

동북아시아지역 선캠브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구 : 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대

박계현¹ · 송용선¹ · 박맹언¹ · 이승규² · 류호정¹

¹부경대학교 환경·해양대학 환경지질학과, ²한국자원연구소

요약 : 영남육괴의 지리산 지역에 분포하는 변성암류의 변성연대를 알아내기 위하여 전암 및 분리한 석류석에 대해 Sm-Nd 연대측정을 실시하였다. 그 결과 반상변정질 편마암은 1819 ± 53 Ma, 이질 편마암은 1780 ± 26 Ma, 반상변정질 편마암내 포획암인 우흑질 백립암은 1717 ± 17 Ma, 그리고 석영장석질 편마암 내에 포획암으로 들어있는 이질 편마암은 1763 ± 14 Ma의 연대를 나타낸다. 이와 같은 지리산 지역 지저 암석의 변성연대와 유사한 연대가 영남육괴의 여러 다른 지역에서도 보고되고 있다. 이는 17~18억년의 시기에 영남육괴 전반에 걸쳐 광범위하면서도 강력한 변성작용이 일어났음을 나타낸다. 이 시기는 경기육괴의 백립암상 변성작용에 대한 기존 변성연대 측정결과와도 오차범위 내에서 일치한다. 이는 두 육괴가 선캠브리아의 비슷한 시기에 유사한 지구조적 사건을 겪었음을 의미하며, 북중국과 남중국 사이의 충돌대가 경기육괴와 영남육괴의 사이를 가로 질러가지는 않을 가능성을 시사한다. 한편 반상변정질 편마암 내에 포획되어 있는 규장질 편마암은 이러한 변성시기보다는 오래된 1928 ± 42 Ma의 연대를 갖는다. 이 연대는 반상변정질 편마암의 원암 생성시기를 나타내는 저어콘 U-Pb 연대와 동일하다.

핵심어 : 영남육괴, 변성연대, Sm-Nd, 선캠브리아, 변성작용

서 언

한반도의 기저는 선캠브리아의 변성암으로 구성되어있는 것으로 알려져 있다. 이러한 선캠브리아 변성암은 지표에 노출된 면적도 한반도의 상당 부분을 차지하는 매우 중요한 암종이다. 따라서 이러한 변성암에 대한 지구연대학적 연구는 한반도의 지각이 최초로 생성된 이래 현재까지 어떠한 경로를 거쳐 발달되어왔는지를 규명하는데 필수적이다. 그러나 시간적으로 볼 때 지난 수 억년간의 현생 지사에 대해서는 많은 연구가 되어왔으나 훨씬 더 오랜 기간을 차지하고 있는 선캠브리아 기저에 대해서는 생성 연대와 변성시기 등이 잘 알려져 있지 않아 한반도의 지각 및 지구조 발달을 연구하는데 큰 걸림돌이 되어 왔다.

한편 최근에 국제적으로 주목이 되고있는 현생에 일어난 남중국과 북중국의 충돌의 경계선이 한반도로 연장되는지의 여부(예, Ree *et al.*, 1996)와, 만약 연장된다면 한반도의 어디로 지나가는지에 대한 문제에 대한 해답도 선캠브리아 기저의 연구로부터 실마리를 찾을 수도 있다. 즉 한반도의 여러 선캠브리아 지괴들이 중국의 북중국과 남중국등 어떤 부분과 대비가 되느냐에 따라 이 문제에 대한 답이

주어질 수도 있다. 만약 옥천대와 대상의 대보 화강암 등에 의해 나누어져 경기육괴와 영남육괴의 두 부분으로 구성되어 있는 남한의 선캠브리아 기저지각이 서로 일치하는 지각발달사를 나타낸다면 남중국과 북중국 사이 충돌대의 연장선이 경기와 영남육괴의 사이를 지나갈 것이라는 가설은 보다 직접적이고 확실한 지질학적 증거를 찾아야만 설득력을 갖게 될 것이다. 반면에 두 육괴가 서로 다른 지각발달사를 나타낸다면 둘 사이를 지나가는 충돌대의 연장선은 더욱 확률이 높은 가설이 될 것이다. 그리고 충돌대의 연장선 문제와 연관짓지 않더라도 전통적으로 하나로 묶어서 생각해 왔던 한중지괴의 여러 부분들이 어떠한 경로를 거쳐 발달해 왔는지를 비교 연구하는 것은 지질학적으로 매우 중요한 과제 중의 하나이다.

그러나 이러한 비교 연구를 위해서는 지각 생성 혹은 변성시기 등에 대한 정밀한 연대자료가 필수적임에도 불구하고 현실은 이러한 자료가 매우 빈약한 실정이며, 따라서 한반도 지각의 지구조 발달을 연구하는데 큰 장애가 되고 있다. 다행히도 최근에 변성연대에 관한 자료들이 계속 보고되고 있다(Table 1). 경기육괴의 경우 박계현과 정창식(1993)은 춘천 부근의 구봉산층군 대리암으로부터 $793 \pm$

Table 1. Previous geochronological data of Precambrian rocks from Yeongnam, Kyeonggi and Nangnim Massifs.

