

실험실적 소성조건에 따른 클린커 광물의 특성변화 및 현장 클린커 고찰

추용식* · 김인섭 · 권춘우 · 이종규 · 권우택 · 김수룡 · 김병익

<요업기술원>

1. 서 론

시멘트의 물리적 특성은 출발물질인 raw materials의 구성 성분들과 이들의 함량, 클린커의 소성조건, 석고의 종류 및 시멘트의 입도 분포 등에 의해 영향을 받는다.^{1,2)} 특히 클린커의 소성 조건은 시멘트의 물리적 특성을 좌우하는 가장 중요한 factor중의 하나이다.^{3,4)}

클린커의 특성을 평가하기 위하여 이용되는 기기로는 XRD, SEM, TG-DTA, 광학 현미경, 고온 현미경, 기공률 측정장치 등을 들 수 있으며, 이중 클린커의 소성 및 공정상태를 가장 합리적으로 평가할 수 있는 장비로 광학 현미경을 들 수 있다.^{5,6)}

광학 현미경 분석을 통한 공정평가측면에서는 raw meal의 분쇄 및 혼합정도의 적정성, 킬른 온도 및 화염의 적정성, cooler의 냉각조건 등을 평가할 수 있으며, 이러한 평가에 따라 최적 공

정 조건을 도출할 수 있다. 또한 클린커 내에 존재하는 각 광물들의 크기 및 존재 상태에 따라 압축강도를 조기에 예측할 수도 있으며, 수화열 및 기타 실험 항목이 추가된다면 최종 시멘트 및 콘크리트의 물리적 특성도 조기에 예측할 수 있다.⁷⁾

광학 현미경을 이용한 포틀랜드 시멘트 클린커의 연구는 Yoshio Ono 등이 1950년대부터 시작하여 포틀랜드 시멘트 클린커의 물리적 특성과 raw material, 소성조건 및 냉각 조건 등을 검토해 왔다.⁸⁾

Yoshio Ono는 시멘트 클린커를 미분말화하여 공정을 평가하는 투과법과 클린커 nodule을 마운팅하여 관찰하는 반사법을 체계화 하였다. 이 2가지 방법중 투과법은 Table 1과 같이 관찰·평가하여 빠른 시간내에 생산 공정으로의 feed back이 가능한 것이며, 반사법은 여기에 더불어 alite와 belite 뿐만 아니라 간극상도 좀 더 자세

Table 1. Burning condition and microscopical character of alite and belite⁹⁾

Burning condition	Hydraulic activity			
	Excellent(+)	Good(VV)	Average(V)	Poor(-)
Heating rate Size of alite(μm)	Quick 15~20	- 20~30	- 30~40	Slow 40~60(120)
Max. Temp. Birefringence of alite	High 0.010~0.008	- 0.007~0.006	- 0.006~0.005	Low 0.005~0.002
Burning Time Size of belite(μm)	Long 25~40	- 20~25	- 15~20	Short 5~10
Cooling rate Color of belite	Quick Clear	- Faint yellow	- Yellow	Slow Amber
Birefringence of belite	0.012	0.015	0.017	0.018

Table 2. Chemical composition of raw materials

(unit : wt%)

Raw materials	Chemical composition					
	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Limestone	37.78	9.70	2.53	1.07	45.98	0.70
Quartz	1.31	87.00	1.67	2.18	2.80	0.28
Coal shale	18.20	51.80	18.76	4.99	2.00	1.44
Dust iron	7.39	3.80	8.40	72.70	10.41	1.15

히 관찰하여 공정의 문제점을 세부적으로 파악하는 방법이다.

그러나 클린커를 구성하는 주요 4대 광물들의 특성은 생산 공장별 원료특성, 킬른 내의 온도분포 및 냉각과정에서의 열적 이력이나 분위기 등에 따라서 다양하게 변화하는 특성을 갖고 있다. 그러므로 제반조건들의 정확한 평가를 위해서는 클린커 관찰시에 생산 공장별 원료 및 기타 실 공정 특성에 맞는 분석조건을 확립하여야 한다.

이에 따라 생산공정별 클린커 관찰 및 평가기준을 수립한다면, 설정된 기준에 따라 클린커를 분석·평가하여 원료 및 공정을 조정할 수 있으며, 최적의 클린커 제조 조건을 도출해 낼 수 있는 기본 data로 사용될 수 있을 것이다.

그러므로 본 연구에서는 국내 시멘트사의 공정 원료를 사용하고, 전기로에서 승온 속도, 고온 유지시간 및 냉각 조건 등을 변화시켜 클린커를 제조한 후 광학현미경을 관찰하였다. 또한 현장 클린커를 샘플링하여 현장 소성 조건의 관찰 및 간략하게나마 광물들의 크기와 압축강도와의 상관성을 도출하여, 이들 관찰 결과를 공정 평가의 기본 자료로 활용해 보고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 원 료

본 연구에서 사용한 출발 원료는 국내 시멘트사의 석회석, 규석, 경석 및 분철이며, 각각의 화학분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 이들 원료들을 사용하여 클린커 target modulus를 LSF

90.0, SM 2.55, IM 1.55로 고정하여 배합하였다. Target modulus에 따른 raw meal의 배합비는 석회석 89.85%, 규석 3.38%, 경석 5.49%, 분철 1.28%이었다.

