

형광분광법에 의한 Eu(III)의 정량

李相學* · 韓鍾煥 · 崔詳堃[†]

경북대학교 자연과학대학 화학과

[†]안동전문대학 환경관리과

(1998. 2. 25 접수)

Determination of Eu(III) by Fluorescence Spectrometry

Sang Hak Lee*, Jong Hwan Han, and Sang Seob Choi[†]

Department of Chemistry, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

[†]Department of Environmental Management, Andong College, Andong 760-820, Korea

(Received February 25, 1998)

요약. 리간드 증감 유발 형광을 이용한 형광 광도법으로 수용액 중의 Eu(III) 이온을 Eu(III)-terephthalic acid(TPA) 착이온의 방출 세기를 측정함으로써 정량하는 방법에 대하여 연구하였다. 들뜸 파장, pH, TPA의 농도 및 방출 파장의 방출 세기에 대한 영향을 조사하였다. Triton X-100에 용해시킨 Trioctylphosphine oxide (TOPO) 용액을 Eu(III)-TPA 용액에 첨가하였을 때는 방출 세기가 현저히 증가함을 관찰하였다. Eu(III) 이온 검정 곡선의 직선 감응 범위와 검출 한계는 TOPO를 첨가하지 않았을 경우에는 들뜸 파장, pH 및 TOPO의 농도가 각각 284 nm, 4.4 및 1.0×10^{-4} M였을 때, 각각 1.0×10^{-6} M- 4.0×10^{-4} M 및 1.0×10^{-6} M였다. TOPO를 첨가하였을 경우에는 들뜸 파장, pH, TPA의 농도 및 방출 파장이 각각 256 nm, 5.6, 3.5×10^{-4} M 및 615 nm였을 때, 각각 1.0×10^{-7} M- 1.0×10^{-4} M 및 1.0×10^{-7} M였다. Eu(III) 이온을 본 방법으로 정량할 때의 방해 이온 효과에 대해서도 조사하였다.

ABSTRACT. Methods to determine Eu(III) ion in aqueous solution by fluorescence spectrometry based upon the ligand sensitized fluorescence of Eu(III)-terephthalic acid (TPA) complex ion have been studied. The effects of excitation wavelength, pH, concentration of TPA and emission wavelength on the fluorescence intensity were investigated. The fluorescence intensity of the Eu(III) complex ion was further increased with addition of trioctylphosphine oxide (TOPO). In this case Triton X-100 was used to dissolve TOPO in aqueous solution. The calibration curve for Eu(III) was linear over the range from 1.0×10^{-6} M to 4.0×10^{-4} M and the detection limit was 1.0×10^{-6} M under the experimental conditions of 256 nm, 5.6, 3.5×10^{-4} M and 615 nm for excitation wavelength, pH, concentration of TPA and emission wavelength, respectively. When TOPO was added to the Eu(III)-TPA system, the concentration range of linear response and the detection limit were 1.0×10^{-7} M to 1.0×10^{-4} M, 1.0×10^{-7} M, respectively under the experimental conditions of 284 nm, 4.4 and 1.0×10^{-4} M for excitation wavelength, pH and concentration of TOPO, respectively. Effects of interferences from various cations for the determination of Eu(III) ion were also investigated.

서 론

란탄족 원소들은 불완전하게 채워진 f궤도 전자들의 독특한 성질 때문에 자기, 광학, 발광, 전기, 촉매 및 열화학 등의 분야에서 응용재료로 많이 이용되고 있다. 또한 생물학 분야에서는 생물학적 거대분자들의 구조 연구를 위한 탐침¹으로, 임상화학 분야에서

는 방사면역학적 검정(radioimmunoassay)을 대신하는 형광면역학적 검정(fluoroimmunoassay)의 발광 탐침²⁻⁵으로 이용되기 때문에 란탄족 원소들을 분석하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 란탄족 원소의 분석방법으로는 분광 광도법,^{6,7} 원자 흡수 분광법,^{8,9} 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법, 유도 결합 플라

