

북동부 경상분지의 화강암류에 대한 지구화학 및 K-Ar 연대

김상중* · 이현구* · 이찬희* · 板谷徹丸**

K-Ar Ages and Geochemistry of Granitic Rocks in the Northeastern Gyeongsang Basin

Sang Jung Kim*, Hyun Koo Lee*, Chan Hee Lee* and Tetsumaru Itaya**

ABSTRACT : The granitic rocks are widely distributed in the northeastern Gyeongsang basin, and are subdivided into the Youngduk, Younghae, Jangsadong and Onjeong granite. Based on the chondrite normalized patterns of REE by primitive mantle, the Jangsadong granite is more negative Eu anomaly than other granites. On the patterns of trace and rare earth elements normalized by primitive mantle, Sr, P, Nd, Sm and Ti contents of the Youngduk and Younghae granites are higher than those of Jangsadong and Onjeong granites. Based on K-Ar ages, the Youngduk granite is 166.5 Ma for biotite, Younghae granite is 158.7 to 178.0 Ma for hornblende, Jangsadong granite is 113.8 to 118.4 Ma for K-feldspar and hornblende, and Onjeong granite is 67.4 Ma for biotite. Thus, geochemical and geochronological results suggest two plutonic episodes: the Youngduk-Younghae granites (178.0~158.7 Ma) and Jangsadong-Onjeong granites (118.4~67.4 Ma). Jurassic plutonism (17°C/Ma) cooled faster than Cretaceous plutonism (26~54°C/Ma) in the study area.

서 언

경상분지의 북동부 (온정-영덕-영해-청하)에는 관입시기를 달리하는 화강암체가 넓게 분포되어 있을 뿐만 아니라, 이들과 성인적으로 밀접한 관련이 있는 Au, Ag, Fe, Mo 및 Cu 광상 등이 배태되어 있다. Hatae (1936)는 영해 및 영덕도폭에서 이 화강암체를 불국사화강암류로 분류하였다. 김옥준 등 (1963, 1968)은 평해도폭에서 온정리 일대를 접하는 온정리 화강암체와 동해안을 따라 분포하는 장사동 화강암체에 대해서 영해-영덕지역에 분포하는 화강암체와 동일암체로 분류하고, 이를 주라기 대보화강암으로 하였다. 또한 영양도폭과 청송도폭내에 분포하는 화강암체에 대해서도 영덕 화강암체의 서측 연장부로 해석되고 있다 (김상욱, 박봉순, 1970; 이홍규, 홍승호, 1973).

이 지역의 화강암체에 대한 지화학적 연구는 김중욱 (1988), 이재영, 이진국 (1992), 이윤종 등 (1993)에 의해 수행되었고, 지질연대학적 연구는 주승환 등 (1982), Jin

et al. (1984), 김중욱 (1988), 진명식 등 (1989)에 의해 수행되었다. 그 결과는 영덕 화강암체가 143~191 Ma, 영해 화강암체가 65~81 Ma, 온정리 화강암체가 96~66 Ma, 장사동 화강암체는 70~75 Ma로 보고되어 있다. 김중욱 (1988)은 연대측정 및 지화학적 결과를 토대로 영덕 화강암체와 영해 (장사동 화강암체)-온정 화강암체로 분리하고, 영해 및 온정 화강암체는 동원마그마의 분화에 의한 산물로 설명하였다.

연구대상 지역의 화강암체에 대한 연대학적 연구는 몇몇 자료를 제외하고는 대부분이 희선트랙법의 결과로서 (Table 1), 이 방법의 폐쇄온도 (250~100°C 영역)를 고려한다면 Rb-Sr 및 K-Ar법에 의해 얻어진 연령보다 다소 젊은 연령이라고 볼 수 있다. 이 연구에서는 이 지역에 분포하는 화강암체에 대해 K-Ar 법을 이용하여 연대측정을 실시하고 동일시료에 대해서 화학분석을 실시하였다. 또한 기존의 연대측정 결과와 비교 검토하여 화강암체의 관입시기를 재조명하고 화강암체에 대한 지화학적 특성을 고찰하였다.

* 충남대학교 자연과학대학 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea), E-mail: kimsang@hanbat.chungnam.ac.kr

** Research Institute of Natural Science, Okayama University of Science, Okayama 700, Japan

지질개요

연구지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암복합체, 화강

Table 1. Previous geochronological data for granitic rocks in the study area.

No.	Mineral	F.T. Age (Ma, $\pm 1\sigma$)	Rb-Sr Age (Ma)	K-Ar Age (Ma)	Reference
Youngduk granite					
234	Ap	165.15 \pm 8.36			Kim (1988)
	Sp	154.57 \pm 13.52			
131	Sp	157.39 \pm 11.05			Kim (1988)
020	Sp	178.20 \pm 14.43			Kim (1988)
85-17	Ap	34.38 \pm 2.26			
	Zr	154.32 \pm 10.14			
85-19	Ap	35.72 \pm 3.02			Jin <i>et al.</i> (1989)
	Zr	150.36 \pm 8.24			
	Sp	190.55 \pm 17.07			
K112	Bt, Wr		185.0 \pm 2.8		Choo <i>et al.</i> (1982)
	Bt			143.5 \pm 1.7	Jin <i>et al.</i> (1984)
Younghae granite					
234-1	Ap	76.96 \pm 5.04			Kim (1988)
	Zr	77.45 \pm 4.26			
	Sp	80.70 \pm 4.33			
030	Zr	80.92 \pm 4.33			
141	Ap	65.30 \pm 3.19			Kim (1988)
85-13	Ap	36.16 \pm 4.02			Kim (1988)
	Zr	66.94 \pm 3.36			Jin <i>et al.</i> (1989)
Jangsadong granite					
157	Ap	61.65 \pm 2.22			Kim (1988)
	Zr	69.63 \pm 2.49			
	Sp	74.70 \pm 3.92			
Onjeong granite					
035	Ap	64.90 \pm 4.53			Kim (1988)
	Zr	75.97 \pm 3.32			
	Sp	74.57 \pm 2.96			
127	Ap	75.69 \pm 5.94			Kim (1988)
	Zr	72.87 \pm 3.55			
	Sp	74.73 \pm 3.46			
204	Zr	69.12 \pm 3.29			Kim (1988)
85-11	Ap	42.90 \pm 3.61			Jin <i>et al.</i> (1989)
	Zr	68.92 \pm 3.77			
	Sp	82.81 \pm 4.46			
85-12	Ap	50.28 \pm 5.43			Jin <i>et al.</i> (1989)
	Zr	66.12 \pm 2.96			
	Sp	78.03 \pm 4.61			
K110	Bt, Wr		96.0 \pm 1.4		Choo <i>et al.</i> (1982)
	Bt			80.6 \pm 4.0	Jin <i>et al.</i> (1984)
K111	Bt, Wr		84.0 \pm 1.4		Choo <i>et al.</i> (1982)
	Bt			84.0 \pm 4.0	Jin <i>et al.</i> (1984)

