

최소자승법에 의한 QUAL2E 모델 반응계수 보정

Calibration of Parameters in QUAL2E using the Least-squares Method

김 경 섭* / 윤 동 구** / 이 기 영***
Kim, Kyung Sub / Yoon, Dong-Gu / Lee, Gi-Young

Abstract

Water quality models can be applied to manage the regional water quality problems and to estimate the target and allowable pollution load in watershed effectively. The optimization of state variables in the given water quality model is necessary to build up more effective model. The least-squares method is applied to fit field observations in QUAL2E developed by U.S. EPA, which is most widely used one in the world to simulate the stream water quality, and the optimization model with constraints is constructed to estimate the parameters. The objective function of the optimization model is solved by Solver in Microsoft Excel and Monte Carlo simulation is conducted to know the influence of parameter in conventional pollutants. It is found that this technique is easily implemented and rapidly convergent computational procedure to calibrate the parameters after applying this approach in Anyang stream located in Kyonggi province mainly.

Keywords : QUAL2E, Monte Carlo simulation, optimization model, calibration, least-squares method

요 지

수질모델은 수계내 오염물질의 총량관리를 위한 오염물질관리 목표량 및 허용총량 파악, 그리고 삭감계획의 효과 분석 등에 효율적으로 사용할 수 있다. 그러나 선정 또는 개발된 모델의 재현성 제고를 위하여 매개변수의 최적화 작업이 필요하다. 본 연구에서는 하천수질관리에 가장 광범위하게 사용되고 있는 미국 EPA에서 개발한 QUAL2E 모델의 반응계수 보정을 위하여 최소자승법을 적용하였으며, 계수가 취할 수 있는 범위를 제약조건으로 갖는 최적화 모델을 구축하여 해를 구하였다. 최적화모델의 목적함수 해는 Microsoft Excel의 해 찾기 기능을 사용하여 구하였으며 수질항목에 대한 매개변수의 영향정도를 파악하기 위하여 Monte Carlo 모의를 실시하였다. 이 방법을 안양천 유역에 적용하여 본 결과 빠른 시간 안에 주관성이 배제된 매개변수 값을 확정할 수 있었다.

핵심용어 : QUAL2E, Monte Carlo 모의, 최적화모델, 보정, 최소자승법

1. 서 론

환경은 자체 정화능력이 있어 어느 정도 외부 환경 압력에 견딜 수 있으나 환경압력이 자정능력을 초과하

면 환경파괴 현상이 발생한다. 이의 하나인 수계의 오염문제는 농업용수 및 공업용수 등의 수자원이용을 부적절하게 하여 수확량 및 생산성의 감소를 초래하고 있으며, 또한 음용수로서의 가치를 상실하여 음용수 수질기준

* 국립환경대학교 환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Envir. Engrg., Hankyong National University, Ansong-si, Kyonggi 456-749, Korea
(E-mail : kskim@hnu.hankyong.ac.kr)
** 한국원자력연구소 연구원
Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute, Gongneung2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-240, Korea
*** 경기개발연구원 책임연구원
Associate Researcher, Kyonggi Research Institute, Pajang-dong, Changan-gu, Suwon, Kyonggi 440-290, Korea

을 만족하기 위한 수처리 비용의 과다를 유발하고 있다. 따라서 수계의 오염정도를 파악하고 원인인자를 규명하는 것은 적절한 수질보전대책 및 관리방안 수립을 위하여 필수적이다. 외부의 오염원 유입에 의하여 야기되는 수계의 수질변화는 계량화가 가능한 수학적 모델을 이용하여 파악할 수 있다. 수질은 유입 오염부하량의 크기에 따라 결정되며 수계내 오염물질은 이 물질의 화학 및 생물학적 특성에 의하여, 또한 수계의 물리적인 특성에 의하여 변화한다. 오염발생원으로부터 비롯되는 부하량은 수질모델을 통하여 농도로 파악되며, 이는 수이용에 필요한 수질기준과 비교·검토하게 된다. 목표로 하는 수질기준을 초과할 경우 다양한 방법을 모색하여 수질관리대책을 수립할 필요가 있다. 상용화된 모델은 이와 같은 현상을 규명하고 대책을 수립하는데 적절히 이용되고 있다 (Brown과 Barnwell, 1987; Chapra, 1997).

