

볼밀의 내벽 보호용 현무암 라이너의 최적형상에 관한 연구

왕지석* · 김종도† · 윤희중**

(원고접수일 : 2007년 7월 10일, 심사완료일 : 2007년 9월 21일)

A Study on the Optimum Shape of Basalt Liner for Inner Wall Protection of Ball Mill

Jee-Seok Wang* · Jong-Do Kim† · Hee-Jong Yoon**

Abstract : For protection of the cylinder wall of the ball mill for grinding raw ore, the inner side of the cylinder is covered with rubber liner. The rubber is easily worn down because the rubber relatively soft compared with raw ore. So, the rubber liner in the ball mill cylinder must be replaced almost every year and the cost for replacing rubber liner formidable.

In this paper, for reducing or excluding the cost of replacing rubber liner, the basalt liner is designed. The basalt materials are generally harder than raw ore and the basalt liner in the ball mill does not wear down and so it can be used almost permanently.

The concave surfaces are made on the liner of the ball mill and the liner in the cylinder wall plays also the role of raising the steel balls mixed in the raw ore. The section profiles of the concave surface have an important effect on the performance of the ball mill. The deep concave grooves raise the steel balls to high levels and give the large potential energy to the steel balls impacting to the raw ore. But if the concave grooves are too deep, the steel balls raised too high by the concave grooves fly along the parabolic path and reach to the other side of cylinder wall and so the steel balls do not play the roles of grinding the raw ore.

The forces acting to a steel ball in a concave groove of the cylinder liner are also analyzed in this paper. The formulas calculating the height and the impact point of the steel ball are introduced and presented. Based to these formulas, the optimum section profiles of the basalt liner are presented.

Key words : Basalt liner(현무암 라이너), Impact energy(충격 에너지), Section profile(단면 형상), Dry type ball mill(건식 볼밀), Take-off angle(이탈 각도), Impact point(충격점)

* 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

† 한국해양대학교

** 동도바잘트산업(주)

1. 서 론

광석분쇄용 볼밀(Ball mill)은 직경 약 5.2미터의 원통 안에 광석과 물 그리고 직경 35mm 내외의 강구로 된 볼을 혼합하여 넣고 이 원통을 회전시켜 광석을 분쇄한다. 이 때에 원통내부에 요철(凹凸)을 만들어 그 오목부에 볼을 가두어 이것들을 끌어 올려서 떨어뜨려 광석에 충돌시킴으로써 광석을 분쇄한다^[1].

Fig. 1은 이 볼밀의 작동원리를 나타낸다^[2~3]. 원통 내에 직경의 3분의 1 정도 되도록 광석과 볼을 물과 혼합하여 채우고 원통을 시계방향으로 회전시키면 광석 상호간의 충돌이 발생하기도 하고 원통의 내벽에 설치되어 있는 요철 라이너(liner)에 의하여 볼이 끌어 올려져서 떨어지므로 광석에 충돌하여 광석이 분쇄된다^[4].

볼밀의 원통 내부에 광석 원자재로부터 원통을 보호하고 광석에 마찰과 충격을 주고 볼을 끌어 올릴 목적으로 설치하는 라이너는 고무나 합성수지로 제작하여 사용하였으나 이들이 광석에 비하여 상대적으로 연하기 때문에 마모가 심하게 일어나서 수명이 짧은 문제가 있다^[5]. 이것을 경도가 광석과 비슷한 현무암 라이너(Basalt liner)로 교체하면 수명이 반영구적으로 될 것이 예상되어 교체에 따르는 경비의 절감 효과가 있을 것이다^[6]. 본 연구에서는 이 라이너를 현무암으로 제작하였을 때 이의 횡단면 요철의 최적 형상을 제시하고자 한다.

