

유역유출 변화에 따른 도암댐 저수지 수질 영향 예측

노희진* · 김정민** · 김영도*** · 강부식****

Noh, Hee Jin*, Kim, Jung Min**, Kim, Young Do***, Kang, Boo sik****

Prediction of Water Quality Effect of Watershed Runoff Change in Doam Reservoir

ABSTRACT

In this research, the integrated modeling system by coupling of a watershed model, a reservoir model, and a river model has been constructed in Doam reservoir watershed. Because of domestic climate characteristics, it is inevitable to construct the dam for control of flood, water use, and power production due to the heavy rain in the summer. Especially, when the dam is constructed on the stream for these kinds of purpose, it is necessary to consider this region as one watershed and also to make the integrated system for simulation and management. In this study, SWAT model was constructed for watershed modeling and EFDC-WASP model was constructed for simulating the hydrodynamic and water quality of the reservoir and the downstream in Doam dam watershed. Also, the water quality improvement equipment for demonstration was applied in the upstream part of Doam reservoir, which shows the applicability of the developed integrated modeling system.

Key words : Doam dam watershed, SWAT, EFDC, WASP, Integrated modeling system

초 록

본 연구에서는 도암댐 유역을 대상으로 유역모형과 호소 및 하천모형의 연계를 통해 통합모델링시스템을 구축하였다. 국내 기후 특성상 하절기에 집중되는 강우로 인해 댐의 건설은 홍수조절, 용수 확보 및 전력생산 등의 목적에 있어서 불가피하다. 특히 이러한 목적의 댐 형태가 하천과 하천 사이에 위치할 경우에는 연계된 구간을 하나의 유역으로 보고 이를 통합적으로 모의 및 관리 할 수 있는 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 도암댐 유역을 대상으로 유역모형인 SWAT 모형을 구축하고 저수지 및 하천의 수리 및 수질 모의를 위해 EFDC-WASP 모형을 구축하였다. 또한 현재 도암댐 상부에서 시범가동 중인 수질개선장치 효율이 반영된 시나리오를 모의하여 통합모델링시스템의 적용성을 검토하였다.

검색어 : 도암댐 유역, SWAT, EFDC, WASP, 통합모델링시스템

1. 서론

유역이란 강우 시 지표면유출수가 동일 수계(하천, 호수 등)로 집수되는 영역을 말하며, 집수되는 물은 유역 내 산림, 농경지, 목축지, 주거지 등을 거치면서 각 지역의 오염물질을 포함하게 된다(HRBEO, 2005). 이는 물 관리에 있어서 유역이 기본적인 관리단위가 될 수 있음을 의미하며 유역관리란 단순히 수질 또는 수량을 다루는 물 관리 개념이 아니라 유역 내 자연자원과 수자원간의 상호작용에

* 인제대학교 환경공학과 박사과정 (nhj1226@lycos.co.kr)

** 인제대학교 환경공학과 박사과정 (nccaa@paran.com)

*** 정회원 · 교신저자 · 인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경센터) 조교수 (Corresponding Author · Assistant Prof., Department of Environmental Engineering (NRERC), Inje University · ydkim@inje.ac.kr)

**** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (bskang@dankook.ac.kr)

Received January 12 2013, Revised February 12 2013, Accepted April 4 2013

대해 고려하여 관리하는 통합관리체계 개념을 포괄 한다(Kim et al., 2005). 유역은 여러 가지 요소를 포함하고 있지만 특히 유역관리의 수질모의 및 예측을 위해서는 댐 자체의 수질뿐만 아니라 하류 하천의 수질 영향도 고려하여야 한다. 본 연구의 대상 지역과 같이 농업활동이 활발하거나 레포츠 관광 사업이 발달한 곳은 유역 내의 토지이용, 오염원 현황 및 분포 등 오염물질의 거동을 파악하여 저수지 및 하류 하천의 장래 수질 영향에 대해 예측할 수 있어야 한다. 댐 하류 하천의 경우, 저수지 운영에 따라 하천의 흐름변화가 일어나고 이로 인해 수체의 거동 및 수질 변화가 발생하기 때문에 일반 하천과는 다른 특성을 지니게 된다. 또한 수심이 깊은 저수지의 경우 흐름 방향과 더불어 수심 방향의 특성도 중요하기 때문에 기존에 알려진 1차원, 2차원 모형이 아닌 수리 및 수질 모형의 연계를 통한 3차원적 해석이 필요하다.

국내에서 댐 상류유역의 유출모형으로 자주 사용되는 모형 중의 하나가 SWAT 모형이다. Kim et al. (2008)은 충주댐 유역의 유출곡선지수를 산정하는 방안을 검토하였으며, Jeong et al. (2008)은 기후인자 변화에 따른 대청댐유역의 유출민감도에 대한 평가를 연구하였으며, Shin et al. (2007)은 유역 내 댐방류 및 인위적인 물이용 요소를 고려한 물수지 시나리오에 따른 하천유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 등 SWAT 모형을 이용한 유출해석이 다양하게 적용되고 있다. 저수지의 3차원 해석을 위한 모형으로는 EFDC 모형과 WASP 모형이 자주 사용되고 있다. Jeong (2010)은 남강댐 유역을 대상으로 수리모형(EFDC)과 저수지 수체를 고려한 수질모형(WASP)을 연계하여 3차원 모의를 실시하였다. Jeong (2007)은 한강유역 전체를 유역모형인 HSPF와 수질모형인 EFDC를 적용하여 수문 및 수질 모의를 합리적으로 실시하면서 시공간적인 수리-수질변화를 평가하고자 하였으며, Park et al. (2010)은 유역모형인 HSPF와 수질모형을 연동하였으며 이때 수질모형은 저수지 유동해석을 위해 EFDC를 사용하였고 WASP 모형을 사용하여 댐유역의 수질변화를 분석하였다. 최근의 연구 동향을 살펴보면, 큰 수체에서의 연구는 활발히 진행되고 있으나 도암댐 유역과 같이 작은 수체에서의 적용사례는 없었다. 특히 운영이 중단된 도암댐의 수질 문제가 하천환경에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 대상 유역에 대한 유역-호소하천의 통합 모형 구축이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 도암댐 유역의 통합모델링시스템을 구축하기 위하여 유역모형, 호소모형, 하천모형을 연계하였으며, 호소 및 하천은 유량변화에 따른 수질영향을 통합적으로 해석하기 위해 수리모형과 수질모형을 연계하였다. 상류유역은 유역모형인 SWAT을 이용하고, 이 결과를 호소 부분의 유입 경계조건으로 적용하여 호소의 수리 및 수질모형인 EFDC-WASP의 연계를 통해 통합모델링시스템을 구축하였다. 또한 호소모형에서의 모의

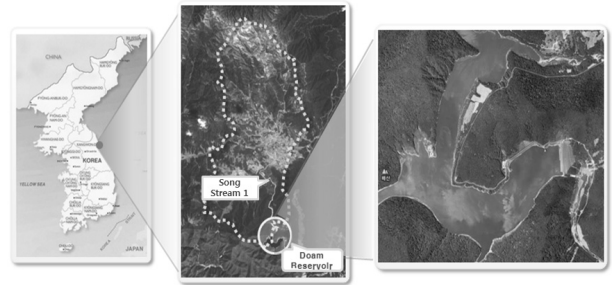


Fig. 1. Doam Reservoir Watershed

결과를 하류하천의 유입 경계조건으로 적용하여 호소모형과 하천모형을 연계하였다. 기상자료는 대관령 기상대 자료(2004~2009년)를 사용하였으며, 도암댐 유역 내 위치한 환경부 수질측정망 자료를 이용하여 모형의 검보정을 수행하였다. 또한 수질개선 장치의 적합성을 검토하기 위해 효율에 따른 시나리오를 반영하여 저수지 및 하류하천의 수질 영향을 예측하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역 현황 및 자료 분석

