

전로슬래그를 이용한 Modified Belite Cement의 제조에 관한 연구

박종옥 · 김승진* · 박홍수** · 신현택***

국립공업기술원 요업기술원

*한국 전자제 시험연구원

**명지대학교 공과대학 화학공학과

***경상대학교 공과대학 무기재료공학과

(1995년 3월 16일 접수)

A Study on the Preparation of Modified Belite Cement Using Converter Slag

J. O. Park, S. J. Kim, H. S. Park and H. T. Shin

Inst. of Ceram. Tech.

*Korea Inst. of Construction Mater.

**Dept. of Chem. Eng., Myoung Ji Univ.

***Dept. of Inorg. Mater. Eng., Kyung Sang Univ.

(Received March 16, 1995)

요 약

저에너지형의 belite cement($C_2S-C_4A_3\bar{S}-C_4AF-C\bar{S}$)를 제조하기 위하여 전로슬래그, 석회석, 석고, 점토를 이용하여 클링커를 합성하였다. 합성된 클링커의 특성을 알아보고, 또한 XRD, SEM 그리고 수화열측정기를 사용하여 수화과정을 조사하였다. 제조한 시멘트의 주요수화물은 C-S-H, ettringite이었다. 초기에 $C_4A_3\bar{S}$ 의 수화에 의해 생긴 침상형의 ettringite의 형성에 의해 내부의 공극이 충전됨으로써 빠른 경화를 보이고, C_2S 의 수화에 의해서 후기 강도가 증진되는 경화체를 형성함을 알 수 있었다. 시멘트-3의 3, 7, 28일의 압축강도를 보면, 115, 128, 211 Kgf/cm²으로 나타났다.

ABSTRACT

In order to prepare the modified belite ($C_2S-C_4A_3\bar{S}-C_4AF-C\bar{S}$) cement with low energy, clinkers were synthesized by converter slag, limestone, gypsum and clay. The synthesized clinkers were characterized and the hydration processes were investigated by XRD, SEM and microconduction calorimetry. The hydrates were mainly C-S-H and ettringite. The needle-like ettringite formed by the hydration of $C_4A_3\bar{S}$ at the early stage of hydration was filled in the inner vacant spaces of the hardened body and it might contribute to the rapid-hardening phenomena. The hardened body became stronger due to the hydration of C_2S at the later period. The compressive strengths of the cement-3 mortars hydrated for 3, 7 and 28 days were 115, 128 and 211 Kgf/cm², respectively.

Key words: Belite, Converter slag, Gypsum, Ettringite

1. 서 론

시멘트의 제조는 석회석, 점토, 규석, 철광석등의 원료를 사용하여 약 1450°C에서 소성하여 시멘트 클링커를 제조하고 있으며, 이때 시멘트 클링커를 만드는데 필요한

이론적 에너지는 약 420 kcal/kg Clinker로써 이러한 에너지의 상당 부분은 $CaCO_3$ 의 분해 엔탈피이다. 시멘트 제조시 에너지 절감방안으로는 크게 ① 제조공정에서의 장치개선 및 공정개발, ② 폐·부산자원의 연료 및 원료로의 적극적 활용, ③ 광화제와 응제의 활용으로 클링커

Table 1. Chemical Composition of Raw Materials.

(wt.%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss
Limestone	8.9	2.8	1.3	47.0	1.4	—	37.30
Clay	46.0	28.9	4.6	12.3	2.0	—	15.1
Converter Slag	14.0	5.7	32.3	39.3	7.8	—	0.6
Gypsum	0.20	0.01	0.01	37.5	—	54.5	7.7

소성온도를 낮추려는 시도, ④ 저온에서 소성가능한 클링커의 개발등을 들 수 있다¹⁻³⁾.

시멘트의 주요광물은 C₃S(Ca₃SiO₃), C₂S(Ca₂SiO₄), C₃A(Ca₃Al₂O₆), C₄AF(Ca₂AlFeO₅)이며 이들중 C₃A, C₄AF는 시멘트의 강도 발현에는 크게 기여하지 않는 광물이고, C₃S 및 C₂S가 시멘트의 강도를 발현하는 중요한 광물이다⁴⁾.

저온 소성 시멘트 개발의 하나인 C₃S를 C₂S로 대체하는 belite계 시멘트의 단점은 초기 수화가 느린 점이나, 장점으로는 1300℃ 부근에서 C₂S 광물상이 존재하므로 낮은 온도에서 소성할 수 있다는 점이다. 또한 수화열이 작아서 저 발열 시멘트를 만들 수 있다는 장점도 가지고 있다. 그러나 단점인 초기 수화가 늦다는 점에 있어 이것을 보완하기 위하여 여러 노력이 행해지고 있는데 그 중에는 화학적, 물리적 그리고 기계적으로 C₂S의 자체 수화활성을 높이려는 노력과 함께 초기 수화 반응이 좋은 조강형 비포틀랜드 시멘트 화합물인 C₄A₃S̄를 조합한 C₂S-C₄A₃S̄ 계 시멘트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁵⁻⁹⁾.

