

# 시멘트밀 출구 집진 Type 변경으로 공정효율 향상

진연우\* · 장경혁 · 신동희 · 김종오 · 이근성

<동양시멘트>

## I. 서 론

에너지 다소비형 산업인 시멘트 제조산업은 다양한 기술개발을 통한 설비 및 운전방법의 개선으로 생산성 향상은 물론, 열 및 동력에너지 절감을 다각적으로 이루어 오고 있다. 특히 국내에서는 외환위기 이후 기존의 양적 성장개념에서 원가절감을 통한 수익구조 개선을 위한 질적 성장개념으로 급격히 방향이 전환됨으로서 에너지절감에 대한 요구는 더욱 커져오고 있다. 따라서 삼척공장에서 생산성 향상, 열 및 에너지 절감을 위하여 많은 노력을 기울여 왔으며, 그 중에 시멘트밀의 공정개선을 통한 생산성 향상을 이룬 원가절감 사례를 소개하고자 한다.

본 개선 사례는 삼척공장에서 운영되고 있는 2호기에서 7호기, 6기의 시멘트 분쇄공정 중 예비분쇄기가 설치 운영되고 있는 2호기에서 5호기까지의 시멘트 분쇄공정 생산성 향상을 위하여 2003년에 실시한 공정개선 결과이다.

개략적으로는 시멘트밀 공정 튜브밀 (Tube mill) 출구에 설치되어 있는 관성 집진장치인 Pyro-screen 을 cyclone type 으로 변경시켜 시멘트 dust 의 집진효율을 향상시킴은 물론, cyclone 및 bag filter 에서 집진된 시멘트 dust 를 고효율 분급기인 SEPOL 로 재투입하던 기존의 운전방식에서, 집진된 시멘트 dust 에 대한 공정 품질시험을 통하여 시멘트 silo 로 직투입하는 방식으로 개선함으로써, 생산성 향상 뿐 만 아니라 동력원단위 절감 및 분쇄조제 사용원단

위를 절감한 내용이다. 이외에도 cyclone type 으로의 변경에 따른 집진효율 증대로, 이후 공정인 B/F 의 dust 부하를 감소시켜 줌으로서, 사용되는 bag 의 수명연장으로 수선비 절감이 기대된다.

## II. 본 론

삼척공장 2,3,4 & 5호 시멘트 밀은 기존의 Tube mill 단독의 시멘트 분쇄 밀에 예비분쇄기 (Polysius 공급, 1992년)를 설치하여 운영되고 있는 combi-grinding type 의 시멘트 밀이다. 급변 기술개선 부문인 pyro-screen 의 위치에 대하여는 Fig. 1과 같다

그 동안의 운전경험을 바탕으로 한 시멘트 밀 공정의 문제점 및 공정개선 해결을 통한 기대효과를 다음과 같다.

### 1. 문제점

- 1) Pyro-screen 공정 내의 screen 적분으로 집진효율 저하
- 2) 집진 dust의 SEPOL 재투입으로 분급효율저하
- 3) Screen 효율저하로 B/F 부하증가 (Bag 교환 주기 : 개선전 1.5년)
- 4) Bag 부하증가에 의해 밀 내 유속 감소로 인한 생산성 저하

