

Research Paper

유전알고리즘을 이용한 WASP7 모형의 보정과 상수원 저수지에 대한 적용

배상목 · 조재현

가톨릭관동대학교 보건환경학과

Calibration of WASP7 Model using a Genetic Algorithm and Application to a Drinking Water Resource Reservoir

Sang-Mok Bae · Jae-Heon Cho

Department of Health and Environment, Catholic Kwandong University

요약 : 수동보정으로 수질모델링을 수행할 때는 연구자의 주관이 개입되어 해당 연구의 객관성에 영향을 줄 소지가 있기 때문에 자동보정에 관심을 갖게 된다. 본 연구에서는 WASP7 모형의 수질 매개변수 보정을 위해서 유전알고리즘과 영향계수법을 적용하였다. 이 방법에서는 대상 호수의 BOD, DO, 인, 질소, 식물성플랑크톤에 큰 영향을 미치는 매개변수를 대상으로 최적 수질 매개변수를 산정한다. 성층현상이 일어나는 대상 호수의 수온과 수리적 특성을 정확하게 계산하기 위해 3차원 수리모형인 EFDC를 적용하였고, 이 모형의 결과는 본 연구에서 이용한 호수수질모형인 WASP7 모형과 연동해서 적용되었다. EFDC와 WASP7의 적용을 위해 동일한 격자망을 구성하였다. WASP7의 보정결과 5개 보정 대상 수질변수 중에서 DO, TN, CBOD에 대한 실측치와 계산치의 상대오차제곱합은 비교적 적었다. 따라서 이 세가지 수질에 대한 보정은 적절히 수행되었으나, TP와 Chl-a에 대한 보정결과는 비교적 정확도가 낮았다.

주요어 : WASP7, 자동보정, 유전알고리즘, 영향계수법

Abstract : When the water quality modelling is done with a manual calibration, it is possible that the researcher's opinion may affect the objectivity of the research. Hence, the role of the automatic calibration is highly important. This research applies a technique to automatically calibrate the water quality parameters by implementing an optimization method. This involves estimating the optimum water quality parameters targeting influential parameters towards the lake's BOD, DO, Phosphorus, Nitrogen and Phytoplankton. To accurately calculate the water temperature and hydraulic characteristics of a deep, stratifying lake, EFDC, a 3-dimensional hydraulic model which can be linked to the WASP7 was applied. With EFDC, the segment of the lake is formed and utilized as an input data of the WASP7. For the calibration of the water quality parameters of the WASP7, an

influence coefficient algorithm and a genetic algorithm was applied. Of the five water quality variables for calibration, the normalized residuals of the observed and calculated values of DO, TN, CBOD were relatively small and the three water quality variables were calibrated properly. Yet the accuracy of the calibration of TP and Chl-a was relatively low.

Keywords : WASP7, automatic calibration, genetic algorithm, influence coefficient algorithm

I. 서론

수질모형을 적용할 때 수동보정(manual calibration)을 하는 경우에는 실측값과 계산값을 비교하여 시행착오를 통해 매개변수를 선정하므로 연구자의 주관에 크게 좌우되고 객관성의 결여가 문제될 수 있다. 따라서 자동보정(automatic calibration)에 대해 관심을 가지게 되고, 하천수질모형의 경우에는 이에 관한 다수의 연구결과가 발표된 바 있다. 근래 들어서는 본 연구에서 적용하고 있는 유전알고리즘을 이용해서 하천수질모형을 보정하려는 시도들이 있었다. Mulligan and Brown(1998)은 유전알고리즘을 이용해서 가상의 수질 자료로 보정작업을 하고 유전알고리즘의 능력을 검증한 후에 시범하천에 대하여 유전알고리즘을 적용하여 보정하였고, 제약식에 감점함수(penalty function)를 고려하고, 다중반응자료(multiple-response data)를 포함시켰을 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다. Ng and Perera(2003)는 유전알고리즘의 매개변수가 최적화 해에 미치는 영향을 분석하였고, 기존의 문헌자료에서 제시된 유전알고리즘 매개변수를 하천수질모형의 매개변수 보정에 사용하더라도 좋은 결과를 얻을 수 있다고 결론지었다. Goktas and Aksoy(2007)는 QUAL2E와 유전알고리즘을 통합해서 보정 작업을 하였고, 목적함수에 가중치를 적용하면 특정 수질의 농도 단위가 높을 때 나타나는 해의 왜곡 현상을 최소화할 수 있었다. The enhanced stream water quality model (QUAL2E)의 최신판인 QUAL2Kw 모형(Pelletier and Chapra, 2004)을 네팔의 하천에 적용하고 자동보정한 바 있고(Kannel et al., 2007), 인공도를 예측하는 유역모형의 보정에 유전알고리즘을 이용한 시도가 있었다(Liu et al., 2007). 국내에서는 유전알고리즘을 이용해서 QUAL2E 모형의 biochemical

oxygen demand(BOD)와 dissolved oxygen(DO)에 관련된 4개의 매개변수를 추정하였고(김성태 등, 1999), 영향계수법과 유전알고리즘을 이용해서 QUAL2K 모형을 자동보정한 바 있다(Cho and Ha, 2010). 유전알고리즘과 the Storm Water Management Model(SWMM)의 통합프로그램을 개발하여 강우유출량을 자동 보정한 연구도 있었다(조재현과 이종호, 2006).

