

연구노트

## 1차원 수질 예측 모형의 검보정 자동화 시스템 개발 및 낙동강에서의 적용

손아롱\* · 한건연\*\* · 박경옥\*\*\* · 김병현\*\*\*\*

경북대학교 건축 토목공학부 박사수료\*, 경북대학교 건축 토목공학부 교수\*\*

국립환경과학원 전문위원\*\*\*, 캘리포니아 대학 post-doc 연구원\*\*\*\*

(2011년 4월 25일 접수, 2011년 9월 5일 승인)

### Development of 1-Dimensional Water Quality Model Automatizing Calibration-Correction and Application in Nakdong River

Son Ah Long\* · Han Kun Yeun\*\* · Park Kyung Ok\*\*\* · Kim Byung Hyun\*\*\*\*

PH.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ.\*

Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ.\*\*

Technical expert, National institute of environmental research\*\*\*

Post-doc researcher Civil engineering department, University of California\*\*\*\*

(Manuscript received 25 April 2011; accepted 5 September 2011)

### Abstract

According to the total pollution load management system, exact prediction and analysis of water quality and discharge has been required in order to allocate the amount of pollution load to each local government. In this study, QUAL2E model was used for comparison with other water quality models and improve the inadequate to forecast future water quality. And Various calibration and verification methods were applied to deal with existing uncertainties of parameter during modeling water quality. For user convenience, A GUI(Graphical User Interface) system named "QL2-XP" model is developed by object-oriented language for the user convenience and practical usage. Suggested GUI system consist of hydraulic analysis, water quality analysis, optimized model calibration processes, and postprocessing the simulation results. Therefore this model will be effectively utilized to manage practical and efficient water quality.

Keywords : Water Quality, QUAL2E, Optimization, QU2-XP

## 1. 서론

우리나라의 오염총량관리제는 2011년 현재 2차 총량관리계획기간에 접어들었으나 오염총량관리제 기본방침에 따라 모든 기초지자체별 오염 부하량 할당이 제대로 이루어 지지 않고 있다. 기초지자체별 오염 부하량을 정확히 할당하기 위해서는 하천 지점별 수질과 10년평균 저수량의 데이터를 활용할 필요가 있다. 따라서 오염물질이 하천으로 유입될 경우 수계에 미치는 영향에 대한 기준에 적용된 수질모형을 분석 및 문제점을 제시하고, 개선된 수질 모델링 기법을 제시하고자 한다. 이를 위해 우선, BOD, DO, T-N, T-P 등 유역특성에 맞는 수질 모델인자의 산정과 오염물질 유달률 산정 등을 통해서 타당한 모델링 결과를 우선적으로 낙동강 유역에 대하여 제시하고자 한다.

하천의 수질모형은 Streeter-Phelps가 유기물 산화와 용존산소 변화에 대한 모형을 최초로 제시하였으며, O'Conner (1960), O'Conner와 Ditoro 등(1970)에 의해 개선되어 왔다. 그 후 미국 환경청(EPA) 및 미 육군공병단(HEC)에서는 수질해석과 관련된 연구가 이루어져 수질관리 기법에 활용되고 있다.

국내 하천에서의 1차원 수질 모형의 적용 예를 살펴보면 QUAL-2 모형 적용이 주류를 이루고 있는데, 한국과학기술원(1982)에서 국내 유역에 대한 적용한계성을 검토한 바 있고, 최홍식과 이길성(1987)은 금강 유역에 대해 적용하여 해석하였다. 전경수와 이길성(1993)은 남한강과 북한강 유역에 적용하였고 영향계수를 이용한 반응계수의 추정을 실시한 바 있다. 한건연 등(2000)은 확정론적 수질해석시 나타나는 오차해석의 필요성을 분석한 바 있다. 송광덕 등(2006)은 수질모형의 매개변수 자동보정 프로그램 개발에 관한 연구를 실시한 바 있으며, 박정하 등(2008)은 보강천의 수질모의 분석에 QUAL-2 모형을 적용하였다. 최근에는 QUAL2E모형을 개선한 QUAK2K모형에 관한 연구가 증가하고 있다. 정성수 등(2008) 안양천에서 두 모형에 대한 적용 및 평가를 하였으며, 박성천 등(2009)은 탐진강 유역의 수질모의를 QUAL2K모형으로 실시하였다.

그러나 본 연구에서는 자료접근의 용이성, 수리모형과 검보정 모형의 연계를 위한 모형 코드 접근의 용이성 등의 이유로 QUAL2E모형을 적용하였다.

오염물 총량규제 시행에 따라 다수의 오염원을 효율적으로 제어할 수 있는 최적수질관리 기법의 개발과 최적화 과정의 불확실성을 처리할 수 있는 추계학적 수질해석 방법의 도입이 요구되고 있는 실정이다. 하천수질의 불확실성 해석을 위한 연구로서 Burges와 Lettenmaier(1975), McDonnell 등(1982)은 용존산소 모형의 불확실성 해석을 위하여 1차 오차해석기법을 적용하였고, Warwick와 Cale(1988)은 모형 출력 불확실도에 대한 입력 매개변수 불확실도의 영향을 조사하기 위해 Monte Carlo 방법을 사용하였다. Tung과 Hathhorn (1990), Melching(1992, 1997)은 DO 해석을 위해서 개선된 1차 오차해석기법을 사용하였다.

Han 등(2001)은 수질해석시 포함된 불확실도 해석을 위해 MFOSM 및 AFOSM 기법을 적용하였고, 그 결과를 Monte Carlo 기법과 비교 검토하였으며, Bae 등(2002)은 GIS 기법과 연계한 수질매개변수 보정과정을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 수질 모델링을 비교 분석을 통하여 적용성을 검토하고 QUAL2E모형을 보완하고자 한다. 또한 하천의 수질예측을 위한 수질 모형의 이용에 있어서 매개변수의 결정은 현장 조사를 통해서 산출하고 검토하여 적정 값을 사용하여야 한다. 그러나 실험을 통한 모든 매개변수의 결정은 불가능할 뿐만 아니라 많은 시간과 노력을 필요로 하며 또한 많은 오차가 포함될 가능성이 크다고 할 수 있다. 일반적으로 많은 수질항목 및 반응계수를 포함하는 복잡한 수질모형에서의 매개변수 추정은 실측치와 모형에 의한 계산치의 차이가 최소가 될 때까지 반복하는 방법과 같은 주로 경험에 의한 시행착오법에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 수질 모형에 의한 계산치와 실측치와의 비교를 위해서 민감도 분석, 전문가 시스템 적용, 난수발생 기법의 적용, 최적화기법 적용 등 자동 검보정 기법을 개발하여 제시하였으며 기존의 QUAL2E 모형

을 편리하게 수행할 수 있도록 편의시스템(GUI)을 추가한 QL2-XP 모형을 개발하였다.

