

SAO 압광 소재의 발광 현상 및 그 기구에 대한 정량적 해석

티밀시나수만¹ · 이창준² · 장일영³ · 김지석[#]

Quantitative Analysis of Mechano-luminescence and Its Mechanism in SAO

S. Timilsina, C. J. Lee, I. Y. Jang, J. S. Kim

(Received March 20, 2012 / Revised June 19, 2012 / Accepted June 20, 2012)

Abstract

The mechanism for mechano-luminescence(ML) in SAO phosphor was investigated quantitatively by measuring the emission intensity under three different tensile conditions. It was found that the ML of SAO was strongly dependent on the dynamic loading rate rather than by the applied load itself. The mechano-luminescent emission in SAO was evaluated based on the trap-releasing process. It was found that the shape of the ML curve in the transient regime obtained from the rate equation has good agreement with the experimental data.

Key Words : Mechano-luminescence(ML), Trap-releasing process, SAO

1. 서 론

SrAl₂O₄:Eu,Dy(SAO) 소재의 경우 녹색 형광 (Green Phosphor; GP), 장-잔광(Long Phosphorescent; LP), 열여기-형광(Thermo-luminescent; TL), 압광 특성(Mechano-luminescence; ML) 등 다양한 물성으로 인하여 다수의 응용분야에서 많은 주목을 받아왔다[1~8]. 특히, 동 재료의 압광 특성은 외부에서 가해진 응력수준에 비례하여 가시적인 발광특성을 나타냄으로써, 극히 최근에 들어서야 응력상태 표시기로서의 가능성에 기초하여 본격적인 연구가 시작된 분야이다[1~3]. 이러한 압광 재료 개발의 최종 목표는 형광 페인트나 박막 형태로 제조되어, 응력을 받고 있는 소재의 표면에 적용됨으로써 실시간으로 가해지는 응력과 변형의 정도 및

그 변화를 가시적으로 표시 하고자 하는 것이다 [9~14]. 상술한 목적 하에 최근 5-6 년 동안 압광 박막 및 압광 페인트의 개발과 이를 적용한 세라믹 파괴 관련 연구 분야에서는 괄목할 만한 진전들이 보고되어 왔다[15~20]. 그러나 이러한 압광 관련 응용 기술의 급격한 발전에도 불구하고 여전히 압광 소재의 발광 기구 자체에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 이는 압광 기구 규명 관련 연구의 자체적인 어려움과 함께, 보다 향상된 성능의 압광 소재 및 압광 복합 소재 개발에 관련 연구가 집중되는 경향이 맞물려 발생된 현상으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 응용 연구에 더하여 상대적으로 주목 받지 못한 압광 기구 규명 관련 연구들을 활성화 시키기 위하여, 보다 폭넓은

1. 경북대학교 나노소재공학부

2. 경북대학교 건축공학과

3. 금오공과대학교 토목공학과

교신저자: 경북대학교 나노소재공학부,

E-mail: jisikkim@knu.ac.kr

범위의 하중 및 하중속도 조건 하에서 발광 현상을 정량적으로 측정하고, 이를 수학적 예측 모델을 기반으로 하여 거시적인 관점에서 발광 기구와 연관하여 예측할 수 있는 이론적/실험적 기반을 동시에 확립하고자 하였다.

2. 발광 기구

본 실험에 사용되어온 SAO 소재의 경우 응력 또는 변형에 의해 유발된 트랩 방출 과정이 발광 기구의 해석에 주로 사용되어 왔으며, 그림 1에 이러한 압광 기구의 전체 모식도를 기술하였다[21, 22]. 동 그림에서 압광 현상에 있어 가장 주요한 활성인자인 Eu^{2+} 이온들은 통상 외부 에너지의 공급(UV 램프 조사 등)에 의해 광-여기 현상을 일으키며 충만대로의 홀 방출을 일으키게 된다. 방출된 홀은 Dy^{3+} 이온들이 충만대(valence band) 직 상의 홀 트랩 에너지 준위를 구성하게 되므로 결과적으로 Dy^{4+} 에 의해 트랩 될 수 밖에 없다. 이때 하중이 외부에서 부가되면, 트랩된 홀은 그림 1의 터널링 및 가전자대를 경유하는 두 가지 경로에 의해 방출되어 Eu^{+} 활성인자와 재결합 함으로써, Eu^{2+} 여기 상태를 만들게 되며, 그 즉시 즉각적인 기저 상태로의 전환에 의해 압광 현상을 유발시키게 된다[21].

