

Influence of ionic size of modifier cations on photoluminescence property in $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ binary aluminate glasses

Minseong Hwang and Jaeyeop Chung[†]

Display Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

(Received April 1, 2025)

(Revised April 28, 2025)

(Accepted May 7, 2025)

Abstract Eu_2O_3 and Er_2O_3 doped $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass systems were successfully synthesized by containerless processing. Photoluminescence (PL) analysis revealed that Eu_2O_3 -doped glasses exhibited the highest emission intensity at 1 mol%, with a decrease at higher concentrations (1.5 mol% and 2 mol%) due to concentration quenching. Similarly, Er_2O_3 doping resulted in reduced PL intensity beyond 1 mol%, with $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glasses exhibiting weaker quenching effects than $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ due to differences in ionic radii. Additionally, Eu^{3+} -doped glasses showed lower resistance to quenching compared to Er^{3+} -doped glasses. These results demonstrate the successful synthesis of new aluminate glass compositions with tunable luminescent properties, offering potential applications in fluorescent glass materials.

Key words Aluminate glass, Photoluminescence, Gas levitation system, Concentration quenching

무용기 용융법을 활용한 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 및 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 이성분계 알루미네이트 유리의 양이온 이온크기가 광발광 특성에 미치는 영향

황민성, 정재엽[†]

한국세라믹기술원 디스플레이소재센터, 진주, 52851

(2025년 4월 1일 접수)

(2025년 4월 28일 심사완료)

(2025년 5월 7일 게재확정)

요약 본 연구에서는 containerless processing 법을 활용하여 Eu_2O_3 와 Er_2O_3 가 도핑된 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 및 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리를 성공적으로 제조하였으며, 합성된 유리 조성에 따른 발광 특성을 확인하였다. $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계와 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리들의 Eu_2O_3 함량에 따른 PL intensity를 확인한 결과, 두 조성 모두에서 Eu_2O_3 의 농도가 1 mol%일 때 최고 발광 강도를 보였고 그 이상인 1.5 mol% 및 2 mol%에서는 발광 강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계와 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리들의 Er_2O_3 함량에 따른 PL intensity의 결과에서 이온 반경의 차이(La^{3+} : 1.032 Å, Eu^{3+} : 0.947 Å)로 $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 유리에 비해 $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 유리가 낮은 농도소광현상을 보였다.

1. 서론

희토류(RE) 이온이 도핑된 유리 소재는 발광 다이오드(LED), 광학 장치, 고체 레이저, 적외선(IR) 감지 및 컬러 디스플레이 패널 등 다양한 광학 분야에 적용될 수 있기 때문에 많은 glass scientist들 사이에서 활발히

연구되고 있다[1-5]. Glass matrix 내 희토류 이온의 뭉침(clustering) 현상은 낮은 도펀트 농도를 수용하고 상대적으로 큰 광학 장치를 사용할 수 있는 실리카기반 유리의 응용 분야 사용을 제한한다. 광 신호 처리, 광 신호 증폭, 레이저 수술과 같은 특수 응용 분야를 위한 소형 장치의 개발로 인해서 뭉침현상 없이 큰 도펀트 농도를 수용하는 새로운 유리조성에 대한 연구가 진행 중이다[6].

알루미네이트 유리는 높은 농도의 희토류 도펀트를 수

[†]Corresponding author
E-mail: jyyj.chung@kicet.re.kr

용할 수 있고 일반 규산염 유리에 비해 포논 에너지가 낮고 투명도의 범위가 넓으며 굴절률이 높다는 장점을 가지고 있다[7]. 산화 알루미늄은 산화물 중에서 단위 부피당 해리에너지가 가장 커서 경도를 높이는 핵심 성분이다[8,9]. 산화 알루미늄 함량이 높은 유리는 산화물 유리 중 가장 높은 경도와 탄성계수를 나타내어 기계적 안정성을 가지는 것으로 보고되었다[10,11]. 알루미늄이 트 유리는 높은 화학적 내구성을 갖고 있고 형광효율 또한 우수하다[12]. 이러한 이유로 알루미늄이 트 유리는 광학유리에서 희토류 도펀트용 host matrix 로서 주목받고 있다.

