

재활용 석고 부산물을 이용한 준불연 유무기 융합 단열재 개발 연구

Development of Organic-Inorganic Hybrid Insulating Materials with Semi-Non-Combustible Using by Recycling Gypsum

하주연^{1*} · 신현규² · 송태협^{3*}

Joo-Yeon Ha¹ · Hyun-Gyoo Shin² · Tae-Hyeob Song^{3*}

(Received November 15, 2019 / Revised December 20, 2019 / Accepted December 20, 2019)

The purpose of this study is to develop an organic-inorganic hybrid insulation materials which has an economic feasibility of organic level and excellent adiabatic performance and fire stability by impregnating organic materials with inorganic binder solutions. The organic base was commercial polyurethane sponge, and the inorganic binder slurry was prepared by mixing water and additives into recycled gypsum byproducts. As a result of evaluation of the developed materials, it was confirmed that it not only has excellent insulation performance of a thermal conductivity of 0.051 W/mK or less but also it is a semi-non-combustible materials specified in the Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2015-744. The developed materials can also be controlled for thermal conductivity and flame retardance according to density control during manufacturing process, and thus it can be applied to various insulation materials.

키워드 : 준불연, 단열재, 유무기 융합, 재활용

Keywords : Semi-non-combustible, Insulating materials, Organic-inorganic hybrid, Recycling

1. 서론

건축물 및 플랜트 등에서 에너지 절감 및 단열을 목적으로 한 소재들은 지속적으로 사용량이 증가하고 있으며, 관련 정책 및 선진국 추이를 고려할 때 향후 증가 추세가 계속될 것으로 예상된다. 국토교통부에서는 2025년 제로에너지 주택건설 의무화를 목표로 녹색 건축물 조성지원법, 에너지절약설계기준 등을 통해 건축물의 에너지저감 대책을 강화하고 있으며 이에 따라 국내 단열재 시장은 급속하게 확대되고 있다(Villasmil et al. 2019; Viel et al. 2019; Hu et al. 2018).

건축용 단열재는 소재에 따라 유기계와 무기계로 나뉘는데, 현재 국내 시장의 70% 이상의 점유율을 가지는 EPS, PUR 등의 유기계 단열재는 단열능력이 우수함에도 불구하고, 화재 취약성, 환경 유해성 및 구조적 취약성 등의 단점을 가지고 있어 점차 그 사용이

제한되고 있는 추세이다. 국내에서는 2010년부터 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」에서 건축물의 외벽 마감 재료는 불연 재료 또는 준불연 재료를 사용하도록 하고 있으며, 2015년 1월 의정부 아파트 화재사고를 계기로 외부 마감 재료의 불연 및 준불연 재료의 사용 의무가 기존 30층 이상에서 6층 이상의 건축물로 확대되었을 뿐만 아니라 2019년 8월 개정사항으로는 3층 이상 5층 이하 또는 높이 9미터 이상 22미터 미만인 건축물을 추가하는 등 안전 기준에 대한 사회적 인식 증대에 따라 화재 안전성에 대한 기준이 점차 강화되고 있다(Yu et al. 2018; Leisted et al. 2017).

하지만 내열성이 우수한 무기계 단열재의 경우 단열능력이 유기계 단열재에 크게 못 미치고, 매우 고가이거나 글라스 울 및 미네랄 울 등처럼 섬유 분진에 의한 유해성 논란, 다양한 형태 생산의 어려움(판상형 위주), 높은 흡습성으로 인한 성능 저하 및 변질 등

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

¹한국산업기술시험원 재료기술센터 연구원 (Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul, 08389, Korea)

²한국산업기술시험원 재료기술센터 수석연구원 (Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul, 08389, Korea)

³한국건설기술연구원 연구전략기획본부 연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

의 문제가 제기되고 있으며, 또한 높은 중량으로 시공성이 매우 떨어진다. 기존 유기계 단열소재를 대체하기 위해 화재 취약성에 대한 해결뿐만 아니라 단열재로서의 낮은 열전도율, 낮은 흡수율, 시공 용이성, 형상 제어, 경제성 등을 만족하는 새로운 소재의 개발이 필요하다(Yang et al, 2018; Ng et al, 2018; Noh et al, 2012).

