



정적 및 동적 이미지 분석법을 활용한 세라믹 분말의 흐름 특성 평가

문예원^{1,2}, 이호동^{1,2}, 오지희^{2,3}, 김진애^{2,3}, 이동원² , 오종민³ 

¹ 한양대학교 재료화학공학과

² 한국산업기술시험원 재료기술센터

³ 광운대학교 전자재료공학과

초록: 세라믹 분말은 첨단 산업 분야에서 다용도로 활용되는 중요한 소재이며 입자 크기, 입도 분포, 흐름 특성 등과 같은 세라믹 분말의 기본 특성은 최종 제품의 품질과 성능을 결정하는 데 핵심적인 역할을 한다. 일반적으로 분말의 특성은 입자 크기 및 형상 분석을 통해 평가되었다. 그러나 이러한 방법은 분말의 흐름, 응집 및 마모와 관련된 현상을 종합적으로 이해하는 데 한계가 있다. 때문에, 분말의 흐름 특성 분석을 통한 성능 평가가 점점 더 많이 적용되었다. 이전에는 주로 funnel 기반의 방식을 사용하여 흐름 특성이 평가되었다. 그러나 이는 수 마이크로미터 이하의 작은 분말이나 응집성이 강한 분말에 적용하기 어렵다는 점과 신뢰성이 낮다는 한계점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 이미지 분석법을 이용하여 흐름 특성을 측정하는 새로운 장비를 소개하고, 이미지 분석법을 적용한 정적 및 동적 거동에 대한 다양한 파라미터를 제시하고자 한다. 제시한 장비는 세라믹 분말의 크기나 형상에 관계없이 모든 종류의 세라믹 파우더에 적용할 수 있으므로 뛰어난 범용성을 제공한다. 예시로 선정된 다양한 크기 및 형상을 가지는 세라믹 분말의 정적 및 동적 이미지 분석을 통해 장비 원리 및 측정 방법을 소개하였다.

키워드: 이미지 분석법, 세라믹 분말, 흐름 특성, 회전 드럼, 자동 상승 실린더

Evaluation of Flow Properties of Ceramic Powders Using Static and Dynamic Image Analysis Methods

Ye-Won Moon^{1,2}, Hyo-Dong Lee^{1,2}, Ji-Hui Oh^{2,3}, Jin-Ae Kim^{2,3}, Dong-Won Lee², and Jong-Min Oh³

¹ Department of Materials Science & Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Korea

² Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul 08389, Korea

³ Department of Electronic Materials Engineering, Korea Testing Laboratory, Seoul 01897, Korea

(Received February 3, 2025; Revised February 20, 2025; Accepted February 20, 2025)

Abstract: Ceramic powder is an important material used for various purposes in advanced industries, and the fundamental properties of ceramic powder such as particle size, particle size distribution, and flow properties play a decisive role in determining the quality and performance of the final product. In general, these properties have been evaluated through particle size and shape analysis. However, these methods have limitations in providing a comprehensive understanding phenomena related to powder flow, coagulation, and wear. Consequently, performance evaluation based on the analysis of powder flow properties has been increasingly adopted. Previously, flow properties were primarily assessed using funnel-based methods.

✉ Dong-Won Lee; dwlee@ktl.re.kr

Jong-Min Oh; jmOH@kw.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
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.

However, these methods have limitations, as they are challenging to apply to powders smaller than a few micrometers or those with strong coagulation tendencies, and they also suffer from low reliability. To address these issues, this paper introduces a novel piece of equipment that measures flow properties using image analysis and presents various parameters for static and dynamic flow behavior based on this technique. The proposed equipment offers exceptional versatility, as it can be applied to all types of ceramic powders regardless of their size or shape. The principles and measurement methods of the equipment are demonstrated through static and dynamic image analysis of ceramic powders with varying sizes and shapes used as examples.

Keywords: Image analysis, Ceramic powder, Flow properties, Rotating drum, Automatic moving cylinder

1. 서론

- 세라믹 분말은 반도체 및 디스플레이, 자동차 및 항공 우주, 이차전지, 연료전지, 고온수전해, 방열 소재 등 첨단 산업 전반에 걸쳐 다양도로 사용되는 소재이며, 공정에 따라 내식성, 열 전도성, 내구성, 내마모성, 내열성, 절연성 등 다양한 특성을 갖는 소재로 제조된다. 이러한 세라믹 소재는 특성에 따라 다양한 산업 분야에 활용되고 있다 [1-13].
- 원료 분말의 특성은 최종 제품의 기계적, 화학적, 물리적 성질 및 품질에 결정적인 영향을 미치기 때문에 입자 크기, 입도 분포, 입자 형상, 비표면적, 흐름 특성 등과 같은 분말 특성을 중요하게 고려해야 한다. 일반적으로 분말의 기본 특성(basic properties)을 평가하는 방법으로 입자 크기 분석(particle size analysis) 방법과 입자 형상 분석(particle shape analysis) 방법 [14-18]이 광범위하게 적용되며, 입자 크기 및 입도 분포를 통해 제품의 품질 및 성능을 관리하는 것으로 알려져 있다.
- 그러나 입자 크기 분석만으로는 분말의 흐름, 응집, 마모, 마찰, 적층 특성 같은 입자 현상을 이해하기에 충분하지 않으므로 크기, 형상 등의 입자의 기본 특성을 포함하면서 분말의 흐름 특성도 함께 고려하여 분말의 성

능을 분석해야 한다.

- 입자의 흐름 특성을 분석하는 방법은 전통적으로 Hausner ratio 및 Carr's index 분석 또는 그림 1(a)와 같이 funnel을 이용하여 유동성(flowability) 및 안식각(angle of repose) 등을 평가하는 방법이 있다 [19].
- 그러나 응집성이 강하거나 미세한 분말의 경우 funnel 내의 구멍(orifice)이 막히는 arching 및 bridging 현상 [20,21]으로 인해 측정이 어렵다는 한계가 있다(그림 1(b)). 또한, clinging이나 funnel flow에 의한 ratholing 현상 [20-22]으로 인해 funnel에 남은 잔류 분말이 흐름 특성 측정에 반영되지 않아 신뢰성 있는 평가가 어렵다는 문제점이 있다 (그림 1(b)).
- 이러한 문제로 인해 funnel을 사용하는 평가 방법을 적용할 수 있는 세라믹 분말은 매우 제한적이다. 과립 분말(granule powders), 수십 마이크로 크기의 구형 세라믹 분말 등은 funnel을 이용한 기존 방법을 적용할 수 있으나 수 마이크로 이하의 세라믹 분말들은 기존 방법을 적용하기 어렵다.
- 이러한 문제점을 해결하기 위해 이미지 분석법(image analysis)을 적용한 회전 드럼(rotating drum) 또는 전단 셀(shear cell)을 사용하는 분말 레오미터(powder