최근 Gas levitation을 활용하여 개발된 glass는 알루미늄이 트 유리의 빠른 결정화와 제조가 어려운 단점을 보완해준다. Gas levitation 방식은 미리 분말 형태로 준비된 전구체를 상부에서 가스를 분사하여 공중에 부양시키고, 고출력 레이저를 조사하여 무용기 상태에서 직접 용융시키는 방식이다. 이 과정에서 시료가 용기 벽면과 접촉하지 않기 때문에 불순물 오염 및 벽면에서의 불균질 핵생성이 방지되며, 부양 가스의 흐름에 의해 시료가 빠르게 냉각됨으로써, 과냉각이 촉진되어 결정화가 억제되고 유리 형성이 용이해진다. 특히 유리 형성 능력이 낮은 조성의 시료에서도 유리화에 성공할 가능성을 높여주는 방법으로, 고내화도 금속산화물 유리 연구에 효과적인 실험법으로 평가되고 있다. 이 방법은 유리샘플을 가스로 띄운 후에 CO₂ 레이저를 활용해서 용융시키는 방법으로, 불균질한 핵 생성을 방지하고 과냉각을 촉진시켜 유리 형성 능력이 낮은 물질을 효과적으로 유리화 하여 벌크 형태로 만들 수 있다. La₂O₃-Al₂O₃ 및 Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리는 이 방법으로 유리화 되어 뛰어난 발광성, 기계적 강도, 광학적 특성을 보여주었다[13,14].

본 연구에서는 La₂O₃-Al₂O₃ 및 Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리 system에서 Eu₂O₃ 및 Er₂O₃ 를 도핑하여 새로운 알루미늄이 트 유리의 유리화 영역을 알아보고 발광특성을 확인하였다. 또한 ⁵D₀ → ⁷F₂ 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광의 세기가 최대가 되는 Eu³⁺ 이온의 농도비를 결정하였다.

2. 실험 방법

La₂O₃-Al₂O₃ 및 Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Eu₂O₃ 및 Er₂O₃를 도핑한 새로운 알루미늄이 트 유리 제조를 위해 La₂O₃, Y₂O₃, Al₂O₃, Eu₂O₃, Er₂O₃ 원료를 사용하였다. Table 1에 표기된 화학 조성의 유리는 Containerless processing 법을 통해 합성하였다. 기존연구에 의하면 R₂O₃-Al₂O₃ 시스템의 유리 형성 영역은 희토류의 양이

Table 1
Eu₂O₃ and Er₂O₃ doped Al₂O₃-La₂O₃ and Al₂O₃-Y₂O₃ aluminate glasses

Glass name	Al ₂ O ₃ (mol%)	La ₂ O ₃ (mol%)	Y ₂ O ₃ (mol%)	Eu ₂ O ₃ (mol%)	Er ₂ O ₃ (mol%)
ALeu0.5	67.66	31.84		0.5	
ALeu1	67.32	31.68		1	
ALeu1.5	66.98	31.52		1.5	
ALeu2	66.64	31.36		2	
ALer0.5	67.66	31.84			0.5
ALer1	67.32	31.68			1
ALer1.5	66.98	31.52			1.5
ALer2	66.64	31.36			2
AYeu0.5	67.66		31.84		
AYeu1	67.32		31.68	0.5	
AYeu1.5	66.98		31.52	1	
AYeu2	66.64		31.36	1.5	
AYer0.5	67.66		31.84	2	0.5
AYer1	67.32		31.68		1
AYer1.5	66.98		31.52		1.5
AYer2	66.64		31.36		2

