

단지내 차도용 투수성 포장의 물순환 효과분석

이정민[†] · 현경학 · 여옥경*

한국토지주택공사 토지주택연구원

*한양사이버대학교 부동산학과

An Analysis on the Hydrologic Cycle Effect of Rodway Permeable Pavement in Residential Site

Jungmin Lee[†] · Kyoung hak Hyun · OkKyung Yuh*

Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation

*Department of Real Estate., Hanyang Cyber University

(Received 26 April 2010, Revised 6 July 2010, Accepted 17 July 2010)

Abstract

In recent years, increases in impervious areas with rapid urbanization and land use changes are causing numerous hydrologic cycle and environmental problems. Impermeable pavement have a various defect such as collection rainwater, decreasing of sliding resistance, and etc. In this study, the hydrologic cycle effect of permeable pavement were analyzed by the experiment and the numerical simulation. The numerical model used was a modified SWMM especially for considering the hydrologic cycle effect of permeable pavement. The parameters of modified SWMM were revised by the experimental results. Also, the effects of runoff quantity reduction are reviewed when permeable pavement is applied to Incheon Cheongna watershed. The hydrologic cycle analysis of Incheon Cheongna watershed, continuous simulations of urban runoff were performed. The analysis results of permeable pavement setup effect on runoff are follows: the surface runoff after permeable pavement setup decreases to 74.35% of the precipitation whereas the surface runoff before permeable pavement setup amounts to 81.38% of the precipitation; the infiltration after permeable pavement setup increases to 15.13% of the precipitation whereas the infiltration before permeable pavement setup amounts to 8.32% of the precipitation.

keywords : Continuous simulation, Hydrologic cycle, Permeable pavement, SWMM

1. 서론

국내의 도로포장은 불투수성 아스팔트콘크리트 및 시멘트콘크리트 포장으로 되어있으며 급속한 산업화와 도시화는 도시지역 불투수 지표면적의 대부분을 차지하고 있는 도로포장면의 증가를 가져왔다. 이로 인해 강우시 배수시설이 완벽하지 못한 도로에서는 많은 양의 물이 배수되지 못하고 도로에 고여 있어 교통 장애를 초래할 뿐만 아니라, 차량의 제동시 마찰 저항성이 떨어져 사고의 위험성이 높다. 또한 물이 땅속으로 침투되지 못하고 포장 표면으로부터 하수관, 하천으로 유입되어 도시 하천의 범람 원인이 된다. 또한 지표에서 지하로 침투가 되지 못해 지하수 고갈의 원인이 되고, 미생물이 서식하지 못하여 토양이 사막화 되는 등 많은 문제점을 발생시킨다.

현재 도로의 포장에는 불투수성 포장이 주로 사용되고 있으나 1980년대부터 선진국에서는 투수성 아스팔트가 개발된 이래 투수성 포장공법에 관한 투수성 시멘트콘크리트의 연

구가 활발하게 진행되고 있으며, 투수성 포장은 보도를 중심으로 한 생활관련 도로, 광장 및 주차장 등에 사용되고 있다.

도로의 기능에 대한 요구가 다양해짐에 따라 개발된 투수성 포장은 강우시 도로표면에 물의 고임을 방지하고 미끄럼 저항성을 향상시키는 장점이 있으며, 지표의 물을 지하로 침투시켜 지하수가 고갈되는 문제를 방지하고 흙속의 미생물이 잘 서식할 수 있는 환경을 만들어 주는 등 여러 가지 측면에서 장점이 있는 것으로 평가되고 있다(최재진과 황의환, 2002). 그러나 투수성 포장도 노반의 배수가 양호하지 않을 경우 겨울철 동해에 의해 노면이 융기하는 현상이 나타나며, 또 강도가 높지 않아 교통량이 많은 차도의 사용에 어려움이 있다(Mallick, 2000).

국내에서는 투수성 아스팔트보다 투수성 콘크리트 포장이 널리 보급되어 왔다. 그러나 지금까지의 투수성 콘크리트는 강도상의 제약 때문에 보도, 주차장 등 비교적 경하중의 용도로 제한되었으나 투수성 콘크리트를 차도포장에 적용하기 위한 기술개발이 요구되고 있다(최선용, 2005). 최근에는 아파트 단지내에 투수성 포장이 설치되고 있으며, 현재 건설 또는 설계가 완료된 신도시에 중교통 차도의 적용 확대를 위한 시험시공이 이루어지고 있다.

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

본 연구에서는 도시면적의 대부분을 차지하고 있는 불투수층 포장으로 인하여 증가되고 있는 도시 홍수와 환경부하 문제에 대응하기 위하여, 왜곡되어 있는 국내 물순환 시스템의 개선 방안으로 실험에 의한 차도용 투수성 포장의 처짐량과 투수계수를 분석하였다. 차도용 투수성포장은 빗물 침투로 노반 이하가 포화 함수비에 가까운 상태에서 차량에 의한 반복 하중을 받기 때문에 투수성포장체를 해석할 때에 노상의 물성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 시험시공구간에 FWD장비를 사용하여 처짐량을 측정하였으며, 투수계수시험은 투수 성능을 유지할 수 있는 특성을 평가하는 것으로 KS F 2494 배수성 아스팔트 혼합물의 실내 투수 시험 방법에 따라 분석하였다. 실험에 의한 투수계수를 시험유역에 적용하여 단지내 차도용 투수성 포장의 설치에 따른 물순환 개선효과 및 유출 양상을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 국내·외 연구동향

현재까지 국내에서 투수성 포장 연구는 미진한 실정이지만, 1990년대 후반 처음 도입되었으며 물순환 체계를 개선하기 위한 포장기술이나 노면온도를 저감하기 위한 포장기술은 현재 연구 수준에 있다. 김병훈 등(2001)은 도시지역에서 적용하기 적합한 투수성 포장에 대한 저감효과를 파악하기 위해 수리 모형실험을 실시하였다. 또한, 이재웅 등(2001)은 호우시 홍수유출로 인한 피해를 경감시키기 위한 방법으로 투수성 포장재를 사용할 경우의 우수유출 저감효과를 실험을 통해 검토하고 실제 도시유역에 적용하였을 경우의 효과를 검토하였다. 이정민(2007)은 SWMM(Storm Water Method Model) 모형을 이용하여 안양천의 지류인 학의천 유역에서 투수성포장이 하천의 수량 증가에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 전상미 등(2009)은 투수성 포장재의 효과를 분석 및 평가하기 위해 수리모형 실험을 통한 관측자료를 활용하여 수치모형 실험에 필요한 매개변수를 보정하였다.

