

# 재활용 석고 부산물을 이용한 유무기 하이브리드 흡음재 개발 연구

## A Study on Organic-Inorganic Hybrid Sound Absorbing Materials Using by Recycling Gypsum

신현규<sup>1</sup> · 전보람<sup>1</sup> · 하주연<sup>1</sup> · 전찬수<sup>2\*</sup>

Hyun-Gyoo Shin<sup>1</sup> · Bo-Ram Jeon<sup>1</sup> · Joo-Yeon Ha<sup>1</sup> · Chan-Soo Jeon<sup>2\*</sup>

(Received October 27, 2017 / Revised December 17, 2017 / Accepted December 19, 2017)

The purpose of this study is to develop the hybrid sound-absorbing materials that is made from organic polyurethane sponge impregnated with inorganic binder solutions. The inorganic slurry which is made from  $\alpha$ -hemihydrate gypsum mixed with 60% water, and various additives including plasticizer are used as binder. The test specimens are prepared and tested for sound absorption performance by the impedance tube methods. From the test results, noise reduction coefficient(NRC) of development materials specimen bound by the inorganic binder slurry is 0.41. They are 2 times or more higher than commercial products specimens bound by organic materials only which have NRC values in the range of 0.14 to 0.28. The polyurethane sponge specimens impregnated with inorganic gypsum slurry binder have a good balance between performance and cost, and have proper properties in density, thermal conductivity, non-combustible, and absence of harmful substances as sound-absorbing internal boards for noise barrier wall. It is apparent that the good sound absorption materials can be produced according to the optimum mix design that is recommended from this study.

**키워드 :** 흡음, 난연, 재활용, 유무기 하이브리드 소재

**Keywords :** Sound absorption, Non-combustible, Hybrid materials

### 1. 서론

소음의 저감 및 제어 방법은 흡음과 차음으로 구분할 수 있다. 흡음이란 발생된 음 에너지가 어떤 물체의 표면 또는 내부에서 반사되지 않고 흡수되는 현상을 말한다. 일반적으로 시중에서 판매되는 흡음재는 폴리에스터, 폴리우레탄, 유리섬유, 미네랄을 등을 원료로 사용하고 있다. 이러한 흡음용 소재는 주로 다공성 구조를 가지는데, 다공성 소재에 소리가 입사되면 기공 내에서 마찰에 의해 흡음이 되는 원리이다. 차음이란 음 에너지가 어떤 물체를 통과할 때 감소 및 차단되는 현상을 말한다. 차음재로는 콘크리트, 벽돌 등과 같이 통기성이 없고 단단하고 무거운 고밀도의 소재가 쓰인다(Allard, J., Atalla, N. 2009; Tanneau, O. et al.

2006; Lee et al. 2007; Lee et al. 2008).

다공성 흡음재는 두께가 두꺼워질수록 통과하는 기공의 길이가 증가하여 중·고음역대 주파수에서 큰 흡음 성능을 나타내는 반면 저음역대에서는 큰 성능을 나타내지 못한다. 저음역대 소음에 적합한 소재는 차음의 성격을 띤 판상형 합판이나 하드보드와 같이 딱딱한 재질로, 입사된 음이 판을 진동시키고 그로 인한 내부 마찰로 인해 진동 에너지를 잃어 음을 흡수할 수 있어야 한다(Lee et al. 2008; Groby, J.P. et al. 2009).

다공성 소재의 흡음 성능은 저주파 영역에서 두께에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있으나, 입사 음파의 방향에 따른 강제벽이 주기적으로 배열될 경우 유효한 흡음 하한치가 낮아져 전반적인 흡음 성능이 향상되는 것으로 알려져 있다(Groby, J.P. et al. 2011;

\* Corresponding author E-mail: jcsi0815@kict.re.kr

<sup>1</sup>한국산업기술시험원 재료기술센터 (Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul, 08389, Korea)

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 건축도시연구소 (Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

Lagarrigue, C. et al. 2013; Christensen, N.A. et al. 2014; Yang et al. 2015). Yang et al.(2015)에 의하면 다공성 물질 내부에 음파 불침투성 강체벽을 분포시킴으로써 광대역에서 보다 향상된 흡음 성능을 나타내는 것이 가능하며, 파동의 경로 길이가 다양한 sub cell들이 존재할 경우 공명 피크 주파수의 다양화로 인한 간섭효과로 흡음능력이 향상되는 것으로 보고되고 있다(Li et al. 2009; Cox, T. and D’Antonio, P. 2009; Jung and Hwang 1996).

