

## Lu-Hf 동위원소시스템의 지질학적 활용

최성희\*

충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과

## Lu-Hf Isotopic Systematics and Its Applications for Geology

Sung Hi Choi\*

Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**요 약:** Lu-Hf 시스템은 다중검출기부착 유도결합플라즈마 질량분석기의 발달과 함께 최근 들어 지질학에 폭 넓게 활용되고 있는 동위원소시스템이다. 본 연구는 Lu-Hf 동위원소시스템의 기본 원리를 소개하고, 지질연 대측정 도구로서 또 암석 성인 연구의 지시자로서의 Lu-Hf 시스템이 활용되고 있는 사례를 소개하며 향후 연구 방향을 제안한다. 나아가서는 우리나라 고철질 내지는 초고철질 암석시료에 활용한 사례를 바탕으로 Hf 동위원소를 통해 본 한반도 맨틀의 생성과 진화과정에 대해 논의한다.

**핵심어:** Lu-Hf 동위원소시스템, 지질연대측정, 암석성인, 맨틀진화

**Abstract:** The Lu-Hf isotope system, coupled with the advent of multiple collector inductively coupled plasma source mass spectrometry, is now widely utilized as a tracer for geological processes. The paper presents a comprehensive review on the principles of the Lu-Hf isotopes, and its current and potential applications to both geochronology and petrogenesis. Finally, based on the Lu-Hf isotopic data from Korean mafic and ultramafic rocks, its has been discussed evolution of the mantle beneath the Korean Peninsula.

**Keyword:** Lu-Hf isotope system, Geochronology, Petrogenesis, Mantle evolution

### 서 론

Hf은 이온화 포텐셜(658.5 kJ/mol)이 높아서 열이 온화질량분석기를 활용할 경우 1 µg 이상에 달하는 원소분리가 필요하여 정밀 분석이 용이하지 않다. 다중검출기부착 유도결합플라즈마 질량분석기(MC-ICP-MS)의 플라즈마 소스는 Hf의 이온화 효율을 증대시켜 100 ng 정도의 원소로도 ±0.5 앵실론 단위의 정밀도로 분석 가능하게 한다(Münker *et al.*, 2001). MC-ICP-MS의 발달은 위 시스템의 활용을 가속시켰고 최근 다양한 지질학적 주제를 Lu-Hf 동위원소시스템의 관점에서 바라보는 연구 결과들이 나오고 있

다(e.g., Blichert-Toft *et al.*, 1999; Amelin *et al.*, 2000; Scherer *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2006).

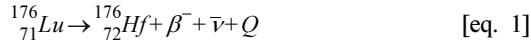
본 연구는 Lu-Hf 동위원소시스템의 기본 원리를 소개하고, 붕괴상수 결정을 비롯한 시스템의 변천사와 다양한 지질학적 활용사례를 변성암과 맨틀암석에서 지질시계로서의 역할과 화성암 성인 연구에의 활용 등을 중심으로 소개한다. 특히 Sm-Nd 동위원소시스템과 교차 활용하여 섭입대에서의 물질재순환 과정을 이해하고자 한 시도와 함께, 지구 맨틀 다이내믹스(dynamics)와 진화과정을 다룬 연구 결과들을 소개하며, 향후 연구 방향을 모색한다.

### Lu-Hf 동위원소시스템의 기본 원리

원자번호 71번인 Lu은 중희토류(heavy rare earth element) 원소로서 두 개의 동위원소(<sup>175</sup>Lu 97.4%,

\*Corresponding author  
Tel: 042-821-6428  
E-mail: chois@cnu.ac.kr

$^{176}\text{Lu}$  2.6%)로 구성되어 있다. 이 중에서  $^{176}\text{Lu}$ 은 방사성 원소로  $\beta$ -붕괴하여 원자번호 72번인 안정원소  $^{176}\text{Hf}$ 이 된다. 붕괴수식은 아래와 같다.



$\text{Lu}$ 은 대개 3가의 양이온으로,  $\text{Hf}$ 은 4가의 양이온으로 존재한다.  $\text{Lu}^{3+}$ 의 이온반경은 약  $0.93\text{\AA}$ 이며,  $\text{Hf}^{4+}$ 의 이온반경은 약  $0.81\text{\AA}$ 이다.  $\text{Hf}$ 은 희토류 원소가 아니며, 지구화학적으로  $\text{Zr}$ 처럼 고장력원소(high field strength element)에 해당한다.  $\text{Hf}^{4+}$ 의 이온반경은  $\text{Zr}^{4+}$ 의 이온반경( $0.80\text{\AA}$ )과 유사하여  $\text{Hf}$ 은  $\text{Zr}$ 을 치환하여 저어콘 내지는 바텔라이트와 같은 광물에 농집한다.

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 의 비로 표현되는  $^{176}\text{Hf}$ 의 함량은 암석내 지 광물의  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  원자비에 따라 시간과 함께 증가하며 아래의 수식으로 표현된다.

$$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} = \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_i + \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} (e^{\lambda t} - 1) \quad [\text{eq. 2}]$$

여기서  $t$ 는 초기 값,  $\lambda$ 는 붕괴상수 그리고  $t$ 는 경과 시간을 의미한다.

### $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수

$\text{Lu-Hf}$  동위원소시스템의 지질학적 활용을 위해서는 정확한 붕괴상수 값 측정이 매우 중요하다. 지금까지 보고된  $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수는  $1.86\sim 1.98 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ 로 다양하다. 현재까지 소개된 값들을 정리하면 다음과 같다.

Patchett and Tatsumoto (1980)는 45.5억년된 유크라이트(eucrite) 운석들을 이용하여  $\text{Lu-Hf}$  전암 등시선을 그리고 이를 이용하여  $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수( $\lambda$ ) 측정을 시도하였다. Tatsumoto *et al.* (1981)은 앞선 10개의 운석 자료에 세 개의 석질운석을 추가하여 이로부터 반감기  $35.7 \pm 1.2 \text{Byr}$  ( $\lambda = 1.94 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ )을 얻었다. 보다 최근에 Bizzarro *et al.* (2003)은 운석시료를 보통 콘드라이트와 탄소질콘드라이트를 포함하는 것으로 확대하여  $\text{Lu-Hf}$  전암 등시선을 그린 후 이로부터  $1.98 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ 의 붕괴상수를 얻었다.

