

폐유리를 활용한 불연 무기물 발포 보드 개발 및 성능평가

Development and Performance Evaluation of Non-flammable Mineral Foam Board Using Waste Glass

김현수¹ · 최원영^{2*} · 김상현³ · 최승환⁴ · 박순돈⁵

Hyen-Soo Kim¹ · Won-Young Choi^{2*} · Sang-Heon Kim³ · Seung-Hwan Choi⁴ · Soon-Don Park⁵

(Received November 15, 2019 / Revised February 28, 2020 / Accepted March 13, 2020)

In this study, non-flammable mineral foam board using waste glass that can be produced to standardized specifications were developed and evaluated for the performance.

In addition to the physical and mechanical performance, the environmental properties such as insulation, non-combustibility, gas hazard, sound absorption, etc. were tested to verify the use as interior and exterior building materials.

Through the structural review, the validity was verified for the application of the office and restaurant building.

키워드 : 폐유리, 불연무기물, 단열, 발포보드, 성능평가

Keywords : Waste glass, Nonflammable Inorganic material, Insulation, Foam board, Performance evaluation

1. 서론

국제적으로 무기물 발포기술과 관련하여 일본, 유럽, 미국 등에서 화산재나 석탄재, 폐유리 분말, 하수 슬러지 등을 원료로 한 기술이 다수 개발되는 등 폐자원을 재활용하여 제품으로 만들기 위한 목적의 연구개발이 많이 이루어져 왔다.

이 중 폐유리는 매년 40만 톤을 넘는 양이 발생하고 있으며 그 양은 증가하고 있는 추세로, 이러한 폐유리를 효과적으로 재활용하기 위한 연구는 불가피한 실정이다(KORA 2018).

이러한 폐유리를 활용한 무기물 발포기술의 건축 자재 개발과 관련하여 국내·외 다수의 연구자들에 의한 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 연구실 수준의 연구에 한정되어 왔으며, 이를 제품으로 생산하여 양산화하기 위한 과정이 실패로 돌아가는 경우가 많이 발생하였다(Lee 2012).

특히, 시장으로 접근하기 위한 사이즈로 생산하기 위해서는 여러

공정 과정에서 발생하는 문제들을 해결해야 한다. 믹서 단계에서 배합의 오차 문제를 해결해야 하고, 열처리 단계에서는 산소량과 온도 유지 등 소결조건을 찾기 위한 수차례의 연구가 필요하며 이를 토대로 문제를 해결해야 한다.

냉각 단계에서는 제품의 열팽창계수로 인해 발생하는 크랙문제를 해결하기 위해 발포단계에서 원료의 결합력을 높여주는 조건 및 서냉 단계에서 온도별 냉각조건을 찾아야 하며, 성형틀과 제품의 열팽창계수로 인한 크랙현상을 극복하기 위한 수차례의 실험이 요구되는 등의 문제가 있다.

상기 문제점들을 해결 및 극복하기 위해 표준화된 규격으로 생산 가능한 폐유리 불연 무기물 발포 보드를 개발하였고, 물리·역학적 성능을 비롯해 단열성, 불연성, 가스유해성, 흡음성, 등 환경적 특성 시험을 통해 건축 내외장재로 활용하기 위한 검증을 실시하였으며, 구조검토를 통해 사무실, 식당 건물 등 현장적용을 통해 그 유효성을 확인하였다.

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

¹한국건설기술연구원 국민생활연구본부 선임연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 건설시험인증본부 전임연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 국민생활연구본부 수석연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁴부림산기(주) 대표이사 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁵부림산기(주) 팀장 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

2. 폐유리 불연무기물 발포 보드 개발

2.1 제조계획

본 연구에서 목표로 하는 폐유리 불연무기물 발포보드 개발을 위해 1,600°C 의 유리용융 과정 없이 분쇄한 폐유리 분말과 발포첨가제를 섞어 800°C 정도의 저온 소결 발포 및 냉각하여 생산하기 위한 제조 과정을 진행하였다.

또한, 제품 생산을 통한 검증과 현장에 적용하기 위한 과정의 일환으로 물리·역학적 성능과 환경적 성능평가를 Table 1과 같이 실시하였다.

Table 1. Environmental impact of recycled aggregate

Physical and mechanical performance		Environmental performance	
Density	KS F 2459	Thermal conductivity	KS L 9016
Absorption	GR L 2002	nonflammable	KS F ISO 1182
Compressive strength	KS L ISO 679	Gas hazard	KS F 2271
Frost resistance	KS F 2604	Heavy metal hazard	Waste disposal standard method
-	-	Mildew resistance	ASTM G -21
-	-	Sound absorption	KS F 2814-2

2.2 사용재료

본 연구에서 목표로 하는 자재의 개발을 위해 사용하는 주원료로는 폐유리분말과 알루미늄 드로스, 석탄회가 있다.

