Research Trends of Transparent Ceramics for Military Applications

Wook Ki Jung, Kisu Lee, Jaeho Choi[†]

Agency for Defense Development, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon 34186, Republic of Korea

군용 투명세라믹스 연구동향

정욱기, 이기수, 최재호[†]

국방과학연구소

(Received September 2, 2020; Revised September 14, 2020; Accepted September 18, 2020)

Abstracts

Transparent ceramics are widely considered in military applications such as transparent armor, electro-optical window and domes, and high power solid-state laser hosting components. Advanced fabrication technologies of polycrystalline ceramics have enabled us to make transparent ceramics with outstanding thermal, mechanical and optical properties which were not possible before. The existing properties of the ceramics, however, need to be improved for the applications of future military systems. Here, we reviewed the studies on the characteristics and the fabrication methods of these transparent ceramics.

Keywords: *Transparent ceramics, Military application, Characteristics, Fabrication technologies*

1. 서론

다결정 세라믹 소결 기술이 고도화됨에 따라, 우수한 광학적, 기계적, 열적 물성을 가지는 투명세라믹 소재 관련 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히, 투명세라믹

소재의 물성을 이론적 한계까지 높이기 위해서는 고순도 분말 합성 기술과 함께 미세구조 제어와 같은 세라믹 공정 연구가 매우 중요하게 고려되어야 한다¹⁾. 이러한 다결정 투명세라믹 소재는 군수분야에서 전자광학 창²⁾, 투명 방탄소재^{2,3)} 및 고체 레이저용 호스트⁴⁾ 등으로 응

[†]Corresponding Author: Jaeho Choi
E-mail: wjddnrl12@naver.com

용되고 있다. 기계적 강도가 우수한 AlON(Aluminum Oxynitride)은 대표적인 방탄소재로 연구가 활발히 진행되었으며, $MgAl_2O_4$, Y_2O_3 -MgO 나노복합소재, Sapphire(Al_2O_3), ZnS 등은 적외선 파장 대역에서 투과 특성이 우수하여 전자광학 창 등의 용도로 많은 연구가 진행되었다. 또한, 열전도도가 우수한 Y_2O_3 , Lu_2O_3 , Sc_2O_3 와 같은 삼산화물들은 고출력 고체 레이저 응용을 위한 호스트 소재로 주목을 받았으며, 앞서 언급된 $MgAl_2O_4$ 는 레이저 창 소재로 각광받고 있다. 이와 같이 각각의 투명세라믹 소재들은 그 자체로 우수한 물성을 지니고 있지만, 더 가혹한 환경에서 사용되기에는 여전히 한계가 있기 때문에 이를 극복하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 본 논문에서는 군수 분야에 응용 가능한 투명세라믹 소재들을 소개하고, 제조 공정에 따른 특성 관련 연구동향을 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 방탄용 투명세라믹

전통적인 투명방탄소재는 투명 폴리머 필름과 같은 유기소재 또는 유리를 다층으로 접착하여 제조하는 방식으로 연구되어 왔다⁵⁾. 1970년대에는 페닐(phenyl)기의 선형적 결합 구조로 인해 강한 내충격성을 가지는 폴리카보네이트(polycarbonate)계 투명방탄소재가 많이 연구되었다.

독일 Schott사는 붕규산염 유리(borosilicate)를 이용하여 투명방탄의 경량화에 기여하였으며, 이탈리아 Isoclima사는 1980년대 초 glass 및 polycarbonate의 다층 복합구조를 최적화하여 방탄유리 개발에 응용하였다. 이후에 무게가 가벼운 AlON, $MgAl_2O_4$ 와 같은 새로운 투명세라믹 소재들이 개발되면서 휴대성과 방탄능력을 동시에 고려한 진일보한 투명방탄소재 개발의 역사가 이어져 왔다.

기존의 유리계 투명방탄소재의 단점인 무게와 크기의 한계를 극복하기 위해서는 새로운 소재가 필요했고, 1959년 제네럴일렉트릭(General Electric)사의 R. L. Coble에 의해 세계 최초로 투명 Al_2O_3 세라믹이 개발되

면서 광학적, 기계적, 열적, 전기적 물성이 우수한 투명세라믹 소재의 연구개발이 활발해질 수 있었다. 이에 유리계 투명방탄소재의 대안으로 투명방탄세라믹이 대두되었으며, 그중 단결정 Al_2O_3 인 Sapphire와 AlON, 그리고 $MgAl_2O_4$ (Mg spinel) 소재가 대표적으로 알려졌다⁶⁾. 최근에는 미국을 비롯하여 프랑스, 독일, 일본, 이탈리아 등 많은 국가들이 방탄용 투명세라믹 기술을 개발해 오고 있다.

