

연구논문

## 수질모형의 매개변수 자동보정 프로그램 개발에 관한 연구

송광덕 · 백도현\* · 이용운

전남대학교 환경공학과, 창원대학교 보건의과학과\*  
(2005년 12월 8일 접수, 2006년 4월 10일 승인)

### Development of Method for Deciding Automatically Parameters of Water Quality Simulation Models

Song, Kwang-Duck · Paik, Do Hyeon · Lee, Yong Woon

Department Of Environmental Engineering, Chonnam National University,  
Department Of Medical Science, Changwon National University\*  
(Manuscript received 8 December 2005; accepted 10 April 2006)

#### Abstract

Water quality simulation models include the difference between the measured and estimated values as an inevitable consequence because they represent the complicated natural phenomena as simplified mathematical equations. The major reason of the difference occurrence is due to the use of the imprecise values of the model parameters, but the parameter values are currently determined by the try and error method directly performed by humans. However, the use of this method requires many time and endeavor of humans, and generally does not obtain the most suitable parameter values. A method for deciding model parameter values is, therefore, developed in this study. The method minimizes the difference between the measured and estimated values and also distributes uniformly the measured values on the upper and lower sides of the line representing the estimated values. A user interface based on this method is also developed by using the Visual Basic 6.0 of Microsoft, and it can be operated in the environment of Windows 98/2000.

In this study, the method for deciding model parameter values is applied for estimating the water quality of the stream Ko-heung. The results of the application show that the method, including its computer program, can effectively obtain the most suitable parameter values and also save many working time in comparison with the existing method directly performed by humans.

Keywords : water quality model, auto\_calibration

## 1. 서론

하천에 대한 수질 모형의 궁극적인 목적은 오염원이 하천의 수질에 미치는 영향을 분석하고 예측하여, 오염원에 대한 대안을 설정하는데 있다. 따라서 적절한 보정과 검증과정을 거친 높은 정확도의 수질 모델이 필수적이다. 그러나 수질모델이란 수체내에서 일어나는 물리·화학적 자연현상을 단순화하여 수식화하였기 때문에 모의 결과와 실제 수질과의 차이는 피할 수 없는 것이기도 하다.

특히, 수질예측 모형의 입력자료 중 매개변수는 구성된 수질모형이 모의하고자 하는 수계를 얼마나 적절히 반영하고 있는가에 좌우됨에도 불구하고, 변수에 대한 실측이 어렵기 때문에 문헌조사에 의존하고 있어, 대부분의 수질모델링 과정에서 많은 오차의 원인이 되고 있다. 즉 사용자가 기존의 다른 지역에서 연구되어 있는 변수의 값을 이용하거나 사용자의 임의의 값을 선정하여 적용시키고 있는 실정이다.<sup>1)</sup>

과거에는 비교적 수질 모형의 구조가 간단한 BOD 및 DO의 모의에 대해서는 최적화에 의한 매개변수 보정 방법도 개발되어 왔으나, 현재는 모의 항목의 수가 많아져 모형의 구조가 복잡하고 그에 따라 보정할 매개변수가 많아짐에 따라 최적화 방법을 적용하기 어려운 실정이므로 대부분 시행착오법에 의존하여 모형의 매개변수를 보정 및 검증하게 되어 많은 시간과 노력이 소용되고 있다. 이때는 특정지역에서의 모형적용 경험에서 나오는 사전지식이나 사용자의 주관성이 개입되어 매개변수를 보정하게 된다.<sup>2), 3)</sup>

본 연구의 목적은 수질예측 모형의 매개변수 자동 보정 방법을 개발하고 프로그램화하는 것이다. 수질 모형 매개변수 보정방법은 세단계로 구성하였다. 첫 번째 단계는 수질모형의 매개변수 중에서 민감도가 높은 매개변수를 선택하고 변수들의 범위를 설정한 후 난수를 발생하여 모형을 반복 수행 한다. 수행결과, 수질모델에 의한 모의치와 실측치의 상관관계수가 가장 높은 매개변수들을 선택한다. 두 번째 단계는 선택된 매개변수들을 분석하여 변수의 범위를 재설정하여 첫 번째 단계와 같은 작업을 수행한다. 세 번째 단계는 첫 번째와 두 번째에 사용되었던 매개변수

를 최적의 값으로 고정시킨 후 나머지 매개변수들에 대하여 보정하도록 구성하였다.

