

## C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계의 초기수화 반응 특성에 미치는 석고의 영향(II)

신규연\*·한기성

인하대학교 무기재료공학과

\*쌍용중앙연구소

(1990년 3월 8일 접수)

### Effect of Gypsum on the Early Hydration Characteristics of the System C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A (II)

Gyoo Youn Shin\* and Ki Sung Han

Dept. of Ceramics Eng., Inha Univ.

\*Ssangyong Research Center

(Received March 8, 1990)

#### 요 약

C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계의 수화 메카니즘을 규명하기 위한 연구의 일환으로 75% C<sub>3</sub>S-25% C<sub>3</sub>A 계에서 C<sub>3</sub>A의 결정형태가 초기 수화 반응특성에 미치는 영향을 석고 존재 여부에 따라 관찰하였다.

C<sub>3</sub>A는 결정형태에 따라 자체의 수화반응속도가 달라지면서 공존하는 C<sub>3</sub>S의 수화반응속도에 영향을 미치는데, cubic-C<sub>3</sub>A 경우에 비하여 Na가 고용된 orthorhombic-C<sub>3</sub>A는 C<sub>3</sub>S 수화반응속도를 가속화시키나 유리상으로 존재하는 melt-C<sub>3</sub>A는 지연시킨다.

석고 존재시의 수화에서는 orthorhombic-C<sub>3</sub>A 및 melt-C<sub>3</sub>A 경우 모두 monosulfate 생성 반응이 지연되는 현상이 나타난다.

#### ABSTRACT

The early hydration characteristics according to the C<sub>3</sub>A polymorphism and the presence of gypsum, in order to establish the hydration mechanism of the system C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A, have been studied.

The hydration rate of C<sub>3</sub>A was changed according to its crystal structure and influenced the hydration of C<sub>3</sub>S. That is, the hydration rate of C<sub>3</sub>S was accelerated in case of orthorhombic-C<sub>3</sub>A, but that was slightly retarded in case of melt-C<sub>3</sub>A than that of cubic-C<sub>3</sub>A.

In the system C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A-gypsum, the retardation phenomenon of the reaction of monosulfate formation was observed in case of both orthorhombic and melt-C<sub>3</sub>A.

#### 1. 서 론

일반적으로 제품화된 시멘트 클링커의 알루미늄에이트 상<sup>1-3)</sup>에서는 순수한 C<sub>3</sub>A\*의 결정형인 cubic-C<sub>3</sub>A 외에도

알칼리가 치환 고용되어 나타나는 orthorhombic, monoclinic-C<sub>3</sub>A 등을 볼 수 있으며, 또한 시멘트 클링커 제조과정 중 냉각 과정에서 클링커 액상 물질인 C<sub>3</sub>A의 재결정화가 완전히 일어나지 못하여 유리상(glass phase,

devitrified-C<sub>3</sub>A) 및 비화학적 조성을 갖는 알루미늄이 트상들이 잔존하는 melt-C<sub>3</sub>A 가 존재한다.

본 연구에서는 전보<sup>4)</sup>에 이어 75% C<sub>3</sub>S-25% C<sub>3</sub>A 계의 수화에서 이러한 C<sub>3</sub>A 의 결정 변태가 초기 수화반응에 미치는 영향을 석고 존재 여부에 따라 검토하였다

## 2. 실험방법

### 2.1. 시멘트 클링커 광물합성

C<sub>2</sub>S 및 cubic-C<sub>3</sub>A (이하 C-C<sub>3</sub>A 로 약기)는 전보<sup>4)</sup>에서 기술한 방법으로 합성하였다.

알칼리가 고용된 orthorhombic-C<sub>3</sub>A(이하 O-C<sub>3</sub>A 로 약기)는 먼저 순수한 C<sub>3</sub>A 를 합성한 후 여기에 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 화학량적 균형을 유지하기 위하여 계산된 양 만큼의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가하여 혼합시킨 후, 알칼리 휘발을 방지하기 위하여 상당한 압력을 주어 원통형 pellet 으로 성형한 다음 백금도가니에 넣고 시료의 윗부분은 백금종이로 덮어서 예비실험<sup>5)</sup>으로 정하여진 1200°C에서 일정시간 소성하여 제조하였다.

