

석탄 저회-규사 필터의 입자상물질 여과 성능 실험적 평가

Experimental Evaluation of Particulate-matter Filtration Performance of a Bottom Ash-Silica Sand Mixture

이 동 현¹ Lee, Dong-Hyun 이 홍 경² Lee, Hong-Kyoung
이 윤 제³ Lee, Yun-Jae 안 재 훈⁴ Ahn, Jaehun

Abstract

Permeable pavement technology allows the penetration of rainfall into the roadbed, thereby reducing surface runoff and enhancing water quality. The water quality can be improved by adding a filter layer to the permeable pavement. This study analyzes the permeability performance and particulate-matter removal efficiency of a bottom ash-silica sand filter. The performances of five filters with bottom ash and silica sand as the basic materials were evaluated on particulate matter sized 60 μm or smaller. The pure silica sand sample and pure bottom ash sample delivered an average removal efficiency of around 70%. The removal efficiency of the mixed sample was approximately 90%, exceeding the recommended reduction rate (80%) at non-point pollution reduction facilities. In future work, the filter performance should be further verified on permeable pavement.

요 지

투수성 포장은 강우를 노반으로 침투시켜 지표면 유출량 감소와 수질 개선을 기대하기 위한 기술이다. 수질 개선 효과의 증대를 위해 투수성 포장 내에는 필터층을 추가하기도 한다. 본 연구에서는 투수성 포장의 구성 요소인 여재 필터의 성능을 알아보기 위해 석탄 저회-규사 여재에 대한 투수성능과 입자상 물질 제거 효율을 분석하였으며, 석탄 저회와 규사를 기본 재료로 하는 5개의 여재를 대상으로 하였고, 입자상 물질로는 60 μm 이하의 입자를 사용하였다. 순수 규사 시료 혹은 순수 석탄저회 시료는 평균적으로 약 70%의 입자상 물질 제거효율을 보였으나, 혼합 시료의 경우 제거 효율이 약 90%로서, 비점오염 저감시설에 대한 저감을 권고치인 80%를 상회하는 것으로 나타났다. 향후 현장 검증을 통한 투수성 포장 내 여재 필터 성능에 대한 검증 후 도로 시설 혹은 독립적인 여과 장치로 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

Keywords : Bottom ash, Non-point pollution reduction facilities, Permeable pavement, Silica sand

1 정희원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)

2 비회원, (주)네오테크 대표이사 (President, Neotech. Co. Ltd.)

3 정희원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)

4 정희원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-7627, Fax: +82-51-513-9596, jahn@pusan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

도시화에 따른 불투수면적 증가, 기후변화로 인한 국지성 집중호우 발생빈도 증가는 지하수 고갈, 침투 유출량 증가, 하천 수질오염 등의 도시 물순환 체계에 부정적인 영향을 증가시킨다(Brattebo and Booth 2003; Smith 2011). 이러한 문제 해결 방안의 하나로 투수성 포장의 적용을 들 수 있다. 투수성 포장은 강우를 노반으로 침투시켜 지표면 유출량 감소와 수질 개선을 기대하기 위한 기술이다. 도심의 토사나 먼지, 도로내 퇴적물, 미세입자 등은 빗물과 함께 투수성 포장 내로 유입되어 입자상 물질의 저감 효과가 발생한다. 수질 개선 효과의 증대를 위해 투수성 포장 내에는 필터층을 추가하기도 한다. 비점오염원에 대한 관리가 보편화된 미국, 유럽 등에서는 강우 시 발생하는 도시 강우 유출수의 오염 부하량을 줄이고 하천 수질을 개선하기 위한 노력으로 투수성 포장을 널리 적용하고 있다(Siriwardene et al., 2007).