본 연구 대상 지역인 도암댐 유역은 행정구역상 강원도 평창군 대관령면에 속하며 유역의 면적은 149.42 km²이고, 유로연장은 22.72 km이다(Fig. 1 참조). 본류는 송천이고 지류인 차항천, 대관령천, 그리고 용평천을 포함하고 있다. 산림과 농업활동 지역이 토지 이용의 많은 비율을 차지하고 있는 도암댐 유역은 경사가 심한 지리적 특성을 가지고 있는 고랭지 밭, 공사부지 등의 토사 유출의 피해를 최소화 하도록 지속적인 관리가 필요한 실정이다. 도암호 유역 내 위치한 도암댐은 1989년 8월 강릉수력발전소의 수력발전을 위해 경사 코아형 석괴댐으로 건설되었다(KWF, 2011). 하지만 발전 지역인 강릉시 남대천에서 수질 오염 문제가 야기되어 2001년부터 현재까지 발전방류가 중단된 상태이며 중단된 이후부터 송천의 하류 구간으로 자연 방류 중이다. Fig. 2는 도암댐의 수문자료를 분석한 결과로서 도암댐 유역과 가장 밀접한 대관령 기상대의 2009년 기상 자료를 이용하였다. 도암댐의 경우 홍수조절 효과가 미미하여 강우가 집중되는 하절기에 유입량과 방류량이 유사한 형태로 증가하는 것을 확인 할 수 있으며 집중호우와 같은 특정 기간을 제외하고는 EL. 695 m의 수위를 유지하는 것으로 나타났다(KWF, 2011).

도암댐 유역의 과거 10년(2000년~2009년) 동안의 수질자료를 분석하였다. 환경부 수질측정망 내 도암댐 상류에 위치한 송천1 지점과 하류에 위치한 송천2 지점의 자료를 이용하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. BOD, T-N, T-P의 경우, 상류의 송천1 지점에서는

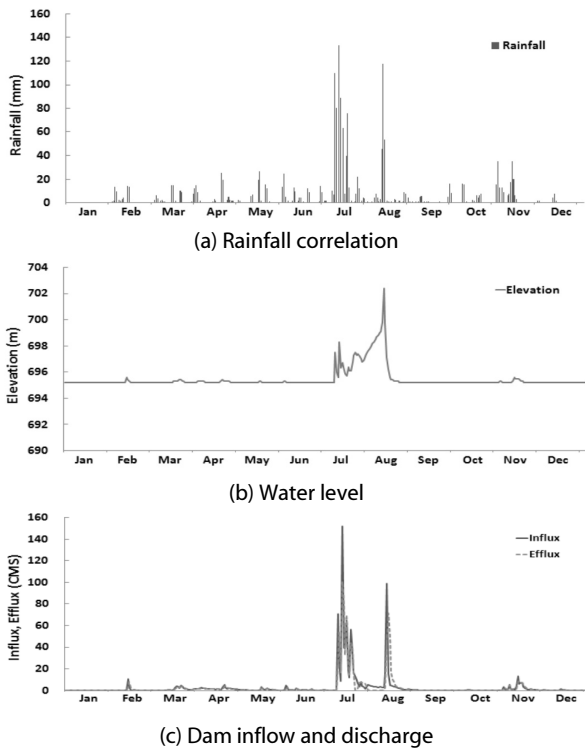


Fig. 2. Hydrological Data of Doam Reservoir Watershed

수질이 나빠지는 경향을 보였으나 하류의 송천2 지점에서는 미세하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 송천1과 송천2 사이에 위치하는 도암댐이 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 SS의 경우, 상류 송천1 지점에서 최대 441 mg/L의 고탁수가 하절기에 발생하는데 이는 유역 내 존재하는 고령지 발뿐만 아니라 관광지 조성에 따른 공사장 등에 의한 토사유출이 가장 큰 원인으로 판단된다. 도암댐 저수지로 고탁수가 유입되는 경우 장기간 하류하천으로 탁수가 방류되므로 유역의 토사유출을 포함한 통합모델링시스템을 통한 정확한 수질영향 예측이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 도암댐 유역을 대상유역으로 선정하여 KWF(2011)에서 구축한 각각의 모형들을 보완하여 유역모형, 호소모형, 하천모형을 연계한 통합모델링시스템을 구축하였다.

2.2 SWAT 모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농업연 구소(USDA)에서 개발된 유역모형으로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다(Arnold et al., 1998). Fig. 4는 SWAT 모형의 구성을 간략하게 정리한 개념도이다. SWAT 모형

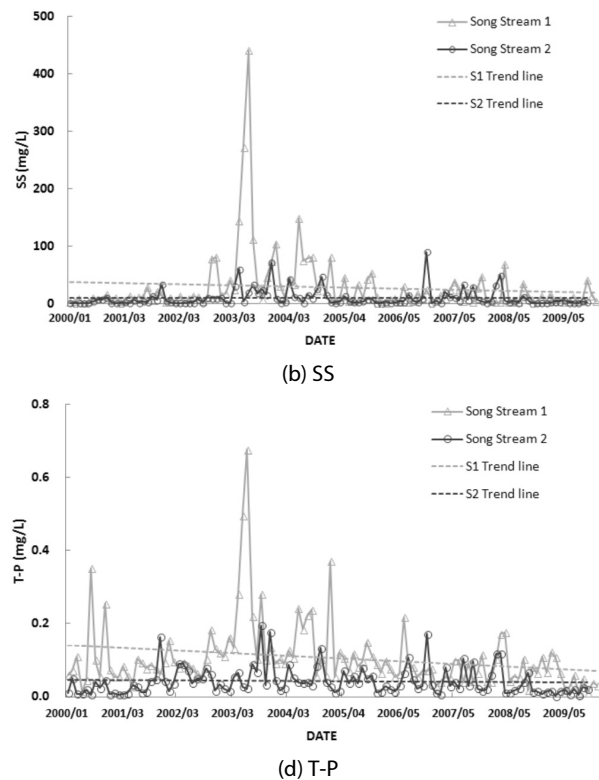
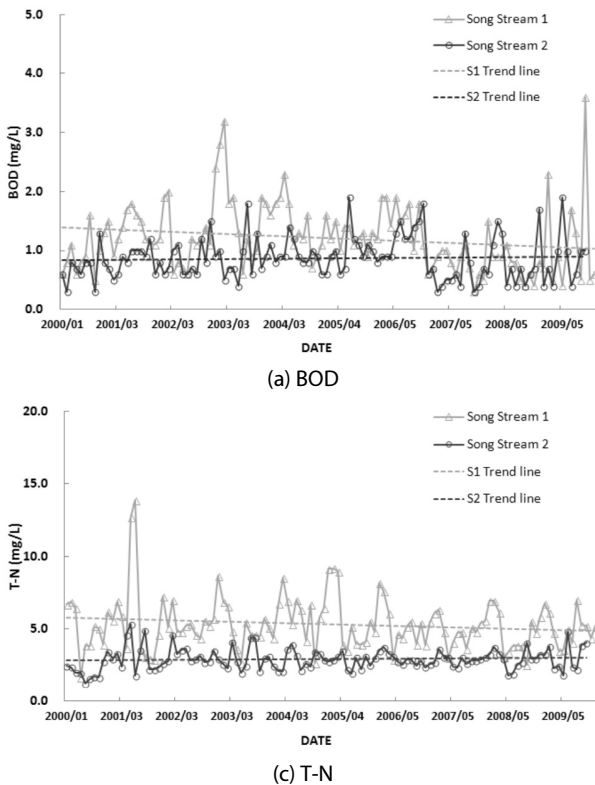


