

# 실리카 흙과 플라이 애쉬를 이용한 고강도 모르타르에 관한 연구

A Study on the high Strength Mortar using Silica Fume and Fly Ash

김영수\*  
Kim, Young Soo

한기성\*\*  
Han, Ki Sung

## ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the effect of substitution of silica fume and fly ash to the mortar mixed with 1:1 of cement/sand ratio on the physical properties.

The changes of physical properties were observed through compressive strength, XRD, SEM, and porosity.

As result, the compressive strength was excellent when silica fume was replaced with cement in the range of 10%. But the substitution of fly ash was not affect with improvement of compressive strength.

Especially, the compressive strength showed the maximum value with 1047kg/cm<sup>2</sup> for the substitution of silica fume and fly ash of 10% and 5%, respectively.

## 1. 서론

산업이 고도로 발달함에 따라 건축구조물에 있어서 고강도화 문제는 많은 필요성을 가지고 제기되고 있는 실정이다. 이에 부응하는 콘크리트의 고강도화에 관한 연구<sup>1,2)</sup>가 국내에서도 많이 이루어지고 있으며 특히 산업부 산물로서 발생하는 실리카 흙과 플라이 애쉬를 이용한 연구가 많이 발표되고 있다. 플라이 애쉬는 시멘트 입자와 비슷한 크기의 구형 입자로서 비정질의 SiO<sub>2</sub> 함량이 약 60wt.% 정도이고 일반적으로 실리카 흙에 비하여 반응성이 느리다고 알려져 있다. 한편 실리카 흙은 평균입경이 0.1 $\mu$ m 정도로 상당히 작고 비정질의 SiO<sub>2</sub> 함량이 90wt.% 이상을 차지하여 시멘트 수화에 의해서 생성되는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 포졸란 반응을 일으켜 시멘트 경화체의 내부 조직을 치밀하게 하기 때문에 경화체의 내구성을 개선하고 강도를 증진시킨다.

본 연구는 이러한 혼합재를 적절히 배합하고 낮은 물비를 이루어 혼합재 치환량이 강도 특성에 미치는 영향을 검토하고 나아가 특수 목적에 사용하기 위한 GROUT 제품화의 일환으로 실용성에 바탕을 둔 고강도 모르타르 제조를 위한 기초적 연구이다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 결합재

본 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용했으며 실리카 흙은 수입품 Micro Silica를 사용했고 플라이 애쉬는 P화력 발전소산 플라이 애쉬를 사용하였다. 이에 관한 화학적 성분과 물리적 성질은 <표 1>과 같다.

#### 2.1.2 모래

모래는 최대치수가 4mm 이하인 강원도 춘성군산 실리카질 모래를 사용했으며 그 물리적 실험결과는 <표 2>와 같다.

\* 정회원, (유) 대주상사

\*\* 정회원, 인하대학교 무기재료공학과 교수

<표 1> 시멘트와 실리카 폼, 플라이 애쉬의 화학적 성분과 물리적 성질

구 분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	lg. loss	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	비 중
시멘트	21.02	5.02	3.48	62.67	2.12	1.54	3200	3.15
실리카 폼	93.48	0.01	2.89	0.51	1.08	2.15	180200	2.2
플라이 애쉬	57.96	23.39	6.85	2.92	0.40	4.00	4430	2.1

<표 2> 모래의 물리적 성질

비중	단위 용적 중량	공극율 (%)	심적율 (%)	흡수율 (%)	조립율
2.65	1629	38.4	61.6	1.46	3.2

2.1.3 혼화제

본 실험에 사용한 대주 SELFLOW H-2023은 고유동화제이며 이에 대한 주성분 및 물리적 성질은 <표 3>과 같다.

<표 3> 혼화제의 주성분 및 물리적 성질

제품명	주성분	비중	pH
대주 SELFLOW H-2023	나프탈렌계 복합물	1.18 ±0.02	8-10

2.2 실험방법

시멘트와 모래는 1:1의 비율로 배합하여 시멘트량에 대하여 실리카 폼과 플라이 애쉬를 각각 일정량 치환 첨가하였으며 이때 물량을 일정하게 하고 유동화제의 사용량을 변화시켜 flow를 17±1cm로 유지시켰다. 모르타르 혼합기(140rpm)를 사용하여 혼련하였으며 KS L 5105, KS L 5109, KS L 5111의 규정에 따라 flow값을 측정하고 2in x 2in x 2in 압축강도 측정용 시편을 제작하였다.