## II. 모형의 기본 이론

하천에서의 수질모형은 비교적 단순한 해석적 모형으로부터 매우 정교한 부정류 모형에 이르기까지 광범위하지만 하천에서 가장 큰 수질변화 양상은 흐름 방향에 대하여 발생하고, 따라서 단면 평균치를 취한 1차원 수질해석 모형이 일반적으로 적절하므로 QUAL2E모형을 적용하였다.

수질해석 모형은 각각 균질의 수문지형 특성을 가진 하천 구간을 다루며 각 구간은 일련의 동일한 거리를 가진 계산요소 또는 검사체적으로 나누어진다. 수질항목을 계산하기 위하여 다음과 같은 질량 평형방정식을 적용하였다.

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial(A_c E)}{\partial x} dx - \frac{\partial(A_c U c)}{\partial x} dx + V \frac{dc}{dt} + s \quad (1)$$

축적      확산      이송      동역학생성소멸

여기서,  $V$ 는 체적,  $c$ 는 오염물 농도,  $A_c$ 는 계산요소의 단면적,  $E$ 는 종확산계수,  $x$ 는 거리,  $U$ = 평균유속,  $s$ 는 오염물의 외부적인 생성/소멸항이다.

식 (1)에서 물질이동은 이송과 확산의 두가지 성분으로 구성되며 이송은 물이 하류방향으로 유하할 때의 오염물의 거동으로 정의되며, 확산은 주로 전단에 의해서 발생하는 오염물의 분산과정과 관계된다. 본 모형은 15가지 수질 항목에 대하여 반응 동역학 모의를 수행하며 정상상태와 시간변동상태에 따라 2가지 형태의 해석이 수행될 수 있다. 본 연구에서는 FORTRAN 77로 코드가 작성된 QUAL2E 모형과 HEC-2모형을 사용하여 유량과 수질모형의 연계가 이루어 질 수 있도록 구성하였다.

## III. 다른모형과의 적용성 검토

기존의 QUAL2E 모형은 용존산소, 질소, 인과 Chl-a 대한 모의만 가능하고 내부생산 유기물의 증가를 모의할 수 없기 때문에 조류의 영향을 많이

받는 낙동강의 정확한 수질 평가를 할 수 없어 이에 대한 부분을 보완하기 위해서 WASP5 모형, CE-QUAL-RIV1 및 다른 수질 모형과의 비교 분석을 통해서 적용성을 검토하고 QUAL2E 모형을 보완하였다.

### 1. WASP6 모형

수질해석 프로그램인 WASP는 최초로 Di Toro 등(1983)에 의해서 개발되었고, 현재까지의 다양한 적용을 통해서 수정·보완되었으며 1993년 현재 WASP5 모형으로 발전되었다. 이 모형에 대한 적용 예로서는 Great Lake의 부영양화와 PCB 오염물, Potomac 만의 부영양화(O' Connor 등, 1983), Delaware 만의 휘발성 유기오염물(Ambrose, 1987), 그리고 North Carolina의 Deep 강의 중금속 오염물(JRB, 1984)을 검토하는데 사용되었다(Thomann, 1975; Thomann 등, 1976; Thomann 등, 1979; Di Toro와 Connolly, 1980).

### 2. CE-QUAL-RIV1 모형

많은 수의 완전 동역학적인 하천 수질모형이 개발되어 왔는데 대표적인 모형으로서는 CE-QUAL-RIV1로서 특별히 수량을 조절할 수 있는 하도 구간에 적용하도록 구성되어 있다. CE-QUAL-RIV1은 미 육군 공병단에 의하여 많은 통제된 하천구역의 환경해석에 적용된 바 있는데 이것들 중에는 수력발전용 댐 하류부 하천의 수량의 재조정, 보충 하도구간에서의 주운을 위한 해석 등의 경우에 적용하였다.

### 3. QUALKO

QUALKO는 전 대상 수역을 크게  $n$ 개의 구간(reach)으로 나누고, 각 구간 내부를 소구간 요소(element)로 다시 나누어 농도를 소 구간별로 계산하는 방법을 이용하고 있다. QUALKO는 조류 생산 및 사멸에 의한 내부 생산 유기물 증가를 고려하고, Bottle BOD 개념을 도입하였다. 부유조류가 사멸하게 되면 조류의 탄소성 유기물이 수준으로 순

환되어 수체내의 유기물 증가를 가져오게 된다. 기존의 QUAL2E 모형에서는 단지 Chl-a와 질소·인, 용존산소에 대한 순환만 모의가 가능하며 내부생산 유기물의 증가를 모의할 수 없기 때문에 조류가 많이 성장하는 시기에는 정확한 수질 평가를 할 수 없어 이에 대한 부분이 보완된 것이다.

#### 4. QUAL2K

QUAL2K모형은 QUAL2E 모형을 보완한 최신 버전의 수질모형이다. QUAL2K은 비 등구간 구획구분이 가능하며 유기탄소를 나타내기 위해서 2가지 형태의 탄소를 사용한다. QUAL2K 모형은 입력과 출력을 Excel/VBA의 worksheet에서 이루어져 사용자에게 편리하다. 그러나 기존의 수질 자료는 QUAL2E모형을 수행하기 위하여 측정된 관계로 QUAL2K 모형을 모의하기에는 수질 항목이 부족할 뿐만 아니라 수리모형과의 연계에 있어서도 QUAL2K 모형의 코드에 접근이 용이하지 않다. 또한 QUAL2K 모형과 QUAL2E모형의 결과에 있어서도 QUAL2K모형이 우수하며 다양한 수질항목과 반응기작을 고려하여 실제자연현상에 더 가깝게 접근하나 실측값과의 비교에 있어 상대오차와 분산계수에 큰 차이를 보이고 있지 않았다. QUAL2K모형의 코드에 접근이 용이해질 경우 본 모형 또한 개선되어져야 할 것으로 판단된다.

#### 5. 선정된 모형의 개선

기존의 QUAL2E 모형은 용존산소, 질소, 인과 Chl-a 대한 모의만 가능하고 내부생산 유기물의 증가를 모의할 수 없기 때문에 조류의 영향을 많이 받는 낙동강의 정확한 수질 평가를 할 수 없어 이에 대한 부분을 보완하기 위해서 WASP5 모형 및 다른 수질 모형과의 비교 분석을 실시하였으며 모형의 개선을 위하여 Bottle BOD의 개념을 도입하였다.

