

# 시멘트 원료로서 납석 사용에 관한 연구

정현일 · 임영수 · 박해경\*

(아세아시멘트공업(주) 기술연구소)

## 1. 서론

시멘트 원료로서 점토질 원료는 석회석의 품위에 따라 사용 비율이 다르지만, 국내 보통 포틀랜드 시멘트 제조시 5~15% 정도 사용하므로, 그 사용량이 결코 적지 않기 때문에, 점토질 원료의 화학성분 및 광물학적 특성에 따라 시멘트 KILN에서 소성시 소성성에 따른 KILN 생산량에 많은 영향을 줄 뿐만 아니라, 시멘트 제품의 특성에도 영향을 주고 있다.<sup>1)~4)</sup>

현재, 국내 시멘트 공장에서 사용하고 있는 점토질 원료는 그 소비량이 증가함에 따라  $SiO_2$ , 알칼리( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) 성분의 함량이 높아지고 점토질 원료의 필요 성분인  $Al_2O_3$  성분의 함량이 감소하고 있는 추세이므로  $Al_2O_3$  함량이 많은 내화물 주 원료인 납석 사용 가능성을 검토 하였다.

본 연구에서는, 납석 자체에 관한 제반 시험을 행함은 물론, 현재 사용하고 있는 점토질 원료와 점토질 원료를 전량 납석으로 대체하여, 소성후 클링커 광물의 형태, 소성성, 분쇄성 및 시멘트에서의 제반 물리적인 성능을 각각 비교하였고, 이러한 물성에 미치는 요인을 찾고자 메카니즘에 관해서도 고찰해 보았다.

## 2. 납석에 대한 일반적인 사항 및 관련시험

### 1) 일반적인 사항

일반적으로 납석이란 미세한 점토 광물이 치밀하게 집합한 괴로서 주 광물은 PYROPHYLLITE ( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ )이며, 100℃에서 흡착수를 방출하고 500~800℃에서 결정수를 잃으며, 1000~1100℃에서 MULLITE( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )가 석출되고 나머지는 비경질 실리카가 되며 1100~1200℃에서 C-RISTOBALITE( $SiO_2$ )가 된다.

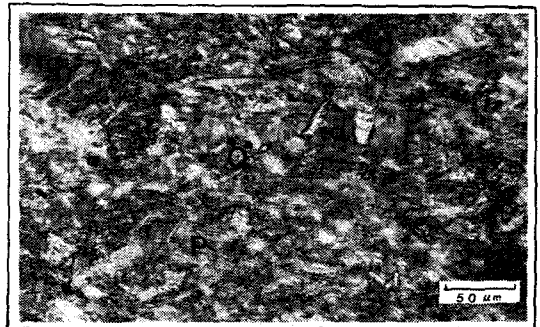
용도는 내화물용, 도자기용, 특수 내화물, 직물의 충전제, 도료의 중량제 등이며 본 연구에서 검토한 시료는, 이러한 용도에 적합하지 않은 품질이 낮은 것이

다.<sup>5), 6)</sup>

### 2) 광학 현미경 관찰

납석의 주요광물과 형태를 알아보고자 광학 현미경으로(독일 LEITZ, MODEL: OPHTHOPLAN-POL) 관찰(투과광법×250)한 결과는 <그림-1>과 같고, 주요 광물은 PYROPHYLLITE, QUARTZ, KAOLINITE 광물 등이며, 구성형태는 이들 광물이 치밀하게 접합되어 있었다.

<그림-1> 광학현미경에 의한 납석 관찰 사진 [P: PYROPHYLLITE, Q: QUARTZ]



### 3) TG/DTA 분석

납석을 1450℃까지 가열하면서 중량변화와 시차열 변화를 알아보고자 TG/DTA(일본 RIGAKU, MODEL 807601) 분석을 하였고, 그 결과는 <그림-2>와 같다.

<그림-2>에서 알 수 있듯이 527℃에서 결정수 증발에 의한 흡열반응 PEAK와 1127℃ 부터 MULLITE 생성에 의한 발열반응 PEAK가 나타났다.

### 4) 온도별 XRD 분석

납석의 주요 구성 광물은 XRD(독일 SIEMENS,

MODEL D500)로 분석하고, <그림-3>과 같이 500℃부터 1500℃까지 100℃씩 고온전기로(일본 MO-TOYAMA, MODEL : SBH-2025)를 이용하여 온도를 가하면서 광물의 변태를 파악하였다.

납석에 대한 XRD 분석결과,  $2\theta=28.9^\circ$  부근의 PYROPHYLLITE( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ ) 광물과  $2\theta=12.5^\circ$  부근의 KAOLINITE( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ),  $2\theta=26.6^\circ$  부근의 QUARTZ( $SiO_2$ ),  $2\theta=29.8^\circ$  부근의 SERICITE( $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ ) 광물 등의 PEAK가 나타났다.

소성 온도별 납석의 XRD 분석 결과에서는, 납석의 주 광물인 PYROPHYLLITE는 1000℃까지 잔존하였으며, 700~1000℃에서는  $2\theta=30.4^\circ$  부근에서 TRIDYMITTE 광물 PEAK가 나타났고, 1100~1400℃에서는  $2\theta=21.4^\circ$  부근에서 CRISTOBALITE 광물 PEAK가 나타났다.

또한, 1100℃에서는  $2\theta=26.3^\circ$  부근에서 MULLITE 광물 Peak가 나타나기 시작하여 1500℃까지 소성 온도가 증가됨에 따라 PEAK INTENSITY가 증가되다가 1500℃에서는 최종적으로 MULLITE 광물만이 나타났다.

