

경기육괴 편마암의 흑운모와 사장석 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대

박계현¹ · 송용선^{1,*} · Cao Lin² · Jin Wei² · Zhang Xingzhou²

¹부경대학교 환경지질학과, 608-737 부산시 남구 대연동 599-1

²College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China

^{40}Ar - ^{39}Ar Biotite and Plagioclase Ages of the Gneisses from Gyeonggi Massif

Kye-Hun Park¹, Yong-Sun Song^{1,*}, Lin Cao², Wei Jin² and Xingzhou Zhang²

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

²College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China

요 약: 경기육괴의 선캠브리아 편마암들에서 분리한 흑운모와 사장석들로부터 Ar-Ar 연대를 분석하였다. 흑운모에서는 $1,294 \pm 46$, $1,241 \pm 39$ 및 $1,217 \pm 39\text{Ma}$ (오차는 모두 2σ), 그리고 사장석으로부터는 934 ± 25 , 872 ± 19 , $819 \pm 15(2\sigma)\text{Ma}$ 의 연령이 구해졌다. 이러한 연대 값은 같은 시료에서 구한 U-Pb 지어콘 연대($1,613 \pm 51$ - $2,168 \pm 24(2\sigma)\text{Ma}$, 송용선 외, 2001)와는 큰 차이가 있다. 이러한 흑운모와 사장석의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대는 각각 독립적이고 광역적인 열적 교란 사건을 지시할 가능성이 크다고 판단된다. 흑운모가 기록하고 있는 중원생대의 시기는 당시에 광역적으로 일어났던 변성작용과 뒤이은 차별적 융기의 결과로 해석될 수 있다. 한편 사장석이 기록하는 신원생대의 연대는 광역적인 인장력 하에서 일어났던 화성활동과 관련 있을 것으로 생각되며, 이는 당시에 존재했던 로디니아 초대륙의 균열과 관련되었을 가능성을 제안한다.

핵심어: 경기육괴, 변성암, 중원생대, 신원생대, ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대

Abstract: ^{40}Ar - ^{39}Ar ages were determined from the biotites and plagioclases separated from the Precambrian gneisses of Gyeonggi Massif. Biotites yield $1,294 \pm 46$, $1,241 \pm 39$ and $1,217 \pm 39\text{Ma}$ (2σ errors), and plagioclases yield 934 ± 25 , 872 ± 19 and $819 \pm 15(2\sigma)\text{Ma}$. These ages are significantly different from the U-Pb zircon ages obtained from the identical samples ($1,613 \pm 51$ - $2,168 \pm 24\text{Ma}$ (2σ), Song *et al.*, 2001). The ages of biotites and plagioclases can be interpreted to represent independent regional thermal events. The Mesoproterozoic ages recorded by the biotites can be interpreted as a consequence of regional metamorphism followed by differential uplift. We propose that plagioclases record Neoproterozoic ages which are related with igneous activities under the regional extensional regime, related with the breakup of the supercontinent Rodinia existed at that time.

Key words: Gyeonggi massif, metamorphic rock, Mesoproterozoic, Neoproterozoic, ^{40}Ar - ^{39}Ar age

서 언

경기육괴는 영남육괴 및 낭림 육괴와 더불어 한반도의 기저를 이루는 선캠브리아의 암석들로 구성된다. 최근 들어 경기육괴 및 영남육괴의 선캠브리아 암석들에 대한 신뢰도 높은 연대측정 결과가 많이 보고 되고 있으며, 이러한 연대자료들은 한반도의 선캠브리아 기저

지각의 형성과 진화에 대하여 갖고 있던 기존의 시각에 많은 수정이 필요함을 보여주고 있다. 특히 옥천대를 사이에 두고 나뉘어져 있는 경기육괴와 영남육괴 사이의 유사성과 차이점들은 이들 각각의 생성과 진화뿐만 아니라 사이에 놓인 옥천대의 형성과정과정과 진화론의 논의하는데도 중요한 단서를 제공해 줄 수 있을 것으로 생각된다. 또한 지난 10여년동안 많은 연구자의 주

*Corresponding author: Tel: 82-51-620-6236, E-mail yssong@pknu.ac.kr

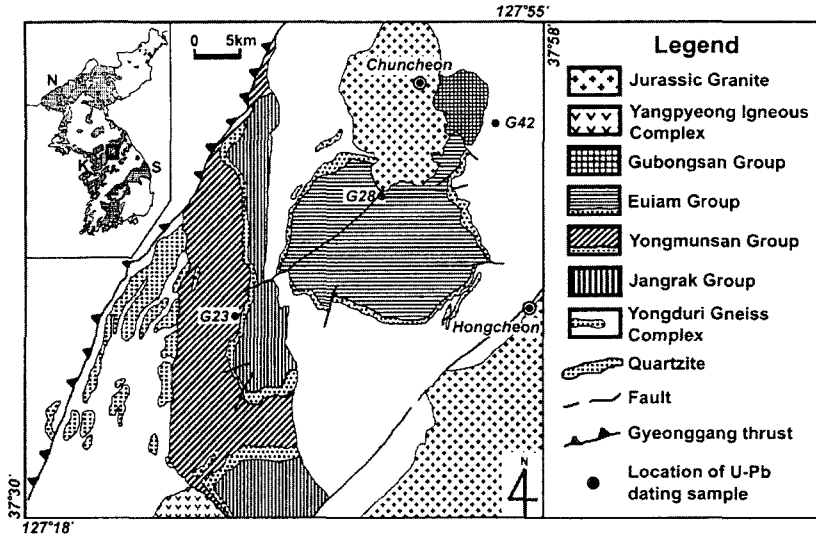


Fig. 1. Geological map of the central part of the Gyeonggi massif modified after Kim *et al.* (1974), D.S. Lee *et al.* (1974) and S.M. Lee *et al.* (1974). Inset shows the distribution of Precambrian Nangnim, Gyeonggi, and Yeongnam massifs from north to south of the Korean peninsula respectively. The square box on Gyeonggi massif indicates the area of the enlarged map. Kim *et al.*(1981) and Kim(1989) suggested that Yongmunsan Group with basal quartzite layer overlies Jangrak Group unconformably and such interpretation is adapted in this figure. Sampling localities for the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determination are also shown.