국내에서는 연세대에 설치된 국방나노응용특화연구센터(방위사업청, 국방과학연구소)의 개별과제를 통해 강화된 붕규산염 유리를 적층하여 경량화, 박형화 방탄소재 제조기술을 개발하였으며, 우수한 방탄성능을 확인하였다. 또한, 민간에서도 핵심방산소재사업을 통해 Mg spinel과 AlON 투명세라믹을 제조하여 방탄성능을 확인한 바 있다. 국내에서 개발된 투명방탄세라믹 소재는 기존 방탄유리 대비 200 % 이상의 방탄 성능을 보여준다.

2.1.1 Sapphire

사파이어는 투명세라믹 중에서 가장 널리 사용되는 소재 중 하나로, 반도체 등 민수 분야뿐만 아니라 군수 분야에서도 투명방탄, 전자광학 창 등의 용도로 연구 및 적용되고 있다. 일반적으로 Rhombohedral 결정구조를 갖는 Al_2O_3 는 광학적 이방성을 갖기 때문에 다결정 형태로는 입계산란이 심하여 가시광 영역에서 투광성을 확보하는 데 어려움이 있다. 따라서, Al_2O_3 의 단결정화(사파이어)를 통해 투광성을 확보할 수 있다. 사파이어를 제조하기 위해서는 단결정 성장 기술이 필요하며, 프랑스 Saint-Gobain사는 사파이어의 크기를 15인치 이상 키우는 기술을 개발하였다. 그러나, 사파이어의 크기가 점점 증가함에 따라 단결정 성장과 표면연마 및 가공에 많은 시간과 에너지가 소모되기 때문에 가격이 급증하는 단점이 있다⁷⁾. 이를 극복하기 위해서 미국 Army Research Laboratory(ARL), Center for Optics Manufacturing과 같은 연구기관에서는 표면가공에 소요되는 비용을 최소화할 수 있는 연마기술들을 병행하여 개발하고 있다.

2.1.2 AION

AION 은 Al_2O_3 와 비슷하게 주로 알루미늄과 산소로 이루어져 있으나, 질소가 소량 첨가됨으로써 cubic 안정상인 $\gamma\text{-AION}(\text{Al}_{(64+x)/3}\text{O}_{32-x}\text{N}_x)$ 을 형성할 수 있다. 따라서, 광학적 이방성이 존재하지 않고, Al_2O_3 와 유사하게 화학적 안정성을 가질 수 있다. AION 투명세라믹은 자외선(UV)부터 중적외선(MWIR)까지 매우 넓은 파장대역에서 우수한 투과율 ($T > 80\%$ @ $0.25\text{--}4\ \mu\text{m}$)과 함께 높은 기계적 물성(강도 $300\text{--}700\ \text{MPa}$), 고온 저항성 및 열충격성을 가진 소재로 알려져 있다. 또한, 기존 사파이어 제조공정과 비교했을 시, 다결정으로 제조할 수 있기 때문에 크기 성장에 제약이 덜한 장점이 있다⁸⁾.

상기에 언급된 바와 같이, AION 투명세라믹은 다결정으로 제작할 수 있다는 장점으로 인하여 세라믹 분말 프로세싱(Powder synthesis)에서 출발하여 건식성형(Green body shaping)-소결(Sintering)-HIP(Hot Isostatic Pressing)공정을 통해 제작이 가능하며, 최종 표면가공(Optical fabrication)을 통해 완성된다(Fig. 1)⁹⁾. 분말은 AION상을 가진 초기 분말로 소결할 수도 있지만, Al_2O_3 와 AlN혼합분말을 이용, 반응소결을 유도하여 치밀화를 이룰 수 있으며 AION상은 $1400\ ^\circ\text{C}$ 이상에서 형성되는 것으로 잘 알려져 있다¹⁰⁾.

