

## 투수성 포장의 침투 실험을 통한 도시유역 유출 변화 연구

구영민\* · 조재안\*\* · 김영도\*\*\* · 박재현\*\*\*\*

Koo, Young Min\*, Jo, Jae An\*\*, Kim, Young Do\*\*\*, Park, Jae Hyeon\*\*\*\*

### A Study on Runoff Analysis of Urban Watershed by Hydrologic Infiltration Experiment of Permeable Pavement

#### ABSTRACT

Recently, due to increase of the impervious layer, the storage of surface layer has been reduced. Otherwise the peak runoff and the total surface runoff have been raised. Because of larger amount of the peak runoff and the rapid time of concentration, the flood damage of the urban watershed was increased. The groundwater level is descended by reducing the amount of rainfall that infiltrated into the soil. Thereby the hydrologic cycle is degenerated by the dry stream. Therefore, in this study, the evaluation and the quantitative analysis of the percolation effect were performed through the infiltration experiment of permeable pavement, which is one of the ways that can reduce the problem of the dry stream. Also the SWMM model is used to analyze the effect of the hydrologic cycle for permeable pavement in Changwon stream and Nam stream watersheds, with the coefficient of permeability from the infiltration experiments.

**Keywords :** Surface runoff, Infiltration, Permeable pavements, Dry stream, SWMM

#### 초록

최근에 불투수층의 증가로 인하여 지표면의 저류량이 감소하고 침투유출과 전체 지표면유출은 증가하고 있다. 침투유출량의 증가와 빠른 도달 시간으로 인하여 도시유역의 홍수 피해가 증가하고 있다. 또한 토양으로 침투되는 강우량이 감소하여 지하수위가 하강한다. 그러므로 도시하천의 건천화가 진행되어 유역의 물 순환이 악화된다. 따라서 본 연구에서는 건천화 문제를 감소시킬 수 있는 방안중 하나인 투수성 포장의 침투 실험을 통하여 투수효과를 정량적으로 분석 및 평가하였다. 또한 SWMM 모형을 창원천 및 남천 유역에 적용하여 침투실험에서 얻어진 투수계수를 이용하여 투수성 포장의 물순환 영향을 분석하였다.

**검색어 :** 지표면유출, 침투, 투수성 포장, 건천, SWMM

## 1. 서론

도시화에 따라 도시의 인구가 증가하고 각종 주거지와 시설물이 건설되어 도시의 자연환경은 크게 변화하였고, 도시를 관통하는 하천의 유출 양상을 크게 변화시키는 원인이 되었다. 특히 도시화에 따른 지표면의 불투수 면적의 증가는 지표하의 저류능력을 감소시키며, 침투유출량의 증가와 도달시간의 감소, 도시하천의 과중한 홍수부담능력을 유발하게 된다(Moon, 2006). 우리나라의 경우 1조원 이상의 홍수피해가 8회 발생하였고 '87년을 제외하고는 대규모의 피해가 최근에 발생하였다. 또한 재해발생 원인별 재산피해 발생비율은

\* 인제대학교 환경공학화 석사과정, 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 (greatkym@nate.com)

\*\* 인제대학교 환경공학과 석사과정 (jaean\_k@daum.net)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구센터) 조교수 (Corresponding Author · Assistant Prof., Department of Environmental Engineering (NRERC), Inje University · ydkim@inje.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 인제대학교 토목도시공학부 부교수 (jh-park@inje.ac.kr)

Received January 17 2013, Revised February 8 2013, Accepted February 19 2013

태풍으로 인한 피해가 59%, 호우 23%, 호우·태풍 11% 등으로 풍수해에 의한 피해가 93%에 달하고 있다(Hong, 2006). 도시구역은 재해취약요인이 증가하고 있고, 지구온난화에 따른 세계적인 기상이변 및 급속한 도시화로 인하여 자연재해 발생이 증가하고 대형화되어 가고 있다. 이러한 도시의 홍수피해 및 건전화 문제를 감소시킬 수 있는 여러 가지 방안들이 검토되고 있다. 개발사업의 초기 행정계획 단계에서부터 사전재해영향성검토협의제도를 통해 홍수유출을 저감시키기 위한 재해저감시설을 설치하도록 하고 있으며, 또한 LID (Low Impact Development) 기법을 의무적으로 적용하도록 규정하고 있다(LH, 2011).

국내에서 투수성 포장은 1990년대 후반 처음 도입되었으며, 물 순환 체계를 개선하기 위한 포장기술은 초기 적용 단계 및 연구개발 중에 있다. 국내 연구사례를 살펴보면, Kim (2001)은 도시지역에 적용하기 적합한 침투형 저감시설 중 하나인 투수성 포장에 대한 저감효과를 파악하기 위해 인공강우 및 실제강우에 대하여 수리모형 실험을 실시하였으며, 불투수성 포장재와 투수성 포장을 통한 우수저감을 정량적으로 해석하였다. Im et al. (2007)은 여러 가지 투수성 재료를 이용하여 표면재료에 따른 침투형 우수유출 저감시설의 침투 특성을 실험적으로 연구하였으며, 표면재료 및 강우강도를 변화시키며 실험장치에 의한 침투특성을 고찰하고, 표면재료의 이용에 따른 침투효과 및 특성을 분석하였다. 최근에는 투수성 포장의 지속적인 관리를 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, Kwon (2007)은 투수성 포장에서의 막힘현상 및 오염제어 포장개발을 위하여 표면 친수화 기법과 오염제어 매트 적용한 투수성 블록 포장을 개발하였으며, KICT (2008)은 신도시 지역의 설계조건을 기준으로 차도에 투수성 포장을 적용할 경우의 교통하중에 따른 노상의 지지력 저하 성능을 수치해석을 통해 분석하고, 저하된 지지력을 확보하기 위해 다양한 방안의 비교분석을 통해 적용 가능한 투수성 포장단면을 제시하고, 시험포장을 통해서 단면의 구조적인 성능을 검증하고 이를 보완하였다. Jun et al. (2009)은 다양한 관측장비를 이용하여 투수성 포장의 효과를 분석 및 평가하기 위해 수리모형 실험을 통한 관측자료를 활용하여 수치모형 실험에 필요한 매개변수를 보정하였다. 도시유출 모형을 적용한 연구로서 Lee (2007)는 SWMM (Storm Water Method Model) 모형을 이용하여 안양천의 지류인 학의천 유역에서 투수성 포장에 하천의 수량 증가에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, LH (2010)은 시험포장 실험 및 SWMM 모형을 이용하여 단지내 차도용 투수성 포장의 물 순환 효과분석을 수행하였다.

LID 공법 및 투수성 포장에 관한 국외의 연구사례를 살펴보면 다음과 같다. 1970년대부터 미국, 독일, 일본 등 선진국에서는 홍수 등으로 인한 수해예방과 지하수 등 수자원의 효율적인 관리를 위하여 우수유출 저감시설물 설치 및 관리방안을 규정하고 이를 연구하였다. 일본의 경우 토목연구소에서 환경을 배려한 다양한

포장공법에 관하여 많은 연구가 진행 중이며, 각 공법별 전담 연구자가 배치되어 관련 연구를 수행하고 있으며, 또한 종합적인 홍수관리 (comprehensive flood management) 연구를 수행하고 있는데, 하천 개선과 유출의 제어, 피해저감 방안을 조합한 공법을 개발중에 있다. 미국 환경청(EPA)에서 추진 중인 Green Infrastructure Research Program에 의하면 도로와 보도를 빗물여과 시스템으로써 사용하기 위해 물의 여과를 향상하는 투과성 포장 공구구조의 아스팔트 소재를 개발하고 있으며, 포장재 종류별 비점오염원을 제거하는 빗물 정원(Rain Garden)의 효율성을 평가하는 연구를 진행하고 있다. 네덜란드는 물에 대하여 각별한 국가로서 우수를 침투시켜 지하수량과 수질을 보호하며, 지하수를 이용하기 때문에 투수성 포장공법에서 지하수의 오염방지까지 연구가 진행되고 있다(Jun, 2006).

국내에서도 침투형 우수유출저감시설에 대한 다양한 연구와 접근이 필요하며, 우수유출 저감시설의 침투 특성에 대한 실험적 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하수 침투 증진 시설 중 하나인 투수성 블록의 투수효과를 정량적으로 분석 및 평가하고 SWMM 모형을 이용하여 도시구역에서의 투수성 포장효과를 분석하고자 한다.

