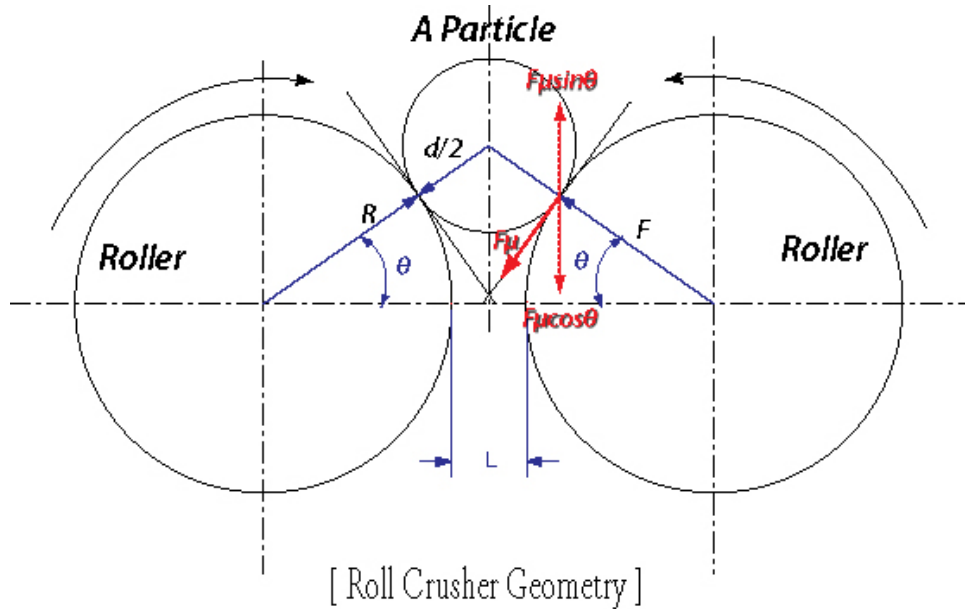


롤 크랏샤의 롤 설계

1. 롤 크기



[그림1]

상기 그림은 구형의 입자가 롤 사이에 거의 끼여서 롤크랏샤의 분쇄구역으로 들어가기 직전의 상황을 나타내고 있다. 같은 반경R과 같은 길이의 2개의 롤이 직경=d인 입자와의 접촉점에서 접선으로 그려지는 Nip Angle=2θ를 형성하고 있다.

$$\cos \theta = \frac{\left(R + \frac{L}{2} \right)}{\left(R + \frac{d}{2} \right)} \quad (R : \text{롤의 반경}, L : \text{롤간 거리}) \quad \text{----- (식1)}$$

(식1)을 롤 반경R로 단순화 하면,

$$R = \frac{L - d \cos \theta}{2(\cos \theta - 1)} \quad \text{----- (식2)}$$

(식2)는 요구되는 Nip Angle에 대한 롤의 반경R을 나타내는 것이다. Nip Angle은 롤의 표면과 입자의 표면사이의 마찰계수 μ에 따라 변할 수 있는 부분이다.

μ를 평가하기 위해 입자가 분쇄되기 직전에 롤에 의해서 작용되는 압축력 F는 롤표면의 접촉점에서 통상적으로 작용하고 롤과 입자사이의 마찰력은 롤표면 접촉점에 접선을 따라 작용한다. 이 마찰력은 압축력F의 함수이며 Fμ로 표현된다. 이 힘들의 수직방향의 성분들을 고려한다면 그리고 중력에 의한 힘들을 무시한다면, 그림에서 보여주는 것과 같이 롤들 사이에 꼭 끼인 입자의 접촉점에서 평형상태로 적용하여 볼 수 있는

$$F \sin \theta = F \mu \cos \theta \text{ or } \mu = \tan \theta \text{ or } \theta = \tan^{-1} \mu \text{ -----(식3)}$$

