

## Surface characteristics for thermal diffusion of FA-BFS-based geopolymer ceramics added alumina aggregate

Jin-Ho Kim, Hyun Park<sup>\*,†</sup> and Kyung-Nam Kim<sup>\*</sup>

*Center for Research Facilities, Samcheok Campus, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea*

*\*Dept. of Advanced Materials Engineering, Samcheok Campus, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea*

(Received April 8, 2019)

(Revised April 18, 2019)

(Accepted April 18, 2019)

**Abstract** Geopolymer is an eco-friendly construction material that has various advantages such as reduced CO<sub>2</sub> emission, fire resistance and low thermal conductivity compared to cement. However, it has not been many studies on the thermal behavior of the surface of the geopolymer panel when flame is applied to the surface. In this study, surface characteristics of hardened geopolymer on flame exposure was investigated to observe its characteristics as heat-resistant architectural materials. External structure changes and crack due to the heat shock were not observed during the exposure on flame. According to the residue of calcite and halo pattern of aluminosilicate gel, decarboxylation and dehydration were extremely limited to the surface and, therefore, it is thought that durability of hardened geopolymer was sustained. Gehlenite and calcium silicate portion was inversely proportional to quartz and calcite and significantly directly proportional to BFS replacement ratio. Microstructure changes due to the thermal shock caused decarboxylation and dehydration of crystallization and it was developed the pore and new crystalline phase like calcium silicate and gehlenite. It is thought that those crystalline phase worked as a densification and strengthening mechanism on geopolymer panel surface.

**Key words** Geopolymer, Fly ash, Blast furnace slag, Thermal property, Thermal resistance

## 알루미나 골재를 첨가한 FA-BFS계 지오폴리머 세라믹스의 열확산에 대한 표면 특성

김진호, 박현<sup>\*,†</sup>, 김경남<sup>\*</sup>

강원대학교 공동실험실습관, 삼척, 25913

\*강원대학교 신소재공학과, 삼척, 25913

(2019년 4월 8일 접수)

(2019년 4월 18일 심사완료)

(2019년 4월 18일 게재확정)

**요약** Geopolymer는 시멘트와 비교하여 CO<sub>2</sub> 배출량의 감소, 내화성, 낮은 열전도성 등 다양한 장점을 보유하고 있는 eco-friendly 건설재료이다. 그러나 표면에 화염을 가할 경우 geopolymer panel 표면의 열적거동에 대한 연구결과는 많지 않다. 본 연구에서는 내열성 건축자재로서 화염노출시 geopolymer 경화체의 표면특성을 조사하기 위하여 alumina 골재가 사용된 geopolymer 경화체 표면의 화염노출 특성에 대하여 조사하였다. 화염노출시 panel의 외형변형 및 열충격에 의한 크랙은 없었으며, calcite의 잔존량과 aluminosilicate gel의 halo 패턴으로 보아 화염에 의한 탈탄산 및 탈수는 표면에 국한되어 발생했으며, geopolymer 경화체의 내구성은 화염조사 후에도 유지되고 있는 것으로 판단된다. Quartz와 calcite가 감소함에 따라 gehlenite와 calcium silicate가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, BFS의 치환량이 많을수록 현저하게 나타난다. 화염노출에 따른 미세구조의 변화는 탈탄산, 결정수의 탈수 등으로 기공의 형성과 발전되는 과정을 거쳐 calcium silicate, gehlenite 등과 같은 새로운 결정상의 형성에 의해 geopolymer panel 표면의 치밀화와 강화기구로 작용하여 내구성이 향상된 것으로 생각된다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: hipark@kangwon.ac.kr

### 1. 서 론

최근 급속한 경제성장과 더불어 건축물이 대형화 · 고층화되고, 용도 및 기능이 다양화 · 복합화 됨에 따라 화재로 인한 인명 피해 및 재산상의 물적 피해가 증가하고 있다. 또한, 잔류 연소 생성물은 인류의 건강, 환경 및 산업분야에 영향을 미치고 있어 세계적으로 문제시 되고 있다.

일반적으로 화재의 확산은 초기 발화원을 중심으로 인근의 가연성 물품 및 내장재료의 연소 확대 과정을 거치게 되므로 대형화재로의 발전을 막기 위해서는 내장재가 화재안전 성능을 확보한 재료 또는 내화성이 강한 재료 사용이 요구된다. 그 대안으로 Sakkas, An, Zhao, Galiano, Turkmen, Son 및 Kim 등이 플라이애시(이하 “FA”), 메타카올린 및 고로슬래그(이하 “BFS”) 등을 기반으로 하는 geopolymer의 내화성 및 경화체의 열적거동에 대하여 연구하였다[1-9].

Geopolymer는 FA 또는 메타 카올린과 같은 알루미늄 실리케이트 물질을 상온 또는 저온에서 알칼리와 반응시키면 고형화 되는 물질로 일반 포틀랜드 시멘트와 같은 무기바인더로 간주할 수 있다. 특히, FA와 BFS는 우수한 pozzolanic 및 cementitious 속성을 가지고 있어 건설업계를 중심으로 많은 분야에 적용이 가능하다[10, 11]. Geopolymer는 광범위한 응용 분야를 가지고 있어 건설 산업분야를 중심으로 시멘트 기반 제품들과 경쟁할 수 있는 뛰어난 잠재력을 발휘 한다[12-14].

일반적으로 geopolymer는 시멘트와 비교하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 80% 이상 감소시킬 수 있으며, 내화성을 포함한 다양성이 이점이 있는 eco-friendly 건설재료이다[15-17].

내화 재료는 특정 온도(주변온도 + 160°C)와 특정시간 동안 구조적으로 변형되지 않고 화재로부터 멀리 떨어져 있는 면(즉 반대면)이 특정 온도보다 높지 않도록 한다. 단열재 또는 수동 방화설비에 사용되는 상업용 제품 중 일부는 FA 기반 제품과 유사한 화학적 조성 및 화학적 성질을 가지고 있으며, FA 기반 geopolymer가 그 중 하나이다. Geopolymer는 일반적으로 고온에서 낮은 열 전도성을 나타내며 가열 될 때 독성 연기를 방출하지 않지만 표면에 화염을 가할 경우 geopolymer 패널(panel)의

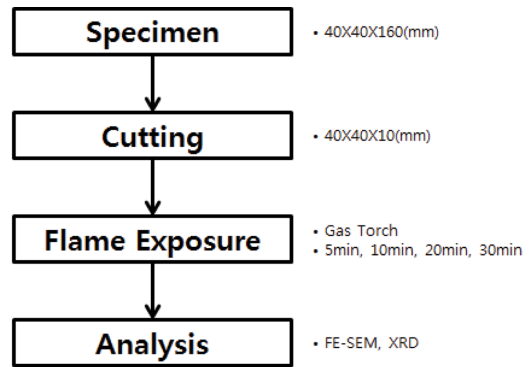
열적 거동에 대한 연구결과는 많지 않다[4].

