

# 폐유리분말과 플라이애시를 사용한 경량 발포소재의 물리적 특성

## Physical Properties of Light Weight Foamed Glass Using Waste Glass Powder and Fly Ash

송 훈<sup>1\*</sup> · 신현욱<sup>1</sup>Hun Song<sup>1\*</sup> · Hyeon-Uk Shin<sup>1</sup>

Received December 10, 2015 / Revised December 23, 2015 / Accepted December 23, 2015

Building insulation materials use for the purpose of energy saving. Insulation materials can be classified inorganic and organic insulation materials. Inorganic insulation is used for fire resistive performance parts and organic insulation is used for thermal performance parts. Meanwhile, organic insulation is due to toxic gas emission in fire. Inorganic insulation is too heavy and low thermal performance than organic materials. This study is focused on evaluation of the physical properties of inorganic foam material using industrial by-products such as waste glass powder and fly ash. From the test result, inorganic foam materials for the applicability of fire-resistance and insulation light-weight materials.

**키워드** : 폐유리분말, 플라이애시, 경량, 발포소재

**Keywords** : Waste glass powder, Fly ash, Light weight, Foamed glass

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

건축물의 에너지절약 설계기준 강화로 외단열 공법의 적용이 보편화되고 도심형 생활주택이나 다세대주택 등에 사용된 가연성 단열재의 시공불량으로 인한 화재의 확산과 소방관의 상해 등이 최근까지 반복적으로 일어나고 있다. 건축용 단열재는 에너지절약을 목적으로 적용되며 불연 및 내화성능이 요구되는 부위는 무기계 섬유를 주재료로 사용하는 미네랄울 및 글라스울 소재가 적용되며 그 외는 유기계 단열재를 사용하여 단열성능을 높이고 있다. 하지만 무기계 소재인 미네랄울이나 글라스울은 특성상 수분에 취약하고 뭉침 및 처짐 현상이 발생하여 단열효과가 떨어지며 유기계 소재인 폴리스티렌폼이나 우레탄폼 등은 화재에 취약하고 일산화탄소 발생으로 인한 가스유해성 등으로 적용에 한계를 갖고 있다.

무기계 단열재는 제품 특성상 단독으로는 패널 형태로 가공하기 힘들 뿐만 아니라 여전히 단열성능이 유기계 단열재에 크게 못

미치고, 또한 질량도 크기 때문에 시공성이 나쁘다. 최근 밀도가 0.05~0.20g/cm<sup>3</sup>인 경량소재를 사용한 단열재 및 단열보드 제조에 대한 연구가 진행되어 열전도율 0.041~0.051W/mk 정도의 무기계 단열재도 소개되고 있지만 아직까지는 일반 유기계 단열재보다 여전히 성능이 많이 떨어지고 있다. KICET(2013)에 따르면 재료의 특성상 무기계는 밀도를 낮춘 다공성 제품이므로 수분에 취약하며 섬유상의 제품은 처짐 등이 발생하여 단열성능을 유지하기 어렵다. 또한 무기계 섬유류는 수분에 노출되는 경우 단열효과가 떨어져 초기 성능을 유지하기 어렵고, 유기계는 화재에 여전히 취약하므로 이를 극복할 수 있는 소재의 개발이 시급하다. 따라서 기존 불연성 무기계 재료의 단열성을 향상하고 내화성능을 확보하기 위한 기술개발이 절실하다.

본 연구에서는 폐유리분말과 플라이애시를 사용하여 경량 발포소재를 제조하고 소재의 공극을 제어하여 가볍고 열전도율이 낮은 무기계 발포소재를 제조하였다. 또한 물리적 특성을 분석하여 단열용 제품으로서의 가능성을 확인하고자 하였다.