모델을 통하여 수질관리대책을 수립할 경우 모델의 현장 적합성 제고를 위하여 매개변수의 최적화작업이 필요하다. 매개변수 추정을 통한 모델의 재현성 향상은 다양한 기법을 동원하여 추진되고 있다. 그중의 하나가 시행착오법이며 이는 편이성은 좋으나 객관성이 결여되고, 모델의 보정 및 검증에 상당한 시간이 요한다는 단점을 갖고 있다. 이를 극복하기 위하여 최적화기법 (Becker와 Yeh, 1972; 전경수와 이길성, 1993; 백경원 등, 1995) 및 유전자 알고리즘법(Mulligan과 Brown, 1998; 김성태 등, 1999; 심순보 등, 2001) 등이 활용되고 있으며 이의 적용성 향상을 위하여 전문가 시스템 (Wood 등, 1990) 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 계산치와 실측치 차이의 제곱의 합을 최소화하는 최소자승법을 하천수질관리에 가장 광범위하게 사용되고 있는 미국 EPA에서 개발한 QUAL2E 모델의 반응계수 보정에 사용하였으며 (Chapra와 Canale, 2002), 계수가 취할 수 있는 범위를 제약조건으로 갖는 최적화 모델을 구축하여 해를 구하였다. 최적화모델의 목적함수는 오차를 다중변수 Taylor급수로 1차 근사하여 얻었으며, 해는 Microsoft Excel의 해 찾기 기능을 사용하여 구하였고, 수질항목에 대한 매개변수의 영향정도를 파악하기 위하여 Monte Carlo 모의를 실시하였다. 이 기법을 안양천에 적용하여 본 결과 빠른 시간 안에 주관성이 배제된 매개변수 값을 확정할 수 있었다.

2. 최적화 모델

매개변수 보정을 위하여 적용된 최소자승법은 계산

치가 실측치를 잘 적합할 수 있도록 계산치와 실측치의 차이의 제곱의 합을 최소화 시키는 기법으로 이를 최적화모델로 수식화하여 나타내면 다음과 같다. 먼저 목적함수는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\min z = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N (\epsilon_{i,j})^2 \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 실측치와 계산치의 차 즉, 오차이며, 아래첨자 i 및 j 는 각각 수질항목 및 측정지점을 나타내며, N 은 수질항목의 수, L 은 수질측정지점의 수이다. 계산치는 매개변수의 함수이므로 식 (1)의 제약조건은 식 (2)와 같이 표현가능하다.

$$p_{m,l} \leq p_m \leq p_{m,u} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

여기서 p 는 매개변수, 아래첨자 m 은 특정매개변수, l 및 u 는 하한 및 상한을 나타내며, M 은 매개변수의 수이다.

식 (1)과 (2)로 주어지는 최적화 모델을 풀기위한 과정은 다음과 같다.

단계 1. 초기 매개변수(p_m^0) 가정

위첨자 0은 초기치를 의미하며 상한 및 하한치 내에 존재하는 초기매개변수 값을 이용하여 QUAL2E모델을 통한 계산치와 실측치의 차를 계산한다.

단계 2. 새 매개변수(p_m^k) 추정

새 매개변수는 초기 오차를 줄이는 방향으로 추정해야 하며 이를 위하여 오차를 다중변수 Taylor급수로 1차 근사하면 식 (3)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{i,j}^k &= \epsilon_{i,j}^{k-1} + (p_1^k - p_1^{k-1}) \frac{\partial \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\partial p_1^{k-1}} \\ &+ \dots + (p_M^k - p_M^{k-1}) \frac{\partial \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\partial p_M^{k-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 편미분은 식 (4)와 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\partial p_m^{k-1}} \approx \frac{\Delta \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\Delta p_m^{k-1}} \quad (4)$$

식 (4)는 $k-1$ 계산단계에서 p_m 만의 미소변화에 대한 $\epsilon_{i,j}$ 의 변화정도를 의미한다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하고 이를 식 (1)에 대입하면 식 (5)와 같고 이를 최소화하는 매개변수를 산정하면 된다.

단계 3. 오차의 제곱합 구함

$$\min z = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N [\epsilon_{i,j}^{k-1} + (p_1^k - p_1^{k-1}) \frac{\Delta \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\Delta p_1^{k-1}} + \dots + (p_M^k - p_M^{k-1}) \frac{\Delta \epsilon_{i,j}^{k-1}}{\Delta p_M^{k-1}}]^2 \quad (5)$$

새매개변수를 사용하여 QUAL2E 모델을 통한 계산치를 구하고 이를 실측치와의 차, 즉 오차를 구하고 이의 제곱 합을 구한다.

단계 4. 단계 2-3 반복

제곱 합이 특정 수치보다 크거나 계속하여 개선되면 단계 2-3을 반복하며 이와 반대면 계산을 종료한다.

