

산업폐기물을 활용한 무기계 흡음 패널 개발 기초 연구

Developing Sustainable Inorganic Sound-Absorbing Panel Mixtures Using Industrial Waste

이철규¹ · 권성우^{2*}Cheulkyu Lee¹ · Seongwoo Gwon^{2*}

(Received November 13, 2023 / Revised November 20, 2023 / Accepted November 21, 2023)

Addressing urban noise problems, this study develops eco-friendly, inorganic sound-absorbing panels, overcoming the limitations of traditional PMMA and cement-based panels. These conventional panels pose safety risks due to flammability and environmental concerns due to carbon emissions. Utilizing industrial waste, the research comprises two phases: initial tests for physical and performance characteristics (fluidity, density, compressive strength, sound absorption) and subsequent development of optimized panel mixtures. This approach aims to replace existing panels with sustainable, effective alternatives, significantly contributing to safer, environmentally responsible urban infrastructure. The findings of this study have implications for the sound panel market, offering novel solutions for noise control while aligning with environmental and safety standards.

키워드 : 흡음 패널, 산업폐기물, 식물섬유, 무기 재료, 소음 제어**Keywords** : Sound absorbing panel, Industrial waste, Cellulose fiber, Inorganic materials, Noise control

1. 서론

도시화의 급속한 진전과 함께 증가하는 교통량은 환경 소음 문제를 심화시켰다. 이러한 배경 아래에서 효과적인 소음 관리와 대책이 그 어느 때보다 중요해졌다. 특히 교통 소음의 경우, 방음 터널과 방음 패널의 사용은 소음저감을 위한 주요한 해결책으로 자리 잡았다. 그러나 현재 국내외에서 널리 사용되는 방음 패널들은 주로 차음 기능에 중점을 두고 있으며, 많은 패널이 연소성을 지니고 있어 화재 발생 시 안전 문제가 우려된다. 특히, Polymethyl methacrylate (PMMA) 기반의 방음 패널은 높은 투명성과 가공성으로 인기를 끌고 있지만, 제한된 내화성 및 낮은 내구성으로 인해 장기 사용 시 안전성 및 성능 저하 문제가 발생할 수 있다.

기존의 무기계 흡음 패널 개발 연구들은 주로 전통적인 시멘트 기반의 소재에 집중해 왔으나(Tie et al. 2020), 이는 여러 한계점

을 내포하고 있다. 시멘트 생산 과정에서 발생하는 탄소 배출은 환경 문제를 악화시키는 주요 요인 중 하나이며, 이러한 패널들은 종종 제한된 흡음 성능을 보이며, 특히 저주파 소음에 대한 효과적인 인 제어가 부족하다는 점이 지적됐다(Neithalath et al. 2004). 또한, 시멘트 기반 소재의 무거운 무게는 설치와 유지 관리 측면에서 불리하며, 이로 인한 구조적 부담이 크다.

본 논문에서는 산업폐기물을 활용하여 경량성과 향상된 흡음 성능을 가진 무기계 흡음 패널을 개발하는 새로운 접근 방식을 제안한다. 본 연구의 배합은 플라이애시 기반의 알칼리 활성화 결합재를 기본 결합재로 사용하였으며(Jeon et al. 2015), 특히 식물 섬유는 장기 강도 발현과 내구성 증진에 유리하도록 내부양생 기능을 하는 중요한 인자로 활용되었다(Gwon et al. 2022). 식물섬유의 사용은 패널의 경량성을 확보하는 동시에 흡음 성능을 높일 수 있다(Bentchikou et al. 2012). 식물섬유는 자체 조직의 기공

* Corresponding author E-mail: ksw4430@hknu.ac.kr

¹한국철도기술연구원 교통환경연구실 책임연구원 (Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute (KRII), 176 Cheoldo Bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Republic of Korea)²한경국립대학교 건설환경공학부 조교수 (School of Civil and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Republic of Korea)

구조(He et al. 2003)와 섬유 간 공기층을 형성함으로써(Kuroiwa et al. 2022), 흡음률을 높이는 데 이바지한다. 이러한 경량화와 향상된 흡음 성능은 패널의 설치와 유지 관리를 쉽게 하며, 동시에 환경친화적인 해결책을 제공한다. 본 연구의 목표는 24시간 이내에 흡음 패널을 생산하는 것이기 때문에, 배합의 양생도 24시간만 진행하였다. 이는 신속한 생산 과정을 가능하게 하며, 적시에 필요한 장소에 방음 패널을 제공할 수 있는 능력을 갖추게 한다.

