

# LID 효율성 검증기기를 이용한 투수성 블록의 수문순환 효율성 검증에 관한 연구

## A Study on the Effectiveness Verification of Hydrological Cycle of Pervious Pavement using LID Simulator

김 미 은\* / 장 영 수\*\* / 남 칠 호\*\*\* / 신 현 석\*\*\*\*

Kim, Mi Eun / Jang, Young Su / Nam, Chil Ho / Shin, Hyun Suk

### Abstract

In recent, the impacts of urbanization on hydrology and water quality can be minimized with the use of Low Impact Development (LID) practices in urban areas. But, there are no ways to verify or to show the quantitative effectiveness with LID practices. This study designed and developed to perform experiments in natural or artificial representation of hydrological cycle, which is called rainfall-runoff simulator to be able to quantify factors in hydrological system. This simulator was applied to a pervious pavement block. The study conducted analysis of effectiveness for a pervious pavement block by comparing the results with a general pavement block. The result from the pervious pavement block showed remarkably reduction effect on surface runoff with increase of rainfall intensity and more duration time. Also, the simulator was possible to control no surface runoff by a rainfall intensity at 50 mm/hr for an hour. The research indicated possibility and effectiveness for LID practices. This might be widely available to apply to LID practices verification. Therefore, the study is possible to make use of practical standards on fundamental studies.

**Keywords** : low impact development, LID efficiency verification equipment, pervious pavement block

### 요 지

최근 수질 및 수문에 있어 도시화에 미치는 영향을 도시 지역 내 저영향개발 기법을 이용한 저감효율에 관하여 연구가 진행되고 있다. 하지만 저영향개발 기법의 정량적 효율성을 증명할 수 있는 방법이나 기준 설정과 관련한 논문은 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수문순환 체계를 재현 및 정량화할 수 있는 강우-유출 시뮬레이터를 개발하였고 실제 투수성 블록에 적용하였다. 이는 일반 블록과의 지표유출 및 중간유출 등 수문순환의 요소에 대하여 정량적으로 산정 및 비교함으로써 기기를 통한 투수성 블록의 효율성 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과로 투수성 블록의 경우 강우강도가 크고 지속시간이 길어질수록 지표유출량의 저감효과를 뚜렷이 확인할 수 있었으며, 50mm/hr의 강우강도로 1시간동안 분사하여도 지표 유출이 전혀 발생하지 않도록 제어할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 사용한 기기의 강우검증 과정을 통해 결과의 신뢰성을 높이고 투수성 블록뿐만 아니라 여러 LID 요소 효율성 검증에도 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 기기를 활용하여 저영향개발 요소기술별 유출의 저감효과 분석을 위한 효율성 검증의 표준화를 정립하는 기초 연구로 활용할 수 있다.

**핵심용어** : 수문순환, 저영향개발, LID 효율성 검증기기, 투수성 보도블록

\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사 (e-mail: way8210@naver.com)

Doctor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사후요 (e-mail: jysone@nate.com)

Doctoral Candidate, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 석사과정 (e-mail: nchao@nate.com)

Master's Course, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: hsshin@pusan.ac.kr, Tel: 82-51-510-3288)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

## 1. 서론

최근 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 증가 및 기후 변화 등으로 인하여 발생되고 있는 홍수피해, 하천수질 저하, 생태계 파괴 등과 관련한 문제점을 해결하고자 저영향개발(LID, Low Impact Development) 기법이 주목받고 있다. 저영향개발(LID)이란 도시 불투수 면적에 의한 영향을 최소화하기 위해 강우 시 자연의 특성을 활용하여 강우 유출수를 관리하는 기법으로 유역의 수문학적 및 생태적 기능을 유지 또는 복원하여 도시의 우수를 효율적으로 관리하는 기술이다. 물순환 체계의 불균형을 해결하고자 투수성 포장, 침투트렌치, 옥상녹화, 나무화분, 빗물통 등과 같은 다양한 저영향개발 기법이 개발 및 적용되고 있으나 이를 효율적으로 검증할 수 있는 장치는 전무한 실정이다. 따라서 다양한 저영향개발 기법에 대한 정량적인 평가 및 적용성 평가를 위해 환경, 수자원, 도로 등 다양한 분야에서 노력을 하고 있으며 특히 보도를 대상으로 한 투수블록의 적용 및 연구가 확대되고 있다. Lee et al. (2009)은 침투형 우수유출저감시설 중 투수성 보도블록에 대한 침투량을 정량적으로 분석하기 위하여 투수성 보도블록의 침투량 산정 실험을 실시하였고 수리실험 결과와 수치모의 결과를 비교 분석하였다. Yi et al. (2001)은 인공강우를 살포할 수 있는 투수성 포장 실험장치를 이용하여 우수 유출 저감효과를 강우강도별로 분석을 실시한 바 있으며, Lee et al. (2012) 역시 블록의 성능 평가를 위하여 강우강도의 모사가 가능한 실험 장치를 이용하여 우수유출 저감 효과 실험을 하였다. 또한 도시화에 따른 불투수면적의 증가로 지표하 저류능력 감소 및 침투유출량의 증가, 도달시간의 감소와 같은 문제를 해결하기 위하여 침투형 우수유출저감시설에 대한 투수성 블록의 투수효과를 정량적으로 분석 및 평가한 연구가 수행되었다(Koo et al., 2013). 이외에도 투수성 포장을 고려한 SWMM 모형 적용에 따른 도시지역 내 수문순환에 대하여 연구한 다양한 사례가 있다(Lee et al., 2006; Bae et al., 2012). Collins et al. (2008)은 수문곡선으로 다양한 투수성 포장의 홍수저감 효과를 평가하였으며, 불투수성 아스팔트 포장에 비해 표면 유출량 및 침투유출의 저감효과를 입증하였다. Pappas et al. (2010)은 강우조건에 따른 투수성 포장의 투수계수를 측정하였고, 포장두께와 침투능과의 관계를 설명하였다. Yong et al. (2013)은 다공성 및 투수성 포장이 물리적으로 막히는 현상에 대해 연구하였다. 또한 Laurent et al. (2013)은 두 개의 도시유역에서 빗물정원 및 투수성 포장을 적용하여 LID 요소의 효율성에 대한 연