따라서 본 연구에서는 저음역대부터 중고음역대 주파수까지 넓은 범위에 걸쳐 우수한 흡음 성능을 얻기 위해 다양한 크기 및 불규칙한 경로의 기공을 가지는 유기계 기재와 음파 불침투성 강체벽을 구성할 수 있게 하는 무기계 소재를 이용하여, 다공성 구조를 가지면서 동시에 단단한 재료로 이루어진 하이브리드 소재를 개발하고자 하였다. 유기 및 무기 소재의 하이브리드화는 저가형으로 제조가 가능하며 경제성이 우수한 것으로 판단되는 유기계 구조체에 무기계 소재를 함침시키는 방식을 선택하여 유기계 수준의 형상제어와 경제성을 가지며 무기계 수준의 난연성 및 성능을 구현하고, 연속 공정에 의해 생산성 및 경제성을 확보할 수 있는 기술을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 재료

본 연구에서는 유기계 폴리우레탄 스펀지에 석고를 베이스로 조성 설계한 무기 바인더 용액을 침지하여 유무기 하이브리드 내장재를 제작하였다. 연구에 사용된 유기계 폴리우레탄 스펀지로 밀도와 열전도율이 낮고 비교적 가격이 저렴한 시중에서 판매되는 제품(AE-2DG)을 선정하였고, 제품 기초 사양을 Table 1에 나타냈다. 스펀지 함침용 무기 바인더 소재로는 물의 양을 조절하여 강도 제어가 가능한 반수석고를 사용하였으며, 특히 적은 물로도 큰 강

Table 1. Specification of the organic polyurethane sponge

Density	Hardness, 25%	Tearing strength	Tensile strength	Elongation	Rebound resilience
0.0176g/cm <sup>3</sup>	9.77kg /314cm <sup>2</sup>	0.67kg/cm	1.20kg/cm <sup>2</sup>	130%	25%

Table 2. Composition of the inorganic binder solution(%)

$\alpha$ -hemihydrate Gypsum	Water	Borax	PNS(NSF)*	Acrylic
100	60	0.5	0.2	5

\* PNS(NSF): Poly naphthalene sulfur formalin condensation

도를 얻을 수 있는  $\alpha$ 형 반수석고를 사용하였다. 분말 형태의  $\alpha$ 형 반수석고에 60%의 물을 혼합하여 슬러리 용액으로 제조하였으며, 혼화제로써 작업시간 연장을 위한 경화 지연제(Borax), 용매 사용량 조절 및 함침효과 증대를 위한 유동화제(PNS(NSF): Poly naphthalene sulfur formalin condensation), 표면 코팅 효과를 위한 아크릴 수지를 첨가하였다. 사전 연구를 통해 최적화시킨 무기 바인더 용액의 조성은 Table 2와 같다.

### 2.2 제조 공정

사전 실험을 통해 300mm×300mm×30mm 스펀지 1장의 최대 함수량이 약 2kg임을 확인하였고, 스펀지 1장을 충분히 함침시키기 위해서는 약 4kg의 석고(2.4kg의 물)가 필요하다고 판단되었다. 따라서, 석고 4kg을 기준으로 Table 2의 조성에 따라 무기 바인더 용액을 제조하여 아크릴 통에 채운 후, 300mm×300mm×30mm 크기로 재단한 스펀지를 침전시켜 무기 바인더가 충분히 함침될 수 있도록 30초 이상 가력하였다. 용액을 최대한 흡수한 스펀지를 꺼내 5mm 간격으로 맞춘 압착롤러를 이용하여 탈수시킨 후, 70°C 온도에서 3시간 이상 건조시켰다. Fig. 1은 제조 공정 모식도를 나타내며, Fig. 2는 실제 제조 공정에서 사용된 롤러 장치의 사진이다.