따라서 본 연구에서는 균일한 기공 제어가 용이하고 형상제어가 자유로운 유기계 단열소재 구조와 화재 안전성과 기계적 강도를 확보할 수 있도록 무기계 소재 기술을 적용한 유기-무기 융합형 형상제어 단열재의 상용화 소재 및 공정기술을 개발하고자 하였다. 유기-무기 융합 구조와 관련하여 여러 가지 방식의 연구가 이루어져 왔으나(Yang et al, 2010; Li et al, 2018) 본 연구에서는 형상제어 및 경제성 등의 인자를 고려하여 일정 크기로 제어된 기공을 가지는 유기계 다공성 구조체에 무기계 함침제가 코팅 또는 막 형태로 융합되어 있는 구조를 채택하였으며(Fig. 1), 이를 구현하기 위해 유기계 기재에 무기계 물질을 함침 시킨 후 압착 또는 감압 공정을 통해 일정량의 무기계 물질을 제거, 형상복원, 건조 공정을 거쳐 최종 시제품으로 제조하였다. 개발 소재의 가장 큰 장점으로 압착 및 감압 공정에서 무기계 함침량 제어에 따른 단열 특성 및 난연 성능 조절이 가능함으로써 다양한 용도의 단열재에 적용 가능할 것으로 판단된다. 또한 유기계 기재로 저렴한 폴리우레탄 계열의 상용 스펀지 폼을 사용하고, 재활용 석고 부산물을 무기계 핵심 소재로 활용함으로써 기존 단열재 시장에서 경제성을 확보할 수 있다.

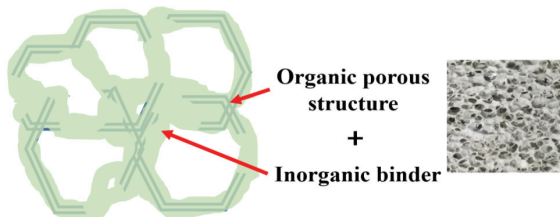


Fig. 1. Concept of organic-inorganic hybrid structure

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서는 유기계 폴리우레탄 스펀지에 석고를 베이스로 조성 설계한 무기 바인더 용액을 침지하여 유기-무기 융합 단열재를 제작하였다. 연구에 사용된 유기계 폴리우레탄 스펀지로 균일한 기공 형상(open cell type)과 크기(45ppi)를 가진 비교적 가격이 저렴한 시중에서 판매되는 제품을 선정하였고, 제품 기초 사양을 Table 1에 나타냈다. 스펀지 함침용 무기 바인더 소재로는 물의

양을 조절하여 강도 제어가 가능한 반수석고를 사용하였으며, 특히 적은 물로도 큰 강도를 얻을 수 있는 재활용 α형 반수석고를 사용하였다. 분말 형태의 α형 반수석고에 40%, 60%, 80%의 물을 혼합하여 슬러리 용액으로 제조하였으며, 혼합재료로써 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.

Table 1. Specification of the organic polyurethane sponge

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

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

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

* PNS(NSF): Poly naphthalene sulfur formalin condensation

2.2 제조 공정

사전 실험을 통해 300×300×30mm 스펀지 1장의 최대 함수량이 약 2kg임을 확인하였고, 스펀지 1장을 충분히 함침 시키기 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, 300×300×30mm 크기로 재단한 스펀지를 침전시켜 무기 바인더가 충분히 함침될 수 있도록 30초 이상 가력 하였다. 용액을 최대한 흡수한 스펀지를 꺼내 1, 3, 5, 7, 9mm 간격으로 맞춘 압착 롤러를 이용하여 탈수시킨 후, 70°C 온도에서 3시간 이상 건조시켰다. Fig. 2는 제조 공정 모식도를 나타내며, Fig. 3은 본 연구를 위해 직접 개발하여 실제 제조 공정에서 사용한 압착 롤러 장치의 기본 설계도 및 사진이다.

