

## Sol-Gel법으로 합성한 $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 적색 형광체의 제조와 그 특성

김상문 · 구자인\* · 김태옥\*

LG전자㈜ Display사업본부 Display Device연구소

\*부산대학교 공과대학 무기재료공학과

(1999년 8월 23일 접수)

## The Synthesis and Properties of Red Phosphor $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ by Sol-Gel Method

Sang-Mun Kim, Ja-In Goo\* and Tae-Ok Kim\*

Display Device Research Lab. LG Electronics Inc.

\*Department of Inorganic Materials Science and Engineering, Pusan National University

(Received August 23, 1999)

### 초 록

Sol-Gel법으로  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  형광체를 제조하고 합성조건에 따른 형광체의 발광특성을 평가하여 저전압형 FED 형광체로서의 용용에 대하여 검토하였다.  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  건조 gel을  $1000^\circ\text{C}$ 에서 3시간 열처리하여  $1\ \mu\text{m}$  정도의 미립자 형광체를 얻었으며  $612\ \text{nm}$ 에서 anode전압  $900\ \text{V}$ 에서 최고  $44\ \text{cd/m}^2$ 의 발광휘도를 갖고 있음을 확인하였다. 그러나 저전압형 FED에서 요구되는 기대수준을 만족시키지 못하고 있어 향후 지속적인 개선이 요구된다고 생각한다.

### ABSTRACT

In an effort to evaluate a feasibility of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  phosphors as low voltage FEDs emission properties of the phosphors, by Sol-Gel method, were evaluated in terms of processing conditions. Fine  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  phosphors having the particle diameter of  $1\ \mu\text{m}$  were obtained by calcination of the gel for 3 h at  $1000^\circ\text{C}$ . The phosphor showed the red emitting properties at  $612\ \text{nm}$  with brightness of  $44\ \text{cd/m}^2$  under anode voltage of  $900\ \text{V}$ . However this brightness does not fulfill with the desired brightness for the application as low voltage FEDs. Thus a further research is required for the application of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  phosphor as FPDs.

**Key words :** FEDs, Phosphor,  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ , Sol-Gel

### 1. 서 론

차세대 FPD(Flat Panel Display)로서 주목되고 있는 FED(Field Emission Display)는 CRT(Cathode Ray Tube)의 단점인 화면의 크기에 따라 무게와 부피가 증가하는 문제점을 해결하고 넓은 시야각, 고해상도, Full Color, 높은 발광휘도, 빠른 응답속도, 저소비 전력 등의 장점을 가지고 있는 차세대 평판 디스플레이이다<sup>1,2)</sup> FED가 상업용 display 소자로서 실용화 되기 위하여는 FEA(Field Emission Array) system, packing기술, 구동방법, 높은 발광을 위한 형광체 개발 등이 절실히 요구되고 있다. 특히 FED용 형광체는 구동조건에 적합한 충분한 발광휘도를 만족하고 응답속도가 빠르고, 짧은 잔광시간을 가지면서 색순도가 우수하고 열적으로 안정한 것이 요구된

다. 현재 FED는 구동전압에 따라 저전압형 FED와 고전압형 FED로 나눌수 있으며 형광체의 발광효율 및 색순도 측면에서 우수한 CRT용 황화물 형광체를 사용하는 고전압형 FED가 상용화를 향한 빠른 발전을 보이고 있다 하지만 황화물 형광체를 사용할 경우 FED의 동작 중 emitter로부터 나온 고에너지 전자의 충돌로인하여 황가스가 형광체로부터 방출되어 FED package 내부의 진공도를 저하시킬 뿐만 아니라 emitter tip을 오염시켜 gate동작전압과 anode current를 저하시키고 FEA의 emission current상태를 불안정하게 만들어 emitter tip으로부터 전자방출을 불균일하게 만들고 tip의 수명을 저하시키는 문제가 있다. 이 때문에 FEA와 스크린이 형성되어 있는 anode 사이의 거리가 길어져야하고 그로인해 진공 scaling시 front plane의 변형 또는 파괴가 일어나는데

