

경상분지 남동부에 분포하는 화강암질암의 광물학적 특징

Mineralogical Characteristics of the Granitic Rocks in the Southeastern Gyeongsang Basin

황 병 훈 (Byoung-Hoon Hwang)^{1,*} · 이 준 동 (Joon-Dong Lee)¹ ·
양 경 희 (Kyounghee Yang)¹ · 옥 수 석 (Soo-Seok Ock)²

¹부산대학교 지구환경시스템학부 지질환경과학전공
(Geological Environmental Science Major, Division of Earth Environmental System, Pusan National University,
Jangjeon-dong, Gumjeong-gu, Busan 609-735, Korea)

²경성대학교 교양과정부
(The Liberal Arts Course, Kyungsung University, Dacyeon-dong, Nom-gu, Busan 608-736, Korea)

요약 : 경상분지 남동부에 분포하는 화강암질암은 야외산상 및 암석기체적 특징에 따라 크게 세 그룹으로 나눌 수가 있다. 즉, 그룹I은 마그마혼합의 영향을 받은 암체로 염기성 미립 포유암 및 염기성광물 집합체를 다양하게 함유한다. 그룹II는 낮은 압력하에서 형성된 천소관입암의 특징을 나타내며, 그룹III은 A-형 화강암류의 특징을 보인다. 화강암질암의 광물학적 특징을 각 광물에 대하여 암상별로 살펴본 결과, 그룹에 따라 장석의 용리온도 및 흑운모의 성분 등에서 비교적 체계적인 성분변화를 보여주었다. 각섬석의 경우, 그룹I의 암상들은 칼식-각섬석 영역에 속하며 각섬석 지압계에 의한 추정압력은 0.4~2.8 kb에 해당되었다. 그룹II에서는 각섬석이 거의 산출되지 않았고, 그룹III의 각섬석은 알칼리-각섬석 영역의 리베카이트에 해당되었다. 흑운모의 화학조성은 비교적 그룹별로 균집을 잘 이루며, 그룹I에서부터 그룹III의 철질-앤나이트까지 연속적인 변화양상을 보여주었다. 사장석은 지역 및 암상별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않으며, 대체로 알바이트, 올리고클레이스, 그리고 안데신의 영역에 해당된다. 그룹별로 페타이트 지온계에 의한 용리 온도를 검토한 결과, 그룹I은 대체로 300~400℃ 정도이며, 그룹II의 등립질화강암과 그룹III의 알칼리장석화강암은 500~600℃ 정도로 높게 나타났다.

주요어 : 화강암질암, 광물화학, 각섬석 지압계, 페타이트 지온계

ABSTRACT : Granitic rocks in the southeastern Gyeongsang Basin can be classified into three groups. The group I contains various mafic microgranular enclave (MME) and/or mafic clot which implies magma mixing or mingling. The group II show the feature of shallow depth emplacement at low pressure, and the group III is characterized by A-type granite implying extensional tectonic environment. Mineralogical characteristics of the granitic rocks have showed systematic variations in perthite exsolution temperatures and biotite compositions according to their rock facies, although they

*교신저자: bhhwang@pusan.ac.kr

do not show any distinctively different trend in geography and textures or rock facies. Amphiboles from Group I are calcic-amphibole and they were formed at 0.4~2.8 kb in pressure based on the amphibole geobarometry. Amphiboles from group III are riebeckite, whileas amphiboles were not observed in Group II. The chemical composition of biotite defined in clusters showing a continuous spectrum between group I to ferric-annite of group III. The composition of plagioclase generally plotted in albite, oligoclase, and andesine area without any distinctive differences among their geography or rock facies. The exsolution temperatures by perthite geothermometry are calculated as 300~400°C in Group I, and 500~600°C in equigranular granite of group II and alkali-feldspar granite of group III.

