

## 투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성 포장의 효과분석

A modification of SWMM to simulate permeable pavement, and the effect analysis on a release of treated wastewater and the permeable pavement

이 정 민\* / 이 상 호\*\* / 이 길 성\*\*\*

Lee, Jung Min/ Lee, Sang Ho / Lee, Kil Seong

### Abstract

Permeable pavement and release of treated wastewater into streams can increase streamflow of urban streams for a dry weather period. A SWMM code was modified to have a permeable pavement option. The modified SWMM was applied to continuous simulations of urban runoff from Hakuicheon watershed and it was used to analyse the effect of a permeable pavement installation and the reuse of treated wastewater. A critical error in the pan coefficient multiplication was also corrected in the modification. The analysis results of the reuse of treated wastewater is as follows: The low flow ( $Q_{275}$ ) increases by 1.63 times as much as the current one and the drought flow ( $Q_{355}$ ) increases by 3.57 times as much as the current one. If the impervious area in the Hakuicheon watershed is replaced with the permeable pavement area by 10 percent, the low flow and the drought flow increases by 3 percent and 17 percent, respectively. The results shows the effectiveness of the release of treated wastewater into stream to increase urban streamflow. The permeable pavement installation also play a minor role in the drought flow increase.

**keywords** : SWMM, reuse of treated wastewater, permeable pavement

### 요 지

투수성 포장과 하수 처리수의 하천 방류는 도시하천의 수량증가 방법이다. 투수성 포장을 모의하도록 SWMM 모형을 수정하였으며, 수정된 SWMM으로 학의천을 대상으로 도시유출 연속 모의를 수행하여 투수성 포장과 하수처리 재이용수의 효과를 분석하였다. 그 과정에서 증발량 처리에 대한 오류도 수정되었다. 하수처리 재이용수의 경우 저수량( $Q_{275}$ )은 1.63배, 갈수량( $Q_{355}$ )은 3.57배 증가하는 것으로 분석되었다. 만일 학의천 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 치환할 경우 하류 비산교 지점의 저수량은 3 %, 갈수량은 17 %가 증가하는 것으로 분석되었다. 결과로부터, 하수처리수의 하천 방류는 도시하천의 수량 증가에 매우 효과적인 수단임이 확인되었다. 투수성 포장은 갈수

\* 부경대학교 토목공학과 박사과정  
Doctoral Student, Department of Civil Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea  
(e-mail: andrew4502@magicn.com)

\*\* 부경대학교 건설공학부 부교수  
Associate Prof., Division of Construction Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea  
(e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수  
Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., Seoul, 151-742 Korea  
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

량을 증가시키는 보조 수단이 될 수 있다.

**핵심용어** : SWMM, 하수처리 재이용수, 투수성 포장

## 1. 서 론

도시화 면적이 증가하면 불투수 면적이 증가하고 그에 따라 도시 하천의 평상시 유출이 감소한다. 도시 지역의 평상시 수량을 회복시키는 방법으로는 침투 증진 시설(투수성 포장, 침투 트렌치, 침투 측구 등)의 설치, 하수의 고도처리 후 방류, 저수지에 의한 유황 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. 본 연구는 기존의 수문 모형을 수정하여 투수성 포장 모의기능을 갖도록 하는 것과, 이를 가지고 하수처리수의 재이용 및 투수성 포장의 수량 회복 효과를 분석하는 것이다.

국내에서 이루어진 도시화의 수문학적 영향 평가는 주로 단기 홍수사상에 대하여 토지이용 변화가 침투유량 변화에 미치는 영향을 분석하는 주제였다. 그리고 우수유출 저감시설을 시범구역에 설치하고 ILLUDAS (ILLinois Urban Drainage Area Simulator) 모형으로 유출저감 효과를 분석한 사례가 있다(조원철 등, 2000). 김병훈 등(2001)은 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과를 인공강우와 실제 강우에 대해 실험을 통하여 불투수 포장재와 투수성 포장재를 비교분석하였다. 그리고 이재응 등(2001)은 실험을 통하여 분석된 연구를 근간으로 실제 문산 시범지역에 적용하여 투수성 포장재의 호우 시 우수유출 저감효과를 분석하였다. 또한 심재현 등(2004)은 치수 측면에서 저류·침투 시설을 통한 재해저감기법을 연구하였다. 즉, 국내 연구의 초점은 토지이용 변화와 우수유출 저감시설이 홍수 시 유출 증감에 미치는 영향분석에 있어 왔다.

국외의 연구로서 Eric et al.(1999)은 원통형과 직사각형의 침투증진시설을 설치한 후 토양 및 지하수에 미치는 영향을 비교하였다. 그리고 Benjamin et al.(2003)은 불투수 아스팔트로 포장되어진 주차장을 네 가지 투수성 포장재로 대체한 후 이들이 장기적으로 수량 및 수

질에 미치는 영향을 실험 연구하였다. 침투 트렌치의 효과를 장기유출 연속모의에 포함시켜 분석한 연구는 Jia et al.(2001)이 수행하였다. 이 연구는 5.7 km<sup>2</sup>의 도시개발이 계획되어 있는 일본 Chiba 현의 해노천 유역에 WEP(Water and Energy transfer Process) 모형을 적용하여 1993년(현재)과 2035년(미래) 수문순환 변화를 분석하였다. 또한 침투 트렌치를 적용한 2035년(미래)의 수문순환 변화도 분석하였다. 국외의 기술 수준은 일부 수량 회복 요소를 포함한 수문순환 모형을 개발하고 적용한 단계이지만 아직 여러 가지 수량 회복 요소를 포함시킨 수문순환 모형이 개발되지는 못하였다.

WEP는 물 및 에너지 순환의 분포형 모형으로 토지이용 변화에 따른 장단기 유출 변화를 모의할 수 있으며 침투 트렌치를 모의할 수 있다. 그리고 지하수 흐름을 2차원으로 모의하는 특징이 있다. 모형의 단점은 하수관과 지표면 흐름(overland flow)을 집중시간(concentration time)으로 추적하는 것이다. 그리고 모형의 실행파일만 공개되어 있다. 반면에, 도시지역의 유출모의 모형으로서 널리 이용되어온 SWMM(Huber와 Dickinson, 1988)은 수량회복 요소로서 저수지를 모의할 수 있고 하수관과 지표면 흐름을 연속식 및 Manning 식으로 추적한다. 또한 SWMM은 수질모의도 수행할 수 있으며, 원시 코드가 공개되어 있다.

