

Research Paper

소옥천 유역의 오염제어 대책에 따른 대청호 조류저감 효과 분석

박형석* · 윤성완** · 정세웅* · 황현식***

충북대학교 환경공학과* · 환경부** · 한국수자원공사***

Effect of Pollutants Control Measures in So-oak Watershed on the Control of Algae Growth in Daecheong Reservoir

Hyung Seok, Park* · Sung Wan Yoon** · Se Woong, Chung* · Hyun Sik Hwang***

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University*
Ministry of Environment**, K-WATER***

요약 : 본 연구의 목적은 대청호의 녹조발생 저감을 위해 우심지역인 추소수역과 그 상류 소옥천 유역에서의 다양한 수질개선 대책들을 제시하고, 대책 시행 시 저수지 수질개선 효과를 평가하는데 있다. 대책별 모의 시나리오는 유역대책과 저수지 내 대책으로 분류하였으며, 시나리오별 녹조저감 효과는 2차원 수리·수질모델을 적용하여 모의하였다. 유역 대책은 점오염원, 비점오염원, 복합 대책으로 시나리오를 구성하였으며, 호내 대책은 추소수역의 퇴적물 처리 및 소옥천 유입수의 인 처리시설 설치를 고려하였다. 연구결과, 개별 대책의 녹조저감 효과는 수문상황에 따라 다르게 나타났으며, 강우가 많은 해에는 비점오염 부하량이 증가하여 비점오염원 저감대책(NPS1~NPS4)이 효과적인 것으로 평가되었으며, 강우가 적은 해에는 평상시 호 내로 유입하는 인의 유입부하를 저감하는 화학적 인처리시설 설치(LS2)가 효과적인 것으로 평가되었다. 특히, 유역에서 발생하는 축산 분뇨를 전량 수거·처리하고 농경지에는 표준시비량만을 적용한 방안(NPS1)이 수질개선에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

주요어 : 소옥천 유역, 대청호, 조류 제어, 비점오염원 제어, 축산분뇨

Abstract : This study was aimed to assess the effect of diverse pollutants control measures suggested in the Chuso basin and its upstream of So-oak stream watershed where are the most concerned areas on the control of algal bloom occurring in Daecheong Reservoir. The control measures were classified as watershed measures and in-reservoir measures, and their effects were simulated using a two-dimensional hydrodynamic and water quality model. The watershed measures were made up of 1) point sources control, non-point sources control, and their

First Author: Hyungseok Park, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Tel:+82-43-231-6375, E-mail: qwrs07@gmail.com

Corresponding Author: Sewoong Chung, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Tel:+82-43-261-3370, E-mail: chung@chungbuk.ac.kr

Co-Authors: Sungwan Yoon, Ministry of Environment, Tel:+82-42-865-0849, E-mail: mswhd0556@korea.kr

Hyunsik Hwang, K-WATER, Tel:+82-42-629-4772, E-mail: hhs216@kwater.or.kr

Received: 30 March, 2016. Revised: 19 July, 2016. Accepted: 20 July, 2016.

combinations. The in-reservoir measures were supposed to treat sediment at Chuso basin and to install a phosphorus elimination plant (PEP) at the end of So-oak stream. The results showed that the effect of each measure was influenced by the hydrological condition of the year. In wet year, as the contribution of non-point sources increased, the non-point source control measures (NPS1~NPS4) showed more effective compared to other measures, while, the PEP system to eliminate phosphorus from So-oak stream showed better performance in dry year. In particular, the scenario of NPS1, in which all livestock manures were collected and treated but only chemical fertilizers (NPS1) were used for agriculture fields, showed the best performance for the control of algal bloom in Chuso basin among the watershed measures.

Keywords : So-Oak stream watershed, Daecheong Reservoir, Algal control, Non-point sources control, Livestock manure

I. 서론

금강유역의 대표적인 용수공급원인 대청호는 저수면적 대비 유역 면적의 비율이 높으며, 상류지역에 거주인구 및 오염부하가 높아 비슷한 규모의 다른 저수지에 비해 수질관리에 취약하다. 하절기 강우가 발생하면 상류유역으로부터 다량의 부영양화 원인물질(질소, 인)이 유입되는 특성을 보이며, 만곡부가 많아 곳곳에 정체수역이 형성되는 지형적 특성으로 인해 녹조현상도 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 소옥천이 유입하는 추소수역은 유입하천의 인 농도(최근 10년간 평균 T-P 농도는 0.094 ± 0.086 mg/L)가 높으며, 대청호 본류와의 연결부에서 병목현상이 발생하여 체류시간도 길어 조류 성장에 유리한 조건을 제공한다. 또한, 하상 퇴적물의 오염도가 심해 내부부하로 용출되는 영양염류만으로도 조류가 성장할 수 있는 충분한 여건을 가지고 있다(Oh & Cho 2015). 이로 인해 추소수역에서는 매년 대량의 조류가 발생하고 있으며, 강우시 본류로 유입하여 대청호 내 녹조 발생을 유발하는 주요 원인으로 작용하고 있다.

조류의 대량 발생은 심미적인 불쾌감을 주며, 수돗물의 맛과 냄새, 수체의 pH상승, 정수장 여과지 폐쇄 등의 문제를 유발 할 수 있다. 특히, 하절기에 수온이 높고 성층이 안정화된 조건에서 주로 발생하는 남조류들 중 일부는 독소를 생성할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 그 중 대청호에 자주 출현하는 Microcystis 속의 남조류에 의해 생성되는 독소인 Microcystin은 인체 및 가축에 유해한 것으로 알려

져 있다. 아직 국내에서 남조류 독소에 대한 피해가 보고된 바는 없지만, 안전한 물 공급 및 국민의 건강을 위해서는 선제적인 대책 마련이 필요한 실정이다.

대청호는 국내 상수원 호수 중 조류 주의보 및 경보가 가장 자주 발령된 호수이기 때문에 조류 제어를 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 환경 기초 자료 수집을 위해 정동환 등(2011)은 대청호 내 수질 및 조류발생현황을 조사하였으며, Shim et al.(2015)은 대청호로 유입하는 지천에 대해 시공간적으로 수질 특성을 파악하고자 하였다. Lee et al.(2000)과 Oh & Cho(2015)은 퇴적물의 용출특성을 분석하여 수질 및 조류 성장에 미치는 영향을 분석하였고, Cho et al.(2012), Noh et al(2014)는 조류발생 특성에 대해 연구한 사례가 있다. 또한, Chung et al.(2007)은 대청호 부영양화 현상을 CE-QUAL-W2 (이후 W2) 모델로 구현할 수 있는 방법론을 제시하고, 개발한 부영양화 모델로 저수지내 수리학적 거동 및 오염부하 특성과 조류발생의 인과관계를 분석하고자 하였고, Lee et al.(2012)는 수위 연동 수류차단막 해석 기능을 포함한 수정 W2 모델을 활용하여 물리적 차단시설인 조류차단막의 적용성을 평가하였다.