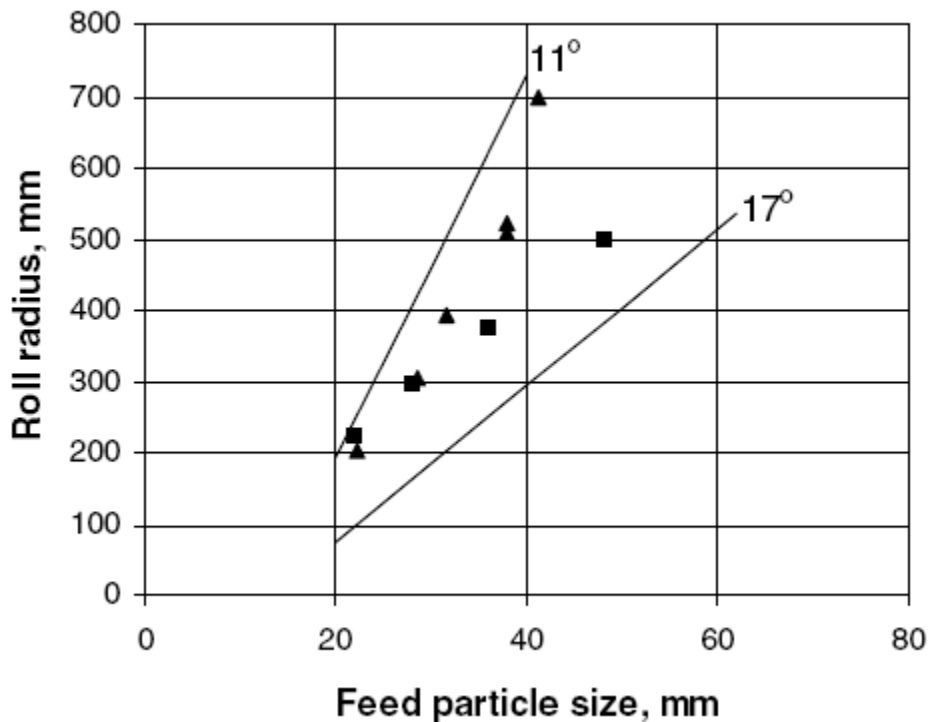
마찰계수가 0.2 ~ 0.3사이로 러프한 만큼 Nip Angle도 약 11°~ 17° 의 값을 갖는다. 어쨌던 롤이 운전상태에서는 광물입자사이의 마찰특성은 롤의 속도에 따라 결정된다. "월스"에 의하면 롤의 속도 v는 공전하는 롤의 마찰운동계수 μ_k 와 관련되어 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$\mu_k = \left[\frac{(1+1.12v)}{1+6v} \mu \right] \text{ -----(식4)}$$

(식4)는 μ_k 값이 롤 속도의 증가에 따라 약간 감소하는 것을 보여준다.

150 ~ 200rpm 사이의 속도변화에 따라 μ 는 0.2 ~ 0.3 범위에서, μ_k 값은 0.037 ~ 0.056사이에서 변화를 가진다.

(식2)는 요구사양에 따른 롤크랏샤 크기를 선택할 때 사용될 수 있다. Nip Angle 11° ~ 17° 사이에서 [그림2는 공급되는 재료의 입자크기 12.5mm에 대하여 계산된 롤 크기를 나타내고 있다.



[그림2 : 공급되는 최대입자크기에 따른 롤의 반경, 일치하는 점들은 산업용 롤크랏샤에 대한 데이터 임]

2. 롤 크랏샤의 분쇄능력

롤 크랏샤의 분쇄능력 Q는 롤의 폭 W, 롤의 직경 D와 롤의 회전속도에 정비례한다.

롤 크랏샤에 재료가 연속적으로 일정하게 공급되는 조건이라면 분쇄능력 Q는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \pi 60 D W \omega L \rho_B$$

$$= 188.5 D W \omega L \rho_B \quad \text{t/h} \quad \text{-----}(식5)$$

- 여기에서 D : 롤의 직경(m)
- W : 롤의 폭(m)
- ω : 롤의 회전속도(rpm)
- L : 롤과 롤 사이의 거리(m)
- ρ_B : 공급재료의 벌크비중(ton/m³)

상기식은 입자들이 일정높이에서 연속적으로 공급되고 운전시간 내내 입자들이 롤사이에 꽉 채워져 있는 상태를 가정한 것이며 이는 재료가 롤 간격과 동일한 두께와 롤 폭과 동일한 폭을 갖는 연속적인 띠모양의 제품을 생산하는 것과 같은 것으로 가정되었다. 이것은 이론적인 생산능력일 뿐이며 실제적인 생산능력은 아래와 같이 표현되는 "리본함수, R_F"에 의해 결정될 것이다.

$$R_F = 0.0095 \frac{Q}{v_p L W} \quad \text{-----} (식6)$$

- 여기에서 Q : 공급률(ton/hr.)
- v_p : 롤의 원주속도(m/sec.)

리본함수는 이론적인 고체의 광석리본의 시간당 톤수에 대한 실제로 크랏샤를 통과한 시간당 톤수의 비율로 정의 된다. 사실, 실제 생산능력은 이렇게 계산된 능력 Q의 25% 정도가 될 수 있다.

