

Belite Rich Clinker의 피분쇄성에 관한 고찰

조계홍* · 김병권 · 서병현 배재순 · 이광조 · 박대병

〈쌍용양회 기술연구소〉

〈쌍용양회 영월공장〉

1. 서 론

최근 국가적 거대 SOC 프로젝트의 추진, 장대 교량, 초고층 건축물 등의 특수구조물의 건설이 늘어나고 있다. 이러한 추세에 따라 기존 OPC로는 만족시킬 수 없는 특성들 즉 고강도, 저발열, 고유동 등의 특성이 요구되고 있다.

이러한 요구특성에 맞는 시멘트를 개발하기 위하여 포틀랜드 시멘트 중 벨라이트(C_2S) 광물의 함량을 40% 이상으로 높게 조절하여 제조되는 저열 포틀랜드 시멘트(ASTM Type IV)의 개발이 요구되고 있는 것이다. 벨라이트 광물의 함량이 많아서 벨라이트 시멘트라고 불리는 이 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 저발열, 고유동, 장기재령에서의 고강도 특성 및 치밀한 경화체 구조에 따른 장기적인 내구성의 증진이라는 장점을 가지고 있어 대형 mass 구조물, 초고층 빌딩, 지하철 등 지중 연속구조물, LNG 저장탱크 등 특수용도의 구조물들에 그 사용이 점차 증가하고 있으며 국내 콘크리트 구조물의 기술수준 발전에도 크게 기여하고 있다.

벨라이트 시멘트를 제조하기 위해서는 클링커의 제계수중 LSF(Lime Saturation Factor)를 보통 시멘트와는 달리 80 내외로 크게 낮추고 SM(Silica Modulus)을 상당히 높게 하여 소성해야 하므로 시멘트 rotary 킬른내에서의 소성공정에 상당한 어려움을 겪게 될 뿐 아니라 제조된 클링커는 1종 시멘트 클링커와는 다른 피분쇄 특성을 나타낸다. 즉, SM이 상당히 높고 IM이 낮으므로 C_3A 및 C_4AF 등으로 구성되는 간극질의 함량이 적기 때문에 파쇄성(Crushability)은 1종 보통 클링커에 비해 양호한 반면 클링커의 구성

광물 중 피분쇄 특성이 제일 나쁜 C_2S 광물의 함량이 높기 때문에 grindability는 나빠지게 되어 최종적으로 cement mill의 생산성에 악영향을 미치게 된다. 시멘트 밀의 생산성은 전체 생산과정 중의 에너지 소비가 많은 부분이므로 이에 대한 개선은 생산성 향상 및 원가절감 측면에서 매우 중요한 인자가 된다.

따라서 본 연구에서는 실제 생산공장에서 킬른의 소성조건의 변화에 따른 벨라이트 시멘트 클링커의 피분쇄 특성을 crushing time, grinding time, grinding 지수 등의 측정을 통하여 검토하였으며 이러한 결과를 통해 킬른의 소성공정을 적절히 조정함으로써 클링커의 피분쇄성을 향상시켜 시멘트의 생산성을 증진시키는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2-1 사용 Clinker

본 연구에 사용한 clinker는 당사의 실제 공장 kiln에서 생산한 것으로, 벨라이트 광물함량과 소성성 그리고 비교를 위한 1종 clinker 등 4종류를 사용하였다. 실험에 사용한 clinker의 소성조건과 화학성분을 <Table 1> 및 <Table 2>에 나타내었다. Clinker LB와 LB-1의 경우는 C_2S 광물 함량은 약 50% 수준으로 비슷하나, f- CaO 의 수준이 차이가 나는 것을 사용하였다.

또한 HB clinker는 벨라이트 광물의 함량이 LB시리즈 clinker에 비해 많은 60% 수준의 것을 이용하였다. 그리고 비교를 위한 1종 clinker는 일반적인 clinker를 사용하였다.

<Table 1> Burning condition of clinkers in used

		Type I	LB	LB-1	HB
Burning condition	Max. temp. (°C)	1,465	1,456	1,423	1,455
	Retention time (min)	45	52	48	50
	Cooler	Grate	Grate	Grate	Grate
	Sp. Gr	3.16	3.21	3.21	3.22
	Wt/ℓ (kg/ℓ)	13.6	14.6	13.5	14.4
Crystal size (μm)	Alite	10~30	25~45	10~25	20~45
	Belite	10~20	40~60	15~35	30~60

2-2 Crushability 측정

Clinker의 crushability 측정방법은 <Fig. 1>에 나타내었다. 그리고 측정에 사용한 mill은 400mm φ×400mmL의 제원을 갖는 Drum mill로서 회전수는 50rpm으로 clinker의 피분쇄성을 측정하였다. 분쇄에 사용한 steel ball은 70mmφ 34.2kg, 60mmφ 25.3kg, 50mmφ 15.9kg 등 총 75.4kg을 사용하였다.