이 문제를 해결하기 위하여 FEA와 anode 사이의 거리를 일정하게 해주는 spacer의 길이를 길게해야만 하는 FED packing에 있어서 일련의 문제를 야기시킨다 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위하여는 궁극적으로 FED는 저전압형으로 만들어져야 하고 FED를 구현시키기 위한 산화물 형광체가 개발되어야 하는 당위성이 제기되고 있다. 하지만 산화물 형광체를 사용할 경우 저전압 하에서 전하의 축적으로인한 대전으로 휘도와 색순도가 저하되는 문제가 있다.<sup>7)</sup> 저전압FED용 적색 형광체로는  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 가 주로 연구되고 있지만 화학적으로 안정하고 전기 전도성이 우수하며 저전압 하에서 휘도 색순도 특성이 양호한 perovskite계 형광체로서  $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{BaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  등이 보고되어 있다.<sup>10-14)</sup> 종래의 형광체 제조는 원료를 혼합하여 1200내지 1500°C의 고온에서 소성하는 고상반응에 의하여 제조하고 있다.<sup>14)</sup> 저전압형 FED용 형광체의 휘도를 올리기 위하여는 형광체 입자가 미립자화 되어야 한다는 점을 감안해볼 때 고상반응으로 제조된 형광체의 경우 입자가 크고, 원료의 혼합 및 분쇄공정에서 불순물의 혼입 등으로 오염되어 발광휘도가 저하되는 문제가 있다. 이에 비하여 Sol-Gel 법으로 산화물 형광체를 제조할 경우 저온에서 합성이 가능하고 다 성분 재료에 대하여 화학양론적으로 제조할 수 있고 발광 중심 원소의 균일한 분포로 재료의 균질화가 가능하며 미립자화 할 수 있다는 장점이 있다.<sup>15)</sup>

본 연구에서는 Sol-Gel법으로  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  형광체를 제조하고 합성조건에 따른 형광체의 발광특성을 평가하여 저전압형 FED 형광체로서의 응용에 대하여 검토하였다.

## 2. 실험방법

형광체 분말제조방법을 개략적으로 Fig.1에 나타내었다. 출발물질로서  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ti}[(\text{CH}_3)_2\text{CHO}]_4$ ,  $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하였으며 용매로 2-Methoxyethanol을 사용하였다. 먼저  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를 2-Methoxyethanol에 넣고 교반시켜 용해한 다음 80°C에서 2시간 유지시켜 sol을 제조하였고 물을 첨가하여 가수분해시킨 후 이를 100°C에 24시간 건조 후 열처리하였다.

Universal Instrument사의 TG-DTA를 이용하여 건조 gel의 온도증가에 따른 열분해변화를 관찰하였으며, Jeol Co. JSM-5400. 전자 현미경(SEM)을 사용하여 분말의 형상과 크기를 관찰하였고 RIGAKU Co의 X선 회절 분석기를 이용하여 물질의 상을 평가하였다. Perkin Elmer Co.의 Luminescence Spectrometer LS50을 사용하여 Photoluminescent(PL) spectrum을 분석하였다 이때 분말 시료를 홀더에 넣고 에너지원으로 xenon방전 램프를 사

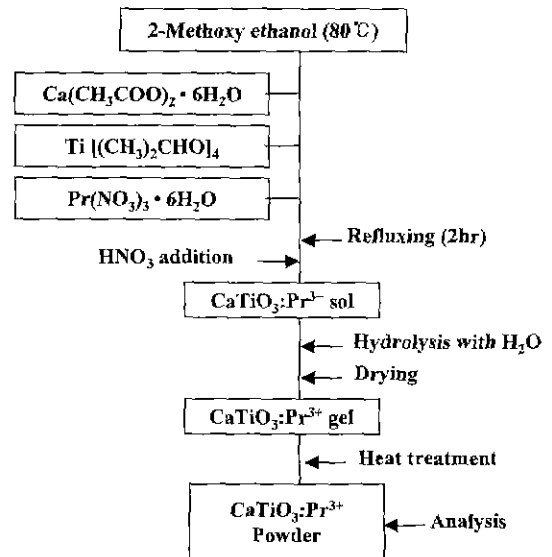


Fig. 1. Experimental procedure in preparation of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  phosphor.

