Permeable Coastal Pavement Structure for Shore Protection and Removal of Non-point Source Pollutants

Yun-Shik Choi^{ID*}, Jong-Yeong Kim^{ID*}, Sangsoo Han^{ID**} and Soonchul Kwon^{ID*}

^{*}Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

^{**}SamhanCI Corp., Busan, Korea

연안재해 방지 및 비점오염원 유출저감을 위한 투수블록의 특성 연구

최윤식^{ID*} · 김종영^{ID*} · 한상수^{ID**} · 권순철^{ID*}

^{*}부산대학교 사회환경시스템공학과

^{**}(주)삼한CI

KEY WORDS: Stormwater runoff 우수 유출, Non-point source pollutants 비점오염원, Permeable block 투수블록, Permeability area ratio 투수 면적비, Permeability coefficient 투수계수, TSS removal efficiency TSS 제거효율

ABSTRACT: Due to climate change, coastal areas are being flooded with torrential rain, typhoons, and tsunamis. In addition, non-point source pollutants (NPSs) that accumulated on the ground, streets, and buildings during the dry season are washed off by rain and stormwater runoff, which adds to the damage associated with environmental pollution, e.g., pollution that makes its way into the ocean. Recently, low impact development (LID) has been considered as a means of controlling water circulation and NPSs. In the coastal area, permeable blocks have been constructed mainly to reduce the flood damage caused by waves. Some important design factors that must be considered to ensure long-term performance are the permeability coefficient, clogging, and the efficiency of the removal of total suspended solids (TSS), but currently there are no standardized design criteria or testing techniques that are used worldwide. Herein, we analyzed the permeability coefficient and the TSS removal efficiency tendency according to the permeability area ratio with an easily-detachable, permeable block filled with calcinated yellow soils as the filter media. Our lab-scale tests indicated that, when the permeability area ratio was 25%, the reduction of the permeability coefficient after clogged was 11%, which was a significant decrease compared to other cases. Permeability persistence increased when the permeability area ratio increased from 50% to 75%. The TSS removal efficiency decreased as the permeability area ratio increased. Our pilot-scale test indicated that the TSS removal efficiency was more than 80% higher in all cases. We also found that the permeability persistence was excellent as the permeability area ratio increased, and, in actual construction, it is effective to set 5.3% of the total area as permeable area in terms of permeability and economic feasibility.

1. 서 론

우리나라는 급격히 진행된 도시화와 산업화로 인한 불투수 면적의 증가와 더불어 기후변화에 따른 집중호우로 인해 우수유출량이 증가하고 있다(Hong, 2006). 특히, 해안 지역에서는 태풍, 쓰나미, 해수면 상승 등의 재해가 빈번하게 일어나고 있다(Kim et al., 2019). 앞서 언급한 재해로 인해 침수피해를 입고 있어 이러한 재해의 피해를 줄이기 위한 대책이 시급하다(Kim et al., 2007). 또한, 오랜 무강우 기간에 축적된 표면의 토사나 분진, 중금속 등의 비점오염 물질은 태풍 내습 시 강우유출수에 의해 씻겨 내려 하구로 유입되어, 해안의 수질오염과 생태계 교란 등의 환경오염피해를 가중시

킨다(Kim and Kang, 2004). 시화호의 경우, 강우유출수로 인해, 막대한 양의 비점오염물질이 유출되어 수질을 악화시키고 있다(Ra et al., 2011).

이에 대해 기존의 불투수성 포장도로를 우수의 침투를 허용하는 투수성 포장으로 대체하여 물 순환을 확보하고 비점오염물질을 제어하는 저영향개발(Low impact development, LID) 연구가 전세계적으로 진행되고 있다(Dietz, 2007). 그 중, 유공포장, 투수블록과 같은 다공성 제품들의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 우리나라는 환경부(Ministry of Environment)(ME, 2016)에서 ‘비점오염저감 시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(이하 ‘매뉴얼’)'을 발간하여, 자연형 시설과 저영향개발기법 시설, 장치형 시설로 구분해 각 시

Received 1 November 2019, revised 17 November 2019, accepted 27 November 2019

Corresponding author Soonchul Kwon: +82-51-510-7640, sckwon@pusan.ac.kr, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3764-331X>

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

설의 설치 및 관리, 운영 기준에 대한 세부적인 기준을 제시하고 있다. 서울특별시에서는 ‘투수블록 포장 설계, 시공 및 유지관리 기준(Ver. 2.0)’을 시행하고, 그에 따라 투수포장체의 성능을 평가하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2013).

