

## 사용후핵연료 침출액 분석을 위한 세슘의 제거 및 스트론튬의 분리

김승수\* · 전관식 · 강철형  
한국원자력연구소  
(2001. 8.23 접수)

### Removal of Cesium and Separation of Strontium from the Analysis of the Leachate of Spent Fuel

Seung Soo Kim\*, Kwan Sik Chun and Chul Hyung Kang  
Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Yusung, Taejeon, Korea  
(Received Aug. 23, 2001)

**요약** : 사용후핵연료 침출액중 비방사능이 작은 핵종들의 정확한 분석을 위해서는 비방사능이 큰 세슘을 제거하여야 한다. 이를 위하여 세슘만을 선택적으로 흡착한다고 알려진 ammonium molybdophosphate(AMP)를 이용하여 사용후핵연료 침출액의 구성원소들(Cs, U, Ce, La, Co, Sr)과 사용후핵연료와 접한 벤토나이트의 성분들(Ca, Na, K)에 대한 제거율을 검토하였다. 그 결과 0.1 M 질산매질에서 AMP로 90% 이상의 세슘이 제거되었고 대부분의 Ca, Na, Co, Sr은 용액 중에 남아있었다. 그러나 일부 세슘을 포함한 란타늄 3가 이온들은 세슘과 같이 제거되었다. 벤토나이트 성분 중 일부 칼륨도 AMP에 흡착하였으나, 실제 시료와 같이 묶은 벤토나이트 용액에서의 칼륨은 AMP의 유효치환용량에 큰 영향을 주지 않았다. 한편, 사용후핵연료의 침출 기준원소인 스트론튬을 분리하기 위하여 8.0 M 질산매질의 스트론튬 용액을 Sr-resin(Eichrom사 P/N SR-B50-A) 충전칼럼에 흡착시킨 후 0.05 M 질산으로 용리할 경우 95% 이상의 스트론튬을 회수할 수 있었다.

**Abstract** : The selective removal of cesium by ammonium molybdophosphate (AMP) was studied in order to reduce an interference by high radioactivity of cesium on the determination of low radioactive elements in leachate of spent fuel. The removal of Cs, U, Ce, La, Co, Ca, Na, Sr and K was investigated for the leachate and the bentonite in contact with a spent fuel. More than 90% of cesium was removed by AMP and Ca, Na, Co and Sr was remained in 0.1 M HNO<sub>3</sub>. However, three valence elements such as La and Ce were also removed by AMP. Though a little of potassium of the bentonite components was adsorbed on AMP, the potassium in the bentonite solution diluted to its concentration in a real sample would not affect the capacity of AMP greatly.

From another experiment for the separation of strontium as a leaching indicator of spent fuel, the recovery of strontium in 8.0 M HNO<sub>3</sub> solution by using Sr-resin (Eichrom, P/N SR-B50-A) was more than 95% by eluting with 0.05 M HNO<sub>3</sub>.

**Key words** : cesium, strontium, ammonium molybdophosphate, Sr-resin, bentonite

---

★ Corresponding author  
Phone : +82+(0)42-868-8524, Fax : +82+(0)42-868-8584  
E-mail : nsskim@kaeri.re.kr