용하여 여기 스펙트럼을 측정하여 최대 흡수피크를 갖는 파장을 복사과장으로서 발광스펙트럼을 측정하였다. UV Spectro-photometer를 이용하여 실온에서 형광체의 분광 반사율을 측정하여 에너지 흡수상태를 평가하였다. 상온에서 여러 시료를 장착할 수 있는 홀더에 형광 시료를 담아  $10^{-7}$  torr의 고진공 상태를 만든 후 가속 전압을 바꿔가면서 전자선을 주사하여 형광체를 발광시켜 그 때의 Cathodoluminescence(CL)와 형광체의 색도를 PR650 colorimeter로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig.2는  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  sol을 100°C에서 건조시킨 gel에 대한 TG-DTA결과이다.

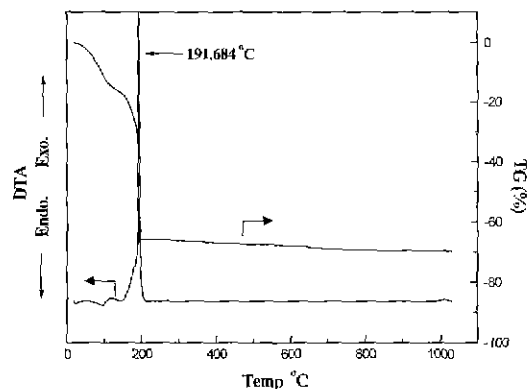


Fig. 2. TG-DTA curve for dry gel of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ .

TG분석결과 전체적으로 70%정도의 중량감소가 열분해 과정에서 일어났으며 191.7°C 이상의 온도에서는 미미한 중량감소가 관찰되고 있는데 이것은 유기물 속에 함유된 탄소의 분해에 기인한 것으로 생각되며 700°C 이상에서는 중량 감소가 거의 없음을 보아 열분해는 거의 완료되었다고 생각된다. DTA 분석결과 191.7°C에서 발열peak를 보이고 있는데 이것은 2-Methoxyethanol 열분해에 기인한 것으로 보이며 그 이상의 온도에서는 열분해 peak가 없는 것으로 보아 191.7°C 이상에서 CaTiO<sub>3</sub> 상으로 형성되기 시작하여 700°C에서는 완전한 CaTiO<sub>3</sub> 상이 형성된다고 판단된다.

Fig.3은 Sol-Gel 반응으로 합성된 CaTiO<sub>3</sub> 분말을 400~700°C에서 3시간 열처리한 분말에 대한 X선 회절 결과이다. Fig.3으로부터 400°C에서 열처리한 시료에서도 CaTiO<sub>3</sub> 결정상이 나타났으며 열처리 온도를 올려감에 따라 CaCO<sub>3</sub> 상은 감소하여 700°C에서 열처리하였을 때 CaCO<sub>3</sub> 상은 소멸되고 순수한 CaTiO<sub>3</sub> 상만이 생성되었다. 따라서 Sol-Gel법으로 얻은 순수한 CaTiO<sub>3</sub> 상은 700°C 이상의 온도에서 얻어진다고 판단된다.

Fig.4는 CaTiO<sub>3</sub> 분말과 CaTiO<sub>3</sub>:(0.2 m/o)Pr<sup>3+</sup>에 대한 X선 회절 pattern이다. 두 시료 모두 perovskite 구조의 CaTiO<sub>3</sub> 결정구조를 갖는 것으로 나타났으며, 미량으로 첨가된 activator Pr<sup>3+</sup>은 CaTiO<sub>3</sub> 결정구조에 영향을 미치지거나 이차상을 형성하지 않고 CaTiO<sub>3</sub>에 고용된 것으로 생각된다.

