

## 도시환경 개선을 위한 단지내 포장체 물순환 시스템 개발 연구

### A study on the Urban Environment Improvement Strategy by the Hydrologic Cycle System of pavement in Residential site

이정민<sup>1)</sup>, Jung-Min Lee, 김영진<sup>2)</sup>, Young-Jin Kim, 진규남<sup>3)</sup>, Kyu-Nam Jin, 한형근<sup>4)</sup>, Hyung-GEUN Han

<sup>1)</sup> 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원, Research Fellow, Land & Housing Institute

<sup>2)</sup> 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원, Research Fellow, Land & Housing Institute

<sup>3)</sup> 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원, Research Fellow, Land & Housing Institute

<sup>4)</sup> 한국토지주택공사 U-Eco City 사업단 수석연구원, Research Fellow, U-Eco City Research Center

**SYNOPSIS** : 급속한 산업화와 도시화는 도시지역 불투수 지표면적의 대부분을 차지하고 있는 도로포장면의 증가를 가져왔으며, 이것은 강우의 급속한 배수를 유발하여 도시홍수를 발생시키고 우수의 지표면 침투 저하로 인한 지하수위의 저하와 용수의 고갈 등 생태계의 불균형과 도시지역의 열섬현상과 같은 환경문제의 주요인으로 지목되고 있다.

불투수층 포장체로 인하여 왜곡되어 있는 국내 물순환 시스템의 개선 방안으로 실험에 의한 투수성 포장체의 처짐량 및 투수계수를 측정하였다. 투수성 포장을 모의하도록 수정 개발된 SWMM을 이용하여 대상지구 내 우수저감효과를 분석하였다.

투수성 포장 설치가 건기 하천유출량과 우수유출에 어떤 영향을 미치는지 연속유출모의를 수행하였다. 1997년부터 2007년까지 투수성 포장 설치 전·후의 물순환 분석결과 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.

**Keywords** : 물순환 시스템, 투수성 포장, SWMM

## 1. 서론

급속한 산업화와 도시화는 도시지역 불투수 지표면적의 대부분을 차지하고 있는 도로포장면의 증가를 가져왔으며, 이것은 강우의 급속한 배수를 유발하여 도시홍수를 발생시키고 우수의 지표면 침투저하로 인한 지하수위의 저하와 용수의 고갈 등 생태계의 불균형과 도시지역의 열섬현상과 같은 환경문제의 주요인으로 지목되고 있다. 본 연구에서는 도시면적의 대부분을 차지하고 있는 불투수층 포장체로 인하여 증가되고 있는 도시 홍수와 환경부하 문제에 대응하기 위하여, 왜곡되어 있는 국내 물순환 시스템의 개선 방안으로 실험에 의한 투수성 포장체의 특성과 우수처리기술을 분석하고자 한다. 최종적으로 단지내 투수성 포장의 설치에 따른 물순환 분석 및 유출 양상을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 국내·외 연구동향

현재까지 국내에서 투수성 포장체 연구는 미진한 실정이지만, 1990년대 후반 처음 도입되어 물순환

체계를 개선하기 위한 포장기술이나 노면온도를 저감하기 위한 포장기술은 현재 연구진행 중에 있다. 김병훈 등(2001)은 도시지역에서 적용하기 적합한 투수성 포장체에 대한 저감효과를 파악하기 위해 수리 모형실험을 실시하였다. 이정민 등(2007)은 SWMM(Storm Water Method Model)을 이용하여 안양천의 지류인 학의천 유역에서 투수성포장이 하천의 수량 증가에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

외국의 경우, 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. 그리고 Benjamin과 Derek(2003)은 불투수 아스팔트로 포장되어진 주차장을 네 가지 투수성 포장재로 대체한 후 이들이 장기적으로 유량 및 수질에 미치는 영향을 실험 연구하였다.

## 2.2 투수계수 실험

투수성포장은 포장체를 통해 빗물을 노상으로 침투시키는 구조이기 때문에 투수성포장을 구축할 때 빗물처리방법 선정이나 구조 설계, 빗물의 침투 속도를 계산하는데 각 포장체의 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 배수성포장이나 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. 투수실험의 개념도 및 실험장치는 그림 1, 그림 2와 같다.

