

# 활성화제에 의한 플라이애쉬-생석회계의 수화반응

김재영\* · 류동우 · 고상렬 · 송종택  
 <단국대 재료공학과>

## 1. 서 론

플라이애쉬는 석탄을 연소시켰을 때 발생하는 인공포졸란 물질의 하나로서 최근에 들어서 폐자원의 활용과 환경보호라는 측면에서 사용량이 증가하고 있으며, 이에 따라 많은 연구가 진행되고 있다. 플라이애쉬의 품질은 화학성분에 큰 영향을 받으며 성분은 작동온도, 연소조건, 집진장비, 보일러의 종류에 따라 변화한다.

이러한 플라이애쉬를 콘크리트에 혼합재로서 사용하게 되면 구상입자에 의한 불 배아링 효과로 유동성을 향상시켜 작업성이 개선됨과 동시에 장기강도가 증진되며 블리딩 현상을 감소시켜 주고 알칼리-골재 반응을 억제하는 등의 성능개선 이외에도 단가를 낮출 수 있다는 장점이 있으나 플라이애쉬는 자체의 수화가 느리기 때문에 콘크리트의 초기강도를 저하시키는 단점이 있다.<sup>2,3,4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 플라이애쉬(미연탄소분 3%)의 수화를 촉진시키기 위하여 4가지의 활성화제  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 를 첨가

하여 플라이애쉬-생석회계의 수화반응을 검토하였다. 또한 미연탄소분 9%의 플라이애쉬를 사용하여 미연탄소분의 영향도 조사하였다.

## 2. 실험

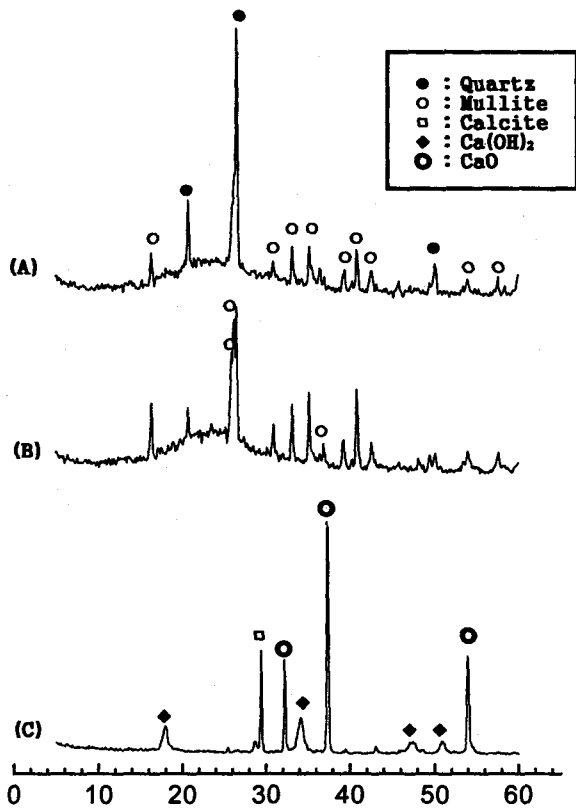
### 2.1 시 료

본 실험에서 사용한 플라이애쉬(미연탄소분 3%)는 S사로부터 공급받은 것이고 생석회는 B사의 제품을 사용하였으며, <Table 1>에 각각의 화학조성을 나타내었다.

플라이애쉬의 주성분은  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 이고 이외에도  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  그리고 소량의  $\text{SO}_3$ 를 함유하고 있으며, 주결정상은 quartz, mullite 그외 대부분은 유리상으로 존재하고 있다(<Fig. 1>). 이러한 전자현미경 관찰(<Fig. 2>)에서는 대부분이 구형의 입자로 이루어진 것을 알 수 있었다. 미연탄소분 9% 플라이애쉬도 3% 경우와 거의 비슷한 모양을 하고 있었다.

<Table 1> Chemical composition of the fly ashes and the lime

Raw materials	Chemical compositions	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	L.O.I	average particle size ( $\mu\text{m}$ )
Fly ash (unburned carbon 3%)		58.6	23.6	7.45	3.13	0.81	1.15	0.4	0.36	1.12	0.53	3.07	16.13
Fly ash (unburned carbon 9%)		50.2	28.4	6.03	1.66	0.69	1.33	0.82	0.5	0.6	0.71	9.25	12.64
Lime		1.5	0.45	0.31	90.68	1.98	-	-	-	-	-	4.15	-



〈Fig. 1〉 XRD patterns of raw materials

(A) Fly ash (unburned carbon 3%)

(B) Fly ash (unburned carbon 9%)

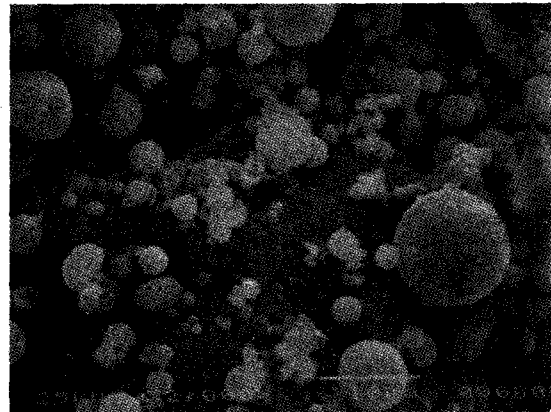
(C) Lime

또다른 원료인 생석회는 주 성분인 CaO이외에도 소량의 알칼리를 포함하고 있었으며, 4%의 Ig. loss가 나타난 것은 생석회의 일부가 소화 및 탄산화에 의해서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ 로 변화되었기 때문인 것으로 여겨진다.

