

연구논문

오염하천의 자동보정을 위한 QUAL2Kw 모형의 적용과 유전알고리즘의 매개변수에 관한 민감도분석

조재현

관동대학교 보건환경학과

(2011년 3월 14일 접수, 2011년 6월 11일 승인)

Application of the QUAL2Kw model to a Polluted River for Automatic Calibration and Sensitivity Analysis of Genetic Algorithm Parameters

Jae-Heon Cho

Department of Health and Environment, Kwandong University

(Manuscript received 14 March 2011; accepted 11 June 2011)

Abstract

The QUAL2K has the same basic characteristics as the QUAL2E model, which has been widely used in stream water quality modeling; in QUAL2K, however, various functions are supplemented. The QUAL2Kw model uses a genetic algorithm(GA) for automatic calibration of QUAL2K, and it can search for optimum water quality parameters efficiently using the calculation results of the model. The QUAL2Kw model was applied to the Gangneung Namdaechon River on the east side of the Korean Peninsula. Because of the effluents from the urban area, the middle and lower parts of the river are more polluted than the upper parts. Moreover, the hydraulic characteristics differ between the lower and upper parts of rivers. Thus, the river reaches were divided into seven parts, auto-calibration for the multiple reaches was performed using the function of the user-defined automatic calibration of the rates worksheets. Because GA parameters affect the optimal solution of the model, the impact of the GA parameters used in QUAL2Kw on the fitness of the model was analyzed. Sensitivity analysis of various factors, such as population size, crossover probability, crossover mode, strategy for mutation and elitism, mutation rate, and reproduction plan, were performed. Using the results of this sensitivity analysis, the optimum GA parameters were selected to achieve the best fitness value.

Keywords : QUAL2Kw, Automatic calibration, Multiple reaches, GA parameters, Sensitivity analysis

1. 서론

수질모형을 자동보정할 때는 주관적인 요소가 개입될 수 밖에 없으므로 모델링의 객관성을 높이기 위해서 수질모형의 자동보정에 대한 필요성이 증가되고 있다. 수질모형의 자동보정을 위해 비선형계획법, 최소자승법, 영향계수법 등 여러가지 방법론이 적용되어 왔다(전경수와 이길성 1993; Becker and Yeh, 1972; Brown and Barnwell, 1987; Je and Kim, 2004; Kim and Je, 2006; Little and Williams, 1992; Rinaldi *et al.*, 1979; Wood *et al.*, 1998).

근래 들어서는 유전알고리즘(GA)을 이용한 수질모형의 자동보정에 관한 연구가 활발하다(Gen and Cheng, 1997; Goldberg, 1989; 김성태 등 1999). Mulligan and Brown (1998)은 수질모형의 보정을 위한 시나리오에서 매개변수를 평가하기 위한 최적화도구로서 GA를 이용하였다. Ng and Perera (2003)는 수질모형의 매개변수 최적화에 있어서 GA 매개변수의 중요성을 평가하기 위한 종합적인 평가를 하였다. Goktas and Aksoy (2007)는 QUAL2E 모형과 GA를 이용해서 수질모형의 보정과 검증을 수행하였고, 그 결과 수질관측치의 질, 관측지점 수 그리고 목적함수의 형태가 최적화 효율에 영향을 준다는 결론을 얻었다. Liu *et al.* (2007)은 GA를 이용해서 준 분포형의 비점원 인모형을 보정하였고, GA와 SWMM 모형을 통합해서 SWMM의 유출과 수질에 관련된 매개변수를 자동보정하는 시도도 있었다(조재현과 이종호, 2006; Cho and Seo, 2007). Cho *et al.* (2004)은 QUAL2E 모형과 GA를 통합해서 유역내 하수처리장의 비용을 최적화하는 수질관리모형을 개발한 바 있다. Pelletier and Chapra (2004)는 QUAL2K 모형과 GA를 통합해서 QUAL2K를 자동보정하는 QUAL2Kw 모형을 개발하였다. Pelletier *et al.* (2006)과 Kannel *et al.* (2007)은 이 QUAL2Kw 모형을 이용해서 자동보정을 한 바 있다. Cho와 Ha (2010)는 영향계수법과 GA를 이용해서 QUAL2K의 매개변수를 자동보정하였다.