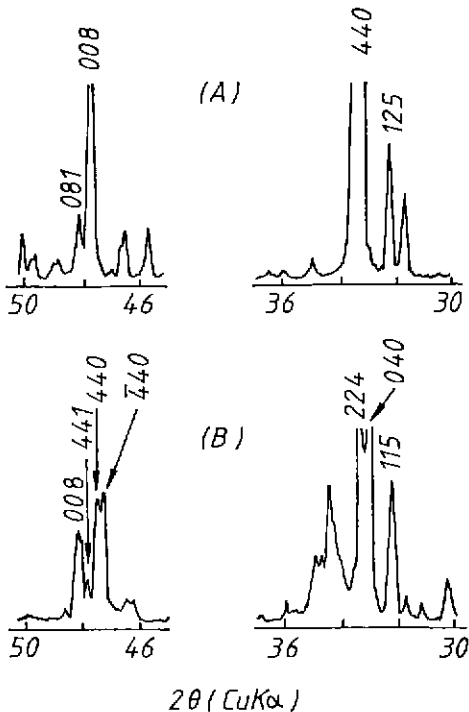


Fig.1. Powder X-ray diffraction patterns of synthetic C<sub>3</sub>A.  
(A) cubic (B) orthorhombic

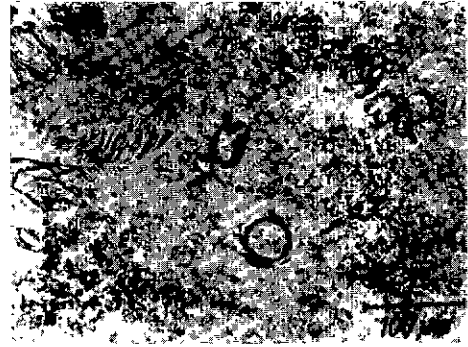


Fig. 2. Polarizing micrographs of Melt-C<sub>3</sub>A.

Melt-C<sub>3</sub>A(이하 M-C<sub>3</sub>A 로 약기)는 순수한 C<sub>3</sub>A 를 봉합된 백금 캡슐에 넣어 1600°C에서 장시간 가열처리로 유리화(glass phase)시킨 후 액체질소 중에서 냉각하여 제조하였다.

C-C<sub>3</sub>A 및 O-C<sub>3</sub>A 의 결정상은 X-선 회절분석(Fig. 1)으로 M-C<sub>3</sub>A 의 유리상은 편광현미경 관찰(Fig. 2)로 확인<sup>6-7)</sup>하였다. 각 광물의 분말도는 Blaine 공기 투과방법에 의한 비표면적이 3000cm<sup>2</sup>/g이 되도록 분쇄하였다.

### 2.2. 수화반응 실험

75% C<sub>3</sub>S-25% C<sub>3</sub>A 계에 있어서 C<sub>3</sub>A 의 결정변태 및 석고 존재 여부에 따른 수화반응 특성을 규명하기 위하여 Table 1에 나타난 배합표에 따라 클링커 광물들을 조합하여 수화실험을 행하였다.

20°C에서 W/S(Water/Solid)비 1.0으로 하여 미소전도 열량계(Twin type microconduction calorimeter)를 이용하여 수화 반응시 나타나는 수화 발열속도를 측정하였다. 또한 특정시료의 수화반응과정에서 일정 수화시간 경과 후 아세톤을 사용하여 수화를 정지시킨 후, SEM-EDS 분석장치, X-선 회절분석장치 및 열분석 장치를 이용, 수화생성물을 분석하고 수화반응의 진행과정을 규명하였다.

