

# 투수성 포장재의 수문학적 침투 특성에 관한 연구

## A study for Hydrological Infiltration Properties of Permeable Pavement

이 정 민\*, 전 상 미\*\*, 박 재 현\*\*\*, 이 상 호\*\*\*\*

Jung Min Lee, Sang Mi Jun, Jae Hyeon Park, Sang Ho Lee

### 요 지

최근 급격한 도시화는 홍수량 증가 및 갈수 시 하천의 건천화 등 유역의 유출특성 변화를 가져왔다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하는 방안 중 하나인 투수성 포장의 유역 내 수문학적 효과를 분석하였다. 이를 위해 투수성 포장을 이용한 수리모형 실험 및 수치모형(SWMM)을 병행하여 수행하였다. 연구에 사용한 수치모형은 기존 도시유출 모형인 SWMM(Storm Water Management Model) 모형에 투수성 포장의 수문학적 효과를 고려할 수 있도록 수정된 모형이며, 수리모형 실험 결과를 토대로 수치모형의 중요 매개변수를 추정하였다. 또한 실험에 의해 관측된 지표 및 지하수 유출량과 수치모형에 의해 산출된 자료를 비교·분석하여 수정된 SWMM 모형의 유용성을 평가하였다.

강우강도가 65 mm/hr, 90 mm/hr, 95 mm/hr인 강우를 4시간씩 공급하는 경우에 대한 3가지 수리모형 실험을 수행하였다. 수리모형실험 결과 강우강도는 지표면 유출의 크기에 직접적인 영향을 미치고 있었으며 지하수 유출량은 강우강도 보다는 지하수위 조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 수리모형 실험결과 및 수치모형 모의결과를 비교 분석한 결과, 토양 함수량 및 지하수위 변동 특성은 초기에서 정상상태로 전이 되는 부분과 강우 정지 후 감소되는 부분에서 수리모형 실험과 다른 양상을 보였다. 지하수위는 실험 시 발생하는 공기층의 포집이 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 함수량 변화에 있어서는 수치모형(SWMM)의 모의 결과가 과도하게 감소하는 특성을 보여 주고 있었다. 즉, 유출량의 특성은 비슷한 양상을 보이고 있으나 지하수위 변화 및 토양 내 함수량 변화 예측에 있어서는 그 정확도가 떨어지는 것으로 평가되었다. 그러나 본 연구결과를 통하여 투수성 포장과 지하수에 관련된 매개변수의 집적과 분석결과는 현장기술 적용 시 매개변수의 유용한 선택과 도시유역의 물 순환 건전화 대안기술 적용에 효과적인 방법론을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어** : SWMM(Storm Water Management Model), 투수성 포장, 수리모형실험

### 1. 서 론

도시로의 인구집중으로 인한 인구 및 가구수 증가와 주거공간의 고밀도화, 상가 및 업무용 면적의 증대, 하천 부지의 점용 등과 같은 도시화로 인해 도시지역은 우수의 유출 특성이 변화되고 자연 하천 유역과는 다른 유출특성을 가지게 되었다. 이러한 도시화 현상에 의해 발생하는 기상 및 수문환경의 변화는 도시주변의 기후변화, 홍수지체시간의 감소, 침투 및 총 유출량의 증가, 침투능 및 기저유출의 감소, 증발량의 증가 등이다. 집수유역의 대부분이 불투수층으로 포장됨으로써 유출계수가 증가하고 자연 상태에 비해 표면의 저류량은 감소하여 침투유량과 전체 유출량이 증가하게 된다. 또한 배수시설의 설치 등으로 수리학적 통수능이 증가하게 되어 자연하천이 직선화가 되고 수심도 깊어지며 수로벽이 콘크리트 등으로 정비되어 우수가 유출

\* 정회원.부경대학교 대학원 토목공학과 박사과정-E-mail : [andrew4502@magicn.com](mailto:andrew4502@magicn.com)

\*\* 정회원.인제대학교 건설기술연구소 연구원-E-mail : [nll79@nate.com](mailto:nll79@nate.com)

\*\*\* 정회원.인제대학교 공과대학 토목공학과 조교수-E-mail : [jh-park@inje.ac.kr](mailto:jh-park@inje.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원.부경대학교 공과대학 건설공학부 부교수-E-mail : [peterlee@pknu.ac.kr](mailto:peterlee@pknu.ac.kr)

되는 속도가 빨라진다. 그 결과 침투시간이 빨라지게 될 뿐 아니라 침투 유출량도 증가하게 된다. 한편 땅 밑으로 침투되는 우수량이 감소하여 지하수위가 하강하고 이에 따라 도시하천이 마르는 건천화가 진행되어 환경에도 좋지 않은 영향을 주고 있다.

