Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 6, pp.902-909 (2009)

SWAT 모형의 하도 수질 모듈의 개선

김남원 · 신아현†

한국건설기술연구원 수자원· 환경연구본부 수자원연구실

Improvement of Channel Water Quality Module in SWAT

Nam-Won Kim · Ah-Hyun Shin†

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, KICT

(Received 20 July 2009, Revised 13 August 2009, Accepted 18 August 2009)

Abstract

With various reservoirs, dams and reduction of water velocity in downstream, rivers in Korea often have characteristics of accumulation of pollutants. Therefore, the main focus of water quality modeling in Korea needs to be shifted from DO to algae and organic matter. Moreover the structures of water quality models should be modified to have capability of simulating BOD which is a key factor of total water pollution load management in Korea as laboratory experiment BOD (Bottle BOD_5). In the SWAT model which is one of the widely used water quality models in Korea, the channel water quality module is using main algorithm of the QUAL2E model which has limitations in simulating algae, organic matter and Bottle BOD5 etc. To overcome this hindrance, in this study, the improved channel water quality module of the SWAT model (Q-SWAT) was proposed by linking the algorithms of the QUAL-NIER model which was developed based on the QUAL2E model to the SWAT model. The algorithms estimating the increase of internal organic matter by fractionization algal metabolism process and calculating Bottle BOD_5 were added and the results of proposed model were compared to those of the original SWAT model. The results of comparison test are showing that more accurate BOD values can be obtained with the Q-SWAT model and it is anticipated that the Q-SWAT model can be used as an effective tool of decision support through the water quality simulation and long term pollution source analysis.

keywords : Bottle BOD_5, Channel Water Quality, Q-SWAT, QUAL-NIER

1. 서 론

효율적인 유역관리를 위하여 유역내에서 발생하는 오염원의 거동 및 하천의 수질변화를 파악하고 이에 따른 적절한 관리 및 예측이 이루어져야 한다. 그러나 현실적으로 실측에 의한 관리는 많은 시간과 비용이 소모되기 때문에 다양한 모형을 통한 유역 및 하천의 관리와 장래 수질 예측의 중요성이 커지고 있다. 수질 모형은 수체의 특성에 따라 1차원 상태부터 3차원 상태의 모형에 이르기까지 매우 광범위하게 개발되어 왔으며, 특히 하천의 주된 수질변화 양상은 흐름 방향을 따라 발생하기 때문에 1차원 모형이 일반적으로 사용되고 있다(한건연 등, 2000). 1차원 상태의 모의를 위해 널리 사용되는 대표적인 모형으로 QUAL2E 모형이 있다. QUAL2E는 미 TWDB(Texas Water Development Board)의 지원에 의해 개발된 1차원 수치 모델인 QUAL-Ⅰ(Masch et al., 1970) 모형의 단점을 보완하기 위하여 Water Resources Engineers에서 질소화합물과 인, Chl.a 등의 수질 항목을 추가하여 개선한 QUAL-II(1973) 모형을 PC상에서 사용 가능하도록 수정한 모형이다(Brown and Barnwell, 1985). 이후 결정론적 모델이 자연하천의 무작위성을 모의하지 못하는 한계를 보완하기 위하여 몬테카를로 기법과 일차함수 오차분석 기법을 적용하고, 민감도 분석을 추가한 확률론적 모형인 QUAL2E-UNCAS(Brown and Barnwell, 1987)와 구간(Segment)의 길이를 자유롭게 분할할 수 있으며 다중 오염원의 유입이 가능하고, 탈질화 및 부착조류 모의를 추가하여 CBOD를 산화 속도에 따라 세분한 QUAL2E의 2000 버전인 QUAL2K(Pack and Lee, 2002)로 지속적인 업그레이드가 이루어지고 있는 모형이다.

QUAL2E는 국내에서도 화옹호 오염원 및 부영양화 평가와 수질개선을 위한 종합연구(경기개발연구원, 1999), 금강·영산강수계 오염총량관리제 시행방안 연구(국립환경연구원, 2002), 낙동강유역에 적합한 수질예측 모델개발(낙동강수계관리위원회, 2004), QUAL2E 모형을 이용한 소하천 관리방안 연구(충청남도 보건환경연구원, 2005), 오산천 수질개선 종합계획(경기보건환경연구원, 2008)등 다각도로 적용되며 널리 사용되고 있는 모형이다. 그러나 QUAL2E는 정상상태 모의 모형이므로 대상수체의 흐름이 연속적이어야 한다는 전제조건하에 모의가 이루어져야하나 우리나라는 하상 경사가 크고, 강수에 의한 하천 유량의 계절적 편

