

대청호 녹조제어를 위한 수류 차단막 설치효과 수치모의

Modeling the Effects of Curtain Weir on the Control of Algal Bloom in Daecheong Reservoir

이흥수*, 정세웅**, 정희영***, 민병환****

Heung Soo Lee, Se Woong Chung, Hee Young Jeong, Byeong Hwan Min

요 지

물리적인 조류제어 기술에 해당하는 수류 차단막(이하 차단막)은 유입하천의 수류를 차단 또는 우회시켜 영양염류가 저수지의 유광층으로 공급되는 것을 차단하고 본류 수역으로의 조류 확산을 방지하는 기능이 있어 일본에서는 저수지 녹조제어 대책으로 자주 활용된 바 있다. 그러나 이러한 차단막은 국내 저수지와 같이 홍수시 유입 유속이 크고 수위변동이 심한 환경에서는 설치효과가 검증되지 않아 현장적용에 앞서 수치모의를 통한 효과 검증이 선행되어야 하며, 최적 규모와 위치 선정도 필요하다. 본 연구에서는 수위변동이 심한 국내 저수지 특성을 고려하여 차단막이 수위변화에 따라 상하로 이동할 수 있도록 기존 CE-QUAL-W2(이하 W2) 모델의 알고리즘을 수정하고, 대청호에서 다양한 수리·수문조건에서 차단막의 기작과 효과를 예측하기 위해 가뭄년(2001년)과 평수년(2004, 2006년)을 대상으로 각각 모델을 적용하였다. 차단막 설치 예정지점은 소옥천 하류(7 m 깊이)와 댐으로부터 각각 14.9 km, 27.4 km 상류에 위치한 회남대교 아래 지점(10 m 깊이)과 대정리(10 m 깊이)로 가정하고, 모의 시나리오는 차단막을 설치하지 않은 경우(S-1), 소옥천 하류에 단독으로 설치한 경우(S-2), 소옥천과 대정리에 설치한 경우(S-3), 모든 지점에 설치한 경우(S-4)를 비교하였다. 차단막 설치에 따른 수문년 및 계절별 수질개선 효과(S-1에 대한 S-4 농도 저감 비)를 비교한 결과, 대청호에서 녹조문제가 가장 심각했던 2001년 6월~8월 기간 동안 차단막은 봄-여름에 걸쳐 모든 비교 지점(회남, 댐, 추동, 문의수역)에서 Chl-a 농도를 최저(문의수역) 30%에서 최고(회남수역) 70% 정도 저감하는 효과를 나타냈다. 평수년인 2004년과 2006년에는 강우사상에 따라 차단막 설치에 따른 Chl-a의 농도 저감 효과가 지점별로 다르게 나타났으며, 큰 강우사상이 6월, 7월, 8월에 걸쳐 골고루 발생한 2004년에 비해 7월 한 달 동안 집중된 2006년에 설치효과가 크게 나타났다. 수역별로 차단막의 설치효과를 비교해 보면, 유입수의 영향을 직접 받는 회남수역과 추동수역이 댐 앞과 문의수역에 비해 차단막 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나, 큰 홍수가 유입할 때 차단막 상류부에 집적된 조류의 일부가 수류의 포획(Entrainment) 기작에 의해 저수지 내부로 유입되는 것으로 확인되어 차단막 효과를 극대화하기 위해서는 홍수 전 차단막 상류부에 집적된 조류의 처리대책이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 녹조제어, 수류 차단막, Curtain Weir, 대청호, CE-QUAL-W2

1. 서 론

화학적·생물학적 저수지 조류제어 대책 방법들은 부분적으로 효과를 거둘 수 있겠지만 적용 규모, 시설 투자비용 및 유지관리비용, 부산물의 생성에 따른 생태계 영향 등 해결해야 할 많은 문제점을 안고 있어 성공적인 적용사례가 매우 드물다. 반면 물리적 녹조(algal bloom)저감 기술인 커튼형 수류차단막은 경제적이면

* 정희원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : hslee@chungbuk.ac.kr
** 정희원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : schung@chungbuk.ac.kr
*** 비희원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : jhy@chungbuk.ac.kr
**** 비희원 · 한국수자원공사 충청지역본부 수질관리팀 · E-mail : minbh@kwater.or.kr

서도 생태계 영향이 적은 대책으로써 일본 등에서 적용된 바 있다(Asaeda et al., 2001). 수류차단막은 외부에서 저수지 표층 또는 유광층으로 유입되는 오염부하 흐름을 차단 또는 인공적인 정체수역을 조성함으로써 제한된 구간에서 조류발생을 유도하여 본류 수역으로의 조류 확산과 성장을 제어하는 기능이 있다. 특히 오염하천으로부터 높은 농도의 인이 표층으로 공급되거나 상류 하천에서 발생한 조류의 유입으로 인해 본류 수역에 조류가 확산, 과잉 성장하는 경우에 커튼형 수류차단막은 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.

