

은 플레이크 분말의 입자크기에 미치는 기계적 밀링 공정변수의 영향

이길근* · 정해영

부경대학교 신소재시스템공학과

Effect of Mechanical Milling Parameters on the Particle Size of Silver Flake

Gil-Geun Lee* and Hae-Young Jeong

Dept. of Materials System Engineering, Pukyong National University

365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

(Received August 7, 2014; Revised August 13, 2014; Accepted August 21, 2014)

Abstract This study is focused on investigating the relation between the particle size of silver flake powder and mechanical milling parameters. Mechanical milling parameters such as ball size, impeller rotation speed and milling time of the attrition ball-mill were controlled to produce silver flake powder. The particle size of the silver flake powder increased with increasing ball size and impeller rotation speed. The change of the particle size of the silver flake powder with mechanical milling parameters was analyzed based on balls motion in the mill container of the attrition ball-mill. The silver flake particles were formed at the elastic deformation area of the ball due to the collision between balls. The change of the particle size of the silver flake powder with mechanical milling parameters well consists with the change of the collision energy of ball with parameters mentioned above.

Keywords: Flake powder, Mechanical milling, Ball motion, Collision energy

1. 서 론

플레이크(flake) 모양의 은(Ag) 분말은 membrane switch, EMI, through hole, 터치 스크린, 전극용 페이스트의 filler, 도전성 접착제 및 전자파 차폐재 등 전기, 전자분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다[1-12]. 플레이크 모양의 은 분말은 사용하고자 하는 용도에 따라 요구되는 입자특성이 다르며, 그 특성은 분말의 입자크기와 형상에 크게 의존한다[7-9].

플레이크 모양의 은 분말은 일반적으로 구형 혹은 불규칙 모양의 은 분말을 원료로 하여 기계적 밀링 방법에 의해 제조되고 있다[10-12]. 기계적 밀링방법은 밀링 용기 내에서 운동하는 볼의 충돌작용을 이용하여 원료분말을 소성변형, 분쇄, 응착시켜 분말을 제조하는 방법으로, 제

조되어지는 플레이크 분말의 입자크기 및 모양 등은 기계적 밀링의 공정변수에 크게 의존한다[13,14]. 목적으로 하는 형상과 크기를 가지는 플레이크 모양의 은 분말을 효율적으로 제조하기 위해서는 밀 용기내의 볼의 충돌작용에 대한 충분한 이해를 필요로 한다. 그러나 기계적 밀링시 볼의 운동이 일어나는 밀 용기는 일반적으로 내부 관찰이 어려운 불투명의 밀폐된 구조를 가지고 있을 뿐만 아니라 다량의 볼들이 각각 독립적으로 운동하고 있어, 밀 용기 내의 각각의 볼들의 충돌효과를 정확히 도출하기는 어렵다. 따라서 기계적 밀링방법으로 목적으로 하는 특성을 가진 플레이크 모양의 분말을 제조하기 위해서는, 일반적으로 많은 경험적 자료들을 필요로 한다.

밀 용기내의 볼 운동을 예측하기 위하여 일부 밀링기(회전식, 유성식 등)를 대상으로 볼 운동을 시뮬레이션한 결

*Corresponding Author : Gil-Geun Lee, TEL: +82-51-629-6381, FAX: +82-51-625-7048, E-mail: gglee@pknu.ac.kr

과가 보고되고 있다[15-18]. 그러나 보고되고 있는 시뮬레이션 결과들을 실제 사용하는 특정구조의 밀링기의 공정 조건에 그대로 적용할 수 없어, 시뮬레이션 기법이 플레이크 모양의 분말 제조에 직접적으로 충분히 활용되지 못하고 있다. 또한 기계적 밀링에 의한 플레이크 분말의 형성을 밀 용기내의 볼의 충돌현상에 기초하여 해석한 결과가 일부 보고되고 있으나, 아직 플레이크 분말의 입자크기와 밀링 공정변수간의 상관관계는 명확히 설명하지 못하고 있다[19,20].

