

## 역상액체크로마토그래피에 의한 지하수 중 U 및 Th의 분리정량

李昌憲 · 趙棋秀 · 徐武烈 · 李 垣\*

한국원자력연구소 화학재료연구부 분석화학연구실

\*경희대학교 기초과학연구소, 문리과대학 화학과

(1994. 4. 5 접수)

### Determination of Uranium and Thorium in Natural Ground Water by Reversed Phase Liquid Chromatography

Chang Heon Lee, Kih Soo Joe, Moo Yul Suh, and Won Lee\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-606, Korea

\*Department of Chemistry, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea

(Received April 5, 1994)

**요 약.** 염의 농도가 큰 시료용액중에 미량으로 함유되어 있는 U(VI)과 Th(IV)을 역상액체크로마토그래피로 동시에 분리, 정량하였다. 약 2 ml의 시료를 pH 5.5의 0.11 M  $\alpha$ -HIBA 용리액과 함께 C<sub>18</sub> 역상농축 컬럼에 통과시켜 U(VI)과 Th(IV)을 농축시켰으며, 농축된 이들 원소들을 다시 비활성 C<sub>18</sub> 역상분리컬럼에서 pH 3.0의 0.17 M  $\alpha$ -HIBA/0.0038 M 1-pentanesulfonate 용리액으로 각각 분리하였다. 분리된 이들 원소들은 Arsenazo III를 사용하는 postcolumn 반응으로 검출되었으며, 검출한계는 두 원소 모두 1 ppb이었다.

**ABSTRACT.** The measurement of trace amounts of uranium(VI) and thorium(IV) in the solutions containing high concentration of dissolved salts was carried out. The procedure using reversed phase liquid chromatography with trace enrichment techniques has been developed to cope with the high salt content of the samples. 2 ml of sample were passed through a small C<sub>18</sub> reversed phase enrichment column with  $\alpha$ -HIBA eluent (0.11 M, pH 5.5) where the uranium and thorium were separated from other constituents and concentrated. The uranium and thorium were then backflushed from the column onto a deactivated C<sub>18</sub> reversed phase analytical column where further separation was achieved with a mixed eluent (pH 3.0, 0.17 M  $\alpha$ -HIBA/0.0038 M 1-pentanesulfonate). The separated species were determined spectrophotometrically by postcolumn reaction with Arsenazo III, the chromogenic reagent. Detection limits were found within 1 ppb range for both species.

### 서 론

우라늄 변환, 핵연료 가공, 조사 후 핵연료시험 및 방사성 폐기물처리 등과 같은 공정에서 발생하는 방사성 폐기물의 양이 점차 증가함에 따라 이들을 안전하게 처리할 수 있는 방법이 연구되고 있다. 이 연구들은 시멘트, 유리 및 합성암 등과 같은 폐기물고화체에 방사성 핵종을 안정하게 고정시키는 처리기술의 확보와, 방사성 폐기물 처분장 주변의 지하수와 폐기물 고화체가 접촉할 경우 지하수대로 용출될 수 있는 방사성 핵종의 화학종 변화 그리고

콜로이드, 토양 또는 암석 표면에서의 흡착 및 탈착반응 등에 의한 방사성 핵종의 이동속도 및 분포의 변화에 관한 것들로써, 그 결과를 해석하는 과정에서 연구결과와 신뢰성은 적용된 분석법의 정밀, 정확성에 의해 크게 좌우된다.

그러나 모든 연구과정에서의 시료와 지하수 등에 함유되어 있는 U(VI)과 Th(IV)의 농도는 극히 미량이며, 어떤 경우에는 매질중 염의 농도가 매우 클 뿐만 아니라, 그 조성이 대단히 복잡하다. 또한 시료가 차폐시설이 갖추어진 실험실에서만 다룰 수

있는 방사성 시료인 경우를 고려한다면 기존에 사용하는 분석법의 적용에는 많은 한계점이 있다. 즉, 방사성 시료에 적용되는 분석법은 가능하면 소량의 시료와 시약을 사용하여 폐기물의 발생을 극소화할 수 있어야 하고, 모든 과정이 장갑상자(glove box) 내에서 이루어질 수 있도록 간편해야 한다. 또한 폐기물의 발생량이 많은 용매 추출법과 같은 분리법은 가급적 지양하는 것이 바람직하다.

