실시간 저수지 탁수 감시 및 예측 모의

A Real-time Monitoring and Modeling of Turbidity Flow into a Reservoir

정세웅*, 고익환**

Se Woong Chung, Ick Hwan Ko

Abstract

The impacts of turbidity flow induced by summer rainfall events on water supply, aquatic ecosystems, and socioeconomics are significant and major concerns in most of reservoirs operations. As a decision support tool, the real-time turbidity flow monitoring and modeling system RTMMS is under development using a laterally integrated two-dimensional (2D) hydrodynamic and water quality model. The objectives of this paper is to present the preliminary field observation results on the characteristics of rainfall-induced turbidity flows and their density flow regimes, and the model performance in replicating the fate and transport of turbidity plume in a reservoir. The rainfall-induced turbidity flows caused significant drop of river water temperature by 5 to 10°C and resulted in density differences of 1.2 to 2.6 kg/m^3 between inflow water and ambient reservoir water, which consequently led development of density flows such as plunge flow and interflow in the reservoir. The 2D model was set up for the reservoir, and applied to simulate the temperature stratification, density flow regimes, and temporal and spatial turbidity distributions during flood season of 2004. After intensive refinements on grid resolutions, the model showed efficient and satisfactory performance in simulating the observed reservoir thermal stratification and turbidity profiles that all are essentially required to enhance the performance of RTMMS.

Key words: Turbidity flow, Water temperature, Turbidity flow monitoring, Reservoir modeling

1. 서 론

중요한 용수공급원인 대형 댐 저수지에서 홍수시 발생하는 탁수의 장기화 문제는 최근 그 발생 빈도와 강도가 점점 커지면서 중요한 사회적 환경적 문제로 대두되고 있다(한국수자원공사, 2000). 탁수로부터 저수지의 수질과 생태계를 보호하고 장기간 탁수방류로 인한 지역주민의 불만과 피해를 최소화하기 위해서는 과학적 해석에 근거한 탁수조절이 이루어져야 한다. 즉, 저수지 운영자는 탁수의 적절한 조절을 위해 수심별 선택적 취수와 배제, 우회수로 또는 차단막 설치와 같은 다양한 저수지운영기술을 고려할 수 있으며, 이를 기술적으로 지원하기 위해서는 탁수의 실시간 감시와 저수지내에서의 밀도류 거동을 정확하게 예측할 수 있는 기술개발이 필요하다(정세웅, 2002, 2004a; 박기영, 2003). 이를 위해 탁수의 도달시간, 시공간분포, 그리고 지속기간 등을 감시하고 예측할 수 있는 실시간 저수지 탁수 감시 및 예측시스템(RTMMS)을 개발 중에 있으며, 본 논문에서는 2004년 홍수기 동안 대청댐 저수지를 대상으로 조사한 탁수의 수리 및 수질특성과 실시간 탁수 예측 모델로 선정된 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질모델의 적용 결과를 제시하고자 한다

* 정회원·충북대학교 환경공학과 조교수·E-mail : schung@chungbuk.ac.kr

** 정회원·한국수자원공사 수자원연구시스템연구소 소장·E-mail : ihko@kowaco.or.kr

2. 연구방법 및 재료

연구대상인 대청호는 금강유역의 최대 상수원으로써 대전과 청주를 비롯한 충청지역에 연간 약 3.7억㎥의 생활 및 공업용수를 공급하고 있으며, 정부에서는 향후 이 지역에 행정도시 이전을 계획하고 있어 장차 인구와 용수수요는 계속 증가 할 전망이므로 안정적인 용수공급을 위해서는 저수지 수질관리가 더욱 중요한 사안으로 대두되고 있다. 대청호에는 청주권과 대전권으로 용수를 공급하기 위한 취수탑이 모두 본 댐 저수지내 위치하고 있으며 최근에 준공된 대청2단계 광역상수도 취수시설도 조정지댐내에 위치하고 있어 홍수기 탁수의 장기화는 원수의 수질에 직접적인 영향을 미치므로 적절한 조절대책이 필요한 실정이다.

