

## Examination on Application of High-Performance Concrete using Fine Fly Ash as Replacement Material of Silica Fume

Bum-Sik Lee, Sang-Kyu Kim<sup>†</sup>, Sang-Youn Kim, Sun-Mi Choi, and Gun-Su Lee  
Housing & Urban Research Institute, Korea National Housing Corp., Seongnam 463-704, Korea  
(Received August 18, 2007; Accepted September 12, 2007)

### 고성능콘크리트의 제조에 사용되는 실리카 흙의 대체재로써 고분말 플라이애시의 적용성 검토

이범식 · 김상규<sup>†</sup> · 김상연 · 최선미 · 이건수  
대한주택공사 주택도시연구원  
(2007년 8월 18일 접수; 2007년 9월 12일 승인)

#### ABSTRACT

This paper investigated how Fine Fly Ash (FFA) with 14,000 cm<sup>2</sup>/g of Fineness affects the micro structure and material properties of High-Performance Concrete (HPC) before and after hardening from Material Test of HPC and Cement Paste. FFA is applied as a substitute of Silica Fume which is used necessarily in producing HPC. As a Material Test results, 5% FFA series specimen shows the lower fluidity than SF series specimen. When, however, the Fluidity of 10% FFA series specimen is increased reversely to the similar value of SF series specimen. The Porosity of FFA series specimen of 3 day age is displayed to 21~24%, which is higher than 19~20% porosity of SF series specimen, while that of 28 day age is reached to 8~9%, which is improved compared with 10% fo SF series specimen. It can be thought that FFA has better influence on the porosity of HPC in case of long term age. The Compressive strength of FFA series specimen shows the similar result with the property of porosity. The compressive strength of 28 day age FFA series specimen is 98~106% of SF series specimen and 107% of plain specimen to reveal better strength development.

**Key words :** High-Performance Concrete, Fine Fly Ash, Silica Fume, Porosity

#### 1. 서 론

19세기 초 근대적 의미의 콘크리트가 개발된 이후 콘크리트는 대표적인 구조재료로서 구조물의 건립에 가장 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 기존 콘크리트의 단점을 보완하고 다양한 기능과 강도를 획기적으로 개선시킨 고성능콘크리트를 개발하여 초고층, 초대형구조물과 특수구조물의 건립에 활발히 적용되고 있다.

일반적으로 초고층구조물의 건립에 사용되고 있는 고성능콘크리트의 제조에는 높은 단위결합재량 뿐만 아니라 다양한 종류의 혼화재료가 사용되고 있으며 이중 콘크리트 강도와 유동성을 증진시키기 위하여 실리카 흙이 필수적으로 사용되고 있다. 그러나 실리카 흙은 일반적인 혼화재료와 비교하여 매우 고가의 혼화재료로써 고성능콘크리트를 적용한 구조물의 골조공사비 상승을 가져오게 될 것으로 예상되어, 보다 경제적인 고성능콘크리트를 개발하여 검증하고 있는 고성능콘크리트의 수요에 효과

적으로 대응하여야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 고성능콘크리트의 제조에 필수적으로 사용하고 있는 고가의 실리카 흙을 대체할 혼화재료, 화력발전소 부산물로 저렴하고 손쉽게 구할 수 있으며 산업부산물의 재활용으로 친환경적인 콘크리트의 제조가 기대되는 플라이애시를 분쇄 가공한 고분말 플라이애시(분말도 14,000 cm<sup>2</sup>/g)를 선정하였다. 그리고 고성능콘크리트의 제조 시 실리카 흙의 대체 재료로써 고분말 플라이애시의 활용에 필요한 기본자료를 제공하기 위하여 고분말 플라이애시를 포함한 3성분계 결합재료[시멘트, FA(일반, 고분말), BS]를 이용한 페이스트와 콘크리트를 제조하여 고분말 플라이애시가 고성능콘크리트의 미세구조와 경화전·후 물성에 미치는 영향을 평가하였다.

#### 2. 실험계획 및 방법

##### 2.1. 실험계획

고성능콘크리트의 제조 시 널리 이용되고 있는 실리카 흙의 대체재료로써 고분말 플라이애시의 적용성을 평가하기 위하여 고분말 플라이애시가 각 5%, 10% 대체된 시

<sup>†</sup>Corresponding author : Sang-Kyu Kim  
E-mail : skkim@jugong.co.kr  
Tel : +82-31-738-4688 Fax : +82-31-738-4612

**Table 1.** Design of Experiment

Factor	Levels*	Mix plan (wt %)						W/B(%)	Testing items
		OPC	BS	FA	SF	FFA			
Admixture	OPC-100	100	-	-	-	-	23.5	Concrete	Air contents
	Plain	60	25	15	-	-			Fluidity(Slump-flow)
	SF-5	55	25	15	5	-			Compressive strength
	SF-10	50	25	15	10	-		Cement paste	Hydration materials(XRD)
	FFA-5	55	25	15	-	5			Hydration degree(DT-TGA)
	FFA-10	50	25	15	-	10			Porosity structure(MIP)
								Micro structure(SEM)	
								Micro hydration heat(TCC)	

