

## 교반 속도와 분산제 농도가 세리아 현탁액의 분산효과에 미치는 영향

한성우\* · 여재훈\* · 김시은\* · 장학룡\* · 임대현\* · Jian Hou\*\* · Lei Zhang\*\*\* · 박정훈\*<sup>†</sup>

\*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 3일 수정본 접수, 2024년 10월 22일 채택)

## Influence of Stirring Speed and Concentration on the Dispersibility and Stability of Ceria Suspensions

Sung Woo Han\*, Jae Hoon Yeo\*, Si Eun Kim\*, Xuelong Zhuang\*, Jian Hou\*\*,  
Lei Zhang\*\*\* and Jung Hoon Park\*<sup>†</sup>

\*Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul, 04620, 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 3 October 2024; Accepted 22 October 2024)

### 요 약

교반 속도와 분산제 농도가 세리아( $\text{CeO}_2$ ) 현탁액의 현탁 정도 및 재분산에 미치는 영향을 조사하고, 최대 14일 방치하여 세리아의 분산 안정성을 확인하였으며, 분산제 농도를 달리한 현탁액을 제조하여 나노입자 크기 및 분산 안정성을 분석하였다. 분산제의 농도가 과도하게 첨가되면 세리아 나노입자가 2차 응집되고 부족하면 분산력이 감소한다는 것이 밝혀졌다. 세 가지 분산제 중 가장 우수한 성능을 보인 분산제 PVP는 세륨 나노입자 분말을 82.1 nm로 분산시킬 수 있었으며 분산 효과 및 분산 안정성이 가장 뛰어났다. 또한, 분산제를 첨가하지 않고 교반 속도에 변화를 주어 관찰하였을 때 4000 rpm, pH 3에서 최적의 분산 효과를 얻을 수 있다.

**Abstract** – The effects of stirring speed and dispersant concentration on the suspension and redispersion of ceria ( $\text{CeO}_2$ ) polishing liquid was investigated. Sedimentation behavior of ceria was evaluated for up to 14 days, and dispersion with varying dispersant concentrations were prepared to analyze the size and distribution of nanoparticles. It was observed that an excessive concentration of dispersant led to secondary aggregation of ceria nanoparticles, while an insufficient concentration resulted in decreased dispersing power. Among the three dispersants tested, PVP exhibited the best performance, effectively dispersing cerium nanoparticle powder to an average size of 82.1 nm, thus providing superior dispersion effect and stability. Furthermore, optimal dispersion was achieved at a stirring speed of 4000 rpm and a pH of 3 in the absence of a dispersant.

Key words:  $\text{CeO}_2$ , Chemical machine polishing, Polyvinyl pyrrolidone (PVP)

### 1. 서 론

화학적 기계적 연마(CMP) 분야에서 나노입자 세리아( $\text{CeO}_2$ )는 반도체 웨이퍼의 표면, 광학 렌즈 및 기타 고정밀 표면을 연마하는데 널리 사용된다[1,2]. 이때, 세리아 입자의 분산 안정성은 연마 품

질과 효율성을 보장하는 핵심 요소 중 하나이다[3,4]. 분산 안정성은 고체 입자들이 액체 내에 균일하게 분산된 상태를 장기간 유지하는 능력이다. 이는 입자간의 상호작용, 전기적 반발력, 입자 표면의 코팅, 분산제의 역할에 따라 좌우된다. 세리아 입자의 응집 현상은 연마 효과를 감소시킬 뿐만 아니라 불균일한 마모를 유발하고 웨이퍼 표면의 평탄도와 품질을 손상시킬 수 있다. 따라서 나노입자를 더 잘 분산시키는 방법이 본 연구의 주요 목표라고 할 수 있다.

기준에 일반적으로 사용되는 Silica slurry( $\text{SiO}_2$ )는 수십, 수백 나노미터 크기의 입자들이 존재한다. Silica slurry의 경우, 입자 크기를 조절하기 용이하다는 장점이 있음에도 불구하고 응집 현상으로 인해

<sup>†</sup>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.

