

연구논문

대청호 저수지 수질해석을 해석을 위한 CE-QUAL-W2 모형의 검보정

하성룡 · 이재일

충북대학교 도시공학과

(2008년 9월 13일 접수, 2008년 11월 29일 승인)

Calibration and Verification of CE-QUAL-W2 Model for Measuring Water Quality in the Daecheong Reservoir

Sung-Ryong Ha · Jae-Yil Lee

Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

(Manuscript received 13 September 2008; accepted 29 November 2008)

Abstract

This paper aims to understand the effects of a turbidity flow intrusion on eutrophication in Daecheong Dam Reservoir. CE-QUAL-W2, a two-dimensional hydrodynamic and water quality model, is applied. The elevation of the reservoir water surface is used to validate the hydrodynamic model parameters and maximum fluctuations in the water surface elevations reaches about 1 m in the reservoir. During the heavy storm season, July, the thermocline submerged to less than 30 m below the surface. The thickness of the thermocline also reduced to 10 to 15 m. While the average TSS in June, the beginning of the monsoon was still low but it peaked in July due to heavy rainfall. Vertical profiles of the TSS regime in July indicated higher concentration in upper water layers and then the regime moves gradually downward in accordance with the time lapse. Due to the dam spillway opening, high concentrations of TSS attributed to storm turbidity ascended to the upper water layer by following the upward current movement and then, the regime precipitated to a layer below 30 to 40 m after September

Keywords : CE-QUAL-W2, Eutrophication, Reservoir, Stratification, Turbidity, Verification

1. 서론

부영양화는 호수와 저수지 수질의 주요 문제 중 하나이다. 저수지로 유입되는 점오염원과 비점오염원은 저수지내의 플랑크톤을 증식시켜 산소량의 변화, 바닥 층에서의 산소결핍, 취수의 이취문제 그리고 수처리기계의 필터막힘등에 영향을 준다(Lung, 2001). 이러한 조류의 성장은 외부적인 성장 요인과 내부적인 생물학적 요인으로 구분되어지는데 이러한 수체의 이동과 혼합과정은 생물학적 반응과 밀접한 관련이 있기에 물질수송과정에 대한 수리적인 부분과 수질반응 알고리즘간의 모의는 많이 연구되고 있다(Lung, 2001; Leon *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2005; Pastres and Ciavatta, 2005; Ha *et al.*, 2005). 이러한 저수지를 모의하기 위하여 모형을 구축할 경우 가장 중요한 것은 입력자료의 구축이다. 국내의 경우 저수지에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만 제한된 실측 데이터로부터의 모형 구축에 어려움을 겪고 있고 모의 결과의 오차는 입력자료의 부족으로 여겨지고 있다. 용존산소를 모의하는 과정에서 생긴 오차의 원인으로 여러 가지 다양한 요소가 복합적으로 작용하였지만 유입수의 경계조건에서의 부족한 자료를 가장 큰 원인으로 분석한 선행연구가 있다(김유경 등, 2006). 본 연구에서는 제한된 유입 실측값을 기준으로 유입농도를 산정하는 추세선을 분석하여 유입농도를 구축하였고 내부생산에 대한 모형의 매개변수를 조정하는 과정을 통해 모형의 보정과 검증을 실시하였다.

2. 연구방법

1. 연구 대상지

Figure 1은 연구대상지역인 대청호를 나타내고 있다. 대청댐은 상류로는 금강이 있는 다목적댐으로 1980년에 금강하구로부터 150km상류지점인 대전시 동북방 16km, 청주시 남방 16km 지점에 위치하고 있다. 대청댐의 주요시설로는 저수용량 14억 9천만 m^3 의 본 댐과 조정지 댐이 있으며, 본댐 주변