반면에 Nir-El and Lavi (1998)는  $\text{LuO}_3$  용액의 붕괴율을 물리적으로 측정함으로써  $^{176}\text{Lu}$ 의 반감기를  $37.3 \pm 0.1 \text{Byr}$  ( $\lambda = 1.86 \pm 0.005 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ )로 보고하였다.

Scherer *et al.* (2001)은  $\text{U-Pb}$  법에 의하여 정밀 연대가 알려진 원생대 지질시료들을 대상으로  $\text{Lu-Hf}$  등시선을 그리고 이로부터 반감기를 측정하여 위 계수 값에 일치하는 붕괴상수( $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ )를 얻었다. Söderlund *et al.* (2004) 역시 원생대 지질시료에 대한  $\text{U-Pb}$  법과  $\text{Lu-Hf}$  법의 교차 활용으로  $1.867 \pm 0.008 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ 의 붕괴상수를 보고하였다.

운석과 지구암석을 대상으로 한  $^{176}\text{Lu}$  붕괴상수 값 측정 결과의 차이는 최근에 Amelin (2005)에 의한 연구로 풀어졌다. Amelin (2005)은 보통 콘드라이트에서 인산염 광물들을 분리한 후 이를 대상으로  $\text{U-Pb}$  법과  $\text{Lu-Hf}$  법을 동시 활용하여  $1.864 \pm 0.016 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ 의 붕괴상수를 얻음으로  $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수가 위 값에 준함을 입증하였다. 인산염광물은 운석전암에 비해  $\text{Lu/Hf}$ 이 매우 커서 고해상도의 붕괴상수 결정에 큰 역할을 하였다. 결과적으로 기존 연구 결과를 활용할 경우 사용된 붕괴상수 값을 확인할 필요가 있다.

### $\text{Lu-Hf}$ 동위원소시스템의 변성암에서의 활용

석류석은  $\text{Lu/Hf}$  비가 높아서  $\text{Lu-Hf}$  법을 이용하여 변성연대를 측정함에 매우 적합한 광물이다. 석류석은 역시 높은  $\text{Sm/Nd}$  비를 가지고 있어  $\text{Sm-Nd}$  법을 이용하여 변성연대측정에 활용할 수 있으나(e.g., Scherer *et al.*, 2000), 변성 석류석의  $\text{Lu/Hf}$  비는  $\text{Sm/Nd}$  비보다 더 큰 변화 폭을 가지고 있다는 장점이 있다. 아울러  $^{176}\text{Lu}$ 의 반감기(37.3 Byr)는  $^{147}\text{Sm}$ 의 반감기(106 Byr)의 약 1/3에 불과해 보다 젊은 암석의 연대측정 내지는 보다 정밀도 높은 연대측정에 유리하다.

Scherer *et al.* (2000)는  $\text{Sm-Nd}$  법과  $\text{Lu-Hf}$  법을 교차 활용함으로써 석류석내  $\text{Lu-Hf}$  폐쇄온도 측정을 시도하였다. 특정원소의 폐쇄온도는 확산계수, 유효 확산 반경 및 냉각률 등에 의하여 결정된다(Scherer *et al.*, 2000). 즉 폐쇄온도는 석류석의 화학성분, 크기 및 냉각사(cooling history)에 상당히 의존적이다. 그러나 대체적으로  $\text{Sm-Nd}$ 의 폐쇄온도에 준하거나 이보다 조금 높다는 결론이 Scherer *et al.* (2000)의 연구로부터 도출되었다. 구체적인 예를 들자면 백립암상에서부터 약  $10^\circ\text{C/m.y.}$  이하의 느린 냉각사를 가지는 변성시료에서 석류석 내  $\text{Lu-Hf}$  폐쇄온도는 약

540°C(직경 0.24 mm)에서부터 약 700°C(직경 4 cm) 범위까지 걸쳐있다.

석류석의 Lu-Hf 동위원소비를 활용하여 변성연대 측정을 시도 할 경우, Hf 함량이 매우 높은 광물(예를 들어, 저어콘)이 포유물로 존재하는지 또 존재한다면 석류석과 평형상태인지 여부를 반드시 확인하여야 한다. 저어콘의 Hf 농도는 ~10,000 ppm에 달하는 반면, 석류석의 Hf 농도는 수 ppm 규모이다(Scherer *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2006). 아울러 저어콘 내 Hf 폐쇄온도는 매우 높다. 예를 들어 약 1°C/m.y.의 냉각사를 가지는 직경 200  $\mu\text{m}$  저어콘 내 Hf 폐쇄온도는 약 1250°C에 달한다(Cherniak *et al.*, 1995). 따라서 석류석 내 저어콘 포유물의 존재유무는 Hf 동위원소 비를 활용하는 연구에서는 반드시 확인되어야 하는 사실이다. 반면에 석류석 내 모나자이트나 인회석 포유물은 Sm-Nd 농도는 높은 반면 Lu-Hf 농도는 낮아 Sm-Nd 시스템에는 큰 영향을 미치나 Lu-Hf 시스템에 미치는 영향은 미미하다.

