

# Laser 및 Scintillator 응용을 위한 투명세라믹스

글 \_ 정육기, 김도경  
KAIST 신소재공학과

## 1. 서론: 투명세라믹의 필요성

종래 산업에 사용되는 투광성 재료로는 유리, 폴리머, 알칼리 수소화물 등이 대부분이었다. 하지만 이러한 재료들은 상대적으로 낮은 기계적 강도와 녹는점 (<math><600^{\circ}\text{C}</math>)을 가지며 화학적, 물리적 안정성이 낮을 뿐만 아니라 IR 영역에서의 흡수율이 높아 투명 방탄소재, 레이저, 섬광체, IR (적외선) 센서 및 윈도우 등으로 응용하는데 있어 한계가 있다. 이를 대체하기 위한 재료로는 단결정 형태의 여러 가지 화합물들이 있는데, 이는 높은 물리적, 화학적 안정성과 함께 IR 파장대역에서의 응용이 가능하기 때문에 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그 대표적인 예로 Sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )는 IR 윈도우로 쓰이며, 레이저용 단결정 YAG (Yttrium aluminium garnet,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )와 전기 광학용 단결정 PZN-PT (Lead zinc niobate-lead titanate,  $\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ) 등이 있다. 하지만 이러한 단결정 재료들은 성장시키기 어렵고 값비싼 공정을 필요로 한다. 또한, 결정학적 성장방향이 정해져 있기 때문에 성형성이 좋지 않은 단점을 갖고 있다.<sup>1)</sup>

최근에는 세라믹 기술의 발전으로 인해 다결정 투명세라믹이 단결정을 대체할 재료로 각광받고 있다. 다결정으로 이루어진 투명세라믹은 단결정에 비해 비용 효율성, 대규모 생산성, 성형성 측면에서 모두 우수하여 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 다양한 다결정 세라믹의 물성에 광학적 투명성을 더하여 레이저, 방탄, 섬광체 등의 다양한 응용이 가능하다. 본고에서는 다결정 투명세라믹

을 이용한 레이저와 섬광체 기술의 연구동향에 대해서 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. 레이저 세라믹 재료

고체 레이저 (Solid-state laser) 기술은 금속가공업, 의료용, RGB (Red-Green-Blue) 광원, 미래 핵융합 분야 등 다양하게 응용되고 있다. 종래에 사용된 고체 레이저 이득물질 (Gain medium: 레이저를 만들기 위해 사용하는 에너지 축적 물질)들은 1960년 미국 과학자 Maiman에 의해 고안된 Ruby 레이저와 1964년에 개발된 Nd:YAG 단결정이 있었다. 하지만 단결정은 여전히 기술적, 경제적 문제를 가지고 있기 때문에 이를 극복하기 위한 다결정 투명세라믹 레이저 기술이 부각되고 있다.<sup>2,3)</sup>

다결정 투명세라믹은 단결정에 비해서 상당한 이점을 가지고 있다. 다결정으로 이루어진 투명세라믹은 큰 부피로 제작할 수 있기 때문에 고출력 레이저를 얻을 수 있으며, 복잡한 모양으로도 제작할 수 있기 때문에 다양한 형태의 이득물질로 응용될 수 있다. 그 뿐만 아니라, 단결정에서는 불가능한 고농도의 레이저용 이온 도핑도 가능하다.