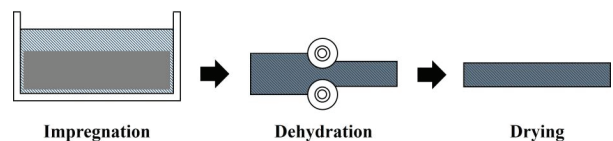
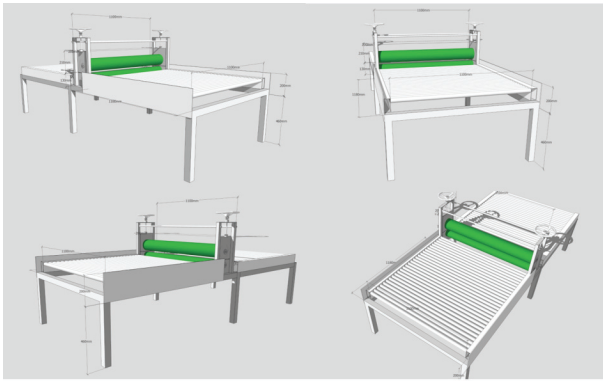
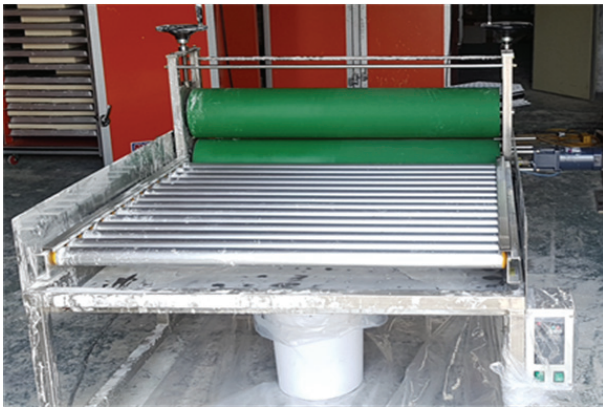


Fig. 2. Diagram of the manufacturing process of the organic-inorganic hybrid materials



(a) Design drawing of the rolling equipment



(b) Photograph of the rolling equipment

Fig. 3. Design and photograph of the rolling equipment for manufacturing the organic-inorganic hybrid materials

2.3 성능 평가

Table 3은 개발 소재에 대한 시험평가 항목 및 측정 규격을 나타낸 표이다. 본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재는 기존 유기계 및 무기계 단열재가 가지는 특성을 복합적으로 지닌 새로운 성능 수준의 제품이므로, 기존 단일계 단열재를 대상으로 제정된 규격들을 바탕으로 유·무기계 소재 특성에 따라 양분화 된 평가 항목을 참고 및 절충하여 유기계 기재에 적용되는 열전도율, 강도,

환경유해성과 더불어 무기계 바인더 적용 항목인 난연성과 내열성을 유무기 융합 단열재 성능 평가항목으로 선정하였다.

열전도율은 KS L 9016의 평판 직접법(보호 열판법)에 의하여 고열판과 저열판 사이에 시험체를 고정하고 시험체를 통과하는 열류량과 그 때의 온도차를 측정하여 열전도율을 산출하였다. 강도는 유기계 기재인 폴리우레탄 폼 단열재 규격 KS M 3809의 5.8(굴곡강도) 및 5.9(압축강도)에 따라 굴곡강도의 경우 KS M ISO 1209, 압축강도의 경우 KS M ISO 844의 시험 방법을 적용하였다. 난연성능은 국토교통부 고시 제 2015-744호: 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준에 근거하여 준불연재료(2급)에 해당하는 열방출률 및 가스유해성 시험 기준 만족여부를 확인하였고, 환경유해성은 환경부 환경표지 인증기준 EL248(벽 및 천장 마감재)에 근거하여 실내공기질공정시험기준(TVOC, 톨루엔, 폼알데하이드 방출량)을 따라 시험 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단열 특성

