

# 수류차단막 설치효과 수치모의 (2009년)

## Numerical Modeling the Effects of Curtain Weir in the Daecheong Reservoir

이흥수\*, 정세웅\*\*, 민병환\*\*\*

Heung Soo Lee, Se Woong Chung, Byeong Hwan Min

### 요 지

물리적 녹조저감 기술인 커튼형 수류차단막은 유입 하천과 저수지 천이부에서 높은 영양염류와 조류를 포함한 표층 수류의 차단 또는 우회를 통해 본류 수역의 녹조발생을 저감하는 대책이다. 본 연구에서는 2009년 5월 회남대교 약 2 km 상류에 시범 설치된 대청호의 수류차단막 효과를 분석하고자 선행연구에서 보정한 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질 모델을 최근의 수문사상인 2009년 6~8월까지 적용하여 검토하고 수치모의를 실시하였다. 저수지 수위와 실측수위를 비교한 결과, 7월 중순 유입량 증가에 따른 수위 상승을 잘 반영하였고, 결정계수값( $R^2$ )이 0.997로 나타나 모델은 저수지 물수지 계산에 있어서 높은 신뢰도를 보였다. 댐 앞과 회남수역에서 수심별 수온예측 오차는 AME 0.258~1.584°C, RMSE 0.393~2.548°C의 범위로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 회남, 댐, 추동, 문의 수역의 표층에서  $PO_4$ -P 및 Chl-a 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과, 모델은 저수지내 각 측정지점에서 실측값의 시계열 변화를 잘 모의하였고, 회남수역에서 7월 중순 홍수 유입에 따라 증가하였다. 특히,  $PO_4$ -P 농도가 0.06 mg/L까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 홍수기에 높은 영양염류를 포함한 탁수가 수류차단막 하단을 통과하여 수리학적 도수현상(Hydraulic jump)을 일으킨 것이 원인이라 판단된다. 수류차단막 설치에 따라 회남수역의 표층에서 Chl-a 농도의 저감 효과가 두드러졌으나, 댐, 추동 및 문의수역에서의 제어 효과는 미미하였다. 이와 같이 회남수역에서 효과가 큰 이유는 2009년 수문사상의 영향과 저수지 지형특정상 유입수의 영향을 직접받기 때문으로 판단된다. 또한, 회남수역에서 수류차단막 설치에 따른 T-N 및 T-P 평균 저감 효율(수류차단막이 설치되지 않은 경우에 대한 설치 후 농도 저감 비)은 각각 10.8% 및 19.1%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 각각 1.637 mg/L에서 1.461 mg/L 및 0.047 mg/L에서 0.038 mg/L로 나타났다. DIN 및  $PO_4$ -P 평균 저감 효율은 각각 6.4% 및 24.6%이었으며, Chl-a 평균 저감 효율은 25.5%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 0.025 mg/L에서 0.018 mg/L로 나타났다. 모의결과를 종합해 볼 때, 대청호에 시범 설치된 조류제어용 수류차단막은 2009년의 수문사상에서 회남수역의 녹조발생 저감에 기여한 것으로 판단된다. 또한 대청호에서 유사한 수문사상을 보인 2006년(62일간)에 비해 2009년(28일간)에 조류주의보 발령 일수가 대폭 줄었다는 사실도 차단막의 효과를 간접적으로 확인해 준다.

**핵심용어** : 녹조저감, 수류차단막, 2차원 모델, 수치모의, 대청호

### 1. 서 론

물리적 저수지 수질개선 기술인 커튼형 수류차단막은 경제적이면서도 생태계 영향이 적은 대책으로 일본,

\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : [hslee@chungbuk.ac.kr](mailto:hslee@chungbuk.ac.kr)

\*\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : [chung@chungbuk.ac.kr](mailto:chung@chungbuk.ac.kr)

\*\*\* 비회원 · 한국수자원공사 충청지역본부 수질관리팀 · E-mail : [minbh@kwater.or.kr](mailto:minbh@kwater.or.kr)

미국, 호주 등에서 녹조(algal bloom)제어, 수온제어, 탁수제어 등을 위해 적용된 바 있다(Asaeda et al., 2001; Morillo et al., 2006; Vermeyen, 2000). 수류차단막은 일반적으로 저수지의 천이구간(transitional zone)에 부상식(float type)으로 설치하여, 일정 깊이의 표층 또는 유광층 흐름을 차단함으로써 상류에서 유입하는 조류와 고 농도의 영양염류를 포함한 오염된 하천수가 본류수역(lacustrine zone)의 유광층으로 공급되는 것을 억제하는 기능이 있다.

