

금속분말의 회전 볼밀링에 있어서 볼 충전율에 따른 볼 거동의 2차원 모델 시뮬레이션

이길근 · 김성규 · 김우열
부경대학교 공과대학 재료공학부

Two-Dimensional Model Simulation of Balls Motion in a Tumbler-Ball Milling of Metal Powder in Relation with Its Ball Filling Ratio

Gil-Geun Lee, Sung-Gyu Kim and Woo-Yeol Kim

Division of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Pukyong National University,
San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Pusan 608-739, Korea

(Received October 6, 2000)

Abstract Effect of ball filling ratio on the behavior of balls motion and their collision characteristic in a tumbler-ball milling of metal powder are investigated by a computer simulation. The discrete element method and the extended Kelvin model composed of nonlinear spring and nonlinear dashpot were employed in the simulation. It can be possible that analysis of the individual balls motion in a three-dimensional actual mill by the two-dimensional model simulation, since the simulated trajectories of ball paths are in relatively good agreement with the actual ones. It knows that the balls motion in the tumbler-ball mill is strongly influenced by the surface conditions of the balls and mill container wall. The energy consumption of the individual balls during impact and the impact frequency of the individual balls increased with an increase in the ball filling ratio and showed maximum values at about 50~60% ball filling ratio, and then decreased.

1. 서 론

볼밀은 원래 원료의 분쇄, 혼합, 분산 등을 목적으로 하여 개발된 장치로서, 밀용기에 원료를 장입한 후 단순히 소정의 시간 밀링하면 분쇄, 혼합, 분산 등의 소정 목적을 쉽게 달성할 수 있어 많은 산업 분야에서 넓게 이용되고 있다.¹⁾ 그러나 밀링 중에 밀용기 내부에서 일어나는 현상에 대해서는 아직 많은 부분이 해명되어 있지 않아, 단 한번의 볼밀링 실험에 의해 얻어진 결과는 보편성이 떨어지며, 한가지 목적을 위해 실험적으로 결정한 밀링조건은 밀링 목적이 조금만 달라도 적용할 수 없는 경우가 많아, 볼밀을 이용한 실제적인 조업에 있어서 작업조건의 선정에 제약이 많으며, 작업조건의 선정도 작업자의 경험에 의존하는 경우가 많아 밀링의 효율이 낮은 것이 현실이다.

볼밀을 이용하는 대표적인 공정으로 1970년대에 Benjamin²⁾에 의해 개발된 기계적합금화(mechanical alloying) 공정은 고체상태에서 분산강화합금, 금속간 화합물, 아몰퍼스합금, 나노구조재료 등의 기능성 분말재료를 쉽게 제조할 수 있는 장점이 있어, 과거 20여년간 이 공정을 이용한 많은 연구가 진행되어 여러가지 새로운 재료가 개발되었으며, 현재에도 기계적합금화공정을 이용한 새로운 기능성 재료 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁻⁶⁾ 그러나 기계적합금화 공정에 있어서도 밀링조건은 밀링시의 밀용기내의 볼의 동적 거동에 대한 정보가 부족하여, 개개의 재료계(system)에 대하여 실험적으로 정해져 왔으며, 같은 계에서도 밀링조건(볼크기, 볼충진율, 밀의 종류 등)이 다르면 다른 결과가 얻어지는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾

이와 같이 볼밀을 이용하여 혼합, 분쇄 혹은 합금

화하는 경우, 공정제어 및 밀링의 고효율화를 위해서는 방대한 양의 실험 데이터의 축적이 요구되나, 밀용기 내부에서 일어나는 현상은 밀링 매체인 볼과 원료간의 상호작용¹⁾에 의한 것으로서, 밀링시 볼의 동적 거동을 해석할 수 있으면 방대한 양의 실험 데이터의 축적 없이 밀용기내에서 일어나는 현상의 해석(혹은 유추)이 가능하여 밀링 공정을 효율적으로 제어할 수 있으리라 생각된다. 그러나 밀용기 내에서의 볼들의 동적거동(속도, 충돌빈도 등)은 넓은 분포를 가지는 하나의 확률론적 현상으로, 이와 같은 확률론적 현상을 해석하기 위해서는 각각의 볼의 동적거동의 확률분포를 정량화할 필요가 있으나, 이와 같은 확률분포를 실험적 혹은 이론적으로 명확히 하는 것은 매우 어렵다. 그러나 Cundall⁸⁾ 등에 의해 이산요소법(discrete element method)이라는 고체 요소 집합체의 거동을 시뮬레이션하는 방법이 제안되어, 이를 응용하여 고체 요소 집합체내의 각각의 고체입자의 거동을 효율적으로 해석할 수 있게 되었다.⁹⁻¹¹⁾

