

Sol-Gel법을 이용한 γ -Al₂O₃ 합성 시 EAcAc 첨가에 따른 구조적 특성 변화

엄명현¹, 안성윤², 하범용^{3*}

¹공주대학교 화학공학부, ²(주)대정, ³영진전문대학교 신재생에너지전기계열

Structure Characteristic Change by the Addition of EAcAc in γ -Al₂O₃ Synthesis Using by Sol-Gel Method

Myeong-Heon Um¹, Sung-Yun An², Beom-Yong Ha^{3*}

¹Division of Chemical Engineering, Kongju National University

²Daejeong Ltd.

³Department of Renewable & Electrical Engineering, Yeungjin University

요약 본 연구에서는 다른 종류의 알루미나 필름 제조시 첨가하여 안정적이고 균열형성을 제어할 수 있으며 겔 입자의 밀도를 높여주는 것으로 알려진 EAcAc(Ethyl acetoacetate, CH₃COCH₂COOC₂H₅)를 졸-겔법을 이용한 γ -알루미나(γ -Al₂O₃) 제조에 첨가하여 그 구조적 특성변화를 확인하고자 하였다. 이를 위해 졸-겔법에 의해 Aluminum isopropoxide(AIP)을 출발물질로 하여 가수분해로 boehmite 졸을 제조한 후 건조 및 하소시켜 γ -알루미나를 제조하였다. 이러한 제조과정 중, 가수분해 이전에 Ethyl acetoacetate(EAcAc, CH₃COCH₂COOC₂H₅)를 첨가하였으며 다양한 EAcAc의 몰비율(1:10, 1:25, 1:60, 1:120), 반응시간(5, 10, 17, 24 시간) 그리고 하소온도(400, 500, 600, 800 °C)를 적용시키며 γ -알루미나 파우더를 제조한 결과, 1:25의 EAcAc 몰비율, 24 시간의 반응시간, 그리고 500 °C의 하소온도에서 가장 높은 순도와 가장 작은 입자크기를 갖는 안정적 γ -알루미나가 생성되었다. 이렇게 최적조건에서 제조된 γ -알루미나에 대해 에너지분산형분광분석법(EDS), X선회절분석(XRD), 고분해능전자주사현미경(FE-SEM), 열중량분석기(TG-DTA) 그리고 푸리에변환적외선분광법(FT-IR) 등의 기기분석을 수행한 결과, 졸-겔법을 이용한 γ -Al₂O₃를 제조과정에서 최적 조건의 EAcAc의 첨가는 안정적인 γ -Al₂O₃ 제조와 더불어 입자크기의 감소, 순도의 향상에 기여하는 것으로 확인되었다.

Abstract In this study, we confirm the structural properties change due to the addition EAcAc in alumina production using the sol-gel method. EAcAc is known to be stable, controlling the crack formation, and increasing the density of gel particles when added in the manufacture of various alumina films. In this study, a boehmite sol prepared by hydrolysis using aluminum isopropoxide (AIP) was used as a starting material for the sol-gel method. The boehmite preparation was followed by drying and calcining to prepare γ -alumina (γ -Al₂O₃). During this sol-gel process, Ethyl acetoacetate (EAcAc, CH₃COCH₂COOC₂H₅) was added before hydrolysis at various EAcAc molar ratios (1:10, 1:25, 1:60, and 1:120), reaction times (5, 10, 17, and 24 hrs), and calcination temperatures (400, 500, 600, and 800 °C) to prepare γ -alumina powder. The results suggested that under the conditions of EAcAc molar ratio of 1:25, reaction time of 24 hours, and calcination temperature of 500 °C stable γ -alumina with the highest purity and smallest particle size was produced. EDS, XRD, FE-SEM, TG-DTA, and FT-IR analysis were performed on the alumina powder manufactured under the above optimal conditions. It was confirmed from these studies that the addition of EAcAc during the production of γ -Al₂O₃ using the sol-gel method contributes to the stable production of γ -Al₂O₃, reduction of particle size, and improvement of purity.

