

1 산화알루미늄 소재의 상용화기술 및 연구 동향

글_이동원 선임연구원 | 한국산업기술시험원 재료기술센터

1. 서론

일본 경제산업성은 사전협의 없이 우리나라의 수출주력사업인 반도체·디스플레이 관련 핵심소재 3종(플루오린 폴리이미드, 고순도 불화수소, 포토레지스트)에 대한 수출 규제를 강화하겠다는 계획을 발표하였고, 연이어 한국을 화이트리스트에서 배제함에 따라 그 어느 때보다도 세라믹 원료·소재 국산화의 필요성이 크게 대두되고 있다. 대일의존도가 높은 세라믹 원료로는 산화알루미늄(Al_2O_3), 지르코니아(ZrO_2), 이트리아(Y_2O_3), 티타니아(TiO_2), 실리카(SiO_2), 탄화규소(SiC), 질화규소(Si_3N_4), 질화알루미늄(AlN) 등이 있으며, 고순도, 고품위, 고성능의 세라믹 원료일수록 대일의존도가 매우 높은 실정이다. 특히 대표적인 세라믹 원료소재 중에 하나인 산화알루미늄(Al_2O_3)은 기계적

특성, 화학적 안정성, 전기 절연성, 내열성, 유전 특성, 경도, 값싼 원료 등의 장점으로 인해 반도체·디스플레이 장비, 고방열 부품 등의 고신뢰성·안정성을 실현하는 내열·내식·방열 특성이 우수한 세라믹 원료소재로 널리 사용되고 있다. 또한 리튬이차전지의 열적 안정성 및 기계적 안정성을 향상시키기 위해 산화알루미늄 입자를 슬러리 형태로 분리막에 코팅한 후 건조하여 제조하는 세라믹코팅 분리막 연구도 활발하게 진행되고 있다 [1-3].

산화알루미늄 원료 분말은 분말의 용도 및 특성에 따라 보통, 저소다, 이소결성, 및 활성알루미나, 구상알루미나 등의 종류로 개발되어져 왔으며, 국산 산화알루미늄 분말의 생산·공급량은 점진적으로 증가하여 국산화율은 35% 이상으로 증가하였다. 그러나 반도체산업, 이차전지, 전자산업 등에 적용되는 고순도·

고품위의 산화알루미늄 분말의 대일의존도는 오히려 확대되어 국내시장은 일본제품의 독과점 상태이다. 따라서 향후 지속적인 수요증가가 예상되는 산화알루미늄 분말소재의 국산화를 위해서는 국산 원료의 특성/성능/신뢰성을 수입 원료 동등 이상으로 향상시킬 수 있는 기술개발이 필요하다. 또한 산화알루미늄 분말의 상용화를 위해서는 국산 산화알루미늄 소재·응용부품에 대한 표준(standards) 및 인증(certification)이 필요하다.

본 기고에서는 산화알루미늄 분말소재의 상용화기술, 국산 산화알루미늄 상용화를 촉진하기 위한 수단으로서 표준화의 필요성 및 국내의 연구 동향을 서술하고자 한다.

2. 본론

2.1 산화알루미늄 소재 상용화기술

산화알루미늄은 값이 싸서 실용적일 뿐만 아니라 거의 불활성 상태로 존재하기 때문에 일반적인 금속이나 플라스틱에 비해 물리적, 화학적, 기계적 및 열적으로 높은 안정성을 가지고 있다. 또한 산화알루미늄은 고온에서 소성되면 커런덤형 구조를 가진 α 산화알루미늄상으로 최종 변화되거나 여러 준안정상이 존재하는 것으로 알려져 있다 [46].

산화알루미늄은 알루미늄이나 금속염을 이용하여 제조한 수산화물로부터 산화알루미늄을 제조하는 과정에서는 boehmite $\rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha$ 산화알루미늄과 같은 상전이 과정을 거치게 되며, 소성온도에 따른 상전이 과정을 그림 1에 나타내었다. 산화알루미늄 산업의 핵심원료인 α 산화알루미늄은 약 1,200 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서 소성을

