

CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의

Simulations of Temporal and Spatial Distributions of Rainfall-Induced Turbidity Flow in a Reservoir Using CE-QUAL-W2

정 세 웅* / 오 정 국** / 고 익 환***

Chung, Se Woong / Oh, Jung Kuk / Ko, Ick Hwan

Abstract

A real-time monitoring and modeling system (RTMMS) for rainfall-induced turbidity flow, which is one of the major obstacles for sustainable use of reservoir water resources, is under development. As a prediction model for the RTMMS, a laterally integrated two-dimensional hydrodynamic and water quality model, CE-QUAL-W2 was tested by simulating the temperature stratification, density flow regimes, and temporal and spatial distributions of turbidity in a reservoir. The inflow water temperature and turbidity measured every hour during the flood season of 2004 were used as the boundary conditions. The monitoring data showed that inflow water temperature drop by 5 to 10°C during rainfall events in summer, and consequently resulted in the development of density flow regimes such as plunge flow and interflow in the reservoir. The model showed relatively satisfactory performance in replicating the water temperature profiles and turbidity distributions, although considerable discrepancies were partially detected between observed and simulated results. The model was either very efficient in computation as the CPU run time to simulate the whole flood season took only 4 minutes with a Pentium 4(CPU 2.0GHz) desktop computer, which is essentially required for real-time modeling of turbidity plume.

keywords : Turbidity flow, real-time monitoring, reservoir density flow regimes, CE-QUAL-W2, RTMMS

요 지

저수지를 통한 수자원의 지속적 확보와 이용에 걸림돌이 되고 있는 탁수의 장기발생문제를 기술적으로 해결하고자 실시간 탁수 감시와 예측시스템(RTMMS)을 구축 중이며, 2004년 홍수기 동안 대청호를 대상으로 유입하는 탁수의 수리 및 수질특성을 조사하고 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형인 CE-QUAL-W2(W2)를 적용하여 탁수의 밀도류 거동과 시·공간적 분포를 예측하고 실측값과 비교하여 모형의 적용가능성을 평가하였다. 강우사상 동안 하천 수온은 5~10°C 정도 하강하였으며 탁수가 저수지내에서 밀도류를 형성하는 원인으로 작용했다. 적용된 W2모형은 수온의 성층구조 변화와 탁수의 침강점, 도달시간, 중층밀도류 두께 등 탁수의 거동특성을 비교적 잘 모의하였다. 그러나 국부적으로 탁수가 위치한 중층과 탁수 유입 전에 형성되었던 전이층에서 수온과 탁도의 모의값과 실측값이

* 충북대학교 환경공학과 조교수, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National University
(e-mail: schung@chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 공과대학 환경공학과 석사과정, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
(e-mail: type710@hotmail.com)

*** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소장, 대전시 유성구 전민동
(e-mail: ihko@kowaco.or.kr)

유의할 만한 오차를 보였다. 펜티엄급 PC(CPU 2.0GHz)로 홍수기 전체기간 모의에 소요된 시간은 약 4분으로써 모형은 계산의 효율성 측면에서 실시간 모의에 적합한 것으로 평가된다.

핵심용어 : 탁수, 저수지 밀도류, CE-QUAL-W2, 실시간 탁수 감시 및 예측시스템

1. 서론

중요한 용수공급원인 대형 댐 저수지에서 홍수시 발생하는 탁수의 장기화 문제는 최근 그 발생빈도와 강도가 점점 커지면서 중요한 사회적 환경적 문제로 대두되고 있다(한국수자원공사, 2000, 2004; 정세웅, 2004; 박기영, 2003). 저수지 운영자는 탁수의 적절한 조절을 위해 수심별 선택적 취수와 배제, 우회수로 또는 차단막 설치와 같은 다양한 저수지운영기술을 고려할 수 있으나, 이를 기술적으로 지원하기 위해서는 탁수의 실시간 감시와 저수지내에서의 거동에 대한 정확한 예측 기술이 필요하다(정세웅, 2002, 2004).

일반적으로 저수지로 유입하는 탁수는 운동에너지가 소멸된 후 하천수온과 저수지 표층수의 수온차로 인한 부력의 영향을 받아 동일 밀도를 가진 중층을 따라 분포한다. 중층 탁수의 수심과 두께는 수온과 부유물질 농도의 함수로 결정되는 유입수의 밀도와 유입 홍수량 그리고 저수지의 성층구조에 따라 결정되며 상층밀도류(overflow), 중층밀도류(interflow) 또는 심층밀도류(underflow)의 형태(Fig.1)로 나타난다(Fischer et al., 1979; Ford and Johnson, 1981; Kennedy et al., 1982; Alavian et al., 1992; Chung and Gu, 1998). 저수지 수리 및 수질 모델링 기술은 탁수의 시공간분포와 취수지점 도달시간을 실시간으로 해석하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있으며 저수지에서 발생하는 탁수의 거동을 미리 예측함으로써, 댐 계획단계에서는 취수탑의 위치 결정과 운영단계에서는 선택적 방류와 취수 등의 적절

한 조절대책을 지원할 수 있다. 본 연구의 목적은 실시간 저수지 탁수 감시 및 예측시스템(RTMMS) 구축을 위해 2004년 홍수기 동안 대형댐 저수지로 유입한 탁수의 수리 및 수질특성을 조사하고 탁수의 밀도류 거동과 시·공간적 분포를 예측하기 위해 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형을 적용하여 그 활용 가능성을 평가하는데 있다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 연구대상 지역 현황

