

Research Paper

QUAL2Kw 모형을 이용한 자동보정 방법 비교분석과 섬강의 수질관리 대안 평가

조재현

가톨릭관동대학교 보건환경학과

Comparative analysis of auto-calibration methods using QUAL2Kw
and assessment on the water quality management alternatives for Sum River

Jae Heon Cho

Department of Health and Environment, Catholic Kwandong University

요약 : 본 연구에서는 GA와 QUAL2K를 통합한 QUAL2Kw 모형을 이용해서 수질모형 매개변수의 자동보정 방법을 비교 분석하였다. 발전 속도가 빠른 원주시의 배출 오염부하의 영향을 크게 받는 섬강에 QUAL2Kw 모형을 적용하였고, 전 구간 단일 매개변수를 적용하는 방법과 구간별 매개변수를 적용하는 두가지 방법으로 자동보정 방법을 비교 분석하였다. CV(RMSE)의 오차와 GA의 적합도 분석결과 구간별 매개변수 방법이 단일 매개변수 방법보다 정밀도가 다소 높은 것으로 나타났으므로 본 연구에서는 구간별 매개변수 방법으로 계산한 자동보정 결과를 채택하였다. 검토정된 QUAL2Kw 모형을 섬강 수질관리를 위한 세가지 시나리오에 대해 적용해서 수질 개선 효과를 분석하였다. 원주하수처리장 방류수질을 개선하는 시나리오 1에서는 증권역 대표지점인 섬강 4-1지점의 BOD와 TP 농도가 각각 17.7%, 29.1% 감소되었고, 원주천 유입직후 섬강에서는 BOD와 TP 농도가 각각 50.4%, 40.5% 감소하여 섬강 수질 개선효과가 크다. 원주취수장을 폐쇄하고 섬강 이외의 수계에서 원주 일대에 광역상수도를 공급하는 시나리오 2에서는 섬강 중하류부의 유량이 증가함에 따라 섬강 본류의 수질이 소폭 개선된다. 원주천 합류 직후 섬강에서 BOD가 0.18mg/L, TP가 0.0063mg/L 감소하였다. 시나리오 3에서는 시나리오 1과 시나리오 2의 대안을 동시에 계획하는 것으로서 시나리오 1보다 섬강 수질이 소폭 더 개선된다. 시나리오별 수질 예측결과 원주하수처리장의 방류수질을 개선하는 것이 섬강 수질개선에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 특히 원주천 합류직후 섬강 수질이 크게 개선된다. 원주취수장을 폐쇄하고 타 수계에서 광역상수도를 통해 원주 지역에 상수도를 공급하는 방안도 섬강 수질을 소폭 개선할 수 있다.

주요어 : QUAL2Kw, 자동보정 방법, 섬강, 원주하수처리장, 광역상수도

Abstract : In this study, auto-calibration method for water quality model was compared and

First Author : Jae Heon Cho, Department of Health and Environment, Catholic Kwandong University, 522 Naegok-Dong, Gangneung, Gangwon-Do 210-701 Tel: +82-33-649-7500, Fax: +82-33-647-7539, E-mail: jhcho@cku.ac.kr

Corresponding Author: Jae Heon Cho, Department of Health and Environment, Catholic Kwandong University, 522 Naegok-Dong, Gangneung, Gangwon-Do 210-701 Tel: +82-33-649-7500, Fax: +82-33-647-7539, E-mail: jhcho@cku.ac.kr

Received: 20 September, 2016. Revised: 20 October, 2016. Accepted: 20 October, 2016.

analyzed using QUAL2Kw, which can estimate the optimum parameters through the integration of genetic algorithm and QUAL2K. The QUAL2Kw was applied to the Sum River which is greatly affected by the pollution loads of Wonju city. Two auto-calibration methods were examined: single parameter application for the whole river reach and separate parameter application for each reach of multiple reaches. The analysis about CV(RMSE) and fitness of the GA show that the separate parameter auto-calibration method is better than the single parameter method in the degree of precision. Thus the separate parameter auto-calibration method is applied to the water quality modelling of this study. The calibrated QUAL2Kw was used for the three scenarios for the water quality management of the Sum River, and the water quality impact on the river was analyzed. In scenario 1, which improve the effluent water quality of Wonju WWTP, BOD and TP concentrations of the Sum River 4-1 station which is representative one of Mid-Watershed, are decreased 17.7% and 29.1%, respectively. And immediately after joining the Wonjucheon, BOD and TP concentrations are decreased 50.4% and 40.5%, respectively. In scenario 2, Wonju water supply intake is closed and multi-regional water supply, which come from other watershed except the Sum River, is provided. The Sum River water quality in scenario 2 is slightly improved as the flow of the river is increased. Immediately after joining the Wonjucheon, BOD and TP concentrations are decreased 0.18mg/L and 0.0063mg/L, respectively. In scenario 3, the water quality management alternatives of scenario 1 and 2 are planned simultaneously, the Sum River water quality is slightly more improved than scenario 1. Water quality prediction of the three scenarios indicates that effluent water quality improvement of Wonju WWTP is the most efficient alternative in water quality management of the Sum River. Particularly the Sum River water quality immediately after joining the Wonjucheon is greatly improved. When Wonju water supply intake is closed and multi-regional water supply is provided, the Sum River water quality is slightly improved.

Keywords : QUAL2Kw, auto-calibration method, Sum River, Wonju WWTP, multi-regional water supply

I. 서론

수질모형을 보정할 때는 보통의 경우에는 시행착오법을 이용해서 수질모형의 여러 가지 매개변수들을 보정하게 된다. 이 경우 매개변수 한 개마다 적합한 값을 찾으면서 다음 매개변수의 적합한 값을 찾는 작업을 반복하고 오차가 커질 때는 앞서 선정한 매개변수를 또다시 수정해나가게 된다. 이 작업은 보정작업에 많은 시간이 소요되고, 일관성 있는 기준으로 보정 작업을 수행하는데 많은 노력이 필요하다. 실측값과 계산값의 오차도 수질모형에 의한 계산을 마치고 별도의 오차분석을 해야 된다.