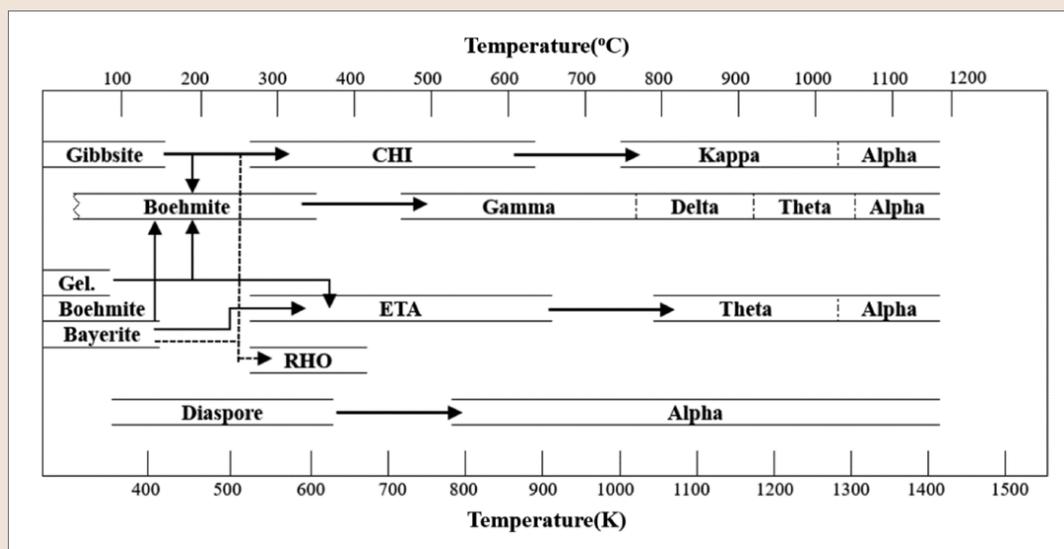


그림 1 ▶ 산화알루미늄 소성온도에 따른 상전이 과정.

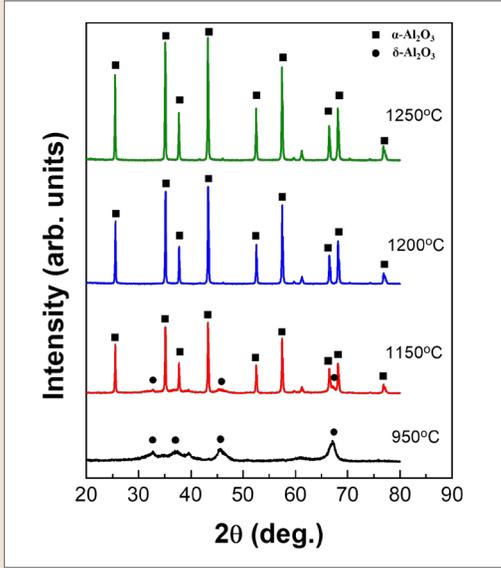


그림 2 ▶ 다양한 소결 온도에서 제조된 산화알루미늄 입자들의 X-선 회절 결과.

통해 얻을 수 있으며 (그림 2), γ 산화알루미늄에 비하여 밀도가 높고 화학적 내구성과 기계적 강도가 우수하여 연마재, 촉매 지지체, 단결정 사파이어, 세라믹 코팅 분리막 등의 제조를 위한 원료로 사용된다.

산화알루미늄 분말원료를 제조하기 위한 방법으로 현재 Bauxite를 원료로 하는 베이어(Bayer)법이 상용화되어 있다 [7-9]. 베이어법은 알루미늄 용출과정, 레드 머드 분리과정, 수산화알루미늄 결정화과정, 소성과정으로 구성되어 있다. 베이어법으로 생산된 알루미늄의 순도는 대략 99.6% ~ 99.8% 수준이며, 국내의 경우 KC(주)만 유일하게 베이어공정을 통하여 연간 15만톤 규모의 99.6%의 순도의 산화알루미늄 분말을 생산하고 있다. 해외의 경우 Showa denko, Sumitomo, 일본경금속, Aloc, Chalco 등에서 알루미늄 분말을 제조하고 있으며,

입도별로 분쇄해서 내화물용과 3~5 μm 의 파인 세라믹용으로 생산, 판매되고 있다. 그러나 베이어법은 고농도의 NaOH 용액을 사용하는 공정 특성상 제조된 산화알루미늄 분말에 다량의 나트륨이 불순물로 혼입되어 고순도 알루미늄을 제조하기에는 부적합하다. 따라서 베이어법으로 생산한 수산화알루미늄으로부터 고순도 알루미늄을 제조시에는 별도로 고도의 정제공정이 요구된다 [10]. 고순도 알루미늄을 제조할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으며, 습식합성법인 알콕사이드 가수분해법, 암모늄 명반의 열분해법, 알루미늄탄산염 열분해법 등이 있다 [11-14].

고순도 산화알루미늄 국내 제조업체는 (주)하이에스, 한국알루미나 등이 있으며 입자 크기에 따라 고순도 산화알루미늄 분말을 생산하고 있다.

이소결성 산화알루미늄은 산화알루미늄의 소결성을 촉진시키기 위해 불순물(Na_2O , SiO_2 , CaO 등)의 함량을 최소화하고, 입자 크기를 서브마이크론 수준으로 낮추고, 소결조제인 마그네시아(MgO)를 첨가시킨 것이 특징이다. 이는 프레스 성형, 테이크 캐스팅, 주입성형 등을 비롯 거의 전 성형 방법에 적용되기 때문에 산화알루미늄의 순도, 분말의 분산성, 탈 바인더성, 수축률 안정성, α 화율 등이 엄격히 제어된 분말로써 소결 중에 발생하는 비정상 입성장을 억제하여 산화알루미늄을 치밀하고 균일한 미세구조를 갖어 고경도, 내식성, 고강도를 발현할 수 있는 분말로 개발되어졌으며, (주)대한세라믹스에서 입자 크기 및 입자 형상에