Fig. 3. Observed Data of Water Quality in Doam Reservoir Watershed

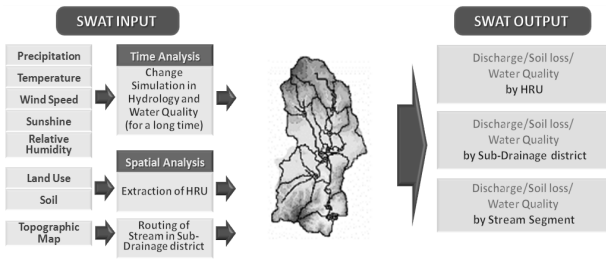
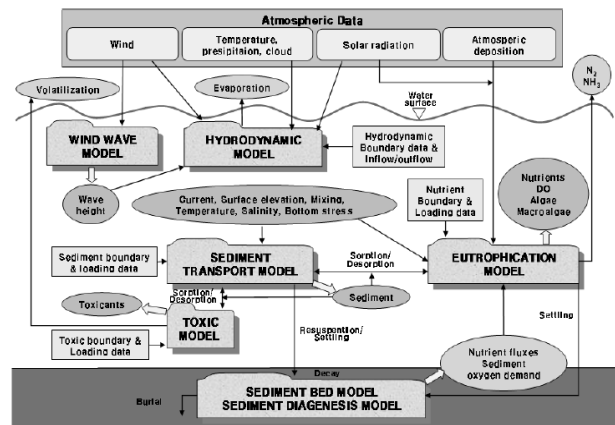


Fig. 4. Diagram of SWAT

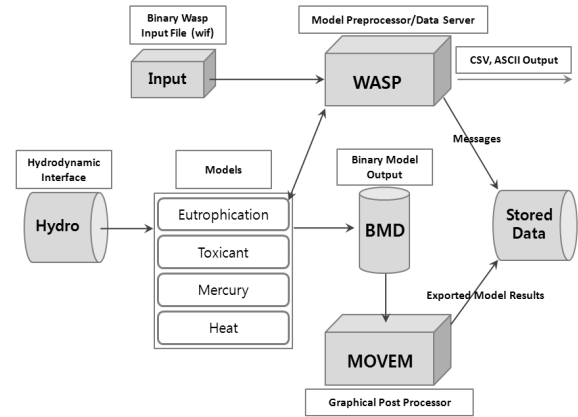
은 유역의 서로 다른 표면특성을 반영할 수 있도록 대상유역을 몇 개의 소유역으로 나누고 소유역 내에서 유사한 특성을 나타내는 수문반응단위(HRU: Hydrologic Response Unit)로 세분화한다 (Kim, 2007). 전체적인 모의는 유역부분과 수체 부분으로 나누어 실시된다. 유역에서는 각 수문반응단위에서 물수지식에 따라 강우량, 지하수로의 침투량, 증발산량 및 표면 유출량을 산정한다. 토양 침식은 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)에 의해 계산되며, 인, 질소, 살충제 등의 유기성 화학물질의 이동량을 모의할 수 있다. 수체는 하천과 저수지를 나타내며 유량, 퇴적물, 영양염류 및 유기화학물질의 반응 등이 고려된다(Lee et al., 2012). 또한 SWAT모형의 입력 자료는 GIS를 통해 자동으로 구성되는 유역자료, 토양자료 등과 기상, 하도추적, 농업관리 등의 자료로 구성된다. 출력자료는 유역 경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과로 표출된다.

2.3 EFDC-WASP 모형의 개요

EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형은 초기에 하구 및 해양에서의 적용을 위해 버지니아 해양과학연구소(VIMS)에서 개발되었다. EFDC 모형은 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다(Choi et al., 2012). 특히 EFDC 모형의 유동 모의에 있어서 댐 또는 암거 등의 수리구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얇은 수체에 대한 찌꺼기 현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서 유동 모의가 가능하다. EFDC 모형은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 Hydrodynamics, Water Quality, Sediment Transport, Toxic 등의 모듈로 구성되며, Hydrodynamics 모듈의 모의 결과인 수심, 유속, 혼합 등의 자료들은 수질모의, 부유사 이동, 독성 물질 모의를 위한 입력 자료로 사용된다(Seo and Kim, 2011). EFDC 모형은 내부의 수질 모듈 외에도 WASP 모형과 연계가 가능하도록 소구간의 구성 유동 및 확산에 관한 입력 자료를 제공한다. 본 연구에서는 3차원 수리 해석을 위해 Hydrodynamics 모듈을 사용하였고 EFDC-Hydro 버전을 이용하여 WASP 모형과 연계하였다.



(a) EFDC (Hur and Park, 2009)



(b) WASP (Seo and Kim, 2011)

Fig. 5. Conceptual Diagram of EFDC and WASP

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 모형은 USEPA에서 개발한 모형으로 하천, 저수지, 하구, 해안 등 광범위한 수체에서의 수질문제를 해결하는데 이용될 수 있는 동역학적 수질해석 모형이다. WASP 모형은 질량보존의 원리에 기초를 두고 있으며 시·공간적으로 각 수질 변수를 추적하게 된다. WASP 모형은 크게 부영양화를 모의할 수 있는 EUTRO 모듈과 독성물질에 대한 모의가 가능한 TOXIC 모듈로 구분할 수 있다. 본 연구에서 사용될 EUTRO 모듈에서는 총 8개의 수질 항목(NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, DO, CBOD, Chl-a, Organic-N, Organic-P)에 대한 모의가 가능하다(Jeong, 2010). 수체 내의 수질항목에 대한 물질수지식은 확산, 유동, 생화학적 변환, 외부로부터의 부하 등이 고려되어진다(Fig. 5 참조).

2.4 모형의 연계

본 연구는 수계단위의 탁수예방 기본계획 보고서(MLTM, 2010)를 바탕으로 도암댐 유역 통합모델링시스템을 구축하였으며 모형 적용을 위한 모식도는 Fig. 6과 같다. 유역모의는 유역으로부터

터 유출되는 비점오염원을 해석하기 위해 기상요소, 지형특성정보, 수문특성, 오염원자료 등을 고려할 수 있는 SWAT 모형을 이용하였다(KWF, 2011). 호소 및 하천모형(EFDC-WASP)은 EFDC 모형을 이용하여 저수지와 하류하천 구간의 유동해석을 하였고 수질예측을 위해 WASP 모형을 연계하여 사용하였다(KWF,

2011). SWAT 모형을 이용하여 도암댐 유역에서 유출되는 유량 및 수질(BOD, T-N, T-P, SS 등)을 모의하였고, 이 결과를 이용하여 유량결과는 저수지의 수리모의를 위해, 수질결과는 저수지의 수질 모의를 위한 경계조건으로 입력하였다. 또한 저수지의 모의 결과는 하류하천 구간의 경계조건으로 동일한 방법으로 적용하였다. 또한 현재 연구대상지역에 설치되어 시범 운영되고 있는 수질개선편장치를 이용하여 시나리오 모의를 진행하였다.

