

연구논문

## 대청호의 조류발생 분석

조완희\* · 염경택\*\* · 김진수\* · 반양진\* · 정세웅\*\*\*

한국수자원공사 수자원사업본부 댐·유역관리처\*, 한국수자원공사 수자원사업본부\*\*, 충북대학교 환경공학과\*\*\*  
(2012년 3월 9일 접수, 2012년 4월 10일 승인)

### Study on Algae Occurrence in Daecheong Reservoir

Cho, Wan Hee\* · Yum, Kyung Taek\*\* · Kim, Jin Soo\* · Ban, Yang Jin\* · Chung, Se Woong\*\*\*

Dam & Watershed Dept., Water Resources Business Division, K-water\*

Water Resources Business Division, K-water\*\*, Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National Univ\*\*\*

(Manuscript received 9 March 2012; accepted 10 April 2012)

### Abstract

There are many long and round shape shores due to terrain characteristics in Daecheong reservoir. Therefore it is indicated different spatial distribution of algae every year since the stream is being regulated by these terrain characteristics and reservoir operation about inflow and outflow discharge. Also oversupply of nutrient salt from tributaries of Daecheong reservoir where pollutants were concentrated generates massive growth of algae and depending on hydrological, reservoir operation condition, those proliferated algae at the stagnant tributaries moves to the mainstream of Daecheong reservoir which could create problems of water quality. In this study, it was analyzed the tendency of algae generation by examining algae occurring status for the last 4 years since 2008, and implemented hydraulic analysis at Daecheong reservoir through numerical tracer simulation by applying 3-dimensional hydrodynamic model, ELCOM. Also it was implemented a quantitative analysis of causal relationship based on the algae generation tendency and hydraulic behavior at Daecheong reservoir. Through numerical tracer simulation in this study, it could be noticed the degree of spread of inflow indicated similar trend to the algae occurring status at Daecheong reservoir and verified the different tendency of algae generation in 2011 unlike previous year caused by the rise of water temperature.

Keywords : Algae Occurrence, Daecheong Reservoir, ELCOM, Hydrodynamic Analysis, Numerical Tracer

## 1. 서론

하천과 달리 정체수역인 저수지는 일사량, 수온, 영양염류 등의 적절한 수환경이 조성되면 조류가 급격히 성장하게 된다. 특히, 영양염류가 풍부하고, 수온이 25°C 이상으로 유지되며, 체류시간이 30일 이상인 정체수역에서는 조류의 급격한 성장으로 인하여 광범위한 녹조를 형성하게 된다. 이러한 녹조 현상은 저수지의 심미적인 경관을 훼손하고 상수원수에 심한 이취미를 발생시키며, 일부 조류종은 독성물질을 생성하는 등 수생태계의 균형을 파괴하는 원인이 되고 있다. 중부권의 주요 용수원으로 대전, 청주, 천안 등 충청권 지역에 생활 및 공업용수를 공급하고 있는 대청호는 정체수역이 많은 지형적인 특성으로 인하여 녹조현상이 자주 발생하고 있다. 대청호에서의 조류발생은 주로 초여름부터 초가을까지 빛이 충분히 전달되는 유평층에서 대량 발생하고, 주로 나타나는 조류종은 규조류, 갈색편모조류, 남조류(*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Oscillatoria*) 등이다. 대청호는 1997년 조류경보제가 시행된 이래 거의 매년 조류주의보가 발령되고(1999년 제외) 2000년, 2001년, 2003년, 2006년의 조류경보발령과 2001년의 조류대발생 등 조류발생에 의한 수질문제가 크게 대두되고 있다. 대청호에서의 수질문제는 안정적인 식수 공급에 영향을 끼치고 있어 효과적이고 근본적인 대책이 시급히 요구되는 실정이며, 이러한 대책의 수립과 추진을 위하여 반드시 선행되어야 하는 것은 조류발생의 현황을 파악하고 원인을 분석하는 것이다.

그동안 대청호의 조류발생 원인을 규명하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 대청호 내에서의 강우와 식물성 플랑크톤 군집의 관계(정승현 등, 2005), 수질항목 및 지수와 Chl-a와의 상관관계 분석(임병진 등, 2010; 연인성 등, 2010), 조류발생 및 이동에 관한 해석(유순주 등, 2006), 남조류 발생 및 독소생성과 유입유량이 조류발생에 미치는 영향 분석(천세억 등, 2006; 국립환경과학원, 2008) 등이 수행되었다. 그러나 효과적인 문제해결을 위해 필수

적이라 할 수 있는 보다 구체적인 원인과 메커니즘에 대한 충분한 이해는 아직도 부족한 실정이다. 대청호의 경우 넓은 면적으로 인하여 정밀한 데이터 수집이 힘들고 댐운영에 따른 유량관리와 취수 등 인위적인 요소로 인하여 구체적인 원인 규명을 위한 연구에 많은 어려움이 있었다. 이러한 점을 보완하기 위하여 수치모델링을 적용한 연구가 수행되었다. 그동안 대청호에서의 수질해석에 주로 적용된 모형은 미국 EPA(U.S. Environmental Protection Agency)에서 개발한 WASP 모형과 미국 공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서 개발한 CE-QUAL-W2모형이다. WASP 모형은 수리해석이 비교적 간단하며 수질해석 항목이 우리나라의 수질측정망 자료와 부합하여 다양한 목적으로 적용되어 왔다(한운구 등, 2003; 김종모, 2005). 그러나 WASP모형의 수리해석 모듈인 DYNHYD는 저수지의 성층화 현상을 반영하지 못하며 특히, 밀도류 형성 등 복잡한 저수지 수리현상을 잘 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. CE-QUAL-W2모형은 저수지 수질해석을 위하여 최근 국내에서 많이 적용되고 있는 모형으로 폭이 좁고 수심이 깊은 수체에 적합한 종방향과 수직방향의 2차원 모형이다. CE-QUAL-W2모형을 적용한 대청호에서의 선행연구(허경미, 2002; 정세웅 등, 2007; 하성룡과 이재일, 2008; 이흥수 등, 2010)에서 CE-QUAL-W2모형은 저수지의 성층현상과 탁수의 밀도류 거동현상을 비교적 잘 모의하는 것으로 평가되었으나, 폭이 넓은 저수지 수역과 만곡부에서는 횡방향 평균 가정에 따른 수리학적 해석의 한계가 지적된 바 있다. 3차원 수리·수질해석 모형은 이러한 요구에 부응하기 위한 대안으로써 수리동력학 현상과 오염물질의 생물·물리·화학적 현상의 상호작용을 분석하는데 유용하게 활용될 수 있다. 정세웅 등(2008, 2009)과 Chung *et al.*(2009)은 3차원 수리동력학 모형인 ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)모형을 적용하여 대청호에서의 시공간적인 유속과 수온의 변화를 분석하였고, 정세웅과 이흥수(2011)는 수질해석 모형인

CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)모형과의 동적 연결(Dynamic Coupling)을 통하여 Microcystis Bloom을 해석하는 연구를 수행하였다.