다결정 투명세라믹을 이용한 레이저 기술은 1964년에 극저온 환경에서 Dy:CaF<sub>2</sub>를 처음으로 레이저 이득물질로 사용하면서부터 연구되기 시작하였다.<sup>4)</sup> 이후, 1970년대에 Nd:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ThO<sub>2</sub>가 펄스레이저 발진용으로 사용되었



지만 낮은 효율을 보여주는데 그쳤다.<sup>5,6)</sup> 20년이 지난 1990년대에는 일본에서 다결정 Nd:YAG 세라믹을 레이저 이득물질로 사용하여 60% 대의 성공적인 발진효율을 보고하였다.<sup>7)</sup> 이는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 기존의 단결정 성능에 견줄만한 효율이었으며, 미세구조에서 잔류기

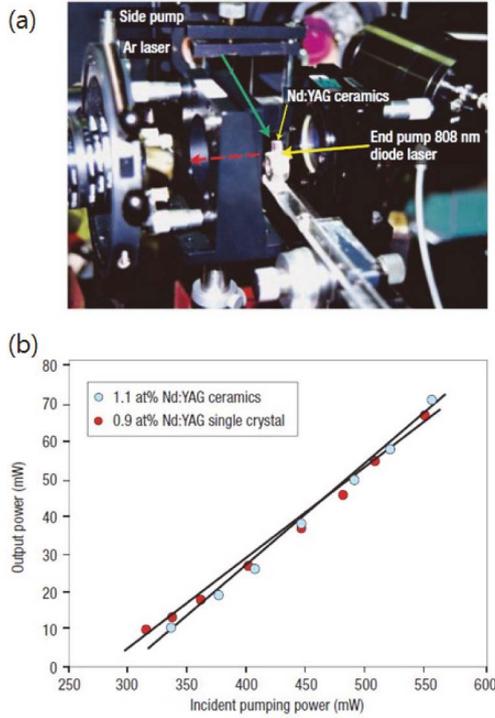


Fig. 1. 레이저 발진 시험장비(a) 및 Nd:YAG 단결정과 다결정 세라믹의 발진효율 비교(b).

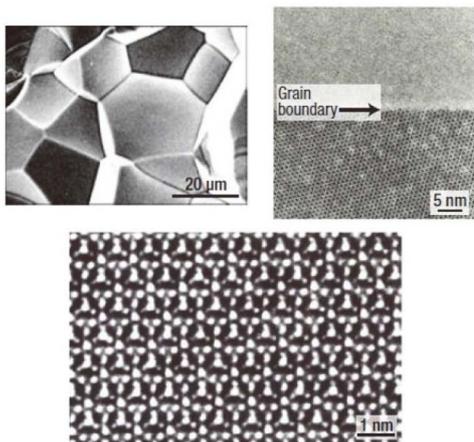


Fig. 2. 1% Nd:YAG 세라믹의 미세구조<sup>7)</sup>

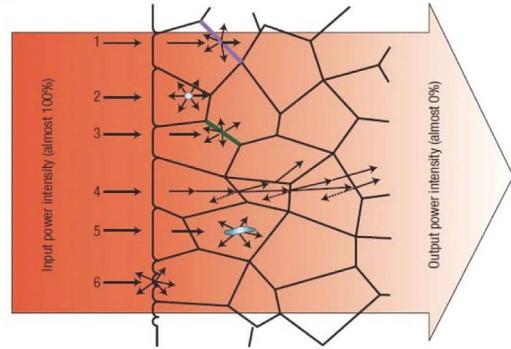


Fig. 3. 다결정에서의 빛의 산란 요인.<sup>14)</sup>

공이나 제 2상과 같은 결함들을 남기지 않으므로써 얻을 수 있는 효율이었다 (Fig. 2). 일반적으로 세라믹에서는 Fig. 3과 같이 잔류기공, 입계, 제 2상, 복굴절 등 다양한 요인에 의해서 빛이 산란될 수 있다. 그 중에서도 특히 잔류기공은 투과도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 높은 발진효율을 갖는 다결정 투명세라믹을 제조하기 위해서는 높은 수준의 분말합성, 특별한 소결분위기와 같은 세라믹 공정들을 필요로 한다. 잔류기공을 효과적으로 제거하기 위한 소결공정으로는 진공소결, HIP (Hot Isostatic Press), Hot press, SPS (Spark Plasma Sintering), Microwave sintering 등이 개발되어왔다.

