

## 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용

정세웅<sup>†</sup> · 박재호<sup>\*</sup> · 김유경 · 윤성완

충북대학교 환경공학과

(주)한국종합기술

## Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation

Se Woong Chung<sup>†</sup> · Jae Ho Park<sup>\*</sup> · Yukyung Kim · Yoon, sung wan

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

<sup>\*</sup>Korean Engineering Consultants Corp.

(Received 26 September 2006, Accepted 20 November 2006)

### Abstract

The objectives of this study were to setup a laterally-averaged two-dimensional eutrophication model in Daecheong Reservoir, and to validate the model under two different hydrological conditions; drought year (2001) and wet year (2004). The suggested modeling approach was found to be very effective to simulate the dynamic variations of water temperature, nutrients, dissolved oxygen, and algae in the reservoir. The model satisfactorily replicated the algal bloom that happened between Janggae (Sta.4) and Haenam (Sta.5) during summer of 2001, although the peak concentration was slightly underestimated due to the laterally averaged assumption. The allochthonous phosphorus and algae induced from upstream and So-oak stream during several rainfall events were found to be most significant sources of algal bloom in 2001. In contrast to draught year, the flood events happened during summer months of 2004 tended to remove the hypolimnetic anaerobic conditions and dilute the dissolved phosphorus in the upper reach of the reservoir, and in turn mitigated algal bloom. It implies that the impact of hydrological and hydrodynamic conditions on the reservoir water quality is highly significant, and a drought year may be more vulnerable to algal bloom in the reservoir.

**keywords** : Algal bloom, CE-QUAL-W2, Daecheong Reservoir, Eutrophication model, Water quality management

### 1. 서론

우리나라의 연간 물 이용량은 약 331억 m<sup>3</sup>이며, 이중 약 40%의 수자원을 댐 저수지에 의존하고 있다(한국수자원공사, 2005). 또한 저수지는 인간을 위한 용수공급원으로써의 가치뿐만 아니라 담수생태계의 서식환경을 제공하는 역할을 하며, 최근 들어서는 시민들의 레크레이션과 관광자원으로써의 가치도 매우 중요하게 부각되고 있다(정, 2003; 박 등, 2003). 그러나 농업용 저수지와 다목적댐 저수지를 포함한 대부분의 국내 인공 저수지는 1980년대 후반에 들어 심각한 부영양상태를 보이고 있으며, 조류의 이상증식에 따른 수질악화를 겪고 있다(농업기반공사, 2002; 김 등, 2001). 따라서 저수지의 지속가능한 이용과 양질의 상수원 확보를 위해서는 저수지 수질오염에 대한 인과분석과 효과적인 대책이 마련되어야 한다.

대청호는 1981년에 준공되어 대전권과 청주권을 비롯한 인근 대도시와 금강 하류지역인 공주와 부여 등의 중부권 지역에 상수원수를 공급하고 있으며, 향후 이 지역에 들어

서게 될 행정복합중심도시의 매우 중요한 수자원이다. 그러나 최근 들어 하절기가 되면 식물성 플랑크톤인 남조류가 다량 증식하는 현상이 자주 발생하고 있다. 특히, 갈수해인 2001년에는 회남수역에서 조류경보가 26일간, 그리고 조류 대발생이 7일 동안 발령되어 수질오염문제의 심각성이 본격적으로 대두되었다(국립환경연구원, 2003). 대청호의 수질오염은 대전권과 청주권의 수돗물에서 맛과 냄새 문제를 유발하는 등 장기적으로 상수원수로서의 품질 저하를 가져올 수 있다.

일반적으로 호소의 수질과 생태적 특성에 영향을 미치는 환경인자는 물의 체류시간, 평균수심, 영양염류와 유기물 등 오염물질부하율, 그리고 유역의 수문기상학적 특성 등이다. 국내 대부분의 저수지와 마찬가지로, 대청호는 유역면적(3,204 km<sup>2</sup>) 대비 저수면적(72.8 km<sup>2</sup>) 비율이 44로써 오염부하량이 매우 큰 인공호이므로 수질관리에 더욱 어려움이 있다. 또한 다른 자연호수나 인공호에 비해 폭이 좁고 긴 편이며 특히 나뭇가지 모양의 저수지 형상이 두드러지는데, 정체수역에서는 물의 유출입량이 적어 본류수역에 비해 부영양화가 더욱 심각하다. 특히 여름철에는 강우-유출수가 집중 유입하여 유역으로부터 토사와 비점오염물질을 대량 유입시킬 뿐만 아니라, 저수지 물질순환과 성층구조를

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
schung@chungbuk.ac.kr

교란하는 등 수리수문학적 현상이 저수지 수질과 생태계에 미치는 영향도 매우 큰 것이 특징이다(천 등, 2006; 정 등, 2005). 따라서 대청호의 장기적이고 적절한 수질관리 대책을 수립하기 위해서는 이러한 다양한 환경영향인자들의 상호관계를 종합적으로 해석하는 연구가 선행되어야 한다.

그러나 실험을 통해 이들 인자간의 상호관계를 종합적이고 거시적으로 분석하는 것은 시간과 비용측면에서 한계가 있다. 따라서 제한된 실험결과를 종합적으로 해석하고 보완하기 위해 수치해석모의 기술을 활용하여 저수지 수질과 생태계시스템을 해석하려는 시도가 지속적으로 이루어져왔다(Ambrose et al., 1993; Cerco et al., 1993; Cole et al., 1995; Chapra, 1997). 최근 들어 저수지의 수질과 생태계의 시스템해석을 위한 수치모형은 정보기술의 발전과 함께 급속한 발전을 이루어왔으며, 저수지 물질순환시스템을 다차원적으로 해석하는 중요한 도구로 정착하였다.

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 저수지 수질 모델은 미국 EPA에서 개발한 WASP(Ambrose et al., 1993)과 미국공병단에서 개발한 CE-QUAL-W2(이후 W2)가 있다(Cole et al., 1999). WASP은 3차원적인 수질해석이 가능한 반면에 수리해석은 비교적 간단하며 수질해석 항목이 우리나라 측정망 자료와 잘 부합하여 다양한 목적으로 적용되어 왔다(허, 2001; 이, 2002; 허, 2000; 조, 2003; 안, 2005; 김, 2005). 그러나 WASP의 수리해석 모듈인 DYNHYD는 성층화 현상을 반영하지 못하며 특히, 홍수 유입에 따른 밀도류 형성 등 복잡한 저수지 수리현상을 잘 반영하지 못해 최근에는 3차원 수리해석 모형인 EFDC와 결합하여 사용하고자 하는 시도가 진행되고 있다(서 등, 2005). 그러나 아직까지 저수지의 성층화 현상과 급격한 수리적 변화를 고려한 부영양화 해석에는 한계성이 있다고 판단된다.

반면에, W2 모델은 횡방향 평균 2차원 수리·수질 해석 수치모델으로써 저수지의 길이방향과 수직방향 모두 농도 구배가 존재하는 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합한 모델이다. 특히, 선택취수설비, 발전방류와 여수로 수문방류 등 복잡한 수리구조물의 해석이 용이하고 저수지 성층화 현상과 밀도류 해석이 뛰어나며, 하천과 저수지의 연계모의가 가능해져 점차 그 활용도가 증가되고 있는 추세이다. 그러나 이 모델은 모의대상 수질항목이 국내 호소수질 측정망 자료와 다소 차이가 있으며, 유기물의 존재 형태에 따라 난분해성 용존상 유기물(R-DOM), 분해성 용존상 유기물(L-DOM), 난분해성 입자상 유기물(R-POM), 분해성 입자상 유기물(L-POM)에 대한 상세한 입력 자료를 요구하므로 부영양화 해석에 많은 어려움이 있었다. 따라서 저수지 수질관리를 위한 해석도구로써 W2 모델의 활용도를 높이기 위해서는 제한된 측정망 자료를 이용하여 저수지 수질과 생태계 물질순환시스템을 해석할 수 있는 방법론에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 제한된 실험 자료를 사용하여 대청호의 부영양화 현상을 W2 모델로 해석할 수 있는 방법론을 제시하고, 여름철 가뭄으로 조류 발생이 가장 극심했던 2001년과 강수량이 평년에 가까웠던 2004년의 서로 다른

수문사상을 대상으로 제안된 방법론과 부영양화 모델의 적용성을 평가하는 데 있다. 개발된 부영양화 모델은 2001년 조류 대발생 당시의 저수지내 수리학적 거동 및 오염부하 특성과 조류 발생의 인과관계를 분석하는데 적용하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 대상 저수지 특성

대청댐은 1975년에 착공하여 1980년 12월에 준공된 이후, 대전을 비롯한 충청 및 전북지역의 용수공급, 하류 홍수조절, 수력발전생산 등을 담당하고 있다. 댐 유역은 대략 동경 126°41'~128°45', 북위 35°35'~37°05'에 위치하고 있으며 댐 유역면적은 4,134 km<sup>2</sup>으로써 금강수계 전체 면적 9,886 km<sup>2</sup>의 41.8%를 점유하고 있으며 용담호 유역을 제외한 유역면적은 3,204 km<sup>2</sup>이다. 연간 용수공급량은 1,649 백만 m<sup>3</sup>이며, 이 중 1,300백만 m<sup>3</sup>가 생활·공업용수로 사용되며 대전, 청주 등의 충청권에 공급하고 청주시구, 금강하류 및 만경강 지구에 349백만 m<sup>3</sup>의 관개용수를 공급하고 있다. 행정구역상으로는 전라북도 장수군, 진안군, 무주군과 충청남도 금산군, 충청북도 영동군, 보은군, 옥천군, 청원군 및 대전시의 일부지역을 점유하고 있어 1개 광역시, 4개도 9개 군을 포함하고 있다. 대청댐 저수지의 방류량을 조절하는 수리시설물은 추동과 문의면에 위치한 2개 취수탑(EL.57.0 m), 본댐 발전방류구(EL.52.0 m), 그리고 홍수조절을 위한 여수로 Tainter gates 6개(EL.64.5 m)가 있다.

