

2 지르코니아 소재 관련 기술 개발 동향

글_김주영 책임연구원·김부영 책임연구원 | 주식회사 하이마

이희수 교수 | 부산대학교 재료공학부

1. 서론

4차 산업혁명에 대한 개념은 2016년 1월 스위스에서 열린 세계경제포럼에서 처음으로 소개되었으며, 현재까지의 어떤 산업혁명보다 빠르고 고도화된 차별성을 보이며 세계 경제의 흐름을 바꾸고 있다. 인공지능, 사물인터넷, 로봇 등 기술 고도화에 기반을 둔 4차 산업은 첨단소재와 같은 하드웨어적 요소 없이는 구현이 불가능하며, 초내구성, 초내열성, 초전도성 등의 요구사항을 만족시키는 첨단소재의 필요성이 대두되고 있다. 특히 변화속도가 빠른 정보통신, 환경, 에너지, 바이오 등의 대표적인 미래 산업에서 첨단소재의 기여율은 50-70%에 이르며, 그 의존도는 갈수록 커지고 있다. 이러한 첨단소재의 세계 시장 규모는 2019년 약 10조 달러에 이를 것으로 추정되고 있고, 이러한 첨단소

재의 개발에 각국의 경쟁도 심화되고 있다 [1].

우리나라는 2001년 「소재·부품특별법」 제정 이후, 1~4차에 걸친 ‘소재·부품발전 기본계획’을 추진하여 국내 소재산업의 기술경쟁력을 강화하고자 하였다. 그 결과, 2001년 대비 소재·부품·장비 산업의 생산은 3배, 수출은 5배 증가하는 등 양적 성장은 큰 성과를 이루었으나, 여전히 핵심 전략품목의 만성적 대외의존 지속, 부가가치의 정체 등의 한계를 보이는 실정이다. 특히, 일부 특정 국가에 대한 핵심 전략 소재의 높은 수입 의존도 등 소재 시장의 독과점 구조를 보이고 있어 원천기술의 개발과 더불어 수요기업의 공급처 관리까지 포함한 소재 산업 전반에 대한 근본적 문제 해결이 요구되고 있다.

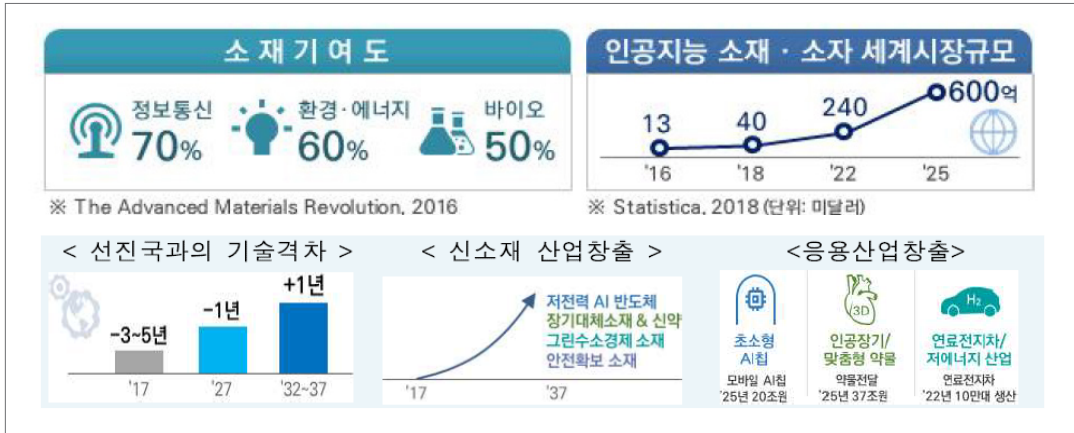


그림 1 ▶ 4차 산업에서의 소재 기여도와 선진국과의 기술격차 및 극복 방안 (과학기술정보통신부, 2018).

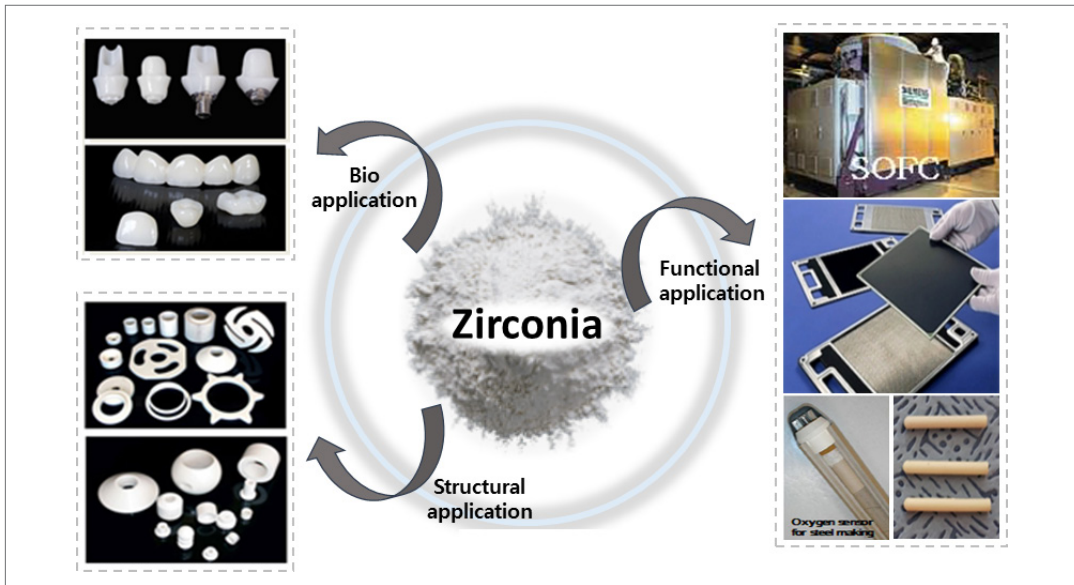


그림 2 ▶ 파인세라믹스 소재인 지르코니아의 다양한 응용 분야.

