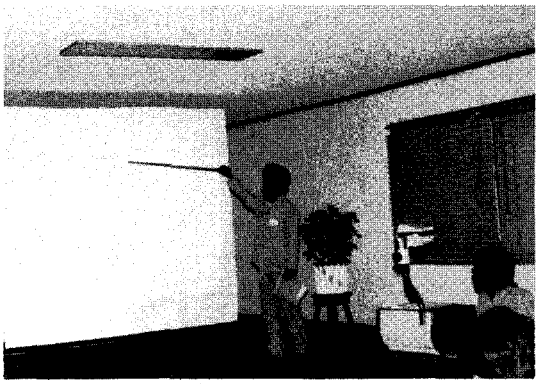
Coal Mill 改造 및 運轉結果分析

張 光 治
〈星信洋灰 丹陽工場〉

1. 서 언



원유 공급의 불안정과 계속되는 원유가 상승 등의 oil shock를 겪은 이래 열 에너지 절감방안은 장비의 개조 및 공정상의 문제점을 개선해 나가는 방향에서 대체 에너지 사용으로 진일보 하게 되었다. 特히 연료소비업체인 당사는 불가피하게 '79년 7월에는 200% 이상의 높은 가격으로 B.C油를 구입하여야 했으며 이로 인한 원가상승의 압박을 피할 수가 없었다(〈표-1〉 참조).

이런 상황하에서 당사도 B·C油 대신 Coal로 연료 대체를 하기로 하고 임시로 Cement mill 1호기(용량 51t/h)를 Air swept ball mill로 개조 Coal grinding을 하기로 하였다.

약 4개월간에 걸친 개조 작업 끝에 1981. 3. 9 시운전 이래 현재까지 약 1년간 가동하였다. 그러나 개조한 Coal mill은 당사 키른 3호기에 전량 전소시킬 수 있는 양을 분쇄하기에는 흡족치 못하며 또한 100% 가동시 Cement mill의 용량이 문제가 되기에 앞으로 25t/h의 전용 Coal mill을 2기 신설공사를 계획 추진하고 있다.