대청호는 지형적 특성상 길고 완곡부가 많으며 흐름이 유입량과 방류량에 따라 통제되기 때문에 조류의 공간적 분포는 매년 다르게 나타나고 있다. 또한 대청호 유역 내 오염원이 집중되어 있는 소하천 유역으로부터 과다한 영양염의 공급은 정체수역에서 조류의 대량 증식 현상을 일으키며 호소내 수리·수문조건에 따라 소하천 유입 정체수역에서 증식된 조류가 대청호 본류로 이동하면서 증식하여 수질문제를 일으키기도 한다. 이와 같이 저수지의 유입량 및 수질에 따라 물질의 이송·확산 해석 및 조류 발생에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 3차원 수리해석 모형을 적용한 저수지 수리 및 수온해석이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 2008년부터 최근 4년간의 조류발생 현황을 조사하여 조류발생 경향을 분석하고, 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한 대청호에서의 수치추적자(Numerical Tracer) 모의를 통하여 대청호에서의 수리학적 거동을 정량적으로 분석하였다. 본 연구에서는 조류발생에 대한 모의가 아닌 조류발생 경향 및 원인을 분석하기 위하여 조류발생에 영향을 미치는 영양염류의 유입, 수심, 수온, 유속 등이 수체의 수리학적 흐름에 영향을 받는다는 가정하에 저수지내에서의 수리학적 흐름을 나타내는 지표로 화학적 반응을 하지않는 비반응성·보존성 물질인 수치추적자 모의를 통하여 대청호에서의 수리학적 거동에 따른 인과관계를 분석하였다.

## II. 연구방법

### 1. 대상유역

금강 하구로부터 상류 약 150km지점에 위치한 대청댐은 저수용량 14.9억 $m^3$ , 저수지길이 86km에 달하는 호수로 복합형 본댐과 조정지댐으로 구성되어 있다. 본댐 주변에는 저수지내의 물이 다른 지역

으로 넘치지 못하도록 3개의 부댐이 있으며, 대전과 청주지역으로 용수를 공급하기 위한 도수로와 시설 용량 9만kw의 수력발전소가 있다. 댐의 완공으로 댐 하류지역의 홍수조절과 하류 연안 농경지의 농업 용수 및 급격히 증가하고 있는 유역내 인접도시의 생활용수와 공업용수를 공급하고 있다. 유역 대부분이 산지로 이루어져 있고, 댐지점으로부터 하류 약 6km에 주거지가 밀집되어 있으며, 계곡을 따라 소규모의 농경지가 형성되어 있다. 대청댐의 유역면적은 3,204 $km^2$ 이고 연평균 강우량은 1,230mm이며 연간 약 28억 $m^3$ 이 유입되는 중부권 주요 용수원으로 대전, 청주, 천안 등 충청권 지역에 연간 약 16.5억 $m^3$ 의 생활 및 공업용수 등을 공급하고 있는 중요한 수자원이다. 대청호의 취수를 위한 수리구조물은 추동과 문의에 위치한 취수탑(EL. 57.3m) 2개와 수력발전을 위한 발전 방류구(EL. 52.0m)가 있으며, 홍수를 조절하기 위한 여수로(EL. 64.6m)가 있다. 대청댐은 우리나라의 전형적인 기후특성인 몬순기후군에 속하여 겨울철에는 대륙성 고기압의 영향으로 한랭건조한데 반하여 여름철에는 습한 해양성 기후로서 고온 다습하며 연간 강우량의 60%~70%가 6월~9월의 홍수기에 집중되고 있다. 그림 1은 본 연구의 대상유역인 대청호의 형상 및 주요 측정지점의 위치를 보여주고 있다.

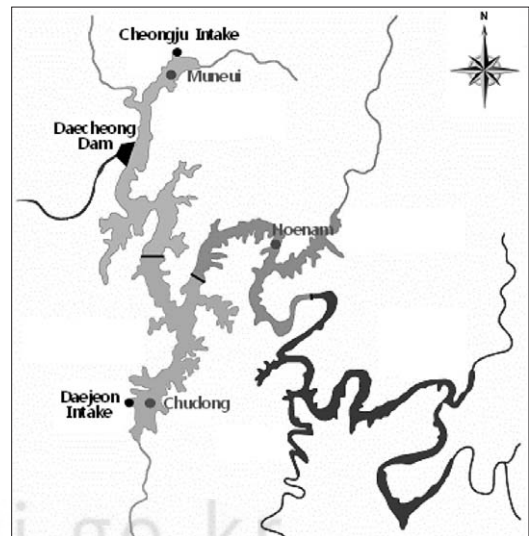


그림 1. 대청호의 형상 및 주요 측정지점

## 2. ELCOM 모형

ELCOM모형은 호수와 저수지를 위한 3차원 수리동력학 모형으로써 시공간적인 수온과 염분농도의 변화를 예측하는데 사용되고 있다. 이 모형은 CAEDYM모형과 연결(Coupling)되어 호수와 저수지의 수질 및 생태계의 동적 모델링을 위한 3차원 수리해석 결과를 제공한다. 지배방정식에는 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질의 이송 및 확산방정식이 포함된다. Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용하며, 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용하지만, 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우(예, 수면경사에 따른 동수압 작용, 내부파 영향 등)에는 비정수압 코드 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다. 식 (1) 및 식 (2)는 모형에 적용되는 x 및 y 방향의 운동량 방정식을 나타내고 있으며, 식 (3)은 정수압 가정에 따른 z 방향의 운동량 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int \rho dz \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + f_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int \rho dz \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - f_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

식 (4)는 모형에 적용되는 연속방정식을 나타내고, 식 (5)는 모형에 적용되는 자유수면 방정식을 나타내며, 식 (6)은 물질의 이송-확산방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_{h_0}^{\eta} u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_{h_0}^{\eta} v dz \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_v \frac{\partial c}{\partial z} \right\} = S_c \quad (6)$$

## 3. 입력자료 및 매개변수의 구성

3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형의 적용을 위해서는 저수지 계산격자, 경계조건 및 초기조건이 요구된다. 경계조건으로는 모의기간 동안의 기상자료와 유량자료, 그리고 수온자료가 적용된다. 유량자료의 상류단 경계조건은 금강본류, 소옥천, 회인천, 주원천, 삼산천, 품곡천의 유입량이며, 하류단 경계조건은 방류량 및 취수량을 적용하였다. 금강본류 경계조건 유량과 댐 방류량 및 취수량 자료는 한국수자원공사의 댐 운영자료를 수집하여 사용하였으며, 미계측 유역의 유입량은 금강본류 유입량에 대한 유역면적비법으로 산정하여 적용하였다.