롤러 간격에 따라 최소 0.087g/cm³에서 0.333g/cm³의 밀도를 가지는 시료를 제조할 수 있었으며(Table 4), 제조된 시료의 밀도에 따른 열전도율 차이를 확인한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 롤러 간격이 증가함에 따라 밀도 및 열전도율 특성이 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 롤러 간격이 커질수록 유기계 기재에 함침되는 무기계 함침량이 많아지기 때문이며 함침된 무기계 소재는 유기계 기재 내부에서 열을 전달하는 매개체 역할을 하므로 밀도가 증가할수록 열전도율도 함께 증가하는 것으로 판단된다. 이론적으로 개기공을 갖는 다공체의 열전도율은 고체골격을 통한 열전도율, 복사에 의한 열전도율, 기체 분자들의 충돌에 의한 열전도율, 그리고 대류에 의한 열전도율 인자로 구성되는데, 함침 공정을 통해 기공이 감소되고 폐기공이 다량으로 형성된 유무기 융합 단열재의 열전도율의 경우 대부분 고체골격을 통한 열전도율 인자에 지배된

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

Test item	Standard for test methods
Thermal conductivity	· KS L 9016 (Test methods for thermal transmission properties of thermal insulations)
Compressive/bending strength	· KS M 3809 (Rigid polyurethane foam for thermal insulation)
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)
Environmental damage assessment	· EL248 (Finishing Materials for Wall or Ceiling)

Table 4. Performance depending on the manufacturing condition of organic-inorganic hybrid insulation materials

Water content (%)	Roller distance (mm)	density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/mK)
60	1	0.087~0.133	0.04021~0.04217
	3	0.142~0.179	0.04519~0.05308
	5	0.184~0.202	0.04560~0.05294
	7	0.207~0.257	0.05241~0.06544
	9	0.275~0.333	0.05901~0.07105

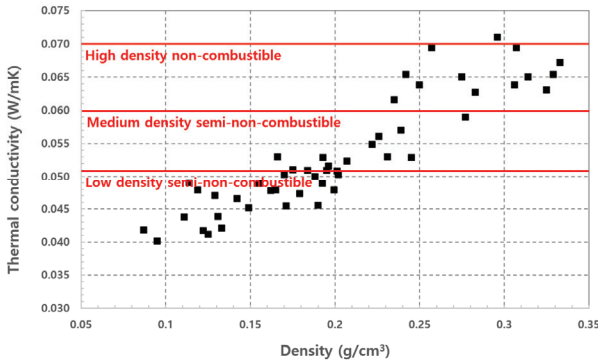


Fig. 4. Thermal conductivity depending on the density of organic-inorganic hybrid insulation materials

다고 볼 수 있으며, 함침량이 많아 밀도가 높은 시료일수록 고품 매개체를 통한 열전달 효과가 높아져 단열특성은 저하되는 것으로 판단된다(Loeb 1954; Barea et al. 2005; Ahn 2012).

본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재의 경우 밀도 조절이 용이하기 때문에 특정 열전도율에 맞게 제작이 가능해 다양한 용도에 맞는 단열 소재 제작이 가능할 것으로 예상된다. Table 5는 적용 용도에 따라 유무기 융합 단열재를 3가지 유형으로 구분한 표이다. 불연성을 요구하는 방화문, 화재확산방지재 용도의 고밀도 불연형(0.25~0.35g/cm³), 천장재, 벽체 등 외단열에 적용 가능한 0.060W/mK 이하의 중밀도 준불연형(0.20~0.25g/cm³), 높은 단열성능을 요구하는 아파트용 AD/PD(Air Duct/Pipe Duct) 등 내 단열 용도로 열전도율 0.051W/mK 이하 저밀도 준불연형(0.15~

