

평택-아산 알칼리 현무암의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성: 한반도 아래 맨틀의 대조적인 조성 경계에 대한 의미

박계현^{1*} · 정창식² · 정연중²

¹부경대학교 환경 · 해양대학 환경지질과학과, ²한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

Sr, Nd and Pb Isotopic Compositions of the Pyeongtaek-Asan Alkali Basalts: Implication to the Contrasting Compositional Boundary for the Mantle beneath Korean Peninsula

Kye-Hun Park^{1*}, Chang-Sik Cheong² and Youn-Joong Jeong

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

요약: 평택-아산 지역에 분포하는 신생대 현무암질 암석의 Sr, Nd, Pb 동위원소 조성은 한국의 다른 신생대 현무암들과 마찬가지로 중앙해령 현무암에 비해 상당히 부화된 값을 보여준다. 평택-아산 지역을 포함하는 한국의 신생대 현무암질 암석들 대부분은 제주도의 현무암들과는 달리 비교적 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 부화맨틀과 곁편맨틀 사이의 혼합으로 설명될 수 있다. 반면에 제주도의 경우는 보다 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 부화맨틀과 곁편맨틀 사이의 혼합으로 설명된다. 이러한 경향성은 북동 중국과 남동중국의 신생대 현무암들에서도 유사한 부화맨틀 단성분의 차이가 발견되는 것과 연관지어 해석할 때는 한국의 중부지역과 남부지역 아래의 대륙암권 맨틀이 각각 북중국지괴 및 남중국지괴의 동측 연장부일 가능성을 나타낸다. 제주도 아래에 남중국 지괴와 같은 종류의 대륙암권맨틀의 성분이 나타나는 것은 중국의 대륙충돌대 위치와 관련한 만입모델로는 설명할 수 없다. 오히려 맨틀의 조성에서 뚜렷한 차이를 보이는 두 대륙의 봉합대가 한반도의 중부와 남부지역의 사이로 지나가며 그 위치는 평택-아산 지역보다 더 남쪽임을 시사한다. 대륙충돌대 경계의 위치가 과거의 연구에서 주로 주장되던 임진강대의 위치와는 상당히 다른 것은 맨틀 경계가 지각의 경계와 다를 가능성을 배제할 수 없다.

핵심어: 알칼리 현무암, 맨틀 포획암, 방사기원 동위원소, 맨틀 도메인, 동아시아

Abstract: Sr, Nd, Pb isotopic compositions of the Cenozoic basaltic rocks distributed in Pyeongtaek-Asan area display significantly enriched values compared with mid-ocean ridge basalts just like other Cenozoic basalts of Korea. The isotopic compositions of most of the Cenozoic basaltic rocks of Korea including those from Pyeongtaek-Asan area can be explained as mixing between enriched mantle component with relatively low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios and depleted mantle component. In contrast, Jejuodo basalts can be explained as mixing between enriched mantle component with relatively higher $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios and depleted mantle component. Combined with that very similar division of enriched mantle components is applied to the Cenozoic basalts of northeast China and southeast China, it is suggested that subcontinental lithospheric mantle of central and southern parts of Korea represents eastern extension of North China Block and South China Block respectively. The indentation model for the late Paleozoic to early Mesozoic continental collision of China contradicts to such an interpretation, because it cannot explain occurrence of subcontinental lithospheric mantle component of South China Block-affinity under the Jejuodo area. Instead, it is more probable that suture zone of the two continental blocks crosses between central and southern Korea and its location is further south from the Pyeongtaek-Asan area. Such distinct location compared with Imjingang belt, supposedly collisional boundary suggested before, suggests that mantle boundary may not be coincide with crustal boundary for the continental collision.

Key words: alkali basalt, mantle xenolith, radiogenic isotope, mantle domain, East Asia

*Corresponding author: Tel. 82-51-629-6629, Fax. 82-51-629-6623, E-mail. khpark@pknu.ac.kr

서 론

한반도를 포함하는 동북아시아 지역에는 신생대의 현무암질 화산암이 매우 넓게 분포한다. 주로 알칼리 화산암으로 맨틀 포획암을 빈번히 포함하는 이 지역의 현무암질 화산암은 상당한 깊이의 맨틀로부터 기원하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현무암질 암석들의 Sr, Nd, Pb 방사기원 동위원소 조성은 마그마를 형성시킨 맨틀근원의 평균조성을 나타낼 수 있으며, 이 때문에 동아시아의 신생대 현무암질 암석들의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 이들의 근원물질과 맨틀부화과정을 조사하는데 활용되어왔다(예, Zhou and Armstrong, 1982; Fan and Hooper, 1991; Song *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2003). 연구결과 동아시아의 신생대 현무암들이 결핍맨틀과 부화맨틀 사이의 혼합을 보이고 있으며, 이러한 혼합에 관여하는 부화맨틀성분은 현무암이 산출되는 지리적 위치에 따라 상이하고, 그 차이는 암권맨틀 또는 연약권 맨틀성분의 차이를 반영하는 것으로 설명되어왔다(예, Zou *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2005, 2006).

북동아시아의 지구조적 진화와 관련하여 아직 해결되지 못한채 남아있는 문제의 하나가 고생대말-중생대초에 일어난 북중국지괴(North China Block, NCB)와 남중국지괴(South China Block, SCB) 사이 대륙충돌대(예, Xu *et al.*, 1992)의 동쪽 연장부 위치이다. 대략적으로 동서의 방향으로 연장될 것으로 보이는 이 대륙충돌대가 한반도로 연장되는지 여부와 연장된다면 한반도의 어느 곳을 지나가는지, 비슷한 시기의 일본 히다대와 연결이 되는지, 연결된다면 한반도의 어느 지역과 연결되는지 등에 대한 것이 의문이 제기되고 있다. 다양한 연구 분야에서 이 문제를 해결하기 위해 노력해 왔지만 아직 확실한 결론이 내려지지 못한 상태이다(Yin and Nie, 1993; Li, 1994; Ernst and Liou, 1995; Ree *et al.*, 1996; Chang, 1996; Zhang, 1997; Oh, 2006; Zhai *et al.*, 2007). 대륙충돌대 연장부의 정확한 위치 문제를 해결할 수 있는 방법의 하나가 지역별 암권맨틀의 특징을 비교하는 것이다. 현재까지 중국 대륙의 아래에 존재하는 맨틀 및 맨틀유래암석들에 대한 연구가 매우 활발히 진행되어 왔으며(예, Peng *et al.*, 1986; Song *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991; Fan and Hooper, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Zou *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2003) 그 결과 NCB 지역에 분포하는 현무암질 암석들과 SCB 지역에 분포하는 현부