Keywords : Sol, Gel, EAcAc, γ -Al₂O₃, Nano Particle Size

*Corresponding Author : Beom-Yong Ha(Yeungjin Univ.)

email: hby1732@yju.ac.kr

Received August 24, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised October 1, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

최근 첨단기술로 제조된 소재들이 전자제품과 자동차 부품 소재 등으로 널리 사용되고 있으며 이중 첨단소재로써 자주 사용되고 있는 세라믹 소재는 실리콘, 알루미늄, 타이타늄 등과 같은 금속원소로 이루어진 산화물, 질화물, 탄화물이고 이런 소재들을 이용하여 물리적, 화학적 처리 및 고온에서 가공, 정제, 성형하여 제품을 제조, 사용하고 있다. 이러한 여러 세라믹 재료 중에서 산화알루미늄인 알루미늄(Al_2O_3)는 높은 잠재력을 가진 중요한 세라믹 재료로써 고강도 제품, 세라믹스전자재료, 촉매, 광학재료, 이온도체, 약학재료, 복합재료, 석유정제업 재료로 쓰이는 중요한 산업소재며 높은 열적 저항, 특유의 저밀도 상태, 고강도, 산화방지 같은 특수한 성질들을 가지고 있고 이를 이용해서 여러 현대기술에 적용되고 있다[1-5]. 이와 같이 현대기술에 알루미늄을 사용하기 위해 다양한 구조결정의 알루미늄을 사용하는데 이때의 알루미늄은 κ -, β -, δ -, θ -, α -, η -, χ - 및 γ -알루미늄(γ -Al₂O₃)와 같은 다양한 결정 구조를 가지고 있는데 500 °C 이상으로 하소하면 γ -알루미늄이 형성되고 800 °C를 넘으면 δ -알루미늄으로 전이된다. 또한 1000 °C 이상에서는 θ -알루미늄으로, 1100 °C 이상에서는 α -알루미늄으로 전이가 된다. 다양한 상태로 상변화가 일어나는 과정에서 급격한 표면적의 변화가 일어나게 되는데 이때 γ -알루미늄에서 α -알루미늄이 될 때 비표면적이 급격하게 감소되므로 α -알루미늄은 높은 강도를 필요로 하는 구조세라믹 소재로써 쓰이고 γ -알루미늄은 높은 기공과 내열성 지지체로 쓰인다[6].

한편 나노입자 크기의 알루미늄은 일반적으로 파괴강도나 인성과 같은 재료의 기계적 물성을 향상시킬 수 있다고 알려져 있다[7]. 여기서 나노입자의 알루미늄은 나노기술의 연구와 기술에 중대한 역할을 하고 있으며 높은 탄성계수, 열적 화학적 안정성, 높은 강도 그리고 유전 성질을 가지는 뛰어난 자재를 제조하는데 쓰이고 있다[8]. 이러한 높은 순도의 나노입자 알루미늄을 얻기 위해서 예전부터 증착 수열 합성법, 플라즈마 합성법, 졸-겔법, 알콕사이드의 가수분해법, 초임계유체와 에어로졸 일 때 유기금속화합물 분해법과 같은 방법들이 쓰였으며 이중에서 졸-겔(Sol-Gel)법이 넓은 범위의 기질, 플라스틱, 금속 그리고 세라믹을 코팅하는데 있어서 편리한 방법으로 알려져 있다[9-16]. 그리고 다양한 코팅 산업 분야에서 무기 나노입자를 이용한 유-무기 하이브리드 소재들을 제조하는데 있어서도 졸-겔법이 적합하다고 알려

져 있다[17].

한편 제품들의 안정성, 광학적, 내마모성을 요구하는 알루미늄을 제조하려면 조밀해야 되며 틈새가 없고 충분히 두꺼워야 한다[18,19]. 다른 연구들에서는 PZT($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$)의 두터운 필름을 만들기 위해서 폴리비닐피롤리돈과 같은 첨가제를 사용하기도 한다[20]. 이처럼 다양한 첨가제 중 아세토아세트산에틸(EAcAc: ethyl acetoacetate, $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$)을 활용한 알루미늄 제조에 관한 연구들이 발표되고 있는데 Aluminium *sec*-butoxide(ASB)와 혼합하여 봉소계 유리기판 위에 ASB/EAcAc 필름을 제조하는 과정에서 ASB에 EAcAc를 첨가하여 안정화된 ABS 알루미늄 졸을 얻을 수 있고 균열형성을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 겔의 표면장력을 감소시켜 입자의 밀도를 높여줌으로써 ASB/EAcAc 필름의 구조적인 특성들을 향상시킬 수 있다고 하였다[21].