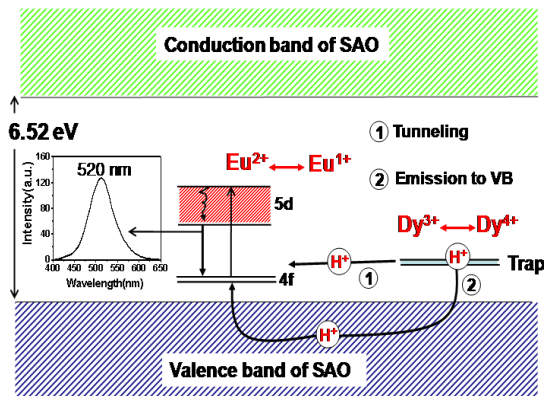


Fig. 1 Schematic diagram showing the trap-releasing (recombination) process for ML

3. 실험방법

현재까지 압광 현상과 관련된 대부분의 연구들은 괴 또는 구형의 압광 재료들을 직접 곱힘 또

는 압축시험 하는 방법으로 응력장 분포를 관찰하려는 수준에 머무르고 있으며, 그 결과 시험장치와 시료간 접촉 영역에서의 과도한 발광량으로 인해 실제 응력이 집중되는 시편 중심부에서의 휘도 분포를 정확히 관찰하는 것이 불가능하여 왔음은 주지의 사실이다[23~31]. 따라서 본 연구에서는 우선 실험적인 측면에서 인장시편 형태로 제작된 압광 재료 시편을 이용함으로써, 게이지 부위에서의 보다 정확한 압광 현상 및 발광 분포를 가시화하고 이를 정량적으로 측정하는 기술적 진보를 이루고자 하였다.

상술한 기술적 목적 하에, 본 연구에서는 압광 인장 시편의 준비를 위해 에폭시 레진형 투명 페인트에 중량비 10%의 SAO 분말을 혼합한 후, 특수 코팅된 유리 컨테이너에 주입하여 관형으로 소성하였다. 제조된 관형 시료는 2 차 기계 가공을 통하여 게이지 길이 12mm, 폭 및 두께 4mm의 인장시편으로 최종 제조되었다. 이후 인장 시편은 본격적인 시험을 위해 만능 시험기의 하중 부가 장치에 장착된 후, 응력에 의한 발광량만을 측정하기 위하여 암실 조건에서 365nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간에 걸친 여기 (excitation) 및 1 분간의 장 잔광(long phosphorescence) 완화 처리를 거쳤다. 실제 인장 시험은 각기 다른 3 종류의 고정된 크로스 헤드 속도 즉, 일정 초기변형속도 (Constant initial strain rates = 2×10^{-2} , 4×10^{-2} , and $2 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$) 조건 하에서 실시 되었으며, 이때 각 하중 부가 단계에서의 압광 현상 및 발광량 정량 측정을 위하여 인장 시험기에 고속 디지털 카메라 및 광량 측정장비 (photomultiplier tube)를 추가로 설치하였다. 특히 인장시험기의 로드셀로부터 측정된 하중 값과 각 하중 값에서의 게이지부 압광 현상 및 발광량 연동을 위해 다채널 데이터 링크 (MCDL) 장치를 이용함으로써 하중, 발광량 및 발광 디지털 영상간의 데이터 동기화를 가능케 하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 2 는 각기 다른 3 종류의 일정 초기 변형 속도(Constant initial strain rates = 2×10^{-2} , 4×10^{-2} , and $2 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$) 또는 하중 부가 속도 조건 하에서 고속 카메라를 이용하여 실험적으로 측정된 부가 하중과 압광 발광 강도 간의 직접적인 상관관계를 연속적으로 기록한 일련의 압광 사진을 이용

하여 가지적으로 보여 주는 결과이다. 동 그림의 발광사진 결과로부터 알 수 있듯이 압광 발광량이 부가 하중에 비례하여 증가됨을 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나 주요한 점은 인장시편의 변형속도 즉, 하중 부가 속도가 증가됨에 따라 발광량이 더욱 두드러지게 증가되었다는 점이다.

