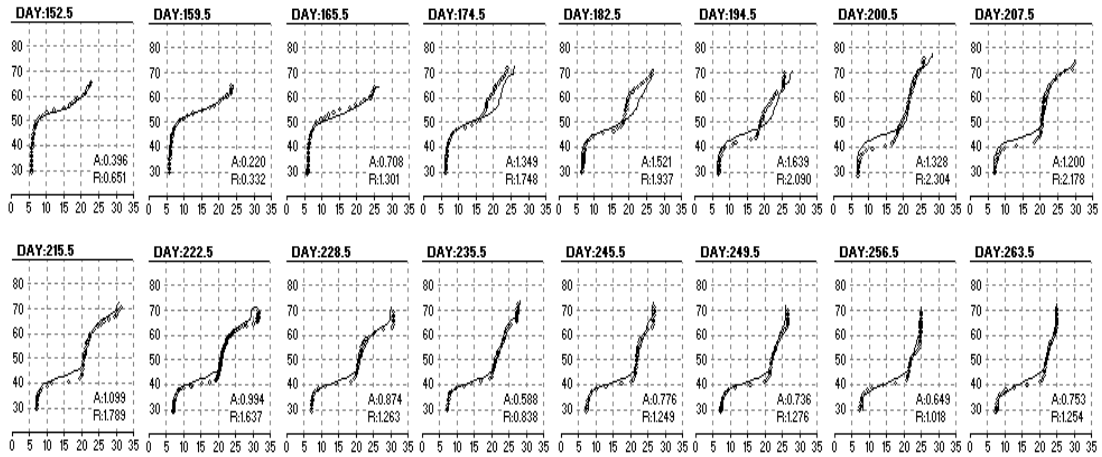


Fig. 7. Comparison of Measured and Simulated Water Temperature Profiles at R-4 in Daechong Reservoir for 2004

3.2 탁도예측

2004년 6월과 7월 중순에 있었던 서로 다른 홍수사상 이후 저수지내 발생한 수심방향과 길이방향(snapshot)의 탁도변화 모의결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두 홍수사상 동안 상류에서 유입한 높은 탁도를 가진 부력 밀도류의 침강점은 서로 다르게 나타났으며, 밀도류의 침강점은 6월 홍수보다는 7월 홍수사상 동안 더 상류에서 일어났다. 그 이유는 6월 홍수에 의한 수위상승과 7월에 저수지 표층수의 수온이 올라가면서 유입수와 주변수의 밀도차가 더욱 커진 것이 원인으로 판단된다. 첫 번째 홍수의 유입(6월 18일) 후 저수지내에서 발생한 탁수가 댐 축에 도달하는데는 3일이 소요되었다. 6월 26일 이후 탁수층은 안정적인 중층밀도류를 형성하였으며, 탁수층의 중심은 발전방류구 인근 EL. 55 m에 위치하였다. 그 당시 탁수는 최대발전용량인 250 m³/s로 댐 하류로 방류되었다.

반면, 두 번째 홍수사상에서는 강우가 일시 소강상태를 보이다 다시 활성화 되면서 이중 침투유량이 발생되어 부력 밀도류의 흐름은 더욱 복잡한 양상을 보였다. 모델은 강우와 유입량의 시간적 변화로 인해 탁수층의 흐름이 일시적으로 단절되는 동적 현상을 잘 모의하였으며, 탁수층은 패치(Patch)를 형성하면서 댐 축으로 이동하였다.

탁도 예측의 정확성을 검증하기 위해 강우기간 동안 저수지 수심별 탁도의 모의값과 관측값을 비교하였다(Fig. 9). RTMMS는 홍수의 초기에 밀도류의 흐름특성과 최고 탁도를 적절히 예측하는 것으로 나타났으나, 그 후 모델은 탁수층 중심축의 최고 탁도값을 과대산정하기 시작했다. 오차의 크기는 시간에 따라 증가하였다. 관측값과 예측값의 AME와 RMSE는 각각 4.153~44.161 NTU와 4.246~58.908 NTU를 나타내었다(Fig. 9). 이것은 비록 빛의 산란정도로 측정되는 탁도가 수중에 있는 부유물질의 양을 간접 측정하는 변수로 사용될

