

Determination of Pu Oxidation states in the HCl Media Using with UV-Visible Absorption Spectroscopic Techniques

UV-Visible 흡수분광학법을 이용한 염산매질내 Pu 산화상태 측정

Myung Ho Lee, Mu Yeol Suh, Kyoung Kyun Park, Yeong Jae Park and Won Ho Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

mhlee@kaeri.re.kr

이명호, 서무열, 박경균, 박영재, 김원호
한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received August 17, 2005 / Approved December 7, 2005)

Abstract

The spectroscopic characteristics of Pu (III, IV, V, VI) in the HCl media were investigated by measuring Pu oxidation states using a UV-Vis-NIR spectrophotometer (400-1200 nm) after adjusting Pu oxidation states with oxidation/reduction reagents. Pu in stock solution was reduced to Pu(III) with $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, and oxidized to Pu(IV) and Pu(VI) with NaNO_2 and HClO_4 , respectively. Also, Pu(V) was adjusted in the Pu(VI) solution with $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$. The major absorption peaks of Pu (IV) and Pu(III) were measured in the 470 nm and 600 nm, respectively. The major absorption peaks of Pu (VI) and Pu(V) were measured in the 830 nm and 1135 nm, respectively. There was not found to be significant changes of UV-Vis absorption spectra for Pu(III), Pu(IV) and Pu(VI) with aging time, except that an unstable Pu(V) immediately reduced to Pu(III).

Key words : Pu oxidation state, absorption spectrum, spectroscopic characteristics

요 약

염산매질에서 산화/환원제를 사용하여 Pu 산화수를 조절한 후, UV-Visible-Near IR 분광기를 이용하여 Pu(III, IV, V, VI) 산화수에 대한 흡수스펙트럼을 측정하여 그 분광학적 특성을 고찰하였다. Pu(III)으로 조절하기 위하여 환원제인 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 를 사용하였으며, Pu(IV)와 Pu(VI)로 조절하기 위하여 산화제인 NaNO_2 및 HClO_4 를 각각 사용하였다. 또한 Pu(VI)로 조절된 용액에 환원제인 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 를 사용하여 Pu(V)로 조절하였다. Pu(III)와 Pu(IV)의 대표적인 흡수피크

는 470 nm 및 600 nm에서 각각 관찰되었고, Pu(VI)와 Pu(V)의 특성피크는 830 nm 및 1135nm에서 각각 관찰되었다. Pu(III, IV, VI) 산화상태의 시간 경과에 따른 흡수스펙트럼 변화는 관찰되지 않았으나 Pu(V)의 경우 매우 불안정하여 생성되자마자 Pu(III)로 변화되었다.

중심단어 : Pu 산화수, 흡수스펙트럼, 분광학적 특성

I. 서론

악티나이드 중에서 산화상태의 종류가 많지 않는 원소들의 수용액 중 화학적 거동은 많이 밝혀져 있다. 반면에 플루토늄의 경우 Pu(III), Pu(IV), Pu(V) 및 Pu(VI)등 다양한 산화수로 존재하므로, 환경중 용액조건 (산화·환원 준위, pH)에 따라 Pu 산화수가 쉽게 변한다. 따라서 Pu 산화상태에 대한 연구는 Pu 환경중 거동 규명에 매우 중요하다. 또한 Pu 산화상태간의 산화·환원준위 값의 차이가 크지 않아서 용액중에 Pu의 산화상태는 두가지 혹은 그 이상의 산화상태로 동시에 존재할 수 있다. 예를 들면, 지하수에서 Pu 대부분은 Pu(IV) 형태로 존재하고 해수에서는 Pu(IV) 및 Pu(V)가 공존하며 호수 및 강물에서는 Pu(III), Pu(V) 및 Pu(VI) 형태로 존재한다고 보고되어 있다[1]. 특히 Pu(V)은 다른 Pu 산화수들에 비해 가장 높은 용해도를 가지고 있어서 Pu 이동에 큰 영향을 미친다. 그러나, Pu(IV)는 다른 Pu 산화수들에 비해 가장 낮은 용해도를 가지고 있어 무기물 및 바위표면에 강하게 흡착된다. Pu(IV)의 낮은 용해도와 강한 흡착성은 악티나이드의 환경중 이동을 억제하는 중요한 역할을 한다. 또한 이온교환수지를 사용하여 Pu 동위원소를 분리하기 위해서는 조절된 Pu 산화수의 안정성 유지가 분리효율을 좌우할 수 있으며 일정한 산화상태를 갖는 Pu를 사용하는 착물반응, 흡착반응등의 연구에도 Pu 안정성이 요구된다. 따라서 플루토늄의 침전, 착물형성, 흡착 및 콜로이드 형성 과정들이 Pu 산화상태 및 안정성에 크게 의존하기 때문에 환경시료중 플루토늄의 분포 및 거동에 대한 자료를 획득하려면 Pu 산화수를 포함한 Pu 화학종(species)에 관한 정보를 파악하는 것이 필요하다.