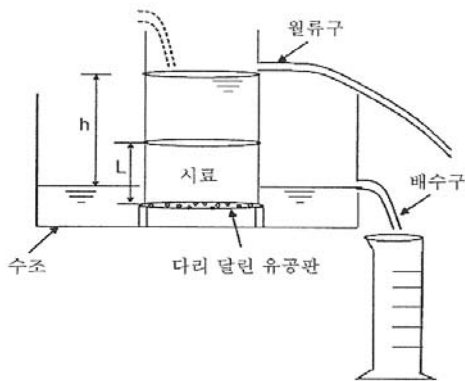


그림 1. 투수실험의 개념도



그림 2. 투수실험 장치

## 2.3 투수성 포장을 고려한 물순환 모의

본 연구에서 활용한 수정 SWMM(SWMM Ground Enhanced; SWMM\_GE)은 Kipkie의 연구를 기반으로 SWMM 최상위 버전인 4.4H를 투수성 포장을 고려할 수 있도록 수정개발된 모형이다. 그리고 투수성 포장을 고려하여 지하수 모의가 가능하도록 SWMM 4.4H 버전의 몇 가지 오류를 함께 수정한 모형이다.

시험유역은 한국토지주택공사에서 조성 중인 인천광역시 청라지구 경제자유구역을 대상유역으로 선정하였다. 시험유역은 지구를 관통하는 지방 2급 하천인 공촌천과 심곡천이 있으며, 동측에서 서측으로 유하하여 서해로 유출되고 있다. 공촌천 및 심곡천은 하천기능 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 그림 3과 같다.

1997~2007년의 강우자료 및 증발자료를 이용하여 하도의 장기유출 연속모의를 수행하였다. 인천청라

지구 UM 배수구역의 토지이용 현황을 고려하여 도로, 주차장의 불투수 지역에 투수성 포장 설치에 따른 효과를 분석하였다. UM 배수구역의 불투수 면적은 363,028 m<sup>2</sup>으로 94 %를 차지하고 있다. 투수성포장 적용지역은 전체 면적의 36 %인 139,032 m<sup>2</sup>이다(그림 4).

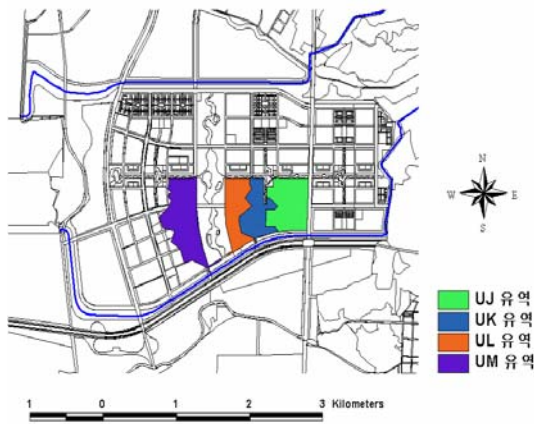


그림 3. 인천청라지구 유역현황



그림 4. 투수성포장 적용지역

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 투수계수 실험 결과

실내 투수시험에 의한 투수계수 실험 결과는 표 1과 같다.

표 1. 투수계수 실험 결과

번호	공시체			측정값			투수계수		
	종류	두께 (cm)	직경 (cm)	측정시간 (sec)	유출수량 (g)	측정온도 (°C)	시험 (cm/sec)	15°C (cm/sec)	평균
1	표층	6.88	10.18	60	3540.80	10.5	0.2625	0.3016	0.2997
2	표층	6.83	10.17	60	3555.80	10.5	0.2623	0.3014	
3	표층	6.71	10.19	60	3570.13	10.5	0.2575	0.2959	
1	기층	7.17	10.17	60	3201.83	10.5	0.2478	0.2848	0.2827
2	기층	6.96	10.18	60	3339.13	10.5	0.2506	0.2880	
3	기층	6.73	10.17	60	3299.90	10.5	0.2397	0.2754	

투수성포장은 표층, 기층, 보조기층이 각각 다른 투수계수로 구성되어 있기 때문에 투수성포장을 통한 우수의 최대 유출량, 우수의 일시 저류량 등과 같은 수문학적인 분석을 위해서는 연직방향의 등가투수계수를 산정해야 한다. 포장 각 층의 투수계수는 등방성이나 각 층마다 다른 투수계수를 가지고 있다. 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 식 (1)을 이용하여 투수성포장의 등가투수계수를 산정한 결과는 표 2와 같다. 표층과 기층은 시험포장구간에 사용된 동일한 재료를 사용하고 보조기층은 일본에서 적용하고 있는 최소 투수계수 기준인

$1 \times 10^{-3}$  cm/s를 적용하여 산출하였다.

표 2. 포장 층별 투수계수

포장층	투수계수	비고
표층	0.2997(cm/s)	공극률 약 23%, 실내투수실험
중간층	0.2997(cm/s)	공극률 약 23%, 실내투수실험
기층	0.2827(cm/s)	공극률 약 23%, 실내투수실험
보조기층	$1 \times 10^{-3}$ (cm/s)	최소 투수계수 기준

### 3.2 투수성 포장 설치 전 · 후 유출 특성분석

투수성 포장을 모의하도록 수정 개발된 SWMM을 이용하여 대상지구 내 우수유출 저감효과를 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 그림 5, 그림 6과 같다.

