

연구논문

## 물리적 차단시설이 대청호 수질에 미치는 효과 분석

이흥수\* · 정세웅\* · 박형석\* · 정동환\*\*

충북대학교 환경공학과\*, 국립환경과학원 금강물환경연구소\*\*

(2011년 10월 21일 접수, 2011년 12월 29일 승인)

### Analysis the Effects of Physical Blocking Weirs on the Water Quality in Daechung Reservoir

Lee Heungsoo\* · Chung Sewoong\* · Park Hyungseok\* · Jeong Donghwan\*\*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University\*

Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research\*\*

(Manuscript received 21 October 2011; accepted 29 December 2011)

### Abstract

This study was aimed to assess the effects of additional installation of two different types of weirs, one is a curtain-type weir and another is a submerged-type weir, on the control of algal growth in Daechung Reservoir. A two-dimensional(2D) coupled hydrodynamic and eutrophication model that can accommodate vertical movement of the curtain weir following the water surface variations was verified using field data obtained in two distinctive hydrological years; dry(2008) and wet(2010). The model adequately simulated the temporal and spatial variations of water temperature, nutrients and algal(Chl-a) concentrations during the periods. The effectiveness of curtain weir on the control of algal bloom was evaluated by applying the model to 2001(dry year) and 2010 assuming 6 different scenarios according to installation locations. The curtain weirs that already installed at 3, 5, 7 sites(scenario C-2) showed significant effect on the control of algal growth in the reservoir; the reduction rates of algal concentration were placed in the range of 7.5~31.5% and 9.1~44.9% for 2001 and 2010, respectively. However the simulation results revealed that additional installation of curtain weirs(scenario C-3~C-6) in the bay area (choosori) have marginal effect. The effectiveness of submerged weir was evaluated against 2010 assuming 7 different scenarios according to installation locations, but all scenarios(S-1~S-7) showed neglectable or negative effect on the control of algal growth.

Keywords : Curtain weir, submerged weir, algal control, Daechung Reservoir, water quality modeling

## 1. 서론

성층화된 부영양상태 저수지의 수면에 식물플랑크톤이 과잉 번성하여 녹조현상(algal bloom)을 일으키게 된다. 특히, 여름철 수온 성층화로 인해 저수지가 비교적 안정되었을 때 빈번히 발생하는 남조류는 높은 수온과 관련되어 있으며, 수온이 21℃ 이상일 때 높은 비율로 나타난다(McQueen and Lean, 1987; Tilman *et al.*, 1986). 또한, 부력 조절이 가능한 남조류는 인이 풍부한 중층 또는 심층부터 상대적으로 인이 부족한 표층까지 상·하로 이동하여 인을 흡수하고 표층에서 세포내에 저장된 인을 성장과 대사활동에 사용할 수 있다(Ganf and Oliver, 1982; Walsby *et al.*, 1989).

대청호의 경우 상류지천에서 부영영화 원인물질의 유입과 곳곳에 정체수역을 형성하는 지형적 특성으로 인해 녹조현상이 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 하수처리장 방류수가 직접 유입하는 소옥천으로부터 표층을 통해 높은 농도의 인이 유입되고 있어 조류의 과잉성장을 촉진하고, 소옥천이 유입하는 추소리와 같이 정체 수역에서 생성된 조류가 강우-유출과 바람에 의해 확산·이송되어 저수지 조류증식을 가속시키는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(국립환경연구원, 2003; 정세웅 등, 2007; 천세억 등, 2006). 대청호는 전국 21개의 조류예보제 대상 호소 중 조류주의보와 경보 및 대발생이 가장 많이 발령되었다(국립환경과학원, 2007). 특히, 가뭄년인 2001년에는 적은 강우로 댐의 유입량과 방류량이 감소하면서 평균 체류시간이 약 499일로 장기화됨에 따라 회남수역에서 조류주의보가 35일, 조류 경보가 47일, 조류 대발생이 7일간 지속되었다(국립환경과학원, 2005). 대청호에서 조류는 주로 초여름에 출현하여 초가을까지 빛이 충분히 전달되는 유광층에서 대량 발생하고, 주로 출현하는 조류의 종은 규조류, 갈색편모조류, 남조류 등인데, 이중 일부 독소를 생성하며, 상수원 수질관리에 가장 어려움을 주는 것은 남조류인 *Anabaena*와 *Microcystis*이다(국립환경연구원, 2003).

댐 저수지의 수질 및 생태환경 문제를 완화하기

위한 기술적 대안은 크게 유역대책과 저수지내 대책으로 구분할 수 있다. 유역대책으로는 환경기초시설 확충, 비점오염원 저감, 오염하천 정비사업 등 유역의 오염부하를 삭감하는 방법으로 다양하게 추진되고 있다. 댐 저수지내 대책은 수중폭기 장치, 황토 및 응집제 살포, 식물정화 시설 등 저수지 내에서의 물리·화학·생물학적 기작을 이해하고 제한인자를 조절하는 방법들이 시도되고 있다. 그러나 저수지 내 수질관리 대책은 임시적이고, 부분적인 효과를 거둘 수 있겠지만 적용 규모, 시설투자 및 유지관리비용, 부산물 생성에 따른 생태계 영향 등 문제점을 안고 있어 성공적인 적용사례는 드물다(나은경 등, 2003).

반면, 물리적 차단시설은 일본, 미국, 독일 등에서 저수지와 방류수 수질관리를 위한 다양한 목적으로 적용되었고, 생태계에 부작용이 없으며, 설치비용대비 효과면에서 유용한 대책으로 평가되었다. 특히, 커튼형 부상 차단시설은 경제적이면서도 생태계 영향이 적은 대책으로 일반적으로 저수지의 유수구간(riverine)과 전이구간(transitional zone)에 부상식으로 설치하며, 일정 깊이의 표층 흐름을 차단함으로써 상류에서 유입하는 조류와 고농도의 영양염류를 포함한 오염된 하천수가 저수지성향인 정수구간(lacustrine zone)의 유광층으로 공급되는 것을 억제하는 기능이 있어 일본, 미국, 호주 등에서 녹조제어, 수온제어, 탁수제어 등을 위해 적용된 바 있다. Asaeda 등(1996, 2001)과 Priyantha 등(1997)은 일본의 큐수지방에 위치한 데라우치 댐에서 조류의 과다성장을 제어하기 위해 불투수성 차단시설을 설치하여 다량의 영양염류를 포함한 하천수가 표층으로 유입되는 것을 차단하고, 유입수가 밀도차에 의해 저수지 표층수 아래로 유입되면 중층 취수시설과 연계하여 중층밀도류를 유광층과 수직 혼합시키지 않고 댐 하류로 바이패스 시키는 효과를 검증하였다. Vermeyen (2000)과 Vermeyen and Knoblauch (2000)는 미국 캘리포니아 북부의 Lewiston 저수지와 Whiskeytown 저수지로부터 연어의 서식환경 보호를 목적으로 냉수를 취수하기

위해 커튼형 차단시설을 설치하여 효과를 분석하였고, Morillo 등(2006)은 호주 Melbourne에 위치한 Silvan 저수지 유입수의 취수구 도달 시간을 조절하기 위해 커튼형 차단시설 설치를 고려하고, 차단 시설 설치 시나리오에 대한 효과를 평가하였다. 이러한 커튼형 부상 차단시설의 설치 효과는 설치 위치, 규격에 따라 다르게 나타나 최적 설계를 위해서는 정확한 사전 예측 기술이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수리·수질·생태 연동 모델을 이용하여 대청호에서 물리적 차단시설인 커튼형 부상 차단시설과 잠류형 고정 차단시설의 설치가 수질에 미치는 효과를 평가하고자 하였다. 이를 위해 선행연구에서 보정한 모델을 수정하고 다양한 수문사상에 대하여 적용성을 검증하였다. 선행연구(이흥수 등, 2010)와의 차별성은 기존 구축된 지형 자료에서 소옥천 유입부와 추소리 수역에서 보다 정교한 모델링을 위해 소옥천 유입부를 약 3 km 상류로 연장하였고, 소옥천 유역의 수치해석 격자(segment)를 10개에서 71개로 세분화하여 구성하였다. 또한, 회남대교 약 2 km 상류에 부상식 차단막이 설치되어 있는 지점을 전·후로 segment 격자를 3개에서 8개로 세분화하여 수정하였다. 수정된 모델은 최근의 수문년인 2008년과 2010년의 다양한 수문사상의 실측자료를 활용하여 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 향후 국내 댐 저수지의 수질 및 생태환경 문제를 완화하기 위한 저수지 내 대책으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상