**Table 1.** Limnological characteristics of Daecheong Reservoir

Item	Value
Watershed area[A <sub>s</sub> ] (km <sup>2</sup> )	3,204
Water surface area[A <sub>w</sub> ] (km <sup>2</sup> )	72.8
A <sub>s</sub> /A <sub>w</sub> ratio	44.0
Annual mean precipitation (mm)	1,230
Total storage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1,490
Effective storage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	790
Mean depth (m)	20
Annual inflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	2,451 (95.6 m <sup>3</sup> /s)
Mean residence time (day)	180
Flood water level (EL.m)	80.0
Normal water level (EL.m)	76.5

저수지내 정기적인 수질조사는 환경부 수질측정망 지점인 장계교(Sta.4), 대정리(Sta.6), 회남대교(Sta.5), 본댐앞(Sta.2), 그리고 대전과 청주시의 수돗물 원수를 취수하는 추동취수탑(Sta.1)과 문의취수탑(Sta.3)에서 이루어지고 있다(Fig. 1).

한국수자원공사는 이들 지점에서 연중 월간측정과 홍수기 주간측정(Sta.4와 6제외)을 실시하고 있으며, 금강물환경연구소에서는 조류예보제 시행을 목적으로 동일한 지점에서 월간측정과 필요시 수시측정을 하고 있다. 환경부 수질측정망 자료에 의하면, 대청호의 수질은 연평균 COD와 TP의 호소수질 기준으로 볼 때, 대체적으로 상수원수 II급수

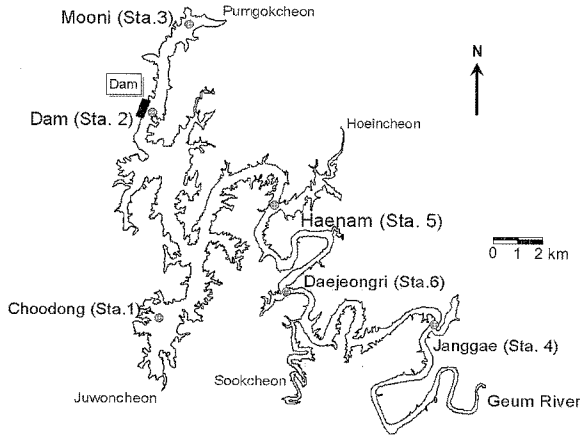


Fig. 1. Location of water quality monitoring stations.

수준을 유지하고 있다. 그러나 대청호는 매년 여름철마다 부영양상태가 반복적으로 발생되고 있으며, 특히 유독성 남조류 등의 출현빈도가 증가하는 추세이다(국립환경연구원, 2003; 천 등, 2006). 대청호에 주로 출현하는 조류의 종은 규조류, 갈색편모조류, 남조류 등인데, 이 중 상수원수질관리에 가장 어려움을 주는 것은 남조류인 *Anabaena*와 *Microcystis*이며, 주로 초여름에 출현하여 초가을까지 우점한다.

2.2. 부영양화모델 입력자료 구성

2.2.1. 지형 및 단면 자료

W2모형의 주요 입력 자료는 저수지 상류 및 하류의 유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 저수지 지형 및 단면자료, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수

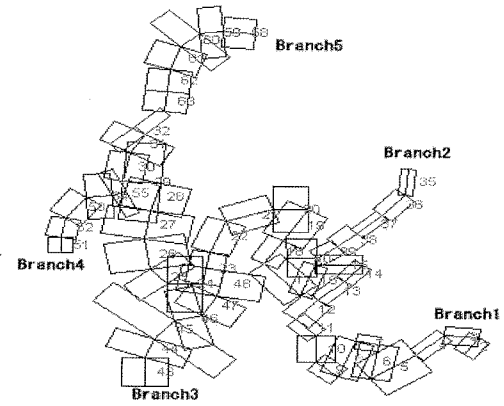


Fig. 2. Computational segments of Daechung Reservoir in longitudinal view.

등이다. 대청호의 유한차분 격자구성은 금강 본류와 주요 지류하천을 5개의 구획(Branch)으로 구분하였으며, 흐름방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 장계교 지점에서 댐측까지 31개의 요소( $\Delta x = 0.5\sim 1.9$  km), 수심방향으로는 0.5~1.0 m 간격으로 69개 수층(Layer)으로 구성하였다(Fig. 2, Fig. 3). 저수지 지형자료(Bathymetry)는 대청댐의 퇴사량측정보고서(한국수자원공사, 1991)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 모형에서 계산한 저수지 수위별 용량곡선을 실측수위와 비교함으로써 그 신뢰도를 검증하였다. 또한 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 대청댐 저수지 유입량과 방류량 자료를 경계조건으로 사용하여 모의한 저수지 수위와 실측수위를 비교한 결과도 결정계수값( $R^2$ )이 0.9995

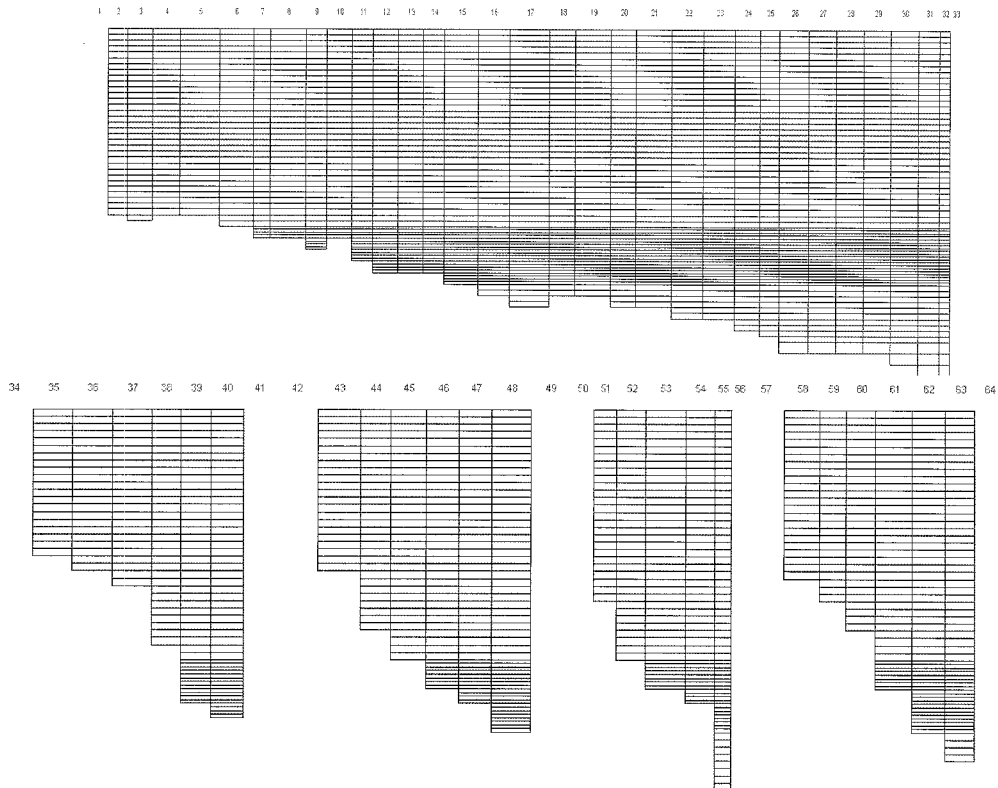


Fig. 3. Computational grid of Daechung Reservoir in vertical view.

로 나타나 모델이 저수지의 물 수지를 잘 반영하는 것으로 확인되었다(Fig. 4).

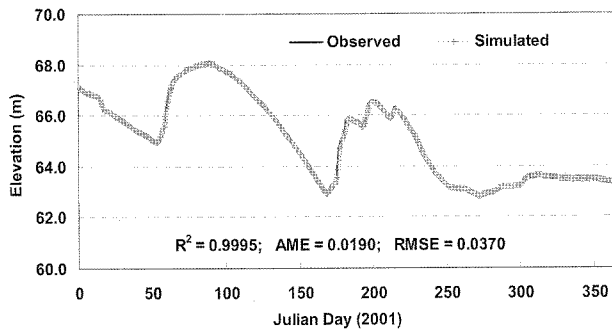


Fig. 4. Comparison of simulated and observed water surface elevations.

