

# 공간분포형 모델을 이용한 최적관리방안의 토사 유출 저감 효과에 관한 연구

이태수\*

## Analyzing the Effectiveness of a Best Management Practice on Sediment Yields Using a Spatially Distributed Model

Taesoo Lee\*

**요약 :** 유역에서의 수질관리를 수행함에 있어 비점오염원의 관리는 매우 중요하면서 복잡한 경우가 많다. 비점 오염원의 관리에서 가장 우선시 되는 것은 토사 유출량의 관리이다. 이는 주로 농경지에서 유출되는 토사와 그에 흡착된 인(phosphorous)을 관리하는 것이다. 이 연구에서는 전라남도 화순군에 위치하고 주암호의 상류에 해당되는 외남천 유역의 유출량과 토사 유출량을 공간분포형 모델을 이용해 모의하였다. 또한 필터스트립의 저감 효과를 분석하기 위해 GIS(Geographic Information System) 데이터를 이용하여 필터스트립을 모의하고 공간분포형 모델의 특성을 이용하여 토사 유출량이 심각한 지역의 공간분포를 파악하고 필터스트립의 저감 효과를 시각적으로 나타내었다. 토사 유출량이 가장 심한 소유역에 필터스트립을 설치한 결과 유출수와 토사 유출량이 각각 17.2%와 46.4%가 감소되는 것으로 예측되었다.

**주요어 :** 비점오염원, 토사, 필터스트립, SWAT, GeoWEPP

**Abstract :** Management of non-point sources for water quality control practice is complicating but very important. Sediments mainly from croplands are prioritized in non-point source management due to the sediment attached phosphorous. In this study, flow and sediment yields are modeled in Oenam watershed located in Hwasun, Jeollanam-do, a upstream of Juam Lake. A spatially distributed model and GIS(Geographic Information System) data was used to find out hot spots of sediment yields, to analyze the effectiveness of filter strips, and to visualize the effectiveness. The impacts of filter strips was estimated on the reduction of flow and sediments at 17.2% and 46.4% respectively when the filter strips were installed in the sub-watersheds with the most serious sediment yields.

**Key Words :** Filter Strip, GeoWEPP, Non-point sources, Sediment, SWAT

### 1. 서론

유역 전반에 걸친 비점오염원(non-point sources)의 관리는 유역 내 혹은 하류에서의 수질 오염을 최소화

하는데 매우 중요하다. 특히 농업지역에서의 토사와 인(P, Phosphorous) 유출은 하류에서의 부영양화에 직접적인 영향을 주기 때문에 주요 관리대상이 되어 왔다. 비점오염원 중에서 특히 토사 유출은 농업지역

이 논문은 2013년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\* 전남대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Dept. of Geography, Chonnam National University), taesoo@jnu.ac.kr

으로부터의 유출뿐만 아니라 경사도가 큰 곳에서 유출이 되기 쉬운데 토사에 흡착된 인 때문에 수질모델링에서 가장 우선적으로 고려되고 있다.

농경지로부터의 토사나 영양염류 등의 비점오염원 유출을 감소시키는 방법으로 필터스트립(Filter Strip)이나 초지수로와 같은 최적관리방안(BMP, Best Management Practice)이 널리 이용되고 있다. 최적관리방안은 종류와 환경에 따라 다르지만 일반적으로 유역으로부터 유출되는 유출수와 토사, 총인(Total P), 총질소(TN, Total Nitrogen)를 약 30%에서 70%까지 감소시키는 것으로 보고되고 있다(USEPA, 2002).

이러한 최적관리방안을 모델링 하는 것은 유역으로부터 유출되는 토사 및 총인, 총질소 등의 감소를 시뮬레이션 함으로써 유역관리와 유역의 수질관리에 대한 예측 값을 제시하고 있다. 최적관리방안의 토사 및 영양염류 저감 효과는 유역으로부터 배출되는 비점오염원 관리에 효과적이며 지금까지 필드 및 모델링 연구들(Pearce *et al.*, 1998; Dabney *et al.*, 1999; Lowrance *et al.*, 2002; Bracmort *et al.*, 2004; Betrie *et al.*, 2011; Fox and Penn, 2013; Winston *et al.*, 2017)에 의해 입증되어 왔다. 하지만 많은 경우(Lee *et al.*, 2010; Fox and Penn, 2013; Wang *et al.*, 2013) 모델의 기술적 특성으로 인해 소유역 단위로(Off-Site) 예측할 수밖에 없는 한계가 있었다. 따라서 공간분포형 모델(Spatially Distributed Model)을 이용한 비점오염원 집중관리 대상지역(hot spot)의 도출과 최적관리방안이 설치되어 있는 곳(On-Site)에서의 저감 효과를 시각적으로 나타내는 연구는 유역관리와 최적관리방안 설치를 위한 계획 수립에 도움을 줄 수 있다. 하지만 이러한 연구(Renschler and Lee, 2005; Meghdadi, 2013; Haque, 2016)는 비교적 드물며 우리나라에서는 거의 소개되지 않은 실정이다.

