

# 대청호에서 CE-QUAL-W2 부영양화 모델의 검증

## Verification of CE-QUAL-W2 Eutrophication Model in Daecheong Reservoir

차윤철\*, 정세웅\*\*, 이흥수\*\*\*, 오동근\*\*\*\*, 고익환\*\*\*\*\*

Yoon Cheol Cha, Se Woong Chung, Heung Soo Lee, Dong Geun Oh, Ick Hwan Ko

### 요 지

효과적인 저수지 수질관리를 위해서는 신뢰도 높은 수리 및 수질모델이 필요하며, 이러한 모델의 성능은 다양한 수문사상에 대하여 적용함으로써 검증할 수 있다. CE-QUAL-W2 모델(이하 W2)은 횡방향 평균 2차원 수리-수질 해석 모델로써 수체의 길이에 비해 폭이 상대적으로 좁고 수심이 깊은 우리나라 대부분의 저수지 지형에 적합한 모델이다. 본 연구의 목적은 기존 연구에서 가뭄년인 2001년과 평수년인 2004년 수문사상에 대하여 보정한 대청호 W2 부영양화모델을 최근 평수년인 2006년과 가뭄년인 2008년을 대상으로 검증하는데 있다. 모델의 검증은 물수지, 수온성층 구조 변화, 부영양화 해석에 중점을 두었으며, 실측자료와 모의결과의 적합성 비교-평가는 결정계수값( $R^2$ ), AME(absolute mean error)와 RMSE(root mean square error)를 이용하였다. 저수지 물수지의 적합성을 검증하기 위하여 모의수위와 실측수위를 비교한 결과,  $R^2$ 값이 2006년과 2008년에 각각 0.9945, 0.9972로 나타나 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다. 계절별 성층구조 변화 모의 성능을 검증하기 위해 회남수역과 댐 앞 지점에서 수심별 수온의 모의값과 실측값을 비교하였다. 2006년의 경우 모델은 홍수기 동안 안정적으로 수온 성층현상을 모의하였으나, 댐 앞 지점에서 수온 약층이 형성된 구간에서 실측값과 다소 편차를 보였으며, 오차크기는 AME가 0.561~2.088℃, RMSE는 0.797~2.762℃ 범위였다. 반면, 가뭄년인 2008년에는 전 기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였으며, 오차크기는 AME 0.413~1.162℃, RMSE 0.546~1.415℃ 범위였다. 조류의 생산성이 높은 표층에서 T-N, T-P 및 Chl-a 농도 모의결과를 장계교, 대정리, 회남대교, 댐 앞, 추동취수탑 및 문의취수탑에서 시계열로 실측값과 비교 검증한 결과, T-N과 T-P는 2006년과 2008년 모두 모든 비교 지점에서 모의값과 실측값의 시계열 변동이 매우 잘 일치하였으며, 홍수기 이외 기간에는 큰 변동 폭을 보이지 않았다. 그러나 기존 연구에서 확인된 바와 같이 7월 이후부터 T-P 모의값이 실측값을 과대 산정하는 경향을 보였는데, 그 원인은 산소 결핍상태에서 저니층에서 용출되는 철(Fe) 또는 망간(Mn)과 같은 이온 성분이 인과 흡착하여 침전되는 기작이 모의과정에 적절히 반영되지 않은 것이 원인으로 판단된다. 조류(Chl-a)농도의 경우, 2006년과 2008년에 모든 지점에서 모델은 조류의 발생과 시계열 변화를 적절히 모의하였으나, 2008년 1월부터 8월까지 댐 앞과 추동 및 문의취수탑에서는 모의값이 실측값을 과대 산정하는 경향을 보였다. 이는 해마다 그리고 계절별로 우점하는 조류 종이 상이한 반면, 모델에서는 이에 대한 매개변수를 적절히 고려하지 못한 것이 원인으로 판단된다.

**핵심용어 :** 부영양화, 저수지 수질관리, 모델 검증, 대청호, CE-QUAL-W2

- 
- \* 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : [mednis@naver.com](mailto:mednis@naver.com)
  - \*\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : [schung@chungbuk.ac.kr](mailto:schung@chungbuk.ac.kr)
  - \*\*\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : [hslee@chungbuk.ac.kr](mailto:hslee@chungbuk.ac.kr)
  - \*\*\*\* 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : [orifyo@hanmail.net](mailto:orifyo@hanmail.net)
  - \*\*\*\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구위원·E-mail : [ihko@kwater.or.kr](mailto:ihko@kwater.or.kr)