상술한 결과들을 보다 정량적으로 살펴 보기 위하여, 본 연구에서는 상기의 3 가지 변형속도 또는 하중 부가 속도 조건 하에서 광량 측정장비를 이용하여 부가 하중과 압광 발광 강도 간의 직접적인 상관관계를 정밀 측정하였다. 그림 3 은 실험적으로 측정된 부가 하중 변화에 따른 발광량 곡선으로써 압광 사진 관독 결과와 동일하게 부가 응력 및 응력 속도에 비례하여 발광 강도가 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 실험결과로부터 알 수 있듯이 하중과 압광 발광량 사이에는 단순 직선 관계가 성립하지 않는다는 점을 분명하게 관찰 할 수 있다. 또한, 변형속도 또는 하중속도와 압광 발광량과의 상관관계도 일견 하중속도의 증가에 따라 직선적으로 발광량이 증가되는 것처럼 보이나, 실험 조건에서 살펴 볼 수 있듯이 고정된 크로스 헤드 속도 조건하에서도 변형속도 또는 하중 부가 속도가 일정한 상수가 아니므로, 실제 하중 부가 속도는 그림 3 의 실험 결과로부터 정교한 연산을 거친 후에 계산된 결과를 고려해 볼 때, 완전히 직선적으로 비례하지는 않는 것으로 판단되었다. 따라서 상술한 내용을 모두 고려하여, 하중 및 하중 속도와 발광 강도 사이에 상관관계를 정리하면, 비록 직선적인 비례 특성을 나타내지는 못하였으나, 현상학적인 관점에서 볼 때 하중이 증가되거나 혹은 하중 속도가 빠를수록 높은 발광 강도를 나타내는 비례 관계가 성립된다고 할 수 있다.

그러나 상술한 현상학적 결과로부터 본 연구에서의 최종 목적인 압광 발광 모델을 기반으로 한 수학적 모델을 제시하고자 함에 있어 한가지 유의할 점은, 그림 1 의 압광 발광 모델의 경우 엄밀히 말해 압광 현상은 기구학적인 관점에서 정적 하중이 아닌 동적 하중 부가 속도(부가 하중의 변화 값) 에 의해서만 촉발 되어야 한다는 점이다 [21]. 특히 이러한 기본 가정이, 본 실험에서 측정된 하중 값과 압광 발광량 사이의 비례관계 및 하중 속도 값과 압광 발광량 사이의 비례관계 결과인 현상학적 결과와 부합되어야 함은 물론이다. 다만, 압광 현상이 탄성영역 내에서 발생되므로,

부가 하중은 트랩에 작용되는 응력 또는 변형량 모두에 비례하는 것으로 고려될 수 있으므로 하중 부가 속도 또한 변형 속도 및 응력 속도에 비례하는 것으로 규정할 수 있을 것이다[19~22].

따라서 상술한 가정하에 본 연구자들은 하중 속도에 따른 압광 현상의 시간적 변화를 정량적으로 밝히기 위하여 그림 1 의 트랩 방출 과정에 기반한 새로운 속도 식을 유도하였다. 기본적으로, 압광 현상을 기술할 수 있는 가장 적절한 수학적 모델은 속도 방정식 형태로 구성 되어야 하며, 특히 홀을 붙잡고 있는 트랩의 수가 감소됨에 따라, 여기 되어 빛을 방출하는 활성인자들이 증가 된다는 점은 명백하다. 따라서 압광 현상을 기술하는 속도 방정식은 다음과 같이 주어 질 수 있다 [19~22].

$$\frac{dN_{Eu^{2+}}}{dt} = M_T \frac{dP}{dt} N_{Eu^+} N_{Dy^{4+}} - C_P N_{Eu^{2+}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{Eu^{2+}}}{dt} = C_P N_{Eu^{2+}} \quad (2)$$

$$\frac{dN_{Eu^+}}{dt} = \frac{dN_{Dy^{4+}}}{dt} = -\frac{dN_{Dy^{3+}}}{dt} = -M_T \frac{dP}{dt} N_{Eu^+} N_{Dy^{4+}} \quad (3)$$

