

# Alite의 水和反應速度와 反應機構

李 承 燦 (譯)

〈韓國洋灰工業協會技術開發部〉

## 1. 서 론

시멘트 화합물의 初期水和에 대해서는 그 誘導期에 이르기까지 일어나고 있는 물리화학적 변화의 복잡성 때문에 아직까지도 완전히 糾明되지 못하고 있다. Alite의 형태를 가진  $C_3S$ 는 포틀랜드 시멘트의 주 組成物로서 水和過程 전체를 支配한다. 이 조성물의 수화는 단지 동시에 連續的으로 그리고 順次的인 反應을 한다는 것 이외에는 더 이상 확인된 바 없다. 일부 學者들이 각기 다른 방법으로 여러가지 온도에서 순수한  $C_3S$  및 Alite의 수화에 관해 연구한 바 그 수화과정을 解析하기 위한 여러가지 反應機構들이 提示되고 있으나 溶解現象, 誘導期の 존재와 그 終了에 대한 이유, 生成過程 그리고 水和生成物의 조성과 液相의 조성 등 대부분의 解析이 제각기 다르다.

本稿는 여러가지 온도에서 傳導熱計量法을 사용하여 제타電位를 測定하고 또한 X線廻折分析和 走査電子顯微鏡 사진으로 Alite의 수화반응을 연구한 것이다. 이에는 타당성 있는 水和反應機構가 논의되어 있다.

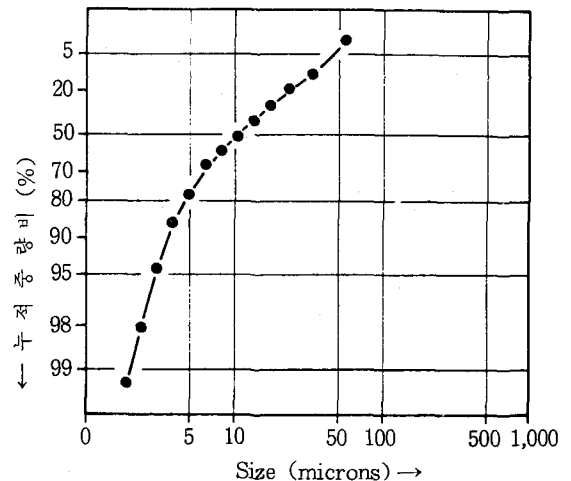
## 2. 實驗 ; Alite의 調製

실리카(Aerosil)와 CaO를 1:3의 比率로 혼합시키되 CaO는 理論的 비율보다 약간 많게

하고 이 혼합물에 흔히 알고 있는 量 만큼의  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , MgO 등을 첨가하였다. 均質한 혼합물을 얻기 위해 이 혼합물에 물을 충분히 가하여 24시간 불밀에서 분쇄시켰다. 다음 全量을 석고판 위에서 乾燥시킨 후 顆粒으로 만들어  $1,310^{\circ}C$ 에서 20분간 가열하여 제조하였다. 그리하여 다음과 같은 성분을 가진 Alite가 얻어졌다.

산화물 함량 (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
	70.0	24.7	1.03	1.22	0.29	0.05	0.03	2.26

Alite가 만들어진 것은 X線廻折分析으로 확



〈그림-1〉 Alite의 입자 크기 分布 (RRSB Diagram)

인되었다. 또한 遊離石灰의 함량은 1.6 wt.%이고 比表面積은 3,890 cm<sup>2</sup>/g 정도로 하였다. 레이저顆粒測定器 (Laser granulometer)로 측정된 입자크기 分布는 <그림-1>과 같다.

### 3. 方 法

#### 1) 水和熱

Alite의 수화열은 文獻(8)에 記述된 바와 같이 傳導熱量計를 이용하여 측정하였다. 즉 Alite 2g을 원통형 셀(cell)에 담아 mg 단위로 정밀하게 秤量하고 또 다른 셀에는 같은 양의 미분쇄시킨 石英(Quartz)을 담아 秤量한다. 그리고 이 두 셀을 각각 피펫(pipette)에 끼워 맞추고 물/시멘트 比를 1.0으로 하기 위해 2ml의 증류수가 들어 있는 주사기를 附着시킨 다음 熱量計 안에 넣어 일정한 온도로 유지시킨다. 마지막으로 熱平衡 原則에 따라 Alite와 Quartz가 들어 있는 셀 속으로 물을 注入한 뒤 혼합이 잘 되도록 1분간 흔들어서 준다. 이후의 發熱速度는 recorder에 기록된다. 실험은 5, 10, 20, 30°C 및 40°C에서 실시하였다.