Fig.5는 1000°C에서 열처리한 CaTiO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>형광체 분말의 주사 전자 현미경 사진이다. 입자크기는 약 1 μm 정도이며 미세하고 약간 응집된 모습을 하고 있다.

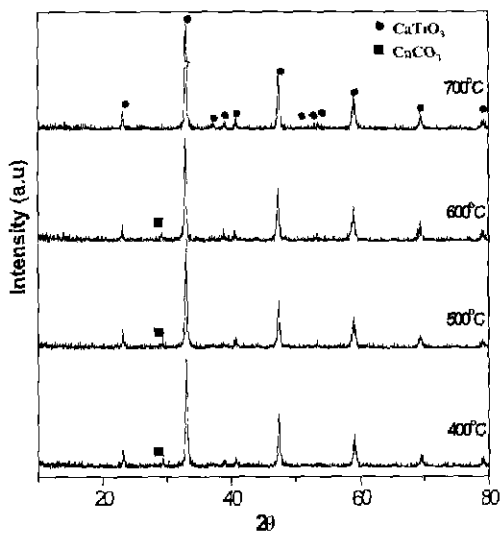


Fig. 3. XRD patterns of CaTiO<sub>3</sub> powders calcined at various temperatures for 3 h

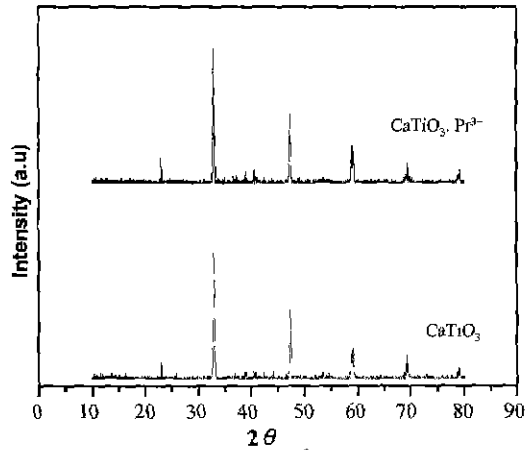


Fig. 4. XRD patterns of CaTiO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> and CaTiO<sub>3</sub> powders.

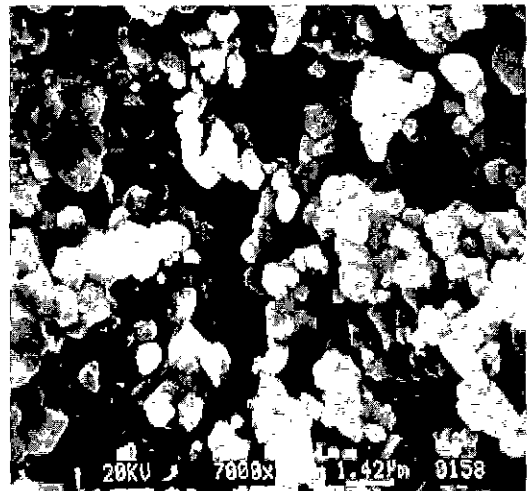


Fig. 5. SEM micrograph of CaTiO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> phosphors.

Fig.6은 CaTiO<sub>3</sub>에 0.2 m/o의 Pr<sup>3+</sup>을 첨가하여 800~1200°C에서 3시간 열처리한 시료의 여기스펙트럼이다. 여기스펙트럼은 200~350 nm 파장영역에서 여기band를 가지고 있으며 320~335 nm 영역에서 가장 크게 여기되어 322 nm에서 절정을 이루며, 450~500 nm에서 미약한 여기peak를 보이고 있다 320~335 nm의 파장 영역에서의 여기peak는 에너지 band level에서 3.87~3.54 eV에 해당되며 CaTiO<sub>3</sub>의 band gap이 3.7 eV임을 감안해볼 때 광흡수율인하여 형광체 모체인 CaTiO<sub>3</sub>에서 전자들이 가전자대에서 전도대로 여기되어 나타난 결과라고 판단되며 Fig.7에 나타난 형광체 모체 CaTiO<sub>3</sub>와 CaTiO<sub>3</sub>:(0.2 m/o)Pr<sup>3+</sup> 형광체의 분광반사를 폭선으로부터 나타난 결과와 잘 일치하고 있다 Fig.7에 나타난 분광반사를 결과를 살펴보면 CaTiO<sub>3</sub>와 CaTiO<sub>3</sub>:(0.2 m/o)Pr<sup>3+</sup> 형광체 시료