Table 1. Nomenclature of Samples According to the Kinds of Used C<sub>3</sub>A in the System 75% C<sub>3</sub>S-25% C<sub>3</sub>A.

Sample No.		Kinds of used C <sub>3</sub> A
Without gypsum	With gypsum*	
AO	AG	Cubic-C <sub>3</sub> A
BO	BG	Orthorhombic-C <sub>3</sub> A
CO	CG	Melt-C <sub>3</sub> A

\* : 10% gypsum for the total weight of C<sub>3</sub>S+C<sub>3</sub>A

### 3. 결과 및 고찰

C<sub>3</sub>A의 결정 변태에 따른 수화 발열속도 측정 결과를 석고가 존재하지 않는 경우는 Fig. 3에, 석고가 존재하는 경우는 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 3 및 Fig 4에서 1차 발열 peak(이하 peak I로 약기)는 물과 접촉 즉시 각 광물들의 용해열을 포함한 개별적인 수화반응에 의하여 나타나므로 본고에서는 각 광물들의 수화 반응이 상호간에 영향을 미치는 2차 및 3차 발열 peak(이하 peak II 및 peak III로 약기)에 대하여 고찰하였다.

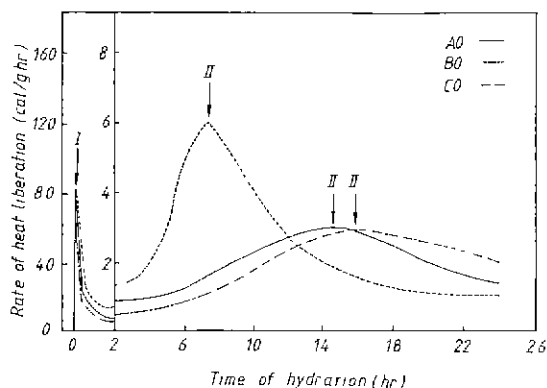


Fig. 3. The curves of heat liberation according to the C<sub>3</sub>A polymorphism in the system C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A as function of hydration time (I and II : the apex of 1st 2nd exothermic peak).

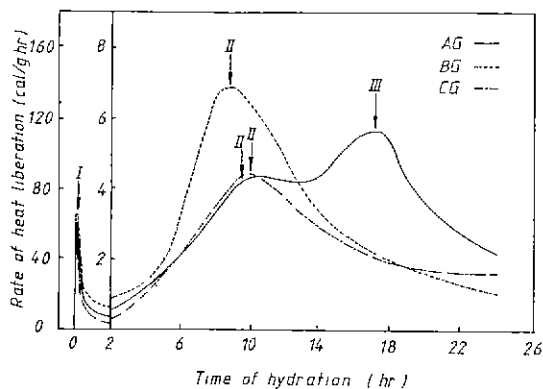


Fig. 4. The curves of heat liberation according to the C<sub>3</sub>A polymorphism in the system C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A-Gypsum as function of hydration time (I, II and III : the apex of 1st, 2nd and 3rd exothermic peak).

#### 3.1. 석고가 존재하지 않는 경우

Fig 3에서 C<sub>3</sub>S의 수화로 인한 Ca(OH)<sub>2</sub> 생성 반응에 따른 peak II의 정점 도달시간 및 정점에서 수화발열속도는 시료 AO인 경우 14시간 30분, 3.0cal/g.hr인데 비하여 시료 BO의 경우에서는 7시간 30분, 5.9cal/g.hr로 빨라지나 시료 CO에서는 AO와 유사한 경향이나 15시간 35분, 2.8cal/g hr로 다소 늦어지는데 이러한 현상은 C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계 수화에서 polymorphous-C<sub>3</sub>A의 수화가 공존하는 C<sub>3</sub>S의 수화에 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

C-C<sub>3</sub>A의 수화(AO)를 기준으로 비교하여 볼 때 Na가 고용된 O-C<sub>3</sub>A 수화(BO)의 경우는 수화반응속도가 느려서 C<sub>3</sub>A의 수화로 인한 수용액 중으로 방출되는 [Ca<sup>2+</sup>]가 동일 수화시간의 C-C<sub>3</sub>A의 경우에 비하여 떨어짐으로서, 이러한 결과는 상대적으로 C<sub>3</sub>A와 함께 수화를 하고 있는 C<sub>3</sub>S의 수화반응 속도를 가속화시켜 Ca(OH)<sub>2</sub> 생성 반응이 활발해지며 이로 인한 생성열이 증가하기 때문으로 생각된다.