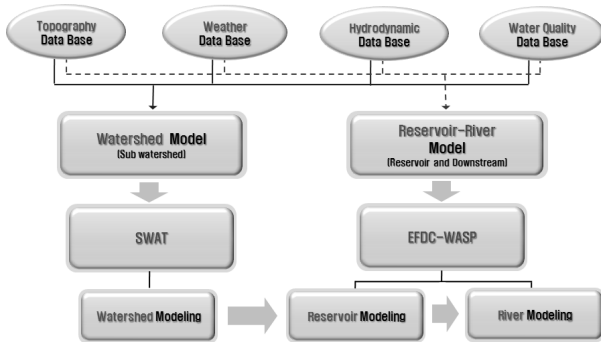


Fig. 6. Model Application Diagram

2.5 입력자료의 구축

본 연구에서는 SWAT 모형의 모의를 위해 강우, 풍속, 기온, 상대습도, 그리고 일사량 자료를 사용하였다. 강우자료는 SWAT 모형에서 유출 및 수문곡선에 큰 영향을 미치는 중요한 입력 자료로서 본 연구에서는 대상유역과 가장 인접한 대관령기상대 자료를 사용하여 2004년부터 2009년까지의 일별 강우자료를 이용하였다. 그리고 토지이용의 변화에 따른 강우-유출 관계를 해석하기 위해 도암댐 유역의 1:25,000 축척의 수치지도로부터 지형관련 Layer인 7000(주곡선), 7004(계곡선), 7217(표고점), 7311(삼각점)을 추출

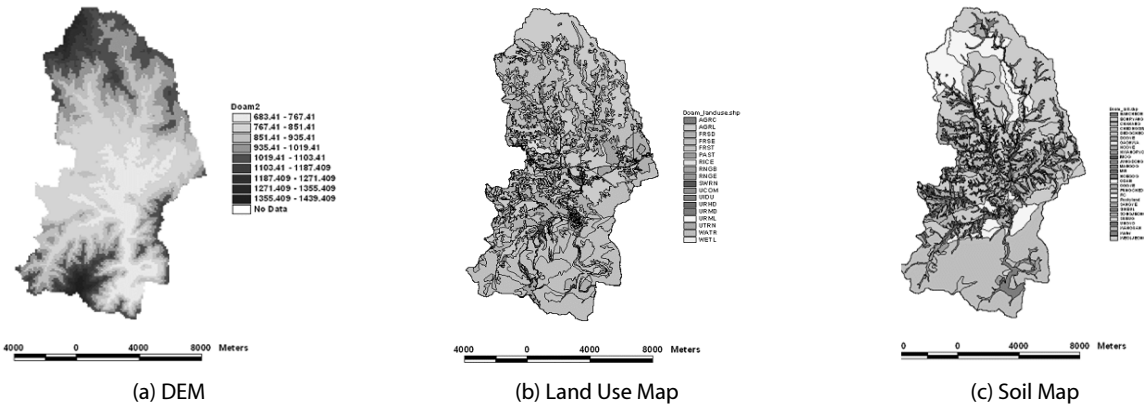


Fig. 7. Topographic Data for SWAT

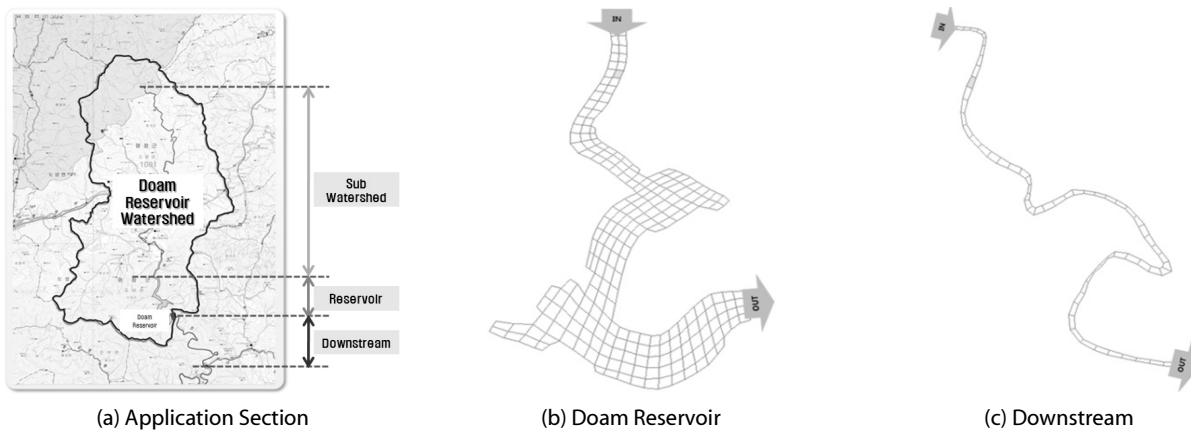


Fig. 8. Grids of Doam Reservoir and Downstream

하고 ARC/INFO를 이용하여 Coverage, TIN, Lattice 변환과정을 거쳐 해당유역의 지형특성, 토양 및 토지이용의 공간적 분포 등을 고려한 공간해상도 30 m × 30 m의 DEM과 하천망을 제작하였다. 또한 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 SWAT 모형의 특성을 반영하기 위해 농촌진흥청에서 제공하는 정밀토양도를 기준으로 유역 내 총 37개의 토양도에 대한 수문학적 토양그룹(A, B, C, D)으로 분류하였으며 토양층의 개수 및 토양층별 깊이를 농업과학기술원의 자료를 이용하여 구축하였다(KWF, 2011).

EFDC-WASP 모형 구축을 위해 1:5000 수치지도를 이용하여 도암댐의 유입지점부터 방류지점까지, 그리고 하류 하천은 댐의 방류부를 유입 지점으로 하여 모의구간을 설정하였다. 격자는 호소구간과 하천구간을 각각 구성하였으며, 도암댐 부분은 수평격자 222개, Layer 3개 층으로 총 666개로 구성하였고, 하류 하천 부분은 수평격자 63개, Layer 1개 층으로 총 63개 격자로 구성하였다(Fig. 8 참조). 호소구간과 하천구간 모두 지류가 포함되어 있지 않으므로 경계조건은 유입, 유출 2개로 지정하여 수리 및 수질모의를 실시하였다(KWF, 2011).

3. 연구결과

3.1 유역모형 모의 결과

유역유출모의를 위해 3개의 지류(차항천, 대관령천, 용평천)를 포함하는 본류(송천)를 중심으로 소유역을 구성하였으며, 유역 모형의 민감도 분석을 실시한 후 시행착오법을 이용하여 보정하였다. 특히, 유출량의 경우 기저유출은 GW_DELAY를 이용하여 최대한 오차를 줄이려고 했으며, 지표유출의 경우 SOL_AWC 등을 이용하여 최고치의 경향을 최대한 반영하도록 보정하였다. Fig. 9는 도암댐 유역 강우 및 유출의 보정 결과로서 시간에 따른

강우 그래프이다. 보정기간은 2004년부터 2009년까지로 R²는 평균 0.73으로 비교적 모의치가 실측치의 경향을 잘 따르는 것으로 분석되었고, RMSE는 5.98 mm/day로 나타났다.

3.2 호소 및 하천모형 모의 결과

호소 및 하천모형은 각각 호소 및 하류하천 구간으로 나누어 보정하였다. 보정기간은 2008년 1월 1일에서 12월 31일까지의 기간으로 설정하였으며, 호소구간 보정 모의를 위한 수리조건은 SWAT 모형의 유출량 결과를 이용하여 일별 유입량으로 입력하였다. 하류하천구간의 수리해석을 위한 유입 경계조건은 EFDC 모형의 저수지 방류량 모의 결과를 적용하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 호소구간과 하천구간의 수리모형의 보정 결과로, 경계조건으로 지정된 유입부와 유출량의 유속장 흐름이 원활하게 재현되었다.