기존의 SWMM은 침투증진시설을 모의할 수 없다. 그렇지만 지표면 흐름과 하수관 흐름을 보다 실제에 가깝게 추적하거나 저수지 추적도 수행하는 점을 보면 추적(routing) 기능에 있어서 실용적 완결성을 갖춘 것으로 평가할 수 있다. 그리고 무엇보다도 원시 코드가 공개되어 있으므로 프로그램의 수정 개발이 용이하다. 더구나 추후 수질모의 연구도 수행할 수 있다. 이런 점을 감안하여 수량회복 요소의 모의 기능을 갖도록 SWMM을 수정 개발하고자 한다. 본 연구에서는 첫 단계로서 투수성 포장 모의 기능을 갖도록 SWMM을 수정하였다. 이를 안양천의 지류인 학의천 유역에 적용하여 투수성 포장과 하수처리수의 하천방류가 수량 증가에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 투수성 포장을 고려한 SWMM 프로그램 수정

### 2.1 SWMM 4.4H 모형의 개요

SWMM은 유역의 유출과 수질을 예측하기 위해 강

우주상도, 기상학적 입력자료, 유역 인자, 하수관로 인자 등을 사용한다. 1981년에 SWMM 모형 내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 모형에 포함시켰다. 그리고 1987년에 지하수 유출을 모의하기 위하여 GROUND 부 프로그램을 추가하였다. 요약하면, SWMM 모형은 도시유역 내에서 강수기 및 건기의 지표유출과 지하수유출, 배수관망 내의 유출량 추적, 수질모의, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

유출 성분은 일반적으로 직접유출과 기저유출로 구분된다. 직접유출은 다시 지표유출과 중간유출로 분류된다. SWMM은 중간유출 개념을 가지고 있지 않고 지표유출과 지하수 유출만을 모의한다. SWMM의 유출 성분을 수문학의 구분과 상응시키고자 하면, 지표유출은 직접유출로 지하수 유출은 기저 유출로 대응시킬 수 있다. 현재 SWMM은 1999년 4.31 버전에서 1999년 4.4A, 4.4G, 4.4H 버전으로 개선되었다. SWMM 모형은 RUNOFF 블록, TRANSPORT 블록, EXTRAN 블록, STORAGE/TREATMENT 블록의 4개의 실행블록과 RAIN 블록, TEMPERATURE 블록, COMBINE 블록, STATISTICS 블록 등의 6개의 보조블록들로 구성되어 있으며, 126개의 부 프로그램들을 포함하고 있다.

## 2.2 RUNOFF 블록 구조분석

RUNOFF 블록은 강우사상에 대해 배수유역의 유량과 수질을 모의하고, 주요 하수관망에 대한 오염물질의 흐름추적을 위해 개발되었다. RUNOFF 블록은 배수유역을 소유역과 관망으로 재구성하여 해석한다. 배수유역을 최대 200개의 소유역과 200개의 하도/관망으로 구성할 수 있다. RUNOFF 블록은 35개의 부 프로그램으로 이루어져 있으며 기본적인 구성은 Fig. 1과 같다.

RUNOFF 블록의 실행과 부 프로그램들과의 구조 및 관계에 대하여 간단히 기술하면 다음과 같다. 실행블록에서 RUNOFF 블록이 호출되면 변수를 초기화한 후에 HYDRO 부 프로그램을 호출하게 된다. HYDRO 부 프로그램은 17개의 관련 부 프로그램으로 배수유역의 수문곡선과 오염도곡선을 계산한다.

RHYDRO 부 프로그램은 배수유역의 집수구에 관련된 정보를 읽는다. RHYDRO 부 프로그램은 GRIN, MKRAIN, SNOWIN과 QHYDRO 부 프로그램을 호출하여 지하수, 강우량, 눈, 수질에 관련된 정보를 읽는다. 만약 수질이 모의되면, QINT와 BUILD 부 프로그램이 호출되며 이 때 배수유역의 오염부하량에 관련된 구성요소를 초기화시킨다.

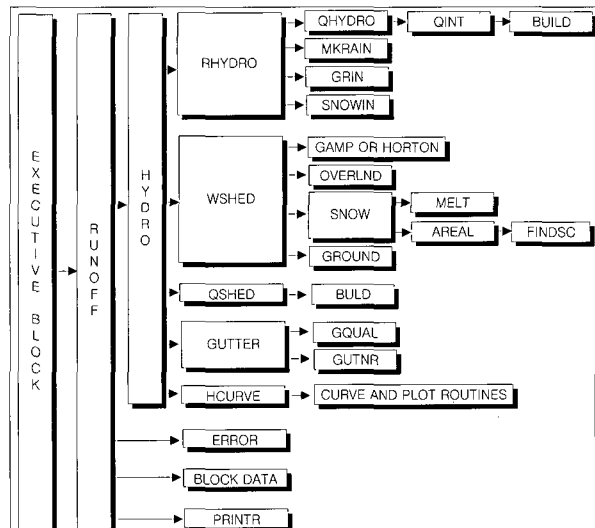


Fig. 1. Structure of RUNOFF Block Subroutines (Huber and Dickinson, 1988)

HYDRO 부 프로그램은 하도/관망의 계산결과를 다음 단계의 하류 하도/관망 구성요소로 보내며, 수문곡선의 시간 간격 계산은 WSHEd 부 프로그램이 호출되어 수행된다. WSHEd 부 프로그램은 GAMP와 HORTON 부 프로그램을 호출하여 침투량을 계산한다. 만약 용설이 모의되면 WSHEd에서 SNOW 부 프로그램이 호출된다.

SNOW 부 프로그램은 AREAL과 MELT 부 프로그램을 호출시키며, AREAL 부 프로그램은 FINDSC 부 프로그램을 호출한다. 소유역 유출은 OVERLND 부 프로그램에서 계산되고 지하수 유출은 GROUND 부 프로그램에서 계산된다. 만약 수질이 모의되면, QSHED와 BULD 부 프로그램이 소유역의 수질, 침식, 먼지, 오염물 등을 모의하기 위해 호출된다.

## 2.3 투수성포장의 개요 및 구조

투수성 포장은 자체 내에 저류구조를 가지고 있고 노반(undisturbed soil), 필터층(filter membrane), 노상(subgrade), 표층(base course), 투수성 포장층(porous pavement)의 구조를 가진다. 전형적인 투수성 포장의 구조는 Fig. 2와 같다. 투수성 포장은 포장층의 특성에 따라 몇 가지 유형으로 나눌 수 있다. 대표적인 4가지 투수성 포장은 투수성 아스팔트 포장(Porous Asphalt Pavement; PAP), 투수성 콘크리트 포장(Porous Concrete Pavement; PCP), 내부배수 맞물림 투수 콘크리트 블록(Modular Interlocking Concrete Block of the Internal drainage Cell type), 외부배수 맞물림 투수 콘크리트 블록(Modular Interlocking Concrete Block with External drainage Cell type)이 있다(Kresin, 1996).

