

# 성층 저수지로 유입하는 탁류의 유동특성과 영향에 관한 연구

Flow regimes and water quality impact of turbidity current into a stratified reservoir

\*정세웅(한국수자원공사)

\*Chung, Se-Woong

## Abstract

Turbidity currents, often develop after heavy storm events, deliver various non-point pollutants and tend to lead eutrophication, depressed dissolved oxygen, and sedimentation in reservoirs. Field observations were performed to investigate the flow regimes of turbidity currents and their impact on reservoir water quality in Daechong Reservoir. A 2D laterally-averaged hydrodynamic and water quality model was applied to simulate the temporal and spatial distributions of turbidity in the reservoir, and evaluated by comparing with the field data.

## I. 서론

홍수기 동안 강우-유출에 따른 토양의 침식 때문에 발생하는 탁류는 댐저수지내에 장기간 체류하면서 댐을 수원으로 하는 정수장의 수처리에 장애를 초래한다. 특히, 인을 포함한 다양한 비점오염원을 저수지로 단시간에 다량 유입시킴으로써 저수지 부영양화의 원인을 제공 할 뿐만 아니라 중·하층의 산소고갈, 저수지퇴사 그리고 장기간 탁수 방류에 따른 하류 수질문제 등을 야기한다. 국내에서 저수지 탁수발생과 관련한 민원으로써는 소양강댐 하류 춘천시 정수장의 정수처리비용 보전요구와 임하댐 하류 안동시의 탁수처리 대책요구 사례가 대표적이며 지속적으로 탁수발생과 관련한 민원은 증가하고 있지만 아직 해결책을 찾지는 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 금강수계 대청댐 저수지를 대상으로 홍수기 중에 유입하는 탁류의 밀도류 유동특성과 수질에 미치는 영향을 조사하고, 댐 계획과 운영단계에서 취수탑 위치선정, 선택방류 및 취수 등의 대안수립을 지원하기 위한 2차원 저수지 탁류거동 예측모형을 구축하는데 있다.

## II. 재료 및 방법

2000년 홍수기 동안 3회의 현장조사를 하였다. 1차는 6월22일에 홍수기전 강우가 없는 상태에서의 저수지 흐름상태, 성층화, 탁도와 수질을 파악하고자 실시되었다. 2차는 7월23일에 강우가 시작되어 하루 동안 156 mm의 집중호우가 내려 침투유입량 4,155 m<sup>3</sup>/sec가 유입된 지 10일 후인 8월4일에 이루어졌다. 3차는 8월24일에 강우가 시작되어 8월27일까지 197.6 mm가 내려 침투유입량 2,582 m<sup>3</sup>/sec가 유입된 지 10일 후인 9월6일에 이루어졌다. 수리 및 수질조사는 흐름특성을 고려하여 상류로부터 장계교(Sta.1), 대정리(Sta.2), 회남교 하류(Sta.3), 청남(Sta.4), 본댐 앞(Sta.5)의 5개 지점에서 실시하였다. 탁류의 수리동력학적 순환특성을 조사하기 위해 ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)를 이용하였으며, YSI-6000을 사용하여 수심별 탁도, DO 농도, 수온, pH, 전기전도도를 측정하였다.