U(VI)과 Th(IV)의 분석에 주로 이용되고 있는 비색법은 8M HNO<sub>3</sub> 매질에서 Zn으로 U(VI)를 U(IV)로 환원시키고 Arsenazo III와 반응시킨 후 U(IV) 또는 Th(IV)과 Arsenazo III 착물의 흡광도를 675.5와 684.4 nm에서 2차 미분법으로 측정하여 0.1~0.7 ppm의 농도범위에서 동시에 분석할 수 있다고 알려져 있다<sup>2</sup>. 그러나 이 방법은 분석원소들을 방해물질로부터 순수하게 분리시켜야 하는 과정이 요구된다. 또한 미량의 원소분석에 광범위하게 적용되고 있는 유도결합 원자방출분광법은 다른 원소들에 비해 U(VI)과 Th(IV)은 감도가 예민하지 않아서 약 0.1 ppm 이상의 농도범위에서만 신뢰할 수 있는 분석 결과를 얻을 수 있다. 따라서 0.1 ppm 이하의 농도 범위에서는 불순물로부터의 분리와 농축을 위하여 유기용매추출과 이온교환분리관을 사용해야 한다. 그러나 이들 방법들은 분리에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 다량의 폐기물을 발생시킬 수 있어서 방사성 시료의 경우에는 비효율적이며, 방사성 차폐 시설을 이용할 경우 실험조작이 번거로운 단점이 있다.

근래에 지하수 및 방사성 시료에 함유되어 있는 양이온과 음이온의 분석에 고성능 액체크로마토그래피의 이용이 증가하고 있다<sup>3~6</sup>. 이 방법은 분리시간이 짧고 분해능이 우수하며, 장치 구성이 간단하여 장갑상자 안에서 운영하기 수월하다는 장점이 있다. Knight 등<sup>7</sup>은 조사후 핵연료의 연소도 측정을 위하여 C<sub>18</sub> 역상분리컬럼에서 1-octanesulfonate를 동적 이온교환체로 사용하고, α-HIBA를 용리액으로 하여 U(VI)과 Th(IV)으로부터 희토류 원소를 각각 분리할 수 있었다. 이 실험에서 U(VI)과 Th(IV)은 희토류 원소보다 먼저 용출되었으며, U(VI)과 Th(IV)의 농도가 희토류 원소보다 상대적으로 매우 클 때에는 두 원소의 크로마토그램의 봉우리가 서로 중첩될 뿐

아니라 다른 희토류 원소의 정량에도 방해물 줄 가능성이 있다. 이와 같은 단점을 제거하기 위하여 Lucy 등<sup>8</sup>은 우선 U(VI)을 UO<sub>2</sub>-α-HIBA 착물의 형태로 역상분리컬럼에 흡착시키고 U(VI)으로부터 분리된 희토류 원소를 2차 양이온 분리컬럼에 흡착시킨 후 개발 분리하는 coupled-column 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 α-HIBA를 사용하여 C<sub>18</sub> 역상농축컬럼에서 U(VI)과 Th(IV)을 불순물로부터 분리, 농축시킨 후 다른 C<sub>18</sub> 역상분리컬럼으로 용리시킨 다음 이들 원소들을 개별 분리하는 방법을 이용하여 비교적 염의 농도가 큰 지하수에 미량으로 함유되어 있는 U(VI)과 Th(IV)을 동시에 정량하고자 하였다.