## 2. 투수성 포장 실험방법

### 2.1 투수성 포장 개요

불투수성 콘크리트나 아스팔트는 빗물이나 하천의 물이 지면으로 침투하지 못하고 증발되거나 강을 통해 바다로 바로 흘러 들어가는 비정상적 물순환 흐름을 야기한다. 현재 도로와 하천 구분할 것 없이 아스팔트나 콘크리트를 포장재로 활용한 형태의 도시는 물순환 시스템을 파괴시켜 여러 가지 심각한 후유증을 가져오고 있다. 투수성 포장은 이러한 물순환 시스템의 복원을 목적으로 개발되었으며, 투수성 포장의 장점은 우천 시 우수의 투수로 물고임 방지, 블록을 통과한 물을 정화시켜 지하수 수질정화를 도모하고 지하수 증가, 수분 증발 시 열을 운반하여 열섬현상 완화, 저류기능으로 인한 홍수피해 감소 등이 있다. 투수성 포장의 단점으로는 공극을 통하여 배수되는 형태의 블록으로 고밀도 블록에 비해 강도가 다소 떨어지며, 환경적 요건으로 점차 공극이 축소되는 점이 있으며, 따라서 투수성 포장의 공극율의 분포도가 매우 중요하다. 이러한 투수성 포장의 우수한 투수성은 우천 시 지표면에 침투를 도와 물 순환이 원활이 될 수 있도록 기여한다(Jun et al., 2009). Fig 1에 나타낸 바와 같이 전형적인 투수성 포장은 투수성 아스팔트 포장으로 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 시멘

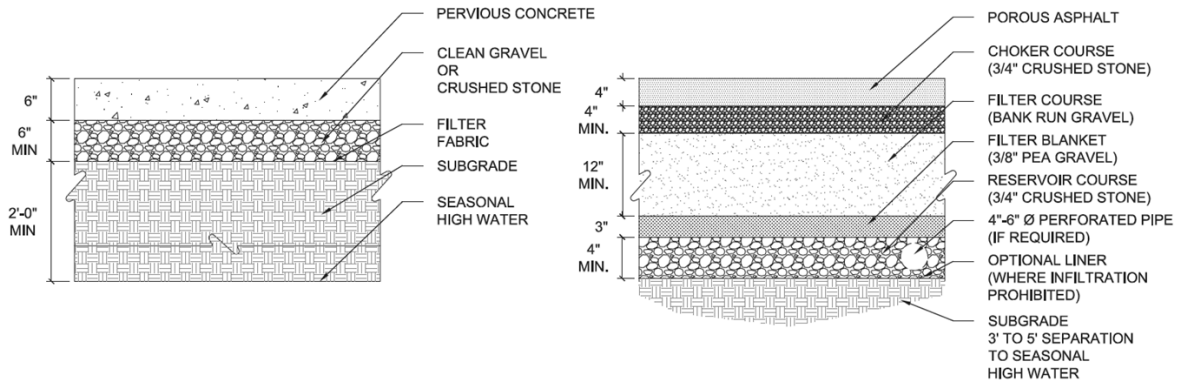


Fig. 1. Permeable Pavement of Porous Concrete and Porous Asphalt (CRWA, 2008)

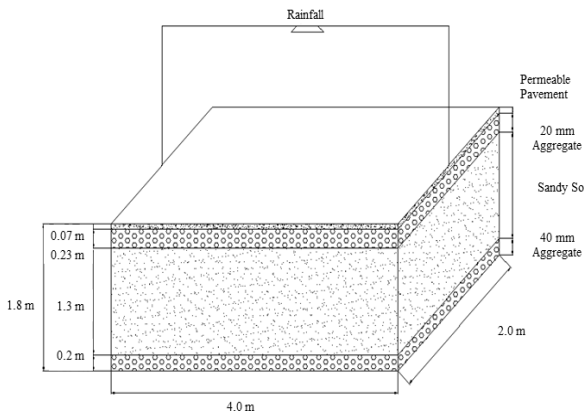


Fig. 2. Conceptual Diagram of Experimental Apparatus



Fig. 3. Front View of Experimental Apparatus

트와 비교하여 약 70~80%의 밀도를 가지고 시공한다(Ferguson, 1994).

본 연구에 사용한 투수성 포장층은 다공성 투수성 포장으로 13 mm 사석에 무독성 접착제를 이용하여 만들었다. 무독성 접착제는 파마자 열매의 식물성 레진이 포함된 식물성 폴리우레탄이며, 재활용이 가능하고 자연생태계에 악영향이나 토양과 식수를 오염시키지 않는다.

## 2.2 실험장치 및 계측기기

본 연구에서는 투수성 평가를 위한 실험장치를 제작하였는데, 2 m × 4 m × 2 m (가로 × 세로 × 높이) 크기의 토조에 표층(투수성 포장, 0.07 m), 기층(쇄석, 0.23 m), 원지반(사질토, 1.3 m), 배수 및 지하수위 조절을 위한 배수층(쇄석, 0.2 m)을 설치하였다. 배수층에는 40 mm 사석을 이용하였으며, 물이 투수될 수 있고 물의 영향을 적게 받는 사질토를 이용하였으며, 자갈이 포함되지 않는 사질토를 다짐기계로 수차례 다짐을 실시하였다. 기층은 20 mm 사석을 이용하였으며, 실험 토조 상부의 강우 장치는 강우 특성에 따른 시간별 침투량을 분석하기 위해 설치하였다. 실험용 토조의

전체적인 개념도는 Fig. 2와 같으며 설치가 완료된 사진은 Fig. 3과 같다. 실험시 강우, 바람, 기온 등 외부영향을 적게 받기위하여 대형천막을 설치하였다.

본 연구에서는 필요로 하는 강우를 발생시키기 위하여 인공강우장치를 설치하였으며, 인공강우장치는 유량조절밸브 및 펌프, 유량계, 노즐장치 등으로 구성된다. Fig. 4는 함수량계와 데이터 로거이며, 초기 토양의 함수량과 인공강우의 침투율에 따른 함수량 변화를 측정하기 위하여 함수량계를 설치하였다. 설치된 함수량계는 데이터 로거를 통해 실시간으로 토양의 함수량을 측정하였다. Fig. 5는 전자유량계이며, 정확한 강우강도 구현을 하기위하여 총 유량과 시간에 따른 유량을 알려주는 전자유량계를 선택하였다. Fig. 6은 인공강우를 발생시키는 노즐이며, 토조안의 지표면에 강우를 균등하게 발생시킬 수 있는 노즐과 높이를 찾아서 설치하였다. 또한 지하수 유출을 측정하기 위하여 외부 배수 장치에 호스를 연결한 후, 유출을 수집하기 위한 집수통(0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)을 설치하였다(Fig. 7 참조). 집수관의 높이는 지하수의 높이 조절을 위하여 조절이 가능하도록 설치하였다.



Fig. 4. Moisture Content Measurement



Fig. 5. Electromagnetic Flowmeter

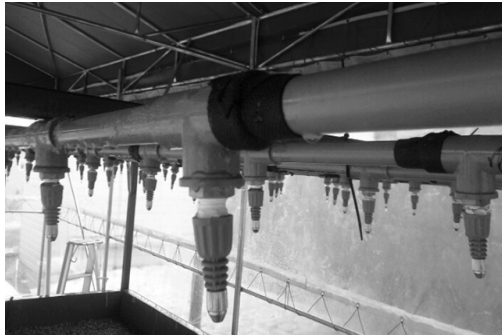


Fig. 6. Injection Nozzle



Fig. 7. Underground Runoff Measurement

Table 1. Experimental Conditions

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Rainfall Intensity (mm/hr)	50	100	50	100	50	100
Rainfall Duration (hr)	3	3	3	3	3	3
Total Rainfall (mm)	150	300	150	300	150	300
Groundwater Level (m)	0	0	0.5	0.5	1.0	1.0

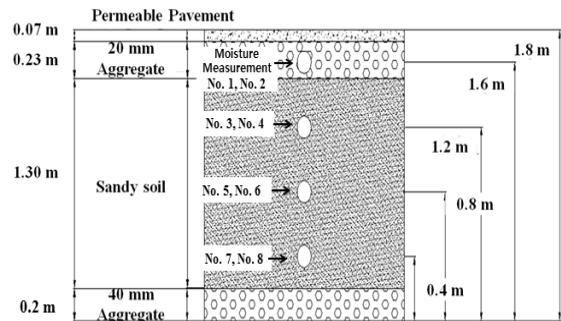


Fig. 8. Moisture Content Measuring Position (Side View)

### 2.3 실험방법 및 내용

본 연구에서는 투수성 포장의 투수성 평가를 위하여 실험 조건은 크게 강우강도와 지하수위 두 가지를 고려하였다. Table 1은 실험조건을 나타낸 것으로 강우강도 50 mm/hr, 100 mm/hr의 두 가지 경우에 대하여 토조바닥 기준으로 한 지하수위 0.0 m, 0.5 m, 1.0 m 세 가지 경우를 교차 적용하여 총 6가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 기저유출의 시간적 변화를 충분히 측정하기 위하여 강우 중단 후 6시간 동안 지하수위, 함수비, 유출량 변동 등을 측정하였다. 각 유출량 측정은 기 언급한 유출 측정 장치를 이용하여 10분 단위로 측정하였으며, 함수비는 설치된 함수량계를 이용하여 5분 단위로 측정하였다.