※ BS:blastfurnaceslag, FA:Flyash, SF:Silicafume, FFA:Fineflyash (blaine 14,000 cm<sup>2</sup>/g)

**Table 2.** The Chemical Component of Materials (wt %)

	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Ig.loss
OPC	3,344	21.6	5.2	3.6	62.78	2.7	2.4	-	0.8	-	0.90
BS	4,400	34.8	17.5	0.6	42.4	3.1	0.03	-	-	-	0.02
FA	3,400	59.5	25.4	5.8	3.7	0.7	-	0.4	1.1	1.6	1.60
SF	200,000	98.5	0.3	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	-	-	0.70
FFA	14,000	53.1	17.4	16.0	6.4	0.8	0.2	0.2	1.5	-	6.46

험체 계획을 수립하였으며, 비교대상으로 실리카 흙을 5%, 10% 대체한 시험체와 OPC만으로 제작된 시험체 및 3성 분계(OPC, BS, 일반 FA) 시험체 계획을 수립하여 각각의 경우에 대하여 페이스트와 콘크리트 시험체를 제작하여 시험을 수행하였다.

고분말 플라이애시가 고성능 콘크리트의 미세구조에 미치는 영향을 평가하기 위하여 페이스트 시험체를 제작하여 공극율과 수화열 등을 평가하였으며, 고성능콘크리트 시험체를 제작하여 플로우와 재령별 압축강도 등 경화 전후의 물성을 평가하였다.

본 논문에서 계획한 고성능콘크리트의 설계강도는 80 MPa(목표강도 96 MPa)이며, 세부 시험체 계획 및 측정 항목은 Table 1과 같다.

**2.2. 사용재료**

본 실험에 사용된 재료로써 시멘트 및 고로슬래그 미분말은 국내 S사, 플라이애시는 K사에서 시판되고 있는 것을 사용하였다. 실리카 흙은 국내에서 널리 사용되고

수급이 용이한 캐나다 산을 이용하였으며, 실리카 흙의 대체재로 사용한 고분말 플라이애시는 분말도 14,000 (Blaine, cm<sup>2</sup>/g)의 고미분말 재료로 국내 W사에서 분쇄에 의해 제조된 것을 사용하였다. 이는 미연탄소 함량이 많고 입형이 불량하여 걸러져 매립되는 플라이애시 입자들을 분쇄에 의해 미분말화 한 것이다.

각 혼화재료의 화학성분은 Table 2와 같다.

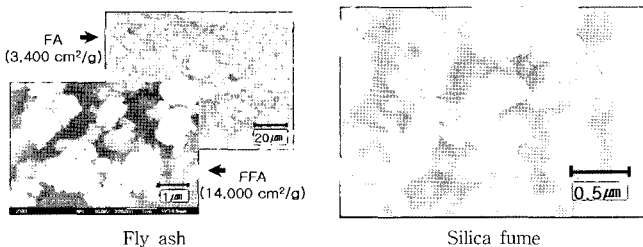
Fig. 1은 SEM을 이용하여 실리카 흙, 플라이애시, 고분말 플라이애시의 입형을 비교한 것으로, 고분말 플라이애시는 실리카 흙의 초미립의 구형입자와 비교하여 다소 거칠지만, 기존의 OPC나 고로슬래그 미분말의 입형과 비교할 시 모서리가 모나지 않고 둥글며, 분쇄되지 않은 플라이애시 고유의 둥근 입형이 일부 남아있어 유동성 개선에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

시험체의 제작에 사용된 잔골재는 세척사를 사용하였으며, 굵은 골재는 19 mm이하의 부순골재를 사용하였다. 고성능 감수제 및 AE제는 국내 W사에서 고강도용으로 제조한 제품을 사용하였다.

**2.3. 시험체 제작 및 측정**

**2.3.1. 시험체 제작**

실리카 흙의 대체재료로써 고분말 플라이애시의 적용성을 평가하기 위하여 고성능 콘크리트의 경화 전후에 대한 물성평가와 시멘트 페이스트에 대한 물성평가가 이루어져야 한다. 이를 위하여 Table 1의 시험체 계획에 의하여 실험변수별, 재령별 콘크리트 공시체를 제작하였다. 그리고 본 논문의 주된 변수인 고미분말 플라이애시와 실



**Fig. 1.** SEM of raw materials.

리카 흙이 고성능콘크리트의 수화작용 시 미치는 영향을 평가하기 위해 필요한 수화특성과 미세구조 등을 분석하기 위하여 시멘트 페이스트 시험체를 제작하였다.

각 시험체는 측정 재령일까지 수중양생 후 측정항목에 따라 분쇄, 절단 등으로 용도에 맞는 시험체를 제작하여 실험 목적에 부합하게 측정하였다.

2.3.2. 측정

1) 굳지 않은 콘크리트 물성

각종 혼화재료와 그 혼입을 등에 따른 기본물성을 평가하고, 고분말 플라이애시가 포함하고 있는 미연탄소에 의한 혼화제 흡착을 비교검토하기 위하여 유동성 실험을 수행하였다. 유동성 실험 시 배합 직후의 슬럼프 플로우와 현장적용 등을 고려하여 배합 1시간 후의 경시변화를 측정하였다.