암질 암석들이 뚜렷이 구분되는 동위원소적 특징을 보이고 있다(예, Tu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Chung *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1995; Zou *et al.*, 2000). 따라서 대륙충돌대가 한반도를 가로질러 지나간다면 한반도 및 그 주변에 분포하는 신생대 현무암질 암석들 역시 지리적 위치에 따른 서로 다른 특징을 보일 것으로 예상할 수 있다. 즉, 한국과 중국의 현무암질 암석들의 동위원소적 특징을 비교하는 것은 한국에서의 대륙충돌대 위치를 결정하는데 매우 결정적인 단서를 제공해줄 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 Park *et al.*(2005)는 한반도 및 부속 도서들에 분포하는 신생대 현무암질암석들의 동위원소 조성분포가 남쪽의 제주도의 현무암과 제주도를 제외한 더 북쪽에 분포하는 현무암질 암석들이 서로 다르며, 이러한 차이는 대륙충돌대가 그 사이를 지나가기 때문일 것으로 해석하였다. 이 연구에서는 평택과 아산 지역에 분포하는 현무암질 암석들의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성을 분석하여 보고한다. 평택과 아산 지역은 백령도, 전곡, 고성을 잇는 더 북쪽의 신생대 현무암 분포지보다 훨씬 더 남쪽에 자리잡고 있기 때문에 평택-아산지역의 현무암질 암석들의 동위원소 특성은 대륙충돌대의 위치를 보다 더 좁게 한정할 수 있을 것으로 기대된다. 이 논문에서는 평택-아산지역의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성의 특성과 근원에 대해 논의하며 동시에, 이를 한반도 및 주변의 다른 신생대 현무암질 암석들의 값과 비교하여 한국의 대륙충돌대 위치의 결정에 어떤 의미를 갖고 있는지에 대해 논의한다.

지질개요

경기육괴 서남부에 해당하는 연구 지역(Fig. 1)은 선캠브리아기의 편암 및 편마암류와 쥐라기의 화강암이 대부분을 차지하고 있으며, 소규모로 마이오세 화산암이 존재한다(김동학 외, 1979). 맨틀유래의 스피넬 페리도타이트를 포획한 평택지역과 아산지역의 현무암질 화산암은 각각 14.5 ± 0.4 Ma~ 16.3 ± 0.4 Ma 및 18.9 ± 0.6 Ma의 분출 연령을 가진 것으로 K-Ar 연령이 보고되었다(신홍자 외, 2006). 평택과 아산 지역의 알칼리 현무암에 포획된 상부 맨틀 암석인 스피넬 페리도타이트는 장경이 최대 55 cm에 이르며, 지온지압계를 적용하면 56~74 km 깊이에서 지표로 올라왔고, 평형 온도는 937~1164°C로 계산되었다(신홍자 외, 2006).

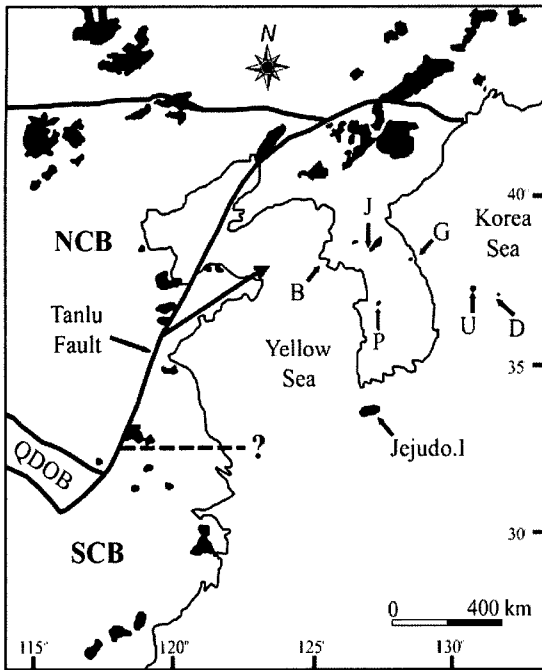


Fig. 1. Distribution of Cenozoic basalts in East Asia. North China Block (NCB), South China Block (SCB), Qinling-Dabie Orogenic Belt(QDOB) and Tanlu Fault are shown. The straight, full and broken lines define the trace of the possible eastern extension of collision boundary between NCB and SCB. Symbols P, B, J, G, U and D indicate Pyeongtaek-Asan, Baengnyeongdo Island, Jeongok, Ganseong, Ulleungdo Island and Dokdo Island, respectively.

분석법

이 연구에서는 한반도에 분출한 맨틀기원의 신생대 화성암 중에서 평택과 아산지역에 분포하는 현무암질 암석에 대하여 야외조사를 통해 표품을 채취하였고 이들 중에서 분석대상의 5개 표품을 선정하였다. 신선한 암석을 파쇄하여 반정이나 포획암이 포함되지 않은 3 mm 이하의 작은 입자들을 골라 탈이온수로 세척한 다음 아게이트 절구를 이용해 분말을 제작하였다.

Sr, Nd 및 Pb 방사기원 동위원소의 분석을 위한 화학적 분리과 동위원소 측정의 모든 작업은 한국기초과학지원연구원의 시설과 기기를 주로 활용하였다. 50-100 mg의 암석분말을 테플론 용기를 사용하여 혼합산 (HF:HClO₄:8:1)으로 용해시켰다. Sr은 전통적인 양이온교환컬럼법으로 분리하였으며, Nd은 첫 번째 양이온교환 컬럼의 단계에서 받은 REE 부분을 다시 두 번째 컬럼으로 분리하였다. Pb는 HBr 매질을 이용해 음이

온 교환 컬럼으로 분리하였다.

Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 VG54-30 열이온화질량분석기를 이용하여 측정하였다. Sr과 Nd 동위원소 조성은 역동적 모드로, 그리고 Pb 동위원소 조성은 정적 모드를 이용해 측정하였다. Sr과 Nd 동위원소 조성은 각각 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$, $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 로 맞추어 질량분석기 내부분별을 보정하였다. NIST-987 Sr 동위원소 표준에 대한 평균 측정값은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710247\pm 0.000004$ ($n=30$, 2σ), 그리고 La Jolla Nd 표준에 대한 평균 측정값은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511838\pm 0.000004$ ($n=20$, 2σ)이다. Pb 동위원소 조성은 NIST-981의 측정값($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.89979\pm 0.0038$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.4413\pm 0.0054$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.545\pm 0.017$, $n=30$, 2σ)을 이용해 기기적 분별을 보정하였으며, 1 amu당 약 0.1%의 질량분별을 보였다. 총과정배경값은 Sr 100 pg, Rb 30 pg, Nd 100 pg, Sm 50 pg, Pb가 200 pg 이하의 수준이었다.

결 과

Sr, Nd 및 Pb 동위원소 분석결과(Table 1~3)를 살펴 보면 평택-아산의 현무암들은 한반도의 다른 지역 신생대 현무암질 암석들처럼 결핍분별에 비해 상당히 부화된 값을 보여준다. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값의 경우 0.714023~0.704875로 중앙해령 현무암(mid-ocean ridge basalt, MORB)들에 비해서는 매우 부화된 값을 보이며, 표품수에 비해 비교적 넓은 범위의 변화를 보인다. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값인 0.512648~0.512769 역시 MORB에 비해 매우 낮은 값이다. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 도형에 도시할 경우(Fig. 2) 맨틀 암석의 일반적인 경향 및 한반도의 다른 지역 신생대 현무암질 암석들처럼 두 동위원소 조성이 음의 상관관계를 갖고 배열한다. 함께 도시한 한반도 다른 지역의 신생대 현무암질 암석들이 형성하는 변화경향을 잘 따르고 있으며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 및 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 모두 중간 범위의 값을 갖는다.

한편 Pb 동위원소 조성은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.783\sim 17.874$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.482\sim 15.573$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.973\sim 38.601$ 로 비교적 좁은 범위의 변화를 보인다. Sr 및 Nd 동위원소 조성과는 달리 Pb 동위원소 조성은 한반도의 신생대 현무암질 암석들이 모두 일치하는 조성변화를 보이지는 않는다(Fig. 3). 평택-아산의 현무암들을 포함한 대부분의 한국 신생대 현무암질 암석들은 비슷한 Pb 동위원소 조성을 보이지만 제주도의 경우는 방사기원 성분이 더 높은 Pb 동위원소값을 보임으로써 다른 한반도 신생대 현무암질 암석들과는 구분된다. 이러한 경향성은 Park *et al.*(2005)에서 제안했던 것처럼 한반도

Table 1. Rb-Sr isotopic compositions of the Pyeongtaek-Asan alkali basalts.

Sample	Rb(ppm)	Sr(ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2s SE
APB1-1	37.9	823	0.1332	0.704676	0.000011
APB1-2	39.1	848	0.1334	0.704875	0.000021
APB2-2	56.8	1317	0.1247	0.704136	0.000014
APB2-4	25.9	1364	0.0549	0.704111	0.000014
APB2-5	32.8	1233	0.0770	0.704023	0.000012

NIST-987: ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710247 ± 0.000004 (N=30, 2s standard error). Total procedure blank level was below 0.1ng for Sr and 30pg for Rb.

Table 2. Sm-Nd isotopic compositions of the Pyeongtaek-Asan alkali basalts.

Sample	Sm(ppm)	Nd(ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2s SE
APB1-1	6.69	35.3	0.1147	0.512653	0.000014
APB1-2	6.76	35.2	0.1162	0.512648	0.000014
APB2-2	9.83	56.7	0.1048	0.512762	0.000014
APB2-4	11.7	69.6	0.1018	0.512740	0.000034
APB2-5	10.1	57.2	0.1064	0.512769	0.000011

La Jolla: ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511838 ± 0.000004 (N=20, 2s standard error). Total procedure blank level was below 0.1ng for Nd and 50pg for Sm.

Table 3. Pb isotopic compositions of the Pyeongtaek-Asan alkali basalts.

Sample	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb
APB1-1	17.853	15.555	38.524	0.8713	2.1578
APB1-2	17.874	15.573	38.601	0.8713	2.1596
APB2-2	17.783	15.482	37.975	0.8706	2.1353
APB2-4	17.818	15.491	38.016	0.8695	2.1336
APB2-5	17.789	15.487	37.973	0.8705	2.1345

The 2S% standard error of the analysis results was below 0.1%. NIST-981 average: ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 16.8997 ± 0.0038, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.4413 ± 0.0054, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 36.545 ± 0.017, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb = 0.9137 ± 0.0001, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb = 2.1625 ± 0.0006 (N=30, 2s standard error). Total procedural blank level was below 0.2ng for Pb.

중부지역의 암권맨틀이 제주도의 현무암 조성으로 대표되는 남부지역의 암권맨틀과는 다른 조성을 갖고 있음을 뒷받침한다고 생각한다.

토 의

혼합과 맨틀 단성분

마그마 생성을 위한 용융이나 마그마 생성 이후의 분별정출등의 과정들로는 Sr, Nd 및 Pb와 같은 무거운 원소의 동위원소 조성이 변화하지 않는다. 따라서 맨틀에서 만들어진 마그마가 분출하여 생성된 젊은 현무암질 암석의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 분출과정 또는 분출 후의 과정들 중에 지각에 의한 오염영향만 없다면 근원 마그마가 생성된 맨틀 근원의 동위원소 조성을 그대로 나타낼 수 있다. 평택과 아산지역의 현

무암을 포함한 한반도의 신생대 현무암질 암석들은 흔히 마그마보다 훨씬 더 비중이 큰 맨틀 포획암을 갖고 있다. 이와 같이 무거운 포획암을 갖고 있다는 것은 분출시 마그마가 맨틀 포획암이 포획된 상당 깊이의 맨틀로부터 지표까지 매우 빠르게 상승하였음을 나타낸다. 따라서 이러한 맨틀 포획암을 갖는 현무암의 경우 일반적으로 뜨거운 현무암질 마그마가 얕은 깊이의 지각 내에서 상당시간 저류할 때 나타날 수 있는 지각과의 상호작용에 의한 오염의 가능성을 배제할 수 있다. 즉, 평택-아산지역의 현무암을 포함하는 한국의 신생대 현무암질 암석의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 이들이 유래한 맨틀 근원지역의 값을 대표한다고 볼 수 있다.

