

지질시료 중의 U과 Th 분석 및 자연방사성동위원소 측정을 위한 화학적 분리

김정석 · 최광순
한국원자력연구소
(1997. 3. 28. 접수)

A Sequential Separation Procedure for the Determination of Uranium, Thorium and Their Isotopes in Geological Materials

Jung Suk Kim, Kwang Soon Choi
Chemistry Division, KAERI, Yusong 150, Korea
(Received Mar. 28, 1997)

요약 : 지질시료 중의 U과 Th을 유도결합플라즈마 원자방출분광법으로 정량하기 위해 시료를 혼산으로 분해하고 TTA(thenoyltrifluoroacetone)와 TOA (tri-n-octylamine) 추출제를 이용하여 계통적으로 용매추출한 다음 HCl 용액으로 역추출하여 분리하였다. 표준암석 NIST SRM 278에 대한 분석결과는 NIST 및 다른 비파괴분석 결과와 비교하여 양호하였다. 알파선분광법으로 U과 Th의 자연방사성 동위원소를 측정하기 위해 추출분리한 각각을 음이온교환크로마토그래피로 정제하였다.

Abstract : Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry(ICP/AES) was used for the determination of uranium and thorium in geological materials. Samples were predecomposed by mixed acid digestion technique. The separation of the uranium and thorium was achieved by systematic solvent extraction with TTA(thenoyltrifluoroacetone) and TOA (tri-n-octylamine) and back extraction into HCl. The results for standard rock sample, NIST SRM 278, showed a good agreement with those certified from NIST as well as found values by other non-destructive techniques. Additional purification for extracted portions was carried out by anion exchange chromatography for measurement of several natural radioisotopes of uranium and thorium by alpha spectrometry.

Key words : uranium and thorium, systematic solvent extraction

1. 서론

U과 Th은 지구화학적으로 친석원소로서 화성과 준화성 과정의 지표원소로 이용되어 왔다. 또한 지질시료 중의 Th/U 농도비는 암석의 종류 및 환경에 따라 매우 다양하여 암석구별을 위한 지표로 이용되어 왔

다.^{1,2} 지하수와 암석의 반응과 관련하여 U과 Th의 자연방사성핵종 붕괴계열은 수송 모델의 억제변수(retardation parameter) 및 자연환경에서의 방사성핵종의 거동에 대한 정보를 제공한다. 미량의 U과 Th을 정량적으로 분리하고 동위원소 측정이 가능하면 우라늄 계열 비평형을 이용한 방사법 연대측정을 할 수

있다.³⁻⁸

지질시료 중의 U와 Th의 분리는 H_2S , $(NH_4)CO_3$, Na_2CO_3 , Cupferron, Oxine, LaF_3 및 CeF_3 , ferric hydroxide, PAN[1-(2-pyridylazo)-2-naphthol], oxalic acid, zirconium phosphate, lead phosphate 등의 침전제를 이용한 침전법, TBP(tributyl phosphate), ethyl acetate, TOPO(trioctylphosphine oxide), TIOA(triisooctylamine), TOA, TTA, HDEHP[Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid], TC(tetracycline hydrochloride) 등의 추출제를 이용한 용매추출법, 양이온 및 음이온 크로마토그래피, TOPO 등을 이용한 추출 크로마토그래피 등이 이용되었다.^{4,6,7,9,10~27}

대부분의 지질시료 중에는 U와 Th가 미량 함유되어 있으므로 정량이 매우 어려우며, 분광광도법, 질량분석, 열 및 열외 중성자방사화분석(NAA), X선형광분석(XRF), 핵분열트래 분석, 알파선 및 감마선 분광분석, 형광분석 및 열발광법(thermoluminescence) 등이 이용되었다.^{6~30} Scott³¹ 등은 지질시료 중의 U 정량에 ICP/AES를 이용하였으며, U의 19개의 방출선에 대한 분석조건과 간섭을 조사하였다. 378.28nm의 방출선으로 0.002~0.02% 범위의 U를 정량하였을 때 Fe와 Ca의 간섭에 대한 보정이 필요하였다. Zhanxia³² 등은 암석시료를 혼산으로 분해한 후 Th를 ICP/AES로 정량하였다. 401.913nm 방출선을 이용하였을 때 검출한계는 3ppb, LQD(lowest quantitatively determinable values)는 10ppm이었다. ASTM³³에서는 토양시료 중의 우라늄 동위원소를 측정하기 위해 산처리 후 $Fe(OH)_2$ 공침분리하고 isopropyl ether로 Fe를 제거하였다. 이어 음이온교환분리로 U를 Pu와 Ra로부터 분리하였으며, 화학적 수율은 대략 78%였다.

