

# 고온에서의 알칼리 활성화 내화성 결합재의 강도 및 공극구조 평가

Estimation of Strength and Pore Structure of Alkali-Activated Fire Protection Materials  
at High Temperature

**송 훈 | Song, Hun**

정회원, 한국세라믹기술원 책임연구원, 공학박사

**김 영 호 | Kim, Young-Ho**

정회원, 세진특허법률사무소 부소장, 공학박사

**김 완 기 | Kim, Wan-Ki**

정회원, 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사

**소 형 석 | So, Hyung-Suk**

정회원, 서남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

---

## Abstracts

This study is interested in identifying the effectiveness of alkali-activated fire protection material compounds including the alkali-activator such as potassium hydroxide, sodium silicate and fly ash as the fire resistant finishing materials. Also, this paper is concerned with change in compressive strength and pore structure of the alkali-activated fire protection material at high temperatures. The testing methods of fire protection materials in high temperature properties are make use of TG-DSC and mercury intrusion porosimetry measurements.

This study results show that compressive strength is rapidly degraded depending on a rise of heating temperature. Porosity showed a tendency to increase irrespective of specimen types. This is due to both the outbreak of collapse of gel comprising the cement and a micro crack by heating. However, alkali-activated fire protection material composed of potassium hydroxide, sodium silicate and fly ash has the thermal stability of the slight decrease of compressive strength and porosity at high temperature. These thermal stability is caused by the ceramic binding capacity induced by alkali activation reaction by the reason of the thermal analysis result not showing the decomposition of calcium hydrate.

---

## Keywords

Fire, Fire Resistance, alkali-activated, Strength, Porosity

## 키워드

화재, 내화, 알칼리 활성화재, 강도, 공극률

---

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업 (과제번호 : 10첨단도시C04 고층빌딩 커튼월용 내화성 적용기술 개발)의 지원을 받아 수행된 연구의 일부임.

### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 화재와 같은 고온에 노출되는 경우 콘크리트 내부의 급격한 수분의 이동과 부재의 온도상승에 따른 시멘트 수화물의 탈수와 열에 의한 팽창 및 수축 등으로 인해 미세균열이 발생한다. 이러한 미세균열은 콘크리트 구조물의 강도와 내화성능을 저하한다. 또한 고강도콘크리트의 경우는 폭렬에 의한 단면손상도 예상되므로 이에 대한 대책이 필요하다. 이 중 가장 효율적인 방법은 화재시의 열을 차단하여 부재의 온도상승을 제어함으로써 구조물에 미치는 영향을 최소화하는 것이 가장 기본적인 대책이다. 온도상승 제어를 위한 가장 효과적인 대책은 부재의 표면에 고온에서 안정한 내화성 결합재의 적용과 열전도율이 낮은 다공성 경량골재 및 유기계 섬유 등을 배합하는 것이다.

현재 내화성 결합재료의 적용하는 재료는 크게 시멘트 및 석고계 등으로 구분할 수 있다. 이 중 시멘트계 결합재는 물과 반응하여 규산칼슘수화물(Calcium silicate hydrate, 이하 C-S-H)과 수산화칼슘(Calcium hydroxide) 등의 수화물을 생성하는데 화재와 같은 고온에서는 수화물의 물리·화학적인 탈수가 발생하여 성

sulfate(CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)를 생성하며 고온에서 화학적인 탈수가 발생하여 성능이 저하하며 표 1과 같다.

시멘트 수화물은 C-S-H가 60~70%를 수산화칼슘이 20~30%를 차지한다. 일반적으로 콘크리트 구조물은 약 100°C에서 모세관 공극의 자유수가 증발하며, 180°C에서 탈수의 1단계로서 겔의 붕괴, 450~500°C의 범위에서 수산화칼슘의 분해, 700°C이상에서는 C-S-H상이 분해된다. 석고는 탈수에 의해 약 130°C에서 반수석고, 약 160°C에서 무수석고로 변화한다.<sup>2)</sup> 이와 같이 수경성 결합재는 화재와 같은 고온에서는 수화물의 물리·화학적인 탈수가 발생하고 성능이 저하한다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위하여 시멘트계 재료를 대체하여 고온에서 비교적 안정하다고 알려진 알칼리 활성화 결합재를 내화성 경량 결합재로서 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>3)</sup> 특히, 알칼리 활성화 반응에 의한 결합재는 시멘트 수화생성물인 C-S-H와 수산화칼슘을 형성하지 않으므로 시멘트계 결합재에서 보이는 500°C이상에서의 현저한 강도저하 현상이 발생하지 않을 것으로 예측된다.