본 연구에 사용된 수질예측 모형은 국내에서 하천의 연구가 시작되면서 주로 사용된 하천수질 예측모형인 QUAL2E 모형을 사용하였으며, 모형의 모의수질 항목으로는 모의가능 전 항목인 BOD와 DO, 질소 순환요소, 인 순환요소, 조류(엽록소a) 등을 포함하였다.

## II. 연구방법

### 1. QUAL2E의 개요

QUAL2E 모형은 정상상태(Steady-state)와 준동적상태(Pseudo dynamic state)의 두가지 모의가 가능하며, 공간적으로 1차원 모형이다. QUAL2E 모형은 이전의 모델에 비해 조류와 용존산소와의 상호관계, 온도보정계수, 댐에 의한 하천수의 산소공급 및 비보존성 물질과 3가지의 보존성 물질, 입·출력 방법개량 등을 보완시킨 1차원 수질 예측 모델로서 1차원 정상상태는 물론이고 동적 상태에서도 예측할 수 있으며, 일반 PC에 이용 가능하게 개발되었다. 그리고 현재 국내 및 국외에서 하천수질모형으로 널리 사용되고 있다. 그러나 QUAL2E는 수초나 부착조류에 의한 용존산소 변화와 부유 조류 사멸시 발생하는 유기물이 고려되지 않았으며, 혐기성 상태에서 발생하는 탈질화 과정이 포함되지 않아 수질변화에 이들의 영향이 크게 작용하는 하천에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 QUAL2E는 적용하천의 연결지류와 구간 그리고 계산요소수가 제한되어 있어 대형수계에 적용하기 위해서는 구간별로 모형을 구성하고 반복해야하는 문제점이 있다.<sup>7)</sup>

QUAL2E 모델의 자료입력 File에 입력되는 사항은 모델 수행 제어 관련사항, 입·출력 옵션, 모델수행 전체에 영향을 미치는 하천시스템의 기상, 기후 및 지형, 온도 보정계수, 하천구간 식별 및 위치, 희석유량, 구간의 유형식별 자료, 하도의 수리계수, BOD와 DO의 반응계수, 질소와 인의 반응계수, 조류와 기타 항목의 반응계수, 비점원의 증분 유입자

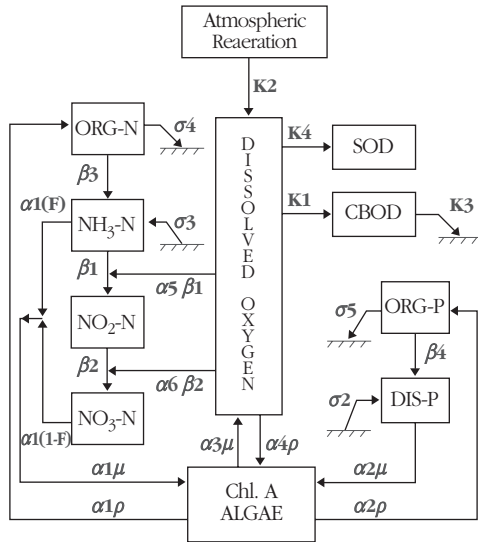


Fig. 1. QUAL2E Kinetics

료, 하천 합류점 자료, 상류 수원자료, 점오염원의 오염부하량 자료, 댐의 재포기 사항, 하천 경계조건, 기상 자료 및 그림출력 사항 등이 입력된다.

QUAL2E 모형에서 사용되는 수질 매개변수는 BOD와 DO에 관련된 변수와 조류와 영양염류와의 관계를 결정하는 변수로 나누어지는데, 실제로 수질 예측 대상하천에 이와 같은 수질계수를 적용하기 위해서는 직접 실측하여야 한다. 그러나 여기에는 여건 상 많은 시간과 경비가 소요되므로 실제로는 모델의 사용자 매뉴얼상에 제시된 범위의 값 중 적당한 값을 가정하여 모델을 수행한 후 실측값과 예측값을 비교하여 실측값에 가까운 값을 가정한다.

## 2. 자동보정프로그램에 의한 매개변수 보정방법

본 연구는 시행착오법에 의해 변수를 보정할 때 발생하는 문제점을 해결하기 위해 변수보정 프로그램을 만들었으며, 수질모형의 매개변수 보정 알고리즘은 Fig. 2에 나타내었다.