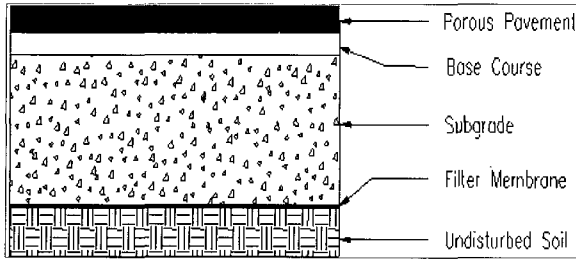


Fig. 2. Typical Permeable Pavement Structure (Kresin, 1996)

전형적인 투수성 아스팔트 포장(PAP)은 일반적인 아스팔트 포장과 달리 빗물이 하부구조에 침투될 수 있도록 매우 미세한 모래와 조골재로 구성되어 있다. 투수성 콘크리트 포장도 투수성 아스팔트 포장의 구조와 전반적으로 유사하다. 포장층의 경우 일반적인 콘크리트 포장의 포틀랜드 시멘트와 비교하여 약 70 ~ 80 %의 밀도를 가지도록 시공한다(Ferguson, 1994).

#### 2.4 투수성 포장을 고려한 SWMM 4.4H 프로그램 수정

투수성 포장을 고려한 SWMM 4.4H 모형의 수정을 위해 먼저 현재까지 진행된 과거의 연구와 문헌을 조사하였다. SWMM은 초기 개발된 이래로 지속적인 수정, 개발이 이루어져 왔다. SWMM 4.4H의 경우 SWMM 4.4A, SWMM 4.4G, SWMM 4.4H의 순으로 발전되었

다. 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 의하여 뒷받침 하지는 않았다. 본 연구에서는 Kipkie의 연구를 기반으로 현재의 SWMM 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.

투수성 포장을 고려한 SWMM 4.4H 버전의 원시코드 수정내용은 다음과 같다.

먼저, RUNOFF 블록의 지표면 유형에 투수성 포장을 포함시키기 위해 필요한 코드를 변경하고 추가하였다. Fig. 3과 같이 RUNOFF 블록의 지표면 유형은 평상시 3가지이고, 융설이 추가되면 4가지의 지표면 유형으로 구분된다. 3가지 유형이란 지표면 저류가 있는 불투수 유역, 지표면 저류가 없는 불투수 유역, 투수유역이고, 이들의 면적비가 입력된다. RUNOFF 블록의 각기 다른 지표면 유형은 변수 WAR(J, NW)로 나타내어 계산한다. 여기서 J는 계산되는 각각의 소유역에 대한

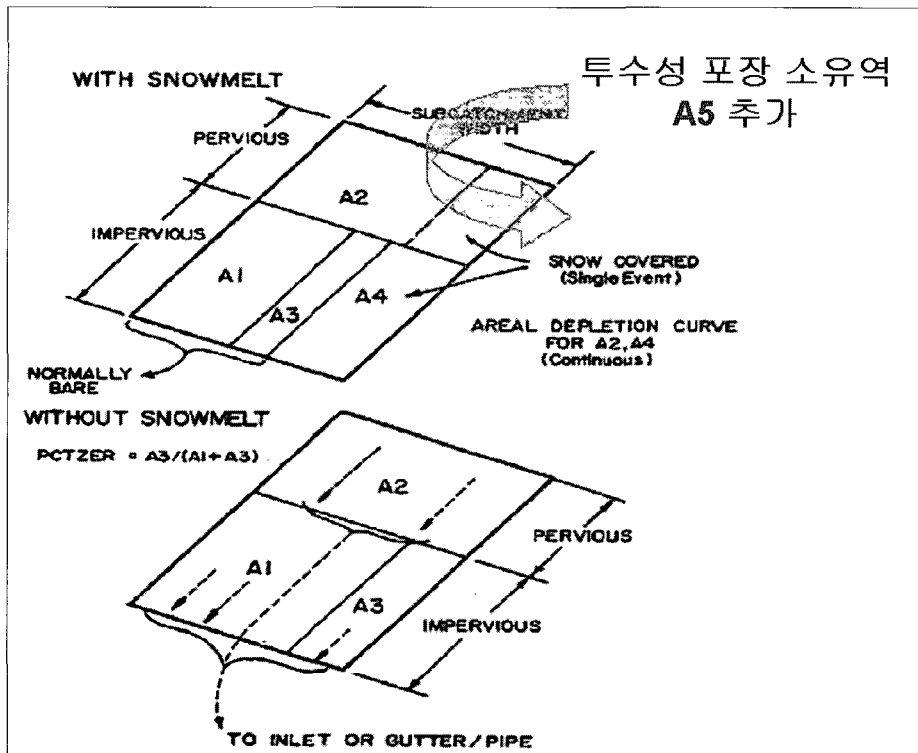


Fig. 3. Subcatchment Schematization of RUNOFF Block (Huber and Dickinson, 1988)

Table 1. Surface Type and the J Variable of Modified SWMM

WAR 매개변수 중 "J" 변수 (J, NW)	RUNOFF 블록의 지표면 유형
1	저류가 있는 불투수 구역
2	투수 구역
3	저류가 없는 불투수 구역
4	불투수 구역 - 용설모의
5	투수성 포장 구역

지표면 유형이고, 변수 NW는 특정 소유역 번호를 의미한다. 현재의 SWMM 4.4H 버전은 J변수의 범위가 1에서 4까지이다. 따라서 투수성 포장 지표면 유형을 추가하기 위해 변수의 범위를 5로 증가시켰다. Table 1은 새롭게 구성된 지표면 유형의 J변수를 나타낸 것이다.

투수성 포장을 고려한 SWMM 4.4H 모형의 수정된 부 프로그램은 RHYDROL.FOR, CATCH.FOR, WSHED.FOR이다. 각 부 프로그램의 주요 수정사항은 다음과 같다. RHYDROL.FOR 부 프로그램의 수정내용은 RUNOFF 블록의 투수성 포장모의 수행여부를 결정하는 것이다. 이러한 정보는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록 입력자료 중 B1 줄에 포함되어 있다. 즉, 투수성 포장에 대한 모의를 수행하면 1을 수행하지 않으면 0을 넣을 수 있도록 RHYDROL.FOR 부 프로그램을 수정하였다.