본 연구는 두 단계에 걸쳐 진행되었다. 첫 번째 단계에서는 유동성, 밀도, 24시간 압축강도, 그리고 흡음률을 측정하는 시험을 진행하였다. 이 단계는 흡음 패널의 기본적인 물리적 및 성능적 특성을 평가하는 데 중점을 두었다. 두 번째 단계 연구에서는 첫 번째 단계의 결과를 토대로 흡음 패널용 최적 배합을 제안하기 위한 시험을 진행하였다. 이 단계에서도 유동성, 밀도, 24시간 압축강도 측정이 이루어졌으며, 최적화된 흡음 패널의 개발에 초점을 맞췄다.

본 논문에서는 먼저, 현존하는 방음 패널의 주요 특성과 그 한계점을 인지한다. 이를 통해 기존 방음 패널이 가지는 연소성 문제와 차음 중심의 성능 한계를 조명하고, 이에 대한 대체 소재 개발의 필요성을 논의한다. 또한, 산업폐기물을 활용한 무기계 흡음 패널 개발의 가능성과 이점에 대해 설명하고, 이러한 접근이 환경 보호와 자원 재활용 측면에서 어떠한 의미가 있는지를 탐구한다.

이어서, 연구 방법론 부분에서는 플라이애시, 실리카퍄, 전기로 산화 슬래그, 양마 식물섬유 등을 활용한 무기멘트 모르타르 배합을 통해 흡음 패널을 제작하는 과정을 자세히 기술한다. 이 과정에서 각 원재료의 선택 이유와 배합 비율, 그리고 기대되는 효과에 대해 상세히 설명한다. 또한, 실험 과정에서 적용한 다양한 테스트 방법과 그 결과의 해석 방법을 제시한다. 또한, 향후 연구 방향과 추가적인 개선점에 대한 제안을 제시하여, 본 연구가 방음 패널 개발 분야에 더욱 이바지할 방안을 모색한다.

이러한 연구는 환경친화적이며 안전한 도시 기반 시설 구축에 이바지할 뿐만 아니라, 산업폐기물의 재활용을 통해 지속 가능한 개발 모델을 제시하는 데 중요한 의미가 있다. 이는 국내외 방음 패널 시장에 새로운 대안을 제공하며, 환경 보호와 안전성 향상에 이바지할 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 원재료 특성

본 연구는 Fig. 1에 제시한 기본 원재료를 기반으로 무기계 흡음 패널 배합을 설계하였다. 이 중에서 플라이애시, 실리카퍄, 전기로

산화 슬래그(EAF slag)의 산화물 조성은 Table 1과 같다. 본 연구는 일반 포틀랜드 시멘트는 원재료로 배제하였으며 기본 결합재로 알칼리 활성화 플라이애시 결합재를 선택하였다. Class F 플라이애시를 사용하였으며 활성화제로는 순도 95 %의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 순도 99.5 %의 Na_2CO_3 를 사용하였다. 플라이애시 활성화를 위해 다양한 활성화제를 채택할 수 있는데 본 연구는 문헌을 참고하여 위의 두 가지 활성화제를 동시 혼입하였다(Jeon et al. 2015). 또한, 결합재의 응결을 지연할 목적으로 사카로스(Saccharose)를 사용하였다. 결합재 유형에 적합한 나프탈렌 계열의 액상 고성능 유동화제를 사용하였다. EAF slag는 일반적인 잔골재를 대체하는 재료로 채택하였으며 체가름 시험 결과에 따르면 최대 입자 크기는 5 mm이며 조립률은 평균 3.61로 파악되었다. 실리카퍄는 EAF slag의 조립률 개선을 위해 사용되었다. 즉, EAF slag와 실리카퍄가 일반적인 모르타르 배합의 잔골재 역할을 하였다. EAF slag와 실리카퍄의 입도 분포는 Fig. 2와 같다. 본 연구는 기초실험과 흡음 패널 배합비 제안을 위한 본 실험으로 구성하여 2단계로 진행하였다. 공통으로 양마 식물섬유를 공기량 유도를 위해 사용하였고, 1단계 실험에서는 길이 5 mm와 10 mm의 식물 섬유를 사용하였고, 2단계 실험에서는 길이 5 mm 섬유만을 사용하였다.