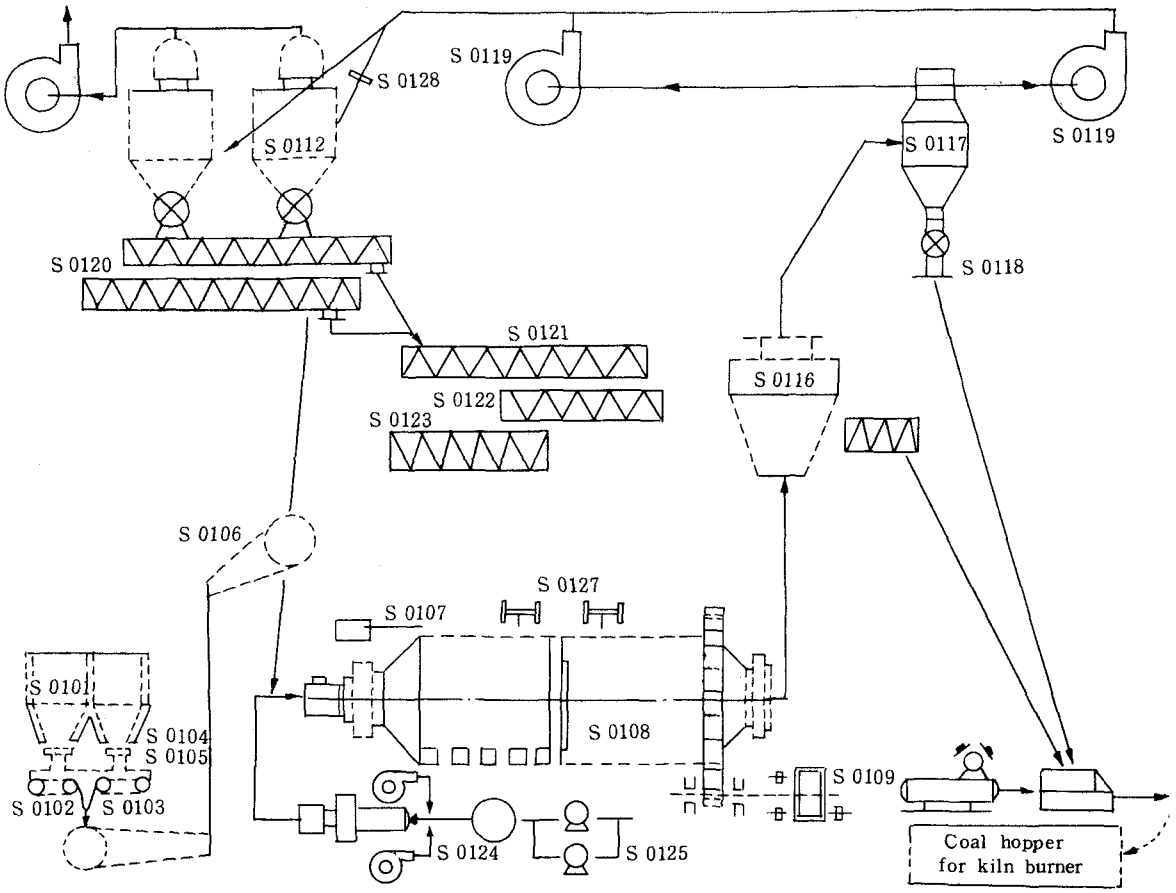
〈표-1〉 당공장 B.C油 도착가격

년	월	일	도 착 가 (원/ℓ)
79.	7.	10	76 18545
80.	1.	10	76 89182
80.	1.	29	121 66454
80.	11.	19	155 62182
81.	4.	19	174 28545
81.	6.	1	174 59545
81.	8. 1	현재	186 87636

이 Report 는 새로 설치되는 Coal mill과 공정자체가 유사하므로 신 Coal mill의 시운전 및 가동에 대비하여 조그마한 보탬이 될 수 있도록 간단하게 간추려 보았다.

2. 본 론

A. 공정도



B. 제조공정 약설

기 설치된 hopper에 크레인으로 Coal을 투입하게 되면 평량 belt에서 평량되어 조합 belt를 타고 mill inlet sluice valve를 통해 mill로 투입하게 된다.

분쇄기에 투입된 Coal은 열풍로로부터 인입되는 hot air에 의해 1실에서 건조와 함께 분쇄된다. 분쇄된 유연탄은 2기의 relief fan 및 I.D.F의 풍력에 의하여 2실로 들어가 보다 작은 steel ball에 의해 미분쇄되어 grit sep로 운반되며 이 곳에서 조분은 분산되어 screw conveyor를 거쳐 mill로 return되고 정분을 함유한 air는 cyclone으로 들어가 포집된다.

cyclone에서 빠져나간 air는 B/F에서 2차 포집되어 air 및 moisture는 I.D.F에 의해 대기중으로 방출되며 cyclone 및 bag filter에서 포집된 정분은 Fuller-Kynion pump에 의하여 키른 bin(용량 60t/h 2기)에 수송 저장된다.

이 공정중 特히 주의할 部分은 relief fan 2기와 I.D.F 1기로 pressure에 의한 적정운전을 하여야 하며 실패시는 방폭벽 파손 및 화재의 위험이 뒤따른다.

C. 제 원

ITEM NO	Machine name	Spec.	Remarks
S 0101	Hopper	109 m^3	
S 0102	Weighing Feeder	belt 1,000×4700 5p	0.37 kw D.C
S 0106	Belt conveyor	650 w×15 m center	distance
S 0107	Sluice valve	800 mm	9 kw × 6p
S 0108	Coal mill	dia : 3.6 m length : 12.5 m	
S 0109	Main drive unit	max 1,950 kw × 6p	
S 0109-1.2	Oil pump 入口		Jacking pump
S 0109-3	Grease pump		
S 0109-4.5	Oil pump 出口	0.9 kw	
S 0109-a	Auxlliary drive unit	25 kw×1160 r. p. m	
H 0109/b	Heater for main reducer		
H 0112	Bag filter	chamber 높이 : 3.5 m bag 수 : 324 매 filtering area : 630 m^2	
H0112-1.2	B/F dust screw conveyor	1.1 kw	
H0112-3	Induced draft fan	45,000 m^3/hr	95 kw × 4p

S0116	grit separator	dia : 2.8 m height : 3.5 m	
S0117	cyclone	dia : 3.75 mφ	
S0119-1.2	relief fan	36,000 m³	125 kw × 4p
S0120-2.2	screw conveyor		
S0124	hot gas burner		
S0124-1	motor for firing	3.7 kw × 2p	
S0124-2	combution fan	15 kw × 4p	
S0124-3	dilution fan	15 kw × 4p	
S0128	hot gas damper	1,000 mmφ	
S0130	Fuller Kynion pump	30 t/h	
S0131	compressor	max 4 kg / cm²	150 kw × 4p