Pu 산화수를 정량적으로 결정하는 방법으로 Pu 농

도가 마이크로몰(μM) 이하이면 공침, 선택적 흡착, 액체 크로마토그래피 및 용매추출등의 화학분리법이 사용되며, 마이크로몰(μM) 이상이면 UV-Visible absorption spectroscopy, photo-acoustic spectroscopy 및 thermal deflection spectroscopy등의 분광학적 방법이 사용된다. 화학분리법은 알고 있는 Pu 산화상태에서 Pu를 정확하게 정량할 수 있지만, 용액중 Pu 화학종에 대한 정보는 제공하지 못한다는 단점이 있다. 그러나 흡수분광법은 용액중 Pu 산화수 측정 뿐만 아니라 Pu 화학종의 특성을 평가하는데 사용된다. 플루토늄의 산화상태 조절은 산화·환원제를 이용하는 방법, 전기화학적 방법과 분광학적 방법이 사용되고 있다[2]. 산화·환원제 방법은 이미 선진국들에 의해서 많이 활용되고 있는 기술이다. 전기화학적 방법은 산화·환원제와 같은 화학약품이 필요치 않고 산화/환원 공정을 단순화할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 목적에 따라 선택적으로 사용되고 있다. 분광학적 방법은 플루토늄을 포함한 우라늄 및 넵투늄의 산화수 조절에 사용되고 있으며, 최근에 레이저 기술의 발전과 더불어 이 분야에 대한 연구가 활성화되고 있다. 악티나이드의 산화상태를 측정하는 방법으로는 방사화학적 분리방법을 이용하여 산화상태별로 분리한 후, 알파 분광법으로 정량하는 방법이 있다. 그밖에도 분광학적 방법과 전기화학적 방법등이 Pu 산화수 측정에 이용되고 있다[3].

질산 자체가 산화성이 강해서 원하는 Pu 산화수 조절이 어려움에도 불구하고 대부분의 우라늄 관련 화학공정이 질산 매질이므로 이미 여러 선진 원자력 연구기관에서 질산매질에서 Pu 산화상태 조절기술이 개발되었다[4-5]. 그러나 염산 자체가 금속에 대한 부식성이 강하고 음이온 교환수지에 대한 선택성이 질산매질에 비해 낮아 아직까지 염산매질에서의 Pu 산화수 조절기술 개발은 미미한 실정이다. 본 연구에

서는 특별한 장치 없이도 Pu 산화상태를 조절할 수 있는 산화·환원제 방법으로 염산매질에서 Pu 산화수를 조절하였다. UV-Visible-Near IR 분광분석법으로 Pu (III, IV, V, VI) 산화상태에 대한 흡수스펙트럼을 측정하여 그 분광학적 특성을 비교하였고, 경과시간에 대한 Pu 산화상태의 안정성도 고찰하였다.

II. 실험방법

가. Pu 기준용액 제조

Pu 기준용액을 만들기 위해 산화플루토늄 (PuO_2 , 0.04% ^{238}Pu , 0.05% ^{239}Pu , 0.022% ^{240}Pu , 0.035% ^{241}Pu , 99.932% ^{242}Pu , 0.02% ^{244}Pu , ORNL, USA) 분말 일정량을 취하여 질산 및 소량의 불산을 사용하여 녹였다. 이 과정을 반복하여 건조된 잔유물을 완전히 녹인 후 증발 건조하였다. 잔유물에 진한 염산을 가해 19.3 mM 농도의 Pu-242 기준용액 (2 M HCl solution)을 만들어서 콜로리미터법을 사용하여 기준용액에 대한 Pu 농도를 정량한 결과 Pu 농도는 19.3 mM로 측정되었다.