현장 측정에서 조류의 호흡과 탄소 부패로 오염될 수 있기 때문에, 내부적으로 계산된 CBOD 값의 사용은 관측 BOD5 값과 비교하여 적절하지 않다. 현장 측정치와 비교하여 적절히 비교하기 위하여

내부적으로 계산된 모형의 BOD는 보정 되어야 한다. 이 개념이 Bottle BOD5 이며, 식 (2)으로 계산된 새로운 변수를 도입한다.

$$\begin{aligned} \text{bottle BOD}_5 = & C_5(1 - e^{-5k_{\text{dbot}}}) + \frac{64}{14} C_1(1 - e^{-5k_{\text{dbot}}}) \\ & + a_{oc} C_4(1 - e^{-5k_{1R}}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, C5는 내부적으로 계산된 CBOD, mg/L, C1는 내부적으로 계산된 NH3, mg/L, C4는 탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 농도, mg/L, aoc는 산소대 탄소의 비율, 32/12 mg O2/mg C, kdbot는 실험실 "bottle" 탈산소계수 (day-1), knbot는 실험실 "bottle" 질산화율 (day-1), k1R는 조류의 호흡률, at 20 °C (day-1)이다.

Bottle BOD 개념을 QUAL2E 모형에 도입하기 위해서 모의로 구한 BOD값(C5)을 위의 Bottle BOD5공식에 C5값을 대입하여 새로운 BOD 값을 구한다. QUAL2E 모형에 Bottle BOD를 고려하는 방법은 코드를 수정하여  $k_{\text{dbot}}$ ,  $k_{\text{nbot}}$  값을 코드를 추가시키거나 출력값에서 BOD값을 수정하는 방법으로 적용하였다. Bottle BOD 고려한 WASP5 모형과 QUAL2E 모형의 계수 비교하면 다음과 같다 :

CBOD의 농도 (mg/l): C5 = L

암모니아성 질소의 농도 (mg/l): C1 =

탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 농도 (mg/l): C4 = A

상수값으로 표시될 수 있는 항 :

$$\textcircled{1} k_{1R} = k_{1R}(20^\circ\text{C})\theta^{(T-20)} 0.125 \times 1.045^{(T-20)}$$

여기서,  $k_{1R}$  (at 20°C) : 0.02 day-1 ~ 0.60 day-1  
(0.05 day-1 ~ 0.20 day-1)

$$\theta_{1R} = 1.045$$

$$\textcircled{2} a_{oc} = 32/12 = 2.67$$

## IV. 모형의 검보정

모의를 성공적으로 수행하기 위해서는 입력자료에 의한 오류를 방지해야 하고, 각종 자료의 가용성 및 신뢰성을 높이는 것은 물론, 수질영향인자에 의한 오차를 최소화시키기 위한 보정 작업이 타당하게 수행되어야 한다. 모형보정의 종류는 크게 시행착오법, 자동보정법, 혼합보정법으로 나눌 수 있다. 시행착오법은 실측 또는 선정된 영향인자를 구간별

로 임의성을 가지고 변화시켜 예측수질을 실측수질에 근접시키는 방법이며, 자동보정법은 실측치와 모의결과치간의 차이를 목적함수로 하고 이를 최소화시키는 수학적인 방법을 이용하여 프로그램에 의해서 최적의 영향인자의 값을 자동적으로 찾아내 보정하도록 하는 방법이다. 또한 혼합보정법은 자동보정법과 시행착오법을 혼용한 방법으로서 시행착오법에 의하여 실측치에 근접시킨 반응계수를 구해내고 이를 자동보정법의 초기치로 사용함으로써 자동보정법에서 신속히 최적치를 찾아내도록 하는 방법이다.

### 1. 민감도 분석

본 연구에서 모형의 적용대상 유역도는 다음 그림 1과 같으며 사용된 QUAL2E 수질모형과 관련된 수질매개변수들은 표 1과 같이 구분될 수 있으며 이들 매개변수들을 중심으로 해석 결과값에 미치는 영향을 분석하기 위해서 민감도 분석을 실시하였다. 일반적으로 민감도 분석은 모형의 적용결과에 미치는 각 매개변수들의 중요성을 체계적으로 파악하려는 과정으로서 각 매개변수들을 적용범위내에서 변화시키면서 관측값과 모의값을 근사시키기 위

한 시도를 반복적으로 수행한다. 이 경우 민감도가 높은 매개변수로부터 민감도가 낮은 매개변수의 순으로 추정해 나가는 방법이 가장 효율적인 방법이지만 이러한 매개변수의 민감도는 적용하는 대상과 매개변수 추정과정에 따라 변화는 것으로 알려져 있어 일반적인 민감도 순위를 제시하기 어렵다 (Baffaut 등, 1987). 이러한 민감도는 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, 식 (4)와 같이 정규화된 형태로 사용하기도 한다.

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{3}$$

$$S_N = \frac{\Delta y/Y}{\Delta x/X} \tag{4}$$

여기서, X는 입력 매개변수의 기본값, Y는 출력 변수의 기본값, Δx는 입력 매개변수에 대한 변화량, Δy는 출력 변수에 대한 변화량이다.

특정 매개변수에 대한 민감도를 결정하기 위한 방법으로서 다른 매개변수들의 값은 표 1에 제시된 기준치로 고정시키고 해당 매개변수의 적용범위내에서 변화시키면서 모형의 계산을 수행하였다. 계산된 민감도 값이 0.1보다 작은 경우에는 해당 매개변수의 민감도는 작은 것으로 고려하여 제거하였다. 왜냐하면 민감도가 낮은 매개변수를 고려할 경