이에 따라 본 연구에서는 졸-겔 방법을 이용한 γ -Al₂O₃ 입자들의 제조 시 EAcAc 첨가에 따른 γ -Al₂O₃의 구조적 특성 등을 검토하고자 하였으며 이를 위해 반응시간, 하소온도 그리고 EAcAc의 첨가비율(몰비) 등을 실험조건으로 하여 γ -Al₂O₃를 제조하였다. 제조된 γ -알루미늄(γ -Al₂O₃)는 에너지분산형 분광분석기(EDS: Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, TESCAN, MIRA LMH, Czech), X-선회절분석기(XRD: X-Ray Diffractometer, Rigaku, MiniFlex600, Japan), 주사전자현미경(FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscope, TESCAN, MIRA2, Japan), 푸리에변환적외선분광기(FT-IR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy Perkinelmer, spectrum100, UK), 열중량분석기(TG-DTA: Thermogravimetric-Differential Thermal Analysis, Rigaku, TG-8120, Japan)등의 기기분석을 통해 구조적 특성 등을 확인하였다.

2. 실험

2.1 시약 및 장치

본 실험에서는 출발 원료물질로 알루미늄 알콕사이드 가운데 Aluminum isopropoxide(AIP: 98 %, $\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$, SAMCHUN)를 사용하였으며 질산(HNO_3 : 60.0 %, SAMCHUN)을 해교제로, Ethyl acetoacetate (EAcAc: 99 %, SAMCHUN)를 첨가제로 사용하였다.

한편, 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 가열 및 교

반이 가능한 반응기를 이용하여 진행하였으며 실험 과정에서 용액의 증발 방지를 위해 냉각기를 설치하였다. 겔의 건조를 위해서는 건조오븐기를 사용하였고 고체화된 시료를 소성하는데는 Furnace(Barnstead, F62700, USA)를 이용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 졸-겔 방법을 이용해 안정적이고 고순도를 갖는 γ -Al₂O₃를 제조하기 위하여 AIP 1몰 당 100몰 비율로 D.I water를 넣고 1시간 동안 90℃에서 교반하였다. 이후 C. Jing 등의 연구에서 제시한 1:25의 몰비율을 기준으로 하여 AcAc와 D.I water에 대한 몰비율을 1:120, 1:60, 1:25, 1:10 4종류로 각각 첨가하여 3시간동안 90℃에서 교반을 실시하며 가수분해를 진행하였다[21]. 가수분해 반응 후 해교제로 질산을 AIP 1몰당 0.30 몰로 각각의 용액에 첨가하였으며 90℃에서 6시간동안 교반을 계속하여 해교가 완전히 일어나도록 하였다. 이렇게 총 10시간의 반응을 통해 알루미나 boehmite 졸을 제조하였으며 이후 상온에서 24시간동안 교반하여 겔화하였다. 이어 오븐기에서 24시간 건조시켜 고체를 얻은 후 500℃에서 2시간 하소하고 냉각, 분쇄시켜 γ -Al₂O₃ 파우더로 제조하였다.

한편, 하소온도에 따른 영향을 확인하고자 EAcAc와 D.I water의 혼합 몰비율을 일정하게 고정하고 400, 500, 600, 800℃의 다양한 온도에서 하소를 수행하였으며 졸-겔 반응시간을 5, 10, 17, 24시간 변화시켜 반응시간에 따른 변화 또한 확인하였다. 개략적인 실험과정을 Fig. 2에 나타내었다.