Key words : granitic rocks, mineral chemistry, amphibole geobarometry, perthite geothermometry

서 언

경상분지 남부 유천소분지에 분포하는 화강암질암에 대한 암상분류의 결과, 이들 화강암류는 크게 세 그룹의 여섯 암상으로 분류할 수 있다(황병훈, 2004). 첫 번째 그룹은 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암이 포함되는데, 이들은 마그마 혼합의 영향을 받은 암체로 염기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave, 이하 MME로 기재)과 염기성광물 집합체를 다양하게 포함하고 있다. 두 번째 그룹은 등립질화강암과 미문상화강암이 포함되며, 이들은 친소관입암의 특징을 나타내며 MME와 염기성광물 집합체를 전혀 함유하지 않는다. 세 번째 그룹에는 알칼리장석화강암이 포함되는데, 이 암상은 확장환경을 지시해주는 A-형 화강암으로 알려져 있다(윤성효와 황인호, 1990; 고정선, 1994; 이미정 외, 1995; 고정선 외, 1996; Kim and Kim, 1997; Koh, 2001).

각 그룹들 간의 성인관계를 살펴보면, 그룹 I의 포유암 함량이 많은 반상화강암은 산성마그마와 염기성마그마의 혼합의 영향을 받았으며(진미정 외, 2000; 김종선, 2001; 신기철, 2001), 화강섬록암과 포유암 함량이 적은 반상화강암에도 마그마 혼합의 증거가 나타난다(황병훈, 2004; 황병훈 외, 2004). 또한 이들은 그룹 II에 의해 관입당하고 있는 양상을 보인다. 한편 그룹 II의 등립질화강암과 그룹 III의 알칼리장석화강암은 지화학적 특징은 큰 차이를 보이지만, 동위원소 조성 및 관입 시기 등에서는 매우 유사한 점을 나타내고 있다(Koh, 2001; 황병훈, 2004).

따라서, 각 그룹들의 성인관계와 그룹 내 암상들 간의 성인관계는 경상분지 전체 화성활동 진화에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 논문은 화강암질암 내의 각 광물들의 광물학적 특징을 암상별로 비교 검토하고, 이들 광물학적 자료가 암상분류의 결과와 잘 부합되는지를 살펴보았다. 또한, 각암석 내 Al^I 를 이용한 지질압력계와 퍼타이트의 용리온도를 이용한 지질온도계를 설정하여, 화강암류의 관입시 압력 및 온도를 암상별로 추정하여 각 암상별 성인관계를 살펴보았다.

연구방법

경상분지 남동부에 분포하는 화강암류를 임의로 크게 세 지역으로 구분하여(그림 1), 각 지역별로 각 암상 내에 나타나는 광물학적 특징을 살펴보았다. 우선 각 지역에는 여러 암체가 공간적으로 떨어져 존재하지만, 동일한 분류기준을 적용하여 암상분류를 실시한 결과(그림 2), 부산-양산지역과 유천-언양지역에서는 동일한 수의 암상으로 구분되었고 경주-울산지역에서는 이들보다 알칼리장석화강암의 한 암상이 더 많은 것으로 분류되었다. 지역에 상관없이 동일한 암상은 서로 야외산상 및 암석기재적 특징이 유사한 것으로 보고되었다(황병훈, 2004; 황병훈 외, 2004). 따라서 본 연구에서는 지역별로 각 암상을 대표할 수 있는 신선한 시료를 선택하여 박편을 제작하였고, 이를 각 광물별로 서울대학교 지구환경과학부 내 JEOL SUPERPROBE 733을 사용하여, 가속 전압 15 kV, beam current 10 nA, beam size (diameter) 5 μm 의 조건 하에