본 연구에서는 QUAL2Kw 모형을 강릉 남대천에 적용하였다. 강릉 남대천은 중하류부가 도시지역을 관통하므로 상당히 오염되어 있다. 상류부는 경사가 급하고 하상에 자갈이 많은 상태이지만 중하류부는 하상 경사가 비교적 완만하여 상하류부의 수리적인 특성이 확연히 다르다. 따라서 모델링 대상구간은 7개의 구간으로 구분하고, rates worksheets의 user-defined auto-calibration 기능을 이용해서 각 구간의 매개변수를 구하였다. GA 매개변수도 최적화 결과의 적합도에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 교배방식 (crossover modes), 돌연변이 (mutation)와 elitism의 전략, 개체군수 (population size), 교배확률 (crossover probability), 돌연변이율 (mutation rate) 등에 관해서 민감도분석을 하였다. 그 결과로 가장 적합한 GA 매개변수를 선정하였고, 최종적으로 QUAL2Kw 모형으로 자동보정을 하고 7개 구간에서의 수질 매개변수를 선정하였다.

II. 연구방법

1. QUAL2Kw 모형의 개요

QUAL2K 모형은 기본적으로 QUAL2E 모형과 같은 특성을 가진 1차원의 정상상태 수질모형이다. QUAL2K에서는 다양한 기능이 추가되어서, VBA (Visual Basic for applications)로 프로그래밍되었고, EXCEL이 GUI (graphic user interface)로서 이용되었다. QUAL2K는 종전 QUAL2E와 달리 서로 다른 길이의 reach를 적용할 수 있고, 한 개의 reach에 다수의 오염부하를 적용할 수 있다. CBOD는 slow CBOD와 fast CBOD로 구분되고, 탈질산화는 저농도의 DO 조건에서 1차 반응으로 계산 가능하다. SOD와 저질로부터의 영양물질 용출과 저질내 간극수의 수질도 모형 내부에서 계산할 수 있다. QUAL2Kw에는 PIKAIA 알고리즘 (Charbonneau and Knapp, 1995)의 GA가 사용되었다. 자동보정을 위해서 수질관측치와 모형의 결과를 비교해서 적합도를 계산하고, 적합도를 최대화하는 수질 매개변수들을 탐색한다.

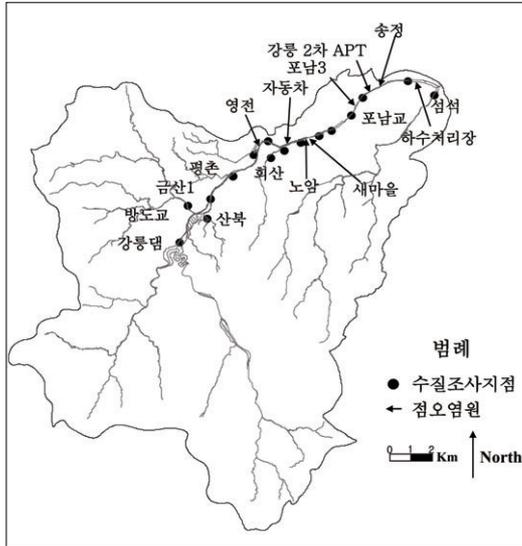


그림 1. 남대천 유역도와 수질조사지점

2. 자동보정을 위한 QUAL2Kw 모형의 적용

QUAL2Kw 모형을 유역면적이 265.2 km²이고, 유역경사가 급하고, 하천 중하류부에 강릉 시가화 지역이 위치한 강릉 남대천에 적용하였다. 강릉하수처리장은 남대천 하구 인근에 위치하고 강릉 시가화지역의 하수를 처리하고 있다. 강릉댐과 하구 사이의 16 km 구간에 대해 수질모형을 적용하였다. 그림 1에는 남대천 유역도와 수질조사지점을 표시하였다.