폐유리는 다양하게 활용 된 유리가 매년 대량으로 발생하여 재활용 혹은 매립을 해야 하는 상황이며, 이러한 유리를 활용한 자원순환을 통해 환경보호에 기여하고 에너지를 절감할 수 있도록 해주고 인체에도 무해한 무기질 원료이다.

Table 2. Environmental impact of recycled aggregate

Compound /element	Percent(w/w)	Compound /element	Percent(w/w)
Al ₂ O ₃	64.8	Na ₂ O	2.75
CaO	0.93	K ₂ O	0.51
SiO ₂	4.0	Cl	3.9
Fe ₂ O ₃	1.5	C	1.25
MgO	3.2	S	0.22

알루미늄 금속 또는 스크랩의 용해 시 용탕 표면에 형성되는 금속성 산화물인 알루미늄 드로스는 대부분 매립 처리되고 있다. 하지만, 매립된 알루미늄 부산물은 식물에 나쁜 영향을 주거나 Table 2와 같이 대부분 알루미늄 산화물로 이루어져 있어 반응성이 매우 크고, 강알칼리 수용액과 반응할 경우 폭발의 위험이 있는 수소기체를 발생시키기도 함에 따라 안전한 처리가 필요하다.

2.3 제조방법

본 연구를 통해 개발을 목표로 하는 폐유리 불연무기물 발포 보드를 제조는 Table 3에 나타냈으며 이를 위해서는 먼저 투입되는 폐유리를 300~800mesh로 분쇄하여야 한다. 폐유리 분말의 입도가 300mesh 미만이면 기공 모양의 균일성이 저하되고, 제조된 발포 보드의 비중이 상대적으로 높아지며, 기공과 기공 사이의 막 두께가 두꺼워지는 문제점이 발생한다. 반대로, 폐유리 분말의 입도가 높아져 800mesh를 초과하면 공정 및 비용의 증가에 대비하여 발포 성능의 향상 정도가 크지 않아 경제성과 효율성이 저하되는 단점이 있다.

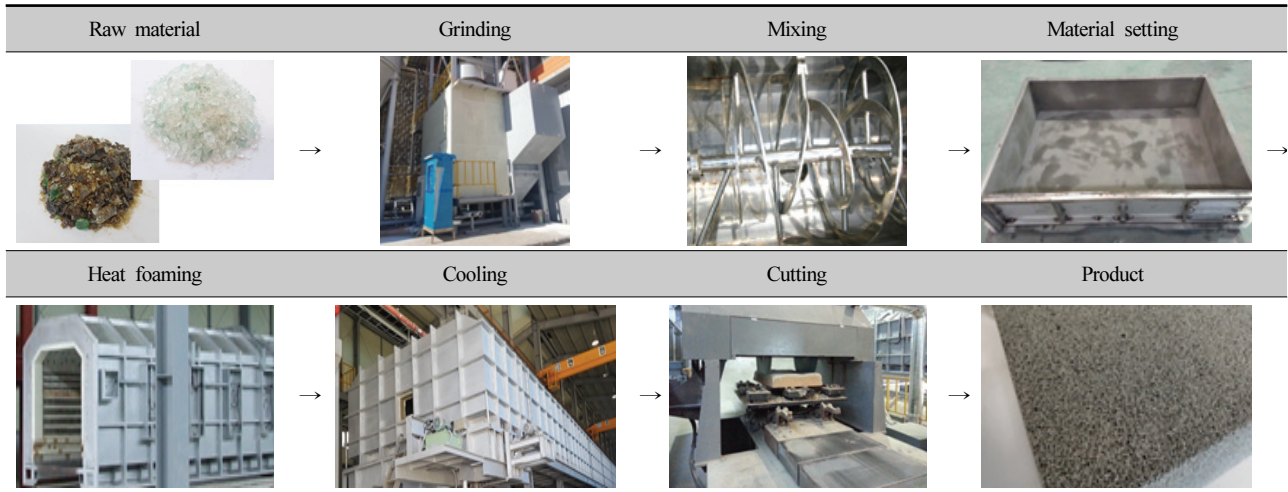
본 연구에서는 금속 알루미늄 성분이 완전히 제거된 알루미늄 드로스를 발포제로 사용하였다. 금속 알루미늄 성분이 포함된 알루미늄 드로스를 사용할 경우 발포제로 사용하기 위해 많은 양의 알루미늄 드로스를 유리 분말에 첨가하여야 하고, 그에 따라 최종 생산물인 발포 단열재의 비중이 증가하여 시공성을 저하시키며, 기공과 기공 사이의 막 두께가 두꺼워져 발포 단열재의 공극률 저하로 이어지기 때문이다.

반면, 금속 알루미늄 성분이 제거된 알루미늄 드로스를 발포제로 사용할 경우 상대적으로 적은 양의 알루미늄 드로스라도 발포제 역할을 충분히 수행가능하며, 최종 제품의 비중이 상대적으로 감소하여 시공성이 향상되며, 기공 사이의 막 두께가 얇아져 발포 단열재의 공극률이 증가, 균질성까지 얻게 된다.