목을 받아온 남중국과 북중국 사이의 대륙 충돌대가 한반도의 어디로 지나가느냐(예, Li, 1993; Ree *et al.*, 1996)를 밝히는데도 두 육괴 암석의 생성시기 및 남북 중국 지괴들과의 대비가 중요한 열쇠가 될 것으로 생각된다.

여러 가지 연대측정 방법들은 폐쇄온도에 따라 기록할 수 있는 지질사건의 종류가 달라진다. U-Pb 저어콘 연령의 경우 화성작용의 시기와 고도 변성작용의 시기를 기록할 수 있으나, 훨씬 낮은 온도에서 일어난 광역변성작용을 밝히는 데는 유용하지 못하다. 반면에 K-Ar이나 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대측정법의 경우는 반대로 비교적 낮은 온도에 광역변성작용에 의해서도 그 이전의 기록이 없어지고 새로운 사건의 시기를 알려줄 수 있는 가능성이 있다. 이 논문에서는 송용선 외(2001)가 U-Pb 저어콘 연대를 보고했던 경기육괴의 편마암들로부터 흑운모와 사장석을 분리하여 측정한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대를 보고함으로써 경기육괴의 변성암들이 생성된 이후의 지질사건들에 대한 추가적인 연대자료를 제공하고 그 의미에 대하여 논의한다.

지질개요

연구대상 지역은 경기도와 강원도의 경계부분에 위

치한 경기육괴의 중앙부이다. 경기육괴 대부분의 변성암들은 상부 각섬암상으로부터 곳에 따라서는 백립암상의 변성정도를 나타낸다(Kim, 1989; 이광진과 조문섭, 1992; 조문섭과 김종욱, 1993; 조윤희 외, 1996; 권용완 외, 1997; 권용완, 1998). 연구지역을 포함한 경기육괴의 일반지질은 송용선 외(2001)에 요약되어 있다. 이 연구의 결과와 직접적인 비교를 위해 경기육괴의 변성암들에 대하여 최근에 보고된 연대자료를 살펴보면 약 7억년으로부터 24억년 범위의 매우 다양한 연대를 나타내고 있다(Lee *et al.*, 1994; Turek and Kim, 1996; 조동룡 외, 1998; Kim *et al.*, 1999; 송용선 외, 2001; 조동룡과 김용준, 2003). 비교적 변성도가 높은 편마암류의 경우 고원생대의 연령을 보이는 것이 대부분(Turek and Kim, 1996; Lee *et al.*, 1997; 조문섭 외, 1999; Kim *et al.*, 1999; 송용선 외, 2001)이라고 할 수 있지만 각섬암과 대리암, 변성 알칼리 화강암류, 토날라이트 등 다양한 암석의 연대가 7.4~8.6억년의 신원생대로 보고되었으며(박계현과 정창식, 1993; 권성택 외, 1995; Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2001; 조문섭, 2001; Lee *et al.*, 2003), 중원생대의 연령도 포함되고 있다(예, Lee *et al.*, 1994).

Table 1. ⁴⁰Ar-³⁹Ar data for metamorphic rocks from Gyeonggi Massif.