이러한 수정은 실제 입자들과 분쇄챔버를 거쳐 통과하는 입자들의 증가된 벌크비중간의 차이 때문에 필요하다. 공급률이 불규칙할 때, 생산능력은 감소한다.

(식5)는 "오트"에 의해 효율함수, ϵ 를 도입하여 생산능력 Q를 수정표현 되었다.

$$Q = 3600 \epsilon W v_p \rho_B L \quad \text{-----}(식7)$$

- 여기에서 ρ_B : 공급되는 재료의 벌크비중(ton/m³)
- ϵ : 롤간격과 생산입자크기에 따라 0.15 ~ 0.30의 값을 가지는 효율함수

($\epsilon \rho_B$) 생산품은 "오트"에 의해 연속적인 리본 혹은 케이크 형태인 생산품의 밀도인 "운전밀도"라고도 언급되었다. "오트"는 롤 크랏샤들의 이 "운전밀도"가 0.25 ~ 0.6 ton/m³으로 낮은 것을 관찰하였다.

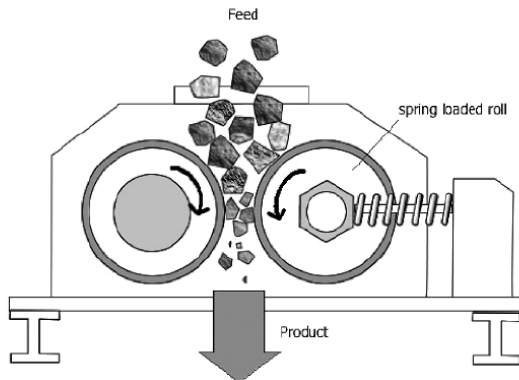
3. 롤 크랏샤의 소비동력

동일한 감속비 범위안에서도 롤 크랏샤의 소비동력은 폭 넓게 변한다.
필요동력은 일반적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

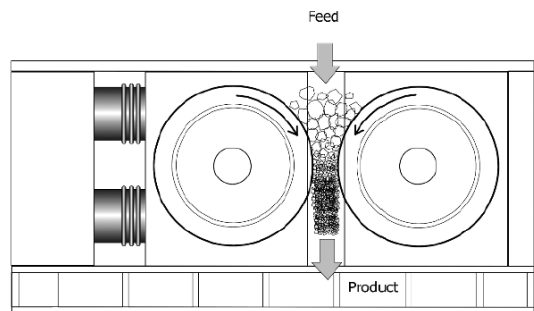
$$P = \text{Capacity} \times \text{Reduction Ratio} \times \text{Work Index} \text{ -----(식8)}$$

산업분야에서, 평활표면의 저압롤들은 건조상태에서 8 ~ 50kW의 동력을 당길 수 있도록 설계된다.
고압용 롤들은 저수분 상태에서 공급재료의 크기에 따라 40 ~ 550kW의 동력으로 설계된다.
분쇄력이 복합적인 치차형 롤들과 때때로 젖은 상태로 운전되는 크랏샤들에 대해서는 충분한 데이터 데 될 수가 없다.

4. HPGR Design



[롤 크랏샤의 개념도]



[고압 그라인더 롤(HPGR) 개념도]

[그림 3]

롤 크랏샤에 있어서, 분쇄의 시작은 개별입자들이 콘버징되는 롤라 표면들 사이에 끼여서 죄여지는 것부터 포함된다. 롤과 입자들 사이의 마찰과 압축력은 입자의 압축강도를 초과하여 입자크기를 감소시킬 수 있는 복합된 힘들이다. 많은 량의 돌들이 롤사이에 끼여있고 높은 압력을 받고 있다면 입자 간 전단을 일으킬 만큼의 압축력에 의해 분쇄가 일어날 수 있으며 전체적으로 작용하는 압력은 돌 조각들의 분쇄강도보다 크게 제공할 것이다. 분쇄생산품은 다져진 케이크 형태로 분쇄된 재료의 연속적인 리본상이 다시 될 것이다.

압축력에 의한 경우와 충격으로 인한 파단비에너지를 연구하는 과정에서 "스호이너트"는 충격의 결과로써 파단비에너지의 작용이 압축력에 의한 경우보다 크지 않다는 것을 관찰하였다. 그래서 높은 압축력이 광석층에 작용하는 고압그라인딩 과정에서 요구되는 총에너지는 주로 충격력을 이용하는 분쇄설비에 비해 비교적 낮다.