따라서, 본 연구에서는 FA-BFS계 geopolymer 경화체로 패널(panel)을 제조하여 화염노출(flame exposure)시 패널 표면의 결정상과 미세구조 변화를 조사함으로써 친환경단열재로 대체할 방호벽, 단열재 등 내화성 건축자재로서의 활용가능성에 대하여 연구하였다.

### 2. 실험 방법

알루미나 골재(이하 WFA)를 첨가한 장기 양생(curing time; 90 days) geopolymer 시험체의 화염(fire exposure) 노출에 대한 시험체 표면의 물리 · 화학적 특성을 조사하기 위하여 Table 1의 배합비(B/A = 1 : 3; binder와 WFA 비율)로 제작된 재령 90일 시험체를 대상으로 하였으며, 시험공정은 Fig. 1에 나타내었다.

시험체는 온도 30°C, 습도 90% 이상의 항온항습챔버



Flame Exposure Experimental Device

Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedures.

Table 1  
Mixture Proportions of Geopolymeric Ceramics

Specimen	Binder		WFA			Liquefied activator		Curing condition		
	BFS	FA	0.5 mm	0.5~1 mm	1~3 mm	L/B (%)	K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> (mole ratio)	Temp. (°C)	R.H. (%)	Time (hour)
B/A	1	3								
BFS80A	80	20				0.4	0.8	30	90	24
BFS60A	60	40	20	50	30					
BFS40A	40	60								

내에서 24시간 양생하였으며, 이후 몰드로부터 탈형하여 상온에서 재령 28일 동안 시험체 내외의 온도차 및 탈수에 의한 건조수축 및 크랙을 방지하기 위하여 봉합양생을 실시하였다. 재령 28일부터 재령 90일까지 시험체의 보관은 일반적인 실내 환경(mean ambient temp.;  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , mean ambient humidity;  $35 \pm 5\%$ )에서 노출 보관하였다.

Geopolymer 시험체의 화염노출에 대한 표면 특성 변화를 조사하기 위하여 시험체로부터 측정용 시편(panel type)을 정밀시편절단기(cutting machine; Struers, Accutom5)를 이용하여 area;  $40 \times 40$  mm, thickness; 10 mm의 크기로 절단하여 준비하였다. 사용된 화염시험장치(flame exposure experimental device)는 Fig. 1에 나타내었다. 화염의 형성은 부탄가스토치(butane gas torch)를 사용하였으며, 화염온도는 약  $1,430^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있다[18].

화염노출에 대한 영향을 조사하기 위하여 FA-BFS 혼합비율에 따른 시편 BFS40A, BFS60A 및 BFS80A의 화염 노출 시간을 5 min, 10 min, 20 min 및 30 min으로 각각 설정하여 화염에 노출시켰다. 화염노출 전후 결정상의 변화는 엑스선회절분석기(XRD; Rigaku, D/Max-2500V, Japan)를 이용하여 분석하였으며, 이때 분석조건은 Scan range;  $5\sim 80^{\circ}$ , Acc. Vol.; 40 kV 250 mA, Scan Speed;  $0.6^{\circ}/\text{min}$ , Target; Cu의 조건으로 분석하였다. 또한, 결정상 정량을 위하여 JADE7(Materials Data, Inc., USA)의 whole pattern fitting and rietveld refinement를

이용하였다. 화염노출 전후 미세구조 분석은 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM; JEOL, JSM-6701F, Japan)을 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 패널(Panel) 표면 및 결정상의 변화

Cement 구조물은 화재에 의해 장시간 화염을 받을 경우 먼저 콘크리트 내부의 시멘트 수화물의 탈수(dehydration) 즉, C-S-H(calcium silicate hydrate), calcium hydroxide 및 ettringite가 단계적으로 진행된다. 또한, 열팽창(thermal expansion)을 수반하여 미세한 균열이 발생하면서 최종적으로 폭발(explosive spalling)에 의해 붕괴가 일어난다 [19, 20].

Geopolymer panel의 화염노출에 대한 표면 특성 변화를 Fig. 2에 나타내었으며, FA-BFS 혼합 비율과 butane gas torch 화염 노출 시간에 따른 변화를 보인 것이다. 일반적으로 고온 소성시 소성수축이나 결정수의 탈수에 의해 크랙이 발생할 수 있으며, 이를 억제하기 위하여 섬유보강재 또는 골재를 첨가하는 것으로 알려져 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 화염노출 시간에 따른 외형의 변화 및 크랙은 관찰되지 않았으며, 색상의 변화만 관찰되었다. 크랙이 관찰되지 않는 것은 내화성능 향상을 위해

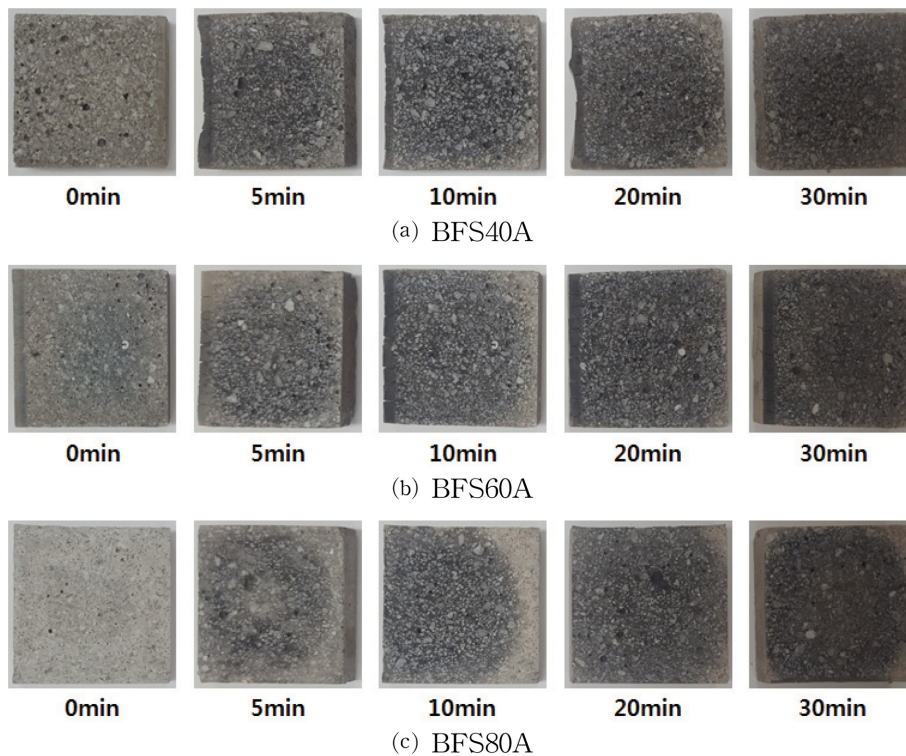


Fig. 2. Appearance changes of geopolymeric ceramics after flame exposure times.