먼저 1단계로 수질모형 매개변수 보정방법은 세 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계는 수질모형의 매개변수 중에서 민감도가 높은 매개변수를 선택하고 변수들의 범위를 설정한 후 난수를 발생하여 모형을 반복

수행 한다. 수행 중에 실측값과 모형에서의 예측값과 상관관계 등을 분석하여 함께 데이터베이스에 저장한다. 실측값과 예측값의 상관관계 분석시에 식 (1)에 표현된 상관계수(R) 뿐만 아니라, 상관관계 그래프상에서 직선의 상·하에 위치하는 수를 세어 D·B에 저장하도록 하였다. 일정량의 수행회수(보통 1000~2000회)를 마친 뒤, 수질모형에 의한 예측치와 실측치의 상관계수가 가장 높은 매개변수들을 선택한다. 이는 사람이 시행착오를 거치는 방법보다 빠르고, 전 범위에 대한 변수를 모의할 수 있다. 2단계 작업에서는 1단계작업에서 선택된 변수의 조합을 바탕으로 범위를 재설정하여 1단계와 같은 작업을 한다. 2단계가 마무리되면 3단계로 1, 2 단계에서 보정된 최적변수들은 고정시킨 후 민감도가 낮은 다른 변수에 보정작업을 수행 한다.

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n (X-X')(Y-Y')}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (X-X')^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (Y-Y')^2}}$$

여기서, X = 실측치

X' = 실측치의 평균

X = 계산치

X' = 계산치의 평균

본 연구의 매개변수 보정방법의 주요 내용은 실측치들이 예측선 상하에 가능한 균등히 분포되도록 하고, 실측치와 예측치의 차이를 최소화하는 것이다.

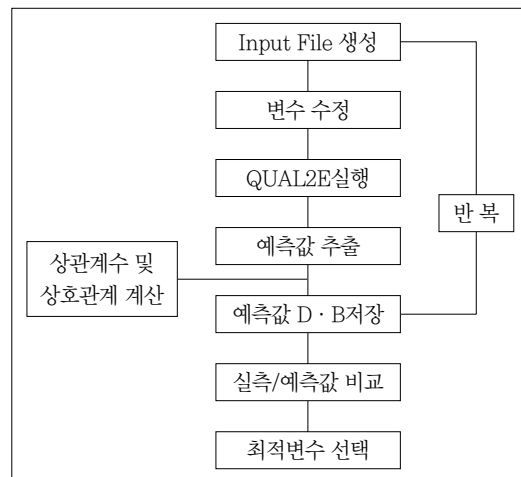


Fig. 2. Flow Chart of Auto Calibration Algorithm



Fig. 3. Study area

개발된 프로그램을 이용하면 시행착오방법보다 전 범위의 변수값을 분석할 수 있게 되어 보다 정확한 변수 값을 찾을 수 있으며, 변수 중 민감도가 낮아 무시할 수 있는 변수들도 보정에 사용되도록 하였다. 그리고 사용자가 직접 반복 실행하지 않아도 컴퓨터가 자동으로 실행될 수 있도록 하여 시간의 절약이 기대되며, 무엇보다도 사용자의 주관이 반영되지 않아 객관적인 변수를 찾을 수 있는 장점이 있다.

또한 본 연구에서 사용된 알고리즘은 모델 전문가들이 보정하는 방법을 구체화 하여 프로그램화 한 것으로서 전문가가 아닌 사용자가 모델의 보정작업을 수행하는데 도움을 줄 것으로 기대 된다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 대상유역

자동 보정프로그램의 적용대상 지역은 고흥에 있는 고흥천으로 하였으며, 고흥천은 지방2급 하천으로 고흥읍에 위치하고 있고, 하천의 분류로 5개의 지천이 유입되고 있다. 총 유역면적은 32.91Km<sup>2</sup>이며, 총 하천의 유로 연장은 12.42Km이고, 모형의 모의

Reach 1	1	H·W
	2	← 지천 1 유입
	3	
	4	← 지천 2 유입
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	
	13	
	14	
	15	← 지천 3 유입
Reach 2	1	← 지천 4 유입
	2	← 지천 5 유입, 하수처리장
	3	
	4	
	5	
	6	

Fig. 4. Stream Network of Computational Reaches and Elements

구간은 8.40Km이다. 하천의 하상구배는 1/170이며 경위도상으로 동경 127° 15' ~127° 19', 북위 34° 34' ~34° 38' 사이에 위치하고 있다. 고흥천은 고흥읍에서 발원하여, 포두면 해안까지이며, 하천의 중간에 장수저수지가 존재하고 있다. 유역 현황은 Fig. 3.에 나타냈다.