Rock	Locality	Mineral	Age(Ma)	Method	Reference
Yeongnam Massif					
Hornblende	vicinity of Jinan	Hornblende	1998±8	Ar-Ar	Kim (1986)
Diorite gneiss	vicinity of Boknae	Hornblende	1657±5	Ar-Ar	Kim (1986)
"Amphibolite (Xenolith)"	vicinity of Bosung	Muscovite	1318±3	Ar-Ar	Kim (1986)
Granitic gneiss	vicinity of Bosung	Muscovite	1330±2	Ar-Ar	Kim (1986)
Porphyroblastic gneiss	Buncheon	Whole rock	1863±103	Rb-Sr	Lee (1988)
Granitic gneiss	Buncheon	Zircon	1930±19	U-Pb	Kim <i>et al.</i> (1989)
Granite gneiss	Buncheon	Zircon	1678±90	Sm-Nd	Kwon & Jeong (1990)
Anorthosite	Hadong-Sancheng	Whole rock	1690±22	Sm-Nd	Kwon & Jeong (1990)
Granite	Taebaeg area	Muscovite	1761±36	K-Ar	Yun (1991)
Granitic gneiss	Kimcheon	Whole rock	1047±69	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1992)
Biotite gneiss	Kimcheon	Whole rock	1699±591	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1992)
Granite gneiss	Buncheon	Whole rock	1920±56	Pb-Pb	Park <i>et al.</i> (1993)
Granitic rock	Naedeogir	Whole rock	1825±86	Pb-Pb	Park <i>et al.</i> (1993)
		Monazite	1720±50	CHIME	Suzuki & Adachi (1994)
Foliated granite	Tanyang	Whole rock	2160±150	Pb-Pb	Kwon <i>et al.</i> (1995b)
Marble	Muju	Whole rock	1990±100	Pb-Pb	Park (1996)
Foliated granite	Damyang-Geochan	Zircon	2120±10	U-Pb	Turek & Kim (1996)
		Zircon	2133±17	U-Pb	Turek & Kim (1996)
Porphyroblastic gneiss	Hadong-Kurye	Zircon	1890±6	U-Pb	Turek & Kim (1996)
		Zircon	1945±5	U-Pb	Turek & Kim (1996)
Amphibolite	Muju	WR-Hb-Pl	1766±121	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1997)
Sandstone	Youngdong	Monazite	1740	CHIME	Kim <i>et al.</i> (1997)
Kyeonggi Massif					
Marble	Chuncheon	Whole rock	793±162	Pb-Pb	Park and Cheong (1993)
Garnet gneiss	Changhowon	Garnet	1198±26	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1994)
Amphibolite	Chuncheon	Whole rock	850±48	Sm-Nd	Kwon <i>et al.</i> (1995a)
Granite gneiss	Seosan	Zircon	1766±26	U-Pb	Turek & Kim (1996)
Amphibolite	Imjingang belt	Whole rock	824±143	Sm-Nd	Ree <i>et al.</i> (1996)
Mafic granulite	Hwacheon	WR-Grt	1897±120	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1997)
Mafic granulite	Hwacheon	WR-Grt	1742±140	Sm-Nd	Lee <i>et al.</i> (1997)
Nangnim Massif					
Garnet-biotite gneiss	Kumsongri Jungsan County	Zircon	2159±32	U-Pb	Kang (1996)
Garnet-biotite gneiss (including hypersthene)	Kykjsongri Huichon city	Zircon	2004±13	U-Pb	"
Porphyroblastic granite(II) (Myohyangsan Intrusive)	Huichon city	Zircon	1894±16	U-Pb	"
Garnet-cordierite garnet gneiss	Oilri, Janggang County	Zircon	1711±24	U-Pb	"
Cordierite-biotite-garnet gneiss	Oilri, Janggang County	Zircon	1752±24	U-Pb	"
Biotite gneiss	Oilri, Janggang County	Zircon	1756±13	U-Pb	"
Augen gneiss	Ryongdam district, Kilju County	Zircon(I)	1830±24	U-Pb	"
			1756±9	U-Pb	"
			1749±9	U-Pb	"
Biotite gneiss (Huchiryong Intrusive)	Sangiri, Toksong County	Zircon	1840±72	U-Pb	"

162(1σ) Ma의 Pb-Pb 연대를 보고하였으며, 이를 변성연대로 해석하였다. Lee *et al.* (1994)는 경기육괴 장호원지역에 분포하는 석류석 편마암으로부터 1198 ± 33(2σ) Ma의 Sm-Nd 광물연대를 구하였으며 이는 석류석 등 구성광물이 만들어진 변성연대를 나타낸다고 해석된다. Lee *et al.* (1997)이 경기육괴의

화천지역에 산출하는 백립암 두 시료로부터 1897 ± 120(2σ) Ma와 1742 ± 140(2σ) Ma의 Sm-Nd 광물연대를 보고하였다.

영남육괴의 경우를 살펴보면 Kwon and Jeong (1990)은 하동-산청지역에 분포하는 회장암질암 두 시료에 대하여 1678 ± 90 Ma와 1690 ± 220 Ma의

Sm-Nd 연대를 보고하였으며, 이 연대를 회장암질 암이 관입한 연대로 해석하였다. 그러나 Kwon and Jeong(1990)의 연대는 각 암석을 구성하는 사장석과 우흑질 부분을 전암과 함께 계산하여 구한 광물연대이며 회장암질암 자체가 변성작용을 받은 암석이 기 때문에 변성연대로 해석하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 박제헌(1996)은 무주지역에 산출하는 대리암에 대하여 $1990 \pm 100(2\sigma)$ Ma의 Pb-Pb 연대를 보고하였으며 이를 변성연대로 해석하였다. 이광식 외(1997)는 무주지역에 산출하는 각섬암으로부터 전암과 각섬석, 사장석에 대한 Sm-Nd 동위원소 분석을 실시하였으며 $1766 \pm 121(1\sigma)$ Ma의 광물연대를 구하였다. 이 연대는 현무암질 암석의 관입 이후 변성작용시에 만들어진 광물을 이용한 연대이므로 변성시기로 해석된다. Cheong *et al.*(2000)은 원남층군의 변성암으로부터 분리한 석류석에서 선별적 용해를 통해 1840 ± 26 Ma의 Pb-Pb 변성연대를 구하였다.

이러한 영남육괴의 변성연대에 대한 자료들은 연대가 가리키는 변성작용 자체에 대한 연구의 수행

없이 연대자료만을 보고하고 있다. 따라서 이 연구에서는 영남육괴 중에서도 광역변성작용에 대한 연구가 집중적으로 수행되었던 지리산 지역의 변성암류에 대하여 변성연대 측정을 시도하였다. 연대 측정의 결과는 현재까지 보고된 한반도 선캄브리아 변성암류에 대한 연대측정 자료들과 비교하여 논의하였다. 영남육괴의 기저암에 대한 연대측정은 오래전부터 시도되어 왔으며 적지않은 자료가 있으나 일부 분석자료들은 부적절한 시료의 선택과 정밀하지 못한 분석으로 오히려 혼란을 가져올 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 분석의 정밀도가 높은 비교적 최근에 보고된 자료들에 한정하여 논의하였음을 밝힌다.