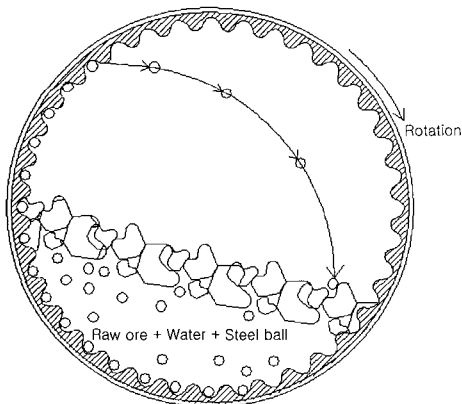


Fig. 1 Ball mill for ore grinding

라이너의 횡단면 형상은 볼밀의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 라이너 횡단면의 형상이 너무 밋밋하면 볼이 높은 곳까지 끌려 올려지지 못하고 조금 끌려 올라가다가 떨어지기 때문에 위치에너지가 충분치 못하여 광석에 충분한 충격을 주지 못하고 따라서 광석의 분쇄가 잘 안 되며 분쇄성능이 현저히 떨어질 것이다. 그에 반하여 횡단면의 형상에 충분한 요철을 주면 볼이 충분히 높은 곳까지 끌려 올라가 큰 위치에너지를 확보하여 떨어지면서 밑에 있는 광석에 부딪칠 때에 광석에 큰 충격을 주어 광석을 잘 분쇄하기는 할 것이나, 요철이 너무 심하여 볼이 너무 높은 곳까지 끌려 올라가면 볼이 포물선 궤적을 그리며 떨어질 때에 광석에 부딪치지 않고 맞은 편 원통 벽에 부딪치게 된다. 이렇게 되면 볼밀의 본래 목적과는 달리 볼이 광석을 분쇄하는 것이 아니라 볼이 원통을 분쇄하는 일이 발생할 수도 있다^[7].

가장 이상적인 라이너 횡단면의 형상은 끌려 올라가는 볼이 되도록 높은 곳까지 도달하다 낙하하여 광석에 부딪치는 정도가 되도록 하는 요철을 가져야 할 것이다. 이런 정도의 요철을 가지려면 횡단면의 형상을 어떻게 하는 것이 가장 이상적인가를 연구하여야 하는데, 이를 위해서는 심도 있는 역학적인 해석을 수행하여야 하고 경우에 따라서는 실험도 병행하여야 할 것이다. 물과 광석 분말과 볼이 뒤섞여 있는 재료가 현무암 표면에서의 마찰력이 얼마인지도 파악하여야 할 것이고, 볼밀이 회전하면서 원통이 광석 덩어리에 부딪치기도 하고 회전체를 받치고 있는 베어링의 Miss-alignment, 회전체의 불평형(unbalance) 등에 의한 진동이 어느 정도인지도 파악되어야 할 것이다^[8]. 이러한 모든 것이 파악되어야 가장 이상적인 현무암 라이너의 횡단면 형상이 나올 것이나 이러한 데이터를 현실적으로 구하기 어려운 상태에서는 여러 가지 상황을 고려하여 유추하는 것은 가능할 것이다.

여기서는 볼밀의 원통에 붙여져 있는 라이너가 볼을 끌어 올려 떨어뜨릴 때에 중력과 원심력 및 마찰력으로 이루어진 힘들의 균형이 어떻게 유지되는가를 분석하여 볼이 어느 정도까지 끌어올려지며 볼이 떨어지는 지점이 어디인가를 계산하는 공

식을 작성하고, 이 공식으로부터 여러 가지 경우의 기울기를 가지는 현무암 횡단면 형상으로 볼이 끌려 올라가는 높이와 이 높이로부터 떨어지는 볼이 충돌하는 지점을 계산하였다. 또한 물과 광석가루 및 볼이 뒤섞인 재료가 현무암 표면과 가지는 마찰력을 추정하기 위하여 광석가루 대신 모래를 사용하여 모래, 물 및 볼을 뒤섞어 현무암 판에 얹어 놓고 그 판을 기울이는 방법으로 마찰계수를 측정하였다. 그리고 이들을 토대로 현무암 라이너의 횡단면 형상을 설계하여 제시하였다.

2. 실험방법

2.1 이탈 각도 (Take-off angle)

원통이 회전함에 따라 볼이 라이너의 오목부에 의하여 끌려 올라가서 어느 높이가 되면 라이너의 오목부로부터 볼이 이탈하여 그때부터 탄도 곡선 궤적을 그리며 운동을 시작한다⁽⁵⁾. 볼이 라이너로부터 이탈할 때의 위치를 알기 위하여 힘들의 균형을 분석하면 다음과 같다.