### 저어콘의 Hf 동위원소비

저어콘 내 높은 Hf 함량에 비해 Lu 함량은 수십 ppm 정도이다. 결과적으로 저어콘 내 Lu/Hf 비는 매우 낮아서 연대보정을 통한  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  초기비 계산 수치와 현재 측정값 사이의 편차가 매우 작은 편이다. 즉,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  초기값 계산에서 연대측정의 정밀도가 기여하는 정도가 미약하다. 아울러 Hf는 저어콘의 주격자 구조를 구성하는 원소이어서 풍화나 변성 등의 이차거동에 비교적 안정적이다. 특히 U-Pb 법을 활용한 저어콘 연대측정 자료는 상당수의 암체에서 선행된 바 있고, 또 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)나 레이저작박 유도결합플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)의 활용과 함께 단일 저어콘 결정에 대한 점분석이 가능하여지면서 화성기원 저어콘 내 Hf 동위원소비는 근원물질(예, 결핍맨틀, 시원적 맨틀, 하부대륙지각, 섭입기원물질 등) 추적이나 맨틀 진화과정 연구에 활용되어 왔다(Patchett *et al.*, 1981; Amelin *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Cheong *et al.*, 2013).

근원물질 추적의 기준이 되는 물질은 콘드라이트이다. 현재까지 보고된 콘드라이트(CHUR, Chondritic Uniform Reservoir)의 Lu-Hf 동위원소 기준값을 요약하면 Table 1과 같다. 콘드라이트 기준값의 차이는

**Table 1.** Present-day  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  and  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of the Chondritic Uniform Reservoir (CHUR)

$(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}$	References <sup>†</sup>
0.0334	0.28286	1
0.0332±0.0002	0.282772±0.000029	2
0.0342	0.282843	3
0.0336±0.0001	0.282785±0.000011	4

<sup>†</sup>1. Tatsumoto *et al.* (1981); 2. Blichert-Toft and Albarède (1997); 3. Patchett *et al.* (2004); 4. Bouvier *et al.* (2008)

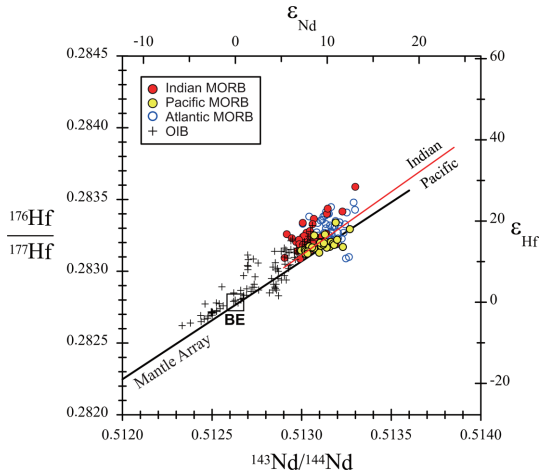
사용된 콘드라이트의 종류(탄소질 콘드라이트, 보통 콘드라이트 및 엔스터타이트 콘드라이트) 및 각 시료의 변성/변질정도 차이, 전암시료의 대표성(즉, 균질도)와 Lu-Hf 동위원소 데이터의 정밀도 등에 기인한다.

맨틀진화과정 연구의 쟁점은 결핍맨틀의 생성시기와 진화방향으로 귀결된다. 결핍맨틀의 생성 시기는 지구탄생이후 수억년 이내의 사건으로 사료되지만, 해당도는  $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수 및 CHUR 값의 정밀도 등에 상당히 좌우된다(Amelin *et al.*, 2000; Bizzarro *et al.*, 2003). 일부의 연구(Vervoort and Blichert-Toft, 1999; Choi *et al.*, 2006)에 의하면 원생대부터 현재에 이르기까지의 결핍맨틀의 진화사에 비추어 보았을 때 시생대초기 지구에는 상당히 결핍된 맨틀이 존재하였을 가능성이 제시되고 있다. 그러나 이 역시  $^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수 및 CHUR 값의 정밀도 등에 상당히 좌우되므로 향후 재조명될 필요가 있다.

### Nd-Hf 동위원소비로 본 지구맨틀

중양해령현무암(MORB)과 해양도현무암(OIB)에 대한  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  동위원소 상관도를 Fig. 1에 나타내었다. 해양 현무암류의  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  비는  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비와 전체적으로 양의 상관관계를 보인다. 이는 부분용융이나 마그마 분화과정동안 모원소인 Lu와 Sm이 자원소인 Hf와 Nd에 비해 상대적으로 호정성(compatible) 원소이기 때문인 것으로 사료된다(Patchett and Tatsumoto, 1980; Patchett, 1983; Johnson and Beard, 1993). 그러나 중양해령현무암류를 조금 자세히 보면 해양도현무암에 비해서  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  대비  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  비의 변화 폭이 상당히 큰 편이다.

Lu-Hf 동위원소시스템은 Sm-Nd 동위원소시스템보다 근원물질 내지는 용융잔류물의 광물조합에 보다



**Fig. 1.**  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios for oceanic basalts. Data sources: MORB (Salters, 1996; Salters and White, 1998; Chauvel and Blichert-Toft 200); Andres *et al.*, 2004; Hanan *et al.*, 2004; Blichert-Toft *et al.*, 2005), OIB (Patchett and Tatsumoto, 1980; White and Hofmann, 1982; Stille *et al.*, 1983, 1986; Salters and Hart, 1991; Chauvel *et al.*, 1992; Salters and White, 1998; Eisele *et al.*, 2002). The bulk Earth (BE) compositions and the mantle array are from Bouvier *et al.* (2008) and Blichert-Toft *et al.* (1999), respectively. MORB = mid-ocean ridge basalt; OIB = oceanic island basalt. The broken red line dividing the Indian and Pacific MORBs is from Pearce *et al.* (1999).

민감하다(Johnson *et al.*, 1996; Vervoort and Patchett, 1996; Schmitz *et al.*, 2004). 예를 들어 석류석의 경우 Lu-Hf간 분배계수 비( $D_{\text{Lu}}/D_{\text{Hf}}$ )는 약 24인 반면 Sm-Nd간 분배계수 비( $D_{\text{Sm}}/D_{\text{Nd}}$ )는 약 2.5이다(e.g., McKenzie and O'Nions, 1991). 따라서 석류석이 잔류광물인 경우 잔류 맨틀의 Sm/Nd 분별 폭보다 Lu/Hf 분별 폭이 상대적으로 커지게 되고 결국 잔류 맨틀의  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  비는  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비에 비해 시간과 함께 큰 폭으로 증가할 수 있다. Salters and Hart (1991)는 중앙해령현무암에서 보이는 부분적인 Nd-Hf 동위원소비 간의 짝풀림(decoupling) 현상을 일부 시료들이 석류석 안정영역에서 부분용융 되었기 때문인 것으로 해석하였다.