\* Corresponding author E-mail: [songhun@kicet.re.kr](mailto:songhun@kicet.re.kr)

<sup>1</sup>한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju, 52851, Korea)

### 1.2 경량 발포소재의 제조 메커니즘

경량 발포소재를 제조하기 위한 메커니즘은 Fig. 1과 같다. 폐유리분말을 원료로 하여 플라이애시와 혼합한 혼합물에 발포제를 섞어 고온에서 발포시켜 소성한다. 유리는 비교적 발포제에 의해 기공제어가 다른 소재에 비해 수월하기 때문에 발포소재의 매트릭스를 구성하는 재료로 널리 사용된다. 또한 발포제는 규산나트륨,

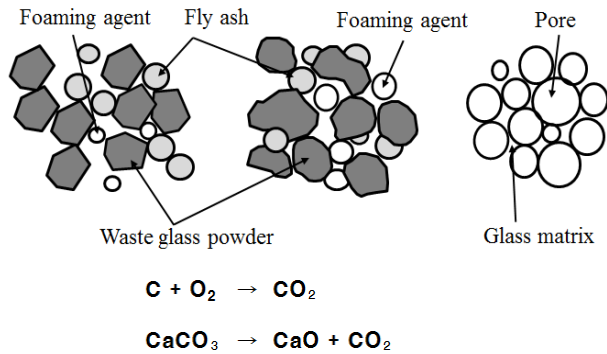


Fig. 1. Mechanism of foaming process

탄산칼슘과 그래파이트 등을 고온에서 반응시켜 기포를 형성한다. 탄산칼슘은 약 820°C 전후의 열분해와 그래파이트는 O<sub>2</sub>와의 반응에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 가스에 의한 발포를 기본 메커니즘으로 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 배합

경량 발포소재를 제조하기 위해 기본이 되는 원재료는 폐유리분말과 플라이애시이며 화학성분은 Table 1과 같다. 폐유리분말은 수거된 소다라임 유리를 2차의 분쇄공정을 거쳐 분말화 한 것이다. 플라이애시는 하동화력에서 부산된 것이며 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 70% 이상인 플라이애시이다. 발포제로는 일본 Y사의 분말형 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>, 99.0%)과 국내 H사의 그래파이트(graphite)를 사용하였다. 경량 발포소재를 만들기 위한 배합은 Table 2와 같다. 발포제의 종류에 따른 물성 변화를 검토하기 위해 2가지의 발포제로 실험을 하였고 플라이애시의 배합량 및 탄산칼슘과 그래파이트의 혼입량을 증량하여 실험하였다. 시험체의 배합은 폐유리

Table 1. Chemical compositions of waste glass powder and fly ash

	Chemical compositions(%)							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Waste glass powder	71.9	0.9	0.36	7.44	3.42	15.2	0.47	0.20
Fly ash	59.5	23.8	5.54	3.75	1.20	0.69	1.50	0.27

Table 2. Mix proportions of light weight foamed glass

Series	Symbols	Waste glass powder (wt.%)	Fly ash (wt.%)	Foaming agent (wt.%)		Temperature (°C)		
				CaCO <sub>3</sub>	C			
LWFG	A1	80	20	2	-	950		
				3	-			
				4	-			
	A2			-	2			
				-	3			
				-	4			
	B1			70	30		2	-
							3	-
							4	-
	B2	-	2					
		-	3					
		-	4					
	C1	60	40				2	-
							3	-
							4	-
C2	-			2				
	-			3				
	-			4				

분말과 플라이애시를 충분히 건조한 후 발포제를 첨가하여 혼합기와 볼밀을 사용하여 12시간 혼합한 후 사용하였다.

## 2.2 소성조건

경량 발포소재를 제조하기 위한 소성은 혼합된 분체를 100×100×50mm의 알루미늄 도가니에 담아 전기로에서 소성하였다. 전기로의 분당 승온속도는 약 5°C이며 Fig. 2와 같다. 소성조건은 사전에 혼합물의 열분석을 통해 발포되는 온도를 결정하였다. 소성온도는 약 950°C이며 실제 열분석 온도보다는 높은 온도이다. 혼합된 혼합물을 소성하였을 경우 발포에 의해 열이 내부로 침투하기 어려우며 이에 따라 발포가 다르게 나타나므로 균열하게 열이 전달될 수 있도록 온도를 설정하였다.