최적관리방안 중에서 필터스트립은 하천의 양안에 5~15m 폭의 초지를 설치하는 것으로 사면으로부터 발생하는 유출수가 초지 식생의 저항으로 인해 유속이 줄어들어 토사를 침전시키고 초지의 식생에 의하여 영양염류를 소비하게 하는 최적관리방안이다(Novotny *et al.*, 1994). 필터스트립은 환경에 따라 다

소 차이는 있지만 설치비용 대비 저감율이 가장 높은 것으로 평가되고 있다(Lee *et al.*, 2010; Naveen *et al.*, 2013).

이 연구에서는 수문 모델 중 공간분포형 모델인 GeoWEPP(Geospatial Interface of Water Erosion Prediction Project, Renschler, 2003)을 이용하여 최적관리방안에서 가장 널리 이용되는 필터스트립의 저감 효과를 On-Site에서 확인하고자 하였다. 이 연구의 목적은 첫째, 기존 연구(이태수, 2016)에서 SWAT(Soil and Water Assessment Tool, Arnold *et al.*, 1998) 모델로 모의한 유역에 대해 GeoWEPP를 적용하여 그 결과를 비교하고, 둘째, 공간분포형 모델을 이용하여 토양 침식이 발생하는 지역의 공간적 분포와 필터스트립의 토사 유출 저감 효과를 분석하고 이를 시각화 하는데 있다.

## 2. 연구방법

### 1) 연구지역

외남천은 전라남도 화순군 남면과 한천면에 위치하고 있는 지방하천으로 섬진강 수계의 일부이다(그림 1). 외남천 총연장은 15.6km이며 유역면적은 58.4 km<sup>2</sup>인 비교적 작고 전형적인 농촌 유역이며 주암호의 상수원 중 하나이다. 주암호는 광주광역시와 전라남도 일부 지역 약 250만 명에게 생활용수를 공급하는 이 지역 최대 상수원이기 때문에 영산강물환경연구소는 주암호의 수질 관리를 위하여 주변 지류들에 대한 수질조사를 실시하였고 외남천은 연구 대상 하천으로 선정되어 1차(2001~2003)(한국헌 등, 2005)와 2차(2007~2008)(최동호 등, 2012)에 걸쳐 수질 및 수량 모니터링을 실시하였다. 이태수(2016)는 추가적으로 2012년부터 2013년까지 2년 간 모니터링을 수행하였다.

표 1과 그림 4(a)는 외남천 유역의 토지이용을 나타내는데 외남천 유역의 대부분은 산림(81%)이며 다음으로 논(10%), 밭(5%), 주거지 및 기타(4%)로 이용되

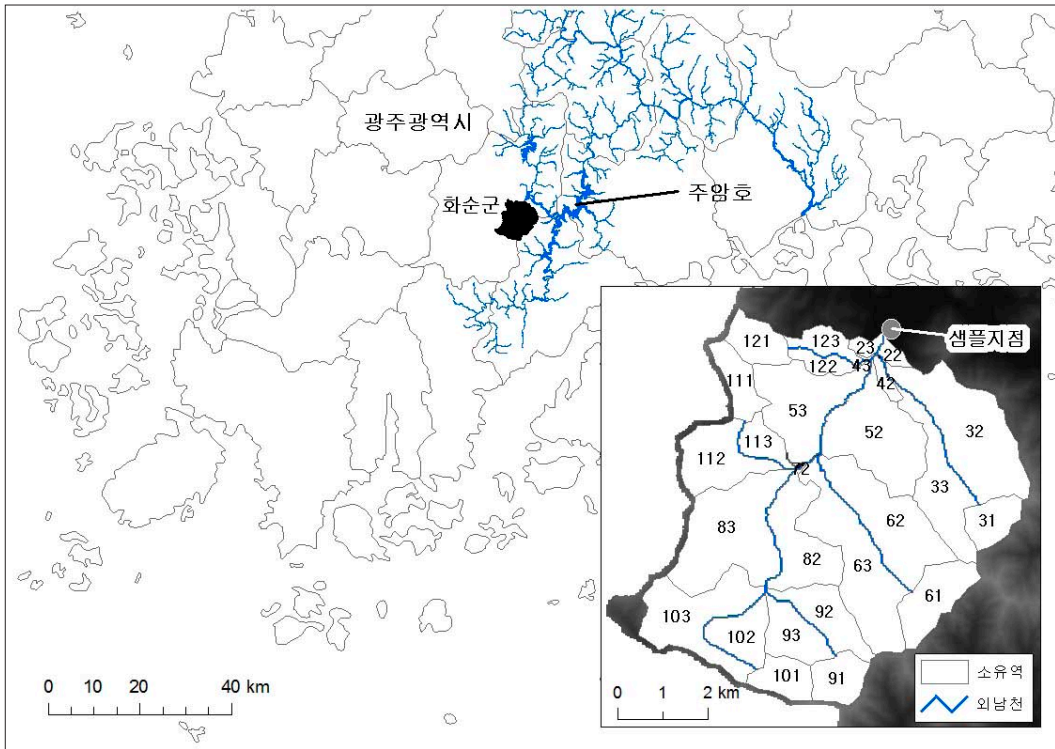


그림 1. GeoWEPP 모델에 의해 나누어진 외남천 소유역과 샘플 지점 위치

표 1. 외남천 유역의 토지이용

	임야	논	밭	주거지/기타	계
면적(km <sup>2</sup> )	47.3	5.8	2.9	2.4	58.4
비율	81%	10%	5%	4%	100%

고 있다. 유역 내 인구는 약 2,000여명이며 전형적인 농촌 유역으로 가금류를 포함한 가축은 약 60,000마리가 사육되고 있다(최동호 등, 2012).

