Korean Chem. Eng. Res., 63(1), 131-136 (2025)
https://doi.org/10.9713/kcer.2025.63.1.131
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

TEOS, CTAB를 이용한 세리아 표면 개질이 분산 효과에 미치는 영향

고민영* · 김시은* · 문성욱* · 장학룡* · 한성우* · **Jian Hou**** · **Lei Zhang***** · 박정훈*,†

*동국대학교 화공생물공학과
04620 서울특별시 중구 필동로1길 30
**School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China
***School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China
(2024년 7월 5일 접수, 2024년 10월 9일 수정본 접수, 2024년 10월 11일 채택)

Dispersion Effect of Ceria Nanoparticle by TEOS and CTAB Modification

Min Young Ko*, Si Eun Kim*, Seong Wook Mun*, Xuelong Zhuang*, Sung Woo Han*, Jian Hou, Lei Zhang*** and Jung Hoon Park*,†**

**Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Republic of Korea*
***School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China*
****School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China*
(Received 5 July 2024; Received in revised from 9 October 2024; Accepted 11 October 2024)

요 약

본 연구는 개질된 세리아 나노입자 분산 및 현탁 안정성을 위해 상이한 표면 개질을 사용하여 세리아 나노입자의 표면 특성을 개질하는 것을 목표로 한다. 브로민화 세트리모늄(CTAB) 양이온 계면활성제와 테트라에틸 규산염 광물(TEOS) 실란 커플링제에 의해 사용되는 두 가지 표면 개질 공정을 수행하였으며 결과를 분석하고 평가하였다. 개질 전후 세리아 나노입자 표면의 원소 간 결합, 표면 개질의 유효성, 현탁성 및 분산 효과는 X-선 광전자 분광기(XPS), 입자 크기 분석(PSA) 및 zeta potential 시험에 의해 평가되었다. 상기 결과를 통해 TEOS, CTAB가 세리아 나노입자 표면을 성공적으로 개질시켰음을 확인하였으며, 이는 개질 전 세리아 나노입자와 비교하여 표면 개질을 진행한 나노입자의 분산성 및 현탁 안정성 향상으로 이어졌다.

Abstract – The objective of this study is to alter the surface characteristics of modified ceria nanoparticles through various surface modification techniques to enhance their dispersion and suspension stability. Two surface modification methods were examined and compared: the use of cationic surfactants, such as cetrimonium bromide (CTAB), and silane coupling agents, such as tetraethyl orthosilicate (TEOS). The effects of surface modification on ceria nanoparticles were evaluated using X-ray photoelectron spectrometry (XPS), particle size analysis (PSA), and zeta potential tests. The study examined the binding, effectiveness, suspension, and dispersion of the particles before and after modification. The results indicate that TEOS and CTAB were successful in modifying the surface of the ceria particles, resulting in improved dispersibility and suspension stability of the surface-modified nanoparticles compared to untreated ceria nanoparticles.

Key words: Ceria nanoparticles, Surface modification, Dispersibility, Ceria slurry

1. 서 론

최근, 나노 기술의 발전과 함께 나노입자의 표면 특성은 응용 분야에서 큰 관심을 받는 주요한 요소 중 하나로 부상하고 있다[1,2]. 특히, 세리아(CeO_2) 나노입자는 높은 산소 이동성과 Ce3+, Ce4+간 빠른 산화환원 상호작용으로 전기적 에너지의 흡수·방출과 산화물로서의 안정성을 통한 촉매 활성이 가능하며, 높은 열 안정성으로 다양한 분야에서 연구와 개발이 이뤄지고 있다[3,4]. 일반적으로 세리아 나노입자는 Chemical Mechanical Polishing(CMP) 분야에서 연마제로 사용되었는데, 최근, 반도체 제조 공정에서 매우 중요한 역할을 하고 있다[5-8]. 그중에서도 세리아의 제거 성능과 연마 효율성으로 인해 실리콘 산화물 CMP 등 분야에서의 활용이 급증하는 추세이다. 그러나, 세리아 나노입자를 사용할 시 큰 표면적과 분자량으로 인해 응집과 침전이 발생하는데, 이로 인해 CMP 슬러리의 불안정성이 증가한다[9]. 이에 따라 세리아 입자 응집으로 인한

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pjhoon@dongguk.edu
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.

