

한국기초과학지원연구원에 도입된 K-Ar 연대 측정 시스템: 개요 및 성능

김 정 민

한국기초과학지원연구원

New K-Ar dating system in Korea Basic Science Institute: Summary and Performance

Jeongmin Kim

Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

요약: 1997년 이후 한국기초과학지원연구원에 K-Ar 연대 측정 시스템이 도입되어 현재 이용중이다. 이 시스템은 흑연전기로, 가스 전처리 장치, 질량분석기와 자료획득장치로 구성되어 있으며 K-Ar 연대 측정은 ^{38}Ar 을 스파이크로 이용하는 동위원소 희석법에 의한 정밀한 Ar 농도 측정과 원자흡광분석을 통한 K 질량분석에 의해 이루어진다. 연대가 잘 알려진 K-Ar 연대측정용 표준물질을 이용하여 시스템의 정밀성과 정확성을 확인하였다. 백만년 이하의 연대를 갖는 시료의 경우 질량분석기의 감도와 질량차별지수의 미약한 변화에도 큰 영향을 받기 때문에 정확한 연대 측정이 곤란하나 중생대 및 제 3기의 K-Ar 연대를 갖는 표준시료의 연대를 측정했을 때, 믿을 만한 결과를 내고 있다. 92.6 ± 0.6 Ma의 연대가 알려진 SORI93 흑운모의 경우 92.1 ± 1.1 Ma의 연대를 얻을 수 있었고, 18.5 ± 0.6 Ma의 Bern4M 백운모는 권고치와 유사한 17.8 ± 0.2 Ma의 연대를 얻을 수 있었다.

핵심어: K-Ar 연대, 질량분석기, 동위원소희석법, 질량차별지수

Abstract: K-Ar dating system of Korea Basic Science Institute (KBSI) was installed in 1997 and has been used since then. The system consists of high temperature graphite furnace, gas purification system, and mass spectrometer with data acquisition system. K-Ar age is determined by the measurement of the concentrations of Ar and K through isotope dilution method using ^{38}Ar as spike and flame spectroscopy, respectively. The accuracy and reliability for the K-Ar age are checked using the several K-Ar standard materials. Although the exact age determination for young samples of less than 1 Ma is hampered by small fluctuations of sensitivity and mass discrimination, the present system yields the reliable K-Ar age compared to the standard materials of Tertiary and Mesozoic age. The measurements for the SORI93 biotite with the recommended K-Ar age of 92.6 ± 0.6 Ma and Bern4M muscovite of 18.5 ± 0.6 Ma yield the reliable age of 92.1 ± 1.1 Ma and 17.8 ± 0.2 Ma, respectively.

Key words: K-Ar age, mass spectrometer, isotope dilution, mass discrimination factor

서 론

K-Ar 연대 측정은 가장 오래된 지질학적 연대 측정 방법중의 하나이다. 이 방법은 비록 과잉 및 손실 Ar에 대한 정보를 얻을 수 없는 점과 K와 Ar의 분리 측정에 따른 시료의 불균질성 문제(Darylmphe and Lanphere, 1969) 등과 같은 여러 가지 약점에도 불구하고

분석기술의 발달에 따라 아직까지도 활발히 이용되고 있다. 연대가 젊은 화산암이나 단층점토의 경우 K-Ar 연대 측정은 가장 쉽고 저렴한 연대 측정법으로 간주되고 있다.

한국기초과학지원연구원에서는 새로운 Ar 연대 측정 장비를 도입하여 1997년 말 설치 완료하고 국내에서 유일하게 광물이나 암석의 K-Ar 연대를 측정하고

*Corresponding author: Tel. 82-42-865-3448, E-mail. j-mkim@comp.kbsi.re.kr

있다. 최근에는 한국원자력연구소의 '하나로' 원자로를 이용한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법을 도입하여 시험 중에 있다. 이 논문에서는 Ar 연대 측정 장비의 구성을 간략히 소개하고 국제적으로 널리 통용되는 K-Ar 연대 측정용 표준시료를 분석하여 기기의 성능과 정확성을 비교해 보고자 한다.