구를 실시하였다. 현재 국내의 경우 수문 및 물순환 왜곡에 의하여 발생하는 여러 문제를 해결하고자 다양하게 개발되고 있는 저영향개발(LID)기법에 대한 효율성 실험에 대한 연구가 필요하며 실험을 통해 표준화된 검증 시스템이 마련되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 저영향개발 기법에 대한 표준화된 평가기법을 개발하기 위하여 정량적 수문순환 분석이 가능하도록 제작된 강우-유출 실험기기를 이용하여 강우 검증 및 투수성 블록 실험을 실시하였다. 강우검증을 통해 최적의 조건을 선별한 후, 저영향개발(LID) 기법 중 하나인 투수성 블록의 우수저감 효과를 일반 블록과 비교·분석하기 위해 3개의 강우강도에서 1시간 동안 적용하였다. 특히, 강우에 의하여 발생하는 수문순환의 요소인 지표유출, 중간유출, 침투의 관계에 대해 정량적인 분석을 실시하여 LID 요소기술의 우수유출저감 효과와 이를 통한 다양한 LID 요소기술의 효율성 검증실험에 대한 기기의 활용성을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 LID 효율성 검증기기의 개요 및 강우 검증

본 연구에서 제작한 LID 효율성 검증기기는 물의 순환 과정에서 유역을 단위 수문 시스템으로 보고 강우를 시스템의 입력, 유역으로부터의 유출을 시스템의 출력으로 하며 침투, 증발, 증산, 지하수 등을 중간 과정 변수로 설정하여 강우와 유출 간의 관계를 나타낼 수 있도록 하였다. 기기의 구성은 3×5×3(m)의 강우 분사 프레임(Frame)과 2.2×5.8×1.5(m)의 유출 플롯(Runoff Plot)으로 이루어져 있다. 먼저 LID 효율성 검증기기는 인공강우(Input Data)를 모의하기 위한 장치로써, 물탱크에 이어진 펌프를 통해 유량계로 유입되는 유량을 수치로 확인할 수 있으며, 밸브를 사용하여 유입유량을 조절할 수 있다. 또한 노즐의 종류에 따라 허용되는 유량과 물입자의 크기, 분사각 등을 조절할 수 있으며, 지속시간에 따른 다양한 강우강도의 재현이 가능하다. 또한 오실레이터를 이용하여 유입유량 배관을 반복적으로 흔들어 줌으로써 펌프압에 지배적인 분사가 아닌 배관의 회전력에 의한 펌프압을 감소함으로써 자유낙하가 되도록 설계하였다. LID 효율성 검증기기의 상세도는 Fig. 1에 나타내었다. 자연현상에서 출력(Output Data)을 나타내는 유출 플롯은 지표유출, 지표하유출, 그리고 지하수유출을 구분하여 실험이 가능하도록 설계함으로써 강우시의 수문학적 현상을 확인할 수 있다. 또한 강우와 유출 플롯의 경우는 10개의 단위 1×1

(m) 베드로 제작하여 다양한 저영향개발(LID) 기법의 효율성에 대한 실험할 수 있도록 설계 및 제작하였다. Fig. 2에 LID 효율성 검증기기의 실제 모습을 보여주고 있다. 각각의 단위베드는 10개에 해당하는 각각의 강우량을 RP11, RP12, RP13, RP14, RP15 및 RP21, RP22, RP23, RP24, RP25로 정의하였다. 유출 플롯을 통하여 발생하는 각 지표, 지표하, 지하수 유출은 해당 수조로 차집이 되고 수조의 수위센서를 통해 자동으로 데이터가 PC로 전송되어 모니터를 통해 시각적으로 자료 확인 및 저장이 가능하다.

자연현상에서의 강우 재현을 위한 강우의 시공간적 변동에 대한 고려는 강우생성에서 가장 중요한 사항이다. Paul et. al. (1989)은 실측자료를 통한 강우모사기 모형의 강우강도 선정 및 강우분포 검정에 대한 연구를 진행한 바 있으며, Navas et al. (1990)은 강우 Drop Size의 설계 및 시공과정 소개, 강우강도별 노즐 선정, 그리고 분사압에 따른 강우입자 크기 검정에 대한 연구를 하였다. 또한 Bhattacharyya et al.(2000)은 강우강도별 강우 분포 사이

즈에 따른 적정 강우모의 범위 선정 연구를 진행한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 강우의 공간 분포와 유입되는 유량별 강우강도 검정 실험을 수행하였다. 선행 연구사례에서 제시된 강우의 입자크기 검정 방법을 이용하여 강우 입자별 분사노즐을 Table 1에 제시한 바와 같이 선정하였다. 먼저 오실레이터의 회전빈도에 따른 강우의 공간적인 분포를 알아보기 위하여 세 개의 노즐 중 분사범위가 중간인 HM-FF 노즐을 사용하였다. 검증 실험 방법으로는 각 단위 유출 플롯에 Fig. 4와 같이 9개의 강우계를 설치하여 회전빈도(RPM)를 중앙 고정(RPM 0), 10, 30 그리고 60의 RPM별로 단위 유출 플롯 당 30분간 강우를 모사하였고 각 RPM에 대한 단위 유출 플롯에 대하여 강우검증 실험을 실시하였다. 또한 강우계의 강우 관측 자료의 불확실성을 고려하여 단위 유출 플롯에 적용 가능한 유량 분포범위 내에서 각 노즐을 RPM별 10분간 강우를 모의 를 통하여 차집수조로 유입되는 수량을 단위 면적 당 강우량을 산정하였다.