2) 압축강도

고성능콘크리트의 재령별 압축강도 측정은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도」에 준하여 수행하였다.

3) 수화열

일반적으로 수화열에 의한 온도상승은 강도발현 등을 비롯한 콘크리트의 제반 성질에 영향을 미치며, 균열의 주된 원인 중 하나이므로 고분말 플라이애시와 실리카 흙이 고성능콘크리트의 온도상승에 미치는 영향을 비교분석하기 위하여 미소수화열량을 측정하였다. 미소수화발열량을 검토하기 위해 물결합재비 50%로 Conduction calorimeter에서 7일 동안 결함재 설계 조건에 따른 수화발열량을 측정하였다.

4) 수화생성물

결합재 종류에 따라 각 재령별 나타나는 수화발현의 정도와 수화생성물과 결정구조 등을 비교 관찰하기 위하여 XRD를 분석범위 5~65°로 측정하였고, 수화에 따른 Ca(OH)<sub>2</sub> (이하 'CH'라 함) 및 C-S-H 등의 수화물 생성량의 비교를 위하여 DT-TGA로 10°C/min으로 25~1000°C까지 측정하였으며, 수화생성물을 관찰하기 위하여 SEM 촬영을 수

행하였다.

5) 세공구조

실리카 흙을 사용한 고강도콘크리트의 경우 고분말에 의한 수화촉진과 포졸란 반응에 의한 미세공극의 충전으로 공극율의 감소가 예상되므로, 실리카 흙의 대체재로써 고분말 플라이애시를 사용했을 경우 결합재에 따른 세공구조를 비교관찰하기 위하여 시멘트페이스트 공시체를 1×1×1 cm의 크기로 절단하여 수화정지 후에 수은압입법 (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)을 이용하여 측정하였다. 실험조건은 10~60,000 psi의 압력으로 3.2 nm 부터 350 μm사이의 공극량 및 공극의 크기별 분포를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 콘크리트의 굳지 않은 특성

플라이애시를 대체 결합재로 사용할 경우 미연탄소량에 의한 응결지연 및 혼화제 흡착 등의 사유로 인하여 그 사용량에 제한을 받는다. 따라서 고분말 플라이애시의 사용이 콘크리트의 유동성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 배합 직후와 1시간 후의 경시변화 등을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 실리카 흙을 사용한 시험체와 비교하여 고분말 플라이애시를 사용한 시험체의 경우 슬럼프 플로우가 다소 감소하고, 슬럼프 플로우가 50 cm에 도달하는 시간이 다소 증가하는 것을 볼 수 있으나, 슬럼프 플로우가 모두 55±5 cm의 범위로 차이가 크지 않고 고분말 플라이애시를 10% 사용한 경우 유동성은 오히려 개선되는 것으로 나타났다. 이는 고분말 플라이애시를 사용할 경우 슬럼프를 상당히 증가시키고 슬럼프 로스를 감소시킨다는 보고가 있는데<sup>1)</sup> 이러한 효과가 미연탄소에 의한 유동성 감소와 절충되어 유동성 측면에서 고분말 플라이애시를 실리카 흙의 대체재로써 사용이 가능한 것으로 사료된다.

3.2. 시멘트 페이스트의 수화특성

3.2.1. 수화발열특성 검토

혼화재 종류에 따른 배합 후 7일간의 미소수화열 총량과 시간에 따른 수화 발열 변화는 각각 Table 3과 Fig. 3에 나타내었다.

재령 7일까지의 미소수화열 총량은 OPC 배합이 가장 높게 나타나고 있으며, 미소수화발열총량은 Plain>SF-5>FFA-10>FFA-5>SF-10의 순으로 높게 나타나고 있다. 미소수화발열총량의 경우와 다르게 실리카 흙을 사용한 경우 실리카 흙에 의한 초기 발열촉진효과가 있지만 혼합량에 따른 수화발열 곡선의 구분이 힘들고, 실리카 흙을 사용한 경우보다 고분말 플라이애시를 10% 사용한 경우