지난해 일본이 반도체 관련 주요 소재에 대한 수출 규제를 선언한 일이 있었다. 이는 국내 반도체 산업에 큰 영향을 미쳤고, 소재 원천 기술 개발과 수입국 다변화의 중요성을 절실히 일깨워 준 사건이라고 할 수 있다. 이에 정부는 2019년 8월 「소재·부품·장비 경쟁력 강화대책」을 발표하면서, 예산과 금융, 세제, 입지, 규

제 특례 등 국가자원과 역량을 총력 투입하는 특단의 대책을 발표하였다. 핵심 전략품목들에 대해서 원천기술의 개발, 수입국 다변화 추진, 국내생산 확대를 위한 지원, 수요-공급기업 및 수요기업 사이에 안정적이고 긴밀한 협력 모델 구축 등의 방안을 제시하였고, 이는 선진 기술력과 안정적 공급역량 확보를 통해 근본적

인 산업체질을 개선하여 대외의존 탈피 및 4차 산업 혁명에서 제조 강국으로 도약을 하고자 하는 의지의 표명일 것이다. 위와 같은 전략으로 반도체 등 국내 산업에 지대한 영향을 미치는 핵심소재의 국산화 및 수입다변화를 추진 하면서, 첨단소재(3D프린팅, 수소생산용 촉매, ICT반도체, 센서 등)에 대해서 국내·국제 표준화 전략을 취하면 4차 산업혁명 시대를 선도해 나아갈 수 있으리라 판단된다.

첨단소재 기술 국산화의 우선순위에 있는 분야는 여전히 일본이 대부분의 기술을 독점하고 있는 알루미늄, 지르코니아, 티타늄옥사이드 등 파인세라믹스 소재이다. 파인세라믹스 소재는 기계, 구조 세라믹스의 기초산업부터 앞서 설명한 4차 산업까지 연계하여 다양한 분야에서 사용되어지고 있다. 특히 그림 2와 같이 기계, 건축 분야부터 반도체, 의학용 재료로까지 응용이 확대되고 있는 지르코니아(Zirconia, ZrO_2)는 그 자체로도 좋은 특성을 가지나, 다른 원소의 첨가를 통해 내열성, 내부식성, 높은 기계적 특성뿐 아니라 화학적으로도 안정한 특성을 보이고, 전기적 특성도 가질 수 있으며, 스스로가 첨가제가 되거나 지지체로도 사용될 수 있어, 연구 및 개발이 폭넓게 이루어지고 있다 [2-4]. 하지만, 하지만, 원료인 지르콘($ZrSiO_4$)의 대부분 중국에서 수입되며 이를 가공한 고부가가치 제품 또한 일본에서의 수입에 크게 의존하고 있는 실정이다. 수입된 원료를 이용하여 첨단 산업에 이용 가능한 고부가가치 제품으로 가공하는 기술에 대한 연구가 우선하여 이루어지고 있으나, 아직은 수입품을 대체하기 힘든

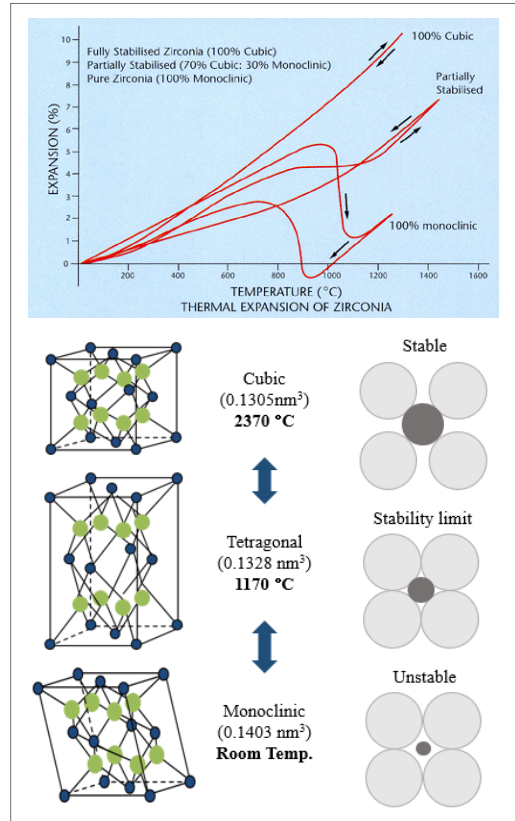


그림 3 ▶ 온도에 따른 순수 지르코니아(ZrO_2)의 열팽창과 상변화.

상황에 있어 이에 대한 대비도 필요하다. 따라서 본 기고에서는 지르코니아에 대한 기본 특성과 연구 및 개발 동향을 알아보고 그에 따른 국산화 방향에 대해 논의해보고자 한다.

