

## 한반도 남부 하부지각맨틀의 생성연령과 진화사

이승렬<sup>1\*</sup>, R. J. Walker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국지질자원연구원 지질기반정보연구부(lecsr@kigam.re.kr)

<sup>2</sup> Department of Geology, University of Maryland, USA

### 1. 서론

맨틀의 부분용융 동안 Re는 불호정성(incompatible), Os은 호정성(compatible)의 원소적 특성이 있기 때문에 현무암질 마그마를 생성시키고 남은 맨틀잔류암(residual mantle)은 상대적으로 낮은 Re/Os 비와 높은 Os 함량을 가진다. 맨틀잔류암은 부분용융을 경험한 이후 일어난 여러 가지 교대작용(metasomatism)(예, 초염기성 포획암을 운반한 현무암질 마그마 혹은 지각물질 등에 의한 혼합)에 의해 원래의 Os 동위원소 비가 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 Re-Os 동위원소 시스템은 지각 물질을 형성하고 남은 잔류물인 지각하부맨틀(subcontinental lithospheric mantle, SCLM)의 생성연령을 구하는데 있어서 현재까지 가장 유용한 동위원소 시스템이다.

이 연구는 백령도, 평택, 보은 및 제주도에 분출한 신생대 알칼리현무암에 산출하는 맨틀 포획암을 대상으로(Fig. 1), Re-Os 동위원소 분석을 통해 한반도 남부의 하부지각맨틀의 생성연령과 진화사를 Lee and Walker (2006)의 연구결과를 인용해 밝히고자 한다.

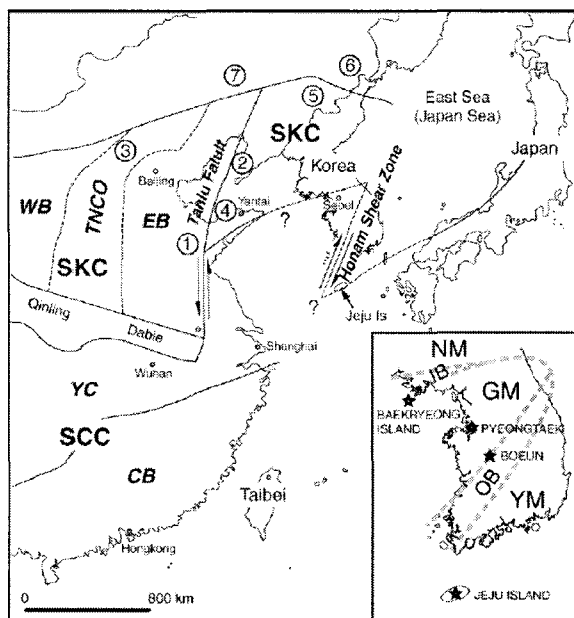


Fig. 1. Regional tectonic map of East Asia. Sample locations are shown as stars in the inset figure. SKC, Sino-Korean craton; TNCO, Trans-North China Orogen; EB, Eastern block; WB, Western block; SCC, South China craton; YC, Yangtze craton; CB, Cathaysian block; NM, Nangrim massif; GM, Gyeonggi massif; YM, Yeongnam massif; IB, Imjingang belt; OB, Ogcheon belt. The Nangrim, Gyeonggi, and Yeongnam massifs are bounded by two intervening Neoproterozoic- Phanerozoic fold-and-thrust belts, the Imjingang belt and the Ogcheon belt, respectively. Numbers in circles represent the locations of the Paleozoic (1 and 2) and Cenozoic (others) volcanic eruptions that contain mantle xenoliths: 1. Mengyin; 2. Fuxian; 3. Hannuoba; 4. Qixia; 5. Longgang; 6. Wangqing; 7. Shuangliao.

## 2. 시료 및 실험방법

이번 연구에 사용된 맨틀포획암은 모두 감람석, 사방회석, 단사회석, 스피넬로 구성된 스피넬 페리도타이트(spinel peridotite)이다. 대부분의 시료들은 변질을 거의 받지 않았으며, 880-1042°C, 12-26 kbar에 해당하는 온도-압력 조건에서 생성된 것으로 알려져 있다(Lee, 1996; Choi et al., 2001). 대부분의 포획암들은 레졸라이트(lherzolite)(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=2.2-4.1 wt%; CaO=1.9-4.3 wt%; Mg#=89.1-90.4)이나, 백령도와 제주도 시료들은 각각 1개(BR5)와 2개(JJ2-5, JJ2-6)의 하즈버가이트(harzburgite)(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=2.2-4.1 wt%; CaO=1.9-4.3 wt%; Mg#=89.1-90.4)를 포함한다(Table 1).