O-C<sub>3</sub>A의 수화속도가 C-C<sub>3</sub>A에 비하여 늦다는 것은 Ca<sub>3-x</sub>Na<sub>2x</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 고용체들의 현탁액(W/S비=100)수화 실험을 통하여 C<sub>3</sub>A에 고용된 Na가 수화 과정에서 수용액 중으로 방출되어 [Na<sup>+</sup>]가 증가 할수록 C<sub>3</sub>A의 수화속도는 지연된다고 보고<sup>11)</sup>한 바 있다.

Table 2는 수화 12시간 및 24시간 경과한 수화물의 분석 결과로서 C<sub>3</sub>S의 수화반응율은 X-선 회절정량분석법, Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성량은 열분석에 의한 수분 분해량(450-500℃)으로 계산하였다. 시료 BO의 경우 동일 수화시간에서 C<sub>3</sub>S의 수화반응율(12시간 : 56.6%, 24시간 : 64.4%) 및 Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성물(12시간 : 11.5%, 24시간 : 14.1%)이 시료 AO 및 CO에 비하여 높은 것으로 보아 C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>

Table 2. Hydration Properties of Samples after 12 and 24 Hrs of Hydration.

Item.	Sample No.			
	Hydration time(hr)	AO	BO	CO
Reaction degree of C <sub>3</sub> S (%)	12	30.2	56.5	29.1
	24	45.2	64.4	56.1
Production degree of Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	12	5.8	11.5	4.9
	24	11.5	14.1	13.2
Cumulative heat liberation (cal/g)	12	49.7	72.4	29.3
	24	74.1	91.7	61.7

C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계의 초기수화 반응 특성에 미치는 석크의 영향(II)

A 계 수화시 Na가 고용된 O-C<sub>3</sub>A의 경우는 C-C<sub>3</sub>A 및 M-C<sub>3</sub>A에 비하여 공존하는 C<sub>3</sub>S의 수화 반응 속도를 가속화시킨다는 것을 확인할 수 있다.

한편 시료 CO의 경우는 peak II의 형태가 전반적으로 시료 AO와 유사한 경향이나, peak II의 개시 및 정점 도달시간이 다소 늦게 나타난다 이는 시료 CO 수화의 경우, M-C<sub>3</sub>A의 유리화 과정에서 완전한 유리상이 되지 못한 상태로 소량 존재하는 비화학량적 조성인 불안정한 결정의 칼슘알루미네이트상들(이하 U-phase로 약기)의

수화 활성도가 높아 수화초기 단계에서 빠른 수화 반응을 일으키기 때문인 것으로 생각된다. 즉 시료 BO의 경우에서 기술한 것과 같은 수화 메카니즘 개념으로 C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계 수화에서 C<sub>3</sub>A의 수화속도가 빨라짐으로서 C<sub>3</sub>S의 수화속도가 다소 지연되어 Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성반응에 기인하는 peak II의 개시 및 정점 도달시간이 늦어지는데 Table 2의 수화 12시간 후의 C<sub>3</sub>S 수화반응 및 Ca(OH)<sub>2</sub> 생성율을 비교하여 보면 시료 AO에 비하여 시료 CO가 다소 낮게 나타나고 있다.

