Journal of Environmental Science International
23(5); 839~852; May 2014

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.5.839

ORIGINAL ARTICLE

비점오염원 관리지역(소양호) 목표수질 달성도 평가

최재완 · 강민지 · 류지철 · 김동일 · 임경재[1] · 신동석*

국립환경과학원 수질총량연구과, [1]강원대학교 지역건설공학과

Assessing the Action Plans in the Control Area(Soyang Reservoir) of Non-point Source Pollution

Jaewan Choi, Min-Ji Kang, Jichul Ryu, Dong-Il Kim, Kyung-Jae Lim[1], Dong-Seok Shin*

National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

[1]Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-944, Korea

Abstract

The Ministry of Environment (MOE) has made more effort in managing point source pollution rather than in nonpoint source pollution in order to improve water quality of the four major rivers. However, it would be difficult to meet water quality targets solely by managing the point source pollution. As a result of the comprehensive measures established in 2004 under the leadership of the Prime Minister's Office, a variety of policies such as the designation of control areas to manage nonpoint source pollution are now in place.

Various action plans to manage nonpoint source pollution have been implemented in the Soyang-dam watershed as one of the control areas designed in 2007. However, there are no tools to comprehensively assess the effectiveness of the action plans. Therefore, this study would assess the action plans (especially, BMPs) designed to manage Soyang-dam watershed with the WinHSPF and the CE-QUAL-W2.

To this end, we simulated the rainfall-runoff and the water quality (SS) of the watershed and the reservoir after conducting model calibration and the model validation. As the results of the calibration for the WinHSPF, the determination coefficient (R^2) for the flow (Q, m^3/s) was 0.87 and the R^2 for the SS was 0.78. As the results of the validation, the former was 0.78 and the latter was 0.67. The results seem to be acceptable. Similarly, the calibration results of the CE-QUAL-W2 showed that the RMSE for the water level was 1.08 and the RMSE for the SS was 1.11. The validation results(RMSE) of the water level was 1.86 and the SS was 1.86.

Based on the daily simulation results, the water quality target (turbidity 50 NTU) was not exceeded for 2009~2011, as results of maximum turbidity in '09, '10, and '11 were 3.1, 2.5, 5.6 NTU, respectively. The maximum turbidity in the years with the maximum, the minimum, and the average of yearly precipitation (1982~2011) were 15.5, 7.8, and 9.0, respectively, and therefore the water quality target was satisfied. It was discharged high turbidity at Inbuk, Gaa, Naerin, Gwidun, Woogak, Jeongja watershed resulting of the maximum turbidity by sub-basins in 3years(2009~2011).

The results indicated that the water quality target for the nonpoint source pollution management should be changed and management area should be adjusted and reduced.

Key words : CE-QUAL-W2, HSPF, Nonpoint source pollutant, SS, Turbidity

Received 19 June, 2013; **Revised** 10 March, 2014;
Accepted 11 March, 2014

***Corresponding author** : Dong-Seok Shin, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea
Phone : +82-17-208-6449
E-mail : sds8488@korea.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

공공수역의 수질오염원은 오염물질 배출원 형태에 따라 점오염원(point source pollution)과 비점오염원(nonpoint source pollution)으로 구분할 수 있다. 점오염원은 폐수배출시설, 하수발생시설, 축사 등에서 관거 · 수로 등을 통하여 일정한 지점으로 수질오염물질을 배출하여 관리가 용이한 반면, 비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등의 불특정 장소에서 빗물과 함께 불특정하게 배출되어 관리가 곤란하다. 환경부는 환경기초시설 설치 등의 수질개선사업으로 점오염원을 관리해왔으나, 점오염원 위주의 관리만으로 공공수역 수질개선에 한계가 있음을 인식하고 관계부처합동으로 「4대강 비점오염원관리 종합대책(2004)」을 수립하여 비점오염원을 관리하기 시작하였다.

종합대책을 근거로 『수질환경보전법(현 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률)』을 개정하여 비점오염원의 체계적 관리 토대를 구축하였으며, 그 결과 중 하나로서 관리지역을 지정하여 비점오염원을 관리하는 제도('비점오염원 관리지역 지정제도')가 도입되었다. 이후 2007년에 광주광역시, 도암호, 소양호, 임하호의 4개 지역이 관리지역으로 지정되었고, 2010년에 수원시가 추가 지정되었다. 관리지역으로 지정되면 환경부 장관이 관리대책을 수립하고, 시·도지사는 관리대책에 대한 시행계획을 수립하여 이행하여야 한다. 이때 비점오염원 관리대책 이행에 따른 관리목표의 달성평가는 3년 평균 연속 2회 목표 수질 유지 시 목표를 달성한 것으로 평가한다. 그러나 더 정확하게 목표수질 달성 여부를 평가하기 위해서는, 지역에 산재되어 이루어지는 대책의 종합적인 평가 뿐 아니라 기상상태를 고려한 시 · 공간적 평가 시스템이 필요하다. 즉, 강우유출모델, 호소수질모델 등을 활용하여 관리대책 시행계획의 효과를 분석하고 목표수질의 달성도를 평가하기 위한 시스템을 구축할 필요가 있다.

이러한 평가시스템 구축을 위해서 Windows Interface to Hydrological Simulation Program-Fortran (WinHSPF; Bicknell 등 1997)과 CE-QUAL-W2(Cole 등, 1999) 등의 모델을 고려해 볼 수 있다. WinHSPF는 유역의 강우유출해석(Brun과 Band, 2000; Choi와 Deal, 2008; Cho 등, 2009)과 토양유실을 포함한 비점오염물질의 거동분석(Hunter와 Walton, 2008; Ribarova 등, 2008), 수질개선과 홍수 재해 방지를 위한 다양한 유역오염관리대책평가(윤 등, 2007; Donigian 등, 1997; Luo 등, 2006) 등에 있어서 세계적으로 널리 이용되고 있는 유역모델이다(전 등, 2009). 또한 CE-QUAL-W2는 미국공병단에서 개발된 횡방향 2차원 수리 · 수질 해석 수치모델로써 저수지의 길이방향과 수직방향 모두 농도 구배가 존재하는 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합한 모델이다(정 등, 2007).

본 연구는 환경부가 지정 · 고시한 5개 관리지역 중 태풍 루사('02), 태풍 에위니아('06)에 의한 집중강우로 인한 토사유출이 심화되어 장기간 탁수를 일으켜 비점오염원 관리지역으로 지정된 소양호 유역을 대상으로, WinHSPF와 CE-QUAL-W2를 이용하여 현재 수질 재현 및 강우 시나리오 적용에 따른 목표수질(소양호 댐 앞의 최고 탁도를 50 NTU 이하로 유지)의 달성 여부를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역

소양호 유역면적은 2,694.35 km^2, 유로연장은 166.2 km로 춘천시 등 5개 시군에 해당되며(유역면적(%) : 인제 60.2, 홍천 16.7, 춘천 10.5, 양구 5.5, 고성 0.4, 북한 6.7), 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 제54조 제1항에 의거 소양호 유역 면적의 82.68%인 2,227.81 km^2가 2007년 8월에 비점오염원 관리지역으로 지정되었다(강원도, 2010).