Fluidity of fresh concrete according to binder types

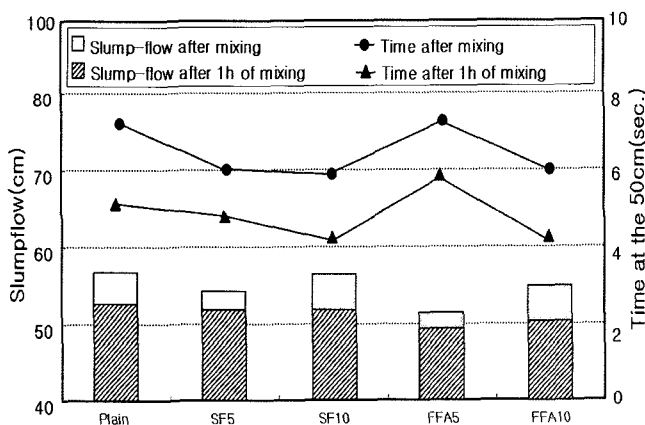
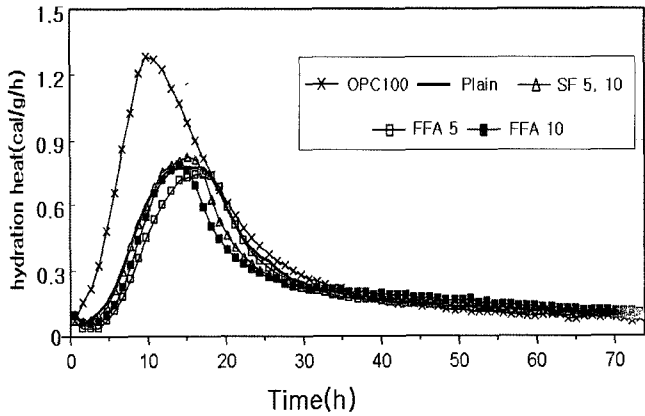


Fig. 2. Fluidity of fresh concrete.

**Table 3.** Total Hydration Heat for 7 Day

Specimen	OPC	Plain	SF5	SF10	FFA5	FFA10
Hydration heat (J/g)	311	257	240	214	221	236



**Fig. 3.** Hydration heat according to time.

의 최대발열피크가 다소 빠른 것으로 나타났다.

일반적으로 평균입경이 작은, 즉 유리질의 양이 많은 것이 초기수화반응을 지연시키지만,<sup>2,3)</sup> Y. Halse<sup>4)</sup> 등의 연구결과에 따르면 플라이애시의 입경이 작을수록 1차 최대발열피크에 도달하는 시간은 지연되지만 최고 온도에 도달하는 시간은 빠르다는 연구결과와 같이, 본 실험에서 고분말 플라이애시의 사용량이 10%를 사용한 경우는 이러한 경향에 의한 것이라 사료된다.

3.2.2. 수화생성물

재령 3, 28일 시 결합재에 따른 XRD 분석결과는 Fig. 4에 나타나고 있다. 10° 전후의 에트링 가이트 및 모노설페이트의 피크는 비정질이 많기 때문에 측정결과로 구분하기가 어려웠다.

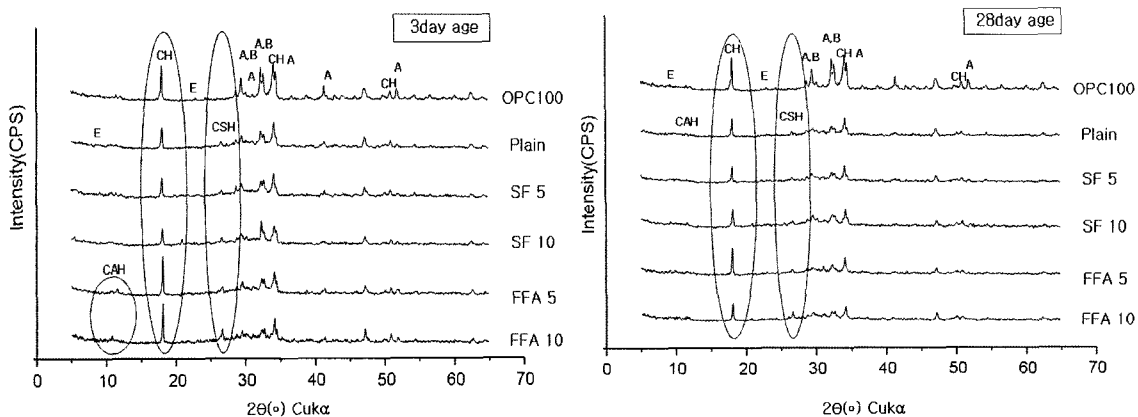
재령 3일에 OPC100의 시험체에 비하여 실리카 흙을 사

용한 경우 CH생성량이 뚜렷이 감소한 것을 볼 수 있으나 고분말 플라이애시를 사용한 경우는 CH생성량이 감소하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 재령 28일의 경우 고분말 플라이애시를 사용한 경우 CH량이 감소한 것을 볼 때 실리카 흙은 초기 재령에 영향을 미치는 반면, 고분말 플라이애시는 재령 3일 이후 반응에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이러한 경향은 재령 1일과 재령 3일에 각각 측정된 SEM 사진에서도 볼 수 있다. Fig. 5와 같이 재령 1일 시의 시험체를 SEM을 이용하여 미세구조를 관찰한 결과, 일반적인 시멘트의 경우 초기재령에 에트링가이트가 큰 침상 결정으로 존재하지만, 본 시험체는 고강도로써 공극 중에 에트링가이트가 성장하여 조직을 치밀하게 만들었다. OPC를 사용한 경우 뚜렷한 에트링가이트와 C-S-H 상이 발견되었고, 실리카흙을 사용한 경우도 약간의 C-S-H가 발견되었으나 고분말 플라이애시를 사용한 경우는 수화생성물은 적고 미수화된 입자들이 보이는 것을 알 수 있다. 이는 고분말 플라이애시의 사용에 따른 응결지연에 의한 현상으로 사료된다.