## 1. 서론

대청호는 폭이 좁고 길며 나뭇가지 모양의 저수지 형상이 두드러지는 인공호이다. 하천과 달리 저수지는 체류시간이 길어 영양염류, 수온, 일사량 등의 적절한 환경조건이 형성되면 조류 발생이 급격히 증가하게 된다(Wetzel, 1983). 조류는 30일 이상 체류하는 호소의 정체 수역에서 주로 발생하며, 수계로 유입되는 질산염이나 인산염의 과잉양 상태와 25~30℃의 높은 수온이 유지 될 때 활발한 성장속도로 광범위한 녹조를 형성하게 된다. 대청호의 체계적인 수질 관리를 위하여 수질 모델링 기법이 이용될 수 있으며, 효율적인 관리를 위해서는 모델의 높은 신뢰도가 요구된다. 본 연구에서 사용된 W2모델은 미공병단에서 개발된 횡방향 평균 2차원 수리·수질 해석 수치모델로 대청호와 같이 폭이 좁고 긴 우리나라 저수지에 적합하다.

본 연구의 목적은 기존 연구에서 가뭄년인 2001년과 평수년인 2004년 수문사상에 대하여 보정한 대청호 W2 부영양화모델을 최근 평수년인 2006년과 가뭄년인 2008년을 대상으로 검증하는데 있다. 모델의 검증은 물수지, 수온성층 구조 변화, 부영양화 해석에 중점을 두었으며, 실측자료와 모의결과의 적합성의 비교 및 평균가는  $R^2$ , AME와 RMSE를 이용하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구대상

대청댐은 대전과 충청지역 및 전북지역의 용수공급, 홍수조절 및 전력생산 등을 위해 설치된 댐으로 1975년에 착공하여 1980년 12월에 준공되었다. 댐 유역은 동경 126° 41'~128° 45', 북위 35° 35'~37° 05'에 위치하고 있으며, 유역면적은 4,134 km<sup>2</sup>이다. 저수지 방류량 조절을 위한 수리시설에는 추동과 문의에 위치한 2개의 취수탑(EL. 57.0 m)과 댐 발전방류구(EL. 52.0 m) 및 6개의 수문을 가진 여수로가 (EL. 64.5 m)가 있다. Fig. 1에 한국수자원공사의 저수지내 수질측정지점인 장계교(Sta. 4), 대정리(Sta. 6), 회남대교(Sta. 5), 댐 앞(Sta. 2)과 대전과 청주에 상수원수를 공급하는 추동취수탑(Sta. 1)과 문의취수탑(Sta. 3)을 나타내었다.

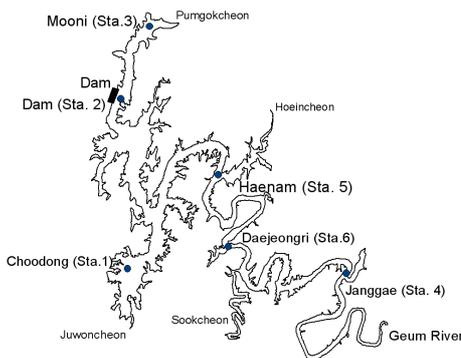


Fig. 1. Location of water quality monitoring stations

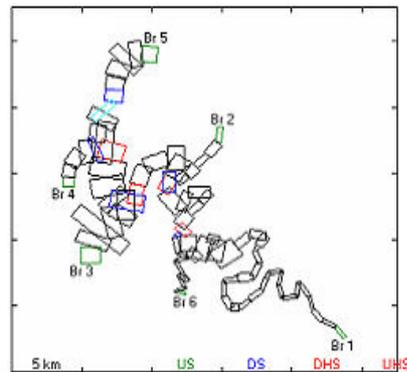


Fig. 2. Grid system created for Daechung reservoir based on bathymetry data

### 2.2 입력자료의 구성

W2모델의 주요 입력 자료는 저수지 상류 및 하류의 유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 저수지 지형 및 단면자료 및 수리수질해석을 위한 매개변수 등이 있다. 대청호의 유한차분 격자 구성은 Fig. 2와

같이 금강 본류와 주요 지류하천을 6개의 Branch로 구분하고, 흐름방향으로는 가덕교 지점에서 댐측까지 0.5 ~ 1.9 km간격으로 98개의 요소(segment)로 구분 하였으며, 수심방향으로는 0.5 ~ 1.0 m간격으로 69개의 수층(Layer)으로 구성하였다. 저수지 지형자료는 대청댐 퇴사량측정보고서(한국수자원공사, 2006)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 실측수위와 모형에서 계산한 저수지 수위를 비교함으로써 신뢰도를 검증 하였다. 모의값과 실측값의 비교 결과는 Fig. 3과 같이 나타났으며, 모델은 저수지의 물 수지에 대해 높은 신뢰도를 나타내었다.