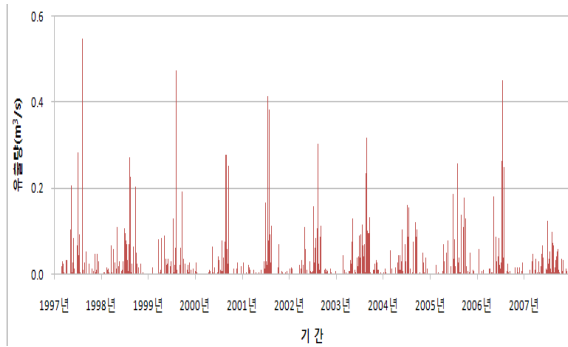


그림 5. 투수성포장 설치전의 유출량

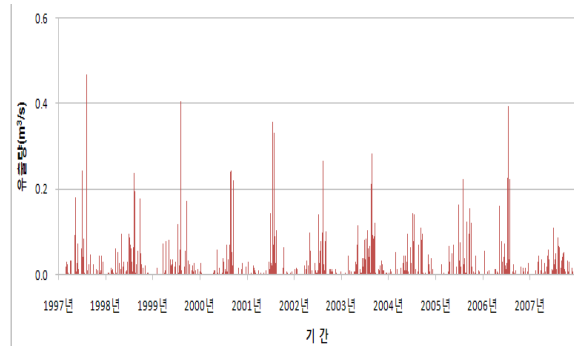


그림 6. 투수성포장 설치후의 유출량

투수성 포장 설치 전 · 후의 시험유역의 물순환 분석결과는 다음 표 3과 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. 표 4는 투수성 포장 설치 전 후의 지하수 유출흐름을 분석한 것이다.

표 3. 투수성포장 설치 전 · 후 물순환 분석

구분	설치전			설치후		
	m <sup>3</sup>	mm	%	m <sup>3</sup>	mm	%
Total Precipitation	2,623,917.0	10,273.75	100.00	2,623,917.0	10,273.75	100.00
Total Infiltration	218,406.7	855.16	8.32	396,981.9	1,554.35	15.13
Total Evaporation	329,535.6	1,290.27	12.56	325,479.2	1,274.39	12.40
Surface Runoff from Watersheds	2,135,410.0	8,361.04	81.38	1,950,983.0	7,638.93	74.35
Water remaining in Surface Storage	0.0	0.00	-	0.0	0.00	-
Infiltration over the Pervious Area	218,406.7	855.16	-	396,981.9	1,554.35	-
Runoff Rate	81.38 %			74.35 %		
The error in continuity	-2.27 %			-1.89 %		

표 4. 투수성포장 설치 전·후 지하수 분석

구분	설치전			설치후		
	m <sup>3</sup>	mm	%	m <sup>3</sup>	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

#### 4. 결론

본 연구에서는 투수성 포장의 설치 효과에 관하여 시험포장 투수계수실험 및 SWMM 모형을 통하여 분석하였다. 국내에서는 투수성 포장체의 현장 적용을 위한 역학적 특성 평가가 희소한 실정이며, 관련 지침 또한 진행 중이거나 마련되지 않은 실정이다. 외국의 경우에 투수성 포장체의 역학적 특성 평가와 관련연구가 현재 진행 중이다. 따라서 본 연구에서 수행된 투수성 포장체의 시험포장실험 및 투수계수 실험결과를 종합적으로 고려하면 단지내 투수성포장의 현장 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

국내의 투수성 포장체에 대해 적용 가능한 수정 SWMM을 이용하여 투수성 포장체 적용에 따른 효과 분석을 수행하였으며, 투수성 포장체 적용에 따른 물순환 효과분석을 제시하였다. 투수성 포장체의 물순환 개선효과는 지표유량분석을 통하여 정량적 제시하였으며, 향후 투수성포장의 정량적인 분석절차에 대한 가이드라인으로 활용할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. 김병훈, 강준구, 이재응, 여운광(2001), "실험을 통한 투수성 포장재의 우수유출 저감 효과에 관한 연구", 대한토목학회 정기학술대회 논문집
2. 이정민(2007), "투수성 포장과 침투 트렌치를 고려한 수정 SWMM의 개발 및 적용", 부경대학교 대학원 박사학위논문
3. 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.
4. Eric, W., Anja, V.L., Per, J., and Peter, S.M. (1999). "Hydrologic behaviour of stromwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation." Water Science Technology, Vol. 39, No. 2, pp. 217-224.
5. Satoshi, F. (1995). "Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes." Water Science and Technology, Vol. 32, No. 1, pp. 25-32.