"스호이너트"는 또한 에너지 활용이 증가함에 따라 입자크기가 감소하는 것도 관찰하였다. 여러 작업자들이 "스호이너트"의 관찰들을 확인해 주었다. 이러한 관찰들이 발전되어 스호이너트와 쿠롭-폴리시우스사가 공동으로 고압 그라인딩 롤(HPGR)을 개발하는 결과로 나타났다. HPGR은 시멘트 철광석과 다이아몬드 산업등에서 상당히 성공적으로 사용되고 있으며 일반 광물산업계에서도 사용이 증가되고 있다.

[그림3]의 우측은 HPGR의 분쇄방식을 설명하고 있다. 이 그림은 공급되는 재료의 크기가 롤간격보다 클 때 입자들의 파단은 롤 크랏샤의 전형적인 힘에 의해 이뤄지는 초기단계를 보여주고 있다. 이 같은 경우에는 롤의 엷지영향이 두드러진다. 공급재료가 점점 내려감에 따라 롤간격보다 큰 일부 입자들은 높은 압축력을 받게되며 이로인해 크기가 감소된다. 이러한 입자들이 큰 입자들 사이의 공간을 채우게 된다. 보다 많은 입자들을 분쇄시키는 입자상호간 압축력이 더 크게 전달되어 입자상호간 접촉은 증가된다. 높은 압축력으로 인해 분쇄된 입자들은 케이크 또는 리본을 닮은 연속상 제품이 형성되도록 다져진다. 광물이나 광석의 특성에 따라 일련의 소성변형이 일어나기도 한다. 다져진 입자들은 그라인딩 밀의 2차 운전에 의해 결국에는 분산된다. HPGR과 볼밀의 복합운전에 요구되는 전에너지는 전형적인 분쇄공정의 것보다 작다는 것을 알 수 있다.

크랏샤를 작동하기 위해서 압력은 측면이동이 가능토록 설계된 롤에 장치된 4개의 유압실린더에 의해 작용된다. 2번째 롤은 고정되어 있으며 대략 200MPa의 분쇄압력이 작용된다. 광물산업에 사용되는 롤의 크기들은 $L/D=0.2 \sim 0.6$ 인 $0.7 \sim 2.8m$ 의 직경을 갖으며 롤 스피드는 $85 \sim 105m/min$ 이다. 롤 표면은 니켈-하드 라이너 또는 스테르드가 장치된다. 텅스텐 카바이드로 제작된 스테르드는 가혹한 마모에는 견딜 수 있지만 크랙이 적게가는 부드러운 스테르드가 더 긴 수명을 나타낼 수 있다.

습식과 건식 분쇄와 조분쇄 모두 가능하며 분쇄율은 남아프리카 다이아몬드 광산에서 450ton/hr과 미국에서는 약 400ton/hr.의 경질 타코나이트 광석에 대한 쿠롭-폴리시우스에 의해 보고되고 있다. 설계능력은 757ton/hr.까지 가능하다. 미립자를 얻을 수 있다는 사실 때문에 HPGR은 분쇄와 조분쇄 양쪽에 다 사용되어 왔다. 분쇄공정에서는 콘 크랏샤와 같은 2차 또는 3차 분쇄기들을 대체할 수 있다. 조분쇄 공정에서는 3차 분쇄기를 대체할 수 있으며 볼밀의 앞공정에 설치될 수 있다. HPGR로 부터 펠렛타이징 공장으로 직접 원료를 공급하는 인도 쿼드라무크 철광석 공정과 같은 경우에는 볼밀 후공정에 설치되기도 했다.

5. HPGR의 운전

고압 그라인딩 롤을 운전하기 위해서는 주 운전함수들이 어떤 것이 있는지 정의할 필요가 있다.

- 1) 운전압력
- 2) Nip Angle
- 3) 롤 간격
- 4) 롤 회전속도
- 5) 광물입자의 크기

5.1 운전압력의 평가

HPGR 폴리콤 그라인딩 밀을 운전하기 위해서는 요구되는 압력은 좌우로 이동할 수 있도록 설계된 4개의 유압실린더를 통해 롤에 작용하게 된다. 2차 롤은 고정되어 있으며 분쇄압력은 대략 200MPa 정도 작용하지만 경질광석의 경우에는 더 높은 압력이 요구되기도 한다. 예를 들면, 사이프러스 시에리타 광산에서는 340MPa의 압력이 사용되었다.