Plain시편은 각 물량에서 혼합재를 치환 첨가하지 않은 상태이고, SF5, SF10, SF15는 시멘트에 대하여 실리카 폼을 각각 5, 10, 15wt.% 치환 첨가하였으며, FA5, FA10은 플라이 애쉬를 각각 5, 10wt.%치환 첨가하였다. S10F5와 S15F10은 실리카 폼과 플라이 애쉬를 각각 10, 5wt.% 15, 10wt.% 시멘트량에 대하여 치환 첨가했다. 물 결합재비 ( W/C+AD :

시멘트에 혼합재를 포함시킨 비율)를 기준으로 3개의 serie로 하였다. 이에 관한 모르타르 배합표를 <표 4>에 나타내었다.

<표-4> 모르타르 배합표

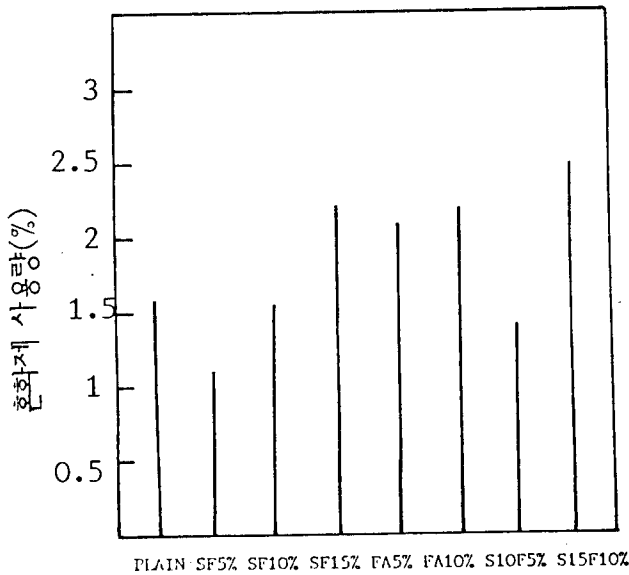
공시체 명	물결 합재 비(W/ C+AD)	혼화제 첨가율 (%)	모 래	시멘 트	실리카 폼	플라이 애쉬		
PLAIN	0.18	3.2	50	50	-	-		
SF5		1.4		45	5	-		
SF10		2.1		40	10	-		
SF15		3		35	15	-		
FA5		3.2		45	-	5		
FA10		3.2		40	-	10		
S10F5		2.1		35	10	5		
S15F10		3.5		25	15	10		
PLAIN		0.20		1.7	50	50	-	-
SF5				1.1		45	5	-
SF10	1.6		40	10		-		
SF15	2.2		35	15		-		
FA5	2.1		45	-		5		
FA10	2.2		40	-		10		
S10F5	1.4		35	10		5		
S15F10	2.5		25	15		10		
PLAIN	0.22		0.9	50		50	-	-
SF5			0.9			45	5	-
SF10		1.3	40		10	-		
SF15		1.8	35		15	-		
FA5		1.0	45		-	5		
FA10		1.2	40		-	10		
S10F5		1.1	35		10	5		
S15F10		2.0	25		15	10		

이렇게 제작한 시편을 이용하여 압축강도, 유동화제 첨가량의 변화, 수은압입법에 의한 기공율측정, X-ray 회절분석 및 주사전자 현미경 관찰등을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 혼합재 첨가에 따른 혼화제 사용량의 변화

