

도암호 유역 비점오염원 관리지역의 흙탕물저감사업 추진에 따른 토사유출 저감효과 평가*

Evaluation of the Soil Erosion Mitigation through Muddy Water
Reduction Project Implementation in the Doam Lake Watershed
Non-point Source Management Zone

류지철** · 김진선*** · 최지연*** · 장희선*** · 신동석**** · 이재관***** · 나은혜*****

Jichul Ryu · Jinsun Kim · Jiyeon Choi · Hee Seon Jang · Dong Seok Shin · Jaekwan Lee · Eun Hye Na

요약: 도암호 유역은 2007년부터 비점오염원관리지역으로 지정되어 환경부의 비점오염원 관리대책인 흙탕물저감사업이 추진되었다. 본 연구는 흙탕물 저감사업 추진에 따른 도암호 유역의 토사유출 저감 효과를 평가하고자 수행하였다. 토사유출저감 평가를 위하여 SWAT 모형을 이용하였고 모형내 2007년부터 2016년까지의 흙탕물 저감사업 내용을 공간정보화 하여 입력하였다. 연구결과, 2016년 기준 토사유출 저감량은 2007년 대비 79.2%로 개선되었으나 이는 2007년 이후 도암호 유역의 연간 강우량 감소에 의한 영향으로 분석되었다. 한편, LDC분석 결과 25% 이하 고유량 조건에서 목표수질을 50%이상 초과하는 것으로 조사되었다. 따라서 도암호 유역은 흙탕물 저감사업을 통한 비점오염원 저감 효과가 일부 나타났으나 비점영향 유량조건에서도 수질을 개선시키기 위해서는 비점오염원 관리사업이 지속적으로 추진되어야 할 것으로 판단된다.

핵심주제어: 도암호, 비점오염원 관리지역, 토사유출, 흙탕물, SWAT

Abstract: Doam Lake watershed was designated as non-point pollution source (NPS) management zone 2007. The water reduction project of the Ministry of the Environment (MOE) was implemented to . The objective of this study was to evaluate the effect of soil erosion mitigation in the Doam Lake watershed after water reduction project. The Soil&Water Assesement Tool (SWAT) model was used sediment erosion reduction evaluation the water reduction projectwere entered as spatial information. soil erosion 79.2% compared to 2007, which was to be by the annual rainfall Load Duration Curvel (LDC) analysis showed that the target water quality exceeded 50% at high flow conditions of less than 25%. Therefore, it is suggested that while some of the sediment erosion reduction effects were achieved through the water reduction project, the NPS pollutant management project should be continued to improve water quality.

Key Words: Doam Lake, Non-Point Source (NPS), Pollution Management Zone, Soil Erosion, Muddy Water, SWAT

* 본 논문은 국립환경과학원 예산(1900-1946-342)을 지원 받아 수행한 연구 과제 (과제번호: 2017-01-01-030) 결과입니다.

** 주저자, 국립환경과학원 유역총량연구과 환경연구사

*** 공동저자, 국립환경과학원 유역총량연구과 전문위원

**** 공동저자, 국립환경과학원 유역총량연구과 과장

***** 공동저자, 국립환경과학원 물환경연구부 부장

***** 교신저자, 국립환경과학원 물환경평가연구과 환경연구관

I. 서론

최근 비점오염원에 의한 하천의 수질악화가 사회적으로 큰 문제를 일으키고 있다(환경부, 2012; 박창근, 2015). 비점오염원은 강우시 유역 내 불특정한 장소에서 불특정하게 하천으로 유입되는 오염원으로 비점오염원 발생물질에는 여러 종류가 있다(환경부, 2018a). 이 중 고랭지 밭에서 강우 시 토사와 함께 쓸려 하천으로 유입되는 흙탕물은 하천의 부영양화 및 수생태계의 건강에 큰 악영향을 끼칠 수 있다(현근우 등, 2010).

특히 고랭지 밭 비율이 높은 강원도 지역에서는 이러한 토사유출에 의한 비점오염원이 문제가 많이 되고 있으며(이수인 등, 2017; 최용훈 등, 2009) 이 중 도암호 유역은 강우 시 다량의 흙탕물이 도암호로 유입되어 호소의 건강성이 악화됐고 이에 따라 도암댐 발전용수 사용이 어려워지는 등 여러 환경문제가 발생 되고있다(국립환경과학원, 2016; 한국수력원자력, 2005).

환경부에서는 이러한 흙탕물과 같은 비점오염원 저감을 위해 정책적으로 비점오염원 관리지역 지정제도를 운영 중에 있으며 현재까지 도암호 유역을 포함 총 10개의 유역이 비점오염원 관리지역(이하 관리지역)으로 지정되어있다(환경부, 2018b). 비점오염원 관리지역 지정제도는 관리대책 및 시행계획을 통해 관리기간, 관리목표 및 연차별 비점오염원 저감 이행 방안을 수립하도록 되어있으며 관리기간 동안 매년 이행평가를 통해 사업 추진 및 관리목표 달성 여부를 평가하게 되어 있다(환경부, 2018a).