호수와 저수지 수질모형으로서 세계적으로 the Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)가 널리 적용되어 왔다(Vuksanovic et al., 1996; Tufford and Mckellar, 1999; Wool et al., 2001; Caruso, 2003; USEPA, 2010). 우리나라에서도 여러 호소에 WASP5가 적용되었다(박영기 등, 2000; 김만식과 한재석, 2003; 한운구 등, 2003; 한건연과 백창현, 2004; 이진호 등, 2006). 해수가 유입되는 동해안 석호에 WASP5를 적용하여 해수유입수가 석호에 미치는 영향과 호수수질개선 대책을 검토하였고(조재현, 1997), 유역내 목장지대가 넓게 분포하여 비점원 오염부하로 인해 호수수질이 악화된 도암호의 수질관리를 위해 WASP5가 적용된 바 있다(조재현, 1998). 농업용 저수지에 WASP6를 적용하였고(이원호 등, 2006), WASP7과 3차원 수리모형 EFDC-Hydro (Tetra Tech Inc., 2007)를 평택호에 적용하여 준설 전후의 수질을 모의하였고(서동일과 이정우, 2005), 안동댐과 임하호에 WASP7을 적용해서 모형의 매개변수를 추정하였다(안승섭 등, 2007, 2008). 심순보 등(2001)은 회귀분석을 이용해서 계산수질을 매개변수만의 관계식으로 나타내고, 계산수질과 실측수질과의 오차를 최소화하는 목적함수를 구성하여 유전알고리즘을 이용해서 BOD, DO, Chl-a에 관련된 5가지 매개변수를 추정하였다. 김만식과 한재석(2003)은 유전알고리즘을 이용해서

WASP5모형의 매개변수를 추정하였고, 식물성플랑크톤의 성장과 사멸에 관계된 매개변수 2개와 질산화, 재폭기, 탈산소에 관련된 3개의 매개변수를 대상으로 하였다. 유전알고리즘의 매개변수는 개체집단의 크기, 교배확률, 돌연변이확률 등을 고려하였다.

Becker and Yeh(1972)는 개수로 부정류의 수리학적 매개변수 추정에 본 연구에서 이용하는 영향계수법을 적용하였고, 수리학적 매개변수들을 가정해서 부정류 지배방정식의 해를 구하고, 실측값과 계산값의 오차제곱합을 최소화하는 수리학적 매개변수들을 추정하였다. 영향계수법은 비교적 쉽고 단순하게 프로그램을 작성할 수 있으며, 매개변수 추정 문제를 해석할 수 있는 수렴이 빠른 계산 방법이기 때문에 본 연구의 WASP7의 자동보정에 이용하였다. 영향계수법으로 도출되는 오차를 최소화하는 최적화문제는 효과적으로 전역적 탐색을 할 수 있고, 수학적인 어려움이나 복잡함이 없는 유전알고리즘을 이용해서 해석하였다. 식물성플랑크톤의 성장과 밀접히 관련된 질소, 인 성분, BOD, DO를 위시해서 호수수질에 큰 영향을 주는 수질인자들과 관련된 매개변수를 대상으로 유전알고리즘을 이용해서 최적 매개변수를 추정한다. 수심이 깊고 성층화되는 호수를 대상으로 수온 및 수리계산을 정확하게 하기 위해, WASP7과 연계할 수 있는 3차원 수리모형인 EFDC를 적용하였다.

II. 연구방법

1. 적용 모형의 개요

EFDC 모형은 3차원의 유체동력학 모형으로 하구, 연안, 호수 등을 포함하는 복합적인 수환경에서 물질의 순환과 수송문제를 해석할 수 있다. 성층구조를 분석하기 위해서 염분, 수온, 보존성물질 등을 해석할 수 있다. 부유사이동, 오염물질의 이동과 반응, 부영양화기작, 범람원(flood plain)의 침수과정, 습지에서의 유동을 모의할 수 있다. EFDC는 수리동력학(Hydrodynamics), 수질(Water Quality), 유사이동(Sediment transport), 유해물질(Toxics) 등의 4개 module로 구성된다(Tetra Tech Inc., 2007). 본 연

구에서는 강릉저수지(오봉저수지)의 수온과 수리특성을 반영하여 WASP7 모형을 모의하기 위해 3차원 수리모형 EFDC-Hydro를 적용했다.

본 연구에서 적용한 WASP7.4는 저질을 포함한 수체에 대한 동적인 모형으로서 1, 2, 3차원의 계산이 가능하고, 13가지 수질변수에 대한 계산이 가능하고, 부영양화(Eutrophication module), 유독성(Toxicant module), 수은(Mercury module), 열(Heat module) 모듈 등으로 구성되어 있다(Wool et al., 2001; USEPA, 2010). 특히 SWMM, HSPF 등의 외부 모형으로부터 계산된 결과의 도입은 전처리 프로그램(Pre-processor)을 이용해서 연계할 수 있고, EFDC, DYNHYD 등의 수리동역학 모형과도 연계하여 입력 자료를 구성할 수 있다. 그 외에도 각종 상수와 매개변수, 구획, 부하, 경계수질, 유량 등의 입력 자료를 구성할 수 있다. 또 후처리 프로그램(Post-processor)에서는 계산된 수질을 실측결과와 함께 도시하여 쉽게 보정할 수 있도록 하였고, 계산 결과를 엑셀 표 형태로 표시해주는 기능이 있다.

2. EFDC와 WASP 모형의 적용

강릉저수지는 강릉 남대천 상류에 위치하고, 강릉시의 상수원과 농업용수원으로 이용되고 있다. 이 저수지의 최고수심이 40 m에 이르고 여름철에 성층현상이 일어나고 있고, 유역면적은 109 km², 만수면적 0.86 km², 유효저수량 14,346,000 ton이다. Figure 1은 강릉 남대천 유역도와 강릉저수지의 구획분할을 나타내고 있다. 저수지의 구획 분할은 연직 구획 수가 일정한 sigma grid와 연직 구획 수를 가변으로 두는 laterally constrained localized(LCL) sigma grid를 병행해서 적용했다. Figure 1과 같이 수평 구획은 32개로 분할하였고, 연직방향으로는 최대 수심에서 5개의 층으로 나누어 총 97개 구획으로 구성하였다. 1번 구획은 남대천 본류인 도마천의 유입부이고, 6번 구획은 남대천 지류인 왕산천 유입부이다. 저수지로 들어오는 도마천과 왕산천의 유출량은 유출계수를 이용해서 도출하였다. 오봉댐의 총방류량은 수문방류량, 의무방류량, 농업용수량, 생활용수량