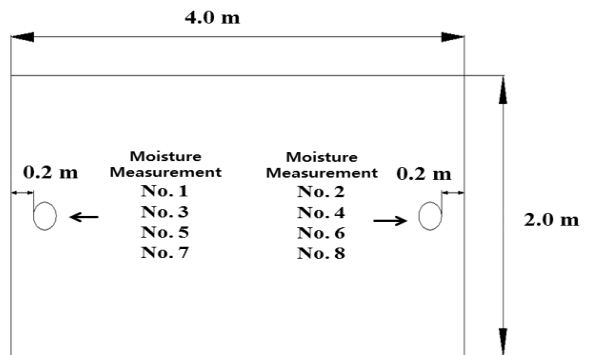


Fig. 9. Moisture Content Measuring Position (Plan View)

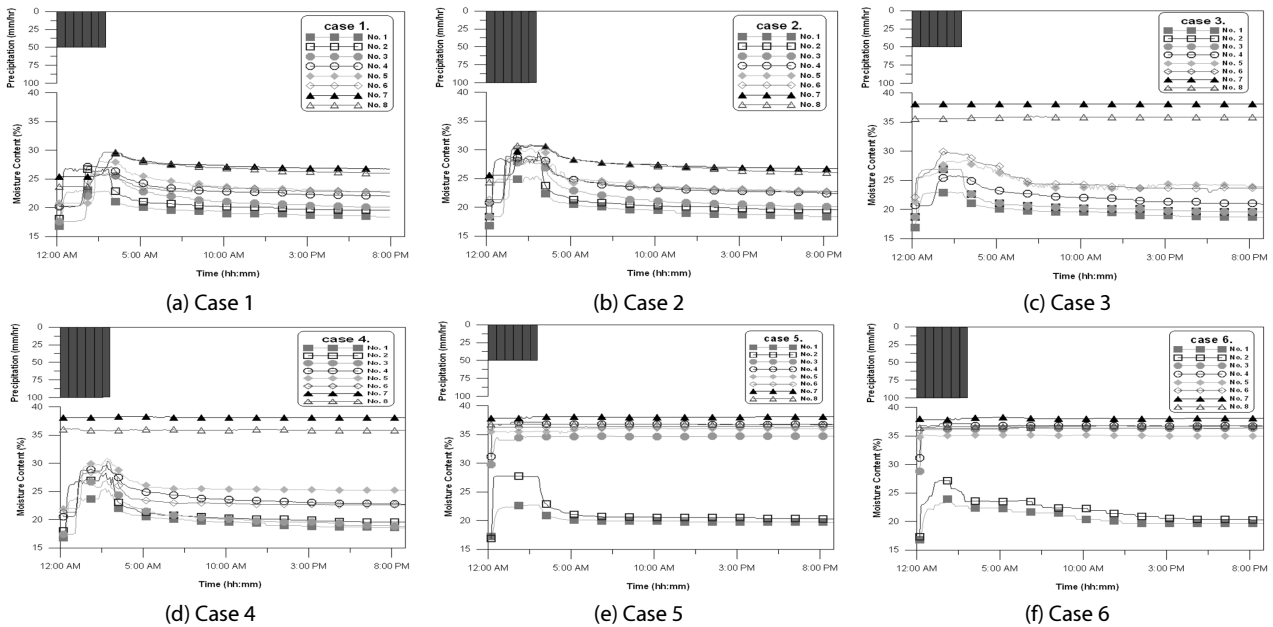


Fig. 10. Changes of Moisture Content (Case 1 ~ Case 6)

Table 2. Experimental Results with Water Balance Analysis

Case No.	Inflow (cm <sup>3</sup> ) ①	Outflow (cm <sup>3</sup> )		Total Outflow (cm <sup>3</sup> ) ②+③=⑤	Total Outflow/Inflow (%) ⑤/①
		Groundwater Outflow ②	Soil Moisture ③		
Case 1	1,200,000 (100%)	619,300 (52%)	552,000 (43%)	1,171,300	0.98
Case 2	2,400,000 (100%)	1,738,800 (72%)	550,800 (23%)	2,289,600	0.95
Case 3	1,200,000 (100%)	794,650 (67%)	334,400 (28%)	1,129,050	0.94
Case 4	2,400,000 (100%)	1,819,250 (76%)	484,000 (20%)	2,303,250	0.96
Case 5	1,200,000 (100%)	799,350 (67%)	297,600 (25%)	1,096,950	0.91
Case 6	2,400,000 (100%)	1,770,750 (74%)	420,000 (18%)	2,190,750	0.91

### 3. 결과 분석

#### 3.1 함수량 변화

Fig. 8과 Fig. 9는 함수량계 설치 위치를 나타낸 것으로, 함수량계는 좌측 4개, 우측 4개, 총 8개를 높이별로 설치하였으며, 각각의 설치 위치는 토조 바닥으로부터 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm 지점이다. Fig. 10는 시간에 따른 수리모형 실험의 함수량 변화를 나타내고 있다. 토조 내 높은 위치에 설치되어 있는 함수량계는 강우에 민감한 반응을 보였으며, Fig. 8에 나타낸 8개의 함수량계에서 No. 1, No. 2 함수량계는 강우 종료 후 다른 함수량계의 비하여 함수량이 급격히 떨어지는 경향을 나타내었다. 그 외 함수량계는 강우시 일정하게 증가하다가 강우 종료 후 서서히 함수량이 떨어지는 경향을 보이며, 포화상태에 가까게 함수량을 나타내고 있다.

#### 3.2 유출량 변화

본 연구에서는 강우강도와 지하수위 변화에 따른 투수성 포장의 투수성을 평가하였다. 6가지 경우 모두 강우발생 중과 강우발생 후에 지표유출은 발생하지 않았고, 지하유출만 발생하였다. 지하유출은 강우 발생 후 6시간동안 매 10분 간격으로 측정하였으며, 지하유출 초기 발생시간은 강우발생 후 약 30 ~ 140분까지 매우 다양하게 나타났다(Table 3 참조). 또한 지하수위가 높을수록 토조 내 지하수 영향으로 지하유출이 빨리 발생하는 것으로 측정되었다.

Table 2는 유입된 강우량, 지하 유출량, 토조내 함수량 등을 바탕으로 각 실험조건별 물수지 분석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 전체 강우량 대비 지하수 유출량은 약 52 ~ 72%, 토양수분 양은 약 18 ~ 43%, 총 유출량은 유입량 대비 약 91% 이상으로 분석되었다. 손실유량은 실험시 증발 및 실험장치 누수 또는 지하수량의 측정 오차에 의하여 발생한 것으로 판단된다. 지하유출 초기

Table 3. Permeability coefficient

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Travel Distance (m) (Permeable Pavement + Foundation)	1.8	1.8	1.3	1.3	0.8	0.8
Groundwater Initial Outflow Time (min)	140	70	60	60	40	30
Hydraulic Conductivity (cm/sec)	0.021	0.043	0.036	0.036	0.033	0.044

발생시간과 강우의 토조내 이동거리를 이용하여 간접적으로 토조 내 지반의 투수계수를 산정하였다. Table 3에서 이동거리는 투수성 포장과 원지반의 높이를 나타내며 지하수위가 증가할수록 이동거리가 줄어들게 된다. Table 3에 나타낸 바와 같이 토조내 지반(투수성 포장+원지반)의 투수계수는 0.021 ~ 0.044 cm/sec으로 산정되었으며, 실험에 사용한 투수성 포장의 투수계수 값은 일반적인 투수성 포장의 투수계수 0.01 cm/sec보다 높은 0.08 cm/sec 값으로 평가되었다.