도암호 유역은 '07년에 관리지역으로 지정되어 '08년에 관리대책이 수립되었고 관리목표는 도암호 말단지점에서 SS 수질항목이 5.0 mg/L, 부목표로 도암호 유입지점에서 25 mg/L를 3년 평균 2회연속 만족으로 설정되어 있고 다양한 흙탕물 저감사업을 매년 추진하는 내용으로 시행계획이 수립되어 있다(강원도, 2010).

비점오염원 관리기간은 총 10년간('07~'16)으로 최근 관리기간이 종료되었으며 '16년도 이행평가 결과 도암호 유역 말단지점 및 도암호 유입지

점에서 관리목표를 만족하는 것으로 분석되었다(강원도, 2017).

관리기간 종료가 도래함에 따라 향후 도암호 유역의 관리지역 지정연장에 대한 정책적 결정이 요구되고 있으며 이를 위해 관리목표 달성 평가에 있어 현재까지 목표달성이 흙탕물 저감사업에 의한 영향인지 아니면 기타 유역의 기상조건 등이 바뀌어 달성했는지에 대해 과학적인 평가가 필요할 실정이다.

이러한 과학적 평가는 그간 추진된 흙탕물 저감사업을 반영하고 유역의 장기강수조건을 반영 할 수 있는 SWAT, HSPF 등과 같은 유역모형을 활용하여 평가할 수 있다.

하지만 과거 연구들은 실측 모니터링기반 위주의 비점영향분석을 하였고(곽성진 등, 2013; 박경훈 등, 2012; 이석중 등, 2012; 이상하 등, 2006) 일부 연구에서 도암호 유역을 대상으로 구축된 유역모형 결과는 6년 전의 과거 자료가 사용되었으며 일부 흙탕물 저감사업만 반영되어 본 연구에 사용하기 어렵다(최재완 등, 2012).

따라서 본 연구의 목적은 도암호 유역의 지속적인 비점관리 필요성 분석을 위해 SWAT모형을 이용하여 장기강우조건 및 10년간 흙탕물 사업 추진사항에 따른 관리목표 및 저감량 평가를 하는데 있다.

본 연구의 결과는 향후 도암호 유역의 관리지역 지정여부의 정책적 결정의 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

II. 연구방법

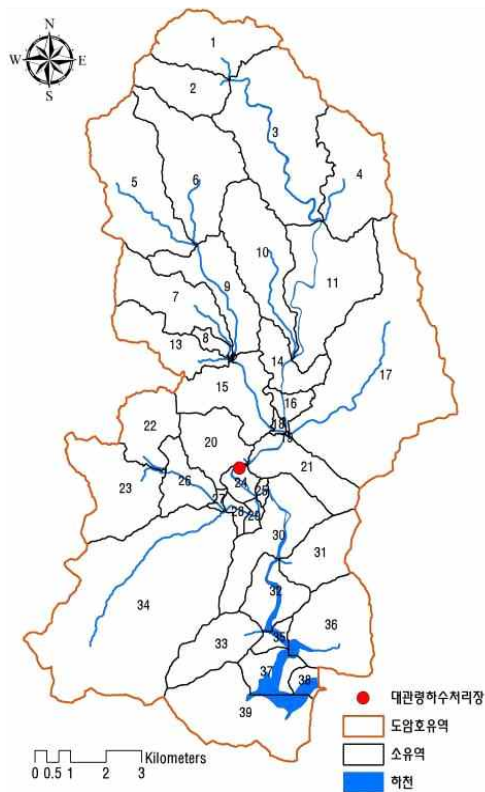
1 연구대상지역

연구대상지역은 현재 관리지역으로 지정되어 있는 도암호 유역이다.

도암호 유역의 관리지역 지정 범위는 강원도 평창군 수하리, 용산리, 유천리, 차항리, 횡계리가 포함되며 지정 면적은 총 148.73 km²로 설정되어 있다(〈그림 1〉).

관리지역 시행계획의 주요 내요 중 관리목표는 도암호 말단지점(도암댐 앞 지점)의 수질을 SS 5 mg/L 이하로 유지하고 도암호 유입지점의 SS 농도를 25 mg/L로 유지하는 것으로 설정되어 있다. 흙탕물 저감사업으로는 빗물우회수로, 침사지, 사면보호시설 등이 설치되도록 계획이 수립되어 있다.

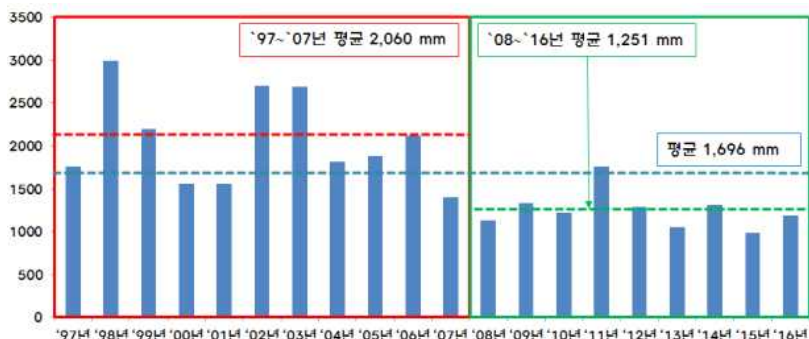
〈그림 1〉 도암호 유역의 구분된 소유역 및 하천도



도암호 유역의 고령지발 면적은 '16년 기준 1,601 ha로 전체 유역면적의 약 11%를 차지하며 '07년 계획 수립 당시와 비교 시 약 1% 감소하였다. 고령지 발 외 콘도 주택건설, 체육·공원 시설 개발 등에 따른 훼손면적(공사면적)은 '16년 기준 56.9 ha이다.

