

Properties of quasi-noncombustible ultra-lightweight geopolymer

Yootaek Kim[†]

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received June 4, 2019)

(Revised June 11, 2019)

(Accepted June 14, 2019)

Abstract EPS (expanded polystyrene) is one of the most used building materials for insulation that is favored by its excellent heat insulation, economical efficiency and lightweight characteristics. However, EPS is vulnerable to the fire and producing large amount of toxic gases in case of fire. Therefore, ultra-lightweight geopolymer which can replace EPS is fabricated by using IGCC (integrated gasification combined cycle) fused slag and Si sludge as raw materials and the possibility of replacement on ultra-lightweight geopolymer for EPS as an insulation building material was evaluated in this study. Ultra-lightweight geopolymer can be fabricated with the pulverized IGCC fused slag having low carbon content and density, compressive strength, thermal conductivity were 0.064 gcm^3 , 0.04 MPa, and 0.072 W/mK, respectively. The thermal conductivity of ultra-lightweight geopolymer is 1.5~2.0 times higher than that of EPS suggested in the KS M 3808; however, the thermal conductivity value of geopolymer is meaningful and competitive to that of EPS in the market. Therefore, ultra-lightweight geopolymer can be applicable to the building material for thermal insulation purpose and have an enough possibility to replace EPS in the future because it is not only much safer than EPS in case of fire but also it can be fabricate by using waste materials from the industry.

Key words Ultra-lightweight geopolymer, Insulator, EPS, IGCC fused slag, Si sludge

준불연 초경량 지오폐리머의 물성

김유탉[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2019년 6월 4일 접수)

(2019년 6월 11일 심사완료)

(2019년 6월 14일 게재확정)

요 약 EPS 단열재는 우수한 단열성능과 경제성, 초경량 등의 장점으로 각광받고 있는 건축재이다. 하지만 EPS 단열재는 가연성 물질로서 화재 시 연소되기 쉽고, 유해가스를 방출시킴으로써 대규모 인명피해를 유발시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 산업부산물인 IGCC fused slag 및 Si sludge를 활용하여 초경량 지오폐리머를 제작하고, EPS 단열재의 대체 가능성에 대해 확인하고자 하였다. 그 결과, 조분쇄 상태의 탄소 함량이 적은 IGCC fused slag를 이용하였을 경우 0.04 MPa, 0.064 g/cm^3 의 압축강도 및 밀도를 갖는 초경량 지오폐리머를 제작할 수 있었고, 이때의 열전도율은 0.072 W/mK를 나타내었다. 이는 KS M 3808에서 제시하는 EPS 열전도율 값의 1.5~2배 정도의 높은 물성이지만 시중에서 판매하는 EPS 단열재와 큰 차이가 없으며 보통 매립되는 산업 부산물을 재활용한다는 점과 세라믹 재료 특성상 화재시에도 고온에서 버틸 수 있다는 큰 장점이 있기 때문에 화재시 쉽게 발화되어 다량의 유독가스를 방출시키는 EPS 단열재의 단점을 해결할 수 있는 차세대 단열재로서의 가능성은 충분하다고 판단되었다.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 건축물은 점차 경량화, 대형화, 고층화, 고기능화 및 복합 용도로 되어가는 추세에 놓여 있다. 샌드위치 패널은 용도에 있어 공업용 65%, 창고용 25%, 주택용 10% 정도로 파악되며, 샌드위치 패널의

여러 장점으로 점차 공업용 건축물뿐 아니라 상업용 건축물 등으로도 확대되는 경향을 보이고 있다. 현재 국내에서 유통되고 있는 샌드위치 패널 중 Expanded Polystyrene (EPS) 샌드위치 패널은 다른 건축자재에 비해 단열성능이 우수하면서 상대적으로 가볍고 취급 및 시공이 유리하며 가격이 저렴하고 작업자의 안전성에서 수요자의 선호를 받는 이유로 현재 시장의 75% 가량을 점유하고 있다[1]. 그러나 이들 단열재들은 모두 연소하기 쉬운

[†]Corresponding author
E-mail: ytkim@kgu.ac.kr

가연성물질로서 화재 시 급속한 화염전파, 높은 열방출을, 다량의 연기발생 등으로 인해 화재의 위험성이 상대적으로 높은 단점을 가지고 있다. 또한 화재 시 발생하는 많은 양의 검은색의 연기는 가시거리의 확보가 어려워 피난 및 소화 활동에 큰 장애 요인이 되고 있으며 이들 연기 중에는 일산화탄소(CO), 염소가스(HCl), 시안화수소(HCN) 등과 같은 유해가스가 포함되어 있어 피난자의 감각기관과 호흡기관을 자극하여 피난 시 피난자의 행동 장애뿐만 아니라 농도에 노출될 경우 사망에 이르게 하는 등 화재로 인한 직접적인 피해를 초과할 만큼 심각한 경우도 있다[2]. 최근 국내에서는 대형화재사례가 빈번히 발생함에 따라 국토해양부는 건축법 및 시행령 개정을 통해 건축물의 화재안전기준을 2010년 상반기부터 시행 하였으며, 더욱이 2010년 12월 29일부터는 건축물의 내부마감재뿐만 아니라 외벽 마감재료까지 방화재료 사용을 의무화하는 건축법 시행안이 시행되어 건축물의 대부분을 차지하고 있는 벽체시스템에서도 불연성 및 내화성능의 향상이 요구되고 있다[3].

