

옥천 각섬암의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구

이광식* · 장호완**

Sr-Nd-Pb Isotopic Study of the Ogcheon Amphibolites

Kwang-Sik Lee* and Ho-Wan Chang**

ABSTRACT : Sr-Nd-Pb isotopic results are reported for the Ogcheon amphibolites from the central part of the Ogcheon Belt. Rb-Sr and Pb-Pb whole rock isotope data plot greatly scattered in the isochron diagrams due to later alteration or metamorphism, whereas the Sm-Nd whole rock isotope data define a linear array with an age of 1270 ± 220 Ma (1σ). Considering several geochemical features of the amphibolites, the 1270 Ma linear array may be not a true but an apparent mixing isochron due to source heterogeneity.

서 언

옥천대는 선캠브리아 기반암인 경기육괴와 영남육괴(소백산육괴) 사이에 남서-북동 방향으로 대상 분포하고 있다. 옥천층군의 변성퇴적암류는 퇴적 후의 심한 변형 및 변성작용으로 인하여 화석의 발견이 용이치 않아서 퇴적 시기를 연구하는데 큰 장애가 되어왔다. 이로 인하여 한반도 지체구조에 대단히 중요한 위치를 차지하고 있는 옥천층군의 지사학적 위치를 정하는데 커다란 결림들이 되어왔다. 옥천층군을 캄브로-오도비스기의 조선계 대석회암층군과 동일시기에 형성된 퇴적암으로 보는 연구자들이 있는가 하면 (손치무, 1970; 이대성, 1974; Cluzel *et al.*, 1990), 원생대 말에 형성된 퇴적물로 보는 연구자들도 있다 (김옥준, 1968, 1970; Reedman, Fletcher, 1976; 김옥준, 윤정수, 1980).

이 옥천대 중부에는 옥천층군 변성퇴적암의 남동부 경계부를 따라 변성염기성암인 각섬암이 분포하고 있다. 이들 변성퇴적암을 관입하고 있는 각섬암의 절대연령 측정 은 변성퇴적암의 퇴적시기에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다는 점에서 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다. 그동안 여러 연구자들이 K-Ar, Ar-Ar 및 Sm-Nd 계

를 이용하여 각섬암의 절대연령을 측정하였다 (이민성, 1988; 권성택, 藍晶瑩, 1991; Kwon *et al.*, 1994; 민경원 외, 1995). 그러나 주변 화강암류에 의한 열변성작용의 시기 혹은 초기 변성작용의 시기 등으로 생각되는 연대를 얻었을 뿐 아직까지 실제 관입연대로 믿어지는 연대를 얻지 못하고 있다.

이 연구는 옥천대에 분포하는 화성기원 각섬암의 암석학 및 암석성인적 연구의 일부로서, 각섬암 전암에 대해 Rb-Sr, Sm-Nd 및 Pb-Pb 동위원소 분석을 실시하였다. 아울러 이 연구에서 얻어진 연구 결과를 그동안 발표되었던 옥천층군의 연대측정 자료와 비교 고찰하였다.

일반지질

옥천층군 내에 분포하는 각섬암의 분포지는 북동에서 남서쪽으로 가면서 크게 3개 지역 (충주-황강리, 문경-가은, 옥천-보은)으로 구분 된다 (Fig. 1). 그동안 각섬암은 옥천층군의 서창리층, 창리층, 상내리층, 계명산층, 향산리 돌로마이트층 및 문주리층과 캄브로-오도비스기의 조선계 석회암층 내에만 한정되어 분포하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 최근 문경-가은 지역에서 각섬암이 황강리층의 일부로 생각되는 함력천매암절암인 백화산층을 관입하여 분포하고 있음이 확인된 바 있다 (Lee, Chang, 투고중). 옥천 각섬암은 입자의 크기에 따라서 세립질과 조립질로 나눌 수 있는데 이들의 분포 지역은 곳에 따라 구

* 기초과학연구원 (Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea)

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

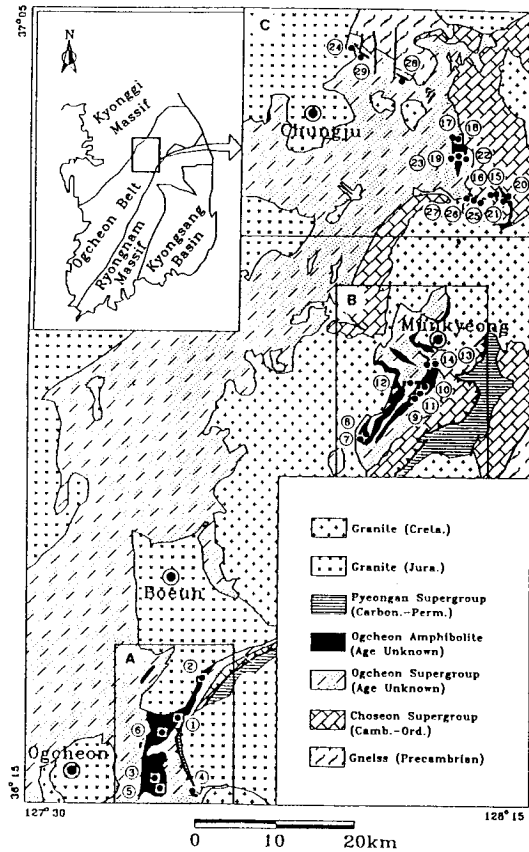


Fig. 1. A simplified geologic map of the central Ogcheon Belt and sample locations for Sm-Nd isotope data. A, Ogcheon-Boeun area; B, Munbyeong-Gaeun area; C, Chungju-Hwanggangri area.