(그림1)은 W/C+AD=0.2일때 각 혼합재 첨가에 따른 혼화제 사용량의 변화를 나타낸 것으로 실리카 흙 5wt.% 치환 첨가했을때 Plain보다 오히려 flow가 좋았으며 10wt.% 이상 첨가시부터 혼화제의 사용량이 plain보다 증가하고 있다. 이것은 실리카 흙을 적정량 첨가시에는 물·시멘트비의 영향을 받지 않으나 8wt.%이상 첨가시부터 물·시멘트비의 영향을 받는다는 연구<sup>3)</sup>와 거의 일치하고 있으며 10wt.%이상 첨가시에는 실리카 흙의 비표면적이 매우 크기 때문에 단위 수량과의 접촉 면적의 증가와 시멘트 수화 생성물인 Ca(OH)<sub>2</sub>와

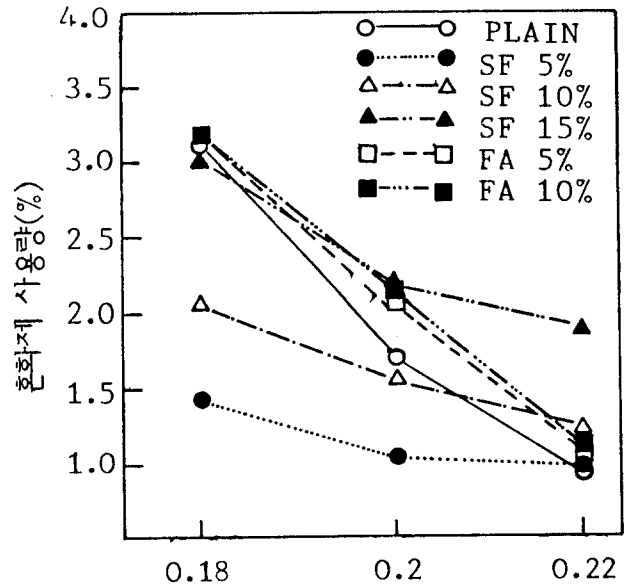


(그림 1) W/C+AD=0.2일때 혼합재 사용량 변화에 따른 혼화제 사용량의 변화

의 반응으로 C-S-H 겔을 생성하기 때문인 것으로 판단된다.<sup>4,5)</sup>

플라이 애쉬를 각각 5, 10wt.% 치환 첨가한 것은 플라이 애쉬의 구형입자에 의한 영향으로 flow가 상승되리라 생각했으나 결과는 plain에 비해 더 많은 혼화제를 필요로 하였다. 이것은 플라이 애쉬의 종류에 따른 불균일성<sup>6)</sup>과 플라이 애쉬가 구형임에도 불구하고 입자 표면의 거칠은 정도 때문으로 생각된다.

(그림 2)는 물·결합재 비와 혼합재의 종류 및 치환 첨가율이 다른 경우의 일정 flow를 얻기 위한 혼화제 사용량을 나타낸 것이다. 물·결합재비가 높아질수록 혼화제 사용량이 줄었으며 혼합재를 첨가하지 않은 것과 플라이 애쉬를 치환 첨가한 것의 그래프의 기울기가 가장 심하고 실리카 흙 5wt.%치환 첨가한 것은 큰 차이가 없었다.



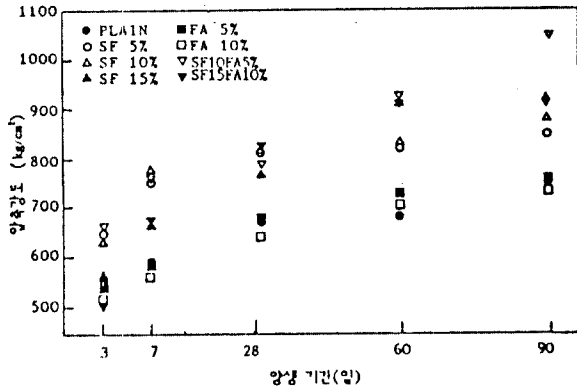
(그림 2) 물 결합재 비와 혼화제 사용량의 관계

#### 3.2 압축강도

(그림 3)은 물·결합재비(W/C+AD)가 18%일때 혼합재 혼입율과 압축강도와의 관계를 각 재령별로 나타낸 것이다.