스마 질량 분석법,¹⁰ 형광 분광법¹¹⁻¹⁵ 등이 있다. 이들 방법 중에서 형광 분광법은 흡수 분광 광도법보다 더 묽은 농도 범위에 적용할 수 있고, 감도가 좋으며 장치가 저렴하다는 장점이 있다.^{16,17} 또한 이 방법은 형광 센서나 자동화 분석 장치의 구성에 쉽게 이용할 수 있다.¹ 그러나 란탄족 이온들은 흡수율이 낮고, 용액 중에서 용매 분자들의 고에너지 진동에 의한 비복사 활성 해소가 크며, 형광 양자 수득률이 보통 10^{-2} ~ 10^{-3} 정도로 매우 낮으므로 약한 형광을 방출한다.⁴ 따라서 형광 분광법에서는 란탄족 원소들의 낮은 흡수율과 형광 수득률을 해결하여야 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 란탄족 이온들과 유기 리간드들 사이의 착물을 형성해 란탄족의 형광을 증가시키는 리간드 증감 유발 형광(ligand sensitized fluorescence)법을 사용하고 있다.¹⁸⁻²² 이 방법에서는 먼저 유기 리간드가 빛을 흡수하여 들뜨게 되고, 리간드로부터 란탄족 이온의 들뜸 준위로 에너지 전이가 일어난 후, 그 결과로 란탄족이 형광을 낸다.¹⁹ Sager 등²³은 란탄족과 β -diketone 착물의 스펙트럼으로부터 분자간 에너지 전이에서 치환기 효과를 보고하였고, Perry 등²⁴은 수용액 중에서 Eu(III)와 1,3-dimethylxanthine 사이의 에너지 전이에 대한 연구 결과를 보고하였으며, Panigrahi 등¹⁹은 Tb(III)와 aromatic acid의 착물 형성에 의한 Tb(III)의 형광 증가를 보고하였다. Stanley 등²⁵은 β -diketone 리간드들을 이용한 란탄족 원소를 분석하였으며, Miller 등²⁶은 dipicolin acid를 써서 Tb(III), Eu(III), Dy(III)를 정량하였다. Tran 등²⁷은 counter ion인 benzoate로부터 crown ether와 란탄족 착물로의 에너지 전이를 이용한 란탄족 이온의 발광을 측정하여 보고한 바 있다.

란탄족 이온들이 리간드와 착물을 형성할 때, 산소나 불소와 같은 굳은 염기(hard base)와 더 잘 반응한다.² 물분자와 수산화기는 란탄족 이온과 특별히 강하게 결합하는 리간드이므로 수용액상에서는 음으로 하전된 산소를 포함하는 주개 기를 가진 리간드만이 란탄족 이온과 강하게 결합할 수 있다.⁵ 중성 산소나 질소가 란탄족 이온과 결합하기 위해서는, 여러 자리 리간드에 적어도 하나나 두 개의 음으로 하전된 산소를 가지고 있는 주개 기가 있어야 한다.⁵ 최근에는 란탄족 착물의 형광을 증가시키기 위하여 상승제(synergistic reagents)를 많이 사용하고 있다.¹ Trioctylphosphine oxide(TOPO), trifluoroacetylacetone,

tributylphosphate와 dihexyl sulfoxide 등의 물질들이 상승제로 사용되고 있는데, 이 화합물들은 란탄족 착물 주위에 절연층을 형성하여 란탄족으로부터 용매로의 비복사 에너지 전이를 최소화시켜 줌으로써 방출 세기를 증가시키는 것으로 알려져 있다.^{24,28,29} 보통 상승제로 쓰이는 물질들은 란탄족 이온과 결합하여 물분자를 제거할 수 있는 비결합 전자쌍을 가진 산소원자를 가지고 있으며, 상승제의 알킬기들은 금속이온 주위에 탄화수소층을 형성하여 물분자들의 접근을 막아낸다.²⁴

본 연구에서는 생체계에서 발광 탐침으로 많이 이용되고 있는 Eu(III) 이온을 리간드 증감 유발 형광을 이용한 형광 분광법으로 분석하는 방법에 대하여 조사하였다. 본 연구에서는 유기리간드로 방향족 고리 때문에 자외선 영역에서 빛의 흡수율이 높고, 수용액상에서 음으로 하전된 산소를 포함하여 Eu(III) 이온과의 착물 형성이 용이할 것으로 예측되는 TPA(terephthalic acid)를 선정하였다. 최적 분석 조건을 찾기 위해 시료 용액의 pH, 리간드의 농도, 상승제의 농도 등에 대한 영향을 검토하였으며, 이러한 최적 분석 조건하에서 형광 분광법으로 Eu(III) 이온을 정량할 때의 검정 곡선과 검출 한계를 구하였다.