한국건설기술연구원(2007)은 투수성 포장에서의 막힘현상 및 오염제어 포장개발을 위하여 표면 친수화 기법과 오염제어 매트를 적용한 투수성 블록 포장을 개발하였다. 한국건설기술연구원(2008)은 신도시 지역의 설계조건을 기준으로 차도에 투수성포장을 적용할 경우의 교통하중에 따른 노상의 지지력 저하 성능을 수치해석을 통해 분석하고 저하된 지지력을 확보하기 위한 방안 분석을 통해 적용 가능한 투수성포장단면을 제시하고 시험포장을 통해서 단면의 구조적인 성능을 검증하고 보완하고자 하였다.

외국의 경우, 미네소타주 도로국의 Lebens(2008)는 주 시험도로에 투수성 포장을 시공하여 적용방안에 대한 연구를 진행하였다. 주차장에 적용하여 열섬효과를 저감할 수 있는 포장 연구가 주요 목표였으며, 따라서 경교통하중에 적용할 수 있는 포장 개발이 주요한 연구였다. Satoshi(1995)는 Road Research Laboratory method를 이용하여 투수성 포장재와 침투 파이프의 설치에 의한 우수조절 연구를 수행하였으며, Eric 등(1999)은 덴마크 코펜하겐의 도시 중심가

공원부지에 침투 증진시설 중 하나인 침투 트렌치를 설치한 후 수문학적 거동에 대해 연구하였다. Hyun 등(2008)은 침투정과 침투트렌치를 이용하여 공동주택단지 내 주차장의 유출수 유출저감과 오염부하 저감효과에 대한 연구를 진행하였다. 그리고 Benjamin and Derek(2003)은 불투수 아스팔트로 포장되어진 주차장을 네 가지 투수성 포장재로 대체한 후 이들이 장기적으로 유량 및 수질에 미치는 영향을 실험 연구하였다.

2.2. 투수성 포장의 개요

투수성 포장은 지금까지의 포장기술과는 정반대의 발상에 의한 기술로 공극이 많은 다공질의 표층재를 사용하여 우수를 노반으로까지 침투, 보수시키는 구조로 되어있다. 즉 일반적인 포장의 강우처리가 도로구배에 의해 포장표면을 따라 배수구에 흘러가는 것에 비하여 투수성 포장은 포장의 공극 안을 통과시켜 바로 아래의 노반으로까지 침투시키고 있어 불투수성 포장의 사용으로 인한 발생 문제점을 해결할 수 있다.

투수성 포장의 사용은 일반 포장재와 비교할 때 강도가 떨어지기 때문에 주차장, 보도 등으로 사용이 제한되어 왔지만 최근 강도를 높이기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 투수성 포장공법의 유형은 표층 구성에 따라 크게 포설형과 블록형으로 구분되는데 블록형에서도 블록자체에 투수기능을 지닌 투수 블록형 포장공법, 식생과 함께 적용되는 중공 블록형 포장공법, 기존의 블록을 활용, 틈새를 만들어 투수시키는 틈새 투수 공법 등으로 세분할 수 있다.

투수성 포장의 개념도 및 구조도는 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

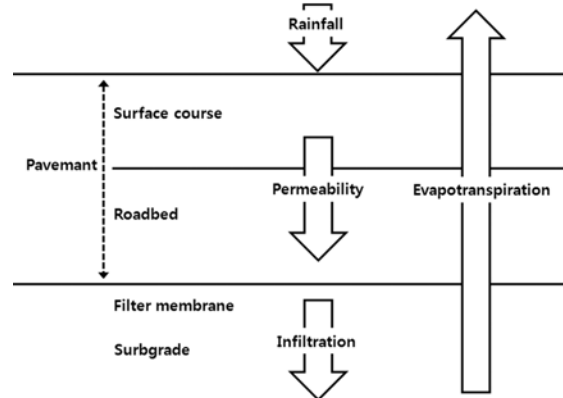


Fig. 1. Conceptual schematization of permeable pavement.

2.3. 시험포장을 통한 실험

2.3.1. 시험시공 구간 노상 지지력 평가

현장 실험은 시험시공된 투수성 포장에서 지지력 측정을 통해 평가하였다. 포장의 지지력은 일반적으로 처짐량 측정을 통하여 평가되는데, 본 연구에서는 포장의 지지력 측정을 위해 처짐량 측정 조사 장비인 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 사용하였다. FWD는 현재까지 사용되고 있는 도로포장평가를 위한 여러 비파괴시험장비 중에서 가장 신뢰성이 있으며 신속한 비파괴시험장비로 평가되고 있

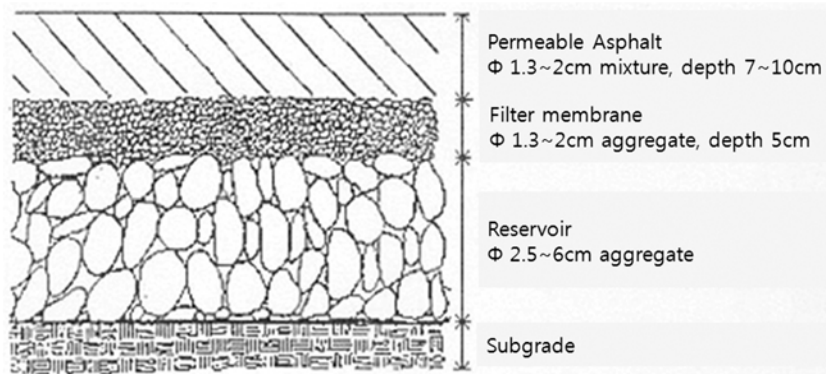


Fig. 2. Structure of permeable pavement.