안정성에서 문제가 발생하며, polishing 과정 중에 측정되는 Position Sensitive Device(PSD)가 변칙적이라는 한계가 있다[5]. 이러한 한계를 극복하기 위해 세리아 기반 slurry에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 세리아 slurry가 재료 선택도(selectivity), 분산 효과에 따른 입자 안정성, 웨이퍼 연마 효율 면에서 우수함을 입증하는 연구가 진행되고 있다[6]. Xiaolan 외 6인은 액상에서 Silica 입자 위 세리아를 코팅한 복합 입자의 분산 메커니즘을 Deryagin-Landau-Verwey-Overbeek(DLVO) 이론을 통해 확인하였으며, CeO<sub>2</sub>-coated SiO<sub>2</sub> 복합 입자의 pH, 계면활성제(surfactant, CTAB, SDBS) 종류와 농도에 따른 분산 안정성을 평가하였다[7]. 반면 Wang Ye 외 5인은 Ceria slurry의 분산 안정성을 향상시키기 위해 세리아 입자 표면 전하를 조절하는 방법을 사용하였다. Slurry의 pH를 조절하고 이온화 가능한 아크릴 폴리머를 첨가하여 세리아 입자의 전기 운동성 강화와 입자 크기에 따른 분산도를 확인하였다[8]. 이외에도 첨가되는 분산제(dispersant) 종류에 따른 Ceria slurry의 입자 안정성 및 크기 분포에 대해 평가해 볼 수 있다. Wang 외 4인은 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) slurry의 웨이퍼 표면 제거율(MRR)을 평가하기 위해 다양한 분산제(Polyethylene Glycol, Sodium polyacrylate)의 농도에 따른 zeta-potential, 점도, 입자 크기 분포 등을 측정하였고, 알루미늄 slurry의 입자 안정성을 입증하였다[9]. 이를 세리아 slurry의 접목한다면 CMP 연마 효율을 극대화할 수 있으며 slurry 개발에 도움이 될 것으로 보인다.

분산제를 사용하는 것은 응집 현상을 해결하기 위해 가장 흔히 사용되고 있는 방법 중 하나이다[10,11]. 나노 재료 과학 및 공학 분야에서 분산제의 선택과 농도는 입자의 분산 효과와 안정성에 중요한 역할을 한다. 분산제의 효과적인 선택은 나노입자의 분산을 균일하게 하여 나노물질의 성능과 응용성을 크게 향상시킬 수 있다. 카올린(KL)은 천연 광물 재료로서 나노입자의 표면에 흡착하여 나노입자의 표면 전하를 변화시켜 나노입자를 잘 분산시킬 수 있다. 따라서 풍부한 표면 특성과 조절 가능한 분산 효과가 주목받고 있다. Polyethylene Glycol(PEG) 및 Polyvinylpyrrolidone(PVP)은 합성 분말이며, 나노물질의 제조에도 널리 사용된다. 그중 PEG는 입자를 분산시킴으로써 용액 내 나노입자의 친수성 및 습윤성을 증가시켜 분산 효과와 분산 안정성을 향상시킬 수 있다. 반면 PVP는 나노입자의 표면에 흡착되어 입자 간의 정전기적 흡인력을 방지하여 덩어리의 발생을 감소시키고 전하 차폐 효과를 통해 분산 용액을 분산 및 안정화 효과를 달성한다. 또한, 여러 종류의 용매에 대한 용해도가 높기 때문에 다양한 유형의 나노입자 분산에 적용 가능하다. DLVO 이론에 따르면 분산제의 주요 기능은 입자 간의 반발 에너지를 향상시키는 것이며 이로 인한 효과는 크게 세 가지가 있다[12]. (1) 표면 전위의 절댓값을 증가시켜 입자 간의 정전기 반발 에너지를 증가시키고, (2) 고분자 분산제를 통해 입자 표면에 흡착층 형성을 통해 입체 장애를 생성 및 강화하여 입자 간의 저항 에너지를 증가시키고, (3) 입자 표면의 친수성을 강화하고, 수화막의 강도와 두께를 증가시켜 입자 간의 수화 반발 효과를 크게 증가시킬 수 있다. 그러나 초미세 및 나노 연마 분말은 액상 매질에서 반데르발스의 힘에 의해 응집이 쉽게 발생하므로 분산제 함량이 높아지면 입자 간의 평균 거리가 감소하고 입자가 충돌하여 응집될 가능성이 크게 증가한다. 또한, 이온 강도가 지나치게 강해지게 되고 전기 이중층이 압축되어 입자 간의 정전기적 반발력이 감소하며, 동시에 다수의 자유 고분자 사슬 또한 브릿지 연결 또는 결원으로 쉽게 응집되기

때문에 연마 슬러리의 안정성을 저하시킨다. 반면, 분산제 농도가 낮을 경우에 연마 슬러리의 안정성은 온도에 민감하게 반응한다 [13,14].