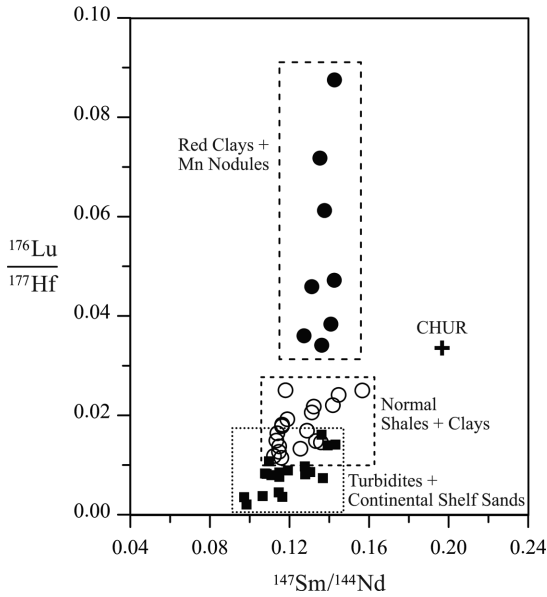
태평양 중앙해령현무암과 인도양 중앙해령현무암의 Nd-Hf 동위원소 비를 비교하면 인도양 중앙해령현무암쪽이 동일한  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비 대비 다소 높은  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  비를 가진다(Fig. 1). 이를 바탕으로 Pearce *et al.* (1999)은 인도양과 태평양 중앙해령현무암류를 구분하는 경협선을 제시하고(Fig. 1), Sr-Nd-Pb 동위원

소 비 뿐만아니라 Hf 동위원소 비를 이용하여서도 인도양 연약권과 태평양 연약권 간의 구분이 가능함을 피력하였다. 향후 동아시아의 신생대 판내부 화산활동의 근원맨틀 추적과 같은 연구에서 결핍맨틀의 단성분을 고려할 때 위 차이를 주목할 필요가 있다.

## 섭입대에서의 물질재순환

섭입에 의한 물질재순환에 관한 연구에서 대개의 관심은 섭입되는 물질(예, 원양성 퇴적물, 해양지각, 화산쇄설성 퇴적물 등)의 변화과정이 탈수작용을 겪는 범위에서 끝나는가 아니면 용융되는가에 초점이 주어진다. 일부의 경우를 제외하고는 대개 열수변성 작용을 받은 섭입하는 해양지각은 탈수작용을 겪는 반면, 퇴적물들은 용융할 수 있다고 사료된다(Turner *et al.*, 1996; Elliott *et al.*, 1997; Hawkesworth *et al.*, 1997). Hf-Nd 동위원소시스템은 이와 같은 섭입대에서의 물질재순환 과정에 관한 중요한 정보를 제공할 수 있다. Hf은 대체적으로 함수유체(aqueous fluid)에 의한 거동정도가 미약하다(Brenan *et al.*, 1994, 1995; Ayers *et al.*, 1997; Stalder *et al.*, 1998). 그러나 Hf은 규산질 용융액(siliceous melt)에는 가용적이다(Pearce *et al.*, 1999). 반면에 Nd은 함수유체와 규산질 용융액 모두에 Hf보다 상대적으로 가용한 원소이다. 결과적으로 Hf-Nd 동위원소 간의 커플링 정도는 섭입대에서 함수유체와 규산질 용융액 간의 기여도를 평가함에 있어서 중요한 정보를 제공할 수 있다.

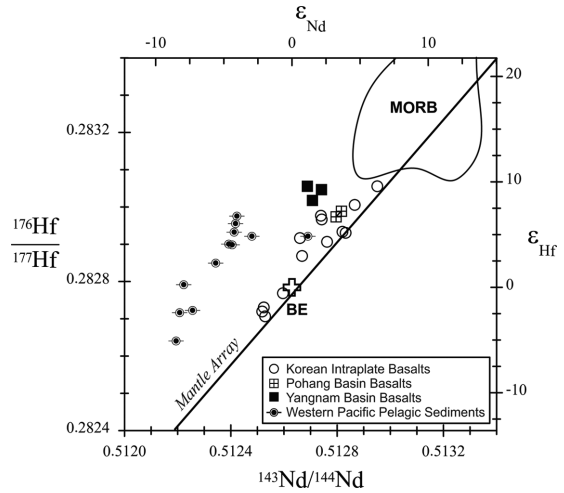
한편, Patchett *et al.* (1984)은 퇴적시스템에서도 Lu/Hf과 Sm/Nd 비 간의 분별이 발생할 수 있음을 보였다.  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  상관도(Fig. 2)에서, 해양퇴적물들의  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  비는 대략 0.10-0.14 사이의 제한된 범위에서 유사하며 콘드라이트 기준값보다 낮은 값을 가지는 반면,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  비는 콘드라이트 기준값을 전후하여 큰 변화 폭을 가지면서 다양하다.  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  비는 퇴적물의 입도와 상관관계를 보이는데, 사암에서 세일을 거쳐 적색이암이나 망간 단괴로 갈수록 증가한다(Fig. 2). Patchett *et al.* (1984)는 이를 풍화에 강하며 상당량의 Hf을 함유하는 저어콘에 의한 분별로 설명하였다. 즉, 대륙연변에 분포하는 저어콘을 함유하는 사질퇴적물은 매우 낮은 Lu/Hf 비를 가지며, 상대적으로 원양성 이암은 저어콘의 초기 분별로 인하여 높은 Lu/Hf 비를 가지게



**Fig. 2.**  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  vs.  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  ratios for various types of sediments. After Patchett *et al.* (1984). CHUR (Chondritic Uniform Reservoir) values from Bouvier *et al.* (2008).