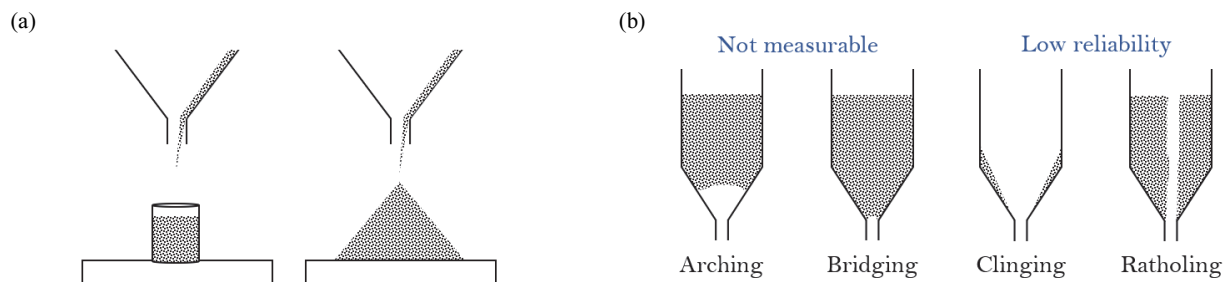


Fig. 1. (a) Test method for flow properties using funnel and (b) low reliability by clinging and ratholing phenomenon. Not measurable due to arching and bridging phenomenon.

rheometers) 등 새로운 분석 방법들을 적용한 장비에 대해 연구되었다 [19,23,24].

- 이미지 분석법은 낮은 응력(low consolidation stress) 하에 중력에 의한 흐름(gravity-driven flow)을 통해 형성된 분말의 이미지를 분석하는 방법으로 1차 입상 분말(primary particle powder)부터 최종 제품 분말까지 모든 종류의 세라믹 분말에 적용할 수 있다. 또한, 분말의 응집 특성과 관계없이 응집력이 없는(non-cohesive) 분말부터 강한 응집력이 있는(strong cohesive) 분말까지 넓은 범위에 적용 가능하다.
- 본 논문에서는 이미지 분석법을 적용하여 세라믹 분말의 정적 및 동적 거동에 대한 흐름 특성을 평가하는 방법에 대해 소개하고, 응집 및 흐름 특성에 대한 파라미터를 제시하고자 한다. 흐름 특성 분석 방법에 대한 이해를 돕기 위해 다양한 크기 및 형상을 가지는 세라믹 분말을 선정하여 분말특성에 따른 흐름 특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 정적 및 동적 이미지 분석

2.1.1 정적 거동에 대한 이미지 분석

- 분말의 정적 및 동적 거동에 대한 이미지를 통해 세라

믹 분말의 흐름 특성을 분석할 수 있으며, 분말의 정적 및 동적 거동에 따라 적용하는 장비와 분석법을 구분할 수 있다.

- 정적 이미지를 통한 흐름 특성 분석은 하나의 분말 이미지를 통해 정적 거동을 분석하는 방식이며, 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석은 연속적인 분말 이미지를 통해 장비 내의 분말의 동적 거동을 분석하는 방식을 사용한다.
- 본 논문에서는 정적 이미지를 분석하기 위해 직접 개발한 자동 상승 실린더 장비를 사용하였다. 그림 2(a)는 자동 상승 실린더 장비의 모식도를 나타낸 것으로 실린더, 자동 모터 장치, 바탕판, 카메라 등으로 구성되어 있다.
- 자동 상승 실린더 장비는 일정 부피의 분말이 투입된 실린더가 자동 모터 장치에 의해 일정속도로 상승하는 동안 중력에 의해 자연스럽게 형성되는 원뿔 형태의 분말 더미를 분석한다. 그림 2(b)는 자동 상승 실린더 장비를 통해 형성된 실제 분말 더미의 이미지이며, 이러한 이미지를 통해 흐름 특성을 평가한다.
- 실린더를 이용한 흐름 특성 분석에서 실린더의 상승 속도, 실린더의 크기, 바닥면의 거칠기 등과 같이 장비 설정 및 구성이나 실린더 내의 분말 높이, 분말의 질량, 밀도, 수분 함량 등에 의해 흐름 특성이 달라질 수 있다 [19,25]. 실린더를 통해 분말 더미가 형성될 때, 분말의 질량, 실린더 내의 분말 종횡비, 바닥면의 거칠기에 의한 영향에 대해 연구되었다 [26].

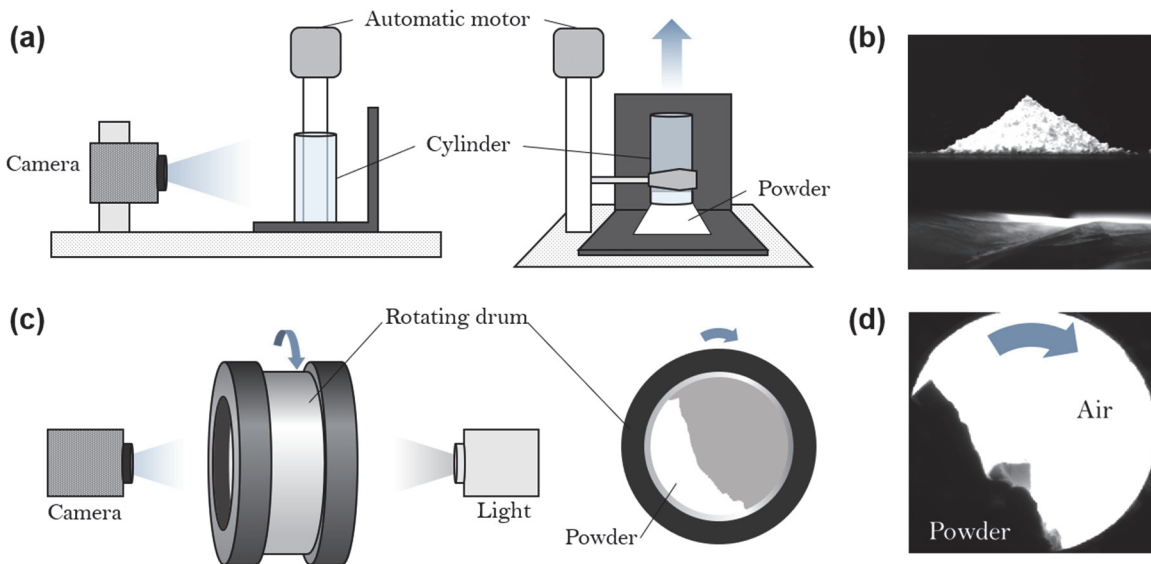


Fig. 2. (a) Automatic moving cylinder for static image analysis, (b) a cone-shaped pile of powder, (c) rotating drum for dynamic image analysis, and (d) a real image of the powder in drum.