현재 대부분의 토목 건설에서 사용하는 포틀랜드 시멘트는 1톤 생산당 0.7~1.0톤의 CO₂ 가스를 배출함으로써 전세계 CO₂의 7%를 차지할 정도로 심각하다[4]. 이에 제조 과정에서 다량의 CO₂를 배출하는 시멘트를 대체할 수 있는 무시멘트 계 재료의 개발 요구가 증대되어 호주, 미국, 유럽 등을 중심으로 플라이애시, 고로슬래그, 메타카울린 등을 이용한 알칼리 활성화제를 이용한 무기결합체에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[5]. 또한 현재 우리나라는 '자원순환 기본법'을 제정하여 폐기물의 재사용과 재활용을 극대화시켜 지속 가능한 자원순환사

회를 만들겠다는 목표를 가지고 있다. 따라서 이산화탄소 절감을 위한 시멘트 대체재 연구와 산업폐기물인 바닥재(bottom ash)의 재활용에 대한 연구가 시급한 것이 현실이다[6].

본 연구에서는 기존의 석탄 화력, 화학 플랜트, 복합 화력이 합쳐진 신개념 발전 방식으로, 기존 석탄 화력보다 효율은 높으면서도 공해 배출은 적어 친환경 청정발전기술로 태안서부 발전의 석탄가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) 설비에서 발생하는 산업 부산물인 IGCC fused Slag와 반도체 분야에서 실리콘 웨이퍼(wafer)를 제조하는 과정 중 잉곳(Ingot)을 컷팅(cutting)하면서 발생하는 산업 부산물인 Si sludge를 발포제로써 활용하여 초경량 지오폐리머를 제조하고 그 특성을 검토하여 향후 샌드위치 패널을 대체할 수 있는지에 대한 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료

2.1.1. IGCC 용융슬래그

본 연구는 태안소재 서부발전의 석탄가스화복합발전(IGCC) 설비에서 발생하는 부산물인 IGCC fused slag와 반도체 웨이퍼를 제작 과정에서 발생하는 산업 부산물인 Si sludge를 발포제로 재활용하여 초경량 지오폐리머를 제작하고 샌드위치 패널 대체 가능성에 대한 연구를 진행하고자 하였다. Fig. 1과 Table 1은 각각 IGCC

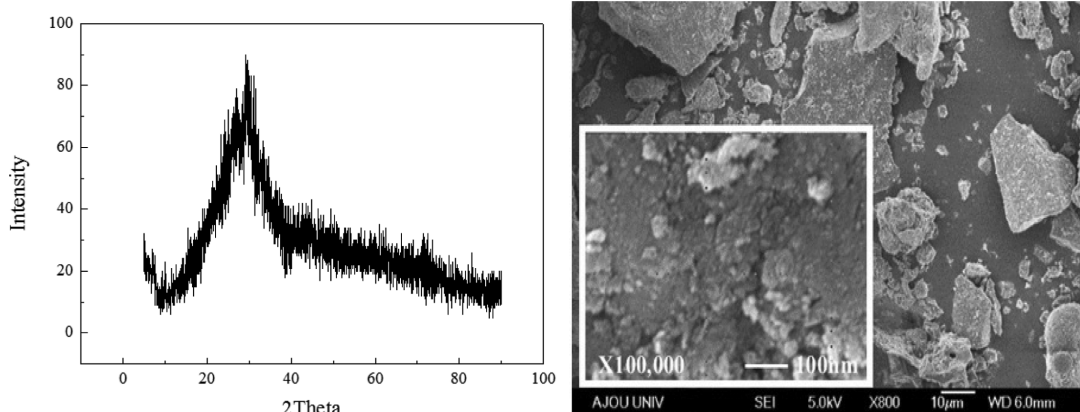


Fig. 1. XRD pattern and SEM of IGCC fused slag.

Table 1
Chemical composition of IGCC fused slag determined by XRF (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Loss	Total
48.93	20.17	6.11	21.92	0.08	0.95	-	0.47	-	0.13	1.24	100.0

Table 2
EDS analysis results of IGCC fused slag (wt%)

C	O	Si	Al	Na	K	Mg	Ca	Fe	Total
39.1	39.87	10.38	5.51	0.74	0.65	0.5	0.48	2.58	99.81