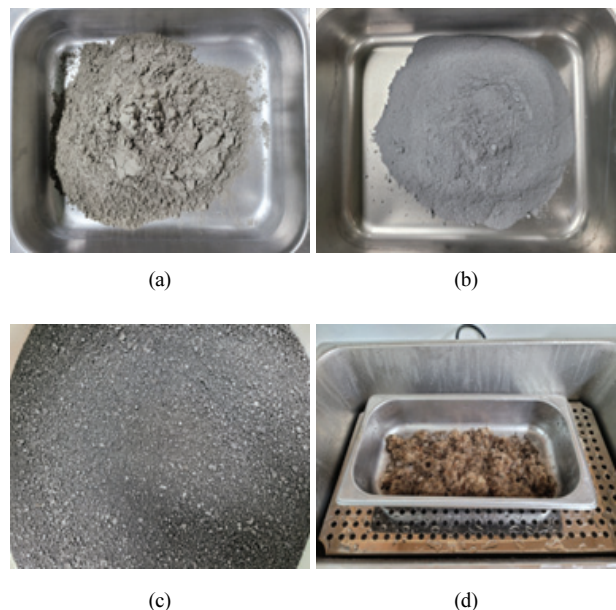
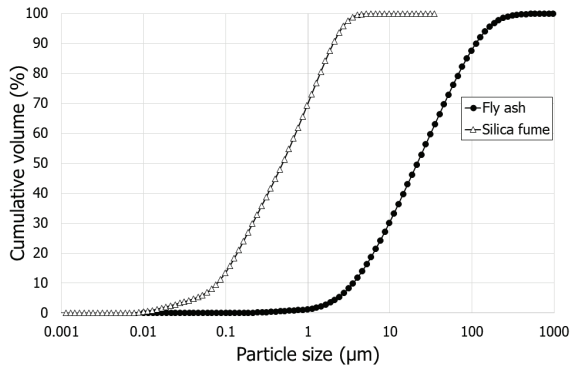


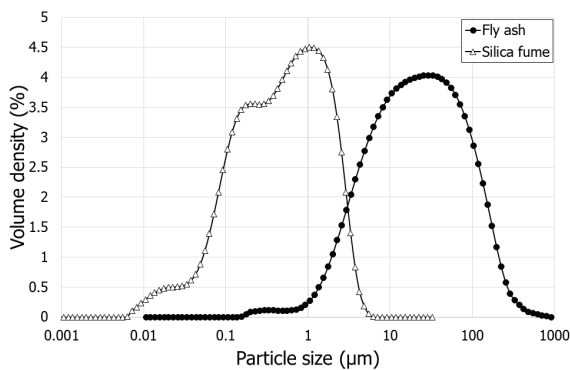
Fig. 1. Raw materials: (a) fly ash; (b) silica fume; (c) EAF slag; (d) cellulose fiber

Table 1. Chemical oxide compositions of raw materials

Oxide	wt. %		
	Fly ash	Silica fume	EAF slag
SiO ₂	54.1	97.0	16.9
Al ₂ O ₃	23.2	0.3	8.8
Fe ₂ O ₃	7.4	0.1	41.7
CaO	5.8	0.5	16.9
K ₂ O	2.0	0.8	0.0
Na ₂ O	1.9	0.2	0.0
MgO	1.8	0.4	5.8
TiO ₂	1.3	0.0	0.7
SO ₃	1.0	0.5	0.0
P ₂ O ₅	0.9	0.1	0.2
MnO	0.0	0.0	5.7
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	2.7
Others	0.6	0.1	0.6
Total	100.0	100.0	100.0



(a)



(b)

Fig. 2. Particle size distributions of fly ash and silica fume: (a) cumulative; (b) density

2.2 배합설계

총 2단계로 구성된 배합설계를 하였다. Table 2는 1단계 기초실험용 배합 9개를 포함하고 있다. 1단계 기초 시험 배합은 공통적으로 물-결합재비는 0.4로 고정하고 식물섬유의 함량을 결합재 대

비 0~4 %로 조절하였다. 배합 “C”는 대조군 배합으로 식물섬유를 포함하지 않았다. 식물섬유의 길이가 5 mm인 배합을 4개, 길이가 10 mm인 배합을 4개로 구성하였다. 예를 들어, Table 2에서 배합명 “10-1”은 길이 10 mm인 식물섬유를 결합재 대비 1 % 포함한 배합을 지칭한다.

Table 2. Mix proportions of 1st phase tested mixtures

Mix	wt. ratio								
	FA	C	N	R	SP	W	SF	EAF	CF
C									0
5-1									0.01
5-2									0.02
5-3									0.03
5-4	0.69	0.2	0.11	0.01	0.03	0.40	0.4	1.6	0.04
10-1									0.01
10-2									0.02
10-3									0.03
10-4									0.04

* FA: fly ash, C: CaCO₃, N: Na₂CO₃, R: retarder, SP: superplasticizer, SF: silica fume, EAF: EAF slag, CF: cellulose fiber

1단계 배합에 대한 기초적인 실험 결과를 분석한 후 Table 3의 2단계 배합을 설계하였다. 2단계 배합은 흡음 패널용 배합비를 제안하기 위해 준비되었다. Table 3은 총 8개의 배합을 포함한다. 2단계 배합은 길이 5 mm 식물섬유만 배합에 사용하였다. 1단계 실험에서 확인한 흡음 시험과 밀도 측정 결과를 토대로 2단계 배합은 물-결합재비를 0.5와 0.55 수준으로 조절하고 식물섬유의 함량을 최대 6 %까지 포함하였다. 2단계 배합의 주요 목적은 물-결합재비와 식물섬유 함량을 높여 배합물의 밀도 저감과 흡음 성능 향상을 달성하는 것이다. 예를 들어, Table 3에서 배합명 “50-4”는 물-결합재비 0.5에 식물섬유를 4 % 포함한 배합을 지칭한다.

