

大型 mill 에 대한 小考

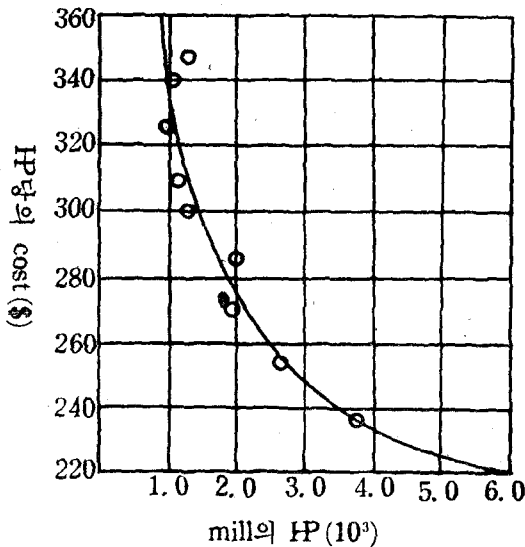
李 裕 仁
 <雙龍東海工場生産課長代理>

金 勇 瑞
 <雙龍東海工場生産課 參事>

1. 서 언

150년 전에 최초로 短胴 mill 이 등장한 이래 大型 gear 제작 기술의 발달과 더불어 ball mill 도 급속히 발달되었다. 처음에는 외부 gear 驅動 방식에 의해 구동되었으나 mill 이 점차 대형화함에 따라서 center driving system 이 發展되지 않으면 안되었으며 현재는 4000 kw 이상의 mill 이 등장하게 되었다.

1968년 東海工場에 설치한 3,200 kw cement mill (3 基)은 국내 최대의 대형 mill 일 뿐 아니라 일본의 경우도 3,000 kw 이상의 mill 은 10基 前



<Fig-1> mill HP 당의 설치비
 (liner, ball, gear, motor, 공급기, 수송기 포함)

後에 불과하다. 미국의 경우는 대형 mill 이 비교적 빨리 발전되어 2,500~3,000 HP 이 mill 이 29基, 3,000~4,000 HP 이 40基, 4,000 HP 이상이 13基나 된다.

mill 이 대형화하면 여러 가지 장점이 있는 반면 아울러 단점도 수반하므로 여기서는 대형화의 배경, 大型化에 따른 문제점 및 3년간에 걸친 운전 실적과 각국의 粉碎 mill 에 대한 data 를 소개하고자 한다.

2. 粉碎 Mill 大型化的 배경

粉碎 mill 대형화의 이유를 열거하면 대개 다음과 같다.

1) 單位粉碎量당의 설치비 저렴

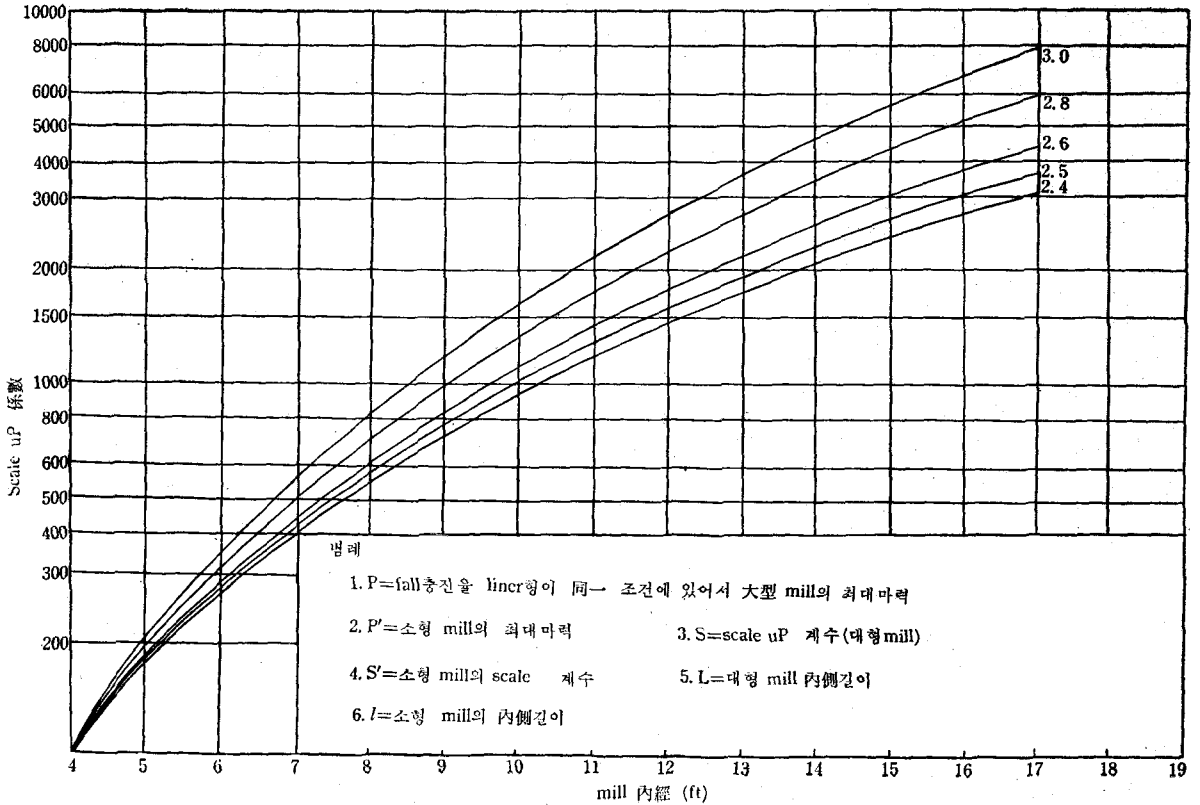
<Fig-1>은 shell liner, ball gear, motor, feeder, 수송기 등을 포함한 mill 設置費의 graph 이다. 4,400 HP 2基와 1,500 HP 6基에서 大型 mill 이 설치비가 26% 절약되고 있다.