도로 오염원 부문에 있어 지금까지는 자동차에서 발생하는 배출가스가 주된 원인으로 여겨져 왔으나, 배출가스 중 입자상 물질(PM)의 배출규제 강화로 인하여 자동차 배기관에서 배출되는 입자상 물질은 많이 감소되었다(Kwak et al., 2013). 하지만 차량 주행시 타이어 및 브레이크 마모에서 발생하는 입자들이 도로 오염원 부문에 큰 기여를 하는 것으로 보고되고 있다(Dahl et al., 2006; Querol et al., 2004; Harrison et al., 2001; Lenschow et al., 2001). Harrison et al.(2012)는 런던 시내의 Marylebone Road에서 수집한 0.9~11.5 μm 입자 크기 범위에서 입자 질량에 대한 브레이크 마모 입자(55.3 \pm 7.0%), 타이어 마모 입자(10.7 \pm 2.3%) 그리고 재비산먼지(38.1 \pm 9.7%)의 구성 비율을 도출하였다. 최근 공개된 2015년 기준

국가대기오염물질 배출량 자료에 따르면, 도로재비산먼지가 전체 서울시 10PM 배출량의 24%을 차지하며, 서울시 2.5PM 원별 배출비중에서 도로재비산먼지의 비중은 21%로 무시할 수 없는 수치이다(Choi et al., 2018). 더욱이 도로비산먼지는 Al, K, Ca 등 지각물질뿐 아니라 자동차 배출가스, 타이어 및 브레이크 마모에서 발생하는 Cd, Pb, Cr 등 유해한 인위적 성분을 포함하고 있다(환경부·한국환경공단, 2015, 도로재비산먼지 관리 업무 편람). Han(2012)은 금속입자를 상대적으로 많이 포함하고 있는 도로비산먼지가 건강 위해성과 관련 있다는 국내외 역학 및 독성 연구사례들을 언급하며, 연소먼지뿐 아니라 도로먼지와 같은 비연소 먼지 관리가 도시지역의 대기질 관리에 필요하다고 강조한 바 있다.

본 연구는 투수성 포장 시스템 내에 적용할 수 있는 여과 필터로서 각기 다른 배합비를 가진 석탄 저회·규사 혼합 여재의 60 μm 입자상 물질에 대한 여과성능을 실험적으로 분석하였다.

2. 석탄 저회와 규사 여재

2.1 석탄 저회와 규사

석탄회(Coal ash)란 화력 발전의 공정에서 화력발전소에서 석탄을 보일러에서 연소시키고 남은 잔재를 말한다(한국토지주택공사, 2018). 석탄회 중 20~30%는 고온의 연소열에 의해 용융되며 여러 입자가 응결되어 보일러 하부의 Clinker Hopper에 떨어지며, 이를 석탄 저회(bottom-ash)라고 한다(Song and Kim, 2019). 본 연구는 석탄 저회와 규사, 그리고 그 혼합물을 실험 대상으로 한다(Fig. 1). 석탄 저회는 국내 화력발전소에서 발생



(a) Bottom ash



(b) Silica sand



(c) Bottom ash-silica sand mixture

Fig. 1. Bottom ash, silica sand, and bottom ash-silica sand mixture

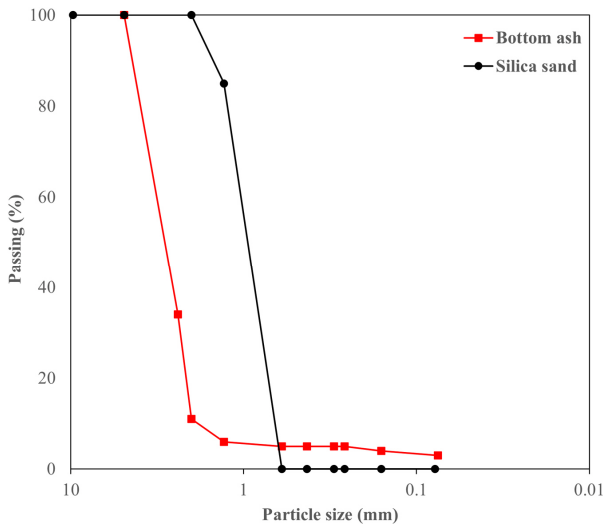


Fig. 2. Particle size distribution curve of bottom ash and silica sand

한 저회를, 규사로는 규사 5호사를 구매하여 사용하였다. 여과 성능 실험 전, 여재 시료에서 검출되는 미분을 최소화하기 위해 여재를 흐르는 수돗물에 세척하고 110°에서 48시간 건조하여 여재 시료를 준비하였다.