## 2) 기존 연구

이태수(2016)는 2012년부터 2013년까지 2년간 4월부터 10월까지 외남천 유역의 출구(사평교)에서 수위와 수질을 측정하였다(그림 1). 수위 측정은 압력식 자동수위측정기(독일 OTT사의 Orpheus Mini)를 이용하여 15분 간격으로 자동 측정하였고 수질은 매 2주마다 1회, 그리고 강우가 발생하는 날 강우의 크기

에 따라 별도로 샘플링(grab-sample)을 실시하였다. 측정된 수위는 수량-수위 관계식(최동호 등, 2012)에 따라 수량으로 변환하였고 수집된 수질 샘플은 분석기관에 의뢰하여 부유토사량(Suspended Solid)과 총인(Total Phosphorous)을 각각 분석하였다.

수량 및 수질 데이터를 SWAT을 이용하여 2012년부터 2013년까지 2년간의 유출량과 부유토사량, 총인을 보정단계(2012년)와 검증단계(2013년)로 나누어 모의하였고 모델 결과를 소유역 단위로 나타내었다(자세한 내용은 이태수(2016) 참조). 모델의 보정 결과(표 2) 유출량은 실측값보다 약 8.6% 정도 적게 예측되었고 부유토사량은 3.1%, 총인은 17.9%를

표 2. 모델 보정단계(2012)의 실측값과 예측값(이태수, 2016)

구분	실측값	예측값	비교
유출량 (m <sup>3</sup> /s)	590.6	539.6	-8.6%
부유토사량 (mg/L)	135.1	139.3	+3.1%
총인 (mg/L)	0.2538	0.2993	+17.9%

표 3. 모델 보정단계(2012)의 실측값과 예측값(이태수, 2016)

구분	실측값	예측값	비교
유출량 (m <sup>3</sup> /s)	324.3	366.1	+12.9%
부유토사량 (mg/L)	55.0	109.9	+99.8%
총인 (mg/L)	0.1960	0.2757	+40.7%

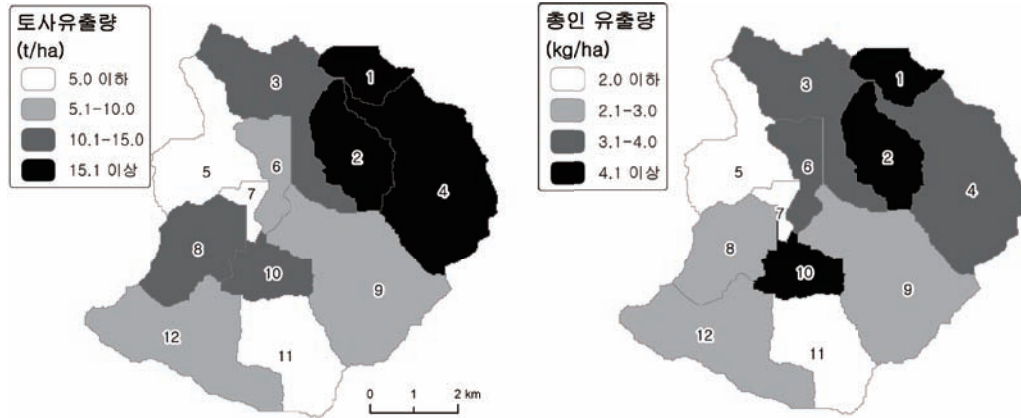


그림 2. SWAT 모델이 예측한 소유역별 토사유출량과 총인 유출량(이태수, 2016)

각각 높게 예측되었다. 모델의 검정 결과(표 3) 유출량은 약 12.9% 정도 높게 예측되었고 부유토사량은 99.8%, 총인은 40.7%를 각각 높게 예측되었다. 토사량의 경우 SWAT 모델은 하상물질까지 모두 포함하여 모의하지만 실측값은 부유물질만 샘플링 하였기 때문에 토사량의 예측값이 더 큰 것으로 생각된다. 총인 또한 일반적으로 토사량과 비례하므로 토사량의 초과 예측이 총인량의 초과 예측에 영향을 준 것으로 분석되었다.

