

토조실험에 의한 투수성 포장재의 수문학적 요소 분석

전상미 · 이정민^{*†} · 박재현 · 이상호^{**}

인제대학교 토목공학과
^{*}한국토지공사 국토도시연구원
^{**}부경대학교 건설공학부

Analysis of Hydrological Factor for Permeable Pavement by using Soil Tank Experiment

Sang-Mi Jun · Jung-Min Lee^{*†} · Jae-Hyeoun Park · Sang-Ho Lee^{**}

Department of Civil Engineering, Inje University
^{*}Land & Urban Research Institute, Korea Land Corporation
^{**}Department of Civil Engineering, Pukyong National University
(Received 21 July 2008, Revised 5 January 2009, Accepted 6 January 2009)

Abstract

In this study, the hydrological properties of permeable pavement were analyzed by the experiment and the numerical simulation. The numerical model used was a modified SWMM especially for considering the hydrological response of permeable pavement. The parameters of modified SWMM were revised by the experimental results, and then the practicability was evaluated through the comparison of the experimental and numerical simulation results. In the experiments, three different rainfall intensities such as 65 mm/hr, 90 mm/hr, 95 mm/hr were supplied for 4 hrs, and the hydraulic properties including surface outflow, subsurface outflow, ground water level, soil water contents were measured for 10 hrs. The results showed rainfall intensity effected directly on surface outflow volume and subsurface outflow volume was more effected by ground water level than rainfall intensity. The ground water level and the soil water contents were under estimated as compared with the experimental data except the portion of occurring direct runoff. The surface and subsurface outflow discharge were simulated very well in comparison with the experimental data. Consequently, the modified SWMM could be used very effectively to evaluate the hydrological property of permeable pavement.

keywords : Permeable pavement, Storm Water Management Model (SWMM), Subsurface outflow, Urban runoff

1. 서론

최근 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, 홍수지체 시간의 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 되는데, 이는 자연하천이 직선화가 되고 수심도 깊어지며 수로벽이 콘크리트 등으로 정비되어

우수가 유출되는 속도가 빨라지기 때문이다. 그 결과 침투 유출 도달시간이 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. 이러한 도시의 홍수피해 및 건천화 문제를 감소시킬 수 있는 여러가지 방안들이 검토되고 있다. 그 중 본 연구에서는 지하수 침투 증진 시설 중 하나인 투수성 포장재의 효과를 분석 및 평가하기 위하여 수리모형 실험과 수치모형 실험을 수행하였으며, 수리모형 실험을 통하여 확보된 관측자료를 활용하여 수치모형 실험에 필요한 매개변수들을 보정하였다. 이러한 과정을 통하여 투수성 포장재의 수문학적 거동 특성을 분석함으로써, 투수성포장을 고려하여 기 수정개발된 SWMM모형의 적절성과 유용성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 동향 및 배경

[†] To whom correspondence should be addressed.
andrew4502@lplus.or.kr

국내에서 이루어진 도시화의 수문학적 영향 평가는 주로 단기 홍수사상에 대하여 토지이용 변화가 침투유량 변화에 미치는 영향을 분석하는 주제였다. 국내의 연구동향을 살펴 보면, 우수유출 저감시설을 시범유역에 설치하고 ILLUDAS (ILLinois Urban Drainage Area Simulator) 모형으로 유출저감 효과를 분석한 사례가 있다(조원철 등, 2000). 또한, 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 지표유출이 유출 증감에 미치는 영향 분석에 있어 왔다.

국외의 연구로서 Eric 등(1999)은 원통형과 직사각형의 침투증진시설을 설치한 후 토양 및 지하수에 미치는 영향을 비교하였다. 그리고 Benjamin and Derek(2003)는 불투수 아스팔트로 포장되어진 주차장을 네 가지 투수성 포장재로 대체한 후 이들이 장기적으로 수량 및 수질에 미치는 영향을 실험 연구하였다.

한편, 침투 증진시설 중 침투 트렌치의 효과를 도시유출 모형과 관련하여 장기유출 연속모의에 포함시켜 분석한 연구가 있다(Jia et al., 2001). 이 연구는 5.7 km²의 도시개발이 계획되어 있는 일본 Chiba 현의 해노천 유역에 WEP(Water and Energy transfer Process) 모형을 적용하여 1993년(현재)과 2035년(미래) 수문 순환 변화를 분석하였다. 또한, 침투 트렌치를 적용한 2035년(미래)의 수문 순환 변화도 분석하였다. 그리고 Kipkie(1999)는 연속유출 모의 시 투수성 포장을 고려할 수 있도록 SWMM을 수정하였다. 그러나 Kipkie의 연구는 지표유출과 투수성 포장에 관한 연구는 수행하였으나 투수성 포장의 지하수 관련 연구는 향후 과제로 남겨두었다. 이러한 국외의 연구동향을 살펴 볼 때 국외의 기술 수준은 일부 유량 회복 요소를 포함한 수문 순환 모형을 개발하고 적용한 단계이지만 아직 여러 가지

유량 회복 요소를 포함시킨 수문 순환 모형은 개발되지 못한 실정이며, 개발된 모형과 침투시설 실험을 병행한 연구 사례는 찾아보기 어렵다.

최근, 이정민 등(2006)과 21세기 프론티어 연구개발 사업 중 “안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발(서울대학교, 2007)”에서 기존의 SWMM모형을 수정하여 투수성포장 모의기능을 갖도록 수행한 연구가 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 SWMM에 투수성 포장재 모듈이 추가된 수정SWMM에 의한 수치모형실험과 토조실험을 통한 수리모형실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 비교된 결과를 통해 투수성포장을 고려하여 수정된 SWMM모형의 적절성과 매개변수의 거동을 평가하였다.

2.2. 수리모형 실험의 개요

2.2.1. 수리모형 실험 장치

본 연구에서는 경남 김해시 소재 인제 대학교내에 설치된 강우 발생장치 및 투수성 포장재가 설치된 토조 실험장치를 이용하였다. 투수성 포장에 대한 실험 모형 제작에 사용된 재료는 크게 토양과 투수성 포장재로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 2 m×2 m×2 m(가로×세로×높이) 크기의 실험토조에 노상, 필터층(모래), 기층(쇄석), 표층(투수성 아스콘), 배수 및 지하수위 조절을 위한 배수층을 설치하였다. 실험토조 상부에는 강우장치를 설치하여 강우강도를 조절하게 하였고, 강우공급량, 지표면 유출량, 지하수유출량을 측정하는 유량계를 설치하였으며, 토조내 깊이별 함수량을 측정하기 위하여 흡수력계를 설치하였다. 또한 투수성 포장, 쇄석층, 기반토양의 포화지하수위를 측정하기 위하여 전자식압력계가 부착된 위압수두계를 설치하였다. 실험토조의 전체적인 개념도와 실험장치 전경은 Fig. 1과 같다.