Fig. 2는 원통(cylinder)의 횡단면 모형을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 원통의 횡단면에서 반경과 각도 α 를 가지는 판을 설치하고 이것과 원통 벽이 이루는 둔각 사이에 볼이 있다고 하자. 지금 원통이 회전하여 반경이 수평과 각도 θ 를 이루고 있는 시점에서 볼에 작용하는

힘들을 생각하여 보자. 그림에 표시한 각도들을 참조하여 볼에 작용하는 힘들을 분석하려고 한다. 우선 볼의 질량을 m 이라 하면 이 볼에 중력 mg 가 연직 방향으로 작용하는데 이 힘이 판에 평행한 방향의 성분은 $mg\cos(\pi/2 - \alpha - \theta)$ 이고, 이 힘이 판과 수직한 방향의 성분은 $mg\sin(\pi/2 - \alpha - \theta)$ 가 된다. 여기서 g 는 중력 가속도이다.

다음에 원통이 회전하므로 이것과 같이 회전하는 볼에 원심력이 작용한다. 원통의 반경을 r 이라 하고 원통의 회전 각속도를 ω 라 하면 볼의 원심력은 $m r \omega^2$ 인데 이 힘의 방향은 원통의 반경방향이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 힘이 판과 평행한 방향의 성분은 $m r \omega^2 \cos \alpha$ 이고 판과 수직한 방향의 성분은 $m r \omega^2 \sin \alpha$ 이다.

그 외에 볼이 떨어지기 직전에는 마찰력 F 가 볼에 작용하는데 이 마찰력의 크기는 볼이 판에 수직한 방향으로 작용하는 힘에 마찰계수 μ 를 곱함으로써 얻어진다. 따라서 마찰력 F 는 다음과 같이 된다.

$$F = \mu [mg\sin(\pi/2 - \alpha - \theta) + m r \omega^2 \sin \alpha] \quad (1)$$

한편 판에 평행한 방향의 힘들의 합이 영이 되는 시점에 볼이 원통으로부터 이탈하여 탄도 운동을 시작한다. 즉,

$$m r \omega^2 \cos \alpha + \mu [mg\sin(\pi/2 - \alpha - \theta) + m r \omega^2 \sin \alpha] - mg\cos(\pi/2 - \alpha - \theta) = 0 \quad (2)$$

가 만족되는 시점에서 볼이 원통으로부터 이탈하여 탄도 운동을 시작한다. 이 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\sin(\alpha + \theta) - \mu \cos(\alpha + \theta) = \frac{r \omega^2}{g} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (3)$$

이 식을 만족하는 각도 θ 에서 볼이 원통으로부터 이탈하여 탄도운동을 시작하는데 이 식을 만족하는 θ 가 없을 수도 있다. 이 경우는 원심력이 커서 볼이 원통으로부터 이탈할 수 없는 경우이다.

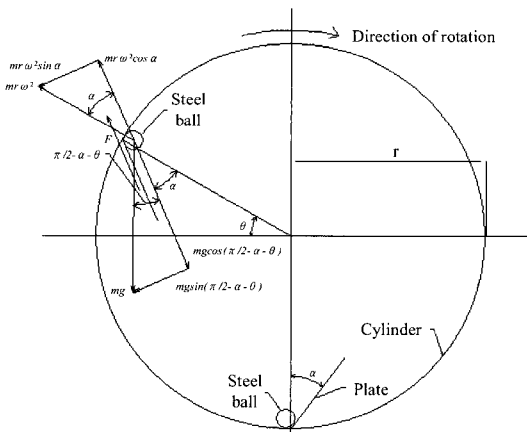


Fig. 2 The forces acting on a steel ball

이 경우는 고려의 대상이 아니므로 이 식을 만족하는 θ 가 있는 경우만 생각한다. 이 식을 만족하는 각도를 이탈 각도(take-off angle)라고 하고 θ_1 이라고 하자. 이 각도를 구하기 위하여 식 (3)을 정리하면 다음과 같이 $\cos(\alpha + \theta)$ 에 관한 2차방정식을 얻을 수 있다.