2.2.2. 경계조건 자료

강우량, 유입량, 방류량, 저수지 수위 등 대청댐의 수문자료와 댐 운영 자료는 WAMIS 데이터베이스에서 수집하였다. 그러나 저수지에 인접한 소유역으로부터 직접 유입하는 지류 유량 자료는 실측자료가 없어 대청댐의 일별 총유입량을 유역면적 비로 환산하여 산정하였다. Table 2에 2001년과 2004년의 댐 유역 강우량, 유입량과 저수지 수위변화 자료를 나타내었는데, 매우 다른 수문사상을 보여주고 있다. 갈수년인 2001년의 홍수기 강우량은 2004년의 50% 미만 수준이며, 평균유입량은 유출률이 떨어져 25% 정도였다. 그리고 저수지 수위변동 폭도 2001년과 2004년이 각각 5.25 m와 12.36 m로써 큰 차이를 보인다.

유입수의 일별 수온자료는 대부분 실측자료가 없어 기상자료(기온, 이슬점온도)를 이용하여 산정하였으며(정 등, 2006), 2004년 7월부터는 실시간 실측 수온자료를 사용하였다. 저수지 표층수의 수온과 수리현상에 영향을 많이 미치는 기상자료인 기온, 이슬점온도, 온도자료는 대전기상청의 시간별 자료를 사용하였고 풍향과 풍속자료는 대청 자동기상관측소(AWS)의 시간별 자료를 사용하였다.

W2 모델에서 유기물질은 분해성 용존상유기물(L-DOM), 난분해성 용존상유기물(R-DOM), 분해성 입자상유기물(L-POM), 난분해성 입자상유기물(R-POM)로 구분하여 모의한다. 그러나 국내 대부분의 저수지에는 이와 같이 상세한 유기물질 측정자료가 축적되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제한된 저수지 수질측정망 자료를 이용하여 대청호 부영양화 모델의 입력자료를 구축하기 위하여 망간법으로 측정된 화학적산소요구량(COD<sub>Mn</sub>)과 총유기탄소(TOC)비를 이용하였다(최 등, 2000). 월별 측정망 자료인

COD<sub>Mn</sub>으로부터 TOC를 구한 후 유 등(2005)의 실험결과를 근거로 이를 다시 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM으로 구분하였다. 그리고 나머지 경계조건 수질항목인 NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, Algae(chl-a)와 DO 등의 항목은 한국수자원공사와 금강물환경연구소의 정기 및 수시 측정망 실측자료를 이용하였다.

우리나라 호수와 하천의 유기물 조성을 보면, 계절적으로 차이가 있긴 하지만 대부분의 수계에서 입자상보다는 용존상유기물이 많이 존재하며(김 등, 1998), 또한, 용존상유기물의 구성은 생분해성보다는 난분해성의 유기물이 대부분을 차지하는 것이 일반적인 경향이다(Thurman, 1985). TOC는 유기물양을 나타내는 것으로 대청호와 관련하여 측정된 자료가 없는 관계로 인해 COD<sub>Mn</sub>/TOC비를 이용하여 구하였다. COD<sub>Mn</sub>/TOC비는 국내 8개 저수지에서 실측한 자료의 평균 COD<sub>Mn</sub>/TOC 관계(최 등, 2000)를 사용하였다. TOC를 구한 다음 유기물에서 탄소(C)가 차지하는 화학양론 비율인 0.45를 나누어 총유기물질량(TOM)을 구하였다.

$$TOM = \{(COD_{Mn} \div 1.09) \div 0.45\} \quad (1)$$

TOM을 산정한 다음 용존상유기물(DOM)과 입자상유기물(POM)을 구분하였는데, 그 비율은 국내 하천과 호수에서 조사한 실험결과를 참조하였다(김 등, 1998; 유 등, 1999; 전 등, 2005). 이들 실험결과 계절별 차이는 있으나 DOM이 총유기물의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 대청호 부영양화 모의에서는 DOM과 POM의 비율을 각각 75%와 25%로 적용하였다. 미국의 Monroe, Allatoona, West Point 저수지에서도 W2 모형의 입력자료 구성을 위해 DOM과 POM 비율을 각각 75%와 25%로 적용한 결과 만족할 만한 결과를 얻은 바 있다(Cole et al., 1999, 2001). 그러나 보다 정확한 입력자료 구성을 위해서는 향후 이들 항목에 대한 실험적 연구가 필요하다.

DOM과 POM을 구한 다음 미생물에 의해 쉽게 분해되는 유기물과 쉽게 분해되지 않는 난분해성 유기물로 분류하여야 하는데, 이들의 비율은 대청호에서 실험한 실측자료를 근거로 각각 70%와 30%로 구분하였다(유 등, 2003, 2005). 결과적으로 대청호 유입수의 월별 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM의 농도는 다음 식을 사용하여 각각 구하였다.

$$L-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.30 \quad (2)$$

$$R-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.70 \quad (3)$$

Table 2. Hydrological conditions of Daecheong Reservoir in 2001 and 2004

Year	Precipitation (mm)		Average inflow (m <sup>3</sup> /sec)		Water level (EL.m)		
	Annual	Flood season*	Annual	Flood season*	Max	Min	Difference
2001	794.6	500.6	34.6	52.1	68.05	62.80	5.25 m
2004	1,381.3	1071.0	83.3	205.5	76.24	63.88	12.36 m

\*Flood season = June ~ September

$$L\text{-POM} = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.25\} \times 0.30 \quad (4)$$

$$R\text{-POM} = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.25\} \times 0.70 \quad (5)$$

여기서 유입수의 조류(algae) 농도는 Chl.a 농도( $\mu\text{g/L}$ )자료로부터 산정하였으며, 식 (6)의 환산계수를 적용하였다. Algae와 Chl.a의 질량비는 조류의 종류에 따라 다른 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 동일한 조류 종이라도 시간에 따라 다를 수 있다(Cole et al., 2004). 여기서 질량비를 100으로 사용한 것은 유기물과 조류농도, 그리고 용존산소 등의 모의결과에 상대적인 오차로 작용할 수 있으나, 저수지내에서의 조류성장과 수질농도 변화 경향을 적절히 모의할 수 있는지 평가하는 데는 문제가 없다고 판단된다.

$$\frac{\mu\text{g Chl.a}}{1} \times \frac{\text{mg}}{10^3 \mu\text{g}} \times \frac{\text{g}}{10^3 \text{mg}} \times \frac{10^3 \text{l}}{\text{m}^3} \times 100 \frac{\text{g OM}}{\text{g Chl.a}} \quad (6)$$

$$= \frac{0.10 \text{g OM}}{\text{m}^3}$$

### 2.2.3. 수리 및 수질 매개변수

저수지 수리해석과 수온예측에 관계된 매개변수는 운동량 방정식의 평균화 과정에서 발생된 외점성계수 AX, 질량 또는 열보존 방정식의 평균화 과정에서 발생된 외확산계수 DX, 바닥과 수체간의 마찰계수 CHEZY, 바람의 차단 효과를 정량적으로 반영하는 WSC, 물에 의한 광전달 감소 효과를 나타내는 EXH20과 태양복사에너지 중 저수지 수면으로부터 0.6 m 깊이에 흡수되는 비율을 나타내는 매개변수 BETA, 그리고 저수지 바닥층과 수층의 열교환 계수 CBHE 등이다. 이들 매개변수 값은 선행연구(정 등, 2005)에서 보정한 값을 사용하였다(Table 3).