본 연구에서는 밀링 중의 볼들의 동적거동을 해석하는 수단으로서 유효할 것으로 생각되어지는 이산요소법의 개념을 기본으로 하여, 2차원 모델 시뮬레이션을 금속분말의 회전 볼 밀링에 적용하여 각각의 볼의 운동을 시뮬레이션하여, 볼 운동에 미치는 볼충진율의 영향을 검토하였다.

2. 모델 시뮬레이션

금속분말의 볼 밀링에 있어서 볼 상호간 혹은 볼이 밀용기에 충돌할 경우, 볼의 운동에너지의 일부 혹은 전부가 볼들 사이에서 압축되는 금속입자의 소성변형과 볼자신의 소성변형으로 소비되고, 탄성변형 에너지로서 볼에 축적된 에너지는 다시 운동에너지로 변환되어 볼의 반발운동이 일어난다. 따라서 밀용기내의 볼의 동적거동을 해석하기 위해서는 볼의 충돌시에 생기는 금속입자와 볼의 소성변형에 의한 에너지의 소비거동 및 볼의 탄성에 의한 반발거동을 모델로서 표시할 필요가 있다. 본 시뮬레이션에서는 그림 1에 나타낸바와 같이 충돌하는 볼의 충돌 접촉면의 법선방향에 스프링(spring), 데시포트(dashpot), 비인장 연결부(no-tension joint) 및 점선방향에 슬라이드(slider)를 조합한 점탄성 모델을 이용하였다. 스프링은 볼의 탄성 반발력, 슬라이드는 마찰저항, 데시

포트(dashpot)는 에너지 소비를 근사적으로 나타내는 것으로 데시포트(dashpot)에 비인장 연결부(no-tension joint)를 직렬로 연결하여 소성변형에 의한 에너지 소비가 압축과정에서만 일어나도록 하였다.

볼간의 충돌 접촉면에 수직으로 작용하는 탄성반발력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$F_{e,i,j} = K_{i,j} \delta_{i,j} \quad (1)$$

여기서 $F_{e,i,j}$ [N]는 i, j 볼간에 작용하는 수직 탄성력, $K_{i,j}$ 는 스프링의 Hook 정수, $\delta_{i,j}$ 는 충돌에 의한 볼의 접근거리로서 스프링의 변위를 나타낸다. 여기서 볼간의 충돌에 Hertz 접촉이론¹³⁾을 적용하면, 스프링은 비선형거동을 나타내며, 스프링의 Hook 정수 $K_{i,j}$ 는 $\delta_{i,j}$ 의 함수로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{i,j} = \frac{1}{3} \left(\frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \right)^{1/2} \left(\frac{E_i}{1 - \nu_i^2} + \frac{E_j}{1 - \nu_j^2} \right) \delta_{i,j}^{1/2} \quad (2)$$

여기서 R_i [m], E_i [Pa], ν_i 는 각각 볼 i 의 반경, 탄성계수, Poisson 비를 나타내고, R_j [m], E_j [Pa], ν_j 는 각각 볼 j 의 반경, 탄성계수, Poisson 비를 나타낸다. 볼 i 와 밀용기의 접촉의 경우에는 밀용기의 반경을 무한대로 가정하였다.

데시포트(dashpot)의 점성저항력은 스프링의 변위 속도($d\delta_{i,j}/dt$)에 비례하지만, 본 시뮬레이션에서는 스프링요소의 비선형성을 고려하여 식 (3)과 같이 가정하였다.

$$F_{v,i,j} = C_v \delta_{i,j}^{1/2} \frac{d\delta_{i,j}}{dt} \quad (3)$$

여기서 C_v 는 상수, $F_{v,i,j}$ [N]는 볼 i 와 j 의 충돌 접촉면에 작용하는 점성저항력으로 압축과정에서만 작용하고 반발과정에서는 $F_{v,i,j} = 0$ 로 두었다. 데시포트(dashpot)의 에너지 소비거동을 나타내는 C_v 값을 구하기 위하여, 두께 5 mm의 스테인레스 판 위에 일정 두께의 Cu 분말의 층을 두고 12.7 mm의 볼을 자유 낙하시켜 낙하와 반발의 양상을 사진으로 촬영하여 사진으로부터 볼의 반발계수를 구하였다. 반발계수는 Cu 분말층이 없는 경우에는 약 0.15를 나타낸 후 Cu 층의 두께 증가와 함께 감소하여 Cu 분말층의 두께가 8 mm 일 때 0을 나타내어, 이 경우의 에너지 소비는 약 85~100%였다. 이 낙하 충돌을