외남천의 토사 유출량과 총인 유출량을 소유역별로 모의한 결과 토사유출량은 소유역 1, 2, 4번에서 가장 높게 나타났고 총인유출량은 소유역 1, 2, 10번

에서 가장 높게 예측되었다(그림 2). 유역 내 각 토지 이용별 총인유출량을 분석한 결과 전체 유역 면적의 5%에 지나지 않는 밭이 가장 많은 53.6%를 배출하는 것으로 예측되었다.

### 3) 데이터와 GeoWEPP 모델

강수량, 최고기온, 최저기온, 습도, 풍속, 복사량 등을 포함한 기상 데이터는 광주광역시 기상청(<http://www.kma.go.kr>)으로부터 획득하였고, 30m 해상도의 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS,

<http://www.wamis.go.kr>)으로부터 획득하였다.

WEPP(Water Erosion Prediction Project)(Lafren *et al.*, 1991) 모델은 미국 농무성 농업연구소(USDA-ARS)에서 USLE(Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1959)을 대체하기 위해 개발된 모델로(Flanagan and Nearing, 1995) 소규모 지역의 유출 및 토양침식을 예측하는 물리적 모델이자 연속형 모델이다. GeoWEPP은 GIS(Geographic Information System) 데이터를 이용하여 WEPP을 구현할 수 있도록 개발된 공간분포형 모델이다. SWAT 모델은 유출수와 토사는 물론 영양염류의 유출까지 예측하는 반면 WEPP은 유출수와 토사의 유출량만 예측하는 모델로 GeoWEPP 또한 영양염류는 모의하지 않는다. GeoWEPP의 특징은 유출수와 토사 유출을 각 소유역별로 예측함(Off-Site)과 동시에 각 셀(Cell)에서의 토사 유출을 모의함(On-Site)으로써 모델의 결과물을 입력 데이터와 같은 해상도로 시각화 할 수 있다는 점이 특징이다.

이 연구에서는 우선 GeoWEPP을 이용하여 DEM으로부터 각 소유역경계와 하천을 도출하였다(그림 1). 기존 연구(이태수, 2016)에서 SWAT을 이용해 총 12개의 소유역을 도출한 것(그림 2)과는 달리 이 연구에서 사용된 GeoWEPP은 같은 400ha의 하천 형성 임계면적(maximum area threshold)을 이용하여 총 27개의 소유역을 도출하였다. 토지이용도와 토양도, 그리고 기상데이터를 모델에 입력하여 각 소유역으로부터(Off-Site) 그리고 각 Cell(On-Site)에서의 유출량과 토사 유출량을 예측하였다.

필터스트립을 모델에 구현을 위하여 토양침식이 가장 많이 발생하는 소유역을 선정하고 하천 양측에 일정 폭의 토지를 토지이용도 데이터 상에서 초지로

변형하였다. 필터스트립이 설치될 부분의 토지이용 변경은 래스터 데이터를 ASCII 파일로 변환한 후 토지이용 코드를 편집하고 다시 래스터 파일로 전환하는 방법으로 구현하였다. 하지만 이 연구에서 사용하는 데이터의 해상도가 30m인 관계로 필터스트립의 폭을 30m로 설정해야 하는 한계가 있었다. 전체적인 모의 순서는 먼저 유역에 대한 모델을 구축하여 유출수와 토사 유출량을 예측한 후 필터스트립 시나리오를 위해 토지이용도 데이터에서 하천 주변의 토지이용을 초지로 변경하여 다시 한 번 모델을 실행하였다.

### 3. 결과

연구 기간 2년 동안 GeoWEPP 모델은 외남천의 연평균 유출량과 토사 유출량은 각각 433.7m<sup>3</sup>/s와 115.3 mg/L로 예측하였다(표 4). 실측치와 비교해 보면 유출량은 5.2% 적게 예측한 반면 토사 유출량은 21.2% 많게 예측하였다. SWAT의 예측(이태수, 2016)과 비교해 보면 유출량과 토사 유출량 모두 GeoWEPP이 다소 적게 예측하였음을 볼 수 있다. 토사 유출량을 두 모델에서 모두 초과 예측한 이유는 전술한 바와 같이 SWAT과 GeoWEPP 모델은 하상의 토사 유출을 포함하여 총 토사 유출량을 예측하지만 샘플링을 통한 부유 토사량 실측은 부유물질만 측정했기 때문이다.

토사 유출량을 소유역별로 분석해보면 그림 3과 같다. 토사유출량은 소유역 22, 23, 31, 32, 33, 42, 52, 83에서 각각 15t/ha/y 이상으로 가장 높게 나타났는데 이는 SWAT의 예측(그림 2)과 비교해 볼 때 소유

표 4. 실측값과 SWAT 및 GeoWEPP 예측값 비교

구분	실측값	SWAT*		GeoWEPP	
		예측값	오차	예측값	오차
유출량 (m <sup>3</sup> /s/y)	457.5	452.9	-1.0%	433.7	-5.2%
토사 유출량 (mg/L/y)	95.1	124.6	+31.0%	115.3	+21.2%

\* 이태수(2016)