1970년대 초 포틀랜드 시멘트와 알루미나 시멘트의 중간 조성을 갖고 있다고 하여 alumina-belite cement라 명명한 Zaharov⁹⁾의 연구가 최초의 Modified belite cement 연구의 효시이며, 그 이후로 Sudoh¹⁰⁾이 C₂S, C₄A₃S̄, C₄AF, CaO를 함유한 시멘트를, Xiuji¹¹⁾이 C₂S, C₄A₃S̄, C₄AF, CaF₂를 조성으로 하는 시멘트를 연구보고 하였다. 1990년대 이후로 여러 연구자들^{8,9)}이 C₂S, C₄A₃S̄, C₃A, C₄AF를 조성으로 하는 Modified belite cement를 보고하고 있다.

본 연구는 여러 선행 연구자들의 연구결과를 분석하여 C₂S, C₄AF, C₄A₃S̄, C₃S 계의 변형 belite계 시멘트를 산업부산물인 전로 슬래그를 원료로 사용하여 클링커의 합성을 시도하였고, 합성한 클링커의 특성과 이로부터 만든 시멘트의 수화 반응을 검토하였다. 또한 전로슬래그를 최대한 많이 이용할 수 있는 방향으로 연구를 시

주: 시멘트 화학의 관례에 따라 다음과 같이 약호로 표시함. CaO=C, SiO₂=S, Al₂O₃=A, Fe₂O₃=F, SO₃=S̄, H₂O=H

Table 2. Ratio of Raw Mixes

(wt.%)

Sample No.	Lime Stone	Clay	Converter Slag	Gypsum
1	58.55	20	10	12.45
2	54.35	16	17	12.45
3	49.86	10.03	25.24	14.87
4	42.16	11.13	31.16	15.55
5	37.17	11.67	35.61	15.55

행하였는데, 이는 낮은 소성온도에서 생성된 C₄AF는 포틀랜드 시멘트에서 존재하는 C₄AF보다 시멘트 수화 반응이 더 빠르고, 클링커에 있어서 C₄AF는 다른 화합물 생성에 있어서 광화제 및 용제의 역할을 하므로 이 성분의 증가로 에너지를 절감할 수 있으리라는 것을 토대로 실험을 하였다.

또한 이 시멘트제조에는 상당량의 황산염, 알루미나, 철성분이 포함되므로 이와같은 성분이 많이 포함되어 있는 다른 산업에서 부산되는 폐기물, 즉 폐석고, 폐슬러지, fly ash와 red mud등을 원료 조합물에서 사용한다면 추가적인 에너지 절감과 환경문제 해결이라는 두 가지 장점이 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1. 원료

원료로 석회석, 점토, 전로슬래그, 석고등을 사용하여 클링커를 제조하였다. 이때 각 원료는 모두 100 μm 이하로 분쇄를 하여 사용하였고, 각 원료의 화학 분석결과는 Table 1에 나타내었다.

2.2. 원료조합

각 원료를 사용하여 CaO : 47.10~55.63 wt%, SiO₂ : 6.98~20.93 wt%, Al₂O₃ : 10.67~21.97 wt% 및 Fe₂O₃ : 4.93~14.79 wt% 사이에서 조합하였고, SO₃는 7.85~9.17 wt% 사이에서 조합하였으며 Table 2에 원료조합비

를 나타내었다.

2.3. 조합원료의 열분석

각 원료와 조합원료 3번의 조성에 대하여 각각 TG-DTA(TG/DTA 320, Seiko Co. Japan)를 사용하여 1300℃까지 원료의 가열 성상을 분석하였다.

2.4. 클링커의 합성

각 원료를 ball mill로써 약 100 μm 이하의 크기로 완전 분쇄한 후 V-mixer를 사용하여 약 24시간 동안 혼합한 후 press를 사용하여 800 Kg/cm²의 압력으로 성형하여 전기로에서 1000℃에서 1시간 하소하였다. 각 온도구간에서의 클링커의 생성 상태를 분석하기 위하여 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350℃의 온도에서 각각 30분간 소성하고 로에서 꺼내어서 공냉하였다.

2.5. 합성클링커의 분석 및 관찰

클링커 광물의 정량분석은 내부표준물질로 Al₂O₃를 20% 첨가하여 함유된 C₂S, C₄A₃S̄, C₄AF, C₃S에 대하여 XRD 내부표준법으로 정량분석을 하였으며 다음 식으로 계산하였다.

$$\frac{I_c}{I_s} = K \frac{W_c}{W_s} \tag{1}$$

Ic: Intensity of X-rays diffracted by the selected plane of individual clinker component.

Is: Intensity of X-rays diffracted by the selected plane of the standard agent.