Table 3
BET and C/S analysis results of IGCC fused slag

Specific surface area (m ² /g)	C (wt%)	S (wt%)
18.744	8.53	0.13

fused slag의 XRD 분석, SEM 관찰 및 XRF 분석결과를 나타낸 것이다. Table 1에서의 Ignition loss(강열감량)은 소성로를 사용하여 측정하였다. 강열감량지오폐리머 원료로서 적합하기 위해서는 두 가지 조건을 충족시켜야 한다. 첫 번째는 원료가 비정질 상태여야 하며 두 번째는 Si와 Al 원소들이 원료 내에 충분히 함유되어 있어야 한다. 그 이유는 원료입자의 표면이 비정질 피막으로 감싸져 있는데 이 비정질 표면이 강알칼리성의 수용액에 의해 피막이 파손되어 내부에 있는 Si와 Al 성분들이 Si⁴⁺와 Al³⁺로 이온화됨으로써 경화체의 강도를 발현시킬 수 있는 겔(gel)을 형성시킬 수 있어야 하기 때문이다. Fig. 1의 XRD 분석결과 결정상은 비정질이며, SEM 분석 결과 표면이 매끈한 입자들과 거친 입자들이 공존하는 것을 확인했다. 두 입자들의 성분 분석을 위해 EDS를 실시했고, Table 3에 나타내었다. Table 1의 XRF 분석 결과 IGCC fused slag는 약 70% 정도가 SiO₂와 Al₂O₃로 이루어져 있는 것을 확인함으로써 IGCC fused slag가 지오폐리머 재료로서 적합하다고 판단하였다[5]. Table 1에서 보듯이, 어떤 원료는 강열감량이 1.24% 정도 되는 것과는 달리, 또 다른 원료들에서는 Table 2와 Table 3의 EDS 및 C/S 분석 결과와 같이 탄소성분이 다량 검출된 것을 볼 수 있었다. 이는 포집된 IGCC 용융슬래그의 포집 시기, 탄중, 연소조건에 따라 원료내의 탄소성분의 변화가 큰 것으로 판단되며 이렇게 완전히 연소되지 않고 남아있는 미연탄소는 향후 지오폐리머 반응에 큰 영향을 끼쳐 지오폐리머 반응에 악영향을 미쳐 물성 저하를 가져오는 것으로 보고된바 있다[7, 8].

2.1.2. Si 슬러지

본 연구에서는 초경량 지오폐리머를 제작하기 위한 발포제로써 반도체 웨이퍼 잉곳을 컷팅하는 과정에서 발생하는 산업 부산물인 Si sludge를 발포제로 사용하였다.

Table 4
Chemical composition of Si sludge determined by XRF (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Loss	Total
97.78	1.97	0.006	0.017	-	-	0.003	-	0.19	0.022	0.012	100.0

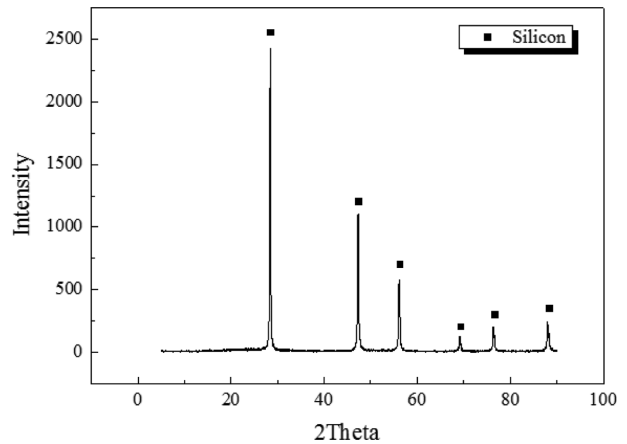


Fig. 2. XRD pattern of Si sludge.

Fig. 2는 Si sludge의 XRD 분석 결과를 나타낸 것으로 전형적인 Si 결정질 peak를 갖고 있었으며, Table 4의 XRF 분석 결과 97.78 wt%의 SiO₂와 1.97 wt%의 Al₂O₃로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 발포 반응의 경우 식(1)과 같은 반응을 통해 수소 가스가 발생하여 내부에 기공을 형성시키며 발포 반응의 Gibbs free energy는 -858.23 kJ/mol로 경화 반응인 Geopolymerization의 Gibbs free energy보다 낮은 값을 갖기 때문에 발포 반응이 일어나고 경화 반응이 일어나는 것으로 사료된다[7].



2.1.3. 알칼리활성화제

본 연구에서는 초경량 지오폐리머를 제작하기 위해 다량의 발포제를 사용하기 때문에 압축강도가 낮아지기 때문에, 압축강도를 증진시키기 위한 방안으로 물유리(Water glass)와 순도 98.0%의 NaOH를 증류수에 용해시켜 제작한 수산화나트륨 용액을 혼합한 복합 활성화제를 사용하였으며 물유리 및 수산화나트륨 용액의 물 비를 1:1로 고정하여 사용하였다.

2.1.4. 실험 조건

본 연구는 IGCC fused slag의 분쇄 정도, 복합 활성

Table 5
Experimental conditions

Mol concentration (Mol) of mixed alkali activator	Si sludge addition (wt%)	W/S ratio	Condition of milling
	0		
6	10	0.2	Coarse grinding
9	20	0.3	Fine grinding
12	30	0.4	
	40	0.5	
	50		

화제의 몰농도, Si sludge의 첨가량, Water/Solid(W/S) ratio가 초경량 지오폐리머에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 하였고, Table 5에 초경량 지오폐리머 제조를 위한 실험 변수 및 조건을 나타내었다.