대청호는 금강유역의 최대 상수원으로써 대전과 청주를 비롯한 충청지역에 연간 약 3.7억m³의 생활 및 공업용수를 공급하고 있으며, 정부에서는 향후 이 지역에 행정도시 이전을 계획하고 있어 장차 인구나 용수수요는 계속 증가 할 전망이므로 안정적인 용수공급을 위해서는 저수지 수질관리가 더욱 중요한 사안으로 대두되고 있다. 현재 대청호의 수질은 COD와 총인의 호소수질 기준을 적용할 때 전반적으로 상수원수 II 급수 수준을 유지하고 있지만, 하절기 동안에는 강우-유출 이후 탁수가 유입할 때 유역으로부터 점원 및 비점원 오염물질이 집중 유입되고 있으며 이로 인해 독성 위해성이 있는 녹조류가 다량 증식하는 부영양화현상이 자주 발생하고 있다. 이러한 현상은 대청호에서 취수하여 수돗물을 공급하는 대전권과 청주권의 수돗물에서 맛과 냄새 문제를 유발하는 등 장기적으로 상수원수로서의 질적 저하를 가져올 우려를 낳고 있다(한국수자원공사,

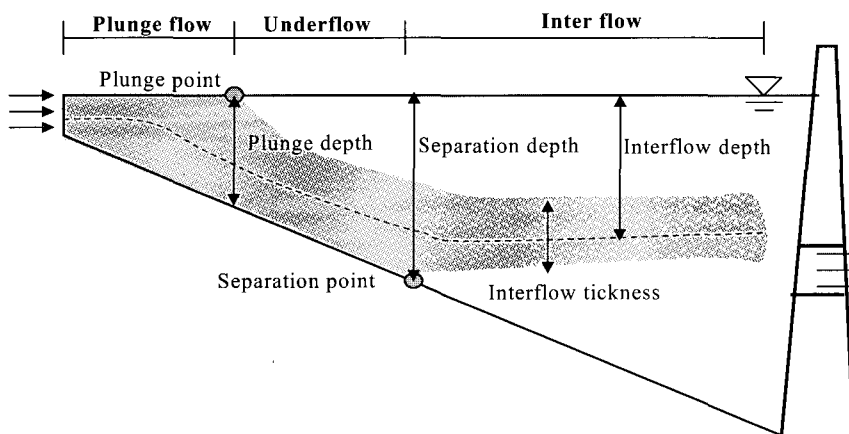


Fig. 1. Density flow regimes of rainfall-induced turbidity flow in a stratified reservoir

2004b). 특히, 대청호에는 청주권과 대전권으로 용수를 공급하기 위한 취수탑이 모두 본 댐 저수지내 청원군 문의면과 대전광역시 추동에 각각 위치하고 있으며, 최근에 준공된 수자원공사의 대청2단계 용수공급을 위한 취수장도 본 댐 직 하류인 조정지댐내에 위치하고 있어 탁수의 장기적인 발생은 원수의 수질에 직접적인 영향을 미치므로 적절한 조절대책이 필요한 실정이다.

2.2 현장실험

2004년 한 해 동안 대청댐 유역의 총 강우량은 1,381mm이었으며 홍수기 동안인 6월~9월 사이에 내린 강우량은 1,070mm로써 연간 강우량의 77.5%를 차지했다. 이 기간 동안의 일별 강우량과 저수지 유입 및 유출

량은 Fig. 2와 같으며 일평균 유입량이 $1,000\text{m}^3/\text{sec}$ 를 초과한 홍수사상은 6월, 7월, 8월에 각각 한번 씩 발생하였다. 한해 동안 총 유입량은 27억3천7백만 m^3 이었으며 이 중 79%에 해당하는 21억7천3백만 m^3 이 홍수기 동안 유입되었다. 홍수조절을 위한 여수로 수문방류는 7월에 1회 있었으며, 8월에는 매우 적은 양의 수문방류가 있었다.

대청호로 유입하는 탁수의 수리 및 수질특성을 조사하기 위해 2004년 7월 1일부터 대청호 상류 옥천군 동이면에 위치한 Sta.7 지점에 탁수감시 장치(YSI6920)를 설치하고 1시간 간격으로 수온, 탁도, 전기전도도, pH, DO를 측정하였다(Fig. 3). 저수지로 유입한 탁수의 수리동력학적인 밀도류 거동과 수질변화 특성을 조사하기

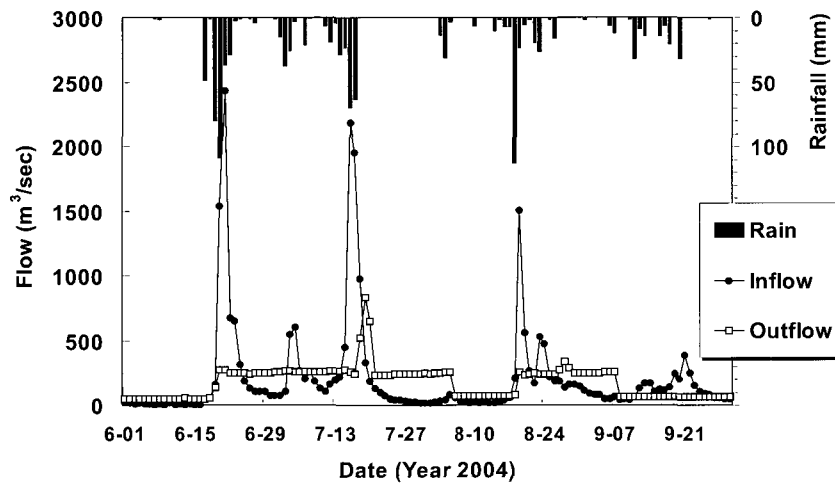


Fig. 2. Rainfall and flow conditions of the reservoir during the study period of 2004

