

연구논문

영향계수법과 유전알고리즘을 이용한 QUAL2K 모형의 매개변수 최적화

조재현 · 이창훈

관동대학교 보건환경위생학과

(2009년 2월 24일 접수, 2009년 4월 16일 승인)

Parameter Optimization of QUAL2K Using Influence Coefficient Algorithm and Genetic Algorithm

Jae-Heon Cho · Chang-Hun Lee

Department of Health and Environmental Hygiene, Kwandong University

(Manuscript received 24 February 2009; accepted 16 April 2009)

Abstract

In general, manual calibration is commonly used for the stream water quality modelling. Because the manual calibration depends upon the subjectivity and experience of the researcher, it has a problem with the objectivity of the modelling. Thus, the interest about the automatic calibration by the optimization technique is deeply increased. In this study, Influence coefficient algorithm and Genetic algorithm are introduced to develop an automatic calibration model for the QUAL2K that are the latest version of the QUAL2E. Genetic algorithm, used in this study, is very simple and easy to understand but also applicable to any complicated mathematical problem, and it can find out the global optimum solution effectively. The developed automatic calibration model is applied to the Gangneung Namdaecheon. The calibration results about the 11 water quality variables show the good correspondence between the calculated and observed water quality values.

Keywords : automatic calibration, Influence coefficient algorithm, Genetic algorithm, QUAL2K, Gangneung Namdaecheon

I. 서론

일반적으로 수질모형을 적용할 때는 수동보정(manual calibration)을 하는 경우가 대부분이지만, 이 경우에는 연구자의 주관과 경험에 의존하게 되므로 부정확성과 객관성의 결여가 문제될 수 있다. 따라서 최적화기법을 이용한 자동보정(automatic calibration)에 대한 관심이 높는데, 최적화기법을 이용한 하천수질모형의 방법론으로는 Little and Williams(1992)가 최소자승법을 이용해서 QUAL2E 모형(Brown and Barnwell, 1987)의 매개변수를 보정하였고, Kim and Je(2006)는 비선형계획법을 이용해서 BOD, DO, Chl-a와 관련된 매개변수를 보정하였다. 근래에는 유전알고리즘(Gen and Cheng, 1997; Goldberg, 1989)을 이용해서 하천수질모형을 보정하려는 시도들이 있었다(Goktas and Aksoy, 2007; Mulligan and Brown, 1998; Ng and Perera, 2003). Liu *et al.*(2007)은 인농도를 예측하는 유역모델의 보정에 유전알고리즘을 이용하였다. Kannel *et al.*(2007)은 QUAL2E 모형의 최신판인 QUAL2K(Chapra *et al.*, 2008)를 자동보정할 수 있도록 수정한 QUAL2Kw 모형(Pelletier and Chapra, 2004)을 네팔의 하천에 적용하고 자동 보정하였다. 국내에서는 전경수·이길성(1993)이 Becker and Yeh(1972)의 영향계수법(Influence Coefficient Algorithm)을 적용하였고, Quasi-Newton 방법을 사용하는 IMSL의 부프로그램을 이용해서 QUAL2E 모형의 수질 매개변수를 최적화하였다. 백경원 등(1995)도 최적화기법의 하나인 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)기법과 영향계수법으로 QUAL2E 모형을 자동보정한 바 있다. 김성태 등(1999)은 유전알고리즘을 이용해서 QUAL2E 모형의 BOD와 DO에 관련된 4개의 매개변수를 추정하였다. 또한 유전알고리즘과 SWMM의 통합프로그램을 개발하여 강우유출량을 자동 보정한 연구도 있고(조재현·이중호, 2006), 유전알고리즘을 이용해서 유역내 다수 하수처리장의 오염부하 삭감비용을 최적화하는 수질관리모형이 개발된 바도

있다(조재현·성기석, 2004; Cho *et al.*, 2004).

본 연구에서는 QUAL2E 모형의 개정판인 QUAL2K 모형의 자동보정을 위해서 다수의 연구에서 적합성이 확인된 영향계수법을 적용한다. 영향계수법은 원래 개수로 부정류의 에너지경사를 나타내는 수리학적 매개변수들을 추정하기 위해서 Becker and Yeh(1972)에 의해 개발되었다(전경수·이길성, 1993). 자동보정의 최적화는 관측수질과 계산수질의 오차를 최소화하는 문제로 구성되고, 이 최적화문제는 효과적으로 전역적 탐색을 할 수 있고, 수학적인 어려움이나 복잡함이 없는 유전알고리즘을 이용해서 해석하였다. 개발된 프로그램을 강릉남대천에 적용하여 QUAL2K 모형의 매개변수를 최적화하였다.