이와 같은 시행착오법에 의한 수질모형의 검보정 방법을 보완하기 위해서 비선형계획법, 최소자승법, 영향계수법 등 여러 가지 자동보정의 방법론이 적용

되어 왔다(Rinaldi et al. 1979; Little & Williams 1992; Wood et al. 1998; Je & Kim 2004; Kim & Je 2006). 우리나라에서는 Son et al.(2011)이 민감도 분석, 전문가 시스템, 난수발생 기법, 최적화기법 등 수질모형의 자동 검보정 기법을 개발하였고, 기존의 QUAL2E 모형을 편리하게 수행할 수 있도록 하는 GUI를 추가한 QL2-XP 모형을 개발하였다. Ryu et al.(2012)은 소양강댐유역에 SWAT 모형의 자동 보정 도구인 SWAT-CUP 프로그램의 세가지 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 유량을 자동 검보정하고, 유황별 검보정 결과를 평가하였다. Song et al.(2006)은 수질모형의 매개변수 중에서 민감도가 높은 것을 선택하고 난수발생에 의해 모형을 반복 실행하고 상관계수가 높은 매개변수를 선택하여 최적값으로 고정후 나머지 매개변수를 보정하는 자동

보정 프로그램을 개발한바 있다.

근래에는 GA(genetic algorithm; 유전알고리즘)를 이용한 자동보정 기법이 다수 개발되었다. Liu et al.(2007)은 준분포형의 비점원 인모형을 보정하는데 GA를 이용하였고, Cho & Seo(2007)는 GA와 SWMM 모형을 통합해서 SWMM의 유출과 수질에 관련된 매개변수를 자동보정한 바 있다. Cho et al.(2004)은 QUAL2E 모형과 GA를 통합한 프로그램을 구성하였고, 난수발생에 의해서 임의로 수행된 계산 수질의 오차분석을 통해서 유역내 하수처리장의 비용을 최적화하는 수질관리모형을 개발한 바 있다.

Pelletier & Chapra(2008)는 QUAL2K 모형과 GA를 통합해서 QUAL2K를 자동보정하는 QUAL2Kw 모형을 개발하였고, 이 프로그램은 VBA(Visual Basic for applications)로 프로그래밍되었고, EXCEL이 GUI(graphic user interface)로서 이용되었다. Cho & Ha(2010)는 영향계수법과 GA를 이용해서 QUAL2K 모형을 자동보정하는 프로그램을 개발하여 강릉 남대천에 적용하였고, QUAL2Kw 모형과 비교 분석했을 때 미세하게 오차가 적은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 빠르게 발전하는 원주시의 배출 오염부하로 인해 다른 강원권의 하천에 비해서 수질이 좋지 못한 섬강에 대해서 QUAL2Kw version 5.1을 적용해서 전구간 단일 매개변수를 적용하는 방법과 구간별 매개변수를 적용하는 두가지 방법으로 자동보정하는 방법을 비교 연구하였다. 그리고 원주하수처리장 방류수질을 춘천하수처리장 방류수질과 같은 수준으로 개선하는 시나리오 1과 원주취수장을 폐쇄하고 섬강 이외의 수계에서 원주 일대에 광역상수도를 공급하는 시나리오 2, 그리고 원주취수장 폐쇄와 원주하수처리장 방류수질개선을 동시에 하는 시나리오 3의 수질보전 대안을 비교 검토한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지역 개요

섬강은 원주시, 횡성군, 홍천군, 양평군, 여주시 등 5개의 행정구역에 분포하고 횡성댐, 횡성댐하류,

금계천, 전천, 원주천합류점, 원주천, 삼산천, 간현수위표, 서곡천, 섬강하류의 10개의 표준유역으로 구성되어 있다. 섬강 유역의 총 면적은 1,491.0 km²이며, 횡성군과 원주시가 섬강유역 대부분의 면적을 차지하고 있고, 상류부에는 횡성댐 소유역이 위치하고 있다. 횡성댐은 유역면적 209.0 km², 유효저수용량 73.4×10⁶ m³이고, 소수력 발전과 상수도 공급을 하는 다목적댐이다. Figure 1은 섬강유역 수계도와 환경부 수질조사지점을 나타내고 있다.

섬강권역에는 지속적으로 발전하는 원주시가 섬강유역 중하류부에 위치해 있어서 섬강 수질에 큰 영향을 주고 있다. 특히 원주시 공공하수처리장 방류수가 섬강 수질에 미치는 영향이 크다. 섬강 상류부 오염원은 원주시에서 발생하는 오염부하에 비해 섬강 수질에 미치는 영향은 적다. 아울러 섬강 중상류부에는 시설용량 95,000톤/일의 원주취수장이 가동 중이고, 한편으로는 한국수자원공사가 횡성댐에서 2015년 기준으로 평균 취수량 82,200톤/일의 광역상수도를 운영하면서 원주시와 횡성군에 상수도 공급을 하고 있다. 원주취수장으로 인해서 상류부인 횡성군 일대가 상수원보호구역으로 지정되어 있어서 지역 개발과 관련해서 해당 지역 주민들의 민원의 대상이 되고 있고, 관련 지자체와 한국수자원공사는 원주취수장을 폐쇄하고 광역상수도로 대체하는 방안을 검토하고 있다.