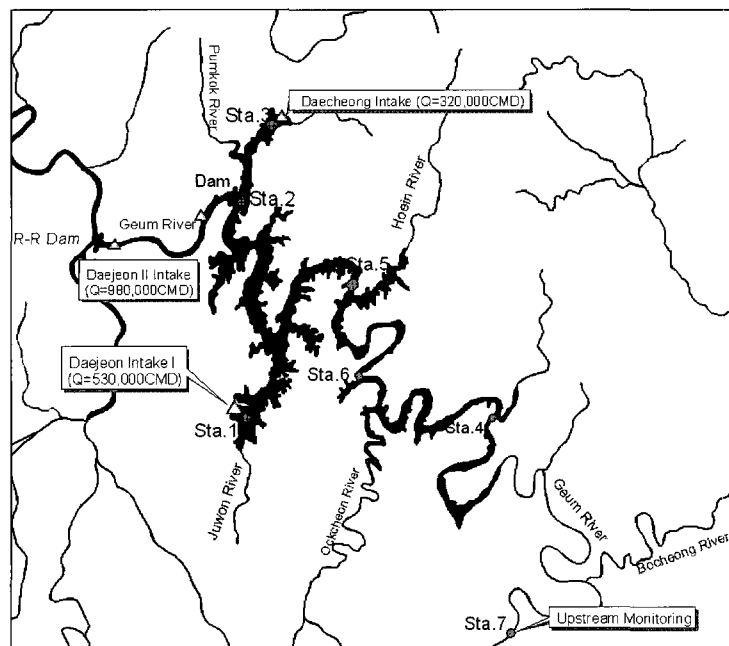


Fig. 3. Layout of the reservoir and locations of monitoring stations

위해서는 Sta.1~6에서 YSI6600으로 수심별 연속 수질 측정을 실시하였다. 탁수 유입기간 동안 저수지내 유속 분포를 측정하기 위해 음파에너지를 이용하여 물의 수직단면별 속도를 측정하는 ADP(Acoustic Doppler Profilers)를 사용하여 3차원 유속측정을 실시하였다. 유속은 수심방향의 요소간격(Cell depth)은 2m로 하였으며, 120초 동안 수신된 신호의 평균값을 사용하였다.

2.3 탁수예측모형

저수지 수질모형은 수체를 해석하는 차원에 따라 수심방향 1차원 모형, 수심평균 2차원(x-y) 모형, 횡방향 평균 2차원(x-z) 모형, 3차원(x-y-z) 모형으로 구분된다. 국내에서 가장 빈번하게 사용된 모형은 미국 환경부(USEPA)에서 개발한 WASP 모형이었다(Ambose et al., 1993). 그러나 WASP은 저수지의 성층화 현상과 밀도류 흐름의 순환특성이 수질에 미치는 영향 등의 모의에는 한계가 있다. 특히, 우리나라의 대형 인공호소는 대부분 저수지 길이가 폭에 비해 상대적으로 크고 수심이 깊어 성층화 현상을 고려한 모의가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 강우-유출 후 저수지로 유입하는 탁수의 이송 및 확산을 실시간으로 해석할 수 있는 모델링 체계를 구축하고자, 저수지 수체를 흐름방향과 수심방향의 2차원으로 해석하고 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이한 CE-QUAL-W2 모형(이후 W2)을 채택하였다(Cole and Buchak, 1995; Cole and Wells, 2003). W2 모형은 미국 호소뿐만 아니라 국내에서도 최근 섬진강댐의 옥정호와 소양호, 팔당호 등에서 호소수온의 성층해석과 홍수시 오염수체의 밀도류 유동해석을 위해 광범위하게 적용된 사례가 있다(정세웅, 2002, 2004; 이상욱 등, 2003; 박옥란 등, 2002; 나은혜 등, 2002; 김윤희 등, 2001).

W2 모형은 연속방정식(1식)과 x-방향(2식) 및 z-방향 운동량 방정식(3식), 자유수면 방정식(4식), 밀도 상태방정식(5식), 물질수지방정식(6식)의 6개 지배방정식으로 구성되며, 6개의 미지수 즉, x-방향 유속(u), z-방향 유속(w), 수압(P), 밀도(ρ), 저수지 수위(η), 수질농도(C)를 유한차분 수치해석기법을 사용하여 푼다. x-방향과 z-방향 유속을 y-방향(횡방향)에 대하여 평균화하기 때문에 운동량방정식은 확산항을 갖게 되며, 확산항의 크기는 횡방향 유속분포의 불균등성의 정도에 좌우된다. 흐름의 난류성분 때문에 발생하는 응력항들은 난류폐합식을 이용하여 해석하는데, W2모형에서는 Prantal의 혼합길이 이론(Mixing length theory)에 의한 eddy viscosity(Zero-equation model)를 사용한다. 즉, 난류의 전단응력항은 속도경사와 와점성 계수의 함수로

표현된다.

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Bu}{\partial t} = & -\frac{\partial(Buu)}{\partial x} - \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} \\ & + Bg \frac{\rho_\xi}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial x} - B \frac{g}{\rho} \int_\xi^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ & + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BA_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial B\xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\xi^H u B dz - \int_\xi^H q B dz \quad (4)$$

$$\rho = f(C_{TDS}, T) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial BC}{\partial t} = & -\frac{\partial(BuC)}{\partial x} - \frac{\partial(BwC)}{\partial z} + Bq_s \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BE_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, B = 저수지 폭(m), u = x방향 유속(m/s), w = z방향 유속(m/s), q = 측방 유입량(m³/sec), P = 압력(N/m²), ρ = 밀도(kg/m³), τ = 전단응력(m³/sec²), A = 와점성계수(m²/sec), H = 저수지 수심(m), ξ = 자유수면 위치(m), C = 물질의 농도(mg/L), C_{TDS} = 총용존부유물농도(mg/L), T = 수온(°C), E = 와확산계수(m²/sec)이다.