ELCOM모형의 적용을 위한 계산격자는 금강 본류와 유입하천인 소옥천, 회인천, 주원천, 삼산천, 품곡천을 포함하여 구성하였다. x방향과 y방향에 대한 격자크기는 150m×150m, 수심방향(z방향)은 1m간격으로 하여 총 128,402개의 계산격자를 구성하였다. 그림 2는 구축된 3차원 계산격자의 형상을 보여준다. 구축된 계산격자의 신뢰도를 평가하기 위하여 대청댐 퇴사량 측정 보고서(한국수자원공사, 2006)에 제시된 저수위-저수용량 관계와 구축된 계산격자의 저수용량을 비교하였다. AME(Absolute Mean Error)와 RMSE(Root Mean Square Error)는 각각  $0.279 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,  $0.531 \times 10^9 \text{ m}^3$ 이며,  $R^2$ (Coefficient of Determination)는 0.997로 나타났다. 오차는 지형의 단순화 과정, 경계의 불확실성, 수치지형도의 해상도로 인하여 발생한 것으로 판단하였다.

대청호 내에는 기상관측 장비가 설치되어 있지 않으므로, 기상자료는 인근 대전관측소의 자료(기온, 기압, 운량, 상대습도, 일사량, 풍속, 풍향)를 수집하여 적용하였다. 또한 ELCOM모형의 대기-수체 열 교환 계산과 수온예측, 그리고 부유물질의 이

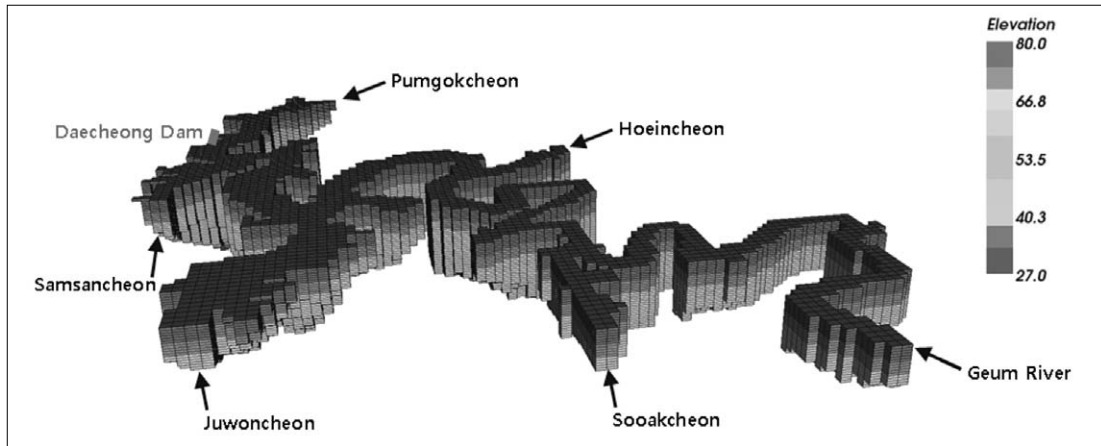


그림 2. 대청호 3차원 계산격자의 형상

표 1. 수리 및 수온해석과 관련한 매개변수

Parameters	Variable	Unit	Default
Horizontal eddy diffusivity	$D_X$	$m^2/s$	1.0
Bottom drag coefficient	$C_D$	-	0.005
Extinction coefficient for NIR	$\lambda_{NIR}$	/m	1.00
Extinction coefficient for PAR	$\lambda_{PAR}$	/m	0.25
Extinction coefficient for UVA	$\lambda_{UVA}$	/m	1.00
Extinction coefficient for UVB	$\lambda_{UVB}$	/m	2.50
Mean albedo for short wave radiation	$\alpha_{SW}$	-	0.08
Mean albedo for long wave radiation	$\alpha_{LW}$	-	0.03

송과 확산에 영향을 미치는 주요 매개변수는 표 1과 같다.  $D_x$ 는 오염물질 스칼라의 수평방향 확산계수이며,  $C_D$ 는 수체와 바닥 경계면에 작용하는 마찰저항의 정도를 나타내는 항력계수이다. ELCOM모형의 수온해석은 열역학적 이론에 근거한 물리적 모형이므로 수온 매개변수는 보정을 하지 않고 초기 값을 그대로 사용하였다. 물에 의한 태양의 단파복사에너지(파장범위 280~2,800nm)의 광수멸계수( $K_w$ )는 근 적외선인 NIR(Near infrared radiation, 700~2,000nm), 식물성 플랑크톤의 1차 생산에 사용가능한 광합성에 유용한 에너지인 PAR(photosynthetically active radiation, 400~700nm), 그리고 자외선A(UVA, 320~400nm)와 자외선B(UVB, 300~320nm)로 나누어 적용하였다. PAR는 Beer-Lambert Law에 의해 수체내로 감소하며 침투하는 것으로 가정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 조류발생 현황 분석

대청호에서의 2011년 조류발생 현황을 살펴보면 조류발생 초기 회남수역 발령 후 수문 및 기상상황에 따라 추동, 문의수역으로 확대되었던 예년과는 달리 8월초부터 대청호 전수역에 조류가 발생하는 양상을 보였다. 이는 대전·충청지역의 잦은 강우로 인하여 영양염류가 유입된 후 수온상승 등으로 조류가 번식하기 좋은 조건이 형성되었고 수문방류 등으로 영양염류가 전수역으로 빠르게 확산되었기 때문으로 판단된다. 그림 3과 그림 4는 대청호에서의 2008년부터 2011년까지의 조류발생 현황을 보여준다.

표 2는 2008년부터 2011년까지의 대청호 조류경보제 발령 현황을 보여준다. 2008년부터 2010년까

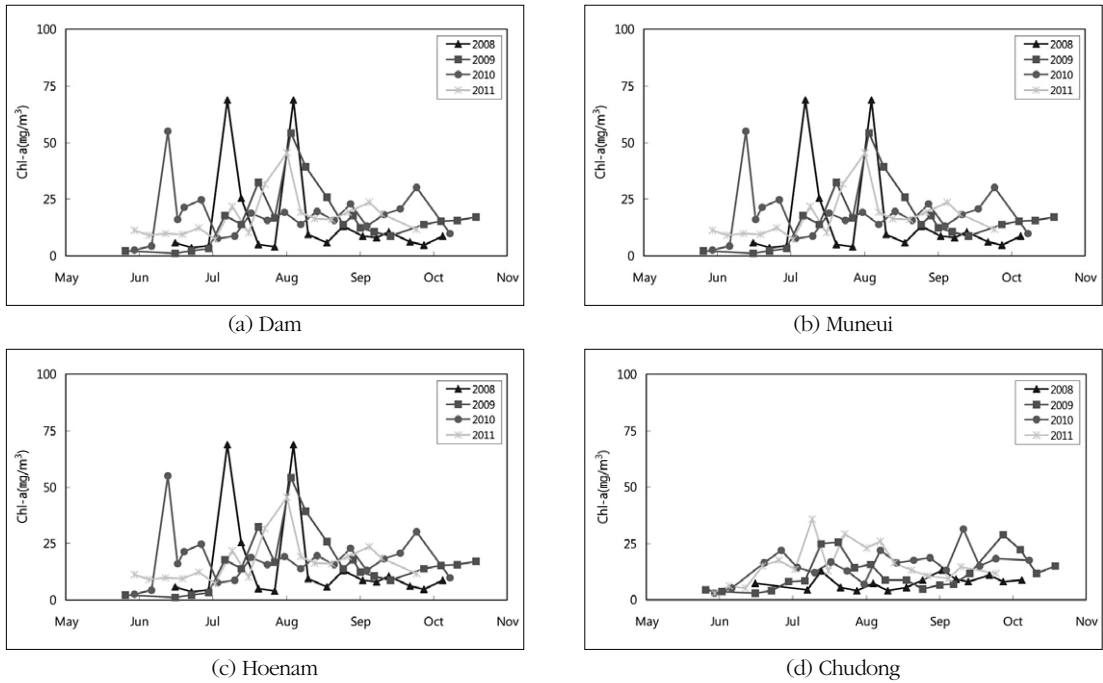


그림 3. 대청호 조류발생 현황(Chl-a)