2. QUAL2Kw 모형과 자동보정 방법

QUAL2Kw 모형은 1차원 정상상태 수질모형인 QUAL2E(Brown & Barnwell, 1987) 모형의 최근 버전인 QUAL2K(Chapra et al. 2007) 모형의 수정판으로서 GA를 이용해서 수질모형의 매개변수를 자동보정하는 기능을 가지고 있다. QUAL2K는 VBA로 프로그래밍되었고 GUI로서 EXCEL을 이용하였다. QUAL2E와 같은 균일한 reach 적용에서 벗어나 서로 다른 길이의 reach를 적용할 수 있고, 한 개의 reach에 여러 개의 지천이나 오염부하가 유입되는 것을 고려할 수 있다. QUAL2Kw는 GA를 이용해서 실측값과 계산값의 오차를 최소화하는 최적 매개변

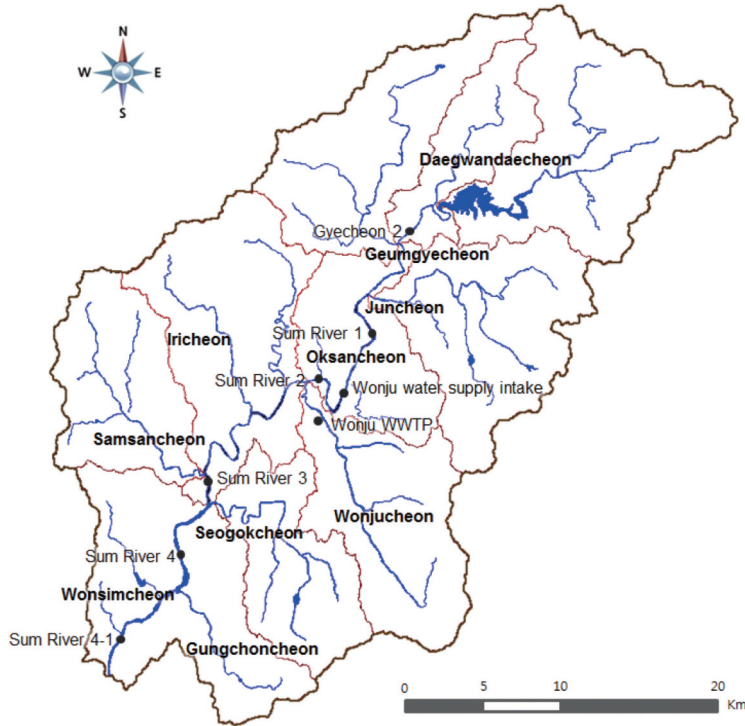


Figure 1. The Sum River watershed and water quality survey points

수를 탐색해나가고, 오차의 최소화는 적합도 (fitness)의 최대값을 통해서 도출한다. 적합도는 먼저 (1)식과 같이 수질항목별로 CV(RMSE)(RMSE의 변동계수)를 계산하고 보정대상인 수질항목마다 가중치 (Kannel et al, 2007)를 주어서 가중 CV(RMSE)를 계산한다. (2)식에서와 같이 가중 CV(RMSE)의 역수로 GA의 적합도를 계산한다. 보정 대상인 수질항목마다 가중치를 두어서 각각의 중요도를 고려할 수 있다. 본 연구에서 보정한 수질 항목은 BOD, TN, TP, Chl-a, DO의 5가지 수질항목이다.

Weighted CV(RMSE)

$$= \sum_{i=1}^n w_i \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^m P_{ij} - O_{ij} \right)^2 / m}{\left(\sum_{j=1}^m O_{ij} / m \right)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Fitness = 1/Weighted CV(RMSE) (2)

여기서 O_{ij} = 실측 수질, P_{ij} = 계산수질, m = 실측

수질과 계산수질 자료 짝의 숫자, w_i = 가중치이다. 본 연구에서 고려한 QUAL2Kw의 매개변수는 Slow CBOD hydrolysis rate, Slow CBOD oxidation rate, Fast CBOD oxidation rate, Organic N hydrolysis rate, Organic N settling velocity, Ammonium nitrification rate 등 19가지이다.

GA의 매개변수로는 Cho(2011)의 연구에서 GA 매개변수들이 GA의 적합도에 미치는 민감도를 분석한 결과를 이용하였다. 개체군수 100, 교배확률 0.6, 교배방식으로는 균일교배(uniform crossover), 돌연변이 방식은 고정비율의 1점법(one point mutation, fixed rate), 복제계획으로는 정상상태 최악의 개체 교체(steady-state-replace-worst)를 적용하였고, 가장 좋은 부모개체가 복제에 반드시 사용되도록 하는 Elitism을 적용하였다. QUAL2Kw 적용시 GA의 세대수는 너무 크게 선정할 때는 연산시간이 너무 길게 소요되므로 본 연구의 보정에서는 세대수를 150으로 계산하였다.

QUAL2Kw에서는 Rates worksheet에서 보정하

고자 하는 수질 매개변수 종류와 매개변수의 최소 최대값의 범위를 지정하여 전체 구간에 단일 매개변수를 적용하여 자동 보정할 수 있다. 또 다른 방법으로 사용자 정의 자동보정(user-defined auto-calibration)

기능을 이용해서 한 종류의 매개변수에도 구간별로 매개변수값을 달리하여 자동 보정할 수도 있다.

섬강 수질모델링의 상류 경계지점은 황성댐 직하류에 위치한 대관대천 합류지점으로 하였다. 수

- W1 Daegwandaecheon
- W2 Geumgyecheon
- W3 Juncheon
- W4 Wonju water supply intake
- W5 Wonjucheon
- W6 Iricheon
- W7 Samsancheon
- W8 Seogokcheon
- W9 Munmak 2nd industrial water intake
- W10 Munmak 1st industrial water intake
- W11 Gungchoncheon
- W12 Wonsimcheon
- W13 Munmak WWTP

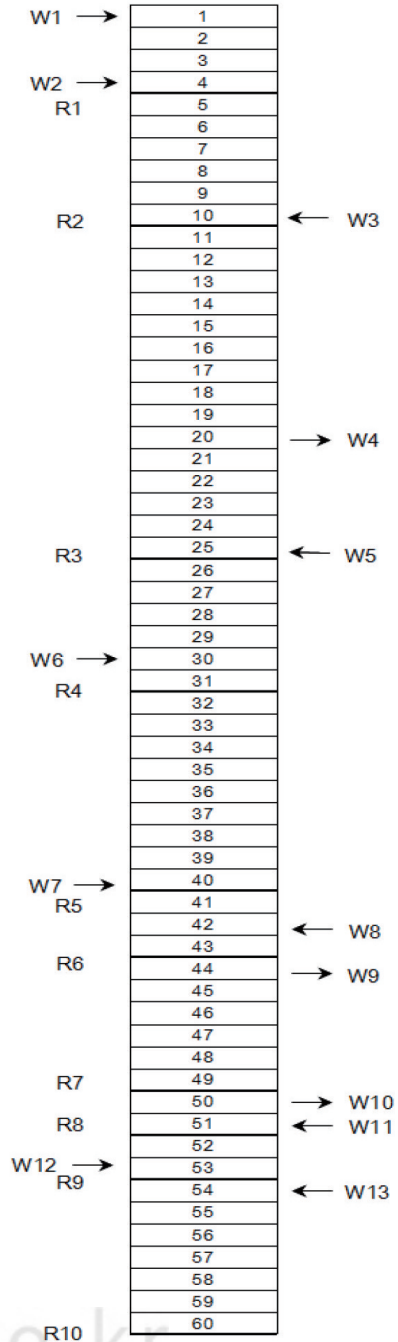


Figure 2. Reach identification and pollution sources of the Sum River for the application of the QUAL2Kw

