



Research Paper

Evaluation of the Feasibility of Foam Glass as Filter Media in Rain Garden

Hyeon Woo Go¹ · Soo-Young Moon² · Hyeon Soo Kim² · So Ye Jang³ · Eun Byeol Kang³ · Jin Chul Joo^{3*}

¹Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Building Research, Republic of Korea

³Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

(Received November 23, 2022; Revised December 5, 2022; Accepted December 5, 2022)

Objectives : In order to recycle and resource waste glass, the feasibility of foam glass as filter media was evaluated, and column experiments using foam glass media were conducted to confirm the applicability as filter media in rain garden. Through this experiment, various design factors to be considered can be derived in application of foam glass media in the rain garden.

Methods : Sieve analysis and SEM/EDS analysis were conducted to confirm the physicochemical properties of the foam glass. Column experiments filled with only foam glass and mixtures of sand and foam glass were conducted to simulate rain garden to evaluate the removal efficiency of suspended solids and turbidity using the foam glass media, head difference (Δh) and hydraulic conductivity (K) changes, and calculation of filtered suspended solids loading using both discrete and cumulative mass approach. Finally, comparison of filtration performance with various filter media used in LID facilities was performed to evaluate the feasibility of foam glass media in rain garden.

Results and Discussion : Since foam glass media has a lower density than water, homogeneous particle size, and smooth surface with pores of various sizes, foam glass media effectively induces internal capture and external adsorption of suspended solids. Foam glass media has been applied to high suspended solids and turbidity removal efficiency. As the suspended solids inflow load increased, clogging occurred in the pores and the removal efficiency gradually decreased, but the foam glass media with lower density than water was continuously disturbed and rearranged due to the head difference energy, and some clogging were alleviated by rearrangement of pores and channels. The load of suspended solids in precipitated, adsorbed, and retained on the foam glass was calculated using the effluent sample (discrete) collected at regular time intervals and the continuously accumulated sample (cumulative) from the output. The filtered suspended solids load calculated using the cumulative mass approach was higher due to the estimation of the amounts of suspended solids remaining in the filtration column is lower because the samples (discrete) collected at regular time intervals from the output do not reflect the amount of suspended solids that change over time. Thus, the amounts of suspended solids removed through the filtration process can be much more accurately estimated using the cumulative samples. Finally, when comparing the removal efficiency with other filter media, foam glass can be used as excellent filter media with higher removal efficiency and greater lifespan.

Conclusion : Foam glass media with smooth surface, pores of various sizes, and lower density than water can rearrange and regenerate pores to alleviate some clogging, resulting in high suspended solids and turbidity removal efficiency for a long period of time. Considering that the amount of suspended solids filtered is determined by various factors such as particle size and distribution, porosity, depth, linear velocity, and inflow load of the suspended solids, the feasibility test using foam glass media through long-term field experiments is warranted. The amounts of suspended solids removed through the filtration process can be much more accurately estimated using the cumulative samples.

Keywords : Foam glass, Suspended Solids, Clogging, Cumulative mass approach, Filter media

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

*Corresponding author

E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr

Tel: 042-821-1264 Fax: 042-821-1476

© 2022, Korean Society of Environmental 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/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

발포유리의 레인가든 내 여재 적용 가능성 평가

고현우¹ · 문수영² · 김현수² · 장소예³ · 강은별³ · 주진철^{3*}

¹한밭대학교 환경공학과

²한국건설기술연구원 건축연구본부

³한밭대학교 건설환경공학과

목적: 폐유리를 재활용하고 자원화하기 위하여 제작된 발포유리의 여재 활용 가능성을 검토하고 레인가든 내 여재로서 적용 가능성을 확인하기 위하여 컬럼 실험을 진행하였으며 실제 레인가든 내 적용 시 고려되어야 하는 다양한 설계인자를 도출하고자 하였다.

방법: 사용된 발포유리의 물리·화학적 특성 확인하기 위하여 체분석과 SEM/EDS 분석을 실시하였으며, 발포유리 여재로만 충전한 컬럼과 레인가든을 모사하기 위하여 모래, 발포유리여재를 충전한 컬럼 실험을 통해 발포유리여재의 부유물질 및 탁도 여과 효율 평가, 여과 컬럼 내 부유물질 부하에 따른 수두 및 투수계수 변화, 누적 접근법과 부유물질 물질수지 분석을 통한 여과된 부유물질 부하량 산출을 진행하였다. 마지막으로 LID 시설 내 사용되는 다양한 여재와의 여과성능 비교를 통해 레인가든 내 발포유리의 여재로서 적용 가능성 검토를 실시하였다.

결과 및 토의: 발포유리는 물보다 밀도가 낮고 균질한 입도를 가지고 있으며 표면이 매끈하고 다양한 크기의 공극을 형성하고 있어 부유물질을 효과적으로 내부 포집 및 외부 흡착을 유도할 수 있는 것으로 조사되었다. 발포유리 여재의 경우, 높은 부유물질 및 탁도 제거효율이 확인되었으나 부유물질 유입 부하량이 증대됨에 따라 공극 내 폐색이 발생하여 제거효율이 점차 감소하였다. 그러나 물보다 밀도가 낮은 발포유리여재가 수두에너지로 인해 지속적으로 교란 및 재배치되어 공극 및 채널의 재배열로 일부 폐색을 완화시킨 것으로 판단된다. 발포유리여재에 여과된 탁수 내 부유물질의 부하량을 유출부에서 일정한 시간 간격으로 채수한 유출수 시료(discrete)와 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)를 활용하여 산출한 결과, 누적된 시료를 활용하여 산정된 여과 부유물질 부하량이 더 높게 산정되었다. 이는 유출부에서 일정한 시간 간격으로 채수한 시료(discrete)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량을 반영하지 못하여 여과 컬럼 내 잔류한 부유물질량이 더 낮은 것으로 예측해 산정한 결과이며, 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량과 무관하게 물질수지식을 기반으로 산정하여 훨씬 더 정확하게 여과공정을 통한 부유물질 제거량 산정이 가능하다. 마지막으로 타 여재와 제거효율 비교 시, 상대적으로 높거나 유사한 효율로 조사되어 발포유리여재는 현장에서 장기간 여재로 활용 가능하다고 판단된다.

결론: 발포유리여재는 표면이 매끈하고 다양한 크기의 공극을 형성하고 있으며, 물보다 밀도가 낮아 수두에너지로 인해 지속적으로 교란되어 공극의 재배열 및 재생으로 일부 폐색을 완화시켜 장기간 높은 부유물질 및 탁도 제거 효율을 유지할 수 있는 우수한 여재로 판단된다. 그러나 여과된 부유물질량은 여재의 입경과 분포, 여재 공극률, 여재층의 깊이, 유체의 여과선속도, 부유물질의 유입 부하 등 다양한 함수에 의해 결정되는 것으로 보고 되고 있기 때문에, 다양한 조건하에 추가적인 현장 장기 실증 실험을 통해 발포유리여재의 활용 가능성을 조사할 필요가 있다고 판단된다. 또한 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량과 무관하게 물질수지식을 기반으로 산정하여 훨씬 더 정확하게 여과공정을 통한 부유물질 제거량 산정이 가능하다.

주제어: 발포유리, 부유물질, 폐색, 누적 물질수지 접근법, 여재

1. 서론

매우 빠른 속도의 과학기술 발달, 경제 발전 산업화 및 도시화 과정을 통해 다양한 천연자원이 빠르게 고갈되고 있으며,

자원의 이용 후 발생하는 폐기물의 양이 급증함에 따라 폐기물 재활용은 전 세계적으로 매우 중요한 환경 이슈로 대두되고 있다.^{1,2)} 인류가 생산 후 사용된 다양한 제품 및 자원들은 다양한 방법으로 재활용되고 있으나, 아직 대부분이 주로 매

립 및 조각 처리되고 있으며, 이를 수용할 수 있는 한계에 도달하였다.^{2,3)} 따라서 전 세계적으로 재활용이 고려되지 않고 자원의 채취에서 폐기로 이어지는 선형 경제(linear economy) 대신 폐기물을 줄이고 이를 재활용하여 자원을 순환시키는 순환 경제(circular economy)로 전환하는 방안에 대한 관심이 증대되어 다양한 정책이 도입되고 있다.³⁻⁵⁾