석탄 저회와 규사의 입도 분포를 파악하기 위해 KS F 2502(2014)의 시험 방법에 따라 체가름 시험을 진행하였으며, No. 4, 10, 16, 30, 40, 50, 60, 100, 200의 표준체를 사용하였다. 분석 결과인 석탄 저회와 규사의 입도 분포곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 여재의 진동 다짐

진동 다짐을 가했을 때 시료의 다짐 정도를 파악하기 위하여, 시험을 통해 다짐 시간 경과에 따른 여재의 단위중량을 산정하였다. 먼저 사각팬에 2개의 시료 캔을 위치시키고, 팬 내에 여재 시료를 투입한 후 평탄화 작업과 진동 다짐을 수행하였다. 진동 다짐 시간에 따른 여재의 단위중량을 시료 캔에 다짐된 여재를 바탕으로 측정하였다. 진동 다짐시험에 사용된 사각팬의 크기는 가로 60cm × 세로 60cm × 높이 7.5cm, 시료캔의 크기는 직경 7.5cm × 높이 5cm와 같다.

다짐 시간에 따른 단위중량 분석은 순수한 저회와 규사, 그리고 저회와 규사를 중량비 50:50인 혼합 여재에 대해 수행하였다. 분석 결과, 규사의 경우 다짐 시간 15초까지 단위중량이 증가하다가, 15초 이후에는 증가 추세가 완화되는 것을 확인하였다. 석탄 저회의 경우 다짐 시간에 따른 단위중량의 변화가 크기는 않지만, 다짐 시

간이 15초 되는 시점까지 단위중량이 증가하다가 그 이후 증가 추세가 둔화되는 것을 확인하였다. 석탄 저회-규사 혼합 여재의 시험 결과도 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서는 여재의 투수계수와 TSS(Total Suspended Solids) 제거 효율을 측정하기 위해, 다짐 시간에 따른 여재의 단위중량이 크게 증가하지 않는 구간의 단위중량을 설정하였으며, 이 값은 규사의 경우 14.5kN/m³, 저회는 7.5kN/m³, 석탄 저회-규사 혼합 여재는 12.7kN/m³로 계산되었다.

3. 여재의 입자상물질 여과 실험

3.1 실험 계획

비점 오염원과 입자상 물질의 크기에 대한 연구 사례를 살펴보면, Andral et al.(1999)은 50µm 이하의 입자상 물질이 전체 부하량의 70~80%와 관련 있다고 보고하였고, Cha et al.(2016)은 단일 강우사상에서 대부분의 입자상 물질들이 50µm에서 집중 발생하였으며 이들의 집중관리가 비점오염 관리에서 가장 중요하다고 보고하였다. 본 연구에서는, 환경부의 비점오염저감시설 설치 및 관리·운영 매뉴얼(환경부, 2016)을 참조하여, 입자상 물질의 여과 성능 분석에 널리 사용되는 60µm 이하의 입자상 물질에 대해 제거 효율 시험을 수행하였으며, 오염수의 농도는, 농도를 100~150mg/L으로 설정하였다.

석탄 저회와 규사를 기본 재료로 하는 총 5개의 여재 (Table 1, Table 2)를 여과 성능 평가 대상으로 하였다. 시료 S00과 S100은 각각 규사와 석탄 저회를 100%로 구

Table 1. Bottom ash-sand filter specimens with the same compaction duration (15 s)

Specimen No.	Mixture proportion (%)	
	Bottom ash	Silica sand
S00	0	100
S50	50	50
S100	100	0

Table 2. Bottom ash-sand filter specimens with the same unit weight (12.7 kN/m³)

Specimen No.	Mixture proportion (%)	
	Bottom ash	Silica sand
S30	30	70
S50	50	50
S70	70	30

성한 단일 시료를 의미하며, 본 시료의 단위중량은 진동 다짐시험의 결과로부터 14.5kN/m^3 와 7.5kN/m^3 를 적용하였다. 시료 S50는 석탄 저회와 규사가 각각 50%로 혼합된 시료를 의미하며, 이 때 단위중량 또한 진동다짐시험의 결과인 12.7kN/m^3 를 적용하였다. 이에 추가로 시료 S50와 동일한 단위중량을 가지지만 혼합비가 다른 여재의 투수계수를 알아보기 위해, 시료 S30과 S70을 계획하였다. S30과 S70은 각각 석탄 저회 30%, 70%로 구성되며, 나머지 비율은 규사를 사용한 혼합 여재이다.