Sample	Mineral	T(°C)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	(⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _k) ± 1σ	³⁹ Ar _k %	Age ± 1σ(Ma)		
G23	Plagioclase	400	68.041	0.1340	1.6203	0.1804	28.75 ± 0.44	2.76	436.9 ± 12.0		
		520	36.046	0.0756	1.2986	0.1628	13.90 ± 0.12	4.89	224.5 ± 1.8		
		630	32.071	0.0606	1.5458	0.1667	14.36 ± 0.01	5.63	231.3 ± 1.5		
		720	45.498	0.0403	1.8818	0.1753	33.82 ± 0.11	5.99	503.9 ± 6.1		
		820	64.495	0.0195	1.3742	0.1270	58.88 ± 0.39	8.73	803.6 ± 18.0		
		900	66.781	0.0216	1.6884	0.1644	60.61 ± 0.42	8.21	822.5 ± 19.6		
		980	64.800	0.0147	1.4118	0.1013	60.63 ± 0.31	10.60	822.7 ± 18.5		
		1060	64.223	0.0131	1.9345	0.1623	60.58 ± 0.39	16.30	822.2 ± 18.4		
		1140	62.987	0.0104	2.9436	0.1121	60.26 ± 0.38	21.90	818.6 ± 17.4		
		1220	65.965	0.0193	4.3248	0.1921	60.79 ± 0.41	8.08	824.4 ± 19.2		
		1300	98.540	0.0721	2.3549	0.2701	77.36 ± 0.92	3.89	996.4 ± 49.5		
		1450	153.310	0.1068	2.8101	0.3398	122.40 ± 2.24	2.92	1,394.9 ± 152.2		
		G23	Biotite	400	57.426	0.1337	1.3734	0.1139	18.20 ± 0.23	1.30	288.6 ± 4.3
				500	35.417	0.0714	0.7285	0.0565	14.44 ± 0.09	2.17	252.6 ± 1.4
				600	36.744	0.0465	0.7211	0.0628	23.10 ± 0.09	2.78	358.9 ± 2.2
700	61.805			0.0321	1.0766	0.1840	52.20 ± 0.27	3.72	728.4 ± 11.3		
800	78.356			0.0205	0.8495	0.2439	72.41 ± 0.43	4.71	946.6 ± 22.2		
900	104.110			0.0109	0.6036	0.1137	100.90 ± 0.76	9.43	1,215.9 ± 47.0		
1000	102.890			0.0069	0.5754	0.0682	100.90 ± 0.74	22.30	1,215.5 ± 45.9		
1100	103.110			0.0084	0.8747	0.1256	100.80 ± 0.74	16.10	1,214.8 ± 46.2		
1200	103.780			0.0076	0.8557	0.1281	101.70 ± 0.75	23.90	1,222.1 ± 46.9		
1300	104.700			0.0118	0.5376	0.0765	101.30 ± 0.77	10.10	1,218.9 ± 47.6		
1450	116.410			0.0538	1.1298	0.2308	100.70 ± 0.95	2.52	1,213.8 ± 58.7		
G28	Plagioclase			450	20.561	0.0327	1.0983	0.1215	11.01 ± 0.00	2.23	180.6 ± 0.6
		580	44.242	0.0242	0.9259	0.0909	37.18 ± 0.20	3.44	547.2 ± 7.1		
		660	68.667	0.0133	0.8488	0.0844	64.82 ± 0.50	4.69	867.8 ± 25.0		
		750	68.254	0.0105	0.7928	0.0730	65.24 ± 0.50	6.57	872.2 ± 24.7		
		830	68.085	0.0095	0.9029	0.0591	65.39 ± 0.50	8.82	873.8 ± 24.8		
		920	68.257	0.0092	0.9164	0.0606	65.64 ± 0.50	11.36	876.5 ± 24.9		
		1000	67.626	0.0079	0.8032	0.0647	65.37 ± 0.50	14.49	873.6 ± 24.4		
		1100	67.010	0.0062	0.6966	0.0495	65.25 ± 0.50	20.22	872.3 ± 23.9		
		1200	66.972	0.0073	0.9704	0.0486	64.90 ± 0.50	22.72	868.6 ± 23.8		
		1300	105.442	0.0510	1.2991	0.3333	90.61 ± 1.20	3.06	1,122.9 ± 71.6		
		1450	124.348	0.0783	1.2774	0.3217	101.50 ± 1.70	2.40	1,220.7 ± 105.7		

⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대측정 결과 및 토의

⁴⁰Ar-³⁹Ar 분석 및 결과

⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대측정을 시행한 시료는 경기육괴의 용두리 편마암 복합체, 용문산층군, 의암층군에서 각 1개씩 선정하였으며 송용선 외(2001)이 U-Pb 저어콘 연대를 보고한 시료와 같은 시료이다. 용두리 편마암 복합체의 시료는 호상편마암으로, 길게 신장되고 불합상조직이 잘 발달된 석영과 흑운모들의 평행배열로 강한 엽상 조직을 이루고 있으며, 흑운모, 석영, 사장석, K-장석이 주성분이고, 소량의 석류석과 각섬석을 포함하

고 있다. 용문산층군의 시료도 호상편마암이며 주로 석영, 사장석, K-장석, 흑운모, 석류석으로 구성되어 있으며, 소량의 섬유상 규선석이 산출된다. 구성광물들의 크기가 대체로 0.5~1 mm 정도인 등립질 조직과 현저하게 발달한 엽상 조직을 이루고 있으며, 석류석들은 사장석과 석영 포유물들을 많이 함유하고 있다. 흑운모는 흔히 주변부나 벽개면을 따라 녹니석으로 후퇴되어 있다. 의암층군의 시료는 호상편마암 중의 각섬석 편마암 부분으로 역시 엽상조직이 뚜렷하며, 흑운모, 석영, 사장석, K-장석과 각섬석이 주성분이다. 입자 크기가 0.5~1 mm 정도인 다른 광물들에 비해 각섬석은

Table 1. Continued.