투수블록은 Fig. 1과 같이, 우수의 투수가 가능한 블록으로, 블록 공극을 통해 우수의 침투 및 저류를 유도하여 유출을 저감시키고, 미세한 오염물질을 제거하는 등의 친환경적인 효과를 가지고 있어 물순환 및 수생태계를 도시개발 전 상태로 개선할 수 있다(Brattebo and Booth, 2003). 더욱이, 해안지역의 경우, 도심지와는 다르게 월파로 인한 직접유출과 홍수 피해를 줄일 수 있다는 장점이 있어 유용하게 사용된다(Dickson et al., 2011). 특히, 부산시 해운대구 지역과 같은 연안도시지역의 경우, 월파량을 고려하였을 때의 침수면적이 일반적인 도시침수에 비해 16.4%가 증가하여, 월파량을 고려한 배수설계가 반드시 요구된다(Song et al., 2017). 하지만, 시공 후 우수유출수의 오염물질이나 분진과 같은 미세입자가 투수블록 공극으로 유입됨에 따라 공극이 급속도로 폐색되는 현상이 발생하여 투수 성능을 정상적으로 발휘하지 못하는 경우가 발생하고 있다(Pezzaniti et al., 2009). 투수블록 공극의 폐색으로 인한 투수 성능의 상실에 대한 선행 시공 사례로는 서울특별시 보고서가 있으며, 투수블록 시공 후 6개월 후의 투수 성능을 비교한 결과, 공극이 막혀 투수 성능이 상실되었다고 발표한 바 있다(Seoul Metropolitan Government, 2010). 투수블록의 투수계수와 폐색현상은 장기적인 공용 성능을 보장할 수 있는 중요한 설계 인자이지만, 현재 국내외에서 표준화된 설계 기준과 시험 기법이 없는 실정이다.

더욱이, 투수성포장의 설치 면적에 대해서는, Koo et al.(2013)이 Storm water management model(SWMM)을 이용하여 투수성포장 설치 면적을 1%에서 15%까지 증가함에 따른 유출저감 효과를 분석한 바 있다. 반면에, 투수블록을 시공함에 있어 투수블록의 설치 면적에 따른 유출저감 효과나 비점오염 제거 효과

Fig. 1 Conceptual diagram of Permeable block

에 대한 실험적 연구나 실증자료는 부족한 상황이다.

본 연구의 목표는 연안재해 방지 및 해안가 비점오염원 유출 저감을 위해 탈부착과 분리가 용이한 투수블록에 소성황토를 여재로서 채워 전체 면적 대비 설치 면적에 따른 투수지속성과 비점오염원의 제거효율을 분석하여, 시공 시의 우수유출 저감 효율과 비용 경제성을 고려한 투수블록 설치의 최적의 비를 찾는 데 있다. Lab-scale 실험에서는 투수 면적비에 따른 투수계수와 Total suspended solid(TSS) 제거효율의 경향성을 분석하였고, Pilot-scale 실험에서는 실제 시공 시에 적절한 전체 면적 대비 투수블록의 설치 면적을 찾고자 투수 면적비에 따른 투수지속성 및 TSS 제거효율을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 Lab-scale 실험 방법

Lab-scale에서 투수계수 및 TSS 제거효율을 관찰할 수 있는 정수위 투수계수 시험장비가 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 그림과 같이, 본 장비는 물과 오염물의 교반 및 시험체에 혼합수의 공급을 위한 교반기(Agitator system), 시료를 장착하고 정수도를 유지시켜 투수계수를 측정할 수 있도록 하는 시험체, 그리

Fig. 2 Schematic diagram of Lab-scale and Pilot-scale experiment set-up

(a) Test-bed (20 cm × 20 cm)

(b) Agitator system (One ton capacity)

Fig. 3 Equipment of Lab-scale experiment**Table 1** Experimental conditions in Lab-scale

Parameter	Permeable area ratio [%]	Hydraulic gradient (<i>i</i>)	TSS size [μm]	TSS average concentration [mg/L]	Operation time [min]	Sampling time [min]			
<i>R_L</i> 25	25	1.5	Particle 1 - <i>D</i> ₅₀ : 35	300	60	10			
<i>R_L</i> 50	50								
<i>R_L</i> 75	75		Particle 2 - <i>D</i> ₅₀ : 130						
<i>R_L</i> 100	100								

고 시험체를 통과한 물의 시간 당 유량을 측정하기 위한 유량 탱크(Outflow tank)로 구성된다.