온의 이온 반경이 감소함에 따라서 더 좁아지는 것으로 보고되었다. 대부분의 희토류 알루미늄이 트 유리는 희토류 산화물 조성이 32 mol%로 얻어졌다. 따라서 본 연구에서는 32R₂O₃-68Al₂O₃ 조성의 유리를 선택했다. 유리 matrix에 따른 차이에 따른 형광 특성 분석을 위해 68Al₂O₃-32Y₂O₃(mol%)와 68Al₂O₃-32La₂O₃(mol%)에 Eu₂O₃와 Er₂O₃를 도핑하였다. 유리 조성의 원료로 만든 혼합물을 15~20 MPa의 압력을 가하여 펠렛으로 압축하고 400°C에서 16시간 동안 소결하였다. 이후 펠렛을 분쇄하여 약 10~20 mg 조각을 Aerodynamic levitation furnace에서 용융하였다. N₂ 가스를 이용하여 부양시킨 후 CO₂ 레이저로 용융되었다. 레이저 출력은 약 20~30 W로 진행되었고 1,200~1,500°C 범위 내에서 샘플을 용융하였다. 유리 형성은 X-Ray 회절분석기(X-ray Diffraction, XRD)로 수행하였다. X선 회절(XRD) 분석은 Cu-Kα 방사선($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)을 이용한 Bruker D8 Advance diffractometer를 사용하여 수행되었다. 측정은 2 θ 범위 10°~80°에서 진행되었으며, 스텝 크기는 0.02°로 설정하였다. 시료는 분말 상태와 펠릿 형태 모두로 측정되었고, 결정성 변화 및 결정 구조를 확인하기 위해 각 시료의 회절 패턴을 비교 분석하였다. 밀도는 Gas pycnometer(Micromeritics, Accupyc II 1340)를 사용하여 측정하였다. 원자 충전 밀도 C_g는 공식을 사용하여 실험 밀도로부터 추정되었다. Eu³⁺ 및 Er³⁺ 이온의 발광 특성은 분광형광광도계(Edinburgh Instruments FLS1000)를 사용하여 측정하였다. Eu³⁺는 393 nm, Er³⁺는 378 nm에서 여기하였으며, 방출 스펙트럼은 450~750 nm 범위에서 수집되었다. 여기광원은 450 W 제논 램프(Xe lamp)를 사용하였고, 시료는 고체 상태로 분석되었다.

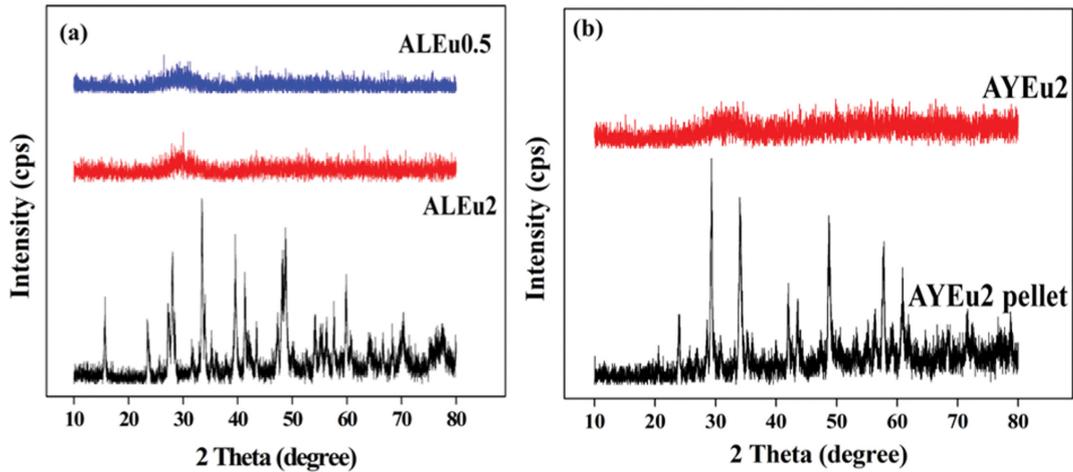


Fig. 1. XRD results of glass samples: (a) ALE glasses and (b) AYE glass.

3. 결과 및 고찰

유리 샘플의 비정질 상태를 XRD로 분석했다. 유리 시편은 모두 투명하고 비정질 상태인 것을 Fig. 1에서 확인하였다.

Table 2는 밀도 및 원자충진밀도 결과를 나타내었다. 유리의 원자충진밀도(C_g)[15]는 다음 공식을 사용하여 유리 몰 당 모든 이온의 총 이론 부피와 유리의 유효 몰 부피로부터 얻어졌다. 여기서 M_v 는 몰부피, X_i 는 산화물 i 의 몰분율, V_i 는 산화물 i 의 이온 부피이다.

$$C_g = \frac{\sum_i X_i V_i N}{M_v} \quad (1)$$

여기서 N 은 아보가드로 수(Avogadro's number)라고

Table 2
Eu₂O₃ and Er₂O₃ doped Al₂O₃-La₂O₃ and Al₂O₃-Y₂O₃ new binary aluminate glasses' atomic packing density