K: Constant determined by equal weight.

$$W_c/W_s = 1$$

Wc: Weight of clinker component.

Ws: Weight of standard agent.

합성한 클링커를 미분쇄하여 XRD(네델란드제의 EN-RAF NONUS FR 590)를 사용하여 생성광물상을 확인 및 분석하고, 또한 SEM(Philips사제 XL-30)과 EDAX(Philips사제, PV-99)를 사용하여 생성광물상을 관찰 및 분석하였다.

2.6. 합성 클링커의 수화 실험

합성한 클링커를 사용하여 만든 시멘트에 대하여 10 wt.%의 이수석고(CaSO₄·2H₂O)와 혼합 및 미분쇄한 후 microconduction calorimeter(Rigaku Co. Japan)를 사용하여 수화발열속도를 측정하였고, 별도로 W/C=0.5, 23℃에서 수화시킨 후 1, 3, 7, 28일이 경과한 뒤 아세

톤으로 수화를 정지시킨 후 XRD, SEM으로 수화 생성물을 분석하였다.

2.7. 압축강도 측정

W/C=0.5로 하여 재령 1, 3, 7, 28일에 대하여 온도 23±1℃에서 수중 수화양생 시킨 시멘트 모르타르를 Universal Testing Machine(UTM)을 사용하여 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 KS L 5015(예상 최대 하중이 20초 이상 80초내에 미치는 속도로 가함)에 의하여 실시했다. 압축강도는 시편에 압력을 가하여 시편이 파괴되는 최대 하중을 측정하였으며, 그 값을 시편의 가압 단면적으로 나눈 값을 사용하였다(단, 시편의 크기는 2.5 cm(지름)×5 cm(높이)이다).

3. 결과 및 고찰

3.1. 클링커의 생성 반응

조합원료의 시차열분석(DTA)과 온도별로 합성한 클링커에 대한 XRD분석으로 클링커의 생성 상태를 검토하고 조합원료에 대한 소성온도와 생성광물의 관계를 해석하여 최적 소성온도를 구하였다. Fig. 1에 각 원료 각각의 시차열 분석을 나타내었고, Fig. 2에 원료 조합 3에 대한 DTA의 그림을 나타내었다. 92℃ 근처의 자유수분 증발과 석고의 분해에 의한 흡열과 500℃ 부근에서의 점토의 탈수로 여겨지는 미세한 흡열에 이어 812℃ 부근에서 탈 탄산에 의한 커다란 흡열을 보이고 있다. Butt¹⁰⁾에 의하면 순수한 석회석의 분해온도는 898℃이나 불순물의 종류에 따라 812~918℃ 범위에서 변하고, 불

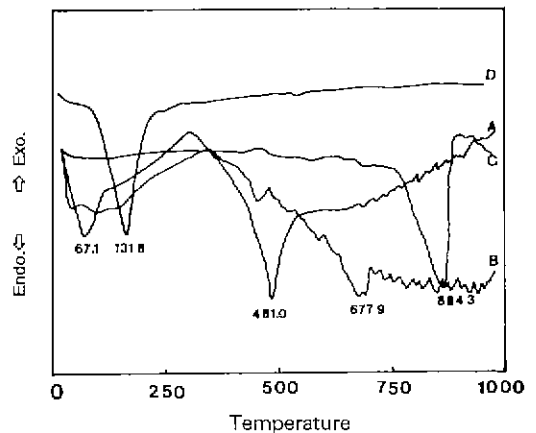


Fig. 1. DTA Curves of the raw materials. (A: Clay, B: Converter Slag, C: Lime stone, D: Gypsum)

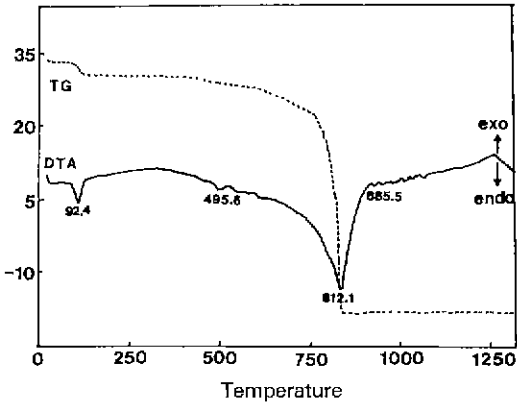


Fig. 2. DTA curve of the raw mix. (Sample 3)