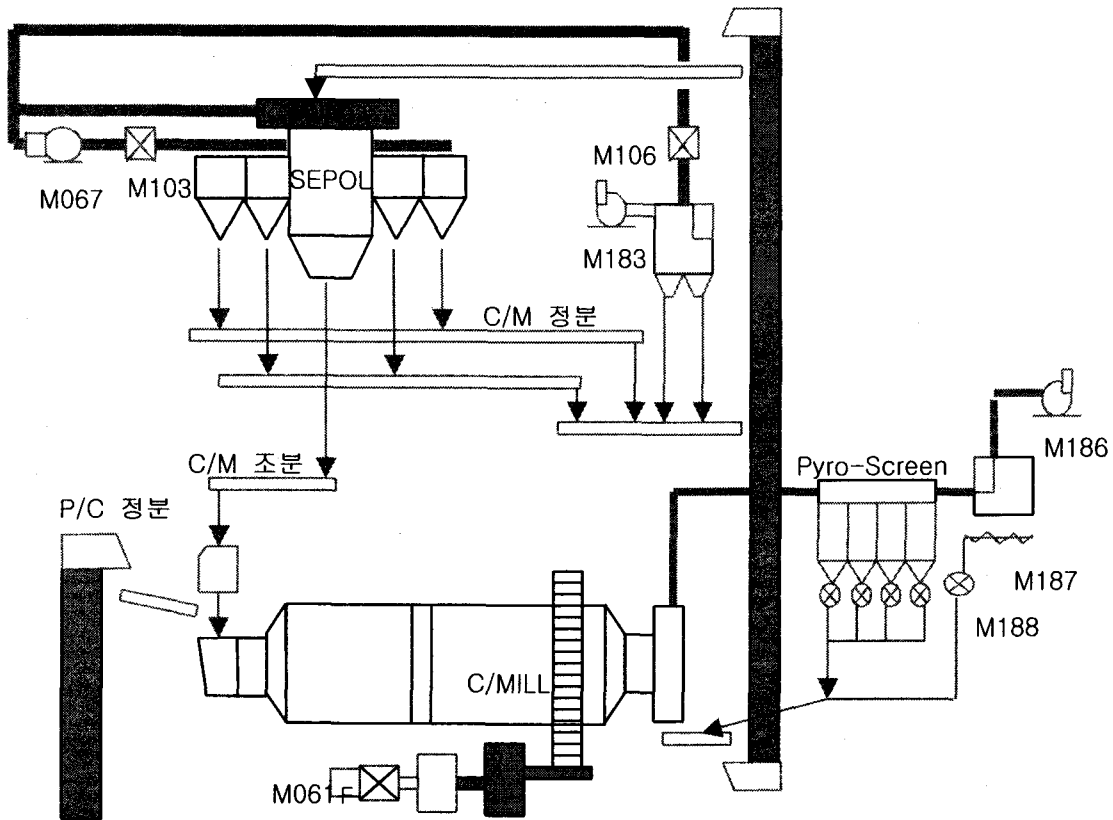


Fig. 1 Pyro-Screen 설치 위치 개략도

## 2. 기대 효과

- 1) 관성 집진장치인 pyro-screen 을 원심력 cyclone type 으로의 교체를 통한 시멘트 dust 집진효율 증대
- 2) Pyro-screen 및 B/F 집진 dust의 시멘트 silo 직투입으로 생산성 향상
- 3) 시멘트 dust 집진효율 증대로 B/F 부하감소 (bag 수명연장으로 수선비 절감기대)
- 4) 시멘트 dust 집진효율 증대로 밀 내 유속 증대 → 생산성 증대 기대

## III. 검토내용

### 1. 검토의 주안점

- 1) 생산성 향상 및 동력원단위 절감
- 2) 운전의 안정성 및 보수의 용이성 확보

- 3) Cyclone 집진효율 향상으로 B/F 시멘트 dust 부하 감소를 통한 수선비 절감

### 2. 이론적 고찰

- 1) 검토 배경 : Pyro-screen 공정의 기능을 보면 공정 내로 공급되는 산물은 air 와 시멘트 dust 의 혼합물로서 B/F 전단에 위치하며, B/F 의 dust 부하감소를 통한 B/F 의 효율 향상 및 밀 내 유속 안정에 기여한다. 따라서 이와 유사한 기능을 유지하면서 집진효율이 높은 cyclone type 으로 pyro-screen 공정을 대체하는 것을 검토하게 되었다.

### 2) Cyclone 설계 사양

- (1) 산출근거 : 시멘트 튜브밀 출구 Pyro-screen 입/출구 B/F suction pipe 에서 측정 한 함진농도 측정결과를 근거로 계산하였다.