RUNOFF 블록의 입력 자료에는 소유역 지표면의 특성인자에 대한 입력을 위해 H1라인이 있다. 이와 유사하게 투수성 포장의 입력라인(H6)을 RUNOFF 블록의 입력 자료에 추가하기 위해 CATCHFOR 부 프로그램을 수정하였다. 각 H6 라인인 각 소유역의 H1 라인에 대응하며, 투수성 포장의 면적은 Eq. (1)과 같이 계산한다.

$$A_{pp} = A_s \times \frac{(100 - imp) \times (perv)}{100} \quad (1)$$

여기서,  $A_{pp}$  = 투수성 포장 면적,  $m^2$   
 $A_s$  = 소유역 면적,  $m^2$   
 $imp$  = 불투수 면적비 %  
 $perv$  = 투수지역 중 투수성 포장 면적비 %

WSHED.FOR 부 프로그램은 HYDRO.FOR 부 프로그램에서 호출된다. HYDRO.FOR 부 프로그램은 RUNOFF 블록에서 호출되어 소유역의 유량과 수심을 계산한다. WSHED.FOR 부 프로그램의 특정 DO 반복문을 수정하여 투수성 포장의 소유역 유출유량을 HYDRO.FOR 부 프로그램에서 고려하도록 하였다. 만

약 투수성 포장 모의가 수행되면 후술할 PERMPAV.FOR 부 프로그램을 호출하도록 하였다.

새롭게 추가된 투수성 포장 부 프로그램(PERMPAV.FOR)은 투수성 포장의 수문학적 응답을 모의한다. 투수성 포장 부 프로그램은 Green-Ampt 방법으로 침투를 계산하며, RUNOFF 블록의 GRMP.FOR 부 프로그램과 유사하다. 만약 투수성 포장 모의가 수행되면 RUNOFF 블록은 WSHED.FOR 부 프로그램에서 PERMPAV.FOR 부 프로그램을 호출한다. 프로그램은 강우사상과 시간을 "TP", "K", "J"의 변수로 전달한다.

투수성 포장층은 시간이 지남에 따라 불순물이 쌓이고 공극의 막힘 현상이 발생한다. 투수성 포장 모의의 주요특징은 시간에 따른 포장층 침투능 감소에 대한 적용이다. 포장층의 막힘과 침투능 감소는 시공후 1~5년 내에 발생한다(Urbonas and Stahre, 1994). 시간에 따른 포장층의 막힘, 침투능 감소현상에 관련된 주요 인자는 교통량, 토지이용상태, 포장층의 재료특성 등이 있다. 투수성 포장층의 시공 후 시간에 따른 포장층 침투능 감소 모의는 Eq. (2)와 같다. 수식은 지수함수 감소 형태로 되어 있다. 결국 시간이 경과되면 투수성 포장층의 침투능은 0에 접근하며 불투수층과 유사하게 된다.

$$K_{S,Pnew} = (K_{S,Pinitial})e^{-kt} \quad (2)$$

$K_{S,Pinitial}$  = 초기 포장층 포화투수계수,  $in/hr (mm/hr)$

$K_{S,Pnew}$  = 재 계산된 포장층 포화투수계수,  $in/hr (mm/hr)$

$t$  = 투수성 포장의 시공 후부터 흐른 시간,  $days$

$k$  = 감쇠계수,  $time^{-1}$

### 3. 수정된 SWMM모형의 시험수행

#### 3.1 대상유역 현황 및 입력자료 구축

학의천은 안양천의 제1지류로서 지방2급 하천이다. 학의천은 경기도 의왕시 학의동에서 발원하여 경기도 안양시 비산동에서 안양천과 합류한다. 학의천의 지류

로는 갈현천과 청계사천이 있으며 안양시, 의왕시, 과천시를 관류한다. 학의천 유역의 위치는 동경 126° 57' ~ 127° 03', 북위 37° 21' ~ 37° 23'이며 유역면적은 44.58 km<sup>2</sup>이다. 우리나라의 산업화가 급속히 진행되던 1970년대 후반에 하천의 고유기능인 치수, 이수 및 환경적인 기능보다는 토지이용 증대를 위해 하천을 상당부분 복개하였다. 학의천의 지류인 갈현천도 이와 같은 이유로 유로연장 3.73 km중에서 0.60 km가 복개되어 있는 실정이다.

이정민 등(2004a; 2004b)은 SWMM을 이용하여 안양천과 하수관망을 포함한 도림천유역의 강우, 증발산, 지표유출, 지하수유출을 고려한 도시유출 연속모의 및 물 순환 모의를 수행한 바 있다. 그리고 학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 강수, 증발산, 지표유출, 지하수 유출, 하수량 등의 성분을 고려한 도시유출 연

속모의를 수행하였다. 수정된 SWMM모형의 시험수행은 서울대학교(2005)의 연구내용 중 학의천 도시유출 연속모의에서 구축된 입력자료를 이용하였다. 대상 유역 입력자료 구축과 모형에 사용된 매개변수의 보정 및 검증에 대한 상세한 내용은 서울대학교(2005)의 문헌에 수록되어 있다.

수정된 SWMM 모형의 시험수행은 학의천의 32개 소유역 중 도시 유역으로서 2016년까지 개발이 예정된 9번 소유역을 대상으로 모의를 수행하였다(Fig 4). 모의 기간은 2000년 8월 1일부터 2004년 9월 30일까지로 하였다. 시험 수행은 투수성 포장의 침투특성에 관련된 매개변수의 특성을 살펴보기 위해 3가지 경우에 대하여 수행하였으며, 지하수모의는 수행하지 않았다. 시험수행에 사용된 투수성 포장 매개변수 입력값은 Table 2와 같다.