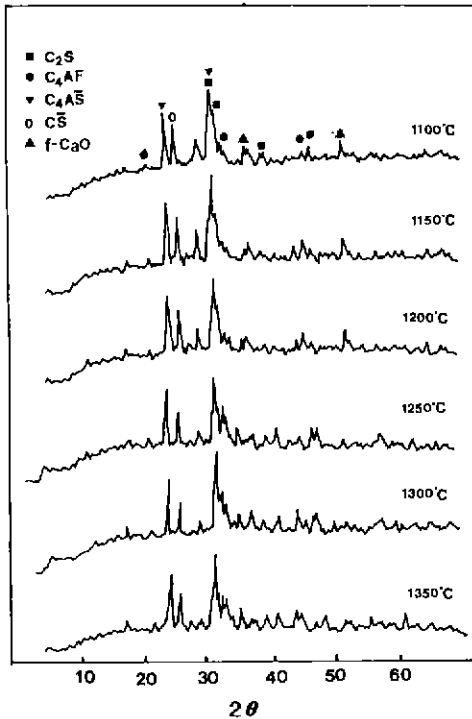


Fig. 3. XRD patterns of clinker burned at various temperatures. (Sample 3)

순물은 석회석의 분해온도를 높이며 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 이를 낮춘다고 보고하였다. 이러한 보고를 볼 때 탈탄산의 온도가 812°C 부근인 이유는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 다량 함유로 추정되어진다.

Fig. 3은 합성한 클링커 광물의 생성 상태를 보기 위하여 1100°C에서 1350°C까지의 구간에서 소성한 후

Table 3. Quantitative Analyses of Clinker Sintered at 1280°C.

Sample No.	C_2S	$C_4A_3\bar{S}$	C_4AF	$C\bar{S}$	f-CaO
1	58	17	14	10	1
2	51	16	25	7	1
3	41	22	29	8	—
4	30	27	34	9	—
5	22	26	43	9	—

XRD로 분석한 것으로써, 합성한 클링커의 XRD 분석 결과를 보면 주성분은 C_2S 와 $C_4A_3\bar{S}$, C_4AF 이며, 그 외에 약간의 $C\bar{S}$ 의 피크를 보이고 있다. $C_4A_3\bar{S}$ 는 1100°C에서부터 안정상으로 존재하기 시작하여 1300°C까지 계속 증가함을 확인하였으며 C_2S 는 1200°C 이상에서 안정하게 존재하고, C_4AF 는 1250°C에서 1350°C 사이의 온도에서 안정하게 존재함을 알 수 있었다. 또한 free-CaO는 1250°C까지 계속적으로 감소하였으나 1300°C 이상의 온도에서도 약간 존재하였다.

秋山桂¹¹⁾는 $C_4A_3\bar{S}$ 가 $CaO-Al_2O_3-SO_3$ 계에서 유일한 삼성분계 화합물이며, 900~1000°C에서 생성되기 시작하여 1400°C까지 안정하고, 1350°C 이하의 온도에서는 석고가 슬래그중의 alumina 성분과 결합하여 $C_4A_3\bar{S}$ 로 안정화하여 C_3A 의 생성을 억제하기 때문이라고 보고하였다. 이로 보아 1350°C에서부터 $C_4A_3\bar{S}$ 의 양이 줄어드는데 이는 고온에서 분해되어 C_3A 로 되는 것으로 추정되며, 이와같은 결과로 볼 때 최적소성온도는 1250~1300°C로 생각되어진다. 따라서 본 실험에서는 최적소성온도구간의 1280°C를 선택하여 클링커를 합성하였다.

3.2. 합성한 클링커의 물성

합성한 각 클링커를 Al_2O_3 를 내부 표준물질로 사용하여 정량 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 클링커 광물로는 C_2S 와 $C_4A_3\bar{S}$ 외에 C_4AF , $C\bar{S}$ 등이 존재하고 있음을 확인하였고, 원료조성중의 Fe_2O_3 의 함량차이에 따라 C_4AF 의 생성량이 약간 달라지고 있음을 보이고 있으며, 또한 SO_3 의 증가시에는 $C_4A_3\bar{S}$ 및 $C\bar{S}$ 가 상대적으로 많아졌다. 이것은 정량분석결과로 볼 때 C_3S 가 $C_4A_3\bar{S}$ 의 생성에 의해 대체된 modified belite cement²⁾라 할 수 있으며, 여기서 합성된 클링커는 aluminat과 ferrite가 공존하는 Calcium sulfoaluminate ferrite 형으로 생각된다.