교반기는 최대 350rpm의 회전속도로 최대 1t의 물과 오염물을 교반할 수 있도록 설계하였다. 고형물 부하 실험에서 사용할 오염물에 가장 적합한 회전 속도를 결정하기 위하여 교반기의 신뢰성을 검토하였다. 교반기의 회전속도를 변수로 두어 수행하였고, 교반기의 회전속도를 300rpm으로 설정하였을 때 혼합수의 목표 농도와 실제 농도가 가장 근접함을 확인하여, 본 실험은 300rpm으로 진행하였다.

교반기에 들어갈 고형물은 ‘매뉴얼’의 입자 입경 $63\mu\text{m}$ 이하 70~80% 및 $63\sim 200\mu\text{m}$ 20~30%의 구성비 조건을 따라 규사의 평균입경(D_{50})이 $35\mu\text{m}$ 인 ‘Particle 1(이하 ‘P1’)'과 규사의 평균입경(D_{50})이 $130\mu\text{m}$ 인 ‘Particle 2(이하 ‘P2’)'시료를 8:2의 비율로 혼합하여 사용하였다(Fig. 4). 시료의 입도분석은 Sympatec GmbH

사의 QICPIC 입도분석기(PSA, Particle size Analyser) 장비로 유동영상분석법을 사용하여 분석하였다. 교반기에 들어갈 ‘P1’과 ‘P2’의 유입농도는 ‘매뉴얼’의 여과형 시설의 실험방법에 근거하여 300ppm(mg/L)의 농도로 투입하여 교반하였다.

교반기에서 유출된 혼합수는 정수위 투수계수 시험체로 공급된다. 본 연구에서는 시험체의 표층과 기층의 투수성이 높고, 사질토로 이루어져 있어, 정수위 투수시험법을 적용하였다. 시험체는 20cm×20cm 정사각형 단면의 4개 층을 결합하여 제작하였다. 4개의 층은 정수두를 유지하기 위한 높이 20cm의 정수두층부(Constant water level layer), 높이 20cm의 표층부(Surface layer), 높이 15cm의 기층부(Base layer), 시험체를 통과한 혼합수를 모아 배출시키는 집수부(Water collector)로 구성된다. 투수계수 시험장비의 성능 검증에 대해서 Kim et al.(2019)이 동수경사에 따른 정수위 투수계수를 산정한 결과, 선형 추세선의

Fig. 4 Particle size distribution of TSS

Fig. 5 Scheme and picture of the permeable block system

$R^2 = 0.98$ 의 높은 상관관계를 검증한 바 있다.

표층부에는 보도용 투수 블록포장 설계 규정에 따라 높이 6cm의 투수블록 및 보도블록을 설치하였다(Seoul Metropolitan Government, 2013). 투수블록은 Fig. 5와 같이 분리 및 탈부착이 용이하도록 제작하였다. 보도용 투수 블록포장 설계 규정에 따라 높이 6.0cm로 제작하고, 일반 보도블록과 동일하게 가로 23.2cm, 세로 11.5cm로 제작하였다.

투수 면적비의 영향을 살펴보기 위해, 전체면적 대비 투수블록 설치 면적을 25%, 50%, 75%, 100%로 나누어 case에 따른 경향을 살펴보고, 투수 면적비는 식 (1)을 따라 산정하였다(Fig. 6).

$$R_L = \frac{P_A}{E_A} \times 100 \quad (1)$$

R_L : Lab-scale test의 투수 면적비 [%]

P_A : 투수블록 설치 단면적 [m^2]

E_A : Test-bed 단면적 [m^2]

Fe_2O_3 , MnO 는 중금속 흡착능력이 뛰어나 비점오염원 흡착제로써 적절하다(Cho et al., 2004). 이러한 선행 연구를 참고하여, 여재로서 소성황토블록의 파편을 선정하였으며, 여재의 화학성분 함량은 Fe_2O_3 75.7%, MnO 1.29% 등으로 구성되어있다(Lee et al., 2017). 또한, 여재의 입도분포는 오염원 저감 효율에 있어

중요한 설계인자이다(Jung et al., 2018). Fig. 7은 여재의 입도분포를 나타낸다. 소성황토 여재의 D_{50} 은 11.58mm이고, 60.8%의 공극률을 가진다. 투수블록에서 공극의 크기는 오염원 저감 효율에 있어 중요하며, 공극률이 클수록 고형물을 많이 포획할 수 있고, 전속도의 감소가 적어 폐색이 되기까지 오래 걸려 투수지속성이 크다.