CMP 프로세스에서 표면 거칠기가 증가하여 스크래치가 형성되며, 연마 효율성과 표면 품질이 저하된다[10,11]. 이러한 문제점으로 인해 입자의 형태와 크기 및 분포를 제어하기 위해 세리아 기반 복합재를 활용하여 표면 거칠기를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[12]. 그 외에도 표면 개질, 분산제 도입, 코팅 레이어 형성, 폴리머 캡슐화 등 다양한 방법들이 활용되고 있다.

그 중에서도 표면 개질은 나노입자의 표면 특성을 개선하거나 조절함으로써 활용 범위를 확장시키는 방법으로, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[13]. 이러한 표면 개질은 세리아 입자의 분산성, 안전성, 그리고 반응성을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 일반적으로 사용되는 표면 개질에는 화학적 표면 개질, 물리적 표면 개질, 나노입자 표면 개질 등 다양한 방법이 있으며, 이러한 표면 개질 방법은 재료의 목적 및 응용 분야에 따라 표면 특성을 조절하여 입자의 분산성 향상, 반응성 개선, 물리적 성능 개선 등 원하는 특성을 얻을 수 있다. 그 중에서도 세리아 표면 개질에 대한 연구는 활발히 이루어져 왔는데, Zhang 외 3인은 APS를 통해 세리아 입자의 표면을 아미노기로 개질하였으며, 이러한 아미노기를 통해 입자의 분산성을 향상시켰다[8]. 또한 개질된 세리아는 입자의 경도 감소, 입자와 기판 표면 간의 윤활 향상, 입자 사이의 응집이 감소하는 현상이 확인하였다. 또한, R.Thanneeru 외 3인의 연구에서는 삼가 희토류 금속원소를 사용하여 세리아 나노결정 코팅을 개발하고, 이러한 코팅이 높은 온도에서 산화 저항성에 미치는 영향을 조사하였다[14]. 이러한 연구는 고온 환경에서 소재의 안정성과 내구성이 중요한 산업 분야에서 높은 응용 가능성을 가지고 있을 것으로 보인다.

앞서 설명한 표면 개질 외에도 다양한 물질들을 통한 표면 개질 방법이 존재한다. 계면활성제를 이용한 표면 개질 연구가 이루어져 왔으나 여전히 입자의 높은 분산 성능을 달성하는데 적합한 계면활성제를 찾고자 한다. 본 연구에서는 계면활성제 TEOS와 CTAB를 사용하여 세리아 표면 개질을 진행한다. TEOS는 세리아 입자의 표면을 실리카로 개질하는 데 사용되며, 입자의 안정성과 화학적 특성을 개선시킨다[13,15-17]. CTAB는 양이온 계면활성제로 세리아 입자의 표면을 양이온으로 개질한다[18-20]. 이들 모두는 입자의 분산성을 향상시키며 입자 간의 상호작용을 조절하는데 도움이 되어 세리아 나노입자의 CMP 성능을 향상시키고 응집 및 침전 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 TEOS, CTAB를 사용하여 세리아의 표면을 개질하는 방법이 세리아 입자의 분산 특성에 미치는 영향에 대해 연구하며, 이들의 개선된 방향을 확인하기 위해 zeta-potential을 포함하여 XPS, PSA를 통해 입자의 특성을 측정하고, 더 나은 개질 방법을 모색한다.

2. 실 험

2-1. 사용 재료

본 연구에서는 Ceria nano powder(세리아, 60 nm, KoreaNano-ot Co. Ltd., Korea.)를 오븐에 건조한 세리아를 사용하였다. 세리아 표면개질제로는 테트라에틸 규산염 광물(Tetraethyl orthosilicate (TEOS), Sigma aldrich, USA), 브로민화 세트리모늄(Cetrimonium bromide(CTAB), Samchun, Korea.)을 사용하였다. 실험에서 사용된 증류수는 연구실에서 제조되었다.

2-2. 세리아 나노입자의 표면 개질

TEOS는 세리아 입자의 표면을 실리카로 개질하는 데 사용되며, 입자의 안정성과 화학적 특성을 개선시킨다. 또한, CTAB는 양이온 계면활성제로, 세리아 입자의 표면을 양이온으로 개질시켜 입자의 분산성을 향상, 입자 간의 상호작용을 조절한다. 이를 이용한 세리아 표면 개질은 다음과 같이 진행되었다[21].