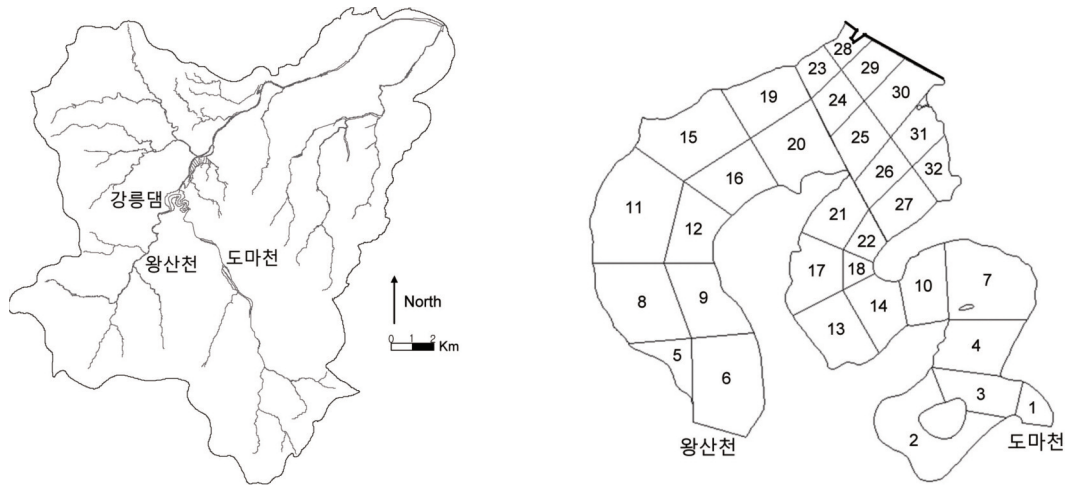


Figure 1. Namdaecheon watershed and horizontal segmentation of Gangneung Reservoir

으로 산정하고, 강릉기상대의 강수량자료와 강릉저수지 유역면적으로 유역의 강수량을 산정하고 저수지의 증발량을 고려해서 2008년 2009년 강릉저수지유역의 유출계수를 산정하였다. 이런 방법을 통해서 유출계수는 2008년에 0.48, 2009년에는 0.57로 산출되었다. 강릉기상대의 2008년과 2009년의 강우자료와 앞서 산출된 유출계수를 이용해서 도마천과 왕산천의 강우유출량을 계산하였고, 건기유출량은 실측유출을 이용하였다. EFDC-Hydro의 입력자료 중에서 기상자료로는 강릉지방 기상대의 강우, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도, 증발량, 구름량에 대한 일별 또는 시간별 자료를 이용하였다. 유량 시계열자료(Flows time series)에는 도마천과 왕산천의 유출량, 수문방류량(Figure 1의 구획 28), 상수도 및 농업용수 취수량(Figure 1의 구획 31) 등이 고려되었다.

WASP7의 적용을 위해 EFDC 적용시와 마찬가지로 수평 구획은 32개, 연직방향으로는 최대 5개의 구획으로 하여 총 97개의 구획을 구성하였다. 강릉저수지의 수리제원과 수온은 앞서의 EFDC모형의 계산결과를 WASP7 모형에 연결시켜서 적용하였다. 저수지의 경계(boundary)는 도마천, 왕산천의 유입지천, 호수유출부의 수문방류와 취수로 하였다. 저수지 유입부의 도마천과 왕산천의 강우유출 오염부하량은 인근 속초 영양호유역의 장천에서 강우유출조사를 통해 도출한 강우량과 유출오염부하에 관한 관

계식(조재현과 강성호, 2009)을 이용하였다. BOD, TN, TP 각각의 강우유출 오염부하량을 구하고 이로부터 EFDC모형 적용시 구한 유출량을 이용해서 강우유출수질을 계산하였다. 두개 지천 외에 외부로부터 호수로 들어오는 별도의 오염부하는 고려되지 않았다. 시간함수(time function)로 입력한 자료는 일사량, 일조시간, 풍속 등의 자료이다. 이들 입력자료와 함께 저질로부터의 영양물질의 용출과 SOD를 고려하여 2008년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지의 CBOD, DO, Org-N, NH₃-N, NO₃-N, Org-P, PO₄-P, Chl-a 등의 수질을 계산하였다.

3. 유전알고리즘과 영향계수법의 적용

실측 수질과 계산값의 상대오차 제공함을 최소화하기 위해 영향계수법(전경수와 이길성, 1993; Becker and Yeh, 1972; Cho and Ha, 2010)을 이용하였다. 추정하고자 하는 매개변수 P^k 로 인한 계산수질의 상대오차 $E_{i,j}^k$ 를 Taylor급수로 전개하고 2차 이상의 항을 무시하면 (1)식과 같다.

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

여기서 i 는 수질변수, j 는 수질측정 지점, M 은 매개변수 번호를 나타낸다. 수질 매개변수의 변화에 따른 상대오차 변화량(영향계수)은 다음과 같이 계산한다.

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

(1)식의 실측값과 계산값의 상대오차 제곱합을 최소화하는 최적화문제는 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용해서 해석하고 현 단계에서의 최적 수질 매개변수를 추정한다. 앞의 과정을 반복 실행하여 상대오차제곱합이 최소가 될 때의 수질 매개변수를 최적 매개변수로 선정한다.

이와 같은 영향계수법과 유전알고리즘을 이용한 수질 매개변수 최적화모형을 강릉저수지의 WASP모형에 적용하였다. 자동보정한 수질변수는 DO, CBOD, TN, TP, Chl-a의 5가지 항목이고, 최적화모형을 통해 추정한 수질 매개변수는 WASP 수질계산 결과에 비교적 큰 영향을 주는 질산화율 상수, 질산화 온도 상수, 질산화 산소한계 반포함 상수, 탈질화율 상수 등 24가지이다.

