

# CaO와 TiO<sub>2</sub>분말로 합성된 CaTiO<sub>3</sub>:Pr형광체의 발광구조 해석과 음극선 발광특성

11-8-10

## The Luminescent Mechanism and Cathodoluminescence of CaTiO<sub>3</sub>:Pr Synthesized with CaO and TiO<sub>2</sub> Powders

박용규\*, 한정인\*, 박민기\*, 이인규\*\*, 김대현\*\*  
(Young-Kuy Park, Jeong-In Han, In-Kuy Lee\*, Dae-Hyun Kim\*\*)

### Abstract

In the present study, the luminescence characteristics and mechanism of CaTiO<sub>3</sub>:Pr phosphor were studied using disk specimens sintered at various temperatures and environment. A single-phase CaTiO<sub>3</sub> was synthesized by sintering above 1400°C and its crystal structure was found to be perovskite orthorhombic. A dominant peak around 360 nm and a broad peak around 395 nm were observed in the PLE(Photoluminescence Excitation) spectrum of CaTiO<sub>3</sub>:Pr. With fixed emission wavelength at 612 nm, the decay time of 360 nm excitation was found to be longer than that of 395 nm excitation. From this result, it is assumed that the free carrier excited to 360 nm is transferred to 395 nm energy level. Therefore, the decrease in 395 nm intensity observed in CaTiO<sub>3</sub>:Pr specimens sintered in Ar gas environment induced shorter decay time and improved CL luminescence.

**Key Words(중요용어)** : CaTiO<sub>3</sub>:Pr, luminescence(발광), decay time(발광소멸시간), energy transfer(에너지 전이)

### 1. 서 론

CRT와 동일한 구동 원리를 가지면서 무게와 부피가 작고 높은 색표현력과 저소비전력, 고효율의 장점을 갖는 Field Emission Display(FED)는 기존의 평판 디스플레이의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있다는 측면에서 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 상품화를 위해서는 해결되어야 할 몇 가지 과제를 안고 있다. 대표적인 과제로 고진공에서 구동되는 FED는 구동시 화학적 안정성과 표면 전하 축적(charge build-up)현상을 억제하기 위하여 양호한 전기 전도성을 갖는 형광체의 개발이 요구된다.<sup>1~3)</sup>

최근 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 기존의 황화물계 형광체가 아닌 산화물계 형광체에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 적색 발광 형광체로서 perovskite 구조의 CaTiO<sub>3</sub>:Pr 형광체는 화학적으로 안정한 산화물이고 넓은 에너지 band gap을 가지면서 전기 전도성이 우수하다고 알려져있다.<sup>4)</sup> 또한 612 nm 와 614.5 nm 에서의 sharp한 발광 스펙트럼을 나타내고 있어서 색순도가 우수하며 FED용 형광체로서 유망시되고 있다<sup>5~6)</sup> 그러나 CaTiO<sub>3</sub>:Pr 형광체의 PL 휘도등 발광특성에 관한 연구는 보고되었지만 발광 mechanism과 FED 형광체로의 적합성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 소성온도, 소성분위기를 달리하여 제작한 시료의 XRD, SEM, photoluminescence(PL) 스펙트럼, cathodoluminescence(CL) 스펙트럼, photoluminescence excitation(PLE) 스펙트럼과 decay time을 측정하였고, PLE 스펙트럼에서 나타나는 395 nm 준위의 여기 스펙트럼의 세기가 발광에 미치는 영향을 조사하여 발광 mechanism을 규명하고

\* : 전자부품종합기술연구소(KETI)  
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Fax: 0333-610-4126  
E-mail : parkyku@nuri.keti.re.kr)  
\*\* : 한국항공대학교 재료공학과  
1998년 3월 20일 접수, 1998년 6월 10일 심사완료

발광 특성을 향상시키고자 하였다.