분이 되기도 하나, 곳에 따라서는 경계가 없이 서로 혼재되어 있기도 하다. 또한 조직에 의하여 괴상인 것과 편리가 뚜렷한 것으로 나뉘어 진다. 옥천층군 도처에서 관찰되는 각섬암의 관입구조, 각섬암 내의 변성퇴적물의 포획물, 녹염석-각섬석 등으로 구성된 행인조직이 도처의 각섬암에서 관찰되는 점 그리고 화성암의 특징을 보여주는 화학분석자료 (Lee, Chang, 투고중; 미발표)와 동위원소 분석 자료 등을 함께 고려할 때, 옥천층군에 분포하는 각섬암은 원암인 현무암질암이 관입 혹은 분출하여 정지된 화성기원 암석이 분명하다.

시료 및 실험 방법

각섬암의 동위원소 분석을 위하여 3개 분포 지역에서 변질을 별로 받지 않은 세립질과 조립질 시료들을 골고루 채취하였다. 채취한 시료들의 원소 분석 결과에 의하면

Table 1. Sample locations.

Sample	National Grid (lat./long.)	Map Sheet (1 : 50,000)
Ogcheon-Boeun area		
OB12	317.5/266.3	Boeun
OB23	321.3/269.2	Chongsan
OB25	321.8/269.6	Chongsan
OB33	310.1/262.2	Ogcheon
OB35	309.8/262.6	Ogcheon
OB48	310.5/261.0	Ogcheon
OB64	308.9/266.1	Ogcheon
OB65	309.1/262.7	Ogcheon
OB66	312.1/259.6	Ogcheon
OB71	315.5/263.6	Boeun
Munbyeong-Gaeun area		
MG1	350.0/110.1	Yongyuri
MG4	350.5/109.8	Yongyuri
MG6	352.0/112.3	Hamchang
MG11	353.4/116.8	Munbyeong
MG24	353.9/116.7	Munbyeong
MG26	354.9/116.8	Munbyeong
MG28	354.4/116.7	Munbyeong
MG29	354.1/116.7	Munbyeong
MG30	356.0/115.0	Munbyeong
MG35	357.9/118.6	Munbyeong
MG44	357.5/117.9	Munbyeong
MG50	358.5/114.4	Munbyeong
MG59	355.8/116.9	Munbyeong
Chungju-Hwanggangri area		
CH3	377.3/127.5	Hwanggangri
CH7	377.4/127.3	Hwanggangri
CH12a	383.6/121.7	Hwanggangri
CH12b	383.6/121.7	Hwanggangri
CH14b	381.4/122.6	Hwanggangri
CH16	381.5/122.1	Hwanggangri
CH18	377.7/128.3	Hwanggangri
CH19	377.6/128.2	Hwanggangri
CH21	377.5/128.2	Hwanggangri
CH23	381.3/122.8	Hwanggangri
CH39	381.5/122.0	Hwanggangri
CH50	393.9/286.4	Moggye
CH59	376.1/124.8	Hwanggangri
CH60a	377.9/123.3	Hwanggangri
CH60b	377.9/123.2	Hwanggangri
CH72	390.1/114.9	Jecheon
CH77	393.6/288.0	Moggye

대부분의 시료들은 변이질 현무암에 해당되고 일부 시료들이 쉘레아이트질 현무암에 해당된다 (Lee, Chang, 투고중; 미발표). 동위원소 분석에 이용한 시료들의 자세한 채취 위치는 Table 1과 같다.

Sr, Nd, Pb 동위원소비 측정을 위하여 시료 약 100 mg 과 혼합산 (HF : HNO₃ : HClO₄ = 3 : 1 : 1) 3~4 ml를 테

Table 2. Sm-Nd isotopic data for the Ogcheon amphibolites.

Sample	Sm (ppm)	Nd (ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (1270)	ε _{Nd} (700)	ε _{Nd} (470)
1	OB12	6.87	0.1338	0.512549	8	8.5	3.9	2.0
2	OB25	9.46	0.1351	0.512497	7	7.3	2.8	0.9
3	OB33	6.18	0.1482	0.512566	4	6.5	2.9	1.5
4	OB64	4.66	0.1478	0.512554	6	6.3	2.7	1.3
5	OB65	6.49	0.1508	0.512570	6	6.2	2.8	1.4
6	OB71	6.97	0.1412	0.512548	5	7.3	3.2	1.6
7	MG1	2.94	0.1582	0.512710	5	7.7	4.9	3.7
8	MG4	2.97	0.1560	0.512707	5	8.0	5.0	3.8
9	MG11	5.82	0.1396	0.512574	7	8.1	3.9	2.2
10	MG28	6.95	0.1371	0.512504	4	8.0	3.6	1.8
11	MG29	6.92	0.1374	0.512559	11	8.1	3.8	2.0
12	MG30	9.46	0.1317	0.512461	11	7.1	2.4	0.5
13	MG35	2.69	0.1603	0.512682	7	6.8	4.1	3.0
14	MG44	8.24	0.1301	0.512516	8	8.5	3.6	1.6
15	CH3	7.90	0.1505	0.512522	7	5.3	1.9	0.5
16	CH7	7.85	0.1461	0.512537	8	6.3	2.6	1.1
17	CH12a	16.16	0.1391	0.512523	7	7.2	2.9	1.2
18	CH12b	8.93	0.1416	0.512543	9	7.1	3.1	1.5
19	CH14b	7.80	0.1363	0.512461	8	6.4	2.0	0.2
20	CH18	4.59	0.1582	0.512561	6	4.8	1.9	0.8
21	CH21	6.53	0.1482	0.512539	3	6.2	2.5	1.1
22	CH23	5.63	0.1392	0.512536	8	7.4	3.2	1.5
23	CH39	12.79	0.1342	0.512523	8	8.0	3.4	1.5
24	CH50	5.30	0.1585	0.512603	9	5.5	2.7	1.6
25	CH59	3.97	0.1478	0.512526	7	5.8	2.2	0.8
26	CH60a	5.46	0.1372	0.512455	18	6.1	1.8	0.0
27	CH60b	6.11	0.1475	0.512519	8	5.7	2.1	0.6
28	CH72	7.06	0.1459	0.512526	6	6.1	2.4	0.9
29	CH77	2.94	0.1685	0.512658	6	5.0	2.9	2.1