### 5) 분쇄성 시험

각 원료별 분쇄성 차이를 비교 하고자 JAW CRUSHER에서 5m/m 조쇄된 시료 50g을 진동 MILL(독일 HERZOG, MODEL : HSM 100)에 서 50초 동안 분쇄하여 체 잔분을 측정 한 결과는 <표-1>과 같으며, 납석의 분쇄성은 분쇄성이 좋은 PYROPHYLLITE 광물의 영향으로 양호하게 나타났다.

## 3. 시료 제조

### 1) 출발원료

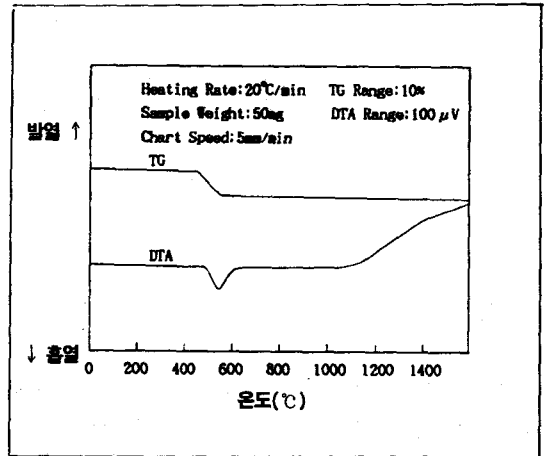
본 연구에 사용된 원료는 당사에서 사용중인 석회석과 철광석 및 점토질 원료로서 점토, 경석을 사용하

<표-1> 각 원료의 분쇄성 시험 결과

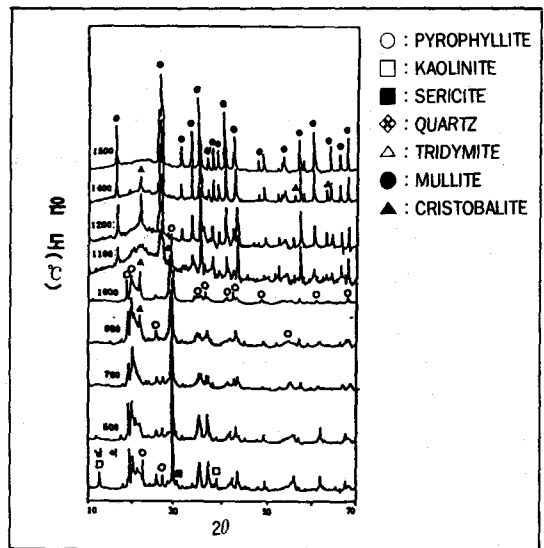
(단위: %)

시료	석회석	철광석	점토	경석	납석	규석
30 $\mu$ R	36.4	40.9	54.5	34.5	36.6	63.4
44 $\mu$ R	14.6	28.1	38.0	27.2	27.7	25.1
88 $\mu$ R	3.5	3.4	7.4	3.1	2.3	2.5

<그림-2> 납석에 대한 TG/DTA CURVE.



<그림-3> 온도별 납석의 X선 회절도



였고, 연구를 위해 점토질 원료 대체용으로 납석과 규석을 사용하였으며, 그 화학성분은 <표-2>와 같다.

### 2) 조합원료

<표-2>의 각 원료를 사용하여 동일한 MODULUS의 조합원료를 제조하기 위하여 점토질 원료(점토, 경석)를 사용한 경우(이후 점토질로 약칭)와 납

〈표-2〉 사용원료의 화학성분 분석결과

(단위 : %)

성분 원료	LOI	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SM	비 고
석회석	38.07	9.74	2.16	0.91	47.00	1.17	0.26	0.79	0.01	3.80	
철광석	2.70	21.20	10.87	50.83	6.19	15.61	0.30	1.50	0.10		
점토	4.54	65.65	17.22	5.09	1.42	0.90	trace	3.18	1.57	2.94	
경석	-	68.58	17.70	6.18	1.38	1.03	1.50	3.03	0.53	2.76	ASH=90%
납석	6.94	54.44	30.68	4.97	1.39	0.07	trace	1.20	0.54	1.19	
규석	2.58	90.45	4.74	1.61	2.95	trace	trace	0.80	0.10		

〈표-3〉 각 원료를 이용한 조합원료 배합비

(단위 : %)

원료 시료	석회석	철광석	점토	경석	납석	규석	계
점토질	89.81	2.30	4.89	3.00	-	-	100
납석	89.85	2.70	-	-	4.00	3.45	100

〈표-4〉 각 조합원료의 화학성분

(단위 : %)

성분 시료	화 학 성 분									MODULUS		
	LOI	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LSF	SM	IM
점토질	34.65	14.12	3.60	2.29	42.60	1.62	0.20	0.94	0.08	94.10	2.40	1.57
납석	34.67	14.09	3.66	2.29	42.67	1.61	0.15	0.78	0.08	94.28	2.37	1.60

〈표-5〉 클링커 화학성분 분석 결과

(단위 : %)

성분 시료	화 학 성 분									
	LOI	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F-CaO
점토질	0.15	22.05	6.02	3.55	64.34	2.49	0.28	1.00	0.11	0.78
납석	0.17	22.05	6.05	3.59	64.70	2.50	0.19	0.69	0.11	1.14

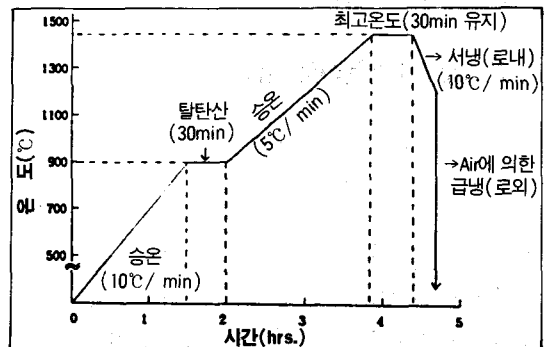
성분 시료	MODULUS			클링커 광물조성			
	LSF	SM	IM	CsS	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
점토질	90.15	2.30	1.70	47.95	27.13	9.95	10.79
납석	90.67	2.29	1.69	49.42	26.02	9.97	10.91

석만을 사용한 경우(이후 납석으로 약칭)의 조합원료를 〈표-3〉과 같은 배합비로 제조하였으며, 그 화학성분은 〈표-4〉와 같다.