## 2. 실험

CaO(99.99%)와 TiO<sub>2</sub>(99.998%)의 분말을 1:1의 비율로 측정하고, 0.15 mole%의 PrCl<sub>3</sub>(99.9%)를 첨가하여 30분 동안 혼합한 후 1 ton/cm<sup>2</sup>로 압력을 가하여 디스크 형태의 펠렛을 제조하였다. 제작된 펠렛은 전기로에서 900 °C까지는 5 °C/min, 그 이상의 온도에서는 2.5 °C/min으로 올려 각각 Ar 분위기와 air 분위기에서 1100 ~ 1400 °C의 온도로 10 시간 동안 소성한 후, 온도의 상승 cycle과 동일하게 상온까지 냉각하였다. 또한 동일한 방법으로 제작된 펠렛을 수정관에 넣고 펠렛내부의 습기를 제거하기 위해 200 °C로 가열하면서 10<sup>-6</sup> torr까지 배기한 후 수정관을 봉입하여 소성한 진공봉입 시료를 제조하였다. 이때 소성온도는 수정관의 내열 한계 온도인 1100 °C로 하였다. 제조된 시료의 결정구조는 XRD 방법으로 조사하였다. PL 스펙트럼은 최대출력이 300 W인 수은 램프를 광원으로 사용하였고, band pass 필터를 이용하여 365 nm 파장을 선택적으로 사용해서 측정하였다. Excitation 스펙트럼은 Edinburge사의 PLE(Photoluminescence Excitation) 장치로 측정하였고, 여기 광원으로 1000 W의 Xe램프를 사용하였다. decay time은 Edinburge사의 TRS(Time Resolved Spectrum) 장치를 사용하여 측정하였다. 이때 섬광 등의 펄스 폭이 80 ps에서 10 sec까지 가변될 수 있는 광원을 분광하여 여기 에너지원으로 사용하였다. CL 특성은 10<sup>-8</sup> torr 이하의 진공도를 유지하는 chamber에 시료를 넣고, 전압과 전류는 각각 200~4000 V과 0.2~1.8 mA의 범위내에서 가변하여 측정하였다. CL 휘도는 Minolta사의 Model CS-100을 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 논의

그림 1은 CaO와 TiO<sub>2</sub> 분말을 1:1로 혼합하고 소성온도를 1100 ~ 1400 °C범위에서 가변시키면서 air 분위기에서 10시간 동안 소성한 시료의 X-선 회절 무늬인데 1100 °C 및 1200 °C인 시료는 CaO, TiO<sub>2</sub> 및 CaTiO<sub>3</sub> 결정이 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 혼재된 CaO 결정은 (111), (200) (220)의 배향 peak로 나타났고 TiO<sub>2</sub> 결정은 (110), (101), (211)의 peak가 확인되었다. 1300 °C에서 소성한 시

료는 소량의 TiO<sub>2</sub> 결정이 혼재되어 나타났다. 한편, 1400 °C 이상의 온도에서 소성한 시료는 perovskite orthorhombic CaTiO<sub>3</sub>구조의 (200), (121), (042) 배향 peak가 관측되었다. XRD 패턴의 결과를 JCPDS 카드와 비교하여 CaTiO<sub>3</sub>에 해당하는 peak를 (↓)로 표시하였다. 그림 1의 결과로부터 CaO와 TiO<sub>2</sub>의 비율이 1:1로 혼합된 분말은 1400 °C 이상의 온도에서 소성할 경우 perovskite orthorhombic 구조의 CaTiO<sub>3</sub> 단일상을 갖는 시료로 형성됨을 알 수 있다. 또한 Ar 분위기에서 제조된 시료에 대한 소성온도에 따른 결정 구조의 변화는 air 분위기에서 제조된 시료와 동일한 경향을 나타내었다. 이로부터 CaO와 TiO<sub>2</sub>를 1:1로 혼합하여 1400 °C 이상에서 소성할 때 완전한 CaTiO<sub>3</sub> 화합물이 형성됨을 알 수 있다.

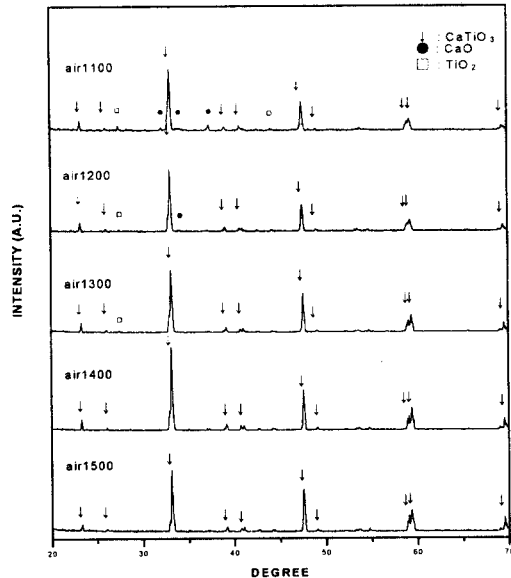


그림 1. Air 분위기에서 소성온도를 달리하여 제조된 CaTiO<sub>3</sub>:Pr 형광체의 X선 회절 무늬.