일반적으로 호수의 녹조문제를 저감하기 위한 대책에는 유역제어 대책과 호 내 제어 대책이 있다. 유역 제어 대책은 다시 점오염원 관리와 비점오염원 관리로 구분 할 수 있으며, 호 내 제어 대책은 인 불활성화, 퇴적물 제어, 물 순환, 용존산소 공급 등 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 대책이 포함된다(Cooke et al. 2005). 그동안 대청호의 녹조 문제 해

결을 위한 제어대책의 일환으로 환경부 및 K-water에서는 다양한 시도를 하였다. 유역 내 환경기초시설 증설, 하수처리장 배출수 총인 농도 규제 강화(2012년 1월), 인공습지설치, 호내 폭기시설 운영, 조류차단막 설치, 인공식물섬 설치 같은 다양한 대책들을 도입하였으나 공간적 규모와 지속성에 한계가 있으며, 개별 대책의 수질개선 효과에 대한 정량적 평가도 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 대청호 녹조발생의 우심지역인 소옥천 수역을 대상으로 녹조발생을 저감하기 위한 다양한 대책들을 제시하고, 개별대책 및 대책들의 조합에 따른 수질개선효과를 수치모델링 기법을 활용하여 정량적으로 평가·분석하여 실효성 있는 대책을 선별하는데 있다. 본 연구결과는 유사한 수질문제를 겪고 있는 국내의 다목적 댐 저수지와 농업용 저수지의 수질개선대책 수립에 확대 적용이 가능하며, 소옥천 유역의 수질 개선 및 대청호의 녹조저감

을 위한 물환경관리 정책 수립의 기초자료로 활용이 기대된다.

II. 연구 방법 및 모형의 구성

1. 대상지역

본 연구의 대상지역인 소옥천은 대청호로 직유입하는 지류 하천이며, 유역면적은 191.56 km²로, 대청댐 중권역 면적 667.48 km²의 약 28.70%를 차지한다. 행정구역으로는 충청북도 옥천군과 충청남도 금산군의 2군의 일부가 포함된다. 소옥천 유역은 소옥천상류와 소옥천하류의 2개 소권역으로 구성되어 있으며, 7개 총량단위유역으로 구분된다(Figure 1). 유역내에 옥천(18,000 m³/d) 및 추부(2,400 m³/d) 하수종말처리장이 위치하고 있다. 현재 하수처리장의 방류수 T-P농도는 방류수 수질기준(0.2 mg/L 이내)을 만족하고 있으나, 유입하천의 인 농도는 호수 내 조류성장을 제어하기에는 너무 높은 수준이다.

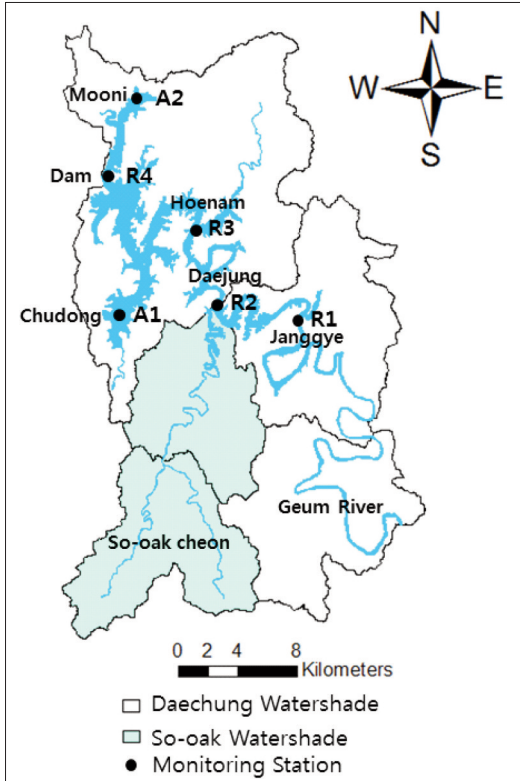
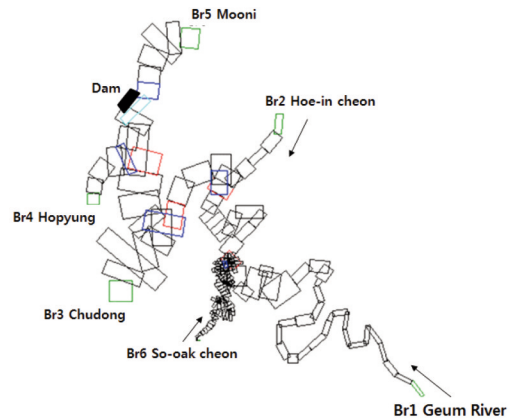
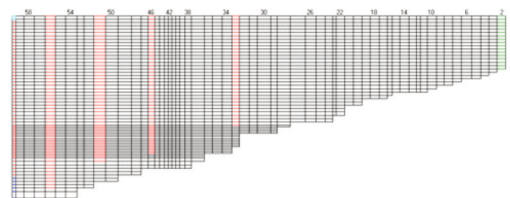


Figure 1. Layout of Daechung dam watershed and locations of regular monitoring stations



(a) Top view



(b) Side view

Figure 2. Grid system in Daechung reservoir

2. 모형 구성

(1) 모형 개요

본 연구에서 수질모델링에 사용한 W2는 2차원 횡방향 평균(Laterally-averaged) 수리 및 수질 모형으로, 우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 수심이 깊고 흐름방향에 비해 상대적으로 폭이 좁은 수체에 서 성층화 현상 및 밀도류 유동 해석에 용이하다 (Cole & Buchak 1995; Cole & Wells 2004; Chung et al. 2005; Chung et al. 2007). W2 모델은 저수지 수위변동, 흐름방향 및 수심방향의 유속분포, 수온 그리고 28가지 수질항목의 모의가 가능하며, 지류 유입, 점 및 비점오염원, 댐 방류, 선택취수 등 다양한 유입 및 방류조건에 대한 모의 기능이 포함되어 있다. 그리고 수리동력학 지배방정식에 하상바닥 경사향을 고려함으로써 하천과 저수지의 연계모의가 가능하다. 최근 W2 모델은 저수지의 수리 및 수온성층해석(USGS 2015), 부영양화 및 녹조해석 (Park et al 2015; Noori et al. 2015), 기후변화에 따른 수환경 영향 예측(Lee et al. 2012; Chang, et al. 2015), 수층-퇴적층간의 상호작용 해석(Jerry et al. 2014(a), 2014(b); Rachel 2014) 등에 활발히 적용되고 있다.

(2) 입력자료구성

본 연구에서 사용한 대청호 W2 모델의 기본적인 입력자료와 주요 매개변수는 선행 연구들(Chung & Oh 2006; Chung et al. 2007; Chung et al. 2008; Lee et al. 2012)에서 구축된 자료와 보정된 매개변수를 활용하였으며, 추소수역의 수리 및 수질 해석의 해상도를 높이기 위해 계산 격자를 추가하였다.

