

PDP 형광체의 진공 자외선 조사에 따른 열화 특성

이임렬[†] · 이수형* · 김유혁*

단국대학교 신소재 공학과
*단국대학교 화학과

Degradation of PDP Phosphors Under VUV Excitation

R. Y. Lee[†], S. H. Lee* and Y. H. Kim*

Dept. of New Materials Engr., Dankook University, Cheonan, 330-714

*Dept. of Chemistry, Dankook University, Cheonan, 330-714

(2002년 8월 6일 받음, 2002년 9월 2일 최종수정본 받음)

Abstract (Y,Gd)BO₃:Eu, Zn₂SiO₄:Mn and BaMgAl₁₀O₁₇:Eu phosphors used in PDP were continuously irradiated by vacuum ultra violet generated from the penning gas (96%Ar+4%Xe) discharge and then the change of emitting intensity with time was investigated. The brightness of these phosphors decreased exponentially with VUV excitation time. The experimental data showed that the degradation rate increased in the order of Zn₂SiO₄:Mn > (Y,Gd)BO₃:Eu > BaMgAl₁₀O₁₇:Eu phosphor. This different degradation property of phosphors was interpreted in terms of brightness saturation and stability against VUV irradiation. It was found that the degradation property of (Y,Gd)BO₃:Eu red phosphor synthesized by ultrasonic thermal spray was superior to commercial phosphor.

Key words: PDP phosphor, degradation, brightness saturation, luminescent killer

1. 서 론

PDP (plasma display device)는 평판으로 대형화할 수 있는 이점으로 향후 CRT (cathode ray tube)를 대체할 차세대 화면 표시 장치이다. PDP는 penning gas 방전에 의하여 발생하는 147nm의 진공자외선 (vacuum ultra violet, VUV)으로 형광체를 여기시켜 가시광을 방출하는 것으로 총 천연색으로 정보와 영상을 표시하기 위하여는 적색, 녹색 및 청색의 형광체가 사용되고 있다. 현재 (Y,Gd)BO₃:Eu, Zn₂SiO₄:Mn, BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 형광체의 발광효율 및 색도등의 발광특성이 양호하여 각각 적색, 녹색 및 청색의 형광체로 사용되고 있다.¹⁾ 그러나 현재 사용되고 있는 PDP용 형광체의 동작특성은 CRT용 형광체나 LCD (liquid crystal display)의 back-light에 비하여 좋지 않다.²⁾ PDP의 특성개선을 위하여는 고휘도의 형광체가 요구되고 있으며 또한 이온 충격에 대한 내성 및 VUV 조사에 대한 내 저항성 등의 형광체 열화특성이 우수하여야 한다.

형광체 열화 (degradation)에 관한 연구는 기존의 화면 표시 장치인 CRT 분야에서 주로 진행되었으며³⁾ 특히 고전류밀도에서 작동되는 프로젝션 TV 나 FED (field emission display)에서는 형광체의 열화거동이 형광체 선택의 기준이 되기도 한다.^{4,5)} 근자에 각광받고 있는 PDP의 내구성과 신뢰성 향상을 위하여는 사용 중 열화되어 휘도 및 색도에 변화가 없어야만 한다. 그러나 PDP 형광체는

panel 제조시의 고온에 의하여 열화되어 그 발광 강도가 감소되고 있으며, 한 예로 (Y,Gd)BO₃:Eu 적색 형광체와 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 청색 형광체는 460°C에서 20분간 baking한 후 발광 효율은 10% 감소되고 있다.⁶⁾ 또한 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 청색 형광체의 발광 스펙트럼은 열화되어 색도 변화가 발생하고 있는 바²⁾ 형광체가 열화되면 휘도 및 색도등의 특성이 변화하고 있다. 그러나 PDP 형광체 열화에 대한 연구는 매우 부족한 실정으로 PDP의 응용성 제고를 위하여는 이에 대한 다양한 연구가 요구되고 있다. 특히 PDP 형광체가 사용 중 VUV 조사 (irradiation)에 따른 열화 현상은 PDP의 내구성과 신뢰성에 상당한 영향을 줄 것인 바 이에 대한 연구는 매우 필요하다. 따라서 본 연구에서는 PDP용 적색, 녹색 및 청색 형광체들의 VUV 조사시간에 따른 휘도 열화특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

