

칼슘 나노분말과 마이크로 분말의 이화학적 특성 비교

백새열림 · 류지나 · 고상훈*
세종대학교 식품공학과

Comparison of Physicochemical Properties of Calcium Carbonate Nano- and Micro-Powders

Sae-Yeol-Rim Paik, Jina Ryu, and Sanghoon Ko*

Department of Food Science and Technology, Sejong University

Abstract

The aim of this study was to compare the physicochemical properties of calcium carbonate nano- and micro-powders for safe food applications of nanomaterials. The morphologies and approximate sizes of calcium particles were observed by scanning electron and transmission electron microscopic methods, showing hexagonal shape with sharp and rough surface. The approximate sizes of the calcium nano- and micro-particles observed on the micrographs were around 100 nm and 100 nm to 3 μ m, respectively. The average particle sizes of the calcium nano- and micro-powders determined by the dynamic light scattering method were 440.2 ± 73.8 and 547.1 ± 105.3 nm at 0.5 mg/mL particle concentration and 388.8 ± 123.2 and 1001.9 ± 160.4 nm at 1.0 mg/mL particle concentration, respectively. The zeta-potential of the calcium nano- and micro-powders were -9.94 ± 1.78 and -2.42 ± 2.38 mV, respectively. It seemed that both calcium nano- and micro-powders were unstable in aqueous conditions but calcium nano-powder was relatively more stable. The results of specific surface area of the calcium nano- and micro-powders were 6.99 and 4.26 m^2/g while the bulk densities of them were similar but the tap densities were 0.81 ± 0.02 and 0.97 ± 0.02 g/mL, respectively. The angles of repose were $35.40 \pm 1.32^\circ$ (nano-powder) and $39.37 \pm 2.46^\circ$ (micro-powder), implying that calcium nano-powder was more flowable. This study provides a potential of various mineral nanoparticles including calcium nanoparticles for future safe food applications.

Key words: calcium nanoparticles, physicochemical property, particle size, zeta-potential, specific surface area

서 론

칼슘은 체내에서 가장 많은 무기질로 뼈와 치아를 구성할 뿐만 아니라 체액에 존재하면서 생리조절 기능을 보이는 중요한 무기질로 널리 알려져 있다(Denk et al., 2007). 세계적으로 고령화 사회가 이슈가 되면서 건강에 대한 관심도 높아짐에 따라 골다공증과 같은 칼슘 대사관련 질병의 완화 등을 위해 칼슘 섭취를 증가시킬 수 있는 많은 연구가 진행되고 있다(Heaney, 2000). 칼슘의 흡수율은 칼슘염의 종류에 따라 다르지만 대부분의 경우 칼슘 섭취량에 비해 흡수율이 낮아 식사 이외에 칼슘을 보충할 수 있는 기능성 식품들이 많이 시판되고 있으며 칼슘의 흡수율을 도울 수 있는 다양한 방법들이 연구되고 있다.

나노물질은 작은 크기 때문에 기존의 마이크로 물질들에 비해 비표면적이 증가하고(Hou et al., 1998) 수용성이 높아지는 것이 특징인데(Douroumis & Fahr, 2006), 이에 따른 잠재적인 물리적, 생물학적, 특성변화의 가능성 때문에 나노물질의 안전관리에 대한 필요성이 점차 증가하고 있다(Thomas & Sayre, 2005). 칼슘의 경우에도 나노화를 통해 칼슘분말의 비표면적을 넓히고 수용성을 높일 수 있으며 이에 따라 칼슘분말의 체내 흡수율을 높일 수 있다고 알려져 있다(Chen et al., 2008). 나노화된 칼슘을 비롯한 나노물질의 안전한 식품적용을 위해서는 잠재적인 위해성을 최소화할 필요가 있는데, 나노물질은 크기가 감소함에 따라 마이크로 물질에서는 나타나지 않았던 이화학적 특성의 변화가 발생할 수 있으므로 충분한 안전성을 확보한 후 식품에 적용을 하는 것이 바람직하다. 나노식품의 안전성을 확보하기 위한 첫 단계는 나노물질의 이화학적 특성을 규명할 수 있는 적절한 분석방법을 제공하는 것인데(Bae et al., 2009), 경제협력기구(OECD)에서는 나노물질의 생체 및 환경에 대한 영향을 파악하고 이들의 안전한 이용을 위하