다양한 폐기물 중 폐유리(waste glass)의 경우 여러 산업에서 판유리, 유리섬유, 유리병 등 다양한 형태로 발생되고 있으며 유리 제품의 활용이 지속적으로 증대됨에 따라 발생량 역시 증대하고 있는 상황이다.⁶⁾ 2021년 기준 국내 폐유리병 발생량은 약 62만 톤이며 이 중 재활용된 양은 약 48만 톤으로 재활용률이 약 75% 이상으로 매우 높게 조사되었으나^{7,8)} 전년도 연간 출고량 10톤 이상, 매출액 10억원 이상, 수입액 3억원 이상인 제조업자만 재활용 의무 대상자이기 때문에 실제로는 더 많은 폐유리병이 재활용되지 않고 폐기되고 있는 것으로 추정된다.⁸⁾ 또한 폐유리의 발생량이 지속적으로 증대됨에 따라 재활용 의무율 역시 증가되고 있으며, 2022년 기준 폐유리의 장기 재활용 의무율은 79.3%로 매년 증가하고 있는 추세이다.⁹⁾

폐유리의 재활용률을 높이기 위하여 유리병 원료로의 재활용 수준을 넘어 다양한 분야에서 부가가치가 증대된 재료로서 재사용하기 위한 연구 및 기술개발이 시도되고 있다. 특히 폐유리를 포장용 투수성 콘크리트에 첨가하여 사용하거나^{10,11)} 파쇄 및 고온에서 발포시켜 인공경량골재를 제조하고 이를 콘크리트 골재로 사용하는 등¹²⁻¹⁴⁾ 주로 건축·토목자재의 원료 등으로 가공하여 실제 공사에 적용하기 위한 연구 개발이 주로 진행되고 있다.

이 중 발포유리(foam glass)는 폐유리를 분쇄한 유리 분말에 $CaSO_4$, $CaCO_3$, SiC 등의 발포제를 첨가한 이후 약 800°C 이상 가열하여 유리를 소결(sintering)상태가 되도록 하고 발포제를 분해시켜 O_2 와의 반응에서 발생하는 CO_2 가스에 의한 기포 발생을 통해 제작된다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 발포유리의 경우 밀도가 낮고 열전도율과 팽창계수가 높으며, 기계적 강도가 높다는 장점을 가지고 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 또한, 생산된 발포유리는 65~80% 범위의 매우 높은 공극률을 가진 것으로 보고되어 투수성 여재(permeable media)로서 활용 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다.²¹⁾

빗물을 최대한 토양에 많이 침투시켜 수자원 보유 및 지하수 함양을 유도하며 오염물질을 침전 및 여과할 수 있도록 설계된 레인가든(rain garden)의 경우²²⁻²⁵⁾, 개발지역의 비점오염물질 저감을 위한 최적관리방안(Best Management Practices, BMPs)으로써 저영향개발(Low Impact Development, LID)을 위한 생태공학적인 대안으로 활용 가능성이 점차 증대되고 있다.^{23,26,27)} 특히 레인가든의 경우 다른 장치형, 자연형 시설 보다 비용면에서 효율적이고²⁸⁾, 강우 유출수의 경제적이고 환경 친화적 제어법 중 하나로 사용될 수 있는 잠재력이 매우 큰 시설로 알려져 있다.^{29,30)} 또한 레인가든 내 모래, 자갈, 우드칩, 석탄저

회 등을 여과 여재(filter media)로 활용하여 유입되는 강우 유출수 내 존재하는 부유물질, 영양염류 및 중금속을 효과적으로 저감시킬 수 있는 것으로 보고되었다.³¹⁻³³⁾

따라서 본 연구에서는 여과 컬럼 내 발포유리를 여재로 충전하여 부유물질 여과 실험을 진행하고, 컬럼 내 레인가든을 모사하여 발포유리와 모래를 활용해 부유물질 여과 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 1) 발포유리의 물리·화학적 특성 확인, 2) 발포유리여재의 부유물질 농도(suspended solids, SS) 및 탁도(turbidity)의 여과 효율(removal efficiency) 평가, 3) 여과 컬럼 내 부유물질 부하에 따른 수두(head difference, Δh) 및 투수계수(hydraulic conductivity, K) 변화, 4) 누적 접근법(cumulative approach)과 부유물질 물질수지 분석(mass balance)을 통한 여과된 부유물질 부하량 산출을 주요 목적으로 진행하였다. 위와 같은 발포유리의 여재로서 성능을 검토한 후 5) LID 시설 내 사용되는 다양한 여재와의 여과성능 비교를 진행하여 레인가든 내 발포유리의 여재로서 적용 가능성을 검토하였다. 본 연구를 통해 폐유리를 자원화해 제작된 발포유리의 레인가든 내 여재로서 적용 가능성을 확인하고, 실제 레인가든 내 적용 시 고려되어야 하는 다양한 설계인자를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 방법

2.1. 발포 유리

본 연구에서는 폐유리를 파쇄하고 고온(800°C 이상)에서 발포시켜 제작된 발포유리를 구매하여 실험에 사용하였다. 여재의 입경과 분포는 여과 효율을 결정하는 중요 인자이기 때문에^{34,35)} 이전 연구를 참고하여 0~20 mm까지 다양한 입경을 가지는 발포유리골재 중 여재로 활용하고자 파쇄를 진행 후 입경 5 mm 미만의 발포유리는 여재로, 입경 5 mm 이상의 발포유리는 레인가든 내 배수재로 활용하여 실험을 진행하였다 (Fig. 1 참조). 이후 분류된 발포 유리에 잔류하는 일부 분진을 제거하기 위하여 수돗물로 세정 후 상온에서 24시간 건조하여 사용하였으며, 여재와 배수재 모두 체분석을 실시하여 입

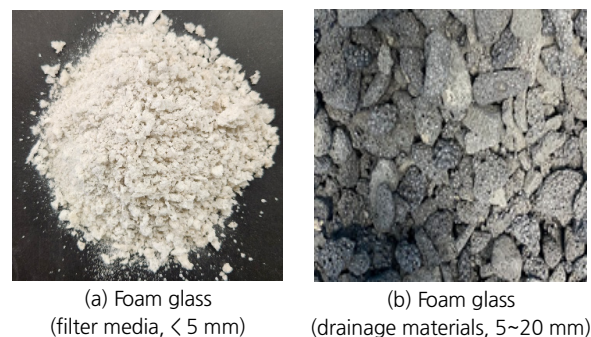


Fig. 1. Pictorial view of foam glass filter media and drainage materials used in filtration column experiment.

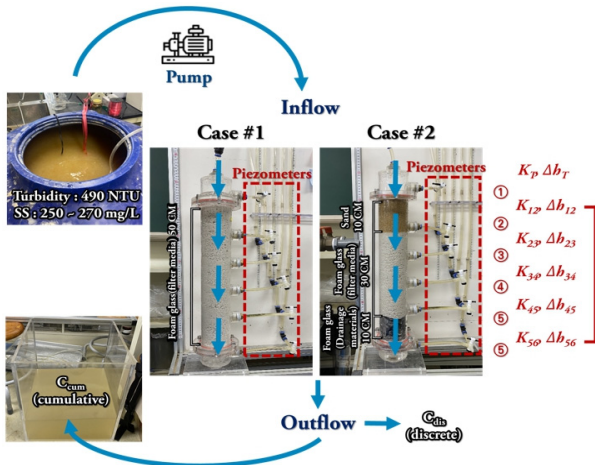


Fig. 2. Schematic diagram of filtration column experiment using form glass media.

경 분포를 확인하고 균등계수(coefficient of uniformity, C_u)와 곡률계수(coefficient of curvature, C_c)를 산출하였다. 또한 표면의 물성과 화학적 조성을 조사하기 위해 Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy(S-4800, HITACHI, Japan)기기를 활용하였다.

2.2. 컬럼 제원 및 실험 방법

비점오염저감시설, LID 시설 등에 유입되는 강우 유출수의 경우, 조사지역의 토지이용형태, 선행건기일수, 강우량, 강우강도 등 여러 자연적, 인위적 요인들의 복합적 함수에 따른 다양한 특성을 보이는 것으로 보고되고 있다.^{36,37)} 따라서 본 연구에서는 강우 시 비점오염저감시설, LID 시설에 유입되는 일정 농도 이상의 강우 유출수를 모사하기 위하여 비점오염저감시설 중 여과형 시설의 부유물질 농도 유입 기준³⁸⁾을 참고하여 인공탁수를 제조하였다. 서화천 주변에서 채취한 토사와 수돗물을 혼합 후 상등액을 1 m³ 크기의 PVC 소재 주입조 (inflow tank)로 이송하였으며, 주입조 내 수중 펌프를 가동하여 인공탁수를 지속적으로 교반하여 컬럼 주입 전 까지 추가적인 침전없이 유입수가 일정한 농도(SS: 250~350 mg/L)가 유지되도록 하였다.