저수지내에서의 성층해석과 탁수의 밀도류 거동 및 농도분포를 모의하기 위해, 저수지를

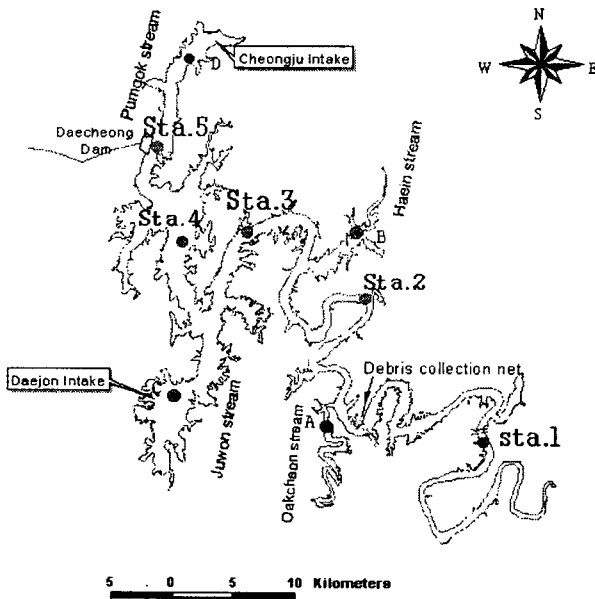


그림 1. 저수지내 조사지점과 취수탑 위치

종방향과 수심방향의 2차원으로 해석(횡방향평균)하는 미공병단이 개발한 CE-QUAL-W2 모형(Cole, 1995)을 적용하였다. 저수지는 본류와 지류를 포함하여 5개의 구획으로 구분하고 본류는 장계교로부터 댐측까지 31개의 요소( $\Delta x = 0.5 \sim 1.9 \text{ km}$ )로 수심방향으로는 2 m간격 28개층으로 모의하였다.

모의에 필요한 경계조건은 저수지 유입유량, 수온, 수질농도, 방류량과 대상지역의 기상자료이다. 유입량과 방류량은 대청댐의 운영자료를 사용하였으며 지류에서의 유입량은 유역면적에 의한 비유량법으로 산정하였다. 기상자료는 대청댐저수지 인근에 위치한 기상청의 자동기상관측소(AWS) 자료와 가장 가까운 대전기

상청의 시간별 자료를 사용하였다. 초기조건은 6월22일에 저수지내 본댐앞에서 측정된 수온과 탁도의 수심별 자료를 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 조사결과

홍수유입이 발생되기 전인 6월22일에 탁도는 저수지 유입부(댐으로부터 거리 30 km 이상)에서 10~25 NTU로 낮게 나타났으며 DO 농도는 댐으로부터 회남교 하류까지는 8.0 mg/l 이상의 높은 농도를 보였으나, 회남교 상류에서는 수심방향으로 용존산소량이 감소하여 바닥층에서 DO농도가 4.0 mg/l 이하로 나타났다. 이것은 상류로부터 유입한 유기물질들이 유입부에서 유속 감소로 인해 침강하여 분해되면서 산소가 소모된 결과로 보인다.

8월4일에 관측된 자료는 수심 10~35 m의 중층구간에서 탁도가 20 NTU 이상을 보이고 수심 25 m에서는 최고탁도 100 NTU가 관찰되었다. DO 농도는 6월22일의 분포와는 달리 수심별로 상이한 값을 보였으며 상층에서는 7.0 mg/l 이상의 농도를 보인 반면, 중층에서는 5.0~6.0 mg/l, 댐 부근의 하층에서는 4.0 mg/l 이하로 나타났다.

9월6일의 탁도분포는 부유물질이 침강됨에 따라 60 NTU 이상의 높은 탁도가 댐으로부터 10~30 km 구간의 저수지 하층에 위치하고 있으며, 저수지내 퇴사가 대부분 이 구간에서 이루어졌다. 댐 부근에서는 고탁도의 물이 발전방류(240 m<sup>3</sup>/sce)를 통해 하류로 방류되어 부유물질 침강이 미미하였다. DO농도분포는 8월4일과 유사하나 다소 회복되어 중층에서 7.0 mg/l 이상을 보였다. 상층의 DO농도는 기온이 하강함에 따라 포화 산소농도가 증가하여 10.0 mg/l 이상의 값을 보였다.

저수지내 유속은 수심별로 차이는 있으나 대체로 2~12 cm/sec 범위였다. 8월4일과 9월6

일에 장계교(Sta.1)와 대정리(Sta.2)에서 상층은 하류로 중층과 하층은 상류방향으로 이동하고 있어 뚜렷한 양방향 흐름을 보였으며, 홍수로 인해 유입한 탁수가 상류로 역류하는 것으로 나타났다.