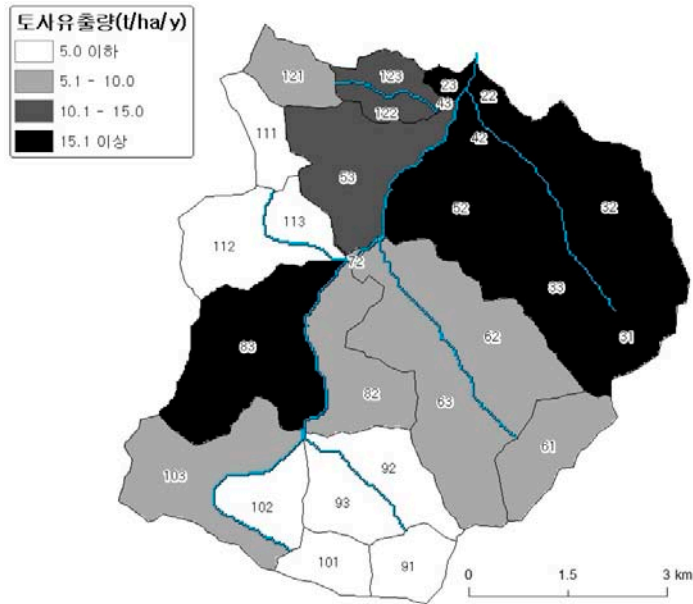


그림 3. 소유역별 토사유출량(Off-Site)

역별로 다소 차이는 있지만 토양 침식이 큰 소유역의 분포 경향은 비슷하게 나타났으며 두 모델 모두 외남천 유역의 북동부 지역에서 가장 많은 토양 유출을 예측하였다. 그 이유로 그 지역은 다른 소유역들에 비해 상대적으로 토사를 많이 유출하는 밭의 비율이 높을 뿐만 아니라 경사도가 비교적 큰 지역이기 때문으로 보인다.

그림 4에서 (A)는 외남천 유역의 토지이용도이고 (B)는 GeoWEPP 모델의 결과로 각 Cell의 토사 유출량을 나타낸다(On-Site). 토양침식 결과에서 T값은 1t/ha/yr로 각 900m<sup>2</sup>(30m×30m) 넓이의 Cell에 해당하는 면적에서 발생하는 연간 토사 유출량을 의미한다. 토사 유출량이 많은 곳들은 토지이용도와 비교했

을 때 밭에 해당되는 지역과 비슷한 패턴을 보이고 있으며 특히 유역의 북동부 지역 소유역들은 토사 유출이 많을 뿐만 아니라 소유역 전반에 걸쳐 토양 침식이 발생하고 있음을 알 수 있다.

토사 유출이 가장 많은 소유역 32, 33의 하천 양안에 30m 폭의 필터스트립을 모델에 구현한 결과 소유역 전체로는 17.2%의 유출수 저감과 46.4%의 토사 유출량 저감 효과를 나타냈다(표 5). 2012년은 강수량이 1,284.3mm로 2013년 987.4mm에 비해 상대적으로 강수량이 많은 기간으로 유출량과 토사 유출량이 2013년에 비해 많으며 따라서 필터스트립의 저감 효과도 더 큰 것으로 보인다. 한편 각 Cell의 토양 침식량 및 퇴적량을 보면 필터스트립이 설치된 Cell들

표 5. 유출수와 토사 유출량의 필터스트립 저감 효과(소유역 32, 33)

기간	유출수(m <sup>3</sup> /s)			토사 유출량(t/ha/yr)		
	예측값	저감량	저감율	예측값	저감량	저감율
2012	46.8	8.4	17.9%	23.7	12.8	54.0%
2013	14.9	2.2	14.8%	12.4	4.0	32.3%
평균	30.9	5.3	17.2%	18.1	8.4	46.4%

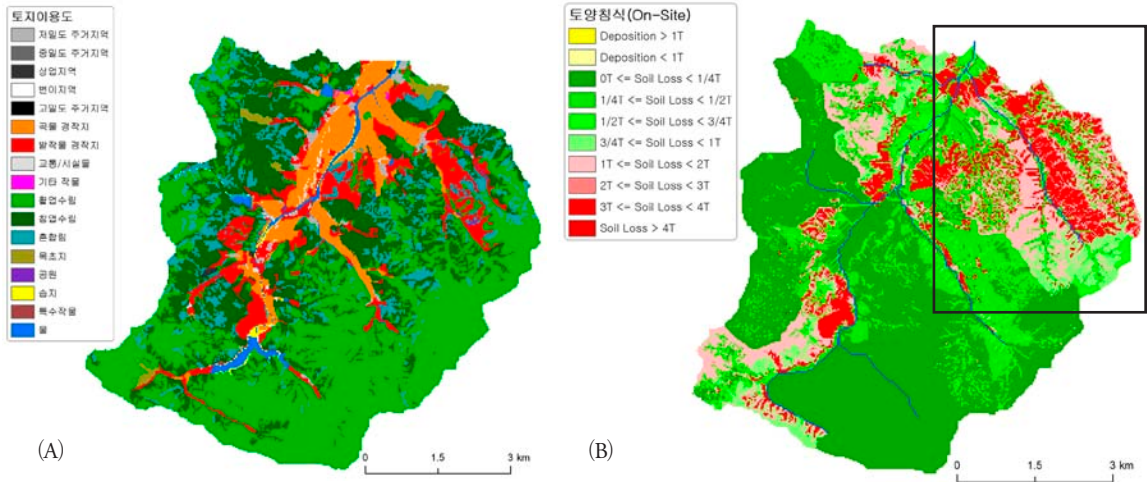


그림 4. 외남천의 토지이용과 토양침식(On-Site)