소양호는 주요 유입하천인 인제지점의 소양강을 통해 유입수의 90% 이상이 유입하며, 길이는 약 60 km로서 나뭇가지 형태의 매우 길고 좁은 지형특성을 가지고 있다(김과 정, 2007). 소양호의 주요 유입하천은 인북천, 내린천, 소양강이고, 비점오염원 관리지역 관리목표 평가지점은 소양호 댐 앞(환경부 수질측정지점인 소양강댐 1지점)이다(Fig. 1). 소양호는 춘천시에서 동북방 13 km, 북한강 합류지점에서 12 km 떨어진 소양강 계곡에 위치한 높이 123 m, 댐길이 530 m, 체적 약 9.6×106 m^3의 Fill Type Dam으로 한강연안과 서울을 비롯한 수도권 지역에 연간 12억m^3의

생·공용수 및 농업용수를 공급하고 5.5억 m^3의 홍수 조절 능력을 갖추고 있다.

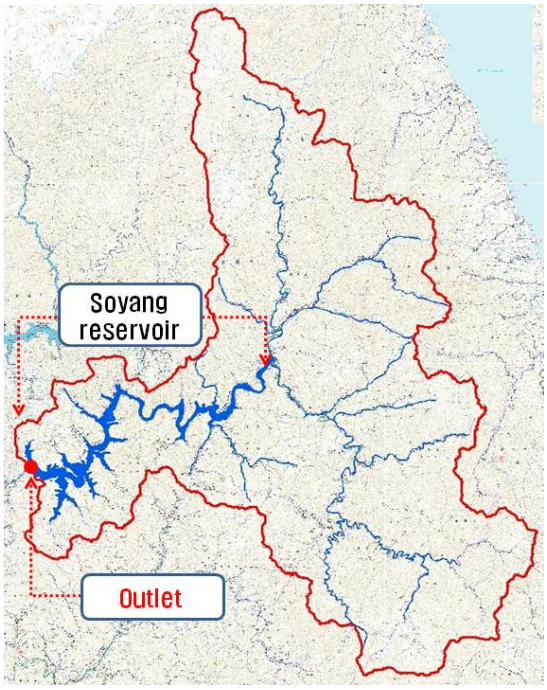

Fig. 1. Soyang reservoir watershed.

2.2. 강수량 조사

소양호 유역 내에 위치한 인제 관측소에서 측정한 최근 30년('82~'11년) 연강수량을 조사한 결과 2011년에 1,778.5 mm로 강수량이 가장 많이 발생하였고, 1988년에 666.9 mm로 강수량이 가장 적게 발생하였다. 연강수량의 30년 평균은 1,219.4 mm로 2007년에 발생한 1,215.6 mm와 가장 비슷하였다. 여름철(6월, 7월, 8월) 강수량을 분석한 결과 최대 강수년('11년)에 1,299.2 mm, 평균 강수년('07년)에 591.0 mm, 최소 강수년('08년)에 456.3 mm로 나타났다.

2.3. 모형의 개요

2.3.1. WinHSPF

WinHSPF 모형은 농촌지역과 도시지역이 혼재된 복잡한 유역에서 연속강우에 의해 발생하는 수량과 수질예측을 위해 미국 연방환경청(USEPA)에서 개발한 유역모형이다. 이 모형은 유역내의 토지이용에 따른 특정 오염물질의 비점오염 부하량을 모의하고 이를 점오염 부하량과 통합하여 강우에 따른 유량 변화를 수질모형에 연결한다(Bicknell 등 2001, Albek 등 2004, Bergman 등 2002, Anthony 등 1991). WinHSPF 모형의 수문성분은 지표수유출(surface runoff), 복류수(interflow) 그리고 지하수(baseflow)로 구성된다. 각각의 수문은 불투수면과 투수면으로 구분되어 유출되는데, 불투수면 지역은 지표유출과 증발산량을 통해 배출되고, 투수면 지역은 surface, upper, lower, ground water로 구분하여 3개의 지표유출수, 복류수, 지하수로 구성된다.

2.3.2. CE-QUAL-W2

우리나라 대부분의 인공저수지와 같이 길이가 폭에 비해 상대적으로 길며 수심이 깊은 경우, 수온성층화가 수체의 수리와 수질에 미치는 영향이 크기 때문에 일반적으로 종방향과 수심방향을 모의할 수 있는 횡방향 평균 2차원 모델(CE-QUAL-W2)이 주로 적용되었다(김 등 2001, 정 2004, Chung과 Gu 1998, Sullivan 등 2007).

2.4. 모형 입력자료 구축

2.4.1. WinHSPF 구축

WinHSPF 모형을 구축하기 위해서는 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM), 하천도, 토지피복도가 필요하다. DEM은 수치지도를 이용하여 30 m×30 m로 구축 하였고(Fig. 2), DEM과 하천도를 이용하여 Fig. 3과 같이 총 11개의 소유역으로 구분하였다. 토지피복도는 1:25,000의 중분류 토지피복도를 WinHSPF에서 사용되는 방식으로 변환하여 사용하였다(Fig. 4). 기상데이터 구축을 위해 기상청에서 제공하는 인제, 춘천, 홍천 기상관측지점의 6가지(강수량, 대기온도, 이슬점 온도, 운량, 풍속, 일사량) 시간별 평균 기상자료를 이용하였으며, 증발량과 증발산량은 WDMUtil 프로그램을 이용하여 생성하였다(Fig. 5). 구축된 소양호 유역 WinHSPF는 11개의 소유역중 2개의 소유역에 한강물환경연구소(2011)이 조사한 자료를 참고하여 6개의 BMP(돌망태, 식생수로, 침사지)가 적용되었다.

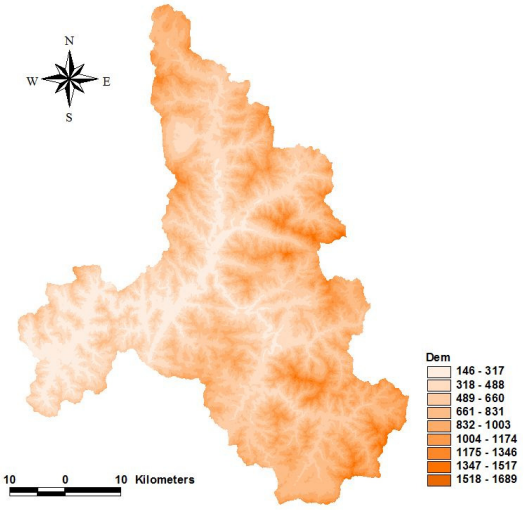

Fig. 2. DEM.

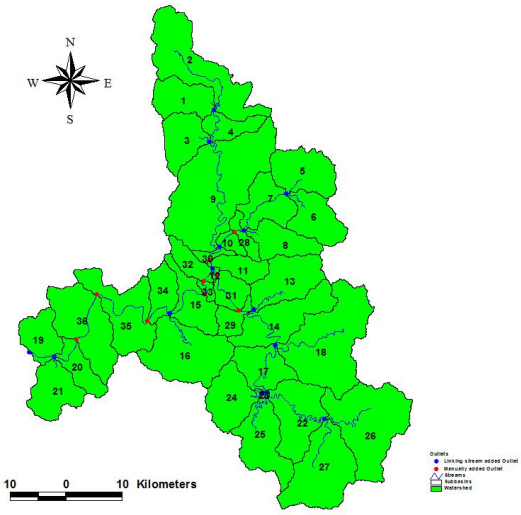

Fig. 3. Sub-basins.