3. 모델 적용

3.1 QUAL2E 모델

QUAL2E는 현재 하천수질을 모의하기 위한 모형 중에서 가장 광범위하게 사용되는 모델이며, 종 및 횡 방향으로 잘 혼합된 수지상의 하천에서 15개까지의 수질 항목을 모의할 수 있고, 다수의 폐수방류, 취수, 지천

및 증분되는 유·출입양 조건을 고려할 수 있다. QUAL2E는 1970년 미국 TWDB(Texas Water Development Board)와 F.D. Masch 및 다수의 협력자들이 공동 개발한 QUAL-I 모델에 기초하고 있으며 1972년도에 WRE(Water Resources Engineers, Inc.)는 미국 EPA와 협력하여 QUAL-I 모델을 수정·보완하여 QUAL-II 모델의 첫 판을 발표하였고 그 후 수년 동안 이 모델은 몇 차례의 수정을 거쳐 지금의 "Enhanced QUAL-II 모델", 간략히 나타내어 QUAL2E 모델로 공개되었다. 여기에는 모델의 불확실성을 해석할 수 있는 기능이 첨부되어 있으며 이 모델에서 수행 가능한 모의 항목 및 수질항목간의 상호작용은 그림 1과 같다.

3.2 대상하천

모델 적용 대상하천은 한강 하류부에 위치한 안양천으로 하였으며 총 모의구간은 상류부에 위치한 왕곡천 본류 합류지점전인 고천2교에서 목감천 유입 본류 하류 지점인 고척교까지 23.4km로 하였다(경기도, 2003). 구간은 유입지천, 오염원 및 수로 특성을 고려하여 수리학적 특성이 비슷한 11개로 구분하였으며 계산요소는 200m로 하였다. 구간 1은 9개, 구간 2는 9개, 구간 3은 10개, 구간 4는 8개, 구간 5는 4개, 구간 6은 11개, 구간 7은 8개, 구간 8은 20개, 구간 9는 10개, 구간 10은 14개, 구간11은 14개로, 총 117개의 계산요소가 설정되었다. 지천 및 안

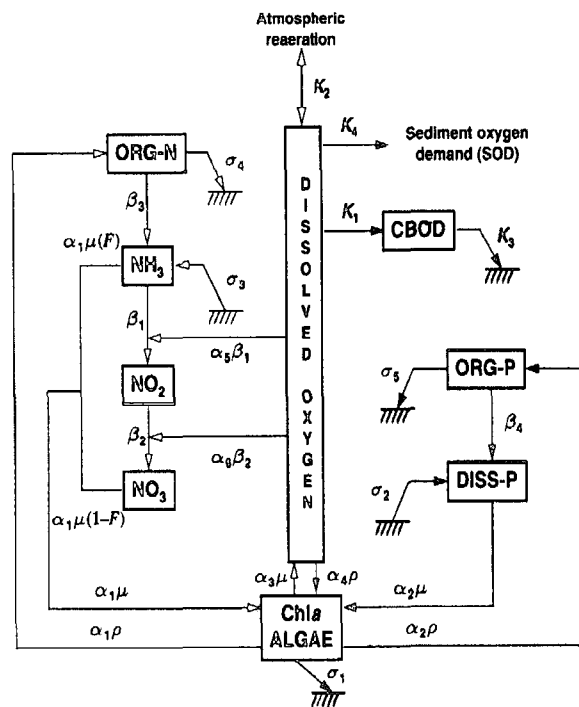


그림 1. QUAL2E 모의항목 및 상호작용

양하수종말처리장을 포함한 11개의 점오염원이 고려되었으며 본류에 7개의 수질 및 수량 측정지점(고천2교, 애자교, 동양교, 비산대교, 안양대교, 기아대교, 고척교)을 선정하였다(그림 2). 수질 및 유량측정은 2002년 9월 30일 및 10월 1일에 실시하였고 수질분석항목은 총 20개, 분석방법은 수질오염공정시험방법(환경부, 2000) 및 Standard Methods(1999)에 준하였으며 QUAL2E 모의항목은 DO, BOD, Org-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, Org-P, Dis-P, Chl-a 등 9개이다. 하천의 수리특성은 같은 해 3회에 걸친 유량측정 자료를 활용하여 유량계수법을 통해 파악하였다.

3.3 Monte Carlo 모의

본 연구에서는 일정한 수치를 가정할 수 있는 매개변수 이외의 15개 주요 매개변수(K_1 (탈산소계수), K_2 (재포기계수), K_3 (BOD 침강계수), K_4 (퇴적물 산소요구량), ρ (호흡율), μ_{max} (최대 성장률), α_1 (조류 침강속도), σ_2 (용존인 하상공급원), α_3 (NH₃-N 하상공급원), α_4 (Org-N 침강속도), α_5 (유기인 침강속도), β_1 (NH₃-N 반응속도상수), β_2 (NO₂-N 반응속도상수), β_3 (Org-N 반응속도상수), β_4 (유기인 반응속도상수))의 모델영향정도를 파악하기 위하여 Monte Carlo 모의를 실시하였다. QUAL2E 모델에서 Monte Carlo 모의는 입력 매개변수의 변동계수(Coefficient of variation, COV)와 분포형태(정규 또는 대수정규 분포)를 지정해 주어야 한다. 분포