다. Hoffman and Thompson(1982)은 FWD, Road Rater, 벤켈만 빔을 비교하여 FWD가 실제 차량하중에 의해 발생하는 포장도로의 처짐 형상을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비임을 밝힌 바 있다. 비파괴 시험방법은 포장체 각 층의 물성을 추정하기 위해 포장체를 파괴하면서 실시했던 CBR이나 평판재하 시험에 비하여 신속하고 경제적이다.

처짐량 측정은 시공 직후와 강우량 20 mm에 상당하는 물을 살수한 뒤 측정하였으며 기준이 되는 축하중은 4.1 ton으로 낙하하중을 가하여 이때 발생하는 처짐량을 측정하였다.

본 연구에 사용된 FWD는 미국 KUAB에서 개발한 장비로서 최대 하중 15 ton까지 재하가 가능하고 하중 재하시 7개의 변위 검출기(LVDT)에서 처짐량 측정이 가능하다.

FWD는 주요 3부분, 운반 트레일러, 처짐량 측정장비(Deflection Measuring System), 컴퓨터 시스템으로 구성되어 있고 이를 조정하는 소프트웨어(Data Acquisition Software)가 있다. 운반 트레일러는 처짐량 측정장치를 견인 할 수 있는 능력을 갖춘 차량으로 제작되었으며 운전실 외에 실내에서 조사가 작업할 수 있는 공간이 있다. 처짐량 측정 장치는 하중 재하판(Load Plate), 하중 발생 장치(Load Generator), 고무 완충 장치(Rubber Buffer)와 거리 측정기 등으로 구성되어 있다. 컴퓨터 시스템은 컴퓨터 일체와 전원 공급 장치, 처짐량 측정 자료를 데이터로 전환하는 시스템 본체 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다. 또 일련의 모든 시스템을 조정 관리하는 소프트웨어(Data Acquisition Software)가 있다.

2.3.2. 투수계수 실험

투수성 포장은 포장을 통해 빗물을 노상으로 침투시키는 구조이기 때문에 투수성포장을 구축할 때 빗물처리방법 선정이나 구조 설계, 빗물의 침투 속도를 계산하는데 각 포장의 투수성능 파악은 매우 중요하다.

본 연구에서는 시험포장 구간에 사용된 표층, 기층 재료의 투수성능을 파악하기 위해서 시공 현장에서 재료를 확보하여 실내에서 투수 실험을 실시하였다.

투수 시험은 차도 또는 보도 등에 적용된 배수성포장이거나 투수성포장에 본 기술을 적용한 경우 투수 성능을 유지할 수 있는 특성을 평가하는 것으로 KS F 2494 배수성 아스팔트 혼합물의 실내 투수 시험 방법에 따라 시행하였다.

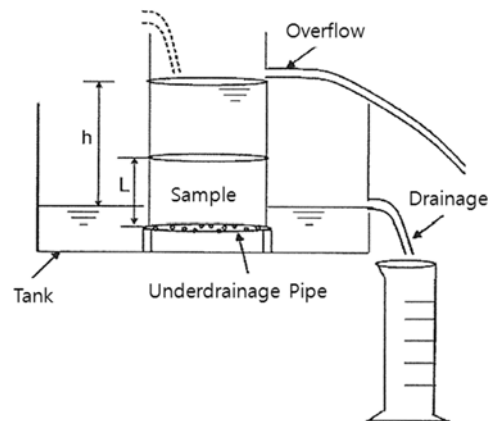


Fig. 3. Conceptual schematization of experiment system.



Fig. 4. A complete view of hydrologic conductivity experiment.

Fig. 3은 투수계수 시험장치의 개념도를 나타내고, Fig. 4는 실내에 투수계수 시험장치를 설치한 사진이다.

2.4. 시험유역 물순환 모의

2.4.1. 투수성 포장을 고려한 SWMM 모형의 개요

2.4.1.1. SWMM 모형의 구조분석

SWMM 모형의 RUNOFF 블록은 강우사상에 대해 배수유역의 유량과 수질을 모의하고, 주요 하수관망에 대한 오염물질의 흐름추적을 위해 개발되었다. RUNOFF 블록은 배수유역을 소유역과 관망으로 재구성하여 해석한다. 배수