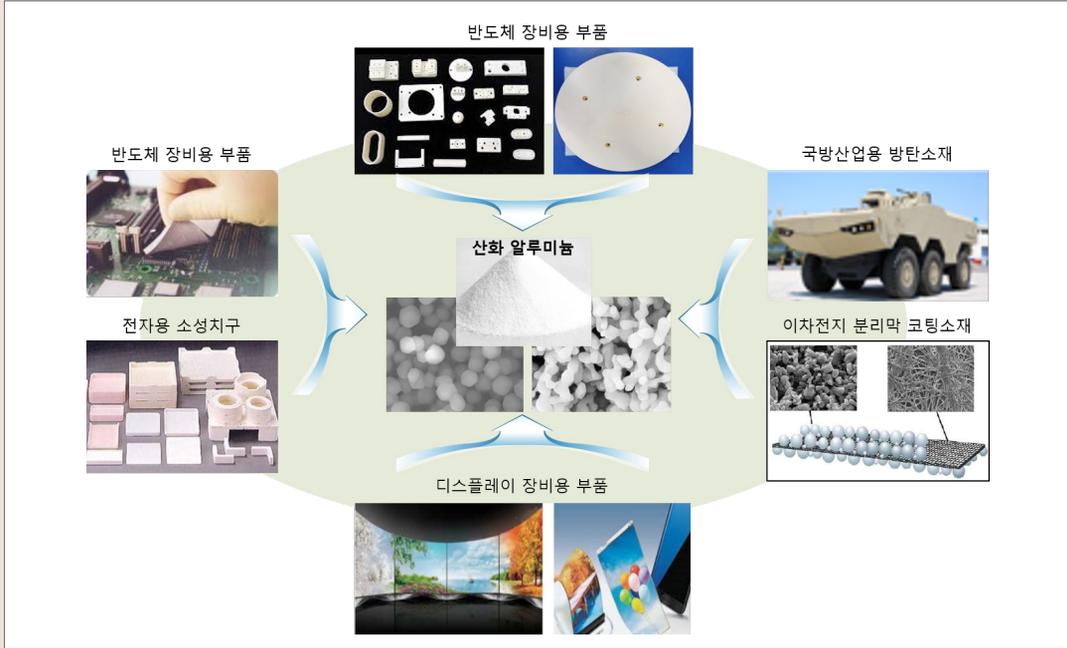


그림 3 ▶ 산화알루미늄 산업계 적용 분야.

따라 이소결 산화알루미늄을 생산하고 있다.

구상 산화알루미늄은 디스플레이, 자동차 전장 등 전자기기의 부품내에서 발생하는 열을 해소시키기 위한 방열 부재로 사용되고 있다. 제조방법으로는 졸겔법, 오일법 등이 활용되고 있으나 이러한 방법들은 1 μm 이하의 구형입자 제조만이 가능하고 치밀한 조직을 얻기 힘들다 [15-18]. 그러나 방열시트의 충진률, 및 열전도성 향상을 위해서는 1~40 μm 입자가 필요하다. 40 μm 이상의 구상 산화알루미늄을 제조하기 위해서는 화염형성을 위한 연료로 연소가스, 플라즈마 및 산소버너 등을 사용하는 화염용융법이 사용되고 있다 [19]. (주)대한세라믹스에서는 산소버너를 사용하는 화염용사공정을 통해 다양한 크기의 구상 산화알루미늄을 생산하고 있다. 그림 3은 산화알루미늄

분말을 적용한 MLCC 산업용 소성 부재, 방탄소재, 방열소재 및 이차전지 코팅분리막 등을 나타내었다. 이러한 상용기술들은 현재 일본기업인 Showa denko, Sumitomo, Denka 등의 산화알루미늄 분말을 사용하고 있어 산화알루미늄 국산화가 시급한 실정이다. 국산 산화알루미늄은 일본제품에 비해 분말의 불균일한 입도분포 및 소재 내부 결함 등으로 인해 고품질 제품 생산이 어려운 실정이다. 이러한 이유에서 분말생산단계에서 물리적·화학적 물성 개선 및 제조공정 최적화 기술이 요구된다.

2.2 산화알루미늄 소재 분야 표준화

현재 일본의 수출규제에 대응하기 위해 국내 수요기업들과 정부에서는 세라믹 원료·소재의 재고 물량을 확보하기 시작하였고, 대일 의

존도를 낮추기 위해 미국, 유럽, 중국 등으로 수입국 다변화를 진행하고 있다. 그러나 재고 물량 확보와 수입국 다변화는 단기적인 미봉책일 뿐 근본적인 해결책이 될 수 없으며, 장기적으로는 세라믹 원료·소재의 국산화를 통해 지급률을 높이는 것이 필요하다. 세라믹 원료·소재 중에 산화알루미늄 분말은 전체 세계시장에서 스미토모화학, 일본경금속의 점유율은 13%이나 국내시장은 90% 이상으로 일본 업체에 거의 전량 의존하고 있다.

그동안 국산 산화알루미늄 분말은 기존 수입 분말의 대체 시 추가공정 개발투자 소모와 대체에 따르는 리스크로 인해 수요기업(반도체, 전자산업 등) 적용이 이루어지기 힘든 상황이었다. 한편 생산기업은 생산 분말의 기초물성분석, 공정기술적용 및 최종제품 성능평가를 위한 시스템 부족으로 수요기업 요구 대응과 데이터를 기반으로 하는 시장 진입 활동에 한계를 가지고 있다. 따라서 산화알루미늄 분말의 조기 상용화를 위해서는 수요기업의 리스크를 최소화하고 생산기업의 관련역량을 극대화하기 위한 생산 및 응용 관련 실증기술, 즉 제품생산 표준공정기술, 소재·부품·제품 연계 평가기술, 인증제도 및 인증을 뒷받침하기 위한 표준화 개발이 필요하다.

