

## 화강암류의 성인 해석에 대한 마그네슘 동위원소 자료의 활용

정창식\* · 류종식

한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

### Use of Magnesium Stable Isotope Signatures for the Petrogenetic Interpretation of Granitic Rocks

Chang-sik Cheong\* and Jong-Sik Ryu

Division of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Ochang, Chungbuk 363-883, Korea

**요 약:** 최근 분석법의 발달에 따라 금속 안정동위원소의 지질학적인 활용이 두드러지고 있다. 이 논평에서는 Mg 동위원소 분석 자료를 화강암류의 성인 해석에 활용하는 원리와 분석 방법, 적용의 예를 소개한다. 먼저 Mg 동위원소가 분별되는 원리를 설명하고 다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기를 활용한 분석 방법을 기술하며 마지막으로 북미 서해안과 호주, 중국의 I형, S형, A형 화강암에 대한 최근의 적용 사례를 살펴볼 것이다.

**핵심어:** Mg 동위원소, 화강암류, 기원 물질

**Abstract:** With the advent of multi collector-inductively coupled plasma mass spectrometry, stable isotopic variations of non-traditional metal elements have provided important constraints on the sources of geologic materials. This review introduces the principles of magnesium isotopic fractionation and analytical methods. Recent case studies are also reviewed for the use of magnesium isotope signatures to decipher the source materials of I-, S-, and A-type granitoids in western North America, Australia, and China.

**Keywords:** magnesium isotope, granitoid, source material

## 서 언

지구 표면적의 약 40%를 점하는 대륙지각은 평균 화학 조성이 SiO<sub>2</sub> 61 wt.%, MgO 4-5 wt.% 내외의 섬록암질로 맨틀에 비해 특징적으로 규장질이다 (Rudnick and Gao, 2003). 초염기성암으로 이루어진 맨틀의 일차적인 부분용융에 의해서는 평균 대륙지각 보다 훨씬 더 염기성인 현무암질 내지 휘석 감람암질 용융체가 만들어지는 것이 일반적이기 때문에 (Jaques and Green, 1980; Hirose and Kushiro, 1993) 대륙 지각이 만들어지는 근본적인 기작에 대해서는 많은 논란이 있어 왔다. 예를 들어 시생대의 TTG(tonalite,

trondjemite, granodiorite) 화강암류에 대해서는 초기 지구의 높은 열류량때문에 섭입되는 해양지각이 쉽게 용융되어 생성되었다는 의견이 있으며 (Martin, 1986; Drummond and Defant, 1990; Martin and Moyen, 2002; Martin *et al.*, 2005), 대륙지각에 부가된 현무암질 지각이나 마그마는 분화에 의해 규장질 암석과 그에 대응하는 Mg이 풍부한 집적체나 잔류암으로 나뉘고 후자는 높은 밀도로 인해 맨틀로 분리 (delamination)된다는 시각도 있다 (Rudnick, 1995; Hawkesworth and Kemp, 2006a). 또한 화학적인 풍화에 의해서 대륙지각의 조성이 현무암질에서 안산암질로 변화한다는 주장도 있다 (Anderson, 1982; Albarède, 1998; Lee *et al.*, 2008). 물론 가장 자연스러운 화강암질 마그마의 생성 기작은 기존에 존재 하던 지각 물질의 재용융이다.

\*Corresponding author  
Tel: 043-240-5170  
E-mail: ccs@kbsi.re.kr

어떤 종류의 지각 물질이 용융되어 화강암질 마그마가 생성되었는지에 대한 가장 잘 알려진 구분은 호주 라클란 습곡대(Lachlan Fold Belt) 화강암을 대상으로 시작된 I-형과 S-형 분류이다(Chappell and White, 1974; White and Chappell, 1977). 최초의 구분에 의하면 화성암의 용융으로 만들어진 전자는 Na 성분이 높고(규장질 암석에서  $\text{Na}_2\text{O} > 3.2\%$ ) 알루미늄 포화지수( $\text{ASI} = \text{molar Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ )가 1.1 이하이며 각섬석이나 티타나이트를 특징적으로 가지는 반면 퇴적암을 기원 물질로 하는 후자는 Na 성분이 상대적으로 낮고(약 5%  $\text{K}_2\text{O}$  암석에서  $\text{Na}_2\text{O} < 3.2\%$ ) 과알루미늄질이며( $\text{ASI} > 1.1$ ) 근정석이나 백운모, 모나자이트, 석류석 등을 함유한다는 것이다. 그러나 추후 계속된 연구를 종합하면 Na 성분이나 ASI 값은 분화, 변질 또는 기원암의 특징에 따라 달라질 수 있으며, 보다 더 본질적인 점은 I-형의 경우 지각 하부에 부가된 화강암이고(즉 *infracrustal*), S-형은 지표에 노출되었던 기원 물질에서 유래된 화강암(즉 *supracrustal*)이라는 것이다(Chappell and White, 2001).