따라서 본 연구의 목적은 다양한 분산제(Kaolin, PEG, PVP) 종류와 분산제의 농도가 세리아 입자의 분산성과 안정성에 미치는 영향을 심층적으로 연구하는 것이다. Kaolin과 같은 비유기계 분산제와 PEG, PVP와 같은 고분자계 분산제는 물리적, 화학적 특성이 상이하기 때문에 각 분산제의 농도에 따른 미세한 분산 안정성 변화를 정량적으로 평가하여 분산제의 종류와 농도에 따른 분산성의 변화를 구체화 하였다. 본 연구는 세리아 입자의 최적 분산 조건을 규명함으로써 연마 효과를 크게 개선하는 데 기여할 뿐만 아니라, 나노물질의 분산성과 안정성에 대한 심화된 이해를 제공하여 미세 공학 및 나노 기술 응용 분야에서 광범위한 활용 가능성을 제시할 수 있다. 특히, 세리아와 같은 금속 산화물 나노입자의 분산 특성은 촉매 효율, 전기화학적 성능 등 다양한 기술적 적용 분야에서 핵심적인 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실 험

### 2-1. 시약 및 제타 전위 분석

본 연구에서 사용된 slurry는 액상 상태에서 높은 분산 안정성과 정밀한 입자 크기를 특성으로 하는 세리아를 기반으로 제조하였다. 연마제 입자 크기를 줄이기 위해 순도 99.9%, 평균 30 nm 입자 크기를 가지는 고순도 세리아 나노입자 현탁액을 수분을 제거하여 사용하였으며 koreaNano-ot Co., Ltd.에서 구매하였다. 이후 첨가되는 분산제의 종류로는 Kaolin(KL), Polyethylene glycol(PEG), Polyvinyl pyrrolidone(PVP)를 사용하였다. KL(Mw ≈ 258.16 g/mol, 99%)은 Samchun Pure Chemical Co., Ltd, Korea에서 구매하였으며 PEG (Mw ≈ 4000 g/mol, 99%)는 Samchun Pure Chemical Co., Ltd, Korea에서 구매하여 사용하였다. 마지막으로 PVP(Mw ≈ 40,000 g/mol, 99%)는 Sigma Aldrich, U.S.A에서 구매하였다. 준비된 세리아 나노입자 5 g과 증류수 45 g을 혼합하고 용액의 pH를 NaOH 및 HCl로 조절하였다. 이후 세리아 나노입자 표면의 전하 특성을 분석하기 위해 zeta-potential 측정장치(ELSZ2000, Otsuka, Japan)를 사용하였다.

### 2-2. 교반 속도와 분산제 농도 변화에 따른 분산 실험

세리아 현탁액은 이전 실험 조건과 동일하게 시행되었다[15]. 구체적인 현탁액 제조 조건은 다음과 같다. 세리아 분말 10 g을 증류수 40 g과 혼합하였으며 분산제는 KL, PEG, PVP를 0.5~2.5 wt%의 농도 범위로 현탁액에 혼합하여 분산 실험을 진행하였다. pH 3보다 낮은 강산 분위기의 현탁액의 경우 연마 시 연마대상이 손상될 가능성이 높아 Fig. 1과 같이 분산 전에 pH 값을 1 mol/L HCl 용액을 이용해 pH 3으로 조정된 후 고속 교반기를 사용하여 세리아 현탁액을 여러 범위의 속도로 분산시켰다. 분산이 완료된 후 현탁액을 24시간 동안 방치시킨 후 zeta-potential 측정장치를 통한 Particle size analysis(PSA) 분석을 사용하여 현탁액의 나노입자 크기 분포를 분석하였다.

분산 성능 실험은 세리아 현탁액을 제조한 후 PSA 분석을 통해 수행되었다. 세리아 분말의 농도를 20 wt%로 고정된 채 분산제의 질량 분율에 변화를 주었으며 다양한 유형의 분산제가 첨가된 세리아

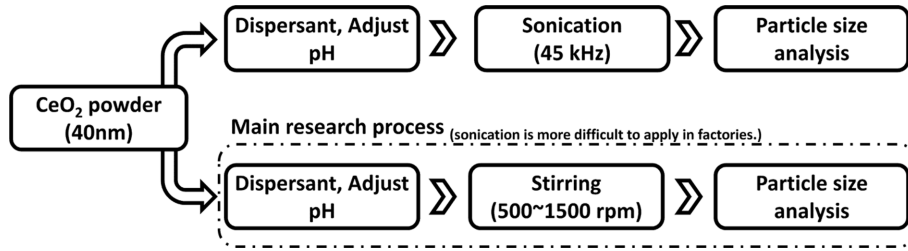


Fig. 1. Overall process for dispersion experiment.

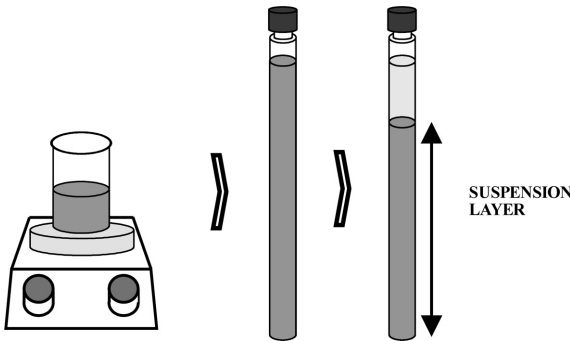


Fig. 2. Schematic diagram of dispersion stability analysis process.