본 연구에서는 2009년 5월 회남대교 약 2 km 상류에 시범 설치된 대청호의 수류차단막 효과를 분석하고자 선행연구에서 보정한 2차원 횡방향 평균 수리 및 수질 모델(CE-QUAL-W2)을 최근의 수문사상인 2009년 6~8월까지 적용하여 검토정하고 수치모의를 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구대상

수류차단막의 시범설치 대상 저수지인 대청호는 금강유역의 최대 상수원으로 총 유역면적(용담댐 유역제외)은 3,204.0 km<sup>2</sup>이고, 저수지의 표면적은 72.8 km<sup>2</sup>로서 유역면적/저수면적의 비는 44.0이다. 연평균 유입량과 총 강우량은 각각 95.6 m<sup>3</sup>/s, 1,230.0 mm이고, 총 저수용량은 1,490×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이며, 유효저수량은 790×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>에 해당한다. 대청호의 취수를 위한 수리구조물은 2개의 취수탑(EL. 57.0 m)과 댐의 발전 방류구(EL. 52.0 m), 6개의 수문을 가진 여수로(EL. 64.5 m)가 있어 용수공급, 수력발전 및 평상시와 홍수 시 유량을 조절하고 있다(한국수자원공사, 2007). 그림 1에 한국수자원공사의 월간 및 주간측정지점인 장계교(R1), 대정리(R2), 회남교(R3) 및 댐 앞(R4)과 대전과 청주에 상수원수를 취수하는 추동(A1), 문의(A2) 취수탑을 나타내었다.

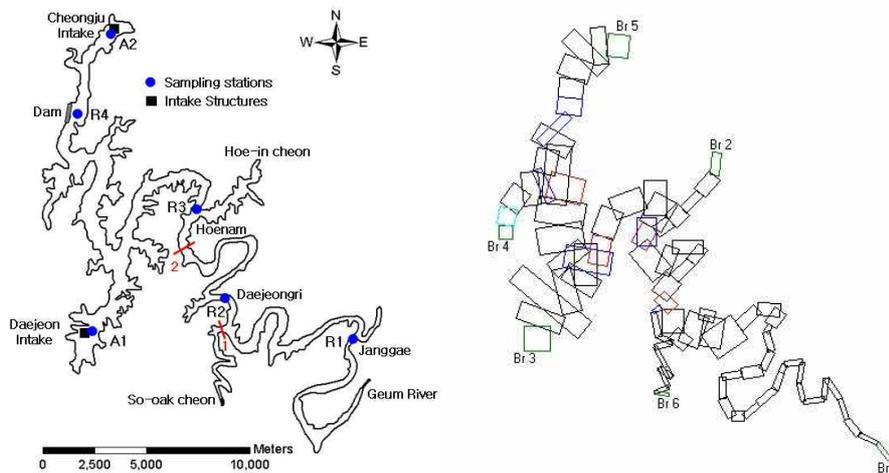


그림 1. 대청호 모니터링 지점, 차단막 설치 위치(좌) 및 유한차분 격자구성(우)

### 2.2 모델의 적용

W2 모델은 횡방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합하고, 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이하다.(정 등, 2005, Cole and Wells, 2004). W2 모형의 주요 입력 자료는 저수지 상류 및 하류의 유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 저수지 지형 및 단면자료, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수 등이다. 대청호의 유한차분 격자구성은 금강본류와 주요 지류하천을 6개의 구획(Branch)으로 구분하였다. 흐름방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 가덕교 지점에서 댐까지 98개( $\Delta x = 0.5 \sim 1.9$  km)의 요소(segment), 수심방향으로는 0.5~1.0 m 간격으로 69개 수층(Layer)으로 구분하였다.

기존의 W2 모델의 커튼형 웨어는 수위변동을 고려할 수 없는 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 수류차단막 설치가 수리, 수질, 조류성장 제어에 미치는 영향을 예측하기 위하여 수위변동이 심한 국내 저수지 특

성을 고려하여 수위변동에 따라 상하로 이동할 수 있도록 기존 모델의 커튼형 웨어 알고리즘을 수정하였다.