그림 2. 안양천 유역도

형태는 계수의 상한치가 하한치의 10배가 넘지 않는 경우는 정규분포로, 넘는 경우도 계수에 대한 정규 및 대수정규분포의 확률밀도함수를 비교해 본 결과 별 차이가 없어 정규분포로 가정하였으며 K_1 의 경우 확률밀도함수가 그림 3에 도시되어 있다. 변동계수는 매개변수의 상한치와 하한치가 대부분의 매개변수 값을 포함하는 $\pm 5\sigma$ (표준편차)가 되도록 입력하였으며 K_1 의 경우 상한치와 하한치는 모델 사용자 지침서에서 제시한 0.02와 $3.4d^{-1}$ 을 사용하였다. 다른 매개변수의 상한치와 하한치도 사용자 지침서에서 제시한 수치를 사용하였으며 적용된 변동계수는 QUAL2E에서 기본값으로 제시되어 있는 수치와 유사하게 나타났다(표 1).

Monte Carlo 모의 횟수는 사용자 지침서에서 제안한 2000회로 하였으며 기아대교 지점에서의 BOD 모의 결과가 표 2 및 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에 보이듯이 BOD 분포는 정규분포와 비슷하나 오른쪽으로 약간 왜곡된 형태를 보이며 다른 지점에서도 비슷한 양상을 나타냈다. 또한 그림 1에서 알 수 있듯이 BOD는 K_1 및 K_3 에만 영향을 받으므로 이들 이외의 다른 매개변수 변화에 의한 모의 결과는 일정구간에서 2000회의 결과가 나타나는 변동계수가 0인 양상을 보였다.

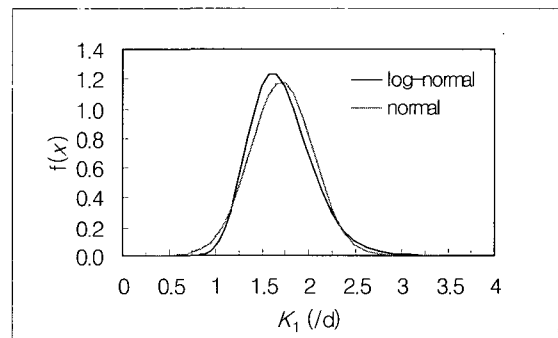


그림 3. K_1 확률밀도함수

표 1. 매개변수 변동계수

parameters	COV	
	default	input
K_1	0.150	0.198
K_3	0.150	0.200
α_1	0.200	0.196
β_1	0.200	0.164
β_2	0.200	0.164
β_3	0.200	0.181
α_5	0.200	0.196
β_4	0.200	0.194
ρ	0.100	0.164
μ_{max}	0.100	0.100

표 2. 기아대교 지점 Monte Carlo 모의 결과 (BOD)

base mean	sim. mean	max.	min.	range	std. dev.	cov	coeff. skew.
6.592	6.616	8.285	5.566	2.719	0.395	0.060	0.431

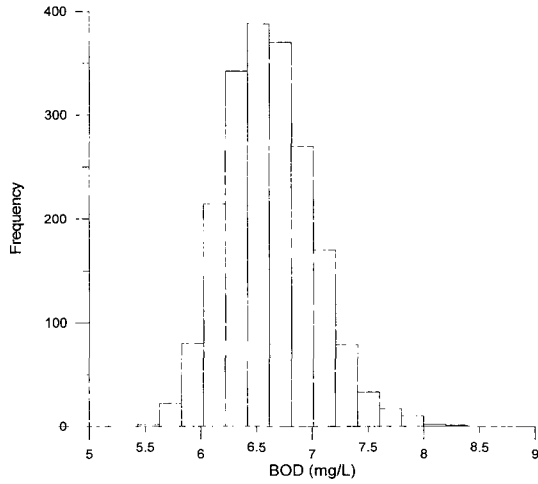


그림 4. 기아대교 지점 BOD 분포

안양천 5개 수질측정지점(애자교, 동양교, 동양대교, 기아대교, 고척교)에 대한 모의결과의 분포정도를 알아보기 위하여 수질항목별 각 매개변수의 변동계수를 파악하였으며 평균치가 표 3에 나타나 있다. K_2 는 하천의 수리특성에 따라 고정화할 수 있으며, K_4 는 안양천 유역의 경우 하수도 보급률이 95% 이상을 보이고 있어 당정천 유입 분류 하류구간 이외에는 무시할 정도이며, α 는 0.1 m/d로 일정한 수치를 적용할 수 있어 본 표에 포함하지 않았다. 또한 변동계수가 0.001보다 작거나 영향이 없는 경우는 제외하였다. 특이한 것은 β_3 이 $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 뿐만 아니라 DO에도 상당한 영향을 미친다는 사실이다.