W2 모델에서 조류와 영양염류, 유기물 모의에 관계되는 매개변수는 60여개 이상이지만, 이 중 주요한 매개변수는 Table 4와 같다. 이들 매개변수 중 대부분은 온도에 따른 반응속도 보정을 위한 변수와 화학양론 관련 매개변수이므로 고정값으로 고려할 수 있다. 지금까지 W2 모델의 적용 결과, 대부분의 호수에서 조류 관련 반응속도와 매개변수는 초기값을 사용하여도 매우 만족할 만한 결과를 주었다. 따라서 영양염류와 관련한 주요 보정 매개변수는 퇴적층으로부터 인과 암모니아의 용출율이며, 용존산소 농도는 저니층 산소요구량(SOD)이 된다. 대청호 부영양화 모의에서 고려

한 조류는 여름철에 우점하는 남조류(*Microcystis*)를 대상으로 하였다. 따라서 조류와 관련한 매개변수는 사용자 매뉴얼에서 남조류에 해당하는 값을 참조하여 사용하였으며, 기량이 있는 특성을 고려하여 침강속도는 0.01 m/day를 적용하였다. 수질관련 매개변수의 보정은 2001년을 대상으로 관측값과 모의값이 가장 잘 일치할 때까지 시행착오법으로 이루어졌다. 보정에 사용된 매개변수의 선택범위는 사용자 매뉴얼과 기존의 연구문헌(허, 2001; 김, 1998; Cole et al., 1999, 2001)을 참고하였으며, 보정결과는 Table 4와 같다. 이들 값 중 W2 모델의 초기값과 다른 값을 사용한 매개변수는 굵은 글자체로 표시하였다. 혐기성상태에서 저수지 바닥으로부터 용출하는 인의 양을 나타내는 매개변수인 PO4R은 대청호 퇴적물에 대한 용출실험 결과 값을 참조하였다(한국수자원공사, 2001).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수온 모의결과

수심이 깊은 저수지의 수온성층 구조는 오염물질의 이송과 상하 수직혼합에 영향을 미치며, 궁극적으로 수질반응속도와 조류의 성장과 소멸에도 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 2001년과 2004년의 수심별 수온 모의값과 실측값을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 홍수기 큰 강우가 없었던 갈수년인 2001년에는 4월 이후 저수지 성층화가 발달하여 여름철동안 매우 안정적인 성층구조가 유지되었으며, 9월말부터 대기기온 강하와 함께 수직혼합이 시작되었다. 반면에 홍수기 동안 3번의 집중호우가 발생했던 2004년에는 높은 탁도를 포함한 홍수가 중층 밀도류를 형성하여 수온 성층구조를 교란함으로써 6월초에 수심 5~10 m 구간에 형성되었던 수온약층이 수심 20 m 이하로 하강하는 결과를 가져왔다.

모델은 갈수년과 풍수년에 대해 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였다. 모의값과 실측값의 오차를 평가하기 위한 통계치는 절대평균오차(absolute mean error, AME)와 평균제곱오차의 평방근(root mean square error, RMSE)을 사용하였다(Cole et al., 2004). 2001년 수온예측 오차는 AME 0.435~2.501°C, RMSE 0.436~2.639°C 범위였으며, 2004년은 AME 0.268~2.141°C, RMSE 0.272~3.302°C 범위로 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 집중 홍수 유입으로 인한 급격한 수위상승

Table 3. Model parameters used for hydrodynamic and water temperature calibrations

Parameters	Variable	Unit	Default	Calibrated
Horizontal eddy viscosity	AX	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	1.0	1.0
Horizontal eddy diffusivity	DX	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	1.0	1.0
Chezy bottom friction factor	CHEZY	$\text{m}^{1/2} \text{s}^{-1}$	70	70
Wind-sheltering	WSC	-	0.85	<b>0.1~0.5</b>
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	-	0.45	<b>0.60</b>
Light extinction for pure water	EXH20	$\text{m}^{-1}$	0.9	<b>0.3</b>
Coefficient of bottom heat exchange	CBHE	$\text{W m}^2 \text{s}^{-1}$	0.3	<b>0.5</b>

**Table 4.** Model parameters used for water quality and algae calibrations

Parameters	Variable	Unit	Default	Calibrated
<b>Algae</b>				
Growth rate	AG	day <sup>-1</sup>	2.0	<b>1.0</b>
Mortality rate	AM	day <sup>-1</sup>	0.1	<b>0.08</b>
Excretion rate	AE	day <sup>-1</sup>	0.04	<b>0.02</b>
Respiration rate	AR	day <sup>-1</sup>	0.04	0.04
Settling rate	AS	m day <sup>-1</sup>	0.1	<b>0.01</b>
Phosphorous half-saturation for algal growth	AHSP	gm <sup>-3</sup>	0.003	<b>0.006</b>
Nitrogen half-saturation for algal growth	AHSN	gm <sup>-3</sup>	0.014	0.014
Light saturation intensity	ASAT	W m <sup>-2</sup>	75	<b>55</b>
Fraction of algae to POM	APOM	-	0.8	0.8
Lower temperature for minimum algal rates	AT1	°C	5	<b>10</b>
Lower temperature for maximum algal rates	AT2	°C	25	25
Upper temperature for maximum algal rates	AT3	°C	35	35
Upper temperature for minimum algal rates	AT4	°C	40	40
Lower temperature rate multiplier for minimum algal rates	AK1	-	0.1	0.1
Upper temperature rate multiplier for minimum algal rates	AK2	-	0.99	0.99
Lower temperature rate multiplier for maximum algal rates	AK3	-	0.99	0.99
Upper temperature rate multiplier for maximum algal rates	AK4	-	0.1	0.1
Phosphorous to biomass ratio	BIOP	-	0.005	0.005
Nitrogen to biomass ratio	BION	-	0.08	0.08
Carbon to biomass ratio	BIOC	-	0.45	0.45
Algae to chlorophyll a ratio	ACHLA	-	145.0	<b>100.0</b>
<b>Phosphorous</b>				
Sediment release rate (fraction of SOD)	PO4R	day <sup>-1</sup>	0.001	<b>0.005</b>
<b>Ammonium</b>				
Ammonium decay rate	NH4DR	day <sup>-1</sup>	0.12	0.12
Sediment release rate (fraction of SOD)	NH4R	-	0.001	0.001
Lower temperature for ammonium decay	NH4T1	°C	5	5
Upper temperature for ammonium decay	NH4T2	°C	25	25
Lower temperature rate multiple for ammonium decay	NH4K1	-	0.1	0.1
Upper temperature rate multiple for ammonium decay	NH4K2	-	0.99	0.99
<b>Nitrate</b>				
Nitrate decay rate	NO3DK	day <sup>-1</sup>	0.03	0.03
Lower temperature for nitrate decay	NO3T1	°C	5	5
Upper temperature for nitrate decay	NO3T2	°C	25	25
Lower temperature rate multiple for nitrate decay	NO3K1	-	0.1	0.1
Upper temperature rate multiple for nitrate decay	NO3K2	-	0.99	0.99
<b>Organic matter</b>				
Labile DOM decay rate	LDOMDK	day <sup>-1</sup>	0.10	0.10
Refractory DOM decay rate	RDOMDK	day <sup>-1</sup>	0.001	0.001
Labile to refractory DOM decay rate	LRDDK	day <sup>-1</sup>	0.01	0.01
Labile POM decay rate	LPOMDK	day <sup>-1</sup>	0.08	0.08
POM settling rate	POMS	ms <sup>-1</sup>	0.1	0.1
Lower temperature for organic matter decay	OMT1	°C	5	5
Upper temperature for organic matter decay	OMT2	°C	25	25
Lower temperature rate multiplier for organic matter decay	OMK1	-	0.1	0.1
Upper temperature rate multiplier for organic matter decay	OMK2	-	0.99	0.99
Zero-order sediment oxygen demand	SOD	g m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0.1~5.8	<b>2.0</b>

과 중층 탁수형성은 모델의 수온예측 성능에도 영향을 미쳤으며, 대체로 수온약층의 깊이와 중층 수온의 계산에 오차가 증가하였다.

### 3.2. 영양염류 모의결과

질소와 인은 조류 성장의 필수 영양요소이며 부영양화 예측에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 특히, 성층화된

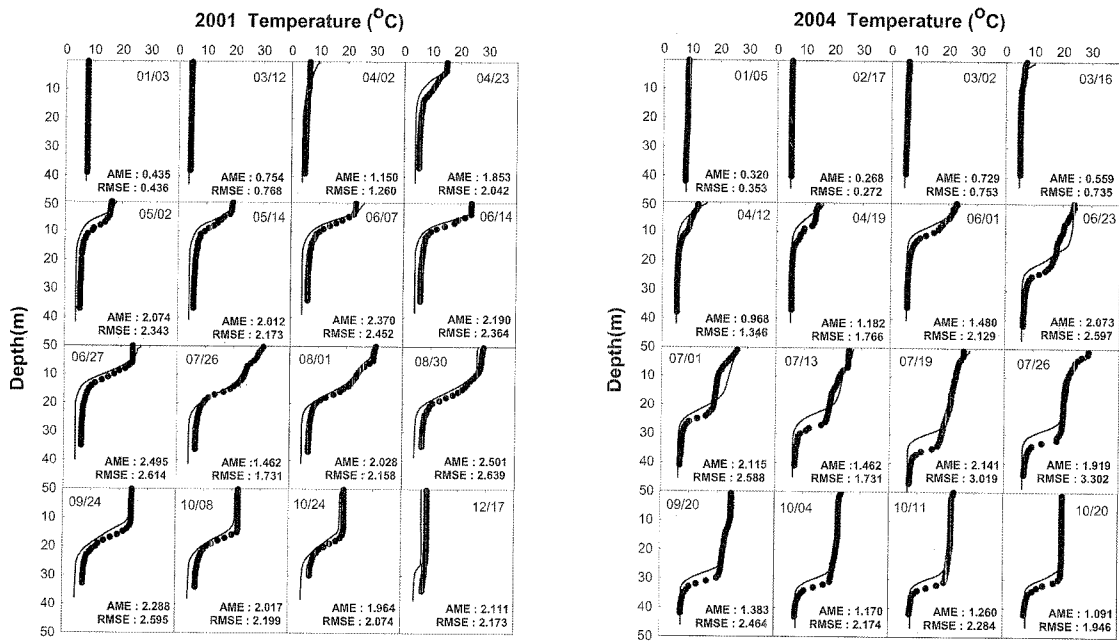


Fig. 5. Profiles of simulated (line) and observed (symbol) water temperature for drought year (2001) and wet year (2004).