## 1. 서 론

원자력발전으로 발생한 사용후핵연료를 안전하게 처분하기 위해서는 사용후핵연료의 침출특성이 규명되어야 한다. 이를 위하여 당 연구실에서는 처분환경의 모사시험으로서 벤토나이트와 접한 사용후핵연료의 지하수에 의한 침출시험을 수행 중에 있는데, 이 시험에서 얻은 침출액 및 벤토나이트내에 흡착된 각 핵종들이 정확히 분석되어야 한다. 그러나 사용후핵연료의 침출액 중 Cs-137, Cs-134, Sb-125의 방사능 농도는 각각 약  $5X \times 10^4$ ,  $4.5 \times 10^3$ , 300 Bq/ml에 해당되지만, 나머지  $\gamma$ -핵종들의 방사능 농도는 훨씬 낮으며,  $\alpha$ -핵종의 총 방사능도 수 Bq에 해당한다. 따라서 비방사능이 큰 세슘이 다른  $\alpha$ -,  $\gamma$ -핵종의 정량을 방해할 뿐 아니라 침출액의 취급을 어렵게 하므로 침출액으로부터 세슘만을 선택적으로 제거하려는 연구가 시도되어 왔다<sup>1</sup>. 또한, 스트론튬은 사용후핵연료 중에 대체로 균일하게 분포되어 있어 사용후핵연료 매트릭스 용해의 기준 원소로 많이 사용될 수 있으므로<sup>2</sup>, 우라늄과 더불어 침출액 중 정량하고자 하는 주요 원소 중의 하나이다. 본 연구에서는 세슘을 선택적으로 흡착하는 물질로 알려진 ammonium molybdophosphate(AMP)<sup>3-8</sup>를 이용하여 모의 침출액 및 핵종 이동을 지연시킬 목적으로 사용한 벤토나이트 블록을 용해한 용액 중에 함유되어 있는 몇 가지 원소들로부터 세슘의 선택적 제거능을 조사하였으며, Sr-resin(bis-t-butyl-cis-dicyclohexano-18-crown-6)으로 벤토나이트가 첨가된 용액중 스트론튬을 분리 정량하는 조건도 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 기기

실험에 사용한 금속용액들은 SPEX사 표준용액을 희석하여 사용하였으며, AMP는 Kanto Chemical사, Sr-Resin은 Eichrom사, ferrous sulfamate는 Stream사 제품을 사용하였다. 벤토나이트는 국내산 벤토나이트를, 질산은 국산 1급 시약을, 증류수는 Millipore 순수제조장치를 통과한 증류수를 사용하였다. 용액 중 원소의 농도는 Jobin-Yvon사 JY-50P, inductively coupled plasma - atomic emission spectrometer(ICP-AES)와 VG Elemental사 PQ3, inductively coupled plasma - mass spectrometer(ICP-MS)로 측정하였다.

### 2.2. 세슘의 선택적 제거특성 실험

세슘을 제거하기 위하여 사용한 AMP는  $(Z^+)_3 [XM_{12}O_{40}]^{3-} \cdot nH_2O$ 의 분자식을 갖는 물질로서, Z는 H<sup>+</sup> 혹은 알칼리 금속, X는 P, As, Ge, Si, B, 그리고 M에는 흔히 Mo, W, Nb, V 원소가 해당된다. AMP의 치환용량은 이론적으로 1.57 meq/g이지만, 입체효과를 고려할 때 유효치환용량은 1.0 meq/g으로 추정된다<sup>3</sup>.

사용후핵연료로부터 유출되는 핵종의 성분들인 Cs, Co, Sr, U, Ce, La과, 그리고 벤토나이트의 용해액 성분들인 K, Na, Ca을 실험에 사용할 원소로 선정하였으며, AMP에 의한 이들 이온들에 대한 흡착정도를 다음과 같이 실험하였다.

첫 번째 실험은 선정된 각 원소들에 대한 AMP의 흡착특성을 알기 위하여 측정오차가 작은 영역인 약 50  $\mu$ g/mL 농도를 갖는 Cs, K, Na, Sr, Ca, Ce, La, U의 개별용액을 사용하여 각 원소의 제거율을 구하였다. 이들 용액 10 mL에 AMP 0.05 g씩 넣고 3분동안 혼돈 다음, 30분간 정지한 후 용액을 0.2  $\mu$ m 필터로 여과하여 ICP-AES로 분석하였다. 이때 용액은 1.0 M과 0.1 M의 질산농도로 각각 조절하였다. 세슘의 경우는 AMP를 첨가한 후 30, 60, 90, 120, 180분 지나서 여과함으로써 정지시간에 따른 영향도 조사하였다.

두 번째 실험은 실제 침출액과 같이 낮은 이온농도를 갖는 혼합용액에서 시도하였다. 실제 사용후핵연료 침출액에 용해된 세슘의 농도는 1~50 ng/mL로 추정되는데, 0.1 M과 0.05 M 질산매질 중에 각 원소들의 농도가 5 ng/mL인 Cs, Ce, La, Co, U, Sr의 혼합용액을 모의시료로 사용하였다.

