The Proceedings of 42th Cement Symposium
pp. 113~120, Sep. 17~18. 2015
Homepage : www.cement.or.kr

Raw Mill용 분쇄조제의 실생산 적용 결과

유동우* · 임영진 · 이승헌 · 고상렬 · 전관석 · 권종원
군산대학교 신소재공학과, 대동켐텍, 고려시멘트(주)

1. 서 론

시멘트산업은 장치산업의 대표적인 산업이며, 특히 시멘트 생산의 공정은 대규모 연속 생산이 이루어지는 공정이다. 시멘트 생산공정은 채광공정, 원료처리공정, 소성공정, 제품공정으로 크게 분류할 수 있으며, 이들 공정 중 미분쇄가 이루어지는 공정은 원료처리공정과 제품공정에 각각 있다. 제품공정에서의 미분쇄는 Kiln에서 생산된 Clinker와 석고를 혼합 미분쇄하여 미분말의 시멘트를 제조하는 공정으로 시멘트의 물성을 반영하는 공정이다. 이때에 Mill의 효율 증대를 도모하는 것은 일반적으로 행하여지고 있는 실정이며, 더욱이 근래에는 시멘트의 물성개선의 목적으로 기능성의 다양한 Cement Mill용 분쇄 조제가 개발 되어 적용되어 지고 있다.[1,2)]

원리처리공정에 있는 미분쇄공정은 후단공정의 Kiln에서 소성성을 높이기 위하여 석회석 등의 원료를 미분쇄하는 공정으로 원료처리공정의 분쇄에 따라 소성성에 영향을 미친다. 또한, 이때에 사용하는 Mill을 Raw Mil이라고 하며, 석회석등의 원료를 분쇄하여 Kiln의 원료를 공급하는 공정이다. Kiln의 생산성 유지를 위하여 Raw Mill의 지속적인 운전유지는 전체적인 공정 흐름에서 중요한 역할을 하며, Clinker 소성에 필요한 조합원료의 화학조성 조정 및 혼합의 역활도 수행하고 있다.

각 시멘트 사에서 사용하고 있는 Raw Mill은 Tube Mill과 Roller Mill 2종류의 밀을 사용하고 있으며, 시멘트 각 사의 간단한 Raw Mill 현황을 Table 1에 나타내었다. 이 Mill 중 Tube Mill은 Cement Mill에서 사용하는 Tube Mill과 달리 Double Rotator Mill을 사용하고 있으며, 이 Double Rotator Mill의 경우 일반적인 Tube Mill 보다 효율이 높은 것으로 알려져 있다.[1)3)]

시멘트 공정에서 사용하는 Cement Mill과 Raw Mill은 비슷한 형식의 Mill을 사용하고 있으나, 분쇄입도 및 피분쇄물의 주성분의 차이에 의해서 운용면에 차이가 있다. Cement Mill과 Raw Mill의 간략한 차이를 Table 2에 나타내었다. Cement Mill에 비하여 Raw Mill은 같은 분쇄기의 용량에서 약 2.3배에 해당하는 피분쇄물을 분쇄하고 있으며, 이는 Cement에 비하여 Raw Mill에서 제조되는 Raw-Mix가 비교적 낮은 분말도이고, 피분쇄물의 주성분이 석회석이기 때문이다. 분쇄를 할 때 일량의 크기를 나타내는 일지수의 경우 석회석이 Clinker에 비하여 일지수가 약 1.3배 작다. 때문에 석회석은 Clinker에 비하여 높은 피분쇄성을 나타내므로 Raw Mill은 Cement Mill에 비하여 시간당 대량의 피분쇄물을 분쇄하고 그에 의한 분쇄조제의 소모량도 높다. 또한 Raw Mill은 석회석 및 부원료에서 유입되는 수분의 건조를 위하여 Mill 내부에 고온의 가스를 유입 원료의 건조를 실시한다. 이러한 고온의 조건은 유기 분쇄조제에 의한 분쇄성능향상에 악영향으로 작용 될 것으로 생각된다. 따라서 Raw Mill에서의 분쇄조제의 사용은 경제성 부분에서 적용하기 어려운 요소를 가지고 있으며, 더욱이 Raw Mill은 시멘트 생산의 중간공정이므로 공정의 안정성이 매우 중요한 요소로 작용한다. 이러한 이유로 Raw Mill에 효율의

Table 1 국내 시멘트사의 Raw Mill 현황 (2014년 기준)

		쌍용	동양	한일	성신	현대	한라	아세아	고려
Raw Mill	대수 (EA)	20	8	5	8	5	5	4	1
	Capa' (ton/hrs)	3,450	2,205	1,480	2,140	1,480	1,660	980	180
Kiln	대수 (EA)	16	7	6	6	6	4	4	1
	Capa' (ton/day)	45,140	30,600	21,610	28,600	20,800	20,300	12,565	2,400
Raw Mill 18시간가동 기준 Capa'비율 (%) (Kiln Capa' / Raw Mill Capa')		72.7	77.1	81.1	74.2	78.1	67.9	71.2	74.1