본 연구에서는 지질시료 중의 U와 Th를 정량하고 동시에 자연방사성 동위원소를 측정하기 위한 분리방법을 도출하기 위해 표준암석(NIST SRM 278, Obsidian rock)을 이용하여 몇 가지 방법으로 화학적 전처리 및 개별분리하고 ICP/AES로 정량해 보았다. 각 분리방법에 따른 정량 결과와 간섭효과를 비교하여 가장 효과적인 방법을 선정하여 국내산 지질시료 중의 U와 Th를 분리하고 이어 분리한 각각을 연속적으로 정제하고 전기전착한 후 알파선 분광분석을 하여 각 원소에 대한 자연방사성 동위원소를 측정해 보았다.

2. 실험

2.1. 시약 및 기기

무수 Na_2CO_3 (99.5%), HCl(37%) 및 potassium hydrogen phthalate는 Aldrich A. C. S. 급, $Li_2B_4O_7$ (99.995%), TC(98%), DTPA(diethylene triamine pentaacetic acid, 98%), 및 TTA(99%)는 Aldrich제, HF(38~40%)와 KOH는 Merck EP급, $HClO_4$ (60%), HNO_3 (65%) 및 $NaClO_4$ (99%)는 Merck GR급, H_2SO_4 (95%)와 NaOH는 Junsei 특급, NH_4OH (25~28%)와 acetone(95%)은 Duksan D. S. P. GR급, benzyl alcohol은 Wako 1급, CDTA(trans-1,2-diaminocyclohexane-N, N, N', N', -tetraacetic acid, 98%)는 Sigma제, PAN은 Baker제, xylene은 Yakuri 특급, TOA는 Kodak제를 사용하였다. TC/benzyl alcohol 포화용액은 제조 후 6시간내에 사용하였다. Phthalate 완충용액은 0.1M potassium hydrogen phthalate 용액에 0.1M KOH 용액을 적가하여 pH 4.6으로 조정하였다. U 표준용액은 Spex사의 Plasma 표준용액(1000ppm) 및 NBS 950b(U_3O_8) 질산용액을 제조하여 사용하였다. Th 표준용액은 Spex사의 Plasma 표준용액(1000ppm)을 사용하였다. 음이온교환수지는 Bio-Rad사의 AG 1x8, 100~200 및 200~400 mesh를 사용하였다.

Table 1. Analytical conditions in Jobin Yvon JY 38 PLUS ICP/AES

Spectrometer :	Sequential(JY 38 PLUS) : focal length 1m Czerny-Turner mount
Holographic grating :	3600 grooves / mm
RF generator :	40.68MHz, 1.0kW working power
Flow rate of argon gas(using humidifier) :	
Coolant gas :	12L/min
Sheath gas :	0.3L/min
Carrier gas :	0.3L/min
Nebulizer :	Meinhard type C
Sample uptake rate :	1mL/min
Observation height :	15mm above load coil
Integration time :	0.5sec
Analytical wavelengths :	
U :	409.014nm
Th :	283.730nm

ICP/AES는 Jobin Yvon사의 모델 JY 38 PLUS 단색화장치를 사용하여 U과 Th를 개별 정량하였다. 이 기기의 작동 조건과 측정 파장은 Table 1과 같다. 원자료를 이용한 시료 중의 U와 Th의 비파괴중성자방사화분석(INAA)을 위한 시료 준비와 분석은 문헌상의 방법에 준하였다.³⁷ 알파선분광분석은 Si 표면장벽검출기(EG&G ORTEC 모델 BU-SAN-450-100) 및 표준알파선원(²³⁹Pu-²⁴¹Am-²⁴⁴Cm)을 사용하였다.³⁸

2.2. 실험방법

2.2.1. 시료분해

표준암석시료 약 1g을 정확히 칭량하여 Teflon beaker에 담는다. HF 2mL, HNO₃ 2mL, HClO₄ 3mL를 가하고 혼합한다. 저온으로 가열하여 산분해하고 이 과정을 2~3회 더 반복한다. HCl 5mL를 가하고 증발건조시킨다. 잔유물을 4M HCl 용액 10mL에 녹인 다음 125mL 용적의 분별깔때기(I) 안에 붓는다. 4M HCl 용액 10mL로 Teflon beaker를 씻고 합친다.