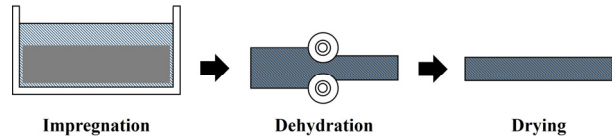


Fig. 1. Diagram of the manufacturing process of the organic-inorganic hybrid materials



Fig. 2. Photograph of the rolling equipment for manufacturing the organic-inorganic hybrid materials

Table 3. Performance evaluation items and its standard for test methods

Test item	Standard for test methods
Density	· KS F 2459(Standard test method for bulk specific gravity, water content, absorption and compressive strength of cellular concrete)
Thermal conductivity	· KS L 9016(Test methods for thermal transmission properties of thermal insulations)
Sound absorption performance	· KS F 2814-2, MOD ISO 10534-2(Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2 : Transfer-function method)
Non-combustible performance	· KS F 5660-1(Reaction-to-fire tests-Hear release, smoke production and mass loss rate-Part 1 : Heat release rate(cone calorimeter method)) · KS F 2271(Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings)
Hazard assessment	· EL248(Finishing Materials for Wall or Ceiling)

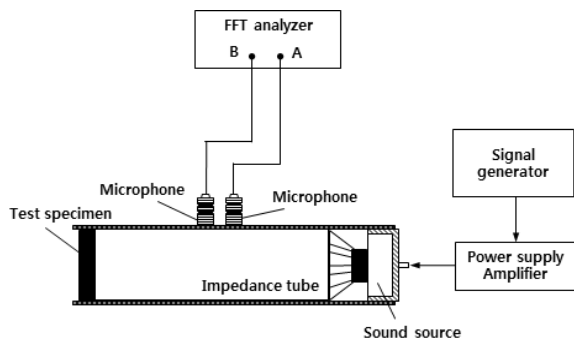


Fig. 3. Diagram of the sound absorption performance evaluation measurement

### 2.3 성능 평가

Table 3은 제조한 유무기 하이브리드 소재 시험체에 대한 시험 평가 항목 및 측정 규격을 나타낸 것이다. 밀도 시험은 KS F 2459에 의하여 측량된 질량과 체적을 통해 절대 건조 겉보기 밀도를 측정하였고, 열전도율 시험은 KS L 9016의 평판 직접법(보호 열판법)에 의하여 고열판과 저열판 사이에 시험체를 고정하고 시험체를 통과하는 열류량과 그 때의 온도차를 측정하여 열전도율을 산출하였다.

흡음성능의 경우 KS F 2814-2 임피던스 관에 의한 흡음 계수와 임피던스의 결정 방법 제2부: 전달 함수법을 바탕으로 시험 평가하였다. 임피던스 관내법에 사용된 장치는 Type SW466 two-microphone impedance measurement tube(BSWA Tech.)로 컴퓨터, 이중신호분석기, 증폭기 튜브 등으로 구성되어 있다(Fig. 3). 흡음률은 주파수에 따라 변화하기 때문에 흡음재 성능의 객관적인 비교를 위해 흡음률은 125Hz부터 3150Hz까지의 15개의 1/3 옥타브 밴드에 대한 흡음효과로 평가하였다(Jung and Hwang 1996).

시험체의 난연성능은 국토교통부 고시 제 2015-744호: 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준에 근거하여 준불연재료(2급)에 해당하는 열방출률 및 가스유해성 시험 기준 만

족여부를 확인하였고, 유해성분은 환경부 환경표지 인증기준 EL248(벽 및 천장 마감재)에 근거하여 폐기물공정시험법(중금속 용출시험), 실내공기질공정시험기준(VOCs, 폼알데하이드 방출량)을 따라 시험 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 밀도

유기계 스펀지를 석고계 무기 바인더 용액에 함침시켜 제조한 유무기 하이브리드 흡음재의 밀도 측정값은 약 0.2948g/cm<sup>3</sup>으로 base인 유기계 스펀지 밀도인 0.0176g/cm<sup>3</sup>에 비해 약 16배 이상 증가하였다. 이는 유기 스펀지 내부 공극을 채워 들어가는 석고계 무기 소재의 함량비율이 전체 흡음재의 94% 이상 차지함을 알 수 있다.

### 3.2 열전도율

동일한 로트에서 제조한 유무기 하이브리드 흡음재 시험편 3개를 대상으로 열전도율을 반복 측정한 결과 각 0.05439W/m·K, 0.04900W/m·K, 0.04895W/m·K로 평균 0.05078W/m·K의 열전도율 값을 도출하였다. 이는 일반 건축물에 쓰이는 단열재의 에너지절약설계기준을 만족할 정도의 열전도율 값으로 본 연구에서 개발한 소재가 흡음재뿐만 아니라 단열 및 보온재로서의 역할도 가능함을 확인할 수 있다.