K-Ar 연대 측정의 원리

K은 지각을 구성하는 8대 원소 중의 하나로서 많은 조암광물들의 주 구성원소이다. K의 동위원소 중 방사성 동위원소는 ^{40}K 로서 전체 K의 양 중 0.012%를 차지한다(Gamer *et al.*, 1975). ^{40}K 의 89.52 %는 β 붕괴를 통해 ^{40}Ca 을 만들고 나머지 10.48%만이 전자 포획과 양전자(positron) 방출을 통해 ^{40}Ar 을 형성한다(Faure, 1986). 양전자 방출에 의한 붕괴는 전체 방사성 붕괴의 0.001% 미만이므로 전자포획에 의한 붕괴 상수를 ^{40}K 가 ^{40}Ar 으로 붕괴될 때의 붕괴상수(λ_{ec})로 간주할 수 있고 그 값은 $0.581 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ 이며 반감기는 11.93 Byr이다(Steiger and Jager, 1977). ^{40}Ca 로 붕괴될 때 붕괴상수(λ_{β})는 $4.962 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ 이며 반감기는 1.397 Byr이다.

^{40}K 중에서 ^{40}Ar 으로 붕괴되는 양은 $\lambda_{ec}/\lambda_{total}$ ($\lambda_{total} = \lambda_{ec} + \lambda_{\beta}$)로 나타낼 수 있으며 이를 방사성 붕괴의 일반식에 대입하면 다음과 같다.

$$^{40}\text{Ar}_{total} = ^{40}\text{Ar}_i + (\lambda_{ec}/\lambda_{total}) ^{40}\text{K} \cdot (e^{\lambda_{total} T} - 1)$$

암석의 생성시에 Ar이 완전히 빠져나갔다면(outgassing), 위 식에서 Ar의 초기값은 없어지고($^{40}\text{Ar}_i = 0$), 식은 아래와 같이 간단해진다.

$$^{40}\text{Ar}_{total} = (\lambda_{ec}/\lambda_{total}) ^{40}\text{K} \cdot (e^{\lambda_{total} T} - 1)$$

이 식을 연대 T에 대해서 정리하면 K-Ar의 연대 측정식이 만들어진다.

$$T = \frac{1}{\lambda_{total}} \cdot \ln \left[\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{40}\text{K}} \cdot \frac{\lambda_{total}}{\lambda_{ec}} + 1 \right]$$

이때 $^{40}\text{Ar}^*$ 는 ^{40}K 의 방사성 붕괴에 의해 만들어지는 Ar을 의미한다. 이 식을 적용해 암석이나 광물의 K-Ar 연대를 계산할 때 시료가 Ar과 K에 대해 폐쇄계를 이루고 있어야 하며, 폐쇄온도 이하의 온도에서 동위원소의 조성이 일정하다는 가정을 전제로 한다. 또한 대기기의 ^{40}Ar 에 대한 적절한 보정이 필요하고, ^{40}Ar 과 K에 대한 정확한 농도 측정이 요구된다.

K-Ar 연대 측정 시스템의 개요

한국기초과학지원연구원에 설치되어 있는 K-Ar 연대 측정시스템은 (1) 흑연전기로, (2) 가스 정제 장치, (3) 불활성 기체 질량분석기와 (4) 자료 수집장치로 구성된다(Fig. 1).

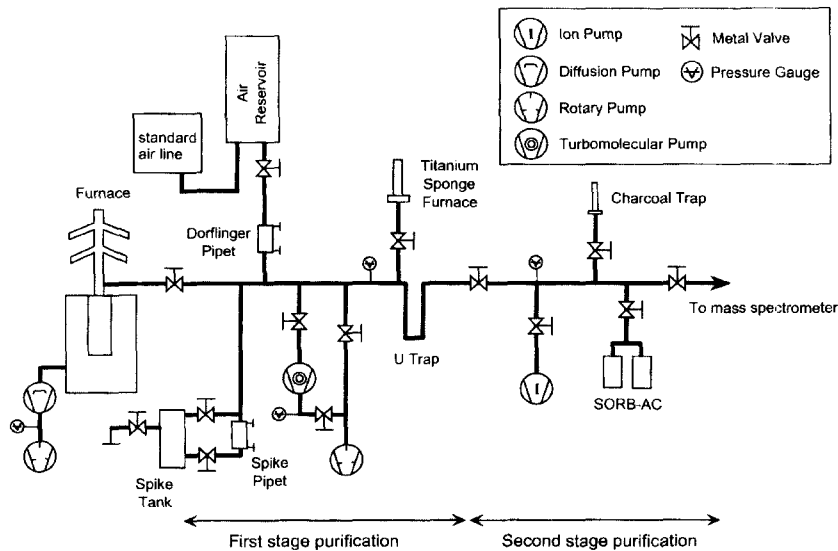


Fig. 1. Schematic diagram for the furnace and the gas preparation system of Ar dating system in KBSI.