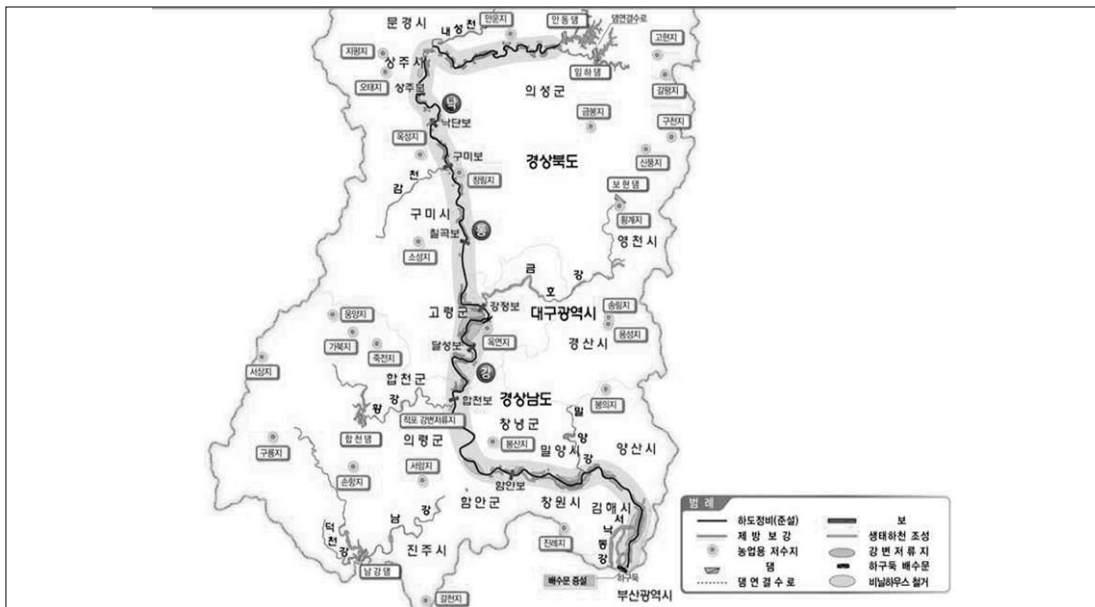
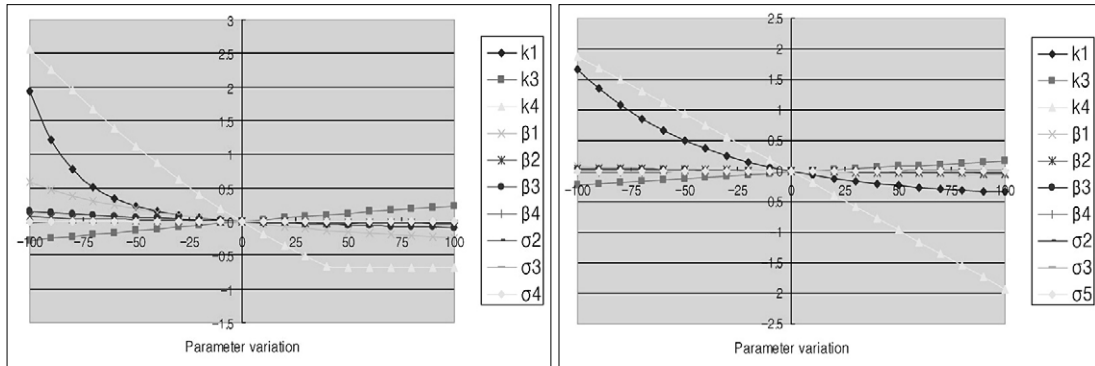


그림 1. 적용대상 구간

표 1. 매개변수의 정의 및 적용범위

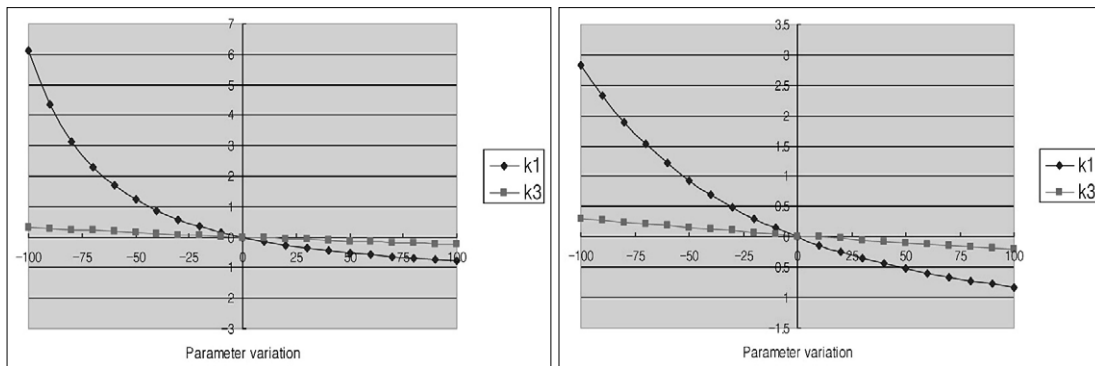
반응 계수	정의	하한치	기준치	상한치
$K_1$	탄소성 BOD의 탈산소계수 (1/day)	0.02	1.69	3.40
$K_3$	탄소성 BOD의 침전계수 (1/day)	-0.36	0.00	0.36
$K_4$	하상산소요구량( $mg/m^2/day$ )	0.07	3.47	7.00
$\beta_3$	유기질소의 산화율 (1/day)	0.02	0.19	0.40
$\sigma_4$	유기질소의 침전율 (1/day)	0.001	0.05	0.10
$\beta_1$	암모니아성 질소의 산화율 (1/day)	0.10	0.45	1.00
$\sigma_3$	암모니아성 질소의 하상 증가율 (1/day)	0.0004	0.90	1.80
$\beta_2$	아질산성질소의 산화율 (1/day)	0.20	0.90	2.00
$\beta_4$	유기인의 산화율 (1/day)	0.01	0.35	0.70
$\sigma_5$	유기인의 침전율 (1/day)	0.001	0.05	0.1
$\sigma_2$	용존인의 하상증가율 (1/day)	0.0004	0.85	1.7



(a) 왜관~남지 구간

(b) 남지~낙동강 하구연 구간

그림 2. DO에 대한 민감도 분석



(a) 왜관~남지 구간

(b) 남지~낙동강 하구연 구간

그림 3. BOD에 대한 민감도 분석

우 모의값이 뚜렷한 개선없이 수렴시간만 길어지거나 수렴조건이 헛수가 제안될 경우 매개변수들이 비현실적인 값으로 산출될 가능성이 크기 때문이

다. 매개변수의 기준값으로부터  $\pm 10\%$ 씩 단계적으로 변화시키면서 모의된 오염물질의 농도값 즉, DO, BOD, 유기질소, 암모니아성 질소 등을 비교하