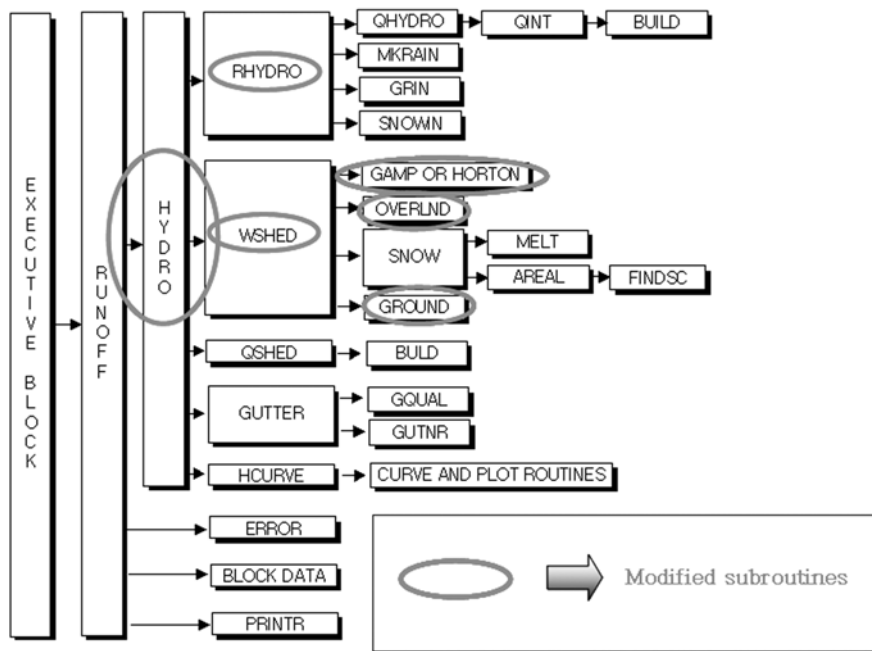


Fig. 5. Structure of subroutines in RUNOFF block (Huber and Dickinson, 1988).

유역을 최대 2,000개의 소유역과 2,000개의 하도/관망으로 구성할 수 있다. RUNOFF 블록은 35개의 부프로그램으로 이루어져 있으며 기본적인 구성과 프로그램의 수정에 관련된 부프로그램은 Fig. 5와 같다.

2.4.1.2. 투수성 포장을 고려한 SWMM 입력자료

투수성 포장을 고려하여 수정된 SWMM 모형은 RUNOFF 블록의 지표면 유형에 투수성 포장 분석 모듈이 있으며 Fig. 6과 같이 RUNOFF 블록의 지표면 유형은 평상 시 세 가지이고, 융설이 추가되면 네 가지의 지표면 유형으로 구분된다. 세 가지 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. 기존의 SWMM 모형은 J변수의 범위가 1에서 4까지이다. 투수성 포장 지표면 유형을 추가하기 위해 변수의 범위 5가 추가되었다. Table 1은 새롭게 구성된 지표면 유형의 J변수를 나타낸 것이다.

투수성 포장의 입력라인(H6)은 각 소유역에 대응하며, 투수성 포장의 면적은 식 (1)과 같이 계산한다.

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

여기서, A_{pp} 는 투수성 포장 면적(m^2), A_s 는 소유역 면적(m^2), imp 는 불투수 면적비(%), $perv$ 는 투수지역 중 투수성 포장 면적비(%)를 의미한다.

투수성 포장층은 시간이 지남에 따라 불순물이 쌓이고 공극의 막힘 현상이 발생한다. 투수성 포장 모의의 주요 특징은 시간에 따른 포장층 침투능 감소에 대한 적용이다. 포장층의 막힘과 침투능 감소는 시공 후 1~5년 내에 발생한다(Urbonas and Stahre, 1994). 시간에 따른 포장층의 막

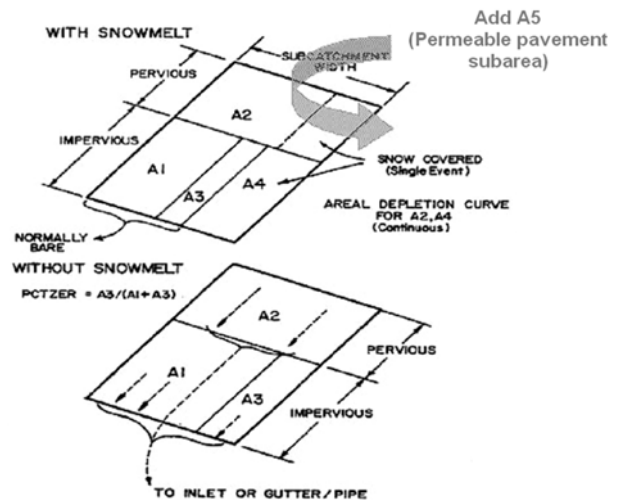


Fig. 6. Subcatchment schematization of RUNOFF block.

Table 1. Surface type and the J variable of modified SWMM

“J” Variable in the parameter WAR (J, NW)	Surface type in RUNOFF block
1	Impervious-with detention
2	Pervious-with detention
3	Impervious-with zero detention
4	Impervious-snow simulation
5	Permeable pavement

힘, 침투능 감소현상에 관련된 주요 인자는 교통량, 토지이용상태, 포장층의 재료특성 등이 있다. 투수성 포장층의 시공 후 시간에 따른 포장층 침투능 감소 모의는 식 (2)와 같다. 수식은 지수함수 감소 형태로 되어 있다. 결국 시간이 경과되면 투수성 포장층의 침투능은 0에 접근하며 불투수층과 유사하게 된다.

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

여기서, $K_{S,Pinitial}$ 는 초기 포장층 포화투수계수(mm/hr), $K_{S,Pnew}$ 는 재 계산된 포장층 포화투수계수(mm/hr), t 는 투수성 포장의 시공 후부터 흐른 시간(days), k 는 감쇠계수($time^{-1}$)를 의미한다.

또한, 투수성 포장을 고려한 H6라인은 Table 2와 같으며, 투수성 포장을 고려한 SWMM 모형의 상세한 내용은 이정민(2007)에 수록되어 있다.