## 실 험

**시약 및 컬럼.** 용리액으로 사용한 α-Hydroxyisobutyric acid(α-HIBA)와 변형제(modifier)로 사용한 1-Pentanesulfonic acid는 Sigma Chemical사 제품이고, 발색제로 사용한 ArsenazoIII[3,6-bis(4-arsenophenylazo)-4,5-dihydroxy-2,7-naphthalene disulfonic acid]는 Fluka Chemical사 제품이다. 모의지하수는 캐나다 표준지하수(Standard Canadian Shield Saline Solution, SCSSS)에 일정량의 U(VI)과 Th(IV)을 첨가하여 사용하였다. 또한 실험에 사용한 물은 1차 중류수를 Millipore사의 Milli-Q System을 통과시킨 것이었으며, 모든 용액은 Millipore사의 0.45 μm membrane으로 거른 다음 사용하였다. 또한 농축컬럼은 Technical Marketing사의 Brownlee Spheri OD-032(C<sub>18</sub> reversed column, 3×0.46 cm)를, 그리고 분리컬럼은 Supelco사의 LC18DB(deactivated C<sub>18</sub> reversed column, 5×0.46 cm)를 각각 사용하였다.

**장치 및 기구.** U(VI)과 Th(IV)을 분리, 정량하기 위하여 Fig. 1과 같이 Waters사의 M510 펌프, M481 파장가변형 UV/Vis 검출기, M840 Data station과 Technical Marketing Associates사의 Rheodyne M 7125 시료주입기, ISCO사의 M314 Syringe pump 및 Rheodyne M7000의 Switching valve로 구성된 크로마토그래프 시스템을 구성하였다. 또한 분리컬럼에서 용리된 U(VI)과 Th(IV)을 검출하기 위하여

분리컬럼과 UV/Vis 검출기 사이에 screen-tee형의 postcolumn 반응기를 설치하였다.

**농축 및 분리조건.** 먼저 역상분리컬럼(Supelco LC18DB)에서 U(VI)과 Th(IV)의 분리에 필요한 머무름 거동을 이해하기 위하여,  $\alpha$ -HIBA 또는  $\alpha$ -HIBA/1-pentanesulfonate 용리액의 농도와 pH를 변화시키면서 U(VI)과 Th(IV)의 머무름시간을 측정하였다. 시료를 주입하기 전에 약 10분 동안 용리액을 1 ml/min의 흐름속도로 컬럼에 통과시켜 미리 평형에 도달하도록 하였으며, 시료를 주입할 때 발생하는 시스템 붕우리를 줄이기 위하여 시료의 pH와 조성을 용리액의 조건과 거의 같도록 조절하였다.

**모의지하수에 함유되어 있는 미량의 U(VI)과 Th(IV)의 분석.** 크로마토그래프 시스템에 설치되어 있는 2 ml 용량의 시료고리(sample loop)에 모의지하수를 주입시킨 후 농축용 용리액으로써 pH 5.5의 0.11 M  $\alpha$ -HIBA를 통과시켜 U(VI)과 Th(IV)을 농축컬럼(Brownlee OD-032)에 흡착시켰다. 약 5분 경과한 후 용리액의 주입을 중지시키고, 농축용 용리액의 흐름방향과 반대 방향으로 pH 3.0의 0.17 M  $\alpha$ -HIBA/0.0038 M 1-pentanesulfonate 분리용 용리액을 통과시켜 분리컬럼으로 U(VI)과 Th(IV)을 용

리시켰다. 분리컬럼에서 각각 분리된 U(VI)과 Th(IV)을 postcolumn 반응기에서 Arsenazo III 발색제를 가하여 반응시킨 다음 658 nm에서 흡광도를 측정하여 각각의 농도를 측정하였다.