2. 본론

2.1 지르코니아의 기본 특성

지르코니아는 세라믹 재료들 중 상대적으로 높은 기계적 물성을 가지고 화학적 부식 환경

에서 안정한 재료 중 하나로 알려져 있으며, 약 1 GPa의 높은 강도와 $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 높은 인성, 낮은 열전도도 ($3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 고내화성 (2700°C 의 용융점) 등의 대표적인 특성을 가지고 있다. 순수 지르코니아의 합성과 제조는 그 천연 원료로서 소량의 baddeleyite외에는 대부분 지르콘($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)에서 지르코니아만을 분해해서 얻게 된다. 지르코니아를 원재료인 지르콘으로부터 얻는 방법에는 여러 가지 방법이 있다. 탄소를 환원제로 하여 Arc로 중에서 SiO_2 를 환원 제거시키는 탈규산법, CaCO_3 와 반응시켜 CaSiO_2 로 SiO_2 를 제거시키는 탄산칼슘 소결법, 플라즈마를 이용하여 지르콘을 해리시킨 후 SiO_2 를 NaOH용액으로 제거시키는 플라즈마법 등과 고순도의 지르코니아를 얻기 위해 NaOH나 Na_2CO_3 등을 지르콘과 반응시킨 후 Zr성분만을 염화물이나 황화물, 질화물 등으로 분리해내는 습식법이 주로 이용되고 있다 [5,6]. 이렇게 분리해 낸 순수 지르코니아는 온도에 따라 그림 3과 같이 다양한 상변화를 가지게 되는데, 이에 따라 큰 특성 변화를 보이며 합성 및 제조에 고도의 기술이 필요로 하게 된다. 실온에서 단사정계(monoclinic)이나 비교적 저온인 $100\sim 400^\circ\text{C}$ 에서 단사정계에서 정방정계의 자발적인 상변태가 시작되며 $1,170^\circ\text{C}$ 에서 정방정계(tetragonal), $2,370^\circ\text{C}$ 에서 입방정계(cubic)의 상을 가진다. 앞서 언급한 단사정계에서 정방정계로 상변화시 부피변화(약 3~5%)가 발생하며 입계파괴로 인한 급격한 강도 저하의 원인이 된다. 이를 막기 위해 순수 지르코니아에 안정화제(Y_2O_3 , MgO , CaO 등)를

첨가하여 정방정 지르코니아를 안정화시킴으로써 상변화로 인한 입계파괴를 막을 수 있으며, 안정화 지르코니아(stabilized zirconia)라 하며, 안정화의 정도에 따라 부분 안정화 지르코니아(Partially stabilized zirconia, PSZ)와 완전 안정화 지르코니아(fully stabilized zirconia, SZ)로 나뉜다. 부분안정화 및 안정화 지르코니아는 순수 지르코니아에 비해서도 고강도, 고인성, 높은 이온전도 특성을 갖게 되며 첨가제에 따라 일부 특성을 중점적으로 강화시키는 연구도 수행되어, 여러 응용 분야에서 주목하고 있다. 특히 지르코니아에 이트리아를 첨가한 이트리아 안정화 지르코니아(yttria stabilized zirconia, YSZ)가 생체재료, 구조재료 및 고성능 고체 전해질 등에 적용이 점차 증대되고 있고, 이에 따라 고품질의 안정화 지르코니아 분말 합성 기술 개발이 요구되고 있다 [7-9].

2.2 기초산업에서의 지르코니아 소재 관련 연구 및 개발 동향

기초산업은 한 나라의 산업 활동 중 그 구조상 상당한 비중을 차지하고 있는 산업을 말한다. 전력·석유 등의 에너지산업, 철강 등 범용 재료 공급산업, 산업기계를 중심으로 한 조립산업과 관련산업의 영역이 매우 넓은 자동차산업, 조선산업 등이 기초산업이라고 할 수 있다. 기계/구조용 파인세라믹스는 우수한 기계적, 열적, 화학적 특성을 가지고 부피 대 중량비가 낮아 금속 및 유기재료와 달리 고온, 내식, 마모 등의 극한 환경에서 그 특성을 잘 발휘할 수 있어 이런 기초산업에서 큰 비중을 차지하고 있다.

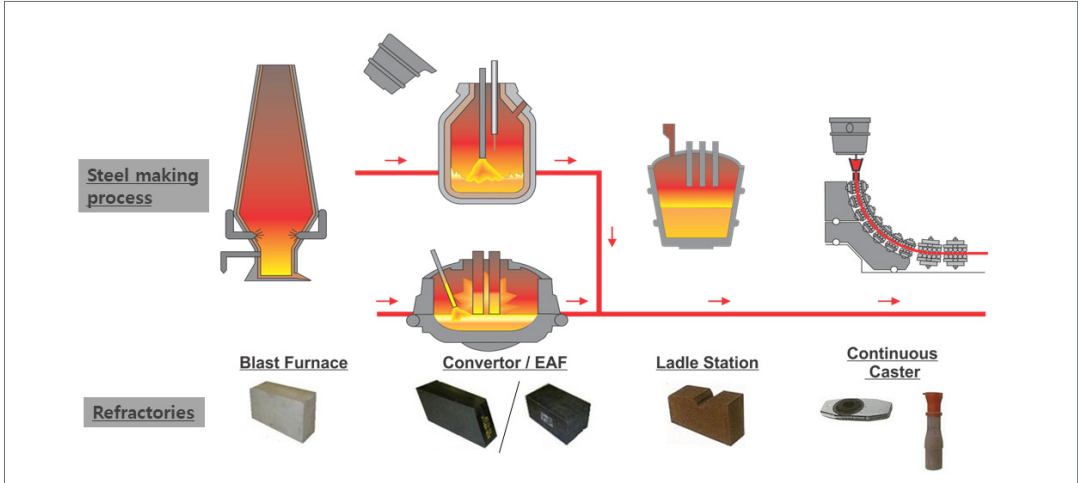


그림 4 ▶ 철강 공정과 각 공정에 사용되는 내화물.

기계/구조용 파인세라믹스에 대한 우리나라의 기술 개발은 1980년대부터 정부출연 연구소를 중심으로 시작되어, 분말 합성, 성형, 소결 등 많은 학문적 진보가 이루어 졌으나, 선진국의 첨단 기술에 대한 catch-up식 발전 정책과 더불어 직접적으로 제품화할 수 있는 2차 가공 및 응용 분야 위주의 연구 개발이 우선적으로 진행되었다. 그 결과 현재까지도 알루미늄이나 일부 국내에서 생산되고 지르코니아를 포함한 대부분의 원재료는 수입에 의존하고 있으며 국내 생산 업체는 소수에 그치고 있다. 본고에서 다루고 있는 지르코니아는 순수 지르코니아, 부분 안정화 및 안정화 지르코니아 등으로 가공되어 원료 분말 혹은 성형 블록, 성형 제품으로 공급되고 있다. 분말 같은 경우는 (주)세원하드페이징, 지르코니아를 이용한 원료 분쇄용 비드 같은 응용 제품으로 (주)세노텍 등을 포함한 여러 업체가 있다.