현재 이러한 도시화 및 도시의 건천화 문제를 감소시킬 수 있는 여러가지 방안들이 검토되고 있는 실정이다. 그 중 본 연구에서는 침투 증진 시설 중 하나인 투수성 포장재의 특성을 수리모형실험 및 수치모형을 통하여 살펴보았으며, 수리모형 실험을 통하여 수치모형에 필요한 매개변수들을 보정하였다. 이러한 과정을 통하여 투수성 포장재의 수문학적 거동 특성을 분석하였으며 투수성 포장재를 고려한 수정 SWMM의 유용성을 평가하였다.

## 2. 연구 내용

### 2.1 연구 배경

국내에서 이루어진 도시화의 수문학적 영향 평가는 주로 단기 홍수사상에 대하여 토지이용 변화가 침투 유량 변화에 미치는 영향을 분석하는 주제였다. 국내의 연구로서 우수유출 저감시설을 시범구역에 설치하고 ILLUDAS (ILLinois Urban Drainage Area Simulator) 모형으로 유출저감 효과를 분석한 사례가 있다(조원철 등, 2000). 한편, 이재웅 등(2001)은 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과를 인공강우와 실제 강우에 대해 실험을 통하여 불투수 포장재와 투수성 포장재를 비교분석하였다. 그리고 이재웅 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.

투수성 포장에 관련된 국외의 연구로는 Benjamin et al.(2003)은 불투수 아스팔트로 포장되어진 주차장을 네 가지 투수성 포장재로 대체한 후 이들이 장기적으로 수량 및 수질에 미치는 영향을 실험 연구하였다.

최근에 21세기 프론티어 연구개발사업(수자원의 지속적 확보기술개발사업)의 일환인 안양천 유역의 물 순환 건전화 기술개발(서울대학교, 2005)에서 이정민 등(2006)은 투수성 포장을 고려하여 SWMM모형을 수정하였다. 본 연구에서는 투수성 포장을 고려하여 수리모형 실험을 수행하고 동일한 조건으로 수정된 SWMM을 모의하고 그 결과를 비교분석하였다.

### 2.2 수리모형 실험의 개요

투수성 포장 실험 모형 제작에 사용된 재료는 크게 토양과 투수성 포장재로 구분할 수 있다. 실험 제작에 사용된 대표 토양은 우리나라 토양 중 중요한 부분을 차지하고 있는 사질토이며, 굵은 자갈 등이 실험 기자재 설치 또는 다짐에 영향을 줄 것으로 판단하여 지름이 약 1 cm인 체를 이용하여 1차로 걸러낸 토양을 이용하였다. 실험에 사용된 투수성 아스콘은 아스팔트, 채움재, 19 mm와 13 mm 골재, 모래, 개질제 등으로 구성된다.

본 연구에서는 2 m × 2 m × 2 m(가로×세로×높이) 크기의 실험 토조에 노상, 필터층(모래), 기층(쇄석), 표층(투수성 아스콘), 배수 및 지하수위 조절을 위한 배수층을 설치하였다. 실험 토조 상부의 강우 장치는 강우 특성에 따른 시간별 침투량과 침투량을 분석하기 위해 설치하였다. 초기 토양의 함수량과 인공강우의 침투율에 따른 함수량 변화를 측정하기 위하여 총 8개의 흡수력계(tensiometer)를 설치하였으며, 토조 내 지하수위 변화를 분석하기 위하여 총 3개의 위압수두계(piezometer)를 설치하였다. 실험 토조의 전체적인 개념도는 그림 1과 같다.

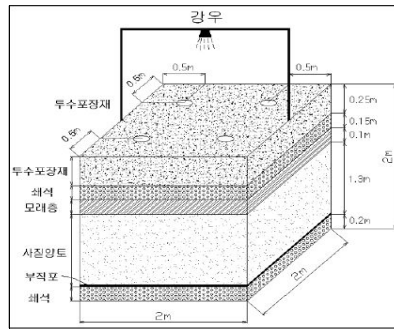


그림 1. 실험장치 개념도

설치된 수리 실험모형에 대하여 모형실험의 기본조건 및 방법은 다음과 같다.