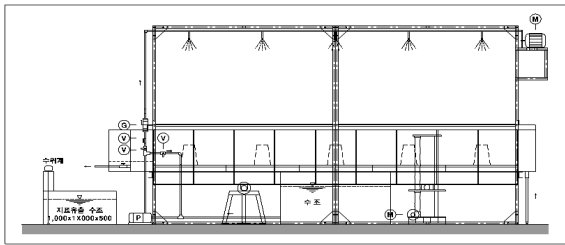


Fig. 1. Profile of Effectiveness Performance Simulator of Low Impact Development



Fig. 2. View of Effectiveness Performance Simulator of Low Impact Development

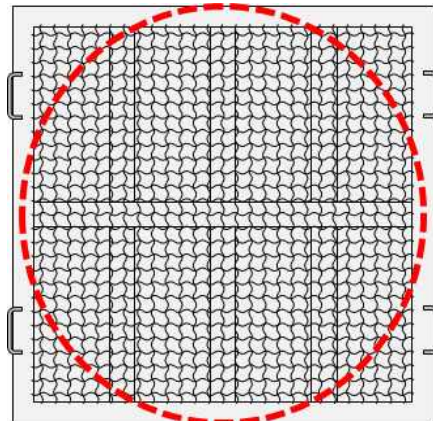


Fig. 3. Allowable Range of Rainfall Distribution at Unit Runoff Plot

## 2.2 LID 효율성 검증기기의 투수성 보도블록 실험

본 연구에서는 LID 효율성 검증기기를 이용하여 일반적으로 사용되고 있는 일반 블록과 LID 기법 중 하나인 투수성 블록을 설계 및 제작하여 인공강우에 의하여 발생하는 유출의 저감효과를 실험하였다. 일반블록은 Fig. 5(a)

Table 1. Specifications for Selected Nozzles

Nozzle	Type	Angle of injection (Deg.)	Drop size (mm)	Range of flow injection ( $\ell$ /min)	RPM
1/4FF-SS14W	Full-cone	120	0.5~3	22~28	0~60
HM-FF	Full-cone	58	0.1~1	14~22	0~60
1/4FF-SS1.5	Full-cone	65	0.1~0.5	6~14	0~60

와 같이 지표면 이하 기층에 대하여 geo-textile, 자갈층, 모래층으로 제작하였으며 투수성 블록은 Fig. 5(b)와 같이 일반 블록과 동일하나 표면에 투수성 블록을 이용하여 제작하였다. 특히 LID 블록 간격제인 스페이서(Spacer)를 사용하여 투수블록 간의 간격을 일정하게 유지시키며 블록 하부에 형성되어 있는 빗물저류공간에 일시적으로 유입되는 우수량을 임시 저장할 수 있도록 설계하였다. 일반블록에 대한 투수성 블록의 우수저감 효과 및 효율성

분석을 위하여 Table 2와 같이 자갈층, 모래층, 포장재의 기층 및 표층의 두께로 설계하였다. 실제 강우와 흡사한 강우를 모사하여 발생하는 유출수의 저감 효율을 비교하므로 강우입자의 낙하에너지에 의한 골재 재배열로 침하가 발생할 우려가 있다. 이를 방지하기 위해 일반 보도블록과 간격제를 이용한 투수성 보도블록의 기층 시공 시 다짐 작업을 실시하였으며, 또한 각 기층별 공극의 막힘 현상 방지를 위하여 자갈이 유실되지 않도록 체에 담고 흐르는 물로 자갈 표면의 이물질들을 세척하여 기층을 구성하였다.

유출실험을 위해 1×1 m 규격의 프레임에 투수성 보도블록 포장과 불투수성 포장(일반 보도블록)을 제작하여 강우강도 30 mm/hr, 50 mm/hr, 100 mm/hr에 대하여 유역 경사 2°로 하여 1시간 동안 강우를 모의하여 실험을 실시하였다. 모의 시작시간부터 지표유출 및 지하수 유출 종료 시 까지 1분 간격으로 차집수조 내 수위 변화량을 관측하였다. 관측된 자료 분석을 통하여 일반 보도블록과 투수성 보도블록의 강우에 의한 유출저감 효율을 비교하여 정량적으로 불투수 보도블록에 비하여 투수성 보도블록의 우수저감 효율성에 대해 검증하였다. Table 3은 강우강도별 노즐(Nozzle) 등 실험에 적용된 조건을 나타내었다.