*Corresponding author: Sanghoon Ko, Department of Food Science and Technology, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea
Tel: +82-2-3408-3260; Fax: +82-2-3408-4319
E-mail: sanghoonko@sejong.ac.kr
Received March 19, 2012; revised May 14, 2012; accepted May 14, 2012

여 나노물질의 이화학적 특성 분석방법에 대한 가이드라인을 제시하고 있다. OECD에서 제시한 이화학적 특성 분석 항목은 총 16 개로 결정크기, 결정상, 수용성, 응집/집적상태, 라디컬형성능, 산화환원전위, 옥탄올-물 분배계수, 다공성, 겔보기 밀도, 광촉매 활성, 표면화학, 제타전위, 비표면적, 입자크기 및 분포, 분진, TEM 등이 있다. 이 항목들 중에서 식품에 적용 가능한 나노물질의 이화학적 특성 규명에 반드시 필요한 항목은 입자크기 및 분포, 응집, 결정크기, 비표면적, 제타전위 등으로 판단되고 있다. 나노물질의 안전한 식품 적용을 위해서는 이들의 이화학적 특성 변화를 기존에 안전하다고 판단되는 마이크로 및 매크로 크기의 물질과 비교 분석한 자료가 필요한데 이에 대한 연구는 아직까지 많이 부족한 실정이며 특히 크기 감소에 따른 이화학적 특성의 변화에 대한 정보를 충분히 획득하여야만 그 정보를 기반으로 유효성연구, 독성연구, 위해성평가 등에 적용 할 수 있다.

본 연구의 목표는 칼슘 나노분말의 이화학적 특성을 칼슘 마이크로분말과 비교분석하고 그 차이를 규명하는 것이다. 이를 위해 방사형 주사현미경 검사(scanning electron microscopy, SEM), 에너지여과형 투과현미경 검사(transmission electron microscopy, TEM), 동적 광산란법(dynamic light scattering, DLS), X-선 회절법(X-ray diffraction, XRD), 질소가스 흡착법, 수증기 흡착법, 전기영동 광산란법(electrophoretic light scattering, ELS), 안식각 측정법을 이용하여 칼슘 나노분말의 이화학적 특성을 칼슘 마이크로분말과 비교하여 분석하였다.

재료 및 방법

재료

칼슘 나노분말과 마이크로분말의 이화학적 특성 비교 분석을 위하여 top-down 방식으로 제조된 칼슘 나노 분말(Calcium Carbonate Nanopowder 100 nm, American Elements, Los Angeles, CA, USA)과 칼슘 마이크로분말(Calcium Carbonate Micropowder 3 μ m, American Elements, Los Angeles, CA, USA)을 구입하여 사용하였다.

형태분석

칼슘 나노 및 마이크로분말의 크기와 형태학적 특성을 분석하기 위하여 전계 방사형 주사현미경(S-4300, Hitachi High-Technologies, Inc., Tokyo, Japan) 과 에너지여과형 투과전자현미경(LEO-912AB Omega, Leo Electron Microscopy, Ltd., Oberkochen, Germany)을 이용하였다. 전계 방사형 주사현미경 관찰을 위하여 시편에 탄소 테이프를 붙인 뒤 시료를 그 위에 소량 올려놓고 시료가 날리지 않을 때까지 충분히 바람을 불어주었다. 그 뒤 시편을 코팅기에 넣고 백금으로 120초간 코팅한 후 현미경에 넣고 관찰하였다. 에

너지여과형 투과전자현미경 관찰을 위하여 전용 시편에 시료를 소량 올려놓고 시료가 날리지 않을 때까지 충분히 바람을 불어준 뒤 현미경에 넣고 관찰 하였다.

크기 분포 분석

입자크기분석기(Delsa Nano C, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, CA, USA)를 이용하여 칼슘 나노 및 마이크로분말의 크기 분포를 분석하였다. 시료 제조를 위하여 칼슘분말의 농도가 각각 0.5, 1 mg/mL가 되도록 첨가하였고 분산 매로는 증류수를 사용하였다. 첨가된 칼슘분말은 볼텍싱 후 초음파분산기(VCX750, Sonic & Materials Inc., Newtown, CT, USA)로 3분간 분산시킨 후 사용하였다. 각 시료 별 3 회 반복 측정 하였다.