흑연전기료

흑연전기료의 상단에는 8개의 가지를 가지는 파이렉스 유리로 만들어진 시료 홀더가 부착되어 있다. 시료를 한꺼번에 40여 개씩 장착할 수 있으며 동일 시료를 나누어 포함함으로써 최대 질량 1g 정도의 시료까지 실험할 수 있다. 외부의 자석을 이용하여 각각의 시료를 전기료 속으로 낙하시킨 후 실험을 진행한다. 전기료는 흑연 발열체와 그 내부의 Ta로 만들어진 튜브로 구성되어 있다. 시료는 Ta 튜브속에 들어 있는 Ta 도가니 속으로 낙하되어 1450 °C의 온도에서 10분간 가열된다. 전기료에 부착되어 있는 오일확산펌프는 흑연 발열체가 산화되지 않도록 약 1×10^{-5} mbar 정도로 내부의 진공을 유지시킨다. Ta 튜브 하단에는 W-Re 열전대 온도계가 있어 전기료 내부의 온도를 측정한다.

표준공기 및 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 저장장치

표준공기 저장장치는 보정된 표준 공기와 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 를 보관하는 두개의 스테인레스제 용기 및 내부 부피가 정확히 알려진 가스피펫과 이들을 연결하는 부품으로 구성되어 있다. 용기 및 기타 부품들의 내부부피는 물과 오일을 이용하여 측정하였다(Nagao and Itaya, 1988). 부피와 압력을 정확히 측정한 공기를 표준 공기 저장용기에 저장한 후 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 의 정량이나 질량분석기의 감도 및 질량차별효과를 측정할 때 이용한다. 대기중의 Ar 농도(0.934%)와 Ar의 동위원소비($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$, $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 0.188$)를 고려했을 때 가스피펫 1회 분량의 표준공기에는 약 1.0×10^{-7} cm³ STP(표준온도 및 압력 조건으로 환산했을 때의 부피)의 ^{40}Ar 이 포함되어 있다. 피펫 1회 분량의 표준공기와 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 을 전처리장치 속에 투입한 후 질량분석기를 통해 측정된 혼합 Ar의 동위원소비를 이용하여 정확한 양의 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 양을 구해낸다. 용기속에 보관된 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 의 양은 실험이 진행되면서 점차적으로 감소하므로 실험을 시작할 때마다 새로 측정하고 ^{40}Ar 의 양이 잘 알려진 표준물질을 이용하여 다시 한번 확인한다. 가장 최근 측정된 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 의 양은 피펫 1회 당 약 9.0×10^{-9} cm³ STP에 달하며 $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 및 $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 의 비는 0.1508 ± 0.0006 과 0.000524 ± 0.000013 이다.

가스 정제 장치

시료로부터 배출된 기체는 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 와 혼합되어 두 단계의 정제 과정을 거쳐 질량분석기로 공급된다. 가스

정제는 Ti 스폰지 전기료와 U 트랩으로 구성된 첫번째 단계와 활성탄 트랩과 두개의 SORB-AC 게터(getter)로 구성된 두번째 단계로 이루어진다(Fig. 1). 스테인레스 튜브 속에 장착된 Ti 스폰지는 외부에서 800 °C 로 가열된 후 식으면서 O₂ 및 N₂ 등의 기체를 흡착한다. H₂O, CO₂ 및 Xe 등의 기체는 액체질소로 냉각된 U 트랩에서 분리된다. 2차 정제 단계에서는 SORB-AC 게터를 이용하여 남아있는 탄화수소, N₂, O₂, CO₂ 및 H₂를 제거한 후 Ar만 활성탄 트랩에 모이게 된다. SORB-AC 게터는 내부에 열선이 있고 그 주위를 Zr과 Al의 합금이 둘러싼 형태로 상온과 250°C의 온도에서 동작한다. 가스 정제 장치의 진공은 터보펌프와 이온펌프를 이용하여 1×10^{-8} mbar 이하를 유지하고 있다.

질량분석기와 자료 수집 장치

연대 측정에 이용되는 불활성기체 질량분석기는 영국 Micromass사에서 제조한 VG5400 모델로 전자 충돌식 이온 발생 장치(electron impact ion source), 54 cm의 반경을 갖는 사반구형 전자석과 두 종류의 이온 검출기로 구성되어 있다. Ar의 동위원소 중 양이 제일 많은 ^{40}Ar 은 패러데이(Faraday) 검출기로, 다른 동위원소들은 전자증배관(electron multiplier)을 이용해 측정하며 검출기의 분해능(mass resolution, $M/\Delta M$)은 각각 200과 600이다. 정제된 Ar이 질량분석기로 투입되면 질량분석기는 질량수 35와 41 사이의 자기장을 스캐닝하여 각 Ar동위원소의 최대 신호 위치(peak position)가 얻어지는 정확한 전류값을 기억시킨다. 이후 ^{36}Ar , ^{38}Ar , 및 ^{40}Ar 에 해당하는 전류값을 순차적으로 변화시키면서 20여 회에 걸쳐 각 동위원소의 최대 신호값을 읽는다. 분석이 끝나면 시료가 투입되었던 시간으로 역산하여 각각의 동위원소 비율을 계산한다.