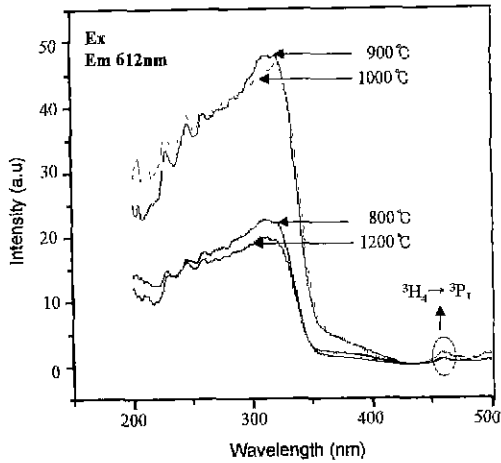


Fig. 6. PL excitation spectra of  $\text{CaTiO}_3:(0.2 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  calcined at various temperature for 3 h.

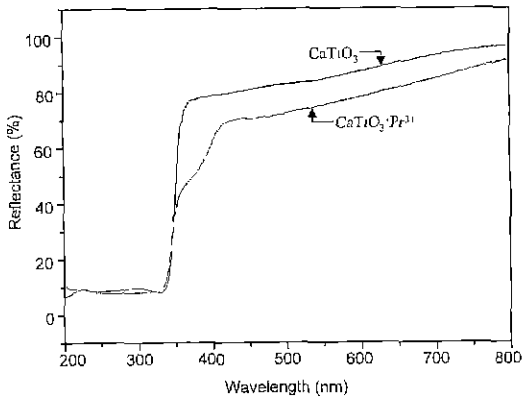


Fig. 7. Reflectance spectra of  $\text{CaTiO}_3$  and  $\text{CaTiO}_3:(0.3 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  at room temperature.

모두 370 nm 이하에서 광흡수로 인하여 반사율이 급격히 저하되어 335 nm이하에서는 분광반사율이 약 10% 수준을 유지하고 있다. 이 결과로부터 335 nm에서의 광흡수는 형광체 모체의 광흡수에 기인한 것으로 판단할 수 있다 그리고 450~470 nm의 파장 영역에서의 여기 peak는 320~335 nm의 파장에서 광에너지의 흡수로 인하여 전도band로 여기되었던 전자가 기저상태로 천이하면서 형광체 모체보다 낮은 에너지 준위에 있는  $\text{Pr}^{3+}$  이온의 에너지 준위에 trap되어 모체에 흡수되었던 광에너지가  $\text{Pr}^{3+}$  이온에 전달되어 그 결과  $\text{Pr}^{3+}$  이온의 전자들이 band gap 2.48~2.76 eV를 가지는 에너지 준위로 여기되어 450~470 nm 파장에서 여기 peak를 나타내게 되었다고 생각된다.  $\text{Pr}^{3+}$  이온은 여기될 때  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{P}_j$  ( $j=0,1,2$ ) 에너지 준위로 천이한다고 보고되어 있으며<sup>15-17)</sup> 이때의 여기 파장을 계산해 보면 444.5~482.5 nm가 된다.

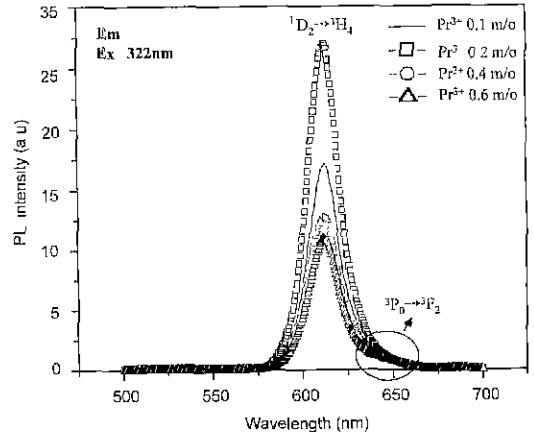


Fig. 8. PL emission spectra of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  calcined at  $800^\circ\text{C}$  for 3 h with various  $\text{Pr}^{3+}$  concentration.

