

비점오염 저감기법 효과분석 도구 개발

Development of the Tool of Assessing Best Management Practices

이은정* · 김학관** · 박승우***

Eun Jeong Lee · Hak Kwan Kim · Seung Woo Park

요 약

본 연구에서는 스프레드시트를 기반으로 하는 Microsoft EXCEL의 VBA(Visual Basic for Application)를 이용하여, 빗물 유출수 관리가 필요한 지역을 결정하고, 해당 유역에 적용가능한 관리방안을 선정하며, 관리방안 적용에 따른 효과를 분석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 모형의 검보정이 완료된 SWAT 모형의 결과를 이용하였으며, 비구조적 관리방안은 모형의 매개변수 및 입력자료 수정을 통해 효과를 분석하였다. 구조적 관리방안은 각 관리방안의 최대 집수면적 및 각 오염물질 별 제거효율을 이용하여 관리방안 효과를 분석하였다. 각 관리방안의 설계규모는 최대 배수면적과 이를 바탕으로 산정된 수질처리용량으로부터 결정하였다.

핵심용어 : 비점오염 저감기법, 최적관리기법, 강우유출수

I. 서 론

도시지역의 불투수율이 증가함에 따라 강우시 유출량이 증가하는 동시에 빗물 유출수가 자연수로 가 아닌 콘크리트 관거를 통해 유하함에 따라 도달시간이 짧아지고 침투유출량이 증가하여 도시지역의 침수피해가 자주 발생하고 있다. 농촌지역 역시 마찬가지로 농어촌도로정비사업으로 인한 도로포장, 시설재배지의 증가 등으로 인해 불투수면이 증가하고 있다. 최근까지 빗물 유출수에 대한 정책은 유역내에서 우수의 신속한 배출을 위한 것으로 지표면에 내린 빗물을 신속하게 우수관거를 통해 하천으로 방류시킴으로써 유역내 침수의 위험을 최소화하는데 중점을 두었다. 물순환을 고려하지 않은 이러한 치수위주의 대응책은 지표유출증가와 지하침투 감소로 지하수위와 기저유출 저하현상을 발생시켜, 하천의 평균적인 유량을 감소시키고 건천화를 촉진하였다 (Dreiseitl and Geiger, 1995).

또한 이로 인한 지하수위 저하 현상은 갈수의 위험, 녹지의 고사 등을 초래해 도시 온도변화, 건조화 등 도시기후의 변화를 가져오는 열섬현상의 원인이 되고 있다. 더욱이 강우 초기에 유출되는 빗물 유출수에는 농경지, 도로면, 건물 등에 축적되어 있던 비점오염물질이 씻겨 빗물 유출수와 함께 수체로 배출된다. 도시지역에서 발생하는 비점오염이 처리되지 않고 그대로 수체로 방류될 경우에는 수체에 많은 문제를 일으킬 수 있으며 물 이용에 많은 제한을 가져오게 된다. 미국 도시지역의 비점오염부하특성의 연구(1978~1983)에 의하면 빗물 유출수에는 고농도의 독성물질과 대장균과 병원성균, 고농도의 침전물 등이 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 농촌지역의 경우 영농활동과 관련하여 토사 및 질소, 인 등을 포함함 영양물질, 농약 살포에 의한 독성물질 및 병원성 미생물 등의 오염물질이 강우시 빗물과 함께 유실되어 수체로 유입되게 된다 (Novotny and Olem, 1994).

* 정회원 · 서울대학교 농업생명과학연구원 연구원 · E-mail : tweety45@snu.ac.kr

** 정회원 · 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원 · E-mail : kwans2@snu.ac.kr

*** 정회원 · 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원 · E-mail : swpark@snu.ac.kr

이러한 빗물 유출수 관리를 관리하여 침투유량을 저감시키고 비점오염물질을 저감시키기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 이경섭 등(2008)은 미국환경청(EPA)에서 개발된 SWMM 5.0 모형을 이용하여 저류지, Green roof, 투수성 포장 설치에 따른 유출저감효과를 모의하였으며, 김이호 등(2006)은 학교 우수저류침투시설의 모니터링을 통해 단일 건축물에서의 유출저감효과 및 수질개선효과를 입증하였다. Schueler (1987)의 연구결과에 의하면 우수처리용 연못, 습지, 여과지 또는 침투방법과 같은 빗물 처리시설이 설치된 경우, 도시의 인 부하량은 경감되는 것으로 나타났으며, 연구결과에 따르면 빗물 처리방법에 따라 인 부하량을 40~60%까지 경감시킬 수 있다고 하였다.