2.1.2 동적 거동에 대한 이미지 분석

- 일반적으로 분말의 동적 이미지 분석에서는 회전 드럼 (rotating drum) 또는 회전 실린더(rotating cylinder) 장비를 사용한다. 본 논문에서는 동적 이미지 분석을 위해 동적 분말 흐름 특성 분석기(Revolution Powder Analyzer, Mercury Scientific Inc., USA)를 사용하였고, 장비는 그림 2(c)와 같이 드럼(또는 실린더), 자동 회전롤러, 카메라, 조명 등으로 이루어져 있다.
- 회전 드럼을 이용한 동적 이미지 분석은 그림 2(d)와 같이 분말이 투입된 드럼이 일정한 속도로 회전하면서 드럼 내의 분말이 거동하는 모습을 전하 결합 장치(CCD) 카메라로 촬영하여 수집된 데이터를 분석하는 방법이다.
- 회전 드럼은 자동 회전롤러에 의해 일정한 속도로 회전하며, 드럼을 따라 회전하는 분말은 흐름 특성에 따라 특정 위치에서 무너지는데, 이를 분말의 쇄도(avalanche) 발생이라고 한다.
- 분말의 디지털 이미지는 픽셀 단위로 수집되어 위치 정보를 인식하며, 분말과 공기의 계면은 가장자리 알고리즘(edge detection algorithm)에 의해 인식된다.
- 회전 드럼의 회전속도는 0.3 rpm으로 설정하는 것을 권장하는데 이는 외부의 힘을 최소화하여 분말이 중력에 의해 자연스럽게 흐르도록 하므로 순수 분말의 거동을 파악하는데 도움이 된다. 또한, 0~1.6 rpm에서 동적 흐름 특성 분석을 진행한 결과 0.3 rpm이하의 속도에서 일관된 데이터가 나타나는 것으로 연구되었다 [27].

- 회전 드럼을 통한 흐름 특성 분석 방법은 반복성과 재현성이 뛰어나다. 회전 드럼형 분말 레오미터(rotating drum powder rheometers)의 반복성과 재현성 평가를 위한 실험실 간 연구에 따르면, 동적 안식각(dynamic angle of repose) 데이터의 변동 중 6%는 반복성에 기인하며, 5%는 재현성에 기인한 것으로 나타났다 [28].

2.2 정적 및 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석

2.2.1 정적 이미지를 통한 흐름 특성 분석

- 정적 이미지 분석 장비를 통해 형성된 분말 더미는 카메라를 통해 자동으로 촬영되며, 분말 이미지는 프로그램에 내장된 소프트웨어를 통해 역 원근 변환(inverse perspective transform)을 거쳐 얻은 변환영상(transformed image)을 통해 흐름 특성 파라미터들을 분석할 수 있다.
- 경사각(angle of inclination)은 분말 더미가 형성하는 원추형 각도로 경사면에 추세선을 그려 측정하며, 프로그램을 통해 측정 지점을 설정할 수 있다. 분말의 최고점을 기준으로 좌측과 우측의 각도를 각 3 포인트씩 분석하였으며, 측정 포인트는 그림 3(a)와 같이 각도가 눈에 띄게 변화하는 부분을 기점으로 삼등분하여 경사각을 나타내었다.
- 이러한 방식으로 경사각을 측정한 데이터를 통해 경사각의 평균, 경사각의 편차 등을 분석할 수 있다. 이러한

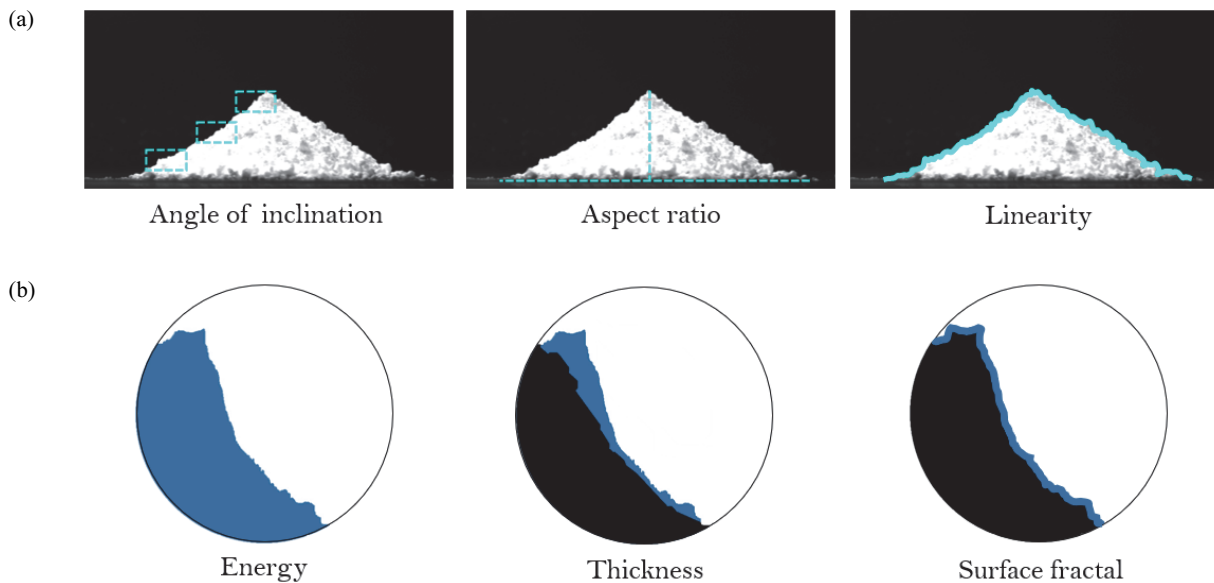


Fig. 3. (a) Parameters of static image analysis and (b) parameters of dynamic image analysis.

데이터를 활용하여 높이에 따른 경사각 편차를 분석하거나, 동일한 높이에서의 좌우측간의 경사각 편차 분석을 통해 분말 더미의 대칭성을 분석할 수 있다.