투수성능은 동수경사(i)를 1.5로 설정하여 정수두 상태에서 정수위 투수계수를 산출하였다. 무부하 상태와 고형물 부하 상태에서 모두 60분간 실험을 진행하였고, 순간유출유량을 측정하여, 투수계수(k)를 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$k = \frac{Q}{A \times t \times i} \quad (2)$$

Q : 유출유량 [m^3/min]

A : Test-bed 단면적 [m^2]

t : 시간 [min]

i : 동수경사

투수 면적비에 따른 TSS의 제거효율을 평가하기 위해, 고형물 부하실험 시, 10분 간격으로 유입수와 유출수의 샘플을 채수하였고, 수질오염 공정실험기준(ME, 2017)에 따라 부유물질의 농도를 분석하였다. TSS 제거효율(ΔC)은 식 (3)과 같이 계산하였다.

Fig. 6 Experiment set-up according to permeability area ratio cases in Lab-scale. Note that R_L25 is Permeable area ratio of 25% over surface area, R_L50 50 %, R_L75 75 %, and R_L100 100 %.

(a) Calcinated yellow soil

(b) Particle size distribution of media

Fig. 7 Picture and particle size distribution of media

$$\Delta C = \frac{(C_{in} - C_{eff})}{C_{in}} \times 100$$

C_{in} : 유입 오염물 농도 [mg/L]

C_{eff} : 유출 오염물 농도 [mg/L]

(3) 2.2 Pilot-scale 실험 방법

Lab-scale 실험 평가에서는 비교적 작은 면적에서의 투수 면적비를 고려한 평가였다면, Pilot-scale 실험 평가에서는 실제 시공 시에 적절한 투수 면적비를 산정하였다. 따라서, Table 2와 같이 대면적에서의 투수 면적비에 따른 투수성능 및 TSS 제거

(a) Test-bed (1 m × 1 m)

(b) Pilot-scale test appearance

Fig. 8 Equipment of Pilot-scale experiment**Table 2** Experimental conditions in Pilot-scale test

Parameter	Permeable area ratio [%]	Linear velocity [m/h]	TSS size [μm]	TSS average concentration [mg/L]	Operation time [min]	Sampling time [min]
$R_{p2.7}$	2.7	20	Particle 1 - D_{50} : 35 Particle 2 - D_{50} : 130	300	60	10
$R_{p4.0}$	4.0					
$R_{p5.3}$	5.3					

효율을 파악하기 위해, 식 (4)를 따라 투수 면적비를 산정하여, 전체 면적에서 2.7%, 4.0%, 5.3%의 면적에 투수블록을 각각 설치한 3개의 Case를 실험하였다(Fig. 9). 투수성능은 모든 Case 동일한 유량을 유입시켜, 투수 면적비에 따른 유출유량의 차이를 분석하였다.

$$R_p = \frac{P_A}{E_A} \times 100 \quad (4)$$

R_p : Pilot-scale test의 투수 면적비 [%]

P_A : 투수블록 설치 단면적 [m^2]

E_A : Test-bed 단면적 [m^2]

Pilot-scale에서 대면적에서의 투수 면적비에 따른 투수성능 및 TSS 제거효율을 관찰할 수 있는 시스템이 Fig. 2와 Fig. 8에 나타났다. Lab-scale과 같이, 본 시스템은 교반기와 유량탱크가 있으며, ‘투수블록 포장 설계, 시공 및 유지관리 기준(Ver. 2.0)’ (Seoul Metropolitan Government, 2017)에 따라 1m×1m 면적의 정사각형 단면의 Test-bed를 제작하여 설치하였다. 교반기와 교반기에 들어갈 오염물은 Lab-scale과 동일하게 사용하였다.