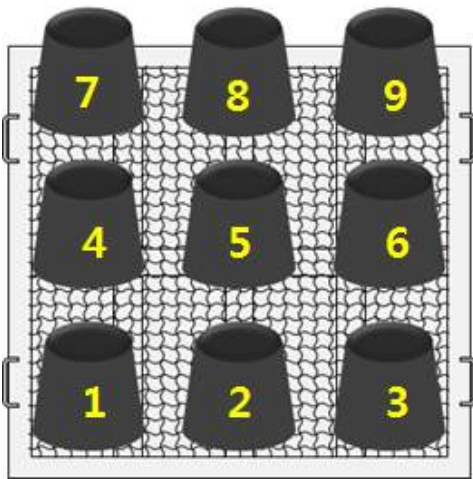


Fig. 4. Arrangement of Rain Gauges at Unit Runoff Plot

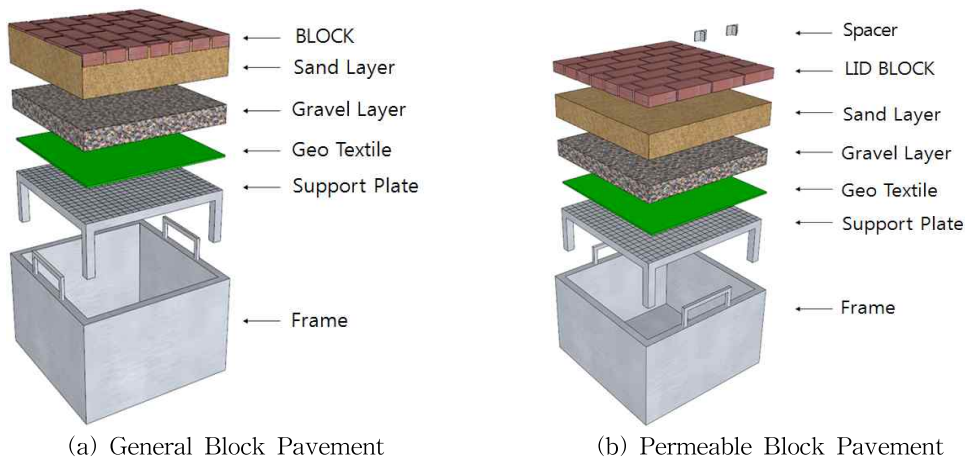


Fig. 5. The Structure of Two Pavements for the Experiment

Table 2. Description of Soil Layers with Pavement Layer

CASE	Thickness (unit : cm)		
	Gravel Layer	Sand Layer	Pavement Layer
Permeable Block	10	15	6
Impermeable Block (General Block)	10	15	6

### 3. 연구결과

#### 3.1 LID 효율성 검증기기의 강우검증 결과

HM-FF노즐을 이용하여 단위 플롯에 적용 가능한 유량 분사범위의 공간분포 검증 실험 결과를 실험 초·종기 5분의 관측 데이터를 배제하고 20분간의 데이터를 이용하여 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 각 강우계의 관측값에 대한 표준편차는 RPM 0에서 10.61 mm로 가장 높게 나타났

으며, RPM 10에서 5.77 mm, RPM 30에서 4.81 mm, RPM 60에서 4.78 mm 순으로 가장 낮게 나타났다. 또한 회전빈도가 고정일 때 평균 22.14 mm로 가장 큰 관측값을 나타냈으며, RPM 10, 30, 60은 평균 관측값이 각각 18.71, 18.66, 18.73 mm로 비슷한 결과를 나타내었다. 본 강우 검증 실험으로 RPM 30 이상의 조건을 형성 시 강우는 공간적으로 균일하게 나타났다.

유입유량에 의하여 산정된 강우강도의 검증실험 결과를

Table 3. Experimental Condition on Rainfall Intensity

Rainfall Intensity (mm/hr)	30	50	100
Nozzle	1/4FF-SS1.5	HM-FF	HM-FF
Discharge (ℓ/min)	6	14	26
RPM	60	60	60
Bed Slope of Degree	2	2	2

Table 4. Results of Statistic Analysis from the Observed Data

	RPM0	RPM10	RPM30	RPM60
Mean	22.14	18.71	18.66	18.73
St. DEV	10.61	5.77	4.81	4.78
Variance	112.59	33.30	30.83	30.43