### 3) 클링커

클링커 소성은 조합원료 : 유연탄=98.35 : 1.65 비율로 혼합하여 고온전기로에서 최고온도 1450℃로 각 클링커를 소성하였으며, 그 소성 CYCLE은 〈그림-4〉와 같다.

〈그림-4〉 클링커 제조시 소성 CYCLE



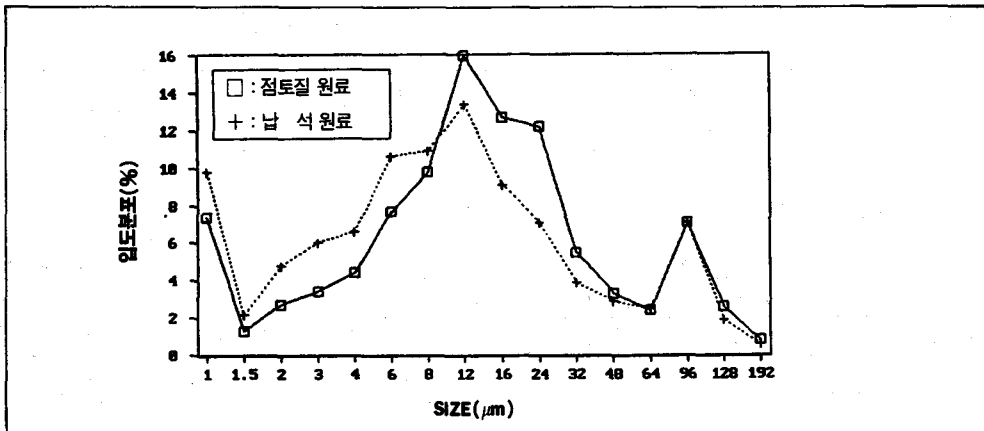
〈표-6〉 시멘트 화학성분 분석 결과

(단위 : %)

성분	화 학 성 분									
	LOI	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F-CaO
점토질	0.75	20.90	5.72	3.49	62.44	2.42	2.41	0.16	0.15	0.75
납 석	1.10	21.00	5.92	3.52	62.13	2.44	2.45	0.87	0.15	1.10

성분	MODULUS			클링커 광물조성			
	LSF	SM	IM	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
점토질	89.95	2.27	1.64	44.99	26.06	9.26	10.61
납 석	88.75	2.22	1.68	41.47	29.00	9.74	10.7

〈그림-5〉 조합원료의 입도 분포 그래프



각 조합원료를 소성하여 제조한 클링커의 화학성분 분석 결과는 〈표-5〉와 같다.

원료의 분쇄성은 좋은 것으로 나타났다.

#### 4) 시멘트

시멘트중 SO<sub>3</sub> 함량이 2.4%가 되게 클링커에 이수 석고를 첨가한 후, Blaine 3200cm<sup>2</sup>/g이 되도록 진동 MILL에서 분쇄를 하였으며, 그 화학성분은 〈표-6〉과 같다.

#### 4. 실험 방법 및 결과

##### 1) 조합원료의 분쇄성 시험

조합원료의 분쇄성은 원료 MILL 생산량과 밀접한 관계가 있으므로, 납석을 사용하였을 때 〈표-3〉과 같은 배합비로 제조된 조합원료를 진동 MILL에서 분쇄한 후, 입도분포 측정기(프랑스 CILAS AL-CATEL, MODEL : 200-LS)로 입도분포를 측정 한 결과는 〈그림-5〉와 같으며, 납석을 사용한 조합

##### 2) 조합원료 소성성 예측 시험

조합원료를 산처리한 후 44μm WET SIEVING 과, 125μm WET SIEVING만을 행하여 잔분을 건조시킨후 광학현미경으로 QUARTZ와 CALCITE 함량을 정량하고 아래와 같이 KIRSTEN THEISEN식<sup>7)</sup>에 의하여 F-CaO<sub>1450℃</sub> 함량을 추정하여 소성 성을 예측하였으며, 그 결과는 〈표-7〉과 같다.

$$F-CaO_{1350℃} = 0.343(LSF-93) + 2.74(SM-2.3) + 0.10C_{125} + 0.83Q_{44} + 0.39AK$$

Where

- LSF : Lime Saturation Factor
- SM : Silica Modulus
- C<sub>125</sub> : Content of Coarse Calcite
- Q<sub>44</sub> : Content of Coarse Quartz
- AK : 100 - (C<sub>125</sub> + Q<sub>44</sub>)