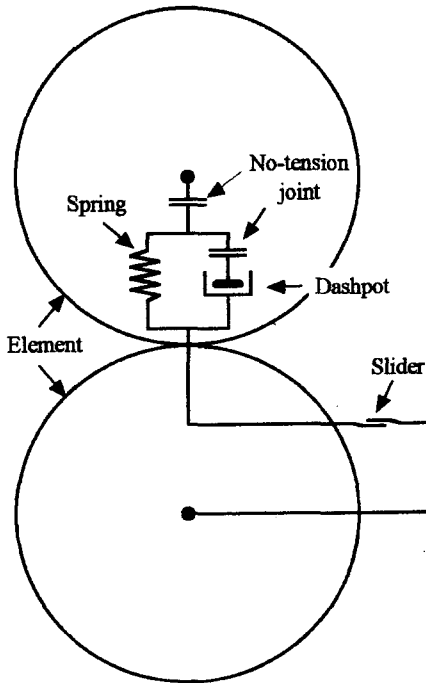


Fig. 1. Spring and dashpot model used in the two-dimensional discrete element method.

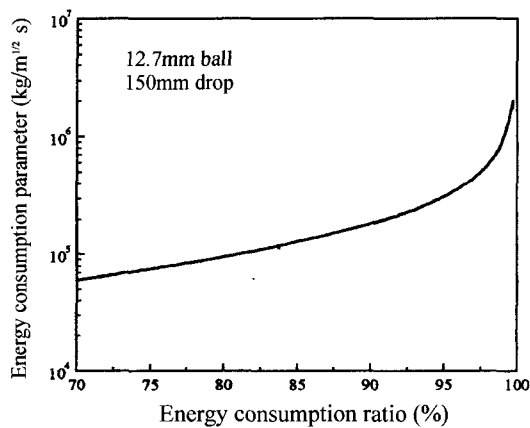


Fig. 2. Variation of calculated energy consumption parameter, C_v , as a function of energy consumption ratio during impact of 12.7 mm steel ball dropped 150 mm on a steel plate.

그림 1의 점탄성 모델과 식(1)~(3)을 이용하여, 각각의 계수 C_v 값에 대하여 계산하여 에너지 소비율에 따른 C_v 값을 구한 결과(그림 2), 에너지 소비율이 85~100% 되는 C_v 값은 $11.25 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^{1/2}\text{s}$

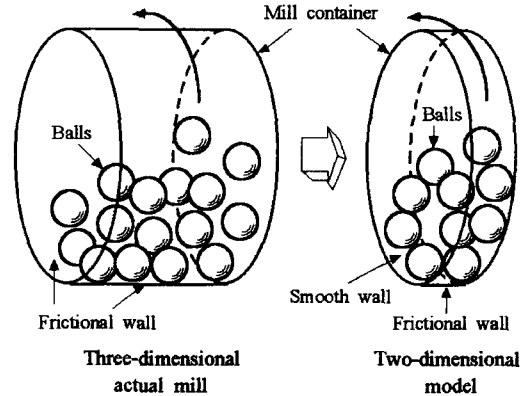


Fig. 3. Two dimensional model of tumbler-ball mill.

임을 알았다. 본 시뮬레이션에서는 12.7 mm 볼에 대하여 충돌에 의한 에너지 소비율이 85~96%로 가정하여 C_v 값을 $11.25 \times 10^{-4} \sim 35 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^{1/2}\text{s}$ 로 두었다.

한편 볼의 마찰력에 의해 충돌 접촉면의 접선방향에도 탄성 및 소성변형이 일어날 것으로 생각되나, 그 변형의 양상은 매우 복잡하고 접선방향의 소성변형에 의한 에너지 소비도 실험에 의한 측정이 곤란하기 때문에, 본 시뮬레이션에서는 접선방향의 스프링과 데시포트(dashpot)는 생략하였다.