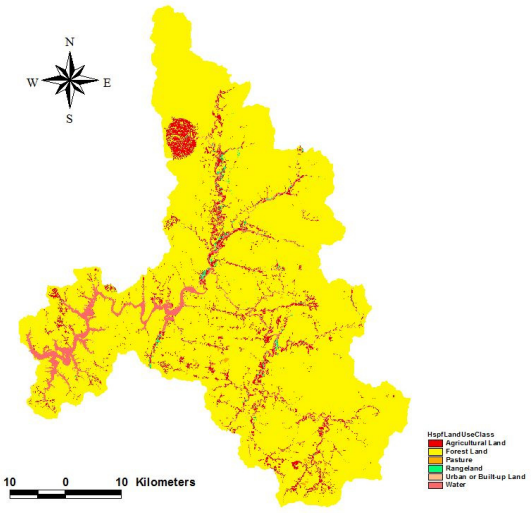

Fig. 4. Landuse.

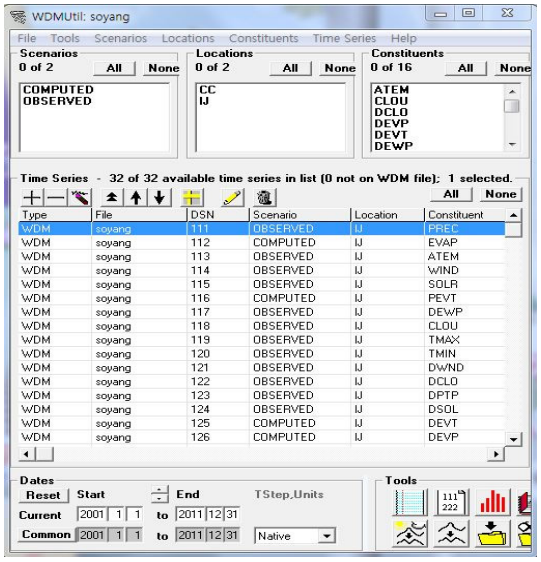

Fig. 5. WDMUtil program.

2.4.2. CE-QUAL-W2 구축

CE-QUAL-W2 모형의 입력자료는 지형 자료, 초기 조건, 경계 조건, 수리학적 매개변수, 반응 매개변수 그리고 보정 및 검증자료 등으로 구성 되어있다. 기상자료(대기온도, 이슬점, 풍속, 풍향, 운량)는 기상청에서 제공하는 인제, 춘천, 홍천 관측지점에서 측정한 자료를 사용하였다. 호 내 유입 · 방류량은 한국수자원공사에서 측정하여 국가 수자원관리 정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 사용하였고, 유입수질은 WinHSPF에서 모의한 자료를 이용하였다. 유입수온은 한강물환경연구소(2011)이 환경부 수질측정망인 소양강 1지점 (사구미교)에서 측정한 자료를 사용하였다. Fig. 6은 소양호 지형자료이다.

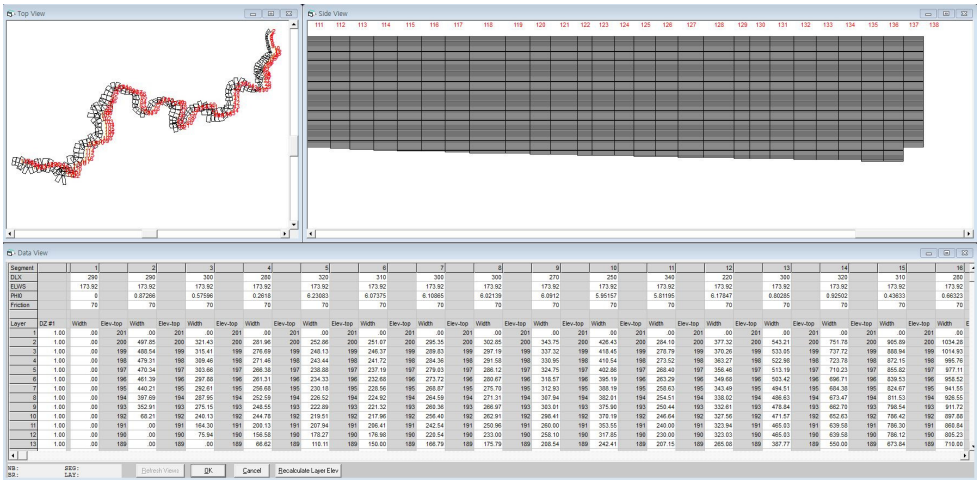

Fig. 6. CE-QUAL-W2 bathy metry file.

2.5. 모형의 적용성 평가 방법

WinHSPF 및 CE-QUAL-W2 모형 비교시 % Diff. (ASCE 1993), 평가시 결정 계수(R^2)와 유효 지수 (Effective Index)를 이용하였다. 유효지수 산정은 Nash-Sutcliffe model efficiency(NSE; Nash & Sutcliffe, 1970). 식 (1)은 결정 계수(R^2), 식 (2)는 % Diff., 식 (3)은 NSE, 식 (4)은 RMSE 산정 공식이다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\%\ diff_{.} = \left| \sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i \right| / \sum_{i=1}^{n} O_i \times 100 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2 / (\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O_i})^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \quad (4)$$

여기서 O_i는 실측 자료, P_i는 모형에서 산정된 결과, $\overline{P}$는 모형에서 산정된 결과의 평균, $\overline{O_i}$는 실측 자료의 평균이다. % Diff.와 RMSE의 값이 0에 가까울수록, R^2와 NSE의 값이 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다. Table 1은 Donigian(2000)이 제시한 목적함수 평가 기준이다.

Table 1. General calibration/validation targets or tolerances for HSPF applications (Donigian 2000)

		Very Good	Good	Fair	Poor
%Diff.	Flow	<10	10～15	15～25	>25
	Sediment	<20	20～30	30～45	>45
R^2		>0.8	0.7～0.8	0.6～0.7	<0.6

2.6. 목표수질 달성도 평가 방법

본 연구에서는 비점관리지역(소양호)의 시행계획 이행에 따른 목표수질 달성도를 평가하였다. 비점관리지역으로 선정된 소양호 유역의 관리목표는 '08년부터 '17년까지 2년 연속으로 전도현상 발생전 소양강댐 1지점의 최고탁도 50 NTU 이하로 유지하는 것이다. 이러한 목표의 달성도를 평가하기 위하여 '11년까지 소양호 유역에 설치된 비점오염원 저감시설을 WinHSPF에 적용하고, CE-QUAL-W2를 이용하여 목표수질 평가 지점인 소양강댐 1지점의 탁도를 산정하여 연차별 목표수질 달성도를 평가하였다. 또한 위에서 조사된 강수량을 이용하여 최대 강수년('11), 최소 강수년('88), 평균 강수년('07) 조건에서 목표수질

달성 여부를 판단하였다.