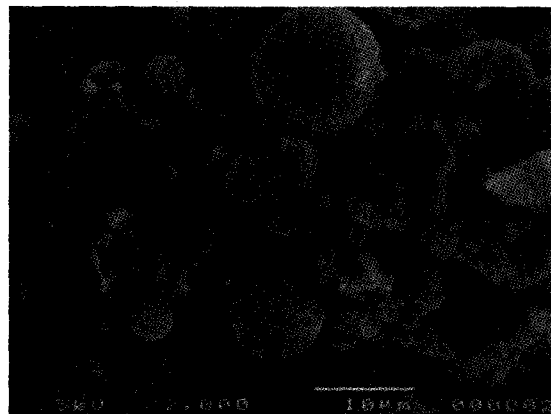
활성화제인  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  및 아세톤은 모두 1급 시약을 사용하였다.

## 2.2 실험방법

플라이애쉬-생석회를 80wt. %-20wt. %의 비율로 혼합한 계와 여기에 4가지의 활성화제를 각각 1, 3, 5%를 첨가한 계를 W/S비가 0.42가 되도록 해서 혼련하여 20×20×20mm의 몰드에서 24시간 동안 수화시킨 후 탈형하여 50℃, 습도 100%의 항온조에서 수산화칼슘 포화수용액중에서 일정 기간(3, 7, 14, 28일) 양생시켰다.



(A) Unburned carbon 3%



(B) Unburned carbon 9%

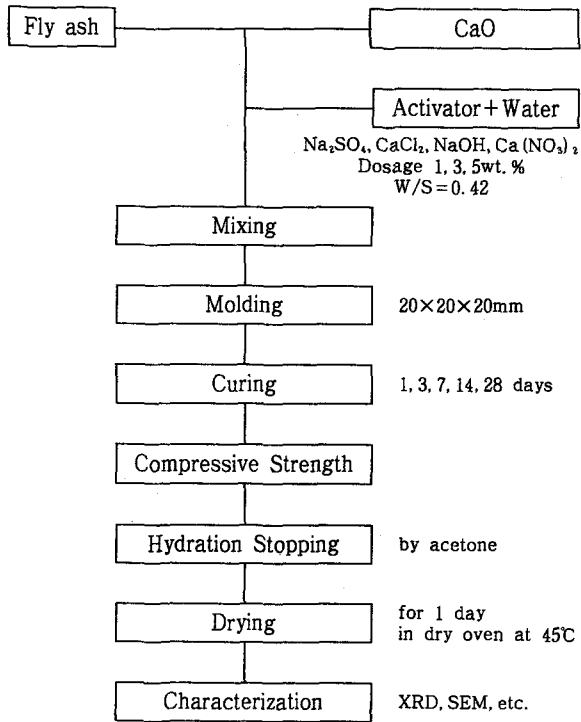
〈Fig. 2〉 SEM photographs of the two fly ashes

수산화칼슘 포화수용액중에서 양생시킨 이유는 fly ash와 포졸란반응을 하게 되는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 시편에서 수용액으로 용출되는 것을 방지하기 위해서이다.

양생 1, 3, 7, 14, 28일이 경과한 후 시편을 항온조에서 꺼내어 공기중에서 시편 표면의 수분을 건조시킨 후 압축강도를 측정하였으며, 압축강도 측정후 파쇄된 시편들은 아세톤으로 수화정지시킨다음 45℃에서 24시간 건조한 후에 수화생성물의 확인 및 관찰을 위하여 XRD 분석 및 SEM 관찰을 하였다.

또한 반응물인 CaO의 감소량을 조사하기 위하여 수화정지시킨 시료를 XRD 분석결과로부터 플라이애쉬의 주상인 quartz의 (101)의 피크의 강도에 대한  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 (101)의 피크의 상대강도를 검토하였다.

실험의 전과정을 〈Fig. 3〉에 나타내었다.



<Fig. 3> Flow chart for experimental process

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 강도발현에 미치는 각각의 활성화제의 영향

여러가지 활성화제를 첨가한 시편들을 각각 1, 3, 7, 14, 28일간 수중양생시킨 후 압축강도 측정을 한 결과를 <Fig. 4, 5, 6, 7>에 나타내었다.

압축강도 측정결과 재령 3일까지의 초기강도는  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ 계가 가장 좋은 강도를 나타내고 있는 것으로 나타났으며 이것은  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  중의  $\text{SO}_3$  성분과  $\text{NaOH}$ 의 강알칼리성에 의한 것으로 여겨진다.<sup>5)</sup>

##### 1) Base paste

Base paste는 1일에는 수중양생을 할 수 없어 3일부터 강도를 측정하였다. 강도는 비교적 완만하게 증가하고 있다.