이에 따라 본 연구에서는 알칼리 활성화 결합재를 이용하여 내화성 마감재를 제조하고 고온에서의 강도특성과 공극구조 변화와의 관계를 검토하여 내화특성을 예측할 수 있는 기초자료의 제

표 1. 시멘트 및 석고계 결합재의 온도에 따른 영향

온도	구분	온도에 의한 영향
30~100°C	시멘트계, 석고계	- 비교적 큰 공극으로부터 물리적으로 결합한 수분이 증발하며 100°C이하의 온도에서 시작됨.
100~700°C	시멘트계	- C-S-H계 수화물: (C-S-H : CaO-SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O) 시멘트 경화체의 주성분이며 결정도가 낮은 겔상으로 100~130°C에서 탈수하지만, 수화물의 화학 조성은 일정하지 않기 때문에 개개의 형태를 명확히 구분하기는 어려움. - 에트린자이트: (C <sub>3</sub> A <sub>3</sub> CSH <sub>32</sub> : 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3CaSO <sub>4</sub> ·32H <sub>2</sub> O) 160~180°C 정도에서 큰 피크를 보이며, 250~270°C에서 작은 피크를 보이며 단계적으로 탈수. - 모노셀페이트: (C <sub>3</sub> ACSH <sub>12</sub> : 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O) 150°C, 200°C, 300°C에서 3단계로 탈수하여, C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S와 CaO로 변화. - 알루미늄이트계 수화물(C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> : 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O) 270~330°C에서 물이 탈수하여 550°C부근에서 남은 물이 탈수하여 C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> 와 CaO로 변화. - 수산화칼슘: (CH:Ca(OH) <sub>2</sub> ) 450~500°C에서 Ca(OH) <sub>2</sub> → CaO + H <sub>2</sub> O
	석고계	- 이수석고(CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O) 탈수에 의해 약 130°C에서 반수석고, 약 160°C에서 무수석고로 변화. CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O → CaSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O

능이 저하한다.<sup>1)</sup>

또한 석고계도 물과 반응하여 이수석고(Calcium

2) 정석조, 알칼리 활성화에 의한 플라야에서 무기결합재의 물리적 특성에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2007.2

1) 송훈 외 1인, 고온에 노출된 실리카폼 혼입 고강도콘크리트의 공극구조 변화, 한국콘크리트학회논문집, pp.597~604, 2004.10

3) Z.P. Bazant, M.F. Kaplan, Concrete at High Temperatures, Material Properties and Mathematical Models; pp.6-26, longman House, England, 1993

표 2. 사용재료

Binder	C	Cement	Ordinary portland cement
	F	Fly ash	Blain : 3,764 cm <sup>2</sup> /g
	M	Meta-kaolin	Blain : 9,812 cm <sup>2</sup> /g
Activator	KOH	Potassium hydroxide	Assay min. 85%
	SS	Sodium silicate (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	Assay min. 99%
Aggregate	Sand	Joomoonjin sand	

표 3. 플라이애시 및 메타카올린의 화학조성 (unit:wt.%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig. loss
Fly ash	55.2	27.0	2.28	1.54	6.07	0.90	0.68	0.39	3.76
Meta-kaolin	52.0	40.2	3.00	0.50	1.20	0.35	0.40	0.60	1.85

표 4. 알칼리 활성화 결합재의 배합표

	Solid/Liquid (%)	Solid			Liquid			Sand	Flow (mm)	Comp. strength (28d, MPa)
		C	F	M	Water	KOH	SS			
Plain	48.5	1	-	-	0.485	-	-	2.45	190	27.2
AAFPM-1	73.0	-	0.5	0.5	-	0.365	0.365	2.45	180	51.5
AAFPM-2	73.0	-	0.5	0.5	-	0.547	0.182	2.45	190	54.0

공 및 알칼리 활성화 결합재의 효용성을 확인하였다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료 및 배합

본 연구의 알칼리 활성화 결합재 제조에 사용된 재료로는 플라이애시, 메타카올린, 수산화칼륨 및 소듐실리케이트이며 표 2와 같다. 플라이애시는 국내 CaO 함량이 10% 이하인 F급 플라이애시이며, 메타카올린은 국내 시판 제품을 사용하였으며 화학적 조성은 표 3과 같다. 알칼리 활성화 용액은 2몰의 수산화칼륨 용액과 소듐실리케이트를 사용하여 알칼리 활성화 용액을 제조하였다. 알칼리 활성화 내화성 마감재 제조를 위한 배합은 표 4와 같다. 알칼리 활성화 결합재는 유동성을 확보하기 위해 플로우값을 180±10mm으로 하였고, 응결시간은 뿔칠 및 마감이 가능하도록 응결시간을 조절하였다.