그림 4와 같은 철강제조공정에서 사용되는

내화물을 포함한 기계/구조용 파인세라믹스로써 지르코니아는 기본적으로 고온에서 기계적/화학적 안정성이 확보되어야 하며, 승온-냉각 과정 중 온도 변화에 따른 열충격에 견뎌낼 수 있는 우수한 내열충격성이 필수적이라 할 수 있다. 순수 지르코니아의 경우 약 1,100~1,300°C에서 단사정상에서 정방정상으로 또 그 역방향으로의 상변화가 발생하는 성질에 대해 앞서 언급하였다. 이 상변화는 마르텐사이트 전이로 알려져 있는데 [10], 그 영향으로 3~5% 사이의 체적변화에 따라 발생된 응력에 의해 지르코니아의 탄성변형을 일으킨다. Y_2O_3 등의 안정화제를 첨가함으로써 부분/완전 안정화 지르코니아를 제작할 수 있고, 그에 따라 고온에서만 존재하던 정방정상이 실온에서도 유지될 수 있으며 이를 통해 내열충격성의 향상을 가져올 수 있다 [11].

순수 지르코니아와 안정화 지르코니아의 조성 및 합성, 그에 따른 특성에 대한 연구는

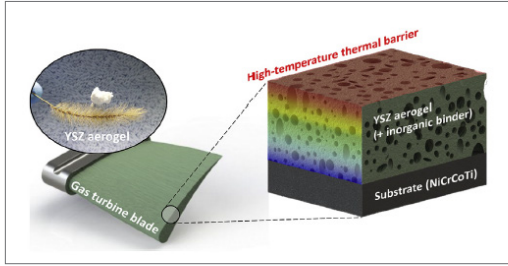


그림 5 ▶ 가스터빈블레이드에 YSZ를 에어로졸법으로 TBC코팅한 컨셉사진 [13].

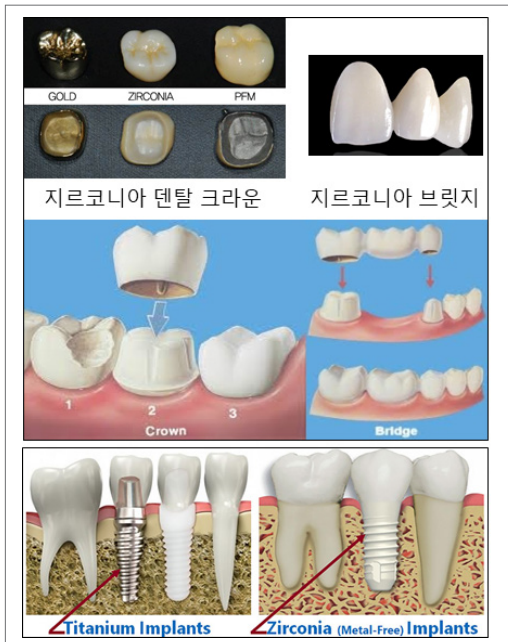


그림 6 ▶ 덴탈용으로 응용되는 지르코니아소재.

국내의 모두 1980년대 후반부터 활성화되기 시작하여 지금까지도 지속되고 있다. 최근 한국세라믹학회지에 보고된 연구에는 Fused CaO 안정화 지르코니아(CSZ)를 이용하여 소결 profile 최적화를 통하여 기공율을 제어함으로써 굽힘강도의 향상과 열 팽창의 감소 효과에 대한 연구가 있었고 [12], MgO 부분 안정화 지르코니아(MgPSZ)에 전이금속을 도핑함으로써 추가적인 산소공공이 형성됨에 따

라 cubic상 안정성 및 내마모성이 향상시켜 지르코니아의 탈안정화 문제를 해결할 수 있을 것이라는 보고가 국내 연구진에 의해서 보고되었다 [13].

파인세라믹스의 또 다른 응용분야는 앞으로의 우주항공 등의 미래산업에까지 응용 및 필요성을 각광받고 있는 기술로서 열차폐코팅 (thermal barrier coatings, TBC)이 있다. 가스터빈, 항공기 엔진, 인공위성, 가스추진시스템 등의 1,000°C 이상의 초고온의 가혹한 환경에서 사용되는 TBC는 작동 온도에서 최소한의 상변화와 함께 낮은 열전도도와 열확산도를 요구하며, 동시에 기반이 되는 금속지지체에 대한 접착성과 높은 내화특성과 내부식성이 필요하기 때문에 적합한 재료의 선택 및 개발이 주요 과제 중 하나이다 [12]. TBC용 재료에 관한 연구는 1950년대부터 이루어져 왔으며, 1980년대 이트리아를 첨가한 안정화 지르코니아가 이례적으로 높은 특성을 보이는 것을 알아내면서 관련된 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며 약 30년 이상 YSZ는 TBC용 재료의 기준이 되어왔다. 최근의 연구 동향은 YSZ 조성 기반에서 추가적으로 희토류 원소 등을 첨가하여 특성을 더욱 강화시키는 방향과 코팅 방법의 개발을 통하여 금속 지지체와 더욱 더 강한 결합을 추구하여 기계적 마모 등을 더 강화시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 최근 국내에서도 YSZ의 합성법 최적화를 통해 열전도도를 최소화함으로써 터빈 블레이드 등의 금속 지지체에 전달되는 열적 응력을 감소시키는 연구들이 진행되고 있다 [13,14]. 합성법

중 하나인 sol-gel 방법을 통하여 형성된 YSZ aerogel을 TBC 코팅에 적용하여 코팅층에 형성된 nano porous structure에 의해 열전도도가 기존 상용되는 YSZ보다 현저히 감소된 연구를 발표하는 등 TBC 코팅의 원료 분말인 안정화 지르코니아 합성법을 바탕으로 한 연구들이 중요할 것으로 판단된다.