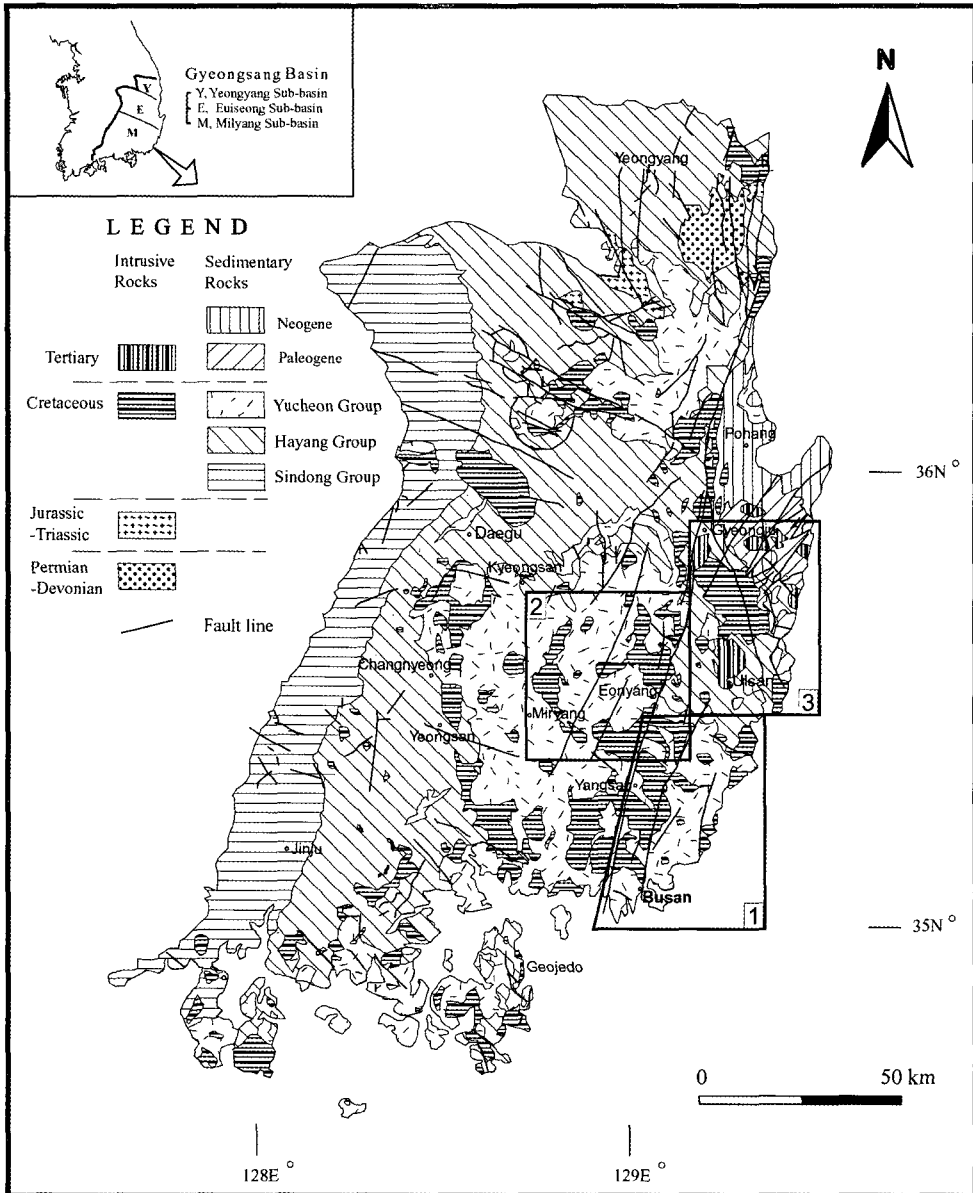


Fig. 1. Simplified geological map of the study area (modified from KIGAM, 1995). Squares are the detailed study areas: 1. Busan-Yangsan area, 2. Yucheon-Eonyang area, 3. Gyeongju-Ulsan area.

서 EPMA 분석을 실시하였다.

지역에 따라 혹은 암상에 따라 산출되지 않는 광물도 존재하지만, 암상간의 전체적인 경향을 관찰하는 데는 어려움이 없을 것으로 판단된다. 분석치는 각 지역별로 각섬석, 흑운모, 사장석 그리고 펄타이트 순으로 표 1, 2, 3, 4에

나타내었다.

광물학적 특징

연구지역 화강암질암의 암상 및 그룹에 따른 광물학적 특징을 각 광물별로 살펴보면 다음과 같다.