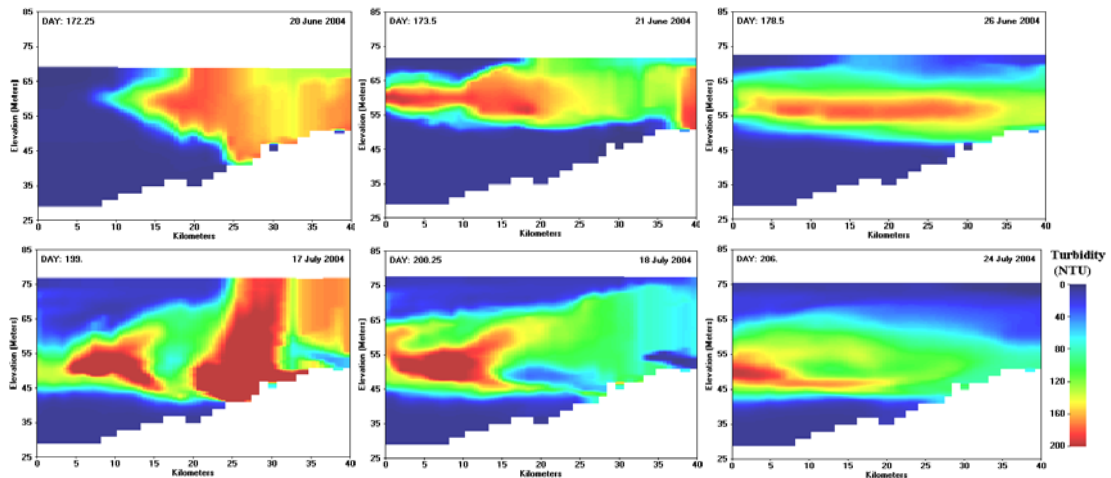


Fig. 8. Simulated Density Flow Regimes of Turbidity Plume Induced during First (upper) and Second (lower) Flood Events in 2004

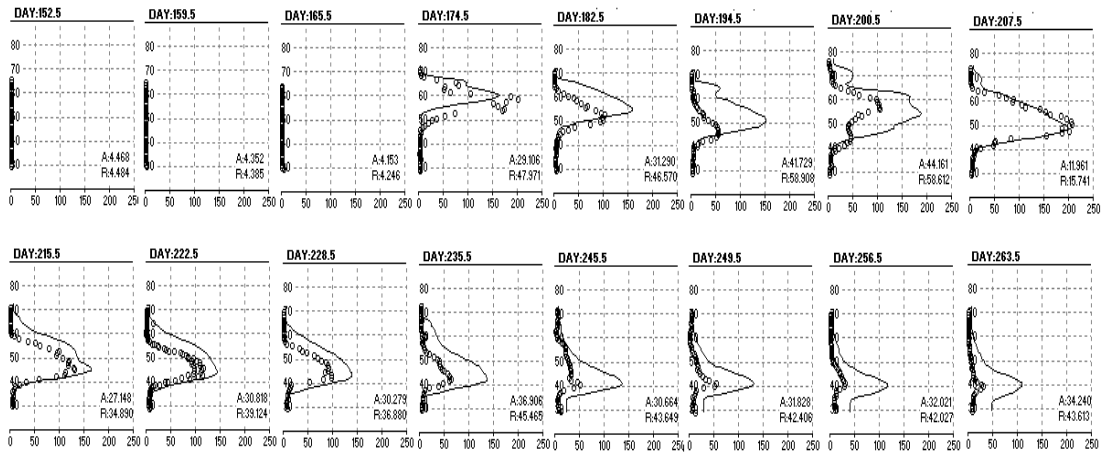


Fig. 9. Comparison of Measured and Simulated Turbidity Profiles at R4 in Daecheong Reservoir for 2004

수 있지만, 탁수에 포함된 총부유물(TSS)의 구성성분에 대한 정확한 측정이 없는 장기적인 탁도 예측에 어려움이 있음을 시사한다. 탁도의 오차를 줄이고 모델의 성능을 향상시키기 위해서는 부유입자 크기별 그룹화, 동적 침강속도, 입자의 응집효과 그리고 TSS에 포함된 유기물의 구성비 등이 고려된 더욱 향상된 탁도 모의 알고리즘 개발이 필요하다. 저수지에서 탁도 모델링에 관한 이론적인 고찰과 논의는 Gelda and Effler(2007)에 의해 보고된 바 있다. 현재 더욱 개선된 탁도 모의 알고리즘이 개발 중이며 RTMMS에 추가될 것이다.