〈표-7〉 각 조합원료 중의 QUARTZ와 CALCITE 정량 및 소성성 예측 결과

시료	Sieve 종류		중량 백분율(%)	정량 결과			추정 F-CaO(%)
				QUARTZ	CALCITE	기타	
점토질	+ 44 $\mu$ m	함량(%)	7.30	41.7	31.8	26.5	1.06
		Size( $\mu$ m)		75~375	75~202	172~278	
	+125 $\mu$ m	함량(%)	7.00	7.6	56.3	36.1	
		Size( $\mu$ m)		188~270	195~450	98~375	
납석	+ 44 $\mu$ m	함량(%)	4.60	9.8	45.7	44.5	0.81
		Size( $\mu$ m)		60~188	90~278	98~225	
	+125 $\mu$ m	함량(%)	6.15	3.3	88.7	8.0	
		Size( $\mu$ m)		210~225	195~300	90~270	

〈표-8〉 클링커 소성성 시험결과

(단위 : %)

구분	점토질				납석			
	n1	n2	n3	$\bar{x}$	n1	n2	n3	$\bar{x}$
F-CaO	0.76	0.81	0.78	0.78	1.10	1.15	1.17	1.14

### 3) 클링커 소성성 시험

조합원료를 〈그림-4〉와 같이 3회 반복하여 소성한 결과 F-CaO 함량은 〈표-8〉과 같으나, 조합원료의 소성성 예측시험과 경향성이 다르게 나타난 요인은, 납석사용의 경우 용융온도가 높은 MULLITE 광물의 생성과 FLUX인 SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 함량이 적기 때문에 차이가 있는 것으로 생각된다.<sup>8)</sup>

### 4) 클링커 광물의 XRD 분석

제조한 클링커를 〈표-9〉와 같은 조건하에 XRD로 클링커 광물을 분석한 결과는 〈그림-6〉과 같다.

제조 클링커에 대한 XRD 측정 결과, 두 시료 공히 2 $\theta$ =34.4° 부근의 ALITE PEAK와 2 $\theta$ =31.9° 부근의 BELITE PEAK, 2 $\theta$ =33.2° 부근의 CALCIUM ALUMINATE PEAK, 2 $\theta$ =33.9° 부근의 CALCIUM ALUMINO FERRITE PEAK가 나타났으며, 두 시료간에는 큰 차이가 없었으나, 2 $\theta$ =37.3° 부근의 FREE-LIME PEAK의 경우 납석을 사용하여 제조한 클링커에서 높게 나타났다.

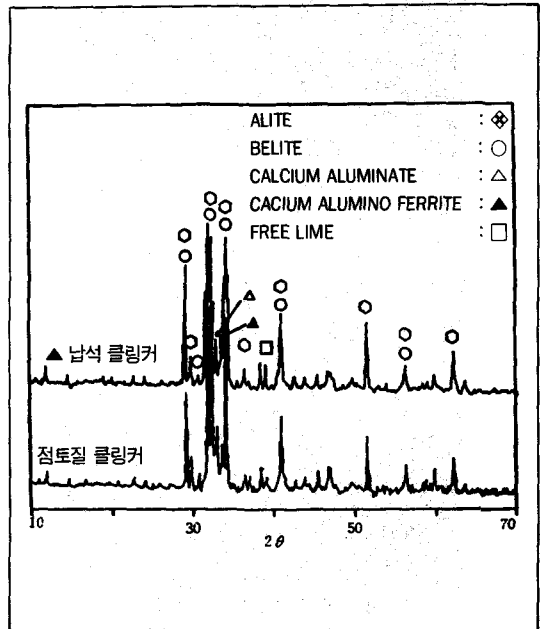
### 5) 광학현미경 및 SEM에 의한 클링커 광물 관찰

제조한 클링커를 광학현미경의 반사광법( $\times 320$ ) 및 SEM(일본 JEOL, MODEL : JSM-840)에

〈표-9〉 XRD 측정조건 표

ITEM	CONDITION
TARGET	CuK $\alpha$
FILTER	Ni
VOLTAGE	40KV
AMPERE	40mV
SCANNING SPEED	0.05sec

〈그림-6〉 제조 클링커에 대한 X선 회절도



의해 관찰<sup>8)</sup>한 ( $\times 1500$ ) 광물의 형태는 <그림-7> 및 <그림-8, 9>와 같다.

<그림-7>에서 알 수 있듯이, 납석을 원료로 사용한 경우는 ALITE 및 BELITE 광물의 크기가 크며, ALITE 결정은 반자형의 결정으로 다량 관찰되었다.

이는 용융온도가 높은 MULLITE 광물의 생성으로 BELITE가 ALITE로의 전환이 용이하지 못하고, 이로 인해 고온에서 장시간 유지되면서 크기가 증가된 것으로 생각된다.

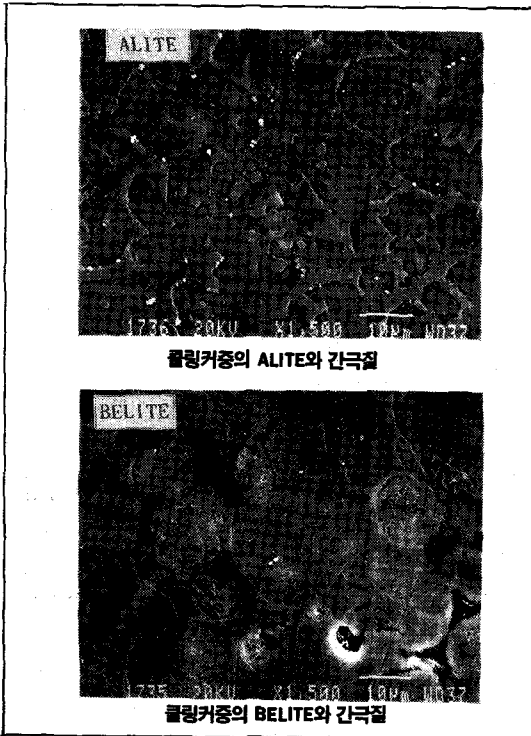
<그림-8, 9>에서 알 수 있듯이 납석을 사용하여 제조한 클링커는 점토질 원료로 제조한 클링커 대비, ALITE와 BELITE 크기가 크고, ALITE 결정은 반자형으로 다량 관찰되었으며, 점토질 원료 사용 경우는 간극질이 다량 관찰되었다.