본 연구의 대상 저수지인 대청호는 금강수계 중류에 위치하고, 충청권 약 200만 명의 주민들에게 매일 약 백만  $m^3$ 의 생·공용수를 공급하는 중요한 상수원으로 댐 하류지역의 홍수피해 경감, 용수공급 및 수력발전 등 다목적으로 1975년 3월에 착공하여 1980년 12월에 준공되었다. 총 유역면적은(상류 용담댐 유역제외) 3,204.0  $km^2$ 이고, 저수지 표

면적은 72.8  $km^2$ 로서 유역면적/저수면적의 비는 44.0이다. 저수지의 평균 유입량은 95.6  $m^3/s$ , 강우량은 1,230.0 mm/yr, 총 저수용량은 1,490 $\times 10^6 m^3$ 이며, 유효저수량은 790 $\times 10^6 m^3$ 에 해당한다. 유역은 행정적으로 충청북도, 충청남도, 전라북도와 경상북도 일부지역 등 총 1개 광역시, 4개 시·도, 11개 군·구를 포함한다(한국수자원공사, 2007).

대청호의 취수를 위한 수리구조물은 추동과 문의에 위치한 취수탑(EL. 57.0 m) 2개와 수력발전과 댐 하류 용수공급을 위한 발전 방류구(EL. 52.0 m)가 있으며, 그리고 6개의 수문을 갖춘 홍수 조절용 여수로(EL. 64.5 m)가 있다(한국수자원공사, 2007). 우리나라 대부분의 기존 댐들과 마찬가지로 대청댐도 선택취수 설비를 갖추고 있지 않아 평상시 하류 용수공급은 발전 방류구를 통해서만 이루어지고 있다. 이러한 고정 취수 방식은 종종 저수지뿐만 아니라, 하류 하천 수질관리에 어려움을 줄 수 있다.

한국수자원공사에서는 조류감시와 강우시 유입하는 탁수의 거동을 파악하고자 저수지 내에서 월간 또는 주간조사를 장계교(R1), 대정리(R2), 회남대교(R3), 댐 앞(R4), 추동취수탑(A1) 및 문의취수탑(A2)에서 실시하고 있다. 또한, 금강물환경연구소에서는 저수지 내에서 조류예보제 시행을 목적으로 대전과 청주의 상수원수를 취수하는 추동(A1)과 문의(A2) 취수탑 및 회남대교(R3)에서 월간, 주간 및 필요시 일간조사를 실시하고 있다(Fig. 1(a)).

대청호 유역에서 모델의 검·보정 기간인 2001년, 2008년 및 2010년의 연도별 수문사상의 변화를 Table 1에 나타내었다. 대청호에서 녹조문제가 가장 심각했던 2001년 대청댐 유역의 연간 총 강수량은 794.6 mm이었고, 홍수기인 6~9월동안 강우량은 500.6 mm(연 강수량의 63.0%)이었다. 일평균 유입량은 34.6  $m^3/s$ 이었고, 홍수기에는 52.1  $m^3/s$ 이었으며, 저수위 일변동의 최대값과 최소값은 각각 68.1 EL. m, 62.8 EL. m로 나타났다. 2001년 동안 대청호 유역의 총 강우량과 일평균 유입량은 각각 예년 평균의 64.6% 및 36.2%에 해당하였고, 강우로 인한 유입량이 작아 홍수조절을 위한 여수

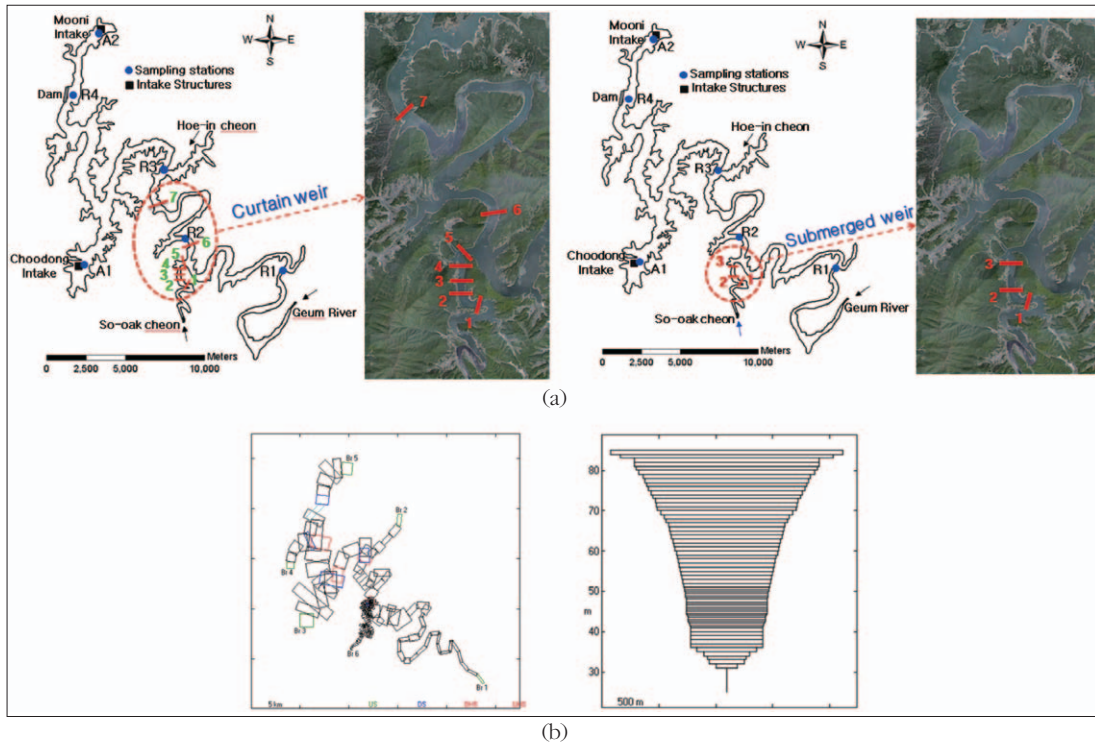


Fig. 1. Layout of Daechung Reservoir, locations of monitoring stations and physical blocking weirs (a), and segmentation for simulations (b).

Table 1. Hydrological conditions of Daechung Reservoir in 2001, 2008 and 2010

Year\ factors	Precipitation (mm)		Average inflow (m <sup>3</sup> /s)		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
2008	782.4	565.5	34.8	67.8	72.6	64.5	8.1
2010	1,219.7	833.0	76.2	156.9	76.4	63.0	13.4

\*Flood season: June~September

로 수문방류는 없었다.

2008년과 2010년에 총 강우량은 각각 782.4 mm, 1219.7 mm이었고, 홍수기(6~9월)동안 강우량은 각각 565.5 mm(72.3%) 및 833.0 mm(68.3%)이었다. 2008년과 2010년에 일평균 유입량은 각각 34.8 CMS, 76.2 CMS이었고, 홍수기동안 일평균 유입량은 각각 67.8 CMS, 156.9 CMS로 나타났다. 2008년의 저수위 일변동에서 최대값과 최소값은 각각 72.6 EL. m, 64.5 EL. m이었고, 2010년에는 각각 76.4 EL. m, 63.0 EL. m로 나타났다 (Table 1). 또한, 홍수조절을 위한 여수로 수문방류

는 2010년의 경우, 8월 18일~27일(1,535.1 CMS), 9월 1일~7일(1120.9 CMS)에 걸쳐 이루어졌다(국가수자원관리종합정보시스템, 2011). 반면, 2008년에는 강우로 인한 유입량이 작아 홍수조절을 위한 수문방류는 없었다.