2.1.5. EPS 판넬의 KS 기준(KS M 3808 : 2011)

EPS 패넬의 KS 표준 규격은 Table 6에서 보는 바와 같다. 본 연구에서는 제조한 지오폐리머 시편이 Table 6에 나타나 있는 단열판 종류 중 단열판 1호에 해당되는 물성을 만족시킬 수 있도록 연구목표를 설정하여 연구를 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 복합 알칼리활성화제의 농도 영향

선행 연구를 통해 12몰의 복합 활성화제, W/S ratio: 0.267, Si sludge 0.1 wt%, 180 μm 이하의 IGCC fused slag를 사용하여 제작하였을 경우 밀도 0.58 g/cm³, 압축강도는 0.8 MPa를 나타내었다. 기존의 이론에 의하면 알칼리 활성화제의 몰농도를 낮춘다면 밀도를 더 감소시킬 수 있다고 알려져 있다. 본 실험에서는 밀도를 낮추기 위해 몰농도를 6 및 9몰로 낮춰 실험을 진행하였다. 그 결과 전체적으로 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었으며 밀도의 경우 9몰에서 소폭 감소한 결과를 나타내었지만 실험적 오차로 생각 되고 오히려 6몰에서 밀도가 증가한 결과를 나타내었다. 따라서 본 실험에서는 밀도를 감소시키기 위한 방법으로 알칼리 활성화제의 농

Table 6
KS standard specification of EPS panel

Type	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK) [Average temperature (23 ± 3) °C]		Compressive strength (N/cm ²)	Combustion condition
		Bead method 1 type	Bead method 2 type		
EPS	1	> 30	< 0.036	< 0.031	Combustion time must be less than 120 s and combustion length must be less than 60mm
	2	> 25	< 0.037	< 0.032	
	3	> 20	< 0.040	< 0.033	
	4	> 15	< 0.043	< 0.034	

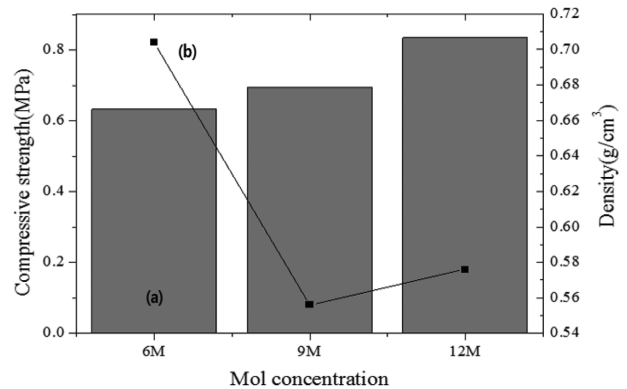


Fig. 3. Comparison of physical properties of geopolymer according to mol concentration: (a) Compressive strength and (b) density.

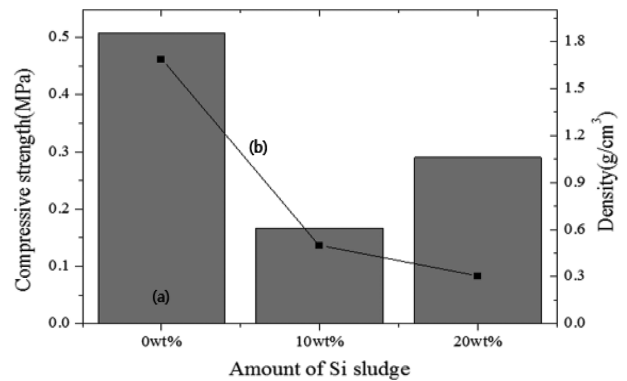


Fig. 4. Comparison of geopolymer properties according to Si sludge addition: (a) Compressive strength and (b) density.

도를 감소시키는 방법은 무의미하다고 판단하여 향후 실험에서는 알칼리활성화제 농도를 12몰로 고정시켜 실험을 진행하였다.

3.2. Si sludge 첨가 영향

Fig. 4는 발포제인 Si sludge 첨가량에 따른 지오폐리머의 물성을 나타내었다. 선행 연구에서는 미분쇄(Fine grinding)된 IGCC fused slag를 이용하여 Sieve를 통해 체분리 하여 180 μm 이하의 원료를 이용하여 실험을 진행하였지만 본 실험에서는 전처리 공정을 최소화 하기 위

한 일환으로 1 mm 내외의 크기를 갖는 조분쇄된 IGCC fused slag를 이용하여 W/S ratio: 0.2, Si sludge를 0, 10, 20, 30 wt% 첨가하여 실험을 진행하였다.

실험결과 Fig. 4에서와 같이 Si sludge 첨가량이 0 wt%에서는 0.507 MPa/1.685 g/cm³, 10 wt%는 0.167 MPa/0.498 g/cm³, 20 wt%는 0.29 MPa/0.304 g/cm³를 나타내었다. Fig. 4에서 보여주고 있지는 않지만, 30 wt% 첨가 시편의 경우 급격한 발포반응에 의하여 발포과정에서 시편 붕괴가 일어나 온전한 구조를 형성시키지 못하였다. Si sludge 첨가량이 증가할수록 밀도는 점차 감소하여 0.301 g/cm³를 달성하였지만 Si sludge 20 wt% 첨가 시편에서 압축강도는 소폭 상승하였다. 그 이유는 실험적 오차 혹은 밀도는 감소하였지만 Si sludge의 양에 비하여 낮은 W/S ratio에 의해 반응할 수 있는 물의 양이 적어 충분한 발포가 일어나지 않아 이러한 결과가 나온 것으로 판단하였다. 따라서 충분히 발포를 시키기 위해서는 적당한 W/S ratio를 설정하는 것이 중요하다고 사료되었다.