도암호 유역의 최근 20년간('97~'16년) 연평균 강우량은 1,696 mm이며, 관리대책 수립 이전('97~'07년)의 연평균 강우량은 2,060 mm, 관리대책 수립 이후('08~'16년)의 연평균 강우량은 1,251 mm으로 나타나 '07년 관리지역 관리대책 수립 이후 강우량이 크게 감소하였다(<그림 2>). 또한 관리대책 수립 이전('97~'07년)에는 월 강우량 500 mm 이상의 집중강우가 거의 매년 여름 발생하였으나, 지정 이후에는 '09년 7월 단 한 차례 발생 하였다.

〈그림 2〉 대관령지점 연도별 강우현황('97~'16)



2. SWAT 모형 구축

도암호 유역의 토지이용, 흙탕물저감시설 등을 반영한 토사유출 모의를 위해 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 적용하였다. SWAT 모형은 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서 대규모 유역에서 토양, 토지이용, 토지관리상태에 따른 장기간의 유출을 시단위 또는 일단위로 모의가 가능하고 특히 토양별 특성이 반영될 수 있어 농업 BMP 적용이 용이하여 농촌유역관리에 따른 영향 예측에 적합하며(국립환경과학원, 2010), 국내 여러 공공기관 및 연구기관에서 활용되고 있다(국립환경과학원, 2017; 한국건설기술연구원

2007; 한국농어촌공사 한국농어촌연구원, 2007).

SWAT 모형의 입력자료는 대상유역의 DEM, 하천도, 토지이용도, 토양도가 GIS 공간자료가 필요하며 강수량, 최대 및 최저 온도, 평균풍속, 평균일사량 및 평균습도와 같은 기상자료를 모형에 입력해 주어야 한다.

SWAT모형의 수문과정을 간단히 요약하면 유역에서 하천으로 유입되는 유출량을 직접, 중간 및 기저유출로 구분하여 HRU단위로 모의하며 직접 유출량은 NRCS-CN(SCS, 1972) 방법 또는 Green-Ampt(Green and Ampt, 1911) 방식으로 모의하고 기저유출은 대수층을 피압 및 비피압 대수층으로 나누어 지표층에서 비피압 대수층으로 유입된 지하수를 지하수 감쇄곡선계수를 이용하여 모의한다. 하천의 유량은 MUSKINGUM 방법과 같은 수문학적 하도추적과정을 거쳐 모의 한다(Netisch et. al., 2005)

SWAT모형의 하천으로 유입되는 토사유출량은 기존 USLE 공식에서 수정된 MUSLE공식을 이용하여 산정하며 하천 내 SS는 4가지의 간단한 유사추적과정 경험식을 이용하여 하천에서 SS가 부유사 또는 침전되는 과정을 모의한다(Netisch et. al., 2005).

1) 모형의 입력자료

도암호 유역의 소유역 분할 및 정보구축을 위하여 1:5,000 수치지도를 이용하여 구축한 5×5m DEM(Digital Elevation Model) 자료와 「도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가사업(원주지방환경청, 2017)」의 모니터링 지점 위치정보를 이용하였다.

모형 내 기상정보 구축을 위해 기상청 대관령 관측지점의 '97~'16년 기상자료(강수량, 최고 및 최저기온, 태양복사량, 평균풍속, 평균습도)를 사용하였고, 토지이용정보는 '15년 기준 전국지적도 자료를 이용하여 28개 지목을 SWAT에서 사용되는 토지이용 형태로 전환하여 모형에 입력 하였다(<표 1>).

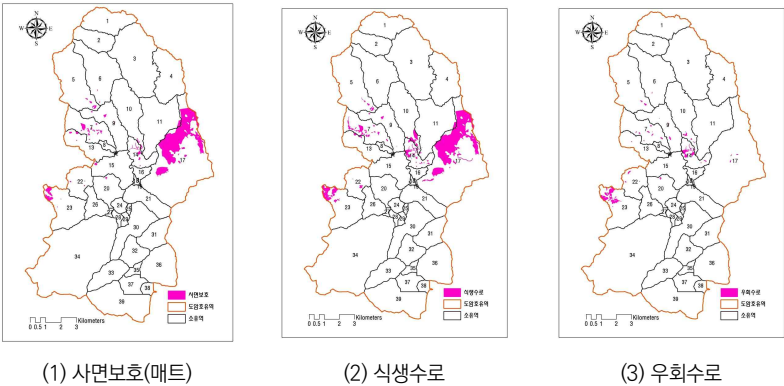
〈표 1〉 지적도 지목과 SWAT 토지이용분류 비교

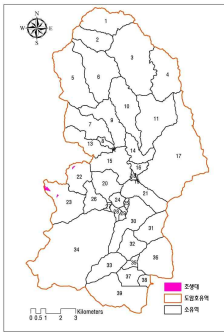
지적도 지목명	SWAT DB
대	URML (주거지역)
장	UIDU (공업지역)
중,창	UCOM (상업지역)
묘,목,공,원,체	PAST (문화체육휴양시설, 묘지, 초지)
주,차,철	UTRN (도로)
유	UINS (공공시설지역)
답	RICE (논)
전	AGRL (농업지역)
임	FRST (산림)
잡	BARR (나지)
양,천	WATR (수역)

토양도는 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도 자료를 이용하였으며, 각 토양종류별 자세한 정보를 SWAT usersoil DB에 입력하였고, 국립환경과학원 전국오염원조사자료의 대관령 하수종말처리장 일방류 자료를 모형의 점오염원으로 입력하였다.