TEOS 개질은 증류수 200 ml에 TEOS 2 g과 세리아 10 g을 첨가하여 용액을 제조한 후, 30 min 간 300 rpm으로 교반하였다. 이후 ultrasonic에서 30 min 동안 sonication을 진행하여 용액을 얻었다. CTAB 개질은 CTAB 2 g과 세리아 10 g을 첨가하여 동일한 과정을 통해 용액을 얻었다. 얻어진 두 용액은 500 ml 둥근 플라스크에 옮긴 후 각각 80℃, 60℃에서 600 rpm으로 5 h 동안 냉각수를 포함한 교반기에서 교반하여 표면 개질을 수행하였다. 개질된 세리아 분말에 2~3번의 원심 세척을 진행하였다. 얻어진 혼합액은 원심분리 후 80℃의 진공 오븐에서 12 h 소결한 뒤 가루를 생성하였다.

2-3. 개질된 세리아 나노입자의 특성 평가

개질 전후 세리아 나노입자의 물리화학적 특성은 zeta potential 분석기, X-선 광전자 분광기(XPS) 및 입자 크기 분석(PSA) 시험에 의해 평가되었다. zeta potential 분석기를 사용하여 세리아 나노입자의 표면 전하 강도를 평가하였다. 이때 HCl, NaOH 수용액을 이용해 수용액의 pH를 조절하여 상이한 pH 조건에서 실험을 진행하였다.

세리아 나노입자의 분산 상태 및 안정성을 평가하였다. zeta potential 평가에서 나타난 개질 전후 입자의 고분산 조건에서 부유층의 두께를 측정하여 식 (1)의 계산 과정을 통해 현탁성을 평가하였다.

$$\text{Suspensibility (\%)} = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \quad (1)$$

그 중, V_s는 부유층, V_t는 눈금 실린더 내 현탁액의 총 부피이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 개질 전후의 세리아 나노입자 특성 분석

Fig. 1은 개질 전후의 세리아 나노입자의 표면 전위이다. 표면 전위는 입자의 표면 전하를 설명하는 지표로, 값이 클수록 두 입자 사이의 정전기적 반발력이 강해지고 반데르발스 힘이 약해지는 것으로 볼 수 있다. 표면 전위의 높은 절댓값은 입자 간 반발력이 우세하여 우수한 분산 상태임을 의미한다. 따라서 연마액의 분산을 위해 슬러리 부식성에 영향을 미치지 않으며 분산 효과가 우수한 pH를 선정해야 한다. Fig. 1(a)는 개질 전 세리아 나노입자의 표면 전위이다. pH가 증가함에 따라 표면 전위가 감소하는 것을 확인하였다. 등전점은 pH 5와 pH 6 사이로 나타났다. pH=3일 때, 제타 전위의 절댓값이 최대이며, 이는 pH=3일 때 두 나노입자 사이에서 가장 큰 정전기적 반발력이 존재함을 의미한다. 즉, 다른 요인(온도, 교반 속도, 분산제 농도 등)의 영향을 받지 않을 때 pH=3에서 세리아 나노입자의 분산 효과가 가장 좋다는 것을 확인하였다. Fig. 1(b)는 CTAB로 개질된 세리아 나노입자의 표면 전위로, pH가 증가함에 따라 증가하고 pH=5 이후에는 안정되는 경향이 있으며 등전점 부근에서 전위값의 변화가 나타났다. 표면 전위는 pH=3에서 절댓값

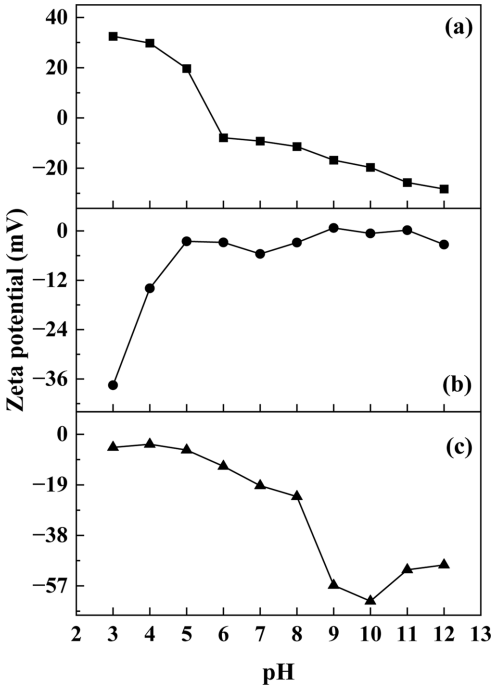

Fig. 1. Zeta potential before and after ceria modification, (a) before modification, (b) after CTAB modification, (c) after TEOS modification.