3.2 실험 장비와 절차

석탄 저회-규사 여재의 입자상 물질 제거 효율시험은 Fig. 3의 시험 장치를 사용하여 진행하였으며, 시험 장치는 교반 장치, 침투 장치, 수집 장치로 구분된다. 교반 장치는 교반수조(Agitation tank), 임펠러(Impeller)로 구성되어 있다. 교반수조의 최대 용량은 1000L이며, 측면에 설치된 수위기록계로 수조 내 오염수의 양을 외부에서 파악할 수 있다. 또한 교반장치의 컨트롤 패널을 통해 교반 속도를 최대 400rpm까지 조절할 수 있다. 위의 장치들이 입자상 물질과 청수를 혼합하여 오염수를 제조하며, 오염수를 교반기 하부에 설치한 침투 장치에 공급한다. 침투 장치는 가로 20cm × 세로 20cm × 높이 12cm인 침투셀(Infiltration cell)이 그 역할을 하며, 오염수를 여과시켜 수집 장치로 흘려보낸다. 침투셀로 유입하는 유입수는 교반수조 하부의 파이프를 통해 정해진

순간에 수집하여 유입수의 농도를 측정한다. 침투셀 상부에는 물을 고르게 분사하기 위해 타공 아크릴판을 설치하였다. 침투셀을 통과한 오염수 또한 침투셀 하부에서 수집되고, 유출수 농도의 산정에 사용된다. 이외의 유출수는 수집 수조(Effluent tank)로 전달된다.

시험 전 준비 단계에서 교반 수조를 세척한 후 물을 채우고, 여재 시료를 주어진 단위중량에 맞게 다지며 포설한다. 입자상 물질 제거 효율을 알아보기 위한 시험을 다음과 같이 진행하였다.

- 침투셀에 청수를 흘려보내고 1분 10분 20분에 유입, 유출수를 수집한다.
- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반수조에 투입하여 270rpm으로 30분간 교반 시킨다.
- 오염수를 침투셀에 흘려보낸 뒤 1분, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분, 70분에 유입수와 유출수를 수집한다.
- 수집한 유입수와 유출수를 수질오염공정시험기준(환경부 2021)에 따라 부유물질 분석을 시행하며, 아래 식(식 (1))을 활용하여 입자상 물질 제거 효율을 구한다. 이때, 는 유입수 농도를, 는 유출수 농도를 나타낸다.

$$RE(\%) = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in}} \times 100 \quad (1)$$

4. 석탄저회-규사 여재의 입자상물질 여과 성능

총 5 종류의 여재 시료에 대해 입자상 물질 제거 효율 시험을 수행하였으며, Fig. 4~Fig. 6에 여재 시료 S00, S50, S100에 대한 실험 결과를 나타내었다. 오염수를 통한 실험을 수행하기 전, 여재 자체로부터 입자상물질이 발생하는 정도를 확인하기 위하여, 청수를 20분간 주입하고 1분, 10분, 20분에 침투셀에 입자상물질이 없는 경우에 여재에서 발생하는 입자상물질로 인한 유출수의 농도를 산정하였다. 확인 결과, 변동성은 다소 있으나, 평균적으로 약 9mg/L 수준의 농도가 검출되었다. 시료의 입자상물질 제거 효율은, 순수 규사 시료인 S00과 순수 석탄저회 시료인 S100은 평균적으로 약 71%의 제거효율을 보이나, 혼합 시료인 S50의 경우 제거 효율이 96%로서 비혼합 시료보다 상대적으로 우수한 입자상 물질 제거 효율을 가지는 것으로 나타났다. 또한 S00와 S100의 제거효율은 계측 시점에 따른 편차가 심했으나,