QUAL2Kw의 자동보정에는 강릉남대천의 11개 지점에서 2008년 3월에 실시한 수질조사 결과를 이용하였고, 수질 조사 항목은 유량, pH, 수온, BOD, DO, SS, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P 그리고 Chl-a 등이다. 전체 모형 적용구간을 80개의 reach로 분할하였고, 각 reach의 길이는 200m로 하였다. 모형 적용대상인 전체구간을 수리적 수질적 특성을 감안해서 7개의 구간으로 나누었다. 이러한 구간분할은 강릉 남대천 전체적으로 볼 때 하류로 갈수록 수질이 점점 악화되는 점과 강릉도심을 통과하는 구간 5부터 수질이 크게 악화되는 것을 고려하였다. 또한 하상경사는 하류로 갈수록 점차로 완만해져서 유속이 하류로 갈수록 점차 작아지고, 특히 하류부 구간 5, 6에서는 유속이 중상

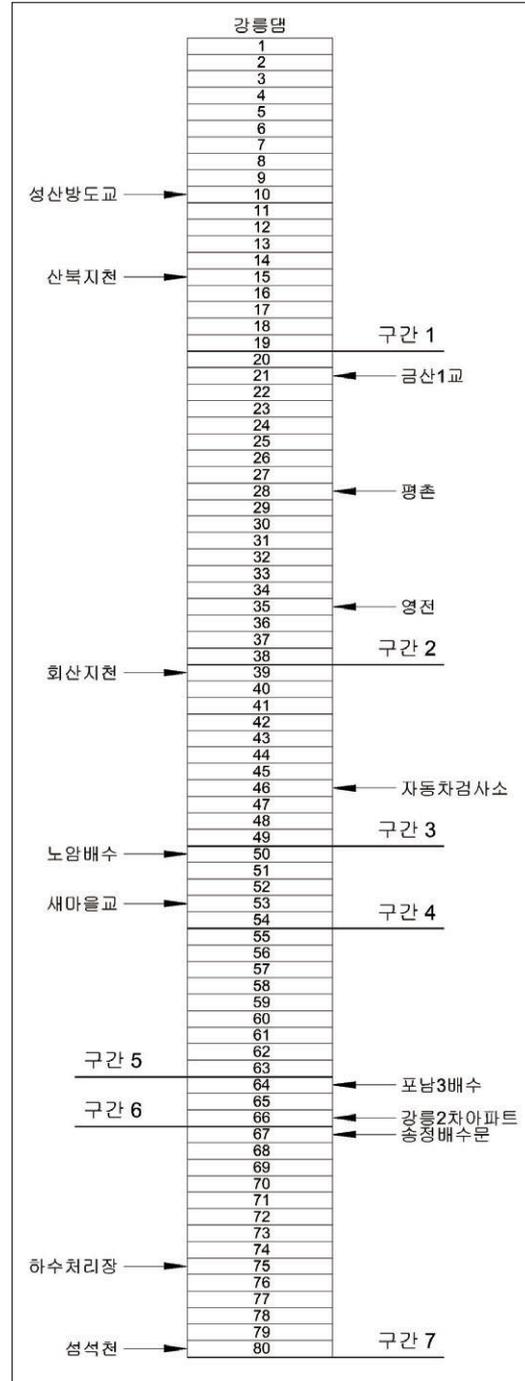


그림 2. QUAL2Kw 모형의 적용을 위한 하천모식도

류부에 비해 아주 낮아지는 특성을 감안하였다. 수리제원은 수심-유량과 유속-유량의 rating curve를 이용하였고, 하천 측량자료와 Manning 공식을

이용하고 회귀분석을 통해서 이들 rating curve를 도출하였다. QUAL2Kw 모형의 연산시간간격은 2.8 분으로 하였고, DO와 영양물질의 저질-수체 간의 이동은 모형 내부에서 계산하도록 하였다. DO 계산을 위한 재폭기식은 수심과 유속에 따라 Owens-Gibbs 식, O'Connor-Dobbins 식 그리고 Churchill 식이 모형 내부에서 선택적으로 적용 되도록 하였고, 바람에 의한 영향도 고려되었다. 남대천에 유입되는 점오염원은 하수종말처리장 방류수, 지천, 하수 등의 15개소이고, 소규모 유입수들은 비점오염원으로 고려되었다. 그림 2는 QUAL2Kw 모형의 적용을 위한 하천모식도를 나타내었다. 본 연구에서 보정한 수질인자는 DO, CBOD_s, CBOD_t, Organic-N, NH₃-N, NO₃-N, Organic-P, PO₄-P, Detritus 등이다.

