

크링카 광물조성에 따른 분쇄성에 관한 연구

김우영* · 민승의 · 정세호

<한일시멘트 단양공장>

1. 서 론

시멘트산업은 대표적인 에너지 다소비 업종으로 연료와 전력비등의 에너지사용금액이 전체 제조원가의 대부분을 차지하고 있다. 시멘트 1ton을 생산하는데 필요한 에너지 중 약 30%는 분쇄공정에서 소비되어 지며, 이는 전체 시멘트 제조비용에 있어서 상당히 높은 비율을 차지하는 것이다. Cement Mill에서의 에너지 소비는 그 형태에 따라 16.5~63.5 kWh/ton범위로 다양하며, 평균 36kWh/ton으로 알려지고 있다.

크링카 분쇄과정에서 수많은 인자들이 에너지 소비에 영향을 미친다. 크링카의 경도는 분쇄능에 많은 변동을 주는 요인이다. 가장 단단한 크링카는 가장 연한 크링카보다 약 80%의 분쇄 전력을 더 필요로 한다. 더욱이 분말도가 다른 여러 종류의 Cement를 생산하기 위해서는 더 많은 에너지가 소비되어야 한다.

크링카의 분쇄능은 분쇄력에 저항할 수 있는 크링카의 능력을 측정하는 것으로 크링카를 주어진 분말도까지 분쇄하는데 필요한 에너지를 평가하는데 사용된다. 크링카의 분쇄능을 결정하기 위해서 사용되는 일반적인 방법들은

- 1) 일정한 분말도의 시멘트를 생산하는데 필요한 분쇄기의 에너지
- 2) 일정한 분말도의 시멘트를 생산하는데 필요한 Cement Mill의 회전
- 3) 동일한 에너지를 소비했을때 분쇄된 크링카의 비표면적
- 4) Cement Mill 회전당 지정된 sieve를 통과하는 분쇄된 크링카의 양 등이 있다.

크링카의 화학적·광물학적 조성이 분쇄능에 미치는 영향에 대한 연구들은 많이 진행되었으며, 대표적인 연구성과들은 다음과 같다.

- Silica ratio가 감소하고 Alumina(Al_2O_3) 및 Iron oxide(Fe_2O_3)가 증가함에 따라 분쇄능은 상승한다.
- C_3S 함량이 증가되면 분쇄능은 상승하는 한편, C_2S 함량이 높아지면 분쇄능은 하락한다. 또한 액상량이 많아질수록 크링카의 분쇄능은 더 하락된다.
- 크링카의 C_3A 함량과 액상량은 지정된 분말도에 대해 필요한 에너지 소비를 상승시키는데 중요한 역할을 한다.
- C_4AF , K_2O 및 MgO 함량이 높을수록 분쇄능은 증가한다.
- 크링카의 Free-CaO 함량이 높아질수록 분쇄가 더 용이해진다.
- 급냉된 크링카가 서냉된 크링카에 비해 더 분쇄가 용이하다.

본 연구에서는 다양한 화학조성을 가진 크링카를 동일한 시간동안 분쇄하여 크링카의 비표면적이 화학조성 및 광물조성과 어떤 상관관계를 가지는지 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 크링카 시료들의 화학조성 광물조성을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 크링카 시료들의 화학조성 및 광물조성