Glass name	ρ	C_g
ALEu0.5	4.35	0.575
ALEu1	4.36	0.572
ALEu1.5	4.36	0.570
ALEu2	4.38	0.671
ALEr0.5	4.38	0.575
ALEr1	4.39	0.572
ALEr1.5	4.39	0.570
ALEr2	4.43	0.671
AYEu0.5	4.01	0.575
AYEu1	4.01	0.572
AYEu1.5	4.02	0.570
AYEu2	4.04	0.671
AYEr0.5	4.04	0.575
AYEr1	4.05	0.572
AYEr1.5	4.05	0.570
AYEr2	4.09	0.671

불리는 상수이고, V_i 는 원소 i 의 이온 부피이다. V_i 는 다음 방정식을 사용하여 Shannon[16]이 제공한 이온반경 (r)을 통해 계산할 수 있다.

$$V_i = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2)$$

Al₂O₃-La₂O₃ 계 유리가 Al₂O₃-Y₂O₃ 계 유리과 유사한 원자충진밀도 값을 보였다. 이는 La³⁺의 이온 반지름은 약 1.06 Å이고, Y³⁺의 이온 반지름은 약 0.90 Å로 La³⁺의 비슷한 이온 반지름을 가지고 있기 때문이다.

Figure 2는 Eu₂O₃를 도핑한 유리의 PL(photoluminescence) 분석 결과이다. 선행 연구 분석을 통해, Eu³⁺ 이온의 여기 파장을 393 nm로 선정할 수 있었다. Figure 2(a)는 La₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Eu₂O₃를 도핑한 PL 결과이고, Fig. 2(b)는 Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Eu₂O₃를 도핑한 PL의 결과이다. 각 PL 스펙트럼은 총 5개의 전이 ⁵D₀-⁷F₀(576 nm), ⁵D₀-⁷F₁(590 nm), ⁵D₀-⁷F₂(612 nm), ⁵D₀-⁷F₃(655 nm), ⁵D₀-⁷F₄(705 nm)를 나타내었다. 선행연구에 의하면 Eu³⁺에 의한 ⁵D₀-⁷F₂ 전이 때문에 형광성질을 나타내고 612 nm 파장의 적색광을 방출한다고 알려져 있다 [17]. Figure 2(a)에 의하면, Eu₂O₃의 함량이 1 mol% 이상 부터 피크의 발광 세기가 점점 약해졌으며 이는 농도 소광(concentration quenching)에 의한 결과로 판단된다. 농도 소광은 희토류 이온(Eu³⁺) 간의 평균 거리 감소로 인해, 여기된 이온 사이에 에너지 전달(energy transfer)이 촉진되고, 이 에너지가 방사성 천이(radiative transition) 대신 비방사성 경로(non-radiative paths)로 소산되면서 발광 효율이 감소하는 현상이다. 특히 Eu³⁺의 경우, 다중 극자 상호작용(multipolar interaction) 또는 교차완화(cross-relaxation)와 같은 비방사성 에너지 전달 메커니즘이 발현될 수 있으며, 이는 고농도에서 급격한 발광 세기 저하를 유도한다. 이러한 현상은 본 연구의 결과에