Table 3. Mix proportions of 2nd phase tested mixtures

Mix	wt. ratio								
	FA	C	N	R	SP	W	SF	EAF	CF
50-0									0
50-4									0.04
50-5						0.50			0.05
50-6							0.4	1.6	0.06
55-0	0.69	0.2	0.11	0.01	0.03				0
55-4									0.04
55-5						0.55			0.05
55-6									0.06

* FA: fly ash, C: CaCO₃, N: Na₂CO₃, R: retarder, SP: superplasticizer, SF: silica fume, EAF: EAF slag, CF: cellulose fiber

2.3 실험 방법

1단계 및 2단계의 모든 배합은 동일한 공정에 따라서 배합되었다. 배합 첫 단계는 전기로 산화 슬래그, 실리카폼, 플라이애시, 분말 형태 활성화제 2가지를 배합 용기에 투입한 후 건식 비빔을 100 rpm 교반 속도로 30초간 진행한다. 다음으로 배합수에 고형능 유동화제와 응결 지연제를 포함하여 용액 상태로 미리 준비한 후 배합 용기에 투입한다. 200 rpm 속도로 습식 비빔을 2분 30초간 진행한 후, 식물섬유(배합표에서는 건조 무게를 나타내지만 실제로 식물섬유는 증기 양생기를 이용하여 사전에 표면건조 포화상태(SSD)로 준비함.)를 투입한다(Gwon et al. 2022). 마지막으로 300 rpm 속도로 5분간 습식 비빔을 진행한 후 배합물을 특정 시험용 몰드에 타설한다.

배합 공정에 따라 준비된 배합물은 1단계 시험에서 플로우 시험, 밀도 측정, 24시간 압축강도 측정, 흡음률 시험순으로 분석되었다. 플로우 시험은 미니 슬러프콘, 다짐봉, 플로우 테이블을 이용하여 ASTM C1437-01에 따라 플로우 지름을 측정하였다(ASTM International-a 2020). 모든 배합의 양방향 지름을 측정 후 이를 평균으로 계산하였다. 모든 배합은 결합재의 특성을 고려하여 타설한 후 90 °C로 설정된 증기 양생기에서 24시간 양생되었다(Jeon et al. 2015). 압축강도 시편은 50 mm 정육면체로 제작되었고 배합당 최소 3개의 시편을 준비하였다. 압축강도 시편을 이용하여 압축 시험 직전에 밀도 측정 시험을 진행하였다. 수중 및 건조 상태 무게를 측정하여 밀도를 계산하였다. 밀도 측정을 완료한 후 24시간 압축 시험을 하고 평균 압축강도를 계산하였다. 배합별 시편의 압축강도는 변동계수가 10 % 이내였다. 밀도 측정은 흡음 성능을 간접적으로 판단하기 위해 실시하였고, Table 2의 배합 중에서는 대표적으로 3개(대조군 “C”, “5-2”, “5-4”)를 선택하여 흡음 실험을 하였다. 흡음률 시험은 임피던스 관 시험 장치를 이용하여 ASTM E1050-19에 따라서 저주파에서 고주파에 이르는 영역(100~5,000 Hz)의 흡음률 분석을 했다. 100~500, 250~1,600, 1,000~5,000 Hz의 주파수대역을 각각 저주파, 중주파, 고주파 대역으로 구분한다. 실제 시험에 사용된 고주파용 시편의 지름은 30 mm, 두께는 50 mm이다. 중저주파 영역의 시험용 시편은 지름은 100 mm, 두께는 50 mm이다. 배합별 흡음 시험용 시편은 고주파 및 중저주파 시험용으로 각각 최소 3개씩 준비하고 이에 관한 결과를 평균으로 계산하여 분석하였다. 흡음 시험용 시편은 초기 24시간은 압축 시편과 같이 증기 양생되었고 흡음 시험일까지는 기건 양생하였다. 흡음 시험은 재령 28일에 실시하였다.

