

매체형 전동밀의 실제 분쇄장에서 분쇄매체의 거동과 DEM 시뮬레이션의 비교연구

보르 암갈란*** · 자갈사이항 바트체첵*** · 이재현*** · 최희규****,†

*창원대학교 메카트로닉스 융합부품소재 연구센터(ERC)
51140 경남 창원시 의창구 창원대로 20
**창원대학교 대학원 금속신소재공학과
51140 경남 창원시 의창구 창원대로 20
***창원대학교 미래융합대학 메카융합공학과
51140 경남 창원시 의창구 창원대로 20
(2019년 3월 27일 접수, 2019년 8월 14일 수정본 접수, 2019년 9월 2일 채택)

A Comparative Study for Grinding Media Behavior and DEM Simulation at Actual Grinding Zone on a Traditional Ball Mill

Amgalan Bor***, Battsetseg Jargalsaikhan***, Jehyun Lee*** and Heekyu Choi****,†

*Engineering Research Center (ERC) for Integrated Mechatronics Materials and Components, Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea
**Graduate School of Material Science Engineering, Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea
***Department of Mechanics Convergence, College of Engineering, Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea
(Received 27 March 2019; Received in revised form 14 August 2019; accepted 2 September 2019)

요 약

본 연구는 매체형 전동밀(전동 볼 밀)에서 매체선정에 관한 공정조건 최적화를 위하여, 직경과 재질이 각각 다른 3 가지 종류의 분쇄매체를 이용, 매체의 움직임을 실제 촬영하고 DEM 시뮬레이션을 병행하여 비교 연구하였다. 시뮬레이션에서는 밀의 회전속도, 매체의 재질, 매체의 운동속도, 매체와 포트 벽면과의 마찰계수 등을 실제 실험조건과 동일하게 조건을 맞추었다. 다양한 종류의 분쇄매체의 움직임을 실제 촬영된 사진 및 시뮬레이션에서 해석된 스냅샷 사진 위에, 본 연구에서 정의한 분쇄장을 설정하여 해석함으로써 그 값을 정량적으로 측정하였다. 또한, 정량적으로 측정된 값과 분쇄시료의 변화된 모습을 관찰하여 그 상관관계를 검토하였다. 따라서 특정 실험조건에서 분쇄장에 가장 큰 영향을 주는 분쇄매체의 최적화를 제언 하고자 하였다.

Abstract – This study was performed the real motion and DEM simulation of ball motion using three different types of grinding media with different size and materials in media formation for optimization of process conditions in a traditional ball mill (media ball mill). In the simulation, the rotational speed of the mill, the material of the medium, the velocity of the medium, and the coefficient of friction between the media and the wall of pot were fixed into the actual experimental conditions. The motion of various kinds of grinding media was quantitatively measured by setting the grinding zone defined in the present study on the photographs taken and the snapshot images analyzed in the simulation. In addition, we observed the quantitatively measured value and the changed morphology of the sample and examined the correlation. Therefore, it is suggested to optimize the grinding media which has the greatest influence on the grinding zone under specific experimental conditions.

Key words: Grinding Zone, Traditional ball mill, DEM Simulation, Ball Material, Copper, Particle morphology

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hkchoi99@changwon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

매체형 분쇄기(볼 밀)를 이용한 분쇄 공정에서 분쇄시료의 변화를 관찰하기 위해서는 매체와 분쇄시료간의 상호작용에 의한, 충격 및 마모 등의 메커니즘을 관찰하여야 하고, 이를 위해 다양한 공정 변수를 변화시키는 실험을 행한다. 공정 변수의 변화에 따라 달라지는 여러 가지 작용 중, 가장 중요한 것이 분쇄매체의 움직임이다. 이는 분쇄매체의 움직임에 따라 분쇄매체가 분쇄시료에 가해지는 충격에너지가 달라지고, 이에 따라 분쇄특성이 변화하기 때문이다. Arno Kwade, Jorg Swhwedes 등의 연구자들은 분쇄가 실질적으로 이루어지는 분쇄장(grinding zone)내에서 분쇄매체의 움직임에 대해 실제 실험결과와 공정모사(시뮬레이션) 결과를 비교하여 분쇄장 내에서 효율적인 분쇄를 진행하는 것이 중요하다고 하였다. 또한 이들은 1996년에는 교반 볼밀 분쇄 시, 분쇄매체의 운동 및 응력 강도를 고찰하여 분쇄장에서 분쇄매체의 움직임을 연구하였다[1,2]. 매체형 전동밀(전동 볼 밀)에서는 밀의 회전수를 증가시켜 갈수록 원심력이 증가하여, 어떤 회전수 이상이 되면 볼의 회전속도가 밀의 회전속도와 동일하게 됨으로써, 마치 볼이 밀의 벽면에 붙어서 회전하는 것처럼 보인다. 이 때의 회전수를 임계회전속도(critical rotation speed)라 한다. 이 임계회전속도는 분쇄포트의 크기, 분쇄매체의 크기, 또한 건식 또는 습식과 같은 분쇄방식에 의해서도 달라진다. 임계회전속도는 밀의 회전속도에 따른 최외곽 분쇄 매체들이 원심력에 의해 원운동을 할 때까지 증가될 수 있는데, 이 값은 중력과 원심력을 이용하여 계산 할 수 있으며, 다양한 연구자들에 의해 여러 가지 식들이 제안되고 있다[3,4]. 매체형 전동밀은 일반적으로 임계 회전속도의 70~80% 정도로 운전되는데 이 때에 투입에너지의 효율이 극대화되고, 분쇄매체의 움직임이 한꺼번에 흐르는 폭포수의 형태와 단계별로 흐르는 폭포수의 형태(cascade와 cataract)의 중간 형태로 나타난다[5]. 매체형 분쇄기를 이용한 이전의 많은 연구에서[6-11] 다양한 공정변수를 변화시키는 실험을 행하였고, 본 연구에서는 각각의 실험조건에 따라, 분쇄장 내에서 분쇄매체의 거동을 정량적으로 살펴보고자 하였다. 이전의 연구에서는[6] 단순히 매체의 재질과 크기에 따라서 분쇄기 내에서의 정량적인 매체거동만 파악하였다면, 본 연구에서는 실제로 분쇄가 이루어지는 분쇄영역(분쇄장)을 설정하고, 그 분쇄장에 매체가 거동하는 분율을 파악하여 분쇄시료에 영향을 주는 매체의 영향력을 정량적으로 파악하였다.