아 현탁액을 구성하였다. 그런 다음 분산제가 용매에 잘 녹을 수 있도록 실온에서 30분 동안 교반하였고 이후 현탁액을 초음파 진동장치를 이용하여 30분 동안 초음파 분산을 수행하였다. 꺼낸 후 24시간 동안 방치한 후 PSA 분석을 위해 샘플을 채취하였고 분산 안정성 실험은 제조된 분산 용액을 1일, 7일, 14일 동안 방치한 후에 진행하였다. 분산 용액의 침전층 두께에 따라 분산 효과를 판단하였으며 실험 단계는 Fig. 2와 같이 진행하였다. 침전층의 두께는 육안으로 관찰 및 측정하였으며 침전물의 백분율 계산은 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\text{Suspensibility (\%)} = \frac{L_{sus}}{L_t} \times 100 \quad (1)$$

그 중,  $L_t(\text{cm})$ 는 실린더에서 세리아 현탁액의 총 길이이며,  $L_{sus}(\text{cm})$ 는 실린더에서 세리아 현탁액의 부유층 길이이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 세리아의 제타 전위

세리아 입자의 pH에 따른 상호작용 변화는 입자 표면 전하의 변화를 통해 설명할 수 있다. 특정 pH에서 표면 전하가 중성인 등전점(IEP)에서는 입자 간 정전기적 반발력이 최소화되어 응집이 잘 일어난다. pH가 IEP보다 낮으면 입자가 양전하를 띠며 반발력이 증가해 분산성이 좋아지고, pH가 IEP보다 높으면 음전하를 띠며 마찬가지로 반발력이 커져 분산이 촉진된다. 이러한 상호작용 강도는 제타 전위로 측정할 수 있으며,  $\pm 30 \text{ mV}$  이상일 때 반발력이 강해 슬러리가 안정한 상태를 유지한다. 따라서 세리아 입자의 최적 분산성을 얻기 위해서는 pH 조절이 중요한 역할을 한다[16].

세리아의 제타 전위는 순수 세리아 현탁액에 NaOH 및 HCl을 첨가해 다양한 pH 값으로 제조 한 후, zeta-potential 분석장치를 통해

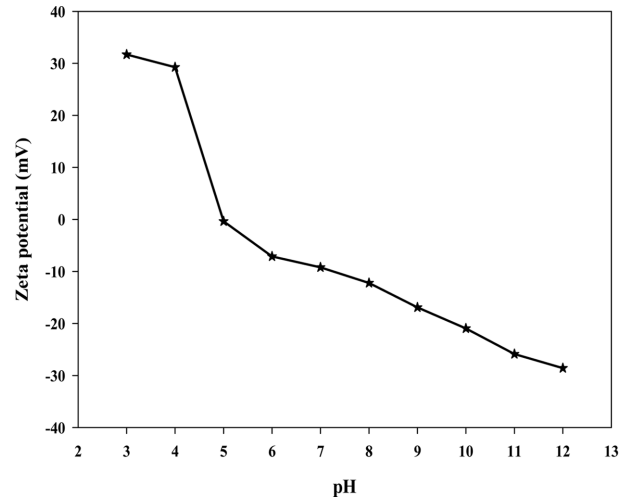


Fig. 3. Zeta-potential graph of ceria slurry as a function of pH.

분석하였다. Fig. 3의 결과는 세리아 나노입자의 표면 전하량을 보여주고 있으며, 세리아 나노입자의 표면 영전위점이 pH 5~6의 범위에 있고, 제타전위의 절대값이 pH 3에서 가장 큰 32.5 mV임을 알 수 있다.

이에 따라 용액의 pH 3일 때 나노 세리아 입자 사이의 정전기 반발력이 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 pH 3일 때 세리아 나노입자 사이에 작용하는 반데르발스 힘의 효과를 더 잘 극복하여 좋은 분산 효과를 얻을 수 있기 때문에 용액의 pH를 3으로 조정한다면 최대 정전기적 반발력을 보장하여 더 나은 분산 효과를 얻을 수 있다.

#### 3-2. 교반 속도의 따른 분산 효과에 영향

나노입자 크기 평가에서 D90 값은 입자 크기 분포를 특성화하는데 사용되는 중요한 변수 중 하나이다. D90은 입자 크기 분포의 90%가 D90 값 아래에 존재하거나 같은 직경을 나타내므로 입자 크기 분포 내에서 대다수의 입자 크기를 유추할 수 있는 핵심 백분위수 지표가 된다[15]. 따라서 순수 세리아 현탁액의 교반 속도에 따른 D90의 변화를 측정하였다.