2단계 배합은 1단계 배합을 토대로 실제로 흡음 패널을 제조하기에 적합한 배합 설계안을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 따라서, 1단계 시험과 동일한 원재료들을 사용하되 흡음패널의 밀도를 2,000 kg/m³ 이하 수준을 달성하는 것을 배합설계의 목표로 설정하였다. 이러한 목표 수준의 밀도를 확보하면 흡음 성능이 확보될 뿐만 아니라 경량성을 확보하여 실제 현장 적용이 가능할 것으로 판단하였다. 2단계 시험의 주요 변수는 물-결합재비와 식물섬유의 함량으로 선정하였다. 2단계 시험에서도 1단계와 동일한 플로우 시험, 밀도 측정, 24시간 압축 시험을 하였다. 모든 시험 방법은 1단계 시험에 명시된 시험 방법과 동일하다.

3. 기초 실험 결과

3.1 유동성

1단계 시험의 9개 배합의 플로우 시험 결과는 Table 4와 같다. 대조군 배합 “C” 대비하여 각 섬유 길이 수준에서 섬유의 양이 증가할수록 플로우 지름은 감소하는 경향을 보였고 섬유의 길이가 플로우에 미치는 영향은 적은 것으로 확인되었다. 섬유의 길이가 다름에도 불구하고 같은 섬유 함량 수준에서 플로우 지름 차이가 크지 않은 것을 토대로 같은 함량으로 계량된 식물섬유 시료가 SSD 상태로 잘 준비된 것으로 간접적으로 판단하였다(Gwon and Shin 2021). 이렇게 SSD 상태로 배합에 포함된 식물섬유는 24시간 증기양생이 종료된 이후에도 계속해서 주변 매트릭스에 수분을 공급하는 내부양생 효과를 유발하고 건조 과정에서 균열 발생을 억제할 수 있다.

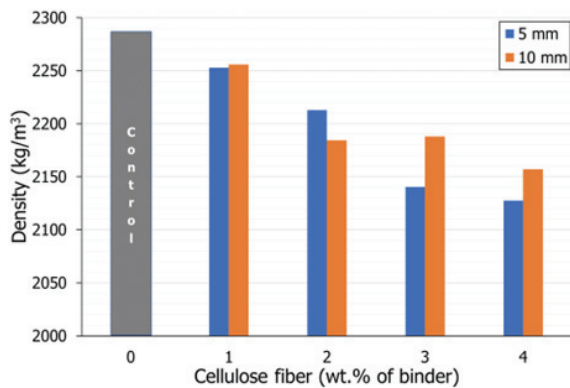
Table 4. Average flow diameters of 1st phase tested mixtures

Name	Average flow diameter
C	140
5-1	140
5-2	135
5-3	132.5
5-4	115
10-1	142
10-2	131
10-3	131
10-4	120

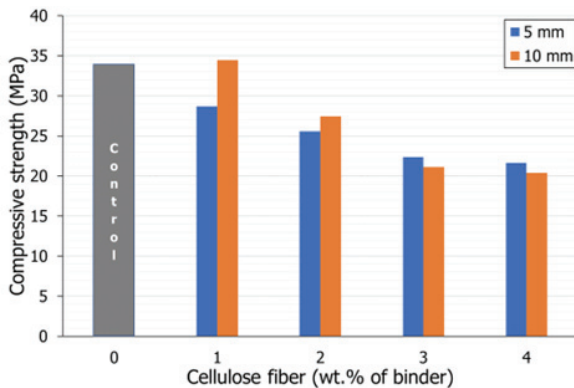
3.2 밀도 및 24시간 압축강도

본 연구는 향후 흡음 패널용 최적 배합비를 도출한 후 1일 이내 패널 제조를 목표로 하였기 때문에 압축 시험도 재령 24시간에 실시하였다. 또한, 실제 설치 환경과 운반 조건 등을 고려할 때 방음 패널은 가벼울수록 유용하기 때문에 낮은 수준의 밀도를 확보하는 것이 필수적이다. Fig. 3은 1단계 시험 배합의 밀도와 24시간 압축강도를 보여준다.

Fig. 3(a)에 따르면 식물섬유 함량 증가에 따라 배합의 밀도가 감소하는 것으로 확인되었다. 대체로 식물섬유가 짧은 경우 같은 함량 수준에서 밀도가 더 낮은 것으로 확인되었다. 이는 같은 건조 식물섬유 시료량이라고 하더라도 긴 섬유 대비 짧은 섬유의 숫자가 배합 내에 훨씬 더 많이 분포하고 이에 따라 섬유와 섬유 사이에 연행되는 공기의 양이 더 크기 때문에 발생한 현상이라고 판단된다(Kuroiwa et al., 2022). 결합재 대비 식물섬유를 4% 수준으로 혼입할 시 대조군 “C” 대비 약 7.2%의 밀도 감소를 달성하였다. 단, 경량 콘크리트의 밀도 기준이 대체로 2,000 kg/m³ 이하 수준



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Density and (b) 24 h compressive strengths of 1st phase tested mixtures

인 것을 고려하여 2단계 배합에서는 이를 달성할 수 있는 배합설계를 고려하였다.