† To whom correspondence should be addressed.
znsin48@kict.re.kr

중이 심하며 일부 하천은 하천 내에 크고 작은 보와 댐, 저수지 등에 의하여 연속적인 흐름이 이루어지지 않으며 이는 특히 갈수기에 심해진다(서동일 등, 2008). 이에 따라 하천의 재포기 현상이 활발히 이루어지며 하류로 갈수록 하천의 정체에 따른 조류의 내부 생산이 발생한다. 따라서 우리나라 하천의 수질 모의를 위해서 불연속적인 흐름에 따른 모의 특성을 고려할 수 있는 수질 모델이 필요하다. 박석순 등(1991)은 QUAL2E의 단점을 보완하기 위하여 탈질화 및 용존 산소의 변화 등의 모의가 가능한 STREAM (Stochastic Time River Elevator Approach Model)을 개발하였다. 박석순과 이용석(1999)은 대형 수계에 적용이 가능하며 내부증가 유기물과 부착식물에 의한 산소변화 등을 고려하여 KQUAL97 모형을 개발하였다. 또한 국립환경연구원(2001)은 QUAL2E와 WASP5의 특성을 결합하여 QUALKO를 개발하였다. 특히, 조류의 감소량을 모두 호흡에 의한 것으로 모의하는 QUAL2E와 다르게 조류의 사멸과 이에 따른 CBOD의 증가를 추가하였고, 현재 우리나라에서 측정하고 있는 Bottle BOD_5모의가 가능하다. 박준대 등(2008)은 조류의 내부생산 유기물 증가 고려 및 Bottle BOD_5의 모의가 가능하고, 유기성 영양물질을 성상별로 분류하여 총질소와 총인의 정확한 모의와 향후 오염총량관리 대상물질로 언급되고 있는 TOC의 모의가 가능한 QUAL-NIER를 개발하였다.

위와 같이 QUAL2E 모형을 국내 조건에 맞게 개선하려는 연구가 꾸준히 이루어졌다. 그러나 QUAL계열의 모형은 한 강우 사상에 대해 모의가 이루어지기 때문에 장기 유출에 따른 연속적인 모의가 불가능한 한계가 있으며 하천의 수질을 모의하기 위해서는 하천으로 유입되는 비점오염원 모의를 위한 유역 개념의 모의가 수반되어야 한다. 따라서 이러한 한계를 포괄하는 모형으로 장기적인 모의가 가능하고 유역 내의 수리·수문 및 수질 변화를 동시에 모의 가능한 유역 모형이 있으며, 대표적으로 HSPF(Hydrological Simulation Program-FORTRAN)와 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)이 있다. 특히 SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins) 모형과 ROTO(Routing Outputs to Outlet) 모형의 결합을 통해 개발된 모형으로써 초기의 SWAT은 SWRRB의 수질 모의 방법이 사용되었으나, SWAT 96.2 버전에서부터 유역으로부터 발생된 오염원의 하천 내 변화양상을 모의하기 위하여 QUAL2E 모형의 수질 방정식을 사용하고 있다 (Neitsch et al., 2001). 이러한 SWAT 모형은 김철겸과 김남원(2007, 2008), 김남원 등(2009)에 의하여 국내 유역에 적용되었고, Gikas 등(2006), Van Griensven 등(2006), Shen 등(2008)에 의하여 전세계의 다양한 유역에 적용되어 수질 모의의 적용성이 입증되었다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 우리나라 하천의 수질 모의를 위해서는 불연속적인 흐름에 따른 모의 특성을 고려할 수 있어야 하기 때문에 QUAL2E를 하도 수질 모형으로 사용하는 SWAT과 같은 대규모 유역 모형 역시 하천 수질 모의에 대한 개선이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연속적인 일단위 모의가 가능한 SWAT 모형의 하도 수질 모의 구조를 개선하기 위하여 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서 개발한 QUAL-NIER 모형을 표본 모형으로 모형 내 조류대사 및 BOD모의 구조를 개선하고, 이를 충주댐 유역에 적용하여 개선 전·후의 모의결과 비교를 통한 개선 효과를 검증하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 수질 모듈 개선을 위한 표본 모형의 선택

기존의 하천수질모델은 대부분 연속적인 하천을 기준으로 개발되어 DO중심의 구조이나 우리나라는 하류로 갈수록 정체되는 하천과 지형의 특징에 의하여 DO부족현상은 나타나지 않고 내부의 유기물 재생산이 이루어지기 때문에 DO중심의 모델 구조를 유기물 및 영양물질 중심의 구조로 전환할 필요성이 제기되고 있다(Fig. 1). 특히 현재 시행중인 수질오염총량관리체제 하에서 대상물질로 지정되어 있는 BOD는 우리나라의 경우 수질공정시험법에 의하여 5일단위의 Bottle BOD를 측정하고 있으나, SWAT에서는 CBODu 형태로 BOD가 모의되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 1과 같이 기존의 QUAL2E와 개선 모형들의 비교를

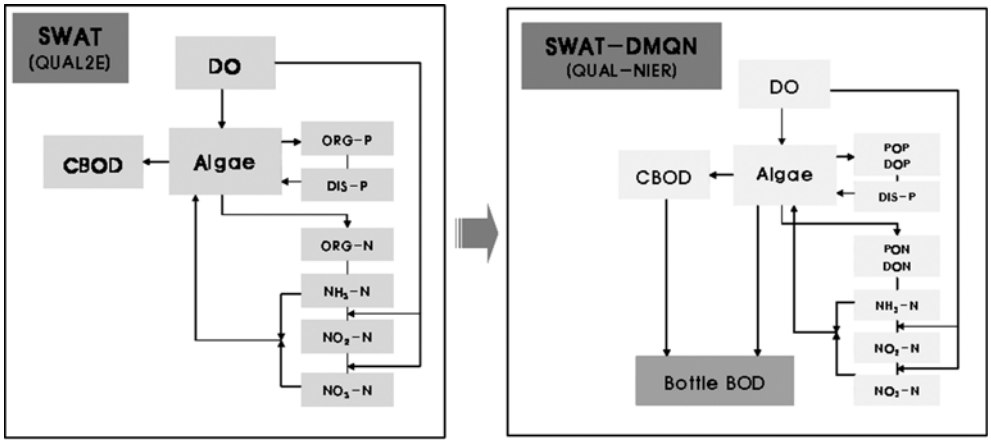


Fig. 1. Conversion of water quality model's main structure.