적색, 녹색 및 청색 형광체는 상용품으로 (일본, Kasei) 사용되고 있는 (Y,Gd)BO₃:Eu, Zn₂SiO₄:Mn, BaMgAl₁₀O₁₇:Eu를 각각 사용하였다. 형광체를 유리기판에 (4×4 cm) 도포하기 위하여는 정량된 형광체 분체를 증류수에 넣고 초음파 진동기 (Cole-Palmer, 750w)로 sonication 시킨 후 침전법으로 통상 사용되고 있는 막 무게 3 mg/cm²의 형광막을 제조하였다. 그 후 진공 건조기로 150°C의 온도에서 10시간 이상 건조시킨 형광막을 열화시편으로 사용하여

[†] E-mail : rhimlee@dankook.ac.kr

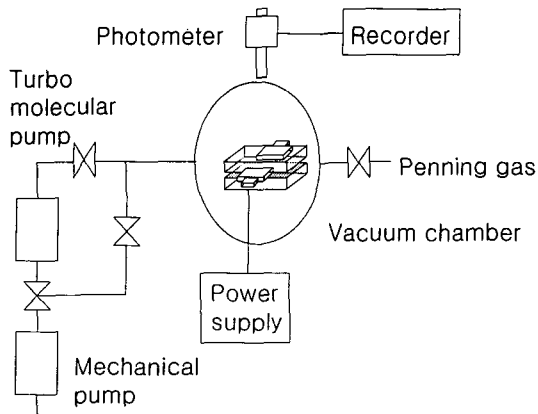


Fig. 1. The schematic diagram of experimental system for phosphor degradation under VUV irradiation.

다. PDP 형광체의 열화 측정을 위하여는 진공 자외선이 요구되고 있는바 Fig. 1과 같은 장비를 구축하여 열화시험을 수행하였다. Fig. 1의 열화 측정장치는 진공 chamber, 진공배기부, 가스주입부, power supply 및 photometer 등으로 구성되어 있으며, 열화측정 시 장비를 검은 천으로 덮어 외부의 빛을 완전히 차단하였다. 형광 막 위에 전극상판을 고정한 후 molecular turbo pump로 10^{-6} torr의 진공으로 배기 하였으며, 그 후 penning gas (96%Ar + 4% Xe)를 gas flow controller로 주입하여 chamber 내의 진공도가 21~33 torr가 되도록 하였다. 그 후 전극 양단에 AC 전압을 인가하여 penning gas를 방전시켜 일정한 강

도의 147nm의 진공자외선이⁷⁾ 발생되도록 하였다. 이와 같이 구성된 system에서 penning 기체의 방전으로 발생한 147nm의 진공자외선은 형광체를 여기시켜 형광막 시편에서 각각 적색, 녹색 및 청색의 가시광이 발광됨을 확인할 수 있었다. 진공자외선 조사에 따른 형광체의 발광 강도의 변화는 photometer (Minolta, LS 100)를 recorder에 연결하여 노출시간에 따른 휘도 변화를 연속적으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 sonication 및 침전법으로 제조한 막 무게 3 mg/cm^2 의 형광 막에 대한 SEM 사진이다. 상용품 형광체는 입도 크기가 조대하고 또한 모양이 불규칙하여 형성된 형광 막도 불균일 하였으며, 3 mg/cm^2 의 막 무게에서는 도포되는 형광체의 양이 불충분하여 유리 기판의 일부가 형광체로 도포되지 않고 노출되어 있다. 한편 Fig. 2(d)는 본 실험실에서 초음파 분무 열분해법 (ultrasonic spray pyrolysis)으로 제조한 $(Y_{0.65}Gd_{0.35})BO_3:Eu$ 적색 형광체를 사용하여 만든 형광 막의 사진이다. 초음파 열분해법으로 제조한 $(Y,Gd)BO_3:Eu$ 적색 형광체의 발광특성은 문헌에 발표한 바 있다.⁸⁾ 초음파 분무 열분해로 제조한 형광 막 표면은 (Fig. 2(d)) 상용품 형광체를 사용하여 만든 것 (Fig. 2(a))에 비하여 치밀하고 균일한 것을 알 수 있다. 이는 상용품 형광체의 평균 입도 크기가 $3\mu\text{m}$ 이상으로 조대하고 입도 크기 분포가 균일하지 않으며 형광체 분말의

