

조합화학을 이용한 Y(As, Nb, P, V)O₄ 청색 발광 형광체의 합성 및 광 특성 분석

전일운[†] · 손기선^{**} · 박희동^{*} · 유승곤

충남대학교 화학공학과

*한국화학연구소

**순천대학교 재료공학부

(2001년 7월 21일 접수, 2001년 10월 30일 채택)

Synthesis and Luminescent Properties Analysis of Y(As, Nb, P, V)O₄ Blue Emitting Phosphors by Combinatorial Chemistry Method

Il Woon Zeon[†], Kee-Sun Sohn^{**}, Hee Dong Park^{*} and Seung Kon Ryu

Dept. of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea

**Materials Science and Metallurgical Engineering, Sunchon National University, Sunchon 540-742, Korea

(Received 21 July 2001; accepted 30 October 2001)

요 약

조합화학기법을 이용하여 청색 발광을 하는 YRO₄(R=As, Nb, P, V)계 형광체를 합성하였다. 합성한 형광체는 254 nm 및 147 nm 여기 하에서의 발광 세기에 관한 사면체 라이브러리를 완성하였다. 254 nm로 여기 시켰을 때, YAsO₄를 중심으로 높은 발광 세기를 보였고, Y(As_{0.4}P_{0.4}V_{0.2})O₄의 조성으로 1,200 °C에서 합성하였을 때 가장 높은 발광 세기를 보였다. 그러나, 147 nm로 여기시켰을 경우에는 YPO₄를 중심으로 해서 높은 발광 세기를 나타내었다.

Abstract – The YRO₄(R=As, Nb, P, V) blue emitting phosphors were prepared by the combinatorial chemistry method. The quaternary combinatorial library was designed to investigate the luminescence of the host material under UV and VUV excitations(254, 147 nm). In view of the luminescence yield, YAsO₄ rich region was found to be optimum under 254 nm excitation. It was found that the phosphor synthesized at 1,200 °C with Y(As_{0.4}P_{0.4}V_{0.2})O₄ composition had a maximum emission intensity. However, the results under 147 nm excitation were different from those of 254 nm excitation, the samples of the composition containing a large amount of YPO₄ shows the high emission intensity.

Key words: Combinatorial Chemistry, Blue Emitting Phosphor, PDP

1. 서 론

FPD(Flat Panel Display)산업은 현재 시장형성 초기단계에 있는 성장 잠재력이 큰 산업으로서 반도체 산업을 이어갈 차세대 핵심 산업으로 여겨진다. FPD중에서 PDP(Plasma Display Panel)는 대화면화의 용이함과 CRT수준의 화질을 내세우면서 평판표시소자로 급속한 성장세를 나타내고 있다[1]. PDP용 형광체는 플라즈마상태에서 방출되는 진공자외선이 형광체를 여기 발광시키는데 주변 조건들인 가스의 종류와 구동전압들의 조건에 따라 발광효율이 달라지므로 주변환경을 고려한 고효율의 형광체를 개발하여야 한다[2]. 지금까지는 형광체의 조성 및 활성제의 양 등에 관한 활발한 연구가 진행되지 않아서 실험적인 방법

의존하여 새로운 형광체를 합성하였고, 기존의 100개미만의 유용한 형광체 역시 합성과 측정을 반복하여 수행하는 방법으로 개발되어져 왔다[3]. 이에 형광체 합성 및 검색을 극대화시키기 위해 조합화학 기법을 도입하기로 하였다.

조합화학기법(Combinatorial Chemistry Method)은 단시간에 많은 수의 물질을 합성 및 검색할 수 있는 방법으로서 초기에 의약산업에서 신약개발을 위해 다수의 유기 화합물의 합성 및 검색에 이용되어져 왔으며, 근래에는 초전도체와 같은 무기 물질의 합성 및 형광체 합성에도 적용하여 많은 연구가 진행중이다[3-5]. 그러나, 이전의 조합화학기법을 형광체 합성에 그대로 적용하기에는 약간의 문제점이 있다. 합성되어져 나온 샘플의 양이 너무 적어, 간단한 광 분석이외에 결정성 및 입자 형태 관찰과 형광 메커니즘 규명에 관련된 분석을 세부적으로 수행할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 단시간에 물질 검색을 할 수는 있지만, 각각의 물질에 따라서 다시 고상법이나 액상법으로 합성해야하는 단점이

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: s0909iw@orgio.net

있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 자체적으로 고안한 반응기를 제작하여, 합성된 샘플의 수는 기존의 방법보다 적지만, 광 특성 및 결정성, 입자 형태 등의 부수적인 분석을 실행할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 합성한 형광체는 모체발광을 하는 물질로써 청색 발광을 나타내며, 다양한 활성제 및 증감제를 도핑하여 CRT(Cathode Ray Tube), FED(Field Emission Display), PDP(Plasma Display Panel)용 형광체로 응용하기 위하여 다양한 실험 및 좋은 결과들을 나타내었고[6-10], 진공자외선(Vacuum UV)영역의 발광 특성과 이성분계 조합에서도 단순히 몇 가지 조성만으로 결과를 보여준 사례[11, 12]가 있을 뿐, 본 연구에서처럼 사성분계에 대한 결과는 거의 없다.

본 연구는 기존의 조합화학 기법을 형광체 합성 및 평가에 용이하도록 수정하여 형광체를 합성하고, PDP용 형광체로서 가능성이 있는 후보 물질을 검색하는데 목적을 두고, Y(As, Nb, P, V)O₄ 형광체의 다양한 조성에 따른 147 nm와 254 nm 여기 하에서의 발광 세기에 대한 체계적인 라이브러리를 작성하였으며, 청색 발광 형광체의 합성과 광 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2-1. 반응기 및 금속 전구체

본 연구에서는 조합화학 방법 중 넓은 범위의 조성을 검색하는 split-pool 방법을 적용하여, 넓은 범위의 대략적인 조성을 검색하였다. 우선 조합화학 기법을 이용한 형광체 합성을 위해 40×80×12(가로×세로×높이: mm) 크기를 가진 알루미늄 판에 부피가 0.5 ml인 18개의 구멍이 있는 반응기를 제작하여 형광체를 제조하였다. 이 반응기는 기존의 형광 분석기인 Perkin Elmer사의 LS 50B plate reader에 사용 가능하도록 제작한 것이다.