II. 연구방법

1. 영향계수법

Becker and Yeh(1972)는 개수로 부정류의 수리학적 매개변수 추정에 영향계수법을 적용하였다. 먼저 수리학적 매개변수들을 가정해서 부정류 지배방정식의 해를 구하고, 실측값과 계산값의 오차제곱합을 최소화하는 수리학적 매개변수들을 추정하였다. 이 과정에서 매개변수의 변화에 따른 오차의 변화량을 나타내는 영향계수가 이용되었다.

본 연구에서는 Becker and Yeh(1972)와 전경수·이길성(1993)의 영향계수법을 적용하고, 실측값과 계산값의 상대오차 제곱합을 최소화하였다. 본 연구의 수질 매개변수 최적화 과정은 다음과 같다.

1) 최초 QUAL2K 적용시 수질 매개변수의 기본값은 각 수질 매개변수의 최대값과 최소값의 산술평균값으로 정하고, 이 기본 매개변수 값으로 수질을 계산하고 계산수질과 관측수질과의 상대오차를 계산한다.

2) 새로 추정하고자 하는 매개변수 P^k 에 의한 계산수질의 상대오차 $E_{T,j}^k$ 를 Taylor급수로 전개하고 2차 이상의 항을 무시하면 (1)식과 같이 표현된다. 수질 매개변수의 기본값에서 상·하한계를 각

+100 %, -100 %로 해서 QUAL2K를 적용하여 수질을 계산하고, 수질 매개변수의 변화에 따른 상대오차 변화량(영향계수, (2)식 참조)을 계산한다.

$$E_{ij}^k = E_{ij}^{k-1} + (P_1^k - P_1^{k-1}) \frac{\partial E_{ij}^{k-1}}{\partial P_1^{k-1}} + \dots + (P_M^k - P_M^{k-1}) \frac{\partial E_{ij}^{k-1}}{\partial P_M^{k-1}} \quad (1)$$

여기서 i 는 수질변수, j 는 수질측정 지점을 나타낸다.

$$\frac{\partial E_{ij}^{k-1}}{\partial P^{k-1}} \approx \frac{\Delta E_{ij}^{k-1}}{\Delta P^{k-1}} \quad (2)$$

3) 1) 단계의 수질 매개변수의 기본값과 계산된 수질, 2) 단계에서 계산된 상대오차 변화량, 수질 관측값 등을 이용해서 (3)식과 같이 실측값과 계산값의 상대오차 제곱합을 최소화한다. (3)식은 유전알고리즘(Genetic algorithm)을 이용해서 해석하고 현 단계에서의 최적 수질 매개변수를 추정한다.

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N (E_{ij}^k)^2 \quad (3)$$

4) 앞 단계에서 추정된 수질 매개변수로 QUAL2K를 실행해서 수질을 계산하고, 계산수질과 관측수질과의 상대오차를 계산한다.

5) 앞 단계에서 추정된 수질 매개변수와 수질 계산값, 관측값, 그리고 2) 단계에서의 수질 매개변수 변화에 따른 상대오차 변화량을 입력하고, 유전알고리즘을 이용해서 상대오차 제곱합을 최소화하고 현 단계에서의 최적 수질 매개변수를 추정한다.

6) 4), 5) 단계의 과정을 반복 실행하여 각 차수별로 수질 매개변수를 추정하고, 상대오차제곱합이 최소가 될 때의 수질 매개변수를 최적 매개변수로 결정한다.

2. 유전알고리즘

유전알고리즘은 전통적인 탐색 기법과 달리 개체군(population)이라 불리는 초기 무작위 해와 함께 시작한다. 개체군의 각 개체는 염색체(chromosome)라고 불리고, 염색체는 일반적으로 이진수 열로 표현된다. 염색체 들은 세대라 불리는 연속적인 반복 연산을 통해서 진화한다. 각 세대의 염색체는 적합도(fitness)의 척도에 의해 평가된다. 다음 세대를

형성하기 위해서, 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)에 의해 자손(offspring)이라 불리는 새로운 염색체 들이 만들어진다. 적합도에 따라 부모와 자손의 일부를 선택하고, 개체군수를 유지하기 위해 나머지를 도태시켜서 새로운 세대가 형성된다. 보다 더 적합한 염색체는 선택될 확률이 높아진다. 여러 세대 후에 가장 좋은 염색체로 수렴해 가고, 어떤 문제에 대한 최적해를 구할 수 있다(Gen and Cheng, 1997; Cho *et al.*, 2004).