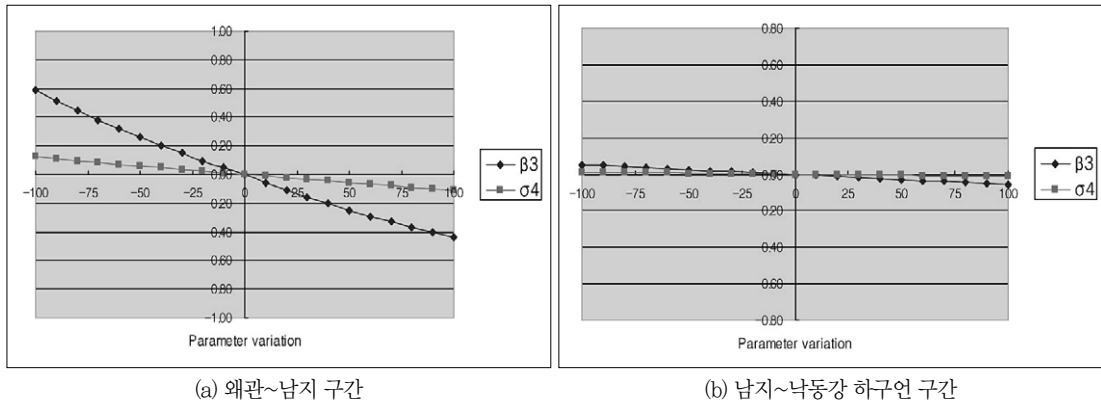


그림 4. ORG-N에 대한 민감도 분석

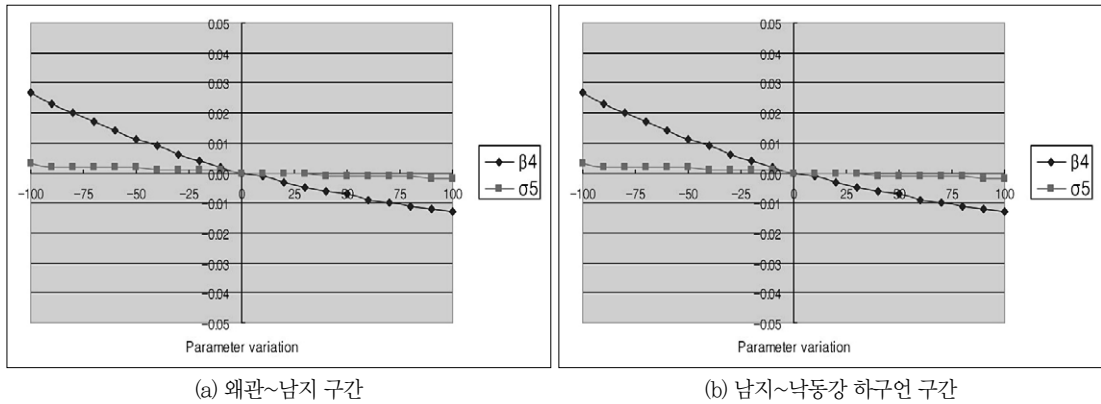


그림 5. ORG-P에 대한 민감도 분석

여 그림 2~5에 제시하였다. 그 결과 각 매개변수들의 변화에 따른 변화양상을 살펴보면 DO의 경우, 매개변수의 증가에 따라 DO농도는 감소하는 경향을 보이고 있으며 BOD의 경우에는 의 증가에 따라 BOD농도는 각각 증가 및 감소하는 반응을 보이고 있는 것으로 나타났다.

## 2. 전문가 시스템에 의한 검보정기법

그림 6는 전문가 시스템에 의한 추론전략을 이용한 과정을 나타낸다. 일반적으로 전문가 시스템은 많은 양의 규칙을 기초로 하여 사용자와 질의 및 응답을 통해 결론을 추론해 내는 방법을 사용하고 있으며, 이러한 시스템에서는 전문가의 지식을 많은 양의 간단한 규칙으로 구성하고 있다. 매개변수의 기여도를 산정한 후 추론

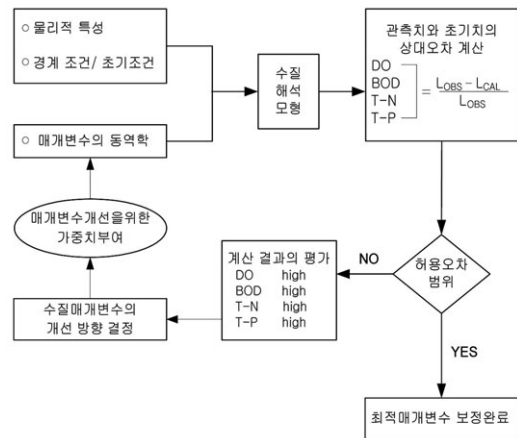


그림 6. 수질모형의 보정 및 검증과정

수질매개변수 추정은 모형에 의해 산정된 모의값과 관측값의 상대오차가 허용범위내일 경우 종결

표 2. 매개변수 추정을 위한 추론전략

Parameter		$K_1$	$K_3$	$K_4$	$\beta_3$	$\sigma_4$	$\beta_1$	$\sigma_3$	$\beta_2$	$\beta_4$
DO	high	↑	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-
	low	↓	↓	-	↓	-	↓	-	↓	-
BOD	high	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-
	low	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-
ORG-N	high	-	-	-	↑	↑	-	-	-	-
	low	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-
NH <sub>3</sub>	high	-	-	-	↓	↑	↑	-	-	-
	low	-	-	-	↑	↓	↓	-	-	-
NO <sub>2</sub>	high	-	-	-	↓	-	↓	-	↑	-
	low	-	-	-	↑	-	↑	-	↓	-
NO <sub>3</sub>	high	-	-	-	↓	-	↓	-	↓	-
	low	-	-	-	↑	-	↑	-	↑	-
ORG-P	high	-	-	-	-	-	-	-	-	↑
	low	-	-	-	-	-	-	-	-	↓
PO <sub>4</sub>	high	-	-	-	-	-	-	-	-	↓
	low	-	-	-	-	-	-	-	-	↑

하도록 하였으며, 식 (5)을 목적함수로 사용하여 추론과정의 진행 및 매개변수들의 민감도를 검토하는 기준으로 이용하였다.

$$\begin{pmatrix} DO \\ BOD \\ ORG-N \\ NH_3 \\ NO_2 \\ NO_3 \\ ORG-P \\ PO_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L_{OBS} - L_{CAL}}{L_{OBS}} \quad (5)$$

여기서, n은 비교대상지점의 수,  $L_{OBS}$ 관측된 오염물질 농도,  $L_{CAL}$ 모의된 오염물질 농도를 의미하며 이러한 새로운 매개변수 추정을 위한 추론전략을 표 2와 같이 구성하였다.

매개변수의 민감도 분석결과를 통하여 매개변수의 증가 및 감소에 따른 모의결과의 변화양상을 알 수 있었으며 관측값과 모의값을 비교하여 그 결과에 영향을 미치는 매개변수를 선정하고, 그 차이를 감소시킬 수 있는 방향으로 매개변수를 변화시킴으로써 적절한 매개변수들을 추정하도록 하였다. 본 모형에서 매개변수 추정을 위한 추론규칙을 살펴보면, 모의치의 BOD농도가 오차범위보다 높을 경우  $K_1$ ,  $K_3$ 를 증가시킴으로서 모의결과를 개선시킬 수

있었다. 이때 매개변수의 증가 및 감소범위는 표 5.2에 제시된 가중치를 활용하여 매개변수를 증·감시키고 오차범위를 벗어나는 모의항목 개수만큼 나누어 새로운 매개변수를 추정하도록 하였다. 또한 매개변수의 적용범위를 고려하여 최대치와 최소치 내에서 합리적인 매개변수 추정이 되도록 하였다.