질모형에는 Figure 2의 모식도와 같이 섬강에 유입되는 원주천, 대관대천, 전천 등 10개 지천의 유입을 고려하였다. 수질모형의 수리계산은 수심-유량, 유속-유량과의 rating curve를 이용해서 계산하였다. 그 외 일사량, 운량, 풍속 등의 기상자료가 입력되었다. 섬강의 모델링 대상구간 60km를 10개의 수리적 수질적 특성이 유사한 구간으로 나누었고, 전체 구간에 단일 매개변수를 적용하는 방법과 구간별 매개변수를 적용하는 두가지 방법을 이용해서 QUAL2Kw의 19가지 매개변수를 선정하는 보정 작업을 수행하였다. 보정을 위한 실측자료로는 2016년 4월에 섬강 본류와 지류에서 실측한 유량과 수질을 사용하였고, 검증자료로는 2016년 5월 실측자료를 사용하였다. 실측자료가 미비한 경우에는 보정 및 검증자료와 같은 시기인 환경부의 4월과 5월 측정자료로 보완하였다.

III. 결과토의

1. 전구간 단일 매개변수 적용방법과 구간별 매개변수 적용에 의한 보정 방법 비교

구간별 매개변수 보정 방법으로 자동보정한 결과의 실측수질과 계산수질의 오차로서 Table 1에 RMSE와 CV(RMSE)를 제시하였다. 실측수질의 평균값에 대한 상대적인 RMSE를 나타내는 CV(RMSE)가 오차의 정도를 평가하기에 RMSE보다 더 적합한 것으로 판단되고, 이 CV(RMSE) 값이 DO가 가장 좋았고, TN, BOD, TP, Chl-a 순으로 좋게 평가되었다. 수질항목의 가중치 결정시는 QUAL2Kw의 default 값과 Kannel et al.(2007)의 경험을 참고하였다. 최적화된 가중치 결정을 위해서는 민감도분석이 필요하나 지나치게 많은 시간이 소요되므로 본 연구에서는 수차례 시행착오를 거치고 섬강의 수질목표와 수질관리의 중요도를 감안해서 BOD의 가중치를 100/630, DO 30/630, Chl-a 100/630, TN 200/630, TP 200/630으로 두고 계산하였다.

전구간 단일 매개변수 보정 방법으로 자동보정한 결과는 Table 1에서 보는 바와 같이 CV(RMSE)가 DO, TN, BOD, Chl-a, TP 순으로 좋게 나타났다.

구간별 적용방법과 비교하면 DO는 비슷하고, BOD와 TN, TP는 오차가 커졌고, Chl-a는 오차가 오히려 작아졌다. 전체적으로는 구간별 매개변수 방법의 CV(RMSE)의 합이 1.301, 전체 단일 매개변수 방법의 CV(RMSE)가 1.343으로 계산되었다. 구간별 매개변수 방법의 오차가 약 3.2% 적어서 정밀도가 다소 높은 것으로 나타났다. 수질 항목별 가중치를 적용해서 GA의 적합도를 계산한 결과는 구간별 매개변수 방법이 3.803, 전체 단일 매개변수 방법이 3.531로 계산되었다. 구간별 매개변수 방법의 적합도가 단일 매개변수 방법보다 약 7.1% 높아서 본 연구의 최종 보정은 구간별 매개변수 방법으로 계산한 결과를 채택하였다. 이 결과로 볼 때 섬강에서는 구간별 매개변수 자동보정 방법이 다소 정밀도에서 앞서지만 수리학적 그리고 수질적 특성이 비교적 단순한 중소하천에서는 구태여 많은 시간과 노력이 필요한 구간별 매개변수 방법으로 자동보정할 필요가 없는 것으로 판단된다.

2. QUAL2Kw 모형의 검보정 결과

본 연구의 QUAL2Kw 모형의 보정은 구간별 매개변수 보정 방법의 결과를 사용하였다. Figure 3는 구간별 보정방법으로 QUAL2Kw 모형을 보정했을 때 세대수 증가에 따른 적합도의 변화를 보여주고, Table 2에는 세대수 증가에 따른 적합도 값을 제시하였다. 세대수 증가에 따라 25세대까지는 적합도가 급격하게 증가하고 25세대부터 100세대까지는 서서히 증가하는 경향을 보인다. 이후 100세대부터 150세대까지 미세하게 적합도가 증가한다. 6세대 인텔®코어™ i7-6700프로세서, 16GB DDR4 메모리 사양의 PC로 본 연구의 QUAL2Kw 모형 적용시 약 32시간이 소요되었다. 150세대 부근에서는 적합도 변화가 아주 미미하기 때문에 연산시간을 고려할 때 더 이상의 세대수에 대한 계산은 불필요한 것으로 판단된다.