본 연구에서는 수직형 교반식 밀링기(attrition mill)를 사용하여, 플레이크 모양의 은 분말의 효율적인 제조조건을 확립하기 위하여, 기계적 밀링공정변수(볼크기, 교반속도 및 밀링시간)를 변화시켜 플레이크 모양의 은 분말을 제조하고, 기계적 밀링 공정 변수에 따른 플레이크 은 분말의 입자크기 변화를 밀 용기내의 볼의 운동에 기초하여 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법

구형의 은 분말(평균입자크기 : 약 $2 \mu\text{m}$)을 원료로 하여, 원통형(내경: 110 mm, 높이: 130 mm)의 밀 용기를 가지는 수직형 교반식 밀링기(attrition mill)를 사용하여 에탄올 분위기에서 기계적 밀링하여 플레이크 모양의 은 분말을 제조하였다. 이때 기계적 밀링 공정변수가 플레이크의 입자크기에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 볼의 크기를 2 mm, 3 mm로 변화시켰으며, 교반속도를 200~400 rpm으로 변화시켜 최대 6시간까지 밀링하였다. 밀링 중의 불순물 혼입을 방지하기 위하여, 볼과 교반기 및 밀 용기는 모두 YSZ(ZrO_2 -3 wt.% Y_2O_3) 재질을 사용하였다. 볼과 분말의 충전비는 무게비로 볼:분말=7:1로 일정하게 하였다. 소정의 조건에서 기계적 밀링 후 제조된 분말의 형상과 입자크기분포를 전자현미경(Scanning electron microscopy; SEM, S-2700, Hitachi)과 입도분석기(Particle size analyzer; PSA, LS-13320, Beckman Coulter)를 이용하여 각각 분석하였다.

또한 밀 용기와 같은 크기를 가지는 투명 아크릴재 용기를 사용하여, 수직형 교반식 밀링기의 밀링 용기 내부의 볼 운동을 관찰하였다. 볼 운동은 아크릴재 용기에 분말만 장입하지 않은 상태로 하여 플레이크 분말의 제조조건과 동일한 기계적 밀링 조건에서 고속카메라(ED AF NIKKOR 80-200 mm 1:2.8 D렌즈, Nikon)를 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에 2 mm 볼로 400 rpm에서 기계적 밀링시 밀링 시간에 따른 은 분말의 입도분석 결과를 히스토그램 형태

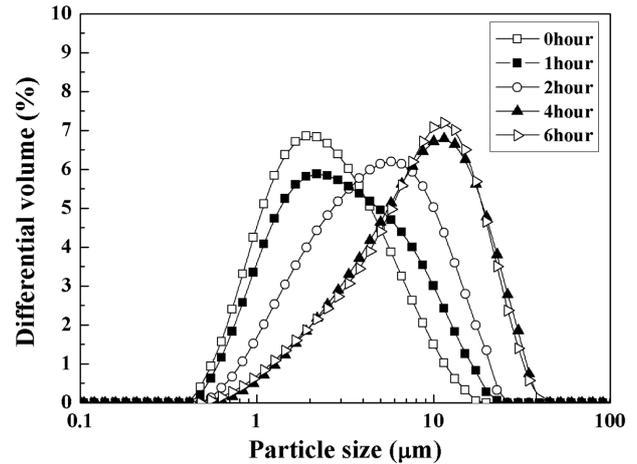


Fig. 1. Change of the particle size distribution of the silver powder with milling time for ball size of 2mm and impeller rotation speed of 400rpm.

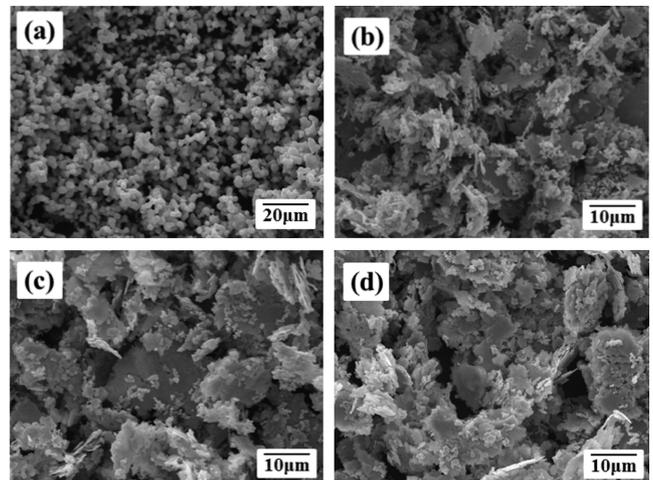


Fig. 2. SEM micrographs of the silver powder with mechanical milling time for (a) 0 hour, (b) 2 hours, (c) 4 hours and (d) 6 hours.