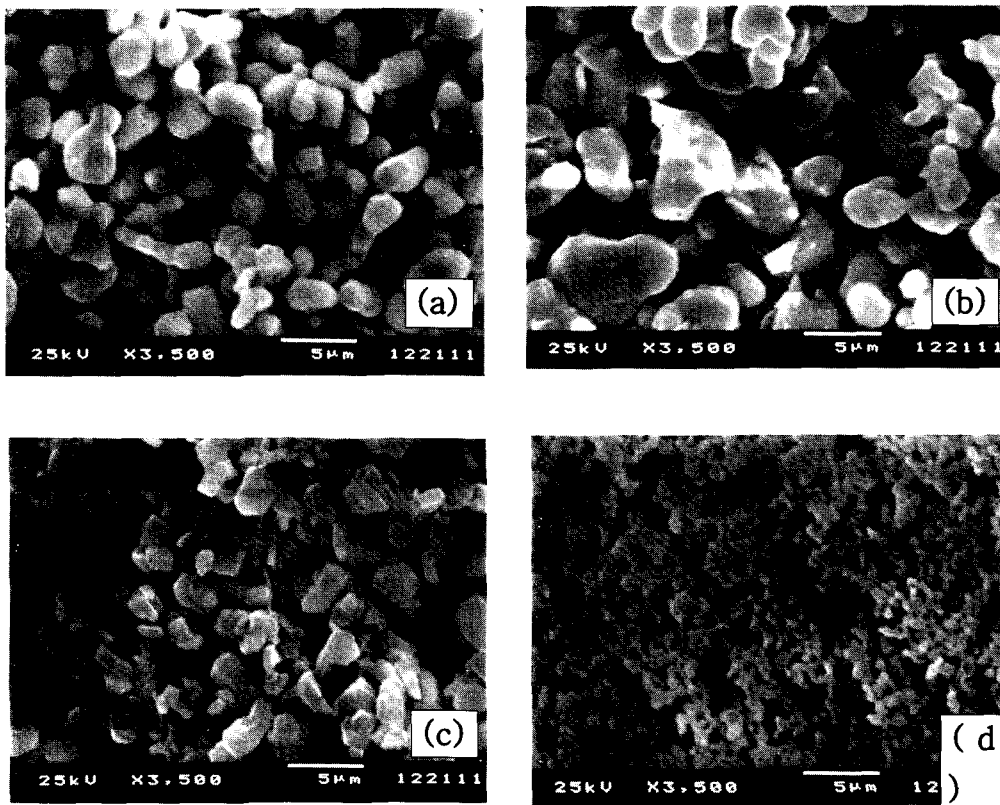


Fig. 2. SEM photos for screened samples from $(Y,Gd)BO_3:Eu$ (a), $Zn_2SiO_4:Mn$ (b), $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu$ (c) commercial phosphors and $(Y,Gd)BO_3:Eu$ phosphor synthesized by spray pyrolysis (d).