나. Pu 산화수 조절

Pu-242 기준용액(stock solution)을 함유한 반응용기에 0.5 M $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 0.193 ml과 0.68 M NaCl 1.307 ml을 가한 후 조심스럽게 교반하여 Pu 산화상태를 Pu(III)으로 조절하였다. 이때 이온 강도를 1.0 M로 유지하기 위해 0.68 M NaCl를 사용하였다. Pu 산화상태가 Pu(III)으로 조절된 Pu 용액(1.2 ml)이 함유된 반응용기에 산화제인 1 M NaNO_2 58 μl (Pu 농도의 약 10배)를 넣고 교반한 후 Pu 산화수 변화에 대한 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 또한 1 M NaNO_2 보다 강력한 산화제인 1 M H_2O_2 및 1 M NaBrO_3 58 μl 를 Pu(III) 용액에 가해 Pu 산화수 변화를 관찰하였다. Pu 기준용액을 함유한 반응용기에 0.5 M NaNO_2 66 μl (Pu 농도의 약 10배)를 넣은 후 조심스럽게 교반하여 Pu 산화상태를 Pu(IV)으로 조절하였다. 또한, Pu 산화상태를 Pu(VI)로 조절하기 위해 Pu 기준용액이 함유된 반응용기에 진한 질산 0.6 ml을 가하여 증발건조하였다. 잔유물에 진한 질

산 0.6 ml를 가한 후 증발 건조한 후, 진한 HClO_4 약 0.6 ml를 가한 후 용액이 거의 증발건조될 때까지 가열하여 Pu 산화상태를 Pu(VI)로 조절하였다. Pu 산화상태가 Pu(VI)로 조절된 Pu 용액(1.2 ml)이 함유된 반응용기에 1 M $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 58 μl (Pu 농도의 약 10배)를 넣은 후 반응시켜 Pu 산화상태를 Pu(V)로 조절하였다.

다. Pu 산화수 측정

Pu(III) 스펙트럼을 측정하기 전에 염산 농도 및 이온강도를 시료와 동일하게 조절한 reference solution (2 M HCl 0.5 ml + 0.5 M $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 0.193 ml + 0.68 M NaCl 1.307 ml)을 만들어 baseline correction 한 후, 반응용기에서 산화수가 조절된 Pu 용액 (III) 일정량(0.8 ml)을 석영셀에 각각 넣고 흡수분광기(Varian, Cary 5)로 400 - 1200 nm 파장영역에서 스펙트럼을 측정하였다. 또한 Pu(IV), Pu(VI) 및 Pu(V)도 Pu(III)와 동일한 방법으로 측정하였다.

라. Pu 산화상태별 안정성 평가

Pu(III), Pu(IV), Pu(V) 및 Pu(VI)로 조절된 Pu 용액의 안정성을 알아보기 위하여 반응후 경과시간에 따른 Pu 흡수스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 또한 Pu(VI)로 조절된 Pu 용액에 환원제인 hydroxylamine 일정량 (Pu 농도의 5배)을 가해 시간의 변화에 따른 Pu 흡수스펙트럼 변화를 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

가. Pu(III, IV, V, VI) 흡수스펙트럼

Pu 기준용액에 대하여, 0.5 M 질산의 경우에는 Pu(IV)의 흡수 스펙트럼만 관찰되었으나^[4] 염산 매질의 경우에는 Pu(IV) 및 Pu(VI) 산화상태가 공존함을 UV-VIS 분광기로 확인할 수 있었다. 0.5 M 염산 매질의 Pu 기준용액에 환원제인 0.5 M $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 을 가한 후, Pu 흡수스펙트럼을 측정한 결과, 전형적인 Pu(III) 흡수스펙트럼을 얻을 수 있었다 (Fig. 1 참조).