Table 1. Comparison of simulation character between QUAL2E and developed models

Pollutants	Consideration	QUAL2E	QUALKO	QUAL-NIER
CBOD	Increase of organic matters by algae death	×	○	○
Bottle BOD	Simulation / Dissimulation	×	○	○
DO	Division of algae respiration (death/respiration)	×	Respiration	Respiration
Algae	Division of decreasing algal biomass	×	Death / Respiration	Death / Excretion / Respiration
N, P	Include living organic nitrogen and phosphorus	×	○	○
	Division of decreasing algal biomass	×	Death / Respiration	Death / Excreation / Respiration
TOC	Simulation / Dissimulation	×	×	○

통하여 QUAL-NIER 모형을 표본 모형으로 SWAT의 하도 수질 모의구조 개선에 주안점을 두고자 한다. 특히 QUAL2E는 1차원 정상 상태 하천 수질 모형으로 기준유량에 따른 하천의 수질은 적절하게 모의하지만 연속적인 일단위의 수질 모의에는 한계가 있다. 따라서 QUAL2E를 하도 수질 모듈로 사용하고 있는 장기유출 유역모형인 SWAT 모형내에 QUAL-NIER의 반응식을 이용하여 조류의 분비와 사멸에 따른 내부유기물 생산과정 및 질산화에 의한 산소소모량(NOD)과 조류 호흡에 의한 DO소모량(AOD)을 고려하여 5일 단위의 Bottle BOD의 모의가 가능하도록 모형 내 BOD 모의 구조를 개선하고자 한다.

2.2. SWAT 수질 모듈의 개선

SWAT 모형은 유역단위의 연속모의모형으로 인위적인 토지이용상태 및 수문환경변화에 따라 일별 단위의 유출과 유사, 영양물질, 박테리아 등의 모의를 통해 복합적인 수자원관리가 가능한 대규모 유역모형이다(김남원 등, 2007a). SWAT은 유역을 소유역으로 구분하고 이를 동일한 토양특성을 갖는 HRU(Hydrologic Response Unit)단위로 세분하여 유역에서 발생하는 유출 및 영양물질을 모의하고 다시 소유역 단위로 합산한 후 하도로 유입되는 구조를 이루고 있으며 모형의 자세한 모의 구조는 Neitsch 등(2001)에 상세히 기술되어 있다.

SWAT 모형의 유역에서 발생하는 BOD값의 계산은 다음과 같은 식에 의해 이루어진다(Neitsch et al., 2001). 식 (1)에 의하여 HRU단위의 유역에서 발생하는 CBOD값($cbodu$)을 계산하여 소유역 단위로 합산($cbodin$)한 후 식 (2)의 과정을 거쳐 하도로 유입되는 CBOD를 계산한다.

$$cbodu = \frac{2.7 \cdot \mathrm{or}g_c}{surfq \cdot hru} \quad (1)$$

여기서, $cbodu$는 HRU의 지표 유출에 의한 cbod(mg/L)농도, $\mathrm{or}g_c$는 HRU의 지표 유출의 유기 탄소 함량(kg/ha), $surfq$는 HRU단위의 일단위 발생 지표 유출량(mm), hru는 HRU면적(km^2)이다.

$$cbodcon = (cbodin \cdot wtrin + cbod \cdot rchwtr)/wtrtot \quad (2)$$

여기서, $cbodcon$는 하천의 초기 cbod(mg/L)농도, $cbodin$은 하천으로 유입되는 cbod(mg/L)농도, $wtrin$는 일별 하도 유입수량(m^3), $cbod$는 하도에서의 cbod(mg/L)농도, $rchwtr$은 시점의 하도 저류수량(m^3), $wtrtot$는 유입수량과 저류수량의 합(m^3)이다.

한편, QUAL2E는 하천 수질 모의를 위하여 1차원 이송-확산 방정식을 기본방정식으로 사용하고 있다. 이는 각 단위구간 하천에 대하여 흐름에 의해 물질이 이동하는 이류(Advection), 유체의 난류와 농도차이에 의한 확산(Dispersion), 수체내부에서 일어나는 생물·화학적 반응과 상호작용에 의한 증감, 외부로부터 오염물질의 유입·유출에 의한 증감을 포함한다(충청남도 보건환경연구원, 2005). 특히 BOD의 경우 다음과 같은 식 (3)에 의하여 모의가 이루어진다(Thomas, 1948).

$$\frac{dL}{dt} = -(K_1 L + K_3 L) \quad (3)$$

여기서, L은 탄소성 BOD의 농도(mg/L), K_1은 BOD의 탈산소계수(d^{-1}), K_3은 BOD의 침전계수(d^{-1}), t는 유하시간(day)이다.

이를 바탕으로 QUAL2E를 하천 수질 모형으로 사용하고 있는 SWAT의 BOD의 모의는 식 (1)~(2)에 의하여 유역에서 발생한 CBOD값을 바탕으로 SWAT상의 watqual.f 서브루틴에서 다음과 같은 식 (4)의 계산 과정에 의하여 하도의 BOD계산이 이루어진다(Neitsch et al., 2001).

$$cbod = cbodcon - (rk_1 + rk_3) \cdot tday \quad (4)$$

여기서, $cbod$는 하도에서의 cbod(mg/L)농도, $cbodcon$는 하천의 초기 cbod(mg/L)농도, rk_1은 탈산소계수(RK1)에 의한 cbod 손실, rk_3는 cbod의 침강손실률(RK3)에 의한 손실, $tday$는 유하시간을 나타낸다.