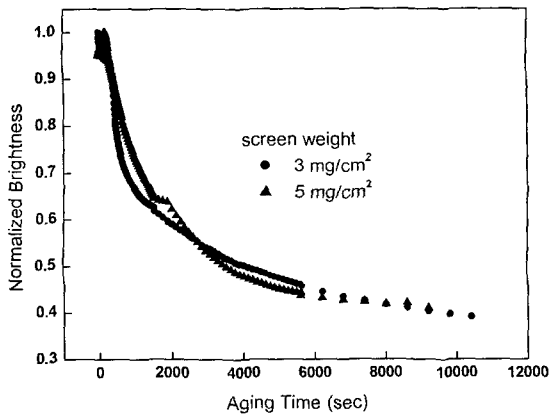


Fig. 3. The decrease in brightness for commercial $(Y,Gd)BO_3:Eu$ phosphor with exposure time under penning-gas plasma for 3 mg/cm^2 and 5 mg/cm^2 screen weight

모양이 불규칙적인 반면, 초음파 분무 열분해로 제조한 형광체는 입도 크기가 $1\mu\text{m}$ 정도로 미세하고 입도 분포가 균일하며 또한 모양이 구형인 특성 때문이다.⁶⁾

Fig. 3은 상용품 $(Y,Gd)BO_3:Eu$ 적색 형광체의 진공 자외선 노출시간에 따른 발광강도 변화이다. 발광강도의 크기는 초기의 최대값으로 규격화(normalizing)시켜 표시하였으며 일정한 방전조건(750 volt, 0.62A, 주파수=34kHz, duty ratio=0.33, penning gas 압력=33 torr) 하에서 노출되는 형광체의 발광강도는 시간 경과에 따라 열화되어 형광체의 발광 휘도는 지수 함수적으로 감소하고 있다. 보는 바와 같이 3 mg/cm^2 및 5 mg/cm^2 의 스크린도포량 차이에 의한 형광체의 열화 거동은 별 차이가 없이 유사하였는바 향후의 열화 시편은 모두 3 mg/cm^2 의 막 무게를 사용하였다. 동일한 penning 기체 방전조건 하에서 노출된 3 mg/cm^2 및 5 mg/cm^2 의 형광 막에서 VUV 조사시간에 따른 휘도 감소가 유사한 것으로 보아, 형광체의 열화 즉 휘도 감소는 고 에너지의 VUV 노출 시 발생할 수 있는 ion sputtering 현상에 인한 형광 막 두께 변화에 기인된 것은 아닌 것으로 해석된다.

PDP 형광체의 발광과정을 살펴보면 Xe 기체의 방전에 의한 $147\sim 180\text{nm}$ ($6.9\sim 8.4\text{ eV}$)의 진공자외선이 형광체 모체(host)에 흡수된 후 에너지 전달(energy transfer)에 의한 활성제(activator)의 여기에 의하여 가시광선의 빛이 발광되고 있다. 형광체에 흡수된 모든 에너지는 빛으로 방출하지 못하고 일부가 결합이나 불순물 등에 의한 비발광(radiationless) 현상으로 손실되고 있다.⁹⁾ 따라서 고효율의 발광 특성을 위하여는 고 순도의 결정성이 우수한 형광체를 사용하여야 한다. 한 예로 형광체의 입도 크기를 미분화하기 위하여 통상 milling이나 grinding등의 분쇄 과정을 수행하고 있으나 분쇄 시 결합의 도입으로 형광체의 발광특성은 저하되고 있다. 본 연구의 열화실험과 같이 PDP 형광체가 penning gas 방전에 지속적으로 노출되었을 경우에는 이온 충격에 의한 표면에서의 결합 생성이나 고 에너지 VUV 조사에 의한 color center 등의 luminescent

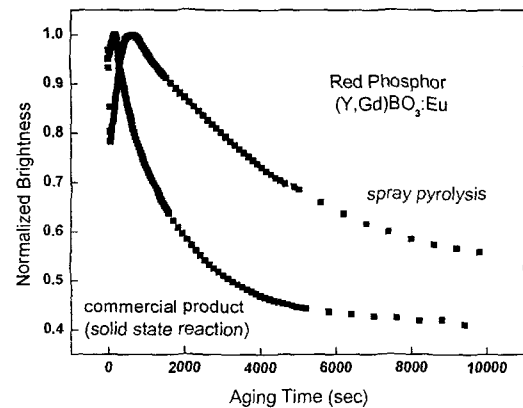


Fig. 4. The degradation property for $(Y,Gd)BO_3:Eu$ phosphors of commercial product and spray pyrolysis one.

