한국지반환경공학회 논문집 제4권 제3호 2003년 9월 pp. 69~77

대청호에서 WASP5 모델 매개변수에 관한 연구

A Study on the Parameters of WASP5 Model in Daechung Reservoir

한운구* · 김규형** · 안태봉***

Han, Woon Woo · Kim, Kyu-Hyung · Ahn, Tae-Bong

Abstract

This study was carried out to evaluate the WASP5 model parameters and to analyze the sensitivity of parameters in Daechung Reservoir. The values predicted by the model and tendency were very similar to the observed data at Daejeon intake, so it is possible to predict water quality of the Daejeon intake region in the future.

Results from the sensitivity analysis showed that Chlorophyll-a was sensitive to variations in saturated growth rate of phytoplankton, endogenous respiration rate of phytoplankton, extinction coefficient and temperature. T-N was sensitive to mineralization rate of dissolved organic nitrogen and temperature. T-P was affected by T-P load, temperature, extinction coefficient, mineralization rate of dissolved organic phosphorus and saturated growth rate of phytoplankton. BOD was influenced by deoxygenation rate and temperature, and DO was influenced by temperature.

Adequate input data was applied and assessed through the model sensitivity analysis. So it is possible to distinguish the input data which need careful attention when it has application to model.

Keywords : WASP5 model, Parameter, Sensitivity analysis, Water quality

요 지

대청호에서 WASP5 모델의 매개변수를 산정하고 민감도분석을 실시하였다. 모델의 계산치와 실측치는 값과 그 경향에 있어 근사한 것으로 나타나 이를 통해 대전취수탑 유역의 장래수질예측이 가능하였다.

매개변수의 민감도분석 결과 조류의 최대성장율, 조류의 호흡율, 광소멸계수, 온도 등이 Chlorophyll-a에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며 T-N에 영향을 주는 주된 인자는 용존유기질소 분해율과 온도이며 T-P는 인부하량, 온도, 광소멸계수, 용존유기인 분해율, 조류의 최대성장율 등의 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다.

BOD에 큰 민감도를 보인 인자는 탈산소계수와 온도였으며, DO는 온도 외의 매개변수에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

모델의 민감도분석을 통하여 해당 수역에 적합한 입력변수의 민감도에 대한 평가를 하였으며 각 수질항목에 대한 입력변수의 영향에 대한 파악을 통해서 모델의 적용에 주의를 기해야할 해당 입력변수의 구분이 가능하였다.

주요어 : WASP5 모델, 매개변수, 민감도분석, 수질

* 정회원, 대전대학교 토목환경공학부 교수

** 대전대학교 대학원 환경공학과 박사과정

*** 정회원, 우송대학교 토목환경공학과 조교수

1. 서 론

우리 나라의 수자원의 주 개발정책은 용수 확보, 홍수조절 및 발전 가능한 다목적댐의 건설을 통해 효과적, 합리적인 수자원 관리를 도모하고 있다. 이러한 댐의 건설로 수자원의 양적인 확보율이 증대되어 왔다. 그러나 댐의 축조로 만들어진 인공호는 다양한 오염원과 흐름의 정체성을 가짐으로써 다량의 영양염류의 유입에 의해 조류가 과다 성장하게 되고 용존산소의 고갈로 어류의 폐사 등을 초래하는 이른바 부영양화현상을 발생시켜 상수원의 역할이나 미적·위락적 가치를 저하시키기도 한다.

이러한 수질악화의 문제는 대전을 비롯한 충청지역에 용수를 공급하고 있는 대청호에서도 역시 심각하게 대두되고 있으며 특히 8-9월의 녹조현상은 그 정도가 매우 심각한 상태이다(대전시, 1994 ; 대전대, 1995 ; 이종호, 1994).

양질의 물을 확보하기 위해서는 오염원 관리 방안의 수립과 목표수질 달성을 위한 처리시설 확충 등 체계적인 수질관리와 수질향상 대책의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 대상 수역의 수질을 효과적으로 재현하고 장래 수질을 예측할 수 있는 수질모델의 적용이 필수적이다(한국수자원공사, 1991-1992 ; 환경처, 1992 ; 대전대, 1995). 이러한 수질 모델을 통해 장래 수질을 모의하기 위해서는 그 대상 수역의 특성을 재현할 수 있는 각종 매개변수의 산정이 매우 중요시된다(황인성, 1991 ; Ambrose 등, 1993 ; 김규형, 1997).

따라서 본 연구는 호수의 수질모델링에 적합한 것으로 알려진 WASP5모델을 대전취수탑 수역에 적용하여 모델의 보정과 입력시 주의해야할 변수, 상수 등의 민감도분석을 통하여 최적의 매개변수와 상수를 파악·산정함으로써 장래수질예측과 부영양화현상 규명을 위한 최적의 모델을 파악하고자 한다.

본 연구에서는 대청호의 대전취수탑수역에 WASP5 모델의 수리모델(DYNHYD5)과 부영양화모델(EUTRO5)을 모의하였다. 모의된 항목은 Chlorophyll-a, NH_3-N, NO_3-N, Org-N, PO_4-P, Org-P, BOD, DO의 8개 항목이고 민감도 분석(Sensitivity Analysis)은 상수(constant), 매개변수 (parameter) 등에 대하여 입력치의 변화에 대한 Chlorophyll-a, T-N, T-P, BOD, DO 농도 계산치의 시간적 변화를 파악하였다.