3.3. W/S 비의 영향

Fig. 4에서 진행했던 실험은 W/S ratio: 0.2에서 Si sludge를 0~20 wt% 첨가하여 실험을 진행했지만 Si sludge의 양에 비해 W/S ratio가 낮다고 판단하여 본 실험에서는 Si sludge를 40 및 50 wt% 첨가하였고, W/S ratio를 상대적으로 높여 0.28 및 0.30으로 진행하였다.

실험결과 Fig. 5와 같이 Si sludge 40 wt% 첨가 시 압축강도 0.054 MPa, 밀도 0.152 g/cm³의 물성을 나타낸 반면, Si sludge 50 wt% 첨가 시 압축강도 0.079 MPa, 밀도 0.168 g/cm³로 압축강도와 밀도 모두 증가한 것을 확인하였다. 그 이유는 앞선 이유와 같이 Si sludge 첨가량에 비해 아직도 여전히 낮은 W/S ratio로 인해 발

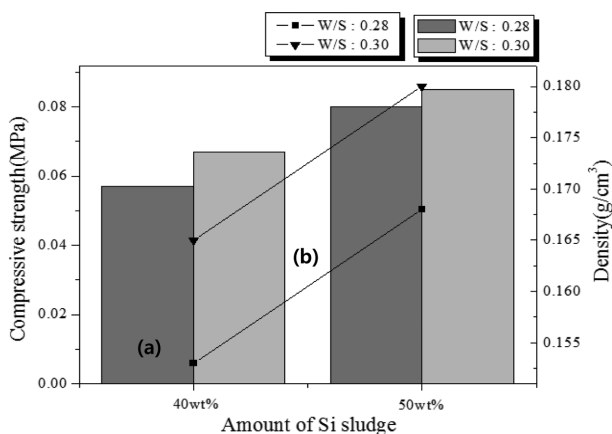


Fig. 5. Comparison of geopolymer properties by W/S ratio and Si sludge addition: (a) Compressive strength and (b) density.

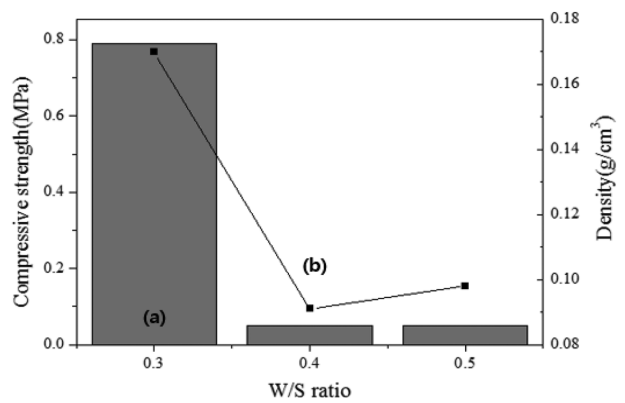


Fig. 6. Comparison of geopolymer properties by W/S ratio and Si sludge addition: (a) Compressive strength and (b) density.

포 반응이 완전히 일어나지 않은 것으로 판단하였고, 따라서 Si sludge 첨가량을 50wt%로 고정된 후 W/S ratio를 0.3, 0.4 및 0.5까지 증가시켜 실험을 진행하여 Fig. 6에 나타내었다.

실험 결과 W/S ratio: 0.4에서 압축강도 0.04 MPa, 밀도 0.091 g/cm³의 물성을 나타낸 것을 확인하였으며 선행 연구에서 Si sludge 100 wt%, W/S ratio: 0.8의 조건으로 제작할 경우 밀도 0.08 g/cm³를 달성한 것을 바탕으로 Si sludge 50 wt% 보다 많은 발포제 양을 넣는 것은 밀도를 낮추는데 한계가 있다고 판단했다. 따라서 Si sludge 50 wt%, W/S ratio: 0.4의 조건이 EPS 패널을 대체할 수 있는 초경량 지오폴리머 제작 조건으로 적합하다고 판단하였다.

3.4. 분쇄 정도와 탄소함유량의 영향

Table 2에서 보듯이 앞선 실험에서는 EDS 분석 결과 39.1 wt%의 탄소를 함유하고 있는 High carbon IGCC

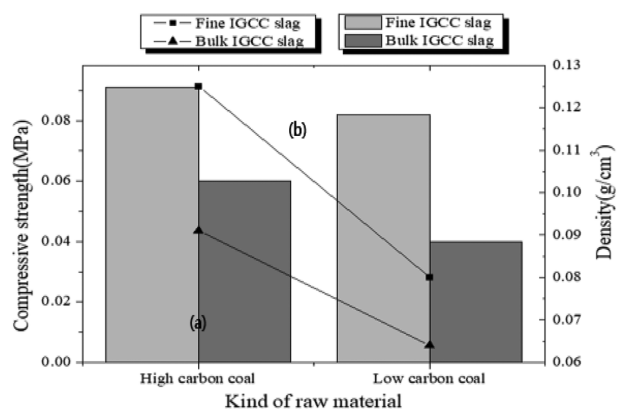


Fig. 7. Comparison of geopolymer properties according to degree of crushing and carbon content: (a) Compressive strength and (b) density.