2.4 입력자료 구성

대청호의 유한차분 격자구성은 해상도가 모의결과에 영향을 미치지 않도록 민감도분석을 통해 정밀하게 이루어졌으며 금강 본류와 주요 지류하천을 5개의 구획(Branch)으로 구분하고, x-방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 장계교지점으로부터 댐축까지 31개의 요소($\Delta x = 0.5 \sim 1.9$ km), 수심방향으로는 0.5~1.0m 간격으로 69개 층(Layer)으로 구성하였다(Fig. 4). 저수지 지형자료(Bathymetry)는 대청댐의 퇴사량측정보고서(한국수자원공사, 1991)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 모형에서 계산한 저수지 수위별 용량곡선을

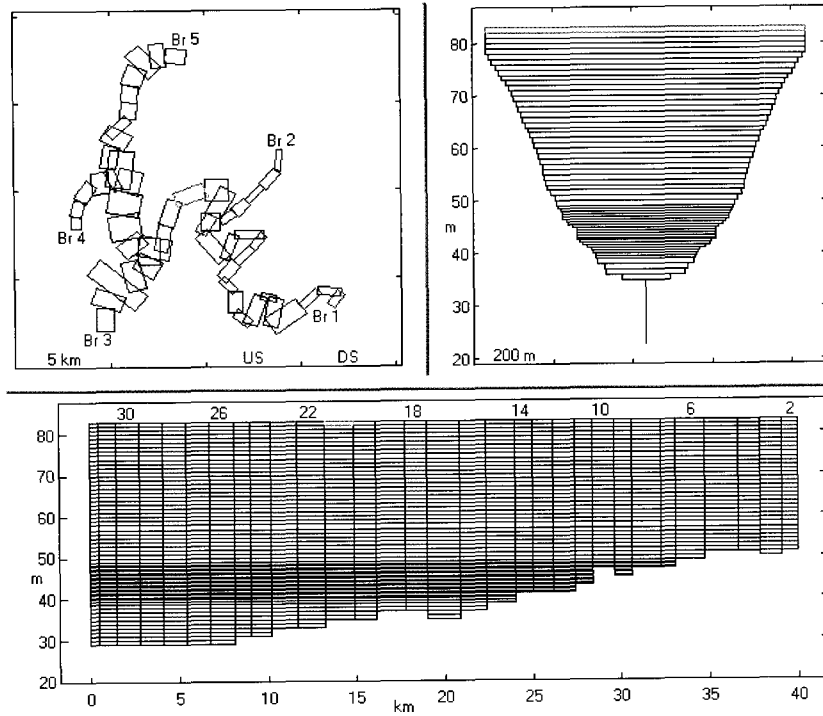


Fig. 4. Finite difference grid system for the reservoir

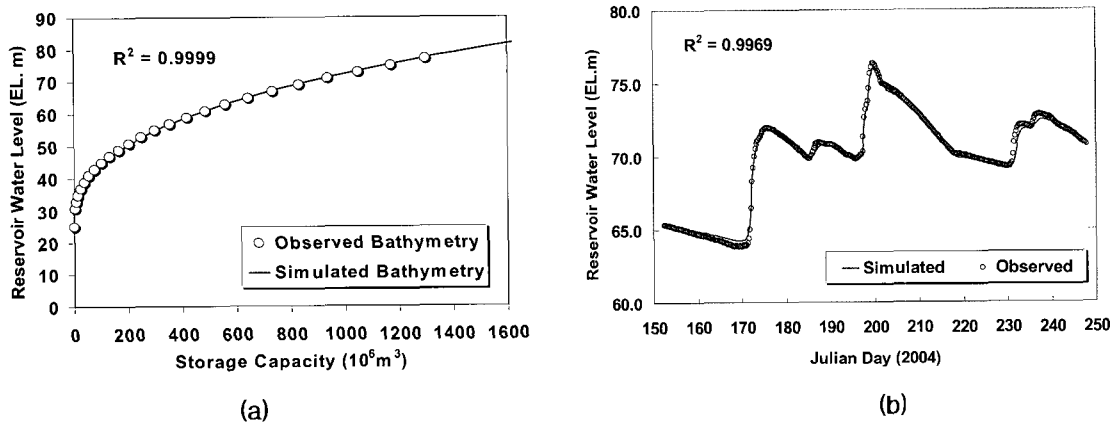


Fig. 5. Validation of reservoir bathymetry data by comparing with surveyed data (a) and observed and simulated water surface elevations (b)

실측자료와 비교한 결과 결정계수값(R^2)이 0.9999로 매우 높았다(Fig. 5a). 또한 연구기간 동안 한국수자원공사의 물관리데이터베이스(WAMIS)에서 추출한 저수지 유입량과 방류량 자료를 경계조건으로 사용하여 모의한 저수지 수위와 실측수위를 비교한 결과, R^2 가 0.9969로 나타나 모델이 저수지의 물 수지를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다(Fig. 5b).

모의기간은 2004년 홍수기인 6월 1일부터 9월 30일까지 4개월 동안이며, 수온과 탁도의 초기조건은 6월 1일에 측정된 수심별 실측자료를 이용하였다. 경계조건은 본류와 지류로 유입하는 유량, 수온, 탁도, 취수량과 방류량, 그리고 기상자료가 필요하다. 유량자료는 대청

댐의 운영실적 자료를 사용하였으며 지류에서의 유입량은 유역면적에 의한 비유량법으로 산정하였다. 유입수의 수온과 탁도는 상류 옥천지점에서 시간별로 실측한 자료를 이용하였다(Fig. 6). 일부 결측된 탁도자료는 유량과 부유물질(SS) 부하량 관계로부터 물질수지식을 사용하여 보완하고 수온은 대기기온과 노점온도, 유량을 독립변수로 하는 다중회귀형모형을 개발하여 산정하였다(Nuemann et al., 2003). 저수지 표층수의 수온과 수리현상에 영향을 많이 미치는 기상자료인 기온, 노점온도, 온도 자료는 가장 가까운 대전기상청의 시간별 자료를 사용하였고 풍향과 풍속자료는 대청 AWS의 자료를 사용하였다.