Table 1  
 Some major element concentrations and Re-Os isotope data of peridotite xenoliths from South Korea

Sample	CaO (wt.%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt.%)	Mg#	Re (ppb)	Os (ppb)	<sup>187</sup> Re/ <sup>188</sup> Os	<sup>187</sup> Os/ <sup>188</sup> Os	2σ	T <sub>RD</sub>
<i>Baekryeong Island (~5 Ma)</i>									
BR1	1.90	2.24	90.4	0.035	1.90	0.0879	0.12483	0.00017	0.66
BR2	3.21	3.49	89.6	0.017	0.45	0.1778	0.12853	0.00024	0.15
BR3	2.44	2.59	89.6	0.088	1.12	0.3760	0.12666	0.00020	0.41
BR4	1.99	2.44	89.9	0.025	0.70	0.1726	0.12130	0.00019	1.14
BR5	1.08	1.46	91.2	0.053	1.43	0.1778	0.11659	0.00036	1.78
<i>Pyeongtaek (~5 Ma)</i>									
PT1	4.25	3.85	89.6	b.d. <sup>1</sup>	1.10	n.d. <sup>2</sup>	0.12572	0.00026	0.54 <sup>3</sup>
<i>Boeun (~5 Ma)</i>									
BE1	3.13	4.05	89.6	0.105	1.96	0.2599	0.12548	0.00021	0.57
BE2	2.90	3.48	89.6	0.076	0.92	0.3992	0.12555	0.00020	0.56
BE3	2.43	2.76	90.0	0.088	1.11	0.3828	0.12413	0.00021	0.76
<i>Jeju Island (~0.6 Ma)</i>									
JJ1-2	3.79	3.65	89.1	0.131	0.95	0.6683	0.12851	0.00015	0.15
JJ2-1	2.88	3.23	89.5	4.36	1.44	14.58	0.12648	0.00008	0.60
JJ2-1(rep)				0.104	1.28	0.3910	0.12677	0.00012	0.39
JJ2-2	2.52	2.91	89.7	0.093	0.69	0.6409	0.12695	0.00033	0.37
JJ2-5	0.59	1.02	91.1	0.016	2.05	0.0371	0.11551	0.00018	1.92
JJ2-6	0.64	0.95	90.6	0.016	2.18	0.0354	0.11654	0.00032	1.78
JJ2-7	3.02	2.27	89.7	0.079	0.99	0.3841	0.12396	0.00034	0.78
JJ2-8	2.28	2.85	89.6	0.045	1.37	0.1579	0.12291	0.00036	0.92
JJ2-9	3.47	2.86	89.7	0.067	1.09	0.2930	0.12469	0.00028	0.68

<sup>1</sup>b.d. — below detection limit. <sup>2</sup>n.d. — not determined. <sup>3</sup>Calculated with no age correction. PUM values of <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os=0.1296 and <sup>187</sup>Re/<sup>188</sup>Os=0.433 (Meisel et al., 2001) were used for the calculation of T<sub>RD</sub> ages.

맨틀포획암에 대한 Re-Os 동위원소 분석은 미국 메릴랜드대학 지질학과 동위원소 실험실에서 수행되었다. 시료들은 <sup>185</sup>Re-<sup>190</sup>Os이 농집된 스파이크(spike)와 함께 카리우스 튜브(Carius tube)에 넣고 밀봉한 다음 오븐에서 약 240°C에서 하루 정도 가열한 다음 튜브를 깨고 Os은 솔벤트 추출법(Cohen and Waters, 1996)으로 Re은 음이온 수지 교환 크로마토그래피 방법으로 원소분리를 하였다. 분리된 Os은 음이온 열이온화 질량분석기(negative TIMS)로 OsO<sub>3</sub>의 음이온으로 측정하였으며, Re은 다검출기 유도결합플라즈마 질량분석기(multi-collector ICP MS)를 사용하여 측정하였다(Walker et al., 2002). <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os의 측정오차는 0.3%(2s) 이하이며, 표준시료에 대해 장기간 측정된 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os의 측정오차는 0.2%(2s) 이하이다.