실험에 사용된 컬럼의 전경 및 개략적 실험 방법을 Fig.2에 제시하였다. 컬럼의 경우 원기둥 형태로 직경(D) 8 cm, 높이(H) 50 cm로 제작되었으며 유입부와 유출부 그리고 여재층 사이에 각각 천공된 스테인리스 거름망을 설치하여 인공탁수의 부유물질 농도(C_{SS})와 유입속도(v)를 균등하게 유지하고자 하였다.

Eq. (1)에 제시된 Darcy 법칙에 따르면 컬럼 내 유입되는 인공탁수 유량(Q)은 투수계수(K)와 수리학적 구배(dh/dL) 및 단면적(A)으로 산출할 수 있으며, 동일 유량 조건에서 여재 공극의 폐색으로 인한 투수계수(K) 감소 시 수두가 증가한다. 이를 활용하여 컬럼 구간별 수두 변화(Δh) 및 총 수두 변화

(Δh_T) 확인 시 폐색(clogging)시기와 구간을 예측할 수 있다.^{34,39)} 따라서 여재 컬럼 내 10 cm 간격의 시료 추출부 (sampling ports)를 설치하고 시료 추출부에 3-way valve를 활용하여 피에조미터(piezometer)를 연결하여 컬럼 구간별 수두 변화(Δh) 및 총 수두 변화(Δh_T)를 확인해 컬럼 내 지속적인 부유물질 유입에 따른 컬럼 내 폐색 구간 및 폐색 지속여부를 추정하였다.

$$Q = -K \cdot \frac{dh}{dL} \cdot A \tag{Eq. (1)}$$

여기서, Q 는 유입되는 탁수 유량(cm³/min), K 는 투수계수 (cm/min), h 는 수두(cm), L 는 탁수 이동거리(cm), A 는 실험에 사용된 컬럼 총 단면적(cm²)을 의미한다.

기존 연구에 따르면 여재의 여과 효율은 여재의 입경과 분포, 여재 공극률, 여재층 깊이, 유체의 여과선속도, 부유물질의 유입 부하 등 다양한 함수에 의해 결정되는 것으로 보고 되고 있다.^{34,40-42)} 특히 여과선속도의 경우, 50~1,000 m/day까지 매우 다양한 조건에서 여재의 여과 효율에 대한 연구가 진행되어 왔다.^{34,42-47)} 본 연구에서는 발포유리의 여재로서 적용 가능성을 우선적으로 확인하기 위하여 이전 유사 연구에서 진행된 다양한 여과선속도(linear velocity)를 참고하여 여과선속도를 설정하였다. 첫번째 실험의 경우, 발포유리의 여과 능력을 확인하기 위하여 5 mm 미만의 발포유리여재를 컬럼 내 충전한 이후 50 m/d의 여과선속도로 인공탁수를 하향류(downflow)로 유입시켰다. 두 번째 실험의 경우, 레인가든 내 여재로서 발포유리여재의 여과 능력을 확인하기 위하여 전체 컬럼 높이 50 cm 중 0~10 cm에는 비교적 입경이 큰 배수재 발포유리를 충전하고 10~40 cm 구간에는 입경 5 mm 미만의 발포유리여재를, 40~50 cm 구간에는 모래 (Jumunjin sand, < 1 mm)를 충전하였다(Fig. 2 참조).

각 충전재 사이에는 geotextile을 삽입하여 여재 간 교란이 발생하지 않도록 하였으며 100 m/d의 여과선속도로 인공탁수를 하향류로 유입시켰다. 이후 일정 시간 간격으로 유출부에서 일정량의 시료를 채수(discrete)하고 부유물질 농도 및 탁도를 측정하여 발포유리여재의 부유물질 및 탁도 제거효율을 확인하였다. 부유물질 농도의 경우 수질오염공정시험기준에 고시된 분석 방법을 활용하여 분석되었으며, 탁도는 측정 기기(K100-TB, iSTEK, Korea)를 활용하여 측정하였다. 또한 부유물질 물질수지 분석과 유출조에 누적된 부유물질을 분석하기 위해 유출조에서도 지속적으로 유출수를 폐기하지 않고 축적(cumulative)하여 일정한 시간 간격으로 채수하고 동일한 방법으로 부유물질 농도 및 탁도를 측정하였다. 자세한 컬럼의 제원 및 실험 방법은 Table 1에 제시되었다.

2.3. 부유물질 물질수지 분석

발포유리여재에 여과된 탁수 내 발포유리여재의 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)을 분석하기 위하여 물질수지식을 적용

Table 1. Detail specifications of filtration apparatus using foam glass media.

		Case #1	Case #2	
Cross-sectional area, A (cm ²)		50.24		
Total volume, V_T (cm ³)		2,512		
Length, L (cm)	Foam glass (filter media)	50	Jumunjin sand	10
			Foam glass (filter media)	30
			Foam glass (drainage materials)	10
Column packing weight, W_C (g)	Foam glass (filter media)	1,500	Jumunjin sand	822
			Foam glass (filter media)	1,000
			Foam glass (drainage materials)	85
Bulk density, ρ_b (g/cm ³)		0.5968	0.7588	
Flow rate, Q (mL/min)		175	350	
Linear velocity, v (m/d)		50	100	
Suspended solids concentration, C_{SS} (mg/L)		250~270	340~350	
Hydraulic conductivity, K_T (cm/s)		0.033	0.144	

하였다. 물질수지식은 Eqs. (2)~(4)를 활용하였으며, 유입량 (inflow mass) 및 유출량(outflow mass)은 여과시간(t) 동안 측정된 유입 및 유출수의 부유물질 농도(mg/L)와 유입된 탁수의 유량(L/min)을 활용해 누적하여 산정한 이후, Eq. (4)와 같이 여재 면적(m²)을 고려하여 산정하였다.

$$\text{Inflow mass} = \sum_{t=0}^T [C_{in(dis)} \cdot Q_{in(dis)} \cdot t] \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{Outflow mass} = \sum_{t=0}^T [C_{out(dis)} \cdot Q_{out(dis)} \cdot t] \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\begin{aligned} \text{Filtered amount of SS loading at time, } T \text{ (kg/m}^2\text{)} = \\ \frac{\sum_{t=0}^T [C_{in(dis)} \cdot Q_{in(dis)} \cdot t] - \sum_{t=0}^T [C_{out(dis)} \cdot Q_{out(dis)} \cdot t]}{SA_{fg}} \quad \text{Eq. (4)} \end{aligned}$$

여기서 $C_{in(dis)}$ 과 $C_{out(dis)}$ 은 특정 여과시간(t)에 측정된 부유물질의 유입과 유출 농도(mg/L), 그리고 $Q_{in(dis)}$ 과 $Q_{out(dis)}$ 은 특정 여과시간(t)에 측정된 탁수의 유입과 유출유량(L/min)을 SA_{fg} 는 여과 컬럼 내 탁수 흐름방향에 수직인 발포유리여재의 단면적(m²)을 의미한다.

또한 발포유리여재로 인하여 여과된 탁수 내 발포유리여재의 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)을 비교·검토하기 위해서 누적 물질수지 접근법(cumulative mass approach)⁴⁸⁾을 참고하여 유출조에서 지속적으로 측정된 시료의 농도(mg/L)와 부피(L)를 활용해 Eq. (5)에서 제시된 식에 적용하여 발포유리여재에 여과된 부유물질량(kg)을 산정하고 Eq. (6)과 같이 여재 면적(m²)을 고려하여 발포유리여재의 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)을 산정한 이후, 두 방법을 통해 산정된 발포유리여재의 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)을 비교·검토하였다.

$$\text{Cumulative Outflow mass at time, } T = C_{out(cum)} \cdot V_{out(cum)} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\begin{aligned} \text{Filtered amount of cumulative SS loading at time, } T \text{ (kg/m}^2\text{)} \\ = \frac{\sum_{t=0}^T [C_{in(dis)} \cdot Q_{in(dis)} \cdot t] - C_{out(cum)} \cdot V_{out(cum)}}{SA_{fg}} \quad \text{Eq. (6)} \end{aligned}$$

여기서 $C_{out(cum)}$ 은 특정 여과시간(T)에 유출조에서 누적하여 측정된 부유물질의 농도(mg/L), 그리고 $V_{out(cum)}$ 은 특정 여과 시간(T)에 유출조에서 측정된 누적 부피(L)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발포유리 물리·화학적 특성

여과 실험에 사용된 발포유리의 입경분포 및 물리·화학적 특성을 확인하기 위하여 체분석을 진행하고 발포유리 판매처에서 제공된 물리적 특성을 **Table 2**에 제시하였다. 밀도의 경우 각각 0.38 g/cm³, 0.35 g/cm³로 입경의 크기와 상관없이 모두 물(1 g/cm³)보다 밀도가 낮고 상호 유사한 밀도를 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나 수분이 흡수된 경우, 발포유리의 공극 내로 수분이 포화됨에 따라 밀도가 증가하였으며, 입경이 작은 발포 유리가 상대적으로 높은 수분 흡윤 밀도 범위를 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 여재와 배수재로 사용된 발포유리의 기상률(air filled porosity)은 각각 29.1%, 66.2%로 입경의 크기에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 발포유리의 입경이 클수록 내부에 많은 기공이 발달되어 있으나 물 분자와의 친수성이 낮은 반면 기체는 압축되어 공극 내부로 침투되므로 수분 흡윤 밀도는 낮으나 높은 기상률을 가지고 있는 것으로 판단된다. 체분석을 진행하고 균등계수 및 곡률계수를 산출한 결과, 여재로 사용된 발포유리는 비교적 모두 균질한(homogeneous) 입도를 가지고 있는 것으로 조사되었으나, 배수재로 사용된 발포유리는 균등계수가 4.06으로 비교적 높은 값이 확인되었으며, 입경의 크기와 분포가 상대적으로 매우 크고 다양한 것으로 확인되었다.