Fig. 1. XRD patterns of CaTiO<sub>3</sub>:Pr phosphors sintered at various temperatures in air.

그림 2는 CaO와 TiO<sub>2</sub>의 비율을 1:1로 혼합한 분말을 air 분위기내의 각각 1100, 1400 °C에서 소성한 시료에 대한 투과 전자현미경(SEM) 사진을 나타내며 Ar 분위기에서 소성한 시료도 이와 유사한 결과를 나타내는 것이 확인되었다. Air 분위기에서 1100 °C로 소성한 시료의 입자 크기는 약 5 μm 정도이고 1400 °C에서 소성한 시료의 입자 크기는 약

10  $\mu\text{m}$ 로서, 고온에서 소성된 시료의 입자의 크기가 좀 더 성장되어 있음을 볼 수 있다. 또한 1100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성된 시료는 한 개 입자의 표면에 작은 알갱이들이 부착된 형태의 불균일한 표면 상태를 보이는 반면, 1400  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성된 시료의 입자는 균일한 표면 특성을 보이고 있다. 이와 같은 결과로부터 1400  $^{\circ}\text{C}$  이상의 온도에서 소성되어 CaTiO<sub>3</sub> 단일상이 형성된 시료는 입자가 크고 표면이 균일한 성장 특성을 가진다는 사실을 알 수 있다.



(a)air1100(x 5000)



(b)air1400(x 5000)

그림 2. Air 분위기에서 제작된 CaTiO<sub>3</sub> 형광체의 전자현미경 사진 (a) 1100  $^{\circ}\text{C}$ , (b) 1400  $^{\circ}\text{C}$ .

Fig. 2. SEM micrograph of CaTiO<sub>3</sub> phosphors (a) sintered at 1100  $^{\circ}\text{C}$  in air (b) sintered at 1400  $^{\circ}\text{C}$  in air.

그림 3(a)는 air 분위기내의 1100 ~ 1400  $^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도에서 소성된 시료에 대해 360 nm 파장의 여기광원을 사용하여 측정한 PL 스펙트럼과 emission 파장을 612 nm로 고정하여 측정한 PLE 스펙트럼이다. PL 스펙트럼은 612 nm와 614.5 nm