수류차단막 설치 효과는 수류차단막의 위치 및 규격에 따라 다르게 나타나 최적 설계를 위해서는 정확한 사전 예측 기술이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대청호를 대상으로 상수원 수질 개선을 위한 수류차단막 설치에 따른 조류 저감 효과를 예측하고자 2차원 수리 및 수질 모델인 CE-QUAL-W2(이후 W2)를 사용하였고, 다양한 수리-수문 조건에서 수류차단막의 기작과 효과를 예측하기 위해 가뭄년(2001년)과 평수년(2004, 2006년)을 대상으로 각각 모델을 적용하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상

차단막의 시범설치 대상 저수지인 대청호는 금강유역의 최대 상수원으로 총 유역면적(용담댐 유역제외)은 3,204.0 km²이고, 저수지의 표면적은 72.8 km²로서 유역면적/저수면적의 비는 44.0이다. 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. 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.

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(그림 1). 부영양화 현상을 W2 모델로 해석하기 위하여 모델의 보정(2001년)과 검증(2004, 2006년)을 실시하였다.

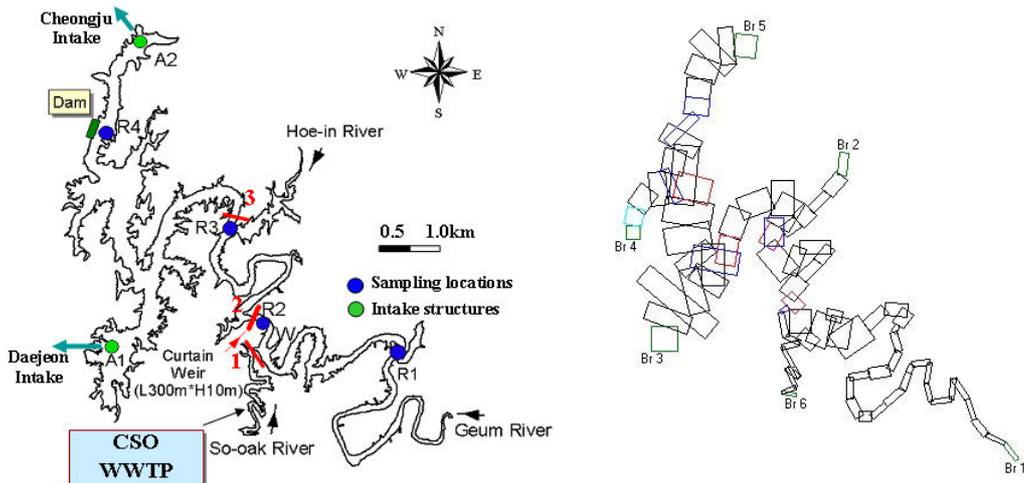


그림 1. 대청호 모니터링 지점, 차단막 설치 위치(좌) 및 유한차분 격자구성(우)

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 모

델은 수위, 압력, 수평방향 유속, 수심방향 유속, 물질의 농도, 밀도 등 6가지 변수를 연속방정식, x방향 운동 방정식, 정수압방정식, 자유수면방정식, 밀도상태방정식, 물질수지방정식 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분 수치해석기법을 사용하여 계산한다(Chung and Gu, 1998).

기존의 W2 모델의 커튼형 웨어는 수위변동을 고려할 수 없는 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 수류차단막 설치 수리, 수질, 조류성장 제어에 미치는 영향을 예측하기 위하여 수위변동이 심한 국내 저수지 특성을 고려하여 수위변동에 따라 상하로 이동할 수 있도록 기존 모델의 커튼형 웨어 알고리즘을 수정하였다.

검증된 W2 모델을 이용하여 수류차단막 설치효과를 예측하고자 시나리오를 구성하였다. 수류차단막 설치 예정 지점은 저수지의 지형과 수리적 특성, 그리고 소옥천 유입 영향을 고려하여 표 1과 같이 4가지 경우를 가정하였다. S-1은 수류차단막 설치가 전혀 없는 대조 시나리오이다. S-2는 2008년에 설치되어 이미 운영 중인 소옥천 하류(Segment 96, 7 m 깊이)에 단독으로 조류차단막 1을 설치한 경우이다. S-3은 댐으로부터 27.4 km(Segment 33, 10 m 깊이) 지점에 수류차단막 2를 설치하는 경우이며, S-4는 S-3에 더하여 댐으로부터 14.9 km(Segment 42, 10 m 깊이) 지점에 수류차단막 3을 하나 더 추가하는 경우이다(그림 1, 표 1).