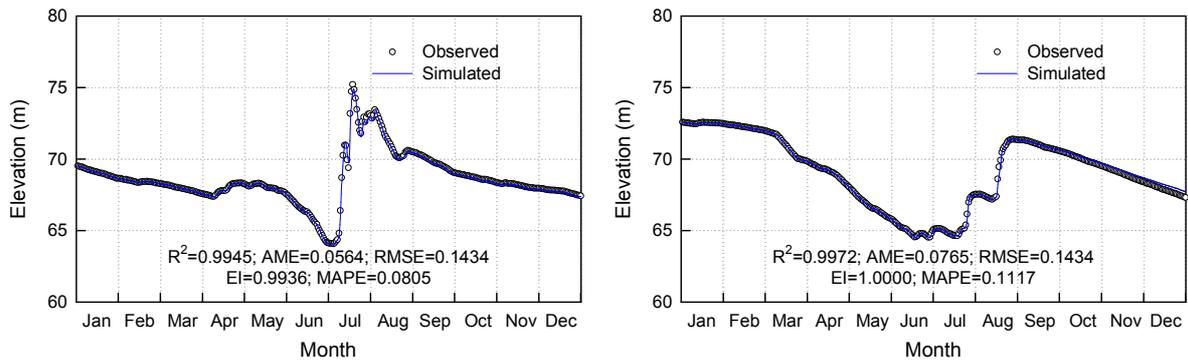


Fig. 3. Comparison of observed values and simulated values for water surface level for 2006(left) and 2008(right)

입력자료 구성을 위한 강우량, 유입량, 방류량, 저수지 수위 등과 같은 수문자료와 댐 운영 자료는 WAMIS 데이터베이스에서 수집하였다. 지류의 유입 유량자료는 실측자료를 구할 수 없어 대청댐의 총 유입량을 유역면적비로 환산하여 산정하였다. 또한 풍향과 풍속은 문의 면사무소에 설치한 자동기상관측소(AWS)자료를 사용하였으며, 그 밖의 기상자료는 대청호에서 서쪽방향으로 8 km 떨어진 곳에 위치한 대전 기상대의 관측 자료를 사용하였다.

모델의 매개변수로는 운동량 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와점성계수 AX, 질량 또는 열 보존 방정식의 평균화 과정에서 발생된 와확산계수 DX, 바닥과 수체간의 마찰계수, 바람의 차단효과를 정량적으로 반영하는 WSC, 물에 의한 광전달 감쇠효과를 나타내는 EXH20과 태양복사에너지 중 저수지 수면으로부터 0.6 m 깊이에 흡수되는 비율을 나타내는 BETA, 저수지 바닥층과 수층의 열 교환 계수 CBHE등이 있으며, 이들 매개변수 값은 선행연구(정세웅 등, 2005)에서 보정한 값을 이용하였다. 또한 W2 모델에서 조류와 영양염류, 유기물 모의에 관계되는 매개변수 중 대부분이 온도에 따른 반응속도 보정을 위한 변수와 화학양론 관련 매개변수이므로 고정값으로 고려하였다. 지금까지 W2모델의 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 저니층산소요구량(SOD)이 되며, 부영양화 모의에서 고려한 조류는 여름철에 우점하는 남조류(*Microcystis*)를 대상으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수온성층 구조 변화

회남수역과 댐 앞 지점에서 실측 및 모의 수온의 성층구조 변화는 2006년의 경우, 수온예측 오차는 AME 0.561 ~ 2.088°C, RMSE 0.797 ~ 2.762°C의 범위로 나타났고, 2008년에는 AME 0.413 ~ 1.162°C, RMSE 0.546 ~ 1.415°C의 범위로 나타났다(Fig. 4). 2006년 수온모의 결과 모델은 홍수기 기간 동안 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였으나, 댐 앞 지점에서 수온 약층이 형성된 구간에서 실측값과 다소 큰 편차를 보였다. 반면, 가뭄년인 2008년에는 전 기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였다.