제타전위 분석

칼슘 나노 및 마이크로분말의 표면전위 변화를 분석하기 위하여 제타전위분석기(Delsa Nano C, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, CA, USA)를 이용하였다. 제타전위 분석을 위해 증류수에 칼슘분말을 0.5 mg/mL의 농도로 첨가한 후 3분간 초음파 분산시킨 다음 3 회 반복하여 측정하였다.

비표면적 분석

비표면적은 기체 흡착법과 수분 흡착법을 사용하여 측정하였다. 기체 흡착방법은 BET analyzer(ASAP 2405N, Micromeritics Corp., Norcross, GA, USA)를 사용하였으며 수분흡착방법은 dynamic vapor sorption 장치(DVS Intrinsic, Surface Measurement Systems, London, UK)를 사용하였다. BET 측정 전 칼슘분말 0.5 g을 95°C에서 24시간 동안 탈기시킨 후 BET 측정시료로 사용하였다. 수분흡착방법에서는 칼슘분말 20 mg을 오븐에서 2시간 건조시킨 후 데시케이터에서 30분간 방냉 후 시료로 사용하였으며, 이들의 비표면적은 상대습도 0%에서 98%까지 한 시간 단위로 10%씩 상대습도를 높여가며 3 회 반복하여 측정하였다.

밀도

칼슘 나노 및 마이크로분말의 겔보기 밀도는 지름 2.2 cm 인 원통형 실린더에 105°C 오븐에서 1시간 동안 건조시킨 시료를 천천히 퇴적시킨 후 부피와 질량을 측정하여 계산하였다. 그 후 실린더를 약 2 cm 높이로 500 회 상하 왕복 운동을 시켜서 다져진 시료의 부피를 측정하여 다짐 밀도를 계산하였다. 측정은 각각 3 회 반복 하였다.

안식각

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 안식각은 105°C 오븐에서 1시간 동안 건조시킨 칼슘 분말 100 g을 지름 16 cm 깔때기를 통해 높이 15 cm에서 자유낙하 시킨 후 낙하된 분말의 지름과 높이를 측정하여 계산하였으며 3 회 반복하

여 측정하였다.

결과 및 고찰

칼슘 나노 및 마이크로 입자의 형태

SEM 사진에서 관찰된 칼슘 나노 입자의 크기는 약 80-120 nm 였고 전체적으로 비슷한 분포를 나타냈다. 칼슘 마이크로 입자는 100 nm-3 μ m 크기의 입자를 다양하게 함유하고 있었다. 칼슘 나노분말의 현미경 사진에서는 100 nm 전후의 상대적으로 비슷한 크기의 나노 입자들만이 관찰되는 반면에 칼슘 마이크로 분말의 현미경 사진에서는 소수의 마이크로 크기의 큰 입자와 다수의 나노 크기의 입자가 관찰되었다. 칼슘 마이크로 분말을 제조한 제조사의 제품 규격에는 3 μ m 크기의 분말이라고 표기되었는데, 본 연구의 결과와 비교하면 칼슘 마이크로 분말에 존재하는 큰 입자들의 크기와 유사한 크기이지만 전체 입자들의 평균 크기를 반영한 결과는 아니라고 판단된다. 즉, 분쇄방법에 의해 분말을 제조할 경우 제조사에서 제시한 입자의 크기 대한 정보는 일치하지 않는 경우가 많으므로 이에 대한 평균 크기 분석이 반드시 필요하다.

SEM 사진에서 도출할 수 있는 또 다른 결과는 칼슘 입자의 형태학적인 특성이다. 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 현미경 사진에서 분쇄에 의해 제조된 칼슘염 입자의 전형적인 육면체 모양이 관찰되었다. 나노와 마이크로 입자 모두 표면이 날카롭고 거친 것이 관찰되었는데 이는 나노와 마이크로 입자 모두 분쇄 과정을 거치기 때문으로 판단된다(Fig. 1).

Fig. 2는 칼슘 나노 및 마이크로 입자의 TEM 사진 결과이다. TEM 사진에 나타난 칼슘 나노입자의 크기는 위에서 언급한 SEM에 나타난 입자들의 크기 결과와 비슷한 100 nm 전후의 고른 입자 분포를 보였고, 칼슘 마이크로 입자의 크기는 SEM 사진에 나타난 입자 크기의 결과보다 다소 작은 80 nm-2 μ m의 다양한 크기의 입자들이 분포되어 있는 결과를 보였다.