Fig. 3(b)에 따르면 대조군 “C”가 34 MPa의 24시간 압축강도를 보였으며 식물섬유 길이에 상관없이 섬유 함량 증가에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 보였다. 특히, 식물섬유가 4% 포함되면 “C” 대비 약 38%의 강도 감소를 보였으나 20 MPa 수준의 압축강도는 유지하였다. 흡음 패널의 특성상 고강도 콘크리트는 요구되지 않으므로 1단계 배합의 압축강도 결과는 흡음 패널 제조에는 적합할 것으로 판단하였다.

3.3 흡음 계수

임피던스 관 시험에 따른 3개 배합의 흡음을 시험 결과는 Fig. 4와 같다. 흡음을 시험은 재령 28일에 실시되었는데 재령 1일에는 공극 구조 발현이 초기 단계라서 Fig. 4의 흡음 계수 결과보다는 다소 높을 것으로 판단된다. 배합에 상관없이 1,000 Hz 미만의 중저주파 대역에서 흡음 계수는 공통적으로 0.1 미만으로 나타났으며 분포도 또한 경향을 파악하기 어려웠다. 이를 통해 1,000 Hz 미만의 주파수 영역에서는 흡음 성능이 저조한 것을 확인하였다. 일반적으로 콘크리트는 0~0.1의 흡음 계수를 보유한 것으로 알려져 있다(Amran et al., 2021). 1,000 Hz를 초과하는 주파수 영역대에서는 식물섬유 함량 증가에 따라 흡음 계수도 전체적으로 상승하는 경향을 확인하였다. 동일한 주파수에서 식물섬유가 많을수록 흡음 계수가 큰 것을 확인했다. 단, 1,000~1,500 Hz 영역에서는 식물섬유의 유무에 따라 흡음계수 차이가 크게 나타났는데, 이를 통해 흡음계수 확보에 영향을 미치는 최소 섬유 함량이 있다고 판단하였다. 대체로 식물섬유의 혼입 영향은 1,500 Hz이상의 고주파 영역대에서 확인되었다. 이를 통해 본 연구에서 사용한 기본

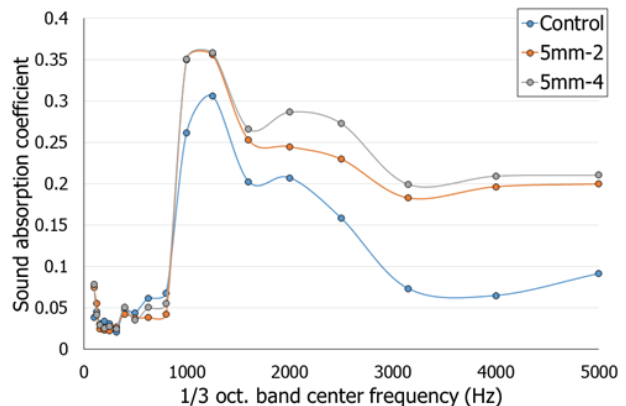


Fig. 4. Sound absorption coefficients of 1st phase tested mixtures

매트릭스가 고주파 영역대의 흡음에 효과적인 것으로 판단하였다. 참고로 도로포장에서는 1,000–5,000 Hz 영역대의 소음이 사람에게 가장 민감하게 작용한다고 보고되었다(Ock et al. 2010). 대체로 일반 콘크리트 보다는 흡음 성능이 우수한 것으로 확인되었으나 우수한 흡음 성능을 확보하기 위해 2단계 시험에는 식물섬유의 함량을 4 % 이상 포함하고 물-결합재비를 1단계 배합보다 높게 설정하였다. 3개의 선택된 배합의 흡음 시험 결과를 통해 Table 2에 구성한 원재료들을 기반으로 경량 흡음 패널 제조가 가능할 것으로 판단하였다.

4. 흡음 패널용 배합비 제안

4.1 유동성

2단계 시험 배합의 플로우 시험 결과는 Table 5와 같다. 각 물-결합재비 수준(0.5 혹은 0.55)에서 식물섬유의 함량이 증가할수록 플로우 지름이 커졌으나 섬유 함량이 지름 변화에 미치는 영향은 크게 보이지 않았다. 예를 들어 식물섬유 함량이 4~6 %일 때 플로우 지름 수준이 물-결합재비 수준과 상관없이 비슷한 수준으로 나타났다. 이를 통해 SSD 상태로 준비된 상태이더라도 섬유 함량이 결합재 대비 과다할 경우 SSD 상태의 섬유가 유동성 개선에 미치는 효과가 감소한 것으로 판단되었다. 단, Table 5에 나타난 플로우 지름은 흡음 패널 제조에는 충분한 흐름성 수준을 나타낸다고 판단하였다.