#### 4. 모형의 적용

##### 4.1 SWMM 모형 개요

미국 EPA에서 개발한 SWMM 모형은 도시구역 및 인위적인 배수체계에 적용될 수 있으며, 소규모 배수구역에서 대규모 배수구역까지 적용될 수 있다. 그리고 각 배수구역에 대한 합성 및 분리와 함께 배수구역 내의 각종 수리시설물을 동시에 고려할 수 있다. 또한, 구역의 유량 및 물 순환에 대한 모의가 가능하고, 1차원적인 지하수 계산 및 장기 유출 해석이 가능하다. SWMM 모형은 강우주상도, 기상자료, 소유역의 자료, 하수관거 자료를 입력하여 구역의 유출 유량과 수질을 예측하고, 오염물질에 대한 처리를 모의할 수 있다. 다양한 버전의 SWMM 모형은 프로그램 구성면에서 일부 차이가 있지만, 모형 내의 계산 과정과 이론은 동일하다(Jun, 2006).

SWMM 모형은 크게 네 가지 층으로 구분하여 유출을 모의한다. 이와 같은 유출모의를 위한 SWMM 모형의 입력자료는 크게 세 가지로 분류된다. 이들은 수문기상 자료군, 매개변수 자료군, 입/출력 제어 자료군이다. 수문기상 자료군은 강우, 강설 및 증발산과 관련된 자료들이고, 매개변수 자료군은 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수들로서는 소유역의 면적, 구역의 평균경사, 불투수지역의 면적 등 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등 배수체계 관련 매개변수 등이며 이들의 대부분은 지형도나 항공사진, 관망도 및 하천도 등을 통하여 추정할 수 있는 매개변수들이다. 수문학적 매개변수들로서는 투수 및 불투수구역의 Manning 계수

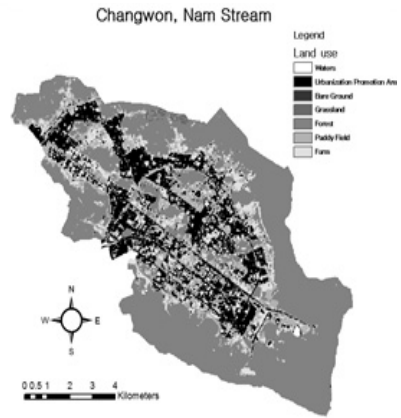


Fig. 11. Land Use Map of Changwon Stream and Nam Stream Watershed

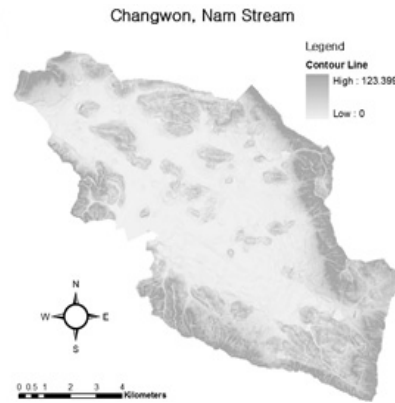


Fig. 12. Contour Line Map of Changwon Stream and Nam Stream Watershed

와 하도 및 관망의 Manning 계수, 지표면 저류, 침투관련 매개변수, 그리고 구역 폭 등이다. 입/출력 제어 자료군은 프로그램의 수행과 결과의 출력형태를 결정하는 자료들로서 사용자의 목적에 따라 결정되는 자료들이다(Lee and Lee, 1998).

##### 4.2 대상구역 현황

본 연구에서 실험에서 얻은 투수성 포장의 효율을 이용하여 도시구역에 SWMM 모형을 적용하고, 대상구역의 홍수예방 및 물 순환 회복 방안을 정량적으로 검토하고자 하였다. 이를 위하여 연구 대상구역은 최근 도시화가 급격하게 진행된 창원지역을 선정하였다. 지리적 위치는 동경 128° 45'51"인 대산면 유등리 유등에서 서쪽으로는 동경 128° 33'43"인 북면 내곡리 도태에 걸쳐있고, 북면 외산리 벌등에 위치하고 있으며, 동서간 경도차는 0° 12'8"이고 남북간의 위도차는 0° 15'28"이다. 1995년 도농통합으로 동읍, 대산면, 북면 3개 읍·면이 창원지역에 통합되어 기존 시가지의 12개 동과 함께 총 면적 292.72 km<sup>2</sup>로 경상남도의 2.8%이며,

인구는 510,120명으로 경상남도 전체인구의 15.74%를 차지하고 있다. 창원천은 남천의 지류로서 남천의 하류부에 유입되며, 창원천과 남천의 유역은 창원시의 도심구간을 포함하고 있다(Fig. 11 참조). 남천유역은 115.97 km<sup>2</sup>이며, 유로연장 15.37 km, 유역 평균경사는 1/1150 ~ 1/51로서 중·하류부는 대체적으로 완만한 편이나 상류부는 급한 유역이다(Fig. 12 참조).

### 4.3 모형의 입력자료 구축

본 연구에서 강우량 자료는 창원 기상청 자료를 이용하였으며, 2011년 1월부터 2011년 12월까지 시간 단위로 입력을 하였다. SWMM 모형의 유역에 관련한 입력 자료들은 물리적 매개변수와 수문학적 매개변수로 구분되어 있다. 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수 지역의 면적비 등의 물리적 매개변수는 GIS 자료를 이용하여 산정하였으며, 수문학적 매개변수는 유역의 조도계수와 지면 저류 깊이가 있으며, 이 값들은 홍수유출 모의를 수행한 후, 홍수유출 모의 결과와 관측 값을 비교하여 추정하지만 일반적으로 정확한 산정이 어려우므로 본 연구에서는 기존 연구에서 제시한 값을 일괄적으로 적용하였다. 유역의 조도계수는 Engman (1986)의 조도계수 추정 값을 이용하여 불투수 지역에는 0.013, 투수 지역에는 0.4를 적용하였다. 지면 저류 깊이는 Tholin and Keifer (1960)의 추정 값을 이용하여 투수지역에는 6.4 mm, 불투수 지역에는 1.6 mm를 입력하였다. SWMM 모형의 침투모형으로는 Horton, Green-Ampt, Curve Number가 있으며 본 연구에서는 Green-Ampt를 이용하였다. Green-Ampt 식은 Darcy의 법칙을 기초로 하고 있으며, 간단하면서도 연직 침투과정의 기본적인 특성을 잘 나타내며 매개변수들은 측정 가능한 흙의 물리적 특성들로 구성된다. 이 모형은 불포화 흐름을 고려한 보다 엄밀한 방법과 비교해도 매우 합리적인 예측 결과를 주는 것으로 알려져 있다 (Wallace et al., 1975).

Fig. 13은 창원천과 남천 유역의 SWMM 모형 구축 현황을 나타낸 것이다. 창원천 유역을 분할하여 7개의 소유역으로 구축하였으며, 남천 유역은 창원천을 제외하고 10개의 소유역으로 구축하였다. 11개의 하천 자료는 창원시에서 구한 CAD 자료와 하천기본 계획보고서를 바탕으로 구축하였다(MLTM, 1993, 1994a, 1994b, 1994c, 1995, 1996, 2000, 2005, 2010a, 2010b).