#### 2. 대상유역에 대한 모형의 입력자료 구축

##### 1) 대상유역의 구획화

모의 대상 하천을 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 저수지의 유입지점까지의 하천구간과 저수지구간으로 2개의 reach로 구분하였다. 또한 계산단위인 element의 단위 길이를 0.4km로 분할하여 전체 8.4km 구간을 하천구간을 15개, 저수지 구간은 6개의 element로 분할하였다.

유입되는 지천 중 Reach 1으로 유입되는 지천 2와

Table 1. Flow Data of study area

REA	ELE	구 분	유 량(CMS)	
			03년 5월	03년 1월
REACH 1	1	H · W	0.0191	0.0105
	2	유입 지천	0.0343	0.0183
	4	유입 지천	0.0427	0.0217
	15	유입 지천	0.0257	0.0107
REACH 2	1	유입 지천	0.0132	-
	2	유입 지천 하수처리장	0.0197	0.0098

Table 2. Water Quality Data of study area

	REA	구 분	DO	BOD	T-N	T-P
03년 5월	REA.1	H · W	8.2	12.9	10.9	0.05
		지천 1	5.0	18.1	11.86	0.2
		지천 2	3.0	15.6	10.6	0.49
		지천 3	2.6	20.6	10.9	0.75
	REA.2	지천 4	6.7	8.6	6.7	0.06
		지천 5	6.5	7.5	5.9	0.04
		ELE. 4	7.5	3.8	2.0	0.08
03년 1월	REA.1	ELE. 6	7.5	3.3	2.1	0.06
		H · W	8.94	7.28	2.83	0.04
		지천 1	8.31	11.08	8.57	0.29
		지천 2	5.00	14.69	11.29	0.57
	REA.2	지천 3	3.40	22.7	13.74	0.86
		지천 4	-	-	-	-
		지천 5	9.24	6.75	3.42	0.03
ELE. 4	11.58	8.02	2.45	0.34		
ELE. 6	13.07	7.21	1.45	0.20		

지천 3은 고흡흡을 관통하는 지천이다. 이는 지천의 기능보다는 하수도의 기능이 더 우수하다고 볼 수 있다. 그리고 Reach 2의 2번째 element에는 현재 고흡흡 하수종말처리장이 운영 중이다.

## 2) 입력자료 구축

모형의 보정 및 검증에 자료는 2002년 8월 하수처리장이 가동되기 전의 자료와 2003년 7월까지 하수처리장 가동후의 실측 자료를 이용하여 실시하였다. 정확한 변수 보정을 위하여 모의 대상 전 구간의 유량 및 수질의 실측 자료가 필요하나 가용자료가 한정되어 있기 때문에 미 측정 자료는 측정지점의 자료로

부터 추정하여 산정하였다. 측정된 유량자료와 수질 자료는 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

이들 측정치 중에서 모형의 매개변수 보정을 위한 자료로는 03년 5월 유량자료와 그 당시의 수질 측정 자료를 바탕으로 실시하였으며, 검증 자료는 갈수기를 중심으로 03년 1월의 유량과 수질자료를 사용하였다.

### (1) 유량자료

수질모형의 적용을 위한 유량의 입력자료로서 하천의 시점(Head Water)과 유입되는 지천의 유량이 필요하다. 하천의 유량은 현장에서 측정된 수심과 하