3.3 2006년 홍수기 실시간 적용 결과

개발된 시스템과 모델의 실시간 적용성과 예측성능을 평가하기 위해 2006년 7월에 발생한 호우사상 동안 대청댐 저수지로 유입한 탁수의 거동해석을 위해 RTMMS를 적용하였다. 7월 10일 새벽부터 시작한 강우는 중간에 약간의 소강상태를 보였으나, 7월 21까지

지속되어 총 370.7 mm (최고강우강도 12 mm/hr)의 강우를 기록하였다(Fig. 10). 저수지 최고 유입량은 7월 17일 오후 7시경에 4,405 m³/sec이었다.

탁수의 거동 예측은 현재예측(nowcasting)을 목표로 하였으며 강우가 종료된 7월 21일에 실시되었다. 저수지내 수심별 수온과 탁도 초기조건은 6월 1일에 현장 측정된 자료를 사용하였으며, 모의 기간은 7월 31일까지 하였다. Fig. 10에서 7월 21일까지 자료는 실측자료이며, 그 이후 예측 유입량과 방류량 자료는 수자원 공사 물관리센터에서 저수지 홍수조절을 위해 활용하고 있는 KOWACO 홍수분석모형(저류함수모형) 결과를 사용하였다. 실측 및 모의시점까지의 유입수의 수온과 탁도는 실측자료를 활용하고, 예측기간 자료는 RTMMS의 수온 및 탁도 예측 모듈을 사용하여 생산하였다. 모의시점까지 기상자료는 기상청홈페이지로부터 대전 기상대 실측자료를 수집하여 활용하였고, 예측기간 기상자료는 수집이 어려워 2004년 유사기간의 기상자료를 그대로 사용하였다.

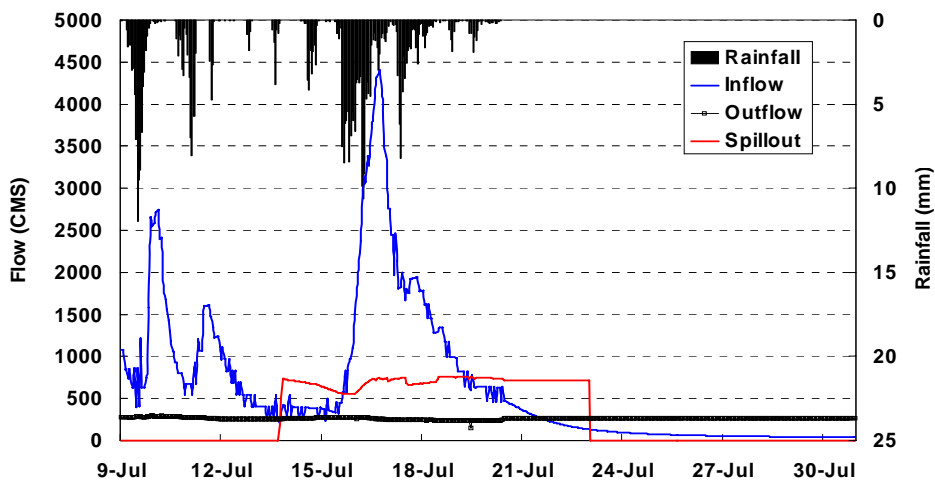
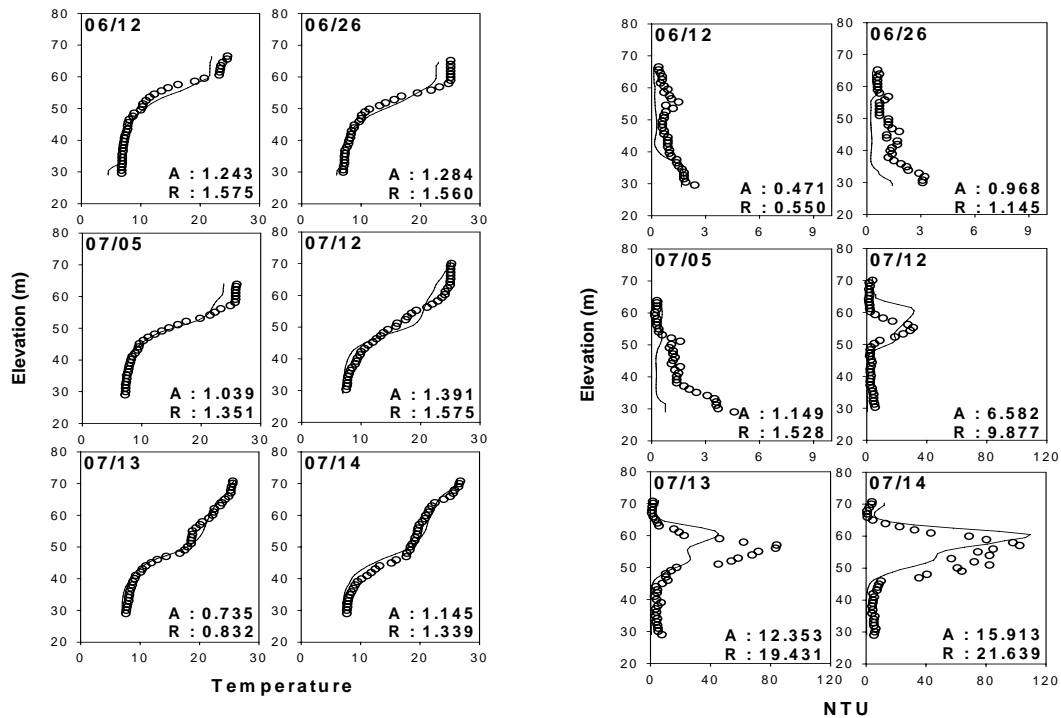