QUAL2Kw 모형은 가장 좋은 적합도(fitness)를 보이는 매개변수의 조합을 찾기 위한 자동보정 기능을 가지고 있다. 본 연구에서의 적합도는 각 수질 항목에 대해서 실측수질과 계산수질 간의 CV(RMSE)를 구하고, 대상수질 전체(9가지 수질 항목)에 대한 가중평균값의 역수로 계산하였다.

GA 매개변수는 최적해의 탐색에 영향을 주기 때문에 QUAL2Kw 모형에서 사용되는 GA 매개변수가 모형의 적합도에 미치는 영향을 분석하였다. 개체군수(population size), 교배확률(crossover probability), 교배방식(crossover mode), 돌연변이 방식(mutation mode) 그리고 복제계획(reproduction plan)에 대해서 민감도분석을 하고 그 결과로 가장 좋은 적합도 값을 나타내는 최적 GA 매개변수가 선정되었다.

본 연구에서는 Rates worksheet의 사용자 정의에 의한 매개변수 자동보정 기능을 이용해서 QUAL2Kw 모형의 최적 매개변수를 결정하였다. Slow CBOD hydraulics rate, Slow CBOD oxidation rate, Fast CBOD oxidation rate, Organic N hydrolysis, Organic N settling velocity, Ammonium nitrification, Nitrate denitrification, Nitrate Sed denitrification

transfer coeff., Organic P hydrolysis, Organic P settling velocity, Inorganic P settling velocity, Detritus(POM) dissolution rate, Detritus(POM) settling velocity의 13가지 항목에 대해서 7개의 구간 각각에 대한 최적 매개변수를 자동보정을 통해서 계산하였다. 한편 Inorganic suspended solids settling velocity, Inorganic P Sed P oxygen attenuation half sat constant, Phytoplankton max growth rate, Phytoplankton respiration rate, Phytoplankton death rate, Phytoplankton nitrogen half sat constant, Phytoplankton phosphorus half sat constant, Phytoplankton settling velocity 은 전 구간에 걸쳐서 단일 매개변수를 적용하고 자동보정을 통해서 계산하였다.

III. 결과토의

1. QUAL2Kw 모형의 GA매개변수의 민감도분석

그림 3-7에는 강릉 남대천에 QUAL2Kw 모형을 적용했을 때 5가지 매개변수에 대한 민감도분석 결과를 나타내었다. 먼저 개체군수에 대한 5가지 경우(10, 30, 50, 70, 100)를 분석하였다. 개체군수 100에서 가장 좋은 적합도를 보였고, 개체군수를 증가시킬 때 반드시 적합도가 높아지는 것은 아닌 것으로 분석되었다(그림 3). 개체군수는 연산시간과 밀접한 관련이 있으므로 민감도분석을 통한 적정 개체군수의 추정이 중요하다. 그림 4는 0.5부터 0.95에 이르기까지 10가지 교배확률 적용에 따른 적합도의 변화를 나타내었고, 교배확률 0.6에서 가장 좋