맨틀로부터 유래한 암석들의 동위원소 조성은 맨틀 내에 혼재하는 물질들의 기원을 추적하는데 활용되어

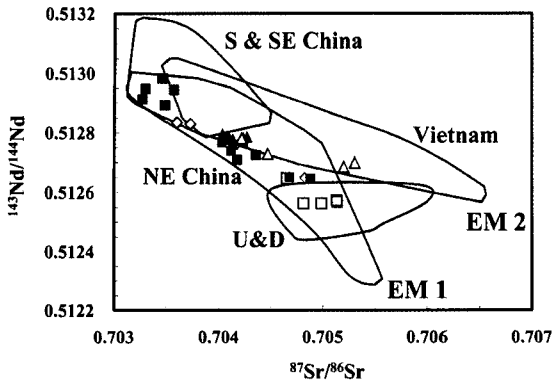


Fig. 2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ correlation diagram. The following symbols are used for the Cenozoic Korean basalts from different localities: Pyeongtaek-Asan (solid red squares), Baengnyeongdo Island (solid black squares), Ganseong (open diamonds), Jeongok (open squares), and Jeju Island (solid triangles=alkali basalts, open triangles=tholeiites). Data for the Ullungdo and Dokdo Islands (U & D) are from Tatsumoto and Nakamura (1991). Fields for the basalts from NE China, South and SE China, and Vietnam are shown for comparison, based on the published data (Peng et al., 1986; Song et al., 1990; Basu et al., 1991; Tu et al., 1991, 1992; Tatsumoto et al., 1992; Hoang et al., 1996; Zou et al., 2000). Enriched mantle components EM1 and EM2 of Zindler and Hart (1986) are also shown.

왔다. 이를 위해 맨틀물질을 몇 가지 단성분(end-member component)들의 혼합으로 설명하는 것이 보편적이다. Zindler and Hart(1986)가 동위원소 연구를 통해 제안한 중앙해령현무암(mid-ocean ridge basalt, MORB)과 해양도현무암(ocean island basalt, OIB)에 대한 여러 개의 맨틀 혼합 단성분들은 다음과 같다: 낮은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 과 높은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 갖는 결핍맨틀(depleted MORB mantle, DMM), 낮은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 와 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 높은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값을 갖는 부화맨틀 1(enriched mantle 1, EM1), 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 와 높은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 및 중간정도의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 갖는 부화맨틀 2(enriched mantle 2, EM2), 그리고 매우 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 높은 U/Pb 물질(high μ , HIMU). Zindler and Hart(1986) 이후에 다른 연구자들은 대부분 Zindler and Hart(1986)의 단성분들을 이용해 맨틀물질의 근원에 대해 논의하고 있다. Zindler and Hart(1986)는 이 외에도 맨틀 유래 암석들에 빈번히 나타나는 PREMA 단성분을 제안했으며, 다른 학자들에 의해 FOZO와 같이 일부 다른 맨틀 단성분이 제안된 경우도 있으나 이 연구에서의 논점에는 큰 영향이 없기 때문에 이에 대한 논의를 생략한다.

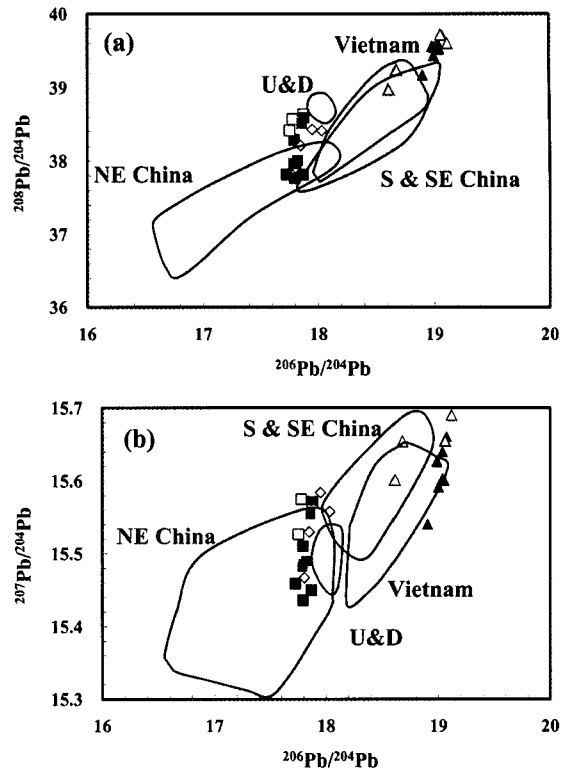


Fig. 3. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and (b) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ correlation diagrams. Symbols and data sources are as in Figure 2. Korean Cenozoic basalts reveal relatively radiogenic $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios compared with NHRL of Hart (1984). The basalts from Jeju Island show higher $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values similar to the basalts from South and SE China and Vietnam than other Korean Cenozoic basalts, including those from Pyeongtaek and Asan area, that show close affinity to the basalts from NE China.