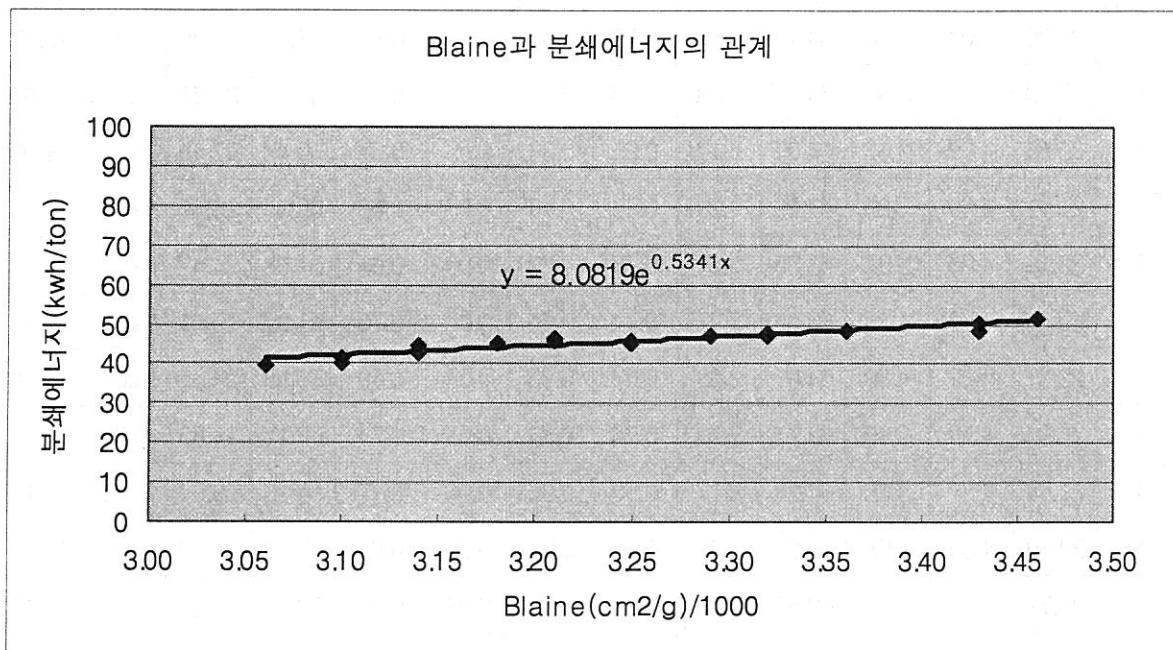
크링카 No.	화학조성(%)									광물조성(%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	f-CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	22.09	5.02	4.36	64.13	2.26	0.70	0.92	0.07	0.65	53.23	23.20	5.93	13.27
2	23.50	4.71	3.89	64.14	2.28	0.68	0.80	0.08	0.63	45.31	33.21	5.90	11.84
3	22.85	4.69	3.62	64.07	2.17	0.65	0.84	0.05	0.67	50.48	27.45	6.30	11.02
4	21.71	4.80	3.89	64.69	2.28	0.65	0.76	0.06	0.68	60.55	16.59	6.14	11.84
5	22.10	4.85	3.98	63.33	2.24	0.77	0.83	0.06	0.65	51.58	24.47	6.12	12.11
6	22.39	4.79	4.25	63.96	2.27	0.74	0.85	0.08	0.70	51.96	25.01	5.50	12.93
7	22.37	5.08	4.39	64.91	2.28	0.64	0.83	0.08	0.69	53.83	23.55	6.03	13.36
8	20.94	4.53	3.36	63.51	2.29	0.74	0.85	0.05	0.74	64.17	11.65	6.32	10.22
9	21.51	4.57	3.65	62.28	2.17	0.90	0.98	0.06	0.77	54.15	20.84	5.93	11.11
10	22.69	4.59	4.08	64.22	2.27	0.46	0.69	0.06	0.81	52.53	25.60	5.26	12.42
11	21.77	4.52	3.75	62.50	2.16	1.04	1.04	0.08	0.84	53.26	22.26	5.63	11.41
12	22.02	4.60	3.36	63.97	2.38	0.86	0.90	0.05	0.90	57.36	19.88	6.50	10.22
13	23.14	4.68	4.18	63.53	2.26	0.69	0.83	0.08	0.87	46.35	32.15	5.33	12.72
14	22.43	4.79	3.93	63.81	2.22	0.70	0.81	0.05	0.90	51.50	25.47	6.04	11.96
15	21.69	4.81	3.70	64.09	2.30	0.81	0.85	0.07	0.96	58.46	18.11	6.49	11.26
16	20.72	4.51	3.56	62.31	2.27	1.58	1.22	0.07	0.93	60.80	13.56	5.93	10.83
17	21.98	4.69	3.75	62.87	2.16	0.89	0.87	0.05	0.96	52.03	23.79	6.08	11.41
18	21.70	4.70	4.27	63.72	2.23	0.80	0.86	0.07	0.99	56.80	19.38	5.23	12.99
19	21.25	4.91	4.34	63.59	2.24	0.80	0.91	0.07	1.02	58.13	17.05	5.67	13.21
20	21.66	4.66	4.28	63.43	2.20	0.80	0.92	0.07	1.05	56.18	19.74	5.11	13.02