2.2.2. 미량 U의 추출 및 정량(Fig. 1)

분별깔때기(I)에 0.5M TTA 용액 10mL를 가하고 10분간 흔든다. 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(II)에 옮기고 다시 남은 유기층에 4M HCl 용액 5mL를 가하고 5분간 흔들어 추출하고 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(II)에 합친다. 분별깔때기(II)에 5% TOA 용액 10mL를 가하고 5분간 흔든다. 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(III)에 옮긴다. 남은 유기층에 4M HCl 용액 5mL를 가하고 3분간 흔들어 추출하고 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(III)에 합친다. 분별깔때기(III)는 Th 분리를 위하여 보관한다. 분별깔때기(II)의 남은 유기층에 0.3M HCl 용액 10mL를 가하고 5분간 흔들어 U을 역추출하고 수층을 분리하여 분별깔때기(IV)에 옮긴다. 재차 분별깔때기(II)의 유기층에 0.3M HCl 용액 5mL를 가하고 3분간 흔들어 U을 역추출한다. 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(IV)에 합친다. 분별깔때기(IV)에 xylene 5mL를 가하고 2분간 흔든다. 수층을 분리하여 Teflon beaker에 모은다. 분별깔때기(IV)의 남은 유기층에 3M HCl 용액 5mL를 가하고 2분간 흔들어 U을 역추출한다. 상분리 후 수층을 분리하여 Teflon beaker에 합친다. Teflon beaker의 용액을 증발건조시킨다. Teflon beaker에 HNO₃ 4mL와 HClO₄ 2mL를 가하고 증발건조시킨다. 이어 HNO₃ 5mL를 가하고 증

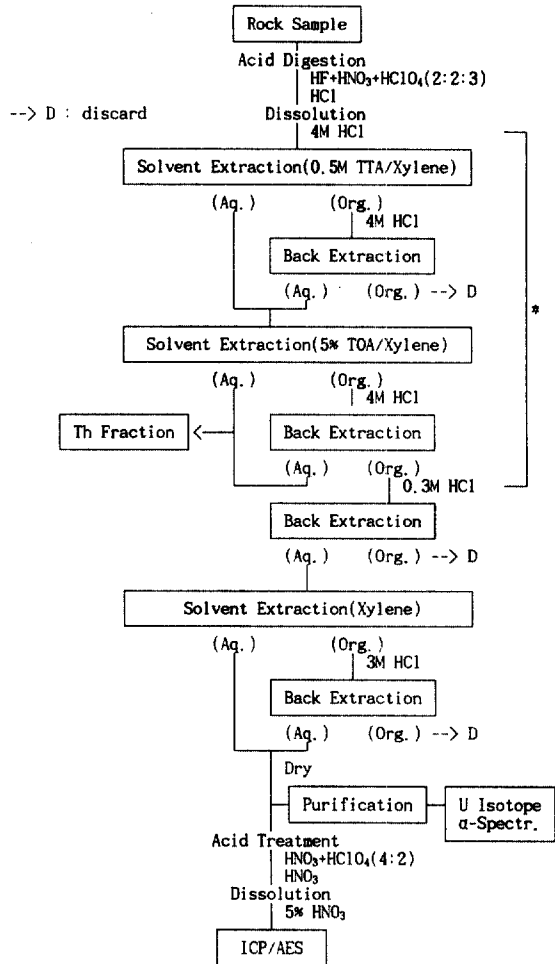


Fig. 1. Analytical procedure of uranium.

발건조시킨다. 5% HNO₃ 용액 5mL에 녹이고 ICP/AES로 U을 정량한다.

2.2.3. 미량 Th의 추출 및 정량(Fig. 2)

U의 분리과정으로부터 Th 분리를 위해 보관된 분별깔때기(III)의 수용액에 NH₄OH를 적가하여 pH 1.7~1.8 용액으로 만든다. 0.5M TTA 용액 10mL를 가하고 15분간 흔든다. 상분리 후 수층을 분리하여 버리고 남은 유기층에 3M HCl 용액 10mL를 가하고 10분간 흔들어 Th을 역추출한다. 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(V)에 옮긴다. 재차 분별깔때기(III)의 유기층에 3M HCl 용액 5mL를 가하고 5분간 흔들어 Th을 역추출한다. 상분리 후 수층을 분리하여 분별깔때기(V)에 합친다. 분별깔때기(V)에 xylene 5mL를 가하고 2분간 흔든다. 상분리 후 수층을 분리하여

(Continued from Fig. 1)