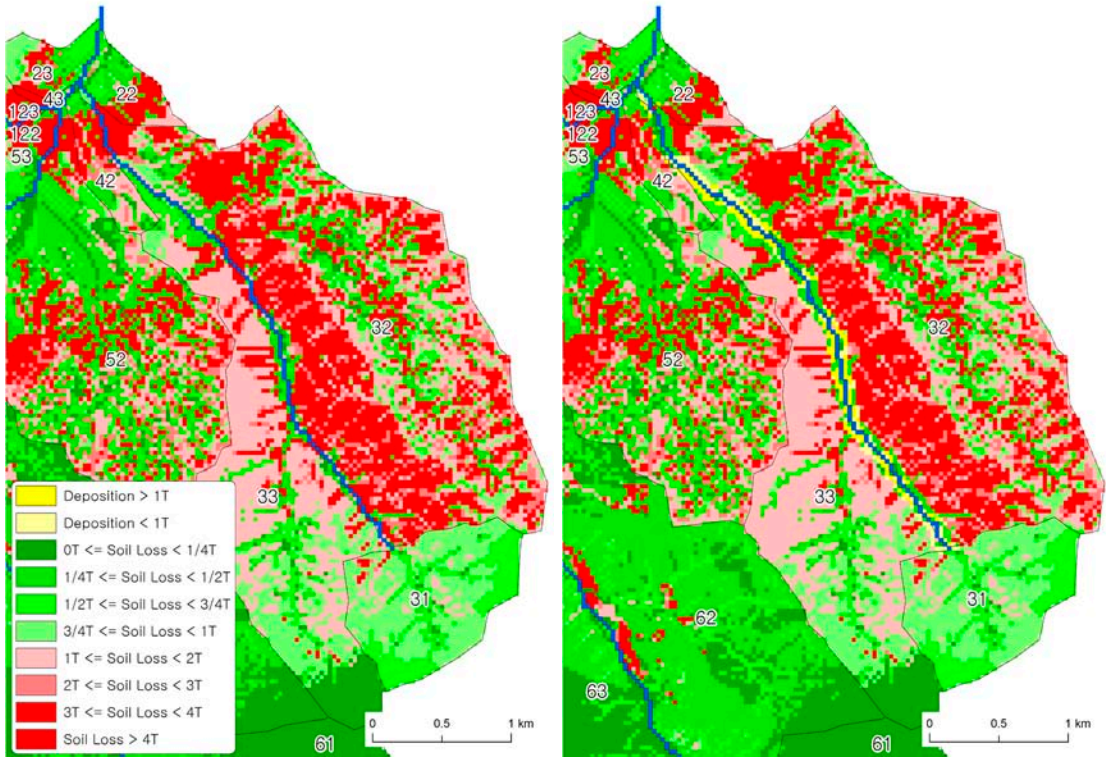


그림 5. 외남천 유역 북동부 지역 필터스트립 저감 효과의 시각화

과 일부 주변 Cell들에서 토양 침식이 현저히 감소하였거나 많은 경우 퇴적이 발생함을 볼 수 있다(그림 5). 이는 사면으로부터 하천으로 유입되는 토사가 필

터스트립을 지나면서 상당부분 퇴적되고 있음을 모델상에서 보여주는 것으로 이러한 필터스트립의 저감 효과의 시각적 표현은 유역관리에 있어서 필터스

트립 설치 계획에 도움을 줄 것으로 생각된다. 단, 각 Cell에 표현된 토양 침식량과 퇴적량은 사면에서 유출수가 흐르는 유출경로(flowpath)에 따른 누적량이 아닌 각 Cell 마다의 독립적인 토양 유출량 혹은 퇴적량을 의미한다.

#### 4. 논의

필터스트립은 사면으로부터 하천으로 유입되는 유출수와 토사, 그리고 영양염류 등을 감소시켜 수질을 보전하기 위해 설치되는 것으로 일반적으로 그 폭을 각 5~15m 정도로 설치한다. 하지만 전술한 바와 같이 이 연구에서는 GIS 데이터의 해상도가 30m인 관계로 모델에서의 필터스트립 또한 하천 양안에 각각 30m의 초지로 구현되었다. 따라서 15m 넓이 이하의 필터스트립에 비해 토사의 저감 효과가 다소 크게 나타났을 것으로 예상된다. 다만 필터스트립의 저감 효과는 폭의 넓이와 선형관계로 비례하는 것은 아니며 15m 이상의 폭에서는 폭이 넓어질수록 저감 효과의 증가율이 일반적으로 큰 폭으로 감소한다. 30m 폭의 필터스트립의 경우 저감 효과는 15m 폭에 비해 약 10% 이내로 증가하는 것으로 연구되었다(Lawrance *et al.*, 2002). 따라서 이 연구에서 이용된 30m 폭의 필터스트립은 현실성이 낮다 하더라도 그 저감 효과의 차이는 매우 크지는 않을 것으로 생각된다.