근간에 이르러 세라믹 공정기술이 진보함에 따라서 레이저 세라믹 기술도 함께 발전하였다. 2002년에는 Nd:YAG 세라믹을 이용하여 최초로 1kW를 뛰어넘는 출력을 얻을 수 있었으며, 2009년에는 100kW 이상의 출력 값이 보고되었다.<sup>8,9)</sup> 이러한 결과들은 Fig. 4에서처럼 세라믹 이득물질인 Nd:YAG의 크기가 커짐으로써 가능할 수 있었다. 원리적으로 다결정 세라믹은 단결정과 달리 레이저 이득물질의 scale-up에 제한이 없는 것으로 알려져 있다.

하지만 레이저 세라믹 재료의 호스트물질인 YAG는 일반적으로 열전도도가 낮고 열팽창계수가 크기 때문에 고출력 레이저 작동시스템에서는 적용하기 불리하다.<sup>1)</sup> 열전도도가 낮은 호스트 재료들은 고출력 레이저로 인한 온도경사 때문에 빔의 왜곡과 복굴절을 일으킬 수 있기 때문이며, 따라서 고출력 레이저 응용을 위한 이득물질

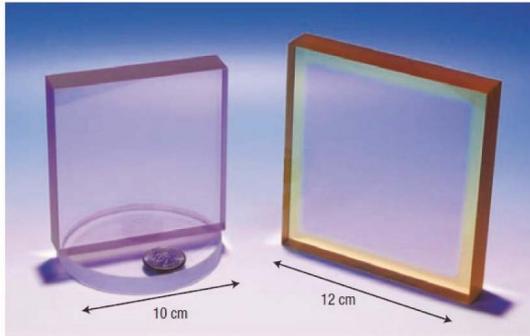


Fig. 4. Nd:YAG세라믹 100 mm x 100 mm x 20 mm(좌) 및 (우) Sm 클래딩.

은 낮은 열팽창계수와 온도변화에 민감하지 않은 굴절률을 가진 재료가 적합하다고 할 수 있다. 온도에 따른 열팽창 및 굴절률 변화에 의한 광경로 (OPL: Opticla Path Length) 식은 다음과 같다.

$$\delta = dn/dT + (n - 1)\alpha$$

여기에서  $\delta$ 는 광경로이며  $n$ 은 굴절률,  $\alpha$ 는 열팽창계수를 의미한다. 위 식을 통해 광경로는 굴절률, 온도, 열팽창계수 모두에 의존함을 알 수 있다.

최근에는 Ikesue가 고출력에서 YAG 투명세라믹의 온도 경사 문제를 완화하기 위한 연구결과를 보고하기도 하였다.<sup>10)</sup> Fig. 5는 각각 다른 Nd 이온농도 분포를 가진 YAG compact들을 적층하여 소결한 결과를 보여주고 있으며, 이러한 복합체 세라믹을 이용하여 YAG의 낮은 열전도도 문제를 극복하고자 하였다.

낮은 열전도도를 갖는 YAG 세라믹을 대체할 수 있는 새로운 재료는  $Sc_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$ 와 같은 삼이산화물이 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 삼이산화물들은 YAG에 비해 고농도  $Yb^{3+}$  도핑에서도 높은 열전도도가 유지된다.<sup>11-13)</sup> 뿐만 아니라 이 재료들은 높은 흡수 및 방출 단면적을 가지고 있기 때문에 고출력 레이저 응용에 적합하다고 알려져 있다. 그 중에서도 특히  $Lu_2O_3$ 는 고농도  $Yb^{3+}$  도핑 시 가장 높은 열전도도 값을 보여준다. 하지만 열적 기계적 물성이 좋은 삼이산화물은 비선형 굴절률 ( $n_2$ )이 크기 때문에 (Table 1) 빔 왜곡을 일으킬 수도 있다는 단점이 있으며, 높은 방사선 강도에서는 비선형 굴절률 또