2.2 Raw meal 제조 및 소성 조건

배합비에 따라 준비된 raw meal을 ball mill로 분쇄하여 90 μ m 잔사 13.0%로 제조하였다. Raw meal은 혼합수와 23%의 비율로 혼합하여 일정 무게(15g)의 성구로 제조하였으며, 제조된 성구는 100 $^{\circ}$ C에서 향량이 될 때까지 건조하였다.

건조가 완료된 성구는 Fig. 1 및 Table 3에서와 같이 소성 조건을 변화시켜 클린커를 제조하였다. 본 연구에서는 클린커링 후 f-CaO를 측정하여 f-CaO 값이 일반적으로 시멘트 공장에서 제조되는 수준인 1 \pm 0.2% 수준을 얻을 수 있는 클린커를 소성의 기준으로 도출하고자 하였으며, 실험에 따른 f-CaO 수준은 A 클린커에서 0.8%를 나타내어 기준값을 만족하였다.

그러므로 소성 조건은 A 시료를 기준으로 하여 기타 소성 조건을 변화시켰으며, 본 연구에서는 Table 3과 같이 승온조건(B), 최대 온도 유지시간 (C, D), 최대 온도 조건(E, F), 냉각 조건 (G) 등을 변화시켜 실험하였다.

2.3 현장 클린커 관찰

현장 클린커를 샘플링한 후 입도 분석하여, 가장 많은 양의 클린커가 존재하는 입단대(10~20 μ m)를 선택하여 관찰하였다. 샘플링된 클린커를

Table 3. Burning condition of clinker raw meal

	Burning condition as steps					Remark
	①	②	③	④	⑤	
A	10°C/min	5°C/min	1450°C-20min	15°C/min	-	-
B	10°C/min	2°C/min	1450°C-20min	15°C/min	-	Heating rate
C	10°C/min	5°C/min	1450°C-40min	15°C/min	-	Retention time
D	10°C/min	5°C/min	1450°C-60min	15°C/min	-	Retention time
E	10°C/min	5°C/min	1400°C-20min	15°C/min	-	Max. Temp.
F	10°C/min	5°C/min	1500°C-20min	15°C/min	-	Max. Temp.
G	10°C/min	5°C/min	1450°C-20min	5°C/min	5°C/min	Cooling rate

광학현미경으로 관찰하여 광물 크기와 특성을 분석한 후, 28일 압축강도와의 상관성을 도출해 보고자 하였다.

2.4 광학 현미경 관찰

광학 현미경을 관찰하기 위하여 에폭시 레진과 경화액을 무게비로 25:3으로 혼합하여 클린커를 마운팅하였다. 마운팅은 mold cup에 클린커를 넣은 후 혼합액(에폭시 레진 + 경화액)을 넣어 주며, 혼합액을 채운 후 진공 펌프를 이용하여 클린커 공극을 채우고 또한 마운팅 과정에서 발생하는 기공을 최대한 제거시켜 주었다. 혼합액이 충분히 채워진 mold를 대기중에서 24시간 동안 충분히 건조시킨 후 탈형하여 마운팅된 클

린커를 준비하였다.

마운팅된 클린커를 #200, 500, 1000의 sand paper를 사용하여 grinding 하였다. Grinding이 완료된 후에는 scratch를 제거하기 위해 polishing cloth를 사용하여 연마를 실시하였다. 이때 연마제로는 3 μ m와 1 μ m의 diamond suspension액을 사용하였다.

Polishing이 완료된 클린커는 1% NH₄Cl 용액으로 약 5초 동안 에칭 시킨 후 Leitz DM RXP 광학 (반사) 현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험실 제조 클린커 특성 분석

3.1.1 승온 및 냉각 조건에 따른 클린커 특성분석

F-CaO가 0.8%인 A 클린커는 alite 크기가 5~40 μ m 내에 존재하였으며, 평균 크기는 약 15~20 μ m 수준이었다. 결정 형태는 반자형과 자형이 주류를 이루고 있으며, 결정면의 분해는 거의 관찰되지 않았다. Belite의 크기는 5~40 μ m이었으며, 평균 입경은 약 15~20 μ m 이었다.(Fig. 2) Alite와 동일하게 belite도 분해 현상이 관찰되지 않았으며, secondary belite도 관찰되지 않았다. 서냉에 의해 발생하는 간극상의 결정화 현상¹⁰⁾도 관찰해 볼 수 없어 소성 및 냉각 조건