지형자료는 한국수자원공사에서 2006년도에 실측한 수치지도로부터 구성하였으며, 수치격자는 금강분류와 주요 지류하천을 6개의 구획으로 구분하였다. 흐름방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 가덕교 지점에서 댐측까지 165개의 요소($\Delta x = 0.2 \sim 1.9$ km), 수심방향으로는 0.5~2.0 m 간격으로 69개 수층(layer)로 구성하였으며 Figure 2와 같다.

경계조건으로 사용된 저수지 유입량과 방류량, 저수지 수위 등 수문자료와 댐운영 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) 데이터를 활용하였으며, 실측값이 없는 지류의 유량 자료는 대청댐 일별 총유입량을 지류 유역 면적 비로 환산하여 산정하였다. 유입수온 자료는 2010년의 경우 한국수자원공사 대청댐관리단이 옥천군 가덕교에서 3시간 단위로 실시간 계측한 자료를 사용하였고, 실측자료가 없는 2001년은 Chung & oh(2006)이 개발한 다중회귀모델을 적용하여 산정하였다.

W2 모델은 대기와 수면의 열 교환 플럭스를 모의하기 위해 기상자료인 대기 기온과 이슬점온도, 풍향과 풍속, 태양의 단파복사량과 운도 자료를 필요로 한다. 풍향과 풍속 자료는 문의 면사무소(EL. 100 m)에 설치한 대청자동기상관측장비(AWS)의 자료를 사용하였고, 기온, 이슬점온도, 운도는 대청호에서 서쪽방향으로 직선거리 8 km 떨어진 곳에 위치한 대전 기상청(EL. 68.3 m)의 관측자료를 수집하여 사용하였다.

경계조건 수질항목인 SS, PO_4-P , NH_4-N , NO_3-N , Algae, DO 등은 한국수자원공사와 환경부의 정기 및 수시 측정망 실측자료를 이용하였다.

3. 모의 시나리오 구성 및 모형 적용방법

환경부 『중장기 물환경 관리계획(2013~2015)』, K-water 『대청댐 수질관리 방안 보고서(2013)』, 국토교통부 『대청댐 탁수발생 사전예방 종합대책』의 소옥천 유역 대상 기존 수질개선 대책을 종합적으로 분석하였으며, 사전 검토가 필요한 대책을 선정하여 모의 시나리오를 구성하였다. 유역대책시나리오는 유역 강우유출 모형인 SWAT에 적용하여 해석하였으며, 유역 말단(소옥천유입부)에서 결과를 출력하였다. 출력 결과중 T-N, T-P 등 각 수질항목들의 배출부하 값을 CE-QUAL-W2모형의 소옥천유입부(Br6) 경계조건으로 하여 모델링을 실시하였다.

(1) 유역 대책시나리오

유역 대책시나리오는 아무 대책이 적용되지 않은 대조 시나리오(S0)와 점오염원(PS1~PS4), 비점오

염원(NPS1~NPS4), 복합 대책(COM1~COM4)이 적용된 시나리오로 구분하여 Table 1에 나타내었다.

점오염원 대책 중 PS1은 강우시 옥천하수처리장으로 유입되는 우수를 15,000 m³ 규모의 저류조에 저장하였다가 처리하여, 미처리수의 발생을 최소화 하는 방안이다. PS2는 강우발생시 옥천하수처리장의 처리용량을 초과하여 미처리되는 월류수를 기존의 소옥천 생태습지로 유입시켜 처리하는 방안이다. PS3은 저류조설치(PS1)와 미처리 월류수 인공습지 연계처리(PS2)를 병행하여 구성한 시나리오이며, PS4는 소옥천 유역내 하수미처리 지역중 인구수가 비교적 많은 금산군 서대리와 상곡리에 각각 120 m³/일, 60 m³/일 시설규모의 마을하수처리시설을 신설하는 방안이다.

비점오염원 대책 시나리오인 NPS1은 소옥천 유역내에 친환경 에너지 타운을 건설하여 축산계 오염부하를 전량 수거·처리하며, 농경지에는 작물 성장에 필요한 적정시비량(질소질 : 135 kg/ha, 인산질 61 kg/ha)을 공급하는 방안이다. NPS2는 소옥천 유역에서 초과로 시비되는 화학비료의 공급량을 삭감하는 방안이며, 기존 시비량(퇴비 및 액비: 질소질 481 kg/ha, 인산질 47 kg/ha, 화학 비료 : 질소질 : 111 kg/ha, 인산질 35 kg/ha)에서 화학비료 질소질 111

kg/ha, 인산질 20 kg/ha를 삭감하여 모의를 수행하였다. NPS3은 유역내 받지역 토지에 등고선 경작을 적용하였으며, NPS4는 옥천 읍내의 불투수면의 일부를 투수면으로 전환하는 방안이다. 현재 옥천읍이 포함된 금구천 유역은 불투수면 비율이 약 20% 정도이며 유역 내 하천 중 가장 오염도가 심한 상태이다. 따라서 하천 수질이 더 이상 악화되지 않도록 유지하기 위해서는 유역의 토지이용에 대한 집중적인 관리가 필요하므로 이를 위해 금구천 유역의 불투수면 5.05 km² 중 약 20% 정도인 1.05 km²를 토지피복 변경을 통해 투수면으로 변환시킨 경우를 가정하고 NPS4 시나리오를 구성하였다.

유역복합대책은 점오염원 대책과 비점오염원대책을 조합하여 모의를 수행하였으며, 세부사항은 Table 1과 같다.

(2) 호내 대책 시나리오

The committee of management at Guem river system(2012)의 연구결과에 따르면 소옥천이 유입하는 추소수역의 퇴적물에서 총인의 용출속도는 6.481(±0.762) mg/m²·day이며, 이러한 속도로 55~69일 동안 계속 용출이 일어날 경우 조류주의보 수준의 Chl-a 농도를 만들 수 있을 것으로 평가되었

Table 1. W2 simulation scenarios applied to So-oak Stream Watershed

Scenario	Details	
S0	Initial condition	
Point source	PS1	Installation of retention tank at Ok-Cheon wastewater treatment plant (WWTP)(15,000 m ³ /day)
	PS2	Treatment of CSOs overflow from Ok-Cheon WWTP by constructed wetland(25,000 m ³ /day)
	PS3	PS1 + PS2
	PS4	Installation of small scale community WWTPs(Seo-dae ri, Sang-gog ri)
Non- Point source	NPS1	Reduction of manure application and optimal use of chemical fertilizer
	NPS2	Reduction of surplus chemical fertilizer
	NPS3	Contour cultivation in farm field
	NPS4	Reduction of impervious area in downtown of Ok-cheon
Complex	COM1	PS3+PS4
	COM2	PS3+PS4+NPS1
	COM3	PS3+PS4+NPS1+NPS3
	COM4	PS3+PS4+NPS1+NPS3+NPS4
In Reservoir	LS1	Treatment of sediment at Chuso basin(Capping or Dredging)
	LS2	Installation of PEP(Phosphorus Elimination Plant) system at the end of So-oak stream

다. 이러한 결과는 소옥천 유역으로부터 외부 인 공급이 전혀 없다하더라도 호 내 퇴적물의 내부 인 용출 부하만으로도 조류 성장이 충분히 가능하다는 것을 시사하여, LS1 시나리오는 추소수역의 퇴적물의 인 용출 억제를 위해 준설 또는 캡핑을 한 경우를 가정하였다. 퇴적물의 용출속도는 $6.481 \text{ mg/m}^2\cdot\text{day}$ 를 적용하였으며, 바닥층의 DO농도 고갈시(2 mg/L 이하) 용출이 발생하는 것으로 모의하였다.