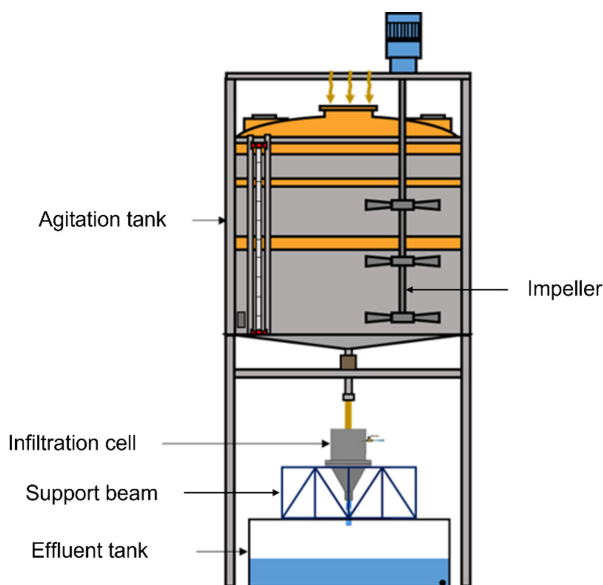


Fig. 3. Schematic of test equipment

S50은 상대적으로 일정한 수치의 제거 효율을 보여주었다. 비점오염 저감시설에 대한 저감율 권고치가 80%(환경부, 2016)이상인 것을 고려할 때, 입자상 물질의 제거를 위한 여재로 규사와 저희의 혼합시료인 S50이 여재

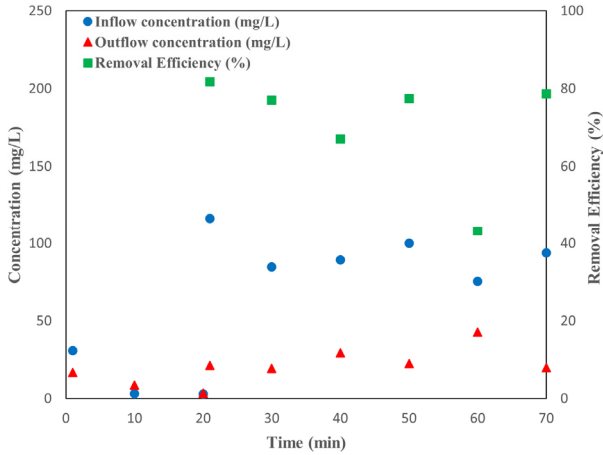


Fig. 4. Concentration and removal efficiency of S00

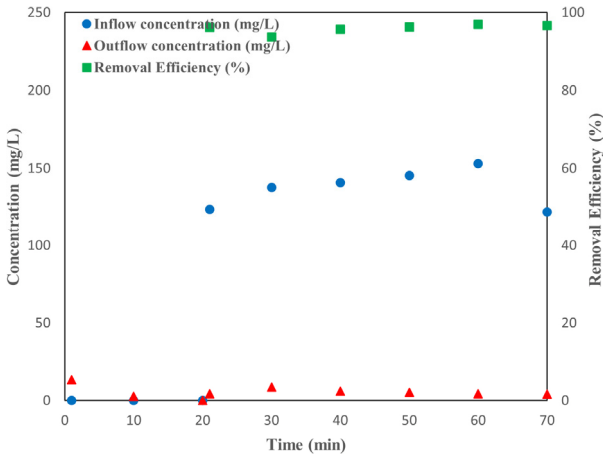


Fig. 5. Concentration and removal efficiency of S50

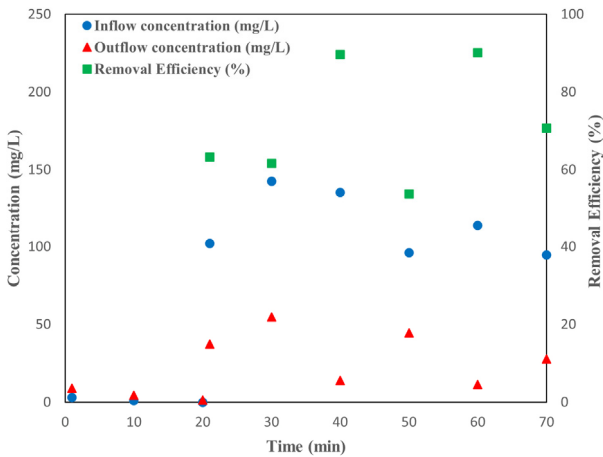


Fig. 6. Concentration and removal efficiency of S100

로 적용하기에 적절한 것으로 판단된다.