Sample	Mineral	T(°C)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k) \pm 1\sigma$	$^{39}\text{Ar}_k\%$	Age $\pm 1\sigma(\text{Ma})$
G28	Biotite	400	48.729	0.1144	0.9239	0.1229	15.13 ± 0.17	2.26	243.0 ± 2.7
		520	39.796	0.0884	0.6846	0.1020	13.81 ± 0.11	2.82	223.1 ± 1.6
		620	40.845	0.0587	0.5906	0.0845	23.61 ± 0.12	4.09	366.1 ± 2.7
		700	58.730	0.0357	0.6323	0.1389	48.27 ± 0.24	4.83	682.7 ± 9.6
		780	107.220	0.0180	0.5732	0.1408	101.10 ± 0.80	5.31	$1,224.8 \pm 50.1$
		900	106.070	0.0098	0.4043	0.0821	103.20 ± 0.79	10.70	$1,235.6 \pm 49.3$
		1000	105.400	0.0081	0.6111	0.0703	103.10 ± 0.78	14.20	$1,234.5 \pm 48.7$
		1100	104.740	0.0074	0.5120	0.0663	102.60 ± 0.77	18.20	$1,230.4 \pm 48.0$
		1200	104.920	0.0061	0.9211	0.1090	103.20 ± 0.77	23.40	$1,235.7 \pm 48.3$
		1300	107.690	0.1370	0.8458	0.0974	103.80 ± 0.81	11.20	$1,240.4 \pm 51.0$
1450	131.790	0.0430	0.8331	0.2450	119.20 ± 1.22	2.81	$1,369.4 \pm 81.7$		
G42	Plagioclase	430	38.690	0.0714	4.1341	0.1670	18.03 ± 0.20	3.05	286.0 ± 3.1
		560	40.889	0.0489	3.6236	0.2133	26.84 ± 0.20	4.09	410.9 ± 4.8
		660	49.425	0.0345	2.4296	0.2031	39.52 ± 0.30	4.74	576.6 ± 9.3
		780	75.273	0.0164	0.9883	0.2218	70.57 ± 0.60	5.00	927.8 ± 31.7
		860	74.490	0.0102	0.8011	0.1531	71.57 ± 0.60	8.92	938.1 ± 31.3
		940	73.469	0.0082	0.9696	0.1143	71.17 ± 0.60	13.37	934.0 ± 30.3
		1020	72.936	0.0060	0.9973	0.0670	71.28 ± 0.60	19.83	935.1 ± 29.9
		1100	73.224	0.0077	0.9571	0.0820	71.07 ± 0.60	16.65	933.0 ± 30.1
		1180	75.200	0.0128	0.6764	0.1008	71.50 ± 0.60	11.37	937.3 ± 31.9
		1250	95.442	0.0299	1.2044	0.1510	86.79 ± 1.00	6.38	$1,087.3 \pm 57.3$
1350	119.565	0.0478	1.1816	0.2043	105.66 ± 1.60	4.18	$1,256.6 \pm 96.7$		
1480	161.654	0.0902	1.5893	0.2481	135.37 ± 2.90	2.42	$1,494.7 \pm 204.6$		
	Biotite	400	68.367	0.1326	1.9350	0.1939	29.51 ± 0.33	2.04	447.1 ± 9.1
		500	35.549	0.0722	0.9467	0.0983	14.36 ± 0.09	3.61	231.2 ± 1.4
		580	45.567	0.0811	1.3395	0.1284	18.81 ± 0.13	3.09	297.5 ± 2.5
		600	51.437	0.0603	1.0898	0.2011	33.78 ± 0.18	3.63	503.4 ± 5.7
		760	83.849	0.0420	1.4493	0.1637	71.65 ± 0.49	4.71	938.8 ± 25.2
		820	114.390	0.0166	0.5725	0.1439	109.6 ± 0.92	5.66	$1,289.9 \pm 59.1$
		900	111.360	0.0068	0.4506	0.0489	109.40 ± 0.87	18.40	$1,288.4 \pm 56.0$
		1000	112.240	0.0112	0.6333	0.2796	109.00 ± 0.88	10.20	$1,285.3 \pm 56.8$
		1100	111.380	0.0081	0.5887	0.2269	109.10 ± 0.87	25.70	$1,285.6 \pm 55.9$
		1200	113.890	0.0157	0.5108	0.1463	109.30 ± 0.91	11.30	$1,287.7 \pm 58.5$
1300	116.420	0.0283	0.6175	0.1672	108.10 ± 0.95	6.99	$1,277.9 \pm 60.8$		
1450	157.080	0.0664	0.7247	0.1903	137.70 ± 1.73	4.72	$1,511.8 \pm 123.8$		

장축이 1~2 mm로 길쭉한 반정상을 이루고 있다.

^{40}Ar - ^{39}Ar 분석을 위한 광물의 분리는 파쇄, 체질 및 자력선별기와 양안실체현미경을 사용하는 일반적인 방법을 따랐으며, 동위원소의 분석은 중국과학원 지질연구소에서 고정진공질량분석기(영국 RGA-10 모델)를 사용하여 분석하였다.

세 시료로부터 분석된 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연령을 살펴보면 흑운모의 연령이 $1,294 \pm 46$, $1,241 \pm 39$ 및 $1,217 \pm 39$ (모두 2σ 오차)Ma, 그리고 사장석의 연령이 934 ± 25 , 872 ± 19 , $819 \pm 15(2\sigma)$ Ma로 구해졌다(Table 1). 같은 시료

에서 송용선 외(2001)가 분석한 U-Pb 저어콘 연대 ($1,613 \pm 51$ ~ $1,688 \pm 24(2\sigma)$ Ma)와 이 연구에서 구한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대를 비교하면 큰 차이가 있다. U-Pb 저어콘 연대는 모두 훨씬 더 오래된 연대를 나타내는 반면에 흑운모 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대는 훨씬 젊으며, 비교적 좁은 범위의 $1,217$ ~ $1,294$ Ma를 나타낸다. 한편 사장석 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대는 흑운모보다도 더욱 젊은 819 ~ 934 Ma의 연대를 보인다. 이러한 연대의 차이를 어떻게 해석하느냐 하는 것이 이 논문의 논의 핵심이다.