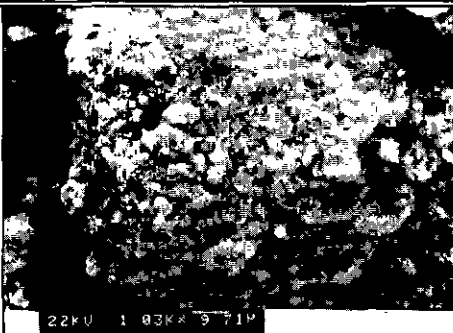
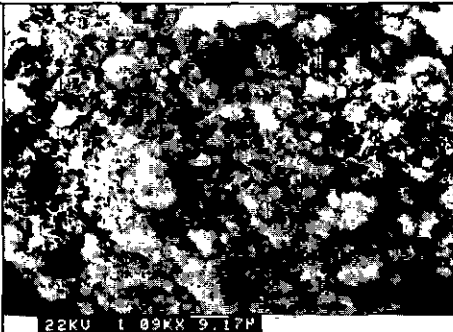
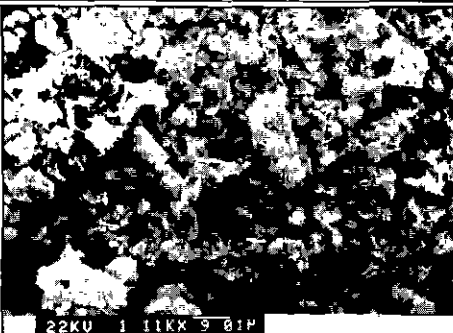
Sample No.	Chemical Composition (%)		Morpholgy of CSH
	CaO	SiO <sub>2</sub>	
AO	CaO	61.93	
	SiO <sub>2</sub>	33.38	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.69	
	C/S mole ratio	1.99	
BO	CaO	59.94	
	SiO <sub>2</sub>	32.59	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95	
	C/S mole ratio	1.97	
CO	CaO	60.31	
	SiO <sub>2</sub>	34.73	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.96	
	C/S mole ratio	1.86	

Fig. 5. SEM micrographs and EDS analysis of the CSH produced in the system 75% C<sub>3</sub>S-25% C<sub>3</sub>A (after 12hours of hydration).

그러나 수화 24시간 후의  $C_3S$  수화반응물 및  $Ca(OH)_2$  생성물을 비교하여 보면 시료 CO의 경우가 시료 AO보다 높게 나타나는 것으로 보아  $M-C_3A$ 에 존재하는 U-phase의 빠른 수화반응이 종료된 후의  $M-C_3A$ 의 수화속도는  $C-C_3A$ 에 비하여 낮다고 생각되는데, 이는 일반적으로 유리질  $C_3A$ 는  $Al-O$ (oxygen)간의 결합 에너지가 결정질  $C_3A$ 에 비하여 높아서<sup>10)</sup> 수화 활성도가 떨어지기 때문이다.

Fig. 5는 전보<sup>9)</sup>에서 기술한 바와 같이  $C_3S-C_3A$ 계 수화시  $C_3A$ 로부터 용해된  $Al^{3+}$ 이  $C_3S$ 의 초기 수화생성물인 gel 형태의 calcium silicate hydrates(이하 CSH로 약기)에 결합됨으로써  $C_3S$ 의 수화반응 과정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수화 12시간 경과한 수화물에 대한 SEM-EDS 분석 결과이다. CSH로 관찰되는 수화물에서  $Al_2O_3$  함량이 시료 BO인 경우 3.95%, 시료 AO 경우 4.69%, 시료 CO의 경우 4.96% 순으로 적게 결합되어 있으며, 이는  $C_3S$ 의 수화반응물 및  $Ca(OH)_2$ 의 생성량과 반비례하는 것으로 보아  $C_3A$  결정의 변태에 따른 수화속도 변화가 공존하는  $C_3S$ 의 수화반응물에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한  $C_3A$ 의 수화로 인한 수용액 중의  $Al^{3+}$ 이  $C_3S$ 의 초기 수화생성물인 CSH에 결합되는 양이 달라짐으로서  $C_3S$ 의 수화반응 과정에서 생성되는 수화생성물의 결정전이 속도에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 석고가 존재하는 경우