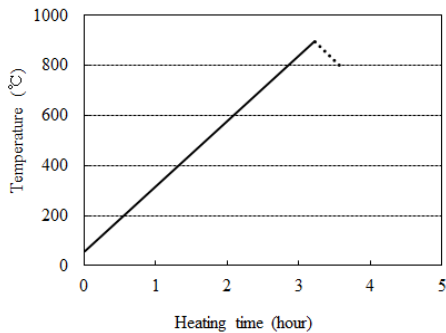


Fig. 2. Heating condition of light weight foamed glass

## 2.3 실험방법

소성된 발포체는 정밀커터를 이용하여 형태에 맞게 가공하였다. 경량 발포소재의 물성측정은 밀도 및 강도이며 밀도는 KS F 2701 경량기포 콘크리트 블록의 밀도 측정방법에 준하여 측정하였고 압축강도는 KS L ISO 679의 시멘트의 강도시험 방법에 준하여 측정하였다. 압축강도는 30ton급 UTM을 사용하였고 규격에 적합하도록 시험체를 가공하였다. 또한 경량 발포소재의 불연 및 난연 특성을 파악하기 위해 KS F ISO 1182와 KS F ISO 1182로 특성을 파악하였고 판정기준은 Table 3과 같다.

Table 3. Classification of combustible materials

Class	Classification criteria	
Non-combustible materials	Equilibrium temp.	≤20K
	Mass loss late	≤30%
Quasi-noncombustible materials	Total heat released	≤8MJ/m <sup>2</sup>
	Exceed to 200kW	10s
	Penetration crack	None

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 원재료 및 혼합물의 특성

#### 3.1.1 크기 및 분포

KICTEP(2014)에 따르면 유리의 조성은 일반적으로 SiO<sub>2</sub> 약 70%, Na<sub>2</sub>O 약 15%, CaO 약 12%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 약 2%의 조성비로 이루어지며 사용용도에 따라 유리의 조성비가 결정된다. 조성에 맞도록 원료조합비가 결정되면 일정한 양의 파유리(cullet)를 배합하여 용융한 후 냉각시켜 제조한다. 폐유리분말은 기본적으로 파유리를 사용하며 경량 발포소재용 원료로 사용하기 위해서는 입도조정이 필요하다. 입도의 조정은 파유리를 분쇄하여 원하는 크기로 조정하는데 분쇄하는 비용이 발생하므로 경제성 측면의 고려가 필요하다. 발포형상에 영향을 미치는 입도의 경우 입도가 작은 것이 유리하며 혼합되는 혼합물의 입도와도 유사한 것이 유리하다.

폐유리분말과 플라이애시의 입도분석 결과는 Fig. 3과 같다. 폐유리분말의 입도분석 결과 약 3~100μm의 크기를 가지며 평균입도는 28μm였다. 유리분말은 90% 이상이 50μm 이하의 입도를 나타냈다. 또한 TG-DSC에 열분석 결과 폐유리분말은 724~771°C 사이에서 용점이 나타났으며 화학분석 결과 일반 소다라임 유리의 특