#### 2) 제타電位(Zeta Potential) 測定

제타電位の 測定은 Zetameter를 이용하였다. 0.02g의 Alite를 100ml의 물과 10<sup>-3</sup>M의 수산화칼슘 溶液에 각각 分散시킨 후 超音波를 사용하여 5분간 均質化시킨다. 그 다음 이 懸濁液을 두개의 電極이 장치된 Zetameter의 電氣移動容器(Electrophoretic cells)에 넣는다. 물리브덴棒은 陽極으로서 그리고 백금-이리듐棒은 陰極으로서 작용된다. 먼저 이 懸濁液의 比傳導率을 측정하고 手動裝置로부터 얻은 對應電壓은 입자의 電氣移動度를 측정하는데 사용하였다. 그리고 개별 입자들의 이동을 Zetameter에 부착된 현미경으로 관찰하였다.

Field의 傾斜度에 따라 입자가 固定된 거리(160 마이크론)를 이동하는데 소요된 시간은 보통의 측정방법으로 실시하였으며 입자의 이동시간은 여러 수화시간 간격마다 구분하여 기록해 두었다. 여기서 입자들은 항상 陽電荷로 帶電되어 陽極에서 陰極으로 이동한다는 것을 알게 되었다.

었다. 이 관찰로부터 제타電位는 溫度補正이된 計器로부터 얻은 자료를 이용하여 계산하였으며 각각의 제타電位 값은 10회 관찰의 平均値이다. 한편 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 wt.%의 Melment 樹脂를 각각 첨가하였을 때의 제타電位도 측정하였다. 이 경우에는 0.02g의 Alite를 100ml의 Melment 용액에 分散시킨지 10분 뒤에 측정하였다.

#### 3) X線廻折分析

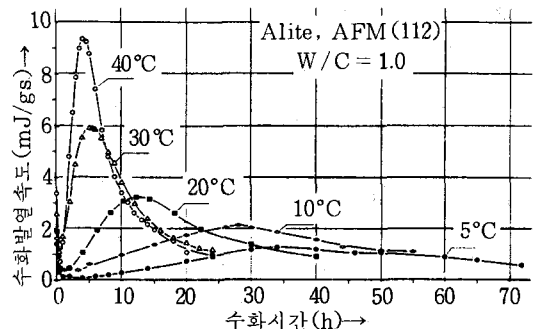
각각 5°C 및 20°C의 熱量計에서 72시간 수화된 Alite를 CuK $\alpha$ 의 輻射를 이용한 X線廻折圖로서 분석하였다.

#### 4) 走査電子顯微鏡(SEM) 分析

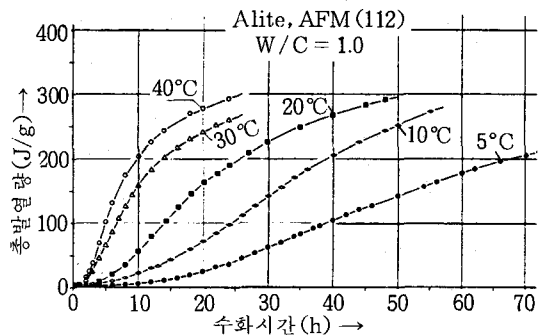
역시 5°C 및 20°C에서 72시간 수화된 Alite의 SEM 寫眞을 관찰하였다.

### 4. 結果 및 考察

<그림-2>는 각각의 온도에서 Alite의 수화가 진행되는 동안 시간에 따른 水和發熱速度의



<그림-2> 온도변화에 따른 Alite의 水和發熱速度



<그림-3> 온도변화에 따른 Alite의 總發熱量

변화를 나타낸 것이며 <그림-3>은 각 온도별로 시간의 흐름에 따른 總發熱量을 나타낸 것이다.