세 번째 실험은 핵종이 흡착된 벤토나이트를 녹인 시료와 유사한 조성을 만들기 위하여 두 번째 실험용액 20 mL에 100  $\mu$ g/mL의 Cs, K용액 1 mL와 벤토나이트 용해액 1.33 mL를 첨가하였다. 이때 사용한 벤토나이트 용해액은 실제 시료와 유사하게 벤토나이트 1.0 g을 진한 불산과 질산으로 용해한 다음 증류수를 첨가하여 부피를 100 mL로 조절한 후 0.2  $\mu$ m 필터로 여과하여 사용하였다.

두 번째와 세 번째 실험은 제조한 모의시료용액 20 mL에 AMP 0.05 g씩을 첨가하여 30분 혹은 60분동안 방치한 후 여과하여 원래의 시료용액과 같이 ICP-MS로 분석하였다. 또한, AMP의 양도 변화시켜 보았다.

### 2.3. Sr-Resin에 의한 스트론튬 흡착실험

BIO-RAD사의 Poly-Prep 칼럼( $\Phi 8 \times 40$  mm)에 0.28~

Table 1. Preparation of sample solutions for strontium separation

Sample	Bentonite solution <sup>a</sup> (mL)	Fe(II) solution <sup>b</sup> (mL)	Sr of 1 mg/mL (mL)	8.0M HNO <sub>3</sub> (mL)	Total volume (mL)
Blank	0	0.1	0	1.9	2.0
SA-1	0	0.2	0.2	3.6	4.0
SA-2	0.4	0.2	0.2	3.2	4.0

<sup>a</sup>Bentonite solution : 1.0 g of bentonite was dissolved by HF + HNO<sub>3</sub> and diluted to 100mL.

<sup>b</sup>Fe(II) solution : 25~30 % ferrous sulfamate solution.

0.44 g의 Sr-resin을 넣고, 0.05 M과 8.0 M 질산 2.5 mL로 각각 1회씩 세척하였다. 그 후 Table 1과 같이 혼합한 시료용액 1 mL를 칼럼에 가한 다음, 스트론튬을 제외한 다른 이온들을 제거하기 위하여 2.5 mL의 8.0 M 질산으로 4회 세척하였다. 칼럼내의 Sr-resin에 흡착된 스트론튬은 0.05 M 질산으로 2.5 mL씩 2회, 1 mL로 1회 흘려 탈착시켰으며, 원래의 혼합용액, 세척액 및 탈착액 중 스트론튬의 농도를 ICP-AES로 측정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. AMP에 의한 세슘의 선택적 제거특성

약 50 µg/mL의 농도를 갖는 각 원소용액 10 mL에 0.05 g의 AMP를 첨가하여 얻어진 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 표에서 여과후 원소들의 농도는 AMP로부터 용출되어 나온 바탕세기를 보정한 값이다. 이 결과로부터 1.0 M의 질산매질에서는 세슘과 칼륨을 제외한 대부분의 원소들은 AMP에 흡착되지 않았으나, 0.1 M의 질산매질에서는 세륨, 란탄, 우라늄도 상당량 흡착하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 산도가 증가함에 따라 AMP의 흡착능이 감소한다는 문헌과 일치하였다<sup>4</sup>. 벤토나이트 성분 중에서는 칼륨을 제외한 나트륨, 칼슘은 대부분 용액중에 남아 있었는데, 이는 0.1 M 이상의 질산매질에서 칼슘과 스트론튬 같은 2가 이온들이 AMP에 흡착하지 않는 것으로 판단된다. 나트륨이 AMP에 흡착하지 않는 현상은 알칼리 금속 이온의 크기가 클수록 AMP에 흡착력이 강하므로<sup>9</sup> 이온크기가 작은 나트륨은 칼륨과 달리 흡착되지 않는 것으로 생각된다. 용액의 매질에 따른 세슘의 제거율은 질산농도를 1.0, 0.1, 0.05 M로 하였을 때 각각 85, 94, 93%로서, 0.1 M의 질산농도가 세슘제거를 위한 적절한 매질로 판단되었다. 또한, 0.1 M 질산매질에서

세슘용액에 AMP를 첨가한 다음 30, 60, 90, 120, 180 분 후 필터한 용액을 측정된 결과, 120분까지는 세슘의 90% 이상이 제거되었으나 180분의 경우는 약 15%의 세슘이 용액중에 남아 있었다. 이러한 현상은 장시간 후 산성용액에서 AMP의 일부가 용해되면서 흡착된 세슘도 용해되는 것으로 생각된다.