SWMM 모형의 5.0 버전에 포함되어 있는 LID 모형은 다양한 빗물관리시설의 수문영향분석이 가능하도록 미국 EPA에서 기존 SWMM 모형에 빗물정원, 습지, 침투트렌치, 침투정, 식생도랑, 투수성 포장 등의 LID 시설 모의가 가능하도록 개발된 모형이다. 침투·저류시설 및 LID 계획요소의 정량적인 수문영향평가가 가능하다. Fig. 14는 LID 모형에서 침투·저류시설 여부에 따른 유출개념도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 LID 모형의 투수성 포장을

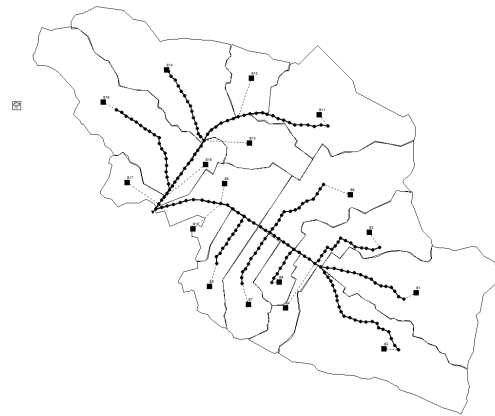


Fig. 13. Drainage System in Changwon Stream and Nam Stream Watershed

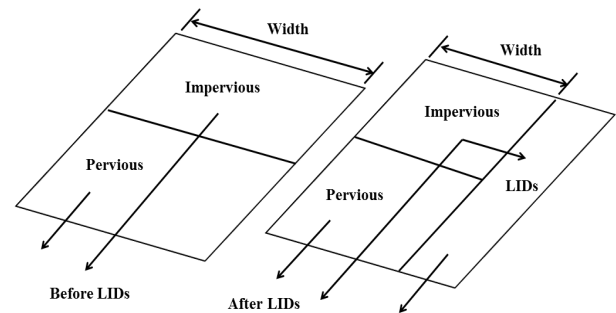


Fig. 14. Conceptual Diagram of Surface Runoff for LID Model (LH, 2011)

적용하였으며, 토조실험에서 구한 투수계수를 평균(0.035 cm/sec)하여 입력하였고, 토조실험에서 사용한 표층(0.23 m)과 저장층(1.3 m)의 높이를 입력하였다. 그 밖의 매개변수는 모형에서 추천하는 기본 값을 이용하였다.

## 5. 모의결과 및 분석

### 5.1 SWMM 모형의 적용성 평가

SWMM 모형의 유출량 보정은 마산만 연안 오염총량관리 기본계획을 위해 실측한 2011년 남천과 창원천의 유량을 이용하였다(MLTM, 2011). 창원천과 남천 각각 보정을 하였으며, 수리적 매개변수인 Green-Ampt의 침투량과 Unit Hydrographs (UHs)에 포함하고 있는 RDII (Rainfall Derived Inflow/Infiltration)를 이용하여 보정을 하였다. Green-Ampt의 침투량은 기존 연구에서 나온 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 보정을 수행하였다. Unit Hydrographs (UHs)은 강우량에 따라 달라지는 유입/침투를 추정하는 방법으로 강우 시작부터의 유출시간과 유출이 끝나는 시간을 조절하는 방법이다. RDII의 입력 값은 추정 값을 사용하며(Muleta

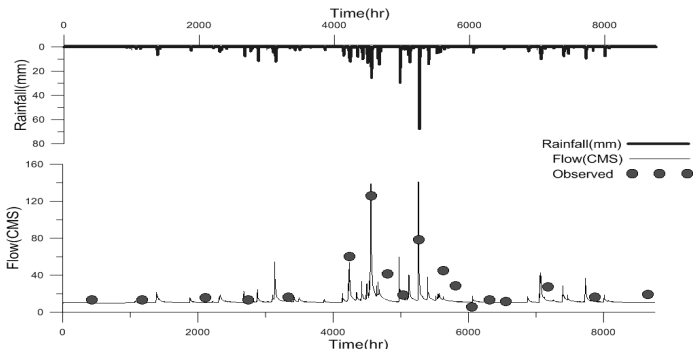


Fig. 15. Comparisons of Observed and Simulated Runoff (Changwon stream)

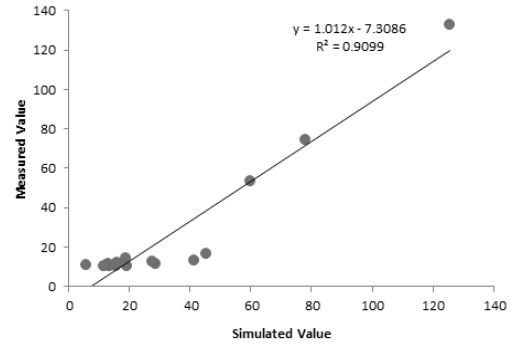


Fig. 16. Relationships between Observed and Simulated Runoff (Changwon Stream)

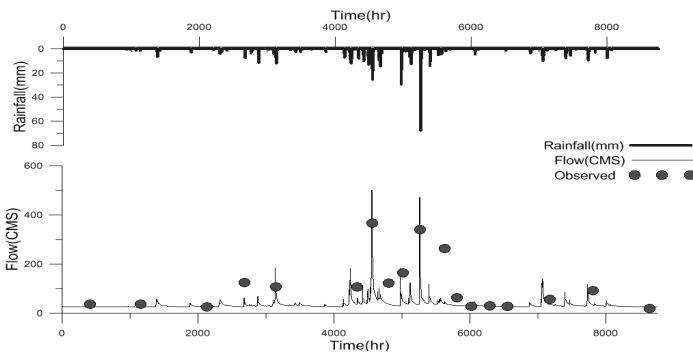


Fig. 17. Comparisons of Observed and Simulated Runoff (Nam stream)

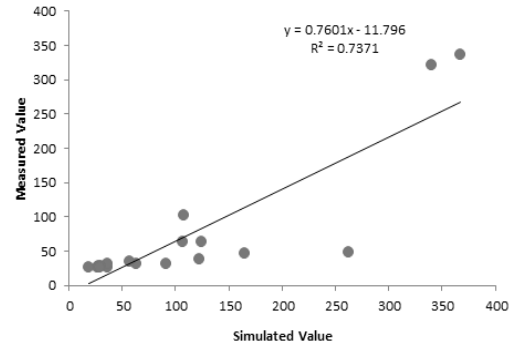


Fig. 18. Relationships Between Observed and Simulated Runoff (Nam Stream)

et al., 2008), SWMM 모형에서 각각의 Node에 입력할 수 있다. 모의 결과와 실측값의 비교분석을 위하여 선형회귀 관계를 판단하는 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )를 이용하여 오차 분석을 하였다. Chung et al. (2002)는  $R^2$ 값이 0.5, Green (1997)는  $R^2$ 값이 0.6 이상이면 모형이 자연현상 모의에 적합하다고 제안한 바가 있다. Fig. 15는 창원천 유량을 보정한 그래프이며, Fig. 17은 남천 유량을 보정한 그래프이다. 모형의 보정 결과, 남천의  $R^2$ 값은 0.7371(Fig. 16 참조), 창원천의  $R^2$ 값은 0.909(Fig. 18 참조)로 나타났다. 창원천에 비해 남천유역의 결정계수가 낮게 나왔지만 선행연구에서 제안한 적합도 이상이므로 SWMM 모형을 이용한 창원천 및 남천 유역에서의 유출해석은 적합하다고 판단된다.

## 5.2 투수성 포장에 따른 창원천 및 남천의 유량 변화

창원천 및 남천 유역을 2011년 1월부터 12월까지 1시간 단위로 모의를 하였으며, 강우는 모형의 보정에서 사용한 2011년 호우사상과 동일한 조건을 적용하였다. 창원천 및 남천 유역전체 불투수면적 중 투수성 포장을 1%, 3%, 5%, 10%, 15% 교체하였을 경우 창원천(Fig. 19 참조) 및 남천(Fig. 20 참조)의 유량 변화를 비교하였으며, 투수성 포장으로 교체된 불투수면적 외에 불투수면적 5%

에서 발생하는 지표유출도 투수성포장으로 유입되어 하천으로 유출된다고 가정하였다. 2011년 창원천의 집중호우는 7월 9일 187.5 mm/day, 8월 8일 4시에 67.5 mm/hr가 발생하였다. 8월 8일의 일 강우 103.5 mm와 비교하면 한 시간 동안 많은 강우가 내린 것을 알 수 있다. 자세한 분석을 위해 창원천이 유입되는 남천을 대상으로 연중 최대 강우량을 보인 2011년 7월 9일(Fig. 21 참조)과 최대 침투유량을 보인 2011년 8월 8일(Fig. 22 참조)을 확대하여 그래프로 나타냈다.