Table 2 Cement Mill과 Raw Mill의 간략한 차이

	Cement Mill	Raw Mill	비 고
생산량	80~ 150 ton/hr	190~350 ton/hr	동일기기 Capa'에서 약 2.2~2.5배 분쇄
분쇄 물질 (주원료)	Clinker	석회석	피분쇄물의 분쇄속도 차이
Mill 형식	Tube, Roller Mill	Tube (double Rotator), Roller	Tube Mill의 경우 형식의 차이 있음.
분쇄온도	100~150°C (출구기준)	250~450°C (입구기준)	Raw Mill : 원료의 건조를 위해 높은 온도유지 (밀형식에 따라 투입구에 건조영역 있음)
분쇄후 입도	약 3,400~3,600 cm^2/g	약 2,400~2,700 cm^2/g	Raw Mill이 낮은 입도로 분쇄
분쇄 후의 필요 물성	시멘트물성 (응결, 강도, 유동성 등)	소성성 (Kiln의 소성 용이성)	Cement Mill의 경우 수화특성 Raw Mill의 경우 소성특성
분쇄조제의 국내시장규모	약 9,000ton	약 18,000ton	Cement Mill 분쇄조제 해외 진출시도
분쇄조제 사용	사용량 0.018%~0.04% (필수사용)	개발 진행중	Mill의 효율 증대 및 분쇄물의 물성 개선의 목적으로 사용

증가 및 소성성의 개선을 위하여 분쇄조제의 사용은 이루어지지 않고 있는 실정이다.[7]

따라서 본 실험에서는 분쇄조제 3종류의 유형을 장기간에 걸친 실적용으로 공정의 안정성과 Raw Mill의 경제성 검토를 실시하여, Raw Mill용 분쇄조제의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실 험

Raw Mill용 분쇄조제의 실험은 Lab. 장비와 실생산 설비와의 차이가 커서 Lab. 실험의 비중을 줄이고 실생산 적용 실험을 주로 실시하였으며, 그러한 이유는 Raw Mill의 경우 실험실에서 실현하기 어려운 고온의 조건이며, 대량의 급속한 분쇄공정이기 때문이다.

2.1 Raw Mill 분쇄조제의 제조

실생산 시험에 사용한 Raw Mill용 분쇄조제의 간단한 특징은 Table 3에 나타내었다. 주성분에 대한 구조식은 Fig. 1에 나타내었다. Type-A와 Type-P에 사용된 Raw Mill용 분쇄조제의 주원료는 다가 하이드록시기를 포함하는 방향족화합물(이하 PHP)로서, 방향족 화합물은 무수프탈산(Phthalic Anhydride)을 사용하였다. 무수프탈산 또는 프탈산(Phthalic Acid)의 성분을 분쇄조제로서 사용한 예는 1970년대에 일본에서 부산물인 프탈산슬러지를 Raw Mill 분쇄조제로서 시험이 진행 된 예가 있으며, 이 슬러지에는 약 프탈산이 약 10% 함유되어 있었다.[5,6] 국내에서는 1990년도에 S사에서 테레프탈산의 제조시에 분산물로 발생되는 슬러지 부산물을 사용하여 광물용 미분

Table 3 실험에 사용한 Raw Mill 분쇄조제의 특성

구 분	주 성 분	특 징
Type-C	Cement Mill 분쇄조제 원료 사용	분체 흐름 특성 증가
Type-A	Raw Mill 전용원료 + Amine계열 분쇄조제 원료 혼용	분체 흐름 특성 일부 개선, 잔사제어 가능
Type-P	Raw Mill 전용원료	분체 흐름특성 제어, 공정 안정

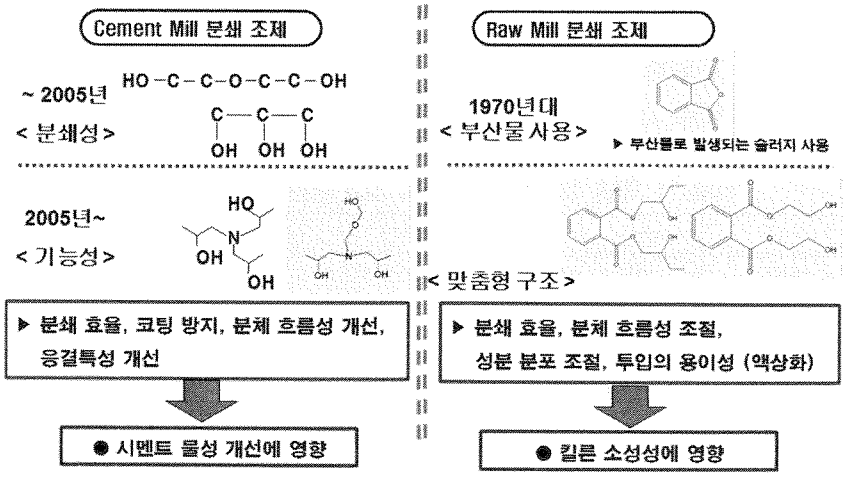

Fig. 1 분쇄조제의 간략한 구조식

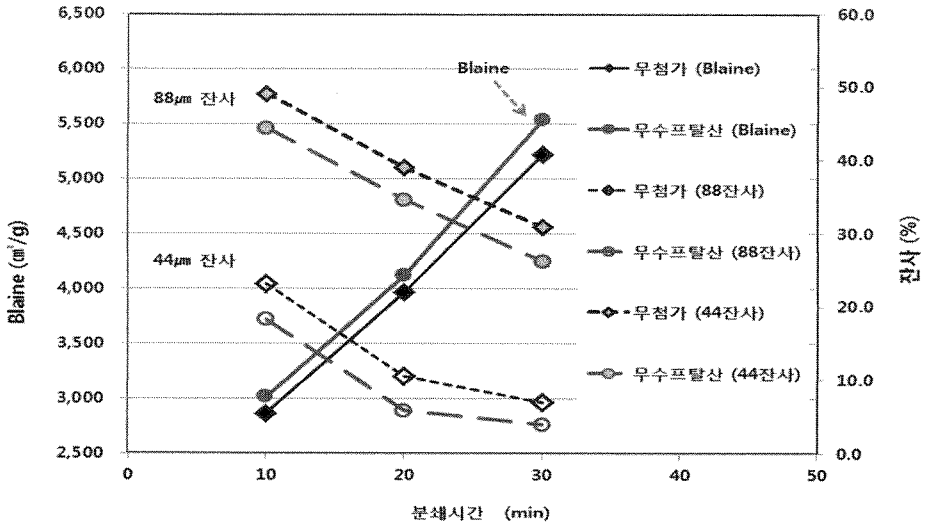

Fig. 2 무수프탈산의 Lab. 실험 결과 (석회석 분쇄, Ball mill)