2) 粉碎率의 向上

mill 동력은 이론적으로 길이와 직경의 2.5 승에 비례하나 마찰 손실이 있기 때문에 2.4승에 비례하게 된다. mill 분쇄량은 직경의 2.6(~3.0)승 및 mill 길이에 비례한다. 이 2.4와 2.6승의 차가 동력 소비에 대하여 분쇄량의 증가도 된다.

<Fig-2>는 동력 및 분쇄량에 대한 비교에 이용된다.

動力은 2.4승의 curve, 粉碎量은 일반의 ball mill 에서는 2.6승의 curve, mill 내의 被粉碎物이



<Fig-2> 분쇄 mill의 동력 및 분쇄량의 scale up curve

- 사용법 ① $\frac{P}{P'} = \frac{S}{S'} \times \frac{L}{l}$ (동력 scale up에는 2.4승 curve 사용)
- ② $\frac{c}{c'} = \frac{S}{S'} \times \frac{L}{l}$ (분쇄량 scale up의 경우 통상의 ball mill에는 2.4승) 곡선, 기타 type mill에는 다른 指數를 쓴다)

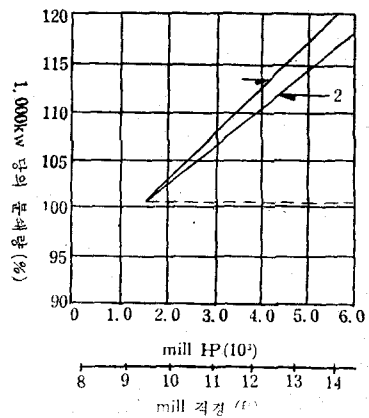
적은 ball mill에서는 3.0승의 curve를 사용한다. 미국의 어떤 cement 공장에서 1,500 HP mill (2.85 mφ × 10.8 ml)과 4,400 HP mill (3.9 mφ × 12.30 ml)의 2년간 동일 조건 (feeding material, product spec)의 실적에서 <Fig-3>과 같은 결과를 얻었다. 여기에서는 단위 동력당의 粉碎량은 대형 mill이 12.1% 증가되었다.

3) shell liner 및 粉碎媒體의 효과적인 이용

mill 粉碎량은 직경의 2.6승에 비례하여 증가하나 liner의 표면적은 직경에 비례하여 증가한다.

즉 粉碎量 = $k \cdot l \cdot d^{2.6}$①

liner의 表面積 = $k \cdot \pi \cdot l \cdot d$②



<Fig-3> 단위 동력당의 분쇄량
① 2.6승의 식 ② 실제의 용량

이로부터 분쇄량에 대한 liner 磨耗는 大型 mill 쪽이 대단히 적다고 추정된다. 대형 mill의 경우 粉砕媒體에 높은 粉砕力을 부여할 수 있다.

ball 量 = $k \cdot l \cdot \frac{d^2}{4}$ 이고 粉砕量은 전술의 ①式과

같으므로 粉砕量의 매체 소비는 대형 mill 쪽이 적다고 추측된다. 미국의 Kaiser Cement & Gypsum Co.의 2년간의 ball 소비 實績은 다음 <表-1>과 같다.