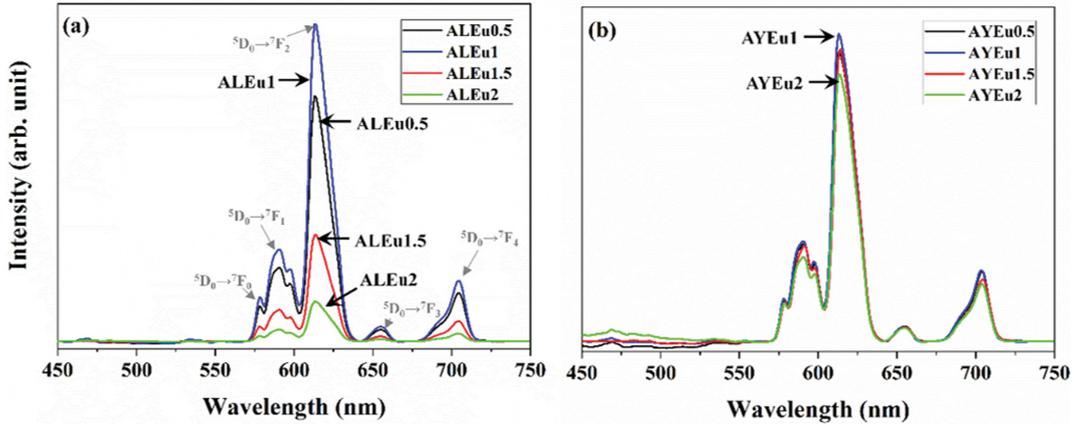


Fig. 2. (a) Fluorescence of Eu_2O_3 doped $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass and (b) Fluorescence of Eu_2O_3 doped $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass.

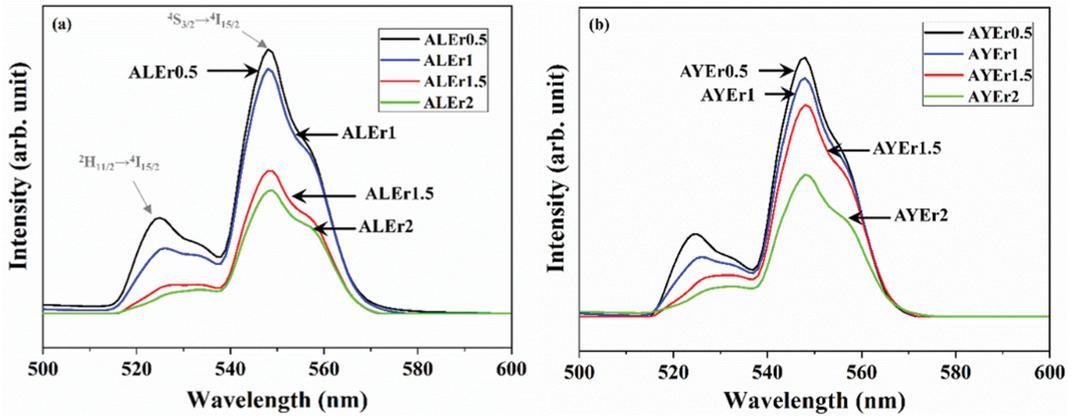


Fig. 3. (a) Fluorescence of Er_2O_3 doped $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass and (b) Fluorescence of Er_2O_3 doped $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass.

서도 동일하게 관찰되며, Eu_2O_3 1 mol% 이하에서는 발광 효율이 증가하지만, 그 이상에서는 이온 간 에너지 전달에 의한 비방사성 손실이 우세해져 발광 세기가 저하된다. 한편, Fig. 2(b)에서는 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리에서는 1 mol% 이상의 Eu_2O_3 를 도핑 했을 때에도 피크의 발광 세기감소가 나타나지 않았다.

Figure 3은 Er_2O_3 를 도핑한 유리의 PL(photoluminescence) 분석 결과이다. 선행 연구 분석을 통해, Er^{3+} 이온의 여기 파장을 378 nm로 선정할 수 있었다. Figure 3(a)는 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리에서 Er_2O_3 를 도핑한 PL 결과이고, Fig. 3(b)는 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리에서 Er_2O_3 를 도핑한 PL의 결과이다. 각 PL 스펙트럼은 ${}^2\text{H}_{11/2}\text{-}{}^4\text{I}_{15/2}$ (524 nm), ${}^4\text{S}_{3/2}\text{-}{}^4\text{I}_{15/2}$ (547 nm) 전이를 나타내었다. Figure 3(a)에 의하면, ALER 유리에서 Er_2O_3 의 함량이 1 mol%를 초과했을 때 피크의 발광 세기가 감소하는 것을 확인하였다. Figure 3(b)에서는 AYER 유리에서는 ALER 유리에 비해 피크 강도의 감소는 줄었으나 Er_2O_3 의 함량이 늘어날수록 피크 발광 세기가 감소하는 것을 볼 수 있다.