Fig. 10. Rainfall and Flow Conditions during a Real-time Application of RTMMS in 2006



(a) Water Temperature Profile

(b) Turbidity Profile

Fig. 11. Comparison of Measured and Simulated Temperature and Turbidity Profiles at R4 during a Real-time Application of RTMMS in 2006

모의기간동안 댐 앞 지점인 R4에서 수심별 수온과 탁도 예측 결과를 실측값과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 홍수가 유입되기 전인 7월 5일까지 모델은 표층에서 실측 수온과 다소 차이를 보이고 있으나, 그 이후 탁수가 유입되면서 변화되는 성층 구조를 매우 잘 반영하였다. 홍수가 유입되기 전 저수지 표층수온은 태양복사에너지와 바람에 의한 난류혼합에 의해 지배되므로, 기상자료가 모의결과의 정확도에 미치는 영향이 매우 크다. 실시간 모델링의 예측 정확도를 향상시키기 위해서는 저수지내 미시 기상관측 장치의 설치가 꼭 필요함을 알 수 있다. 모델의 수온예측 정확도를 보면, 모의값과 관측값의 AME와 RMSE는 각각 0.735~1.391과 0.832~1.575°C 범위를 나타내어 구축된 시스템이 저수지 수온을 잘 모의하는 것으로 평가되었다.

탁도 모의결과는 홍수 유입전에 심층부에서 다소 큰 편차를 보이고 있으나, 대체로 RTMMS는 유입 탁수의 중층 밀도류 거동 현상, 탁수층 두께, 그리고 최고 탁도를 비교적 잘 예측하는 것으로 보인다. 오차분석결과, AME와 RMSE는 각각 0.471~15.913와 0.550~21.639 NTU 범위를 나타내었다. 역시 수심별 탁도 분포를 좀더 정확히 예측하기 위해서는 부유입자 크기별 침강속도 고려와 지점별 SS-탁도 관계의 고려가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

효과적인 저수지 운영을 위해 탁수의 실시간 감시와 예측을 통한 저수지내 탁수조절 대안 분석을 위한 의사결정지원시스템으로써 RTMMS를 개발하였다. RTMMS는 실시간 계측자료를 수집하여 저장 및 조회할 수 있는 데이터베이스관리 시스템, 모델의 입력자료를 자동으로 생성하기 위한 예측모듈, 저수지의 수리해석과 탁도 모의를 위한 2차원 수치모델, 그리고 모의결과와 탁수조절 시나리오 분석을 위한 후처리 시스템으로 구성하였다.

RTMMS의 표준구성(Protocol)은 대청댐을 대상으로 개발되었으며, 시스템의 신뢰도를 검증하기 위해 2004년 홍수기 동안 실시간 계측을 통해 수집된 자료를 이용하여 저수지의 수온과 탁도의 공간적인 변화를 모의하고 실측값과 비교하였다. RTMMS는 저수지내 탁수의 밀도류 유동특성과 소멸과정을 비교적 잘 모의하였으며, 특히 시스템의 실시간 적용에 필수적인 조건인 계산효율이 매우 높은 것으로 나타났다.