된다는 것이다.

동해확장과 관련하여 생성된 우리나라 제3기 분지 (포항분지와 양남분지)내 현무암류들의 Nd-Hf 동위원소 상관도를 Fig. 3에 나타내었다. 비교를 위해서 우리나라 신생대후기 판내부기원 현무암류와 서태평양의 원양성 퇴적물의 동위원소비도 함께 도시하였다. 판내부기원 현무암류는 대체적으로 맨틀 배열선 (mantle array)을 따라서 도시된다. 제3기 분지 현무암류의 경우, 포항분지 현무암류는 Nd-Hf 맨틀 배열선을 따라 도시되는 반면, 양남분지 현무암류는 Nd-Hf 동위원소간의 짝풀림을 보인다(Fig. 3). 원양성 퇴적물의 Nd-Hf 동위원소 상관관계 역시 전술한 것처럼 짝풀림이 특징적이다(Fig. 3). 미량원소의 지구화학적 특징에 의하면 포항분지 현무암은 판내부 기원이나, 양남분지 현무암은 섭입대 기원 화산활동의 특징을 가진다(Choi *et al.*, 2013). 위 결과와 함께 Choi *et al.* (2013)은 양남분지 현무암의 근원물질은 태평양판의 섭입과정에서 공급된 원양성 퇴적물의 용융액에 의하여 변성교대작용(metasomatism)을 받은 맨틀 웨지(mantle wedge)이며, 동해가 확장되고 있는 동안에도 양남분지에는 태평양판의 섭입과 관련한 화산활동이 지속되고 있었음을 주장하였다.



**Fig. 3.**  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios for Korean basalts (Late Cenozoic intraplate basalts (Choi *et al.*, 2006), Tertiary Pohang Basin basalts (Choi *et al.*, 2013), Tertiary Yangnam Basin basalts (Choi *et al.*, 2013)). For comparison, Nd and Hf isotopic compositions for western Pacific pelagic sediments (Godfrey *et al.*, 1997; Pearce *et al.*, 1999; Vervoort *et al.*, 1999) are also shown. The bulk Earth (BE) and the mantle array are from Bouvier *et al.* (2008) and Blichert-Toft *et al.* (1999), respectively. MORB=mid-ocean ridge basalt. Data sources for MORB as in Fig. 1.

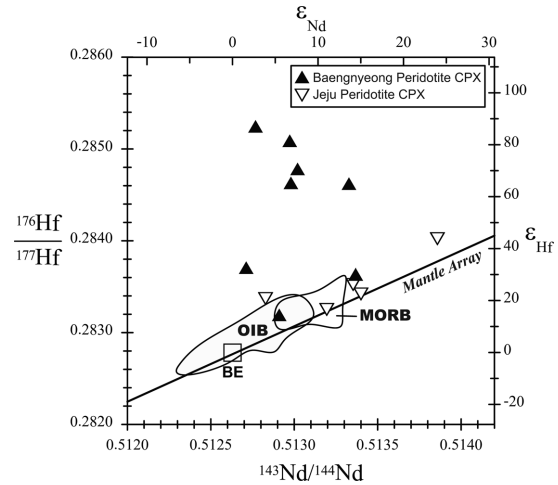
### 암석권맨틀에서의 Lu-Hf 동위원소시스템의 활용

암석권맨틀의 생성시기를 측정하는 것은 맨틀 진화사를 이해함에 있어 매우 중요한 정보를 제공한다. 예를 들어 북중국지괴(North China craton) 동쪽 블록의 경우, 오르도비스기의 암석권은 약 200 km 두께로 낮은 지각열류량(~40 mW/m<sup>2</sup>)을 가지며 현무암질 액에 친화적인 원소가 상당히 결핍된 성분의 암석권맨틀이었으나, 신생대의 암석권은 상대적으로 고온(~60-80 mW/m<sup>2</sup>)의 얇은 두께(~60-80 km)로 부화된 성분의 암석권맨틀로 변화되었음이 알려져 있다(Griffin *et al.*, 1998; Menzies *et al.*, 1993, 2007). 암석권맨틀의 성장과 변화 및 파괴과정은 연약권의 진화와 연동되어 있으므로 동아시아와 나아가서는 지구 전체 맨틀의 본성을 이해함에 있어서 암석권맨틀의 지구화학적 특성을 규명하고 정밀한 연대 측정을 하는 것은 매우 중요한 시사점을 제공한다.

그러나 암석권맨틀은 대개 1,000°C 전후의 고온 상태이며 지구화학적 개방계(open system)로 존재하는

경우가 많아서 연대측정이 쉽지 않다(Choi and Kwon, 2005; Choi and Mukasa, 2012). Rb-Sr, Sm-Nd 및 U-Pb 동위원소 시스템의 경우, 모원소와 자원소 모두 액상친화적인 원소로 암석권맨틀에서의 이차 변성교대작용동안 쉽게 거동한다(Downes, 2001; Wittig *et al.*, 2007; Choi and Mukasa, 2012). Re-Os 동위원소 시스템의 경우는 맨틀 암석내 Os 농도가 변성교대작용을 일으키는 매체(예, 함수유체, 탄산염질 유체 또는 규질 액체 등)보다 약 10-10,000배 정도로 높아서 이차 거동에 대하여 상대적으로 안정한 편이다(Walker *et al.*, 1989; Pearson *et al.*, 1995; Reisberg and Lorand, 1995). 그러나 Re과 Os 같은 백금족원소는 대개 맨틀 암석내 부구성광물인 황화광물에 농집되어 있어 이들의 이차거동에 매우 민감하므로 주의가 필요하다(Gao *et al.*, 2002; Lorand *et al.*, 2013). 최근 연구 결과에 의하면 Lu-Hf 동위원소시스템은 맨틀 내 변성교대작용 동안 쉽게 거동하지 않으므로 Re-Os법과 교차 활용하면 비교적 신뢰도 높은 범주의 연대측정이 가능하다고 알려졌다(Pearson and Nowell, 2003; Lapen *et al.*, 2005; Wittig *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2010; Choi and Mukasa, 2012). 맨틀 단사회석 내 Lu-Hf 폐쇄온도는 약 900°C로 추정된다(Choi *et al.*, 2008; Choi and Mukasa, 2012). Lu-Hf 및 Re-Os 동위원소시스템을 활용한 연구결과에 의하면 우리나라 암석권맨틀은 약 1.9±0.1 Ga에 생성된 것으로 사료된다(Lee and Walker, 2005; Choi *et al.*, 2010). 이 연대는 우리나라 전역에서 보고되고 있는 약 1.8-2.1 Ga에 걸친 지각변동 시기(Sagong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2008)와 일치하므로 대륙지각과 암석권맨틀의 생성이 성인적으로 연계되어 있음을 알 수 있다.