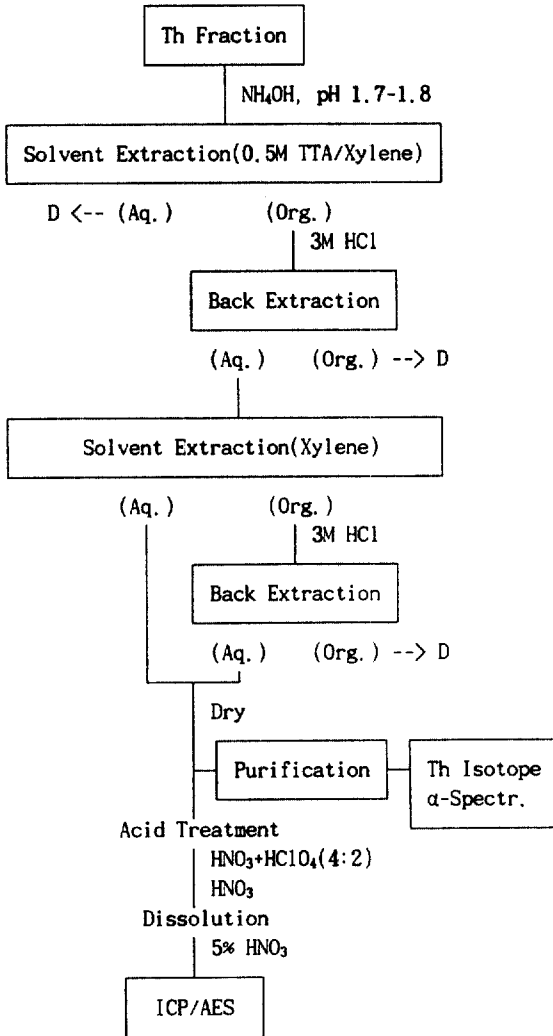


Fig. 2. Analytical procedure of thorium.

Teflon beaker에 모은다. 분별깔때기(V)의 남은 유기층에 3M HCl 용액 5mL를 가하고 1분간 흔들어 Th를 역추출한다. 상분리 후 수층을 분리하여 Teflon beaker에 합친다. Teflon beaker의 용액을 증발건조시킨다. Teflon beaker에 HNO₃ 4mL와 HClO₄ 2mL를 가하고 증발건조시킨다. 이어 HNO₃ 5mL를 가하고 증발건조시킨다. 5% HNO₃ 용액 5mL에 녹이고 ICP/AES로 Th를 정량한다.

2.2.4. 다량 U의 추출(* in Fig. 1)

U를 다량 함유하고 있는 지질시료(K2) 중의 U의

분리는 상기의 미량 U의 분리과정을 수정하여 적용한다. 시료를 분해한 후 잔유물을 4M HCl 대신 9M HCl 용액에 용해한다. TTA 용액으로 추출하고 유기층으로부터 U와 Th를 역추출할 때 4M HCl 용액 대신 9M HCl 용액을 사용한다. 이어 수층으로부터 U를 추출할 때 5% TOA 용액 대신 20% TOA 용액을 사용한다. 유기층으로부터 4M HCl 용액을 이용한 역추출은 생략하고 이어 0.3M HCl 용액으로 역추출할 때 수 회 더 반복한다.

2.2.5. U의 정제

시료 중의 U에 대한 자연방사성 동위원소 측정을 위해 용매추출로 최종 분리한 U 용액을 연속과정으로 정제한다. 최종 분리 용액 전량 혹은 일정량을 Teflon beaker에 취하여 증발건조시킨다. H₂SO₄(1:1) 용액 3mL를 가하고 증발건조시킨다. 수분이 완전히 증발하면 일정량의 증류수를 가하여 0.25M 용액으로 희석한다. 외경 1cm와 높이 15cm의 이온교환분리관(AG 1×8, 200~400 mesh)을 준비한다. 0.25M H₂SO₄ 용액을 충분히 통과시켜 분리관을 평형시킨 후 시료용액을 흡착시킨다. 1M H₂SO₄ 용액 50mL로 U를 용리하고 beaker에 모은다. 증발건조시킨 후 자연방사성 동위원소 측정을 위하여 보관한다.

2.2.6. Th의 정제

시료 중의 Th에 대한 자연방사성 동위원소 측정을 위해 용매추출로 최종 분리한 Th 용액을 연속과정으로 정제한다. 최종 분리용액 전량 혹은 일정량을 Teflon beaker에 취하여 증발건조시킨다. HNO₃ 5mL를 가하고 증발건조시킨 후 9M HNO₃ 용액 10mL로 시료를 녹인다. 외경 1cm와 높이 15cm의 이온교환분리관(AG 1×8, 100~200 mesh)을 준비한다. 9M HNO₃ 용액을 충분히 통과시켜 분리관을 평형시킨 후 시료용액을 흡착시킨다. 9M HNO₃ 용액 60mL를 통과시켜 분리관을 씻어 준다. 이어 10M HCl 용액 150mL를 통과시켜 Th를 용리하고 beaker에 모은다. 증발건조시킨 후 자연방사성 동위원소 측정을 위하여 보관한다.