QUAL2Kw 모형과 구간별 매개변수 보정 방법을 섬강에 적용해서 보정한 결과는 Figure 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 QUAL2Kw 모형의 매개변수

Table 1. Comparison of CV(RMSE) and fitness between two auto-calibration methods

Auto-calibration method	Item	DO	Chl-a	TN	TP	BOD	Sum	Fitness
Parameter calibration at each reach	RMSE	0.56	3.55	0.77	0.0147	0.38		
	CV(RMSE)	0.055	0.387	0.231	0.3514	0.275	1.301	
	Weighted CV(RMSE)	0.0088	0.0184	0.0367	0.112	0.087	0.263	3.802
Single parameter calibration for all reaches	RMSE	0.55	3.19	0.85	0.0158	0.42		
	CV(RMSE)	0.054	0.349	0.255	0.3782	0.306	1.343	
	Weighted CV(RMSE)	0.00858	0.0166	0.0406	0.120	0.097	0.283	3.531
Verification results of multiple reach calibration	RMSE	0.97	3.61	0.36	0.0165	0.73		
	CV(RMSE)	0.103	0.365	0.091	0.325	0.33	1.214	
	Weighted CV(RMSE)	0.016	0.0174	0.0144	0.1032	0.1048	0.256	3.904

* Units of RMSE for BOD, TN, TP, DO are mg/L, unit of RMSE for Chl-a is mg/m³.

* CV(RMSE) = RMSE/mean

* Weighting factors of BOD, TN, TP, Chl-a, DO to calculate weighted CV(RMSE) are 200/630, 100/630, 200/630, 30/630, 100/630, respectively.

Table 2. Fitness values in the calibrated QUAL2Kw

Generation No.	0	25	50	75	100	125	150
Fitness	1.8329	3.1924	3.4875	3.5968	3.7065	3.7817	3.8024

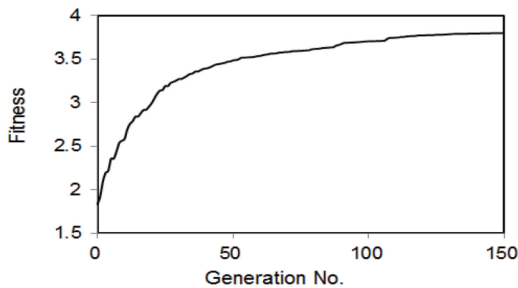


Figure 3. Fitness variation in the calibrated QUAL2Kw according to the generation number

보정이 적절히 수행된 것으로 판단된다. 보정이 이루어진 BOD, TN, TP, DO, Chl-a 항목들 중에서 CV(RMSE)가 가장 큰 값으로 계산된 Chl-a 보정결과 오차가 다른 수질 항목의 오차보다 상대적으로 커 보인다.

Figure 4의 보정결과에서 보듯이 BOD, TN, TP 등의 농도가 25km 지점부근에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 25km 지점에서는 원주천이 합류되고 있는데, 이 원주천 소유역에는 원주 시가화 지역을 포함하고 있어서 섬강 유역 중에서 수질오염의 우려가 가장 크고, 원주천의 하류부에 위치한 원주공공하수처리장의 방류수가 원주천과 섬강 수질에 아주 큰 영향을 주고 있다. 원주천 유입후에는 하류로

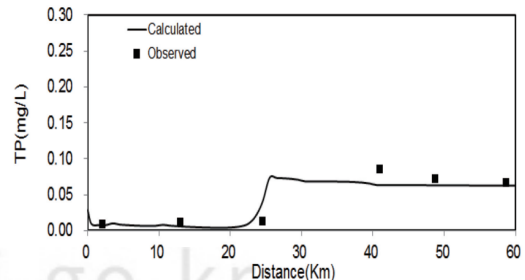
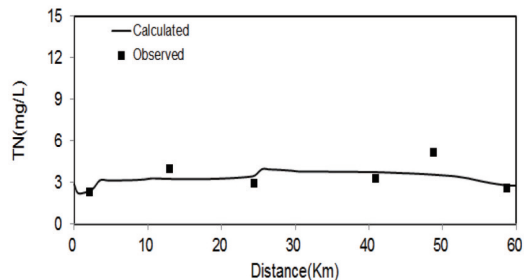
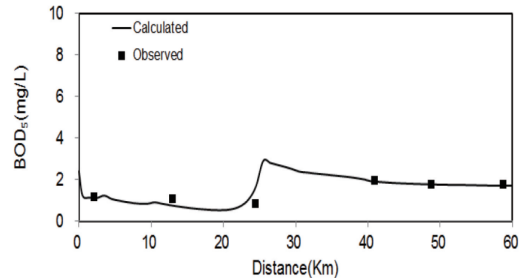


Figure 4. Calibration results of the QUAL2Kw

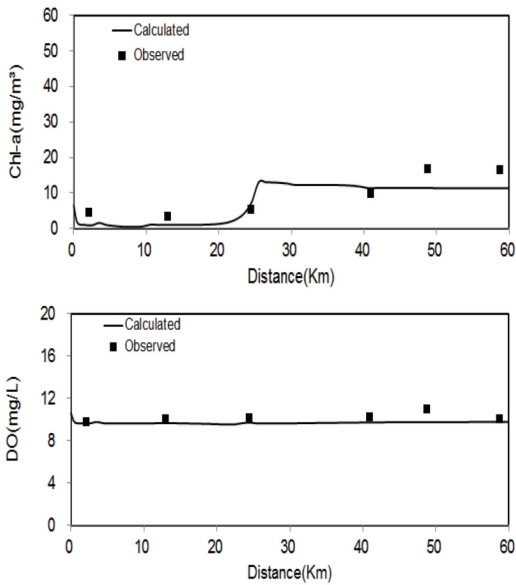


Figure 4. Calibration results of the QUAL2Kw(Continued)