에서 sharp한 peak를 가지며 소성온도에 따른 스펙트럼의 변화가 관측되지 않았다. 612 nm와 614.5 nm의 발광 준위는 dopant로 첨가된 Pr<sup>3+</sup>이온의 <sup>1</sup>D<sub>2</sub> → <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 전이에 의한 발광 준위로 알려져 있다.<sup>7)</sup> PLE 스펙트럼을 보면 360 nm(A)를 중심으로 하는 주된 peak와 395 nm(B)부근의 broad한 peak가 나타나고, 475 nm, 500 nm, 521 nm에서도 peak의 세기가 약한 여기 준위들이 관측된다. 1100 ~ 1300  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성된 시료는 여기 스펙트럼의 모양이 유사하고, 주된 peak는 358 nm에 위치하였다. 반면, 1400  $^{\circ}\text{C}$  온도에서 소성된 시료는 395 nm의 여기 스펙트럼 준위의 세기가 증가하여 주된 peak의 위치가 361 nm로 이동되었다. 1400  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성된 CaTiO<sub>3</sub>:Pr 결정은 1100 ~ 1300  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성되어 CaTiO<sub>3</sub>:Pr 형광체에 CaO 및 TiO<sub>2</sub> 결정이 혼재되어 있는 시료에서 보다 395 nm 준위의 여기 스펙트럼의 세기가 크게 증가한 것으로 보아 395 nm 준위는 단일상의 CaTiO<sub>3</sub> 결정에 기인된 여기 준위로 해석된다. 그림 3(b)는 소성 분위기를 air, Ar, 진공 sealing으로 달리하고 1100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성된 시료의 PL 스펙트럼과 PLE 스펙트럼이다. PL 스펙트럼은 마찬가지로 612 nm와 614.5 nm에서 sharp한 peak를 가지며 소성 분위기에 따른 변화는 관측되지 않았다. 진공 sealing 분위기에서 소성된 시료의 PLE 스펙트럼에서 나타나는 320 nm의 peak는 CaO결정에 의한 여기 에너지에 해당되며 이는 CaO에 PrCl<sub>3</sub>를 첨가하여 1100  $^{\circ}\text{C}$ 의 동일한 조건으로 제작된 CaO:Pr 형광체의 PLE 스펙트럼을 측정하여 확인되었다. 360 nm 여기 준위의 세기를 기준으로 할 때 395 nm 준위의 상대적인 여기준위의 세기는 air, Ar, 진공 sealing의 순서로 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 시료의 소성분위기가 395 nm 여기 스펙트럼의 세기에 관련된다는 사실을 시사한다. 1200 ~ 1400  $^{\circ}\text{C}$ 로 air와 Ar 분위기에서 소성된 시료에서도 같은 결과가 나타났으며 이는 상대적으로 산소 분압이 높은 air 분위기에서 CaO와 TiO<sub>2</sub>가 소성될 때 단일상의 CaTiO<sub>3</sub>로 합성이 용이해지고 그 결과로서 395 nm 준위가 증가되는 것으로 설명된다. 이상에서 PL 스펙트럼은 소성온도와 소성분위기에 따라 변화되지 않은 반면 PLE 스펙트럼은 1100 ~ 1300  $^{\circ}\text{C}$ 로 소성되어 CaO 또는 TiO<sub>2</sub> 결정이 혼재되어 있는 시료에서는 유사한 형태를 나타내고, 1400  $^{\circ}\text{C}$ 에서 소성하여 CaTiO<sub>3</sub>의 단일상으로 합성된 시료에서는 395 nm의 여기 스펙트럼의 세기가 증가하였다. 또한 395 nm의 여기 스펙트럼의 세기는 air 분위기에 서 소성된 경우 높게 나타났다. 이것으로 395 nm

준위는  $\text{CaTiO}_3$ 의 결정결함이 형성하는 여기준위로서 소성 분위기와 밀접하게 관련된 여기준위임을 알 수 있다.

그림 4(a)는 air분위기에서 1400 °C로 소성된 시료에 대해, 발광 스펙트럼 파장의 위치를 612 nm로 고정하고 360 nm와 395 nm 파장의 여기에 대한 시간에 따른 발광세기의 감쇠특성을 나타내고 있다. 여기 스펙트럼의 파장을 360 nm로 고정하고 측정된 decay time은 약 0.21 msec이고 395 nm는 0.18 msec로서 360 nm로 여기 시켰을 때의 decay time

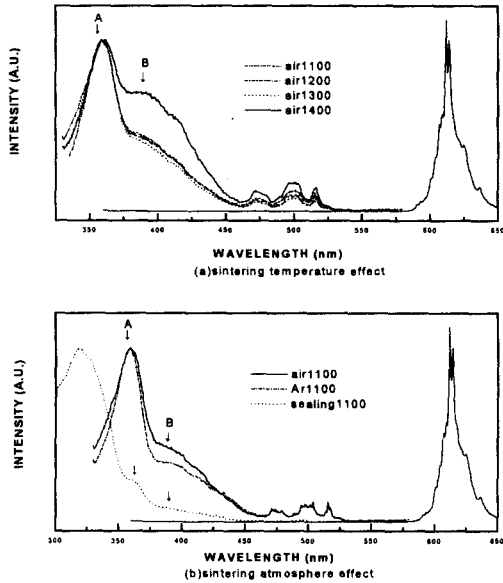


그림 3. (a) Air 분위기하의 서로 다른 소성온도에서 제조된  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$ 의 PLE, PL 스펙트럼과 (b) 1100 °C에서 분위기를 달리하여 소성된 시료의 PLE 및 PL 스펙트럼.

Fig. 3. PLE and PL spectra of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$  (a) sintered at four different temperatures in air (b) sintered at 1100 °C in three different atmospheres.