WASP7 모형의 매개변수 자동보정을 위해서 Carroll(2004)의 유전알고리즘을 이용하였다. Carroll(2004)의 프로그램에 상대오차를 이용한 적합도함수에 관한 부분, 수질 실측값, 수질인자별 가중치, 매개변수 변화에 따른 상대오차 변화량 등을 입력할 수 있게 프로그램을 수정하였고, 계산수질과 실측수질의 상대오차 제곱합이 최소화되도록 포트란 프로그

램을 작성하였다. 유전알고리즘의 적합도는 상대오차 제곱합의 역수로 두었다. 아래 식은 유전알고리즘을 이용해서 해석하는 최적화문제의 목적함수이다.

$$\text{Maximize } \frac{1}{\sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N w_i (E_{i,j}^k)^2} \quad (3)$$

여기서 i 는 수질변수, j 는 수질측정 지점, w_i 는 각 수질별 가중치, $E_{i,j}^k$ 는 계산수질의 상대오차이다.

III. 결과토의

EFDC모형으로 2008년과 2009년 2년 동안의 강릉저수지 수위표지점이 위치한 28번 구획의 수위를 계산하고 실측수위와 함께 표시한 것은 Figure 2와 같다. 저수지 실측수위와 계산 수위간의 표준편차를 나타내는 the root mean squared error(RMSE)를 실측 평균값에 대해서 표준화한 the coefficient of variation of the RMSE (CV(RMSE)); $(\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 / n)^{1/2} / \bar{O}$, 여기서 O_i 는 실측치, P_i 는 계산치)가 0.0195로 계산되어 EFDC모형의 결과가 저수지수위를 적절하게 나타내는 것으로 판단된다.

WASP 모형의 자동보정을 위한 유전알고리즘은 tournament selection으로 부모개체를 선택하고, 교배에서는 uniform crossover를 적용하였다. 돌연

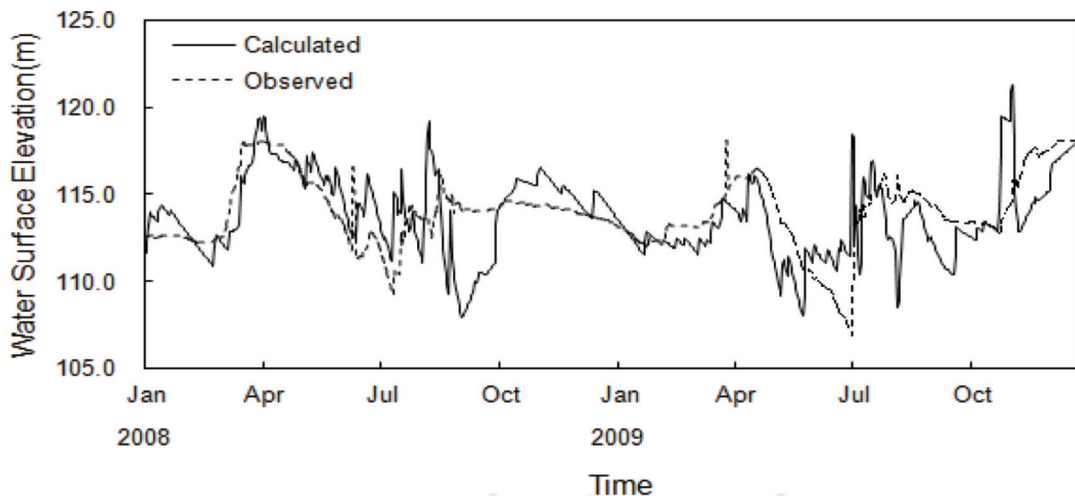


Figure 2. Calculation results of Gangneung reservoir water level

변이로는 jump mutation과 creep mutation이 함께 적용되었고, 가장 좋은 부모개체가 복제에 반드시 사용되도록 하는 elitism이 채택되었다. 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.

영향계수법에서는 수질모형의 적용 결과를 이용해서 영향계수를 계산하고, 각 차수별로 유전알고리즘을 적용해서 적합도와 상대오차를 평가하고 최적 매개변수를 추정한다. 각 차수별 계산은 Cho and Ha (2010)의 연구와 같이 모든 차수에서 영향계수를 동일하게 적용하는 방법을 적용해서 최적화 계산을 수행하였다. 이와 같은 영향계수법과 유전알고리즘으로 강릉저수지에 대한 WASP 모형의 최적 수질 매개변수를 반복 추정하여 각 차수별로 상대오차 제곱합을 계산하였고, 이 중 가장 낮은 상대오차 제곱합을 보이는 결과로부터 최적 수질매개변수를 결정하였다. 여기서 상대오차제곱합은 2008년, 2009년 실측값과 각 차수별 계산수질을 이용해서 5개 수질항목 전체의 상대오차 제곱합을 계산하였고, 실측수질은 DO, CBOD, TN, TP, Chl-a 등의 5개 수질항목에 대해서 조사한 환경부 자료와 본 연구의 현장조사 결과를 이용하였다. 환경부 자료는 강릉저수지에서 2008년에 4회, 2009년에 4회 조사된 자료이며, 나머지는 본 연구실에서 2008년 1월부터 2009년 3월까지 11회 실측 조사한 자료이다. DO, CBOD, TN, TP, Chl-a의 실측자료의 변동계수는 각각 0.10, 0.19, 0.31, 0.73, 0.63이었고, TP, Chl-a의 변동성이 크다. 따라서 TP와 Chl-a는 상대오차가 다른 수질 항목에 비해서 아주 큰 값으로 산출되므로 최적화 과정에서 이들 두가지 수질항목의 중요도가 너무 높게 계산되는 경향이 있다. 이점을 고려해서 TP와 Chl-a에 대해서 가중치 1/100을 적용하고 나머지 BOD, DO, TN의 세항목은 가중치 1을 적용했을 경우(case 1)와 모든 5가지 수질항목에 대해서 가중치 1을 적용한 경우(case 2)를 비교하였다.