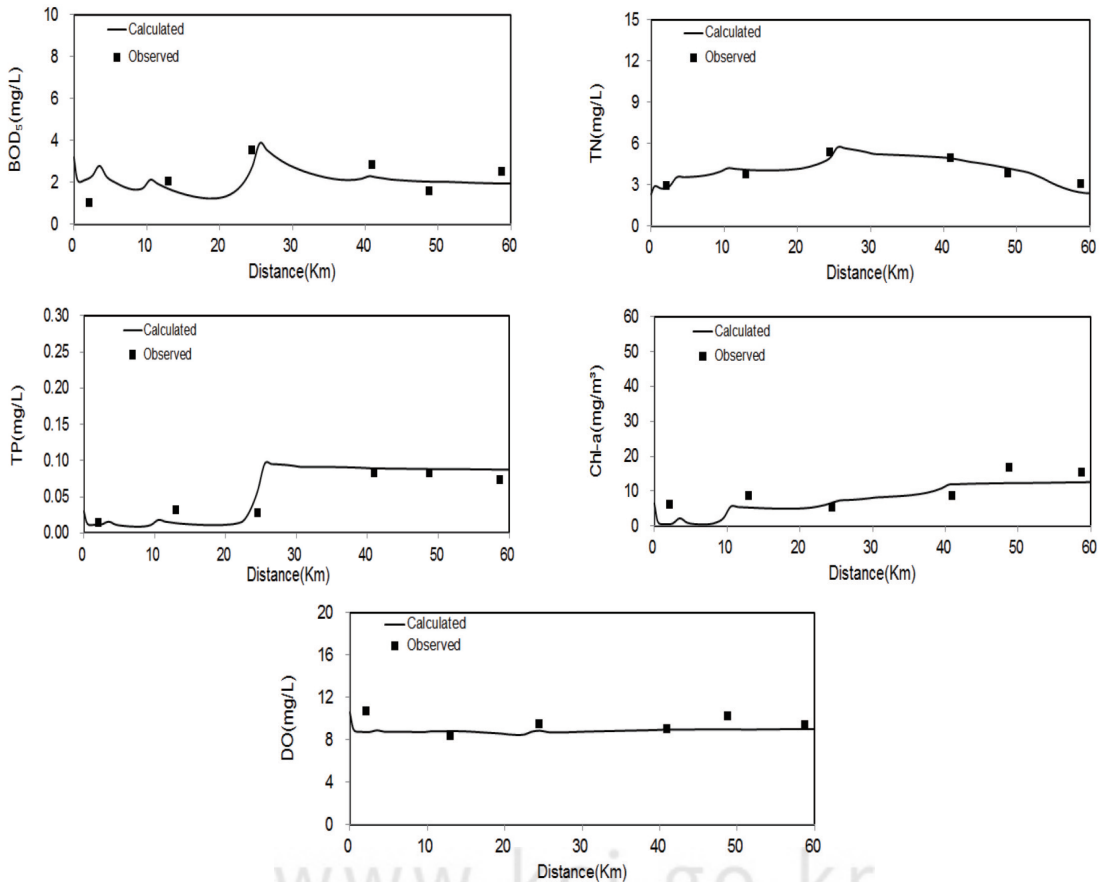


Figure 5. Verification results of the QUAL2Kw

흘러 가면서 자정작용에 의해 서서히 수질 농도가 낮아지고 있다. 섬강의 10개 구간에 대해서 QUAL2Kw 모형의 19개 매개변수를 GA를 이용해서 최종 선정하였고, 매개변수별 선정된 값의 범위를 Table 3에 제시하였다.

구간별 매개변수 방법으로 보정한 결과의 QUAL2Kw 매개변수를 적용해서 2016년 5월의 실측 수질과 유량자료를 이용해서 검증한 결과는 Figure 5와 같다. 검증결과는 CV(RMSE)의 합이 1.214, 적합도는 3.904여서 전체적으로 보정결과보다 오차가 더 적은 것으로 산정되었다. 그림에서 보는 바와 같이 검증결과도 계산수질이 실측수질을 잘 나타내고 있어서 검보정이 적절히 이루어진 것으로 판단된다.

Table 3. Estimated parameter values using QUAL2Kw and their minimum and maximum ranges

Parameter	Range of calibrated values	Min.	Max.
O ₂ reeration model		Internal	
Slow CBOD hydrolysis rate (/d)	0.616 - 4.901	0	5
Slow CBOD oxidation rate (/d)	0.498 - 4.991	0	5
Fast CBOD oxidation rate (/d)	0.550 - 4.994	0	5
Organic N hydrolysis rate (/d)	0.273 - 4.886	0	5
Organic N settling velocity (m/d)	0.0067 - 1.710	0	2
Ammonium nitrification rate (/d)	0.020 - 8.128	0	10
Nitrate denitrification rate (/d)	0.243 - 1.824	0	2
Nitrate Sed denitrification transfer coeff (m/d)	0.00008 - 0.965	0	1
Organic P hydrolysis rate(/d)	0.074 - 4.920	0	5
Organic P settling velocity (m/d)	0.00004 - 1.699	0	2
Inorganic P settling velocity (m/d)	0.00066 - 1.969	0	2
Detritus dissolution rate (/d)	0.057 - 4.530	0	5
Detritus settling velocity (m/d)	0.059 - 4.885	0	5
Phytoplankton max. growth rate (/d)	2.093, 2.959	1.5	3
Phytoplankton respiration rate (/d)	0.472, 0.685	0	1
Phytoplankton death rate (/d)	0.216, 0.647	0	1
Phytoplankton nitrogen half sat. constant (µgN/L)	137.349, 148.725	0	150
Phytoplankton Phosphorus half sat. constant (µgP/L)	6.891, 15.183	0	50
Phytoplankton settling velocity (m/d)	0.00015, 4.865	0	5

3. 섬강 수질관리를 위한 시나리오별 수질 개선 효과

원주하수처리장은 NPR공법의 고도 하수처리를 하여 2013년 하수도통계에 의하면 방류수질이 BOD 6.70mg/L, TN 13.68mg/L, TP 0.31mg/L로 조사되었다. 이 방류수질은 방류수 수질기준을 만족하지만 방류수계인 원주천과 나아가서 섬강 수질에 큰 영향을 주고 있다. 본 연구에서는 섬강과 원주천 수질 개선을 위해서는 원주하수처리장 방류수질 개선이 필수적이라고 판단하여 원주하수처리장 방류수질을 강원도 도청 소재지인 춘천 수준으로 개선하는 것을 섬강 수질관리를 위한 우선적인 대안으로 고려하였다. 또한 원주취수장은 상류부가 상수원보호구역으로 설정되어 있어 지역주민으로부터 많은 민원이 제기되고 있어서 주변 지자체와 한국수자원공사에서는 2019년 이후 원주취수장을 폐쇄하고 광역상수도를 공급하는 계획에 대해 협의를 진행 중이다. 본 연구에서 검토 결과 저수기에는 황성댐으로부터 원주취수장 취수량 전량을 공급하는 것은 문제가 있기 때문