일반적으로 하천으로 유입된 오염물질은 하천수와의 혼합에 의하여 하류로 유하하면서 분해, 침전 등의 과정을 거쳐 하류로 갈수록 오염물의 농도가 감소한다(국립환경연구원, 2004). 그러나 일부 국내하천에 적용했을 시, 이와 같은 일반적인 현상과는 달리 하천의 하류로 갈수록 정체현상에 따른 부영양화가 발생하고 이에 따른 조류 대사과정에 의한 내부 유기물 증가가 고려되지 않는 문제가 발생하며, 식 (4)와 같이 SWAT은 BOD를 CBOD로 모의하는 한계가 있다. 따라서 QUAL-NIER의 반응식을 바탕으로 조류

의 대사과정에 의한 CBOD값을 고려하여 식 (5)와 같이 연속적인 모의가 가능한 수식으로 나타낼 수 있다.

$$cbod = cbodcon + A_EXCRT + A_DEATH - (rk_1 + rk_3) \cdot tday \quad (5)$$

여기서, A_EXCRT는 조류분비에 의한 CBOD농도의 증가, A_DEATH는 조류 사멸에 의한 CBOD농도의 증가를 나타내며 나머지 항목은 식 (4)와 동일하다. 식 (5)는 조류 감소량을 사멸/분비로 세분하고 그에 따른 CBOD 변화를 추가하여 하천의 정체 현상에 따른 조류의 내부 유기물 증가를 고려한 계산이 가능하다. 또한 국립환경연구원(2004)이 제안한 식 (6)과 같이 CBOD값에 질소산화에 의한 산소소모량과 조류의 호흡에 의한 산소소모량을 고려하여 Bottle BOD로 전환하고, 실험 계수를 고려하여 총 BOD를 5일 BOD로 환산하기 위하여 다음과 같은 식 (7)을 구성하였다.

$$BottleBOD_5 = C_BOD_5 + N_OD_5 + A_OD_5 \quad (6)$$

여기서, $BottleBOD_5$는 실험실 측정에 의한 5일 BOD (mg/L), C_BOD_5는 5일 탄소성 BOD(mg/L), N_OD_5는 질소산화에 의한 산소소모량, A_OD_5는 조류호흡에 의한 산소소모량이다.

$$bod_5 = cbod(1 - e^{-5Ldbod}) + 4.57NH_4(1 - e^{-5Lobod}) + \alpha_{i4}Algae(1 - e^{-5R_{20}}) \quad (7)$$

여기서, bod_5는 실험실 측정에 의한 5일 BOD(mg/L), $cbod$는 하도에서의 cbod(mg/L), $Ldbod$는 BOD실험시 탈산소계수(day^{-1}), NH_4는 암모니아성 질소(mg/L), $Lobod$는 BOD실험시 질산화계수(day^{-1}), α_{i4}는 조류호흡시 조류량에 대한 산소량 비율(mgO$_2$/mgA), $Algae$는 조류생체량(mg/L), R_{20}는 20°C에서의 조류 호흡률(day^{-1})이다.

2.3. 모형의 적용

연구대상지역은 남한강 유역의 충주댐 상류유역으로 도암댐을 포함한 충주댐 상류까지의 구간이다. 유역면적은 약 6,648 km^{2}로 남한강 유역의 약 50%를 차지하고 있으며, 유로연장 375 km, 평균표고 EL.607 m, 유역평균경사 42.3%로 전형적인 산림지역에 속한다. 행정구역상으로 강원도, 충청북도, 경상북도의 3개도에 걸쳐 분포하고 있으며 13개의 시·군을 포함하고 있다(Fig. 2).

SWAT모형을 적용하기 위하여 유역도, 하천도, 환경부의 1/50,000 토지이용도, 환경부의 100 m×100 m의 수치고도모형(DEM), 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도 등의 GIS자료를 구축하였다. 토지이용도는 환경부 토지피복분류의 중분류를 참고하여 15개의 피복상태로 분류하였다. 유역의 하천 흐름과 건교부 수위측정망, 환경부 수질측정지점을 고려하여 유역을 14개 소유역으로 분할하였고, HRU (Hydrologic Response Unit)생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 총 406개의 HRU를 생성하였다. 기상자료는 유역 내 대관령, 동해, 원주, 영월, 충주, 제천, 태백, 제천, 영주 등 9개 기상관측소의 1990~2006년 자료를 기상청으로부터 제공받아 Thiessen법에 의하여 분할하여 기온, 강우, 일사량, 풍속, 상대습도의 항목을 모형내에 입력하였다. 점오염원자료는 유역 내 하수종말, 마을하수, 분뇨, 공단 및 축산폐수처리시설을 포함하는 환경기초시설자료를 충주댐 관리연보(한국수자원공사, 2003)에서 제시하고 있는 환경기초시설이 모두 가동되고 있다는 전제하에 가동 효율은 70%로 가정하여 각 처리시설별 방류수 수질 기준과 관측 수질자료의 항목별 비율을 고려하여 소유역별 배출부하량을 산정하였다.