2. WASP5 모델의 특성

WASP5(The Water Quality Analysis Simulation Program5)모델은(Ambrose 등, 1993) 1981년 EPA에서 처음 개발된 이후 여러 차례 수정과 보완을 거친 수질모델로서 정상상태와 동적상태에 대한 모의가 가능하고 호수, 강, 하구 등을 포함한 여러 수체에 적용할 수 있는 모델이다. 또한 수체의 이동, 일반 또는 독성물질의 이동과 상호반응에 대한 모의가 가능하다.

WASP5는 동수역학적 프로그램(수리모델)과 수질프로그램으로 구성되는데 수리모델인 DYNHYD5는 수질프로그램의 계산에 필요한 수체의 거동을 모의한다. 수질프로그램은 유기화학물질, 중금속, 침전물 등을 포함하는 TOXIC의 독성물질 모델과 용존산소, 생물학적 산소요구량, 영양물질과 부영양화 등을 모의하는 EUTRO5의 부영양화모델로 구성된다.

WASP5의 계산 격자망은 분할된 구획으로 구성되며 수체는 x, y, z방향의 3차원 구획화가 가능하며 수체의 수심방향에 대한 연직분할은 표수층(epilimnion), 심수층(hypolimnion), 상위 저질층(upper benthic layer), 하위 저질층(lower benthic layer)의 4가지 형으로 구분되어 각 유형의 구획에 대한 특성을 반영할 수 있다.

EUTRO5 모델은 복잡도에 따라 가장 간단한 복잡도 1의 Streeter-Phelps 모형으로부터 복잡도 6 까지 6 단계별 모의가 가능하다. 단순 부영양화 모형은 영양염류 순환과 DO 평형에 영향을 미치는 식물성 플랑크톤의 성장, 사멸 과정을 포함하는데, 식물성 플랑크톤의 성장은 무기질소, 무기인, 빛 등의 제한을 받으며 8가지 주 수질인자(Chlorophyll-a, NH_3-N, NO_3-N, Org-N, PO_4-P, Org-P, BOD, DO)를 모두 포함하여 해석한다(Ambrose 등, 1993).

3. 모델의 적용

본 연구에서 적용된 대상 수역은 대청호의 대전취수탑 부근 수역이다. 이 수역은 내만 형태의 정체수역으로서 유속자료가 없을 뿐만 아니라 유속이 매우 작으므로 유속측정이 거의 불가능한 수역이다. 또한 유속 측정자료가 없으므로 흐름특성에 의한 수역의 구획화에도 많은 어려움이 따른다. 따라서 수질모델을 모의하기 위해 필요한 유속·

유량계수의 산정이 불가능하여 부영양화모델(EUTRO5)을 모의하기 위한 사전 작업으로서 수리모델(DYNHYD5)의 적용은 필수적이다(김규형, 1997:Ambrose 등, 1993). 본 연구에서는 호수의 지형특성과 수심(수자원공사, 1991), 수질측정망 위치 등을 고려하여 그림.1과 같이 대상 수역을 9개의 구획으로 나누어 적용하였다.

모델 검정의 적용 기간은 1994년 3월 1일부터 12월 25일이며 모델에 사용된 수리·수문자료는 대청댐 관리연보(수자원공사, 1990-1994), 수질자료는 한국수자원공사의 일별 수리측정 자료(수자원공사, 1991-1994)와 대전광역시 상수도사업본부의 수질자료를 이용하여 보정하였다.

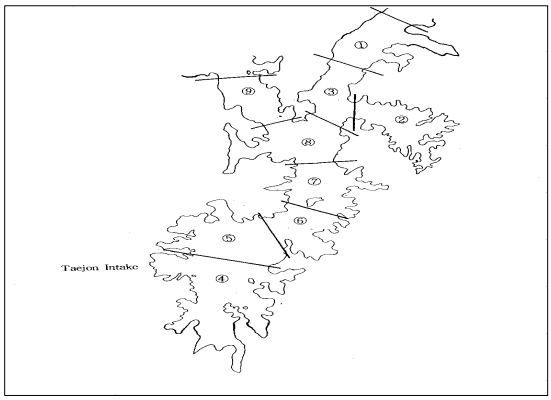

그림 1. Segmentation of Reservoir

4. 모델의 보정

DYNHYD5 모델에 의해 계산된 대청호의 대전취수탑 유역의 수위를 비교한 결과는 그림 2와 같으며 계산치와 실측값이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 실시한 모델의 구획화와 DYNHYD5 모델의 각종 입력변수의 적용은 적합한 것으로 판단된다.