질량차별효과

질량분석기는 기기 내부에서의 분별 작용과 동위원소별 이온화 정도 차이로 인해 시료의 정확한 동위원소 비율을 직접적으로 측정하지 못한다. 또한 동위원소별 다른 검출기를 이용함으로써 그들 사이의 보정은 반드시 필요하다. 질량차별지수(mass discrimination factor)는 이러한 차이점을 극복하기 위한 수단으로 표준 공기를 이용해 측정된 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 값과 실제 공기의 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (= 295.5) 값과의 비율을 나타낸다. 시료의 실제 동위원소비는 측정값에 질량차별지수를 곱한 값으로 나

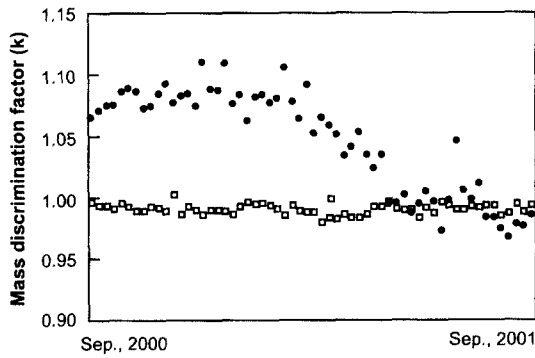


Fig. 2. Temporal variation of the mass discrimination factor calculated from the standard air analysis during one year. The open boxes represent the measurement of both ^{40}Ar and ^{36}Ar using high Faraday detector. The closed circles represent the measurement of ^{40}Ar and ^{36}Ar using high Faraday detector and electron multiplier, respectively. The variation of the latter is due to the fluctuation of the high voltage supplied to electron multiplier.

타낼 수 있다. 전처리장치와 질량분석기 내부의 ^{38}Ar 기역효과 때문에 $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 에 대한 질량 차별 지수는 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 으로부터 계산되었다. Fig. 2에 2000년 9월부터 2001년 9월 사이에 측정된 표준공기의 동위원소비율의 변화가 제시되어 있다. 패러데이 검출기로 ^{40}Ar 과 ^{36}Ar 을 동시에 측정할 경우 질량차별지수는 거의 일정하지만 ^{36}Ar 을 전자증배관을 이용하여 측정할 경우 검출기에 공급되는 전압(약 1400 V)의 변화에 따라 그 값이 조금씩 변화할 수 있다. 질량분석기에 공급하는 표준공기의 양을 다르게 하였을 때 질량차별지수가 조금씩 달라질 수 있으나(Fig. 3) 공급량과 측정 비율에 있어서 어떤 일정한 관계가 나타나지는 않는다. 실제 실험에서는 분석에 앞서 표준공기를 이용하여 질량차별지수를 매일 구하고, 시료에서 발생하는 Ar의 양이 질량차별지수를 측정할 때 쓰는 표준 공기의 양과 같아지도록 K의 양과 예상연대를 고려하여 시료의 양을 조절한다. 예를 들어 중생대 화강암내의 흑운모는 약 10 mg, 각섬석은 약 20 mg 시료를 이용하게 된다.

동위원소 회석법을 이용한 K-Ar 연대 측정

K의 정량

K 농도 분석을 위해서 약 0.1 g의 시료를 혼합산 (HF: HNO₃: HClO₄=4:4:1)과 섞어 테플론 재질의 압력 용기에 넣은 후 약 200°C의 온도로 가열하여 완전

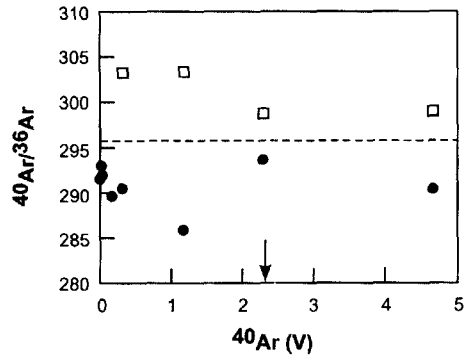


Fig. 3. Variation of the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio of standard air against the ^{40}Ar abundances introduced into mass spectrometer. The X-axis represents the signal intensity of ^{40}Ar measured by high Faraday detector. Symbols: open box, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio measured by only high Faraday detector; closed circle, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio measured by high Faraday for ^{40}Ar and electron multiplier for ^{36}Ar . Arrow indicates the intensity of ^{40}Ar in one aliquot standard air. Dashed line represents the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio (=295.5) of the air.