## 2. 모델 구성

### 1) 모델 개요 및 시나리오 구성

CE-QUAL-W2(이후 W2) 모델은 미 육군공병단(US Army corps of Engineers)에서 개발한 2차원 횡방향 평균(laterally-averaged) 수리·수

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

Scenarios\ curtain weir	curtain weir 1 (5 m)	curtain weir 2 (7 m)	curtain weir 3 (7 m)	curtain weir 4 (7 m)	curtain weir 5 (7 m)	curtain weir 6 (10 m)	curtain weir 7 (10 m)
C-1	×	×	×	×	×	×	×
C-2	×	×	○	×	○	×	○
C-3	○	×	○	×	○	×	○
C-4	×	○	○	×	○	×	○
C-5	×	×	○	○	○	×	○
C-6	×	×	○	×	○	○	○

질·생태 모델로써, 횡방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 저수지 수체에 매우 적합하고, 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이하다(정세웅 등, 2005; Cole and Buchak, 1995; Cole and Wells, 2004). 현재 W2 모델은 미 육군 공병단, 미 개척국(USBR), 테네시유역관리청(TVA) 등 미국의 주요 저수지관리 기관에서 댐 저수지의 수질관리를 위한 모델로 광범위하게 활용되고 있다(Cole and Tillman, 1999, 2001).

W2 모델의 수리해석은 수위( $\eta$ ), 압력( $P$ ), 수평방향 유속( $u$ ), 수심방향 유속( $w$ ), 물질의 농도( $C$ ), 밀도( $\rho$ ) 등 6가지 변수를 연속방정식, x방향 운동방정식, 정수압방정식, 자유수면방정식, 밀도상태방정식, 물질수지방정식 등 6개의 지배방정식을 사용하여 다양한 유한차분수치해석기법(Finite Different Method, FDM)을 사용하여 푼다(Cole and Buchak, 1995; Chung and Gu, 1998; Cole and Wells, 2004).

W2 모델은 저수지내 수리구조물인 내부 차단시설(internal weir)의 설치효과를 모의하는 기능을 가지고 있다. 내부 차단시설은 수면에서 수심방향으로 설치하는 커튼형 부상 차단시설(curtain weir)과 저수지 수중 바닥에 설치하는 잠류형 고정 차단시설(submerged weir)의 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 그러나 기존 W2 모델에서는 커튼형 부상 차단시설을 고정식 차단시설로 모의하기 때문에 수위 변화에 따라 차단시설이 상·하로 이동하는 현상을 해석할 수 없는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고 우리나라 저

수지와 같이 홍수기 수위변동이 심한 저수지 특성을 고려하기 위해 수위변화에 따라 상·하로 이동하는 부상식 차단시설 모의 기능을 추가한 수정 모델을 사용하였다.

검증된 W2 모델을 이용하여 차단시설이 대청호 수질에 미치는 효과를 분석하고자 시나리오를 구성하였다(Fig. 1(a); Table 2, 3). 물리적 차단시설인 커튼형 부상 차단시설과 잠류형 고정 차단시설의 설치 지점은 저수지의 지형과 수리적 특성, 소옥천 유입 영향을 고려하였으며, 현재 소옥천 하류 조류 확산방지막(7 m 깊이) 2지점(curtain weir 3, 5)을 제외하고, 접근성, 설치 가능성, 수심 등을 종합적으로 고려하여 상류 3지점을 선정하였다(Fig. 1(a); Table 2, 3).

커튼형 부상 차단시설의 시나리오 중 C-1은 차단시설의 설치가 전혀 없는 대조 시나리오이고, C-2는 차단시설 3과 5(2008년에 설치된 소옥천 조류확산방지막 2개)에 차단시설 7(2009년에 설치된 회남대교 약 2 km 상류의 수류차단막)을 추가 설치한 경우이다. 즉, 추가적인 설치 시나리오는 총 4개이며, 차단시설 3(7 m 깊이), 5(7 m 깊이), 7(10 m 깊이)이 설치된 상황에서 소옥천 상류로부터 하류측으로 C-3은 차단시설 1(5 m 깊이), C-4는 차단시설 2(7 m 깊이), C-5는 차단시설 4(7 m 깊이) 및 C-6은 차단시설 6(10 m 깊이)을 추가 설치하는 경우로 적용하였다(Fig. 1(a); Table 2).

또한, 잠류형 고정 차단시설의 시나리오는 커튼형 부상 차단시설이 전혀 설치되어 있지 않은 경우로 가정하였다. 차단시설의 설치가 전혀 없는 대조 시나리오를 S-1, 소옥천 상류로부터 하류측으로 S-

Table 3. Simulation scenarios for the evaluation of submerged weir installation

Scenarios\ submerged weir	submerged weir 1 (5 m)	submerged weir 1 (7 m)	submerged weir 2 (7 m)	submerged weir 2 (10 m)	submerged weir 3 (7 m)	submerged weir 3 (10 m)
S-1	×	×	×	×	×	×
S-2	○	×	×	×	×	×
S-3	×	○	×	×	×	×
S-4	×	×	○	×	×	×
S-5	×	×	×	○	×	×
S-6	×	×	×	×	○	×
S-7	×	×	×	×	×	○

2와 S-3은 각각 저수지 바닥으로부터 5 m와 7 m 높이로 차단시설 1지점(추소리에서 소옥천 상류방향 1.6 km)에 설치한 경우이다. S-4, S-5 및 S-6, S-7 시나리오는 차단시설 2지점(추소리에서 소옥천 상류방향 1.0 km)과 3지점(추소리에서 소옥천 상류방향 0.4 km)에 각각 7 m와 10 m 높이로 차단시설을 설치한 경우로 가정하여(Fig. 1(a); Table 3) 차단시설 설치에 따른 수질 저감효과를 분석하였다.

2) 모델의 입력자료 구성

W2 모델의 주요 입력자료는 저수지 지형 및 단면자료, 저수지 상류 및 하류의 유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수 등이다. 대청호의 유한차분 격자구성은 금강 분류와 주요 지류하천을 6개의 구획(branch)으로 구분하였고, 흐름방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 대청호 상류인 가덕교 지점에서 댐축까지 165 개( $\Delta x = 0.2\sim 1.9$  km)의 요소(segment), 수심방

향으로는 0.5~1.0 m 간격으로 69개 수층(layer)으로 구성하였다(Fig. 1(b)). 저수지 지형자료(bathymetry)는 대청댐 퇴사량측정보고서(한국수자원공사, 2006)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 모형에서 계산한 저수지 수위별 용량곡선을 실측수위와 비교함으로써 그 신뢰도를 검증하였다. 모델의 검증기간인 2008년과 2010년의 실측수위와 모의수위를 비교한 결과, 결정계수값( $R^2$ )이 각각 0.996, 0.009로 나타났고, 7월과 8월의 유입량 증가에 따른 수위 상승을 잘 반영하는 것으로 나타나 모델은 저수지 물수지 계산에 있어서 높은 신뢰도를 보였다(Fig. 2).