3. QUAL2K모형의 개요

QUAL2K는 기존의 QUAL2E와 같이 정상상태 부등류 흐름에 대한 1차원 하천수질모형이지만 여러 가지 기능이 개선되었다. 먼저 QUAL2E에서는 각 구간(reach)에서 균등한 길이의 계산요소(computational element)만을 가질 수 있었지만 QUAL2K에서는 자유롭게 계산요소의 길이를 설정할 수 있고, 각 계산요소에서 여러 개의 오염원이 유입되는 것을 고려할 수 있다. 또한 CBOD를 slow CBOD(CBOD_s)와 fast CBOD(CBOD_f)로 구분하였고, 입자상유기물질(detritus)도 계산할 수 있다. 저산소 조건에서, 산화반응 속도를 늦춰줄 수 있고, 탈질산화도 1차반응식으로 계산된다. 저질과 수층 사이에서 일어나는 DO와 영양물질의 흐름과 교환을 외부에서 입력하는 형식이 아니라 모형내부에서 계산할 수 있다. 저층에 부착된 조류도 수층과 별도로 계산할 수 있고, 조류, detritus, 무기 고형물질의 함수로 햇빛의 차단도 계산한다. Alkalinity, 총무기탄소, 하천 pH, 병원균도 계산할 수 있다. QUAL2K 모형의 동역학과 물질전달과정은 그림 1과 같고, 그림의 상태변수는 표 1에 정의되어 있다.

4. 수질 매개변수 최적화모형의 적용

본 연구에서 개발된 영양계수법과 유전알고리즘을 이용한 수질 매개변수 최적화모형을 강릉남대천에 적용하였다. 강릉남대천은 대관령을 경계로 한 강과 유역이 나누어지고 있다. 상류 유역은 주로 임야와 농경지역이 대부분이고 오염부하도 크지 않

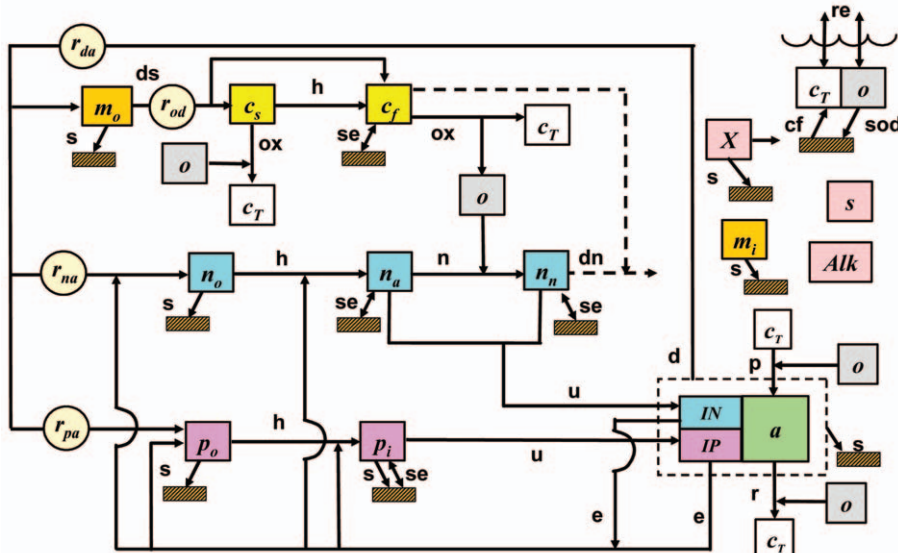


그림 1. QUAL2K 모형의 동역학과 물질전달과정(모형의 상태변수는 표 1에 정의되어 있음. 동역학적 과정은 dissolution (ds), hydrolysis (h), oxidation (ox), nitrification (n), denitrification (dn), photosynthesis (p), respiration (r), excretion (e), death (d), respiration/excretion (rx)이고, 물질전달과정은 reaeration (re), settling (s), sediment oxygen demand (SOD), sediment exchange (se), sediment inorganic carbon flux (cf)이다.

표 1. QUAL2K 모형의 상태변수

Variable	Symbol	Units*
Conductivity	<i>s</i>	mmhos
Inorganic suspended solids	<i>m_i</i>	mgD/L
Dissolved oxygen	<i>o</i>	mgO ₂ /L
Slowly reacting CBOD	<i>c_s</i>	mgO ₂ /L
Fast reacting CBOD	<i>c_f</i>	mgO ₂ /L
Organic nitrogen	<i>n_o</i>	mgN/L
Ammonia nitrogen	<i>n_a</i>	mgN/L
Nitrate nitrogen	<i>n_n</i>	mgN/L
Organic phosphorus	<i>p_o</i>	mgP/L
Inorganic phosphorus	<i>p_i</i>	mgP/L
Phytoplankton	<i>a_p</i>	mgA/L
Phytoplankton nitrogen	<i>IN_p</i>	mgN/L
Phytoplankton phosphorus	<i>IP_p</i>	mgP/L
Detritus	<i>m_o</i>	mgD/L
Pathogen	<i>X</i>	cfu/100 mL
Alkalinity	<i>Alk</i>	mgCaCO ₃ /L
Total inorganic carbon	<i>c_T</i>	mole/L
Bottom algae biomass	<i>a_b</i>	mgA/m ²
Bottom algae nitrogen	<i>IN_b</i>	mgN/m ²
Bottom algae phosphorus	<i>IP_b</i>	mgP/m ²
Constituent i		
Constituent ii		
Constituent iii		

* D, N, P, A는 각각 건조중량, 질소, 인, chlorophyll-a이다.