$$(1 + \mu^2)\cos^2(\alpha + \theta) + 2\mu C_c \cos(\alpha + \theta) + C_c^2 - 1 = 0 \quad (4)$$

여기서 $C_c = \frac{r\omega^2}{g}(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)$ 이다. 이 식을 풀면

$$\cos(\alpha + \theta) = \frac{\sqrt{1 + \mu^2 - C_c^2} - \mu C_c}{1 + \mu^2} \quad (5)$$

가 되는데 $1 + \mu^2 < C_c^2$ 이 되면 식 (5)는 허근으로서 이 경우는 원심력이 커서 볼이 떨어지지 않는다. 볼이 떨어지려면 $1 + \mu^2 > C_c^2$ 이어야 하고 이 경우 이탈 각도는 다음과 같이 된다.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{\sqrt{1 + \mu^2 - C_c^2} - \mu C_c}{1 + \mu^2} - \alpha \quad (6)$$

2.2 볼의 최대 높이와 충격점

이탈 각도(take-off angle) θ_1 에서 볼은 원통의 오목부로부터 이탈하여 탄도 운동을 시작하는 데,

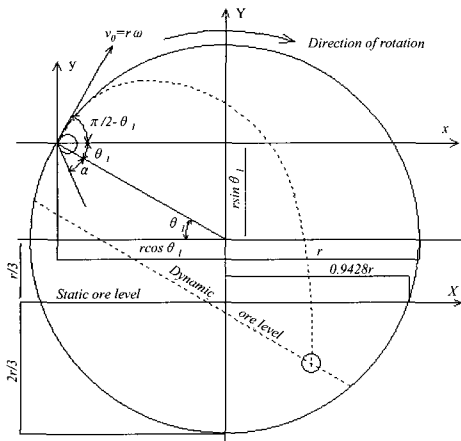


Fig. 3 Impact point of a steel ball

볼의 운동궤적은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 볼이 원통으로부터 이탈하여 탄도 운동을 시작하는 점을 원점으로 하는 국소 좌표계(local coordinates system) $x-y$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$y = x \cot \theta_1 - \frac{gx^2}{2r^2\omega^2 \sin^2 \theta_1} \quad (7)$$

볼의 운동궤적을 나타내는 이 방정식으로부터 볼이 올라가는 최대 높이를 구할 수 있는데 이 높이가 높으면 높을수록 볼이 광석에 부딪혔을 때 큰 에너지로 광석을 파괴할 수 있고 따라서 불밀의 성능이 좋다고 할 수 있다. 그러나 이 높이가 너무 높으면 볼이 광석에 부딪치는 것이 아니고 맞은편 원통에 부딪치게 되므로 볼이 광석을 분쇄하는데 아무런 역할도 못하게 된다. 따라서 볼이 낙하하여 광석에 부딪치는 충격점을 알 필요가 있다.

식 (7)을 x 에 관하여 미분하고 이것을 영으로 놓음으로서 볼이 최대로 올라갈 때의 x 좌표를 구할 수 있고 이것을 식 (7)에 대입하면 볼의 최대 높이 y_{max} 를 구할 수 있다.

$$y_{max} = \frac{r^2\omega^2}{2g} \cos^2 \theta_1 \quad (8)$$

볼의 충격점을 구하려면 식 (7)에서

$y = -r \sin \theta_1 - r/3$ 을 대입하고 이를 만족하는 x 를 구하면 된다. 이 점의 x 좌표를 x_i 라 하면 이는 다음과 같이 된다.

$$x_i = \frac{r\omega \sin \theta_1}{g} [r\omega \cos \theta_1 + \sqrt{r^2\omega^2 \cos^2 \theta_1 + 2rg(1/3 + \sin \theta_1)}] \quad (9)$$

이 충격점을 국소 좌표계 $x-y$ 로 나타내면 볼이 광석에 부딪치는지 맞은편 원통에 부딪치는지 알기 어렵다. 그러므로 Fig. 3에 보인 바와 같이 원통의 세로 중심선을 Y축으로 하고, 원통에 3분의 1쯤 채워져 있는 광석의 수준을 X축으로 하는 중앙좌표계(global coordinates system)를 써서 볼의 최고 높이 Y_{max} 와 충격점 X_i 를 나타내면 다음과 같이 된다.