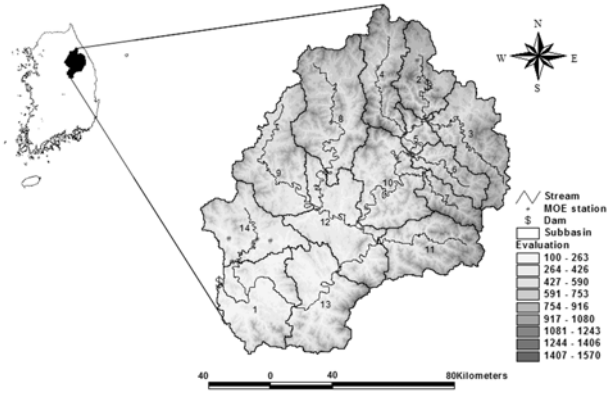


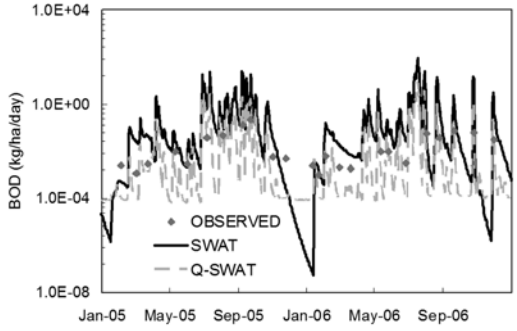
Fig. 2. Location of study area.

3. 결과 및 고찰

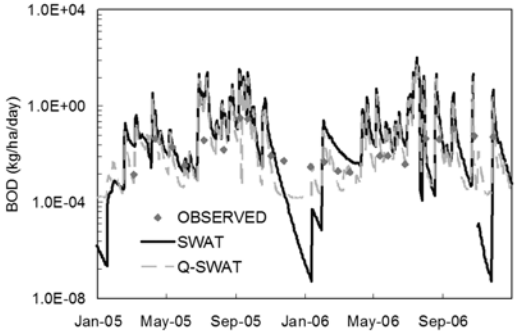
하도 수질 모듈 개선에 의한 결과를 분석하기에 앞서 유출은 하도의 흐름을 따라 이동하는 수질항목의 모의에 큰 영향을 미치기 때문에(김남원 등, 2009) 수질항목의 정확한 결과 도출을 위하여 2000년부터 2006년까지 유역의 출구점인 충주댐 지점에 대하여 유출분석이 선행되었다. 유출분석에는 SWAT-K(Korea)모형을 사용하였다. SWAT-K는 기존의 모형을 국내 실정에 적합하도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화 및 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선하여, 강우·증발산·토양수분·지표수·지하수의 시공간적 분포의 정량적 산정이 가능하도록 개선한 모형이다(과학기술부, 2007). 매개변수는 총유출량과 첨두유량에 변위가 큰 매개변수 순으로 시행착오법에 의하여 보정하였으며, 결정 계수 및 모형 효율의 값이 0.80이상으로 신뢰도 있는 결과를 나타내었다. 그러나 유출량의 산정은 본 연구목적을 벗어나므로 자세한 결과는 생략하기로 한다. BOD항목의 분석을 위하여 대상 유역의 중류에 해당하는 환경부 수질측정망의 가곡과 영월 1 지점, 그리고 충주댐 지점에 대하여 2000년에서 2006년까지 모의결과를 통하여 분석이 수행되었다. 대상지점의 월 1회 측정 관측값과 개선 전(SWAT) 개선 후(Q-SWAT) 결과값의 비교를 통하여 개선효과를 분석하였

다. 개선 전·후의 정확한 비교를 위하여 입력자료 및 모든 조건을 동일하게 적용하였으며, SWAT상의 BOD관련 매개변수인 RK1, RK3의 값 역시 개선 전·후 동일하게 적용하여 분석의 신뢰도를 높이고자 하였다.

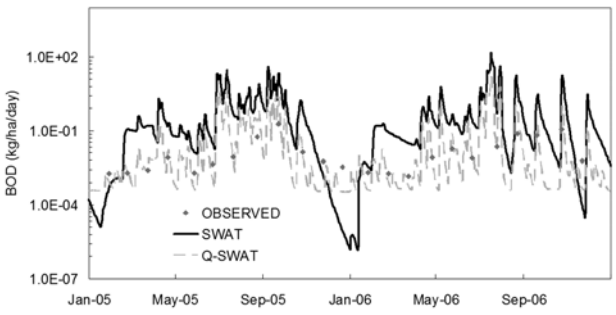
Fig. 3은 개선 전·후 각 지점의 BOD 모의결과를 나타낸 것으로 대상지점 모두 개선 전에 비하여 개선 후 관측값과의 유사성이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 일부 저유량 시 BOD관련 매개변수인 RK1, RK3 등의 매개변수 산정이 이루어졌음에도 불구하고 모형의 개선 전 증가하지 않고 이상치를 보이던 값들이 본 모듈의 개선에 의하여 정상 범위로 상승한 것을 확인할 수 있다. 또한 개선 전 BOD의 부하량이 지체되며 시간적 변화를 유연하게 모의하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞서 언급한 SWAT-K 모형이 하도 수질의 개선에 앞서 하도추적과 지표유출모듈을 개선하기 위하여 비선형 저류방정식(Nonlinear Storage Method, NSTR)과 시간 가중평균 유출곡선지수 산정법(Temporally