0.20g/cm³)으로 구분하였다. Table 4를 통해 각 유형별 성능에 부합하는 단열재 공정 조건을 제시할 수 있으며, 혼수량 60%의 함침 조건을 기준으로 고밀도 불연형은 롤러 간격 9mm, 중밀도 준불연형은 7mm, 저밀도 준불연형은 3~5mm의 압착 조건으로 생산 가능하다. 하지만 3mm 이하의 롤러 간격에서는 단열재 두께 대비 90% 이상의 압축률로 작업성 및 제품의 외관품질이 취약하여 저밀도 준불연형의 최적 압착 조건으로 5mm의 롤러 간격을 도출하였다.

용도에 따른 구분 중 단열재 시장에서 가장 범용적으로 활용될 수 있는 유형으로는 가장 우수한 단열특성과 낮은 밀도로 시공성이 확보되는 저밀도 준불연형으로, 실험적 데이터베이스를 바탕으로 준불연 이상의 난연성과 건축자재로서의 품질을 확보할 수 있는 최소한의 무기계 함침량에 따른 밀도 범위를 0.15~0.20g/cm³으로 판단하였으며 그에 부합하는 열전도율인 0.051W/mK을 성능 기준으로 도출하였다. 이는 KS M 3808, 3809 및 KS L 9102에 의한 해당 단열재 및 기타 단열재의 성능 기준과 국토교통부 고시 제 2017-71호 건축물의 에너지절약설계기준을 고려한 수치이다. 따라서 역학적 특성, 난연 성능, 환경 유해성 시험에 대해서도 밀도 0.2g/cm³, 열전도율 0.048W/mK 급의 저밀도 준불연형 유무기 융합 단열재를 대상으로 실시함으로써 최소한의 무기계 함침량에 따른 성능 적합성을 확인하고자 하였다.

3.2 역학적 특성

유무기 융합 단열재의 기계적 물성 평가는 단열재가 견디는 하중에 대한 지표로 굴곡강도와 압축강도 시험으로 수행하였다. KS M 3809에서 제시하는 시험방법을 참고하여 굴곡강도의 경우 휨 변형이 20mm일 때의 하중을 측정하였고, 압축강도는 초기 두께의 85%가 감소될 때의 최대 하중을 측정하였다. 열전도율 0.04782, 0.04895, 0.04908W/mK 급의 저밀도 준불연형으로 제조된 시제품 3개를 대상으로 강도 시험한 결과, 휨강도는 3.73kgf/cm² (36.6N/cm²), 압축강도는 3.46kgf/cm²(33.9N/cm²)의 평균값을 도출하였다. 이는 기존의 상용 단열재 규격에서 제시하는 최소 강

Table 5. Classification of organic-inorganic hybrid insulation materials by application

Classification	Performance	Application
High density non-combustible	Thermal conductivity of 0.070W/mK or less Density of 0.25~0.35g/cm ³	Fire door, fire resistance material, etc.
Medium density semi-non-combustible	Thermal conductivity of 0.060W/mK or less Density of 0.20~0.25g/cm ³	Ceiling material, wall, etc.
Low density semi-non-combustible	Thermal conductivity of 0.051W/mK or less Density of 0.15~0.20g/cm ³	Air Duct/Pipe Duct(AD/PD) of apartment, inside insulation, etc.

도 기준인 $3\text{kgf/cm}^2(28.8\text{N/cm}^2)$ 를 만족하는 강도 값으로 본 연구에서 개발한 단열재가 건축자재로서 기본적인 기계적 품질을 확보함을 확인할 수 있다.