<表-1> ball 소비 실적

	1963년		1964년	
	평균 Blaine (cm ² /gr)	Lb/bbl	평균 Blaine (cm ² /gr)	Lb/bbl
1,500 HP	3,767	0.187	3,654	0.208
4,400 HP	3,486	0.079	3,348	0.108
比	92.3%	42.4%	91.8%	52.0%

<表-1>에 의하면 소형 mill의 Blaine이 크나 대형 mill 쪽이 粉砕量당의 ball 소비는 적다고 상술한 바와 같이 일치되고 있다. 그러나 대형 mill의 경우 장치상의 문제와 병행하여 분쇄매체에 대해선 몇가지 문제점이 있다.

4) 設置面積의 절약

上記한 4,400 HP 2基와 1,500 HP 6基의 설치 면적을 비교하여 보면 각각 932m² 및 2,691m²로서 床面積은 대형 mill에서 65% 절약되고 있다.

5) 보조적인 수송 장치가 적고 경제적이다.

대형의 pump, screen, oil tank, conveyor, elevator를 사용하여 장치의 수를 적게하고 단위를 크게 하므로 분쇄량당의 cost가 저렴하고 운전 및 보수를 위한 인건비를 적게 할 수 있다. 특히 인력 자원의 획득이 곤란하고 인건비가 고가인 미국과 같은 곳에선 더욱 경제적이다.

3. mill 대형화의 문제점

mill 대형화의 배경에서 기술한 바와 같이 대형화의 경우는 다음과 같은 몇가지 문제점을 내포하고 있어 계속 연구 검토되어야 한다.

1) mill 출구 cement 溫度의上昇

응결 지연제로 사용하는 석고의 탈수가 120°C

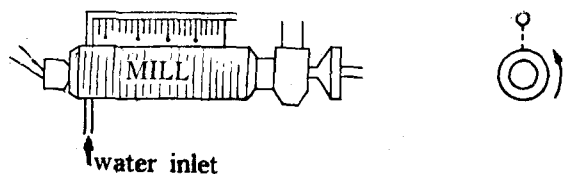
전후에서 일어나기 때문에 cement mill 출구의 cement 온도를 120°C 이하로 유지하여 석고의 탈수를 방지하여야 한다. 그러나 mill이 대형화 할수록 분쇄 媒體에 부여되는 분쇄력이 크기 때문에 cement 온도가 120°C 이상으로 상승할 가능성이 충분히 있으며, close type의 clinker storage를 가지고 있을 때는 그 영향이 치명적이다. 특히 Europe, 일본 등 世界의 경향이 온도가 낮은 cement (60°C)를 요구하고 있는 차체에 cement 온도 상승 방지에 대해선 재고할 필요가 있을 것 같다. 대형 mill에서 cement 온도 상승을 방지하기 위해 사용되는 방법에는 다음과 같은 방법이 이용되고 있다.

① mill 内部 water spray

mill 内部 water spray 方法은 cement maker에 따라 사용하는 곳도 있으나 이 경우 trunnion chute의 폐쇄, 1,2실 사이 screen plate의 폐쇄, bag filter, 각 chamber의 concrete 형성, bag의 filtering 효율 악화 등의 악영향이 있어 계속 장시간 사용에는 애로가 많다. 따라서 효율적인 사용 방법을 모색하여야 할 것이다.