2.2.7. 알파선분광분석

U와 Th 분리용액의 알파선분광분석을 위한 전착 cell의 준비와 전착 및 알파선분광분석은 문헌상의 방법에 준하였다.³⁸ 지질시료 중의 U와 Th의 자연방사성 핵종에 대한 알파선분광분석에 앞서 시약용 U와 Th 각각 10_μg을 이용하여 전착하고 표준선원의 알파선스펙트럼을 얻었다. 미지 시료 K1과 K2로부터 분리 및

정제한 U와 Th 각각을 동일한 방법으로 전착하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표준암석 중의 U와 Th 분리정량

Table 2에는 표준암석을 상기 방법으로 U를 분리한 후 정량한 결과(U-M1)와 다른 두 가지 시료전처리와 분리방법으로 분리한 후 ICP/AES로 정량한 결과(U-M2¹⁴⁻¹⁶와 U-M3¹⁸), 비파괴분석인 X-선 형광분석에 의한 결과³⁹ 및 NIST 공인값을 나타내었다. 비교를 위하여 실시한 다른 두 가지 시료전처리 및 분리방법은 다음과 같다 :

U-M2 : 산분해(HF+HNO₃+H₂SO₄) - 가리움(DTPA+NaClO₄)- pH(3.5) 조절(d-NaOH+d-HClO₄) - 용매추출(TC/benzyl alc.) - 역추출(1M HNO₃) - 산처리(HNO₃+HClO₄) - 용해(5% HNO₃) - ICP/AES,

U-M3 : 산분해(HF+HNO₃+HClO₄) - 가리움(CDTA+HCl) - pH(4.6) 조절(phthalate buffer) - 공침(1% PAN/acetone) - 여과(0.45 μ m) - 강열(500 $^{\circ}$ C) - 산처리(HNO₃+H₂SO₄, HNO₃+HClO₄, HNO₃) - 용해(5% HNO₃) - ICP/AES.

U-M2는 분리한 U 시료를 ICP/AES로 정량하는 과정에서 노란색 불꽃을 보였다. 이 결과는 시료 중의 주요 알칼리 및 알칼리토금속 원소가 완전분리되지 않은 것으로 생각된다. 1M HNO₃ 용액으로 역추출하여 100% 회수가 가능하였으나 상분리능이 좋지 못하였

다. U-M3에 의한 정량 결과는 NIST 공인값보다 높게 나타났다. 공침분리 후 침전제를 혼산처리하였으나 완전제거되지 않고 정량을 방해하였다. 따라서 정량에 앞서 미분해된 미세한 침전물을 여과하여 제거하는 과정이 필요하였다.

본 분석방법인 U-M1은 시료를 산분해한 후 TTA, TOA 및 xylene을 이용하여 계통적으로 추출분리한 결과이다. 3회 실험결과 평균 4.93ppm으로 나타났으며, 대략 100%의 분리수율을 보였다. 이 결과는 NIST 공인값과 비교할 때 7.6%의 상대오차를 나타내며 비파괴 분석인 X-선 형광분석 결과(4.72ppm)³⁹와 비슷하였다. 이 방법은 동일시료로부터 연속적 다단계추출로 U를 분리하고 이어 Th를 분리할 수 있다. 따라서 미량의 U와 Th를 신속히 동시에 분리 및 정량할 수 있으므로 U와 Th 각각을 개별분리 후 정량하는 방법보다 효과적으로 생각된다.

Table 3에는 표준암석을 상기 방법으로 Th를 분리한 후 정량한 결과(Th-M1)와 비교를 위해 아래의 방법으로 시료전처리 및 개별분리한 후 ICP/AES로 정량한 결과(Th-M2)¹³, 비파괴 분석인 X-선 형광분석 결과³⁹ 및 NIST 공인값을 함께 나타내었다.

Th-M2 : 산분해(H₂SO₄+HF, HF) - 강열(500 $^{\circ}$ C) - 용융(Na₂CO₃+Li₂B₄O₇, 1000 $^{\circ}$ C) - 산처리(HF, HNO₃) - 음이온교환크로마토그래피(Dowex 1 \times 8) - 용리(1.5M HCl, 3M HCl) - 산처리(HNO₃) - 용해(5% HNO₃) - ICP/AES.

Th-M2 방법으로 분리한 Th 시료를 ICP/AES로

Table 2. Analytical data of U in NIST SRM 278 rock standard

Element	Sample	Reported(ppm)	Found(ppm)		Difference (%)
		NIST	XRF	ICP/AES	
U	SRM	4.58 \pm 0.04	4.72 \pm 0.39		3.1
	U-M1			4.93 \pm 0.2	7.6
	U-M2			5.25 \pm 0.5	14.6
	U-M3			5.95 \pm 0.8	29.9

Table 3. Analytical data of Th in NIST SRM 278 rock standard

Element	Sample	Reported(ppm)	Found(ppm)		Difference (%)
		NIST	XRF	ICP/AES	
Th	SRM	12.4 \pm 0.3	12.9 \pm 1.12		4.0
	Th-M1			12.2 \pm 0.5	1.6
	Th-M2			9.0 \pm 1.4	27.4