따라서, 매체형 전동밀에서 분쇄매체의 실제 움직임 및 DEM 시뮬레이션의 스냅샷 사진으로부터 분쇄가 이루어지는 분쇄장을 설

정하고, 그 영역을 표시하여, 매체가 움직이는 것에 대한 이미지 분석을 하여 정량적인 결과를 얻고자 하였다. 또한 분쇄장에서의 분쇄매체의 움직임과 분쇄시료의 입자형상 변화를 관찰하여 상관 관계를 검토하였다.

2. 실 험

본 실험에서는 하지이엔지(HAJI Eng. Korea)에서 제작한 매체형 전동밀(전동 볼 밀)을 사용하였다. 매체형 전동밀의 포트 재료는 스테인리스스틸이고, 포트 직경은 67.7 mm 내경은 40 mm, 길이는 42 mm, 부피는 45 ml이다. 분쇄매체의 재질은 알루미늄, 지르코니아 그리고 스테인리스스틸을 사용하였으며, 1, 3, 5, 7 mm의 크기의 매체를 사용하였다[6-9]. 본 연구에 사용된 분쇄시료로는 산업현장에서 고강도 경량 합금재료로 다양하게 사용되는 구리분말((주)알드리치, 순도 99.9%, 중위경 25 μm)을 사용하였다(Fig. 1). 포트에 투입하는 매체와 구리분말의 양 즉, BPR (Ball Powder Ratio)은

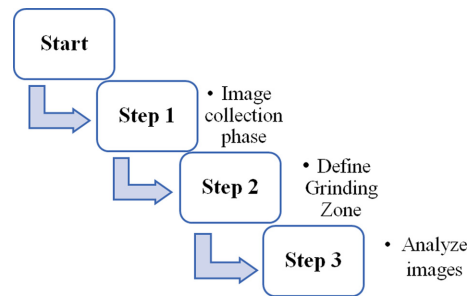


Fig. 2. The procedure of image analysis of the ball motion in a traditional ball mill [13].

Table 1. Experimental conditions

Experimental conditions		
Rotation speed [rpm]	100, 300, 500	
Milling time [h]	24	
BPR [based on wt%]	10:1	
Ball filling ratio [-]	0.3	
Material of pot	stainless steel	
Material of media	alumina, zirconia, stainless steel	
Density of media [g/cm ³]	Alumina	4.36
	Zirconia	6.22
	Stainless steel	7.95
Size of media [mm]	1, 3, 5, 7	

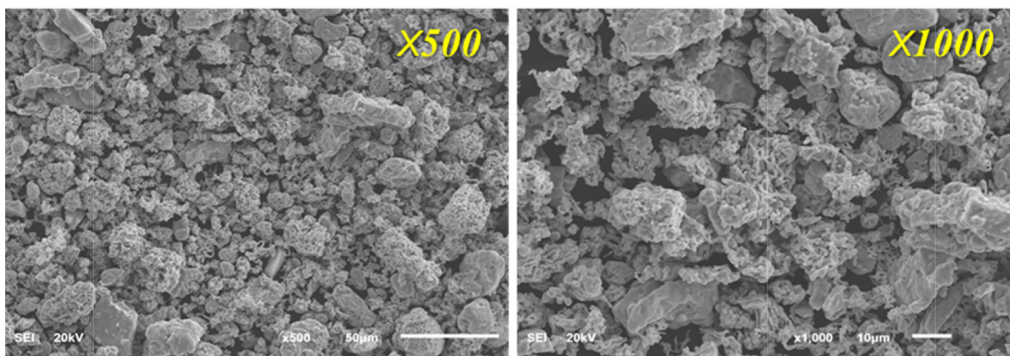


Fig. 1. SEM photograph shows the starting materials employed in this study.

10:1로 하였다. 밀의 회전속도는 각각 100, 300, 500 rpm으로 변화시켜 실험하였고, 최대 24시간까지 분쇄를 하였다. 입자형상 변화는 일본의 JEOL사제(Model: JMS6510) 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. Table 1에 각각 매체의 종류에 따른 밀도와 함께 본 실험의 실험 조건을 나타내었다. 그리고 분쇄 시뮬레이션을 행하기 위하여, 밀 용기 내에서 종류가 다른 매체의 움직임을 관찰

Table 2. Simulation parameters

Simulation conditions	Traditional ball mill		
	Ball to ball	Ball to wall	
Friction coefficient [-]	Alumina media	2.0	0.1
	Zirconia media	1.0	0.5
	Stainless steel media	0.3	0.1
Rotation speed [rpm]	100, 300, 500		
Ball diameter [mm]	1, 3, 5, 7		
Number of media	1 mm	12,376	
	3 mm	582	
	5 mm	113	
	7 mm	36	
Density of media [g/cm ³]	Alumina	4.36	
	Zirconia	6.22	
	Stainless steel	7.95	
Ball filling ratio [-]	0.3		

하여 실제 회전속도에 따라 달라지는 매체의 움직임을 동영상으로 촬영하였고, 최적의 시뮬레이션 조건을 통하여 DEM 시뮬레이션을 행하였다. Table 2에 본 실험에 맞는 시뮬레이션의 조건을 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 실제의 실험조건과 일치하게 하기 위하여 소프트웨어 내에서 구동할 수 있는 조건에서는 모든 것을 일치시켰다. 또한 분쇄가 이루어지는 영역인 분쇄장을 설정하고, 화상해석기(Image J)를 통하여 수집단계 및 접촉 점수 계측 단계를 이용하여 정량적으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 매체형 전동밀에서 공정조건 최적화를 위한 분쇄매체 선정에 관해 고찰하기 위해서, 크기와 재질이 다른 3 가지 종류의 분쇄매체의 움직임을 실제 비디오 촬영 및 DEM 시뮬레이션을 통해 행하여 비교 분석하였고, 그 결과를 통해 구리 분말 입자 형상변화에 미치는 공정조건의 영향을 알아보았다. 분쇄매체의 크기와 재질을 달리하여 그 거동을 관찰하는 것은 같은 회전수에서도 분쇄매체의 크기와, 밀도차에 의해 움직임이 달라져, 분쇄시료에 전달되는 분쇄매체의 충격에너지 즉, 충격에너지가 다르게 되고, 그 결과 최종 생산물의 특성이 다르게 되는 메커니즘을 규명하고자 하였다.