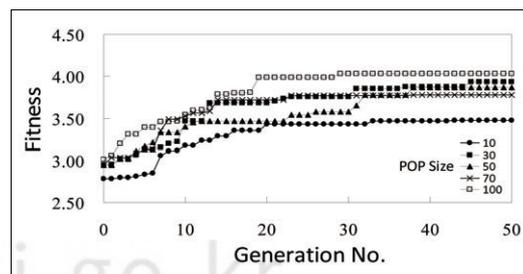


그림 3. 개체군수에 따른 적합도의 변화

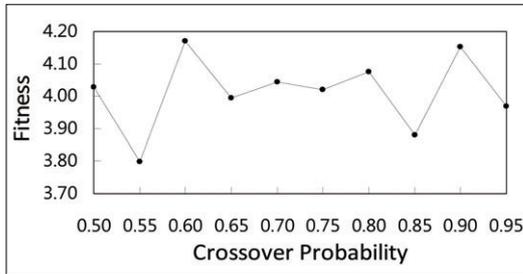


그림 4. 교배확률 적용에 따른 적합도의 변화

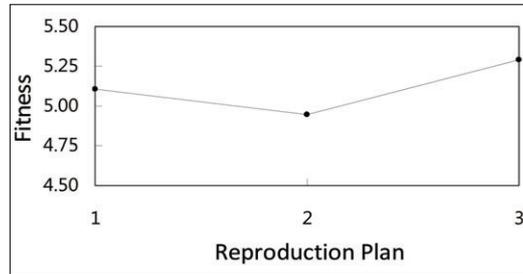


그림 7. 복제계획에 따른 적합도의 변화

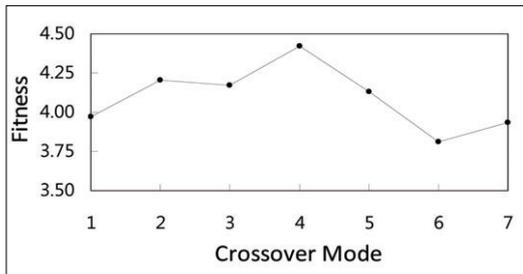


그림 5. 교배방식에 따른 적합도의 변화

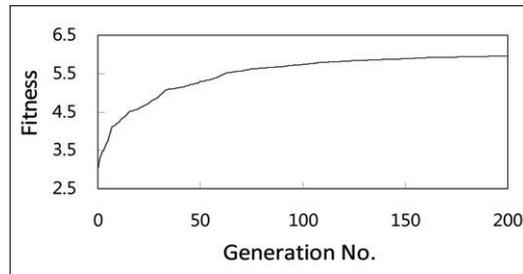


그림 8. 세대에 따른 적합도의 변화

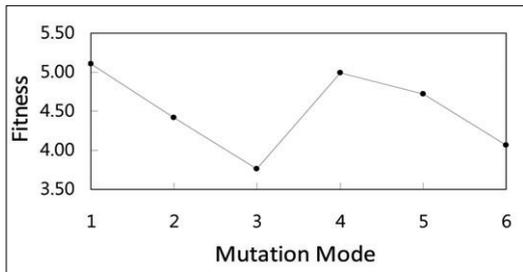


그림 6. 돌연변이 방식에 따른 적합도의 변화

은 적합도를 보였다. 그리고 다음의 7가지 교배방식이 분석되었다: 1) 1점, 2) 2점, 3) 1점 혹은 2점의 등확률 (equal probability of either one-point or two-point), 4) 균일교배 (uniform crossover), 5) 1점, 2점 혹은 균일의 등확률 (equal probability of either one-point, two-point, or uniform), 6) 산술적(arithmetic), 그리고 7) 1점, 2점, 균일 혹은 산술적인 등확률 (equal probability of either one-point, two-point, uniform, or arithmetic). 그림 5는 교배방식에 따른 적합도의 변화를 나타내고 있고, 가장 좋은 방식은 네번째 방식인 것으로 계산되었다. 6가지 돌연변이 방식 중에서는 첫번째 방식인 고정비율의 1점법 (one point

mutation, fixed rate)이 가장 좋은 방식으로 선택되었다(그림 6). 진화 단계에서 자손을 생성하는 복제계획으로 1) 세대간 전부 교체 (full generational replacement), 2) 정상상태 무작위 교체 (steady-state-replace-random), 그리고 3) 정상상태 최악의 개체 교체 (steady-state-replace-worst)의 세가지를 분석하였고, 세번째 방식이 가장 좋은 적합도를 보였다(그림 7). 가장 좋은 부모개체가 복제에 반드시 사용되도록 하는 Elitism 적용시와 미적용시는 동일한 적합도를 나타내었다.

개체군수, 교배확률, 교배방식, 돌연변이방식 그리고 복제계획에 대한 민감도분석에서 최대 적합도에 대한 최대 적합도와 최소 적합도의 차이의 비값 ((최대 적합도 · 최소 적합도)/최대 적합도)은 각각 13.7%, 8.9%, 13.7%, 26.4%, 그리고 6.6%로 계산되었다. 이 결과로 볼 때 어떤 돌연변이 방식을 적용하느냐에 따라 적합도의 변화가 가장 큰 것으로 나타나고, 다음으로 교배방식과 개체군수가 적합도에 큰 영향을 주었다.