표 3을 통하여 수질항목에 대한 매개변수의 영향정도를 파악할 수 있으며 이를 근거로 최소 자승법에 기초한 QUAL2E 모델의 매개변수를 보정할 수 있다.

3.4 매개변수 보정

3.4.1 Chl- a (μ_{\max} , ρ)

Chl- a 는 μ_{\max} 및 ρ 에 영향을 받으며 영향정도가 비슷함을 표 3으로부터 알 수 있다. 표 4는 매개변수보정 결과를 정리한 것으로 초기값은 상한과 하한치 차이가 10 배를 넘지 않으면 산술평균을, 넘으면 기하평균의 근접값을 취하였으며, $\Delta\mu_{\max}$ 및 $\Delta\rho$ 는 각 값의 20%를 사용하였다. SSE는 오차의 제곱합(sum of the squares of the errors)이다. 최적화 모델의 목적함수는 Microsoft Excel의 해 찾기(Solver) 기능을 사용하여 구하였다. 이 기능은 도구(Tools) 메뉴에 있으며 그림 5는 Excel의 해 찾기 창을 보여주고 있다. 표 4에 보이듯이 첫 반복에서 매개변수의 극한값에 도달하므로 더 이상 계산을 수행하지 않았으며 실측치와 보정한 계수를 사용한 계산치를 비교한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 Chl- a 농도가 높아지면 실측치에 더욱 근접하나 높아질 수 있는 조건인 큰 μ_{\max} 및 작은 ρ 값은 제약조건에서 가한 값 이상 및 이하로 변할 수 없으므로 SSE가 더 이상 개선되지 않을 것을 알 수 있다. 실측치와 계산치의 상이성은 실측치의 대표성 결여와 모델 재현성의 한계를 설명하고 있으며, 이는 구간별 매개변수의 최적화 작업을 통하여 다소 개선할 수 있을 것이다.

표 3. 수질항목별 매개변수 변동계수

parameters	DO	BOD	Org-N	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	Org-P	Dis-P	Chl- a
K_1	0.010	0.060						
K_3		0.012						
α			0.002					
β_1	0.007			0.016	0.007			
β_2					0.008			
β_3			0.009	0.022				
α_5						0.002		
β_4						0.013	0.011	
ρ								0.006
μ_{\max}								0.005

표 4. Chl-a 매개변수 보정 결과

iteration	$\mu_{max}/(d)$		ρ/d		SSE
	min.	max.	min.	max.	
	1	3	0.05	0.5	
0	2.00		0.16		1.078
1	3.00		0.05		1.020

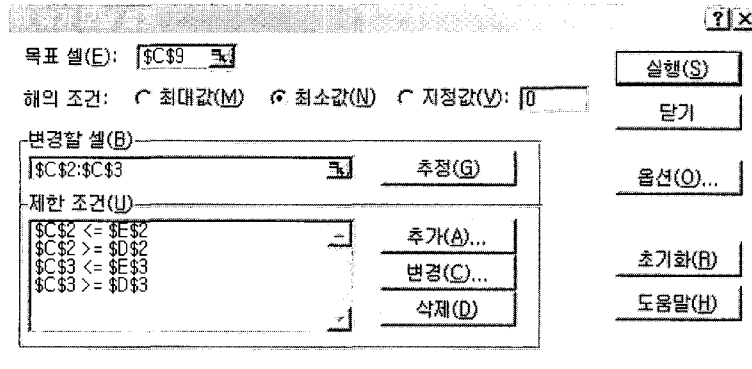


그림 5. Excel의 해 찾기 창

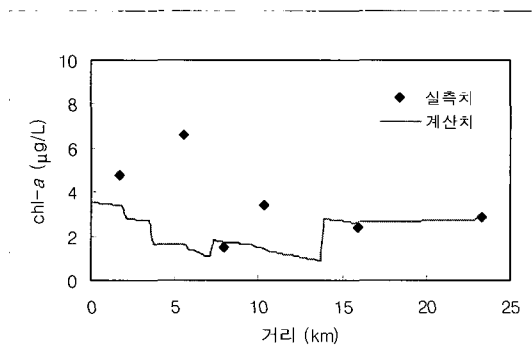


그림 6. Chl-a 농도 비교

3.4.2 Org-P 및 Dis-P (β_1 , α)

Org-P 및 Dis-P는 β_1 및 α 에 영향을 받으며 β_1 는 Org-P, Dis-P 모두에 영향을 미치고 있다. β_1 변동계수는 α 의 약 5배정도가 되므로 $\Delta\beta_1$ 및 $\Delta\alpha$ 는 각각 20 및 100%를 취하였다. 매개변수보정 결과를 정리한 표 5로부터 SSE는 첫 번째 반복에서 개선되지 않으며 두 번째 반복에서 초기 가정보다 0.016 개선되는 것으로 나타났다. 그림 7은 모의결과를 보여주고 있다.