일반지질 및 변성작용

이 연구에서는 영남육괴 중에서도 백립암상의 변성작용이 보고되어 변성도가 높은 것으로 알려져 있으며 비교적 연구가 많이 이루어진 영남육괴의 서남부에 위치한 지리산 일대의 변성암류를 연구대

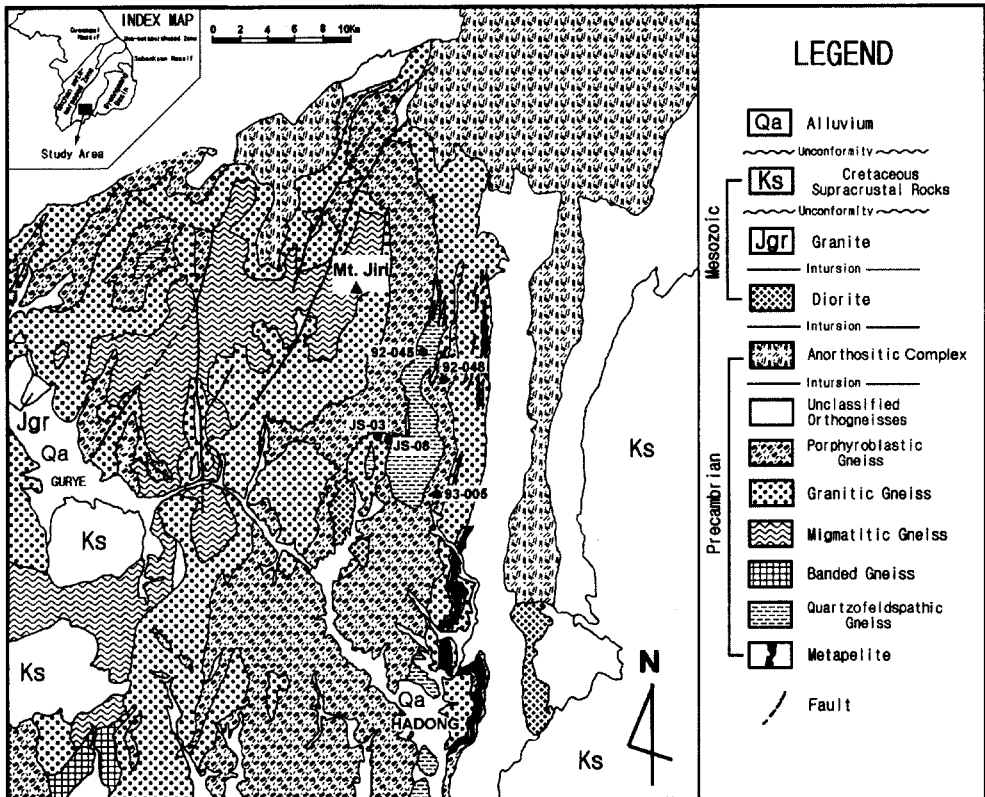


Fig. 1. Geologic map and sample locations of the studied area.

상으로 선택하였다(Fig. 1). 이 지역의 선캠브리아 편마암류는 기존 연구들에서 호상편마암, 미그마타이트질 편마암, 조립화강암질 편마암등으로 구분된 준편마암류와 유색광물의 함량과 주구성 암종에 따라 우백질 화강편마암, 흑운모 편마암, 각섬석 편마암, 흑운모-각섬석 편마암으로 분류되는 정편마암으로 구성되어 있으며, 각섬암 내지 상부 각섬암상의 고변성을 받은 것으로 알려져 왔다(이상만, 1980). 또한 이들 변성암류는 동쪽 연변부에서 남북 방향의 대상으로 분포한 회장암과 변력암질암 등으로 구성된 하동-산청 회장암 복합체에 의해 관입되었다. 조사 지역의 경우 서부 지역에 분포된 변성암류는 대부분 화강암질 편마암이며 남북 방향의 좁은 대상으로 이질 편암과 반상변정질 편마암을 협재하고 있다. 중앙부에는 기 발간 지질도폭에 흑운모 편마암, 메타텍틱 편마암, 그리고 안구상 편마암으로 분류되어 있지만 김동연 외(1998)의 연구 결과 차노카이트 내지 차노카이트질 편마암인 것으로 밝혀졌다.

호상 편마암은 규칙적인 층상 우백부가 발달한 층상구조를 이루고 있다. 호상 편마암을 핵으로 그 주변에는 미그마타이트질 편마암이 광범위하게 분포한다. 이 암석들은 화강암질 성분의 주입에 의해 호상 구조가 파괴 및 단절되어있다. 화강암질 편마암류들은 상대적으로 균질한 조직을 보이며, 흔히 소규모의 이질 또는 사질의 잔류물들을 함유한다. 반상변정질 편마암은 자형 내지 반자형의 미사장석이 10 cm 내외 크기의 거정질 반상변정을 이루고 있으며, 흔히 변형되어 반상변정이 신장되었거나 국부적으로는 안구상 구조를 이루기도 한다. 반상변정질 편마암 내에선 포획암의 형태로 우흑질 백립암이 산출되기도 한다. 차노카이트는 사방회석과 K-장석이 공생하는 입상 변정질의 화강암질 내지 화강섬록암질의 암석으로 어두운 색을 띤다. 덕천강 서편에 분포된 이 암석들은 전형적인 차노카이트의 특성을 보이지만, 서편의 회장암에 인접한 부분들은 대체로 우흑부와 우백부가 정연하게 교호된 층상의 편마 구조를 이루고 있다. 차노카이트와 백립암질 포획암의 암석 기재적 특성은 각각 김동연(1999)과 송용선(1999)의 연구에 자세히 기재되었다.

지리산 지역에서 얻어진 변성조건을 살펴보면(김동연, 1999; 송용선, 1999) 상부 각섬암상 내지는 백립암상의 변성작용이 있었음을 알 수 있다. 편마암류들은 정점에서 600~750°C, 3~6kb, 후퇴시는 500~650°C, 2~5kb이다. 한편 반상변정질 편마암 내의 백립암상을 나타내는 이질 편마암은 정점에서 800~

850°C, 6kb이고 후퇴시는 500°C, 4kb 정도로 시계 방향의 후퇴경로를 보이는데 반하여 차노카이트의 경우는 초기에 600~650°C, 2kb, 정점에서는 600~750°C, 7~9kb이고 다시 400~600°C, 4~6kb로 후퇴된 반시계방향의 진화경로를 나타낸다. 지리산 지역에 분포하는 변성암류 중에서 변성연대 측정을 위해 이 연구에서 분석한 암석은 이질 편마암, 석영장석질 편마암 및 포획암으로 나타나는 이질 편마암, 그리고 반상변정질 편마암 및 그 안에 포획암으로 산출하는 우흑질 백립암과 규장질 포획암 등이다.