원료 투입 단계에서는 혼합된 원료를 몰드에 주입하고 다져서 평탄화 하는데 이는 원료 내부의 잔류공기를 제거하기 위함이다. 원료 내부의 잔류공기가 제거되지 않으면 열처리 후 정상적인 기공형성에 영향을 미치게 된다. 기공 모양의 균일성, 기공 사이의 막 두께, 기공의 크기 등은 폐유리의 입도와 알루미늄 드로스의 성분으로 제어되어야 하며, 특히 기공의 크기는 폐유리의 입도와 알루미늄 드로스의 성분 이외에도 열처리 온도와 첨가물의 영향도 받게 된다.

이러한 변수만으로 통제하는 것이 원하는 성능과 품질의 자재를 얻기에 유리하며, 원료 내부의 잔류공기와 같은 추가적인 변수는 미리 제거해야 한다. 몰드 내에 평탄화 된 원료는 열처리하여 소성

Table 3. Method of manufacture



시키는 단계가 필요하다. 유리와 같은 비결정질 고체는 녹는점이 뚜렷하지 않아 특정 온도에서 녹아 흐르는 상태가 되는 것이 아니라 유동성을 가지는 액체의 형태를 띠게 되는데 이때의 온도가 유리의 전이온도이고, 소성 중 전이온도에 이르렀을 때 발포가 시작된다.

소성온도는 700~1000℃으로 하는데 온도가 700℃ 미만이면 전이온도에 미치지 못하여 원활한 발포가 이루어지기 어렵고, 온도가 1000℃를 초과하면 과 발포로 인해 이상 기공이 발생하거나 기공벽(기공과 기공 사이의 막)이 허물어지는 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 소성 이후 500℃까지 급냉 시키는데 500℃까지는 급속 냉각하여도 자재의 성능과 품질에 큰 영향이 없으며, 몰드로부터 탈형을 하기에 용이하다.

이 후 몰드로부터 발포 보드를 탈형하고 500℃ 이상의 온도에서 대략 20℃~30℃의 상온까지 서냉 시키는데 이런 과정을 통해 개발 자재의 내·외부의 온도차가 크지 않고 성능과 품질에 영향을 덜 미치게 된다. 이 후 표면을 가공하여 마무리하게 된다.

3. 폐유리 불연무기물 발포 보드 성능평가

3.1 평가 개요

본 장에서는 본 연구를 통해 개발하고자 하는 폐유리 불연무기물 발포 보드를 건축용 자재가 기본적으로 요구하는 물리·역학적 성능을 평가하고자 하였다.

또한, 폐유리를 활용하여 개발하고자 하는 자재임에 따라, 인체 유해성에 대한 성능 시험을 실시하여 무해·환경적 특성을 확인함으로써 본 자재가 건축용 내·외장재로 활용되기에 적합한지에 대한 여부를 확인하고자 한다.

3.2 물리·역학적 성능평가

3.2.1 밀도

본 시험의 밀도는 KS F 2459에 규정하여 실시하였으며 규격은 900*600*30T를 기준으로 측정하였다.

그 결과, Table 4와 같이 밀도는 0.29g/cm³로 대리석 및 화강석 밀도에 비하여 1/9에 불과하며, KS에서 제시한 ALC 기준인 0.45~0.55g/cm³보다도 가벼운 것으로 폐유리를 활용한 자재인 만큼 경량성이 우수한 것으로 확인되었다.

특히, 얇은 벽으로 이루어진 유리 cell로 형성되어 있어 가공이 쉽고 시공이 편리하다는 특성을 비롯하면 건축 내장재로 활용되기에 매우 적합한 특성을 지닌 것으로 판단된다.

Table 4. Physical properties

Materials	Density (g/cm ³)	Weight (kg)	Rate (%)
Marble / Granite	2.70	43.74	100
Non-flammable mineral foam insulation board	0.29	4.86	11.1%

3.2.2 흡수율

흡수율 시험은 GR L 2002(재활용 발포유리블럭)에 의거하여 시편의 크기는 50*300*450(mm)이상으로 하였고, 실험실 온도는 21±3℃, 상대습도는 50±10%로 유지하였다.

시험방법은 시편의 건조무게와 흡수 후 무게를 측정하여 다음의 식을 통해 계산한다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{\text{흡수후무게}(g) - \text{건조무게}(g)}{\text{부피}(V)} \times 100 \quad (1)$$

본 실험을 통한 흡수율 시험 결과는 1.1%로 충분한 내수성을 가지며 습도에 큰 영향을 받지 않아 내장재로 활용하기에 적합한 것으로 판단된다.