Table 2. Physicochemical properties and particle-size distribution characteristics of foam glass media.

	Foam glass (filter media)	Foam glass (Drainage materials)
Specific density (g/cm ³)	0.38 ^a	0.35 ^a
Density at moisture absorption (g/cm ³)	0.65~0.78 ^a	0.45~0.50 ^a
Porosity (%)	69.3 ^a	78.5 ^a
Air filled porosity (%)	29.1 ^a	66.2 ^a
Diameter (mm)	<i>d</i> ₁₀	0.56 ^b
	<i>d</i> ₃₀	0.72 ^b
	<i>d</i> ₆₀	1.07 ^b
Coefficient of uniformity, <i>C</i> _v	1.90 ^b	4.06 ^b
Coefficient of curvature, <i>C</i> _c	0.85 ^b	1.79 ^b

^a <http://www.rainbowscape.com/business04/part05.php>⁽⁴⁹⁾
^b In this study

여재로 사용된 발포유리여재의 SEM/EDS 분석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 발포유리여재의 표면은 비교적 매끈한 편이나 0~200 μm까지 다양한 크기의 공극을 형성하고 있는 것으로 확인되었다. 발포유리여재에 형성되어 있는 다양한 크기의 공극은 부유물질을 효과적으로 내부에 포집함과 동시에 외부에 흡착을 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 표면 내 분포하는 원소 확인 결과, 주로 O, Si, C, Na 등의 원소가 표면에 존재하는 것으로 확인되었으며, 각종 중금속을 포함한 오염물질의 표면 분포는 확인되지 않았다. 따라서 발포유리여재를 레인가든 내 여재로 활용 시, 표면에 존재하는 중금속 용출로 인하여 환경에 미치는 위해성은 없을 것으로 판단된다.

3.2. 부유물질 및 탁도 여과 효율 평가

컬럼 내 탁수 유입에 따른 컬럼의 육안상 변화를 Fig. 4에 제시하였다. 발포유리여재만 충전된 컬럼의 경우 탁수 유입 전, 하얀색의 발포유리여재가 확인되었으나, 탁수를 흘려준 이후 발포유리여재의 색이 부유물질과 혼합되어 점차 진한 갈색으로 변화하였다. 특히 실험 초기에는 컬럼 상부에서 우선적으로 많은 양의 부유물질이 여과로 인해 축적되는 것으로

관찰되었으며, 시간이 경과함에 따라 컬럼 전체에 부유물질이 축적되고, 축적된 양이 증가하여 점차 진한 갈색으로 변화하는 것으로 확인되었다.

레인가든을 모사한 실험에서도 유사하게 탁수의 유입에 따라 발포유리여재의 색이 점차 진한 갈색으로 변화하였으나, 발포유리여재만 충전된 컬럼보다 부유물질 유입 부하량이 많아 상대적으로 빠르게 발포유리여재의 색이 진한 갈색으로 변화하고 부유물질이 컬럼 전체에 축적되는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 진행된 여과 컬럼의 부유물질 및 탁도 여과 효율을 Fig. 5에 제시하였다. 발포유리여재만 충전된 컬럼의 경우(Fig. 5a 참조), 초기에는 95% 이상의 높은 부유물질 제거효율이 확인되었으나, 시간이 경과함에 따라 부유물질 유입 부하량이 증대되면서 여재 공극 내 폐색이 발생하여 제거효율이 점차 감소하였다. 200 min 이후 부유물질 제거효율이 10% 이상 급격히 감소하였으나 더 이상 제거효율이 감소되지 않고 80% 이상의 제거효율을 실험종료 시까지 유지하였다. 이는 폐색된 공극 내 축적된 부유물질이 일부 탈리되고, 발포유리여재의 밀도(0.35 g/cm³)가 물보다 낮아 컬럼 내부에서 지속적인 교란으로 재배치되어 폐색이 일부 완화되어 제거효율이 더 이상 감소하지 않고 증가 또는 유지된 것으로 판단된다. 탁도 역시 부유물질과 유사한 경향이 확인되었으나, 비교적 작은 입径의 부유물질 입자는 여재의 공극 통해 여과되지 않고 유출되어 부유물질 제거효율 대비 10~20% 정도의 낮은 제거효율이 확인되었다.

부유물질 및 탁도 제거효율의 증가는 레인가든을 모사한 실험(Fig. 5b 참조)에서 명확히 확인되었다. 실험 초기에는 주된 여과 역할을 하는 발포유리여재 충전 길이가 이전 실험 대비 짧아 상대적으로 낮은 60% 정도의 부유물질 제거효율이 확인되었으며, 컬럼 내 유입 부하량이 증대됨에 따라 제거효율이 점차 감소할 것으로 예상되었다. 그러나 일부 구간에서 제거효율이 10% 이상 급격히 증가하였다가 다시 감소하는 현상이 반복되었다. 탁도 역시 이전 컬럼 실험과 유사하게 매우 작은 입径의 부유물질 입자를 여과하지 못해 부유물질 제거효율 대비 10% 정도의 낮은 제거효율이 확인되었으며, 제거효율의 증감이 반복되었다. 이는 발포유리를 여재로 사용 시, 부유물질 유입 부하량이 증대됨에 따라 일부 구간에서 폐색이 발생

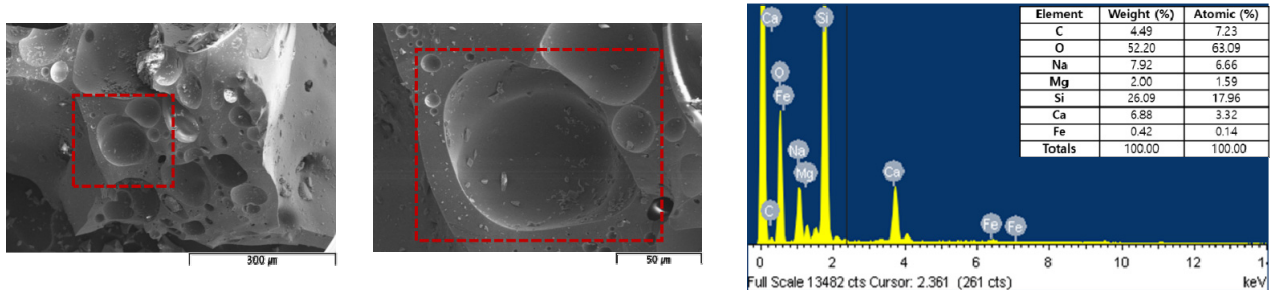


Fig. 3. SEM/EDS results of foam glass media: (a) ×180, (b) ×600, and (c) EDS results.