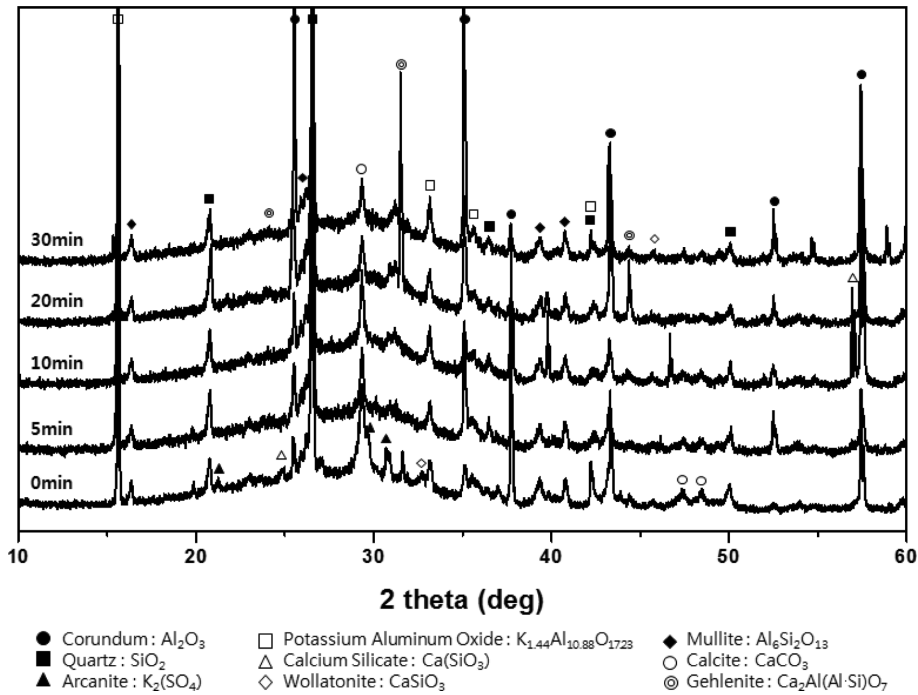


Fig. 3. XRD patterns of BFS40A with flame exposure times.

첨가된 WFA로 인해 내화성능이 향상되었기 때문이다[9]. 화염에 노출되지 않은 시편 절단면의 색상은 BFS의 함량이 많을수록 옅은 회색을 띠고 있으며 화염노출시간

이 길어질수록 검게 그을린 듯한 색상을 나타낸다. 검게 그을린 색상은 화염 노출 전후 색상대비 BFS 첨가량이 높은 BFS80A에서 가장 큰 색상의 변화가 관찰된다.

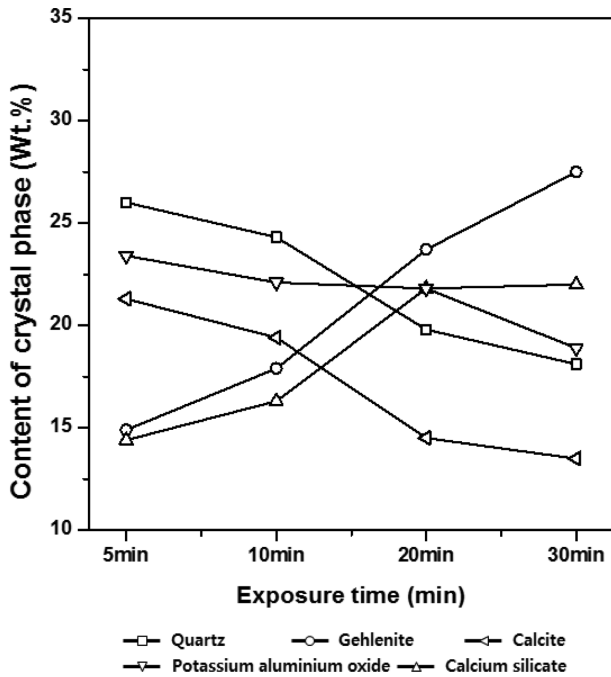


Fig. 4. Change of crystal phase of BFS40A geopolimer ceramics with flame exposure times. \* (Fitting Halted at Iteration: 5 min (R = 19.86 %, E = 3.7 %), 10 min (R = 19.78 %, E = 3.72 %), 20 min (R = 24.8 %, E = 3.64 %), 30 min (R = 23.72 %, E = 3.72 %).

Fig. 3, Fig. 5, 및 Fig. 7의 XRD 패턴에서 알 수 있듯이 모든 조건의 시편에서 alumino-silicate의 halo 패턴과 C-S-H gel 및 calcite(CaCO<sub>3</sub>)가 확인된다. 이것은 Ca가 풍부한 원료인 BFS(CaO 44.89 wt%)에서 알칼리 활성화제에 의해 용출된 Ca로 인해 생성된 C-S-H gel 과 calcite가 화염 노출시 지극히 표면에서만 탈수 및 탈탄산이 일어났음을 알 수 있다. Fig. 4, Fig. 6 및 Fig. 8의 결정상 정량에서 화염노출 시간에 따라 calcite의 양이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 양생과정에서의 탄산화로 발생한 calcite가 30분 경과 후에도 여전히 다량 존재하고 있다. 이전 연구에서 탈탄산에 의해 미세한 내부 크랙의 발생한 것과 달리 geopolimer 경화체 표면에 국한된 탈탄산은 화염노출 후에도 내구성이 유지되고 있는 것으로 판단된다[8, 9]. 양생시 탄산화는 조직을 치밀화 하는 강화기구로 알려져 있으며, CO<sub>2</sub>를 흡수하는 탄산화 반응은 장기적으로 조직을 치밀화 시킴으로서 재료의 환경부하 저감과 함께 내구성 향상기능을 가지는 특징이 있다. 그러나 철근 콘크리트의 경우 탄산화반응은 내부의 알칼리를 저감시켜 철근을 부식시키거나, 동결융해 과정에서 내부 수분의 팽창압을 완충 작용하는 공극이 탄산화로 줄어들고 동결융해 저항성을 저하시켜 장기적인 성능저하를 우려하는 보고도 있지만 무철근 구조물에의 탄산화는 조직의 치밀화와 강도 향상 등에 긍정적