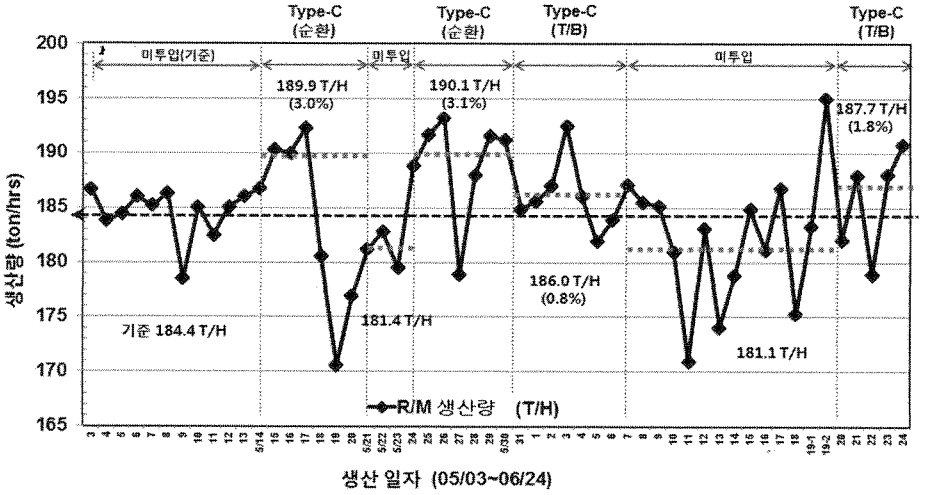

Fig. 3 Type-C 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 생산량 변화

건조중량에 40~85%의 프탈산류를 포함하고 있었다. 그러나 현재에는 무수프탈산 슬러지의 경우 발열량이 높아 재활용되어 산업 부산물로서 발생하지 않는 실정이다.

무수프탈산을 Raw Mill용 분쇄조제로서 Lab. 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었고, 특히 낮은 분말도(약 3,000 cm^2/g)에서도 44 μm 잔사 감소율은 4.7%, 88 μm 잔사 감소율은 4.8%을 나타내어 Raw Mill 분쇄 조제로서 충분한 성능을 나타내는 것으로 판단되었다. 그러나 프탈산 및 무수프탈산은 매우 고가의 원료이고, 입자상태의 물질로서 Raw Mill 분쇄조제로서 사용은 어려움이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 무수프탈산에 다가 하이드록시기를 함유하도록 합성하였으며, 본 실험에서 사용한 Raw Mill용 분쇄조제 중 2종은(Type-A, P) PHP을 주성분으로 하고 있다.

2.2 실공정 적용

Raw Mill용 분쇄조제의 실생산시험은 K시멘트사의 ϕ 4.4 m × 14 m의 Tube Mill을 사용하였으며, Raw Mill 분쇄조제는 3가지 종류를 적용하여 실시하였다. 분쇄조제의 사용량은 0.018%로서 고정하여 실시하였다. 실생산 기간은 Raw Mill 후단의 Kiln 공정과 Raw Mill의 생산 안정성을 검토하기 위하여 최소 1주일 이상 가동하여 생산 안정성과 Raw Mill의 생산효율 평가를 실시하였다.

2.2.1 Type-C의 분쇄조제 적용

Raw Mill 분쇄조제 Type-C의 경우는 Cement Mill에 일반적으로 사용되는 분쇄조제 원료를 조합하여 제조한 분쇄조제이다. 이 Raw Mill용 분쇄조제를 실공정 적용한 결과를 Fig. 3, 4에 나타내었다. Fig. 3은 분쇄조제를 적용한 Raw Mill의 효율변화이다. 분쇄조제의 투입위치는 조분쇄된 석회석이 Raw Mill에 투입을 위하여 이송되는 Total Belt(T/B)와 분급기에서 Raw Mill로 순환되는 위치(순환)에 각각 시험을 실시하였다. 시험결과 평균효율은 0.8~3.1% 증가를 나타내었으나. 전체적인 공정의 불안정이 나타났으며, 특히 분쇄조제의 투입구간에서 순환량의

감소가 나타났다. Type-C의 분쇄조제를 사용하는 경우 분체유동성의 급격한 상승으로 분급기를 통과해 Raw-Mix로 이동한 것으로 생각 되며, 이는 Raw Mill의 피분쇄물의 많은 양을 차지하는 순환량의 감소로 나타나 공정 불안정이 발생한 것으로 생각 된다. Type-C의 분쇄조제를 사용하는 경우 짧은 기간의 분쇄 효율을 증가 시킬 수는 있으나 Raw Mill 공정의 불안정을 초래하여, 지속적인 사용에는 좋지 않은 것으로 판단되었다.