로 나타내었다. 밀링시간이 증가함에 따라 입도분포 곡선은 입자크기가 증가하는 방향으로 이동하고 있다. 또한 밀링 약 4시간 이후에는 입도분포 곡선에 큰 변화는 관찰되지 않고 있다. 밀링시간에 따른 이러한 입자크기 분포의 변화는 본 실험의 다른 밀링조건에서도 동일한 경향을 나타내었다. 밀링시간이 증가하여도 입도분포곡선에서 큰 변화를 보이지 않는 현상은, 볼 크기와 교반기의 회전수가 증가할수록 짧은 밀링시간에서 관찰되는 경향을 나타내었다.

그림 2에 2 mm 볼로 400 rpm에서 기계적 밀링시 밀링 시간에 따른 은 분말의 SEM 관찰 결과를 나타내었다. 밀링에 의해 평균입자크기 약 $2 \mu\text{m}$ 의 원료입자들이 상호 응집되어 플레이크 모양의 입자들이 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 플레이크 입자들의 크기는 밀링시간이 증가함에 따라 증가하며, 밀링시간 약 4시간 이후에는 큰

변화를 보이 않는 것을 알 수 있다.

일반적으로 은 분말과 같은 연성금속분말을 기계적 밀링하면, 밀 용기 내부에서 운동하고 있는 볼의 충돌작용에 의해 분말입자의 소성변형, 응집, 분쇄 등이 일어나는 것으로 알려져 있다[13,14,19-21]. 그림 2와 같은 플레이크 모양의 분말입자의 형성은 밀 용기 내부에서 운동하는 볼의 충돌작용에 의해 분말입자들의 소성변형을 수반하는 응집에 의한 것으로 생각된다. 이러한 소성변형을 수반하는 응집만 일어나는 경우에는 분말 입자크기는 밀링시간의 증가와 함께 계속 증가하여야 한다. 그러나 그림 1에 나타낸바와 같이 밀링 약 4시간 이후에는 분말의 입도분포 곡선이 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 형성된 플레이크 모양의 입자들이 볼의 충돌 작용에 의해 분쇄되고 다시 응집되는 과정을 반복하고 있음을 의미한다. 분말을 기계적 밀링하면 일반적으로 특정 밀링시간 이후에는 이러한 응집과 분쇄가 서로 균형을 이루어 입도분포곡선에서 큰 변화가 관찰되지 않는 것으로 알려져 있다 [13,14]. 이러한 응집과 분쇄가 균형을 이루는 밀링시간은 밀링조건에 의존한다. 본 실험의 밀링조건 범위에서는 밀링시간 약 4시간 이후에는 분말의 입도분포곡선에서 큰 변화가 관찰되지 않았다.

그림 3에 2 mm 볼을 사용하여 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm, 3 mm 볼을 사용하여 200 rpm, 300 rpm에서 각각 6시간 밀링하여 제조한 플레이크 모양 은 분말의 평균입자크기의 교반속도에 따른 변화를 나타내었다. 동일한 밀링시간 6시간의 결과를 비교한 것은 전술한 기계적 밀링 과정에서의 분말 입자 상호간의 응집과 분쇄가 어느 정도 균형을 이루는 상태에서 기계적 밀링 공정변수가 플레이크 모양 은 분말의 입자크기에 미치는 영향을 알아보기 위함이다. 플레이크 모양 은 분말의 입자크기는 교반속도가 증가

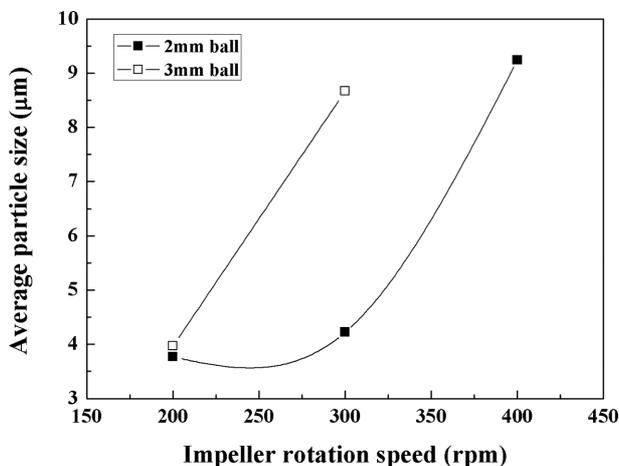


Fig. 3. Changes of average particle size of the silver flake powder with impeller rotation speed for various ball sizes.