killer가 형성되어¹⁰⁾ 형광체의 발광 휘도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

형광체의 열화는 결합 이외의 요인에 의하여도 발생한다.^{3,16)} 열화 연구가 많이 진행된 CRT 형광체에서 수행된 열화 연구를 살펴보면 다음과 같다. 형광체는 지속적인 입사 전자선에 노출될 시 형광체의 온도가 상승함에 따른 온도소광(thermal quenching)에 의하여 발광효율이 감소되며, 더욱이 고 에너지의 전자빔에는 형광체가 burning되어 영구적으로 손상되기도 한다. 또한 CRT 형광체는 누적된 전하량 증가에(coulombic aging) 따라 열화되어 발광 휘도는 지수 함수적으로 감소되고 있다. 이와 유사하게 본 연구에서 수행한 PDP 형광체의 평가에서도 penning gas 방전의 고 에너지원에 의하여 형광체가 지속적으로 노출됨에 따라 형광체의 온도 상승이 예상되고 있는 바, 이에따른 형광체가 열화될수 있다. 즉, 본 연구에서 관찰한 PDP 형광체의 열화는 온도소광 및 결합 생성등에 기인된 것으로 해석되나, 형광체의 열화 과정을 보다 명확히 규명하기 위하여는 향후 이에 대한 추가의 연구가 요구되고 있다.

Fig. 4는 고상반응법으로 제조한 상용품 적색 형광체와 실험실에서 초음파 분무 열분해법으로 제조한 $(Y,Gd)BO_3:Eu$ 적색 형광체를 동일한 방전 조건하에서 측정한 열화 거동이다. 상용품 형광체가 비교적 빨리 열화되는 반면, 초음파 분무 열분해법으로 제조한 형광체의 발광강도의 감소 속도는 상용품 보다 작아 열화거동이 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 이는 동일 조성의 형광체라도 그 제조 방법에 따라 형광체의 모양과 크기가 변화되어 형광체의 열화특성에 차이가 있음을 보여주고 있다. FED 형광체의 열화 연구에 의하면 미세한 형광체 분말은 형광막의 충전 밀도를 증가시켜 열화특성이 개선된다고 하였다.¹¹⁾ 초음파 분무로 제조한 형광막은(Fig. 2(d)) 형광체의 입자 크기가 $1\mu\text{m}$ 으로 미세하고 구형의 모양을 갖고 있어 상용품으로 제조한 형광막에(Fig. 2(a)) 비하여 충전 밀도가 큼을 알 수 있다. 충전 밀도가 크면 VUV 조사시 발생하는 열이 효율적으로 발산되어 온도 소광 효과가 상대적으로 작게되어, Fig. 4에서 보는 바와같이 초음파 분무 열분해법으로 제조한 형광체의

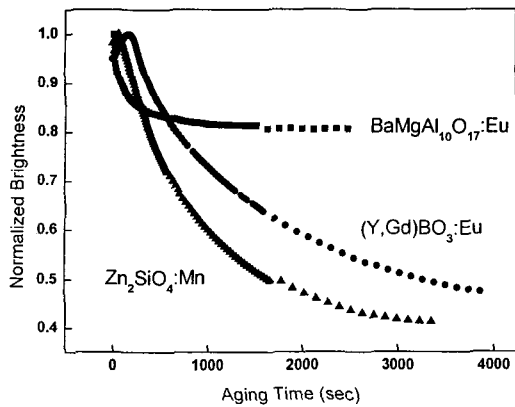


Fig. 5. The change in brightness with VUV aging for (Y,Gd)BO₃:Eu, Zn₂SiO₄:Mn and BaMgAl₁₀O₁₇:Eu PDP phosphors.