프론 바이알에 넣고 가열판 위에서 시료를 용해시켰다. 용해된 시료의 매질을 2.5 N과 6 N HCl로 매질을 바꿔 양이온 교환수지 (Dowex AG 50W-X8, H⁺ form, 200~400#)를 이용하여 Pb, Rb, Sr, REE를 포함하는 부분들을 일차적으로 단계분리하였다. 분리된 REE로부터 HIBA (α-hydroxy-isobutyric acid, (CH₃)₂C(OH)CO₂H)를 이용하여 Sm과 Nd를 분리하였다 (Makishima *et al.*, 1991). 한편 Pb는 1 N HBr, 6 N HCl과 음이온 교환수지 (Dowex AG 1X8, 200~400#)를 이용하여 Pb 포함 부분으로부터 다시 분리하였다. Sm, Nd, Rb, Sr의 함량은 ¹⁴⁹Sm, ¹⁴⁵Nd, ⁸⁷Rb, ⁸⁴Sr 스파이크 용액을 이용한 동위원소 희석법으로 구하였다. 동위원소분석은 기초과학연구원 연구소의 열이온화 질량분석기 (VG Sector 54-30)로 수행하였다. 측정된 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd와 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 값은 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219와 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194로 각각 동위원소 분별효과를 보정하였으며, 그 오차는 평균표준오차의 2배값으로 보고하였다. 이 시료들을 분석할 때 함께 분석한 La Jolla Nd의 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 평균값은 0.511845±4 (2σ) 이다. 동일 시료의 재분석을 통하여 추정된 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr와 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd의 오차는 각각

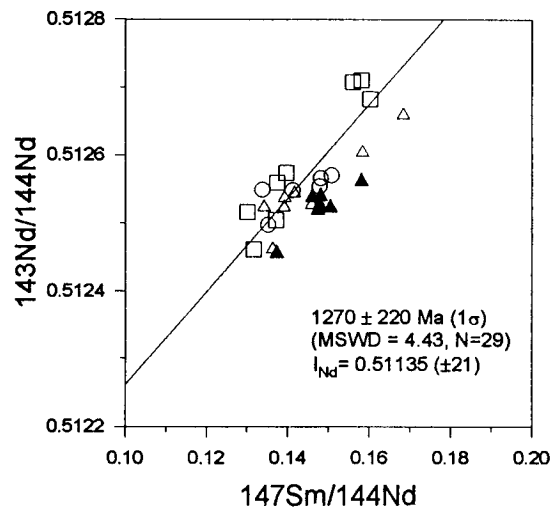


Fig. 2. Sm-Nd plot for the Ogcheon amphibolites, Circle, Ogcheon-Boeun area; square, Munbyeong-Gaeun area; triangle, Chungju-Hwanggangri area (open, amphibolites in the Seochangri Formation; closed, amphibolites in the Choseon Supergroup).

Table 3. Pb-Pb and Rb-Sr isotope data the Ogcheon amphibolites.

Sample	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ
OB12	19.109	15.665	39.516	12.1	398.8	0.0878	0.705094	6
OB23	18.792	15.623	39.060	-	-	-	-	-
OB25	19.371	15.788	39.564	18.8	554.4	0.0984	0.712012	6
OB33	-	-	-	1.2	112.3	0.0319	0.706331	5
OB35	19.380	15.639	38.517	-	-	-	-	-
OB48	18.966	15.598	39.852	-	-	-	-	-
OB64	19.114	15.702	39.411	2.8	426.6	0.0191	0.707129	9
OB65	18.636	15.651	39.053	3.6	117.5	0.0876	0.712399	4
OB66	18.225	15.580	28.248	-	-	-	-	-
OB71	18.706	15.660	38.659	17.8	441.8	0.1167	0.708652	12
MG1	18.383	15.649	38.993	16.8	222.6	0.2190	0.710375	5
MG4	18.415	15.662	38.949	19.4	345.1	0.1627	0.709473	9
MG6	18.603	15.677	39.212	13.9	734.4	0.0547	0.709499	8
MG11	18.731	15.746	39.363	29.4	320.7	0.2657	0.713017	13
MG24	18.870	15.720	39.670	4.6	289.9	0.0461	0.713326	8
MG26	18.554	15.680	39.061	37.4	905.3	0.1195	0.713413	7
MG28	18.703	15.721	39.334	8.2	576.3	0.0411	0.709953	6
MG29	-	-	-	1.1	277.4	0.0119	0.723126	5
MG30	-	-	-	32.7	288.1	0.3290	0.712272	9
MG35	18.814	15.738	39.173	17.0	340.2	0.1449	0.707086	5
MG44	19.187	15.680	39.641	21.3	503.0	0.1225	0.706492	7
MG50	8.858	15.651	39.091	17.3	488.4	0.1025	0.713191	7
MG59	18.465	15.568	38.778	-	-	-	-	-
CH3	19.360	15.707	40.024	-	-	-	-	-
CH12a	18.761	15.695	39.343	-	-	-	-	-
CH12b	18.608	15.623	38.938	-	-	-	-	-
CH14b	18.807	15.641	39.524	-	-	-	-	-
CH16	18.800	15.768	39.796	-	-	-	-	-
CH19	18.898	15.653	39.054	-	-	-	-	-
CH21	18.969	15.676	39.054	7.0	106.2	0.1898	0.712399	4
CH23	18.819	15.719	39.227	-	-	-	-	-
CH39	18.605	15.710	39.321	-	-	-	-	-

0.5%와 1% 이하였다. 분석시 Sm 배경값은 300 pg, Nd은 400 pg, Rb은 300 pg, Sr은 400 pg 그리고 Pb는 1 ng 수준이었다. 동시선의 통계학적 처리는 York (1969)에 따랐으며 연대 계산에 사용된 ¹⁴⁷Sm의 붕괴 상수는 6.54×10^{-12} /yr 이다.