$$Y_{\max} = \frac{r^2\omega^2}{2g} \cos^2\theta_1 + r(1/3 + \sin\theta_1) \tag{10}$$

$$X_i = \frac{r\omega \sin\theta_1}{g} [r\omega \cos\theta_1 + \sqrt{r^2\omega^2 \cos^2\theta_1 + 2rg(1/3 + \sin\theta_1)}] - r\cos\theta_1$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이탈 각도와 최대높이 및 충격점에 관한 고찰

2.1절에서 논의한 볼의 이탈 각도 θ_1 와 2.2절에서 논의한 바와 같이 볼이 탄도 운동을 할 때의 최대 높이와 낙하하여 광석에 부딪치는 충격점을 계산 하여 그림으로 나타내었다. 이 계산은 원통 직경 5.52m의 볼밀이 12.6rpm으로 회전할 때의 이탈 각도와 최대 높이 및 충격점이 판 경사각 α 와 볼과 판 사이의 마찰계수 μ 의 변화에 어떻게 달라지는가를 알아보기 위하여 수행하였다. 이 계산 결과를 근거로 하여 현무암 라이너 횡단면의 최적 형상을 도출해 내게 될 것이다.

Fig. 4는 가로축을 판의 경사각 α 로 하고 볼과 판 사이의 마찰계수 μ 를 파라미터로 하여 이탈각도 θ_1 을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 판의 경사각 α 가 커질수록 이탈각도 θ_1 은 작아지는데 이의 변화는 그리 크지 않고 판과 볼 사이의 마찰계수 μ 에 더 큰 영향을 받는다. 즉 마찰 계수가 커지면 이탈각도도 커진다. 이탈 각도가 커진다는 것은 볼을 높은 곳까지 끌어오려서 낙하시키므로 볼의 위치에너지가 커진다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 이탈각도 θ_1 에서 라이너의 오목부로부터 볼이 이탈하여 탄도 곡선을 그리면서 비행할 때에 볼이 올라가는 최대 높이를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 판의 경사각 α 가 작을수록, 판과 볼 사이의 마찰계수 μ 가 클수록 높이 올라가고 따라서 볼이 광석에 부딪칠 때 큰 충격을 줄 수가 있으나 너무 높이 올라가면 볼이 광석에 부딪치는 것이 아니라 맞은편 원통에 부딪쳐서 원통을 파손할 우려가 있으므로 충격점을 파악할 필요가 있다.

Fig. 6은 볼의 충격점의 위치를 나타낸다. 여기서도 판의 경사각 α 가 작을수록, 판과 볼 사이의 마찰계수 μ 가 클수록 멀리 떨어진다 것을 알 수 있다. 그런데 너무 멀리 떨어지면 볼이 맞은편 원통에 부딪치므로 이 충격점이 어느 한계 이내에 들도록 하여야 한다. 광석을 원통 직경의 3분의 1쯤 채운다고 볼 때, 이 한계는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 $0.9248r$ (여기서 r 은 원통의 반경)인데 이 그림에서 보는 바와 같이 이것은 정적인 광석 수준이고 원통이 돌아가면 광석의 수준이 점선으로 표시되는 바와 같이 기울어진다. 이 기울어지는 정도는 광석의 종류와 덩어리의 크기에 따라 다를 것인데, 이런 점을 감안하여 충격점은 대략 $0.6r$ 이내에 들어와야 할 것이다. 이 거리가 충격점의 한계인데, 이에어서는 반경이 $r=2.6m$ 이므로 $1.56m$ 가 된다. 즉, 충격점이 $1.56m$ 를 넘으면 볼이 광석에 부딪치는 것이 아니라 맞은편 원통에 부딪치므로 광석을 분쇄하는데 전혀 도움을 주지 못한다. 이럴 때는 판의 경사각 α 를 증가시켜서 충격점을 낮추어야 한다. 예를 들면 마찰 계수가 $\mu = 1.0$ 일 때에 판의 경사각 α 는 8.4° 보다 커야하는데 너무 크면 볼이 올라