(a) Gagok

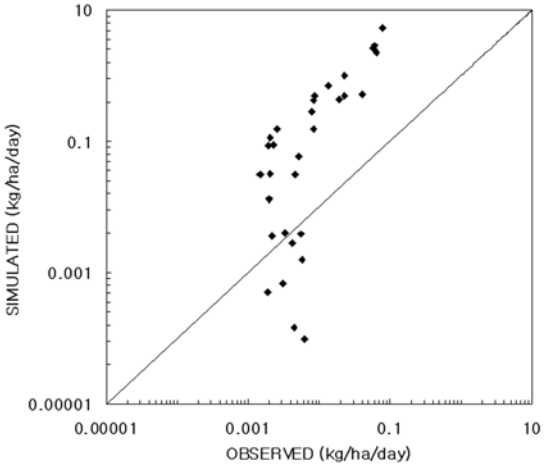


(b) Yongwol 1

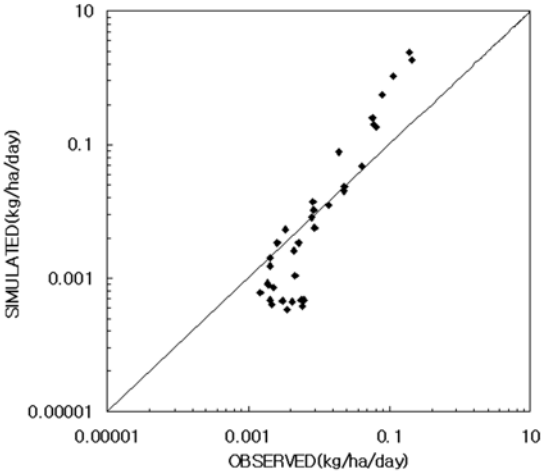


(c) Chungju dam

Fig. 3. Comparison of BOD simulation by before and after modified.



(a) SWAT (R^2 = 0.54)



(b) Q-SWAT (R^2 = 0.88)

Fig. 4. Comparison of observed and simulated BOD.

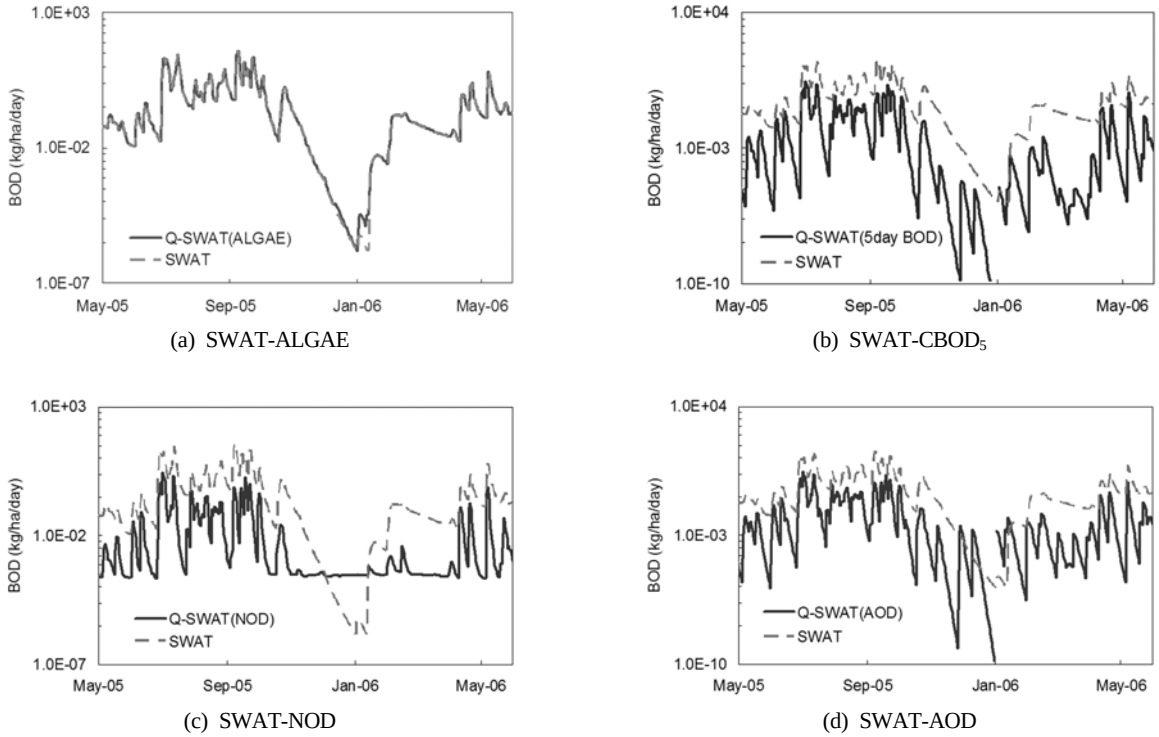
Weighted Average Curve Number Method, TWA-CN)을 모형에 탑재하였기 때문에 유출의 지체와 첨두 유출이 과소 산정되던 문제가 개선되었다(김남원 등, 2007b; Kim and Lee, 2008). 따라서 유출의 영향을 크게 받는 BOD의 부하량 역시 하도 수질의 개선에 앞서 1차적으로 유출 구조의 개선에 의하여 부하량의 지체 현상이 개선되었다고 판단된다. Fig. 4와 같이 충주댐 지점에 대하여 2004년부터 2006년까지 월 1회 관측값과 개선 후 모의값과의 일대일 비교를 수행한 결과 개선 전 관측값에 비하여 과대하게 산정되던 모의값이 모듈 개선에 의하여 감소하여 관측치와 선형성이 높아지면서 결정 계수(R^2)가 0.54에서 0.88로 상승한 것을 확인할 수 있다.