분석결과

중부 옥천대에서 채취한 각섬암 전암의 Nd 동위원소 분석 자료를 Table 2에 나타내었다. ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd의 비는 0.130~0.169로 좁은 범위를 보이며 자료들이 비교적 분산되기는 하지만, 모든 자료들이 일정한 기울기를 갖는 선 부근에 도시된다 (Fig. 2). 이 선을 연대로 환산하면 1270 ± 220 Ma (1σ) (MSWD=4.34) 이며, Nd 초생치는 0.51135 ± 21 이다. 이 연대를 이용한 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값은 +5.3 ~ +8.5이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 옥천대의 3 지역에 분포하는 각섬암들은 Sm-Nd 동위원소 자료에 의하여 서로 구

분되지 않는다. 또한 황강리 지역의 경우 옥천층군 변성퇴적암을 관입하고 있는 암체들과 석회암층군을 관입하는 것들 사이에도 서로 구분이 되지 않는다. 이러한 결과들은 원소분석 자료에서 얻은 결과와도 일치된다 (미발표).

Rb-Sr과 Pb-Pb 동위원소 분석 결과는 Table 3에 나타내었고 각각 Fig. 3과 4에 도시하였다. Fig. 3과 4에서 각섬암은 지역간 혹은 동일지역 내에서도 상당히 분산되어 어떠한 연대도 정의하지 않는다. 이는 Rb-Sr 계와 Pb-Pb 계가 정치 후의 변성 및 변질작용에 의하여 유동적이었음을 의미한다.

토 의

이제까지 발표된 옥천층군 변성퇴적암류 및 각섬암 시료들에 대한 K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr 및 Sm-Nd 절대연령 측정 결과를 Table 4에 요약하였다.

Cliff *et al.* (1985)은 황강리 일대에 분포하는 문주리층

의 흑운모와 백운모에서 77~266 Ma Rb-Sr 광물연대와 황강리층 기질로부터 151~201 Ma Rb-Sr 전암연대를 얻었으며, 약 200 Ma 시기에 옥천대에 주 변성작용이 일어난 것으로 해석하였다. 이는 이민성 (1988)의 옥천 각섬암의 230 Ma Ar-Ar 각섬석 연령과 유사하다. Kim (1990)은 옥천계 변성 사질암의 흑운모에서 95~319 Ma K-Ar 연대와 흑색 점판암으로부터 392 Ma Rb-Sr 전암연대를 얻었으며 이들 연대를 변성작용의 시기로 제안한 바 있다.

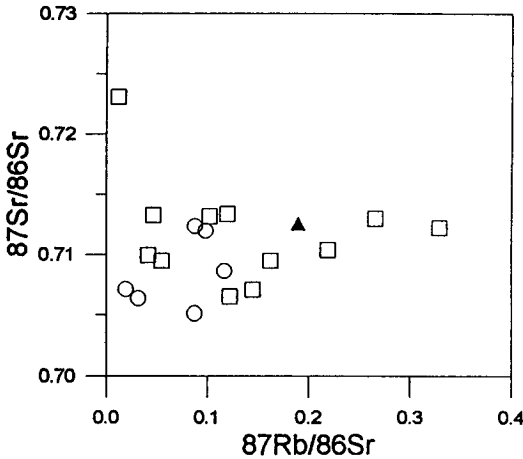


Fig. 3. Rb-Sr plot for the Ogcheon amphibolites. Symbols are the same as in Fig. 2.

Rb-Sr 및 K-Ar 계에 비하여 Sm-Nd 계는 고기의 초염기성암 내지 염기성암의 연대측정에 적용하기가 용이할 뿐만 아니라 각섬석상의 변성작용중에도 전암 규모에서 Sm-Nd에 대해 폐쇄계를 유지하는 것으로 알려져 있어서 (Hamilton *et al.*, 1977; DePaolo, Wasserburg, 1979; Zindler *et al.*, 1981; Barovich, Patchett, 1992) 옥천계에 분포하는 변성 염기성암인 각섬암에 대한 Sm-Nd 계를 이

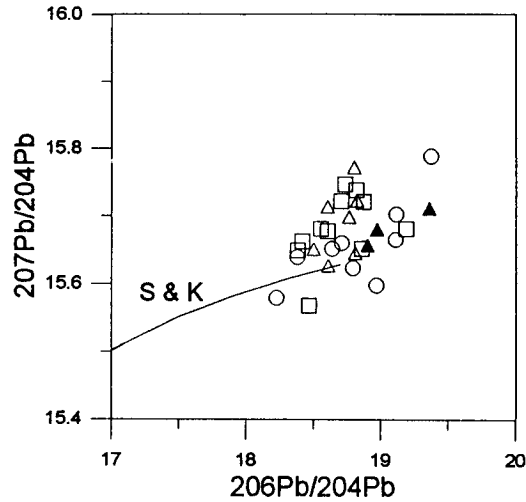


Fig. 4. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for the Ogcheon amphibolites. S & K denotes the terrestrial lead isotope evolution curve of Stacey and Kramers (1975). Symbols are the same as in Fig. 2.