D. 개조 작업 내역

1) belt conveyor

mill inlet sluice valve 設置로 slope 상향 조정

2) mill inlet sluice damper 設置

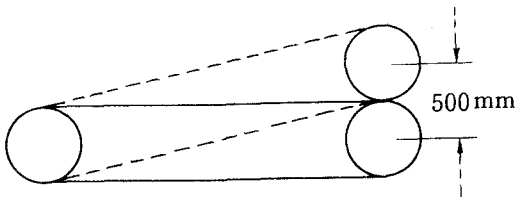
① 위치 : belt conveyor end part 와 mill 入口 chute 사이

② 크기 : dia 800 mm

③ 설치목적

㉠ 대기 공기의 유입을 차단

㉡ 유연탄 공급의 균일화



3) grit separator

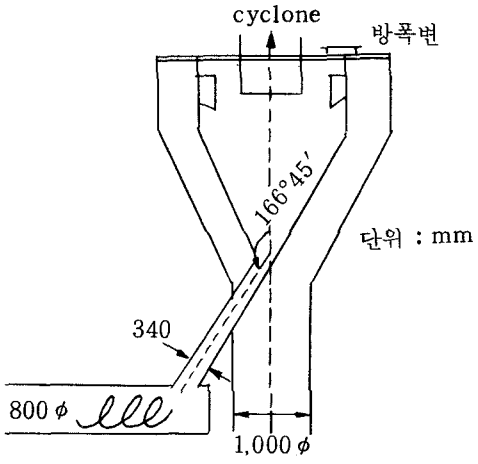
① 조분 chute 설치

② 방폭변 설치

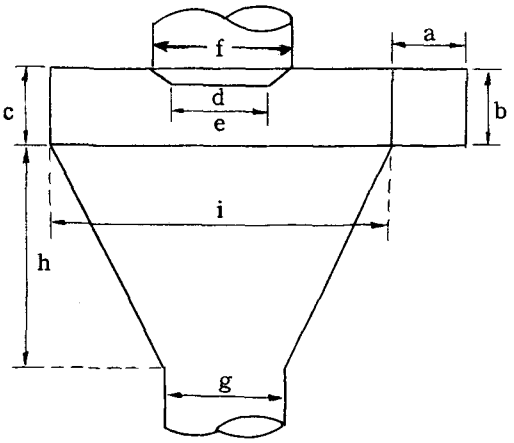
③ 2,700 mm 상향 조정

④ gas duct 설치(dia 1,000mm φ)

- grit sep 上部로는 1,160φ duct 로 cyclone에 연결되고 sep 상부에 550×550 mm의 방폭변을 設置.
- 정조분의 分離를 조정키 위하여 blade가 설치되어 있으며 blade는 chain에 依해 조정 가능하다.



4) cyclone



dimension 단위 : mm

- a : 673
- b : 1,588
- c : 840
- d : 628
- e : 2,037
- f : 2,371
- g : 600
- h : 5,906
- i : 3,735

a) cyclone 上部 duct 는 B / F에 인입되며 방폭변이 설치되여 있다.

b) cyclone 포집량 등은 운전결과에서 기술한다.

5) bag filter

a) bag chamber 下部 hopper에 Coal 이 적분되는 것을 막기 위해 경사각을 72° 로 조정

b) 各 chamber 별로 화재에 대비한 N_2 gas line 設置

c) Coal bag 은 방전용 bag 으로 교체했다.

* 방전용 bag의 제원

시 험 항 목	단 위	시 험 결 과	시 험 방 법
인 장 강 도			KSK 0520
경 사 방 향	kg	149	사용기기 :
위 사 방 향	kg	121	정속인하식
마 모 강 도	回	170	KSK 0540
공 기 투 과 도	cm^3/cm^2 sec	36	KSK 0570
마 찰 대 전 압	volt	330	KOTTTT TM 4

6) Fuller - Kynion pump (신구입 설치)