열화특성이 향상된 것으로 보인다.

Fig. 5는 상용품의 적색, 녹색 및 청색 형광체를 동일 방전조건 (750volt, 0.62A, 주파수=34kHz, duty ratio=0.33, penning gas 압력=33 torr)에서 측정된 열화거동을 상호 비교한 것이다. 동일 방전조건으로 발생하는 VUV의 강도는 동일하나 적색, 녹색 및 청색의 형광체들의 발광 효율이 상이하서 형광체들의 발광 휘도는 상이하였으나 상호 비교를 위하여 형광체들의 발광 휘도는 각각 초기 최대값으로 규격화한 후 표시하였다. 보는 바와 같이 형광체들의 발광 휘도는 진공 자외선 노출시간에 따라 모두 지속적으로 감소하고 있으며, 이는 이미 언급한 바와 같은 온도소광 및 결함 생성에 의한 것으로 해석된다. 열화시험 후 SEM으로 관찰한 형광막의 상태는 시험전의 시편과 유사하였다. 또한 형광막의 열화시험 전후의 발광 스펙트럼을 VUV spectrometer (Acton Research)로 분석하여 보았으나, 통상 VUV spectrum 분석 시 사용되는 압축된 powder 시편이 아닌 미량의 3 mg/cm² 도포량을 사용하여 분석하였기 때문에 발광 spectrum 상에 noise가 많아 색도 등의 변화 유무는 확인할 수 없었다. 한편 본 실험에서의 방전조건은 실제 device panel의 방전조건과는 상이하고 더욱이 방전 전력이 panel의 것보다 상당히 커서 형광체의 실제 수명(life time)하고는 많은 차이를 보이고 있으나, 형광체의 열화특성을 단시간 내에 수행할 수 있는 이점이 있다.

Fig. 5에서 형광체의 열화 속도는 형광체의 종류에 따라 변하고 있으며 적색, 녹색 및 청색 형광체 중에서 녹색인 Zn₂SiO₄:Mn 형광체의 열화 속도가 가장 크게 보이고 있다. 녹색 발광체인 Zn₂SiO₄:Mn의 경우 모체는 SiO₂ 로써 VUV 특성이 매우 나쁜 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 결과적으로 광자가 형광체 입자의 표피층밖에 침투를 하지 못하여 VUV의 흡수를 통한 activation 이 일어날 수 있는 활성제 Mn의 양이 표피층 내에 국한되기 때문에 연속적인 VUV의 조사시 형광체는 휘도 포화(saturation)가 발생된다. 포화현상에 대한 연구에¹³⁾ 의하면 활성제의 감쇄 시간(decay time)이 길수록 활성제 이온의 기저상태의 고갈

(ground state depletion)이 증가하여 활성제의 여기에 따른 발광이 감소되며 이에 따른 휘도 포화가 급격히 생기게 된다. 문헌상에 보고되고 있는 감쇄 시간은¹⁴⁾ 녹색 형광체인 Zn₂SiO₄:Mn는 12ms, 적색의 (Y,Gd)BO₃:Eu 형광체는 4.3ms이며, BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 형광체의 잔광시간은 측정할 수 없을 정도로 매우 짧다(<1 ms). 즉, 형광체의 열화 속도는 감쇄 시간이 길수록 증가되고 있는 바 열화 특성을 개선키 위하여는 감쇄 시간이 짧은 형광체의 개발이 요구되고 있다. 이와 관련 Zn₂SiO₄:Mn 형광체에서 활성제 Mn의 양을 증가하여 감쇄 시간을 감소 하고¹⁵⁾ 있으며, 이는 또한 열화 특성의 향상에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 형광체의 열화는 FED에서도 매우 중요한 과제로서 ZnS:Ag 청색 형광체는 발광 효율은 우수하나 열화가 빨라 그 사용이 제한되고 있다. 특히 저전압의 FED에서는 휘도를 증가 시키기 위하여 고전류 밀도로 작동되고 있는 바 형광체의 휘도 포화특성은 매우 중요한 형광체 선택의 기준이 되고 있다. 한 예로 Y₂SiO₅:Ce 형광체의 감쇄 시간은 25ns로 ZnS:Ag의 25μs 에 비하여 매우 짧아¹³⁾ 휘도 포화 특성이 개선되고 있기 때문에 FED의 청색 형광체로 응용이 되고 있다.⁵⁾ 형광체는 전자 충돌(electron bombardment), 전장(electric field)이나 빛 등의 입사 에너지에 지속적으로 노출되면 열화된다. 전자선(electron beam) 충돌에 의하여 발광되는 CRT 형광체의 열화특성은 물질 고유의 특성으로 다음과 같은 순으로 강하다고 알려져 있다.¹⁶⁾