Pu 산화수를 IV로 조절하기 위해 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 로 조절된 Pu(III) 용액에 산화제인 0.5 M NaNO_2 를 첨가한 후 경과시간에 대한 UV-VIS 흡수스펙트럼을 관찰한 결과 Pu(III) 및 Pu(IV)이 혼합된 흡수스펙트럼이 관찰되었다 (Fig. 2 참조). 순수한 Pu(IV) 흡수스펙트럼만을 얻기 위해 산화제 (NaNO_2) 농도를 증가시켜 흡수스펙트럼을 측정한 결과, 백그라운드만 증가될 뿐 Pu(III) 특성 피크는 여전히 관찰되었다. NaNO_2 보다 강력한 산화제인 H_2O_2 및 NaBrO_3 을 Pu(III) 용액에 첨가한 후 그 흡수스펙트럼 패턴을 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다. H_2O_2 를 첨가한 경우 10분 후 470 nm 및 655 nm에서 Pu(IV) 특성피크가 비록 관찰되었으나 플루토늄 과산화물 콜로이드 (나노 혹은 마이크로 크기) 형성으로 인해 흡수스펙트럼 백

그라운드가 증가되었다. 따라서 용액중에 콜로이드 상태로 존재하는 플루토늄 과산화물이 시간 경과함에 따라 서서히 중력침강 하여서 용액중 Pu 흡수스펙트럼 세기도 감소하였고, 48시간 경과 후에는 Pu(IV) 피크 관찰이 불가능하였다. Pu(III) 용액에 NaBrO_3 를 첨가한 경우에도 NaBrO_3 산화 작용으로 Pu(III)이 Pu(IV)로 산화되어 반응시작 후 10분이 경과하면 Pu(IV) 피크(655 nm)가 관찰되었고, 20분 경과하면 Pu(IV) 전형적인 흡수스펙트럼이 관찰되었다. 그러나 H_2O_2 경우와 유사하게 NaBrO_3 첨가후 30분이 경과한 경우 플루토늄 과산화물 콜로이드가 형성되어서 흡수스펙트럼 백그라운드가 증가되었고, 60분 경과후에는 Pu 과산화물 침전이 침강하여 용액 내에서 Pu(IV) 흡수스펙트럼 관찰이 불가능하였다.

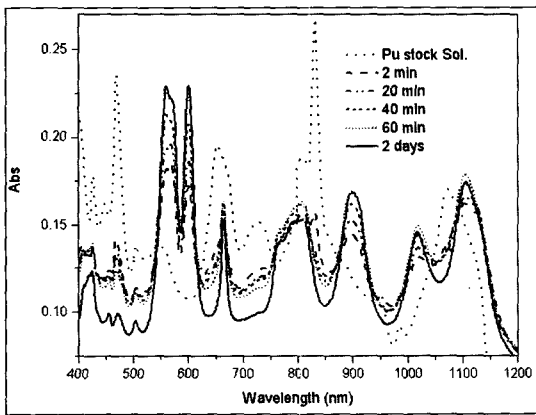


Fig. 1. Growing of absorption spectra of Pu(III) in Pu stock solution after adding $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$

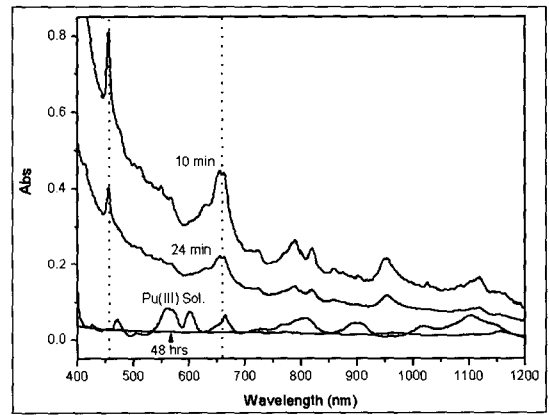


Fig. 3. Changes of absorption spectra of Pu(IV) in Pu(III) solution after adding H_2O_2