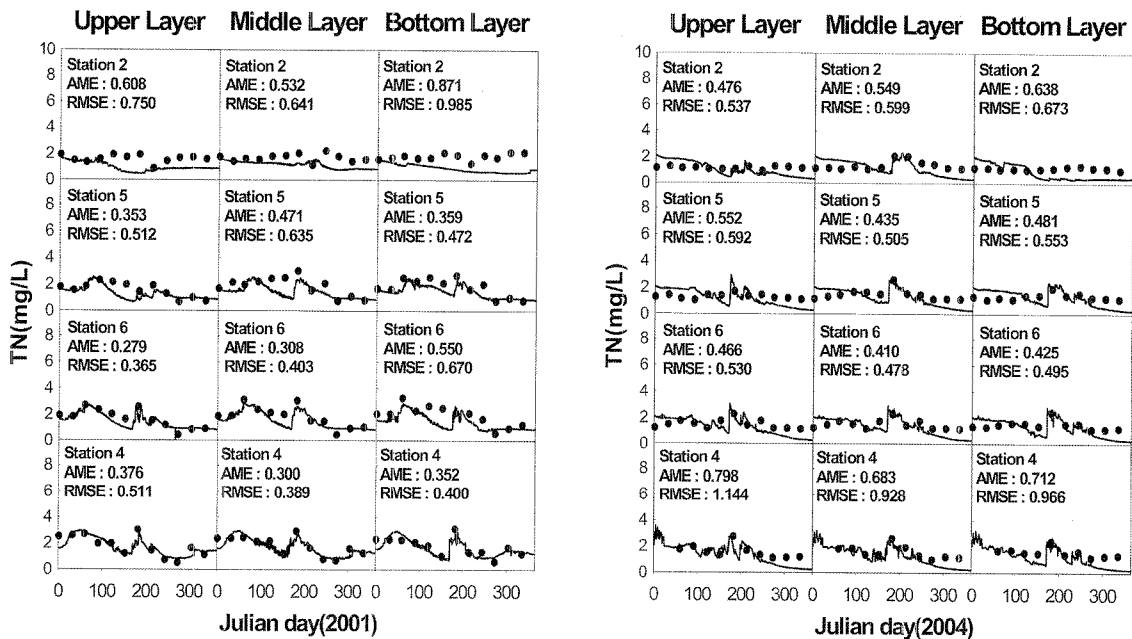


Fig. 6. Time series of simulated (line) and observed (symbol) TN concentrations for drought year (2001) and wet year (2004).

저수지에서 유역으로부터의 외부 부하가 큰 경우 제한영양염인 인의 부하특성과 시공간적인 농도 변화를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 2001년과 2004년의 총질소(TN)와 총인(TP)에 대한 모의값과 실측값의 시계열 비교 결과는 Fig. 6과 같다. 모의결과는 댐 앞 측정점(Sta.2)부터 장계교 측정점(Sta.4)까지 본류의 4개 수질 측정망 지점에 대하여 상층(upper layer), 중층(middle layer), 하층(bottom layer)에서 측정된 실측값과 비교하였다.

2001년 TN의 모의결과는 댐 앞 측정점(Sta.2)을 제외한 장계교(Sta.4), 대정리(Sta.6), 화남대교(Sta.5) 모든 지점에서 실측값과 매우 잘 일치하였다. 댐 앞의 경우는 모의값이

실측값을 과소평가하였는데, 이는 상류에서 유입되어 댐 앞에 이르는 동안 조류에 소모되거나 탈질되는 양이 모델에서 과다하게 반영되었기 때문으로 생각된다. 또한 대기로부터 수면에 부하되는 질소의 플럭스가 모형에서 반영되지 않은 것도 원인으로 사료된다. 2004년에도 모델은 측정점별 TN의 시계열 변화를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 저수지내에서 TN의 농도는 대체로 댐 유입부인 장계교와 대정리 구간에서는 모든 수층에서 계절적인 변동을 보이고 있으나, 댐 앞지점에서는 중층만 홍수기에 상승하고 상층과 하층은 연중 일정한 농도를 보이고 있다. 모의값은 여름철에 탁수가 유입하는 기간동안 중층에서

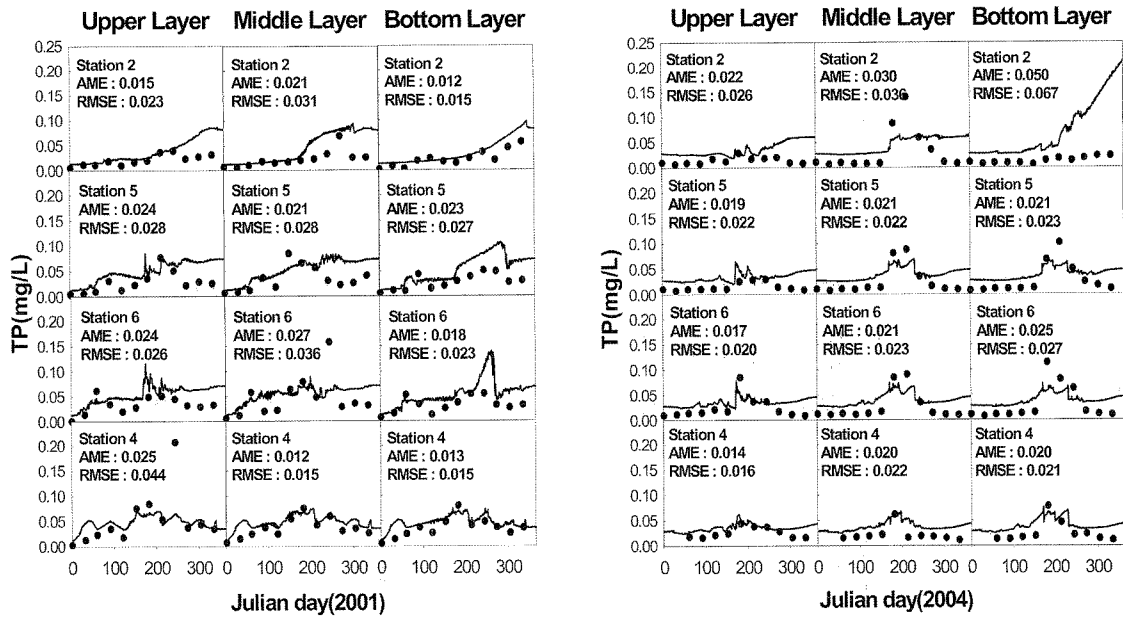


Fig. 7. Time series of simulated (line) and observed (symbol) TP concentrations for drought year (2001) and wet year (2004).

질소 농도가 증가하는 현상을 잘 반영하고 있으나, 홍수기 이후 모든 지점에서 TN의 농도를 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 오차의 원인은 모델에서 반영하지 못하고 있는 입자상 질소성분의 침강속도와 관련이 있을 것으로 보인다.

인은 대청호 부영양화의 제한영양염으로 작용하는 성분이다. Fig. 7은 분류 4개 측정점의 수층별 총인의 모의값과 실측값을 시계열 자료로 비교하여 나타낸 것이다.

모델은 저수지내 각 측정점에서 총인의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하였으며, 총질소와 마찬가지로 홍수 유입시 증충을 따라 나타나는 높은 농도를 잘 모의하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 7월 이후부터 모의값이 관측값을 과대 산정하는 경향을 보였으며, 특히 2004년에는 이러한 현상이 뚜렷하다. 그 이유로는 산소 결핍 상태에서 저니층에서 용출되는 철(Fe) 또는 망간(Mn)과 같은 이온 성분이 인과 흡착하여 침전되는 기작이 모의과정에 적절히 반영되지 않은 것이 원인으로 생각된다. 현재 월간수질측정망 자료에는 이러한 이온성분의 농도가 포함되지 않아, 이러한 기작을 정확히 모의하는데 한계가 있었다.

저수지 바닥 저니층에 퇴적된 유기물은 기온이 상승하는 6월 이후 수심이 얕아 수온이 빨리 상승하는 저수지 유입부로부터 호기성 분해가 시작되는데, 이때 용존산소가 고갈되어 혐기성 상태가 되면 침강되었던 인이 다시 용출하게 된다. 급변 연구에서는 실험실 조건에서 측정된 값을 사용하여 용존산소가 0.5 mg/L 이하가 되면 저니층에서 인이 0.005 mg/L/day 용출되는 것으로 모의하였다. 그러나 이 값은 상온에서 측정된 값이며, 저니층의 인농도와 무관하게 0차 반응으로 계속 용출되는 것으로 모의되었기 때문에 실제 용출량보다 다소 높게 모의된 것으로 보인다. 향후 인에 대한 용출실험을 통해 매개변수를 보다 정확히 반영할 필요가 있다.