Fig.8은  $800^\circ\text{C}$ 에서  $\text{Pr}^{3+}$ 을 함량을 변화시킨  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 에 대하여 322 nm의 파장으로 여기발광시킨 PL 발광 스펙트럼이다. 612 nm에서 최대의 발광peak를 나타내고 있으며 645~655 nm에서 미소한 peak를 나타내고 있다. 612 nm에서의 발광은  $\text{Pr}^{3+}$  이온이  ${}^3\text{P}_1(J=0,1,2)$  준위로 여기되었다가  ${}^1\text{D}_2$  준위로 완화된 후  ${}^3\text{H}_4$  준위로 떨어지면서 나타나는 발광이며 645~655 nm에서의 발광peak는  ${}^3\text{P}_0$ 에서  ${}^3\text{F}_2$  에너지 준위로의 전이에 의한 것으로  ${}^3\text{P}_0$ 에서  ${}^1\text{D}_2$  준위로 비복사 감쇄되어 peak가 약하게 나타난 것으로 보고된바 있다.<sup>15-17)</sup>  $\text{Pr}^{3+}$  함량 변경 결과 0.2 m/o의  $\text{Pr}^{3+}$ 을 첨가하였을 때 최대 발광을 일으키고 0.2 m/o를 전후하여 발광intensity는 감소하는데 0.1 m/o의 경우는 activator 함량 부족에 기인한 것이며 0.4 m/o, 0.6 m/o 첨가하였을 경우는 과량의 activator첨가로 농도소광이 일어나 발광의 세기가 감소된 것으로 생각된다

Fig.9는 0.2 m/o의  $\text{Pr}^{3+}$ 을 첨가하여  $800\sim 1400^\circ\text{C}$ 에서

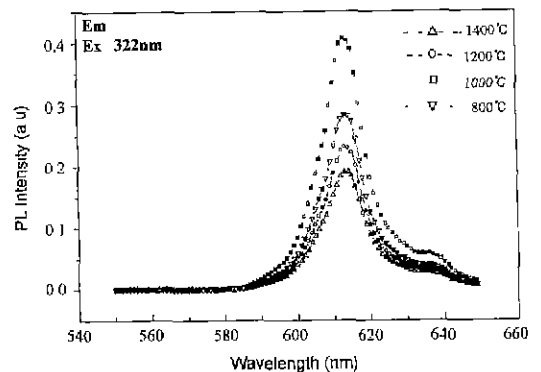


Fig. 9. PL emission spectra of  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  calcined at various temperatures for 3 h.

3시간 열처리한 시료의 온도별 발광스펙트럼을 나타낸 것이다. 1000°C에서 열처리한 시료가 가장 우수한 발광 특성을 보이고 있다. 800°C 보다 1000°C에서 열처리 하였을 경우가 형광체 내에 잔류하고있는 불순물들이 완전히 제거되고 또한 형광체 입자들의 성장으로 인한 결과로 발광특성이 최대로 나타나게 되었다고 생각된다.

Fig.10은 1000°C에서 3시간 열처리한  $\text{CaTiO}_3:(0.2 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  시료에 대하여 CL특성을저전압 상태에서 평가한 결과이다. Anode 전압을 올려감에 따라 발광휘도는 증가하고 있으나 400-600 V 전압에서는 발광이 매우 약하며 900 V에서 44  $\text{cd/m}^2$ 로 나타나고 있다. 이 결과로부터  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  형광체의 전자선 여기 발광이 약하기 때문에 300  $\text{cd/m}^2$ 가 요구되는 저전압형 FED에 적용하기 위하여는 새로운 dopant의 첨가와 형광체 표면처리와 같은 지속적인 발광효율 향상이 필요하다고 생각된다.