Ap; apatite, Zr; zircon, Sp; sphene, Bt; biotite, Wr; whole rock.

암복합체 및 백악기 퇴적암류로 구성되어 있다. 선캠브리아기의 변성암복합체는 편암류, 결정질석회암, 석회규산염암 및 편마암류 구성된다. 화강암복합체는 영덕, 영해, 장사동 및 온정 화강암체로 나뉜다. 백악기 퇴적암류는 육성기원의 역암, 사암 및 셰일로 구성되며, 선캠브리아기 및

쥬라기 화강암류를 부정합적으로 피복하고 있다 (Fig. 1).

영덕 화강암체는 조립질이고 각섬석 및 흑운모가 많이 함유되어 있으며, 부분적으로 거정의 알카리장석이 다량 함유되어 있어 육안상 홍색을 띠는 것이 특징이다. 구성 광물은 석영, 정장석, 사장석, 각섬석 및 흑운모 등이고 미

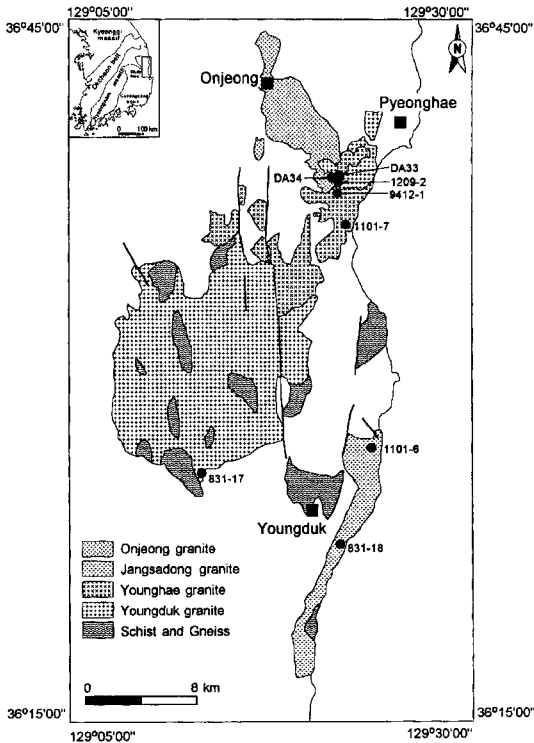


Fig. 1. Simplified geological map and sampling sites for K-Ar dating in the study area (by Kim, 1988).

사장석 및 정장석이 반정을 이루며 소량으로 자철석, 인회석, 녹염석, 저어콘 등을 함유한다. 이 화강암체의 관입 시기는 144~191 Ma (주승환 등, 1982; Jin *et al.*, 1984; 김중욱, 1988; 진명식 등, 1989)이다.

영해 화강암체는 영덕 화강암체와의 직접적인 관계는 알 수 없으나, 중립내지 조립질로서 대부분이 화강섬록암에 속하고 부분적으로 섬록암 및 토날나이트로 구성된다. 각섬석 및 흑운모가 자형을 이루어 집합체로 산출되고 있다. 주구성광물은 사장석, 석영, 정장석, 각섬석 및 흑운모 등이고, 자철석, 인회석, 저어콘, 녹염석, 금홍석 및 스피넬 등이 소량으로 산출된다. 이 화강암체의 연령은 65~81 Ma 이다 (김중욱, 1988; 진명식 등, 1989).

장사동 화강암체는 영덕, 영해 및 온정 화강암체와는 직접적인 관계는 관찰할 수 없고 동해안을 따라 약 20 km 연장성을 보이며 독립적으로 분포한다. 중립내지 조립질의 입도를 보이나, 영덕 및 영해 화강암체보다 반정질 알카리장석이 많이 포함되어 있어 홍색의 암상을 보인다. 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 각섬석 및 흑운모 등이고, 소량으로 자철석, 인회석, 녹염석 등이 관찰된다. 이 화강암체의 연령은 70~75 Ma 이다 (김중욱, 1988).

온정 화강암체는 영덕 및 영해 화강암체를 관입하고 있으며 중립내지 세립질로서 다른 암체에 비해 알카리 장석이 현저하게 많다. 주구성광물은 석영, 정장석 및 사장석 등이고, 소량으로 흑운모, 백운모, 각섬석, 자철석 및 녹염석 등이 있다. 이 화강암체의 연령은 66~96 Ma 이다 (주승환 등, 1982; Jin *et al.*, 1984; 김중욱, 1988; 진명식, 1989).

화학조성

암석시료의 주원소, 미량 및 희토류원소의 분석은 캐나다의 ACTLABS와 충남대학교 공동실습관에 의뢰하여 유도분극 아르곤 플라즈마 분광분석기 (ICP-AES), 유도분극 아르곤 플라즈마 질량분광분석기 (ICP-MS)와 증성자 활성분석기 (INAA)를 이용하여 정량분석을 실시하였다.