## 3. 결과 및 토의

맨틀포획암의 Os과 Re 함량은 각각 0.45-2.18 ppb와 0.05-0.13 ppb이며, 일반적으로 하즈버가이트가 레졸라이트에 비해 Os 함량이 높다(Table 1). 모든 포획암의 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 동위원소

비는 콘드라이트 값(~0.13)에 비해 낮은 0.1155-0.1285이며, 이들 시료 중 3개의 하즈버가이 트가 가장 낮은 0.1155-0.1166의  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비를 가진다.  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비는 대부분이 콘드라이트 값(~0.4) 보다 낮지만, 2개의 제주도 시료(JJ1-2, JJ2-2)는 상대적으로 높은 0.64와 0.67의 값을 가져서, 이들 포획암이 지표로 운반될 당시 외부에서 Re이 추가되었음을 지시한다. 맨틀포획암의 경우 Re의 이동성(mobility) 때문에 대부분이 등시선을 형성하지 않는 것으로 알려져 있는데, 한반도 맨틀포획암 시료의 경우도 역시  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  vs  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  등시선도(isochron diagram)에서 뚜렷한 등시선을 정의하지 않는다(Fig. 2a). 반면에  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비는 맨틀포획암의 부분용융 정도를 나타내는 화학적 지시자(예,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO)와 뚜렷한 양의 상관관계를 보인다(Fig. 2b).

일반적으로 Re-Os 동위원소 시스템을 이용하여 하부지각맨틀의 연령을 구하는 방법은 3가지로 구분할 수 있다, 즉 (1) 전통적인 등시선을 이용하는 방법; (2) 각각 시료에 대한  $T_{MA}$ 와  $T_{RD}$  모델 연령을 구하는 방법(Walker et al., 1989); (3) 부분용융을 지시하는 원소들(예,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, Lu 등)과  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비의 상관관계를 이용하여 구한  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  초기값을 맨틀진화곡선(mantle evolution curve)에 투영하여 모델 연령을 구하는 방법(Reisberg and Lorand, 1995) 등이 있다.

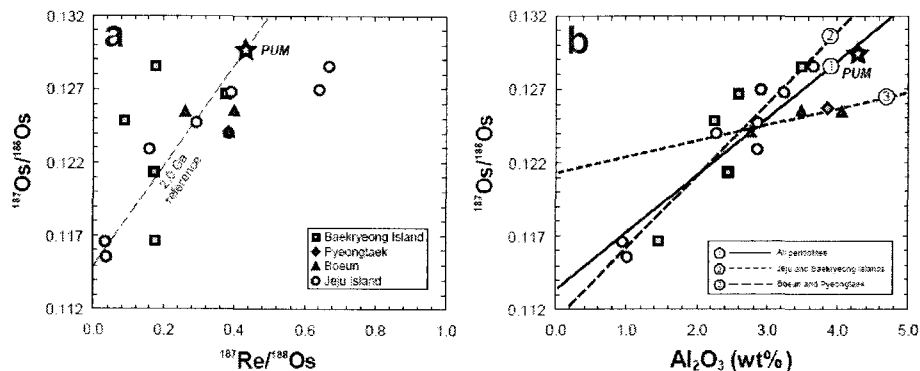


Fig. 2. (a) Re-Os isochron diagram for South Korean peridotite xenoliths. The  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  and  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  ratios of most mantle xenoliths scatter along a 2.0 Ga reference isochron, projected from the PUM, indicative of a recent perturbation of Re/Os. (b)  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (wt.%). The equation of each regression line is:  $Y1 = 0.0038X + 0.1135$  ( $R^2 = 0.75$ );  $Y2 = 0.0049X + 0.1113$  ( $R^2 = 0.87$ );  $Y3 = 0.0011X + 0.1213$  ( $R^2 = 0.77$ ).

우리나라 맨틀포획암은  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  vs  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  등시선도에서 등시선을 정의하지 않기 때문에 가장 정확한 하부지각맨틀의 연령을 구할 수 없다. 따라서 이번 연구에서는 (2)번과 (3)번 방법을 이용해서 하부지각맨틀의 연령을 구하였다.  $T_{MA}$  모델 연령은 Nd 동위원소 시스템에서 사용되는 모델연령 계산법과 동일한 방법으로 구할 수 있다. 그러나 일반적으로 Re은 지각하부맨틀이 생성된 이후 일어난 다양한 고대작용에 의해 상당한 이동성을 가지기 때문에 대부분의 맨틀포획암 시료들은 부분용융 당시에 형성된 원래의  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비를 보존할 가능성이 매우 낮다. 따라서 이러한 Re의 이동성을 제거하기 위해 고안된  $T_{RD}$  (Re-depletion model age, Walker et al., 1989) 모델 연령이  $T_{MA}$  모델연령에 비해 보다 비교적 정확히 하부지각맨틀의 생성연령을 지시하는 것으로 알려져 있다.  $T_{RD}$  모델연령은 시료를 포획한 화산암의 분출시기 이후 생성된 방사성  $^{187}\text{Os}$ 의 양을 보정하여 맨틀의 부분용융 등