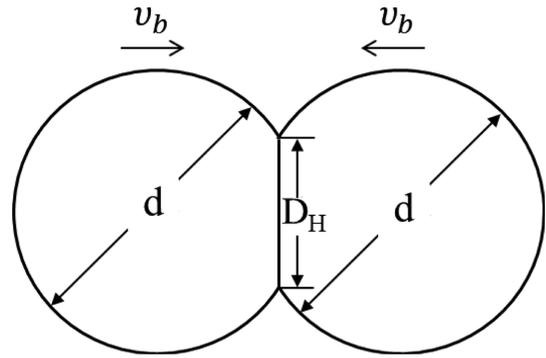


Fig. 4. Schematic diagram of the formation of elastic-deformation contact area due to the collision between balls.

하고, 볼 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으나, 낮은 교반속도(200 rpm)에서는 볼 크기에 따른 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 2 mm/200 rpm과 3 mm/200 rpm의 경우 서로 비슷한 평균입자크기를 나타내었다. 특히 3 mm/200 rpm 경우의 평균 입자크기는, 2 mm 볼보다 상대적으로 볼 크기가 큰 3 mm 볼 임에도 불구하고, 2 mm/300 rpm의 경우와 비슷하며 2 mm/400 rpm의 경우에 비하여 현저하게 작은 크기를 나타내었다. 이와 같은 3 mm/200 rpm의 경우가 2 mm/400 rpm의 경우보다 현저하게 작은 평균입자크기를 나타내는 경향은 본 실험의 모든 밀링시간(6시간 이하)에서 동일하였다.

한편 저자들은 알루미늄 분말의 수평형 회전식 밀링기의 건식 기계적 밀링에 있어서의 플레이크 모양의 입자형성이 밀링시 볼의 탄성충돌 변형에 의한 가능성을 제시하였다[19,20]. 즉 플레이크 모양 분말은 그림 4와 같이 밀 용기 내부에서 충돌하는 직경 d의 두 볼이 탄성변형 되어 형성되는 접촉부(D_H 부분)에서 형성될 가능성을 제시하였다. 본 연구에서는 그림 3에 나타낸 수직형 교반식 밀링기의 기계적 밀링공정변수(볼크기, 교반속도)에 따른 플레이크 모양 은 분말의 입자크기 변화를 밀 용기 내부의 볼의 탄성충돌 관점에서 고찰하고자 하였다. 이를 위해 고속카메라를 이용하여 밀 용기 내부의 볼 운동을 직접 관찰하는 방법과 교반기의 회전운동에너지(rotational kinetic energy)를 간접적으로 계산하여 밀 용기 내부의 볼 운동을 추정하였다.

그림 5에 3 mm 볼로 300 rpm에서 밀링시 고속카메라를 이용하여 밀 용기 내부의 볼 운동을 촬영한 사진(a)과 본 실험에서 사용한 수직형 교반식 밀링기의 교반기의 형상(b)을 나타내었다. 사진의 화살표는 0.02초 동안 각각의 볼이 이동한 거리와 방향을 나타낸다. 100개 이상의 화살표 길이로부터 볼들의 속도를 계산하여 평균 볼 속도를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 본 실험의 플레이크 분말 제조 조건과 동일한 조건에서 볼 운동을 직접 관찰하여