국제표준화기구인 ISO에 따르면 “표준(standard)이란 재료(materials), 제품(products), 공정(processes) 및 서비스(services) 등이 목적에 적합한지를 보증하기 위해 일관성 있게 활용될 수 있는 요구사항(requirements), 사양(specification), 가이드라인(guidelines) 및

특성(characteristics)을 제공하는 합의(consensus)된 문서”이다 [20]. 표준은 반드시 제조자, 소비자, 규제당국 등 모든 이해당사자들이 참여하여 그들 간 합의에 의하여 제정되어야 하고, 낮은 거래비용 및 가격, 제품의 안전성 및 품질 향상 등을 통해 모든 이해당사자들의 이익에 부합해야 한다.

특히, 국제표준(international standards)은 제품 및 서비스의 안전성, 신뢰성, 우수한 품질을 보증하고, 생산비용을 낮추고 생산성을 증가시키므로써 새로운 시장으로서의 진입과 자유롭고 공정한 국제무역을 촉진시키는 역할을 한다. 표준이 미치는 영향력의 범위에 따라 하위단계인 사내표준으로부터 단체표준(ASTM 등)과 국가표준(KS, JIS, DIN 등)을 거쳐 최상위 단계인 국제표준(ISO, IEC 등)으로 구분할 수 있다. 우리나라와 같이 내수시장이 작고 수출의존도가 높은 국가에서는 국가표준도 중요하지만 해외시장 진출을 위하여 특히 국제표준의 큰 노력을 기울여야 한다. 국제표준화 기구인 ISO에는 분야별로 기술위원회(technical committee, TC)가 있는데, 세라믹 분야의 국제표준을 담당하는 기술위원회는 TC 206이다. 파인세라믹스(fine ceramics) 제목의 ISO/TC 206은 1992년에 설립되어 분체(powders), 모놀리스(monoliths), 코팅(coatings), 복합체(composites) 등에 대한 평가기술들을 국제표준으로 제정하고 있다.

최근 들어 전력반도체용 단결정 소재, SOFC용 소재, 에너지 하베스팅용 압전소재 및 열전소재 등 세라믹의 응용분야들로 국제표준화

표 1 ▶ 산화알루미늄 분말소재 평가기술 관련 해외 표준화 현황.

적용 분야	평가 항목	국제표준	해외 국가표준	해외 단체표준
반도체	소결밀도	ISO 18754	JIS R 1634	-
	내플라즈마특성	ISO 21859	-	-
	힘강도	ISO 14704	JIS R 1601	ASTM C1674-16
	비열	ISO 19628	JIS R 1611	ASTM E1952-17
방열소재	구형화율	-	-	-
반도체, 방열소재	화학분석 (순도, 불순물)	ISO/NP 3169 ISO 1617 ISO 805	JIS R 1649 JIS M 8856	-
	입도분포	ISO 24235	JIS R 1629	ASTM C1070-01
	비커스경도	ISO 14705	JIS R 1610	ASTM C1327-15
	열전도도	-	JIS R 1611	ASTM E1952-17

범위를 점차 확대해 나가고 있다. 표 1은 첨단 산업용 산화알루미늄 분말소재 평가기술 관련 해외 표준화 현황을 나타내었다. 반도체 및 방열소재와 같은 첨단산업용 분말 소재 시장에서 일본 업체의 점유율이 높은 만큼 평가기술에 대한 표준화 수준 또한 일본의 JIS 표준이 가장 앞서 있으며, JIS를 토대로 ISO, KS 표준들이 제정되어 활용되고 있다. 따라서 성공적인 국산화를 위해서는 반도체산업용 이소결 산화알루미늄 분말 및 전자산업용 고방열 구상 산화알루미늄에 요구되는 분체 특성 및 성능 평가기술에 대한 표준화 연구가 필요하다.

2.3 산화알루미늄 소재 연구 동향

2.3.1 산화알루미늄 소결체

소결(sintering)이란 분말을 원료로 사용해 만들어진 성형체를 고온에서 치밀화시키는 과정을 의미한다. 이때 분말성형체의 밀도는

40~60%에서 소결이후 80~99.9%까지 증가하며 부수적인 현상을 동반하게 된다. 산화알루미늄 분말을 성형하는 공정 중에서 분말압축 공정은 저비용, 대량생산, 생산 속도 등으로 인해 일반적인 방법으로 널리 사용되고 있으며, 대표적으로 일축 압축 성형법(uniaxial press)과 냉간 등압성형(cold isostatical press) 등이 있다. 일축압축 성형법은 2개의 펀치 사이에 배치된 분말을 성형하는 전통적인 기술이다. 하지만 성형 중 몰드 내벽과 분말 간 마찰의 문제점과 성형체의 위치에 따른 압력 분포의 불균형 문제가 발생하게 되며, 이로 인하여 성형밀도(green density)의 불균형이 성형체 내에서 존재하게 되어 crack이 발생하고 springback으로 인한 결함의 원인이 된다. 냉간 등압성형은 등방 압축 성형방법 중 하나이며 성형 몰드 안에서 정수압을 가하면 성형체 모든 표면에 압력이 균일하게 가해지도록 하는 성형방법이며, 등압성형에 비하여 최대인가 압력을 증가시켜

성형밀도를 높일 수 있으며 또한, 압축 불균형을 현저하게 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다.