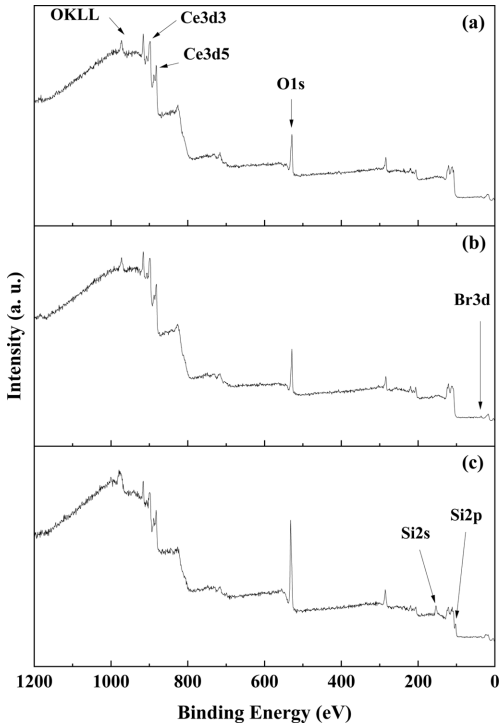

Fig. 2. XPS before and after ceria nanoparticles modification, (a) pristine ceria nanoparticles, (b) CTAB modification ceria nanoparticles, (c) TEOS modification ceria nanoparticles.

의 최대를 가지며, 이는 pH=3일 때 분산 효과가 가장 우수함을 확인하였다. 또한, 양이온 계면활성제인 CTAB로 개질된 입자는 표면 전위가 상대적으로 약한 음전하를 나타내는 것으로 볼 수 있다. Fig. 1(c)는 TEOS로 개질된 세리아 나노입자의 표면 전위이다. pH가 증가함에 따라 표면 전위는 감소하며, pH=10에서 절댓값의 최대에 도달 이후에는 전위값이 계속하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그 중 pH 3~12 범위에서 표면 전위는 모두 강한 음전하를 나타냈다. 이는 개질된 세리아 나노입자 표면의 실라놀기의 탈양성자화로 인해 표면에 음전하가 생성되는 것으로 볼 수 있다. 표면 전위는 pH=10에서 절댓값의 최댓값을 가지며, 이는 pH=10일 때 두 나노입자 사이의 정전기 반발력이 가장 크고 분산 효과가 가장 좋음을 확인하였다. 개질 전후의 세리아 나노입자의 분산 효과를 비교하였을 때, TEOS로 개질된 세리아 나노입자가 가장 우수한 분산 효과를 보여주는 것을 알 수 있다.

XPS 분석을 세리아 나노입자 표면에 존재하는 원소 및 화학 결합을 통해 입자의 개질 여부를 확인하였으며 그 결과는 Fig. 2에 나타냈다. 개질 전후 세리아 나노입자는 공통적으로 Ce, O 원소의 peak가 나타났다. Fig. 2(b)에서, CTAB로 개질된 세리아 나노입자에서는 Br3d의 peak가 관찰되며 입자 표면에 Br 원소의 존재를 확인하였다. Fig. 2(c)에서, TEOS로 개질된 입자에서는 Si2s, Si2p의 peak가 검출되며 입자 표면에 Si 원소가 존재함을 확인하였다. Table 1은 입자 표면의 원소 농도이다. 표면 개질로 인해 Ce 원소의 농도가 감소,

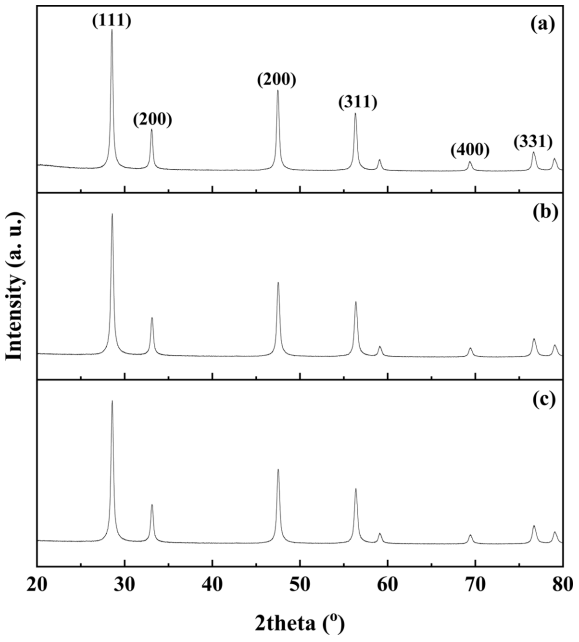

Fig. 3. XRD before and after ceria nanoparticles modification, (a) pristine ceria nanoparticles, (b) CTAB modification ceria nanoparticles, (c) TEOS modification ceria nanoparticles.