### 결과 및 고찰

U(VI)과 Th(IV)의 최적 농축 및 분리조건을 구하기 위하여 용리액의 조성과 농도 그리고 pH를 변화시키면서 이들 원소의 머무름거동을 조사하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 동일한 pH 4의 조건에서  $\alpha$ -HIBA의 농도를 0.06~0.46 범위에서 증가시키면 두 원소의 머무름시간과 그 차이가 감소하는 반면에,  $\alpha$ -HIBA의 농도를 0.11 M로 고정시키고 pH를 3~5 범위에서 증가시키면 U(VI)과 Th(IV)의 머무름시간이 함께 증가하여서 pH 5에서는 20분이 경과하여도

Table 1. Effects of pH,  $\alpha$ -HIBA and 1-pentanesulfonic acid on the retention of U(VI) and Th(IV) in reversed phase column

pH	$\alpha$ -HIBA (M)	1-pentanesulfonic acid (M)	$\Delta R_t$	Retention time (min)	
				Th(IV)	U(VI)
4	0.06	—		8.0	>20
4	0.11	—		5.6	>20
4	0.23	—	11.6	3.4	15
4	0.34	—	7.8	2.6	10.4
4	0.46	—	5.3	2.1	7.4
3	0.11	—	4.4	3.1	7.5
4	0.11	—		5.6	>20
4	0.11	—		>20	>20
4	0.11	0.005	9.4	3.8	13.2
4	0.17	0.005	8.2	2.9	11.1
4	0.23	0.005	7.4	2.5	9.9
4	0.34	0.005	5.3	2.1	7.4
3	0.17	0.005	1.8	1.7	3.5
3.5	0.17	0.005	4.4	2.1	6.5
4	0.17	0.005	8.2	2.9	11.1
3	0.17	0.0013	2.8	2.0	4.8
3	0.17	0.0025	2.3	1.9	4.2
3	0.17	0.004	2.0	1.8	3.8
3	0.17	0.005	1.8	1.7	3.5

$\Delta R_t$ : difference between U(VI) and Th(IV) in retention time.

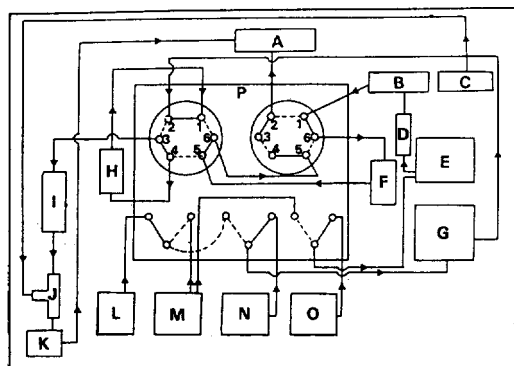


Fig. 1. Schematic diagram of HPLC system. A: Waste tank, B: Sample loop, C: Pump for Arsenazo III, D: Guard column, E: Pump for enrichment eluent, F: Auto-sampler, G: Pump for Analytical eluent, H: Enrichment column, I: Analytical column, J: Postcolumn reactor, K: UV/Vis spectrophotometer, L: Washing solution (60% methanol/H<sub>2</sub>O), M: Washing solution (H<sub>2</sub>O), N: Analytical eluent, O: Enrichment eluent, P: Auto-switching valve station.

용출되지 않았다. 이와 같이 동일한 pH에서  $\alpha$ -HIBA의 농도를 증가시킬 때 머무름시간이 감소하는 것은 소수성을 갖는 U(VI)과 Th(IV)의  $\alpha$ -HIBA 착물과  $\alpha$ -HIBA 분자가 역상표면에서 서로 경쟁적인 흡착반응을 일으키기 때문이라고 생각한다. 또한 일정한  $\alpha$ -HIBA의 농도에서 용리액의 pH를 증가시키면  $\alpha$ -HIBA의 free ion이 증가하여 소수성의 U(VI)과 Th(IV)의  $\alpha$ -HIBA 착물을 보다 안정하게 형성하여<sup>10</sup> 역상과의 상호작용이 증가하는 결과라고 본다. 그리고 U(VI)이 Th(IV)보다 머무름시간이 더 큰 이유는 U(VI)- $\alpha$ -HIBA의 착물안정도상수값( $K_1$ , 3.18)이 Th(IV)의 경우보다 ( $K_1$ , 4.43) 작지만<sup>11</sup>, U(VI)은  $UO_2L_2$  ( $L: \alpha\text{-HIB}^-$ )와 같이 중성의 착물을 형성하는 반면에 Th(IV)은  $ThL_2^{2+}$ 와 같은 양의 전하를 갖는 착물을 만들기 때문이라고 생각된다.