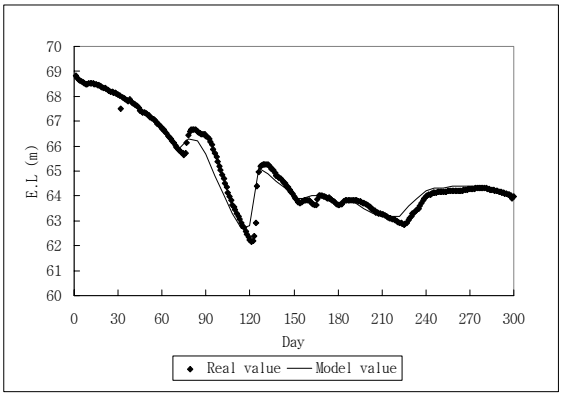

그림 2. Surface Elevation(1994. 3.1～ 12.25)

본 연구에서 모의된 항목은 Chlorophyll-a, NH_3-N, NO_3-N, Org-N, PO_4-P, Org-P, BOD, DO이며 모델 적용 수역인 대전취수탑 수역은 실측지점(한국수자원공사, 1991-1994 : 대전시, 1994)이 구획의 중심에 위치하고 있어 실측값과 모의 값을 비교하는데 적당하였다. 따라서 이 지점을 중심으로 계산치와 실측치가 근사되도록 수역내의 매개변수 및 상수의 값을 보정하였다.

보정순서는 Chlorophyll-a를 중심으로 T-N, T-P, BOD, DO의 순으로 보정을 실시하였다. 질소와 인의 실측치는 총질소(T-N)와 총인(T-P)의 값인 반면 모델에서 계산된 값은 질소와 인의 구성별 값이므로 모델의 보정에 있어서는 모델에서 계산된 질소와 인의 구성별 항목을 합하여 총질소와 총인에 대한 보정을 실시하였다. 표 1은 본 연구에서 보정된 매개변수이다.

4.1 Chlorophyll-a의 보정

Chlorophyll-a 농도의 계산치와 실측치의 평균값에 대한 상대오차는 0.1%였고, 그림 3에 나타낸 바와 같이 Chlorophyll-a 농도의 변화는 전반적으로 경향과 값에 있어서 재현성이 좋은 것으로 나타났다.

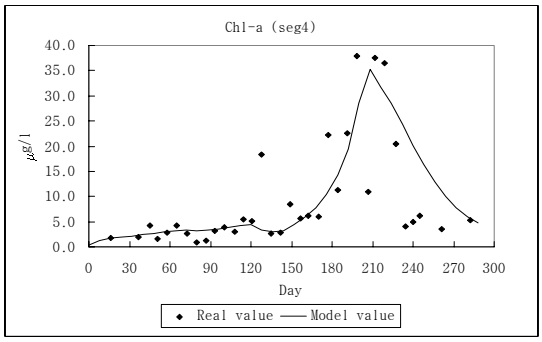

그림 3. Concentration of Chl-a at Daejeon Intake

표 1. Calibrated Parameters in EUTRO5

NAME	Definition and Units	Value
K12C	Nitrification rate at 20℃, per day.	0.03
K12T	Temperature coefficient	1.08
KNIT	Half-saturation constant for nitrification-oxygen limitation, mg O2/L	1.0
K1C	saturated growth rate of phytoplankton, day-1	4.2
K1T	Temperature coefficient	1.07
LIGHTS	Light formulation switch	1.0
CCHL	Carbon to chlorphyll ratio	40
IS1	Saturation light intensity for phytoplankton	350
KMNG1	Nitrogen half-saturation constant for nitrogen for phytoplankton growth, mg-N/L	0.025
KMPGI	Phosphorous half-saturation costant for phytoplankton, mg PO4-P/L	0.0025
PCRB	Phosphrous to carbon ratio in phytoplankton , mg P/mg C	0.025
NCRB	Nitrogen to carbon ratio in phytoplankton, mg N/mg C	0.25
K1RC	Endogenous respiration rate of phytoplankton at 20 ℃, day-1	0.11
K1D	Non-predatory phytoplankton death rate, day-1	0.006
KDC	CBOD deoxygenation rate at 20℃, per day	0.06
OCRB	Oxygen to carbon ratio in phytoplankton, mg O2/mg C	2.667
K71C	Mineralization rate of dissolved organic nitrogen, per day	0.015
K71T	Temperature coefficient for K1013C	1.08
K83C	Mineralization rate of dissolved organic phosphorus, per day	0.004
K83T	Temperature coefficient for K58C	1.08

4.2 총 질소(T-N)와 총 인(T-P)의 보정

T-N과 T-P 농도의 계산치와 실측치 평균의 상대오차는 각각 2.3%, 7%였으며 그림 4와 그림 5는 각각 T-N과 T-P의 농도 변화를 나타낸 것으로 T-N과 T-P 농도 모의 결과는 값과 경향에 있어 비교적 재현성이 좋은 것으로 판단된다. 210~270일의 T-N 농도의 계산치가 실측치 보다 크게 나타난 것은 유량이 적은 시기의 모델의 유출부하량과 실제 유출부하량과의 차이에 기인된 것으로 판단되며, T-P 농도의 계산치와 실측치의 차이는 실제 인의 구성별 농도(PO_4-P, Org-P)는 인부하량, 온도, 일사량 등의 영향을 받지만 총인의 농도는 주로 인부하량에 영향을 받으므로 이 역시 모델과 실제 유출부하량과의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