2.2.2 Type-A의 분쇄조제 적용

Type-A의 경우 본 실험에서 사용하기 위하여 합성한 PHP과 아민계의 분쇄조제를 모두 함유하는 Raw Mill용 분쇄조제이며, 방향족 화합물 특유의 분체 유동성 제어와 아민계 분쇄조제 특유의 분체 유동성 제어 성능을 모두 가지는 Raw Mill용 분쇄 조제이다.

실생산 결과를 Fig. 5, 6, 7, 8에 나타내었다. 분쇄 효율의 경우 평균 4.0% 상승을 나타내었으며, 최고평균 효율의 경우 7.8%를 약 30시간 정도 유지 할 수 있었다. Type-A의 분쇄조제의 경우 분체의 유동성을 다소 변화시키는 경향이 있어서 조제 투입 초반에는 운전 불안정한 현상이 나타났다. 그러나 Raw Mill 내부의 공기흐름을 다소 감소시킴으로서 공정의 안정과 생산성의 향상을 기대 할 수 있었다. 이는 분쇄조제의 성능 때문에 분체의 흐름이 빨라지는 경우 순환량의 감소와 피분쇄물의 Mill 체류시간의 감소로 공정의 조정이 매우 민감해지는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 실생산 초기의 5일간 나타났으며, 공기흐름의 조절 이후에는 순환량의 증가하고, 생산 효율의 증가와 공정 안정의 효과를 얻을 수 있었다. 또한 공기흐름의 저하로 Raw-Mix의 잔사 감소가 0.5% 가량 나타났고, Kiln의 효율이 일부 향상 되는 것을 볼 수 있었다.

이러한 현상은 Raw Mill 내부의 피분쇄물(투입분+순환분)의 양을 늘리고 Mill 내부의 체류시간을 길게 하는 효과로서 작용을 하였으나, Raw Mill에서 토출되는 피분쇄물의 양을 증가로 Raw Mill 후단의 이송설비인 B/E(Bucket Elevator)의 부하를 일부 증가 시켜, 추가적인 효율상승에 걸림돌이 되었다.(Fig. 7) Raw Mill의 Main Motor의 경우 피분쇄물의 양이 증가에서도 공기흐름 조절 후에는 분쇄조제 투입

전과 큰 차이가 없이 안정 되었다.(Fig. 8) 이때 생산된 Clinker를 사용하여 실험실에서 시멘트를 제조한 후, 몰탈 압축강도의 변화를 측정한 결과 강도는 분쇄조제를 사용