Fig. 21에 나타낸 바와 같이 2011년 7월 9일 장마철에 발생한 최대강우에 투수성 포장을 점차적으로 창원천 유역에 불투수면적을 교체 적용하였을 경우를 보면, 투수성 포장이 1%의 경우 2.29 CMS, 3%의 경우 3.98 CMS, 5%의 경우 5.76 CMS, 10%의 경우 10.38 CMS, 15%의 경우 15.1 CMS가 감소하였으며, 창원천이 합류되는 남천의 투수성 포장을 적용한 결과는 1%의 경우 6.88 CMS, 3%의 경우 13.63 CMS, 5%의 경우 20.19 CMS, 10%의 경우 36.41 CMS, 15%의 경우 53.31 CMS 감소하였다.

Fig. 22에 나타낸 바와 같이 창원천에서 가장 높은 침투유량은 2011년 8월 8일 6시에 하천 유량이 가장 크게 발생하였으며, 유량이 141 CMS까지 올라갔다. 창원천 유역에 불투수면적을 교체



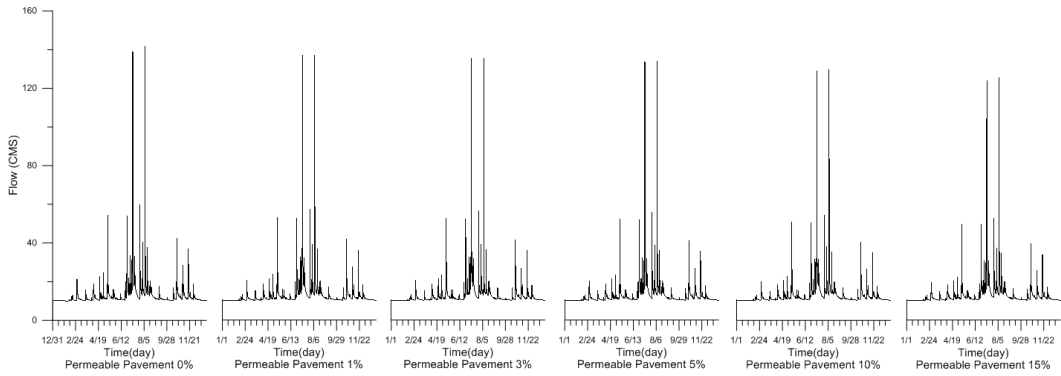


Fig. 19. Flowrate Changes for Increase of Permeable Pavement (Changwon Stream)

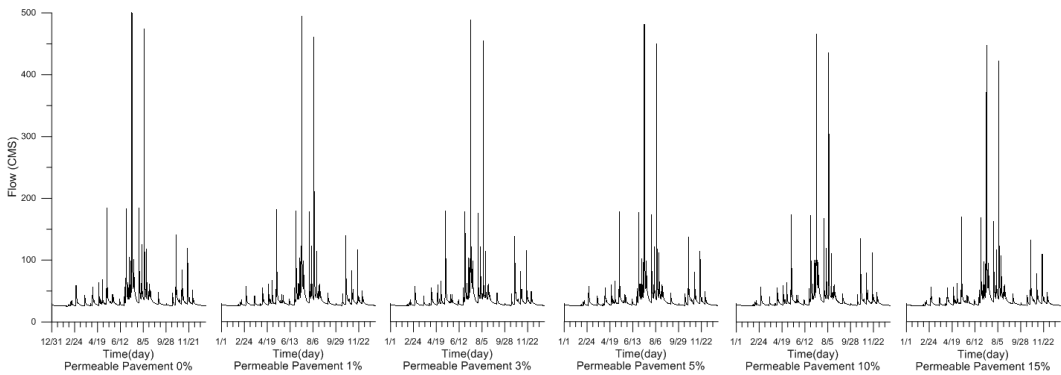


Fig. 20. Flowrate Changes for Increase of Permeable Pavement (Nam Stream)

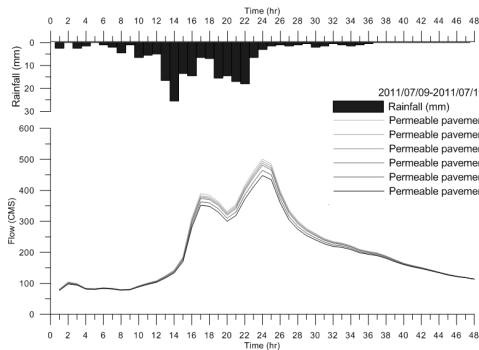


Fig. 21. Flowrate Changes for Maximum Rainfall Depth Event (Nam Stream)

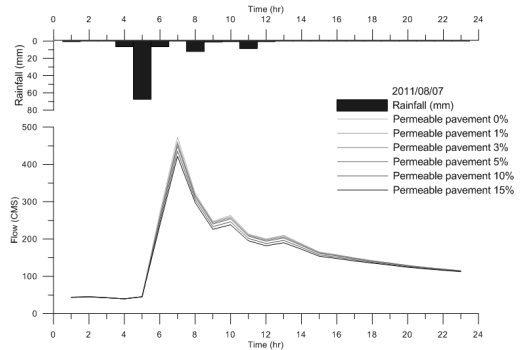


Fig. 22. Flowrate Changes for Maximum Peak Runoff Event (Nam Stream)

적용하였을 경우를 보면, 투수성 포장이 1%의 경우 4.34 CMS, 3%의 경우 6.05 CMS, 5%의 경우 7.67 CMS, 10%의 경우 11.95 CMS, 15%의 경우 16.28 CMS가 감소하였다. 창원천이 합류되는 남천의 투수성 포장을 적용한 결과는 1%의 경우 12.86 CMS, 3%의 경우 18.39 CMS, 5%의 경우 23.81 CMS, 10%의 경우 37.66 CMS, 15%의 경우 51.73 CMS가 감소하였다. 일반적으로 홍수기에 발생한 7월 9일강우보다 8월 8일에 발생한 강우의 침투유량 감소효과가 컸다. 지하수위가 높아지는 7월 9일은 토양이 포화상

태이고 8월 8일은 지하수위가 낮아질 때 발생한 강우로서 흡수비가 낮아 침투유량이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

### 5.3 투수성 포장에 따른 창원천 및 남천 유역의 지표유출량 변화

모형의 보정에서 사용한 2011년 강우에 대하여 창원천 및 남천 유역 전체 불투수면적 중 투수성 포장을 1%, 3%, 5%, 10%, 15% 교체하였을 경우 지표유출 변화를 비교하였다. Fig. 23은

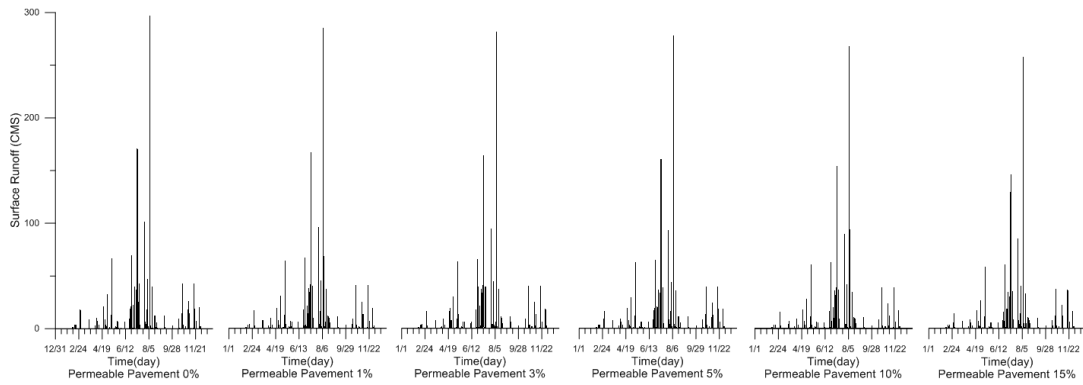


Fig. 23. Surface Runoff Changes for Increase of Permeable Pavement (Changwon Stream Watershed)