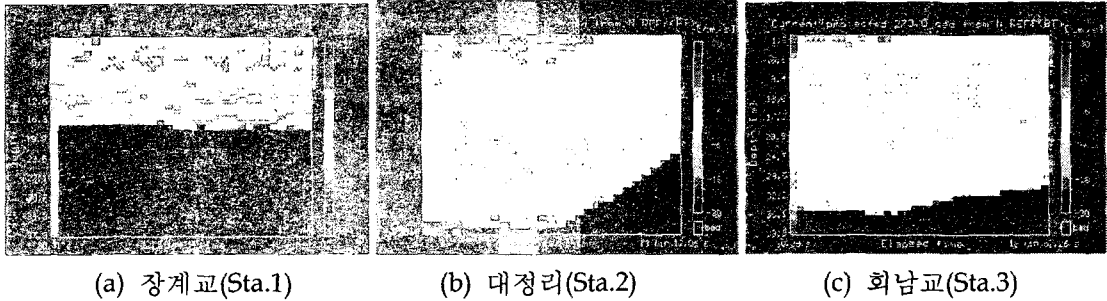


그림 2. 저수지내 유속측정결과(2000.8.4, positive values indicate downstream direction)

7월23일의 집중호우 이후 탁류가 유입하는 중층을 따라 DO농도가 4.0 mg/l이하로 급격히 고갈되어 탁수가 수질악화에 결정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 수온이 급변하는 수심 5~15 m 구간에서 급격한 DO농도 감소가 관찰되었다. 이 구간에서 DO농도가 급격히 저하되는 이유는 저수지의 성층화 때문에 식물성 및 동물성 플랑크톤 등의 입자성 유기물질의 침강속도가 감소하여 다량의 산소가 소모된 결과로 추정된다. 또한 이 구간은 저수지 흐름순환 특성상 흐름이 상대적으로 느린 영역(stagnant region)이므로 용존산소의 소모율을 증가시키는 경향이 있다(Kim et al., 1984).

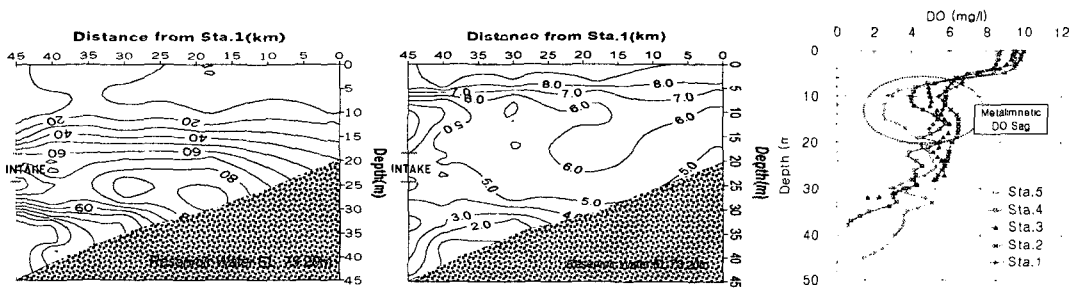


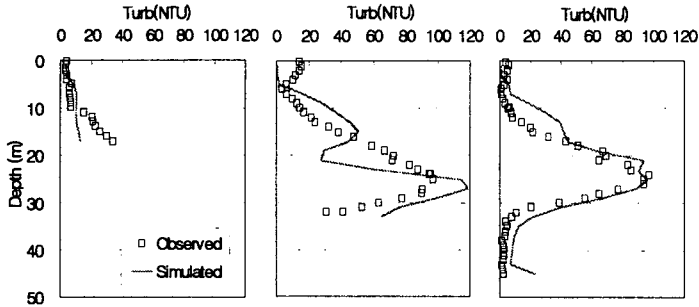
그림 3. 저수지내 탁도 및 DO 조사결과(2000.8.4)

조사결과를 종합하면, 성층화된 대정담저수지로 유입한 탁류는 본류를 따라 이동하다가 유입수와 저수지 상층부의 밀도차(수온과 부유물질 농도의 함수)때문에 저수지 표면 아래로 침강한 후 심층 밀도류를 형성하며 장계교로 유입하고 대정리와 회남교 사이(담축으로부터 약 20~25 km 구간)에서 동일한 밀도층을 만나 저수지 바닥으로부터 이탈하여 층간 밀도류를 형성하는 것으로 보인다. 탁류는 저수지 중층의 수심 10~30 m 구간에서 층간 밀도류 형태로 하류로 진행하다 저수지의 심한 만곡 형상 때문에 본담쪽으로 직접 진행하지 않고 주원천쪽으로 먼저 유입되는 것으로 판단된다.