한편 앞에서의 실험에서와 같이 동일한 pH 4의 조건에서  $\alpha$ -HIBA의 농도를 0.11~0.34 M 범위에서 증가시키면서, 변형제로서 일정한 양의 1-pentane-

sulfonate를 첨가시켰을 때 나타나는 변형제의 영향을 검토하였다. Table 1의 결과에 나타난 바와 같이 변형제를 첨가하면 U(VI)과 Th(IV)의 머무름시간의 감소가 변형제를 첨가하지 않을 때보다 더 큰 것을 알 수 있었다. 즉  $\alpha$ -HIBA의 농도 증가에 따르는 머무름시간의 감소는 변형제를 첨가하지 않은 앞의 실험결과에서와 같이 Th(IV)의  $\alpha$ -HIBA 착물과  $\alpha$ -HIBA 분자가 역상표면에서 서로 경쟁적인 흡착반응을 일으키기 때문인 것으로 설명할 수 있으나, 변형제를 첨가하였을 때 머무름시간이 더 크게 감소하는 이유는 변형제가 그 농도가 매우 낮을 뿐만 아니라( $<0.005 M$ ), 탄소사슬이 짧기 때문에 소수성이 낮아 역상표면에서의 흡착력이 감소하여 이온교환체를 형성하지 않기 때문이며, 또한 변형제가 U(VI) 및 Th(IV)의  $\alpha$ -HIBA 착물과 역상표면에 대한 상호 경쟁반응을 일으키므로 U(VI) 및 Th(IV)의 용리를 촉진시키는 것으로 생각된다. 따라서 이 결과로부터 변형제의 첨가에 의한 머무름시간의 감소는 분리단계에서 변형제의 농도를 조절함으로써 U(VI)과 Th(IV)의 적절한 분리가 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 U(VI)과 Th(IV)의 농축에 적합한  $\alpha$ -HIBA의 농도를 0.11 M로 하였으며, pH는 금속이온들의 가수분해를 막기 위하여 5.5로 조절하였다 (Table 3). 이러한 조건은 Kerr 등<sup>12</sup>이 지하수에 미량 함유되어 있는 U(VI)을 농축시키기 위하여 제시한 용리액과 동일한 조성이었다.

그리고  $\alpha$ -HIBA와 변형제의 농도를 각각 0.11 M

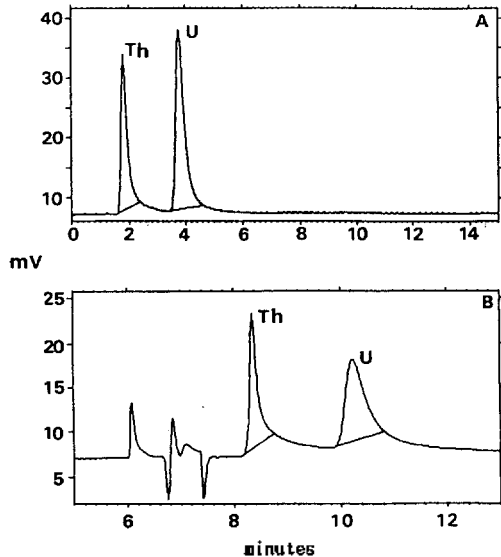


Fig. 2. Typical chromatograms under the specific experimental conditions as follows: Sample volume injected: 0.1 ml, Sample concentration: Th(IV) and U(VI)-0.25 ppm each, Other conditions: see in Table 3. (A) Chromatogram of Th(IV) and U(VI) obtained using an analytical column only, (B) Chromatogram of Th(IV) and U(VI) obtained using an analytical and an enrichment column.