시험체는 ‘투수블록 포장 설계, 시공 및 유지관리 기준(Ver. 2.0)’을 따라 표층(Surface layer)부터 6cm 높이의 투수블록 (Permeable block) 및 보도블록을 설치하였고, 받침안정층(Stable layer)은 3cm 높이의 규사를 다짐하여 설치하였다. 투수기층 (Base layer)은 균등계수 10 이상, 곡률계수 1~4 범위의 골재를

(a) $R_{p2.7}$ (b) $R_{p4.0}$ (c) $R_{p5.3}$ **Fig. 9** Experiment set-up according to permeability area ratio cases in pilot-scale. Note that $R_{p2.7}$ is Permeable area ratio of 2.7 % over surface area, $R_{p4.0}$ 4.0 %, and $R_{p5.3}$ 5.3 %.

15cm 높이로 설치하였다. 받침안정층과 투수기층의 경계를 유지하기 위하여 층 사이에 토목 섬유(Geo-textile)를 배치하였다. 실험의 목적인 투수 면적비의 영향을 분석하기 위해 투수블록을 각각의 Case에 따라 설치하고, 그 외의 면적은 불투수지역(Impermeable area)으로 설정하여 실험을 진행하였다.

무부하 시험은 약 20m/h의 선속도로 청수를 60분 동안 공급하였고, 유출유량을 측정하였다. 고형물 부하 실험에서 사용된 유입수는 '매뉴얼'의 고형물의 입도 분포 특성을 고려하여 Lab-scale과 같이 'P1'과 'P2'시료를 8:2의 구성 비율을 갖도록 혼합하여 300ppm(mg/L)의 유입농도로 Test-bed에 약 20m/h의 선속도로 공급하였다. 순간 유출유량은 0.1667s 간격으로 측정하여 실험이 진행됨에 따라 나타나는 유출유량을 파악하였다. TSS 제거효율을 평가하기 위해, Lab-scale 실험과 동일하게 10분 간격으로 유입수와 유출수의 샘플을 채수하여 부유물질 농도를 측정하였다.

3. 연구 결과

3.1 Lab-scale 실험 결과 분석

3.1.1 투수 면적비에 따른 투수성능 분석

먼저 무부하 상태에서 투수 면적비에 따른 투수계수 값을 확인하기 위해 청수를 이용하여 실험을 수행하였다. 20cm×20cm 면적의 test-bed를 대상으로 청수를 1시간 동안 유입시켜 R_L25 , R_L50 , R_L75 , R_L100 의 4개의 Case를 비교 분석하였다(Fig. 10). R_L25 는 투수계수가 256mm/s, R_L50 은 250mm/s, R_L75 는 275mm/s, R_L100 은 273mm/s로 1시간 동안 일정하게 나타났다. 투수계수는 투수 면적비가 R_L25 와 R_L50 , 그리고 R_L75 와 R_L100 이 각각 큰 차이 없이 유사한 값이 나타났고, 50%에서 75%로 투수 면적비가 상승할 때 투수계수의 차이가 약 20mm/s 생기는 것을 확인할 수 있다.

이후, 동일한 Test-bed에 고형물을 교반한 실험수를 부하하여 실험을 수행하였다(Fig. 11). 투수계수는 무부하 상태와 달리 1

Fig. 10 Permeability coefficient of permeable block system for four area ratio cases in pure water condition. Note that R_L25 is Permeable area ratio of 25 % over surface area, R_L50 50 %, R_L75 75 %, and R_L100 100 %.

Fig. 11 Permeability coefficient of permeable block system for four area ratio cases in solid loaded condition. Note that R_L25 is Permeable area ratio of 25 % over surface area, R_L50 50 %, R_L75 75 %, and R_L100 100 %.