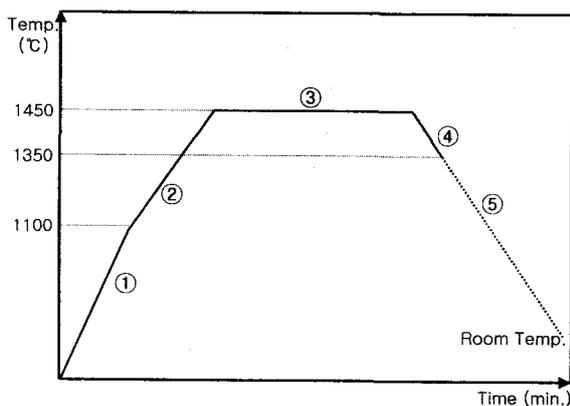


Fig. 1. Burning condition of clinker raw meal

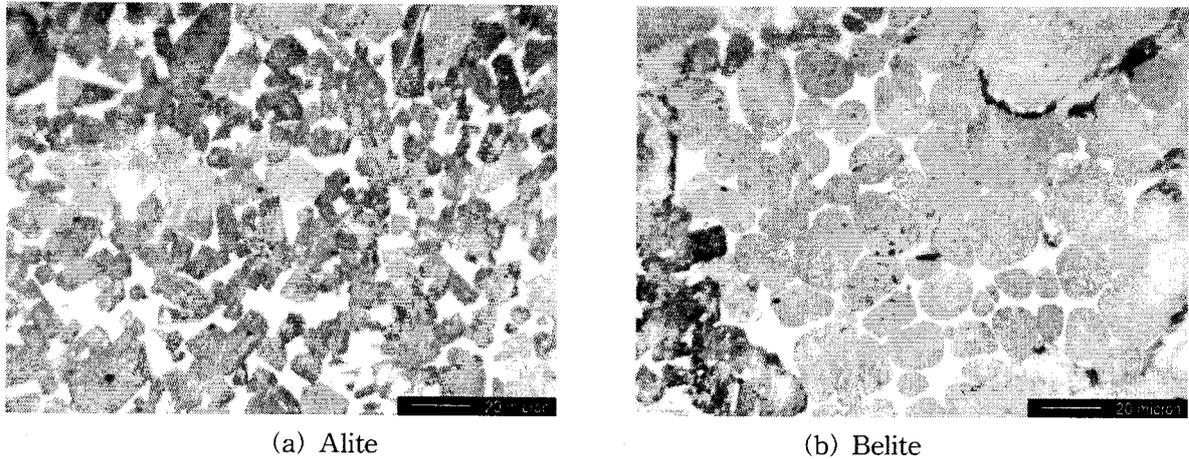


Fig. 2. Photographs of light microscope on A clinker ($\times 500$)

은 양호한 것으로 판단되었다.

B 클린커는 1100°C에서 1450°C까지의 고온영역에서의 승온 속도를 A 클린커보다 낮은 2°C/min으로 변화시켜 소성하였으며, 이외 조건은 A 클린커와 동일하게 제조하였다. Fig. 3에서와 같이 alite의 크기는 10~50 μm 내에 존재하였으며, 평균 크기는 약 25~30 μm 수준이었다. A 클린커와 비교하여 약 10 μm 의 성장이 이루어졌음을 확인할 수 있었으며, 이는 Ono가 주장한 승온 속도가 낮아짐에 따라 alite의 크기가 커진다고 설명한 것과 동일한 결과이다. Belite는 10~45 μm 내에 존재하였으며, 평균 크기는 약 25~30 μm 수준으로 A 클린커보다 커지는 것을 관찰할

수 있었다. 본 실험에서는 alite의 크기 뿐만 아니라 belite도 변화하는 것을 관찰할 수 있었으며, Ono는 승온 속도에 따라 alite의 크기가 작아진다고 하였다.⁹⁾ 즉 승온 속도는 alite 뿐만 아니라 belite의 크기도 증가시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4의 G 클린커는 냉각조건을 로내에서 5°C/min으로 고정하여 상온까지 서냉한 것이다. Alite 결정은 5~50 μm 내에 존재하였으며, 평균 입경은 20~25 μm 이었다. 결정면은 대체로 양호하였으나 약간의 분해 현상도 관찰되었다. Belite는 10~60 μm 내에 존재하였으며, 평균 입경은 30~35 μm 로 A 클린커보다 10 μm 이상 성장한