국가수자원관리종합정보시스템(2011)에서 제공하는 대청댐 저수지 유입량과 방류량, 저수지 수위 등 수문자료와 댐 운영 자료를 경계조건으로 사용하였고, 유입량 자료는 대청댐 유역 전체의 유입유량이기 때문에 각 지류하천의 유입량은 대청댐의 일별 총유입량을 유역면적 비로 환산하여 산정하였다. 2008년과 2010년 유입수의 일별 수온자료는

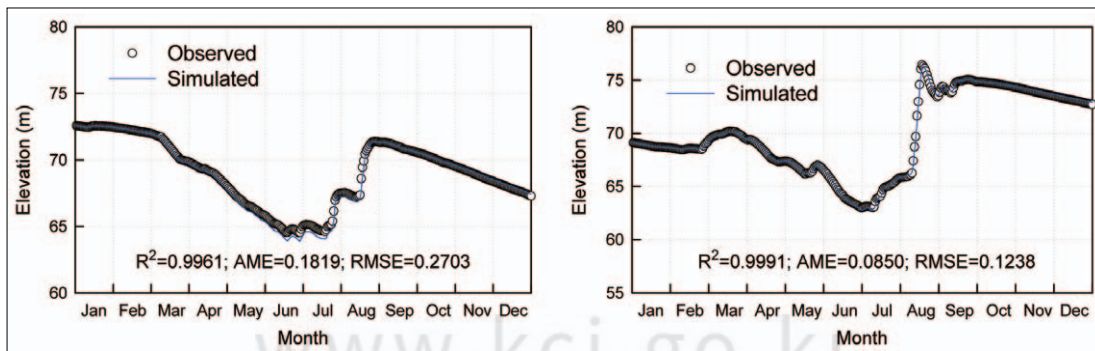


Fig. 2. Comparisons of observed and simulated water surface elevations in 2008(left) and 2010(right)

가덕교에 설치된 자동계측기(3시간 단위)의 실시간 수온자료를 활용하였고, 실측자료가 없는 기간에 대하여는 동일 하천의 실측수온과 기상자료인 기온, 이슬점온도로부터 개발한 회귀식(정세웅과 오정국, 2006)을 사용하여 유입수온을 산정하였다.

대기와 수면의 열 교환 플럭스를 모의하기 위해 기상자료인 기온과 이슬점 온도, 풍향과 풍속, 태양의 단파복사량과 운도를 사용하였다. 풍향과 풍속 자료는 문의면사무소(EL. 100 m)에 설치된 대형 자동기상관측장비(AWS)의 자료를 이용하였고, 그 외의 자료는 대청호에서 서쪽방향으로 직선거리 8 km 떨어진 곳에 위치한 대전기상대(EL. 68.3 m)의 관측 자료를 사용하였다.

경계조건 수질항목인 SS, PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Algae(Chl-a), DO 농도 등의 항목은 한국수자원공사와 금강물환경연구소의 정기 및 수시 측정망 실측자료를 이용하였다. W2 모형에서 조류(algal) 농도에 대한 초기조건 및 경계조건 입력은 생체량(mg/m<sup>3</sup>)으로 하며, 입력자료인 ACHLA 변수에서 조류의 생체량 중의 Chl-a의 비율을 지정해 줌으로써 Chl-a 단위로 결과를 출력할 수 있다. 본 연구에서는 기존 연구(정세웅 등, 2007)에서 보정한 결과를 근거로 ACHLA를 100.0으로 입력하였다.

W2 모형에서 조류와 영양염류, 유기물 모의에 관계되는 매개변수는 60여개 이상이지만, 이들 매개변수 중 대부분은 온도에 따른 반응속도 보정을 위한 변수와 화학양론 관련 매개변수이므로 본 연구에서는 초기값을 사용하였다. 대청호 부영양화 모의에서 고려한 조류는 여름철에 우점하는 *Microcystis*를 대상으로 하였고, 조류와 관련한 매개변수는 사용자 매뉴얼에서 남조류에 해당하는 값

을 참조하여 사용하였으며, 침강속도는 기량이 있는 *Microcystis*의 특성을 고려하여 0.01 m/day를 적용하였다. 수질관련 매개변수의 보정은 2001년을 대상으로 관측값과 모의값이 가장 잘 일치할 때까지 시행착오법으로 민감도 분석을 통하여 유효한 범위 내에서 보정하였다.

### 3) 모델의 검·보정 및 평가

모델의 보정은 대청호에서 조류 발생이 가장 극심했던 가뭄년인 2001년 수문사상에 대하여 수정한 지형자료를 바탕으로 W2 모델을 보정하였고, 검증은 가뭄년인 2008년과 평수년인 2010년을 대상으로 하였다. 검증기간인 2010년에는 소옥천 하류 조류확산방지막(7 m 깊이)과 수류차단막(10 m 깊이)이 운영된 것을 감안하여 모의하였다. 모델 보정과 검증은 대청호에서 수위변동해석, 수온성층해석, 부영양화 해석에 중점을 두었으며, 다양한 수문사상을 고려하였다. 수리 및 수질 모델의 보정과 검증에 대한 상세한 내용은 정세웅 등(2007)에 제시되어 있다.

모델의 오차크기와 신뢰도를 평가하기 위한 지표로써 Table 4에 제시된 통계값을 사용하였다. 절대 평균오차(absolute mean error, AME)는 실측값과 모의값 잔차의 절대값을 산술평균한 값으로, 그 값이 0에 가까울수록 모의결과의 정확도가 높고 모델의 성능이 우수하다는 것을 의미한다. 평균제곱 오차의 평방근(root mean square error, RMSE)은 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 모의결과의 평균오차를 나타내는 지표로 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다(Table 4).

Table 4. Statistical indices used to evaluated the model accuracy

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

O<sub>i</sub> = observations, P<sub>i</sub> = simulations, N = total number of observations,  $\bar{O}$  = mean of observations

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 모델의 검증

##### 1) 수온성층 구조

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

모델의 검증기간인 2008년과 2010년에 R4 지점에서 수심별 수온 모의값과 실측값을 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 홍수기 큰 강우가 없었던 가뭄년인 2008년에 여름철 동안 매우 안정적인 성층구조가 유지되었고, 10월초부터 대기기온 강화와 함께 수직혼합이 시작되었다. 수온예측 오차는 AME 0.654~1.821°C, RMSE 0.878~2.211°C 범위로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 반면, 2010년의 경우, 8월말 홍수기 이후 수위가 약 10 m 정도 상승하였고, 수온예측 오차는 AME 0.233~1.255°C, RMSE 0.293~2.110 범위로 나타났으며, 전 기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였으나 9월 중순 이후 수온약

층이 형성된 구간에서 실측값과 다소 차이를 보였다(Fig. 3).

##### 2) 영양염류(T-N, T-P)

질소와 인은 조류 성장의 필수 영양요소이며 부영양화 모델의 검증에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 특히, 성층화된 저수지에서 유역으로부터의 외부 부하가 큰 경우 제한영양염인 인의 부하특성과 시공간적인 농도 변화를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 조류의 성장과 밀접한 관련이 있는 질소와 인의 시공간적인 농도변화 모의 성능을 확인하고자 2008년과 2010년의 총질소(T-N) 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과는 Fig. 4와 같고, 대청호에서 조류성장의 제한영양염인 총인(T-P) 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모의 결과는 저수지내 수질측정망 지점의 표층에서 측정된 실측값과 비교하였다.