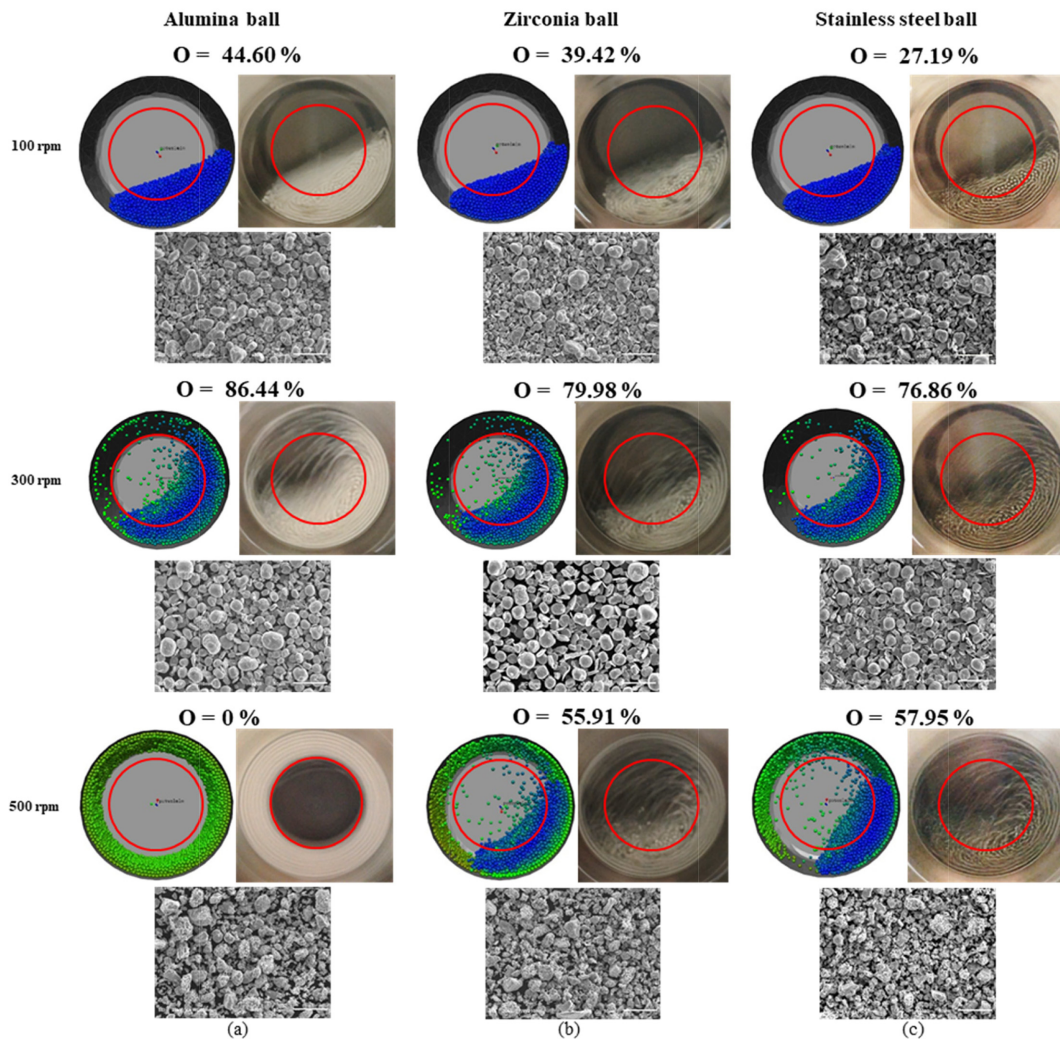


Fig. 3. Simulation and real snapshots of ball motion with SEM images (a) Alumina ball (b) Zirconia ball (c) Stainless steel ball, (Ball size 1 mm) [6].

또한 이전에 많은 연구에서 행해졌던, 같은 크기와 재질의 분쇄매체를 사용하더라도, 회전수를 달리 하여 분쇄매체의 움직임을 관찰하기 위해, 실제 비디오 촬영을 통한 분쇄매체의 움직임과 DEM 시뮬레이션을 통한 분쇄매체 움직임의 비교, 그리고 분쇄가 이루어지는 분쇄장에서의 분쇄매체의 움직임을 관찰하여 최종 생산물에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 3-6는 매체 직경 1, 3, 5, 7 mm의 경우에 회전속도를 각각 100, 300, 500 rpm으로 수행한 실험 결과를 보여 준다.

Fig. 3에서는 매체 직경 1 mm, 회전속도 100, 300, 500 rpm으로 실험 한 결과이다.

Fig. 3(a)는 알루미나 재질의 분쇄매체를 이용하고 회전속도가 100, 300, 500 rpm으로 회전하는 분쇄장에 대한 이미지 분석의 결과이다. 본 연구에서는 분쇄가 실제로 일어나는 분쇄장에서 분쇄매체가 거동하는 영역을 이미지 분석장비를 이용하여 전체적인 2차원 점유 분율(백분율)을 파악하였으며, 100 rpm에서 분쇄매체가 거동하는 분율이 44.60%, 300 rpm에서 86.44%, 500 rpm에서 0%이

었다. Fig. 3(b)에서는 지르코니아 재질의 분쇄매체를 이용했을 때 100 rpm에서는 39.42%, 300 rpm에서 79.98%, 500 rpm에서 55.91%를 차지했다. Fig. 3(c)에서 100, 300, 500 rpm에서는 27.19, 76.86, 57.95 퍼센트를 각각 차지하였다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 실제 분쇄장에 분쇄매체가 거동하는 분율이 올라갈수록 분쇄매체의 움직임이 폭포처럼 움직이는 모습을 보였다. 따라서 회전속도와 매체의 재질이 적절하게 상호작용을 하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4에서는 매체 직경 3 mm, 회전속도 100, 300, 500 rpm으로 실험한 결과이다.