그림 3에 시뮬레이션에 사용한 회전 볼밀의 모델을 나타내었다. 밀용기는 원통형으로 내부 길이를 볼의 직경과 같이 두고 볼과 항상 접촉하는 양단면의 마찰은 무시하여 밀용기내의 볼의 운동은 2차원 운동이 되도록 하였다. 볼에 작용하는 힘으로는 점탄성력($F_{e,ij}$, $F_{v,ij}$)이외에 충돌접촉면에 작용하는 마찰력 Ff_{ij} 과 연직방향으로 작용하는 중력 Fg_i 을 추가적으로 생각할 수 있고, 마찰력과 중력은 각각 식 (4), (5)로 나타낼 수 있다.

$$Ff_{ij} = \mu Fn_{ij} \tag{4}$$

$$Fg_i = M_i g \tag{5}$$

여기서 Ff_{ij} [N]는 볼 i 와 j 의 충돌접촉면에 작용하는 마찰력, μ 는 마찰계수, Fn_{ij} 는 충돌접촉면에 작용하는 수직력, Fg_i [N]는 볼 i 에 작용하는 중력, M_i [kg]는 볼 i 의 질량, g [m/s²]는 중력가속도이다.

각각의 볼에 작용하는 모든 힘들을 계산한 후, 식 (6), (7)에 나타난 각각의 볼의 병진운동의 운동방정식과 식 (8)에 나타난 각각의 볼의 자전운동의 운동

Table 1. Data used in model simulation.

Parameter	Value
Mill diameter	70×10^{-3} m
Ball diameter, 2R	1.27×10^{-3} m
Ball filling ratio	10~80%
Mill rotation speed	11.4 rad/s
Ball density, ρ	7.9×10^3 kg/m ³
Dynamic friction coefficient, μ	0.2, 0.4, 0.6
Elastic modulus, E	21.5×10^4 MPa
Poisson's ratio, ν	0.3
Energy consumption parameter, C_v	13.5×10^4 kg/m ^{1/2} s

방정식을 표 1에 나타낸 변수값을 이용하여 $1 \mu\text{s}$ 구간으로 구함으로서 볼의 운동을 시뮬레이션 하였다.

$$M_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n Fx_{i,j} \quad (6)$$

$$M_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n Fy_{i,j} - M_i g \quad (7)$$

$$Im_i \frac{d\eta_i}{dt} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n R_i Ff_{i,j} \quad (8)$$

여기서 $Fx_{i,j}$ [N], $Fy_{i,j}$ 는 각각 볼 i, j 사이의 충돌점 측면에 작용하는 힘의 x 축과 y 축 성분을 나타내며, Im_i [kgm²]는 볼 i 의 관성모멘트, η_i [rads⁻¹]는 볼 i 의 자전 각속도를 나타낸다. 또한 x 축 방향은 2차원 평면 좌표축계에서 수평방향, y 축방향은 수직방향을 나타낸다.

3. 실험방법

밀링은 내경 70 mm, 길이 135 mm의 스테인레스(SUS304)제 밀용기와 12.7 mm의 스틸(SUJ2)제 볼을 이용하여, 표의 시뮬레이션과 같은 조건인 회전속도 11.4 rad/s, 볼 충전율 20, 40, 60, 80%의 조건에서 각각 밀링하였다. 밀링실험은 분말을 충전하지 않은 경우와 분말을 충전한 경우의 2가지 경우에 대하여 하였으며, 분말을 충전한 경우에는 전해 Cu분말(순도 : 99.9%, 평균입경 : 48 μm)을 볼 충전층내의 공극

체적의 10%에 해당하는 양을 충전하여 Ar 가스 분위기 중에서 밀링하였다. 또한 밀용기의 한끝을 투명한 아크릴로 하여 밀링시 밀용기 내의 볼의 실제 거동을 관찰하여, 모델 시뮬레이션의 결과와 비교 검토 하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 4에 볼 충전율을 40%로 하여 밀링시 밀용기의 한끝을 투명한 아크릴판으로 하여 촬영한 밀용기 내부의 볼운동을 나타내었다. (a)는 볼만을 밀용기에 넣어 운전한 경우이며, (b)는 Cu 분말을 충전하여 40시간 밀링한 경우이다. 볼만을 넣어 운전한 경우는 볼과 밀용기의 표면상태가 장입 초기상태로서 금속 분말 밀링시의 밀링초기의 볼 운동을, Cu 분말을 충전하여 40시간 밀링한 경우는 볼과 밀용기벽에 Cu 분말이 압착되어 코팅층¹⁴⁾이 형성되어 있는 상태로