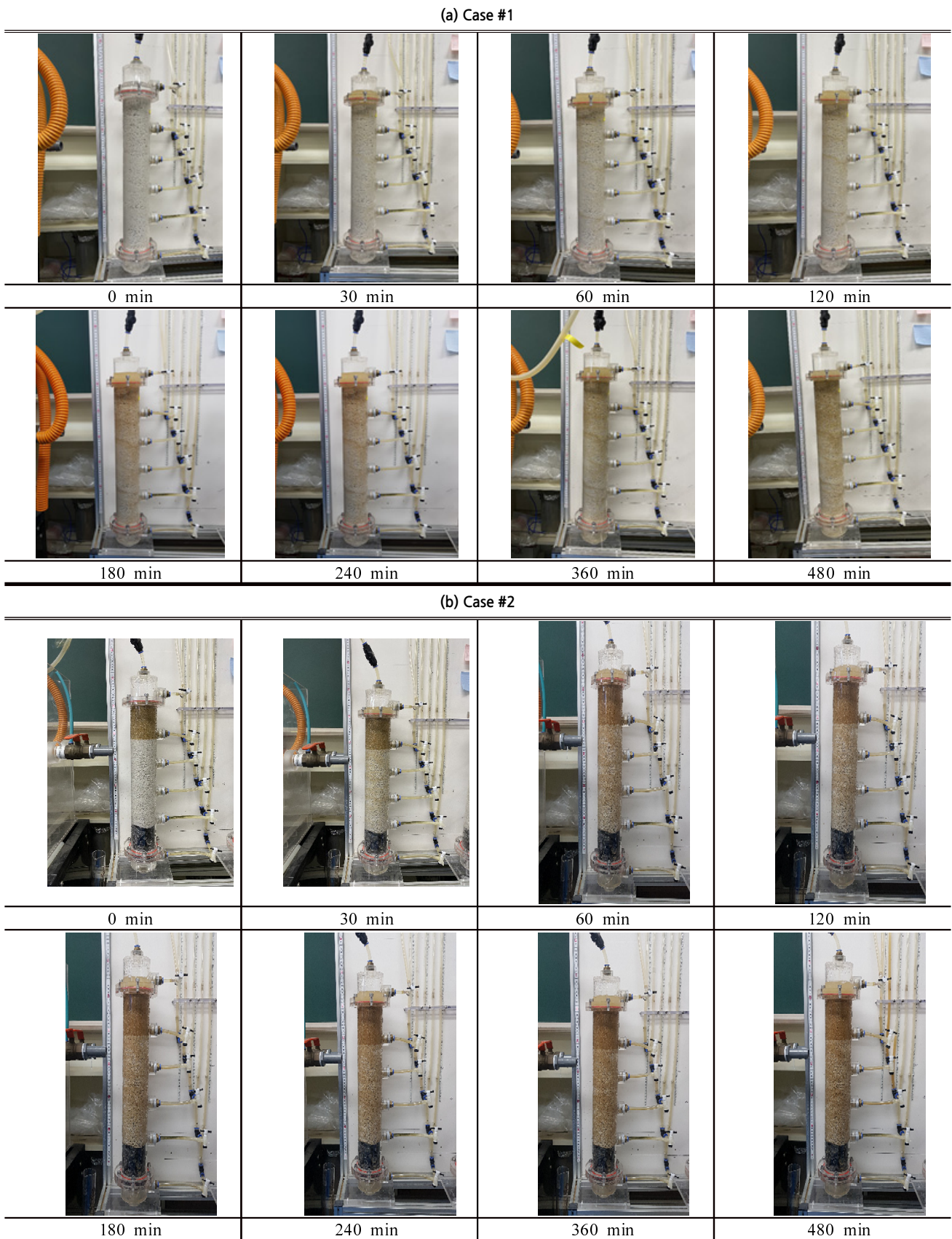


Fig. 4. Pictorial view of filtration column experiment using foam glass media with elapsed time.

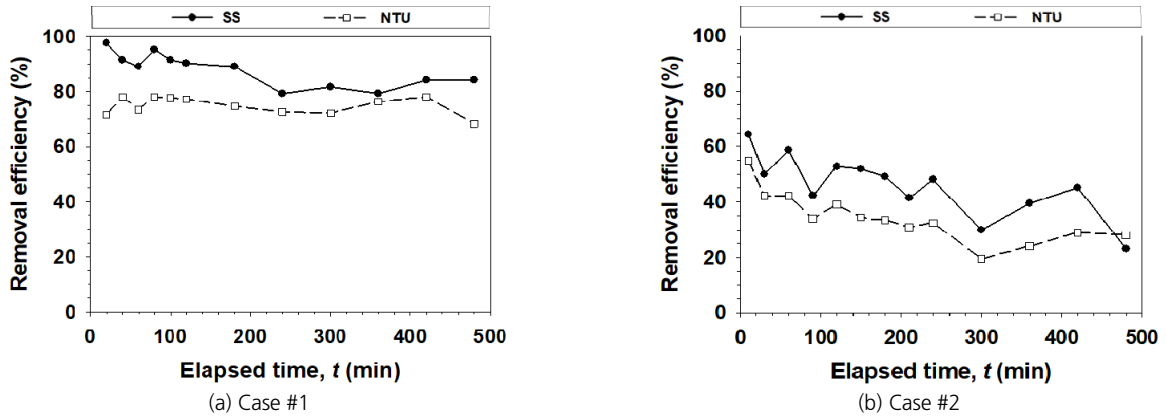


Fig. 5. Removal efficiency of suspended solids and turbidity using foam glass media.

할 수 있으나, 폐색 이후 물보다 밀도가 낮은 발포유리여재가 수두에너지로 인해 지속적으로 교란 및 재배치되어 공극 및 채널의 재배열로 일부 폐색을 완화시킨 것으로 판단된다. 따라서 기존 여재에서 발생하는 폐색과 여재 교체 필요에 대한 단점을 극복할 수 있으며, 발포유리를 여재로 사용 시 장기간 높은 부유물질 및 탁도 제거효율을 유지할 수 있을 것으로 예상되나, 정확한 부유물질 및 탁도 제거효율을 확인하기 위해서는 장기적인 효율 평가를 통한 검증이 필요하다.

3.3. 수두 및 투수계수 변화

컬럼 내 탁수 유입에 따른 수두 및 투수계수 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 발포유리여재만 충전된 컬럼의 경우(Fig. 6a 참조), 탁수 유입에 따라 부유물질의 지속적인 유입으로 인하여 공극 폐색이 발생하고 흐름이 방해되어 컬럼 내 수두 손실이 발생해 총 투수계수가 감소하였으나 흐름을 크게 방해하지 않는 수준에서 완만하게 감소하였다. 구간별 수두 및 투수계수 검토 시, 여과 컬럼의 상부인 40~50 cm 구간에서 300 min

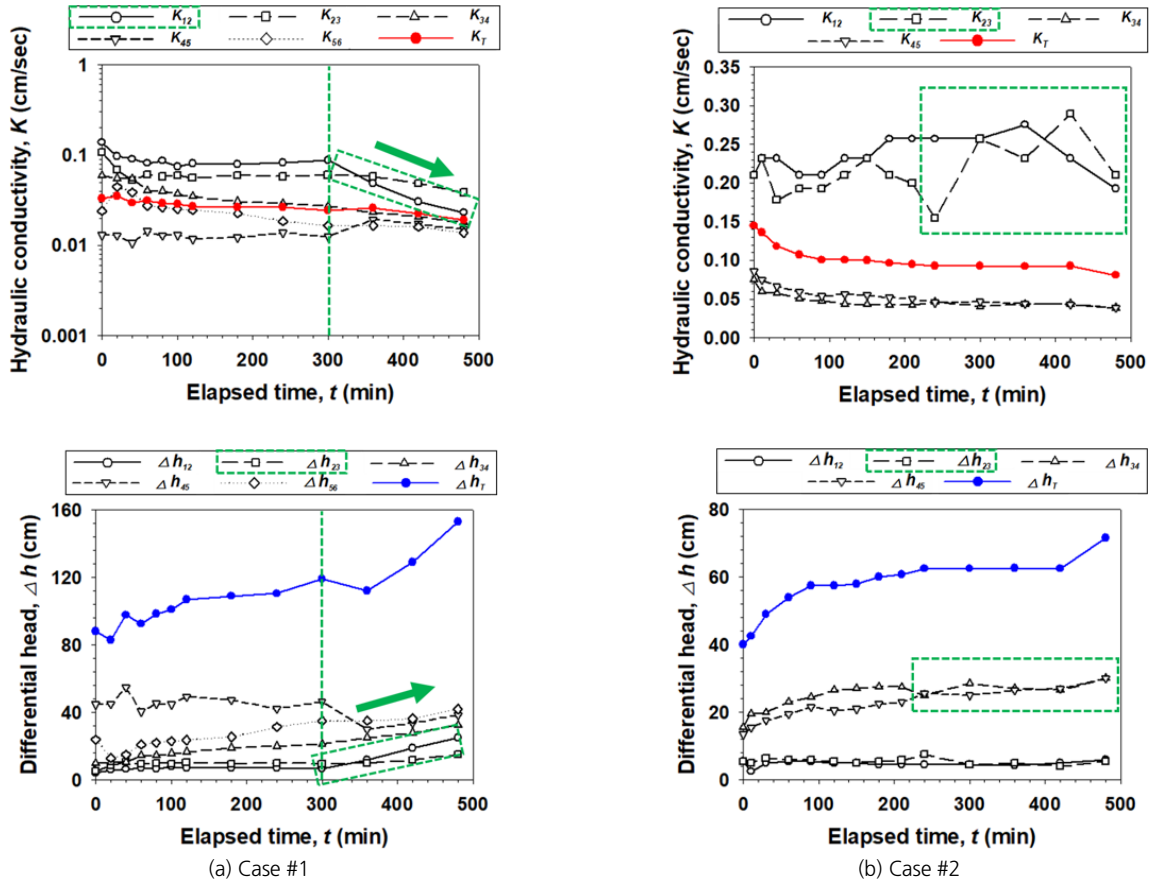


Fig. 6. Changes in both hydraulic conductivity and head difference of foam glass media during filtration column experiment.