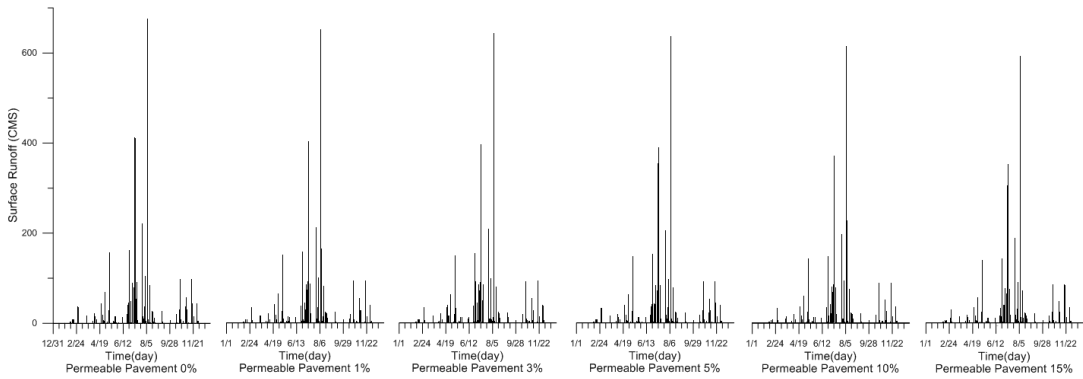


Fig. 24. Surface Runoff Changes for Increase of Permeable Pavement (Nam Stream Watershed)

창원천의 지표유출량이며, Fig. 24 남천의 지표유출량이다. 지표 유출량은 각각의 소유역 지표유출량을 총 합하여 분석하였다. 투수성 포장의 증가에 의해 지표유출량이 점차적으로 감소되는 것을 알 수 있었다. 남천 유역의 7월 9일 지표유출량은 411. 81 CMS로 나타났다. 불투수 면적에 투수성 포장으로 1%교체하였을 경우 지표유출량이 8.70 CMS 감소하였으며, 3%의 경우 15.71 CMS, 5%의 경우 22.75 CMS, 10%의 경우 40.50 CMS, 15%의 경우 58.49 CMS가 감소하였으며, 2011년 중 가장 많은 지표유출이 발생한 8월 8일은 675 CMS이며, 불투수 면적에 투수성 포장으로 1%교체하였을 경우 23.81 CMS, 3%의 경우 32.15 CMS, 5%의 경우 40.53 CMS, 10%의 경우 61.61 CMS, 15%의 경우 82.93 CMS가 감소되었다. 8월 8일 지표유출량의 감소량이 많은 이유는 7월 9일 발생한 강우는 이전 강우에 의해 토양이 포화상태로 토양으로 침투되는 지표유출량이 8월 8일보다 낮은 것으로 판단된다. 또한 지표유출량의 감소량이 하천에서 감소되는 유량보다 많은 것으로 나타났다.

#### 5.4 투수성 포장에 따른 전체 유역의 지하수위 변화

모형의 보정에서 사용한 2011년 강우에 대하여 창원천 및 남

천 유역 전체 불투수면적 중 투수성 포장을 1%, 3%, 5%, 10%, 15% 교체하였을 경우 지하수위 및 지하수유량 변화를 비교하였다. 지하수 모의를 위하여 전체유역의 지하수위 변화를 평균하여 분석하였으며, 지하수 유출량은 전체유역에서 발생하는 지하수 유량을 합하여 분석하였다. 2011년 중 가장 높은 지하수위는 7월 15일에 나타났으며, 불투수 면적에 투수성 포장으로 1% 교체하였을 경우 지하수위는 0.03 m, 3%의 경우 0.05 m, 5%의 경우 0.7 m, 10%의 경우 0.12 m, 15%의 경우 0.16 m 상승하였다. 2011년 중 가장 많은 지하수유량은 7월 15일에 하천으로 유입되었으며, 불투수 면적에 투수성 포장으로 1% 교체하였을 경우 지하수유량은 0.31 CMS, 3%의 경우 0.51 CMS, 5%의 경우 0.72 CMS, 10%의 경우 1.21 CMS, 15%의 경우 1.63 CMS 증가하였다. 도시구역 지하수의 흐름을 정확하게 모의하기위해서 많은 자료가 있어야 하고 실측값을 이용하여 보정 및 검증하는 것이 필요하나, 본 연구에서는 지하수의 실측값 부족으로 모의결과를 검증하지는 못 하였다.

Table 4는 모의결과를 전체적으로 보여주는 결과표이다. 창원천은 남천의 지류로 Table 4에 나타난 남천유역은 창원천 유역을 포함한 값이다. 2011년 동안 투수성 포장이 증가하더라도 연간

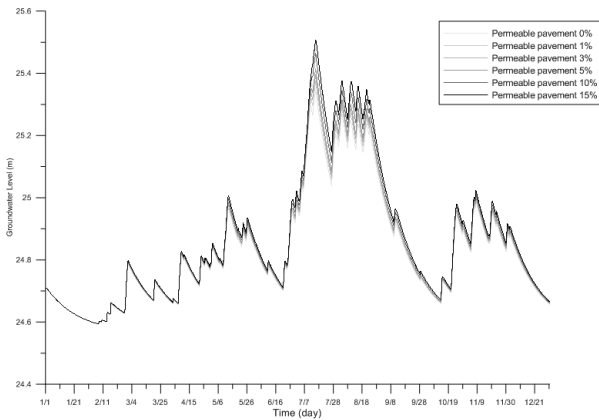


Fig. 25. Changes in Groundwater Elevation for Increase in Permeable Pavement

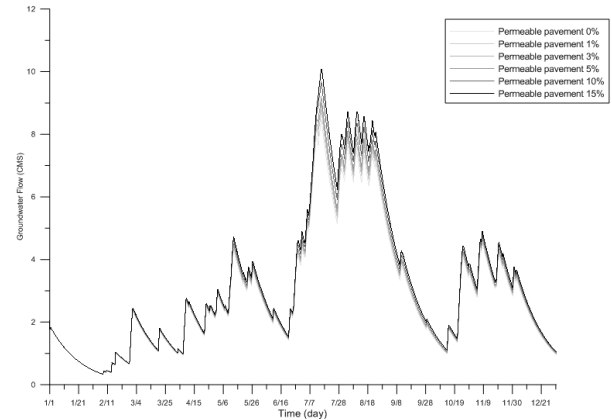


Fig. 26. Changes in Groundwater Flow for Increase in Permeable Pavement

Table 4. Simulation Results for Increase of Permeable Pavement

Hydrological Process	Time	Rainfall (mm)	Watershed	Permeable Pavement					
				0%	1%	3%	5%	10%	15%
Yearly Flowrate (CMS)	2011	1456.6	Changwon Stream	110,336.5 (100%)	110,335.7 (99.99%)	110,337.1 (100.00%)	110,340.8 (100.00%)	110,348 (100.01%)	110,353.1 (100.02%)
			Nam Stream	305,007.82 (100%)	305,007.56 (99.99%)	305,007.6 (100.00%)	305,016 (100.00%)	305,036 (100.01%)	305,052.5 (100.02%)
Daily Flowrate (CMS)	2011.07.09	187.5	Changwon Stream	1,462.19 (100%)	1,437.95 (98.34%)	1,423.64 (97.36%)	1,409.39 (96.38%)	1,373.35 (93.92%)	1,336.27 (91.38%)
			Nam Stream	5057.99 (100%)	4,986.11 (98.57%)	4,935.78 (97.58%)	4,884.75 (96.57%)	4,756.39 (94.04%)	4,624.80 (91.44%)
Peak Flowrate (CMS)	2011.08.08 - 6:00	67.5	Changwon Stream	141.49 (100%)	137.15 (96.93%)	135.45 (95.73%)	133.82 (94.58%)	129.55 (91.56%)	125.22 (88.50%)
			Nam Stream	473.62 (100%)	460.76 (97.28%)	455.23 (96.12%)	449.81 (94.97%)	435.96 (92.05%)	432.89 (91.40%)
Yearly Surface Runoff (CMS)	2011	1456.6	Nam Stream	17,673.75 (100%)	17,097.59 (96.68%)	16,786.7 (94.92%)	16,474.59 (93.16%)	15,691.4 (88.73%)	14,902.13 (84.27%)
Yearly Groundwater Flow (CMS)	2011	1456.6	Nam Stream	25,317.52 (100%)	28,898.91 (102.30%)	26,210.91 (103.53%)	26,529.46 (104.79%)	27,329.21 (107.95%)	28,132.27 (111.12%)

총 하천유량의 변화는 거의 없었다. 하지만 투수성 포장의 증가할 수록 일최대강우가 발생한 7월 9일 총 일유량은 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 침투유량의 감소율이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 투수성 포장의 설치되면서 강우가 지하로 침투되는 양이 증가하게 되고 증가한 만큼 천천히 하천으로 유출되어 침투유량과 일최대유량은 감소하지만 1년의 총유량은 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 지표유출의 감소율은 크게 나타났으며, 투수성 포장에 의해 침투된 만큼 지하수유량이 증가하게 된 것으로 나타났다.