Fig. 4와 같이 4000 rpm 미만의 교반 속도에서 교반 속도가 증가함에 따라 세리아 나노입자의 크기가 감소한다. 이는 고속으로 교반하면서 전단력이 발생하여 응집된 나노입자가 분산되기 때문이다. 전단력의 작용은 반데르발스 힘의 흡인 효과를 극복하므로 세리아의 좋은 분산을 달성할 수 있다. 4000 rpm 이후의 고속 교반에서 세리아 나노입자는 2차 응집 현상이 발생하였다. 나노입자 크기는 소폭 증가하다가 안정화에 도달하였다. 이러한 결과의 원인은 고속 교반 하에서 세리아 나노입자 사이의 충돌로 인한 마찰열이 발생하

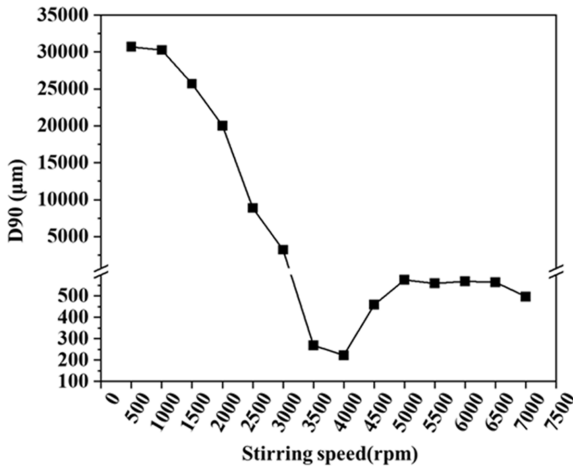


Fig. 4. PSA patterns of ceria slurry with varying stirring speed.

여 용액의 온도가 상승하므로 나노입자의 표면 에너지를 증가하고 세리아 나노입자를 다시 응집시키기 때문으로 보인다.

### 3-3. 분산제 농도가 분산 효과에 미치는 영향

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 현탁액의 분산제 농도 첨가량이 0.5 wt%일 때 분산 효과가 가장 뛰어났다. 이 중 D90은 130 nm로 용액 내 130 nm 미만의 나노입자가 전체 나노입자 함량의 90%를 차지한다. 분산 효과의 순서는 0.5 wt% KL>1.0 wt% KL>2.5 wt% KL>1.5 wt% KL>2.0 wt% KL이다. 이러한 결과의 이유는 분산제의 농도가 적정 수준 이상으로 높아지면 나노입자 사이의 전기 이중층이 압착되어 전하 효과가 차폐되고 이에 따라 전하 중력이 감소하여 나노입자의 응집이 증가되기 때문이다[15].

Fig. 5(b)를 통해 현탁액의 PEG 분산제 농도 첨가량이 1.0 wt%일 때 분산 효과가 가장 우수하다는 것을 확인하였다. 이 중 D90은 94.3 nm로 용액 내 94.3 nm 이하의 나노입자가 전체 나노입자 함량의 90%를 차지한다. 이후 분산 효과의 순서는 1.0 wt% PEG>1.5 wt% PEG>2.0 wt% PEG>2.5 wt% PEG>0.5 wt% PEG순으로 나타난다. 이러한 결과의 이유는 KL의 경우와 마찬가지로 분산제가 과도하게 첨가되어 나노입자 사이의 전기 이중층이 압착되고 전하 효과가 차폐됨으로 인해 전하 중력이 감소하여 나노입자가 응집되기 때문이다. 반면 0.5 wt% PEG의 분산 효과가 가장 저조한 이유는 다음과 같다. 나노입자 사이의 입체장애를 증가시켜 분산제 입자가 나노입자 표면에 개질됨으로써, 나노입자 간의 물리적 상호작용을 제한하여 입자들이 용액 내에서 잘 분산되도록 하는 것이 분산제의 효과이다. 입체장애효과는 입자 표면에 흡착된 고분자 사슬이나 큰 분자가 일종의 공간적 장벽을 형성함으로써, 입자 간의 가까워짐을 방해하여 응집을 억제하는 원리이다. 하지만 0.5 wt% PEG를 첨가할 경우, 이러한 입체장애효과가 반데르발스 인력에 의한 응집을 상쇄하기에 충분하지 않아, 결과적으로 충분한 분산 효과를 얻기 어려운 것으로 보인다.

Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 현탁액의 분산제 농도 첨가량이 1.0 wt%일 때 분산 효과가 가장 우수함을 확인할 수 있다. 그중 D90은 82.1 nm로 용액 내 82.1 nm 이하의 나노입자가 전체 나노입자 함량의 90%를 차지하며 세 가지 분산제 중 PVP가 가장 잘 수행됨을 알 수 있다. 분산 효과의 우수성은 1.0 wt% PVP>1.5 wt% PVP>2.0 wt% PVP>2.5 wt% PVP>0.5 wt% PVP순으로 나타나는데 이는 앞선 분산제와

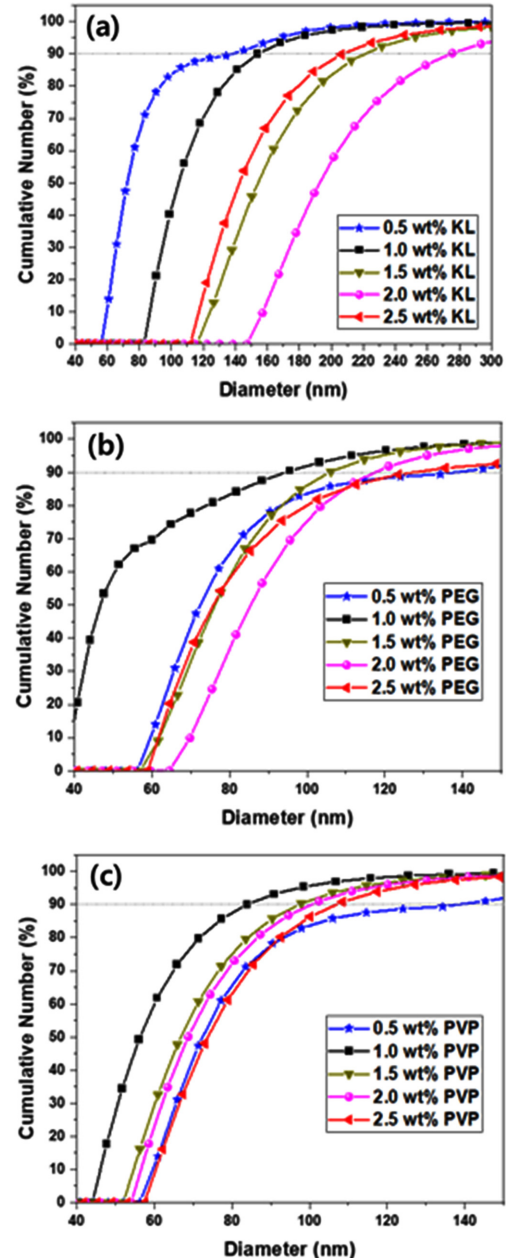


Fig. 5. PSA patterns of ceria slurry with varying dispersant concentration, (a) ceria slurry dispersed with KL dispersant, (b) PEG dispersant, (c) PVP dispersant.

유사한 경향을 보이며 분산제의 함량이 일정치를 넘어서면 분산 효과가 악화된다고 볼 수 있다. 따라서 적절한 분산제 농도의 선택은 분산 실험을 수행할 때 중요한 조건이라고 할 수 있다. 최적 농도 범위 이하일 경우, 분산 효과가 작동하지 않거나 반대로 과도한 농도는 전기 이중층이 압착되어 재응집을 유발할 수 있다.

### 3-4. 분산제 농도가 분산 안정성에 미치는 영향

분산 안정성은 식 (1)에 따라 육안으로 관찰된 현탁액의 높이에 따라 계산하였다. Fig. 6을 통해 분산 안정성을 비교할 때 KL 분산제가 분산 안정성 효과가 가장 낮고, 반면 PVP 분산제가 분산 안정성 효과가 가장 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 모든 기간에 걸쳐 KL은 분산제 함량에 따라 분산 안정성이 증가하다가 1 wt%에서