주원소

영덕 화강암체의 SiO₂의 함량은 64.15~68.12 wt.%, 영해 화강암체는 61.77~68.30 wt.%, 장사동 화강암체는 74.46 wt.%, 온정 화강암체는 71.04~76.00 wt.%로, 영덕 및 영해 화강암체는 장사동 및 온정 화강암체보다 다소 낮은 영역에 해당된다. TiO₂, Al₂O₃, FeO*, MgO 및 CaO의 함량을 비교해 보면, 영덕 화강암체와 영해 화강암체가 장사동 화강암체와 온정 화강암체보다 다소 높은 함량을 갖는다 (Table 2). 이는 영덕과 영해 화강암체가 장사동과 온정 화강암체보다 각섬석 및 흑운모의 함량이 다소 많은 것과 잘 일치한다. 그러나 K₂O의 함량은 온정 화강암체 (3.06~4.59 wt.%)가 다소 높고, 영덕 화강암체 (2.59~2.77 wt.%)가 가장 낮은 함량을 갖는다. 이는 온정 화강암체에 K-장석이 가장 많이 함유된 것과 잘 조화된다.

이 지역의 화강암체는 SiO₂의 함량이 증가함에 따라 TiO₂, Al₂O₃, FeO*, MgO 및 CaO의 함량은 감소하고 K₂O의 함량은 증가하여 전형적인 마그마 분화 경향을 보여준다 (Fig. 2). MgO-FeO* 와 MgO-TiO₂의 상관관계는 영덕 및 영해 화강암체가 거의 비슷한 영역 및 함량범위를 보이며, 장사동 및 온정 화강암체는 상당히 낮은 MgO 영역에 FeO* 와 TiO₂가 밀집되어 있음을 보여준다 (Fig. 2). 이 지역의 화강암류들은 비알카리계열 (Fig. 3) 및 peraluminous의 영역에 도시된다 (Fig. 4). 또한 Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)의 비가 1.1보다 큰 것으로 보아 Chappel, White (1984)가 분류한 S-형 화강암류와 유사

Table 2. Representative chemical compositions of granitic rocks in the study area.

	Youngduk granite		Younghae granite		Jangsadong Granite	Onjeong granite		
	831-17	1101-5	1101-7	9412-1	831-18	1209-2	DA33	DA34
wt. %								
SiO ₂	68.12	64.15	61.77	68.30	74.46	76.00	71.04	72.80
TiO ₂	0.42	0.43	0.53	0.38	0.18	0.08	0.14	0.10
Al ₂ O ₃	15.77	16.02	16.14	15.13	12.79	13.68	14.86	13.91
FeO*	2.69	4.51	5.20	3.73	1.51	1.02	1.74	2.55
MnO	0.04	0.09	0.10	0.08	0.02	0.01	0.03	0.03
MgO	0.72	1.80	2.64	1.19	0.19	0.06	0.18	0.12
CaO	2.40	3.73	3.89	3.23	0.28	0.29	0.51	0.29
Na ₂ O	5.26	3.86	3.56	3.53	3.81	4.53	5.09	4.30
K ₂ O	2.77	2.59	2.66	3.75	4.43	4.59	3.06	4.13
P ₂ O ₅	0.15	0.12	0.10	0.11	0.04	0.02	0.02	0.03
LOI	0.85	1.82	2.00	0.53	0.63	0.52	1.25	0.49
Total	99.18	99.11	98.57	100.20	98.32	100.79	98.10	99.03
ppm								
Ba	999	456	412	512	509	595	855	736
Sr	856	848	437	375	103	215	275	147
Rb	55	46	88	63	84	127	85	130
Y	6	18	20	19	8	4	7	7
Zr	164	89	111	126	107	81	152	118
V	34	75	104	41	10	2	4	2
Hf	4.1	2.9	3.7	4.3	3.9	3.1	4	3.6
Co	6	12	15	6	5	3	3	4
Cr	12	16	16	25	16	11	16	17
Ni	4	6	6	17	11	7	18	54
Cu	21	16	17	11	6	4	13	21
Pb	14	<5	<5	16	8	13	21	14
Zn	86	101	55	29	24	17	26	36
La	29.0	18.5	10.5	31.6	24.1	21.1	37.9	23.6
Ce	54	44	25	62	41	17	56	29
Nd	21	21	13	18	14	11	18	12
Sm	3.0	4.3	3.1	3.5	1.8	1.5	2.3	2
Eu	0.8	1.0	0.9	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4
Yb	0.4	1.4	2.1	1.9	1.0	0.6	0.5	0.5
Lu	0.05	0.23	0.31	0.34	0.18	0.11	0.13	0.11

한 특징을 갖는다.

미량원소 및 희토류원소

SiO₂ 함량변화에 따른 미량원소의 변화를 보면 (Fig. 5), Sr, Y, V 및 Zn는 부의 상관관계를 보이고 Rb는 정의 상관관계를 갖는다. Table 1에서 보여주는 바와 같이 영덕 화강암체는 Sr와 Zn의 함량 (848~856 ppm, 86~101 ppm)이 높고, 장사동 화강암체는 낮은 Sr 함량 (103 ppm)을 갖는다. Rb는 온정 화강암체 (85~127 ppm)가 다소 높은 함량을 갖으며, 영덕 화강암체는 46~55 ppm로 낮은 함량을 갖는다. Co 및 Cr은 영해 화강암체 (6~15 ppm, 16~25 ppm)가 다른 화강암체보다 비교

적 높은 함량 범위를 나타낸다. SiO₂/MgO와 Sr/Ce의 관계에서 영덕과 영해 화강암체는 다른 화강암체보다 상당히 낮은 SiO₂/MgO 비를 보이나 Sr/Ce 비는 높은 값을 보인다.