시간 동안 고형물이 부하됨에 따라 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다. R_L25 는 초기투수계수 220mm/s에서 136mm/s로 점차적으로 감소하였다. R_L50 은 220mm/s에서 143mm/s로, R_L75 는 250mm/s에서 175mm/s로, R_L100 은 250mm/s에서 190mm/s로 각각 감소하였다. 전체적인 투수계수 감소율은 투수 면적비가 증가할수록 각각 38%, 35%, 30%, 그리고 24%로 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 투수계수가 급격히 저하하기 시작하는 시점인 20분부터의 투수계수 감소율은 R_L25 의 경우 11.0%로, R_L50 , R_L75 , R_L100 의 6.5%에 비해 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 이는 투수 면적비가 25%일 때 폐색이 빠른 속도로 진행되어 투수 지속성이 현저히 낮아지는 현상이며, 투수 면적비가 증가할수록 고형물이 더 넓은 면적에 천천히 폐색되기에 투수지속성이 뛰어난 것으로 보여진다. 또한, R_L25 와 R_L50 , 그리고 R_L75 와 R_L100 은 투수계수 값이 각각 유사하게 나타났다. 무부하 상태에서의 실험과 동일하게 투수 면적비가 50%에서 75%로 상승할 때 투수성능의 차이가 생긴다는 것을 확인할 수 있다.

3.1.2 투수 면적비에 따른 TSS의 제거효율 분석

투수 면적비에 따른 TSS 제거효율은 R_L25 에서 평균 79.4%, R_L50 은 평균 82.0%, R_L75 는 평균 71.7%, R_L100 에서 평균 74.9%의 제거효율을 보였다(Fig. 12). 투수 면적비의 변화에 따른 제거효율은 앞의 투수성능과 같이 투수 면적비가 50%에서 75%로 상승할 때 차이가 생기는 것을 알 수 있다. R_L25 에서는 유입수 평균농도 272.5mg/L로 초기 제거효율은 76.1%에서 실험이 진행됨에 따라 제거효율은 84.0%까지 상승하였다. R_L50 에서는 유입수 평균농도 284.2mg/L로 초기 제거효율 71.9%에서 86.8%까지 상승하였다. R_L75 는 유입수 평균농도 269.2mg/L에서 초기 제거효율 64.7%에서 79.8%까지 상승하였고, R_L100 은 유입수 평균농도 271.0mg/L에서 초기 제거효율 65.2%에서 72.7%까지 상승함을 볼 수 있다. 모든 case에서 유입 TSS에 의해 공급이 폐색됨에 따라 여과작용이 더 뚜렷하게 나타나 TSS 제거효율이 약소하게 증가하는 현상으로 보여진다. 또한, 투수 면적비가 작을수록

Fig. 12 TSS removal efficiency of each cases in Lab-scale. Note that $R_L 25$ is Permeable area ratio of 25 % over surface area, $R_L 50$ 50 %, $R_L 75$ 75 %, and $R_L 100$ 100 %.

록 TSS 초기 제거효율이 뛰어남을 알 수 있으나, 폐색 현상이 더 빠른 속도로 진행되어 장기적인 공용 성능을 보장할 수 없다는 문제가 있다.

3.2 Pilot-scale 실험 결과 분석

3.2.1 투수 면적비에 따른 투수성능 분석

Lab-scale 실험과 동일하게 먼저 청수를 이용한 무부하실험과 고형물 부하실험을 진행하였다. 무부하 상태의 경우, 시간당 유출량은 $R_p 2.7$, $R_p 4.0$, $R_p 5.3$ 의 3가지 Case 순서대로 약 8.27L/min, 10.61L/min, 11.96L/min으로 나타났다(Fig. 13). 이는 투수면적이 증가할수록 시간당 유출량이 증가함을 알 수 있다. 무부하 상태의 경우 TSS에 의한 폐색이 일어나지 않으므로 유출량이 감소하지 않고 0.5L/min 오차 범위 이내로 일정한 값을 유지하여 충분한 투수성능을 발휘하는 것을 확인하였다.

고형물 부하실험에서의 초기 시간당 유출량은 $R_p 2.7$, $R_p 4.0$, $R_p 5.3$ 의 3가지 Case 순서대로 각각 7.76L/min, 9.90L/min, 10.85 L/min으로 나타났으며, 고형물 부하에 따른 폐색으로 인해 실험 종료 시의 시간당 유출량은 각각 7.03L/min, 9.17L/min, 10.72L/min으로 나타났다(Fig. 14). 초기 유출량에 비해 투수성능이 각각 9.41%, 7.33%, 1.14%로 감소하였음을 확인하였다. 투수

가능한 면적이 증가할수록 고형물이 부하될 때에 투수지속성이 증가한다. 전면적의 5.3%를 투수면적으로 설정하였을 때 투수지속성 관점에서 가장 효율적임을 파악하였다.

