

# 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용

## Development and Application of Modified SWMM to Simulate Permeable Pavement and Infiltration Trench

이정민\*, 이상호\*\*, 박재현\*\*\*, 이길성\*\*\*\*

Jung Min Lee, Sang Ho Lee, Jae Hyeon Park, Kil Seong Lee

### 요    지

도시화 면적이 증가하면 불투수 면적이 증가하고 그에 따라 도시 하천의 평상시 유출이 감소한다. 도시 유역의 평상시 수량을 회복시키는 방법으로는 침투 증진시설(투수성 포장, 침투 트렌치, 침투 측구 등)의 설치, 하수의 고도처리 후 방류, 저수지에 의한 유량 개선, 지하철 용출수 활용 등이 있다. 우리나라의 경우에 일부 도시하천의 수량 감소가 심각한 상황에 이르고 있으며 이를 해결하고자 하는 노력이 최근에 나타나고 있다. 수량을 회복하려면 유량 평가를 위한 현장조사, 수량회복 계획, 재원의 반영, 수량회복 시설의 설치 및 관리의 순서로 단계별 사업이 수행되어야 한다. 계획 단계의 과업에서 필요한 사항은 여러 가지 수량 회복 방법의 영향을 정량 평가하는 것이다. 이에 핵심이 되는 것은 수량 회복 요소를 포함하거나 추가한 수문순환 평가 도구이다.

침투시설 중 투수성 포장과 침투 트렌치를 모의하도록 기존의 SWMM 모형을 수정하였다. 그 과정에서 증발량 처리와 지하수 출력기능에 대한 오류도 수정되었다. 수정 개발된 SWMM을 침투시설 모형실험 결과와 비교하여 수정된 프로그램의 적합성을 검증하였다. 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려하여 수정된 프로그램을 안양천의 지류인 학의천 유역에 적용하여 침투시설의 효과를 분석하였다. 만일 학의천 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 교체하면 하류 비산교 지점의 저수량( $Q_{275}$ )이 3 %, 갈수량( $Q_{355}$ )이 17 % 증가하는 것으로 분석되었다. 침투 트렌치의 경우 학의천 소유역 별로 100 m 트렌치를 5 ~ 10 개 시공할 경우 저수량은 약 1 %, 갈수량은 약 9 %가 증가하였다. 수정 개발된 SWMM을 사용하면 침투 트렌치와 투수성 포장이 도시 유역의 건기 수량회복에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

핵심용어 : SWMM(Storm Water Management Model), 투수성포장, 침투 트렌치, 침투시설 실험

### 1. 서 론

도시화 면적이 증가하면 불투수 면적이 증가하고 그에 따라 도시 하천의 평상시 유출이 감소한다. 우리나라의 경우에 일부 도시하천의 유량 감소가 심각한 상황에 이르고 있으며 이를 해결하고자 하는 노력이 최근에 나타나고 있다. 유량을 회복하려면 유량 평가를 위한 현장조사, 유량회복 계획, 재원의 반영, 유량회복 시설의 설치 및 관리의 순서로 단계별 사업이 추진되어야 한다. 계획 단계의 과업에서 필요한 사항은 여러 가지 유량 회복 방법의 영향을 정량 평가하는 것이다. 이에 핵심이 되는 것은 유량 회복 요소를 포함하거나 추가한 수문 순환 평가 도구이다.

본 연구의 목적은 기존의 수문 모형인 SWMM(Storm Water Management Model)을 수정하여 투수성 포장과 침투 트렌치의 모의기능을 갖도록 하는 것이다. 투수성 포장과 침투 트렌치 모의기능을 갖도록 수정개

\* 정회원·한국토지공사 책임연구원 공학박사 E-mail : andrew4502@iklc.co.kr

\*\* 정회원·부경대학교 공과대학 건설공학부 교수 E-mail : peterlee@pknu.ac.kr

\*\*\* 정회원·인제대학교 공과대학 토목공학과 조교수 E-mail : jh-park@inje.ac.kr

\*\*\*\* 정회원·서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 E-mail : kilselee@snu.ac.kr

발된 모형은 침투시설 모형실험을 통하여 검증하였다. 그리고 수정개발된 모형을 안양천의 지류인 학의천 시 범유역을 대상으로 적용성을 평가하였다. 투수성 포장과 침투 트렌치에 대한 정량적인 평가와 실험을 통한 침투특성 분석은 향후 현장적용 지침으로 활용될 수 있으며, 수정개발한 SWMM은 도시하천의 수문 순환 해석과 수량 회복 요소의 효과분석에 널리 활용될 것으로 기대된다.