- 윤곽도(outline)는 좌표계로 나타나는 분말 계면의 위치 정보로, 분말의 바닥면부터 분말 표면까지의 수직 거리로 측정되며, 분말의 양 끝 포인트와 그 사이의 100 포인트를 지정하여 총 102개의 윤곽도를 분석하였다.
- 이러한 윤곽도 데이터를 바탕으로 종횡비(aspect ratio), 선형성(linearity)을 분석할 수 있다. 종횡비는 분말 더미의 너비와 높이의 비로, 그림 3(a)와 같이 분말의 너비는 바닥면을 기준으로 분말의 양 끝 포인트의 길이로 인식되며, 분말의 높이는 분말의 최고점부터 바닥면까지의 수직 길이로 인식되어 윤곽도의 최대값으로 계산된다. 선형성은 분말의 경사면이 선형을 나타내는 정도로, 측정 데이터의 최고점을 기준으로 좌우측의 데이터들에 대한 선형 회귀분석 결과인 선형 예측 함수와 비교한 일치도를 분석하였다.

2.2.2 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석

- 동적 이미지 분석에서 드럼 내의 분말은 드럼을 따라 회전하면서 분말 더미를 형성하는데, 이를 building 단계라고 한다. 낮은 속도로 회전하는 분말이 일정 높이까지 상승한 후 쇄도를 일으키는데, 분말의 쇄도 발생 직전의 이미지를 peak 단계라고 하며, 쇄도 발생 직후는 change라고 한다.
- 이러한 분말의 연속적인 거동을 카메라로 촬영하여 수집된 데이터를 통해 동적 이미지에 대한 파라미터들을 분석할 수 있다. 회전 드럼을 이용한 흐름 특성 분석에

서는 주로 동적 안식각(dynamic angle of repose)과 쇄도각(avalanche angle)을 대표적인 척도로 사용하였다 [24,27-34].

- 동적 안식각은 쇄도 발생 후의 최소 힘에서의 분말 각도의 평균값으로, 동적 연속 이미지에서 분말 표면의 경사면과 쇄도 후의 수평면 사이의 각도를 분석한다.
- 쇄도각은 쇄도 시작 전의 최대 힘에서의 분말 평균 각도로 쇄도 전의 이미지로부터 분석된다.
- 분말의 흐름 특성을 분석하기 위해서는 동적 안식각과 쇄도각 이외에도 다양한 파라미터를 종합적으로 고려해야 하며, 흐름 특성에 관한 주요한 파라미터들은 표 1에 나타나 있다.
- 쇄도 에너지(avalanche energy)는 분말의 쇄도를 통해 배출되는 에너지의 양으로, 쇄도 전 에너지 레벨과 쇄도 후의 에너지 레벨 차이의 평균값으로 계산되며, 에너지 레벨은 각 픽셀의 질량, 중력가속도, 높이를 통해 계산되는 각 픽셀의 중력 퍼텐셜 에너지의 합으로 구한다.
- 파열 에너지(break energy)는 회전 드럼의 회전이 시작되기 전의 분말의 시작 에너지 레벨과 쇄도 시작 전의 분말의 최대 에너지의 차로 각 쇄도가 시작하기 위해 필요한 에너지의 평균을 나타낸다. 파열 에너지는 분말의 입자 상호작용에 의한 응집성을 나타내는데 우수한 것으로 연구되었다 [30].
- 두께(thickness)는 분말의 상단 표면을 따라 일정 두께의 층으로 흐르는 흐름층의 두께로 분말이 흐를 때의 이미지를 분석하여 평균 픽셀 수와 픽셀 크기를 곱한 값으로 계산된다.
- 응집력(cohesion-T)은 드럼과 함께 위로 이동하는 분말

Table 1. Parameters of flow properties.

Type	Parameters	Contents
Static	Angle of inclination (°)	The angle formed by the powder falling on the surface.
	Aspect ratio	The ratio of the length and width of the shape of the powder.
	Linearity	The agreement between the outline of the powder and the linear prediction function.
Dynamic	Dynamic angle of repose (°)	The angle of the powder at the minimum energy after an avalanche.
	Avalanche angle (°)	The angle of the powder at the maximum energy before an avalanche.
	Avalanche energy (mJ/kg)	The amount of energy released by an avalanche in the powder.
	Break energy (mJ/kg)	The amount of energy required to start each avalanche.
	Thickness (mm)	Thickness of the layer flowing along the upper surface of the powder.
	Cohesion-T (mJ/kg)	The average of the shear stress created by the thickness of the flowing layer.
	Surface fractal	The degree of surface roughness of the powder expressed as a relative number.
	Surface linearity	An indication of the surface linearity of the powder.

로 구성된 정지층과 분말 표면 아래로 흐르는 분말의 흐름층 사이의 경계면에서 발생하는 전단력을 나타낸다.

- 표면 거칠기(surface fractal)는 분말 표면이 거친 정도를 상대적인 숫자로 표현한 값으로 표준 거칠기 계산(fractal calculation)에 따라 달라질 수 있다.
- 표면 선형성(surface linearity)은 분말 표면에 대한 선형 상관관계수(linear correlation) 값으로 쇄도 후의 분말 표면의 선형성을 나타낸다.
- 그림 3(b)는 중력 퍼텐셜 에너지, 두께, 표면 거칠기가 동적 거동 이미지로부터 분석되는 방법을 나타낸 것이다.

2.3 이미지를 통한 흐름 특성 분석 결과

2.3.1 크기 및 형상이 다른 세라믹 분말 특성 분석

- 일반적으로 분말 거동은 반발력, 마찰력, 응집력, 기체 상호작용 등에 의해 영향을 받는다고 알려져 있으며, 응집력은 정전기적 인력, 반데르발스 상호작용, 자기 쌍극자-쌍극자 상호작용, 표면에너지 등과 같이 입자 상호작용에 의해 결정된다 [35].
- 일반적으로 흐름 특성은 입자 크기 및 입자 크기 분포, 입자 형상, 응집력, 마찰 및 접착력에 영향을 받는다고 알려져 있다 [27,29,31,32,34,36].
- 입자 크기와 입도 분포는 분말의 응집성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 입자 크기가 감소하면 반데르발스 상호작용, 표면에너지에 의한 영향 증가 등에 의해 응집성이 증가하여 좋지 않은 흐름 특성이 나타나

는 것으로 연구되었다 [32,36].