Aluminates > Silicate > Oxysulfides
> Sulfides > Fluorides

PDP 형광체에서도 발광의 여기원인 고 에너지의 진공 자외선 조사에 대한 형광체의 안정성(stability)도 이와 유사하다고 보면, 본 연구에서 관찰한 silicate 계인 Zn₂SiO₄:Mn 녹색 형광체의 열화 특성이 aluminates계인 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 청색 형광체에 비하여 상대적으로 나쁜 것도 silicate 물질의 VUV 조사에 대한 내 저항성이 aluminates 보다

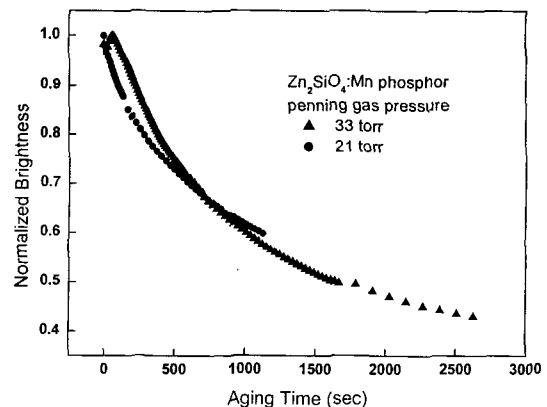


Fig. 6. The effect of penning gas pressure on the degradation of Zn₂SiO₄:Mn phosphor.

작기 때문인 것으로 사료된다.

방전조건이 열화특성에 미치는 영향을 분석키 위하여 열화 속도가 가장 큰 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 녹색 형광체를 상이한 방전조건에서 평가하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 본 실험에서 방전조건은 주로 penning gas 압력에 따라 현저히 변화하였다. 일정한 조건 (주파수=34kHz, duty ratio=0.33)에서 penning gas (96%Ar + 4%Xe) 압력이 33 torr 일때 Xe 방전에 요하는 전압과 전류는 각각 750V와 0.62A 이었으며, penning gas 압력이 21 torr 일 경우는 전압과 전류값은 540V와 0.44A 이었다. 압력이 33 torr 일시의 방전 전력(power)은 465W로 penning gas 압력 21 torr 시의 전력 238W 보다 커서 penning gas 방전으로 생성되는 VUV의 강도는 크게 되어, $p=33$ torr에서 관찰되는 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 형광체의 발광 강도는 $p=21$ torr의 경우 보다 크다. 그러나 그림에는 비교를 위하여 각 조건의 최대 휘도값으로 규격화 한 후 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 방전 조건 모두에서 형광체의 발광 휘도는 방전시간에 따라 지수 함수적으로 감소되어 열화되고 있으며, penning gas 압력에 따른 열화 속도는 큰 차이 없이 유사한 거동을 보이고 있다. penning gas 압력이 큰 방전 조건에서는 온도소광 효과 및 color center 등의 불감층이 더 많이 형성되어 열화가 촉진 될 것으로 기대되었으나, 압력이 33 및 21 torr의 조건하에서는 그 차이가 크지 않아 이를 확인 할 수는 없었다.