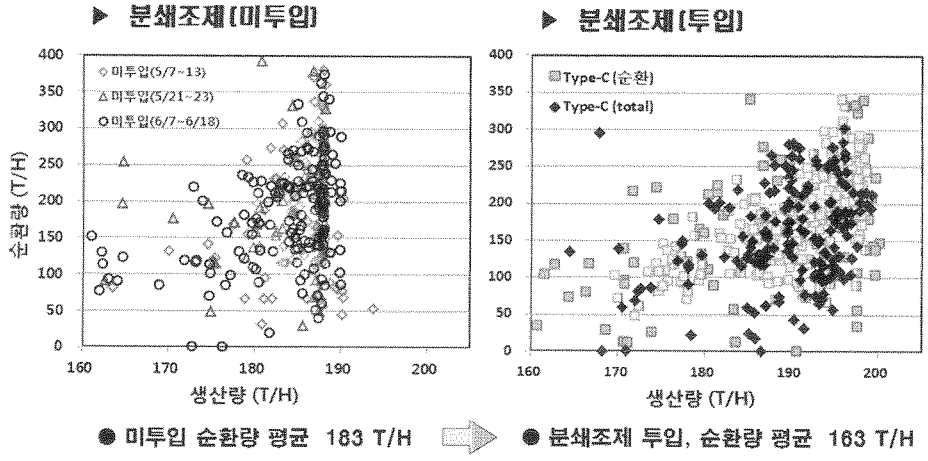

Fig. 4 Type-C 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 순환량 변화

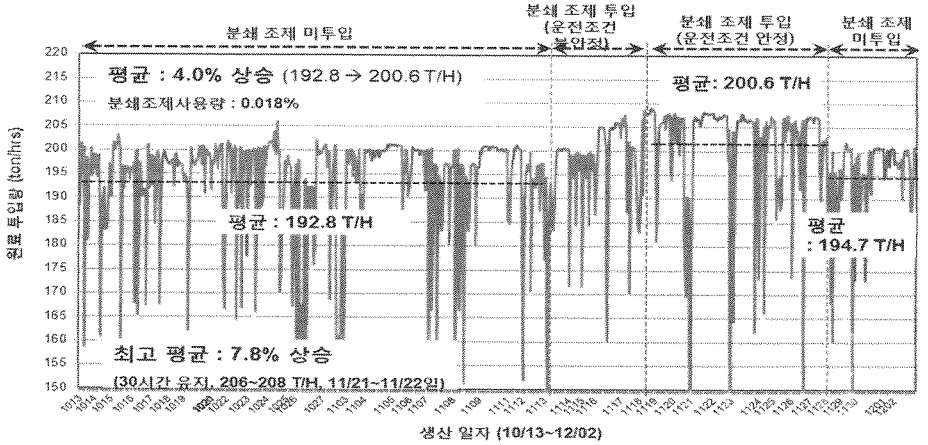

Fig. 5 Type-A 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 생산량 변화

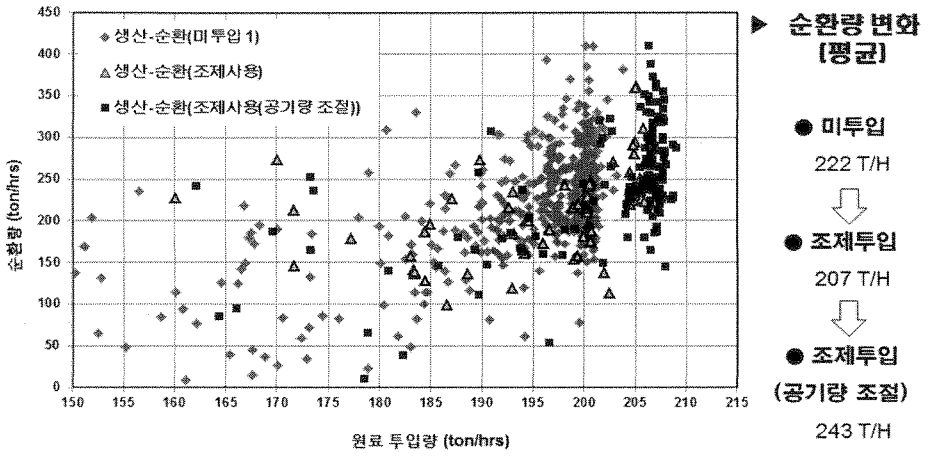

Fig. 6 Type-A 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 순환량 변화

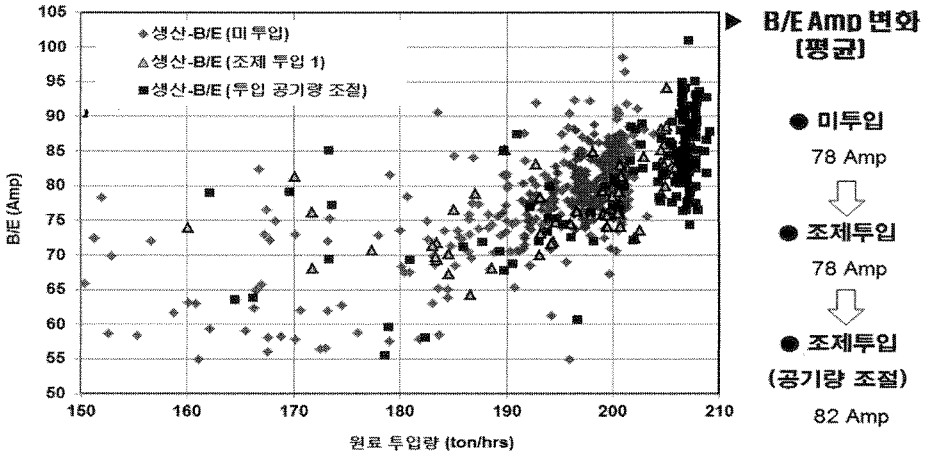

Fig. 7 Type-A 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill의 B/E 부하 변화

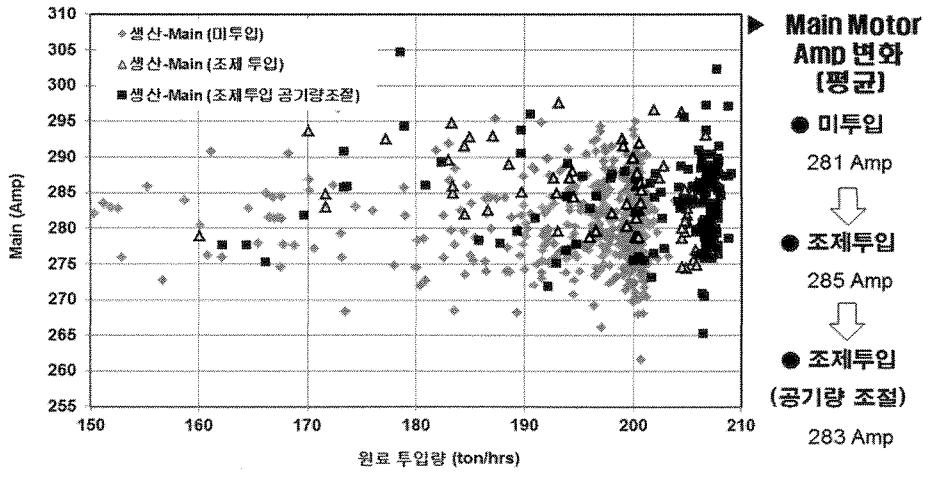

Fig. 8 Type-A 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill의 Main Motor 부하 변화

하기 전에 비하여 일부 상승하는 것을 확인 하였다. 이는 분쇄조제의 분체 분산성에 기인하는 생각되며, Clinker의 현미경 분석에서 각 결정의 응집이 감소하고, 결정의 크기가 다소 작아지는 것을 확인 하였다.(Fig. 9)

Type-A의 Raw Mill분쇄조제의 경우, Raw Mill의 공기 흐름을 조절하는 경우 분쇄조제로서 사용이 가능함을 확인 하였으나, 후단 이송설비의 부하증가에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

2.2.3 Type-P의 분쇄조제 적용

Type-P의 Raw Mill 분쇄조제를 실생산 적용한 경우, 3주간 평균 3.9%의 효율 증가의 결과를 나타내었다.(Fig. 10) Type-P의 분쇄조제는 Raw Mill 분쇄조제 원료로 합성된 HPH를 주성분으로 하고 있어 피분쇄물의 흐름의