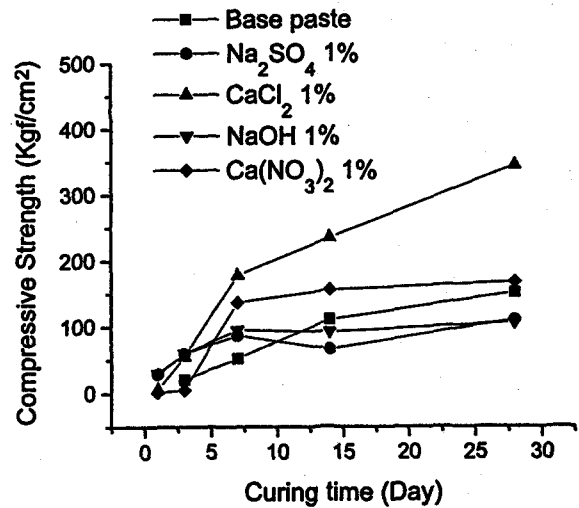
재령 28일 시편의 파단면의 SEM 관찰(<Fig. 15>)에서는 monosulfate와  $\text{C}_4\text{AH}_3$ 으로 보이는 육각관상의 수화상들이 관찰되어지고 있으며 28일 압축강도는  $151\text{kgf/cm}^2$ 이다.

##### 2) $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 계

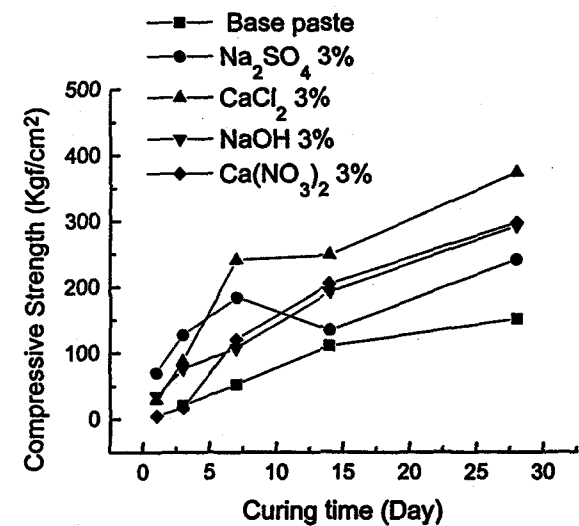
3일까지의 재령초기에는 비교적 높은 강도<sup>4, 9)</sup>를 나타내고 있으나 완만한 강도의 증가를 보이고 있다.

수화생성물은 base paste와 비슷한 양상을 보이고 있으며, 3% 첨가계(<Fig. 4>)의 경우 재령 14일에서 강도저하 현상이 나타나고 있는데 이는  $\text{SO}_3$  성분 부족에 의해 ettringite상의 일부가 monosulfate로 변화되는 것에 의한 것으로 여겨진다.

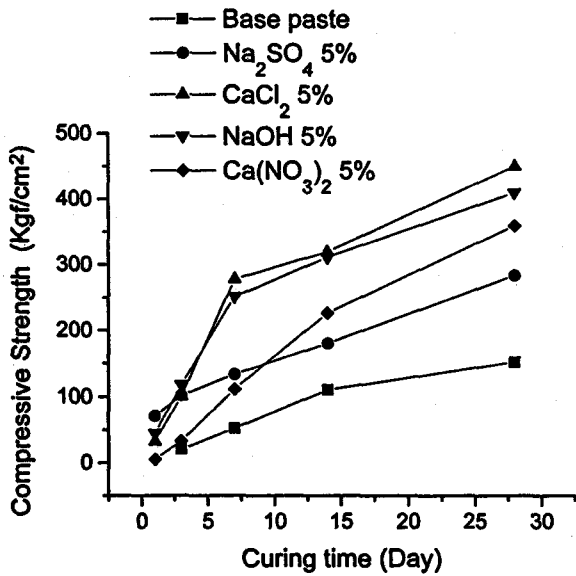
재령 28일 시편의 파단면의 SEM 관찰(<Fig.



<Fig. 4> The compressive strength in the fly ash-CaO system with various activators(1%)



<Fig. 5> The compressive strength in the fly ash-CaO system with various activators(3%)

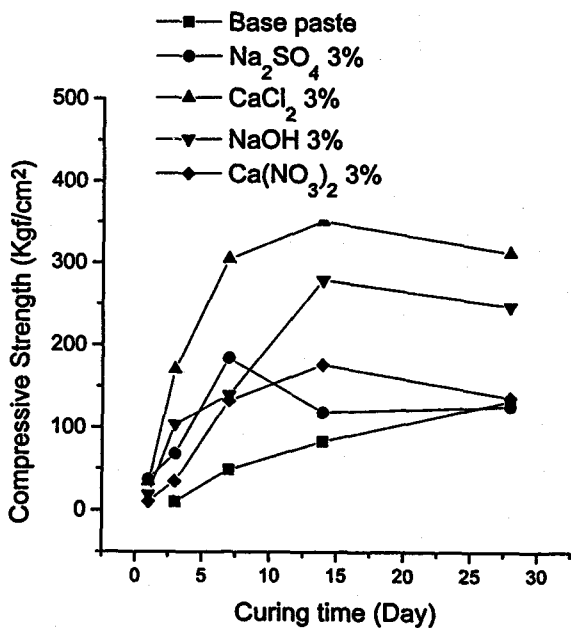


<Fig. 6> The compressive strength in the fly ash-CaO system with various activators (5%)