Table 5. Average flow diameters of 2nd phase tested mixtures

Name	Average flow diameter
50-0	133
50-4	140
50-5	140
50-6	141
55-0	134
55-4	138
55-5	139
55-6	139

4.2 밀도 및 24시간 압축강도

2단계 시험의 배합은 Fig. 5와 같은 밀도를 나타냈다. 식물섬유의 함량이 0 %에서 4 %로 증가하면서 밀도 감소 효과가 확연히 나타났으나 동일 섬유 함량 수준에서 물-결합재비가 밀도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 식물섬유가 5 % 이상 포함될

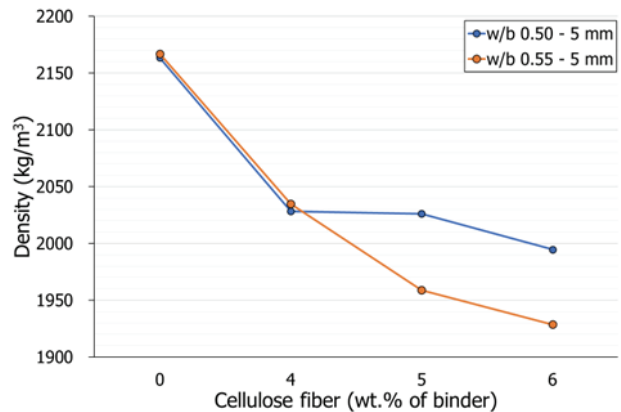


Fig. 5. Density of 2nd phase tested mixtures

Table 6. 24 h compressive strengths of 2nd phase tested mixtures

Name	Compressive strength (MPa)
50-0	27.4
50-4	16.9
50-5	16.6
50-6	15.0
55-0	20.3
55-4	16.2
55-5	11.9
55-6	11.1

시에는 동일한 섬유 함량 수준에서 물-결합재비 증가가 밀도 감소에 미치는 영향이 뚜렷하게 확인되었다. 특히, 2단계 시험 배합 중에서 “50-6”, “55-5”, “55-6”은 2,000 kg/m³ 미만의 밀도를 나타냈다. 이들은 각각 Table 6에 따르면 평균 15.0, 11.9, 11.1 MPa의 24시간 압축강도를 나타냈다. 이러한 압축강도 감소 현상은 물-결합재비 증가와 섬유 함량 증가에 따른 공기 연행량 증가와 크게 연관이 있다고 판단된다.

4.3 최적 배합비 제안

2단계 시험 배합을 통해 물-결합재비와 식물섬유 함량의 증가는 24시간 압축강도 감소를 유도한다고 확인하였다. 하지만, 배합 내부에 포함된 식물섬유의 내부 양생 효과는 장기적으로 지속할 것으로 예상하기 때문에 이들 배합의 장기 강도 발현은 24시간 기준보다 훨씬 더 높을 것으로 판단된다. 따라서, 흡음 패널 제조용 배합으로서 충격하중에 의한 손상 문제나 건조에 따른 균열 발생은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 특히, “55-5”와 “55-6”과 같은 배합은 각각 약 1,950 kg/m³과 1,925 kg/m³의 밀도를 달성하

였기 때문에 흡음 성능 또한 1단계 시험에서 확인한 배합들보다 훨씬 더 우수할 것으로 판단된다. 따라서, 이들을 최적 배합에 적합하다고 판단하여 향후 임피던스 관 시험에 따른 흡음 시험과 패널의 실제 현장 적용을 통한 흡음을 시험을 진행할 계획이다.