2.2.2. 실험토양 특성

본 연구에 사용된 토양은 사질토이다. 토양의 수리학적 특성으로는 입도분포, 투수계수, 물보유함수 등이 있다.

입도분석 자료에 의하면 자갈(gravel)=16.67%, 모래(sand)=80.79%, 점토(silt)=2.54%으로 모래질 흙이며, d₅₀은 약 1.8 mm이다.

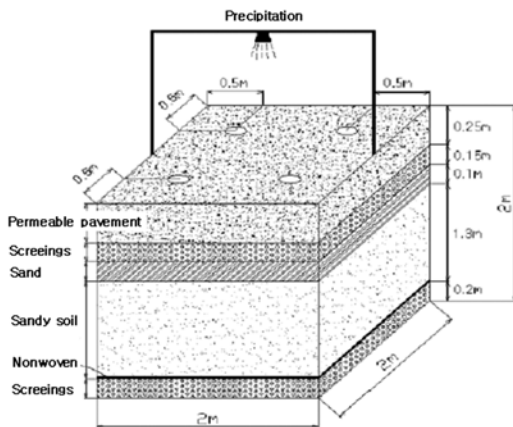


Fig. 1. Conceptual schematization of experiment system.

본 연구에서는 투수성 포장재 수리모형의 샘플에 정수두법을 이용하여 토양의 포화 투수계수를 측정하였다. 실험 결과 토조 샘플의 포화 투수계수 평균값은 60 mm/hr이다.

대수층과 같이 포화상태의 토양에서는 지하수면을 기준으로 하여 지하수위에 비례하는 정압력이 발생하지만 비포화 상태의 토양에서는 토양 속의 공극에 의해 모세관 현상이 발생하기 때문에 토양 내 함수량에 따른 negative pressure, 즉 모세관 압력수두가 발생한다. 이때 함수량과 모세관 압력수두의 관계를 물보유함수(water retention function)라 하며, 물보유함수는 토양에 따라 다르게 나타나는 고유한 물리적 특성이다. 물보유함수는 함수량에 따른 모세관 압력수두를 표시한 함수이기 때문에 어떤 토양의 물보유함수를 알고 모세관 압력수두를 알고 있으면 그 모세관 압력수두에 대응하는 함수량을 알 수 있다.

본 연구에서는 사질토에 대한 대표 매개변수를 이용하여 물보유함수(water retention curve)를 추정하였다. 사용된 van Genuchten 식은 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{(1 + |A\psi|^n)^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \tag{1}$$

S : effective degree of saturation

$$\left(= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$$

- θ : 함수량 (water content)
- θ_s : 포화함수량(saturated water content)
- θ_r : 잔여함수량(residual water content)
- ψ : 모세관 압력 수두
(capillary pressure head)
- A : 경험 상수(empirical parameter)

이 식을 함수량에 관한 식으로 고치면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |A\psi|^n)^m} + \theta_r \tag{2}$$

토조내 토양의 함수량 측정 실험을 통하여 θ_s 를 결정하였고 θ_r , A, n 값은 사질토에서 사용하는 0.08, 0.005, 1.56

값을 사용하였다(박창근, 1993). 실험에 사용된 토양의 대표적인 수리학적 특성 상수값들을 함수량에 관한 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 함수량식이 된다.

$$\theta = \frac{0.31 - 0.08}{(1 + |0.05 \times \psi|^{1.56})^{0.3589}} + 0.08 \tag{3}$$

본 연구에서는 식 (3)을 이용하여 모세관 압력 수두에 따른 함수량값을 계산하였다.

2.2.3. 투수성 포장층 특성

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 투수성포장재를 사용하였다. 실험에 사용된 투수성 아스콘은 주식회사 청해 아스콘에서 시공하였으며, 설치한 포장재는 시공회사에서 타 현장에 시공 중인 포장재를 사용하였다. 사용된 투수성 포장재는 아스팔트, 채움재, 직경 19 mm, 13 mm 골재, 모래, 개질제등으로 구성된다(Fig. 2). 투수성 포장재의 포화 함수량 $\theta_s=0.2$ 이며, 쇄석층의 포화 함수량은 $\theta_s=0.3$ 이다.

2.2.4. 수리실험 조건 및 실험방법

실험 시 일정한 조건을 유지하기 위하여 선행강우가 없다고 가정하였으며, 강우 발생장치를 이용하여 실험을 수행한 후 48시간 이상 배수시켜 토조내 초기 토양함수량이 0.21이하가 되도록 유지시켜 실험 수행 시 일정한 조건을 유지하도록 하였다. 강우강도는 65 mm/hr, 90 mm/hr, 95 mm/hr 총 3가지 경우에 대하여 수행하였다. 부산과 마산지역의 경우 지속시간 1시간 10년 빈도의 확률 강우량은 60~70 mm이며, 지속시간 2시간 50년 빈도의 확률 강우량은 120~140 mm이다.

이 자료를 바탕으로 첫 번째 실험의 강우강도는 65 mm/hr 설정하였으며, 2시간 강우를 발생한 후에도 지표 유출이 발생하지 않았기 때문에 지표유출을 확인하고 지표면 유출과 지하수 유출 특성을 명확히 분리, 분석하기 위해 지속시간을 총 4시간 동안 유지하였다.

두 번째 실험의 강우강도는 공극률이 높은 포장층과 쇄석층을 포화시키는 경우에 대한 것으로 설정하였다. 이를 위해 각층의 유효 저류고를 산정하였으며, 포장층의 경우 4.5 cm(두께×공극률 = 25 cm×0.2=4.5 cm), 쇄석층의 경우

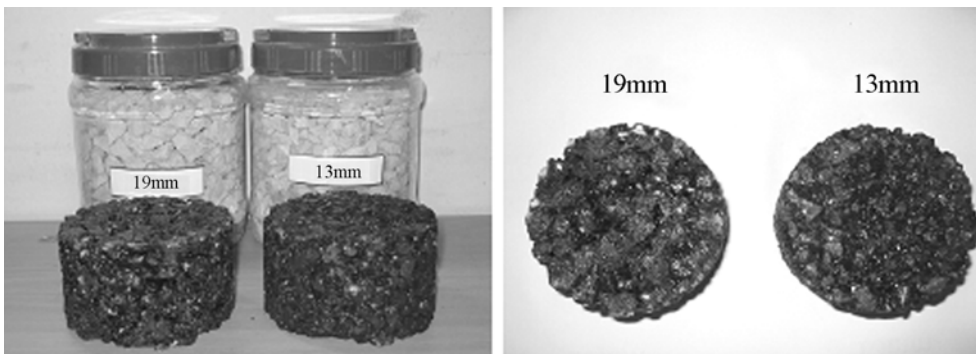


Fig. 2. Permeable Pavement Sample.