이 길게 나타났다. 이와 같은 결과는 360 nm준위에서 여기된 free carrier가 612 nm와 614.5 nm의 발광에 직접적으로 기여하기 보다, 다른 에너지 준위(즉, 395 nm 준위 또는 결합 준위)로 전이되어 발광에 기여하는 것으로 설명된다. 이것은 그림 4(b)의 에너지 band model에 의하여 설명될 수 있다. 즉, 그림 4(b)에서  $E_A$ 의 에너지 준위로 여기된 free

carrier는 그림 4(b)의 (1)의 경로처럼 발광 준위의 전자를 직접 여기 시키지 않고 그림 4(b)의 (2)의 경로처럼  $E_B$ 의 에너지 준위로 전이된 후, 발광에 기여하기 때문에 decay time이 길게 나타나는 것으로 설명된다.

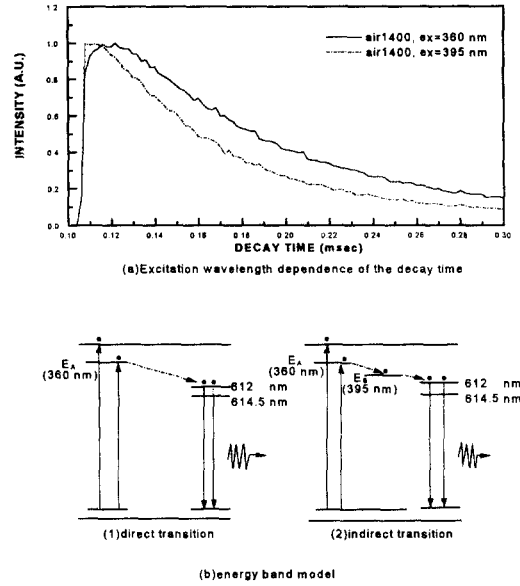


그림 4. (a) Air 분위기에서 1400 °C로 소성된  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$ 형광체의 decay time( $\lambda_{em} = 612 \text{ nm}$ )과 (b) energy band model.

Fig. 4. (a) Decay time of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$  sintered at 1400 °C in air ( $\lambda_{em} = 612 \text{ nm}$ ) and (b) energy band model.

그림 5(a)는 air 분위기에서 온도를 달리하여 소성된 시료에 대하여, 발광 스펙트럼 파장과 여기 스펙트럼 파장을 각각 612 nm와 360 nm로 고정하여 측정한 decay time이다. 1100, 1200, 1300, 1400 °C에서 소성된 시료의 decay time은 각각 0.290, 0.250, 0.218, 0.210 msec로서 소성온도에 따라

decay time이 감소하나, 1400 °C에서 소성된 시료는 1300 °C에서 소성된 시료와 유사한 특성을 나타냈다. 높은 온도에서 소성된 시료일수록 decay time이 짧아지는 현상은 Ar 분위기에서도 동일하게 나타났다. 그러나 1400 °C에서 소성된 시료는 1300 °C에서 소성된 시료의 decay time과 비교하여 뚜렷한 변화가 관측되지 않았다. 이는 그림 3의 PLE 스펙트럼과 그림 4의 에너지 band model에서 설명된 바

와 같이 395 nm 준위의 여기스펙트럼의 세기는 1400 °C의 온도로 제작된 시료에서 크게 증가하여 360 nm 준위로 여기된 전자는 395 nm 준위로 전이된 후 발광에 기여하게 되어 decay time이 길어지게 되는 것으로 이해된다. 결과적으로 1400 °C 온도에서는 결정 결함의 감소에 의한 decay time의 감소와, 395 nm 준위의 여기스펙트럼의 세기 증가로 인한 decay time의 증가가 동시에 나타남으로서 1300 °C에서의 decay time과 뚜렷한 차이를 나타내지 않는 것으로 해석된다. 그림. 5(b)는 1100 °C에서 air와 Ar 분위기로 소성된 시료에 대한 결과인데, 발광 스펙트럼 파장과 여기 스펙트럼 파장은 각각