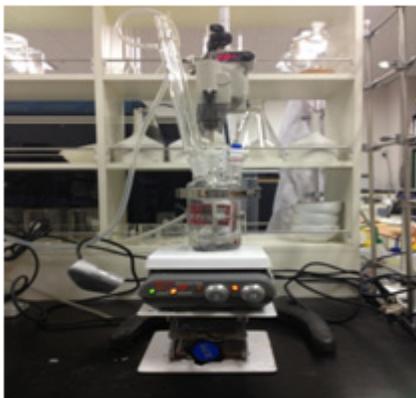


Fig. 1. Experimental apparatus for reaction

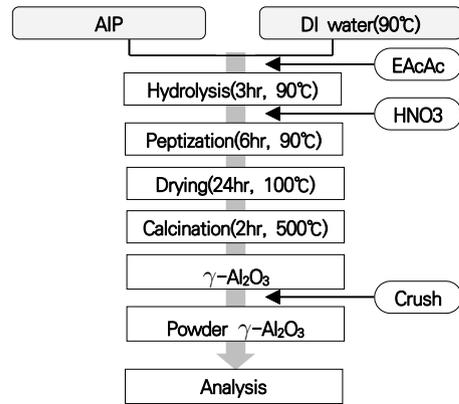


Fig. 2. Flow chart of experiment

2.3 기기분석

EAcAc를 첨가하여 합성한 γ -Al₂O₃의 온도변화에 따른 질량변화와 온도변화를 확인하기 위해 열중량분석기(TG-DTA)를 사용하여 분석하였다. 또한 합성된 γ -알루미나의 화학구조를 확인하고자 푸리에변환적외선분광기(FT-IR)를 사용하여 분석하였으며 합성한 γ -Al₂O₃의 조성을 확인하기 위해서 에너지분산형분광분석기(EDS)를 이용하여 분석하였고 알루미나 합성 과정에서 EAcAc 첨가에 따른 영향을 γ -Al₂O₃의 결정구조 측면에서 확인하기 위하여 X-선회절분석기(XRD)를 사용하여 결정상 분석을 실시하였다. 최종적으로는 제조된 γ -Al₂O₃ 파우더 형태와 입자 크기를 보기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 γ -Al₂O₃ 제조를 위한 몰비율 및 반응시간 변화 실험결과

Fig. 3은 EAcAc에 대한 D.I water의 최적 몰비율을 확인하기 위해 1:120, 1:60, 1:25, 1:10로 합성한 γ -Al₂O₃ 파우더를 FE-SEM 250.00 kx의 배율에서 촬영한 사진이다. 1:120 비율에서는 알루미나들이 전반적으로 뭉쳐 있는 상태로 입경이 큰 입자들이 관찰되었고 1:60 비율에서는 52.8 nm 전후 크기의 입자들이 분포되어 있으나 응집이 발생하여 아직 입자들이 뭉쳐있는 모습이 관찰되었다. 1:25 비율의 사진에서는 49.0 nm 전후의 나노입자 크기로 이전보다 작은 입자들의 숫자가 증가된 것이 관찰되었고 1:10 비율에서는 나노입자가 형

성되지 않고 표면이 얇으면서 거칠어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 FE-SEM 결과로부터 적정량의 EAcAc는 입자의 응집현상과 크기를 감소시켜 작은 입자들이 더 많이 형성되지만 과도하거나 적은 EAcAc의 첨가는 입자표면에 영향을 주어 나노크기의 입자를 형성하지 못하게 한다는 것을 확인할 수 있었다.

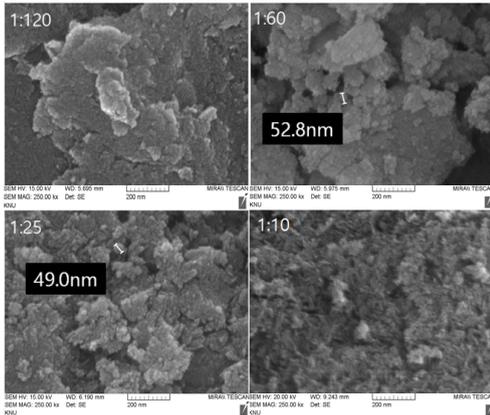


Fig. 3. FESEM images of the samples synthesized with the ratio of EAcAc 1:120, 1:60, 1:25 and 1:10

Fig. 4는 EAcAc에 대한 D.I water의 몰비율을 1:25로 하고 반응시간을 5, 10, 17, 24 시간동안 반응하여 500 °C로 2 시간동안 하소한 후 제조한 γ -Al₂O₃ 파우더의 FE-SEM 이미지를 나타낸 것이다. 5 시간의 반응에서는 63.8 nm 전후 크기의 비정형입자들이 관찰되었고 10 시간 일 때는 5 시간보다 더 작은 49.0 nm 전후 크기의 입자들이 분포되어 있었다. 한편, 17 시간에서는

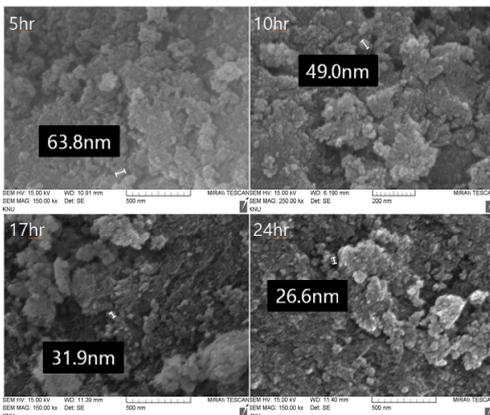


Fig. 4. FE-SEM images of the samples synthesized with reaction time in 5, 10, 17 and 24 hr

31.9 nm 전후 크기의 입자들이 보이며 24 시간에서는 26.6 nm 전후 크기의 입자들도 확인하였다. 이와 같이 γ -Al₂O₃ 제조 시 반응시간의 증가는 입자표면의 변화는 크지 않지만 입자의 응집이 줄어들면서 입자 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있어 반응시간이 입자크기 제어에 주요 인자로 작용할 수 있음을 의미한다고 하겠다.