수질매개변수 가운데 매개변수의 중요도 순위를 결정하고 중요한 매개변수를 구분하여 가중치를 부여하기 위하여 모의 수질농도에 대한 각 매개변수가 미치는 기여도를 다음의 식(6)으로 계산하였다. 표 2는 민감도 분석 결과를 이용하여 산출된 기여도를 나타내고 있다.

$$Var(Y_j) = \sum_i Var(X_i) \times \left(\frac{\Delta Y_j}{\Delta X_i}\right)^2 \quad (6)$$

식 (6)에서와 같이 각 항은 입력변수에 의하여 기여된 출력변수의 분산성분이다. 출력분산 성분인 는 입력에 대한 모형출력의 민감도인 에 의해서 입력분산의 가중치를 나타내고 있다(한건연 등, 1999). 이러한 절차를 통해서 구해진 기여도는 표 3과 같으며 이를 매개변수의 개선을 위한 가중치로 활용함으로써 수렴조건의 횟수와 계산수렴시간을 줄이도록 하였다.



표 3. 입력 매개변수의 출력변수에 대한 기여도 계산

	DO	BOD	Org-N	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Org-P	Dis-P
$K_1$	22.397	68.912	-	4.343	0.333	4.015	-	-
$K_2$	21.749	40.780	-	19.031	7.801	10.638	-	-
$K_4$	69.384	-	-	15.327	11.645	3.644	-	-
$\beta_1$	38.932	-	-	30.573	9.481	21.014	-	-
$\beta_2$	7.216	-	-	3.299	46.460	43.024	-	-
$\beta_3$	19.831	-	39.662	28.059	7.489	4.958	-	-
$\beta_4$	10.870	-	-	8.696	-	4.348	40.580	35.507
$\sigma_2$	20.000	-	-	50.000	-	-	-	30.000
$\sigma_3$	30.769	-	-	46.154	23.077	-	-	-
$\sigma_4$	1.724	-	63.793	20.690	6.897	6.897	-	-
$\sigma_5$	15.385	-	-	-	-	-	61.538	23.077

### 3. 난수발생을 이용한 검보정기법

난수발생을 이용한 검보정기법은 수질모형의 매개변수 추정을 위해서 대상 오염물질에 대한 반응상수의 임의구간을 설정하고 그 구간내에서 임의 발생된 난수를 이용하여 매개변수를 선정한다. 선정된 매개변수를 적용하여 수질모의를 실시한 후, 임의구간내에서 모형계산치와 실측치의 오차범위가 최소화되도록 시행착오적인 계산을 반복 수행한다. 많은 연구자들에 의해서 Monte Carlo 기법에 대한 연구결과는 기대되는 시스템의 반응이 동일한 시스템에 대한 확정론적인 해와 상이할 수 있다는 것을 제시한 바 있고, Monte Carlo 해석 결과가 확정론적 결과에 비하여 더욱 안정된 해를 제시하는 것으로 나타났다. 이는 모형입력의 작은 변화가 확정론적 해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, Monte Carlo 결과에는 그 영향이 작게 나타났다.

Monte Carlo 모의수행을 위해 난수를 발생시키는 기본 공식은 식 (7)과 같다.

$$Z_i = aZ_{i-1} + c(\text{mod } m), i = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

위 식과 같은 합동법(congruential method)은 주어지는 연속된 정수  $Z_i$ 에 의한다. 여기서  $a$ ,  $c$ 와  $m$ 은 주어진 적당한 상수이다.

식 (7)에서  $a \neq 1$ ,  $c > 0$  이면 혼합합동법(mixed congruential method)이라고 하고,  $a = 1$ ,  $c = 0$ 이면 배수합동법(multiplicative congruential

method)이라고 한다. 식 (7)에 의해 정수가 발생되려면 상수  $a$ ,  $c$ ,  $m$ 과 초기값  $Z_0$ 의 값이 주어져야 한다. 이렇게 4개의 값이 주어지면 정수는  $Z_1, Z_2, \dots$ 로 생성된다.

### 4. 최적화 기법에 의한 검보정기법

본 연구에서는 모형의 매개변수를 분산모형과 일괄모형의 두 가지 개념을 혼용하여 사용하였다. 낙동강 전체 하도구간이 340 km에 달하는 긴 하도이므로 전체에 대해서 공간적으로 균일한 매개변수(일괄 매개변수)를 사용할 경우에는 하천의 특징지점에서의 특징적인 거동을 모의할 수 없게 되는 단점이 있다. 하지만 수질 매개변수를 전체 하도구간, 혹은 분할한 요소에 대해서 추정할 경우에는 추정할 매개변수의 수가 크게 늘어나게 되므로 최적 추정에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 최적알고리즘을 수행하여 일괄모형의 개념으로 매개변수를 추정하고, 하도를 따라서 일어나는 국부적인 변화에 대해서는 자료를 참조하여 시행착오법에 의해서 2차적으로 보완하는 방법을 사용하였다. 2차적으로 매개변수를 추정하기 위해서 수질관측자료가 있는 지점을 기준으로 요소를 분할하여 동 요소에서는 같은 매개변수값을 사용하였다. 수질모형의 보정 및 검증과정은 추정 매개변수의 선정, 목적함수를 구성하여 관측치와의 오차를 줄이는 최적화모형의 구성, 추정된 매개변수를 사용하여 검증하는

과정으로 이루어진다.

본 연구에서는 오차의 제곱합을 최소화 하는 최적 매개변수의 추정에 대하여 수행하였다. 최적화 과정은 IMSL에서 지원하는 부프로그램을 사용하였으며 전체적인 변수 추정방법은 Han 등(2001)에 의하여 수렴속도의 우수성이 판명되고, 한강수계에 적용된 QUAL2E 모형의 변수추정시 적용(Han, 2001)된 영향계수법(Becker and Yeh, 1973)을 이용하여 수행하였다.

### 5. 사용자편의시스템(GUI)의 개발

본 연구에서는 기존의 QUAL2E 모형을 편리하게 수행할 수 있도록 사용자편의시스템(GUI : Graphical User Interface)인 QL2-XP를 개발하였다.

본 모형의 GUI는 Windows-XP를 비롯한 모든 환경에서 실행이 가능하다. 또한 기존의 QUAL2E-Windows 와의 차별화를 위해서 다음과 같은 기능을 강화하여 새롭게 구축하였다.