2.4.2. 시험유역 현황

본 연구의 시험유역은 한국토지주택공사에서 조성 중인 인천광역시 청라지구 경제자유구역으로 현재 시공 중인 유역으로 설계가 완료되어 토지이용계획 및 자료취득, 물순환 시스템의 적용 등을 고려하여 본 연구대상유역으로 선정하였다. 본 시험유역은 지구를 관통하는 지방 2급 하천인 공촌천과 심곡천이 있으며, 동측에서 서측으로 유하하여 서해로 유출되고 있다. 공촌천 및 심곡천은 하천 기능 및 저류 기능을 복합하여 홍수시 하천에 유출증가량을 일시 저류하였다가 서해로 방류하는 복합기능의 하천이다. 또한 중앙에 홍수시 저류지 기능을 할 수 있도록 호수공원 조성계획이 있으며 유역현황은 Fig. 7과 같다.

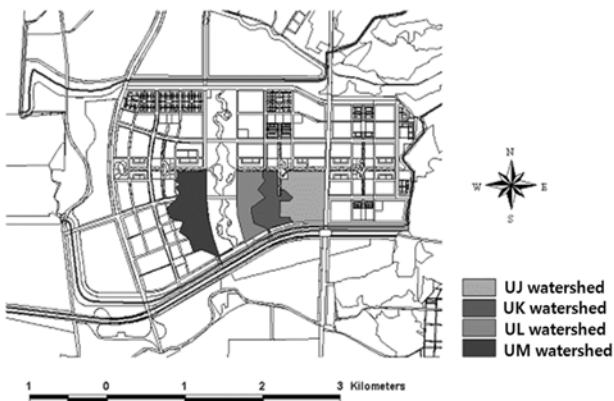


Fig. 7. The diagram of Incheon Choengna watershed.

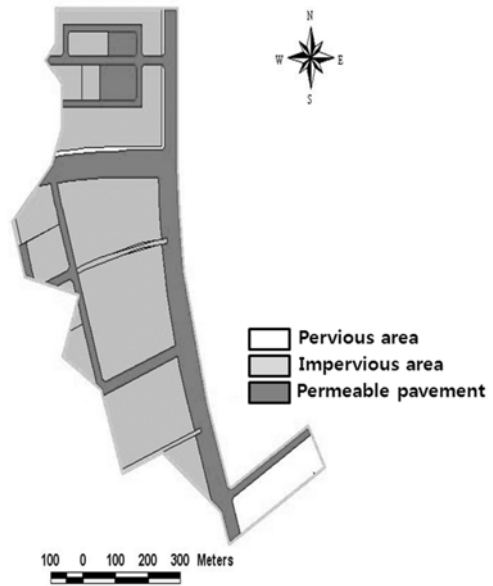


Fig. 8. Test subcatchment for modified SWMM.

1997 ~ 2007년의 강우자료 및 증발자료를 이용하여 하도의 장기간의 유출모의를 수행하였다. 인천청라지구 UM 배수구역의 토지이용 현황을 고려하여 도로, 주차장의 불투수 지역에 투수성 포장 설치에 따른 효과를 분석하였다. UM 배수구역의 불투수 면적은 363,028 m²로 94%를 차지하고 있다. 투수성 포장 적용지역은 전체 면적의 36%인 139,032 m²이다(Fig. 8).

3. 결과 및 고찰

3.1. 시험포장실험 결과

FWD를 이용하여 투수성 포장 시험포장 구간에서 살수 전·후의 처짐량을 측정된 결과를 아래 Table 3과 Fig. 9 ~ 11에 나타내었다.

Table 3과 Fig. 9 ~ 11에 나타난 바와같이 살수 전·후의 최대 처짐량 및 노상에서의 처짐량에 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 본 측정 결과 시험포장 구간에서는 살수 전과

Table 2. Input data for permeable pavement (H6)

Division	Data groups	Variables	Description
Physical parameters	H6	PERAREA	Percentage of pervious area for t 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 3. Comparison of of deflection measurement

Pavement section	Maximum deflection (mm)			Deflection of subgrade (mm)		
	Before watering	After watering	Difference	Before watering	After watering	Difference
Site 1	0.283	0.288	0.005	0.066	0.078	0.012
Site 2	0.224	0.231	0.008	0.071	0.083	0.012
Site 3	0.755	0.957	0.202	0.058	0.068	0.010

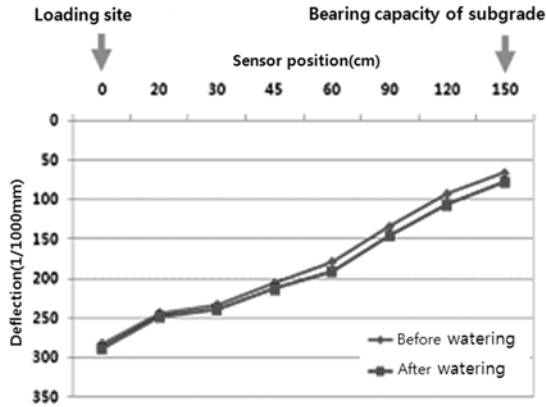


Fig. 9. Result of deflection measurement in the site 1.

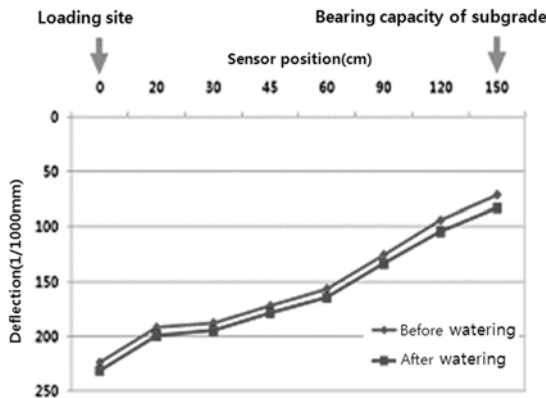


Fig. 10. Result of deflection measurement in the site 2.