4.5 cm(두께×공극률 = 15 cm×0.3=4.5 cm)로 포장층과 쇄석층의 총유효저류고는 9.0 cm이다. 산정된 저류고를 고려하여 강우강도가 90 mm/hr, 95 mm/hr인 두 경우에 대해 실험을 수행하였다. 이 두 가지 실험의 경우도 강우 발생 1시간 후에 지표유출량이 발생하지 않았기 때문에 지표유출을 확인하고 지표면 유출 및 지하수 유출 특성을 명확히 분리, 분석하기 위해 지속시간을 총 4시간 동안 유지하였다. 또한 기저유출의 시간적 변화를 충분히 측정하기 위하여 강우가 중단 후 6시간 동안 지하수위, 함수량변화, 유출량 변동 등을 관측하였다.

각 유출량 측정은 앞 절에서 언급한 유출 측정 장치를 이용하여 5분단위로 측정하였고, 지하수위는 위압수두계를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 함수량은 설치된 흡수력계를 이용하여 모세관 압력수두를 측정 후 식 (3)을 이용하여 함수량으로 환산하였다.

2.3. 수치모형 실험의 개요

본 연구에서는 수리모형 실험의 조건과 실험 결과 등을 이용하여 유출 모형 SWMM에 필요한 매개변수들을 추정하고, 결과값을 비교, 분석하였다.

2.3.1. 매개변수의 민감도 분석

Table 1은 SWMM의 RUNOFF 블록의 입력자료를 나타내고 있다. 입력자료 중 H1~H4 그룹은 매개변수 보정이 필요하며, 이들 자료의 특성을 분석하기 위하여 민감도 분석을 실시하였다.

우선 H1 그룹인 소유역 및 하도/관망의 입력자료는 물리학적 매개변수(Physical Parameter)와 수문학적 매개변수(Hydrological Parameter)로 분류할 수 있다. 물리학적 매개

Table 1. Input Data in RUNOFF Block (Huber and Dickinson, 1988)

Data groups	Description
Runoff	Call the runoff block
A1	Title - two line
B1 - B4	General control data
C1 - C5	Snow input data
D1	Rainfall control line
E1 - E3	Choice of rainfall data
F1	Evaporation data
G1	Channel/Pipe data
G2	Weir/Oripi data
H1	Subcatchment data
H2 - H4	Groundwater portion of the subcatchment
I1 - I3	Subcatchment snow input data
J1 - J4	General quality control
K1	Urban erosion data
L1	Subcatchment quality data
M1 - M3	Control output data

변수는 수리모형 실험 조건들로서 명확한 값을 구할 수 있다. 그러므로 매개변수 추정의 대상이 되지 않으며, 수문학적 매개변수 조도(Manning Roughness) 관련 매개변수, 저류(storage) 관련 매개변수, 침투(Infiltration) 관련 매개변수로 구성되어 있어 일반적인 경우 전부 추정의 대상이 되지만 본 실험의 경우 토조 샘플 실험을 통하여 각 값들을 구할 수 있으므로 추정의 대상이 되지 않는다. 침투량 산정은 Green-Ampt식을 사용하였으며 방법은 물리적 개념을 바탕으로 한 침투 관련 매개변수를 사용한다.

Green-Ampt 방법은 지표면에서의 토양층 수분조건만에 의해서가 아니고 침투된 물의 체적에 의해서도 결정되는

Table 2. Groundwater parameters in SWMM (H2~H4)

Division	Data Groups	Variables	Description	
Groundwater Simulation	Physical parameters	H2	BELEV	Elevation of bottom of water table aquifer
		GRELEV	Elevation of ground surface	
		STG	Elevation of initial water table stage	
		BC	Elevation of channel bottom	
		TW	Elevation of water in channel	
	Hydrological parameters	H3	A1	Groundwater flow coefficient
			B1	Groundwater flow exponent
			A2	Coefficient for channel water influence
			B2	Exponent for channel water influence
			A3	Coefficient for the cross product between groundwater flow and channel water
			POR	Porosity
			WP	Wilting point
			FC	Field capacity
			HKSAT	Saturated hydraulic conductivity
			TH1	Initial upper zone moisture
		H4	HCO	Hydraulic conductivity vs. moisture content curve - fitting parameter
			PCO	Average slope of tension vs. soil - fitting parameter
			CET	Maximum evapotranspiration rate assigned to the upper zone
			DP	Coefficient for unquantified losses
			DET	Maximum depth over lower zone

장점이 있다.

SWMM모형에서 지하수모의는 Runoff Block의 부 프로그램인, GROUND 부 프로그램에서 수행된다. 지하수모의를 위한 입력자료는 물리적 매개변수(H2)와 수문학적 매개변수(H3, H4)가 있다(Table 2). 물리학적 매개변수는 BELEV, GRELEV, STG, BC, TW인데 보통의 경우 하천의 횡단면도와 지하대수층을 조사하면 정량적인 값을 얻을 수 있으며, 본 연구의 경우도 수리모형 실험의 초기조건값으로 보정의 대상이 아니다. 수문학적 매개변수는 A1, B1, A2, B2, A3, POR, WP, FC, HKSAT, TH1, HCO, PCO, CET, DP, DET가 있는데 일반적으로 모두 추정 대상이지만, 본 연구의 경우 토조 모형의 형태에 의해 B1, A2, B2, DP, DET값은 얻을 수 있으며, POR, HKSAT는 토조 샘플 실험

을 통해 정량적인 값을 얻을 수 있다. 그러므로 민감도 분석 대상은 A1, A3, WP, FC, TH1, HCO, PCO, CET이다 (Table 3).

매개변수 추정의 대상이 되는 수문학적 매개변수들을 H3, H4의 입력자료 그룹으로 나누고, 적정 매개변수를 기준으로 일정한 범위($\pm 20\%$)씩 단계적으로 변화시키면서 민감도 분석을 실시하였다. Fig. 3~6은 침투유량에 대한 지표, 지하수 유출량과 지표, 지하수 총 유출량에 대한 민감도 분석 결과이다. 분석 결과 A1, FC, TH1, HCO, PCO가 변화에 따라 각 값들이 다양한 형태로 변화하는 것을 볼 수 있으므로 추정 대상으로 선택하였다.