실리카 흙을 치환 첨가한 시편은 실리카 흙의 첨가율에 관계없이 plain시편보다 압축강도가 높게 나타났으며 실리카 흙 15wt.%치환

첨가한 시편이 가장 압축강도가 높았다. 플라이 애쉬를 치환 첨가한 시편은 플라이 애쉬 치환량에 관계없이 plain에 비해 별다른 강도 상승이 없었으며 실리카 흙과 플라이 애쉬를 함께 치환 첨가한 시편은 실리카 흙 10wt.%, 플라이 애쉬 5wt.% 치환 첨가한 것이 가장 압축강도가 높았다.



(그림 3) 혼합재를 첨가한 시편의 압축강도 결과 (W/C+AD = 0.18)

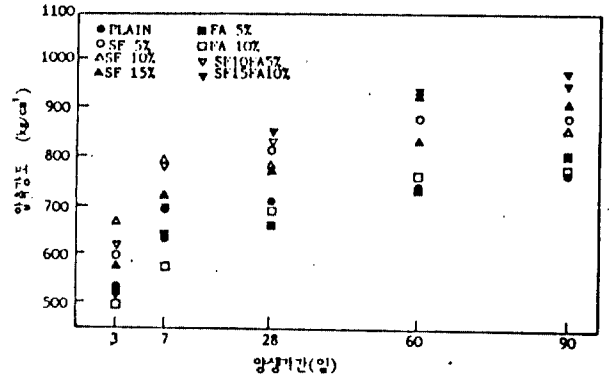
(그림 4)는 물 결합재비가 20%일때 혼합제 혼입율과 압축강도와의 관계를 각 재령별로 나타낸 것이다. (그림 3)과 마찬가지로 실리카 흙을 치환 첨가한 시편의 압축강도가 plain시편보다 높게 나타나고 플라이 애쉬를 치환 첨가한 시편의 압축강도는 plain시편에 비해 큰 증가가 없었다. 실리카 흙 10wt.% 플라이 애쉬 5wt.% 치환 첨가한 시편은 초기와 후기재령에 있어서 압축강도가 높게 나타났으며 특히 양생기간이 길어질수록 압축강도 증가폭이 커졌다.

(그림 5)는 물 결합재비 22%일때 혼합제 혼입율과 압축강도와의 관계를 각 재령별로 나타내었다.

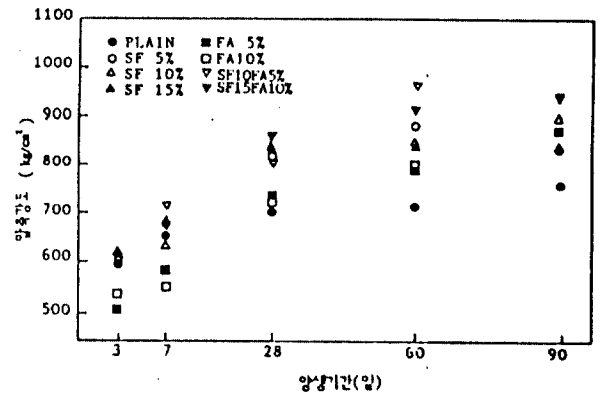
플라이 애쉬를 치환 첨가한 시편은 재령 3, 7일에 있어서 plain시편보다 압축강도가 낮게 나타났으며 재령 28일 이후 부터 plain시편보다 압축강도가 상승되었다.

### 3.3 기공을 측정

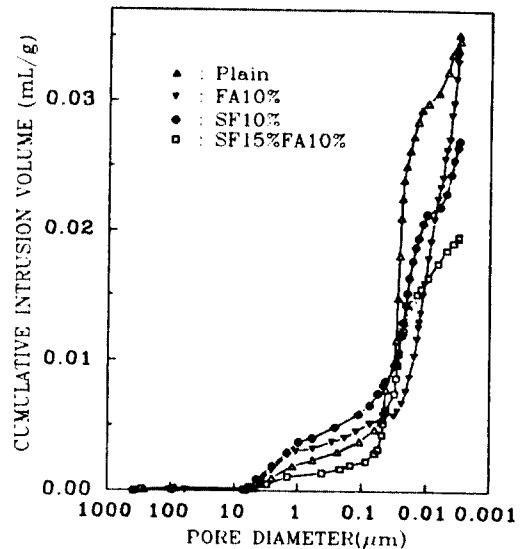
(그림 6)은 재령28일인 각 혼합재 치환 첨가한 시편의 기공을 측정값을 나타낸 것이다.