2008년의 경우, T-N 농도의 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.43 mg/L (0.36~0.56 mg/L 범위), RMSE 평균 0.52 mg/L (0.45~0.66 mg/L 범위)이었고, 2010년은 AME 평균 0.35 mg/L(0.26~0.42 mg/L 범위), RMSE 평균 0.42 mg/L(0.29~0.50 mg/L 범위)로 나타났

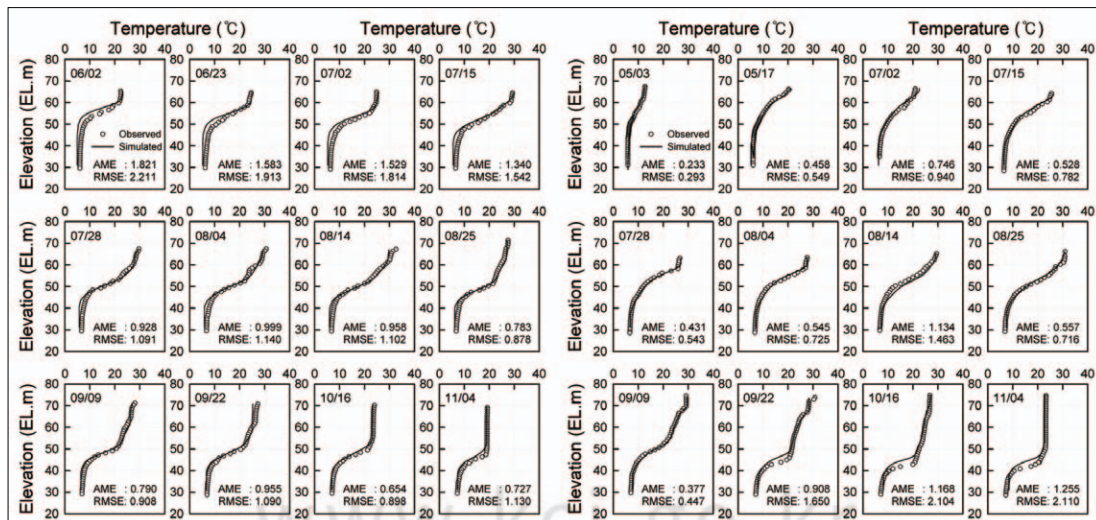


Fig. 3. Comparison of simulated and observed profiles of water temperature at R4 in 2008(left) and 2010(right)



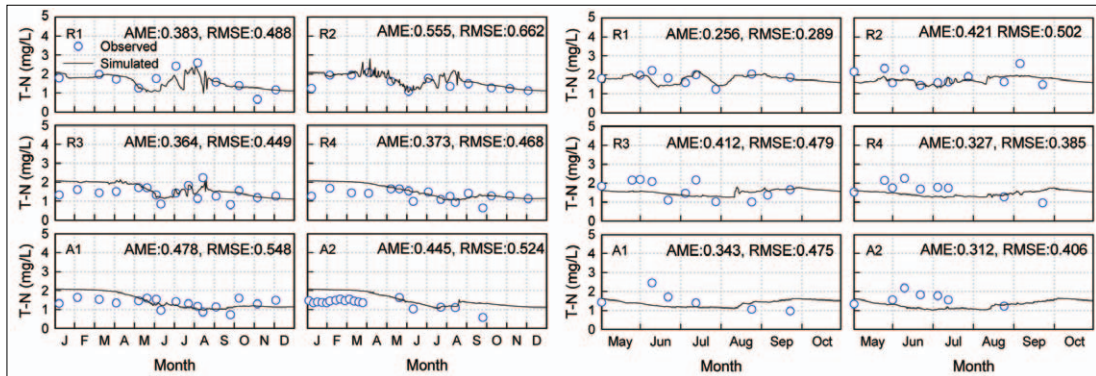


Fig. 4. Comparison of simulated and observed time series of T-N concentrations in 2008(left) and 2010(right)

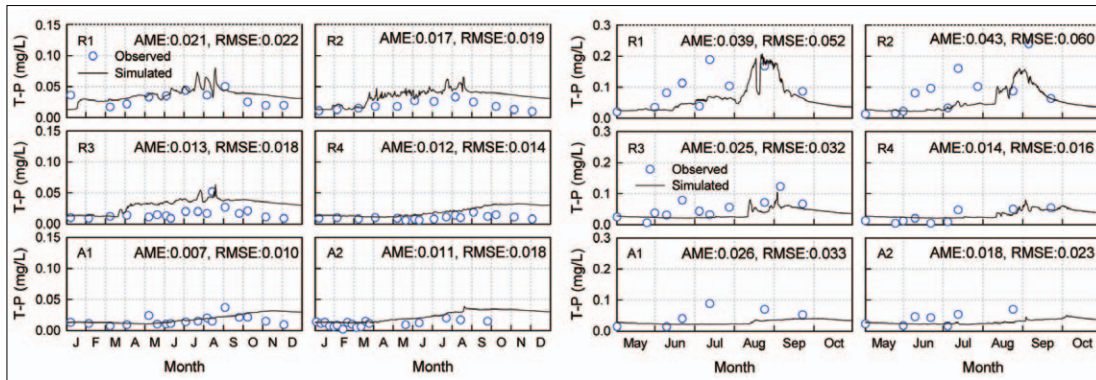


Fig. 5. Comparison of simulated and observed time series of T-P concentrations in 2008(left) and 2010(right)

다(Fig. 4). 모델은 2008년과 2010년 T-N 농도의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히 R1, R2 및 R3수역에서의 T-N 농도는 홍수 유입시 증가하는 경향을 보이고 있어 이 수역은 하천 유입수의 영향을 직접 받는 것으로 판단된다. R4와 A2 및 A1 지점에서는 홍수가 중층 밀도류를 형성하므로 표층에 미치는 영향이 작은 것으로 보인다. 반면, 2010년 모의결과는 모든 지점에서 T-N농도의 실측값 범위(2.0 mg/L 내외)를 적절히 재현하였으나, 5월말부터 7월중순까지 모의값은 실측값의 강우시 변동 경향을 적절히 재현하지 못하였으며 실측 농도를 과소평가하는 경향을 보였다. 이는 2008년에 비해 강수량이 풍부했던 2010년의 5월과 7월중순에 발생한 강우사상에 의한 유입수 수질농도의 변화를 경계조건에 반영하지 못한 원인으로 사료된다.

2008년의 경우, T-P 농도의 모의값과 실측값의

오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.014 mg/L (0.007~0.021 mg/L 범위), RMSE 평균 0.017 mg/L (0.010~0.022 mg/L 범위)이었고, 2010년은 AME 평균 0.028 mg/L(0.014~0.043 mg/L 범위), RMSE 평균 0.036 mg/L(0.016~0.060 mg/L 범위)로 나타났다(Fig. 5). 모델은 저수지내 각 측정지점에서 모의값은 실측값의 시계열 변동경향을 잘 재현하였으며, 총질소와 마찬가지로 홍수 유입에 따른 지점별 농도변화를 잘 모의하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 2010년의 경우, 모든 지점에서 초기값을 만족하였으나 R1과 R2 지점에서 6, 7월에 모의값이 실측값을 과소평가하였다. 그 이유는 매개변수 보정의 문제이기 보다는 강우시 하천 유입수에 대한 경계조건 실측 자료의 부족에 있는 것으로 판단된다.

### 3) 조류(Chl-a)

2008년과 2010년 저수지내 각 측정지점의 표층

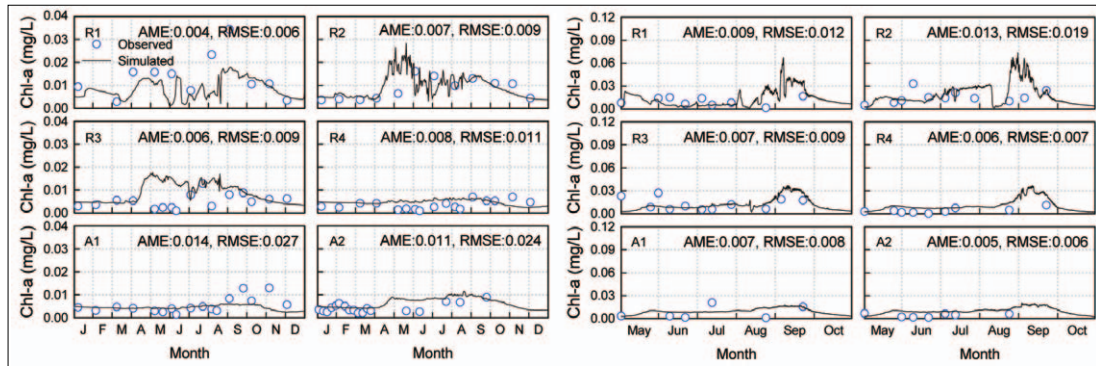


Fig. 6. Comparison of simulated and observed time series of Chl-a concentrations in 2008(left) and 2010(right)