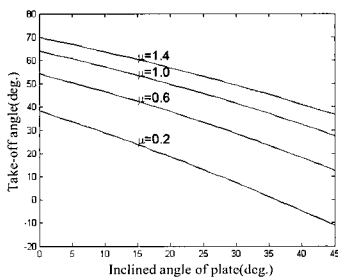


Fig. 4 Take-off angle

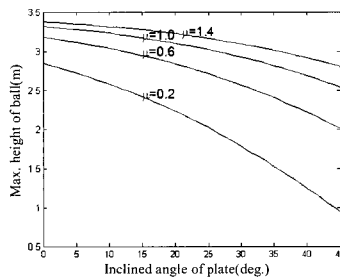


Fig. 5 Maximum height of ball

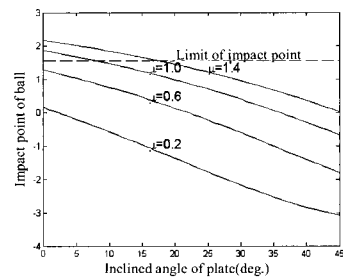


Fig. 6 Impact point of ball

가는 최대 높이가 작아지므로 유의해야 한다.

3.2 마찰계수 측정

전 절의 그림에서 보는 바와 같이 불과 판 사이의 마찰계수는 불의 이탈 각도 θ_1 과 탄도 곡선의 궤적 및 충격점에 지대한 영향을 미친다. 그러므로 이의 마찰계수를 비교적 정확하게 알아야 현무암 라이너의 횡단면 형상을 설계할 수 있을 것이다. 불밀에서 현무암 라이너가 사용되는 환경은 물과 광석 덩어리 및 광석 가루가 불과 섞여서 현무암 위에서 마찰될 것이 예상되므로, 광석 가루를 물에 개고 여기에 불을 섞어서 현무암 판 위에 얹어 놓고 마찰 계수를 측정 시험하여야 할 것이나 광석 가루를 구하기 어려우므로 그 대신 모래를 물에 개고 거기에 불을 섞어서 현무암 판위에 얹어서 마찰 계수 측정시험을 실시하였다. 현무암 판은 시험하기 전에 물에 충분한 시간(약 2시간)동안 담가두어서 물이 배어들도록 하여 실제 사용될 환경과 되도록 비슷하게 하였다. 마찰계수 측정시험은 경사시험법으로 수행하였다. 즉, 현무암 판을 평판위에 수평으로 올려놓고 그 위에 물에 개 모래와 불을 섞어서 펼쳐 얹은 다음 Basalt판을 서서히 기울인다. 기울이는 각도를 점차로 증가시켜 가면 어느 순간에 불이 아래로 떨어진다. 그 때의 각도를 β 라 하면 마찰계수 μ 는 다음식과 같이 된다.

$$\mu = \tan \beta \tag{5}$$

Photo 1은 물에 개 모래와 불을 현무암 판 위에 얹어서 경사시험법으로 마찰계수를 측정하는 모습을 보인다. 측정결과는 $\mu = 1.25 \sim 1.45$ 정도

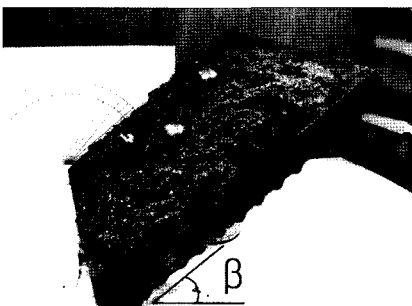


Photo 1 Friction factor test

로 비교적 크게 나왔다. 그러나 실제의 사용 환경에서는 광석 덩어리가 원통에 부딪치기도 하고 배어링의 Miss-alignment, 원통의 불평형, 구동회전력의 불균형 등에 기인하는 진동이 예상되므로 이 보다는 작을 것이다.