앞에서 선택된 GA 매개변수의 최적값을 이용해서 최종적으로 세대수 200으로 QUAL2Kw 모형을 실행하였고, 각 세대별 적합도의 변화는 그림 8과

같다. 세대수 200의 최적 적합도에 대해서 세대수 50, 100과 150에서의 최적 적합도의 비값은 각각 88.84 %, 96.44 % 그리고 98.83%로 계산되었다. 100세대와 200세대의 적합도는 별 차이가 없으나 50세대와 200세대의 결과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Microsoft windows 7 환경에서 Intel(R) Core™ i7 2.80 GHz computer를 이용해서 앞서의 최적 GA 매개변수로 세대수 200까지 QUAL2Kw 모형을 실행했을 때 약 47시간이 소요되었다. 반면에 100세대까지 계산하는 데는 약 24시간이 소요되었다. 이 같이 각 세대별 연산시간과 정확도의 결과를 고려할 때 최소한 100세대 이상으로 최종 자동 보정을 수행하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

2. 자동보정 결과

앞서 민감도분석에 의해 결정된 최적 GA 매개변수와 2008년 3월의 수질조사 결과를 이용해서 전체 모형 적용 구간을 7개의 구간으로 나눠서 자동보정을 수행해서 각 구간에 대한 최적 수질 매개변수를 결정하였고, 최적 수질 매개변수에 의한 전체 구간의 수질을 계산하였다.

표 1에는 자동보정을 통해서 7개의 구간 각각에 대해 결정한 최적 매개변수의 범위와 QUAL2Kw 모형에서 적용되는 각 수질매개변수의 최대값과 최

소값을 나타내었다. 자동보정 결과로 도시한 남대천의 수질분포는 그림 9와 같다. 전반적으로 수질계산 결과가 실측치의 수질을 잘 대변하고 있다. Org-P와 Org-N의 경우에 다른 수질 항목에 비해서 상대적으로 오차가 크게 나타난다. DO의 보정 결과 그림에서 최하류의 실측치와 계산치의 차이나 보이는데 이것은 최하류부의 수질조사지점수가 적기 때문에 다른 구간에 비해서 상대적으로 오차가 크게 계산된 것으로 판단된다. 표 2에는 DO, CBOD_s, CBOD_f, Organic-N, NH₃-N, NO₃-N, Organic-P, PO₄-P, Detritus의 9가지 수질 항목에 대해서 실측수질과 계산수질간의 RMSE를 평균값에 대해서 표준화한 CV(RMSE)를 나타내었다.

표 2. QUAL2Kw 모형 보정결과의 계산수질과 실측수질간의 CV(RMSE)

수질변수	CV(RMSE)
CBOD _s (mg/L)	0.129
CBOD _f (mg/L)	0.155
Detritus (mg/L)	0.109
DO (mg/L)	0.055
Org-N (mg/L)	0.388
NH ₄ -N(mg/L)	0.204
NO ₃ -N(mg/L)	0.196
Org-P (mg/L)	0.407
PO ₄ -P(mg/L)	0.318

표 1. 자동보정을 통해서 결정한 최적 매개변수의 범위와 QUAL2Kw 모형에서 적용되는 수질매개변수의 최대값과 최소값

수질매개변수	보정값의 범위	최소값	최대값
O ₂ reaeration model	Internal		
Slow CBOD hydrolysis rate (/d)	0.108 - 2.486	0	5
Slow CBOD oxidation rate (/d)	0.012 - 4.995	0	5
Fast CBOD oxidation rate (/d)	0.0015 - 4.989	0	5
Organic N hydrolysis (/d)	0.016 - 4.986	0	5
Organic N settling velocity (m/d)	0.0028 - 1.993	0	2
Ammonium nitrification (/d)	0.263 - 9.998	0	10
Nitrate denitrification (/d)	0.277 - 1.601	0	2
Nitrate Sed denitrification transfer coeff (m/d)	0.00017 - 0.101	0	1
Organic P hydrolysis (/d)	0.0012 - 2.599	0	5
Organic P settling velocity (m/d)	0.0004 - 0.032	0	2
Inorganic P settling velocity (m/d)	0.0093 - 1.997	0	2
Detritus dissolution rate (/d)	0.068 - 4.961	0	5
Detritus settling velocity (m/d)	0.064 - 4.481	0	5