3.2 하소온도 변화에 따른 γ -Al₂O₃의 XRD 분석 결과

Fig. 5는 EAcAc에 대한 D.I water의 몰비율을 1:25로 하고 10 시간동안 반응하여 만든 알루미나를 400, 500, 600, 800 °C로 온도를 나누어 2 시간동안 하소한 후 제조된 알루미나 파우더의 결정상을 XRD를 이용해 분석한 결과이다. 400 °C에서는 γ -Al₂O₃의 피크 외 다른 물질의 피크들이 확인되었는데 γ -Al₂O₃가 형성되기 전인 α -알루미나가 제조된 것이 확인되었다. 500 °C, 600 °C에서는 일반적 γ -Al₂O₃와 같은 피크들이 확인되어 정상적 γ -알루미나가 제조되었고 800 °C에서는 γ -알루미나보다 높은 피크들이 확인되는데 이것은 β -알루미나가 제조된 것이다. 따라서 정상적 γ -Al₂O₃를 제조하기 위한 하소온도는 500 °C, 600 °C로 확인되었다.

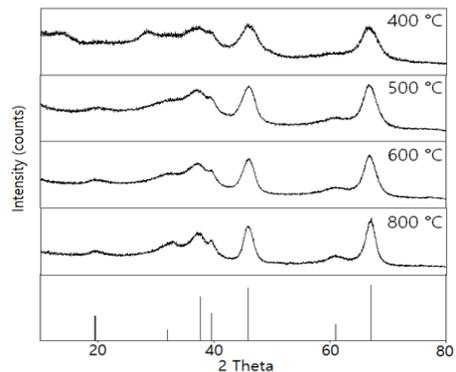


Fig. 5. XRD spectra of the samples synthesized with calcination temperature in 400, 500, 600, 800 °C

3.3 제조된 γ -Al₂O₃의 TG-DTA 기기분석 결과

Fig. 6은 1:25의 EAcAc 몰비율로 500 °C 하소온도에서 24 시간동안 반응하여 제조한 γ -Al₂O₃ 파우더를 열중량분석기(TG-DTA)를 사용하여 확인한 결과이다.

400 °C 이전에는 급격한 질량변화가 보였고 그 이후로는 낮은 기울기의 질량변화가 확인되었으며 900 °C에

서부터 질량변화가 나타나지 않았다. 그리고 DT그래프에서는 95 ℃에서 흡열피크가 나타났고 433 ℃에서는 발열피크가 확인되었는데 95 ℃에서의 질량변화는 용매의 증발과 흡착되어있던 습기의 탈착이 주된 원인이고 433 ℃ 전까지는 유기화합물의 분해에 의한 질량변화가 일어난 다음 433 ℃ 이후 부터는 γ -Al₂O₃의 결정화에 의해 질량이 감소했다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 γ -Al₂O₃ 파우더 제조에 있어 433 ℃ 이상의 결정화를 위한 하소온도조건이 요구됨을 알 수 있다.

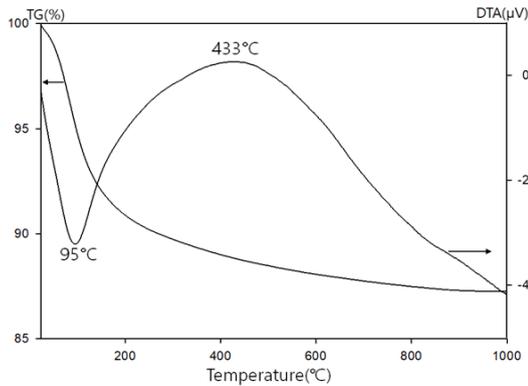


Fig. 6. TG-DTA curves of the samples synthesized with molar ratio of EAcAc to water 1:25 in 24 hr