열적 교란에 의한 부분적인 Ar 손실 가능성

가장 처음으로 검토해 볼 수 있는 경우는 고원생대에 형성된 이 암석들이 후기의 열적 교란을 겪은 것은 사실이지만 평형에 이르지 못한 불완전한 교란으로 K-Ar 체계가 부분적인 영향을 받은 경우이다. 이러한 교란에 의해 비교적 폐쇄온도가 낮은 사장석은 더 많은 영향을 받아 기존에 축적된 Ar의 대부분을 잃어버렸으나 상대적으로 폐쇄온도가 더 높은 흑운모는 영향을 덜 받아 Ar 손실이 적었으며, 결과적으로 더 오래된 연령을 나타내게 된 것으로 해석할 수 있다. 특히 경기육괴의 주변에는 중생대의 화강암체들이 많이 관입하고 있기 때문에 이에 의한 영향도 검토해보아야 할 것이다. 분석 시료 중에서 G-42의 경우 춘천 화강암에 가까이 위치한 반면에 다른 시료들은 주라기 대보화강암 등에서 비교적 멀리 떨어진 경기육괴 기저암체의 중앙부에 위치하고 있다. 따라서 G-42가 관입에 의한 열적 영향을 가장 많이 받았을 가능성이 있으나, 흑운모와 사장석의 연대 모두 가장 높은 연령을 나타내는 것으로 볼 때 이러한 가능성은 높지 않은 것으로 생각된다.

K-Ar법과는 달리 이 연구에서와 같은 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대 측정의 경우는 Ar 손실의 영향이 Ar 추출온도에 따라 다르게 나타날 수 있다. 일반적으로 어떤 광물이 간직하고 있는 Ar 가스를 온도를 올려가면서 분석하였을 때 최저온과 최고온의 부분을 제외한 나머지 온도에서 추출한 Ar 가스들이 잘 일치하는 연대값을 보인다고 하면 대부분의 경우 이를 이 광물의 폐쇄온도이상에 도달했던 시기로 해석한다. 즉, 마그마로부터의 정출시기가 이거나 아니면 해당온도 이상으로 상승하였던 열적 교란 사건의 시기로 해석하는 것이 일반적이다. 따라서 이 연구에서 구해진 경기육괴 변성암에서 분리한 흑운모와 사장석의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대는 해당 암석이 각 광물의 폐쇄온도를 상회하는 열적 교란 사건의 시기를 지시한다고 해석할 수 있다.

경기육괴의 변성작용에 대한 연구결과를 보면 백립 암상에 이르는 고온의 변성작용을 겪을 것으로 되어있다. 그러나 그 시기가 약 18억년전(Lee *et al.*, 1997)으로 흑운모의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대와와는 상당한 차이가 있다. 따라서 흑운모의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대는 정점 변성작용 이후에 일어났던 독립적인 열적 교란으로 해석되어야 할 것이다.

그러나 흑운모의 연대와 사장석의 연대가 상당히 다르고, 같은 광물로 구한 연대 역시 시료에 따라 상당한 차이가 있기 때문에 그 이유에 대해 설명할 수 있는 사건이라야 할 것이다. 이러한 논리에 부합되는 사

건의 첫 번째 가능성은 전체 지역에 걸쳐 일어났던 단일의 열적 사건으로부터 파생된 결과를 생각해 볼 수 있다. 하지만 이 경우 흑운모와 사장석이 각각 다른 시기를 기록하려면 상당히 느린 냉각이어야 하며, 두 광물의 연대 차이가 수 억년에 이르는 것을 감안하면 단순한 냉각시기의 차이로 해석하는 것은 무리라고 판단된다.

두 번째 가능성은 흑운모의 연대와 사장석의 연대가 각각 독립된 광역적인 열적 교란의 시기를 나타내는 것이다. 이 경우 사장석에 나타난 연대시기의 열적 사건은 광범위하게 일어난 것이긴 하지만 흑운모의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 시계를 다시 돌려놓을 만큼의 수준에는 도달하지 않았어야 한다. 일부 시료의 경우 흑운모가 녹니석으로 후퇴변성작용을 보이는 것은 이러한 후기의 열적 사건에 의한 결과일 수도 있다. 그러나 이러한 열적 사건의 온도가 비교적 낮고, 지속시간이 길지 않았다면 이를 감지할 수 있는 특징적인 광물조합이 나타나기는 어려울 것으로 생각한다.

중원생대-신원생대의 열적 교란사건

흑운모와 사장석이 각각 나타내는 열적 교란사건들이 실제의 지질사건으로 인정받기 위해서는 다른 독립된 연구에 의한 검증이 필요할 것으로 생각된다. 지금까지 경기육괴에서 보고된 유사한 시기의 화성활동이나 변성작용에 대한 연구결과로는 다음과 같은 것들이 있다.

12~13억년의 시기

Lee *et al.*(1994)는 경기육괴 중남부 지역에 위치한 장호원의 한 석류석 편마암의 석류석, 흑운모, 전암 시료로부터 $1,198 \pm 33(2\sigma)\text{Ma}$ 의 Sm-Nd 연대를 구하였다. 이 연대는 변성광물을 분리하여 구한 연대이기 때문에 변성시기라고 해석된다. 송용선 외(2001)가 이 연구와 동일한 시료로부터 보고한 저어콘 연대 중에서 용두리 편암복합체의 저어콘들은 일치곡선(concordia)에서 상당히 떨어진 위치의 불일치선(discordia) 위에 놓이며 앞에서 언급한바와 같이 $2,167 \pm 25\text{Ma}$ 의 상부교점 연대와 더불어 $1,224 \pm 43\text{Ma}$ 의 하부교점 연대를 정의한다. 이러한 하부교점의 연대는 동일한 시료의 흑운모 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대(1294Ma)와 매우 비슷한 연대이다. 남서쪽의 장호원 지역에서는 변성암 내에 변성광물로 석류석이 만들어졌고, 북동쪽의 춘성군 지역에서는 편마암 내의 저어콘이 일치곡선에서 상당히 떨어진 지점의 불일치선에 놓이기 때문에 당시의 변성작용이 꽤 강한 정도였을 것으로 판단된다. 나머지 지역에서도 적어도