이 화강암류들의 미량 및 희토류 원소들을 초기 맨틀조성 (Sun, McDonough, 1989)으로 표준화시키면 (Fig. 6), 유사한 유형을 보인다. 영해 화강암체와 영덕 화강암체는 Sr, P, Sm 및 Ti 등이 장사동 및 온정 화강암체에 비해 상당히 부화된 경향을 가지며 특히 온정 화강암체는 P, Ti가 상당히 결핍된 양상을 갖는다. 기존의 연대측정에서 비슷한 관입시기를 갖는 영해 화강암체, 장사동 화강암체 및 온정 화강암체를 비교해 보아도 영해 화강암체가 Sr, P, Sm, Ti, Y 및 Yb 등에서 장사동 및 온정 화강암체보다

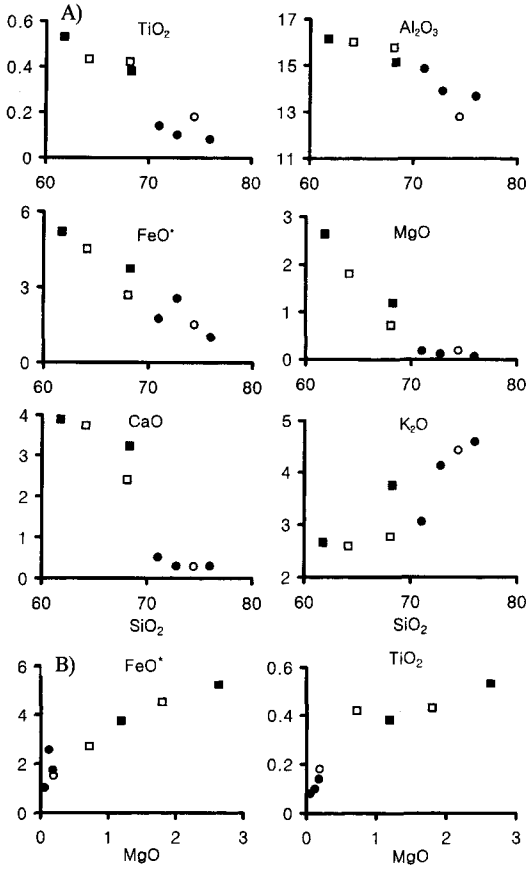


Fig. 2. A) Major elements versus SiO_2 variation diagrams. B) FeO^* and TiO_2 versus MgO variation diagram. open squares; Youngduk granite, filled squares; Younghae granite, open circle; Jangsadong granite, filled circles; Onjeong granite.

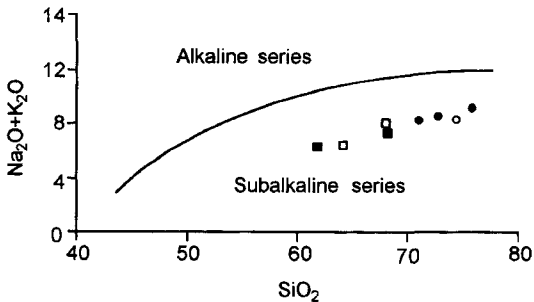


Fig. 3. Total alkali versus SiO_2 diagram for granitic rocks in the study area. The discriminant line is that of Irvine and Baragar (1971). Symbols are the same as in Fig. 2.

높은 함량을 가지며, 온정 화강암체와 장사동 화강암체는 유사한 변화양상을 보인다. 이는 장사동 및 온정 화강암체는 영해 화강암체와는 다른 기원임을 암시한다고 볼 수

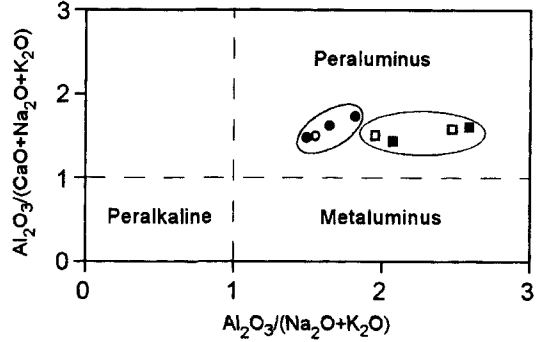


Fig. 4. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ versus $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ diagram for granitic rocks in the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

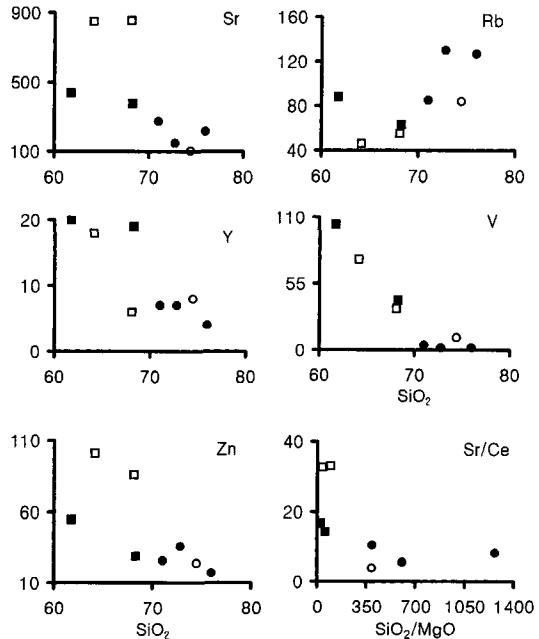


Fig. 5. Some trace elements versus SiO_2 and SiO_2/MgO variation diagrams. Symbols are the same as in Fig. 2.

있다.

희토류 원소의 총합량 (ΣREE)은 영덕 화강암체가 90.47~108.25 ppm, 영해 화강암체는 54.91~118.10 ppm, 장사동 화강암체는 82.58 ppm, 온정 화강암체는 51.91~115.33 ppm의 범위이다. 희토류 원소의 함량을 초기 맨틀조성으로 표준화시킨 결과 (Sun, McDonough, 1989)는 이지역의 화강암체는 비교적 유사한 변화유형을 보이나, 영덕 및 영해 화강암체보다는 장사동 및 온정 화강암체가 좀더 높은 부의 Eu값을 보인다 (Fig. 7).