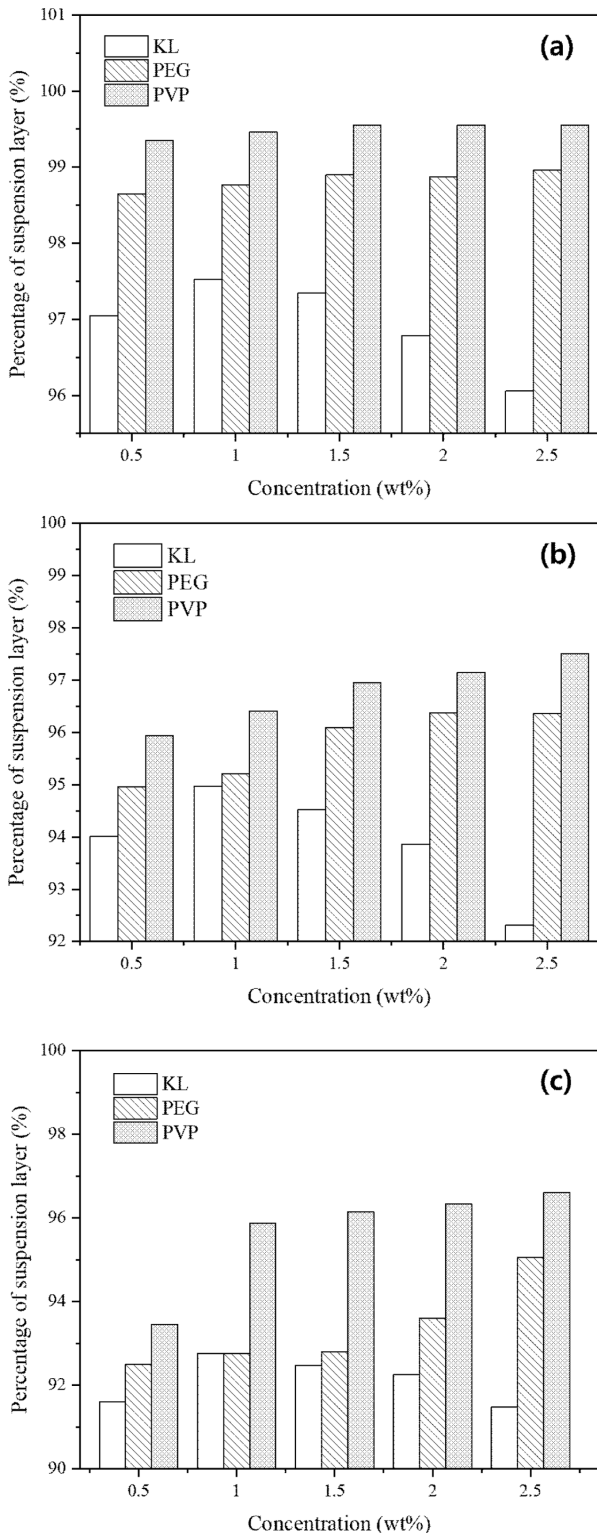


Fig. 6. Suspensibility changes with varying dispersant concentration and time, (a) 24 hr, (b) 7 days, (c) 14 days.

가장 안정성을 가지며 1.5 wt% 이후 감소하는 경향을 보인다. 반면에 PEG 및 PVP의 분산 안정성은 분산제 농도에 따라 비례하여 증가함을 확인할 수 있고 이는 분산 효과의 경향과 일치한다. 따라서 분산 효과와 분산 안정성 사이에는 일정한 관계가 있다고 해석된다.

시간 경과에 따라 분산 효과가 가장 우수한 현탁액을 기준으로

비교했을 때, 0.5 wt% KL 분산제는 1일 차 대비 7일 후 3.13% 감소하였으며, 14일 후 5.62% 감소하여 다른 분산제에 비해 가장 큰 감소치를 나타내었다. 이것은 KL의 분산 안정성이 뛰어나지 않아 입자 간의 상호작용으로 인해 응집이 발생하여 시간에 따른 침전속도가 높기 때문이라고 볼 수 있다. 한편, PEG의 분산 안정성은 농도에 따라 비례하여 감소하는 경향이 뚜렷하다. 그중 1 wt% 분산제를 첨가했을 때 PEG 분산 용액은 7일 차에 3.6% 감소, 14일 차에 3.76% 감소하여 미미한 차이를 보였다. 마지막으로 1 wt% 분산제 함량을 가지는 PVP 분산 용액은 각각 3.07%, 3.61% 감소하는 경향을 보였다. 결론적으로 PVP가 분산 안정성 측면에서 가장 우수한 결과를 나타내었으며, PEG 또한 효과가 우수하지만, 지속 안정성 측면에서 PVP의 성능에는 미치지 못한다. 반면, KL은 좋은 분산 효과를 나타내지만, 분산 안정성은 뛰어나지 않은 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구의 목적은 다양한 pH 조건, 교반 속도, 분산제 첨가에 따른 세리아 나노입자 슬러리의 분산성을 체계적으로 분석하는 것이다. 이를 통해 세리아 현탁액의 분산 특성을 평가하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) pH의 영향성: 우리는 세리아 나노입자가 pH 3에서 최대 제타 전위를 나타내어 가장 안정한 상태로 존재하며 분산 효과를 향상시키는 데 도움이 된다는 것을 확인하였다. 따라서 CMP에서 pH 값을 조정하면 세리아 나노입자의 분산성과 안정성을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

(2) 교반 속도 및 2차 응집: 교반 속도가 증가함에 따라 세리아 나노입자의 크기가 감소하지만, 특정 속도 이후에는 2차 응집이 발생하여 나노입자의 크기가 증가하며 안정화되었다. 이것은 과도한 응집을 피하기 위해 CMP 동안 교반 속도의 균형을 맞추는 필요가 있음을 의미한다.

(3) 분산제 농도의 영향: 분산제 농도는 분산 효과와 안정성에 영향을 미치는 또 다른 중요한 변수이다. 분산제 농도가 너무 높으면 나노입자 사이의 전기 이중층이 압축되어 응집이 증가한다는 것을 확인하였다. 따라서 안정적인 분산 상태를 유지하려면 적절한 농도의 분산제를 선택해야 한다.