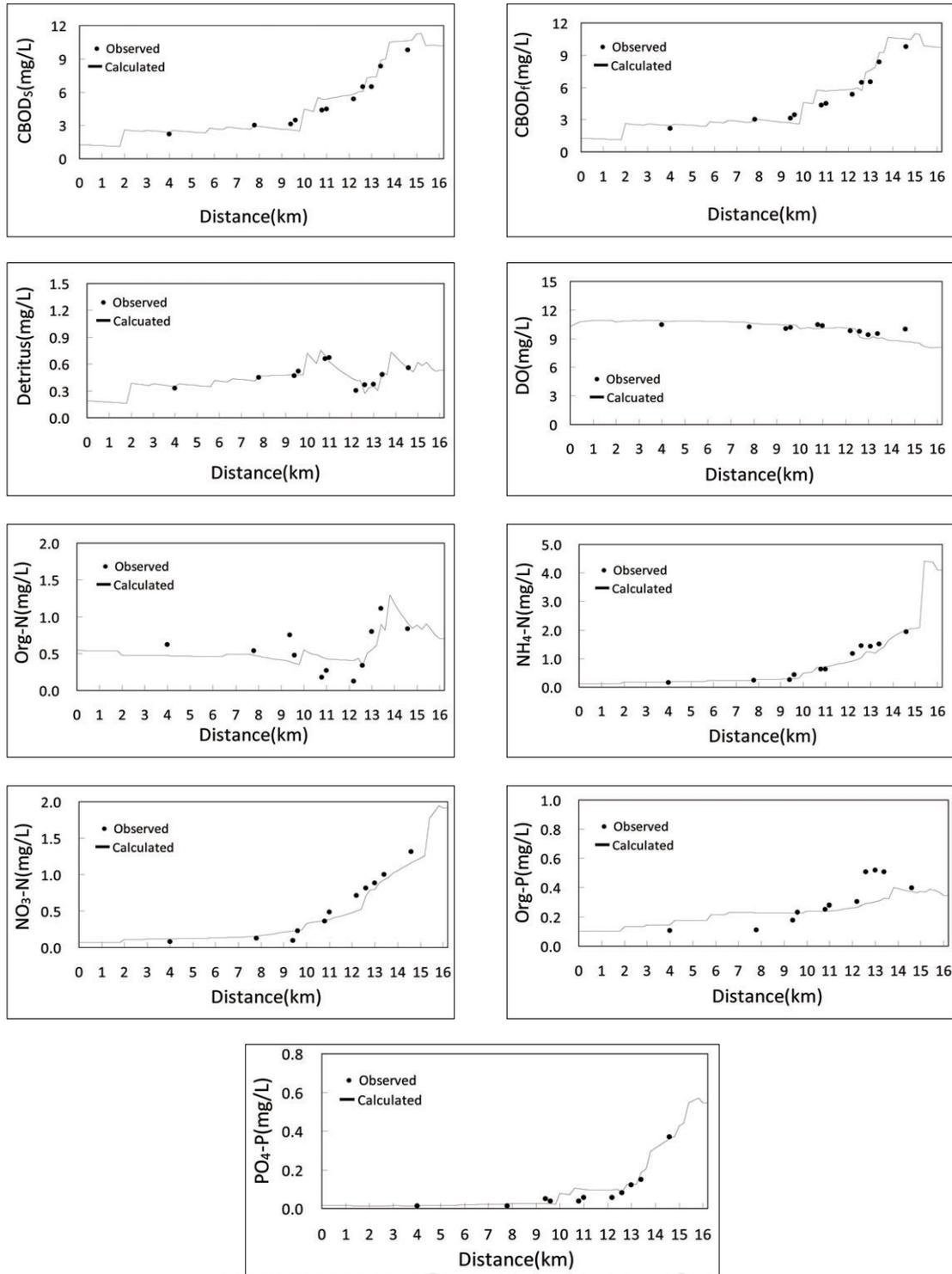


그림 9. 자동보정 결과의 수질분포

CV(RMSE)를 통해서 계산 결과에 대한 수질항목간의 상대적인 정확도를 쉽게 파악할 수 있다. 이 표에서도 Org-P와 Org-N 항목의 오차가 큰 것으로 나타난다. DO의 경우에는 최하류부 일부만 오차가 있기 때문에 CV(RMSE) 값은 적은 것으로 계산되었다.