맨틀에서 만들어진 마그마를 대표하는 것은 양적으로나 빈도로 보나 단연코 MORB라고 할 수 있다. 따라서 MORB가 나타내는 단성분인 DMM이 맨틀을 구성하는 물질 중에서 가장 우세한 단성분이라고 말할 수 있다. 그렇기 때문에 맨틀에서 만들어지는 마그마는 일반적으로는 가장 흔한 물질인 DMM과 맨틀내 비교적 소량으로 존재하는 다른 부화된 단성분들 중의 하나 사이에 2성분 혼합관계 또는 경우에 따라서는 DMM과 2개 이상의 부화맨틀 물질들 사이의 다성분 혼합관계를 보이게 된다. 한국의 신생대 현무암들이 보이는 부화된 동위원소적 특징 역시 DMM과 부화맨틀 단성분들 사이의 혼합으로 설명될 수 있다(Fig. 2, 4). 하지만 한국 신생대 현무암들을 모두 함께 도시하면

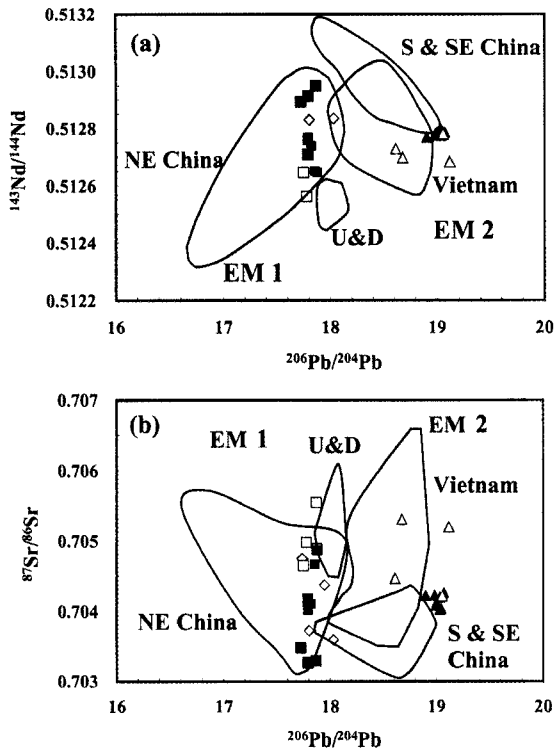


Fig. 4. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and (b) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ correlation diagrams. Symbols and data sources are as in Figure 2. The majority of Korean Cenozoic basalts, including those from Pyeongtaek and Asan area, and NE China show variation toward EM1 while those from Jeju Island, South and SE China, and Vietnam vary toward EM2.

단순한 선형변화를 형성하지 않고 불규칙한 분산을 보이기 때문에 두 성분사이의 혼합만으로는 설명할 수 없으며, 적어도 세 개의 성분이 필요하다. 가장 단순한 해석은 한국 신생대 현무암질 암석들을 지리적 위치에 따라서 두 그룹으로 나누는 것이다. 이 경우 제주도의 알칼리 현무암과 솔레아이트으로 구성되는 한 그룹, 그리고 제주도를 제외한 나머지 그룹으로 나눌 수 있다. 두 그룹은 Sr과 Nd 동위원소 값의 변화범위에서는 상당히 중첩되지만 Pb 동위원소값은 서로 뚜렷이 구분된다. 남쪽의 제주도는 한국의 다른 지역 현무암들보다 훨씬 더 높은 방사기원 Pb 동위원소 조성을 보인다.

한국의 신생대 현무암질 암석들이 형성하는 각각의 그룹이 형성하는 변화경향 역시 맨틀 내에 존재하는 물질들 사이의 혼합으로 해석할 수 있다. 특히 제주도를 제외한 한국 다른 지역의 신생대 현무암들은 여러 도형에서 비교적 뚜렷한 선형관계를 보이며, 따라서 2

성분 혼합으로 해석할 수 있다. 하지만 부화맨틀 단성분의 경우 전통적인 EM1, EM2 구분과는 다소 상이하게 두 성분의 중간 위치에 놓인 맨틀물질이 필요하다. 이와 같은 중간 조성의 맨틀 단성분의 생성기작에 대해서는 맨틀 단성분의 생성과 순환에 대한 더 깊은 논의가 필요하지만 이 논문의 주제를 벗어나기 때문에 다른 논문에서 논의하기로 한다.

동아시아와 동남아시아 하부의 대조적인 부화 맨틀

앞에서 논의한 것처럼 한반도 및 부속도서에 분포하는 신생대 판내부 현무암들은 동위원소 조성에 따라 두 그룹으로 나뉜다. 중국의 신생대 현무암들 역시 지역에 따라 구분되는 비슷한 혼합경향을 보인다(Fig. 4). 남동 중국의 현무암들은 한국 남쪽의 제주도 현무암들처럼 비교적 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 가지며, 북동 중국의 현무암들은 한국 북쪽의 현무암들처럼 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는다(Peng *et al.*, 1986; Song *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Zou *et al.*, 2000). 두 지역의 현무암들은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 도형에 도시할 때 거의 중첩되지 않는다. 일반적인 맨틀 단성분으로 해석할 때 북동 중국의 현무암들은 DMM-EM1, 그리고 남동 중국의 현무암들은 DMM-EM2 사이의 혼합으로 해석할 수도 있다(예, Zou *et al.*, 2000). 한국과 중국의 신생대 현무암질 암석들을 비교하면 남쪽의 제주도는 남동 중국과 유사하지만 상당수 현무암들이 더 높은 방사기원 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 갖는 쪽으로 남동 중국의 영역을 벗어나 도시된다. 반면에 제주도를 제외한 북쪽 그룹은 상당수가 북동 중국의 영역에 포함되지만 대체로 다소 높은 방사기원 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 갖는 쪽으로 치우쳐 분포하며, 일부는 동시에 더 높은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비율을 갖는다. 한국의 신생대 현무암질 암석들이 일관되게 더 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 갖는 쪽으로 치우침은 한반도 아래에서의 맨틀 단성분의 Pb 동위원소 값이 중국과 다르기 때문일 가능성 또는 제3의 혼합단성분이 게재될 가능성을 반영할 수도 있다. 한반도가 중국에 비해 섭입대에 가깝기 때문에 섭입대의 영향을 생각할 수도 있지만 한반도의 현무암들은 중국의 신생대 현무암들과 마찬가지로 섭입의 영향을 나타내는 Nb(-) 이상치 등이 나타나지 않기 때문에 마그마가 만들어질 당시의 섭입대로부터의 오염물질이 섞여 들어갔을 영향은 배제할 수 있다.