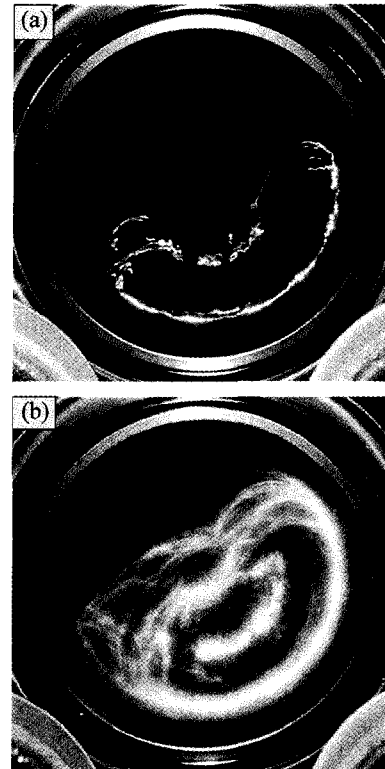


Fig. 4. Photographs of the actual ball movement for various conditions in the tumbler-ball mill with 40% ball filling ratio. (a) bare balls (b) coated balls with copper powder after milling of 40 hours

금속분말 밀링시의 밀링 중·후기의 불 운동을 나타낼 것으로 생각된다. 코팅층이 형성되어 있지 않는 경우에는 불은 캐스캐딩(cascading) 운동¹⁾을 하고 있으나, 코팅층이 형성되면 카타락팅(catacracting) 운동¹⁾으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 금속분말의 밀링에 있어서 같은 불 충전율에서도 불과 밀용기 벽에의 금속분말 코팅층의 유무에 따라 불의 운동상태가 매우 다른 것을 알 수 있으며, 이와 같은 불 운동의 차이는 불과 밀용기 벽에 형성된 코팅층의 유무에 따른 마찰계수의 차이가 크게 영향을 미칠 것으로 생각되어 마찰계수가 불운동에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다.

그림 5에 불 충전율 40%의 경우 마찰계수가 0.2(a), 0.6(b) 일 때 2차원 모델 시뮬레이션에서 시뮬레이션한 불의 운동궤적을 나타내었다. 시뮬레이션한 불의 운동궤적은 그림 4의 실험결과와 잘 일치하였다. 즉 마찰계수 0.2의 경우는 그림 4(a)의 불만을 장입하여 운전한 경우와 잘 일치하였으며, 마찰계수 0.6의 경우는 그림 4(b)의 Cu 분말을 장입하고 밀링

한 경우와 잘 일치하였다. 이와 같이 2차원 모델 시뮬레이션에 의해 구한 불의 운동궤적은 실제 불의 운동궤적과 잘 일치하고 있어, 본 연구의 2차원 모델 시뮬레이션에 의해 3차원의 실제 회전 불밀의 밀용기내의 불 운동을 어느 정도 해석할 수 있음을 알 수 있다. 또한 금속분말의 밀링시 마찰계수는 밀링시간의 증가와 함께 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 증가의 정도는 밀링시 불과 밀용기 표면의 표면상태의 변화 정도에 의존할 것으로 생각된다. 따라서 회전 불밀의 불 운동을 모델 시뮬레이션할 경우 마찰

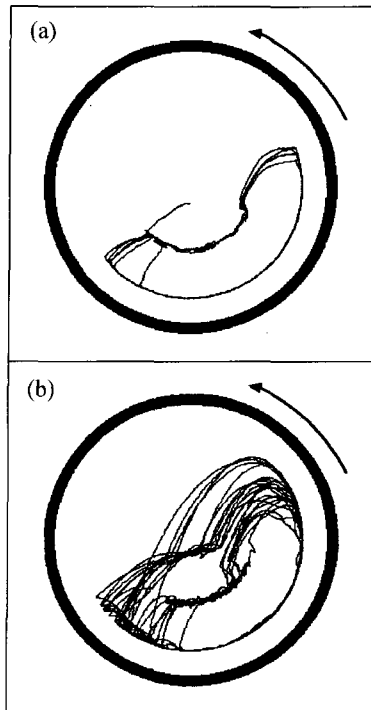


Fig. 5. Trajectories of ball paths in the two-dimensional mill at 40% ball filling ratio which were simulated with friction coefficient of (a) 0.2 and (b) 0.6.