윗 식에서 $N_{Eu^{*2+}}$ 및 $N_{Eu^{2+}}$ 는 각각 2 가 Eu 활성인자의 여기 상태 및 기저 상태 밀도 수를, N_{Eu^+} 는 1 가 Eu 활성인자의 밀도 수를, $N_{Dy^{3+}}$ 와 $N_{Dy^{4+}}$ 는 3 가 및 4 가 Dy 이온의 밀도 수를 나타낸다. 또한, P 는 부가 하중을 나타내며, 전술 했듯이 탄성 영역에서의 압광 거동을 측정하였으므로 하중 P 는 응력 및 변형량에 거의 직선적으로 비례한다고 할 수 있다. 마지막으로, M_T 는 상호작용 혹은 재결합 항의 속성을 나타내는 상수이며, C_P 는 무 하중 상태에서 측정된 장 형광 속도 상수이다.

윗 식을 그림 1 의 기구학적인 관점과 연관지어 살펴볼 때 부가 하중 속도 dP/dt 는 인장 시험에 의해 측정된 하중-시간 곡선으로부터 미분 연산에 의해 얻어진 값들이며, 비선형 항은 홀을 붙잡은 트랩(4 가 Dy 이온들)과 이온화된 활성인자들(1 가 Eu 이온들) 사이의 상호작용을 의미하게 된다. 특히, 이러한 상호작용은 충만대로의 방출 또는 직접 터널링에 의한 재 결합으로 이어져 최종적인 발광 현상이 구현되는 것으로 볼 수 있다.

윗 식을 이용하여 본 연구에서는 기존의 접근

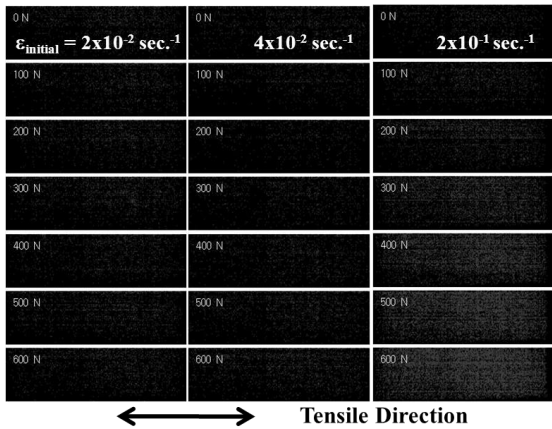


Fig. 2 Visualized profiles of applied load and ML intensity with three different initial constant strain rates