- 혼합가스온도 : 95~100℃
- 혼합가스유량 : 526.1 Sm<sup>3</sup>/min
- 혼합가스분진농도: 418,985 mg/Sm<sup>3</sup>

▶ 혼합가스 분진 농도 산출

$$C = \frac{(Q_1 \times C_1) + (Q_2 + C_2)}{Q_1 + Q_2}$$

$$= \frac{(443.1 \times 406,788.6) + (83.0 \times 484,095.9)}{(443.1 + 83.0)}$$

$$= 418,985 \text{mg/Sm}^3$$

- 집진기 수 : 1 set

(2) 입구 면적 산출

$Q = A \cdot V$  에서,

$Q =$  유입유량(526.1 Sm<sup>3</sup>/min) = 8.7683Sm<sup>3</sup>/sec

$V =$  설계유속(m/sec) = 15m/sec, 따라서

$$A = Q / V = \frac{8.7683 (Sm^3/min)}{15 m/sec} = 0.585 m^2$$

속도가 10 m/sec 이하일 경우 집진기 (cyclone) 의 전체크기가 대형으로 되며, 20m/sec 이상일 경우 압력손실이 증가하기 때문에 일반적으로 10~20m/sec 의 값으로 설계한다. 따라서 본 설계에서는 15m/sec을 적용하였다.

(3) Cyclone의 설계

1) Type 및 원리 : single cyclone

Dust 부하를 가진 기체를 cyclone 에 유입시키면, inlet duct 를 통하여 cyclone 의 외통을 따라 집진방향으로 회전하게 된다. Cyclone 내부로 유입된 시멘트 dust 를 포함하는 기체는 회전 하강운동을 하면서, 이때 생기는 원심력에 의하여 시멘트 분진입자는 하부로 포집되고 clean air는 B/F 방향으로 배출되는 원리로, 후단에 B/F 가 위치하고 있으므로 cyclone 자체의 집진효율 정도에는 크게 민감하지 않아도 된다.

- 2) 설계조건: 설계 속도 : 15m/sec, 혼합가스 온도: 95℃, 혼합가스 유량 : 526.1 Sm<sup>3</sup>/min
- 집진기 수 : 1set (single cyclone)

3) Single cyclone 유입부 면적

- Single cyclone 은 unit cyclone으로 설계 예정임으로  $Q = A \cdot V$  에서

$Q =$  유입유량 (526.1 Sm<sup>3</sup>/min)  
= 8.7683Sm<sup>3</sup>/sec

$V =$  설계유속 =15m/sec,

따라서  $A = Q / V = \frac{8.7683 (Sm^3/min)}{15 m/sec}$   
= 0.585m<sup>2</sup>

4) Single cyclone의 수치계산

- 선권회식 cyclone 의 경우 설계치수 비 결정은 single cyclone 이 전단부에서 전처리 공정으로서 작용, 후단의 고효율 집진기 (B/F) 와 직렬로 연결되기 때문에 이론적 검토와 현장 여건 및 경험을 토대로 최적의 설계 치수비를 적용하였다.
- 유입부 높이 :  $H_c = 0.65 \times D_c$
- 유입부 폭 :  $B_c = 0.3 \times D_c$
- 몸체 외통 직경 :  $D_e = 0.55 \times D_c$
- 본체 몸통 길이 :  $L_c = 1.2 \times D_c$
- Cyc'콘의 길이 :  $Z_c = 2.0 \times D_c$
- Gas 출구 길이 :  $S_c = 1/6 \times D_c$
- 분진 출구 :  $J_c = 0.25 \times D_c$

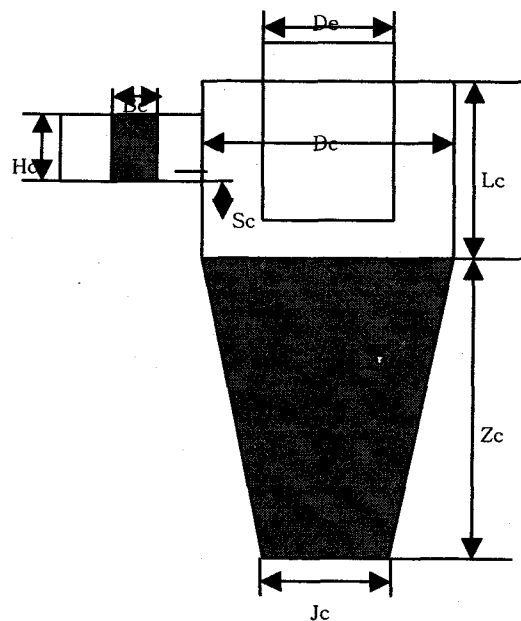


Fig. 2 관성 Single Cyclone 설계 개략도

- 사이클론의 몸통경 결정 :