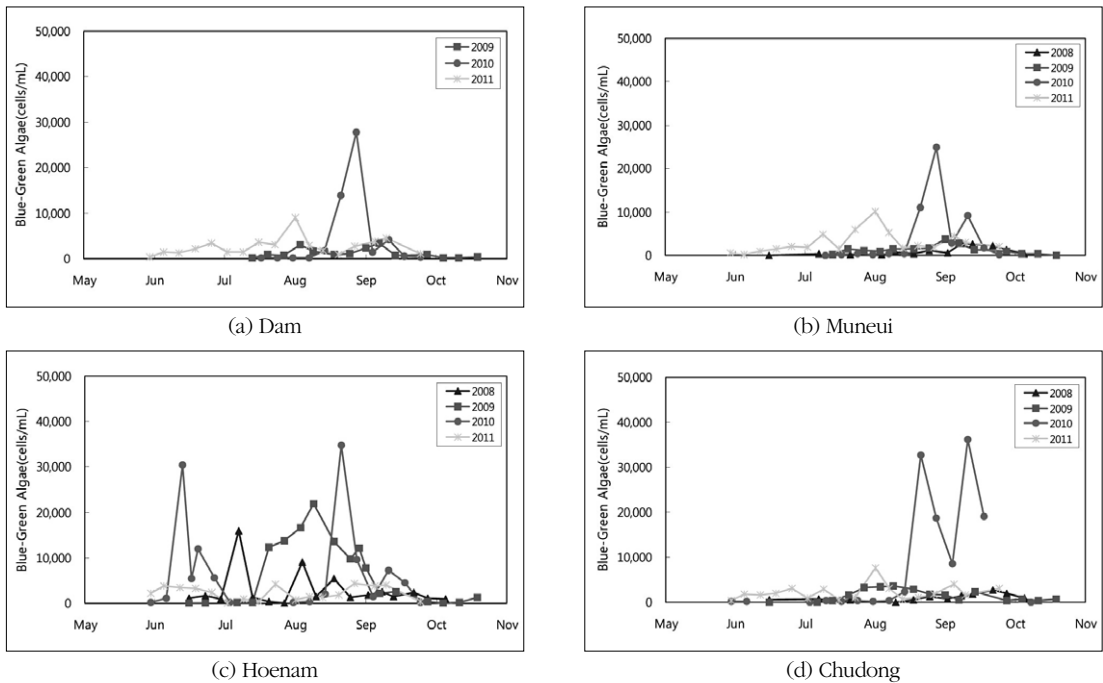


그림 4. 대청호 조류발생 현황(남조류)

지의 조류경보제 발령 현황을 살펴보면 회남수역에서 발령되기 시작하여 수문 및 기상상황에 따라 추

동 및 문의수역으로 확대되거나, 추동 및 문의수역으로 확대되지 않고 회남수역에서만 조류경보제가

표 2. 대청호 조류경보제 발령 현황

구 분	조류주의보	조류경보	조류대발생	수 역
2008	7.25~8. 8(15일)			회남
2009	8. 6~8.20(15일)			회남
	9. 8~9.21(14일)	8.21~9. 7(18일)		
2010	7. 7~7.22(16일)			회남
	9. 2~10.14(43일)			
	9. 2~10.14(43일)			추동
	9.16~10.14(29일)			문의
2011	8.12~9. 9(29일)			추동
	8.12~9.28(48일)			문의
	8.12~10.17(57일)			회남

발령되었다. 그러나 2011년의 경우 예년과는 달리 대청호 전수역에서 동시에 조류주의보가 발령되었다. 2010년과 2011년의 조류경보제 발령 현황을 비교해 보면, 2010년에는 수역별로 조류주의보가 29~59일간 지속(7.7~7.22, 9.2~10.14)되었고, 2011년에도 3개 수역에 29~57일간 지속(8.12~10.7)되어 주의보 발령일수는 비슷한 수준을 보였다. 그러나 2010년에는 7월 초순 회남수역에서 조류주의보가 발령된 후 9월 들어 전 수역에 조류주의보가 발령되었던 것과 달리 2011년에는 8월 중순 전 수역에 조류주의보가 발령되었다. 이는 2011년의 경우 예년과는 달리 6월과 7월부터 많은 강우로 인하여 조류 증식 및 확산 시기가 다른 양상을 보인 것으로 판단된다.

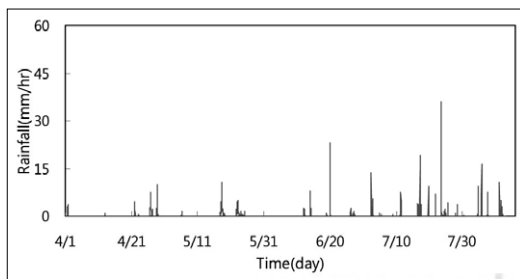
## 2. 조류발생 원인 분석

앞 절의 조류발생 현황에서 확인한 바와 같이 2008년부터 2010년까지와는 달리 대청호에서의

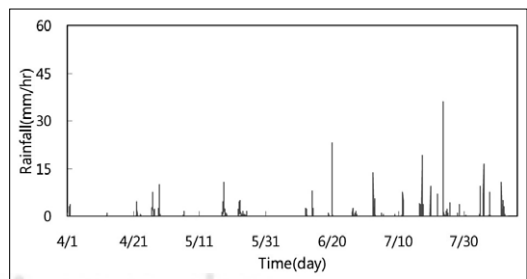
2011년 조류발생 현황을 살펴보면 8월초부터 대청호 전수역에 조류가 발생하는 양상을 보였다. 본 연구에서는 대청호에서의 이러한 조류발생 원인을 분석하기 위하여 대청호유역의 강우량 및 유입/방류량의 변화를 분석하였고, 보다 정량적인 분석을 위하여 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한 수치추적자(Numerical Tracer) 모의를 통하여 대청호 내에서의 수리학적 거동을 해석하였다.