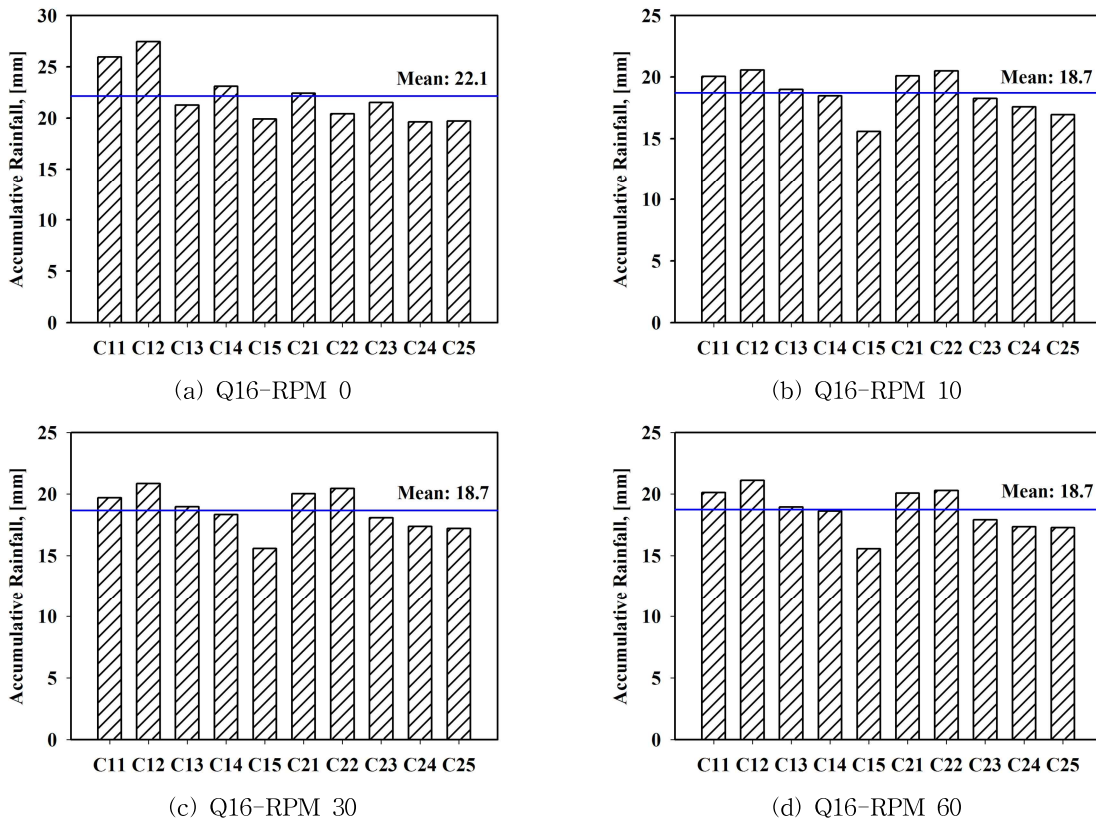


Fig. 6. Results of Rainfall Verification for Allowable Range Distribution

아래 Tables 5~7에 나타내었다. 노즐의 분사압으로 발생하는 분사각과 RPM의 구동에 의한 손실량을 비교 한 결과 2.39~37.32%로 평균 25.63%의 손실량이 나타났다. 또한 HM-FF와 1/4FF-SS14W의 유입유량 22 l/min를 비교하면 동일한 유량임에도 불구하고 1/4FF-SS14W의 강우량이 현저히 크게 나타났다. 이는 1/4FF-SS14W노즐

의 분사압의 감소로 분사각이 작아짐에 따라 유출 플롯을 통하여 발생하는 손실량이 줄어든 것으로 판단된다.

### 3.2 LID 효율성 검증기기의 투수성 블록의 실험결과

LID 투수블록의 효율성을 평가하기 위해 강우강도 30, 50, 100 mm/hr에 대해서 강우모의실험을 실시하였고 그

**Table 5. Results of 10-minute Rainfall Intensity with 1/4FF-SS1.5 Nozzle**

Input Flow (ℓ/min)	RPM	0	10	20	30	40	50	60	Mean
6	Input Flow (mm)	6.15	5.95	6.04	6.05	6.12	6.12	6.09	6.06
	Rainfall (mm)	5.91	5.24	5.23	5.22	5.29	5.27	5.21	5.24
	Loss (%)	3.90	28.74	29.97	30.25	29.90	30.23	30.87	29.99
8	Input Flow (mm)	8.40	8.44	8.35	8.4	8.39	8.39	8.39	8.39
	Rainfall (mm)	8.01	6.42	6.4	6.4	6.4	6.4	6.41	6.41
	Loss (%)	4.64	23.93	23.35	23.81	23.72	23.72	23.60	23.69
10	Input Flow (mm)	10.2	10.4	10.34	10.32	10.4	10.4	10.31	10.36
	Rainfall (mm)	9.7	7.6	7.51	7.63	7.56	7.49	7.49	7.55
	Loss (%)	4.90	26.92	27.37	26.07	27.31	27.98	27.35	27.17
12	Input Flow (mm)	12.23	12.04	12.16	12.1	12.1	12.13	12.10	12.11
	Rainfall (mm)	10.99	8.69	8.51	8.59	8.59	8.59	8.61	8.60
	Loss (%)	10.14	27.82	30.02	29.01	29.01	29.18	28.87	28.98
14	Input Flow (mm)	14.15	14	14	14	14	14	14	14.00
	Rainfall (mm)	12.96	9.78	9.78	10.02	9.78	9.78	9.78	9.82
	Loss (%)	8.41	23.00	23.00	21.29	23.00	23.00	23.00	22.71

**Table 6. Results of 10-minute Rainfall Intensity with HM-FF Nozzle**

Input Flow (ℓ/min)	RPM	0	10	20	30	40	50	60	Mean
14	Input Flow (mm)	14.17	14.25	14.01	13.79	14.47	14.33	14.23	14.18
	Rainfall (mm)	10.26	9.01	8.97	8.81	9.07	9.12	9.89	9.15
	Loss (%)	27.59	36.77	35.97	36.11	37.32	36.36	30.50	35.51
16	Input Flow (mm)	16.69	16.53	16.71	16.88	16.55	16.56	16.89	16.69
	Rainfall (mm)	12.37	10.89	11.02	11.52	10.91	10.48	10.95	10.96
	Loss (%)	25.88	34.12	34.05	31.75	34.08	36.71	35.17	34.31
18	Input Flow (mm)	18.27	17.61	17.61	17.82	18.54	18.66	18.96	18.20
	Rainfall (mm)	14.27	13.05	12.98	12.91	13.1	13.1	12.97	13.02
	Loss (%)	21.89	25.89	26.29	27.55	29.34	29.80	31.59	28.41
20	Input Flow (mm)	20.13	20.08	20.16	20.06	19.95	20.27	20.13	20.11
	Rainfall (mm)	15.23	14.09	14.13	14.09	14.1	14.11	14.11	14.11
	Loss (%)	24.34	29.83	29.91	29.76	29.32	30.39	29.91	29.85
22	Input Flow (mm)	22.99	23.11	23.21	22.92	23.05	23	23.33	23.10
	Rainfall (mm)	16.78	15.33	15.61	15.78	15.42	15.4	15.47	15.50
	Loss (%)	27.01	33.67	32.74	31.15	33.10	33.04	33.69	32.90

결과를 아래 Figs. 7~9와 Tables 8~10에 나타내었다. 지표유출, 지하수 유출, 저장량에 대한 결과이므로 모두 양의 값을 가지며 Figs. 7~9에서 나타나지 항목은 유출이 발생하지 않았음을 의미한다. 강우강도 30 mm/hr에서는 일반(불투수성) 보도블록과 투수성 보도블록 모두 지표유출은 발생하지 않았으며 발생하는 모든 강우량이 침투되

었다. 지하수 유출은 강우모의 19분 후에 침투가 발생하였고, 지하수유출량은 일반 보도블록과 투수성 보도블록에서 각각 3,350 cm<sup>3</sup>과 3,425 cm<sup>3</sup>로 비슷한 값을 나타내었다.