Fig. 4는 클링커의 파단면에 대한 주사전자현미경 및

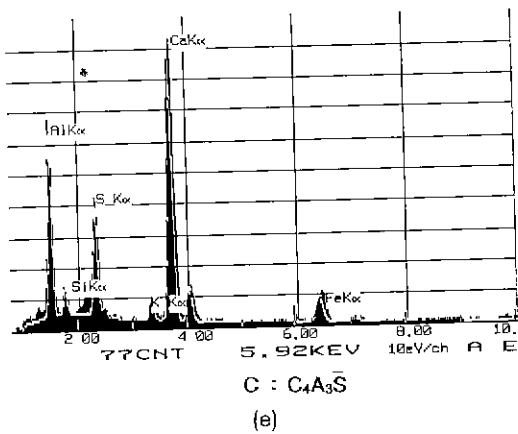
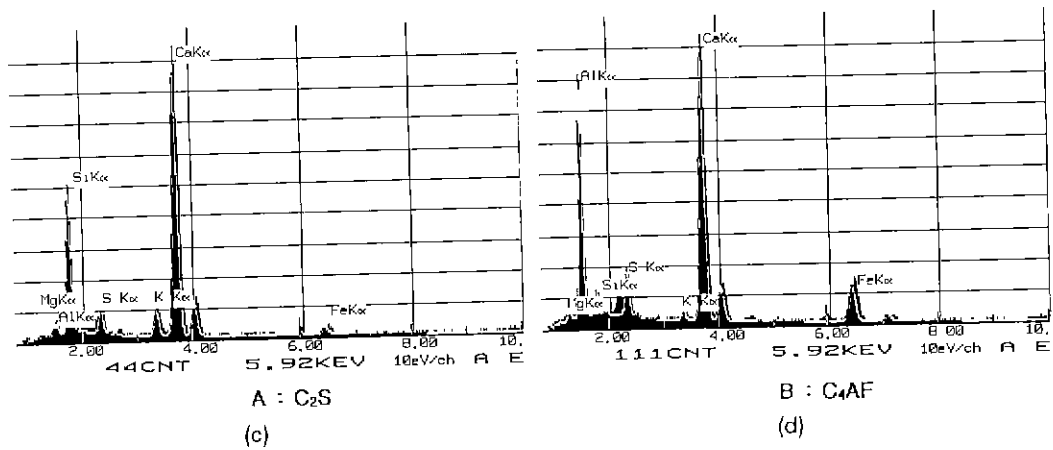


Fig. 4. SEM micrographs [(a) and (b)] of the clinker phases sintered at 1280°C and EDAX spectra of (c) area A in (a), (d) area B in (a) and (e) area C in (b).

EDAX 분석 결과이다. Fig. 4의 (a)에서는 클링커내에 주된 광물로 존재하는 둥근 형태의 C_2S 와 입방 결정형태의 $C_4A_3\bar{S}$ 의 존재를 확인할 수 있었고 용액상으로 존재하는 것으로 알려진 C_4AF 의 존재를 확인할 수 있었으며, 클링커 결정의 A와 B 부위에 대한 EDAX 분석

결과로써도 C_2S 와 C_4AF 를 확인할 수 있었다. Fig. 4의 (b)는 클링커의 광물상중 $C_4A_3\bar{S}$ 의 주사전자현미경 사진으로써 입방결정 형태의 C 부분을 spot-EDAX로 분석한 결과 약간의 Fe_2O_3 가 존재하는 것은 Al_2O_3 의 Fe_2O_3 에 의한 치환¹²⁾으로 추정되어진다.

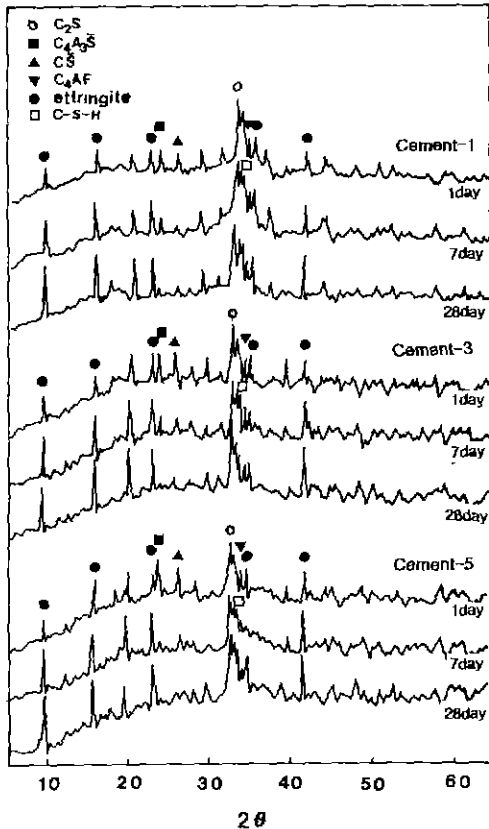
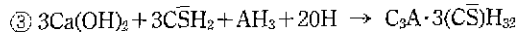
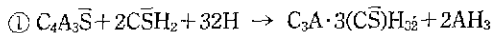


Fig. 5. XRD patterns for cement hydrates with various hydration times.

3.3. 수화 반응

각각의 합성한 클링커에 석고 10 wt.%를 첨가하여 미분쇄(Blaine 4000 cm²/g)하여 만든 시멘트를 W/C=0.5로 23±1°C의 항온조에서 수화시켰다. 그중 Cement-1, 3, 5의 1, 7, 28일 수화물의 각 XRD를 Fig. 5에 나타내었다.