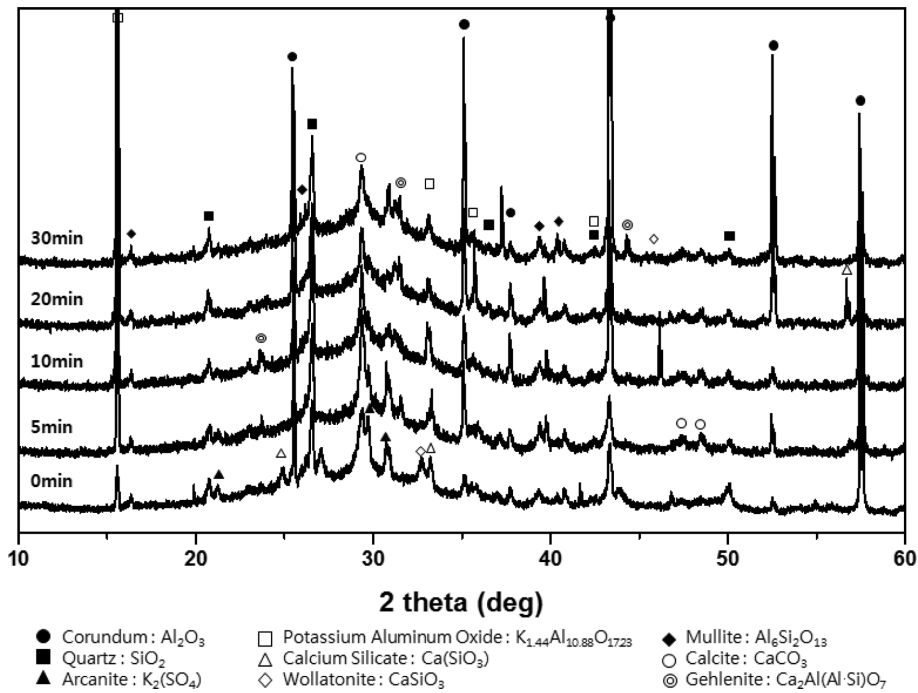


Fig. 5. XRD patterns of BFS60A with flame exposure times.

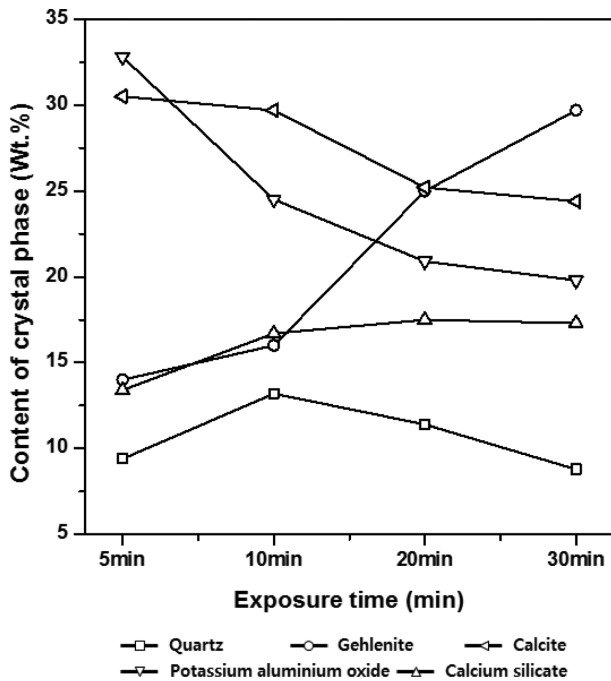


Fig. 6. Change of crystal phase of BFS60A geopolymer ceramics with flame exposure times. \* (Fitting Halted at Iteration: 5 min (R = 30.18 %, E = 3.62 %), 10 min (R = 27.35 %, E = 3.7 %), 20 min (R = 31.78 %, E = 3.69 %), 30 min (R = 32.12 %, E = 3.68 %)).

인 효과를 가져 올 수 있다[21, 22].

Geopolymer에서 열처리에 의해 halo 패턴의 감소는 비정질상인  $M_n[-(SiO_2)_z-AlO_2]_n \cdot wH_2O$ (여기서 M은 알

칼리 원소, z는 1, 2 또는 3 그리고 n은 중축합 정도)가 열처리에 의해 탈수 및 결정의 재배열되는 과정으로 결정화가 진행되면서 사라지는 것을 의미한다[6]. Fig. 3, Fig. 5 및 Fig. 7의 FA-BFS 혼합비율과 화염노출 시간에 따른 엑스선 회절 패턴에서 화염에 노출되지 않은 panel에서 주된 결정상은 quartz, mullite, calcite, arcanite, C-S-H gel 및 amorphous aluminosilicate gel 등이 관찰되며, 화염노출 시간이 증가함에 따라 gehlenite, calcium silicate, wollastonite, potassium aluminium oxide 결정상이 추가적으로 관찰된다. Geopolymer 중축합 반응에 의해서 생성된 aluminosilicate gel의 영향으로 보고되고 있는 20~35°(2theta) 범위의 비정질 halo 패턴이 미미한 차이는 있을 수 있지만 화염노출 시간과 관계없이 나타나고 있다[23, 24]. 또한 이 패턴은 BFS 함량이 증가할수록 더 넓은 범위에서 관찰된다. 이전의 연구에서 열처리에 의해 800°C 이후에는 halo 패턴이 관찰되지 않았던 결과와 상반되는 양상을 나타내고 있으며, 양생시 탄산화로 인한 calcite가 관찰되고 있다[8, 9]. 따라서, 화염에 의한 결정상 변화는 표면에 국한되어 발생하는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 4, Fig. 6 및 Fig. 8의 화염노출 시간과 BFS 함유량 증가에 따른 결정상 변화에 대하여 rietveld 법으로 결정상을 정량한 결과를 나타내었다. Quartz는 BFS60A에서 10 min까지 증가 후 감소하고, BFS80A는 20 min 이후 감소둔화를 나타내고 있지만 전체적인 경향은 BFS 치환량이 증가할수록 quartz와 calcite가 감소함에 따라 gehlenite와 calcium silicate가 증가하는