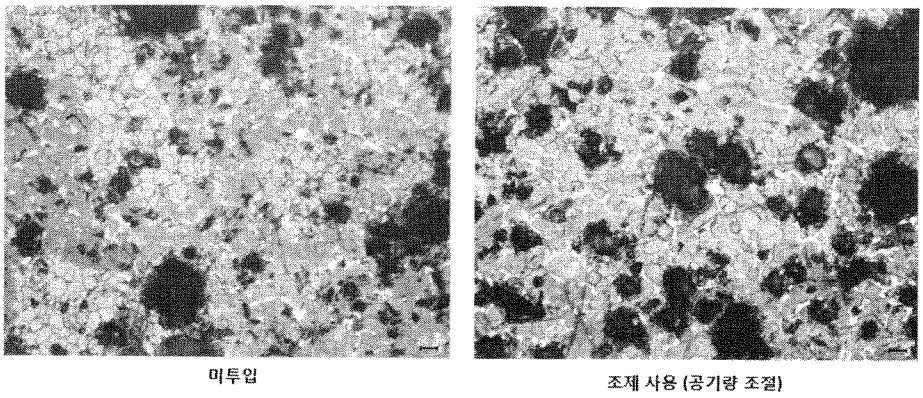

Fig. 9 Type-A 분쇄조제 사용에 따른 Clinker 현미경사진

제어가 가능 했으며, 그에 따라 Raw Mill의 공기흐름의 제어 없이도, 순환량의 증가를 나타내었고,(Fig. 11) 이는 공정의 안정을 유지하면서 생산량 증가의 결과를 나타내었다. 더욱이 피분쇄물양(투입량+순환량)의 증가에도 후단의 이송설비에 부하는' 동등 수준을 유지하였고, Main Motor의 부하도 나타나지 않았다.(Fig. 12, 13) Type-P의 분쇄조제의 경우 공정의 흐름에 큰 변화 없이 Raw Mill의 생산량 증가를 실현 할 수 있었으며, 장시간의 안정적인 생산을 유지 할 수 있는 것으로 평가되었고, 분쇄조제의 단속사용도 가능한 것으로 파악되었다. 이때 생산된 Clinker를 사용하여 실험실에서 시멘트를 제조한 후, 몰탈 압축강도의 변화를 측정한 결과 강도는 분쇄조제를 사용하기 전에 비하여 일부 상승하는 결과를 나타내어 Type-A와 같은 경향을 나타내었다. 생산공정에서 실생산된 시멘트의 경우도 같은 경향을 나타내었다. (Fig. 14)