Fig. 4(a)에서는 알루미나 재질의 분쇄매체가 100 rpm에서 실제 분쇄장에 분쇄매체가 거동하는 분율이 40.52 %, 300 rpm에서 74.43 %, 500 rpm에서 0 %이었다. 알루미나 재질의 분쇄매체를 사용할 경우, 500 rpm에서 분쇄장에서는 아무런 거동이 보이지 않았다. 왜냐하면 회전속도가 500 rpm 이상이 되면 임계 회전속도를 넘게 되어, 분쇄매체가 포트 벽면과 함께 돌아가는 결과가 나타나기 때문이다. 이 때는 분쇄매체의 충격에너지가 분쇄시료에 전달되지

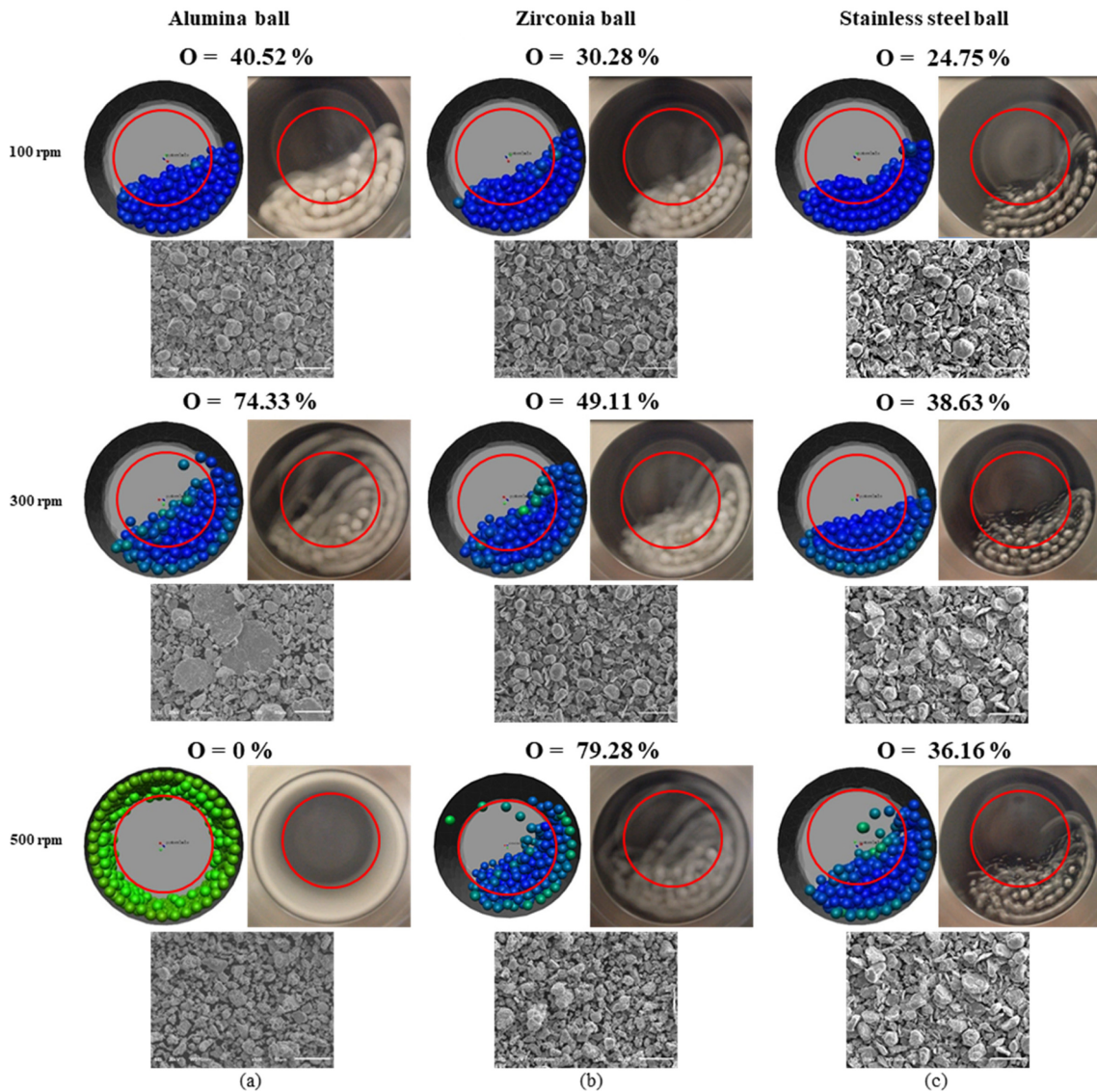


Fig. 4. Simulation and real and snapshots of ball motion with SEM images (a) Alumina ball (b) Zirconia ball (c) Stainless steel ball, (Ball size 3 mm) [6].