### 3.3 흡음성능

본 연구에서 개발된 유무기 하이브리드 흡음재 시험편의 흡음성능을 확인하기 위해 기존에 시판되고 있는 다양한 종류의 흡음재들과 함께 동일한 조건에서 흡음 계수를 측정 및 그 값들을 비교 분석하였다. 직경 100±0.5mm(저주파용), 29±0.5mm(고주파용)

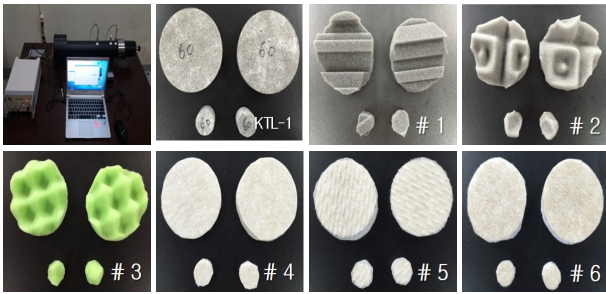


Fig. 4. Photos of developed and commercial products

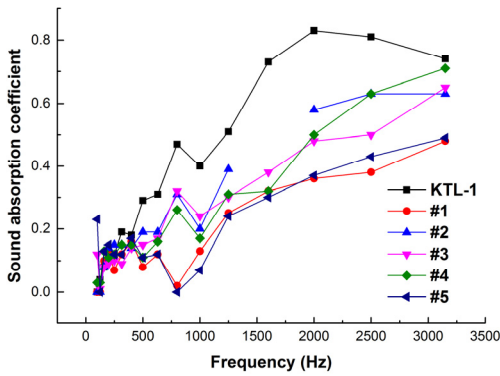


Fig. 5. Sound absorption performance of the development materials (KTL-1) and commercial products at frequency range from 125Hz to 3150Hz

크기로 재단한 시료들을 대상으로 임피던스 관에 주입해 발생하는 음원에 대한 흡음률을 측정하였고, 시험 평가를 위해 준비된 유무기 하이브리드 흡음재 시험편 및 시판 제품 6종의 사진을 Fig. 4에 나타냈다. 시제품 1번~3번은 각각 사선무늬, 사각무늬, 계란판 모양으로 형상의 변화를 주어 흡음 성능을 향상시킨 폴리우레탄 재질로 음악실이나 연습실 등에서 많이 사용되는 제품을 선정하였다. 시제품 4번~6번은 폴리에스터 재질로 이루어진 제품들로 시제품 4번의 경우 다른 제품보다 밀도를 높인 제품이다. 시제품 4번과 5번은 표면에 방염처리가 된 제품으로 강당이나 종교시설 등에 많이 사용되는 제품이다. 시제품은 본 과제 개발품과 동일한 두께 30mm로 재단하여 흡음률을 측정하였다.

Fig. 5와 Table 4는 총 7개의 개발품 및 시제품에 대해 흡음계수를 측정된 결과를 나타낸 그래프와 표이다. Table 4에 제시된 NRC 값은 noise reduction coefficient의 약자로 흡음률을 수치화하여 나타낸 흡음계수 값으로 NRC가 1.00이면 완전 흡음이 이뤄진 상태를 뜻하며 반대로 0이면 흡음이 전혀 이뤄지지 않음을 나타낸다. ASTM C423에 의거하여 1/3 옥타브 대역으로 측정된 중심주파수 250, 500, 1000, 2000Hz에서의 흡음률의 산술평균치이며 식으로

Table 4. Sound absorption coefficient for the development materials and commercial products

Specific frequency (Hz)	Development materials	Commercial products				
		#1	#2	#3	#4	#5
250	0.12	0.07	0.15	0.10	0.12	0.12
500	0.29	0.08	0.19	0.15	0.11	0.11
1000	0.40	0.13	0.20	0.24	0.17	0.07
2000	0.83	0.36	0.58	0.48	0.50	0.37
NRC*	0.41	0.16	0.28	0.24	0.23	0.17

\* NRC: Noise reduction coefficient

나타내면 다음 식 (1)과 같다. Table 4를 보면 시제품들의 NRC 값은 0.14에서 0.28까지 비슷비슷한 수준을 나타내고 있으며, 그에 비해 개발품의 NRC 값은 0.41로 우수한 흡음 성능을 나타냄을 확인할 수 있다. 하지만 시제품의 경우 재단하는 과정에서 이격의 발생 가능성이 있어 판매처에서 제시하는 성능보다 낮은 결과를 나타내는 제품도 발생한 사항에 대한 고려도 필요하다.