Fig. 4에서 peak II의 모양은 석고가 존재하지 않는 경우에 비하여 모든 경우에서 전반적으로 높아지는데 이는  $C_3S-C_3A$ -석고계 수화에서는  $C_3A$ 와 석고와의 반응이 속도결정 단계가 됨으로써  $C_3A$  수화에 의한  $C_3S$ 의 수화반응 지연 영향이 감소<sup>9)</sup>되기 때문이나, monosulfate 생성반응에 기인하는 peak III의 변화는  $C_3A$ 의 결정변태에 따라 큰 변화를 나타낸다.

시료 AG의 경우는 peak II와 peak III이 겹치면서 peak III의 정점 도달 시간이 17시간 25분, 정점에서의 수화발열 속도는 5.6cal/g.hr로 나타나는 반면에 시료 BG 및 CG의 경우는 peak III의 모양이 뚜렷하게 구분되어 나타나지 않는다. 그러나 수화 24시간 경과후의 수화물에 대한 열분석 결과(Fig. 6)를 보면 이들 두 시료에 있어서도 200°C 부근에서 monosulfate에 의한 흡열 피크가 작게나마 존재하는 것으로 보아 수화발열 특성상으로는 나타나지 않지만 소량의 monosulfate 생성반응이 진행되고 있다

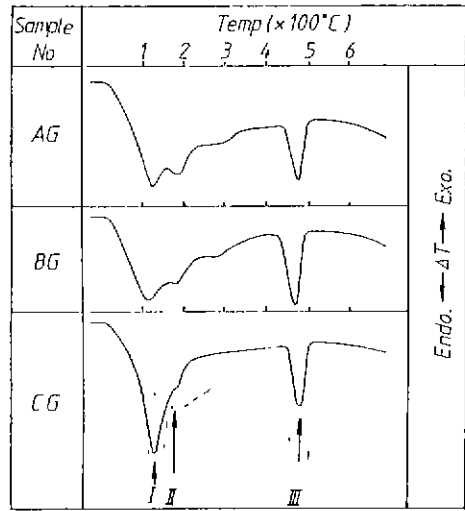


Fig. 6. Thermograms of hydrated products in the system  $C_3S-C_3A$ -Gypsum after 24 hours of hydration. (I = ettringite, II = monosulfate, III =  $Ca(OH)_2$ )

는 것을 알 수 있다. 이와 같은 monosulfate 생성반응 정도의 차이점은 결정 변태에 따른  $C_3A$ 의 수화반응 속도 차이점 및 이로 인한 석고의 용해 및  $C_3A$ 와의 반응속도 등이 서로 복합되어서 나타나는 결과로서 다음과 같이 생각할 수 있다.

$C-C_3A$ 의 수화(AG)를 기준으로 하여 비교하여 볼 때  $O-C_3A$ 의 수화(BG)에서는 수용액 중의  $[Na^{+}]$ 로 인하여  $C_3A$ 의 수화속도가 지연되어 극부화학적(topochemical) 반응으로 소량의 monosulfate 반응이 일어나기는 하지만 전체적으로는  $C_3A$  입자주변에서 연속적으로 새로운 ettringite 생성반응이 일어남으로써 monosulfate 생성반응이 지연되는 것으로 생각되는데 이러한 현상은 Regourd<sup>11)</sup> 등이  $C_3S-Na_2O$  doped  $C_3A$ -gypsum 계에서 수화 11일 후에 pure- $C_3A$ (no  $Na_2O$ )는 monosulfate로 둘러싸여 있는 반면에 Na-doped  $C_3A$ 는 ettringite로 둘러싸여 있다고 보고한 바 있다.