a) 용량 : 30t/h

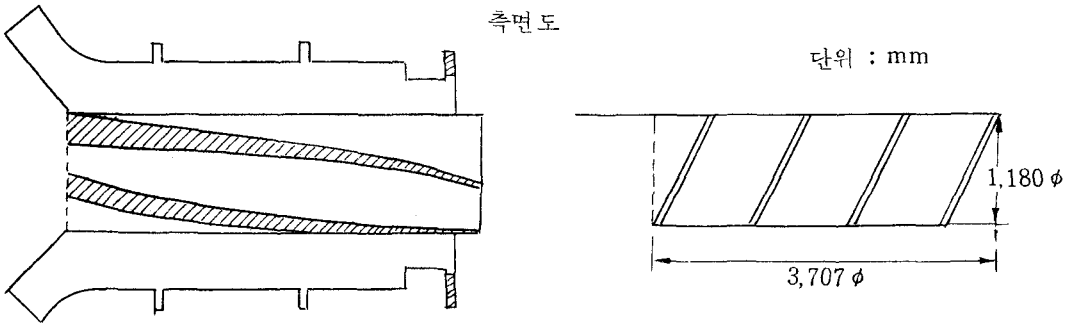
b) air 壓 : 0.9 bar

c) power : 30kw × 6p

7) mill

a) inlet, outlet 部

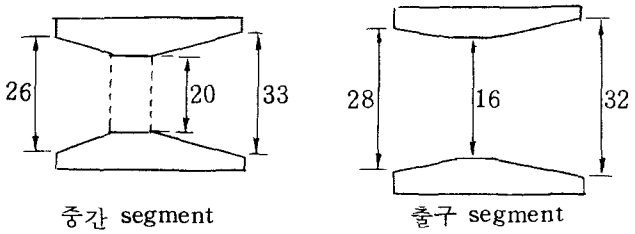
원료의 적분을 방지하여 원활히 投入하기 위하여 screw와 같은 형의 Cone을 하기와 같이 신설하였다.



b) 중간 출구 목판

ㄱ) 중간 체대 후편(2 실측)의 맹판을 제거하고 목판 부착

ㄴ) 목판 slot 확장(12mm→20mm, 16mm)



중간 segment 출구 segment

Slot open holes area

Slot 폭	out side	in side	계	비 고
16 mm	0.6331	0.2910	0.9241 m²	출구 목판
20 mm	0.7914	0.3640	1.1554 m²	중간 목판

E. 운전현황

1) 평균 운전 현황(81. 11월 1개월 평균)

운전시간 : 369^{50} hr

생 산 량 : 9,640 톤 시간당 생산량 : 26 t/h

부 분 별	기 계 명	단 위	indicator	비 고
전 력	mill motor	kw	1,160	
	compressor	A	105	
	I. D. F	A	85	
	relief fan 1	A	84	
	relief fan 2	A	84	
	kynion pump	A	30	
온 도	mill inlet	℃	200 ~340	
	mill outlet	℃	65	
	bag chamber	℃	63	
	cyclone	℃	62	
압 력	mill inlet	mmwg	80 ~100	
	mill outlet	mm wg	150 ~200	
	B / F inlet	mm wg	60 ~100	
	B / F outlet	mm wg	250 ~300	

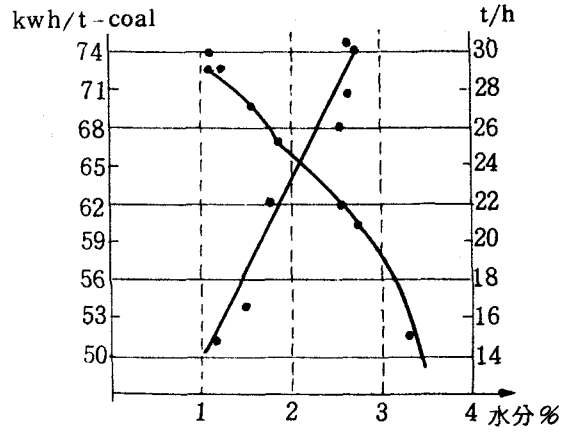
2) 水分함량에 따른 생산량 변이(8~9月)

月. 日	生産量 t/h	sieve %	水分%	電力原單位 kw/t-coal	비고
8. 1	30	14.1	1.1	50.5	
2	29	13.8	1.2	51	
3	29	13.4	1.1	51.4	
4	27	14.8	1.5	55	
5	25	14.6	1.8	62	
9. 2	22	15.3	2.5	68	
3	21	14.6	2.6	70	
4	21	14.3	2.5	69	
5	20	14.1	2.6	74	
6	20	13.4	2.6	75	
7	15	16.8	3.3	96	

理論的으로 水分 1.5% 일때 電力소모량과 만나게 되지만(data book에 依하면) 上記 data는 2% 선에서 Junction되고 있다. 이는 실제 Coal 생산량 보다는 mill 자체가 너무 대형(51t/h 용.: Cement grinding 時)으로 생기는 unbalance인 것 같다.

特히나 장마 后 水分 과다의 원탄이 투입할 때 mill inlet에 적분 발생으로 화재 현상이 일어나기도 하였으며 bag에 水分과다로 인하여 운휴되는 일도 알어났다.

上記 data에서 보는 바와같이 水分이 2%이상 일때 급격한 생산량 감소 현상이 일어났음을 보아 Coal 미분탄 水分은 1.5～2.0%를 유지함이 바람직한 것으로 사료된다.