이러한 화강암 기원물질의 차이는 Sr이나 Nd, Pb와 같은 방사기원 동위원소 조성에 잘 반영된다고 알려져 왔으나 S-형 화강암에 기원 물질로 포함된 퇴적암이 젊은 지각에서 유래된 경우, 또는 I-형 화강암에 포함된 화성암 기원물질의 맨틀 거주시간이 오래되었을 경우 이들 방사기원 동위원소를 기준으로 한 단순한 구분(예를 들어 I-형  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기치 0.704-0.706, S-형  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기치  $> 0.708$ ; Chappell and White, 1974)은 유효하지 않다. 그런 경우 저온에서 분별이 일어나는 안정 동위원소 자료가 퇴적물의 기원 물질 포함 여부에 대하여 더 분명한 정보를 제공할 수 있다. 이 점은 저온에서 Hf 동위원소 조성을 산소 동위원소 조성과 결합하여 해석할 때 지각 진화가 매우 성공적으로 설명되는 사례에서 잘 알 수 있다(Hawkesworth and Kemp, 2006b; Kemp *et al.*, 2006, 2007).

산소 동위원소 자료는 화강암 기원 물질의 지표 노출 여부를 판단하는 매우 중요한 지시자이지만 마그마에 풍화된 퇴적물이 포함되었는지 여부와 무관하게 이차적인 물과의 상호 작용으로 인해 영향을 받을 수 있다. 산소와 마찬가지로 Mg 동위원소도 저온에서의 풍화에 의해 체계적으로 분별이 일어나는 것으로 알려져 있고(Young and Galy, 2004; Teng *et al.*, 2010b) 물과의 반응에 의해서는 거의 변화되지 않기

때문에 화강암의 기원 물질 연구에 보다 직접적인 정보를 제공해 줄 수 있으며 최근 북미 서해안 코딜레라(Cordillera) 형 화강암의 성인 해석에 성공적으로 활용된 바 있다(예: Shen *et al.*, 2009). 다만 이때까지 알려진 화강암의 Mg 동위원소 조성 변화가 오차 범위의 10배 이내로 매우 작아서 분석에 큰 주의를 요한다. 이 논평에서는 Mg 동위원소 분별의 원리를 설명하고 다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(MC-ICP MS, multi collector-inductively coupled plasma mass spectrometry)를 활용한 분석 방법을 설명하며 북미와 호주, 중국에서 현생 화강암류를 대상으로 기원 물질 해석에 적용한 사례를 살펴볼 것이다.

### 마그네슘 동위원소의 분별

원자번호 12번의 Mg은 주기율표의 IIA족에 속하며 24, 25, 26 3개의 질량수를 가지는 동위원소들로 이루어져 있는데 자연 상태에서 각각의 비율은 78.99, 10.00, 11.01% 정도이다(Berglund and Wieser, 2011). 현재의 분석 오차 수준에서 볼 때 Mg 동위원소 비율은 분별정출작용과 같은 고온의 마그마 과정에 의해서는 달라지지 않는 것으로 알려져 있다(Teng *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2010). 한편  $^{24}\text{Mg}$ 은  $^{26}\text{Mg}$ 에 비해 8% 이상 가볍기 때문에 풍화와 같이 저온에서 일어나는 지질과정 동안에는 분석이 가능한 정도의 분별작용이 일어날 수 있을 것으로 기대할 수 있다(Young and Galy, 2004).

Mg 동위원소는 표준물질(보통 Dead Sea Magnesium (DSM)-3; Galy *et al.*, 2003)에 대한 상대적인 값을 천분률(‰)로 표시한다. 즉

$$\delta^x\text{Mg} = \left[ \left\{ \frac{(^x\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{sample}}}{(^x\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{standard}}} \right\} - 1 \right] \times 1000$$

으로 정의되며  $\delta^{25}\text{Mg}$ 와  $\delta^{26}\text{Mg}$  측정값이 예측되는 질량 의존 분별 법칙을 따르는지는

$$\Delta^{25}\text{Mg}' = \delta^{25}\text{Mg}' - 0.521 \times \delta^{26}\text{Mg}'$$

로 표시하면 편리한데, 여기서  $\delta^x\text{Mg}' = 1000 \times \ln [(\delta^x\text{Mg} + 1000)/1000]$ 을 의미한다(Young and Galy, 2004). 위 식에서 0.521은 평형상태를 가정한 것이다(관계 지수  $\beta = (1/m_{24} - 1/m_{25}) / (1/m_{24} - 1/m_{26}) = 0.521$ ,  $m_x$  = 동위원소 x의 원자질량단위,  $m_{24} = 23.985042$ ,

$m_{25} = 24.985837$ ,  $m_{26} = 25.982593$ ).