분쇄를 위해 요구되는 압력은 50MPa을 초과해야 한다. 베타스비, 켈러워셀과 오베르흐유저는 요구되는 힘은 100kN/롤의 폭(m) 정도가 된다고 언급했으며 스토너트는 롤 사이에 낀 광물입자들에 대한 비분쇄압력을 다음과 같이 이론적으로 평가 하였다.

$$P = \frac{F}{L \cdot D} \quad N / m^2 \quad \text{-----}(식9)$$

여기에서 F : 그라인딩 힘(kN)

L : 롤의 폭(m)

D : 롤의 직경(m)

입자들에 대한 최대압력은 입자상호간의 Nip Angle에는 반비례하며 다음과 같이 표현된다.

$$P_{Max} = \frac{F}{KDL\theta_{IP}} \quad MPa \quad \text{-----}(식10)$$

K는 0.18 ~ 0.23의 값을 갖는 재료상수, θ_{IP} 는 입자상호간 분쇄가 일어나는 Nip Angle 등이 (식12)에서 정의 된다. 다음과 같이 표현되는 입자들에 대한 평균압력식에서 클라이모우스키 등이 정의하는 K를 사용하기가 어렵기 때문에 (식10)은 사용하기 어렵다.

$$P_{Ave} = \frac{F}{1000LR\theta_{IP}} \quad \text{-----}(식11)$$

여기에서 R은 롤의 반경이며 θ_{IP} 는 입자상호간의 Nip Angle로 (식13)에서 정의된다.

5.2 Nip Angle의 평가

HPGR에서 파단의 메커니즘은 다음과 항목으로 인해 고압영역에서 분쇄가 일어난다고 결론을 내린 크라이모우스키의 이론이 공인되어오고 있다.

- 1) 롤 간격보다 적은 입자간 거리에 작용하는 입자상호간 작용하는 힘.
- 2) 단일입자들이 롤간격보다 클 때 롤에 직접 끼이기도 하고 입자 상호간의 마찰에 의해 복합적으로 파단되어 압축영역에 들어가기 전에 분쇄된다.

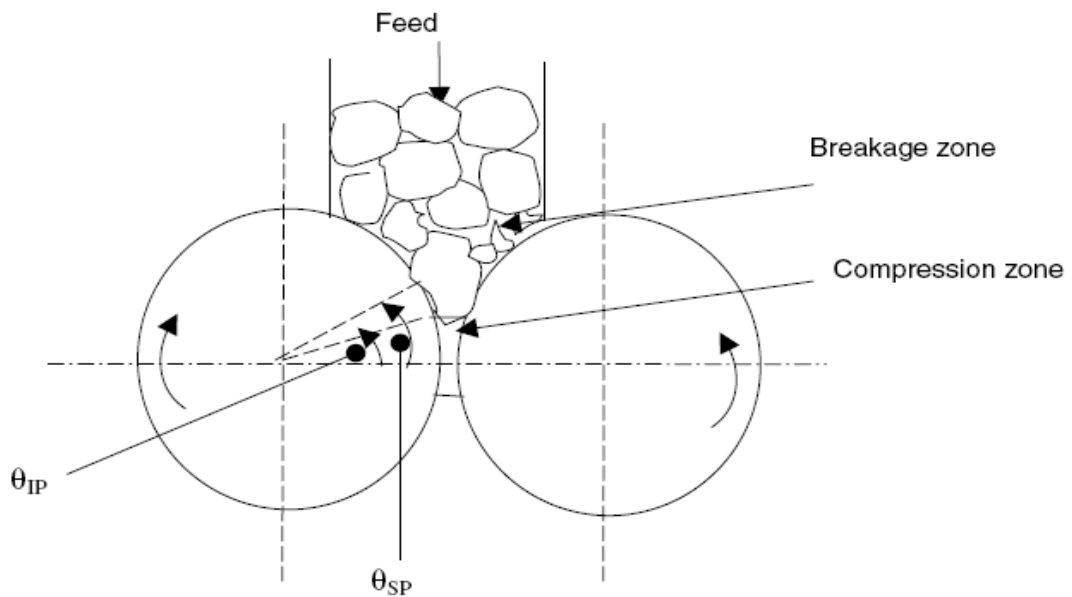
압축영역에 들어가기 전에 보다 큰 입자들은 부셔진다. 광석의 벌크비중이 압축되는 영역에서 케이크의 벌크비중이 감소된다. 이러한 개념은 [그림4]로 나타낼 수 있다. 단일입자의 파단을 포함한 2 상황에 대한 Nip Angle은 다음과 같이 유도 되었다.

$$\theta_{SP} = \arccos \left[1 - \left(\frac{d_{\max}}{L_T} - 1 \right) \frac{L_T}{1000D} \right] \text{-----(식12)}$$

그리고 상호입자간 파단에 대한 Nip Angle θ_{IP} 는 다음과 같다.