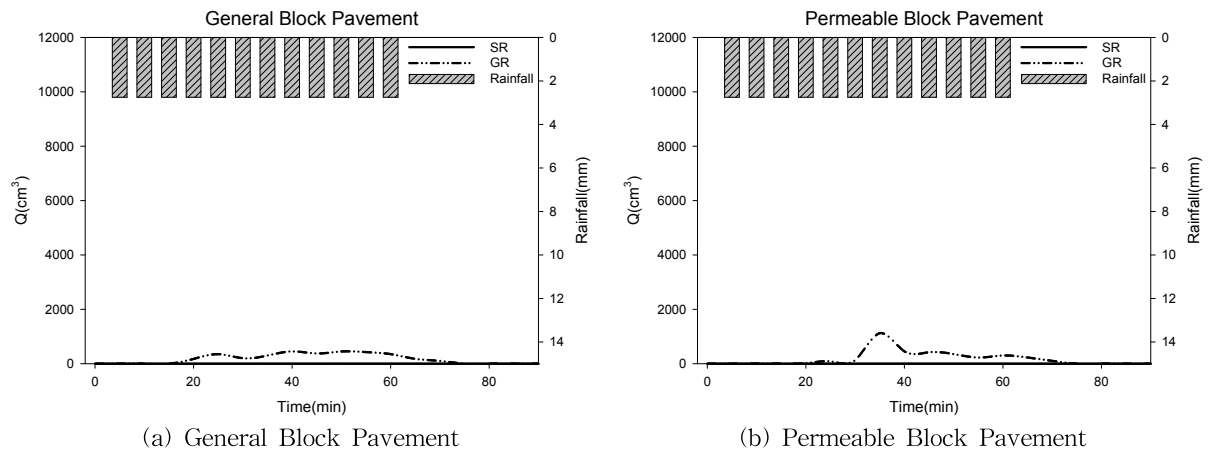
강우강도 50 mm/hr에서 일반 보도블록에서는 발생하는 지표유출은 10.79%로 나타났으며, 지하수 유출은 74.07%, 기층의 저장률은 25.93%로 나타났다. 투수성 보도블록의

**Table 7. Results of 10-minute Rainfall Intensity with 1/4FF-SS14W Nozzle**

Input Flow (ℓ/min)	RPM	0	10	20	30	40	50	60	Mean
22	Input Flow (mm)	23.05	22.85	23.01	23.95	23.84	23.8	23.83	23.55
	Rainfall (mm)	22.5	21.16	20.83	21.69	21.46	21.16	21.09	21.23
	Loss (%)	2.39	7.40	9.47	9.44	9.98	11.09	11.50	9.81
24	Input Flow (mm)	27.33	27.76	27.65	27.81	27.34	26.91	25.77	27.21
	Rainfall (mm)	24.33	22.97	22.94	23.05	22.9	22.93	22.82	22.94
	Loss (%)	10.98	17.26	17.03	17.12	16.24	14.79	11.45	15.65
26	Input Flow (mm)	28.44	25.95	28.91	28.71	29.14	28.47	29.34	28.42
	Rainfall (mm)	25.11	23.13	23.52	23.66	23.65	23.61	23.92	23.58
	Loss (%)	11.71	10.87	18.64	17.59	18.84	17.07	18.47	16.91
28	Input Flow (mm)	31.23	31.02	30.92	31.05	30.75	31.02	30.69	30.91
	Rainfall (mm)	26.1	24.41	24.38	24.61	24.36	24.21	24.97	24.49
	Loss (%)	16.43	21.31	21.15	20.74	20.78	21.95	18.64	20.76

**Table 8. Results of Water Balance Analysis (I=30 mm/hr)**

General Block Pavement		
Surface Runoff, SR	Groundwater Runoff, GR	Storage
0 (0%)	3.35 mm (9.85%)	30.65 mm (90.15%)
Permeable Block Pavement		
Surface Runoff, SR	Groundwater Runoff, GR	Storage
0 (0%)	3.425 mm (10.07%)	30.575 mm (89.93%)