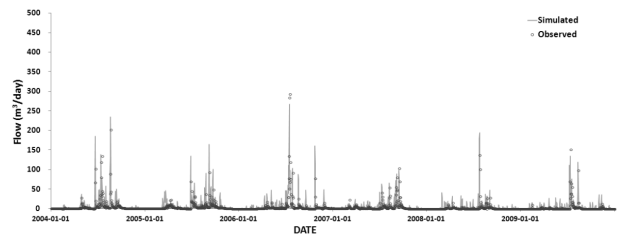


Fig. 9. Flow Rate Results in SWAT Model

Table 1. Summary of Statics for Runoff Calibration

Year	R ²	RMSE (mm/day)	Year	R ²	RMSE (mm/day)
2004	0.79	6.65	2007	0.68	4.18
2005	0.66	7.64	2008	0.81	4.80
2006	0.74	7.90	2009	0.73	4.74
Average				0.73	5.98

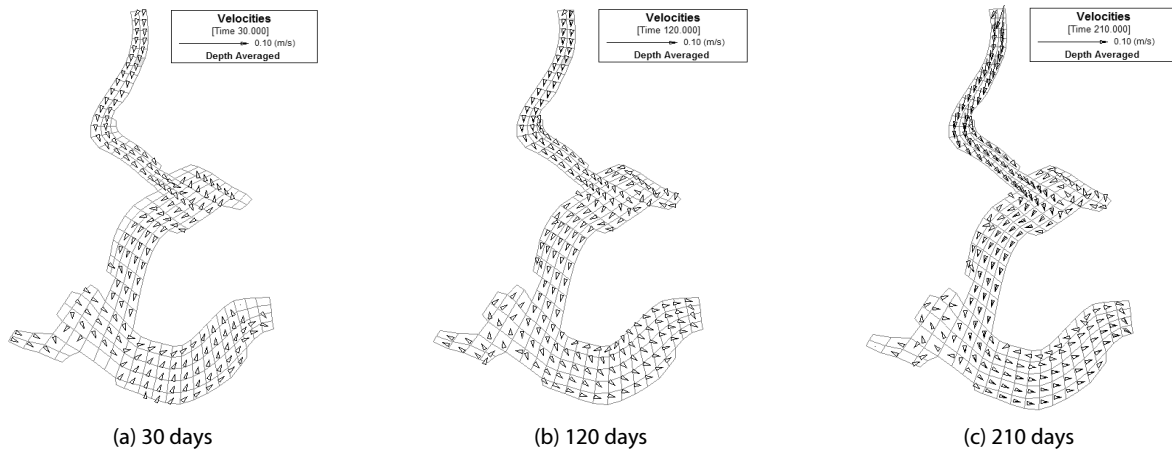


Fig. 10. Velocity Field of EFDC in Reservoir Section

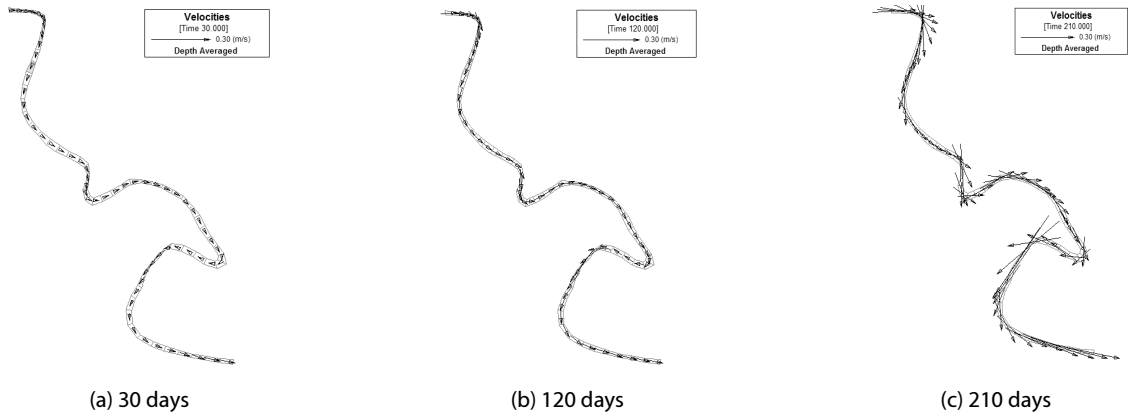


Fig. 11. Velocity Field of EFDC in Downstream Section

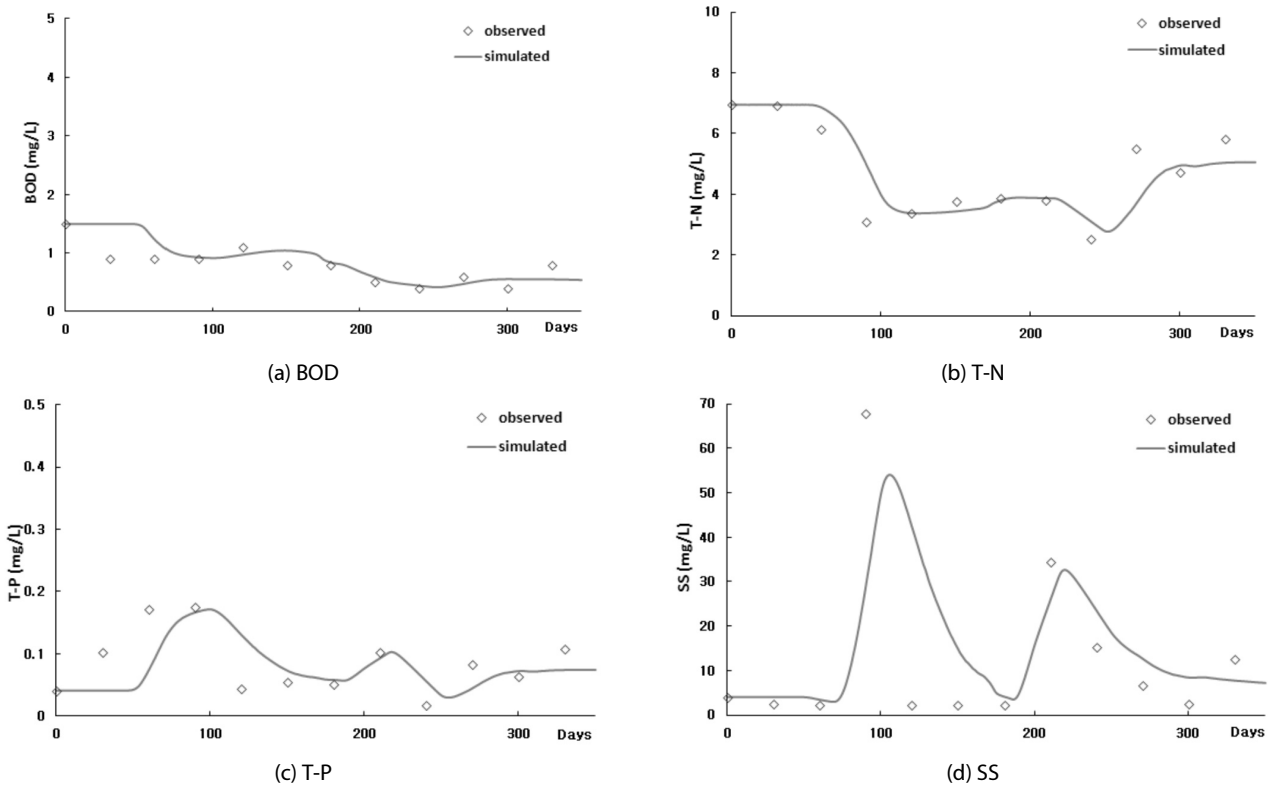


Fig. 12. Verification of WASP in Reservoir Section

호소구간과 하류하천 구간 모두 여름철 강우로 인한 유입량 증가로 유속의 흐름이 빨라졌으며 호소구간의 경우, 최소 0.001 m/s에서 최대 0.5 m/s의 흐름을 보였다. 하천구간의 경우, 최소 0.1 m/s에서 최대 4 m/s의 흐름으로 특히 홍수기에 유속장의 차이가 크게 나타났다. 이는 유입부와 유출부 경계조건 내 하류하천을 구성하는 지형의 경사 차이가 크기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 운영 중인 저수지에 대해서는 모형의 입력 자료로서 현재의 유입수질 등의 경계조건을 적용하고 동일한 시간대의 호소

내 수질을 고려하여 모델을 보정 한 후 장래 수질변화를 예측한다(Park et al., 2010). 하지만 본 연구대상지역의 도암댐은 운영이 중단된 상태이기 때문에 저수지 수질에 관한 실측 자료 수집의 한계를 보완하고자 도암댐 유역 내 위치한 환경부 수질측정망 자료를 이용하여 현재 호소의 상황을 재현하고자 하였으며 이 또한 시행착오법을 통해 보정하였다.