2.7. 소유역별 탁도 분석 및 시행계획 타당성 검토 방법

비점관리지역(소양호)의 시행계획 타당성 및 향후 집중투자 지역을 파악하기 위하여 WinHSPF 모형을 이용하여 소유역별 3년 평균 탁도 및 최고 탁도를 모의한 후 이를 지도로 작성하여 향후 집중투자 지역을 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. WinHSPF 모형의 적용성 평가 결과

모형의 정확성 평가를 위하여 유량 보정 및 검증시 한국수자원공사에서 측정하고 WAMIS에서 제공하는 소양호 유입량을 이용하였으며, SS 보정 및 검증시 한강물환경연구소(2011)에서 측정한 소양호 유입지점(소양강 1지점)의 SS를 이용하였다. 유량 및 SS의 보정기간은 2009년 1월부터 2009년 12월까지 이며, 검증기간은 2011년 1월부터 2011년 12월까지 이다.

3.1.1. 유량 보정 및 검증 결과

모형의 유량 보정시 사용한 매개변수는 Table 2와 같다. 유량을 보정한 결과 R^2는 0.87, %Diff.는 3.6, NSE는 0.74로 산정되었다. 모형을 검증한 결과 R^2는 0.78, %Diff.는 30.2, NSE는 0.77로 산정되었다(Fig. 7～10). Donigian(2000)의 기준으로 보정시 R^2와 %Diff. 모두 '좋음'으로 이상으로 나타났고, 검증시 R^2는 '좋음'으로 나타났으나 %Diff '나쁨'으로 나타

Table 2. Flow calibration parameter

parameter	range	use
LZSN	0.01～100	4-6.5
INFILT	0.0001～100	0.3
DEEPFR	0.0～1.0	0.1
BASETP	0.0～1.0	0.02
CEPSC	0.0～10.0	0.1
UZSN	0.01～10	1.128
NSUR	0.0001～1.0	0.2
INTFW	0.0～	1.0
IRC	0.0～0.99	0.99
LZETP	0.0～1.5	0.5

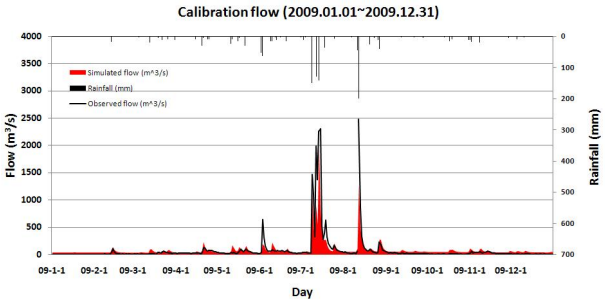

Fig. 7. Comparisons between simulated and observed flow ('09.01～'09.12).

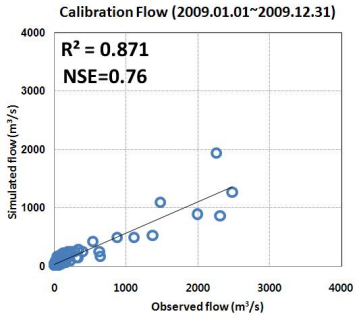

Fig. 8. Result of calibrated flow ('09.01～'09.12).

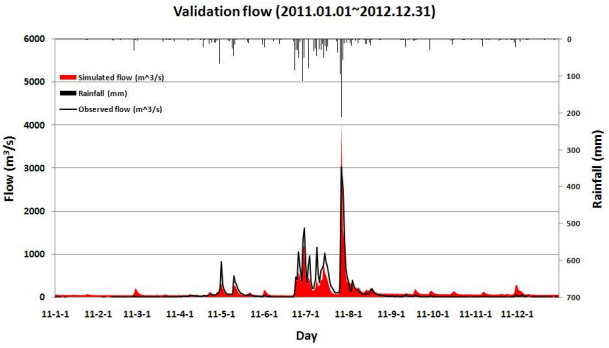

Fig. 9. Comparisons between simulated and observed flow ('11.01～'11.12).

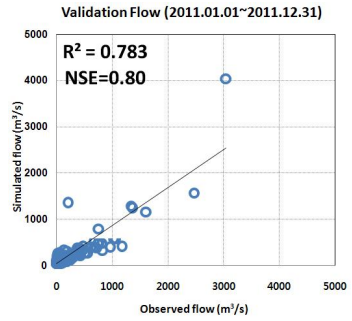

Fig. 10. Result of validated flow ('11.01～'11.12).

나, WinHSPF 모형의 유량 적용성 평가 결과 실측 유량을 적절히 반영할 수 있는 것으로 판단되었다.

3.1.2. SS 보정 및 검증 결과

WinHSPF 모형에서 SS 보정시 사용한 매개변수는 Table 3과 같다. 모형을 보정한 결과 R^2는 0.78, %Diff.는 16.1, NSE는 0.70으로 산정되었다. 모형을 검증한 결과 R^2는 0.67, %Diff.는 5.0, NSE는 0.63으로 산정되었다(Fig. 11~14). Dnigian(2000)의 기준으로 SS 보정시 R^2는 '좋음', %Diff.는 '매우 좋음'으로 나타났으며, 검증시 R^2는 '보통', %Diff.는 '매우 좋음'으로 나타나, WinHSPF 모형이 SS 산정시 실측치를 적절히 반영할 수 있는 것으로 판단되었다.

Table 3. SS calibration parameter

parameter	range	use
KRER	0.0~	0.1
AFFIX	0.0~1.0	0.002~0.01
DET	0.0~	0.02
JRER	0.0~	0.1
JSER	0.0~	1
KGER	0.0~	0
JGER	0.0~	1
KSAND	0.0~	3.4
EXPSND	0.0~	1.5

3.2. CE-QUAL-W2 모형의 적용성 평가 결과

CE-QUAL-W2 모형의 적용성 평가를 위하여 수위 보정 및 검증시 한국수자원공사에서 측정하고 WAMIS에서 제공하는 소양호 수위자료를 이용하였으며, SS 및 수위 보정 및 검증시 한강물환경연구소(2011)에서 측정한 자료를 이용하였다. 수위의 보정기간은 2009년 1월부터 2009년 12월까지 이며, 검증기간은 2010년 1월부터 2010년 12월까지 이다. SS의 보정기간은 2009년 1월부터 2009년 12월까지 이며, 검증기간은 2010년 1월부터 2010년 12월까지 이다.

3.2.1. 수위 보정 및 검증 결과

수위 보정시 CE-QUAL-W2에서 제공하는 waterbalance 프로그램을 이용하였다. 수위를 보정한 결과 2009년에는 RMSE가 1.08로 나타났고, 수위를 검증한 결과 2010년에는 RMSE가 1.86으로 나타났다(Fig. 15, 16).

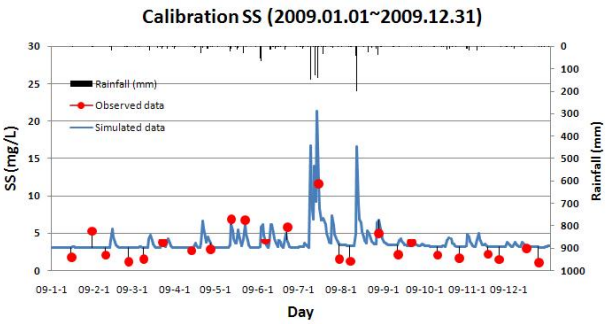

Fig. 11. Comparisons between simulated and observed SS ('09.01~'09.12).