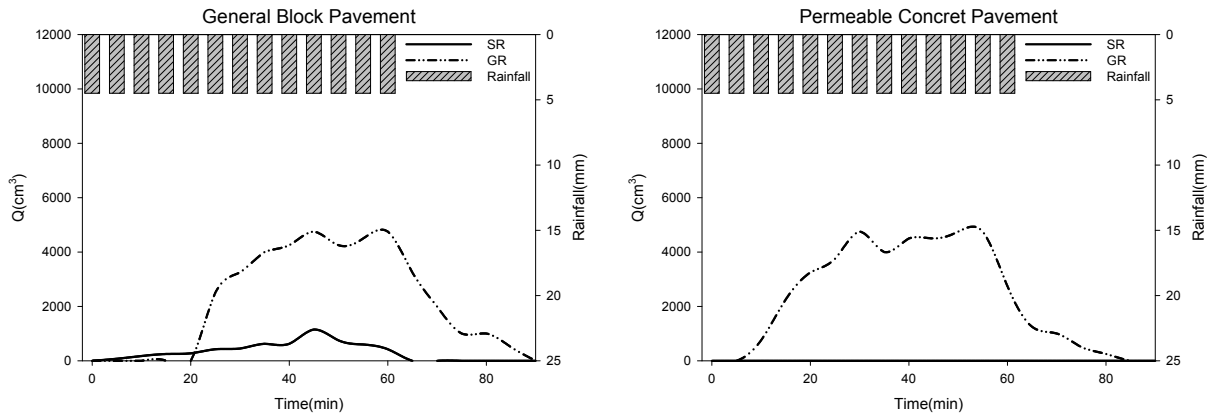


**Fig. 7. Result of Measured Data with Rainfall Intensity, 30 mm/hr**



Table 9. Results of Water Balance Analysis (I=50 mm/hr)

General Block Pavement		
Surface Runoff	Groundwater Runoff	Storage
5.83 mm (10.79%)	40.00 mm (74.07%)	14.00 mm (25.93%)
Permeable Block Pavement		
Surface Runoff	Groundwater Runoff	Storage
0 (0%)	43.00 mm (79.63%)	11.00 mm (20.37%)



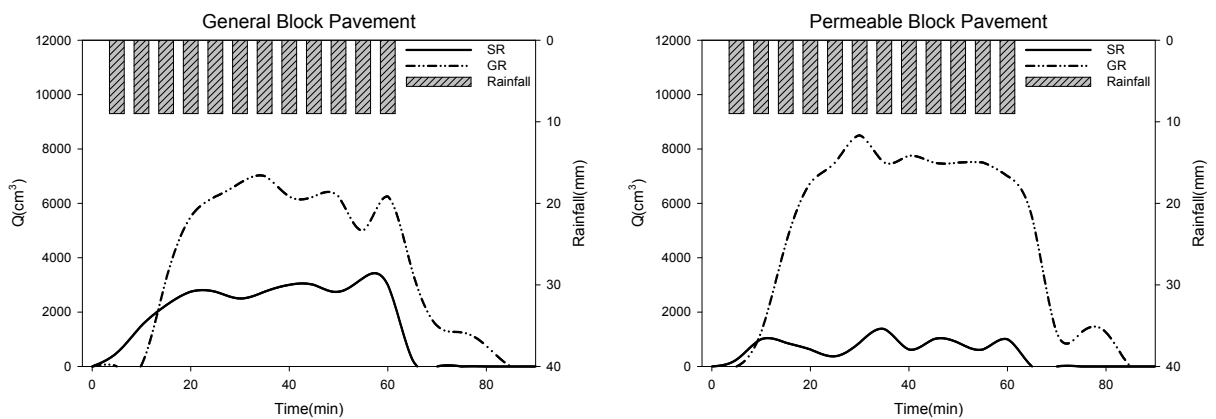
(a) General Block Pavement

(b) Permeable Block Pavement

Fig. 8. Result of Measured Data with Rainfall Intensity, 50 mm/hr

Table 10. Results of Water Balance Analysis (I=100 mm/hr)

Impermeable Block		
Surface Runoff	Groundwater Runoff	Storage
30.25 mm (28.01%)	65.75 mm (60.88%)	12 mm (11.11%)
Permeable Block		
Surface Runoff	Groundwater Runoff	Storage
9.5 mm (8.80%)	82.5 mm (76.39%)	16 mm (14.81%)



(a) General Block Pavement

(b) Permeable Block Pavement

Fig. 9. Result of Measured Data with Rainfall Intensity, 100 mm/hr



지표유출은 나타나지 않았으며, 지하수 유출은 79.63%, 기층의 저장률은 20.37%로 나타났다.

강우강도 100 mm/hr에서 일반 보도블록의 지표유출은 28.01%로 나타났으며, 지하수 유출은 60.88%, 기층의 저장률은 11.11%로 나타났다. 투수성 보도블록의 지표유출은 8.80%로 나타났으며, 지하수 유출은 76.39%, 기층의 저장률은 14.81%로 나타났다. 지표유출량은 투수성 블록이 9.5 mm, 불투수성 블록은 30.25 mm로 투수성 블록이 불투수성 블록에 비해 20.75 mm 적게 발생하였다. 그러므로 투수성 블록을 사용할 경우, 지표유출량이 68.60% 저감되는 효과가 있었다. 그리고 지하수 유출량은 투수성 블록은 82.5 mm, 불투수성 블록이 65.75 mm로 투수성 블록이 불투수성 블록에 비해 16.75 mm 많이 발생하였다. 따라서 투수성 블록을 사용하면 지하수 유출량이 25.48% 증가하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시화로 인한 유역 내의 물순환/수문 순환을 개선하기 위한 LID 기법의 수문학적 평가기법을 개발하기 위해 강우 시 수문학적 물수지 분석에 특화된 실험 장비를 제작하였으며 실험 장비의 검·보정을 통해 자연강우와 유사한 인공강우를 생성하였다. 특히 다양한 강우강도의 실험이 가능하며 LID 요소기술 중 침투율이 뛰어난 투수성 보도블록을 이용하여 일반(불투수성) 보도블록과 우수저감 평가실험을 통해 투수성 블록의 우수저감 효율성을 평가하였다. LID 효율성 검증기기를 이용한 평가 기법의 장점 중 하나는 강우에 따른 지표유출, 지표하 유출, 지하수 유출을 동시에 측정이 가능하며, 강우량 제어가 용이하고 자동 측정 장치를 이용하여 관측된 데이터를 실시간 모니터링과 자료의 저장이 가능하다. 또한 유출 플롯의 각 단위 유출 플롯에 개별적인 강우 모의가 가능하므로 시료시공의 비용 부담이 적으며, 1×1m의 단위 유출 플롯으로 구성되어 다수의 LID 요소기술의 결합 시공이 가능하며 따라서 융복합 LID 요소기술의 효율성 평가 및 개발도 가능하다. 하지만 이 연구에서 분석한 투수성 블록은 일반적으로 설치 후 장기간 사용하다보면 공극으로 오염물질이 유입되어 막힐 수 있기 때문에 효율성이 저감되는 특성이 있는데 연구에서 사용된 LID 효율성 검증기기로는 공극이 막힐 정도로 소요되는 장기간을 모의하기에는 어려움이 있고, 공극 막힘 현상을 유발하는 유입 오염물질을 제공하는 기능이 없으므로 투수성 블록의 우수저감 효과에 공극 막힘 현상이 미치는 영향을 고