그러나 재령 3일 시 고분말 플라이애시를 사용한 경우 재령 1일에는 거의 생성되지 않았던 CH 및 C-S-H상이 다수 확인되었다. 이러한 결과로 미루어 고분말 플라이애시를 사용할 경우 재령 1일까지의 응결지연을 발생시키지만 이후 3일까지의 재령에서는 고분말도에 의한 반응으로 인하여 1일 이후의 C-S-H의 발생에는 효과적인 것으로 나타났다.

또한 재령 28일 시 고분말 플라이애시 10%를 사용한 경우 OPC 100%의 시험체에 비하여 현저한 C-S-H량의 차이를 알 수 있고, XRD 상에서 11° 전후에서 확인할 수 있는데 이는 고분말 플라이애시의 활발한 포졸란 반응성에 의하여 유리질 성분에서 용출한 SiO<sub>2</sub> 성분 등이 CH와 반응하여 생성된 C-S-H 때문인 것이라 사료된다.



A:alite, B:belite, CH:Ca(OH)<sub>2</sub>, E:ettringite

**Fig. 4.** XRD patterns according to the age.

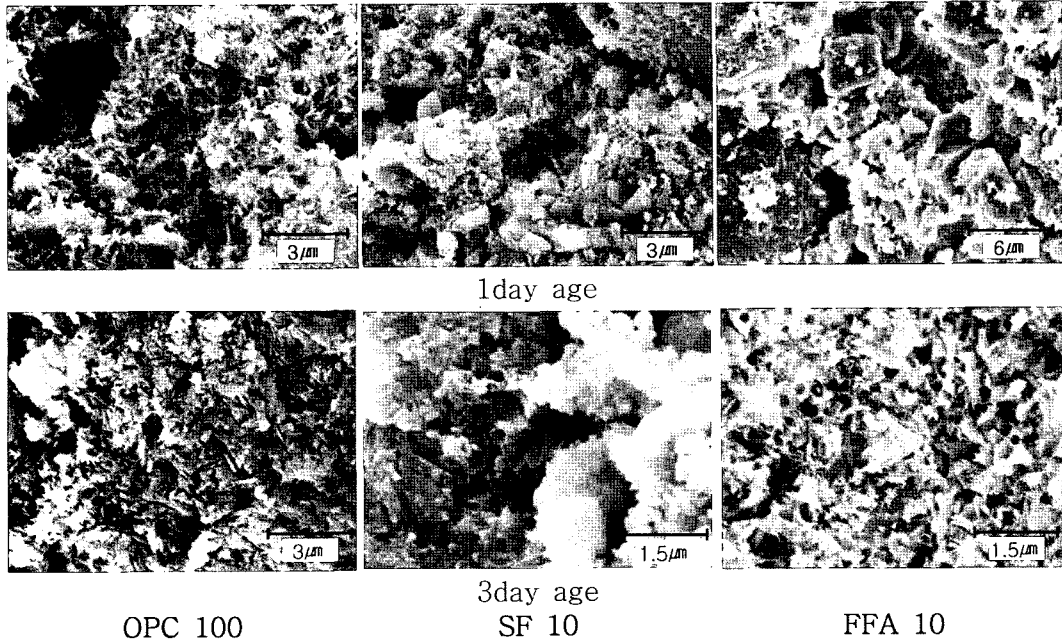


Fig. 5. SEM images according to the age.

Fig. 6은 재령 28일에 결합재에 따른 DT-TGA 측정결과를 그래프로 나타낸 것이고, Table 4는 TGA측정에 의한 온도에 따른 질량 감량율을 나타낸 것이다. 일반적으로 알려진 수화물들의 온도에 의한 변화는 C-S-H계 수화물은 100~130°C에서 탈수, 에트링가이트는 100°C 이하 및 100°C, 160~180°C에서 최대피크를 보이며, 250~270°C에서 작은 피크를 보이며 단계적으로 탈수한다. 또한 모노설페이트는 50~150°C 및 200~300°C에서 세단계로 탈수하고, CH는 400~500°C에서 물과 CaO로 분해된다고 보고되고 있다.<sup>5)</sup>

Fig. 6에 의하면 100°C 전후와 170°C 근처의 피크는 에트링가이트와 모노설페이트의 탈수에 의한 것이라 사료되며 이 피크는 고분말 플라이애시를 사용한 경우 가장

크게 나타나고 있고, 이를 통해 고분말 플라이애시는 초기의 모노설페이트 및 CAH상 생성에 영향을 미친다고 사료된다.