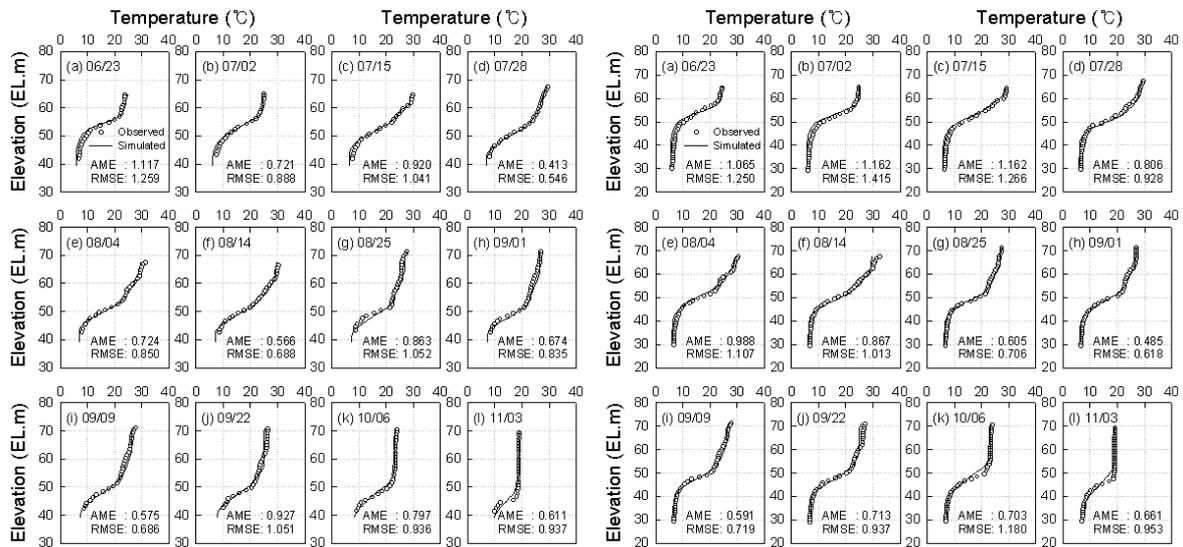


Fig. 4. Comparison of simulated and observed profiles of water temperature at the Hoenam(left) and Dam(right) for 2008

### 3.2 영양염류(T-N, T-P) 검증

2006년과 2008년 모든 지점(장계교, 대정리, 회남대교, 댐 앞, 추동수역, 문의수역)의 표층에서 T-N과 T-P 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 2006년과 2008년에 모델은 T-N 농도의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하였다. 또한, 2006년과 2008년에 모델은 저수지내 각 측정지점에서 T-P 농도의 동적인 변화 추세를 비교적 잘 반영하였고, T-N 농도와 마찬가지로 홍수 유입에 따른 지점별 농도변화를 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 T-P 농도의 경우 2006년 7월 이후부터 모의값이 실측값을 과대 산정하는 경향을 보였다. 이러한 오차는 산소 결핍상태에서 저니층에서 용출되는 철(Fe)또는 망간(Mn)등의 이온 성분이 인과 흡착하여 침전되는 기작이 모의과정에 적절히 반영 되지 않은 것이 원인으로 판단된다.