정량하는 과정에서 노란색 불꽃을 보였다. 이것은 알칼리용융에 의한 시료분해 후에 용융제로부터의 Na와 Li이 1단계의 음이온교환분리로 완전 분리제거되지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서 이 방법은 용융분해를 생략하거나 이온교환이나 용매추출에 의한 분리 과정을 추가할 경우 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다. 본 분석방법인 Th-M1은 Th를 TTA, TOA 및 xylene을 이용하여 계통적으로 추출분리한 결과이다. 3회 실험결과 재현성을 보이고 대략 100%의 분리수율을 보였다. 정량결과(12.2ppm)를 NIST 공인값과 비교하였을 때 1.6%의 상대오차를 나타내었으며, 비파괴 분석인 X선 형광분석 결과(12.9ppm)³⁹와도 비슷하였다. 이 방법은 연속적 다단계추출로 동일 시료로부터 U를 분리한 후 연속과정으로 Th를 분리할 수 있으므로 신속히 동시정량할 수 있는 장점을 가진다.

3.2. 미지 시료 중의 U와 Th 분리

표준암석 중의 U과 Th을 계통적 추출로 분리한 상기의 방법을 2종의 국내산 지질시료(K1과 K2) 중의 U와 Th 분리에 적용해 보았다. 이 시료들은 분리에 앞서 비파괴중성자방사화분석(INAA)으로 U과 Th을 정량한 결과 아래와 같이 나타났다.

Sample	Found(ppm)	
	U	Th
K1	2.35±0.43	41.97±3.19
K2	629±83.13	38.18±8.06

U 함량이 적은 K1 시료는 5g을 취하고 시료분해를 위한 산과 추출제의 양을 2~3배 증가시켰다. 다량의 U을 포함하는 K2 시료는 1g을 취하고 상기의 다량 U의 추출방법으로 U을 분리하였다. 연속적 추출에 의해 다량의 U을 분리한 수층을 분석해 보았을 때 U의 화학적 회수율은 94.5%였다.

F. L. Moore^{34,35} 등은 U의 추출에 여러 긴사슬 아민 추출제를 이용하였으며 다량(수 mg)의 U을 TIOA/xylene으로 추출할 때 추출되는 U의 양이 많을수록 xylene층 밑에 U을 포함하는 노란색의 오일이 형성되고 보다 높은 농도에서는 접촉면에 겔이 형성됨을 관찰하였다. 이러한 현상은 다음의 4가지 방법, 즉 1) 수층의 HCl 농도 증가, 2) 수층에 acetone 첨가, 3) xylene보다 극성이 큰 용매 사용, 4) xylene 중의 TIOA 농도 증가 등에 의해 방지할 수 있었다. 본 연구에서도 9M HCl 용액으로 용해 및 역추출하고 20% TOA 용액으로 추출하였을 때 다량의 U에 의해 생기는 겔 형성을 방지할 수 있었다.