GeoWEPP은 토사 유출의 결과물을 소유역 단위(Off-Site, 그림 3)와 Cell 단위(On-Site, 그림 4) 두 가지로 나타낸다. 소유역 단위 결과물은 소유역 내에서 발생하는 토양 침식량을 모두 합하여 소유역 전체의 값으로 표현하며 Cell 단위의 결과물은 각 Cell에서 발생하는 토양 침식을 해당 Cell의 값으로 부여하여 나타낸다. GeoWEPP은 각각의 하천 Cell에 상류(사면)로부터 도달하는 유출수의 흐름을 파악하여 유출 경로를 계산한다. 하지만 그림 4에서 나타난 각 Cell의 토양 침식률은 앞서 설명한 바와 같이 유출 경로에 따라 누적되는 토양 침식률이 아니라 각 Cell에서 나타나는 토양 침식률을 독립적으로 나타낸 것이다.

GeoWEPP은 모델의 결과물을 공간적 분포로 나타내어 집중관리지역(hot-spot)이나 최적관리방안의 저감 효과를 시각화할 수 있다는 장점이 있지만 각각의 Cell에 나타나는 토사 유출량의 값은 아직 검증되지 않은 것이다(Renschler, 2003). 유역이나 소유역 전체의 유출수와 토사 유출량은 일반적으로 유역의 출구에서 실측 데이터를 획득 한 후 모델의 보정과 검증 작업을 수행하지만 유역 내 각 Cell에 해당하는 범위에서 실측 데이터를 획득하는 것은 거의 불가능한 것으로 실측 데이터가 존재하지 않는 한 모델의 보정과 검증이 불가능하기 때문이다. 이러한 공간분포형 모델에 대한 보정과 검증은 매우 드물게 수행되고 있는데 이러한 연구들은 세슘(Cesium-137) 등과 같은 희유원소(rare earth elements)를 이용하여 연구되어지고 있다(Polyakov and Nearing, 2004).

#### 5. 결론

수질 보전을 위한 유역관리에 있어서 비점오염원의 관리는 매우 중요하며 비점오염원의 저감을 위한 대책을 마련하는 것이 유역의 수질관리에 필수적인 요소이다. 비점오염원은 그 출처가 불분명한 경우가 많고 유역 내에서도 공간적으로 다양하게 분포하는 경향이 있으므로 모델을 이용한 모의를 통해 집중관리 대상지역을 파악하여 관리하는 것이 효율적이라 할 수 있다. 또한 최적관리방안을 이용하여 비점오염원을 관리하는데 앞서 모델링을 통한 저감 효과의 분석은 시간과 비용을 줄이는데 매우 큰 역할을 할 것으로 보인다.

이 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 외남천 유역에 대한 SWAT 모델과 GeoWEPP 모델의 예측 결과를 비교 분석하였다. GeoWEPP 모델은 SWAT에 비해 유출량과 토사 유출량을 낮게 예측하였다. 토사 유출량은 두 모델이 모두 실측값에 비해 높게 예측하였는데 이는 실측값은 부유 토사량만을 측정하는데 비해 모델들은 하상물질의 유출까지 포함하여 예측했기 때문으로 분석된다.



공간분포형 모델인 GeoWEPP을 이용하여 각 소유역의 유출량과 토사 유출량을 예측함과 동시에 각 Cell에서의 토사 유출량을 예측함으로써 토사 유출이 심각하다고 예상되는 지역의 분포를 파악할 수 있었다. GeoWEPP은 모델의 특성상 SWAT의 도출한 소유역보다 더 많은 수의 소유역을 도출하는데 각 소유역별 토사 유출량은 SWAT이 예측한 각 소유역의 토사 유출량과 다소 차이는 있었으나 전체적인 추세와 분포는 비슷하였다. 외남천 유역에서 토사 유출이 큰 곳은 농경지, 특히 밭의 분포와 관계가 깊었으며 특히 북동부 지역에서 토사의 유출량이 크게 나타났는데 이는 이 지역에 상대적으로 밭이 많이 분포할 뿐만 아니라 상대적으로 큰 경사도에도 영향을 받은 것으로 보인다.

