

무주 지역 각섬암의 지구화학 및 Sm-Nd 동위원소 연구

이광식* · 정창식* · 박계현* · 장호완**

Geochemical and Sm-Nd Isotopic Study of Amphibolite from the Muju Area, Korea

Kwang-Sik Lee*, Chang-Sik Cheong*, Kye-Hun Park* and Ho-Wan Chang**

ABSTRACT : Geochemical and Sm-Nd isotopic results are reported for amphibolite of the Muju area, Ryeongnam massif. Major and trace element data analyzed indicate that the parental rock of the Muju amphibolite is tholeiitic basalt. The Sm-Nd amphibole-WR-plagioclase data define an isochron corresponding to 1766 ± 121 Ma (1σ) (MSWD=1.10) with an initial ratio of 0.51032 ± 15 . We interpret this age as a metamorphic age of the Muju amphibolite. Tectonic discrimination diagrams clearly fail when they are applied to the Muju amphibolite probably due to compositional variations resulting from crustal contamination and/or degrees of partial melting.

서 론

영남육괴 (소백산육괴)는 주로 선캠브리아기 편마암류로 구성되어 있으며, 중생대 (트라이아스기~จู라기) 화강암류에 의하여 관입을 받았고, 백악기 퇴적암에 의하여 피복 되어 있다. 영남육괴는 북서쪽에서 옥천대와 접하고 있으며 남동쪽에서 경상분지와 접하는데, 경기육괴 및 남령육괴와 함께 한반도의 기저를 이루고 있다. 최근 들어 많은 연구에서 중국 충돌대의 한반도 연장 가능성이 제시되었는데, 가능한 후보지역으로 임진강대와 옥천대가 거론되고 있다 (Yin, Nie, 1993; Chang, 1996; Ree *et al.*, 1996). 옥천대와 호남 압쇄대를 사이에 두고 접하고 있는 영남육괴는 연구자들에 따라 북중국지괴 또는 남중국지괴에 대비되어 왔는데 (김인수 등, 1995; Yin, Nie, 1993; Chang, 1996), 이는 이 지역의 화성활동사와 변성작용의 시기에 대한 자료가 부족함에도 그 원인이 있다. 최근 들어 박계현 (1996)은 영남육괴 무주 지역 대리암의 납 동위원소를 분석하여 약 20 억년의 변성연대를 얻었으며, 경기육괴 변성암의 납 동위원소 자료들도 이들과 같은 직선 상에 도시되는 점으로 보아 영남육괴와 경기육괴가 이

시기에 같은 육괴였을 가능성을 제시한 바 있다. 그 동안 영남육괴의 선캠브리아기 변성암에 대한 신뢰할 만한 연대측정 자료가 부족하였으나, 최근에 일부 화성기원 편마암과 중생대 화강암류에 대한 저어콘의 U-Pb 연대가 발표되어 영남육괴의 지각발달사 해석에 큰 진전이 있었다 (Turek, Kim, 1995, 1996; Kim, Turek, 1996). 영남육괴에는 경상북도 봉화지역과 전라북도 무주지역 등에 염기성 화성암인 각섬암이 분포하고 있지만 이들의 정치나 변성작용의 시기에 대한 연대측정 자료는 전무하다. 이 연구에서는 무주지역의 편마암과 대리암을 관입하여 분포하고 있는 각섬암의 Sm-Nd 동위원소 분석을 실시하였으며 아울러 주성분원소와 미량성분원소 분석도 실시하였다. 이러한 자료는 영남육괴의 변성작용 시기의 규명과 지각 발달을 연구하는데 도움이 될 것이다.

지질개요

연구지역은 1:50,000 무주도폭 (홍승호 등, 1980), 설천도폭 (윤석규, 박병권, 1968) 그리고 장기리도폭 (이대성, 남기상, 1969)의 일부가 포함되는 지역으로 행정구역상 전라북도 무주군 일대에 해당된다. 이 지역은 선캠브리아기 편마암이 기반암으로 넓게 분포하고 있으며 선캠브리아기 탄산염암인 대리암이 소규모로 협재되어 있다 (Fig. 1; 이대성, 남기상, 1969; 윤석규, 박병권, 1968; 홍승호

* 기초과학지원연구소 (Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-33, Korea)