Y₂O₃, As₂O₃, Nb₂O₅, P₂O₅, V₂O₅는 질산과 염산, 불산 등을 사용하여 액상으로 제조한 뒤에 이를 정량적으로 조성표에 맞게 분취 후 약 100 °C에서 1차 건조한 뒤 전기로에서 500 °C로 약 2시간동안 2차 건조하고, 1,100-1,300 °C에서 3시간동안 공기 중에서 소성시켜 형광체를 최종 합성하였다.

2-2. 분석

소성 후 반응기내의 형광체는 형광광도계 Perkin Elmer사의 LS 50B와 PDP 패널 내와 유사한 환경에서 발광스펙트럼을 측정하기 위해 D₂ 램프와 Kr램프가 장착된 조합화학 측정용 VUV PL(Photoluminescence) 장치를 사용하여 254 nm와 147 nm로 각각 여기시켜 흡수 및 발광스펙트럼을 측정하였다. 진공자외선 영역 측정시 시료가 장착된 챔버 내부를 TMP(Turbo Molecular Pump)를 이용하여 4×10⁻⁵ torr 이하의 진공으로 유지시켰다. 제시된 결과들은 주 피크의 최고 세기 값이 아닌 280-550 nm 내에 있는 피크의 면적을 구한 값들이며, 시편 표면의 서로 다른 위치에서 2번 측정된 값을 평균값으로 나타내었으며, 일정한 결과 값을 얻기 위한 측정 기준물질로서 일본 Kasei사에서 제조한 BAM 청색형광체를 사용하였다. 광 특성 분석 후에 반응기내의 형광체를 적당량 분취하여, X선 분말회절기 Rigaku사의 DMAX-33으로 결정성을 확인하였고, SEM으로 입자 형상을 관찰하였다.

2-3. Quaternary Combinatorial Library: QCL

측정결과와 경향성을 쉽게 알아보기 위하여, 제작한 반응기 7개에 총 121개의 샘플을 합성하여 quaternary combinatorial library(이하 'QCL'로 표기)를 작성하였다. 여기에서 구 하나는 다른 구와는 다른 조성을 가진 형광체를 의미하고, 사면체는 총 121개의 구로 이루어져 있다. 각 구의 위치로서 조성이 결정되는데 그 방법은 간단한 lever rule에 의해 4원 상평형도를 보는 방법과 같다. 측정된 발광특성은 각 구의 밝기로 나

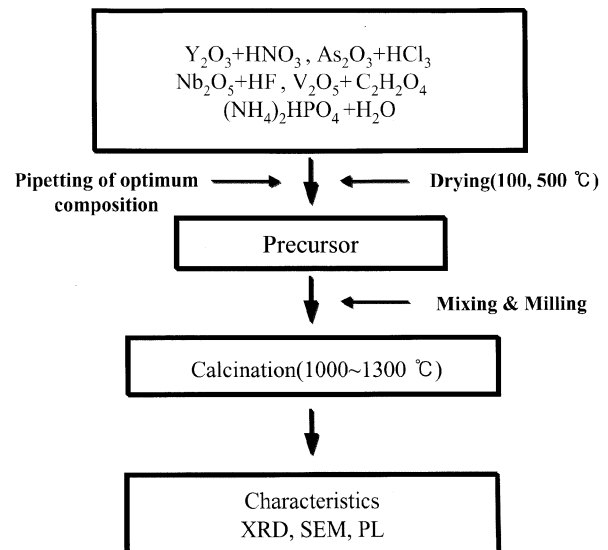


Fig. 1. Schematic flow chart of experimental procedure.

타내는데 흰색은 발광 세기가 높은 것이고, 검정색은 상대적으로 발광 세기가 낮은 것을 나타낸다. 첫 번째 꺾점의 꼭지점은 각각 YAsO₄, YNbO₄, YPO₄, YVO₄의 조성이며, 이것을 중심으로 As, Nb, P, V의 농도가 꼭지점에서 수직으로 이동할 때 0.06 mole, 모서리와 면에서는 0.2 mole의 농도 변화를 주었고, 따라서 120개의 서로 다른 조성으로 합성된 형광체의 광 특성을 정성적으로 한눈에 관찰할 수 있도록 하였다. Fig. 1에 실험과정을 간단히 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

조합화학을 실시하기 전에 각각의 꼭지점을 이루는 YAsO₄, YNbO₄, YPO₄, YVO₄에 대한 합성온도 및 각각의 온도에 따라 합성된 형광체의 진공자외선(147 nm), 자외선(254 nm) 여기 하에서의 광 특성에 대해 알아보았다. Fig. 2-4에 꼭지점 형광체들의 여기 스펙트럼과 여기 원에 따른 발광 스펙트럼을 보였다. YNbO₄의 경우 다른 연구에서와 마찬가지로 자외선 영역(220-240 nm)에서 높은 흡수선을 나타내고 있으며, YPO₄의 경우 자외선 및 진공자외선 영역에서 높은 흡수선을 보인다. 특히, 진공자외선 영역인 110-180 nm의 거의 모든 영역에서 다른 형광체들에 비해 높은 흡수 특성을 보이고 있다.