## 6. 결론

최근 급격한 도시화로 인해 불투수층의 증가로 인하여 우수의 유출 특성이 변화되고 과거의 유역과는 다른 유출특성을 가지게 되었다. 도시화로 의해 발생하는 물 순환 변화는 홍수지체시간의 감소, 침투 및 총 유출량의 증가, 침투능 및 기저유출의 감소, 증발량의 감소 등이 있다. 도시 유역은 자연상태에 비해 표면의 저류량은 감소하며, 지표유출수가 저항이 줄고 유출시간이 빨라져 하천으로 직접 유출되므로 침투유량이 증가하게 된다. 본 연구에서

는 도시 구역의 물 순환 변화를 예방할 수 있는 지하수 침투 증진 시설 중 투수성 포장의 투수효과를 토조실험을 통하여 분석 및 평가하였다. 또한 SWMM 모형을 이용하여 창원천 및 남천 유역에서의 투수성 포장 효과를 분석하였으며 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 투수성 포장의 수리 실험을 위하여 대형 토조 및 강우장치 등을 제작하였으며, 함수량계로 토조의 함수량 변화를 측정하였으며, 이를 바탕으로 강우강도 및 지하수위별로의 투수계수를 산정하였고, 토조 지반의 투수계수는 0.021 ~ 0.044 cm/sec 로 평가 되었다.
- (2) 경상남도 창원시 남천 및 창원천 유역의 물 순환 해석을 위하여 SWMM 모형을 구축하고 2011년 강우사상을 이용하여 보정하였으며, 모의 유량과 실측 유량을 비교한 결과 구축된 모형은 대상유역의 유출현상을 적절히 모의되는 것으로 판단되었다. 토조의 침투시험 결과를 바탕으로 SWMM 모형의 LID 관련 매개변수를 입력하였으며, 투수성 포장의 정량적 효과를 분석하였다.
- (3) 창원천 및 남천 유역에 1%에서 15%까지 투수성 포장으로 교체하였을 경우 침투유량의 감소 비율을 예측하였으며, 모의 결과를 바탕으로 홍수방어의 효과가 있을 것으로 판단되었다. 지표면 유출량을 모의한 결과 투수성 포장을 적용하였을 경우 지표면 유출유량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 강우가 발생하였을 경우 투수성 포장에 침투 및 저류되어 초기유출의 발생이 늦어지고, 지표면 유출량이 줄어드는 것을 알 수 있었다.
- (4) SWMM 모의 결과 투수성 포장을 설치할 경우 지하수위 증가로 인하여 도시하천의 건천화 및 평수량 회복에 도움이 되는 것으로 사료되며, 도시구역의 물순환 회복에 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구의 결과는 도시구역의 물 순환 회복에 있어 투수성 포장의 효과를 제공하며, 연구 결과를 통하여 도시구역의 홍수 예방 및 유역관리에 활용되는 기초자료가 되길 기대한다. 추후 연구에서 투수성 포장의 증가가 수질에 미치는 영향을 분석하고, LID 공법을 비교하여 도시구역에 미치는 효과를 분석할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(중소기업청)의 재원으로 산학연 공동 기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임(과제명: 다기능 친환경 투수블럭 개발).

## References

- Chung, W.C., Hui, K.Y., and Cheng, S.C. (2002). Sensitive method for the determination of 1,3-dichloropropan-2-ol and 3-chloropropane -1,2-diol in soy sauce by capillary gas chromatography with mass spectrometric detection, *J. Chrom A.*, Vol. 952, pp. 185-192.
- CRWA (Charles River Watershed Association) (2008). *Permeable Pavement, Low Impact Best Management Practice (BMP) Information Sheet.*
- Engman E.T. (1986). Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 112-1, pp. 39-53.
- Ferguson, B.K. (1994). *Stormwater Infiltration.* Lewis Publishers, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, pp. 269.
- Green, S.I. (1997). Analytical and computational modeling of twin-wire blade forming, *J. Pulp and Paper Sci.*, Vol. 23-7, pp. 353-357.
- Hong, C. (2006). Understanding the Affect of Preliminary Disaster Insoection and Consultation System, *Journal of Korean Society Civil Engineers*, Vol. 54, No. 5, pp. 21-27 (in Korean).
- Im, G., Song, J., Park, S., and Park, H., (2007). An Experimental Study on Infiltration Characteristics of Facilities for Reducing Runoff Considering Surface Materials According to Housing Lot Developments, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 8, No. 5, pp. 47-55 (in Korean).
- Jun, S.M. (2006). *A Study on Hydrological Infiltration Properties of Permeable Pavement*, MS Thesis, Inje University (in Korean).
- Jun, S.M., Park, J.H., Lee, J.M., and Lee, S.H. (2009). Analysis of hydrological Factor for permeable Pavement by using Soil Tank, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Korean Society of Water Environment, Vol. 25, No. 2, pp. 181~192 (in Korean).
- KICT (Korea Institute of Construction Technology) (2007). *Improvement of sidewalk pavement construction and maintenance*, Phase II Research Report, pp. 123-198 (in Korean).
- KICT (Korea Institute of Construction Technology) (2008). *Watershed diagnostic techniques developed for building healthy water circulation system*, Research Report, KICT. 2008-039, pp. 97-101 (in Korean).
- Kim, B.H. (2001). *Experimental and Numerical Study on Effects of Runoff Reduction in the Permeable Pavement*, MS Thesis, Myongji University (in Korean).
- Kwon, S.A. (2007). *Improvement of sidewalk pavement construction and maintenance*, Korea Institute of Construction Technology (in Korean).
- Lee, B.H., and Lee, K.S. (1998). Development of an Expert System to Improve the Methods of Parameter Estimation, *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 31, No 6, pp. 641-655 (in Korean).
- Lee, J.M. (2007). *Development and Application of Modified SWMM to Simulate Permeable Pavement and Infiltration Trench*, Ph.D Thesis, Pukyong National University (in Korean).
- LH (Korea Land & Housing Corporation) (2010). *A Study on the*

- Establishment of Reasonable Guidelines for Prior Review System on the Influence of Disasters*, Research Report (in Korean).
- LH (Korea Land & Housing Corporation) (2011). *Analysis of Flooding Reduction Effect Using LID*, Research Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1993). *Stream Maintenance Master Plan*, Nam Stream, Namsan Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1994a). *Stream Maintenance Master Plan*, Naedong Stream, Sogye Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1994b). *Stream Maintenance Master Plan*, Towol Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1994c). *Stream Maintenance Master Plan*, Yanggok Stream, Gaeumjeong Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1995). *Stream Maintenance Master Plan*, Sin Stream, Negok Stream, Mugok Stream, Wolchon Stream, Changwon Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (1996). *Stream Maintenance Master Plan*, Hanam Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2000). *Stream Maintenance Master Plan*, Changwon Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2005). *Stream Maintenance Master Plan*, Sangbok Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010a). *Stream Master Plan*, Anmin Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010b). *Stream Master Plan*, Wanam Stream, Technical Report (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2011). *Total Pollution Loads Management System (TPLMS) in Masan Bay*, Supplement. 2, Stream Environmental Investigation in Masan Bay, Technical Report (in Korean).
- Moon, Y.I., Yoon, S.K., Kim, J.S., and Ahn, J.H. (2006). A Study on the Change of Runoff Characteristics due to the Urbanization, *Conference of Korea Water Resources Association*, May 18, pp. 730-734 (in Korean).
- Muleta, M.K., and Boulos, P.F. (2008). Analysis and Calibration of RDII and Design of Sewer Collection Systems, *Environmental and Water Resources Institute*: Honolulu, Hawaii, May 12, pp. 1-10.
- Tholin, A.L., and Keifer, C.J. (1960). *Hydrology of urban runoff*, Trans, ASCE, Vol. 125, pp. 1308-1379.
- Wallace, K., and Leonardi, F. (1975). *Theoretical analyses of pavement edge infiltration and drainage*, ARRB External Project 176 Report No AIR 176-5.