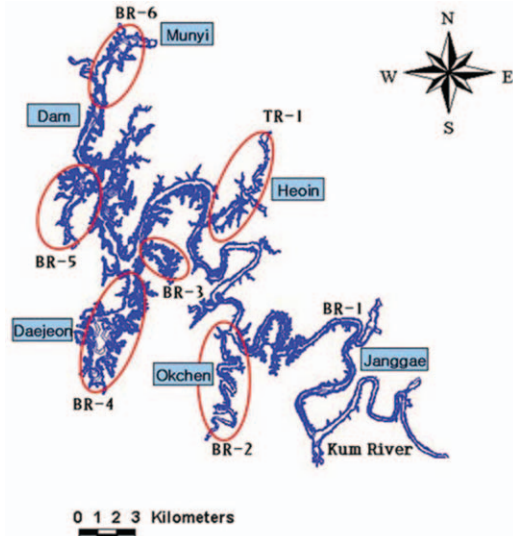


Figure 1. Study area of Daecheong Dam Reservoir and its watershed with major tributaries

에는 저수지 내의 물이 다른 지역으로 넘치지 못하도록 하는 3개의 보조 댐이 있다. 또한 대전과 청주 지역으로 용수를 공급하기 위한 도수로와 시설용량 9만 kW의 수력발전소가 있다. 저수지 유역의 토지 이용은 70% 이상이 산림이고 20%가량이 농지로 구성되어 있다. 유역의 면적은 3,204 km^2 , 저수지 표면적은 72.8 km^2 그리고 대청댐에서의 평수위는 76.5m이다.

2. 모델 입력자료의 구성

CE-QUAL-W2 모형은 모의대상 수체를 흐름방향과 수심방향으로 각각 일정한 간격으로 나누어 온도, 유속 등의 변화에 따라 수질을 모의할 수 있는 2차원 횡방향 평균(Laterally-averaged) 수리 및 수질 모델로 미국 육군 공병단(US Army Corps of Engineers)에 의해 1986년에 개발되었다. 현재 W2 모형은 미 육군공병단(US Army Corps of Engineers), 미 개척국(USBR), TVA등 미국의 주요 저수지관리 기관에서 댐 저수지의 수질관리를 위한 모델로 광범위하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 모의 대상 기간을 설정하기 위해 대청호의 2001년부터 2005년까지 5년간의 수질 데이터를 환경부 수질측정망 DB로부터 추출하여 분석

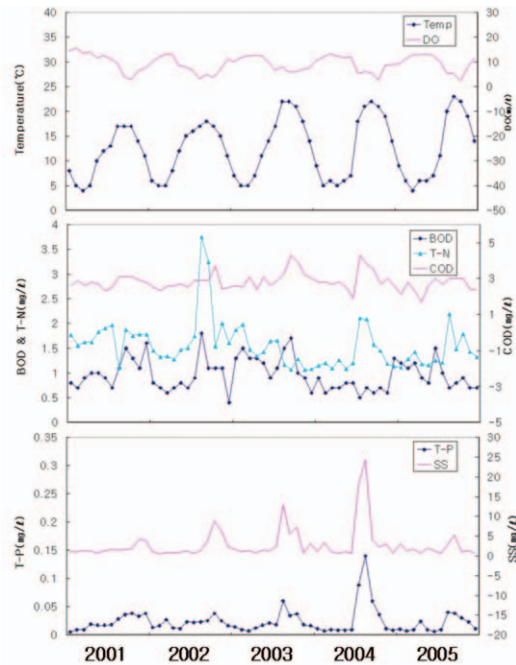


Figure 2. Variations of water quality factors from 2001 to 2005 in the Daecheong Reservoir

하였다(Figure 2). 수질항목은 용존산소(Dissolved oxygen), 생물학적 산소 요구량(Biochemical oxygen demand), 화학적 산소 요구량(Chemical oxygen demand), 부유물질(Suspended solid), 총인(Total phosphorus) 그리고 총질소(Total nitrogen)이다. 유입유량의 큰 차이를 보이는 2003년과 2005년을 모의 대상 기간으로 정하였다. 2003년은 강우유입이 많았던 시기로 댐에서의 여수로 방류가 35일에 걸쳐 이루어졌으며, 2005년은 강우유입이 적었던 시기로 댐에서의 여수로 방류기간이 3일에 그쳤다. 2003년의 TN 농도가 2005년에 비해 낮은 분포를 나타내고 있는 반면에 SS와 TP의 농도는 2003년 강한 탁수 유입으로 인해 2005년에 비해 높은 농도를 보이고 있다. 또한, 2005년의 경우 강우 시기의 댐 지점에서의 강한 강우 유입이 없음에도 TSS 농도를 보면 침전에 의해 높게 형성되고 있다.