다. 반면에 중·하류지역은 강릉 시가화지역이 위치해 있어 발생 오염부하가 큰 지역이다. 하구 인접 지역에 강릉하수처리장이 위치해서 대부분의 발생 하수를 처리하고 있으나 시가화지역에서 강릉남대천으로 배출되는 우수관로를 통해서 상당량의 오염 부하가 강릉남대천으로 유입되고 있다. 이같은 영향으로 강릉남대천 하류부의 수질은 여전히 악화되어 있는 상황이다. 본 연구에서 개발된 최적화모형을 강릉남대천의 강릉댐 방류지점부터 포남교 직상류지점까지의 12 km 구간에 적용하였다. 강릉남대천의 유역도는 그림 2와 같다.

본 연구에서 보정한 수질변수는 SS, DO, CBOD_s, CBOD_f, Organic-N, NH₃-N, NO₃-N, Organic-P, PO₄-P, Phytoplankton, Detritus 등이고, 추정된 수질 매개변수는 총 21가지로서 1) ISS 침전속도, 2) Slow CBOD 가수분해율, 3) Slow CBOD 산화율, 4) Fast CBOD 산화율, 5) Organic N 가수분해율, 6) Organic N 침전속도, 7) Ammonium 질산화율, 8) Nitrate 탈질산화율, 9) Nitrate 저질 탈질 전달 계수, 10) Organic P 가수분해율, 11) Organic P 침전속도, 12) Inorganic



그림 2. 강릉남대천 유역도와 모형 적용구간의 수질조사지점과 오염원

P 침전속도, 13) Inorganic P Sed. oxygen attenuation 반포화상수, 14) Phytoplankton 최대성장률, 15) Phytoplankton 호흡률, 16) Phytoplankton 치사율, 17) Phytoplankton Nitrogen 반포화상수, 18) Phytoplankton Phosphorus 반포화상수, 19) Phytoplankton 침전속도, 20) Detritus 분해율, 21) Detritus 침전속도이다.

III. 결과토의

QUAL2K를 자동보정하기 위한 최적화 기법으로 Carroll(2004)의 유전알고리즘을 이용하였다. Carroll의 프로그램에 수질관측값, 매개변수 변화에 따른 상대오차 변화량 등을 입력할 수 있게 프로그램을 수정하고, 상대오차 제곱합이 최소화되도록 (3)식을 만족하는 적합도함수를 구성하여 source code를 작성하고, Fortran Compiler를 이용해서 실행하였다. 본 연구의 최적화모형 적용시 고려된 수질 매개변수 21 가지는 QUAL2K에서 계산하는 11 가지 수질변수와 관련된 것이고, 최적화모형의 가중치는 상기 11 가지 항목에 대해서 각각 1로 적용하여 (3)식의 목적함수를 계산하고 유전알고리즘의 적합도를 평가하였다. 본 연구의 유전알고리즘