수자원의 효율적 이용과 질적 보호, 홍수유출로 인한 피해를 방지하고 빗물 유출수 관리를 위한 대책을 수립하기 위해서는 빗물 유출수를 관리할 수 있는 관리방안에 관한 연구가 필요하며, 이러한 방안들이 유역의 수문/수질에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 이들의 영향을 평가할 수 있는 방법이 정립되어야 한다. 그러나 국내 많은 연구들이 단일 관리방안에 의한 모니터링 및 효과분석과 수문모의모형을 이용한 효과분석에 관해 이루어지고 있으며, 유역 특성에 맞는 관리방안을 선정하는 것에 관한 연구는 미비한 실정이다. 단일 관리방안 모니터링에 의한 방법의 경우 그 효과를 유역규모로 해석하기는 무리가 있으며, 수문모의모형을 이용하여 분석하는 경우 상세하게 관리방안에 의한 효과 등을 모의하는 것은 가능하나, 모형의 선택 시 모형의 특성을 고려하여 해당 유역에 맞는 모형을 선택하는 것이 중요하며, 관리효과 등을 모의하기 위한 입력자료의 수정 등이 요구된다. 따라서 대상유역의 특성에 맞는 관리방안을 선정하고 관리방안 적용시 나타나는 효과를 좀 더 쉽게 파악하기 위한 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 빗물 유출수 저감방안을 마련하고, 그 효과를 분석할 수 있는 스프레드시트 기반의 시스템 개발을 통해 빗물 유출수 저감방안이 유역에 미치는 영향을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

GA유역은 경기도 광주시 경안동 경안교를 출구점으로 하는 경안천 상류유역을 말하며, 기존 경안천 유역과 구분하기 위해 본 연구에서 GA유역이라고 새롭게 명명하였다. Fig. 1은 GA 유역의 위치도로서 유역의 중상류에 용인시가 위치하고 있으며, GA 유역 출구점 하류에 광주시 시가지가 위치하고 있다.

빗물 유출수 관리는 수문학적 특성을 고려하여 유역단위로 이루어져야 한다. 따라서 저감방안에 따른 효과를 분석하기 위해서는 우선 기본적인 소유역별 자료가 구축되어야 한다. GA 유역에 관한 소유역별 자료는 SWAT 모형을 이용하여 검보정이 완료된 자료를 이용하여 구축하였다. GA 유역을 포함하는 DEM 자료를 이용하여 총 55개의 소유역으로 구분하였으며, 소유역의 경계는 각각의 소하천에 대하여 구분하였다. 소유역별 연유출량, 연간 SS, T-N, T-P 오염물질 부하량 자료를 구축하였다.

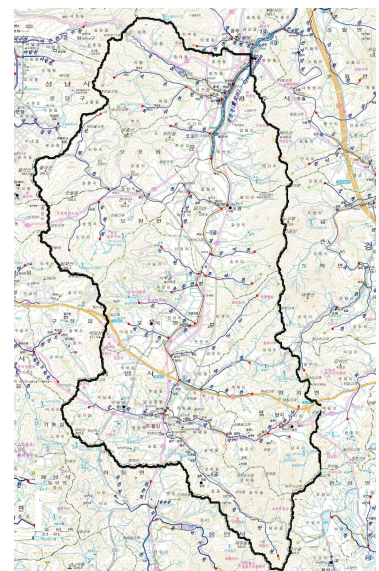


Fig. 1 Study watershed

III. 결과 및 고찰

3.1. 빗물 유출수 관리방안 효과분석을 위한 시스템 개발

스프레드시트를 기반으로 하는 Microsoft EXCEL의 VBA(Visual Basic for Application)를 이용하여, 빗물 유출수 관리가 필요한 지역을 결정하고, 해당 유역에 적용가능한 관리방안을 선정하며, 관리방안 적용에 따른 효과를 분석할 수 있는 시스템을 개발하였다.