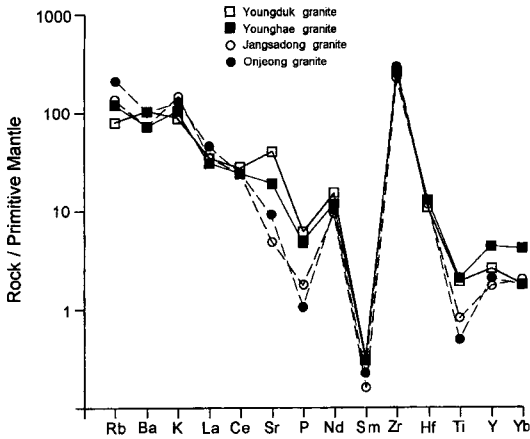


Fig. 6. Primitive mantle normalized trace element abundances for granitic rocks in the study area. Primitive mantle values are from Sun and McDonough (1989).

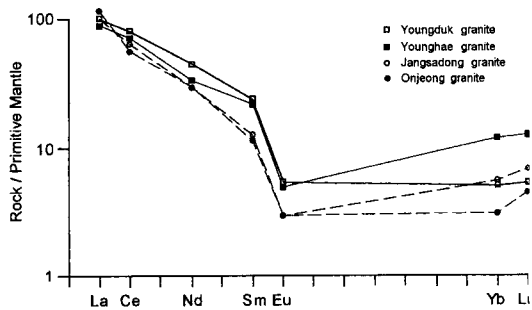


Fig. 7. Primitive mantle normalized REE patterns for granitic rocks in the study area. Primitive mantle values are from Sun and McDonough (1989).

K-Ar 연대측정

시료준비 및 분석

연대측정을 위하여 영덕 화강암 1개, 영해 화강암 2개, 장사동 화강암 2개 및 온정 화강암 1개를 선택하였다 (Fig. 1). 이들 시료의 행정구역, 위도 및 경도를 표시하면, 831-17: 경북 안동군 지품면 신안리 (북위 36°26' 90", 동경 129°16' 55"), 9412-1: 경북 영덕군 병곡면 금곡동 유금광산 (북위 36°38' 60", 동경 129°22' 60"), 1101-7: 경북 영덕군 병곡면 백석동 백석마을 (북위 36°37' 30", 동경 129°24' 70"), 1101-6: 경북 영덕군 영덕읍 매정리 성황동 (북위 36°26' 70", 동경 129°24' 90"), 831-18: 경북 영덕군 남점면 호남리 피전동 (북위 36°19' 90", 동경 129°22' 80"), 1209-2: 경북 영덕군 병곡면 삼읍동 대남광산 (북위 36°40' 05", 동경

129°23' 09")이다.

먼저 이들 화강암 시료에 대해서 60~80 메쉬로 분쇄하였다. 분쇄된 시료에 대해서는 초음파세척기를 이용하여 증류수로 세척하여 분쇄하는 동안에 흡착된 이물질들을 제거하였고, 건조기에서 50°C로 건조하였다. 이렇게 준비된 시료에서 각섬석, 흑운모 및 K-장석을 비중액과 자력분리기를 이용하여 분리한 후, K 및 Ar 분석에 사용하였다.

K 분석에 사용된 시료의 양의 광물에서의 K의 함량을 참고하여 50~100 mg를 사용하였다. K 분석은 2000 ppm Cs buffer를 사용하여 원자흡광분석기에 의해 분석하였다 (Nagao *et al.*, 1984). 분석을 위한 시료는 테프론 용기에서 HF (47%)와 HNO₃ (60%)로 용해시키고, 12시간동안 90°C로 가열시킨다. 이렇게 용해된 시료에 대해서 증류수를 가지고 200리터 또는 1000리터로 희석하여 분석에 사용한다. 이러한 분석방법은 호화 표준시료에 대한 실험결과 2% 미만의 오차를 보였다. 분석은 표준시료와 같이 미지시료에 대해서 2회 분석을 실시하여 분석오차가 2% 이내 일때의 평균치를 연대계산에 사용하였다.

아르곤 분석은 일본 오카야마 이과대학 자연과학연구소에 설치된 ³⁸Ar 스파이크를 이용하여 질량분석기로 분석하였다. 이 질량분석기는 Nagao, Itaya (1986)에 의해 새로이 개발된 웨도반경 30 cm, 편향각 90° 선형자장-단수속 질량분석기로서 그 관련계는 변성암, 화성암 뿐만 아니라 화산암의 K-Ar 연대측정을 위하여 고안된 것이다. K-Ar 연대산출식은 Nagao, Itaya (1988)의 방식에 따랐으며, 여기에 사용된 붕괴상수는 $\lambda_e=0.581 \times 10^{-10}/y$, $\lambda_\beta=4.962 \times 10^{-10}/y$ 및 $^{40}K/K=0.0001167$ 이다 (Steiger, Jäger, 1977).

측정결과

화강암으로부터 분리한 광물에 대한 K-Ar 연령은 Table 3과 같다. 영덕 화강암에서 분리한 흑운모의 K-Ar 연령은 166.5 ± 8.3 Ma이고, 영해 화강암에서 분리된 각섬석의 연령은 178.0 ± 4.3 와 158.7 ± 4.9 Ma이다. 장사동 화강암에서 분리된 각섬석의 연령은 118.4 ± 4.0 Ma, K-장석의 연령은 113.8 ± 2.7 Ma이다. 온정 화강암에서 분리된 흑운모의 연령은 67.4 ± 1.6 Ma이다.

토 론

지화학적 특성

연구지역의 화강암체에 대해 주원소의 함량을 비교해

Table 3. K-Ar ages for granitic rocks in the study area.