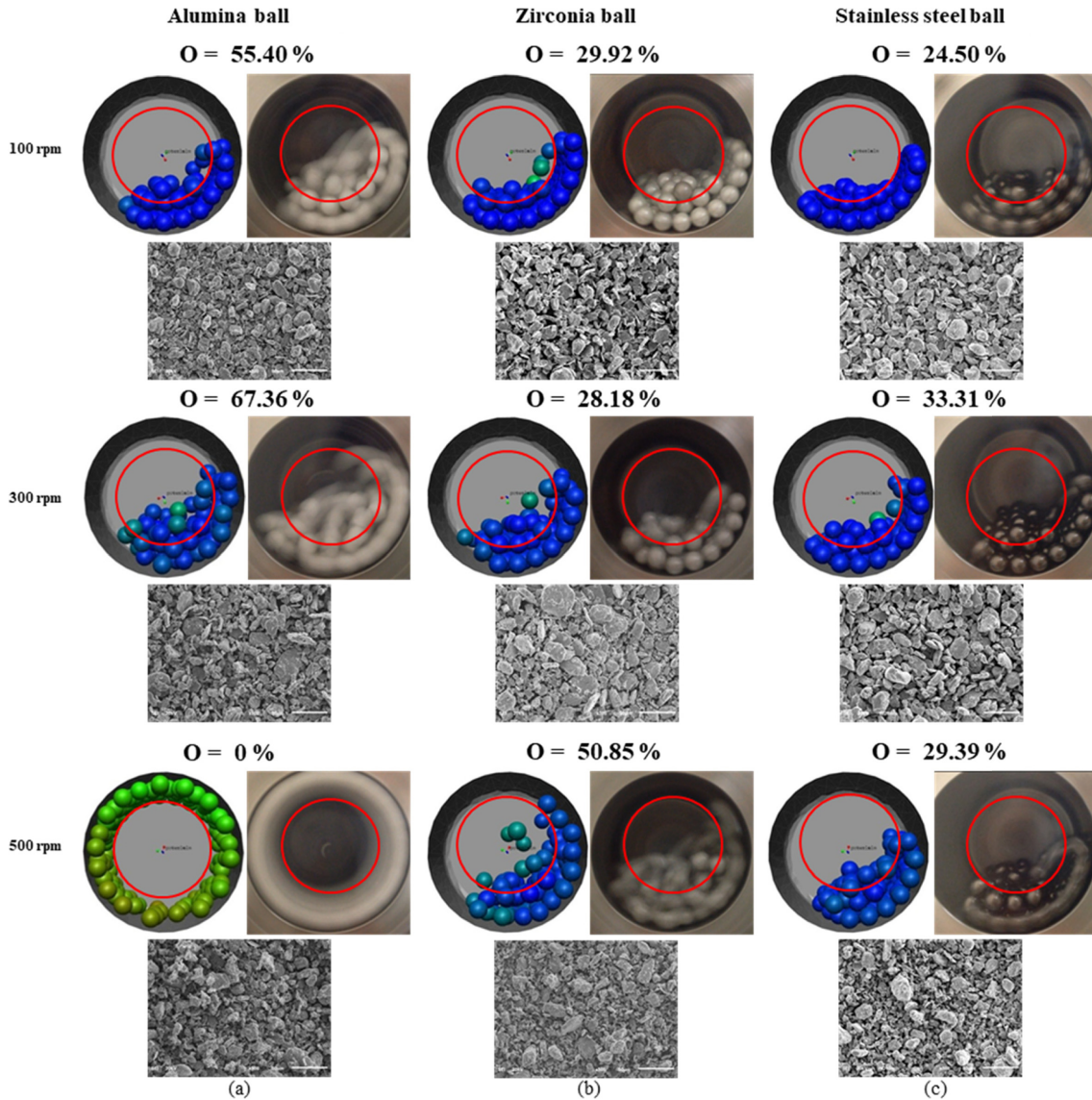


Fig. 5. Simulation and real snapshots of ball motion with SEM images (a) Alumina ball (b) Zirconia ball (c) Stainless steel ball, (Ball size 5 mm) [8].

않아 아무런 분쇄 효과를 내지 못하게 된다. Fig. 4(b)에서는 지르코니아 매체를 이용했을 때 100 rpm에서는 30.28%, 300 rpm에서 49.11%, 500 rpm에서 79.28%를 차지했다. Fig. 4(c) 스테인리스스틸 재질의 분쇄매체를 사용하였을 경우, 100, 300, 500 rpm에서는 24.75, 38.63, 36.16 퍼센트를 각각 차지하였다. 즉 매체의 재질에 따라서 회전 수가 올라갈 경우에도 임계회전속도에 도달하는 분쇄매체와 회전속도와의 상관관계가 다르므로, 결과적으로 매체의 재질과 회전속도와의 상관관계를 면밀히 검토할 필요가 있다고 생각된다.

Fig. 5에서는 분쇄매체의 직경 5 mm, 회전속도 100, 300, 500 rpm으로 실험한 결과이다.

Fig. 5(a)에서는 알루미늄 재질의 분쇄매체를 사용하였을 경우, 분쇄장에서 분쇄매체가 거동하는 분율이 100 rpm에서 55.40%, 300 rpm에서 67.36%, 500 rpm에서 0%이었다. 즉 500 rpm에서 분쇄매체가 포트벽면을 따라 회전하기 때문에 입자형상 변화를 볼 수 없었다. Fig. 5(b)의 지르코니아 재질의 분쇄매체를 사용했을 경우

100, 300, 500 rpm에서 29.92%, 28.18%, 50.85%이었다. Fig. 5(c) 스테인리스스틸 재질의 분쇄매체의 경우, 24.50%, 33.31%, 29.39%를 각각 차지하였다.

Fig. 6에서는 분쇄매체 직경 7 mm, 회전속도 100, 300, 500 rpm으로 실험한 결과이다.

Fig. 6(a)에서는 알루미늄 재질의 분쇄매체를 사용하고 회전속도가 100, 300, 500 rpm으로 실험한 결과이다. 100 rpm에서 분쇄장에 분쇄매체가 거동하는 분율이 50.07%, 300 rpm에서 67.04%, 500 rpm에서 0%이었다. Fig. 6(b)에서는 지르코니아 재질의 분쇄매체를 사용했을 때 100 rpm에서는 45.76%, 300 rpm에서 36.53%, 500 rpm에서 39.07%를 차지했다. Fig. 6(c)에서 100, 300, 500 rpm에서는 50.27, 38.88, 30.03 퍼센트를 각각 차지하였다.

매체형 분쇄기에서 매체의 운동에 관해 DEM 시뮬레이션으로 해석한 연구는 이전에도 많이 있었고, 충격 에너지도 계산하였다 [10-12]. Rosenkranz, S.는 매체형 분쇄기에서 매체의 운동을 관찰하였고, 매체 운동과 스트레스 조건을 측정하기 위해 유성 볼 밑에