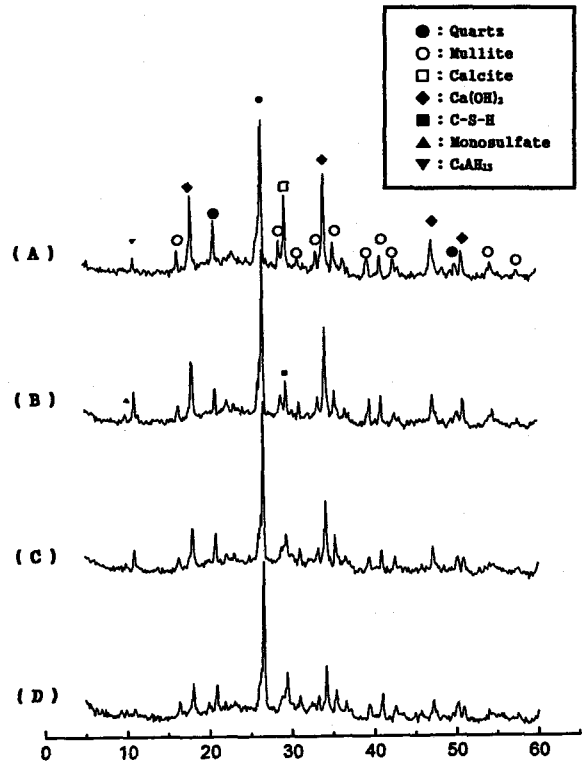
16(A))에서는 ettringite상이 미세하게 나타나고 있으며 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3% 첨가계의 재령 28일 압축강도는 241kgf/cm<sup>2</sup>이다.

3) CaCl<sub>2</sub>계

모든 첨가량에 대하여 재령 7일 이후 가장 높



<Fig. 7> The compressive strength in the fly ash (unburned carbon 9%) -CaO system with various activators (3%)



<Fig. 8> XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash-CaO with the curing time (A) 3days (B) 7days (C) 14days (D) 28days

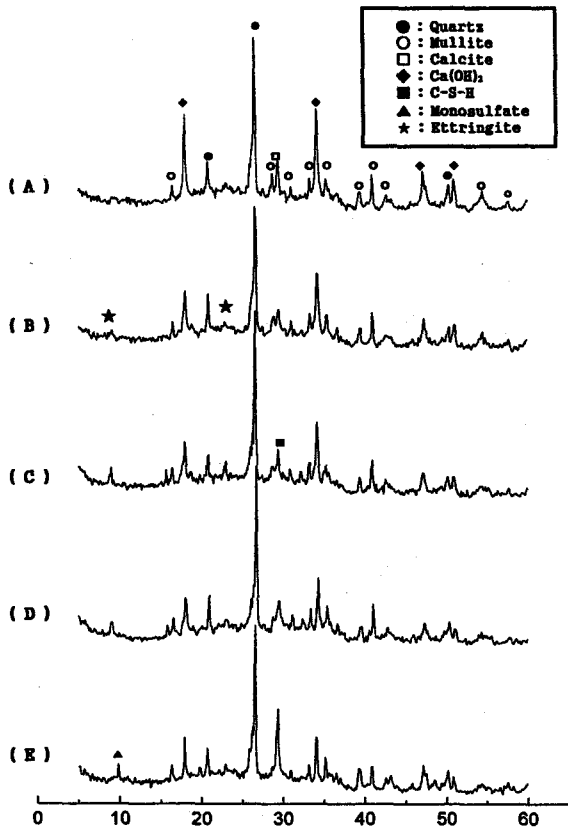
은 강도를 나타내고 있어 가장 좋은 촉진효과를 보이고 있다. 그러나 첨가량이 증가해도 강도의 증가폭은 그렇게 크지는 않았다.

재령 28일 시편의 파단면의 SEM 관찰(<Fig. 16(B)>)에서는 특이한 모양의 수화생성물이 관찰되어지고 있으며 3% 첨가계의 재령 28일 압축강도는 374kgf/cm<sup>2</sup>이다.

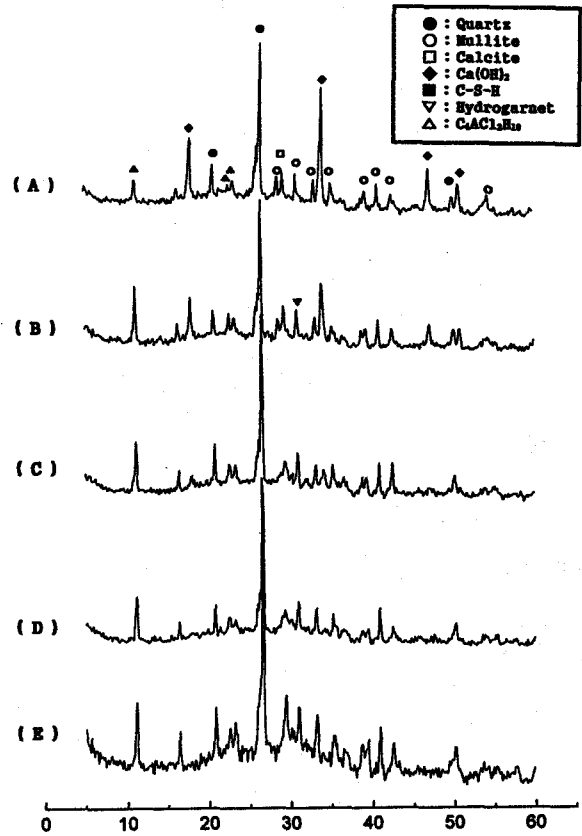
4) NaOH계

재령 3일까지의 초기재령에서 높은 강도를 나타내고 있다. 특히 첨가량이 1, 3, 5%로 증가함에 따라 강도의 증가폭이 매우 커지고 있으며 5%를 첨가한 시편의 강도(<Fig. 6>)는 CaCl<sub>2</sub>계에 근접한 값을 나타내었다.