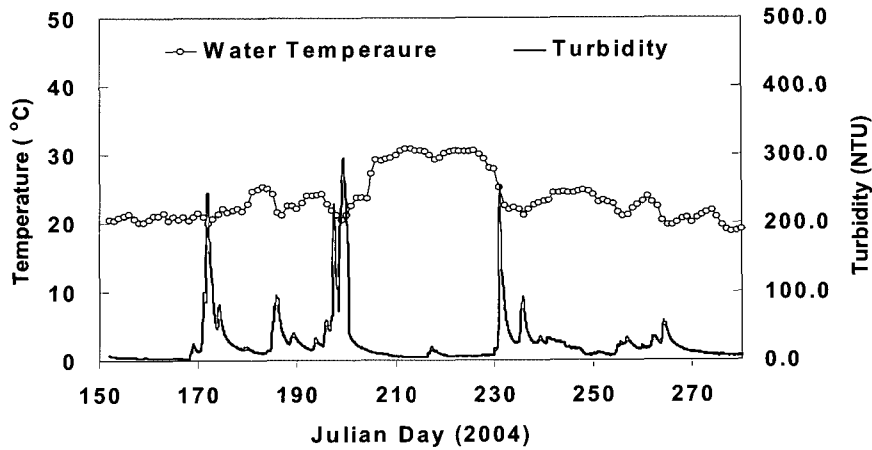


Fig. 6. Inflow water temperature and turbidity boundary conditions

저수지 수온과 탁수의 이송·확산 모의에 영향을 미치는 주요 매개변수는 광소멸계수, 확산계수와 침강속도 등이다. 저수지 표면에 도달한 빛에너지가 저수지내로 확산되는데 영향을 미치는 광소멸계수는 저수지내에서 측정된 투명도(Secchi disk depth)를 사용하여 산정하였으며, 바람의 풍향과 풍속에 의한 혼합효과를 모의하는데 영향을 미치는 바람차폐계수(Wind sheltering coefficient)는 저수지 주변의 지형적 형상을 고려하여 0.85를 사용하였다. 탁수의 주성분이 부유물질이므로 침강속도는 저수지내 탁도의 공간분포에 큰 영향을 미친다. 부유물의 침강속도는 실측한 탁수의 중심선 하강속도로부터 산정하여 0.5 m/day를 사용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온예측결과

저수지 수온 모의결과는 Fig. 7과 같으며, 6월 중순에 발생한 1차 강우 이전인 6월 8일에는 성층화가 매우 안정적으로 발달되어 저수지 상층부인 EL. 60~65m에서 수온은 20~23°C 범위이며 수온 전이층이 EL. 60~50m에 형성되었다. 그러나 6월 20일에는 1차 강우사상으로 인해 탁수가 본격적으로 유입되어 저수지의 수온 성층 구조가 파괴되기 시작하였으며, 유입한 탁수는 회인천 합류 직전(댐으로 부터 거리 약 20km 지점)에서 저수지 수면 아래로 침강(plunge point)하는 것으로 모

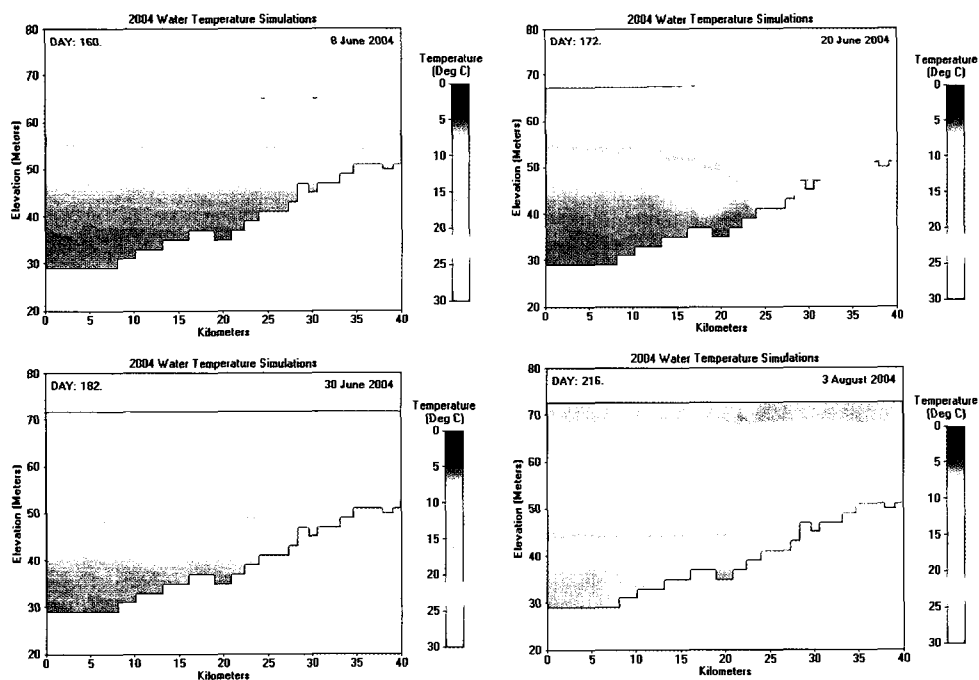


Fig. 7. Snapshots of simulated water temperatures on selected dates in 2004

의 되었다. 이러한 침강현상은 6월 21일 현장 유속측정 과정에서 육안으로 확인 할 수 있었으며, 탁수는 하천 흐름특성(Plug flow)을 유지하면서 최대유속 1.0 m/sec로 장계교를 통과하고 회남대교 상류에서 운동에너지가 소멸됨에 따라 음의 부력에 지배를 받아 호수 아래로 침강하여 중층밀도류를 형성하였으며 모의결과는 현장 조사 결과와 매우 잘 일치하였다. 탁수가 중층 밀도류를 형성한 후 6월 30일에는 저수지의 수온분포는 다시 안정적인 성층구조를 회복하였으나, 탁수가 중층으로 관입됨에 따라 기존의 수온 전이층이 EL. 45~55m 구간으로 하강하였다.