## 2. 침투증진시설을 고려한 수정 SWMM의 개발

### 2.1 투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정

투수성 포장을 고려한 SWMM 4.4H 모형의 수정을 위해 먼저 현재까지 진행된 과거의 연구와 문헌을 조사하였다. SWMM은 초기 개발된 아래로 지속적인 수정, 개발이 이루어져 왔다. SWMM 4.4H의 경우 SWMM 4.4A, SWMM 4.4G, SWMM 4.4H의 순으로 발전되었다. 기존 연구로서 투수성 포장을 고려할 수 있도록 SWMM 4.4A 버전을 수정한 사례가 있다(Kipkie, 1999). 이 연구는 투수성 포장을 고려할 수 있도록 모형을 수정하고 가상의 10개 소유역에 대하여 투수성 포장의 포장층 침투능 감쇠효과 등을 시험 수행하였다. 그러나 Kipkie의 연구는 지표유출 모의와 투수성 포장 모의만 수행하고 지하수 모의는 수행하지 않았다. 그리고 투수성 포장 계산결과를 실험에 의해 뒷받침 하지는 않았다. 본 연구에서는 Kipkie의 연구를 기반으로 도스용 SWMM의 최상위 버전인 4.4H를 투수성 포장을 고려할 수 있도록 모형을 수정하였다. 그리고 투수성 포장을 고려한 지하수 모의가 가능하도록 SWMM 4.4H 버전의 몇 가지 오류를 함께 수정하였다.

### 2.2 침투 트렌치를 고려한 SWMM의 수정

침투 트렌치를 고려한 SWMM 4.4H 모형의 수정을 위해 먼저 현재까지 진행된 연구와 문헌을 조사하였다. 현재까지 침투 트렌치를 고려할 수 있도록 SWMM을 수정한 사례는 없으나, Jia 등(2001)에 의해 개발된 WEP 모형과 Smith(2004)가 개발한 MIDUSS 모형의 경우 트렌치의 수문학적 영향을 고려할 수 있도록 각 모형 내 트렌치 모의 모듈을 가지고 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 모형 중 MIDUSS 모형이 가지고 있는 침투 트렌치 모듈의 기본 이론과 방법을 이용하여 SWMM 모형을 수정하였다. MIDUSS 모형에서 고려하고 있는 침투 트렌치의 기본이론 및 방법은 다음과 같다.

MIDUSS 모형은 유입량을 통하여 지하로 빠져나가는 침투량을 Exfiltration으로 표현하고 있으며 이러한 트렌치를 Exfiltration 트렌치로 명명하고 있다. 그림 1은 MIDUSS 모형 내 Exfiltration 트렌치의 전형적인 모습이다.

MIDUSS 모형에서는 저수지 추적방법 중 수정 Puls법을 이용하고 있으며, 수정 Puls법과의 한 가지 차이점인 Exfiltration되는 X를 고려할 수 있도록 다음과 같은 방법을 사용하고 있다. MIDUSS 모형에서 침투 트렌치의 단면은 그림 2와 같이 가정하고 있다. 즉, 침투 트렌치는 사다리꼴 모양의 단면이고, 높이 H와 상부 수면 폭 T, 그와 대칭되는 바닥 폭 B로 이루어져 있다. 지하수위는 수평으로 깊이 P만큼 아래에 위치하고 있다. 만약 트렌치 내의 공극에 의한 수심을 트렌치 벽면의 습윤전선 y로 표현한다면 ay로 나타낼 수 있으며, 여기서 a는 식 (1)과 같이 주어진다.

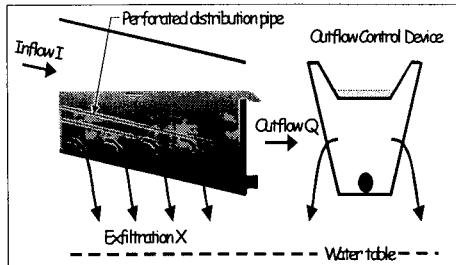


그림 1. 전형적인 Exfiltration 트렌치

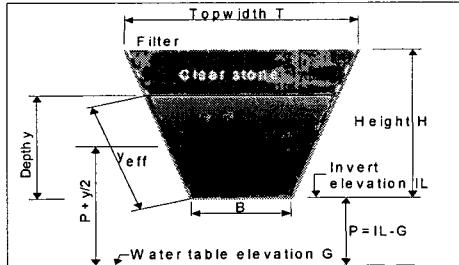


그림 2. 침투 트렌치 횡단면 개념도

$$a = \sqrt{1 + \left(\frac{T-B}{2H}\right)^2} \quad (1)$$

트렌치의 단위 길이당 Exfiltration되는 양  $X$ 는 다음 식 (2)로 추정할 수 있다.

$$dX = (2ay + \beta B)KS, \quad (2)$$

투수성 포장과 침투트렌치를 고려한 SWMM의 수정 및 침투모형 실험에 관계된 상세한 내용은 지면관계상 생략하였으며, 자세한 내용은 이정민(2007)의 논문을 참고할 수 있다.