2.2 실험방법

분쇄는 10kg의 분쇄용량을 가진 실험실 Ball Mill에서 이루어졌으며, 다양한 화학조성을 가진 크링카를 동일한 시간동안 Ball Mill에서 분쇄하여 비표면적을 측정하였다.

3 실험결과

Blain과 그에 상응하는 분쇄에너지 소비와의 관계는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> Blaine과 분쇄에너지의 관계

비표면적에 따른 Blaine값과 분쇄에너지와의 관계는 다음과 같은 지수함수로써 나타낼 수 있다.

$$P = Ae^{BS}$$

: P= 에너지소비량(kWh/ton)

: S= Blaine의 1000분의 1값[(cm²/g)/1000]

: A,B = 크링카 조성에 의존하는 상수

상수 A,B를 크링카와 분쇄에너지 그래프의 관계에서 결정하였으며, 문헌상으로 기술되어있는 크링카의 화학적 매개변수들과의 상호관계를 결정하여 <표 2>에 나타내었다.

표에서 볼 수 있듯이 상수들과 매개변수들 사이에는 상호 관련성이 존재하는데 그 중에서 특히 Al₂O₃, F-CaO, Silica Modulus(SM), Silicate/flux 비율 사이에는 상당한 상호 관련성이 존재하고 있다.

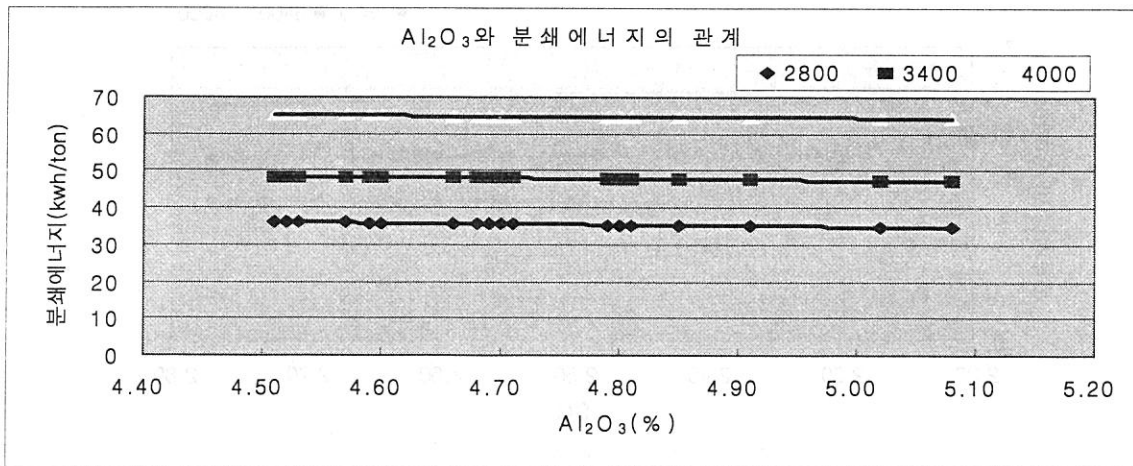
<표 2> 크링카의 화학적 매개변수들과 상수 A,B와의 관계 및 상관계수