재령 28일 시편의 파단면 SEM 관찰(<Fig. 17(A)>)에서 보이듯이 C-S-H 수화상 이외의 특정 수화물은 관찰되어지지 않고 있으나 매우 치밀한 수화물 구조를 보이고 있는데 이로 인하여 좋은 압축강도를 보이는 것으로 여겨진다. 또한 첨가



<Fig. 9> XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash-CaO-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3%) with the curing time  
 (A) 1day (B) 3days (C) 7days  
 (D) 14days (E) 28days



<Fig. 10> XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash-CaO-CaCl<sub>2</sub> (3%) with the curing time  
 (A) 1day (B) 3days (C) 7days  
 (D) 14days (E) 28days

량이 1, 3, 5%로 증가함에 따라 압축강도의 증가 폭이 가장 큰 것으로 나타났다.

1, 3, 5% 첨가계의 재령 28일의 압축강도는 각각 106kgf/cm<sup>2</sup>, 292kgf/cm<sup>2</sup>, 409kgf/cm<sup>2</sup>였다.

5) Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>계

1% 첨가계의 경우(<Fig. 4>) 재령 7일 이후 완만한 강도의 증가를 보이고 있으나, 첨가량이 3, 5%인 경우(<Fig. 4, 5>)에는 재령 7일 이후에도 꾸준한 강도의 증진을 보이고 있다.

재령 28일 시편의 파단면 SEM 관찰(<Fig. 17 (B)>)에서는 수화물들이 관찰되어지고 있으나 NaOH계와 비교하여 비교적 덜 치밀한 구조를 보이고 있다. 재령 28일의 압축강도는 3% 첨가계에서 298kgf/cm<sup>2</sup>이다.

6) Unburned carbon 9% fly ash system

미연탄소분 9%의 플라이애쉬를 사용한 계의 재령별, 활성화제별 압축강도의 변화는 <Fig. 7>에 나타난 바와 같이 미연탄소분 3%의 경우와 비슷하였으나 재령 28일에 일부 활성화제계의 강도저하 현상이 나타나고 있다. 이것은 플라이애쉬중의 유리상의 반응률에 의한 것으로 여겨지며 이에 대해서는 좀 더 많은 검토가 이루어져야할 것 같다.

3.2 수화생성물에 대한 활성화제의 영향

각각의 계의 수화생성물은 첨가된 활성화제의 종류에 따라 다양하게 나타났으며, 각각의 계별로 확인된 수화물을 <Table 2>에 나타내었다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에서는 첨가량이 3, 5%의 경우에는 ettringite가 확인되었으며, NaOH를 첨가한 계에서는 C-S-H상 이외의 특정 수화물은 관찰되지

<Table 2> Hydration products of the fly ash-CaO system with various activators

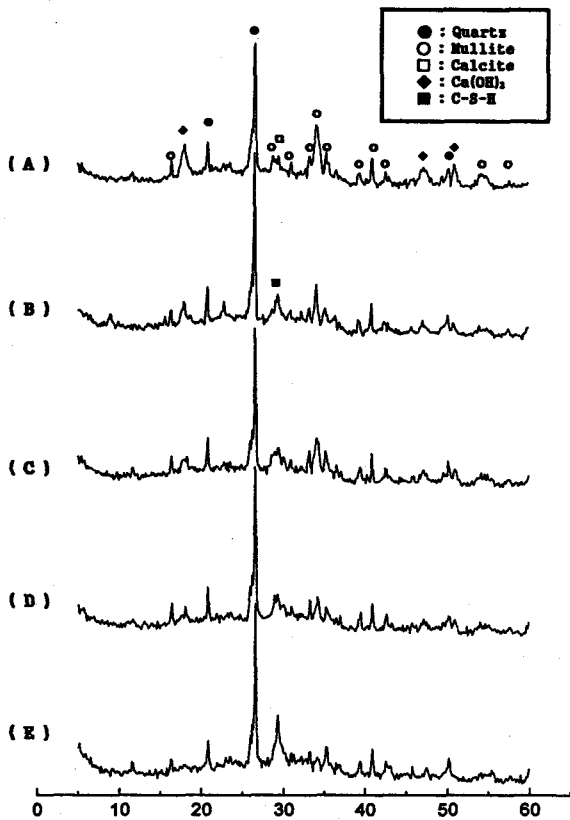
Activator	Dosage	Hydration products
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1%	C-S-H, Monosulfate
	3%	C-S-H, Ettringite, Monosulfate
	5%	C-S-H, Ettringite, Monosulfate
CaCl <sub>2</sub>	1%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> -C <sub>4</sub> ACl <sub>2</sub> H <sub>10</sub> , Hydrogarnet
	3%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> -C <sub>4</sub> ACl <sub>2</sub> H <sub>10</sub> , Hydrogarnet
	5%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> -C <sub>4</sub> ACl <sub>2</sub> H <sub>10</sub> , Hydrogarnet
NaOH	1%	C-S-H
	3%	C-S-H
	5%	C-S-H
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>x</sub> , Hydrogarnet
	3%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>x</sub> , Hydrogarnet
	5%	C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>x</sub> , Hydrogarnet
None (base paste)		C-S-H, C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> , Monosulfate

않았다. NaOH계의 강도증진은 특정 수화물에 의한 것이 아니라 수화계의 pH를 높여줌으로써 플라이애쉬중의 유리상의 용출을 증가시켜 매우 치밀한 구조의 C-S-H를 생성하는 것에 의한 것으로 여겨진다.