2009년을 대상으로 검증된 W2 모델을 이용하여 수류차단막 설치효과를 예측하고자 표 1과 같이 3가지 경우를 가정하였다. S-1은 2008년에 설치되어 이미 운영 중인 소옥천 하류 조류차단막 1(Segment 96, 깊이 7 m)에 2009년 시범사업으로 설치된 수류차단막 2(Segment 39, 깊이 10 m)를 설치하는 경우이며, S-2는 소옥천 하류에 단독으로 조류차단막 1을 설치한 경우이다. S-3은 S-1과 동일한 경우이지만, 본류 수류차단막 2가 수류에 의한 들림 현상이 발생할 수 있는 상황을 가정하여 설치 깊이를 7 m로 모의한 경우이다(그림 1, 표 1).

표 1. 수류차단막 설치 시나리오

Scenarios	curtain weir 1	curtain weir 2
S-1	○ (7 m)	○ (10 m)
S-2	○ (7 m)	×
S-3	○ (7 m)	○ (7 m)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수온 모의결과

저수지의 수온성층 구조는 오염물질의 공간적 분포, 수직혼합, 입자상 물질의 침강속도 및 조류의 성장환경 등에 영향을 미치는 중요한 인자이므로 수질모델링에서 우선 검증되어야 한다. 2009년 6월부터 8월까지 R4 및 R3 수역에서 수심별 수온 모의값과 실측값을 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 2009년에는 소옥천 하류 조류확산방지막(7 m)과 수류차단막(10 m 깊이)이 운영된 것을 감안하여 수온을 모의하였다. R4 및 R3 수역에서 7월 중순 홍수기 이후 저수위가 약 10 m 정도 상승하였고, 수온예측 오차는 AME 0.258~1.584°C, RMSE 0.393~2.548°C 범위로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

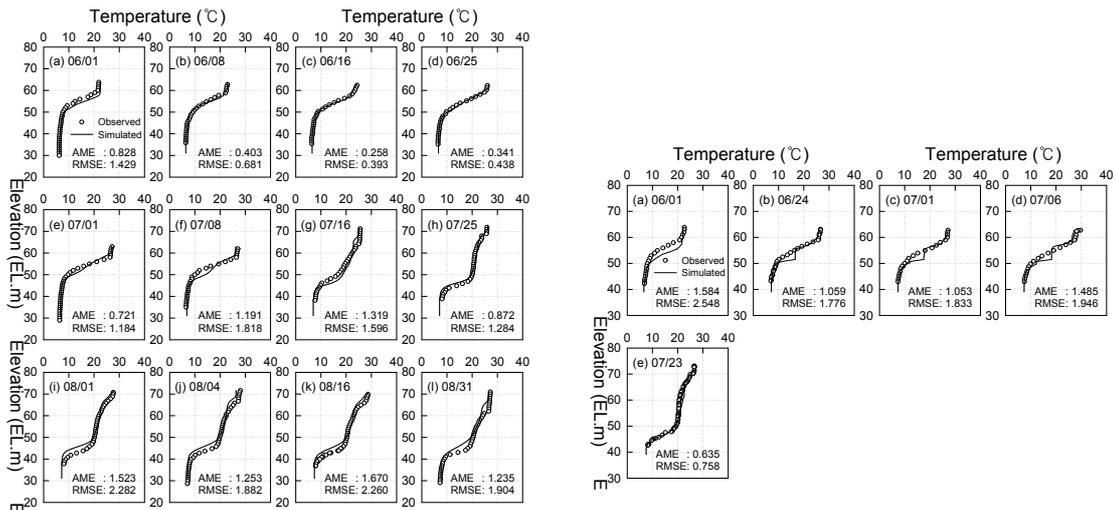


그림 2. 대청호 R4(좌) 및 R3(우) 수역에서 실측 및 모의 수온 비교

#### 3.2 영양염류 및 조류 시계열 모의 결과

2009년 6월부터 8월까지 표층에서 PO<sub>4</sub>-P 및 Chl-a 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 그림 3에 나타내었다. PO<sub>4</sub>-P 농도의 표층 모의 결과, R3, R4, A1 및 A2 수역의 모든 지점에서 실측값을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났고, 모든 지점에서 7월 중순 홍수 유입에 따라 증가하였다. 특히, R3 수역의 경우 PO<sub>4</sub>-P 농도가 0.06 mg/L까지 증가하는 것으로 모의되었다. 이는 홍수기에 높은 영양염류를 포함한 탁

수가 수류차단막 하단을 통과하여 수리학적 도수현상(Hydraulic jump)을 일으킨 것이 원인이라 판단된다. 또한, Chl-a 농도의 표층 모의 결과, 저수지내 모든 수역에서 홍수 유입시 증가하는 경향을 보였다. 반면, R3 수역을 제외한 모든 지점에서 표층 실측값은 감소하는 경향을 보였다. 이는 홍수시 R3 수역은 하천 유입수의 영향을 직접 받지만, R4, A1 및 A2 수역에서는 홍수가 중층 밀도류를 형성하므로 표층에 미치는 영향이 작기 때문으로 판단된다.