화학적 풍화에 의해 유색광물이 용해될 때 가벼운 Mg 동위원소가 선택적으로 빠져나감에 따라 풍화 잔류물의  $\delta^{26}\text{Mg}$  값은 높아진다(Teng *et al.*, 2010b). 강물의  $\delta^{26}\text{Mg}$  값은 탄산염암의 기여 정도에 따라 영향을 많이 받지만(Brenot *et al.*, 2008) -1.1‰ 정도로(Tipper *et al.*, 2006) 해수(-0.8‰, Chang *et al.*, 2003; Young and Galy, 2004; Teng *et al.*, 2010a, Ling *et al.*, 2011)나 맨틀(-0.3‰, Teng *et al.*, 2007, 2010a; Handler *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009, Bourdon *et al.*, 2010) 값에 비하여 특징적으로 낮아 화학적 풍화에 의한 영향이 강물에 반영되어 있음을 지지한다.

토양이 풍화를 받을 때 액상과 풍화 잔류물 사이에서 Mg 동위원소 비율의 분별정도를 나타내는 분별계수  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{aqueous}}}{(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{residue}}}$$

Mg의 동위원소의 분배가 레일리(Rayleigh) 증류에 의해 지배된다고 가정하면

$$(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{residue}} = (^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_0 F^{\alpha-1}$$

과 같이 표현되는데 여기서  $(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_0$ 는 토양의 최초 동위원소 조성이며 F는 풍화를 겪지 않고 남아 있는 토양 Mg의 비율이다(즉 F=1이면 풍화를 전혀 안 받은 상태). 이 식의  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 를  $\delta^{26}\text{Mg}$ 로 표현할 경우

$$\delta^{26}\text{Mg}_{\text{residue}} = 1000 \times [(\delta^{26}\text{Mg}/1000+1)F^{\alpha-1} - 1]$$

과 같다. 한편  $F = (C_{\text{residue}} \times M_{\text{residue}}) / (C_0 \times M_0)$ 로 표시할 수 있는데 C는 Mg 농도, M은 무게를 의미한다. 이 계산식에 의하여 풍화에 따른 MgO 농도와  $\delta^{26}\text{Mg}$  사이의 관계를 도시하면  $\alpha$  값이 1보다 작아질수록 위쪽으로 점사되는 곡선을 보인다(Fig. 1). Fig. 1은 Shen *et al.*(2009)의 예를 따라  $C_0 = 3.5\%$ ,  $\delta^{26}\text{Mg}_0 = -0.3\%$ 인 경우로서  $M_{\text{residue}}/M_0$ 는 0.7로 가정하였으며 F=0.5, 0.2인 MgO 2.5%와 1% 지점을 직선으로 표시하였다. 이 그림에서 풍화된 토양의  $\delta^{26}\text{Mg}$ 를 0.4‰, MgO를 0.5%로 놓으면 분별계수  $\alpha = 0.9997$  정도로 계산되며(점선 교차점) MgO 농도를 더 높게 잡을 경우 같은  $\delta^{26}\text{Mg}$ (=0.4‰)을 달성하기 위한 분별계수는 더 작아져 풍화에 따른 분별이 더 크게 일어나야 함을 의미한다.