Fig. 8은 댐 앞인 Sta.2 지점에서 관측수온과 모의수온의 수직분포를 비교한 결과를 보여준다. 모형의 예측성능을 평가하기 위하여 실측값과 계산값 간의 절대평균오차(absolute mean error, AME)와 평균제곱오차의 평방근(root mean square error, RMSE)을 사용하였다. AME는 실측값과 모의값 잔차의 절대값을 산술평균한 값으로서 0에 가까울수록 모형의 성능이 우수하다. RMSE는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균 제곱오차를(root mean square errors) 구하여 제곱근을 구한 것으로 표준계산오차(standard error of estimates)가 된다. RMSE는 그 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 작을수록 모형의 오차가 작은 것으로 평가된다.

$$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (8)$$

여기서 y_i = 실측값, \bar{y}_i = 모의값, y_{ave} = 실측값 평균, N = 자료수를 나타낸다.

모의결과는 수심별 저수지 수온분포를 비교적 잘 반영하고 있으며 AME와 RMSE 값은 각각 0.399~1.64 3°C와 0.655~2.249°C의 범위를 나타내었다. 그러나 모의결과는 6월 중순에 발생한 1차 홍수가 유입한 후인 7월 1일에 EL. 50~65m구간에서 실측수온과 비교적 큰 차이를 보였다. 또한 성층현상이 다시 안정화 된 이후에는 탁수 유입 전에 형성되었던 수온 전이층이 위치한 EL. 45~55m 구간에서 비교적 큰 오차가 나타났다. 이러한 오차는 홍수기 동안 단기간에 유입량이 급증하는 우리나라 호수의 수리·수문학적 특성과 이로 인한 중층의 갑작스런 수온성층 파괴현상이 W2모형에서 잘 반영되지 않았기 때문으로 판단되며 매개변수에 대한 민감도 분석, 수치해석 방법, 난류 폐항 방정식 처리 방법 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.2 밀도류 거동 및 탁도 모의 결과

저수지로 유입한 탁수의 시공간적 분포 특성을 모의한 결과는 Fig. 9와 같으며, 펜티엄급(CPU 2.0 GHz) PC로 3개월 모의에 소요된 시간은 약 4분으로써 모의 효율성 측면에서 W2 모형은 RTMMS의 실시간 탁수에 측모의에 매우 적합한 것으로 평가되었다. 탁도의 시공간분포 모의결과는 수온예측 결과와 같이 6월 20일에 탁수가 회인천 합류점 직전인 댐으로부터 20km 지점까지 관입류(plug flow)의 특성을 보이며 진행하다가 운동에너지가 소멸됨에 따라 부력의 영향을 받아 침강한 후 중층밀도류를 형성하는 것을 보여준다.

Fig. 10은 댐 앞인 Sta.2 지점에서 관측탁도와 모의

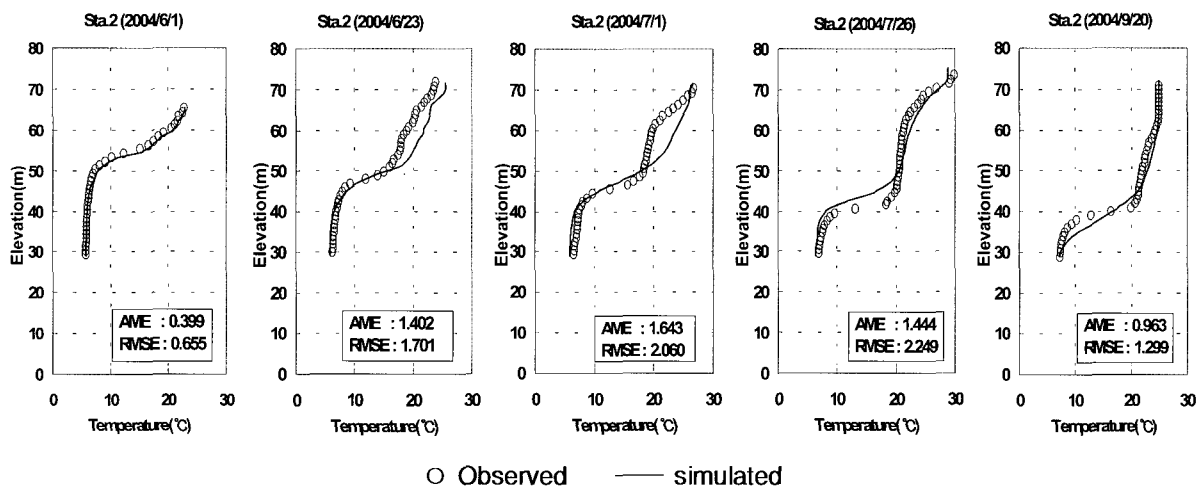


Fig. 8. Comparisons of observed and simulated water temperature profiles at station 2 in 2004