IV. 결론

1) 본 연구에서는 유전알고리즘을 이용해서 하천 수질 매개변수를 자동보정하는 QUAL2Kw 모형을 강릉 남대천의 강릉댐 방류지점부터 하구까지의 16 km 구간에 대해서 7개 구간으로 나누어 적용하였다.

2) 강릉 남대천에 QUAL2Kw 모형을 적용했을 때 GA 매개변수에 대한 민감도분석 결과 개체군수 100, 교배확률 0.6 에서 가장 좋은 적합도를 보였다. 특히 개체군수를 증가시키면 적합도가 항상 높아지는 것은 아닌 것으로 나타났다. 7가지 교배방식 중에서는 균일교배 방식이 가장 좋은 적합도를 보였고, 6가지 돌연변이 방식 중에서는 첫번째 방식인 고정비율의 1점법이 가장 좋은 결과를 보였다. 진화 단계에서 자손을 생성하는 복제계획으로는 정상상태 최악의 개체 교체 방식이 가장 좋은 적합도를 보였다.

3) 개체군수, 교배확률, 교배방식, 돌연변이방식 그리고 복제계획에 대한 민감도분석 결과를 비교하면 돌연변이방식, 교배방식, 개체군수가 다른 GA 매개변수보다 적합도에 대해서 더 민감한 것으로 나타났다.

4) 수질계산 결과가 전반적으로 실측치의 수질을 잘 대변하고 있다. Org-P와 Org-N의 보정결과가 다른 수질 항목에 비해서 상대적으로 오차가 큰 것으로 나타난다.

5) 실측수질과 계산수질에 대한 CV(RMSE)를 분석한 결과에서도 다른 수질 항목과 비교해서 상대적으로 Org-P와 Org-N 항목의 오차가 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원(No. 2010-0024879)을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 김성태, 채수권, 김진홍, 1999, 유전알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정, 대한토목학회논문집, 19(II-4), 507-514.
- 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.
- Becker, L., 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.
- Charbonneau, P., Knapp, B., 1995, A user's guide to PIKAIA 1.0, NCAR Technical Note 418+1A, National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- Cho, J.H., Seo, H.J., 2007, Parameter optimization of SWMM for runoff quantity and quality calculation in a eutrophic lake watershed using a genetic algorithm. Water Science and Technology: Water Supply, 7(5-6), 35-41.

- Cho, J.H., Sung, K.S., Ha, S.R., 2004, A river water quality management model for regional wastewater treatment cost using a genetic algorithm. *Journal of Environmental, Management*. 73(3), 229-242.
- Cho, J.H., Ha, S.R., 2010. Parameter optimization of the QUAL2K model for a multiple-reach river using an influence coefficient algorithm. *Science of the Total Environment*, 408(8), 1985-1991.
- Gen, M. and Cheng, R. 1997, *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley & Sons, New York, 1-2.
- Goktas, R. K., 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.
- Je, C.H., Kim, K.S., 2004. Web-based application for estimating water quality impacts due to environmental dredging. *Environmental Geology*. 46(2), 123-234.
- Kannel, P.R., Lee, S., Lee Y.S., Kanel, S.R., 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., 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., Williams, R. E., 1992, Least-squares calibration of QUAL2E, *Water Environment Research*, 64(2), 179-185.
- Liu, S., Butler, D., Brazier, R., Heathwaite, L., K hu, S.T., 2007, Using genetic algorithms to calibrate a water quality model, *Science of the Total Environment*, 374, 260-272.
- Mulligan, A. E., Brown, L. C., 1998, Genetic algorithms for calibrating water quality models, *Journal of Environmental Engineering*, 124(3), 202-211.
- Ng, A.W.M., 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/>.
- Pelletier, G.J., Chapra, S.C., Tao, H., 2006, QUAL2Kw - A framework for modeling quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental modelling & Software*. 21, 419-425.
- Rinaldi, S., Romano, P., Soncini-Sessa, R., 1979. Parameter estimation of Streeter-phelps models. *Journal of Environmental Engineering*. 105(1), 75-88.
- Wood, D., Houck, M.H., Bell, J.M., 1998. Automated calibration and use of stream quality simulation model. *Journal of Environmental Engineering*. 116(2), 236-248.