3.2.3 압축강도

압축강도 시험은 KS L ISO 679에 의거하여 실시하였으며, 압축강도 Table 5와 같이 시험결과 5.5N/mm²의 강도를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 국내에서 건축자재로 많이 사용되고 있는 ALC에 대한 KS 성능기준 2.9N/mm²에 비하여 약 2배에 해당하는 수준을 나타내는 것으로 단위용적질량이 낮아 경량인 것에 반하여 높은 강도 수준을 지니고 있음을 확인할 수 있다.

Table 5. Strength comparison

Division	Non-flammable mineral foam insulation board	ALC(KS standard)
Strength (N/mm ²)	5.5	2.9

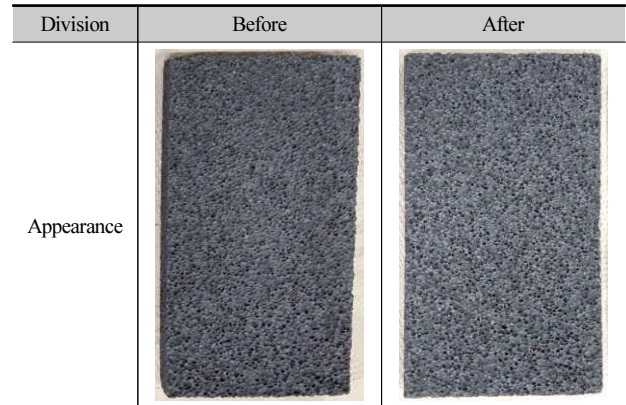
3.2.4 내동해성

내동해성 시험은 KS F 2604에 의거하여 실시하였다. 내동해성 시험결과는 Table 6과 7에 나타내었다. 겉보기모양에는 변화가 없었으며 질량변화율 0.2%, 두께변화율 -1.1%, 길이변화율 -0.1%, 부피변화율 -1.3%, 강도변화율 0.08%로 동결융해를 12사이클을 반복했음에도 제품에 큰 변화가 없는 것으로 확인되었고, 이는 건축용 마감재로 적합하다는 것으로 판단할 수 있다.

Table 6. Frost resistance test result

Division		Result
Frost resistance	Appearance	All right
	Mass(%)	0.2
	Thickness(%)	-1.1
	Length(%)	-0.1
	Volume	-1.3
	Strength	0.08

Table 7. Appearance change

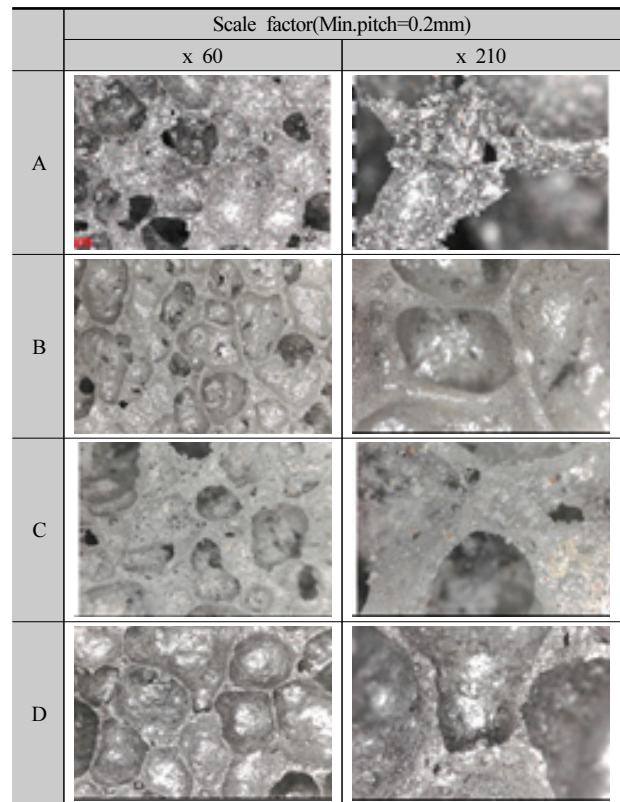


3.2.5 기타 성능

본 연구를 통해 개발된 폐유리 불연무기물 발포 보드는 유리질이 셀의 내벽을 감싸는 형태로 되어있어 각각의 독립적인 기공으로 구성이 되며 이는 생산되는 제품이 우수한 경량성을 지니도록 한다.

또한, Table 8에 나타난 그림에서 (A), (B)와 같이 셀의 벽이 얇고 기공이 조밀하게 형성되면서 우수한 단열성을 갖도록 생산 가능하고, (C)와 같이 open cell로 물의 통과가 가능하도록 할 수 있으며,

Table 8. Enlargement print of production



반대로 (D)와 같이 close cell로 물이 흡수 되지 않는 우수한 내수성의 제품으로 생산이 가능하다.