** 서울대학교 지질학과 (Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

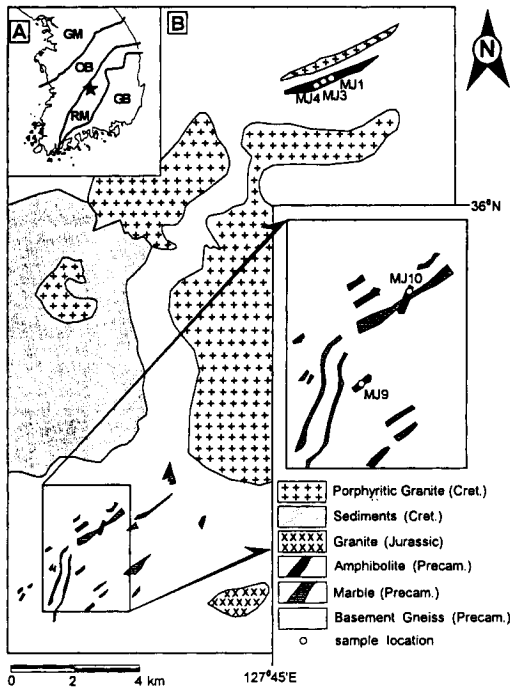


Fig. 1. A; Simplified geologic map of southern Korea. Star indicates the Muju area. GM; Gyeonggi massif, OB; Ogcheon belt, RM; Ryeongnam massif, GB; Gyeongsang basin. B; Geologic map of the Muju area (modified from Yun, Park, 1968; Lee, Nam, 1969; Hong *et al.*, 1980) and sample locations.

등, 1980). 편마암과 대리암은 각섬암, 주라기 화강암 및 백악기 화강반암에 의하여 관입되어 있다. 각섬암이 편마암과 대리암을 관입한 증거는 몇 군데 노두에서 잘 관찰되며, 이는 이 지역에 분포하는 각섬암이 화성기원암을 뚜렷이 한다. 이 지역에 분포하는 편마암은 호상흑운모 편마암, (반상변정)화강암질 편마암 및 미그마타이트질 편마암 등 다양한 산출 상태를 보여준다. 연구 지역 서쪽 중앙부에는 백악기 경상계 퇴적암이 넓게 산출된다.

연구 지역에 맥상으로 무리 지어 분포하는 각섬암은 서로 유사한 방향성을 보일 뿐만 아니라 대리암과 밀접히 관련되어 산출된다. 이는 과거 영남육괴의 일부 지역도 탄산염암이 퇴적될 수 있는 얇은 바다 환경의 시기가 있었음을 시사하며, 아울러 각섬암은 탄산염암의 퇴적과 유사한 시기에 정지되었을 가능성을 시사한다. 연구에 이용한 각섬암 시료들의 채취 지점을 Fig. 1에 나타내었으며 이 논문에서 무주 각섬암으로 부르기로 한다. 무주 각섬암은 주로 각섬석과 사장석으로 구성되어 있으며 granoblastic texture를 잘 보인다. 흑운모, 석영, 불투명광물

및 인회석이 소량 수반되며, 사장석은 흔히 견운모화 되었고 흑운모는 녹니석화 되었다.

분석방법

기초과학지원연구소의 XRF, ICP-AES 및 ICP-MS를 이용하여 무주 각섬암의 주성분 및 미량성분원소를 분석하였다. 미량성분원소 중 Zr과 Hf은 리튬메타보레이트 (LiBO₂)를 이용한 알칼리 용융법으로 전처리한 후 분석하였고 다른 미량성분원소는 혼합산 (HF : HNO₃ : HClO₄ = 3:1:1)으로 전처리한 후 분석하였다. Sm-Nd 동위원소 분석을 위하여 시료 약 100 mg을 혼합산으로 용해하였다. 양이온 교환수지 (Dowex AG 50W-X8, H⁺ form, 200~400#)를 이용하여 희토류 원소를 일차적으로 단체 분리한 후 HIBA 용액 (alpha-hydroxy-iso-butyric acid)을 이용하여 Sm과 Nd를 분리하였다. 동위원소 분석은 기초과학지원연구소의 열이온화 질량분석기 (VG Sector 54-30)로 수행하였다. ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 값은 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219로 동위원소 분별효과를 보정하면서 dynamic mode로 측정하였고, 그 오차는 평균표준오차의 2 배값으로 보고된다. Sm과 Nd의 농도는 ¹⁴⁹Sm과 ¹⁴⁵Nd spike를 이용한 동위원소 희석법으로 정량 하였다. 반복측정에 의한 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd의 오차는 1% 이내였다. 함께 측정된 La Jolla 표준시료의 평균값은 0.511849 (±4) (n=18, 2σ 표준오차)이다. 등시선의 통계학적 처리는 York (1969)에 따랐으며 연대계산에 사용된 ¹⁴⁷Sm의 붕괴상수는 6.54×10⁻¹²/yr이다. 분석시 Sm과 Nd의 배경값은 500 pg 이하였다.

결과 및 토의

암석화학

무주 각섬암 5개 시료의 주성분원소, 미량성분원소 및 희토류원소의 분석치를 Table 1에 나타내었다. 분석한 각섬암의 SiO₂ 함량은 49~51 wt%로 변화 폭이 매우 적으며 그 원암이 현무암질암에 해당된다. 화산암류 분류에 흔히 이용되는 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 그림에서 무주 각섬암은 현무암 영역에 속하며 비알칼리 계열에 도시된다 (Le Bas *et al.*, 1986; Fig. 2). 무주 각섬암은 AFM 변화도에서 Irvine, Baragar (1971)의 슬레이트 분화경향을 따른다 (Fig. 3). Nb/Y 비는 알칼리 지표로 흔히 이용되는데 (알칼리질 암석 > 1; Pearce, 1982), 무주 각섬암은 그 비가 0.14~0.67로 슬레이트질 현무암에 해당된다 (Table 1).