2004년 7월1일부터 대청호 상류 옥천군 동이면에 위치한 Sta.7 지점에 탁수감시 장치(YSI6920)를 설치하고 수온, 탁도, 전기전도도, pH, DO를 한 시간 단위로 계측하였다(Fig.1). 2004년 대청댐 유역의 총 강우량은 1,381mm였으며 홍수기인 6월~9월 사이에 내린 강우량은 1,070mm로써 전체 강우의 77.5%를 차지했다. 일평균 유입량이 1000 ㎥/sec를 초과한 홍수사상은 6월, 7월, 8월에 각각 한번 씩 발생하였다. 저수지내로 유입한 탁수의 밀도류 거동과 수질변화 특성을 조사하기 위해서는 Sta.1~6에서 YSI6600으로 수심별 연속 수질측정을 실시하였다. 탁수 유입기간 동안 유속분포를 측정하기 위해 Acoustic Doppler Profilers를 사용하여 3차원 유속측정을 실시하였다. 유속은 수심방향의 요소간격을 2m로 하였으며 120초 동안 수신된 신호의 평균값을 사용하였다.

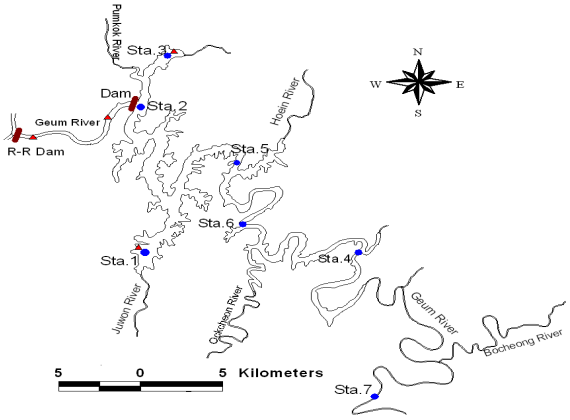

Fig.1 Layout of the reservoir and monitoring stations.

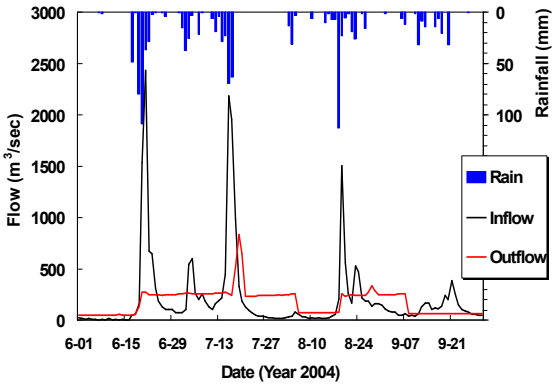

Fig. 2. Rainfall and flow conditions of the reservoir in 2004.

우리나라 댐 저수지는 대부분 길이가 폭에 비해 상대적으로 크고 수심이 깊고 홍수기에는 성층화 현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 탁수의 실시간 예측모델로써 저수지 수체를 흐름방향과 수심방향의 2차원으로 해석하고 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이한 CE-QUAL-W2 모형(이후 W2)을 채택하였다(Cole and Wells, 2003). W2 모형은 미국 호소뿐만 아니라 국내에서도 최근 섬진강댐의 옥정호와 소양호, 팔당호 등에서 호소 수온의 성층해석과 홍수시 오염수체의 밀도류 유동해석을 위해 광범위하게 적용된 사례가 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대청호 유입탁수의 수온 및 수질특성

Fig.3는 실시간 탁수감시장치를 통해 계측된 시간단위의 탁도, 수온, 전기전도도, pH, DO농도의 시계열변화를 보여주고 있다. 하천의 탁도는 대체로 유출수문곡선과 높은 유사성을 보이고 있으며 7월의 강우시에는 일시적으로 1000 NTU 이상의 높은 탁도가 발생하였고 8월에도 최고 250 NTU의 탁도가 발생하였다. 강우사상으로 탁수가 발생하는 기간 동안 하천의 수온은 강우 전 보다 대체로 5~10℃ 정도 하강하는 것으로 나타났다. 탁수 유출기간 동안 하천수온의 하강은 대기온도의 영향이 크며 탁수의 밀도는 저수지 표면수보다 수온차이로 인해 1.4~2.6 kg/m^3 높게 되어 저수지에서 중층 밀도류를 형성하는 직접적인 원인이 된다. 탁수의 전기전도도는 강우에 따른 단기 유출 효과 때문에 이온강도가 낮아 강우 전 하천수 보다 약 40~50μs/cm 정도 낮아졌다. pH는 큰 변화를 보이지는 않았지만 산성 강우의 영향으로 평균적으로 강우 전에 비해 약 0.6 정도 하강하였다. 하천의 용존산소농도는 기온의 강하로 인해 강우 전에 비해 약 1~3 mg/L 정도 상승하였으며 유출기간 동안에는 일주기 변화가 약화되는 현상을 보인다.