광학현미경과 SEM에 의한 클링커 광물 관찰 결과, 납석 사용 경우는 소성상태는 약간 나쁘게 관찰되었지만 시멘트 품질에 나쁜 영향을 미칠 정도의 소성상태는 아닌 것으로 생각되며, 특히 간극질이 소량으로 결정들 사이에 분포되어 있고, ALITE 결정이 크게 생성되어 있어 분쇄성에 좋은 영향을 미칠 것으로 생각된다.

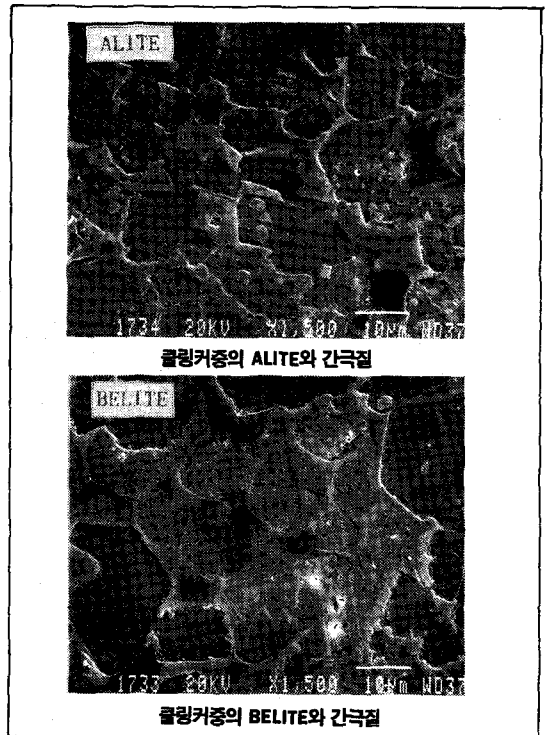
<그림-7> 광학현미경에 의한 클링커 광물 관찰 사진  
[A: ALITE, B: BELITE]



<그림-8> SEM에 의한 점토질 원료를 사용하여 제조한 클링커 광물 관찰 사진



<그림-9> SEM에 의한 납석을 원료로 사용하여 제조한 클링커 광물 관찰 사진



〈표-10〉 클링커 분쇄성 시험 결과

시료	구분	BLAINE (cm <sup>2</sup> /g)	관 사(%)		
			30 $\mu$ m	44 $\mu$ m	88 $\mu$ m
점토질		2691	37.96	22.51	11.5
납석		3087	29.97	15.61	3.8

〈표-11〉 제조 시멘트에 대한 물성시험 결과

시료	색도 측정 결과			표준 주도(%)	응결시간(분)		수화열 (Cal/g)				압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )			
	L	a	b		초결	종결	3hr	12hr	24hr	72hr	1일	3일	7일	28일
점토질	58.02	-2.32	6.19	27.5	230	320	7.57	15.67	21.68	37.10	94	216	261	340
납석	58.55	-2.30	5.84	26.5	230	345	3.83	13.07	31.08	37.36	92	212	270	361

### 6) 클링커 분쇄성 시험

제조한 클링커 50g을 진동 MILL에서 20초 동안 분쇄한 후 분말도를 측정하여 분쇄성을 비교한 결과는 〈표-10〉과 같으며, 납석 사용 경우 분쇄성이 매우 양호하게 나타났는데, 이는 간극질이 소량 결정들 사이에 분포되어 있고, ALITE 결정의 크기가 큰 때 문인 것으로 생각된다.<sup>9)</sup>

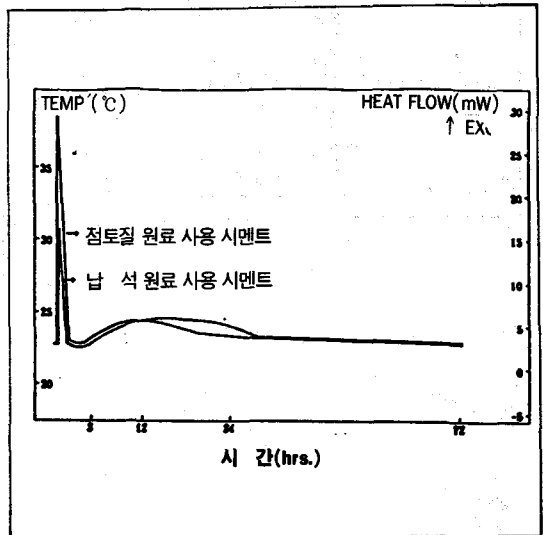
### 7) 시멘트의 물리성능 시험

제조한 시멘트에 대해 KS L 5102 “수경성 시멘트의 표준주도 시험 방법”에 의하여 주도를 측정하고, KS L 5103 “길모아 침에 의한 시멘트의 응결시간 시험 방법”에 의하여 응결시간을 측정하였으며, CONDUCTION CALORIMETER [프랑스 SETARAM, MODEL : C80D]에 의한 단기 수화열인 3, 12, 24, 72시간 동안의 수화열을 측정하였다. 또한 KS L 5105 “수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법”에 의한 재령 1, 3, 7 28일 동안의 압축강도를 측정하였다.