Table 4. Summary of available age data for the metasedimentary rocks and amphibolites of the Ogcheon Belt.

Method	Sample	Age (Ma)	Author's interpretation	References
Ar-Ar	Am of amphibolite	230	collision age	Lee (1988)
K-Ar	Mus, Bt of the Munjuri Fm	93~209	metamorphic age	Min <i>et al.</i> (1995)
	Am of Am schist in	675±30	metamorphic age	
K-Ar	Mus, Am of Am schist	206-220	metamorphic age	Oh <i>et al.</i> (1995)
		421-424	the meaning is not	
K-Ar	Bt of the Ungyori & Guryongsan Fms	95~319	metamorphic age	Kim (1990)
Rb-Sr	Uraniferous black slate	392	metamorphic age	
Rb-Sr	Bt, Mus, matrix of the Hwanggangri Fm	77~266	age of peak regional metamorphism (~200)	Cliff <i>et al.</i> (1985)
Rb-Sr	Amphibolite (WR)	742±87	the meaning is not clear	Kwon <i>et al.</i> (1994)
Sm-Nd	Amphibolite (WR)	1290±260		
Sm-Nd	Internal isochron of amphibolite	677±91	early metamorphic or emplacement age	Kwon and Lan (1991)
	Duplicate	257±91	metamorphic age	Kwon <i>et al.</i> (1994)
Sm-Nd	Amphibolite (WR)	1270±220	apparent age(?)	This study

Abbreviations: Am, amphibole; Mus, muscovite; Bt, biotite; Fm, formation; WR, whole rock; Pl, plagioclase

용한 연대측정이 시도되고 있다 (권성택, 藍晶瑩, 1991; Kwon *et al.*, 1994). 권성택, 藍晶瑩 (1991)은 문경-가은 지역의 조립질 각섬암의 Sm-Nd 연대측정을 시도하여 전암 분석치로는 의미있는 동시선을 얻지 못하였지만, 각섬석과 사장석의 광물 동시선 연대로 677 ± 91 Ma를 보고하고, 이를 각섬암의 정치시기 혹은 초기 변성작용 시기로 해석한 바 있다. 그 후 Kwon *et al.* (1994)은 앞의 광물을 다시 분석하여 257 ± 91 Ma의 Sm-Nd 광물연대를 얻었는데, 이와 같이 각각 다른 연대가 얻어진 이유에 대해 다변성작용의 영향으로 일어난 복합 재배치 (complex resetting) 현상으로 설명하였다. 또한 그들은 옥천-보은 및 문경-가은 지역에 분포하는 각섬암 전암에 대해 1290 ± 260 Ma Sm-Nd 연대와 742 ± 87 Ma Rb-Sr 연대를 보고하고, 이 연대들은 비록 불확실하지만 적어도 옥천층군의 일부가 선캄브리아 말 또는 이전에 퇴적되었을 가능성을 지지하는 것으로 해석하였다.

민경원 외 (1995)는 충주부근 문주리층의 변성암류에서 분리한 백운모, 흑운모, 및 각섬석의 K-Ar 절대연령을 측정하였다. 니질 편암에서 분리한 백운모 7 시료와 흑운모 7 시료에서 $93 \sim 209$ Ma 연대를 얻었으며, 이 연대를 트라이아스기 말에서 쥐라기 초에 일어난 변성작용의 연대로 해석하였다. 또한 각섬석 편암 4시료에서 분리한 각섬석들에서 675 ± 30 Ma를 얻었으며, 이를 원생대 말에 옥천대에서 일어난 광역변성작용 연대로 해석하였다. 최근 충주-황강리 지역의 덕곡리 일대에 분포하는 1개의 각섬암의 각섬석에서 722 ± 24 Ma K-Ar 연대가 얻어졌는데 (유병욱, 미 발표), 이는 민경원 외 (1995)의 자료와 오차범위내에서 일치하는 연대이다. 그런데 K-Ar 연대는 과잉 (excess)의 Ar 의하여 실제 연대보다 오래된 연대를 나타낼 수 있으므로 이를 확인해야하는 문제가 있다.

Oh *et al.* (1995)은 옥천대 서남부 지역의 변성퇴적암에서 채취한 백운모와 각섬석에서 $206 \sim 220$ Ma와 $421 \sim 424$ Ma K-Ar 연대를 얻고, 전자를 삼첩기 말-쥐라기 초에 일어난 변성작용 시기를 지지하는 것으로 해석하였으나 후자는 이유가 불확실한 것으로 해석하였다.

위의 자료들을 종합해보면, 옥천층군의 변성퇴적암과 각섬암에서 얻어진 연령 측정치는 대체적으로 약 $100 \sim 270$ Ma, 약 $670 \sim 700$ Ma 그리고 약 1300 Ma에 해당되는 연대들로 크게 구분되어진다. 그중 $100 \sim 270$ Ma 연대는 쥐라기와 백악기 화강암류의 관입에 의하여 영향을 받은 연대로 해석된다 (Cliff *et al.*, 1985; Kim, 1990; Kwon *et al.* 1994, 민경원 외, 1995; Oh *et al.* 1995). 그리고 $670 \sim 700$ Ma는 아직 확실하진 않지만 원생대 말에 옥천계에 일어난 광역변성작용에 의하여 영향을 받은 연대로

해석이 시도되고 있다 (권성택, 藍晶瑩, 1991; 민경원 외, 1995). 각섬암의 Sm-Nd 전암 연대인 약 1300 Ma는 현재까지의 연대 자료만 가지고는 그 의미가 불확실 하지만 아래와 같은 이유로 정치연대보다 오래된 겉보기 연대 (apparent age)일 가능성이 높다.