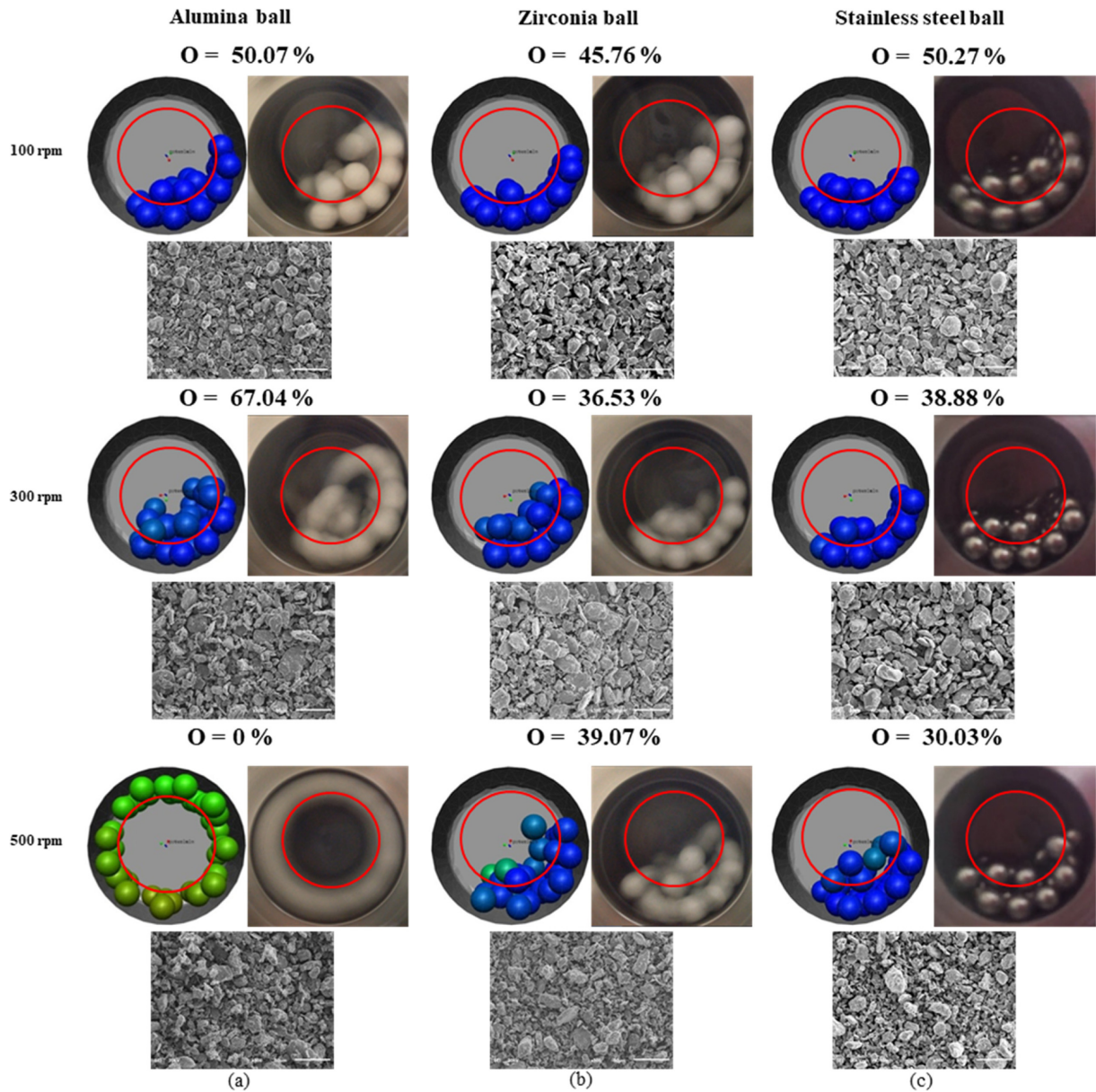


Fig. 6. Simulation and real snapshots of ball motion with SEM images (a) Alumina ball (b) Zirconia ball (c) Stainless steel ball, (Ball size 7 mm) [8].

고속 비디오 카메라를 사용하여 분쇄 과정에서 매체의 움직임을 분석하였다. 또한 시뮬레이션 모델을 사용하여 마찰 계수가 매체 운동, 상대 충돌 속도 및 응력 에너지 분포에 강하게 영향을 준다는 것을 보여주었다[12].

Table 3에 매체의 재질 및 크기를 다르게 하고, 회전속도를 100, 300, 500 rpm으로 변화 시키면서 매체가 분쇄장에서 분쇄매체의 거동하는 분율을 정량적으로 나타내었고, 입자형상 변화 관찰결과를 나타내었다.

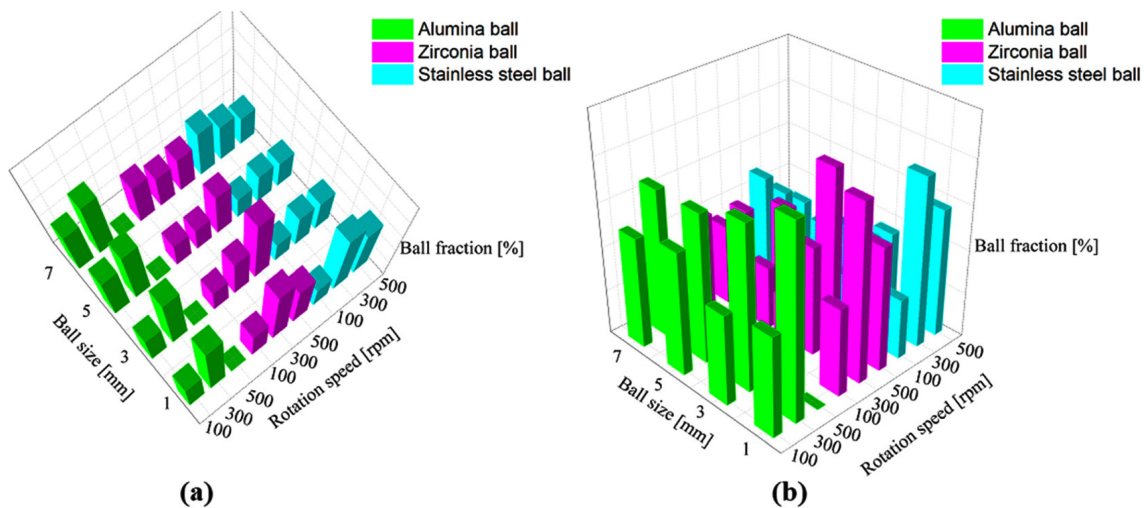
전체적인 입자형상 변화를 살펴보면, 분쇄장 내에서 매체의 분율이 클수록 원로입자의 형상이 괴상(massive)형태에서 판상(plate)형태로 바뀌었고, 그 중간단계에서 구형(spherical)형태의 모습을 볼 수 있었다. 또한 분쇄 매체가 포트의 벽면을 따라 회전하는 경우, 즉 분쇄장에 분쇄매체의 분율이 거의 차지하지 않는 경우에는 역시 입자형상 변화는 거의 없었다. 또한 알루미늄 재질의 매체를 이용