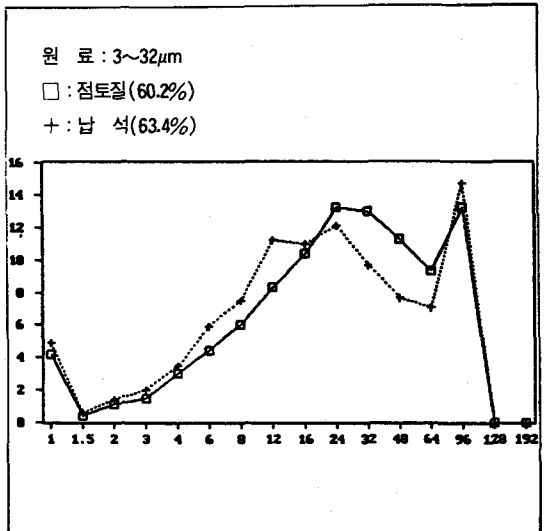
제반 물리성능을 측정한 결과는 〈표-11〉과 같으며 납석 사용 경우, 표준주도가 낮고 응결시간이 점토질 원료를 사용한 경우에 비하여 지연되었는데, 이는 알칼리 함량이 낮은데 기인된 것으로 생각되며 제품의 색도는 차이가 없는 것으로 나타났다.

또한, 단기 수화열 측정 결과에서도 〈그림-10〉과 같이 응결시간이 지연된 납석 사용의 경우, 클링커 광물 조성중 C<sub>3</sub>A에 의한 약 3시간 까지의 1차 발열 PEAK가 매우 낮고, 휴지기를 포함한 12시간까지의 수화열도 동일한 결과를 나타내고 있다. 그러나 C<sub>3</sub>S 등에 의한 2차 발열 PEAK에서는 24시간 까지의 수

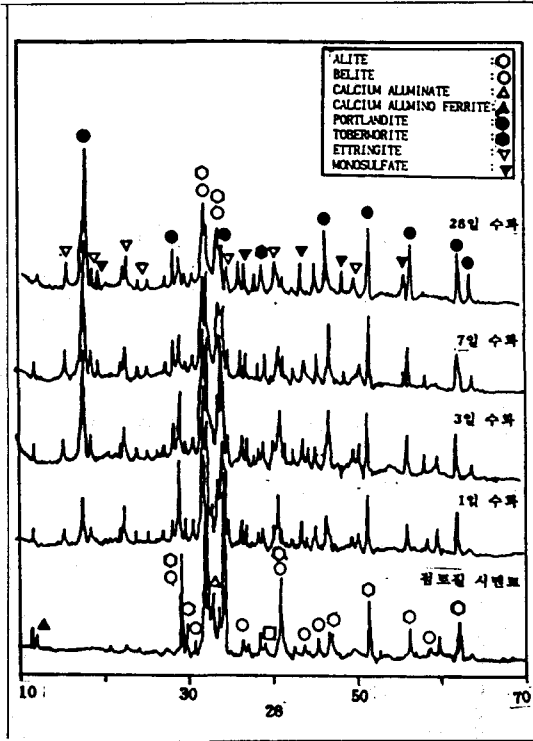
〈그림-10〉 CONDUCTION CALORIMETER 수화열 CURVE