Sample No.	Rock name (analyzed mineral)	K (wt.%)	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-Rad. ⁴⁰ Ar (%)
Youngduk granite					
831-17	Hornblende granite(bt)	1.87±0.09	1266.5±19.7	166.5±8.3	46.3
Younghae granite					
9412-11	Hornblende granite (hb)	0.58±0.02	372.1±4.1	158.7±4.9	7.5
101-7	Hornblende granite (hb)	0.49±0.01	357.1±5.5	178.0±4.3	10.4
Jangsadong granite					
1101-6	Feldspar granite (hb)	0.34±0.01	161.0±4.6	118.4±4.0	1.5
831-18	Feldspar granite (k-f)	10.38±0.21	4730.7±65.6	113.8±2.7	1.5
Onjeong granite					
1209-2	Biotite granite (bt)	4.39±0.09	1168.8±14.2	67.4±1.6	11.4

보면, 영덕 화강암체 및 영해 화강암체가 TiO₂, Al₂O₃, FeO*, MgO 및 CaO의 함량에서 장사동 화강암체 및 온정 화강암체보다 다소 높은 함량을 보이며, 온정 화강암체는 K₂O의 함량이 3.06~4.59 wt.%로 다른 화강암체보다 높은 함량을 갖는다. 한편 Sr 및 Zn의 함량은 영덕 화강암체가 가장 높고 (848~856 ppm, 86~101 ppm), Co 및 Cr은 영해 화강암체가 비교적 높은 함량 범위 (6~15 ppm, 16~25 ppm)를 갖는다. Rb는 온정 화강암체가 85~130 ppm으로 다소 높은 함량을 나타낸다. 이와 같이 주원소 및 미량원소의 함량에 있어서 4개의 화강암체가 다소 차이를 보이고, MgO-FeO*, MgO-TiO₂ 및 (SiO₂/MgO)-(Sr/Ce) 관계도에서 두 개의 영역, 즉 영덕-영해 화강암체와 장사동-온정 화강암체로 분류되어 투영된다.

미량원소의 함량 변화를 초기 맨틀조성으로 표준화시킨 결과를 검토해 보면, 영덕 및 영해 화강암체는 거의 비슷한 변화유형 및 함량을 보이고 있으며, 이들 화강암체는 장사동 및 온정 화강암체보다 Sr, P, Nd, Ti 등의 함량에서 다소 높은 경향을 갖고 있다. 또한 희토류원소의 함량에 대해 초기 맨틀조성으로 표준화시킨 결과, 이 지역의 화강암체는 거의 비슷한 변화유형을 갖고 있으나 장사동 및 온정 화강암체가 영덕 및 영해 화강암체보다 좀더 부의 Eu 값을 보인다. 주원소, 미량원소 및 희토류 원소의 변화에 있어서 영덕-영해 화강암체가 장사동-온정 화강암체와 다른 경향을 보이는 것은 두 화강암체 (영덕-영해 화강암체와 장사동-온정 화강암체)의 기원마그마에 차이가 있음을 나타낸다. 따라서 이 지역의 화강암체들은 비알카리계열의 peraluminus한 성분을 갖는 서로 다른 마그마로부터 분화된 것으로 추정된다.

화강암체의 관입시기

앞에서 언급한 바와 같이, Rb-Sr법에 의한 영덕 화강암체의 전암-흑운모 연령은 185 Ma, 흑운모의 K-Ar 연령은 144 Ma, 횡선트랙법의 스피인 및 저어콘 연령은 150~191 Ma로 주라기에 해당한다. 영해 화강암체의 횡선트랙법에 의한 스피인 및 저어콘 연령은 65~81 Ma로 백악기 말에 해당된다. 김옥준 (1963; 1968)에 의해 장사동 화강암체로 분류되었던 암체는 인회석, 저어콘 및 스피인의 횡선트랙 연령이 62~75 Ma (김중욱, 1988)로 백악기 말임을 보여주고 있으며, 온정 화강암체에 대한 전암-흑운모의 Rb-Sr 연령이 84~96 Ma, 흑운모의 K-Ar 연령이 81~84 Ma, 횡선트랙법에 의한 인회석, 스피인 및 저어콘의 연령이 66~83 Ma로 백악기 말의 관입암체로 보고되었다.

상기의 연대학적 결과는 두 암체 (영덕 화강암체, 영해-장사동-온정 화강암체)의 관입시기가 서로 다르다는 것을 지시한다. 그러나 영해 및 장사동 화강암체에 대한 연대는 횡선트랙법에 의한 것뿐이어서, 다른 방법을 통한 비교검토의 기회가 없었다. 일반적으로 횡선트랙법에 사용되는 광물 (인회석, 저어콘 및 스피인)의 폐쇄온도는 다른 절대연령측정 방법에서 폐쇄계가 이뤄질 때의 온도보다 더 낮다. 따라서 화강암체에서 측정된 광물의 횡선트랙연대는 Rb-Sr, K-Ar 및 Ar-Ar 법에 의한 연령보다 젊은 연대를 보여주기 마련이다.