Fig. 13 Outflow of Pilot-scale system for three area ratio cases in pure water condition. Note that $R_p 2.7$ is Permeable area ratio of 2.7 % over surface area, $R_p 4.0$ 4.0 %, and $R_p 5.3$ 5.3 %.

Fig. 14 Outflow of Pilot-scale system for three area ratio cases in solid loaded condition. Note that $R_{p2.7}$ is Permeable area ratio of 2.7 % over surface area, $R_{p4.0}$ 4.0 %, and $R_{p5.3}$ 5.3 %.

3.2.2 투수 면적비에 따른 TSS의 제거효율 분석

TSS 제거효율은 Lab-scale과 동일하게 동시간대 유입농도와 유출농도의 비에 의하여 산출되었다. ‘매뉴얼’에 따르면, 장치형 시설 기준 TSS 제거효율이 80% 이상이 되도록 설치해야하며, 이 실험의 경우 장치형이 아닌 침투시설임에도 불구하고 투수

면적비와 상관없이 모든 Case가 기준을 충족하였다. TSS의 평균 제거효율은 $R_{p2.7}$ 에서 92.8%, $R_{p4.0}$ 에서 90.2%, $R_{p5.3}$ 에서 90.8%로 나타났고, $R_{p2.7}$ 이 제거효율이 가장 크게 나타났다(Fig. 15). $R_{p2.7}$ 은 유입수 평균농도 288.0mg/L로 초기 제거효율은 83.2%에서 최종 제거효율은 95.3%로 상승하였고, $R_{p4.0}$ 은 유입수 평균농도 284.9mg/L로 초기 제거효율은 78.8%에서 최종 제거효율은 93.3%로 상승, $R_{p5.3}$ 은 유입수 평균농도 282.4mg/L로 초기 제거효율은 81.0%에서 최종 제거효율은 94.2%로 상승하였다. 이는 유입된 TSS가 Test-bed에 여과되면서 공극이 점차 막히는 폐색이 진행되었고 이에 따라 TSS 제거효율이 점차 높아지는 현상이다. 3.1절의 Lab-scale 실험에서의 제거효율보다 월등히 뛰어남을 알 수 있는데, 실제 시공에 적합하도록 투수 면적비를 작게 설정하여 TSS 제거효율이 큼을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연안재해 방지 및 해안가 비점오염원 유출저감을 위해 소성항토를 여재로서 채운 투수블록을 전체 면적 대비 설치 면적을 달리하여 투수지속성과 비점오염원의 저감 효율을 분석하였다. Lab-scale에서는 4가지의 투수 면적비에 따른 투수계수와 TSS 제거효율의 경향성을 분석하였고, Pilot-scale에

Fig. 15 TSS removal efficiency of each cases in Pilot-scale. Note that $R_{p2.7}$ is Permeable area ratio of 2.7 % over surface area, $R_{p4.0}$ 4.0 %, and $R_{p5.3}$ 5.3 %.

서는 3가지의 투수 면적비에 따른 투수지속성 및 TSS 제거효율을 분석하였다. 주요 분석 결과는 다음과 같다.

(1) Lab-scale 실험 결과, 고형물을 부하한 상태에서의 정수위 투수계수는 모든 Case 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다. 투수 면적비가 25%일 때 폐색 후의 투수계수 감소율은 11.0%로 다른 투수 면적비의 Case의 투수계수 감소율인 6.5%에 비해 급격히 감소함을 확인하였다. 또한, 무부하 상태와 같이 투수 면적비는 50%에서 75%로 상승할 때 투수지속성의 차이가 생김을 확인하였다.

(2) 투수 면적비에 따른 TSS 제거효율을 분석한 결과, 모든 Case에서 평균 71.7 ~ 82.0%의 제거효율을 보였고, 투수 면적비가 증가할수록 TSS 제거효율은 감소하였다. 또한, 시간이 지남에 따라 제거효율은 약소하게 상승하였다. 폐색이 진행될수록 공극이 줄어들어 여과작용이 더 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다.

(3) Pilot-scale 실험 결과, 고형물을 부하한 상태에서의 시간당 유출량은 Lab-scale과 동일하게 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다. 초기 유출량에 비해 투수성능은 각각 9.41%, 7.33%, 1.14% 감소함을 확인하였고, 투수 면적비가 증가할수록 투수지속성이 뛰어난 것을 확인하였으며, 실제 시공 시, 전면적의 5.3%를 투수면적으로 설정하는 것이 투수성능 및 경제성 관점에서 가장 효율적이라 판단된다.