살수 후에 노상에 지지력에는 차이가 없는 것을 확인하였다. 이번에 수행된 현장 시험은 시험포장 구간에서 노반 이하가 포화 함수비에 가까운 상태로 침투될 수 있도록 강우량 약 20 mm 정도의 물을 살수하였고 살수 후 약 2시간이 경과한 시점에서 측정된 결과이다. 이 결과, 침투로 인한 노상의 상태를 단정하기는 어려우며 보다 다양한 조

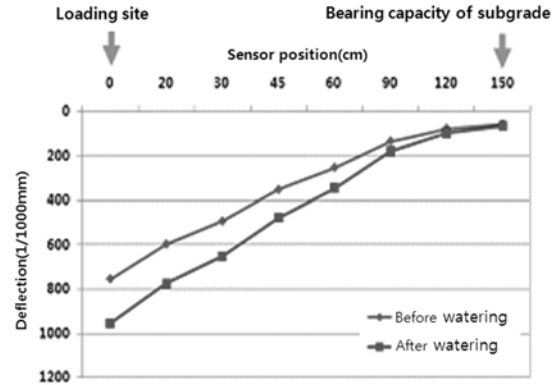


Fig. 11. Result of deflection measurement in the site 3.

건 상황에서 상태를 파악할 필요가 있다.

실내 투수시험에 의한 투수계수는 Table 4와 같다.

투수성포장은 표층, 기층, 보조기층이 각각 다른 투수계수로 구성되어 있기 때문에 투수성포장을 통한 우수의 최대 유출량, 우수의 일시 저류량 등과 같은 수문학적 분석을 위해서는 연직방향의 등가투수계수를 산정해야 한다.

포장 각 층의 투수계수는 등방성이나 각 층마다 다른 투수계수를 가지고 있다(Fig. 12). 이러한 경우에 대한 투수계수를 결정하기 위해서는 각 층의 투수계수를 결정하고 아래 식으로부터 연직방향의 등가투수계수를 산정한다.

$$k_v = \frac{h}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \dots + \frac{h_n}{k_n}} = \sum_{j=1}^n \frac{h}{\left(\frac{h_j}{k_j}\right)} \quad (1)$$

위 식을 이용하여 투수성포장의 등가투수계수를 산정한 결과는 Table 5와 같다. 표층과 기층은 시험포장구간에 사용된 동일한 재료를 사용하고 보조기층은 일본에서 적용하고 있는 최소 투수계수 기준인 1×10^{-3} cm/s를 적용하여 산출하였다.

Table 4. Result of hydrologic conductivity experiment

No.	Specimen			Measured value			Hydrologic conductivity	
	Type	Thickness (cm)	Diameter (cm)	Time (sec)	Runoff (g)	Temperature (°C)	Test (cm/sec)	15°C (cm/sec)
1	Surface course	6.88	10.18	60	3540.80	10.5	0.2625	0.3016
2	Surface course	6.83	10.17	60	3555.80	10.5	0.2623	0.3014
3	Surface course	6.71	10.19	60	3570.13	10.5	0.2575	0.2959
Average								0.2997
1	Base course	7.17	10.17	60	3201.83	10.5	0.2478	0.2848
2	Base course	6.96	10.18	60	3339.13	10.5	0.2506	0.2880
3	Base course	6.73	10.17	60	3299.90	10.5	0.2397	0.2754
Average								0.2827

Table 5. Hydrologic conductivity of pavement

Pavement	Hydrologic conductivity	Note
Surface course	0.2997 (cm/s)	porosity 23%, laboratory test
Binder course	0.2997 (cm/s)	porosity 23%, laboratory test
base course	0.2827 (cm/s)	porosity 23%, laboratory test
Subbase course	1×10^{-3} (cm/s)	minimum hydrologic conductivity

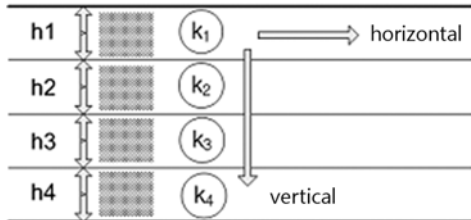


Fig. 12. Equivalent Hydrologic conductivity of pavement.

3.2. 투수성 포장 설치 전·후 유출 특성분석

투수성 포장을 모의하도록 수정된 SWMM 모형을 이용하여 대상지구 내 우수저감효과를 분석한 결과는 다음과 같다. 투수성 포장 설치가 건기 하천유출량과 우수유출에 어떤 영향을 미치는지 연속유출모의를 수행하였다. 1997년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 11년 동안 시간단위로 연속유출모의를 수행한 후 투수성 포장 설치 전·후의 11년 일평균 유출량은 Fig. 13, Fig. 14와 같다. Fig. 13, Fig. 14를 비교하면 투수성 포장의 설치로 유출량이 감소하는 것을 알 수 있다.

차도용 투수성 포장 설치 전·후 시험유역의 물순환 분석

결과는 다음 Table 6과 같다. 설치 전·후 유출률 및 침투율은 각각 81.38%, 74.35% 와 8.32%, 15.13%로 산정되었다. 대상지구의 투수성 포장의 설치로 유출량은 감소, 침투량은 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 Table 7은 유역에 침투된 강우가 지하수 층에서 이동하는 양을 산정한 것이다. 또한 Fig. 15는 Table 6과 Table 7을 도식적으로 표현한 것이다.

3.3. 투수성 포장 설치 전·후 지표유량 분석

투수성 포장의 시공효과를 객관적으로 파악하기 위해 시험유역에 투수성 포장을 시공한 경우와 시공하지 않은 경우에 대하여 시간단위로 수행된 연속유출모의 결과를 일단위로 계산하여 유황곡선을 산정하였다. 유황곡선은 차도용 투수성 포장을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량을 비교하여 나타내었다. Table 8, Fig. 16, Fig. 17 유황분석 결과 풍수량(Q₉₅), 평수량(Q₁₈₅), 저수량(Q₂₇₅), 갈수량(Q₅₅₅) 모두 증가하였다. 유역면적이 작아 유황분석의 효과는 미미한 것으로 판단된다. 유출량이 큰 경우는 투수성 포장의 설치로 인해 투수성 포장 설치 전보다 유출량이 감소하는 것을 Fig. 17에서 알 수 있다.