분석방법

영남육괴의 시료들은 Sm-Nd 동위원소 계를 이용한 연대측정을 위하여 전암 분말을 제작하였으며 석류석을 분리하였다. 석류석의 분리는 분쇄 및 체질 뒤에 자력 선별기를 이용하여 석류석을 다른 광물들로부터 구분한 뒤에 최종적으로는 양안 실체현미경 아래에서 불순물들을 손으로 골라 버렸다. 동위원소 분석을 위한 시료 전처리와 Nd의 동위원소 비율 분석과 Sm 및 Nd의 동위원소 희석법에 의한 정량분석은 기초과학지원연구소에서 수행하였다. 암석분말과 석류석은 테플론 용기안에 넣고 ^{150}Nd - ^{149}Sm 혼합 스파이크를 더한 뒤에 혼합산(HF: HClO₄: HNO₃ = 4:1:1)을 더한 뒤에 가열판 위에서 용해시켰다. 양이온 교환 컬럼을 이용해 희토류 원소 부분을 분리한 뒤에 Sm과 Nd은 다시 0.2M HIBA(alpha-hydroxy-isobutyric acid)를 쓰는 컬럼을 이용해 분리하였다. 동위원소 비율은 9개의 파라메이 검출기를 장착한 기초과학지원연구소 VG 54-30 열이온화 질량분석기를 이용하여 측정하였다. Nd 동위원소 비율의 측정은 역동적(dynamic) 모드로 측정하여 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비율은 $^{146}\text{Nd}/^{142}\text{Nd} = 0.7219$ 에 맞추어 출력하였으며 시료에 더한 스파이크의 Nd부분을 감안하여 추가로 보정하였다. 기초과학지원연구소에서의 La Jolla Nd 표준의 반복 측정 결과는 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511833 \pm 0.00005$ (N = 13)이며 전체적인 바탕값 수준은 Sm에 대하여 약 10 pg, Nd에 대하여 약 50 pg으로 무시할만한 수준이다 (Cheong *et al.*, 2000).

분석결과

이 연구에서 변성연대를 구하기 위해 Sm-Nd 연대측정법을 선택하였다. 그 이유는 이 일대 변성광

물로 흔히 산출되는 석류석이 매우 높은 Sm/Nd 비율을 갖기 때문에 비교적 용이하게 높은 정밀도로 변성연대를 구할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 전암-석류석으로 구한 변성연대를 살펴보면 (Fig. 2, Table 2) 여러 종류의 변성암들이 상당히

유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 우선 반상변정질 편마암은 1819 ± 53 Ma와 1851 ± 70 Ma, 이질편마암은 1780 ± 26 Ma, 그리고 반상변정질 편마암내 포획암인 우흑질 백립암은 1717 ± 17 Ma를 나타낸다. 한편 반상변정질 편마암내에 포획되어 있