Table 2. Experimental conditions for the enrichment and separation step

Step	Reagents	Flow rate	Column
Enrichment	0.11 M $\alpha$ -HIBA pH 5.5	1.0 ml/min	Brownlee, 3 cm OD-032
Separation	0.17 M $\alpha$ -HIBA/ 1-pentanesulfonic acid(0.0038 M) pH 3.0	1.0 ml/min	Supelco, 5 cm LC18DB
Detection	$7.5 \times 10^{-5}$ M Arsenazo III with 0.1 M $HNO_3$	1.0 ml/min	

(0.17 M)과 0.005 M로 하고 pH를 3~4의 범위에서 증가시키면 머무름시간이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 결과 역시 앞에서와 같이 pH가 미치는 영향과 같은 현상으로 설명할 수 있다. 또한 pH를 3으로 고정한  $\alpha$ -HIBA의 농도를 0.17 M로 조절된 상태에서 변형제의 농도를 증가시키면 역시 예측한 바와 같이 머무름시간이 감소하였다.

분리단계에서는 용리액의 흐름속도를 1.0 ml/min으로 고정시키고 변형제의 농도를 변화시키면서 용량인자( $k'$ )를 측정한 결과  $k'$ 이 2~10 사이에서 최적 분리조건을 찾을 수 있었다. 따라서 분리단계에서 사용되는 용리액은 Table 1에서와 같이 pH 3.0의 0.17 M  $\alpha$ -HIBA/0.0038 M 1-phenanesulfonate가 가장 적당하였으며, U(VI)과 Th(IV)의 농도가 각각 0.25 ppm인 시료 0.1 ml를 주입하여 얻은 U(VI)과 Th(IV)의 크로마토그램을 Fig. 2의 A에 나타내었다.

마지막으로 농축과 분리단계를 연속으로 수행하기 위하여 Fig. 1과 같은 크로마토그래프 시스템에 U

(VI)과 Th(IV)의 농도가 각각 0.25 ppm인 시료 0.1 ml를 주입하여 얻은 U(VI)과 Th(IV)의 크로마토그램을 Fig. 2의 B에 나타내었다. Fig. 2의 A와 B를 비교해 보면 분리컬럼만을 단독으로 사용할 때보다 농축컬럼을 같이 사용하면 봉우리의 꼬리끼기현상이 더 증가하는 결과를 볼 수 있다. 이것은 농축컬럼을 같이 사용하면 결과적으로 전체 분리관의 길이가 길어지게 되기 때문에 나타나는 일반적인 현상으로 생각된다. 따라서 이러한 꼬리끼기 현상을 제거하기 위하여 용리액에 질산암모늄, 질산나트륨 및 메탄올을 첨가하여 그 농도를 각각 5%까지 증가시켜 보았으나 머무름시간이 감소하는 경향을 보인 것 외에는 U(VI)과 Th(IV)의 정량에 있어서 정밀도와 정확도를 개선시킬 만큼 큰 변화를 주지 않았다.