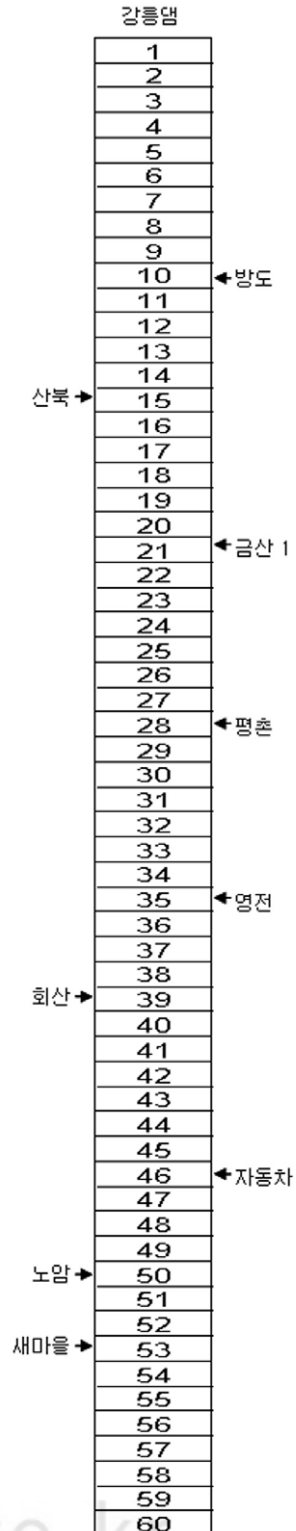


그림 3. 수질매개변수 최적화모형의 적용구간 모식도

은 Tournament selection으로 부모개체를 선택하고, 교배에서는 Uniform crossover를 적용하였다. 돌연변이로는 Jump mutation과 Creep mutation이 함께 적용되었고, 가장 좋은 부모개체가 복제에 반드시 사용되도록 하는 Elitism이 채택되었다. 적합도는 (3)식의 목적함수 값을 계산하여 그 역수를 취하여 적합도를 산정하였다. 유전알고리즘의 매개변수로서 Carroll(2004)이 추천한 값을 적용하였고, Jump mutation 확률은 0.01, Creep mutation 확률은 0.1, 교배확률은 0.5를 적용하였다. 개체군수와 세대수는 연산시간을 고려해서 각각 70으로 적용하였다.

QUAL2K의 적용시에 재폭기계수는 O'Connor-Dobbins 식으로 계산하고, 점오염원은 그림 2, 그림 3과 같이 9개소를 고려하였다. QUAL2K의 적용구간은 강릉남대천 중·상류부로서 수리적 특성에 있어서 큰 차이가 없으므로 12 km 전체 구간을 단일 구간(reach)으로 보고 각 계산요소의 길이를 200 m로 하여 총 60개의 계산요소로 구성하였다. QUAL2K의 자동보정을 위해서 2008년 3월에 강릉남대천의 7개 지점에서 수질조사를 하였고, 조사항목은 유량, pH, 수온, BOD, DO, SS, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P 그리고 Chl-a 등이다. Manning공식과 하천의 단면자료를 이용해서 수심-유량곡선과 유속-유량곡선을 도출하고 이로부터 수리제원을 계산하였다.

본 연구에서 영향계수를 계산할 때 매 차수마다 앞 단계에서 결정된 최적 수질매개변수에 따른 영향계수를 각기 계산해서 다음 단계의 최적 수질매개변수를 결정하는 방법과 모든 차수에서 최초에 계산된 영향계수를 동일하게 적용하는 방법을 비교했을 때 전자의 방법에서 특별한 장점을 보이지 않았기 때문에 모든 차수에서 영향계수를 동일하게 적용하는 후자의 방법을 적용해서 최적화 계산을 수행하였다. 이와 같은 영향계수법과 유전알고리즘으로 강릉남대천의 최적 수질 매개변수를 반복 추정하여 각 차수별로 상대오차 제공합의 결과를 나타낸 것은 표 2와 같다. 이 표의 11개 항목에 대한

표 2. 최적화 모형의 반복 적용차수별 상대오차 제공합

반복회수	상대오차 제공합	
	수질 11개 항목	수질 6개 항목
기본계산	24,573	5,746
1	16,168	4,535
2	16,709	4,619
3	16,191	4,568
4	16,604	4,682
5	16,018	4,638
6	16,238	4,614
7	16,346	4,609
8	16,127	4,463
9	16,772	4,797
10	16,379	4,751
11	16,223	4,571
12	16,534	4,572
13	16,387	4,575
14	16,247	4,675
15	16,439	4,795
16	16,588	4,546
17	16,514	4,585
18	16,298	4,713

것은 강릉남대천 수질조사 지점 7개소 중에서 최상류 경계지점을 제외한 6개소에서 CBOD_s, CBOD_f, Detritus, DO, SS, Organic-N, NH₃-N, NO₃-N, Organic-P, PO₄-P, chl-a의 11개 항목에 대해서 실측값과 각 차수별 계산수질을 이용해서 전체 상대오차 제공합을 계산하였다. 참고로 6개 항목에 대한 결과는 수질관리 계획 차원에서 활용도가 많은 CBOD, DO, SS, TN, TP, chl-a에 대한 각 차수별 상대오차 제공합을 표시하였다. 원래 이 연구의 보정은 앞의 11개 수질항목에 대해서 수행되었으므로 이에 대한 전체 18차까지의 계산 결과 중 5차의 계산 결과가 상대오차 제공합이 가장 작은 것으로 계산되어 이 결과의 최적 수질 매개변수를 강릉남대천 중·상류부의 최적 수질매개변수로 결정하였다. 또한 이 결과에서 차수가 반복됨에 따라 항상 결과가 좋아지는 것은 아닌 것을 알 수 있다. 18차 이후에 계산을 반복하면 가장 최적화된 결과를 얻을 가능성도 있지만 현재 결과의 정확도나 소요시간을 고려하면 그렇게까지 계산할 필요는 없는

것으로 판단된다.