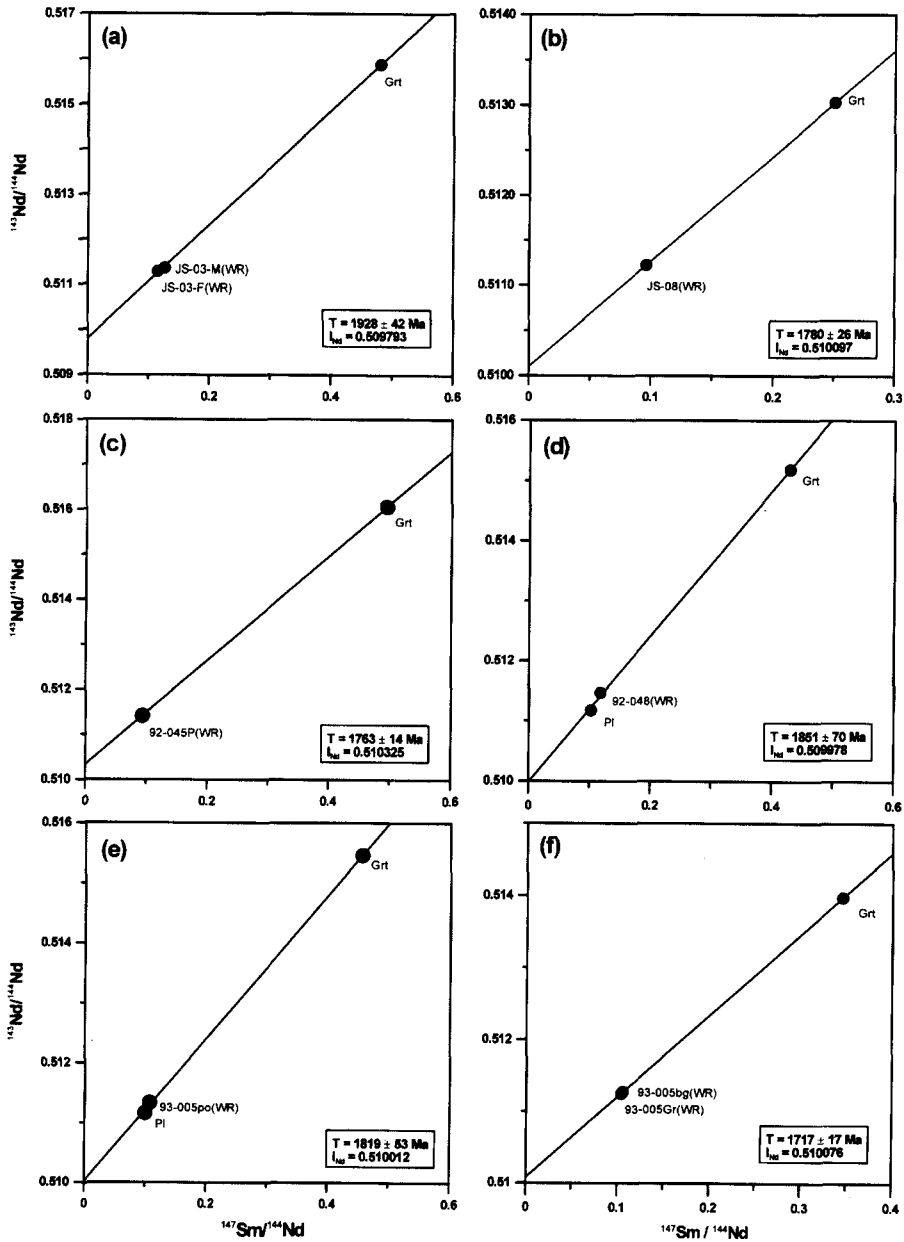


Fig. 2. Sm-Nd isochron diagrams for the metamorphic rocks of the Jirisan area: (a) quartzofeldspathic gneiss xenolith in the porphyroblastic gneiss, (b) pelitic gneiss, (c) pelitic gneiss xenolith in the quartzofeldspathic gneiss, (d) and (e) porphyroblastic gneiss, and (f) mafic granulite xenolith in porphyroblastic gneiss.

Table 2. Sm-Nd data for Precambrian metamorphic rocks from Jirisan Area.

Rock type	Sample		Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Age (Ma)
Quartzofeldspathic xenolith in porphyroblastic gneiss	JS-03-1	WR(Mafic)	30.21	144.24	0.1267	0.511366	1928±42
		WR(Felsic)	18.42	96.60	0.1153	0.511289	
		Garnet	7.17	9.04	0.4799	0.515886	
Pelitic gneiss	JS-08	WR	7.49	47.06	0.0963	0.511224	1780±26
		Garnet	7.60	18.35	0.2505	0.513030	
Pelitic gneiss xenolith in quartzofeldspathic gneiss	92-045	WR	2.48	9.85	0.0936	0.511411	1763±14
		Garnet	9.55	11.68	0.4946	0.516062	
Porphyroblastic gneiss	92-048	WR	6.29	32.37	0.1175	0.511465	1851±70
		Garnet	9.32	13.17	0.4284	0.515187	
		Plagioclase	4.17	24.66	0.1022	0.511173	
	93-005	WR	11.34	64.29	0.1067	0.511333	1819±53
		Garnet	7.96	10.56	0.4561	0.515467	
		Plagioclase	2.51	15.27	0.0995	0.511161	
Mafic granulite (xenolith)	93-005b	WR	26.88	153.82	0.1057	0.511274	1717±17
		Garnet	7.08	12.40	0.3453	0.513975	

는 규장질 편마암이 가장 오래된 1928±42 Ma, 석영장석질 편마암 내에 포획암으로 들어있는 이질 편마암은 1763±14 Ma를 나타낸다.

반상변정질 편마암 안에 포획되어 있는 폭 약 1.5 m, 길이 약 3 m 정도의 규장질 편마암의 변성연대 1928±42 Ma는 반상변정질 편마암의 생성시기(1890±6~1945±5 Ma; Turek and Kim, 1995, 1996)와 동일한 값이다. 따라서 이 규장질 편마암은 반상변정질 편마암의 원암이 관입할 당시 포획되어 변성작용을 받은 결과이며, 이후 약 18억2천만년의 부근의 시기에 이 관입체가 광역변성작용을 받아 반상변정질 편마암이 만들어질 당시에는 이 이질편마암 포획체의 Sm-Nd 동위원소 계는 큰 교란을 받지 않은 것으로 판단된다. 석류석의 Sm-Nd 계는 600°C 이상의 온도에서 폐쇄계를 유지하지 못할 수도 있으나(Vance *et al.*, 1998) 이 포획암은 반상변정질 포획암이 겪은 약 800°C 이상의 조건에도 크게 영향받지 않은 것으로 나타난다. 이것은 이 포획암체의 주구성 광물이 석영과 장석 및 석류석으로써 변성작용시 석류석 내의 Nd 동위원소가 확산에 의한 교환반응을 할만한 물질이 주변에 없었기 때문이 아닌가 생각된다.

한편 반상변정질 편마암 자체와 반상변정질 편마암 내에 포획암으로 산출하는 우흑질 백립암, 석영장석질 편마암 내에 포획암으로 들어있는 이질 편마암 등 산청-하동의 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 다양한 종류의 변성암들의 변성연대가 1717±17~1819±53 Ma의 범위에 집중되는 것은 이 시기의 변성작용이 매우 강력하였으며 상당히 넓은 범위에 걸쳐 일어났음을 확인해 주는 결과라고 할 수 있다.

토 의

변성연대와 영남육괴의 선캠브리아 지각 발달사

영남육괴의 연대측정 결과를 오래된 지질연대 순서대로 나누어 살펴보면 우선 구례 화강편마암의 저어콘이 2120±10 Ma 및 2113±17 Ma(Turek and Kim, 1995, 1996)를 나타내며, 단양 천동리 지역의 열리상 화강암이 2160±150 Ma(권성택 외, 1995b)로 가장 오래된 연령을 보인다. 최근 Cheong *et al.*(2000) 역시 평해지역의 화강 편마암에 대해 2093±86 Ma의 Pb-Pb 전암연대를 얻었다. 이들은 비록 멀리 떨어져 있으며 서로 다른 방법으로 연대 측정을 하였음에도 불구하고 잘 일치하는 연대를 나타낸다. 이러한 사실은 이 시기에 영남육괴의 남서부와 북동부를 포함하는 광범위한 면적에 걸쳐 화강암의 관입을 가져온 화성활동이 있었음을 알 수 있다.

그 다음으로는 영남육괴의 남서부에 매우 넓은 면적에 걸쳐 분포하는 현재는 반상변정질 편마암이 된 화강암질 마그마가 1945~1890 Ma의 시기에 관입하였다(Turek and Kim, 1995, 1996). 한편 이 시기에 영남육괴의 북동부에서도 약 1930 Ma에 현재의 분천 화강편마암이 된 화강암질 마그마가 관입하였다(김종환 외, 1989; 박계현 외, 1993). 무주 지역에 산출하는 대리암이 1990±100(2σ) Ma의 변성연대(박계현, 1996)를 나타내는 것은 이러한 화성활동을 일으킨 지구조적 변동에 변성작용이 수반하였음을 시사한다.