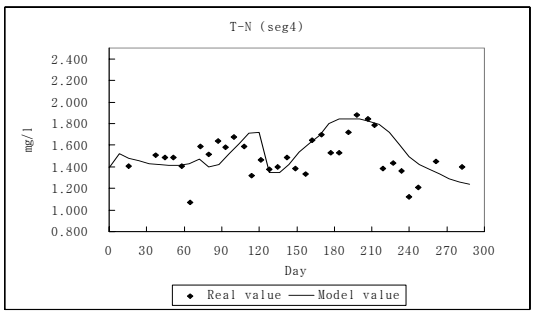

그림 4. Concentration of T-N at Daejeon Intake (1994. 3.1~ 12.25)

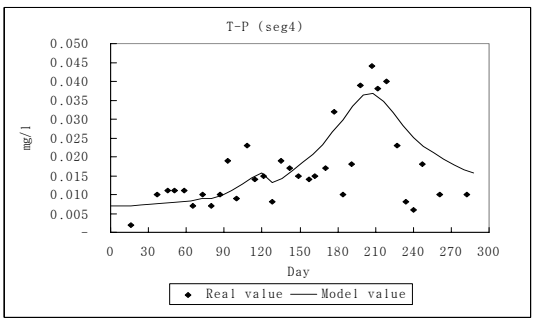

그림 5. Concentration of T-P at Daejeon Intake (1994. 3.1~12.25)

4.3 BOD와 DO의 보정

BOD와 DO농도의 계산치와 실측치 평균의 상대오차는 각각 0.1%, 6.5%였으며 그림 6과 그림 7은 BOD와 DO의 농도 변화를 나타낸 것으로 BOD와 DO의 모의결과 값과 경향에 있어 비교적 재현성이 좋은 것으로 판단된다. 특정 시기의 DO농도 차이는 유속과 수심에 의해 결정되는 재포기 계수의 변화와 성층현상, 조류의 광합성에 의한 DO 농도의 변화 등에 의한 것이 그 원인이라 판단된다.

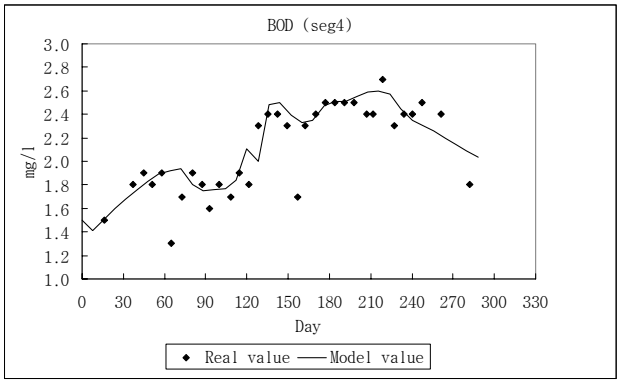

Fig.6 Concentration of BOD at Daejeon Intake (1994. 3.1 ~ 12.25)

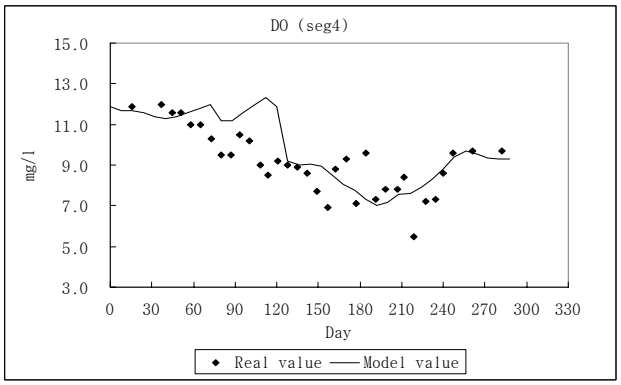

Fig.7 Concentration of DO at Daejeon Intake (1994. 3.1 ~ 12.25)

5. 민감도분석

모델의 불확실성은 실측의 오차, 상수와 매개변수, 경계조건, 수리특성 등의 부적절한 선정에 의해서 비롯될 수 있으나 특히 지역적 특성을 반영하는 상수와 매개변수의 영향을 크게 받는다. 따라서 민감도 분석을 통하여 입력변수의 불확실성이 출력값에 미치는 영향을 파악하고 이들의 각 항목에 대한 영향을 분석하여 모델 적용에 주의를 기하여야 한다.

민감도분석은 입력변수에 대한 출력되는 수질농도의 변화를 분석하는 것으로서 민감도계수(Sensitivity Coefficient, Cs)는 입력 변수값의 변화율에 대해 출력 결과의 변화율에 대한 비로 나타내지며 민감도계수가 클수록 해당 변수에 대하여 민감하다고 할 수 있다(황인성, 1991 : 김규형, 1997).

본 연구에서 입력변수의 변화폭은 0%, ±5%로 하였고 조류의 최대성장율(K1C), 조류의 호흡율(K1RC), 빛의 포화강도(IS1), 조류의 사멸율(K1D), 조류내 탄소와 Chlorophyll-a의 비(CCHL), 탈산소계수(KDC), 용존유기질소 분해율(K71C), 용존유기인 분해율(K83C) 등의 매개변수와 광소멸계수(KE), 온도 등과 같은 입력변수의 변화 폭에 대한 각 수질인자의 변화와 민감도를 파악하였다.

5.1 Chlorophyll-a에 대한 민감도

그림 8은 조류의 최대성장율(KIC)에 대한 민감도를 나타낸 것으로 빛, 영양염류의 성장제한 요소와 온도가 Chlorophyll-a 증가에 매우 민감한 것을 나타내고 있다. 9월 이후 인 등의 유출부하, 일사량, 온도 감소로 K1C의 민감도는 9월 이전 민감도 계수의 상승 추세에 비해 다소 완만해지는 것을 알 수 있다.