1946년 Yamaguchi 가 최초로 $\gamma\text{-AION}$ 스피넬구조가 $1,000\ ^\circ\text{C}$ 까지 안정하다는 사실을 밝힌 후 1960년도에 많은 프랑스 연구자들이 AION 소재의 상태도와 제조기술을 연구하였고, 미국을 중심으로 많은 국가에서 군수용 투명세라믹소재로 AION을 개발해 왔다. 일례로 미국의 방산업체인 Raytheon사에서는 2002년에 AION 제조기술 및 연구개발 성과를 Surmet사로 기술이전하면서, Surmet사가 현재까지도 가장 우수한 AION 투명세라믹을 제조기술 보유업체 중 하나로 자리매김하고 있다. 특히 Surmet사는 AION 분말 합성기술부터 다양한 형태의 소결 완제품 생산에 이르기 까지 매우 성숙된 기술을 보유하고 있으며, $70\ \text{kg}$ AION 투명방탄소재를 $46 \times 24 \times 12.5$ 인치 크기까지 만들 수 있는 것으로 파악된다. 또한, 방탄시험결과 AION 투명방탄소재가 기존의 투명방탄소재 대비 매우 우수한 성능을 나타낸 것으로 알려져 있으며, 기존 방탄소재 대비 1/3 두께 수준으로 동일한 방탄성능을 가진다¹¹⁾. 하지만, 기존 적층유리 방식의 투명방탄소재 대비 비싼 제조단가로 인하여 생산량을 늘리는 데는 아직까지 한계가 있다. 최근에는 AION을 방탄소재뿐만 아니라 창, 돔, 렌즈 형태로 제작하여 레이저, 미사일 등 다양한 응용처에 적용하고자 노력하고 있다(Fig. 2)¹²⁾.

Fig. 1. Surmet사의 ALON 및 Spinel 투명세라믹 제조과정⁹⁾

Fig. 2. Surmet사의 ALON 성형체 및 완성된 돔 사진⁹⁾

2.2 적외선용 투명세라믹

적외선용 투명세라믹은 적외선 파장영역에서 투광도가 높은 세라믹을 일컫는다. 대표적으로 Ge, 사파이어, Y_2O_3 -MgO nanocomposites, ZnS 등이 있다. 국내 국방과학연구소에서는 최근까지 Ge, 사파이어, Y_2O_3 -MgO, Mg spinel 소재들을 개발해왔으며, 현재까지도 열적, 기계적 물성 향상을 위해 연구개발 중에 있다.

2.2.1 Mg Spinel

스피넬의 경우 해외에서는 독일 Fraunhofer IKTS, 미국 US Army Research Lab., 일본 NIMS, 국내에서는 국방과학연구소, KIMS 와 같은 연구기관들이 연구개발 중이다. 투명 스피넬은 방탄뿐 아니라 창, 돔 형

태로도 제작되어 투광성을 요구하는 IR seeker의 보호용 소재로도 응용되고있다¹³⁾. 방탄용 원도우는 미국 방산업체인 Armorline 등에서 연구되고 있으며, 동시에 1 m 이상의 길이 및 너비를 가진 평판형 스피넬이 생산되고있다. 적외선 투과창을 위한 스피넬은 TA&T사에서 U.S. Army 개발프로그램을 통해 Joint Air-to-Ground Missile(JAGM, 2008~) 등의 돔을 제작하는데 성공하였다. 그 밖에 미국 NRL(Naval Research Lab.)에서도 투명 스피넬의 광학적, 기계적 물성 향상을 위한 연구를 수행해오고 있다.

스피넬, 사파이어, ALON 세라믹의 투과율을 Fig. 3에 나타내었다¹⁴⁾. 일반적인 스피넬의 IR cut-off는 6 μm 이며, 5.5 μm 인 ALON보다 길고 6 μm 인 사파이어와 동등한 수준으로 알려져 있다. 광학적으로 두께 2 mm 기준 5 μm 파장에서도 80 %에 가까운 높은 투과율을 보유하고 있다. 이에 반해, 기계적 강도는 통상적으로 150~300 MPa으로 보고되고 있으며, ALON이나 사파이어 대비 낮은 수준이다. 하지만 스피넬의 탄도특성은 ALON 및 사파이어와 유사한 수준으로 보고되기도 하였으며, 4.5 μm 이상에서의 고온투과특성은 더 우수한 장점이 있다¹⁵⁾.