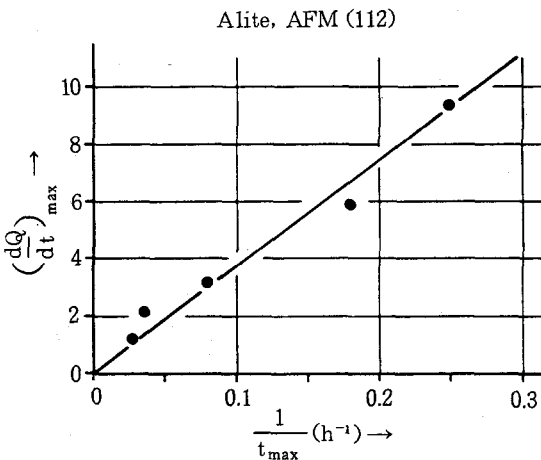
<그림-2>의 水和發熱速度曲線은 4部分으로 나누어 생각할 수 있다. 第1段階는 Alite가 물과 접촉하기 시작하자마자 높은 속도의 發熱이 일어난 것으로 보이며 이 期間은 거의 5분간 계속된다. 다음 제 2段階에서는 발열속도가 매우 느려지는데 이를 誘導期 또는 休止期라 하며 온도에 따라 0.5~6시간 동안 유지된다. 誘導期가 終了되면 第3段階인 加速期로서 다시 높은 發熱速度로서 수화가 加速하기 시작하여 最大値에 이르게 된다. 第4段階는 減速期로서 發熱速度가 계속적으로 감소하여 수화의 最終段階에 이르면 현저히 느려진다.

온도에 따른 변화는 水和發熱速度曲線의 第3段階까지 영향을 미친다. 즉 온도가 상승함에 따라 다음과 같은 변화가 온다. ① 初期發熱速度가 증가하고 ② 誘導期가 짧아지며 ③ 發熱速度의 頂點이 더욱 높아짐과 동시에 수화시간이 더 짧은쪽으로 이동한다.

여기서 Q를 어떤 주어진 시간 t에서의 總發熱量이라 하면  $(dQ/dt)_{max}$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{max} = \frac{A}{t_{max}} \dots\dots\dots (1)$$

A는 常數로서 이 식의 妥當性을 위해  $1/t_{max}$



<그림-4> 식(1)의 시험

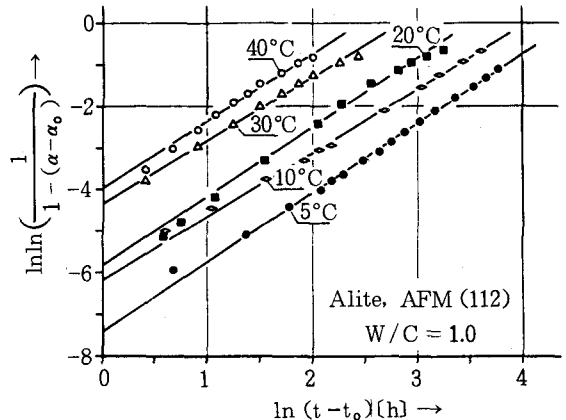
에 대한  $(dQ/dt)_{max}$ 로 플로팅(plotting) 하면 직선으로 나타난다(<그림-4>).

수화반응속도 전체는 溶解, 核生成, 結晶成長 등 系統的인 과정에 따르며 그것은 가장 느린 段階의 속도로서 결정된다. 즉 律速段階(速度決定段階)는 Alite의 溶解速度, 수화물의 核生成速度와 成長速度 또는 移動過程의 速度와 관계가 있는 것으로 보인다. 그러나 이 식은 단순한 動態方程式이 아니며 수화과정 전체의 反應 데이터에 적합하다. Fierence 외 몇 學者들<sup>2)</sup>은 그들의 反應데이터를 附合시키기 위해 Avrami 方程式을 사용하였다. 그렇지만 그 데이터는 단지 初期수화시간 즉 5°C에서 9시간, 45°C에서 2시간 동안에만 有效하다. 즉 核生成 및 結晶成長을 隨伴하는 加速期인 水和發熱速度曲線(<그림-2, 3>)의 제 3 단계에 한해서만 認定될 수 있으며 그 수화반응속도는 다음과 같이 修正된 Avrami 方程式으로 표시할 수 있다.

$$-\ln [1 - (\alpha - \alpha_0)] = k_1 (t - t_0)^M \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $\alpha_0$ 는 誘導期 끝의 시간  $t_0$ 에서의 水和率이며  $\alpha$ 는 어떤 주어진 시간 t에서의 水和率을 뜻한다. 그리고  $k_1$ 은 겉보기速度常數, M은 또 다른 常數이다.  $\alpha$ 의 決定을 위해 완전히 수화될 때 발생하는 수화열은 500 J/g이 되는 것으로 假定하였다.

