

대청호 수류차단막 설치 위치에 따른 녹조제어 효과 분석

이흥수 · 정세웅[†] · 정희영 · 민병환*

충북대학교 환경공학과

*한국수자원공사

Analysis the Effects of Curtain Weir on the Control of Algal Bloom according to Installation Location in Daecheong Reservoir

Heung Soo Lee · Se Woong Chung[†] · Hee Young Jeong · Byeong Hwan Min^{*}

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

*Korea Water Resources Corporation

(Received 31 August 2009, Revised 8 January 2010, Accepted 18 February 2010)

Abstract

The objective of study was to determine an optimal location of a float-type curtain weir in Daecheong Reservoir and to assess its effectiveness for the control of algal blooms in the reservoir. CE-QUAL-W2, a laterally averaged two-dimensional hydrodynamic and eutrophication model, was modified to accommodate vertical displacement of the weir according to water surface fluctuation and applied to simulate the reservoir hydrodynamics and water quality changes for the reservoir. The model calibrated in a previous study was updated and validated for different hydrological conditions representing drought year (2008) and normal year (2006) for the study, and adequately simulated the temporal and spatial variations of water temperature, nutrients and algal (Chl-a) concentrations. The effectiveness of curtain weir on the control of algal bloom was evaluated by applying the validated model to 2001 and 2006 assuming 9 scenarios for different installation locations. The reduction rates of algal concentration were placed in the range of 11.2~40.3% and 20.3~56.7% for 2001 and 2006, respectively. Although, the performance of curtain weir was slightly varied for different locations and different hydrological years, overall, the performance was improved as the weir was installed further downstream.

keywords : Algal bloom, CE-QUAL-W2, Curtain weir, Daecheong Reservoir

1. 서론

국제대댐회(ICOLD)의 통계에 따르면 우리나라는 대댐으로 분류되는 댐이 765개로서 세계에서 7번째로 댐이 많은 나라이다(World Commission on Dams, 2000). 자연 상태의 하천을 가로지르는 거대한 댐 저수지는 하천의 유황(Flow regime)에 변화를 가져왔으며, 이것은 하천의 지형과 생태계의 변화뿐만 아니라 부영양화에 따른 식물성플랑크톤의 과잉성장, 즉 녹조 또는 수화현상(algal bloom)과 탁수의 장기화와 같이 하천의 물리·화학적 특성에도 큰 영향을 미치고 있다(김범철 등, 2001; 서동일, 1998; 정세웅 등, 2005; Dyson et al., 2003; Tharme, 2003; World Commission on Dams, 2000).

하천과 달리 정체수역인 저수지는 일사량, 수온 및 영양염류 등의 적절한 수환경이 조성되면 식물성플랑크톤이 급격히 성장한다. 일반적으로 저수지 수질상태는 수리학적 구조인 저수면적, 평균수심, 체류시간과 내부 및 외부 기원성

오염부하, 그리고 수문기상학적 특성에 의해 결정될 수 있다(Thornton et al., 1990; Wetzel, 2001). 특히, 영양염류가 풍부하고, 수온이 25°C 이상으로 유지되며, 체류시간이 30일 이상인 정체수역에서 조류는 활발한 성장속도로 광범위한 녹조를 형성한다.

대청호는 나뭇가지 모양의 저수지 형상이 두드러지는 인공호로 지형적인 특성으로 인해 곳곳에 정체수역을 형성하여 녹조현상이 자주 발생하고 있다. 그동안 전국 17개의 호소를 대상으로 조류예보제를 실시한 결과, 대청호에서 조류주의보와 경보 및 대발생이 가장 많이 발령되었다(국립환경과학원, 2007). 특히, 가뭄년인 2001년에는 회남수역에서 조류주의보가 35일(9월 1일~10월 5일), 조류경보가 42일(7월 14일~8월 3일, 8월 11일~8월 31일), 조류대발생이 7일(8월 4일~8월 10일)간 지속되었다(국립환경과학원, 2005). 대청호에서 조류의 발생은 주로 초여름부터 초가을까지 빛이 충분히 전달되는 유평층에서 대량 발생하고, 주로 출현하는 조류의 종은 규조류, 갈색편모조류, 남조류 등인데, 이중 일부 독소를 생성하는 남조류인 *Anabaena*와 *Microcystis*의 피해가 우려된다(국립환경연구원, 2003; 천세억 등, 2006).

[†] To whom correspondence should be addressed.

schung@chungbuk.ac.kr

최근 자주 발생하는 대청호의 녹조 발생 저감을 위해 수중폭기 장치, 식물정화시설, 황토살포 등 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 방법들이 시도되고 있으나 이들 대책은 임시적이고 부분적인 효과를 거둘 수 있겠지만 적용 규모, 시설투자비용 및 유지관리비용, 부산물의 생성에 따른 생태계 영향 등 해결해야 할 많은 문제점을 안고 있어 성공적인 적용사례가 드물다(나은경 등, 2003; 한국수자원공사, 2007b). 반면, 물리적 녹조저감 기술인 커튼형 수류차단막은 경제적이면서도 생태계 영향이 적은 대책으로 일본, 미국, 독일 등에서 적용된 바 있다. Asaeda 등(1996, 2001)은 일본의 데라우치 댐에서 조류의 과다성장을 제어하기 위해 불투수성 수류차단막을 설치하여 다량의 영양염류를 포함한 하천수가 표층으로 유입되는 것을 차단하고, 유입수가 밀도차에 의해 저수지 표층수 아래로 유입되면 중층 취수 시설과 연계하여 중층밀도류를 유광층과 수직 혼합시키지 않고 댐 하류로 바이패스 시키는 효과를 검증하였다. Vermeyen(2000)과 Vermeyen and Knoblauch(2000)는 미국의 Lewiston 저수지와 Whiskeytown 저수지로부터 냉수를 방류하기 위해 유연성 있는 커튼형 수류차단막을 설치하여 효과를 분석하였고, Morillo 등(2006)은 호주의 Silvan 저수지 유입수의 취수구 도달 시간을 조절하기 위해 커튼형 수류차단막 설치를 고려하고, 서호주대학교 물연구센터에서 개발한 3차원 수리동력학 해석 모델인 ELCOM(Estuary, Lake, and Coastal Ocean Model)을 사용하여 여러 가지 차단막 설치 시나리오에 대한 효과를 평가하였다.

이러한 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. 그러나 홍수시 유입유속이 크고 수위변동이 심한 대규모 저수지에서의 효과 검증은 부족하며, 특히 설치 위치 및 규격에 따라 그 효과가 상이하므로 수류차단막의 최적 설계를 위해서는 정확한 사전 예측 기술이 필요하다.

선행연구에서 김유경 등(2007)은 대청호에서 부상웨어 설치에 따른 조류 성장 억제 효과 수치모의를 실시하고 단일 차단막 설치 시 규격은 수심 7 m 깊이 이상이 필요하다고 제안 한 바 있다. 현재, 대청호에는 소옥천이 합류하는 추소리 수역에 조류확산방지막(7.0 m)이 설치되어 운용 중에 있으며, 대청호 내에 추가적인 설치가 검토 중에 있다. 본 연구의 목적은 수치해석모형을 이용하여 대청호에서 수류차단막의 설치 위치에 따른 녹조발생 저감효과를 평가하는데 있으며, 이를 위해 선행연구에서 보정한 대청호 2차원 횡방향 평균 수리 및 부영양화 모델을 수정하고 다양한 수문사상에 대하여 적용성을 검증하였다. 선행연구(김유경 등, 2007)와의 차별성은 추소리 수역에 이미 설치된 조류확산방지막의 효과를 반영하기 위해 소옥천을 모의 구간

(Branch)으로 포함시켰으며, 상류 유입 경계지점도 장계교에서 10 km 상류인 옥천군 합금리(가덕교 지점)까지 연장하였다. 수정된 모델은 최근의 수문년인 2006년과 2008년의 다양한 수문사상의 실측자료를 사용하여 검증하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 저수지

수류차단막의 시범설치 대상 저수지인 대청호는 금강유역의 최대 상수원으로 만수위가 EL. 83.0 m로서 금강 하구로부터 약 135.0 km 상류지점인 대전광역시 동북방 16.0 km, 청주시 남방 16.0 km의 대전광역시와 충청북도가 만나는 지점에 위치하고 있다(Fig. 1(a)). 총 유역면적(용담댐 유역제외)은 3,204.0 km²이고 저수지의 표면적은 72.8 km², 유역면적/저수면적의 비는 44.0이다. 연평균 강수량과 유입량은 각각 1,230.0 mm, 95.6 m³/s이고, 총 저수량은 1,490×10⁶ m³이며, 유효저수량은 790×10⁶ m³에 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 홍수시 유량을 조절하고 있다(한국수자원공사, 2007a).