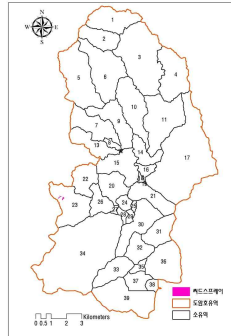
환경부에서 진행된 흙탕물 저감사업은 '16년 기준 설치 완료 시설을 대상으로 시설 위치, 규모를 지반단위로 구축된 토지이용도 위치와 연계하여 시설별 토사유출 저감효과는 침사지의 경우 SWAT Pond 모듈을 이용하였고 식생수로, 초생대, 사면보호(매트, 펜싱), 우회수로, 법면녹화공법(Seed spray)의 경우 SWAT Operation 모듈을 이용하여 모의하였다(그림 3)).

〈그림 3〉 SWAT HRU에 입력된 환경부 흙탕물 저감사업 위치도 ('07~'16)

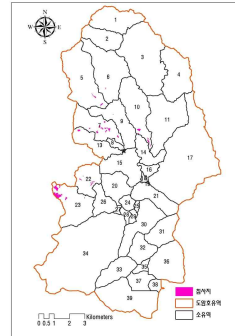




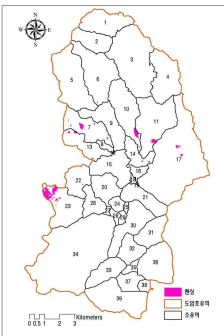
(4) 초생대



(5) 법면녹화공법
(Seed spray)



(6) 침사지



(7) 비점펜싱

특히 침사지의 경우 실제 준공된 완료시점을 기준으로 Pond 모듈에서 요구하는 각 침사지별 영향면적 및 체적은 실제 침사지 설계 내용을 그대로 반영하였고 기타 수질항목별 침전 등에 대한 매개변수는 기본값을 사용하였다.

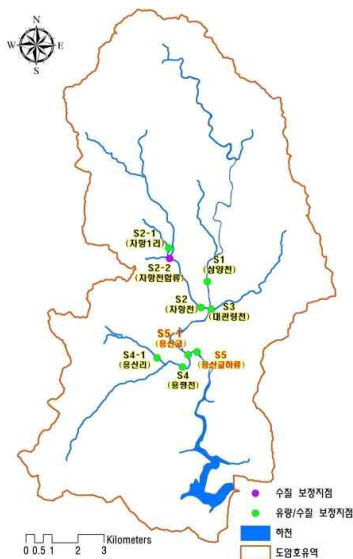
SWAT Operation 모듈을 이용한 식생수로의 경우 수로 길이는 설계된 내용을 그대로 반영하였으나 수로 폭에 대한 정보가 없어 모든 수로의 폭을 1m로 가정하여 입력하였으며 Manning's N 과 같은 기타 계수 등은 기본값을 이용하였고 초생대의 경우 발면적 대비 초생대의 비율의 정보를 전량 파악하기 어려운 점이 있어 모두 10%로 가정하여 입력하였다. 기타 사면보호(매트, 펜싱), 우회수로, 법면보호공법(Seed spray)은 SWAT Operation 모듈에 구조적으로 입력할 수 없어 SWAT 매뉴얼에서 권장하는 토사유출 저감

효율을 참고하여 입력하였다(Netisch et. al., 2005).

2) 모형의 검보정

도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가사업(원주지방환경청, 2014~2016), 환경부 수질측정망, 강원도보건환경연구원 및 한국수력원자력에서 모니터링 된 9개 지점 <그림 4>에 대한 유량 및 SS 수질자료를 이용하여 '14년부터 '16년 기간을 설정하여 모형의 매개변수를 보정하였다.

<그림 4> 유량 및 SS 보정지점



3. 흙탕물 저감사업 추진에 따른 토사저감 효과 및 목표달성 평가

SWAT 모형의 매개변수 보정 후 흙탕물 저감사업 추진에 따른 토사저감 효과를 평가하기 위하여 먼저 도암호 유역의 '16년 기준 연간 토사유출량을 소유역별로 도출하고 모형에 입력된 흙탕물 저감사업 내용을 제외함으로서 저감사업 추진에 따른 토사저감 효과 및 목표달성 여부를 평가

하였다. 그 후 강수조건 시나리오 분석(20년치 최대, 최소, 평균강우 적용)을 통해 강수량 변화가 연간 토사유출량 및 저감효과에 미치는 영향 및 또한 도암호 유입 말단지점(S5)에서 Load duration curve (LDC) 분석을 통해 향후 흙탕물 저감사업 지속여부를 평가하였다.