바이오 세라믹 소재는 인체 내 생물학적 활성에 따라 적용할 수 있는 부위 및 요구물성이 달라지므로 생물학적 반응 정도에 따라 세 가지로 분류할 수 있는데, 생체활성(bioactive), 생체불활성(bioinert), 생분해성(biodegradable) 소재로 구분된다. 지르코니아는 대표적인 생체불활성 세라믹의 하나로 생체 활성 세라믹스와 달리 활성을 띠지 않는 소재로 인체에 삽입되면 염증과 독성은 유발하지 않지만 생체 조직과 직접 결합을 하지 못하고 주위에 섬유 조직이 생성되면서 결합하게 된다. 덴탈용 소재에서 특히 요구되는 것은 화학적 안정성 등과 같

은 기능성과 동시에 심미성 또한 중요한 요건 중 하나로 꼽힐 것이다. 지르코니아는 첨가제의 종류와 조성에 따라 재료의 색을 제어할 수 있으며, 알레르기를 유발할 가능성이 매우 낮고, 1,200 MPa 정도의 높은 굽힘강도를 가지고 있으며, 내화학적, 내부식성 등의 특성 또한 보이고 있어 주목받는 소재이다 [15].

전 세계 바이오 세라믹 시장은 2025년에는 200억 달러 이상으로 전망되고 있으며, 그 중 산화지르코늄이 32%로 알루미늄(63%)에 뒤이어 2위의 점유율을 가지고 있다. 이들 대부분은 미국, 독일, 인도, 네덜란드 등 해외 기업들에 의해 개발 및 생산이 진행되고 있는 실정이다. 덴탈용 지르코니아의 개발 및 복합재료의 성능향상을 위한 기술 국산화 노력은 1990년대부터 대학, 연구소를 중심으로 국책과제를 통한 연구가 진행되어 오고 있다. 우리나라는 개발 및 생산되는 바이오세라믹 관련 제품을 생산하는 업체는 다수 존재하고 있으나,

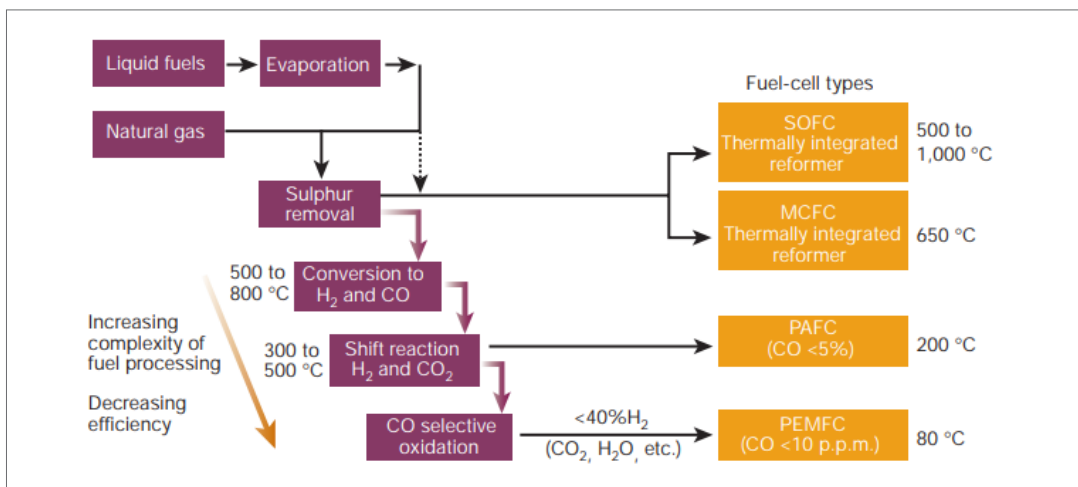


그림 7 ▶ 연료전지의 종류와 그에 따른 연료 공정 [17].

치과용 임플란트 업체를 모기업으로 하거나 작은 규모의 영세한 기업 등이 대부분이다. 1998년 설립된 생명공학업체인 (주)오스코텍이 국내시장을 선점하고 있다. 국내 시장은 뼈 및 관절부분의 기능 치료 및 대체, 치과용 소재 및 코팅소재 등 제품의 수요가 증대하고 있으나, 바이오세라믹 소재의 대부분을 수입에 의존하고 있기 때문에 의료가 산업 손실 및 환자의 의료비 부담도 커지고 있어 바이오세라믹 관련 원료합성, 환자 맞춤형 형상설계 및 성형기술, 물리적/화학적/플라즈마 용사 등 코팅기술 개발이 필요한 실정이다.

2.3 첨단산업에서의 고기능성 지르코니아 소재 합성 및 제조 관련 연구 동향

앞서 설명한대로 지르코니아는 반도체, 디스플레이, 항공우주산업, 차세대 에너지 산업 등 첨단 산업에도 다양하게 응용되고 있다. 화석 연료 고갈과 환경오염으로 그 필요성이 급증되어 왔고, 전기 및 수소 자동차 등 현실에 가까워져 있는 차세대 에너지 분야는 현재와 미래 산업의 발전에 근간이 되는 소재 분야라 할 수 있을 것이다. 이런 에너지 분야에 사용되는 세라

믹 소재들은 주로 다공성 세라믹이 사용되며 리튬전지용 양극재인 복합산화물 및 음극재인 탄소나노복합소재 등과 연료전지의 전해질을 구성하는 고체 이온전도막, 분리막 등에 많이 사용되고 있다.