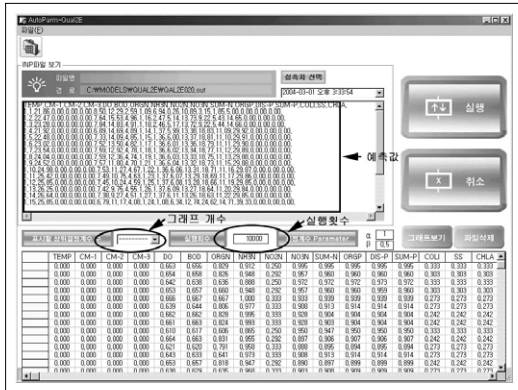


Fig. 5. Numerical Results of Parameter Calibration

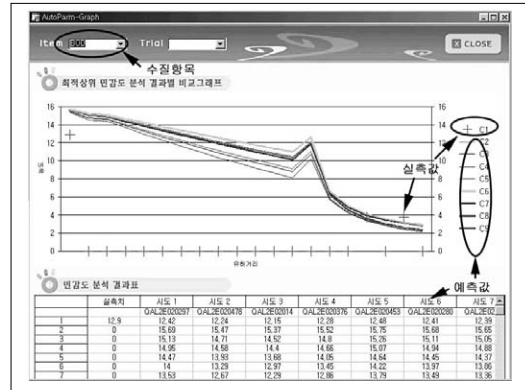


Fig. 6. Graphical Results of Parameter Calibration

천의 폭 그리고 유속계로 측정된 유속을 이용하여 하천의 유량을 산정 하였다.

(2) 수질자료

수질측정은 하천의 시점부와 각 지천 그리고 저수지 내에 4지점을 분석하였다. 그러나 유입 지천의 수질 측정이 총 인과 총 질소 측정만을 실시하였으나, QUAL2E의 입력자료는 질소 및 인의 순환요소인 유기질소, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 및 유기인, 용존 인의 입력도 필요하다. 그러므로 총 질소와 총 인으로부터 순환요소의 농도를 산정하였다. 산정방법은 총 질소 및 총 인과 여러 순환요소들의 측정을 같이 한 문헌들을 참고로 구성비를 구하였다.

하천의 수질분석 결과, 03년 5월의 경우 DO 2.6~8.2mg/l, BOD 3.3~20.6mg/l, T-N 2.0~

11.86mg/l, T-P 0.04~0.75mg/l로 측정되었다. 그리고 03년 1월의 농도는 DO 3.40~13.07mg/l, BOD 6.75~22.7mg/l, T-N 1.45~13.74mg/l, T-P 0.03~0.86mg/l로 측정되었다. 농도의 변화 폭이 큰 이유는 부하가 높은 우리나라 소하천의 특징이라고 말할 수 있다.

모형의 검증과 보정자료는 측정된 03년 5월 자료와 03년 1월 자료를 각각 사용하였다.

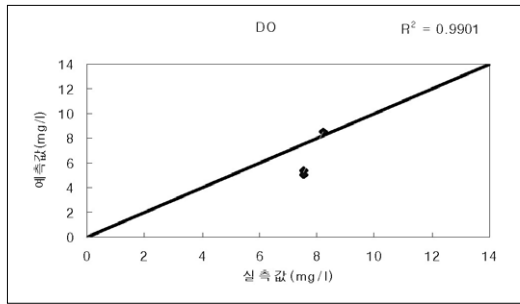
3) 매개변수 보정

(1) User Interface 개발

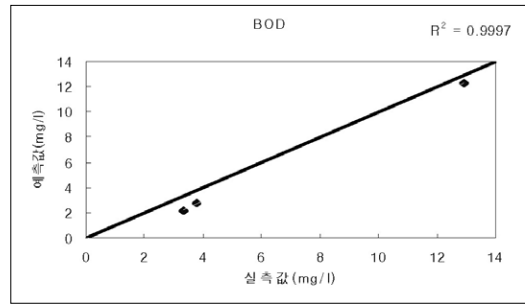
본 연구에서는 Microsoft사의 Visual Basic 6.0 프로그램과 D·B구축 작업은 Access 2000을 이용하였으며 Window 98/2000의 환경에서 구동 가능