투수성포장 모의를 위해 SWMM 4.4H 모형에 추가시킨 H6 라인의 투수성 포장 매개변수는 Table 4와 같다. DEG-

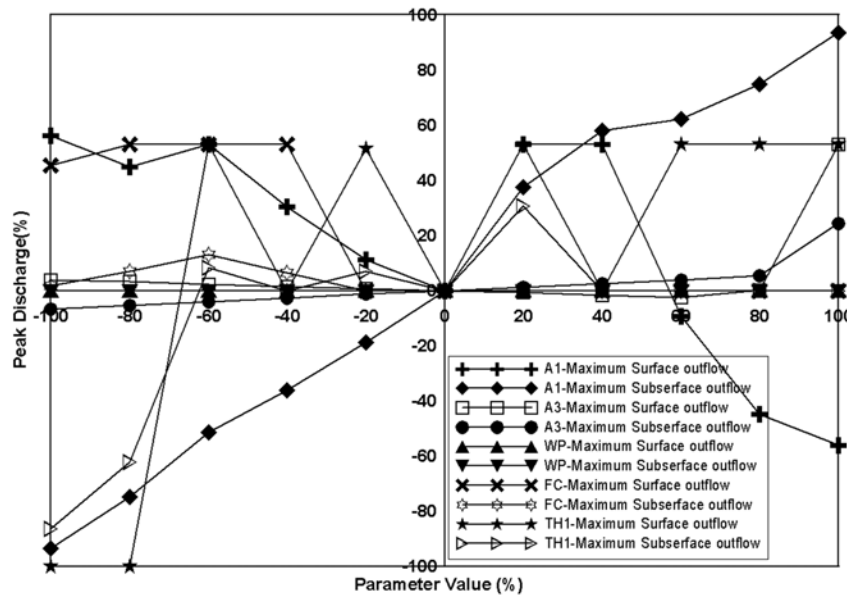


Fig. 3. Sensitive analysis for peak runoff (H3 group).

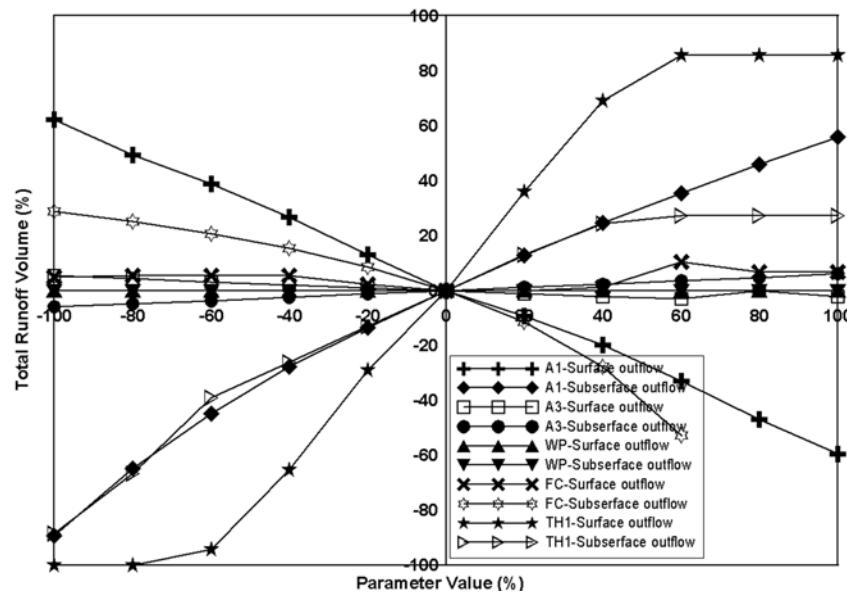


Fig. 4. Sensitive analysis for total runoff (H3 group).

Table 3. Parameters for sensitive analysis

Division	Data groups	Variables	Description	
Groundwater Simulation	Hydrological parameters	A1	Groundwater flow coefficient	
		FC	Field capacity	
		TH1	Initial upper zone moisture	
		H4	HCO	Hydraulic conductivity vs. moisture content curve - fitting parameter
		PCO	Average slope of tension vs. soil - fitting parameter	

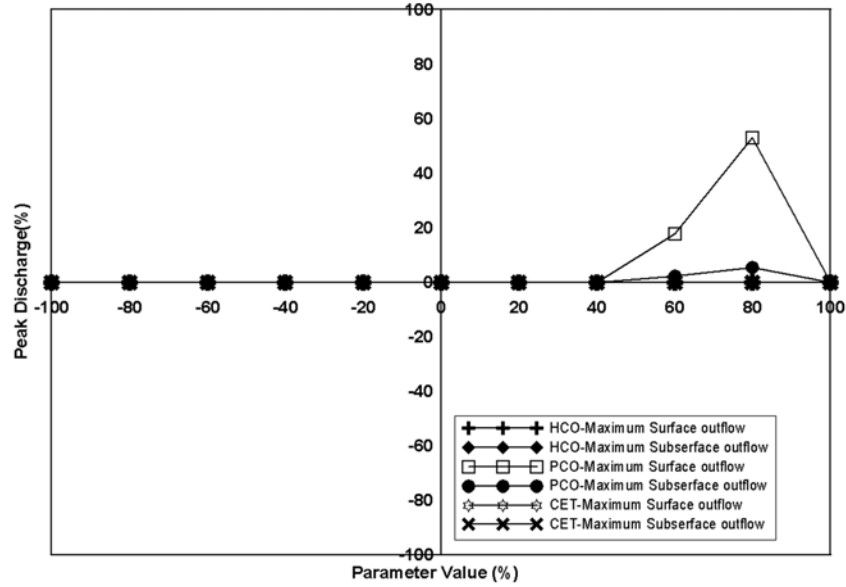


Fig. 5. Sensitive analysis for peak runoff (H4 group).

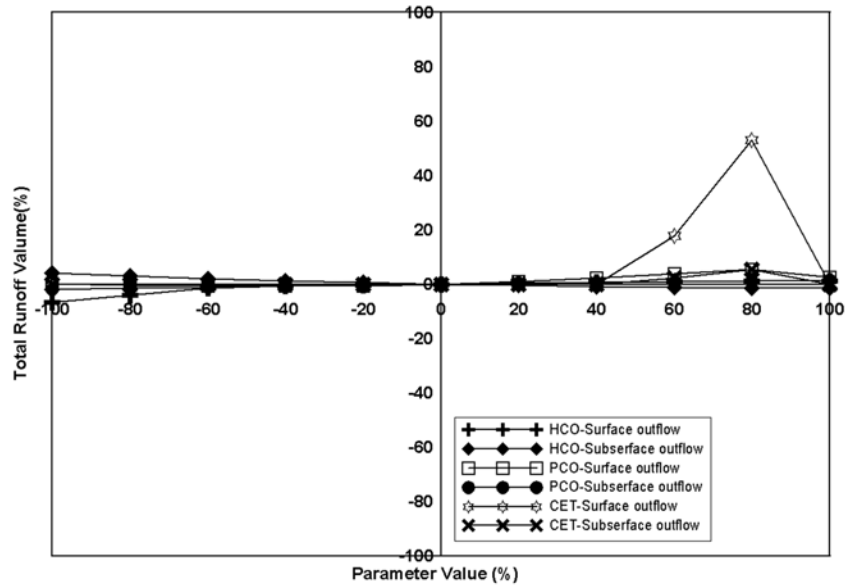


Fig. 6. Sensitive analysis for total runoff (H4 group).