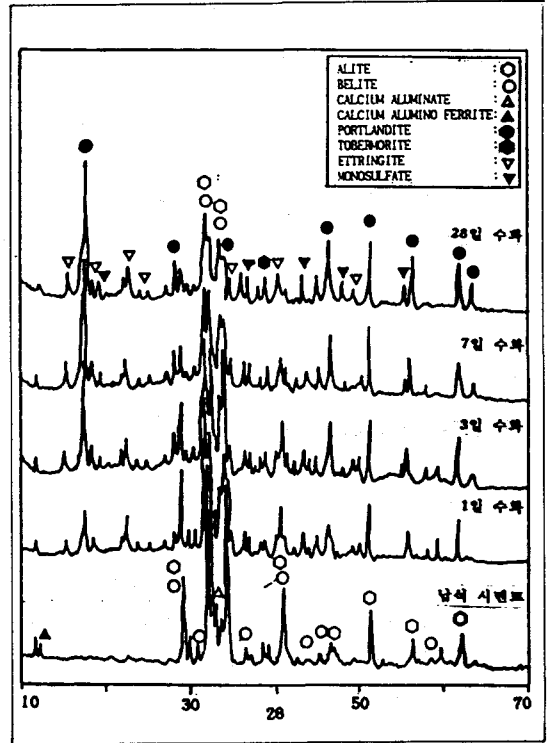
〈그림-11〉 시멘트의 입도분포 그래프



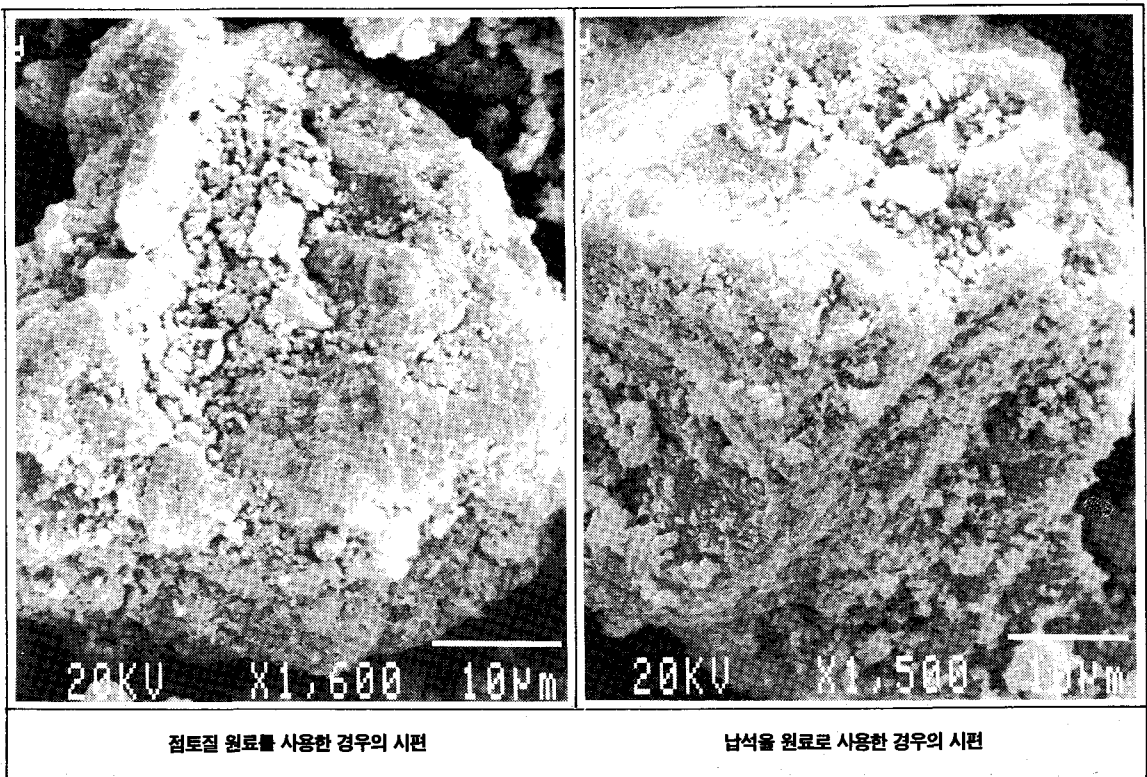
<그림-12> 점토질 시멘트 수화물에 대한 재량별 X선 회절도



<그림-13> 납석사용 시멘트 수화물에 대한 재량별 X선 회절도



<그림-14> 시멘트 PASTE의 재령 1일 양생후의 SEM 관찰 사진





화열에서 오히려 높았고, 72시간 까지의 수화열은 두 시료가 공히 유사하게 나타났다.

압축강도에 있어서 납석 사용의 경우, 점토질 원료 사용대비 재령 1, 3일 압축강도는 차이가 없었으나, 7, 28일 재령에서의 압축강도는 각각 3.4, 6.2% 상승하는 것으로 나타났는데, 이는 알칼리 함량이 적고, 분쇄성이 양호하여 <그림-11>에서 알 수 있듯이, 입도분포에서 3~32 $\mu$ m 함량의 분포가 많기 때문으로 생각이 된다.

### 8) 시멘트 수화물의 XRD 분석

제조 시멘트 PASTE의 재령별 생성 수화물을 XRD로 측정하였고, 그 결과를 <그림-12, 13>에 나타내었다.

점토질 원료를 사용하여 제조한 시멘트 PASTE는, 재령 1일에서는 미수화된 클링커 광물이 잔존하고 있었고, 3일 이후에는 PEAK INTENSITY가 크게 감소되었다.

또한, 재령 1일에서는  $2\theta=34.1^\circ$  부근에서 PORTLANDITE와  $2\theta=15.9^\circ$  부근에서 ETTRINGITE 수화물이 나타나기 시작하여 재령 기간이 증가되면서 그 PEAK INTENSITY가 증가 하였고,  $2\theta=38.7^\circ$  부근에서 C-S-H 수화물이 나타났으며, MONOSULFATE 수화물의 경우는  $2\theta=19.9^\circ$  부근에서 재령 7일 이후에 나타나기 시작하였다.

납석을 사용한 경우, 각 재령별 시멘트 PASTE 수화물은 점토질 경우와 유사하였으나, MONOSULFATE 수화물의 경우, 점토질 원료 사용에서는 재령 7일 이후에, 납석을 사용한 경우 재령 3일 이후에 나타나기 시작하여 재령 기간이 증가 될수록 PEAK INTENSITY가 증가하였다.