YPO₄와 마찬가지로 구조가 같은 YAsO₄, YVO₄는 흡수 세기 값은 차이가 많이 나지만, 200 nm부근의 여기 스펙트럼을 포함하여 유사한 여기 스펙트럼 모양을 가지고 있다. 특히, YNbO₄를 제외한 나머지 형광체들은 200 nm이상의 자외선 영역보다 147 nm 부근의 진공자외선 영역에서 큰 흡수선을 보이고 있다. 장파장 자외선 영역에선 YAsO₄의 여기 스펙트럼이 가장 두드러지게 나타나는데, 특히 발광 측정 광원인 254 nm 부근에서의 흡수 크기는 YAsO₄-YPO₄-YNbO₄-YVO₄의 순서이나, YVO₄의 흡수가 나머지 꼭지점 형광체보다 현격히 떨어진다. 여기 스펙트럼과 마찬가지로 발광 스펙트럼에서도 YNbO₄는 다른 형광체와는 달리 400 nm부근에서 중심파장이 형성되었고, 나머지는 430 nm부근에서 최대 발광 세기 값을 나타내었다. 254 nm 및 147 nm의 여기 원으로 여기시켰을 때 합성 온도에 따른 발광 세기가 각각 다르게 나타나고 있다. YAsO₄는 여기 파장에 따라 가장 대조적인 결과를 보였는데, 254 nm 여기 하에서는 1,100 °C에서 소성하였을 때 발광 세기가 가장 높았으나, 147 nm 여기 하에서는 1,300 °C에서 소성하였을 때가 가장 높은 발광 세기를 나타내었다. 각각의 형광체에 대해 상대적인 발광 세기는

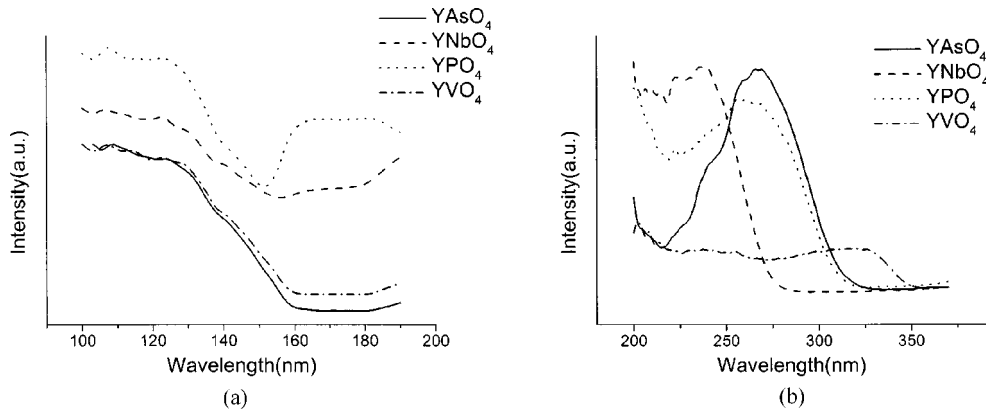


Fig. 2. Excitation spectra of phosphors.

(a) VUV region, (b) UV region.

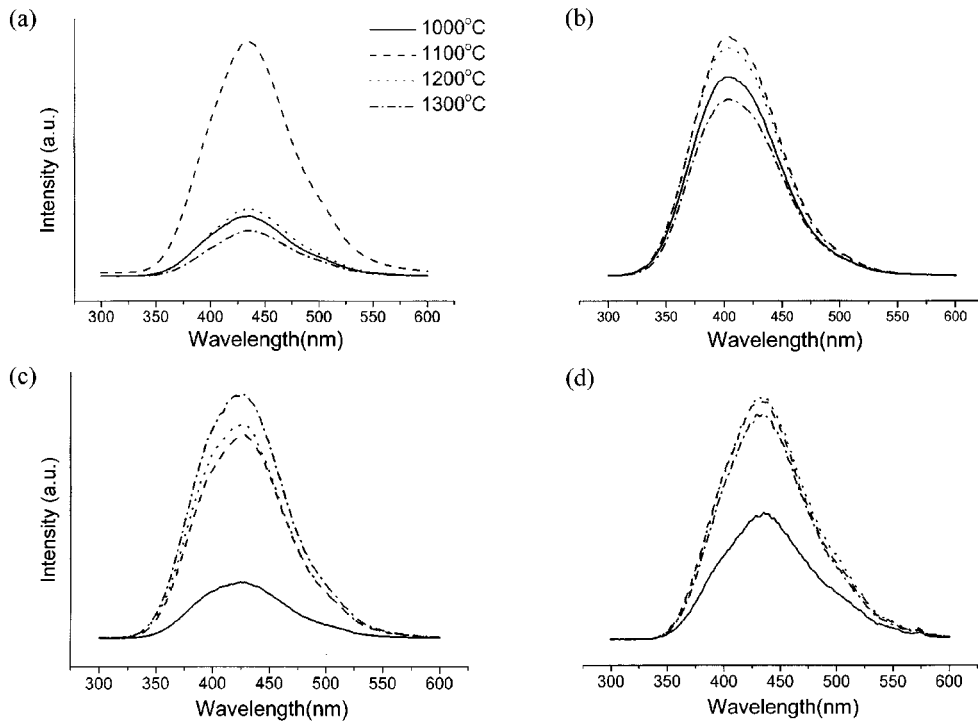


Fig. 3. Emission spectra of phosphor as a function of firing temperature under 254 nm excitation.

(a) YAsO₄, (b) YNbO₄, (c) YPO₄, (d) YVO₄.

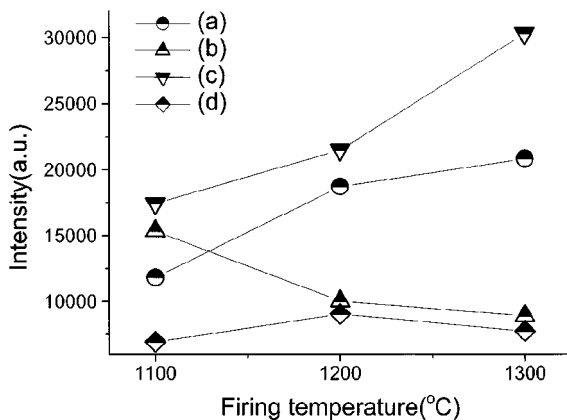


Fig. 4. Emission intensities of phosphor as a function of firing temperature under 147 nm excitation.