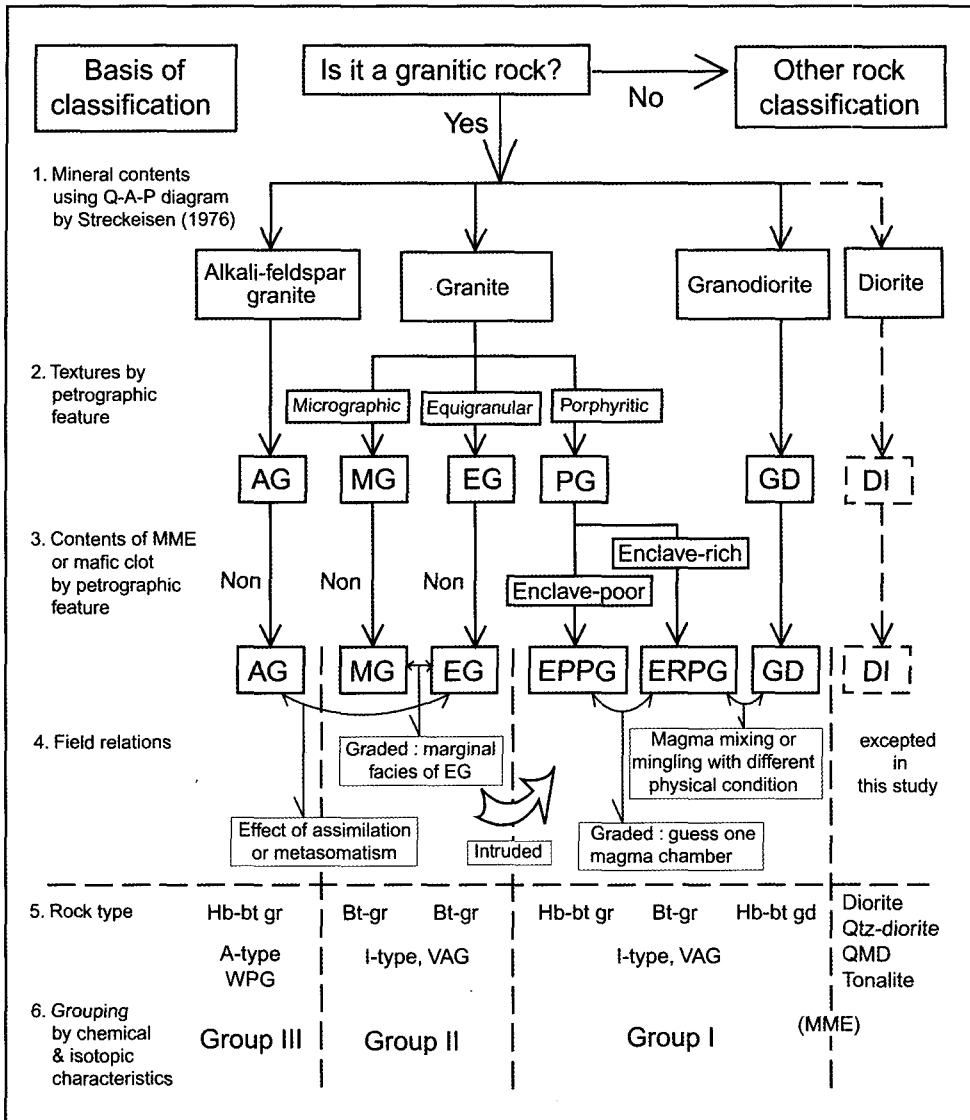


Fig. 2. Classification flow chart of the granitic rocks in the study area. Abbreviations are DI: diorite, QMD: quartz monzodiorite, GD: granodiorite, ERPG: enclave-rich porphyritic granite, EPPG: enclave-poor porphyritic granite, EG: equigranular granite, MG: micrographic granite, AG: alkali-feldspar granite, gr: granite, qtz: quartz, hb: hornblende, bt: biotite, pl: plagioclase, WPG: within plate granitoids, VAG: volcanic arc granitoids.

각섬석

각섬석은 세 지역 모두에서, 그룹I에 해당되는 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암, 그리고 MME에서만 관찰되며, 그룹II의 화강암류에는 나타나지 않는다. 다만 경주지역에서만 그룹III에 알

칼리장석화강암에서도 각섬석이 관찰되는데, 그룹 I 내에 포함된 각섬석과는 성분이 매우 다른 것으로 나타났다.