대청호의 구획(Branch) 및 흐름방향 요소(Segment)인 구간 지점의 구분은 본류와 주요지류를 포함하여 6개의 구획으로 구분하였고, 구간은 수

체의 흐름에 직각이 되도록 하고 대청호 저수지의 형상과 수리 및 수질변동 특성 등을 종합적으로 고려하여 구분하였다. 또한 수심방향으로는 간격을 2m로 하여 26개 Layer를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

1. 모델 입력 자료의 구축

국내의 경우 대청호의 실측값에 대한 자료가 미흡한 실정이다. 금강 수계 주요 하천의 경우 8일 간격으로 수질 및 유량 측정을 실시하고 있지만 대청호의 경우 수질 측정 지점 및 횟수가 매우 부족하다. 모델을 수행하기 위해 제한된 실측자료를 바탕으로 유량 및 수온과의 관계를 분석하여 도출해야 하는 경우도 있다. 본 연구에서는 장계교, 옥천천, 회인천, 추동, 문의 지점으로 유입되는 경계 조건에 대한 실측자료를 최대한 수집하여 유량과의 관계를 분석하였다. 실측자료는 2001년부터 2005년까지의 데이터를 사용하였고, 수질 항목은 SS, PO₄-P, Chl-a, DO, TN, LDOC, RDOC을 수집하였다. DO항목은 온도와의 관계를 분석하였다. 수질항목별 추세는 Figure 3와 같다.

SS는 유량규모가 150m³/d 이하일 경우 유량의 증가에 따라 초기에 다소 증가 추세를 나타내지만 150m³/d 까지 비교적 완만한 증가추세를 나타내고 있다. 하지만 유량규모가 150m³/d 이상에서 크게 증가하는 추세이며 이는 강우가 집중되는 7월과 8월의 SS 유입농도가 크게 증가하고 있음을 나타내고 있다. PO₄-P는 유량이 100m³/d 이상이 되면서 크게 증가하고 있으며 T-N은 유량규모에 크게 좌우하지 않지만 유량이 200m³/d 이상부터 다소 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. Chl-a, LDOC 그리고 RDOC는 유량규모에 다소간의 영향을 보이지만 그 값의 변화가 매우 적은 관계를 나타내고 있다. DO의 경우 온도가 증가함에 따라 감소하는 관계를 나타내고 있다. 추세선 그래프로부터 분석된 수질항목별 관계식은 Table 1과 같다. 유입농도의 실측값으로부터 추세선의 R²이 높게 나오고 있지는 않지