3.3 현무암 라이너의 최적 횡단면 형상

원통의 3분의 1쯤 채워진 광석 수준은 원통이 회전하면 Fig. 3에서 점선으로 표시된 바와 같이 이 수준이 기울어지게 된다. 따라서 불의 착지점이 너무 먼 경우에는 광석에 부딪치지 않고 원통에 부딪치게 되어 현무암 라이너를 파손시키는 원인만 제공하고 광석을 분쇄하는 데는 전혀 쓸모없는 충격만 유발하게 된다. 이런 점을 감안하면 불의 착지점이 너무 멀지 않아야 한다. 회전할 때의 광석수준의 기울기는 회전속도와 불밀의 직경 등에 관계하는데 논문에서 취급한 불밀의 경우 그 기울기가 33°이었으므로 한계치인 X_{bnd} 의 60% 이내에 들어야 한다. 즉, $X_{bnd} = 2.6m$ 이므로 충격점은 1.56m이내에 들어야 한다.

원통의 진동을 감안하여 마찰계수를 $\mu = 0.9$ 로 추정한다면 3.1절에서 계산한 결과로부터 $\alpha = 12^\circ$ 가 적당하다. 이 때에 불의 이탈 각도는 $\theta_1 = 53.57^\circ$ 이고 최대 높이 (X축으로부터의 높이)는 $Y_{max} = 3.17m$ 가 되며 착지점은 $X_1 = 1.25m$ 가 된다. 물론 실제의 마찰계수는 원통의 진동정도에 따라 확연히 다를 것이며 마찰계수가 커지면 착지점이 증가하고 마찰계수가 작아지면 착지점이 감소한다. 이런 점들을 고려하여 현무암 라이너의 최적 단면 형상을 제시하면 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

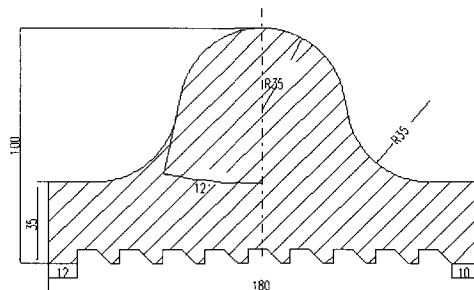


Fig. 7 Optimum section profile of basalt liner

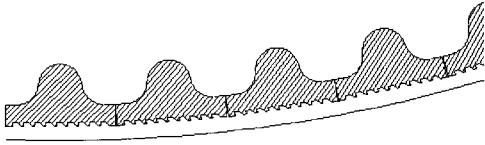


Fig. 8 Basalt liner in the ball mill cylinder

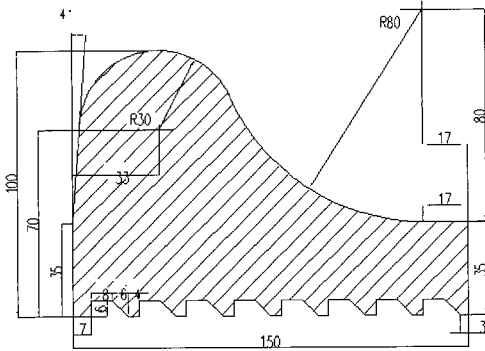


Fig. 9 Optimum section profile of basalt liner for dry type ball mill

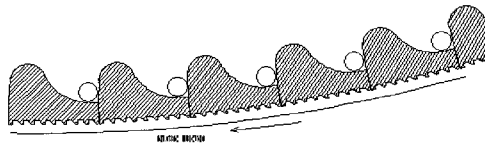


Fig. 10 Basalt liner in the cylinder of dry type ball mill

이상의 형상은 통상 사용하는 방식인 습식으로 물과 광석을 혼합하여 볼의 자유낙하 충격력으로 광석을 분쇄하는 경우의 최적 단면 형상이나 물을 배제하고 광석만 원통 안에 도입하여 볼의 자유낙하 충격력으로 광석을 분쇄하는 건식도 고려해볼 수 있다. 건식으로 하면 우선 무게가 가벼워지므로 베어링 부하를 줄일 수 있고, 광석이 잘 분쇄되고, 습기로 인한 부식을 방지할 수 있으며 더욱이 광석 분말이 건조하므로 이의 용융시 에너지의 절감을 기대할 수 있는 등 여러 가지 장점이 있을 것이 예상된다.