이 연구에서 밝힌 지리산 일대의 여러 종류의 변

성암들의 변성연대인 약 17~18억년의 시기의 연대가 영남육괴의 전 지역에 걸쳐 여러 학자들에 의해 보고되고 있음이 주목할만하다. 이러한 자료로는 이광식 외(1997)가 보고한 무주지역에 산출하는 각섬암의 변성작용($1766 \pm 121(1\sigma)$ Ma), Cheong *et al.*(2000)이 원남층군의 변성암으로부터 분리한 석류석에서 구한 1840 ± 26 Ma의 Pb-Pb 변성연대들을 수 있다. Kim *et al.*(1997)이 보고한 영동분지에서 산출하는 사암에서 분리한 모나자이트가 나타내는 관입 혹은 변성시기(약 1740 Ma), Suzuki and Adachi(1994)가 보고한 영남육괴 북동부 울리 편마암의 모나자이트 CHIME 연대(1720 ± 50 Ma) 역시 이러한 범위에 속한다. 그리고 Kwon and Jeong(1990)이 하동-산청지역에 분포하는 회장암질암 두 시료에 대하여 구한 1678 ± 90 Ma와 1690 ± 220 Ma의 Sm-Nd 연대는 변성작용을 받은 각 회장암질암을 구성하는 사장석과 우흑질 부분을 전암과 함께 계산하여 구한 광물연대이기 때문에 변성연대로 해석된다. 한편 내덕리 화강암에 대한 연대측정 결과(윤현수, 1991; 박계현 외, 1993)도 이 범위에 포함시킬 수 있다. 이와 같이 이 시기의 연대가 전체 영남육괴지역에서 보고되고 있는 것은 17~18억년의 시기에 영남육괴 전반에 걸쳐 활발한 화성 혹은 변성작용이 있었음을 나타낸다.

Table 1과 Fig. 2를 살펴보면 지리산 일대의 여러 종류 변성암들로부터 구한 변성연대가 서로 일치하는 것은 물론 구한 변성작용시의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초기치 역시 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 생성 연대가 같은 동일한 균질한 암체에서는 같은 초기치를 갖는 것이 당연한 현상이지만 광역적으로 같은 초기치를 갖게되는 것은 매우 예외적인 현상이다. 이와 같이 균일한 초기치가 나타나는 현상은 몇 가지 경우로 나누어 해석할 수 있다. 우선 이 지역에 일어났던 변성작용의 세기가 강력하였을 뿐만 아니라 이 시기에 대부분의 암석들의 동위원소 값이 재평형될 정도로 물질의 교환이 활발했었다는 해석이다. 다른 해석으로는 동위원소 초기치가 광역변성시에 동질화되었다기 보다는 근본적으로 유사한 값을 가진 근원물질에서 유래된 암석들이었을 가능성을 생각해 볼 수 있다. 이러한 해석들은 보다 넓은 지역의 변성암들에 대한 추가적인 분석을 통해 가려낼 수 있을 것으로 판단한다.

경기육괴와 영남육괴의 변성연대 및 지각발달사 비교

경기육괴에서 구해진 확실하게 변성시기로 해석할 수 있는 연대측정 결과는 많지 않다. 그러나 최근에 Lee *et al.*(1997)가 화천지역의 백립암 두 시료로부터 구한 $1897 \pm 120(2\sigma)$ Ma와 $1742 \pm 140(2\sigma)$ Ma의 Sm-Nd 광물연대는 변성광물을 분리하여 이로부터 구한 연대이기 때문에 변성연대로 해석할 수 있다. 이러한 경기육괴 화천지역 백립암의 변성연대는 이 연구에서 보고하는 지리산 지역을 포함하는 영남육괴의 넓은 지역에서 일어났었던 17~18억년의 변성연대와 오차범위 내에서 일치하는 값으로, 경기와 영남육괴의 변성암 복합체들이 같은 시기에 변성작용을 받았음을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 또한 두 지역은 경기육괴와 영남육괴로 나뉘어져 있기는 하지만 모두 백립암상에까지 이르는 고도의 변성작용이 나타나는 지역이라는 공통점이 있다. 경기육괴와 영남육괴가 동일한 시기에 변성작용을 받았을 뿐만 아니라 백립암상에 이르는 비슷한 온도 압력 조건의 광역 변성작용을 받았다는 것은 이들이 당시에 동일한 지괴안에서 서로 인접한 위치에 있었을 가능성을 시사한다. 두 육괴의 유사성은 두 육괴에서 보고된 가장 오래된 저어콘 연대에서도 찾아볼 수 있다. 최근 조문섭 외(1999)와 Yi *et al.*(1999)이 경기육괴의 화천지역에서 약 30억년에 해당하는 저어콘 연대를 보고하였으며, 이호선 외(1999) 역시 영남육괴의 김천지역으로부터 유사한 연대를 보고하였다. 이는 한반도의 지각발달사를 살펴볼 때 이미 30억년 전에는 저어콘을 함유하는 산성지각이 있었으며, 이로부터 30억년의 연대를 갖는 저어콘이 영남육괴와 경기육괴에 공히 공급되었거나 혹은 30억년전에 변성 저어콘이 만들어졌어야함을 의미한다. 아직 이러한 연대를 갖는 암석자체는 알려지지 않고 있기는 하지만 이러한 저어콘 연대의 일치는 경기와 영남 두 육괴가 동일한 지괴로 발전해왔을 가능성을 더욱 크게 해준다.

그러나 경기육괴와 영남육괴의 선캄브리아 지각 발달사가 동일하기만 한 것은 아니다. 경기육괴에서는 춘천지역에 분포하는 대리암이 $793 \pm 162(1\sigma)$ Ma(박계현과 정창식, 1993) 그리고 같은 지역의 각섬암이 850 ± 48 Ma(권성택 외, 1995a)로 선캄브리아 말 변성작용을 나타내며, 임진강대의 삼꽃 각섬암에 대해서는 824 ± 143 Ma의 연대(Ree *et al.*, 1996)가 보고되었다. 이를 종합하면 선캄브리아 말에 경기육괴에는 염기성 화성활동 및 거의 동시적인 석회암의 퇴적, 뒤이은 광역 변성작용이 있었음을 알 수 있다. Lee *et al.*(1994)는 경기육괴 장호원

지역에 분포하는 석류석 편마암으로부터 $1198 \pm 33(2\sigma)$ Ma의 광물연대를 구하였으며 이는 석류석 등 구성광물이 만들어진 변성연대를 나타낸다고 해석된다. 하지만 영남육괴로부터는 아직 이러한 연대에 해당되는 변성작용이 보고되지는 않고 있다.