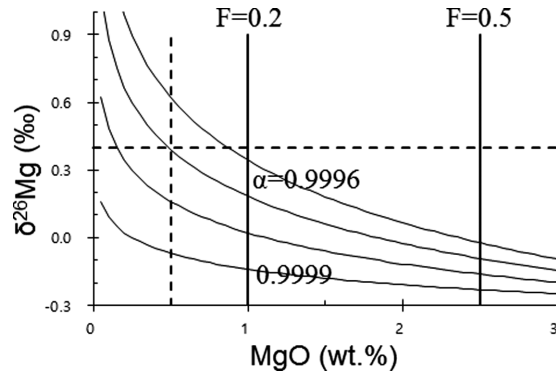


Fig. 1. Variation of  $\delta^{26}\text{Mg}$  in weathered soil residues as a function of Mg concentration for given fractionation factors( $\alpha$ ) ranging from 0.9996 to 1. For the unweathered protolith, absolute MgO content of 3.5 wt.% and  $\delta^{26}\text{Mg}$  of -0.3‰ are assumed. Also it is assumed that the protolith lost its original mass by 30% (i.e.  $M_{\text{residue}}/M_0=0.7$ ) during weathering. Solid lines represent the points corresponding to F=0.5 and 0.2 (F is the mass fraction of Mg left behind in a soil relative to the protolith Mg). The vertical and horizontal dashed lines indicate the range of fractionation factors for the case of MgO=0.5% and  $\delta^{26}\text{Mg}=-0.4\%$ , respectively.

### 분석 방법

현재 한국기초과학지원연구원에서 시행 중인 방법을 요약하면 다음과 같다. 우선 Mg를 칼럼 크로마토그래피법으로 추출하는 방법을 설명하고, 그 다음에 동위원소 비율을 측정하는 방법을 설명한다.

6 N 염산으로 세척된 칼럼(Bio-rad Poly-Prep chromatography column, 0.8 × 4 cm)에 양이온 교환수지(Bio-rad, AG-50W-X8 resin, 200-400 mesh) 0.8 g을 충전한 후 0.15 N 불산 10 mL와 6 N 염산 30 mL을 사용하여 양이온 교환수지 내 불순물을 제거한다. 다음 3차 증류수 2 mL과 0.4 N 염산 5 mL을 사용하여 양이온 교환수지의 매질을 변화시킨다. 시료 용액 0.5 mL을 양이온 교환수지에 얹고 다음 과정을 통하여 Mg를 분리한다(Choi *et al.*, 2012; Fig. 2).

- ① 0.4 N 염산 0.5 mL을 넣어 시료가 양이온 교환수지에 충분히 흡착되도록 한다.
- ② 0.15 N 불산 5 mL을 넣어 시료 내 Al과 Ti를 제거한 후 3차 증류수 2 mL를 넣어 매질을 변화시킨다.
- ③ 0.5 N 염산-95% 아세톤 혼합용액 10 mL를 넣

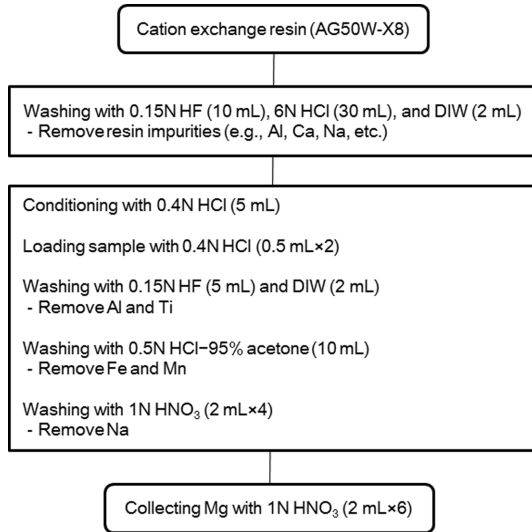


Fig. 2. Flow chart of the Mg purification process.

어 시료 내 Fe와 Mn을 제거한 후 3차 증류수 2 mL을 넣어 매질을 변화시킨다.

④ 1 N 질산 8 mL(2 mL씩 4번)을 넣어 시료 내 Na를 제거한 후 1 N 질산 12 mL(2 mL씩 6번)을 넣어 Mg를 분리한다.

실험 결과 Mg 동위원소 표준물질(DSM-3)에 대한 2 mL 구간별  $\delta^{26}\text{Mg}$  값은  $-0.67 \sim +0.65\%$  범위를 가졌으며 전체 1.3%의  $\delta^{26}\text{Mg}$  값 변화를 보여주었다. 이는 가벼운 동위원소( $^{24}\text{Mg}$ )가 무거운 동위원소( $^{26}\text{Mg}$ )보다 양이온 교환수지에 더 강하게 흡착되기 때문이다. 질량보정계산식을 통하여 분리된 Mg의 회수율이 96% 이상일 경우 칼럼 전과 후에 대한  $\delta^{26}\text{Mg}$  값이 오차범위 내에서 일치함을 확인하였으며(Fig. 3), 따라서 정확한 분석을 위해서는 Mg 회수율이 96% 이상이어야 한다.