② mill 胴體 water spray

<Fig-4>와 같이 일정한 수량을 저압으로 spray하는 방법이다. 동해 공장 cement mill에



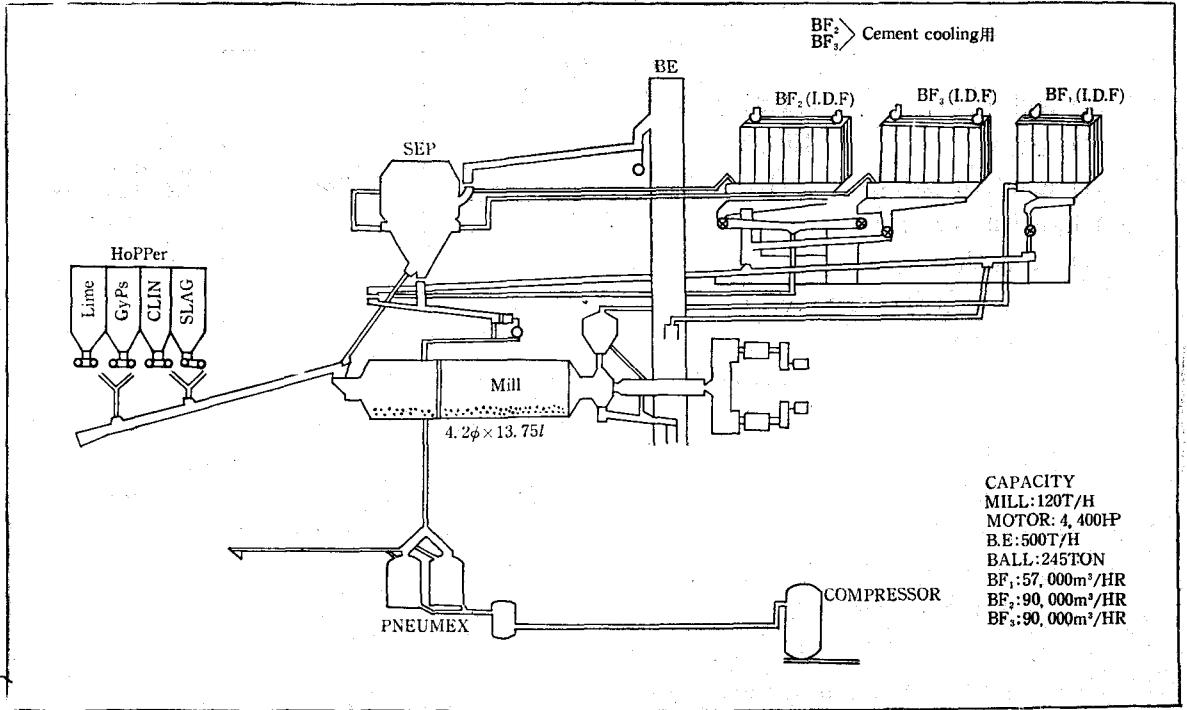
<Fig-4> mill 胴體 water spray 例

서 동체에 water spray하여 얻은 결과는 <表-2>와 같다.

<表-2>에 나타난 바와 같이 mill 출구 시멘트 온도는 동체 spray 시작 후 4~5시간 만에 8°C 하강하였다.

③ separator 냉풍 混入에 의한 냉각

mill I. D. F 이외에 separator에 별도의 cool-



<Fig-5> separator에서 냉각 공기 혼입에 의한 cement cooling의 예

ing 용 I. D. F를 설치하여 cement를 cooling시키는 방법이다. 예로서 프랑스 Lafarage Cement Co., St. Pierre La Cour 공장 4, 400 HP (2 × 2, 200 HP, 4.2φ × 13.75) mill의 예를 보면 <Fig-5>에서와 같이 mill I. D. F 57, 000 m³/h의에 90, 000 m³/h I. D. F 2대를 추가 설치하고 있다.

● cement mill heat balance 예

(Lafarage Cement Co.(佛) St. Pierre La Cour 공장의 신설 mill에 대한 cement cooling 문제를 다룬 heat balance 임)

(1) mill spec

- motor : 2 × 2, 200 HP = 4, 400 HP.
- dimension : 4.2mφ × 13.75 ml
- B. Z cap : 500 t/h
- steel ball : 245 ton
- mill speed : 15 r. p. m
- mill cap : 120 t/h
- mill I. D. F cap : 57, 000 m³/h

<表 -2>

胴體 spray 결과 예

	spray 前	spray 後	비 고
胴體表面溫度 (°C)	82	60	water spray 量: 25 m²/h
spray water 온도 (°C)	21	30	
mill 출구 cement 온도 (°C)	130	122	

sep I. D. F cap : 90, 000 m³/h × 2

(2) calculation basis

가) 被粉碎物 공급비

- clinker 80%
- slag 13%
- gypsum 4%
- lime 3%

- 나) Blaine 2, 800cm²/gr
- 다) 생산량 110 t/h
- 라) 要求 cement 溫度 60°C
- 마) mill 입구 clinker 온도 100°C
- 바) 대기 온도 0°C

사) 입구 혼합 온도 84°C

아) 수분 (slag) 7%
(석고) —

자) slag에 수반되는 水量 1.1 t/h

차) mill의 전력 3,100 kw

카) 순환량 440 t/h

타) mill feed back q'ty 330 t/h

(3) heat balance 계산

가) 入熱(Q₁)