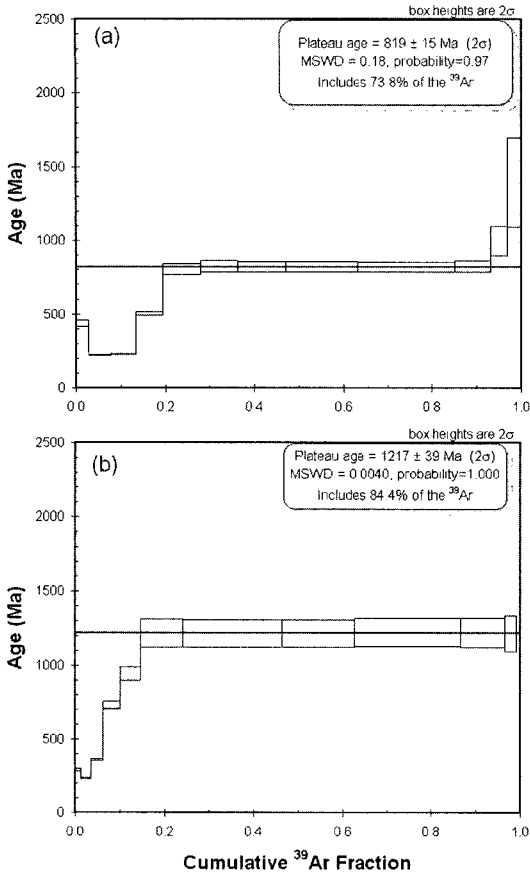


Fig. 2. ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra of (a) plagioclase and (b) biotite from gneiss sample G-23, central Gyeonggi massif.

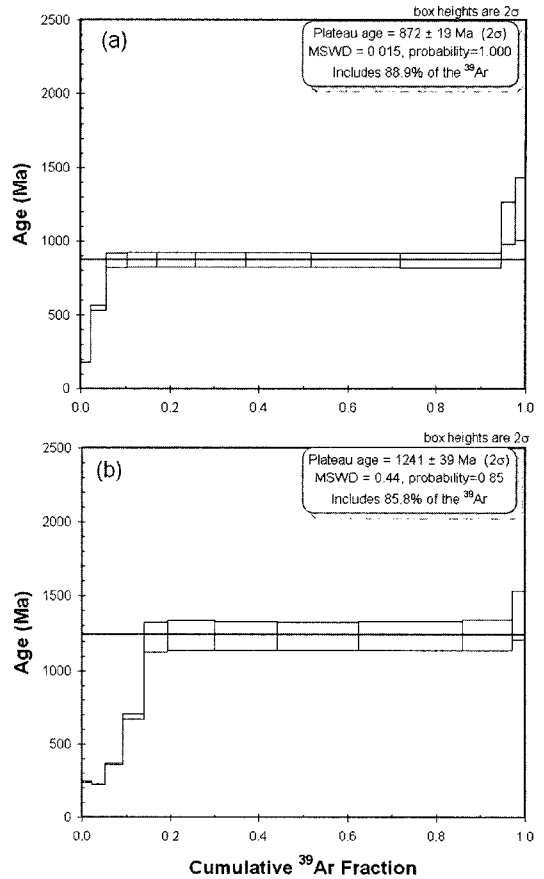


Fig. 3. ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra of (a) plagioclase and (b) biotite from gneiss sample G-28, central Gyeonggi massif.

흑운모의 폐쇄온도를 훨씬 상회하는 온도까지 지운이 상승하였을 것이다.

한편, 이 연구에서 구한 세 시료의 흑운모 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대와 Lee *et al.*(1994)의 장호원 석류석 편마암의 Sm-Nd 연대는 북동에서 남서쪽으로 가면서 점차 젊어지는 현상을 보인다. 가장 북동쪽의 시료가 1,294 ± 46Ma이고 남서쪽으로 가면서 1,241 ± 39, 1,217 ± 39, 1,198 ± 33Ma로 바뀐다. 이러한 경향성을 형성하게 된 원인에 대해서는 확실하게 단정할 수는 없지만 광역적인 냉각사와 관련 있을 가능성이 높다고 생각된다. 즉, 이 지역의 광역적인 열변성작용 이후의 냉각 과정에서 차별적인 용기 등으로 인하여 지역적인 냉각속도에 차이가 있었을 가능성이 있으며, 최종적으로 흑운모의 폐쇄온도를 밀도는 온도로 냉각된 시점이 달라 이와 같은 지역적인 변화를 가져온 것으로 해석할 수 있다.

7~9억년의 시기

박계현과 정창식(1993)은 강원도 춘성군 동면 느릿재 부근의 경기육괴중 구봉산층군의 대리암들에 대한 동위원소 분석을 통해 794 ± 162(1σ)Ma의 Pb-Pb 연대를 보고하였다. 한편 권성택 외(1995)는 구봉산층군에 인접한 상갈리 지역의 경기편마암 복합체에서 산출되는 각섬암에 대한 분석을 통해 852 ± 48Ma의 Sm-Nd 연대를 구하였다고 보고하였으며, 이 연대를 각섬암의 정치시기로 해석하였다. 이 두 연구에서 보고한 연대들은 비록 오차가 크기는 하지만 인접한 지역에서 동일하다고 상호 일치하는 연대를 구하였기 때문에 신원생대에 일어났던 화성활동 및 변성작용의 시기를 나타낼 가능성이 매우 높으며, 이 연구의 사장석 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대와 비슷한 연대로 주목할 필요가 있다고 생각한다.