LDC 분석 방법은 SWAT 모델 결과를 바탕으로 최근 20년간('97~'16년) 도암호로 유입되는 송천의 일유량자료를 도출하고 이에 대해 누적빈도를 조사하여 유량지속곡선(FDC; Flow Duration Curve) 작성하였다.

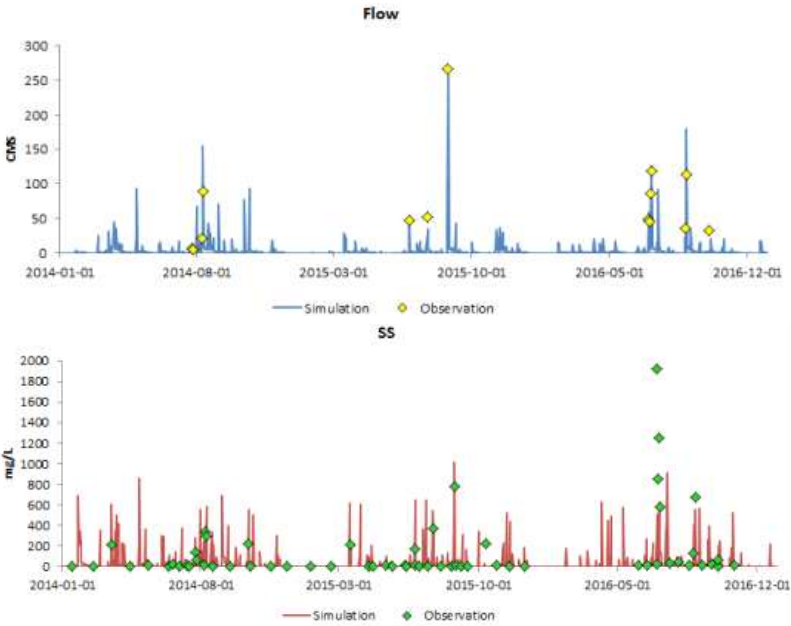
그 후 FDC에 목표수질 SS 25 mg/L를 곱하여 목표수질 부하지속곡선(LDC; Load Duration Curve) 작성하고 흙탕물저감사업 추진 완료시 도암호 유입 말단지점(S5) SS 부하량 모의결과를 이용하여 유형별 목표부하량 초과율을 평가하였다.

III. 분석결과

1. 모형의 구축 및 검보정 결과

SWAT를 이용한 유량 모의 결과는 도암호유입전 지점(S5)에서 실측 유량을 '매우만족' 수준에서 재현하고 있는 것으로 분석되었으며 지점별 R^2 는 0.32~0.99, Dffi.(%)는 S2-1지점을 제외한 대부분의 지점에서 7.42~65.03으로 나타났고 SS의 경우 도암호유입전 지점(S5)에서 실측 농도를 '만족' 수준에서 재현하고 있는 것으로 분석되었으며 지점별 R^2 는 0.03~0.78, Dffi.(%)는 8.07~66.63으로 나타나 전반적으로 모형의 모의 유량 및 SS 농도가 실측값과 유사하게 모의하는 것으로 분석되었다.

〈그림 5〉 SWAT 보정결과 S5지점(용산교 하류)



이를 토대로 보정된 매개변수는 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 SWAT 매개변수 보정 결과

구분	매개변수명	매개변수 속성	범위	조정값
Flow	CN	SCS runoff curve number for moisture condition	20~98	+11%
	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0~1	0.1
	ESPO	Plant uptake compensation factor	0~1	0.5
	MSK_1	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for normal flow	0~10	0.05
	MSK_2	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for low flow	0~10	0.95
	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0~5,000mm	100
	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	0~1days	0.5

	GWDELAY	Groundwater delay	0~500days	5
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0~1	0
SS	USLE_K	USLE equation soil erodibility (K) factor	0~1	-30%
	USLE_P	USLE equation support practice	0~1	0.60~0.90
	SLSUBBN	Average slope length	10~150m	-40%
	SPCON	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	0.0001~0.01	0.0006
	SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	1~1.5	1.15
	CH_COV1	Channel erodibility factor	0~1	0.1
	CH_COV2	Channel cover factor	0~1	0.01