### 2.2 시험체의 제작

내화성 마감재의 혼합은 강제식 믹서를 이용하여 혼합하였고, 재료투입은 재료의 균질성을 위하여 선비법을 실시하였으며 이후 KS L 5105(수경성 시멘트

모르타르의 압축강도 시험방법)에 의거하여 실시하였다. 내화성 마감재는 제조된 모르타르를 바탕으로 강재형틀을 이용하여 50×50×50mm의 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 항온항습 챔버를 이용하여 온도 23±2°C, RH 95% 이상의 조건에서 표준양생을 실시하였다.

#### (1) 가열시간 및 압축강도 측정방법

알칼리 활성화 내화성 결합재의 고온특성을 파악하기 위한 가열곡선을 그림 1에 나타내었다. 가열은 전기로를 이용하였고 가열온도는 200°C, 400°C, 600°C, 800°C이다. 승온속도는 분당 5~10°C로 1시간 이내에 다음 온도단계에 도달할 수 있도록 하였다.

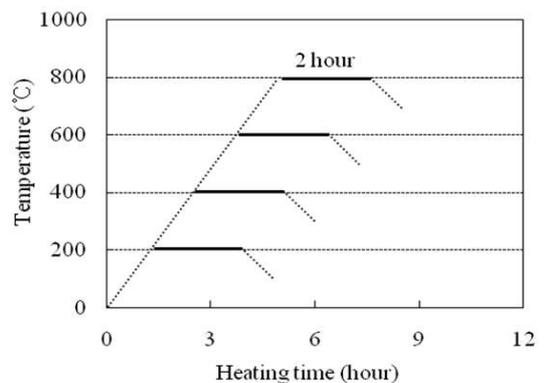


그림 1. 내화성 결합재의 가열시간 온도곡선

시험체는 전기로에서 2시간 가열 후, 상온으로 냉각하여 측정하는 냉간법을 사용하였다. 고온특성의 평가는 Plain, AAFPM-1, AAFPM-2의 각각의 시험체에 대해 상온과 전술의 온도에서 2시간 동안 가열한 후 상온으로 향량한 후 압축강도를 측정하였고 내화시험용 시험체의 재령 3, 7, 28일이다.

(2) TG-DSC 및 공극구조 측정방법

고온시의 특성은 28일 양생한 시험체를 사용하였고, TG-DSC에 의한 시차열분석을 실시하여 재료특성을 평가하였다. 또한, 고온시의 공극률의 측정은 수은압입법에 의한 공극측정기를 사용하여 측정하였다. 공극구조의 측정은 28일 양생한 시험체를 다이아몬드 커터로 5mm의 각으로 절단 후 아세톤에 침적시켜 수화를 정지시켰다. 20°C의 상온의 시험체는 2주간 D-dry 건조 후 측정하였고 고온용 시험체는 전기로를 이용하여 각각의 가열온도에서 2시간 가열한 후 상온으로 냉각하여 측정하였다.



그림 2. 포로시미터

3. 실험결과 및 분석

3.1 고온시의 압축강도

(1) 압축강도

가열온도에 따른 재령별 압축강도 변화를 그림 3에 나타내었다. 상온에서 Plain 시험체의 28일 압축강도는 27.2 MPa이었다. 2시간 가열 후 시험체의 압축강도는 각 시험체에 관계없이 가열온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 시험체의 압축강도는 약 200°C정도까지는 상온의 압축강도와 비교하여 크게 저하하지 않았지만 200°C이상의 온도에서는 급격하게 저하하는 경향을 보였다. 이러한 압축강도의 감소는

콘크리트 내부의 수축팽창의 구속에 대한 미세균열의 발생이나 시멘트 수화물의 탈수에 의한 공극증가 요인에 의한 것이다.

고온하의 압축강도는 500°C에서는 약 60%, 800°C에서는 15% 정도의 강도잔존율을 보이는 것이 일반적이다<sup>1),3)</sup>. Plain 시험체의 압축강도 잔존율은 400, 600°C의 온도범위에서 0.82, 0.43의 값을 나타냈으며 Eurocode 2에서 제시하고 있는 콘크리트 부재의 압축강도 잔존율인 0.75, 0.40과 거의 유사한 값을 보였다. 또한 800°C에서의 압축강도 잔존율은 0.28로 Eurocode의 잔존율인 0.15 보다는 다소 높은 결과 값을 나타냈다. 이는 기준이 되는 콘크리트나 가열방법에 따른 차로 추정되어 직접적인 비교는 불가하지만 고온하의 시멘트계 재료의 물성변화를 추정할 수 있었다.<sup>4)</sup>