하지만 이러한 굴곡 및 압축강도 측정 시 본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재는 기존의 경질 단열재와 달리 다공성 유기계 기재 내부에 무기계 물질이 분체 형태로 분포되어 있는 구조를 가짐으로써 유기계가 모두 압축된 후부터는 무기계 소재간의 압착이 일어나 하중이 급격히 증가한다거나 굴곡에 의해서는 얽혀있는 무기계 물질로 인해 찢어지는 양상을 나타내기도 하였다. 이로 인해 동일한 시험편을 대상으로 한 반복시험의 경우에도 무기계 분포 양상에 따라 시험 결과의 재현성이 확보되지 않는 등 유무기 융합 단열재의 강도를 평가하는 데 있어 기존의 경질한 단열재에 대한 평가방법의 적용이 적합하지 않다고 판단되었다. 따라서 유무기 융합 단열재의 기계적 물성을 평가하기 위해 인장 강도, 로크웰 및 쇼어 경도, 수직하중 시험법 등을 차용하여 본 개발품의 기계적 성능을 나타내기 위해 적합한 새로운 시험방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.



Fig. 5. Destruction mechanism for compressive and bending strength measurement

3.3 난연 성능

난연성은 재료가 연소하기 어려운 정도를 나타내는 특성으로 기존 유기계 단열재 KS 중 난연성 평가항목을 포함하는 규격은 없다. 따라서 본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재의 난연성 평가는 국토해양부 고시 제2015-744호 「건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준」을 적용하여 그 내용을 도출하였다. 또한 기존 유기계 단열재의 화재 취약성을 무기계 바인더와의 함침 및 융합을 통해 크게 보완했지만, 유기계 기재가 포함된 제품이므로 준불연재료(난연2급)로 분류되어 이에 해당하는 시험방법 및 성능기준을 적용하였다. 준불연재료란 한국산업규격 KS F ISO 5660-1 「연소성능시험-열 방출, 연기 발생, 질량 감소율-제1부: 열 방출률(콘칼로리미터법)」에 따른 가열시험 개시 후 10분간 총

방출열량이 8MJ/m^2 이하이며, 10분간 최대 열방출률이 10초 이상 연속으로 200kW/m^2 을 초과하지 않고, 10분간 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열, 구멍 및 용융(복합자재의 경우 심재가 전부 용융, 소멸되는 것을 포함한다) 등이 없어야 한다. 또한 한국산업규격 KS F 2271 중 가스유해성 시험 결과, 실험용 쥐의 평균행동정지 시간이 9분 이상이어야 하는 기준을 만족해야 한다.

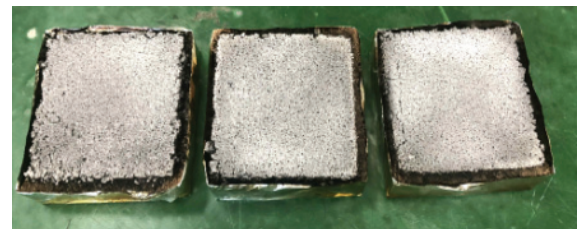
제시된 방법에 따라 밀도 0.193g/cm^3 , 열전도율 0.04895W/mK 의 저밀도 준불연형으로 제조된 시료를 대상으로 준불연시험을 수행하였다. 열방출률 시험 결과 총 방출열량은 평균 5.33MJ/m^2 으로 기준치 8MJ/m^2 이하를 만족하였고, 열방출률이 200kW/m^2 를 연속하여 초과한 시간이 0초로 기준치인 10초 이하를 만족하였다(Table 6). Fig. 6의 열방출률 시험 전과 후의 사진을 보면 심재의 전부 용융 및 관통하는 균열과 구멍 등이 발견되지 않아 육안테스트도 만족함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 7의 가스유해성 시험 결과 마우스의 평균 행동 정지시간은 14분 이상으로 9분 이상의 기준치를 만족함으로써 본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재가

Table 6. Test results of heat release rate(cone calorimeter method) for the development materials specimen

Test item	Performance criterion	Test results
Total emission calorie for 10 minutes (MJ/m^2)	Below 8MJ/m^2	5.33MJ/m^2
Maximum heat release rate (kW/m^2)	Under 200kW/m^2	8.87kW/m^2
200kW/m^2 overtime (s)	Within 10 seconds	0 seconds
Visual evaluation	No crack, hole, and melting	None