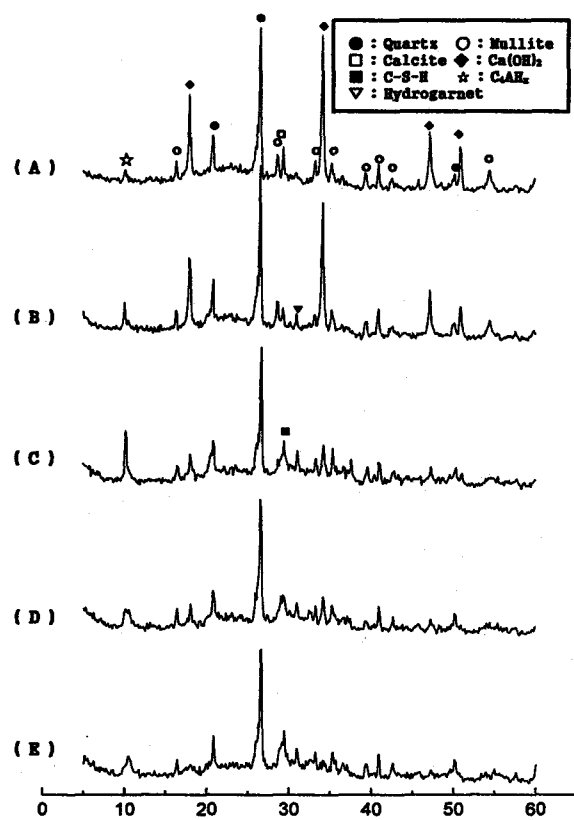
### 1) Base paste

<Fig. 7>은 3일에서부터 28일까지의 base paste의 재령별 X선 회절분석을 나타낸 것이다. 재령 3일에 CaO 피크가 관찰되어지지 않는 것으로 보아 전부 Ca(OH)<sub>2</sub>로 된 것으로 여겨지며 Ca(OH)<sub>2</sub> 피크는 재령이 경과함에 따라 감소하고 있으나 재령 28일에도 어느정도 피크가 남아있었다.

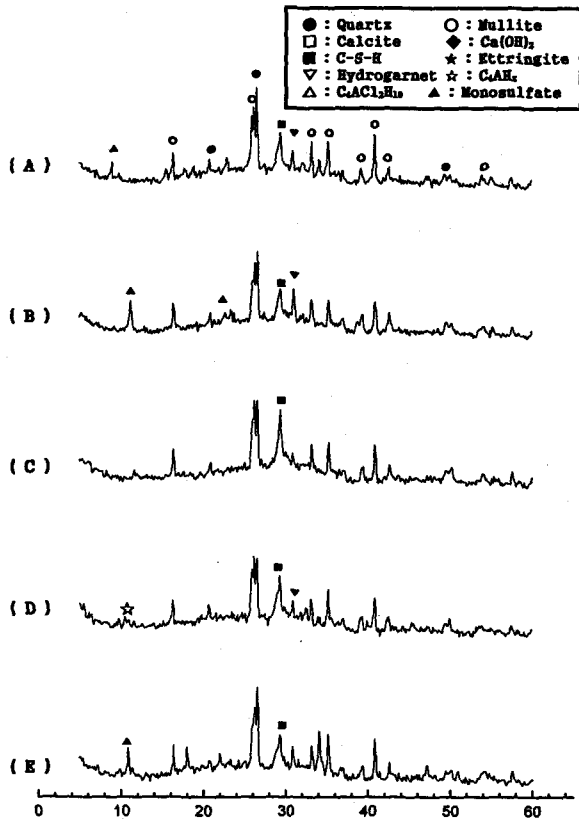
재령 3일에서부터 C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>의 피크가 나타나 7일까지는 성장하고 있으나 그후로는 감소하고 있다. 또한 모노설페이트의 미약한 피크가 7일부터 관찰되어지고 있으나 이는 XRD상으로도 미소한



<Fig. 11> XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash-CaO-NaOH (3%) with the curing time  
(A) 1day (B) 3days (C) 7days  
(D) 14days (E) 28days



<Fig. 12> XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash-CaO-Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (3%) with the curing time  
(A) 1day (B) 3days (C) 7days  
(D) 14days (E) 28days



〈Fig. 13〉 XRD patterns of hydrated products in the system of fly ash (unburned carbon 9%) - CaO-activators (3%) for 28 days  
 (A) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (B) CaCl<sub>2</sub> (C) NaOH  
 (D) Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (E) Base Paste

양이며 이는 플라이애쉬중의 SO<sub>3</sub>성분에 기인한 것으로 여겨진다.

29° (2θ) 부근의 CaCO<sub>3</sub> 피크는 재령 7일까지 감소하다 14일부터 폭이 넓어지면서 증가하는 것이 관찰되어지는데 이는 C-S-H 수화상의 피크와 중첩되어지기 때문으로 여겨지며 이것으로 C-S-H 수화물이 재령 14일부터 생성되는 것을 알 수 있다.

2) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>계

〈Fig. 8〉은 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3% 첨가한 계의 재령별 X선 회절분석이다.