LS2 시나리오는 소옥천이 추소수역으로 유입하기 직전에 하천수를 펌핑하여 화학적인 처리를 한 후 다시 호 내로 유입시키는 방안을 구상하였다. 이 시나리오 대책은 독일의 Wahnbach 저수지 사례(Bernhardt 1980; Cooke et al. 2005)를 참조하여 구성하였으며, 소옥천 유역 말단에 처리용량 $100,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 화학적 인처리 시설을 설치하여 방류수 인 농도를 $5 \mu\text{g-P/L}$ 로 호 내로 유입시키는 것으로 가정하였다. 처리용량을 초과하는 유량은 그대로 호 내로 유입되며, 처리용량 내의 하천수는 전량 처리 후 유입시키는 것으로 모의하였다.

4. 호내 수질저감효과 평가

호내 수질저감효율은 T-P 항목의 경우 소옥천이 유입하는 추소수역(br6) 전체, Chl-a항목은 추소수역 말단 표층을 대상으로 수질개선훈련 적용전의 평균농도(CSO)대비 각 시나리오의 평균농도(Cscenario) 저감율을 평가하였다.

$$Efficiency (\%) = \left(\frac{C_{SO} - C_{scenario}}{C_{SO}} \right) \times 100$$

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정 및 검증

시나리오 모의분석에 사용한 모형은 Lee et al. (2013)이 평수년에 해당하는 2010년 수문사상을 대상으로 보정한 모형을 사용하였으며, 새로 구축된 W2 모형의 검정을 위해 갈수년인 2001년을 대상으로 수온 및 영양염류에 대해 실측값과 모의값을 비교하였다. 실측 수질자료는 한국수자원공사에서 조사한 장계교(R1), 대정리(R2), 회남대교(R3), 댐 앞

(R4), 추동취수탑(A1), 문이취수탑(A2) 지점의 월간 및 주간 수질 조사자료를 사용하였다. 그리고 시나리오 대책에 대한 수질개선 효과 평가는 갈수년인 2001년과 평수년인 2010년을 대상으로 각각 수행하였다.

(1) 수온

수심이 깊은 저수지에서는 수질모델링에 앞서 모형 수리해석의 신뢰도를 평가를 위해 수온 성층구조에 대한 재현성 분석이 선행 되어야 한다. 수온 수직 분포의 재현성을 확인하기 위해서 2001년 수문사상을 대상으로 댐 앞 지점에서 수심별 수온 모의값과 실측값을 비교한 하여 Figure 3에 나타냈으며, 모의값과 실측값의 통계량을 AME(Absolute Mean Error)와 RMSE(Root Mean Square Error)로 평가하였다. 홍수가 큰 강우가 없었던 2001년에는 4월 이후 저수지 성층화가 발달하여 여름철 동안 매우 안정적인 성층구조가 유지되었으며, 9월말부터 대기기온 강하와 함께 수직혼합이 시작되었다. 모형은 갈수년 전기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였다. 2001년 수온예측 오차는 AME $0.416 \sim 1.872^\circ\text{C}$, RMSE $0.459 \sim 2.384^\circ\text{C}$ 범위였다.

(2) 영양염류

질소와 인은 조류 성장의 필수 영양요소이며 부영양화 예측에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 특히, 성층화된 저수지에서 유역으로부터의 외부 부하가 큰 경우 제한영양염인 인의 부하특성과 시공간적인 농도 변화를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 질소와 인의 시공간적인 농도변화 모의 성능을 확인하고자 2001년을 대상으로 T-N 및 T-P에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과를 Figure 4에 나타내었다.

2001년의 경우, T-N 농도의 모의값과 실측값의 오차는 모든 지점에서 AME 평균 0.27 mg/L ($0.21 \sim 0.33 \text{ mg/L}$ 범위), RMSE 평균 0.32 mg/L ($0.25 \sim 0.39 \text{ mg/L}$ 범위)이었고, T-P 농도는 AME 평균 0.014 mg/L ($0.008 \sim 0.023 \text{ mg/L}$ 범위), RMSE 평균 0.021 mg/L ($0.012 \sim 0.045 \text{ mg/L}$ 범위)로 모형은 보정 기간동안 T-N 및 T-P 농도의 동적인 변화 추

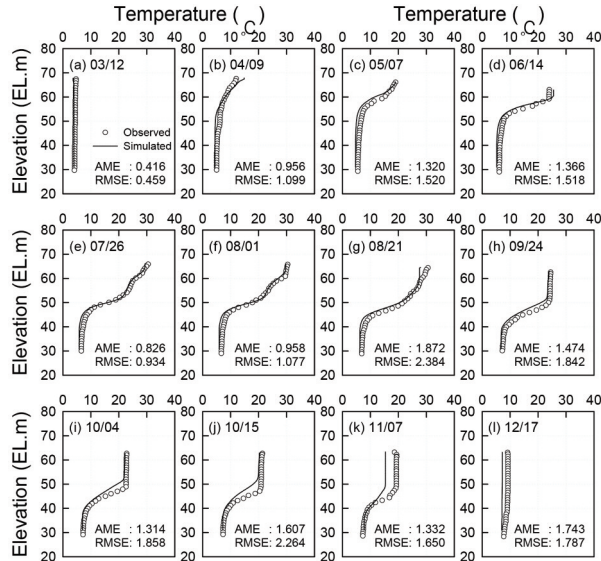


Figure 3. Comparison of simulated and observed profiles of water temperature in front of the Dam(2001)