필터스트립의 저감 효과를 보기 위해 토양 침식이 가장 활발한 소유역 32와 33에 30m 폭의 초지를 하천 양안에 설치한 결과 유출수와 토양 유출량이 각각 17.2%와 46.4%가 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 필터스트립이 설치된 Cell은 토양침식이 현저히 감소했거나 많은 경우 오히려 퇴적이 발생하여 필터스트립의 저감 효과를 파악할 수 있었다. 이러한 필터스트립의 토양 유출 저감 효과를 공간분포형 모델에서 시각적으로 표현하는 것은 유역의 종합적인 수질관리 계획에 있어서 직관적인 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

이 논문은 2013년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- 이태수, 2016, "SWAT 모델을 이용한 외남천 유역의 토사 및 총인 유출량 분석," 한국지역지리학회지, 22(1), 240-250.
- 최동호·정재운·이경숙·최유진·조소현·박하나·임병진·장남익, 2012, "유량-부하량관계식을 이용한 주암호 외남천 유역의 유황별 유달을 산정," 한국환경과학회지 21(1), 31-39.
- 한국현·윤광식·정재운·윤석균·김영주, 2005, "주암호 농촌 소유역 오염부하특성," 한국농공학회논문집 47(3), 77-86.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R., 1998, Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Betrie, G. D., Mohamed, Y. A., van Griensven, A., and Srinivasan, R., 2011, Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model, *Hydrology and Earth System Science*, 15(3), 807-818
- Bracmort, K.S., Engel, B.A. and Frankenberger, J.R., 2004, Evaluation of structural best management practices 20 years after installation: Black Creek Watershed, Indiana, *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(5), 659-667.
- Dabney, S. M., Liua, Z., Lanec, M., Douglasc, J., Zhua, J., and Flanagan, D.C., 1999, Landscape benching from tillage erosion between grass hedges, *Soil & Tillage Research*, 51, 219-231.
- Flanagan, D. C. and Nearing, M. A., 1995, USDA - Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation, National Soil Erosion Research Laboratory Report No. 10. West Lafayette, Indiana.
- Fox, G. A. and Penn, C. J., 2013, Empirical model for quantifying total phosphorus reduction by vegetative filter strips, *Transactions of the ASABE*, 56(4), 1461-1469.
- Haque, M. Z., Rahim, S., Abdullah, M. P., Embi, A. F. and Elfithri, R., 2016, Predicting Sediment Load and Runoff in GeoWEPP Environment from Langat Sub Basin, Malaysia, *Nature Environment and Pollution Technology; Karad*, 15(3), 1077-1082.
- Laffen, J. M., Lane, L. J. and Foster, G. R., 1991, WEPP: A new generation of erosion prediction technology, *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1), 34-38.

- Lee, T., Rister, M. E., Narasimhan, B., Srinivasan, R., Andrew, D. and Ernst, M. R., 2010, Evaluation and spatially distributed analyses of proposed cost-effective BMPs for reducing phosphorous level in Cedar Creek Reservoir, Texas, *Transaction of ASABE*, 53(5), 1619-1627.
- Lowrance, R., Dabney, S. and Schultz, R., 2002, Improving water and soil quality with conservation buffers, *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(2), 36A-43A.
- Meghdadi, A. R., 2013, Identification of effective best management practices in sediment yield diminution using GeoWEPP: the Kasilian watershed case study, *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(12), 9803-9817.
- Naveen C. A., Rister, E. D., Lacewell, R. D., Lee, T., Blumenthal, J., and Srinivasan, R., 2013, The Economics of Mitigating Effects of BioEnergy Production on Water Quality, *Conference Proceeding of University Council on Water Resources*, June 11, 2013, Tahoe, CA.
- Novotny, V. and Olem, H., 1994, *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- Pearce, R. A., Trlica, M. J., Leininger, W. C., Mergen, D. E., and Frasier, G. W., 1998, Sediment movement through riparian vegetation under simulated rainfall and overland flow, *Journal of Range Management*, 51, 301-308.
- Polyakov, V. O. and Nearing, M. A., 2004, Rare earth element oxides for tracing sediment movement, *Catena*, 55, 255-276.
- Renschler, C. S., 2003, Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach, *Hydrological Processes*, 17, 1007.
- USEPA, 2002, *National Water Quality Inventory*, Washington DC, Report no. EPA-841-R-02-001.
- Wang, X., White, M., Tuppard, P., Lee, T., Srinivasan, R., Zhai, T., Andrews, D. and Narasimhan, B., 2013, Simulating sediment loading into the major reservoirs in Trinity River Basin, *Journal of Soil and Water Conservation Society*, 68(5), 372-383.
- Winston, R. J., Anderson, A. R., and Hunt, W. F., 2017, Modeling Sediment Reduction in Grass Swales and Vegetated Filter Strips Using Particle Settling Theory, *Journal of Environmental Engineering*, 143(1), 1-12.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1959, *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No.82.
- 교신: 이태수, 61186, 광주광역시 북구 용봉로 77, 전남대학교 사회과학대학 지리학과(이메일: taesoo@jnu.ac.kr)  
Correspondence: Taesoo Lee, Department of Geography, Chonnam National University, 77 Yongbong-Ro, Buk-Gu, Gwangju 61186, Korea (e-mail: taesoo@jnu.ac.kr)

최초투고일 2017. 2. 8  
수정일 2017. 2. 15  
최종접수일 2017. 2. 20