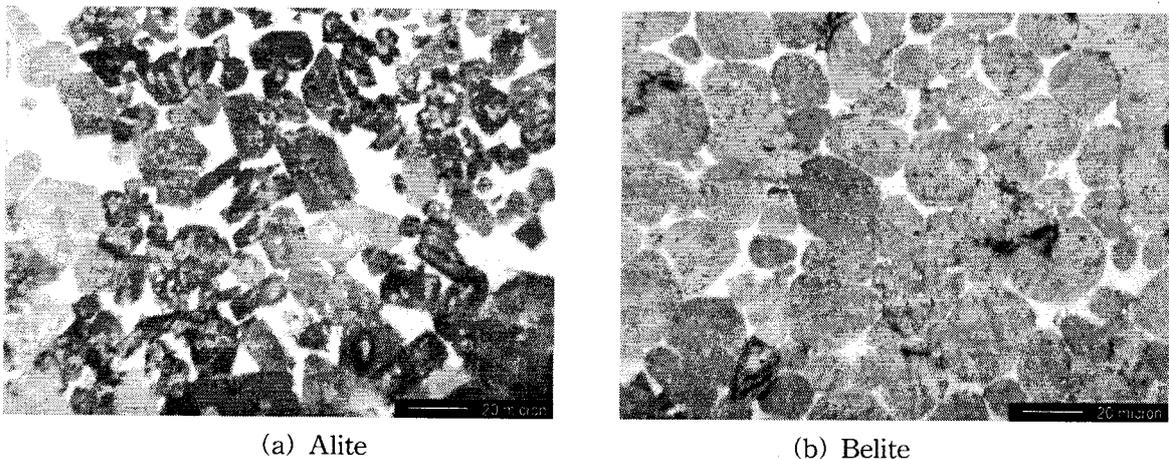
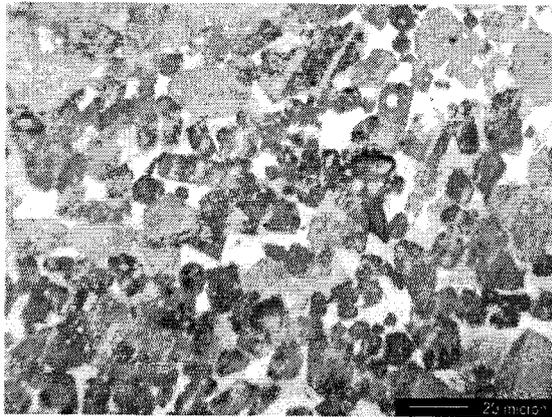
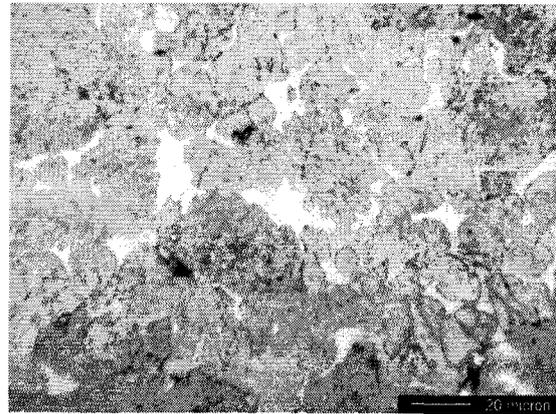


Fig. 3. Photographs of light microscope on B clinker ($\times 500$)



(a) Alite



(b) Belite

Fig. 4. Photographs of light microscope on G clinker ($\times 500$)

것을 확인할 수 있었다. 이는 belite가 성장할 수 있는 온도인 1100°C 이상의 고온 경로 시간이 서냉 조건에 의해 70분으로 매우 길어지기 때문으로 판단된다. 또한 belite는 dot형의 belite가 다수 관찰되고 ragged belite가 많이 생성되는 서냉의 현상이 관찰되어짐을 확인할 수 있었다. 간극상인 aluminat은 결정이 크게 성장했음을 확인할 수 있었으며 이는 대표적인 서냉 현상이라 할 수 있을 것이다. 즉 본 실험의 서냉 조건에서는 서냉 현상으로 언급되어지는 dot형의 belite, ragged belite 및 간극상의 결정 성장을 확인해 볼 수 있었다.

3.1.2 유지 시간에 따른 클린커 특성분석

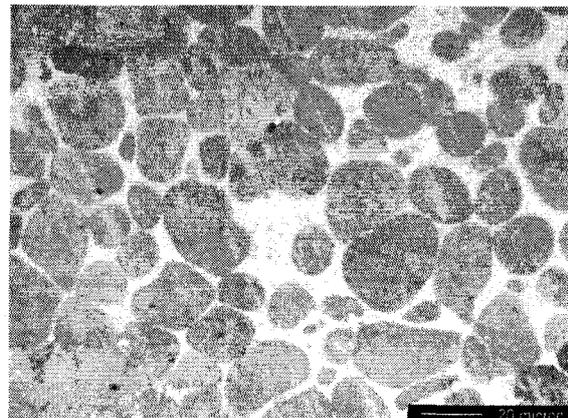
고온에서의 유지 시간에 따른 클린커의 특성 변화를 검토하기 위해 1450°C 에서의 유지시간을 A 클린커 보다 각각 20분 및 40분 증가시켜 소성하였으며, 이외 소성/냉각 조건은 동일하게 클린커링 하였다.

1450°C 에서 40분 유지시킨 클린커의 경우(Fig. 5), alite의 크기는 $5\sim 50\mu\text{m}$ 내에 존재하였으며, 평균 크기는 $20\sim 25\mu\text{m}$ 수준이었다. Belite의 크기는 $5\sim 50\mu\text{m}$ 에 분포하였으며, 평균 크기는 alite와 동일 수준이었다. Secondary belite, belite의 분해 현상 및 간극상인 aluminat와 ferrite의 상태는 A 클린커와 큰 차이가 발견되지 않았다.