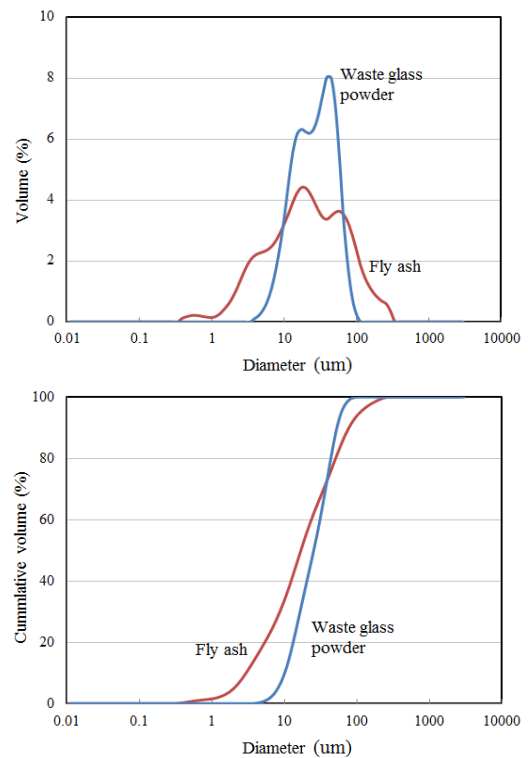


Fig. 3. Distribution of waste glass powder and fly ash



Fig. 4. Micro-structure of waste glass powder and fly ash

징을 나타냈다. 플라이애시는 약 3~310 $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지며 평균입도는 약 19 $\mu\text{m}$ 이다. 90% 이상이 80 $\mu\text{m}$  이하의 입도로 분석되었다. Fig. 3과 같이 폐유리분말의 입도는 플라이애시보다 좁은 범위에서 분포하며 평균입도는 플라이애시보다 크고 90% 이상의 범위에서는 플라이애시보다 작은 특징을 나타냈다. 이는 분쇄기를 통하여 1차, 2차 파쇄 등 인공적으로 균일하게 분쇄한 결과에 따른 것이다. 전체적으로 혼합물의 입도분포는 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 폐유리분말과 플라이애시를 500배 확대한 SEM사진이다. SEM에 의한 사진에서 폐유리분말은 인공적인 분쇄에 의해 모서리가 뾰족한 형태인 각형의 구상형태를 하고 있으며 플라이애시는 완전한 형태의 구상을 하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 사진과 같이 폐유리분말이 플라이애시보다는 좀 더 입도가 고르게 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