그림 9는 조류의 호흡율(K1RC)에 대한 것으로 시간에 따라 민감도가 크게 증가하며 조류의 호흡율이 Chlorophyll-a 농도에 매우 민감함을 나타내고 있다.

빛의 포화강도(IS1), 조류의 사멸율(K1D)은 시간에 따라 민감도가 증가하기는 하나 K1C와 K1RC에 비해 낮은 민감도를 보였으며 조류내 탄소와 Chlorophyll-a의 비(CCHL)는 시간에 따른 민감도가 거의 일정하여 시간 변동과는 관련성이 적었고 K1C와 K1RC에 비해 상대적으로 낮은 민감도를 나타내었다(그림 10).

인의 반포화상수(KMPG1)는 시간에 따라 민감도가 증가한 후 점차 일정해지며 상대적으로 낮은 민감도를 나타내었으며(그림 11) 인부하량 등의 영양염도 Chlorophyll-a 농도에 영향을 주나 상대적으로 낮은 민감도를 나타내었다(그림 12). Chlorophyll-a 농도는 질산염의 유출 부하량에

대해서는 거의 영향을 받지 않았다.

호수의 기후환경적 요인도 큰 변수로 작용하는데 온도, 광소멸계수 등에 의해서 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다(그림 13 -14). 그림 13에 나타낸 바와 같이 온도 상승이 빠른 7월에서 9월 사이에 온도에 대한 민감도가 큰 것으로 나타나 해당 기간의 온도 상승이 Chlorophyll-a의 성장에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있듯이 Chlorophyll-a에 대한 민감도 분석결과 빛과 온도의 영향인자인 K1C, K1RC, KE, 온도 등이 Chlorophyll-a에 가장 큰 영향을 주며, 그 다음으로는 IS1, K1D, KMPG1, CCHL, 인 부하량 등의 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다.

민감도 계수가 큰 기간동안의 매개변수는 불확실성이 증가하는 것을 의미하며 K1RC, K1D와 같은 작은 값의 적용에 있어서는 미소 변화에도 그 모의 결과가 크게 변화하므로 해당 매개변수에 대한 주의 깊은 적용이 필요하다.

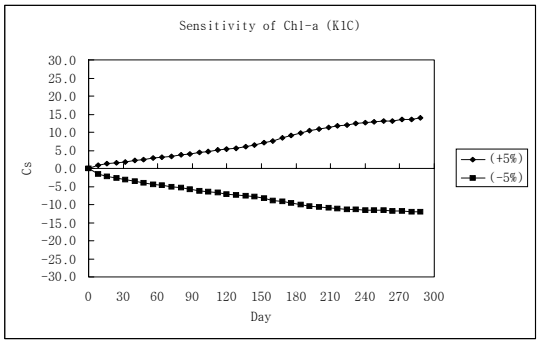

그림 8. Sensitivity of Chl-a (K1C)

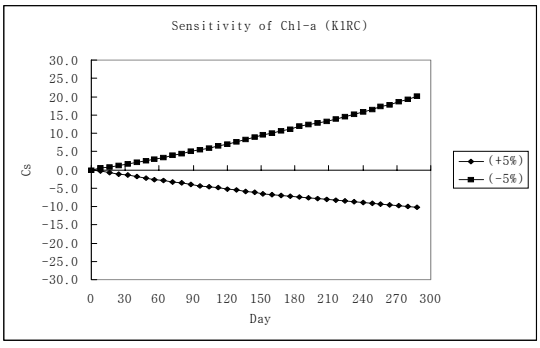

그림 9. Sensitivity of Chl-a (K1RC)

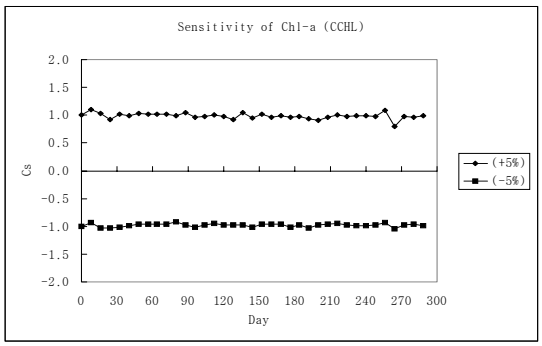

그림 10. Sensitivity of Chl-a (CCHL)

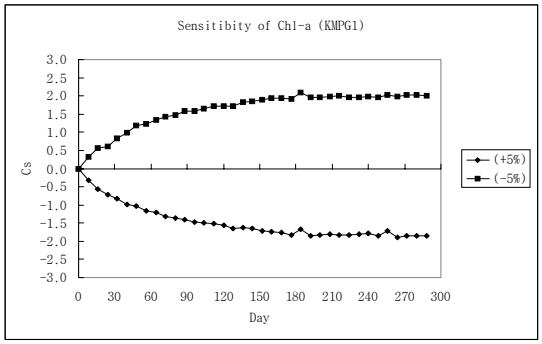

그림 11. Sensitivity of Chl-a (KMPG1)