$$B_c \times H_c = A = (0.3 \times D_c) \times (0.65 \times D_c) = A$$

$$\therefore D_c = \sqrt{\frac{0.585}{(0.65 \times 0.3)}} = 1.732m$$

따라서 상기 몸통경  $D_c$ 를 가지고서 각각의 치수를 계산하면 아래와 같다.

입구 폭의 길이 :  $B_c = 0.3 \times 1732mm = 519.6mm$   
 입구 높이 :  $H_c = 0.65 \times 1732mm = 1125.8mm$   
 몸체 내통 길이 :  $D_e = 0.55 \times 1732mm = 952.6mm$   
 본체 몸통 길이 :  $L_c = 1.2 \times 1732mm = 2078.4mm$   
 원추부 길이 :  $Z_c = 2.0 \times 1732mm = 3464.0mm$   
 분진 출구 길이 :  $J_c = 0.25 \times 1732mm = 433.0mm$   
 내통관 인입 길이 :  $S_c = 1/6 \times 1732mm = 288.7mm$   
 Cyclone 총 높이 :  $H = L_c + Z_c = 2078.4 + 3464.0$   
 $= 5542.4mm$

상기 식에 의해 이론적 수치가 산출되었으나 본 관성 cyclone 은 실제제작 및 효율향상, 가스의 흐름, 현장 설치여건을 고려하여 여유있는 경험 설계치를 적용하였다.

Table 1. 수치계산 결과

구분	비고	수치상 계산치 (mm)	실제 설계치 (mm)
입구폭 (Bc)		520	590
입구 높이 (Hc)		1,126	1,600
외통 직경 (Dc)		1,732	2,360
내통 직경 (De)		953	1,180
몸통 길이 (Lc)		2,078	2,360
원추 길이(Zc)		3,464	4,720
내통관 인입길이(Sc)		289	360
분진 출구 길이(Jc)		433	600
Cyclone 총 높이(H)		5,542	7,080

- 실제 유입속도(V) =  $\frac{8.585 (m^3 / sec)}{(0.52 m \times 1.130 m)}$   
 $= 14.6m/sec$

5) Single cyclone 압력손실( $\Delta P$ ) 산출 계산 :

$$\Delta P = \frac{30 \times H_c \times B_c \times \sqrt{D_c}}{D_c^2 \cdot (\sqrt{L_c} + Z_c)} \times \frac{\rho \cdot V_i^2}{2g}$$

Table 1 의 이론적 수치 결과를 적용하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\therefore \Delta P = \frac{30 \times 0.586 \times \sqrt{1.732}}{0.953^2 \times \sqrt{(2.078 + 3.464)}} \times \frac{0.916 \times 14.6^2}{2 \times 9.8} = 107.8mmAq$$

계산식에 의하여 single cyclone 에 대한 압력손실은 107.8mmAq 로 계산되었다. 그러나 입, 출구 duct의 압력손실, 곡관에 의한 압력손실, duct 마찰에 의한 압력손실, cyclone 내면의 마찰에 의한 압력손실 등 제반 요인들을 감안하여 cyclone의 압력손실을 120mmAq 적용하였다.