### 1) 강우량 및 유입/방류량

그림 5는 대청호에서 가장 근거리에 위치한 대전 관측소에서 관측된 2008년부터 2011년까지의 강우량을 보여준다. 4월 1일부터 8월 11일까지 133일간의 누적강우량을 살펴보면 2008년에는 432.4mm, 2009년에는 688.4mm, 2010년에는 621.0mm, 2011년에는 1530.8mm의 강우량을 기록하였다. 2011년의 경우 2008년부터 2010년까지의 강우량에 비하여 2~3배의 강우가 동일기간에 대청호 유

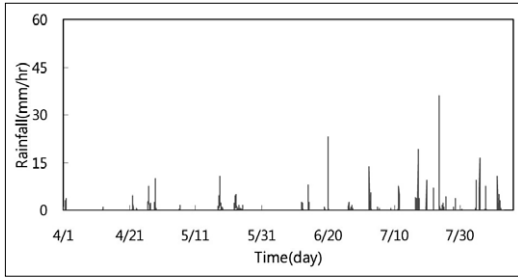


(a) 2008

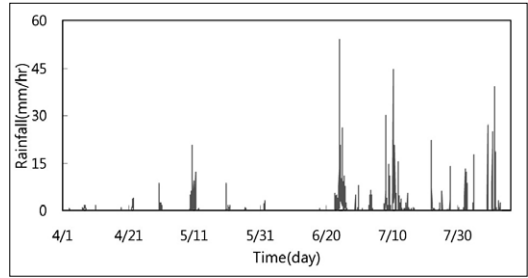


(b) 2009

그림 5. 연도별 강우량(4.1~8.11)

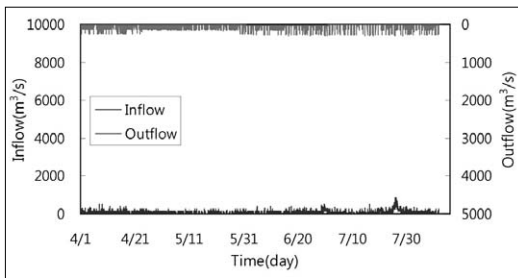


(c) 2010

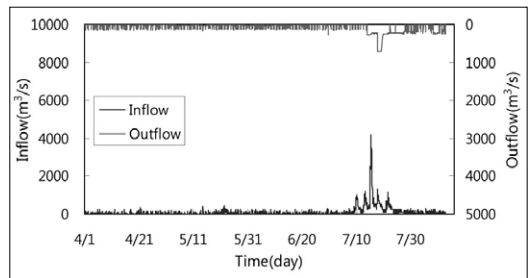


(d) 2011

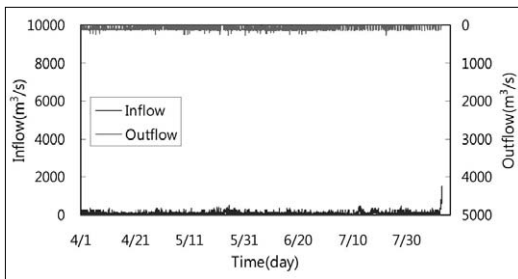
그림 5. 계속



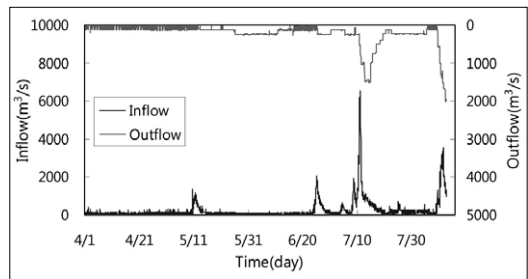
(a) 2008



(b) 2009



(c) 2010



(d) 2011

그림 6. 연도별 유입/방류량(4.1~8.11)

표 3. 연도별 유입/방류량 비교(4.1~8.11)

구 분	2008	2009	2010	2011
유입량 (시간 최대)	7.2억 <sup>3</sup> (843.5m <sup>3</sup> /s)	11.3억 <sup>3</sup> (4,197.7m <sup>3</sup> /s)	8.2억 <sup>3</sup> (1,531.5m <sup>3</sup> /s)	27.7억 <sup>3</sup> (6,521.0m <sup>3</sup> /s)
방류량 (시간 최대)	6.2억 <sup>3</sup> (301.3m <sup>3</sup> /s)	7.3억 <sup>3</sup> (704.0m <sup>3</sup> /s)	7.4억 <sup>3</sup> (283.3m <sup>3</sup> /s)	24.1억 <sup>3</sup> (2,008.3m <sup>3</sup> /s)
수문방류		0.7억 <sup>3</sup> (7.17~7.19)		5.0억 <sup>3</sup> (7.10~7.19) 3.1억 <sup>3</sup> (8. 8~8.11)

역에 발생하였음을 확인하였다. 특히 6월 22일부터 8월 11일까지는 1288.2mm의 강우가 발생하여 4월 1일부터 8월 11일까지 133일간의 누적강우량인 1530.8mm의 약 85%가 집중된 것을 확인하였다.

이러한 강우량 변화에 따라 대청호의 연도별 유

입 및 방류량도 커다란 차이를 보이는 것을 확인하였다. 그림 6과 표 3은 대청호에서의 연도별 유입 및 방류량을 보여준다. 2011년의 경우 강우량 증가에 따라 2008년부터 2010년까지의 유입량에 비하여 2~3배의 유입량 증가가 나타났고, 방류량 또한

2008년부터 2010년까지의 방류량에 비하여 3~4 배 증가한 것으로 확인되었다. 특히 2회에 걸친 여수로 수문방류에 따른 약 8억 $m^3$ 의 2011년 수문방류량은 2008년부터 2010년까지의 방류량을 모두 초과하는 것으로 확인되었다.

## 2) 대청호에서의 3차원 수리해석

본 연구의 대상유역인 대청호는 지형적 특성상 길고 만곡부가 많으며 흐름이 유입량과 방류량에 따라 통제되기 때문에 조류의 공간적 분포는 매년 다르게 나타나고 있다. 또한 대청호 유역 내 오염원이 집중되어 있는 소하천 유역으로부터 과다한 영양염의 공급은 정체수역에서 조류의 대량 증식 현상을 일으키며 호소내 수리·수문조건에 따라 소하천 유입 정체수역에서 증식된 조류가 대청호 본류로 이동하면서 증식하여 수질문제를 일으키기도 한다. 또한 횡방향 수질분석 결과에 따르면 대청호 하류부 및 소하천합류부 등에서는 횡방향 수질변화가 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, 폭이 넓은 저수지 수역과 만곡부 및 정체수역에서는 횡방향 평균 가정에 따른 해석모형(CE-QUAL-W2 등)의 한계가 지적된 바 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 2차원 해석모형이 아닌 3차원 해석모형을 적용하였다.

본 연구에서는 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한 대청호에서의 수치추적자(Numerical Tracer) 모의를 통하여 강우량 및 유입/방류량 변화에 따른 대청호에서의 수리학적 거동 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 대청호에서

의 조류발생 경향과 수리학적 거동에 따른 인과관계를 분석하였다. ELCOM모형을 적용한 대청호에서의 수리학적 거동 해석을 수행하기 위해서는 경계조건 및 초기조건이 요구되며, 경계조건으로는 기상조건 및 유량조건이 적용된다. 기상 경계조건은 대전관측소에서 관측된 시간별 기온, 기압, 운량, 상대습도, 일사량, 풍속, 풍향자료를 적용하였다.