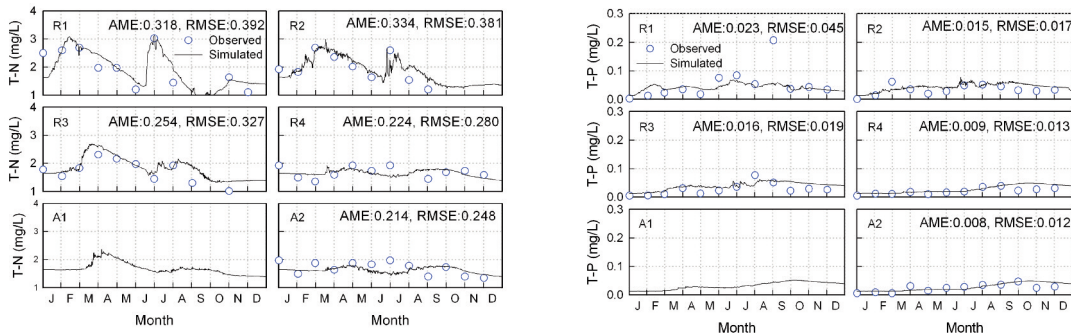


Figure 4. Comparison of simulated and observed time series of T-N(left) and T-P(right) in 2001

세를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나, 다른 모든 측정과 달리 R1 지점에서 2001년 9월에 실제 T-P 농도가 0.20 mg/L로 2배 이상 상승하였으나, 모델은 이러한 급격한 수질변화를 재현하지는 못했다. 일반적으로 저수지 내 급격한 수질변화는 강우에 의한 비점오염부하, 바람과 수류에 의한 조류의 공간적 밀집, 대기 기온강하와 바람에 의한 수직혼합, 예기치 않은 오염부하 등 다양한 원인으로 발생할 수 있다.

2. 시나리오 모의 결과

(1) 유역대책

소옥천 유역 수질개선 시나리오를 적용하여 평수

년(2010년)과 갈수년(2001년)을 대상으로 모의를 수행하였으며, 추소수역 및 회남수역에서 각 시나리오에 대한 T-P, Chl-a 저감효율을 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다.

평수년 시나리오 모의 결과 점오염원 대책인 PS1~PS4 시나리오는 추소수역에서 T-P 농도 저감 효율 0.5%~1.6%, Chl-a 농도 저감효율 0.3%~1.2%로 저감효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 추소수역에서 조류성장의 중요한 제한 영양염인 T-P 오염부하량의 약 88.3%가 강우시 상류 유역의 토지계와 축산계로부터 비점오염원의 형태로 배출되는 것이 원인으로 판단된다(The committee of management at Guem river system

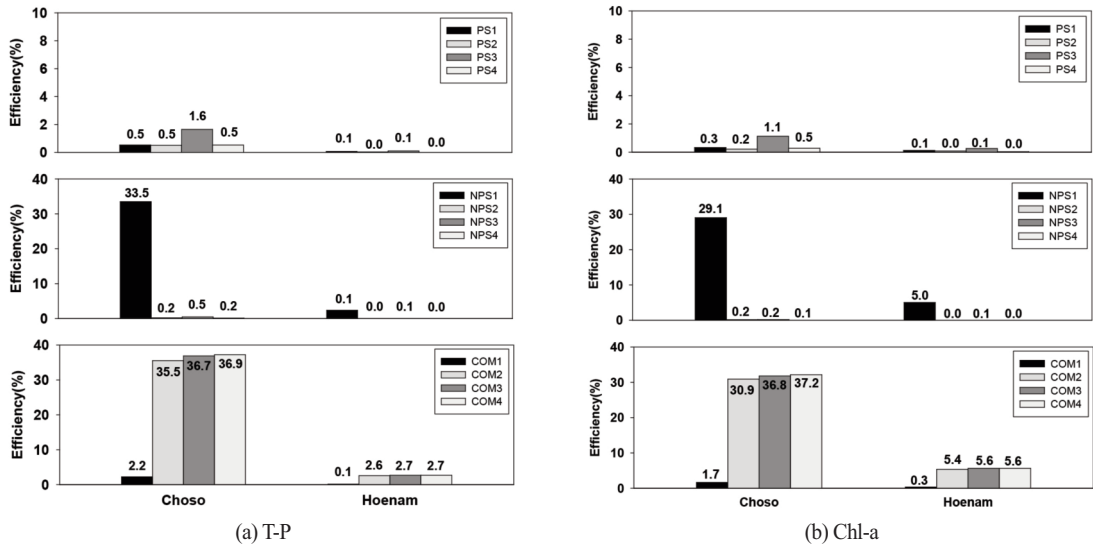


Figure 5. Reduction efficiency of T-P(a), Chl-a(b) at Chuso, Hoenam basin in 2010

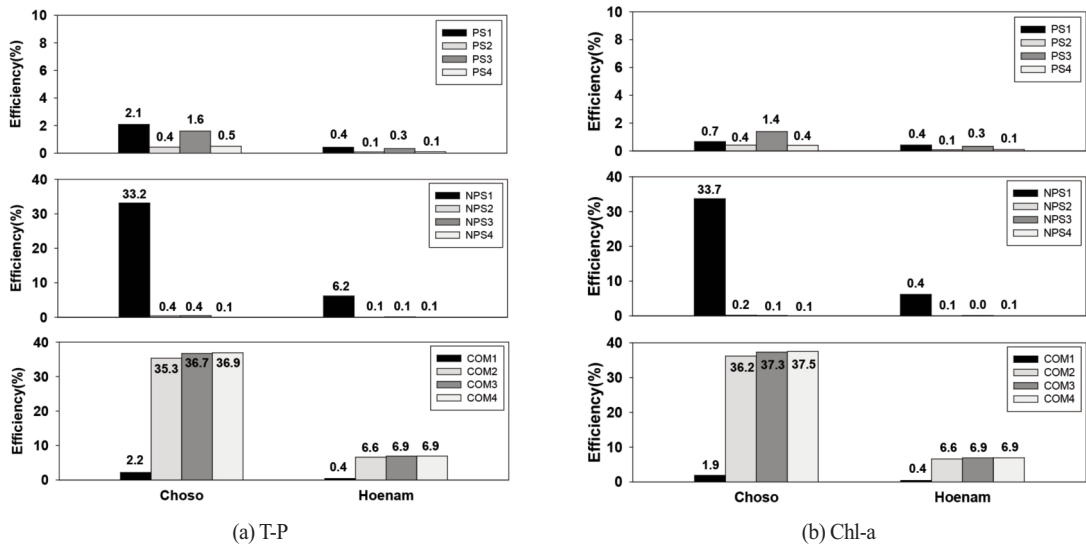


Figure 6. Reduction efficiency of T-P(a), Chl-a(b) at Chuso, Hoenam basin in 2001

2014). 반면, 비점오염원 대책인 NPS1~NPS4 시나리오 모의 결과는 추소수역에서 T-P 농도 0.1%~33.5%, Chl-a 농도 0.1~29.1%의 저감효율을 보였으며, 이 중 축산분뇨 수거·처리를 위한 친환경에너지 센터 조성 및 표준시비량을 적용한 시나리오(NPS1)가 가장 높은 저감효율을 보였다. 복합 시나리오인 COM1~COM4의 모의 결과 추소수역에서 T-P 2.2%~37.2%, Chl-a 1.7%~33.2%의 저감효

율을 보였으며, NPS1이 포함된 시나리오에서 T-P 및 Chl-a가 30% 이상 저감되는 효과를 보였다. 소옥천 유역의 오염제어 효과가 대청호 본류의 중심부인 회남수역에서의 T-P와 Chl-a 저감효과를 분석한 결과, T-P 항목에 대해서는 0.01~2.68%, Chl-a 항목에 대해서는 0.04%~5.62%의 낮은 저감효율을 보였다. 소옥천이 유입하는 추소수역은 지형적인 병목 현상으로 인해 평상시는 정체되어 있다가 강우시에

대청호 분류로 유입되는 특성이 있다. 소옥천 유역 오염저감 대책이 회남지역의 수질개선에 미치는 영향은 크지 않은 이유는 소옥천 유역이 대청호 전체 유역면적에 대해 차지하는 비중이 적은(약 6.0%) 것이 원인으로 판단된다.