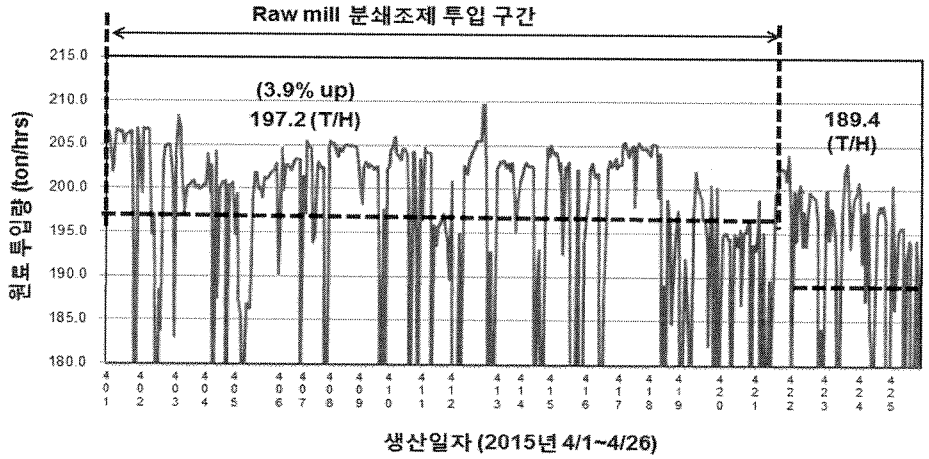

Fig. 10 Type-P 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 생산량 변화

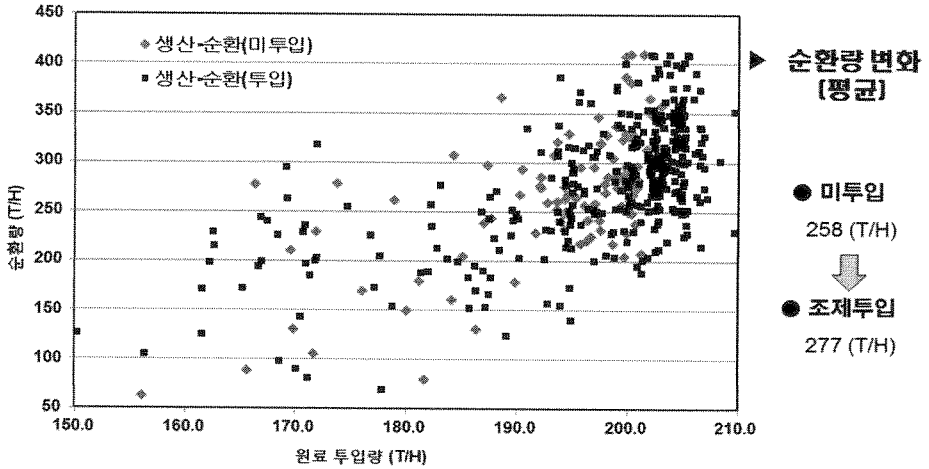

Fig. 11 Type-P 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill 순환량 변화

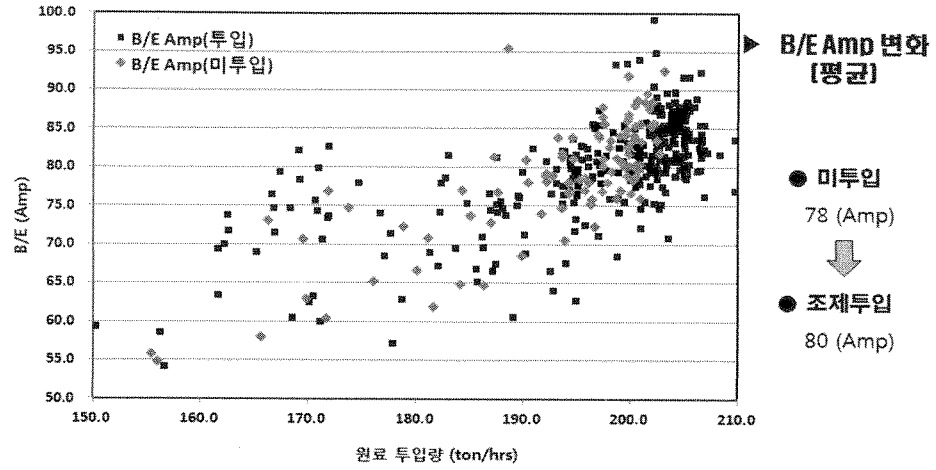

Fig. 12 Type-P 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill의 B/E 부하 변화

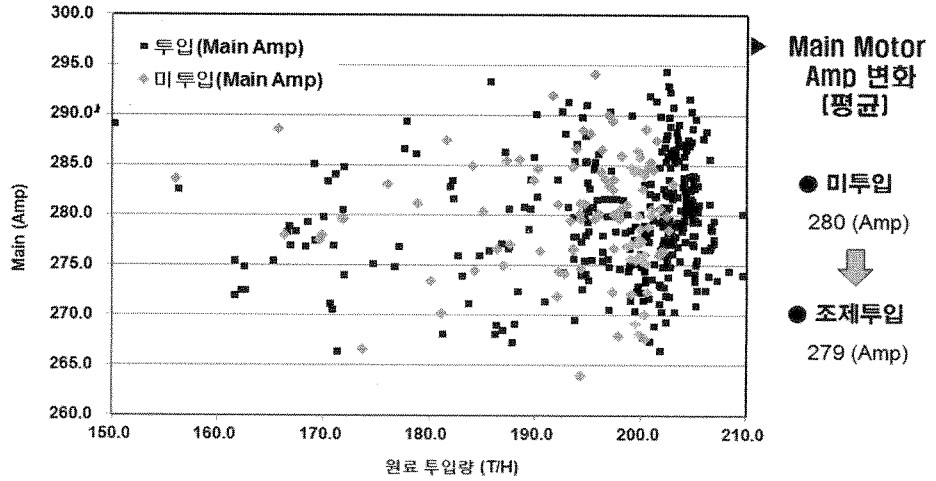

Fig. 13 Type-P 분쇄조제 사용에 따른 Raw Mill의 Main Motor 부하 변화

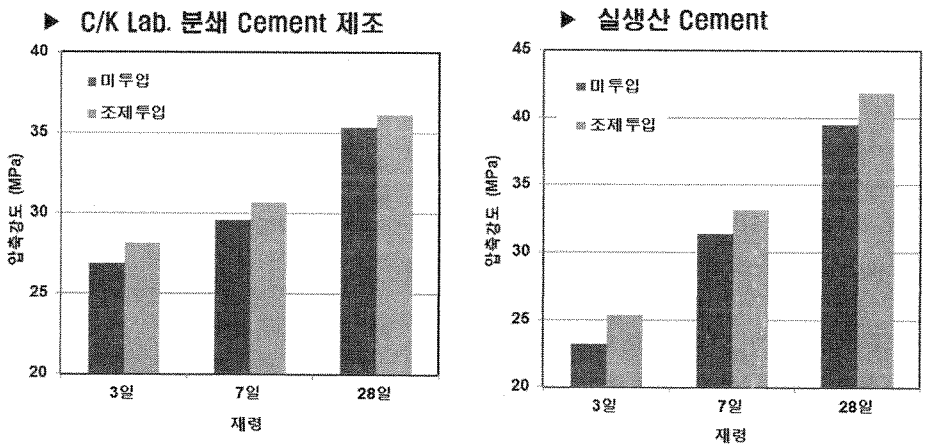

Fig. 14 Type-P 분쇄조제 사용에 따른 몰탈 압축강도 (KS L 5105 적용)

2.2.4 경제성 검토

현재 시멘트 산업에서 미분쇄 공정에 분쇄조제를 사용하는 목적에는 여러 가지가있으나, 분쇄 전력비의 절감의 목적이 매우 중요한 항목이라고 할 수 있겠다.[3)4)] Raw Mill 부분의 평균 전력비를 기준으로 Raw Mill용 분쇄조제를 사용하여 향상되는 효율과 분쇄조제의 사용에 따라 증가되는 비용을 감안하여 계산하는 경우, 분쇄조제 사용량 0.018%에서 증가 효율이 약 9~11% 상승되어야 사용가능 한 것으로 계산 되었다. 각 회사 마다 전력요금 체계와 분쇄기의 효율의 차이에 따라 변동 폭은 있는 것으로 생각 된다.