Fig.11은  $\text{CaTiO}_3:(0.2 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  시료에 대하여 CL측정 하였을 때의 색도를 CIE1931 색좌표 상에 나타낸 것이다. 평균적으로 (0.644, 0.343)의 좌표를 가지는 적색을 나타내고 있으며 anode전압을 올려감에 따라 x좌표는 증가하고, y좌표는 감소하는 경향을 보이며 색순도 측면에서 매우 우수한 적색을 나타내고 있다.

4. 결 론

Sol-Gel법으로  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  형광체를 제조하고 합성조건에 따른 형광체의 발광 특성을 평가하여 저전압형 FED 형광체로서의 용용에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1.  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  전조 gel은 191.7°C에서 급격한 열분해를 일으켜 700°C에서 분해가 종료되며 400°C부터  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 상이 나타나기 시작하여 700°C에서 완전히  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 상이 형성되었다.

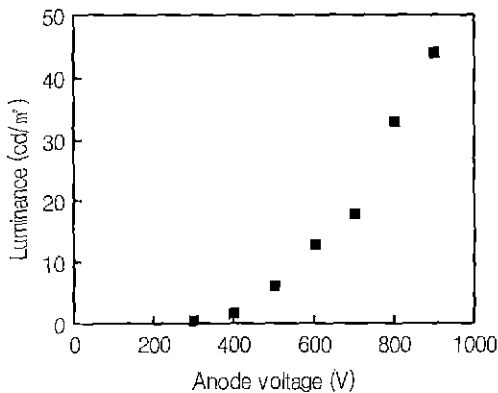


Fig. 10. Cathodoluminescence of  $\text{CaTiO}_3:(0.2 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  calcined at 1000°C for 3 h.

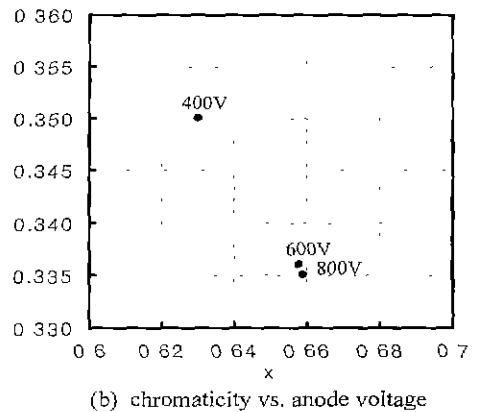
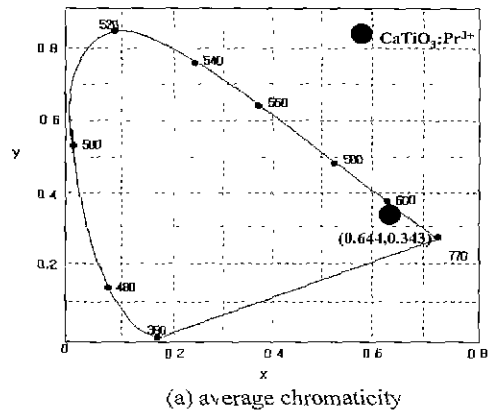


Fig. 11. Chromaticity of  $\text{CaTiO}_3:(0.2 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}$  calcined at 1000°C for 3 h in CIE1931.

- 1000°C에서 3시간 열처리한 결과 입경 1  $\mu\text{m}$  정도의 미립자 형광체가 얻어졌다.
- $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  형광체는 612 nm에서 적색 발광을 보이며  $\text{Pr}^{3+}$  함량은 0.2 m/o, 열처리 조건은 1000°C 3시간일 때가 최적의 발광 상태를 나타냄을 알 수 있다.
- CL특성 평가 결과 저전압에서 최고 44  $\text{cd/m}^2$ 의 발광휘도를 나타내고 있으나 저전압형 FED에서 요구하는 기대수준을 만족시키지 못하고 있어 향후 지속적인 개선이 요구된다.
- 형광체의 color는 CIE1931색좌표 상에서 평균적으로 (0.644, 0.343)의 순수한 적색으로 나타나며 anode전압을 올려감에 따라 x좌표는 증가하고, y좌표는 감소하는 경향을 보이며 색순도 측면에서 매우 우수한 적색을 나타내고 있다.