표 1. 수류차단막 설치 시나리오

Scenario	curtain weir 1	curtain weir 2	curtain weir 3
S-1	×	×	×
S-2	○	×	×
S-3	○	○	×
S-4	○	○	○

3. 결과 및 고찰

3.1 수류차단막의 수류제어 기작 검토

대청호내 수류차단막 설치(S-3)가 금강본류에서 유입하는 하천수의 수리적인 거동에 미치는 효과를 알아보기 위해, 2001년 수문년을 대상으로 모의된 수령(water age)의 분포를 비교하였다(그림 2). 수령은 하천수가 유입할 때 0의 값을 가지고, 하루에 1씩 값이 증가하며, 하천수가 유입한 후 저수지내에 체류한 시간을 의미한다. 그림 2는 하천수 체류시간 20일을 한계값(threshold)으로 나타낸 것이므로, 유량이 작은 갈수기 동안에는 20일 이후 저수지 주변수와 완전 혼합되는 것으로 가정한 것이다. 2001년의 경우, 하천수가 바닥밀도류를 형성하는 기간을 제외한 대부분의 기간에서 수류차단막은 하천수가 본류 수역의 표층으로 유입되는 것을 차단하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

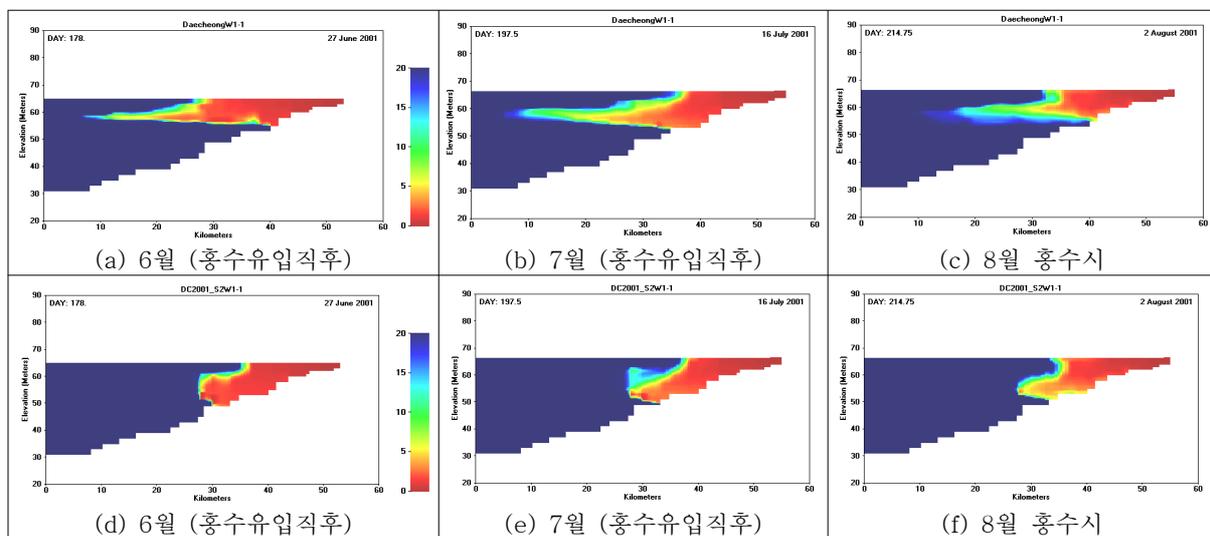


그림 2. S-1(위)과 S-3(아래) 시나리오에서 하천수 유입특성 비교(2001년)