저수지 내에서 조류감시와 강우 시 유입하는 탁수의 거동을 파악하기 위해 한국수자원공사에서는 주간 또는 월간 조사를 장계교(R1), 대정리(R2), 회남대교(R3), 댐 앞(R4)과 대전과 청주에 상수원수를 취수하는 추동(A1), 문의(A2) 취수탑에서 실시하고 있다(Fig. 1(a)). 또한, 금강물환경연구소에서는 조류예보제 시행을 목적으로 R3, A1, A2 지점에서 월간조사와 필요시 주간조사를 실시하고 있다.

대청댐 유역에서 모델의 보정기간인 2001년과 검증기간인 2006년 및 2008년에 총 강우량은 각각 794.6 mm, 1,235.9 mm 및 782.4 mm이었고, 홍수기(6~9월)동안 강우량은 각각 500.6 mm(63.0%), 868.3 mm(70.3%) 및 565.5 mm(72.3%)이었다. 2001년과 2006년 및 2008년에 일평균 유입량은 각각 34.6 CMS, 86.7 CMS, 34.8 CMS이었고, 홍수기동안 일평균 유입량은 각각 52.1 CMS, 204.1 CMS, 67.8 CMS로 나타났다. 2001년의 저수위 일변동에서 최대값과 최소값은 각각 68.1 EL. m, 62.8 EL. m이었고, 2006년에는 각각 75.2 EL. m, 64.1 EL. m이었으며, 2008년에는 각각 72.6 EL. m, 64.5 EL. m로 나타났다(Table 1). 또한, 홍수조절을 위한 여수로 수문방류는 2006년에 7월 14일~24일(6,701.0 CMS), 7월 26일~28일(1,420.4 CMS)에 걸쳐 이루어졌다(국가수자원관리종합정보시스템, 2009). 반면, 2001년과 2008년에는 강우로 인한 유입량이 작아 홍수조절을 위한 수문방류는 없었다.

2.2. 모델 구성

2.2.1. 모델 개요

W2 모델은 횡방향 평균(Laterally-averaged) 수리·수질 모델로써, 횡방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합하고,

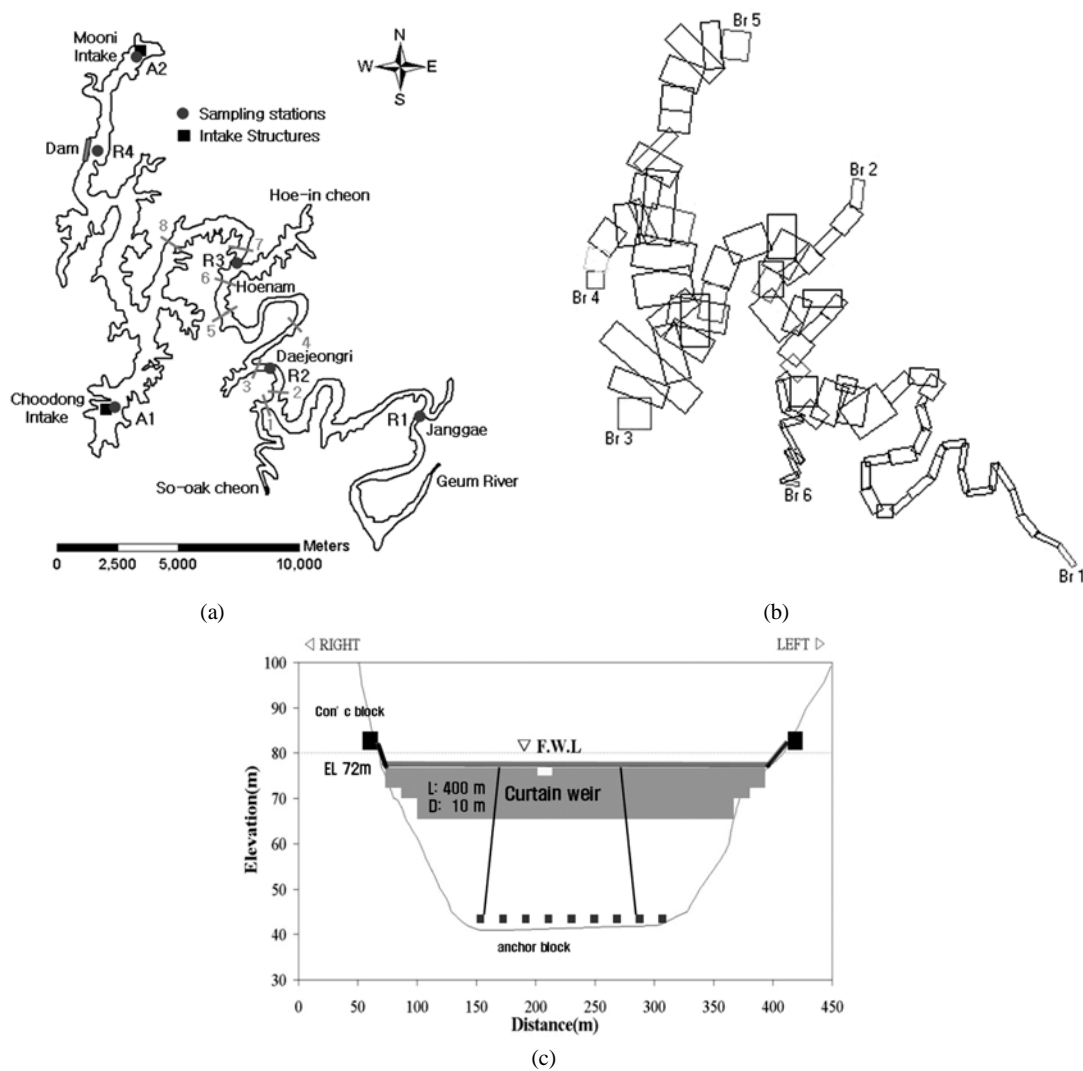


Fig. 1. Layout of Daecheong Reservoir, locations of monitoring stations (a), segmentation for simulations (b), and drawing information (c).

Table 1. Hydrological conditions of Daecheong Reservoir in 2001, 2006 and 2008

Year \ Factors	Precipitation (mm)		Average inflow (m ³ /sec)		Water level (EL. m)		
	Annual	Flood season*	Annual	Flood season*	Max	Min	Difference
2001	794.6	500.6	34.6	52.1	68.1	62.8	5.3 m
2006	1,235.9	868.3	86.7	204.1	75.2	64.1	11.1 m
2008	782.4	565.5	34.8	67.8	72.6	64.5	8.1 m

*Flood season: June~September

성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이하다(정세웅 등, 2005; Cole and Buchak, 1995; Cole and Wells, 2004). W2 모델의 수리해석은 수위(η), 압력(P), 수평방향 유속(u), 수심방향 유속(w), 물질의 농도(C), 밀도(ρ) 등 6가지 변수를 연속방정식, x방향 운동방정식, 정수압방정식, 자유수면방정식, 밀도상태방정식, 물질수지방정식 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분수치해석기법(Finite Different Method, FDM)을 사용하여 계산한다(Chung and Gu, 1998; Cole and Buchak, 1995; Cole and Wells, 2004).