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 입자 크기 분포

DLS법을 통한 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 입도 분석 결과는 분산된 칼슘분말의 농도에 영향을 받았다. 칼슘 분

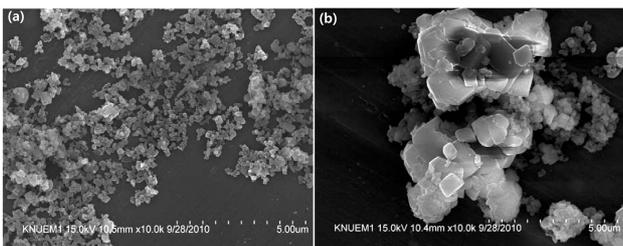


Fig. 1. The SEM images of calcium nano- and micro-powders.

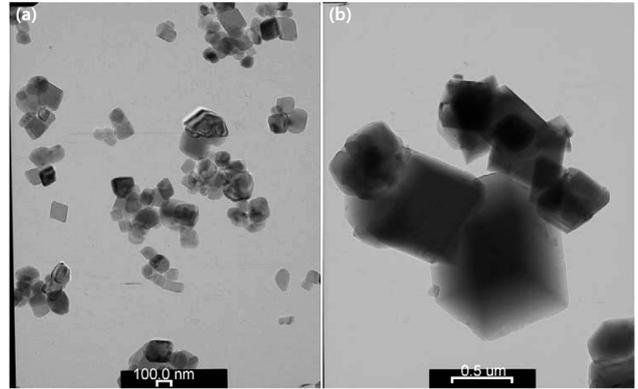


Fig. 2. The TEM images of calcium nano- and micro-powders.

말의 농도가 0.5 mg/mL 일 때, 칼슘 나노 분말의 평균입자크기는 440.2 ± 73.8 nm이었으며, 칼슘 마이크로 분말의 평균입자크기는 547.1 ± 105.3 nm로 분석되었다. 분산된 칼슘분말의 농도가 1.0 mg/mL 일 때, 칼슘 나노 분말의 평균입자크기는 388.8 ± 123.2 nm이었으며, 칼슘 마이크로 분말의 평균입자크기는 1001.9 ± 160.4 nm이었다(Table 1). DLS법에 의한 칼슘분말의 평균입자크기는 SEM과 TEM을 이용하여 분석한 입자의 크기보다 큰 결과를 나타내었는데, 그 이유는 첫째, 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 낮은 수용성 때문으로 볼 수 있다. 이는 수용성이 낮은 칼슘 입자들의 응집 및 집적에 의해 용매에 균일하게 단일분산(monodisperse)을 하지 못하고 몇 개의 입자들이 불규칙하게 합쳐져 있는 다중분산(polydisperse)을 한다는 것을 의미한다. 둘째, SEM과 TEM 등 전자현미경에서는 전체적인 시료 중에서 관찰자 자신이 원하는 부분의 영역만을 선택하여 관찰하므로 전체 입자들의 평균 입자크기를 확인하는데 한계가 있다. 그로 인해 전자현미경 결과와 DLS법에 의한 결과가 차이가 있으며, 본 연구의 결과에서는 칼슘분말의 경우 수용액 상에서 분산성이 낮아 입자간 응집으로 인해 상대적으로 큰 입자크기 결과 값을 나타내었다.

DLS 방법을 이용한 입자크기 분포 분석에서는 3 가지의 다른 크기 분포에 관한 정보를 주는데 산란강도에 따른 입자 분포(intensity distribution), 수로 환산한 입자 분포(number distribution), 체적으로 환산한 입자 분포(volume distribution)가 있다. 일반적으로 동일한 크기의 입자들이 단일분산을 한 상태의 시료에서 DLS를 이용하여 크기를 측정하면 산란강도에 따른 입자분포, 수로 환산한 입자분포, 체적으로 환산한 입자분포의 결과가 동일한 값을 나타내지만 다른 크기의 입자들이 있거나 다중 분산을 하게 되면 산란강도에 따른 입자분포에 의한 평균 크기는 수나 체적으로 환산한 입자분포의 평균 크기보다 큰 값을 나타낸다. 또는 산란강도에 따른 입자 분포와 체적으로 환산한 입자 분포의 값이 크게 측정 되면 비교적 부피가 큰 입자들이 존재한다는 것을 의미한다. 분산된 칼슘 분말의 농도가 0.5 mg/

Table 1. Intensity, number and volume distributions of calcium nano- and micro-powders.