Fig. 12은 호소구간 보정 결과로써 T-N과 SS의 경우, 특정시간에 과대·과소평가되는 등 다소 차이가 있긴 하지만 대체적인 흐름은

Table 2. Summary of Statics for Water Quality Calibration in Reservoir

Water Quality	R ²	Ave.		Med.		Std.		75%		25%	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
BOD	0.64	0.80	0.88	0.80	0.88	0.31	0.38	0.90	1.09	0.58	0.56
T-N	0.68	4.71	4.74	4.29	4.41	1.52	1.47	5.91	5.49	3.68	3.60
T-P	0.42	0.075	0.081	0.060	0.073	0.046	0.039	0.099	0.089	0.046	0.057
SS	0.64	8.44	10.78	3.20	7.99	10.26	8.28	11.03	14.23	2.35	3.96

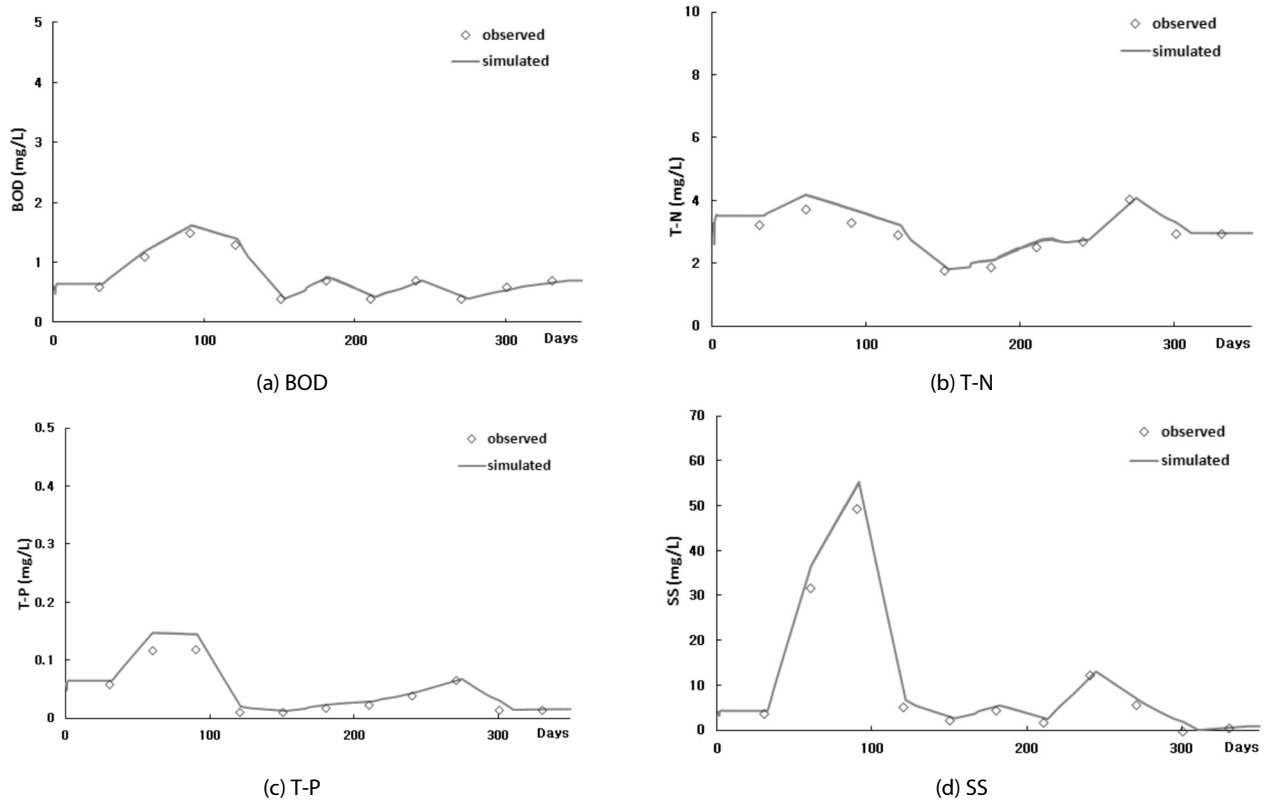


Fig. 13. Verification of WASP in Downstream Section

모의값이 실측값에 유사한 것을 확인할 수 있었다. T-P를 제외한 나머지 수질항목에서는 R²값이 0.60 이상의 상관성을 보였으며 각 통계치 항목별 결과 또한 비슷한 수치의 수준을 보였다(Table 2 참조). 특히 강우 집중 시기에 따른 유량 증가로 인해 상류 하천에서 들어오는 많은 양의 탁수가 댐에 그대로 반영되어 탁수 장기화를 일으킬 것으로 판단된다.

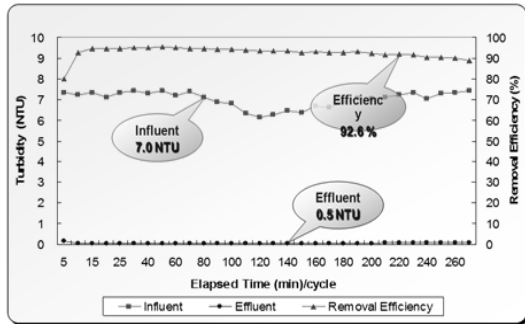
Fig. 13은 하류하천구간의 보정결과를 나타낸 그래프이다. SS의 경우 하절기에 강우집중에 따른 농도값이 실측값과 모의값 모두 높은 수치를 보이지 않는데, 이는 수집한 자료의 측정 시기와 월평균 자료라는 한계점에서 나온 결과라 판단된다. Table 3에서 볼 수 있듯이 R²는 0.9 이상으로 높은 상관성을 보였다. 그 외 통계항목 또한 실측치 대비 모의치를 비교한 결과 호소하천모형의 구현이

잘 반영되는 것으로 나타났다.

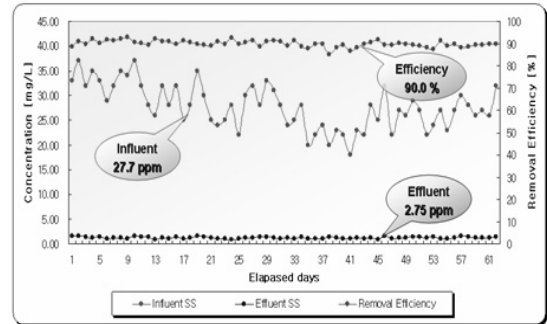
최종적으로 통합수질관리시스템 구축을 검토하기 위해 보정결과를 바탕으로 시나리오를 모의하였다. 시나리오는 보정기간 동안 (2008년)의 도암댐 상류부 실측 수질자료를 기반으로 도암댐 상류에 수질개선장치를 설치하여 나타나는 효과를 예측할 수 있도록 구성하였으며 모의 기간은 365일로 설정하였다. 본 시나리오에서 사용된 수질개선장치의 제거 효율은 현재 도암댐에서 시범 가동 중인 섬유사공법(3FM)을 바탕으로 적용하였다. 섬유사공법(3FM)은 모래여과기술과 분리막 기술을 혼합한 공법으로 유연성 섬유사를 사용하여 수중의 미립자 및 조류 등의 부유물질을 효과적으로 여과·분리하는 장치를 사용하는 공법이다. 하지만 현재 도암댐 내 수질개선장치의 운영 실적이 없기 때문에 과거 타기관의 운영