소결은 치밀화가 이루어지는 기술적인 방법에 따라 상압소결(normal sintering), 가압소결(press sintering), 스파크 플라즈마소결(spark plasma sintering), 반응소결(reaction sintering) 등 크게 4가지로 분류된다 [21]. 상압소결은 통상의 소결공정으로 성형체를 대기압의 공기 혹은 불활성 분위기에서 열처리해 치밀화하는 방법이다. 가압소결은 소결체의 외부에서 압력을 가해 치밀화하는 방법이다. 스파크 플라즈마소결은 소결체에 압력을 가함과 동시에 고전류의 펄스를 흐르게 함으로써 저온에서 치밀화하는 기술이다. 마지막으로 반응소결은 소결 과정 중에 외부로부터 제품 내로 물질의 이동이 발생해 새로운 소재가 합성되면서 치밀화가 일어나게 하는 방법이다. 상기의 4가지 소결방법 모두 소결 과정 중에 치밀화를 촉진하기 위한 기술이라고 할 수 있다.

산화알루미늄은 앞에서 언급하였듯이 제조 방법에 따라 다양한 상이 얻어지며, 가장 일반적인 산화알루미늄은 커런덤(corundum)이라고 불리며, 거의 육방정계(hexagonal) 구조의 안정적인 형태인 α 산화알루미늄이다. α 산화알루미늄에 대한 연구로는 소결조제로서 Mg, Si, Ca, Y 등의 도펀트 첨가의 영향 연구, Graphene, Carbon nanotube 및 SiC 첨가제에 의한 기계적 향상 등의 연구가 진행되어 왔다 [22-29]. Wang 등은 다른 전하를 갖는 기지상의 조합(heterocoagulation)을 이용하여 매우 잘 분산된 그래핀-산화알루미늄 복합체를 제



그림 4 ▶ 하이브리드 CNT/Al₂O₃ 복합소재 제조 모식도 및 복합소재의 특성.

조하였다 [30]. Mukherjee 등은 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)를 알루미늄과 혼합하여 방전 플라즈마소결(spark plasma sintering, SPS)방법으로 CNT를 강화한 세라믹 기지 나노복합체를 제조하였다 (그림 4 참조). 이 복합재료의 항복강도(yield strength)는 순수 산화알루미늄의 약 5배 정도, 전기전도도는 탄소나노튜브를 이용한 세라믹들보다 7배 높다고 보고한 바 있다 [31-34]. Al₂O₃-SiC 세라믹 복합소재는 1 μ m 미만의 미세한 SiC를 첨가함으로써 단상 Al₂O₃ 세라믹의 기계적 물성을 증진시켜 그 응용 폭을 넓히고자 하는 목적으로 30여년 전부터 연구되어온 소재이다. 공정에 따라 다소 차이는 있으나 약 5 vol% 소량의 SiC만을 첨가하여도 상온에서 굽힘강도가 500 MPa ~ 1 GPa를 상회하여 제조하는 것이 가능하며, 고온에서 크립 저항성 또한 최대 2배 가량 향상되는 것으로 알려져 있다.

2.3.2 산화알루미늄 코팅 분리막

최근 배터리의 안전에 관련된 사례사고가 늘고 있어, 오작동, 발화 및 폭발 안정성에 대한 관심이 고조되고 있다. 현재 폴리올리핀계열의

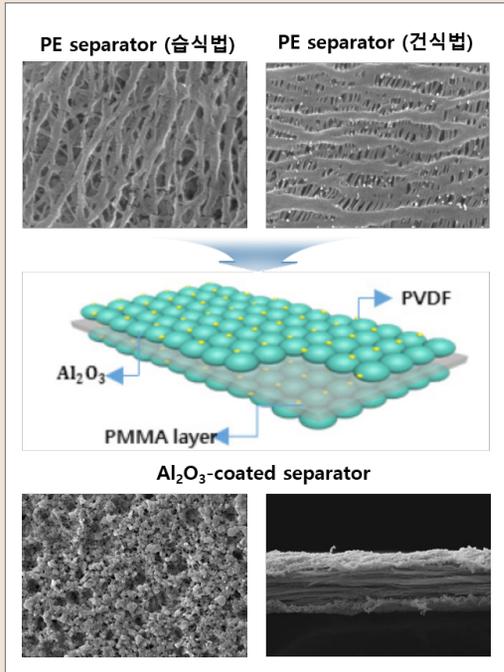


그림 5 ▶ PE 분리막 양면에 코팅된 Al₂O₃-coated 분리막 구조와 SEM 이미지.