6) 기대 집진효율에 따른 cut size의 결정

- 기대치 집진효율에 따른 cut size 의 예측

$$\eta = \frac{\pi \times N_e \times \rho_s \times D_p^2 \times V_i}{9 \times \mu \times B_e}$$

여기서  $N_e$  : 유효 회전수 (통상 5회),

$\rho_s$  : 입자의 밀도 (2900kg/m<sup>3</sup>)

$D_p$  : cut size ( $\mu m$ ),

$V_i$  : 입구속도(14.8m/sec),

$\mu$  : 가스점성도(at 92.2°C)

$$= 2.23 \times 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{sec},$$

$B_e$  : 입구 폭 (0.37m)

- 상기식을  $D_p$  에 대해서 다시 풀어쓰면

$$D_p = \left[ \frac{\eta \cdot 9 \cdot \mu \cdot B_e}{\pi \cdot N_e \cdot \rho_s \cdot V_i} \right]^{1/2} \text{ 로 주어진다.}$$

따라서 상기식을 이용하여 50% 집진효율에 따른 이론적인 cut size를 결정하면

$$D_p = \left[ \frac{(0.5 \cdot 9 \cdot (2.23 \times 10^{-6}) \cdot 0.52)}{\pi \cdot 5 \cdot 2900 \cdot 14.6} \right]^{1/2} \times 106$$

$$= 2.8\mu m$$

Table 2. 집진효율에 따른 cut size

cut size (μm)	효율	cut size (μm)	효율
1.3	10	3.1	60
1.8	20	3.3	70
2.2	30	3.5	80
2.5	40	3.8	90
2.8	50	4.0	100 (critical size)

상기 식의 계산에서 cut size는 2.8μm 로 산출되었으나, 시멘트 dust 재비산 및 입구 분진 부하 변동, 또는 다른 효율저하 요인들을 감안하여 50% cut size를 3.0μm 로 적용하였다. Table 2 는 상기 식을 이용, 입경(cut size)별 기대 집진 효율을 보여주고 있다.

- 부분 집진효율 산출 : cyclone의 부분 집진효율은 처리가스의 함진농도와 포집 분진농도의 비를 말하며, dust 입경에 따라서 다르게 나타나기 때문에 부분 집진효율의 개념으로 검토

하였다.

부분 집진효율의 산출 식은 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{1}{[1 + (D_{P50} / D_{Pi})^2]}$$

여기서  $D_{P50}$ : 50% 절단 입경,

$D_{Pi}$  : 부분입경(μm)

상기 식에 의해 cyclone (효율 50% 산정)을 통과한 잔류 입경 별 중량분포에 따른 총 효율을 구하였다. Table 3 은 잔류입경, 중량분포 및 총 집진효율을 보여주고 있다.

Single cyclone에 의한 집진효율은 상기 산출식에 의해 81.2%로 산정되었으며 이를 바탕으로 입구분진농도 418,985 mg/Sm<sup>3</sup>일 때 출구농도는 418,985×(1-0.812)= 78,769 mg/Sm<sup>3</sup> 으로 예상되나, 실제 현장에서 유입분진의 성분 및 입경분포, 점도, 부하 량의 변화 등에 의한 효율저하요인을 감안 single cyclone의 출구농도는 80,000 mg/Sm<sup>3</sup> 이하로 산정하였다.

Table 3. 잔류 입경 및 중량분포

입경(μm)	Wt(%)	Δ (부분입경)	η (%)	Wt(%) × η
0 ~ 1	5.75	0.5	0.0270	0.1554
1 ~ 2	6.51	1.5	0.2000	1.3020
2 ~ 4	8.72	3.0	0.5000	4.3600
4 ~ 6	6.4	5.0	0.7353	4.7059
6 ~ 8	4.56	7.0	0.8448	3.8524
8 ~ 10	5.72	9.0	0.9000	5.1480
10 ~ 14	4.32	12.0	0.9412	4.0659
14 ~ 18	4.35	16.0	0.9660	4.2023
18 ~ 30	6.32	24.0	0.9846	6.2228
30 ~ 34	8.98	32.0	0.9913	8.9018
34 ~ 60	11.28	47.0	0.9959	11.2342
60 ~ 68	9.37	64.0	0.9978	9.3495
68 ~ 100	7.1	84.0	0.9987	7.0910
100 ~ 160	6.78	130.	0.9995	6.7764
160 <	3.84	160.0	0.9996	3.8387
계	100			81.2%