AAFPM-1, AAFPM-2 시험체의 경우 28일 압축강도는 51.5, 54.0 MPa이었다. AAFPM-1, AAFPM-2 시험체는 재령 증가에 따른 압축강도의 변화는 크지 않았다. 3일 압축강도도 42.8, 46.5 MPa 이었으며 초기재령에서 강도의 발현이 컸는데 이는 알칼리 자극제인 수산화칼륨과 소듐실리케이트와 플라이애시 및 메타카올린과의 알칼리 활성화 반응에 의한 조강성으로부터 기인한 결과이다. 이는 내화성 피복을 위한 마감재로 적용할 경우 경화가 빨라 시공성의 측면에서 유리하며 몰비에 따라 가사시간의 조절도 가능한 장점을 지닌다. 또한, AAFPM-1, AAFPM-2의 경우도 가열온도가 상승함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 보였으나 200~400°C의 영역에서 Plain시험체에 비해 강도가 크게 증가하였다. 재령이나 가열시간에 상관없이 동일한 경향을 보였으며 특히, 재령이 짧을수록 강도의 증가는 크게 나타났다.

시멘트 수화물은 물과 반응하여 C-S-H계 수화물, 수산화칼슘을 생성하고 가열온도의 상승에 따라 화학적으로 결합된 수분이 탈수하고 450~500°C의 범위에서 수산화칼슘이 열분해되므로 통상 500°C이상의 온도범위에서 강도의 감소가 크게 나타나는 것이 일반적이다. 이러한 강도저하는 화재발생시 콘크리트 구조물의 강도를 감소시켜 내화성능을 저하한다. 하지만 AAFPM-1, AAFPM-2의 경우 플라이애시 및 메타카올린을 주성분으로 수화가 아닌 활성화제에 의한 응결 경화과정을 거치므로 강도저하가 작게 나타났다. 또한 알칼리 활성화 반응은 상온보다 고온에서 활성

4) Eurocode 2, Design of Concrete structures, Structural fire design, 1994

화가 되므로 초기재령에서 좀 더 치밀하게 입자사이를 결합(-Si-O-Al-O)하여 강도의 증가가 크다.<sup>5)</sup>

(2) 상대압축강도

가열온도에 따른 상대압축강도의 변화를 그림 4에 나타냈다. Plain 시험체의 경우 재령이 짧을수록 온도

의 상승에 따른 강도저하는 크게 나타났으며 AAFPM-1, AAFPM-2 시험체의 경우는 반대의 경향을 보였다. 특히, 재령 초기의 200°C 부근에서 강도의 증가가 크게 나타났다. 재령이 증가할수록 가열온도의 증가에 따라 상대압축강도는 감소하는 경향을 보였다. 하지만, AAFPM-1, AAFPM-2 시험체의 경우 200°C 이상