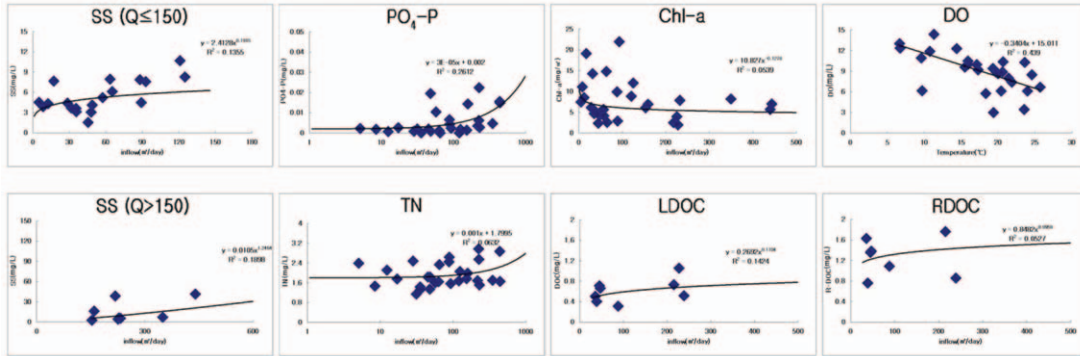


Figure 3. Branch inflow constituent concentration

Table 1. Trend line equation of inflow constituent concentration and R² values

	Equation	R ²		Equation	R ²
SS(Q ≤ 150m ³ /d)	y = 2.4128x ^{0.1915}	0.135	TN	y = 0.001x+1.7995	0.063
SS(Q > 150m ³ /d)	y = 0.0105x ^{1.2404}	0.189	Chl-a	y = 10.827x ^{-0.1278}	0.053
PO ₄ -P	y = 3E-05x+0.002	0.261	LDOC	y = 0.2692x ^{0.1704}	0.142
DO	y = -0.3404x+15.011	0.439	RDOC	y = 0.8482x ^{0.0959}	0.052

만 부족한 실측값의 유입농도를 추정하는 데는 무리가 없는 것으로 판단된다. 향후 실측값의 추가로 보다 정확한 유입농도를 추정해야 할 것이다.

2. 구축된 경계조건 자료의 모의 결과

CE-QUAL-W2 모형을 구축하기 위해서 저수지 지형정보, 기상자료, 유출입량 자료, 유입농도 등과 같은 자료를 구축하였다. 기상자료는 실온, 이슬점 온도, 풍속, 풍향 그리고 운량에 이르기까지 다양한 정보를 구축하였으며, 수질 항목별 유입농도는 Figure 3에서 분석된 방법으로 구축하였다.

Figure 4는 모의 결과가 저수지 수위와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 연중 특성을 보면 갈수기에 수위가 점차적으로 감소하다가 초여름에 가장 낮은 수위를 나타내고 있다. 이는 강우시에 저수지로 많은 유입량이 예상되기에 미리 댐조절을 통해 방류로 인한 현상으로 분석되어진다. 그 이후 점차적으로 증가하다가 늦은 여름과 가을에 가장 수위가 높게 분포하고 있으며 집중강우에 의해 유입량이 증가하였음을 나타내고 있다.

모의 결과는 상류 유입부인 장계교(Sta.1), 추소

(Sta.2), 댐앞(Sta.3) 지점까지 수질측정망 지점에 대하여 상층(upper layer), 중층(middle layer), 하층(bottom layer)에서 측정한 자료 실측값과 비교하였다. 모델의 평가는 평균제곱오차의 평방근 (root mean square error)의 통계값을 사용하였다. RMSE는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 모의 결과의 평균오차를 나타내는 지표로 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_f - Q_o]^2} \quad (1)$$

* Q_o = observations, Q_f = simulations,
N = total number of observations

2003년 9월에 추소지점에서 TSS의 오차값이 크게 나왔는데 이는 강한 유입유량으로 인한 실측값의 크기를 모의값이 충분히 반영하지 못해서 생긴 결과이다. 하지만 이 시기의 실측값이 31.7mg/l로 상대적인 오차는 크지 않았다. 인은 대청호 부영양화의 제한영양염으로 작용하는 성분이다. 부영양화의 성분인 인과 클로로필-a의 보정과 검증이 잘 이

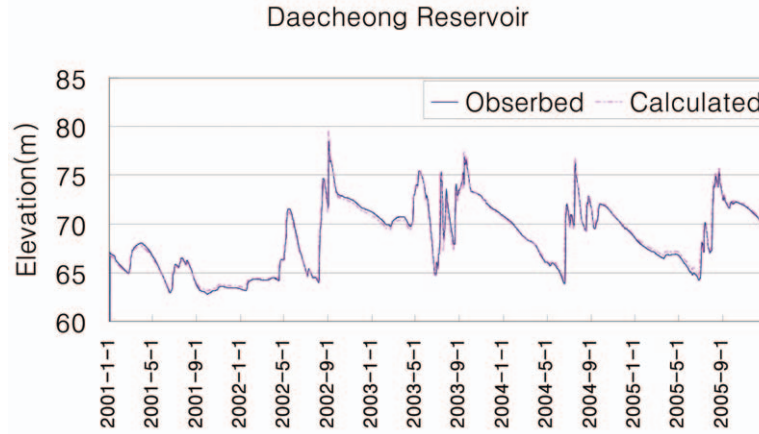


Figure 4. Calculated and Observed water surface elevations

루어졌기에 모형이 부영양화 현상을 모의하기에 적합한 상황이라 판단할 수 있다.