제주도와 백령도의 신생대후기 현무암류에 포획되어 온 암석권맨틀 기원 침정석 페리도타이트에 대한 Nd-Hf 동위원소 상관도를 Fig. 4에 나타내었다. 침정석 페리도타이트의 광물조합(감람석-사방회석-단사회석-침정석±황화광물) 중에서 Nd와 Hf를 포함하고 있는 주된 광물은 단사회석이다. Fig. 4는 페리도타이트에서 분리한 단사회석에 대한 동위원소 측정 자료를 도시한 것이다. 비교를 위해서 맨틀 배열선과 해양 현무암류의 범주를 함께 도시하였다. 제주도 페리도타이트 단사회석의 경우 Nd-Hf 동위원소비는 전암지구(Bulk Earth) 성분에서부터 중앙해령현무암을 넘어 그 보다 더 곁핍된 즉, 높은  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 와  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$



**Fig. 4.**  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios for clinopyroxenes separated from Korean spinel peridotite xenoliths (after Choi and Mukasa, 2012). The bulk Earth (BE) compositions and the mantle array are from Bouvier *et al.* (2008) and Blichert-Toft *et al.* (1999), respectively. MORB=mid-ocean ridge basalt; OIB = oceanic island basalt. Data sources for MORB and OIB as in Fig. 1.

$^{177}\text{Hf}$  비에 이르기까지 다양한 범위에 걸쳐있으나 대체적으로 맨틀 배열선을 따라서 도시된다. 반면에 백령도의 경우는 Nd-Hf 동위원소간 짝풀림이 매우 크다. Choi and Mukasa (2012)는 이와 같은 특징에 기초하여 Nd는 암석권맨틀에서의 이차 변성교대작용 동안 쉽게 거동하는 반면 Hf는 거동도가 낮다고 추론하였다. 이와 같은 현상은 하와이 암석권맨틀에서도 관찰된다(Bizimis *et al.*, 2003). 일부의 암석권맨틀에서 보이는 이와 같은 Nd-Hf 동위원소간 짝풀림 현상은 판내부 화산활동의 근원물질 추적에서 엽렬(delamination)되어 연약권으로 공급된 암석권맨틀의 재활성 여부에 관한 중요한 시사점을 제공할 수 있다.

## 결론

$^{176}\text{Lu}$ 의 붕괴상수는  $\sim 1.865 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 변성 석류석 내 Lu-Hf 확산 폐쇄온도는 Sm-Nd의 것에 준하거나 이보다 조금 높다. 화성기원 저어콘 내 Hf 동위원소비는 근원물질 추적이나 맨틀 진화과정에 관한 정보를 제공한다. Nd-Hf 동위원소 상관도에서 인도양과 태평양 연약권은 서로 구분된다. 지질시료들은 Nd-Hf 동위원소 상관도에서 대개 양의 상관관계를 보이나 원양성 퇴적물 내지는 일부 암석권맨틀에서는

Nd-Hf 동위원소간 짝풀림이 관찰된다. Lu-Hf 동위원소시스템은 암석권맨들의 생성시기를 추정하는 지질시계 역할을 할 수 있다.

## 사 사

이 연구는 2014년도 충남대학교 자체연구비에 의해 지원되었습니다. 심사과정에서 건설적인 비평을 해주신 이승렬박사와 김윤섭교수께 깊은 감사드립니다.