Table 3. Parameter Calibration of Water Quality model

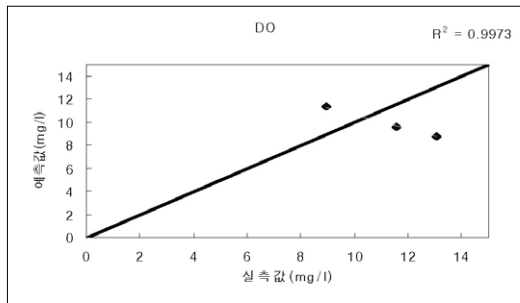
수 질 항 목	상관계수(R <sup>2</sup> )	계 수 명	Reach 1	Reach 2
BOD	0.9901	K <sub>1</sub>	3.062	2.893
		K <sub>3</sub>	0.036	0.072
DO	0.9997	K <sub>1</sub>	3.062	2.893
		K <sub>4</sub>	0.146	0.146
		β <sub>3</sub>	0.1594	0.1990
		σ <sub>4</sub>	0.72	0.81
		β <sub>1</sub>	1.08	1.44
T-P	0.9967	σ <sub>3</sub>	0.54	0.36
		β <sub>2</sub>	0.0208	0.0307
		β <sub>4</sub>	0.0109	0.0802
		σ <sub>2</sub>	2.842	1.456



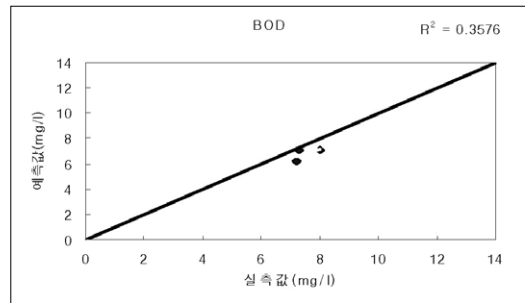
a) 03년 05월



a) 03년 05월



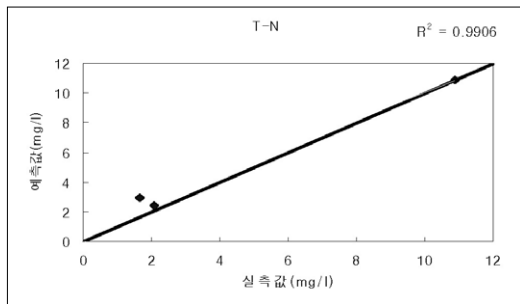
b) 03년 01월



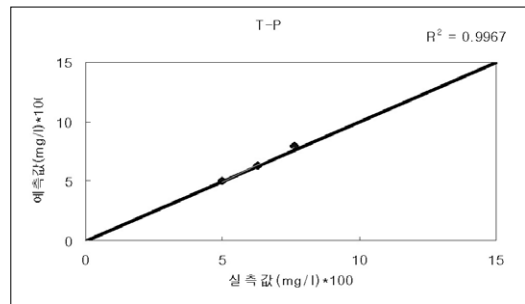
b) 03년 01월

Fig. 7. Relationship between Measured and Predicted Values of DO

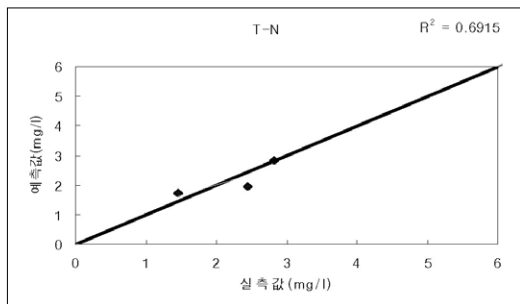
Fig. 8. Relationship between Measured and Predicted Values of BOD



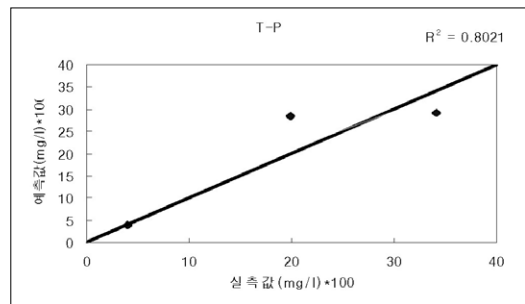
a) 03년 05월



a) 03년 05월



b) 03년 01월



b) 03년 01월

Fig. 9. Relationship between Measured and Predicted Values of T-N

Fig. 10. Relationship between Measured and Predicted Values of T-P

하게 개발되었다.

Fig. 5는 프로그램을 구동한 상태를 보여주고 있으며 사용자가 원하는 회수만큼 모형을 반복 실행할 수 있게 하였고, 사용자의 선택에 따라 실측값과 예측값을 비교하여 그래프(Fig. 6)로 나타낼 수 있게 하였다.