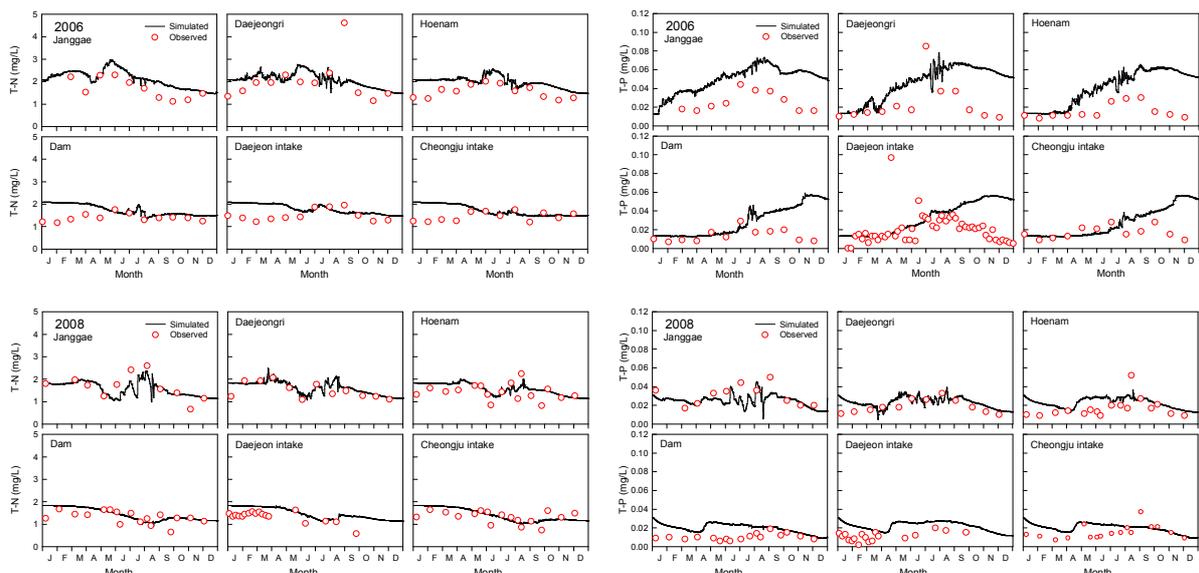


Fig. 5. Comparison of simulated and observed time series of T-N(left) and T-P(right) concentration for 2006 and 2008

### 3.3 조류(Chl-a) 검증

2006년과 2008년 모든 지점의 표층에서 Chl-a 농도에 대한 모의값과 실측값의 시계열 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 모델은 대청호 대부분의 수역에서 Chl-a 농도의 시계열 변화를 비교적 잘 모의하였으나, 2006년 문의수역에서 침두 Chl-a 농도를 과소평가하였다. 이러한 오차는 해마다 그리고 계절별로 우점하는 조류 종이 상이한 반면, 모델에서는 이에 대한 매개변수를 적절히 고려하지 못하는 것과 모델의 횡방향 농도 평균화 특성상 국지적인 조류 대발생을 제대로 반영하지 못하는 것 때문으로 판단된다.

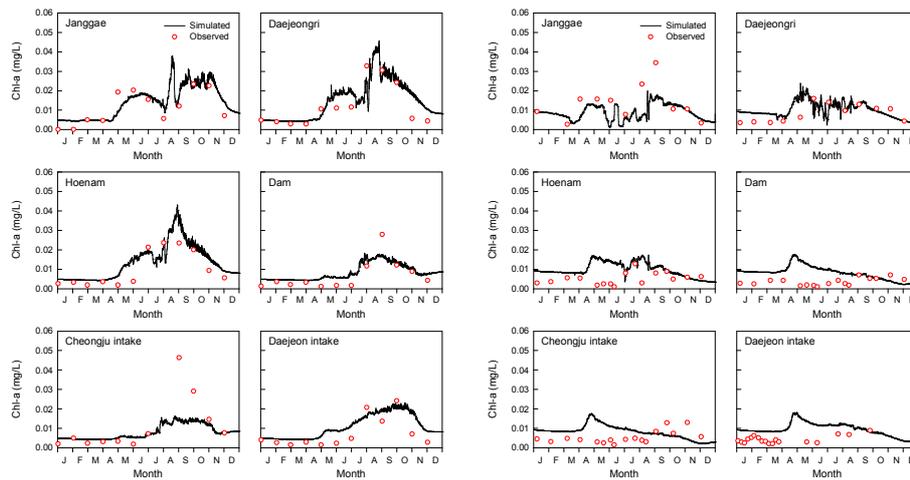


Fig. 6. Comparison of simulated and observed time series of Chl-a concentration for 2006(left) and 2008(right)

### 4. 결론

계절별 성층구조 변화를 회남수역과 댐 앞 지점에서 모의한 결과, 2006년의 경우 모델은 홍수기 동안 안정적으로 수온 성층현상을 모의하였으나, 댐 앞 지점에서 수온 약층이 형성된 구간에서 실측값과 다소 편차를 보였다. 반면, 2008년에는 전 기간에 걸쳐 모두 안정적으로 저수지 수온 성층현상을 모의하였다.

저수지 표층에서 T-N, T-P 및 Chl-a 농도 모의결과를 모든 지점에서 실측값과 시계열로 비교한 결과, T-N과 T-P는 2006년과 2008년에 모든 비교 지점에서 모의값과 실측값의 시계열 변동이 매우 잘 일치하였으며, 홍수기 이외 기간에는 큰 변동 폭을 보이지 않았다. Chl-a농도의 경우, 2006년과 2008년에 모든 지점에서 모델은 조류의 발생과 시계열 변화를 적절히 모의하였으나, 2008년 1월부터 8월까지 댐 앞과 추동 및 문의취수탑에서는 모의값이 실측값을 과대 산정하는 경향을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-6-3)의 재정지원에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 정세용, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의, *한국수자원 학회논문집*, **38**(8), pp. 655-664.
2. 한국수자원공사(2006). *대청댐 퇴사량 측정 보고서*.
3. Wetzel, R. G.(1983). *Limnology*, Saunders College Publishing, Philadelphia, PA.