3.4 제조된 γ -Al₂O₃의 FT-IR 기기분석 결과

Fig. 7은 1:25의 EAcAc 몰비율로 24 시간 반응시간과 500 ℃ 하소온도에서 제조한 γ -Al₂O₃ 파우더를 FT-IR로 분석한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 3378, 2243, 1639, 835 cm⁻¹에서 큰 피크가 발현되었으며 이러한 피크들 중에서 3378 cm⁻¹의 피크는 -OH

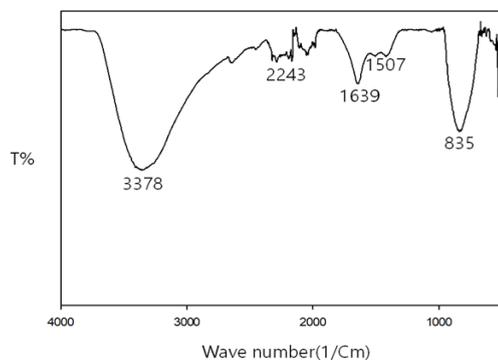


Fig. 7. FTIR spectra of the samples synthesized with molar ratio of EAcAc to water 1:25 in 24 hr

그룹들과 연관된 것이고 2000 - 2260 cm⁻¹에서 보인 피크들은 알루미늄에서 나온 불순물들과 관련된 것이다. 또한 1639cm⁻¹, 1507 cm⁻¹에서 나타난 밴드에서는 Al-OH 결합을 나타낸 피크들이며 835 cm⁻¹에서의 피크는 Al-O의 그룹과 연관된 것이다. 이와 같은 스펙트럼을 통해서 EAcAc를 첨가한 졸-겔 방법으로 γ -Al₂O₃ 파우더가 안정적으로 제조되었음을 확인할 수 있었다.

3.5 제조된 γ -Al₂O₃의 EDS 정성, 정량분석

1:25의 EAcAc의 몰비율로 24 시간 반응시간과 500 ℃ 하소온도로 제조한 γ -Al₂O₃에 대해 EDS로 기기분석한 결과를 Table 1과 Fig. 8에 나타내었다. Table 1을 통해서 제조한 γ -Al₂O₃의 질량 비율은 산소 36.08%와 알루미늄 63.92% 그리고 원자비율은 산소 48.77%과 알루미늄 51.33%로서, 구성성분이 산소와 알루미늄으로 되어 있다는 것을 알 수 있었으며 그 외의 불순물들은 극소량으로 EDS분석으로는 확인되지 않았다. 이것을 통해서 EAcAc의 첨가로 제조를 할 경우 높은 순도의 γ -Al₂O₃가 제조되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. EDS analysis of wt% and at% synthesized with molar ratio of EAcAc to water 1:25 in 24 hr

Element	Series norm[wt%]	C Atom[at%]
Oxygen	36.08	48.77
Aluminium	63.92	51.33

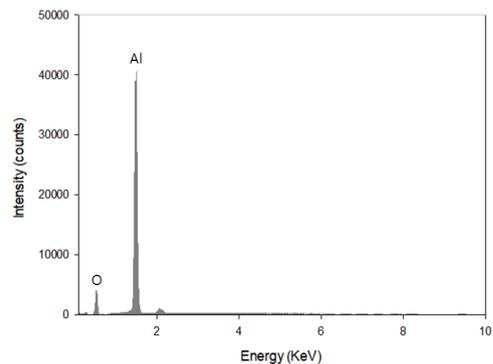


Fig. 8. EDS diagram of γ -alumina with molar ratio of EAcAc to water 1:25 in 24 hr

4. 결론

본 연구에서는 Sol-Gel법을 이용하여 γ -Al₂O₃을 제조하였으며 제조 과정 중 안정적 알루미늄나 졸의 생성과 구조적 특성을 향상시킬 수 있는 EAcAc를 첨가하여 그 특성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 EAcAc 몰비율, 졸 겔법 반응시간, 그리고 하소온도 등의 주요 조건들을 변화시켜 γ -Al₂O₃를 제조하였으며 이때 얻은 γ -Al₂O₃ 파우더를 EDS, XRD, FT-IR, TG-DTA, FE-SEM 등의 기기를 이용하여 구조적 특성변화를 분석하였다.