## References

- Amelin, Y., 2005, Meteorite phosphates show constant  $^{176}\text{Lu}$  decay rate since 4557 million years ago. *Science*, 310, 839-841.
- Amelin, Y., Lee, D.-C. and Halliday, A.N., 2000, Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 4205-4225.
- Amelin, Y., Lee, D.-C., Halliday, A.N. and Pidgeon, R.T., 1999, Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399, 252-255.
- Andres, M., Blichert-Toft, J. and Schilling, J., 2004, Nature of the depleted upper mantle beneath the Atlantic: Evidence from Hf isotopes in normal mid-ocean ridge basalts from 79°N to 55°S. *Earth and Planetary Science Letters*, 225, 89-103.
- Ayers, J.C., Dittmer, S.K. and Layne, G.D., 1997, Partitioning of elements between peridotite and  $\text{H}_2\text{O}$  at 2.0-3.0 GPa and 900-1000°C, and application to models of subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 381-398.
- Bizimis, M., Sen, G. and Salters, V.J.M., 2003, Hf-Nd isotope decoupling in the oceanic lithosphere: constraints from spinel peridotites from Oahu, Hawaii. *Earth and Planetary Science Letters*, 217, 43-58.
- Bizzarro, M., Baker, J.A., Haack, H., Ulfbeck, D. and Rosing, M., 2003, Early history of Earth's crust-mantle system inferred from hafnium isotopes in chondrites. *Nature*, 421, 931-933.
- Blichert-Toft, J., Agranier, A., Andres, M., Kingsley, R., Schilling, J. and Albarède, F., 2005, Geochemical segmentation of the Mid-Atlantic Ridge north of Iceland and ridge-hot spot interaction in the North Atlantic. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6, <http://dx.doi.org/10.1029/2004GC000788>.
- Blichert-Toft, J. and Albarède, F., 1997, The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 243-258.
- Blichert-Toft, J., Albarède, F. and Kornprobst, J., 1999, Lu-Hf isotope systematics of garnet pyroxenites from Beni Bousera, Morocco: implications for basalt origin. *Science*, 283, 1303-1306.
- Bouvier, A., Vervoort, J.D. and Patchett, P.J., 2008, The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273, 48-57.
- Brenan, J.M., Shaw, H.F., Phinney, D.L. and Ryerson, J.F., 1994, Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: implications for high field strength element depletion in island arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 128, 327-339.
- Chauvel, C. and Blichert-Toft, J., 2001, A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 190, 137-151.
- Chauvel, C., Hofmann, A.W. and Vidal, P., 1992, HIMU-EM: The French Polynesian connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 110, 99-119.
- Cheong, C.-S., Yi, K., Kim, N., LEE, T.-H., Lee, S.R., Geng, J.-Z. and Li, H.-K., 2013, Tracking source materials of Phanerozoic granitoids in South Korea by zircon Hf isotopes. *Terra Nova*, 25, 228-235.
- Cherniak, D.J., Hanchar, J.M. and Watson, E.B., 1995, Hf and rare earth diffusion in zircons. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 75, 704.
- Choi, H.-O., Choi, S.H., Lee D.-C. and Kang, H.-C., 2013, Geochemical evolution of basaltic volcanism within the Tertiary basins of southeastern Korea and the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 109-122.
- Choi, S.H. and Kwon, S.-T., 2005, Mineral chemistry of spinel peridotite xenoliths from Baengnyeong Island, South Korea, and its implications for the paleogeotherm of the uppermost mantle. *Island Arc*, 14, 236-253.
- Choi, S.H. and Mukasa, S.B., 2012, Lu-Hf and Sm-Nd isotope systematics of Korean spinel peridotites: A case for metasomatically induced Nd-Hf decoupling. *Lithos*, 154, 263-275.
- Choi, S.H., Mukasa, S.B., Andronikov, A.V., Osanai, Y., Harley, S.L. and Kelly, N.M., 2006, Lu-Hf systematics of ultra-high temperature Napier Metamorphic Complex in Antarctica: Evidence for the early Archean differentiation of Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 246, 305-316.
- Choi, S.H., Mukasa, S.B., Kwon, S.-T. and Andronikov, A.V., 2006, Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of late Cenozoic alkali basalts in South Korea: Evidence for mixing between the two dominant asthenospheric mantle domains beneath East Asia. *Chemical Geology*, 232, 134-151.
- Choi, S.H., Mukasa, S.B., Zhou, X.-H., Xian, X.H. and Andronikov, A.V., 2008, Mantle dynamics beneath East

- Asia constrained by Sr, Nd, Pb and Hf isotopic systematics of ultramafic xenoliths and their host basalts from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 248, 40-61.
- Choi, S.H., Suzuki, K., Mukasa, S.B., Lee, J.-I. and Jung, H., 2010, Lu-Hf and Re-Os systematics of peridotite xenoliths from Spitsbergen, western Svalbard: Implications for mantle-crust coupling. *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 121-132.
- Downes, H., 2001, Formation and modification of the shallow sub-continental lithospheric mantle: A review of geochemical evidence from ultramafic xenolith suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of western and central Europe. *Journal of Petrology*, 42, 233-250.
- Eisele, J., Sharma, M., Galer, S.J.G., Blichert-Toft, J., Devey, C.W. and Hofmann, A.W., 2002, The role of sediment recycling in EM-1 inferred from Os, Pb, Hf, Nd, Sr isotope and trace element systematics of the Pitcairn hotspot. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 197-212.
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., White, W.M. and Bourdon, B., 1997, Element transport from subducted slab to juvenile crust at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research*, 102, 14991-15019.
- Gao, S., Rudnick, R.L., Carlson, R.W., McDonough, W.F. and Liu, Y.-S., 2002, Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198, 307-322.
- Godfrey, L.V., Lee, D.-C., Sangrey, W.F., Halliday, A.N., Salters, V.J.M., Hein, J.R. and White, W.M., 1997, The Hf isotopic composition of ferromanganese nodules and crusts and hydrothermal manganese deposits: Implications for seawater Hf. *Earth and Planetary Science Letters*, 151, 91-105.
- Griffin, W.L., Andi, Z., O'Reilly, S.Y. and Ryan, C.G., 1998, Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* (eds. Flower, M., Chung, S.-L., Lo, C.-H. and Lee, T.Y.), American Geophysical Union Geophysical Monograph, Vol. 27, 107-126.
- Hanan, E.H., Wagner, T.P. and Grove, T.L., 1994, Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts. *Chemical Geology*, 117, 149-166.
- Hawkesworth, C., Turner, S., Peate, D., McDermott, F. and van Calsteren, P., 1997, Element U and Th variations in island arc rocks: Implications for U-series isotopes. *Chemical Geology*, 139, 207-221.
- Johnson, C.M. and Beard, B.L., 1993, Evidence from hafnium isotopes for ancient sub-oceanic mantle beneath the Rio Grande rift. *Nature*, 362, 441-444.
- Johnson, C.M., Shirey, S.B. and Barovich, K.M., 1996, New approaches to crustal evolution studies and the origin of granitic rocks: What can the Lu-Hf and Re-Os isotope systems tell us? *Royal Society of Edinburgh Transactions, Earth Sciences*, 87, 339-352.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S. and Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the southwestern Gyeonggi Block, Korea: Implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162, 475-497.
- Lapen, T.J., Medaris Jr., L.G., Johnson, C.M. and Beard, B.L., 2005, Archean to middle Proterozoic evolution of Baltica subcontinental lithosphere: evidence from combined Sm-Nd and Lu-Hf isotope analyses of the Sandvik ultramafic body, Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150, 131-145.
- Lee, S.R., Cho, D.-L., Cho, M., Wu, F.-Y., Kim, H. and Jeon, H., 2007, Hf isotopic evidence for Paleoproterozoic (>3.5 Ga) crustal components in the Korean Peninsula. *Geosciences Journal*, 11, 271-277.
- Lee, S.R. and Walker, R.J., 2006, Re-Os isotope systematics of mantle xenoliths from South Korea: Evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chemical Geology*, 231, 90-101.
- Lorand, J.-P., Luguet, A. and Alard, O., 2013, Platinum-group element systematics and petrogenetic processing of the continental upper mantle: A review. *Lithos*, 164-167, 2-21.
- McKenzie, D. and O'Nions, R.K., 1991, Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32, 1021-1091.
- Menzies, M.A., Fan, W.M. and Zhang, M., 1993, Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In *Magmatic Processes and Plate Tectonics* (ed. Prichard, H.M.), Geological Society of London, 71-81.
- Menzies, M.A., Xu, Y.G., Zhang, H.F. and Fan, W.M., 2007, Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 96, 1-21.
- Münker, C., Weyer, S., Scherer, E. and Mezger, K., 2001, Separation of high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf) and Lu from rock samples for MC-ICPMS measurements. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2, <http://dx.doi.org/10.1029/2001GC000183>.
- Nir-EI, Y. and Lavi, N., 1998, Measurement of the half-life of <sup>176</sup>Lu. *Applied Radiation and Isotopes*, 49, 1653-1655.
- Patchett, P.J., 1983, Hafnium isotope results from mid-ocean ridges and Kerguelen. *Lithos*, 16, 47-51.
- Patchett, P.J., Kouvo, O., Hedge, C.E. and Tatsumoto, M., 1981, Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78, 279-297.
- Patchett, P.J. and Tatsumoto, M., 1980, Lu-Hf total-rock isochron for the eucrite meteorite. *Nature*, 288, 571-574.
- Patchett, P.J., Vervoort, J.D., Söderlund, U. and Salters, V.J.M., 2004, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systematics in