Parameter	A	R _A	B	R _B
SiO ₂	$0.0026(\text{SiO}_2)^{2.62}$	0.422	$-0.66\ln(\text{SiO}_2)+2.55$	0.477
Al ₂ O ₃	$20.61e^{-0.18\text{Al}_2\text{O}_3}$	0.576	$0.04\text{Al}_2\text{O}_3+0.31$	0.538
MgO	$-1.02(\text{MgO})^2+3.67(\text{MgO})+4.66$	0.366	$0.025(\text{MgO})^2-0.084(\text{MgO})+0.583$	0.341
K ₂ O	$13.78e^{-0.88\text{K}_2\text{O}}$	0.554	$0.16\text{K}_2\text{O}+0.41$	0.438
Na ₂ O	$8.85e^{-0.73\text{Na}_2\text{O}}$	0.542	$0.13\text{Na}_2\text{O}+0.49$	0.419
Total alkalis	$11.84e^{-0.49(\text{alkali})}$	0.609	$0.09(\text{alkali})+0.44$	0.476
SO ₃	$1.15(\text{SO}_3)+6.41$	0.365	$-0.025(\text{SO}_3)^2+0.019(\text{SO}_3)+0.536$	0.383
F-CaO	$1.2\ln(\text{F-CaO})+8.89$	0.599	$-0.03\ln(\text{F-CaO})+0.49$	0.575
SM	$5.76(\text{SM})-5.82$	0.579	$-0.2(\text{SM})+0.98$	0.678
C ₃ A	$10.75e^{-0.04\text{C}_3\text{A}}$	0.537	$8.4 \times 10^{-3}\text{C}_3\text{A}+0.45$	0.480
C ₄ AF	$2.33(\text{C}_4\text{AF})^{0.5}$	0.367	$0.74(\text{C}_4\text{AF})^{-0.15}$	0.243
$(\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S})/(\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF})$	$1.007[(\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S})/(\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF})]^{1.46}$	0.628	$-0.345\ln[(\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S})/(\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF})]+0.99$	0.660

3.1 크링카의 Al₂O₃ 함량이 분쇄에너지에 미치는 영향

크링카의 Al₂O₃ 함량과 주어진 상수 A,B를 이용하여 계산된 분쇄에너지의 관계를 3개의 서로 다른 Blaine(2800,3400,4000)에 대해서 표시하면 <그림 2>와 같다.

Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 분쇄에너지 소비는 감소하는 경향을 나타낸다.