REFERENCES

1. S. J. Newman, R. T. Smith and C. Penn, "Development

- of a 5.1-in. Field-Emission Display." *Proc. SID 98 Digest*, 95-98 (1992).
2. K. Yokoo, "Prospect of Field Emission Display Development," *Monthly Display* 97, **8**, 48-51 (1997).
  3. J. S. Sebastian, H. C. Swart, T. A. Trottier, S. L. Jones and P. H. Holloway, "Degradation of Zinc Sulfide Phosphors under Electron Bombardment." *J. Vac. Sci. Technol.*, **A 15**(4) 2349-2353 (1997).
  4. H. C. Swart, L. Oosthuizen, P. H. Holloway and G. L. P. Berning. "Degradation Behavior of ZnS Phosphor Powders under Different Experimental Conditions," *Sci. Interface Analysis*, **26**, 337-342 (1998).
  5. L. Oosthuizen, H. C. Swart, P. E. Viljoen, P. H. Holloway and G. L. P. Berning. "ZnS:Cu,Al,Au Phosphor Degradation under Electron Excitation," *Appl. Surf. Sci.* **120**, 9-4 (1997).
  6. 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**, 2198-2204 (1994).
  7. T. Shimojo, "Recent Trend of FED," *Monthly Display* 98, **11**, 15-18 (1998).
  8. S. M. Jacobsen, S. Yang, F. L. Zhang and C. J. Summers. Late News Paper : Improved Performance of Low Voltage Phosphor of Field Emission Display," *Proc SID 95 Digest*, 631-633 (1995).
  9. C. Bojko, N. Kumar, S. M. Jacobsen, S. Yang and C. J. Summers, "Selecting Phosphors for Low-Voltage FED Applications," *Proc Asia Display* **95**, 635-638 (1995).
  10. H. Toki, F. Kataoka, Y. Satoh and S. Itoch, "Phosphors for Low Voltage Electron Excitation," *Proc IDW 95*, PH-5 (1995).
  11. H. Yamamoto and S. Okamoto, "Effect of Impurity Addition to Perovskite-Type Oxide Phosphors," *Proc. Inter. Symp. on Future Emissive Displays*, 10-11 (1998).
  12. P. T. Diallo, P. Boutnaud, R. Mariou and J. C. Coussens, "Red Luminescence in  $\text{Pr}^{3+}$  Doped Calcium Titanates," *Phys. Stats. Sol(a)*, **160**, 255-263 (1997).
  13. K. Horikawa, M. Kottaisamy, H. Komnamu, T. Aoki, N. Azuma, T. Nakamura, Y. Nakanishi and Y. Hatanaka. "Effect of Al on Cathodoluminescence Properties of Red Emitting  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{Pr:Al}$  Phosphors," *IDY 99*, **3**, 13-18 (1999).
  14. G. Wittmann and R. M. Macfarlane. "Photon-gated Photoconductivity of  $\text{Pr}^{3+}$ : YAG," *Opt. Lett.*, **21**(6) 426-428 (1996).
  15. S. Rotman. Wide-gap Luminescent Materials: Theory and Applications, pp.43-48. Edited by L. Hanry and K. Teller, Academic Publishers, London, 1997.
  16. L. Ozawa, Cathodoluminescence; Theory and Application, pp 52-64, Kodansha, Tokyo, 1990
  17. H. Takashi, S. Kamiya, E. Nakazawa, K. Narita, K. Ohno, M. Tamatani, M. J. Weber and H. Yamamoto. "Principle Phosphor Materials and Their Optical Properties"; pp 177-200 in PHOSPHOR HANADBOOK. VOL. 1. Phosphor Res. Soc. Edited by S. Shonoya and W. M. Yen. CRC Press. New York, 1998