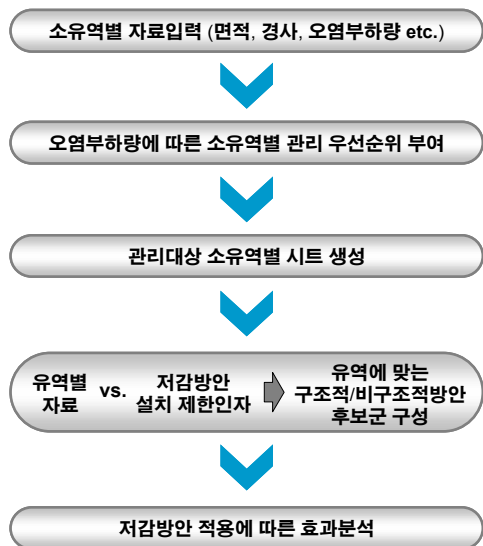


Fig. 2 Flowchart of system

같이 일정 처리규모를 갖는 시설에 단순 처리효율을 적용하여 그 효과를 판단할 수가 없다. 이와 같은 비구조적 관리방안의 특성을 반영하여 그 효과를 분석하기 위하여 GA 유역에 대해 모형의 검보정이 완료된 SWAT 모형을 이용하여 비구조적 관리방안의 적용효과를 분석하였다. 모형의 보정과 검증은 통해 적용성이 인정된 SWAT 모형의 1999년 매개변수 및 입력자료를 이용하였다.

본 연구에서 개발된 시스템을 통해 분석 가능한 비구조적 관리방안으로는 농경지에서 논의 물꼬 관리 등과 같이 물관리를 개선한 경우, 시설재배지로부터의 배수체계를 개선하여 유출수가 배수로로 직접 흘러가지 않고 논이나 기타 투수지역을 통과하여 배수되는 경우와 같이 시설재배지의 배수개선을 통해 빗물 유출수를 관리하는 경우가 있다. 그리고 농경지에서 작물을 재배한 후 잔유물을 관리하여 물순환을 개선하는 경우도 모의 가능하다. 또한, 주거지나 도로 등과 같은 불투수면의 관리를 통하여 불투수면의 비율을 20%, 30%, 38% 등으로 개선하는 경우도 모의 가능하다.

구조적 관리방안은 일정한 배수구역을 갖고 배수구역으로부터 유출되는 빗물 유출수를 차집하여 침진/저류 등의 과정을 거쳐 유출수를 방류시킨다. 이는 비구조적 관리방안과는 달리 유역 출구점에서 유출수를 체류시켜 유출을 지연시킴으로써 침투유량을 줄이고 오염물질을 저감한다. 그러나 SWAT 모형은 장기유출모형으로 침투유량의 모의가 불가능하므로 구조적 관리방안이 침투유량에 미치는 영향은 분석이 불가능하다. SWAT 모형의 모의결과로부터 소유역별 수문/수질 자료를 구축한 후 각 저감방안이 가지는 오염물질 제거효율을 적용하여 그 효과를 분석하였다.

개발된 시스템은 Fig. 2와 같은 과정에 의해 진행된다. 먼저 면적, 경사, 오염부하량 등과 같은 유역의 일반 인자 및 유역 문제의 원인 규명에 따른 관리 우선순위를 입력한다. 관리 우선순위와 기타 소유역별 자료를 바탕으로 빗물 유출수 관리가 필요하다고 판단되는 소유역의 개수를 입력하면 관리 대상 소유역별 시트가 생성되고 각 시트에서 소유역별 관리에 따른 효과를 평가하게 된다. 소유역별 시트에서는 유역별 자료와 저감방안 설치 제한인자를 비교하여 각 소유역에 적용 가능한 구조적/비구조적 관리방안 후보군을 구성한다. 구성된 후보군 중에서 효과를 알고자 하는 관리방안을 선택하면 각 방안의 기초조사된 저감효율을 고려하여 최종 결과를 도출하게 된다.