Case 1과 case 2 모두 유전알고리즘을 이용해서

Table 1. The sums of the squares of the normalized residuals of observed and predicted water quality

수질 변수	상대오차 제곱합	
	TP, Chl-a 가중치 0.01 적용(Case 1)	TP, Chl-a 가중치 1 적용(Case 2)
DO	0.266	0.303
CBODu	1.783	3.240
TN	1.523	3.992
TP	1.141	4.774
Chl-a	1.592	4.359
합계	6.305	16.668

10차까지 반복 계산하였고, 10차까지의 계산 결과 중에서 상대오차제곱합이 가장 작은 것은 6.305 였고, 이 결과의 수질 매개변수를 강릉저수지에 대한 WASP모형의 최적 수질매개변수로 선정하였다. Table 1에는 앞서 계산된 최적 수질 매개변수에 의한 수질항목별 상대오차 제곱합을 표시하였다. Case 2에서는 TP와 Chl-a의 상대오차가 case 1보다 크게 나타나고 TN, DO, CBOD의 오차도 case 1보다 커진다. 전체적으로 5가지 수질 항목 중에서 DO, TN, CBOD의 상대오차 제곱합이 작고 비교적 정확한 보정이 이루어졌고, TP와 Chl-a에서는 실측치 자체의 변동성이 큰 문제점으로 인해 다른 수질항목보다 상대적으로 보정의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 TP와 Chl-a에 대해서 가중치 1/100을 적용하고 나머지 BOD, DO, TN의 세항목은 가중치 1을 적용했을 경우를 최종적으로 채택하였다. Table 2에는 자동보정모형에서 최적화하여 최종 추정된 수질 매개변수와 각각의 수질 매개변수의 최소 최대값의 범위를 나타내었다. 이 범위는 WASP모형의 상수표(Constant data)에 제시된 값을 기초로 작성되었다(USEPA, 2010). WASP모형에 대한 자동보정모형을 적용해서 강릉저수지 취수탑지점의 수질을 보정한 결과는 Figure 3과 같다. 보정 결과의 그림에서도 DO, TN, CBOD의 보정결과는 비교적 정확도가 높고 TP와 Chl-a의 보정결과는 정확도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 한편 실측치와 계산치 수질농도의 % 차이는 DO, TN, CBOD, TP와 Chl-a가 각각 -1.2%, 7.9%, 20.8%, -7.8%,

-22.1%로 계산되어 DO, TN, TP의 신뢰도가 더 높았다. %차이의 계산식은 아래와 같다.

$$\%difference = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100$$

Table 2. Optimum water quality parameters estimated by genetic algorithm

수질 매개변수	보정값	최소값	최대값
Nitrification Rate Constant (/day)	6.4598	0	10
Nitrification Temperature Coefficient	1.0774	1.04	1.08
Half Saturation Constant for Nitrification Oxygen Limit (mg O/L)	1.4644	0	2
Denitrification Rate Constant (/day)	0.0302	0	0.09
Denitrification Temperature Coefficient	1.0397	1.02	1.06
Half Saturation Constant for Denitrification Oxygen Limit (mg O/L)	0.0178	0	0.1
Dissolved Organic Nitrogen Mineralization Rate Constant (/day)	0.211	0	1.08
Dissolved Organic Nitrogen Mineralization Temperature Coefficient	1.0724	1.04	1.08
Mineralization Rate Constant for Dissolved Organic P (/day)	0.2196	0	0.22
Dissolved Organic Phosphorus Mineralization Temperature Coefficient	1.0464	1.04	1.08
Phytoplankton Maximum Growth Rate Constant (/day)	2.9907	0	3
Phytoplankton Growth Temperature Coefficient	1.0322	1.03	1.07
Phytoplankton Carbon to Chlorophyll Ratio	12.3144	10	112
Phytoplankton Half-Saturation Constant for Nitrogen Uptake (mg N/L)	0.047	0	0.05
Phytoplankton Half-Saturation Constant for Phosphorus Uptake (mg P/L)	0.0003	0	0.05
Phytoplankton Endogenous Respiration Rate Constant (/day)	0.0006	0	0.5
Phytoplankton Respiration Temperature Coefficient	1.0796	1.04	1.08
Phytoplankton Death Rate Constant (Non-Zooplankton Predation) (/day)	0.2471	0	0.25
Phytoplankton Phosphorus to Carbon Ratio	0.0654	0	0.24
Phytoplankton Nitrogen to Carbon Ratio	0.002	0	0.43
Global Reaeration Rate Constant (/day)	0.8792	0	4
BOD (1) Decay Rate Constant (/day)	0.0017	0	0.1
BOD (1) Decay Rate Temperature Correction Coefficient	1.0658	1.02	1.07
BOD (1) Half Saturation Oxygen Limit (mg O/L)	0.1179	0	0.5