표 3에는 본 연구에서 최적화하는 수질 매개변수의 최소 최대값의 범위와 최종 추정된 수질 매개변수를 나타내었다. 표 4에는 최종적으로 적용된 제 5차의 최적 계산 결과에 의한 11개 수질변수와 CBOD, TN, TP에 대한 상대오차 제곱합과 오차제곱합을 표시하였다. DO에 대한 상대오차 제곱합이 가장 낮고 정확한 보정이 이루어졌고, chl-a와 SS에 대한 상대오차 제곱합이 다른 수질항목보다 상대적으로 크고 보정의 정밀도가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 세부 항목별로 분석하면, TN의 경우 Organic-N이 NH₃-N, NO₃-N보다 상대오차가 크고, TP의 경우에는 PO₄-P의 상대오차가 Organic-P보다 큰 것으로 계산되었다. TN, TP의 상대오차가 각각의 세부 항목별 상대오차 보다 적은 것은 이 세부 항목들의 ±오차가 서로 완충작용을 한 결과이다. 본 연구의 최적화모형을 적용해서

표 4. 최적 수질 매개변수에 의한 수질항목별 상대오차 제곱합과 오차 제곱합

수질변수	상대오차 제곱합	오차 제곱합
CBOD _s (mg/L)	0.339	4.645
CBOD _f (mg/L)	0.233	4.813
Detritus(mg/L)	0.614	2.432
DO(mg/L)	0.015	9.802
SS(mg/L)	1.640	48.757
Organic-N(mg/L)	3.838	0.649
NH ₃ -N(mg/L)	0.298	0.429
NO ₃ -N(mg/L)	0.917	0.281
Organic-P(mg/L)	1.007	0.029
PO ₄ -P(mg/L)	5.326	0.0077
Chl-a(mg/L)	1.793	0.0005
CBOD(mg/L)	0.256	11.890
TN(mg/L)	0.297	1.360
TP(mg/L)	0.639	0.037

강릉남대천 중·상류부의 수질을 보정한 결과는 그림 4와 같다. CBOD_s, CBOD_f, Detritus, DO, SS,

표 3. 최적화모형에 의한 강릉남대천의 최적 수질 매개변수

수질 매개변수	보 정 값	최소값	최대값
ISS settling velocity(m/d)	1.66	0	2
Oxygen reaeration model	O'Connor-Dobbins		
Slow CBOD hydrolysis rate(/d)	0.37	0	5
Slow CBOD oxidation rate(/d)	3.48	0	5
Fast CBOD oxidation rate(/d)	4.83	0	5
Organic N hydrolysis(/d)	0.39	0	5
Organic N settling velocity(m/d)	1.98	0	2
Ammonium nitrification(/d)	2.74	0	10
Nitrate denitrification(/d)	1.81	0	2
Nitrate Sed. denitrification transfer coeff.(m/d)	0.19	0	1
Organic P hydrolysis(/d)	0.33	0	5
Organic P settling velocity(m/d)	1.29	0	2
Inorganic P settling velocity(m/d)	1.98	0	2
Inorganic P Sed. P oxygen attenuation half sat. constant(mgO ₂ /L)	0.03	0	2
Phytoplankton Max Growth rate(/d)	2.13	1.5	3
Phytoplankton Respiration rate(/d)	0.47	0	1
Phytoplankton Death rate(/d)	0.09	0	1
Phytoplankton Nitrogen half sat. constant(ugN/L)	148.60	0	150
Phytoplankton Phosphorus half sat. constant(ugP/L)	1.33	0	50
Phytoplankton Settling velocity(m/d)	0.33	0	5
Detritus dissolution rate(/d)	4.65	0	5
Detritus settling velocity(m/d)	3.03	0	5