또한 Ree *et al.*(1996)은 경기육괴 서부지역의 삼국

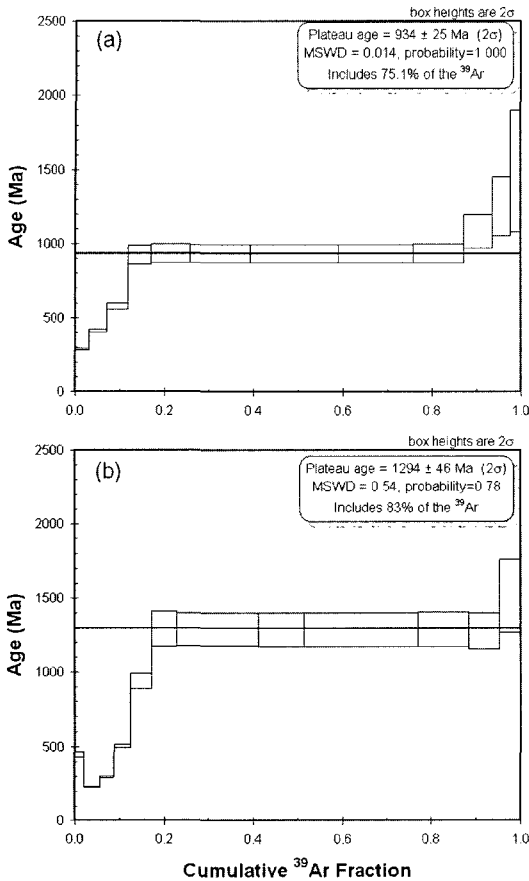


Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of (a) plagioclase and (b) biotite from gneiss sample G-42, central Gyeonggi massif.

각섬암으로부터 $824 \pm 143(1\sigma)\text{Ma}$ 의 Sm-Nd 연대를 구하였으며, 이 연대가 삼곳 각섬암의 원암이 만들어진 시기일 것으로 해석하였다. 이러한 연대는 Cho *et al.* (2001)이 동일지역 각섬암으로부터 $861.2 \pm 7.3\text{Ma}$ 의 SHRIMP U-Pb 저어콘 정출연대를 구함으로써 확인되었다. Cho *et al.* (2001)은 이 시기가 신원생대에 Rodinia 초대륙의 분열과 관련 있을 가능성이 있다고 하였다. 삼곳 각섬암의 생성연대는 권성택 외(1995)가 경기육괴 동부의 상거리 각섬암에서 보고한 연대와 같은 시기로 볼 수 있으며, 약 8.6억년 부근의 시기에 경기육괴의 상당히 넓은 지역에 걸쳐 열곡의 발달과 현무암질 암석의 분출이 일어났을 가능성을 시사한다.

이 밖에도 조문섭(2001)은 경기육괴 남서부 홍성지역의 화강암질 편마암으로 알려진 암석에 대해 $812 \pm 14\text{Ma}$ 와 $822 \pm 17\text{Ma}$ 의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대를 보고하였으며, 김장하와 조문섭(2002)은 이 암석이 토

날라이트-트론제마이트-화강섬록암(TTG) 복합체로 분류된다고 하였다. 그리고 Lee *et al.* (2003)은 경기육괴 북서부지역의 알칼리질 변성화강암질암으로부터 $742 \pm 40\text{Ma}$ 의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대를 보고하였으며, 이 시기의 알칼리질 화성활동은 남중국과 남한지역에 동시에 일어났던 신원생대의 열곡 관련 화성활동이었다고 해석하였다.

이상과 같은 경기육괴 자료들을 종합하면 신원생대의 시기에 경기육괴는 각섬암의 원암인 현무암질 암석의 출현과 알칼리 화강암이 시사하는 것처럼 인장력에 의한 열곡의 생성과 이에 따른 화성활동들이 활발히 일어났던 것으로 판단된다. 이와 같은 화성활동에 의해 광역적인 지온의 상승이 일어났고, 이러한 온도상승이 편마암 내의 사장석에 기록된 것으로 생각된다. 사장석의 연령이 흑운모의 경우와 마찬가지로 북동에서 남서쪽으로 가면서 젊어지는 현상은 지역적인 용기 속도의 차이가 중원생대에 이어 신원생대에도 마찬가지로 작용하였던 것일 수도 있고, 아니면 지역적으로 다소 다른 시간에 일어났던 열적 교란시기를 반영할 수도 있다고 생각한다. 특히 7~9억년의 시기는 원생대 말의 초대륙 로디니아가 분열되는 시기이기 때문에 경기육괴에서 발견되는 이러한 열적 교란 사건들 역시 로디니아의 분열과 연관있을 가능성이 있다. 따라서 신원생대의 경기육괴에 대한 연구는 초대륙의 복원과 관련하여 당시 한반도의 위치를 가늠하는데도 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

결론

이 연구에서 분석에 사용된 시료의 수가 적어 경기육괴의 전체적인 지열사를 반영하기는 어려울 것으로 판단되며, 또한 대표성에도 다소 문제가 있을 수 있다고 생각한다. 그러나 경기육괴의 변성암들로부터 분리한 흑운모와 사장석에서 구한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 각각 독립적이고 광역적인 열적 교란 사건을 지시할 가능성이 있으며, 이러한 중원생대와 신원생대의 광역적인 열변성작용의 가능성은 추가적인 연구를 통해 확인해볼 가치가 있다고 판단한다. 저어콘 연대가 고원생대에도 불구하고 흑운모가 중원생대의 시기를 기록하고 있는 것은 당시에 광역적으로 일어났던 변성작용과 뒤이은 차별적 용기의 결과로 해석될 수도 있다. 한편 동일 시료들 내의 사장석이 기록하는 신원생대의 연대는 광역적인 인장력 하에서 일어났던 화성활동과 관련 있을 가능성이 있다. 특히 신원생대의 시기는 경기육괴의 여러 곳에서 각섬암과 변성 화강암질암, 토날라이트 등