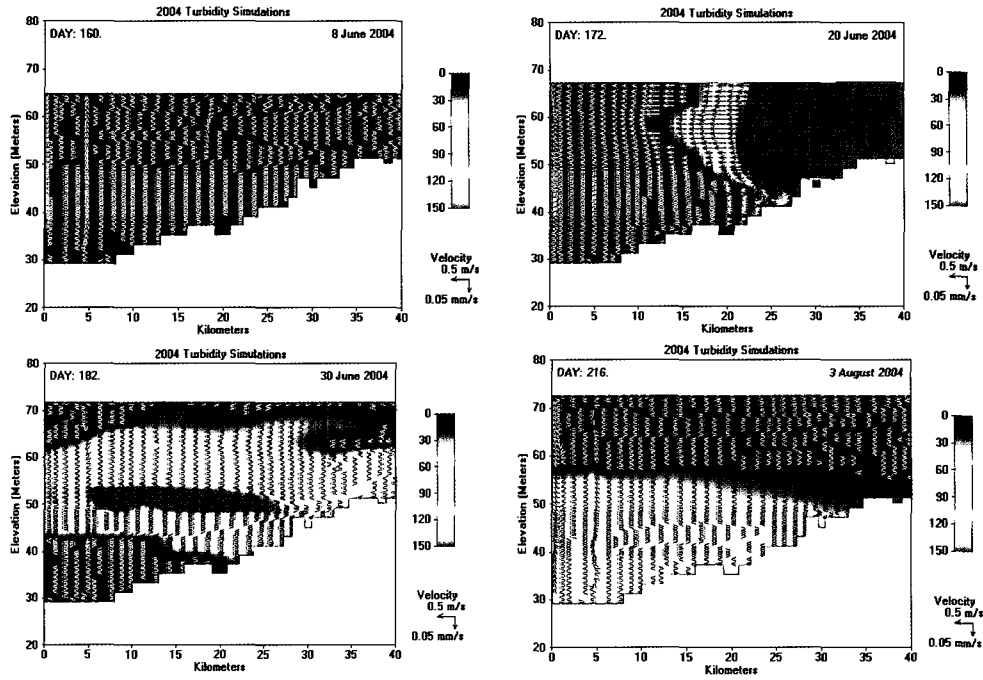


Fig. 9. Snapshots of simulated turbidity distributions on selected dates in 2004

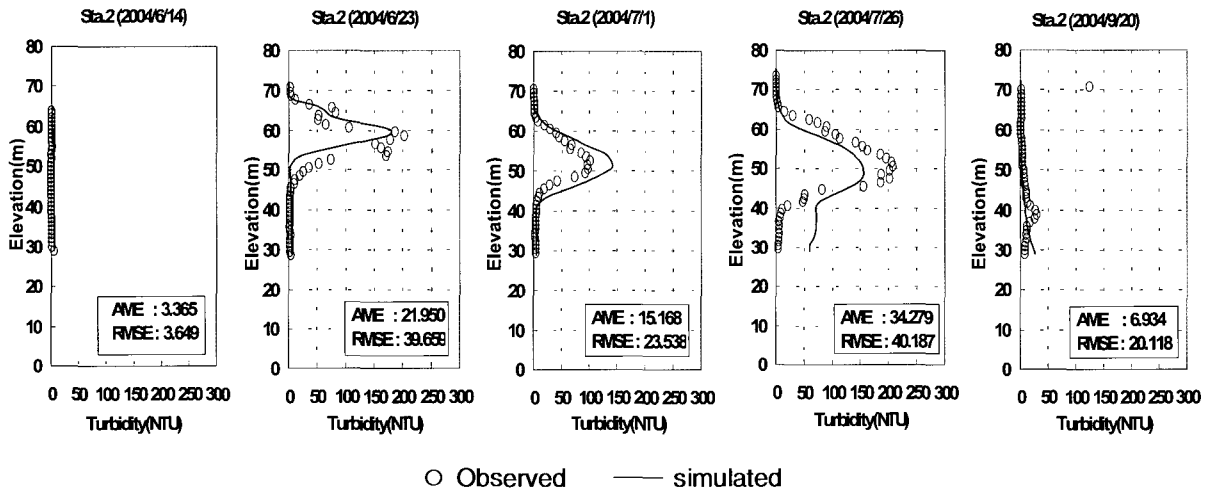


Fig. 10. Comparisons of observed and simulated turbidity profiles at station 2 in 2004

탁도의 수직분포를 비교한 결과를 보여준다. 모의된 수심별 탁도분포 및 최고탁도 발생수심은 실측자료와 비교적 잘 부합하였으며 AME와 RMSE 값은 각각 3.365~34.279NTU와 3.649~40.187NTU의 범위를 나타내었다. 그러나 7월26일에 심수층인 EL. 40.0m 이하 구간에서 탁도의 모의값은 관측값 보다 50NTU 정도 높게 산정되었다. 이것은 모형에서 부유물질의 침강속도를 저수지 전체에서 하나의 상수로 사용함으로써 중층의 탁도와 저수지 심수층의 물이 서로 다른 밀도층을 형성하여 경계면(stagnant region)에서 부유물질의 침강속도가 매우 작아짐에도 불구하고 모형에서는 이를 제대로

반영하지 못하기 때문으로 판단된다. 또한, 탁도의 원인물질인 부유물질(SS)의 입도분석을 통해 입자크기에 따라 SS를 3가지 정도의 형태로 구분하여 침강속도를 다르게 산정하여 모의하는 연구도 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

모의기간 동안 저수지 상층(EL.65m), 중층(EL.55m), 그리고 하층(EL.45m)에서 관측된 탁도와 모의결과의 시계열 비교는 Fig. 11에 제시되었다. 모형은 수심별 침투 탁도와 발생시간을 비교적 잘 예측하였으며 실측값의 시계열 변화를 비교적 잘 모의하는 것으로 평가된다. 시계열 모의결과는 탁도의 도달시간, 지속기간과 강