$$NRC = \frac{1}{4}(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) \quad (1)$$

Fig. 5 및 Table 4의 결과를 보면 500Hz 이하의 저주파 영역에서 시제품보다 개발품이 비교적 높은 흡음 성능을 보였다. 일반적으로 층간소음에서 문제가 되는 중량충격음은 저주파 영역에 해당하며, 이 구간에서 좋은 성능을 나타내기 위해서는 차음의 효과가 필요하다. 500Hz 이하의 저주파 영역에서 개발품과 동일한 폴리우레탄 재질의 시제품 1번~3번과 비교했을 때 개발품의 경우 다공성의 스펀지 내부 공극에 무기바인더가 고르게 분포해 차음의 역할을 하여 저주파 영역에서 향상된 흡음 성능을 나타냄을 알 수 있다. 500Hz에서 3000Hz까지의 고주파수 영역에서도 개발품의 흡음 성능이 시제품에 비해 탁월하게 우수함을 확인할 수 있는데, 스펀지 내부 공극에 존재하는 무기바인더로 인해 흡음재 내부에서 통과해야 하는 기공의 길이도 길어져 고주파 영역에서도 시제품에 비해 높은 흡음률을 나타내었다.

### 3.4 불연성능

불연성능 시험을 통해 본 연구를 통해 개발한 유무기 하이브리드 흡음재가 건축내장재로서 준불연재료 2급 조건을 만족하는지 여부를 확인하였다. 열방출률 시험의 경우 10분간 가열하여 총방출열량이 8MJ/m<sup>2</sup> 이하, 10분간 최대 열방출율이 10초 이상 연속으

Table 5. Test results of heat release rate(cone calorimeter method) for the development materials specimen

Test item	Performance criterion for semi-non-combustible material	Test results
Total emission calorie for 10 minutes(MJ/m <sup>2</sup> )	Below 8MJ/m <sup>2</sup>	5.87MJ/m <sup>2</sup>
Maximum heat release rate(kW/m <sup>2</sup> )	Under 200kW/m <sup>2</sup>	23.161kW/m <sup>2</sup>
200kW/m <sup>2</sup> overtime(s)	Within 10 seconds	0 seconds
Visual evaluation	No crack, hole, and melting	None

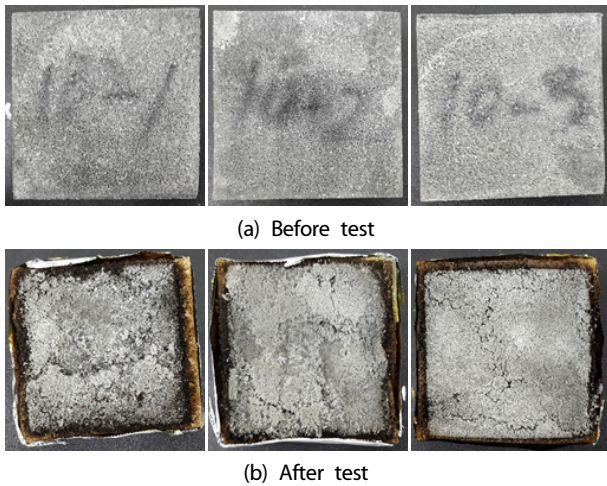


Fig. 6. Visual comparison before and after the heat release rate test for the development materials specimens

Table 6. Test results of gas toxicity for the development materials specimen

Test item	Performance criterion for semi-non-combustible material	Test results
Average deed stopping time of white mouse	9 minutes or more	Satisfied

로 200kW/m<sup>2</sup>를 초과하지 않으며, 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열, 구멍 및 융용 등이 없음을 만족해야 한다. 또한, 가스유해성 시험의 경우 회전 바구니 속에 흰 쥐를 8마리 넣은 후 가열로 속에 시험체를 넣어 6분 가열 후 시험체가 타면서 나온 연소가스가 교반상자를 거쳐 회전바구니 상자까지 가서 흰 쥐에게 미치는 영향을 보는 시험을 통해 15분간 개개의 실험용 흰 쥐의 행동정지시간을 측정하여 실험용 흰 쥐의 평균행동정지시간이 9