그러나 수량분석만으로는 소옥천에서 유입하는 영양염류, 조류(Chl-a) 농도의 제어효과와 저수지 유입부 정체수역에서 형성된 Chl-a 농도의 확산 방지효과를 확인할 수 없어, Chl-a 농도에 대하여 수류차단막 설치(S-3)에 따른 효과를 비교하였다. 수류차단막은 4월부터 10월 수직혼합 시기 전까지 뚜렷하게 효과가 나타나는 것으로 나타났다. 이 기간 동안 수류차단막 상류와 하류의 Chl-a 농도는 큰 차이를 보이고 있으며, 수류차단막 하류부의 표수층이 효과적으로 보호되는 것을 알 수 있다. 이것은 수량의 비교에서 보다 훨씬 큰 영향을 보여 주는 것이다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, R2 지점에 수류차단막을 설치할 경우 본류 수역에서 유입하는 오염원의 차단 효과 보다는 소옥천 수역에서 유입하는 영양염류와 조류의 본류 유입 제어효과와 저수지 유입부인 R1과 R2 구간에서 자생한 조류의 확산 방지효과가 더 큰 것을 유추 할 수 있다. 10월 이후에는 저수지 수직혼합이 본격적으로 이루어져 수류차단막의 효과는 급격히 감소하였다. 그러나 이 시기가 되면 영양염류보다는 수온이 조류성장의 제한요인으로 작용하는 시점이 되므로 실질적인 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

3.2 수문조건별 수류차단막의 설치효과

모든 시나리오에 대하여 2001, 2004, 2006년에 R3, R4, A1 및 A2 지점에서 모의된 표층 Chl-a 농도의 시계열 변화를 그림 3에 비교하였다. 가뭄년인 2001년의 경우, 수류차단막 설치에 따라 R3하류와 A1에서 Chl-a 농도 저감 효과가 두드러졌으나, R4와 A2에서는 제어 효과의 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 이와 같이 R3하류와 A1에서 효과가 큰 이유는 저수지 지형특성상 유입수의 영향을 직접받기 때문으로 판단된다. 소옥천에 조류차단막이 설치되어 있어, 이를 수류차단막으로 가정하여 수류차단막 설치가 조류농도 저감에 미치는 효과를 모의하였으며, 효과는 S-1<S-2<S-3<S-4 순으로 컸고, 수직혼합시기에 시나리오별 효과의 편차가 작아지는 것으로 나타났다.

평수년인 2004년은 유입수의 영향을 직접 받는 R3하류와 A1에서 수류차단막 설치에 따라 Chl-a 농도 저감 효과가 있는 것으로 나타났으나, 수문사상의 영향으로 그 효과는 2001년에 비해 상대적으로 작게 나타났다. R4와 A2에서는 홍수기 이전까지 수류차단막 설치 시나리오에 따른 제어 효과의 차이가 미미하였으나, 홍수기 이후에 S-1<S-2<S-3<S-4 순으로 저감 효과를 보였다. 따라서 수류차단막 효과를 극대화하기 위해서는 홍수사상 이전에 수류차단막 상부에 집적된 조류의 처리대책이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 2006년의 경우, R3하류에서 홍수기를 제외하면 S-3과 S-4 설치 시나리오에서 Chl-a 농도 저감 효과가 크게 나타났고, 모든 지점에서 수류차단막 설치 효과의 크기는 S-1<S-2<S-3<S-4 순으로 증가하였다.