남중국-북중국 사이의 충돌대 연장선과의 관계

남중국과 북중국 사이의 충돌대가 한반도로 연장되느냐의 여부와 충돌대가 연장된다면 한반도의 어디를 지나가느냐의 문제는 최근 몇 년동안 중요 관심사의 하나였다. 이 문제를 해결하는데 경기육괴와 영남육괴의 지각발달사를 밝히는 것이 중요한 단서를 제공해 줄 수 있다. 우선 경기육괴와 영남육괴의 지각발달사가 유사한지 혹은 서로 다른지 여부와, 각각 중국의 북중국과 남중국 어느 지괴와 밀접한 연관성을 보이느냐를 밝히는 것로부터 충돌대의 연장선 문제는 해결의 단서를 찾을 수 있을 것이다. 이 연구에서는 앞에서 경기와 영남육괴가 유사한 지각발달사를 갖고 있으며 따라서 동일한 지괴로 발달해왔을 가능성을 언급하였다. 따라서 남중국과 북중국 사이에서 발견되는 대륙충돌대가 경기와 영남육괴의 사이로 지나갈 가능성은 적은 것으로 생각할 수 있다.

일반적으로 북중국은 시생대를 포함하는 오래된 지각으로 구성되어 있고 남중국은 북중국보다는 젊은 지각으로 구성되어 있다고 생각되어 왔다(Miyashiro, 1981; Ma and Wu, 1981; Jahn and Ernst, 1990). 실제로 북중국에서는 약 38억년전까지 올라가는 연대가 보고되었다 (Song *et al.*, 1996). 그러나 최근 Qiu *et al.*(2000)이 중국 충돌대의 바로 남쪽에서 32억년 이상된 저어콘을 발견하여 남중국에도 시생대의 지층이 존재한다고 보고하였다. 따라서 경기와 영남육괴에서 공통적으로 발견된 약 30억년의 연대를 갖는 저어콘의 존재만으로는 두 육괴를 중국의 북중국이나 남중국 어느 한 곳과 연관시키기는 곤란하다고 볼 수 있다. 전통적인 한중지괴(Sino-Korean Craton)의 이름대로 한반도는 중국의 북동부 지역과 함께 지각발달을 해온 것일지 아니면 모두 다 남중국과 함께 발달해온 것인지는 추가적인 연구가 필요하다.

결 론

남한의 선캠브리아 기저 지각의 발달사를 밝히기 위해 실시한 영남육괴의 지리산 지역에 분포하는

변성암류에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과를 종합하면 지리산 지역에 광범위하면서도 강력한 변성작용이 약 17~18억년 전에 일어났음을 알 수 있다. 한편 반상변정질 편마암내에 포획되어 있는 규장질 편마암이 나타내는 1940 ± 30 Ma의 연대는 Turek and Kim(1995, 1996)이 반상변정질 편마암에서 분리한 저어콘의 U-Pb 연대와 동일하며 반상변정질 편마암의 원암 생성연대로 해석된다. 지리산 일대 기저암석의 변성연대와 유사한 연대가 무주의 각섬암($1766 \pm 121(1\sigma)$ Ma, 이광식 외, 1997), 영동분지 사암에서 분리한 모나자이트(약 1740 Ma, Kim *et al.*, 1997), 영남육괴 북동부 울리 편마암의 모나자이트(1720 ± 50 Ma, Suzuki and Adachi, 1994), 내덕리 및 농거리 화강암($1761 \pm 36(1\sigma)$ Ma, 윤현수, 1991) 및 산청-하동지역 화강암(1678 ± 90 Ma, Kwon and Jeong, 1990) 등 영남육괴의 여러 지역에서 확인되기 때문에 약 17~18억년의 시기에 영남육괴 전반에 걸쳐 강한 광역 변성작용 혹은 화성활동이 있었다고 판단된다.

경기육괴에서 백립암상의 변성작용에 대한 기존의 변성연대 측정결과($1897 \pm 120(2\sigma)$ Ma와 $1742 \pm 140(2\sigma)$ Ma, Lee *et al.*, 1997)도 오차범위 내에서 이 시기와 일치하는 것은 영남육괴와 경기육괴가 동일한 지판 내의 지리적으로도 인접한 위치에서 함께 발달해왔을 가능성을 높게 한다. 이것은 경기육괴와 영남육괴에서 공통적으로 약 30억년의 연령을 가진 저어콘이 발견된다는 것으로부터 더욱 뒷받침된다. 따라서 이 두 육괴들은 시생대부터 함께 지각발달을 해왔던 것으로 해석할 수 있으며, 이 경우 북중국과 남중국 사이의 충돌대가 남한의 경기육괴와 영남육괴 사이의 어떤 부분을 가로 질러가지는 않을 것임을 시사한다.

사 사

논문 원고에 대한 건설적인 비평을 해 주신 조문섭 교수께 감사드린다. 또한 시료준비와 동위원소 분석, 실내작업에 도움을 준 김동연 석사와 정창식 박사께도 감사드린다. 이 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 국제협력연구과제 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