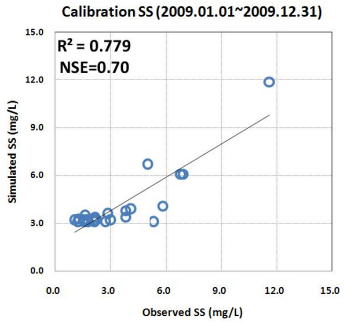

Fig. 12. Result of calibrated SS ('09.01~'09.12).

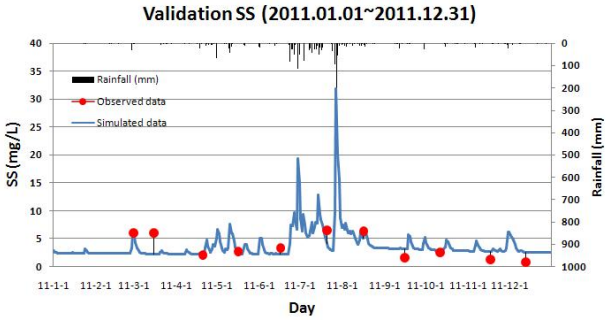

Fig. 13. Comparisons between simulated and observed SS ('11.01~'11.12).

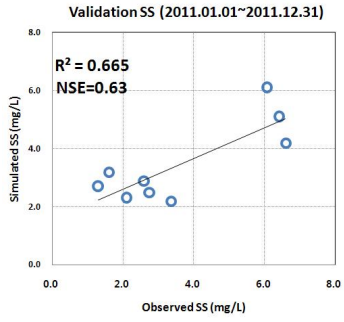

Fig. 14. Result of validated SS ('11.01~'11.12).

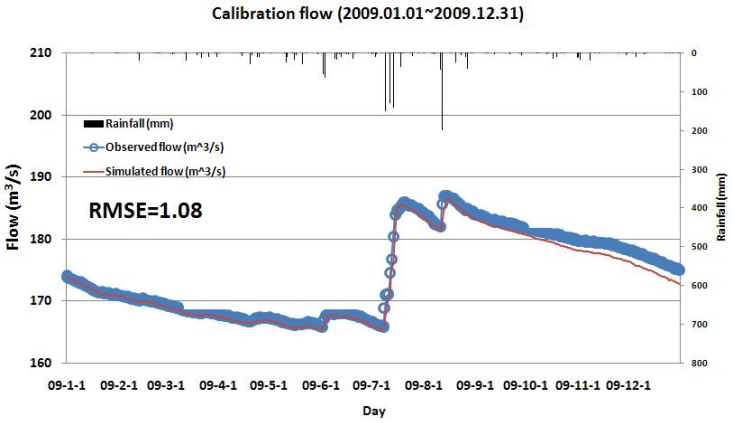

Fig. 15. Calibration water level (outlet of Soyang reservoir).

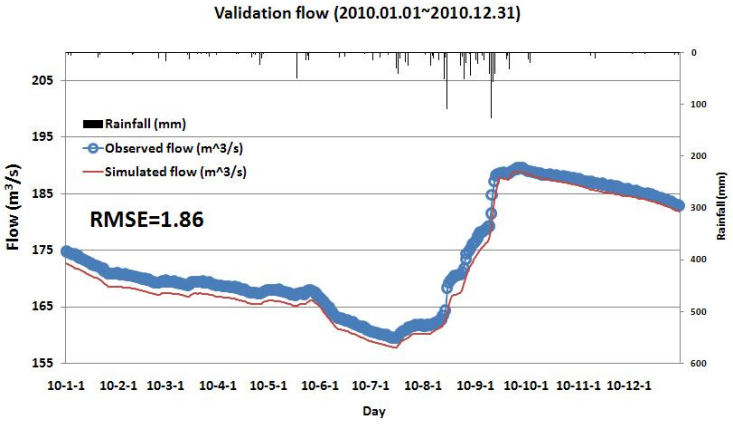

Fig. 16. Validation water level (outlet of Soyang reservoir).

보정 및 검증 결과 CE-QUAL-W2 모형으로 산정된 수위가 실측 수위를 잘 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2.2. 수온 보정 결과

한강물환경연구소(2011)에서 측정한 수심별 수온 자료(소양호 댐 앞)를 이용하여 보정시 이용하였으며, 적용된 매개변수는 표 6과 같다. 2009년 2, 4, 5, 7, 11월에 소양호 댐 앞에서 측정한 수심별 수온과 비교한 결과 R^2가 0.30~0.98로 나타났다(Fig. 17). '09년 2월 25일을 제외한 나머지 결과에서 R^2가 0.90 이상으로 높게 나타났다.

Table 4. Water temperature calibration parameter

parameter	range	use
AX	1	100
DX	1	0.5
FRICT	70	70
BETA	0.45	0.45
EXH2O	0.45	0.45

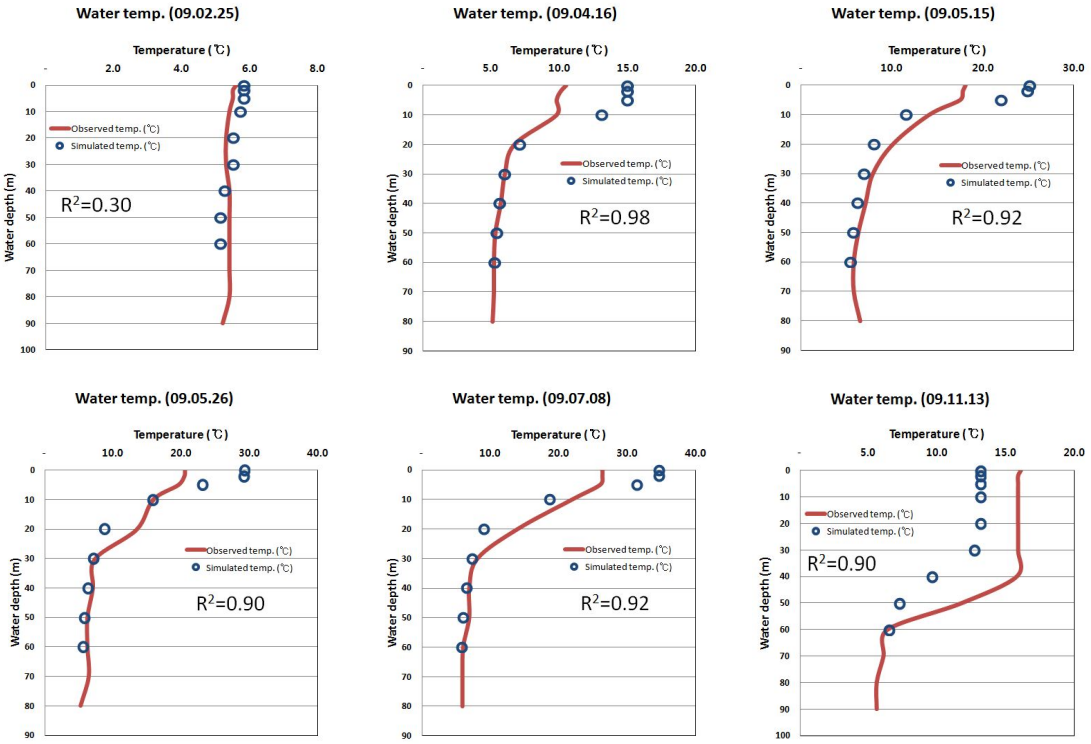

Fig. 17. CE-QUAL-W2 model calibration results of water temperature.