2.2절에 언급된 바와 같이 반응식의 수정에 있어서 여러 가지 변수가 추가 되었으므로 개선의 원인을 구체적으로 분석하기 위하여 충주댐 지점에 대하여 개선 전과 각 개선 항목에 대하여 비교·분석을 수행하였다(Fig. 5). 통계분석은 가장 널리 사용되는 결정계수(Coefficient of determination, R^2)와 평균제곱오차(Root mean square error, RMSE)를 산정하였다. 계산과정의 순서를 고려하여 조류 대사과정 세분화의 추가(SWAT-ALGAE), 5일 CBOD로의 변환(SWAT-

$CBOD_5$), Bottle BOD_5로의 변환에 있어서 NOD항의 추가(SWAT-NOD), AOD항의 추가(SWAT-AOD)의 4가지 주요 추가 항목과 개선 전(SWAT), 개선 후(Q-SWAT)에 대하여 분석이 이루어졌다(Table 2). 분석 결과 Fig. 5(a)의 조류 대사과정 세분화는 전체적인 개선에 미치는 영향이 일부 저유량 시에 국한되고, 결정계수 또한 개선전과 유사한 값을 나타내며 개선 전과 유사한 변화양상을 나타냈다. 이와 같은 결과의 일부 원인으로서 조류 생체량의 CBOD로의 변환비율과 조류의 호흡률이나 사멸률 등의 조류대사에 대한 매개변수를 자료의 부족으로 대상 하천의 특성에 맞게 고려하지 않고 기존에 산정된 매개변수(국립환경연구원, 2004, 2005)를 적용했음을 고려할 수 있다. 또한 최정규 등(2008)은 유역내의 조류의 종과 성장과정에 따른 매개변수나 하천 외부의 다양한 환경요인 등이 모형에 정확하게 반영되지 못하였음을 QUAL-NIER 모형의 Chl.a나 BOD 값의 과소 모의 원인으로 지적한 바 있다. Fig. 5(b)와 같이 총 CBOD로 모의되던 기존의 계산 과정을 5일 CBOD로 변환하는 반응식의 추가는 총BOD값을 국내에서 측정하고 있는 실험조건에 의해 5일 BOD로 변환하면서 관측값에 비하여 과대 산정되던 값이 감소되어 개선 효과를 보였으나, 전체적인 감소 효과에 따라 특히 저농도 시의 값이 과대하게 감소하는 한계를 보였다. Bottle BOD_5 계산과정의 추가에 의한 개선효과는 CBOD값에 Fig. 5(c)의 NOD를 추가한 경우와 Fig. 5(d)의 AOD만 추가한 경우로 분석한 결과, 조류 호흡시의 산소소모량인 AOD는 통계분석결과 결정계수가 감소하고, 평균제곱오차가 증가하여 음(-)의 개선 결과를 보였으며, NOD의 추가가 BOD값에 절대적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. NOD의 추가는 Fig. 3(c)에 도시된 충주댐 지점의 개선 후 결과와 변화양상이 매우 유사하고, 결정계수가 개선 후와 동일한 값을 보이며 타 개선과정에서 나타나는 저농도시의 과소 모의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 하도 수질의 개선에 있어 분석지점인 충주댐 지점은 체류시간이 긴 호소의 특징을 지니고 있음에도 불구하고 조류의 내부대사과정의 세분화보다 질소산화에 의한 산소소모량의 추가와 5일 BOD로의 변환이 전체적인 개선에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 개선한 SWAT 2000 버전은 점오염원 입력 항목에 BOD, ALGAE, Chl.a가 포함되어 있지 않고, 반응식의 추가에 따른 새로운 입력 매개변수의 값이 대상 유역의 특성을 정확하게 반영하고 있지 못하기 때문에 유역에서 배출되는 BOD값의 정확한 산정에 한계가 있다.

Table 2. Statistical Analysis of BOD Simulation from 2004 to 2006

	SWAT	SWAT - ALGAE	SWAT - $CBOD_5$	SWAT - NOD	SWAT - AOD	Q - SWAT
Mean Value (kg/ha/day)	2.179	2.180	0.066	0.069	0.075	0.193
R^2	0.54	0.55	0.61	0.88	0.45	0.88
RMSE	1.46	1.45	2.68	0.85	2.16	0.63



(a) SWAT-ALGAE (b) SWAT-$CBOD_5$

(c) SWAT-NOD (d) SWAT-AOD

Fig. 5. Comparison of simulation by improvement constituents.

4. 결 론

최근 모델링을 통한 의사결정의 중요성이 증가하면서 다양한 모형이 사용되고 있으나 대부분 미국에서 개발된 모형이 사용되어 국내 적용에 한계를 보인다. 이는 특정한 하천과 지형 및 기후조건 하에서 개발된 모형을 국내에 적용하며 국내 조건을 고려한 모형 구조의 개선보다 매개변수의 산정을 통하여 적용의 정확도를 높이고자 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 유역모형인 SWAT 모형의 BOD모의와 현재 우리나라에서 측정하는 BOD 값이 상이하여 정확한 모의가 불가능한 문제를 개선하기 위하여 QUAL-NIER 모형을 표본 모형으로 조류대사과정의 세분화를 통한 조류의 내부 유기물 생산과 Bottle BOD모의 및 5일 BOD환산을 고려하여 하도 수질 모듈을 수정하고, 충주댐 유역의 적용을 통한 개선효과를 분석하였다.