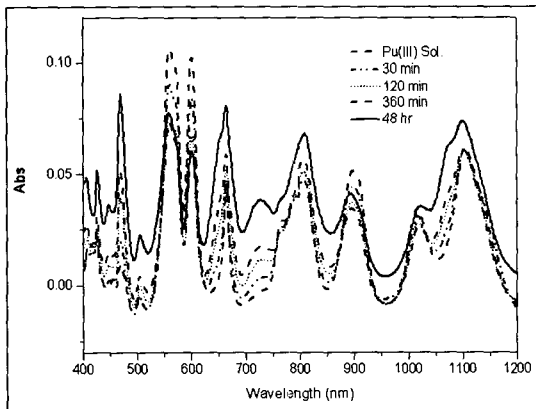


Fig. 2. Changes of absorption spectra of Pu(III) in Pu(III) solution after adding NaNO_2

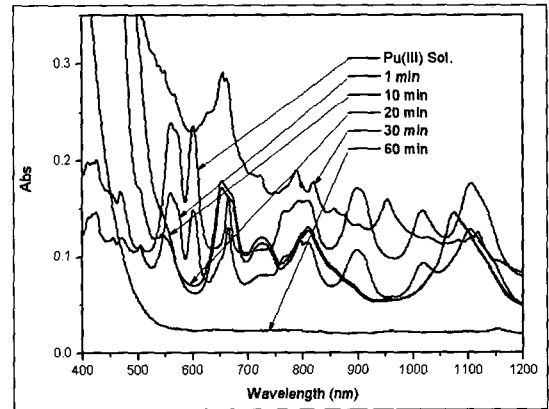


Fig. 4. Changes of absorption spectra of Pu(IV) in Pu(III) solution after adding NaBrO_3

Pu 기준용액에 0.5 M NaNO₂를 가해 시간 변화에 따른 Pu 흡수스펙트럼을 관찰하면 Fig. 5에 나타난 것처럼 Pu(VI)이 서서히 환원되어 반응시작 후 약 7일이 경과되면 대부분의 Pu(VI)가 Pu(IV)로 환원되어 전형적인 Pu(IV) 흡수스펙트럼을 얻을 수 있었다.

Pu(VI) 흡수스펙트럼을 얻기 위하여 Pu 기준용액에 농질산(67%) 및 고농도 HClO₄(60%)용액을 가해 Pu(VI) 산화상태로 조절한 후 Pu(VI) 흡수스펙트럼 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 Pu(VI) 산화상태를 만들기 위해서는 오존발생기를 사용하는데 이 기기를 사용할 경우 오존발생기 작동에 따른 작업자 및 실험실 오염등의 문제가 발생할 소지가 있어 본 연구에서는 HClO₄ 용액을 사용하여 Pu(VI) 산화상태를 조절하였다. HClO₄ 용액을 사용

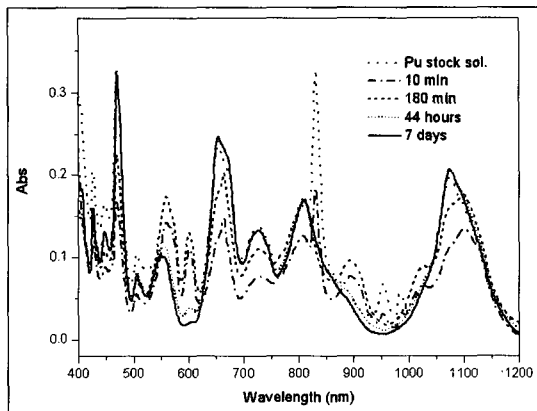


Fig. 5. Growing of absorption spectra of Pu(IV) in Pu stock solution after adding NaNO₂