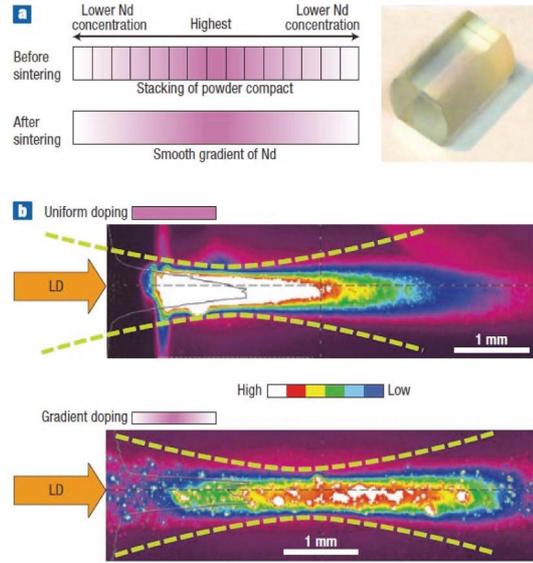


Fig. 5. Gradient Nd 농도분포를 갖는 YAG 복합체 (a) 및 열적 특성 (b).<sup>10)</sup>

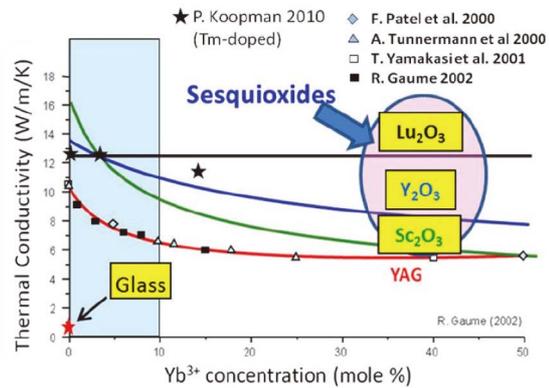


Fig. 6. 도핑농도에 따른 레이저 호스트 재료의 열전도도 그래프<sup>13)</sup>

Table 1. 레이저 호스트 재료들의 광학적 성질<sup>14)</sup>

Material	$n$ (index)	$dn/dT$ (ppm/K)	$\delta$ (ppm/K)	$n_2$ [11] ( $10^{-13}$ esu)	$\gamma$ ( $10^{-20}$ m <sup>2</sup> /W)
MgO	1.736	19	27.8	1.61	3.89
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.72	13.2	--	1.5	3.66
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.78	--	--	5.33	12.60
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.85	--	--	--	--
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.83	--	--	--	--
Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	1.945	17.4	24.5	8.1	17.46
Gd <sub>3</sub> Sc <sub>5</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	1.943	10.9	17.9	--	--
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	1.816	7.83	12.8	2.7	6.23
Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2.14	4.88	11.7	5.5	10.77
SrTiO <sub>3</sub>	2.31	--	--	26.7	48.45
ZrO <sub>2</sub> (c)	2.176	--	--	5.8	11.17
CaF <sub>2</sub>	1.429	-10.6	-2.2	0.43	1.26
SrF <sub>2</sub>	1.439	-12	-3.7	0.5	1.46
BaF <sub>2</sub>	1.468	-14	-4.13	0.67	1.91
Sc <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F	1.61262/1.61760	-5.0	0.2/5.9	1.57	4.07
LG-750	1.516	-5.1	1.7	1.08	2.99



한 광경로에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup>

다결정 투명세라믹 공정 기술의 발전에 힘입어 많은 레이저 이득물질들이 보고되었지만, 여전히 해결해야 할 문제들이 많이 남아있다. 다결정 투명세라믹들은 입계에서의 레이저 산란 문제가 심각하기 때문에 이를 극복해야만 한다. 게다가 보다 더 큰 사이즈의 투명세라믹을 만들기 위해서는 세라믹 공정 연구 역시 지속되어야 한다. 투명세라믹 공정에서 가장 중요한 요소는 균일한 크기의 원료분말과 균일한 기공분포를 갖는 성형체이다. 소결 전 성형체의 상태에 따라서 소결 후 잔여 기공의 유무가 달라지기 때문이다.<sup>15)</sup> 따라서 다결정 세라믹을 이용하여 큰 레이저 이득물질을 만들기 위한 세라믹 공정개발이 필요하다.