조사결과를 보충 증명하기 위하여 주원천에 위치한 대전취수탑과 품곡천에 위치한 청주취수탑의 원수 탁도자료를 수집하여 비교한 결과, 청주취수탑 보다 대전취수탑에서 원수의 탁도가 5배 이상 높게 나타났으며, 발생지점도 홍수의 유입시점과 매우 잘 일치하였다.

## 2. 모의결과

W2모형은 저수지의 성층화 현상과 홍수유입에 의한 중층 성층 파괴 현상 등을 매우 잘 모의하는 것으로 나타났다. 수심 25~30 m 구간에서 모의수온과 실측 수온값이 다소 차이를 보였으나, 상류경계면에서의 유입수 수온자료와 전이층에서의 수직확산계수를 정확히 산정하여 사용하면 개선될 것으로 판단된다. 모의된 탁류의 유동특성은 대정리와 회남교



(a) Station 1 (b) Station 3 (c) Station 5

그림 4. 탁도분포 모의결과 비교(2002.8.4)

사이(댐축으로부터 약 20~25 km 거리)에서 저수지 바닥으로부터 이탈하여 수심 10~35 m (두께 25 m)구간을 따라 댐축으로 층간 밀도류를 형성하며 이동하는 것으로 모의되었으며, 수심별 탁도분포 및 최고탁도 발생수심 등이 실측자료와 매우 잘 부합하였다(그림 4). 장계교에서 댐축 방향으로 중층에서의 유속은 2~9 cm/sec의 범위, 상층과 하층에서는 0~-2.0 cm/sec의 범위를 보여 ADCP로 측정한 결과와 비교해 볼 유속의 크기는 실측유속(6 cm/sec 내외)에 매우 근접하였지만, 유속의 방향은 국부적으로 다소 상이하였다. 특히, 장계교로부터 하류방향 10 km 구간에서 관측된 저수지 하층의 역류 현상이 모형에서는 잘 반영되지 않았다. 이것은 모형의 지배방정식이 저수지내 흐름을 x-z 방향의 2차원으로 모의하기 때문에 저수지의 만곡 등 지형적인 영향으로 발생하는 국지적인 역류현상을 제대로 반영하지 못한 때문인 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

탁수발생을 근본적으로 억제하고 수질에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 상류 유역에 대한 토양침식 방지와 비점오염원의 관리가 선행되어야 하지만, 이것은 장기간의 노력과 투자를 요구한다. 저수지내로 일단 유입한 탁수는 가능한 빨리 하류로 배제하는 것이 저수지수질관리 측면에서 유리하다. 그러나, 홍수때 확보한 물을 평갈수기 동안 이용해야 하는 수자원 부존 여건을 감안하면 탁수의 중심이 댐축에 도달하는 시간에 맞추어 적기에 적정량의 물을 하류로 배제하는 방안을 고려할 수 있다. 저수지 탁류해석모형은 탁수 및 오염물질의 이송·확산 특성을 분석하고 선택적 취수와 발전 방류량 조절 등 저수지운영자들이 실시간으로 적절한 조절대책을 수립하는데 사용 할 수 있다. 또한 저수지내와 하류에 위치하고 있는 취수장과 정수장에 실시간으로 탁수의 발생시간, 지속기간, 농도 등을 예보하여 원수의 수질을 예측하는데 활용 가능하다. 그리고 신규댐의 계획과 설계시 선택적 취수설비의 위치와 형식, 그리고 운용방법의 설계에도 모형은 적용가능하다.

#### 참고문헌

- Cole, T.M. and E.M. Buchak. 1995. CE-QUAL-W2: a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, EL-95-1, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.  
Kim, B.R., J.M. Higgins, and D.J. Bruggink(1984), "Reservoir Circulation Patterns and Water Quality", J. of Envir. Engr. 109(6), pp. 1284~1294.