에서 Chl-a 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 모델은 대청호 대부분의 수역에서 조류의 발생과 시계열 변화를 비교적 잘 모의하였다. 2008년 R1 지점을 제외한 모든 지점의 표층에서 Chl-a의 실측 농도는  $20.0 \mu\text{g/L}$  이하로 매우 낮았다. 2008년의 경우, Chl-a 농도의 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균  $0.008 \text{ mg/L}$  ( $0.004 \sim 0.014 \text{ mg/L}$  범위), RMSE 평균  $0.014 \text{ mg/L}$  ( $0.006 \sim 0.027 \text{ mg/L}$  범위)이었고, 2010년은 AME 평균  $0.008 \text{ mg/L}$  ( $0.005 \sim 0.013 \text{ mg/L}$  범위), RMSE 평균  $0.010 \text{ mg/L}$  ( $0.006 \sim 0.019 \text{ mg/L}$  범위)로 나타났(Fig. 6).

## 2. 물리적 차단시설 설치 효과

### 1) 커튼형 부상 차단시설

2010년 평수년을 대상으로 부분 차단시설인 커튼형 부상 차단시설의 설치효과와 기작을 예측하고자 하였다. 이에 커튼형 부상 차단시설을 설치하지 않은 경우(C-1)와 저수지 본류 회남대교 2 km 상류의 1지점(10 m 깊이)과 소옥천 하류 말단의 2지점(7 m 깊이)에 설치한 경우(C-2), Chl-a 농도의 공간분포와 유속벡터를 Fig. 7에 나타내었다.

커튼형 부상 차단시설을 설치하지 않은 경우(C-1), 금강본류와 소옥천으로부터 유입한 Chl-a 농도가 저수지 표층을 따라 댐 방향의 저수지 내부로 확산되었고, 커튼형 부상 차단시설을 설치한 경우(C-2)는 부유성 조류(Chl-a)의 이동이 차단되어 저수

지 내부로 더 이상 확산되지 않는 것으로 나타났다. 소옥천에 설치된 커튼형 부상 차단시설은 소옥천에서 발생한 조류를 차단하고, 본류에 설치된 커튼형 부상 차단시설도 소옥천 유입부~회남대교 약 2 km 상류 구간에서 자생한 조류가 본류 수역으로 진행하지 못하도록 차단하는 효과가 있는 것으로 모의되었다(Fig. 7). 따라서 커튼형 부상 차단시설이 설치된 경우, 상·하류의 조류 농도는 큰 차이를 보이고 있어 커튼형 부상 차단시설의 설치는 본류 수역으로의 조류 확산 방지에 효과가 있는 것으로 판단된다.

### 2) 잠류형 고정 차단시설

2010년 평수년을 대상으로 부분 차단시설인 잠류형 고정 차단시설의 설치효과와 기작을 예측하고자 하였다. 이에 잠류형 고정 차단시설을 설치하지 않은 경우(S-1)와 소옥천 상류(5 m 높이)에 설치한 경우(S-2)의 조류 확산 특성과 SS농도 확산 특성을 Fig. 8에 비교하였다. 비교 결과, 잠류형 고정 차단시설의 조류제어 효과는 기대하기 어려우며, 하천수가 하층밀도류 형태로 유입할 경우 SS 농도와 같은 입자상 물질의 제거효과는 다소 있는 것으로 모의되었다(Fig. 8).

## 3. 물리적 차단시설의 조류 저감 효과

### 1) 커튼형 부상 차단시설

2001년과 2010년의 수문사상에 대하여 커튼형

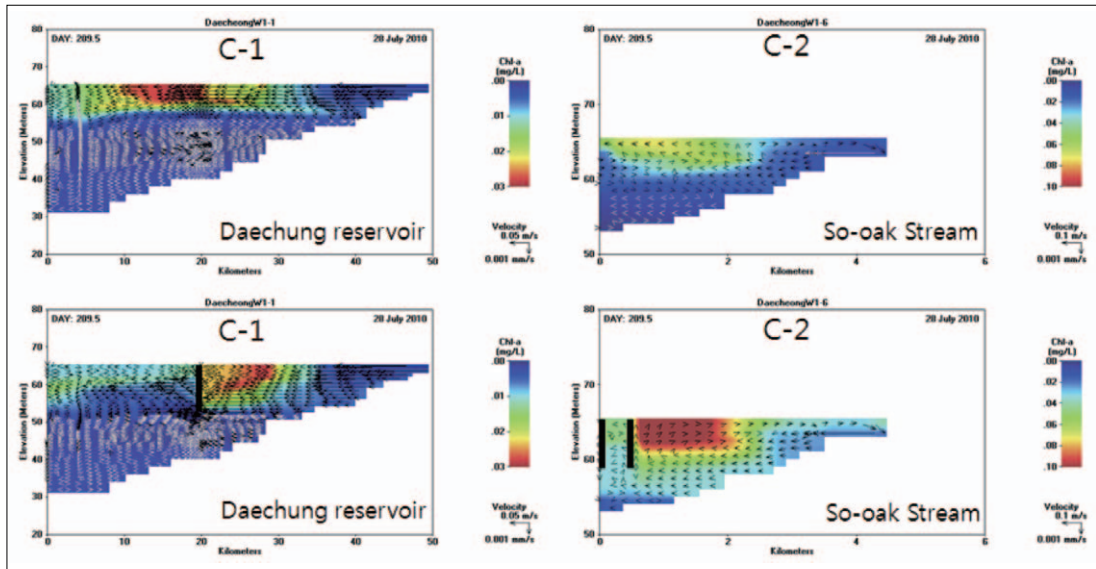


Fig. 7. Effect of curtain weirs on the control of Chl-a concentrations in the reservoir for C-1(up) and C-2(down) scenarios in 2010

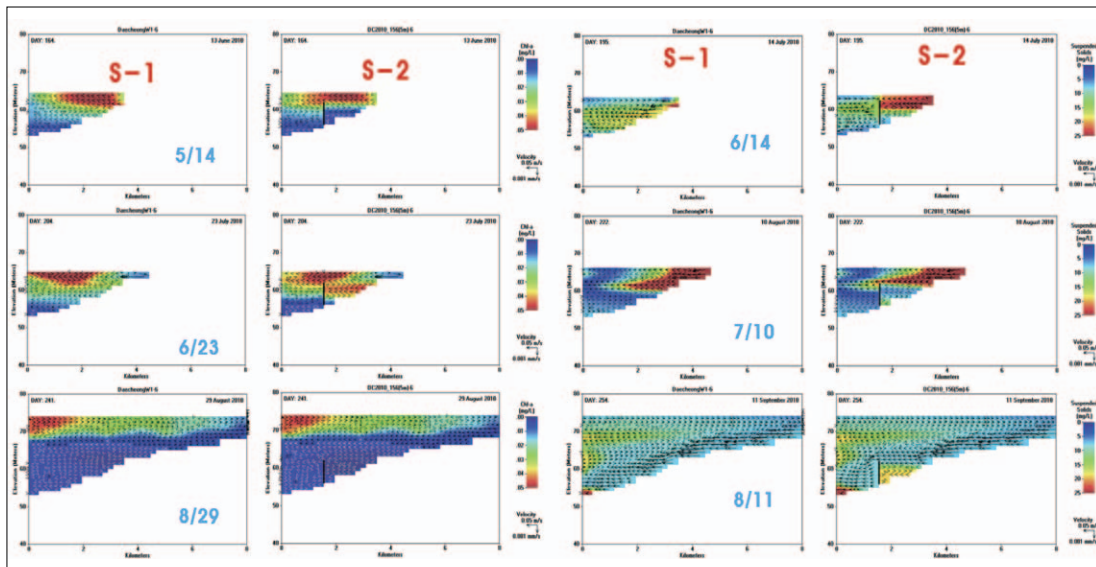


Fig. 8. Effect of submerged weir on the control of Chl-a(left) and suspended solid(right) concentrations in the So-oak Stream for S-1(left) and S-2(right) scenarios in 2010