중요한 것은 한국 남쪽과 북쪽에 분포하는 신생대 현무암질 암석들이 각각 보이는 맨틀 혼합의 단성분

차이가 중국의 신생대 현무암들 경우와 매우 비슷한 경향을 보인다는 것이다. 즉, 제주도 이외의 한국 신생대 현무암질 암석과 제주도의 현무암질 암석들이 각각 북동 중국과 남동 중국의 현무암질 암석들과 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성이 뚜렷이 유사하다는 점은 확실하다. 중국 신생대 현무암질 암석들은 대략적으로 NCB-SCB 경계를 중심으로하여 동위원소적인 구분이 이루어질 수 있다. 따라서 한반도 및 그 주변에 분포하는 신생대 현무암질 암석들이 남북으로 지리적 위치에 따른 서로 다른 특징을 보이고 있으며, 각 지역이 중국에서의 구분과 잘 연결되는 것은 대륙충돌대가 한국의 두 신생대 현무암 그룹들 사이를 경계로 해서 한반도를 가로질러 지나가는 것으로 해석될 수 있다.

남동중국 뿐만 아니라 남중국 및 인도지나반도를 포함하는 남쪽으로 더 넓은 지역의 많은 신생대 현무암질 암석들 역시 EM2 단성분을 향한 혼합경향을 나타낸다. 여기에는 남중국의 하이난 섬(Tu *et al.*, 1991; Flower *et al.*, 1992), 남중국해(Tu *et al.*, 1992), 대만(Chung *et al.*, 1994, 1995), 태국(Mukasa *et al.*, 1996; Zhou and Mukasa, 1997) 및 베트남(Hoang *et al.*, 1996; Hoang and Flower, 1998) 등이 포함된다.

맨틀 단성분의 근원과 생성

동아시아와 동남아시아의 신생대 현무암들은 지역에 따라 특징적인 부화맨틀-결핍맨틀 사이의 혼합경향을 보인다. 한국의 신생대 현무암중 제주도를 제외한 북쪽그룹과 북중국 현무암들이 상대적으로 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 갖는 쪽을 향한 동위원소적 편향을 보이며, 대조적으로 한국 남쪽의 제주도와 남중국 및 인도지나의 현무암들에는 보다 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 갖는 쪽의 성분이 상당한 기여를 한 것은 분명하다. 그렇다면 이와 같은 특징적인 맨틀성분을 만들어낸 근원 물질은 무엇일까? 동아시아의 판내부 대륙현무암을 연구하는 많은 연구자들은 결핍맨틀과 부화맨틀 단성분이 각각 연약권(asthenospheric) 맨틀과 대륙 암권맨틀(subcontinental lithospheric mantle, SCLM)에서 왔다고 본다(예, Peng *et al.*, 1986; Song *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto and Nakamura, 1991; Tu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Chung *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 1995; Zhou and Mukasa, 1997; Zou *et al.*, 2000). 남동중국, 남중국 및 인도지나의 EM2 성분의 근원으로도 대륙하부의 암권맨틀이 제안되었다(Tu *et al.*, 1991; Flower *et al.*, 1992; Chung

et al., 1994; Zhou and Mukasa, 1997; Zou *et al.*, 2000). 하지만 부화맨틀 성분이 연약권 맨틀에서 유래한다는 주장도 있다(예, Choi *et al.*, 2005, 2006).

우선 결핍맨틀 성분의 경우를 살펴보면 판내부 현무암들이 인장력이 작용하는 지구조환경에서 만들어지며, 이러한 환경에서는 암권의 신장과 연약권맨틀의 융승에 의한 현무암질 마그마의 형성을 야기하기 때문에 판내부 현무암의 결핍맨틀 단성분은 연약권 맨틀에서 유래한다고 보는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 부화맨틀 성분의 경우 동위원소적 특성이 생성되기 위해서는 10억년 내지 20억년 이상의 상당한 기간동안 대류하는 맨틀로부터 격리되어 있어야 하며 이러한 이유로 SCLM이 적합한 저장고로 생각되어 왔다. 또한 부화맨틀 특성이 지리적인 구분을 하고 있다는 점도 이러한 SCLM 기원을 지지한다. 하지만 SCLM의 직접적인 용융으로 현무암질 마그마를 만드는 것은 여러 가지로 곤란한 면이 있기 때문에 대류하는 맨틀로 떨어져나온 SCLM이 근원물질로 작용하는 것을 가정하는 경우가 대부분이다. 연약권 맨틀을 부화맨틀의 근원으로 주장하는 경우에도 이러한 SCLM의 재순환을 배제할 수 없다. 이 논문에서는 SCLM 또는 연약권에 산재하여 국지적인 연약권 전체를 영향을 준 경우 모두 SCLM이 근원인 것으로 간주하여 논의한다.

고생대말-중생대초에 충돌하여 현재는 연결되어 있는 NCB와 SCB가 서로 구분되는 진화사를 갖고 있음은 이미 잘 알려져 있다. NCB의 경우 시생대에 형성된 지각이 우세하며, 반면에 SCB의 경우는 시생대 지각은 매우 드물고 신원생대에 형성된 지각이 매우 넓게 분포한다. 지각의 형성과 연계되어 있을 것으로 보이는 SCLM의 진화사 역시 NCB와 SCB가 매우 다른 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 특징을 가질 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이러한 SCLM이 어떤 이유론든 용융되어 마그마를 만드는 과정에 참여하게 된다면 각각의 진화사에 따른 동위원소적 특성이 생성되는 마그마의 조성에 반영될 수 있을 것이다. 현재 각각 NCB와 SCB 내에 분포하는 북동 중국과 남동 중국의 신생대 현무암질 암석들의 동위원소적 차이 및 동일한 남북 방향의 지리적인 차이를 보이는 한국의 신생대 현무암질 암석들의 동위원소적 차이(예, Tu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Chung *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1995; Zou *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2005)는 이와 같은 NCB와 SCB의 지괴구분에 따른 SCLM의 진화사 차이가 반영된 것으로 보인다.

구분되는 맨틀 도메인과 한국의 대륙충돌대 위치

한반도의 신생대 현무암질 암석들이 지역적으로 구분되는 부화맨틀 단성분을 나타내는 현상은 중국의 신생대 현무암들의 변화경향과 일치한다. 이러한 대비관계는 중국 대륙충돌대의 동쪽 연장에 대한 만입모델 (Yin and Nie, 1993; Ree *et al.*, 1996)로는 이러한 맨틀 성분의 구분을 설명할 수 없다. 왜냐하면 이들의 모델에 따르면 제주도가 NCB에 속하며 현재보다 훨씬 더 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율을 가져야만 하기 때문이다. 그 보다는 제주도 현무암들이 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 것을 제주도 아래에 SCB와 같은 종류의 암권맨틀이 연장된다고 해석하는 것과 더 잘 부합한다. 즉, 한반도의 대륙지각 아래에 놓인 북쪽과 남쪽의 암권맨틀은 각각 NCB와 SCB 아래에 놓인 암권맨틀의 연장부라는 해석과 합치한다. 이러한 해석에 따르면 한국에서의 대륙붕합대는 남쪽의 제주도와 보다 북쪽에서 산출되는 다른 신생대 현무암들의 산출지 사이로 한반도를 가로질러 지나가야만 한다. 즉, 평택-아산 지역과 제주도 사이로 대륙충돌대가 지나감을 시사한다.