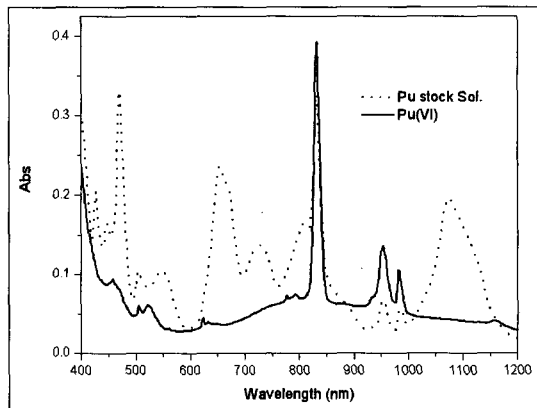


Fig. 6. Absorption spectra of Pu(VI) in Pu stock solution after adding HClO₄

할 경우 833 nm, 953 nm 및 983 nm 등의 Pu(VI)의 특성 피크들이 Near IR 영역에서 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. Connick et al.의 보고에 따르면 과염소산 (perchloric acid) 매질에서 Pu(VI)O₂²⁺ 이온의 O-Pu-O 진동 스펙트럼 피크가 390-450 nm 영역에서 측정되었다고 알려져 있으나[6], 본 연구결과 염산 매질에서는 관찰되지 않았다.

Pu(V)은 불안정해서 불균등화 반응으로 Pu(IV)와 Pu(VI) 산화상태로 쉽게 변화할 뿐만 아니라 환원반응 후 여러 산화수가 공존한다고 알려져 있다. 따라서 Pu(VI)를 환원시켜 안정한 Pu(V) 산화상태로 만들기 어렵다. 본 연구에서는 Pu(V) 산화상태를 얻기 위하여 HClO₄ 용액으로 조절된 Pu(VI) 용액에 환원제인 1M NH₂OH · HCl을 첨가한 후 경과시간에 대한 UV-VIS 흡수스펙트럼을 관찰하였다. 반응시작 후 약 50분 경과한 후 Pu(V)의 특성피크인 569 nm, 775 nm 및 1135 nm가 비록 흡수세기는 약하지만 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다 (Fig. 7 참조). 일반적으로 Pu(V) 산화상태에서의 색깔은 무색이기 때문에 Pu(V) 산화상태에서 흡광세기는 Pu(III), Pu(IV) 및 Pu(VI)의 흡광세기에 비해 매우 미약하게 측정되었다.

나. Pu 산화수에 따른 분광 특성

0.5 M 염산 매질에서 얻은 400 - 1200 nm 영역에서의 Pu(III), Pu(IV), Pu(VI) 및 Pu(V) 스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었고 그 분광학적 특성을 표 1에 나타내었

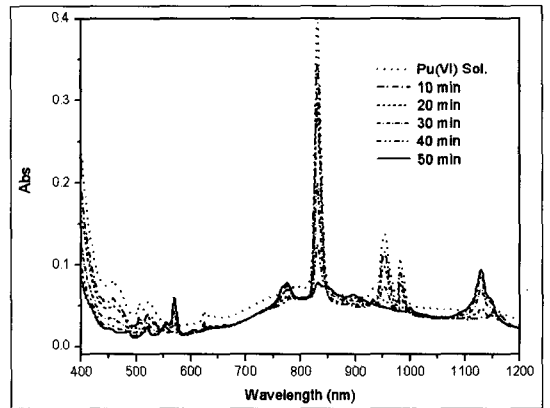


Fig. 7. Growing of absorption spectrum of Pu(V) in Pu(VI) solution after adding NH₂OH · HCl

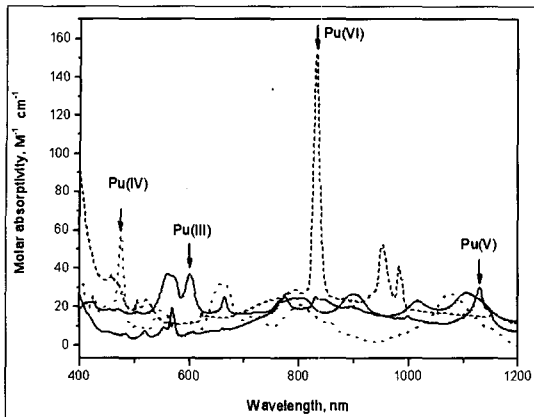


Fig. 8. Typical absorption spectra of Pu(III), Pu(IV), Pu(V) and Pu(VI) in 0.5 M HCl solution