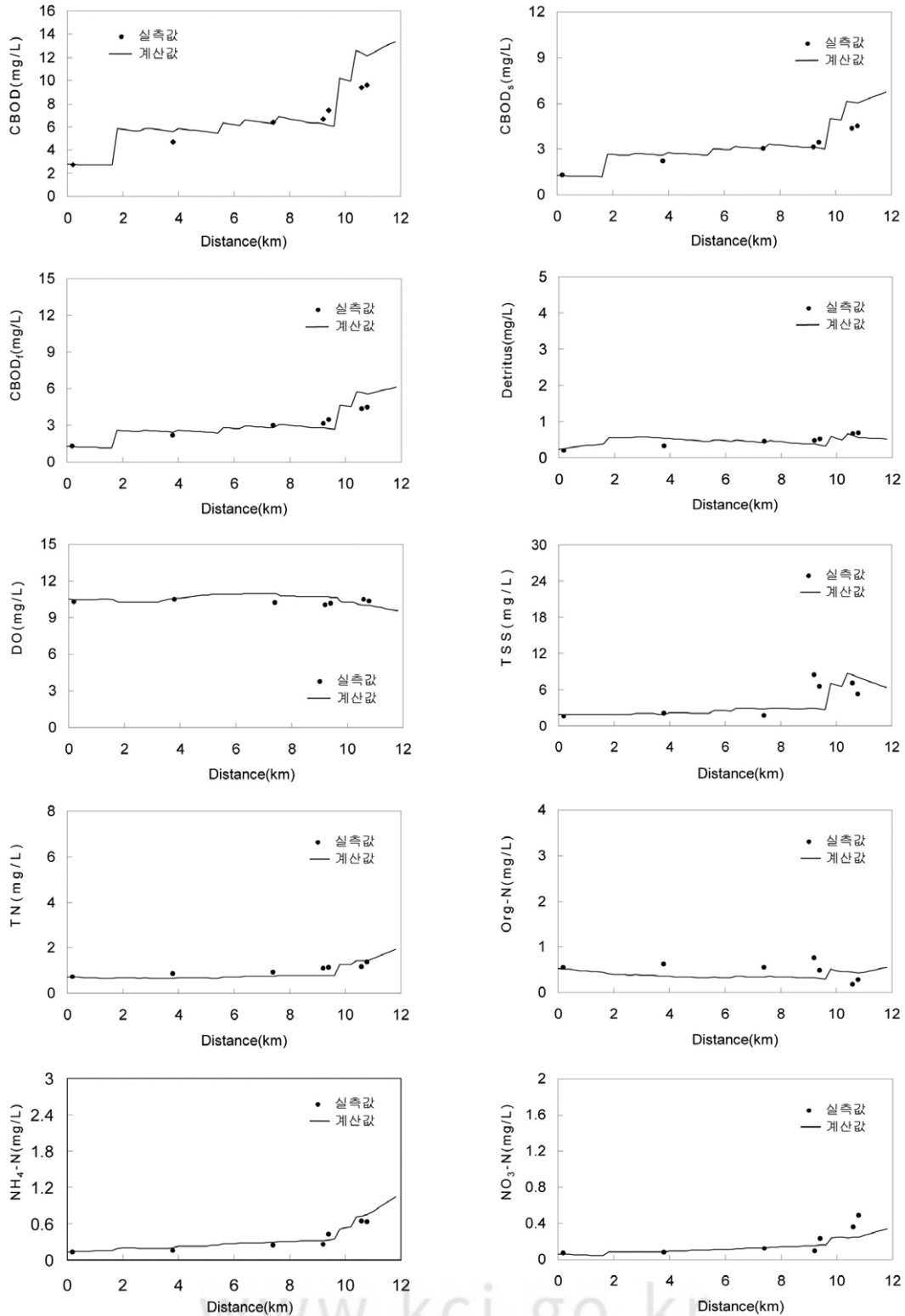


그림 4. 최적화모형에 의한 보정결과

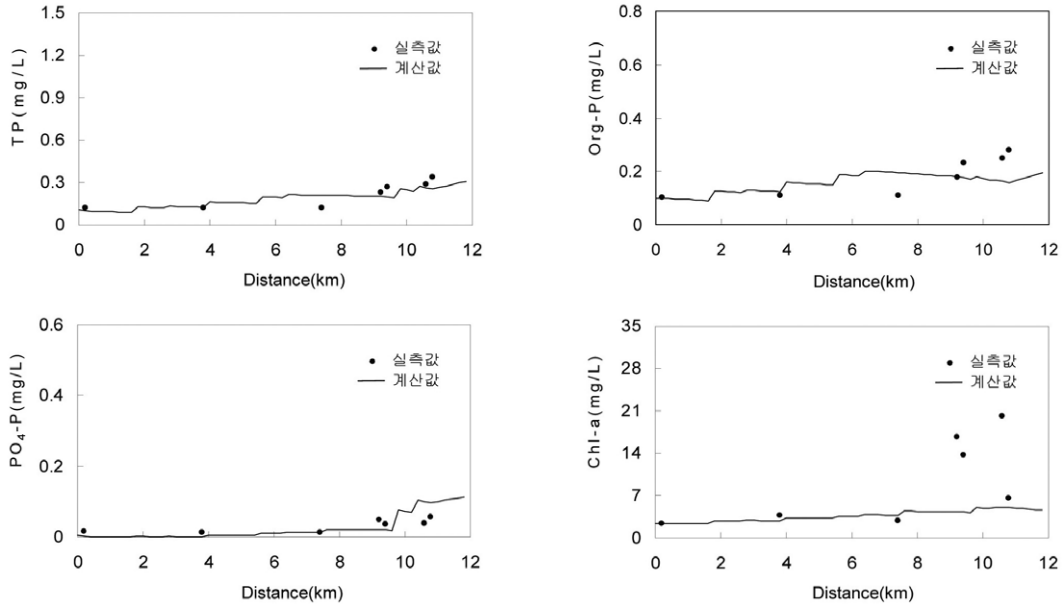


그림 4. 계속

Organic-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, Organic-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, chl-a의 11개 항목 대부분의 보정 결과는 만족할 만하다.