상기의 우수한 경량성, 단열성, 내수성 등을 장점으로 다양한 분야에 적용이 가능할 것이다. 특히, 물과 공기의 흐름을 필요로 하는 투수 블럭, 생태 블럭 또는 방열판(heat sink)으로 활용할 수 있으며, 물과 공기가 통하지 않도록 기공을 조밀하게 형성하여 생산하면 단열 효과가 좋은 내외장재에, 습기에 자주 노출되는 지하의 차수벽이나 내벽 등으로도 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.3 환경적 성능평가

3.3.1 열전도율

본 개발 자재를 내장용 보드로 활용하기 위한 만큼 열전도율 특성에 대한 시험결과는 매우 중요하다. 열전도율 시험은 KS L 9016에 보온재의 열전도율 측정방법에 대하여 규정하고 있다. 이 규정 중 평판 직접법으로 측정하였으며, 이는 시험체를 통과하는 열류량을 직접 전기적으로 측정하고, 이 때 시험체의 온도차를 측정하여 열전도율을 구하는 방법이다.

본 자재를 상기 KS L 9016규정에 따라 시험한 결과 열전도율이 0.05W/mK 로 확인되었다. 이는 내장용 보드류로 활용되는 석재, 미장모르타르, 목재 등과 비교하여 매우 뛰어난 성능을 나타내는 것으로 확인되었다.

Table 9. Heat conductivity comparison

Indoor material		Heat conductivity (W/mK)
Stone	Marble	2.79
	Granite	3.49
Plastering	Mortar	1.5
Wood	Pine	0.15
	Plywood	0.15
Non-flammable mineral foam insulation board		0.05

또한, 국토교통부 고시에 따라 시행중인 ‘건축물의 에너지 절약 설계 기준’에서 단열재의 등급 기준 ‘라’에 해당하는 수준으로 단열재용이 아닌 일반 내장재로 개발된 폐유리 불연무기물 발포 보드를 일반 단열재와 함께 내장재로 활용 시 벽체의 단열 특성이 매우 뛰어나므로 사료된다.

Table 10. Energy saving design standard of building

Division	Heat conductivity range (by KS L 9016, 20±5°C)		Related standard
	W/mK	kcal/mh°C	
가	0.034 below	0.029 below	KS M 3808, KS M 3809, KS L 9102, KS M ISO 4898, KS M 3871-1, KS F 5660, Heat conductivity 0.034W/mK (0.029kcal/mh°C)below
나	0.035 ~ 0.040	0.030 ~ 0.034	KS M 3808, KS L 9102, KS M ISO 4898, KS M 3871-1, KS F 5660, Heat conductivity 0.035 ~ 0.040W/mK (0.030 ~ 0.034kcal/mh°C)below
다	0.041 ~ 0.046	0.035 ~ 0.039	KS M 3808, KS F 5660, Heat conductivity 0.041 ~ 0.046W/mK (0.035 ~ 0.039kcal/mh°C)below
라	0.047 ~ 0.051	0.040 ~ 0.044	Heat conductivity 0.047 ~ 0.051 W/mK (0.040 ~ 0.044kcal/mh°C)below

3.3.2 불연성 및 가스유해성

불연성 시험은 KS F ISO 1182에 의거한다. 가열시험 개시 후 20분간 가열로 내의 최고온도가 최종평형온도를 20K 초과하여 상승하지 않아야 한다. 다만, 20분 동안 평행에 도달하지 않으면 최종 1분간 평균온도를 최종평형온도로 하며 가열종료 후 시험체의 질량 감소율이 30%이하여야 한다.

또한, KS F 2271에 따라 가스유해성 시험을 한 결과는 실험용 쥐의 평균행동정지 시간이 9분 이상이어야 한다.

상기 실험에 의해 불연성 및 가스유해성 시험을 실시한 결과로 질량 감소율은 30% 이하 기준에는 충분히 만족하며, 감소율 변화가 거의 없는 것으로 확인되었으며, 최종평형온도차 또한 20K를 넘지 않아 기준을 만족하였으며, 가스유해성은 9분을 넘는 15분에 도달하여 각 기준을 충분히 만족시키는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 개발된 단열보드를 활용하면 폐유리를 재활용하여 만든 무기물 발포 세라믹 보드인 만큼 불연성이 강한 자재임을 확인할 수 있었으며, 화재발생 시 어떠한 유독가스도 발생시키지 않아 2차 사고로 많이 발생하는 유독가스에 의한 질식사도 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 11. Result for nonflammable and gas hazard tests

Division	Unit	Result			Standard	Note
		1	2	3		
Nonflammable	Mass reduction	%	0.1	0.5	0.4	KS F ISO 1182
	Final equilibrium temperature difference	K	13.0	3.3	6.7	
Gas hazard	Stop time for action	min:s	15:00	15:00	Over 9min	KS F 2271

3.3.3 중금속유해성(폐기물공정시험)

우리나라를 비롯한 선진국에서는 이들 유해물질을 함유한 폐기물로부터 인간의 건강과 환경오염을 방지하기 위해 유해 폐기물을 분류하고, 규제기준 및 항목별 시험방법 등을 정하여 체계적으로 관리하고 있다.