히 용해시킨다. 시료의 K의 농도를 고려하여 5000-10000배 정도 희석 시킨 후 2000 ppm의 Cs를 추가하여 원자 흡광분석기(모델명: Unicam 989)를 이용하여 K의 양을 측정한다. K의 양이 잘 알려진 일본지질조사소 화강암 표준물질 JG-1a (K=3.29 wt %; Imai *et al.*, 1995)을 같이 용해시킨 후 K의 양을 측정하여 실험의 정확성 및 분석의 재현성을 확인한다. 이와 같은 방법으로 K는 약 2% 이내의 오차범위에서 측정된다 (Table 1).

Table 1. K concentrations of JG-1a determined by AAS in 2001

date	weight (g)	concentration (wt%)	uncertainty*
29 Dec 00	0.0999	3.258	-0.96%
31 Jan 01	0.1024	3.231	-1.80%
17 Mar 01	0.1126	3.237	-1.62%
21 May 01	0.1012	3.249	-1.25%
05 May 01	0.1059	3.312	0.68%
02 Jul 01	0.1018	3.341	1.54%
13 Sep 01	0.0999	3.335	1.36%
05 Aug 01	0.0999	3.269	-0.65%
17 Oct 01	0.0963	3.313	0.71%

Recommended K concentration of JG-1a is 3.29 %

*Uncertainty = (recommended value-measured)/recommended value

Ar의 측정

10-50 mg의 시료를 15-18 μm 두께의 250°C의 온도에서 열처리된 알루미늄 박으로 포장한 후 시료 홀더에 장착한다. 시료 전처리 장치와 시료 홀더를 200°C의 온도에서 하루 이상 가열하여 진공도를 높이고 시료에 흡착되어 있는 대기기원의 Ar을 방출시킨다. 시료 교환중 대기에 노출된 전기로 내부를 1600°C의 온도에서 수 시간 가열하여 전체 실험 과정 중의 ^{40}Ar 배경값(hot blank)을 $2.0 \times 10^9 \text{ cm}^3 \text{ STP}$ 이하로 낮춘다. 이때 Ar의 동위원소 비는 대기의 Ar 조성구와 유사하다. $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 과 배경값에 대한 보정이 끝난 후 시료 홀더 안의 시료들은 차례대로 전기로 안으로 떨어뜨린 후 1450°C의 온도에서 가열되어 내부의 기체들을 방출한다. 전처리 장치를 통해 분리된 Ar은 질량분석기 안으로 투입된 후 각 동위원소들의 비율이 측정된다. 방사기원의 ^{40}Ar 과 오차계산은 $^{38}\text{Ar}_{\text{spike}}$ 내의 ^{36}Ar 과 ^{40}Ar 의 값, 배경값의 Ar의 양과 동위원소 비율을 고려한 Nagao *et al.*(1996)에 의해 제시된 방법을 따랐다.

계산된 Ar 동위원소들의 양은 시료의 질량으로 나눈 후 아래의 식에 대입되어 K-Ar 연대와 오차를 계산한다. 이때 이용된 붕괴상수는 Steiger and Jäger (1977)에 의해 제시된 값을 따랐다($\lambda_{\text{ec}} = 0.581 \times 10^{-10}/\text{y}$ and $\lambda_{\text{p}} = 4.962 \times 10^{-10}/\text{y}$, and atomic ratio $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.0001167$)

$$T(\text{Ma}) = 1.804 \times 10^3 \times \ln \left(1 + 1.428 \times 10^{-4} \times \frac{^{40}\text{Ar}^*}{K} \right)$$

$$\Delta T = \left[\frac{1.804 \times 10^3 \times 1.428 \times 10^{-4} \times ^{40}\text{Ar}^*}{K + 1.428 \times 10^{-4} \times ^{40}\text{Ar}^*} \right]$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{\Delta ^{40}\text{Ar}^*}{^{40}\text{Ar}^*} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K}{K} \right)^2}$$