Yaumou¹³⁾가 제시한 belite 시멘트의 주요 광물상들의 수화과정은 다음 반응식으로 요약할 수 있다.



C₄A₃ \bar{S} 가 ①의 반응식처럼 석고와 직접 반응하여 ettringite와 AH₃를 형성하고 이 AH₃는 ②의 반응에서 C₂S의 수화로 늦게 생성하는 Ca(OH)₂와 반응하여 ③의 반응식처럼 다시 ettringite를 형성하게 된다.

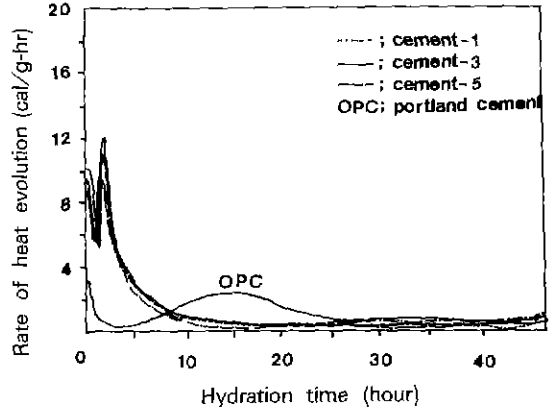


Fig. 6. Rate of heat evolution at 23°C for several synthesized cements.

Fig. 5를 보면 세가지 조성 모두 수화 1일부터 C₄A₃ \bar{S} 와 C \bar{S} 의 수화반응에 의한 ettringite가 생기는 경향을 보이고 있으며, C₄A₃ \bar{S} 는 수화 7일째에는 약간 남아 있고 대부분은 ettringite로 변했으며, 수화시 첨가한 무수석고는 수화가 진행되면 ettringite의 생성과 함께 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. Ettringite의 생성경향을 보면 시간이 경과함에 따라 생성량이 계속 증가하는 것을 볼 수 있으나, 수화 7일째부터는 ettringite가 별다른 변화를 보이지 않고 있다. 또한 ettringite와 함께 C₂S의 수화로부터 생성되는 Ca(OH)₂의 피크가 보이지 않는 것은 생성 즉시 AH₃와 반응한 것으로 생각되어진다.

Fig. 6의 수화 발열 속도 곡선에서 보이는 바와 같이 세 조성 모두 수화 직후의 C₄A₃ \bar{S} 가 C \bar{S} 와 수화시 발생되는 것으로 생각되는 큰 1차 발열을 보인 후, 약 2시간 이후부터 급격히 하락하여 20시간 이후부터는 C₂S의 수화에 의한 것으로 보이는 지속적인 약한 발열을 보이고 있다.

Cement-5의 경우 cement-3보다 약간 낮은 수화발열을 보이는데 cement-3의 경우 cement-5에 비해 상대적으로 철분이 적어 수화 초기 ettringite 생성이 빨랐으나 철분이 많은 cement-5는 C₄AF가 많아 좀 늦게 ettringite가 생성한데서 온 결과로 보여진다. 또한 cement-1은 C₄A₃ \bar{S} 의 성분이 제일 적어서 가장 낮은 발열을 보이고 있다. 그러나 그 이후부터는 비슷한 발열을 보이고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 Cement-3의 수화물 시편의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 수화 1일을 보면 C₄A₃ \bar{S} 의 수화로 인하여 생성된 침상형의 ettringite가 보이며, 7일에는 수화가 진행되면서 ettringite가 성장하고 있고 수화 28일에는