3.2.3. SS 보정 결과

한강물환경연구소(2011)에서 측정한 소양호 댐 앞의 수심별 SS 측정자료를 CE-QUAL-W2 모형 보정 시 이용하였으며, 부유물질 침전율을 0.28 m/day로 적용하여 모의하였다. Fig. 18와 19는 표층 SS 보정 후 실측자료와 비교한 그래프이다. '09년 SS 보정결과 RMSE는 1.11로 나타났으며, '10년 SS 보정결과 1.86으로 나타났다. '09년 수심별 SS를 보정한 결과 R^2가 0.42~0.67로 나타났다(Fig. 20).

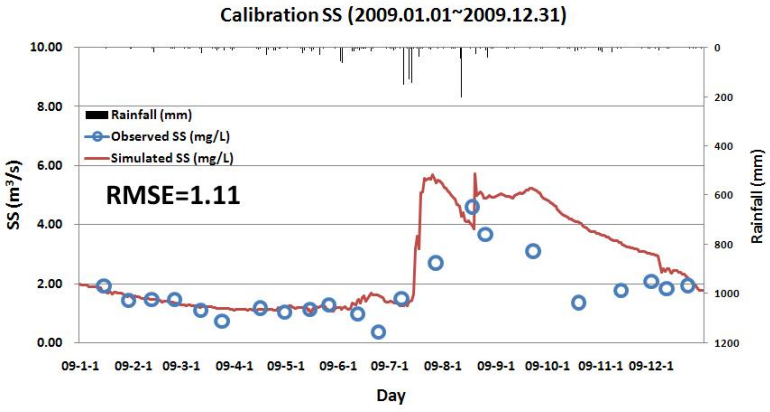

Fig. 18. SS calibration result (outlet of Soyang reservoir).

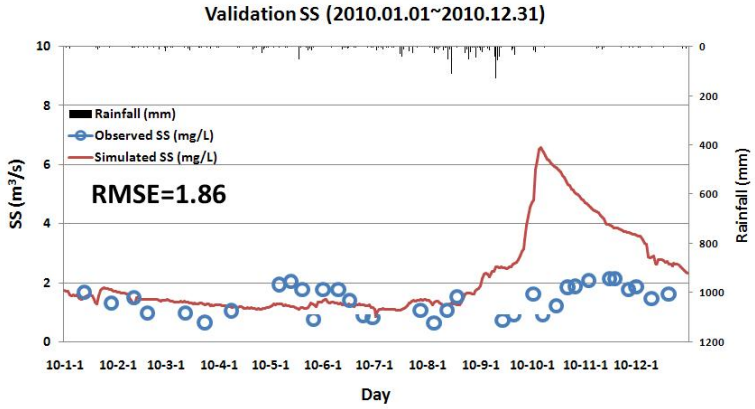

Fig. 19. SS validation result (outlet of Soyang reservoir).

3.3. 목표수질 달성도 평가 결과

본 연구에서는 WinHSPF와 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 비점오염원 관리지역(소양호)의 시행계획 이행에 따른 관리목표(최고 탁도 50 NTU) 달성도를 평가하였다. 평가시 한강물환경연구소(2011)에서 측정한 SS와 탁도의 상관관계를 이용하여 모형결과(SS)를 환산하여 이용하였다. SS-탁도의 상관관계 분석결과 유입수의 경우 R^2가 0.63, 소양호 댐 앞이 0.91로 나타났다(Fig. 21, 22).

'09년 소양호 댐 앞 표층의 연평균 탁도는 3.1 NTU, '10년 연평균 탁도는 2.5 NTU, '11년 연평균 탁도는 5.6 NTU로 나타났으며, 연중 최고 탁도를 평가한 결과 '09년에는 7.8 NTU, '10년에는 9.0 NTU, '11년에는 11.7 NTU로 나타나 목표수질을 모두 초과하

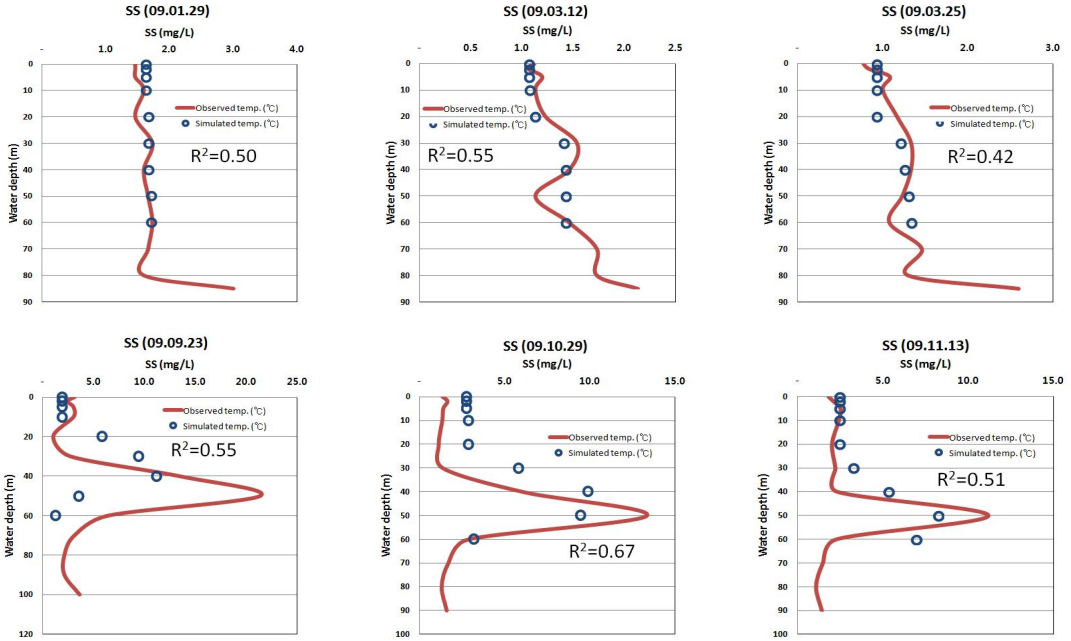

Fig. 20. CE-QUAL-W2 model calibration results of SS (outlet of Soyang reservoir).

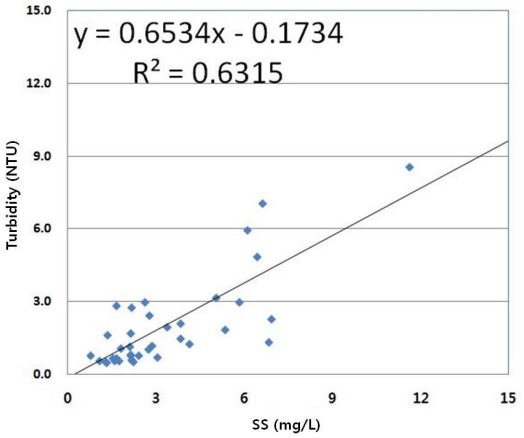

Fig. 21. Turbidity-SS conversion formula(inflow of Soyang reservoir).