또한 450°C 전후에서의 흡열 피크는 CH의 피크로 재령 28일에 OPC가 가장 크고, Plain, 실리카흙, 고분말 플라이애시 순으로 나타났다. 이러한 경향은 TGA곡선을 보아도 동일하게 나타나며, 감량을 정량화 해본 결과 OPC > Plain > SF-5 > FFA-10 > FFA-5 > SF10의 순으로 나타났다. OPC만을 사용한 경우는 재령 28일에 최종 CH생성량이 14.9%로 나타났고, 실리카흙 10%의 경우 5.5%, 고분말

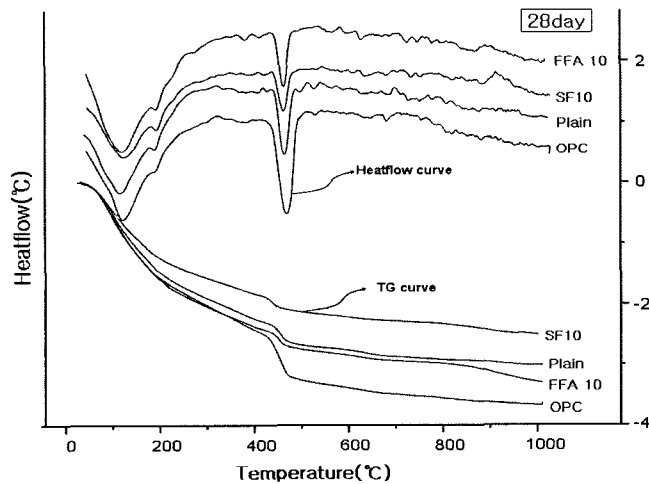


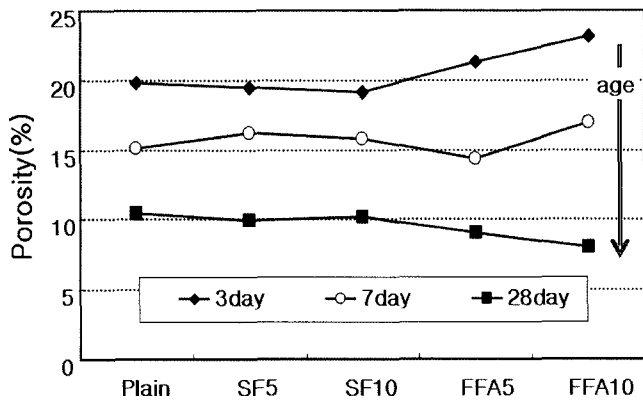
Fig. 6. DT-TGA curve at the 28day curing.

Table 4. Results of Gravimetric Thermal Analysis of Cement Pastes after 3, 28 Days Curing

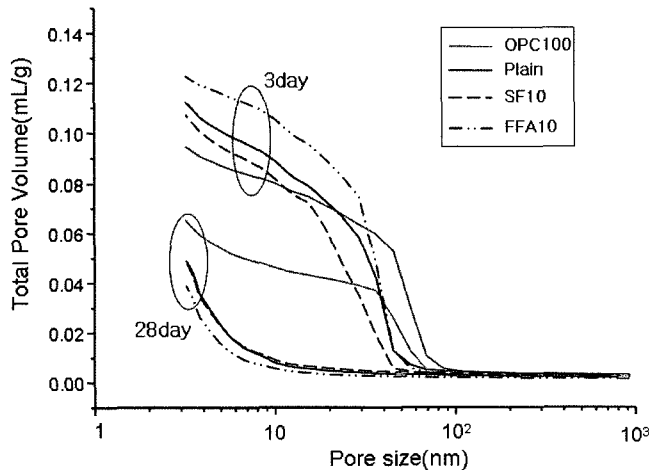
Composition of blend		Weight loss (%)				
(wt %)	age (day)	100-420°C	400-480°C	480-1000°C	Ca(OH) <sub>2</sub> wt (%)	
OPC	3	5.6	2.6	1.7	10.5	
	28	8.4	3.6	2.1	14.9	
Plain	3	5.9	1.9	2.8	7.9	
	28	8.4	2.0	1.8	8.3	
SF	5	3	5.8	1.6	1.7	6.5
		28	10.6	2.2	2.0	9.2
	10	3	5.8	1.4	2.2	5.6
		28	6.6	1.3	2.0	5.5
FFA	5	3	5.8	1.7	3.2	7.0
		28	8.0	1.7	1.8	6.9
	10	3	5.5	1.6	3.1	6.7
		28	8.9	1.8	3.0	7.2

**Table 5.** Results of Porosimetry of Cement Pastes after 3, 28 Days Curing

Composition of blend		Porosity (%)	Total pore vol (mL/g)	Median pore Diameter (nm)
(wt %)	age (day)			
Plain	3	19.8	0.0983	39.8
	28	10.4	0.0494	4.5
SF	5	19.5	0.1011	28.3
	28	9.9	0.0488	4.4
	10	19.2	0.1072	19.3
	28	10.2	0.0500	4.5
FFA	5	21.3	0.1115	29.1
	28	9.0	0.0433	4.4
	10	23.1	0.1227	29.5
	28	8.1	0.0391	4.2