분석의 정확성 및 재현성

실험의 정확성과 신뢰도를 확인하고자 여러 실험실에서 Ar에 대한 정보가 잘 알려진 K-Ar 연대 측정용 표준물질들을 분석하였다(Table 2). 일본의 야마가타 대학에서 보급하고 있는 Baba 응회암에서 분리한 흑운모는 $11.8 \pm 0.1 \text{ Ma}$ (Takahashi *et al.*, 1992)의 K-Ar 연대를 갖는다. 이 흑운모에 대한 분석결과는 $11.7 \pm 0.3 (1\sigma) \text{ Ma}$ 로서 권고치와 유사한 연대가 얻어진다. $128.5 \pm 1.4 \text{ Ma}$ (Odin *et al.*, 1982)의 K-Ar 연대 측정값을 갖고 있는 LP6 흑운모로부터 $119.6 \pm 2.4 \text{ Ma}$ 범위의 조금

낮은 연대값이 얻어진다. Jäger *et al.*(1963)에 의해 $18.5 \pm 0.6 \text{ Ma}$ 의 연대를 갖고 있는 것으로 알려진 Bern4M 백운모의 경우 $17.8 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 사이의 연대가 계산되고 방사기원의 ^{40}Ar 의 양도 잘 일치한다. 일본지질조사소의 화강암 표준 물질인 JG-1에서 분리된 흑운모는 $90.4 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 의 K-Ar 연대가 알려져 있는데(Nagao *et al.*, 1996) 이번 연구를 위한 측정에서는 $89.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 의 연대를 지시한다.

최근 일본 지질조사소에서는 $92.6 \pm 0.6 \text{ Ma}$ 의 연대를 갖는 새로운 K-Ar 연대 측정용 흑운모를 보고한 바 있다(SORI93 흑운모: Sudo *et al.*, 1998). 이 시료를 분석하였을 때, $92.1 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 의 연대를 얻을 수 있었다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정에서 흔히 증성자 모니터링으로 이용되는 GA1550 흑운모의 경우 $98.8 \pm 0.8 \text{ Ma}$ K-Ar 연대를 갖고 있는데, 2회의 연대측정 실험 결과 $100.4 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 및 $101.4 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 의 연대 측정 결과가 얻어졌다. 이상의 결과를 종합할 때 현재 설치된 K-Ar 연대 측정시스템은 중생대 및 제3기 시료에 대해 믿을 만한 연대 측정 결과를 보여주고 있다.

최근 피크 직비교법(peak comparison method, 또는 감도측정법, sensitivity method)을 이용한 백만년 미만의 연대를 가지는 시료들에 대한 연대측정 연구가 활발해지고 있다. 이 방법에서는 시료의 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비율을 이용해 초기 Ar의 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비율을 계산한다. 그러나 우리의 시스템에서는 이미 ^{38}Ar 을 이용하고 있으므로 감도측정법을 정확하게 이용할 수는 없다. 초기 Ar의 동위원소 비율을 현재 공기의 값($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$)으로 가정하고 Takaoka(1988)에 의해 보급된 일본 제4기 표준물질인 YZ-1(0.23 Ma)을 단순한 감도측정법을 이용해 2회 측정해 본 결과 $0.28 \pm 0.05 \text{ Ma}$ 와 $0.32 \pm 0.05 \text{ Ma}$ 의 연대를 얻을 수 있었으나 동위원소 희석법을 이용하였을 경우 $0.24 \pm 0.01 \text{ Ma}$, $0.41 \pm 0.01 \text{ Ma}$ 및 $0.73 \pm 0.02 \text{ Ma}$ 의 재현성이 그리 좋지 못한 연대가 얻어진다. 이는 질량분석기의 감도 및 질량차별 지수의 변화 때문이며 수십만년 이하의 젊은 연대를 만족할 수 있을 정도로 측정하기 위해서는 추가적인 실험을 통한 분석법 개선이 필요하다.

결 론

한국기초과학지원연구원에 설치된 불활성 기체 질량분석기는 국내 유일의 K-Ar 연대 측정장비로서 활발하게 이용되고 있다. 흑연전기, 가스전처리 장치 및 질량분석기로 구성된 연대 측정시스템은 동위원소 희석법을 이용한 Ar의 농도 측정에 사용되며, K의 양은

원자흡광분석기를 이용하여 측정된다. K-Ar 연대는 별도로 측정된 K와 Ar의 양을 바탕으로 계산된다. 중생대 및 제3기의 연대를 갖는 K-Ar 표준물질에 대해 연대 측정을 실시한 결과 Baba 흑운모(권고치 11.8±0.1

Ma)는 11.7±0.3 Ma, Bern4M 백운모(18.5±0.6 Ma)는 17.8±0.2 Ma, JG-1 흑운모(90.4±1.2 Ma)는 89.9±1.1 Ma, SORI93 흑운모(92.6±0.6 Ma)는 98.8±0.8 Ma LP6 흑운모(128.5±1.4 Ma)는 119.6±2.4 Ma의 K-Ar