그러나 현재 시멘트사에서 사용하는 국내전력요금은 경부하, 중간부하, 최대부하 구간으로 나누어 각기 다른 전력비를 부과하고 있다. 또한 계절별로 다른 요금기준

Table 4 Raw Mill 생산량과 전력요금 구간별 가동시간

구분	생산량 (ton)	총생산 시간 (Hrs)	전력료 기준 (가동시간/월)			운전일지 기준 (가동시간/월)
			경부하 (Hrs)	중부하 (Hrs)	최대부하 (Hrs)	최대부하 (Hrs)
A 월	89,931	472	332	115	25	33
B 월	99,199	516	311	106	99	72
C 월	105,429	549	369	123	56	65

을 부과하고 있는 실정이다. 여름과 겨울의 경우 경부하 시간의 전력비에 비하여 최대부하 시간대의 요금이 2.7~3.5 배에 이르고. 봄, 가을의 경우는 2배에 해당한다. 각 시멘트 회사는 최대 부하시간대를 전력피크타임이라고 하며, 가급적 생산설비의 가동을 자제하는 경향이 있다. 그러나 Raw Mill의 경우 후단의 Kiln에 원료를 제조하는 공정으로 Kiln Feeding에 준하는 양을 분쇄하여야만 하며, Raw-Mix의 저장 용량에 제한을 받는다. 또한 부분적인 수리 등의 이유로 경부하나 중간부하 시간에 Raw MIll을 운휴하였을 경우 최대부하시간의 Raw Mill의 가동은 불가피한 현실이다. 따라서 일부 최대 부하시간의 Raw Mill의 가동은 피할 수 없는 사항이다.

따라서 Raw Mill용 분쇄조제의 경제성을 최대부하시간 운휴의 관점에서 재검토하였다. Raw Mill의 효율 증가는 Raw Mill 가동시간을 줄이게 되고, 이 절감된 시간을 최대부하시간에 운휴 한다면, Raw Mill의 전기료 절감은 평균 전력요금의 절감보다 큰 폭으로 개선 될 것이다. 이것을 바탕으로 3개월간 시멘트사의 각 구간별 사용전력요금과 공정일지를 바탕으로 Raw Mill의 가동시간, 생산량을 파악한 결과를 Table 4에 나타내었다. 전력요금을 바탕으로 계산한 Raw Mill의 최대부하 시간의 가동은 25~99시간 이었으며, 공정일지를 바탕으로 확인한 시간은 33~77시간으로 월평균 60시간을 최대부하시간에 가동하는 것으로 나타났다. 실생산량을 기준으로 계산하면 Raw Mill의 효율이 4.8% 상승시 가동시간을 약 25시간(월)을 추가로 운휴 할 수 있다. 이것을 최대부하시간에 운휴 한다면 Raw Mill용 분쇄조제의 경제성은 하절기 전력요금 체계에서는 충분한 경제성을 확보 하는 것으로 판단되었다. 더욱이 경제성 외의 금액으로 환산하기 어려운 Raw Mill 분쇄조제의 사용에 의한 생산 공정안정 등의 효과를 추가로 기대 할 수 있을 것으로 생각 된다.

3. 결 론

Raw Mill용 분쇄조제 3종류를 실생산 공정에 적용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) Raw Mill용 분쇄조제는 Raw Mill의 공정 특성인 낮은 분말도, 대량의 급속분쇄, 연속공정의 원료제조에 적합한 낮은 분말도 영역의 분쇄능, 공정안정성, 분체의 유동성 조절의 기능을 가져야한다.

(2) 분쇄조제에 의한 과도한 흐름성 개선은 순환량의 감소를 동반하여 생산 불안정을 초래하였다.

(3) Type-A의 Raw Mill용 분쇄조제의 경우 Mill 내부의 공기흐름 제어시 순환량의 증가와 피분쇄물의 체류시간 증가에 의한 안정적인 효율증대와 생산의 안정성을 확보 할 수 있었다.

(4) Type-P의 Raw Mill용 분쇄조제의 경우 분체흐름의 제어로 공정의 변화 없이 순환량과 생산량을 증가시키는 것을 확인하였고, 따라서 필요에 따라 단속사용이 가능한 성능을 가지는 것을 확인하였다.

(5) Raw Mill용 분쇄조제의 사용에 의한 효율증가로 발생하는 잉여의 운휴 시간을 최대부하시간에 운휴 적용하는 경우, 4.8% 이상 효율 증가시 하절기에는 전력비 절감의 효과를 기대 할 수 있었다.

<참고문헌>

1. 김병규, 류민수, "Cement Clinker 분쇄조제 선택에 관한 연구", 한국화학공학회, Vol. 21, No. 5, October, pp. 245~252, (1983)
2. 김병규, 이인우, "시멘트 분쇄에 포화 알콜이 미치는 영향(II), 한국화학공학회, Vol. 16, No. 1, February, pp. 49~56, (1978)
3. 백승재, 심연석, 김은석, 송용순, 허홍기, "분쇄조제 사용에 따른 시멘트·콘크리트 품질비교", 시멘트심포지움, pp. 177~120, 2014
4. 一坪辛輝, 林采龍, 山田一夫, 市川牧彦, "시멘트 유동성에 미치는 분쇄조제의 영향과 고온 분쇄의 효과", Cement Science and Concrete Technology, No. 59, 2005
5. Z. Heren, H.Olmez, "The influence of ethanolamines on the surface properties of portland cement pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, pp. 805~809, 1997
6. "최신 분체기술 핸드북", 대신기술, pp. 523
7. Paul J. Sandberg, F. Doncaster, "On the mechanism of strength enhancement of cement paste and mortar with triisopropanolamine", Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 973~976, 2004