### 3.3. 용존산소 모의결과

수층의 용존산소 농도는 생태계의 건강성을 나타내는 지표로서 매우 중요한 수질항목이다. 그러나 대기로부터의 폭기, 유기물 분해, 질산화, 광합성, 퇴적물 산소요구량 등 매우 다양한 기작이 영향을 미치므로 정확한 예측이 매우 어렵다. 특히 성층화된 저수지에서 강우시 유입하는 홍수에 의한 수체의 교란이 큰 경우에는 수심별 용존산소 농도변화를 예측하는데 많은 어려움이 있다.

Fig. 8은 댐 앞 지점에서 용존산소 농도의 수심별 변화를 비교한 것이다. 모델은 비록 제한된 입력자료를 사용하였음에도 불구하고 실측 DO 농도의 수직분포를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 2001년과 2004년 모두 모델은 DO 농도의 계절적 변동과 고갈현상을 잘 반영하고 있다. 특히, 여름철에 수온이 상승하면서 댐 유입부 저니층의 유기물이 산화되어 용존산소가 고갈되어 증충을 따라 발달하는 증충산소 고갈현상을 매우 잘 모의하고 있다.

그러나 모델은 저수지의 용존산소 농도를 대체로 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 오차의 원인은 폭기계수, 유기물 양과 분해속도, 질산화속도, 퇴적물 산소요구량 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하였다고 판단되나, 특히 유입부의 경계조건 DO 농도 자료의 측정빈도가 떨어지는 것이 오차의 큰 원인으로 판단되며, 모델의 보다 정확한 평가를 위해서는 상류 유입부 하천의 연속 수질측정이 필요할 것으로 보인다.

### 3.4. 조류 모의 결과

2001년과 2004년 동안 저수지내 6개 측정점에서의 조류 발생 예측에 대한 평가는 Chl.a 농도의 모의값과 실측값을 사용하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 모델은 대청호 대부분의 수역에서 조류의 발생과 시계열 변화를 비교적 잘 모의하였으나 일부지역에서 봄철에 Chl.a 농도를 다



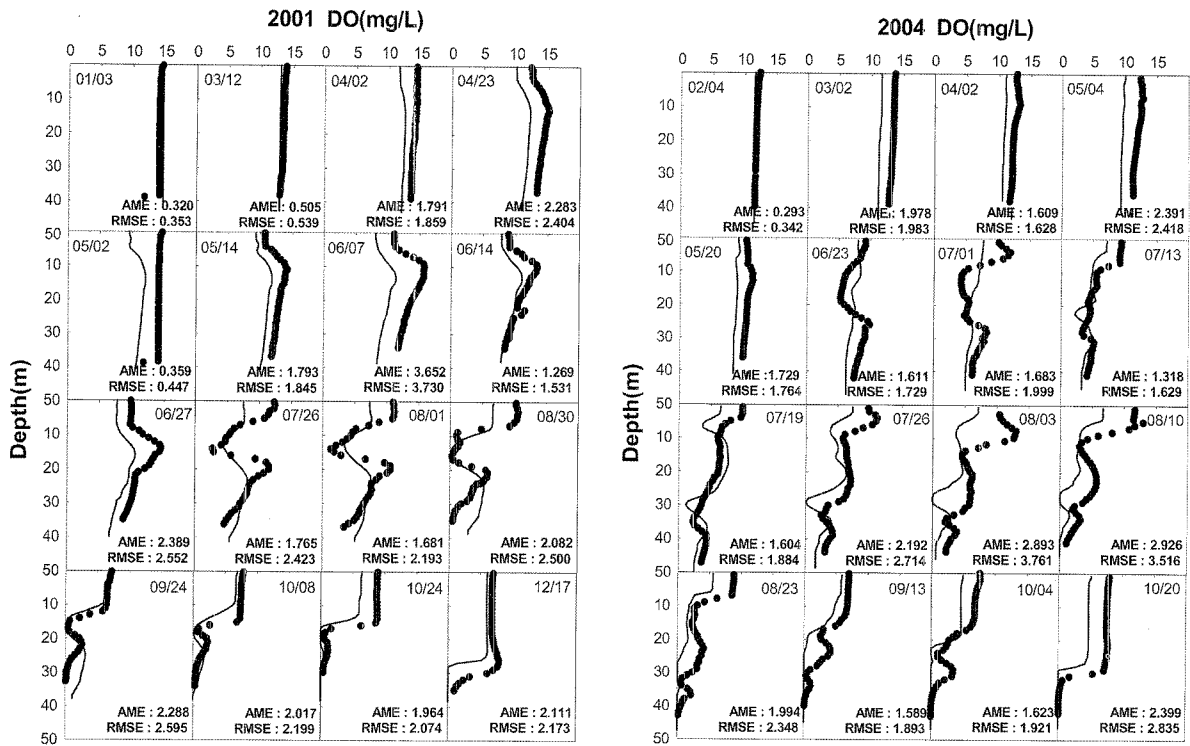


Fig. 8. Profiles of simulated (line) and observed (symbol) DO concentrations at Station 2 for drought year (2001) and wet year (2004).

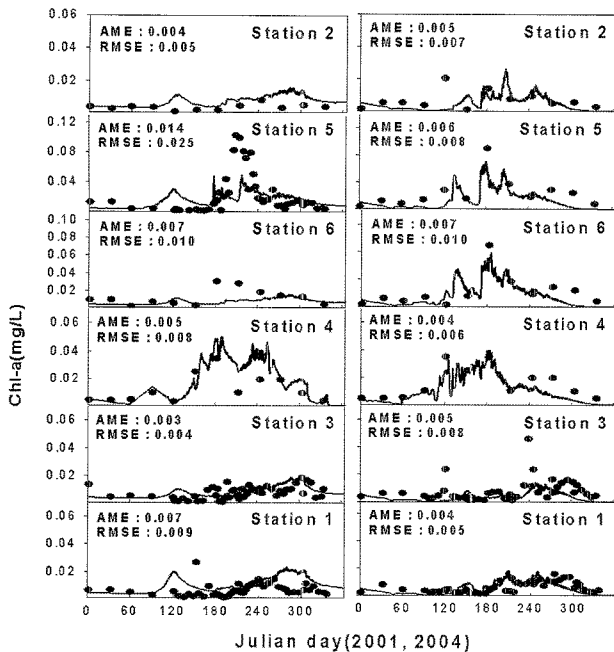


Fig. 9. Comparison of simulated (line) and observed (symbol) Chl-a time series for different stations.

소 과다하게 산정되는 경향을 보였다. 그리고 2001년 회남 지점(Sta.5)에서는 8월초에 chl-a 침투농도가 100 mg/m<sup>3</sup> 이상으로 증가하는 조류 대발생이 있었는데, 모의 결과는 침투농도를 절반 정도로 과소평가하여 국지적인 조류 대발생 현상은 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 오차의 원인은 모형의 지배방정식이 횡방향(y-방향) 평균화된 2차원 흐름으로 가정함으로써 조류의 농도도 저수지 폭

방향으로 평균화하여 동일한 값으로 모의하기 때문에 바람 등에 의해 한쪽방향으로 표류하여 누적(build-up)되는 조류의 특성을 모형에서 반영할 수 없기 때문으로 사료된다.

홍수기간 동안 특별한 강우사상이 없어 저수지의 수온 성층구조가 매우 안정적이었던 보정기간과는 달리, 2004년 홍수기에는 조류가 대발생되지 않았으며 Chl-a 농도도 저수지 전체 수역에서 비교적 낮게 나타났다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 모의값은 대부분의 측정에서 실측값의 추세를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히, 여름철에 댐 유입 부인 장계교와 정체수역인 회남수역에서 발달하는 조류농도의 증가현상이 잘 반영되고 있다.

### 3.5. 2001년 조류대발생 원인분석

2001년 대청호 회남지점(Sta. 5)에서는 6월 중순까지 조류농도에 큰 변동이 없었으나, 7월 중순부터 급격히 증가하여 8월 초순에는 Chl.a 농도가 최고 140 mg/m<sup>3</sup>까지 상승하였다(국립환경연구원, 2001). 그 이후 곧바로 급감하여 9월에는 20 mg/m<sup>3</sup> 이하를 유지하였다. 그러나 소옥천이 합류하는 추소리 수역과 회남수역에서의 조류대발생과는 달리, 댐 앞지점(Sta. 2)과 취수탑이 위치한 추동(Sta. 1)과 문 의수역(Sta. 3)에서의 Chl.a 농도는 연중 20 mg/m<sup>3</sup> 이하의 낮은 농도를 유지하였다. 이러한 결과는 저수지 수리현상과 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 회남수역에서 발생한 조류 대발생 현상의 인과관계를 파악하기 위해 그 기간 동안의 저수지 수리특성과 부영양화 영향인자의 시공간분포특성을 분석하였다.