Eu^{3+} 이온을 둘러싼 단거리 효과(covalency)와 분극

(polarization)을 알기 위해 유리에 대한 발광비율 또는 비대칭비율이라는 매개변수를 계산한다[17,18]. 리간드 원자의 결정 field에 크게 영향을 받는 IED(Intensity of Electric Dipole transition) 전이의 방출 강도 대 IMD(Intensity of Magnetic Dipole transition) 전이의 방출 강도 비율은 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$R = I_e({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2) / I_m({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1) \quad (3)$$

${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 는 전기 쌍극자 전이이고 Eu^{3+} 주변 환경에 민감하다. ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 는 자기 쌍극자 전이이며 Eu^{3+} 주변의 환경에 따라 거의 변하지 않는다. R 값이 작으면 일반적으로 Eu^{3+} 이온이 대칭성이 높다는 것이고, R 값이 크면 Eu^{3+} 이온 주변에 대칭성이 낮고 Eu-O 의 공유성이 높다는 것을 나타낸다. Figure 4(a), (b)는 각각 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리의 R 값과 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 계 유리의 R 값의 결과이다. R 값은 두 조성에서 모두 상대적으로 높은 값을 보였다. Eu-O 의 공유성이 높고 Eu^{3+} 이온 주변의 대칭성이 낮음을 의미한다. Figure 4(a)의 R 값은 3.31에서 3.45로 2.97에서 3.18 사이의 값을 가지는 Fig.

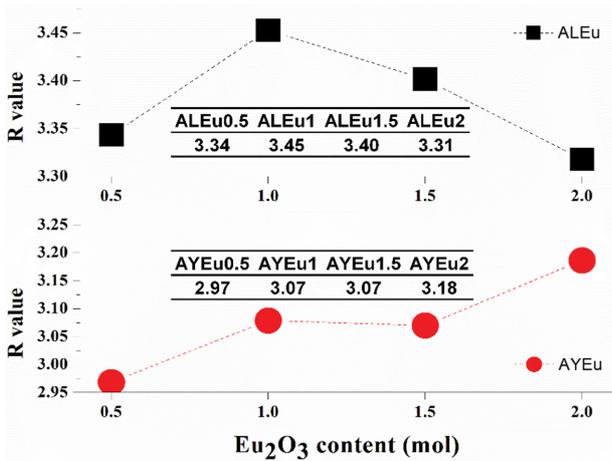


Fig. 4. The luminescence intensity ratio (R) values of (a) Eu₂O₃ doped La₂O₃-Al₂O₃ glass and (b) Eu₂O₃ doped Y₂O₃-Al₂O₃ glass.

4(b)에 비해 더 높은 값을 보였는데, 이는 ALEu 유리의 공유성과 비대칭성이 더 높다는 것을 알 수 있다. 또한 PL 분석결과, 농도 소광 현상으로 인한 피크 발광 세기가 감소하는 결과와 Fig. 4(a)에서 Eu-O의 공유성이 낮아짐에 따라 R 값이 감소하는 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

Figure 5(a)는 ALEu 계와 AYEu 계 유리들의 Eu₂O₃ 함량에 따른 PL intensity의 관계를 나타냈고, Fig. 5(b)는 ALEr 계와 AYEr 계 유리들의 Er₂O₃ 함량에 따른 PL intensity의 관계를 나타낸다. Figure 5(a)에서 Eu₂O₃의 농도가 1 mol%일 때 최고 발광 강도를 보였고 그 이상인 1.5 mol% 및 2 mol%에서는 발광 강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 농도소광현상(concentration quenching)으로 설명할 수 있다. 농도소광은 모체의 양이온 자리에 치환되지 못하고 계면 등의 적절하지 못한 위치에서 석출되어서 발광효율이 저하되는 현상이다. La³⁺ 이온 반경은 1.032 Å이고, Y³⁺ 이온 반경은 0.9 Å이며 Eu³⁺(0.947 Å) 이온반경과 각각 0.085 Å와 0.047 Å