Table 1. Major and trace element data of the Muju amphibolite

Sample	MJ1	MJ3	MJ4	MJ9	MJ10
SiO ₂ (wt%)	50.96	51.05	49.02	49.66	49.30
TiO ₂	0.79	0.72	0.51	1.65	1.62
Al ₂ O ₃	14.81	14.45	14.30	14.52	16.35
Fe ₂ O ₃ *	10.53	10.37	9.48	11.62	10.90
MnO	0.15	0.18	0.16	0.18	0.16
MgO	8.71	8.34	11.48	9.06	8.05
CaO	9.02	12.18	11.11	9.46	10.98
Na ₂ O	2.56	2.07	0.96	1.91	2.38
K ₂ O	1.24	0.65	1.36	1.17	0.62
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.04	0.16	0.17
LOI	1.59	0.93	1.78	1.06	0.53
Total	100.41	100.99	100.20	100.45	101.04
Mg#	70.8	69.6	72.6	50.7	53.7
V (ppm)	214	209	146	133	147
Sr	250	182	112	329	430
Rb	47	21	73	63	17
Ba	156	78	91	115	99
Sc	45	54	33	26	30
Cr	420	354	543	368	351
Ni	113	86	284	185	111
Cu	131	68	64	38	59
Zr	26	22	16	102	87
Y	13	12	8	20	20
Nb	2.3	1.7	1.3	13.3	13.0
Hf	1.2	0.7	0.7	3.5	3.4
Ta	0.2	0.3	0.1	1.1	1.2
Pb	12.8	15.8	6.3	16.4	8.1
Th	0.5	0.4	0.3	1.3	0.7
U	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2
Nb/Y	0.18	0.14	0.17	0.67	0.65
La	2.93	2.17	1.50	9.42	9.89
Ce	7.45	5.76	3.95	21.31	22.87
Pr	1.13	0.89	0.62	3.00	3.19
Nd	5.47	4.56	3.02	14.14	14.95
Sm	1.80	1.61	1.08	4.01	4.19
Eu	0.74	0.60	0.51	1.53	1.61
Gd	2.22	2.06	1.42	4.39	4.54
Tb	0.38	0.37	0.24	0.69	0.69
Dy	2.60	2.56	1.60	4.25	4.13
Ho	0.53	0.50	0.33	0.79	0.78
Er	1.59	1.48	1.04	2.19	2.17
Tm	0.23	0.23	0.14	0.31	0.32
Yb	1.61	1.51	1.04	2.11	2.01
Lu	0.23	0.22	0.14	0.30	0.29
Eu/Eu*	1.13	1.01	1.26	1.11	1.12
(La/Yb) _N	1.23	0.97	0.97	3.01	3.32

Fe₂O₃*=total Fe as Fe₂O₃, Mg# (=100 Mg/(Mg+Fe²⁺)) are calculated assuming Fe³⁺/(Fe³⁺+Fe²⁺)=0.15.

한반도 다른 지역의 각섬암과 비교해보면, 영남육괴 북서부인 경상북도 봉화지역에서 선캄브리아기 원암층군을 관입하여 분포하고 있는 옥방 각섬암도 비알칼리 영역에

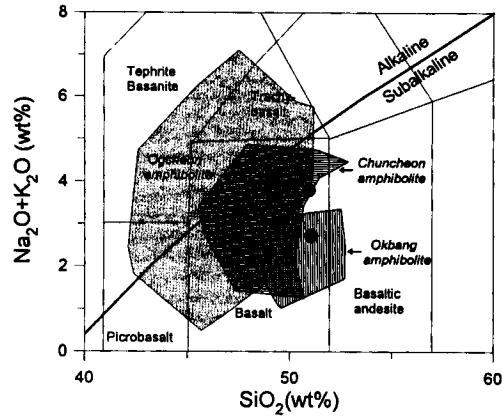


Fig. 2. The total alkali-silica diagram for the Muju amphibolite (Le Bas *et al.*, 1986). The boundary curve between alkaline and subalkaline fields is after Irvine, Baragar (1971). Dotted and hatched areas are the composition fields of amphibolites previously reported from the Gyeonggi massif (Kwon *et al.*, 1995), Ogcheon belt (Cluzel, 1992; Kwon and Lee, 1992; Lee and Chang, 1997) and Ryeongnam massif (Chang *et al.*, 1993).