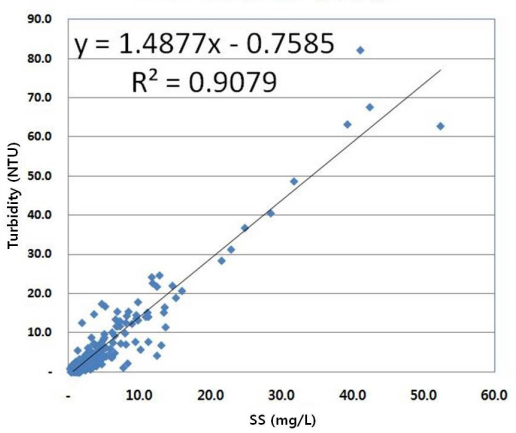

Fig. 22. Turbidity-SS conversion formula(outlet of Soyang reservoir).

지 않은 것으로 나타났다. (Table 5, Fig. 23).

탁도 강우량에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 연도별로 목표수질 달성도를 평가하기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 최대・최소・평균 연강우량 조건에 따른 유입량, 유입 탁도, 호 내 평균 및 최고 탁도를 모의하여 목표수질 달성도를 평가하였다. Fig. 32는 CE-QUAL-W2를 이용하여 소양호 내 탁도를 모의한 것이다. 평균 연강우량(2007년) 조건에서 호내 평균 탁도는 4.4 NTU, 최고 탁도는 11.7 NTU로 나타났다. 최소(2008년)・최대(1998년) 연강우량 조건에서 호 내 평균 탁도는 각각 2.5, 5.2 NTU이며, 최고 탁도는 각각 4.8, 15.5 NTU로 나타났다(Table 6). 모든 조건에서 목표수질을 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 목표수질 초과일수 또한 없는 것으로 나타났다.

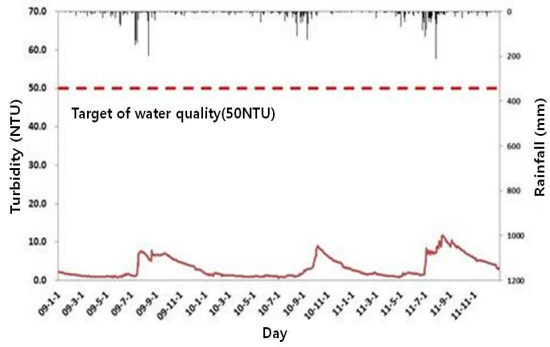

Fig. 23. Assessing of the turbidity at the outlet of the Soyang reservoir in 2009.

Table 5. Results of modeling by year

Rainfall condition	Avg. inflow (m^3/s)	Avg. inflow turbidity(NTU)	Avg. turbidity in reservoir(NTU)	Max. turbidity in reservoir(NTU)	Exceeding days
2009	75.4	5.1	3.1	7.8	0
2010	74.7	4.4	2.5	9.0	0
2011	105.7	4.9	5.6	15.5	0

Table 6. Simulated results for different precipitation conditions(2007, 1988, and 2011)

Rainfall condition	Avg. inflow (m^3/s)	Avg. inflow turbidity(NTU)	Avg. turbidity in reservoir(NTU)	Max. turbidity in reservoir(NTU)	Exceeding days
Ave.(2007)	95.8	1.9	4.4	11.7	0
Min(1988)	77.4	1.6	1.8	4.8	0
Max(2011)	105.7	4.9	5.6	15.5	0

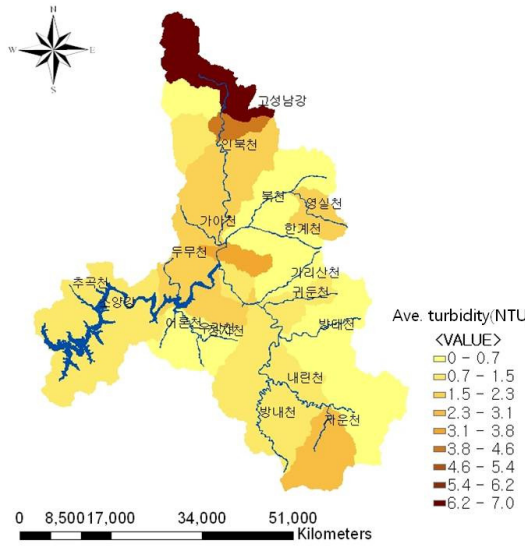

Fig. 24. Average turbidity by watershed(2009～2011).

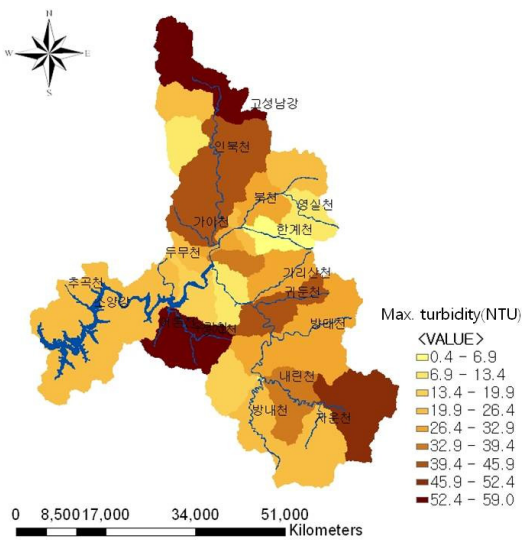

Fig. 25. Maximum turbidity by watershed(2009～2011).

3.4. 소유역별 탁도 발생 분석 및 시행계획 타당성 검토

본 연구에서는 소유역별 3년 평균 및 최대 탁도를 산정하여 시행계획 타당성을 검토하고, 향후 비점오염원 저감사업이 집중적으로 투자되어야할 지역을 선정하였다. 현재까지 소양호 비점오염원 저감사업의 일환으로 저감시설투자가 양구군 해안면, 홍천군 자운리, 인제군 가아리에 집중되었다. 소유역별 3년 평균 탁도를 분석한 결과 인북천, 가아천, 자운천 유역에서 탁도가 높게 발생되었으며(Fig. 24), 최고 탁도를 분석한 결과 인북천, 가아천, 내린천, 귀둔천, 우각천, 정자천 유역에서 탁도가 높게 발생되는 것으로 나타났다(Fig. 25). 소양호 비점오염원 관리지역의 관리목표가 최고 탁도 기준이므로, 최고 탁도 발생이 높은 지역을 중심으로 집중 투자할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 비점오염원관리지역(소양호)의 시행계획 이행에 따른 목표수질 달성여부를 평가 및 향후 추진방향을 제시하는 것이며, 본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 연구대상지역인 소양호 유역을 WinHSPF와 CE-QUAL-W2를 이용하여 적용성 평가를 수행하였다. 먼저 WinHSPF의 유출량 보정시 R^2와 %Diff.는 각각 0.87, 3.6, 검증시 R^2와 %Diff.는 각각 0.78, 30.2로 평가되었다. SS 보정시 R^2와 %Diff.는 각각 0.78, 16.1로 나타났으며, 검증시 R^2와 %Diff.는 각각 0.67, 5.0으로 평가되었다. CE-QUAL-W2의 수위 보정 및 검증시 RMSE는 각각 1.08, 1.86으로 평가되었으며, SS 보정 및 검증시 RMSE는 각각 1.11, 1.86으로 평가되었다. WinHSPF와 CE-QUAL-W2 모형의 적용성 평가 결과 모형이 소양호 유역을 적절히 평가할 수 있는 것으로 판단되었다.