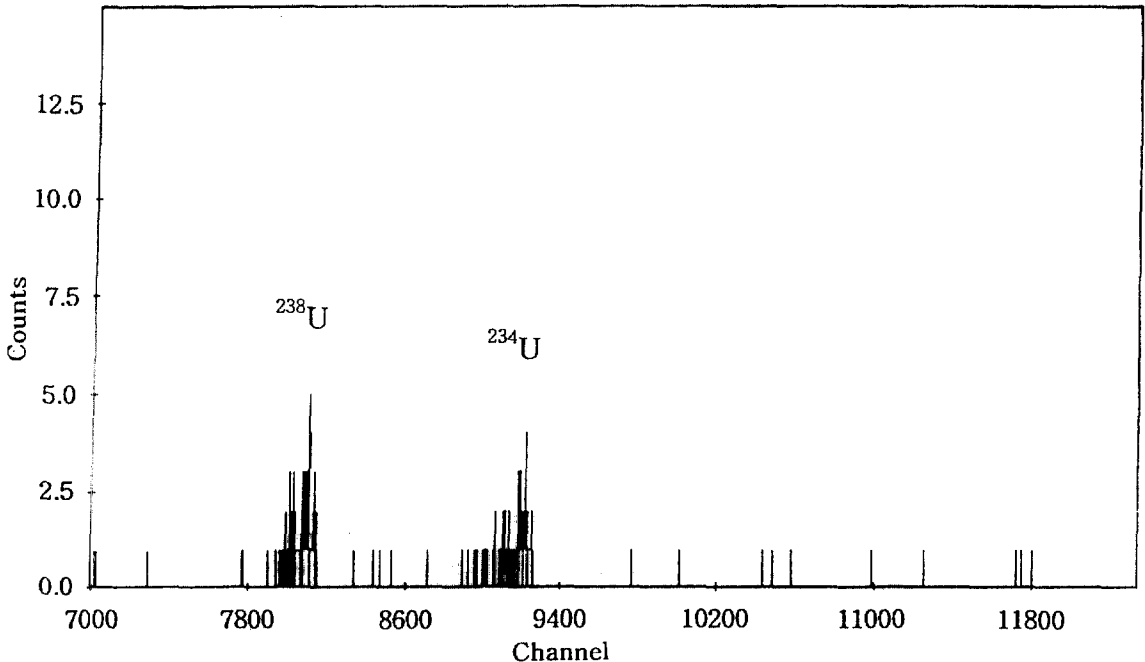


Fig. 3. Alpha spectra of uranium fraction of unknown sample K2 after chemical separation.

3.3. U와 Th의 정제

알파선분광분석으로 U과 Th의 자연방사성동위원소를 측정하려면 두 원소간 순수한 분리가 이루어져야 하고, 또한 여러 다른 원소들로부터 간섭을 받지 않도록 정제를 거친 순수한 전기전착용액을 준비해야 한다. McCabe 등⁹은 지질시료로부터 U과 Th를 정량적으로 추출하여도 μg 량의 다른 원소가 존재할 경우 전기전착효율을 상당히 감소시킨다고 지적하였다.

본 연구에서 추출분리한 U와 Th를 정제하지 않고 전기전착하였을 때 알파선분광분석이 불가능하였다. 이것은 분리용액 중에 Fe 등이 잔존하여 간섭하기 때문이었으며, 추가로 음이온교환분리를 하여 정제하였다. U의 경우 추출분리한 용액을 이온교환분리관상에서 0.25M H₂SO₄ 용액으로 Fe와 Al 등을 용출시켜 제거하고 1M H₂SO₄ 용액으로 U를 용리하였다. Th의 경우 추출분리한 용액을 이온교환분리관상에서 9M HNO₃ 용액으로 U와 Fe 등의 불순물을 용출시켜 제거하고 10M HCl 용액으로 Th를 용리하였다. 정제 후의 각 용액은 알파선분광분석 중에 간섭을 보이지 않았다. 50000초 동안 계측하였을 때 U과 Th의 알파선 스펙트럼으로부터 ²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁸Th, ²³⁰Th 및 ²³²Th의

알파선 피크를 확인할 수 있었다(Fig. 3과 4).

4. 결론

지질시료를 혼산(HF, HNO₃, HClO₄)으로 사전분해하고 미량의 U와 Th를 TTA/xylene과 TOA/xylene 추출제를 이용하여 계통적으로 추출 분리하는 방법은 동일 시료부터 U와 Th를 동시에 신속히 분리 및 정량할 수 있는 장점을 가진다. 다량의 U를 포함하는 지질시료 중의 U의 분리는 추출조건을 약간 수정하여 분리할 수 있다. 추출 분리한 U와 Th를 이온교환분리로 정제하고 알파선분광분석을 하면 자연방사성 동위원소를 측정할 수 있다.

참고문헌

1. D. G. Brookins, "Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal", p.27, Springer-Verlag, New York, U.S.A., 1984.
2. J. C. Laul, *At. Ener. Rev.*, **173**, 680(1979).
3. J. C. Laul, *J. Radioanal. Nucl., Chem. Art.*, **156**(2), 235(1992).