### 2.2. 세라믹 섬광체 재료

섬광체는 X-선, 감마선 등의 고에너지 방사선을 흡수하여 가시광선을 발광하는 형광체의 일종이다. 섬광체는 검역, 산업검색 및 의료용 등으로 사용되며 CT imaging 용 부품이 그 대표적인 예 중 하나이다. 초기 세라믹 섬광체로는 CdWO<sub>4</sub> 단결정을 사용하였으나, 단결정 섬광체가 지니는 단점을 극복하고 더 나은 물성을 얻기 위해 다결정 세라믹 섬광체가 개발되어 왔다.<sup>15)</sup>

기본적으로 섬광체는 방사선을 흡수하여 가시광선으로 발광하기 때문에 광센서로의 광전달 효율을 향상시키기 위해서 높은 투과율과 낮은 흡수율을 가져야만 한다. 따라서 세라믹 섬광체는 투명해야 하며, 이를 위해서는 앞선 레이저 세라믹의 경우와 마찬가지로 잘 조정된 세라믹 소결 공정 기술이 필요하다.

세라믹 섬광체의 종류와 물성치들은 아래 Table 2에 나와있다.<sup>16)</sup> CT scanner로 가장 많이 사용되던 단결정 Tl:CsI와 CdWO<sub>4</sub>는 높은 잔광 (Afterglow: 0.3%)과 방사선손실 (Radiation damage: 13.5%)을 보이는데 이는 이미지 품질을 떨어뜨리는 요인이 된다. 뿐만 아니라 CdWO<sub>4</sub>의 낮은 광출력 (30%)은 신호 대 잡음비를 떨어뜨리는 요인이다.

이에 반해 다결정 세라믹 섬광체인 (Y,Gd<sub>2</sub>)O<sub>3</sub>:Eu은 비교적 높은 광출력 값과 낮은 잔광 및 방사선손실 값을

Table 2. 다양한 세라믹 섬광체들의 물성<sup>16)</sup>

Material	X-ray attenuation coefficient (cm <sup>-1</sup> )		Emission λ (nm)	Relative light output (%) <sup>c</sup>	Primary decay time (s)	Afterglow (%) <sup>d</sup>	Radiation damage (%) <sup>e</sup>
	70 keV	500 keV					
CsI:Tl	34	0.49	550	100	1 × 10 <sup>-6</sup>	0.3	+13.5
CdWO <sub>4</sub>	56	0.91	530	30	5 × 10 <sup>-6</sup>	0.02	-2.9
Y <sub>1.34</sub> Gd <sub>0.6</sub> Eu <sub>0.06</sub> O <sub>3</sub> <sup>f</sup>	26	0.71	610	70	1 × 10 <sup>-3</sup>	<0.01	<-1.0
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :S:Pr,Ce,F	52	0.80	510	80	3 × 10 <sup>-6</sup>	<0.01	-3.0
Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Cr,Ce	32	0.70	730	40	14 × 10 <sup>-5</sup>	0.01	-0.3
BaHfO <sub>3</sub> :Ce	64	0.95	400	15	25 × 10 <sup>-9</sup>	NA	NA

<sup>a</sup>Measured with photodiodes for X-ray tube voltage of 60 kVp.

<sup>b</sup>Measured at room temperature and at 100 ms after turn-off of a 0.5 s X-ray excitation pulse.

<sup>c</sup>Percent relative change in light output after dose of 450 Roentgens of 140 kVp X-rays.