연구지역 화강암류 내의 각섬석은 함유된 B-site의 Na_B 와 Ca_B 의 함량에 따라 크게 calcic amphibole group과 alkali amphibole group으로 분류가 되는데(그림 3a), 그룹I의 세 암상과

MME 내의 각섬석은 $(Ca+Na)_B \geq 1.34$ 이고, $0.67 \leq Na_B \leq 1.34$ 이므로 calcic amphibole group의 magnesio-hornblende, actinolitic-hornblende, 그리고 actinolite에 걸쳐 도시되었다(그림 3b). 그러나 그룹 III에 해당되는 알칼리장석화강암 내의 각섬석은 $Na_B \geq 1.34$ 이므로 alkali amphibole group 내의 리베카이트 영역에 해당되었다(그림

3c). 이것은 A-형 화강암에 나타나는 특징으로 다른 암상과 매우 독특한 차이를 나타낸다.

한편, 그룹 I 내의 각 암상들의 각섬석 성분은 서로 유사하며, 암상 및 지역별로 큰 차이를 보이지 않았다(그림 3b). 다만, 부산-양산 지역과 언양-유천 지역의 각섬석은 성분이 중첩되어 구분이 되지 않지만, 경주지역의 화강섬록암 내

Table 1. Chemical compositions and structural formulas of amphibole from the granitic rocks in study area (analyzed by EPMA)

Area	1. Busan-Yangsan*			2. Yucheon-Eonyang**						
	GD	MME		ERPG		EPPG	MME			
Rock Type										
Sample No.	DY-20	A-71B	A-71C	M-7A	M-7B	H-158	H-174	H-175	M-1A	M-1B
SiO ₂	48.80	47.27	48.89	47.85	48.17	47.33	48.20	51.58	48.56	48.61
TiO ₂	1.28	0.92	1.06	1.25	1.22	1.59	1.18	0.08	1.20	1.30
Al ₂ O ₃	6.19	4.90	5.07	5.36	5.19	5.77	4.73	12.48	4.49	4.82
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^T	14.74	15.94	16.80	17.40	16.61	17.40	15.94	16.33	14.68	16.25
MnO	0.50	1.50	1.30	0.78	0.61	1.02	0.64	0.41	0.53	0.53
MgO	13.73	12.12	12.03	11.75	12.85	11.98	12.66	3.05	13.42	12.66
CaO	10.52	10.76	10.66	10.74	10.60	10.41	10.85	12.03	10.94	10.72
Na ₂ O	1.75	1.49	1.46	1.32	1.28	1.79	1.23	0.35	1.29	1.19
K ₂ O	0.40	0.52	0.45	0.62	0.54	0.67	0.54	0.16	0.49	0.49
Total	97.91	95.41	97.71	97.07	97.07	97.96	95.97	96.47	95.60	96.57
	cation per 23 oxygens									
Si ^{IV}	7.12	7.18	7.24	7.15	7.14	7.03	7.24	7.91	7.28	7.24
Al ^{IV}	0.88	0.81	0.76	0.85	0.84	0.94	0.76	0.09	0.72	0.76
Fe ^{IV}	-	-	-	-	0.03	0.03	-	-	-	-
T site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.18	0.06	0.13	0.10	0.07	0.07	0.07	2.16	0.07	0.09
Ti ^{VI}	0.14	0.11	0.12	0.14	0.14	0.18	0.13	0.01	0.14	0.15
Fe ⁽⁺³⁾	0.40	0.34	0.36	0.36	0.44	0.40	0.33	-	0.28	0.36
Mg	2.99	2.74	2.66	2.62	2.84	2.65	2.83	0.70	3.00	2.81
Fe ⁽⁺²⁾	1.26	1.66	1.66	1.74	1.48	1.64	1.60	2.09	1.48	1.56
Mn	0.03	0.10	0.08	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03
O site	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Fe ⁽⁺²⁾	0.14	0.02	0.06	0.08	0.11	0.10	0.08	-	0.08	0.10
Mn	0.03	0.10	0.08	0.05	0.04	0.07	0.04	0.01	0.03	0.03
Ca	1.64	1.75	1.69	1.72	1.68	1.66	1.75	1.98	1.76	1.71
Na	0.19	0.13	0.16	0.15	0.17	0.18	0.14	0.01	0.13	0.15
B site	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.01	2.01	2.00	2.00	1.99
Na	0.31	0.30	0.26	0.24	0.20	0.33	0.22	0.09	0.25	0.19
K	0.08	0.10	0.09	0.12	0.10	0.13	0.10	0.03	0.09	0.09
A site	0.38	0.41	0.34	0.36	0.30	0.46	0.32	0.12	0.34	0.28
P (kbar)	1.18	0.85	0.61	1.02	0.98	1.46	0.63	-	0.42	0.60