토조 샘플 함수량 측정 실험을 통하여 다음과 같은 함수량 식을 산정하였으며, 식 1을 이용하여 모세관 압력 수두에 따른 함수량 값을 계산하였다.

$$\theta = \frac{0.31 - 0.08}{(1 + |0.05 \times \psi|^{1.56})^{0.3589}} \quad (1)$$

투수성 포장재 수리모형의 샘플을 이용하여 측정된 대표 토양의 투수 계수 평균값은 60 mm/hr이고, 투수성 포장재의 포화 함수량  $\theta_s$  는 0.2이며, 쇄석층의 포화 함수량은 0.3이다. 실험 시 일정한 조건을 유지하기 위하여 선행강우가 없다고 가정하였으며, 토조 내 초기 토양함수량이 0.21 이하가 되도록 유지시켜 실험 수행 시 일정한 조건을 유지하도록 하였다. 강우강도는 65 mm/hr, 90 mm/hr, 95 mm/hr의 총 3가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 지표면 유출과 지하수 유출 특성을 명확히 분리, 분석하기 위해 지속시간을 총 4시간 동안 유지하였다. 또한 기저유출의 시간적 변화를 충분히 측정하기 위하여 강우 중단 후 6시간 동안 지하수위, 함수량 변화, 유출량 변동 등을 관측하였다. 각 유출량 측정은 유출 측정 장치를 이용하여 5분 단위로 측정하였고, 지하수 수위는 위압수두계를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 함수량은 설치된 흡수력계를 이용하여 모세관 압력수두를 측정한 후 식 1을 이용하여 함수량으로 환산하였다.

수행된 수리모형 실험결과를 동일한 조건으로 수치모형(SWMM)을 통하여 모의하였다. 수치모형의 모의 시 투수성 포장과 지하수에 관련된 매개변수는 각 매개변수의 민감도 분석 결과와 수리모형의 실험 자료를 바탕으로 수동 보정하였다. 표 1은 보정된 각 CASE별 SWMM 지하수관련 매개변수 및 입력 자료 값을 나타내고 있다.

표 1. 수치모형(SWMM)의 지하수 매개변수

		CASE 1	CASE 2	CASE 3
BELEV	대수층 수표면 바닥의 표고(m)	0.2	0.2	0.2
GRELEV	지하수 표면의 표고(m)	2	2	2
STG	초기수표면 수위의 표고(m)	0.4	0.4	0.4
BC	지하수 흐름의 한계수위	0.9	0.4	0.4
TW	수로흐름의 영향계수	0.9	0.4	0.4
A1	지하수 흐름계수(mm/hr-m <sup>B1</sup> )	10.5	13.5	13
B1	지하수 흐름 지수, (무차원)	2	2	2
A2	수로 흐름 영향 계수(mm/hr-m <sup>B2</sup> )	0	0	0
B2	수로 흐름 영향 지수	0	0	0
A3	지하수 흐름과 수로 흐름사이의 적에 대한계수(mm/hr-m)	5	7	6.5
POR	퍼센트로 표현된 공극비	0.31	0.31	0.31
WP	포센트로 표현된 시들음점	0.15	0.15	0.15
FC	퍼센트로 표현된 최대 보수량	0.19	0.19	0.19
HKSAT	수리학적 포화 전도도(cm/hr)	60	60	60
TH1	퍼센트로 표현된 초기 상부 수분	0.20	0.21	0.21
HCO	수리학적 전도도와 수분 함량 곡선의 수정계수	15	15	15
PCO	토양의 수분과 장력의 평균경사곡선(m/fraction)	15	15	15
CET	상부구역의 최대 ET의 비율	0.35	0.35	0.35
DP	비대수층 손실계수(cm/hr)	0	0	0
DET	발산이 발생하는 중요한 하부구역의 최대수심 (m)	0	0	0

### 3. 연구결과 및 결론

본 연구에서는 지하수 침투 증진 시설중 하나인 투수성 포장재의 효과에 관하여 수리모형실험 및 투수성 포장을 고려하여 수정된 수치모형(SWMM)을 이용하여 실험을 수행하고 결과를 비교분석하였다. 수리모형 실험결과를 토대로 수치모형인 SWMM의 매개변수를 보정하였고, 지표 및 지하 유출량에 대한 수리실험 및 수치모형의 모의 결과자료를 비교분석하여 수정된 SWMM 모형의 유용성을 평가하였다. 수리모형 실험장치는 상부에 25 cm의 투수성 포장재가 설치된 토조와 강우장치 등으로 구성되어 있다. 강우 강도에 따라 65 mm/hr, 90 mm/hr, 95 mm/hr에 대하여 4시간씩 총 3가지 경우에 대한 수리모형 실험을 수행하였으며 실험을 통하여 강우량, 지표, 지하수 유출량, 함수량, 지하수위 등을 측정하였다. 수리모형실험 결과, 강우강도는 지표면 유출에 큰 영향을 미치고 있었으며 지하수 유출량은 지하수위에 의해 영향을 받는 것으로 평가되었다. 수치모형의 모의결과와 수리 모형실험을 분석한 결과에 의하면 지표, 지하수 유출 특성은 두 결과가 매우 유사한 특성을 보였으나, 함수량 변동 및 지하수위 변동 특성에서는 SWMM이 상승 시는 천천히 증가하고 강우 중단 후 하강 시는 급격히 감소하는 특성을 보였다. 이러한 결과는 SWMM의 토양함수량의 예측 부분이 부족한 것으로 사료된다. 하지만 전체적인 지표 및 지하수 유출 변동 특성은 두 결과가 매우 잘 모의되고 있으며, 본 연구결과를 통하여 투수성 포장을 고려하여 수정된 SWMM 모형이 투수성 포장재의 수문학적 거동 평가에 적용성이 매우 큰 것으로 판단된다.