㉞ raw material 持入熱(Q₁₁)

$$Q_{11} = 0.19 D \cdot T_c$$

$$= 0.19 \times 110 \times 84 = 1,760 \text{ (kcal/h)}$$

㉟ grit 持入熱(Q₁₂)

$$Q_{12} = 0.19 DG (T_c - 15)$$

$$= 0.19 \times 330 \times T_c = 62.7 (T_c - 15)$$

㊱ raw material 수분 지입열(Q₁₃)

$$Q_{13} = 1.1 \times 20 = 22 \text{ (kcal/h)}$$

㊲ ball에 의한 발생열(Q₁₄)

$$Q_{14} = P \times 0.95 \times 0.86 \text{ (95\% 흡수)}$$

$$= 3,100 \times 0.95 \times 0.86 = 2,540 \text{ (kcal/h)}$$

㊳ mill I. D. F에 의한 gas 지입열(Q₁₅)

$$Q_{15} = V \cdot D \cdot P \cdot T$$

$$= 390 \times 110 \times 0.312 \times 10^{-3} \times 20 = 268 \text{ (kcal/h)}$$

$$\text{total } 5,590 + 62.7 (T_c - 15)$$

$$= 4,650 + 62.7 T_c$$

나) 出熱(Q₂)

㉞ 胴體 radiation heat loss(Q₂₁)

$$Q_{21} = 0.04 \times 4.2 \times \pi \times 13.75 (T_c - 20)$$

$$= 7.25 (T_c - 20)$$

㉟ gas 持去熱(Q₂₂)

$$Q_{22} = 43,000 \times 10^{-3} \times 0.312 (T_c - 10)$$

$$= 13.4 (T_c - 10)$$

㊱ 물 증발 손실열(Q₂₃)

$$Q_{23} = 1.1 \times 628 = 690$$

㊲ cement 持去熱(Q₂₄)

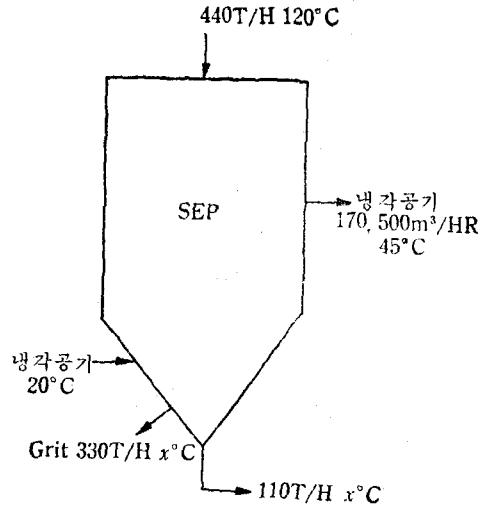
$$Q_{24} = (D + DG) 0.19 T_c = 83.5 T_c$$

$$\text{total } 690 + 7.25 (T_c - 20) + 13.4 (T_c - 10) + 83.5 T_c = 406 + 104.15 T_c$$

Q₁ = Q₂ 이므로

$$4,650 + 62.7 T_c = 406 + 104.15 T_c$$

$$4,244 = 41.45 T_c$$



<Fig-6> separator에서 cement 냉각의 예

$$T_c = 102^\circ \text{C}$$

따라서 cement 溫度는 10°C 정도이다.

where

D : raw material 投入量 (t/h)

T_c : 혼합 원료 온도 (°C)

0.19 : cement 비열 (kcal/kg°C)

DG : grit 량 (t/h)

T_c : mill 출구 cement 溫度 (°C)

P : mill 전력 (kw)

V : gas 량 (m³/t)

ρ : gas 비열 (kcal/m³°C)

T₀ : 대기 온도 (°C)

102°C의 cement를 60°C까지 cooling시키기 위해 <Fig-5>에서와 같이 separator에 別途의 I. D. F를 추가 설치 및 mill 内部 water spray 방법을 사용하고 있다.

다) separator에서의 냉각

<Fig-6>에 separator에서의 냉각 상태를 나타 내었다.

separator 자체의 heat balance를 취해 보면

$$440 \times 10^3 \times 0.19 \times 102$$

$$= 440 \times 10^3 \times 0.19 \times x + 170,500 \times 0.31$$

$$\times (45 - 20) \quad x = 72^\circ \text{C}$$

따라서 separator에서의 온도 차는 30°C이다.