3) steel ball 배열

a) 最大 ball size 결정

$$B = (F/K)^{\frac{1}{2}}$$

$$(S \cdot W/100\ C_s\sqrt{D})^{\frac{1}{3}}$$

where
- B : 최대 ball size (inch)
- C_s : 임계 회전비율(0.72)
- S : 비 중
- W : Work index
- F : 80% 통과한 원료의 입경(μ)
- K : 상 수
- D : mill dia (feet)

$$B = \left(\frac{11{,}000}{335}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1.63 \times 11.37}{100 \times 0.72 \times \sqrt{11.2}}\right)^{\frac{1}{3}} \times 25.4 = 62\,\text{mm}$$

b) ball의 배열

$$Y = \left(\frac{X}{B}\right)^{3.84}$$

- Y : ball의 누적 %
- X : 임의의 ball 직경
- B : 최대

最大 ball을 60 mm로 할 때

$$B_{60} = \left(\frac{55}{60}\right)^{3.84} = 0.716$$

$$1 - 0.716 = 0.284 \fallingdotseq 28\,\%$$

$$B_{50} = \left(\frac{45}{60}\right)^{3.84} = 0.331$$

$$0.716 - 0.331 = 0.385 \fallingdotseq 39\,\%$$

$$B_{40} = 1 - (0.28 + 0.39) = 33\,\%$$

1실 steel ball 량이 26 M/T,

$B_{60} = 7$ M/T,

B_{50} = 10㎏,

B_{40} = 9㎏ 이 된다.

2 실도 상기와 같은 方法으로 계산하면 된다.

당사에서는 상기와 같은 계산식 및 Cement mill 운전상태 등과 steel ball 재고를 감안하여 하기와 같이 ball 을 투입하였다.

size	1 실	2 실	계	비 고
60~70φ	10		10	
50φ	16	6	22	
40φ		24	24	
30φ		22	22	
계	26	52	78	

(單位 : ㎏)

上記와 같이 ball 을 투입하여 '81 5月 평균 27t/h 의 생산을 기록하였다. ball 의 충진량은 Cement grinding 時의 58 %이며 電力 power 는 Cement mill 당시의 63% 인 1,160 kw 를 나타냈다.

c) steel ball 마모량

초기에 투입했던 ball 중 S강구 회사 제품은 피구현상을 나타냈다. 이는 재질상의 문제 및 열팽창에 의한 것으로 사료된다.

파구된 ball 은 D강구회사 제품인 Hi-Cr 강구로 전량 교환하였다. 키른이 all stop 되는 경우가 없기에 정확한 steel ball 검량을 하지는 못했지만 고공측정을 통해 마모량을 구해 보았다.

	1 실	2 실	계
운 전 시 간	2,588.05 hr	2,588.05 hr	
생 산 량	69,617 ㎏	69,617 ㎏	
steel ball 소모량	6.340 ㎏	2.440 ㎏	8.780 ㎏
coal ton당 마모량	91 gr/t-coal	35gr/t-coal	126gr /t-coal

이는 Cement mill 의 경우 1 실 35 gr/t-cem, 2 실 10 gr/ t-cem와 비교하여 보면 거의 3 배에 달하며 ball 이외에도 liner 의 보수물량이 Cement mill 당시의 3배 정도로 이에 대한 계속적인 고찰이 필요하리라 본다.

4) bag filter 및 cyclone 포집 비율

a) data

	sieve			moisture			생산량
	cyclone	B/F	F-K pump	cyclone	B/F	F-K pump	
81. 8. 11	19	3.4	13.2	1.7	1.1	1.7	26 t/h
8. 21	17	2.5	11.6	1.9	1.0	1.5	27 t/h
8. 25	20	3.8	14.4	2.3	1.1	1.6	27 t/h
8. 26	16	2.4	11.0	1.8	0.9	1.4	27 t/h
8. 27	17	2.6	11.8	1.9	1.2	1.7	26 t/h
Av	17.8%	2.94	12.4	1.92	1.06	1.58	27 t/h

◎ by sieve test

B/F 포집량 : x

cyclone 포집량 : y } 라 하면

$$\begin{cases} x + y = 27 \\ 0.0294x + 0.178y = 0.124 \times 2x \end{cases}$$

上記 式을 풀면

cyclone 포집량 : 17.2 t/h ; 64 %

B/F 포집량 : 9.8 t/h ; 36 %

◎ By moisture test

$$\begin{cases} x + y = 27 \\ 0.0106x + 0.0192y = 0.158 \times 27 \end{cases}$$

cyclone 포집량 : 16.3 t/h ; 60 %

B/F 포집량 : 0.7 t/h ; 40 %

sieve 및 moisture content에 依해 포집량을 계산해 보면 cyclone은 대략 60～65 %, B/F 40～35 %로 나타났으나 damper 조정 등 사정에 따라 이 수치는 변동폭이 있다.