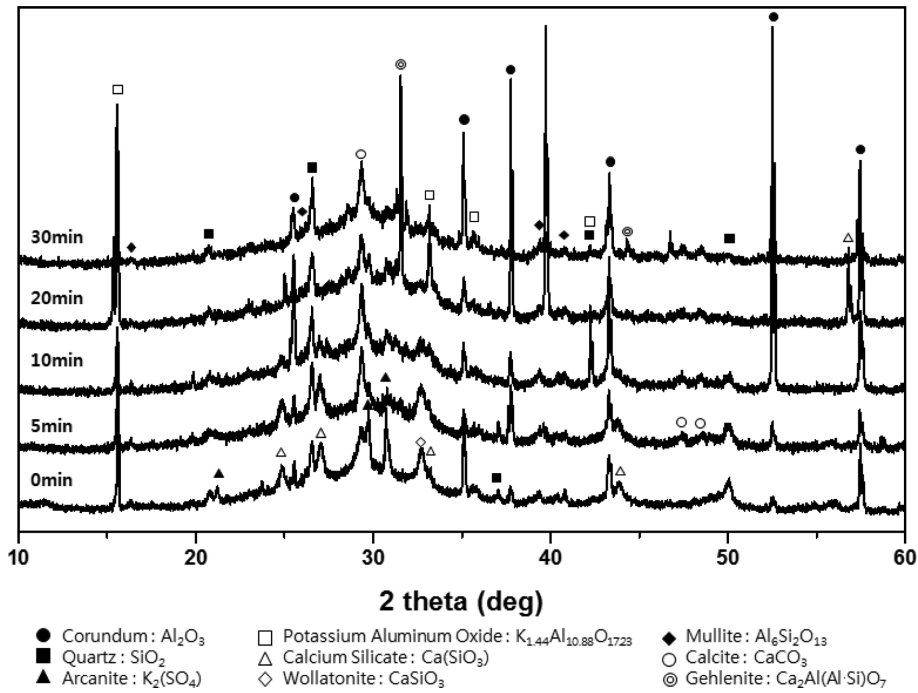


Fig. 7. XRD patterns of BFS80A with flame exposure times.

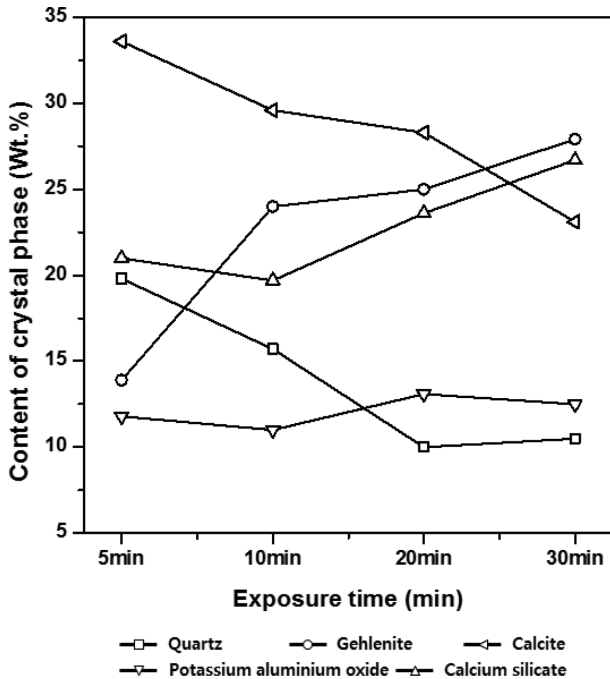


Fig. 8. Change of crystal phase of BFS80A geopolymer ceramics with flame exposure times. \* (Fitting Halted at Iteration: 5 min (R = 17.38 %, E = 3.86 %), 10 min (R = 23.41 %, E = 3.82 %), 20 min (R = 26.86 %, E = 3.8 %), 30 min (R = 21.07 %, E = 3.89 %)).

경향을 나타내고 있다. 이것은 BFS의 풍부한 CaO 성분이 gehlenite의 결정상 생성 및 성장에 기여한 것으로 보고된 것과 유사한 경향을 나타내고 있다[6, 7]. 또한,

화염노출 시간이 증가함에 따라 gehlenite와 calcium silicate 결정상이 지속적으로 증가하는 것은 이전 연구 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, geopolymer panel 표면의 치밀화와 강화기구로 작용하여 내구성이 향상될 것으로 판단된다[8, 9].

### 3.2. 패널(Panel) 미세구조의 변화

FA-BFS 혼합 비율과 butane gas torch 화염노출 시간에 따른 geopolymer panel의 미세구조변화에 대하여 전계방사형주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다.

모든 조건에서 화염노출 전의 미세구조는 투입된 원료 성분에서 비롯된 FA로 보이는 등근입자와 BFS 또는 알루미늄 골재로 보이는 괴상의 입자가 관찰되며, 그 주위를 작은 입자형태들이 엉켜있는 듯한 집합조직으로 이루어져 있으며 시편 모두 치밀한 조직을 나타내고 있다.

화염노출 시간에 따른 미세구조의 변화는 BFS 치환율에 따라 다소 차이가 있어 보이나 기공의 형성과정을 거치고 다시 치밀화 되는 양상을 보이고 있다. Son 등의 연구에서도 800°C에서 열처리된 시편의 경우 calcite의 탈탄산 반응에 의한 CO<sub>2</sub> 가스의 방출과 결정수의 탈수로 다량의 기공이 형성되고, 1,000°C 이상에서는 새로운 결정상의 형성으로 치밀화 된다고 하였다[6, 7].