라) 이를 다시 water spray하여 10°C 더

down 시켜 목표치 60°C에 맞춘다.

(water spray 량) 0.82 t/h

④ after cooling

고온의 cement를 packing할 때와 저온의 cement를 packing할 때와는 전자가 난대 발생률이 크다고 하나 정확한 data를 가진 것은 없다. mill에서 나온 cement를 일단 cooling하여

상기의 난대를 방지하고 품질적인 면을 고려 <Fig-7>과 같은 after cooling system을 채택하기도 한다.

물론 horizontal 구조도 할 수 있으며 이 system에 대해선 F.L. Smidth社에서 特許를 가지고 있다.

2) 장치상의 문제

장치상의 문제로서 소형 mill 數基가 설치되어 있으면 어느 한 mill이 운휴하더라도 기타 밀은 가동되므로 그 損失은 일부에 국한되나 대형 밀의 경우는 생산이 100% 정지되기 때문에 운휴회수는 최소한으로 감소시켜야 하고 가능한 한 예측하지 못한 운휴가 없도록 해야 하므로 예방 정비 및 감시에 배가의 노력이 필요하다.

또한 분쇄를 위해선 ball의 마모가 필연적으로 수반되므로 일정 주기로 ball을 adding 해주어야 한다. 독일 Dickerhoff Cement Co.에서는 0.430 kg/t-cem의 ball 마모율을 가진 2.4φ×14 m mill에서 ball adding 없이 1개월 운전하였더니 13.6%의 생산량 감소와 3%의 전력 원단위가 상승되었다는 보고를 한 적이 있다.

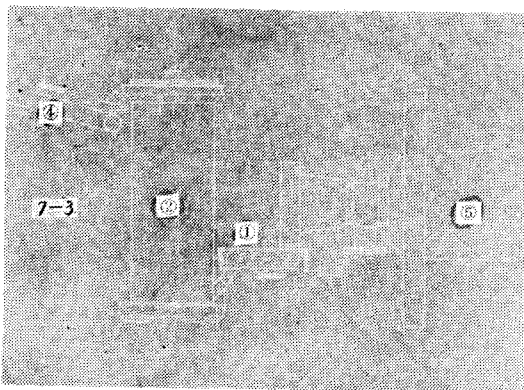
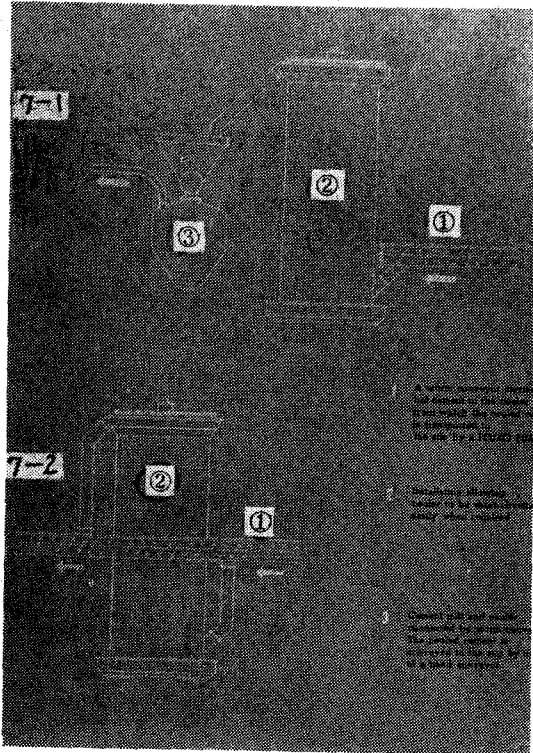
ball adding에 의한 운휴 회수를 감소시키기 위해선 수명이 긴 ball을 사용할 필요가 있다. 참고로 ball 마모율을 비교해 보면 <表-3>과 같다.