고체전해질연료전지(SOFC)는 H_2 나 Hydrocarbons 등을 연료로 삼아 화학 에너지를 전기 에너지로 직접적으로 변환할 수 있는 기술로, Carnot cycle의 한계를 벗어날 수 있다는 특징을 가지고 있으며 에너지 변환시 오염물질 배출이 없고 고효율을 달성할 수 있어 미래 에너지로 주목받고 있다. 하지만 SOFC를 이용한 에너지 시스템을 실현하기 위해서는 높은 가격 장벽과 600~1,000°C의 고온에서의 작동 환경으로 인한 재료 선택의 어려움이 존재하고 있다 [16-18]. 지르코니아는 고온용 SOFC 소재의 대표적인 후보로 일찍부터 거론되어 왔으며, 특히 첨가제를 넣은 안정화 지르코니아는 온도변화에 따른 열적 특성 뿐 아니라, 높은 내화학적 특성도 가져 현재까지도 대표적인 양극재로 사용되고 있다. 이 중 YSZ는 고온 안정성과 여러 특성 및 가격을 고려했을 때 많은 안정화 지르코니아 중 SOFC에 가장 적합한 재료로

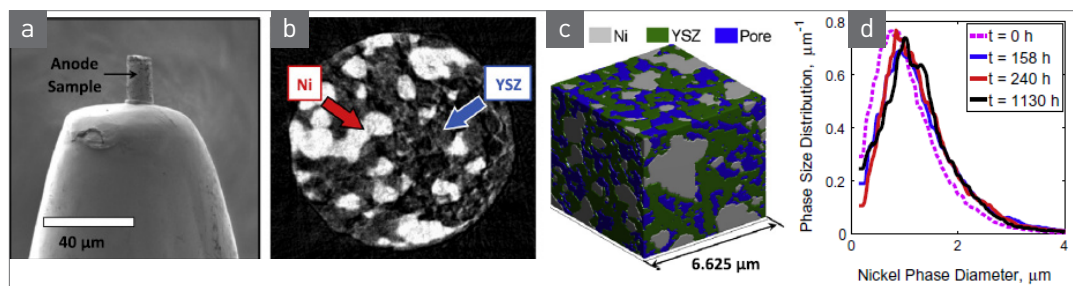


그림 8 ▶ 구형 SOFC anode 샘플과 X-ray nanotomography 측정 결과. (a) FIB milling 샘플, (b) 측정 결과(2차원), (c) Ni 상의 분포를 볼 수 있는 3차원 map, (d) X-ray nanotomography 결과를 통해 작성된 그래프. [19].

평가받고 있다 [16]. 이런 YSZ의 성능 향상을 위해 금속 이온 첨가, 소결 방법 개선 등 많은 방법이 사용되고 있으며, 그 중 Ni 금속 이온을 첨가한 Ni-YSZ가 높은 특성을 나타내며 사용되고 있다 [2]. SOFC에서 출력과 전기적 효율의 감소는 작동 중의 셀 구성요소의 조성과 미세구조 변화에 기인한다. 이런 변화들은 셀의 디자인과 작동 조건에 의한 일정한 전류하에서 정해지는 SOFC 동작 전압을 낮추는 악영향을 끼친다. 앞서 언급한 Ni-YSZ에서 대표적으로 발견될 수 있는 미세구조적 열화는 양극에서 Ni 입자의 응집으로 나타난다. 최근 한 연구에서는 Transmission X-ray Microscopy를 이용하여 응집 메커니즘을 관찰하였다. 관찰 결과 작동 시간이 길어짐에 따라 Ni 및 YSZ의 Phase size 감소가 일어나게 되고, YSZ의 이상 입자 성장 사이즈와 Ni의 critical phase 크기가 일치할 때 응집이 가속화 되는 것을 확인할 수 있었다 [19]. 이에 대한 해결책으로 slurry spray process를 이용하여 Ni-YSZ를 합성 후 1,250°C 이하의 온도에서 소결함으로써 이상 입자 성장을 억제하는 방법도 소개되었다 [20,21].

SOFC와 더불어 산소 센서, 산소 펌프 분야에서도 사용되는 고성능의 고체 전해질을 만들기 위한 연구는 최근 가장 주목받는 연구 중 하나일 것이다. 지르코니아 기반의 전해액은 산소이온 고체 전해질에서 요구되어지는 특성을 잘 드러내어 지는 연구 결과들이 발표되고 있고, 특히 YSZ가 가장 신뢰성 있는 후보로 사용되면서 지르코니아 기반의 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, YSZ의 이트리아 첨가

제 조성비 변화, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 첨가에 의한 영향, CaO안정화 지르코니아, MgO안정화 지르코니아, 희토류(Sc, Scandia)안정화 지르코니아 등 첨가제와 조성비를 변화시키는 연구가 국내외를 막론하고 진행되고 있다 [22].

고체 전해질에서 일반적으로 요구되어지는 성능은 이온투과도가 0.99 이상, 전자투과도 0.01 이하, energy gap 3 eV 이상 등을 들 수 있다. CeO_2 , LaGaO_3 , $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 기반의 전해질들은 지르코니아 기반의 전해질들에 비해 산소이온전도도가 높다고 보고되고 있지만, CeO_2 와 Bi_2O_3 는 환원 분위기에서 쉽게 반응이 일어나 버리고 [23], LaGaO_3 는 2차상이 생성되는 경우가 흔히 일어나게 된다. 이에 비해 YSZ는 상대적으로 매우 안정한 성능을 유지함으로써 후보물질의 표준처럼 사용되고 있다 [24]. 이런 YSZ도 첨가하는 이트리아의 조성비가 9% 이하일 경우 1,000°C 부근에서 이온전도도가 감소하는 경향을 나타낸다. 한 연구를 따르면, 8% YSZ의 경우 1,000°C에서 1,000h의 작동 시간을 거쳤을 때, 이온전도도가 50%이하로 감소하는 결과를 나타냈다. 이는 1,000°C 부근에서 bulk impedance가 증가하기 때문인데 이트리아를 10%이상 첨가함으로써 이를 방지할 수 있다는 연구 결과도 국내연구진에 의해 발표되었다 [25].