5. 결론

1. 이 연구는 국내 방음 터널에서 사용되는 방음 패널이 주로 차음성을 갖추고 있으며 연소성을 가지고 있다는 점을 고려하여, 기존의 방음 패널을 대체할 수 있는 무기계 흡음 패널을 개발하는 것을 목표로 삼았다.
2. 여러 연구가 시멘트 기반의 무기계 흡음 패널 개발에 집중되어 있었지만, 이 연구는 산업폐기물을 활용하여 천연자원을 소모하지 않는 흡음 패널 소재 개발을 추구했다. 연구는 두 단계로 진행되었으며, 기초 연구와 최적의 흡음 패널용 배합비를 제안하는 것을 목표로 했다. 주요 원재료로 플라이애시, 실리카폼, 전기로 산화 슬래그, 양마 식물섬유를 사용하고, 알칼리 활성화를 기반으로 한 무시멘트 모르타르 배합을 설계하였다. 유동성 확보를 위해 나프탈렌 계열의 고성능 유동화제와 응결을 조절하기 위해 응결 지연제를 사용하였다.
3. 1단계 실험 결과, 알칼리 활성화 플라이애시 결합재를 기반으로 한 모르타르 배합에 식물섬유를 포함하면 밀도를 줄이는 효과가 있으며, 24시간 압축강도가 적절하게 나타나는 것을 확인했다. 식물섬유 자체의 기공과 섬유와 섬유 사이에 연행된 공기량을 통해 배합의 경량성과 흡음성을 확보할 수 있었다. 특히, 물-결합재비 0.4에 식물섬유를 0, 2, 4 % 포함하여 흡음 시험을 수행한 결과, 식물섬유가 포함되면 1,500 Hz 이상의 고주파 영역에서 흡음 제어가 효과적인 것으로 나타났다.
4. 2단계에서는 밀도를 2,000 kg/m³ 이하로 유지하면서 흡음 성능을 개선할 수 있는 배합을 제안하였다. 물-결합재비를 0.5, 0.55로 설정하고 식물섬유를 4~6 % 포함할 때 적합한 유동성과 밀도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. 특히, 물-결합재비 0.55에서 식물섬유를 5, 6 % 포함할 경우 1,950 kg/m³ 이하의 밀도를 달성할 수 있었다. 이러한 배합을 바탕으로 향후 관내법 흡음 시험과 실제 현장에 흡음 패널을 설치하여 관찰할 계획이다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(지속가능 철도교통을 위한 탄소중립 핵심기술 개발, PK2302C1)의 연구비 지원과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20223030010080, 소음저감과 탄소중립을 위한 철도적합 태양광 실증)을 받아 수행되었습니다.

References

- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Vatin, N., Al-Fakih, A. (2021). Sound-absorbing acoustic concretes: a review, *Sustainability*, **13(19)**, 10712.
- ASTM International-a. (2020). ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International-b. (2019). ASTM E1050-19, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., Hanini, S. (2012). Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix, *Construction and Building Materials*, **34**, 451-456.
- Gwon, S., Choi, Y.C., Shin, M. (2022). Internal curing of cement composites using kenaf cellulose microfibers, *Journal of Building Engineering*, **47**, 103867.
- Gwon, S., Shin, M. (2021). Rheological properties of cement pastes with cellulose microfibers, *Journal of Materials Research and Technology*, **10**, 808-818.
- He, J., Kunitake, T., Nakao, A. (2003). Facile in situ synthesis of noble metal nanoparticles in porous cellulose fibers, *Chemistry of Materials*, **15(23)**, 4401-4406.
- Jeon, D., Jun, Y., Jeong, Y., Oh, J.E. (2015). Microstructural and strength improvements through the use of Na₂CO₃ in a cementless Ca(OH)₂-activated Class F fly ash system, *Cement and Concrete Research*, **67**, 215-225.
- Kuroiwa, E., Quy, N.X., Hama, Y. (2022). Influence of nanofibrillated

- bacterial cellulose on the properties of Ordinary and expansive mortars, *Materials*, **15(6)**, 2094.
- Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J. (2004). Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **26(4)**, 359–370.
- Ock, C.K., Kim, J.H., Lee, J.S. (2010). Noise reduction of asphalt concrete pavement: techniques and their performance evaluation, *International Journal of Highway Engineering*, **12(1)**, 29–37.
- Tie, T.S., Mo, K.H., Putra, A., Loo, S.C., Alengaram, U.J., Ling, T.C. (2020). Sound absorption performance of modified concrete: a review, *Journal of Building Engineering*, **30**, 101219.

산업폐기물을 활용한 무기계 흡음 패널 개발 기초 연구

이 연구는 도시화와 교통량 증가로 인해 심화되는 환경 소음 문제에 대응하여, 친환경적인 무기계 흡음 패널을 개발함으로써 기존의 PMMA 및 시멘트 기반 패널의 한계를 극복하고자 한다. 이러한 전통적인 패널들은 가연성으로 인한 안전 위험과 탄소 배출로 인한 환경 문제를 가지고 있다. 산업폐기물을 활용한 이 연구는 두 단계로 구성된다: 첫째, 물리적 및 성능적 특성(유동성, 밀도, 압축 강도, 흡음률)에 대한 기초 시험, 둘째, 최적화된 패널 혼합물의 개발. 이 접근 방식은 기존 패널을 지속 가능하고 효과적인 대안으로 대체하고자 하며, 안전하고 환경적으로 책임 있는 도시 인프라에 중요한 기여를 목표로 한다. 연구 결과는 방음 패널 시장에 대한 새로운 해결책을 제시하며, 소음 제어와 함께 환경 및 안전 기준에 부합하는 혁신을 추구한다.