한편  $M-C_3A$ 의 수화(CG)에서는 수화초기 단계에서 U-phase들의 빠른 수화반응으로 인하여 석고로부터 용해된 sulfate ion과의 결합 반응이 가속화되어  $C_3A$  입자 표면을 다량의 ettringite가 치밀하게 둘러싸므로 미수화  $C_3A$ 와 수용액과의 접촉이 방해되어 미수화  $C_3A$ 의 수화반응이 활발치 못하여 monosulfate의 생성반응이 지연

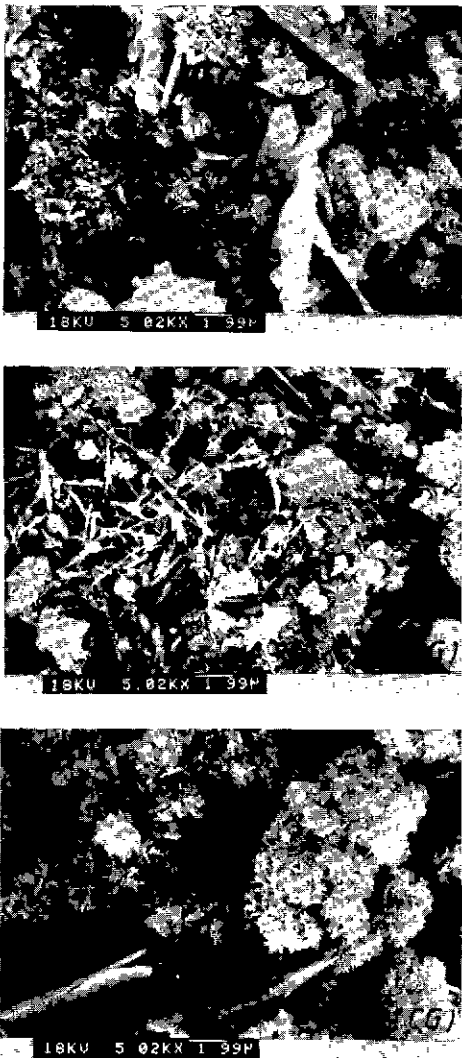


Fig. 7. Morphology of ettringite according to the C<sub>3</sub>A polymorphism in the system C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A-Gypsum.

되는 것으로 생각되는데 SEM-EDS 관찰결과(Fig.7) 수화 24시간 경과 후에도 C<sub>3</sub>A 입자표면이 짧은 막대형의 ettringite 상과 foil 형태의 막(sub-stratum)으로 덮혀 있는 것을 볼 수 있으며 이 두 성분 모두 수화지연 기능이 크다고<sup>12)</sup> 알려져 있다.

그러나 Fig.7의 ettringite 형태를 비교하여 보면, M-C<sub>3</sub>A의 경우의 ettringite 형태는 짧은 막대형인데 비하여 O-C<sub>3</sub>A에서는 침상형으로 C-C<sub>3</sub>A에서는 이 둘 간의 중간형으로 나타나는데 이러한 ettringite 형태의 차이점은

석고의 용해도에 따른 수용액 중의 [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]의 변화 때문일 것이며, 수화생성물 결정성장 측면에서 좀 더 검토되어야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

75%C<sub>3</sub>S-25%C<sub>3</sub>A 계에서 C<sub>3</sub>A의 결정 변태가 초기수화 반응특성에 미치는 영향을 석고 존재 여부에 따라 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) C<sub>3</sub>A는 결정형태에 따라 자체의 수화반응 속도가 달라지면서 공존하는 C<sub>3</sub>S의 수화반응 속도에 영향을 미치는데 cubic-C<sub>3</sub>A에 비하여 Na가 고용된 orthorhombic-C<sub>3</sub>A는 C<sub>3</sub>S의 수화반응속도를 가속화시키니 유리상으로 존재하는 melt-C<sub>3</sub>A는 C<sub>3</sub>S의 수화반응 속도를 지연시킨다.