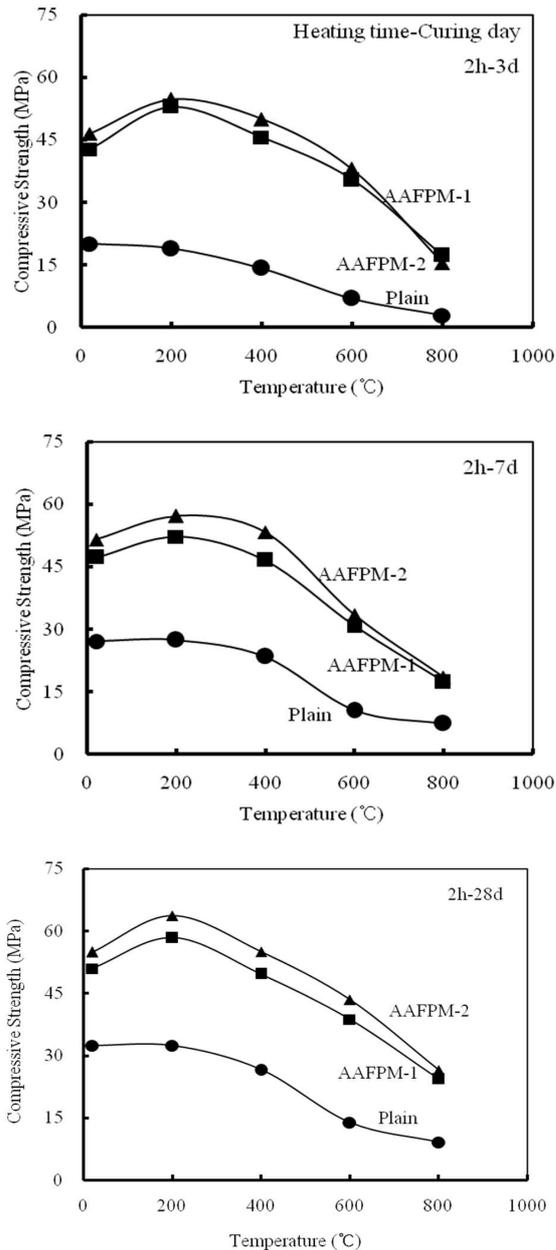


그림 3. 내화성 결합재의 압축강도

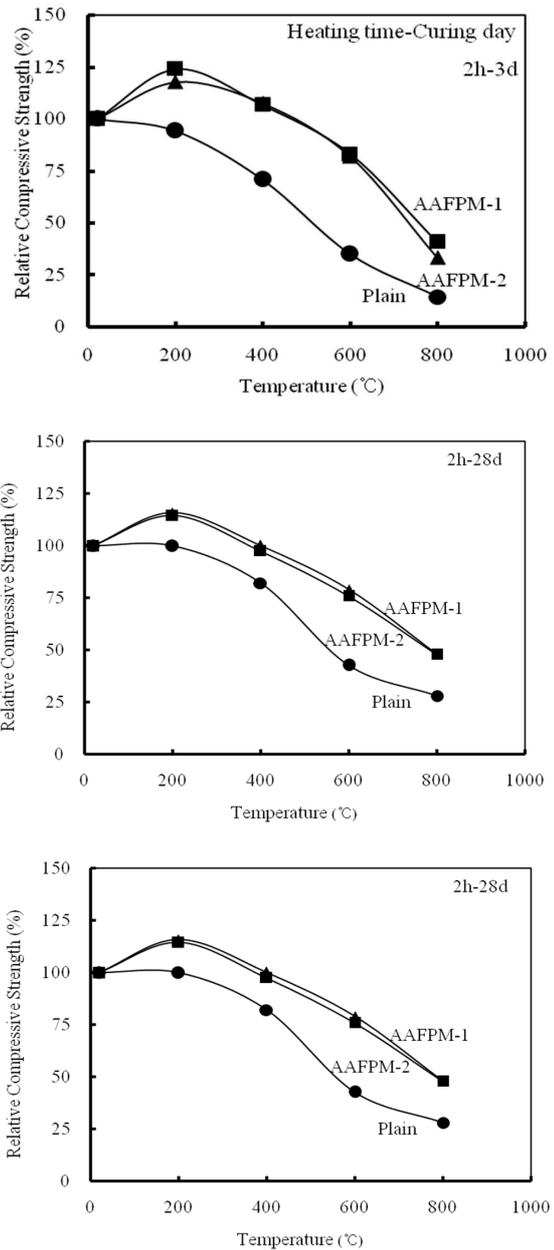


그림 4. 내화성 결합재의 상대압축강도

5) A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, M. Criado, Micro structure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, Cement and Concrete Research 35 pp.1204~1209, 2005

의 온도구간에서 Plain 시험체 보다 압축강도의 감소 폭이 작게 나타났다. 이는 전술한 알칼리 활성화 반응에 의한 화학적 결합의 결과이며 내화성 마감재에 적용하는 경우 보다 유리할 것으로 판단된다.

일반적으로 시멘트계 결합재를 사용한 경우 압축강도는 200°C 정도까지는 온도에 큰 영향을 받지 않지만 그 이상의 온도에서는 급격하게 성능이 저하한다. 대부분 탄성거동이 소실되며 응력도 감소하며 콘크리트 압축강도의 차이나 종류 등에 관계없이 동일한 경향을 보이며 가열온도에 따라 물성이 변화되는 결과를 보인다. 화재와 같은 고온에서는 콘크리트 내부의 수화물이 탈수에 의해 공극구조가 변화되며 미세균열이 발생하게 된다.

또한 온도의 증가에 따라 서로 다른 열팽창률을 가진 재료의 신축이 구속되어 발생된 열응력과 콘크리트를 구성하는 재료의 열적 성질의 차이에 따라 균열이 발생한다.

### 3.2 TG-DSC

알칼리 활성화 결합재의 TG-DSC 결과는 그림 5와 같다. Plain 시험체는 3~8%의 중량감소를 보였고 90~108°C 부근에서 나타나고 있는 에트린자이트 피크