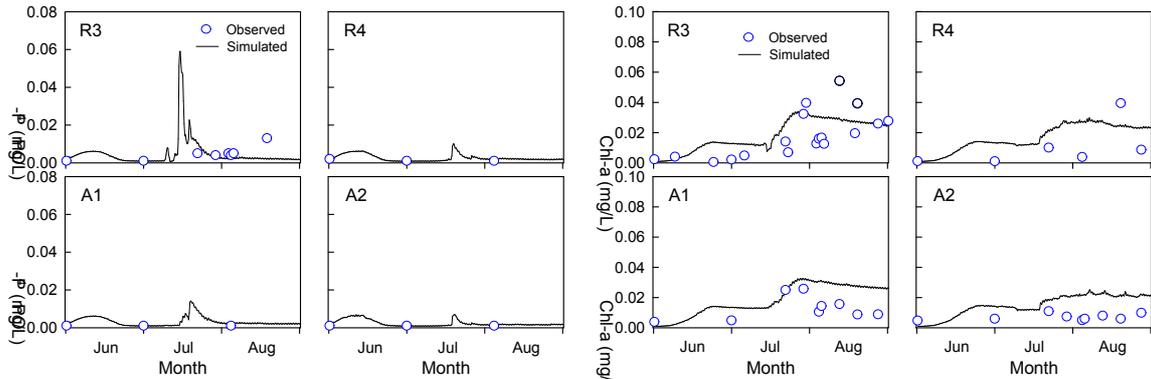


그림 3. 저수지내 각 지점에서 PO<sub>4</sub>-P(좌), Chl-a(우) 농도의 실측 및 모의 시계열 농도 변화

### 3.3 수류차단막 효과 분석

모든 시나리오에 대하여 2009년 6월부터 8월까지 R3, R4, A1 및 A2 수역에서 모의된 표층 Chl-a 농도의 시계열 변화를 그림 4에 비교하였다. 수류차단막 설치에 따라 R3 수역의 표층에서 Chl-a 농도의 저감 효과가 두드러졌다. 그러나, R4, A1 및 A2 수역에서는 조류농도가 높지 않았으며 이에 따라 수류차단막 효과도 적었다. 이런 이유는 유사한 수문사상을 보인 2006년과 달리 이들 수역에서 조류농도가 높지 않았던 원인은 가뭄으로 인해 저수지 초기수위가 낮았기 때문으로 유추된다. 또한, 2009년 수문사상의 영향과 저수지 지형 특성상 유입수의 영향을 직접받기 때문으로 판단된다. R3 수역에서 수류차단막 설치효과의 크기는 시나리오 S-2<S-3<S-1 순으로 증가하였으며, 수류에 의한 막의 들림 현상은 수류차단막의 효율을 다소 저하시키는 것으로 판단된다.

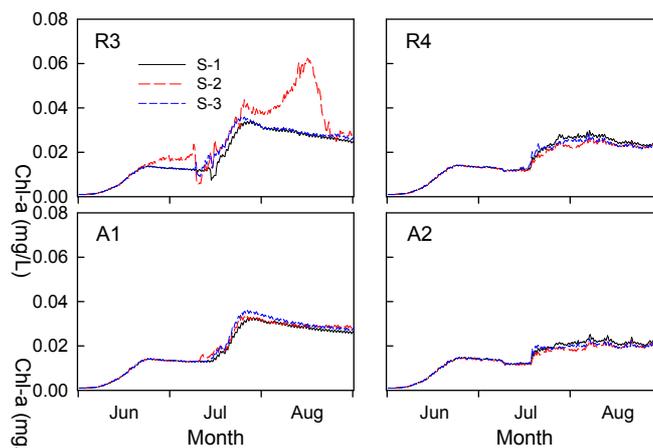


그림 4. 시나리오에 따른 R3, R4, A1, A2 지점에서 Chl-a 농도의 시계열 농도 변화

2009년 6~8월까지 수류차단막 설치에 따른 R3 수역에서 T-N, DIN, T-P, PO<sub>4</sub>-P 및 Chl-a 농도의 수질 개선 효율[수류차단막이 설치되지 않은 경우(S-2)에 대한 설치 후(S-1) 농도 저감 비]를 그림 5에 나타내었다.