일반적으로 부탄가스 토치의 화염온도가 약 1430°C로

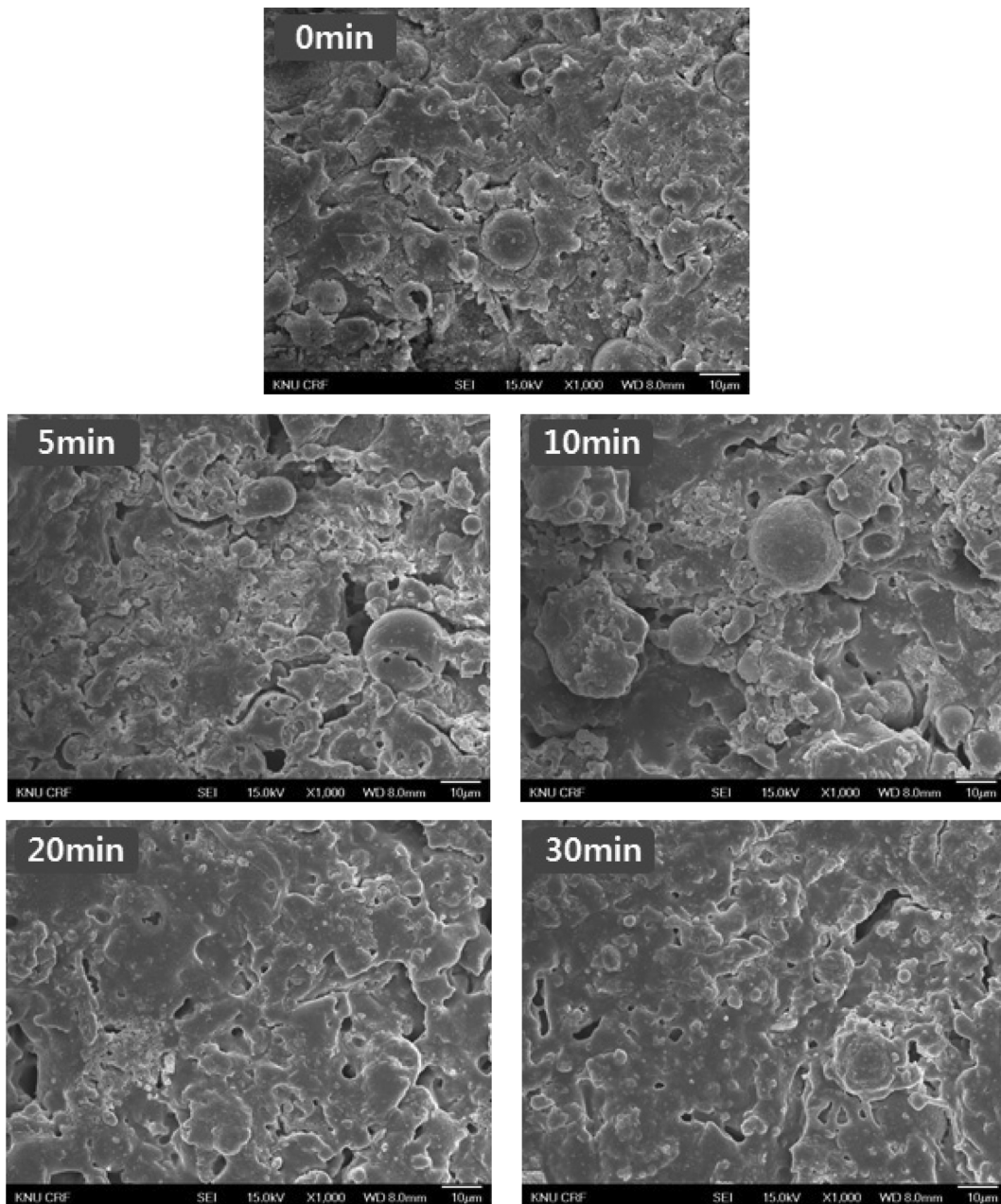


Fig. 9. FE-SEM micrographs of BFS40A with flame exposure times.

알려져 있는 것을 고려해 볼 때 화염 노출 시간에 따른 미세구조의 변화 과정은 다른 연구와 유사하다고 할 수 있다[18]. Fig. 9에서 BFS40A의 경우 10분 경과까지는 입자를 관찰할 수 있고, 20분간 화염노출 시편부터 입자가 관찰되지 않고 다량의 기공이 존재한다. 30분 경과 시편에서는 기공이 감소하며 조직이 치밀한 형상을 나타내고 있다. Fig. 10에서 BFS60A는 화염 노출 경과 시간 10분부터 입자의 형상은 관찰되지 않았으며, 기공이 발전하기 시작하여 20분에 가장 많은 기공 분포를 나타내었다. 30분 노출에서는 기공의 수는 줄었지만 기공의 크기가 조대해진 것으로 관찰되고 있다. 이것은 BFS 치

환량의 증가로  $\text{CaCO}_3$ 와 C-S-H gel의 형성이 증가되어 화염노출 시간의 증가에 따라 더욱 활발해진 탈탄산 및 C-S-H gel의 탈수에 의한 것으로 생각된다. Fig. 11은 BFS 치환량이 가장 많은 BFS80A의 경우 5분 경과부터 기공의 형성이 시작되고 미세한 크랙이 관찰되고 있다. 10분 경과 시 기공이 확장되었으며, 20분 경과부터 기공은 다시 작아지고 조직은 치밀화 되었으나 30분 경과까지 미세한 기공이 다량 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 또한 BFS60A에서와 같이 BFS 치환량의 증가로  $\text{CaCO}_3$ 와 C-S-H gel 형성의 증가와 화염노출 시간의 증가에 따른 지속적인 탈탄산 및 C-S-H gel의 탈수가 진행되고