이후 부유물질의 여과로 인한 발포유리여재 내 공극 폐색이 발생하여 수두(Δh_{12})는 상승하고 투수계수(K_{12})는 감소하였다. 반면 0~40 cm 구간의 경우 시간이 경과됨에 따라 부유물질 유입 부하량이 증대되어도 300 min까지 일정하게 유지되다가 점진적으로 수두가 상승하고 투수계수가 감소하였으나, 40~50 cm 구간 대비 변화 폭이 크지 않은 것으로 관찰되었다.

레인가든을 모사한 두번째 실험의 경우(Fig. 6b 참조), 발포유리여재 충전 높이(10~30 cm)가 짧고 0~10 cm 구간에 모래를 충전하여 초기 상부의 투수계수가 상대적으로 높은 것으로 확인되었다. 부유물질의 지속적인 유입에 따라 공극 폐색이 점차 발생하며 컬럼 내 수두 손실이 발생하였으나 흐름을 크게 방해하지 않는 수준에서 완만하게 감소하였으며, 구간별 수두 및 투수계수 변화 확인 시 200 min 이후 발포유리여재 충전 구간 중 상부인 10~20 cm 구간에서 부유물질 제거 효율 변화 결과와 유사하게 수두(Δh_{23})와 투수계수(K_{23})의 증감이 반복되었다. 따라서 여과공정이 활발하게 발생하는 컬럼의 상부에서 총 수두(Δh_T)와 총 투수계수(K_T)를 지배하며, 다량의 부유물질이 여과됨에 따라 공극 폐색을 발생시키지만 밀도가 낮은 발포유리여재의 특성으로 인하여 부유 및 교란이 발생해 공극의 재배열 또는 재생으로 일부 폐색을 완화시킨 것으로

판단된다. 본 연구와 유사하게 Segismundo et al. (2016)⁵⁰, Lee et al. (2018)⁵¹, Kang et al. (2019)³⁴ 등의 연구에서 하향류로 여과 컬럼 실험 수행 시, 다양한 실험조건에서 부유물질은 여과 컬럼의 상부 25% 깊이에서 부유물질 총량의 70% 이상이 여과되어 공극 폐색이 진행되는 것으로 보고하고 있다. 따라서 여과 컬럼의 전체 여과 효율을 결정하는데 있어 여과공정이 발생하는 여재 상부의 공극 폐색 여부가 매우 중요한 인자로 작용하며, 발포유리여재의 경우 폐색된 공극의 재배열 및 재생을 통해 여재 상부뿐만 아니라 여재층 전부를 활용이 가능해 수명이 연장되어 유지관리 비용이 절감될 것으로 판단된다.

3.4. 물질수지를 활용한 부유물질 부하량 산출

발포유리여재에 여과된 탁수 내 부유물질의 부하량을 분석하기 위하여 물질수지식을 이용해 발포유리여재 면적(m^2) 당 여과된 부유물질량(kg)을 Fig. 7에 제시하였다. 발포유리여재만 충전된 컬럼의 경우 일부 구간에서 폐색이 발생한 것으로 판단되었으나 물보다 밀도가 낮은 발포유리여재의 영향으로 컬럼 내부에서 지속적인 교란이 발생해 폐색이 일부 완화되어 여과 성능이 저하되지 않고 여과가 지속되어 발포유리여재

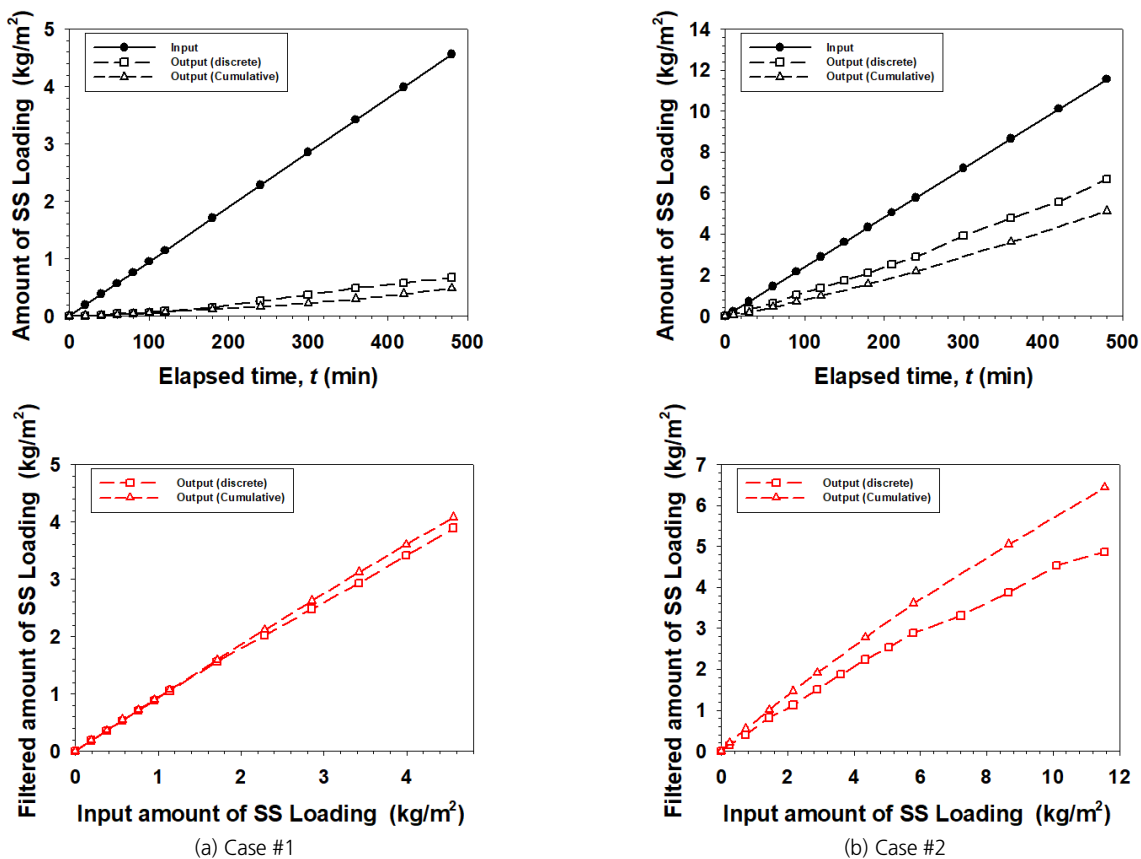


Fig. 7. Comparison of filtered amounts of suspended solids using foam glass media between discrete and cumulative mass approach.

면적(m²)당 여과된 누적 부유물질량(kg)이 지속적으로 증가하였다. 유출부에서 일정한 시간간격으로 채수한 유출수 시료(discrete)와 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)를 비교한 결과, 발포유리여재 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)이 유사하게 도출되었으나, 누적된 시료를 활용하여 산정된 부유물질 부하량이 높은 것으로 산출되었다.

레인가든을 모사한 두번째 실험에서도 충전된 발포유리여재의 양과 구성의 차이로 제거효율이 상대적으로 낮아 여과한 부유물질 부하량의 차이는 있지만 컬럼 내부에서 지속적인 교란이 발생해 폐색이 일부 완화되어 여과 성능이 저하되지 않고 여과가 지속되어 발포유리여재 면적(m²) 당 여과된 누적 부유물질량(kg)이 지속적으로 증가하였으며, 유출부에서 일정한 시간간격으로 채수한 유출수 시료(discrete)와 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)의 발포유리여재 면적(m²) 당 여과된 부유물질량(kg)을 비교 시, 누적된 시료를 활용하여 산정된 부유물질 부하량이 더 높게 산정되었다. 이는 유출부에서 일정한 시간 간격으로 채수한 시료(discrete)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량을 반영하지 못하여 여과 컬럼 내 잔류한 부유물질량이 더 낮은 것으로 예측해 산정한 결과이다. 따라서 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량과 무관하게 물질수지식을 기반으로 산정하여 훨씬 더

정확하게 여과공정을 통한 부유물질 제거량 산정이 가능하다.