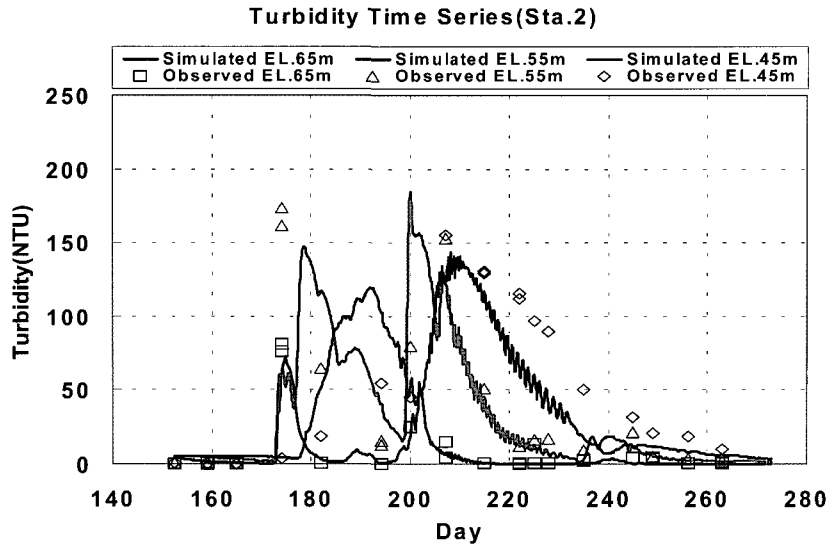


Fig. 11. Comparisons of observed and simulated reservoir turbidity time series at station 2 in 2004

도를 사전에 댐 운영자, 취수시설 운영자, 지역주민에게 통보함으로써 탁수발생에 대한 정보를 적극적으로 공개함으로써 그 피해를 최소화하는데 사용할 수 있다.

4. 결 론

실시간 저수지 탁수 감시 및 예측시스템(RTMMS) 구축을 위하여 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모형인 CE-QUAL-W2를 저수지 수온과 탁도 예측 모형으로 선정하고 2004년 홍수기 동안 대청댐 저수지를 대상으로 모형의 적용가능성을 평가하였다. 홍수기 동안 대청댐 상류 하천에서 수온과 탁도를 연속 측정된 결과, 강우사상 동안 하천수온은 5~10℃ 정도 하강하였으며 이것은 탁수가 저수지내로 유입한 후 밀도류를 형성하는 원인으로 작용했다. W2모형은 저수지 수온의 성층구조 변화와 탁수의 침강점, 도달시간, 중층밀도류 두께, 시·공간적 분포 등 저수지내에서 탁수의 밀도류 거동 특성을 비교적 잘 모의하였으며, 펜티엄급 PC(CPU 2.0GHz)로 홍수기 전체기간 모의에 소요된 시간은 약 4분으로써 계산의 효율성 측면에서 RTMMS에 적합한 것으로 평가되었다. 그러나 홍수가 유입한 후 탁수층이 위치한 중층구간과 탁수 유입 전에 형성되었던 전이층구간에서 모의수온과 탁도가 실측값과 비교적 큰 오차를 보였다. 이것은 급격한 유입량 증가에 따른 중층의 성층과괴현상이 모형에서 잘 반영되지 않았기 때문으로 판단되며 매개변수에 대한 민감도 분석, 수치해석 방법, 난류 폐합 방정식 처리 방법 등에 대한 추가적인 연구 검토가 요구된다. 또한 실시간 탁수 예측 모의결과와 신뢰도를 높이기 위해서는 지속적인 현장 조사와 모형

의 보정작업이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련되신 분들께 감사드립니다. 그리고 현장실험과 자료를 협조해 주신 한국수자원공사 물관리센터와 대청댐관리단 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일 (2001). "2차원 수리수질모형을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링." **대한상하수도학회지**, 15(1), pp.40-49.
- 나은혜, 안규홍, 박석순 (2002). "팔당호의 계절적 전도현상과 연직 수온 분포에 관한 모델 연구." **대한환경공학회지**, 24(5), pp.901-910.
- 박기영 (2003). **2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축**, 석사학위논문, 경북대학교
- 박옥란, 박석순 (2002). "육정호의 연직 수온분포에 관한 시변화 모델 연구." **한국육수학회지**, 35(2), pp.79-91.
- 이상욱, 서동일, 정세웅 (2003). "2차원 수리·수질모형(CE-QUAL-W2)을 이용한 대청호 수온 성층현상의 모델링." **2003 춘계 학술연구발표회논문집**, 대한환경공학회, pp.676-678.

- 정세웅 (2002). "성층 저수지로 유입하는 탁류의 유동 특성과 영향에 관한 연구." **2002년 한국농공학회 학술발표논문집**, pp.269-272.
- 정세웅 (2004). "성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링." **대한환경공학회지**, 26(9), pp.970-978.
- 정세웅, 박기영, 한건연, 박기영 (2004). "임하호 탁수 거동 분석을 위한 CE-QUAL-W2 모형의 적용." **2004 춘계학술발표회 논문집**, 대한환경공학회, pp.1220-1225.
- 한국수자원공사 (1991). **대청댐 퇴사량 측정 보고서**.
- 한국수자원공사 (2000). **댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발**.
- 한국수자원공사 (2004a). **임하댐 탁수저감 방안 수립 보고서**.
- 한국수자원공사(2004b). **대청댐 주변지역 환경정비 기본계획**.
- 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.*, 118(11), pp. 1464-1489.
- Ambrose, R. B. Jr., Wool, T.A., and Martin, J. L.(1993). *WASP5. a hydrodynamic and water quality model, user's manual and programmer's guide(Parts I)*, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Chung, S. W., and Gu, R., (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *J. Hydr. Eng.*, 124(7), pp.704-711.
- Cole, T. M., and Wells, S. A.(2003). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.1 user's manual*, Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Engineers, Washington, DC.
- Cole, T.M., and Buchak, E.M., (1995). *CE-QUAL-W2: a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, user's manual*, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- 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.
- Ford, D.E. and Johnson, L.S.(1981). "Field observations of density currents in impoundments." *In Proceedings of Symposium on Surface Water Impoundments*, Stefan, H. G.(Eds.), Am. Soc. of Civil Eng., NY.
- 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.
- Neumann, D. W., Rajagopalan, B., and Zagona, E. A., (2003). "Regression Model for Daily Maximum Stream Temperature." *J. of Envir. Engr.*, pp.667-674.

(논문번호:05-57/접수:2005.04.12/심사완료:2005.07.08)