수중의 용존산소 농도는 생태계의 건강성을 나타내는 지표로서 매우 중요한 수질항목이다. 그러나 대기로부터의 폭기, 유기물 분해, 질산화, 광합성, 퇴적물 산소요구량 등 매우 다양한 기작의 영향으로 정확한 예측이 매우 어렵다(Chung *et al.*, 2006). 대청호와 같이 성층화된 저수지에서는 유입부에서 강우시기에 많은 강우가 들어와 댐 지점에서의 여수로 방류와 같은 수문조작으로 수체 내에 교란이

일어나게 된다. 따라서 대상지와 같은 기상조건과 지형조건의 수체는 수심별 용존산소 농도변화를 예측하는데 많은 어려움이 있다. 실측값을 기준으로 추세선을 적용하여 유입농도를 분석하고 매개변수를 조절한 결과 DO의 수질분포는 봄철 모의 값이 실측값보다 다소 과소평가되는 경향을 보이고 있지만 전반적으로 잘 모의가 되고 있는 것으로 나타났다.

Figure 5는 2003년 댐지점에서 여수로 방류를 했던 7월 11일부터 17일까지의 8일 동안의 TSS 그리고 TP의 평균농도분포와 같은 시기의 2005년 평

Table 2. Evaluation of model performance during model calibration stage (RMSE) - 2003

수질항목	site	26. Mar	21. May	13. Aug	23. Sep	5. Nov
Chl.a	장 계	4.5288	5.8130	4.7925	1.7918	1.0372
TP		0.0052	0.0033	0.0131	0.0021	0.0043
TSS		0.4237	2.8181	13.9847	6.4808	2.1268
DO		1.7372	3.6379	2.8409	1.9946	1.3992
Temp		2.1523	4.4397	2.1733	0.8413	4.9633
Chl.a	추 소	18.2626	3.0115	2.5213	6.8905	4.2634
TP		0.0127	0.0079	0.0095	0.0019	0.0011
TSS		2.5523	3.5346	6.9452	29.2271	4.9101
DO		3.0399	4.2252	3.1211	2.7600	0.5209
Temp		1.3041	3.9315	1.8842	1.0118	2.9656
Chl.a	댐	2.2233	1.5447	3.0080	1.4719	0.6137
TP		0.0037	0.0007	0.0102	0.0048	0.0062
TSS		3.2460	1.2043	8.2180	15.6073	7.9677
DO		1.2993	1.6688	4.7228	2.7936	2.4116
Temp		0.4367	1.9698	1.7960	4.3000	4.4838

Table 3. Evaluation of model performance during model verification stage (RMSE) - 2005

수질항목	site	26. Mar	21. May	13. Aug	23. Sep	5. Nov
Chl.a	장 계	1.1599	0.9177	5.0384	16.4148	3.1456
TP		0.0102	0.0149	0.0172	0.0291	0.0306
TSS		2.1236	0.5704	0.7992	4.3530	1.2437
DO		1.0086	3.9263	1.3624	4.0889	0.9223
Temp		3.3490	1.6087	2.5063	0.8398	0.7617
Chl.a	추 소	12.0382	3.7030	11.9265	22.6954	23.0817
TP		0.0195	0.0155	0.0250	0.0539	0.0232
TSS		0.7158	1.2626	3.7946	7.3524	2.4802
DO		1.7463	3.7803	2.3577	11.3194	1.1419
Temp		0.8510	2.5205	1.3140	1.9058	2.0067
Chl.a	댐	4.9362	2.4721	3.7623	1.4621	6.0416
TP		0.0070	0.0036	0.0046	0.0064	0.0125
TSS		5.5388	3.9203	1.0934	2.8938	10.7866
DO		1.4573	4.3030	5.3035	4.7453	1.3940
Temp		0.8694	0.6270	1.0717	1.6229	3.2463