다. 질산매질에서의 Pu 산화수에 따른 흡수스펙트럼은 이미 많이 보고되어 있지만 염산매질에서의 Pu 스펙트럼은 보고된 것이 별로 없는 실정이다. Fig 8에서 나타난 Pu(V)는 다른 산화상태의 Pu에 비하여 흡수세기가 매우 작음을 확인할 수 있다. Pu 산화수에 따른 분광특성은 산화수를 확인할 수 있는 특성파장(λ)과 그 특성파장에서의 흡광도계수($\epsilon\lambda$)로 나타난다. Pu(III), Pu(IV), Pu(VI) 및 Pu(V) 스펙트럼 모양 및 형태는 질산 및 염산 매질에서 비슷하게 측정되었으나, 표1에 나타난 Pu 산화수에 대한 분광특성은 질산 및 염산 매질에서 약간 차이를 보였다. 특히 산화상태가 가장 높은 Pu(VI)의 $\epsilon\lambda$ ($M^{-1}cm^{-1}$) 값은 차이가 나는데 매질의 영향이 크게 작용한 것으로 추측되나 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

다. Pu 산화상태에 대한 안정성 평가

Pu(III) 산화상태에 대한 안정성을 알아보기 위해 경과시간에 따른 Pu(III) 흡수스펙트럼을 10일 간격으로 측정한 결과, 흡수스펙트럼 변화는 거의 관찰되지 않았다 (Fig. 9 참조). Pu(IV) 및 Pu(VI)의 경우

에도 경과시간에 따른 흡수스펙트럼 변화는 거의 관찰되지 않았다. 그러나 Pu(III) 용액에 H_2O_2 를 가한 산화반응의 경우, 반응 시작 후 약 48시간 경과 후에는 회백색의 Pu(IV) 과산화물 침전이 형성되어서 Pu 흡수스펙트럼 관찰이 불가능하였다 (Fig. 3 참조). $NaBrO_3$ 의 경우에도 반응 시작 후 20분 정도에 Pu(IV) 스펙트럼을 얻었으나, 60분 경과후 흡수 스펙트럼을 측정하면 Pu(IV) 과산화물 침전으로 인해 Pu 흡수스펙트럼 관찰이 불가능하였다 (Fig. 4 참조). 본 연구에서 생성된 회백색의 Pu 과산화물 침전은 그 크기가 아주 작은 (나노크기) 입자들이 서로 결합 되었을것으로 추정되나 그 구조나 형태에 대해서는 노틀담과 아르곤국립연구소의 연구진에 의해 Pu 과산화물 침전을 구조가 규명되었다[6]. Np 및 U 등의 과산화물 침전은 나노크기(직경이 약 2nm)의 클러스터들이 24개, 28개 혹은 32개의 동일한 다면체로 속이 빈 새장모양 형태를 가진 자기조립 과정으로 형성된 나노구형체 구조임을 SAXS (Small Angle X-ray Scattering) 및 XRD (X-ray Diffraction) 자료 해석 결과로부터 확인되었다. 본 연구에서 형성된 Pu 과산화물 침전도 나노구형체일것으로 예측할 수 있는데 Pu 과산화물 클러스터들이 24개, 28개 혹은 32개인지는 XRD 분석에 의해 가능하다고 생각된다.

Pu(V) 산화상태의 안정성을 알아보기 위해 경과시간에 따른 Pu(IV) 흡수스펙트럼을 관찰하여 Fig. 10에 나타내었다. 점선으로 나타낸 Pu(V) sol. 스펙트럼은 Pu(VI) 용액에 1M $NH_2OH \cdot HCl$ 을 가하여 50분 경과한후 생성된 Pu(V) 흡수 스펙트럼이다. Fig. 10에서 Pu(V)는 약산성 매질에서 매우 불안정하여 Pu(V)가 생성되자마자 Pu(III)로 변화되어 약 180분 후에는 대부분의 Pu(V)가 Pu(III) 산화상태로 변화하였다.