상기의 결과로부터 A 클린커와 비교하여 1450°C 에서의 유지 시간이 20분 증가함에 따라 약



(a) Alite



(b) Belite

Fig. 5. Photographs of light microscope on C clinker ($\times 500$)

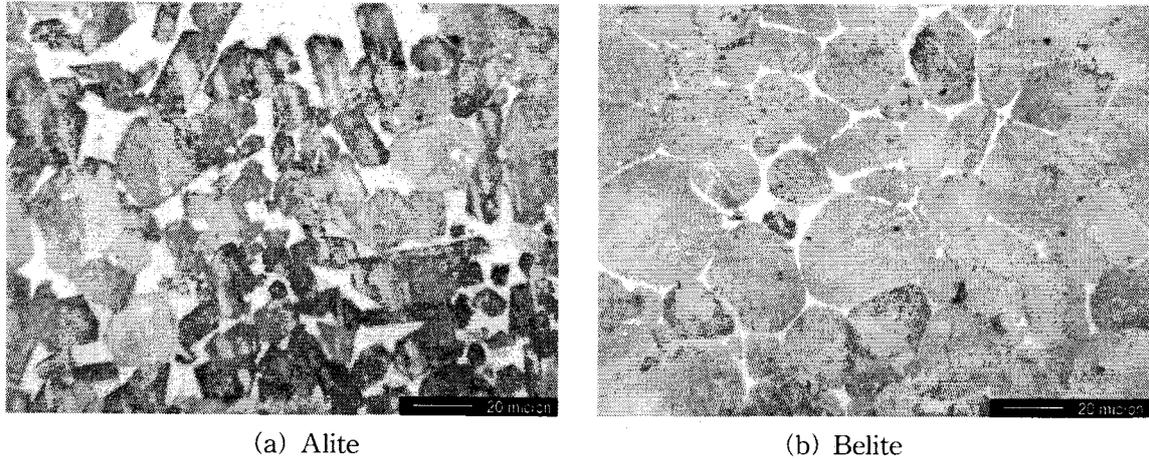


Fig. 6. Photographs of light microscope on D clinker ($\times 500$)

$5\mu\text{m}$ 정도 성장한다는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 알려진 1400°C 이상에서의 고온 유지 시간이 길어짐에 따라 belite 크기가 성장한다는 일반적 이론과 belite의 성장은 유사하나 alite 또한 동일한 크기로 성장하여 고온에서의 유지 시간은 alite와 belite의 동일한 성장을 유도한다는 것을 확인하였다. 1450°C 에서 60분 동안 유지시킨 클린커의 경우(Fig. 6), alite의 크기는 $5\sim 50\mu\text{m}$ 내에 존재하였으며, 평균 크기는 $25\sim 30\mu\text{m}$ 수준이었다. Belite의 크기는 $10\sim 50\mu\text{m}$ 에 분포하였으며, 평균 크기는 $25\sim 30\mu\text{m}$ 이었다. Alite의 결정상은 반자형과 타형이 주로 존재하여, A 클린커와는 약간의 차이가 있었다. Belite

의 결정상은 톱니바퀴 모양의 분해 현상과 구형보다는 타원형이 좀 더 많이 관찰되는 특징을 나타내었다.

이는 고온에서의 유지시간이 길어짐에 따라 alite와 belite의 결정 성장과 더불어 결정면의 분해 현상을 동반하기 때문으로 판단된다. 간극상인 aluminate와 ferrite는 큰 차이를 발견하기 어려웠으나 약간의 결정화 현상도 관찰할 수 있었다.

1450°C 에서의 유지 시간이 길어짐에 따라 alite와 belite가 성장하는 것을 확인할 수 있었으며, 이때 유지 시간이 20분씩 길어짐에 따라 alite와 belite 모두 약 $5\mu\text{m}$ 정도씩 성장한다는 것

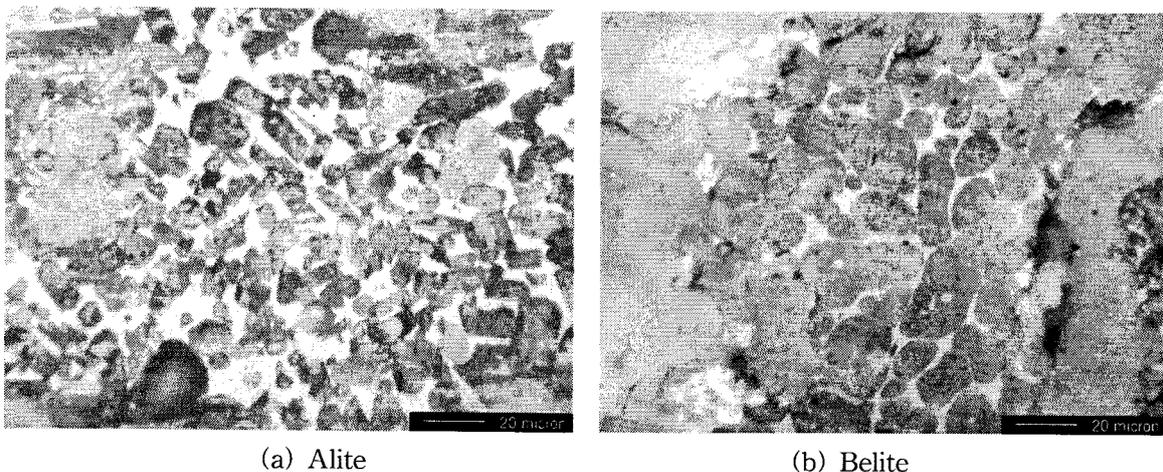


Fig. 7. Photographs of light microscope on E clinker ($\times 500$)