### IV. 개선 사항

#### 1. Pyro - screen 개조 : (개조 전 및 후의 모습)



Fig. 3 #2,3,4,5 C/M pyro-screen 모습

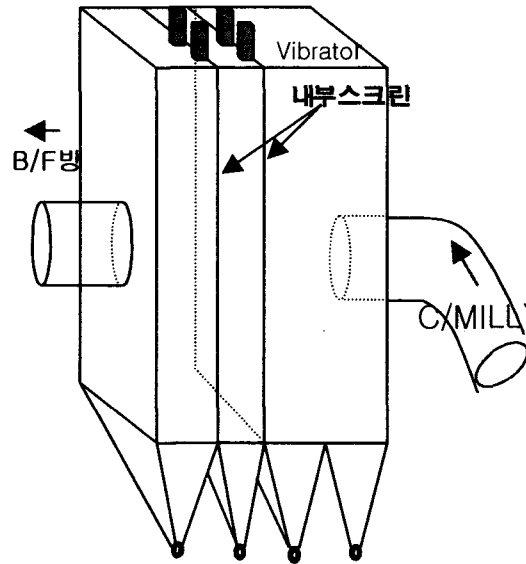


Fig. 4 #2,3,4,5 C/M pyro-screen 구조

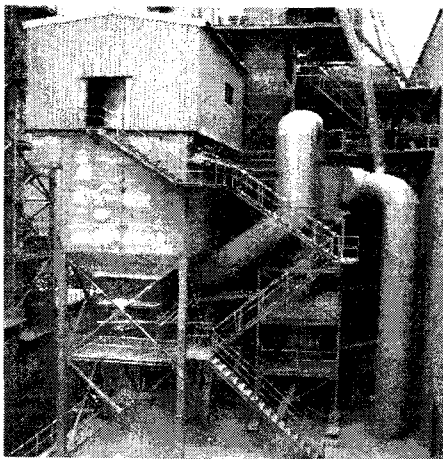


Fig. 5 개조후 모습

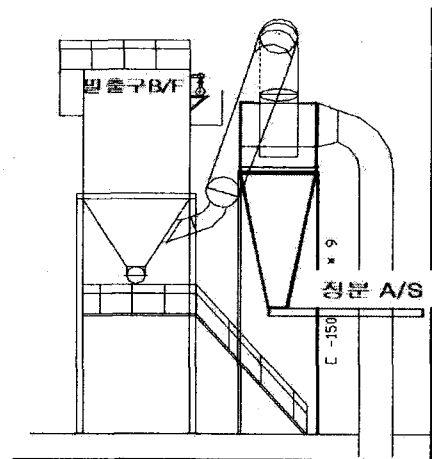


Fig. 6 개조후의 도면

### V. 개선 효과

#### 1. 집진효율 개선

Table 4. Single Cyclone의 처리 효과 (단 5C/M의 경우임)

구분	단위	Cyc'입구	Cyc'출구	차이	비고
분진농도	mg/Smin	541,789	22,704	519,084	*Cyclone 집진효율:95.8%
분진유량	kg/hr	7,926	368	7,557	*7.6T/H 100% 정분이송

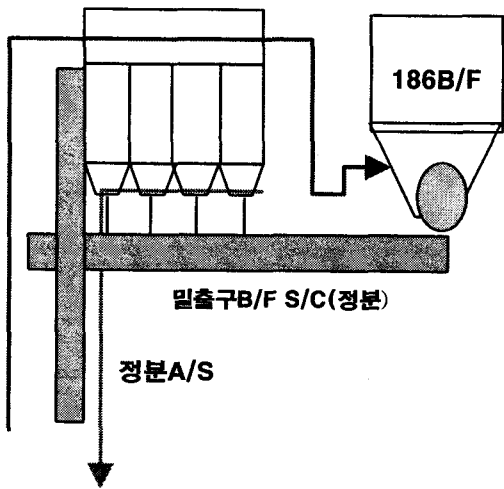


Fig. 7 Ptro-screen Flow (조분처리)