Cubic 결정구조를 갖는 $MgAl_2O_4$ 는 MgO와 Al_2O_3 의 화합물로서, ALON과 마찬가지로 다결정 형태로 가시광선 영역에서 투광성을 확보할 수 있다. 스피넬은 주

Fig. 3. 스피넬, ALON, 사파이어의 적외선 투과율 비교 그래프¹⁴⁾

Fig. 4. 상용 분말(좌) 및 산 처리된 고순도 분말(우)을 이용하여 제조된 투명 스피넬 사진(NRL)²²⁾

로 소결/HIP공정, Hot-press/HIP공정, SPS(Spark Plasma Sintering)/HIP공정으로 제작된다. 최종 HIP 공정을 통해 소재의 잔여 기공을 줄임으로써 투광도와 기계적 물성을 더욱 향상시킬 수 있다. 앞서 소개한 Surmet사에서 제조하는 ALON과 스피넬 공정은 매우 유사하지만(Sintering/HIP 공정), 분말 준비단계와 세부적인 공정변수들은 다르다. 스피넬의 조성은 $MgO+nAl_2O_3$ 이며, 여기서 n 값은 0.6에서 7.7까지 넓은 범위로 변화시킬 수 있으며, 이에 따른 투광도와 기계적 물성이 달라질 수 있다. Krell 등은 Al_2O_3 함량이 증가할수록 IR cut-off가 감소한다고 보고하였으며, n 값이 2.5일 때 $6\mu m$ 이하로 떨어진다¹⁶⁾. 경도 값 또한 n 값에 의해서 변하므로 이를 고려한 스피넬 조성설계가 필요하다. 최근에는 우수한 강도와 경도가 요구되는 IR 센서의 보호창 역할을 수행하기 위해 입성장을 최대한 억제시켜 기계적 물성을 크게 향상시키고자 하는 연구가 진행되었다. 미세구조 상에 28 nm 정도의 결정립 크기를 가진 스피넬을 저온고압소결공정을 통해 제조하기도 하였으며, 이를 통해 통상적인 스피넬의 경도 값(13~16 GPa)보다 큰 20 GPa의 경도 값이 보고되었다¹⁷⁾. 스피넬의 투과율에 영향을 미치는 인자는 초기 분말의 순도 및 입도분포 특성과 2차상 형성, 카본 오염 등이 있을 수 있다. Bernard-Granger, Goldstein, Morita 등은 SPS 소결 시 생성될 수 있는 카본 오염과 그에 따른 투과율 감소 및 소재의 변색(Discoloration)에 대해서 연

구하였으며, 이를 방지하기 위한 공정변수 제어의 영향성을 보고하였다¹⁸⁻²⁰⁾. 초기 분말의 입도분포에 따른 소결체의 투과율 변화 또한 연구되었으며, 특히 성형체의 기공분포 균일도에 따라 $MgO-Al_2O_3$ 반응소결의 소결성이 달라진다고 알려졌다²¹⁾. NRL에서는 상용분말 대비 초고순도 산처리된 분말을 이용하여 동일한 투명세라믹 제조공정 시 투과율이 매우 우수하며 흡수계수가 낮은 스피넬 투과창을 제조하였다(Fig. 4)²²⁾.

2.2.2 Nanocomposite ceramics

미래의 적외선 추적 미사일용 돔 소재는 운용 전파 환경에서 높은 투과율을 유지하면서도 동시에 더 우수한 기계적, 열적 물성을 요구하고 있다. 미 Raytheon, Naval Air Center, US Air Force Research Lab. 등은 Y_2O_3 소재의 기계적 강도의 한계를 극복하기 위한 한 가지 대안으로써 Y_2O_3-MgO 나노복합소재를 개발하였다²³⁾. 복합소재는 단일상(single phase) 투명세라믹 대비 이중 세라믹 사이에서 입계산란이 일어나기 때문에 이를 최소화하기 위한 수백 나노미터 이하의 결정립 크기를 가진 미세구조가 요구된다. Y_2O_3 와 MgO 는 소재 간 굴절률 차이가 크지 않기 때문에 (Y_2O_3 : 1.84, MgO : 1.64 @4.85 μm) 결정립 크기를 줄임으로써 적외선 영역 투과율을 충분히 확보할 수 있다(Fig. 5). MgO 와 Y_2O_3 의 분율을 50:50 vol%으로 하여 Hot-press 또는 SPS 공정을 통해 결정립 크기를 150 nm 이하로 줄일 수 있었으며, 이를 통해 중적외선에서 투명하면서도 기계적 강도와 열충격저항성이 높은 Y_2O_3-MgO 나노복합소재를 제조할 수 있었다(Fig. 6). 투과율은 4.85 μm 기준 83%까지 보고되었다. 본 나노복합소재의 MgO 상은 친수성이 매우 강하기 때문에 3.25 μm 파장의 H_2O 흡수 현상이 두드러지며 이는 여전히 해결과제로 남아있다.