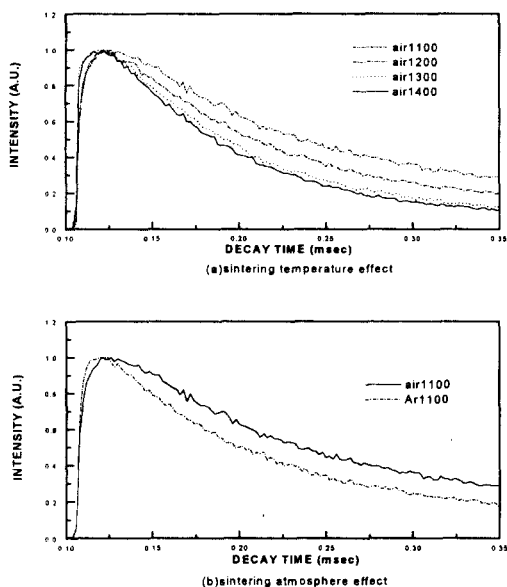


그림 5. (a) Air 분위기에서 온도를 달리하여 소성된 CaTiO<sub>3</sub>:Pr의 decay time과 (b) 1100 °C에서 분위기를 달리하여 소성된 CaTiO<sub>3</sub>:Pr의 decay time.

Fig. 5. Variation in the decay time of CaTiO<sub>3</sub>:Pr (a) sintered at four different temperatures in air (b) sintered at 1100 °C in different atmospheres.

612 nm와 360 nm로 고정하였다. air 분위기에서 소성된 시료의 decay time은 0.29 msec이고 Ar 분위기에서 소성된 시료의 경우는 0.24 msec로서 산소가 적은 분위기에서 소성될 때 decay time이 짧아졌다. 이와 같은 경향은 1100 ~ 1400 °C에서 소성된 모든 시료에서 동일하게 관측되었다. 그림. 3의

PLE 스펙트럼과 비교하면, 395 nm 준위의 세기가 낮을 때 decay time이 더 짧아짐을 알 수 있다.

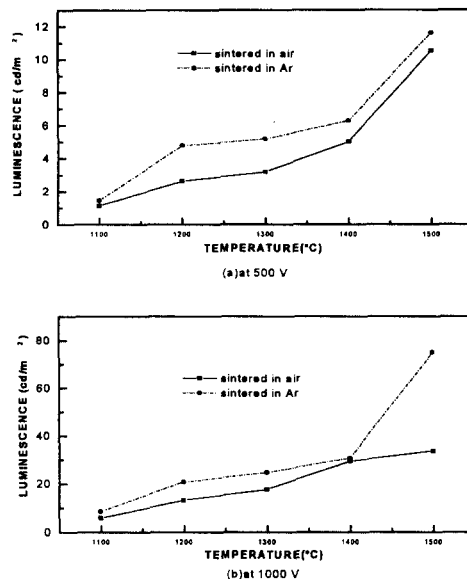


그림 6. Air와 Ar 분위기에서 온도를 달리하여 소성된 시료를 (a) 500 V와 (b) 1000 V의 전압에서 측정된 CL 휘도(at 1 mA).

Fig. 6. CL brightness of CaTiO<sub>3</sub>:Pr sintered in two different atmospheres as a function of sintering temperature bias voltage was fixed at (a) 500 V(1 mA) and (b) 1000V(1 mA).

그림. 6(a)는 소성온도를 달리하여 air와 Ar 분위기에서 소성된 시료를 1 mA의 전류와 500 V의 전압이 인가된 전자총(electron gun)으로 여기하여 얻어진 CL 휘도특성이고 (b)는 동일한 조건에서 전압을 1000 V로 변화시켜 얻어진 CL 휘도특성이다. 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 °C에서 air 분위기로 소성된 시료를 1 mA의 전류와 500 V의 전압에서 측정된 CL 휘도는 각각 1.1, 2.6, 3.3, 5, 10.5 cd/m<sup>2</sup>로서 온도가 높아짐에 따라 발광휘도가 증가되는 것을 볼 수 있다. 이것은 소성온도가 높아질수록 CaO와 TiO<sub>2</sub>의 혼재된 결정이 감소되고 CaTiO<sub>3</sub> 결정의 입자가 커져서 시료 내의 결함이 감소됨에 따라 발광휘도가 향상되는 것으로 설명된다. 또한 CL 휘도는 1100 ~ 1500 °C의 온도범위에서 Ar 분위기로 제작된 시료가 air 분위기로 제작된 시료에서 보다 높게 나타났다. 그림. 4의 PLE 스펙트럼과 비교

하면 decay time의 결과에서와 유사하게 395 nm의 여기스펙트럼준위의 세기가 낮을 때 CL 휘도가 향상됨을 알 수 있다. 따라서 395 nm의 여기 준위는 포획 준위로 작용하고 CL 휘도를 저하시키는 요인으로 작용된다고 설명될 수 있다.