$\ln \ln 1/[1 - (\alpha - \alpha_0)]$ 를  $\ln(t - t_0)$ 에 대해 플로팅하면 <그림-5>에서 보는 바와 같이 직선으로 나타난다.



<그림-5> 식(2)의 시험

식(2)에서의  $k_1$ ,  $M$  및 加速  
期的 活性化에너지와 엔트로피

<表-1>

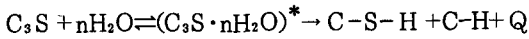
Spec. No.	Temp. (°C)	$k_1$	M (h <sup>-1</sup> )	E (kJmol <sup>-1</sup> )	S* (JK <sup>-1</sup> )
1	5	$0.61 \times 10^{-3}$	1.65		
2	10	$2.13 \times 10^{-3}$	1.52		
3	20	$3.01 \times 10^{-3}$	1.65	54.4	-112.2
4	30	$12.91 \times 10^{-3}$	1.52		
5	40	$19.25 \times 10^{-3}$	1.60		

이 직선의 截片과 기울기로부터 계산된  $k_1$ 과 M의 값이 <表-1>에 나와 있다.

<表-1>에서 온도가 증가함에 따라  $k_1$ 의 값이 증가하는 반면 M은 거의 일정하게 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편  $\ln k_1$ 을 絕對溫度의 逆數  $1/T$ 에 대해 플롯하면 직선으로 나타나서(<그림-6>) Arrhenius 方程式과 일치한다.

이 직선의 기울기로부터 계산된 活性化 에너지가 <表-1>에 주어져 있는데 이 값은 다른 學者들이 報告한 數値와 동일하며 活性化 엔트로피 또한 活性化 에너지로부터 계산할 수 있다.

Alite의 수화과정에는 다음과 같은 平衡이 존재한다.



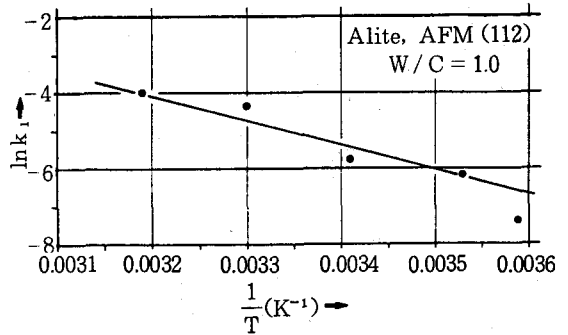
여기서 轉移狀態理論에 의하면  $(C_3S \cdot nH_2O)^*$ 는 活性化物을 나타내며 Q는 發熱量을 나타낸다. 質量作用의 法則에 따라

$$K^* = \frac{(C_3S \cdot nH_2O)^*}{(C_3S) \times (H_2O)^n} \dots\dots\dots (3)$$

$K^*$ 는 활성화物의 생성을 위한 平衡常數이다. 역시 轉移狀態理論에 의하면 反應速度는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{-d(C_3S)}{dt} = (C_3S \cdot nH_2O)^* \times \text{장벽 통과 속도} \dots (4)$$

장벽 통과속도는 활성화物이 수화물 속으로 흘러 떨어져 떨어져 나갈 때의 振動數와 같다. 이 錯物은 그 振動이 並進運動을 할 때 떨어져 나가며 진동하기 이전에 錯物을 가지고 있는 結합들 모



<그림-6> 水和加速期에서의 Arrhenius plot

두는 단순히 分離된 斷片 사이의 中心線이 된다. 振動數  $\nu = \epsilon/h$ 로서  $\epsilon$ 는 分解에 이르는 平均振動 에너지이며 h는 플랑크常數(Plank's constant)이다. 이는 온도 T에서 들뜬 상태이므로 古典에너지  $\epsilon = kT$ 로 표시할 수 있으며 여기서 k는 볼츠만常數(Boltzmann constant)이다. 그러므로 振動數  $\nu = kT/h$ 가 되어 反應속도는 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{-d(C_3S)}{dt} &= k_1(C_3S) \times (H_2O)^n \\ &= K^*(C_3S) \times (H_2O)^n \times \frac{kT}{h} \end{aligned}$$