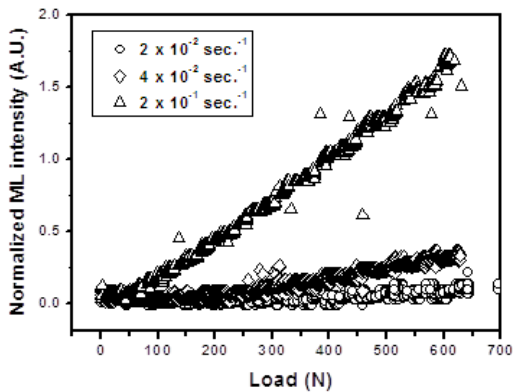


Fig. 3 Effects of applied load and loading rate on the Normalized ML intensity

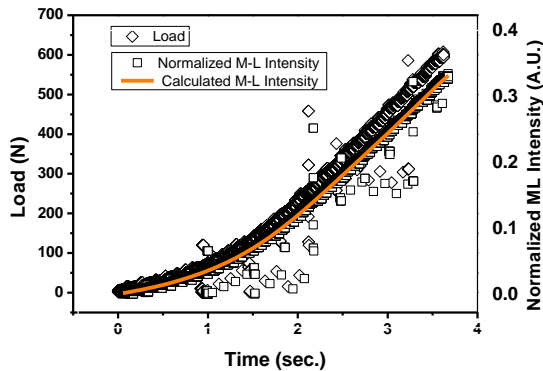


Fig. 4 Experimental and calculated ML intensities based on rate equation

법들과 달리 부가 하중 속도가 압광 속도 식의 수치 연산에 사용되었으므로, 이러한 하중 부가 속도의 포함은 발광 속도 식의 해석적 연산이 불가능하게 만든다[32, 33]. 따라서 이러한 계산상의 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 압광 현상을 기술하는 속도 방정식을 이용한 발광량 예측을 위해 잘 알려진 Runge-Kutta 법을 이용하였다[34, 35]. 이때, 실 연산에 사용된 초기 조건은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$t = 0 \text{ 에서}$$

$$N_{Eu}^{*2+} = 0, N_{Eu}^{2+} = (1-m)/2, N_{Eu}^{+} = m/2,$$

$$N_{Dy}^{3+} = (1-m)/2, N_{Dy}^{4+} = m/2 \text{ 이고,}$$

$$N_{Eu}^{*2+} + N_{Eu}^{2+} + N_{Eu}^{+} + N_{Dy}^{3+} + N_{Dy}^{4+} = 1 \text{ 이다.}$$

위 조건에서 m 은 홀을 붙잡은 트랩 및 이온화된 활성인자들의 초기 분율을, M_T 값은 초기 자외선 여기 강도, 자외선 노출 시간 및 완화 시간에 의존하는 값이다. 여기서 완화 시간은 자외선 조사 후 하중 부가 전까지 걸린 시간을 말한다.

그림 4 는 상술한 연산을 위해 사용된 시간에 따른 하중 변화 실측 곡선과, 계산 후 얻어진 압광 강도 값(N_{Eu}^{*2+})을 인장 시험 시 광도계로부터 측정된 압광 강도 결과와 함께 보여주고 있다. 두 예측 및 실측 결과에서 살펴 볼 수 있듯이, 아래로 볼록한 형태의 N_{Eu}^{*2+} 계산 곡선과 측정된 압광 강도 곡선이 비교적 잘 일치 함을 알 수 있다. 결론적으로, 본 연구에서는 SAO 소재의 압광 현상을 예측하기 위하여 부가 하중 속도의 함수로 비교적 간단한 형태의 속도식을 유도하였으나, 압광 발광강도에 대한 하중 부가 속도의 영향을 밝혀줄 최초의 유용한 수학적 모델임을 감안할 때, 이러한 수학적 접근방법이 향후 SAO 소재의 응용에 있어 발광 기구를 기반으로 하는 발광량과 응력과 정량적 상관관계에 대한 이해를 증진시켜 줄 것으로 생각한다.

5. 요약

- (1) SAO 소재의 발광 현상은 부가 하중의 변화 즉, 하중 속도에 의해 촉발 되었으며 동적 하중 변화에 의해 발광 강도가 변화 하였다. 이와는 달리 발광 현상에 있어 정적 하중의 역할은 제한적이었음을 알 수 있었다.
- (2) 압광 현상을 기술할 수 있는 가장 적절한

수학적 모델은 발광 강도가 하중 속도 향을 포함하는 형태의 속도 방정식으로 판단되며, 실험 결과 또한 계산된 속도 방정식 예측 결과와 잘 일치 하였다.

후 기

This research was supported by a grant(11 첨단도시 C02) from High-Tech Urban Development Program funded by Transport and Maritime Affairs of Korean government and was also supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2012-0001380 and 2011-0007236).