Abbreviations are the same as those in Fig. 2 (*: data from Jeon, 1998; **: data from Shin, 2001).

Table 1. Continued

Area	2. Yucheon-Eonyang**			3. Gyeongju-Ulsan						
	MME			GD				AG	MME	
Rock type				AL-56A		AL-36		AL-72	AL-28	
Sample No.	M-1C	M-4	S-1							
SiO ₂	49.64	48.84	50.66	53.29	52.74	50.59	47.62	48.26	49.65	45.37
TiO ₂	0.84	0.90	0.40	0.23	0.41	0.58	1.17	1.04	0.04	2.07
Al ₂ O ₃	4.13	4.16	3.81	1.90	2.96	3.88	5.77	5.33	0.87	7.06
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0.06	0.06	0.06	-	0.01	0.04	0.02
FeO*	14.27	17.20	15.08	10.58	11.70	13.53	15.03	13.76	35.96	13.83
MnO	0.36	0.71	0.27	0.52	0.62	0.71	0.77	0.62	2.83	0.62
MgO	14.27	12.43	13.85	16.73	16.21	14.56	13.32	13.89	0.31	13.32
CaO	11.11	10.67	11.57	11.78	11.92	11.32	11.30	10.53	0.32	10.72
Na ₂ O	1.10	0.94	0.77	0.52	0.65	0.82	1.36	1.25	6.35	2.31
K ₂ O	0.47	0.38	0.47	0.14	0.20	0.03	0.44	0.39	0.37	0.55
Total	96.19	96.23	96.88	95.74	97.46	96.33	96.78	95.07	96.74	95.87
	cation per 23 oxygens									
Si ^{IV}	7.34	7.30	7.45	7.70	7.53	7.33	7.01	7.13	7.72	6.77
Al ^{IV}	0.65	0.68	0.55	0.30	0.47	0.63	1.00	0.87	0.16	1.24
Fe ^{IV}	-	0.03	-	-	-	-	-	-	0.12	-
T site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.96	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.07	0.06	0.11	0.03	0.03	0.04	0.01	0.05	-	0.01
Ti ^{VI}	0.09	0.10	0.04	0.02	0.04	0.06	0.13	0.12	0.05	0.23
Fe ⁽⁺³⁾	0.32	0.43	0.26	0.40	0.49	0.64	0.70	0.83	2.18	0.57
Mg	3.15	2.77	3.04	3.61	3.45	3.16	2.92	3.06	0.07	2.96
Fe ⁽⁺²⁾	1.35	1.60	1.53	0.88	0.91	1.00	1.15	0.87	2.37	1.16
Mn	0.02	0.05	0.02	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08	0.37	0.08
O site	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.04	5.00
Fe ⁽⁺²⁾	0.09	0.09	0.07	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0.02	0.05	0.02	-	-	-	-	-	-	-
Ca	1.76	1.71	1.82	1.83	1.82	1.77	1.78	1.67	0.05	1.71
Na	0.13	0.14	0.09	0.15	0.18	0.23	0.22	0.33	1.91	0.29
B site	2.00	1.99	2.00	1.97	2.00	2.00	2.00	2.00	1.97	2.00
Na	0.19	0.14	0.13	-	-	-	0.17	0.02	-	0.38
K	0.09	0.07	0.09	0.03	0.04	0.05	0.08	0.07	0.07	0.11
A site	0.28	0.21	0.22	0.03	0.04	0.05	0.25	0.10	0.07	0.49
P (Kbar)	-	-	-	-	-	-	1.73	1.15	-	2.87