대표적으로 Table 2와 같은 분석조건에서 시료를 2 ml 용량의 시료고리에 주입시켜 얻은 크로마토그램을 Fig. 3과 4에 나타내었다. 이 결과로부터 미량의 농도범위에서 U(VI)과 Th(IV)의 정량이 가능함을 알

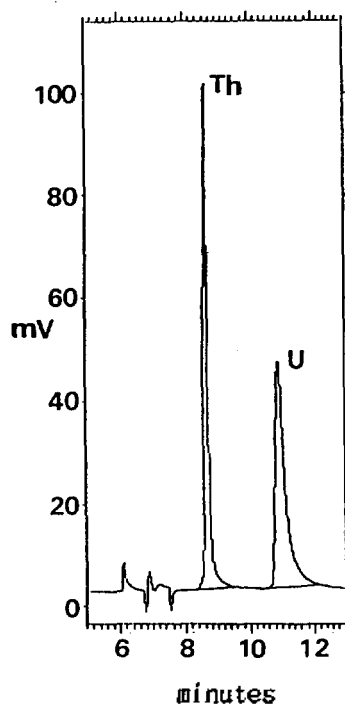


Fig. 3. Chromatograms of Th(IV) and U(VI), Sample concentration: Th(IV)-135 ppb, U(VI)-79 ppb, Sample volume injected: 2 ml, Analytical conditions: see in Table 2.

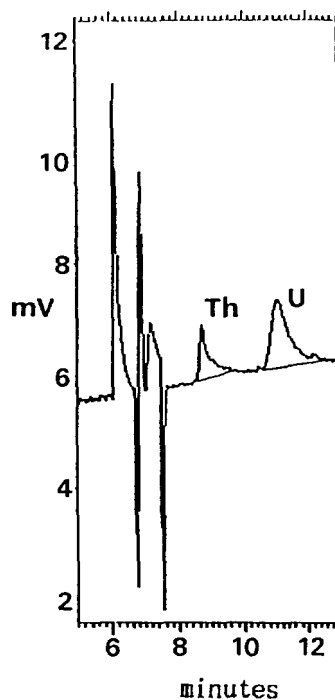


Fig. 4. Chromatograms of Th(IV) and U(VI), Sample concentration: Th(IV)-3.5 ppb, U(VI)-4.0 ppb, Sample volume injected: 2 ml, Analytical conditions: see in Table 2.

Table 3. Chemical composition of artificial ground water and recovery of uranium and thorium

Ions	Sample 1		Sample 2	
	Real concentration (1)	Found	Real concentration (2)	Found
Na <sup>+</sup>	202		404	
K <sup>+</sup>	2		4	
Mg <sup>2+</sup>	8		16	
Ca <sup>2+</sup>	600		1200	
Sr <sup>2+</sup>	0.8		1.6	
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.8		1.6	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.4		0.8	
Cl <sup>-</sup>	1372		2744	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	31.6		63.2	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2		4	
UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> <sup>a</sup>	31.4	28.1	61.8	457.5
Th <sup>4+</sup> <sup>a</sup>	55.8	54.5	112.1	108.2

<sup>a</sup>ppb, (1) 1:25 dilution of SCSSS, (2) 1:12.5 dilution of SCSSS.

수 있었다.

한편 U(VI)과 Th(IV)의 분석가능성을 검토하기 위하여 비교적 염의 농도가 큰 캐나다 표준지하수에 일정량의 U(VI)과 Th(IV)을 첨가하여 만든 모의지하수를 각각 4회씩 분석하여 얻은 평균값을 모의지하수의 조성값과 함께 Table 3에 나타내었다. U(VI)과 Th(IV)의 회수율은 각각 91 및 97%이었으며 정밀도는 10% 이내 그리고 검출한계는 1 ppb로 나타났으며, 이들 결과로 미루어 볼 때 염의 농도가 큰 지하수가 성분들이 U(VI)과 Th(IV)을 정량하는데 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 특히  $\alpha$ -HIBA를 용리액으로 사용할 때 분리컬럼에는 희토류 원소, Cu(II), Zn(II), Fe(II), Fe(III), Mn(II), Co(II), Pb(II) 및 Ni(II) 등<sup>13</sup>이 거의 흡착되지 않으므로, 본 방법은 매질의 조성이 복잡한 방사성 폐기물 처리 및 처분에 관련된 시료의 분석에 매우 효과적으로 사용할 수 있다고 생각한다.