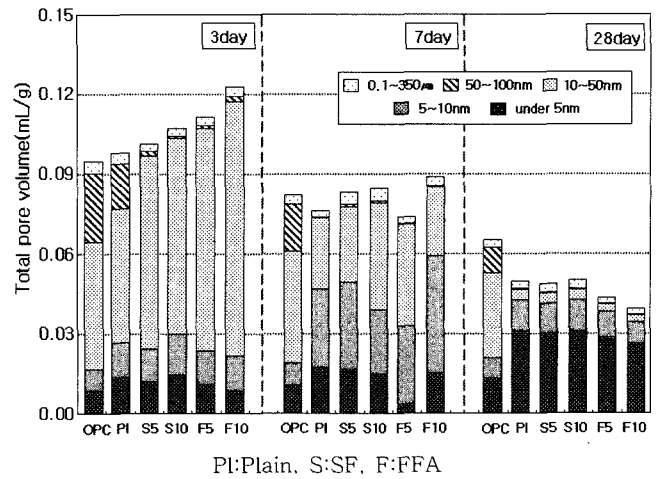


**Fig. 7.** Porosity of cement paste according to the age.



**Fig. 8.** The distribution curve of pore size.

플라이애시 10%의 경우 7.2%로 나타났다. 이러한 결과는 OPC만을 사용한 경우보다 혼화재를 사용한 경우가 시멘트의 상대적인 감소에 의한 감량 원인과 포졸란 반응에



**Fig. 9.** Pore size distribution of cement paste.

의한 감량의 이유로 해석되어 진다.

**3.3. 세공구조 및 압축강도**

Table 5는 porosimeter로 측정된 결합재 종류에 따른 공극률, 공극량, 평균 공극직경에 대한 값을 나타낸 것이고, Figs. 7~9는 Table 5에 나타난 값을 그래프화하여 나타낸 것이다.

콘크리트의 공극구조를 나타내는 것으로는 공극률 및 전체 세공량, 세공경분포를 들 수 있으며, Fig. 7에서 공극률을 살펴보면 초기재령에는 Plain 배합과 실리카 흙을 사용한 배합이 유사한 공극률을 나타내며, 고분말 플라이애시를 혼합한 경우가 가장 높은 공극률을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 고분말 플라이애시의 초기 응결 지연 효과에 의한 것으로 사료된다. 그러나 장기재령으로 갈수록 고분말 플라이애시의 첨가량에 따라 공극률 및 총 공극량이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 이전의 SEM 결과에서도 볼 수 있었던 고분말 플라이애시의 3일 이후의 반응 효과에 의한 것이라 사료된다.

Fig. 8은 세공경의 누적분포를 나타낸 것으로 초기 3일 재령에서는 OPC 100%의 시험체가 가장 낮은 값을 나타내는 것을 볼 수 있으나, 28일 재령으로 갈수록 공극의 크기는 감소하고 고분말 플라이애시를 사용한 시험체가 공극량이 가장 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서도 이러한 경향을 볼 수 있는데 초기재령에서는 10~50nm의 공극이 많이 분포되어있지만, 28일 재령에서는 5nm 이하의 공극이 많아져 공극크기가 작은 쪽으로 전이되는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 OPC를 사용한 경우보다 포졸란 혼화재를 많이 혼합한 경우에서 뚜렷이 볼 수 있다. 이는 포졸란 재료들 중의 가용성 SiO<sub>2</sub>가 시멘트 수화시 생성되는 CH와 상온에서 서서히 화학하여 불용성의 안정된 규산칼슘(CaO·SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O)를 생성시켜 경화체의 수밀성이 향상시키고, 장기적으로 안정적인 강도를 확보

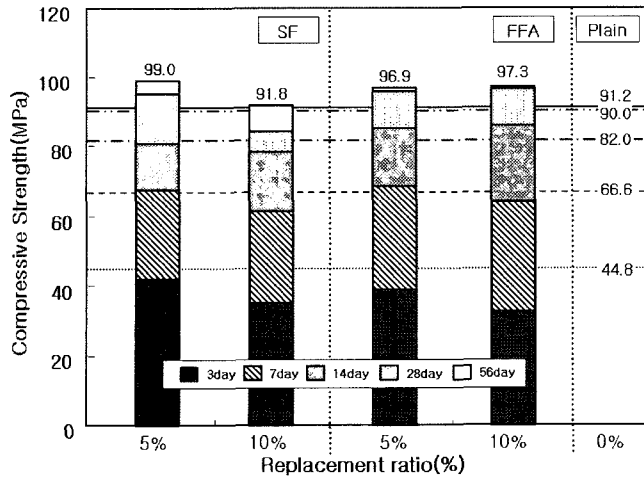


Fig. 10. Compressive strength of concrete.

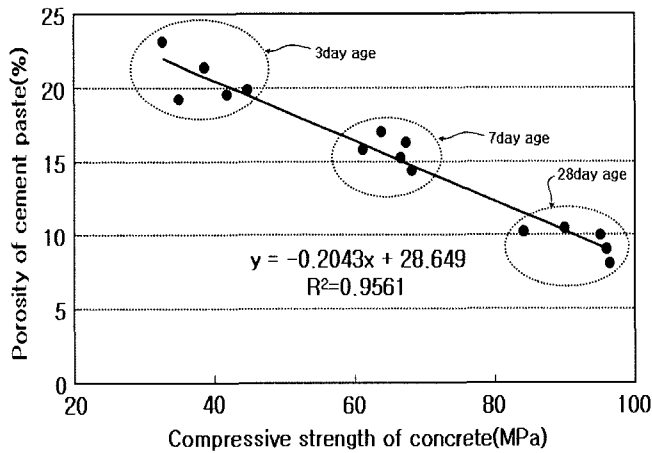


Fig. 11. Relationship of compressive strength with porosity.