재령 3일에서부터 ettringite 피크가 관찰되어지며 7일까지는 다소 증가하나 14일부터는 모노설페이트로 전환되어 28일에는 모노설페이트만이 존재하게 된다. 그러나 첨가량이 1%인 계에서는 ettringite의 피크를 관찰할 수 없었다.

이외에도 C-S-H 수화물 피크가 관찰되어지고 있으며 전반적으로 base paste와 비슷한 수화물 양상을 나타내고 있다.

3) CaCl<sub>2</sub>계

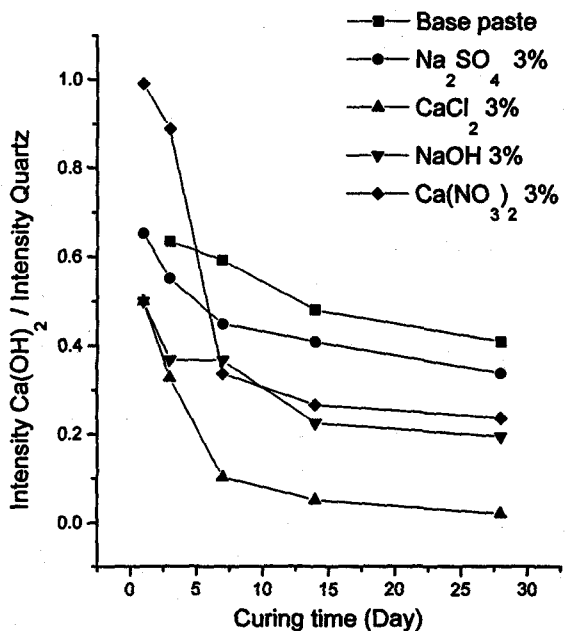
〈Fig. 9〉에서 보이듯이 Ca(OH)<sub>2</sub> 피크가 재령이 지남에 따라 급격히 감소하여 14일 이후에는 거의 피크가 존재하지 않고 있다. 수화상으로는 CaCl<sub>2</sub>가 고용된 C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>·C<sub>4</sub>ACl<sub>2</sub>H<sub>10</sub>,<sup>6)</sup> hydrogarnet, C-S-H가 관찰되었다.

4) NaOH계

〈Fig. 10〉에서와 같이 재령 1일부터 Ca(OH)<sub>2</sub>의 피크는 낮게 나타나고 있으며 폭이 넓은 것으로 보아 결정성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 특정 수화물 피크는 관찰되어지지 않고 있으나 재령 28일에서 보이듯이 C-S-H 피크가 매우 높게 나타나고 있다.

5) Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>계

〈Fig. 11〉은 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 3% 첨가한 계의 X선 회절분석을 나타낸 것이다. 재령 1일에는 Ca



〈Fig. 14〉 Relative intensity of Ca(OH)<sub>2</sub>(101)/SiO<sub>2</sub>(101) versus curing time for hardened pastes of the system of fly ash-CaO-activators (3%)



〈Fig. 15〉 SEM photograph of the system of fly ash-CaO for 28days

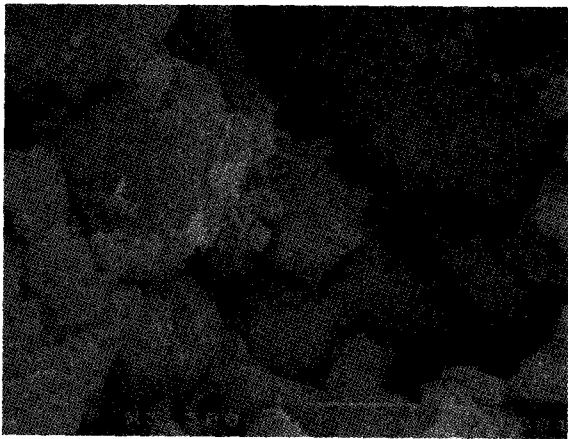
(OH)<sub>2</sub> 피크가 매우 높게 나타나고 있으나 재형

7일까지 급격히 감소하여 28일에는 거의 존재하지 않고 있다.

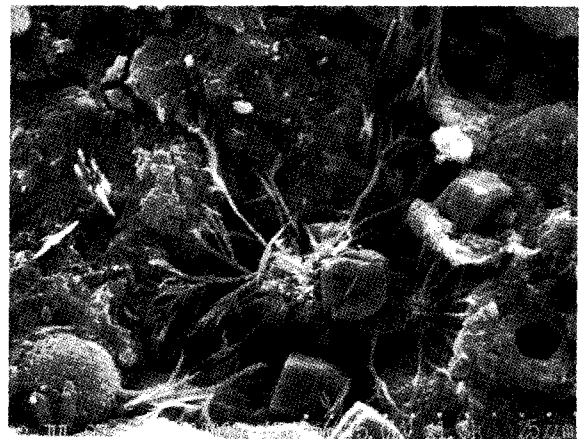
10° (2θ) 부근에서 증가 및 감소하는 피크는 시편들이 45°C에서 건조되었기 때문에 C<sub>4</sub>AH<sub>x</sub>'의 층간화합물 수화생성물이 수분의 흡수 및 탈리에 의해서 d값이 약 8.3Å에서 9.0Å까지 변화되는 것이 나타나는 것으로 여겨지며, 이외의 수화물로는 hydrogarnet, C-S-H가 관찰되어진다.

#### 6) Unburned carbon 9% fly ash system

〈Fig. 13〉은 미연탄소분 9% 플라이애쉬를 사용한 base paste 및 각각의 활성화제를 3%씩 첨가한 시편들의 재형 28일 X선 회절분석이다. 미연탄소분 3% 플라이애쉬 계와 거의 유사한 수화생성물을 나타내고 있다.