- 입도 분포의 폭이 감소함에 따라 분말 내의 미립자 함량이 감소하여 입자 간 반데르발스 상호작용이 감소하기 때문에 좋은 흐름 특성이 나타나는 것으로 연구되었다 [34].
- 또한, 분말의 흐름 특성은 입자 형상에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 [27,29], 입자 형상이 입자 간 마찰에 의한 흐름 특성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다 [36].
- 입도 분포, 입자 형상, 입자 표면 거칠기에 따른 흐름 특성에 대해 연구되었으며 [31], 입자의 형상과 마찰 및 접착력 조건에 따른 흐름 특성에 대해 연구되었다 [27].
- 정적 및 동적 거동에 대한 이미지를 통해 흐름 특성을 분석하기 위해 세 종류의 세라믹 분말 ZrO₂(Cenotec, Korea), AlOOH(KC, Korea), TiO₂(US Research Nanomaterials, Inc., USA)을 준비하였다. 분말의 특성 분석에 사용한 세 종류의 세라믹 분말은 110°C 오븐에서 2시간 건조하여 수분을 제거하였다.
- 세라믹 분말의 입자 형상은 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, MIRA-3XMU, TESCAN)를 사용하여 분석하였으며, 입도 분석기(particle size analyzer, MICROTRAC, Bluewave)를 통해 세라믹 분말의 입자 크기와 입도 분포를 분석하였다.
- 그림 4에서 분말의 원형도 및 종횡비가 1에 가깝고 중간 입도(D₅₀)가 49.67 μm인 구형 ZrO₂ 분말, 중간 입도

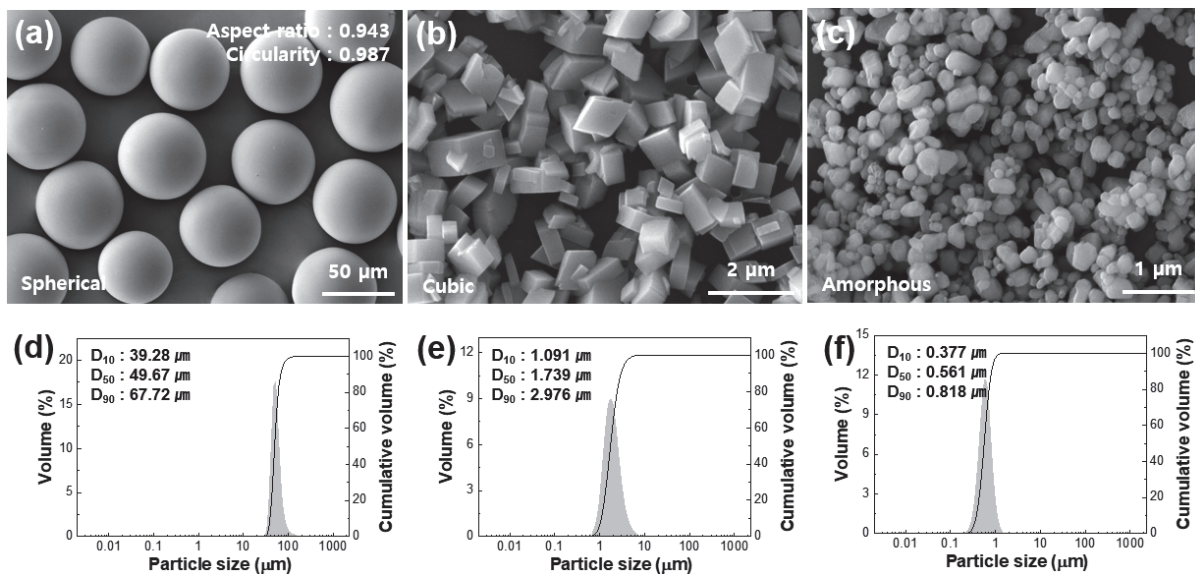


Fig. 4. SEM image and particle size distribution of ceramic powders: (a, d) ZrO₂, (b, e) AlOOH, and (c, f) TiO₂.

(D_{50})가 1.739 μm 인 큐빅 형상의 AlOOH 분말, 중간 입도(D_{50})가 0.561 μm 이며 무정형의 TiO_2 분말을 확인할 수 있다.

- 그림 4(d-f)는 입도 분석기를 통해 세라믹 분말의 입자 형상과 입도 분포를 분석한 결과로 구형 세라믹 분말은 입도 분포 그래프의 폭을 나타내는 Span 값($(D_{90} - D_{10})/D_{50}$)이 0.57로 나타났다. 반면 큐빅 형상의 세라믹 분말 및 무정형의 세라믹 분말은 각각 1.08, 0.79로 구형 세라믹 분말에 비해 큰 span 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.
- 이러한 분석을 통해 얻은 세라믹 분말의 정보를 기반으로 입자 크기, 입도 분포 및 형상이 다른 세 종류의 세라믹 분말을 대상으로 정적 및 동적 이미지를 통한 흐름 특성을 분석하였다.

2.3.2 정적 이미지를 통한 분말의 흐름 특성 분석

- 우선, 정적 이미지 분석을 통해 크기 및 형상이 다른 세 종류의 세라믹 분말의 흐름 특성을 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다.
- 정적 이미지 분석을 위해 직경이 20 mm인 아크릴 소재의 실린더와 내식성 금속제의 연마된 바탕판을 사용하였으며, 시료는 바탕판의 바닥면을 기준으로 5 cm 높이까지 실린더에 투입하였다. 자동 모터 장치의 속도는 200 mm/sec로 고정하였으며, 100 mm만큼 실린더를 상승시켰다.
- 이에 따라 실린더 내부의 분말이 중력에 의해 낙하하며

형성된 원뿔 형태의 분말 더미의 이미지를 그림 5(a-c)에 나타내었다. 또한, 그림 5(d-f)는 분말 더미의 윤곽선과 선형회귀분석 결과를 통해 얻은 기준선을 나타낸 것이다.

- 그림 5의 흐름 특성 분석 데이터는 그림 5(a-c)에 나타난 분말 더미의 이미지로부터 얻은 흐름 특성 분석 결과이며, 세 종류의 세라믹 분말의 각 5개의 정적 이미지를 분석한 결과는 표 2에 나타내었다.
- 일반적으로 우수한 흐름 특성을 갖는 분말은 좌우대칭을 이루는 이상적인 원뿔 형상이 나타나고 더 완만한 원뿔을 형성하며, 이에 따라 낮은 경사각과 종횡비의 값을 갖는다. 또한, 이상적인 흐름 특성을 갖는 분말은 표면이 고른 형태를 형성하여 선형성은 1에 가까운 값을 나타낸다.
- 원형도 및 종횡비가 1에 가까운 값을 나타내는 구형 세라믹 분말은 그림 5(a, d)와 같이 좌우대칭을 이루는 이상적인 형태의 프로파일을 얻을 수 있었으며, 분말 더미의 종횡비가 0.181, 경사각의 평균은 19.8°임을 확인할 수 있었고, 선형성은 0.999로 1에 가까운 값이 나타났다. 중간 입도(D_{50})가 1.739 μm 인 큐빅 형상의 세라믹 분말의 정적 이미지 분석 결과, 경사각의 평균은 40.8°, 종횡비는 0.396, 선형성은 0.986임을 확인할 수 있었고, 중간 입도(D_{50})가 0.561 μm 이며 무정형의 세라믹 분말은 경사각의 평균이 31.0°, 종횡비는 0.304, 선형성은 0.991임을 확인할 수 있었다.
- 표 2에서 세 종류의 세라믹 분말의 각 5개의 이미지 분