Table 1. Element composition before and after ceria nanoparticles modification, (a) pristine ceria nanoparticles, (b) CTAB modification ceria nanoparticles, (c) TEOS modification ceria nanoparticles

Concentration	Ce	O	C	Si	Br	N
(a)	13.2	50.8	36.0	0	0	0
(b)	10.8	51.4	36.9	0	0.3	0.6
(c)	7.6	49.3	38.3	4.8	0	0

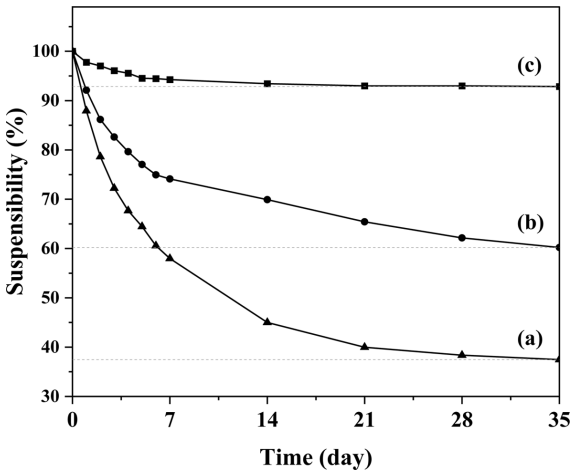

Fig. 4. Suspensibility before and after ceria nanoparticles modification, (a) pristine ceria nanoparticles, (b) CTAB modification ceria nanoparticles, (c) TEOS modification ceria nanoparticles.

C 원소의 농도가 증가하였다. 이 결과를 통해 CTAB, TEOS로 세리아 나노입자의 표면이 성공적으로 개질된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 세리아 나노입자의 XRD 결과를 보여준다. 개질 전 세리아 나노입자는 (111), (200), (220) 및 (331) 결정면에서 각각 28.59, 33.14, 47.54 및 56.14에서 고강도 peak가 나타났다. 또한 개질 전후 세리아 나노입자의 동일한 peak가 나타나므로 개질로 인한 세리아 나노입자의 결정구조에는 변화가 없었음을 알 수 있다.

3-2. 분산 효과 및 안정성

Fig. 4는 최적의 분산 상태에서 개질 전후의 세리아 나노입자의 현수성을 나타낸다. 현수성은 나노입자의 성능 및 안정성을 평가하는데 주요 척도이다. (a)~(c)에서 개질 전후의 나노입자는 시간이 지남에 따라 현수성이 감소하였다. 시간이 증가함에 따라 분자의 끊임없는 운동으로 인해 두 입자 사이의 반데르발스 힘이 두 입자를 끌어당기는 것의 결과로 볼 수 있다. 그러나 각각의 경우에서 현탁 성능의 감소 속도가 다른 것을 확인하였다. 이는 개질로 인해 반데르발스 힘을 극복하는 효과가 상이하기 때문이다. 개질된 세리아 나노입자는