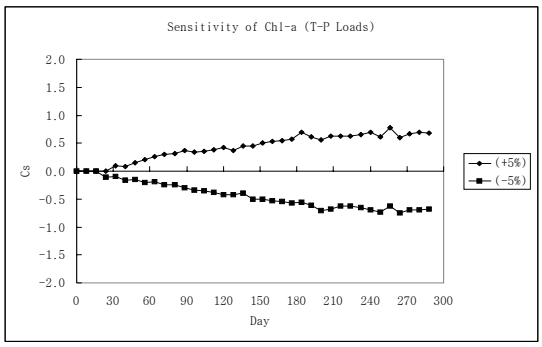

그림 12. Sensitivity of Chl-a (T-P Loads)

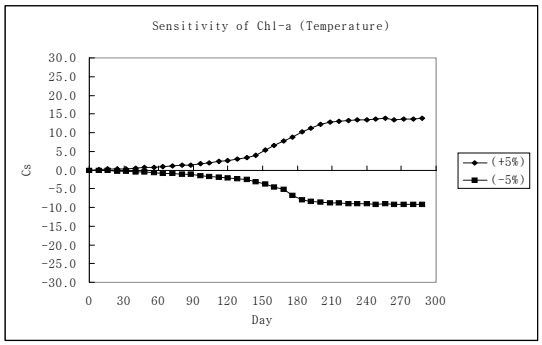

그림 13. Sensitivity of Chl-a (Temperature)

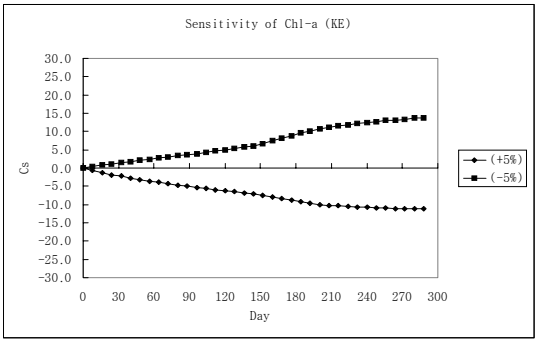

그림 14. Sensitivity of Chl-a (KE)

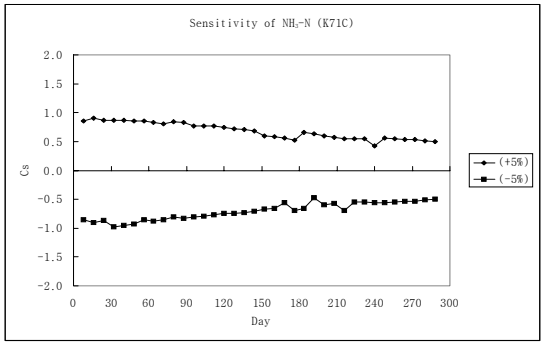

그림 17. Sensitivity of NH3-N (K71C)

5.2 T-N에 대한 민감도

T-N의 경우는 용존유기질소 분해율(K71C)과 온도 외에는 민감도를 나타내지 않았다(그림 15 - 16). 인의 성분별 민감도를 분석한 결과, NH_3-N, NO_3-N, Org-N에 대해 K71C만이 미소한 민감도를 나타냈으며(그림 17) 질소와 다른 수질관련 변수들의 영향은 거의 없었다.

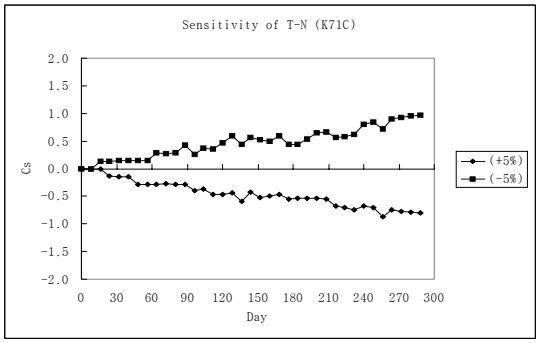

그림 15. Sensitivity of T-N (K71C)

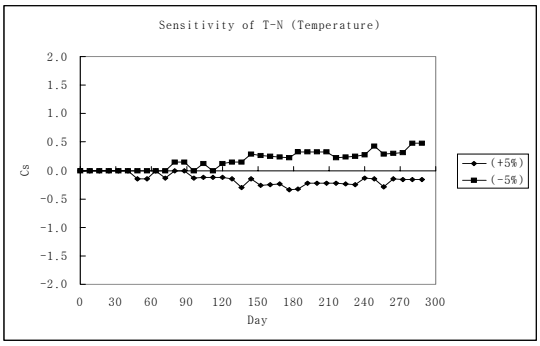

그림 16. Sensitivity of T-N (Temperature)

5.3 T-P에 대한 민감도분석

T-P는 인 부하량 등 호소 외 조건뿐만 아니라 온도, 광소멸계수(KE)등 호소 내의 환경요인에도 민감한 것으로 나타났다. 용존유기인 분해율(K83C)을 제외한 다른 매개변수에 대해서는 민감도를 보이지 않았다(그림 18 - 21).