W2 모델은 저수지내 수리구조물인 내부웨어(internal weir)의 설치효과를 모의하는 기능을 가진다. 내부웨어는 수면에

서 수심방향으로 설치하는 커튼형 웨어(Curtain weir)와 저수지 수중 바닥에 설치하는 잠수형 웨어(Submerged weir)의 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 그러나 기존 W2 모델의 커튼형 웨어는 수위변동을 고려할 수 없는 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 수류차단막 설치가 수리, 수질, 조류 성장 제어에 미치는 영향을 예측하기 위하여 수위변동이 심한 국내 저수지 특성을 고려하여 수위변동에 따라 상·하로 이동할 수 있도록 기존 모델의 알고리즘과 소스코드를 수정하였다. 수정된 W2 모델에서는 KTWR 변수와 KBWR 변수의 값을 동일하게 사용하면 이동식 웨어로 인식한다. 이러한 경우 KTWR 변수와 KBWR 값은 수면 아래로 설

치된 웨어의 높이로 인식되며, 수위변화와 연동되어 상·하로 이동하게 된다.

수정된 W2 모델을 이용하여 수류차단막 설치 위치 변화에 따른 녹조발생 저감효과를 예측하고자 시나리오를 구성하였다(Table 2). 수류차단막 설치 지점은 저수지의 지형과 수리적 특성, 그리고 소옥천 유입 영향을 고려하여 Table 2와 같이 9가지 경우를 가정하였으며, 이중 대청호 내 수류차단막 설치예정지점은 7개소(S-3~S-9)로 선정하였다. S-1은 수류차단막 설치가 전혀 없는 대조 시나리오이고, S-2는 2008년에 설치된 소옥천 조류확산방지막으로 소옥천 하류(Segment 96, 7 m 깊이)에 수류차단막이 단독으로 설치된 경우로 가정하였다. 즉, 추가적인 설치 시나리오는 총 7개이며 소옥천 수류차단막이 설치된 상황에서 상류로부터 하류측으로 S-3은 추소리(Segment 33, 10 m 깊이) 지점, S-4는 방아실 2(Segment 34, 10 m 깊이) 지점, S-5는 방아실 1(Segment 36, 10 m 깊이) 지점, S-6은 어부동 3(Segment 39, 10 m 깊이) 지점, S-7은 어부동 2(Segment 39, 10 m 깊이) 지점, S-8은 회남대교 아래(Segment 42, 10 m 깊이) 지점, S-9는 어부동 1(Segment 44, 10 m 깊이) 지점에 각각 수류차단막을 설치하는 경우로 적용하였다(Fig. 1(a), Table 2).

수정된 모델의 보정은 가뭄년인 2001년을 대상으로 하였고, 검증은 평수년인 2006년과 가뭄년인 2008년을 대상으로 하였다. 모델 보정과 검증은 대청호에서 물수지, 수온, 성층해석, 부영양화 해석에 중점을 두었으며, 다양한 수문사상을 고려하였다. 수리 및 수질 모델의 보정과 검증에 대한 상세한 내용은 정세웅 등(2007)에 제시되어 있다.

2.2.2. 입력자료 구성

W2 모델의 입력자료는 저수지 지형자료, 유입 및 유출 유량과 수질 경계조건, 초기조건, 기상자료 및 수리·수질해석을 위한 매개변수 등이 있다. 대청호의 유한차분 격자구성은 금강 분류와 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(Fig. 1(b)). 저수지 지형자료(Bathymetry)는 대청댐 퇴사량 측정보고서(한국수자원공사, 2006)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 실측수위와 모델에서 계산한 저수지 수위를 비교함으로써 신뢰도를 검증하였다. 모델의 검증기간인 2006년 및 2008년의 실측수위와 모의수위를 비교한 결과, 결정계수값(R^2)이 0.995로 나타났고 7월과 8월의 유입량 증가에 따른 수위 상승을 잘 반영하는 것으로 나타나 모델은 저수지 물수지 계산에 있어서 높은 신뢰도를 보였다(Fig. 2).

경계조건으로 사용된 저수지 유입량과 방류량, 저수지 수위 등 수문자료와 댐 운영 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(2009)의 자료를 사용하였다. 유입량 자료는 대청댐 유역 전체의 유입유량이기 때문에 각 지류하천의 유입량은 대청댐의 일별 총 유입량을 유역면적비로 환산하여 산정하였다.

유입수 수온자료는 2006년(1월 1일~10월)의 경우, 대청호 상류인 옥천지점에서 1시간 단위로 실측한 자료를 사용하

Table 2. Simulation scenarios for the evaluation of curtain weir installation

Scenarios\ Curtain weir	Curtain weir 1	Curtain weir 2	Curtain weir 3	Curtain weir 4	Curtain weir 5	Curtain weir 6	Curtain weir 7	Curtain weir 8
S-1	×	×	×	×	×	×	×	×
S-2	○	×	×	×	×	×	×	×
S-3	○	○	×	×	×	×	×	×
S-4	○	×	○	×	×	×	×	×
S-5	○	×	×	○	×	×	×	×
S-6	○	×	×	×	○	×	×	×
S-7	○	×	×	×	×	○	×	×
S-8	○	×	×	×	×	×	○	×
S-9	○	×	×	×	×	×	×	○

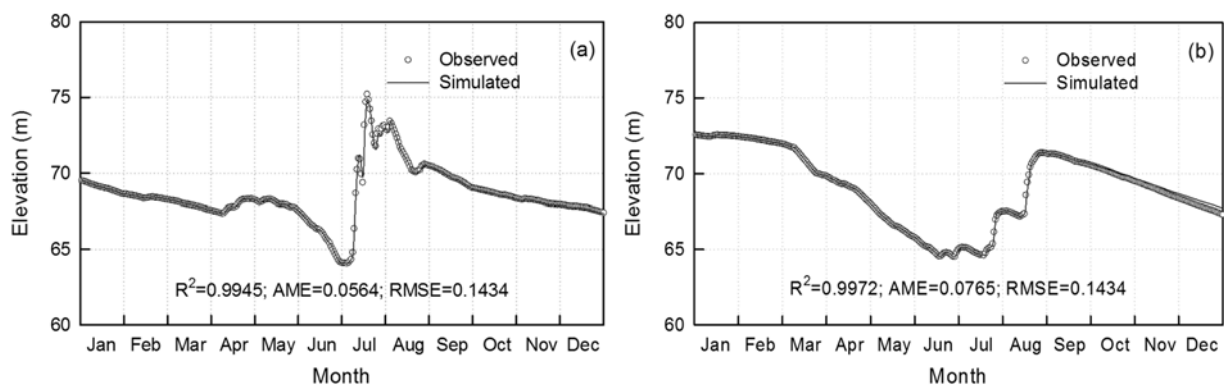


Fig. 2. Comparisons of observed and simulated water surface elevations in 2006 (a) and 2008 (b).

였고, 2008년(1월 1일~12월 31일)은 한국수자원공사 대청댐관리단에서 육천군 가덕교에 설치·운영 중인 실시간계측자료(3시간 단위)를 활용하였다. 실측자료가 없는 기간에 대하여는 동일 하천의 실측수온과 기상자료인 기온, 이슬점온도로부터 개발한 회귀식(정세웅과 오정국, 2006)을 사용하여 유입수온을 산정하였다.

기상자료인 풍향과 풍속자료는 문의면사무소(EL. 100 m)에 설치한 대청 자동기상관측장비(AWS)의 자료를 사용하였고, 기온, 이슬점온도, 운도는 대청호에서 서쪽으로 8 km 떨어진 곳에 위치한 대전 기상청(EL. 68.3 m)의 관측 자료를 사용하였다.