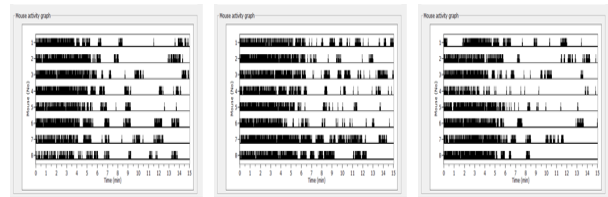


Fig. 7. Mouse activity graphs after gas toxicity test for the development materials specimens

Table 7. Test results of hazard assessment(EL248) for the development materials specimen

Test item	Performance criterion for EL248 standard by Ministry of Environment	Test results
Environmental dispute adjustment system	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cd: under 0.3mg/L</li> <li>- Pb: under 3mg/L</li> <li>- Cu: under 3mg/L</li> <li>- As: under 1.5mg/L</li> <li>- Hg: under 0.005mg/L</li> <li>- Cr<sup>6+</sup>: under 1.5mg/L</li> <li>- CN<sup>-</sup>: under 1mg/L</li> <li>- Organophosphorus : under 1mg/L</li> <li>- Trichloroethylene : under 0.3mg/L</li> <li>- Tetrachloroethylene : under 0.1mg/L</li> </ul>	Satisfied
VOCs*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- VOCs emissions after 7 days: below 0.40mg/m<sup>2</sup>·h</li> <li>- Toluene emissions : below 0.080mg/m<sup>2</sup>·h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0.101mg/m<sup>2</sup>·h</li> <li>- Under 0.005mg/m<sup>2</sup>·h</li> </ul>
Formaldehyde emissions	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formaldehyde emissions : below 0.3mg/L</li> <li>- Formaldehyde emissions after 7 days: below 0.05mg/m<sup>2</sup>·h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0.006mg/m<sup>2</sup>·h</li> </ul>

\* VOCs: Volatile organic compounds

분 이상이어야 한다. Table 5와 Table 6은 열방출률 및 가스유해성 시험 결과를 나타낸 표이며, 표에서 나타낸 바와 같이 열방출률 및 가스유해성 시험 모두 준불연재료 2급 조건을 만족하는 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

### 3.5 유해성분

유해성분에 대한 시험 항목 및 평가 기준은 EL248, 벽 및 천장 마감재 규격에서 제시하는 항목을 기준으로 시험을 수행하였다. 환경부 고시 폐기물공정시험법에서 제시하는 중금속용출시험법을 통해 확인한 중금속 함유량 결과를 Table 7에 제시했으며, 10 가지 중금속을 대상으로 시험한 결과 모두 기준치를 만족하였다.

또한, 실내공기질공정시험으로 진행한 7일 후 VOCs 방출량은 0.101mg/m<sup>2</sup>·h, 톨루엔 방출량은 0.005mg/m<sup>2</sup>·h 미만, 7일 후 폼알데하이드 방출량은 0.006mg/m<sup>2</sup>·h으로 확인할 수 있으며, 이는 EL248.에서 제시하는 기준값 미만으로 본 연구에서 개발한 유무기 하이브리드 흡음재가 친환경 건축자재로서 적합한 소재라고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유기성 소재가 가진 흡음 특성 및 다공성의 장점을 유지하면서 무기물이 가진 낮은 내열성의 단점을 보완할 수 있도록 난연성 재질의 무기 바인더와 첨가제를 결합시켜 열적 특성 및 물리적 특성을 강화시키고, 무기계의 차음 특성을 부여하였다. 유기계 베이스 소재로는 경제성이 높은 상용 폴리우레탄계 스펀지를 사용하였고, 이를 무기계 석고 분말에 물을 첨가하여 제조한 바인더 용액에 함침, 탈수, 건조시킴으로서 유무기 하이브리드 흡음 소재를 개발하였다.

개발 소재의 흡음능을 임피던스 관내법을 이용하여 시험 평가한 결과, NRC 흡음계수 값은 0.41로 기존에 시판되고 있는 다양한 종류의 흡음재들의 흡음계수(0.14~0.28)와 비교하여 2배 이상으로 우수한 흡음능을 나타냈다. 또한 불연성 시험평가 결과, 개발 소재가 준불연재료(2급) 기준을 만족하며 기존 유기계 흡음재에 없는 난연능을 가지고 있음을 확인하였다.