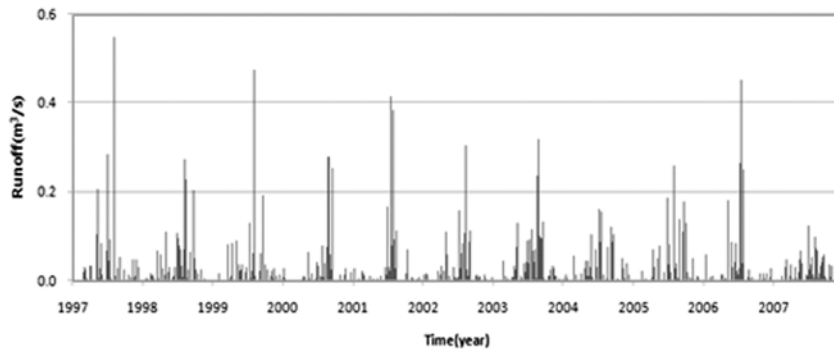


Fig. 13. Runoff before permeable pavement setup.

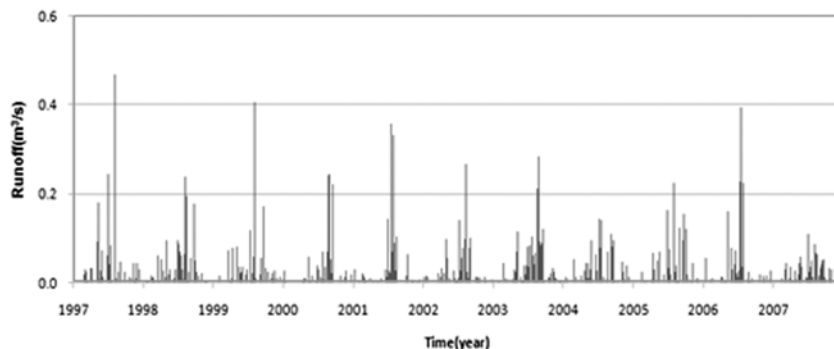


Fig. 14. Runoff after permeable pavement setup.

Table 6. Hydrologic cycle comparison by permeable pavement setup

	Before permeable pavement setup			After permeable pavement setup		
	m ³	mm	%	m ³	mm	%
Total precipitation (Rain plus snow)	2,623,917.00	10,273.75	100.00	2,623,917.00	10,273.75	100.00
Total infiltration	218,406.70	855.16	8.32	396,981.90	1,554.35	15.13
Total evaporation	329,535.60	1,290.27	12.56	325,479.20	1,274.39	12.40
Surface runoff from watersheds	2,135,410.00	8,361.04	81.38	1,950,983.00	7,638.93	74.35
Total water remaining in surface storage	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
Infiltration over the pervious area	218,406.70	855.16	-	396,981.90	1,554.35	-
Runoff rate		81.38%			74.35%	
The error in continuity		-2.27%			-1.89%	

Table 7. Groungwater comparison by permeable pavement setup

	Before permeable pavement setup			After permeable pavement setup		
	m ³	mm	%	m ³	mm	%
Total infiltration	218,406.7	855.2	100.00	396,981.9	1,554.4	100.00
Total upper zone ET	21,565.1	84.4	9.86	21,879.8	85.7	5.76
Total lower zone ET	12,086.5	47.3	5.52	12,033.3	47.1	3.17
Total groundwater flow	140,454.1	549.9	64.19	316,573.0	1,239.5	83.29
Total deep percolation	10,749.7	42.1	4.91	10,664.4	41.8	2.81
Initial subsurface storage	3,116,821	12,203.7	-	3,116,821	12,203.7	-
Final subsurface storage	3,150,767	12,336.6	-	3,135,741	12,277.8	-
Storage	33,946	132.9	15.51	18,920	74.1	4.98

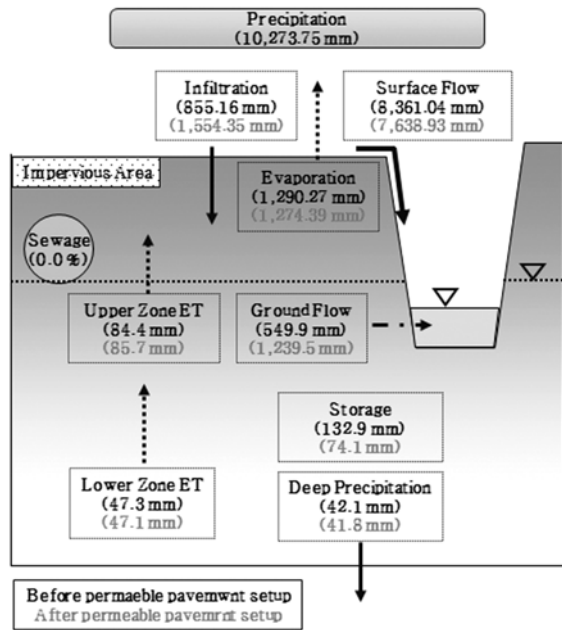


Fig. 15. Hydrologic cycle simulation.

4. 결론

본 연구에서는 차도용 투수성 포장의 설치 효과에 관하여 시험포장 실험 및 SWMM 모형을 통하여 분석하였다.