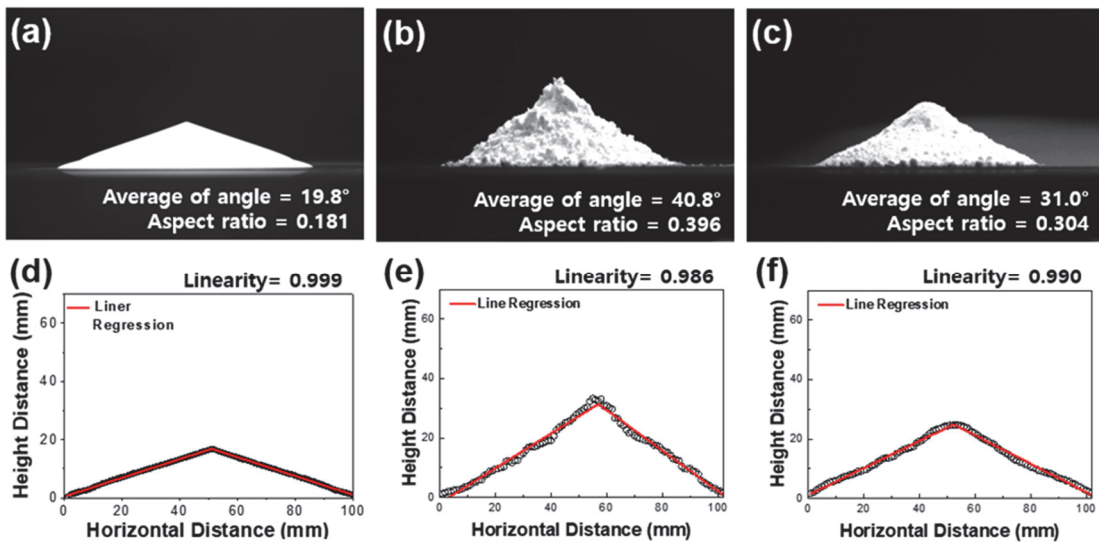


Fig. 5. Static image analysis of ceramic powders: (a, d) ZrO_2 , (b, e) AlOOH , and (c, f) TiO_2 .

Table 2. Results for flow properties obtained from static and dynamic images.

Type	Parameters	ZrO ₂	AlOOH	TiO ₂
Static	Average of angle of inclination (°)	13.7	36.4	29.6
	Average of aspect ratio	0.12	0.368	0.294
	Average of linearity	0.995	0.978	0.992
	Standard deviation of angle of inclination	0.297	1.778	0.525
	Standard deviation of aspect ratio	0.00526	0.0161	0.0164
	Standard deviation of linearity	0.00139	0.0067	0.00535
Dynamic	Dynamic angle of repose (°)	22.3	52.5	40.6
	Avalanche energy (mJ/kg)	4.15	37.17	17.31
	Break energy (mJ/kg)	11.39	134.27	75.25
	Thickness (mm)	0.28	8.56	3.7
	Cohesion-T (mJ/kg)	4.26	44.26	24.78
	Surface fractal	1.86	8.8	2.47
	Surface linearity	1	0.93	0.983

석을 통해 얻은 결과의 평균값과 표준편차를 나타내었다. 경사각은 하나의 이미지에서 6 포인트를 측정된 값의 평균값으로 전체 경사각의 평균과 경사각의 표준편차를 계산하였고, 종횡비와 선형성은 하나의 이미지에서 측정된 값을 통해 평균과 표준편차를 구하였다.

- 구형 세라믹 분말의 전체 경사각의 평균은 13.7°, 종횡비의 평균은 0.120, 선형성의 평균은 0.995임을 확인하였다. 큐빅 형상의 세라믹 분말의 전체 경사각의 평균은 36.4°, 종횡비와 선형성의 평균은 0.368, 0.978임을 확인하였으며, 무정형의 세라믹 분말의 전체 경사각의 평균은 29.6°, 종횡비와 선형성의 평균은 0.294, 0.992임을 확인하였다.
- 정적 이미지에 대한 흐름 특성 분석 결과, 구형 세라믹 분말은 큐빅 형상의 세라믹 분말과 무정형의 세라믹 분말보다 더 작은 경사각, 종횡비의 평균값과 1에 가까운 선형성의 평균값을 가져 더 우수한 흐름 특성을 보였으며, 구형 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말, 큐빅 형상의 세라믹 분말 순서대로 좋은 흐름 특성이 나타나는 것을 확인하였다.
- 또한, 세 종류의 세라믹 분말의 경사각, 종횡비, 선형성의 표준편차는 구형 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말, 큐빅 형상의 세라믹 분말의 순서대로 작은 값이 나타났으며, 표준편차가 작은 분말일수록 더 균일한 흐름 특성 분포를 갖는 분말임을 확인할 수 있었다.

2.3.3 동적 이미지를 통한 분말의 흐름 특성 분석

- 회전 드럼을 통한 동적 이미지 분석에 사용한 드럼은 200 cm³이며, 시료 분말은 100 cm³를 투입하였다. 쇄도 임계치(avalanche threshold)는 쇄도로 판단되는 변화율로 설정한 변화율만큼 분말 이미지가 변화하면 쇄도로 인식되며, 본 연구에서는 0.65%로 설정하였다.
- 회전 드럼을 통한 동적 이미지 분석에서 0.3 rpm의 속도로 회전하며 100회의 쇄도 발생을 통해 얻어진 데이터를 표 2에 나타내었다. 그림 6(a-c)는 동적 이미지 분석에서 얻은 분말의 쇄도 발생 전과 후의 이미지이다.
- 동적 이미지 분석에서 쇄도 발생 전 분말의 위치는 분말의 흐름 특성에 의해 결정된다. 응집성이 강한 분말의 쇄도가 발생하기 위해서는 강한 입자간 힘을 극복해야 하기 때문에 많은 중력 퍼텐셜 에너지가 필요하므로 더 높은 위치에서 쇄도가 발생하여 분말의 위치 정보를 통해 분석되는 쇄도각, 쇄도 에너지, 파열 에너지 등의 파라미터는 큰 값을 갖는다. 또한, 응집성이 강한 분말은 분말의 표면이 고르지 않은 형태를 보이며, 쇄도가 발생한 후 많은 양의 분말이 재배치되어 두꺼운 흐름층의 두께가 나타난다.
- 표 2에서 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석 결과, 구형 세라믹 분말의 동적 안식각은 22.3°, 큐빅 형상의 세라믹 분말과 무정형의 세라믹 분말은 각각 52.5°, 40.6°임을 확인하였다.
- 구형 세라믹 분말의 쇄도 에너지와 파열 에너지는 4.15