Table 2. K-Ar ages for international standard materials

Sample	date	K (wt%)	wt (g)	³⁶ Ar (10 ¹⁰ cm ³ STP/g)	⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ cm ³ STP/g)	⁴⁰ Ar radiogenic 2σ	Age (Ma)	2σ	Air (%)	reference value (Ma)
Baba Tuff (biotite)	27 Apr 98	6.56	0.01574	8.08	297.06	0.54	11.63	0.23	7.44	11.81 ± 0.1 ^{*1}
	19 Jun 98		0.01199	22.15	286.67	1.18	11.22	0.22	18.59	
	29 Jun 98		0.01330	108.91	296.45	2.37	11.60	0.23	52.05	
	23 Mar 99		0.01152	15.48	319.67	0.87	12.51	0.25	12.52	
Bern4M (muscovite)	03 Feb 99	8.68	0.01179	132.95	628.45	3.12	18.56	0.37	38.47	18.5 ± 0.6 ²
	08 Mar 99		0.00613	137.57	625.46	3.37	18.47	0.37	39.39	
	26 Apr 99		0.00876	102.85	603.58	2.79	17.83	0.35	33.49	
	25 Aug 99		0.00920	97.80	584.95	2.17	17.28	0.34	33.07	
	15 Sep 99		0.00991	98.15	595.17	2.23	17.58	0.35	32.76	
	05 Jan 00		0.00943	114.52	598.02	2.24	17.66	0.35	36.14	
	22 Feb 00		0.00975	108.02	593.96	2.73	17.54	0.35	34.96	
	26 Apr 00		0.01110	129.53	611.76	2.11	18.07	0.36	38.49	
	11 Jul 00		0.01092	123.46	608.25	2.70	17.96	0.54	37.49	
	18 Aug 00		0.00969	109.59	591.16	3.00	17.46	0.35	35.39	
	21 Sep 00		0.00836	135.30	670.49	3.13	19.79	0.39	37.36	
	23 Nov 00		0.00805	236.12	621.01	4.35	18.34	0.37	52.91	
	22 Dec 00		0.00601	109.96	594.65	3.20	17.56	0.35	35.34	
17 Aug 01	0.00648	145.19	615.90	2.78	18.19	0.37	41.06			
JG-1 (biotite)	17 Mar 99	6.96	0.01160	34.15	2634.62	1.91	94.97	1.85	3.69	89.5-93.4 ³
	14 Apr 99		0.01040	28.17	2432.53	3.45	87.86	1.72	3.32	
	03 Sep 99		0.00895	13.27	2513.39	3.01	90.71	1.77	1.54	
	22 Sep 99		0.00756	12.29	2514.14	2.83	90.74	1.77	1.42	
	13 Oct 99		0.00707	26.46	2394.44	3.20	86.52	1.69	3.25	
	29 Nov 99		0.00796	44.07	2422.61	3.17	87.51	1.71	5.10	
SORI93 (biotite)	30 Aug 00	6.77	0.01080	9.03	2534.59	4.07	93.90	0.54	1.04	92.6 ± 0.6 ⁴
	09 Oct 00		0.00791	93.33	2527.12	11.91	93.63	0.54	9.84	
	17 Oct 00		0.00609	41.59	2473.91	3.79	91.71	0.53	4.73	
	07 Nov 00		0.00620	76.71	2449.74	4.27	90.84	0.52	8.47	
	12 Mar 01		0.00612	122.98	2479.04	5.19	91.90	0.53	12.78	
GA1550 (biotite)	11 Mar 99	7.63	0.00586	73.21	3057.17	2.52	100.43	0.21	6.61	98.8 ± 0.8 ⁵
	21 Jul 99		0.00696	336.04	3089.31	13.92	101.45	0.21	24.32	
LP6 (biotite)	21 Apr 98	8.33	0.01444	32.58	4220.64	16.75	126.02	0.44	2.23	128.5 ± 1.4 ⁶
	18 May 98		0.01206	41.05	4169.41	19.41	124.54	0.06	2.83	
	23 Jun 98		0.01403	47.49	3947.39	20.22	118.12	0.42	3.43	
	07 Jul 98		0.01042	32.27	3831.77	11.49	114.77	0.40	2.43	

*reference age for standard materials: 1. Takahashi *et al.* (1992); 2. Jäger *et al.* (1963); 3. Nagao *et al.* (1996); 4. Sudo *et al.* (1998); 5. Renne *et al.* (1998); and 6. Odin *et al.* (1982)

연대를 얻을 수 있었다. 다만 백만년 미만의 연대가 아주 젊은 암석의 경우 연대 측정의 재현성이 좋지 못하는데 이는 향후 질량분석기의 질량차별지수 및 감도 변화를 충분히 고려할 수 있는 분석기법의 개발로 극복될 수 있다.