갈수년 시나리오 모의 결과, PS1~PS4 시나리오는 추소수역에서 T-P 농도의 저감효율은 0.4%~2.1%, Chl-a 농도 저감효율은 0.4%~1.4%로 저감 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. NPS1~NPS4 시나리오 모의 결과 추소수역에서 T-P 농도는 0.1%~33.2%, Chl-a 농도 0.1~33.7%의 저감효율을 보였다. 복합 시나리오인 COM1~COM4의 모의 결과 추소수역에서 T-P 2.2%~36.9%, Chl-a 1.9%~37.5%의 저감효율을 보였으며, NPS1이 포함된 시나리오에서 T-P 및 Chl-a가 30% 이상 저감되는 효과를 보였다. 회남지역의 시나리오 모의결과 T-P항목에 대해서 0.06%~6.93%, Chl-a항목에 대해서는 0.10%~2.83%의 저감효율을 보였다.

단일 시나리오 모의 중에 축산계 배출오염부하를 전량 수거 에너지화 하고 농경지에는 표준시비량을 적용하는 시나리오인 NPS1 대책 적용시 가장 높은 수질개선 효율을 보였다. 밭 경작지에 대한 비점오염 저감사업을 적용한 NPS3는 그 다음으로 효과를 보였으나, NPS1과의 차이가 매우 크게 나타났다. 복합 시나리오에서도 NPS1이 포함된 COM4에서 가장 높은 수질개선 효율을 보였다. 따라서 축산계 배출부하에 대한 대책을 우선적으로 수립해야 할 것으로 판단된다.

추소수역에서는 시나리오별 갈수기와 평수기의 수

질개선 효율의 차이가 크게 나타나지 않았다. 그러나 회남수역에서 평수년(2010년)에는 T-P 최대 2.7%, Chl-a 최대 5.6%의 개선 효율을 보인 반면, 갈수년(2001년)에는 수질 농도 저감효율이 T-P 최대 6.9%, Chl-a 최대 12.8%로 높게 나타났다.

(2) 호내 대책

추소수역의 퇴적물 인불활성화 대책(LS1)을 가정하여 개선효과를 모의하였다. 갈수년인 2001년을 대상으로 모의하였으며, 추소 수역 말단의 평균 T-P 및 표층 Chl-a의 농도변화를 Figure 7에 나타내었다. 소옥천 수역 하층에서 인의 용출이 발생된 일수는 77일 (바닥 DO < 2.0 mg/L 기간)이며 수온 성층이 형성되는 5월에서 8월 사이에 집중되어 있었다. 모의결과 평균 T-P의 농도는 무대책 시 0.0661 mg/L에서 인 불활성 대책 적용 시 0.0653 mg/L로 약 0.8%, Chl-a의 농도는 기존 0.054 mg/L에서 대책 후 0.052 mg/L로 약 0.3% 저감되는데 그쳤다. 이는 대청호의 내부퇴적물에 의한 인용출은 외부에서 유입되는 양의 약 5%로 상대적으로 작으며(K-water 2013), 인이 용출되는 시기에는 수온 성층이 형성되어 용출된 인이 저수지 바닥층에 머무르다 강우시 유입하는 유량과 함께 분류로 유입하기 때문으로 나타났다(Figure 8). 따라서, 추소수역과 대청호내 조류저감을 위해서는 유역으로부터 유입하는 인의 부하를 저감하는 방안이 보다 효율적인 것으로 판단된다.

소옥천에 인 제거 시스템(PEP)을 설치하는 LS2 시나리오의 모의는 2001년(갈수년)과 2010년(평수

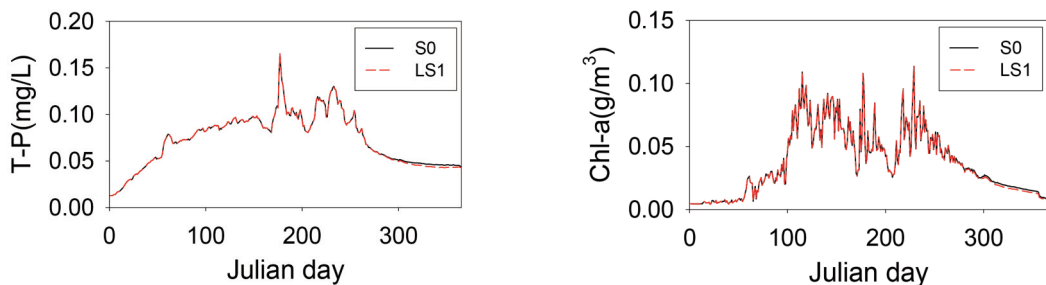
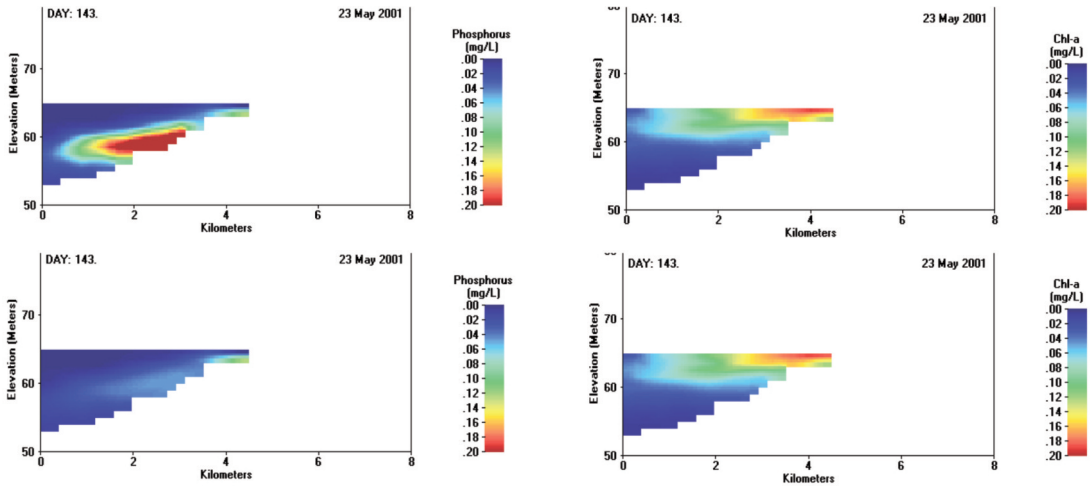
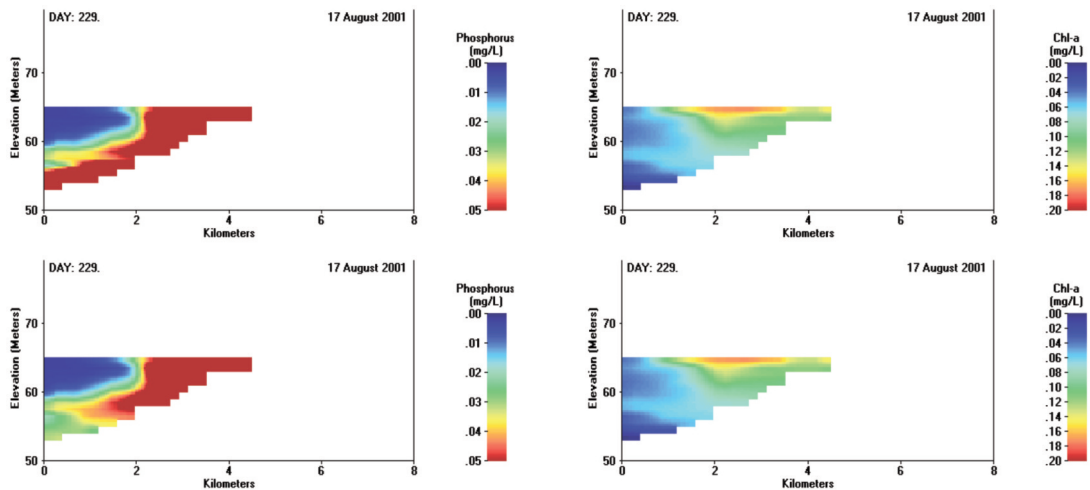