Mg 동위원소 비는 독일 Thermo Scientific사의 Neptune MC-ICP-MS를 이용하여 분석하며 최외각과 중앙에 위치한 페라데이 검출기(L4, C, H4 Faraday cup)를 사용하여 3개의 동위원소  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ 를 분석한다. 분석과정 중 발생할 수 있는 각 동위원소간 질량분별(mass fractionation)과 질량편이(mass-bias effect)는 Mg 동위원소 표준물질(DSM-3)을 이용한 표준물질-시료-표준물질의 외부 보정법을 사용하여 보정한다.

통상 시료당 3번 이상의 반복분석을 실시하여 분석

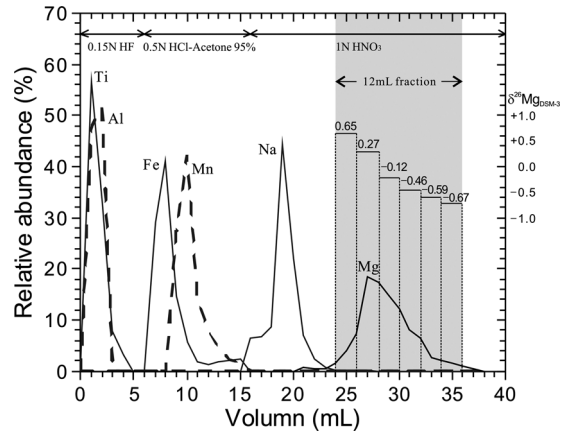


Fig. 3. Elution curves of interference elements and Mg. The elements Al and Ti are eluted in 5 mL of 0.15 N HF, Fe and Mn in 10 mL of 0.5 N HCl-95% acetone, Na in 8 mL of 1 N HNO<sub>3</sub>, and Mg in 12 mL of 1 N HNO<sub>3</sub>, respectively. The Mg isotopic compositions of 2 mL aliquot of the Mg cut for DSM-3 range from  $-0.67$  to  $0.65\%$ , yielding a total variation in  $\delta^{26}\text{Mg}$  of 1.3%.

정밀도를  $2\sigma$ 로 보고한다. 최근 분석된 모든 시료에 대한 각 동위원소 비( $\delta^{25}\text{Mg}$  versus  $\delta^{26}\text{Mg}$ )를 선형회귀직선으로 나타냈을 때 기울기는 0.515이었으며, 이는 이론적 평형분별 상수인 0.521과 이론적 운동분별 상수인 0.511 범위 내 값이다.

## 적용 사례

현재까지 화강암류를 대상으로 Mg 동위원소 연구를 통해 기원 물질의 특징을 체계적으로 밝힌 대표적인 논문은 Shen *et al.*(2009)이다. 그들은 북미 서해안 PRB(Peninsula Range Batholith)에서 채취한 I-형 화강암 11개 시료로부터 흑운모를 분리하여 Mg 동위원소 조성을 분석하였다. PRB는 백악기 전기에 북미 대륙 연변부를 따라 일어난 파라온(Farallon)판의 섭입과 관련하여 생성된 전형적인 코딜레라(Cordillera)형 화강암질 저반이다. 시료는 Sr, Nd, 산소 동위원소 연구를 통해 오래된 지각이 기원 물질로 포함된 것으로 알려진 PRB 동부 지역에서 채취되었다. 화강암질암에서 Mg의 대부분은 흑운모와 각섬석에 존재하고 분석된 시료의 흑운모/각섬석 비는 10 이상이었으므로 전암의 Mg 동위원소 조성은 흑운모에 의해 효과적으로 대표될 수 있다. 분석 결과 흑운모의  $\delta^{26}\text{Mg}$  값은  $-0.40$ 에서  $+0.44\%$  범위였으며 (+)