의 각섬석은 이들보다 B_{Ca}+B_{Na}의 함량이 높게 군집되었으며(그림 3a), 다른 지역과는 달리 T_{Si}의 함량이 분산된 양상을 보여주었다(그림 3b). 그룹Ⅲ의 알칼리장석화강암 내의 각섬석은 경주 지역에서만 관찰되므로 지역간의 대비는 이루어지지 않았다.

흑운모

연구지역 화강암질암 내에 함유된 흑운모의

성분을 Fe/(Fe+Mg)에 대한 Al^{IV} 함량비를 도시해 본 결과(그림 4a), 그룹별로 비교적 좋은 군집을 나타내었다. 그룹Ⅰ의 경우는 Fe/(Fe+Mg)의 성분이 0.4~0.6이고, Al^{IV} 함량이 2.0~2.4 정도의 값을 가지며, 암상간 또는 지역간에 체계적 변화가 잘 나타나지 않는다. 그룹Ⅱ의 흑운모는 경주지역 등립질화강암의 한 시료에서만 분석되었으며 그 성분이 그룹Ⅰ과 유사하게 도시되지만, 부산지역 미문상화강암의 흑운모 시료(Lee, 1991)와 함께 도시해보면, Fe/(Fe+Mg)

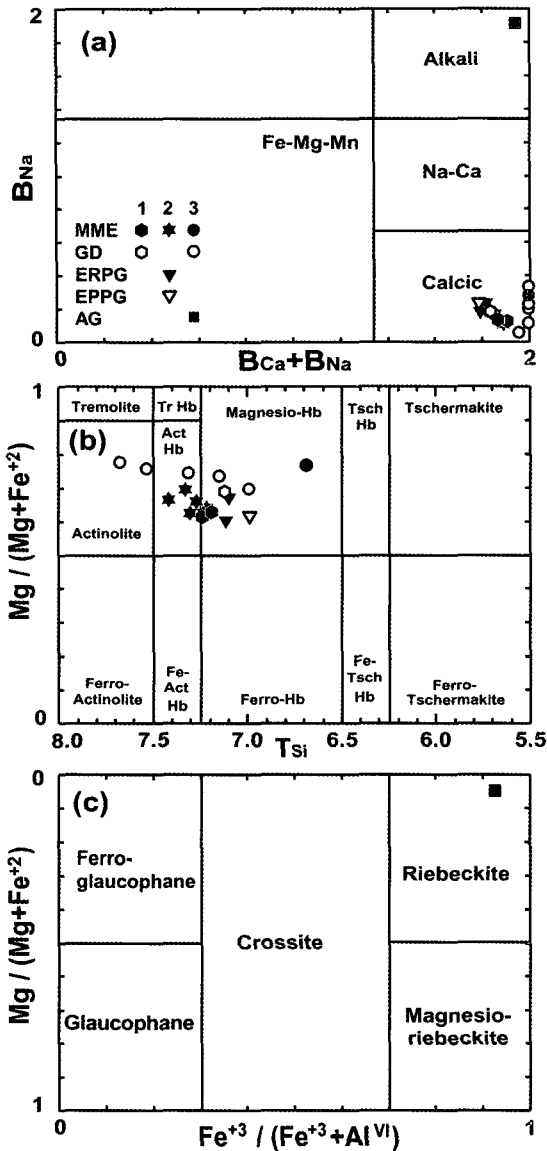


Fig. 3. Chemical compositions of the amphiboles in the granitic rocks in the study area. Classification of amphibole (a), calcic amphibole (b), and alkali amphibole (c). Abbreviations are the same as those in Fig. 2. 1. Busan-Yangsan area, 2. Yucheon-Eonyang area, 3. Gyeongju-Ulsan area.