도시되며 슬레이트 분화경향을 따른다 (Chang *et al.*, 1993; Fig. 2). 경기육괴의 춘천 각섬암도 비알칼리 계열과 슬레이트 분화경향을 따른다 (권성택 등, 1995; Fig. 2). 이와같이 옥천대 퇴적 이전에 영남육괴와 경기육괴에서 소규모의 대륙열개와 관련되어 일어났던 열기성 화성 활동 산물인 각섬암들의 화학적 특성이 서로 유사한 것은, 화성활동시의 지구조환경과 근원물질의 유사성을 시사하는 것이라 할 수 있다. 이와는 달리 옥천대에 분포하는 옥천 각섬암의 대부분은 원암이 변이질 (transitional)

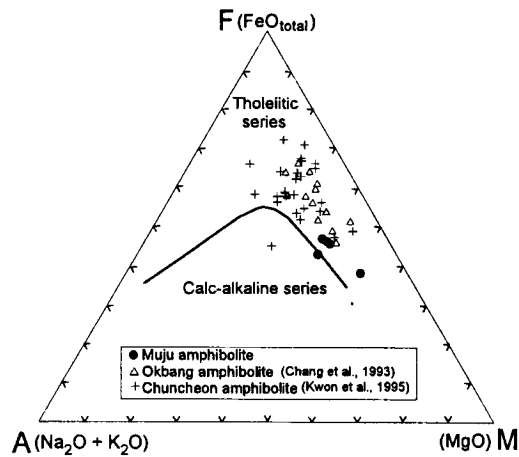


Fig. 3. Total alkali-FeO_{total}-MgO (AFM) diagram of Irvine, Baragar (1971) for the Muju amphibolite.

현무암에 해당된다 (Cluzel, 1992; 권성택, 이동호, 1992; Lee, Chang, 1997; Fig. 2).

MgO 함량은 5 시료 모두 8.1~11.5 wt%로 분화가 비교적 진행되지 않은 현무암 영역에 해당된다. 한 암체에서 채취한 3시료 (MJ1, 3, 4)는 Mg #가 69.6~72.6, Cr이 354~543 ppm 그리고 Ni이 86~284 ppm으로 Green (1980)의 초생 마그마 (primary magma)와 가까운 특성을 보이고 있다. 앞의 3시료 채취 지점에서 남서쪽으로 약 12~14 km 떨어진 지점의 각기 다른 암체에서 채취한 MJ9, 10은 Mg #가 50.7~53.7로 초생마그마보다 상당히 낮은 값을 보인다. 초생마그마의 특징을 보이는 시료들과 그렇지 않은 시료들 사이에 Cr과 Ni과 같은 호정적원소들 (compatible elements)은 함량이 유사하지만, Zr, Nb 그리고 Ce과 같은 친액상원소들 (incompatible elements)의 함량은 차가 뚜렷하다. 만일 이들 시료가 동일 마그마에서 파생되었다면, 이러한 화학적 특성은 분별작용보다는 부분용융에 의하여 만들어지는데 MJ9, 10시료보다 MJ1, 3, 4 시료가 더 많이 부분 용융을 받아 만들어진 것이다 (Hanson, 1978).

각섬암을 콘트라이트에 표준화시킨 희토류원소의 변화양상은 Fig. 4와 같다. 초생 마그마에 가까운 조성을 보이는 3시료는 LREE와 HREE의 부화정도가 유사하여 ($0.97 < [La/Yb]_N < 1.23$) 거의 수평에 가까운 변화 경향을 보인다. 이러한 평평한 희토류 패턴은 각섬암의 원암이 유래된 결핍원소의 특징을 반영하는 것으로 판단된다. 이들은 Eu 이상을 거의 보이지 않거나 또는 정 (+)이상을 뚜렷이 보인다 ($1.01 < Eu/Eu^* < 1.26$). 이러한 Eu 정이상은 사장석의 소량 집적과 관련이 있는 것으로 해석된다. 3시료들은 서로 준평행한 희토류 변화양상을 보여준다. MJ9와 MJ10은 LREE가 HREE보다 부화된 변화양상을 보이며 ($3.01 < [La/Yb]_N < 3.32$) 약한 Eu 정이상을 보인다 ($1.11 < [La/Yb]_N < 1.12$). 이러한 Eu 정이상, 높은 Al_2O_3

함량 (14.5~15.4 wt%) 및 높은 Sr 함량 (329~430 ppm)을 동시에 고려할 때, 이들 암석도 사장석 집적과 관련 있는 것으로 판단된다. 또한 MJ9와 MJ10은 서로 다른 암체에서 채취하였지만 희토류의 총합량과 변화 경향이 극히 유사하다. 이러한 희토류 패턴은 MJ9와 MJ10이 희토류 원소가 비교적 부화된 근원물질에서 유래되었을 가능성도 지시하지만 동일 마그마에서 MJ1, 3, 4 시료보다 훨씬 적은 부분용융을 받아 생성되었을 가능성도 있다.

지구조 환경

어떤 특정한 지구조환경에서 생성된 화성암들은 미량 성분원소가 (어떤 경우엔 주성분원소가) 독특한 특성을 나타내는 것으로 알려져 왔다. 선캠브리아기 화성암류에 이러한 기준을 적용하기 위해선 미량성분과 지구조환경과의 관계가 지질시대에 따라 변하지 않았다는 전제조건이 필요하다 (예, Wilson, 1989의 1~2장).