3.5. 다양한 여재와의 여과 효율 비교

기존에 탁수 내 부유물질 유출 저감을 위하여 연구가 진행된 여러 여재의 다양한 조건에 따른 부유물질 제거효율을 **Table 3**에 정리하여 제시하였다. 조사된 여재의 여과 실험은 여재 입경, 여과선속도, 부유물질 유입부하 등 실험 조건이 다양하여 본 연구에서 진행된 실험과 비교·분석을 위해 유사한 부유물질 유입 부하량(4~5 kg/m²)에서 제거효율을 비교하였다. 발포 유리의 제거효율은 84% 이상으로 타 여재보다 제거효율이 상대적으로 높거나 유사하여 여재로서 사용 가능하다고 판단된다. 본 연구에서 진행된 실험의 경우, 다른 여재 실험 대비 여과선속도가 4~10배 정도 낮아 유입되는 부유물질 부하량이 상대적으로 낮기 때문에 유입 부하량이 증대될 경우 일부 구간에서 폐색이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 폐색 후 물보다 밀도가 낮은 발포유리여재의 수두에너지로 인한 지속적인 부유 및 교란을 통해 공극의 재배열 및 재생으로 일부 폐색을 완화시켜 장기간 높은 부유물질 및 탁도 제거 효율을 유지할 수 있으며, 밀도가 물보다 큰 기존 여재에서 발생하는 폐색과 여재 교체 필요에 대한 단점을 극복하여 발포유리여재를 현장에 적용 시 장기간 높은 부유물질 및 탁도 제거효율을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. Jung

Table 3. Comparison of removal efficiency of suspended solids among various types of filter media.

Filter media	Media particle size	Concentration of raw water (mg/L)	Filtration linear velocity (m/d)	Removal efficiency (%)	Reference
Foam glass (Case #1)	< 5 mm	270	50 m/d	84.2	This study
Foam glass with sand (Case #2)	0~20 mm	340	100 m/d	49.0	
Foam glass	< 2 mm	112.1	187.2 ~ 1310 m/d	47	Jung et al. (2019) ⁴³⁾
Granular media	7×5×3 mm	310.8	500 m/d	85.4	Park (2018) ⁴⁴⁾
Fiber filter	25~30 mm	308.7	490 m/d	63.1	Park (2018) ⁴⁴⁾
Fiber filter	1.5×1.5×1.5 cm	300	480 m/d	60	Kim et al. (2019) ⁴⁵⁾
Zeolite	1~4 mm	123	508 m/d	60.9	Park (2018) ⁴⁴⁾
Volcanic stone	5~10 mm	303	480 m/d	88.4	Kim (2016) ⁴⁶⁾
Poly ethylene	-	311	480 m/d	94.8	Kim (2016) ⁴⁶⁾
Fiber ball	-	285	480 m/d	76.8	Kim (2016) ⁴⁶⁾
Wood waste	< 100 mm	571	240 m/d	75	Kang et al. (2012) ⁴⁷⁾
		794	200 m/d	68.9	
	3~6 mm	731	500 m/d	41.9	
		923	1000 m/d	27.4	
		532	200 m/d	58.2	
Bottom ash	6~10 mm	660	500 m/d	54.4	
		559	1000 m/d	52.4	
		528	200 m/d	63.8	
	10~20 mm	587	500 m/d	46.9	
		512	1000 m/d	15.8	

et al. (2019)⁴³⁾에서도 발포유리를 여재로 활용하여 컬럼 실험을 진행한 결과, 밀도가 낮고 다공성이 높기 때문에 여재로 사용 가능하며, 재사용을 위한 역세척 시 밀도가 낮기 때문에 역세척에 소모되는 시간이 적고 에너지 소비가 적기 때문에 우수한 여재로 보고되고 있다. 그러나 여과된 부유물질량(kg)은 여재의 입경과 분포, 여재 공극률, 여재층의 깊이, 유체의 여과선속도, 부유물질의 유입부하 등 다양한 함수에 의해 결정되는 것으로 보고 되고 있기 때문에^{34,40-47)}, 다양한 조건하에 추가적인 현장 장기 실증 실험을 통해 발포유리여재의 활용 가능성을 조사할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 폐유리를 재활용하고 자원화하기 위하여 제작된 발포유리의 레인가든 내 여재로서 적용 가능성을 확인하기 위하여 컬럼 실험을 진행하였으며 다양한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 발포유리의 경우 물보다 밀도가 낮고 균질한 입도를 가지고 있으며 표면이 매끈하고 0~200 μm 까지 다양한 크기의 공극을 형성하고 있어 부유물질을 효과적으로 내부에 포집함과 동시에 외부에 흡착을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 발포유리여재가 충전된 두 컬럼 모두 높은 부유물질 제거효율이 확인되었으나, 부유물질 유입 부하량이 증대되면서 여재 공극 내 폐색이 발생하여 제거효율이 점차 감소하였다. 그러나 실험 진행 기간 동안 일부 구간에서 제거효율 상승이 관찰되었다. 이는 물보다 밀도가 낮은 발포유리여재가 수두에너지로 인해 지속적으로 교란 및 재배치되어 공극 및 채널의 재배열로 일부 폐색을 완화시킨 것으로 판단된다.

3) 컬럼 내 탁수 유입에 따른 수두 및 투수계수 변화 확인 시, 컬럼 내 수두 손실이 발생해 총 투수계수가 감소하였으나 흐름을 크게 방해하지 않는 수준에서 완만하게 감소하였다. 특히 발포유리여재가 충전된 구간의 상부에서 총 수두(Δh_T)와 총 투수계수(K_T)를 지배하는 것으로 확인되었다. 여재 상부의 공극 폐색 여부는 매우 중요한 인자로 보고되고 있으며, 발포유리여재의 경우 폐색된 공극의 재배열 및 재생을 통해 여재 상부뿐만 아니라 여재층 전부를 활용이 가능해 수명이 연장되어 유지관리 비용이 절감될 것으로 판단된다.

4) 발포유리여재에 여과된 탁수 내 부유물질의 부하량을 분석하기 위하여 물질수지식을 이용해 발포유리여재 면적(m^2) 당 여과된 부유물질량(kg)의 경우, 누적된 시료를 활용하여 산정된 부유물질 부하량이 더 높게 산정되었다. 따라서, 유출부에서 지속적으로 축적하여 누적된 시료(cumulative)가 시간에 따라 변화하는 부유물질 제거량과 무관하게 물질수지식을 기반으로 산정하여 훨씬 더 정확하게 여과공정을 통한 부유물질 제거량 산정이 가능하다.

5) 유사한 부유물질 유입 부하량 조건에서 타 여재와 제거효율

비교 시, 물보다 밀도가 낮아 지속적으로 교란되어 공극의 재배열 및 재생으로 일부 폐색을 완화시켜 장기간 높은 부유물질 및 탁도 제거효율을 유지하는 여재로 판단된다. 그러나 여과된 부유물질량(kg)은 여재의 입경과 분포, 여재 공극률, 여재층의 깊이, 유체의 여과선속도, 부유물질의 유입부하 등 다양한 함수에 의해 결정되는 것으로 보고 되고 있기 때문에, 다양한 조건하에 추가적인 현장 장기 실증 실험을 통해 발포유리여재의 활용 가능성을 조사할 필요가 있다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 국가 R&D(22AUDP-B146511-5)의 지원을 받아 연구를 수행했습니다.

References

1. H. R. Fernandes, D. U. Tulyaganov, J. M. F. Ferreira, Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents, *Ceramics international*, 35(1), 229-235(2009).
2. M. J. Son, Research on the utilization of waste glass as a circulating resource, *Magazine of RCR*, 15(3), 40-45(2020).
3. H. S. Lee, H. Lee, Comminution characteristics for recycling waste glass bottle, *Resources Recycling*, 29(2), 28-36(2020).
4. P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner production*, 114, 11-32(2016).
5. R. Merli, M. Preziosi, A. Acampora, How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review, *Journal of cleaner production*, 178, 703-722(2018).
6. J. H. Park, Evaluation on material properties of lightweight cement mortar with crushed and expanded waste glass aggregates, *Magazine of RCR*, 14(2), 28-34(2019).
7. Ministry of Environment, Waste recycling statistics, <https://www.data.go.kr/dataset/3043420/fileData.do>, November (2022).
8. H. Lee, H. S. Lee, The process development study for improving recycling rate of waste glass bottles, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 33(5), 20-23(2021).
9. Korean Law Information Center Home Page, <https://www.law.go.kr>, November(2022).
10. Y. I. Lee, J. H. Eom, Y. W. Kim, I. H. Song, Effect of additive composition on flexural strength of cullet-loess tile bodies, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 50(6), 416-422(2013).
11. J. K. Kim, I. D. Lim, The development of environmental friendly glass tile design for coal refuse, *Journal of Korea Design Knowledge*, 25, 367-375(2013).
12. A. Jamshidi, K. Kurumisawa, T. Nawa, T. Igarashi, Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 211-236 (2016).