#### 4. 결 론

소성온도, 소성분위기를 달리하여 결정 구조가 서로 다른  $\text{CaTiO}_3\text{:Pr}$ 형광체를 제작할 수 있었다. 1300 °C 이하의 온도로 소성된 시료는 CaO 및  $\text{TiO}_2$  상이 혼재되어 나타났고 1400 °C 이상의 온도에서 소성된 시료는 perovskite orthorhombic 구조의  $\text{CaTiO}_3$  단일상으로 합성되었다. PLE 스펙트럼에서 360 nm를 중심으로 하는 주된 peak와 395 nm 부근의 broad한 peak가 나타나고, 360 nm로 여기시켜 측정된 decay time은 395 nm로 여기시켰을 때보다 길게 나타났다. 이로부터 360 nm 준위로 여기된 전자는 395 nm 준위로 포획된 후 Pr의 발광 준위로 전이되어 발광됨을 알 수 있었다. 1300 °C 이하의 온도로 소성된 시료들은 395 nm 여기 준위의 세기가 비슷하고 decay time은 소성온도가 높을수록 짧아졌다. 이것은 소성 온도가 높아지면 혼정된 CaO 및  $\text{TiO}_2$  결정이 사라지고,  $\text{CaTiO}_3\text{:Pr}$  형광체 내의 결정 결함이 감소됨에 따라 여기된 전자가 결합준위에 포획되지 않고 직접적으로 발광 준위로 전이되어 나타나기 때문으로 설명된다. 1400 °C에서 소성된 시료는 395 nm 여기 준위의 세기가 증가하고 더 이상의 decay time의 감소가 나타나지 않았다. 이것은 결합준위의 감소로 인해 decay time이 짧아지고, 395 nm 준위의 세기가 증가함으로 인해 decay time이 길어지는 현상이 동시에 나타나기 때문으로 해석된다. Air 분위기로 소성된 시료는 Ar 분위기로 소성된 시료에서 보다 395 nm 여기 준위의 세기가 증가하였고 decay time은 길어졌다. 즉 395 nm 여기 준위의 세기가 낮을수록 decay time이 짧아졌다. 이것은 395 nm 준위는 360 nm 준위로

여기된 free carrier를 포획된 후 발광준위로 에너지가 전이되는 것으로 설명된다. CL 휘도는 395 nm의 여기 준위의 세기가 감소 할수록 향상된 발광휘도를 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 정보통신부에서 수행하는 '98년도 FED 국책기술개발 사업의 연구비로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. L. E. shea, R. K. Datta, and J. J. Brown, "Low Voltage Cathodoluminescence of  $\text{Mn}^{2+}$ -Activated  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$ ", J. Electrochem. Soc., 141, 8, pp.2198, 1994.
2. S. M. Jacobsen, S. Yang, F. L. Zhang, and C. J. Summers, "Selecting Phosphors for Low-Voltage Field Emissive Devices", SID95 DIGEST, pp.1031, 1995.
3. S. Itoh, T. kimizuka and T. Tonegawa, "Degradation Mechanism for Low Voltage Cathodoluminescence of Sulfide Phosphors", J. Electrochem. Soc., 136, pp.1819, 1989.
4. H. Toki, F. Kataoka, Y. Satoh, and S. Itoh, "Phosphors for Low-Voltage Electron Excitation", Proceeding of IDW'95, PH-5, 1995.
5. S. S. Chadha, D. W. Smith, and A. Vecht, "New and Improved Phosphors for Low-Voltage Applications", SID94 DIGEST pp.51-54, 1994.
6. A. Vecht, D. W. smith, S. S. Chadha, "New electron excited light emitting materials", J. Vac. Sci. Technol, B 12(2), 1994.
7. J. D. Lee, "95 Annual Research Report", Semiconductor Materials Devices Lab, Seoul National University, 1995.