<sup>d</sup>Contains a small amount of proprietary additive that controls afterglow.

NA, not available.

가지고 있기 때문에 고성능 의료검출기에 적합하다. 다결정 세라믹 Y<sub>1.34</sub>Gd<sub>0.6</sub>Eu<sub>0.06</sub>O<sub>3</sub>는 입방정 구조를 가지며 고순도의 단일상 고용체이다. 이렇게 복잡한 조성을 가진 재료는 단결정 성장법으로는 제작할 수 없으며, 화학적 습식법으로 합성된 고순도 분말의 소결공정으로만 만들 수 있다.

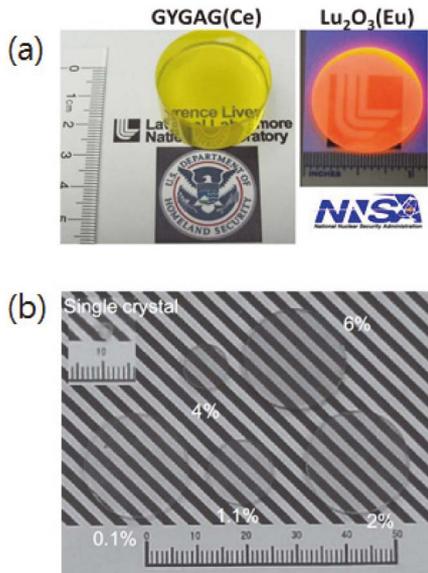
섬광체 재료의 물성을 판단하는 기준으로는 투광성, 광출력, 잔광, 방사선손실 값 이외에도 X-ray 저지능 (X-ray stopping power)이 있다. X-ray 저지능은 재료가 얼마나 많은 양의 X-ray를 통과시키지 않고 흡수하느냐에 따라서 결정된다. 만약, 일부 X-ray가 흡수되지 않고 통과한다면 광검출 다이오드에 흡수되어 전자결합을 형성하게 되고 결과적으로 검출성능을 악화시키게 된다. X-ray가 물질을 통과할 때 일반적인 투과도는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$T = e^{-\alpha(E)x}$$

여기서 α(E)는 입사에너지에 관계된 감쇠계수이며 x는 섬광체의 두께를 의미한다. 일반적으로 재료에서 α값은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\alpha(E) = \rho \left( \sum_i \mu(E)M_i \right) / \sum_i M_i$$

여기서 ρ는 섬광체의 밀도, i는 섬광체를 이루는 원소들, μ(E)는 특정한 에너지 E에서 원소 i의 질량감쇠계수를, M<sub>i</sub>는 분자량을 나타낸다. 위 두 식으로부터 알 수 있듯이, X-ray의 투과도를 줄이려면 섬광체가 두껍고 밀도가 높으며 높은 원자번호의 원소들로 이루어져 있어야



**Fig. 7.** Ce:GYGAG와 EuLu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 재료(a) 및 Nd:YAG 단결정과 다결정 섬광체(b).<sup>21,22)</sup>

한다. (Y,Gd<sub>2</sub>)O<sub>3</sub>:Eu 섬광체는 Y원소의 일부를 높은 원자번호를 갖는 Gd으로 치환함으로써 X-ray 저지능을 높인 사례이다.<sup>17,18)</sup>

또 다른 세라믹 섬광체로는 대표적으로 YAG와 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 연구되고 있다.<sup>19,20)</sup> YAG는 비교적 낮은 밀도와 유효 원자번호를 갖고 있는 반면 Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 높은 밀도 값을 가지고 있기 때문에 X-ray 저지능이 높다. 특히 Nd:YAG는 그 재료 자체만으로도 연구되고 있지만 높은 원자번호를 도핑하려는 연구도 함께 진행되고 있다. 그 예로 GYGAG라고 불리는 (Gd,Y)<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>은 YAG 세라믹에서 Gd, Ga와 같은 무거운 원소를 일부 치환하여 만든 섬광체이다<sup>21, 22)</sup> (Fig. 7).