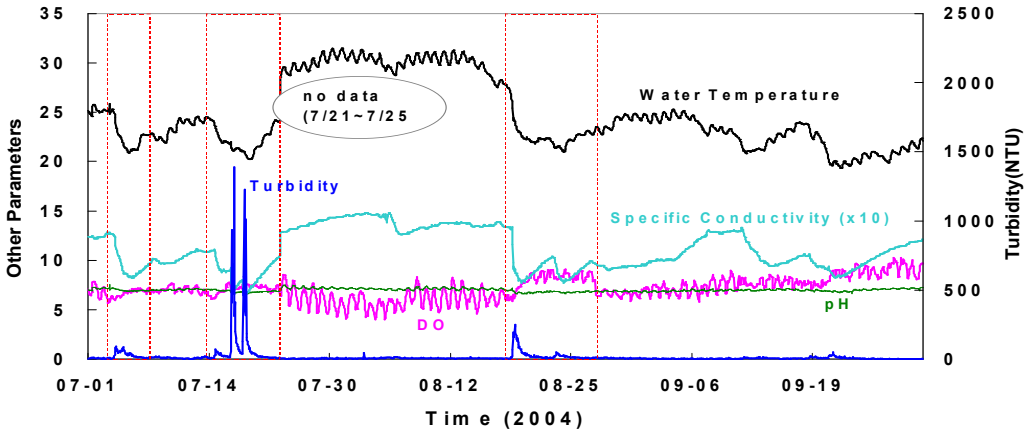

Fig. 3. Observed water temperature, turbidity, conductivity, pH, and DO at Sta.7.

Fig. 4와 5는 댐 앞 지점(Sta.2)에서 주간 측정한 수온, 탁도, 전기전도도, DO의 수심별 분포를 등고선으로 나타낸 것이다. 수온은 5월경부터 성층화가 서서히 진행되었으며 본격적인 탁수가 유입되기 전인 6월 중순까지 EL. 55m인근에 전이층이 발달되었다. 그러나 6월 중순이후 유입한 탁수가 중층에서 밀도류를 형성하면서 수온 전이층은 15m 정도 하강하여 EL. 40m 부근에서 형성되었다. 9월에는 기온의 하강으로 전도현상이 나타나기 시작하였으나, 이미 대부분의 탁수가 하류로 배제되거나 바닥으로 침강하여 재부상으로 인한 탁도 증가 현상은 나타나지 않았다. 탁수가 관입하여 지나가는 중층을 따라 상류하천에서 관측된 결과와 유사하게 전기전도도가 급격히 떨어지는 현상이 나타났다. 그러나 탁수층이 통과하는 중층에서 DO 농도는 낮게 나타났으며, 특히 표층수와 탁수층의 경계면에서 급격한 DO 농도 감소, 즉 Metalimnetic DO Sag 현상이 관찰되었다. 이 현상은 흐름의 정체구역인 댐 축 가까이 갈수록 더욱 강하게 나타났다. 이 구간에서 DO 농도가 급격히 저하되는 이유는 탁수와 함께 유입한 유기물과 영양염류가 분해 또는 산화되면서 다량의 산소가 소모된 결과로 추정된다. 또한, 이 구간은 저수지 흐름순환 특성상 유속이 상대적으로 느린 영역(stagnant region)이므로 식물성 및 동물성 플랑크톤 등의 입자성 유기물질의 침강속도가 감소하여 용존산소의 소모율이 증가된 것으로 보인다.