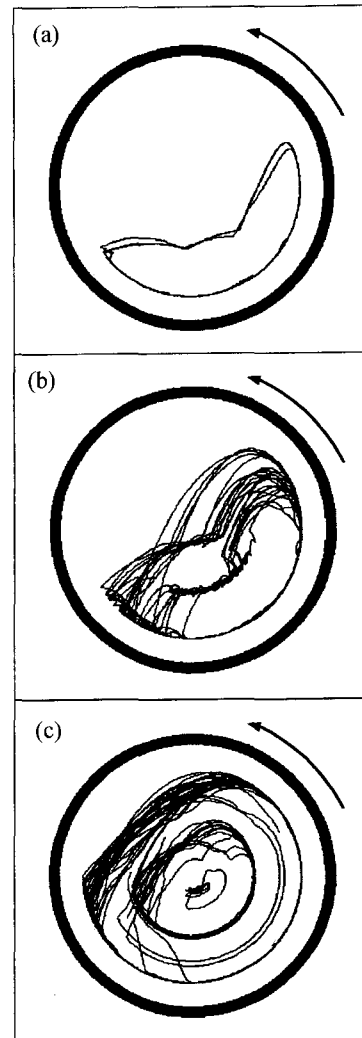


Fig. 6. Trajectories of ball paths simulated by two-dimensional model simulation with ball filling ratio of (a) 20%, (b) 40% and (c) 80%. (Friction coefficient is 0.6)

계수의 선정은 시간의 함수를 고려하여야 할 것으로 판단되나, 마찰계수의 시간에 따른 변화를 고려하는 것은 매우 곤란하므로 본 모델 시뮬레이션에서는 마찰계수 0.2~0.6의 범위에서 볼 거동을 해석하였다.

그림 6에 2차원 모델 시뮬레이션에서 마찰계수를 0.6으로 하여 볼 충전율에 따라 시뮬레이션한 볼의 운동궤적을 나타내었다. 볼 충전율의 증가와 함께 볼은 밀용기벽을 미끄러지는 슬라이딩(sliding) 상태에서 밀용기의 회전에 의해 높은 위치까지 운반된 볼이 볼 충전층 위를 굴러 떨어지는 캐스캐딩(cascading) 상태로 변화하여, 볼 충전율 40~50%에서는 캐스캐딩(cascading)상태와 높은 위치까지 운반된 볼이 포물선을 그리며 낙하하는 카타락팅(catacracting) 상태가 혼합된 상태가 된다. 볼 충전율이 더욱 증가하면 볼의 운동은 볼이 원심력에 의해 밀용기벽에 붙어 거의 낙하가 일어나지 않는 롤링(rolling)상태가 된다. 볼의 충돌은 카타락팅(catacracting) 상태가 가장 격렬하고 캐스캐딩(cascading), 롤링(rolling) 상태 순으로 약하게 된다.¹⁾

금속분말의 밀링과정을 볼의 충돌작용에 의한 금속분말의 변형, 분쇄, 혼합 과정이라고 보면 밀링의 효율을 지배하는 것은 볼의 충돌거동으로서, 충돌거동을 해석하기 위해서는 개개의 볼의 충돌속도, 충돌빈도, 충돌시 에너지 소비량 등에 대한 정보가 중요할 것으로 생각된다. 그림 7에 볼 충전율에 따른 볼 1개당 평균 충돌빈도의 변화를 나타내었다. 볼 1개당 평균 충돌빈도는 볼 충전율의 증가와 함께 증가하여

최대치를 나타낸 후 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 최대 충돌빈도를 나타내는 볼 충전율은 마찰계수가 0.4일때는 60%, 마찰계수가 0.6일때는 40~50%로 마찰계수의 증가와 함께 최대 충돌빈도를 나타내는 볼 충전율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 볼 충전율에 따른 충돌빈도의 변화는 그림 6에 나타낸바와 같이 볼의 충돌은 카타락팅(catacracting) 상태가 가장 격렬하고 캐스캐딩(cascading), 롤링(rolling) 상태 순으로 약하게 되기 때문이다. 또한 볼이 높은 위치로 운반되어 카타락팅(catacracting) 운동을 하기 위해서는 임계 회전속도¹⁾ 이상의 밀 회전속도와 밀용기내에 일정량 이상의 볼 충전율이 요구되나, 같은 밀 회전속도와 볼 충전율에서 마찰계수가 증가하게 되면 카타락팅(catacracting) 운동을 하지 않던 볼들도 보다 높은 위치까지 운반되게 되어 카타락팅(catacracting) 운동을 하게 된다. 따라서 카타락팅(catacracting) 운동을 일으키는데 필요한 임계 볼 충전율은 같은 밀 회전속도에서 마찰계수의 증가와 함께 감소하게 되어, 그림 7과 같이 최대 충돌빈도를 나타내는 볼 충전율은 마찰계수의 증가와 함께 감소하게 된다. 그림 8에 마찰계수가 0.6일 때 볼 1개가 일정속도(충돌 접촉면의 법선성분)이상의 속도로 충돌하는 횟수의 누적 빈도분포의 볼 충전율에 따른 변화를 나타내었다. 전체 충돌빈도(그림 8의 왼쪽 끝 점들은 볼 충전율의 증가와 함께 증가하여 볼 충전율이 약 50%일 때 최대로 되고 그 이상의 범위에서는 감소하는 것을 알 수