Figure 7. Simulated time series of T-P(left), Chl-a(right) concentration at the end of Chuso basin according to S0 and LS1 scenarios in 2001



(a) Day 143 of 2001



(b) Day 229 of 2001

Figure 8. Snapshots of simulated T-P and Chl-a in Chuso basin according to S0 and LS1 on Julian days (a) 143 and (b) 229 in 2001

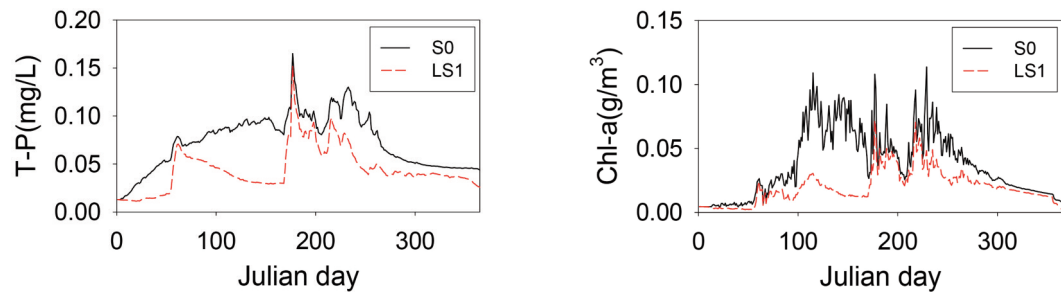


Figure 9. Simulated time series of T-P(left), Chl-a(right) concentration at Chuso basin according to S0 and LS2 scenarios in 2001

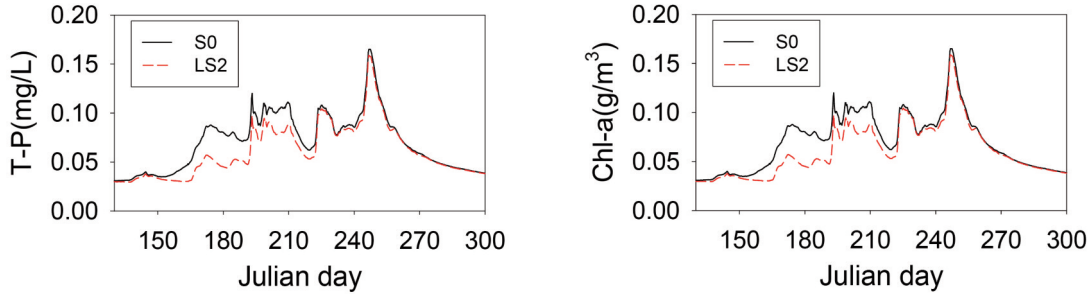


Figure 10. Simulated time series of T-P(left), Chl-a(right) concentration at Chuso basin according to S0 and LS2 scenarios in 2010

년) 사상에 대해 수행하였으며, 추소수역의 평균 T-P 농도와 수역 말단의 표층 Chl-a의 농도를 비교하여 Figure 9와 Figure 10에 나타내었다. 2001년 수문사상에서 PEP의 처리량을 분석한 결과 연간 유입량의 43%(28,105 천m³)를 처리하였으며, 추소수역의 평균 T-P 농도를 약 39%, Chl-a농도는 약 48% 저감시키는 것으로 나타났다. 2010년 사상에서는 평균 T-P 농도가 약 13%, Chl-a 농도가 약 34% 저감되는 것으로 모의되어 갈수년에 저감효과가 더 큰 것으로 평가되었다.

IV. 결론

본 연구는 대청호 조류발생의 주요원인으로 지목되는 소옥천 유역을 대상으로, 수질개선 대책 적용시 대청호의 수질변화에 대해 모의 분석하였으며, 본 연구결과를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 2차원 수리-수질 해석 모형인 CE-QUAL-W2를 이용하여 점오염저감대책(4개), 비점오염저감대책(4개), 조합대책(4개), 호내대책(2개)에 대한 수질개선 효과를 검토한 결과 오염 대책으로는 축산분뇨를 에너지화하고 농경지에는 표준시비량을 적용하는 시나리오인 NPS1 대책이 가장 높은 수질개선 효율을 보였다. 현재와 같이 축산분뇨를 자원화하여 농경지에 살포하는 농업을 유지하면서, 화학비료 시비량을 조절하는 비점오염 저감대책의 효과는 낮은 것으로 나타났다.

2) 퇴적물 인불활성화(LS1) 모의결과 수온성층이 형성되는 시기인 6월부터 8월 사이에 퇴적물로부터

인의 용출이 약 77일간 발생하였다. 용출 되는 인의 양은 상류 유입 부하량에 비해 상당히 낮은 수준으로 나타났으며, 수질 및 조류개선 효과도 미미하여 실효성이 없는 대책으로 판단된다.