여러 연구자들에 의해 캐나다, 오스트레일리아 및 남아프리카 등에 분포하는 시생대 화산암의 Sm-Nd 전암연대가 실제 정치시기보다 $130 \sim 500$ Ma 더 오래된 연대를 나타내는 현상이 발견되었다 (Cattell *et al.*, 1984; Hegner *et al.*, 1984; Chauvel *et al.*, 1985; Grau *et al.*, 1987). 그들은 이러한 원인을 동위원소적으로 차이가 있는 맨틀물질간의 혼합 (맨틀의 불균질성)이나 맨틀 기원 마그마와 대륙물질간의 혼합 때문에 일어난 현상으로 해석하였다. 한편 ^{147}Sm 의 반감기는 매우 길 뿐만아니라 자연계에서 Sm/Nd 비가 비교적 작기 때문에, 시료들간의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초기치의 비교적 작은 차이에 의해서도 Sm-Nd 계는 겉보기 연대를 나타낼 수 있다 (Hegner *et al.*, 1984). 이러한 오차는 암석의 연대가 젊을수록 더 큰 영향을 주게된다.

옥천 각섬암의 일부가 충주-황강리 지역에서 캄브로-오도비스기의 조선계 석회암층을 관입하고 있고 (이민성, 박봉순, 1965), 문경-가은 지역에서는 옥천층군의 황강리층 (초기 오도비스기 이후의 층, Lee *et al.*, 1989), 대비되는 함력천매암질암인 백화산층을 관입하고 있는 사실 (Lee, Chang, 투고중)을 바탕으로 할때, 1300 Ma 연대는 근원 물질의 불균질성이나 지각물질의 오염에 의하여 실제 연대보다 오래된 겉보기 연대일 가능성이 매우 크다. 따라서 앞에서 구한 Sm-Nd 전암연대가 겉보기 연대일 가능성은 각섬암의 지각물질에 의한 오염 정도와 근원암의 동위원소적 불균질성을 함께 고려하여 지구화학적으로 평가하여야 한다.

맨틀의 부분용융에 의하여 생성된 마그마는 분출환경에 따라 상승도중 지각물질에 의하여 오염을 쉽게 받을 수 있다. 흔히 지각물질은 염기성 마그마보다 고기 암석이며 평균적으로 좀 더 분화되어 있어 지각물질의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 낮다 (Claesson, 1987). 따라서 지각물질에 의한 오염은 마그마의 불호정원소의 함량은 증가시키나 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 더 낮아지게 하며 이러한 원인에 의하여 겉보기 연대가 얻어질 수 있다. Lee and Chang (투고중)은 여러가지 지구화학적 오염인자를 이용하여 옥천 각섬암의 원암이 지각물질에 의한 영향을 거의 받지 않았음을 밝히고 있다. 그러나 이들이 제시한 연구 결과는 옥천 각섬암이 지각물질에 의하여 상당히 오염을 받았다는 Cluzel (1992)의 연구 결과와 배치된다.

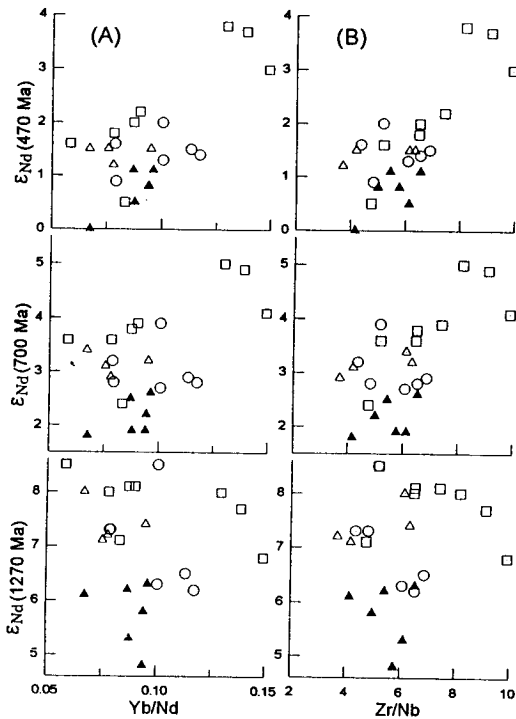


Fig. 5. $\epsilon_{Nd}(T)$ versus Yb/Nd (A) and $\epsilon_{Nd}(T)$ versus Zr/Nb (B). Symbols are the same as in Fig. 2.

이 연구에서 얻어진 Sm-Nd 전암연대인 1270 Ma를 이용하여 계산된 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값 (+4.8~+8.5)은 맨틀의 Nd 동위원소 진화모델에서 결핍맨틀 진화선상 주변에 도시된다. 이것은 결핍맨틀에서 유래한 원암이 지각물질에 의한 오염을 별로 받지 않고 정치되었음을 의미하며, 이는 미량원소를 이용한 결과와도 부합된다 (Lee, Chang, 투고중). 따라서 1270 Ma 연대가 지각물질의 오염에 의해 만들어진 결보기 연대일 가능성은 일단 배제할 수 있기 때문에, 우리는 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원소적 특징이 맨틀 근원지의 불균질성을 반영하는지를 고찰해 보았다. 이는 분석된 시료의 Yb/Nd과 Zr/Nb비와 3개의 서로 다른 연대 (1270 Ma, 700 Ma, 470 Ma)를 이용하여 계산한 $\epsilon_{Nd}(T)$ 간의 관계를 이용하였다 (Fig. 5). 1270 Ma 연대를 실제 관입연대보다 오래된 연대로 가정하고 이보다 좀 더 젊은 연대를 이용하여 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값을 계산하였다 (Table 2). 1270 Ma 보다 젊은 연대로는 700 Ma와 470 Ma를 선택하였다. 700 Ma는 권성택과 藍晶瑩 (1991)이 문경지역 각섬암에서 얻은 Sm-Nd 광물 연대, 민경원 외 (1995)의 문주리층 각섬석 편암의 각섬석에서 구한 K-Ar 연대 및 유병욱 (미발표)의 황강리 지역 각섬암의 각섬석에서 얻은 K-Ar 연대를 함께 고려한 연대이다. 그리