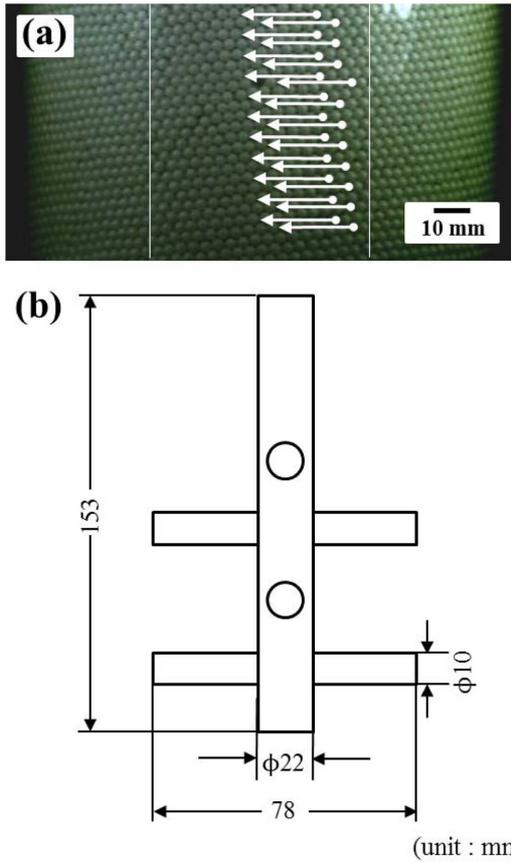


Fig. 5. Photograph of moving balls in the mill container and schematic diagram of impeller of the attrition ball-mill.

각각의 기계적 밀링조건에서의 볼의 평균 속도를 추산하였다. 또한 교반기의 축을 중심으로 하는 교반기의 회전운동에너지가 에너지 손실 없이 밀 용기 내부의 볼의 운동에너지로 변환된다고 가정하고, 각각의 밀링 조건에서의 볼 1개당 운동에너지를 도출하여 볼의 속도를 추산하였다. 이때 교반기의 회전운동에너지는 교반기가 가로방향의 4개의 원주모양의 핀과 세로방향의 1개의 원주 축으로 구성되었다고 가정하여, 식 (1)을 이용하여 계산하였다[22].

$$K_{Impeller} = \left\{ \frac{1}{2} R_i^2 (M_{i,i} - M_{i,j}) + \frac{1}{6} (M_{i,i} L_{i,i}^2 - M_{i,j} L_{i,j}^2 + \frac{1}{4} M_s R_s^2) \right\} \left(\frac{\pi N}{30} \right)^2 \quad (1)$$

여기서 R_i 는 가로방향 핀의 반경, $M_{i,i}$ 는 가로방향 핀의 질량, $M_{i,j}$ 는 가로방향 핀과 세로방향 축이 중복되는 부분의 질량, $L_{i,i}$ 는 가로방향 핀의 길이, $L_{i,j}$ 는 가로방향 핀과 세로방향 축이 중복되는 부분의 길이, M_s 는 세로방향 축의 질량, R_s 는 세로방향 축의 반경, N 은 교반기의 회전수이다. 이렇게 두 가지 방법으로 추산된 볼의 속도를 본 연구에서는 볼의 충돌속도로 보았다. 그림 6에 2 mm와 3 mm 볼의 경우 볼 운동의 직접관찰과 교반기의 회전운동에너지로부터 추산한 볼 충돌속도의 교반기 회전수에 따른 변

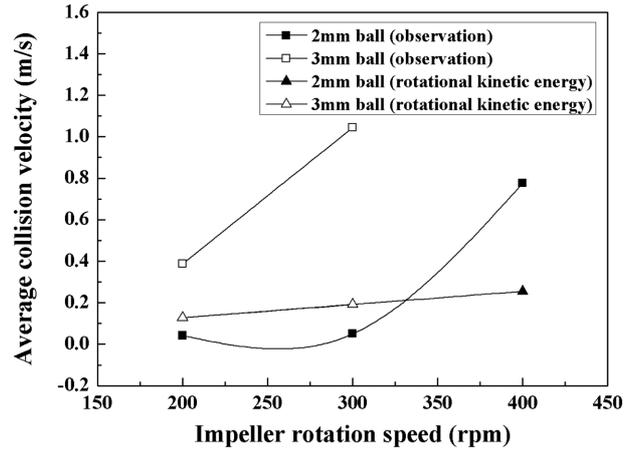


Fig. 6. Changes of the estimated average ball collision velocity with impeller rotation speed for various ball sizes.