<表-3> ball 마모율(gr/t-cement)

東海工場			Dundee Co.(美)	Lafarge Co.(佛)
69년	70년	71년	323	70
673	1,050	928		
			high chromium ball	high chromium ball

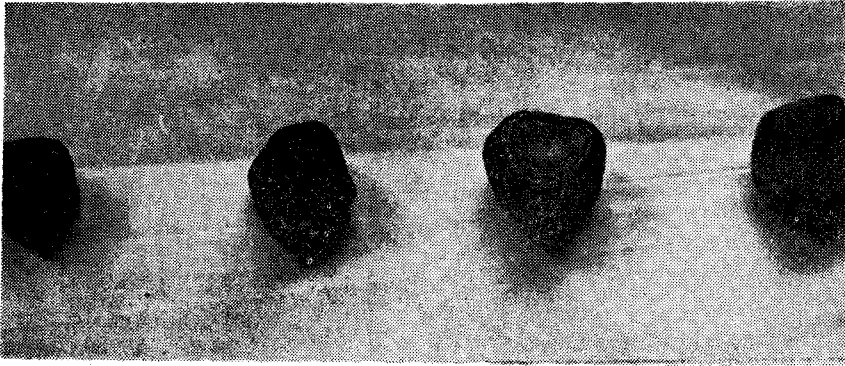
상기의 high chromium ball은 Belgium Magotteux社에서 수년간에 걸쳐 개발한 high chromium 함량의 ball로서 독일 Dickerhoff Cement에선 상기 Magotteux ball을 사용하므로 80%의 ball 마모율을 줄여 분쇄 매체로 인한 cost를 70% 감소시킬 수 있었다고 보고하고 있다.

ball 마모율에 영향을 미치는 factor에는 mill 길이, 밀 직경, 밀 speed, liner 형상, ball 직경

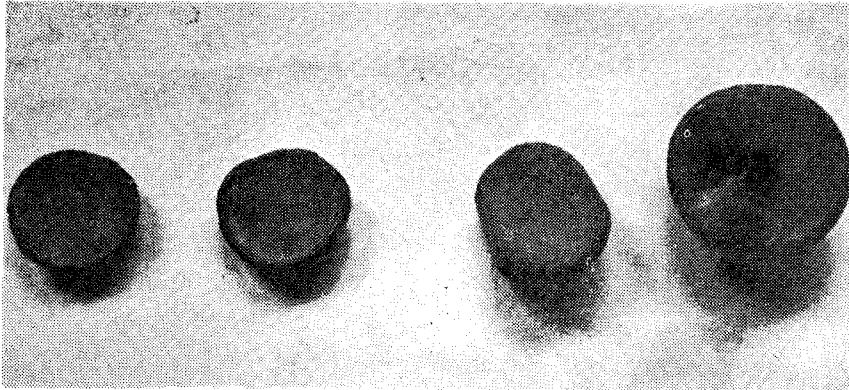


<Fig-7> after cooling system의 예

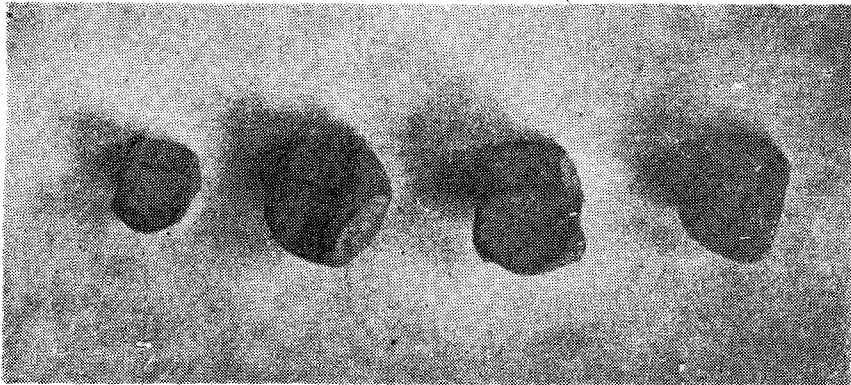
- ① screw conveyor (cement 수송용)
- ② cooler
- ③ fluxo pump
- ④ belt conveyor
- ⑤ mill



<Fig-8> ball의 이상 마모(例) (cement mill 1실)



<Fig-9> ball의 이상 마모(例) (cement mill 1실)



<Fig-10> ball의 이상 마모(例) (cement mill 2실)

및 composition 밀 内の clinker quantity, clinker size 와 hardness, circulating load 등이 있겠으나 근본적으로는 ball 재질에 의존되는 것같이 추측된다 (同一 mill의 경우).

한편 東海工場の 경우는 <Fig-8>, <Fig-9>, <Fig-10>에서 보는 바와 같이 ball의 이상 마모가 극심하여 문제가 되고 있다. 이는 근본적으로 한국의 제강 공업이 더욱 발달되어야 한다는 사실에까지 비약될 수도 있으나 국내 steel ball maker에선 이점에 착안 꾸준히 연구 검토해야 할 것이다.