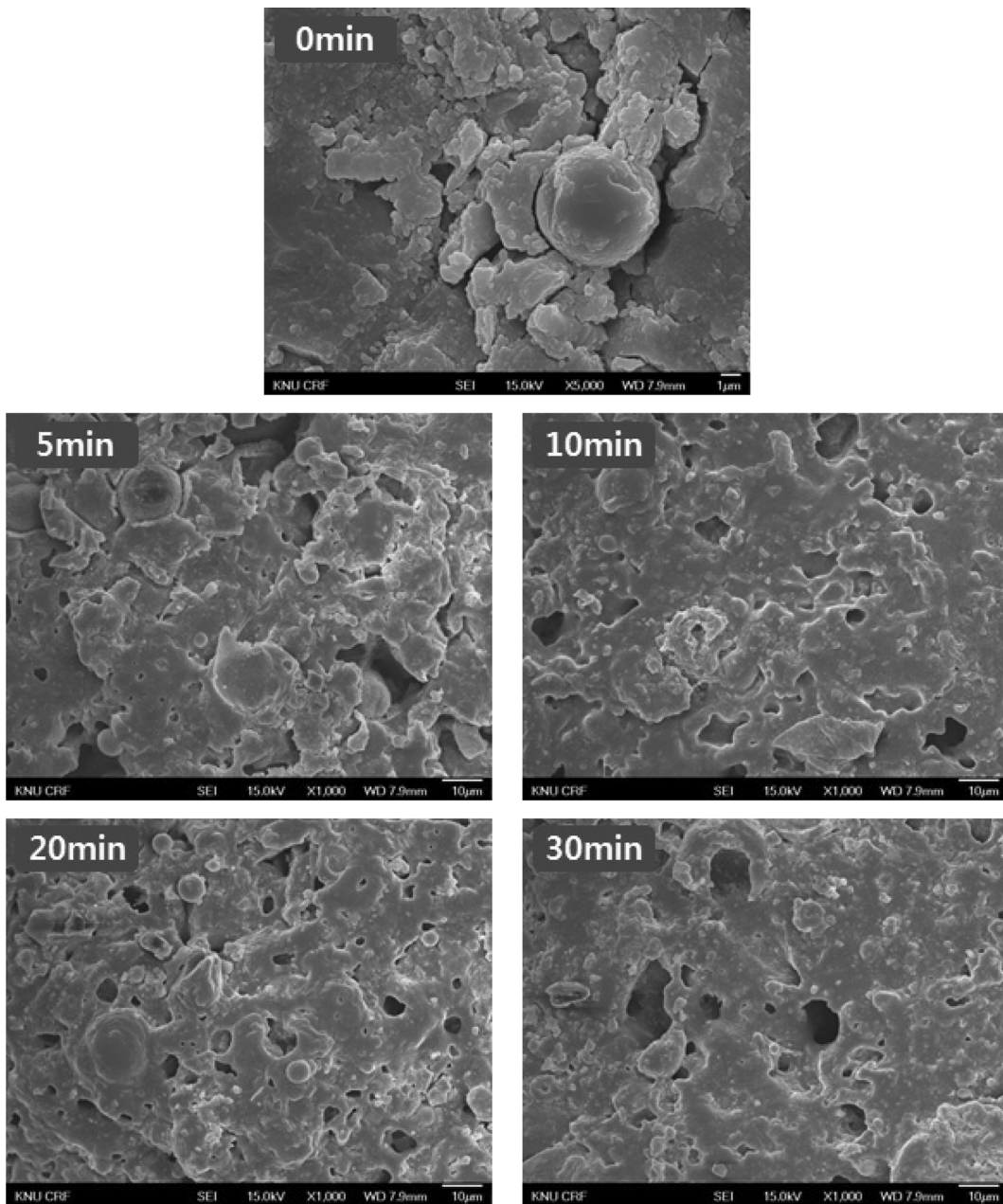


Fig. 10. FE-SEM micrographs of BFS60A with flame exposure times.

있는 것으로 생각된다.

화염노출에 따른 미세구조의 변화는 탈탄산, 결정수의 탈수 등으로 기공의 형성과 발전되는 과정을 거쳐 gehlenite와 calcium silicate 등과 같은 새로운 결정상의 형성에 의해 다시 치밀해지는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

FA-BFS 혼합 비율과 butane gas torch 화염노출 시간에 따른 geopolymer panel 표면의 결정상의 변화와 미

세구조 변화에 대한 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화염노출시 panel의 외형변형 및 열충격에 의한 크랙은 없었으며, 양생과정에서 발생한 탄산화에 의한 calcite의 잔존량과 aluminosilicate gel의 halo 패턴으로 보아 화염에 의한 탈탄산 및 탈수는 지극히 표면에 국한되어 발생했으며, geopolymer 경화체의 내구성은 화염조사 후에도 유지되고 있는 것으로 판단된다.

2) Amorphous aluminosilicate gel, quartz, mullite는 화염 노출 시간에 관계없이 유지되었으며, BFS의 치환량이 증가함에 따라 quartz와 calcite가 감소하고 gehlenite