(4) 투수 면적비에 따른 TSS 제거효율을 분석한 결과, 모든 Case에서 80% 이상의 높은 제거효율을 보였다. 실험이 진행됨에 따라, Test-bed의 공극 폐색으로 인해 제거효율은 10~15%가 상승하였다. 실제 시공 환경에 맞게 투수 면적비를 작게 설정하였을 때, 비점오염 제거 측면에서 뛰어난 것을 확인하였다.

후 기

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C2008733).

References

- Brattebo, B.O., Booth, D.B., 2003. Long-term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems. *Water Research*, 37(18), 4369-4376. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)
- Cho, H.G., Park, S., Choo, C.O., 2004. The Copper Adsorption onto Hwangto Suspension from Pankok-ri, Kosung-gun. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 17(3), 209-220.
- Dickson, D.W., Chadwick, C.B., Arnold, C.L., 2011. National LID Atlas: A Collaborative Online Database of Innovative Stormwater Management Practices. *Marine Technology Society Journal*, 45(2), 59-64. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.2.7>
- Dietz, M.E., 2007. Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water, Air and Soil Pollution*, 186(1-4), 351-363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>
- Hong, C., 2006. Understanding The Affect of Preliminary Disaster Inspection and Consultation System. *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 54(5), 21-27.
- Jung, J., Cao, S.C., Shin, Y.H., Al-Raoush, R.I., Alshibli, K., Choi, J.W., 2018. A Microfluidic Pore Model to Study the Migration of Fine Particles in Single-phase and Multi-phase Flows in Porous Media. *Microsystem Technologies*, 24(2), 1071-1080. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3462-1>
- Kim, J.Y., Choi, Y.S., Kim, T., Lee, S.H., Kwon, S., 2019. Study on the Permeability and TSS Removal Efficiency of Permeable Pavement Using Constant Head Particle Loading Test. *Journal of Coastal Research*, 91(sp1), 236-240. <https://doi.org/10.2112/SI91-048.1>
- Kim, L.H., Kang, J.H., 2004. Determination of Event Mean Concentrations and Pollutant Loadings in Highway Storm Runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 20(6), 631-640.
- Kim, D.S., Kim, J.M., Lee, G.H., Lee, S.D., 2007. Inundation Analysis Considering Water Waves and Storm Surge in the Coastal Zone. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(2), 35-41.
- Koo, Y.M., Jo, J.A., Kim, Y.D., 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 Engineering*, 33(2), 559-571. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.559>
- Lee, J.W., Kim, S., Hwang, G.S., 2017. Changes in Physical Properties and Its Metal Removal Efficiency for The Yellow Soils by Calcination Process. *Journal of the Korea Acadimia-Industrial Coopertion Society*, 18(4), 584-591. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.4.584>
- Ministry of Environment (ME), 2016. Installation, Management and Operation Manual of Nonpoint Pollutions Treatment Facility. Ministry of Environment, Korea.
- Ministry of Environment (ME), 2017. Standard of Water Pollution Process Test. Ministry of Environment, Korea.
- Pezzaniti, D., Beecham, S., Kandasamy, J., 2009. Influence of Clogging on the Effective Life of Permeable Pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 162(3), 211-220. <https://doi.org/10.1680/wama.2009.00034>
- Ra, K., Kim, K.T., Kim, J.K., Bang, J.H., Lee, J.M., Kim, S.K., Kim, E.S., Yun, M.S., Cho, S.R., 2011. Study on the Characteristics and Non-point Source Pollution Loads in Stormwater Runoff of Shihwa Lake. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 14(1), 40-50. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2011.14.1.040>
- Seoul Metropolitan Government, 2010. Pilot Permeable Block Pavement Construction (1st) Report.
- Seoul Metropolitan Government, 2013. Design, Construction and Maintenance Standards of Pitcher Block Pavement, 2.0.
- Song, Y., Joo, J., Lee, J., Park, M., 2017. A Study on Estimation of Inundation Area in Coastal Urban Area Applying Wave Overtopping. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(2), 501-510. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.2.501>