또는  $k_1 = kT/h \cdot K^* \dots\dots\dots (5)$

여기서 平衡常數  $K^*$ 는 다음 식에 나오는 活性化自由에너지  $\Delta G^*$ 와 관계가 있으므로

$$\Delta G^* = -RT \ln K^* \dots\dots\dots (6)$$

또는  $K^* = e^{-\Delta G^*/RT} \dots\dots\dots (7)$

식(5)와 (7)을 결합하면

$$k_1 = kT/h e^{-\Delta G^*/RT} \dots\dots\dots (8)$$

그런데  $\Delta G^*$ 는 活性化 엔트로피  $\Delta S^*$ 와 관계가 있으므로

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T \Delta S^* \dots\dots\dots (9)$$

또한  $\Delta H^*$ 는 活性化 엔탈피로서 活性化 에너지와 관계가 있으므로

$$E = \Delta H^* + RT \dots\dots\dots (10)$$

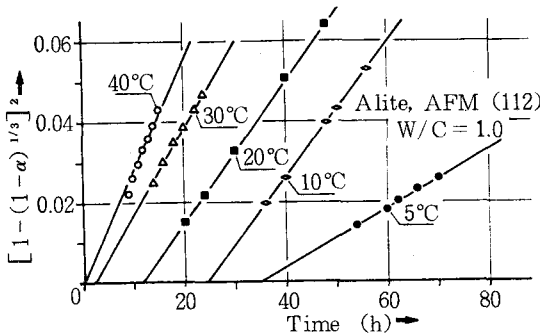
이와 같이 방정식 (8), (9), (10)을 사용한 20°C

의 활성화 엔트로피 계산값이 <表-1>에 나와 있다. 엔트로피의 감소(negative)는 활성화물의 불규칙한 분자配列이 어느 정도 정돈되었음을 뜻한다. C<sub>3</sub>S와 H<sub>2</sub>O 분자는 상당한 自由損失이 생긴 傳移狀態下에서 이미 결합된 것으로 結論지을 수 있다. 이로써 방정식 (2)가 수화반응이 擴散 調節되기 시작할 때까지의 데이터에 적합하다는 것은 <그림-5>에 의해 매우 확실해졌다. Jander 방정식 (11)은 이러한 減速期の 데이터 算出에 적합하다.

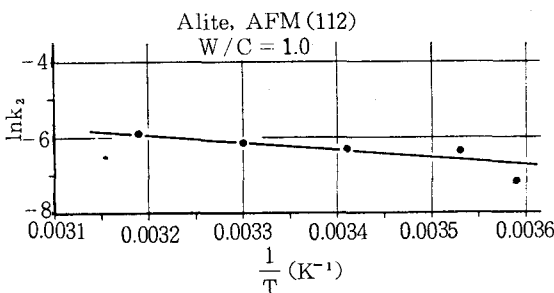
$$\{1-(1-\alpha)^{1/3}\}^2 = k_2 t - \text{상수} \dots\dots (11)$$

여기서 k<sub>2</sub>는 擴散을 위한 겔보기速度常數로서 {1-(1-α)<sup>1/3</sup>}을 t에 대해 플롯하면 직선으로 나타난다(<그림-7>). 직선의 기울기로부터 계산된 速度常數는 <表-2>에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 같이 증가하고 있다. lnk<sub>2</sub>를 絕對溫도의 逆數(1/T)에 대해 플롯하면 직선으로 나타난다(<그림-8>). 擴散에 필요한 活性化 에너지와 엔트로피의 계산치 또한 <表-2>에 주어져 있다.

活性化 에너지는 물의 自體擴散에 필요한 活



<그림-7> Jander 방정식(11)의 試驗



<그림-8> 水和減速期에서의 Arrhenius plot

性化 에너지(4.6 kcal/mole 또는 19.2 J/mole)와 같다. 活性化 에너지의 減少幅이 核生成 調節過程時보다 2倍가 넘음을 알 수 있는데 이는 活性化물이 정돈된 분자配列을 더욱 많이 가지고 있음을 뜻한다.