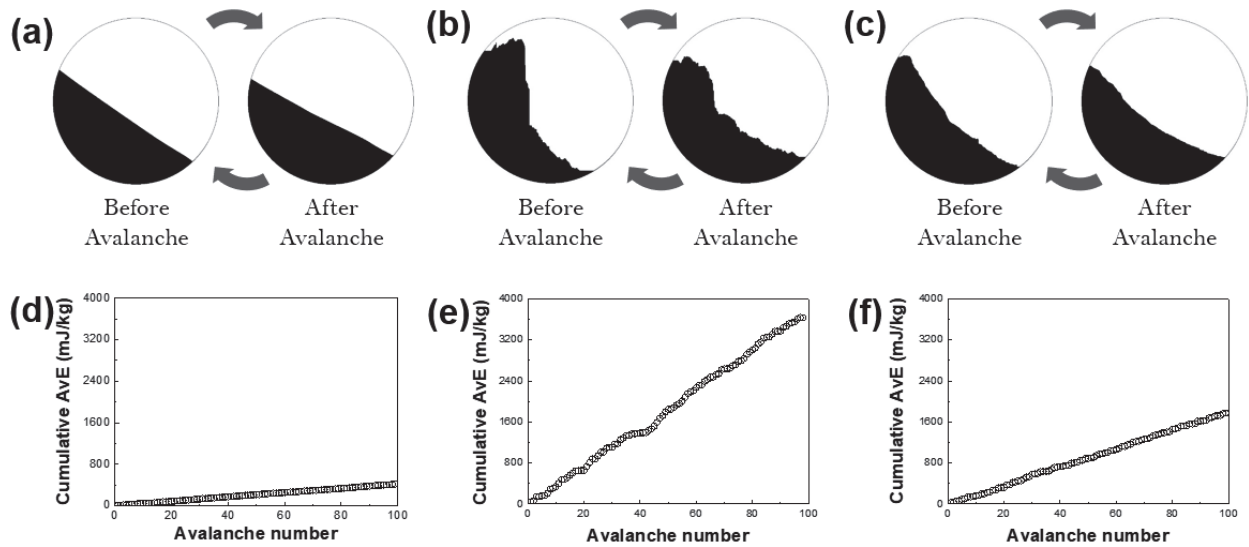


Fig. 6. Dynamic images of ceramic powders: (a) ZrO_2 , (b) $AlOOH$, and (c) TiO_2 . Cumulative avalanche energy of ceramic powders: (d) ZrO_2 , (e) $AlOOH$, and (f) TiO_2 .

mJ/kg과 11.39 mJ/kg임을 확인하였으며, 큐빅 형상의 세라믹 분말과 무정형의 세라믹 분말의 쇄도에너지는 각각 37.17 mJ/kg과 17.31 mJ/kg이며, 파열 에너지는 134.27 mJ/kg과 75.25 mJ/kg임을 확인하였다.

- 구형 세라믹 분말, 큐빅 형상의 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말의 흐름층의 두께는 각각 0.28 mm, 8.56 mm, 3.7 mm임을 확인하였으며, 응집력은 4.26 mJ/kg, 44.26 mJ/kg, 24.78 mJ/kg임을 확인하였다.
- 구형 세라믹 분말의 표면 거칠기와 표면 선형성은 1.86, 1의 값이 나타났으며, 큐빅 형상의 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말의 표면 거칠기는 각각 8.8과 2.47, 표면 선형성은 0.93과 0.983임을 확인하였다.
- 그림 6(d-f)는 세라믹 분말의 누적 쇄도 에너지를 나타낸다. 완전한 기울기를 가질수록 작은 쇄도 에너지를 가지기 때문에 흐름 특성이 우수하며, 그래프의 개형이 직선에 가까울수록 균일한 쇄도 에너지 분포를 보인다. 일반적으로 흐름 특성이 좋지 않은 분말의 파라미터는 불균일한 분포를 나타낸다 [37].
- 이를 통해 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석에서 구형 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말, 큐빅 형상의 세라믹 분말의 순서대로 흐름 특성이 우수함을 확인하였으며, 세라믹 분말의 모든 파라미터에서 일관된 경향성을 확인할 수 있었다.
- 정적 및 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석 결과, 수십 마이크로 크기의 구형 세라믹 분말에서 가장 우수한 흐름 특성이 나타났다. 또한, span 값이 작은 순서인 구

형 세라믹 분말, 무정형의 세라믹 분말, 큐빅 형상의 세라믹 분말 순서대로 우수한 흐름 특성을 가지는 것을 확인하였다.

3. 결론

- 본 연구에서는 세라믹 분말의 정적 및 동적 이미지를 활용하여 흐름 특성을 평가하는 이미지 분석법을 제시하였다.
- 정적 이미지 분석에서는 자동 상승 실린더를 통해 형성되는 원뿔 형태의 분말 더미의 이미지를 분석하여 경사각, 종횡비, 선형성 등의 파라미터를 분석하는 방법에 대해 소개하였다.
- 동적 이미지 분석에서는 회전 드럼 내의 분말 거동의 이미지를 분석하여 분말의 위치 정보에 기반한 다양한 파라미터를 분석하였다.
- 세 종류의 세라믹 분말 ZrO_2 , $AlOOH$, TiO_2 의 정적 및 동적 이미지를 통한 흐름 특성 분석 실험을 통해 이미지 분석법을 활용하여 흐름 특성을 분석하는 방법에 대해 소개하였으며, 입자 크기 및 입도 분포와 흐름 특성의 상관관계를 고찰하였다.
- ZrO_2 , $AlOOH$, TiO_2 의 흐름 특성 분석 결과는 본 연구에서 제시한 장비와 방법이 세라믹 분말의 입자 크기, 입도 분포, 형상, 응집성 등과 무관하게 다양한 세라믹 분말의 흐름 특성을 평가할 수 있음을 보였다.