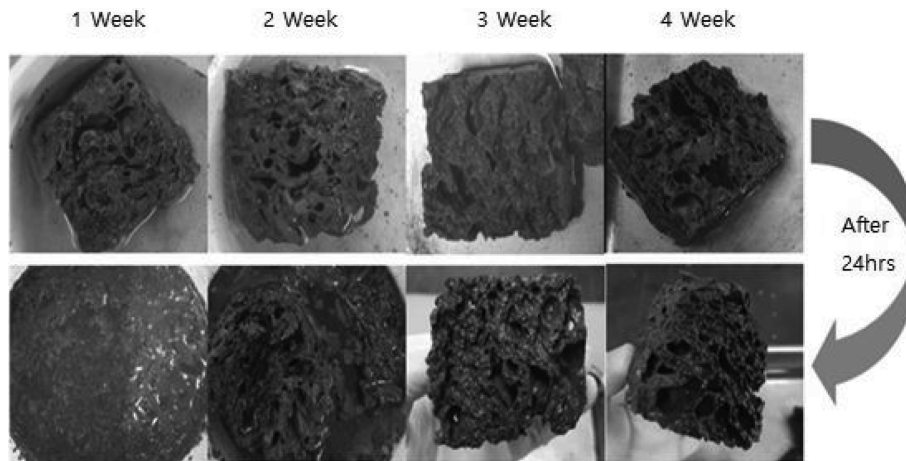


Fig. 8. Stability of ultra-lightweight geopolymers in water for 24 hours according to the aging time.

fused slag를 활용하여 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 탄소 함량이 적게 들어있는 Low carbon IGCC fused slag를 조/미분쇄를 실시하여 초경량 지오폐리머를 제작하기 위해 실험을 진행하였다. 실험결과 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 기존의 탄소 함량이 많은 원료를 사용했을 때보다 압축강도 및 밀도 부분에서 더 낮은 값을 나타내었다. 미분쇄된 Low carbon IGCC fused slag를 이용할 경우 압축강도 0.082 MPa, 밀도 0.08 g/cm³, 조분쇄된 Low carbon IGCC fused slag를 이용할 경우 압축강도 0.04 MPa, 밀도 0.064 g/cm³의 물성을 나타내었으며 가장 낮은 밀도인 0.064 g/cm³을 달성하였다. 실험 결과로 미루어볼 때 밀도는 낮아진 반면 압축강도의 감소가 현격하게 일어나 시편 제작 시 미분쇄된 원료를 사용할 필요가 없다는 결론을 내릴 수 있었고, 이는 분쇄 비용을 줄일 수 있어 경제성 확보까지도 가능하다고 사료되었다.

3.5. Si 슬러지 첨가 초경량 지오폐리머의 열전도도

Table 7은 조분쇄된 Low carbon IGCC fused slag를 이용한 초경량 지오폐리머의 열전도율 분석 결과이다. 열전도율 분석은 Heat Flow Meter 방법으로 진행하였으며 Si sludge를 40 wt% 첨가하였을 경우 밀도 0.1 g/cm³을 갖는 시편과 Si sludge를 50 wt% 첨가하였을 경우 밀도 0.062 g/cm³을 갖는 시편에 대해서 실시하였다.

Table 7 Thermal conductivity according to Si sludge addition of ultra-lightweight geopolymer

Addition of Si sludge	40 wt%	50 wt%
Density	0.1 g/cm ³	0.062 g/cm ³
Thermal conductivity	0.055 W/Mk	0.072 W/mK

실험결과 밀도 0.1 g/cm³의 시편을 경우 0.055 W/mK의 열전도율을 나타내었으며, 밀도 0.062 g/cm³를 갖는 시편은 0.072 W/mK의 열전도율을 나타내었다. 물론 밀도가 낮으면 열전도율이 낮은 것이 일반적 경향이나, Si이 다량 포함된 경량 지오폐리머에서는 기공의 크기나 분포에 의해 열전도율이 위에서 언급한 일반적 경향에서 벗어날 수 있고 사료된다. Table 7에서 보듯이 두 시편 모두 발포 폴리스티렌의 열전도율인 0.036 W/mK에 약 1.5배에서 2배 정도 높은 수치지만 단열재로서 충분히 활용 가능한 수치로 사료되었다.