Sample	Concentration (mg/mL)	Average particle size (nm)		
		Intensity	Number	Volume
Calcium nano-powder	0.5	440.2±73.8	323.8±92.0	368.9±91.5
	1.0	388.8±123.2	199.0±37.2	235.2±42.0
Calcium micro-powder	0.5	547.1±105.3	430.7±65.9	478.0±82.5
	1	1001.9±160.4	754.9±134.7	857.2±148.2

mL일 때, 입자의 크기는 나노와 마이크로분말 모두 수로 환산한 입자 분포가 다른 2 가지 값 보다 작게 측정되었다. 칼슘 분말의 농도가 1.0 mg/mL일 때도 같은 경향을 보였으나 그 차이의 정도가 마이크로분말이 더 컸다. 이는 칼슘 마이크로분말이 나노분말 보다 더 큰 입자를 많이 포함하고 있다고 볼 수 있다(Table 1).

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 제타전위

수용액 속에 분산된 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 제타전위는 각각 -9.94 ± 1.78 mV, -2.42 ± 2.38 mV였다(Table 2). 일반적으로 입자 표면의 제타전위가 0 ± 5 mV이면 주어진 용매에서 빠르게 응집하며 불안정해져 침전하게 된다고 알려져 있으며(Parsons, 1997), 입자의 제타전위가 $\pm 30 \pm 60$ mV 일 때에는 용매와 친화력이 좋아 분산이 잘 되고 안정한 상태의 유지가 지속되며 ± 61 mV 이상이면 매우 안정한 상태라고 볼 수 있다. 본 연구에서 칼슘 나노 및 마이크로분말의 제타전위는 모두 ± 10 mV 이하로 분산매인 물에서 불안정하므로 용액상태에서는 응집과 침전이 쉽게 이루어진다고 할 수 있다. 특히, 칼슘 마이크로 분말은 칼슘 나노 분말에 비해 더 불안정한 것으로 나타났다.

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 비표면적

수분흡착 방법을 사용한 비표면적 분석에서 칼슘 나노분말의 질량변화율이 수분함량 98%에서 최고 2.382% 증가하여 칼슘 마이크로분말의 최고 증가율 1.542% 보다 0.84% 높았다. 또한, 이 결과를 바탕으로 계산한 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 비표면적은 칼슘 나노분말이 6.99 m²/g으로 칼슘 마이크로분말의 비표면적 4.26 m²/g 보다 2.73 m²/g 가량 높았다. 이는 칼슘 나노분말의 비표면적이 칼슘 마이크로 분말보다 더 넓다는 것을 의미한다. 입자의 크기가 작아지면 입자가 차지하는 질량 또는 부피에 비해 표면적의 넓이는 증가하게 되므로 동일한 무게의 칼슘 입자는 입자의

크기가 작아질수록 비표면적이 증가한다. 이론적으로 칼슘 마이크로분말과 나노분말의 비표면적의 차이는 대략 1/900 이어야 하지만 전자현미경 결과에서도 볼 수 있듯이 칼슘 마이크로분말은 소수의 마이크로 크기의 입자와 다수의 나노 크기의 입자가 섞여 있으므로 산출된 칼슘 마이크로분말의 비표면적 값은 나노분말과 비슷한 결과를 보인다.

기체 흡착 방법인 ASAP 2405N으로 측정된 결과 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 비표면적은 각각 11.68 ± 0.01 m²/g, 3.25 ± 0.02 m²/g 이었다. 이 역시 수분 흡착 방법 결과와 다소 차이는 있지만 칼슘 나노분말의 비표면적이 칼슘 마이크로 분말의 비표면적 보다 약간 크다는 동일한 결과를 얻을 수가 있었으며 차이가 작은 것은 설명하였듯이 칼슘 마이크로분말에 다량의 나노 크기의 입자가 섞여 있기 때문으로 보인다. 본 실험 결과는 이전에 보고된 60-240 nm 크기의 입자 분포를 가지는 입자의 비표면적이 20-130 nm 크기의 입자 분포를 가지는 입자의 표면적 보다 크다는 결과와 비슷한 결과를 보였다(Tsuzuki et al., 2000). 수분 흡착 방법과 기체 흡착 방법에 따른 결과의 차이는 칼슘 나노분말에서 크게 나타났다. 비표면적은 수분 또는 질소 기체가 시료의 표면에 단일분자층을 형성 한다고 가정하고 흡착된 분자의 질량에 따라 값을 계산하기 때문에 실제로 수분 또는 질소 기체가 시료의 표면에 얼마나 단일분자층을 잘 형성 할 수 있는가에 따라 결과 값에 차이가 생길 수 있다.