RAD, PREGEN를 제외한 각 매개변수 값들은 토조 샘플 실험을 통하여 정량적인 값을 구할 수 있으며, DEGRAD, PREGEN의 경우 본 실험에서는 장기간 유출량을 모의하는 것이 아니기 때문에 추정 대상에 들어가지 않는다.

2.3.2. 모형 입력 자료

매개변수 민감도 분석 결과와, 3장의 수리모형 실험 자료

를 바탕으로 모형을 수동 보정하였다. Table 5는 각 CASE 별 입력 자료값을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유출량 비교

Table 4. Input data for permeable pavement (H6)

Division	Data groups	Variables	Description
Physical parameters	H6	PERAREA	Percentage of pervious area for the specific subcatchment that is permeable pavement, (%)
		PWSTORE	Depression storage for permeable pavement, in(mm)
		PRESIS	Permeable pavement area Manning's roughness
		PSUCT	Average capillary suction, in(mm) of water for the upper layer of the permeable pavement installation
Hydrological parameters	H6	PHYDCON	Saturated hydraulic conductivity of soil, in/hr(mm/hr) for the upper layer of the permeable pavement installation
		PSMDMAX	Initial moisture deficit for soil, volume air/volume voids(fraction) for the upper layer of the permeable pavement installation
		DEGRAD	Degradation coefficient, time-1
		PREGEN	Average length of time between mechanical regeneration of permeable pavement infiltration properties(days)

Table 5. Input data for SWMM RUNOFF block groundwater parameters (permeable pavement simulated)

		CASE 1	CASE 2	CASE 3
BELEV	Elevation of bottom of water table aquifer	0.2	0.2	0.2
GRELEV	Elevation of ground surface	2	2	2
STG	Elevation of initial water table stage	0.4	0.4	0.4
BC	Elevation of channel bottom	0.9	0.4	0.4
TW	Elevation of water in channel	0.9	0.4	0.4
A1	Groundwater flow coefficient	10.5	13.5	13
B1	Groundwater flow exponent	2	2	2
A2	Coefficient for channel water influence	0	0	0
B2	Exponent for channel water influence	0	0	0
A3	Coefficient for the cross product between groundwater flow and channel water	5	7	6.5
POR	Porosity	0.31	0.31	0.31
WP	Wilting point	0.15	0.15	0.15
FC	Field capacity	0.19	0.19	0.19
HKSAT	Saturated hydraulic conductivity	60	60	60
TH1	Initial upper zone moisture	0.20	0.21	0.21
HCO	Hydraulic conductivity vs. moisture content curve - fitting parameter	15	15	15
PCO	Average slope of tension vs. soil - fitting parameter	15	15	15
CET	Maximum evapotranspiration rate assigned to the upper zone	0.35	0.35	0.35
DP	Coefficient for unquantified losses	0	0	0
DET	Maximum depth over lower zone	0	0	0

Fig. 7은 각 CASE 별로 수리, 수치 모형실험의 지표 지하 유출량을 비교한 그림이며, Table 6은 CASE별 지표, 지하 총 유출량을 비교한 것이다. 지하 유출 경향을 살펴보면 수리 실험 수행 시 부분적으로 나타난 토조내 공기 유출 현상에 의한 지하 유출 감소 현상을 제외한다면, 모든 CASE에서 수리모형과 수치모형의 지하 유출경향 및 최고 값이 비슷하게 나타나며 유출량 또한 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강우가 발생 후 일정 시간이 경과한 뒤 지하유출량이 나타나며 이후에 지표유출량이 발생하였다. 이것은 초기강우량이 투수성 포장재 내에 저류되었기 때문이다. 하지만 이 시기에도 침투가 진행되어 지하유출이 먼저 발생하는 결과를 보이고 있다.

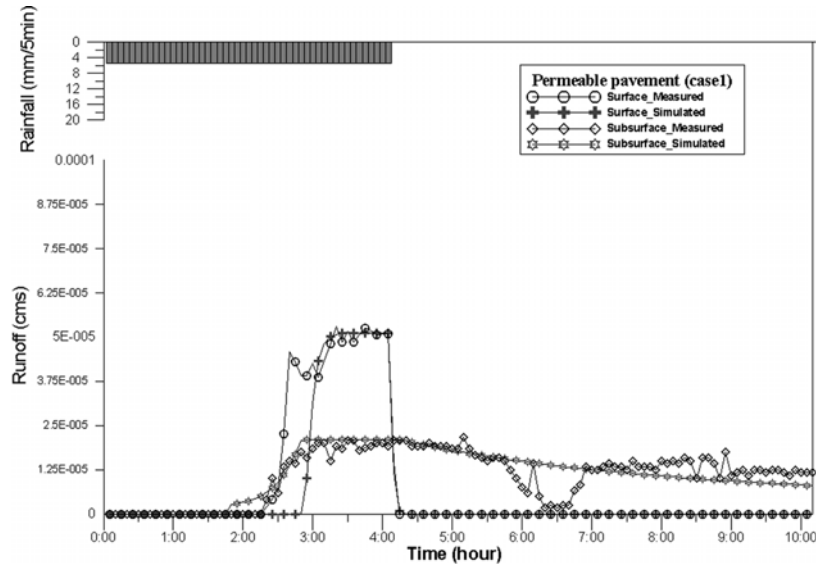
유출량 결과를 비교해본 결과 본 연구에서 사용한 SWMM H6 Module이 지표, 지하 유출 예측에 매우 유용한 도구로 활용되어질 수 있다고 판단된다. 또한 수문학적 의미를 가

진 매개변수의 특성을 분석하고, 이러한 특성이 유출결과에 어떠한 영향을 주는지 확인하였다. 본 연구결과는 현장의 수문학적 매개변수 결정에도 도움이 될 것으로 판단된다.