Pearce (1983)가 제시한 보통중앙해령현무암 (N-MORB)에 표준화한 거미그림 (spider diagram)에 무주 각섬암의 분석자료를 도시하면 Fig. 5와 같다. 초생마그마의 특성을 보이는 3시료 (MJ1, 3, 4)는 친석원소 (K에서 Th)를 제외한 모든 원소들이 N-MORB에 비하여 상대적으로 결핍된 특성을 보이고 있다. 그리고 나머지 2시료 (MJ9, 10)는 Y와 Yb를 제외한 대부분의 원소가 N-MORB에 비하여 다소 부화되었는데 이는 전형적인 판내부환경에서 생성된 현무암질암의 유형과 매우 유사하다. 일반적으로 판내부환경 (해양과 대륙 모두)에서 형성된 마그마는 MORB에 비하여 친액상원소 대부분이 부화되어 있기 때문에 흑 모양을 나타낸다 (Pearce, 1983). 초생마그마와 가까운 조성을 보이는 3시료는 약한 Nb 부 (-) 이상을 보일 뿐만 아니라 Th/Yb-Ta/Yb 그림에서 (Pearce, 1983; 생략) 지각물질에 의하여 오염을 받은 영역쪽으로 도시되는데, 이는 정치과정 중에 지각물질에 의해

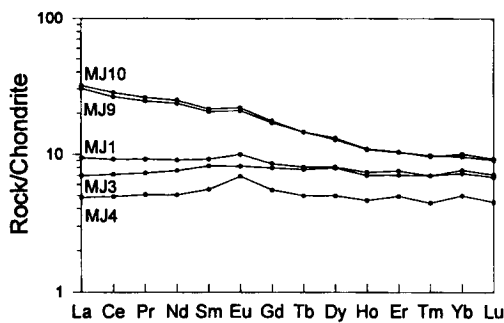


Fig. 4. Chondrite-normalized rare earth element pattern for the Muju amphibolite.

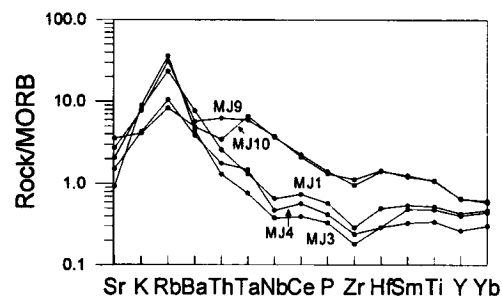


Fig. 5. MORB-normalized spider diagram for the Muju amphibolite (Pearce, 1982).

오염되었거나 또는 맨틀 교대작용 (mantle metasomatism)을 받은 부화된 맨틀암석권 (subcontinental lithosphere)에 의하여 영향을 받았음을 의미한다. 알칼리 원소들의 변성작용중의 유동성을 감안하더라도 Th과 같이 불유동 친석원소가 부화된 것은 지각물질에 의한 오염을 지시할 가능성이 크다.

Pearce (1982)의 Nb/Y-Ti/Y 분별도에서 초생마그마의 특성을 보이는 3시료들은 MORB 또는 화산호 현무암 영역에 도시되나 다른 암체에서 채취한 나머지 2시료는 판내부 현무암 영역에 도시된다 (Fig. 6A). Ti-Zr-Y 분별도에서도 화산호 슬레이트 영역에 도시되는 3시료와 판내부 현무암 영역에 도시되는 2시료로 뚜렷이 구분된다 (Pearce, Cann, 1973; Fig. 6B). Zr-Nb-Y 분별도에서도

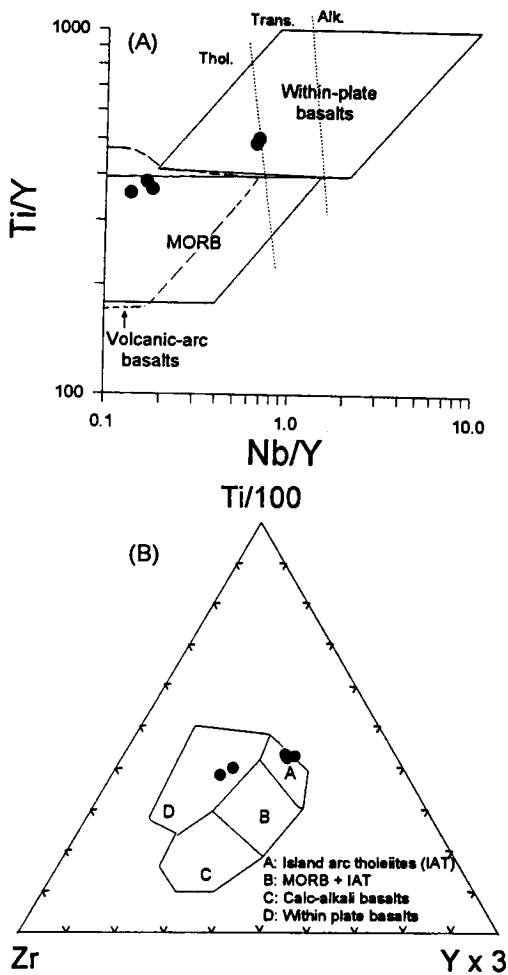


Fig. 6. A; Ti/Y vs Nb/Y diagram (Pearce, 1982) and B; Zr-Ti-Y diagram (Pearce, Cann, 1973) for the Muju amphibolite.