고 470 Ma는 충주-황강리 지역에서 일부 각섬암들이 조 선계 석회암층군을 관입하고 있고 (이민성, 박봉순, 1965), 문경-가은 지역에서 황강리층의 일부라 생각되는 함력 천매암질암인 백화산층을 각섬암이 관입하고 있는 야외 산출상태와 (Lee, Chang, 투고중) Cluzel (1992)이 각섬암의 관입 연대라 추정된 연대를 함께 고려한 연대이다. 이들 연대를 이용하여 옥천 각섬암의 $\epsilon_{Nd}(700 \text{ Ma})$ 와 $\epsilon_{Nd}(470 \text{ Ma})$ 구해보면 각각 +1.8~+5.0과 +0.0~+3.8에 해당된다.

옥천 각섬암들의 지구화학적 특징은 각섬암의 원암이 주로 변이질 현무암이며 약간의 솔레아이트질 현무암임을 지시하는데, 이들의 불유동-불호정 원소비의 변화 양상은 각섬암의 근원 마그마 혹은 맨틀근원지가 결핍성분과 부화성분간의 혼합에 의하여 생성되었을 가능성을 잘 보여준다 (Lee, Chang, 투고중). 만일 이러한 혼합현상에 의하여 옥천 각섬암의 원암이 형성되었다면, 불호정 미량 원소비와 $\epsilon_{Nd}(T)$ 간의 그림에서도 혼합관계가 잘 보여져야 하지만 $\epsilon_{Nd}(1270 \text{ Ma})$ 에서는 이러한 현상이 잘 보여지지 않는다. 그러나 각섬암들의 원암이 두개의 서로 다른 성분의 혼합에 의하여 만들어진 특성은 700 Ma와 470 Ma에서는 뚜렷이 보여준다. 따라서 옥천 각섬암들의 미량성분원소의 변화경향 (Lee, Chang, 투고중)과 결부시켜 고려하면, 이 연구에서 얻어진 약 13억년의 Sm-Nd 전암연대는 각섬암의 정치연대라기보다는 동위원소 조성이 다른 마그마간의 혼합에 의하여 만들어진 결보기 연대일 가능성을 지시한다.

Cattel *et al.* (1984)은 마그마간의 혼합은 다음과 같은 3가지 유형으로 일어날 수 있음을 제시하였다. (1) 결핍 맨틀과 이들 내에 맥상 (vein)이나 덩어리 (blob) 모양으로 존재하는 부화된 부분이 동시에 부분용융을 되어 일어나거나, (2) 어떤 기원물질에서 유래된 마그마가 상승도중 다른 맨틀물질에 의하여 오염되거나, (3) 기원이 서로 다른 물질에서 유래한 마그마가 분출하기 전에 마그마 방 (magma chamber) 내에서 혼합되는 경우이다. 옥천 각섬암의 경우 현재의 자료로는 위의 유형중 어떤 것에 해당되는지 판단하기 곤란하다.

결 언

옥천대에 산출되는 옥천 각섬암의 정치시기를 규명하기 위하여 각섬암 전암 시료에 대하여 Sr, Nd 그리고 Pb 동위원소 조성을 분석하였다. Rb-Sr와 Pb-Pb계를 이용한 각섬암 전암의 연대 측정은 이들 계가 정치 후 변성작용 등에 의하여 심하게 교란되었기 때문에 어떠한 연대도 얻

지 못하였다. 그러나 각섬암 전암의 Sm-Nd 연대 측정 자료들은 다소 분산되기는 하지만 모든 자료가 기울기가 약 13 억년인 선상에 도시된다. 여러가지 지구화학적 특징과 각섬암의 야외 산출 상태를 고려할때, 이 연대는 각섬암의 실제 관입시기보다 오래된 겉보기 연대일 가능성이 매우 크다. 이러한 원인은 지각물질에 의하여 오염되어서가 아니고 원암의 근원지가 불균질하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 아직까지 Sm-Nd 계와 무관한 다른 계로부터 옥천 각섬암의 정치시기로 타당한 연대가 제시된 바 없기 때문에, 이 연구에서 얻어진 13억년이 겉보기 연대일 가능성 이외의 다른 해석은 현재로서는 큰 어려움이 있다. 그동안 옥천 각섬암의 절대연령 측정에 효과적이라 기대되었던 Sm-Nd법은 각섬암 근원물질의 불균질성 때문에 큰 역할을 하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 Sm-Nd 계와 무관한 다른 계 (예, 저어콘의 U-Pb 계)를 이용한 옥천 각섬암의 연대측정이 요망된다.