비구조적 관리방안은 빗물 유출수를 출구점에서 차집하여 처리하는 방법과 달리 빗물 유출수가 유하하여 유역을 빠져나오는 과정을 컨트롤하는 것으로 구조적 관리방안과

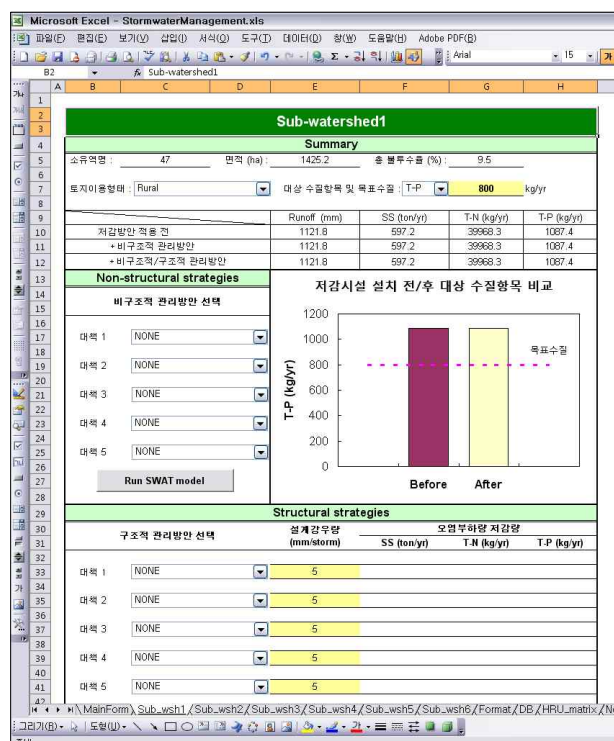


Fig. 3 Worksheet for target sub-watershed

3.2 시스템 적용 및 평가

개발된 시스템을 이용하여 빗물유출수 관리를 위한 구조적/비구조적 관리방안의 효과를 분석하기 위하여 관리방안을 적용할 대상 소유역을 선정하였다. 소유역의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Characteristics of target sub-watershed

Sub-watershed	Area (ha)		Runoff (mm/yr)	SS (t/yr)	T-N	T-P
					(kg/yr)	
A	Forest	939.4	1,124.1	622.8	16,097.6	832.3
	Paddy	154.9				
	Built-up	330.9				
	Total	1,425.2				

대상 소유역에 대해 Table 2와 같은 빗물유출수 관리방안 시나리오를 작성하고, 분석 시스템을 이용하여 그 효과를 분석하였다. Scenario I은 논에서 물꼬높이를 조정하여 여유고를 높임으로써 논에서의 저류효과를 증대시키는 방안이며, Scenario II는 도시 불투수면 관리 정도에 따른 효과를 분석하는 시나리오이다. Scenario III은 두가지 시나리오의 복합적인 효과를 분석하는 시나리오이다. Scenario IV~VIII은 구조적 관리방안의 효과를 분석하기 위한 시나리오이다.

Table 2 Stormwater management scenarios for target sub-watershed

Scenario	설 명
I-1	논 물관리개선 (현행 물꼬높이보다 여유고를 높이는 경우)
I-2	논 물관리개선 (현행 물꼬높이보다 여유고를 많이 높이는 경우)
II-1	도시 불투수면 관리 38% (도시의 평균 불투수율을 38%까지 낮추는 경우)
II-2	도시 불투수면 관리 20% (도시의 평균 불투수율을 20%까지 낮추는 경우)
II-3	도시 불투수면 관리 12% (도시의 평균 불투수율을 12%까지 낮추는 경우)
III	논 물관리개선 + 도시 불투수면 관리 (Scenario I-1 + Scenario II-1)
IV	인공습지 1개소
V	자연형저류지 1개소
VI	침투저류지 1개소
VII	식생여과대 1개소
VIII	유공포장 1개소

Table 3은 대상 소유역에 11가지 빗물유출수 관리방안 시나리오를 적용한 결과이다. 논 물관리개선에 따라 각각 SS는 1.4~2.5%, T-N은 0.5~1.9%, T-P는 0.2~3.6% 정도 부하량이 감소하는 것으로 분석되었다. 도시 불투수면 개선 시나리오는 오염부하량이 SS 2.1~19.5%, T-N 0.5~3.6%, T-P 5.7~20.0% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 유출량에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 한편 구조적 관리방안에 따른 효과를 살펴보면 5가지 구조적 관리방안을 적용한 결과 SS는 0.0~1.2%, T-N은 0.0~0.6%, T-P는 0.0~0.7%로 오염부하량이 줄어드는 것으로 모의되었으며, 비구조적 관리방안에 비해 수질개선효과가 낮은 것으로 나타났다. 이는 비구조적 관리방안에 비해 구조적 관리방안은 배수구역이 작아 유역에서의 빗물유출수를 처리하는 대상지역이 좁기 때문이다.