(a) YAsO₄, (b) YNbO₄, (c) YPO₄, (d) YVO₄.

254 nm 여기 원에서 YAsO₄가 전체적으로 발광 세기가 높게 나타났고, 147 nm 여기 원에서는 YPO₄의 발광 세기가 가장 높았다. 그러나 합성된 형광체는 모체 발광에만 의한 것이어서 기준물질로 사용한 사용 청색형광체와 비교했을 때 발광 세기가 30%미만인 것으로 나타났다. 합성된 형광체의 발광 스펙트럼에서 보여지듯이 각각의 형광체는 합성 온도와 발광 세기가 아주 밀접한 관계를 가진 것을 알 수 있다. 254 nm 여기에서 YAsO₄의 온도에 의존한 결과를 살펴보면 1,100 °C에서 합성된 형광체의 발광 세기가 월등함으로써 다른 온도에서 합성된 형광체들과의 발광 세기의 차이가 무려 4-5배 차이가 났으며, YPO₄는 1,000 °C에서 합성된 형광체가 나머지 온도에서의 형광체보다 발광 세기가 많이 낮았다. 전자의 경우는 모체의 주성분인 As₂O₃가 매우 휘발성이 강하여 합성온도가 올라감에 따라서 미량씩 휘발되고, 전체적으로 당량비가 맞지 않아서 직접적으로 발광 특성에 나쁜 영향을 끼치는 것으로 보인다. X-선 회절분말기의 분석에서도 YAsO₄는 1,100 °C에서부터 Y₂O₃상이 관찰되었다. 보고된 결과에 의하면, YNbO₄는 일반적인 고상법을

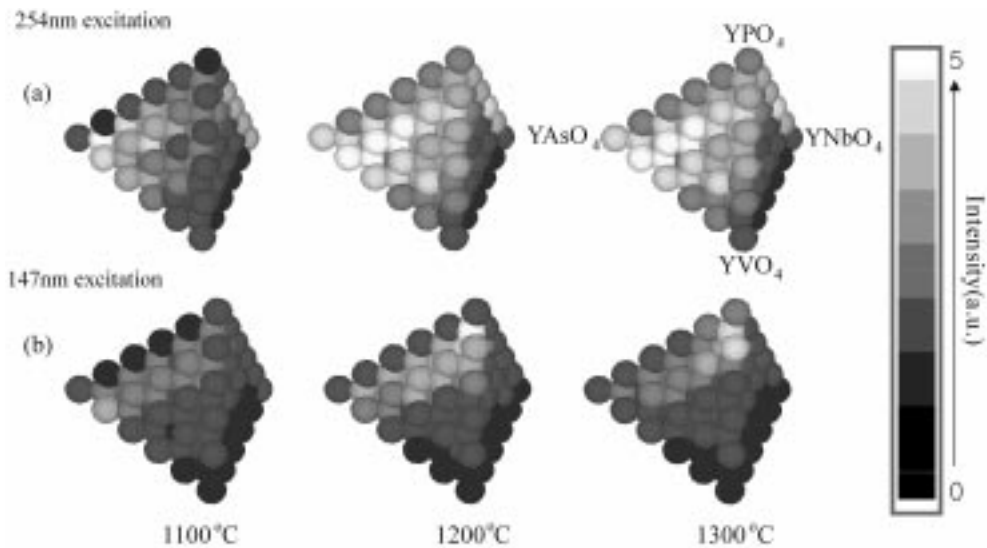


Fig. 5. Quaternary combinatorial library: The gray level stands for emission intensity under (a) 254, (b) 147 nm excitation. The samples were fired at 1,100 °C, 1,200 °C, 1,300 °C.

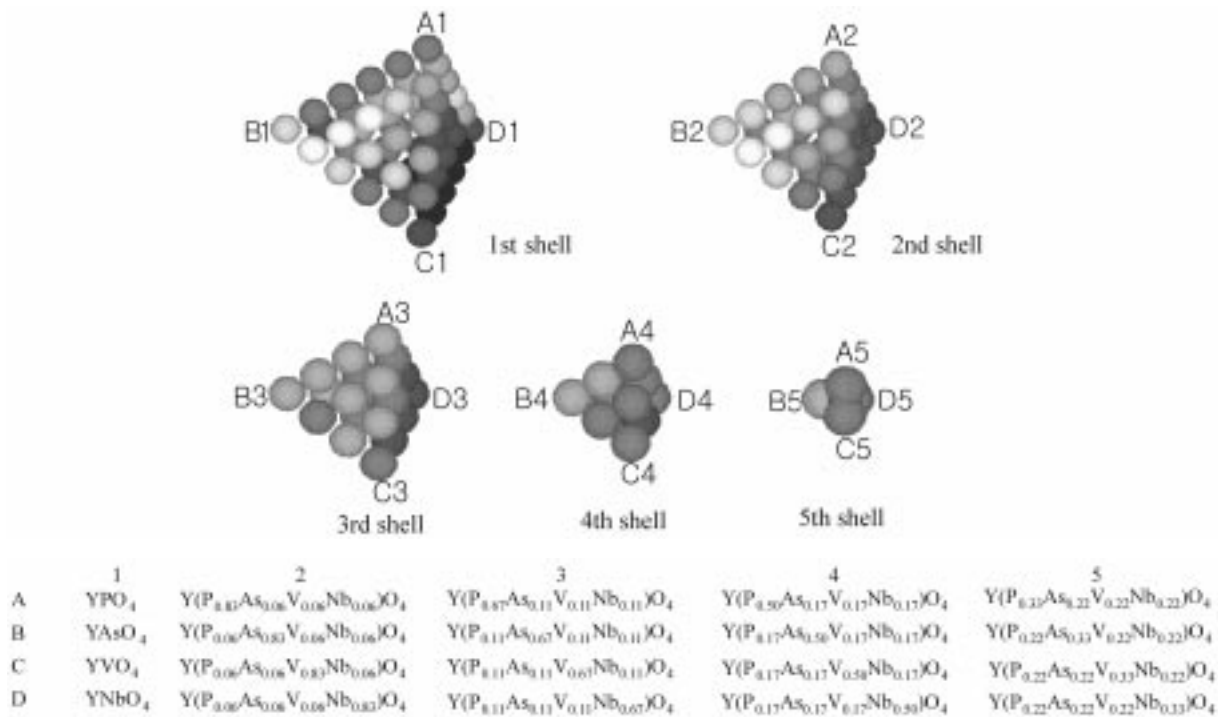


Fig. 6. Quaternary combinatorial library: fired at 1,200 °C, under 254 nm excitation.