다공성 구조를 가진 폴리에틸렌(PE)와 폴리프로필렌(PP) 소재의 고분자 필름이 리튬이차 전지의 분리막으로 많이 사용되고 있으나, 이런 분리막은 열안정성 및 기계적 파손에 취약하기 때문에 내열성을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적인 방법으로 PE 분리막에 내열성이 좋은 PP 분리막을 중첩하여 제조하는 방법, 고내열 특성을 지니는 유기물 혹은 무기물을 코팅하는 방법, PE에 감마선과 전자선과 같은 방사선을 조사하여 가교구조를 형성시켜 내열성이 향상된 분리막을 제조하는 방법이다 [35-39]. 세 가지 방법 중에서 PE 혹은 PP 소재에 무기물을 코팅하는 방법이 상용 내열성강화 분리막 제조에 가장 많이 적용되고 있다 (그림 5 참조).

일반적으로 비수성 전해질은 폴리올리핀계 분리막에 젖지 않는 성질을 가지나, 산화알루미늄과 같은 무기 입자의 첨가로 인해 ethylene carbonate (EC), propylene carbonate (PC) 등과 같은 액체 전해질에 상당한 흡윤성을 가진다. 이는 비수성 액체 전해질을 사용하는 리튬이온 이차전지에 좋은 열 내구성과 안정성을 가져온다.

2.3.3 AD법을 이용한 산화알루미늄 코팅

에어로졸 데포지션(AD) 공정은 200~400 m/s의 분사속도로 미세한 세라믹 입자를 노즐로 가속시켜 기판에 충돌하여 코팅층을 형성하는 것이다. 현재까지 보고된 AD법에 의한 코팅막의 형성 메커니즘을 정리해 보면 분사된 세라믹 입자들이 기판 또는 형성된 코팅 층에 충돌하면서 미세하게 분쇄되어 수~수십 나노미터 수준의 입자가 생성되고, 충돌 시 입자의 기계적인 운동에너지가 열에너지로 소산되면서 발생하는 수백도 수준의 온도로 인해 입자들이 결합하고 반복되어 치밀화가 이루어진다고 보고되고 있다 [40-43].

AD 공정은 화학량론비의 제어 및 저 융점 재료와의 혼합막 형성이 매우 용이하기 때문에 마이크로액츄에이터, 내장형 수동소자, 광학소자, 광촉매, 리튬이온전지, 연료전지 등과 같은 전자세라믹스 분야뿐만 아니라 내마모/내부식성 코팅, 생체적합물질 코팅, 초소수성 코팅 등과 같은 표면 처리 분야로의 응용연구 또한 활발히 진행되고 있다.

최근에는 유전체 및 박막저항 등을 제조하기

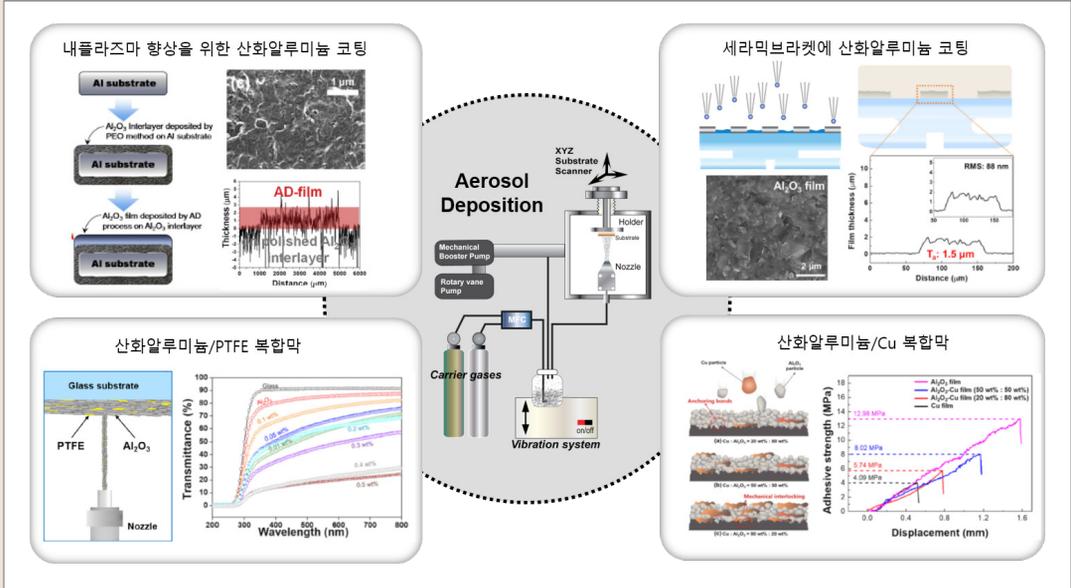


그림 6 ▶ AD법을 이용하여 상온에서 산화알루미늄 단일막 및 복합막 제조.

위해 세라믹(Al_2O_3 , BaTiO_3 , TiO_2 등)과 금속(Ag, Cu 등)을 혼합한 세라믹/금속 복합체에 대한 연구와 산화알루미늄과 PTFE (poly-tetra-fluoro-ethylene)를 혼합한 세라믹/고분자 복합체를 제조하여 소수성과 투명성을 향상시킨 연구가 보고되고 있다 [44-47]. AD법은 상온에서 치밀한 산화알루미늄 코팅을 형성할 수 있고 다양한 세라믹, 금속, 고분자 분말과 혼합하여 복합막을 형성이 가능하기 때문에 그 응용분야가 그림 6에서 나타낸 것처럼 매우 넓다.