값은 SiO<sub>2</sub> 70% 이상의 규장질 시료에서만 나타났다. 또한 δ<sup>26</sup>Mg 값은 전암의 SiO<sub>2</sub>, 초기 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, δ<sup>18</sup>O 값과 정(+)의 상관관계, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd과 부(-)의 상관관계를 잘 보여 주었다. 이러한 현상은 수십 km 규모의 노두에서 관찰된다는 점에서 수 cm나 수 m 규모로 예상되는 마그마 시스템 관련 열적 확산(Ritcher *et al.*, 2008)보다는 지각 물질이 초생 마그마에 불균질하게 기여하였음을 나타낸다. δ<sup>26</sup>Mg 값과 SiO<sub>2</sub> 성분, Sr-Nd-Pb-O 동위원소 조성 사이의 체계적인 상관관계는 맨틀과 유사한 낮은 δ<sup>26</sup>Mg, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, δ<sup>18</sup>O, 높은 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 비를 가지는 초생 마그마와 그 반대의 특징을 가지는 대륙지각 물질 사이의 혼합에 의해서 설명될 수 있는 것이다. 저자들은 시료의 SiO<sub>2</sub>-MgO 관계가 직선이 아닌 곡선을 보인다는 점에서 동화-분별정출 모델(AFC, assimilation and fractional crystallization, DePaolo, 1981)의 필요성을 인식하였다. Fig. 4는 분석된 시료의 MgO-δ<sup>26</sup>Mg 관계를 단순 혼합 및 AFC 모델곡선과 같이 나타낸 것인데, 초생 마그마의 δ<sup>26</sup>Mg=-0.3‰, MgO=2%, 혼염된 지각의 δ<sup>26</sup>Mg=0.6‰, MgO=0.5%로 가정된 것이다. Fig. 4에서 MgO의 전체 분배계수(D)는 3으로 가정하였고 r(=assimilation rate/crystallization rate) 값이 1.5, 1, 0.2의 세 AFC 경우에 대하여 도시하였다. 먼저 r=1.5인 경우는 마그마의 양이 점점 늘어나는 경우이므로 F(=M<sub>m</sub>/M<sub>0</sub>, 남아 있는 마그마의 최초 양에 대한 비) 값 1-3 범위에 대해 그렸고, r=1인 경우 마그마의 양은 변화하지 않으므로(즉 F=1) M<sub>a</sub>/M<sub>m</sub>(마그마 양에 대한 혼염체 양의 비) 0-2인 경우에 대해 그렸으며, r=0.2인 경우 마그마의 양이 점점 줄어드는 상황이므로 F 값 1-0 범위에서 그렸다. 한편 각 모델 곡선에 혼염체:초생 마그마 비가 1:1인 지점(단순 혼합곡선)과 F=2(r=1.5), M<sub>a</sub>/M<sub>m</sub>=1(r=1), F=0.5(r=0.2)인 지점을 표시하였다. 이 그림에서 보면 단순 혼합곡선과 r=1 경우의 AFC 곡선에서 혼염체와 초생 마그마의 양적 비율 1:1을 초과하는 지점에 일부 자료가 찍혀 적어도 일부 시료에서는 최초 마그마 양 이상의 지각이 혼염된 것으로 해석할 수 있다.

Teng *et al.*(2013)은 호주 퀸즈랜드(Queensland)에서 채취된 백립암 포획암의 Mg 동위원소 자료 변화를 맨틀 기원 마그마와 지각물질 사이의 AFC 모델로 설명하고 하부지각이 Mg 동위원소적으로 가벼운 변성 기원 석류석의 함유 정도에 따라 불균질하며

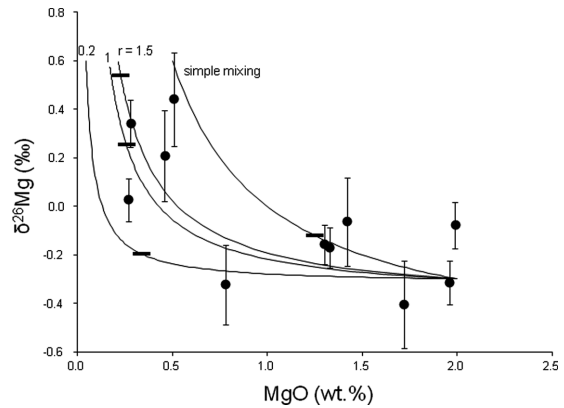


Fig. 4. Whole-rock MgO(wt.%) versus δ<sup>26</sup>Mg plot for samples from eastern PRB(Shen *et al.*, 2009) with simple mixing and AFC model curves between juvenile endmember(δ<sup>26</sup>Mg = -0.3‰, MgO = 2%) and crustal assimilant(δ<sup>26</sup>Mg = 0.6‰, MgO = 0.5%). Three AFC model curves are constructed for the case of r(=assimilation rate/crystallization rate)=1.5, 1, and 0.2. The partition coefficient for MgO is assumed to be 3. Thick ticks on the model curves represent the points of f<sub>assimilant</sub>=1(simple mixing), F(M<sub>m</sub>/M<sub>0</sub>)=2(AFC with r=1.5), M<sub>a</sub>/M<sub>m</sub>=1(AFC with r=1), and F(M<sub>m</sub>/M<sub>0</sub>)=0.5(AFC with r=0.2).