수질항목의 정확한 결과 도출을 위하여 BOD모의에 앞서 유출분석을 선행하였다. BOD항목의 분석결과 대상지점 모두 개선 전에 비하여 개선 후 관측값과의 유사성이 증가하였으며, 특히 일부 저유량 시 BOD관련 매개변수의 산정에도 불구하고 이상치를 보이던 값들이 본 모듈의 개선에 의하여 정상 범위로 상승한 것을 확인할 수 있었다. 또한 하도 수질의 개선에 앞서 유출 및 하도추적 구조를 개선하였기 때문에 BOD 부하량은 하도 수질의 개선에 앞서 1차적으로 유출 구조의 개선에 의하여 부하량의 지체 현상이 개선됨을 확인하였다. 개선의 주요인을 분석한 결과 조류 대사과정 세분화는 전체적인 개선에 미치는 영향이 일부 저유량 시에만 나타나며 개선 전과 유사한 결과를 보였다. 5일 CBOD로 변환과정의 추가는 관측값에 비하여 과대 산정되던 값이 감소되어 개선 효과를 보였으나, 저농도 시의 값이 과대하게 감소하는 한계를 나타냈다. Bottle BOD_5 계산과정의 추가는 조류 호흡시의 산소소모량인 AOD가 통계분석결과 음(-)의 개선 결과를 보였으며, NOD의 추가가 BOD값에 절대적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제안한 조류의 내부대사과정 세분화, 5일 BOD 및 Bottle BOD로의 변환 등에 의한 SWAT 모형의 하도 수질의 개선은 적용 결과 국내 유역 특성을 반영한 BOD값의 산정이 가능함을 확인하여 모형의 개선 효과가 입증되었다. 특히 기존 연구에 의해 개발된 모형에 비하여 연속적인 일단위 모의가 가능하기 때문에 장기간의 오염원 분석을 통하여 수질오염총량제 및 다양한 의사 결정에 있어 효율적인 사용이 가능할 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

경기개발연구원(1999). *화옹호 오염원 및 부영양화 평가와 수질개선을 위한 종합연구*.

경기보건환경연구원(2008). *오산천 수질개선 종합계획*.

과학기술부(2007). *지표수 수문성분 해석 시스템 개발. 2단계 연구보고서*.

국립환경연구원(2001). *한강유역통합관리시스템 구축사업-오염부하 해석 및 수질관리모델 개발*.

국립환경연구원(2002). *금강·영산강수계 오염총량관리제 시행방안 연구*.

국립환경연구원(2004). *오염총량관리를 위한 하천수질모델의 개발(I)*.

국립환경과학원(2005). *오염총량관리를 위한 하천수질모델의 개발(II)*.

김남원, 신아현, 이정우(2009). SWAT 모형의 유출해석모듈 개선이 수질모의에 미치는 영향. *한국수자원학회지*, **42**(4), pp. 297-307.

김남원, 이병주, 이정은(2007a). 공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, **27**(4B), pp. 431-440.

김남원, 이정우, 이병주, 이정은(2007b). 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법. *대한토목학회논문집*, **27**(5B), pp. 533-542.

김철겸, 김남원(2007). 충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성. *한국수자원학회지*, **40**(11), pp. 887-898.

김철겸, 김남원(2008). 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 465-472.

낙동강수계관리위원회(2004). *낙동강 유역에 적합한 수질예측 모델개발*.

박석순, 이용석(1999). 대형 수계 관리를 위한 수질 모델의 개발과 적용. *대한환경공학회지*, **21**(10), pp. 1837-1848.

박석순, 이용석, 박민대(1991). 반응조 나열법을 이용한 하천 모델의 개발. *한국육수학회지*, **24**(4), pp. 265-274.

박준대, 신동석, 김문숙, 공동수, 류덕희, 정동일, 나은혜(2008). 수질오염총량관리를 위한 하천수질모델(QUAL-NIER)의 개발. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(6), pp. 784-792.

서동일, 윤종욱, 이재운(2008). QUAL2E, QUAL2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질모델링 결과 비교 분석. *상하수도학회지*, **22**(1), pp. 121-129.

최정규, 정세웅, 류재일(2008). 부영양 하천의 수질예측을 위한 QUAL2E와 QUAL-NIER 모델의 비교·평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(1), pp. 54-62.

충청남도 보건환경연구원(2005). *QUAL2E 모형을 이용한 소하천 관리방안 연구*.

한건연, 김상호, 배덕효(2000). GIS와 연계한 하천에서의 2차원 수질관리모형의 개발. *대한토목학회논문집*, **20**(5-D), pp. 593-601.

한국수자원공사(2003). *충주댐 관리연보*.

Brown, L. C. and Barnwell, T. O. (1985). Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA EPA/600/3-85/065.

Brown, L. C. and Barnwell, T. O. (1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual. EPA/600/3-87/007, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

Gikas, G. D., Yiannakopoulou, T., and Tsihrintzis, V. A. (2006). Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environmental Modeling & Assess-*

ment, **11**(3), pp. 219-233.

Kim, N. W. and Lee, J. (2008). Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. *Hydrological Processes*, **22**, pp. 4936-4948.

Masch, F. D. and Associates (1970). QUAL-Ⅰ Simulation of water quality in stream and canals, Program Document and User's Manual, Texas Water evelopment Board.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). Soil and Water Assessment Tool; the theoretical documentation (version 2000). U. S. Agricultural Research Service.

Park, S. S. and Lee, Y. S. (2002). Water quality modeling study of the Nakdong river, Korea. *Ecological Modeling*, **152**, pp. 66-75.

Shen, Z., Hong, Q., and Yu, H. (2008). Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China. *The Science of the Total Environment*, **405**(1/3), pp. 195-205.

Thomas, H. A., Jr. (1948). Pollution Load Capacity of Streams. *Water and Sewage Works*, **95**(11), pp. 409-413.

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, **324**, pp. 10-23.