위의 결과는 Alite의 수화에 있어서의 두 반응과정이 系統的으로 일어나고 있음을 뚜렷하게 나타내고 있다. 加速期에서의 核生成 및 結晶成長은 速度調節過程이며 減速期는 擴散調節過程으로서 그 데이터는 Jander 방정식에 따른다.

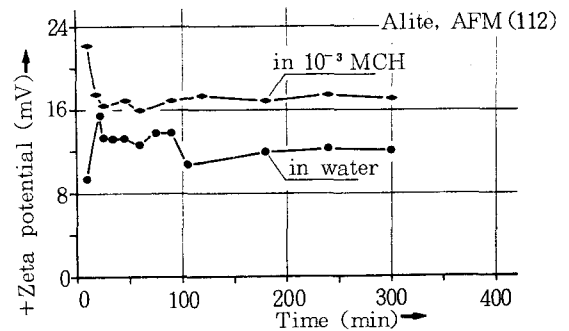
水和反應機構를 이해하기 위해 수화가 開始될 때 Alite 표면에서 일어나는 帶電現象을 考察해 보는 것은 필수적이다. 이를 위해 제타電位(Zeta Potential)를 물과 10<sup>-3</sup> M의 수산화칼슘溶液에서 시간의 函數로서 측정하였다(<그림-9>).

제타電位는 항상 陽電荷를 띄며 初期水和期間(30분)을 제외하고는 측정시간 300분까지 거의 일정한 수준을 나타내고 있다. 초기수화기간 동안의 제타電位の 변화에 대해서는 解析하기가 어렵다. 대체로 이 期間 중에는 電氣二

擴散에 필요한 速度常數(k<sub>2</sub>), 活性化 에너지(E), 活性化 엔트로피(S\*)

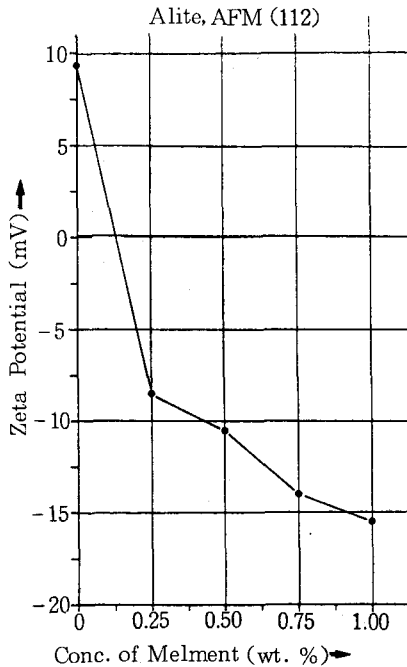
<表-2>

Spec. No.	Temp. (°C)	k <sub>2</sub> (h <sup>-1</sup> )	E (kJmole <sup>-1</sup> )	S* (JK <sup>-1</sup> )
1	5	0.70 × 10 <sup>-3</sup>	17.2	-246.9
2	10	1.67 × 10 <sup>-3</sup>		
3	20	1.75 × 10 <sup>-3</sup>		
4	30	2.13 × 10 <sup>-3</sup>		
5	40	2.77 × 10 <sup>-3</sup>		



<그림-9> Alite의 제타電位 변화

重層에서 이온의 吸着 및 脫着이 일어나는 것으로 추측된다.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 존재하에서의 수치는 항상 높다. 이미 糾明된 바와 같이  $\text{C}_3\text{S}$ 는 물과 접촉하자마자 加水分解가 시작되어  $\text{Ca}^{++}$ 이온은 실리온 4面體를 떠나 溶液 속에 존재하게 되며 이 용액 속의 陽이온은 그후 Alite 표면에 吸着하게 됨으로써 positive의 제타 電位가 나타나게 되는 것이다. 그러나  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 존재하에서는  $\text{Ca}^{++}$ 이온의 濃도가 더욱 높아지기 때문에 더 많은  $\text{Ca}^{++}$ 이온이 표면에 吸着하게 되어 제타 電位 또한 더욱 높아지게 된다. X線分光光度分析(X-ray photoelectron spectrophotometric analysis)<sup>11)</sup>에 의하면 5초~1분간 수화하는  $\text{C}_3\text{S}$ 의 표면에서는 끊임없이 位置가 뒤바뀌고 있는 것을 볼 수 있는데 이것이 平衡狀態는 아니며 그 1분 뒤에는  $I_{\text{Ca}}/I_{\text{Si}}$ 가 最大値에 달한다. 다시 말해 풍부해진 실리온 표면에  $\text{Ca}^{++}$ 이온이 化學吸着을 하는 것으로 설명될 수 있다. 또한 높은 pH에서의  $\text{Ca}^{++}$ 이온은 실리카 표면에 대해 높은 親和力을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서  $\text{C}_3\text{S}$ 의 수화에 있어서 溶液 속의 칼슘 含量은 시