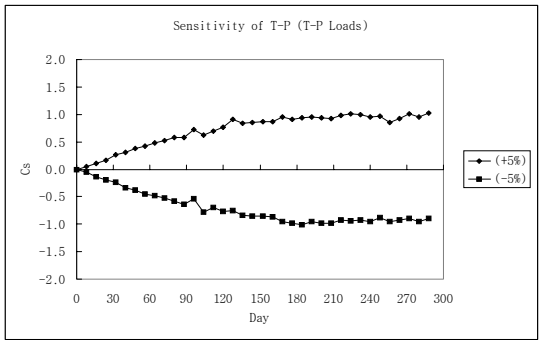

그림 18. Sensitivity of T-P (T-P Loads)

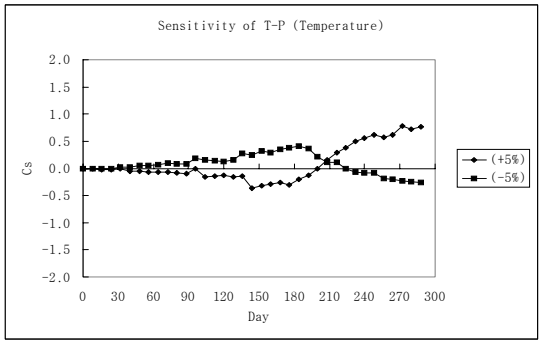

그림 19. Sensitivity of T-P (Temperature)

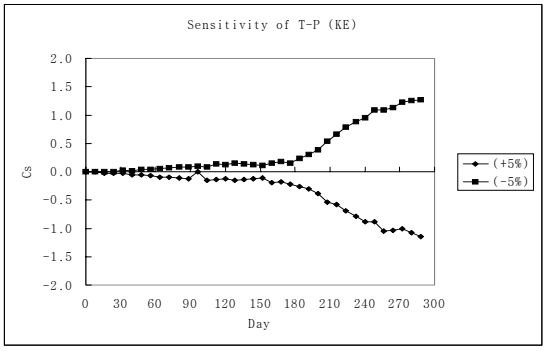

그림 20. Sensitivity of T-P (KE)

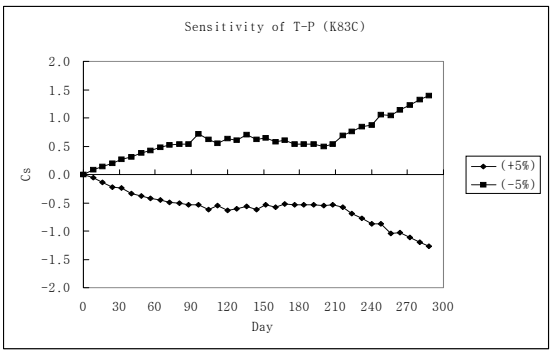

그림 21. Sensitivity of T-P (K83C)

Org-P는 조류의 최대성장율(K1RC)과 용존유기인 분해율(K83C)에 대하여 T-P의 최고치를 보이는 시기(210일)부터 민감도가 상승되는 결과를 나타내고 있다(그림 21). 이는 K83C와 K1RC의 경우 특히 인 부하량 등이 증가되고 T-P농도가 높은 기간 중에는 예측 오차가 클 수 있음을 나타내기도 하므로 모델의 적용에 주의를 기울여야 한다.

PO4-P는 Org-P에 비해 조류의 성장과 사멸에 관련된 K1RC, K83C 등의 매개변수에 대해 민감도가 크지 않았고 PO4-P와 Org-P 모두 빛의 포화강도(IS1), 조류의 사멸율(K1D)에는 거의 민감도를 나타내지 않았다.

5.4 BOD와 DO에 대한 민감도분석

BOD는 탈산소계수(KDC)와 온도에 민감하였으며(그림 23-24), 조류의 성장과 사멸에 대한 BOD의 영향을 고려하기 위하여 조류 관련 매개변수에 대하여 분석을 한 결과 조류의 호흡율(K1RC), 조류의 최대성장율(K1C), 조류내 탄소와 Chlorophyll-a 비(CCHL) 등의 영향은 거의 없었다.

탈산소 계수(KDC)에 대한 민감도 변화는 그림 23과 같이 BOD가 높은 7월에서 9월에 낮게 나타났다. DO는 탈산소 계수, 조류의 호흡율 등에 민감도를 나타낼 것으로 예상할 수 있으나 그림 25에 나타낸 바와 같이 온도 외에는 민감도를 나타내지 않았다.

민감도분석 결과 민감도계수는 입력치의 변화량 0%(기준치)에 대하여 대칭의 양상을 보였으며 출력치의 증감변화도 유사한 증감형태를 나타내어 적절한 입력변수의 산정이 이루워졌다고 판단된다.