모델의 매개변수로는 크게 수리 및 수질로 구분할 수 있고, 각각의 매개변수는 사용자 매뉴얼과 기존의 연구문헌(김윤희, 1998; 정세웅 등, 2007; 허경미, 2001; Cole and Tillman, 1999, 2001)을 참고하여 시행착오법으로 민감도 분석을 통하여 유효한 범위 내에서 보정하였다. 수리 매개변수는 운동량 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와점성계수(AX), 질량 또는 열 보존 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와확산계수(DX), 바닥과 수체간의 마찰계수(CHEZY), 바람의 차단효과를 정량적으로 반영하는 계수(WSC), 물에 의한 광전달 감소효과를 나타내는 계수(EXH20), 태양복사 에너지 중 저수지 수면으로부터 0.6 m 깊이에 흡수되는 비율을 나타내는 계수(BETA) 및 저수지 바닥층과 수층의 열교환 계수(CBHE) 등이 있으며, 이들 매개변수 값은 선행연구(정세웅 등, 2007)에서 보정한 값을 이용하였다. 또한 W2 모델에서 유기물, 영양염류, 조류 모의에 관계되는 매개변수는 60여개 이상이지만 대부분이 수온에 따른 반응속도 보정을 위한 변수와 화학양론 관련 매개변수이므로 본 연구에서는 W2 모델의 초기값을 사용하였다. W2 모델에서 조류와 관계되는 매개변수로는 조류의 성장률(AG), 사멸률(AM), 분비율(AE), 호흡률(AR), 침강률(AS), 인 반 포화 상수(AHSP), 질소 반 포화 상수(AHSN) 및 algae/chl-a 비 등 20여개 이상이다. W2 모델에서 모의한 조류는 여름철에 우점하는 남조류(Microcystis)를 대상으로 하였다. 따라서 본 연구에서는 기낭이 있는 Microcystis의 특성을 고려하여 침강속도를 0.01 m/day로 적용하였다.

2.2.3. 모델의 평가

W2 수리 모델 결과인 물수지, 수온 성층해석과 수질 모델 결과인 영양염류 및 조류 검증에 대한 재현성 검토를 위하여 실측자료와 모의결과의 비교·평가는 AME(Absolute Mean Error) 및 RMSE(Root Mean Square Error)를 이용하였다(Table 3). AME(절대평균오차)는 실측값과 모의값 간의 절대값을 산술평균한 값으로 그 값이 0에 가까울수록 모의결과의 정확도가 높고, 모델의 성능이 우수하다는 것을 의미한다. RMSE(평균제곱오차의 평방근)는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 모의결과의 평균오차를 나타내는 지표이다. RMSE는 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

Table 3. Statistical indices used to evaluated the model accuracy

Statistical index	Equation	Desired value
Absolute mean error	$AME = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n O_i - P_i \right)$	0
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$	0

O_i = observations, P_i = simulations, N = total number of observations, \bar{O} = mean of observations

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온성층 구조 변화

수심이 깊은 저수지의 수온성층 구조는 오염물질의 공간적 분포와 수직혼합에 영향을 미치며, 궁극적으로 입자상 물질의 침강속도, 수질반응 속도, 조류의 성장환경에도 영향을 미치는 매우 중요한 인자이므로 수질모델링에 앞서 반드시 검증되어야 한다.

모델의 검증기간인 2006년과 2008년의 R4 지점에서 실측 및 모의 수온의 성층구조 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 2006년의 경우, 홍수가 중층 밀도류를 형성하여 수온 성층구조를 교란하였고, 수온약층이 EL. 40 m로 하강하는 결과를 가져왔다. 수온예측 오차는 AME 0.844~1.961°C, RMSE 1.010~2.762°C의 범위로 나타났고, 모델은 홍수기 기간 동안 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였으나, 수온약층이 형성된 구간에서 실측값과 다소 큰 편차를 보였다(Fig. 3). 반면, 홍수기 큰 강우가 없었던 가뭄년인 2008년에는 여름철 동안 매우 안정적인 성층구조가 유지되었고, 10월초부터 대기기온 강화와 함께 수직혼합이 시작되었다. 수온예측 오차는 AME 0.485~1.162°C, RMSE 0.618~1.415°C의 범위로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났고, 전 기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였다(Fig. 3).

3.2. 모델의 검증

3.2.1. 영양염류(T-N, T-P)

부영양화 모델의 검증에서 조류의 성장과 밀접한 관련이 있는 질소와 인의 시공간적인 농도변화를 정확히 예측하는 것은 중요한 부분 중의 하나이다. 2006년과 2008년의 T-N 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과는 Fig. 4와 같고, 대청호에서 조류성장의 제한영양염인 T-P 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모의결과는 한국수자원공사에서 저수지내 구간 또는 월간조사를 실시하는 지점(R1, R2, R3, R4, A1, A2)의 표층에서 측정된 실측값과 비교하였다.

2006년의 경우, T-N 농도의 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.440 mg/L(범위 0.364~0.598 mg/L), RMSE 평균 0.552 mg/L(범위 0.477~0.872 mg/L)이었고, 2008년은 AME 평균 0.253 mg/L(범위 0.193~0.347 mg/L), RMSE 평균 0.315 mg/L(범위 0.259~0.384 mg/L)로

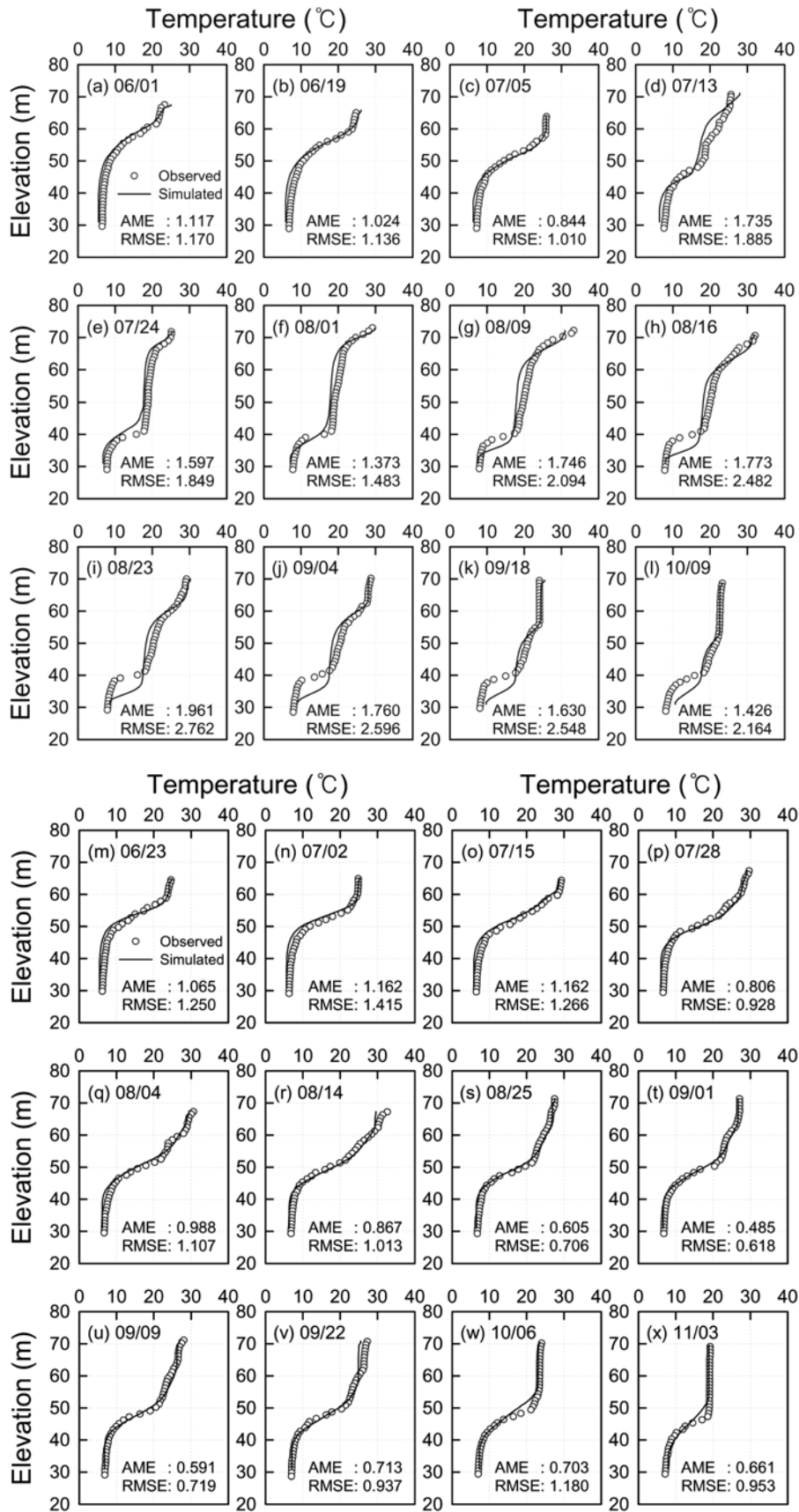


Fig. 3. Comparison of simulated and observed profiles of water temperature at the R4 in 2006(up) and 2008(down). (a) 6/1, (b) 6/19, (c) 7/5, (d) 7/13, (e) 7/24, (f) 8/1, (g) 8/9, (h) 8/16, (i) 8/23, (j) 9/4, (k) 9/18, (l) 10/9, (m) 6/23, (n) 7/2, (o) 7/15, (p) 7/28, (q) 8/4, (r) 8/14, (s) 8/25, (t) 9/1, (u) 9/9, (v) 9/22, (w) 10/6, and (x) 11/3

나타났다. 모델은 2006년과 2008년 T-N 농도의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하였다. 특히, R1, R2, R3 지점에서의 T-N 농도는 홍수 유입시 증가하는 경향을 보이고 있어, 하천 유입수의 영향을 직접 받는 것으로 판단된다. 반면, R4, A1, A2 지점에서는 홍수가 중층 밀도류를 형성하며 저수지 주변수체와 혼합되어 표층에 미치는 영향이 작은 것으로 보인다(Fig. 4).