### 9) SEM에 의한 시멘트 수화물 관찰

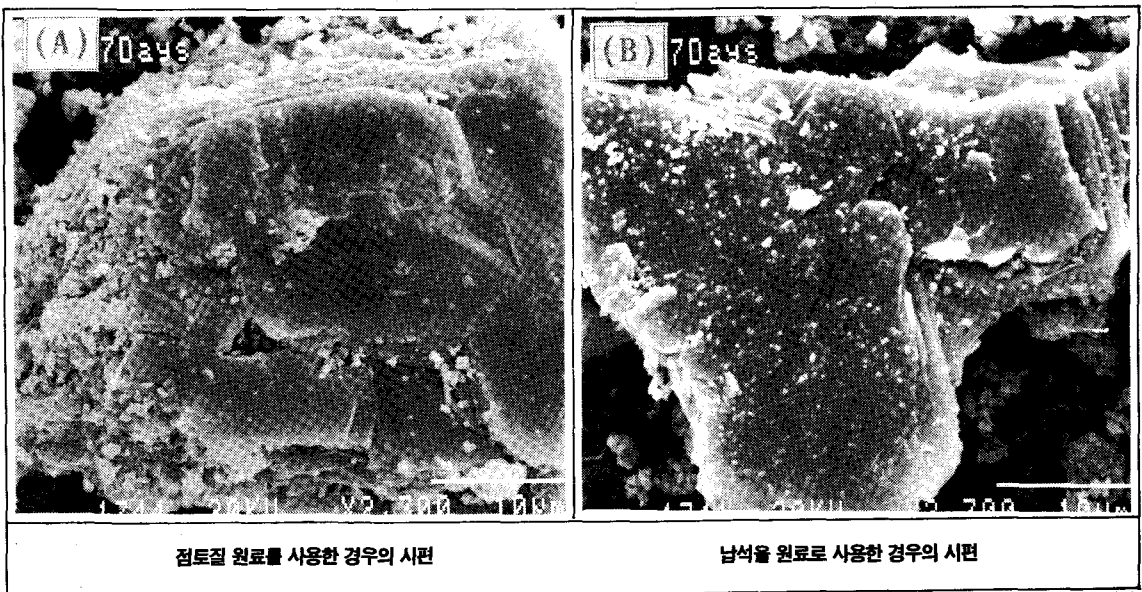
제조 시멘트 PASTE를 1, 7일 동안 수중양생후 아세톤에 30분 동안 침적하여 수화를 중지 시킨후 생성 수화물을 SEM으로 관찰한 결과는 <그림-14, 15>와 같다.

<그림-14, 15>와 같이 시멘트 PASTE의 재령 1, 7일 양생후 시편에 대한 SEM 관찰 결과, 재령 1일 수화에서는 두 시료 공히 미수화 클링커 광물이 잔존하고 있었고, C-S-H 수화물이 다량 생성되어 있었다.

또한, 재령 7일 수화에서는 납석을 사용한 경우, PORTLANDITE( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )의 판상 수화물이 충상으로 다량 생성되었고, 그 표면에 아주 미세한 소량의 ETTRINGITE( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )와 크기가 작은 C-S-H 수화물이 산포되어 있었다.

점토질 원료를 사용한 경우 7일 재령에서 PORTLANDITE 수화물이 다량 생성되었지만, 그표면에 ETTRINGITE 수화물이 납석 경우와 같이 미세하

<그림-15> 시멘트 PASTE의 재령 7일 양생후의 SEM 관찰 사진



고 소량으로 산포되어 있었으나, C-S-H 수화물의 경우 크기가 크고 다량으로 관찰되었다.

## 5. 결론

- 1) 납석 자체의 화학성분은  $Al_2O_3$  함량이 높고  $SiO_2$  함량이 낮아 조합원료 제조시 SM 조정이 용이하며, 납석이 함유하는 주 광물은 PYRO-PHYLLITE( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ ) 광물로서 1000~1500°C 온도에서 MULLITE( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) 광물이 석출되었다.
- 2) 납석 자체의 분쇄성은 분쇄성은 좋은 PYRO-PHYLLITE 광물의 영향으로 양호하게 나타났으며, 이로 인해 조합원료의 분쇄성이 양호하였다.  
제조한 클링커의 분쇄성 또한 양호하게 나타났는데 이는 간극질이 클링커 광물 주위에 소량 분포 되어 있었고, ALITE 광물의 크기가 크기 때문으로 생각된다.
- 3) 점토질 원료를 전량 납석으로 대체한 조합원료의 소성성 시험에서 소성상태를 나타내는 FR-

EE LIME 함량이 점토질 원료보다 약간 높은 것으로 나타나 소성상태가 좋지 않았는데, 이는 용융온도가 높은 MULLITE 광물의 석출과 FLUX인  $SO_3$  알칼리 함량이 적은데 기인된 것으로 판단된다.

- 4) 납석을 사용한 경우, ALITE 및 BELITE 광물의 크기가 크게 나타났는데, 이는 용융온도가 높은 MULLITE 광물의 생성으로 BELITE가 ALITE로의 전환이 용이하지 못하여 이로 인해, 고온에서 장시간 유지 되면서 크기가 증가된 것으로 생각된다.
- 5) 납석을 사용한 조합원료의 경우,  $SO_3$  함량과 알칼리 함량이 낮아 시멘트 제품에 있어서  $C_3A$  광물 수화 PEAK인 1차 발열 PEAK가 낮게 나타나 12시간 까지의 수화열량이 현저하게 낮았으며 응결시간이 지연되었다.
- 6) 납석을 사용하여 제조한 시멘트 제품의 경우, 표준준도가 낮고, 압축강도의 경우 1, 3일 재령에서는 큰 차이가 없었으나 7, 28일 재령의 압축강도에서는 각각 3, 4, 6.2% 상승하는 것으로 나타났다.

## 〈참고문헌〉

1. 김형선, "조합원료 소성성 검토", 제16회 시멘트 심포지엄(1988), pp.41~51
2. 崔相紘 "시멘트 클링커 소성반응", 제10회 시멘트 심포지엄(1982), pp.41~47
3. S. N. Ghosh, Advances in Cement Technology, Pergamon Press Ltd(1983).
4. Donald H. Campbell, Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker(1986).
5. 일본 요업협회, 요업공학 핸드북(1978), pp. 196, 1075.
6. 이종근, 요업 원료학(1978), pp.41~43
7. Kirsten Theisen, "The Influence of Raw Mix Burnability on Cement Clinker", WORLD CEMENT AUGUST 1992. pp.17~23
8. 河村繁雄, "粉末儉鏡法によるクリンカーの被粉性の推定法", セメント技術年報, pp.89~92, 1982.
9. 小野吉雄, "クリンカー 檢鏡による 燒成條件および水和強さの推定", セメント製造技術シンポジウム, 35, pp. 74~83, 1978.