참 고 문 헌

- [1] A. J. Walton, 1977, Triboluminescence, *Adv. Phys.*, Vol. 26, No. 6, pp. 887~948.
- [2] B. T. Brady, G. A. Rowell, 1986, Laboratory Investigation of the Electrodynamics of Rock Fracture, *Nature*, Vol. 321, pp. 488~492.
- [3] J. I. Zink, G. E. Hardy, J. E. Sutton, 1976, Triboluminescence of Sugars, *J. Phys. Chem.*, Vol. 80, No. 3, pp. 248~249.
- [4] T. Shiota, K. Yasuda, Y. Matsuo, 2008, Correlation Between the Flexure Strength and the Photon Emission Intensity during Fracture on Single Crystal and Polycrystalline MgO, *Mater. Sci. Eng., B*, Vol. 148, No. 3, pp. 230~233.
- [5] T. Shiota, K. Yasuda, and Y. Matsuo, 2008, Dependence of the Particle Emission during the Fracture of Silica Glass on Its Mechanical Property, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 100, pp. 072041~072044.
- [6] C. G. Camara, J. V. Escobar, J. R. Hird, S. J. Putterman, 2008, Correlation Between Nanosecond X-ray Flashes and Stick-slip Friction in Peeling Tape, *Nature*, Vol. 455, pp. 1089~1092.
- [7] N. C. Eddingsaas, and K. S. Suslick, 2007, Plasma Characteristics of the Discharge Produced during Mechanoluminescence, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 99, No. 23, pp. 234301~234304.
- [8] C. N. Xu, M. Akiyama, P. Sun, T. Watanabe 1997, A Novel Approach to Electrochromism in WO₃ Thin Film using Piezoelectric Ceramics for Power Supply, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, No. 13, pp. 1639~1640.
- [9] C. N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, X. G. Zheng, 1999, Artificial Skin to Sense Mechanical Stress by Visible Light Emission, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 9, pp. 1236~1238.
- [10] H. Matsui, C. N. Xu, H. Tateyama, 2001, Stress-Stimulated Luminescence from ZnAl₂O₄:Mn, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 8, pp. 1068~1070.
- [11] Y. Liu C. N. Xu, 2003, Influence of Calcining Temperature on Photoluminescence and Triboluminescence of Europium-Doped Strontium Aluminate Particles Prepared by Sol-Gel Process, *J. Phys. Chem. B*, Vol. 107, No. 17, pp. 3991~3995.
- [12] C. N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, X. G. Zheng, 1999, Direct View of Stress Distribution in Solid by Mechanoluminescence, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 17, pp. 2414~2416.
- [13] H. Matsui, C. N. Xu, Y. Liu, H. Tateyama, J. Electrochem, 2004, Origin of Mechano Luminescence from Mn-activated ZnAl₂O₄: Triboelectricity-induced Electroluminescence, *Phys. Rev. B*, Vol. 69, No. 23, pp. 235109~2351097.
- [14] S. D. Jee, K. S. Choi, J. S. Kim, 2011, Luminescence Properties of (Sr_{0.95-x}-yMg_xY_y)Si₂O₇-yN_{2+y}:Eu²⁺+0.05 for Novel LED Conversion Phosphors, *Met. Mater. Int.*, Vol. 17, No. 4, pp. 655~660.
- [15] K. S. Sohn, S. Y. Seo, Y. N. Kwon, H. D. Park, 2002, Direct Observation of Crack Tip Stress Field Using the Mechanoluminescence of SrAl₂O₄: (Eu,Dy,Nd), *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 85, No. 3, pp. 712~714.
- [16] J. S. Kim, Y. N. Kwon, K. S. Sohn, 2003, Dynamic Visualization of Crack Propagation and Bridgingstress using the Mechano-luminescence of SrAl₂O₄:(Eu,Dy,Nd), *Acta Mater.*, Vol. 51, No. 20, pp. 6437~6442.
- [17] J. S. Kim, Y. N. Kwon, N. Shin, K. S. Sohn, 2005, Visualization of Fractures in Alumina Ceramics by Mechanoluminescence, *Acta Mater.*, Vol. 53, No. 16, pp. 4337~4343.
- [18] J. S. Kim, Y. N. Kwon, N. Shin, K. S. Sohn, 2007,