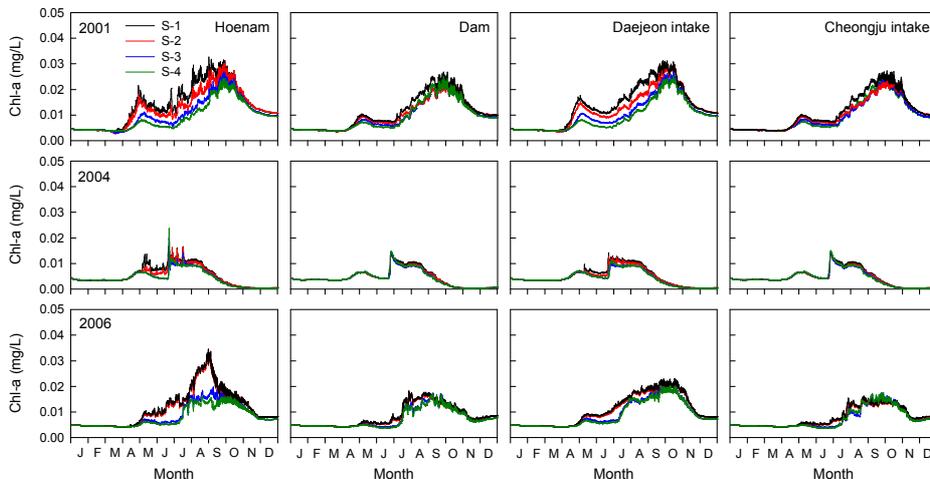


그림 3. 시나리오에 따른 R3, R4, A1, A2 지점에서 Chl-a 농도의 시계열 농도 변화

수류차단막 설치에 따른 수문년 및 계절별 Chl-a 농도의 수질개선 효율(수류차단막이 설치되지 않은 경우에 대한 설치 후 농도 저감 비)을 그림 4에 나타내었다. 대청호에서 녹조문제가 가장 심각했던 2001년 6월~8월 기간 동안 수류차단막 설치 유(S-4)무(S-1)에 따른 모든 지점에서 Chl-a 농도를 최저(A2) 30%에서 최고(R3) 70% 정도 저감하는 효과를 보였으며, R3의 경우 저감효과는 모의값을 기준으로 8월 평균 0.025 mg/L에서 0.012 mg/L로 나타났다. 평수년인 2004년과 2006년에는 강우사상에 따라 수류차단막 설치에 따른 Chl-a의 농도 저감 효과가 지점별로 다르게 나타났으며, 큰 강우사상이 6월, 7월, 8월에 걸쳐 골고루 발생한 2004년에 비해 7월 한 달 동안 집중된 2006년에 수류차단막 효과가 크게 나타났다. 6월~8월 기간 동안 수류차단막 설치 유(S-4) 무(S-1)에 따른 모든 지점에서 Chl-a 농도는 2004년과 2006년에 각각 14.5% 및 33.2% 정도 저감하는 효과를 보였다. 2006년의 경우 모의값을 기준으로 8월 평균 Chl-a 농도는 0.019 mg/L에서 0.013 mg/L 저감되는 효과를 보였다.

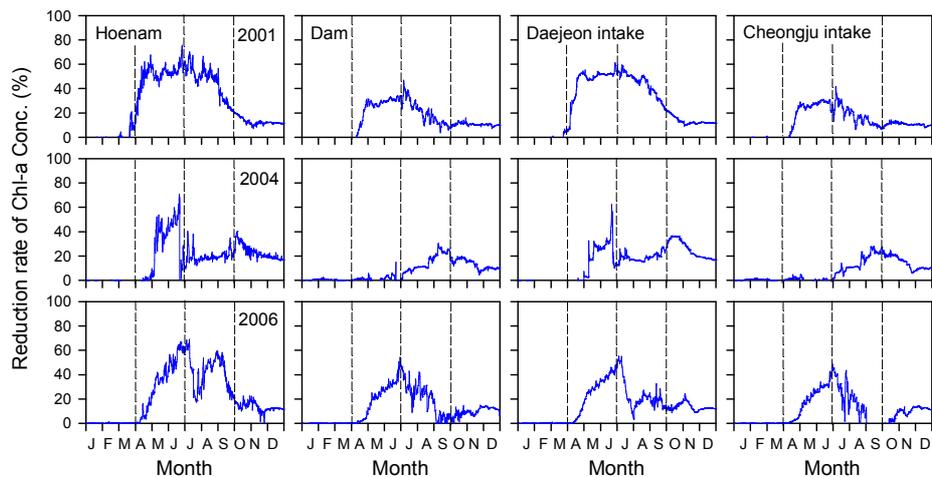


그림 4. 수류차단막 설치 유(S-4)무(S-1)에 따른 R3, R4, A1, A2 지점에서 Chl-a 농도의 수질개선 효율

4. 결론

대청호에서 수류차단막의 효과는 저수지 수리-수문 상황에 따라 해마다 다르게 나타났고, 2001년 6월~8월 기간 동안 수류차단막 설치 유(S-4)무(S-1)에 따라 Chl-a 농도를 최저(A2) 30%에서 최고(R3) 70%까지 저감하는 효과를 보였으며, R3의 경우 저감효과는 모의값 기준 8월 평균 0.025 mg/L에서 0.012 mg/L로 나타났다. 평수년인 2004년과 2006년에는 강우사상에 따라 수류차단막 효과가 다르게 나타났으며, 큰 강우사상이 6월, 7월, 8월에 걸쳐 연속하여 발생한 2004년에 비해 7월 한 달 동안 집중된 2006년에 수류차단막 효과가 상대적으로 크게 나타났다. 6월~8월 기간 동안 수류차단막 설치에 따라 모든 지점에서 평균 Chl-a 농도는 2004년과 2006년에 각각 14.5% 및 33.2% 정도 저감하는 효과를 보였다.

참고 문헌

1. 정세웅, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간적분포 모의, *한국수자원학회 논문집*, **38**(8), pp. 655-664.
2. Asaeda, T., Pham, H. S., Priyantha, D. G., Manatunge, J., Hocking, G. C.(2001). Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: a numerical analysis, *Ecological Engineering*, **14**, pp. 395-404.
3. Chung, S. W., and Gu, R.(1998). Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir, *J. Hydr. Eng.*, **124**(7), pp. 704-711.
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.