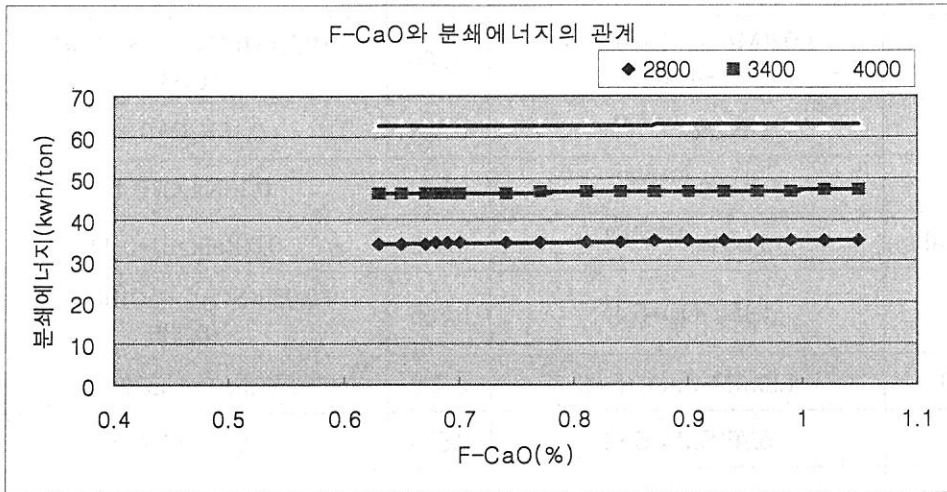


<그림 2> Al₂O₃ 함량과 분쇄에너지의 관계

3.2 크링카의 F-CaO 함량이 분쇄에너지에 미치는 영향

크링카의 F-CaO함량과 주어진 상수 A,B를 이용하여 계산된 분쇄에너지의 관계를 3개의 서로 다른 Blaine(2800,3400,4000)에 대해서 표시하면 <그림 3>과 같다.

F-CaO함량이 증가함에 따라 분쇄에너지는 증가하는데 대수적으로 증가하는 관계임을 알 수 있다.

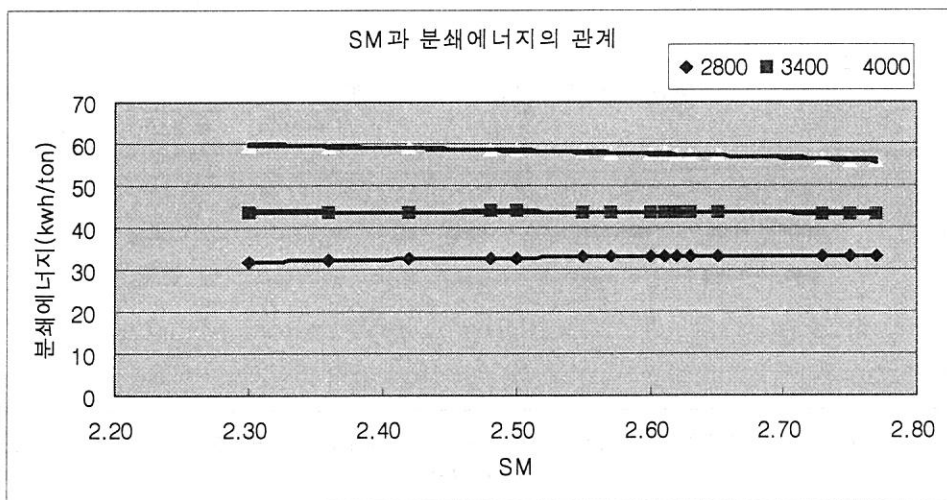


<그림 3> F-CaO와 분쇄에너지의 관계

3.3 크링카의 Silica Modulus(SM)가 분쇄에너지에 미치는 영향

크링카의 SM과 주어진 상수 A,B를 이용하여 계산된 분쇄에너지의 관계를 3개의 서로 다른 Blaine(2800,3400,4000)에 대해서 표시하면 <그림 4>와 같다.

SM과 분쇄에너지의 관계는 2차 다항 방정식으로 설명되어진다. 각각의 분말도에 대해 분쇄에너지 소비가 가장 높은 지점인 다항식의 극점에 해당하는 SM값은 분말도가 증가함에 따라 직선적으로 감소한다. 분말도 2,800, 3,400, 4,000 cm²/g에 대해 최대 분쇄에너지를 갖는 SM은 각각 2.77, 2.48, 2.19로 감소하는 경향을 보여준다.