실 험

시 약. 실험에 사용한 Eu_2O_3 (99.9%), Pr_6O_{11} (99.9%), Nd_2O_3 (99.9%), Sm_2O_3 (99.9%), Gd_2O_3 (99.9%), Dy_2O_3 (99.9%), Ho_2O_3 (99.9%), Er_2O_3 (99.9%), Yb_2O_3 (99.9%), Lu_2O_3 (99.9%), $\text{TbCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99.9%), Triton X-100, sodium acetate 및 acetic acid는 Aldrich사(Milwaukee, WI, USA), terephthalic acid(TPA)는 Junsei사(Japan), trioctylphosphine oxide(TOPO)는 Nakari사(Japan), 염산은 동우반도체 제품을 정제하지 않고 그대로 사용하였다. Eu(III) 저장 용액은 Eu_2O_3 를 2% 염산용액에 녹여 1.0×10^{-2} M로 만들었으며, TPA 용액은 TPA를 맑은 용액이 될 때까지 1.0 M NaOH를 첨가하면서 탈이온수에 녹여 1.0×10^{-2} M로 만들었다. 1.0×10^{-2} M TOPO 용액은 10% Triton X-100 용액에 녹여 만들었으며, pH 조절을 위해 0.20 M sodium acetate-acetic acid 완충 용액을 썼다. 모든 수용액은 Millipore사(Bedford, MA, USA)의 Milli-Q water system으로 얻은 탈이온수로 만들었

고, 표준 용액은 저장 용액을 실험 직전에 적당한 농도로 묽혀서 사용하였다.

기 기. 본 실험에서 사용한 분광 형광계는 Spex사(Edison, NJ, USA)에서 제작된 Model FL111 Spectrofluorometer이다. 광원은 450 W Xe Lamp이며 기준검출기로 silicon diode, 시료의 형광을 측정하는 검출기로는 Hamamatsu사(Bridgewater, NJ, USA)의 Model R928 PMT를 각각 사용하였으며, 시료 측정 시 기준 검출기에는 400 V, PMT에는 900 V의 전압이 걸리도록 하였다. 들뜸 단색화 장치와 방출 단색화 장치의 입구와 출구 슬릿 나비는 0.5 mm였고, 측정용 형광 셀은 사면이 투명한 1 cm 석영 셀을 사용하였으며, 입사빛의 90도 각도에서 방출 세기를 측정하였다.

실험방법. Eu(III) 이온과 TPA의 착물 형성에 의한 Eu(III) 이온의 들뜬 상태 스펙트럼과 방출 스펙트럼을 측정하기 위하여 사용한 용액은 다음과 같이 만들었다. 먼저 10 mL 용량 플라스크에 완충 용액 1 mL와 필요한 농도의 Eu(III) 이온 용액을 넣고, TPA 용액 1 mL를 넣은 후, 눈금까지 탈이온수로 채우고 잘 흔들어 준다. 이 용액을 1 cm 석영 셀에 담고, 들뜸 파장과 방출 파장을 바꾸어 가면서 스펙트럼을 얻었다. Eu(III) 이온의 증가된 방출 세기를 조사하기 위해서는 완충 용액에 Eu(III) 용액과 TPA 용액 1 mL를 넣은 다음, Triton X-100에 녹인 TOPO 용액 1 mL를 추가하여 전체 부피가 10 mL가 되게

하여 스펙트럼을 얻었다. 검출 한계를 구할 때의 신호 대 잡음비는 3으로 정하였다.

결과 및 고찰

들뜬 상태 스펙트럼과 방출 스펙트럼. 최적 들뜸 파장을 선택하기 위하여 Eu(III) 이온의 들뜬 상태 스펙트럼을 측정하였다. 방출 파장을 615 nm로 고정하고 측정한 2×10^{-2} M Eu(III) 이온 용액의 들뜬 상태 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었고, 4.0×10^{-5} M Eu(III) 이온 용액에 TPA를 첨가한 용액의 들뜬 상태 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 Eu(III) 이온의 농도가 Fig. 1에서의 경우보다 1000배나 묽혀졌으므로 Fig. 1에서 볼 수 있는 많은 피이크들은 볼 수 없지만 256 nm에서 새로운 센 피이크를 볼 수 있다. 따라서 Fig. 2의 256 nm에서 나타난 피이크는 TPA를 첨가하였을 때에 나타나고, TPA 용액의 흡수 스펙트럼에서도 이 파장에서 센 흡수 피이크를 관찰하였으므로 이 피이크는 TPA의 피이크임을 알 수 있다. 250 nm에서 400 nm의 범위에서 Eu(III) 이온과 TPA가 들어있는 용액의 들뜬 상태 스펙트럼을 들뜸 파장을 변화시켜 가면서 측정하였을 때, 가장 센 방출 세기를 보여 준 들뜸 파장은 256 nm였다.