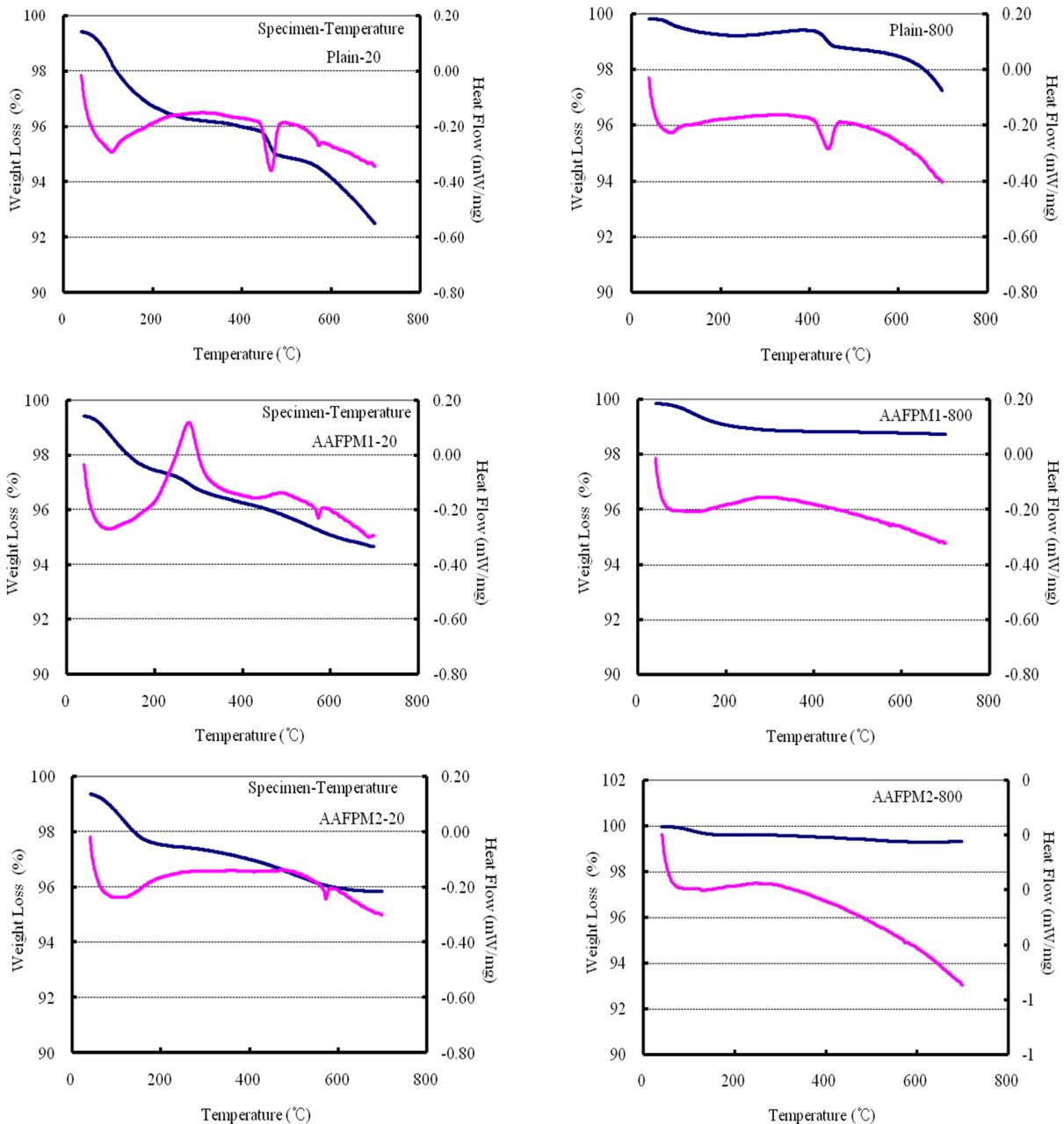


그림 5. 20°C 및 800°C에서의 TG-DSC

와 수산화칼슘의 존재를 확인할 수 있는 흡열피크(450°C 부근)가 뚜렷하게 나타났다. 또한 수산화칼슘 피크는 시험체의 가열온도가 상승함에 따라 크게 줄어들고 있음을 확인하였다. 이는 450°C에서부터 이미 대부분의 수산화칼슘이  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ 로 분해된 결과에 의한 것이다. 따라서 시험체의 가열온도가 450°C 이상의 고온으로 갈수록 수산화칼슘의 흡열반응은 감소하는 것으로 나타났다. AAFPM-1, AAFPM-2 시험체의 경우 수산화칼슘에 의한 흡열반응 피크가 보이지 않았고 700°C까지 약 1~5% 내외의 중량감소를 보였다. 57

0°C 부근의 흡열피크는 주로 실리카질 골재 등에 포함되어 있는 석영의 변태로 판단된다. 또한 가열온도가 증가함에 따라 흡열반응에 의한 탈수효과는 감소하는 경향을 보이고 있다.