(그림 4) 혼합재를 첨가한 시편의 압축강도 결과 (W/C+AD = 0.20)



(그림 5) 혼합재를 첨가한 시편의 압축강도 결과 (W/C+AD = 0.22)



(그림 6) 혼합재를 첨가한 시편의 기공 크기 분포

각 혼합재를 치환 첨가할수록 총기공율은 plain시편에 비해 낮아졌으며 특히 실리카 함 15wt.% 플라이 애쉬 10wt.% 치환 첨가했을때 가장 기공율이 낮았다.

이러한 결과는 실리카 흙의 입자크기가 시멘트의 입자크기에 비하여 매우 작기 때문에 시멘트 입자 사이의 공극을 실리카 흙이 충전 해줌으로써 전체 기공율이 저하된 것으로 판단된다.

### 3.4 X-ray 회절분석

(그림 7)은 각 혼합재를 치환 첨가한 시편의 X-ray 회절 분석 결과이다.

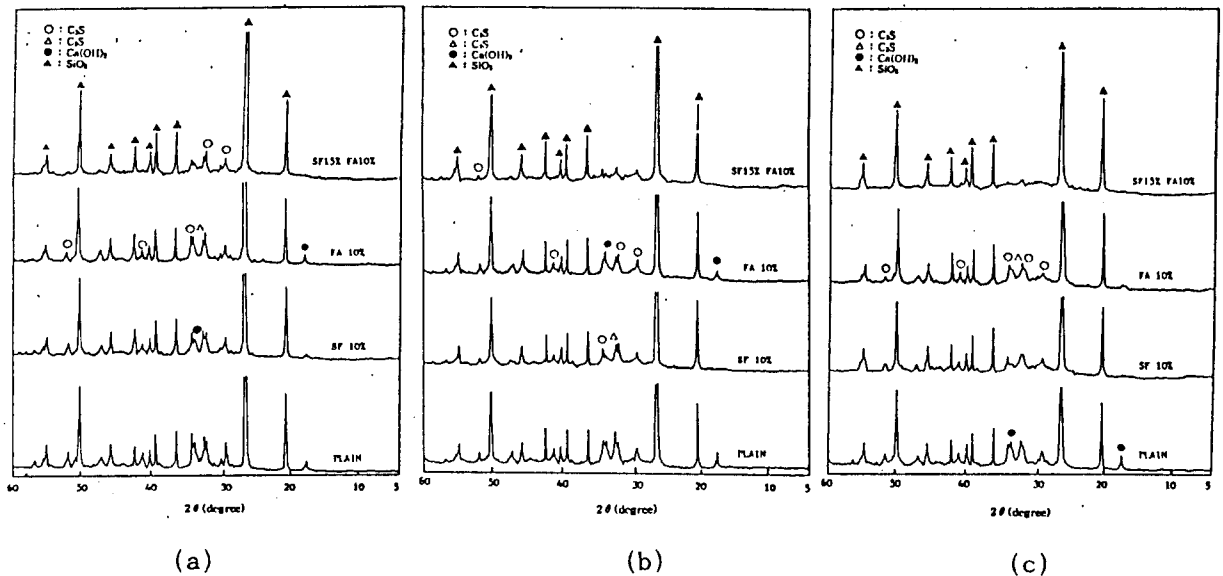
(a)는 재령 3일 경과한 시편의 X-ray 회절 분석 결과로써 실리카 흙 10wt.%치환 첨가한 시편의  $Ca(OH)_2$  peak가 약하게 나타나고 있으며 플라이 애쉬 10wt.%치환 첨가한 시편은 plain시편에 비해 큰 변화가 없다. 실리카 흙 15wt.%, 플라이 애쉬 10wt.%치환 첨가한 시편은  $Ca(OH)_2$  peak가 나타나지 않았다. 이것은 시멘트 수화 생성물인  $Ca(OH)_2$ 와 실리카 흙 입자와의 포졸란 반응이 일어나서 C-S-H 겔

로 변화된 것으로 판단되며 일반적으로 실리카 흙 10wt.%정도 치환 첨가한 시편의  $Ca(OH)_2$  양이 재령 14일 이후 부터 감소하는 것<sup>7)</sup>에 비하여 상당히 빨리 소멸되는 것을 볼 수 있다.