### 3.1.2 혼합물의 특성

폐유리분말과 플라이애시 혼합물의 TG-DSC 결과를 Fig. 5에

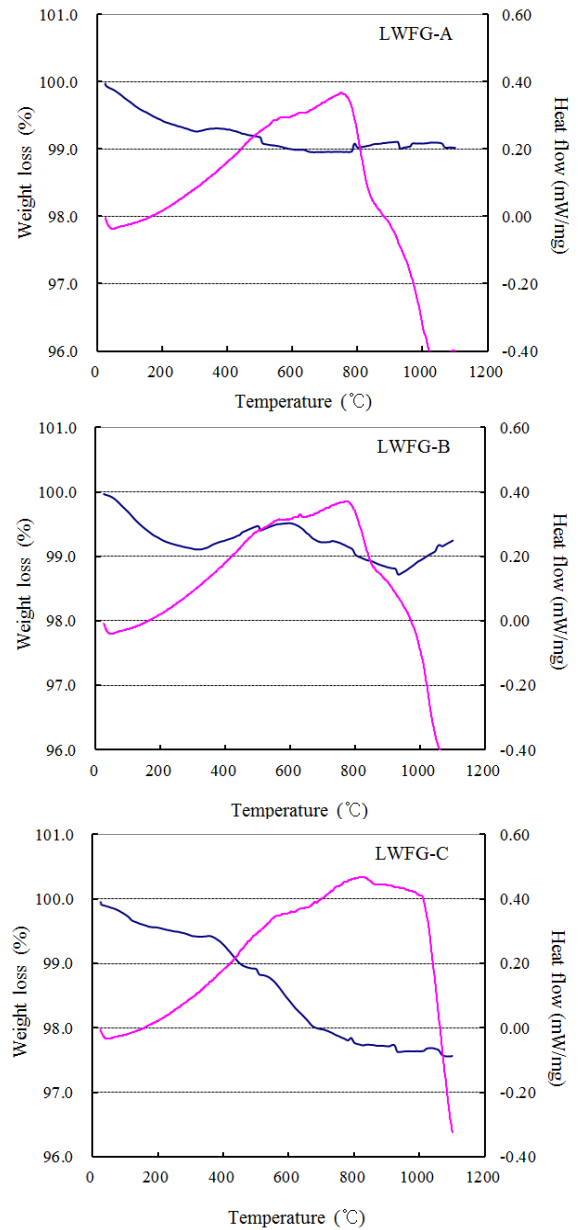


Fig. 5. Thermogravimetry analysis of mixtures

나타내었다. LWFG-A와 같이 80:20 배합에서의 용융이 시작되는 온도는 약 750 $^{\circ}\text{C}$  이상으로 나타났으며 플라이애시의 혼입량이 많아질수록 용융이 일어나는 온도는 높아진다. 또한 전기로를 이용한 분석에서는 TG-DSC의 온도보다 더 높은 온도인 약 800 $^{\circ}\text{C}$  이상에서 용융이 시작되므로 발포를 위한 온도는 더 높아야 한다. 이와 같은 결과는 플라이애시의 혼입율이 증가할수록  $\text{SiO}_2$  및  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 양의 많아지기 때문이며 특히  $\text{SiO}_2$ 는 발포형상 및 강도에도 영향을 미친다.