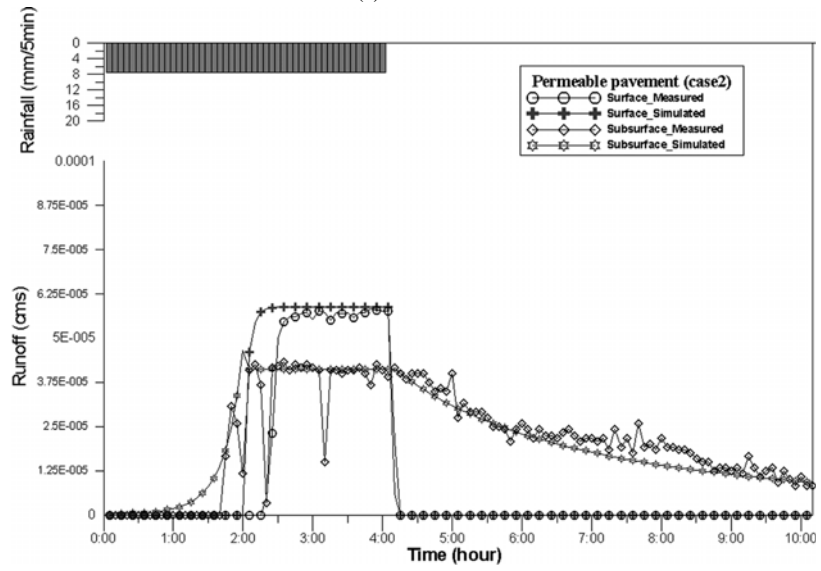
3.2. 수위 변화 비교

Fig. 8은 각 CASE 별로 수리, 수치 모형실험의 수위 변화를 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 강우 중단 후의 지하수위 변화는 비슷한 양상을 가지나, 초기 변화 경향에서 수리실험과 수치 실험에서 상당한 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

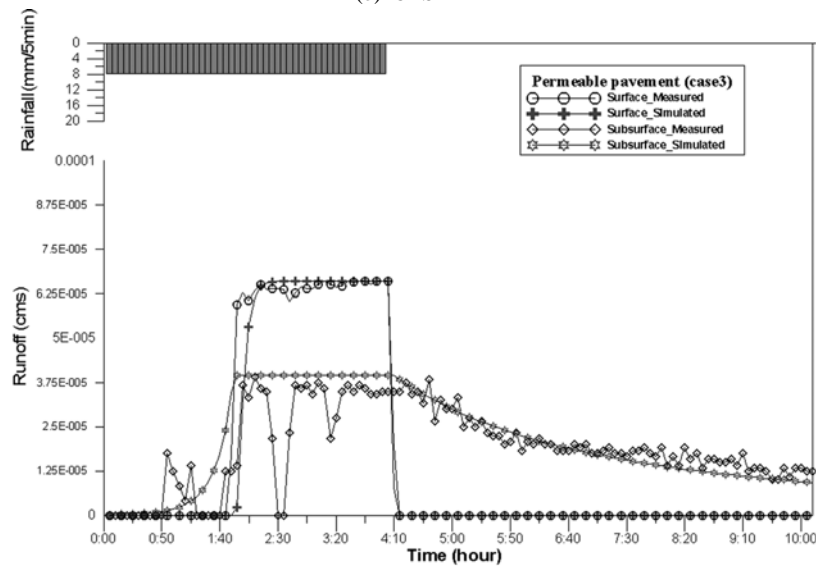
각 CASE 별 수리모형 실험의 경우 #1 영역에서 지하수위가 급격히 상승하는 것은 공기 포집에 의해 지하수위가 과다하게 측정된 것으로 판단된다. 그리고 #2 영역에서 지하수위가 서서히 증가하는 것은 공극물이 큰 쇄석층 영역이 포화되고 있는 것을 나타내며 #3 영역은 토조의 마지막 포장층이 포화되고 있는 것을 나타내는 것으로 판단된다.