### 3. 침투시설을 고려한 수정 SWMM의 적용

#### 3.1 대상유역의 현황

학의천은 국가하천인 안양천의 제 1지류로서 지방2급 하천이다. 학의천의 지류로는 청계사천과 갈현천이 있으며 이 하천들은 안양시와 의왕시를 관류한다(그림 3). 학의천은 경기도 의왕시 학의동에서 발원하여 경기도 안양시 비산동으로 유하하여 본류와 합류하며, 유역면적은  $44.58 \text{ km}^2$ 이다.

학의천유역 내에는 농업용수와 냉각용수를 공급하고 있는 백운저수지가 있는데, 여수로에는 수문이 없어 자연 월류되는 형식으로 되어 있어 홍수조절능력은 없다. 농업기반공사에서 1953년도에 설치하여 관할하고 있으며, 저수면적은 6.6 ha이다.

#### 3.2 모형 입력자료의 구성

수문순환과정의 해석을 위한 기본 자료로서 소유역폭, 면적, 하도길이, 경사(소유역, 하도) 등의 지형학적 요소들은 필수적이며, 특히 도시 지역에서와 같이 강우와 유출의 관계가 토지이용현황 등과 복잡하게 연관되어 어지는 수문현상의 해석을 위해서는 보다 정밀한 지형요소의 추출이 필수적이다. 본 연구의 소요 입력자료들은 GIS기법을 이용하여 산정하였다. 학의천유역의 특성인자를 추출하기 위해 유역분할을 실시하였다. 먼저 전체유역의 경계를 정한 후 지형도(1:5,000)와 안양·의왕시의 하수관망도 및 행정구역경계도 그리고 박달·석수하수종말처리장의 처리구역 및 배수구역도를 이용하여 배수구역 경계를 설정하였다. 배수구역도로부터 관로형태와 설치위치 등을 구성한 후 32개의 소유역으로 분할하였다(그림 4). 모형의 입력자료를 구축하기 위해 학의천유역의 수치지형도(1:5,000), 토지이용도, 토양도, 하도 종·횡단면도, 하수간선관망도 등을 수집하고 GIS를 이용하여 분석하였다. 먼저 수치지형도와 하도 종·횡단면도를 이용하여 하도망을, 안양·의왕시 하수간선관망도를 이용하여 하수관망을 구성하였다(그림 5).

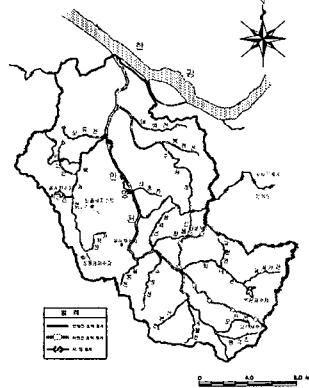


그림 3. 안양천유역 내 학의천유역

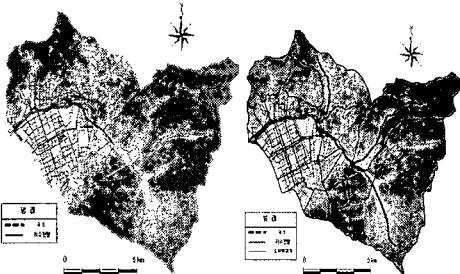


그림 4. 유역분할도

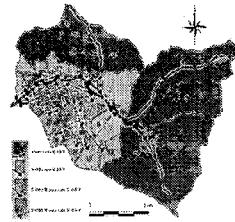


그림 5. 하도 및 하수관망 구성도

### 3.3 학의천 유역에 대한 침투시설 효과분석

투수성 포장을 고려한 수정 SWMM을 이용하여 학의천 유역 내 투수성 포장의 시공 효과를 분석하였다. 투수성 포장의 설치 가능 면적은 대상유역의 지형, 지질, 토지이용에 따라 다르다. 투수성 포장의 경우 1.0 ha당 설치 가능 면적은 약 1,900 m<sup>2</sup> 정도이다(조원철 등, 2000). 따라서, 실행 가능성과 경제성을 고려하여 현재 학의천 32개 소유역의 불투수면적 10 %를 투수성 포장으로 치환하였다. 그리고 수정된 SWMM 4.4H 모형에 의한 투수성 포장 시공 효과를 분석하였다. 학의천 투수성 포장 효과분석에는 지표수 모의와 지하수 모의를 수행하였다. 연속유출모의 수행기간은 2001년 9월 1일부터 2004년 8월 31일까지 3년이다. 학의천 하류 비산교 지점에 대하여 모의기간 중 2001년 7월 28일부터 8월 2일까지의 모의결과를 그림 6에 나타내었다. 학의천 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 치환할 경우 홍수기에는 1.52 ~ 8.36 m<sup>3</sup>/s의 유출량 감소를 전기에는 0.03 ~ 0.07 m<sup>3</sup>/s의 유출량 증가를 볼 수 있다. 현재 학의천의 불투수율은 약 23 %로 학의천 상류의 대부분이 불투수 면적이 거의 없는 투수지역이다. 현재 불투수면적의 10 %를 투수성 포장으로 치환할 경우 치환되는 면적이 전체의 2.3 %로 미미하여 홍수기간 동안 투수성 포장에 의한 지표유출의 감소효과는 작은 것으로 판단된다.