권성택, 조문섭, 전은영, 이승렬, E. Nakamura, 1995a, 춘천 각섬암의 Sm-Nd와 Rb-Sr 동위원소 연구. 제4

- 차 암석학회 정기총회 및 학술발표회 요약집, 25.
- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영, 1995b, 단양 천동리 지역 옥천대영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 4, 144-152.
- 김동연, 송용선, 박계현, 1998, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구. 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, 35-36.
- 김동연, 1999, 지리산 동부지역에 분포하는 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 석사학위논문, 부경대학교, 79p.
- 김용준, 1986, 영남육괴에 분포하는 고기화강암질암의 지질연대와 성인에 대한 연구. 광산지질, 19(특별호), 151-162.
- 김종환, 조한익, 박중원, 서효준, 김상엽, 이태섭, 조진동, 서상용, 오천혁, 홍영국, 김통권, 박영수, 구성분, 최중호, 고상모, 채수천, 1989, 분천화강암원 우리나라 광산 탐사모델개발. 한국전력공사 연료처 시행 연구 보고서, 540pp.
- 박계현, 1996, 무주지역 대리암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 5, 84-88.
- 박계현, 정창식, 1993, 선캠브리아 경기육괴중 대리암의 연대측정에 대한 예비 연구. 암석학회지, 2, 130-138.
- 박계현, 정창식, 1998, 옥천변성대 변성퇴적암의 스트론튬 동위원소 조성 및 연대. 지질학회지, 34, 81-93.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질학회지, 29, 387-395.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
- 윤현수, 1991, 상동지역 선캠브리아 화강암류의 K-Ar 백운모 연령측정. 광산지질, 24, 21-25.
- 이광식, 정창식, 박계현, 장호완, 1997, 무주지역 각섬암의 지구화학 및 Sm-Nd 동위원소 연구. 30, 313-320.
- 이덕원, 1988, 상동-울진 지역의 주석광화작용과 관련된 화강암류의 암석지구화학적 특징과 탐사예의 응용에 관한 연구. 서울대학교 공학박사학위논문, 153pp.
- 이상만, 1980, 지리산 (하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
- 이호선, 송용선, 박계현, 이석훈, 1999, 중부소백산육괴 선캠브리아 편마암의 2950Ma CHIME연대. 대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회 초록집, 77-78.
- 조문섭, 이기욱, 이승렬, R. Stern, 1999, 남한에서 가장 오래된 지각물질의 나이: SHRIMP 연대측정. 한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 89.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T., and Park, K.-H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. Precambrian Research, 102, 207-220.
- Jahn, B.-M. and Ernst, W.G., 1990, Late Archean Sm-Nd isochron age for mafic-ultramafic spracrual amphibolites from the Northeastern Sino-Korean Craton, China. Precambrian Research, 46, 295-306.
- Kang, H. G., 1996, Appendix 1. Isotopic geochronology. In Paek, R. J., Kang, H. G., and Jon, G. P. Eds., Geology of Korea, Institute of Geology, State Academy of Sciences DPR of Korea, Foreign Languages Books Publishing House, Pyongyang, 631p.
- Kim, B.-C., Choi, S.-J., Suzuki, K., Adachi, M., Obayashi, T., and Yu, K.-M., 1997, Provenance of Cretaceous sandstones in the southeastern Yongdong Basin, Korea: CHIME geochronology of detrital monazites. Geosci. J., 1, 37-49.
- 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, 26, 341-349.
- Lee, S.-G., Shimizu, H., Masuda, A., and Song, Y.-S., 1992, Crustal evolution of the Precambrian basement in the Korean Peninsula. J. Petrol. Soc. Korea, 1, 124-131.
- Lee, S.-G., Song, Y.-S., and Masuda, A., 1994, 1.2 Ga mineral isochron of Changhowon garnet gneiss. J. Geol. Soc. Korea, 30, 62-68.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., and Park, K.-H., 1997, An early Proterozoic Sm-Nd age of mafic granulite from the Hwacheon area. South Korea, Geosci. J., 1, 136-142.
- Ma, X.Y. and Wu, Z.W., 1981, Early tectonic evolution of China. Precam. Res., 14, 185-202.
- Miyashiro, A., 1981, Tectonic and petrologic aspects of Asia. Mem. 4, Geol. Soc. China, 1-31.
- Qiu, Y.M., Shan, G., McNaughton, N.J., Groves, D.L., and Ling, W., 2000, First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. Geology, 28, 11-14.
- Ree, J.-H., M. Cho, 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, B., Nutman, A.P., Liu, D., and Wu, J., 1996, 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province northeastern China. Precam. Res., 78, 79-94.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1994, Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the Hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implications for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. Tectonophysics, 235, 277-292.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1995, U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area. Ryeongnam massif, Korea, Geochem. J., 29, 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.*, 30, 231-249.

Yi, K., Cho, M., and Lee, S.R., 1999, Chemical ages of monazite in the Hwacheon granulite complex. Pro-

gram and abstract volume for the 54th Fall Meeting, The Geological Society of Korea, 78-79.

(책임편집 : 조문섭)

(2000년 1월 20일 접수, 2000년 2월 25일 수리)

**Petrological, Geochemical and Geochronological Studies of
Precambrian Basement in Northeast Asia Region:
1. Age of the Metamorphism of Jirisan Area**

Kye-Hun Park¹, Yong-Sun Song¹, Maeng-Eun Park¹, Seung-Gu Lee² and Ho-Jeong Ryu¹

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University
599-1 Daeyeon-3dong, Nam-gu, Pusan 608-737

²Korea Institute of Geology, Mining & Materials
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Taejeon 305-350

Abstract : For the determination of metamorphic age of the metamorphic rocks distributed in the Jiri-san area of Youngnam massif, Sm and Nd isotopic compositions were analyzed for the whole rock and garnet separates. As the result, we obtained 1799 ± 11 Ma from the porphyroblastic gneiss, 1776 ± 30 Ma from the metapelite, 1714 ± 35 Ma from the mafic granulite xenolith within the porphyroblastic gneiss, and 1776 ± 30 Ma from the metapelite occurred as a xenolith within the quartzofeldspathic gneiss. There have been reports of geologic ages similar to such metamorphic ages of Jirisan area from the other portion of the Youngnam massif, which reveals that very intense metamorphism took place over the vast area of Youngnam massif during the period of 1.7~1.8 Ga ago. The granulite facies metamorphism of the Gyeonggi massif also shows the age similar to this period. Such resemblance in their metamorphic ages suggests that these massifs experienced similar tectonothermal events occurred at about the same Precambrian periods, which implies the possibility that the extension of the collision belt between the north and south China blocks does not extend through some places between the Youngnam and Gyeonggi massifs. On the other hand a quartzofeldspathic xenolith of porphyroblastic gneiss show 1928 ± 42 Ma which is older than above age of the metamorphism and is identical with the zircon U-Pb age of porphyroblastic gneiss indicating the formation age of the protolith of the porphyroblastic gneiss.

Key words : Youngnam massif, metamorphic age, Sm-Nd, Precambrian, metamorphism