Table 3. Summary of Statics for Water Quality Calibration in Downstream

Water Quality	R ²	Ave.		Med.		Std.		75%		25%	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
BOD	0.98	0.76	0.80	0.70	0.66	0.37	0.40	0.90	0.96	0.50	0.51
T-N	0.93	2.92	3.10	2.94	3.23	0.69	0.71	3.28	3.61	2.61	2.68
T-P	0.97	0.045	0.054	0.023	0.031	0.041	0.048	0.063	0.064	0.015	0.024
SS	0.99	10.84	12.39	4.70	5.29	15.69	17.11	9.20	10.31	2.20	2.87

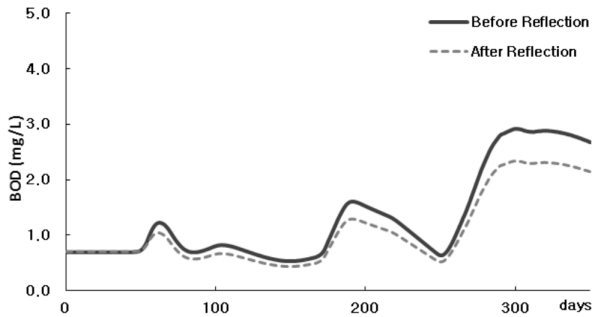


(a) Turbidity

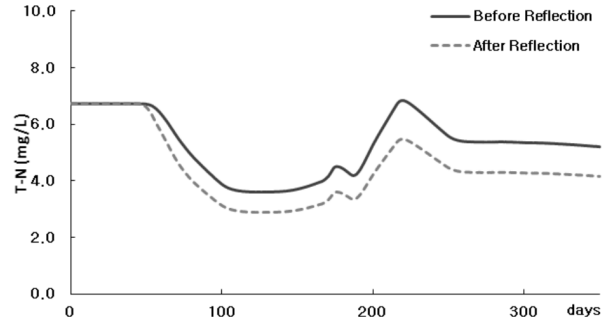


(b) SS

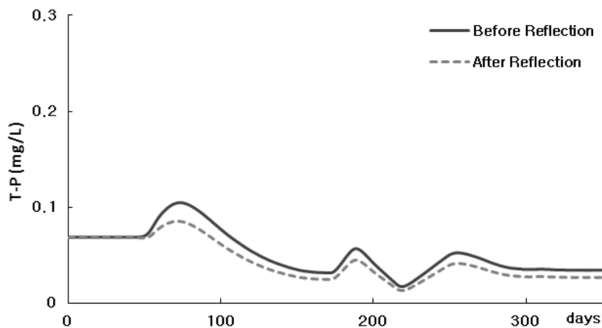
Fig. 14. 3FM Installation Efficiency Results (NanoENTech, 2007)



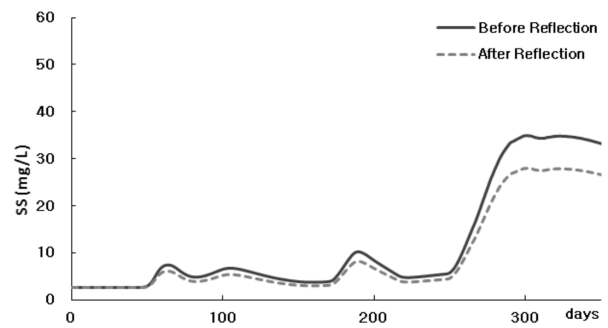
(a) BOD



(b) T-N



(c) T-P



(d) SS

Fig. 15. Results Graph of Scenario in Reservoir Section

효율을 기반으로 모의하였다(NanoENTech, 2007). Fig. 14은 과거 POSCO 정수장에서 수질개선편장치 설치 후 탁도 제거효율을 나타낸 그래프로 90% 이상의 제거효율을 보이고 있다(NanoENTech,

2007). 기존 적용된 수질개선편장치와 도암댐 규모를 비교해 보았을 때 본 시나리오에서는 유입되는 수질의 제거효율을 80%로 가정하고 모의를 실시하였다.

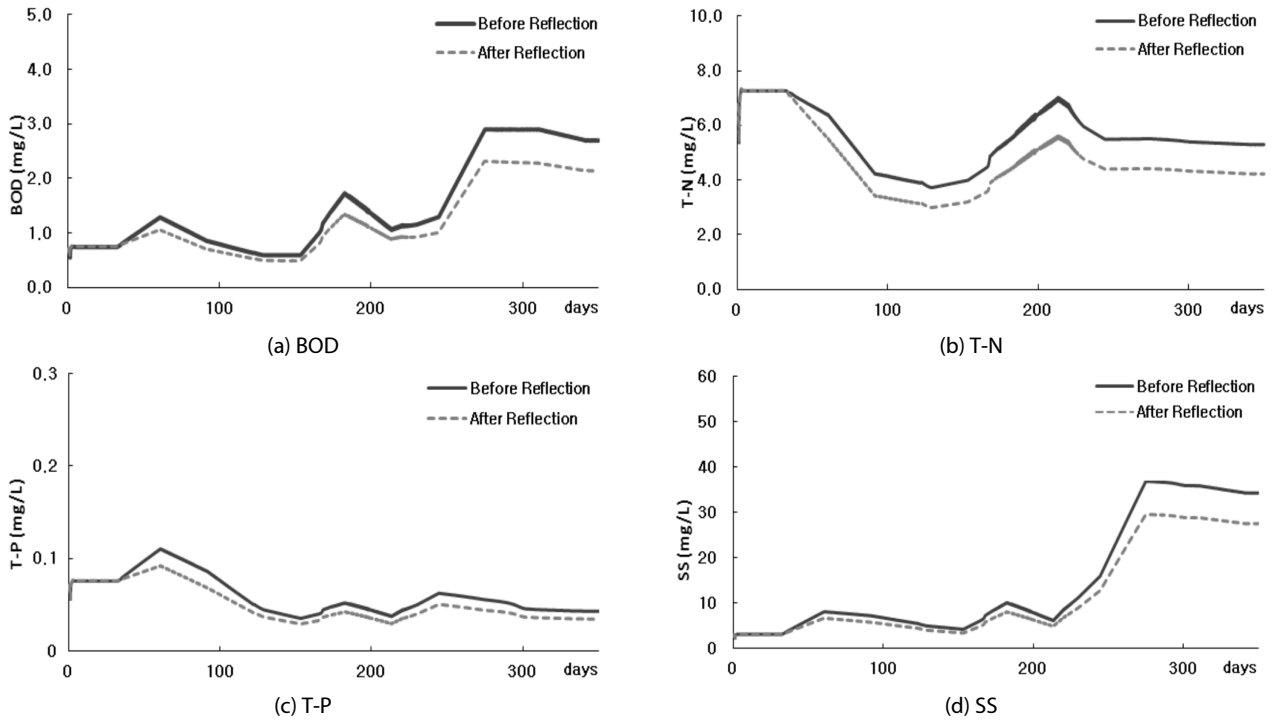


Fig. 16. Results Graph of Scenario in Downstream Section

Table 4. Removal Efficiency of Water Quality in Reservoir Section

Water Quality	Before Reflection (mg/L)	After Reflection (mg/L)	Removal Efficiency (%)
BOD	2.68	2.15	19.8
T-N	5.22	4.17	20.1
T-P	0.034	0.027	20.6
SS	33.31	26.65	20.0

Fig. 15는 호소구간의 시나리오 모의 결과를 나타낸 것이다. 초반 40일 동안은 수질개선효과를 보이지 않는 것으로 나타났다. 시나리오 적용 시, 입력 자료는 도암댐 상류 유입수질 자료를 사용하고 이에 따른 모의 결과는 댐 축 부분에서 추출하였는데 초반 40일 동안은 갈수기(겨울철) 유량에 따라 댐 축까지 반영되는 도달 시간의 한계 때문이라고 판단된다. 하지만 40일 이후 차츰 효과를 보이며 시간이 지날수록 수질개선정도가 증가하는 추세를 보였다. BOD, TN, TP 및 SS의 기존 농도는 각각 2.68 mg/L, 5.22 mg/L, 0.034 mg/L 및 33.31 mg/L이었으며, 수질개선장치 설치 후 삭감 농도는 각각 2.15 mg/L, 4.17 mg/L, 0.027 mg/L 및 26.65 mg/L로 호소 내 제거효율은 19~20%로 나타났다(Table 4 참조).