2) 석고 존재시의 수화에서는 orthorhombic-C<sub>3</sub>A 및 melt-C<sub>3</sub>A 경우 모두 monosulfate 생성반응이 지연되는 현상이 나타나는데, 이는 orthorhombic-C<sub>3</sub>A는 수용액 중의 [Na<sup>+</sup>]로 인하여 C<sub>3</sub>A의 수화반응속도가 지연되어 C<sub>3</sub>A 입자 주변에서 연속적으로 새로운 ettringite의 생성반응이 이루어지기 때문이며, melt-C<sub>3</sub>A는 수화 초기 단계에서 C<sub>3</sub>A의 입자 표면이 다량의 ettringite로 치밀하게 둘러 싸이므로서 미수화 C<sub>3</sub>A와 수용액과의 접촉이 방해되기 때문인 것으로 생각된다

#### REFERENCES

1. I. Maki, "Nature of the Prismatic Dark Interstitial Material in Portland Cement Clinker." *Cem. Conc. Res.*, 3 (3), 295-313 (1973).
2. I. Maki, "Morphology of the So-Called Prismatic Phase in Portland Cement Clinker," *Cem. Conc. Res.*, 4 (1), 87-93 (1974).
3. M. Regourd and A. Guinier, "The Crystal Chemistry Constituents of Portland Cement Clinker." 4th, Int. Symp. Chem., Moscow, 1-A, A Principal Paper (1974).
4. 신규연, 한기성, "C<sub>3</sub>S-C<sub>3</sub>A 계의 초기 수화 반응 특성에 미치는 석고의 영향(I)," *한국요업학회지*, 26 (4), 514-520 (1989).
5. G.Y. Shin and F.P. Glasser, "Interdependence of

- Sodium and Potassium Substitution in Tricalcium Aluminate," *Cem. Conc. Res.*, **13** (1), 135-140 (1983).
6. I. Maki, M. Nishi and T. Sugimura, "Structural Changes in the Orthorhombic Modification of Tricalcium Aluminate." *J. Ceram. Soc. Japan*, **79** (7), 241-245 (1971).
  7. P.V. Zozalya, "On the Composition of the Liquid Phase of Portland Cement Clinker," 4th, Int. Symp. Chem, Moscow, 1-B, (1974).
  8. A.I. Boikova, A.I. Domansky and V.A. Paramonova, "The Influence of Na<sub>2</sub>O on the Structure and Properties of 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Cem. Conc. Res.*, **7** (5) 483-492 (1977).
  9. G.Y. Shin and F.P. Glasser, "Chemistry of Cement Pore Fluids—I. Suspension Reactions of Ca<sub>3-x</sub>Na<sub>2x</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> Solid Solutions with and Without Gypsum Additions," *Cem. Conc. Res.*, **13** (3), 366-376 (1983).
  10. N. Tsuyuki, N. Hirota, T. Miyakawa and J. Kasai, "The Physical Properties and The Hydration Mechanism of C<sub>3</sub>A in the Presence of CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O and Ca(OH)<sub>2</sub>," 8th, Int. Symp. Chem., Brasil, VI, 400-404 (1986).
  11. M. Regourd and B. Mortureux, "Tricalcium Aluminate in Synthetic Solid Solutions and in Cements," Contribution to a Cembureau Seminar on Reactions of Aluminates During the Setting of Cements, Univ. of Tech., Eindhoven, Netherlands, 13-14 (1977).
  12. P.W. Brown, L.O. Libermann and G. Frohnsdorft, "Early Hydration of Tricalcium Aluminate in Solutions Containing Calcium Sulfate," *J. Am. Ceram. Soc.*, **67** (12), 793-799 (1984)

---

\*Cement chemists' nomenclature is used.

C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\bar{S}$ =SO<sub>3</sub>, H=H<sub>2</sub>O

Ettringite=Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>12</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 26H<sub>2</sub>O

Monosulfate=Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>12</sub>(SO<sub>4</sub>) · 6H<sub>2</sub>O