그 밖에도 섬광체로서 Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(Ce:LaAG), (Lu,Y)<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Ce:LYSO) 등 많은 다결정 투명세라믹들의 연구가 진행되고 있다.

### 3. 결론

세라믹 공정기술의 발전은 다결정 투명세라믹의 제작과 응용을 실현시켰다. 최근에는 SPS 소결로 등을 통해 결정립 크기를 100 nm 수준까지 줄인 투명세라믹도 보

고되고 있다. 다결정에서 결정립 크기를 줄이게 되면 입계에서 산란되는 빛의 파장 범위를 줄일 수 있기 때문에 다양한 종류의 세라믹들을 투명하게 만들 수 있다. 예를 들면, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같은 높은 강도를 갖는 세라믹들도 투명성을 확보하여 레이저 이득물질, 섬광체 등에 응용할 수 있다.

다결정 투명세라믹을 이용하여 단결정으로는 구현할 수 없었던 레이저 물성들을 가능하게 하였음에도 여전히 이 분야는 연구 중이고 개발단계이다. 초기 단결정 레이저 시스템의 상용화가 20년이 걸렸던 것처럼 다결정 세라믹 레이저의 상용화에도 시간이 걸릴 것으로 보인다. 가까운 미래에는 세라믹 레이저를 이용한 금속기계 가공, 수술의료장비, 진단장비, 레이저텔레비전 등의 응용이 가능할 것이다.

투명세라믹 섬광체는 최근 고해상도 CT, 보안감사, PET 스캔, 고에너지 물리학 분야 등에서 점점 더 많은 수요가 발생하고 있다. 이러한 수요에 맞추기 위해서는 넓은 범위로 물성을 제어할 수 있는 세라믹 소재와 도핑 기술에 대한 연구가 더 필요하다.

본고에서는 투명세라믹을 이용한 응용분야로써 레이저 및 섬광체 기술을 중점으로 소개하였으나 이 밖에도 다결정 투명세라믹은 렌즈와 같은 광학시스템, 전기광학장치, 조명, 투명방탄, IR 센서 및 윈도우 등에 응용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며 이에 대한 앞으로의 전망이 기대된다.

### 참고문헌

1. S. F. Wang, J. Zhang, D. W. Luo, F. Gu, D. Y. Tang, Z. L. Dong, G. E. B. Tan, W. X. Que, T. S. Zhang, S. Li, and L. B. Kong, "Transparent Ceramics: Processing, Materials and Applications," *Prog. Solid State Chem.*, **41** 20-54 (2013).
2. K. Shiraki, "Solid State Laser Material-Optical Homogeneity and Crystal Growth of YAG (*in Japanese*)," *Oyo Butsuri*, **38** 177-82 (1969).
3. T. Sekino and Y. Sogabe, "Progress in the YAG Crystal Growth Technique for Solid State Lasers (*in Japanese*)," *Rev. Laser Eng.*, **21** 827-831 (1993).
4. S. E. Hatch, W. F. Parsons, and R. J. Weagley, "Hot Pressed Polycrystalline CaF<sub>2</sub>:Dy<sup>2+</sup> Laser," *Appl. Phys.*