2-3 Grindability 측정

Clinker의 grindability 측정방법은 <Fig. 2>에 나타내었다. 그리고 측정에 사용한 mill은 305mm φ×305mmL의 제원을 갖는 Bond mill로서 회전

<Table 2> Mineral composition of clinkers in used

Symbol	Mineral composition (%)					f-CaO
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	LP	
LB	29.03	51.83	2.46	11.76	22.7	0.2
LB-1	30.15	50.67	2.51	12.09	2.29	0.8
HB	20.40	60.73	2.70	11.90	2.31	0.4
Type I	58.50	16.68	10.93	9.82	2.94	0.6

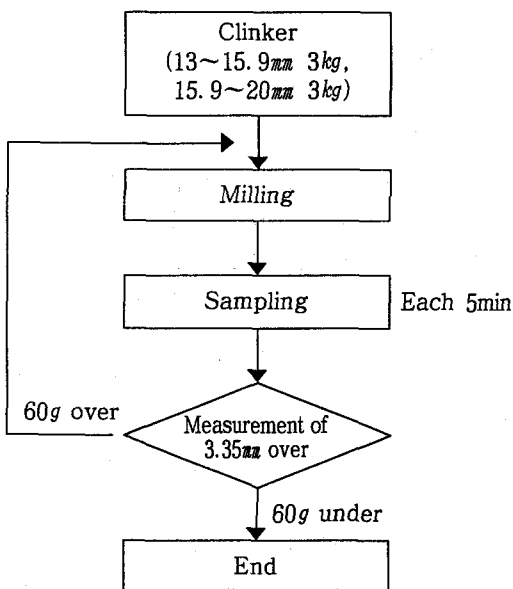
수는 67rpm으로 clinker의 피분쇄성을 측정하였다. 분쇄에 사용한 steel ball은 40mmφ 9.96kg, 30mmφ 5.74kg, 25mmφ 0.74kg, 19mmφ 2.80kg, 13mmφ 0.90kg 등 총 20.14kg을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

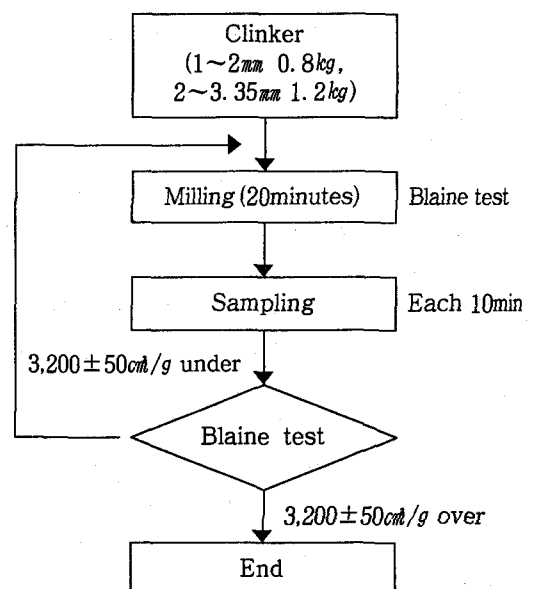
3-1 Clinker 특성

실험에 사용한 clinker의 현미경 관찰 결과를 <Fig. 3>에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 소성온도가 높고, kiln내 체류시간이 긴 LB와 HB의 결정 size가 제일 큰 것을 알 수 있다.