산화물 중에서도 MgO 소재 자체의 열전도도가 높은 편이기 때문에 Y_2O_3 와 복합화한 경우, Y_2O_3 (14 W/mK) 대비 열전도도 값이 2배 가량 높은 것으로 알려져 있다²³⁾. 기계적 강도 또한 결정립 크기가 작기 때문에 우수하다. 공정변수 최적화로 인해 결정립 크기가 작아질수록 Hall-Petch 현상에 의한 기계적 강도 향상이 있

Fig. 5. 단결정 MgO, 다결정 Y_2O_3 및 $Y_2O_3:MgO$ 나노복합소재의 결정립 크기에 따른 투과율 비교 그래프²³⁾

Fig. 6. 50:50 vol% $Y_2O_3:MgO$ 나노복합소재의 미세구조²³⁾

으며, 굴곡강도는 상온에서 660 MPa, 고온(600 °C)에서 485 MPa까지 보고되었다. Y_2O_3 -MgO 나노복합소재의 열충격저항지수는 $3.8(\times 10^3 \text{ W/m})$ 로써, c-Plane sapphire의 8.6 대비 낮지만 스피넬(0.9-1.7)이나 Y_2O_3 (1.0-1.4)대비 높은 수준이다²³⁾.

최근 Y_2O_3 -MgO 나노복합소재는 분말 준비단계가 최종

물성을 결정하는 데 큰 영향을 주는 것으로 알려졌다²⁴⁾. 입자크기 및 분포도 영향을 주지만, Y_2O_3 와 MgO 입자가 균일하게 섞여있는 분말이 소결 시 입성장을 제어하는데 효과적이다.

화염분무법(Flame pyrolysis technique)을 비롯하여 sol-gel합성법, 연소법 등 많은 분말합성기술이 보고되었으며, 그에 따른 소결특성 및 투과율, 강도 변화가 연구되어왔다.

2.2.3 ZnS

ZnS 소재는 이론적으로 가시광에서부터 장적외선(LWIR)영역까지 투과성이 확보되기 때문에 다중대역 ZnS(Multispectral ZnS)로써 seeker의 보호 창 역할이 기대되는 소재이다. 해외 II-VI사, VITRON, ISP Optics, SCHOTT, KODAK 등을 비롯하여 국내에서도 많은 업체들이 개발 및 제조하고 있으며, 통상적으로는 CVD(Chemical Vapor Deposition)법을 이용한다. CVD로 제조된 ZnS는 추가적인 HIP공정을 거쳐서 Cleartran이라는 상호로 불리는 다중대역 ZnS가 된다²⁵⁾. CVD/HIP 공정을 통해 제조된 다중대역 ZnS소재는 대부분 열전도도 27 W/mK, 4점곡강도 60 MPa, 경도 150 kg/mm² 수준의 물성을 보여준다. 음속 이상의 영역에서 사용되기 위해서는 기계적 물성을 향상이 필수적으로 요구된다.

ZnS 소재의 기계적 물성을 향상시키기 위한 방법으로 결정립 크기를 줄이고자 하는 연구가 수행되어왔다. 기존 CVD/HIP 공정 특성 상 수십 μm 이상의 결정립 크기를 갖게 되는 반면, Hot-press 또는 SPS 소결을 통한 제조방법은 상대적으로 작은 결정립 크기(수 μm 수준)로 제어할 수 있다. 이에 많은 연구자들이 ZnS 분말 프로세싱과 소결 공정을 통해 ZnS 투명화 연구를 수행해왔다(Fig. 7)²⁶⁾. 그러나, ZnS는 상온에서 cubic상 이외에 hexagonal상이 추가로 존재할 수 있으며, 800 °C 이상의 고온에서 hexagonal상의 양이 더욱 늘어나는 문제점이 있다. 따라서 고온 소결 시 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 hexagonal상 때문에 ZnS 소결체의 가시광영역 투과성을 잃어버리게 된다. 최근에는 고온 공