N-MORB 영역에 도시되는 3시료와 판내부 슬레이트 영역에 도시되는 2시료로 뚜렷이 구분된다 (Meschede, 1986; 생략).

연구지역은 동서와 남북으로 거리가 각각 15 km 이내의 좁은 지역이다. 그런데 이렇게 좁은 연구지역 내에서 산출되는 각섬암들의 지구조환경이 두 개로 뚜렷이 구분되는 것은 특이한 현상이다. 화학적 특성이 다른 두 종류 암체들이 동 시기에 생성되었다는 결정적인 증거는 없다. 하지만 좁은 지역에서 같은 방향성을 보이며 대리암과 밀접히 관련하여 산출되는 점과 Sm-Nd 동위원소 자료들이 같은 기울기를 갖는 선상에 배열되는 점을 볼 때, 이들은 유사한 시기에 동원마그마에서 유래하였을 가능성이 있다. 이렇게 좁은 지역에서, 산출상태와 동위원소 초기치가 유사하지만 생성환경이 상이한 암석이 생성되었다고 추론하는 것은 매우 어렵다. 이러한 원인은 근원물질의 불균질성이나 부분용융의 정도 차 또는 대륙물질에 의한 오염에서 파생된 화학조성의 차이에서 반영된 것으로 생각할 수 있다. 무주 각섬암의 경우 화학조성만 가지고 염기성암의 생성환경을 구분하는 것에 다소 문제가 있을 수 있음을 나타내는 예라 할 수 있다. 근원물질의 불균질성 등에 의하여 화산암의 지구조환경을 구분하기가 어려운 예들이 여러 학자들에 의하여 보고되고 있다. 예로서 Marsh (1987)와 Duncan (1987)은 남아프리카에 넓게 분포하는 대륙현무암의 화학조성을 가지고 생성환경을 구분할 때 다양한 생성환경에 도시됨을 보고한바 있다. 그리고 Myers, Breitkopf (1989)는 세계의 여러 지역에서 생성환경이 분명한 화산암의 화학조성을 가지고 이런 분류를 할 때 맨틀의 불균질성, 맨틀 교대작용 또는 지각물질에 의한 오염 등에서 파생되는 화학조성의 변화에 의하여 실제 생성환경과는 전혀 다른 영역에 도시됨을 보고한바 있다.

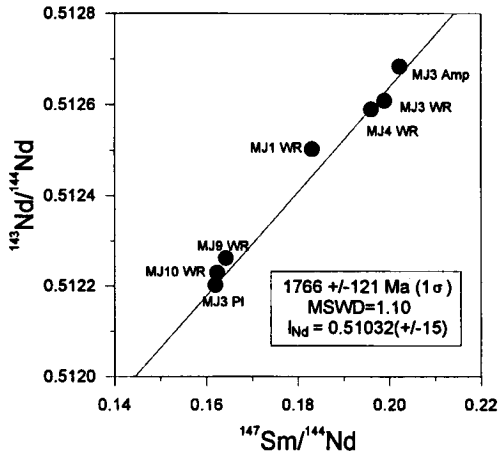
Sm-Nd 연대 측정

각섬암 전암과 광물의 Sm-Nd 분석자료를 Table 2에 나타내었고 Fig. 7에 도시하였다. 초생마그마에 가까운 특성을 보이는 전암 3 시료 (MJ1, 3, 4)의 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd의 비는 0.183~0.196으로 매우 좁은 범위를 보일 뿐만 아니라 분산되기 때문에 등시선을 정의하기가 어렵다. 이 중 MJ3에서 각섬석과 사장석을 분리하여 분석한 결과 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd의 비는 0.162~0.202로 전암만의 경우보다 변화 폭이 약 3배 더 크다. MJ3 전암 시료와 2 개의 광물 시료는 1766±121 Ma (1σ) (MSWD=1.10)의 등시선을 형성하며, 초생치는 0.51032±15이다. 이 연대는 최초 분출

Table 2. Sm-Nd isotope data of the Muju amphibolite

Sample	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma^*$	ϵ_{Nd} (1766 Ma)
MJ1 WR	1.93	6.39	0.1831	0.512503	6	0.5
MJ3 WR	1.80	5.47	0.1989	0.512609	10	-1.1
MJ4 WR	1.17	3.61	0.1960	0.512590	26	-0.8
MJ9 WR	3.37	12.42	0.1642	0.512262	8	0.0
MJ10 WR	3.94	14.67	0.1623	0.512230	15	-0.2
MJ3 Amp	2.19	6.55	0.2022	0.512684	8	
MJ3 Pl	0.19	0.71	0.1619	0.512202	15	

WR; whole-rock, Amp; amphibole, Pl; plagioclase

* least significant digit and $\pm 2\sigma$ mean.**Fig. 7.** $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ isochron plot of the Muju amphibolite.