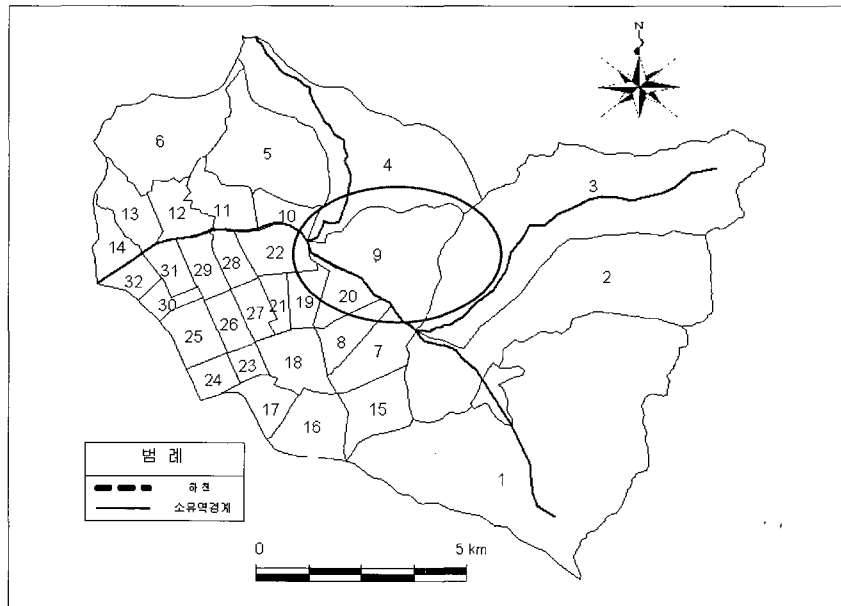


Fig. 4. Test Subcatchment of Modified SWMM

Table 2. Description of Permeable Pavement Parameters for Test

변수	변수 설명	입력값
H6	그룹 지시자	
PERAREA	특정 소유역 투수유역 면적 중 투수성 포장 면적 %	100 (투수지역 50 %)
PWSTORE	투수성 포장의 감쇠 저류 깊이, in(mm)	4.318
PREIS	투수성 포장의 Manning 조도계수	0.024
PSUCT	시공된 투수성포장의 상층부 모세관 흡인수두, in(mm)	101.6
PHYDCON	시공된 투수성포장의 상층부 토양 포화 투수계수, in/hr(mm/hr)	12.7 38.1
PSMDMAX	시공된 투수성포장의 상층부 초기 토양수분 부족분, (FRACTION 단위)	0.34
DEGRAD	감쇠계수 시간 <sup>-1</sup>	0.002
PREGEN	투수성 포장층의 침투특성(포화투수계수)이 다시 회복될 때까지 소요되는 물리적인 시간의 평균길이(days)	0.5 1500

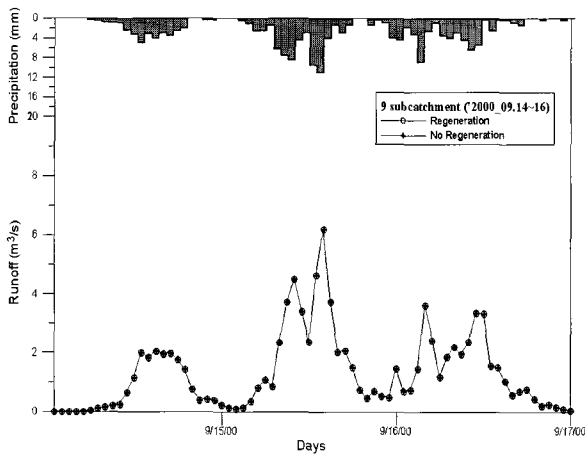
### 3.2 투수성 포장의 재생과 방치 결과의 비교

첫 번째 시험수행으로 수정된 SWMM 4.4H 모형의 포장층 침투율 감쇠에 대한 모의를 수행하였다. 학의천 9번 소유역을 대상으로 불투수지역은 없고 전체 유역 중 50 %는 투수지역, 나머지는 투수성 포장지역으로 가정하였다. 가정된 9번 소유역에 대하여 투수성 포장층 재생시간 매개변수(PERGEN)가 0.5 day인 경우와 1500 days인 경우에 대하여 시험 수행하였다. PERGEN = 0.5 day는 포화투수계수가 한나절에 한번씩 재생됨을 의미한다. 따라서 투수성 포장층의 초기 포화투수계수는 변화가 거의 없다. PERGEN = 1500 days는 포화투수계수가 약 4년간 감쇠계수에 따라 감소함수 형태로 감소하며 4년 초기에 포장층의 치환이나 이물질 제거 등에 의해 재생됨을 의미한다. 4년 모의 중 시험 수행 초기에는 두 가지 경우의 수문곡선이 거의 일치한다(Fig. 5(a)).

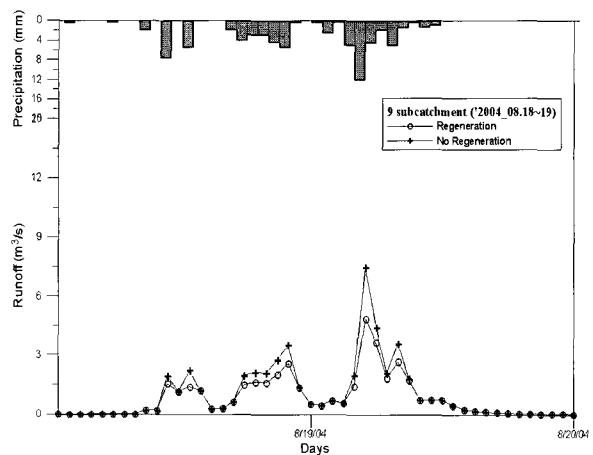
시험 수행 말기를 살펴보면 PREGEN = 1500 days인 경우 포화투수계수의 감쇠현상으로 침투능이 감소되어 지표유출이 증가됨을 알 수 있다(Fig. 5(b)).

### 3.3 불투수유역과 침투 포장유역의 침투특성 비교

시험 수행 두번째 경우는 불투수지역과 방치된 투수성 포장지역의 침투특성을 비교한 것이다. 9번 소유역 전체 유역면적 중 첫번째 경우는 100 % 불투수 지역으로, 두번째 경우는 50 %는 불투수 지역으로 나머지는 투수성 포장지역으로 가정하였다. PERGEN 매개변수는 1500 days로 동일하다. 4년 모의 중 초기의 경우 투수성 포장지역이 50 %인 경우가 100 % 불투수지역의 경우에 비해 지표유출이 작음을 알 수 있다(Fig. 6(a)). 그러나 시험 수행 말기에는 포장층의 방치에 따른 포화 투수계수의 감쇠현상으로 침투능이 감소되어 100 % 불투수 지역과 수문곡선이 거의 유사함을 알 수 있다(Fig. 6(b)).

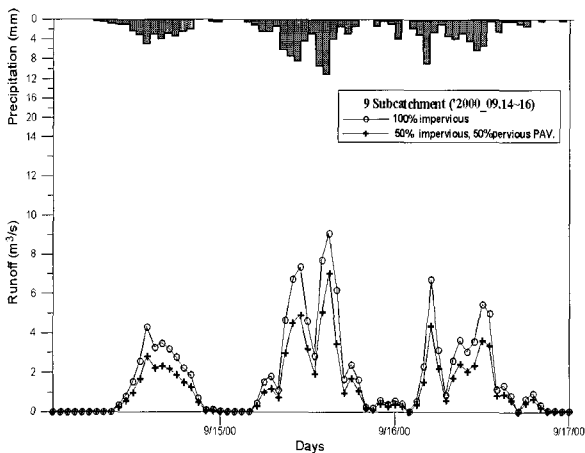


(a) Regeneration Effect of Permeable Pavement Layer, the Beginning of the Simulation