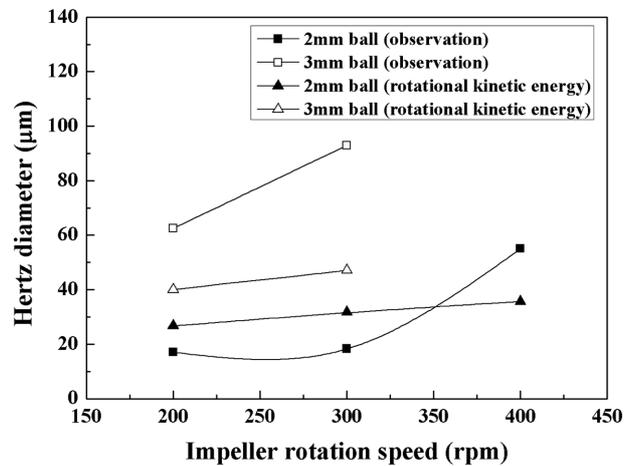


Fig. 7. Changes of the Hertz diameter (diameter of the elastic-deformation contact area) with impeller rotation speed for various ball sizes.

화를 나타내었다. 두 경우 모두 교반기의 회전수가 증가할수록 충돌속도가 증가하였다. 직접관찰의 경우에는 볼 크기가 증가할수록 충돌속도가 증가하였다. 회전운동에너지를 이용한 경우에는 볼 크기에 무관하게 동일한 충돌속도를 나타내었다. 회전운동에너지를 이용한 경우 충돌속도가 볼 크기에 무관한 것은, 밀 용기내의 볼 장입량을 모든 볼 크기에서 일정하게 하였기 때문이다. 즉 교반기의 회전운동에너지가 에너지 손실 없이 밀 용기 내에 장입한 볼 전체에 전달된다고 가정하였기 때문에 볼 1개의 속도는 교반기의 회전운동에너지와 볼의 장입량에만 의존한다.

그림 7에 직접관찰과 회전운동에너지를 이용하여 추산된 볼 충돌속도로부터 계산한 Hertz직경(Hertz diameter)의 교반속도에 따른 변화를 나타내었다. Hertz직경은 그림 4에 나타낸바와 같이 밀 용기 내부에서 속도 v_b 로 충돌하는 크기가 같은 두 볼 사이에서 형성되는 탄성변형 접촉부의 직경을 나타내며, 식 (2)를 이용하여 계산하였다

[23,24].

$$D_H = \left\{ \frac{15m(1-\nu^2)}{8E} d^2 v_b^2 \right\}^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

여기서 m 은 볼의 질량, ν 는 볼의 포아송 비, E 는 볼의 탄성계수, d 는 볼의 직경, v_b 는 볼의 충돌속도이다. 플레이크 입자가 볼 충돌시 탄성변형 접촉부에서 형성되고, 탄성 변형 접촉부에 빈 공간 없이 분말입자가 채워져 있다고 가정하면, Hertz직경과 실제 플레이크 입자의 크기는 서로 같다. 그러나 실제 밀링에서는 탄성변형 접촉부에 빈 공간 없이 분말입자가 채워지지 않으므로, Hertz직경은 실제 제조된 플레이크 입자의 크기보다 클 것으로 예상된다. 그림 3의 실제 제조된 플레이크 은 분말의 평균입자크기와 Hertz직경을 비교해 보면, 실제로 제조된 플레이크 분말의 평균입자크기에 비하여 Hertz직경이 약 5~10배 정도 큰 것을 알 수 있다. 또한 Hertz직경은 교반속도가 증가할수록 증가하고 볼 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내어, 실제 제조된 플레이크 분말 입자크기의 교반속도와 볼 크기에 따른 변화와 동일한 양상을 나타낸다. 따라서 저자들이[19,20] 알루미늄 플레이크 분말 제조시(건식, 수평형 회전식 밀링기)에 제안한 볼의 탄성변형 접촉부 개념이 본 연구의 습식 밀링을 통한 은 플레이크 분말 제조(습식, 수직형 교반식 밀링기)에도 유용함을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7의 Hertz직경의 변화가 그림 3의 실제 플레이크 분말의 입자크기 변화와는 달리 3 mm 볼의 경우가 2 mm 볼의 경우보다 모든 조건에서 크게 도출됨을 알 수 있다. 즉 실제 제조된 플레이크 분말의 입자크기의 경우 3 mm/200 rpm이 2 mm/400 rpm 보다 현저하게 작으나, Hertz직경의 경우에는 3 mm/200 rpm이 2 mm/400 rpm 보다 크게 도출되고 있다. 따라서 플레이크 분말의 입자크기에 미치는 기계적 밀링 공정변수의 영향을 보다 심도 깊게 고찰하기 위해서는 종래에 제안된 볼의 탄성변형 접촉에 의한 Hertz직경 이외에 새로운 개념을 도입하여야 할 것으로 판단된다.