-0.18‰의 δ<sup>26</sup>Mg 평균값을 가진다고 보고하였다. 저자들은 대륙지각 전체에 대한 δ<sup>26</sup>Mg 평균값을 맨틀 값보다 무거운 -0.19‰로 제시하였다.

그러나 이때까지 분석된 모든 화강암류에서 체계적인 Mg 동위원소 조성 변화가 나타난 것은 아니다. Li *et al.*(2010)의 연구 결과에 의하면 호주 남동부의 8개 I-형 화강암 시료는 δ<sup>26</sup>Mg 변화 범위가 -0.25에서 -0.15‰, 2개 S-형 화강암 시료는 -0.23에서 -0.14‰ 정도였고, 중국 동부 화강암 15 시료 또한 δ<sup>26</sup>Mg 값이 -0.35에서 -0.16‰ 범위로 변화폭이 매우 좁았으며 SiO<sub>2</sub> 성분과 어떠한 상관관계도 보이지 않았다. 다만 중국 북동부 A-형 화강암 19 시료는 -0.28에서 +0.34‰ 범위의 비교적 큰 δ<sup>26</sup>Mg 변화를 보였는데 저자들은 이 변화가 기원 물질의 불균질성을 반영한다고 추론하였다. 화강암과 함께 분석된 뉴질랜드, 호주, 미국, 중국의 퇴적암 시료는 전반적으로 δ<sup>26</sup>Mg 값이 화강암류보다는 높았으며 이러한 자료로부터 저자들은 상부 대륙지각의 평균 δ<sup>26</sup>Mg 값을 -0.22‰로 제시하였다. 중국 다비(Dabie) 조산대에서 채취된 I-형 화강암도 좁은 범위(-0.26에서 -0.14‰)의 δ<sup>26</sup>Mg 값을 나타내었고 흑운모와 각섬석도 비슷한 값을 보였다(Liu *et al.*, 2010).

## 결 언

우리는 이 논평에서 저온에서 일어나는 Mg 동위원소의 분별 원리를 살펴보고 MC-ICP MS를 활용한 분석법을 소개하였다. 연구 사례를 살펴본 결과 화강암의 Mg 동위원소 조성 변화폭이 분석 오차 수준을 상회하는 경우 산소 동위원소와 함께 기원 물질로 퇴적물이 어느 정도로 포함되었는지에 대하여 매우 유용한 정보를 제공할 가능성이 있다.

## 사 사

이 연구는 한국기초과학지원연구원(과제번호 G34200)과 극지연구소(과제번호 PLE040)에 의해 지원되었다. 초고에 대해 유익한 지적과 충고를 해 준 박계현 교수님과 익명의 심사자께 감사드린다.

## References

- Albarède, F., 1998. The growth of continental crust. *Tectonophysics*, 296, 1-14.
- Anderson, Jr. A.T., 1982. Parental basalts in subduction zones: implications for continental evolution. *Journal of Geophysical Research*, 87, 7047-7060.
- Berglund, M. and Wieser, M.E., 2011. Isotopic compositions of the elements 2009 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 83, 397-410.
- Bourdon, B., Tipper, E.T., Fitoussi, C. and Stracke, A., 2010. Chondritic Mg isotope composition of the earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5069-5083.
- Brenot, A., Cloquet, C., Vigier, N., Carignan, J. and France-Lanord, C., 2008. Magnesium isotope systematics of the lithologically varied Moselle river basin, France. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 5070-5089.
- Chang, V.T.-C., Makishima, A., Belshaw, N.S. and O'Nions, R.K., 2003. Purification of Mg from low-Mg biogenic carbonates for isotope ratio determination using multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18, 296-301.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48, 489-499.
- Choi, M.-S., Ryu, J.-S., Lee, S.-W., Shin, H.S. and Lee, K.-S., 2012. A revisited method for Mg purification and isotope analysis using cool-plasma MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27, 1955-1959.
- DePaolo, D.J., 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 189-202.
- Drummond, M.S. and Defant, M.J., 1990. A model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95, 21503-21521.
- Galy, A., Yoffe, O., Janney, P. E., Williams, R. W., Cloquet, C., Alard, O., Halicz, L., Wadhwa, M., Hutcheon, I. D., Ramon, E. and Carignan, J., 2003. Magnesium isotope heterogeneity of the isotopic standard SRM980 and new reference materials for magnesium-isotope-ratio measurements. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18, 1352-1356.
- Handler, M.R., Baker, J.A., Schiller, M., Bennett, V.C. and Yaxley, G.M., 2009. Magnesium stable isotope composition of Earth's upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 282, 306-313.
- Hawkesworth, C.J. and Kemp, A.I.S., 2006a. Evolution of the continental crust. *Nature*, 443, 811-817.
- Hawkesworth, C.J. and Kemp, A.I.S., 2006b. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226, 144-162.
- Hirose, K. and Kushiro, I., 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures; determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth and Planetary Science Letters*, 114, 477-489.
- Jaques, A.L. and Green, D.H., 1980. Anhydrous melting of peridotite at 0-15 Kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, 287-310.
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., Paterson, B.A., Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Gray, C.M. and Whitehouse, M.J., 2007. magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315, 980-983.
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Paterson, B.A. and Kinny, P.D., 2006. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, 439, 580-583.
- Lee, C.-T. A., Morton, D.M., Little, M.G., Kistler, R., Horodyskyj, U.N., Leeman, W.P. and Agranier, A., 2008. Regulating continental growth and composition by chemical weathering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 4981-4986.
- Li, W.Y., Teng, F.-Z., Ke, S., Rudnick, R.L., Gao, S., Wu, F.-Y. and Chappell, B.W., 2010. Heterogeneous magnesium isotopic composition of the upper continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 6867-6884.
- Ling, M.-X., Sedaghatpour, F., Teng, F.-Z., Hays, P.D., Strauss, J. and Sun, W., 2011. Homogeneous magnesium isotopic composition of seawater: An excellent geostan-