(a) Before test



(b) After test

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

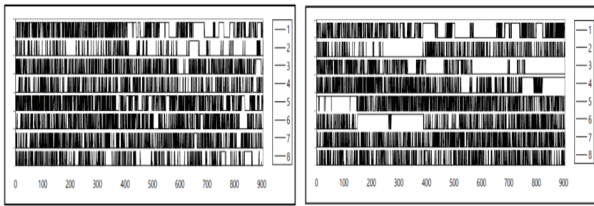


Fig. 7. Mouse activity graphs after gas toxicity test for the development materials specimens

국토교통부고시 「건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지 구조 기준」에서 제시하는 준불연재료에 적합한 소재임을 확인할 수 있다.

3.4 환경 유해성

유무기 융합 단열재의 환경 유해성은 환경표지 인증기준인 EL248 「벽 및 천장 마감재 기준」에서 제시하는 시험항목으로 평가하였으며, 이는 국내의 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법 시행규칙」보다 낮은 농도로 더 엄격한 안정성을 요구하는 기준이다. EL248에서 제시하는 기준에 따르면 VOCs의 경우 7일 후 VOCs 방출량 $0.10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이하 또는 톨루엔 방출량 $0.080\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이하를 만족해야 하며, 폼알데하이드의 경우에는 방출량 $0.3\text{mg}/\text{L}$ 이하 또는 7일 후 방출량이 $0.015\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이하를 만족해야 한다. 유무기 융합 단열재 시제품을 대상으로 KS I ISO 16000-9에 따라 7일 동안 시료부하율 $2.0\text{m}^2/\text{m}^3$, 23°C , 50% R.H. 온도 및 습도 조건에서 방출시험을 수행하여 농도를 확인한 결과, Table 7에 나타난 바와 같이 TVOC 방출량은 $0.004\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 미만, 톨루엔 방출량은 $0.001\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 미만, 폼알데하이드 방출량은 $0.001\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 미만으로 모두 검출 한계에 해당함으로써 본 연구에서 개발한 유무기 융합 단열재가 친환경 건축자재로서 적합한 소재라고 판단할 수 있다.

Table 7. Test results of environmental damage assessment (EL248) for the development materials specimen [Unit: $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

Test item	Performance criterion for EL248 by Ministry of Environment	Test results
VOCs* emissions	VOCs emissions after 7 days: below 0.10	Under 0.004
Toluene emissions	Toluene emissions: below 0.080	Under 0.001
Formaldehyde emissions	Formaldehyde emissions after 7 days: below 0.015	Under 0.001

* VOCs: Volatile organic compounds

4. 결론

본 연구에서는 다공성 유기계 기재에 재활용 석고를 활용한 무기계 바인더 소재를 함침시킴으로써 유기계 수준의 경제성을 가지며 우수한 단열성능 및 화재 안전성을 보유한 유무기 융합형 단열재를 개발하였다.

- 밀도 및 열전도율 특성을 평가한 결과 $0.15\sim 0.20\text{g}/\text{cm}^3$ 의 밀도 범위에서 $0.051\text{W}/\text{mK}$ 이하의 우수한 단열 성능을 확인할 수 있었고, 공정 조건에 따라 소재의 밀도 및 열전도율 조절이 용이하기 때문에 다양한 용도에 맞는 상용 제품 생산이 가능할 것으로 판단됨
- 역학적 특성 평가 결과, 상용 단열재 규격에서 제시하는 성능 기준인 $3\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상의 휨 및 압축강도를 가짐을 확인
- 난연 성능평가를 통해 국토교통부 고시 제 2015-744호 건축물 마감 재료의 난연 성능 및 화재 확산 방지구조 기준에 명시된 준불연 재료임을 확인
- 환경부 EL248. 규격에 따른 유해성분 시험평가를 통해 유해성 기준을 만족하는 친환경 건축소재임을 확인

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C130213-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahn, W.S. (2012). Effects of GTR and unexpanded expancel powders on thermal conducting characteristics of rigid polyurethane foams, *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, **13(6)**, 2846-2851 [in Korean].