유량 경계조건은 그림 6에 제시된 연도별 유입 및 방류량 자료를 적용하였고, 유입 수온자료는 수질자동측정장치에서 측정된 시간별 수온자료를 적용하였다. 유입량은 유입하천의 유역면적비를 기준으로 본류 87.9%, 소옥천 8.1%, 회인천 8.0%, 주원천 1.0%, 삼산천 0.5%, 품곡천 0.6%로 구분하여 적용하였고, 방류량은 수문방류, 발전방류, 취수(대전, 청주)로 구분하여 적용하였다. 초기 수위는 한국수자원공사 댐통합정보시스템(DIIS)에 제시된 수위자료를 적용하였으며, 초기 수온은 수질자동측정장치에서 측정된 수심별 수온자료를 적용하였다. 모의기간은 4월 1일부터 8월 11일까지 133일로 하였으며, 계산시간 간격은 60초로 하였다. 저수지내에서의 수리학적 거동은 하천과는 달리 수온성층과 중층 밀도류의 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 수리 및 수온해석과 관련한 매개변수 및 수리학적 거동 해석을 검증하기 위하여 대청호에서의 수온해석 결과와 수질자동측정장치에서 관측된 실측 수온자료를 비교하였다. 그림 7은 댐앞지점에서 2011년 수온해석 결과와 실측 수온자료의 비교를 통한 수리 및 수온해석과 관련한 매개변수의 검증 결과를 보여준다.

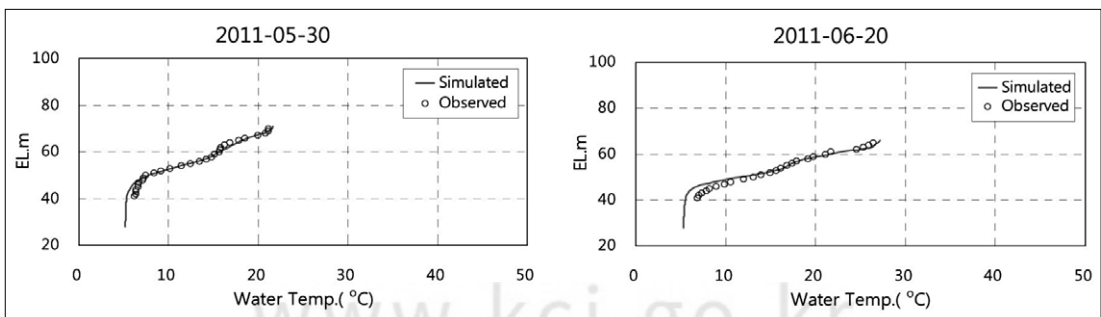


그림 7. 수리 및 수온해석과 관련한 매개변수의 검증

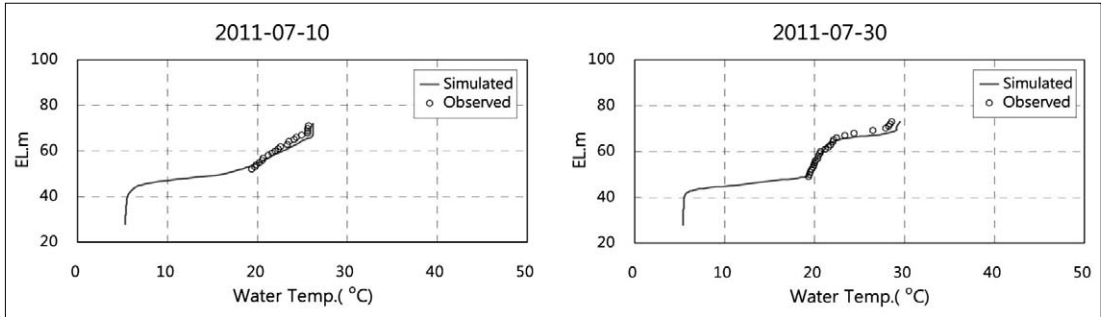


그림 7. 계속

본 연구에서는 수치추적자 모의를 통하여 대청호로 유입된 유량의 이송 및 확산정도를 정량적으로 분석하였다. 수치추적자는 저수지내에서의 수리학적 흐름을 나타내는 지표로 농도 범위는 0~1이며, 화학적 반응을 하지않는 비반응성·보존성 물질로 가정하였다. 수치추적자는 유입하천에서 농도 1의 값을 가지고 유입되는 것으로 경계조건을 설정하였으며, 수치추적자의 농도변화를 통하여 대청호에서의 이송 및 확산정도를 확인하였고, 이를 통하여 본

연구에서는 대청호에서의 수리학적 거동을 해석하였다. 그림 8~그림 10은 대청호 수표면에서의 수리학적 거동에 따른 연도별 수치추적자 분포를 보여준다.

그림 8~그림 10 및 표 4~표 6에 제시된 대청호 수표면에서의 수치추적자 분포에서는 6월중순 이후의 강우 및 수문방류의 영향으로 2011년의 경우 7월초부터 유입유량의 이송 및 확산정도가 2008년~2010년의 경우와 차이를 보이기 시작하며, 8월초

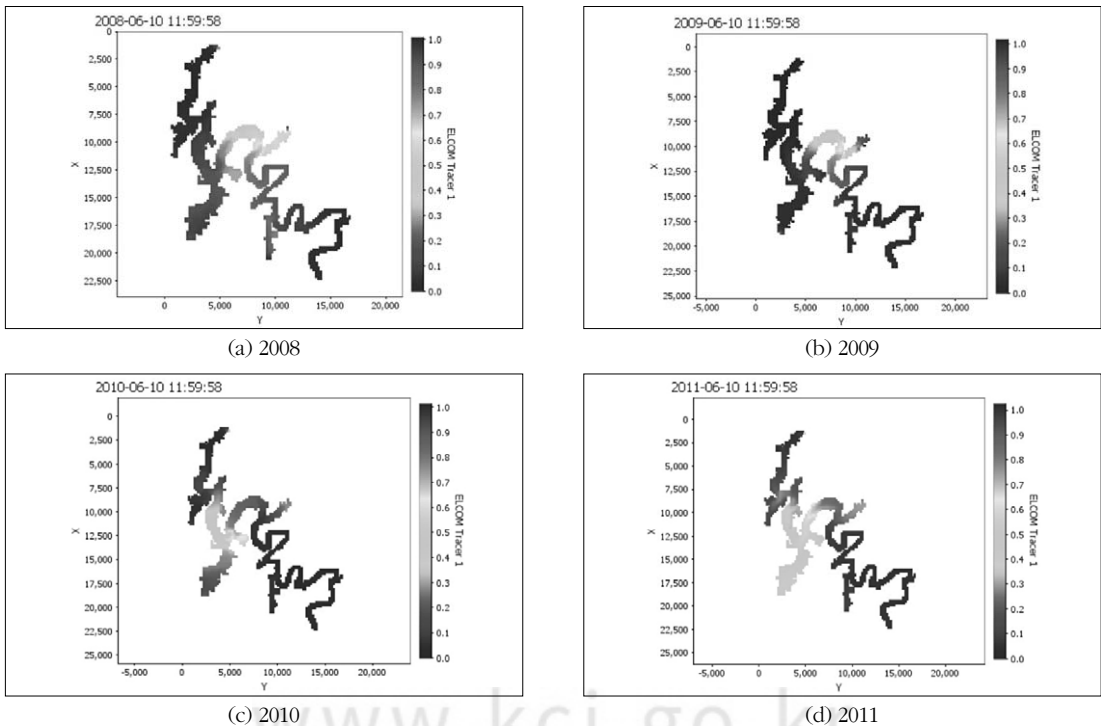


그림 8. 수치추적자 농도 비교(6.10)