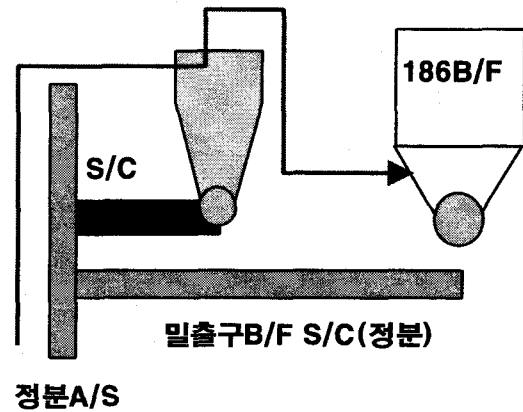


Fig. 8 Cyclone flow (조분처리)

- 5C/M의 경우 개조 전 (pyro-screen 설치운영) 에는 공정의 공간여건 미흡으로 측정 이 실시되지 못하였지만, #2,3,4 C/M의 경우 pyro-screen 설치운영시 측정 집진효율이 86.64% 인 점을 감안, 5C/M은cyclone 개조 후 집진효율은 95.8%로 약 9.16% 증대되었다.
- Cyclone 하부 포집 시멘트는 screw conveyor, A/S 를 이용하여 시멘트 silo 에 7.6t/h을 직 투입 하였다.

2. 5C/M 생산성 증가

Table 5. 5C/M 생산성 및 원단위 비교

구 분	단위	개조전	개선후	차 이
생산성	T/day	3,812	4,100	288
전 력 원단위	kWh/T-cem.	34.28	32.42	-1.86

- 증가 요인 : 개선 전 feeding량 159t/h 투입시 밀 축 조분량이 380~420t/h가 유지 되었으며 pyro-screen 에서 집진된 시멘트는 밀 출구로 재순환되어 순환량이 증가하기 때문에 밀 내의 feeding 을 증가시킬 수 없었으나, cyclone 설치 후 시멘트 정분을 약 8톤 처리함으로써, 밀 내 feeding 의 여유를 얻을 수 있었으며,

이로부터 생산성 증가를 이룰 수 있었다. 또한 후 공정의 B/F 의 시멘트 dust 부하 감소로 I.D.FAN 부하감소 및 밀내 유속이 증가되었다.

3. 조제 원단위 감소

시멘트 밀 공정의 순환량 감소로 밀 내 흐름 원활로 조제 투입량 감소를 이룰 수 있었다.

Table 6. #2,3,4,5C/M의 조제 원단위 감소 비교

		2C/M	3C/M	4C/M	5C/M
생산량(T/day)		4,830	4,830	4,830	4,830
투입량 (CC/10sec)	개선전	320	350	320	170
	개선후	250	250	250	158
원단위 (g/T-cem.)	개선전	256	280	256	172
	개선후	200	200	200	160
	차 이	56	80	56	12

4. 품질영향

최종 제품으로 얻어진 시멘트 분말 결과가 설 계품질보다 양호하게 나타났다.

Table 7. 품질비교

구 분	Blaine	44 $\mu$ mR
시멘트 분말	3,464	10.9
설계기준	3,350	11.0

## &lt; 참고 문헌 &gt;

1. Cement 기술 총론, 산업도서(주), pp 420~435, 611~620, 927~929, (1980)
2. 분체공학, 강석호 pp 194~199, 221~230, 247~256 (1987)
3. Ionzia & Leith: "Effect of cyclone dimension on gas flow pattern and collection efficiency,"(1989)

## 5. 총 유형효과

Table 8. 개선에 따른 총 유형효과

(단위 : 천원)

구 분	2~4C/M	5C/M	합 계	비 고
생산성증가		215,718	215,718	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 투자금액 : 1억원</li> <li>25,000천원 × 4기</li> </ul>
전력원단위절감		140,242	140,242	
조제원단위절감	204,936	10,967	215,903	
총 유형효과 금액	204,936	366,927	571,863	