에 원주취수장을 폐쇄하고 생산량 전량을 충주댐 광역상수도로 부터 공급받는 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 섬강의 수질관리 대안 평가를 위한 수질예측은 저수량을 기준으로 하였다. 섬강 하류부 문막교 지점에서 2006년부터 2015년까지 국토부 실시간 일유량 자료를 이용해서 산정한 10년 기준 저수량은 8.368 m³/sec이었다. 이 저수량을 섬강 유역의 소유역별로 배분하여 저수기의 유량을 계산하였고, 저수기의 각 지천수질은 2월, 3월, 4월, 11월 수질 평균으로 적용하였다. 저수기 수질 자료는 환경부와 원주시의 측정 자료를 이용하였다. 이 저수기의 유량과 수질을 기초로 시나리오별 섬강 수질을 예측하였다.

시나리오 1은 현재의 저수기 조건에서 원주하수처리장 방류수질을 BOD 2mg/L, T-P 0.122mg/L, SS 2.4mg/L 수준으로 개선하는 것으로 계획하고, 시나리오 2는 섬강 중상류부에 위치한 원주취수장을 폐쇄하고 광역상수도로 전량 대체하는 것이다. 시나리오 3는 원주하수처리장 방류수질을 시나리오 1과 같이 개선하고 시나리오 2와 같이 광역상수도로 원

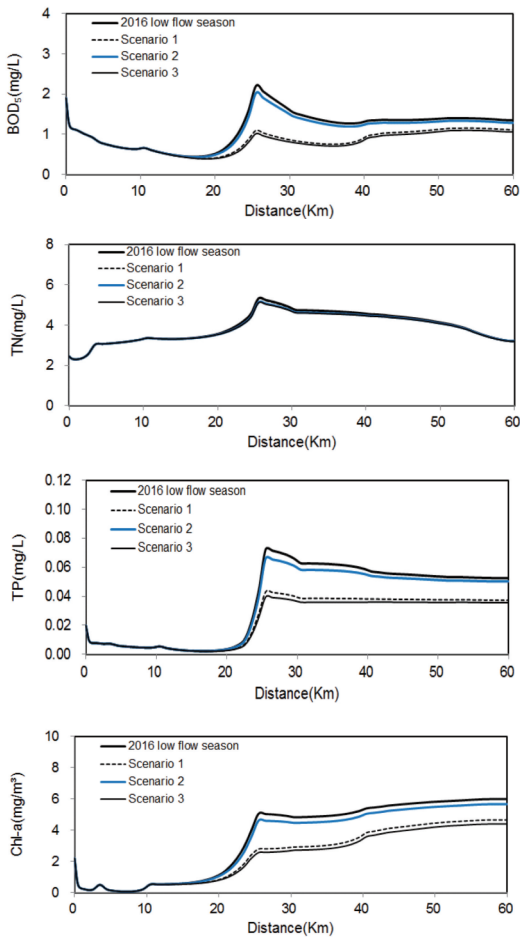


Figure 6. Water quality distribution calculated by three scenarios for the water quality management of the Sum River

취수장을 대체하는 안이다. 이와 같은 3개의 대안에 대해서 현재 저수기 수질과 비교하였다.

시나리오별 수질예측결과는 Figure 6과 같다. 시나리오 1의 수질개선 효과를 분석하면 중권역 대표지점인 섬강 4-1지점 (Figure 1 참조)의 현재 조건으로 저수기일 때 BOD 농도가 1.36mg/L에서 1.12mg/L로 약 17.7%가 개선되었다. 원주하수처리장의 방류수가 원주천 최하류부에 방류되기 때문에 원주천 유입직후 섬강에서는 BOD 농도가 2.21mg/L에서 1.09mg/L로 약 50.4%가 낮아져서 시나리오 1에 의한 수질개선효과가 크게 나타난다. TP의 경우에는 섬강 4-1지점에서 0.053mg/L에서 0.037mg/L로

약 29% 개선되었고, 원주천 유입 직후에는 약 40.5% 감소하였다. 하수처리장 방류수의 BOD와 TP 농도를 낮추는 것으로 계획했기 때문에 섬강의 TN 농도는 미세하게 개선되었다. Chl-a 농도는 Figure 6에서 보는 바와 같이 비교적 큰 폭으로 농도가 낮아진다.

원주취수장을 폐쇄하는 시나리오 2에서는 유량증가에 따라 수질 개선효과가 나타나서 섬강 본류 수질이 소폭 개선된다. 중권역 대표지점인 섬강 4-1지점의 BOD가 약 0.063mg/L 감소하고, TP는 약 0.0023mg/L 감소한다. 원주천 합류 직후 섬강 본류에서는 BOD가 0.18mg/L, TP가 0.0063mg/L 감소하였다.

하수처리장 처리효율 개선효과와 취수장 폐쇄효과가 동시에 나타나는 시나리오 3의 경우에는 섬강 4-1지점의 BOD 농도가 약 18.6% 낮아지고, 원주천 유입직후 섬강에서는 BOD 농도가 약 53.9%가 낮아진다. TP는 섬강 4-1지점에서 약 32.3% 감소하고, 원주천 유입직후 섬강에서는 약 45.5% 감소한다.

시나리오별 수질 예측 결과를 보면 원주하수처리장 처리효율을 현재보다 높이면 원주천 합류후인 섬강 중하류부의 수질이 크게 개선될 수 있다. 고도처리방법은 모래여과, 활성탄 흡착, 응집제투여 등의 여러 가지 공법을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 원주취수장을 폐쇄하고 횡성댐이 아닌 충주댐 등지로부터 광역상수도를 공급 받으면 취수장 상류부 주민들의 큰 민원사항인 상수원보호구역 해제를 통해 지역 주민의 기대에 부응할 수 있겠고, 큰폭은 아니지만 섬강 수질 개선효과도 기대할 수 있다.