석탄 저희와 규사가 동일한 비율로 구성된 S50 혼합 여재 시료와 동일한 단위중량을 가지지만 다른 배합비를 가진 S30(석탄 저희 30%, 규사 70%), S70(석탄 저희 70%, 규사 30%)의 여재를 구성하고 시험을 진행하였으며, Fig. 7, Fig. 8에 해당 시료에 대한 실험 결과를 나타내었다. 본 시험의 결과로부터 S30은 약 92%의 제거 효율을 보이며, S70은 약 80%의 제거 효율을 보여, S00과 S100에 비해 S50의 제거 효율인 89%와 유사한 입자상 물질 제거 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었고, 측정 시간에 따른 제거 효율 결과의 편차 또한 크지 않았다.

Fig. 9에 각 시료별 6개의 데이터를 활용해 시험에 사용된 다섯 가지 여재 시료의 제거 효율을 오차 막대로 표시하였으며, 이로부터, 규사와 저희의 단일 재료 여재에 비해, 동일한 단위중량을 가지지만 여재의 구성 비율이 다른 세가지 혼합 여재들이 모두 여재로서 성능이 유사한 수준으로 우수한 것을 확인할 수 있었다. 또한,

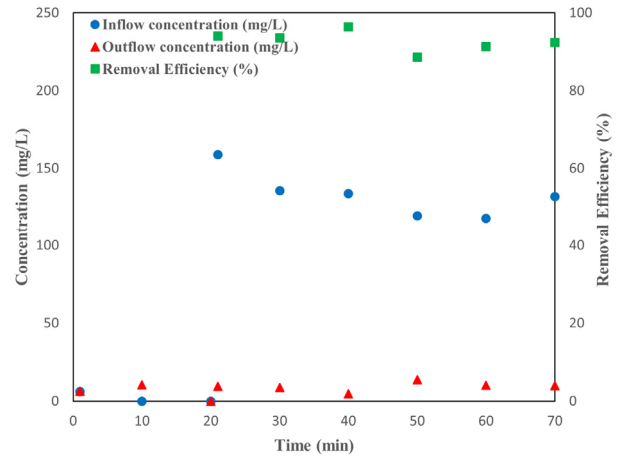


Fig. 7. Concentration and removal efficiency of S30

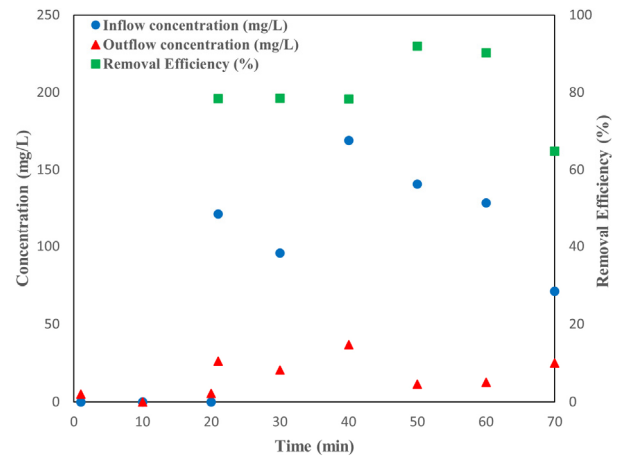


Fig. 8. Concentration and removal efficiency of S70

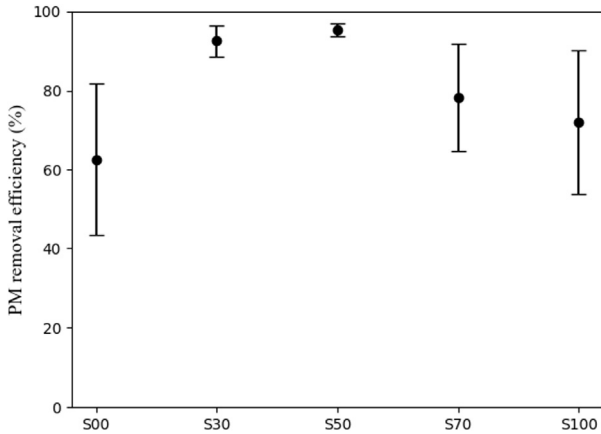


Fig. 9. Removal efficiency of five filters

단일 재료로 구성된 여재는 혼합 여재보다 비교적 공극이 크기 때문에 투수계수가 높고 유체가 균일하게 흐르지 않아 검출 농도에 영향을 미치게 되어 혼합 여재에 비해 오차 범위가 크게 나온 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 저영향개발(LID) 기법 중 하나인 투수성 포장의 구성 요소인 여재 필터의 성능을 알아보기 위해 석탄 저회-규사 여재에 대한 투수성능과 입자상 물질 제거 효율을 분석하였으며, 석탄 저회와 규사를 기본 재료로 하는 5개의 여재를 대상으로 하였고, 입자상 물질로는 60 μm 이하의 입자를 사용하였다.