### 3.3 세공구조의 변화

알칼리 활성화 내화성 결합재의 가열온도와 공극구조의 분포를 그림 6에, 누적공극률을 그림 7에 나타내었다. Plain 시험체는 가열온도의 상승에 의해 공극률도 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 0.1~0.5 $\mu\text{m}$ 의 공

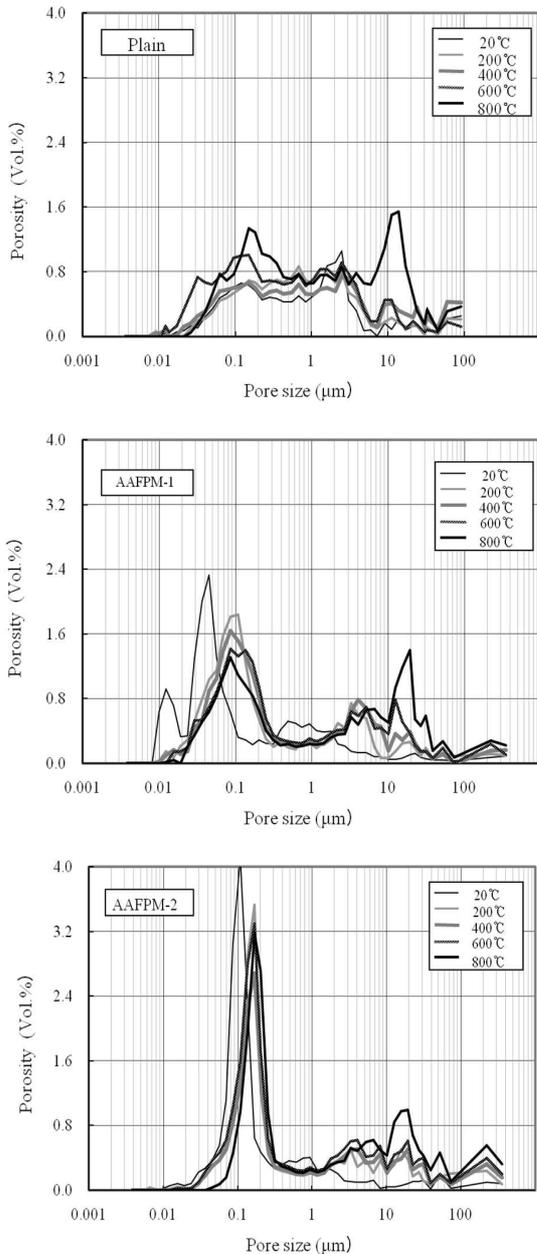


그림 6. 가열온도와 공극구조의 변화

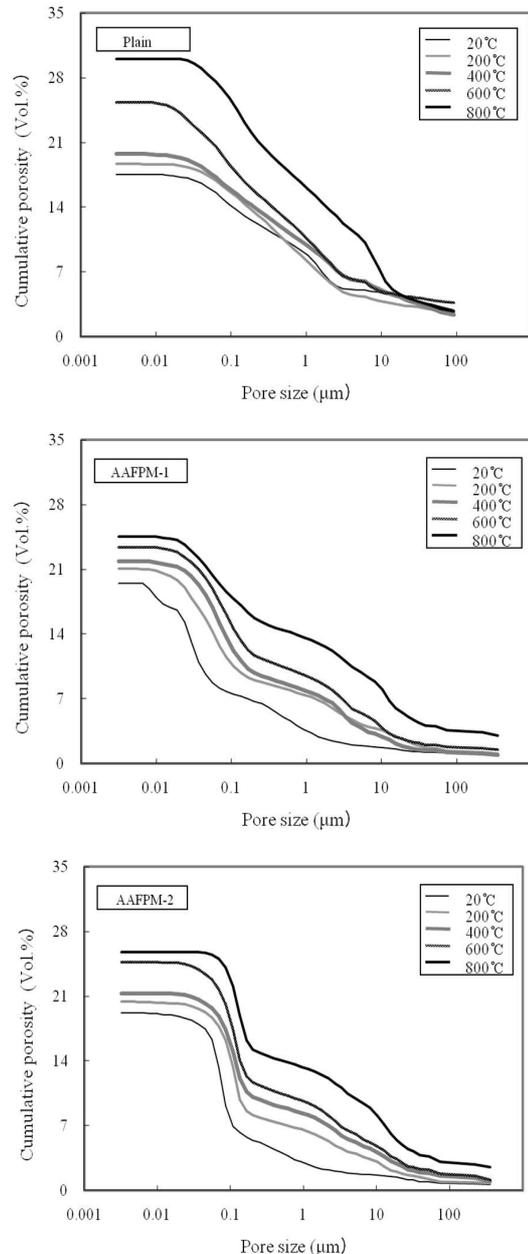


그림 7. 가열온도와 누적공극률의 변화

극의 증가가 현저하였다.