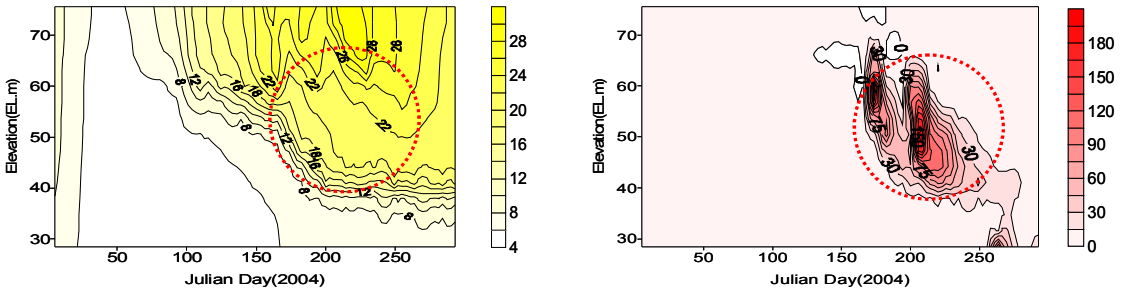

Fig. 4. Temporal and spatial variations of water temperature(left) and turbidity(right) at Sta.2

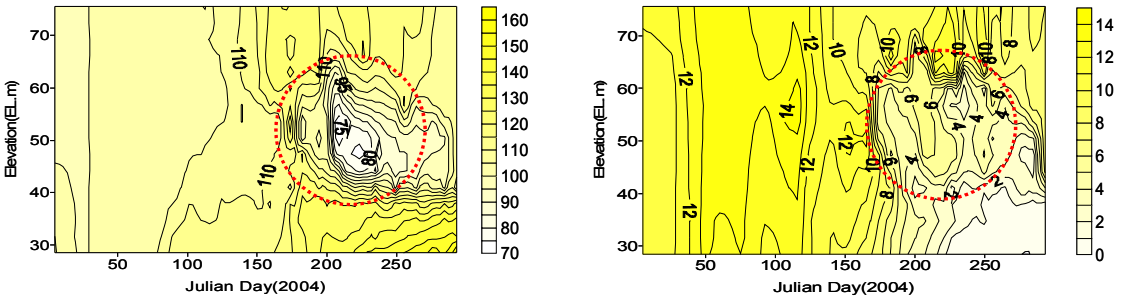

Fig. 5. Temporal and spatial variations of water temperature(left) and turbidity(right) at Sta.2

3.2 모델 적용 결과

W2 모델은 펜티엄급(CPU 2.0 GHz) PC로 홍수기 4개월 모의에 소요된 시간이 약 4분으로써 계산의 효율성 측면에서 RTMMS의 실시간 탁수예측모의에 매우 적합한 것으로 평가되었다. Fig. 6은 댐 앞인 Sta.2 지점에서 수온의 수직분포를 비교한 결과를 보여준다. 모델의 예측성능을 평가하기 위하여 실측값과 계산값 간의 절대평균오차(absolute mean error, AME)와 평균제곱오차의 평방근(root mean square error, RMSE)을 사용하였다.

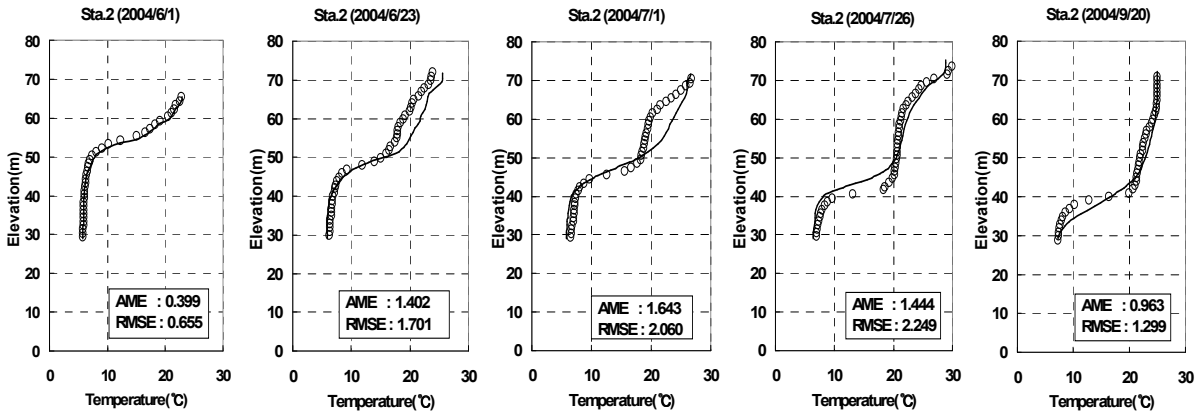

Fig. 6. Comparisons of observed and simulated water temperature profiles at station 2 in 2004.