Eu(III) 이온과 TPA가 들어있는 용액을 256 nm에서 들뜨게 하여 얻은 Eu(III) 이온과 TPA와의 착물

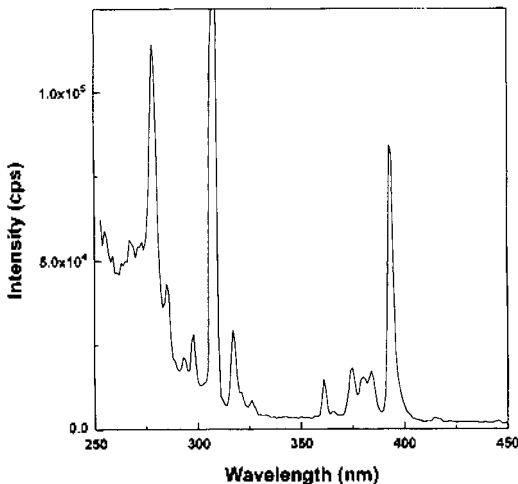


Fig. 1. Excitation spectrum of Eu(III) ion in aqueous solution: [Eu(III)], 2.0×10^{-2} M; λ_{em} , 615 nm.

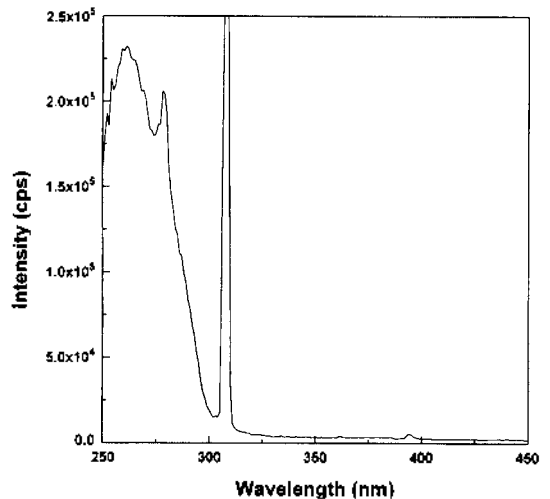


Fig. 2. Excitation spectrum of aqueous Eu(III)-TPA complex in aqueous solution: [Eu(III)], 4.0×10^{-5} M; [TPA], 3.5×10^{-4} M; pH, 5.6; λ_{em} , 615 nm.

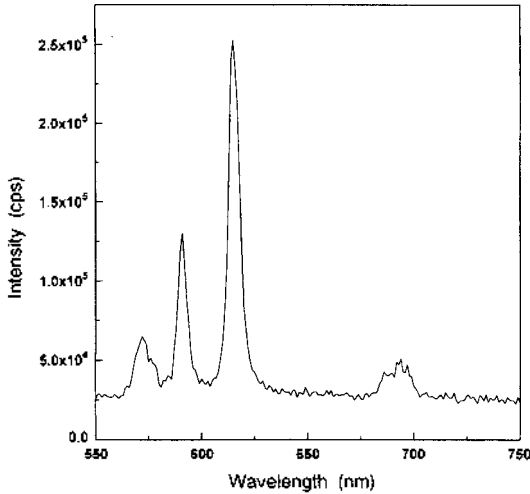


Fig. 3. Emission spectrum of Eu(III)-TPA complex in aqueous solution: [Eu(III)], 4.0×10^{-5} M; [TPA], 3.5×10^{-4} M; pH, 5.6; λ_{ex} , 256 nm.

에 대한 방출 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. Eu(III)-TPA 착물의 방출 스펙트럼에서 피크 파장의 위치가 Eu(III) 이온의 방출 스펙트럼에서의 피크 파장의 위치와 일치하는 것으로부터 이 스펙트럼은 Eu(III) 이온의 전자 전이에 의한 것임을 알 수 있다. $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ 전이인 615 nm의 띠가 가장 센 방출 세기를 나타냄을 볼 수 있다. 또한, 이 피크는 어떤 들뜬 파장에서도 4.0×10^{-5} M Eu(III) 이온 용액에 TPA를 첨가하지 않았을 때는 관찰할 수 없었다. 따라서 Eu(III) 이온과 TPA가 착물을 만든 후의 방출은 Eu(III) 이온의 직접적 여기에 의한 결과가 아니라 리간드 증감 유발 형광 때문이라는 것을 알 수 있다. Eu(III) 이온과 TPA의 용액에 TOPO를 첨가시켰을 때에는 TOPO의 광 흡수 때문에 최대 흡수를 나타내는 파장이 284 nm로 이동하였다. 이 경우, 284 nm로 들뜨게 하여 얻은 방출 스펙트럼에서 관찰한 피크들의 위치는 TOPO를 첨가하지 않았을 때의 방출 피크들의 위치와 동일하였으며, 256 nm로 들뜨게 했을 때 방출 피크들의 위치는 동일하였다. 그러나 615 nm에서의 방출 세기는 Eu(III) 이온의 농도 및 TPA의 농도가 각각 1.0×10^{-5} M 및 3.5×10^{-4} M일 때, TOPO를 넣지 않았을 때의 방출 세기보다 32배 증가됨을 알 수 있었다. TOPO를 첨가할 때, 방출 세기가 증가하는 것은 Eu(III) 이온 주위의 TOPO 때문에 수용액 중에서 Eu(III) 이온의 들뜬 상태 에너