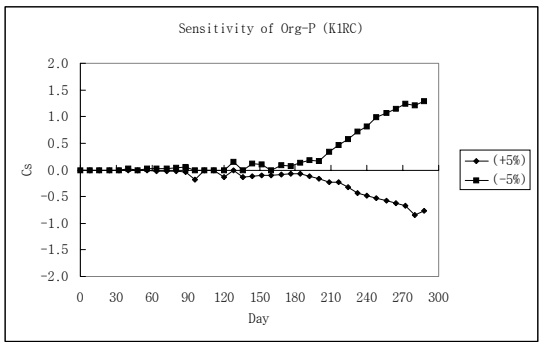

그림 22. Sensitivity of Org-P (K1RC)

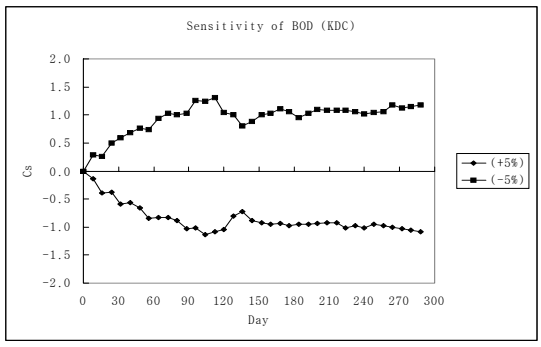

그림 23. Sensitivity of BOD (KDC)

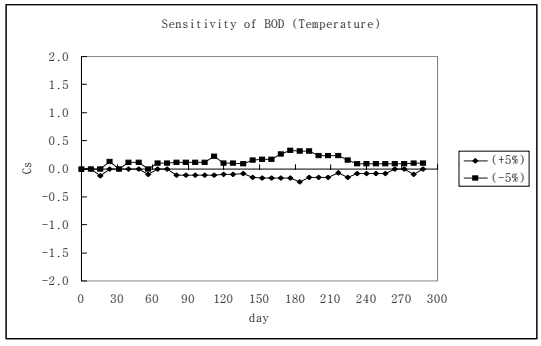

그림 24. Sensitivity of BOD (Temperature)

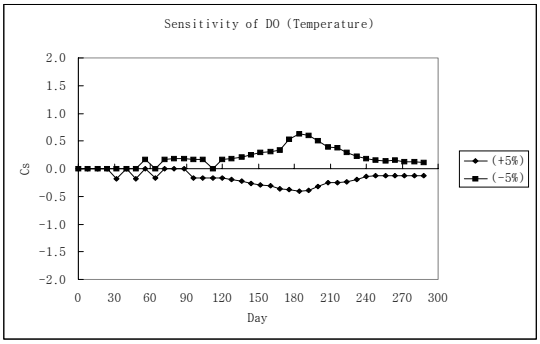

그림 25. Sensitivity of DO (Temperature)

6. 결론

대전취수탑 수역에 WASP5모델을 적용한 본 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 각종 매개변수와 상수를 모델의 보정과 민감도 분석을 통해 파악·선정한 결과 본 연구의 계산치와 실측치는 값과 그 경향에 있어 재현성이 높은 것으로 나타나 이를 통해 대전취수탑 유역의 장래수질예측이 가능하였다.

(2) Chlorophyll-a의 민감도분석 결과 온도의 영향 인자인 조류의 최대성장율(K1C), 조류의 호흡율(K1RC), 광소멸계수(KE), 온도 등이 Chlorophyll-a에 가장 큰 영향을 주며 그 다음으로는 빛의 포화강도(IS1), 조류의 사멸율(K1D), 인의 반포화상수(KMPG1), 조류내 산소와 Chlorophyll-a의 비(CCHL), 인 부하량 등의 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다.

(3) T-N에 영향을 주는 주된 인자는 용존유기질소 분해율(K71C)과 온도이며 T-P는 인부하량, 온도, 광소멸계수(KE), 용존유기인 분해율(K83C)의 영향을 주로 받는 것으로 나타났다.

(4) BOD에 큰 민감도를 보인 인자는 탈산소계수(KDC)와 온도였으며, DO는 온도 외의 매개변수에 대해서는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

(5) 모델의 민감도 분석을 통하여 해당 수역에 적합한 입력변수의 적용과 평가를 하였으며 각 수질항목에 대한 입력변수의 영향에 대한 파악을 통해서 모델의 적용에 주의를 기해야할 해당 입력변수를 구분이 가능하였다.

(접수일자 : 2003년 4월 30일)

참 고 문 헌

1. 김규형(1997). WASP5를 이용한 대전취수탑 유역의 부영양화 및 수질예측에 관한 연구. 석사학위 논문, 대전대학교.
2. 대전광역시 상수도사업본부(1994). 대전취수탑 수질영향평가 보고서.
3. 대전대학교 환경문제연구소(1995). 대청 광역상수도 2단계 사업 타당성 조사 및 기본계획용역중 수질조사 및 수질예측 보고서.
4. 이종호 (1994). 대청호 정체수역의 수질예측과 관리, 환경영향평가, 한국환경영향평가학회, 제3권 제2호.
5. 한국수자원공사(1991-1994). 다목적댐 저수지 수질조사 보고서.
6. 한국수자원공사(1991). 대청 다목적댐 저수지 퇴사량 보고서. pp. 105-108.
7. 한국수자원공사(1990-1994). 대청호 다목적댐 관리년보.
8. 환경처(1992), 수자원보전 장기종합계획수립 종합보고서.
9. 황인성(1991). 생태학적 모형을 이용한 팔당호의 수질분석과 모형의 감응도 분석. 석사학위논문, 서울대학교.
10. Ambrose, R.B. Jr., Wool, T.A. and Martin, J.L.(1993). The hydrodynamics program, DYNHYD5 model documentation and user manual. U.S EPA.
11. Ambrose, R.B. Jr., Wool, T.A. and Martin, J.L.(1993). The water quality analysis simulation program, WASP5. U.S EPA.