지금까지 주장된 한국의 대륙 충돌대 위치와 신생대 현무암질 암석으로 추정된 지괴경계는 서로 다르다. 즉, 현무암질 암석으로 추정한 맨틀 경계는 변성정도 와 연령 등으로 추정한 지각의 경계와 다르다. 지각암석의 경우 임진강대가 유력한 경계이지만(예, Li, 1993; Ree *et al.*, 1996) 맨틀경계의 경우는 이보다 훨씬 더 남쪽을 지나간다. 이러한 차이는 두 가지 가능성을 시사한다. 하나는 지각이 얇게 벗겨져 북쪽으로 올라탄 경우로, 실제의 판경계는 훨씬 남쪽을 지나가는 경우이다. 중국에서도 이와 같이 지각에서의 경계가 실제의 판경계와 다를 가능성이 제기되었으며(Li, 1994; Tang *et al.*, 2006), 한반도로도 마찬가지로의 연장이 제안되기도 하였다(Zhai *et al.*, 2007). 다른 하나는 현재의 실제 암권경계는 훨씬 북쪽에 있지만 현무암들을 형성시킨 맨틀은 떨어져나간 암권맨틀로부터 생성되었으며, 판의 움직임과 그 아래 연약권 맨틀의 상대적인 움직임 때문에 지표에서 나타나는 충돌경계와 현무암이 보이는 맨틀내 분포하는 물질의 경계가 상이하게 나타나는 경우이다. 이와 같은 모델들의 검증에는 지진파 토모그래피등과 같은 연구가 필요하다고 생각한다.

결 론

한국의 신생대 현무암들의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소

조성은 결핍맨틀과 부화성분들 사이의 혼합을 보여준다. 남쪽에 위치한 제주도의 현무암들은 상대적으로 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 단성분을 향한 변화를 보이며, 보다 북쪽에 위치한 한국의 다른 신생대 현무암들은 이 연구에서 보고한 평택-아산지역 현무암을 포함하여 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 성분을 갖는 부화맨틀과의 혼합을 나타내는 것으로 뚜렷이 구분된다. 제주도와 그 북쪽의 한국 신생대 현무암들이 서로 다른 부화맨틀 단성분을 나타냄과 더불어 이와 비슷하게 북동 중국과 남동중국의 신생대 현무암들에서도 유사한 부화맨틀 단성분의 차이가 발견되는 것은 한국 아래의 SCLM이 단순히 NCB 및 SCB의 측면 연장부임을 나타낸다. 중국의 대륙충돌대 위치와 관련한 만입모델은 SCB와 같은 종류의 SCLM 성분이 제주도 아래에서 나타나는 이러한 대비관계를 설명할 수 없다. 이 논문에서 보고한 평택-아산 지역의 현무암들은 Park *et al.*(2005)가 제안한 대로 한국의 대륙충돌대가 제주도와 더 북쪽의 한국 신생대 현무암 분포지 사이를 지나 한반도를 가로지른다는 모델에 합치하며, 이러한 대륙충돌 경계의 위치가 평택-아산지역보다 더 남쪽임을 시사한다.

이와 같이 충돌대 경계의 위치가 과거의 연구에서 주로 주장되던 임진강대의 위치와는 상당히 다른 것은 맨틀 경계가 지각의 경계와 다를 가능성을 시사한다. 즉, 임진강대보다 훨씬 더 남쪽을 지나가는 맨틀경계가 추정되는 이유는 첫째 지각이 얇게 벗겨져 북쪽으로 올라탄 경우로, 실제의 판경계는 훨씬 남쪽을 지나가는 경우, 두 번째는 현재의 암권경계는 훨씬 북쪽에 있지만 현무암들을 형성시킨 맨틀은 떨어져나간 암권 맨틀로부터 생성되어 현무암이 보이는 맨틀경계는 판의 움직임과 대류의 영향을 받아 지표의 지각경계와는 다른 위치를 보이는 것이다.

사 사

논문심사시 건설적인 의견제시로 원고의 질을 향상 시키는데 많은 도움을 주신 이승렬 편집위원과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 교신저자가 2006년도에 한국기초과학지원연구원에서 연구년을 보낼 수 있도록 지원한 2005년도 부경대학교 연구년 교수지원 사업에 의하여 연구되었다(PS-2005-031).

참고문헌

김규한, 2000, 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar 연대와 Nd-Sr 동위원소 조성. 지질학회지, 36, 313-324.