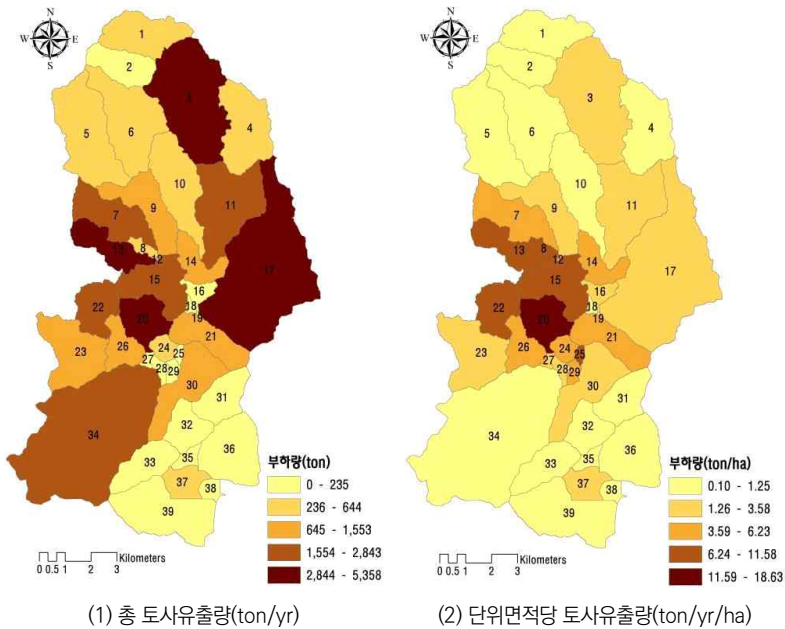
2. 흙탕물 저감사업 추진에 따른 효과평가 결과

1) '16년 기준 토사유출 및 저감량 현황

SWAT 모형을 이용하여 '16년 기준 토사유출 현황을 평가한 결과, 도암호 유역의 토사유출량은 39,355 ton/년으로 분석되었으며 단위면적당 토사유출량은 나지 비율이 제일 높은 20번 소유역에서 가장 높은 것으로 분석되었고 상대적으로 밭과 초지 면적 비율이 높은 중류 유역에서 높게 나타났다. 또한 '16년 기준 흙탕물저감사업에 의해 저감된 토사유출량은 2,937 ton/년(△6.9%)이며, 대형 침사지 2개가 설치된 23번 소유역에서 저감효과가 가장 크게 나타났다(용평천 전체 유역 28%).

'16년 SS 수질의 연평균 모의 결과, 도암호 유입하천 말단지점인 S5지점에서(용산교 하류)에서 33.1 mg/L으로 목표 25.0 mg/L을 달성하지 못하는 것으로 분석되었다.

〈그림 6〉 도암호 소유역별 토사유출량(2016)



2) 강수조건별 흙탕물 저감사업 추진에 따른 토사유출 저감량 분석

지난 20년 평균 강수조건으로 재평가시 토사유출 저감량은 8,965 ton/년($\Delta 6.6\%$)이며, 연강수량이 조건이 최소(2015년 기준)일 때 7.1%에서 최대(1998년 기준)일 때는 6.3% 토사유출 저감율이 나타나 연강수량이 점점 증가할수록 저감효율이 다소 감소하는 경향을 나타냈다(〈표 3〉).

또한 지난 20년 평균 강수조건으로 재평가시 S5(용산교 하류)의 연평균 SS 농도 저감효과는 18.8%($\Delta 23.2$ mg/L)이며, 연강수량이 증가할수록 저감효율이 감소하는 경향을 보였다(〈표 4〉).

이러한 결과를 종합적으로 분석한 결과, '16년 현재 도암호 유역의 토사유출량은 관리대책 시행 이전인 '06년 대비 150,253 ton/년 감소($\Delta 79.2\%$)하였으나, 이 중 77.7%(총 저감률 대비 98.0%)는 강수량 감소('06년 2,060.2→'16년 1,184.0 mm)에 기인한 것으로 판단된다.

〈표 3〉 흙탕물저감사업에 추진에 따른 토사유출량 변화

구분	강수조건		토사유출량(ton/년)		
	기준년도	연 강수량 (mm)	저감사업 미반영 (A)	저감사업 반영 (B)	저감량 (B-A)
현재	'16년	1,184.0	42,292	39,355	△2,937 (△6.9%)
시나리오	지난 20년간('97~'16년) 평균	1,695.9	136,658	127,693	△8,965 (△6.6%)
	관리대책 시행 이전 평균 ('97~'07년)	2,060.2	189,608	177,406	△12,201 (△6.4%)
	관리대책 시행 이후 평균 ('08~'16년)	1,250.7	71,942	66,932	△5,010 (△7.0%)
	'98년 (지난 20년간 최대 강수량)	2,998.3	376,801	352,955	△23,846 (△6.3%)
	'15년 (지난 20년간 최소 강수량)	981.9	46,493	43,205	△3,288 (△7.1%)

〈표 4〉 흙탕물저감사업에 추진에 따른 SS수질 변화

구분	강수조건		SS 농도(mg/L) (S5, 용산교 하류)		
	기준년도	연 강수량 (mm)	저감사업 미반영 (A)	저감사업 반영 (B)	저감농도 (B-A)
현재	'16년 기준	1,184.0	40.4	33.1	△7.2 (△17.9%)
시나리오	지난 20년간 평균 ('97~'16년)	1,695.9	123.5	100.3	△23.2 (△18.8%)
	관리대책 시행 이전 평균 ('97~'07년)	2,060.2	165.8	139.2	△26.6 (△16.0%)
	관리대책 시행 이후 평균 ('08~'16년)	1,250.7	71.8	52.7	△19.1 (△26.6%)
	'98년 (지난 20년간 최대 강수량)	2,998.3	257.8	224.5	△33.3 (△12.9%)
	'15년 (지난 20년간 최소 강수량)	981.9	36.0	29.9	△6.0 (△16.8%)