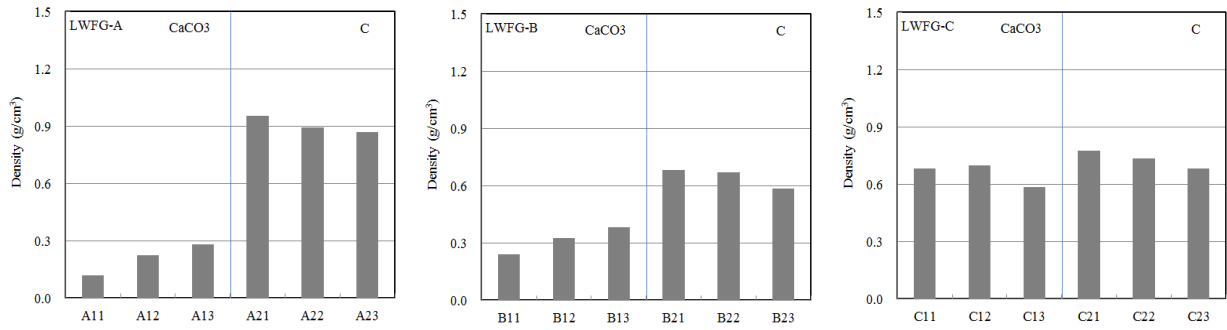


Fig. 6. Density of light weight foamed glass

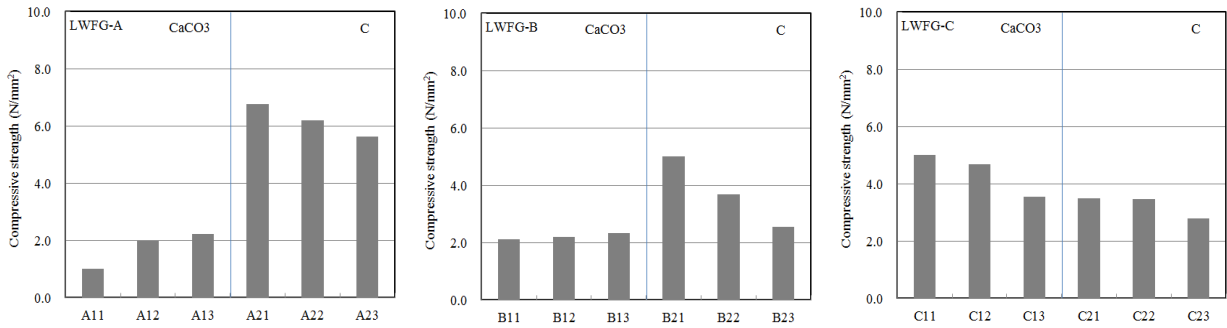


Fig. 7. Compressive strength of light weight foamed glass

### 3.2 밀도 및 압축강도

고온에서 소성하여 제조한 경량 발포소재의 밀도를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 플라이애시의 혼입량이 증가할수록 밀도도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 발포제의 종류에 따라 경향은 다르게 나타났다. 탄산칼슘을 발포제로 사용한 경우는 플라이애시의 혼입량이 많아질수록 발포 정도가 감소하였다. 또한 발포제의 혼입량이 많은 경우 발포 정도는 커지나 과도 발포되어 공극이 병합되거나 형상이 일정하지 않았고, 혼입량이 적은 경우도 과소 발포되어 공극이 불균일하고 일정한 공극크기를 유지하지 못했다. 그라파이트를 발포제로 사용한 경우는 사용량이 많아질수록 밀도가 감소하는 경향을 보였다. 또한 플라이애시의 혼입율이 10%인 경우보다 20%인 경우가 더 기포가 생성되어 밀도가 작게 나타났다. 이에 따라 탄산칼슘을 사용하는 경우가 발포에는 더 유리한 것으로 보이지만 뚜렷한 경향을 찾아보기는 어렵다. 또한 내부에 공극이 생성되어 밀도가 감소하더라도 공극의 크기가 균일하지 못한 경우도 발생하므로 플라이애시의 혼입량에 따라 발포 최적조건을 확인하는 것이 필요하다.

경량 발포소재의 압축강도를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 Fig. 8에 밀도와 압축강도의 관계를 나타내었다. 발포제에 따른 뚜렷한 경향을 보이지는 않았지만 그라파이트의 혼입량이 증가할수록 밀도

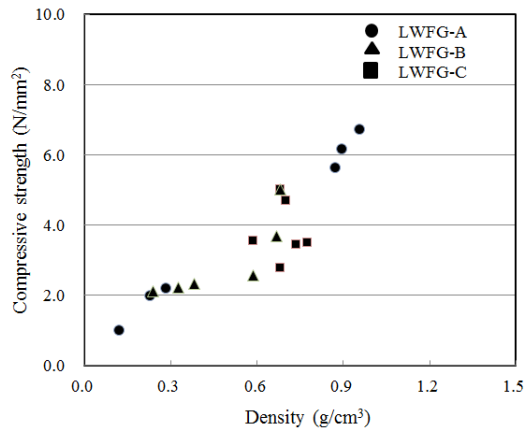


Fig. 8. Compressive strength vs. density of light weight foamed glass

의 감소보다 압축강도의 감소가 더 크게 나타났으며 열린 공극의 형태를 보였다. 밀도가 작은 경우 압축강도도 낮게 나타났으며 밀도가 큰 경우 압축강도도 높은 일반적인 경향을 보였다. 현저하게 불균일한 공극을 가지는 경우를 제외하면 이와 같은 경향은 시험체에 상관없이 유사하므로 발포소재의 용도에 적합한 강도를 기준으로 밀도를 제어하는 것도 한 방안이다. 또한 폐유리분말을 기본 소재로 사용하는 경우 용융과 발포제에 의해 공극을 형성하고 또

한 밀도가 높고 닫힌 공극으로 형성되는 경우 일반 ALC(autoclaved light-weight concrete)와 다르게 높은 강도를 발현할 수 있다.