2.4 지르코니아 소재 국산화를 위한 표준 및 인증

지르코니아에 대한 관심이 높아지고 있는 만큼 응용 기술 뿐 아니라 소재 합성, 제조, 평가

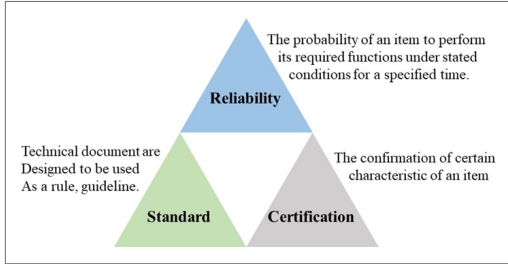


그림 9 ▶ 신뢰성(Reliability) - 표준(Standard) - 인증(Certification)의 관계도.

기술 또한 다양하게 연구되어지고 있다. 이런 핵심소재기술은 완제품의 특성과 성능을 좌우하기 때문에 기술의 개발과 더불어 제조된 소재의 신뢰성 확보가 무엇보다 중요하게 다루어져야 할 것이다.

선진국들은 표준 및 인증을 통해 신뢰성을 확보하고 있다. OECD와 영국표준협회에 따르면 각각 세계무역의 80%가 표준의 영향을 받고 있으며, 표준이 GDP 성장률에도 크게 기여한다고 보고하고 있다. 미국은 국립표준기술연구소(NIST)를 주축으로 신뢰성 기관인 Wyle 연구소, CALCE센터 등과 함께 연구개발 기획 단계부터 신뢰성 확보를 위한 시험 평가기술 개발 및 표준, 내구성·가속시험 설계 등을 함께 진행하고 있으며, 또 일본은 경제산업성 주도로 신뢰성 관련 표준화 업무를 반영하여 개발 초기부터 신뢰성과 안전에 관련된 시험 및 평가방법을 정립하도록 의무화하고 있다. 우리나라 또한 2001년부터 부품·소재 신뢰성 평가·인증사업을 통하여 부품·소재에 대한 신뢰성을 확보하려 하였으나, 주로 부품에 치중되었고, 소재는 미흡한 실정이다.

지르코니아 관련 국내의 표준의 경우 ISO 국

제 표준은 5건에 불과하고, KS 국내 표준은 6건이나 그 중 ISO 국제 표준 기반 4건, 자체 국가 표준 2건으로 다른 파인세라믹스 관련 표준에 비해서도 적은 수의 표준만이 제정되어 있다 (알루미나의 경우, ISO 국제 표준은 제정 혹은 진행중인 안전을 포함하여 17건이 등록되어 있고, KS 국내 표준은 19건 중 ISO 기반 5건, 자체 국내 표준 14건이 제정되어 있음). 지르코니아 관련 ISO 표준의 내용을 살펴보면, 내화물 관련 표준이 3건, 의학용이 1건으로 모두 지르코니아 관련 소재의 화학 분석 방법에 관한 내용만이 등록되어 있었고, 지르코니아의 특성 평가에 관한 표준은 2013년 ISO/TC206 파인세라믹스 분과에 일본의 주도로 지르코니아 및 파인세라믹스 소재 전도체의 이온 전도도 측정 방법에 대해서 1건이 등록 완료 되었다. 지르코니아 등의 파인 세라믹스 소재의 경우 앞서 살펴본 대로 해외 기술 및 표준에 대한 주도가 이루어지고 있다. 앞으로 여러 산업 분야에서 응용이 기대되어 연구 및 개발이 시도되고 있는 만큼 각 분야에서 필요로 하는 특성 및 주요 평가 항목 또한 달라질 것이고, 이에 대한 세부적이고 구체화된 국내의 표준의 주도적 정립이 필요할 것이다.

지르코니아의 인증과 관련된 주요 선진국의 현황을 살펴보면 독일과 영국은 국제 기구 등의 인증을 통한 인증표준물질(Certified Reference Material, CRM)을 개발하였고, 일본은 자국 표준인증기관을 통한 표준물질(Reference Material, RM)의 개발을 진행하여 상용화된 상태이다. 반면, 국내의 경우 한국표준과학

연구원(KRISS)에 표준물질로 등록 완료된 무기 재료 및 광물은 전무하며, 알루미늄에 관한 인증 1건 만이 개발 중에 있다. 최근 산업통상자원부 한국산업기술평가원에서는 원천기술이 확립되어 있지 않은 소재들에 대해 지원하여, 표준물질의 생산 및 국가기술표준원(KATS)에서 운영하는 한국인정기구(KOLAS)의 인증을 획득하고, 이를 기반으로 국제 표준 인증을 받음으로써 소재 신뢰성 확보를 목적으로 하는 상용표준물질개발사업을 시작하였다. 지르코니아 또한 이번 사업에서 필수 소재 중 하나로 선정되어, 2021년 개발을 목표로 한국산업기술시험원(KTL)의 주관하에 사업을 진행하게 되었다. 이런 표준 및 인증의 확보는 개발된 지르코니아 소재 및 관련 기술에 대한 국내외의 높은 신뢰성 확보를 위해 필수적인 것이다.

3. 맺음말

지금까지 파인 세라믹스 소재인 지르코니아 소재의 국산화 필요성, 국내외 연구 동향, 표준 및 인증에 대해 살펴보았다.

4차산업의 발전과 더불어 첨단 소재 기술의 보유가 국가 경쟁력의 확보로 이어지고 있고, 그 중 지르코니아 소재는 기존의 금속, 고분자 소재들에 비하여 기계적, 화학적, 열적 특성이 상대적으로 우수하여 가혹한 환경에서도 작동 가능하고, 상대적으로 친환경적인 경향을 가

지고 있어 기초산업을 포함하여 첨단 산업 분야에까지 다방면에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 대표적으로 사용되는 순수 지르코니아 및 안정화 지르코니아와 같은 조성 개발, 이종재료와의 복합 재료 개발, 고순도·고강도 특성을 위한 합성 공정 개발 등 다양한 연구가 이루어지고 있으나, 기술선진국들에 비해 원천 소재 합성 및 가공 기술에 대한 발전도가 떨어지고, 소재 및 그 특성과 평가 방법에 대한 표준이나 인증의 부족으로 신뢰성의 확보가 되지 않아 국내 수요의 대부분이 해외 수입에 의존하고 있는 실정이다.