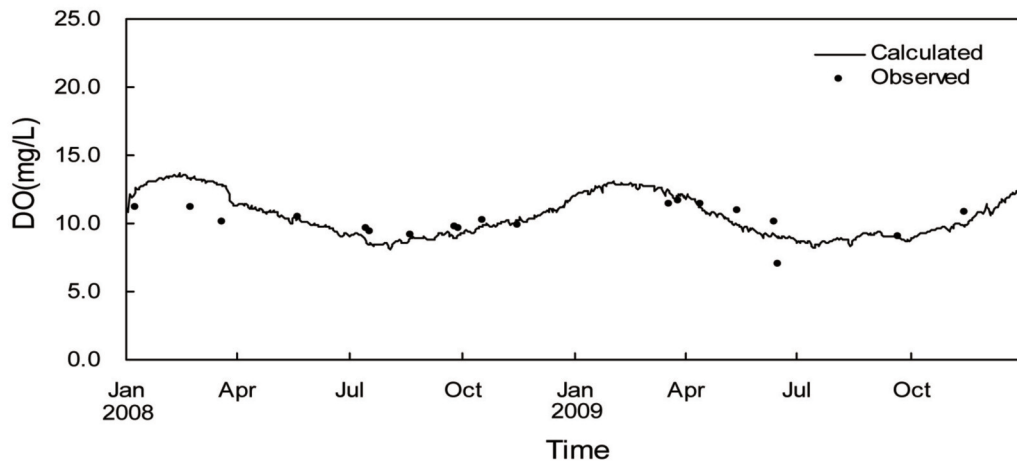


Figure 3. Calibration results for WASP7

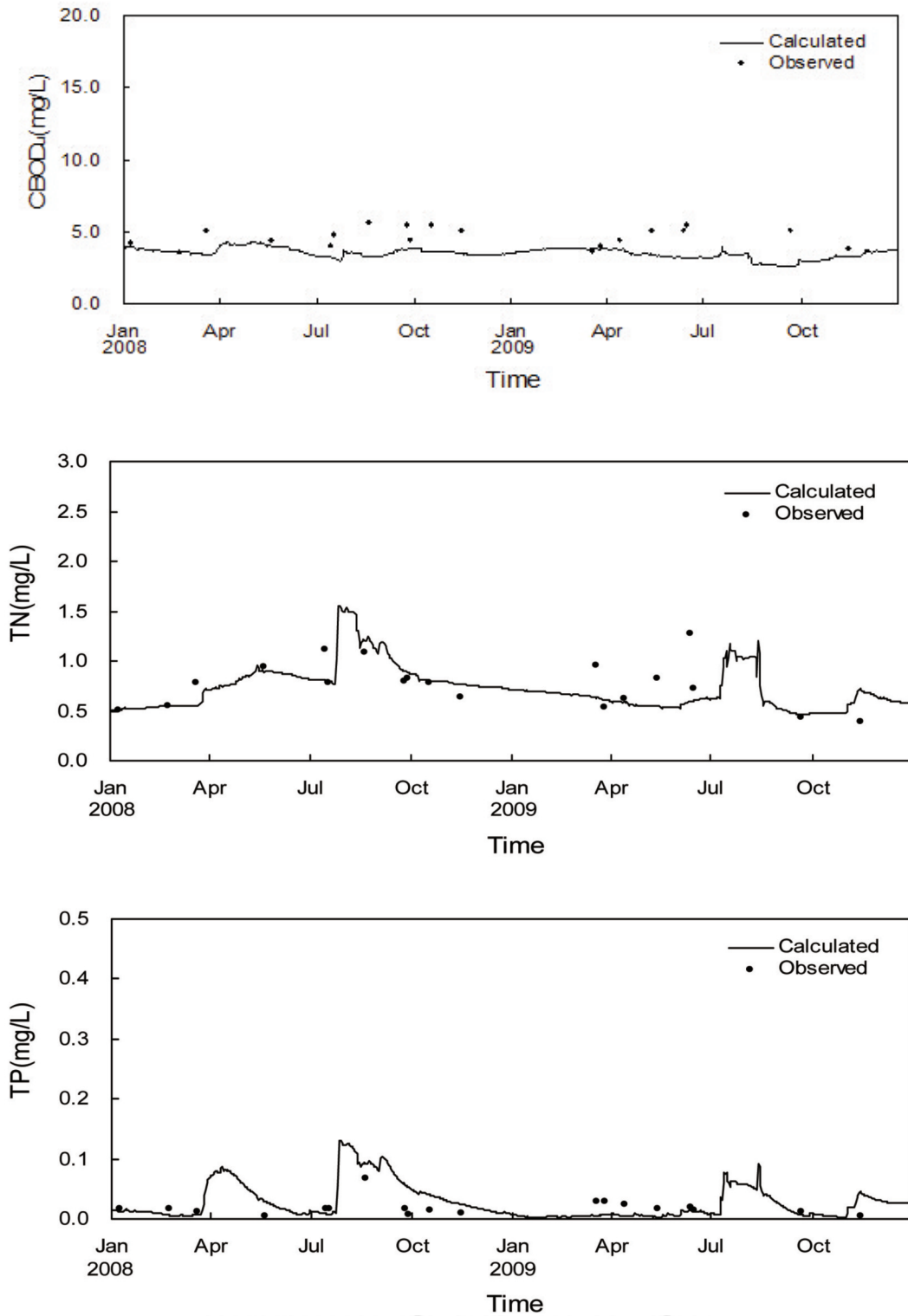


Figure 3. Continued

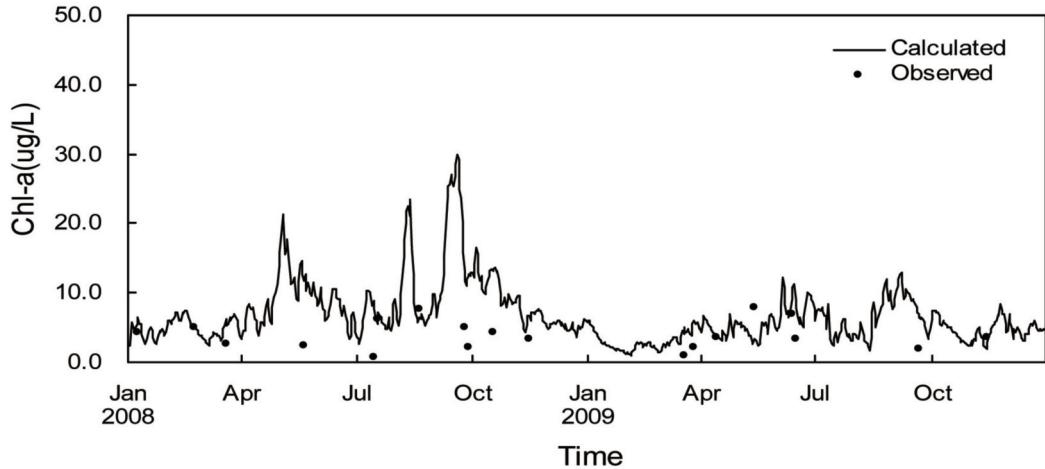


Figure 3. Continued

IV. 결론

유전알고리즘과 영향계수법을 이용해서 WASP7 모형의 수질 매개변수를 보정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) EFDC모형 적용결과 실측값과 계산값의 CV(RMSE)가 0.0195로 계산되어 계산된 저수지수위가 실측 수위값을 적절히 재현하고 있다. WASP모형의 수리제원은 EFDC모형으로 계산한 강릉저수지의 수리제원을 연계시켜서 적용하였다.