본 연구의 K-Ar법에 의해 얻어진 결과는 영덕 화강암체의 흑운모의 연령이 167 Ma, 영해 화강암체의 각섬석 연령이 159~178 Ma, 장사동 화강암체의 각섬석과 K-장석의 연령이 114~118 Ma, 온정 화강암체의 흑운모 연령이 67 Ma이었다. 영덕 및 온정 화강암체는 기존의 연구결과 (영

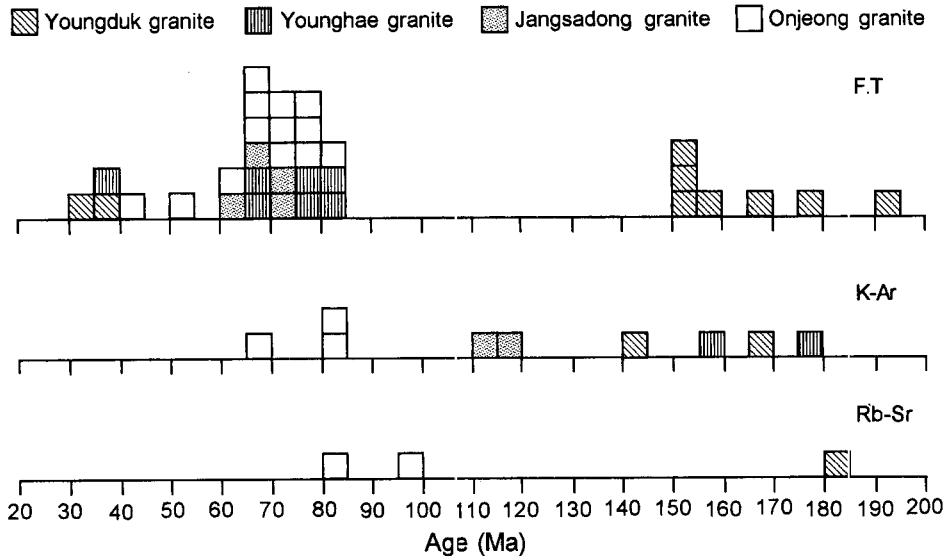


Fig. 8. Histogram of radiometric ages for granitic rocks in the study area.

덕 화강암체: 144~191 Ma, 온정 화강암체: 66~96 Ma)와 거의 일치한다. 그러나 동일한 암체로 분류하였던 영해 및 장사동 화강암체의 관입시기는 각각 159~178 Ma와 114~118 Ma로서, 이 두 화강암체는 관입시기가 서로 다른 두 암체로 분류하는 것이 타당할 것으로 보인다.

기존의 연구와 이 연구에서 연대 차이는 다음과 같이 관찰할 수 있다. 횡선트랙법에 사용된 스피린 (250°C), 저어콘 (175°C), 인회석 (100°C)의 폐쇄온도로 볼 때 이들의 연령도 이와 같은 순서이어야 하나 반대의 경우가 있고, 횡선트랙 연대는 Rb-Sr 및 K-Ar 연령보다 상당히 젊어야 함에도 불구하고 차이가 거의 없는 것도 있다 (Table 1). 한편 이 연구에서 얻어진 연령이 기존의 K-Ar법에 의해 얻어진 연령과 다소 차이가 있는 것은 화강암체가 갖는 일반적인 냉각속도의 차이, 마그마 분화과정의 차이, 연대 측정의 오차와 측정광물의 차이에 기인한다고 생각된다.

특히 영해 화강암체와 장사동 화강암의 연령이 기존의 연구와 상당한 차이를 보이고 있어 이번 연구를 토대로 이 지역의 화강암체에 대한 관입시기를 재정리하고자 한다. 영덕 및 영해 화강암체의 지화학적 특성이 유사한 것으로 보아 동원마그마의 분화 결과로 생각되며, 158.7 Ma보다 이전에 분화를 시작한 것으로 추정된다. 장사동 화강암체와 온정 화강암체는 영덕 및 영해 화강암체와는 다른 지화학적 특성을 보이고 관입시기에 있어서도 차이를 보인다. 장사동 화강암체의 각섬석의 연령은 118.4 Ma, K-장석은 113.8 Ma이고, 온정 화강암체의 흑운모는 67.4 Ma를 보인다. Choo *et al.* (1982)는 온정 화강암체

의 전암-흑운모 Rb-Sr 연령이 84~96 Ma, Jin *et al.* (1984)에 의한 흑운모 K-Ar 연령이 80.6~84.0 Ma라고 하였다. 두 화강암체 (장사동 및 온정 화강암체)의 연령에 다소의 차이를 보이고 있으나 지화학적 특징에서는 유사성을 보이고 있다. 두 암체에 대한 동일방법 및 동일광물을 대상으로 연대학적 연구가 수행되지 않아 아직 두 화강암체를 나누어 설명하기에는 무리가 있다고 생각되고 좀더 체계적인 연구를 필요로 한다.

연구지역에서 얻어진 지금까지의 연령자료를 도시하여 보면 상당히 긴 시간동안 심성활동이 있었고, 이를 요약하면 쥐라기와 백악기의 심성활동으로 나눌 수 있다 (Fig. 8). 금번연구의 지화학적 특징 및 연대측정 결과로부터 이 지역에는 2회의 관입시기 (158.7 Ma 이전과 118.4 Ma 이후)가 있었을 것으로 판단된다.

화강암체의 냉각사

화강암체의 K-Ar 광물연령은 광물내에 보존된 아르곤에 대한 폐쇄온도를 기록하는 냉각사이다. 보존 아르곤에 대한 폐쇄온도는 실험에 의해서 구해져 있고, 여기서 사용된 각 광물의 온도는 각섬석; $500 \pm 25^\circ\text{C}$, 흑운모; $300 \pm 50^\circ\text{C}$ (Dodson, McClelland-Brown, 1985), K-장석; $230 \pm 18^\circ\text{C}$ (Berger, York, 1981)이다.

쥐라기 화강암체의 각섬석에서 흑운모로의 냉각속도는 $17^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 이다. 이러한 결과는 Jwa *et al.* (1991)이 인제-홍천지역의 화강섬록암체의 냉각속도를 $13^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 와 이현

구 등 (1997)이 청송 화강암체의 냉각속도를 12°C/Ma로 보고한 것과 비슷한 냉각속도이다. 백악기의 장사동 화강암체는 각섬석이 118 Ma, K-장석이 114Ma이고, 온정 화강암체의 Rb-Sr법의 전암-흑운모 연령이 84.0~96.0 Ma (Choo *et al.*, 1982), K-Ar법의 흑운모 연령이 80.6~84.0 Ma (Jin *et al.*, 1984)와 67.4 Ma을 갖는다. 이처럼 백악기 화강암체의 광물연령에 있어서 큰 차이를 갖지는 않는다는 것은 이 화강암체들이 상당히 빠른 속도로 냉각되었을 가능성을 암시하는 것이다. 즉, 장사동 화강암체의 각섬석에서 K-장석의 냉각속도는 54°C/Ma이고, 온정 화강암체의 전암 (약 700°C)에서 흑운모의 냉각속도는 26°C/Ma이다. 따라서 백악기의 심성활동은 쥐라기의 심성활동보다 빠르게 냉각되었음을 시사한다.