볼밀을 건식으로 하면 볼과 광석가루의 혼합물이 현무암 표면에서 가지는 마찰 계수가 $\mu = 0.4$ 내외로 현저히 감소하고 그러므로 볼을 충분히 높은 곳까지 끌어 올릴 수 없다는 이유 때문에 건식을 회피한다. 그러나 볼밀의 원통 회전 방향을 한 방

향으로만 유지한다면 건식에 쓸 수 있는 현무암 라이너도 고안할 수 있는데 4절에서 제시하는 공식의 계산 결과들을 이용하여 최적 형상을 나타내면 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

4. 결 론

광석 분쇄용 볼밀에서 고무로 된 라이너의 마모에 의한 교체비용을 절감하고 볼밀의 성능을 향상시킬 목적으로 현무암 라이너를 고안하기 위하여 볼에 작용하는 힘들을 분석하고 현무암 판과 모래에 섞인 볼과의 마찰 계수를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 볼밀에서 볼의 이탈 각도(take-off angle)는 다음식과 같이 된다.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{\sqrt{1 + \mu^2 - C_c^2} - \mu C_c}{1 + \mu^2} - \alpha$$

(2) 볼의 최대 높리와 충격점의 위치는 다음식과 같이 된다.

$$Y_{\max} = \frac{r^2 \omega^2}{2g} \cos^2 \theta_1 + r(1/3 + \sin \theta_1)$$

$$X_i = \frac{r\omega \sin \theta_1}{g} [r\omega \cos \theta_1 + \sqrt{r^2 \omega^2 \cos^2 \theta_1 + 2rg(1/3 + \sin \theta_1)}] - r \cos \theta_1$$

(3) 반경과 Basalt 판과 이루는 각도가 작을수록 볼의 이탈 각도는 커진다.

(4) 현무암 판과 광석분말에 섞인 볼과의 마찰계수가 클수록 볼의 이탈 각도는 커진다.

(5) 볼의 이탈 각도가 커지면 볼의 최대 높리가 커지고 따라서 볼밀의 성능이 증가하는데 볼의 이탈점 (take-off point)과 충격점 (impact point) 사이의 거리가 커지는 것에 유의해야 한다.

(6) 볼의 이탈점과 충격점 사이의 거리가 너무 크면 볼은 광석에 부딪치지 않고 실린더 벽에 부딪쳐서 볼은 광석을 분쇄하는데 아무런 역할을 못한다.

(7) 물에 갠 모래와 볼의 혼합물이 현무암 판 위에서 미끄러질 때 마찰계수는 1.25 정도이다.

(8) 건조한 모래와 볼의 혼합물이 현무암 판 위에서 미끄러질 때 마찰계수는 0.4 정도이다.

참고문헌

- [1] Robert H. Perry, "Perry's chemical engineers' handbook, Sixth edition", McGraw-Hill Book company, (1984)
- [2] F.C. Bond, "Crush. & Grind. Calculation" Allis Chalmers(1956), (1961)
- [3] F.C. Bond, "Mining Eng., Grinding Ball size Selection(5)", 594(1958)
- [4] 방 한우, "Ball mill 분쇄에너지 이론식의 현장 비교", 한국양회공업협회 36호 pp.49-52, (1970.6)
- [5] 김 상기, "분쇄율에 기초를 둔 ball mill 분쇄 속도", 한국양회공업협회 46호 pp.67-73, (1972.3)
- [6] R.N. McNally & G.H. Beall, "Crystallization of fusion cast basalt ceramics and glass-ceramics", Journal of materials science, 14(11), pp.2596-2604 (1979)
- [7] 성 수경, "Ball Mill분쇄의 이론과 실제", 한국양회공업협회 28호(1069.2) pp.58-67, (1969)
- [8] 서 정태, "초경합금용 볼밀(ball mill for hard metal)", 특허공개 10-2007-0019187 (2007)

저 자 소 개

**왕지석(왕지석)**

1946년 11월27일생, 1971년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1975년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 1979년 프랑스 낭뜨대학교 박사과정 졸업(공학박사) 1973~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수

**김중도(金鍾道)**

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산기공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 모니터링

**윤희중(윤희중)**

1961년 5월20일생, 1985년 한국해양대학교 항해학과 졸업, 2004년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 박사과정 입학, 1997~현재 동도 BASALT산업(주) 전무이사