Cs, Co, La, Ce, U의 농도를 각각 5 ng/mL로 조절된 혼합용액에 대한 실험결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 0.1 M 질산매질에서 세륨과 란탄이 세슘과 같이 AMP에 흡착되어 제거된 반면, 대부분의 코발트와 우라늄은 용액 중에 남아 있었다. 이러한 현상은 세륨, 란탄 등과 같이 침출액 중에 존재하는 3가의 악티늄족과 란탄족 이온들이 0.1 M 질산매질에서 AMP에 의하여 세슘과 동시에 제거될 수 있음을 의미한다. 그러나 코발트의 경우는 앞에서 기술한 칼슘, 스트론튬과 같이 2가 이온이므로 0.1 M 질산매질에서 AMP에 흡착하지 않았다. 이러한 0.1 M 질산매질에서 2가와 3가 이온들의 성질은 낮은 pH 영역에서 AMP의 흡착능이 코발트에서는 급격히 감소하나, 세륨에서는 완만한 감소곡선을 이룬 문헌결과<sup>4</sup>와 일치한다. 낮은 농도의 우라늄이 AMP에 흡착되지 않는 현상은 대기와 접한 수용액 중에서 UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>로 존재할 것이므로 산화수가 6인 우라늄이 3가 이온보다는 2가 이온들과 유사한 성질을 갖기 때문으로 생각할 수 있으나, 50 µg/mL의 개별용액에서 얻어진 결과는 세륨 및 란탄과 유사한 제거율을 나타내므로 이를 단정하기는 어렵다.

혼합시료용액에서 0.1 M보다 0.05 M의 질산매질에서 AMP에 의한 세슘의 제거율은 비슷하였으나, 다른 이온들의 농도가 크게 감소하므로 AMP로 세슘을 선택적으로 제거하기 위해서는 0.05 M보다 0.1 M의 질산매질이 더 유리한 것으로 나타났다.

0.1 M의 질산매질에서 AMP와 세슘을 혼합한 후

Table 2. Comparison of the elemental removed ratios in the respective elemental sample solution by 0.05g of AMP

Element	Matrix (HNO <sub>3</sub> )	Concentration (μg/mL)		Removed ratio (%)
		Original	After filtering	
Cs	1.0 M	40.5	6.08	85
	0.1 M	47.8	2.7	94
	0.05 M	57.8	4.10	93
K	1.0 M	47.2	40.8	14
	0.1 M	49.5	39.7	20
Na	1.0 M	53.7	53.6	< 5
	0.1 M	50.6	50.4	< 5
Sr	1.0 M	44.9	45.4	< 5
	0.1 M	44.6	44.0	< 5
Ca	1.0 M	43.9	43.0	< 5
	0.1 M	44.1	42.6	< 5
Ce	1.0 M	58.5	58.3	< 5
	0.1 M	60.4	48.8	19
La	1.0 M	32.3	31.8	< 5
	0.1 M	51.0	43.0	16
U	1.0 M	33.7	33.7	< 5
	0.1 M	35.4	30.2	15

Table 3. Comparison of the ion concentrations in mixed solution I<sup>a</sup> between before and after addition of AMP

Condition	Matrix (HNO <sub>3</sub> )	Weight of AMP (g)	Stationary time <sup>b</sup> (min.)	Concentration (ng/mL)				
				Cs	Co	La	Ce	U
Blank <sup>c</sup>	0.1 M	0.05	60	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Before addition of AMP	0.1 M	-		5.51	5.15	4.22	4.56	5.05
	0.05 M	-		4.11	3.51	2.49	2.73	5.05
After addition of AMP	0.1 M	0.05	30	0.55	4.05	0.18	0.45	4.87
	0.1 M	0.05	60	<0.5	4.87	0.35	0.48	4.91
	0.05 M	0.05	30	0.58	2.63	0.23	0.34	3.54
	0.05 M	0.05	60	0.58	2.82	<0.1	0.11	3.04

<sup>a</sup>mixed solution I : This solution contains about 5 ng/mL of Cs, Co, La, Ce and U.

<sup>b</sup>Stationary time : the time between shaking and filtering.

<sup>c</sup>Blank : 0.05 g of AMP was added in 20 mL of 0.1 M HNO<sub>3</sub>.