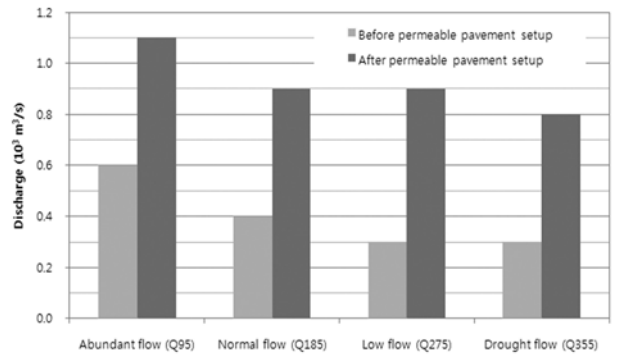


Fig. 16. Comparison of maintenance streamflow.

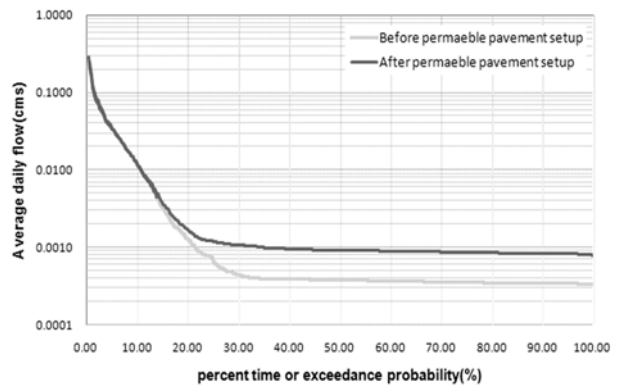


Fig. 17. Comparison of flow duration curves.

Table 8. Comparison of maintenance streamflow

Discharge	Abundant flow (Q ₉₅)	Normal flow (Q ₁₈₅)	Low flow (Q ₂₇₅)	Drought flow (Q ₃₅₅)
Before permeable pavement setup	0.0006	0.0004	0.0003	0.0003
After permeable pavement setup	0.0011	0.0009	0.0009	0.0008

(unit: m³/sec)

시험시공에 의한 최대 처짐량 및 노상에서의 처짐량에 큰 차이를 나타내고 있지 않으므로 살수 전과 살수 후에 노상에 지지력에는 차이가 없는 것을 확인하였다. 수문학적 인 분석을 위해서 산정된 투수계수를 시험구역에 적용하여 단지내 차도용 투수성 포장의 설치에 따른 물순환 개선효과 및 유출 양상을 분석하였다. 차도용 투수성 포장 설치 전·후 시험구역의 물순환 분석결과 유출률은 7.03% 감소, 침투율은 6.81% 증가하였다. 대상지구의 투수성 포장의 설치로 유출량은 감소, 침투량은 증가하는 것으로 나타났다.

국내에서는 투수성 포장의 현장 적용을 위한 역학적 특성 평가가 거의 전무한 실정이며, 관련 지침 또한 마련되어 있지 않다. 외국의 경우에는 투수성 포장의 역학적 특성 평가와 관련된 연구가 현재 진행 중이다. 따라서 본 연구에서 수행된 차도용 투수성 포장의 시험포장 실험 및 투수계수 시험결과를 종합적으로 고려하면 단지내 투수성 포장의 현장 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

국내의 투수성 포장에 대해 적용이 가능한 수정 SWMM을 이용하여 단지내 차도용 투수성 포장 적용에 따른 효과 분석을 수행하였으며, 투수성 포장 적용에 따른 물순환 효과 분석을 제시하였다. 투수성 포장의 물순환 개선효과를 지표유량분석을 통하여 정량적 제시하였으며, 향후 투수성 포장의 정량적인 분석절차에 대한 가이드라인으로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

김병훈, 강준구, 이재웅, 여운광(2001). 실험을 통한 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과에 관한 연구. 2001년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1-4.
 이재웅, 여운광, 심재현, 강태호(2001). 투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석. 대한토목학회논문집, 21(6-B), pp. 645-654.
 이정민(2007). 투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용. 박사학위논문, 부경대학교.
 전상미, 이정민, 박재현, 이상호(2009). 토조실험에 의한 투

수성 포장재의 수문학적 요소 분석. 수질보전 한국물환경학회지, 25(2), pp. 181-192.
 최선용(2005). 고성능 투-배수 콘크리트포장. 대한민국특허청, 특허출원번호 20-2004-0027862, 특허등록번호 20-0373294.
 최재진, 황의환(2002). 투수성 폴리머 콘크리트의 물리적 성질. 한국콘크리트학회 논문집, 14(1), pp. 41-48.
 한국건설기술연구원(2007). 포장면의 환경성 향상 소재 개발. 건기원 2007-098.
 한국건설기술연구원(2008). 도시부 Green Street System 기술 개발(I). 건기원 2008-115.
 Benjamin, O. B. and Derek, B. B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance or 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 Technology*, 39(2), pp. 217-224.
 Hoffman, M. S. and Thompson, M. R. (1982). Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices. *Transportation Research Record*, 852, pp. 32-41.
 Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988). *Stormwater Management Model, Version 4: User's Manual Ver. 2.1*. U. S. Army Corps of Engineers.
 Hyun, K. H., Ahn, S. S., Choi, J. J., and Park, S. Y. (2008). The effect of a decentralized rainwater management system in Korea apartment complex. *Water Practice & Technology*, 3(2).
 Lebens, M. (2008). *Minnesota Porous Pavement Research*. 2008 TERRA Pavement Conference.
 Mallick, R. B. (2000). *Design Construction and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Course*. NCAT Report No. 2000-01.
 Satoshi, F. (1995). Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes. *Water Science and Technology*, 32(1), pp. 25-32.
 Urbanas, B. R. and Stahre, P. (1994). *Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management*, Prentice-Hall, New Jersey.