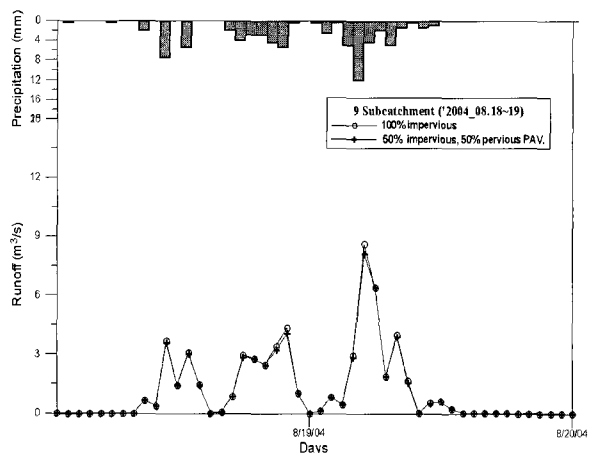


(b) Regeneration Effect of Permeable Pavement Layer, the Ending of the Simulation

Fig. 5. Test 1 of Modified SWMM



(a) The Effect of Permeable Pavement, the Beginning of the Simulation



(b) The Effect of Permeable Pavement, the Ending of the Simulation

Fig. 6. Test 2 of Modified SWMM

### 3.4 투수성 포장 포화투수계수의 변화에 따른 침투특성 비교

시험 수행 세번째 경우는 수정된 SWMM 4.4H 모형의 포장층 포화 투수계수 변화에 따른 결과를 비교한 것이다. 9번 소유역 중 50 %는 불투수 지역으로 나머지는 투수성 포장지역으로 가정하였다. 가정된 9번 소유역에 포화 투수계수가 12.7 mm/h인 경우와 38.1 mm/h인 경우로 모의를 수행하였다.

4년 모의 중 초기의 경우 포화 투수계수가 12.7 mm/h인 경우가 38.1 mm/h보다 침투율이 작아 지표유출이 큼을 알 수 있다(Fig. 7(a)). 시험 수행 말기에도 포화투수계수가 12.7 mm/h인 경우가 38.1 mm/h인 경우보다 지표유출이 크나 상대적으로 그 차이가 작음을 알 수 있다(Fig. 7(b)).

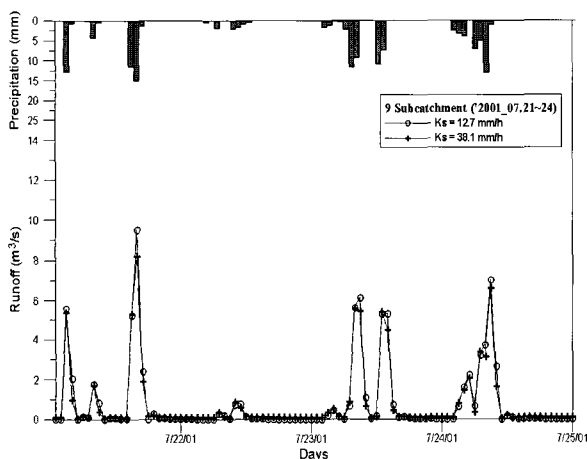
## 4. 수정된 SWMM에 의한 하수처리 재이용수와 투수성 포장 효과분석

### 4.1 하수처리 재이용수 효과분석

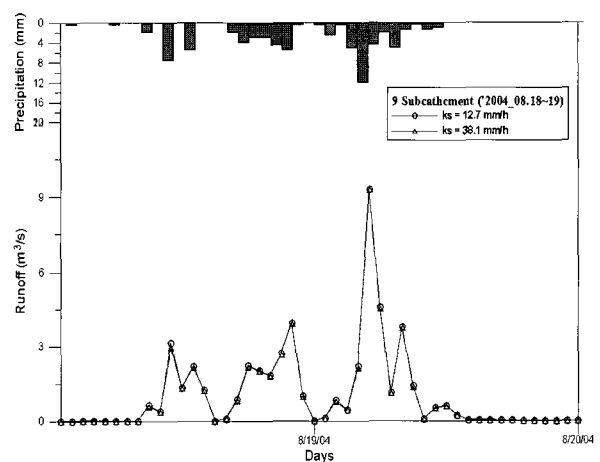
안양시는 학의천 도심 내에서 발생하는 지하철 용출수와 하수처리 재이용수를 공급하고 있다(Fig. 8). 안양시는 2000년 12월부터 석수하수처리장에서 하수를 최대 300,000 m<sup>3</sup>/day 만큼 처리하는데, 이중에 21,000 m<sup>3</sup>/day를 인덕원교 상류측의 학의천으로 방류하여 하천유지용수로 재이용하고 있다(남원 Eng., 2002). 그리고 1999년 12월부터 인덕원역 1구간에서 발생하는 2,520 m<sup>3</sup>/day와 인덕원역 2구간에 발생하는 1,200 m<sup>3</sup>/day의 지하철 용출수를 학의천으로 방류하고 있다(한국건설기술연구원,

2001). 그러나 하수처리 재이용수와 지하철 용출수를 항상 방류하는 것이 아니고 하천수량과 상황에 따라 관련기관에서 임의로 방류하고 있다. 이 중 하수처리 재이용수를 방류했을 때 건기 하천유출량에 어떤 영향이 있는지 학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 모의를 수행하였다. 하수처리 재이용수의 양은 21,000 m<sup>3</sup>/day(= 0.243 m<sup>3</sup>/s)이다. Fig. 9는 하수처리 재이용수를 학의천으로 방류하지 않았을 때와 방류하였을 때 비산교 지점을 대상으로 하천 모의유량을 비교한 것이다. 하수처리 재이용수를 학의천으로 방류하지 않은 경우 건기 모의유량이 약 0.15 m<sup>3</sup>/s정도인 것을 볼 수 있다. 그리고 하수처리 재이용수를 학의천에 방류한 경우 건기 모의유량이 약 0.4 m<sup>3</sup>/s로 방류하지 않은 경우에 비해 0.25 m<sup>3</sup>/s정도 건기유량의 증가를 볼 수 있다.

하수처리 재이용수의 효과를 객관적으로 파악하기 위해 학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 하수처리 재이용수를 포함한 유황 곡선(flow-duration curve)과 포함하지 않은 유황곡선을 산정하였다. 유황 곡선을 산정하기 위해 1994년 9월 1일 ~ 2004년 8월 30일까지 10년 동안 연속유출모의(日 간격)를 실시하였다. 10년 동안 유출을 모의한 결과를 1년 단위로 나눈 후, 1년에 대한 풍수량·평수량·저수량·갈수량을 산정하여 10개의 자료를 생성하였다. 10개의 자료들을 평균하여 풍수량·평수량·저수량·갈수량을 산정하고 유황 곡선을 작성하였다(Fig. 10). 학의천 하류 비산교 지점의 유황을 분석한 결과 저수량(Q<sub>75</sub>)은 0.139 m<sup>3</sup>/s에서 0.366 m<sup>3</sup>/s로 1.63배가 증가하였고, 갈수량(Q<sub>355</sub>)은 0.014 m<sup>3</sup>/s에서 0.064 m<sup>3</sup>/s로 3.57배 증가하였다.