지가 물분자에 의해 소광되는 정도를 줄이게 되어 방출 수득율을 증가시키기 때문으로 생각된다.⁵

pH의 영향. TPA는 2가 유기산($pK_1=3.54$; $pK_2=4.46$ ³⁰)으로 용액의 pH는 TPA와 Eu(III)와의 착물 안정도 상수에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 pH의 영향을 조사하였다. 시료 용액의 최적 pH를 결정하기 위하여 TOPO를 첨가하지 않고 Eu(III) 이온과 TPA만을 반응시킬 때, pH를 3.5에서 6.5까지 변화시키면서 얻은 615 nm에서의 방출 세기의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 pH가 높아짐에 따라 615 nm에서의 방출 세기가 증가하다가 pH 5.6에서 가장 큰 세기를 나타내고, 그 이후에는 감소하였다. 용액의 pH가 5.6에서 최대 방출 세기를 나타낸다는 사실과 TPA의 pK_2 값이 4.46임을 고려하면 TPA의 두 카르복시기이 전부 이온화되었을 때 효율적인 리간드 증감 유발 형광이 일어남을 알 수 있다. TOPO를 첨가한 용액의 경우, pH 3.5에서 pH 5.7까지 pH를 변화시켰을 때의 방출 세기 변화의 결과는 Fig. 5에 나타내었다. TOPO 존재 하에서는 pH 4.4에서 최대의 방출 세기 값을 얻었다. 따라서 이하의 실험에서는 TOPO를 첨가하지 않을 때는 pH 5.6으로, TOPO를 첨가했을 때는 pH 4.4로 고정시켜서 실험하였다. TOPO를 첨가했을 경우에 pH 4.4에서 최대 방출세기를 나타내는 이유는

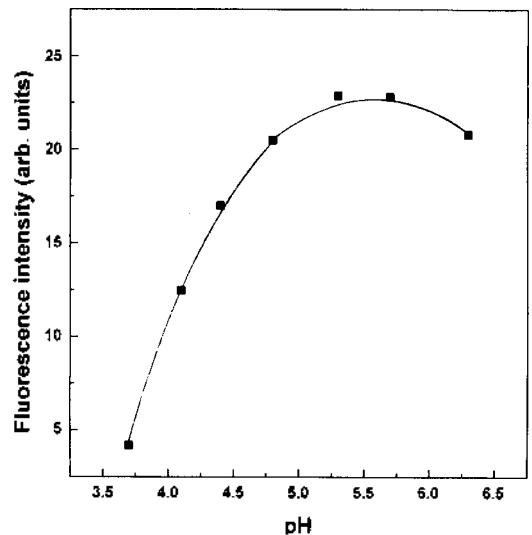


Fig. 4. Effect of pH on fluorescence intensity of the Eu(III)-TPA complex in aqueous solution: [Eu(III)], 4.0×10^{-5} M; [TPA], 3.5×10^{-4} M; λ_{ex} , 256 nm; λ_{em} , 615 nm.

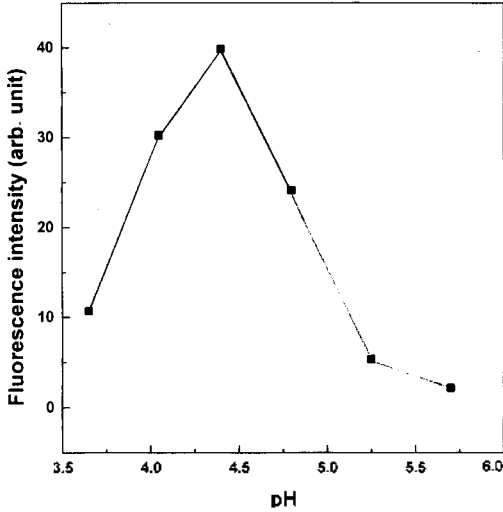


Fig. 5. Effect of pH on fluorescence intensity of the Eu(III)-TPA-TOPO-Triton X-100 system in aqueous solution: [Eu(III)], 1.0×10^{-5} M; [TPA], 3.5×10^{-4} M; [TOPO], 1.0×10^{-4} M; λ_{ex} , 284 nm; λ_{em} , 615 nm.