3) Load Duration Curve 분석

흙탕물 저감사업 추진으로 주로 '중간범위(40~60%)'와 '습윤(25~40%)' 상태에서 목표수질 초과율이 크게 개선되었다. 이와 같은 이유는 최근 흙탕물저감시설이 대형침사지와 같은 사후처리시설 위주로 추진되었으며, 이들 시설은 처리대상유량 이상 조건에서 부하량 저감효과가 급격히 감소

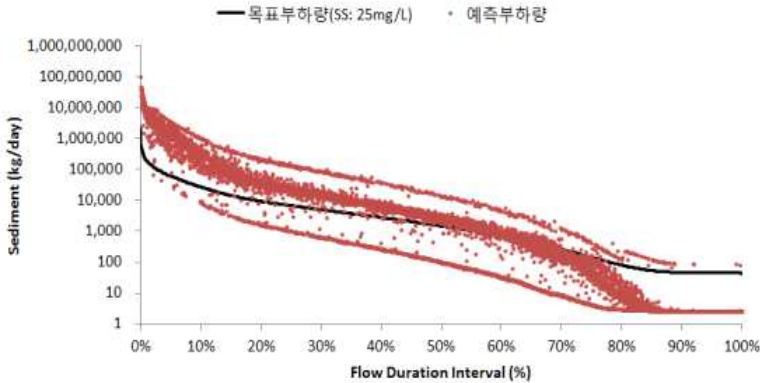
되었기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 상위 25% 이상 높은 유량 조건에서의 토사유출 저감을 위해 지속적 관리가 필요할 것으로 판단된다

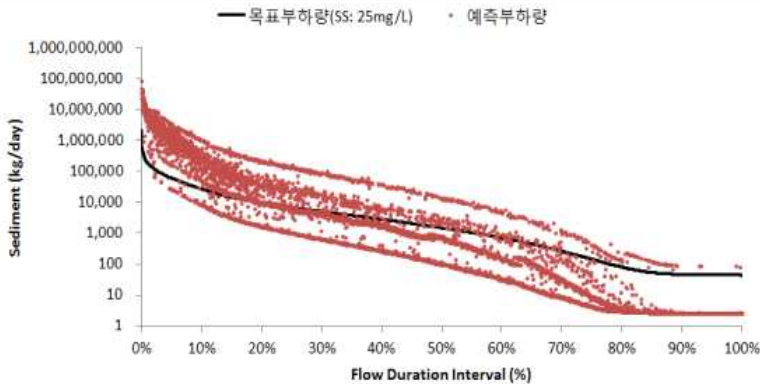
〈표 5〉 S5지점에 대한 수문상태별 목표수질 초과율(%)

구분	고유량	습윤		중간범위		건조	저유량
	0~10%	10~25%	25~40%	40~60%	60~90%	90~100%	
관리대책 이전	98%	88%	82%	67%	16%	1%	
관리대책 이후	94%	67%	29%	15%	8%	1%	

〈그림 7〉 Load Duration Curve (S5 지점)



(1) 관리대책 이전



(2) 관리대책 이후 (저감사업 반영)

IV. 결론

`07년 8월 비점오염원관리지역으로 지정·고시된 “도암호 유역”을 대상으로 SWAT 모델을 적용, 고령지발에 대한 비점오염저감사업 추진에 따른 효과를 정량적으로 평가하여 지속적인 흙탕물 저감 관리 필요성을 분석하였다.

도암호 비점관리대책 수립 이전(`97~`07년)과 `16년 현재를 비교할 경우, 대형침사지 5개소 등 다양한 흙탕물저감사업이 추진된 동시에 강수량이 크게 감소하였고 대부분의 저감효과는 강수량이 감소함에 따라 저감한 것으로 판단된다.

또한 모형으로 예측한 도암호 유입 말단 지점(S5)의 `16년 연평균 SS수질은 33.1 mg/L로 목표수질(25.0 mg/L)을 만족하지 못하고 있으며 LDC 분석결과, 비점영향구간인 25% 이하 습윤~고유량 조건에서는 목표수질을 50%이상 초과하여 이 유황구간에 대한 관리가 필요한 실정이다.

따라서 토사유출은 강수조건에 따라 크게 좌우되므로 목표수질 설정 및 달성도 평가 시에는 장기간 강수 및 유량조건 고려 필요하며 도암호의 경우에도 장기간 강수조건 고려시 안정적인 목표수질 달성을 위해 기존의 사후측면에서의 흙탕물 저감 방안이 아닌 발생원 관리 측면에서의 지속적인 관리가 필요 할 것으로 판단된다.

본 연구는 도암호 유역의 장기 토사유출 저감 평가 시 연도별 변화 하는 토사유출 저감 기법은 적용하였으나 토지이용변화는 적용되지 못했기 때문에 이에 대한 한계가 있으며 향후 이러한 부분까지 고려된 토사유출 저감 효과 평가도 추가적으로 필요 할 것으로 판단된다.

■ 참고문헌 ■

- 강원도, 2010, 『도암호 비점오염원관리지역 관리대책 시행계획』, 강원: 강원도.
 _____, 2017, 『도암호 비점오염원관리지역 관리대책 시행계획 이행평가보고서』, 강원:

강원도.