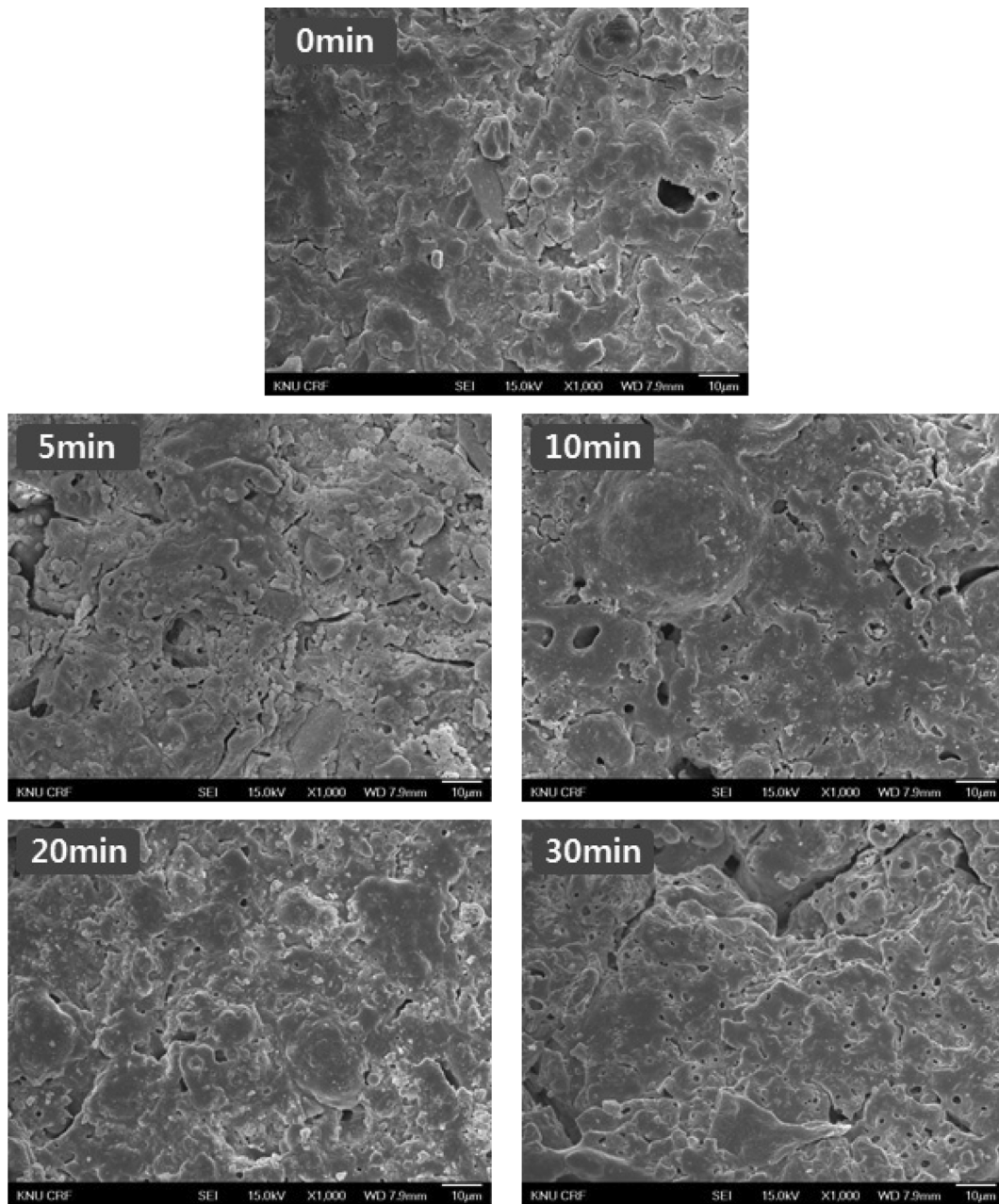


Fig. 11. FE-SEM micrographs of BFS80A with flame exposure times.

와 calcium silicate가 증가하는 경향을 나타낸다.

3) 화염 노출에 따른 미세구조의 변화는 탈탄산, 결정수의 탈수 등으로 기공의 형성과 발전되는 과정을 거쳐 calcium silicate, gehlenite 등과 같은 새로운 결정상의 형성에 의해 geopolymer panel 표면의 치밀화와 강화기구로 작용하여 내구성이 향상된 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비

로 연구하였으며, 이에 감사드립니다(관리번호-620170032).

## References

- [ 1 ] K. Sakkas, S. Kapelari, D. Panias, P. Nomikos and A. Sofianos, "Fire resistant K-based metakaolin geopolymer for passive fire protection of concrete tunnel linings", OALib. Journal 1 (2014) 1.
- [ 2 ] E.M. An, Y.H. Cho, C.M. Chon, D.G. Lee and S.J. Lee, "Synthesizing and assessing fire-resistant geopolymer from rejected fly ash", J. Kor. Ceram. Soc. 52 (2015) 253.



- [ 3 ] Y.B. Zhao, J. Jow, X.L. Cai and S.Y. Lai, "Fly ashbased geopolymer foam technology for thermal insulation and fire protection applications", 2015WOCA Conference in Nashville (2015).
- [ 4 ] Y. Luna-Galiano, A. Cornejo, C. Leiva, L.F. Vilches and C. Fernandez-Pereira, "Properties of fly ash and metakaolin based geopolymer panels under fire resistance test", *Materials de Construccion* 65 (2015) e059.
- [ 5 ] I. Turkmen, M.B. Karakoc, F. Kantarci, M.M. Maras and R. Demirboga, "Fire resistance of geopolymer concrete produced from ferrochrome slag by alkali activation method", *The International Conference on Renewable Energy Research and Applications (IJRER, Madrid, 2013)* p. 58.
- [ 6 ] S.G. Son and Y.D. Kim, "Effect of thermal behaviour and mechanical properties of heat treatment on the geopolymer mortar", *J. Kor. Soc. Waste Manag.* 27 (2010) 709.
- [ 7 ] H.J. Jung, S.G. Son, E.Y. Park, M.K. Kim and Y.D. Kim, "The thermal behaviour of geopolymer using waste disc and refractory aggregate", *J. Kor. Soc. Waste Manag.* 28 (2011) 875.
- [ 8 ] J.H. Kim, I.T. Nam, H. Park and K.N. Kim, "Thermal property of geopolymer ceramics based on fly ash-blast furnace slag", *Korean J. Mater. Res.* 26 (2016) 521.
- [ 9 ] J.H. Kim, I.T. Nam, H. Park and K.N. Kim, "Thermal property of geopolymer on fly ash-blast furnace slag system with the addition of alumina aggregate", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 26 (2017) 47.
- [10] A. Gonzalez, R. Navia and N. Moreno, "Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: Current and innovative potential applications", *Waste. Manage. Res.* 27 (2009) 976.
- [11] M. Anderson, R. Jones and M. McCarthy, "Established uses of combustion residues", In *Combustion Residues. Current, Novel and Renewable Applications* (Cox, M., Nugteren, H. and Janssen-Jurkovicova, M. (eds.)) Wiley and Sons Ltd. Chichester, England (2008).
- [12] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva and A. Fernandez-Jimenez, "A review on alkaline activation: new analytical perspectives", *Materi- als de Construccion* 64 (2014).
- [13] J. Davidovits, "Inorganic polymeric new materials", *J. Therm. Anal.* 37 (1991) 1633.
- [14] P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey and J.S.J. Van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the department of green concrete", *Cement Concr. Res.* 37 (2007) 1590.
- [15] W.D. Rickard, J. Temuujin and A.V. Riessen, "Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition", *J. Non-Cryst. Solids* 358 (2012) 1830.
- [16] W.D. Rickard and A.V. Riessen, "Performance of solid and cellular structured fly ash geopolymer exposed to a simulated fire", *J. Cem. Concr. Compos.* 48 (2014) 75.
- [17] H.D. Kim, "A Review on spalling phenomenon of high strength concrete during a fire accident", *J. Fire Sci. Eng.* 20 (2006) 80.
- [18] Wikipedia, "Butane torch", [https://en.wikipedia.org/wiki/Butane\\_torch](https://en.wikipedia.org/wiki/Butane_torch) (last modified on 17 February 2017).
- [19] H. Song, J.W. Ko and S. Sugahara, "Thermal properties and explosive spalling for high strength concrete (in Korean)", *J. Kor. Con. Insti.* 20 (2008) 26.
- [20] Z.P. Bazant and M.F. Kaplan, "Concrete at high temperatures, material properties and mathematical models", Longman House, England (1993) p. 6.
- [21] J.S. Ryou, H.S. Kim and J.B. Lee, "Combined deterioration of concrete durability with respect to carbonation", *Magazine of the Korea Concrete Institute* 22 (2010) 36.
- [22] J.C. Lee, "A study on the early property of the cement mortar by CO<sub>2</sub> gas curing", *J. Korea Soc. Waste Man- age.* 31 (2014) 396.
- [23] D. Papias, I.P. Giannopoulou and T. Perraki, "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ashbased geopolymer", *Colloid.Surface. Physicochem. Eng. Aspect. Surface. Physicochem. Eng. Aspect.* 301 (2007) 246.
- [24] Y. Zhang, W. Sun, Q. Chen and L. Chen, "Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer", *J. Harzard. Mater.* 143 (2007) 206.