학의천 유역 내 각 소유역 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 치환한 경우와 기존상태인 경우에 대하여 지표유량을 비교하면 기존 저수량의 3 %, 갈수량의 17 %가 증가한다.

동일한 방법으로 학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 침투 트렌치 시공을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 2001년 9월 1일부터 2004년 8월 31일까지 3년 동안 시간단위로 연속유출을 모의하였다(그림 7). 침투 트렌치 시공은 전체 소유역의 불투수율과 현실성을 감안하여 길이 100 m의 트렌치를 각 소유역별로 약 5 ~ 10 개 정도 설치하여(총 150 개) 그 효과를 분석하였다. 모의결과 중 강우가 발생하였던 2002년 10월 12일부터 10월 14일까지의 기간을 보면(그림 7의 타원부분; 그림 8), 침투 트렌치를 설치한 경우 홍수기간(FP)에서는 9.0 m<sup>3</sup>/s ~ 18.0 m<sup>3</sup>/s의 유출량 감소를 보였고, 건기(DWP)에는 0.028 m<sup>3</sup>/s ~ 0.037 m<sup>3</sup>/s의 유출량 증가를 보였다.

### 4. 결 론

침투시설 중 투수성 포장과 침투 트렌치를 모의하도록 기존의 SWMM 모형을 수정하였다. 그 과정에서 증발량 처리와 지하수 출력기능에 대한 오류도 수정되었다. 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려하여 수정된 프로그램을 안양천의 지류인 학의천 유역에 적용하여 침투시설의 효과를 분석하였다. 만일 학의천 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 교체하면 하류 비산교 지점의 저수량(Q275)이 3 %, 갈수량(Q355)이 17 % 증가하는 것으로 분석되었다. 침투 트렌치의 경우 학의천 소유역 별로 100 m 트렌치를 5 ~ 10 개 시공할 경

우 저수량은 약 1 %, 갈수량은 약 9 %가 증가하였다. 수정 개발된 SWMM을 사용하면 침투 트렌치와 투수성 포장이 도시 유역의 건기 수량회복에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

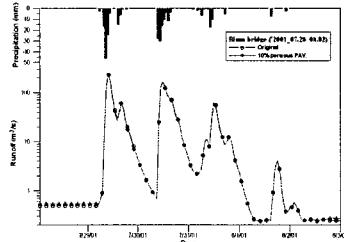


그림 6. 학의천  
투수성포장 효과분석

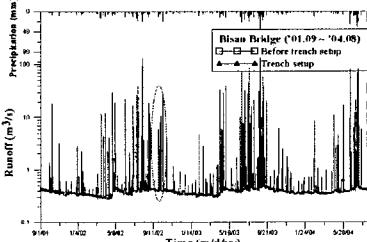


그림 7. 학의천 침투트렌치  
효과분석

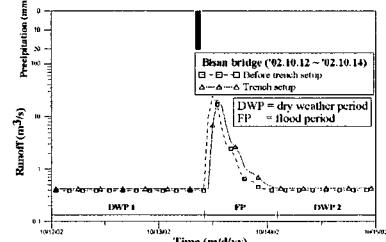


그림 8. 학의천 침투트렌치  
효과분석

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(과제번호: 1-7-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊은 감사드립니다.

## 참고문헌

- 조원철 등(2000). 우수유출 저감시설 시범사업 검토연구. 연구보고서, 서울특별시.
- 이정민(2007). 투수성포장과 침투트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용, 박사학위논문, 부경대학교.
- James, W., Huber, W.C., Dickinson, R.E., Pitt, R.E., James, W.R.C., Roesner, L.A., and Aldrich, J.A. (2003). *User's guide to SWMM*. CHI, Guelph, Ontario, pp. 289–351.
- Jia, Y., Guangheng, N., Yoshihisa, K., and Tadashi, S. (2001). "Development of WEP model and its application to an urban watershed." *Hydrological Processes (J)*, Vol. 15, pp. 2175–2194.
- Smith, A.A. (2004). *MIDUSS : Reference Manual Version 2*. Alan A. Smith Inc.