2. 비점오염원관리지역(소양호)의 목표수질(탁도 50 NTU) 달성도를 평가한 결과, '09, '10, '11년 소양호 댐 앞의 연평균 탁도는 각각 3.1, 2.5, 5.6 NTU(실측 탁도:1.8, 1.4, 1.4 NTU)로 나타났고, 최고 탁도는 각각 7.8, 9.0, 15.5 NTU(실측 탁도:4.6, 2.2, 3.2 NTU)로 나타나 목표수질을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

3. 탁도 강우에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 매년 목표수질 달성도를 평가하는데 어려움이 있으므로, 소양호 유역의 최근 30년간('82～'11) 최대('11년) · 최소('88년) · 평균('07년) 연강우량 발생 조건에

서 목표수질 달성도를 평가하였다. 최대・최소・평균 연강우량 조건에서 소양호 댐 앞의 최고 탁도는 각각 15.5, 4.8, 11.7 NTU로 나타나 목표수질을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 최대 연강수량 조건에서도 목표수질(50 NTU)을 달성하는 것으로 나타나, 비점관리지역(소양호)의 관리목표 및 관리지점을 재검토할 필요가 있다.

4. 소양호 소유역의 3년 평균 탁도를 분석한 결과 인북천, 가아천, 자운천 유역에서 탁도가 높게 발생되었으며, 최고 탁도를 분석한 결과 인북천, 가아천, 내린천, 귀둔천, 우각천, 정자천 유역에서 탁도가 높게 발생되는 것으로 예측되었다. 탁수발생원에서 소양강댐까지 유하하는 과정에서 오염도가 감소하여 현재 목표수질 설정 지점은 수질이 양호하나, 고랭지밭 직하류에는 고농도 탁수 등으로 수생생물 서식처가 불량하므로 관리지역을 축소・조정하여 고탁수 발생 지역을 집중 관리할 필요가 있다.

참 고 문 헌

Gangwondo, 2010, The Action Plans in the Control Area of Non-point Source Pollution(Soyang Lake).

Gangwondo, 2011, The performing Report of the Action Plans in the Control Area of Non-point Source Pollution(Soyang Lake)

Kim, B. C., Jung, S. M., 2007, Turbid Storm Runoffs in Lake Soyang and Their Environmental Effect, Korean Society of Environmental Engineers, 26(11), 1185-1190.

Kim, Y. H., Kim, B. C., Choi, K. S., Seo, D. I., 2001, Modelling of Thermal Stratification and Transport of Density Flow in Soyang Reservoir Using the 2-D Hydrodynamic Water Quality Model(CE - QUAL – W2), Korean Sociaty of Water and Wastewater, 15(1), 40-49.

Yoon, C. G., Shin, A. H., Jung, K. W., Jang, J. H., 2007, A Study on BASINS/WinHSPF for Evaluation of Non-point Source Reduction Efficiency in the Upstream of Nam-Han River Watershed, Journal of Korean Society on Water Quality, 23(6), 951-960.

Jeon, J. H., Choi, D. H., Kim, J. J., Kim, T. D., 2009, Evaluating Calibration Methods of Stream Flow for Water Quality Management, Journal of Korean Society on Water Quality, 25(3), 432-440.

Chung, S. W., 2004, Density Flow Regime of Turbidity Current into a Stratified Reservoir and Vertical Two-dimensional Modeling. Korean Society of Environmental Engineers, 26(90), 970-978.

Chung, S. W., 2007, Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation, Journal of Korean Society on Water Quality, 23(1), 52-63.

Han River Environment Research Center, 2011, Assessing monitoring in in the Control Area of Non-point Source Pollution(Ⅲ).

Albek, M., Qgutveren, U. B., Albek, E., 2004, Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed(Turkey) with HSPF, J. of Hydrology, 285, 260-270.

Anthony, S. D., Wayne, C. H., Thomas, O. B., 1991, Modeling of nonpoint source water quality in urban and non-urban areas, EPA Publication No.600/3-91-039, Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.

ASCE, 1993, ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models. Irrigation Drainage Engineering, 119(3), 429-442.

Bergman, M. J., Green, W., Donnangelo, L. J., 2002, Calibration of storm loads in the South Prong watershed, Florida, using BASINS/HSPF, J. of American Water Resources Association, 38(5), 1423-1436.

Bicnell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Jr., Donigian, A. S. Jr., Johanson, R. C., 1997, Hydrological Simulation Program-Fortran, user's manual for version 11, USEPA Publication No.600-R-97-080, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.

Brun, S. E. Band, L. E., 2000, Simulating runoff behavior in an uranizing watershed, Computers, Environment and Urban Systems, 24(1), 5-22.

Choi, W., Deal, B. M., 2008, Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kiswaukee River basin (USA), J. of Environmental Management, 88(4), 1119-1130.

Cho, J., Barone, V. A., Mostaghimi, S., 2009, Simulation

of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a virginia watershed, Agricultural Water Management, 96, 1-11.

Cole, T. M. Tilman, D. H., 1999, Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, U.S. Army Engineer Publication No.EL-99-1, Louisville District, Louisville, Kentucky.

Chung, S. W., Gu, R., 1998, Two dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir, J. Hydrology Engineering, 124(7), 704-711.

Donigian, Jr., A. S., 2000, HSPT Training Workshop Handbook and CD. Lecture ＃19, Calibration and Verification Issues, Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.

Donigian, Jr. A. S., Chinnaswamy, R. V., Jobes, T. H., 1997, Conceptual Design of Multipurpose Detention Facilities for Flood Protecrion and Nonpoint Source Pollution Control, AQUA TERRA Consultants, Califomia, 158.

Hunter, H. M., Walton, R. S., 2008, Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia, J. of hydrology, 356(1-2), 131-146.

Luo, B., Li, J. B., Huang, G. H., Li, H, J., 2006, A simulation-based interval two-stage stochastic model for agricyltural nonpoint source pollution control through land retirement, Science of The Total Environment, 361(1-3), 38-56.

Nash J.E. Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part Ⅰ: Adiscussion of princples, J. of Hydrology, 10, 282-290.

Ribarova, I., Ninov, P., Cooper, D., 2008, Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria, Ecological Modeling 211(1-2), 241-246.

Sullivan, A. B., Rounds, S. A., Sobieszczyk, S., Bragg, H. M., 2007, Modeling hydrodynamics, water temperature, and suspended sediment in Detroit Lake, Oregon, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5008, VA, USA.