Fig. 10은 2001년 홍수기 일부 기간 동안 저수지 흐름특

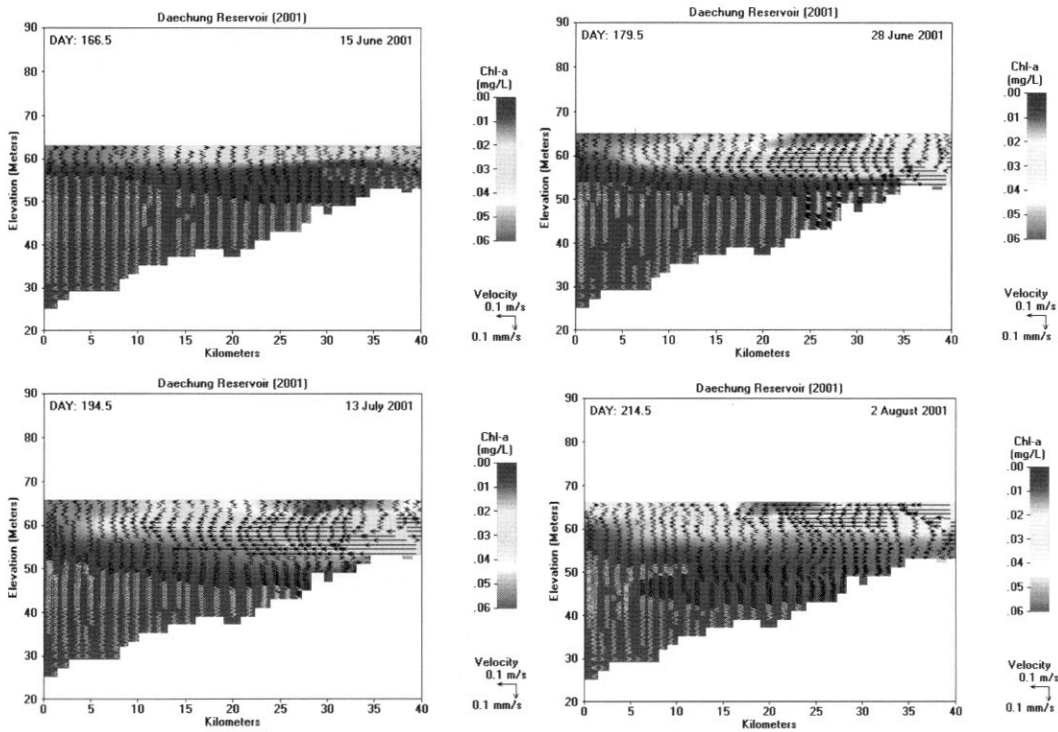


Fig. 10. Hydrodynamic flow regime and its impact on algae transport during the algal bloom in 2001.

성과 조류의 공간적 분포를 보여준다.

이 기간 동안 유입량은 다른 해에 비해 매우 적었으며 최고 유입량은 6월 25일에 382 m<sup>3</sup>/sec이었다. 유역 유출량이 저수지로 유입하기 직전인 6월 15일에 이미 소옥천이 유입하는 추소리 수역부터 회남수역에 이르는 구간에서 Chl.a 농도가 30 mg/m<sup>3</sup> 이상 증가하였으며, 6월 말에는 50 mg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 농도가 발생하였다. 그리고 최고 유입량이 발생한 3일 후인 6월 28일에는 이 구간에서 중층 밀도류가 형성되었으며, 표층의 조류는 매우 느린 속도로 상류방향으로 이동하는 경향을 보였다. 그러나 7월 중순 이후 표층에 분포한 조류는 바람의 영향 때문에 다시 회남수역 방향으로 이동하여 정체되었으며 조류 대발생을 유발하였다. 2001년의 경우 강우가 적었기 때문에 6~8월 사이에 이런 수리적 특성을 나타낸 것으로 보여진다. 즉, 유입량이 적어 조류를 본류 수역으로 이동시키지 못하였으며, 추소리에서 발생한 조류가 정체수역인 회남수역으로 이동하여 체류시간이 길어지면서 조류가 대발생한 것으로 보인다.

Fig. 11은 회남수역에 조류가 대발생한 8월 2일의 저수지 내 Chl.a 농도의 공간분포와 유입량, 그리고 조류 성장에 영향을 미치는 인자들을 동시에 나타낸 그래프이다. 조류 성장에 영향을 미치는 제한인자로는 수온, 부유물질농도(광저해효과), 총질소와 총인농도를 고려하였다. 이 기간 동안 저수지 표층 수온은 28~30°C로 매우 높았으며, 유입 탁수가 중층밀도류를 형성하면서 성층구조가 다시 안정화되는 단계였다. 7월 말에 있었던 강우로 인해 중층은 약한 탁수층이 형성되었으며, 총인의 농도는 본류 홍수와 소옥천 유입의 영향으로 대정리에서 회남수역 구간에 걸쳐 가장 높

게 나타났다. 이러한 환경은 정체수역인 회남수역에서 조류가 대발생하여 Chl.a 농도가 가장 높게 나타나는 결과를 가져 온 것으로 판단된다. 특히 소옥천에서 유입하는 인은 대부분 조류 성장에 직접 이용되는 용존인 형태이며 유광층으로 공급되기 때문에 대청호 본류의 조류 발생에 직접적인 원인으로 작용하는 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 제한된 수질측정방자료를 사용하여 대청호의 부영양화 현상을 CE-QUAL-W2 모델로 해석할 수 있는 방법론을 제시하였다. 제시된 연구방법의 적합성을 검증하기 위해 서로 다른 수문사상을 대상으로 모델을 보정하고 검증하였다. 모델의 보정과 검증은 홍수기 동안 큰 강우사상이 없어 조류 발생이 가장 극심했던 2001년과 강우량이 평년수준이었던 2004년을 대상으로 각각 수행하였다. 아울러, 개발된 부영양화 해석 모델을 적용하여 2001년 조류 대발생 당시의 상황을 재현하였고, 저수지내 수리동력학적 거동과 오염물질 부하 특성이 조류발생에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 최 등(2000)이 제시한 COD<sub>Mn</sub>/TOC 비율과 유 등(2005)이 제시한 유기물 구성성분 분율을 대청호 부영양화 해석을 위한 CE-QUAL-W2 모델의 유기물 입력자료 산정에 적용한 결과 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다.
- 2) 구축된 W2 부영양화 모델은 2001년(갈수년)과 2004년(평수년) 각기 다른 수문사상에 대하여 저수지 수온과 영양염류물질의 농도를 비교적 잘 모의하였으며, 조류의

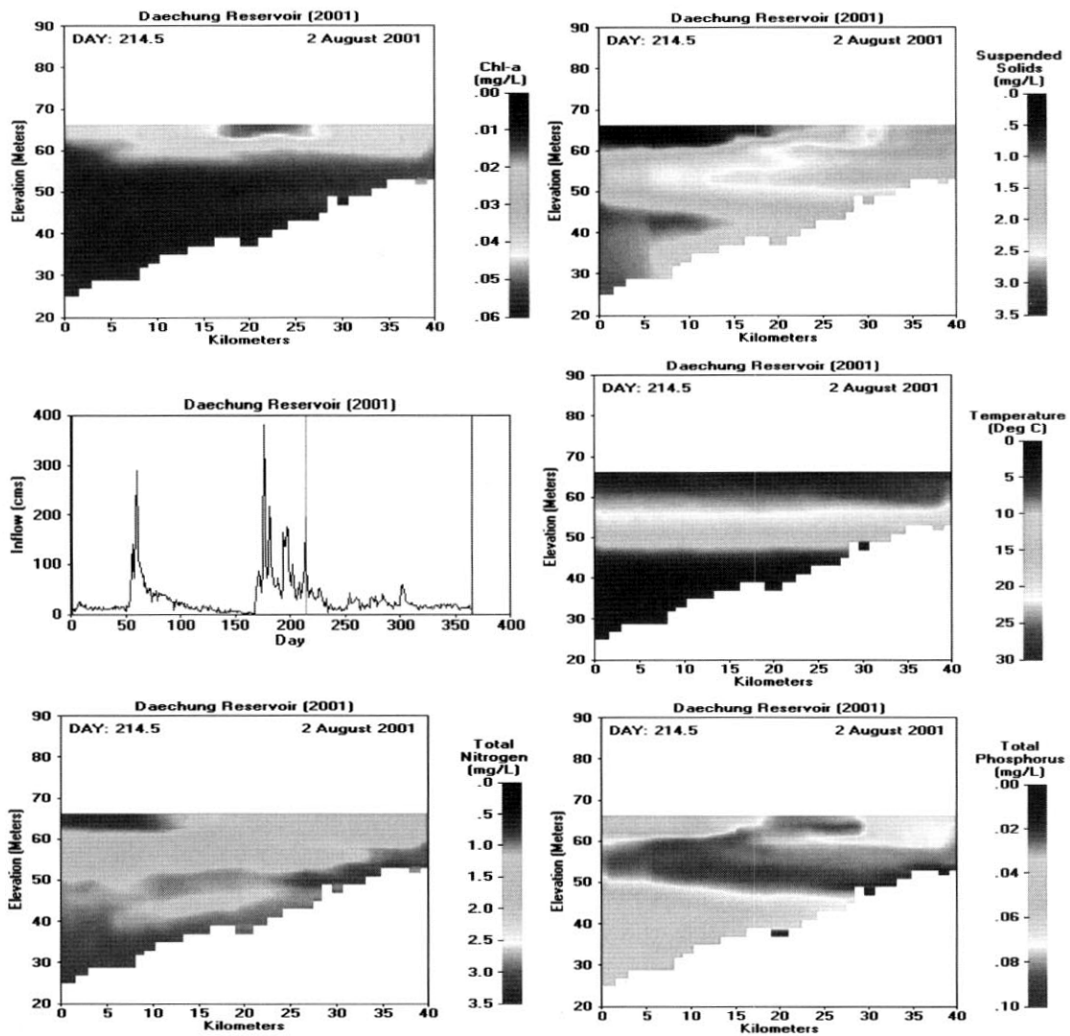


Fig. 11. Snapshots showing spatial distribution of Chl-a and influencing factors on August 2, 2001.