2006년의 경우, T-P 농도의 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.020 mg/L(범위 0.013~0.027 mg/L), RMSE 평균 0.026 mg/L(범위 0.018~0.030 mg/L)이었고, 2008년은 AME 평균 0.009 mg/L(범위 0.007~0.012 mg/L), RMSE 평균 0.011 mg/L(범위 0.008~0.013 mg/L)로

나타났다. 2006년과 2008년에 모델은 저수지내 각 측정지점에서 T-P 농도의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하였고, T-N 농도와 마찬가지로 홍수 유입에 따른 지점별 농도변화를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 T-P 농도의 경우, 2006년 7월 이후부터 모의값이 실측값을 과대 산정하는 경향을 보였다(Fig. 5(a)). 이러한 오차는 홍수시 유입한 중층 탁수층에 포함된 부유물질과 성층화에 따른 심수층 산소 결핍상태에서 퇴적층에서 용출된 철(Fe)또는 망간(Mn)등의 이온 성분이 가을 수직혼합시기에 인과 흡착하여 침전되는 기작이 모의과정에 적절히 반영되지 않은 것이 원인으로 판단된다. 또한, 대청호 퇴적물에 대한 용출실험 결과 값을 참조하여 용존산소가 0.5 mg/L 이하의 조건

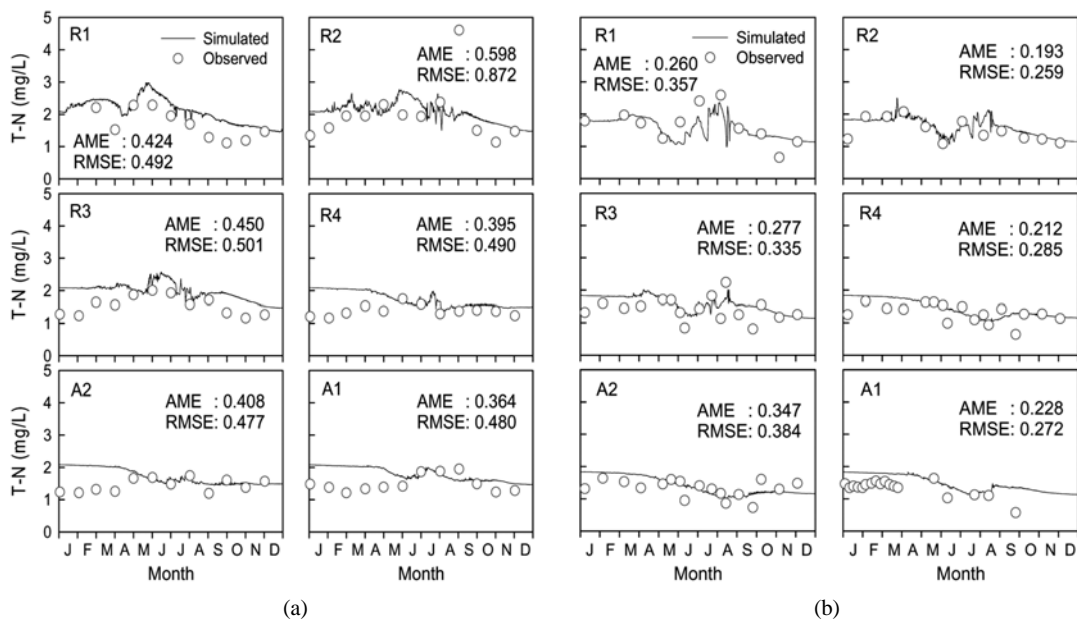


Fig. 4. Comparison of simulated and observed time series of T-N concentrations in 2006 (a) and 2008 (b).

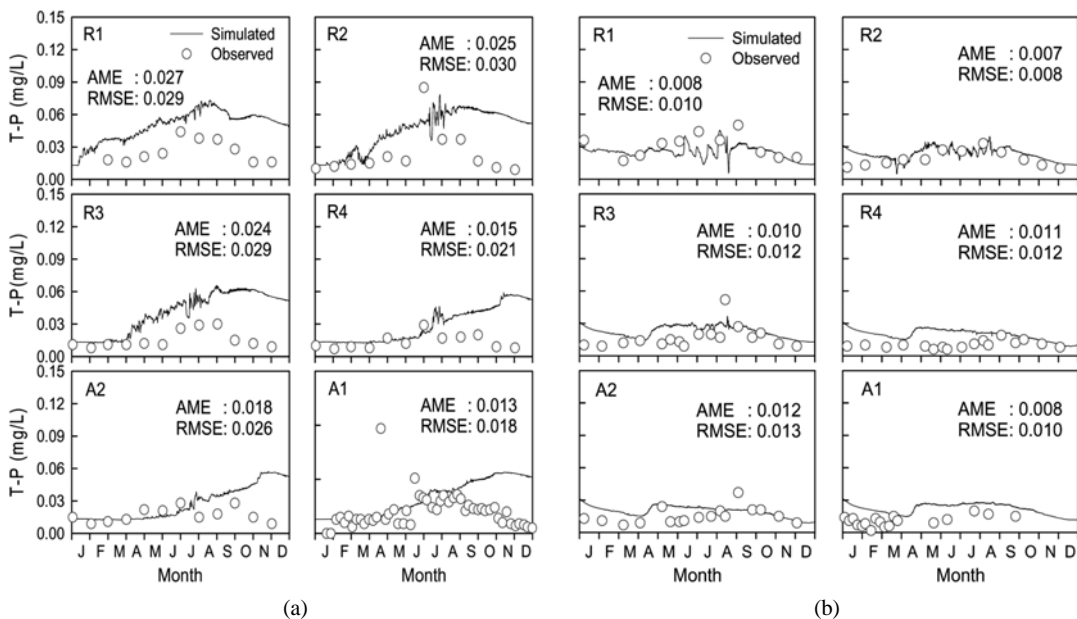


Fig. 5. Comparison of simulated and observed time series of T-P concentrations in 2006 (a) and 2008 (b).

이면 퇴적층에서 인 용출이 0.005 mg/L/day되는 것으로 모의하였다. 그러나 이 값은 상온에서 측정되었고, 퇴적층의 인 농도와 무관하게 0차 반응으로 계속 용출되는 것으로 모의되어 실측값보다 모의값이 다소 높은 것으로 판단된다.

3.2.2. 조류(Chl-a)

2006년과 2008년 저수지내 각 측정지점의 표층에서 Chl-a 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 모델은 대청호 대부분의 수역에서 Chl-a 농도의 시계열 변화를 비교적 잘 모의하였다. 2006년의 경우, 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.005 mg/L(범위 0.004~0.011 mg/L), RMSE 평균 0.008 mg/L(범위 0.005~0.024 mg/L)이었고, 2008년은 AME 평균 0.006 mg/L(범위 0.004~0.006 mg/L), RMSE 평균 0.007 mg/L(범위 0.005~0.009 mg/L)로 나타났다.