- (1) γ -Al₂O₃ 제조 시 첨가되는 EAcAc 대비 D.I water의 몰비율을 1:120, 1:60, 1:25, 1:10로 변화시켜 4종류로 합성한 후 FE-SEM으로 분석한 결과, 1:25의 몰비율에서 입자들의 응집이 방지되고 그 크기가 가장작은 49 nm 전후의 미립화된 입자를 형성하여 EAcAc가 첨가된 γ -Al₂O₃ 제조의 최적 몰비율로 확인되었다.
- (2) EAcAc가 첨가된 γ -Al₂O₃ 제조 시 5, 10, 17, 24 시간의 다양한 반응시간에 대한 영향을 FE-SEM으로 확인한 결과, γ -Al₂O₃ 제조를 위한 반응시간이 증가할수록 입자크기는 감소하는 것으로 나타나 제조공정상 반응시간이 입자크기를 제어하는 주요인자로 작용할 수 있음이 확인되었다.
- (3) 1:25의 EAcAc 몰비율에서 10시간 반응하여 합성된 알루미늄나 졸을 400, 500, 600, 800 °C의 다양한 하소 온도로 하소한 후 XRD로 기기분석한 결과 500 °C 및 600 °C에서 정상적 γ -Al₂O₃가 형성되어 500 °C가 최적의 하소 온도로 결정될 수 있었다.
- (4) 열중량 분석기(TG-DTA)를 이용한 질량변화 그래프를 통해 분석한 결과, γ -Al₂O₃의 결정화를 위해서는 최소 433 °C 이상의 하소온도가 요구되었다는 것으로 확인할 수 있었다.
- (5) 1:25의 EAcAc 몰비율, 24시간의 반응시간, 500 °C의 하소온도로 제조한 γ -Al₂O₃의 FT-IR 및 EDS 기기분석 결과, EAcAc의 첨가가 γ -Al₂O₃의 안정적 제조에 방해물질로 작용하지 않을뿐더러 높은 순도의 γ -Al₂O₃의 제조가 가능하도록 하는 첨가제 역할을 하는 것으로 확인되었다.

이러한 결과들로부터, 졸-겔법에 의해 γ -Al₂O₃를 제조하는 과정에서 최적조건인 EAcAc 첨가는 안정적인 γ -Al₂O₃ 제조와 더불어 입자크기의 미립화, 순도의 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] B. H. Oh, H. Kong, N. I. Kim, S. J. Kim, "Effect of Co₂O₃ addition on liquid phase sintering behavior and mechanical properties of commercial alumina", *J. of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, Vol.30, No.4, pp.150-155, Jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.6111/KCGCT.2020.30.4.150>
- [2] Y. Jin, K. Kato and N. Umehara, "Further investigation on the tribological behavior of Al₂O₃-20Ag₂O₂CaF₂ composite at 650°C", *Tribology Letters* Vol.6, pp.225-232, May 1999. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019132328220>
- [3] D. Jun, T. Tsuzuki, P. G. McCormick, "Ultrafine alumina particles prepared by mechanochemical thermal processing", *J. of the American Ceramic Society*, Vol.79, No.11, pp.2956-2958, Nov. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08731.x>
- [4] J. E. Park, J. J. Park, "Electrical and Mechanical Strength Properties of Epoxy/Micro Silica and Alumina Composites for Power Equipmen", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol.31, No.7, pp.496-501, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.7.496>
- [5] J. Zhang, F. Shi, J. Lin, S. Y. Wei, D. Chen, "Nanoparticles assembly of boehmite nanofibers without a surfactant", *Materials Research Bulletin*, Vol.43, No.7, pp.1709-1715, Jul. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.07.022>
- [6] G. Y. Park, G. Y. Jeong, "Preparation of Nanostructured Alumina Powder by Aerosol Process", *Ceramist*, Vol.12, No.2, pp.27-37, Apr. 2009.
- [7] K. Niihara, "New design concept of structural ceramics", *J. of the Ceramic Society of Japan*, Vol.99, No.10, pp.974-982, Jul. 1991. DOI: <https://doi.org/10.2109/jcersi.99.974>
- [8] N. Varghese, M. Hariharan, A. B. Cheria, J. Paul, "PVA-assisted synthesis and characterization of nano α -alumina", *International J. of Sci. and Res. Publications*, Vol.4, No.10, pp.1-5, Oct. 2014.
- [9] P. V. Ananthapadmanabhan, K. P. Sreekumar, N. Venkatramani, P. K. Sinha, P. R. Taylor, "Characterization of plasma-synthesized alumina", *J. of Alloy and Compounds*, Vol.244, No.1-2, pp.70-74, Jun. 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)02440-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(96)02440-1)
- [10] W. L. Suchanek, "Hydrothermal synthesis of alpha alumina(α -Al₂O₃) powders: study of the processing variables and growth mechanisms", *J. of the American Ceramic Society*, Vol.93, No.2, pp.399-412, Jan. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03399.x>
- [11] M. Nguefack, A. F. Popa, S. Rossigno, C. Kappenstein, "Preparation of alumina through a sol-gel process. Synthesis, characterization, thermal evolution and model of intermediate boehmite", *Physical Chemistry*