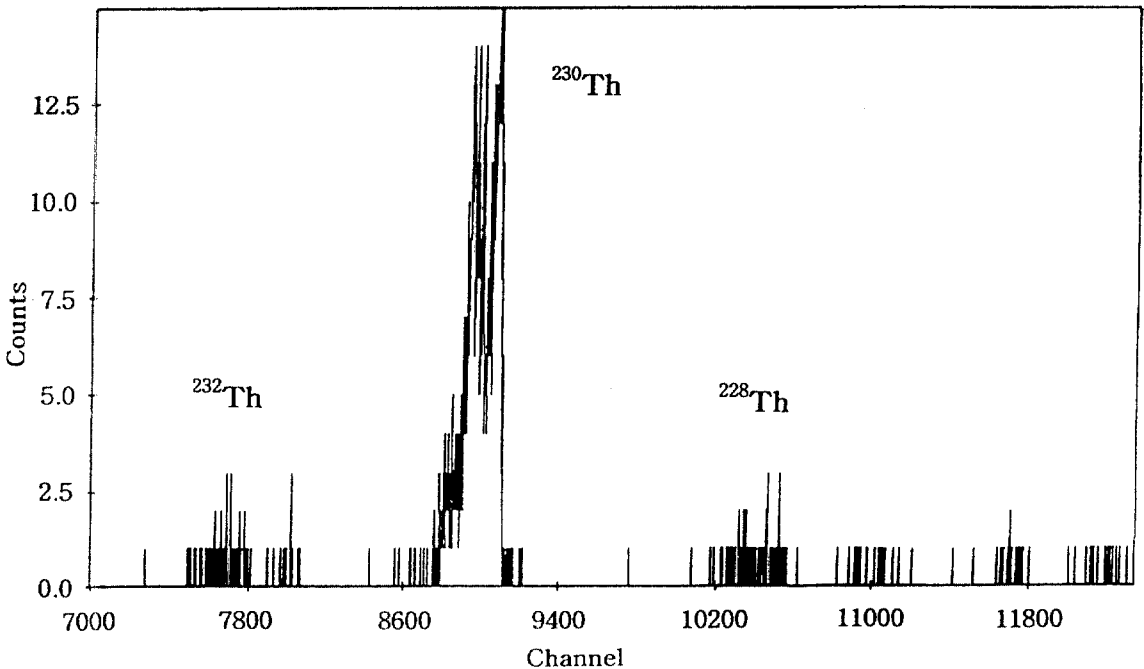


Fig. 4. Alpha spectra of thorium fraction of unknown sample K2 after chemical separation.

4. J. C. Laul et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **110** (1), 101(1987).
5. J. C. Laul and M. R. Smith, *Rad. Waste Manage. Nucl. Fuel. Cycle*, **11**(2), 169(1988).
6. E. Wild and L. Steffan, *Radiochim. Acta*, **54**, 85 (1991).
7. E. Wild and L. Steffan, *Radiochim. Acta*, **57**, 153 (1992).
8. T. L. Ku and L. U. Joshi, *J. Radioanal. Chem.*, **67** (2), 351(1981).
9. R. G. Ditchburn and N. E. Whitehead, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **189**(1), 115(1995).
10. B. Parsa, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **157**(1), 65 (1992).
11. B. Gleisberg et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **147**(1), 95(1991).
12. W. J. McCabe et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **159**(2), 267(1992).
13. C. O. Ingamells and F. F. Pitard, "Applied Geochemical Analysis", p.496, John Wiley and Sons, New York, U. S. A., 1986.
14. M. Saiki and F. W. Lima, *Radiochem. Radioanal. Lett.*, **29**(2), 67(1977).
15. R. Petrauskas and M. Saiki, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.*, **95**(3), 155(1985).
16. M. Saiki and F. W. Lima, *Radiochem. Radioanal. Lett.*, **30**(1), 1(1977).
17. H. M. Shihomatsu and S. S. Iyer, *Anal. Chim. Acta*, **228**, 333(1990).
18. H. Bem and D. E. Ryan, *Anal. Chim. Acta*, **158**, 119 (1984).
19. M. Ebihara et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **109**(1), 69(1987).
20. R. B. Pathak and A. P. Argekar, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.*, **166**(6), 503(1992).
21. J. Korkisch and K. A. Orlandini, *Anal. Chem.*, **40** (13), 1952(1968).
22. S. R. Joshi, *Anal. Chem.*, **57**(6), 1023(1985).
23. H. Onishi and K. Sekine, *Talanta*, **19**, 473(1972).
24. M. N. Nadkarni et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.*, **86**(5), 275(1984).
25. I. Kuleff and D. Todorovsky, *J. Radioanal. Chem.*, **21**, 445(1974).
26. J. Holzbecher and D. E. Ryan, *J. Radioanal. Chem.*, **74**(1), 25(1982).
27. M. Pimpl et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **161** (2), 437(1992).
28. N. Lavi and E. Ne'eman, *J. Radioanal. Chem.*, **78** (2), 327(1983).
29. E. Steinnes, *Anal. Chem.*, **48**(11), 1440(1976).
30. S. Ahmad et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **170** (1), 165(1993).
31. 김영삼 · 성학제, "ICP-방출분광법의 기초와 응용", p.233, 자유아카데미, 1990.
32. Z. Zhanxia et al., *Spectrochim. Acta*, **46B**(8), 1171 (1991).
33. ASTM C 1000-90, "Standard Test Method for Radiochemical Determination of Uranium Isotopes in Soil by Alpha Spectrometry", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12. 01, 1987.
34. F. L. Moore, *Anal. Chem.*, **29**(11), 1660(1957).
35. F. L. Moore, *Anal. Chem.*, **30**(5), 908(1958).
36. I. Hodara and I. Balouka, *Anal. Chem.*, **43**(10), 1213(1971).
37. 전관식 외, KAERI-NEMAC/RR-129/94/SUPPL., p.215, 1994.
38. 전관식 외, KAERI-NEMAC/RR-129/94, p.26, 1994.
39. Y. J. Park et al., *Anal. Sci. & Tech.*, **9**(1), 20(1996).