Fig. 7. Hot-press로 제작된 0.6 mm 두께 ZnS 투명세라믹 사진 및 투과율 그래프⁽²⁶⁾

정 시 hexagonal상을 줄이기 위한 연구결과들이 보고 되기도 하였다⁽²⁷⁾. ZnS 소재의 낮은 기계적 물성을 향상 시키는 데는 여전히 한계가 따르기 때문에 표면 하드 코팅을 위한 연구결과들도 보고되었다⁽²⁸⁾. 표면 코팅으로는 경도와 탄성계수(Young's Modulus)가 높으며 동시에 투과율이 높고 IR cutoff가 긴 소재들로 연구가 되어왔다. 그 중에서도 특히 다이아몬드는 탄성계수 값(1,050 GPa) 및 경도(70 GPa)가 매우 높다. 본 ZnS 하드 코팅 기술의 주된 이슈는 열팽창계수 차이로 인한 박리(Delamination)현상이다. 그 밖에도 ZnS/다이아몬드 복합화, 다이아몬드 창 등을 개발하여 ZnS 소재를 대체하기 위해 연구되었으나, 비싼 공정 비용 등 한계가 있다.

2.3 레이저 세라믹

고체 레이저(Solid-state laser) 분야에서, 기존의 단결정의 한계점을 극복할 수 있는 다결정 투명세라믹 레이저가 개발되어왔다. 다결정 투명세라믹은 큰 부피로 제작할 수 있어서 고출력을 얻을 수 있으며, 고농도 도핑이 가능하다. 1990년대 일본에서는 300~600 mW 수준에서 다결정 Nd:YAG(Yttrium Aluminum Garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) 세라믹을 사용하여 단결정 Nd:YAG와 견줄 만한 60 %대의 발진 효율을 가지는 고체 레이저를 선보였다⁽²⁹⁾. 이후 수많은 Nd:YAG 다결정 투명세라믹 소재의 제조방법 및 특성 평가에 관한 연구들이 이루어졌다 (Fig. 8, 9)^(30,31).

Fig. 8. Nd:YAG 세라믹 100 x 100 x 20 mm³ (좌) 및 (우) Sm 클래딩⁽³⁰⁾

Fig. 9. 다양한 크기 및 모양을 가진 Nd³⁺:YAG 투명세라믹 소재 사진⁽³¹⁾

기존의 레이저 호스트물질인 YAG는 높은 열팽창계수와 10 W/mK 이하의 낮은 열전도도를 가지며, 이러한 낮은 열전도도를 가지는 호스트는 고출력 시 온도 경사에 의한 빔의 왜곡과 복굴절이 발생하기 때문에 출력

을 높이는 데 한계가 있었다. Ikesue 등은 이를 해결하기 위하여 Nd 농도 분포가 다른 YAG 성형체들을 적층 소결하여 YAG의 낮은 열전도도 문제를 극복하고자 하였다³²⁾. 그 밖에도 새로운 레이저 호스트 물질들도 활발히 연구되고 있다. 특히, 기존 YAG에 비해서 상대적으로 열전도도가 높은 삼산화물(Lu_2O_3 , Y_2O_3 , Sc_2O_3)들은 도핑 농도가 증가하여도 열전도도 감소가 적으며, 높은 흡수 및 방출 단면적을 가져서 고출력 레이저 응용에 더욱 적합하다고 알려졌다³³⁾. 다결정 투명세라믹들은 기공 산란뿐만 아니라, 입계(grain boundaries)에서의 레이저 산란도 심각하다고 보고되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 미 산란(Mie scattering) 이론, 레일리(Rayleigh scattering) 산란 이론을 모두 고려한 매우 고도화된 세라믹 공정기술이 필요하다. 다결정 입계의 이차 상 및 불순물은 고출력 레이저가 가지는 치명적 한계 중 하나이며, 공정 시 초기 분말의 순도를 높이는 것이 매우 중요하다.

3. 결론

투명세라믹의 제조방법에 따른 물성 연구는 세라믹 공정 기술과 함께 많은 발전이 있었다. 최근에는 국내에서도 민군 과제 등을 통해 산학연에서 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 특히, 방탄/적외선 윈도우용 다결정 투명세라믹스 분야에서 ALON, 단결정 Al_2O_3 , Y_2O_3 -MgO 나노복합소재, MgAl_2O_4 , ZnS, Ge 등과 같은 투명세라믹 제조기술에 대한 연구성과들이 있었다. 군수 분야에 사용되기 위한 투명세라믹 소재는 극한환경에서 운용되기 위해 기계적 강도와 열 물성을 더욱 향상시키기 위한 여러가지 과제들이 남아있다. 특히, 다결정 세라믹의 투명화 확보를 위해 기공을 최소 100 ppm 미만으로 제어하면서도 동시에 필요한 무기체계 운용에 적합한 물성치에 도달하기 위해서는 아직까지 넘어야 할 산들이 많다. 또한, 고체 레이저용 투명세라믹스는 기존의 방탄/윈도우용 소재 제조기술보다 더욱 높은 수준의 공정 난이도를 가지고 있다. 앞으로 가까운 미래에 고품질의 레이저 투명세라믹 개발을 위해서는 그동안 축적