하는데 효과를 나타낸다. 또한 OPC만을 사용한 경우를 제외한 모든 시험체는 큰 공극량은 적고 10 nm이하의 미세공극량이 대부분을 차지하여 강도증진에 크게 기여할 것이라 예상된다.

Fig. 10은 각 결합체들의 재령별 압축강도를 Plain 배합의 강도값과 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 재령에는 실리카 흙 및 고분말 플라이애시를 사용한 경우 첨가량에 따라서 강도값은 감소하고 있으나 재령 7일 경우 5%의 첨가시 Plain 배합과 동일한 값을 나타내며, 장기재령으로 갈수록 Plain 배합의 강도값을 상회하며, 재령이 증가할수록 그 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

모든 시험체의 경우 재령 28일에 목표강도인 80 MPa를 만족하며 실리카흙을 사용한 경우는 5%, 고분말 플라이애시를 사용한 경우는 첨가량이 클수록 강도는 100 MPa에 근접해지는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 이러한 포졸란 재료 첨가에 의한 공극률 변화가 압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공극률 및 압축강도의 관계 그래프를 표현한 것이다. 그림에서

볼 수 있듯이 공극률과 압축강도는 밀접한 관계를 가지고 있으며, 공극률이 감소할수록 압축강도는 거의 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 포졸란 재료의 첨가에 따른 이상의 개선효과는 포졸란 반응에 의한 CH의 비결정질 칼슘실리케이트 수화물로의 변화에 의한 것으로 모세관 공극의 감소, 전체 세공 용적의 감소 등에 기인된 결과로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 분쇄 제조된 고분말 플라이애시를 실리카 흙의 대체재로써 고강도 콘크리트에 적용하기 위한 기본자료를 도출하기 위하여 수행된 연구로써 실험을 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 고분말 플라이애시를 사용한 경우 고성능감수제 흡착으로 인한 약간의 유동성을 저하가 발생하였으나, 고분말 플라이애시의 첨가량이 증가할수록 유동성능은 증가하는 것으로 나타났다.
2. XRD 및 SEM 결과를 통한 수화생성물의 관찰결과, 고분말 플라이애시의 사용이 초기재령에는 지연을 초래하나 3일 이후 반응에는 실리카흙과 유사한 결과를 나타내었다.
3. 공극율의 경우, OPC만을 사용한 시험체에 비하여 혼화제를 사용한 경우가 적게 나타났다. 실리카 흙을 사용한 경우에 비하여 고분말 플라이애시를 사용한 경우 더욱 낮은 세공량을 나타내었다. 또한 혼화제를 사용한 경우 장기재령으로 갈수록 작은 공극으로의 전이가 확연히 나타났다. 이러한 경향은 압축강도와 직선적인 영향을 가지고 있으며, 고분말 플라이애시를 사용한 경우가 세공량에 영향을 받아 가장 높은 강도를 발현하는 것으로 나타났다.
4. 실리카 흙을 5% 이상 사용할 경우 강도 및 수화특성에 악영향을 미치는 것으로 나타났으나, 고분말 플라이애시는 10%를 사용한 경우 5%를 사용한 경우보다 높은 강도특성을 나타내어 실리카 흙을 대체하여도 고성능콘크리트의 강도발현 측면에서는 적용이 가능할 것이라 사료된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 건설교통부 05건설핵심기술연구개발사업(과제번호:05건설핵심 D11)의 지원 하에 수행된 ‘고강도 콘크리트를 이용한 초고층 공동주택 적용방안’ 연구의 일부로써 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

1. K. Ogawa, Uchikawa, and K. Takemoto, “The Mechanism

- of the Hydration in the System  $C_3S$ -Pozzolania,” *Cement and Concrete Reserch*, **10** [5] 683-96 (1980).
2. D. Kuni and O. Levenspi, “Fludization Engineering, Butterworth Heineman Series in Chemical Engineering,” pp. 6 , Academic Press, 1944.
  3. Wei Fajun, Michael W. Grutzeck, and Della M. Roy, “The Retarding Effects of Fly Ash upon the Hydration of Cement Pastes,” The first 24 hours, *Cem. Concre. Res.*, **15** [1] 174-84 (1985).
  4. Y. Halse, P. L. Pratt, J. A. Dalziel, and W. A. Gutteridge, “Development of Microstructure and other Properties in Fly Ash OPC Systems,” *Cem. Concr. Res.*, **14** [4] 491-98 (1984).
  5. H. Song, K.-J. Mun, and Y.-S. Soh, “Mechanical Properties and Pore Structure of Cement Matrix at High Temperature(in korean),” *J. of Proceeding of Architectural Institute of Korea*, **20** [1] 107-14 (2004).