IV. 결론

수질관리계획이나 수질오염총량관리 기본계획을 수립하거나 수질영향평가를 위해 수질모형을 적용할 때는 여러 이해 당사자가 있고, 끊임없이 변화하고 다양한 환경요인의 지배를 받는 수체를 다루기 때문에 가능한 주관성을 배제하고 객관적으로 수질 계산과 예측을 할 필요가 있다. 본 연구에서는 GA와 QUAL2K를 통합해서 오차를 최소화해 나가면서 최적해를 도출하도록 만들어진 QUAL2Kw 모형을 적용해서 전체 대상 구간에 단일 매개변수를 적용하는

방법과 구간별로 매개변수를 적용하는 두가지 방법을 비교 분석하였다. 섬강에 대한 보정결과에서 구간별 매개변수 방법의 CV(RMSE)의 합이 1,301, 전체 단일 매개변수 방법의 CV(RMSE)가 1,343으로 계산되었다. 구간별 매개변수 방법의 오차가 약 3.2% 적었고 정밀도가 다소 높은 것으로 나타났다. GA의 적합도에 있어서도 구간별 매개변수 방법의 적합도가 단일 매개변수 방법보다 우위에 있기 때문에 본 연구의 수질모델링에서는 구간별 매개변수 방법으로 계산한 자동보정 결과를 채택하였다.

검보정된 QUAL2Kw 모형을 저수기 유량과 수질의 조건에서 섬강 수질보전을 위한 세가지 시나리오를 대상으로 적용해서 수질 개선 효과를 비교 분석하였다. 원주하수처리장 방류수질을 춘천하수처리장 방류수질과 같은 수준으로 개선하는 시나리오 1에서는 중권역 대표지점인 섬강 4-1지점의 BOD 농도가 약 17.7%가 개선되고, 원주천 유입직후 섬강에서는 BOD 농도가 약 50.4%가 감소되어서 수질개선효과가 크게 나타난다. TP는 섬강 4-1지점에서 약 29% 개선되었고, 원주천 유입 직후에는 약 40.5% 감소하여 섬강 수질 개선효과가 크다. 섬강의 TN 농도는 미세하게 개선되고, Chl-a 농도는 비교적 큰 폭으로 농도가 낮아진다.

원주취수장을 폐쇄하고 섬강 이외의 수계에서 원주 일대에 광역상수도를 공급하는 시나리오 2에서는 섬강 중하류부의 유량이 증가함으로써 수질 개선효과가 나타나서 섬강 본류의 수질이 소폭 개선된다. 섬강 4-1지점의 BOD가 약 0.063mg/L, TP는 약 0.0023mg/L 감소한다. 원주천 합류 직후 섬강에서는 BOD가 0.18mg/L, TP가 0.0063mg/L 감소하였다. 시나리오 3에서는 섬강 4-1지점과 원주천 유입직후 섬강의 BOD 농도가 각각 18.6%, 53.9% 감소한다. TP는 섬강 4-1지점과 원주천 유입직후 섬강에서 각각 32.3%, 45.5% 감소한다. 시나리오 3에서는 원주하수처리장 처리효율 개선과 취수장 폐쇄효과가 함께 나타나서 섬강 수질개선 효과가 가장 큰 것으로 분석되었다.

시나리오별 수질 예측결과에서 원주하수처리장의 방류수질을 개선하는 것이 섬강 수질개선에 가장 효

과적이라는 결론을 도출할 수 있고, 아울러 원주취수장을 폐쇄하고 타 수계에서 광역상수도를 통해 원주 지역에 상수도를 공급하는 방안도 섬강 수질을 소폭 개선하면서 상수원보호구역 해제라는 지역주민의 숙원도 해결할 수 있다.

References

- Brown LC, Barnwell TO 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.
- Chapra SC, Pelletier GJ, Tao H. 2007. QUAL2K: a modeling framework for simulating river and stream water quality, version 2.07. Documentation and Users Manual. Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University.
- Cho JH. 2011. Application of the QUAL2Kw model to a Polluted River for Automatic Calibration and Sensitivity Analysis of Genetic Algorithm Parameters. Journal of Environmental Impact Assessment. 20(3): 357-365. [Korean Literature]
- Cho JH, Ha SR. 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 JH, Seo HJ. 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 JH, Sung KS, Ha SR. 2004. A river water quality management model for regional wastewater treatment cost using a genetic

- algorithm. *Journal of Environmental Management*. 73(3): 229-242.
- Je CH, Kim KS. 2004. Web-based application for estimating water quality impacts due to environmental dredging. *Environmental Geology*. 46(2): 123-234.
- Kannel PR, Lee S, Lee YS, Kanel SR, Pelletier GJ. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*. 202: 185-190.
- Kim KS, Je CH. 2006. Development of a framework of automated water quality parameter optimization and its application. *Environmental Geology*. 49: 405-412.
- Little KW, Williams RE. 1992. Least-squares calibration of QUAL2E. *Water Environment Research*. 64(2): 179-185.
- Liu S, Butler D, Brazier R, Heathwaite L, Khu, ST. 2007. Using genetic algorithms to calibrate a water quality model. *Science of the Total Environment*. 374: 260-272.
- Pelletier GJ, Chapra SC. 2008. QUAL2Kw theory and documentation(version 5.1): A modeling framework for simulating river and stream water quality. Available from: <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/>.
- Rinaldi S, Romano P, Soncini-Sessa R. 1979. Parameter estimation of Streeter-phelps models. *Journal of Environmental Engineering*. 105(1): 75-88.
- Ryu JC, Kang HW, Choi JW, Kong DS, Gum DH, Jang CH, Lim KJ. 2012. Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 28(3): 347-358. [Korean Literature]
- Son AL, Han KY, Park KO, Kim BH. 2011. Development of 1-Dimensional Water Quality Model Automatizing Calibration-Correction and Application in Nakdong River. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 20(5): 765-777. [Korean Literature]
- Song KD, Paik DH, Lee YW. 2006. Development of Method for Deciding Automatically Parameters of Water Quality Simulation Models. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 15(2): 101-109. [Korean Literature]
- Wood D, Houck MH, Bell JM. 1998. Automated calibration and use of stream quality simulation model. *Journal of Environmental Engineering*. 116(2): 236-248.