Barea, R., Osendi, M.I., Ferreira, J.M.F., Miranzo, P. (2005). Thermal conductivity of highly porous mullite material, *Acta Materialia*, **53(11)**, 3313-3318.

Hu, F., Wu, S., Sun, Y. (2018). Hollow-structured materials for thermal insulation, *Advanced Materials*, **31(38)**, 1801001.

Leisted, R.R., Sorensen, M.X., Jomaas, G. (2017). Experimental

- study on the influence of different thermal insulation materials on the fire dynamics in a reduced-scale enclosure, *Fire Safety Journal*, **93**, 114–125.
- Li, Y., Liu, X., Nie, X., Yang, W., Wang, Y., Yu, R., Shui, J. (2019). Multifunctional organic–inorganic hybrid aerogel for self-cleaning, Heat-Insulating, and Highly Efficient Microwave Absorbing Material, *Advanced Functional Materials*, **29(10)**, 1807624.
- Loeb, A.L. (1954). Thermal conductivity: VIII, a theory of thermal conductivity of porous materials, *Journal of the American Ceramic Society*, **37(2)**, 96–99.
- Ng, S., Jelle, B.P., Sandberg, L.I., Gao, T., Mofid, S.A. (2018). Hollow silica nanospheres as thermal insulation materials for construction: Impact of their morphologies as a function of synthesis pathways and starting materials, *Construction and Building Materials*, **166(30)**, 72–80.
- Noh, H.K., Song, H., Chu, Y.S., Park, J.S., Lee, J.K. (2012). Evaluation of an organic–inorganic hybrid insulation material using an inorganic filler and polyurethane with a foaming condition, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **49(6)**, 654–658 [in Korean].
- Viel, M., Collet, F., Lanos, C. (2019). Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources, *Construction and Building Materials*, **214**, 685–697.
- Villasmil, W., Fischer, L.J., Worlitschek, J. (2019). A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **103**, 71–84.
- Yang, H., Jiang, Y., Liu, H., Xie, D., Wan, C., Pan, H., Jiang, S. (2018). Mechanical, thermal and fire performance of an inorganic–organic insulation material composed of hollow glass microspheres and phenolic resin, *Journal of Colloid and Interface Science*, **530(15)**, 163–170.
- Yang, T.Y., Kim, W.Y., Yoon, S.Y., Park, H.C. (2010). Macroporous silicate ceramics prepared by freeze casting combined with polymer sponge method, *Journal of Physics and Chemistry*, **71(4)**, 436–439.
- Yu, Z.L., Yang, N., Kalkavoura, V.A., Qin, B., Ma, Z.Y., Xing, W.Y., Qiao, C., Bergstrom, L., Antonietti, M., Yu, S.H. (2018). Fire-retardant and thermally insulating phenolic-silica aerogels, *Angewandte Chemie*, **57(17)**, 4538–4542.

재활용 석고 부산물을 이용한 준불연 유무기 융합 단열재 개발 연구

본 연구는 유기계 기재에 무기계 바인더 소재를 함침시킴으로써 유기계 수준의 경제성을 가지며 우수한 단열성능 및 화재 안전성을 보유한 유무기 융합형 단열재 개발을 목적으로 한다. 유기계 기재는 폴리우레탄 소재의 상용 스펀지를 사용하였고, 함침용 무기 바인더 용액은 재활용 석고 부산물에 물과 첨가제를 혼합하여 제조하였다. 개발 소재의 성능평가 결과 열전도율 0.051W/mK 이하의 우수한 단열성능 뿐만 아니라 국토교통부 고시 제 2015-744호 기준에 명시된 준불연 재료임을 확인할 수 있었다. 또한 본 개발 소재는 제조 공정 과정에서 밀도 제어에 따른 열전도율 및 난연성 조절이 가능하여 다양한 용도의 단열재에 적용 가능할 것으로 판단된다.