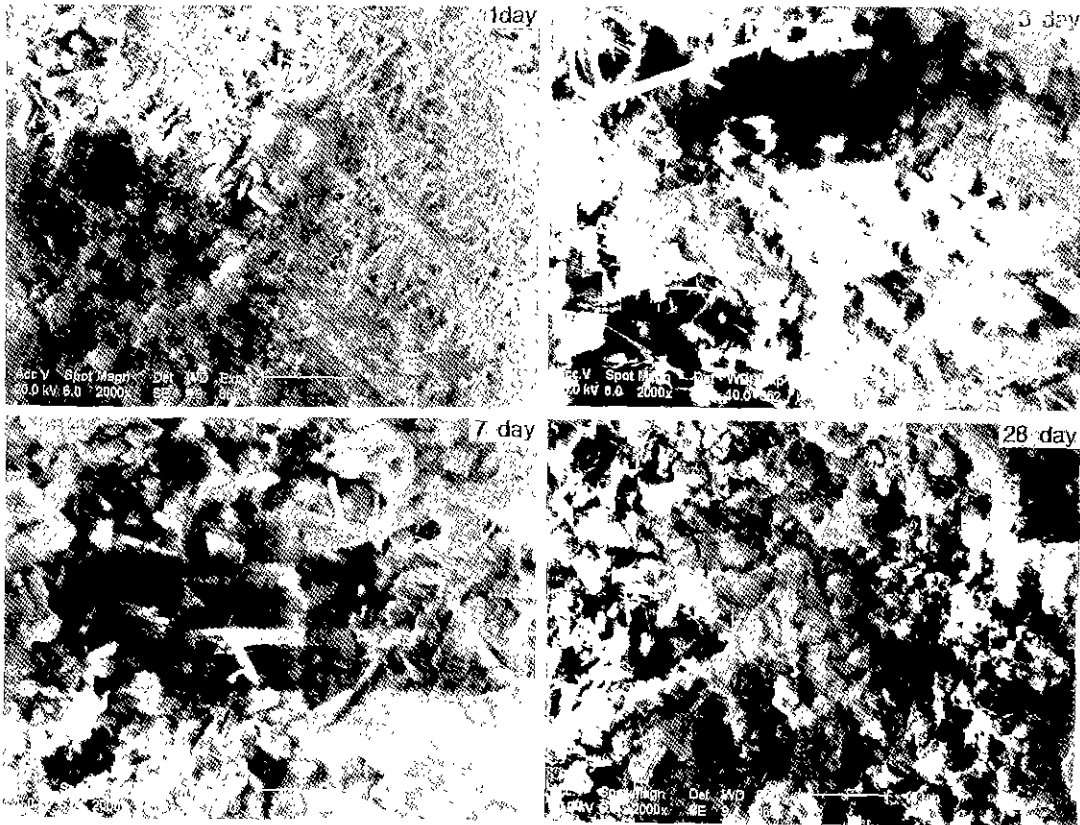


Fig. 7. SEM micrographs of cement-3 hydrates at various curing times. (W/C=0.5, 23±1°C)

더 치밀한 수화물을 보이고 있음을 알 수 있었다. Ettringite를 시멘트중에 생성시킬 경우 침상결정의 생성시기와 크기를 제어하면 시멘트에 급경성, 고강도성, 팽창성등의 기능을 부여할 수가 있다^{14,15)}. 이들 기능중 선택된 어느 기능을 발휘하기 위해서는 ettringite의 생성시기와 포틀랜드 시멘트의 수화과정과의 균형을 맞추는 것이 매우 중요한 것으로 제시되고 있다. ettringite의 생성 반응의 제어는 화학조성이나 광물조성의 조절로 가능하며, CaO-Al₂O₃-SO₃계에 관한 연구결과에서는 CaO가 많을수록 팽창성을, SO₃가 많을수록 고강도성을 그리고 Al₂O₃가 많은 조성일수록 급경성을 현저하게 나타내고 있다고 보고되었다¹⁶⁾.

본 실험의 클링커에 SO₃ 성분을 다량 함유시켜서 고강도를 나타내도록 시도하였고 spot-EDAX 분석 결과를 보면 SO₃ 성분이 22 wt.% 함유되어 있어 고강도성의 ettringite가 생성된 것으로 추정되어지고 있으나, 4성분계의 시멘트 조성에서 한 성분의 강도 증가로 인한 강도 증

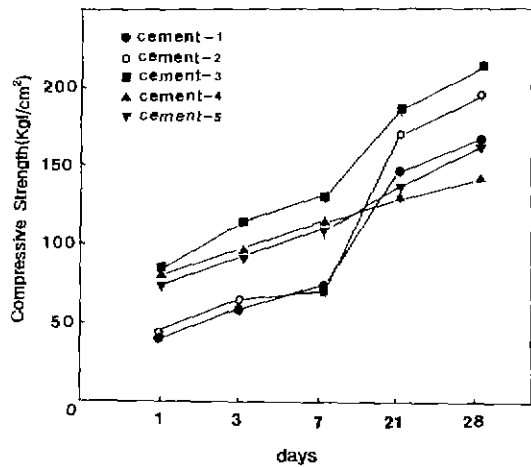


Fig. 8. Compressive strength of mortars for several synthesized cements with different hydration time. (W/C=0.5, 23±1°C)

진여부를 확인할 수는 없었다.

각 시멘트를 KS L 5201의 방법에 의하여 시멘트와 모래의 비는 1:2.45로 배합하였고 수량은 시멘트의 48.5%, 흐름도는 110±5%로 맞추어 모르타르 시편을 만들어서 온도 23±1°C의 항온 수조에서 1, 3, 7, 21, 28일 동안 수중 양생시킨 후의 압축강도를 측정하여 측정값을 Fig. 8에 나타내었다.

이들 클링커로 만든 시멘트의 압축강도는 cement-1의 경우 3일 55 Kg/cm², 7일 77 Kg/cm², 21일 149 Kg/cm²로써 포틀랜드시멘트 KS 규격 값보다 낮게 나타났으며, cement-3의 경우 3일 115 Kg/cm², 7일 128 Kg/cm², 21일 185 Kg/cm², 28일 211 Kg/cm²로써 포틀랜드시멘트 KS 규격 값과 비슷한 압축강도를 보이고 있다.