실제 플레이크 입자 형성에는 볼 충돌부에서의 분말입자의 소성변형과 입자 상호간의 응착이 관여하게 된다. Hertz직경은 충돌하는 볼의 단순 치수변화 관점에서 도출된 개념으로 실제 플레이크 입자 형성과정에서 발생하는 분말입자의 이러한 야금학적 변화를 반영하지 못하고 있다. 볼 충돌부에서 일어나는 분말입자의 야금학적 변화는 볼이 상호 충돌시 볼이 가지고 있는 에너지에 의해 일어난다. 볼이 상호 충돌시 충돌부에 분말이 존재하지 않는다고 가정하고 에너지 손실을 무시하면, 볼이 가지고 있는 에너지는 볼 충돌시 접촉되어 탄성변형되는 변형부에 축적된다. 만일 충돌하는 볼 사이에 분말이 존재하면 이러한

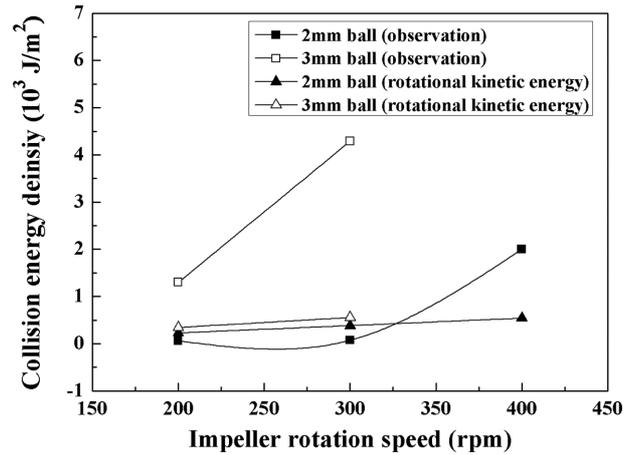


Fig. 8. Changes of the collision energy density with impeller rotation speed for various ball sizes.

충돌에너지의 일부가 분말입자의 소성변형과 응집에 소모되고 나머지는 탄성변형부에 축적된다. 따라서 기계적 밀링 공정변수에 따른 볼 충돌에너지를 상호 비교하면 분말 입자의 플레이크화에 기여하는 에너지의 상대적 크기를 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 8에 직경이 같은 두 개의 볼이 상호 충돌시 형성되는 탄성변형 접촉부의 단위면적당 축적되는 충돌에너지(충돌에너지 밀도)의 교반속도에 따른 변화를 나타내었다. 충돌에너지 밀도를 나타낸 것은 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 탄성변형 접촉부가 플레이크 입자의 형성에 무관하지 않았기 때문이다. 충돌에너지 밀도는 식 (3)으로 계산하였다[25].

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \left[(5m)^3 \left\{ \frac{\sqrt{2}E}{3(1-\nu^2)} \right\} d^4 v_b^6 \right]^{\frac{1}{5}} \quad (3)$$

여기서 m 은 볼의 질량, ν 는 볼의 포아송 비, E 는 볼의 탄성계수, d 는 볼의 직경, v_b 는 볼의 속도이다. 충돌에너지 밀도는 볼 크기와 교반속도가 증가함에 따라 증가하였다. 특히 직접관찰과 회전운동에너지를 이용하여 추산한 두 가지 모두 3 mm/200 rpm의 경우가 2 mm/400 rpm의 경우보다 낮은 충돌에너지 밀도를 나타내어, 그림 3의 실제 제조된 플레이크 분말의 평균입자 크기 변화와 동일한 경향을 나타내었다. 즉 그림 3의 기계적 밀링 공정변수에 따른 플레이크 은 분말의 입자크기 변화는, 밀링 공정변수에 따른 볼 충돌에너지의 변화에 의존하는 것을 알 수 있다. 따라서 수직형 교반식 밀링기를 사용하여 습식 분위기에서 플레이크 모양의 은 분말 제조시 플레이크 입자는 충돌하는 볼의 탄성변형 접촉부에서 형성되고, 형성되는 플레이크 입자의 크기는 볼의 충돌에너지에 의존하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