부상 차단시설의 설치에 따른 조류 저감 효과를 분석하고자 모든 시나리오에 대한 R2, R3, A1 및 A2 지점에서 모의된 표층 Chl-a 농도의 시계열 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 2001년과 2010년의 모든 지점에서 Chl-a 농도는 커튼형 부상 차단시설을 설치하지 않은 경우(C-1)가 가장 높게 나타났다. 현재 저수지 분류 회담대교 2 km 상류의 1지점(10 m

깊이)과 소옥천 하류 말단의 2지점(7 m 깊이)에 커튼형 부상 차단시설이 설치되어 있는 경우(C-2), 2001년과 2010년 수문사상의 모든 지점에서 Chl-a 농도를 저감시키는 효과가 나타났으나, 소옥천과 추소리 수역에 추가로 커튼형 부상 차단시설을 설치하는 시나리오(C-3~C-6)는 2010년 R2 지점을 제외한 모든 지점에서 Chl-a 농도를 저감시키는

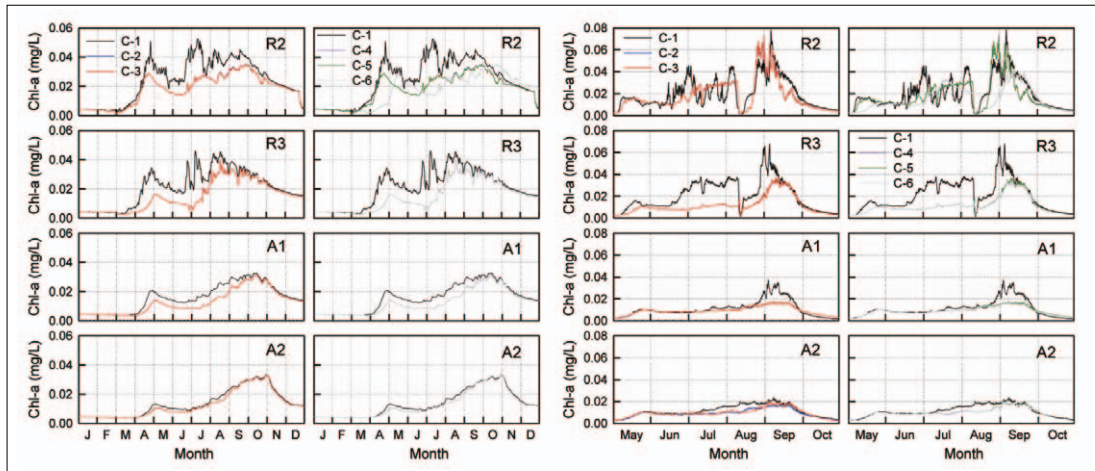


Fig. 9. Simulated time series of Chl-a concentration at R2, R3, A1 and A2 stations according to scenarios in 2001(left) and 2010(right)

효과가 없는 것으로 나타났다(Fig. 9).

2001년의 경우, 커튼형 부상 차단시설의 설치에 따라 R2, R3 및 A1 지점에서 Chl-a 농도 저감 효과가 두드러졌으나, A2 지점에서는 제어 효과의 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 이는 저수지 지형 특성상 유입수의 영향을 직접받기 때문으로 판단된다. 가뭄년인 2001년의 Chl-a 농도는 수직혼합시기에 시나리오별 효과의 편차가 작아지는 것으로 나타났고, 평수년인 2010년은 수문사상의 영향으로 홍수기에 R2지점에서 일시적으로 Chl-a 농도의 저감 효과가 미미하게 나타났다(Fig. 9).

2001년과 2010년에 커튼형 부상 차단시설 설치에 따른 R2, R3, A1 및 A2 지점에서 5월~10월까지 Chl-a 농도의 저감 효율[커튼형 부상 차단시설이 설치되지 않은 경우(C-1)에 대한 설치 후 농도 저감 비율]을 Table 5에 나타내었다.

2001년 5월~10월 기간 동안 모든 지점에서 커튼형 부상 차단시설 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 7.5~31.5%로 나타났고, C-2 시나리오에서 커튼형 부상 차단시설을 하나 더 설치하는 대안(C-3~C-6)은 Chl-a 농도의 저감 효율이 비슷하거나 크지 않은 것으로 평가되었다. 또한, 2010년 5월~10월 기간 동안 모든 지점에서 커튼형 부상 차단시설 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효

Table 5. Efficiency of Chl-a concentrations improvement at R2, R3, A1, and A2 stations for curtain weir installations in 2001 and 2010 (May~October, unit: %)

Years \ scenarios		C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
2001	R2	29.8	29.9	30.0	30.1	31.5
	R3	29.8	29.7	29.7	29.8	29.7
	A1	23.0	23.1	23.1	23.1	23.0
	A2	7.5	7.6	7.6	7.6	7.5
2010	R2	9.1	9.2	9.1	9.2	24.6
	R3	43.5	43.5	43.5	43.5	44.9
	A1	15.4	15.2	15.2	15.2	17.3
	A2	19.1	15.4	15.2	15.4	15.9

율의 범위는 9.1~44.9%로 나타났고, R2 지점에서는 추소리 수역에 커튼형 부상 차단시설을 추가로 설치하는 시나리오(C-6)가 Chl-a 농도의 저감 효율이 가장 높게 모의되었다(Table 5).

## 2) 잠류형 고정 차단시설

2010년 수문사상에 대하여 잠류형 고정 차단시설의 설치효과를 분석하고자 5월~10월까지 모든 시나리오에 대한 R2, R3, A1 및 A2 지점에서 모의된 표층 Chl-a 농도의 시계열 변화를 Fig. 10에 비교하였고, Chl-a 농도의 저감 효율[잠류형 차단시설이 설치되지 않은 경우(S-1)에 대한 설치 후 농도 저감 비율]은 Table 6과 같다. 2001년은 가뭄년으로 시나리오 일부의 잠류형 고정 차단시설의 높이

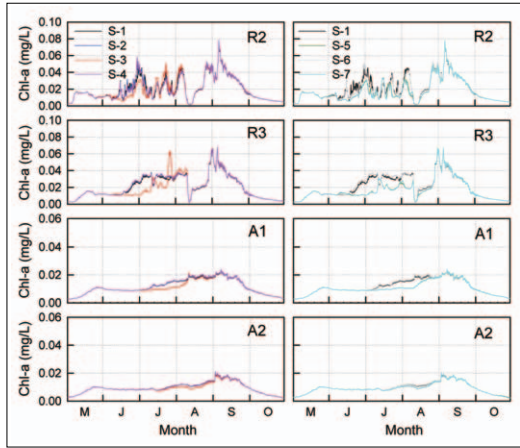


Fig. 10. Simulated time series of Chl-a concentration at R2, R3, A1 and A2 stations according to scenarios in 2010

가 소옥천 최저 수위보다 상대적으로 높기 때문에 비교결과에서 제외하였다.