이런 지르코니아 소재의 국산화를 위해서는 대학, 연구소 등의 선진 기술에 대한 연구와 수요기업 및 공급기업과의 연계, 관련 산업에 대한 정부의 정책적 지원 등이 같이 이루어져야 될 것이라고 생각된다. 그런 의미에서 이번 정부의 정책(「소재·부품·장비 경쟁력 강화대책」, 2019)은 지르코니아를 포함한 산업핵심 소재의 국산화를 위한 좋은 기회일 것이며, 상용표준물질개발 사업 등의 국가 지원을 적극 활용하여 원료 소재에 관한 원천 기술 개발과 더불어 지르코니아 소재에 대한 KS 국가 표준, ISO 국제 표준 및 국내외 인증을 통한 높은 신뢰성의 확보를 통해 소재 국산화 및 나아가 기술 선진국으로 도약을 이루어 낼 수 있을 것이다. 🌐

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] G. Büchi, M. Cugno, R. Castagnoli, A. B. Kim, C. D. Choi, and D. J. Choi, *Techno. I Forecast. Soc. Change*, 150, 119790 (2020).
- [2] M. S. Khan, S. B. Lee, R. H. Song, J. W. Lee, T. H. Lim, and S. J. Park, *Ceram. Int.*, 42, 35 (2016).
- [3] G. Pekkan, K. Pekkan, B. Bayindir, M. Özcan, and B. Karasu, *Dent. Mater. J.*, 39, 1 (2020).
- [4] P. S. Rane, R. V. Dubey, D. B. Rawal, and M. B. Mandake, *Int. Res. J. Eng. Tech.*, 4, 2409 (2017).
- [5] H. Kim, S. Sunwoo, K. C. Shin, and K. H. Hwang, *J. Korean. Ceram. Soc.*, 24, 186 (1987).
- [6] H. Kim, S. Sunwoo, J. B. Kang, K. S. Shim, K. C. Shin, and K. H. Hwang, *J. Korean. Ceram. Soc.*, 25, 131 (1988).
- [7] H. L. Lee, D.P.H. Hasselman, L. D. Bentsen, and R. Syed, *J. Korean. Ceram. Soc.*, 22, 40 (1985).
- [8] Y. J. Kim, Y. S. Yoo, and H. Kim, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (1995 Mater. Res. Soc.), 357, 151.
- [9] J. S. Park and Y. S. Lee, *J. Korean Inst. Electr.*, 49, 39 (2012).
- [10] G. M. Wolten, *J. Am. Ceram. Soc.*, 49, 418(1963).
- [11] R. C. Garvie, *J. Phy. Chem.*, 82, 475 (1978).
- [12] J. H. Park, I. H. Bang, and S. J. Lee, *J. Korean. Ceram. Soc.*, 56, 184 (2019).
- [13] B. Y. Kim and H. S. Lee, *J. Am. Ceram. Soc.*, 101, 1790 (2018).
- [14] S. W. Yoon, G. D. Han, D. Y. Jang, J. W. Kim, D. H. Kim, and J. H. Shim, *J. Alloy. Compd.*, 806, 1430 (2019).
- [15] D. S. Nakonieczny, A. Ziębowicz, Z. K. Paszen-da, and C. Krawczyk, *Biocybern. Biobern. Biomed. Eng.*, 37, 229 (2017).
- [16] N. Q. Minh, *J. Am. Ceram. Soc.*, 76, 563 (1993).
- [17] B.C.H. Steele and A. Heinzl, *Nature*, 414, 345 (2001).
- [18] M. C. Chang, *J. Korean. Ceram. Soc.*, 53, 50 (2016).
- [19] G. J. Nelson, K. N. Grew, J. R. Izzo, and J. J. Lombardo, et al., *Acta Mater.*, 60, 3491 (2012).
- [20] H. Yokokawa, *Key Eng. Mater.*, 154, 37 (1998).
- [21] Z. Zakaria, S. H. A. Hassan, N. shaari, A. Z. Yahaya, and Y. B. Kar, *Int. J. Energy Res.*, 1 (2019).
- [22] T. Liu, X. zhang, X. Wang, J. Yu, and L. Li, *Ionics*, 22, 2249 (2016).
- [23] C. H. Lee and G. M. Choi, *Solid State Ion.*, 135, 653 (2000).
- [24] J. B. Goodenough, *Solid State Ion.*, 94, 17 (1997).
- [25] D. Lee, I. Lee, Y. Jeon, and R. Song, *Solid State Ion.*, 176, 1021 (2005).

저/자/약/력



성명	김 주 영	
학력	2010년	부산대학교 재료공학부 공학사
	2012년	부산대학교 재료공학부 공학석사
경력	2011년 ~ 2018년	일본 다이하츠자동차 주임연구원
	2020년 ~ 현재	주식회사 하이마 책임연구원



성명	김 부 영	
학력	2013년	부산대학교 재료공학부 공학사
	2018년	부산대학교 재료공학부 공학박사
경력	2018년 ~ 현재	주식회사 하이마 책임연구원



성명	이 희 수	
학력	1998년	한양대학교 무기재료공학과 박사
	1998년	Univ. of Washington _ Visiting Scholar
	2006년	Univ. of Southern California _ Visiting Scholar
	2013년	Colorado School of mines _ Visiting Scholar
경력	1994년 ~ 2006년	한국산업기술시험원 수석연구원
	2007년 ~ 현재	부산대학교 재료공학부 교수
	2018년 ~ 현재	ISO/TC206 Fine ceramics chairperson