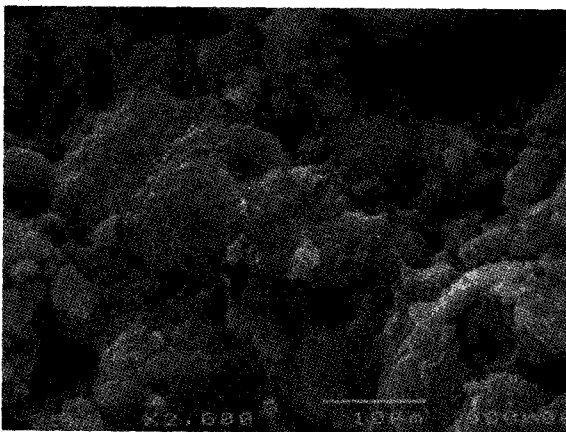


(A) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



(B) CaCl<sub>2</sub>

〈Fig. 16〉 SEM photographs of fly ash-CaO-activators (3%) system for 28days



(A) NaOH



(B) Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

〈Fig. 17〉 SEM photographs of fly ash-CaO-activators (3%) system for 28days



### 3.3 Ca(OH)<sub>2</sub> 피크의 상대강도 비교

〈Fig. 12〉는 플라이애쉬의 주상인 quartz의 (101)의 강도에 대한 Ca(OH)<sub>2</sub>의 (101)의 상대강도로 Ca(OH)<sub>2</sub>의 변화를 관찰한 것이다. Base paste와 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>계의 경우 완만한 감소를 보이고 있으며, 초기강도가 좋은 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>계와 NaOH계가 낮은 값을 나타내고 있다. CaCl<sub>2</sub>는 재령 7일 이후로 가장 낮은 상대강도 값을 나타내어 가장 많은 Ca(OH)<sub>2</sub>를 소비하고 있음을 보여주고 있고, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>의 경우 재령 7일까지 급격하게 감소하고 있다.

이러한 Ca(OH)<sub>2</sub>의 상대강도 변화는 앞에서 본 재령별 압축강도의 변화와 비슷한 경향을 나타내고 있다.<sup>8)</sup>

## 4. 결 론

이상의 플라이애쉬-생석회계에 4종의 활성화제(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCO<sub>2</sub>, NaOH, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)를 첨가한 수화경화체에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 재령 3일까지의 초기 압축강도는 NaOH와 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가한 계가 비교적 높은 강도를 나타내었고, 모든 계에서 재령 7일 이후의 압축강도는 CaCl<sub>2</sub>를 첨가한 계가 가장 높았다 (CaCl<sub>2</sub> 5% 첨가계의 재령 28일 강도는 409 kgf/cm<sup>2</sup>, base paste의 재령 28일 강도는 151.6kgf/cm<sup>2</sup>).
2. 활성화제의 종류에 따라 수화생성물은 각기 다르게 나타났으며, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 첨가계에서는 C-S-H, ettringite, monosulfate상이 나타났고, CaCl<sub>2</sub> 첨가계에서는 C-S-H, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> · C<sub>4</sub>ACL<sub>2</sub>H<sub>10</sub>, hydrogarnet상이, NaOH 첨가계에서는 C-S-H상이, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 첨가계에서는 C-S-H, C<sub>4</sub>AH<sub>x</sub>, hydrogarnet상이 나타났다.
3. CaO의 반응량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였으며, 특히 CaCl<sub>2</sub> 3, 5% 첨가계에서는 Ca(OH)<sub>2</sub>가 재령 14일 이후 거의 소비되었다.
4. 미연탄소분 3% 플라이애쉬계와 미연탄소분 9% 플라이애쉬계의 압축강도 비교에서는 거의 차이가 없었다.

### 〈참 고 문 헌〉

1. C. Shi, "Activation of Natural Pozzolans, Fly Ashes and Blast Furnace Slag", Ph. D. Thesis, The University of Calgary, (1992).
2. V.M. Malhotra and A.A. Ramezani-pour, "Effects of Fly Ash on the Structural Properties of hardened Concrete", Fly Ash in Concrete, Second edition, 50~72, (1994).
3. V.M. Malhotra and A.A. Ramezani-pour, "Effects of Fly Ash on the Properties of Fresh Concrete", Fly Ash in Concrete, Second edition, 73~100, (1994).
4. Caijun Shi, "Early microstructure development of activated lime-Fly Ash pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 9, 1351~1359, (1996).
5. H.S. Pietersen, A.L.A. Fraay and J. M. Bijen, "Reactivity of Fly ash at high pH", Fly Ash and Coal Conversion By-Products : Characterization, Utilization and Disposal, IV, 139~157, (1989)
6. Cakun Shi and Robert L. Day "Acceleration of the reactivity of Fly Ash by chemical activation", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 7, 15~21, (1995)
7. Russel Hill, "The interaction of calcium nitrate and a Class C Fly Ash during hydration", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 7, 1131~1143, (1996)
8. Joseph A. Larbi and Jan M. Bijen, "Evolution of Lime and Microstructural development in Fly Ash-Portland cement systems", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 178, 127~138, (1990)
9. C. Shi and R.L. Day, "Chemical Activation of Blended Cements made with Lime and Natural Pozzolans, Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 6, 1389~1396, (1993)