또한 가열온도의 상승에 따라 공극률은 점진적으로 증가하는 경향을 보였는데 이는 100°C 이상에서의 화학적으로 결합된 C-S-H계 수화물의 탈수와 수산화칼슘의 분해의 영향을 받은 것이다. 또한, 1~10µm의 공극도 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 압축강도와 상관관계가 높은 0.05µm 이하의 공극은 가열온도의 증가에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

Plain 시험체는 0.1µm 부근에서 공극의 변동이 크게 나타났고 10µm 부근에서도 공극의 변동이 현저하였다. 이와 같이 특정한 공극크기에서의 증감의 변화는 일반적으로 동일 크기의 공극크기에 대해서 유사한 경향을 보인다. 0.01µm의 공극에서는 가열온도의 증가에 따라 공극이 감소하는 결과를 보이고 0.1µm, 10µm 전후의 공극에서는 가열온도의 증가에 따라 공극도 증가하는 경향을 보였다. 각각의 온도에서의 공극 증감의 폭은 가열온도와 밀접한 관계를 보였으며 온도의 상승에 의해 증감의 폭은 더욱 크게 나타났다.

AAFPM-1 시험체는 Plain 시험체에 비해 0.05µm 이하에 분포된 공극이 많았으며 0.5µm 이하의 공극도 많았다. 이는 시험체의 압축강도와도 연관되는 결과이며 또한 AAFPM-2 시험체에서도 동일하게 찾아볼 수 있어 고온에서 비교적 강도의 감소가 작다는 것을 반증할 수 있다. 하지만 AAFPM-1 및 AAFPM-2는 시멘트 결합체에서 보이는 공극분포와는 다른 경향을 보였다. AAFPM-1 및 AAFPM-2는 공극률과 압축강도도 유사하고 고온에서의 강도변화도 동일한 경향을 보였지만 공극분포는 다르게 나타났다.

특히 AAFPM-2는 0.1µm의 공극이 많이 측정되어 AAFPM-1과는 다른 양상을 보였다. 이는 플라이애시 및 메타카올린과 화학적 결합을 유도하는 알칼리 자극제의 차에서 오는 결과로 사료되며 알칼리 자극제의 종류나 몰농도에 따라 압축강도 및 공극구조의 차이를 보이는 것으로 판단할 수 있으며 보다 체계적인 연구가 필요하다. 또한, 시험체에 따라 공극의 증감의 차는 다르게 나타났으며 800°C에서 2시간 가열한 경우 Plain 시험체의 경우 약 12.5 Vol.% 증가한 반면 AAFPM-1 및 AAFPM-2는 약 5.0~6.6 Vol.%의 증가를 보였다. 이와 같은 결과는 전술한 강도특성으로부터 유추해 볼수 있는 결과이며 시멘트계 재료에 비해 고온에서 유리하게 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

알칼리 활성화제를 이용하여 제조한 내화성 마감재의 고온하의 압축강도 및 공극구조 변화를 통해 확인한 결과는 다음과 같다.

1) Plain 시험체는 가열온도의 상승에 의해 압축강도는 감소하며 특히 200°C 이상의 고온에서는 감소경향이 현저하다. AAFPM 시험체의 경우 Plain 시험체에 비해 강도감소의 폭이 작아 내화성 마감재료의 적용이 가능하다.

2) 시험체 모두 가열온도의 증가에 따라 공극률도 점진적으로 증가하지만 증가의 폭은 다른 결과를 보였다. Plain 시험체 보다 AAFPM 시험체의 경우 증가의 폭이 작아 고온에서 비교적 안정적인 것으로 판단된다.

3) 특정한 공극크기에서의 증감의 변화는 일반적으로 동일 크기의 공극크기에 대해서 유사한 경향을 보이며 이는 수화물의 탈수 및 열에 의한 신축과 미세 균열의 발생에 따른 결과이다.

4) 알칼리 활성화 결합체는 고온에서 강도특성 및 공극구조의 변화가 작아 내화성 마감재 제조에 적합하며 추후 적절한 배합에 대한 검토가 필요하다.

#### 참고문헌

1. 송 훈 외1인, 고온에 노출된 실리카폼 혼입 고강도콘크리트의 공극구조 변화, 한국콘크리트학회논문집, 2004.10
2. 정석조, 알칼리 활성화에 의한 플라이애시 무기결합체의 물리적 특성에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문, 2007.2
3. Z. P. Bazant, M. F. Kaplan, Concrete at High Temperatures, Material Properties and Mathematical Models; pp.6-26, longman House, England, 1993
4. Eurocode 2, Design of Concrete structures, Structural fire design, 1994
5. A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, M. Criado, Micro structure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, Cement and Concrete Research 35 pp.1204~1209, 2005

논문접수일 (2012, 10, 31)  
 심사완료일 (1차 : 2012, 11, 15. 2차 : 해당없음)  
 게재확정일 (2012, 11, 20)