- ard for Mg isotope analysis, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25, 2828-2836.
- Liu, S.-A., Teng, F.-Z., He, Y., Ke, S. and Li, S., 2010, Investigation of magnesium isotope fractionation during granite differentiation: Implication for Mg isotopic composition of the continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 646-654.
- Martin, H., 1986, Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14, 753-756.
- Martin, H. and Moyen, J.-F., 2002, Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of Earth. *Geology*, 30, 319-322.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.-F. and Champion, D., 2005, An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79, 1-24.
- Richter F.M., Watson, E.B., Mendybaev, R.A., Teng, F.Z. and Janney, P.E., 2008, Magnesium isotope fractionation in silicate melts by chemical and thermal diffusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 206-220.
- Rudnick, R.L., 1995, Making continental crust. *Nature*, 378, 571-578.
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003, Composition of the continental crust. In *The crust* (eds. Rudnick, R.L.), *Treaties on Geochemistry* volume 3, 1-64.
- Shen, B., Jacobsen, B., Lee, C.-T. A., Yin, Q.-Z. and Morton, D.M., 2009, The Mg isotopic systematics of granitoids in continental arcs and implications for the role of chemical weathering in crust formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 20652-20657.
- Teng, F.-Z., Li, W.-Y., Ke, S., Marty, B., Dauphas, N., Huang, S., Wu, F.-Y. and Pourmand, A., 2010a, Magnesium isotopic composition of the Earth and chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 4150-4166.
- Teng, F.-Z., Li, W.-Y., Rudnick, R.L. and Gardner, L.R., 2010b, Contrasting lithium and magnesium isotope fractionation during continental weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 300, 63-71.
- Teng, F.-Z., Wadhwa, M. and Helz, R.T., 2007, Investigation of magnesium isotope fractionation during basalt differentiation: Implications for a chondritic composition of the terrestrial mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 261, 84-92.
- Teng, F.-Z., Yang, W., Rudnick, R.L. and Hu, Y., 2013, Heterogeneous magnesium isotopic composition of the lower continental crust: A xenolith perspective. *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems*, 14, 3844-3856.
- Tipper, E.T., Galy, A., Gaillardet, J., Bickle, M.J., Elderfield, H. and Carder, E.A., 2006, The magnesium isotope budget of the modern ocean: Constraints from riverine magnesium isotope ratios. *Earth and Planetary Science Letters*, 250, 241-253.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1977, Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7-22.
- Yang, W., Teng, F.-Z. and Zhang, H.-F., 2009, Chondritic magnesium isotopic composition of the terrestrial mantle: a case study of peridotite xenoliths from the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 475-482.
- Young E.D. and Galy A., 2004, The isotope geochemistry and cosmochemistry of magnesium. In *Geochemistry of Non-Traditional Stable Isotopes* (eds. Johnson, C.M., Beard, B.L. and Albarede, F.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* volume 55, 197-230.

## Figure captions

---

2014년 6월 17일 접수  
 2014년 6월 17일 심사개시  
 2014년 8월 5일 채택