## 결 론

본 연구에서는 농축컬럼을 적용한 역상크로마토그래피를 이용하여 지하수에 미량으로 함유되어 있는 U(VI)과 Th(IV)을 동시에 분리정량하기 위하여

최적조건을 검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정한 pH에서  $\alpha$ -HIBA의 농도를 증가시키면 U(VI)과 Th(IV)의 머무름시간과 머무름시간의 차이가 감소하였으며, pH 5.5의 0.11 M  $\alpha$ -HIBA를 용리액으로 사용하면 U(VI)과 Th(IV)이 다른 불순물로부터 분리될 뿐만 아니라 20분 이상 농축컬럼에서 용출되지 않았다.

2. 일정한 pH와 농도를 유지하는  $\alpha$ -HIBA의 변형제로서 1-pentanesulfonate를 첨가하면  $\alpha$ -HIBA를 단독으로 사용할 때보다 U(VI)과 Th(IV)의 머무름시간이 감소하였다. 그리고 변형제의 농도를 조절하여 두 원소의 머무름시간의 비율을 조절할 수 있어서, U(VI)과 Th(IV)을 농축컬럼에서 농축시킨 후 pH 3의 0.17 M  $\alpha$ -HIBA/0.0038 M 1-pentanesulfonate를 용리액으로 사용하여 효과적인 농축과 분리정량이 가능하였다.

3. 30~60 ppb 농도범위의 U(VI)과 50~100 ppb 농도범위의 Th(IV)을 분석할 때 정확도는 각각 91% 및 97%, 정밀도는 10% 이내였으며, 또한 검출한계는 1 ppb로 나타났다.

따라서 본 방법을 매질의 조성이 매우 복잡한 지하수 및 방사성 폐기물 처리, 처분에 관련된 시료에 미량 함유되어 있는 U(VI)과 Th(IV)의 분석에 매우 효과적으로 적용할 수 있다고 생각된다.

본 연구는 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 후원으로 CANADA, AECL(Atomic Energy Canada Limited)의 WNRE(White Shell Nuclear Research Establishment)에서 수행하였으며, 본 연구에 도움을 준 Analytical Science Branch의 Andrew Kerr와 Michael Attas에게 감사를 표한다.

## 인 용 문 헌

1. Sargent, F. P. *AECL TR-149*, 1982.
2. Kuroda, R.; Kuroscki, M.; Hayashibe, Y.; Ishimaru, S. *Talanta* 1990, 6, 19.
3. Cassidy, R. M.; Elchuk, S.; Elliot, N. L.; Green, L. W.; Knight, C. H.; Recoskie, B. M. *Anal. Chem.* 1990, 58, 1181.
4. Cassidy, R. M.; Elchuk, S. *J. Chromatogr. Sci.* 1983, 21, 454.

5. Cassidy, R. M.; Elchuk, S. *J. Chromatogr.* **1983**, *262*, 311.
6. Cassidy, R. M.; Elchuk, S. *Anal. Chem.* **1982**, *54*, 1588.
7. Knight, C. H.; Cassidy, R. M.; Recoskie, B. M.; Green, L. W. *Anal. Chem.* **1984**, *56*, 474.
8. Lucy, C. A.; Gureli, L.; Elchuk, S. *Anal. Chem.* **1983**, *65*, 3320.
9. Savvin, S. B. *Talanta* **1961**, *8*, 673.
10. Iskandarani, Z.; Pietrzyk, D. J. *Anal. Chem.* **1982**, *54*, 2427.
11. Martell, A. E.; Smith, R. M. *Critical Stability Constants*; Plenum Press: New York and London, 1977; Vol. 3.
12. Keerr, A.; Kupferschmidt, W.; Attas, M. *Anal. Chem.* **1988**, *60*, 2729.
13. Barkley, D. J.; Blanchette, M.; Cassidy, R. M.; Elchuk, S. *Anal. Chem.* **1986**, *58*, 2222.