균농도분포를 공간적으로 나타낸 것이다. TSS와 TP의 공간적인 분포는 수평방향 변화뿐만 아니라 수직방향의 농도변화도 볼 수 있다. 강우에 의한 SS의 강한 유입은 장계교에서부터 댐 지점까지 영향을 미치고 있다. 오른쪽에서 왼쪽방향으로 강우에 의한 오염원은 진행이 되고 있으며 댐 주변지역

과 다른 정체지역으로까지 확산되어진다. 대청호에는 2개의 취수탑이 있는데 위치는 Figure 1에 나타나 있는 것처럼 추동과 문의 지역에 있다. 따라서 취수탑이 있는 두 곳의 수체에 미치는 수질의 변화는 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 2003년과 2005년의 표면층 아래의 12~24m 사이의 중간층

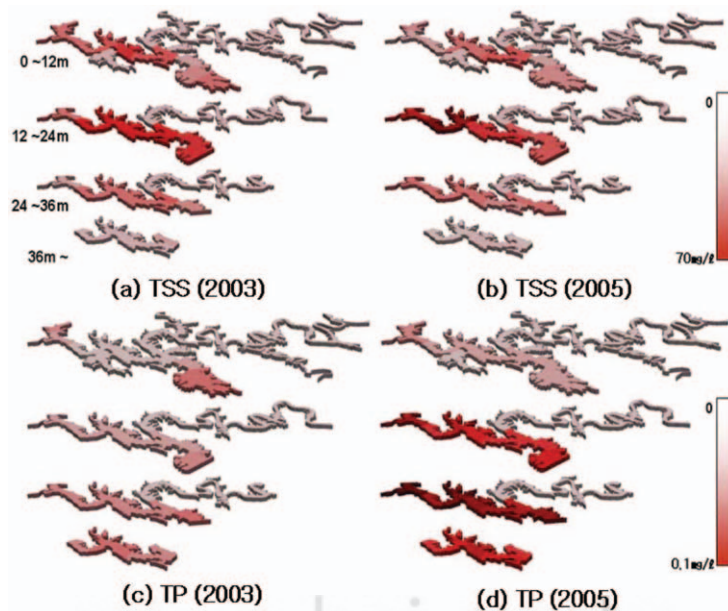


Figure 5. Spatial distribution of TSS and TP concentrations averaged for eight days from 11-17th July 2003 for which the discharge Gates were opened actively whereas passive dam gate operations were done in 2005

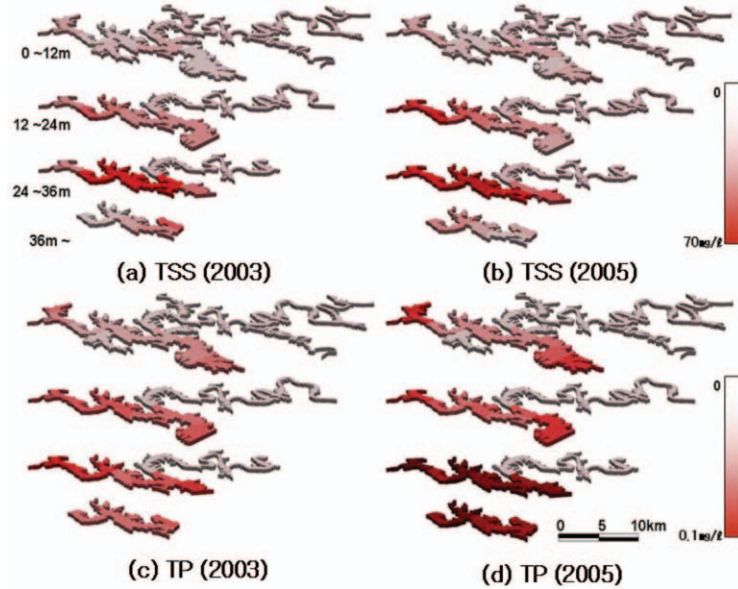


Figure 6. Effect of turbidity regime discharge on the spatial distribution of TSS and TP concentrations in the reservoir after seven days from the gate opening date

댐지점에서의 TSS 농도는 Gate 조절 시기에 매우 높게 형성되고 있다. 강한 탁수의 유입이 있는 기간 동안 저수지 수표면의 TSS와 TP의 농도는 취수탑이 있는 지점에서 높은 농도 값을 보이고 있다.