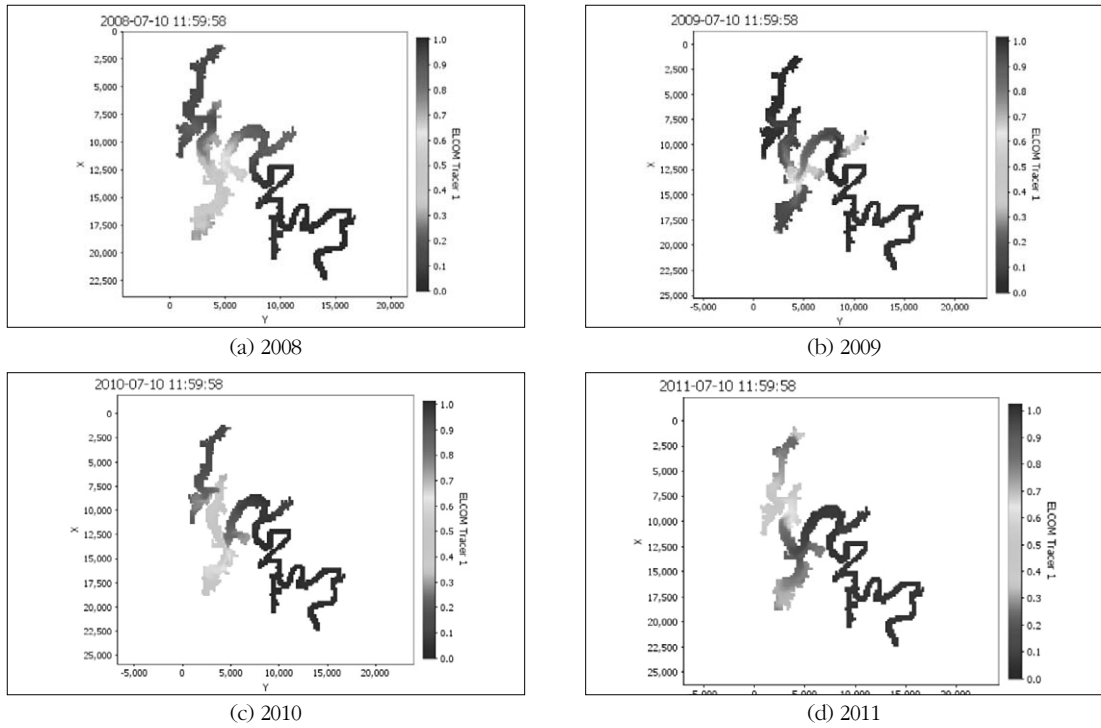


그림 9. 수직추적자 농도 비교(7.10)

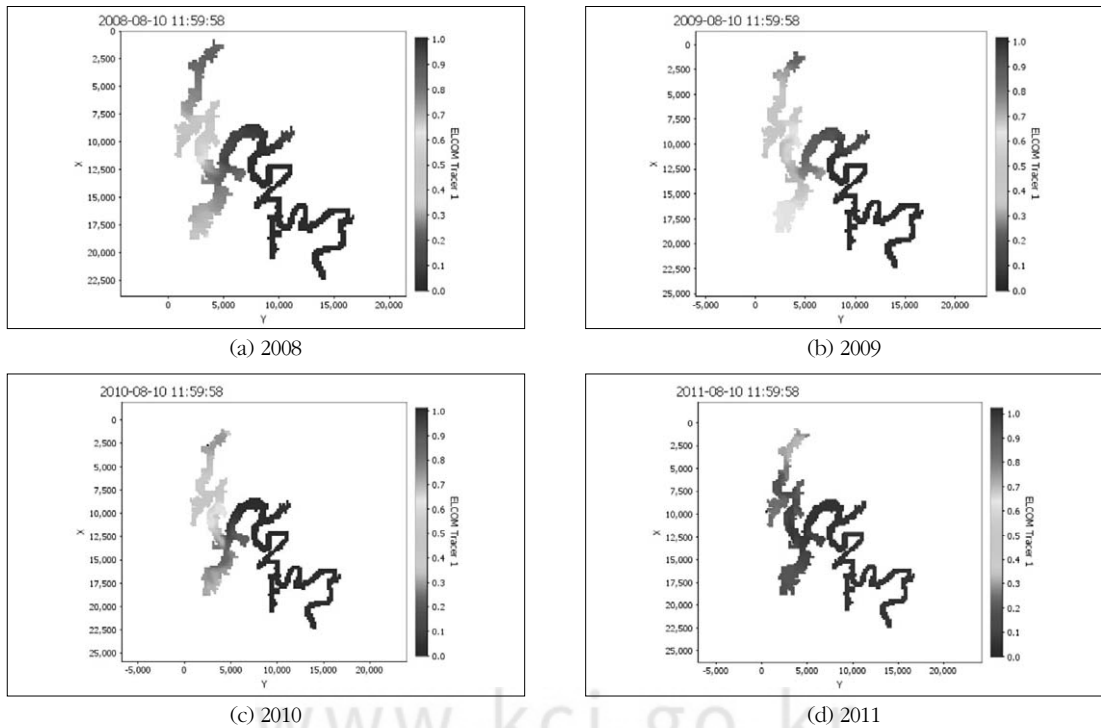


그림 10. 수직추적자 농도 비교(8.10)

표 4. 수표면에서의 수치추적자 농도(6.10)

구분	댐앞	회남	문의	추동
2008	0.029	0.589	0.178	0.028
2009	0.005	0.601	0.050	0.003
2010	0.086	0.943	0.254	0.040
2011	0.105	0.838	0.435	0.062

표 5. 수표면에서의 수치추적자 농도(7.10)

구분	댐앞	회남	문의	추동
2008	0.130	0.891	0.400	0.132
2009	0.036	0.998	0.187	0.014
2010	0.170	0.982	0.612	0.134
2011	0.324	0.995	0.792	0.247

표 6. 수표면에서의 수치추적자 농도(8.10)

구분	댐앞	회남	문의	추동
2008	0.274	0.986	0.712	0.229
2009	0.423	0.957	0.647	0.256
2010	0.349	0.999	0.759	0.292
2011	0.920	0.998	0.925	0.708