반응시간(정치시간)을 30, 60, 90, 120, 180분 변화시켰을 때 세슘이 각각 94, 98, 96, 97, 99% 제거되었으며, 혼합시료용액에서 반응시간을 30분에서 60분으로 증가시켰을 때 용액중 세슘 이외의 다른 이온들의 농도가 대체로 높게 나타났다. 따라서 세슘을 선택적으로 제거하기 위한 반응시간은 30분보다 60분이 적합하였다. 그러나 50 μg/mL의 농도를 갖는 세슘의 경우와 같이 장시간 정치시킬 경우 세슘의 제거율이 감소하는 경향도 나타날 수 있으므로 AMP 첨가후 120분 이내에 용액을 거르는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

벤토나이트 용액을 첨가한 경우에도 앞의 결과와 유사하게 나타났다 (Table 4). 세슘의 농도가 5 μg/mL 일 경우 99% 이상까지 제거되었으며, 0.1 M 질산 매질에서 AMP 0.05 g을 넣고 60분간 방치하였을 경우 코발트, 우라늄, 스트론튬은 90% 이상이 용액 중에 남아있었다. AMP의 첨가량에 따른 영향은 AMP의 양이 증가할수록 용액 중 세슘 이외의 다른 이온들이 농도가 감소하므로 과량의 AMP 첨가는 오히려 세슘의 선택적 제거를 방해한다. 다만, 칼륨의 상당량이 AMP에 흡착하기 때문에 많은 양의 벤토나이트가 용해되어 있

Table 4. Comparison of the ion concentrations in mixed solution II<sup>a</sup> between before and after addition of AMP

Condition	Matrix (HNO <sub>3</sub> )	Weight of AMP (g)	Stationary time <sup>b</sup> (min.)	Concentration (ng/mL)						
				Cs	Co	La	Ce	U	K	Sr
Before addition of AMP	0.1 M	-		5390	14.8	12.6	22.8	6.7	7810	63.9
After addition of AMP	0.1 M	0.05	30	25.6	14.7	4.0	6.9	6.7	5820	64.0
	0.1 M	0.05	60	24.3	14.8	4.2	7.3	6.3	5800	64.8
After addition of AMP	0.1 M	0.3	60	<50	15.1	2.2	4.4	6.0	4880	61.6
	0.1 M	0.5	60	<50	15.2	0.94	2.9	5.7	2440	58.4
	0.1 M	1	60	<50	14.2	0.55	2.9	5.8	1130	52.6
	0.1 M	2	60	<50	11.3	0.55	4.7	5.4	656	45.5
	0.1 M	2	60	<50	11.3	0.55	4.7	5.4	656	45.5

<sup>a</sup>mixed solution II : 1.33 mL, of bentonite solution (0.01 g/mL of bentonite) was added in 20 mL of mixed solution of Cs, Co, La, Ce, U, K and Sr.

<sup>b</sup>Stationary time : the time between shaking and filtering.

을 경우는 AMP의 유효치환용량때문에 AMP의 양을 증가시켜야 하나, 실제 침출시험으로부터 얻은 벤토나이트 용해액중 칼륨의 농도범위가 수  $\mu\text{g/mL}$ 에 해당하므로 벤토나이트에 흡착된 세슘을 0.05 g의 AMP로 제거하는데 문제가 없을 것이다.

### 3.2. 스트론튬의 흡착분리

Sr-resin에 의한 스트론튬의 흡착실험 결과를 Table 5에 나타내었다. Ferrous sulfamate 용액은 실제 침출액 중 존재하는 플루토늄에 대비하여 첨가하였는데, Pu<sup>4+</sup>를 Pu<sup>3+</sup>로 환원시켜<sup>10</sup> 진한 질산매질에서 Sr-resin에 스트론튬보다 강하게 흡착하는 Pu<sup>4+</sup>을 제거하기 위하여 첨가하였다<sup>11</sup>. Table 5의 결과는 스트론튬의 양이 50  $\mu\text{g}$ 이고, Sr-resin 약 0.3 g을 사용할 때 8.0 M 질산으로 스트론튬을 Sr-resin에 흡착시킨 후 6 mL의 0.05 M

질산으로 세척할 경우 95% 이상의 회수율을 얻을 수 있었다. 그러나 약 0.44 g의 Sr-Resin을 사용할 경우는 스트론튬이 완전히 탈착되지 않고 Sr-Resin 중에 잔류하므로 더 많은 양의 용리액이 필요할 것으로 생각된다. 벤토나이트 용해액에 들어있는 다른 이온들은 Sr-resin에 의한 스트론튬 분리 및 정량에 거의 영향을 주지 않았다.