Table 3 빗물유출수 관리방안 적용효과

시나리오	Runoff (mm)	SS (ton/yr)	T-N (kg/yr)	T-P (kg/yr)
관리방안 적용전	1,124.1	622.8	16,097.6	832.3
I-1	1,123.4 (▽ 0.1%)	614.3 (▽ 1.4%)	16,020.7 (▽ 0.5%)	830.9 (▽ 0.2%)
I-2	1,122.9 (▽ 0.1%)	607.1 (▽ 2.5%)	15,791.2 (▽ 1.9%)	802.4 (▽ 3.6%)
II-1	1,122.7 (▽ 0.1%)	610.0 (▽ 2.1%)	16,012.1 (▽ 0.5%)	785.3 (▽ 5.7%)
II-2	1,123.6 -	567.2 (▽ 8.9%)	15,826.8 (▽ 1.7%)	716.9 (▽ 13.9%)
II-3	1,124.9 (△ 0.1%)	501.7 (▽ 19.5%)	15,523.3 (▽ 3.6%)	665.6 (▽ 20.0%)
III (I-1 + II-1)	1124.2 -	577.2 (▽ 7.3%)	16,056.3 (▽ 0.3%)	758.2 (▽ 8.9%)
IV	1,124.1 -	615.5 (▽ 1.2%)	16,002.8 (▽ 0.6%)	827.4 (▽ 0.6%)
V	1,124.1 -	615.5 (▽ 1.2%)	16,026.5 (▽ 0.4%)	826.2 (▽ 0.7%)
VI	1,124.1 -	622.0 (▽ 0.1%)	16,083.4 (▽ 0.1%)	831.5 (▽ 0.1%)
VII	1,124.1 -	622.6 -	16,095.3 -	832.2 -
VIII	1,124.1 -	621.8 (▽ 0.2%)	16,074.4 (▽ 0.1%)	831.3 (▽ 0.1%)

IV. 요약 및 결론

소유역 단위의 빗물 유출수 관리를 통한 유역환경 개선효과를 분석하기 위한 시스템을 개발하였다. 시스템은 스프레드시트 기반의 Microsoft Excel VBA를 이용하여 개발하였다. 유역 현황을 고려하여 적용 가능한 관리방안을 선택하고, 관리방안에 따른 저감효과를 분석할 수 있는 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 개발된 시스템을 통해 분석 가능한 비구조적 관리방안으로는 농경지에서 논의 물꼬관리 등과 같이 물관리를 개선한 경우, 시설재배지로부터의 배수체계를 개선하여 빗물 유출수를 관리하는 경우, 작물잔유물관리가 이루어지는 경우, 주거지나 도로 등과 같은 불투수면의 관리를 통하여 불투수율을 줄이는 경우 등이다. 분석 가능한 구조적 관리방안으로는 식생수로, 식생여과대, 자연형저류지, 인공습지, 유공포장, 침투저류지, 침투트렌치 등이다.

빗물유출수 관리를 위한 구조적/비구조적 관리방안의 효과를 분석하기 위하여 관리방안을 적용할 대상 소유역을 선정하였다. 대상 소유역에 대해 빗물유출수 관리방안 시나리오를 작성하고, 분석 시스템을 이용하여 그 효과를 분석하였다. 대상 소유역은 논 물관리개선에 따라 각각 SS는 1.4~2.5%, T-N은 0.5~1.9%, T-P는 0.2~3.6% 정도 부하량이 감소하는 것으로 분석되었다. 도시 불투수면 개선 시나리오는 오염부하량이 SS 2.1~19.5%, T-N 0.5~3.6%, T-P 5.7~20.0% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 유출량에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 한편 구조적 관리방안에 따른 효과를 살펴보면 구조적 관리방안을 적용한 결과 SS는 0.0~1.2%, T-N은 0.0~0.6%, T-P는 0.0~0.7%로 오염부하량이 줄어드는 것으로 모의되었으며, 비구조적 관리방안에 비해 수질개선효과가 낮은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원(과제번호 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Novotny, V., and H. Olem, 1994. Water Quality; Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, New York, Van Nostrand Reinhold.
2. Schueler, T., 1987. Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.