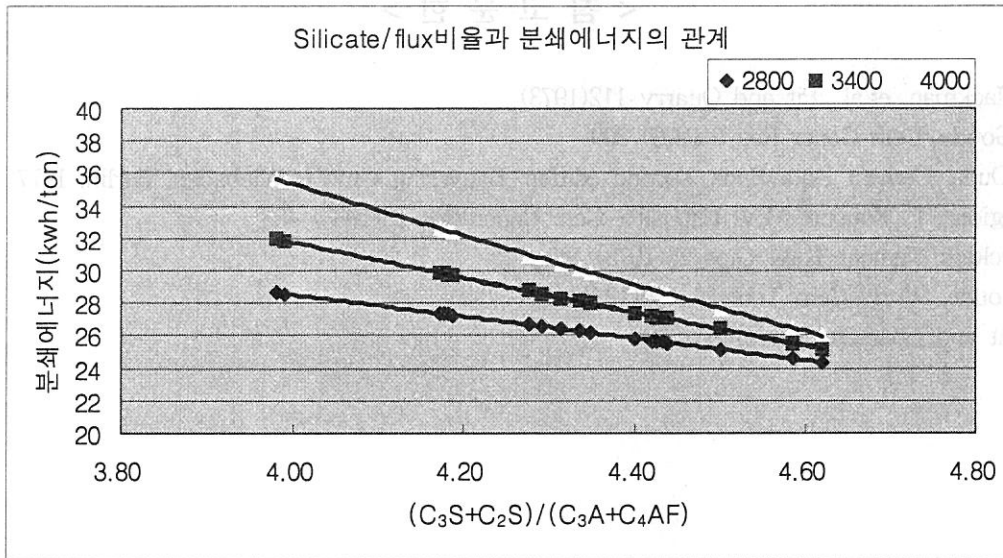


<그림 4> SM과 분쇄에너지의 관계

3.4 크링카의 $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$ 가 분쇄에너지에 미치는 영향

크링카의 silicate/flux 비율 $[(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)]$ 과 주어진 상수 A,B를 이용하여 계산된 분쇄 에너지의 관계를 3개의 서로 다른 Blaine(2800,3400,4000)에 대해서 표시하면 <그림 5>와 같다.

Silica/flux 비율이 증가할수록 분쇄에너지는 급격하게 감소하는 경향을 나타낸다. Silica/flux비율이 증가하면 증가할수록 Blaine이 큰 Cement의 분쇄에너지가 Blaine이 낮은 Cement의 분쇄에너지와 비슷하게 떨어지는 경향을 나타내고 있다.



<그림 5> Silicate/flux비율과 분쇄에너지의 관계

4. 결론

화학적·광물학적 조성이 다른 크링카를 이용하여 조성에 따라 분쇄성을 수학적으로 계산하여 보았다. 화학적 매개변수들 중에서 Al_2O_3 , F-CaO, Silica Modulus(SM), Silicate/flux 비율은 특히 분쇄에너지와 상당한 상호관계가 있는 것으로 밝혀졌다.

본 연구 결과로부터 이끌어낸 결론들은 다음과 같다.

1. Blaine과 분쇄에너지의 관계는 지수함수로써 나타낼 수 있으며, 지수함수에서의 상수들은 크링카의 화학조성에 의존한다.
2. Al_2O_3 의 함량이 증가할수록 분쇄에너지는 감소한다.
3. F-CaO 함량과 분쇄에너지는 대수적인 상관관계를 갖게 되며, F-CaO함량이 증가함에 따라 분쇄에너지는 증가한다.

4. SM이 증가하면 분쇄에너지는 증가하며, 이 관계는 2차 다항 방정식의 관계를 보인다.

5. Silicate/flux 비율이 증가함에 따라 분쇄에너지는 급격하게 감소한다.

따라서, Kiln 원료의 화학적 조성의 신중한 조절을 통해서 분쇄가 용이한 크링카를 제조한다면 상당한 양의 에너지를 절약할 수 있다고 할 수 있다.

< 참고 문헌 >

- 1) A.H Hackman, et.al., Pit and Quarry 112(1973)
- 2) G.R. Gouda, Cem Concr Res 9(1979) 209
- 3) W.H Duda, Cement Data Book, second edition, Bauverlag GmbH, Wiebaden, Berlin, 1977
- 4) G. Frigione, F. Zonone, M.V. Esposito, Cem Concr Res 13(1983) 483
- 5) M. Deckers, Zement-Kalk-Gips 25(1973) 445
- 6) G.R Goude, World Cem Technol 156(1981)
- 7) Cement and Concrete Research 1999