(a) The Effect of Saturated Hydraulic Conductivity for the Permeable Pavement Layer, the Beginning of the Simulation



(b) The Effect of Saturated Hydraulic Conductivity for the Permeable Pavement Layer, the Ending of the Simulation

Fig. 7. Test 3 of Modified SWMM



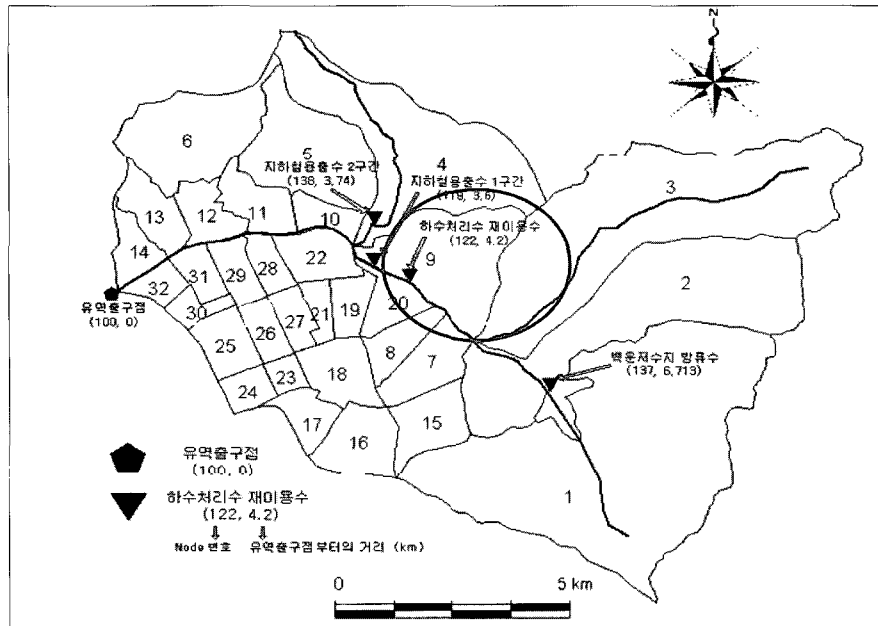


Fig. 8. Outlet Points of Maintenance Water to Prevent Streamflow Depletion in the Hakuicheon

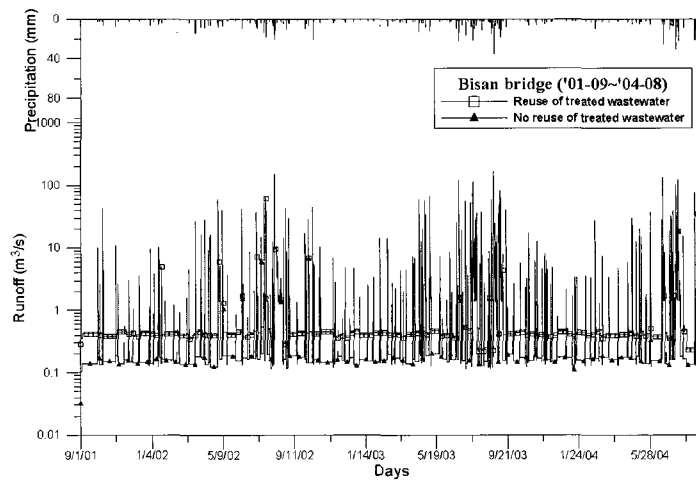


Fig. 9. The Effect Analysis on a Release of Treated Wastewater in the Hakuicheon (Bisan Bridge)

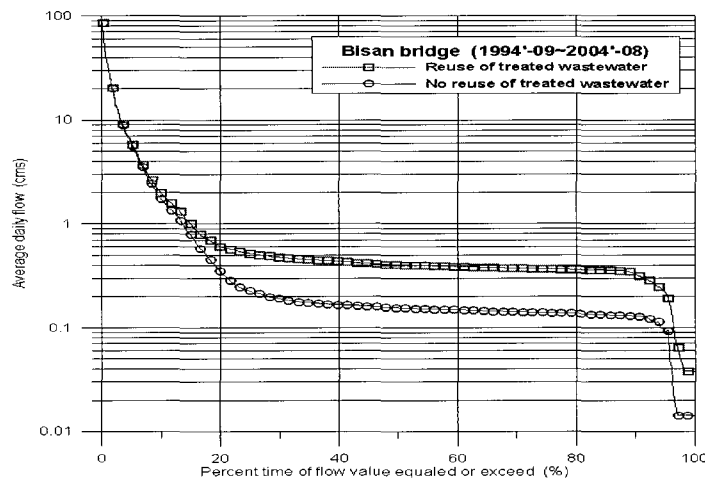


Fig. 10. Comparative Flow Duration Curves for a Release of Treated Wastewater in the Hakuicheon (Bisan Bridge)

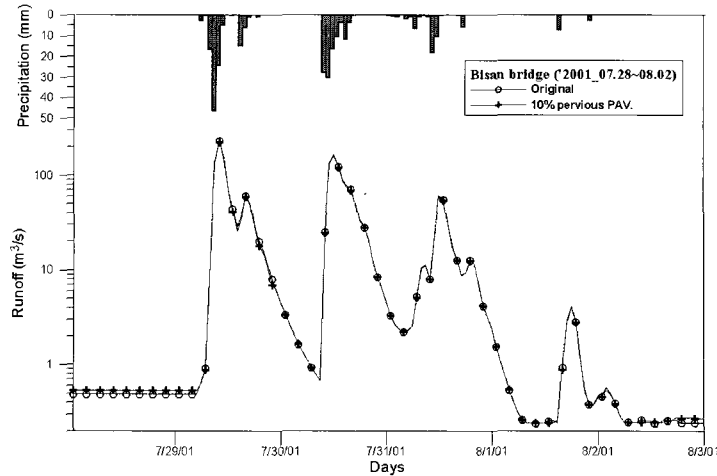


Fig. 11. The Effect of Permeable Pavement in the Hakuicheon (10 % Replacement of Impervious Area)

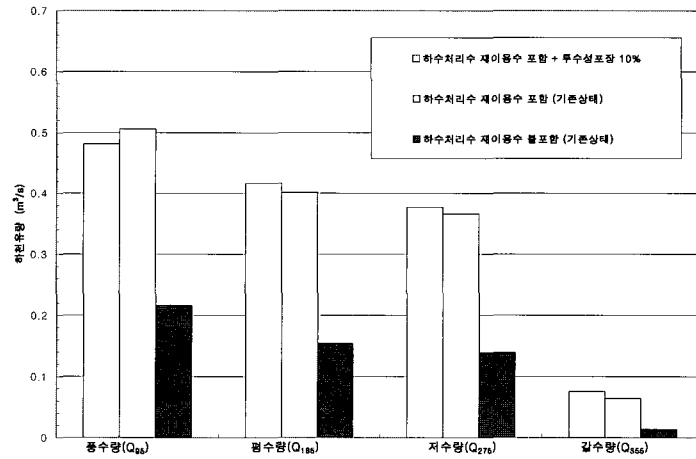


Fig. 12. The Effect of Permeable Pavement in the Hakuicheon (Bisan Bridge)