(4) 분산제 선택: KL 및 PEG 모두 뛰어난 분산 능력을 나타냈지만 다른 분산제 대비 PVP가 분산 효과와 안정성 측면에서 가장 우수하였다. 따라서 CMP 적용에서 분산제의 올바른 선택은 나노입자의 분산 상태를 유지하는 데 중요하다.

결론적으로, pH 정도, 교반 속도 및 분산제 농도를 조정함으로써 세리아 나노입자의 분산 및 안정성을 효과적으로 개선하여 CMP의 품질과 효율성을 향상시킬 수 있다. 이러한 연구 결과는 세리아 나노입자의 광범위한 응용 분야에 적용 가능하다는 실질적인 의의가 있으며 산업 및 과학 연구 분야에서 나노 물질의 성능과 응용을 향상시키는 데 중요한 참고 자료를 제공한다.

#### 감 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 대기환경관리기술 사업화 연계 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.

다(과제번호: RE202103386, 과제명: 블루 수소충전소용 수소 정제 분리 시스템 실증 기술개발-Technology development of hydrogen purification membrane separation demonstration for blue hydrogen station).

## References

- 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**, 024015(2020).
- Jiao, L., Cui, Y., Chen, Z., Jin, Y. and Lin, N., "Study on the Particles Classification Control of CeO<sub>2</sub> Polishing Powder, in: 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies," *SPIE*, pp. 402-407(2019).
- Luo, X., Yang, W. and Qian, Y., "Fixed Abrasive Polishing: the Effect of Particle Size on the Workpiece Roughness and Sub-surface Damage," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **115**, 3021-3035(2021).
- Lu, S., Wang, H., Meng, Y., Wang, F., Fan, M. and Chen, J., "Silica Nano-particle Anneal Treatment and Its Effect on Chemical Mechanical Polishing," *J. Electr. Eng. Technol.*, **14**, 355-361(2019).
- 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**, 491-497(2004).
- Kim, Y., Park, B. and Jeong, H., "Frictional Characteristic of Ceria Abrasive in Oxide CMP," *Proceedings of the Spring and Fall Academic Conference of the Korean Society for Precision Engineering*, 125-128(2008).
- Song, X., Jiang, N., Li, Y., Xu, D. and Qiu, G., "Synthesis of CeO<sub>2</sub>-coated SiO<sub>2</sub> Nanoparticle and Dispersion Stability of Its Suspension," *Materials Chemistry and Physics*, **110**, 128-135(2008).
- Ye, W., Baoguo, Z., Pengfei, W., Min, L., Dexing, C. and Wenhao, X., "Improving the Dispersion Stability and Chemical Mechanical Polishing Performance of CeO<sub>2</sub> Slurries," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **12**, 044004(2023).
- Wang, W., Zhang, B., Shi, Y., Zhou, D. and Wang, R., "Improvement in Dispersion Stability of Alumina Suspensions and Corresponding Chemical Mechanical Polishing Performance," *Applied Surface Science*, **597**, 153703(2022).
- Gao, R.-J., Yao, Y., Wu, H. and Wang, L., "Effect of Amphoteric Dispersant on the Dispersion Properties of Nano-SiO<sub>2</sub> Particles," *Journal of Applied Polymer Science*, **134**, 45075(2017).
- Ren, D., Zou, Y., Zhan, C.-Y. and Huang, N.-K., "Behaviors of Different Dispersers on Morphologies of Porous TiO<sub>2</sub> Films," *Front. Mater. Sci. China*, **4**, 394-397(2010).
- Agmo Hernández, V., "An Overview of Surface Forces and the DLVO Theory," *ChemTexts*, **9**, 10(2023).
- Lamba, J., Thompson, A. M., Karthikeyan, K. G., Panuska, J. C. and Good, L. W., "Effect of Best Management Practice Implementation on Sediment and Phosphorus Load Reductions at Subwatershed and Watershed Scale Using SWAT Model," *International Journal of Sediment Research*, **31**, 386-394(2016).
- Lestari, M. L. A. D., Müller, R. H. and Möschwitzer, J. P., "Systematic Screening of Different Surface Modifiers for the Production of Physically Stable Nanosuspensions," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **104**, 1128-1140(2015).
- Zhuang, X., Magnone, E., Han, S. W. and Park, J. H., "Novel Surface Modification Strategies for Enhanced CeO<sub>2</sub> Nanoparticle Dispersion and Suspension Stability," *Ceramics International* **50**(13), 24801-24814(2024).
- Chorom, M. and Rengasamy, P., "Dispersion and Zeta Potential of Pure Clays as Related to Net Particle Charge Under Varying pH, Electrolyte Concentration and Cation Type," *European Journal of Soil Science*, **46**(4), 657-665(1995).

## Authors

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

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

**Jaе Hoon Yeo:** Student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea; yeojaehoon9874@gmail.com

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

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

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

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