모의결과는 수심별 저수지 수온분포를 비교적 잘 반영하고 있으며 AME와 RMSE 값은 각각 0.399 ~ 1.643℃와 0.6555 ~ 2.249℃의 범위를 나타내었다. 그러나 모의결과는 6월 중순에 발생한 1차 홍수가 유입한 후인 7월 1일에 EL. 50 ~ 65m구간에서 실측수온과 비교적 큰 차이를 보였다. 또한 성

층현상이 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 W2 모형에서 잘 반영되지 않기 때문으로 판단되며 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 댐 앞인 Sta.2 지점에서 관측탁도와 모의탁도의 수직분포를 비교한 결과를 보여준다. 모의된 수심별 탁도분포 및 최고탁도 발생수심은 실측자료와 비교적 잘 부합하였으며AME와 RMSE 값은 각각 3.365~34.279NTU와 3.6494~39.659NTU의 범위를 나타내었다. 그러나 7월26일에 심수층인 EL. 40.0m 이하 구간에서 탁도의 모의값은 관측값 보다 50NTU 정도 높게 산정되었다. 이것은 모델에서 부유물질의 침강속도를 저수지 전체에서 하나의 상수로 사용함으로써 중층의 탁수와 저수지 심수층의 물이 서로 다른 밀도층을 형성하여 경계면(stagnant region)에서 부유물질의 침강속도가 매우 작아짐에도 불구하고 모형에서는 이를 제대로 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. 또한, 발전방류로 인해 생성되는 접근유속도 댐 앞 지점에서의 부유물질 침강을 방해하는 요인으로 작용할 수도 있으므로 모의결과의 개선을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

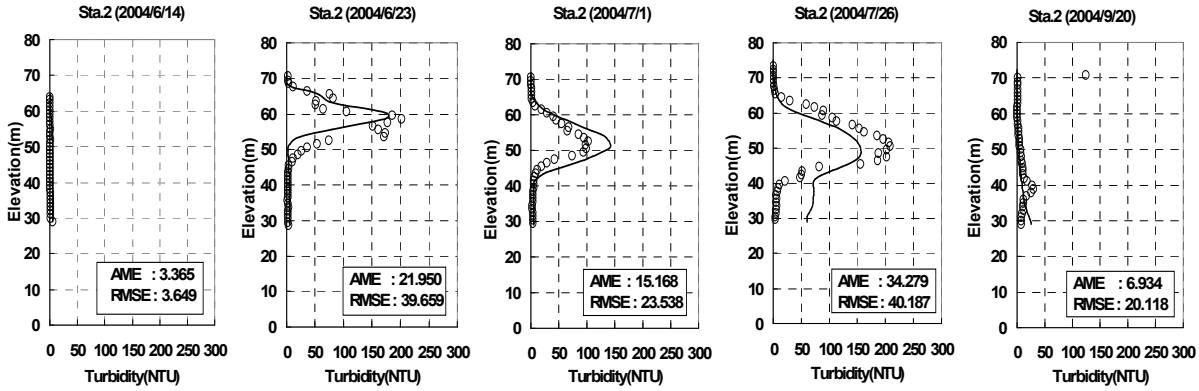

Fig. 7. Comparisons of observed and simulated reservoir turbidity profiles at station 2 in 2004.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련되신 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박기영(2003). 2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축, 석사학위논문, 경북대학교
2. 정세웅 (2002), "성층 저수지로 유입하는 탁류의 유동특성과 영향에 관한 연구," 2002년 한국농공학회 학술발표 논문집, pp.269~272.
3. 정세웅 (2004), "성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링", 대한환경공학회지, 26(90, pp.970-978.
4. 한국수자원공사 (2000), 댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발.
5. 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.