수화에 따른 강도발현을 보면 C₄A₃S̄의 수화에 의한 ettringite의 급속한 생성은 cement paste의 간극수로부터 다량의 물을 빼앗고 그 공극중에 침상형으로 성장하는데 유동수를 빼앗는 것과 ettringite(1~2 μm) 결정 상호의 interlocking에 의해 시멘트가 급속히 고화하여 초기의 강도를 발현하게 된다. C₄A₃S̄의 수화 이후에는 클링커에 공존하는 C₂S가 서서히 수화가 일어나 이때 생성한 C-S-H gel은 미수화 입자간에 생성된 ettringite 골격 구조내의 공극을 충전하여 조짐을 치밀화시키고 강도를 증진시킨다. 이와 같은 메커니즘으로 다량의 ettringite에 의한 초기강도와 C-S-H에 의한 장기 강도를 발현하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

전로슬래그, 석회석, 석고, 점토를 원료로 사용하여 C₂S-C₄A₃S̄-C₄AF-C₃S̄ 계의 modified belite cement의 클링커를 만들어 합성 클링커의 특성을 조사하고 수화 반응과 물성들을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 전로 슬래그를 원료로써 사용하여 1280°C의 온도에서 C₂S, C₄A₃S̄, C₄AF, C₃S̄를 주성분으로 하는 calcium sulfoaluminate ferrite 형의 Modified belite cement를 합성할 수 있었다.

2. C₂S 43 wt.%, C₄A₃S̄ 23 wt.%, C₄AF 27 wt.%, C₃S̄ 11 wt.%를 함유한 클링커에 석고 10 wt.%를 첨가하여 수화시킨 결과 이 시멘트는 3일 강도 115 Kg/cm², 28일 강도 211 Kg/cm²로 나타났다.

3. 이 시멘트는 수화하여 ettringite, C-S-H 등의 수화물을 형성하여 경화하였으며, 이때 C₄A₃S̄의 수화에 의한 초기강도 증진을, C₂S의 수화에 의한 비교적 좋은

장기강도를 얻을 수 있었다.

REFERENCES

1. S. Sprung and M. Delort, "Effect of Energy Conservation and Environmental Control Measures on Clinker Properties," *9th Inter. Cong. Chem. Cement*, **1**, 15-174 (1992).
2. P.K. Mehta, "Investigations of Energy Saving Cement," *World Cement Technology*, **11**(4), 166-177 (1980).
3. J. Stark and A. Mullerd, "International Development Trends in Low Energy Cement," *Zement Kalk Gips*, **41**(4), 162-165 (1988).
4. H.F.W. Taylor, "Cement Chemistry," 2nd Ed., 15-23, Academic press Ltd. (1990).
5. L.A. Zaharow, "Alumina-Belite Cement," *6th Inter. Cong. Chem. Cement*, III-4, Moscow (1974).
6. G. Sudoh, et al., "High Strength Cement in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-SO₃ System and its Application," *7th Inter. Cong. Chem. Cement*, **3**, 152-157 (1980).
7. F. Xiuji and Z. Yufeng, "Research on the Early Strength Cement Containing High Content of Iron," *8th Inter. Cong. Chem. Cement*, **2**, 285-292 (1986).
8. C.B. Kim, K.S. Han and S.H. Choi, "Synthesis and Hydration of Modified Belite Cement Clinker," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **27**(2), 195-200 (1990).
9. W.H. Chae, S.H. Choi and K.S. Han, "Development of Modified Belite Cement," *3rd Beijing Inter. Symp. Cem. Concrete*, **1**, 414-418 (1993).
10. R.L. Butt, *Am. Assoc. Petrol. Bull.*, **43**, 1-38 (1959).
11. 秋山桂一, 太田 誠, "早強高熱セメントの製造," *セメント技術年報(日)*, **34**, 98 (1980).
12. K. Ogawa and D.M. Roy, "C₄A₃S̄ Hydration Ettringite Formation and its Expansion Mechanism: 1. Expansion; Ettringite Stability," *Cem. Conc. Res.*, **11**, 741-750 (1981).
13. Wang Yaumou, "An Investigation into cement CaO-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-SO₃ System," *8th Inter. Cong. Chem. Cement*, **2**, 300-309 (1986).
14. J. Bensted, "Studies of Ettringite and its Derivatives," *Cement Technology*, 73-100 (1971).
15. H. Kawano, et al., "The Characteristics of Ultra High-Early Strength Concrete Put Using Ettringite Additive," *Cement & Concrete*, 548, (Oct. 1992).
16. S.S. Seehra, Saroj. Gupta & Stander, "Rapid Setting Magnesium Phosphate Cement for Quick Repair of Concrete Pavements Characterisation and Durability Aspects," *Cem. Conc. Res.*, **23**(2), 254-261 (1993).