3.4.3 DO 및 BOD (K_1 , K_3)

DO는 K_1 및 β_1 에, BOD는 K_1 및 K_3 에 영향을 받으며, 또한 β_1 은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 그리고 이 농도변화는 다른 변수에 영향을 받음을 표 3으로부터 알 수 있다. 결론적으로 DO 및 BOD는 Org-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 변화와 함께 변하며 여기에 관여하는 매개변수는 6개 (K_1 , K_3 , α , β_1 , β_2 , β_3)이다. 이 변수들을 모두 고려하여 DO 및 BOD를 모의하는 것은 매개변수의 초기값 가정, 증분 등 불확실한 요소가 많으므로 먼저 간편한 해석을 위하여 DO 및 BOD와 관련 있는 매개변수 중 변동계수가 작은 β_1 을 제외한 K_1 및 K_3 만을 고려하도록 한다. ΔK_1 및 ΔK_3 를 각각 10%를 취한 보정 결과가 표 6에 나타나 있으며, 증분은 K_1 및 K_3 에 의한 수질함량 민감도가 높아 $\Delta\mu_{max}$ 및 $\Delta\rho$ 보다 낮게 취하였다. 세 번째 반복 (3-1)에서 제품의 합이 전 단계 값과 같으며 ΔK_1 및 ΔK_3 를 각각 0.001%를 취하여 해를 구한 결과(반복 3-2) 수렴도가 약간 개선되는 것으로 나타났다. 그림 8에 보이듯이 계산결과가 실측치를 잘 모의하며 후에 여기에서 얻어진 K_1 및 K_3 값을 사용하여 Org-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 보정시 DO 및 BOD도 함께 보정하여 K_1 및 K_3 를 재수정 하도록 한다.

표 5. Org-P 및 Dis-P 매개변수 보정 결과

iteration	$\beta_1(d)$		$\alpha(d)$		SSE		
	min.	max.	min.	max.	Org-P	Dis-P	Total
	0.01	0.7	0.001	0.1			
0	0.100		0.010		3.530	1.578	5.108
1	0.010		0.010		3.618	1.506	5.124
2	0.066		0.010		3.525	1.567	5.092

표 6. DO 및 BOD 매개변수 보정 결과

iteration	K_1 (/d)		K_3 (/d)		SSE		
	min.	max.	min.	max.	DO	BOD	Total
	0.02	3.4	-0.36	0.36			
0	0.200		0.000		0.408	0.763	1.171
1	0.742		0.165		0.182	0.494	0.676
2	0.848		0.292		0.179	0.477	0.655
3-1	0.844		0.341		0.179	0.476	0.655
3-2	0.866		0.292		0.179	0.475	0.654

표 7. Org-N, $\text{HN}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 매개변수 보정 결과

iter.	K_1 (/d)		K_3 (/d)		β_1 (/d)		β_2 (/d)		β_3 (/d)		SSE					
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	DO	BOD	Org-N	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	Total
	0.02	3.4	-0.36	0.36	0.1	1.0	0.2	2	0.02	0.4						
0	0.850	0.300	0.300	0.600	0.100	0.215	0.476	0.766	0.591	0.430	2.478					
1	0.740	0.360	0.200	0.200	0.134	0.175	0.478	0.775	0.594	0.426	2.448					
2	0.556	0.360	0.395	0.200	0.158	0.179	0.493	0.780	0.566	0.425	2.443					