차이가 나는데, 이온 반경의 차이가 적은 Y³⁺가 La³⁺에 비해 Eu³⁺의 octahedral site를 1 mol% 함량까지 쉽게 차지한다. Figure 5(b) 또한 이온 반경의 차이로 인한 농도소광현상을 볼 수 있다. Er³⁺의 이온 반경은 0.89 Å 이고, La³⁺와 0.142 Å, Y³⁺와 0.01 Å 차이를 보인다. 이는 ALEr 유리에 비해 AYEr의 유리가 낮은 농도소광현상을 보이는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 보고되지 않았던 Eu₂O₃ 및 Er₂O₃가 도핑된 새로운 알루미늄이트 유리의 유리화 영역을 확인하고 발광 특성을 확인하였다. 68Al₂O₃-32Y₂O₃ 및 68Al₂O₃-32La₂O₃ 유리에 Eu₂O₃ 및 Er₂O₃를 0.5, 1, 1.5, 2 mol% 도핑된 유리를 containerless processing 법을 활용하여 성공적으로 합성하였다. La₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Eu₂O₃를 1 mol%를 초과해서 도핑하면 농도 소광 현상으로 인해 피크가 감소하는 경향을 보였고, Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Eu₂O₃를 도핑 했을 때 피크의 발광 세기 차이는 나타나지 않았다. La₂O₃-Al₂O₃ 계 유리에서 Er₂O₃를 도핑한 결과는 Eu₂O₃를 도핑한 결과와 일치하게 1 mol% 초과 시 피크가 감소하는 경향을 보였고, AYEr 유리에서는 ALEr 유리에 비해 피크 강도의 감소는 줄었으나 Er₂O₃의 함량이 늘어날수록 피크 발광 세기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. PL intensity 결과, Eu₂O₃의 농도가 1 mol%일 때 최고 발광 강도를 보였고 그 이상인 1.5 mol% 및 2 mol%에서는 발광 강도가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 ALEr 유리에 비해 AYEr의 유리가 낮은 농도소광현상을 보였고 Eu³⁺의 특성으로 인해 AYEr 유리와 ALEr 유리 둘 다 AYEu 유리와 ALEu 유리보다 quenching이 쉽게 발생하는 것을 확인하였다. 본 실험에서 La₂O₃-Al₂O₃ 및 Y₂O₃-Al₂O₃ 계 유리 system에서 Eu₂O₃ 및 Er₂O₃를 도핑한 새로운 알루미늄

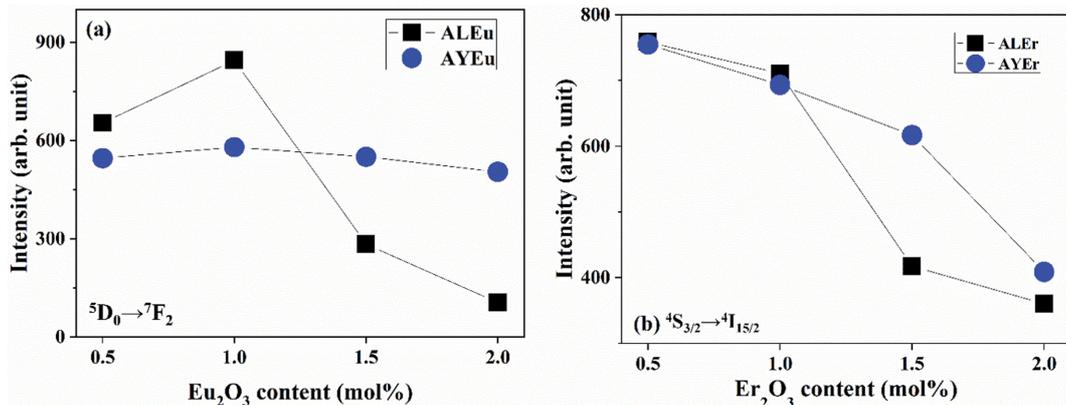


Fig. 5. PL intensity of (a) Eu₂O₃ doped glass samples and (b) Er₂O₃ doped glass samples.