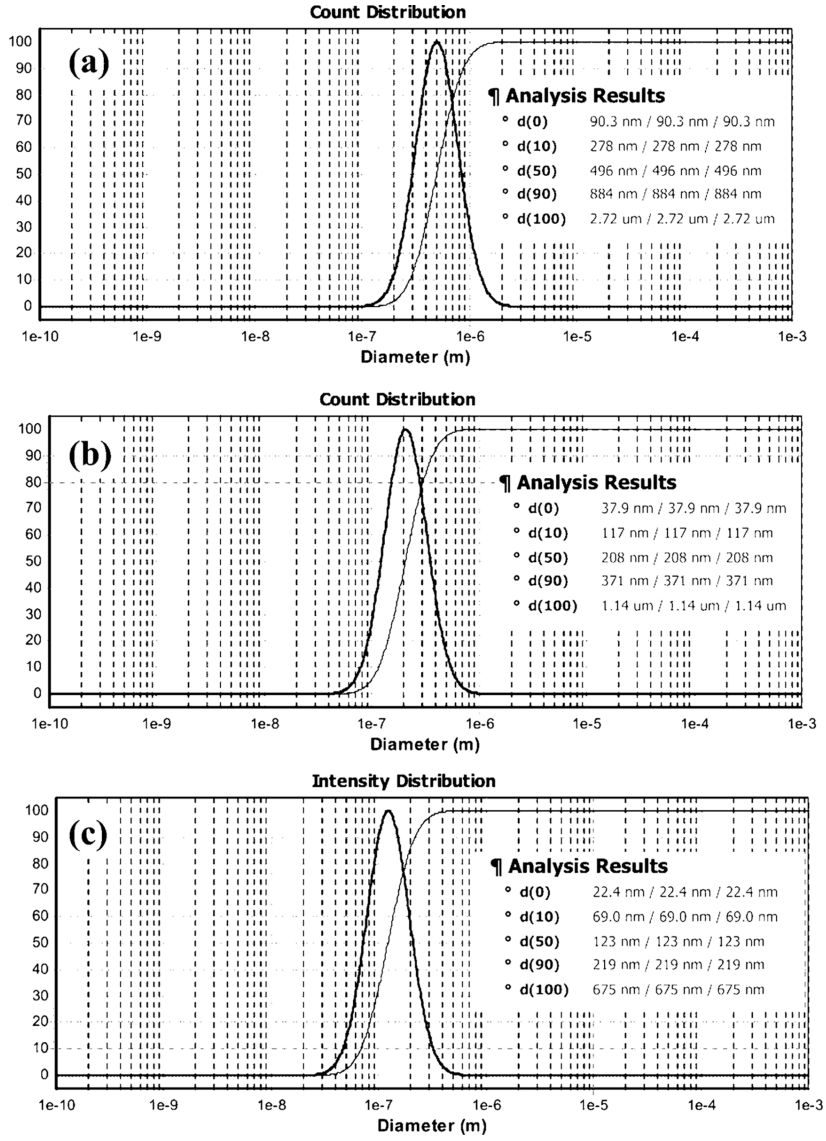

Fig. 5. PSA before and after ceria modification, (a) Ceria before modification at pH=3, (b) CTAB modification at pH=3, (c) TEOS modification at pH=10.

개질 전 입자보다 현수성이 우수한 것을 확인할 수 있다. CTAB 개질은 CTAB의 독특한 장쇄 구조를 통해 입체 장애를 증가시킴으로써 세리아 나노입자를 잘 분산시키는 것으로 추측된다. 또한, TEOS 개질은 세리아 나노입자의 표면 전위 변화를 통해 정전기 반발력을 증가시켜 세리아 입자를 잘 분산시키는 것으로 볼 수 있다. 개질된 나노입자의 현수성은 개질 3일 동안 90% 이상의 현탁성을 유지하였다. CTAB 개질 입자는 개질 35일 차에 60%의 현탁성을 보였으나, TEOS 개질 입자는 개질 7일 차 이후 90%를 넘는 현탁성을 유지하며 가장 우수한 현탁성을 나타내었다. 따라서, 표면개질이 세리아 나노입자의 분산 성능을 증가시켜 현탁성을 향상시키는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 개질 전후의 세리아 나노입자의 분산 효과를 보여준다. 개질 전 세리아 나노입자의 D90 입자 직경은 884 nm였으나, TEOS로 개질된 D90 입자의 직경은 219 nm, CTAB를 통해 개질된 D90 입자의 직경은 371 nm로 확인되었다. 상기 결과를 통해 세리아 표면 개질이 입자 분산에 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 또한, 상이한 표면 개질법으로 인해 분산 메커니즘에 따라 분산 효과가 다르게 나타나는 결과를 확인하였다. 분산 효과는 TEOS가 CTAB에 비교하여 우수하였으며, 이는 입자 간 정전기적 인력이 입체 장애의 영향보다 우세하게 작용했음을 추측할 수 있다. 이는, Fig. 1와 연관지어, TEOS로 개질된 입자가 표면 전위의 값이 가장 크므로 입자의 반발력이 가장 강해 분산 효과가 우수한 것으로도 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 CTAB 양이온성 계면활성제와 TEOS 실란 커플링제의 두 가지 다른 표면개질제를 사용하여 세리아 나노입자의 분산 효과, 현탁 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 추가로 pH가 분산에 미치는 영향을 관찰하여 개질 전후의 세리아 나노입자를 비교하였다. 개질 전 세리아 나노입자는 빠른 시간 내에 분산성을 잃었으며 24시간 이후에는 현탁성이 급격히 감소하여 슬러리 제조에 적합하지 않다는 것을 확인하였다. CTAB 양이온 계면활성제와 TEOS 실란 커플링제를 이용한 표면 개질은 세리아 나노입자의 분산성을 크게 향상시켰다. CTAB로 개질 후 분산성은 처음 3일은 크게 향상되었으나, 14일째에는 감소하는 경향을 보였다. 이에 반해 TEOS로 개질된 세리아 나노입자는 처음 6일 이내에 더 나은 분산성을 유지하였다. 또한, 35일 동안 92.8%의 높은 수준의 분산성을 유지하였다는 점이 주목할만한 부분이다. 특히, pH=9에서 TEOS로 개질된 세리아 나노입자는 오랜 기간 현탁성을 유지할 수 있었으나 pH 조절이 이루어지지 않은 경우에는 나노입자의 안정성을 유지할 수 없었다. 따라서, 세리아 나노입자의 현탁성 측면에서 세리아 나노입자의 표면 개질 및 pH 조절이 중요함을 의미한다.