시공간적 분포 변화도 잘 반영하였다.

- 3) 그러나 2001년에 회남수역에서 국부적으로 발생한 조류 대발생은 정량적인 면에서 다소 과소평가하는 것으로 나타났으며, 그 원인은 모델의 지배방정식이 횡방향 평균 유속과 농도를 사용하기 때문으로 사료된다. 또한, 모델은 홍수기 이후 용존성 인의 농도를 대체로 과대 평가하였는데, 그 이유는 이온성 물질 등에 의한 인의 흡착과 침전작용이 적절히 모의되지 않았기 때문으로 사료된다.
- 4) 2001년 조류 대발생을 모의한 결과, 대청호 유입부에서 조류발생이 심각했던 원인은 소옥천에서 유입하는 고농도의 용존성 인( $PO_4\text{-P}$ )이 표층으로 유입되었기 때문인 것으로 나타났다. 반면에 저니층 용존산소 고갈에 따라 용출되는 인은 비록 그 양은 많은 편이지만 수온 성층장벽 때문에 수표면으로 공급되는 양이 제한을 받아 조류 성장에 직접적인 영향으로 작용하지 않는 것으로 나타났다.
- 5) 2004년의 풍수년 수문사상에 대한 대청호 부영양화 모의 결과, 홍수시 유입하는 탁수는 대청호 유입부에 형성된 저니층의 무산소층을 제거하는 역할을 하며, 용출한

용존성 인을 희석시키는 것으로 나타났다. 또한 큰 홍수시 유입하는 탁수는 장계교와 회남대교 구간에 발생하는 조류의 성장을 제어하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 연구방법론과 결과는 그 동안 수질 측정망 자료와 부영양화 수질모의 항목간의 차이 때문에 활용도가 미흡했던 CE-QUAL-W2 모델의 적용성을 제고하는데 크게 기여할 것으로 판단된다. 특히, 이 모델은 우리나라 저수지 지형과 수위 운영특성, 그리고 수문특성에 매우 적합한 모델이므로 수질오염총량관리 평가 모델로서 활용가능성이 매우 크다. 향후 모델의 예측 신뢰도를 한 차원 높이기 위해서는 체계적인 측정망 자료의 수집이 필요하며, 다양한 저수지에서 검증되어야 할 것이다.

## 사 사

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음. 본 연구를 위해 귀중한 실험 자료를 제공해 주신 한국수자원공사와 국립환경과학원 금강물환경연구소에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 국립환경연구원, 금강수계 상수원 수질조사 (2001).
- 국립환경연구원, 금강수계 상수원 수질조사 (2003).
- 권효성, 유역특성에 따른 유기물오염도 평가, 금오공과대학교 대학원 석사학위 논문 (2002).
- 김범철, 최광순, 김철구, 이윤희, 김동섭, 박제철, 소양호의 DOC와 POC분포, *Korean J. Limnol.*, **31**(1), pp. 17-24 (1998).
- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수, 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호, *Korean J. Limnol.*, **34**(1), pp. 30-44 (2001).
- 김윤희, 홍수시 소양호에서 중층탁수의 이동 및 영향에 관한 연구, 강원대학교 석사학위논문 (1998).
- 김종모, 수변구역이 대청호 수질에 미치는 영향 연구, 청주대학교 대학원 석사학위 논문 (2005).
- 농업기반공사, 저수지와 담수호의 수질개선 방안(최종) (2002).
- 박제철, 부영양호 퇴적층으로부터 용존유기물의 용출특성, *Korean J. Limnol.*, **36**(3), pp. 304-310 (2003).
- 박호표, 이익수, 정세용, 조용진, 정삼철, 박일선, 박창재, 김혜성, 수자원의 관광자원적 활용과 효율적 관리방안, 충북경제 *Forum* 정책연구(2003-4호) (2003).
- 서동일, 이정우, WASP7.0을 위한 3차원 수리 모델, EFDC-Hydro(Environmental Fluid Dynamics Code)의 활용에 관한 연구, *대한환경공학회 2005 춘계학술발표회논문집*, pp. 431-436 (2005).
- 안기선, 총량규제에 따른 주암호에 장래 수질 예측, 서남대학교 대학원 석사학위 논문 (2005).
- 유순주, 하성룡, 황종연, 김창수, 금강 수계에서 소독부산물 생성에 미치는 유기물 특성, *한국물환경학회지*, **19**(6), pp. 707-713 (2003).
- 유순주, 김창수, 하성룡, 황종연, 채미희, 금강 수계 자연유기물 특성 분석, *한국물환경학회지*, **21**(2), pp. 125-131 (2005).
- 유순주, 황종연, 윤영삼, 천세억, 한의정, *하천·호소의 유기물 지표 평가, 환경영향평가*, **8**(1), pp. 81-92 (1999).
- 이석호, WASP5를 이용한 담수호의 수질거동 특성 연구, 건국대학교 대학원 석사학위논문 (2002).
- 전성식, 오인영, 강태구, 서정미, 한인섭, 강우에 따른 팔당호 수질변화 특성에 관한 연구, *대한환경공학회 2005 춘계학술발표회논문집*, pp. 437-444 (2005).
- 정세용, 댐 저수지의 레크레이션 기능 재개발, *한국수자원학회지*, **36**(4), pp. 54-61 (2003).
- 정세용, 오정국, 고익환, CE-QUAL-W2 모델을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의, *한국수자원학회논문집*, **38**(8), pp. 655-664 (2005).
- 정세용, 오정국, 대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모델 개발, *한국수자원학회 논문집*, **39**(1), pp. 79-88 (2006).
- 조해원, CAP 수질모델의 매개변수 산정 및 보정, 충남대학교 대학원 석사학위 논문 (2003).
- 천세억, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재, 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계, *한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 342-348 (2006).
- 최광순, 김범철, 김형봉, 사승환, 소양호에서 유기탄소와 COD<sub>Mn</sub>과의 상관관계, *Korean J. Limnol.*, **33**(4), pp. 328-335 (2000).
- 한국수자원공사, *대청댐 퇴사량 측정 보고서* (1991).
- 한국수자원공사, *댐 저수지 탁류 및 오염물질이송·확산 모의기술개발* (2000).
- 한국수자원공사, *댐저수지 퇴적오염물질 분해 및 용출에 관한 연구(1차년도)* (2001).
- 한국수자원공사, *대청댐 일원 수문기초조사 보고서* (2004).
- 한국수자원공사, *다목적댐 운영 실무편람* (2005).
- 허강희, 수질 모형을 이용한 삼교천 유역의 장래수질 예측 및 개선방안, 공주대학교 대학원 석사학위 논문 (2000).
- 허경미, 대형 인공호의 수리수문학적 변화에 대한 호수수질 모델 비교 연구, 이화여자대학교 과학기술대학원 석사학위 논문 (2001).
- Ambrose, R. B. Jr., Wool, T. A. and Martin, J. L., WASP5. A Hydrodynamic and Water Quality Model, User's Manual and Programmer's Guide(Parts I), U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA (1993).
- Cerco, C. F. and Cole, T. M., Three-dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay, *ASCE J. Environ. Engr. Div.*, **119**(6), pp. 1006-1025 (1993).
- Chapra, S. C., *Surface Water-Quality Modeling* (1997).
- Cole, T. M. and Tillman, D. H., *Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2*, January 1999, Miscellaneous Paper EL-99-1 (1999).
- Cole, T. M. and Tillman, D. H., *Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs Using CE-QUAL-W2*, U.S. Army Corps of Engineers (2001).
- Cole, T. M. and Wells, S. A., CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2 User Manual, U.S. Army Corps of Engineers (2004).
- Cole, T. M., and Buchak, E. M., 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 (1995).
- Thurman, E. M., *Organic Geochemistry of Natural Water*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1985).