3. 맺음말

산화알루미늄은 소재는 거의 일본 등 수입에 의존하고 있고, 난이도/기술 수준에 따라 3~5

년 기술격차로 수입대체를 위해 국내 업체들이 개발을 착수하였으나 아직 초기단계에 머물고 있다. 조기 사용화를 위해서는 수요기업(반도체, 전자산업 등)의 리스크를 최소화하고 생산기업의 관련역량을 극대화하기 위한 생산 및 응용관련 실증기술 개발이 필요하다.

본 기고문에서는 국내 산화알루미늄 소재개발 현황, 일본 수출규제 등에 따른 산화알루미늄원료 국산화의 필요성, 국산 산화알루미늄 소재의 상용화를 촉진하기 위한 표준의 역할 및 산화알루미늄 소재 관련 연구 동향을 살펴보았다. 첫 번째로, 일본의 수출규제 및 화이트리스트 배제로 인해 세라믹 원료·소재의 안정적인 공급이 심각한 문제로 부상하였고, 그에 대한 대응책으로 재고물량 확보, 수입국 다변화, 국산화 등을 진행하고 있다. 근본적인 해결책은 세라믹 원료·소재의 국산화이지만 수요기업

의 회피 성향, 높은 진입 장벽 등으로 인해 상용화에 성공한 원료·소재는 많지 않은 편이다. 따라서 국산화를 위한 실증기술인 제품생산표준공정기술, 소재·부품·제품연계 평가기술, 표준화 개발이 필요하다.

두 번째로 국산 원료·소재의 신뢰도를 제고시키고 수요기업-공급기업 간 긴밀한 협력 관계를 강화시키는 방법으로 실증 및 양산 테스트 등 수요기업의 니즈를 반영한 표준과 인증을 활용할 수 있을 것이다. 현재 산화알루미늄 분체 특성 및 성능 평가기술과 관련해서는 JIS를 토대로 ISO, KS 표준들이 제정되어 활용되고 있다. 이러한 기보유 표준을 적용하여 산화알루미늄 분말의 물성평가 기술을 표준화하고, 응용제품별 핵심 특성 실증평가를 위한 표준 개발이 필요하다.

마지막으로 산화알루미늄 소재의 국내외 연구 동향은 고품위의 산화알루미늄 제조, 우수한 기계적/화학적 내구성 향상을 위한 산화알루미늄 기반 복합세라믹 소결체 제조, 이차전지 세라믹 코팅 제조, 및 AD법을 산화알루미늄 단일 및 복합막 제조 등 다양한 분야에서 연구개발이 이루어지고 있다. 향후 산화알루미늄 소재의 국가 경쟁력 확보를 위해서는 산화알루미늄 소재·응용부품에 대한 체계적인 실증평가를 통해 산·학·연이 긴밀히 연결된 기술개발 네트워크가 필요하다. 또한 작은 규모의 내수시장을 보유한 우리나라는 해외시장으로 진출하기 위해 국제표준의 뒷받침이 반드시 필요하다. 

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] J. Lee, C. L. Lee, K. P, and I. D. Kim, *J. Power Sources*, 248, 1211 (2014).
- [2] D. W. Lee, S. H. Lee, Y. N. Kim, and J. M. Oh, *Powder Technology*, 320, 125 (2017).
- [3] A. Shamshad, T. Chao, W. Muhammad, L. Weiqiang, W. Zhaohuan, W. Songhao, B. Bismark, L. Jingna, A. Junaid, X. Jie, G. J. B, and H. Weidong, *Adv. Materials*, 5, 1701147 (2018).
- [4] S. F. Wang, X. Xiang, Q. P Ding, X. L, Gao, C. M. Liu, Z. j. Li, and X. T Zu, *Ceramics International*, 39, 2943 (2013).
- [5] M. Tahmasebpour, A. Babaluo, S. Shafiei, and E. Pipelzadeh, *Powder Technology*, 191, 91 (2009).
- [6] J. S. Si and M. S. Lee, *J. Korean Inst. of Resources Recycling*, 28, 15 (2019).
- [7] S. A. Halawy, M. A. Johamed, and M. I. Zaki, *J. Chem, Technol. Biotechnol*, 72, 320 (1998).
- [8] A. R. Hind, S. K. Bharava, and S. C. Grocott, *Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 146, 359 (1999).
- [9] Y. Liu, C. Lin, and Y. Wu, *J. Hazardous Materials*, 146, 255 (2007).
- [10] N. K. Park, H. Y. Choi, D. H. Kim, T. J. Lee, M. Kang, W. G. Lee, H. D. Kim, and J. W. Park, *J. Crystal Growth*, 373, 88 (2013).
- [11] J. S. Chung and W. K. Park, *J. Korean Ceram. Soc.*, 35, 953 (1998).
- [12] B.E. Yoldas, *J. Applied Chemistry and Engineering B*, 52, 145 (1973).
- [13] H. N. Paik, M. K. Lee, C. H. Kwak, and T. S. Suh, *J. Korean Ceramic Society*, 26, 445 (1989).
- [14] J. H. Choy, J. S. Yoo, J. T. Kim, C. K. Lee, and N. H. Lee, *J. Korean Ceram. Soc.*, 35, 422 (1991).
- [15] M. Mofazzal Hossain, Yaochun Yao, Takayuki Watanabe, Fuji Funabiki, and Tetsuji Yano, *Chem. Eng. J.*, 150, 561 (2009).
- [16] J. T. Feng, Y. J. Lin, F. Li, D. G. Evans, and D. Q. Li, *Appl. Catal. Z*, 329, 112 (2007).
- [17] T. Hyodo, M. Murakami, Y. Shimizu, and M. Egashira, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 25, 3563 (2005).
- [18] S. Kumar, V. Selvarajan, P. V. A. Padmanabhan, and K. P. Sreekumar, *J. Mater. Process. Technol.*, 176, 87 (2006).
- [19] S. H. Eom, J. H. Pee, J. K. Lee, K. T. Hwang, W. S. Cho, and K. J. Kim, *J. Korean Powder Metallurgy Institute*, 16, 431 (2009).
- [20] ISO 홈페이지 (www.iso.org)
- [21] 소재기술백서 2011
- [22] S. van der Gijp, J. E. ten Elshof, O. Steigelmann, and H. Verweij, *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 2610 (2000).
- [23] H. L. Marcus and M. E. Fine, *J. Am. Ceram. Soc.*, 55, 568 (1972).
- [24] M. L. Gall, A. M. Huntz, B. Lesage, C. Monty, and J. Bernardini, *J. Mater. Sci.*, 30, 201 (1995).
- [25] J. Sun, L. Gao, and W. Li, *Chem, Mater.* 14, 5169 (2002).
- [26] D. Chakravarty, S. Bysakh, K. Muraleedharan, T. N. Rao, and R. Sundaresan, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, 203 (2008).
- [27] I. Ahmad, H. Cao, H. Chen, H. Zhao, A. Kennedy, and Y. Q. Zhu, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30, 865 (2010).
- [28] L. Gao, H. Z. Wang, J. S. Hong, H. Miyamoto, K. Miyamoto, Y. Nishikawa, and S. D. D. L. Torre, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19, 609 (1999).