이트 유리 조성 개발을 성공하였고 발광특성을 확인하여 추후 형광유리 분야에 폭 넓게 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] T. Okura, Y. Nojima, K. Kawada and Y.K. Yamashita, "Photoluminescence properties of rare-earth ion-doped $\text{Na}_3\text{YSi}_4\text{O}_{12}$ -based glass ceramics", *Inter. Ceram.* 47 (2021) 1940.
- [2] G. Hou, C. Zhang, W. Fu, G. Li, J. Xia and Y. Ping, "Improvement of mechanical strength in $\text{Y}^{3+}/\text{La}^{3+}$ co-doped silicate glasses for display screen", *Inter. Ceram.* 45 (2019) 11850.
- [3] M.H. Imanieh, B.E. Yekta, V. Marghussian, S. Shakhshi and I.R. Martín, "Crystallization of nano calcium fluoride in $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system", *Sol. Stat. Sci.* 17 (2013) 76.
- [4] Z. Hu, Y. Wang, F. Bao and W. Luo, "Crystallization behavior and microstructure investigations on LaF_3 containing oxyfluoride glass ceramics", *J. Non-Cryst. Sol.* 351 (2005) 722.
- [5] M. Shoaib, G. Rooh, R. Rajaramakrishna, N. Chanthima, N. Kiwsakunkran, H.J. Kim, J. Kaewkhao and S. Tuscharoen, "Comparative study of Sm^{3+} ions doped phosphate based oxide and oxy-fluoride glasses for solid state lighting applications", *J. R. Ceram.* 37 (2019) 374.
- [6] J.K.R. Weber, J.G. Abadie, T.S. Key, K. Hiera and P.C. Nordine, "Synthesis and optical properties of rare-earth-aluminum oxide glasses", *J. Am. Ceram. Soc.* 85 (2002) 1309.
- [7] A. Rosenflanz, M. Frey, B. Endres, T. Anderson, E. Richards and C. Schardt, "Bulk glasses and ultrahard nanoceramics based on alumina and rare earth oxides", *Nature.* 430 (2004) 761.
- [8] S. Inaba, S. Todaka and Y. Ohta, "Equation for estimating the Young's modulus, shear modulus and Vickers hardness of aluminosilicate glasses", *J. Jpn. Inst. Met.* 64 (2004) 177.
- [9] J. Johnson, R. Weber and M. Grimsditch, "Thermal and mechanical properties of rare earth aluminate and low-silica aluminosilicate optical glasses", *J. Non-Cryst. Solids.* 351 (2005) 650.
- [10] B. Stevansson and M. Edén, "Structural rationalization of the microhardness trends of rare earth aluminosilicate glasses: interplay between the Re^{3+} field-strength and the aluminium coordinations", *J. Non-Cryst Solids.* 378 (2013) 163.
- [11] B. Pahari, S. Iftekhhar, A. Jaworski, K. Okhotnikov, K. Jansson and B. Stevansson, "Composition property-structure correlations of scandium aluminosilicate glasses revealed by multinuclear ^{45}Sc , ^{27}Al , and ^{29}Si solid-state NMR", *J. Am. Ceram. Soc.* 95 (2012) 2545.
- [12] G.A. Rosales-Sosa, A. Masuno, Y. Higo, H. Inoue, Y. Yanaba and T. Mizoguchi, "High elastic moduli of a $54\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}46\text{Ta}_2\text{O}_5$ glass fabricated via containerless processing", *Sci. Rep.* 5 (2015) 15233.
- [13] W. Chunxu, Z. Mingjie, C. Yuanzhi, W. Yan, L. Junchang, H. Xiangxin, W. Yuhang, W. Lei, H. Shuqiang, L. Zhen, C. Zhenqiang and L. Zhaohui, "Synthesis and study of novel erbium-doped $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ glasses for on-chip waveguide amplifier", *J. Alloys Compd.* 899 (2022) 162915.
- [14] M.C. Wilding, M. Wilson, C.J. Benmore, J.K.R. Weber and P.F. McMillan, "Structural changes in supercooled $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ liquids", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 15 (2013) 8589.
- [15] K. Januchta, T. To and M.S. Bodker, "Elasticity, hardness, and fracture toughness of sodium aluminoborosilicate glasses", *J. Am. Ceram. Soc.* 102 (2019) 4520.
- [16] R.D. Shannon, "Revised Effective ionic-radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides", *Acta Cryst. Sec. A* 32 (1976) 751.
- [17] R. Reisfeld, E. Zigansky and M. Gaft, "Europium probe for estimation of site symmetry in glass films, glasses and crystals", *Mol. Phys.* 102 (2004) 1319.
- [18] A.A. Reddy, S. Das, S. Ahmad, S.S. Babu, J.M. Ferreira and G.V. Prakash, "Influence of the annealing temperatures on the photoluminescence of $\text{KCaBO}_3\text{: Eu}^{3+}$ phosphor", *RSC Adv.* 2 (2012) 8768.