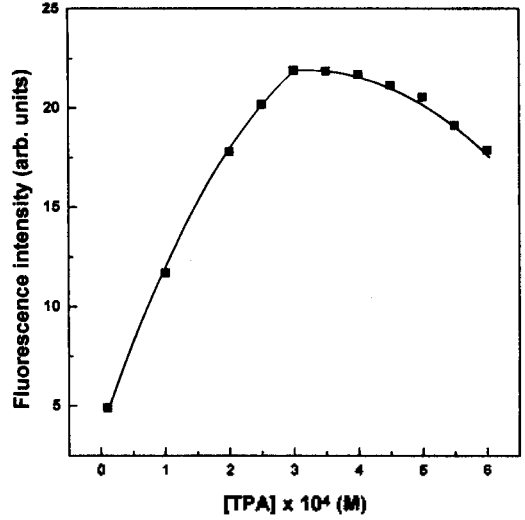


Fig. 6. Effect of TPA on fluorescence intensity of the Eu(III)-TPA complex in aqueous solution: [Eu(III)], 4.0×10^{-5} M; pH, 5.6; λ_{ex} , 256 nm; λ_{em} , 615 nm.

TPA의 두 카르복시기 중, 이온화되지 않은 카르복시기가 TOPO를 용해시킬 때에 사용한 Triton X-100의 극성부분과 강하게 결합하지 못하므로 TOPO와 Eu(III) 이온의 착물 형성을 방해하지 않기 때문으로 생각된다. 그러나 pH가 증가할 때 Eu(III) 이온의 방출 세기가 감소하는 것은 이온화된 두 카르복시기 중 하나는 Eu(III) 이온과 착물을 형성하고 남아있는 한 카르복시기가 TOPO와 Eu(III) 이온의 결합을 방해하여 Eu(III) 이온의 들뜸 준위 에너지가 물분자에 의해 소광되는 정도가 커지기 때문으로 설명할 수 있다.

TPA 농도의 영향. Eu(III) 이온과 TPA의 착물이 615 nm에서 최대 방출 세기를 나타내는데 필요한 리간드 TPA의 농도를 구하기 위해 다음과 같이 실험하였다. pH는 5.6으로 고정시키고, Eu(III) 이온의 농도는 4.0×10^{-5} M로 하여 측정된 TPA의 농도 변화에 따른 방출 세기 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 보여 주는 바와 같이 TPA의 농도가 진행함에 따라 방출 세기가 점차 증가하다가 3.5×10^{-4} M에서 최대값을 보이고 다시 감소하였다. 따라서 이후의 실험에서는 TPA의 농도를 3.5×10^{-4} M로 고정하고 실험하였다.

TOPO 농도의 영향. 최대의 방출 세기를 얻기 위한 TOPO의 양을 조사하기 위해 pH를 4.4로 고정시

키고, 농도가 1.0×10^{-5} M인 Eu(III) 이온 용액에 Triton X-100에 녹인 TOPO를 1.0×10^{-5} M에서 2.0×10^{-4} M까지 변화시키면서 방출 세기를 측정하였다(Fig. 7). 그림에 나타난 바와 같이 TOPO의 농도가 낮을 때는 거의 영향을 주지 않다가 1.0×10^{-4} M에서 가장 큰 방출 세기를 나타내었다.

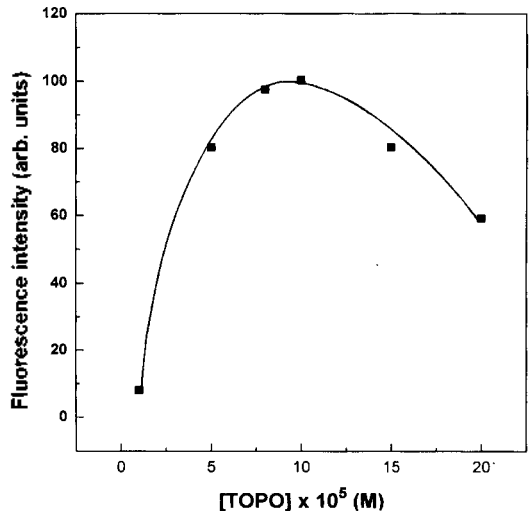


Fig. 7. Effect of TOPO on fluorescence intensity of the Eu(III)-TPA-TOPO-Triton X-100 system in aqueous solution: [Eu(III)], 1.0×10^{-5} M; [TPA], 3.5×10^{-4} M; pH, 4.4; Triton X100, 0.1%; λ_{ex} , 284 nm; λ_{em} , 615 nm.