- 김규한, 長尾敏介, 장형숙, 各野浩史, 정정인, 2002, 백령도에 분포하는 알칼리 현무암과 맨틀 포획암의 Nd-Sr과 영속기체 동위원소 조성. *자원환경지질*, 35, 523-532.
- 김동학, 최위찬, 오인섭, 1979, 한국지질도 아산도폭, 자원개발연구소, 10p.
- 박준범, 박계현, 정창식, 1996, 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구. *암석학회지*, 5, 89-107.
- 신홍자, 길영우, 진명식, 이석훈, 2006, 아산, 평택 지역 상부맨틀 포획암의 암석학적 연구. *지질학회지*, 42, 95-113.
- Arakawa, Y., Saito, Y., and Amakawa, H., 2000, Crustal development of the Hida belt, Japan: Evidence from Nd-Sr isotopic and chemical characteristics of igneous and metamorphic rocks. *Tectonophysics*, 328, 183-204.
- Basu, A.R., Wang, J.W., Huang, W.K., Xie, G.H., and Tatsumoto, M., 1991, Major element, REE, and Pb, Nd, and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105, 149-169.
- Chang, E.Z., 1996, Collision orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 267-277.
- Choi, S.H., Jwa, Y.-J. and Lee, H.Y., 2001, Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: Evidence from mantle xenoliths. *Island Arc*, 10, 175-193.
- Choi, S.H. and Kwon, S.-T., Mukasa, S.B., and Sagong, H., 2005, Sr-Nd-Pb isotope and trace element systematics of mantle xenoliths from Late Cenozoic alkaline lavas, South Korea. *Chemical Geology*, 221, 40-64.
- Choi, S.H., Lee, J.I., Park, C.-H. and Moutte, J., 2002, Geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from Jeju Island, Korea. *Island Arc*, 11, 221-235.
- 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 between East Asia. *Chemical Geology*, 232, 134-151.
- Chung, S.L., 1999, Trace element and isotopic characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the east plate boundary between North and South China. *J. Geol.*, 107, 301-312.
- Chung, S.L., Jahn, B.M., Chen, S.J., Lee, T. and Chen, C.-H., 1995, Miocene basalts in northwestern Taiwan: Evidence for EM-type mantle sources in the continental lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 549-555.
- Chung, S.L., Sun, S.-S. and Crawford, A.J., 2001, Indian Ocean type convecting mantle underlies East Asia: A consequence of Gondwana break-up and reassembly? *Western Pacific Earth Sci.*, 1, 1-18.
- Chung, S.L., Sun, S.-s., Tu, K., Chen, C.-H. and Lee, C.Y., 1994, Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: Product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chem. Geol.*, 112, 1-20.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Constraining plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, 23, 353-356.
- Fan, Q.C. and Hooper, P.R., 1991, The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: Petrology and chemical composition. *J. Petrol.*, 32, 765-810.
- Flower, M.F.J., Zhang, M., Chen, C.Y., Tu, K. and Xie, G.H., 1992, Magmatism in the South China Basin, 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. *Chem. Geol.*, 97, 65-87.
- Hart, S.R., 1984, A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 309, 753-757.
- Hoang, N. and Flower, M.F.J., 1998, Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: Implications for the origin of a "diffuse igneous province". *J. Petrol.*, 39, 34-50.
- Hoang, N., Flower, M.F.J. and Carlson, R.W., 1996, Major, trace element, and isotopic compositions of Vietnamese basalts: Interaction of hydrous EMI-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 4329-4351.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Nagao, K. and Jang, S.K., 1999, Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. *Geochemical J.*, 33, 317-341.
- Li, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 2, 9-18.
- Li, Z.X., 1994, Collision between the north and south China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22, 739-742.
- Mukasa, S.B., Fisher, G.M. and Barr, S.M., 1996, The character of subcontinental mantle in Southeast Asia: Evidence from isotopic and elemental compositions of extension-related Cenozoic basalts, in Thailand. In: Hart, S.R. and Basu, A.R. (Eds.), *Earth Processes: Reading the Isotopic Codes*. AGU Geophys. Monogr., 95, 233-252.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.-s., 1989, Chemical geodynamics in a back-arc region around the Sea of Japan: Implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea and China. *J. Geophys. Res.*, 94, 4634-4654.
- Nakamura, E., McCulloch, M.T. and Campbell, I.H., 1990, Chemical geodynamics in the back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Ndisotopic compositions. *Tectonophysics*, 174, 207-233.
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- Park, K.H., Park, J.-B., Cheong, C.-S., and Oh, C.W., 2005, Sr, Nd and Pb Isotopic Systematics of the Cenozoic

- Basalts of the Korean Peninsula and Their Implications for the Permo-Triassic Continental Collision Boundary. *Gondwana Research*, 8, 529-538.
- Peng, Z.C., Zartman, R.E., Futa, K. and Chen, D.G., 1986, Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem. Geol.*, 59, 3-33.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in south Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Song, Y., Frey, F.A. and Zhi, X.C., 1990, Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chem. Geol.*, 85, 35-52.
- Tang, J., Zheng, Y.-F., Wu, Y.-B. and Gong, B., 2006, Zircon SHRIMP U-Pb dating, C and O isotopes for impure marbles from the Jiabei terrane in the Sulu orogen: implication for tectonic affinity. *Precam. Res.*, 144, 1-18.
- Tatsumoto, M., Basu, A.R., Huang, W., Wang, J. and Xie, G., 1992, Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China: enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113, 107-128.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y., 1991, Dupal anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 3697-3708.
- Tu, K., Flower, M.F.J., Carlson, R.W., Zhang, Z. and Xie, G.H., 1991, Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (south China): implications for a sub continental lithosphere Dupal source. *Geology*, 19, 567-569.
- Tu, K., Flower, M.F.J., Carlson, R.W., Xie, G.H., Chen, C.Y. and Zhang, M., 1992, Magmatism in the South China Basin, 1. Isotopic and trace element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chem. Geol.*, 97, 47-63.
- Xu, S., Okay, A.I., Ji, S., Sengor, A.M.C., Su, W., Liu, Y. and Jiang, L., 1992, Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256, 80-82.
- Xu, X., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L. and Zhou, X., 2003, Enrichment of upper mantle peridotite: petrological, trace element and isotopic evidence in xenoliths from SE China. *Chem. Geol.*, 198, 163-188.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhai, M., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q., and Fan, Q., 2007, Linking the Sulu UHP belt to the Korean peninsula: evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12, 388-403.
- Zhang, K.-J., 1997, North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270, 145-156.
- Zhang, M., Suddaby, P., Thompson, R.N., Thirlwall, M.F. and Menzies, M.A., 1995, Potassic volcanic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source and magma genesis. *J. Petrol.*, 36, 1275-1303.
- Zhou, P. and Mukasa, S.B., 1997, Nd-Sr-Pb isotopic, and major and trace-element geodynamics of Cenozoic lavas from the Khorat Plateau, Thailand: sources and petrogenesis. *Chem. Geol.*, 137, 175-193.
- Zhou, X.H. and Armstrong, R.L., 1982, Cenozoic volcanic rocks of eastern China - secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, 301-329.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571.
- Zou, H., Zindler, A., Xu, X. and Qi, Q., 2000, Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chem. Geol.*, 171, 33-47.

2008년 9월 9일 접수

2008년 9월 10일 심사개시

2008년 9월 19일 채택