### 3.3 발포특성

Fig. 9는 camscope에 의해 40배 확대한 이미지이며 플라이애시 및 발포제의 혼입량에 따라 공극이 다른 형태로 생성되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 플라이애시와 발포제 등 여러 요인에 따라 발포특성은 달라지지만 미세하고 균일한 공극을 많이 포함할수록 강도 측면에서 유리하다. 탄산칼슘을 발포제로 사용한 경우 플라이애시의 비율이 증가할수록 공극은 닫힌 공극의 형태로 생성되는 것을 확인할 수 있었으며 공극의 형태도 구형의 공극 형태를 보였고 공극도 작아지는 경향을 보였다. 이는 폐유리분말의 함량이 감소함에 따라 소성조건에서 발포 할 수 있는 여력이 적었고 유리의 연화 및 용융과 발포가스의 생성에 의해 공극이 생성되어야 하나 바인더로 적용되는 양이 적어졌기 때문이다. 따라서 필러로서 적용할 수 있는 플라이애시의 양이 한정되어 있음을 확인할 수 있었고 발포에도 영향을 미치므로 적절한 배합의 조절이 필요하다. 또한 Chu(2005)에 따르면 탄산칼슘은 CaO가 플럭스로 작용하여 유리의 점도를 낮춰 공극이 병합되어 커지는 경향이 있다. 따라서 공극이 균일하지 않아 밀도 및 강도 측면에서 불리할 것으로 판단된다. 따라서 탄산칼슘의 양은 2% 이하가 적당하며 그 이상이 첨가될 경우 공극이 너무 커지거나 터져서 없어지므로 발포소재의 공

극 확보에 어려움이 생긴다.

그라파이트는 미세공극이 발생하지만 혼입량이 증가할수록 열린 공극의 형태로 생성되며 밀도 및 강도 측면에서 불리하다. 또한 발포제가 충분히 반응하지 않고 시험체에 남아있게 되며 산소와 반응하여 이산화탄소를 발생하므로 2% 이하로 첨가하는 것이 유리하다.

또한 소성체인 경량 발포소재는 탄산칼슘이나 그라파이트에 상관없이 내부와 열에 직접 접하는 바탕면과는 다른 공극 특성을 지니므로 균일한 공극생성을 위한 조절이 필요하다.

### 3.4 불연 및 난연특성

경량 발포소재의 불연 및 난연성능 시험결과 모두 적합한 것으로 나타났다. 불연재료의 판정기준인 평형온도차와 질량감소율이 약 3K와 0.5%로 나타나 판정기준인 20K와 30% 이하를 만족하였으며, 준불연재료 판정기준인 총방출열량, 200kW 초과시간과 가스유해성 실험에서도 판정기준을 만족하는 것으로 나타났다. 경량 발포소재는 불연재료인 유리 및 플라이애시를 기본으로 소성하여 제조하므로 불연재료로서 적합하다.