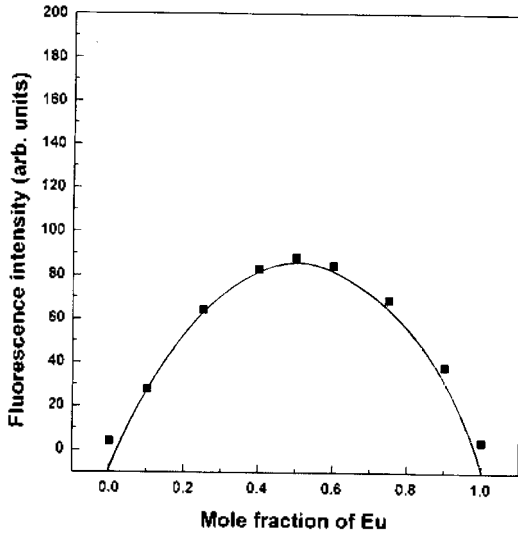


Fig. 8. Fluorescence intensity versus mole fraction of europium in Eu(III)-TPA complex in aqueous solution: pH, 5.6; λ_{ex} , 256 nm; λ_{em} , 615 nm.

Eu(III)-TPA 착물의 조성. Eu(III) 이온과 TPA 착물의 화학량론적 조성을 결정하기 위해 연속변화법을 썼다. 용액의 전체 농도는 1.0×10^{-4} M이 되도록 하고, Eu(III) 이온과 TPA의 농도를 변화시키면서 방출 세기를 측정 한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 몰비가 1:1인 착물이 형성된다는 것을 알 수 있다.

Eu(III)의 검정 곡선. 앞에서 조사한 최적 실험 조건에서 형광 분광법으로 시료 용액 중의 Eu(III) 이온을 정량할 때의 검정 곡선을 구하였다. pH는 5.6으로 고정시키고 TPA의 농도가 3.5×10^{-4} M일 때 Eu(III) 이온의 농도가 5.0×10^{-7} M~ 5.0×10^{-4} M이 되도록 만들어서 615 nm에서 방출 세기를 측정하였다. TOPO를 첨가할 때는 pH는 4.4, TPA의 농도는 3.5×10^{-4} M, 10% Triton X-100에 녹인 TOPO의 농도는 1.0×10^{-4} M로 하여 측정 한 5.0×10^{-8} M~ 5.0×10^{-4} M의 Eu(III) 이온 용액의 방출 세기를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 Eu(III)-TPA 용액의 검정 곡선이며, 1.0×10^{-6} M~ 4.0×10^{-4} M 사이에서 직선성이 비교적 잘 성립하였다. 직선의 상관 계수는 0.9925였으며 검출 한계는 1.0×10^{-6} M였다. 검출 한계를 구할 때의 신호 대 잡음비는 3으로 정하였다. Fig. 9(b)는 Eu(III)-TPA-TOPO-Triton X-100 용액의 검정곡선이며, 직선성이 성립하는 범위는 1.0×10^{-7}

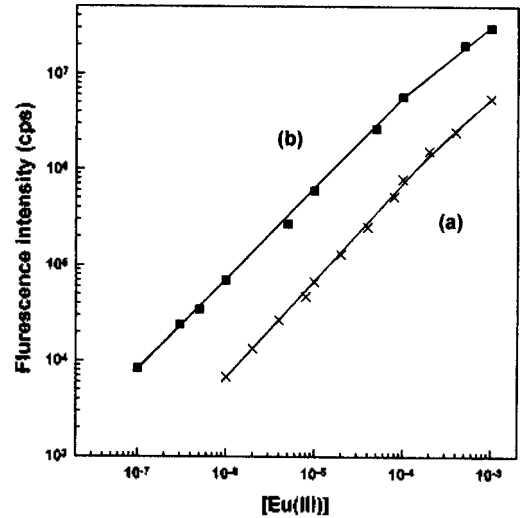


Fig. 9. Calibration curves for Eu(III) ion in aqueous solution: (a) [TPA], 3.5×10^{-4} M; pH, 5.6; λ_{ex} , 256 nm; λ_{em} , 615 nm. (b) [TPA], 3.5×10^{-4} M; [TOPO], 1.0×10^{-4} M; Triton X-100, 0.1%; pH, 4.4; λ_{ex} , 284 nm; λ_{em} , 615 nm.

M~ 1.0×10^{-4} M였다. 직선의 상관계수는 0.9990였으며 검출한계는 1.0×10^{-7} M였다.

방해 이온의 효과. 수용액 상에서 Eu(III) 이온을 TOPO를 사용한 방법을 이용하여 정량할 때에 방해를 할 수 있는 여러 원소들의 영향을 조사하였다. 앞에서 조사한 실험 조건하에서 1.0×10^{-5} M Eu(III) 표준 용액에 란타늄 원소들을 첨가하였을 때의 방출 세기를 관찰하였다. Pr, Tb, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu 및 Sm의 농도가 1.0×10^{-5} M일 때, Eu(III) 이온의 방출세기는 각각 1.5, 4.8, 1.5, 5.0, 1.8, 2.0, 2.2, 2.0 및 3.5% 감소하였고, Nd 및 La의 경우에는 1.0×10^{-5} M로 존재할 때에 Eu(III) 이온의 방출 세기 변화가 1% 이하였다. 그러나 Nd 및 La가 1.0×10^{-4} M일 때는 각각 5.4 및 6.2%의 방출 세기가 감소하였다. Fe, Al, Ca, Cu, Co 및 Cr 이온들은 1000배까지는 Eu(III) 이온의 방출 세기에 영향을 주지 않았다.