3.6. 초경량 지오폐리머의 재령에 따른 수중 안정성

Fig. 8은 밀도 0.062 g/cm³를 갖는 초경량 지오폐리머 시편의 재령일에 따른 수중안정성 즉, 재령에 따른 수분과의 반응성을 나타내었다. 실험결과 시편을 제작한 후 1주차에서 3주차 정도 지난 시편을 물에 담가 놓을 경우 Fig. 9와 같이 구조가 붕괴되는 현상을 볼 수 있었으며

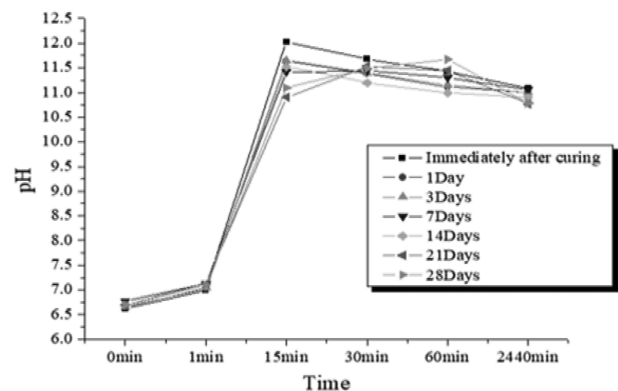


Fig. 9. Change of pH of ultra-lightweight geopolymer according to the aging time.

3주 이상의 재령을 한 시편의 경우 수분 접촉 전과 후의 압축강도 차이가 없는 것을 확인하였다. 그 이유는 다량의 발포제인 Si sludge를 첨가함에 따라 알칼리 활성화제와 반응하지 못하고 남아있는 미반응 Si sludge가 추가적으로 공급된 수분과 잔여 NaOH와 반응하여 2차 발포반응을 일으켜 구조를 붕괴시키는 현상을 발생시킨 것으로 생각되며 pH 변화를 통해 원인을 분석하고자 하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 고온 양생 직후 시편을 증류수에 침지시켰을 때 15분만에 최고 pH를 달성하였으며 그 이후에는 감소하는 경향을 나타내었고, 재령 14일 차까지 같은 경향을 나타내었다. 재령 21일차에서는 침지 30분이 경과하면서 최고 pH를 달성한 후 pH가 감소하였으며, 재령 28일차에서는 침지 60분이 경과하면서 최고 pH를 달성한 후 앞선 시편들과 같이 pH가 감소하는 경향을 나타내었다. 침지 초기에는 반응하지 않고 남아있는 잔여 알칼리 성분들에 의해 pH가 증가하다가 미반응 Si sludge가 물과 반응하여 2차 발포반응을 일으키면서 수소 가스를 생성시켜 pH를 감소시키는 것으로 생각된다.

3.7. 화염 노출 전/후의 각 재료의 난연성 비교

Table 8에는 일반 EPS, 난연 EPS, 초경량 지오폐리머의 가열종료시간 및 관측 최고온도를 정리하였다. Fig. 10은 일반 EPS, 난연 EPS 및 초경량 지오폐리머의 착화 시간 및 온도에 대하여 간이 실험을 진행한 모습을 보여주고 있다. 실험 방법은 토치를 사용하여 시편과 불꽃과의 거리는 10 cm 이격을 주었고, Fig. 10에 보이는 것과 같이 시편이 완전히 파손되어 사라질 때까지의 시간 및 온도를 나타내었다. 일반 EPS의 경우 토치를 이용하여 가열한지 24초만에 Fig. 10과 같이 시편이 파손

Table 8
Exposing time to fire frame and temperature of the specimen surface (m: minute, s: second)

	EPS	Quasi-noncombustible EPS	Ultra-lightweight geopolymer
Firing time	24 s	1 m 30 s	2 m 30 s
Surface temperature	111°C	194°C	274°C

되었으며 그때의 온도는 111°C를 나타내었다. 난연 EPS의 경우 1분 30초가 경과하였을 때 시편이 파손되었고, 그때의 온도는 194°C를 나타내었다. 하지만 초경량 지오폐리머의 경우 2분 30초가 경과하였음에도 불구하고 시편에 아무런 영향을 주지 못하였다. Jeon et al. (2010)에 따르면 지오폐리머의 장점 중 하나는 내열성으로써 0.5 mm 두께의 박막 형태로 지오폐리머를 이용하여도 1,200°C까지 버틸 수 있다는 점에서 2분 30초를 훨씬 초과하여도 내장재로서의 기능을 유지할 수 있을 것으로 사료된다[8, 9].

3.8. 초경량 지오폐리머의 난연성능

초경량 지오폐리머의 난연 성능에 대해 알아보기 위해 불연 시험 및 준불연 시험을 국토교통부고시 제 2015-744호(건축물 마감 재료의 난연 성능 및 화재 확산 방지 구조 기준)에 따라 시험을 진행하였다.

불연 시험의 경우 불연성 및 가스 유해성 시험 방법이 있으며 세부 항목으로는 질량 감소율, 로 안의 최고 온도 및 최종 평형 온도와의 온도차, 평균 행동 정지 시간이 있으며 초경량 지오폐리머의 경우 Table 9에서 보는 바와 같이 모든 항목에서 기준을 만족하였으나 다만, 로 안의 최고온도와 최종 평형 온도와의 온도차 항목에서만, 기준치인 20 K보다 높은 결과인 29.73 K의 값을 나타내