되었던 현무암으로부터 변성작용에 의해 각섬석과 사장석이 만들어진 시기로 해석된다. 즉 현무암에서 각섬암을 형성시킨 변성연대를 지시한다. 다른 전암들의 분석 자료들도 이 등시선 \pm 위에 놓이는 점으로 보아 관입 혹은 분출의 시기와 변성작용의 시기 사이에 큰 시간차가 없었다는 추론이 가능하다. MJ9, 10도 이 등시선에 매우 가까이 도시되지만 MJ1, 3, 4와 동일암체에서 채취한 시료가 아니기 때문에 정치시기와 동위원소 초기치가 같았다고 단정하기 어렵다. 또한 지구조 그림에서 MJ1, 3, 4 시료와 다른 영역에 도시될 정도로 화학 조성상 상당히 큰 차이를 보이기 때문에 위의 우려가 더욱 커진다. 하지만 전암의 Sm-Nd 분석 자료를 고려할 때 전암 모두가 같은 시기에 생성되었다 하더라도 동위원소적으로 불균질했을 가능성이 매우 높다.

이 연대를 이용하여 계산한 각섬암 5 시료의 ϵ_{Nd} (T) 값은 $-1.1 \sim +0.5$ 로 변화 폭이 적고 CHUR와 매우 유사한 값을 보인다. 이는 각섬암의 원암이 CHUR와 유사한 특

질을 갖는 부화된 맨틀에서 유래하였거나 또는 결핍맨틀에서 유래한 마그마가 상승도중 지각물질에 의해 오염되었음을 의미한다. 피관입암이 고기 편마암이고 Nb 부이상과 같은 지각물질에 오염되었음을 지시하는 몇 가지 오염인자들을 고려할 때 후자의 가능성이 더 크다.

연구지역 내에서 대리암 (박계현, 1996)을 제외한 다른 암석들에 대한 직접적인 연대측정은 이 연구 외에는 시도된 바 없지만 영남육괴 전반에 걸쳐 많은 연대측정 자료들이 보고되었다. 분천화강편마암의 $2,107 \pm 3$ Ma Rb-Sr 전암연대 (주승환, 김성재, 1985)와 $1,920 \pm 56$ Ma Pb-Pb 연대 (박계현 등, 1993), 단양과 무주 일대 편마암류의 $1,950 \sim 2,390$ Ma Rb-Sr 전암 연대 (주승환, 김성재, 1986), 옥방 각섬암의 $2,007$ Ma K-Ar 각섬석 연대 (박희인 등, 1988), 하동-산청 회장암질암의 $1,678 \pm 90$ Ma Sm-Nd 광물연대 (Kwon, Jeong, 1990), 내덕리 화강암의 $1,825 \pm 86$ Ma Pb-Pb 연대 (박계현 등, 1993), 내덕리 및 농거리 화강암의 $1642 \sim 1802$ Ma K-Ar 백운모 연령 (윤현수, 1991), 단양 천동리 지역 화강암질 편마암의 $2,160 \pm 150$ Ma Pb-Pb 연대 (권성택 등, 1995), 무주 지역 대리암의 $1,990 \pm 80$ Ma Pb-Pb 연대 (박계현, 1996) 그리고 구례-하동간에 분포하는 화성기원 편마암의 $1,890 \sim 2,120$ Ma U-Pb 저어콘 연대 (Turek, Kim, 1996) 등을 함께 고려할 때, 영남육괴에서는 원생대 초인 20~21 억년과 17~18 억년에 광역변성작용이 있었으며 이와 관련된 화강암류의 관입이 있었다. 이 연구에서 얻은 무주 각섬암의 $1,766 \pm 121$ Ma Sm-Nd 광물 연대는 17~18 억년에 영남육괴에 있었던 변성작용시에, 원암인 현무암이 각섬암화된 변성연대로 해석된다.

결론

무주 지역에 암맥상으로 무리 지어 산출되는 무주 각섬암은 현무암 영역에 속하며 솔레아이트 분화경향을 따르

는데, 화학조성에 의하여 초생마그마와 매우 유사한 것보다 이보다 친액상원소들이 부화된 것으로 분류된다. 초생마그마와 가까운 조성을 보이는 무주 각섬암의 전암과 광물의 Sm-Nd 동위원소 분석을 실시하여 얻은 $1,766 \pm 121$ Ma 광물연대는 각섬암의 변성작용의 시기를 나타내는 것으로 해석된다. 각섬암 전암의 Sm-Nd 동위원소 자료도 이 등시선 가까이 도시되는 점으로 보아 각섬암 원암의 정치시기와 변성작용시기 사이에는 큰 연대 차가 없는 것으로 판단된다. 화학조성을 이용하여 이들 각섬암의 생성 환경을 분류한 결과 두 개의 서로 다른 영역, 즉 판내부 현무암 영역과 화산호 현무암 영역으로 뚜렷이 구분된다. 이는 각섬암의 원암이 정치되면서 지각물질에 의한 오염을 받았거나 그리고/또는 부분용융 정도의 차이에서 파생되는 화학조성의 다양성 때문에 나타나는 현상으로 해석된다.