2) 영향계수법과 유전알고리즘을 이용한 수질 매개변수 최적화모형을 강릉저수지의 WASP모형에 적용하였다. 자동보정한 수질변수는 DO, CBOD, TN, TP, Chl-a의 5가지 항목이고, 최적화모형을 통해 추정된 수질 매개변수는 WASP 수질계산 결과에 비교적 큰 영향을 주는 질산화율 상수, 질산화 온도 상수 등 24가지이다. 영향계수법과 유전알고리즘을 이용해서 계산한 결과 중에서 상대오차제공합이 가장 작은 것은 6.305 였고, 이 결과의 수질 매개변수를 강릉저수지에 대한 WASP모형의 최적 수질매개변수로 선정하였다.

3) 자동보정한 5가지 수질 항목 중에서 DO, TN, CBOD의 상대오차 제공합이 작고 비교적 정확한 보정이 이루어졌고, 상대적으로 TP와 Chl-a는 보정의 정확도가 낮았다. 이것은 TP와 Chl-a 실측치 자

체의 변동성이 큰 것에 기인한다고 판단된다. 유전알고리즘의 적합도를 산정할 때 5개 수질 항목 각각의 가중치를 1로 뒀을 때는 TP와 Chl-a의 오차가 너무 커서 적합도 자체에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서와 같이 변동성이 큰 일부 수질항목의 보정시에는 다른 항목보다 작은 가중치를 적용해서 최종 보정을 수행하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 일부 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2010-0024879).

인용문헌

김만식, 한재석. 2003. 인공지능기법을 이용한 수질모형의 최적 매개변수 추정 연구. 환경관리학회지. 9(1), pp.1-9.

김성태, 채수권, 김건홍. 1999. 유전알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정. 대한토목학회논문집. 19(2-4), pp.507-514.

박영기, 최문술, 이장춘. 2000. WASP5 모형에 의한 새만금호의 수질매개변수 추정. 대

- 한환경공학회는논문집. 22(4), pp.743-754.
- 서동일, 이정우. 2005. WASP7.0을 위한 3차원 수리모델, EFDC-Hydro의 활용에 관한 연구. 대한환경공학회 춘계학술연구발표회. 2005년 4월 28- 30일, pp.431-436.
- 심순보, 김연국, 김만식, 심규철. 2001. 유전자알고리즘을 이용한 WASP5/EUTRO5모형의 최적 매개변수의 추정. 대한토목학회논문집. 21(4B), pp.315-326.
- 안승섭, 서명준, 박노삼, 정광옥. 2007. 수질예측을 위한 WASP7 모형 매개변수의 추정 연구. 한국환경과학회지. 16(5), pp.623-632.
- 안승섭, 서명준, 정도준, 박노삼. 2008. WASP7 모형을 이용한 임화호 수질모의에 관한 연구. 한국환경과학회지. 17(6), pp.611-621.
- 이건호, 김영관, 이용석, 김동진. 2006. 의암호 내부생성 유기물에 대한 물질수지 분석 및 WASP모델 적용. 대한상하수도학회. 한국물환경학회 공동 춘계학술발표회 논문집, pp.G-1~G-11.
- 이원호, 한양수, 김진극. 2006. WASP6모형을 이용한 성춘화 호소의 수질모의. 한국지반환경공학회 논문집. 7(6), pp.57-65.
- 전경수, 이길성. 1993. 영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정. 대한토목학회논문집. 13(4), pp. 163-176.
- 조재현. 1997. 해수유입을 고려한 석호의 수질모델링. 한국수질보전학회지. 13(2), pp.145-153.
- 조재현. 1998. 목장지대 주변에 위치한 도암호의 수질관리. 대한상하수도학회지. 12(3), pp.41-47.
- 조재현, 이종호. 2006. SWMM의 유출량 보정을 위한 매개변수 최적화. 환경영향평가. 15(6), pp.435-441.
- 조재현, 강성효. 2009. 강우유출오염부하를 고려한 호수수질모델링. 환경영향평가. 18(2), pp.59-67.
- 한건연, 백창현. 2004. GIS를 이용한 저수지의 수질관리시스템 구축. 한국공간정보학회지. 12(1), pp.409-420.
- 한운구, 김규형, 안태봉. 2003. 대청호에서 WASP5 모델 매개변수에 관한 연구. 한국지반환경공학회 논문집. 4(3), pp.69-77.
- Becker, L. and W. W. G. Yeh. 1972. Identification of parameters in unsteady open channel flow. Water Resources Research. 8(4), pp.956-965.
- Carroll DL. 2004. FORTRAN Genetic Algorithm (GA) Driver, <http://cuaerospace.com/carroll/ga.html>.
- Caruso, B. S. 2003. Water quality simulation for planning restoration of a mined watershed. Water, air, and soil pollution. 150(1/4), pp.221-324.
- Cho, J. H. and 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.
- 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), pp.126-136.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., S. R. Kanel and G. J. Pelletier. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. Ecological Modelling. 202, pp.185-190.
- Liu, S., D. Butler, R. Brazier, L. Heathwaite and S. T. Khu. 2007. Using genetic algorithms to calibrate a water quality model. Science of the Total Environment. 374, pp.260-272.
- Mulligan, A. E. and L. C. Brown. 1998. Genetic