- [29] Z. Shen, M. Johnsson, Z. Zhao, and M. Nygren, *J. Am. Ceram. Soc.*, 85, 1921 (2002).
- [30] K. Wang, Y. F. Wang, Z. J. Fan, J. Yan, and T. Wei, *Mater. Res. Bull.*, 46, 315 (2011).
- [31] J. D. Kuntz, G. D. Zhan, and A. K. Mukherjee, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 1228, (2003).
- [32] C.C. Anya, *J. Mater. Sci.*, 34, 5557 (1999).
- [33] Y. K. Jeong, A. Nakahira, and K. Niihara: *J. Am. Ceram. Soc.*, 82, 3609 (1999).
- [34] S. Gustafsson, L. K. L. Falk, E. Liden, and E. Carlstrom: *Ceram. Int.*, 34, 1609 (2008).
- [35] J. H. Park, W. Park, J. H. Kim, D. Ryoo, H. S. Kim, Y. U. Jeong, D. W. Kim, and S. Y. Lee, *J. Power Sources*, 196, 7035 (2011).
- [36] K. J. Kim, J. H. Kim, M. S. Park, H. K. Kwon, H. Kim, and Y. J. Kim, *J. Power Sources*, 198, 298 (2012).
- [37] C. Shi, P. Zhang, L. Chen, P. Yang, and J. Zhao, *J. Power Sources*, 270, 547 (2014).
- [38] Z. Zhang, Y. Lai, Z. Zhang, K. Zhang, and J. Li, *Electrochimica Acta*, 129, 55 (2014).
- [39] S. J. Gwon, J. H. Choi, J. Y. Sohn, S. J. An, Y. E. Ihm, and Y. C. Nho, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266, 3387 (2008).
- [40] J. Akedo, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89, 1834 (2006).
- [41] J. Akedo, *J. Therm. Spray Technol.*, 17, 181 (2008).
- [42] D. M. Chun and S. H. Ahn, *Acta Mater.*, 59, 2693 (2011).
- [43] D. W. Lee, H. J. Kim, Y. H. Kim, Y. H. Yun, and S. M. Nam, *J. Am. Ceram. Soc.*, 94, 3138 (2011).
- [44] C. W. Kim, J. H. Choi, H. J. Kim, D. W. Lee, C. Y. Hyun, and S. M. Nam, *Ceramics International*, 38, 5621 (2012).
- [45] M. Y. Cho, S. J. Park, S. M. Kim, D. W. Lee, H. K. Kim, S. M. Koo, K. S. Noon, and J. M. Oh, *Ceramics International*, 44, 16548 (2018).
- [46] M. Y. Cho, D. W. Lee, I. S. Kim, W. J. Kim, S. M. Koo, D. Lee, Y. H. Kim, and J. M. Oh, *Ceramics International*, 45, 6702 (2019).
- [47] M. Y. Cho, D. W. Lee, P. J. Ko, S. M. Koo, J. Kim, Y. K. Choi, and J. M. Oh, *Electronic Materials Letters*, 15, 227 (2019).

저/자/약/력



성명	이동원	
학력	2008년	광운대학교 전자재료공학과 학사
	2010년	광운대학교 전자재료공학과 석사
	2014년	광운대학교 전자재료공학과 박사
경력	2015년 ~ 2018년	한국산업기술시험원 연구원
	2019년 ~ 현재	한국산업기술시험원 선임연구원