다양한 암석들에서 보고 되고 있으며, 이는 신원생대에 존재했던 로디니아 초대륙의 균열과 관련된 연구에서 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문을 읽고 여러 가지 유익하고 건설적인 비평을 해준 김정민 박사와 이종익 박사께 감사드린다. 또한 원고의 준비에 많은 도움을 준 김남훈 석사와 김찬수 학사에게도 감사드린다. 이 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행되었으며(특정기초 과제번호 R01-2004-000-10825-0) 이에 감사드린다.

참고문헌

권성택, 조문섭, 전은영, 이승렬, Nakamura, E., 1995, 춘천 각섬암의 Sm-Nd과 Rb-Sr 동위원소 연구. 한국암석학회 제4차 정기총회 및 학술발표회 요약집, 25.

권용완, 1998, 오대산편마암복합체내에 산출되는 앵피블라이트의 지화학적 특성과 변성작용. 암석학회지, 7, 111-131.

권용완, 김형식, 오창환, 1997, 경기육괴 북동부지역에 분포하는 오대산편마암복합체의 다변성작용. 암석학회지, 6, 226-243.

김장하, 조문섭, 2002, 홍성지역에 분포하는 신원생대 토날라이트-트론제마이트-화강섬록암(TTG)의 지구화학적 특성과 지구조적 의미. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 추계공동학술발표회 초록집, 37.

김옥준, 김서운, 유병화, 박병권, 1974, 한국지질도 (1:50,000), 가평도폭 및 설명서. 국립지질광물연구소, 45p.

김종환, 김종대, 정태진, 오천혁, 1981, 가평지역 우라늄 광화대지역 조사연구. 가평 및 울진지역 우라늄광상조사연구(우라늄-8), 한국동력자원연구소, 61-80.

박계현, 정창식, 1993, 선캠브리아 경기육괴 중 대리암의 연대측정에 대한 예비연구. 암석학회지, 2, 130-138.

송용선, 박계현, 박맹언, Cao Lin, Jin Wei, Zhang Xingzhou, 류호정, 2001, 동북아시아 선캠브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 2. 경기육괴 일부 변성암의 저어콘 연대. 암석학회지, 10, 95-105.

이광진, 조문섭, 1992, 가평-청평 지역 경기육괴의 변성작용. 암석학회지, 1, 1-24.

이대성, 남기상, 이하영, 양승영, 1974, 한국지질도 (1:50,000), 춘천도폭 및 설명서. 국립지질광물연구소, 45p.

이상만, 김봉균, 소철섭, 진명식, 1974, 한국지질도 (1:50,000), 용두리도폭 및 설명서. 국립지질광물연구소, 35p.

조동룡, 김용준, 2003, 경기육괴 포천 지역의 흑운모 편마

암과 우백질 화강암맥에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정: 광역변성작용 연령 및 퇴적시기의 제한. 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 76.

조동룡, 홍승호, 최위찬, 이병주, 최범영, 1998, 한국지질도 (1:50,000), 고성-간성 도폭 및 지질조사보고서. 한국자원연구소, 74p.

조문섭, 2001, 이온현미분석기를 사용한 남서부 경기육괴 변성암류의 U-Pb 저어콘 연대: 남중국지괴와의 대비 가능성. 한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 141-142.

조문섭, 김종욱, 1993, 춘천-홍천 지역 용두리 편마암 복합체내에 산출하는 남정석: 변성지구조적 의의. 암석학회지, 2, 1-8.

조문섭, 이기욱, 이승렬, Stern, R., 1999, 남한에서 가장 오래된 지각물질의 나이: SHRIMP 연대 측정. 한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 89.

조윤희, 조문섭, 이승렬, 1996, 청평-양평 지역에 분포하는 근정석편마암의 백립암상 변성작용. 암석학회지, 5, 52-65.

Cho, D.-L., Kwon, S.-T., Jeon, E.-Y., and Armstrong, R., 2001, SHRIMP U-Pb zircon geochronology of an amphibolite and a paragenesis from the Samgot unit, Yeoncheon Complex in the Imjingang belt, Korea, tectonic implication. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 추계공동학술발표회 초록집, 89.

Kim, J.-B., Turek, A., Chang, H.-W., Park, Y.-S., and Ahn, K.-S., 1999, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. Geochemical J., 33, 379-397.

Kim, Y. J., 1989, A study on metamorphism of the metamorphic rocks in the central part of Gyeonggi massif, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 278p.

Lee, S.-G., Song, Y.-S., and Masuda, A., 1994, 1.2 Ga mineral isochron of Changwon 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. Geoscience J., 1, 136-142.

Lee, S. R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H., and Wingate, M. T. D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. Precam. Res., 2294, 1-14.

Lee, S. R., Cho, M., Hwang, J. H., Lee, B.-J., Kim, Y.-B., and Kim, J. C., 2003, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. Precam. Res., 121, 25-34.

Li, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. J. Petrol. Soc. Korea, 2, 9-18.

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.

Turek, A. and Kim, C.-B., 1996, U-Pb zircon ages for Pre-

cambrian rocks in southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. J.*, 30, 231-249.

(2004년 8월 11일 접수; 2004년 9월 10일 채택)