## 4. 결론

폐유리분말과 플라이애시를 사용하여 제조한 경량 발포소재의

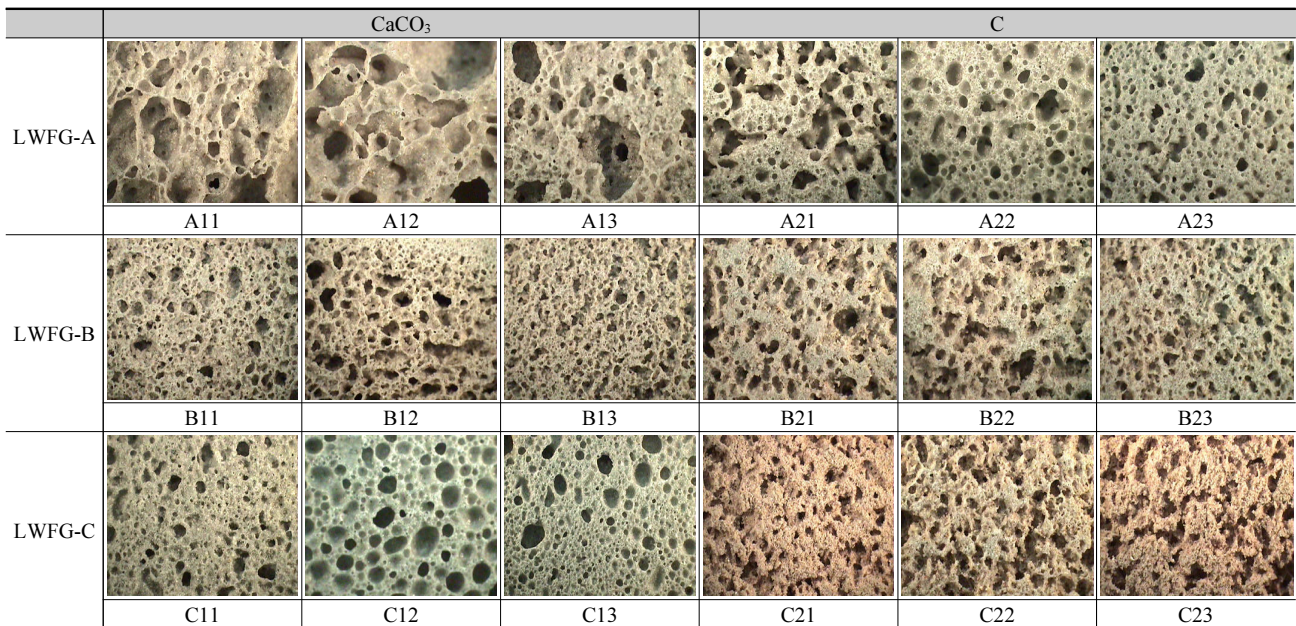


Fig. 9. Section image of light weight foamed glass

연구결과는 다음과 같다.

1. 플라이애시의 혼입량이 증가할수록 밀도도 증가하는 경향을 보인다. 또한 탄산칼슘 및 그래파이트의 혼입량 증가에 따라 공극이 불균일하며 열린 공극을 형성하므로 2% 이하로 사용하는 것이 유리하며 발포제 및 혼합물에 대한 다양한 접근이 요구된다.
2. 소성에 의해 생성되는 공극은 외부에 접하는 바탕면보다는 내부의 공극이 크며 발포제의 종류에 따라 생성되는 공극도 변한다. 또한 균일하고 미세한 공극이 많을수록 밀도와 강도에서 유리하다.
3. 폐유리분말과 플라이애시를 사용하여 제조한 경량 발포소재는 밀도 및 강도가 우수하고 불연재료이므로 화재시 성능이 요구되는 부위에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통기술사업화사업 “초경량 세라믹 불연 단열재를 이용한 건습식 벽체시스템 기술”의 연구결과의 일부입니다.

### References

Shin, H.Y., Song, H., Chu, Y.S., Lee, J.K. (2011). A study of fire-resistance light-weight inorganic foam material using cullet and fly-ash, *Proceeding of Korea Institute of Building Construction*, **11(2)**, 79-81.

KICET. (2013). Development of Fire Resistant Curtain Wall System.

KICTEP. (2014). Commercialization of Dry and Wet Construction Method of Exterior Insulation Wall System Using Light-weight Nonflammable Ceramic Insulation.

Chu, Y.S., Lee, J.K., Shim, K.B. (2005). Preparation of lightweight aggregate using glass abrasive sludge and effects of pores on the aggregate properties, *Korean Journal of Ceramics*, **42(1)**, 37-42 [in Korean].

#### 폐유리분말과 플라이애시를 사용한 경량 발포소재의 물리적 특성

건축용 단열재는 에너지 절약을 목적으로 적용되며 불연 및 내화성능이 요구되는 부위는 무기계 섬유를 주재료로 사용하는 미네랄울 및 글라스울 소재가 적용된다. 하지만 무기계 소재인 미네랄울이나 글라스울은 특성상 수분에 취약하여 뭉침 및 처짐 현상 등이 발생하여 단열효과가 떨어지며 유기계 소재인 폴리스티렌폼이나 우레탄폼 등은 화재에 취약하고 일산화탄소 발생에 의한 가스유해성 등으로 적용에 한계를 갖고 있다. 본 연구에서는 폐유리분말과 플라이애시를 사용하여 가볍고 열전도율이 낮은 무기계 경량 발포소재를 제조하고 물리적 특성을 분석하여 단열용 제품으로서의 가능성을 확인하고자 하였다. 연구결과 폐유리분말과 플라이애시를 사용한 경량 발포소재는 균일한 공극을 형성하며 발포하였고 경량이며 불연재료이므로 불연성능 요구되는 부위에 사용이 가능하다.