RTMMS의 실시간 검증을 위해 2006년 7월 홍수 상상을 대상으로 시스템을 적용한 결과, 모델은 제한된 기상자료를 사용하였음에도 불구하고 실측 저수지 수온 구조와 수심별 탁도 분포를 비교적 잘 예측하는 것으로

평가되었다. 그러나 탁도와 TSS를 단순 선형관계로 가정한 2차원 탁도 예측 모델은 시간이 갈수록 탁수층의 최고 탁도값을 지속적으로 과대평가하는 경향을 보였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 부유입자의 크기별 침강속도 고려, 수심별 수온변화에 따른 침강속도의 동적 계산, 입자의 응집효과 그리고 TSS에 포함된 유기물의 구성비 등이 고려된 더욱 향상된 탁도 모의 알고리즘 개발이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 RTMMS의 구성은 동일한 탁수 문제를 가지고 있는 많은 저수지에서 수자원 공급과 탁수조절을 최적화하기 위한 의사결정도구로 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김윤희, 김범철, 최광순, 서동일 (2001). "2차원 수리모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링." **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제15권, 제1호, pp. 40-49.

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

정세웅, 오정국, 고익환 (2005). "CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의." **한국수자원학회 논문집**, 제38권, 제8호, pp. 655-664.

허우명, 김범철, 김윤희, 최광순 (1998). "소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수피의 호수내 이동." **한국육수학회지**, 한국육수학회, 제31권, 제1호, pp. 1-8.

Alavian, V., Jirka, G. H., Denton, R.A., Johnson, M.C., and Stefan, H.G. (1992). "Density currents entering lakes and reservoirs." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 118, No. 11, pp. 1464-1489.

Bartholow, J., Hanna, R.B., Saito, L., Lieberman, D., and Horn, M. (2001). "Simulated limnological effects of the Shasta Lake Temperature Control Device." *Environmental Management*, Vol. 27, No.

4, pp. 609-626

Bath, A.J. and Timm, T.D. (1994). "Hydrodynamic simulation of water quality in reservoirs of South Africa." *Commission Internationale Des Grands Barrages*. Vol. 69, No. 39, pp. 625-633.

Chikita, K. and Okumura, Y. (1990). "Dynamics of turbidity currents measured in Katsurazawa reservoir, Hokkaido, Japan." *J. Hydrol.*, Vol. 117, pp. 323-338.

Chung, S.W. and Gu, R. (1998). "Two dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 124, No. 7, pp. 704-711.

Chung, S.W., Oh, J.K. and Ko, I.H. (2006). "Calibration of CE QUAL W2 for a monomictic reservoir in monsoon climate area." *Water Sci. & Tech.*, Vol. 54, No. 12, pp. 29-37.

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.

de Kok, J.L., and Wind, H.G. (2003). "Design and application of decision support systems for integrated water management : lessons to be learnt." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 571-578.

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.

Gelda, R.K., and Effler, S.W. (2007). "Modeling turbidity in a water supply reservoir: Advancements and issues." *J. Environ. Eng.*, Vol. 133, No. 2, pp. 139-148.

Glasgow, H.B., Burkholder, J.M., Reed, R.E., Lewitus, A.J., and Kleinman, J.E. (2004). "Real time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies." *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 300, pp. 409-448.

Gordon, J.A., and Morris, J. W. (1977). "Reservoir metalimnion oxygen demands." *J. of Environ. Eng.*, Vol. 33, No. E66, p. 1001.

Henley, W. F., Patterson, M. A., Neves, R. J., and Lemly, A. D. (2000). "Effects of sedimentation and

- turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers." *Reviews in Fisheries Science*, Vol. 8, No. 2, pp. 125-139.
- Kennedy, R.H., Thornton, K.W., and Gunkel, R.C. Jr. (1982). "The establishment of water quality gradients in reservoirs." *J. of Can. Wat. Res.*, 7, pp. 71-87.
- Martin, J.L. (1988). "Application of two dimensional water quality model." *J. of Environ. Engrg.*, Vol. 114, No. 2, pp. 317-336.
- Martin, J.L., and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc., pp. 335-384.
- Neumann, D.W., Rajagopalan, B., and Zagona, E.A. (2003). "Regression model for daily maximum stream temperature." *J. of Envir. Engr.*, pp. 667-674.
- Newcombe, C.P., and Jensen, J.O.T. (1996). "Channel suspended sediment and fisheries: A synthesis for quantitative assessment of risk and impact. North Amer." *J. Fish Management*, Vol. 16, pp. 693-727.
- Umeda, M., Yokoyama, K., and Ishikawa, T. (2006). "Observation and simulation of floodwater intrusion and sedimentation in the Shichikashuku Reservoir." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 132, No. 9, pp. 881-891.
- (논문번호:07-120/접수:2007.10.30/심사완료:2008.01.25)