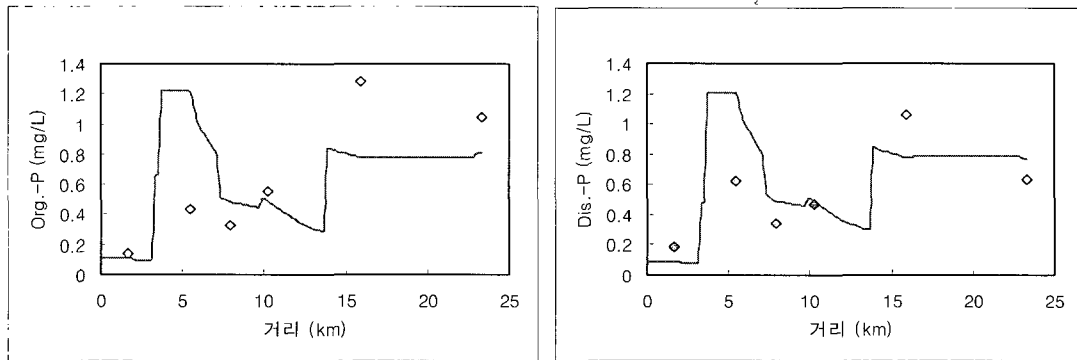


그림 7. Org-P, Dis-P 농도 비교

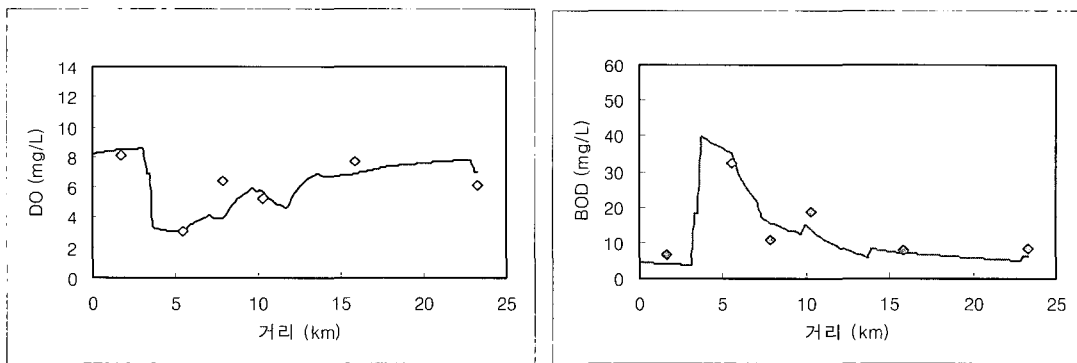


그림 8. DO, BOD 농도 비교

3.4.4 Org-N, $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ (α_1 , β_1 , β_2 , β_3)

위에서 언급한 바와 같이 Org-N, $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 DO 및 BOD변화에 영향을 받으며 영향을 주고받는 매개변수는 변동계수가 작은 α_1 를 제외하면 5개이다. 위에서 구한 $K_1(0.866 \approx 0.85)$ 및 $K_3(0.292 \approx 0.3)$ 를 초기 값으로 첫 번째 반복에서 Δp_m 을 10%를 취하여 Org-N, $\text{NH}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 보정하였다 (표 7). 보정

결과는 SSE가 약 0.03정도 개선되는 것으로 나타났으며 첫 번째 반복에서 K_3 및 β_3 는 극한값을 갖는 것으로 파악되었다. 수렴된 해를 얻기 위하여 두 번째 반복에서 Δp_m 을 5%를 취했으며 수질항목의 모의 결과가 그림 9에 나타나 있다. 수정된 K_1 및 K_3 에 대한 DO 및 BOD 농도는 그림 8과 유사하게 나타나 도시를 생략하였다.