- algorithms for calibrating water quality models. *Journal of Environmental Engineering*. 124(3), pp.202-211.
- Ng, A. W. M. and B. J. C. Perera. 2003. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 16, pp.529-541.
- Pelletier, G. and S. Chapra. 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/>.
- Tetra Tech Inc. 2007. The environmental fluid dynamics code user manual US EPA version 1.01, USEPA.
- Tufford, D. L. and H. N. Mckellar. 1999. Spatial and temporal hydrodynamics and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain. *Ecological modelling*. 114, pp.137-173.
- USEPA. 2010. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), <http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html>
- Vuksanovic, V., F. D. Smedt and S. V. Meerbeek. 1996. Transport of polychlorinated biphenyls(PCB) in the Scheldt Estuary simulated with the water quality model WASP. *Journal of Hydrology*. 174, pp.1-18.
- Wool, T. A., R. B. Ambrose, J. L. Martin and E. A. Comer. 2001. The Water Quality Analysis Simulation Program. WASP6 User's Manual, USEPA.
- quality prediction at Imha Reservoir using WASP7. *Journal of the Environmental Sciences*. 17(6), pp.611-621.
- Ahn, S. S., Seo, M. J., Park, R. S. and Jeong, K. O. 2007. The parameter estimation of WASP model for water quality prediction. *Journal of the Environmental Sciences*. 16(5), pp.623-632.
- Becker, L. and W.W.G. Yeh. 1972. Identification of parameters in unsteady open channel flow. *Water Resources Research*. 8(4), pp.956-965.
- Carroll DL. 2004. FORTRAN Genetic Algorithm (GA) Driver, <http://cuaerospace.com/carroll/ga.html>.
- Caruso, B. S. 2003. Water quality simulation for planning restoration of a mined watershed. *Water, air, and soil pollution*. 150(1/4), pp.221-324.
- Cho, J. H. 1997. Water quality modeling of a lagoon considering seawater input. *Journal of Korean Society of water environment*. 13(2), pp. 145-153.
- Cho, J. H. 1998. Water quality management of Doam Lake around the pasture. *Journal of Korean Society of water and wastewater*. 12(3), pp.41-47.
- Cho, J. H. and 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.
- Cho, J. H. and Kang, S. H. 2009. Lake water quality modelling considering rainfall-runoff pollution loads. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 18(2), pp.59-67.
- Cho, J. H. and Lee, J. H. 2006. Parameter optimization for runoff calibration of

References

- Ahn, S. S., Seo, M. J., Jung, D. J. and Park, R. S. 2008. The research about the water

- SWMM. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 15(6), pp.435-441.
- 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), pp.126-136.
- Han, K. Y. and Baek, C. H. 2004. Development of water quality management system in Daecheong Reservoir using geographic Information system. *The Journal of GIS Association of Korea*. 12(1), pp.409-420.
- Han, W. W., Kim, K. H. and Ahn, T. B. 2003. A study on the parameters of WASP5 model in Daechung Reservoir. *Korean Geo-Environmental Society*. 4(3), pp.69-77.
- Jun, K. S. and Lee, K. S. 1993. Calibration of QUAL2E reaction coefficients by the influence coefficient algorithm, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 13(4), pp. 163-176.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., S. R. Kanel and G. J. Pelletier. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*. 202, pp.185-190.
- Kim, M. S. and Han, J. S. 2003. Study estimation of optimal parameter on water quality model using artificial intelligence technical methods. *J. Korean Society of Environmental Administration*. 9(1), pp.1-9.
- Kim, S. T., S. K. Chea and Kim, G. H. 1999. Estimation of QUAL2E Reaction Coefficients by the Genetic Algorithm. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 19(2-4), pp.507-514.
- Lee, W. H., Han, Y. S. and Kim, J. G. 2006. Water quality modeling of stratification Lake using WASP6 model. *Korean Geo-Environmental Society*. 7(6), pp.57-65.
- Liu, S., D. Butler, R. Brazier, L. Heathwaite and S. T. Khu. 2007. Using genetic algorithms to calibrate a water quality model. *Science of the Total Environment*. 374, pp.260-272.
- Mulligan, A. E. and L. C. Brown. 1998. Genetic algorithms for calibrating water quality models. *Journal of Environmental Engineering*. 124(3), pp.202-211.
- Ng, A. W. M. and B. J. C. Perera. 2003. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 16, pp.529-541.
- Park, Y. K., Choi, M. S. and Lee, J. C. 2000. Estimation on parameters of water quality in the Saemanguem Lake by WASP5 model. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 22(4), pp.743-754.
- Pelletier, G. and S. Chapra. 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/>.
- Seo, D. I. and Lee, J. W. 2005. Application of 3-D hydrodynamic Model, EFDC-Hydro for WASP7.0. *Conference proceedings of Korean Society of Environmental Engineers*. April 28-30, 2005, pp.431-436.
- Shim, S. B., Kim, Y. K., Kim, M. S. and Shim, K. C. 2001. Estimation of Optimal Parameter on WASP5/EUTRO5 Model using Genetic Algorithm. *Journal of the*

- Korean Society of Civil Engineers. 21(4B), pp.315-326.
- Tetra Tech Inc. 2007. The environmental fluid dynamics code user manual US EPA version 1.01, USEPA.
- Tufford, D. L. and H. N. Mckellar. 1999. Spatial and temporal hydrodynamics and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain. *Ecological modelling*. 114, pp.137-173.
- USEPA. 2010. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), <http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html>
- Vuksanovic, V., F.D. Smedt and S. V. Meerbeeck. 1996. Transport of polychlorinated biphenyls(PCB) in the Scheldt Estuary simulated with the water quality model WASP. *Journal of Hydrology*. 174, pp.1-18.
- Wool, T. A., R. B. Ambrose, J. L. Martin and E. A. Comer. 2001. The Water Quality Analysis Simulation Program. WASP6 User's Manual, USEPA.
- Yi, G. H., Kim, Y. K., Lee, Y. S. and Kim, D. J. 2006. Balance analysis and application of the WASP model on the internal Organic Matter production in Lake Uiam. *Conference proceedings of Korean Society of water and wastewater*. Nov. 15, 2006, pp.G-1 ~ G-11.