〈그림-10〉 Melment 첨가에 따른 Alite의 제타電位 변화

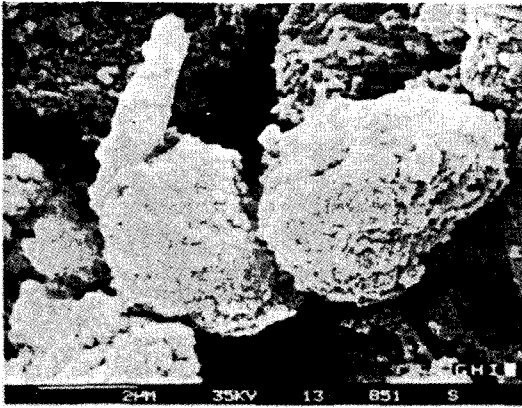
간이 지남에 따라 급격히 증가되는 반면 실리카 입자표면에서는  $\text{Ca}^{++}$ 의 吸着이 용이하기 때문에 溶液 속의 실리카는 점차 적어진다.

또한 이러한 吸着過程을 확인하기 위해 超可塑劑(Superplasticizer)인 Melment를 여러가지 濃도로 첨가하여 제타電位를 측정하여 본 결과(〈그림-10〉) 측정치는 negative로 나타났으며 Melment의 濃도가 증가할수록 더욱 낮아졌다. 이 negative로의 변화는 Melment가 Alite의 표면에 吸着되고 있다는 것을 뚜렷이 나타내 주는 것이다.

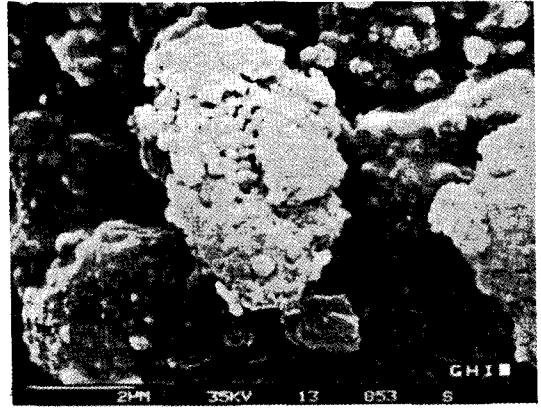
이로써 Alite의 수화가 시작될 때에는  $\text{Ca}^{++}$ 와 같은 陽이온들이 표면에 吸着하여 陽電荷의 電位로 나타난다는 것이 분명해졌다. Alite 표면의 陽電荷는 그 이상의 수화에 대해 장벽 역할을 하여 誘導期를 더욱 길어지도록 만든다. 보편적으로 제타電位는 온도가 상승함에 따라 감소하게 되는데 이는 온도가 더 높아질수록 더 적은 양의 이온이 吸着하게 되는 것을 의미한다. 그러므로 온도의 증가로서 장벽에 의한 영향이 減少됨과 동시에 水和率이 증가하게 되는 바 이는 실제 경우에서도 마찬가지이다. 이 懸濁液의 측정 결과를 페이스트의 수화에 적용시켜 初期水和過程을 看破할 수는 있으나 시멘트-물 시스템에서 제타電位값을 解析할 때에는 주의깊게 다루어야 할 것이다. 餘他 鑛物에 비해 Alite는 水性 懸濁液 속에서 비교적 잘 規定된 表面을 가지는데 시간이 지남에 따라 물 속에 分散된 시멘트의 表面積에 比例하여 그 成分比와 表面電荷를 변화시킨다. 이것이 電氣二重層의 成分比를 변화시키는 이유인 것이다.

熱量計로 5°C 및 20°C에서 72시간 동안 수화시킨 Alite의 X線廻折分析을 각각의 온도에서 서로 다른 수화물을 生成시킬 목적으로 실시하여 보았으나 이 두가지 온도로부터 생성된 수화물은 거의 同一하였다.