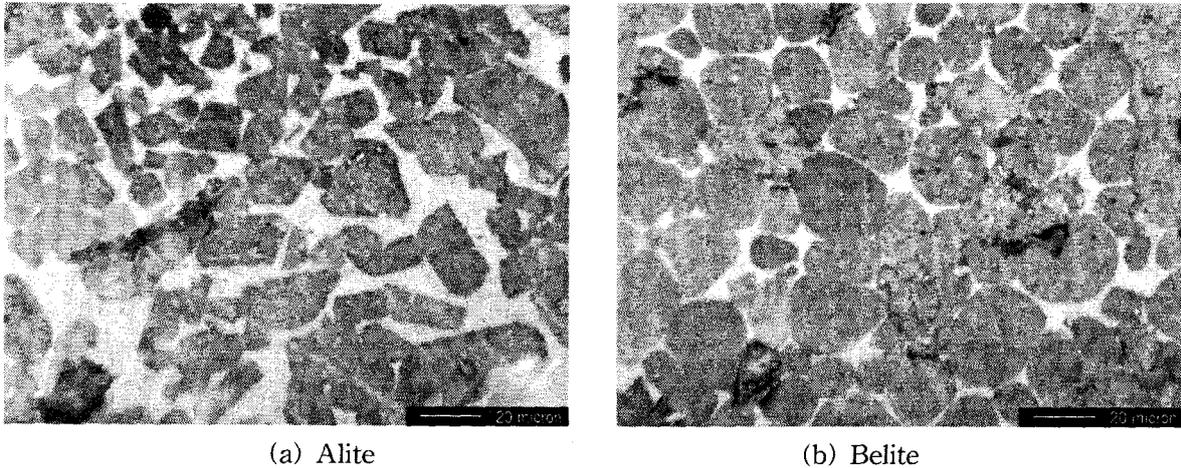


Fig. 8. Photographs of light microscope on F clinker ($\times 500$)

을 확인할 수 있었다. 그러나 간극상은 큰 차이를 발견할 수 없어 고온에서의 유지시간은 주 광물상인 alite와 belite의 결정 크기와 더불어 결정면의 분해 현상에 영향을 주는 요인으로 판단되어 진다.

3.1.3 최대 소성 온도에 따른 클린커 특성분석

최대 소성 온도가 1400°C인 클린커의 경우 (Fig. 7), alite는 5~40 μm 내에 존재하였으며 평균 크기는 약 10~15 μm 정도로 본 실험에서 기준으로 선택한 A 클린커보다 약 5~10 μm 작은 광물이었다. 이는 alite 결정 크기를 적정 범위로 제조하기 위해서는 최대 온도도 매우 중요한 인자임을 나타내는 것이라고 판단된다. Belite의 크기는 5~35 μm 내에 존재하였으며, 평균 크기는 15~20 μm 로 A 클린커와 유사하였다. 즉 1400°C의 소성 온도에서는 belite 보다는 alite의 결정 크기에 좀 더 영향을 미치는 것으로 판단되어진다. 간극상은 A 클린커와 큰 차이를 발견하기 어려웠으며, 상당량의 f-CaO가 관찰되었다. 즉 최대 소성 온도 1400°C는 적정 클린커의 제조에는 낮은 온도임을 확인할 수 있었다.

최대 소성 온도가 1500°C인 클린커의 경우 (Fig. 8), alite는 5~45 μm 내에 존재하였으며 평균 크기는 약 20~25 μm 정도로 본 실험에서 기준으로 선택한 A 클린커보다 약 5 μm 정도 큰 결정이었다. Belite는 10~45 μm 내에 존재하였으

며, 평균 크기는 20~25 μm 이었다. Alite와 belite는 A 클린커보다 분해 현상이 약간 심한 것으로 관찰되기는 하였으나 큰 차이점은 발견할 수 없었다. 간극상 또한 A 클린커와의 차이점을 발견하지 못하였다.

3.2 현장 클린커 특성 분석

3.2.1 공정 클린커 분석 일례

각 시기별/라인별 생산되는 클린커는 동일한 원료 및 연료를 사용한다 할지라도 매번 특성이 달라지게 된다. 이는 실공정에서의 제반 공정조건이 항상 변화하여 클린커의 생성 및 성장에 큰 영향을 주기 때문이다. 그러므로 실험실적 조건 변화에 따른 기초적 물성 변화를 토대로 한 현장 클린커의 생성 조건 평가는 매우 중요한 품질/공정 평가방법중의 하나이다.