순수 규사 시료 혹은 순수 석탄저회 시료는 평균적으로 약 71%의 입자상 물질 제거효율을 보였으나, 중량비 50:50 혼합 시료의 경우 제거 효율이 96%로서 비혼합 시료보다 상대적으로 우수한 입자상 물질 제거 효율을 가지는 것으로 나타났다. 동일한 단위중량을 가진 석탄 저회와 모래의 중량비 30:70, 50:50, 70:30인 혼합 여재의 여과 성능을 비교했을 때, 모두 평균적으로 80~92%의 제거 효율을 보이는 것을 확인할 수 있었고, 측정 시간에 따른 제거 효율 결과의 편차 또한 크지 않았다.

비점오염 저감시설에 대한 저감을 권고치가 80% 이상인 것을 고려할 때, 도로에 사용되는 투수성 포장의 설계 및 시공시, 석탄 저회-규사 혼합 여재의 사용을 통해 60 μm 이하의 입자상 물질을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서 보인 결과는 실험에 사용된 조건에 성립하는 한정된 결과이며, 향후 현장 실증 실험을 통하여 투수성 포장 내 여재 필터 성능에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단한다.

참고문헌 (References)

- Ahn, Jae-Hun (2017), Test Equipment and Procedure to Evaluate Permeability Characteristics of Permeable Pavements, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol.17, No.6, pp.359-365.
- ANDRAL, M. C., Roger, S., Montrejeud-Vignoles, M., and Herremans, L. (1999), Particle Size Distribution and Hydrodynamic Characteristics of Solid Matter Carried by Runoff from Motorways, *Water Environment Research*, 71.4: 398-407.
- APPEL, B. R., Tokiwa, Y., Hsu, J., Kothny, E.L., and Hahn, E. (1967), Visibility as Related to Atmospheric Aerosol Constituents, *Atmospheric Environment*, 1985, 19.9: 1525-1534.
- BALL, James E. and Abustan, Ismail. (1995), An Investigation of Particle Size Distribution during Storm Events from an Urban Catchment, *In: Proceedings of the Second International Symposium on Urban Stormwater Management*, pp.531-535.
- CHA, Sung Min, LEE, Seung Won, CHO, Kyung Hwa, LEE, Sun Hong, and KIM, Joon Ha (2016), Determination of Best Management Timing of Nonpoint Source Pollutants Using Particle Bins and Dimensionless Time in a Single Stormwater Runoff Event, *Ecological Engineering*, 90: 251-260.
- Choi, Yong-Jin, Oh, Jeong-Ho, Han, Shin-In, Ahn, Jaehun, and Shin, Hyun-Suk (2017), Elastic Modulus and Layer Coefficient of Permeable Block Pavements Based on Plate Load Tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.12, pp.75-80. doi:10.7843/kgs.2017.33.12.75
- Choi, Yu-Jin and Kim, Young-Eun (2018), A Study on Road Cleaning to Reduce Resuspension of Road Dust, The Seoul Institute, pp.1-135.
- Dahl, A., A. Gharibi, E. Swietlicki, A. Gudmundsson, M. Bohgard, A. Ljungman, G. Blomqvist, and M. Gustafsson (2006), Traffic-generated Emissions of Ultrafine Particles from Pavement-tire Interface, *Atmospheric Environment*, 40, pp.1314-1323.
- DOCKERY, Douglas W., POPE, C. Arden., Xu, Xiping., Spengler, John D., Ware, James H., Fay, Martha E., Jr, Ferris Benjamin G., and Speizer, Frank E. (1993), An Association between Air Pollution and Mortality in Six US Cities, *New England journal of medicine*, 329.24: 1753-1759.
- DRAPPER, D. Road Runoff Water Quality in South-east Queensland, Progress Report, July, 1998.
- ELDERING, A. and CASS, G. R. (1996), Source-oriented Model for Air Pollutant Effects on Visibility, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101.D14: 19343-19369.
- Han, Se-Hyeon (2012), A Study on the Emissions and Chemical Characteristic of Resuspended Dust from Paved Roads in Urban Areas, Inha University.
- Harrison, R., A. Jones, J. Gietl, J. Yin, and D. Green (2012), Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements, *Environmental Science and Technology*, 46, pp. 6523-6529.
- Harrison, R., J. Yin, D. Mark, J. Stedman, R. Appleby, S.J. Booker, and S. Moorcroft (2001), Studies of the Coarse Particle (2.5~10 μm) Component in UK Urban Atmospheres, *Atmospheric Environment*, 35, pp.3667-3679.
- Kim, Dong-Yeong (2013), Fine Dust that Threatens Health, Causes and Countermeasures, *Gyeonggi Research Institute*, 121: 1-25.
- Kim, Seong-Beom and Lee, Won-Tae (2017), Reduction of Suspended