- 또한, 기존의 측정방식으로는 측정이 불가능했던 수 마이크로 크기의 세라믹 분말인 AlOOH, TiO₂ 분말을 이미징 분석법을 통해 흐름 특성을 평가할 수 있음을 확인하였다.
- 결론적으로 본 연구에서 제시한 이미징 분석법은 다양한 종류의 세라믹 분말에 적용 가능하므로 흐름 특성 분석에서의 범용성을 제공하여 다양한 첨단 산업에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Dong-Won Lee
Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0003-0730-2442>
<https://orcid.org/0000-0001-6303-2876>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발 사업(RS-2024-00432123)과 과학기술정보통신부 기초연구실사업(RS-2024-00415922)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

[1] F. Adamyan, H. Avanesyan, M. Asatryan, S. Chatrchyan, V. Hagopian, B. Harutunyan, M. Haykazyan, A. Hovsepyan, A. Sirunyan, and L. Shinkareva, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, **551**, 285 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.06.061>

[2] T. R. Hinklin, S. C. Rand, and R. M. Laine, *Adv. Mater.*, **20**, 1270 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200701235>

[3] L. S. Mahmud, A. Muchtar, and M. R. Somalu, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **72**, 105 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.019>

[4] M. Covei, I. Visa, and A. Duta, *Adv. Ceram. Coat.* (Elsevier, 2023), pp. 137-155.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99659-4.00012-7>

[5] S. Marimuthu and A. N. Grace, *Adv. Ceram. Energy Storage Thermoelct. Photonics* (Elsevier, 2023), pp. 185-208.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90761-3.00006-1>

[6] V. S. Bhamare and R. M. Kulkarni, *Adv. Ceram. Coat.* (Elsevier, 2023), pp. 157-185.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99659-4.00008-5>

[7] A. Mallik, *Adv. Ceram. Coat.* (Elsevier, 2023), pp. 255-267.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99659-4.00009-7>

[8] S. Das, S. Mukherjee, and A. Jain, *Adv. Ceram. Coat.* (Elsevier, 2023), pp. 269-315.

doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99659-4.00015-2>

[9] M. Najafizadeh, M. Ghasempour-Mouziraji, M. Hosseinzadeh, E. M. Shirkharkolaei, M. Bozorg, and P. Cavaliere, *Adv. Ceram. Coat.* (Elsevier, 2023), pp. 335-356.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99659-4.00010-3>

[10] T. T. Zate, N. Ko, H. L. Yu, W. J. Choi, J. W. Seon, J. J. Ho, and J. Wook, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 214 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.2>

[11] M. M. Mikhailov, A. N. Lapin, S. A. Yuryev, V. A. Goronchko, S. A. Artishchev, N. S. Trufanova, and D. S. Fedosov, *Ceram. Int.*, **50**, 41039 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.415>

[12] S. Choi, U. Kim, Y. Roh, C. B. Dzakpasu, J. Lim, M. Song, J. Rhee, Y. S. Lee, and Y. M. Lee, *J. Power Sources*, **623**, 235427 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235427>

[13] H. Liu, L. Cao, J. Gu, X. Luo, X. Yu, G. Wang, Z. Lu, Y. Hu, Y. Tabak, A. Evcin, M. Spreitzer, W. Li, and K. Song, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **45**, 116957 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116957>

[14] Z. Yu, N. Zhou, Y. Sun, Z. Chen, H. Gong, and B. Shen, *Solid State Sci.*, **144**, 107309 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107309>

[15] X. Sun, B. S. Kuwik, Q. Yang, S. Chocron, R. C. Hurley, R. A. Haber, J. C. LaSalvia, and K. T. Ramesh, *Powder Technol.*, **417**, 118243 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118243>

[16] Y. Ye, Z. He, Z. Qi, W. Ye, and J. Xie, *Ceram. Int.*, **50**, 49770 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.320>

[17] H. Jiang, H. Su, M. Yu, J. Yao, Q. Chen, Z. Shen, X. Li, D. Dong, M. Guo, and Z. Zhang, *Addit. Manuf.*, **81**, 103984 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103984>

[18] W. Shi, Y. Wu, H. Tu, S. Guan, J. Xing, L. Xu, H. Xu, and Q. Chen, *Scr. Mater.*, **258**, 116493 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116493>

[19] H.M.B. Al-Hashemi and O.S.B. Al-Amoudi, *Powder Technol.*, **330**, 397 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003>

[20] M. A. Polizzi, J. Franchville, and J. L. Hilden, *Powder Technol.*, **294**, 30 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.011>

[21] E. P. Maynard, *Proc. IEEE-IAS/PCA Cement Ind. Tech. Conf.* (IEEE, Chattanooga, TN, USA, 2004), pp. 139-147.
doi: <https://doi.org/10.1109/CITCON.2004.1309858>

[22] J. Taillet, *J. Electrostat.*, **30**, 181 (1993).
doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(93\)90073-G](https://doi.org/10.1016/0304-3886(93)90073-G)

[23] M. Krantz, H. Zhang, and J. Zhu, *Powder Technol.*, **194**, 239 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.05.001>

- [24] V. R. Nalluri and M. Kuentz, *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, **74**, 388 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2009.09.010>
- [25] H. Shi, G. Lumay, and S. Luding, *Powder Technol.*, **367**, 183 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.036>
- [26] E. Lajeunesse, A. Mangeney-Castelnau, and J. P. Vilotte, *Phys. Fluids*, **16**, 2371 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1736611>
- [27] L. Dai, Y. R. Chan, G. Vastola, and Y. W. Zhang, *Powder Technol.*, **408**, 117790 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117790>
- [28] V. N. Tondare, J. G. Whiting, A. L. Pintar, S. P. Moylan, A. Neveu, and F. Francqui, *Powder Technol.*, **441**, 119810 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119810>
- [29] H. R. Norouzi, R. Zarghami, and N. Mostoufi, *Chem. Eng. Res. Des.*, **102**, 12 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.06.010>
- [30] Ž. Trpělková, H. Hurychová, M. Kuentz, B. Vraníková, and Z. Šklubalová, *Powder Technol.*, **375**, 33 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.095>
- [31] Y. Zhao, Y. Cui, Y. Hasebe, H. Bian, K. Yamanaka, K. Aoyagi, T. Hagiwara, and A. Chiba, *Powder Technol.*, **393**, 482 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.006>
- [32] D. Portnikov, G. Ziskind, and H. Kalman, *Powder Technol.*, **403**, 117398 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117398>
- [33] S. Pourandi, P. C. van der Sande, T. Weinhart, and I. Ostanin, *Powder Technol.*, **446**, 120176 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120176>
- [34] J. Xie, X. Zhu, Y. Shao, H. Zhang, H. Zhang, and J. Zhu, *Prog. Org. Coat.*, **195**, 108668 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108668>
- [35] G. Lumay, K. Traina, F. Boschini, V. Delaval, A. Rescaglio, R. Cloots, and N. Vandewalle, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, **35**, 207 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2016.04.007>
- [36] H. P. Goh, P.W.S. Heng, and C. V. Liew, *Int. J. Pharm.*, **547**, 133 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.05.059>
- [37] M.A.S. Quintanilla, J. M. Valverde, A. Castellanos, and R. E. Viturro, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 194301 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.194301>