국내 시멘트 공장의 라인별 클린커 분석 결과, 생산 라인에 따라 클린커 광물의 특성이 달라짐을 확인할 수 있었다. 소형 킬른 클린커의 경우, alite 평균 크기는 대형 킬른 클린커보다 작게 관찰되었으며, belite 또한 유사한 결과를 나타내었다. 소형 킬른 클린커의 alite 크기는 약 26~27 μm 이었으며, 대형 킬른 클린커의 alite 크기는 30~33 μm 이었다. 각 생산 라인별 하절기(7~10월) 및 동절기(11~6월) 클린커의 비교 분석 결과, 하절기에는 각 생산라인에 구분 없이

대부분의 클린커에서 alite와 belite가 커지는 특징을 나타내었다. 이에 따라 압축강도 특성도 하절기에 약간 불량해지는 현상을 관찰할 수 있었다.

3.2.2 클린커 광물과 압축강도와의 상관성

일반적으로 클린커 광물의 크기 및 색상 등을 관찰·측정하여 28일 압축강도를 예측하기도 한다. 이때 관찰법은 투과법을 사용하며, 관찰항목별 계수를 구하여 추정식을 도출한다. 이러한 추정식과 28일 압축강도와의 상관성이 매우 높으며, 이의 대표적인 개발자로는 Yoshio Ono를 들 수 있다. 그러나 본 연구에서는 반사법으로 관찰한 클린커의 광물 크기만을 고려하여 실측 압축강도와의 상관성을 간단하게나마 검토해 보고자 하였다. 압축강도와 클린커 광물과의 상관성을 도출하기 위해서는 각 샘플링된 클린커들의 제반 특성이 어느 정도의 일정 범위 안에 존재하여야 하나, 본 연구에서 관찰된 클린커들은 1일 1회 샘플링된 클린커로서 soft burnt 된 클린커도 존재하며, C₃S의 함량에 큰 차이를 보이는 클린커도 있다. 이러한 클린커들은 통계적 평가를 도출하기 위해 사용될 경우 통계적 상관성을 낮추는 역할을 한다. 즉 soft burnt 된 클린커의 alite size는 매우 작아 통계적으로는 우수한 물성을 나타내리라 예측되어지나, 실제적으로는 28일 압축강도를 떨어뜨리는 역할을

할 수도 있으며, C₃S의 함량에 따라서도 28일 압축강도에는 좋지 못한 영향을 줄 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 상관계수 및 상관관계 방정식을 도출하기 위해서, C₃S와 f-CaO 함량의 평균값과 표준편차를 구하고, 이들 표준편차를 벗어나는 측정값은 통계처리시 제외하였다.

현장 킬른 클린커와 28일 압축강도와의 상관성을 도출해 보고자 Table 5의 alite 광물 크기, belite 크기 등을 검토해 보았다. Alite 광물 크기와 28일 압축강도와의 상관관계 계수 r값은 -0.65 이었으며, belite 크기와 상관관계 계수는 -0.72 이었다. 즉 alite와 belite 광물의 크기가 커질수록 28일 압축강도는 감소한다는 것을 의미한다. Belite는 일반적으로 알려진 "belite 커질수록(alite는 작아질수록) 강도가 증가한다"는 이론과 반대의 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 alite가 동일 크기 조건에서 belite가 커질수록 강도는 증가할 수 있다는 것이나, 실공정에서는 alite와 belite가 동시에 커지거나 작아지는 특성을 갖기 때문으로 판단된다. Alite 및 belite의 크기와 28일 압축강도와의 다중상관관계 방정식을 구하면, 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\langle 28\text{일 압축강도(추정치, kgf/cm}^2) = 399.72 + A \cdot S \times 3.65 - B \cdot S \times 4.61 \rangle$$
 이때 28일 압축강도와 alite 및 belite 크기를 고려한 추정식에 따른 압축강도와의 상관 관계 계수 r값은 0.81로 매우 높은 값을 나타내었다.

Table 4. Clinker analysis according to seasons

		Size (μm)		Content (%)				Strength(kgf/cm ²)		
		Alite	Belite	C3S	C2S	C3A	C4AF	3D	7D	28D
Small Kiln	Winter	23.6	19.1	54.2	24.2	5.2	11.6	234	302	395
	Summer	28.2	22.9	56.2	22.6	4.4	12.1	249	306	390
Large Kiln	Winter	27.0	23.6	59.7	19.8	5.3	11.8	234	302	395
	Summer	34.1	26.9	65.1	14.9	4.0	11.9	250	308	390
	Winter	29.7	23.7	67.9	11.3	4.3	12.2	243	306	395
	Summer	30.9	26.3	65.9	13.4	4.4	12.2	241	300	387

Table 5. Compressive strength and Clinker minerals

	Size(μm)		Content (%)		Comp. Strength (kgf/cm ²)			28D Strength (Assumption)
	Alite	Belite	C3S	C2S	3D	7D	28D	
6/23	20	15	53.8	24.7	230	294	406	404
7/7	23	18	58.4	19.8	258	314	404	401
7/21	30	28	57.0	21.2	246	299	378	380
8/18	30	25	55.6	24.7	248	300	380	394*
10/6	30	25	61.8	16.6	249	312	395	394
10/20	33	30	53.6	26.4	236	290	385	382
11/10	25	20	52.8	26.2	225	298	398	399
11/24	35	30	61.1	18.6	234	311	396	389