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 밀도

Fig. 3에서와 같이 칼슘 나노분말과 마이크로 분말의 겉보기 밀도는 각각 0.47 ± 0.01 g/mL, 0.45 ± 0.03 g/mL으로 비슷하였으나, 다짐밀도는 칼슘 마이크로 분말이 0.97 ± 0.02 g/mL로 칼슘 나노분말 0.81 ± 0.02 g/mL 보다 더 높았다. 동일한 질량 조건에서 단일 크기의 입자들로만 구성되어 있을 때보다 다양한 크기의 입자들로 구성되어 있는 경우 시료가 차지하는 부피가 더 적어지게 되어 밀도가 줄어들게 되므로 겉보기 밀도는 비슷하나 다짐밀도가 큰 칼슘 마이크로 분말이 나노 분말보다 더 크게 나왔다고 해석할 수 있다. 결과 값의 차이가 작은 것은 이전에 설명하였듯이 칼슘 마이크로분말에 다량의 나노 크기의 입자가 섞여 있기 때문에 평균 입자 크기에 의한 이론적인 밀도의 차이보다 산출된 밀도의 차이는 더 작다.

Table 2. Zeta potential of calcium nano- and micro-powders at pH 7.0.

Sample	Zeta potential (mV)
Calcium nano-powder	-9.94 ± 1.78
Calcium micro-powder	-2.42 ± 2.38

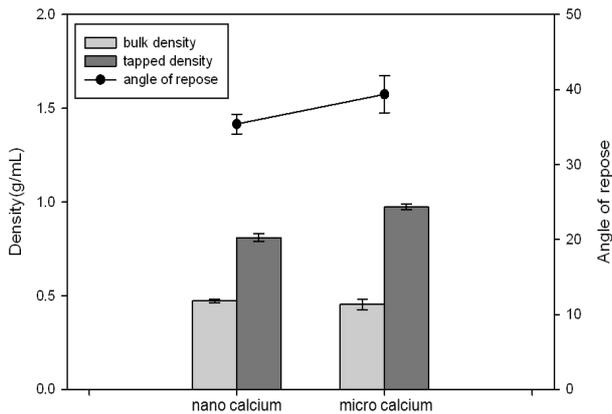


Fig. 3. Bulk density, tapped density and angle of repose of calcium nano- and micro-powders.

칼슘 나노 및 마이크로 분말의 안식각

안식각은 입자의 유동성을 나타내는 값으로 안식각이 작을수록 유동성이 크다. 칼슘 나노분말의 안식각은 $35.40 \pm 1.32^\circ$ 로 칼슘 마이크로 분말의 안식각 $39.37 \pm 2.46^\circ$ 보다 더 작았다. 본 연구의 결과는 Ali et al.(2009)의 연구 결과처럼 나노 분말의 안식각이 마이크로 분말의 안식각 보다 상대적으로 작은 결과를 보였다는 보고와 유사하였다. 입자의 크기가 미세할수록 입자의 질량이 가볍기 때문에 낙하 시 더 멀리 넓게 퍼지는 경향이 있으며 그 결과 안식각이 작게 나타난다. 이런 현상은 칼슘 나노분말의 안식각이 더 작은 결과를 설명할 수 있다. 또한 입자의 크기가 작은 칼슘 나노분말이 마이크로분말 보다 유동성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