- Mechanoluminescent SrAl₂O₄:Eu,Dy Phosphor for use in Visualization of Quasi-dynamic Crack Propagation, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 24, pp. 241916-1~241916-3.
- [19] J. S. Kim, K. Kibble, Y. N. Kwon, K. S. Sohn, 2005, Rate-equation Model for the Loading-rate-dependent Mechanoluminescence of SrAl₂O₄:Eu²,Dy³⁺, *Opt. Lett.*, Vol. 34, No. 13, pp. 1915~1917.
- [20] J. S. Kim, 2011, Visualization of Crack Propagation and Fracture Transition in Bulk Metallic Glass using Mechano-luminescence, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 4, pp. 303~308.
- [21] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, Y. Murayama, 1996, A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness, SrAl₂O₄:Eu²,Dy³⁺, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, No. 8, pp. 2670~2673.
- [22] H. Yamamoto, T. Matsuzawa, 1997, Mechanism of Long Phosphorescence of SrAl₂O₄:Eu²+Dy³⁺ and CaAl₂O₄:Eu²+Nd³⁺, *J. Lumin.*, Vol. 72-74, pp. 287~289.
- [23] C. N. Xu, H. Yamada, X. Wang, X. G. Zheng, 2004, Strong Elasticoluminescence from Monoclinic-structure SrAl₂O₄, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, No. 16, pp. 3040~3042.
- [24] C. Li, Y. Adachi, Y. Imai, K. Nishikubo, C. N. Xu, 2007, Processing and Properties of SrAl₂O₄:Eu Nanoparticles Prepared via Polymer-Coated Precursor, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 154, No. 11, pp. J362~J364.
- [25] F. Clabau, X. Rocquefelte, S. Jobic, P. Deniard, M. H. Whangbo, A. Garcia, T. LeMercier, 2005, Mechanism of Phosphorescence Appropriate for the Long-Lasting Phosphors Eu²⁺-Doped SrAl₂O₄ with Codopants Dy³⁺ and B³⁺, *Chem. Mater.*, Vol. 17, No. 15, pp. 3904~3912.
- [26] F. Clabau, X. Rocquefelte, T. Le Mercier, P. Deniard, S. Jobic, M. H. Whangbo, 2006, Formulation of Phosphorescence Mechanisms in Inorganic Solids Based on a New Model of Detect Conglomeration, *Chem. Mater.*, Vol. 18, No. 14, pp. 3212~3022.
- [27] W. L. Medlin, 1961, Decay of Phosphorescence in CaCO₃, MgCO₃, CaMg(CO₃)₂, and CaSO₄, *Phys. Rev.*, Vol. 122, No. 3, pp. 837~842.
- [28] W. L. Medlin, 1961, Decay of Phosphorescence from a Distribution of Trapping Levels, *Phys. Rev.*, Vol. 123, No. 2, pp. 502~509.
- [29] P. Avouris, T. N. Morgan, 1981, A tunneling Model for the Decay of Luminescence in Inorganic Phosphors: The case of Zn₂SiO₄:Mn, *J. Chem. Phys.* Vol. 74, No. 8, pp. 4347~4355.
- [30] I. F. Chang, P. Thioulouse, 1982, Treatment of Thermostimulated Luminescence, Phosphorescence and Photostimulated Luminescence with a Tunneling Theory, *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 8, pp. 5873~5875.
- [31] P. Thioulouse, I. F. Chang, E. A. Giess, 1983, Comparative Study of Phosphorescence and Photostimulated Luminescence in Zinc Silicate Phosphors and Their Description by a Tunneling Mode, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 130, No. 10, pp. 2065~2071.
- [32] B. P. Chandra, J. I. Zink, 1980, Mechanical Characteristics and Mechanism of the Triboluminescence of Fluorescent Molecular Crystals, *J. Chem. Phys.*, Vol. 73, No. 12, pp. 5933~5941.
- [33] B. P. Chandra, 2008, Mechanoluminescence Induced by Elastic Deformation of Coloured Alkali Halide Crystals using Pressure Steps, *J. Lumin.*, Vol. 128, No. 7, pp. 1217~1224.
- [34] B. P. Chandra, S. K. Mahobia, P. Jha, R. K. Kuraria, S. R. Kuraria, R. N. Baghel S. Thaker, 2008, Transient Behaviour of the Mechanoluminescence Induced by Impulsive Deformation of Fluorescent and Phosphorescent Crystals, *J. Lumin.*, Vol. 128, No. 12, pp. 2038~2047.
- [35] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, Y. Murayama, 1996, A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness, SrAl₂O₄:Eu²,Dy³⁺, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, No. 8, pp. 2670~2673.