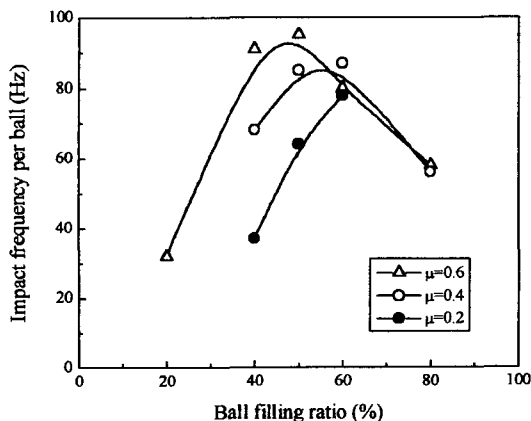


Fig. 7. Variation of impact frequency per ball calculated by two-dimensional model simulation with various friction coefficients, μ , as a function of ball filling ratio.

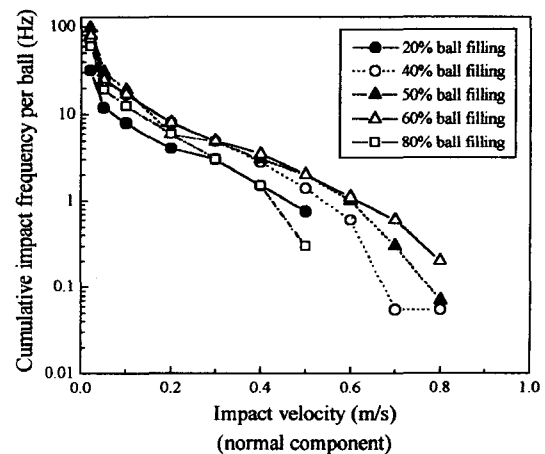


Fig. 8. Cumulative frequency distributions of impacts having normal component of impact velocity for given values of various ball filling ratios.

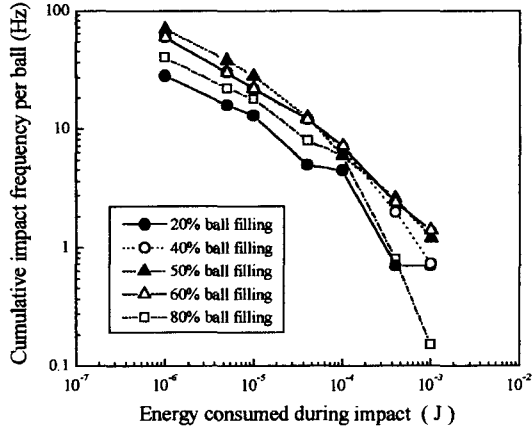


Fig. 9. Cumulative frequency distributions of impacts consuming energy for given values of various ball filling ratios.

있다. 또한 고속으로 충돌하는 빈도(그림 8의 오른쪽 끝 점들)는 볼이 카타락팅(catacracting) 운동을 하는 볼 충전율 60%에서 최대로 되고 볼의 운동상태가 롤링(rolling) 상태로 되는 볼 충전율 80% 이상에서는 충돌빈도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 9에 마찰계수가 0.6일 때 볼 충돌시 볼 1개당 일정량 이상의 에너지 소비가 생기는 충돌의 누적빈도분포의 볼 충전율에 따른 변화를 나타내었다. 미소한 에너지의 소비가 발생하는 충돌까지 포함한 전체 충돌빈도(그림 9의 왼쪽 끝 점들)는 볼 충전율의 증가와 함께 증가하여 볼 충전율 50%에서 최대를 나타낸 후 감소하며, 큰 에너지 소비가 일어나는 충돌 빈도(그림 9의 오른쪽 끝 점들)도 볼이 카타락팅(catacracting) 운동을 하는 볼 충전율 50~60%에서 최대로 되는 것을 알 수 있다.