요 약

본 연구에서는 분쇄공정에 의한 나노화에 따른 이화학적 특성 변화를 밝히기 위하여 칼슘 나노분말의 이화학적 특성을 칼슘 마이크로분말과 비교 분석하였다. 형태분석 위해 전자현미경을 이용한 결과 칼슘 나노입자의 크기는 약 100 nm였고 칼슘 마이크로 입자의 크기는 100 nm-3 μ m 이었으며 칼슘 나노 및 마이크로 입자들의 형태는 육면체 모양의 표면이 날카롭고 거친 것으로 관찰되었다. 입도분석기를 이용해 크기 분포를 분석한 결과 칼슘의 농도가 0.5 mg/mL 일 때, 칼슘 나노 및 마이크로분말의 평균 입자크기는 각각 440.2 ± 73.8 nm, 547.1 ± 105.3 nm이었으며 칼슘의 농도가 1.0 mg/mL 일 때, 칼슘 나노 및 마이크로분말의 평균 입자크기는 각각 388.8 ± 123.2 nm, 1001.9 ± 160.4 nm이었다. 제타전위는 칼슘 나노 분말이 -9.94 ± 1.78 mV이었으며 칼슘 마이크로 분말은 -2.42 ± 2.38 mV으로 서로 두 가지 모두 수용액 상태에서 불안정 하지만 나노 분말이 상대적으로 안정한 것으로 나타났다. 칼슘 나노 및 마이크로 분말의 비표면

적은 각각 $6.99 \text{ m}^2/\text{g}$, $4.26 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 나노 분말이 더 높게 측정되었다. 겉보기 밀도는 칼슘 나노($0.47 \pm 0.01 \text{ g/mL}$)와 마이크로($0.45 \pm 0.03 \text{ g/mL}$)분말의 차이가 거의 없었으나, 다짐 밀도에서 칼슘 마이크로 분말이 $0.97 \pm 0.02 \text{ g/mL}$ 로 칼슘 나노분말 $0.81 \pm 0.02 \text{ g/mL}$ 보다 더 높았다. 안식각은 칼슘 나노분말이 $35.40 \pm 1.32^\circ$ 로 칼슘 마이크로 분말의 안식각 $39.37 \pm 2.46^\circ$ 보다 작아 유동성이 큰 것으로 분석되었다. 본 연구 결과들은 분쇄 공정에 따른 나노화에 의한 칼슘 나노 분말을 비롯한 다양한 무기질 나노분말의 이화학적 특성 변화를 밝힐 수 있는 연구로 확대될 수 있는 가능성이 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0003293).

참고문헌

- Ali R, Jain GK, Iqbal Z, Talegaonkar S, Pandit P, Sule S, Malhotra G, Khar RK, Bhatnagar A, Ahmad FJ. 2009. Development and clinical trial of nano-atropine sulfate dry powder inhaler as a novel organophosphorous poisoning antidote. *Nanomed. Nanotechnol.* 5: 55-63.
- Bea EJ, Lee JJ, Kim YH, Choi KH, Yi JH. 2009. Sample preparation and analysis of physico-chemical properties for safety assessment of manufactured nanomaterials. *J. Korean Soc. Environ. Anal.* 12: 59-73.
- Chen HS, Chang JH, Wu JSB. 2008. Calcium bioavailability of nanonized pearl powder for adults. *J. Food Sci.* 73: H246-H251.
- Denk E, Hillemonds D, Hurrell RF, Vogel J, Fattinger K, Häuselmann HJ, Kraenzlin M, Walczyk T. 2007. Evaluation of 41 calcium as a new approach to assess changes in bone metabolism: Effect of a bisphosphonate intervention in postmenopausal women with low bone mass. *J. Bone Res.* 22: 1518-1525.
- Douroumin D, Fahr A. 2006. Nano- and micro-particulate formulations of poorly water-soluble drugs by using a novel optimized technique. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 63: 173-175.
- Heaney RP. 2000. Calcium, dairy products and osteoporosis. *J. Am. Coll. Nutr.* 19: 83S-99S.
- Hou JG, Wang Y, Xu w, Yang L, Wu ZQ, Zhang YH. 1998. Formation of (110) oriented layered silver nano-crystallites. *Mater. Lett.* 34: 36-39.
- Parsons SA, Judd SJ, Stephenson T, Udol S, Wang BL. 1997. Magnetically augmented water treatment. *Process Saf. Environ.* 75: 98-104.
- Thomas K, Sayre P. 2005. Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, Part I: Evaluating the human health implications of exposure to nanoscale materials. *Toxicol. Sci.* 87: 316-321.
- Tsuzuki T, Pethick K, McCormick PG. 2000. Synthesis of CaCO_3 nanoparticles by mechanochemical processing. *J. Nanopart. Res.* 2: 375-380.