(a) CASE 1

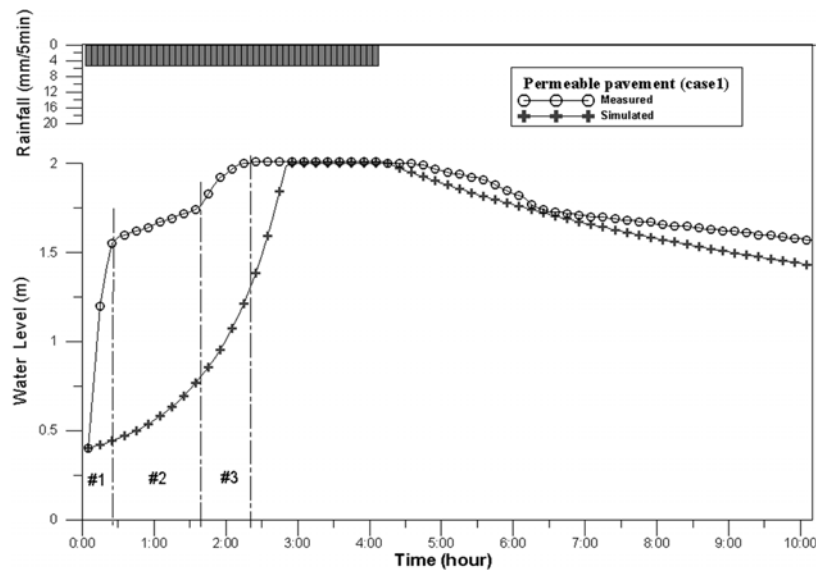


(b) CASE 2

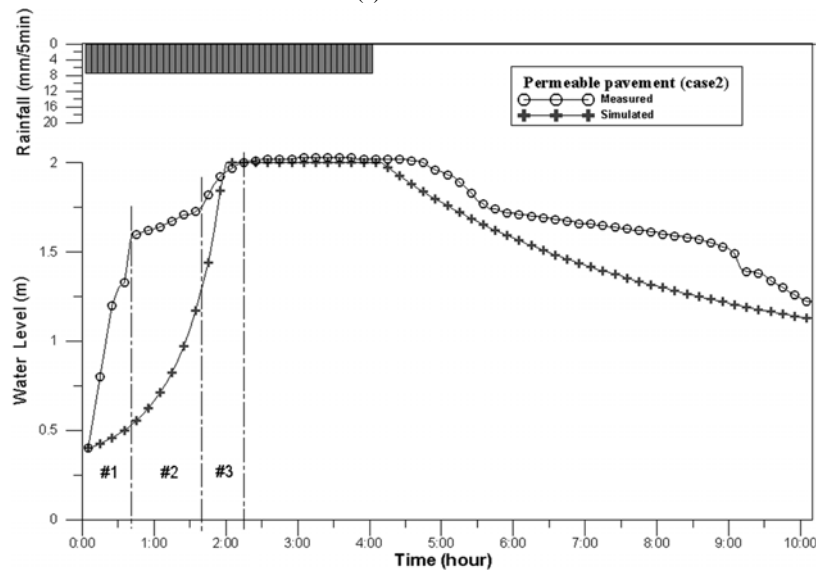


(c) CASE 3

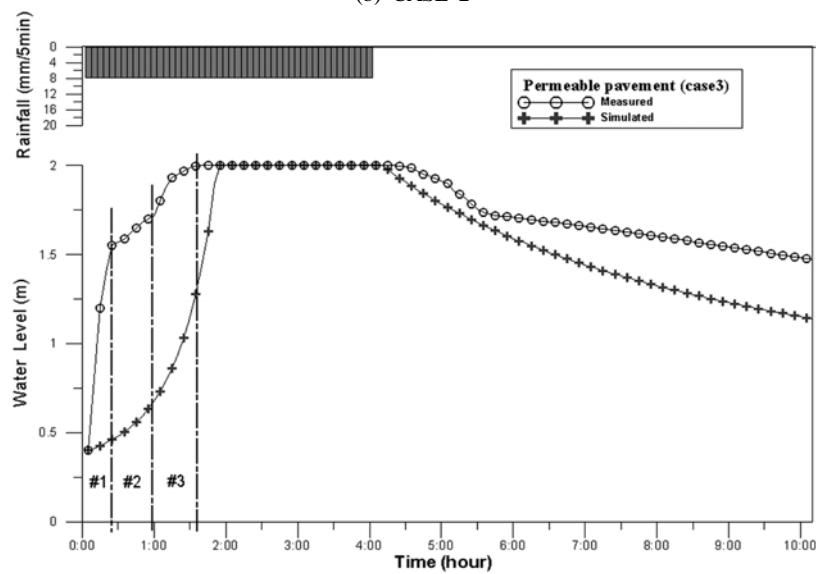
Fig. 7. Comparison of surface runoff and subsurface runoff.



(a) CASE 1

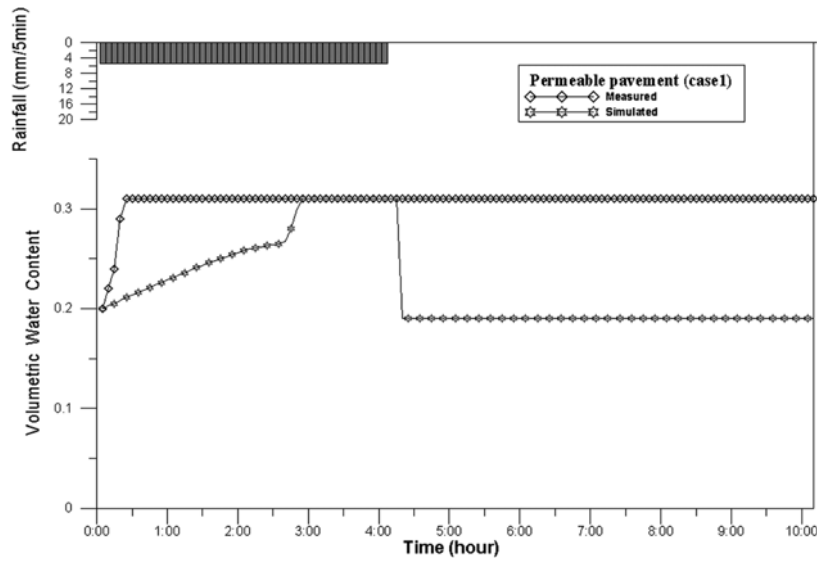


(b) CASE 2

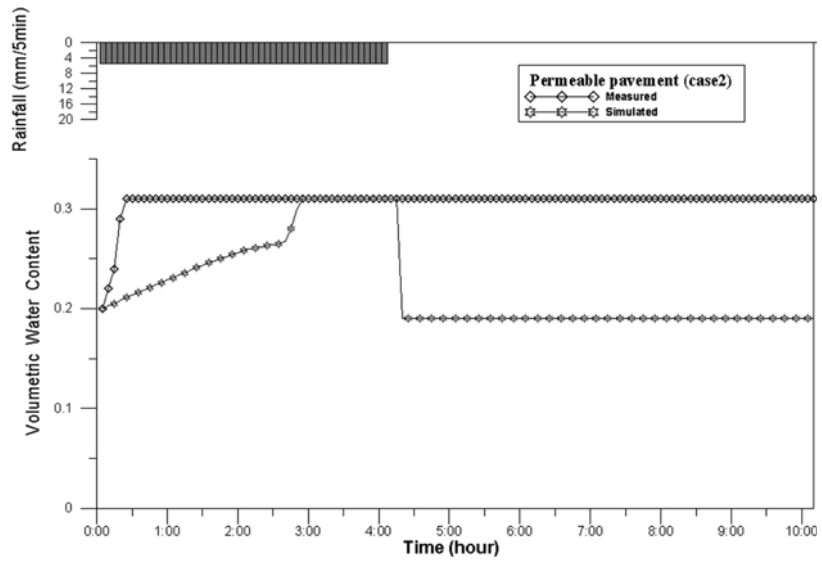


(c) CASE 3

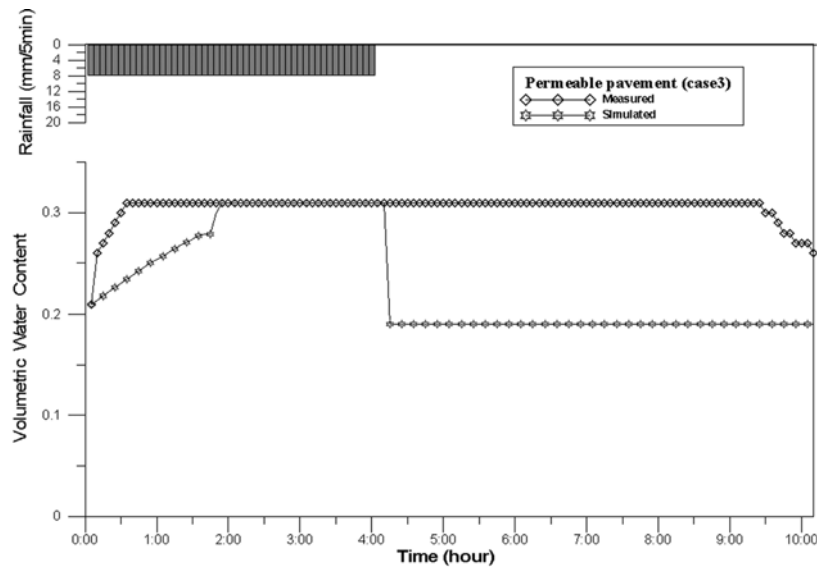
Fig. 8. Groundwater level comparison of experiment and modified SWMM.