결론적으로, 본 연구에서는 CTAB 양이온 계면활성제와 TEOS 실란 커플링제를 이용한 표면 개질이 세리아 나노입자의 분산 및 현탁 안정성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. TEOS 개질제가 입자의 안정성을 위해 CTAB보다 적합한 표면개질제로 볼 수 있으나, CTAB의 양이 증가함으로써 입자의 입체 장애가 심화되어 입자의 분산 안정도가 높아질 수 있다. 이에 따른 영향은 추가적으로 논의할 필요가 있다. 또한, pH 조절은 개질된 입자의 현탁성을 더욱 향상시킬 수 있으며, 첨단 화학 기계적 연마 공정과 같은 다양한 응용 분야에서 세리아 나노입자의 성공적인 사용을 위한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구는 표면 나노 물질의 적용 및 개질에 대한 유용한 통찰력을 제공하며, 표면 과학 분야에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

감 사

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00421886). This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00421886, Development of low energy post treatment process for simultaneous removal of air and water pollutants in semiconductor process) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea). Xuelong Zhuang is a recipient of China Scholarship Council scholarship (CSC number: 202208260028).

References

1. Chu, X., Yu, J. and Hou, Y.-L., "Surface Modification of Magnetic Nanoparticles in Biomedicine," *Chin. Phys. B* **24**(1), 014704(2015).
2. Kango, S., Kalia, S., Celli, A., Njuguna, J. and Habibi, Y., "Kumar R. Surface Modification of Inorganic Nanoparticles for Development of Organic–inorganic Nanocomposites—A Review," *Prog. Polym. Sci*., **38**(8), 1232-1261(2013).
3. Konsolakis, Michalis, Maria Lykaki. "Facet-dependent Reactivity of Ceria Nanoparticles Exemplified by CeO_2-based Transition Metal Catalysts: A Critical Review," *Catalysts* **11**(4), 452(2021).
4. Jayakumar, G., Irudayaraj, A. A. and Raj, A. D., "Investigation on the Synthesis and Photocatalytic Activity of Activated Carbon–cerium Oxide (AC–ceria) Nanocomposite," *Appl. Phys. A*. **125**(11), 742(2019).
5. Cheng, J., Huang, S. and Lu, X., "Preparation of Surface Modified Ceria Nanoparticles as Abrasives for the Application of Chemical Mechanical Polishing (CMP)," *ECS J. Solid. State. Sci. Technol*., **9**(2), 024015(2020).
6. Kang, H.-G., Katoh, T., Kim, S.-J., Paik, U., Park, H.-S. and Park, J.-G., "Effects of Grain Size and Abrasive Size of Polycrystalline Nano-particle Ceria Slurry on Shallow Trench Isolation Chemical Mechanical Polishing," *Jpn. J. Appl. Phys*., **43**(3A), L365(2004).
7. Lee, J., Kim, E., Bae, C., Seok, H., Cho, J., Aydin, K. and Kim, T. "Improvement of Oxide Chemical Mechanical Polishing Performance by Increasing Ce^{3+}/Ce^{4+} Ratio in Ceria Slurry via Hydrogen Reduction," *Mater. Sci. Semicond. Process*, **159**, 107349(2023).
8. Zhang, Z., Yu, L., Liu, W. and Song, Z., "Surface Modification of Ceria Nanoparticles and Their Chemical Mechanical Polishing Behavior on Glass Substrate," *Appl. Surf. Sci*., **256**(12), 3856-3861(2010).
9. Sorooshian, A., Ashwani, R., Choi, H. K., Moinpour, M., Oehler, A. and Tregub, A., "Effect of Particle Interaction on Agglomeration of Silica-Based CMP Slurries," *MRS Online Proceedings Library*., **816**(1), 491-497(2004).
10. Jiao, L., Cui, Y., Chen, Z., Jin, Y. and Lin, N., Study on the Particles Classification Control of CeO_2 Polishing Powder. In: 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. *SPIE*, 402-407(2019).