이와 같이 개개의 볼의 충돌거동을 나타내는 충돌 속도 분포, 충돌빈도, 충돌시 에너지 소비량의 볼 충전율에 따른 변화를 2차원 모델 시뮬레이션으로 시뮬레이션 할 수 있었으며, 볼 충전율이 증가하면 충돌에 의한 에너지 소비와 충돌빈도는 증가하여 최대치를 나타낸 후 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 충돌에 의한 에너지 소비와 충돌빈도는 볼 충전율 약 50~60%에서 최대치를 나타내어, 일반적으로 볼의 충돌작용이 가장 격렬한 카타락팅(catacracting) 상태가 얻어지는 볼 충전율 50~60%에서 밀링하는 경우가 가장 높은 밀링효율을 얻을 수 있다는 정성적인 사실¹⁾을 개개의 볼의 충돌속도, 충돌빈도 및 충돌시

에너지 소비량의 관점에서 정량적으로 재확인 할 수 있었으며, 이러한 결과는 향후 회전 불밀링을 이용한 신 기능성재료의 효율적 제조조건 확립에 유용하게 이용되리라 생각된다.

5. 결 론

볼 충돌시 에너지 소비를 고려한 점탄성 모델에 기초한 2차원 모델 시뮬레이션을 이용하여, 금속분말의 회전 불밀링에 있어서 볼 충전율에 따른 밀용기 내의 볼의 운동을 해석하여, 시뮬레이션 결과와 실제 밀용기내의 볼 운동을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시뮬레이션에서 구한 볼들의 운동궤적이 실제 관찰한 볼들의 운동궤적과 잘 일치하여, 2차원 모델을 이용하여 3차원의 실제 불밀 용기내의 볼의 운동을 해석할 수 있었다.
- (2) 금속분말의 회전 불 밀링에서는 볼과 밀용기의 표면상태가 볼의 운동상태에 큰 영향을 미침을 알았다.
- (3) 볼 충돌시 충돌에 의한 에너지 소비량과 충돌 빈도는 볼 충전율의 증가와 함께 증가하여 볼 충전율 50~60%에서 최대치를 나타낸 후 감소하였다.
- (4) 일반적으로 볼의 충돌작용이 가장 격렬한 카타락팅(catacracting) 운동상태가 얻어지는 볼 충전율에서 밀링하는 경우가 가장 높은 밀링효율을 얻을 수 있다는 정성적인 사실을 개개의 볼의 충돌속도, 충돌빈도 및 충돌시 에너지 소비량의 관점에서 정량적으로 재확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. ASM International Handbook Committee: ASM Handbook Vol.7 Powder Metal Technologies and Application, ASM International, New York, (1998) 53
2. J. S. Benjamin: Metall. Trans., **1** (1970) 2943
3. S. Diamond and A. N. Patel : Microstructure Sci., **16** (1990) 147
4. M. Takagi, Y. Kawamura, T. Imura, J. Nishigaki and H. Saka: J. Mater. Sci., **27** (1992) 817
5. M. A. Morris and D. G. Morris: J. Mater. Sci., **26** (1991) 4687
6. C. C. Koch: Nanostructured Materials, **9** (1997) 13
7. G. G. Lee, H. Hashimoto and R. Watanabe: J. Japan

- Inst. Metals, **56** (1992) 1444
8. P. A. Cundall and O. D. L. Strack: Geotechnique, **29** (1979) 47
9. R. Watanabe, H. Hashimoto and G. G. Lee: Mater. Trans., JIM, **36** (1995) 102
10. Y. Tsuji: KONA, **11** (1993) 57
11. T. Yokoyama, K. Tamura, H. Usui and G. Jimbo: KONA, **11** (1993) 179
12. L. D. Landau and E. M. Lifshitz: Theory of Elasticity, Pergamon Press, New York, (1986) 9
13. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity 3rd ed., McGraw-Hill, New York, (1970) 409
14. G. G. Lee, R. Watanabe, B. K. Kim, G. H. Ha, D. W. Lee and I. M. Park: J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., **34** (1996) 1362