이용하여 합성할 때 소결 보조제를 첨가하여도 1,250 °C 이상의 고온에서 열처리해야 M-fergusonite 결정구조를 갖는 저온상을 얻을 수 있으나[8], 본 연구에서는 1,100 °C에서부터 단일상을 형성하였다. 대체로 낮은 온도에서 최적 합성온도에 도달하였고, 단일상을 얻을 수 있었다. 조합화학을 실시한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5는 각각의 합성 온도와 254 nm 및 147 nm의 여기 원을 사용하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 254 nm, 147 nm 여기 파장과 온도에 따른 모든 발광 세기 값을 명암의 차이로 나타내었다. QCL의 장점은 앞서 언급한 바와 같이 조합화학 결과를 나타낼 때 모체에 따른 발광 세기 경향성과 가장 좋은 혼합 조성을 한번에 확인하는 것이다. 254 nm 여기 하에서는 YAsO₄를 중심으로

해서 발광 세기가 높은 형광체들이 YAsO₄-YPO₄-YVO₄ 면에서 집중적으로 관찰되었고, 147 nm 여기원하에서는 Y(As_{0.06}Nb_{0.06}P_{0.83}V_{0.06})O₄의 조성에서 다른 조성에 비해 월등한 세기를 나타내었다. 적정 합성온도는 1,200 °C이었다.

Fig. 6과 7은 적정 합성온도인 1,200 °C에서 합성한 형광체에 대해 254 및 147 nm의 여기 원으로 여기시켰을 때의 QCL을 내부까지 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 첫 번째 껍질과 두 번째 껍질에서 높은 발광 세기를 나타내는 물질들이 있고, 세 번째 껍질이상에서는 상대적으로 발광 세기가 많이 낮은 것을 볼 수 있는데, 이것은 각각의 꼭지점 물질들이 많이 혼합되면 상대적으로 발광 세기에 나쁜 영

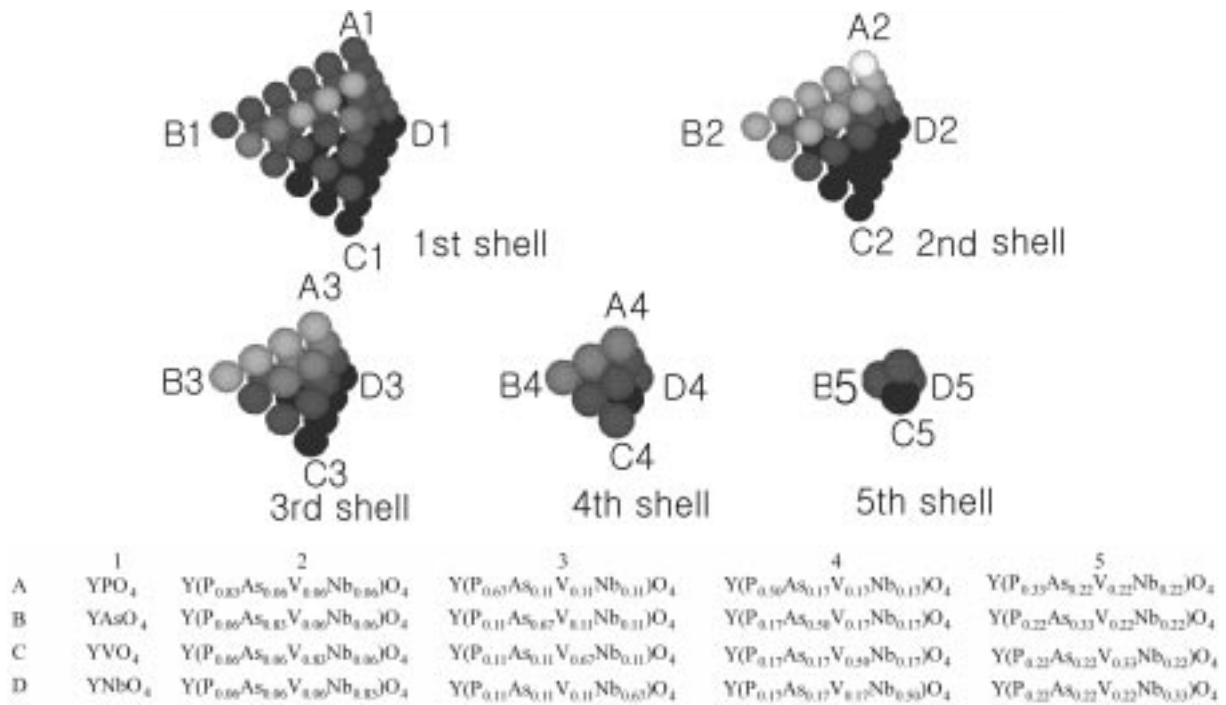


Fig. 7. Quaternary combinatorial library: fired at 1,200 °C, under 147 nm excitation.