감사의 글

이 연구는 “충부 옥천 변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 조구조적 연관성 연구”의 일부로서 1995년도 교육부 기초과학 학술 연구 조성비와 한국과학재단 후원 전략광물자원연구센터 지원에 의해 이루어졌음을 감사드린다. 야외조사와 지질도 작성에 큰 도움을 준 유병욱과 동위원소 분석에 많은 도움을 준 정창식 석사께 깊이 감사한다. 논문을 세심하게 심사를 하여 주신 진명식 박사님과 개인적으로 초고를 읽고 유익한 비평을 하여주신 박준범 박사께 깊이 감사드린다. 끝으로 평소 이 연구에 관심을 갖고 많은 조언을 하여 주신 박계현 박사님과 권성택 박사님께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 권성택, 熊晶瑩 (1991) 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원소연구: 예비보고서. 광산지질, 24권, p. 227-285.
- 김옥준 (1968) 충주-문경간의 옥천계의 층서와 구조. 광산지질, 1권, p. 35-46.
- 김옥준 (1970) “옥천층군의 지질시대에 관하여”에 대한 회답. 광산지질, 3권, p. 187-191.
- 김옥준, 윤정수 (1980) 상부 옥천층의 암석학적 및 지구구조적 해석에 관한 연구. 광산지질, 13권, p. 91-103.
- 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, 長尾敬介, 中村榮三 (1995) 충주 지역에 분포하는 변성암류의 K-Ar 연대: 원생대 말기 (675 Ma)의 옥천대 변성작용. 지질학회지, 31권, p. 315-327.
- 손치무 (1970) 옥천층군의 지질시대에 관하여. 광산지질, 3권, p. 9-15.
- 이대성 (1974) 옥천계 지질시대 결정을 위한 연구. 연세논총 제11집, p. 229-323.
- 이민성 (1988) 옥천대 각섬암의 화학조성과 그 성인. 제 34차 정기 학술발표회 요약, 지질학회지, 24권, p. 518-519.
- 이민성, 박봉순 (1965) 한국지질도, 황강리 지질도폭 설명서 (1:50,000), 국립지질조사소, 43p.
- Barovich, K. M. and Patchett, P. J. (1992) Behavior of isotopic systematics during deformation and metamorphism: A Hf, Nd and Sr isotopic study of mylonitized granite. Contrib. Mineral. Petrol., v. 109, p. 386-393.
- Cattell, A., Krogh, T. E. and Arndt, N. T. (1984) Conflicting Sm-Nd whole rock and U-Pb zircon ages for Archean lavas from Newton Township, Abitibi Belt, Ontario. Earth Planet. Sci. Lett., v. 70, p. 280-290.
- Chauvel, C., Dupre, B. and Jenner, G. A. (1985) The Sm-Nd age of Kambalda volcanics is 500 Ma too old!. v. 74, p. 315-324.
- Claesson, S. (1987) Nd isotope data on 1.9-1.2 Ga old basic rocks and metasediments from the Bothnian basin, central Sweden. Precambrian Res., v. 35, p. 115-126.
- Cliff, R. A., Jones, G., Choi, W. C. and Lee, T. J. (1985) Strontium isotopic equilibration during metamorphism of tillites from the Ogcheon belt, South Korea. Contrib. Mineral. Petrol., v. 90, 346-352.
- Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): intracontinental rift-related volcanic activity. J. Southeast Asian Earth Sciences, v. 7, p. 195-209.
- Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapierre, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). Tectonophysics, v. 183, p. 41-56.
- DePaolo, D. J. and Wasserburg, G. J. (1979) Sm-Nd age of the Stillwater complex and the mantle evolution curve for neodymium. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 43, p. 999-1008.
- Grau, G., Jahn, B. M., Glikson, A. Y., Davy, R., Hickman, A. H. and Chauvel, C. (1987) Age of the Archean Talga-Talga Subgroup, Pilbara Block, Western Australia, and early evolution of the mantle: new Sm-Nd isotopic evidence. Earth Planet. Sci. Lett., v. 85, p. 105-116.
- Hamilton, P. J., O'Nions, R. K. and Evensen, N. M. (1977) Sm-Nd dating of Archean basic and ultrabasic volcanics. Earth Planet. Sci. Lett., v. 36, p. 263-268.
- Hegner, E., Kroner, A. and Hofmann, A. W. (1984) Age and isotope geochemistry of the Archaean Pongola and Usushwana suites in Swaziland, southern Africa: a case for crustal contamination of mantle-derived magma. Earth Planet. Sci. Lett., v. 70, p. 267-279.
- Kim, J. H. (1990) Middle paleozoic isotopic ages of the Ogcheon group in Korea and their significance. In: Aubouin and Bourgeois (eds.), Tectonics of Circum-Pacific Continental Margins, p. 181-191.
- Kwon, S. T., Lan, C. Y., Lee, T. and Mertzman, S. A. (1994) Nd-Sr isotopic study of the Ogcheon metabasite, Korea. 4th IGCP Project 321, abstract volume, p. 64-65.
- Lee, K. S. and Chang, H. W., Sm-Nd isotopic and geochemical studies of the Ogcheon amphibolites from the Munkyeong-Gaeun area, Korea (submitted to J. Geol. Soc. Korea).
- Lee, J. H., Lee, H. Y., Yu, K. M. and Lee, B. S. (1989)

- Discovery of microfossils from limestone pebbles of the Hwanggangri formation and their stratigraphic significance. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 25, p. 1-15.
- Makishima, A., Nakamura, E. and Akimoto, S. (1991) Investigation of the bias in a secondary electron multiplier of Finnigan-Mat 261 mass spectrometer for the quantitative analysis of rare-earth elements in rock samples. Technical report of ISEI, ISSN 0911-4114.
- Oh, C. W., Kim, S. T. and Lee, J. H. (1995) The P-T condition and timing of the main metamorphism in the southwestern part of the Okchon Metamorphic Belt. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 31, p. 343-361.
- Reedman, A. J. and Fletcher, C. J. N. (1976) Tillites of the Ogcheon Group and their stratigraphic significance. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 12, p. 107-112.
- Stacey, J. S. and Kramers, J. D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 26, p. 207-221.
- York, D. (1969) Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 5, p. 320-324.
- Zindler, A., Hart, S. R. and Brooks, C. (1981) The Shabogamo intrusive suite, Labrador: Sr and Nd isotopic evidence for contaminated mafic magmas in the Proterozoic. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 54, p. 217-235.

1996년 1월 10일 원고접수