국내에서는 이러한 폐기물에 의한 유해성을 평가하기 위한 시험으로 국립환경과학원고시에 따른 폐기물공정시험기준을 정하고 이를 표준화하여 실시하고 있다. 폐기물 검사항목으로는 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg), 아연(Zn), 구리(Cu), 니켈(Ni) 등을 정하고 있다.

상기 시험에 의해 개발 자재를 시험한 결과 모든 물질에 대해 검출이 되지 않아, 환경보호에 기여하고 에너지 또한 절감할 수 있는 자연친화적 자재임을 확인할 수 있다.

3.3.4 곰팡이 저항성

개발된 발포 보드의 곰팡이 저항성 시험은 ASTM G-21에 의해 4주간 실시되었다. 건축물 외장재에서 주로 발견되는 *Aspergillus niger* ATCC 9642, *Penicillium pinophilum* ATCC 11797, *Chaetomium globosum* ATCC 6205, *Gtiosadium virens* ATCC 9645, *Aureobasidium pullulans* ATCC15233를 시험편에 접종한

Table 12. Result for waste process test

Division	Waste process test standard	Eco-labelling certification standard	Non-flammable mineral foam insulation board	Note
Waste process test (mg/L)	Pb	3	3	N.D
	Cd	0.3	0.3	N.D
	Cr	1.5	-	N.D
	As	1.5	1.5	N.D
	Hg	0.005	0.005	N.D
	Zn	-	-	N.D
	Cu	3	3	N.D
Ni	-	-	N.D	* N.D: Non-Detection

후 균사의 발육을 확인하였다. 그 결과 개발된 발포 보드에서는 균사의 발육이 인지되지 않음을 확인할 수 있었다. 상기 시험방법에 의한 개발 자재의 곰팡이 저항성 시험결과는 Table 13과 같다.

Table 13. Result for fungal pathogen protection test

Test	Unit	Test method	Result
Fungal pathogen protection (4weeks)	Grade	ASTM G 21-15	0

3.3.5 흡음률

흡음률 측정은 KS F 2814-2에 의거한 전달함수법으로 실용 주파수 범위에서의 흡음률을 측정하였다. 흡음률측정 시, 전달함수법, 정재파비법 공히 임피던스튜브를 사용하는데 임피던스튜브 직경의 주파수 제한으로 고주파수영역은 29mm, 저주파수영역은 99.0mm의 두 직경에서 흡음율을 측정해야 한다. 본 연구에서는 상기 시험방법을 한국세라믹기술원에 의뢰하여 250~2,000Hz 구간의 주파수변화에 따른 흡음율을 측정한 결과는 Table 14와 같다.

Table 14. Result for sound absorbing coefficient test

Frequency (Hz)	250	500	1000	2000	Noise reduction coefficient
Sound absorbing coefficient	0.09	0.15	0.40	0.50	0.285

Table 15에는 기존 문헌에 의해 조사된 각종 건축 재료의 흡음률을 나타내었다.

본 연구를 통해 단열보드의 흡음 능력은 500Hz 미만의 저주파 영역에서는 모르타르 바름(두께25mm)이나 석회 바름(두께 18mm)과 비교하면 높은 수준인 것으로 확인 되었다.경량기포콘크리트(ALC)와는 비슷한 수준으로 확인 되었으며, 그 이외에 타 재료와 비교 하였을 때 흡음성능이 다소 열세인 것으로 나타났다.

500Hz를 초과하는 고주파 영역에서는 ALC, 모르타르 바름, 석회 바름에 비하여 우수한 흡음성능을 보였고, 목모 보드와 합판, 구멍합판, 구멍석고보드, 철판에 비하여 우수한 흡음성능을 나타내었다.

암면판, 구멍경질 섬유판, 구멍석면판 등에 비하여는 흡음성능이 다소 열세인 것으로 나타났으나, 최근 석면 등에 대한 인체 위험성이 국내·외에서 보고됨에 따라 흡음재로서는 비교적 우수한 성능을 보여주고 있는 반면, 건축 내장재로서 석면을 적용하기 위한 규제가

Table 15. Sound absorbing coefficient comparison

Materials	Thickness (mm)	Frequency(Hz)			
		250	500	1000	2000
ALC	100	0.12	0.14	0.19	0.26
Mortar	25	0.07	0.05	0.10	0.12
Lime	18	0.05	0.06	0.08	0.04
Rock wool	50	0.40	0.50	0.59	0.60
Wood wool board	12.5	0.15	0.35	0.38	0.43
Plywood	3	0.21	0.10	0.05	0.03
Perforated plywood	5	0.12	0.38	0.29	0.21
Perforated hardboard	4.5	0.55	0.75	0.82	0.82
Perforated asbestos board	4	0.69	0.84	0.90	0.64
Perforated gypsum board	6	0.38	0.28	0.20	0.07
Steel sheet	0.5	0.30	0.53	0.28	0.17

강화되고 있음에 따라 석면의 활용 사례가 줄어들고 있다.