81년 5월 sampling한 경우 B/F 16 %, cyclone은 84 %로 나타나기도 했다.

5) 전력 원단위

◎ 운전시 實전력 원단위

최대 생산시(81. 8. 16)

part	소 요 전 력 kw / hr	생 산 량 t/h
mill motor	1,160 kw	30 t/h
comp	70 kw	
I. D. F	54 kw	
relief fan 1	54 kw	
relief fan 2	54 kw	
F-K pump	19 kw	
기 타	25 kw	
계	1,436 kw	

上記 data로 부터 전력 원단위는 1,436/ 30.1 = 47.7 kw/t-coal로 나타났다. 그러나 상술한 data는 單位 時間當 最大 生産을 하였을 때이고 평균 전력 원단위는 55～65 kw/t-coal로 나타나고 있다.

이 수치는 pol社에서 제작된 거의 동형의 공정을 가진 25t/h 용량의 air swept ball mill의 26 kw/t-coal과 비교하면 2～3 배에 달한다.

그 이유는

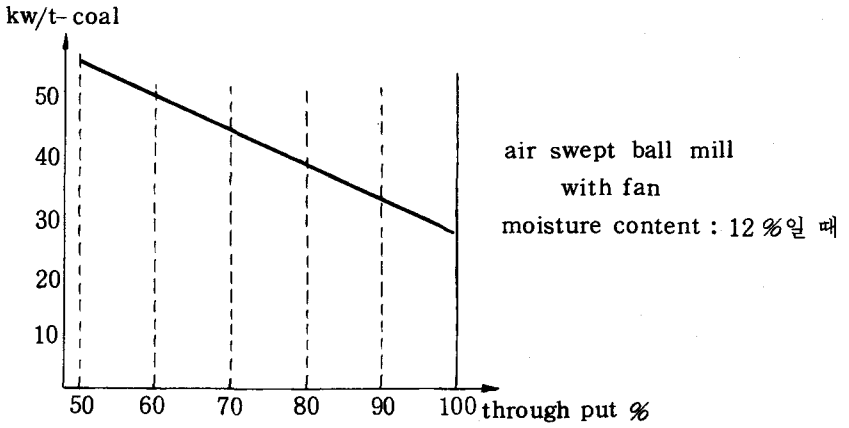
i) 51t/h 의 Cement grinding 用 mill motor (1,950 kw× 6p)

ii) 필요 이상의 relief fan 2기(125kw× 6p)

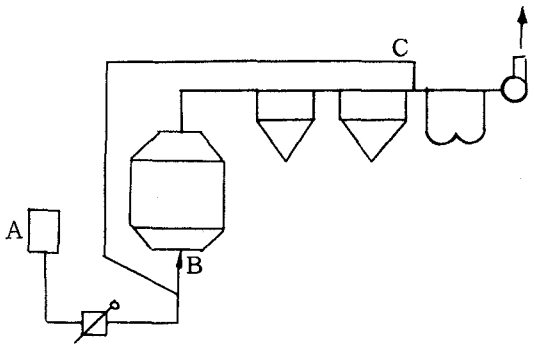
iii) Cement 수송용의 compressor 사용(160kw× 4p 최대 4.8 기압)

iv) 경기 불황으로 인한 키른 stop(평균 60% 가동)으로 빈번한 운휴 등에 있다고 할 수 있다.

參考로 pol社의 air swept ball mill의 전력 원단위는 아래와 같다.



6) air & heat blance



• 측정 data

지 점	명 칭	풍 량	온 도	압 력	비 고
A	열 풍 로	8,900m³/hr	20°C	−60mmwg	이른 연소 공기
B	mill 入 口		250°C		1,914 Nm³
C	return gas line	8,860m³/hr	58°C	−58mmwg	
D	I.D.F入 口	40,020m³/hr	57°C	−330mmwg	

• B, C油 사용량 20ℓ/hr 温度 85°C

• 時間當 투입량 27t/ hr 温度 20°C

• F-K pump 미분탄 水分 2.0 %

• 원탄 水分量 9.8 %

(1) air balance

측정 수치를 S, T, P 상태로 환산하면

a) 열풍로 : $8,900 \times \frac{273}{273+20} \times \frac{10,330-60}{10,330} = 8,244\ Nm^3/hr$

b) return gas line : $8,860 \times \frac{273}{273+58} \times \frac{10,330-58}{10,330} = 7,266\ Nm^3/hr$

c) I.D.F 入口 : $40,020 \times \frac{273}{273+57} \times \frac{10,330-330}{10,330} = 32,050\ Nm^3/hr$