$$\theta_{IP} = \arccos \left[1 - \left(\frac{\rho_C}{\rho_{B(F)}} - 1 \right) \frac{L_T}{1000D} \right] \text{-----(식13)}$$

- 여기에서 d_{MAX} : 최대입자의 크기(mm)
- L_T : 케이크의 두께(mm)
- D : 롤의 직경(m)
- ρ_C : 다져진 케이크의 비중(ton/m³)
- $\rho_{B(F)}$: 공급되는 재료의 벌크비중(ton/m³)



[그림4 : HPGR의 분쇄 메커니즘]

5.3 롤 간격의 평가

롤 간격은 입자크기의 분포를 정의하므로 HPGR의 간격조정을 예상하는데 유용하다.

모델은 롤 직경 D 에 대한 작업-롤간격 L_G 의 비율로 무차원의 작업-롤간격을 표현하였다. 이 비율은 비조분쇄력의 로그에 선형적으로 비례하고 (식14)로 표현될 수 있다.

$$\frac{L_G}{D} = \left[k_1 v_P^2 \left(\frac{2}{gD} \right) + k_2 v_P \sqrt{\frac{2}{gD}} + k_3 \right] (1 + k_4 \log F_S) \text{-----(식14)}$$

- 여기서 L_G : 작업-롤간격
- v_p : 롤의 원주속도(m/sec.)
- g : 중력가속도(=9.8m/sec.²)
- D : 롤의 직경(m)
- F_s : 比조분쇄력(N/mm²)
- $k_1 \sim k_4$: 재료상수

(식14)는 $\log(F_s)$ 가 증가하면 L_G/D 의 비가 감소한다는 것을 보여주고 있다. 작업-롤간격은 광석조각의 최대크기와 수분함량, 롤의 표면특성에 영향을 받을 것이다. (식14)를 평가하기 위해서, 재료상수들은 실험실 작업으로 정의 된다.

5.4 롤 속도

롤 속도의 선택은 생산성에 영향을 준다. 하지만, 속도가 높고 폭이 좁은 롤의 선택이 폭을 따라 간격제어의 문제점들이 일어날 수 있는 저속 광폭롤을 운전하는 것에 비해 쉽다. 지나친 속도로 인해 분쇄영역에서 입자들이 롤에서 튀어나가서 생산성이 감소되는 경향을 피해야 한다.

롤 속도는 롤의 직경과 관련된다. 클라이모우스키는 서로 다른 롤의 직경들에 대한 원주속도를 다음과 같이 제시하였다.

1. 롤 직경이 2m보다 작은 경우 : 원주속도 $v_p \leq 1.35\sqrt{D}$
2. 롤 직경이 2m보다 클 경우 : 원주속도 $v_p \leq D$

5.5 공급재료 크기와 목표입자크기

공급재료입자의 크기와 작업-롤간격은 너무 크지도 않고 너무 작지도 않은 조각들로 받아드려질 만큼 적합해야 한다. 광석의 경도와 롤 표면의 종류 또한 공급재료입자의 크기에 영향을 받는다. 공급재료 입자의 크기/작업-롤간격의 비율에 따라 추천되는 공급재료입자의 크기가 있다. 이 비율을 γ 로 표현하는 클라이모우스키의 추천들이 아래 [표1]에 요약되어 있다.

[표1 : 광석종류에 따른 HPGR에 공급하는 재료입자의 크기]

광석의 종류	압축강도	공급입자크기/작업-롤간격
연질광물	< 100MPa	Up to 1.5
경질광석	> 250MPa	≤ 1

표면경화 처리를 한 평활표면 롤의 경우에는 공급재료 입자의 크기를 작업-롤간격의 3배까지 올릴 수 있다. 스톨드 표면의 롤인 경우에는 작업-롤간격보다 작거나 같게 해야한다.

브라질의 일부 광산들에서는 HPGR에 공급하는 재료입자의 크기가 1mm망을 90%통과하는 수준이지만, 16 ~ 50mm의 보다 큰 입자들의 사용에 대해서 펠렛트에 의해 보고되고 있다. 호주의 아길 다이아몬드 광산에서는 750mm나 되는 덩어리와 함께 75mm망을 80%통과하는 크기의 재료입자들이 충전되고 있다고 맥스톤은 보고하고 있다.

목표입자크기

HPGR에서의 목표입자크기는 상당되는 볼 혹은 로드 밀보다 더 작은입자들을 얻을 수 있다.