한 실험에서는 500 rpm의 회전속도에서는 매체의 크기가 어느 경우라든 상관 없이 분쇄장에 들어가는 분율이 0%으로 나타났고, 입자형상 변화도 거의 없었다. 따라서 본 실험에 사용된 매체형 전동밀에서는 알루미늄 재질의 매체를 사용하는 경우 매체의 크기에 상관없이 500 rpm이상에서는 분쇄효과가 거의 없다는 것을 보여준다. 또한 지르코니아 재질의 분쇄매체를 사용하였을 경우, 100 rpm에서 7 mm 경우에, 300, 500 rpm에서는 3 mm의 경우에 분쇄장에 거동하는 분율이 제일 높았고, 스테인리스 재질의 분쇄매체를 사용한 경우에는 100 rpm에서 7 mm, 300, 500 rpm에서는 3 mm의 경우에 분쇄장에 거동하는 분율이 제일 높았다.

또한 입자형상의 변화를 살펴보면, 낮은 회전속도(100 rpm), 중간 회전속도(300 rpm)에서 1 mm 매체를 사용했을 때 괴상(massive type)의 입자형상을 가지는 구리분말이 3가지 종류 매체에 모두 구형(spherical type)의 형태로 변화되는 것을 관찰할 수 있었다. 높은 회

Table 3. Comparison of the ball motion with various experimental conditions

Ball material	Ball size [mm]	Particle Morphology		Ball fraction [%]	Particle Morphology		Ball fraction [%]	Particle Morphology	
		Before milling	After milling		Before milling	After milling		Before milling	After milling
		100 rpm			300 rpm			500 rpm	
Alumina ball	1	44.60	spherical	86.44	spherical	0	0	no change	
	3	40.52	plate	74.33	plate	0	0	no change	
	5	55.40	plate	67.36	plate	0	0	no change	
	7	50.07	plate	67.04	plate	0	0	no change	
Zirconia ball	1	39.42	spherical	79.98	spherical	55.91	55.91	slightly plate	
	3	30.28	Massive type	49.11	Massive type	79.28	Massive type	79.28	plate
	5	29.92		28.18		50.85		50.85	plate
	7	45.76		36.53		39.07		39.07	plate
1	27.19	spherical		76.86		spherical		57.95	57.95
Stainless steel ball	3	24.75	plate	38.63	plate	36.16	36.16	plate	
	5	24.50	plate	33.31	plate	29.39	29.39	slightly plate	
	7	50.27	plate	38.88	plate	30.03	30.03	slightly plate	

**Fig. 7. Ball fraction for the different size and material of the milling media in the grinding zone (a) view from the top (b) view from the side.**

전속도(500 rpm)에서는 알루미늄 재질의 매체의 경우 분쇄장에서 분쇄매체의 거동하는 분율이 0%로 나타나서 입자형상의 변화가 없었다. 즉 매체가 포트 벽면을 따라 회전하기 때문에 입자형상에 큰 영향을 미치지 않았고, 판상에 가까운 형태로 적은 변화를 살펴 볼 수 있었다. 알루미늄, 지르코니아, 스테인리스 재질에 3 mm 크기 매체의 경우 100 rpm, 300 rpm에서 구리분말이 괴상(massive) 형태에서 판상(plate) 형태로 변화된 것을 확인할 수 있었다. 500 rpm에서는 알루미늄 재질의 매체를 사용한 경우에는 형상의 변화가 거의 없었고, 지르코니아 및 스테인리스스틸에서 입자형상이 판상형태로 변화되었다. 5, 7 mm의 경우, 100, 300 rpm에서 3가지 종류의 매체에서 모두 입자형상이 판상형태로 변화되었고, 높은 회전속도 500 rpm에서는 지르코니아 매체에서 입자형상이 판상형태로 바뀌었고, 스테인리스스틸 매체에 5, 7 mm 분쇄장에 들어가는 분율이 각각 29.39, 30.03%로 나타나서 입자형상이 완벽한 판상형태는 아니고 판상에 가까운 형태로 변화되었다.

Fig. 7은 본 실험에서 각각 재질이 다른 분쇄매체를 사용하여 매체 크기의 변화 및 가장 중요한 조건인 회전속도의 변화를 3차원 그래프로 정리한 결과이다. 그래프에서 보는 바와 같이 알루미늄 불을 사용하였을 경우, 제일 높은 회전속도 500 rpm에서 분쇄매체

가 거동하는 분율이 매체의 크기에 상관없이 모두 0%로 나타났고, 중간 회전속도 300 rpm에서 가장 높은 것으로 관찰되었다. 이는 역시 밀도가 상대적으로 낮은 분쇄 매체의 경우 마찰계수와 원심력의 상호작용으로 회전속도가 빨라질 경우 분쇄 매체가 모두 포트 벽면으로 붙어 포트와 함께 회전한다는 것을 직접적으로 확인할 수 있었다.

지르코니아 분쇄매체를 사용하였을 때, 분쇄장에서 분쇄매체의 거동하는 분율이 100 rpm에서 제일 낮았고, 300, 500 rpm에 비슷하게 나타난 것을 알 수 있었다.

밀도가 가장 높은 스테인리스스틸 재질의 경우, 중간 회전속도 300 rpm, 제일 작은 볼 크기 1 mm에 분쇄장에서 분쇄매체의 거동하는 분율이 제일 높은 것으로 관찰하였고, 500 rpm, 1 mm에 그 다음을 차지하였다, 나머지 실험 조건 등을 보면 비슷하게 나타났다.

또한 분쇄매체의 크기를 비교해보면 1 mm 볼 사용하였을 때 불 재질이 상관없이 300 rpm에서 분쇄매체의 거동하는 분율이 제일 높았고, 3 mm 볼의 경우, 알루미늄 불이 300 rpm, 지르코니아 불의 경우 500 rpm에서 제일 높았다는 것으로 정량적인 결과를 얻을 수 있었다. 볼 크기 5, 7 mm의 경우, 알루미늄 재질이 300 rpm에서 제일 높았다, 지르코니아의 경우 500 rpm에서 제일 높았다는 것

로 확인되었다.