- (1) 입출력자료의 일괄처리 기능
- (2) 하천의 단면자료와 유량자료등을 이용한 수리해석 기능
- (3) 수리해석 결과에 의한 회귀식 산정기능
- (4) 모형의 검보정의 자동화 기능
  - 최적화기법
- (5) 검보정된 해석결과와 실측자료와의 각종 통계분석 기능
  - 오차의 계산
  - 상관식의 계산
- (6) 그 외 사용자 요구에 따라 기능추가가 가능함

본 시스템에서 구축된 QL2-XP 모형의 GUI 기본화면은 그림 7에 도시하였으며 수행절차를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 풀다운 메뉴 및 아이콘 메뉴로 구성되어 초보자도 사용하기 쉽게 개발되었으며, 파일, 수리해석, 모형 수행 입력, 모형의 검보정, 결과확인, 도움말 등의 메뉴로 구성하였으며, 아이콘 메뉴는 입·출력에 필요한 각종 기능을 수행하는 아이콘으로 구성하였다. 그림 7은 본 연구에서 구축된 GUI의 개념도이다.

시스템을 실행하기 위해서는 사용자가 Dialog를

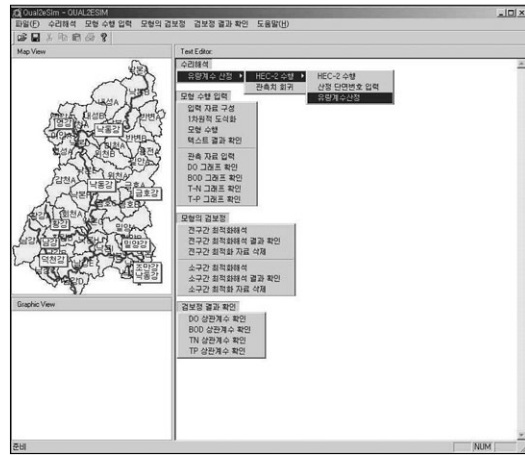


그림 7. 수량 및 수질통합 GUI 시스템

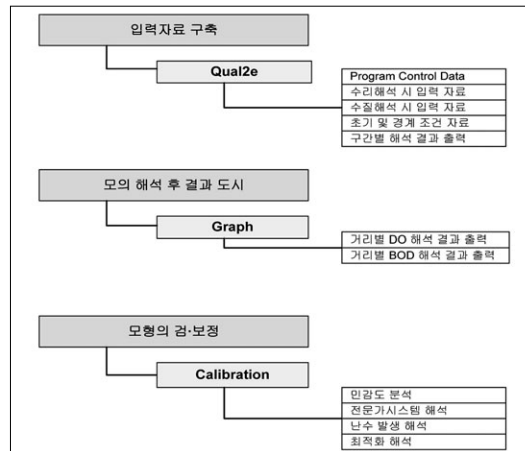


그림 8. 하천 수질모형을 위한 GUI 설계

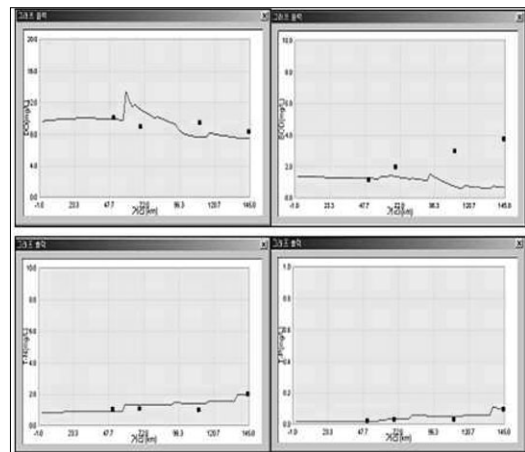


그림 9. 모의 수행 결과

통해 작업대상 구역 및 element를 지정하고 메뉴에

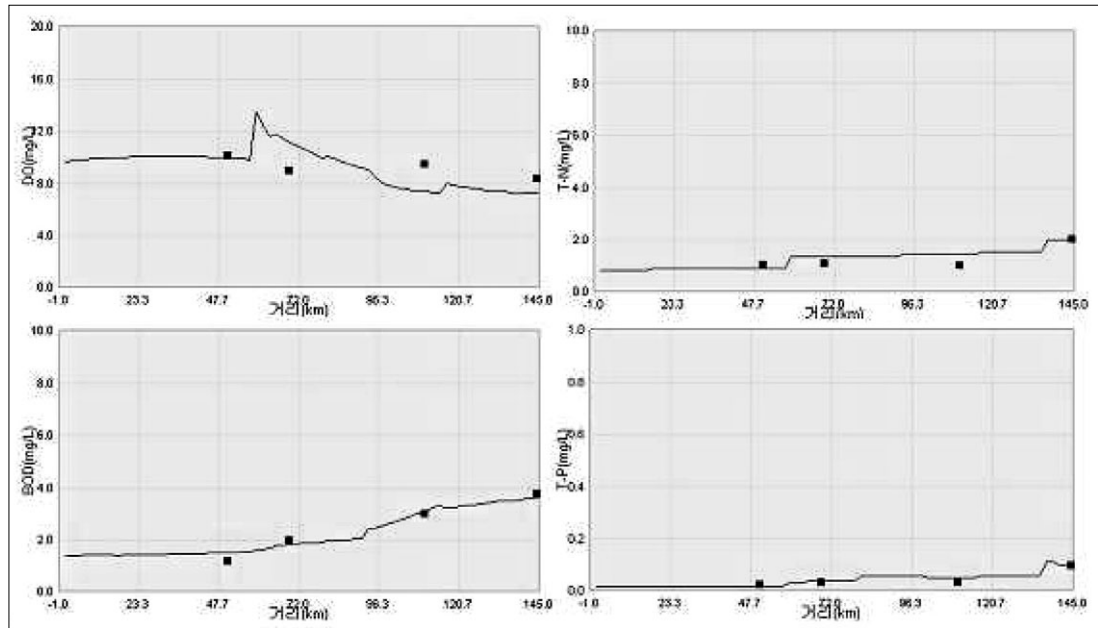


그림 10. 모형의 검보정 결과

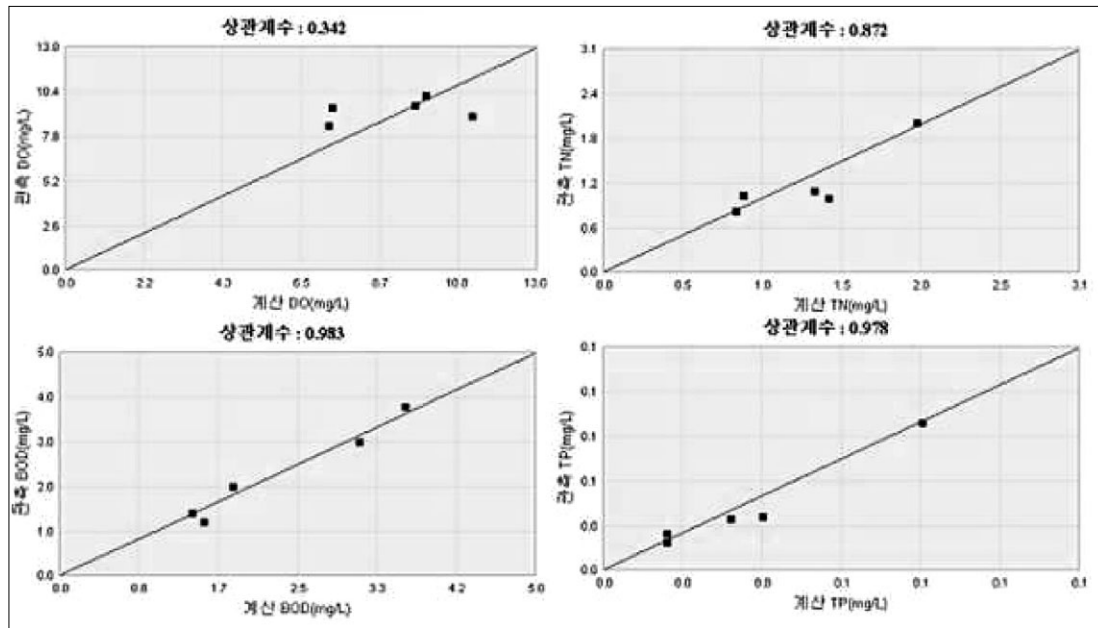


그림 11. 모형의 상관관계

서 원하는 기능을 선택하면 열리게 된다. 여기서 모형 수행 시 필요한 Option 또는 매개변수를 사용자로부터 입력받고 Window를 구성하고 있는 각 버튼의 명령에 따라 실행될 코드를 호출하여 입력값을 텍스트 파일로 저장되게 된다. 그 후 저장된 텍

스트 파일은 모형의 입력문으로 구성되어 모형이 수행된다.

QUAL2E 모형과 관련된 낙동강수질관리시스템은 크게 입력자료 구축 및 보정 부분과 결과출력 기능으로 나눌 수 있고, 입력자료 구축 및 보정은 최

적화 해석에 의해 실행되고, 결과 출력은 속도 및 DO, BOD, T-N, T-P의 출력으로 구성되어 있다.

모의한 결과를 그래프 상으로 확인하기 위해서 모의 수행 입력 메뉴 하부 항목인 DO 그래프 확인, BOD 그래프 확인, T-N 그래프 확인, T-P 그래프 확인 메뉴를 선택하여 보도록 한다. 각 항목에 대한 결과는 그림 9과 같으며 거리별로 각 항목들의 값이 제시되게 된다. 모의 결과를 바탕으로 모형의 검보정을 실시하였으며 결과는 그림 10와 같으며 그림 11에 상관관계를 제시하였다.

## 6. 결론

본 연구는 낙동강 유역에 적합한 체계적인 수질 해석기법의 개발을 실시한 것으로서 본 연구를 통한 연구결과는 다음과 같다.

기존의 QUAL2E 모형은 내부생산 유기물의 증가를 모의할 수 없기 때문에 조류의 영향을 많이 받는 낙동강의 정확한 수질 평가를 할 수 없어 이에 대한 부분을 보완하기 위해서 WASP5 모형, CE-QUAL-RIV1 모형 및 기타 수질 모형과의 비교 분석을 통해서 적용성을 검토하고 QUAL2E 모형을 보완하였으며 수질모형에 의한 계산치와 실측치와의 비교를 위해서 민감도 분석, 전문가시스템 적용, 난수발생기법 적용, 최적화기법 적용 등 자동 검보정 기법을 개발하여 제시하였다. 따라서 낙동강 구간에 대해서 수질에 미치는 반응상수에 대한 민감도 분석을 실시하였고, 입력 매개변수가 출력 변수에 미치는 기여도를 산출하여 매개변수 추정을 위한 추론전략을 수립하였다. 이에 따라 기존의 QUAL2E 모형을 편리하게 수행할 수 있도록 사용자 편의시스템(GUI)을 추가한 QL2-XP 모형을 개발하였다. 새롭게 개발된 GUI 시스템 내에는 입출력 자료의 일괄처리 기능, 하천의 단면자료와 유량 자료 등을 이용한 수리해석 기능, 수리해석 결과에 의한 회귀식 산정 기능, 모형 검보정의 자동화 기능, 검보정된 해석 결과와 실측 자료간의 통계분석 기능 등이 포함되어 있다. 낙동강 340km에 대한