IV. 결론

1) 본 연구에서는 영향계수법과 유전알고리즘을 이용해서 하천의 수질 매개변수를 최적화하는 모형을 개발하여 강릉남대천의 강릉댐 방류지점부터 포남교 직상류지점까지의 12 km 구간에 적용하였다.

2) 수질 매개변수 최적화모형의 영향계수를 계산할 때 매 차수별로 별도의 영향계수를 적용하는 방법과 모든 차수에서 영향계수를 동일하게 적용하는 방법을 비교했을 때 전자의 방법에서 특별한 장점을 보이지 않았기 때문에 후자의 방법을 적용해서 최적화 계산을 수행하였다.

3) 최적화모형의 차수가 반복됨에 따라 항상 결과가 좋아지는 것은 아닌 것으로 나타났다. 본 연구에서 계산한 18차 이후에 계산을 반복하면 가장 최적화된 결과를 얻을 가능성도 있지만 현재 결과의 정확도나 소요 시간을 고려하면 그렇게까지 계산할 필요는 없는 것으로 판단된다.

4) 자동보정된 수질 계산값과 실측값을 비교했을 때 11개 수질변수 중 대부분의 항목에서 만족스러운 결과를 보였다. 다만 Chl-a의 경우에는 하루 일부 구간에서 오차가 비교적 큰 것으로 나타났다.

5) 하천 구간별로 수리적 수질적 특성이 다른 경우에 복수의 구간(Multiple reach)에 대해서 영향계수와 유전알고리즘을 이용해서 수질 매개변수를 최적화하는 방법론에 관한 것도 향후의 연구과제이다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00265).

참고문헌

- 김성태, 채수권, 김건홍, 1999, 유전알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정, 대한토목학회논문집, 19(II-4), 507-514.
- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우, 1995, QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석, 대한토

- 목학회논문집, 15(2), 451-461.
- 전경수, 이길성, 1993, 영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정, 대한토목학회논문집, 13(4), 163-176.
- 조재현, 이종호, 2006, SWMM의 유출량 보정을 위한 매개변수 최적화, 환경영향평가 15(6), 435-441.
- 조재현, 성기석, 2004, 유전알고리즘을 이용한 하천수질관리모형에 관한 연구, 대한상하수도학회, 18(4), 453-460.
- Becker, L. and Yeh, W. W. G., 1972, Identification of parameters in unsteady open channel flow, *Water Resources Research*, 8(4), 956-965.
- Brown, L. C. and Barnwell, T. O. Jr., 1987, The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S.EPA/600/3-87 /007.
- Carroll, D. L., 2004, <http://cuaerospace.com/carroll/ga.html>.
- Chapra, S. C., Pelletier, G. J., and Tao, H., 2008, QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual, Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Cho, J. H., Sung, K. S., and Ha, S. R., 2004, A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment cost using a genetic algorithm, *Journal of Environmental Management*, 73(3), 229-242.
- Gen, M. and Cheng, R., 1997, Genetic algorithms and engineering design, John Wiley&Sons, New York, 1-2.
- Goktas, R. K. and Aksoy, A., 2007, Calibration and verification of QUAL2E using genetic algorithm optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(2), 126-136.
- Goldberg, D. E., 1989, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee Y. S., Kanel, S. R., and Pelletier, G. J., 2007, Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal, *Ecological Modelling*, 202, 185-190.
- Kim, K. S. and Je, C. H., 2006, Development of a framework of automated water quality parameter optimization and its application, *Environmental Geology*, 49, 405-412.
- Little, K. W. and Williams, R. E., 1992, Least-squares calibration of QUAL2E, *Water Environment Research*, 64(2), 179-185.
- Liu, S., Butler, D., Brazier, R., Heathwaite, L., and Khu, S. T., 2007, Using genetic algorithms to calibrate a water quality model, *Science of the Total Environment*, 374, 260-272.
- Mulligan, A. E. and Brown, L. C., 1998, Genetic algorithms for calibrating water quality models, *Journal of Environmental Engineering*, 124(3), 202-211.
- Ng, A. W. M. and Perera, B. J. C., 2003, Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16, 529-541.
- Pelletier, G. J. and Chapra, S. C., 2004,

QUAL2Kw theory and documentation
(version 5.1): A modeling framework
for simulating river and stream water

quality, from: [http://www.ecy.wa.gov/
programs/eap/models/](http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/).

최종원고채택 09. 04. 17