Table 3. Comparative Index Flow on the Effect of Permeable Pavement in the Hakuicheon

비교유량 ( $m^3/s$ )	비산교 지점		
	기존 상태		투수성 포장 치환
	하수처리 재이용수 불 포함 ( $m^3/s$ )	하수처리 재이용수 포함 ( $m^3/s$ )	하수처리 재이용수 포함 + 불투수 구역의 10% 투수성 포장 치환 ( $m^3/s$ )
풍수량( $Q_{95}$ )	0.216	0.506	0.481
평균량( $Q_{185}$ )	0.154	0.401	0.416
저수량( $Q_{275}$ )	0.139	0.366	0.377
갈수량( $Q_{355}$ )	0.014	0.064	0.075

#### 4.2 투수성 포장 효과분석

다음은 학의천 유역 내 투수성 포장에 대한 효과를 분석하였다. 투수성포장의 설치가능 면적은 대상유역의 지형, 지질, 토지이용에 따라 다르다. 투수성포장의 경우 1.0 ha당 투수성포장의 설치면적은 약 1,900  $m^2$  정도이다 (조원철 등, 2000). 따라서 실행 가능성과 경제성을 고려하여 현재 학의천 32개 소유역의 불투수면적 10%를 투

수성 포장으로 치환하였다. 그리고 수정된 SWMM 4.4H 모형에 의한 투수성 포장 효과를 분석하였다. 학의천 투수성 포장 효과분석에는 지표수모의와 지하수모의를 수행하였다. 연속유출모의 수행기간은 2000년 8월 1일부터 2004년 9월 30일까지 4년이다. 학의천 하류 비산교 지점에 대하여 모의기간 중 2001년 7월 28일부터 8월 2일까지의 모의결과를 Fig. 11에 나타내었다. 학의천 불투수

면적의 10 %를 투수성 포장으로 치환할 경우 홍수기에 1.52 ~ 8.36  $m^3/s$ 의 감소를 건기에는 0.03 ~ 0.07  $m^3/s$ 의 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 지표유출을 비교하면 Fig. 12, Table 3과 같다. 즉, 기존 저수량의 3 %, 갈수량의 17 %가 증가한다.

## 5. 결론 및 향후연구

투수성 포장을 고려하여 SWMM 4.4H 모형을 수정하였다. 학의천의 32개 소유역 중 도시 유역으로서 2016년까지 개발이 예정된 9번 소유역을 대상으로, 수정된 모형에 대한 투수성 포장 모의를 시험 수행하였다. 시험 수행은 투수성 포장의 침투특성에 관련된 매개변수의 특성을 살펴보기 위해 3가지 경우에 대하여 수행하였다.

시험 수행을 끝낸 모형에 대하여 학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 하수처리 재이용수와 투수성 포장에 대한 효과를 분석하였다. 하수처리 재이용수의 경우 학의천으로 방류하지 않은 경우 건기 모의유량이 약 0.15  $m^3/s$ , 방류한 경우 건기 모의유량이 약 0.4  $m^3/s$ 로 방류하지 않은 경우에 비해 0.25  $m^3/s$ 정도 건기유량의 증가를 볼 수 있다.

학의천 하류 비산교 지점을 대상으로 학의천 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 교체 할 경우 홍수기에 1.52 ~ 8.36  $m^3/s$ 의 감소를 건기에는 0.03 ~ 0.07  $m^3/s$ 의 유량이 증가함을 알 수 있다. 지표유출을 비교하면 현재 불투수 면적의 10 %를 투수성 포장으로 교체할 경우 기존 저수량의 3 %, 갈수량의 17 %가 증가한다.

본 연구의 주요성과는 현재 최상위 버전인 SWMM 4.4H 모형에 투수성 포장 모의를 고려할 수 있도록 모형을 수정하고, 지표수모의 뿐만 아니라 지하수 모의를 수행한 것이다. 또한 모형의 수정과정에서 장기유출 연속모의에 필요한 증발량처리에 대한 오류와 지하수 모의결과의 출력기능이 불완전한 것을 개선한 것이다.

현재 2 m 육면체의 토조를 이용하여 투수성 포장 실험을 진행하고 있으며 향후 실험결과와 침투모의 기능을 갖게 된 SWMM의 모의 결과를 비교할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구결과는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-7-2)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고 문헌

- 김병훈, 강준구, 이재웅, 여운광 (2001). "실험을 통한 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과에 관한 연구." **2001년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1-4.
- 남원 Eng. (2002). **안양시 하수도정비기본계획 변경**. 보고서, 안양시.
- 서울대학교 (2004). **안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 적용**. 연구보고서, 과학기술부.
- 서울대학교 (2005). **안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 개발**. 1차년도 연구보고서, 과학기술부.
- 심재현, 이철규, 이종규, 김진영 (2004). "침투통의 설치에 따른 치수효과 분석." **2004년 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1-5.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2004a). "SWMM을 이용한 독립천 장기유출 연속모의." **2004년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 4074-4079.
- 이정민, 이상호, 이길성, 김영오 (2004b). "안양천 유역의 물순환 모의." **2004년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2183-2188.
- 이재웅, 여운광, 심재현, 강태호 (2001). "투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제 21권, 제 6-B호, pp. 645-654.
- 조원철 등 (2000). **우수유출 저감시설 시범사업 검토 연구**. 연구보고서, 서울특별시.
- 한국건설기술연구원 (2001). **안양천 살리기 종합계획**. 연구보고서, 안양시.
- Benjamin, O.b., and Derek, B.B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance or permeable pavement systems." *Water Research*, Vol. 37, pp. 4369-4376.
- Eric, W., Anja, V.L., Per, J., and Peter S.M. (1999). "Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 217-224.
- Ferguson, B.K. (1994). *Stormwater Infiltration*. Lewis Publishers, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida,

- pp. 269.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual Ver. 2.1*. USACE.
- 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.
- Kipkie, C.W. (1999). *Feasibility of a permeable pavement option in the Storm Water Management Model (SWMM) for long-term continuous modelling*. M.Sc. thesis, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- Kresin, C. (1996). *Long-Term Stormwater Infiltration Through Concrete Pavers*. M.Sc. thesis, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- Urbonas, B.R. and Stahre, P. (1994). *Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management*. Prentice-Hall, New Jersey.
- (논문번호:05-101/접수:2005.07.16/심사완료:2005.11.17)