최근 한국기초과학지원연구원에서는 한국원자력연구소의 하나로 원자로를 이용한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법을 도입하여 시험 중에 있다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정은 시료의 불균질성 문제를 해결할 수 있고 과잉 또는 손실 Ar에 대한 정보를 제공해 줄 수 있는 등 K-Ar 연대 측정에 비해 많은 장점을 지니고 있다. 향후 성공적인 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법의 도입은 화강암체의 냉각 경로 및 변성 작용의 온도-시간 경로(T-t path) 연구에도 도움을 줄 수 있을 것이다.

사 사

저자는 이 논문을 심사하고 건설적인 의견을 주신 박계현 교수와 김상중 박사께 감사드립니다. 또한 연대 측정 표준시료를 기꺼이 제공하고 분석법에 대한 조언을 아끼지 않은 일본 동경대학교 K. Nagao 교수, 연세대학교 권성택 교수, 서울대학교 조문섭 교수, 일본 Okayama 이과 대학의 T. Itaya 교수, H. Hyodo 박사, 호주국립대학교 I. McDougall 교수와 일본지질조사소 M. Sudo 박사께 깊은 사의를 표합니다. 기기의 운영과 자료 해석에 많은 도움을 준 한국기초과학지원연구원의 정창식 박사, 이광식 박사, 최만식 박사, 신형선 박사, 한정희 박사께 감사드리며 기기설치 및 수리에 많은 도움을 준 영국 Micromass 사의 R. Smith와 C. Haynes 박사, 한국기초과학지원연구원의 윤수병 책임기술원, 이정민, 김종윤 기술원께 감사의 뜻을 표시합니다. 이 연구는 과학기술부의 하나로 공동이용 활성화 사업의 일부 지원을 받았습니다.

참고문헌

Darylmphe, G.B., and Lanphere, M.A., 1969, Potassium-argon dating, Principles, techniques and application to geochronology. Freeman, San Francisco, 258p.
Faure, G., 1986, Principles of isotope geology. Wiley, New

York, 589 p.
Garner, E.L., Murphy, T.J., Gramlich, J.W., Paulsen, P.J., and Barnes, I.L., 1975, Absolute isotopic abundance ratios and the atomic weight of a reference sample of potassium. Jour. Res. Natl. Bureau Stand., 79A, 713-725.
Imai, N., Terashima, S., Itoh, S., and Ando, A., 1995, 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "Igneous rock series". Geostandards Newsletter, 19, 135-213.
Jäger, E., Niggli, E., and Baethge, H., 1963, Two standard materials, biotite and muscovite, for Rb-Sr and K-Ar age determinations, sample Bern4B and Bern4M from a gneiss from Brione Valle Verzasca. Schweiz. Min. Petr. Mitt., 43, 465-470.
Nagao, K., and Itaya, T., 1988, K-Ar age determination. Mem. Geol. Soc. Japan, 29, 5-21.
Nagao, K., Ogata, A., Miura, Y.N., Yamaguchi, K., 1996, Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG5400 mass spectrometers - I: Isotope dilution method. J. Mass. Spectrom. Soc. Jpn., 44, 39-61.
Odin, G.S., and 35 collaborators, 1982, Numerical Dating in stratigraphy. John Wiley, 123p.
Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D., Owens, T.L., and DePaolo, D.J., 1998, Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. Chem. Geol., 145, 117-152.
Steiger, R.H., and Jäger, E., 1977, Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.
Sudo, M., Uto, K., Anno, K., Ishizuka, O., and Uchiumi, S., 1998, SORI93 biotite: A new mineral standard for K-Ar dating. Geochem. Jour., 32, 49-58.
Takahashi, M., Saito, K., Umetsu, H., and Ichikawa, A., 1992, K-Ar and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age of the Miocene Kitamura and Baba Tuffs in the Tomioka area, Gunma Prefecture, central Japan-with special reference to the N.13/N.14 boundary of planktonic foraminiferal zones. Jour. Geol. Soc. Japan, 98, 323-335.
Takaoka, N., 1988, Absolute age determination of volcanic rocks younger than 1 Ma. Report of the 1985-1987 Monobusho Scientific Research Program. Proj. No. 60303011.

(2001년 8월 30일 접수, 2001년 12월 6일 채택)