## 4. 결 론

사용후핵연료 침출액 중의 세슘을 선택적으로 제거하기 위해서는 이들 용액 20 mL에 질산을 가하여 0.1 M의 질산매질로 만든 다음, 0.05 g의 AMP를 첨가한 후 60분 반응시키고 0.2  $\mu\text{m}$  필터로 여과하는 방법이 가장 효율적이라 판단된다. 그러나 이 방법을 사용할

Table 5. Comparison of the concentrations of strontium in original solution, 8.0M HNO<sub>3</sub> washing solution and 0.05 M HNO<sub>3</sub> eluent

Sample	Weight of Sr-resin (g)	Concentration of Sr ( $\mu\text{g/mL}$ )		
		Original	8.0M HNO <sub>3</sub>	0.05M HNO <sub>3</sub>
Blank <sup>a</sup>	0.4042	<0.01	<0.01	0.3
SA-1 <sup>a</sup>	0.4361	7.5	<0.01	6.2
SA-1 <sup>a</sup>	0.2935	7.5	<0.01	7.8
SA-2 <sup>a</sup>	0.4431	7.6	<0.01	6.8
SA-2 <sup>a</sup>	0.2793	7.6	0.01	7.5

<sup>a</sup>Blank, SA-1, SA-2 : their compositions are shown in Table 1.

경우 침출액 중 우라늄과 스트론튬은 90% 이상이 용액 중에 남아 있지만, 탄산과 세륨은 AMP에 의해 세슘과 같이 제거될 것이다.

벤토나이트 용해성분 중 칼슘과 나트륨은 AMP에 흡착되지 않으나, 칼륨은 AMP에 상당량 흡착되었다. 그러나 벤토나이트 용해액에 포함된 약 100  $\mu\text{g}$ 의 칼륨은 0.05 g의 AMP로 세슘을 제거할 경우 별다른 영향을 미치지 않을 것이다.

8.0 M 질산매질에 용해된 스트론튬 50  $\mu\text{g}$ 을 Sr-resin 0.29 g에 흡착시킨 후 6 mL의 0.05 M 질산으로 용리할 경우 95% 이상의 회수율을 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2001년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. B. Grambow, A. Loida, P. Dressler et al, "Long-term safety of radioactive waste disposal: Chemical reaction of fabricated and high burnup spent  $\text{UO}_2$  fuel with saline brines, final report", FZKA-5702, Germany, May, 1996.
2. B. Grambow, A. Loida, H. Geckeis et al, "Direct disposal of spent fuel - chemistry of reactions" Proceedings of the 4th EU-conference on radioactive waste management and disposal, Luxembourg, March 25-29, 1996.
3. 김창규, 김철수, 김용재, 노병환, *J. Korean Asso. Radiat. Prot.*, **23**(2), 115-121 (1998).
4. 도규식, 제원목, *Bulletin of Environmental Science*, **11**, 23-28 (1990).
5. F. Sebesta, V. Stefula, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **140**(1), 15-21(1990).
6. I. I. L. Cunha, L. Sakai, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **131**(1), 105-109(1989).
7. J. Molero, A. Moran J. A. Sanchez-Cabeza et al, *Radiochim. Acta*, **62**, 159-162 (1993).
8. M. V. R. Prasad, D. S. S. Narayana, R. K. Jeevanram, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **197**(2), 281-293 (1995).
9. E. B. Sundell, Hiroshi Onishi, "Photometric determination of traces of metals, Part I, 4th ed." Wiley Interscience Pub., U.S.A., p. 721, 1978.
10. 김승수, 전관식, 강철형, *분석과학*, **14**(1), 28-33 (2001).
11. Eichrom Technologies Inc., "Sample preparation using extraction chromatography", 8205 South Cass Avenue, Suite 111 Darien, IL 60561 USA, 2001.