(b)는 혼합재를 치환 첨가한 시편의 재령 28일 경과한 시편의 X-ray 회절 분석 결과이다.

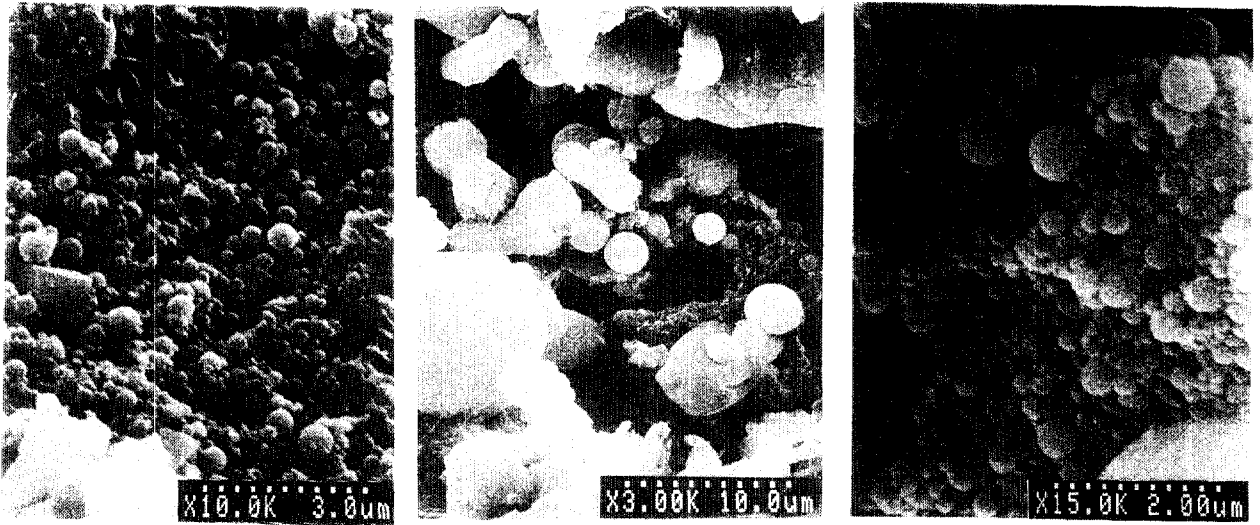
실리카 흙 10wt.%치환 첨가한 시편과 실리카 흙 15wt.% 플라이 애쉬 10wt.%를 함께 치환 첨가한 시편은  $Ca(OH)_2$  peak가 나타나지 않고 있으며 plain시편에 비하여 시멘트 광물에 관한 peak가 많이 감소되어 있다. 플라이 애쉬 10wt.%치환 첨가한 시편은  $Ca(OH)_2$  peak가 관찰되고 있다. 이것은 실리카 흙에 비하여  $SiO_2$ 의 함량이 낮고 입자 크기가 거대하기 때문에 포졸란 반응성이 떨어진 결과로 생각된다.

(c)는 혼합재를 치환 첨가한 시편의 재령 90일의 X-ray 회절 분석 결과이다. 실리카 흙 15wt.%와 플라이 애쉬 10wt.%함께 치환 첨가한 시편은 시멘트 광물의 peak가 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 혼합재 치환량이 많기 때문에 적은량의 시멘트가 장기 재령에 있어



(그림 7) 혼합재를 첨가한 시편의 재령에 따른 XRD 결과 (W/C+AD = 0.22)

(a) 재령 3일      (b) 재령 28일      (c) 재령 90일



(a)

(b)

(c)

(그림 8) 혼합재를 첨가한 시편의 주사전자 현미경 관찰 (재령 28일, W/C+AD = 0.22)

(a) 실리카 흙 15%

(b) 플라이 애쉬 10%

(c) 실리카 흙 15%, 플라이 애쉬 10%

서 대부분 수화반응을 한 결과로 생각된다. 플라이 애쉬 10wt.% 치환 첨가한 시편은 포졸란 반응에 의해서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  peak가 약하게 나타났다.