에는 대청호 전수역으로 유입유량이 확산되는 것으로 확인되었다. 8월초에 나타난 수치추적자 농도는 댐앞지점의 경우 2011년의 농도가 2008년~2010년의 경우에 비하여 0.497~0.646, 회남지점의 경우 -0.001~0.041, 문의지점의 경우 0.166~0.278, 추동지점의 경우 0.416~0.479 정도 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 유입유량의 이송 및 확산 정도를 나타내는 수치추적자 농도는 그림 3과 그림 4에 제시된 대청호 조류발생 현황과 유사한 경향을 나타내는 것으로 확인되었다. 이를 통하여 강우량 및 유입/방류량의 변화에 따른 대청호에서의 수리학적 거동의 변화에 따라 영양염류의 유입 및 확산, 수심, 수온, 유속 등이 차이가 발생하여 2011년의 조류발생 경향이 예년과 다르게 나타나게 되었음을 판단하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 2008년부터 최근 4년간의 조류발생 현황을 조사하여 조류발생 경향을 분석하고, 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한

대청호에서의 수리학적 거동 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 대청호에서의 조류발생 경향과 수리학적 거동에 따른 인과관계를 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대청호에서의 2011년 조류발생 현황을 살펴 보면 조류발생 초기 회남수역 발령 후 수문 및 기상상황에 따라 추동, 문의수역으로 확대되었던 예년과는 달리 8월초부터 대청호 전수역에 조류가 발생하는 양상을 보였다. 이는 대전·충청지역의 잦은 강우로 인하여 영양염류가 유입된 후 수온상승 등으로 조류가 번식하기 좋은 조건이 형성되었고 수문방류 등으로 영양염류가 전수역으로 빠르게 확산되었기 때문으로 판단하였다.
- (2) 4월 1일부터 8월 11일까지 133일간의 누적강우량을 살펴보면 2008년에는 432.4mm, 2009년에는 688.4mm, 2010년에는 621.0mm, 2011년에는 1530.8mm의 강우량을 기록하였고, 2011년의 경우 2008년부터 2010년까지의 강우량에 비하여 2~3배의 강우가 동일기간에 대청호 유역에 발생한 것으로 확인되었다. 2011년의 경우 강우량 증가에 따라 2008년부터 2010년까지의 유입량에 비하여 2~3배의 유입량 증가가 나타났고, 방류량 또한 2008년부터 2010년까지의 방류량에 비하여 3~4배 증가한 것으로 확인되었다.
- (3) 본 연구에서는 강우량 및 유입/방류량 변화와 수문방류에 따른 대청호에서의 연도별 수리학적 거동 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 대청호에서의 조류발생 경향과 수리학적 거동에 따른 인과관계를 정량적으로 분석하였다. 수치추적자 모의를 통하여 유입유량의 확산정도가 대청호 조류발생 현황과 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였고, 이를 통하여 대청호에서 강우로 인하여 유입된 영양염류가 수리학적 거동에 따라 대청호 전수역으로 확산되고, 수온의 변화에 따라 2011년의 조류발생 경향이 예년과 다르게 나타나게 되었음

을 판단하였다.

- (4) 본 연구에서는 조류발생에 대한 모의가 아닌 조류발생 경향 및 원인을 분석하기 위하여 조류발생에 영향을 미치는 영양염류의 유입, 수심, 수온, 유속 등이 수체의 수리학적 흐름에 영향을 받는다는 가정하에 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한 저수지내에서의 수리학적 거동에 따른 인과관계를 분석하였다. 향후 개선된 대청호에서의 조류발생 모의 및 원인 분석을 위해서는 ELCOM모형과 연계되는 수질해석 모형인 CAEDYM모형과의 연계를 통한 3차원 저수지 수리·수질해석에 따른 추가적인 연구 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구에서와 같이 3차원 저수지 수리해석 모형인 ELCOM모형을 적용한 저수지내에서의 수리학적 거동 해석은 향후 조류차단막, 선택취수 설비 등 수질관련 시설물의 설치 및 운영의 효과분석을 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단되며, 추가적으로 수질해석 모형인 CAEDYM모형과의 연계를 통한 조류발생 모의 및 예측이 이루어진다면 저수지내에서의 방재설비 설치, 방재대책 수립, 취수시설 운영기간 조정 등의 판단자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 국립환경과학원, 2008, 대청호 수질 및 조류발생 실태조사.
- 한국수자원공사, 2006, 대청댐 퇴사량 측정 보고서.
- 김종모, 2005, 수변구역이 대청호 수질에 미치는 영향 연구, 석사학위논문, 청주대학교.
- 연인성, 홍지영, 홍은영, 임병진, 2010, 연속 측정된 Chlorophyll-a의 자료 특성 및 상관 분석, 수질보전 한국물환경학회지, 26(6), 994-999.
- 유순주, 황종연, 채민희, 김상용, 2006, 대청호 유속에 따른 조류이동 영향, 수질보전 한국물환경학회지, 22(5), 887-894.
- 이흥수, 정세웅, 정희영, 민병환, 2010, 대청호 수류 차단막 설치 위치에 따른 녹조제어 효과 분석, 26(2), 231-242.
- 임병진, 홍지영, 연인성, 2010, 대청호 내 실시간 수질측정자료를 이용한 CCME WQI의 적용, 수질보전 한국물환경학회지, 26(5), 796-801.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성환, 2007, 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용, 수질보전 한국물환경학회지, 23(1), 52-63.
- 정세웅, 이흥수, 류재일, 류인구, 오동근, 2008, ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입 탁수의 3차원 모델링, 41(12), 1187-1198.
- 정세웅, 이흥수, 최정규, 류인구, 2009, 3차원 ELCOM 모형을 이용한 대청호 수온성층 모의, 수질보전 물환경학회지, 25(6), 922-934.
- 정세웅, 이흥수, 2011, ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청호 Microcystis Bloom 해석, 수질보전 물환경학회지, 27(1), 73-87.
- 정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목, 2005, 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군번의 관계, 한국환경생물학회지, 23(1), 57-63.
- 천세억, 이재안, 이재정, 유영목, 방규철, 이열재, 2006, 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계, 22(2), 342-348.
- 하성룡, 이재일, 2008, 대청호 저수지 수질해석을 위한 CE-QUAL-W2 모형의 검보정, 환경영향평가, 17(6), 349-356.
- 한운구, 김규형, 안태봉, 2003, 대청호에서 WASP5 모델 매개변수에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 4(3), 69-77.
- 허경미, 2002, 인공호의 수리수문학적 변화에 대한 수질모델 비교 연구, 석사학위논문, 이화여자대학교.
- Chung, S.W., Hipsey, M.R. and Imberger, J., 2009, Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified

- lake : Daechong Reservoir, Korea, Environmental Modelling & Software, 24, 1467-1482.
- Hipsey, M.R., Romero, J.R., Antenucci, J.P. and Hamilton, D.P., 2006, Computational Aquatic Ecosystem DYNamics Model : CAEDYM, v2 User Manual, Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hodges, B. and Dallimore, C., 2007, Estuary, Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM, v2.2 User Manual, Centre for Water Research, University of Western Australia.

최종원고채택 12. 04. 24