13. S. H. Kim, S. H. Kim, Y. S. Park, H. G. Jeon, C. H. Seo, A experimental study on the property of lightweight aggregate concrete using hollow micro sphere, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 15(2), 177-183(2015).
14. T. O. Ogundairo, D. D. Adegoke, I. I. Akinwumi, O. M. Olofinnade, Sustainable use of recycled waste glass as an alternative material for building construction - A review, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640(1), 012073(2019).
15. J. Bai, X. Yang, S. Xu, W. Jing, J. Yang, Preparation of foam glass from waste glass and fly ash, *Materials Letters*, 136, 52-54(2014).
16. M. Hibbert, Understanding the production and use of foam glass gravel across europe and opportunities in the UK, Final Report, (2016).
17. J. A. Kim, B. J. Kim, T. H. Kim, W. J. Kim, G. H. Jang, J. M. Oh, Evaluation of removal efficiency of pollutants with filter media, *Journal of Korea Society of Water Science and Technology*, 24(1), 27-36(2016).
18. H. W. Guo, X. F. Wang, Y. X. Gong, X. N. Liu, D. N. Gao, Improved mechanical property of foam glass composites toughened by glass fiber, *Materials Letters*, 64(24), 2725 - 2727(2010).
19. M. Jain, V. K. Garg, K. Kadirvelu, Cadmium (II) sorption and desorption in a fixed bed column using sunflower waste carbon calcium - alginate beads, *Bioresource technology*, 129, 242-248(2013).
20. J. König, R. R. Petersen, Y. Yue, Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass, *Ceramics international*, 41(8), 9793-9800(2015).
21. F. Mear, P. Yot, M. Cambon, R. Caplain, M. Ribes, Characterisation of porous glasses prepared from cathode ray tube (CRT), *Powder technology*, 162(1), 59-63(2006).
22. N. Dunnett, A. Clayden, Rain gardens, *Managing water sustainably in the garden and designed landscape*, 1st ed., Timber Press Publishing, U.S.A, (2007).
23. T. M. Muthanna, M. Viklander, S. T. Thorolfsson, Seasonal climatic effects on the hydrology of a rain garden, *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(11), 1640-1649(2008).
24. G. H. LeFevre, R. M. Hozalski, P. J. Novak, The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils, *Water research*, 46(20), 6753-6762(2012).
25. P. E. D. Flores, M. C. Maniquiz-Redillas, F. K. F. Geronimo, J. C. P. Alihan, L. H. Kim, Transport of nonpoint source pollutants and stormwater runoff in a hybrid rain garden system, *Journal of Wetlands Research*, 18(4), 481-487(2016).
26. M. E. Dietz, J. C. Clausen, A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment, *Water, Air, and Soil Pollution*, 167(1), 123-138(2005).
27. D. H. Kim, C. G. Park, Optimum mix proportion and mechanical properties of rain garden structure concrete using recycled coarse aggregate, hwang-toh, blast furnace slag and jute fiber, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(3), 25-33(2013).
28. A. Wossink, B. Hunt, The economics of structural stormwater BMPs in North Carolina, *Water Resources Research Institute of the University of North Carolina*, (2003).
29. S. M. Kim, I. S. Lee, Articles : environmentally friendly controlling way of storm water by using rain garden, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 10(5), 58-66(2007).
30. C. S. Kim, K. J. Sung, Effects of rain garden on reduction of subsurface runoff and peak flow, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 14(5), 69-79(2011).
31. J. F. Good, Water quality treatment and hydraulic efficacy of laboratory and field rain gardens, *University of Canterbury*, (2011).
32. J. S. Hong, L. H. Kim, Assessment of performances of low impact development (LID) facilities with vegetation, *Ecology and resilient infrastructure*, 3(2), 100-109(2016).
33. H. Wang, Y. Sun, L. Zhang, W. Wang, Y. Guan, Enhanced nitrogen removal and mitigation of nitrous oxide emission potential in a lab-scale rain garden with internal water storage, *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102147(2021).
34. E. B. Kang, J. C. Joo, G. W. Bang, J. H. Kim, B. U. Park, J. S. Choi, Y. H. Kim, A study on filtration characteristics of turbid water in construction sites using bottom ssh as filter media I . lab scale upflow filtration column experiment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(2), 88-99(2019).
35. B. S. Lee, L. H. Kim, B. H. Goo, Clogging characteristics of stormwater infiltration system according to filter media conditions, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 18(3), 391-398(2018).
36. J. Y. Choi, C. M. Shin, Stormwater runoff management plan for reduction of outflow from nonpoint pollution sources, *Basic Research Report*, 1-220(2002).
37. Seong Su Kim, Jong Seok Kim, Ki Yeon Bang, Eun Mi Gwon, Wook Jin Chung, The estimation of the unit load and characteristics of non-point source discharge according to rainfall in kyongan watershed, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 24(11), 2019-2027(2002).
38. Ministry of Environment Home Page, <https://www.me.go.kr>, November(2022).
39. H. Darcy, Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitumen, *Dalmont*, 2(5), (1856).
40. C. S. Lim, D. G. Kim, S. O. Ko, Evaluation of downflow granular media filtration for stormwater treatment, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 34(10), 684-693(2012).
41. S. W. Kang, T. Y. Lee, Recycling of wood waste generated from construction sites for removal of soil efflux, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(3), 245-250(2012).
42. K. W. Bang, J. C. Joo, J. H. Kim, E. Kang, J. Choi, J. M. Lee, Y. Kim, Application of bottom ash as filter media for construction site runoff control, *Water*, 12(4), 990(2020).
43. T. U. Jeong, K. H. Chu, S. J. Kim, J. Lee, K. J. Chae, M.

- H. Hwang, Evaluation of foam-glass media in a high-rate filtration process for the removal of particulate matter containing phosphorus in municipal wastewater, *Journal of environmental management*, 239, 159-166(2019).
44. J. C. Park, Comparison analysis of filtration efficiency of the upflow type nonpoint pollution filter, Korea National University of Transportation Master's Thesis, 1-54(2018).
45. J. Y. Kim, Y. S. Choi, J. H. Kim, S. H. Hong, T. I. Jeong, S. C. Kwon, Filtration efficiency of fiber filter for total suspended solid removal and backwash effect, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 19(4), 247-256(2019).
46. S. S. Kim, A study on up flow filtering nonpoint source pollutants treatment facilities using volcanic stone filter media, University of Seoul Master's Thesis, 1-92(2016).
47. S. W. Kang, T. Y. Lee, Recycling of wood waste generated from construction sites for removal of soil efflux, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(3), 245-250(2012).
48. C. D. Shackelford, Contaminant transport, In *geotechnical practice for waste disposal*, ringer, Boston, MA, 33-65(1993).
49. Rainbowscape Home Page, <http://www.rainbowscape.com/business04/part05.php>, November(2022).
50. E. Q. Segismundo, B. H. Koo, L. H. Kim, B. S. Lee, Effects of media breakage on infiltration characteristics in stormwater management system, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 32(2), 31-41(2016).
51. B. Lee, L. Kim, B. Goo, Clogging characteristics of stormwater infiltration system according to filter media conditions, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(3), 391-398(2018).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Hyeon Woo Go

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, MS candidate, ORCID[®] 0000-0002-9384-1954: Conceptualization, Data analysis, Methodology, Visualization, Validation, Writing - original draft, Writing - review and editing.

Soo-Young Moon

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ph.D, ORCID[®] 0000-0002-8117-1957: Funding acquisition, Supercision, Validation, Writing - review and editing.

Hyeon Soo Kim

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ph.D, ORCID[®] 0000-0002-5648-5399: Funding acquisition, Supercision, Validation.

So Ye Jang

Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, MS, ORCID[®] 0000-0002-1189-6725: Data analysis, Methodology, Visualization, Validation.

Eun Byeol Kang

Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, MS, ORCID[®] 0000-0002-0698-7905: Data analysis, Methodology, Visualization, Validation.

Jin Chul Joo

Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-8551-3945: Conceptualization, Data analysis, Validation, Writing - original draft, Writing - review and editing.