<表-4>에서 알 수 있음과 같이 ball의 전반적인 wear rate도 상승하나 괄목할 만한 사실은 파구율(이상 마모율)이 급증하고 있다는 것이다. 이는 ball 재질과 열 처리를 병행하여 검토하여야 할 것이다.

<表-4>

마모율과 파구율

(단위 : gr/t)

	마 모 율				파 구 율 (이상 마모)				계
	1 실	2 실	소 계	마모율비 (%)	1 실	2 실	소 계	파구율 (%)	
69년	236	384	620	92	30	23	53	8	673
70년	345	530	875	84	30	145	175	16	1,050
71년	232	533	765	84	30	133	163	16	928

3) automation 및 計測

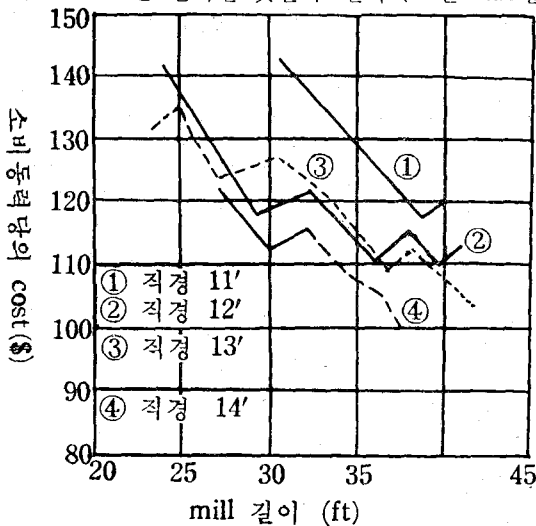
최근 cement 공장도 점차 자동화되어 가고 있는 경향이어서 粉碎單位가 대형화하면 automation 및 계측에는 경제적이거나 보다 신뢰성 있는 計裝이 요구된다.

4) mill의 길이

mill의 動力은 직경의 2.4승과 길이에 비례한다.

$$\text{즉 } IP = k \cdot d^{2.4} \quad IP = k \cdot l$$

<Fig-11>은 장치의 cost에 관한 data를 plot한 것이다. cost 중에는 liner, motor, 구동부 등을 포함하고 있다. curve의 曲部는 size에 의한 gear나 구동부의 가격이 다르기 때문이다. 직경이 큰 mill을 선택할 것인가 길이가 긴 mill을



<Fig-11> 소비 동력당의 cost (\$)

선택할 것인가에 대해서는 직경이 큰 mill을 택하면 동력 효율이 좋고 床面積이 작으나 粗立子の 함유가 용이해진다. 이와는 반면에 길이가 긴 밀은 마력당의 cost가 저렴하고 粗立子の 함유는 적으나 동력 효율이 나쁘다.

4. 結 論

mill이 대형화함에 따라 여러 가지 이점이 있으나 아울러 몇가지 문제점이 야기되고 있다. mill 출구 cement 온도 상승을 방지하기 위해서는 胴體 spray, 內部 spray, separator, 냉각 공기 混入을 위한 별도의 I. D. F 設置 및 after cooling 방법들이 있으나 최근 separator에 별도의 I. D. F를 설치하고 기타 다른 한 방법을 병용하는 경우가 많으나 향후 보다 효율적인 냉각 방법이 계속 검토되어야 할 것이다.

장치상의 문제로 운휴 회수를 줄이기 위해 선양질의 ball을 사용할 필요가 있으나 현재 한국에서 사용중인 ball은 수명이 짧은 것은 제외하더라도 이상 마모(마모가 불균일)가 격증하고 있어 더욱 심각한 문제로 등장하고 있다.

Belgium의 Magotteux ball <表-3>과는 비교되지 않더라도 다소 수명이 길고 마모율이 균일한 ball의 生産이 시급하다고 생각한다.

참고 文獻

- ① Trends in the Design of Large Grinding Mills Dettmer p.13
- ② The 5th International Cement Industry Seminar (Rock Product 社)

近 着 外 國 圖 書

● CEMENT, LIME AND GRABEL, August 1971

1. Editorial : Cement and Concrete Association 1970
2. The Manufacture of Portland cement—5 K. C. BARRELL
3. BRS Gold Jubilee Congress and open days
4. Bulk-handling system at Northfleet cement works
5. Open day at Singleton Birch plant
6. GLC land for gravel workings
7. Sand and Gravel Association—New officers elected
8. Brewis Trophy plaque presented at Tilcon's Knotford Nook Quarry