* flash air damper : 기타 유입 공기는

$32,050 - 8,244 = 23,806\ Nm^3/hr$

* 수증기량 $27,000 \times \frac{9.8-2}{100} \times \frac{22.4}{18} = 2,621\ Nm^3/hr$

入	1) 열풍로 연소 공기	8,244 Nm^3/hr
	2) flesh air(희석공기) 및 기타 유입공기	23,806 Nm^3/hr
	계	32,050 Nm^3/hr
出	I. D. F	32,050 Nm^3/hr
Return Air		7,266 Nm^3/hr

(2) heat balance

a) 입 열

㉠ 연료의 연소열

$200 \times 0.9156 \times 9,700 = 1,776,264$ kcal/ hr

㉡ 공기현열

$(8,244 + 23,806) \times 0.311 \times 20 = 199,351$ kcal / hr

㉢ 원탄현열 $27,000 \times 0.28 \times 20 = 151,200$ kcal / hr

㉣ mill 자체 발생열량 $1,150 \times 0.8 \times 860 = 791,200$ kcal/ hr

㉤ 연료의 현열 $0.45 \times 200 \times 0.9156 \times 85 = 7,004$ kcal/hr

b) 출 열

㉠ 수증기 현열

$2,621 \times 0.354 \times 57 + 2,621 \times 539 = 1,465,606$ kcal/ hr

㉡ 배기 air 현열

$(32,050 - 2,621) \times 0.311 \times 63 = 576,602$ kcal/ hr

㉢ 미분탄 $27,000 \times \left(1 - \frac{9.8 - 2}{100}\right) \times 0.28 \times 60 = 418,220$ kcal/ hr

㉣ 기타(방산열 포함)

입 열	① 열풍로	1,776,264	kcal/hr
	② 공기현열	199,351	kcal/hr
	③ 원료현열	151,200	kcal/hr
	④ mill 자체 발생량	791,200	kcal/ha
	⑤ 연료의 현열	7,004	
	계	2,925,019	kcal/hr
출 열	① 수증기	1,465,606	kcal/hr
	② 배기 air	576,602	kcal/hr
	③ 미분탄(완제품)	418,220	kcal/hr
	④ mill 방산열	140,000	kcal/hr
	⑤ 기타 열손실	324,591	kcal/hr
	계	2,925,019	kcal/hr

7) 주요 운휴 사항

a) bag 소실(3 회)
- 81. 4. 4 전소(18ch 324 매)
- 81. 11. 5 部分發火(2ch 36 매)
- 81. 12. 20 部分發火(3ch 54 매)

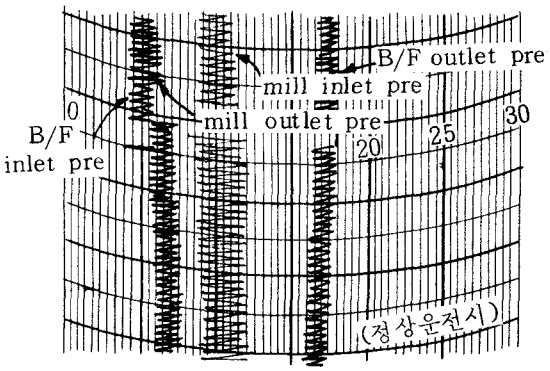
〈원인〉

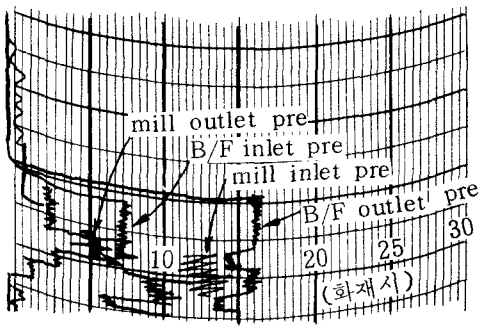
1. 2 차 화재 발생시까지는 B/F 에서 유입되는 flesh air 및 정전기로 인한 화재로 보았으나 3 차 화재 발생시 정밀 check 결과 return hot gas duct 에서 return 된 Coal 미분이 發火되어 있다. mill start 時 I.D.F 가동(첫번째 시동순서임)에 따라 duct로 역순되어 bag 실로 인입 發火되었음을 알았다.

〈대책〉

1) 기계적 장비의 보완으로 duct damper의 sealing 을 100 % 기하기 위하여 새로 신작 교환하였다(현재까지 remote control 은 되지 않고 있음).