### 3.5 주사전자 현미경 관찰

(그림 8)은 실리카 흙과 플라이애쉬를 치환 첨가한 시편의 주사전자 현미경 사진이다.

(a)는 실리카흙을 15wt.%치환 첨가한 시편으로 시멘트 입자사이에 형성되어 있는 실리카흙 입자를 관찰할 수 있었다. (b)는 플라이애쉬를 10wt.% 치환 첨가한 시편으로 사진윗 부분의 모래입자와 시멘트 및 플라이애쉬 입자를 관찰할 수 있었다. (c)는 실리카흙과 플라이애쉬를 각각 15wt.%, 10wt.% 치환 첨가한 시편으로 좌측상단의 시멘트 입자와 우측상단의 플라이 애쉬 입자 사이에 형성되어 있는 실리카 흙 입자 상태를 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 실험은 시멘트 : 모래 = 1:1로 배합하고 시멘트량에 대하여 실리카 흙과 플라이 애쉬를 각각 5, 10, 15wt.% 치환첨가 했을때 재령에 따른 압축강도와 물성의 변화를 연구한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실리카 흙의 치환 첨가량이 10wt.% 이하 일때는 flow가 증가 되었으며 10wt.%이상 첨가 되면 flow가 떨어지므로 더 많은 유동화제의 양이 소모되는 것으로 나타났다.

2) 실리카 흙 10wt.% 플라이 애쉬 5wt.%치환 첨가한 시편의 압축강도가 가장 높게 나타났다. 이것은 실리카 흙의 입자 충전에 의한 기공율의 감소와 플라이 애쉬의 포졸란 반응에 의한 조직의 치밀화 때문인 것으로 생각된다.

3) 각 혼합재의 치환량이 많을수록 총 기공율

은 감소했으나 압축강도와 비례하지는 않았다. 이것은 시멘트 치환량이 너무 많기 때문에 결합재로서 시멘트의 성능 약화 때문으로 판단된다.

4) 실리카 흙과 플라이 애쉬를 각각 15wt.%, 10wt.% 치환 첨가한 시편은 X-ray 회절분석 결과 재령 3일 이전 부터 포졸란 반응이 진행 되는 것으로 나타났으며 플라이 애쉬를 치환 첨가한 시편은 재령 28일 이후에야 포졸란 반응이 나타났다.

#### 참고문헌

1. 權寧鎬의 3명, “混和材를 사용한 高强度 콘크리트의 品質改善에 관한 實驗的 研究”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.5, NO.1, 1993, pp.79-88.
2. 박기철, 정헌수, “실리카 흙 및 플라이 애쉬를 사용한 초고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.1, NO.1, 1991, pp.23-28
3. E. Tkalcec, Zagreb, J. Zelic and DugiRat, “Influence of amorphous silica(silica dust) on the properties of portland cement mortars”, ZKG., Nov. 1987, pp.574-579.
4. 田尺雄二郎, “シリカフュームをいた高强度コンクリートの特性”, セメント コンクリート, No.405, Nov. 1985, pp.20-26.
5. Aitcin, P. C.,Pinsonneault, P. and Rsu,G., “The Use of Condensed Silica Fume in Concrete”, Proceedings, Materials Research Society Annual Meeting, Boston, Nov. 1981, pp.316-3225.
6. S.Nagataki, E.Sakai, T.Takeuchi, “The Fluidity of Fly Ash-Cement Paste with Superplasticizer”, CEMENT and CONCRETE RESEARCH., Vol.14, 1984. pp.631-638.
7. Huang Cheng-yi and R.F.Feldman, “Influence of Silica Fume on the Microstructural Development in Cement Mortars”, CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 15, 1985, pp.285-294.