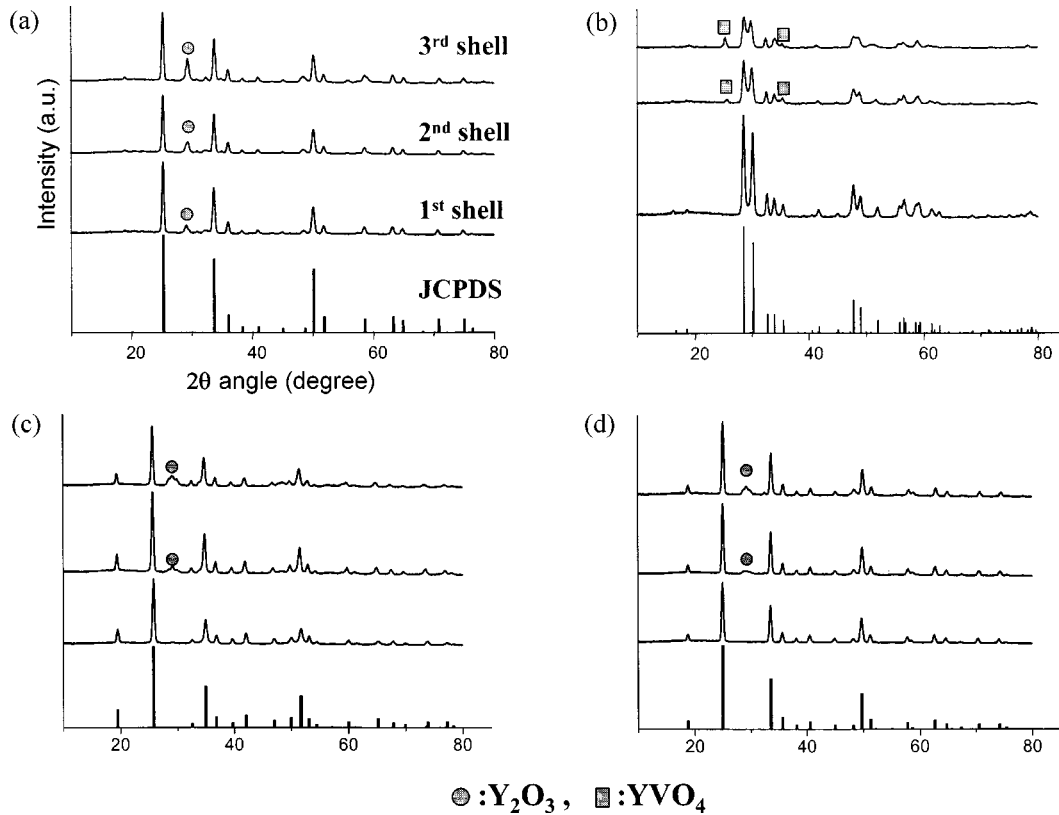


Fig. 8. XRD patterns of phosphor fired at 1,200 °C.

(a) YAsO₄, (b) YNbO₄, (c) YPO₄, (d) YVO₄.

향을 끼치는 것을 알 수 있다. Fig. 7에 제시한 결과는 앞서 제시한 Fig. 6의 결과보다 더 확실한 경향성을 보이고 있다. YVO₄와 YNbO₄가 포함된 면에서는 상대적으로 발광 세기가 많이 낮아지고, 두 번째 껍질의 아

주 좁은 영역에서 발광 세기가 높은 물질들을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 첫 번째에서 세 번째 껍질까지의 꼭지점을 형성하는 형광체들의 X선 회절 스펙트럼을 나타냈다. 합성 온도는 전체적으로 좋은 발

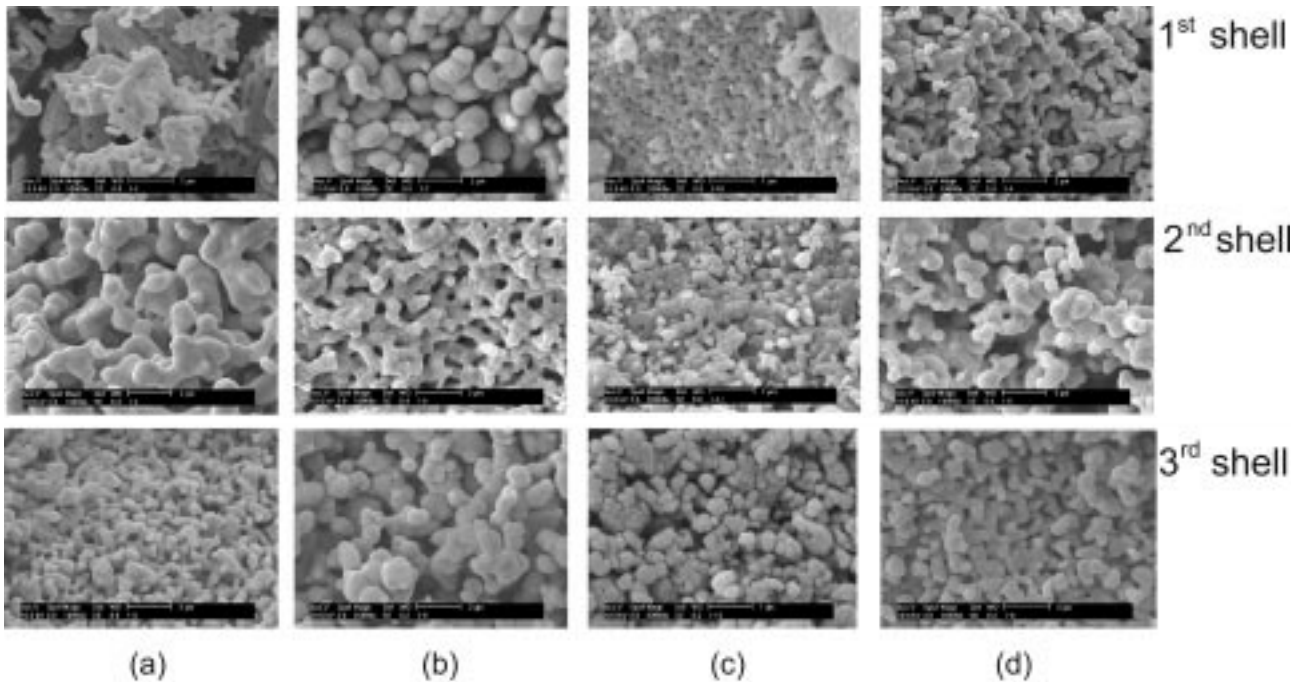


Fig. 9. SEM photographs of phosphor prepared by combinatorial chemistry method.