적용결과 계산치와 관측치 사이에 DO를 제외한 BOD, TN, TP는 높은 상관성을 보이고 있었다. DO의 경우 그 값에 영향을 미치는 반응계수가 다른 항목에 비하여 매우 많아 민감성 정도가 큰 것으로 판단되어 좀 더 면밀한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

2011년도 BK21 사업에 의해 지원되었음.

## 참고문헌

- 건설교통부 (1997). 낙동강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정보고서.
- 국립환경연구원 (2001). 낙동강 수계별 오염부하량 조사연구 (I).
- 낙동강환경관리청 (2002). 낙동강 유역 환경지도
- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우 (1995). "QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석." 대한토목학회 논문집, 제15권 제2호.
- 전경수, 이길성 (1993). "영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정." 대한토목학회 논문집, 제13권 제4호, pp.163-176.
- 정성수, 김경섭 (2008). "안양천에서 QUAL2E와 QUAL2K 모델의 적용 및 평가.
- 한건연 등 (1994). "낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석." 한국수문학회 논문집, 제27권 제1호, pp. 53-67.
- 한건연 등 (1994). "추계학적 해석기법에 의한 하천 수질 관리." 대한토목학회지, 제42권 제1호, pp.80-92.
- 한건연 (1999). "하천수질 모델링의 이론과 적용." 한국수자원학회지, 제32권 제1호, pp.22-31
- 환경부 (2001). 수질측정망 운영계획.
- Burger, S.J. and D.P. Lettenmaier (1975). "Probabilistic methods in stream quality management.", Water Resources Bulletin,

- Vol. 11, No. 1, pp. 115-130.
- Chadderton, R.A., Miller, A.C., and McDonnell, A.J. (1982). "Uncertainty analysis of dissolved oxygen models.", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 108, No. EE5, pp. 1003-1013.
- Tung, Y.K. and W.E. Hathhom. (1990). "Stochastic waste load allocation.", *Ecological Modeling*, pp. 29-46.
- Warwick, J.J. and Cale, W.G. (1988). "Estimation model reliability using data with uncertainty.", *Ecological Modeling*, pp. 169-181.