3) 강우가 적은 해에는 유역으로부터 오염부하량이 작아 비점오염원 대책보다 인의 유입부하를 저감하는 화학적 인처리시설 설치(LS2)가 효과적인 것으로 평가되었으며, 강우가 많은 해에는 비점오염 부하량이 증가하여 비점오염원 저감대책(NP1~4)이 효과적인 것으로 평가되었다.

4) 대청호 조류저감을 위해 실현가능한 단기대책으로는 적정규모의 유입수 화학적 인처리시설을 설치하는 방안이라 판단되며, 장기적으로는 축산분뇨의 자원화를 줄이고 에너지화는 방안 마련이 가장 효과적인 것으로 사료된다. 이를 위해 최근 환경부에서 추진하고 있는 가축분뇨와 바이오매스와 같은 유기성폐기물을 통합하여 처리하는 친환경 에너지 타운 조성사업을 소옥천 유역에 도입하는 방안 마련이 필요하다.

5) 본 연구의 결과는 소옥천 유역의 수질개선 및 대청호 녹조저감을 위한 정부의 중장기적 물관리정책에 반영이 기대된다.

사사

This work was supported by (Establishment of an Action Plan for the Restoration of So-oak Stream and Algal Bloom Control) of Environmental Basic Research program by Geum-river watershed management committee.

References

- Bernhardt H. 1980. Reservoir Protection by In-River Nutrient Reduction, In Restoration of Lake and Inland Water. EPA Report 440/5-81-010. pp. 272-277
- Chang CH, Cai LY, Lin TF, Chung CL, Linden L, Burch M. 2015. Assessment of the Impacts of Climate Change on the Water Quality of a Small Deep Reservoir in a Humid-Subtropical Climatic Region. *Water*. 7(4): 1687-1711.
- Cho WH, Yum KT, Kim JS, Ban YJ, Chung SW. 2012. Study on Algae Occurrence in Daecheong Reservoir. *J Environ Impact Assess*. 21(3): 367-380. [Korean Literature]
- Chung SW, Jung YR, Ko IH, Kim NM. 2008. Development and Validation of A Decision Support System for the Real-time Monitoring and Management of Reservoir Turbidity Flows : A Case Study for Daecheong Dam. *J Korea Water Resources Association*. 41(3): 293-303. [Korean Literature]
- Chung SW, Oh JK. 2006. Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic Reservoir in Monsoon Climate Area. *Water Science and Technology*. 54(12): 29-37.
- ChungSW, Oh JK, Go IH. 2005. Simulation of Temporal and Spatial Distributions of Rainfall-Induced Turbidity Flow in a Reservoir Using CE-QUAL-W2. *J Korea Water Resources Association*. 38(8): 655-664. [Korean Literature]
- Chung SW, Oh JK. 2006. River Water Temperature Variations at Upstream of Daecheong Lake During Rainfall Events and Development of Prediction Models. *J Korea Water Resources Association*. 39(1): 79-88. [Korean Literature]
- Chung SW, Park JH, Kim YK, Yoon SW. 2007. Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation. *J Korean Society on water Quality*. 23(1): 52-63. [Korean Literature]
- Cole TM, Buchak EM. 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 TM, Tillman DH. 1999. Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2. Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole TM, Tillman DH. 2001. Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs Using CE-QUAL-W2. U.S. Army Corps of Engineers.
- Cole TM, Wells SA. 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.
- Cooke GD, Welch EB, Peterson S, Nichols SA. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs. CRC press.
- Hanna R. 2014. Implementation of a Sediment Transport Model for CE-QUAL-W2. Portland State University. Civil and Environmental Engineering Master's Project Reports.
- Jeong DH, Lee JJ, Kim KY, Lee DH, Hong SH, Yoon JH, Hong SY, Kim TS. 2011. A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daecheong Reservoir. *J Environ Impact Assess*. 20(6): 915-925. [Korean Literature]

- K-Water. 2013. Report on management of water quality of Daechung reservoir. [Korean Literature]
- Lee HS, Chung SW, Park HS, Jeong DH. 2012. Analysis the Effects of Physical Blocking Weirs on the Water Quality in Daechung Reservoir. *J Environ Impact Assess.* 21(1): 25-39. [Korean Literature]
- Lee HW, Kim EJ, Park SS, Choi JH. 2012. Effects of climate change on the thermal structure of lakes in the Asian Monsoon Area. *Climatic change. J Environ Impact Assess.* 112(3): 859-880. [Korean Literature]
- Lee YS, Lee KS. 2000. A study on Release Characteristics of Sediment and its Impacts on Water Quality in Daecheong Dam Reservoir. *J Environ Impact Assess.* 9(2): 99-107. [Korean Literature]
- Noh SY, Park HK, Choi HL, Lee JA. 2014. Effect of Climate Change For Cyanobacteria Growth Pattern in Chudong Station of Lake Daechung. *J Korean Society on water Quality.* 30(4): 377-385. [Korean Literature]
- Noori R, Yeh HD, Ashrafi K, Rezazadeh N, Bateni SM. 2015. A reduced-order based CE-QUAL-W2 model for simulation of nitrate concentration in dam reservoirs. *J Hydrology.* 530(2015): 645-656.
- Oh KH, Cho YC. 2015. Evaluation of Contamination Level of the Sediments from Chusori and Chudong Areas in Daechung Reservoir. *J Korean Soc. Environ. Eng.* 37(5): 277-284. [Korean Literature]
- Park YE, Pachepsky YA, Cho KH, Jeon DJ, Kim JH. 2015. Stressor-response modeling using the 2D water quality model and regression trees to predict chlorophyll-a in a reservoir system. *J Hydrology.* 529(3): 805-815.
- Shim MJ, Yoon JY, Lee SH. 2015. Water Quality Properties of Tributaries of Daechung Lake, Korea. *KJEE.* 48(1): 12-25. [Korean Literature]
- The committee of management at Guem river system. 2012. (A) study on constraining algae for management of water quality in the Daecheong and Boryeong lake(III). [Korean Literature]
- The committee of management at Guem river system. 2014. Establishment of an Action Plan for the Restoration of So-oak Stream and Algal Bloom Control. [Korean Literature]
- USGS. 2015. Improved Algorithms in the CE-QUAL-W2 Water-Quality Model for Blending Dam Releases to Meet Downstream Water-Temperature Targets.
- Vandenberg J, Prakash S, Buchak E. 2014a. Sediment Diagenesis Module for CE-QUAL-W2. Part 1: Conceptual Formulation, Environmental Modeling & Assessment. 20(3): 239-247.
- Vandenberg J, Prakash S, Buchak E. 2014b. Sediment Diagenesis Module for CE-QUAL-W2 Part 2: Numerical Formulation, Environmental Modeling & Assessment. 20(3): 248-258.