반면에 Figure 6은 2003년 댐지점에서의 여수로 방류 후 7일이 지난 시점에서의 TSS와 TP의 농도분포를 나타낸 것이다. TP의 농도가 높은 상태의 강한 탁수 유입으로 중층에서 이루어지고 여수로 방류가 끝난 후 수체가 저층으로 이동하는 모습을 보여주고 있다. 우기시기가 지난 후 저수지내에서 TP의 농도가 TSS의 농도보다 높게 누적되는 것으로 나타나는데 이는 2005년에 강우에 의한 탁수유입이 크지 않았기 때문으로 보이고 이는 저수지내의 내부생산에 지속적으로 영향을 주는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대청댐 저수지의 제한된 유입 실적값을 기준으로 유입농도를 산정하는 추세선을 분석하여 유입농도를 구축하였고 내부생산에 대한 모

형의 매개변수를 조정하는 과정을 통해 모형의 보정과 검증을 실시하여 대청호 내의 부영양화상태를 분석하기 위한 모형을 구축하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 제한된 실측자료로부터 경계조건에 대한 입력 자료를 구축하기 위해 실측자료를 바탕으로 분석하였다. 유량규모별로 구분하여 데이터를 구축 후 모의한 결과 수문사상의 변화가 큰 2003년과 2005년의 모의 기간에 대해 댐앞지점에서의 수위 및 실측 지점 수질결과값이 만족스러운 결과를 가져왔다.

2) 2003년과 2005년의 표면층 아래의 12-24m 사이의 중간층 댐지점에서의 TSS 농도는 Gate 조절 시기에 매우 높게 형성되고 있고 추동지점의 경우 2003년 Chl-a 농도가 높게 형성되고 있는데 이는 댐지점의 여수로 방류의 영향으로 분석되어 진다.

3) 2003년 댐지점에서의 여수로 방류 후 7일이 지난 시점에서의 TP의 농도가 높은 상태의 강한 탁수유입으로 중층에서 이루어지고 여수로 방류가 끝난 후 수체의 저층으로 이동하였다. 2005년의 경우 저수지내의 내부생산이 지속적으로 이루어지면서 누적되는 양이 TSS보다 TP가 높게 유지되었다. 모

의결과 저수지로 들어오는 외부 유입과 내부생산의 반응이 모델에 비교적 잘 반영되고 있음으로 평가되었다.

사 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

- Chung, S. W., Park, J. H., Kim, Y. K., Yoon, S. W., 2006, Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation, *Korean Society on Water Quality*, 23 (1), 52-63.
- Ha, S. R. and Kim, S. Y., 2005, Improvement of Wasp hydraulic module for a stratified reservoir, Proceedings of COE Joint Symposium on Environment Engineering among Hokkaido University, Chungbuk National University and Bandung Institute of Technology, Hokkaido, Japan.
- Leon, L. F., Lam, D. C., Mc Crimmon, C., and Swayne, D. A., 2003, Watershed management modeling in Malawi: Application and technology transfer. *Environmental Modeling and Software*, 18, 531-539.
- Liu, W. C., Kuo, J. T., and Kuo, A. Y., 2005, Modeling hydrodynamics and water quality in the separation waterway of the Yulin offshore industrial park, Taiwan. *Environmental Modeling and Software*, 20(3), 309-328.
- Lung, W. S., 2001, Water quality modeling for waste load allocations and TMDLs, John wiley & Sons Inc., 333.
- Pastres, R. and Ciavatta, S., 2005, A comparison between the uncertainties in model parameters and in forcing functions: its application to a 3D water-quality model. *Environmental Modeling and Software*, 20(8), 981-989.

최종원고채택 08. 12. 18