2010년 모의 결과, 잠류형 고정 차단시설을 설치하는 모든 시나리오는 대청호 내 R2 지점에서 6월 초순부터 8월 초순(강우시)까지 Chl-a 농도의 저감 효과가 다소 있는 것으로 나타났고(Fig. 10), 5월~10월까지 차단시설 설치 시나리오(S-2~S-7)에 따른 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 0.5~13.0%이었다(Table 6). 모든 지점에서 잠류형 고정 차단시설 설치에 따른 Chl-a 농도의 저감 효율의 범위는 -3.0~17.8%로 모의되었고, R3, A1 및 A2 지점에서 S-2, S-4, S-6 시나리오에서는 잠류형 고정 차단시설을 설치하지 않은 경우(S-1)에 비해 Chl-a 농도가 더 높게 나타났다. 즉, 잠류형 고정 차단시설의 설치 높이에 따라 Chl-a 농도 저감 효율의 차이를 보였으며, 차단시설 1지점(추소리에서 소옥천 상류방향 1.6 km)에 저수지 바닥으로부터 7 m 높이로 가정한 S-3과 차단시설 2지점(추소리에서 소옥천 상류방향 1.0 km)과 3지점(추소리에서 소옥천 상류방향 0.4 km)에 저수지 바닥으로부터 10 m 높이로 각각 차단시설을 설치한 S-5, S-7 시나리오에서 Chl-a 농도의 저감 효율이 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 10, Table 6). 이는 잠류형 고정 차단시설의 설치에 따른 조류 저감 효과는 커튼형 부상 차단시설이 전혀 설치되어 있지

Table 6. Efficiency of Chl-a concentrations improvement at R2, R3, A1, and A2 stations for submerged weir installations in 2010 (May~October, unit: %)

Years \ scenarios	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	
2010	R2	0.5	3.4	0.8	12.6	1.9	13.0
	R3	-1.2	6.5	-1.9	17.8	-3.0	17.4
	A1	-1.1	4.9	-1.3	8.3	-1.9	8.1
	A2	-0.4	3.5	-0.5	2.9	-0.7	3.0

않은 경우로 가정하였기 때문에 조류 저감 효율이 높게 모의된 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 대청호를 대상으로 물리적 차단시설인 커튼형 부상 차단시설과 잠류형 고정 차단시설의 설치에 따른 조류 저감 효과를 평가하고자 하였다. 이를 위해 2차원 수리·수질·생태 연동 모델을 수정하고, 가뭄년인 2001년과 2008년, 그리고 평수년인 2010년 등 다양한 수문사상에 대하여 검증 하였으며, 다양한 위치에 차단시설을 설치하는 시나리오에 대해 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 아래와 같다. 본 연구결과는 국내 저수지 수질 관리를 위한 저수지내 대책으로 활용되는 될 수 있을 것으로 판단된다.

- 1) 2차원 수리·수질·생태 연동 모델을 대청호의 다양한 수문사상에 대하여 적용한 결과, 물수지, 수온성층 구조, T-N, T-P 및 Chl-a 농도의 시계열 변화를 잘 반영하는 것으로 검증되었다.
- 2) 저수지 본류 회남대교 2 km 상류의 1지점(10 m 깊이)과 소옥천 하루 말단의 2지점(7 m 깊이)에 커튼형 부상 차단시설을 설치한 경우(C-2), 2001년과 2010년 모든 지점에서 Chl-a 농도를 저감시키는 효과가 나타났으나, 소옥천과 추소리 수역에 추가로 커튼형 부상 차단시설을 설치하는 대안(C-3~C-6)은 2010년 R2 지점을 제외한 모든 지점에서 Chl-a 농도를 저감시키는 효과가 없는 것으로 나타났다.
- 3) 반면, 소옥천에 잠류형 차단시설을 설치하는

시나리오는 설치지점에 따라 다소 차이는 있으나 조류 저감 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 하천수가 하층밀도류 형태로 유입할 경우 SS 농도와 같은 입자상 물질의 제거효과는 다소 있는 것으로 모의되었다.

- 4) 연구결과를 종합해 볼 때, 대청호에서 기존에 설치된 커튼형 부상 차단시설은 본류 수역의 표층으로 영양염류가 유입하는 것을 억제하고 조류의 확산을 방지하는 효과가 있는 것으로 판단되나, 추소리 수역에 추가적인 물리적 차단시설 설치에 대청호의 녹조 저감에 효과가 미미한 것으로 예측된다.

## 사 사

본 연구는 금강수계위원회 및 금강물환경연구소의 “환경기초조사사업비” 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 국가수자원관리종합정보시스템, 2011, <http://www.wamis.go.kr/>.
- 국립환경과학원, 2005, 대청호 수질 및 조류발생 실태조사.
- 국립환경과학원, 2007, 대청호 조류상습 발생수역이 본류 수질에 미치는 영향분석(Ⅰ).
- 국립환경연구원, 2003, 금강수계 상수원 수질조사  
나은경, 신경숙, 정제현, 강호, 2003, 전자선조사를 이용한 부영양화 호수의 조류제어에 관한 연구, 대한환경공학회지, 25(11), 1368-1374.
- 이홍수, 정세웅, 정희영, 민병환, 2010, 대청호 수류 차단막 설치 위치에 따른 녹조제어 효과 분석, 한국물환경학회지, 26(2), 231-242.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완, 2007, 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용, 한국물환경학회지, 23(1), 52-63.

정세웅, 오정국, 2006, 대청호 상류 하천에서 강우 시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발, 한국수자원학회지, 39(1), 79-88.

정세웅, 오정국, 고익환, 2005, CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의, 한국수자원학회논문집, 38(8), 655-664.

천세익, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재, 2006, 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계, 한국물환경학회지, 22(2), 342-348.

한국수자원공사, 2006, 대청댐 퇴사량측정보고서.

한국수자원공사, 2007, 댐운영 실무편람.

Asaeda, T., H. S. Pham, D. G. Priyantha, J. Manatunge, and G. C. Hocking, 2001, Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: a numerical analysis, Ecological Engineering, 14, 395-404.

Asaeda, T., D. G. Priyantha, S. Saitoh, and K. Gotoh, 1996, A new technique for controlling algal blooms in the withdrawal zone of reservoirs using vertical curtains, Ecological Engineering, 7, 95-104.

Chung, S. W. and R. Gu, 1998, Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir, J. Hydr. Eng., 124(7), 704-711.

Cole T. M. and E. M. Buchak, 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 S. A. Wells, 2004, CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.2 User Manual, U.S. Army Corps of Engineers.

Cole, T. M. and D. H. Tillman, 1999, Water

- Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole, T. M. and D. H. Tillman, 2001, Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs Using CE-QUAL-W2, U.S. Army Corps of Engineers.
- Ganf, G. G. and R. L. Oliver, 1982, Vertical separation of light and available nutrients as a factor replacement of green algae by blue-green algae in the plankton of a stratified lake, *J. Ecol.*, 70, 829-844.
- McQueen, D. J. and D. R. S. Lean, 1987, Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratios on the dominance of blue-green algae in Lake St. George, Ontario, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46, 1171-1175.
- Morillo, S., J. Imberger, and J. Antenucci, 2006, Modifying the residence time and dilution capacity of a reservoir by altering internal flow-paths, *J. River Basin Management*, 4(4), 255-271.
- Priyantha, D. G., T. Asaeda, S. Saitoh, and K. Gotoh, 1997, Modelling effects of curtain method on algal blooming in reservoirs, *Ecological Modeling*, 98, 89-104.
- Tilman, D., R. Kiesling, R. Sterner, S. S. Kilham, and F. A. Johnson, 1986, Green, blue-green and diatom algae: Taxonomic differences in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen, *Arch. Hydrobiol.*, 106, 473-485.
- 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, 457-462.
- Vermeyen, T. B. and H. Knoblauch, 2000, Hydraulic Characteristics of a Plunge Zone in Whiskeytown Reservoir, California, U.S. Bureau of Reclamation, D-8560, Denver, CO 80225, 469-474.
- Walsby, A. E., C. S. Reynolds, R. L. Oliver, and J. Kromkamp, 1989, The role of gas vacuoles and carbohydrate content in the buoyancy and vertical distribution of *Anabaena minutissima* in Lake Rotongaio, New Zealand, *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 32, 1-25.