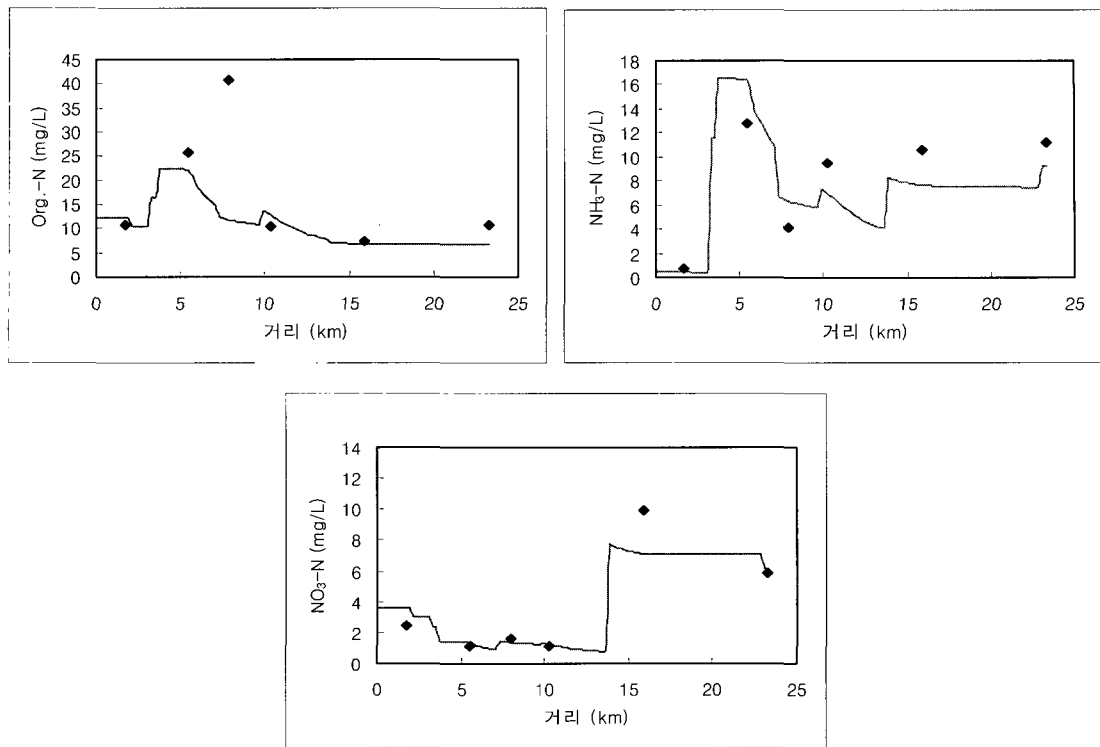


그림 9. Org-N, NH₃-N, NO₃-N 농도 비교

4. 결 론

본 연구에서는 QUAL2E 모델 반응계수 보정을 위하여 최소자승법을 적용하였으며, 해는 제약조건을 갖는 최적화 모델을 구축하여 구하였다. 수질항목에 대한 매개변수의 영향정도를 파악하기 위하여 Monte Carlo 모의를 실시하였으며, 이를 기초로 최적화 모델을 안양천 유역에 적용하여 보았다. 연구결과 및 장래연구방향을 서술하면 다음과 같다.

- 1) Monte Carlo 모의결과 안양천 DO는 K_1 및 K_4 뿐만 아니라 β 에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 3 매개변수의 변이에 따른 DO변화를 파악하여야 하며 계수의 민감도 분석은 꼭 필요한 단계로 재확인 되었다.
- 2) Monte Carlo 모의에서 매개변수 확률밀도함수는 변수가 취할 수 있는 양 극한값을 $\pm 5\sigma$ 로 할 경우 정규 및 대수정규분포사이에 큰 차이를 보이지 않았으며, 정규분포를 사용할 경우 COV는 사용자 지침서에서 제시한 COV와 크게 다르지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 1차 근사 Taylor 급수에 의한 최적화 모델은 수렴도가 양호하여 낮은 반복횟수에도 만족할만한 성과를 보이는 것으로 나타났다.

- 4) 매개변수들은 수질항목에 미치는 영향정도로 그룹화 가능한데 안양천의 경우 ρ , μ_{max} 및 α 은 Chl-*a*, K_1 , K_2 , K_3 , K_4 및 β 은 DO 및 BOD, α 및 β_2 는 P , α_4 , β_1 , β_2 및 β_3 는 N과 관련있는 것으로 나타났다.
- 5) 다른 반응계수 보정 기법보다 본 방법은 단순하고, 최적화모델의 목적함수를 구하기 위하여 Excel의 해 찾기 기능을 사용하는 등 실무 적용성이 뛰어나 모델 적용의 수월성이 제고될 것으로 사료된다.
- 6) 오차가 적은 실측자료가 확보되면 구간별 상이한 매개변수를 추정하여 모델의 재현성을 향상시킬 수 있을 것이며, 최적화모델의 수렴성 확보를 위하여 해에 근접한 매개변수 초기값 및 적절한 변화율이 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국립환경대학교 환경연구소의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 경기도 (2003). 안양천 살리기 종합대책.
 김성태, 채수권, 김건홍 (1999). "유전 알고리즘을 이용

- 한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-4호, pp. 507-514.
- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우 (1995). “QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제2호, pp. 451-461.
- 심순보, 김연국, 김만식, 심규철 (2001). “유전자알고리즘을 이용한 WASP5/EUTRO5모형의 최적 매개변수 추정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제4-B호, pp. 315-326.
- 진경수, 이길성 (1993). “영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제4호, pp. 163-176.
- 환경부 (2000). **수질오염공정시험방법**.
- APHA (1999). *Standard methods for the examination of waters and wastewaters*, 20th ed.
- Becker, L., and Yeh, W. W-G. (1972). “Identification of parameters in unsteady open channel flow.” *WRR*. Vol. 8, No. 4, pp. 956-965.
- Brown, L. C., and Barnwell Jr., T. O. (1987). *The Enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual*, EPA/600/3-87/007, USEPA, Envir. Res. Lab., Athens, GA.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Chapra, S. C., and Canale, R. P. (2002). *Numerical methods for engineers*. 4th ed., McGraw-Hill, New York, NY.
- Mulligan, A. E., and Brown, L. C. (1998). “Genetic algorithm for calibrating water quality models.” *Journal of Environmental Engineering*. ASCE, Vol. 124, No. 3, pp. 202-211.
- Wood, D. M., Houck, M. H., and Bell, J. M. (1990). “Automated calibration and use of stream-quality simulation model.” *Journal of Environmental Engineering*. ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 236-249.

(논문번호:04-60/접수:2004.06.07/심사완료:2004.08.03)