결 론

1. 이 지역의 화강암체들은 비알카리계열 및 peraluminus한 성질을 갖는다.
2. 이 지역 화강암류에 대한 K-Ar 연대측정 결과는 영덕 화강암의 흑운모 연령이 166.5±8.3 Ma, 영해 화강암의 각섬석 연령이 178.0±4.3와 158.7±4.9 Ma, 장사동 화강암의 각섬석 연령이 118.4±4.0 Ma와 K-장석의 연령이 113.8±2.7 Ma, 온정 화강암의 흑운모의 연령이 67.4 ±1.6 Ma이다.
3. 지화학적 특성 및 연대측정결과로 이 지역은 2회의 판입시기 (158.7 Ma 이전과 118.4 Ma 이후)가 있었을 것으로 판단된다.
4. 쥐라기의 심성활동 (17°C/Ma)은 백악기의 심성활동 (26~54°C/Ma)보다 빠르게 냉각되었다.

사 사

이 연구는 1998년도 교육부 기초과학연구소 육성지원 사업 (BSRI-98-5419)의 연구비 지원과 일부는 1997년도 한국학술진흥재단의 박사후과정 연구지원 (김상중)에 의해 이루어 졌음을 명기하며 이에 감사드린다. 아울러 심사과정에서 건설적인 비평과 수정을 해 주신 전남대학교 김용준 교수님과 전북대학교 오창환 교수님께 감사드립니다. 또한 야외조사 및 시료준비에 도움을 준 이종창 학사에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

김상욱, 박봉순 (1970) 한국지질도 (1:50,000), 영양도폭 및

지질도폭 설명서. 국립지질조사소, p. 1-25.
 김옥준, 윤 선, 길영준 (1968) 한국지질도 (1:50,000), 청하도폭 및 지질도폭 설명서. 국립지질조사소, p. 1-16.
 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태 (1963) 한국지질도 (1:50,000), 평해도폭 및 지질도폭 설명서. 국립지질조사소, p. 1-17.
 김중욱 (1988) 경상분지 북동부 영덕-온정지역 화강암질암류의 암석학 및 Fission Track 연대. 경북대학교 대학원 박사학위논문, 91p.
 이윤종, 김중욱, 정원우 (1993) 경상북도 북동부, 영해 영덕 일대의 화강암질암의 흑운모와 각섬석의 진화경로. 광산지질, 26권, p. 349-361.
 이재영, 이진국 (1992) 평해지역 온정화강암 증 미량원소와 광화학작용의 관계에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 245-258.
 이현구, 김상중, 板谷徹丸 (1997) 의성-청송일대에 분포하는 화성암체와 광상의 K-Ar 연대. 박희인교수 정년퇴임 기념집, p. 169-175.
 이흥규, 홍승호 (1973) 한국지질도 (1:50,000), 청송도폭 및 지질도폭 설명서. 국립지질박물관연구소, p. 1-23.
 주승환, 진명식, 윤현수, 김동학 (1982) Rb/Sr연대 측정 연구 (서산화강편암 및 화강암, 평해 온정리화강암, 기타지역 화강암류). 조사연구보고 13권, 한국동력자원연구소, p. 193-208.
 진명식, 김성재, 이주연 (1989) K-Ar 및 핏선트랙법에 의한 한국 동남부지역 화강암 및 화산암의 암석, 광물연대 측정 연구. KR-88-6D, 한국동력자원연구소, p. 51-84.
 Berger, G.W. and York. D. (1981) Geothermometry from 40Ar/39Ar dating experiments. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 45, p. 795-811.
 Chappel, B.W. and White, A.J.R. (1984) I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. In Keqin, X. and Guanchi, T. (eds), Geology of granites and their metallogenic relations, p. 87-101. Beijing: Science Press.
 Dodson, M.H. and McClelland-Brown, E. (1985) Isotopic and paleomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion. in Snelling, N.J., ed., The chronology of geologic record, p. 315-325.
 Hatae, N. (1936) Geological Atlas of Korea, no. 18, Younghae and Yongdok sheet. Geol. Surv. Korea, p. 2-15.
 Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the common volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., v. 8, p. 523-548.
 Jin, M.S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F. (1984) Fission track dating of apatite from the Jurassic and Cretaceous granites in south Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 20, p. 257-265.
 Jwa, Y.J., Nakajima, T., Uchiumi, S. and Shibata, K. (1991) Geochronology and cooling history of mesozoic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. J. Min. Petr. Econ. Geol., v. 36, p. 93-103.
 Nagao, K. and Itaya, T. (1986) Construction on mass spectrometer of oblique incident and exit type with triple collector for argon analysis. Mass spectroscopy. Annual Meet. Abst., p. 127-128.
 Nagao, K. and Itaya, T. (1988) K-Ar age determination. Mem. Geol. Soc. Japan, No. 29, p. 5-21.
 Nagao, K. Nishido, H., Itaya, T. and Ogata, K. (1984) K-Ar age determination method. Bull. Hiruzen Res. Inst.,

- No. 9, p. 19-38.
- Steiger, G. and Jäger, E. (1977) Subcommission on geochronology convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 36, p. 359-362.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds) *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, v. 42, p. 313-345.

1998년 10월 13일 원고접수, 1999년 2월 3일 게재승인.