건축 내장재로서의 역할에 적합한 소재인지 확인하기 위해 밀도, 열전도율 등의 기초 시험평가를 함께 실시하였고, 밀도는 약 0.3g/cm<sup>3</sup>이며 열전도율은 약 0.05W/m·K 정도로 개발 소재가 흡음재뿐만 아니라 단열 및 보온재로서의 역할이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 환경부 EL248. 규격에 따른 유해성분 시험평가를 통해 유해성 기준을 만족하는 친환경 건축소재임을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 사회문제해결형기술개발사업(NRF-2015 M3C8A8071373) 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

Allard, J., Atalla, N. (2009). Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, John Wiley & Sons, 2nd Ed., UK.  
Christensen, J., Romero-Garcia, V., Pico, R., Cebrecos, A.,

Garcia de Abajo, F.J., Mortensen, N.A., Willatzen, M., Sanchez-Morcillo, V.J. (2014). Extraordinary Absorption of Sound in Porous Lamella-crystals, Scientific Reports, **4**, 4674.  
Cox, T.J., D'Antonio, P. (2009). Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design, and Application, CRC Press, 2nd Ed., USA.  
Groby, J.P., Wirgin, A., De Ryck, L., Lauriks, W., Gilbert, R. P., Xu, Y.S. (2009). Acoustic response of a rigid-frame porous medium plate with a periodic set of inclusions, Journal of Acoustical Society of America, **126(2)**, 685–693.  
Groby, J.P., Dazel, O., Duclos, A., Boeckx, L., Kelders, L. (2011). Enhancing the absorption coefficient of a backed rigid frame porous layer by embedding circular periodic inclusions, Journal of Acoustical Society of America, **130(6)**, 3771–3780.  
Jung, S.S., Hwang, C.H. (1996). A study on the acoustical characteristics of the absorbent materials using two microphones, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, **6(2)**, 225–232 [in Korean].  
Lagarrigue, C., Groby, J.P., Tournat, V., Dazel, O., Umnova, O. (2013). Absorption of sound by porous layers with embedded periodic arrays of resonant inclusions, Journal of Acoustical Society of America, **134(6)**, 4670–4680.  
Lee, J.S., Kim, E.I., Kim, Y.Y., Kim, J.S., Kang, Y.J. (2007). Optimal poroelastic layer sequencing for sound transmission loss maximization by topology optimization method, Journal of Acoustical Society of America, **122(4)**, 2097–2106.  
Lee, J.S., Kim, Y.Y., Kim, J.S., Kang, Y.J. (2008). Two-dimensional poroelastic acoustical foam shape design for absorption coefficient maximization by topology optimization method, Journal of Acoustical Society of America, **123(4)**, 2094–2106.  
Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G., Zhang, X. (2009). Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens, Nature Materials, **8(12)**, 931–934.  
Tanneau, O., Casimir, J. B., Lamary, P. (2006). Optimization of multilayered panels with poroelastic components for an acoustical transmission objective, Journal of Acoustical Society of America, **120(3)**, 1227–1238.  
Yang, J., Lee, J.S., Kim, Y.Y. (2015). Metaporous layer to overcome the thickness constraint for broadband sound absorption, Journal of Applied Physics, **117(17)**, 174903.

### 재활용 석고 부산물을 이용한 유무기 하이브리드 흡음재 개발 연구

본 연구에서는 유기계 소재의 폴리우레탄 스펀지를 무기계 바인더 용액에 함침시킴으로써 유무기 하이브리드 구조의 흡음재를 개발하였다. 무기계 바인더 용액은  $\alpha$ 형 반수석고에 60%의 물과 경화 지연제, 유동화제, 아크릴 수지 등의 혼화 재료를 첨가하여 슬러리 용액으로 제조하였으며, 무기계 바인더 용액에 함침시킨 유기계 스펀지를 함침, 가압탈수, 건조시킴으로써 특성평가용 시료를 제작하였다. 개발 시료의 흡음률을 임피던스 관내법을 이용하여 시험 평가한 결과, NRC 흡음계수 값은 0.41로 기존에 시판되고 있는 흡음재들과 비교하여 2배 이상으로 우수한 흡음성능을 나타냈으며, 불연성능 시험평가 결과 준불연재료(2급) 기준을 만족함을 확인하였다. 또한 건축 내장재로서의 기초 시험평가 및 EL248, 규격에 따른 유해성분 시험평가를 통해 본 연구에서 개발한 유무기 하이브리드 소재가 흡음재뿐만 아니라 단열 및 보온재로서의 역할이 가능하며, 유해성 기준을 만족하는 친환경 건축소재로 활용 가능함을 확인하였다.