사 사

이 연구는 1997년도 교육부 기초과학 학술 연구 조성비 (BSRI-97-5404)와 한국과학재단 후원 전라광물자원연구센터 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사한다. 야외조사에 도움을 준 유병욱 석사, 원소분석에 도움을 준 최만식 석사, 신행선 석사 그리고 박찬수 박사께 깊이 감사드린다.

참고문헌

- 권성택, 이동호 (1992) 보은 지역의 옥천 변성염기성암에 대한 암석 - 지구화학적 연구. 암석학회지, v. 1, p. 104-123.
- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영 (1995) 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, v. 4, p. 144-152.
- 권성택, 조문섭, 전은영, 이승렬, 이진한 (1995) 춘천 각섬암의 지구화학과 기원: (I) 주성분원소. 암석학회지, v. 4, p. 20-30.
- 김인수, 민경덕, 전희영 (1995) 문경지역 대동누층군에 대한 고지자기 연구 (II): 지구조적, 층서적 의의. 지질학회지, v. 31, p. 382-392.
- 박계현 (1996) 무주지역 대리암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, v. 5, p. 84-88.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완 (1993) 태백산지역의 고기화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질학회지, v. 29, p. 387-395.
- 박희인, 장호완, 진명식 (1988) 태백산지역내 광상의 생성연령. 광산지질, v. 21, p. 57-67.
- 윤석규, 박병권 (1968) 한국지질도 1: 50,000 설천도폭. 국립지질조사소.
- 윤현수 (1991) 상동지역 선캄브리아 화강암류의 K-Ar 백운모 연령측정. 광산지질, v. 24, p. 21-25.
- 이대성, 남기상 (1969) 한국지질도 1: 50,000 장기리도폭. 국립지질조사소.
- 주승환, 김성재 (1985) Rb/Sr 법에 의한 영남육괴 연대측정 연구 (I). 연구보고서 KR-85-24, 7-40, 한국동력자원연구소.
- 주승환, 김성재 (1986) 영남육괴 Rb-Sr 연대 측정 연구 (II). 연구보고서 KR-86-7, 7-33, 한국동력자원연구소.
- 홍승호, 이병주, 김원영 (1980) 한국지질도 1: 50,000 무주도폭. 자원개발연구소.
- Chang, E.Z. (1996) Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. J. SE. Asian Earth Sci., v. 13, 267-277.
- Chang, H.W., Lee, D.W. and Park, K.H. (1993) Magmatism and metamorphism of the Proterozoic in the northeastern part of Korea: Petrogenic and geochemical characteristics of the Okbang amphibolites. J. Korean Inst. Geol., v. 26, 489-498.
- Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): intracontinental rift-related volcanic activity. J. SE. Asian Earth Sci., v. 7, p. 195-209.
- Duncan, A.R. (1987) The Karoo igneous province-A problem area for inferring tectonic setting from basalt geochemistry. J. Volcano. Geother. Res., v. 32, p. 13-34.
- Green, T.H. (1980) Island arc and continent-building magmatism: a review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. Tectonophysics, v. 63, p. 367-385.
- Hanson, G.N. (1978) The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth Planet. Sci. Lett., v. 38, p. 26-43.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., p. 8, v. 523-548.
- Kim, C.B. and Turek, A. (1996) Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. Geochem. J., v. 30, p. 323-338.
- Kwon, S.T. and Jeong, J.G. (1990) Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong-Sanchung anorthositic rocks in Korea: Implication for their origin and for the Precambrian tectonics. J. Geol. Soc. Korea., v. 26, 341-349.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J. Petrol., v. 27, p. 745-750.
- Lee, K.S. and Chang, H.W. (1997) Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic systematics of the Ogcheon amphibolites from the central Ogcheon Belt, Korea: Implication for the source heterogeneity. Geochem. J., v. 31, p. 223-243.
- Marsh, J.S. (1987) Basalt geochemistry and tectonic discrimination within continental flood basalt provinces. J. Volcano. Geother. Res., v. 32, p. 35-49.
- Meschede, M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chem. Geol., v. 56, p. 207-218.
- Myers, R.E. and Breitkopf, J.H. (1989) Basalt geochemistry and tectonic settings: A new approach to relate tectonic and magmatic processes. Lithos, v. 23,

- p. 53-62.
- Pearce, J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R. S. (ed.), *Andesites*, Wiley, Chichester, p. 525-548.
- Pearce, J.A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (eds), *Continental basalts and mantle xenoliths*, Shiva, p. 230-249.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 19, p. 290-300.
- 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*, v. 24, p. 1071-1074.
- Turek, A. and Kim, C.B. (1995) U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryongnam massif, Korea. *Geochem. J.*, v. 29, p. 243-258.
- Turek, A. and Kim, C.B. (1996) U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. J.*, v. 30, p. 231-249.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman Ltd., London, 466p.
- 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*, v. 12, p. 801-813.
- York, D. (1969) Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 5, p. 320-324.

1997년 6월 19일 원고접수