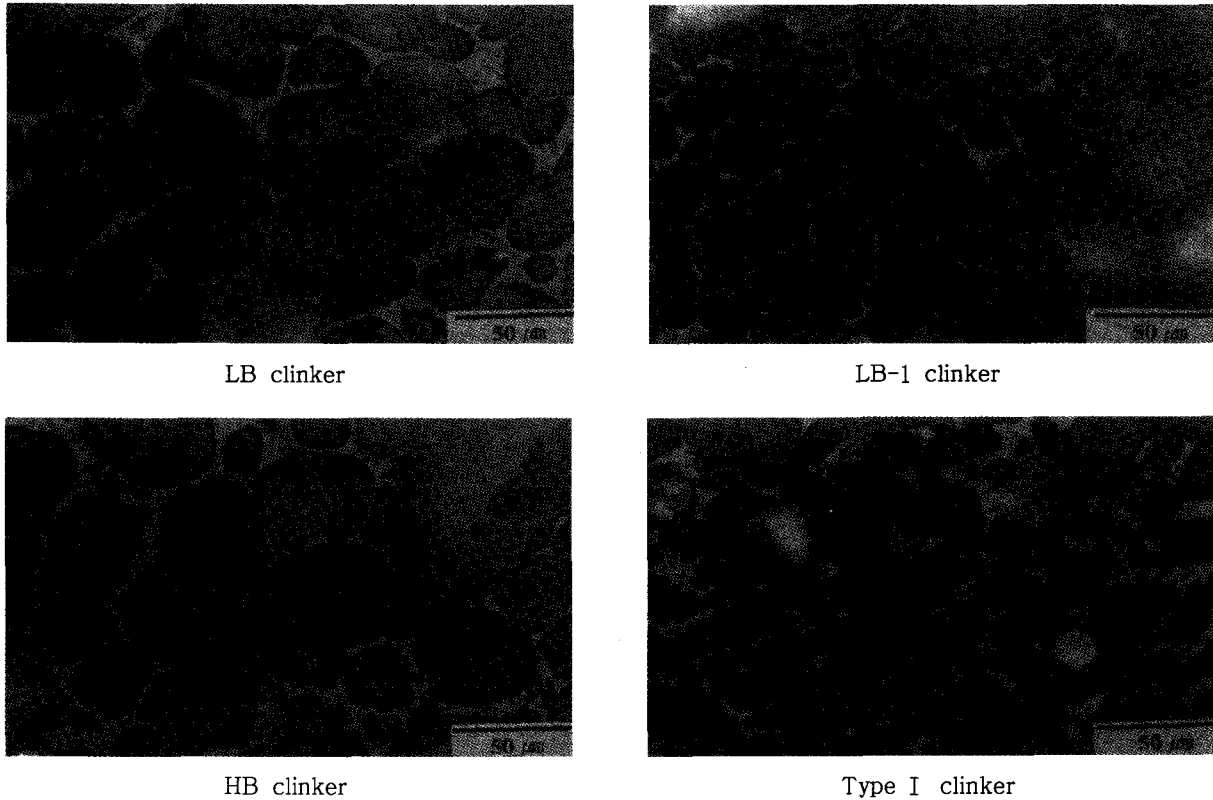
즉 kiln내 체류시간이 길고 소성온도가 높은 쪽의 결정성장이 많이 일어남을 알 수 있고 특히 grindability에 많은 영향을 미치는 belite 광물이



<Fig. 1> Flow diagram of crushability test



<Fig. 2> Flow diagram of grindability test



<Fig. 3> Micrographs of belite and type I clinker

크게 성장을 하였다.

상대적으로 피분쇄성이 양호한 LB-1이나 type I clinker의 경우 belite 광물의 size가 작거나 양이 작다.

3-2 Crushability 특성

각 clinker의 피분쇄시간 측정 결과를 <Table 3>에 나타내었다. Crushing time은 belite clinker가 1종에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다. 이는 belite clinker가 1종에 비해 간극질의 양이 적고, 상대적으로 파쇄성이 우수한 C₃S 함량이 높기 때문인 것으로 판단된다.

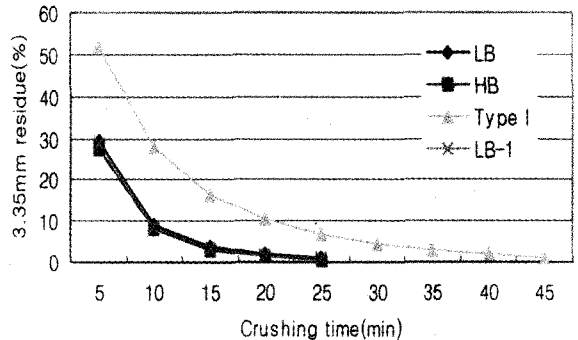
<Table 3> Crushing and Grinding time of clinker

구 분	Crushing time (min)	Grinding time (min)
LB	25	85.7
LB-1	25	72.4
HB	23	94.2
Type I	44	59.0