그러나 2006년 A2 지점에서 침두 Chl-a 농도를 과소하게 산정하는 경향을 보였다. 이는 해마다 그리고 계절별로 우점하는 조류 종이 상이한 반면, 모델에서는 이에 대한 매개 변수를 적절히 고려하지 못하는 것과 모델이 조류의 횡방향 농도 분포를 평균화하여 계산하기 때문에 국지적인 조류 발생을 제대로 반영하지 못하는 한계가 원인으로 판단된다.

3.3. 수문조건별 수류차단막의 설치 효과

2001년 가뭄해와 2006년 평수년을 대상으로 각각 수문조건별 수류제어 차단막의 설치 효과를 예측하였다. 2001년과 2006년에 수류차단막을 설치하지 않은 경우(S-1)와 수류차단막을 설치한 경우(S-4), Chl-a 농도의 공간분포와 유속벡터를 Fig. 7에 나타내었다.

수류차단막을 설치하지 않은 경우(S-1), 금강본류와 소옥천으로부터 유입한 Chl-a 농도가 저수지 표층을 따라 뱀방향으로 넓게 퍼지면서 저수지 내부로 확산되었고, 수류차

단막을 설치한 경우(S-4)는 부유성 조류(Chl-a)의 이동이 차단되어 저수지 내부로 더 이상 확산되지 않는 것으로 나타났다. 소옥천 말단부에 설치된 수류차단막은 소옥천에서 발생한 조류를 차단하고, 홍수시 일부 조류가 수류차단막 아래 깊은 수심으로 유입되게 하는 효과를 보였으며, 본류 R2에 설치된 수류차단막도 소옥천 유입부~R2 구간에서 발생한 조류가 본류 수역으로 진행하지 못하도록 차단하는 효과를 보였다. 가뭄년인 2001년 수문사상에서 수류차단막의 조류제어 효과가 크게 나타난 것은 홍수기 동안 큰 강우사상이 없었고, 작은 강우사상 동안 높은 인 농도를 함유한 유입수가 표층을 따라 유입한 결과로 판단된다.

평수년인 2006년 수류차단막을 설치한 경우(S-4), 홍수시에는 R2에 설치된 수류차단막의 상류부에 집적되었던 조류가 하천 수류에 포획되어 수류차단막 아래를 통과하여 하류로 유입되는 것으로 나타났다. 하천수가 수류차단막 아래를 통과하는 과정에서 하천수는 저수지 수온약층의 차가운 물과 혼합이 일어나고, 이로 인해 밀도가 약간 증가하여 수류차단막 하류에서는 동일 밀도층으로 상승한 후 다시 본류 수역으로 진행되는 것으로 판단된다. 또한, 소옥천에 설치된 수류차단막에서도 홍수 유입시 조류제어 효과는 미미한 것으로 나타났다.

3.4. 수류차단막의 조류 저감 효과

모든 시나리오에 대하여 2001년과 2006년에 R3, R4, A1 및 A2 지점에서 모의된 표층 Chl-a 농도의 시계열 변화를 Fig. 8에 비교하였다. 모의결과, 2001년과 2006년의 모든 지점에서 Chl-a 농도는 수류차단막이 없는 경우(S-1)가 가장 높게 나타났다. 특히, 2001년과 2006년에 수류차단막 설치 유·무에 따라 R3와 A1에서 Chl-a 농도 저감 효과가 크게 나타났으나, R4와 A2에서는 Chl-a 농도 제어 효과가 상대적으로 작게 나타났다(Fig. 8). 이와 같이 수류차단막에 의해

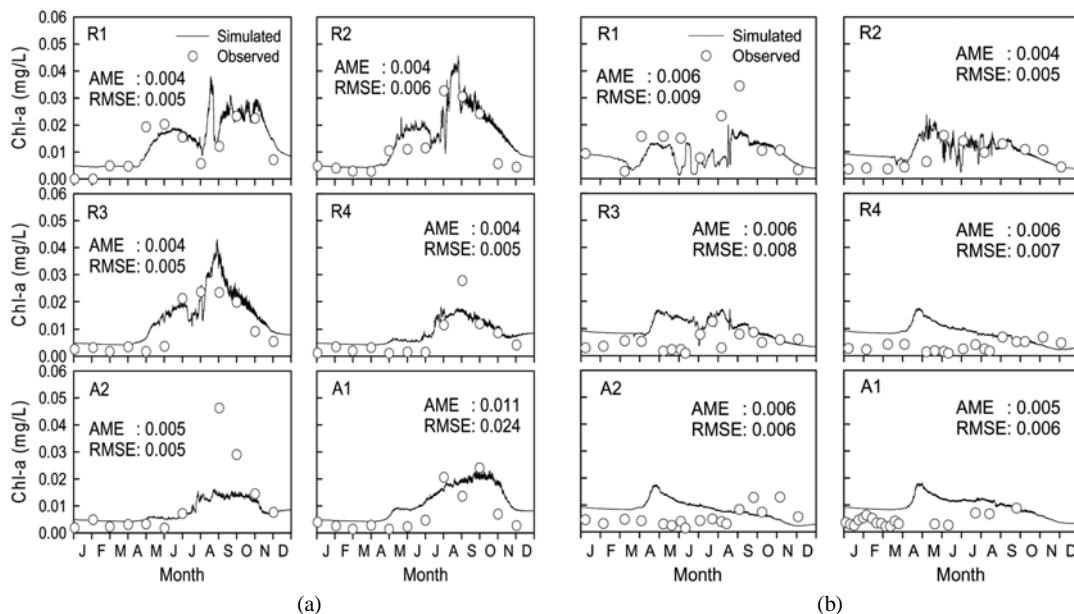


Fig. 6. Comparison of simulated and observed time series of Chl-a concentration in 2006 (a) and 2008 (b).