(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3

Fig. 9. Water content comparison of experiment and modified SWMM.

Table 6. Comparison of experiment and modified SWMM results (runoff: permeable pavement)

Division		SWMM	Experiment	SWMM /experiment (%)
CASE 1	Surface runoff (m ³)	0.2118	0.2697	78.5
	Subsurface runoff (m ³)	0.4122	0.4005	102.9
	Total runoff (m ³)	0.6240	0.6702	93.1
	Rainfall (m ³)	1.04	1.04	-
	Total runoff /rainfall(%)	60	64.4	-
CASE 2	Surface runoff (m ³)	0.4369	0.3532	123.7
	Subsurface runoff (m ³)	0.7929	0.7966	99.5
	Total runoff (m ³)	1.2298	1.1498	106.9
	Rainfall (m ³)	1.44	1.44	-
	Total runoff /rainfall(%)	85.4	79.8	-
CASE 3	Surface runoff (m ³)	0.5018	0.5311	94.5
	Subsurface runoff (m ³)	0.7796	0.7128	109.3
	Total runoff (m ³)	1.2814	1.2439	103
	Rainfall (m ³)	1.52	1.52	-
	Total runoff /rainfall(%)	84.3	81.8	-

수치모형 실험의 경우 층별 수위 상승을 묘사하지 못하며, 증가하는 경향이 smoothing 되는 형태의 결과를 보이고 있다. 수치 모형에서 포장층의 저류 특성을 포괄적으로 적용하였으나, 실제 포장층은 각 재료특성에 따라 물리적량을 보유하고 있다. 만약 SWMM을 이용하여 정확한 지하수위 변동을 찾아내어야 하는 수리학적 문제라면 SWMM은 적절치 않을 수 있다. 하지만 본 연구는 투수성포장모의를 위한 SWMM H6 그룹을 이용하여 유출을 모의하고자 하기 때문에 이러한 수위 변동의 차이가 유출총량에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

포장층의 경우 물리적으로는 3개층으로 구성되어 층별 지하수위 상승의 경우 실험결과와 같은 변곡점을 보이면서 지하수위가 상승하지만, 수치모형의 경우 이들 3개층을 불연속적으로 움직이는 형태의 지하수위 증가를 묘사해 주지는 못하였다.

3.3. 함수량 변화 비교

Fig. 9는 각 CASE 별로 수리, 수치 모형실험의 토조내 함수량 변화를 비교한 그림이다. 수리 실험 결과와 수치 실험 결과의 경향에 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다.

수리 실험의 경우 초반에 함수량이 급격히 증가하고, 강우를 중단하여 지하수위가 떨어지기 시작한 부근에서는 함수량의 변화가 일어나지 않는 것을 관측할 수 있었다. 이것은 실험 조건에서 함수량 측정용 흡수력계(tensiometer) 설치 지점으로 강우가 빠르게 유입하고 이동함으로서 측정된 함수량이 과도하게 나타날 수도 있을 것으로 판단된다.

수치 실험의 경우 강우 발생 시 함수량의 변화는 이론적으로 잘 맞다고 판단되나, 강우 중단과 거의 동시에 함수량이 최대보수량(field capacity)로 급격히 떨어진다는 것은 실제 토양에서 일어날 수 없는 일로서 SWMM 모형이 함수량 변화를 민감하게 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 수리 모형이 지하수위 변동과 마찬가지로 시간에 따른 함수량 변화를 따라가는데 오차를 보이지만, 실험결과에 의하면 물수지에는 큰 영향을 주지 않고 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 지하수 침투 증진 시설중 하나인 투수성 포장재의 효과에 관하여 수리모형실험 및 투수성 포장재의 효과를 고려하기 위해 기존 SWMM 모형에 H6 그룹을 추가한 수치모형을 이용하여 분석하였다. 수리모형 실험결과를 토대로 수치모형인 SWMM의 매개변수를 보정하였고, 지표 및 지하 유출량에 대한 수리실험 및 수치해석 자료를 비교, 분석하여 수치해석 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. 이 유출 결과를 이용하여 수치모형 결과와 비교 분석하였는데, 분석한 결과에 의하면 지표, 지하수 유출 특성은 두 결과가 매우 유사한 특성을 보였으나, 함수량 변동 및 지하수위 변동 특성에서는 SWMM이 상승시는 천천히 증가하고 강우 중단 후 하강시는 급격히 감소하는 특성을 보였다. 이러한 결과는 SWMM의 토양함수 예측 부분이 부족한 것으로 해석되는 부분이다. 하지만, 전체적인 지표 및 지하수 유출 변동 특성은 두 결과가 매우 잘 모의되고 있어, H6 그룹을 활용한 SWMM 모형이 투수성 포장재의 수문학적 거동 평가에 매우 적용성이 큰 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실험을 통해 투수성포장의 수문학적 침투특성을 분석하였다. 그리고 투수성포장 실험 모형 결과와 기 수정개발된 SWMM 수치모형을 적용하여 비교분석함으로써 수정된 프로그램의 적절성을 검증하였다. 본 연구에서 수행된 실험 및 수치분석결과는 투수성포장의 현장 적용 시 참고자료로 활용할 수 있으며, 도시하천의 수문 순환 해석과 수량 회복 요소의 효과 평가에 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(과제번호 1-7-3) 및 2006년도 인제대학교 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

김병훈, 강준구, 이재응, 여운광(2001). 실험을 통한 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과에 관한 연구. *2001년도 대한토목학회 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 1-4.

박장근(1993). 비포화 비균질 다공성 매질에서 이력현상 모형의 개발과 적용. 공학박사 학위논문, 서울대학교.

서울대학교(2007). 안양천 유역의 물 순환 건전화 기술 개발. 과학기술부.

심재현, 이철규, 이종규, 김진영(2004). 침투통의 설치에 따른 치수효과 분석. *학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1-5.

이재응, 여운광, 심재현, 강태호(2001). 투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석. *대한토목학회논문집*, **21**(6-B), pp. 645-654.

이정민, 이상호, 이길성(2006). 투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성포장의 효과분석. *한국수자원학회논문집*, **39**(2), pp. 109-120.

조원철 등(2000). 우수유출 저감시설 시범사업 검토연구. 서울특별시.

Benjamin, O. B. and Derek, B. B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, **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*, **39**(2), pp. 217-224.

Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). Storm Water Management Model User's Manual, Version 4, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

Jia, Y., Guangheng, N., Yoshihisa, K., and Tadashi, S. (2001). Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrological Processes*, **15**, pp. 2177-2194.

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.