- 곽성진·발데브·김은정·이창근·이형진·허우명, 2013, “도암호 유역의 강우시 비점오염 물질 유출 특성,” 『한국하천호수학회지』, 45(1), pp.62-71.
- 국립환경과학원, 2010, 『수질오염총량관리를 위한 유역관리모델 적용방안 연구』, 인천: 국립환경과학원.
- _____, 2016, 『도암호 유역 고령지발 비점오염원 관리 및 저감 방안(II)』, 인천: 국립환경과학원.
- _____, 2017, 『비점오염원 관리 및 물순환 개선을 위한 맞춤형 정책지원 연구 (II)』, 인천: 국립환경과학원.
- 박경훈·김병석·윤혜정·류경열·윤종철·최준열 등, 2012, “대관령지역 주요하천 및 도암호의 수질 특성,” 『한국토양비료학회지』, 45(6), pp.882-889.
- 박창근, 2015, “4대강 녹조발생 위험성과 정부대응의 문제점,” 『한국수자원학회 물과미래 학술지』, 48(10), pp.41-50.
- 원주지방환경청, 2014a, 『소양호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(IV)』, 원주: 원주지방환경청.
- _____, 2014b, 『도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(VI)』, 원주: 원주지방환경청.
- _____, 2015, 『도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(VII)』, 원주: 원주지방환경청.
- _____, 2016, 『도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(VIII)』, 원주: 원주지방환경청.
- _____, 2017, 『도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(IX)』, 원주: 원주지방환경청.
- 이석종·김종철·원운재·박충기·신용건·은주영 등, 2012, “도암호의 수질 변화 및 수질 개선처리 효과,” 『보건환경연구원보』, 23, pp.91-97.
- 이상하·이광열·장영수·임인수·허우명·김재구 등, 2006, “도암호의 수질과 어류군집 특성 연구,” 『한국육수학회지』, 39(2), pp.167-177.
- 이수인·신재영·신민환·주소희·서지연·박운지 등, 2017, “장기 모니터링을 통한 고령지발 지역의 비점오염물질 유출특성,” 59(4), pp.85-96.
- 최용훈·원철희·서지연·신민환·양희정·임경재 등, 2009, “평지발과 고령지발의 비점오염에 대한 분석과 비교,” 『한국물환경학회지』, 25(5), pp.682-688.
- 최재완·신동석·임경재·이상수·강민지, 2012, “강수조건에 따른 도암호 부유물질 평가,” 『한국환경농학회지』, 31(2), pp.113-121.
- 한국건설기술연구원, 2007, 『지표수 수문성분 해석시스템 개발』, 경기도: 한국건설기술연구원.
- 한국농어촌공사 한국농어촌연구원, 2007, 『농촌지역 비점오염물질 관리방향 연구 및

- 기술개발』, 경기도: 한국농어촌공사 한국농어촌연구원.
- 한국수력원자력, 2005, 『도암댐 문제해결을 위한 연구』, 경상북도: 한국수력원자력.
- 환경부, 2012, 『제2차 비점오염원종합대책』, 세종: 환경부.
- _____, 2018a, 『물환경보전법』, 세종: 환경부.
- _____, 2018b, 비점오염원관리지역 지정 고시 제2018-78호.
- 현근우·박성빈·박정희·전상호·최재완·김기성 등, 2010, “WEPP 모델을 이용한 고랭지 밭 경사도별 침사지 적정용량 산정방법”, 52(5), pp.87~94.
- Green, W. H. and G. Ampt, 1911, “Studies of soil physics, part I - The flow of air and water through soils,” *Journal of Agriculture Science*, 4, pp.1-24, DOI:10.1017/S0021859600001441.
- Netisch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005, *Soil & water assessment tool theoretical documentation version 2005*, Soil and Water research Lavatory, Agricultural Research Service: Temple, TX, USA.
- Soil Conservation Service (SCS), 1972, *National engineering handbook, section 4, hydrology*, Department of Agriculture, US Government Printing Office: Washington, DC, USA.

류지철: 강원대학교에서 박사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 유역총량 연구과에서 환경연구사로 재직 중이다. 주요 관심분야는 수질오염총량관리, 수자원, 유역모델링, 비점오염원관리, 유역관리계획 등 이다(ryu0402@korea.kr).

김진선: 서울시립대학교에서 석사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 유역총량연구과에서 전문위원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 비점오염원, 유역모델링, 유역관리계획 등 이다(kjs1235@korea.kr).

최지연: 공주대학교에서 박사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 유역총량 연구과에서 전문위원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 비점오염원, LID, GI, 인공습지, 유역관리계획 등 이다(yeonjichoi@korea.kr).

장희선: 한국교통대학교에서 석사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 유역총량연구과에서 전문위원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 비점오염원, 유역모델링, 유역관리계획 등 이다(jhs0522@korea.kr).

신동석: 서울대학교에서 박사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 유역총량 연구과 과장으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 수질오염총량관리, 비점오염원 관리, 유역모델링 등이다(sds8488@korea.kr).

이재관: 부경대학교에서 박사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부에서 부장으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 물환경평가, 수생태계 건강성 및 유역관리 등이다(jkleenier@korea.kr).

나은혜: 이화여자대학교에서 박사학위를 취득하고 국립환경과학원 물환경연구부 물환경평가연구과에서 환경연구관으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 비점오염원, 수자원 유역모델링, 유역관리계획 등 이다(eunye@korea.kr).