5°C 및 20°C에서 72시간 동안 수화시킨 Alite의 走査電子顯微鏡(SEM) 사진이 〈그림-11〉과 〈그림-12〉에 있다. 여기서 5°C에서의 수화물은 20°C에서의 수화물보다 더 치밀해 보이는데 이 또한 낮은 온도에서는 水和速度가 감소한다는 理由 중의 하나가 될 수 있을



〈그림 - 11〉 5°C에서 72시간 수화  
시킨 Alite의 SEM사진



〈그림 - 12〉 20°C에서 72시간 수화  
시킨 Alite의 SEM사진

것이다.

## 5. 結 論

이제까지의 實驗結果들로부터 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

(1) 온도가 상승함에 따라 Alite의 수화는 加速하여 水和發熱速度曲線에서 일어나는 변화는 다음과 같이 ① 初期發熱速度가 증가하고 ② 誘導期가 짧아지며 ③ 發熱速度의 頂點이 더욱 높아짐과 동시에 수화시간이 더 짧은쪽으로 移動한다.

(2) 水和加速期는 核生成이 調節된 過程으로서 反應데이터는 修正된 Avrami 方程式에 따르며 活性化 에너지 및 엔트로피는 각각 13.0 kcal/mole (54.4 KJ/mole), -27.3 cal/K (-114.2 J/K)로 나타난다.

(3) 수화가 擴散調節되었을 때의 反應데이터는 Jander 方程式에 따르며 擴散에 필요한 活性化 에너지와 엔트로피는 각각 4.1 kcal/mole (17.2 KJ/mole), -59.0 cal/K (-246.9 J/K)로 나타난다.

(4) 물과 Ca(OH)<sub>2</sub> 용액에서의 제타電位는 陽이온이 Alite의 표면에 吸着되고 있는 것을 나타낸 반면 Melment의 침가로서 제타電位는 negative로 나타난다. 이 陰전하는 Alite 표면에 樹脂가 吸着되었기 때문인 것으로 보인다.

## 〈參 考 文 獻〉

- 1) Kondo, R., and Ueda, S.: Kinetics and mechanism of hydration of cements. Proc. Vth Int. Symp. Chem. Cem., Tokyo, 1968, Vol. II, pp. 203-255.
- 2) Kondo, R., and Diamon, M.: Early hydration of tricalcium silicate: A solid reaction with induction and acceleration periods. J. Amer. Cerm. Soc., 1969, Vol. 52(9), pp. 503-508.
- 3) Tenoutasse, N., and DeDonder, A.: 'La cinétique et le mécanisme de l'hydratation du silicate tricalcique. Silicates Industriels, 1970, Vol. 35, pp. 301-307.
- 4) Fujii, K., and Kondo, W.: Kinetics of the hydration of tricalcium silicate. J. Amer. Cerm. Soc., 1974, Vol. 57(11), pp. 492-497.
- 5) Fierens, P., Kabuema, Y., and Tirloqu, J.: Influence du milieu de trempe sur la cinétique d'hydratation du silicate tricalcique. Cem. Congr. Res., 1982, Vol. 12, pp. 191-198.
- 6) Skalny, J., and Young, Y. F.: Mechanism of portland cement hydration. Proc. VIIth Int. Cong. Chem., Cem., Paris, 1980, Vol. I, pp. II. 1-35.
- 7) Brown, P. W., Pommersheim, J., and Fronsdorff, G.: A Kinetic model for the hydration of tricalcium silicate. Cem. Congr. Res., 1985, Vol. 15, pp. 35-41.
- 8) Bürger, D., Ph. D.: Thesis submitted to Technische Hochschule, Aachen, W.-Germany, 1985.
- 9) Brown, P. W., Pommersheim, J., and Fronsdorff, G.: Kinetic modelling of hydration process. Cement Research Progress, 1983, pp. 245-260.
- 10) Moore W. J.: Physical Chemistry. Prentice-Hall International, Inc., 3rd ed., 1962, p. 296.
- 11) Regourd, M.: Microanalytical studies (X-ray photoelectron spectrometry) of surface hydration reactions of cement compounds. Technology in the 1990's Developments in Hydraulic Cements, Phil. Trans. R. Soc., London, 1983, Vol. A310, pp. 85-92. ♣

〈資料 : ZKG 12/86〉