2) return hot gas duct 를 SO123 조분 S/C 下部로 이전하여 air 및 미분탄이 mill inlet trap 으로 낙하시키는 작업이 고려중에 있다.

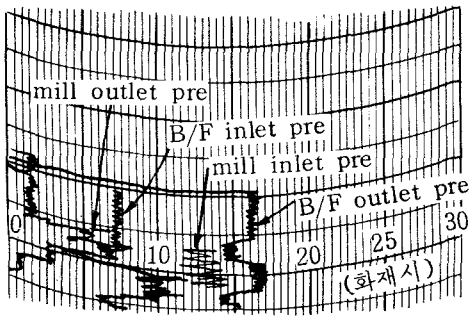




3) 운전상의 실책을 보완키 위하여 초기 start a duct damper의 100 % closing 및 relief fan가동의 동시화로 mill inlet, outlet 부압을 상향 조정하고 mill stop 시 inlet部를 cleaning 하여 문제점을 完全 해소하였다.

b) 방폭변 파손

시 운전후 최초의 방폭변 폭발은 운전 miss에서 發生했다.



열풍로 가동시 연돌 damper를 열고 hot gas damper를 닫은 상태에서 I.D.F 및 relief fan을 가동시켜 flesh air가 유입되었지만 air량의 절대 부족으로 부압이 걸리면서 폭발하였다. 이 문제는 damper조정으로 쉽게 해결을 보았지만 그 후에도 서너차례 파손사고를 일으켰다. 주요한 원인으로는 B/F shaking system의 고장(전기 trip 및 shaking system의 고장)으로 bag에 적분이 싸여 suction壓이 떨어지면서 파손되었다.

c) 기 타

i) liner 파손 교환

ii) F-K pump 補修(grand packing 교환 8회)

iii) screw conveyor shaft 절단

iv) mill inlet sluice valve 이물질 삽입으로 이형교환 2회

v) bag 교환

vi) I.D.F motor 소실 2회

vii) 기 타

3. 효 과

81. 4 ~ 82. 2 까지의 가동시간 및 생산량은 아래와 같다.

구 분	단 위	실 적	비 고
가동시간	hr	12,533[29]	
생산량	t	1,370,765	
B C 油	ℓ	1,540,383	
Coal	t	144,975	

Coal 全體 사용량을 B·C油로 환산하면,

Coal L.H.V = 6,700 kcal/kg
B, C유 L.H.V = 9,700 kcal/kg } 이므로

$$144{,}975{,}000\,\text{kg} \times \frac{6{,}700\,\text{kcal/kg-coal}}{9{,}700\,\text{kcal/B.C-kg}} \fallingdotseq 100{,}137{,}000\,\text{kg-B.C}$$

Coal 평균 공장 도착가 : 68,000원/t-coal

B.C 유 공장 도착가 : 180원/ℓ

i) Coal

144,975 × 68,000 = 9,858,300,000 원

ii) B.C 유

100,137,000 × 180 = 18,024,660,000 원

iii) Coal 전력비

144,975 t × 60 kw/t × 55 원/kw = 478,417,500 원

iv) 보수비 및 기타 금액 = 100,000,000 원

으로 잡으면 10 개월간 연료대체로 인한 절감액은

18,024,660,000 − (9,858,300,000 + 478,417,500 + 100,000,000) ≒ 7,587,940,000원

이 금액은 시설 투자비 등은 제외된 것으로 대략 50 억원에서 60 억원의 연료비 절감을 가할 수 있게 되었다.

위와같은 연료비 절감액 외에도 원단위 절감에 대한 새로운 인식 및 적극적 자세를 종업원이 갖게된 것도 큰 이익이라고 볼 수 있다. 계속하여 motor 용량 검토 등을 통하여 전력원단위의 하향을 기하여야 할 것이다.

4. 끝맺음

81. 3. 9 Cement mill 1호를 개조하여 Coal grinding을 한 이래 몇차례의 화재 및 방폭변 파손 등 사고를 겪으면서도 약 50억원 정도에 달하는 연료대체 이익을 냈다.

그러나 mill 자체로 보면 비능율적인 요소들이 산재해 있으며 이는 새로 설치되는 Coal mill 2기(용량 각각 25 t/h의 air swept ball mill)가 가동되면 Cement mill로 환원됨에 따라 시설투자가 되지는 못하지만 운전상 개선점 및 공정의 check 등을 통해 합리적으로 고쳐져야 할 것이다. 이 보고서의 목적은 신설 Coal mill의 가동시 수분량, steel ball, air balance 등 운전 제반 조건에 유용하게 사용되기를 바라며 간략히 기술하였다.