11. Ye, W., Baoguo, Z., Pengfei, W., Min, L., Dexing, C. and Wenhao, X., "Improving the Dispersion Stability and Chemical Mechanical Polishing Performance of Ceria Slurries," *ECS J. Solid State Sci. Technol*., **12**(4), 044004(2023).
12. Chen, Y., Mu, Z., Wang, W. and Chen, A., "Development of Mesoporous SiO_2/CeO_2 Core/shell Nanoparticles with Tunable Structures for Non-damage and Efficient Polishing," *Ceram. Int*., **46**(4), 4670-4678(2020).
13. Hah, H. J. and Koo, S. M., "Surface Modification of PTMS Particles with Organosilanes: TEOS-, VTMS-, and MTMS-Modified Particles," *J. Sol-Gel Sci. Technol*., **31**(1), 117-121(2004).
14. Thanneeru, R., Patil, S., Deshpande, S. and Seal, S., "Effect of Trivalent Rare Earth Dopants in Nanocrystalline Ceria Coatings for High-temperature Oxidation Resistance," *Acta Mater*., **55**(10), 3457-3466(2007).
15. Cho, H., Lee, D., Hong, S., Kim, H., Jo, K., Kim, C. and Yoon, I., "Surface Modification of ZrO_2 Nanoparticles with TEOS to Prepare Transparent ZrO_2@SiO_2-PDMS Nanocomposite Films with Adjustable Refractive Indices," *Nanomaterials*. **12**(14), 2328 (2022).
16. Klein, L. C. and Garvey, G. J., "Tetraethylorthosilicate (Teos)," *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, **32**, 33(1984).
17. Zheng, L., Zhou, J., Shen, J., Qi, Y., Li, S. and Shen, S., "TEOS Surface Modification of CLST Ceramic Particles for PTFE-based Composites," *J. Mater. Sci-Mater. Electron*., **29**(20), 17195-200 (2018).
18. Kaviyarasu, K., Manikandan, E., Nuru, Z. Y. and Maaza, M., "Investigation on the Structural Properties of Ceria Nanofibers via CTAB Surfactant," *Mater. Lett*., **160**, 61-63(2015).
19. Shettigar, R. R., Misra, N. M. and Patel, K., "Cationic Surfactant (CTAB) a Multipurpose Additive in Polymer-based Drilling Fluids," *J. Pet. Explor. Prod. Technol*., **8**(2), 597-606(2018).
20. Wang, T., Li, W., Xu, D., Wu, X., Cao, L. and Meng, J., "A Novel and Facile Synthesis of Black TiO_2 with Improved Visible-light Photocatalytic H_2 Generation: Impact of Surface Modification with CTAB on Morphology, Structure and Property," *Appl. Surf. Sci.*, **426**, 325-332(2017).
21. Zhuang, X., Magnone, E., Han, S .W. and Park, J. H., "Novel Surface Modification Strategies for Enhanced CeO_2 Nanoparticle Dispersion and Suspension Stability," *Ceram. Int.*, **50**(13), 24801-24814(2024).

Authors

Jung Hoon Park: Professor; Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; pjhoon@dongguk.edu

Si Eun Kim: Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; 2021112204@dgu.ac.kr

Seong Wook Mun: Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; ehflflfld@naver.com

Xuelong Zhuang: Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; zhuangxuelong@dgu.ac.kr

Sung Woo Han: Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; lunadial486@naver.com

Min Yeong Ko: Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; buf51@naver.com

Lei Zhang: Professor, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Shandong 255000, China; leizhang@sdut.edu.cn

Jian Hou: Proffesor, Department of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China; jhou@lit.edu.cn