Chemical Physics, Vol.5, No.19, pp.4279-4289, Sept. 2003.

DOI: <https://doi.org/10.1039/B306170A>

- [12] T. Ogihara, H. Nakajima, T. Yanagawa, N. Ogata, K. Yoshida, N. Matsushita, "Preparation of monodisperse, spherical alumina powders from alkoxides", *J. of the American Ceramic Society*, Vol.74, No.9, pp.2263-2269, Sept. 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb08294.x>
- [13] A. Janbey, R. K. Pati, S. Tahir, P. Pramanik, "A new chemical route for the synthesis of nano-crystalline α -Al₂O₃ powder", *J. of the European Ceramic Society*, Vol.21, No.12, pp.2285-2289, Dec. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00322-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00322-8)
- [14] B. Felde, A. Mehner, J. Kohlscheen, R. Glade, F. Hoffmann, P. Mayr, "Deposition of alumina coatings on monocrystalline diamonds by sol-gel techniques", *Diamond and related Materials*, Vol.10, No.3-7, pp.515-518, Mar.-Jul. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(00\)00490-8](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(00)00490-8)
- [15] T. Ishizaka, S. Tero-Kubota, Y. Kurokawa, T. Ikoma, "EPR studies on defects in sol-gel derived alumina films", *J. of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.64, No.5, pp.801-806, May 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(02\)00377-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(02)00377-3)
- [16] J. Yu, J. C. Yu, W. Ho, Z. Jiang, "Effects of calcination temperature on the photocatalytic activity and photo-induced super-hydrophilicity of mesoporous TiO₂ thin films", *New Journal of Chemistry*, Vol.26, No.5, pp.607-613, May 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1039/B200964A>
- [17] Y. Y. Yu, W. C. Chen, "Transparent organic-inorganic hybrid thin films prepared from acrylic polymer and aqueous monodispersed colloidal silica", *Materials Chemistry and Physics*, Vol.82, No.2, pp.388-395, Nov. 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00259-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00259-1)
- [18] B. J. J. Zelinski, D. R. Uhlmann, "Gel technology in ceramics", *J. of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.45, No.10, pp.1069-1090, 1984.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(84\)90049-0](https://doi.org/10.1016/0022-3697(84)90049-0)
- [19] R. L. Kozodoy, J. A. Harrington, "Solgel alumina coating for hollow waveguide delivery of CO₂ laser radiation", *Applied optics*, Vol.34, No.34, pp.7840-7849, May 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.34.007840>
- [20] H. Kozuka, M. Kajimura, "Single-Step Dip Coating of Crack-Free BaTiO₃ Films> 1 μ m Thick: Effect of Poly(vinylpyrrolidone) on Critical Thickness", *J. of the American Ceramic Society*, Vol.83, No.5, pp.1056-1062, Oct. 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01330.x>
- [21] C. Jing, X. Zhao, Y. Zhang, "Sol-gel fabrication of compact, crack-free alumina film", *Materials research bulletin*, Vol.42, No.4, pp.600-608, Apr. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.08.005>

엄 명 현(Myeong-Heon Um)

[정회원]



- 1987년 2월 : 단국대학교 일반대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1991년 8월 : 단국대학교 일반대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 화학공학부 교수

<관심분야>

무기소재, 무기공업화학

안 성 윤(Sung-Yun An)

[준회원]



- 2020년 2월 : 국립공주대학교 화학공학부 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : ㈜대정

<관심분야>

먹는물, 무기소재

하 범 용(Beom-Yong Ha)

[정회원]



- 2000년 2월 : 단국대학교 일반대학원 화학공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 단국대학교 일반대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 영진전문대학교 신재생에너지전기계열 교수

<관심분야>

먹는물 수질, 태양광, 신재생에너지