안 시료에서 Re이 완전히 제거되었다는 가정 하에 시료의  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  동위원소 비를 맨틀진화곡선에 투영하여 구한다. 그러나 일반적으로 부분용융 동안 시료에서 Re이 완전히 제거되지 않기 때문에  $T_{RD}$  모델연령은 항상 실제 부분용융이 일어난 시기보다 젊은 연령을 나타내게 된다. 이러한 효과는 상대적으로 결핍도(depletion degree)가 낮은 시료, 즉 초생맨틀에 가까운 시료일수록 더욱 크게 된다. 따라서 정확한 하부지각맨틀의 연령을 구하기 위해서는 가장 결핍도가 큰 시료들, 즉 부분용융 정도를 나타내는 지시자인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (혹은  $\text{CaO}$ ) 함량이 적은 하즈버그아이트 같은 시료를 대상으로  $T_{RD}$  모델연령을 구하여야 한다. 우리나라 맨틀포획암 시료 중에는 백령도와 제주도에서 산출되는 3개의 하즈버그아이트가 상당히 결핍된 맨틀 시료의 특성을 보이기 때문에 이들 시료에서 구한  $T_{RD}$  모델연령인 1.9-1.8 Ga가 한반도 남부 하부지각맨틀의 생성시기로 생각된다. 이러한 원생대 생성시기는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 의 상관관계를 이용해서 구한  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  초기치를 사용해서 맨틀 진화곡선에 투영해서 구한 모델연령, 즉 방법 (3)을 이용해서 구한 모델연령인 1.9-2.1 Ga와 잘 일치한다(Fig. 2b). 따라서 현재 우리나라 하부에 분포하는 지각맨틀의 연령은 초기 원생대(1.8-2.1 Ga) 시기에 형성된 것임을 알 수 있다.

신생대 알칼리현무암에 산출되는 맨틀포획암에 대한 Re-Os 동위원소 분석을 통해 얻어진 한반도 하부지각맨틀의 생성연대는 상부 지각에 대한 Nd 동위원소 연구를 통해 밝혀진 시생대 연령(2.5-2.9 Ga)(Lan et al., 1995; Cheong et al., 2000; Lee et al., 2003)에 비해 상대적으로 젊은 것을 알 수 있다. 상부지각과 하부맨틀의 이러한 연령 차이는 한반도를 형성한 시생대 지각물질들의 추출과 관련되어서 형성되었던 시생대 하부지각맨틀이 초기 원생대 시기에 일어난 활발한 조산운동에 의해 대부분이 초기 원생대 하부지각맨틀 물질로 대체되었음을 시사한다.

#### 4. 참고문헌

- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T., Park, K.-H., 2000. Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. *Precambrian Res.* 102, 207-220.
- Choi, S.H., Jwa, Y.-J., Lee, H.Y., 2001. Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: Evidence from mantle xenoliths. *Island Arc* 10, 175-93.
- Cohen, A.S., Waters, F.G., 1996. Separation of osmium from geological materials by solvent extraction for analysis by TIMS. *Anal. Chem.* 332, 269-275.
- Lan, C.-Y., Lee, T., Zhou, X.-H., Kwon, S.-T., 1995. Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: evidence for Early Archean crust. *Geology* 23, 249-252.
- Lee, H.Y. 1996. Petrochemical study of mantle xenoliths in alkali basalts from South Korea: P/T regime of the upper mantle. *Int. Geol. Rev.* 38, 320-35.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B.-J., Kim, Y.-B., Kim, J.C., 2003. Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Res.* 121, 25-34.
- Lee, S.R., 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. *Chem. Geol.* (in press).

- Meisel, T., Walker, R.J., Irving, A.J., Lorand, J.P., 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: a global perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 1311-1323.
- Reisberg, L.C., Lorand, J.-P., 1995. Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature* 376, 159-162.
- Walker, R.J., Carlson, R.W., Shirey, S.B., Boyd, F.R., 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 1583-1595.
- Walker, R.J., Prichard, H.M., Ishiwatari, A., Pimentel, M., 2002. The osmium isotopic composition of convecting upper mantle deduced from ophiolite chromites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 329-345.