## 특 집 ■■■ 정육기, 김도경

- Lett.*, **5** 153-54 (1964).
5. C. Greskovich and K. N. Wood, "Fabrication of Transparent ThO<sub>2</sub>-doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **52** 473-78 (1973).
  6. C. Greskovich and J. P. Chernoch, "Polycrystalline Ceramic Laser," *J. Appl. Phys.*, **44** 4599-606 (1973).
  7. 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 (1995).
  8. J. Lu *et al.*, "Neodymium Doped Yttrium Aluminum Garnet (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) Nanocrystalline Ceramics - A New Generation of Solid State and Optical Materials," *J. Alloys Compd.*, **341** 220-25 (2002).
  9. R. M. Yamamoto *et al.*, in Proc. Adv. Solid State Photon., Nara, Japan, WC5, 2008.
  10. T. Kamimura, T. Okamoto, Y. L. Aung, and A. Ikesue, in CLEO 2007, Baltimore, Maryland, CThT6, 2007.
  11. V. Peters, A. Bolz, K. Petermann, and G. Huber, "Growth of High-melting Sesquioxides by the Heat Exchanger Method," *J. Cryst. Growth*, **237** 879-83 (2002).
  12. A. Brenier and G. Boulon, "Overview of the Best Yb<sup>3+</sup> Doped Laser Crystals," *J. Alloys Compd.*, **323** 210-13 (2001).
  13. J. Sanghera, W. Kim, G. Villalobos, B. Shaw, C. Baker, J. Frantz, B. Sadowski, and I. Aggarwal, "Ceramic Laser Materials," *Materials*, **5** 258-77 (2012).
  14. J. D. Kuntz, J. P. Hollingsworth, and T. F. Soules, "Transparent Ceramics for Lasers," Lawrence Livermore National Laboratory Report, UCRL-JRNL-237245, 2007.
  15. A. Ikesue and L. A. Yan, "Ceramic Laser Materials," *Nat. Photonics*, **2** 721-27 (2008).
  16. C. Greskovich and S. Duclos, "Ceramic Scintillators," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **27** 69-88 (1997).
  17. C. Greskovich, D. A. Cusano, R. J. Riedner, and D. Hoffman, "Ceramic Scintillators for Advanced, Medical X-ray Detectors," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **71** 1120-30 (1992).
  18. Y. K Kim, H. K. Kim, and D. K. Kim, "Synthesis of Eu-doped (Gd,Y)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Transparent Optical Ceramic Scintillator," *J. Mater. Res.*, **19** [2] 413-16 (2004).
  19. T. Yanagida, T. Roh, H. Takahashi, S. Hirakuri, M. Kokubun, K. Makishima *et al.*, "Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillators to (YGd)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(Ce) for Gamma-ray Detectors," Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, **579** [1] 23-26 (2007).
  20. R. H. Bartram, A. Lempicki, L. A. Kappers, and D. S. Hamilton, "Hole Traps in Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu Ceramic Scintillators," *J. Lumin.*, **106** [2] 169-76 (2004).
  21. N. J. Cherepy, J. D. Kuntz, Z. M. Seeley, S. E. Fisher, O. B. Drury, B. W. Sturm, T. A. Hurst, R. D. Sanner, J. J. Roberts, and S. A. Payne, "Transparent Ceramic Scintillators for Gamma Spectroscopy and Radiography," *SPIE Proc.*, **7805** (2010).
  22. Y. Takayuki, K. Kei, F. Yutaka, Y. Yuui, Y. Akira, Y. Hideki, and Y. Takagimi, "Scintillation Properties of Transparent Ceramic and Single Crystalline Nd:YAG Scintillators," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **631** 54-57 (2011).

### ●● 정육기



- 2012년 한국항공대학교 항공재료공학과 학사
- 2012년 KAIST 신소재공학과 석·박사 통합과정

### ●● 김도경



- 1982년 서울대학교 요업공학과 학사
- 1984년 KAIST 재료공학과 석사
- 1987년 KAIST 재료공학과 박사
- 1987-1994년 국방과학연구소 선임 연구원
- 1991-1992년 University California, San Diego(UCSD) 초빙 연구원
- 1997-1998년 NIST, USA 객원 연구원
- 2007-2008년 University of California Berkeley, USA, 방문교수
- 1994-현재 KAIST 신소재공학과 교수
- 2013-현재 KAIST 나노융합연구소 소장
- 2013년 미국 세라믹학회 펠로우 선정