이에 상기의 분석 결과로부터 석면이나 경질 섬유판의 사례와 마찬가지로 필요에 따라서 본 개발 제품에 구멍을 뚫거나 공기층을 형성하도록 시공을 한다면 흡음성능을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.3.6 에너지 절약성

본 연구를 통해 개발된 폐유리 불연무기물 발포 보드는 Table 16에 나타난 바와 같이 발포에 적합한 유리를 만들기 위한 1600℃ 이상의 고온 용융 유리 제조 과정을 생략하여, 일반 폼글라스 제품 제조에 대해 단순 온도 상승 기준 비교 시 약 60%의 에너지 사용량을 절감할 수 있다.

Table 16. Environmental impact of recycled aggregate

Materials	Heating temperature / loss probability (%)		Calorie necessary / heat loss(kcal)		Total required heat loss (kcal)	Rate%
	Melting process	Sintering process	Melting process	Sintering process		
Foamglas	1600℃ / 10%	900℃ / 40%	315,000 / 346,500	175,000 / 245,000	591,500	100
Non-flammable mineral foam insulation board	-	900℃ / 40%	-	175,000 / 245,000	245,000	40

한 달 생산량이 100ton 이라 가장하였을 때 약 2.9ton의 LPG(약 1,000원/kg)를 절약하고 이는 연간 3.5백만원 절감 효과가 있다. 또한 제조 공정을 단순화하여 유리 제조 및 제조 유리 급냉 설비 등이 불필요한 특성을 지니고 있다.

4. 폐유리 불연무기물 발포 보드의 시공

본 자재를 내·외장재로 현장에 적용하기 위해서는 최대외력(고정하중, 풍하중)에 대하여 벽체와의 접합성 등을 검토할 필요가 있음에 따라 설계하중을 ‘건축구조기준 및 해설 KBC-2016(국도교통부 고시)’의 기준에 따라 산정하였다.

고정하중 검토는 KCC 외단열 미네랄울 보드에 대하여 작용 가능한 최대외력을 적용 하였으며, 검토를 위한 자재 구성은 Table 17과 같이하여 콘크리트 벽면에 단열재(미네랄울)를 붙이고 그 외측에 개발된 제품을 붙이는 형태로, 단열재와 개발 제품의 비중과 두께로 고정하중을 산정하였다. 풍하중은 ‘KBC-2016’의 지역별 기본풍속(Vo) 중 부산지역 기준의 38m/s 와 각종 하중계수를 적용하여 2.2kN/m² 정도의 풍하중이 작용하는 것으로 확인되었다(KBC, 2016).

Table 17. Dead load calculation

Materials	Weight(kN/m ³)	Thickness(mm)	Weight(kN/m ²)
Mineral wool	1.0 (=100kg/m ³)	115	0.115 (=11.5kg/m ²)
Non-flammable mineral foam board	3.0 (=300kg/m ³)	30	0.09 (=9kg/m ²)
Sum			0.205 (=20.5kg/m ²)

미네랄울 보드 한 개소의 크기는 900mm×600mm 이며, 한판에 고정시키는 앵커는 ‘KPS Ø8(ALC전용앵커)-2EA’로 활용되어 이에 풍하중 부하를 구하면 아래 식 (2)와 같다.

앵커의 인발내력은 식 (3)과 같으며 3.17kN로 고정철물 앵커만으로 충분한 안전성이 확보되는 것으로 확인되었다.

$$-2.2kN/m^2 \times 0.9m \times 0.6m = -1.19kN \quad (2)$$

$$\frac{2115N(\text{인발하중}) \times 2EA}{1000} \times 0.75(\text{안전계수}) = 3.17kN \quad (3)$$

상기 구조검토 결과를 바탕으로 개발한 자재는 Fig. 1과 같이 경

기도 분당의 리모델링 주택과 경남 김해시 식당 건물 신축 시에 외벽용 불연 마감재로 활용하여 외단열 성능을 구현하고, 화재로 인한 건축물 피해 저감이 가능하도록 하였다. 또한, 부산 해운대구의 사무실 인테리어 시 내벽 경량 마감 벽체로 적용하여 인체에 무해하며 흡음, 단열, 항균 성능 등 기능적인 측면에서 기존의 마감재에 비해 우수한 성능을 구현함과 동시에, 현무암과 유사한 질감의 외관으로 디자인적인 요소도 가미할 수 있도록 활용하였다.

최근 리모델링에 대한 수요가 증가하고 있으며, 리모델링 시 오래된 건축물 일수록 구조 설계가 취약한 단점에 의해 경량 소재의 적용은 필수적임에 따라 개발된 자재와 같은 경량 소재의 수요는 점점 늘어날 것으로 추측된다. 또한, 과거 낮은 단열 규정에 의한 건축물의 경우 현재의 단열성능 기준을 만족하지 못하고 현저히 떨어지는 수준이므로, 이러한 단열 성능을 보완할 수 있는 소재가 필요하며, 최근 국내에서 여러 차례에 걸쳐 발생한 대형 화재로 인해 불연성 자재를 찾는 수요도 늘어나고 있음에 따라 위와 같이 본 개발 자재를 리모델링 시장에 적용하기에도 매우 적합하다.