예를 들면, 동일한 에너지(4kWh/ton)를 입력했을 때 HPGR과 볼 그리고 로드밀로부터 얻은 입자크기들을 그래프로 그려놓은 모오스키의 실험결과들이 [그림5]에 주어져 있다. 여기에서 100미크론 이하의 입자크기들은 로드밀에 비해서 HPGR이 훨씬 많이 생산된다는 것을 볼 수 있다. 다른 작업자들도 비슷한 결과들을 관찰 해었다.

6. HPGR의 생산능력

HPGR의 생산능력은 2개의 롤간격 사이를 통과하는 재료의 체적으로 계산될 수 있다. 그래서 그것은 롤의 폭, 작업-롤 간격과 롤 간격을 통과하는 재료의 속도에 따라 결정된다. 다음과 같이 롤 간격을 통과하는 질량유동율이 생산능력이 될 것이다.

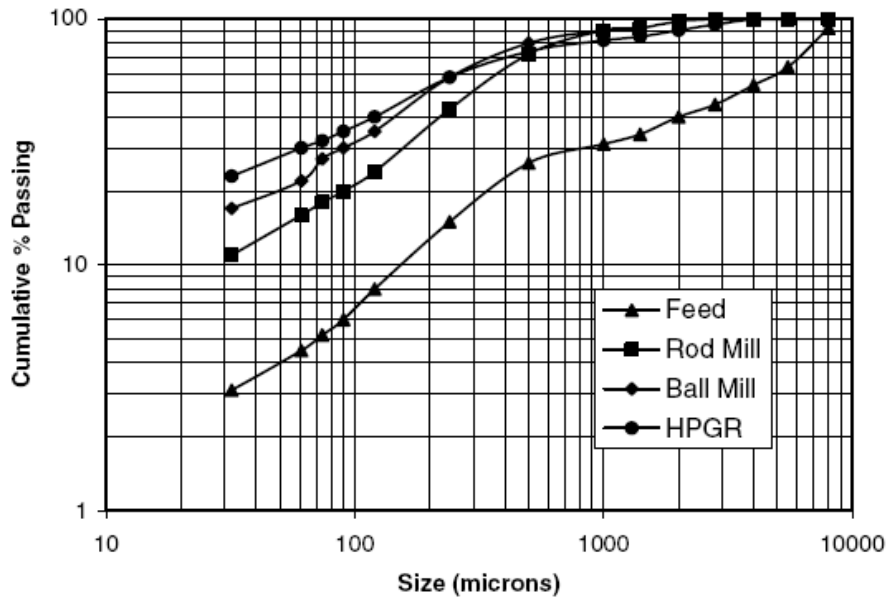
Q = 롤의 폭 x 작업-롤 간격 x 재료의 롤간격 통과속도 x 롤 간격을 통과하는 재료의 비중 또는

$$Q = 3.6WL_G v \rho_s \quad ton / hr. \quad \text{-----}(식15)$$

여기에서 W : 롤의 폭(m),

L_G : 작업-롤 간격(mm)

v : 롤 간격을 통과하는 재료의 속도(m/sec.)



[그림5 : HPGR과 볼, 로드밀로부터 얻은 목표입자사이즈들의 분포]

생산능력을 설명하는 보편적인 방법은 비처리율의 항목으로 표현하는 것이다.

시바흐와 노블록 그리고 후일 모델이 다음과 같이 무차원 형식으로 표현하였다.

$$Q = Q_s DW v_p \rho_s \quad ton / hr. \quad \text{-----}(식16)$$

- 여기에서 Q_s : 比처리율
- D : 룰의 직경(m)
- W : 룰의 폭(m)
- ρ_s : 룰 간격을 통과하는 재료의 비중

오토는 HPGR의 생산능력을 다음과 같이 룰 간격과 광물의 운전밀도의 항목으로 표현하였다.

$$Q = WL_G v_P \rho_{OP} \quad \text{ton / hr.} \quad \text{-----}(식17)$$

여기에서 ρ_{OP} : 운전밀도, ton/m^3 , (배출케이크 밀도)

모델의 실험실에서의 경험은 比처리량이 선형함수의 형태로 比조분쇄력, F_s 에 관련된 것을 보여준다.

$$Q_s = k(1 + C \log F_s) \quad \text{-----}(식18)$$

여기에서 F_s : 比조분쇄력, k : 룰 속도에 따른 계수, C : 재료상수

룰 속도에 대한 계수 k 는 경험적으로 평가되었으며 다음과 같은 다항식에 따라 룰 속도함수 v_p 이다.

$$k = C_1 v_p^2 + C_2 v_p + C_3 \quad \text{-----}(식19)$$

여기에서 $C_1 \sim C_3$: 재료상수이며 (식19)는 실험적으로 유도된 것이다.