6~8월 기간 동안 R3 수역에서 수류차단막 설치 유(S-1)·무(S-2)에 따른 T-N 및 T-P 평균 저감 효율은 각각 10.8% 및 19.1%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 각각 1.637 mg/L에서 1.461 mg/L 및 0.047 mg/L에서 0.038 mg/L로 나타났다. DIN 및 PO<sub>4</sub>-P 평균 저감 효율은 각각 6.4% 및 24.6%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 각각 0.979 mg/L에서 0.916 mg/L 및 0.0061 mg/L에서 0.0046 mg/L로 나타났다. 또한, Chl-a 평균 저감 효율은 25.5%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 0.025 mg/L에서 0.018 mg/L로 나타났다. 6월, 7월, 8월의 Chl-a 평균 저감 효율은 각각 12.5%, 16.7%, 31.7%이었으며, 평균 저감농도는 모의값을 기준으로 각각 0.008 mg/L에서 0.007 mg/L, 0.024 mg/L에서 0.020 mg/L, 0.041 mg/L에서 0.028 mg/L로 나타났다.

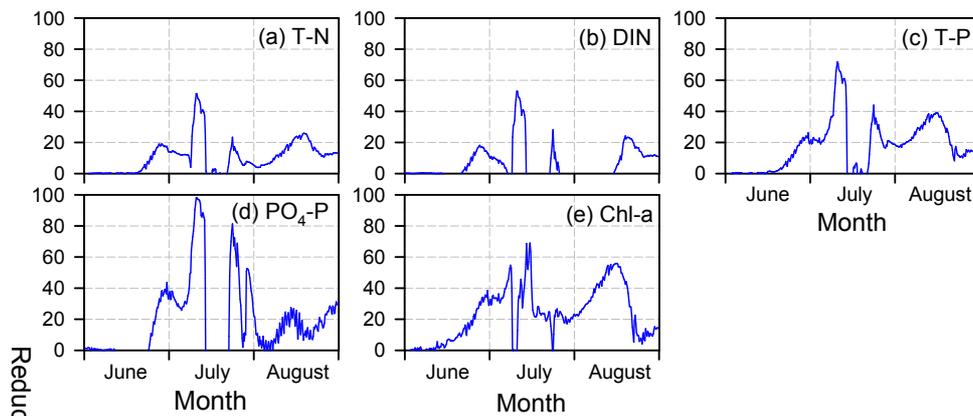


그림 5. 수류차단막 설치 유(S-1)·무(S-2)에 따른 R3 지점에서 T-N, DIN, T-P, PO<sub>4</sub>-P 및 Chl-a 농도의 수질개선 효율

#### 4. 결론

모의결과를 종합해 볼 때, 대청호에 시범 설치된 조류제어용 수류차단막은 2009년의 수문사상에서 R3 수역의 녹조발생 저감에 기여한 것으로 판단된다. 또한 대청호에서 유사한 수문사상을 보인 2006년(62일간)에 비해 2009년(28일간)에 조류주의보 발령 일수가 대폭 줄었다는 사실도 차단막의 효과를 간접적으로 확인해 준다.

#### 참 고 문 헌

1. 정세용, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간적분포 모의, *한국수자원학회 논문집*, **38**(8), pp. 655-664.
2. 한국수자원공사(2007). 댐운영 실무편람.
3. Asaeda, T., Pham, H. S., Priyantha, D. G., Manatunge, J., and Hocking, G. C.(2001). Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: a numerical analysis, *Ecological Engineering*, **14**, pp. 395-404.
4. 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.
5. Morillo, S., Imberger, J., and Antenucci. J. (2006). Modifying the residence time and dilution capacity of a reservoir by altering internal flow-paths, *J. River Basin Management*, **4**(4), pp. 255-271.
6. Vermeyen, T. B. (2000). Application of Flexible Curtains to Control Mixing and. Enable Selective Withdrawal in Reservoirs. U.S. Bureau of Reclamation, D-8560, Denver, CO 80225, pp. 457-462.