#### (2) 보정 결과

고흥천의 QUAL2E 모형의 매개변수 보정결과는 매개변수 자동 보정 프로그램으로 변수를 보정한 값과 수질항목별 실측값과 예측값의 상관관계( $R^2$ )값을 Table 3에 나타내었다. 이는 1단계로 보정 프로그램을 실행하여 나온 결과를 바탕으로 변수의 범위를 선정하고 2단계 프로그램을 실행하여 상관도가 높은 변수 10개를 선정하여 검증자료인 03년 1월의 유량과 수질농도를 바탕으로 모형을 실시하여 변수를 선택하였다.

보정 결과, 실측값과 예측값의 관계 그래프는 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다. 표와 그래프에서 보는 바와 같이 수질농도에 따른 상관계수( $R^2$ ) 값은 DO, BOD, T-N, T-P 각각 0.9901, 0.9997, 0.9906, 0.9967로 나타나 매우 높은 상관성을 보이고 있어 보정결과의 우수성을 보여 주고 있다.

### IV. 결 론

본 연구는 하천수질 예측모형인 QUAL2E 모형을 자동 보정할 수 있는 프로그램을 개발하여 전남 고흥천에 적용하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 수질측정 실측치들이 수질모형 예측선 상하에 균등히 분포되도록 하고 실측치와 예측치의 차이가 최소화 되도록 하는 수질모형 매개변수 자동보정 방법을 개발하였다.

(2) 이러한 방법은 모형의 메뉴얼에 표시된 변수의 한계범위내의 거의 모든 값을 적용하는 시행착오를 거침으로서 변수의 전체범위 값을 적용·검토할 수 있고 변수들 간의 여러 조합을 통해 변수 보정이 이루어지기 때문에 최적의 매개변수 값을 구하는 것이 가능하다.

(3) 고흥읍에 있는 고흥천의 소하천의 변수를 모의하여 결정한 결과, 측정치와 예측치의 수질농도에 따른 상관계수( $R^2$ ) 값은 DO, BOD, T-N, T-P 각각 0.9901, 0.9997, 0.9906, 0.9967로 나타나 매개변수의 보정이 효율적으로 진행되었음을 보여 주고 있다.

(4) 컴퓨터 프로그램에 의해 자동 보정됨으로써 사용자의 주관이나 의도가 배제되어 객관적이며 정확한 값을 찾을 수 있었으며, 또한 컴퓨터상에서 자동으로 반복 구동됨으로써 사람이 수행할 때 보다 많은 시간을 절약할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) 김성태, 채수권, 김건홍, 1999, “유전알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정”, 대한토목학회논문집, 19(II-4), 507-514.
- 2) Orlob, G.T., Mathematical Modeling of water Quality; Streams, Lakes, and Reservoirs, John Wiley & Sons. New York. NY, 1983, 433-459.
- 3) 최홍식, 이길성, 1989, “Streeter-Phelps 모델의 최적계수추정”, 한국상하수도학회지 2(1), 19-26.
- 4) Texas Water Development Board, “DOSAG-1 simulation of water quality in stream and canals”, Program Documentation and User's Manual, Austin, 1970.
- 5) Masch, F. D., and Associates, “QUAL- I simulation of water quality in stream and canals”, Program Documentation and User's Manual, Texas Water Development Board, 1970.
- 6) 전경수, 박석순, 1993, “영향계수를 이용한 Qual2E 모형의 반응계수 추정”, 대한토목학회 논문집, 13(4), 163-176.
- 7) 이용운, 성치남, 이병희, 정선용, 1998, “주암호 수질관리 전략개발에 관한 연구”, 한국수자원공사.
- 8) 조홍래, 2001, “유전자 알고리즘을 이용한



- WASP5 모형의 매개변수 추정”, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 9) 박영기, 최문술, 이장춘, 2000, “WASP5 모형에 의한 새만금호 수질 매개변수 추정”, 대한환경공학회지, 22(44).
  - 10) 선종우, 1991, “팔당호 수질에 관한 WASP4 모형의 적용성 검토”, 서울대학교 석사학위논문.
  - 11) 전경수, 이길성, 1993, “영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정”, 대한토목학회논문집, 13(4).
  - 12) 조홍연, 전경수, 이길성, 한광성, 1993, “WASP4 모형의 매개변수 추정”, 대한토목학회논문집, 13(4).
  - 13) 홍원석, 1993, “WASP4 모형의 민감도 분석에 관한 연구” 서울대학교 석사학위논문.

최종원고채택 06. 04. 14