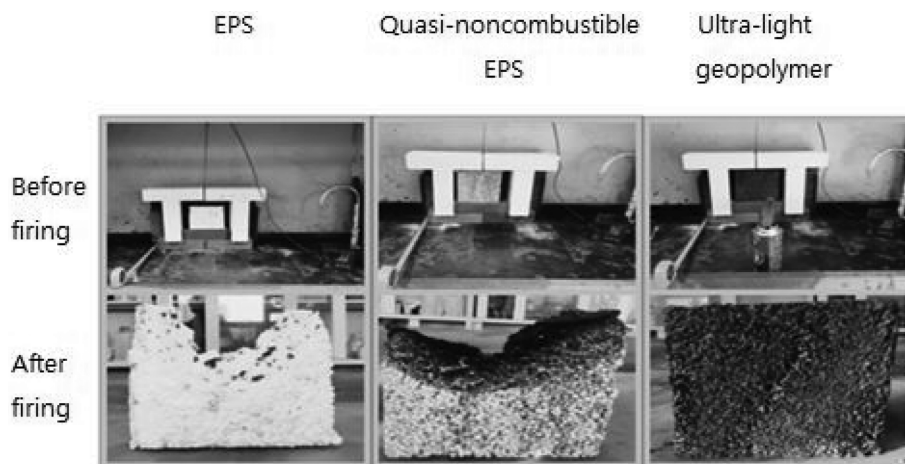


Fig. 10. Photographs of the samples before and after exposing to fire frame.

Table 9
Incombustible test result of ultra-lightweight geopolymer (m: minute, s: second)

Test Method	Specific item	Standard	Test result
Noncombustible	Mass loss	<3 0 %	3.39 %
	Temperature difference between highest temperature and equilibrium temperature	< 20 K	29.73 K
Gas toxicity		> 9 m	14 m 57 s
Final decision	-	-	Not suitable

Table 10
Quasi-noncombustible test result of ultra-lightweight geopolymer (m: minute, s: second)

Test item	Standard	Test result
Total thermal emission	< 8 MJ/m ²	3.5
		5.2
		3.1
Time for excess 200 Kw/m ²	< 10 s	0
Examination of specimen after test	No crack, hole, and melting	Noe
Gas toxicity	> 9 m	14 m 58 s
		14 m 48 s
Final decision	-	Suitable

어 불연 등급에는 부적합하였다. 따라서 준불연 시험을 추가로 진행하였는데, 준불연 시험 결과 Table 10에 나타내었듯이 모든 항목에서 기준치를 뛰어넘는 결과를 나타내면서 준불연 등급을 획득하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 산업 부산물인 IGCC fused slag와 Si sludge를 이용한 초경량 지오폐리머의 EPS 패널 대체 가능성에 대해 확인하기 위해 연구를 진행하였다. 실험 결과 밀도는 최대 0.062 g/cm³까지 감소시켰으며 열전도율의 경우 0.072 W/mK을 나타내었다. 이는 KS 규격에서 제시하는 물성보다 약 2배 정도 높은 수치이다. 하지만 실제 시중에서 판매하는 EPS 패널과 큰 차이가 없으며 보통 매립되는 산업부산물을 재활용한다는 점과 세라믹 재료 특성상 화재시 고온에서도 버틸 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서 화재에 굉장히 취약하고 유독가스를 방출시키는 EPS의 단점을 해결할 수 있는 차세대 단열재로서의 가능성은 충분하다고 판단된다. 하지만 다량의 발포제사용으로 인해 압축강도가 급격히 약해진다는 점은 향후 개선해야 할 점으로 판단된다. 추가적인 연구를 진행하여 압축강도를 증진시키고 불연 등급을 획득할

수 있도록 향후 연구목표를 설정하여 연구를 진행시켜야 하겠다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

References

- [1] J.H. Shim and N.W. Cho, "Fire Performance Testing Method for Fire Retardant EPS Sandwich Panel Using X-ray Analysis", *Fire Sci. Eng.* 29 (2015) 76.
- [2] H.J. Park and M.H. Cho, "A study on the heat release rate of EPS sandwich panel core", *J. Kor. Fire. & Eng.* 22 (2008) 72.
- [3] K.P. Lee, S.S. Song and H. Young, "Cementless type eco-friendly lightweight composite panel using industrial by product", *J. Kor. Arch. Inst.* 27 (2011) 111.
- [4] K.T. Koh, G.S. Ryu and J.H. Lee, "Development of geopolymer mortar based on fly ash", *J. Kor. Rec. Const. Res. Inst.* 16 (2011) 119.
- [5] Y.T. Kim, S.Y. Kim and T.S. Chae, "Effect of manufacturing conditions on physical properties of integrated gasification combined cycle (IGCC) slag geopolymer", *J. Cer. Proc. Res.* 18 (2017) 214.
- [6] G.H. Lim, J.B. Lee, H.K. Jeong and S.S. Kim, "Study on characteristics of fine bottom ash based geopolymer mortar", *J. Rec. Const. Res.* 4 (2016) 418.
- [7] Y.T. Kim, S.Y. Kim and C.S. Jang, "Fabrication of porous geopolymer using fused slag with silicon sludge", *J. Cer. Proc. Res.* 17 (2016) 1202.
- [8] Y.T. Kim and S.Y. Kim, "Property enhancement of geopolymer after heat treatment", *J. Cer. Proc. Res.* 18 (2017) 59.
- [9] C.S. Jeon and T.W. Song, "Properties of self-hardened inorganic coating in the system alumina-silica-calcium oxide by the reaction with alkalis", *J. Kor. Cer. Soc.* 47 (2010) 381.