Fig. 1. Application of non-flammable mineral foam board

5. 결론

본 연구에서는 폐유리 불연 무기물 발포 보드를 개발하고, 국내 시장에서의 사용 활성화를 위한 과정으로 물리적·역학적·환경적 특성 시험을 통해 건축 내외장재로 활용하기 위한 검증을 목적으로 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폐유리를 재활용하고 알루미늄 드로스, 석탄회를 이용하여 열처리 및 냉동 단계 등에서 발생하는 문제를 해결하는 등의 노력을 통해 친환경적 불연 무기물 발포 보드를 개발하였다.

2. 물리·역학적인 특성을 파악하기 위해 밀도, 흡수율, 압축강도, 내동해성에 대한 확인을 한 결과 ALC 기준에 비해 낮은 밀도, 흡수율 1.1%, 압축강도 5.5N/mm², 내동해성 시험에 큰 변화가 없는 등 건축용 마감재로 활용하기에 적합한 것으로 확인되었다.
3. 환경적 특성으로 열전도율 시험 결과 0.05W/mK로 단열특성이 뛰어나 에너지 효율적인 벽체 조성이 가능하며, 불연성이며 유독가스를 발생하지 않아 화재에 대한 안전성이 매우 뛰어나다.
4. 폐기물공정시험기준에 따른 폐기물 항목별 물질이 검출되지 않고 곰팡이 저항성 시험에 따른 균사 발육이 인지되지 않으며, 기존 실내 마감재와 유사한 범위내의 흡음률을 나타내어 내장재로 활용 시 인체에 무해하며 흡음성능도 확보 될 것으로 판단된다.
5. 본 연구를 통해 개발하고, 성능평가를 통해 성능이 검증된 폐유리 불연 무기물 발포 보드를 외벽용 불연 마감재, 내벽 경량 마감재로 적용하여 외단열 성능 및 화재 안전성 등 다양한 성능에 대한 구현성을 확인하였다.

본 연구를 통해 폐유리 불연 무기물 발포 보드의 물리적·역학적·환경적 성능을 검증하고, 단열 및 내화성이 뛰어난 외벽 자재로의 활용 가능성을 제시하였으며, 흡음, 단열, 항균 성능으로 내장재로서의 활용 가능성도 확인하였다.

다만, 본 자재의 시공성 및 경제성에 대한 추가적인 검토가 이루어진다면 건축물뿐만 아니라 선박, 토목 등 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(18AUDP-B146511-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Korea Resource Circulation Service Agency. (2018). Report for Amount of Recycled Glass Bottle, <http://www.kora.or.kr/>.

- Lee, B.Y. (2012). Strategies for product development of building materials with recycled glass, The Korean Society of Living Environmental System, **19(3)**, 362~370.
- KS F 2271 (2016). Testing Method for Gas Toxicity of Finish Materials of Buildings.
- KS F 2459 (2017). Testing Method for Bulk Specific Gravity, Water Content, Absorption and Compressive Strength of Cellular Concrete.
- KS F 2604 (2018). Standard Test Method for Frost Resistance of Exterior Wall Materials for Buildings(Freezing and Thawing Method).
- KS F 2814-2 (2017). Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer-Function Method.
- KS L 9016 (2017). Testing Method for Thermal Transmiss Ion Properties of Thermal Insulations.
- KS F ISO 1182 (2016). Test Method of Non-Combustibility of Building Products.
- KS L ISO 679 (2016). Methods of Testing Cements - Determination of Strength.
- ASTM G-21 (2014). Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi.
- Park, S.K. (2009). An Experimental Study for Hwangto and Charcoal Board Development using Eco-Friendly Building Materials, Korea University.
- Lee, K.Y. (2008). Development of Environment-Friendly Internal Finish Material of Building using Vermiculite, Kangwon National University.
- Architectural Institute of Korea. (2016). Architectural Structural Standards and Commentary, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

폐유리를 활용한 불연 무기물 발포 보드 개발 및 성능평가

본 연구에서는 폐유리 불연 무기물 발포 보드를 개발하고, 국내 시장에서의 사용 활성화를 위한 과정으로 물리적·역학적·환경적 특성 시험을 통해 건축 내외장재로 활용하기 위한 검증을 목적으로 한다.

이를 위해, 물리·역학적 특성으로 밀도, 흡수율, 압축강도, 내동해성에 대한 시험을 실시하였으며, 환경적 특성으로 열전도율, 불연성능, 가스유해성, 중금속 함유, 곰팡이 저항성 등의 시험을 실시하였다. 또한, 실제 건축물 내외장재로 활용하기 위한 적용을 실시하여 실제 건축 자재로 활용하기 위한 검증을 진행하였다.