된 투명세라믹 공정기술 노하우들이 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. A. Krell, J. Klimke, T. Hutzler, *Opt. Mater.*, **31** 1144 (2009).
2. Parimal J. Patel, Gary A. Gilde, Peter G. Dehmer, James W. McCauley, "Transparent ceramics for armor and EM window applications", *Proc. SPIE.*, **4102**, Inorganic Optical Materials II (25 October 2000).
3. D. C. Harris, *Infrared Phys. Technol.*, **39** 185 (1988).
4. W. Kim, G. Villalobos, C. Baker, J. Frantz, B. Shaw, S. Bayya, B. Sadowski, M. Hunt, I. Aggarwal, J. Sanghera, *Opt. Eng.*, **52** 21003 (2012).
5. G. Subhash, "Transparent armor materials", *Exp. Mech.*, **53** 1-2 (2013).
6. Parimal J. Patel, Jeffrey J. Swab, Gary A. Gilde, "Fracture properties and behavior of transparent ceramics", *Proc. SPIE.*, **4102**, Inorganic Optical Materials II (25 October 2000).
7. A. F. Dericioglu, Y. Kagawa, "Effect of grain boundary microcracking on the light transmittance of sintered transparent MgAl_2O_4 ", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** [6] 951-959 (2003).
8. T. G. Talladay, D. W. Templeton, "Glass armor- an overview", *Int. J. Appl. Glass. Sci.*, **5** [4] 331 (2014).
9. L. M. Goldman, M. Smith, M. Ramisetty, S. Jha, S. Sastri, "Conformal ALON and spinel windows", *Proc. SPIE.*, **10985**, Window and Dome Technologies and Materials XVI, 109850G (13 May 2019).
10. Shan Y, Zhang Z., Sun X., Xu J., Qin Q., Li J., "Further, experimental investigation on fast densification mechanism of bimodal powder during pressureless sintering of transparent ALON ceramics", *Ceram. Int.*, **43/11** 8195-8201 (2017).
11. M. Grujicic, W. C. Bell, B. Pandurangan, "Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems", *J. Mater. Design.*, **34** 808-819 (2012).