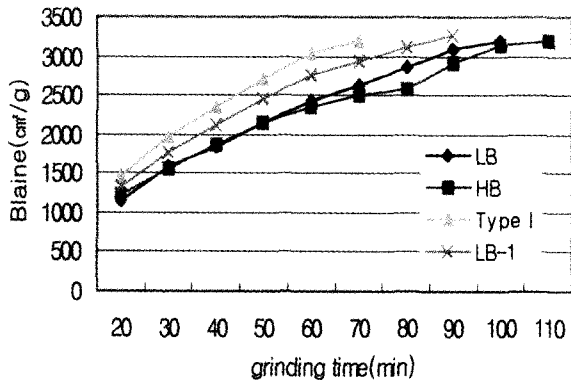
<Fig. 4>에서 보는 것처럼 파쇄특성의 전반적인 경향도 belite clinker쪽이 우수함을 알 수 있다.

3-3 Grindability 특성

각 clinker의 피분쇄시간 측정결과를 <Table 3>과 <Fig. 5>에 나타내었다. Grushing time은 belite clinker가 1종에 비해 매우 나쁜 결과를 나타낸다. 이는 clinker 광물의 피분쇄성이 제일



<Fig. 4> Crushing time of clinker



〈Fig. 5〉 Grinding time of clinker

나쁜 belite 광물의 양이 많고, 결정의 size가 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 일정 분말도를 얻는데 필요한 분쇄시간이 belite clinker 쪽이 더 긴 것을 알 수 있다.

3-4 광물지수 특성

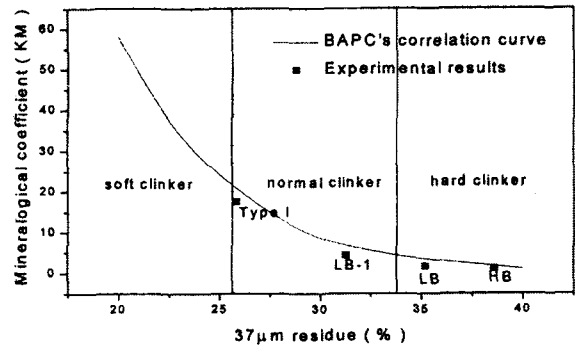
Clinker 광물의 구성비율과 크기로 계산되는 광물지수는 clinker의 피분쇄성을 판단하는 척도가 될 수 있으며, 광물지수의 계산은 다음 식에 따른다.

$$KM = (\% \text{ Alite} / (\% \text{ Belite} \times \text{Alite average size})) \times 100$$

본 연구의 실험결과를 기존의 계산곡선에 plot한 결과를 〈Fig. 6〉에 나타내었는데, 기존의 이론적 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

그림에서 보는 것처럼 피분쇄성이 좋지 않은 LB나 HB가 hard clinker에 속함을 알 수 있으며, 1종과 LB-1의 경우가 normal clinker에 속한다. 따라서 clinker 소성시에 공정조건을 잘 조절하여 clinker가 hard한 쪽으로 가지 않도록 해야 한다.

분쇄공정이 동력소모가 큰 부분이므로 클링커 소성단계에서부터 피분쇄성을 고려하여 소성하는 것이 매우 중요하다. 만약 1종 clinker와 비슷하



〈Fig. 6〉 Correlation between KM and 37µm residue

게 소성하면 belite clinker는 hard clinker로 소성될 것이다.

4. 결론

Belite rich clinker의 피분쇄 특성은 광물조성과 소성조건에 따라 다른 특성을 나타낸다.

- 1) Belite rich clinker의 crushability는 1종보다 우수하였다. 이것은 Belite rich clinker의 간극질의 양이 적기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) Belite의 양이 많을수록 grindability는 나쁘다. 이것은 clinker 고유의 피분쇄 특성이 $C_3S > C_3A > C_4AF > C_2S$ 의 성질을 갖기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 소성온도가 높을수록, kiln내 체류시간이 길수록 alite와 belite의 결정이 크게 성장함으로써 grindability는 저하되었다.
- 4) 같은 조성의 clinker라도 결정의 크기가 클수록 grindability 특성은 나빠짐을 알 수 있다.

이상의 결론에서 보는 바와 같이 belite 시멘트를 제조하는 경우에는 피분쇄성이 생산성에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 소성공정의 세심한 조절을 통해 원하는 clinker를 생산해야 한다.