- Solids in First Flush from a Building Rooftop using Various Media, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39.4: 214-219.
17. Kwak, Ji-Hyun, Lee, Sun-Youp, and Lee, Seok-Hwan (2013), Characterization of Coarse, Fine, and Ultrafine Particles Generated from the Interaction between the Tire and the Toad Pavement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.29, No.5, pp.656-667
 18. LAND & HOUSING CORPORATION, KOREA ENERGY (2018), A Study of Practical Application of Bottom Ash as Fill Materials and Road Materials.
 19. Lee, Yun-Je (2020), Exoerimental Evaluation of Permeability of Permeable Block Systems Considering Particle Clogging, Department of Civil Engineering The Graduate School Pusan National University.
 20. Lenschow, P., H. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J. Preu, and W. Reichenbacher (2001), Some Ideas about the Sources of PM10, *Atmospheric Environment*, 35, pp.23-33.
 21. Ministry of Environment·Korea Environment Corporation (2015), Handbook on the management of Resuspended road dust.
 22. Ministry of Environment·Korea Environment Corporation (2016), Manual for installation, management and operation of non-point pollution reduction facilities.
 23. POPE, C. Arden, Thun, Michael J., Namboodiri Mohan M., Dockery Douglas W., Evans John S., Speizer Frank E., and Jr Clark W. Heath. (1995), Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of US Adults, *American journal of respiratory and critical care medicine*, 151.3: 669-674.
 24. Querol, X., A. Alastuey, C. Ruiz, B. Artinano, C. Hansson, M. Harrison, E. Buringh, H. ten Brink, M. Lutz, and P. Bruckmann (2004), Speciation and Origin of PM10 and PM2.5 in Selected European Cities, *Atmospheric Environment*, 38, pp.6547-6555.
 25. Brattebo, B.O.; Booth, D.B. (2003), Long-term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems, *Water Research*, 37, pp.4369-4376.
 26. Segismundo, Ezequiel Q., Koo, Bon-Hong, Kim, Lee-Hyung and Lee, Byung-Sik (2016), Effects of Media Breakage on Infiltration Characteristics in Stormwater Management System, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.2, pp.31-41. doi:10.7843/kgs.2016.32.2.31
 27. SIRIWARDENE, Nilmini Rukma, DELETIC, Ana, and FLETCHER, T. D. (2007), Clogging of Stormwater Gravel Infiltration Systems and Filters: Insights from a Laboratory Study, *Water research*, 41.7: 1433-1440.
 28. Smith, D.R. (2011), Permeable Interlocking Concrete Pavements, 4th ed.; Interlocking Concrete Pavement Istitute: Herndon, VA, USA.
 29. Song, Tae-Hyeob and Kim, Ha-Seog (2019), A Evaluation of Physical and Chemical Properties for the Use of Embankment and Subgrade Materials of Bottom Ash Produced by Dry Process, *Korea Concrete Institute*, 31.3: 241-249.
 30. WON, Jongmuk, KIM, Taehyeong, KANG Minkyu, CHOE, Yongjoon, and CHOI Hangseok (2021), Kaolinite and Illite Colloid Transport in Saturated Porous Media, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 127052.

Received : May 25th, 2022

Revised : June 15th, 2022

Accepted : June 16th, 2022