Table 1. Characteristic wavelength and molar extinction coefficient of various oxidation states of plutonium

	Pu(III)		Pu(IV)		Pu(V)		Pu(VI)	
	Reported (1M HNO ₃)	This work (0.5M HCl)	Reported (1M HNO ₃)	This work (0.5M HCl)	Reported (1M HNO ₃)	This work (0.5M HCl)	Reported (1M HNO ₃)	This work (0.5M HCl)
λ (nm)	600	600	470	470	568	569	830	830
$\epsilon\lambda$	20~40	43	60~77	67	19	21	280~550	194

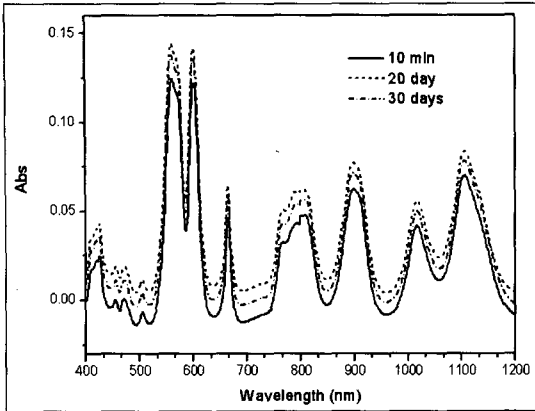


Fig. 9. Absorption spectra of Pu(III) with increasing standing time

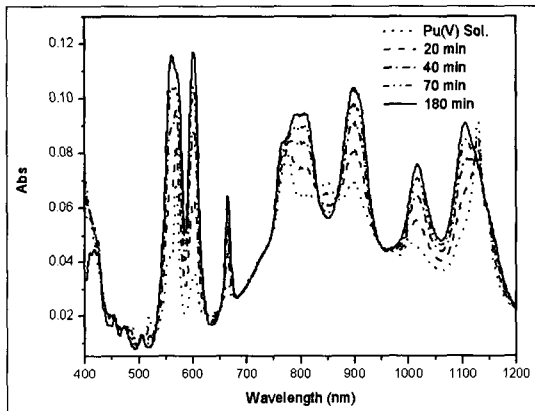


Fig. 10. Growing of absorption spectrum sorption of Pu(III) in Pu(V) solution after adding $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$

IV. 결론

Fig. 8에 나타난 Pu(III)의 스펙트럼의 경우 400~1200 nm 사이에 다양한 흡수피크가 검출되었으나 600 nm에서 검출된 피크는 다른 Pu 산화 상태에서 검출된 피크와 비교해 Pu(III)의 특성피크로 간주할 수 있다. Pu(IV)의 경우 470 nm, Pu(VI)의 경우 830 nm, Pu(V)의 경우 1135 nm에서 특성피크들을 관찰할 수 있었다. 또한 600 nm에서 측정된 Pu(III)의 몰흡광도 (molar absorption coefficient)는 $37 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$, 470 nm에서 측정된 Pu(IV)의 몰흡광도는 $597 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$, 830 nm에서 측정된 Pu(VI)의 몰흡광도는 $152 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$, 1135 nm에서 측정된 Pu(V)의 몰흡광도는 $28 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$

값을 나타내었다. 염산매질에서 각각의 Pu 산화수의 주요피크(major peak)에 대한 몰흡광도는 질산매질에서 측정된 몰흡광도[2]와 비교하면 약간 낮은 값으로 측정되었다. 각 산화상태에서 검출된 Pu 산화상태에 대한 특성피크는 Pu 산화상태에 대한 정보를 제공하여 다른 Pu 산화상태와 구별하는데 사용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1]W. Runde, Los Alamos Science, No 26, Vol II (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM) pp. 465 (2000).
- [2]R. J. Silva, H. Nitsche, "Environmental Actinide Science", MRS Bulletin, 26, pp. 707-713 (2001).
- [3]P. G. Hagan, F. J. Miner, Spectrophotometric Determination of Plutonium III, IV and VI in Nitric Acid Solutions, US Atomic Energy Commission, REP-1391 (1969).
- [4]M. Y. Suh, S. C. Sohn, C. H. Lee, W. H. Kim, Adjustment of Oxidation States of Plutonium in Nitric Acid Solutions, KAERI/TR-1983 (2001).
- [5]R. E. Connick, M. Kasha, W. H. McVey, G. E. Sheline, Spectrophotometric studies of plutonium in aqueous solution, P. P. R. 14B, No. 4-20 (1945).
- [6]P. C. Burns, L. Soderholm, "Actinyl Peroxide Nanospheres", Angew. Chem. Int. Ed., 44, pp. 2135-2139 (2005).