(a) YAsO_4 , (b) YNbO_4 , (c) YPO_4 , (d) YVO_4 .

광 세기를 나타낸 $1,200^\circ\text{C}$ 이다. YAsO_4 를 제외한 나머지 형광체들은 첫 번째 껍질에서 단일상을 형성한 것을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 YAsO_4 는 경우 $1,100, 1,200, 1,300^\circ\text{C}$ 에서 YAsO_4 의 chervite 단일상과 함께 $2\theta=30^\circ$ 에서 Y_2O_3 의 피크가 관찰되었고, 두 번째 세 번째 껍질로 들어갈수록 Y_2O_3 의 피크 세기가 증가한다. 나머지 꼭지점 형광체들의 경우에도 두 번째 껍질에서부터 Y_2O_3 의 피크가 관찰되는 이유도 휘발성이 강한 As_2O_3 의 휘발에 기인한다고 설명할 수 있다.

합성된 형광체의 대표적인 형태 관찰을 위해 Fig. 9에 전자 주사 현미경(SEM) 사진을 제시하였다. 전체적으로 리간드 그룹의 원자량이 낮은 형광체일수록 입자의 크기가 작았고, 내부 껍질로 들어갈수록 일정한 모양을 유지하지 못하고, 불규칙한 입자 형상을 나타내었다. YNbO_4 는 첫 번째 껍질에서 아주 균일한 형태에서 두 번째 껍질 이상에서 망상 형태로 불규칙해지는 것을 볼 수 있고, 앞서 제시한 결과에서 보았듯이 발광 세기 또한 급격히 감소하였다. YPO_4 는 첫 번째 껍질에서 아주 조밀한 벌집구조 모양을 이루었지만, 두 번째 껍질에서 벌집 모양을 탈피하였고, 입자의 크기 또한 증가한 것을 볼 수 있다.

147 nm 여기원하에서 가장 발광 세기가 우수하였던 $\text{Y}(\text{As}_{0.06}\text{Nb}_{0.06}\text{P}_{0.83}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$ 조성의 형광체는 YPO_4 형광체의 최대 발광 세기 보다 약 2배 이상 높았다. YPO_4 의 최적 합성 온도가 $1,300^\circ\text{C}$ 인데 반하여 이 조성에서는 $1,200^\circ\text{C}$ 였다. 이것은 조성에서 아주 미량을 차지하는 As, Nb, V 성분들이 소결 보조제 역할을 하여 합성 온도를 낮추고, 또한 발광 세기에 좋은 영향을 주었을 가능성이 있고, 또한 이 성분들이 일종의 활성제로 치환되었을 가능성이 있다[13]. 이에 가능한 여섯 가지 조성을 선택한 뒤 $1,200^\circ\text{C}$ 에서 합성하여, 광 특성을 분석하였다. Fig. 10과 11에 254 nm 여기원하에서의 발광 스펙트럼과 상대 발광 세기를 나타내었다.

각각의 조성에 따라서 발광 스펙트럼의 중심파장이 단파장쪽으로 이동하였거나, 스펙트럼의 모양이 조금씩 일그러진 것을 볼 수 있다. 특히, 254 nm 여기원하에서는 $\text{Y}(\text{As}_{0.06}\text{Nb}_{0.06}\text{P}_{0.88})\text{O}_4$ 와 $\text{Y}(\text{Nb}_{0.06}\text{P}_{0.94})\text{O}_4$ 의 조성에서 가장 좋은 발광 세기를 보였으며, 중심파장이 430 nm 에서 400 nm 부근으로 이동한 것으로 보아 Nb의 효과가 큰 것으로 보이고, 또한 중

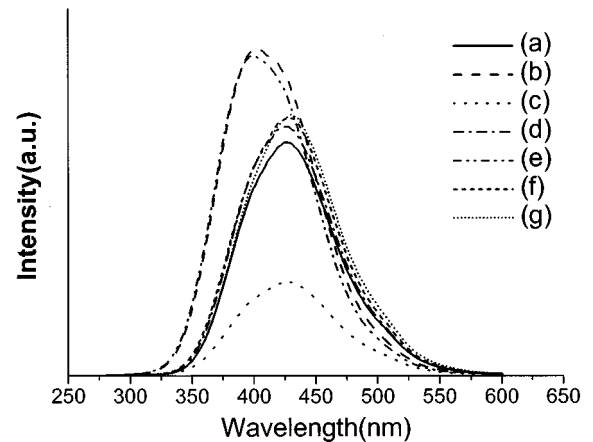


Fig. 10. Emission spectra of phosphors, fired at $1,200^\circ\text{C}$.

(a) $\text{Y}(\text{P}_{0.83}\text{As}_{0.06}\text{V}_{0.06}\text{Nb}_{0.06})\text{O}_4$, (b) $\text{Y}(\text{P}_{0.88}\text{As}_{0.06}\text{Nb}_{0.06})\text{O}_4$, (c) $\text{Y}(\text{P}_{0.94}\text{As}_{0.06})\text{O}_4$, (d) $\text{Y}(\text{P}_{0.88}\text{V}_{0.06}\text{Nb}_{0.06})\text{O}_4$, (e) $\text{Y}(\text{P}_{0.94}\text{Nb}_{0.06})\text{O}_4$, (f) $\text{Y}(\text{P}_{0.94}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$, (g) $\text{Y}(\text{P}_{0.88}\text{As}_{0.06}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$.