Fig. 16은 하류하천구간의 시나리오 모의 결과를 나타낸 그래프로서 40일 전후로 수질개선효과를 보임으로써 호소구간과 흐름이 유사하게 나타났다. Table 5는 하류구간에서의 수질 제거효율을

Table 5. Removal Efficiency of Water Quality in Downstream Section

Water Quality	Before Reflection (mg/L)	After Reflection (mg/L)	Removal Efficiency (%)
BOD	2.70	2.15	20.4
T-N	5.30	4.23	20.3
T-P	0.043	0.034	20.9
SS	34.27	27.42	20.0

정리해 놓은 결과로써 BOD, T-N, T-P 및 SS의 기존 농도는 각각 2.70 mg/L, 5.30 mg/L, 0.043 mg/L 및 34.27 mg/L이었으며, 수질개선장치 설치 후 삭감 농도는 각각 2.15 mg/L, 4.23 mg/L, 0.034 mg/L 및 27.42 mg/L로 하류하천구간의 제거효율은 20~21%로 나타났다. 호소구간과 유사한 흐름을 보이는 것은 하류하천구간 모의 시 사용되는 입력자료가 호소구간의 결과 값으로 사용되어 유량 및 수질변화가 비슷하게 반영되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

댐은 홍수조절 및 전력생산 등 수자원의 가치를 높이는 중요한 역할을 한다. 하지만 1991년에 건설된 도암댐은 하류 지역의 수질문제로 인해 2001년 발전을 중단하고 자연방류를 실시하고 있다.

본 연구에서는 저수지와 하천을 연계하여 유역의 통합적 영향을 분석하고자 하였다. 수계단위 탁수예방 기본계획 보고서(MLTM, 2010)에서 제시한 기술지침을 기반으로 유역모형인 SWAT 모형으로 상류구간의 유출 모의를 수행하고, 이 결과를 호소 및 하천모형인 EFDC-WASP의 유입 경계 조건으로 부여하여 저수지 및 하류하천의 수리 및 수질 영향을 모의할 수 있는 통합모델링시스템을 구축하였다.

2009년의 환경부 수질측정망 자료를 이용하여 호소 및 하천모형의 보정을 수행하였으며 그 결과 저수지 및 하류하천구간의 평균 R² 값이 각각 0.6, 0.9 이상의 상관성을 보였다. 개발된 통합모델링시스템의 적용성을 검토하기 위해 도압댐 상류에 시범 운영되고 있는 수질개선장치에 대한 시나리오 모의를 실시하였다. 수질개선장치가 반영된 결과로 제거 효율은 19~21%를 보였으며 전반적으로 호소구간과 하류하천구간 모두 수질개선장치를 설치할 경우 일정정도의 수질개선효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

유역모의를 위해 사용되는 SWAT 모형과 호소 및 하천 모의를 위해 사용되는 EFDC-WASP 모형은 각각의 수체 및 범위에 있어서 적용성이 높으나 두 모형의 연계를 통해 유역관리를 위한 통합모델링시스템을 구축한 사례는 드물다. 향후 대상유역의 유량 및 수질에 관한 장기 모니터링을 실시하여 본 연구에서 개발된 통합모델링시스템을 검증 및 보완하면 탁수 및 수질을 고려한 저수지운영의 의사결정지원을 위한 도구로써 매우 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것이며(No. 2010-0024119), 본 연구에서 사용한 수치모형은 (사)한국물포럼 주관으로 정인옥학술장학재단의 지원에 의해 구축한 것을 보완한 것으로 이와 같은 지원에 감사드립니다.

References

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development." *J. of American Water Resources Association.*, Vol. 34, No. 4, pp. 73-89.

Choi, H. G., Kim, D. I., Na, C. H., Han, K. Y. (2012). "Assessment of EFDC model for water quality analysis in Nakdong river." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 45, No. 7, pp. 685-696 (in Korean).

HRBEO (2005). *Organization and activation plan of watershed management system*, Report, ME.

Hur, Y., Park, J. (2009). "Assessment of EFDC model for hydrodynamic analysis in the Nakdong river." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 42, No. 4, pp. 309-317 (in Korean).

Jeong, K. W. (2007). *Development of 3D integrated water quality simulation system by applying BASINS/WinHSPF and EFDC in Han River basin and Paldang Reservoir*, Ph.D. Dissertation, Konkuk University (in Korean).

Jeong, S. M., Seo, H. D., Kim, H. S., Han, K. H. (2008). "Sensitivity assessment on Daechong Dam basin streamflows according to the change of climate components." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 41, No. 11, pp. 1095-1106 (in Korean).

Jeong, Y. W. (2010). *3-Dimensional hydrodynamic and water quality change simulation of reservoir using EFDC-WASP*, MSc. Dissertation, Inje University (in Korean).

Kim, C., Kim, C., Sim, W. B. (2005) *Securing financial resources for integrated river basin management*, Report, KRIHS (in Korean).

Kim, H. S. (2006). *Estimation of suspended sediments in inha reservoir considering parameter uncertainty of SWAT model*, MSc. Dissertation, Inha University (in Korean).

Kim, M. A., Seo, D. (2011). "Water quality modeling of the Nakdong river due to restoration project by using EFDC-WASP." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 44, No. 3, pp. 24-31 (in Korean).

Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J. W., Lee, J. E. (2008). "Estimation of runoff curve number for Chungju Dam watershed using SWAT." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 41, No. 12, pp. 1231-1244 (in Korean).

KWF (Korea Water Forum). (2011). *Development of integrated turbidity management system for optimal water quality improvement plan and turbid water solution in Doam Dam*, Technical Report (in Korean).

Lee, E., Choi, K., Kim, T. (2012). "A study on runoff properties of non-point pollutant in Nakdong watershed by using SWAT model." *J. of Korea Society of Water and Wastewater.*, Vol. 26, No. 6, pp. 815-823 (in Korean).

MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010). *Report of master plan for turbidity prevention in watershed*, Technical Report, K-water (in Korean).

NanoENTech (2007) *Technical data package of 3FM filter installation*, Report. NanoENTech Company (in Korean).

Park, J. C., Choi, J. H., Song, Y. I., Seo, D. I. (2010). "Water quality modeling of Youngju dam reservoir by HSPF, EFDC and WASP." *J. of Environmental Impact Assessment.*, Vol. 19, No. 5, pp. 465-473 (in Korean).

Shin, H. S., Kang, D. K., Kim, S. D. (2007). "Analysis of the effect of water budget elements on flow duration characteristics using SWAT-Nakdong." *J. of Korea Water Resources Association.*, Vol. 40, No. 3, pp. 251-263 (in Korean).