比처리율은 (식18)과 (식19)를 조합하여 다음과 같은 식으로 컴퓨터로 처리될 수 있다.

$$Q_s = (1 + C \log F_s)(C_1 v_p^2 + C_2 v_p + C_3) \quad \text{-----}(식20)$$

이 같은 관계식은 완벽한 실험들을 수행하는 것이 필요하다.

0.25 ~ 1.0mm와 1.6 ~ 6.3mm의 입자크기를 갖는 석회석을 사용하여 HPGR 실험실 모델(직경: 200mm, 폭 : 100mm)로 실험을 수행한 룰주흔과 스톨너트는 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 밀링력이 1 ~ 6 N/m^2 사이를 변화될 때 처리량에 작은 영향이 관찰되었다.
- 2) 比파단력이 일정할 때, 속도인자는 파단효과가 낮게 작용한다.
- 3) 코르게이트 표면을 갖는 룰은 큰 처리량을 갖는다.

7. HPGR의 소비동력

일반적인 규칙으로 모터의 동력은 생산능력과 입력에너지를 나타낸다. HPGR에 경우에서, 우리는 입력에너지가 比입력에너지로 정의되는 것은 본 적이 있다. 전통적인 작업에서 본드의 작업지수는 분쇄에 요구되는 순수한 比에너지의 측정값이 통상적으로 받아드려졌다. 클라이모우스키와 리우는 본드의 작업지수는 반복적인 충격력과 조분쇄력이 입자크기감소에 확실하게 작용하는 텀블링 밀을 사용하여 정의한 것과는

달리 HPGR의 경우에는 잘 적용되지 않는 것을 발견하였다. 게다가, 텀블링 밑에서는 입자들이 입자층 위로 폭포같이 떨어지고 충격은 완충되어 이렇듯 입자크기감소의 비에너지에 영향을 준다. 클라이모우스키 등은 본드 작업지수가 해당 광석에 대한 상수가 정확하지 않았다는 것을 보여줬다. 오토는 구리광산의 경우에 13.9kWh/t에서 15.6kWh/t로 증가된 그리고 금광에서는 9.4kWh/t에서 15.6kWh/t으로 증가한 작업지수 W_i 를 보고 하였다. 비슷한 관찰들은 팻젤트 등에 의해서도 이뤄졌으며 클라이모우스키 등은 HPGR의 경우에는 본드의 작업지수보다 리팅거의 법칙이 보다 적합하다고 주장하기도 한다.

동력을 정의하기 위해 모델 등은 물리학의 기본법칙들을 적용하였다. 그들은 롤의 각속도가 롤라 축에 주어지는 토크에 의해 초기화 된다는 것을 고찰하였다. 동력학의 기본원리에 따르면 롤 축에 요구되는 동력은 다음과 같이 될 것이다.

$$P = \frac{2\text{토크} \times \text{각속도}}{\text{롤의 직경}} = \frac{T\omega}{D} \quad \text{-----}(식21)$$

여기에서 T : 토크(N.m), ω : 각속도(rad/s)

토크는 재료들 사이에서 수평력 F의 각변위 β 에 의해 다음과 같이 생성된다.

$$T = \beta FD \quad \text{-----}(식22)$$

$$D = \frac{T}{F\beta} \quad \text{-----}(식23)$$

유동롤에 의해 작용하는 조분쇄력의 수평요소가 F이며 이것이 2개의 롤사이에 있는 재료에 전달된다는 것을 주지해야 한다. F는 롤직경과 롤폭에 배수인 비조분쇄력과 같다. (식21)에서 (식23)으로 직경 D의 값을 대체하면 다음과 같다.

$$P = \frac{2T\omega F\beta}{T} = 2\omega F\beta \quad \text{-----}(식24)$$

각속도 ω 는 비조분쇄력에 영향을 받을 것이다. 모델등은 각변위 β 가 다음과 같은 관계식에 의해 비조분쇄력과 관련있다는 것을 실험적으로 발견하였다.

$$\beta = (av_p^2 + bv_p + c)(1 + kF_s) \quad \text{-----}(식25)$$

여기에서 a, b, c, k들은 상수

(식24)에서 β 값을 (식25)로 대체하면 고압롤을 작동시키는데 필요한 동력은 다음과 같이 될 것이다.

$$P = 2\omega F (av_p^2 + bv_p + c)(1 + kF_s) \quad \text{-----}(식26)$$

모델등에 의한 계량분석은 이 식의 타당성을 입증하였다.