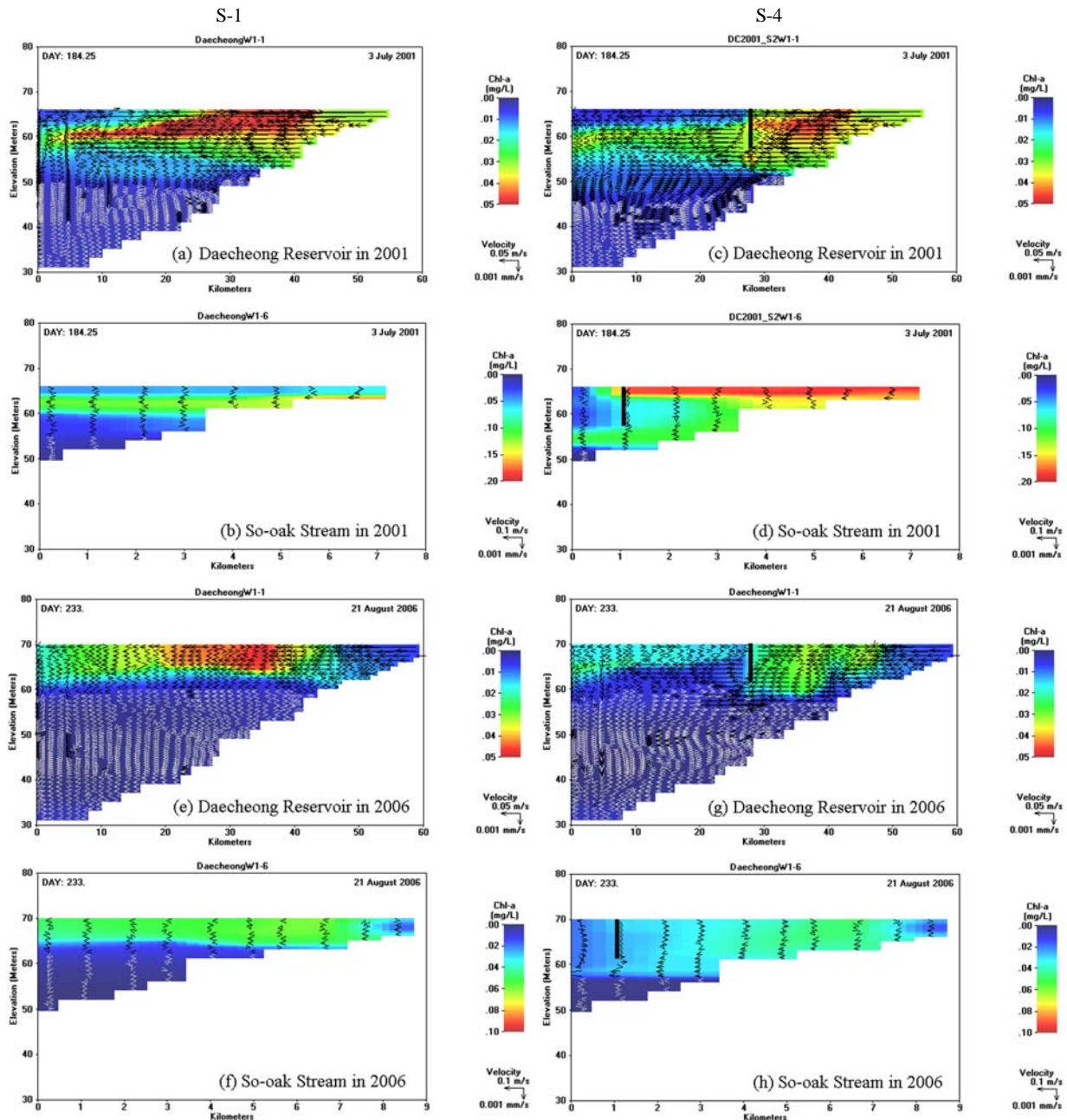


Fig. 7. Effect of curtain weirs on the control of algae(Chl-a) concentrations in the reservoir for S-1(left) and S-4(right) scenarios in 2001 and 2006. (a), (c), (e), and (g): Daecheong Reservoir; (b), (d), (f), and (h): So-oak Stream

Chl-a 농도의 저감 효과가 R3와 A1에서 큰 이유는 저수지 지형특성상 유입수의 영향을 직접받기 때문으로 판단된다.

가뭄년인 2001년의 Chl-a 농도는 수직혼합시기에 시나리오별 효과의 편차가 작아지는 것으로 나타났고(Fig. 8(a)), 평수년인 2006년은 수문사상의 영향으로 홍수기에만 일시적으로 Chl-a 농도의 저감 효과가 미미하게 나타났다(Fig. 8(b)). 따라서 수류차단막의 효과를 극대화하기 위해서는 홍수사상 이전에 수류차단막 상부에 집적된 조류의 처리대책이 필요할 것으로 판단된다.

2001년과 2006년에 수류차단막 설치에 따른 R3, R4, A1 및 A2 지점에서 5월~10월까지 Chl-a 농도의 저감 효율[수류차단막이 설치되지 않은 경우(S-1)에 대한 설치 후 농도

저감 비율]을 Table 4에 나타내었다.

대청호에서 녹조문제가 가장 심각했던 2001년 5월~10월 기간 동안 모든 지점에서 수류차단막 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 11.2~40.3%로 나타났다. 특히, Chl-a 농도의 저감 효율은 S-5, S-6, S-7 및 S-8 시나리오가 가장 높았고, 그 범위는 15.6~40.3%이었다(Table 4). 반면, 기존에 설치된 소옥천 S-2(조류확산방지막) 시나리오의 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 11.2~16.8%로 S-3~S-9 시나리오의 14.0~40.3% 보다 작게 모의되어 향후 조류확산방지막의 상세한 기능적 효과분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 평수년인 2006년 5월~10월 기간 동안 모든 지점에서 수류차단막 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효율의

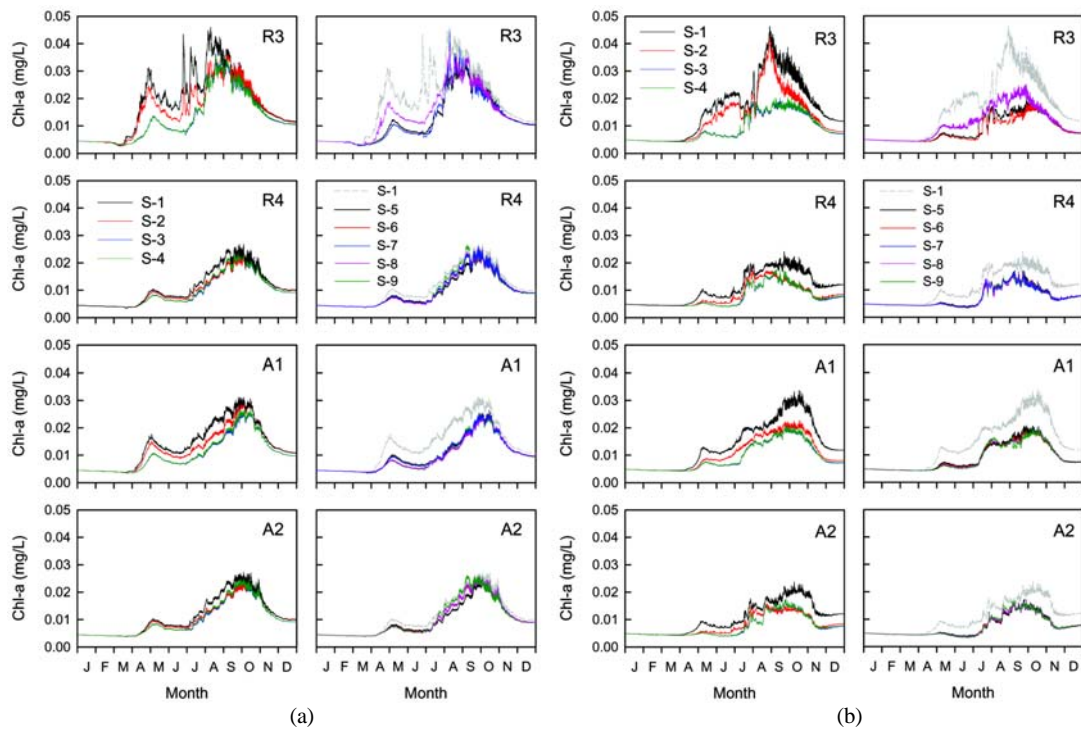


Fig. 8. Simulated time series of Chl-a concentration at R3, R4, A1 and A2 stations according to scenarios in 2001(a) and 2006(b).

Table 4. Efficiency of Chl-a concentrations improvement at R3, R4, A1, and A2 stations for curtain weir installations in 2001 and 2006. (May ~ October, unit: %)

Years \ scenarios		S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9
2001	R3	16.8	33.0	32.9	35.6	36.8	36.8	24.6	-
	R4	11.4	18.5	16.7	20.1	17.7	17.7	19.8	16.8
	A1	13.7	31.0	30.3	34.0	34.9	34.9	40.3	39.9
	A2	11.2	17.4	15.5	18.8	15.6	15.6	17.6	14.0
2006	R3	20.3	49.6	49.0	52.9	56.7	56.7	36.4	-
	R4	26.6	36.6	36.0	38.6	40.6	40.6	41.4	42.4
	A1	24.4	37.8	37.4	39.5	41.1	41.1	42.1	43.7
	A2	27.3	34.8	34.4	36.5	37.0	37.0	37.6	37.5

범위는 20.3~56.7%로 나타났고, S-6, S-7, S-8 및 S-9 시나리오가 Chl-a 농도의 저감 효율이 가장 높았으며, 그 범위는 36.4~56.7%이었다(Table 4).

2001년과 2006년에 수류차단막에 의한 지점별 Chl-a 농도의 저감 효과는 유입수의 영향을 직접 받는 R3와 A1이 R4와 A2에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 수류차단막에 의한 시나리오별 Chl-a 농도의 저감 효과는 S-3 = S-4 < S-5 < S-8 < S-9 < S-7 = S-6 순으로 설치위치가 하류로 갈수록 높게 나타났다(Table 4).

2001년과 2006년에 수류차단막 설치에 따른 R3, R4, A1 및 A2 지점에서 5월~10월까지 Chl-a 농도의 저감 효율(S-3~S-9)을 Table 5에 나타내었으며, 소옥천의 조류확산방지막 효과를 제외하고 수류차단막만의 효과를 재 모의하였다. 모의결과, 2001년 5월~10월 기간 동안 대청호 내 수류차단막 설치(S-3~S-9)에 따른 모든 지점에서 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 6.8~31.3%로 나타났고, S-5, S-6, S-7

및 S-8 시나리오가 가장 높았다. 또한, 2006년 모든 지점에서 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 9.3~44.9%이었고, S-6, S-7, S-8 및 S-9 시나리오가 가장 높았으며, 그 범위는 13.0~44.9%이었다(Table 5).