수직형 교반식 밀링기를 사용하여 기계적 밀링 함으로써 다양한 입자크기 분포를 가지는 플레이크 모양의 은 분말을 제조하였다. 제조된 플레이크 은 분말의 입자크기는 밀링기의 교반속도가 증가하고 볼 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 볼 상호간의 충돌에 의한 탄성변형 접촉과 충돌에너지 개념을 사용하여, 기계적 밀링 공정변수의 변화에 따른 이러한 플레이크 분말의 입자크기 변화를 해석하였다. 제조된 은 플레이크 분말의 입자크기는 밀 용기내의 볼 충돌시 형성되는 볼의 탄성변형 접촉부의 직경보다는 작은 크기를 나타내었다. 플레이크 모양의 은 입자는 기계적 밀링시 상호 충돌하는 볼의 탄성변형 접촉부에서 형성되는 것으로 판단된다. 기계적 밀링 공정변수의 변화에 따른 플레이크 분말의 입자크기 변화는 볼의 충돌에너지의 변화거동과 상호 잘 일치하였다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] J. Oprosky and D. Stotka: USA, US 5,346,651 (1993).
- [2] R. G. Reed: USA, US 4,964,948 (1989).
- [3] N. I. Liu and R. Meer: USA, US 4,566,990 (1983).
- [4] S. M. Towlson: USA, US 5,653,918 (1996).
- [5] V. Panecasio and M. P. Chasse.: USA, US 6,013,203 (1998).
- [6] H. W. Cui, D. S. Li, Q. Fan and H. X. Lai: Int. J. Adhes. Adhes., **44** (2013) 232.
- [7] H. H. Lee, K. S. Chou and Z. W. Shih: Int. J. Adhes. Adhes., **25** (2005) 437.
- [8] H. W. Cui, Q. Fan and D. S. Li: Int. J. Adhes. Adhes., **48** (2014) 177.
- [9] H. W. Cui, A. Kowalczyk, D. S. Li and Q. Fan: Int. J. Adhes. Adhes., **44** (2013) 220.
- [10] D. Lu and C. P. Wong: Int. Sym. Adv. Packag. Mater., **10** (1998) 48.
- [11] D. L. Markley, Q. K. Tong, D. J. Magliocca and T. D. Hahn: Int. Sym. Adv. Packag. Mater., **12** (1999) 16.
- [12] W. Songping: J. Mater. Sci. Mater. Electr., **18** (2007) 447.
- [13] C. Suyanarayana: Prog. Mater. Sci., **46** (2001) 1.
- [14] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook Vol 7 Powder Metal Technologies and Application, ASM International, Ohio (1998) 134.
- [15] J. Kano and F. Saito: Powd. Tech., **98** (1998) 166.
- [16] A. Theodore, K. J. Jeon and C. Y. Wu: Kona, **24** (2006) 83.
- [17] P. R. Santhanam and E. L. Dreizin: Powd. Tech., **221** (2012) 403.
- [18] R. Watanabe, H. Hashimoto and G. G. Lee: Mater. Trans. JIM, **36** (1995) 102.
- [19] G. G. Lee, D. W. Lee, G. H. Ha and B. K. Kim: J. Jpn. Soc. Powd. Met., **43** (1996) 1253.
- [20] D. W. Lee, B. K. Kim, G. G. Lee and G. H. Ha: J. Kor. Powd. Met. Inst., **3** (1996) 159.
- [21] S. H. Hong and B. K. Kim: Mater. Lett., **51** (2001) 139.
- [22] R. A. Serway and J. W. Jewett: Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 6th Ed., Cengage Learning Korea Ltd., Seoul (2005) 292.
- [23] H. Hashimoto, T. Shinozaki and S. Yashima: J. Chem. Eng. Jpn., **20** (1987) 380.
- [24] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity, 3rd Ed., McGraw-Hill, NewYork (1970) 420.
- [25] K. S. Venkataraman and K. S. Narayanan: Powd. Tech., **96** (1998) 190.