4. 결 론

소성 조건을 달리한 실험실 클린커/현장 클린커를 광학현미경(반사법)으로 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 승온 속도가 낮아짐에 따라 alite가 성장하였으며, belite 또한 성장하여 일반적으로 보고되고 있는 alite 뿐만 아니라 belite 결정도 성장한다는 것을 확인할 수 있었다.
2. 냉각 속도를 5°C/min으로 낮게 하였을 경우, belite가 크게 성장하였다. 이는 냉각 속도가

느려짐에 따라 belite가 성장할 수 있는 고온에서의 유지시간이 길어지기 때문으로 판단된다. 일반적으로 고온에서의 유지시간에 따라 belite가 크게 성장하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 냉각 조건에 의해서도 belite의 성장을 확인해 볼 수 있었다. 이외 서냉에 의해 관찰되는 일반적인 dot형 또는 ragged belite가 본 연구에서도 다수 관찰되었으며 간극상 또한 광물화 하는 현상을 발견하였다.

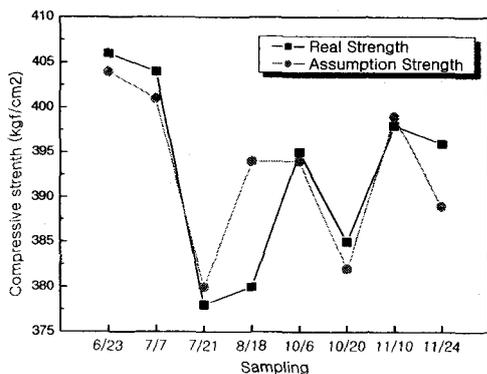


Fig. 9 Compressive strength (Assumption and real strength)

3. 고온에서의 유지 시간이 길어짐에 따라 alite 및 belite가 성장하는 것을 관찰할 수 있었으며, 유지 시간이 20분 증가함에 따라 각각의 결정은 약 5 μm 정도 성장함을 확인할 수 있었다. 또한 클린커 광물들의 결정면 분해는 유지 시간이 60분인 경우에서 관찰되었으나 서냉 조건 변화시 더 큰 분해를 관찰할 수 있어, 결정면의 분해는 주로 유지시간 보다는 냉각 조건(서냉)의 변화에서 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 최대 소성 온도가 1400°C인 클린커의 경우, belite보다는 alite의 결정 성장이 제대로 이루어지지 않았음을 확인하였으며, 다수의 f-CaO

도 관찰할 수 있었다. 최대 소성 온도 150 0°C에서는 결정 성장과 더불어 약간의 분해 현상이 관찰되었으나 이외 큰 특징을 관찰해 볼 수 없었다.

5. 국내 시멘트 공장의 클린커 분석 결과, 소형 킬른 클린커의 alite 및 belite 광물 크기가 대형 킬른 클린커 보다 작게 관찰되었다. 또한 하절기(7~10월) 및 동절기(11~6월) 클린커의 비교 분석 결과, 하절기에는 각 생산라인에 구분이 없이 대부분의 클린커에서 alite와 belite가 커지는 특징을 나타내었다.
6. 현장 킬른 클린커와 28일 압축강도와의 상관성을 도출한 결과, alite 및 belite 광물 크기와 28일 압축강도와의 다중상관관계 방정식은 $\langle 28\text{일 압축강도(추정치, kgf/cm}^2) = 399.72 + A \cdot S \times 3.65 - B \cdot S \times 4.61 \rangle$ 이었으며, 이때의 상관관계계수 r값은 0.81로 매우 높은 값을 나타내었다.

< 참고 문헌 >

1. Philip A. Alsop, The Cement Plant Operations Handbook, 2nd Edition, pp.85~105, F.L.Smith, Denmark, 1998
2. K. Svinning and K. A. Datu, "Prediction of Microstructure and Properties of Portland Cement from Production Condition in Cement Mill," 11th International Congress on the chemistry of Cement, Vol.2, pp.1080~1089 (2003)
3. Japan Cement Association, C&C encyclopedia, pp.60~61, Japan Cement Association, Japan, 1999
4. Fredrick M. Lea, The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd Edition, pp.118~157, Chemical Publishing Co., New York, 1970
5. C. S. Lee, I. S. Cho, "Preparation of Clinker for Analysis using Optical microscope," The 10th Cement symposium, pp.109~118 (2003)
6. G. C. Bye, Portland Cement, 2nd Edition, pp.54~58, Thomas Telford, pp.54~58, London, 1999
7. Donald H. Campbell, Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker, Portland Cement Association of USA, pp.30~33, Illinois, 1986
8. Yoshio Ono, Fundamental Microscopy of Portland Cement Clinker, Chichibu Onoda Cement Co., pp.3~4, Japan, 1995
9. Donald H. Campbell, Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker, Portland Cement Association of USA, pp.32, Illinois, 1986
10. Yoshio Ono, Fundamental Microscopy of Portland Cement Clinker, Chichibu Onoda Cement Co., pp.41~43, Japan, 1995