즉 분쇄매체의 크기만을 가지고 비교하였을 경우, 매체 개개의 크기에 다른 밀도차에 의한 분쇄장에서 분쇄 매체가 차지하는 분율의 차는 거의 없었고, 회전속도에 적합한 분쇄매체의 크기가 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 분쇄기의 종류와 분쇄 포트의 크기 그리고 분쇄 포트의 재질 등 다양한 변수가 존재 하는 것도 확인 할 수 있었다. 따라서, 매체형 전동밀을 사용하는 경우, 분쇄매체의 재질, 크기에 따라서 분쇄장에서 거동하는 분쇄 매체의 분율이 다르고, 이에 따라 입자 형상과 크기의 변화도 달라지는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 매체형 전동밀을 사용하여 공정조건 최적화를 위한 매체 선정에 관하여 직경과 재질이 다른 분쇄 매체를 이용하여 매체의 움직임 실체 비디오 촬영 및 3차원 DEM 시뮬레이션을 행하였다. 또한 비디오 촬영을 통한 스냅샷 사진들을 통해 실제로 분쇄가 이루어지는 분쇄장에서 분쇄매체의 거동하는 분율을 측정하여 정량적으로 측정하고, 입자형상 변화를 관찰하였다. 이 때의 결과를 보면 분쇄 매체의 선정이 재질 및 크기에 따라서 같은 회전 속도라도 그 결과가 매우 다르다는 확인할 수 있었다. 즉, 분쇄 매체의 밀도가 상대적으로 낮은 분쇄 매체의 경우 마찰계수와 원심력의 상호작용으로 회전속도가 빨라질 경우 분쇄 매체가 모두 포트 벽면으로 붙어 포트와 함께 회전한다는 것을 직접적으로 확인 할 수 있었다. 그리고 분쇄매체의 크기만을 가지고 비교하였을 경우, 매체 개개의 크기에 다른 밀도차에 의한 분쇄장에서 분쇄 매체가 차지하는 분율의 차는 거의 없었고, 회전속도에 적합한 분쇄매체의 크기가 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 매체의 특성에 따라 회전속도가 빨라질 경우에도 임계회전속도에 도달하는 매체의 특성이 다른 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 이에 따라서 분쇄시료를 입자형상 및 크기도 달라지는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 매체형 분쇄기에서 공정 조건의 최적화를 위해서는, 매체의 특성(재질, 크기 등)과 회전속도와의 상관관계를 면밀히 검토할 필요가 있다고 제언하게 되었다.

감 사

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

1. Blecher, L., Kwade, A. and Schwedes, J., "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in Stirred Media Mill. Part 1: Energy Density Distribution and Motion of Single Grinding Beads," *Pow. Tech.*, **86**, 59-68(1996).

2. Kwade, A., Blecher, L. and Schwedes, J., "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in Stirred Media Mill. Part 2: Stress Intensity and Its Effect on Comminution," *Pow. Tech.*, **86**, 69-76 (1996).
3. Watanabe, H., "Critical Rotation Speed for Ball-milling," *Powd. Tech.*, **104**, 95-99(1999).
4. Rose, H. E. and Sullivan, R. M. E., "A Treatise on the Internal Mechanics of ball tube and Rod mills," Constable, London 35-68 (1957).
5. Cho, H. C., "Manufacturing Ultra-Powder by Grinding," *Powder Engineering Summer Workshop*, **16**, 54-64(2002).
6. Amgalan, B., Ichinkhorloo, B., Battsetseg, J., Lee, J. and Choi, H., "Particle Morphology Behavior and Milling Efficiency by DEM Simulation during Milling Process for Composites Fabrication by Traditional Ball Mill on Various Experimental Conditions - Effect of Rotation Speed, Ball Size, and Ball Material," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(2), 191-203(2018).
7. Amgalan, B., Uyanga, B., Battsetseg, J., Lee, J. and Choi, H., "Particle Morphology Change and Quantitative Input Energy Variation during Stirred Ball Milling Process by DEM Simulation on Various Experimental Conditions," *Korean J. Mater. Res.*, **28**(3), 148-158(2018).
8. Batchuluun, I., Amgalan, B., Uyanga, B., Lee, J. and Choi, H., "Particle Morphology Change and Different Experimental Condition Analysis during Composites Fabrication Process by Conventional Ball Mill with Discrete Element Method (DEM) Simulation," *Korean J. Mater. Res.*, **26**(11), 611-622(2016).
9. Uyanga, B., Amgalan, B., Batchuluun, I., Lee, J. and Choi, H., "Analysis of Particle Morphology Change and Discrete Element Method (DEM) with Different Grinding Media in Metal-based Composite Fabrication Process Using Stirred ball mill," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(4), 546-466(2017).
10. Sakuragi, S., Amgalan, B., Lee, J. and Choi, H., "Particle Morphology via Change of Ground Particle for Various Experimental Conditions During a Grinding Process by Three Kinds of Media Mills," *Par. Aerosol Res.*, **11**(1), 9-19(2015).
11. Amgalan, B., Sakuragi, S., Lee, J. and Choi, H., "Comparative Study for Standardization of Grinding Equipment During Dry Grinding Process by Various Grinding Mills," *Korean J. Mater. Res.*, **25**(6), 305-316(2015).
12. Christine, F. and Arno, K., "Process Engineering with Planetary Ball Mills," *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 7660-7667(2013).
13. Khoa, H. X., Bae, S., Bae, S., Kim, B. and Kim, J., "Planetary Ball Mill Process in Aspect of Milling Energy," *J. Kor. Powd. Met. Inst.*, **21**, 155-164(2014).
14. Rosenkranz, S., Breitung-Faes, S. and Kwade, A., "Experimental Investigations and Modelling of the Ball Motion in Planetary Ball Mills," *Powd. Tech.*, **212**, 234-230(2011).
15. Choi, H., Lee, J. H. and Choi, J., "New Evaluation Method for the Particle Size and Morphology via Change of Ground Particle During a Grinding Process," *Par. Aerosol Res.*, **9**(1), 1-6(2013).