심파장에는 변화가 없으나 (c)와 (d)의 스펙트럼의 모양이 장파장 쪽에 일그러진 현상으로 미루어 소결 보조제 역할 외에 일종에 활성제 역할도 하였다고 볼 수 있다. 예로써 CaSO_4 에 W이 도핑되었을 때와 YTbO_4 에 Nb가 도핑되었을 때 스펙트럼 모양이 각각 CaWO_4 와 YNbO_4 로 관찰되는 것을 볼 수 있는데, 아직까지 명확한 메커니즘은 규명되지 못한 상태이다[14]. X-선 회절 분석 결과를 보게 되면 YPO_4 를 축으로 한 두 번째 껍질에서 YPO_4 와 As 성분의 휘발에 기인하는 Y_2O_3 의 혼합상만이 관찰되었다. 이와는 반대로 147 nm 여기 하에서는 $\text{Y}(\text{Nb}_{0.06}\text{P}_{0.88}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$ 와 $\text{Y}(\text{P}_{0.94}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$ 의 조성으로 합성된 형광체가 $\text{Y}(\text{As}_{0.06}\text{Nb}_{0.06}\text{P}_{0.83}\text{V}_{0.06})\text{O}_4$ 보다 발광 세기가 더 높았고, V의 효과가 지배적이라 볼 수 있다.

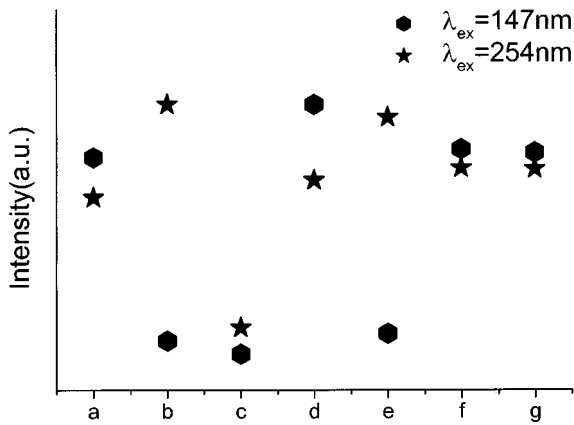


Fig. 11. Emission intensity of phosphors fired at 1,200 °C.

(a) Y(P_{0.83}As_{0.06}V_{0.06}Nb_{0.06})O₄, (b) Y(P_{0.88}As_{0.06}Nb_{0.06})O₄, (c) Y(P_{0.94}As_{0.06})O₄, (d) Y(P_{0.88}V_{0.06}Nb_{0.06})O₄, (e) Y(P_{0.94}Nb_{0.06})O₄, (f) Y(P_{0.94}V_{0.06})O₄, (g) Y(P_{0.88}As_{0.06}V_{0.06})O₄.

4. 결 론

조합화학을 형광체 합성에 적용하여 Y(As, Nb, P, V)O₄ 형광체를 합성하였다. 합성된 형광체는 일관성 있는 결과를 보였으며, 측정 결과를 바탕으로 하여 만든 사면체 조합 라이브러리로 합성 조성에 따른 형광 특성의 경향성을 비교할 수 있었다. 합성된 형광체들은 새로운 구조의 단일 상이 아닌 혼합 상을 주로 이루고 있었으며, 147 nm 여기 원에서는 두 번째 껍질의 꼭지점을 이루는 형광체는 대체로 그 발광 특성이 첫 번째 껍질에서 보다 좋았다. 그러나, 세 번째 이상의 껍질로 들어가면 즉, 더 많은 비율로 서로 혼합될 때에는 발광 세기가 감소하는 현상이 일어났다. 형광체 조합 시에 합성된 형광체의 특성은 첫 번째 껍질

에 꼭지점을 이루는 순수한 모체들의 영향을 많이 받았고, 이것은 발광 세기에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 사면체 조합에서 여기 원에 따른 최적 조성은 254 nm 여기 원에서는 Y(As_{0.4}P_{0.4}V_{0.2})O₄이었고, 147 nm 여기 원에서 Y(Nb_{0.06}P_{0.88}V_{0.06})O₄의 조성이었다.

참고문헌

1. Lee, J. S.: *J. Information Display*, **1**, 25(2000).
2. Moon, S. I., Shin, Y. Y., Heo, Y. D., Kim, Y. H. and Gong, M. S.: *Chem-world*, **37**, 26(1997).
3. Danielson, E., Golden, J. H., McFarland, E. W., Reaves, C. M., Weinberg, W. H. and Wu, X. D.: *Nature*, **389**, 944(1997).
4. Wang, J., Yoo, Y., Chen, G., Takeuchi, I., Sun, X., Chang, H., Xiang, X.-D. and Schultz, P. G.: *Science*, **279**, 1712(1998).
5. McFarland, W. W. and Weinberg, W. H.: *Trends in Biotechnology*, **17**, 107(1999).
6. Osvaldo, A. S., Simone, A. C. and Renata, R. I.: *J. Alloys & Compounds*, **303**, 316(2000).
7. Dinesh, K. A. and William, B. W.: *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 1261(1986).
8. Han, C. H., Kim, H. J., Chang, H., Lee, S. K. and Park, H. D.: *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 2800(2000).
9. Blasse, G. and Bril, A.: *J. Chem. Phys.*, **50**, 2974(1969).
10. Ropp, R. C.: *J. Electrochem. Soc.*, **115**, 841(1986).
11. Rambabu, U., Amalnerkar, D. P., Kale, B. B. and Buddhudu, S.: *Mater. Chem. Phys.*, **70**, 1(2001).
12. Rambabu, U. and Buddhudu, S.: *Opt. Mater.*, **17**, 401(2001).
13. Zeon, I. W., Sohn, K.-S., Jeong, Y. S., Kim, C. H., Park, H. D. and Ryu, S. K.: *Kor. J. Mat., Res.*, **11**, 227(2001).
14. Blasse, G. and Grabmaier, B. C.: "Luminescent Materials," Germany (1994).