12. Joseph M. Wahl, Thomas M. Hartnett, Lee M. Goldman, Richard Twedt, Charles Warner, "Recent advances in ALON optical ceramic", *Proc. SPIE.*, **5786** Window and Dome Technologies and Materials IX (18 May 2005).
13. A. A. DiGiovanni, A. LaRoche, L. Schubel, L. Fehrenbacher, D. W. Roy, "Polycrystalline transparent spinel domes for multimode seeker applications", *Proc. SPIE.*, **6545**, Window and Dome Technologies and Materials X 6545, 654514 (2 May 2007).
14. A. A. DiGiovanni, L. Fehrenbacher, and D. W. Roy, "Hard Transparent Domes and windows from magnesium aluminate spinel", *Proc. SPIE.*, **5786** 56-63 (2005).
15. C Zhang, J W Cao, J B Guo, F F Liu, C Wang, G W Hasi and Z Z Guo, "The research on transparent armor material technology", *J. Phys. Conf. Ser.*, **1507** 102014 (2020).
16. A. Krell, K. Waetzig and J. Klimke, "Influence of the structure of $\text{MgO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ spinel lattices on transparent ceramics processing and properties", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **32** [11] 2887-2898 (2012).
17. J. A. Wollmershauser, B. N. Feigelson, E. P. Gorzkowski, C. T. Ellis, R. Goswami, S. B. Qadri, J. G. Tischler, F. J. Kub and R. K. Everett, "An extended hardness limit in bulk nanoceramics", *Acta Mater.*, **69** 9-16 (2014).
18. A. Goldstein, "Correlation between MgAl_2O_4 -spinel structure, processing factors and functional properties of transparent parts (progress review)", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **32** [11] 2869-2886 (2012).
19. G. Bernard-Granger, N. Benameur, C. Guizard and M. Nygren, "Influence of graphite contamination on the optical properties of transparent spinel obtained by spark plasma sintering", *Scr. Mater.*, **60** [3] 164-167 (2009).
20. K. Morita, B-N. Kim, H. Yoshida, K. Hiraga and Y. Sakka, "Influence of spark plasma sintering (SPS) conditions on transmission of MgAl_2O_4 spinel", *J. Am. Ceram. Soc.*, **98** [2] 378-385 (2015).
21. G. Bonnefont, G. Fantozzi, S. Trombert and L. Bonneau, "Fine-grained transparent MgAl_2O_4 spinel obtained by spark plasma sintering of commercially available nanopowders", *Ceram. Int.*, **38** [1] 131-140 (2012).
22. W. Kim, G. Villalobos, C. Baker, J. Frantz, B. Shaw, S. Bayya, B. Sadowski, M. Hunt, B. Rock, I. Aggarwal and J. Sanghera, "Overview of transparent optical ceramics for high-energy lasers at NRL", *Appl. Opt.*, **54** [31] F210-F221 (2015).
23. D. C. Harris, L. R. Cambrea, L. F. Johnson, R. T. Seaver, M. Baronowski, R. Gentilman, C. Scott Nordahl, T. Gattuso, S. Silberstein, P. Rogan, T. Hartnett, B. Zelinski, W. Sunne, E. Fest, W. Howard Poisl, C. B. Willingham, G. Turri, C. Warren, M. Bass, D. E. Zelmon, S. M. Goodrich, "Properties of an infrared-transparent $\text{MgO}:\text{Y}_2\text{O}_3$ nanocomposite", *J. Am. Ceram. Soc.*, **96** 3828-3835 (2013).
24. H. J. Ma, W. K. Jung, C. Baek, D. K. Kim, "Influence of microstructure control on optical and mechanical properties of infrared transparent Y_2O_3 - MgO nanocomposite", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **37** [15] 4902-4911 (2017).
25. P. Ramavath, P. Biswas, R. Johnson, G. J. Reddy, P. Laxminarayana, "Hot isostatic pressing of ZnS powder and CVD ZnS ceramics: comparative evaluation of physicochemical, microstructural and transmission properties", *Trans. Ind. Ceram. Soc.*, **73** 299-302 (2014).
26. Y. Li, Y. Wu, "Transparent and luminescent ZnS consolidated by vacuum hot pressing method", **98** [10] 2972-2975 (2015).
27. J. S. McCloy, R. Korenstein, B. Zelinski, "Effects of temperature, pressure, and metal promoter on the recrystallized structure and optical transmission of chemical vapor deposited zinc sulfide", *J. Am. Ceram. Soc.*, **92** [8] 1725-1731 (2009).
28. D. C. Harris, "Frontiers in infrared window and dome materials", *Proc. SPIE.*, **2552**, Infrared Technology XXI (8 September 1995).
29. A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata, and K. Yoshida, "Fabrication and optical properties of high-

performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid state lasers,”*J. Am. Ceram. Soc.*, **78** 103-1040 (1955).

30. R. M. Yamamoto et al., in *Proc. Adv. Solid State Photon., Nara, Japan, WC5*, (2008).
31. R. Feldman and Y. Shimony, “Strength and strengthening of polycrystalline (ceramic) laser components”; presented at the 6th International

Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications, Munster, Germany, December 6–8 (2010).

32. T. Kamimura, T. Okamoto, Y. L. Aung, and A. Ikesue, in *CLEO 2007*, Baltimore, Maryland, CThT6 (2007).
33. J. Sanghera, W. Kim, G. Villalobos, B. Shaw, C. Baker, J. Frantz, B. Sadowski, and I. Aggarwal, “Ceramic Laser Materials”, *Mater.*, **5** 258-277 (2012).

●● 정 욱 기

- 2017년 한국과학기술원 신소재공학과 박사
- 2018년 삼성전자 메모리사업부 선임연구원
- 2019년~현재 국방과학연구소 선임연구원

●● 이 기 수

- 2010년 광주과학기술원 신소재공학과 박사
- 2010년~현재 국방과학연구소 선임연구원

●● 최 재 호

- 2015년 한국과학기술원 생명화학공학과 박사
- 2001년~현재 국방과학연구소 연구원, 선임연구원, 책임연구원