2001년과 2006년에 수류차단막 설치가 Chl-a 농도 저감에 미치는 효과는 S-3 = S-4 < S-5 < S-8 < S-9 < S-7 = S-6 순으로 나타났다. 2001년의 S-6(어부동 3지점)의 월별 평균 Chl-a 농도 저감 효율(저감 농도)은 R3에서 5월 46.4% (0.017→0.009 mg/L), 6월 48.2% (0.014 →0.007 mg/L), 7월 33.7% (0.020→0.013 mg/L), 8월 13.8% (0.029→0.025 mg/L), 9월 11.3% (0.030→0.027 mg/L) 및 10월에 15.6% (0.023→0.019 mg/L)이었다. 또한, 2006년은 5월 40.4% (0.011→0.006 mg/L), 6월 66.7% (0.016 →0.005 mg/L), 7월 43.3% (0.016→0.009 mg/L), 8월 55.4% (0.029→0.012 mg/L), 9월 47.1% (0.027→0.014 mg/L) 및 10월에 17.2% (0.019→0.016 mg/L)로 나타났다.

Table 5. Efficiency of Chl-a concentrations improvement at R3, R4, A1, and A2 stations for curtain weir installations (S-3~S-9) in 2001 and 2006. (May~October, unit: %)

Years/scenarios		S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9
2001	R3	21.0	20.8	24.2	25.6	25.6	9.5	-
	R4	8.0	5.8	9.7	6.6	6.6	9.0	5.3
	A1	20.4	19.6	23.9	24.9	24.9	31.3	30.7
	A2	6.8	4.6	8.4	4.4	4.4	6.5	2.2
2006	R3	36.2	35.5	40.2	44.9	44.9	19.7	-
	R4	13.0	12.3	15.7	18.5	18.5	19.6	21.1
	A1	17.5	17.0	19.8	21.9	21.9	23.2	25.5
	A2	9.8	9.3	12.1	13.0	13.0	13.9	14.0

4. 결론

유입 하천과 저수지 천이부에서 높은 영양염류와 조류를 포함한 표층 수류의 차단 또는 우회를 통해 본류 수역의 녹조발생을 저감하는 수류차단막은 대청호와 같이 중요한 취수장이 본류 수역과 댐 하류에 위치한 반면 녹조발생이 빈번한 저수지에서는 경제적이고 생태적으로 안전한 대책이 될 수 있다. 그러나, 수류차단막의 설치 효과는 설치 위치에 따라 그 효과가 다르게 나타나므로 최적위치 선정을 위한 수리 및 수질모델링 과정이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구에서 보정한 대청호 2차원 횡방향 평균 수리 및 부영양화 모델을 수정하고 다양한 수문사상에 대하여 적용성을 검증한 후, 수류차단막의 설치 위치에 따른 녹조발생 저감효과를 평가하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 본 연구를 위해 수정한 대청호 2차원 수리 및 부영양화 모델(W2)을 최근의 수문사상인 2006년과 2008년에 적용하여 검증한 결과, 모델은 저수지 물수지와 수온, 영양염류, 그리고 조류(Chl-a) 농도의 시공간적 변화를 적절히 모의하는 것으로 평가되었다.
- 2) 대청호에서 수류차단막 설치에 따른 주요지점 조류농도 저감 효과는 차단막의 설치 위치와 저수지 수리·수문 상황, 그리고 저수지 수역에 따라 다르게 나타났으며, 가뭄년인 2001년에는 11.2~40.3%, 홍수기 동안 한 번의 강우사상(7월)이 있었던 2006년에는 20.3~56.7% 정도였다.
- 3) 수역별로는 하천 유입수의 영향을 직접 받는 R3(회남), A1(추동) 수역이 R4(댐앞), A2(문의) 수역에 비해 상대적으로 그 효과가 크게 나타났으며, 설치 위치 시나리오별로는 S-3 = S-4 < S-5 < S-8 < S-9 < S-7 = S-6 순으로 증가하였고, 대체로 대정리 상류보다는 하류로 갈수록 그 효과가 크게 나타났다.
- 4) 시기별로는 가을 수직혼합 시기에 차단막 효과가 미미해지는 것으로 나타났으나, 이 시기에는 영양염류보다 수온이 조류성장의 제한인자로 작용하므로 실질적인 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.
- 5) 그리고 홍수 유입시 일시적으로 차단막 상류에 집적된 조류가 포획되어 본류 수역으로 유입되는 것을 방지하기 위해서는 홍수사상 이전에 막 상부에 집적된 조류의 처리대책이 필요할 것으로 판단된다.

6) 연구결과를 종합해 볼 때, 수류차단막은 유입하천의 수류를 차단 또는 우회시켜 영양염류가 저수지의 유광층으로 공급되는 것을 차단하고 본류 수역으로의 조류 확산을 방지하는 기능이 있는 것으로 나타났다. 따라서 수류차단막은 대청호의 물리적 녹조 저감 기술로써 경제적이면서 효과가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

국가수자원관리종합정보시스템(2009). <http://www.wamis.go.kr/>.
 국립환경과학원(2005). 대청호 수질 및 조류발생 실태조사.
 국립환경과학원(2007). 2007년 대청호 조류예보제 시행결과.
 국립환경연구원(2003). 금강수계 상수원 수질조사.
 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수 (2001). 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호. *Korean J. Limnol.*, **34**(1), pp. 30-44.
 김유경, 정세웅, 이흥수, 정용락(2007). 부상웨어 설치에 따른 대청호 조류 성장 억제 효과 수치모의. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 581-590.
 김윤희(1998). 홍수시 소양호에서 증축탁수의 이동 및 영향에 관한 연구. 석사학위논문, 강원대학교.
 나은경, 신경숙, 정제현, 강호(2003). 전자선조사를 이용한 부영양화 호수의 조류제어에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **25**(11), pp. 1368-1374.
 서동일(1998). 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **20**(9), pp. 1219-1234.
 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완(2007). 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 52-63.
 정세웅, 오정국(2006). 대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발. *한국수자원학회지*, **39**(1), pp. 79-88.
 정세웅, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의. *한국수자원학회논문집*, **38**(8), pp. 655-664.
 천세억, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재(2006). 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 342-348.
 한국수자원공사(2006). *대청댐 퇴사량추정보고서*.
 한국수자원공사(2007a). *댐운영 실무편람*.
 한국수자원공사(2007b). *하천-저수지시스템에서 녹조발생기작 및 저감기술연구 (1차년도)*.

- 허경미(2001). 대형 인공호의 수리수문학적 변화에 대한 호수수질 모델 비교 연구. 석사학위논문, 이화여자대학교.
- 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.
- Asaeda, T., Priyantha, D. G., Saitoh, S., and Gotoh, K. (1996). A new technique for controlling algal blooms in the withdrawal zone of reservoirs using vertical curtains. *Ecological Engineering*, **7**, pp. 95-104.
- 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 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.
- Cole, T. M. and Tillman, D. H. (1999). Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole, T. M. and Tillman, D. H. (2001). Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs Using CE-QUAL-W2, U.S. Army Corps of Engineers.
- 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.
- Dyson, M., Bergkamp, G., and Scanlon, J. (2003). Flow: The Essentials of Environmental Flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- 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.
- Tharme, R. E. (2003). A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trend in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers. *River Res. Applic.*, **19**, pp. 397-441.
- Thornton, K. W., Kimmel, B. L., and Payne, F. E. (1990). Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 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.
- Vermeyen, T. B. and Knoblauch, H. (2000). Hydraulic Characteristics of a Plunge Zone in Whiskeytown Reservoir, California, *U.S. Bureau of Reclamation*, D-8560, Denver, CO 80225, pp. 469-474.
- Wetzel, R. G. (2001). Limnology: Lake and River Ecosystems. Third Edition. Academic Press, California, pp. 1006.
- World Commission on Dams (2000). *Dams and Development*, Earthscan, London.