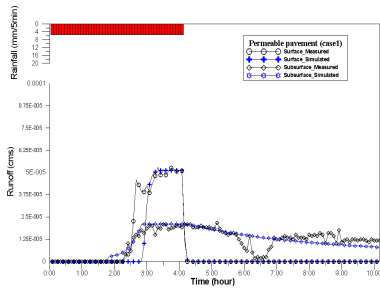


그림 2. 수리, 수치모형의 지표, 지하수 유출량 비교

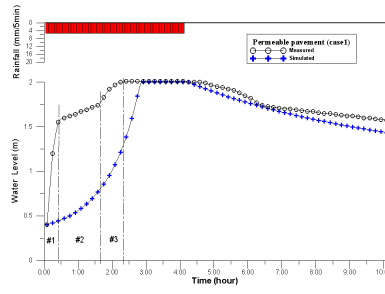


그림 3. 수리, 수치모형의 함수량 변화 비교

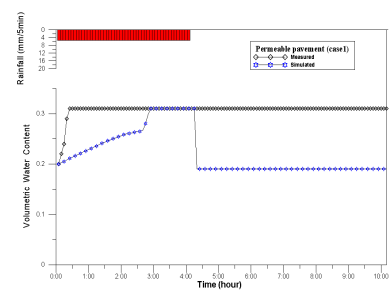
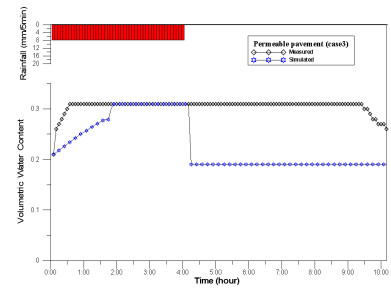
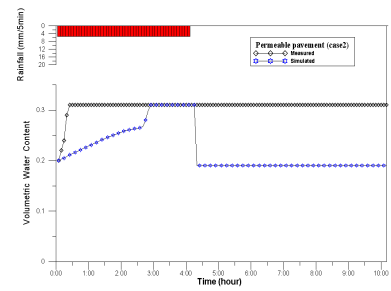
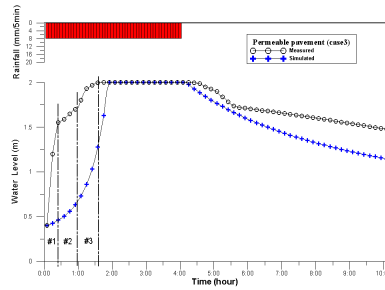
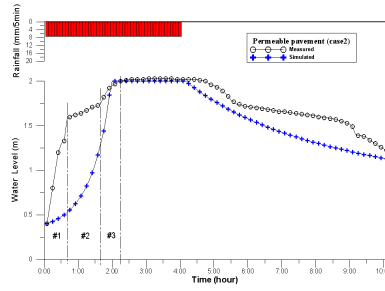
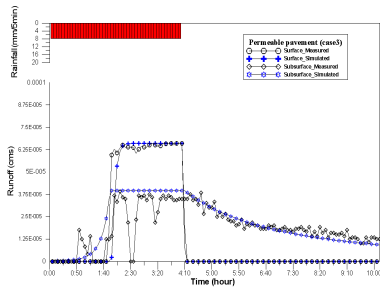
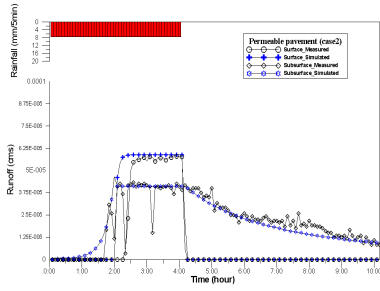


그림 4. 수리, 수치모형의 수위 변화 비교



## 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(과제번호: 1-7-2)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊은 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 서울대학교 (2005). 안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 개발. 1차년도 연구보고서, 과학기술부.
2. 심재현, 이철규, 이종규, 김진영 (2004). “침투통의 설치에 따른 치수효과 분석.” **2004년 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1-5.
3. 이정민, 이상호, 이길성 (2006). “투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성 포장의 효과분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 109-120.
4. 이재응, 여운광, 심재현, 강태호 (2001). “투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제6-B호, pp. 645-654.
5. 조원철 등 (2000). 우수유출 저감시설 시범사업 검토연구. 연구보고서, 서울특별시.
6. 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.