- chondrites and their constraints on the Lu-Hf properties of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 222, 29-41.
- Patchett, P.J., White, W.M., Feldmann, H., Kielinczuk, S. and Hofmann, A.W., 1984, Hafnium/rare earth element fractionation in the sedimentary system and crustal recycling into the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 69, 365-378.
- Pearce, J.A., Kempton, P.D., Nowell, G.M. and Noble, S.R., 1999, Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in western Pacific arc-basin systems. *Journal of Petrology*, 40, 1579-1611.
- Pearson, D.G., Carlson, R.W., Shirey, S.B., Boyd, F.R. and Nixon, P.H., 1995, Stabilization of Archean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaal craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 134, 341-357.
- Pearson, D.G. and Nowell, G.M., 2003, Dating mantle differentiation: a comparison of the Lu-Hf, Re-Os and Sm-Nd isotope systems in the Beni Bousera peridotite massif and constraints on the Nd-Hf composition of the lithospheric mantle. *Geophysical Research Abstract* 5, 05430.
- Reisberg, L. and Lorand, J.P., 1995, Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massif. *Nature*, 376, 159-162.
- Sagong, H., Cheong, C.-S. and Kwon, S.-T., 2003, Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research*, 122, 275-295.
- Salters, V.J.M., 1996, The generation of mid-ocean ridge basalts from the Hf and Nd isotope perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 141, 109-123.
- Salters, V.J.M. and Hart, S.R., 1991, The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf-isotope connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 104, 364-380.
- Salters, V.J.M. and White, W.M., 1998, Hf isotope constraint on mantle evolution. *Chemical Geology*, 145, 447-460.
- Scherer, E., Münker, C. and Mezger, K., 2001, Calibration of the Lutetium-Hafnium clock. *Science*, 293, 683-687.
- Scherer, E.E., Cameron, K.L. and Blichert-Toft, J.B., 2000, Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 3413-3432.
- Schmitz, M.D., Vervoort, J.D., Bowring, S.A. and Patchett, P.J., 2004, Decoupling of the Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems during the evolution of granulitic lower crust beneath southern Africa. *Geology*, 32, 405-408.
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D. and Isachsen, C.E., 2004, The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 311-324.
- Stalder, R., Foley, S.F., Brey, G.P. and Horn, I., 1998, Mineral-aqueous fluid partitioning of trace element at 900-1200°C and 3.0-5.7 GPa: new experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 1781-1801.
- Stille, P., Unruh, D.M. and Tatsumoto, M., 1983, Pb, Sr, Nd and Hf isotopic evidence of multiple sources for Oahu, Hawaii basalts. *Nature*, 304, 25-29.
- Stille, P., Unruh, D.M. and Tatsumoto, M., 1986, Pb, Sr, Nd, and Hf isotopic constraints on the origin of Hawaiian basalts and evidence for a unique mantle source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 2303-2319.
- Tatsumoto, M., Unruh, D.M. and Patchett, P.J., 1981, U-Pb and Lu-Hf systematics of Antarctic meteorites. *National Institute of Polar Research (Tokyo), Special Issue*, 20, 237-249.
- Turner, S., Hawkesworth, C., van Calsteren, P., Heath, E., Macdonald, R. and Black, S., 1996, U-series isotopes and destructive plate margin magma genesis in the Lesser Antilles. *Earth and Planetary Science Letters*, 142, 191-207.
- Vervoort, J.D. and Blichert-Toft, J., 1999, Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 533-556.
- Vervoort, J.D. and Patchett, P.J., 1996, Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 3717-3733.
- Vervoort, J.D., Patchett, P.J., Blichert-Toft, J. and Albarède, F., 1999, Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 79-99.
- Walker, R.J., Carlson, R.W., Shirey, S.B. and Boyd, F.R., 1989, Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern Africa peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1583-1595.
- White, W.M. and Hofmann, A.W., 1982, Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296, 821-825.
- Wittig, N., Baker, J.A. and Downes, H., 2007, U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic constraints on the evolution of sub-continental lithospheric mantle, French Massif Central. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 1290-1311.

---

2014년 6월 27일 접수  
 2014년 6월 27일 심사개시  
 2014년 9월 2일 채택