려하기에는 한계가 있었다. 이러한 장비로 투수성 블록의 우수저감 실험을 실시한 결과, 강우강도가 30 mm/hr의 경우 투수성 블록이나 일반블록의 지하수 유출량이 전체 강우의 약 10%를 차지하는 것으로 유사하게 나타났다. 그러나 강우강도가 50 mm/hr, 100 mm/hr로 높아짐에 따라 투수성 블록의 지하수 유출량이 일반 블록에 비해서 상대적으로 각각 5.56%, 15.51% 높은 결과가 나타났다. 또한 중기 침투능은 일반 블록에 비해 2배 이상 큰 값을 나타내었으며 100 mm/hr의 강우강도에서 투수성 블록은 일반 블록에 비해 지표유출량이 약 20% 더 저감되는 효과가 있었다. 본 연구를 통하여 개발된 LID 효율성 검증 기법 및 실험방법은 LID 요소기술 중 하나인 투수성 블록을 포함하여 향후 많은 기술에 대한 효율성 평가와 검증에 있어서 유용할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C04)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Bae, C.Y., Park, C., Kil, S.H., Choi, I.K., and Lee, D.K. (2012). "Analysis of Urban Runoff with LID Application -Focused on Green Roofs and Permeable Paver-." *Journal of Korean Planners Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 39-47.
- Bhattacharyya, S., Dan, M., and Sen, A.K. (2000). "Modeling of drop size distribution of rain from rain rate and attenuation measurements at millimeter and optical wavelengths." *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 21, No. 12, pp. 2065-2075.
- Collins, K.A., Hunt, W.F., and Hathaway, J.M. (2008). "Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 1146-1157.
- Dagnachew, L., Christine, V.C., and Françoise, G. (2003). "Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical africa : case study south central ethiopia." *Journal of Hydrology*, Vol. 275, No. 1-2, pp. 67-85.
- Kim, B.H. (2001). Experimental and Numerical Study on

- Effects of Runoff Reduction in the Permeable Pavement. M.S. dissertation, Myongji University, pp. 32-42.
- Kim, S.G. (2005). An Experimental Study on Infiltration Characteristics of Facilities for Reducing Runoff According to Surface Materials. M.S. dissertation, Hongik University, pp. 4-15.
- Koo, J.Y. (2008). Promotion System for Development Research of a Guideline about Design and Maintenance Management. No. SEST08-0523032, Seoul Green Environmental Center, pp. 2-16.
- Koo, Y.M., Jo, J.A., Kim, Y.D., and Park, J.H. (2013). "A Study on Runoff Analysis of Urban Watershed by Hydrologic Infiltration Experiment of Permeable Pavement." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 559-571.
- Laurent, M.A., Bernard, A.E., and Indrajeet, C. (2013). "Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement." *Journal of Environmental Management*, Vol. 119, pp. 151-161.
- Lee, H., Jung, D.J., Kim, Y.B., and Kim, Y.T. (2009). "An Experimental Study on the Analysis of Infiltration Capacity of the Permeable Block." *Journal of KOSHAM*, Vol. 9, No. 4, pp. 99-106.
- Lee, J.M., Jun, S.M., Park, J.H., and Lee, S.H. (2006). "A study for Hydrological Infiltration Properties of Permeable Pavement." *Journal of Korea Water Resource Association*, pp. 1711-1715.
- Lee, S.H., Kim, J.W., Yoo, I.K., and Kim, N.S. (2012). "Analysis on Runoff Reduction Effects of Detachable Permeable Block." *Journal of KOSHAM*, Vol. 12, No. 6, pp. 157-162.
- Navas, A., Alberto, F., Machin, J., and Galan, A. (1990). "Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion." *Soil Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 385-397.
- Pappas, E., and Huang, C.H. (2010). "Runoff and Infiltration Dynamics on Pervious Paver Surfaces." *Watershed Management*, Vol. 394, No. 69, pp. 767-773.
- Paul, T.W., and Paul, T. (1989). "Drop-Size Distributions Associated with intense Rainfall." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 28, No. 1, pp. 3-15.
- Yi, J.E., Yeo, W.K., Sim, J.H., and Kang, T.H. (2001). "Analysis of Stormwater Runoff Reduction Effects by Using Porous Pavement." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 38-44.
- Yong, C.F., Mccarthy, D.T., and Deletic, A. (2013). "Predicting physical clogging of porous and permeable pavements." *Journal of Hydrology*, Vol. 481, pp. 48-55.

<p>paper number : 15-014</p> <p>Received : 13 February 2015</p> <p>Revised : 9 March 2015 / 18 March 2015</p> <p>Accepted : 18 March 2015</p>
---