본 연구의 일부는 1995년도 경북대 공모과제 연구비의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

인용문헌

1. Baeyens, W. R. G.; Ling, B. L. *Practical Spectroscopy*; Marcel Dekker: New York, U.S.A., 1991;

- Vol. 12, Chap. 1.
- Bunzil, J.-C. G. In *Lanthanide Probes in Life, Chemical and Earth Sciences*; Bunzil, J.-C. G.; Choppin, G. R., Ed.; Elsevier: New York, U.S.A., 1989; Chap. 7.
 - Diamandis, E. P. *Anal. Chem.* **1993**, *65*, 454R.
 - Georges, J. *Analyst* **1993**, *118*, 1481.
 - Richardson, F. S. *Chem. Rev.* **1982**, *82*, 541.
 - Pavon, J. L. P.; Cordero, B. M. *Analyst* **1992**, *117*, 215.
 - Wang, N.; Liang, W.; Zhang, Z. *Analyst* **1992**, *117*, 1963.
 - Jie, Z.; Sixuan, G. *Analyst* **1995**, *120*, 1661.
 - Saleh, M. I.; Salhin, A.; Saad, B. *Analyst* **1995**, *120*, 2861.
 - Jarvis, E. In *Lanthanide Probes in Life, Chemical and Earth Sciences*; Bunzil, J.-C. G.; Choppin, G. R., Ed.; Elsevier: New York, U.S.A., 1989; Chap. 3.
 - Yoshida, I.; Koyabu, K.; Nishida, M.; Sagara, F.; Ishii, D.; Shinkai, S. *Analytical Sciences* **1994**, *10*, 353.
 - Gao, J.; Zhao, G.; Kang, J.; Li, C. *Analyst* **1995**, *120*, 2081.
 - Du, X.; Gao, J.; Xie, Q.; Kang, J. *Talanta* **1994**, *41*, 201.
 - Zhu, G.; Si, Z.; Yang, J.; Ding, J. *Anal. Chim. Acta* **1990**, *231*, 157.
 - Morin, M.; Bador, R.; Dechaud, H. *Anal. Chim. Acta* **1989**, *219*, 67.
 - Albert, G.; Massucci, M. A. *Anal. Chem.* **1966**, *38*, 215.
 - Yoshimura, K.; Matsuoka, S.; Tabuchi, T.; Waki, H. *Analyst* **1992**, *117*, 189.
 - Gorges, J.; Ghazarian, S. *Anal. Chim. Acta* **1993**, *276*, 401.
 - Panigrahi, B. S.; Peter, S.; Viswanathan, K. S.; Mathews, C. K. *Spectrochimica Acta, Part A* **1995**, *51*, 2289.
 - Panigrahi, B. S.; Peter, S.; Viswanathan, K. S.; Mathews, C. K. *Anal. Chim. Acta* **1993**, *282*, 117.
 - Peter, S.; Panigrahi, B. S.; Viswanathan, K. S.; Mathews, C. K. *Anal. Chim. Acta* **1992**, *260*, 135.
 - Xu, Y.; Hemnila, I. A.; Lovgren, T. N. E. *Analyst* **1992**, *117*, 1061.
 - Sager, W. F.; Filipescu, N.; Serafin, F. A. *J. Phys. Chem.* **1965**, *69*, 1092.
 - Perry, L. M.; Winefordner, J. D. *Anal. Chim. Acta* **1990**, *237*, 273.
 - Stanley, E. C.; Kinneberg, B. I.; Varga, L. P. *Anal. Chem.* **1966**, *38*, 1363.
 - Miller, T. L.; Senkfor, S. I. *Anal. Chem.* **1982**, *54*, 2022.
 - Tran, C. D.; Zhang, W.; *Anal. Chem.* **1990**, *62*, 835.
 - Halverson, F.; Brinen, J. S.; Leto, J. R. *J. Chem. Phys.* **1964**, *41*, 157.
 - Halverson, F.; Brinen, J. S.; Leto, J. R. *J. Chem. Phys.* **1964**, *41*, 2752.
 - Dean, J. A. *Handbook of Organic Chemistry*; McGraw-Hill: Singapore, 1987; Sect. 8.