4. 결 론

PDP 형광체의 사용 중에 따른 휘도 변화 현상을 검토키 위하여 상용품인 $(Y,Gd)BO_3 : Eu$ 적색, $Zn_2SiO_4 : Mn$ 녹색 및 $BaMgAl_{10}O_{17} : Eu$ 청색 형광체들을 penning gas (96%Ar + 4%Xe)의 방전으로 발생한 진공 자외선에 지속적으로 노출하여 노출시간에 따른 휘도 변화를 측정하여 다음과 같은 결과를 알 수 있었다. Penning gas 방전에 지속적으로 노출된 형광체는 온도 소광 및 결함, color center 등의 비발광 경로가 증가되어 그 발광 휘도는 진공자외선 조사시간에 따라 지수 함수적으로 감소하고 있다. 적색 형광체 도포량이 3 mg/cm^2 및 5 mg/cm^2 인 형광막의 열화거동은 유사하였으며, 또한 녹색 형광체의 penning gas 압력에 따른 열화 거동도 큰 차이는 없었다. 그러나 형광체의 열화 속도는 $Zn_2SiO_4 : Mn > (Y,Gd)BO_3 : Eu > BaMgAl_{10}O_{17} : Eu$ 순으로 증가하였는바, 이는 형광체의 감쇄 시간이 길수록 휘도 포화가 증가하며 또한 silicate계의 안정성이 aluminates계 보다 작기 때문이다. 또한 초음

과 분무 열분해로 제조한 $(Y,Gd)BO_3 : Eu$ 적색 형광 막은 입도특성 및 충전 밀도가 향상되어 열화거동은 상용품에 비하여 상대적으로 우수함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2001학년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었는바, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Koike, T. Kojima, R. Toyonaga, A. Kagami, T. Hase and S. Inaho, *J. Electrochem. Soc.*, **126** (6), 1003 (1979).
2. H. Bachtel, W. Czarnojan, H. Glaser, T. Justel, H. Nikol and D.H. Wiechert, *IDW*, **593** (1998).
3. D.B.M. Klassen, D.M. de Leeuw and T. Welker, *J. Luminescence* **37**, 21 (1987).
4. H. Bachtel, W. Czarnojan, M. Hasse and D. Wadow, *J. SID*, **4/3**, 219 (1996).
5. R.Y. Lee, F.L. Zhang, J. Penczek, B.K. Wagner, P.N. Yocom and C.J. Summers, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 16** (2), 855 (1998).
6. J. Koike, *IDW*, **617** (1997).
7. E. Steinrisser, *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 213 (1970).
8. D.S. Kim and R.Y. Lee, *J. Mat. Sci.*, **35**, 4777 (2000).
9. G. Blasse and B.C. Grabmair, *Luminescent Materials* (Springer Verlag, Germany, 1994) p71.
10. C.H. Kim, H.S. Bae, C.H. Pyun and G.Y. Hong, *J. Kor. Chem. Soc.*, **42** (5), 588 (1998).
11. H. Yamamoto, The 1st International Conference on the Science and Technology of Display Phosphor (Nov. 14-16, San Diego, California), Extended Abstracts (1995) p16.
12. N. Yocom, R.S. Meltzer, K.W. Jang and M. Grimm, *J. SID*, **4/3**, 169 (1996).
13. C. Stoffers, R.Y. Lee, J. Penczek, B.K. Wagner and C.J. Summers, *Appl. Phys. Lett.*, **76** (8), 949 (2000).
14. T. Kojima, in *Phosphor Handbook*, ed S. Shionoya and W. M. Yen (CRC press, New York, USA, 1998) p635.
15. A. Morell and N.E. Khiati, *J. Electrochem. Soc.*, **140** (7), 2019 (1993).
16. A. Vecht and S. S. Chadha, *Display Phosphors* (The University of Greenwich, England, 1993) p13.