의 성분이 0.6~0.9로 그룹 I보다 높은 값을 가지며 군집을 이룬다. 또한 그룹 III에 해당되는 경주지역 알칼리장석화강암의 흑운모는 Fe/(Fe+Mg)의 비가 그룹 II보다 높은 0.9~1.0의 값을 가지며, 특히 Al^{IV} 함량이 1.3~1.5로 훨씬 낮아

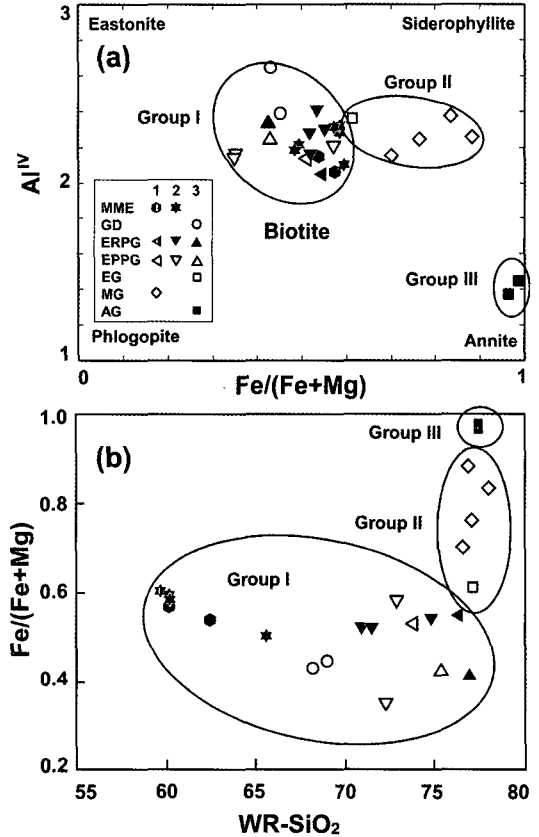


Fig. 4. Chemical compositions of the biotite of the granitic rocks in the study area. Classification of biotite (a), and Fe/(Fe+Mg) of biotite vs. SiO₂ of whole rock (b). Abbreviations are the same as those in Fig. 2. The WR means whole rock, and the data of diamond samples are from Lee, 1991. 1. Busan-Yangsan area, 2. Yucheon-Eonyang area, 3. Gyeongju-Ulsan area.

이들과 뚜렷이 구분되는 철질 앤나이트에 해당되었다.

또한 연구지역 화강암질암의 전암 SiO₂ 성분 에 대한 흑운모의 Fe/(Fe+Mg)의 성분변화를 알아본 결과(그림 4b), 그룹 I의 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암, 그리고 MME 내 흑운모의 Fe/(Fe+Mg) 비는 0.4~0.6 정도로 분산되어 수평적 변화를 보이거나, 그룹 II와 III의 경우는 수직적 변화 양상을 보인다. 전체적인 변화경향을 살펴 보면, 지역 간에는 큰 차이를 보이지 않지만 그룹 및 암상별로는 좋은 군집을 보여주었으며,

각 암상 간에도 다소 체계적인 변화양상을 보여 주었다. 즉, MME가 SiO₂가 가장 낮은 값을 보이며, 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암이 다소 분산이 심하지만 중간성분을 나타내며, 다음으로 등립질화강암, 미문상화강암, 그리고 알칼리장석화강암 순으로 SiO₂와 Fe/(Fe+Mg)의 성분이 증가하는 경향을 보인다(그림 4b).

장 석

장석은 누대조적을 보이는 사장석과 페타이트 조적을 보이는 정장석에 대하여 세 지역에서 암상별로 분석을 실시하였다. 누대조적을 보여주는 사장석의 조성은 대부분의 암상에서 core로부터 rim으로 갈수록 calcic 성분에서 sodic 성분으로 변해가는 정상 누대구조를 보여준다(표 3). 그러나 일부 화강섬록암과 포유암 함량이 많은 반상화강암에서는 중심부에서 연변부로 가면서

Table 2. Chemical compositions and structural formulas of biotite from the granitic rocks in study area (analyzed by EPMA)

Area	1. Busan-Yangsan*				2. Yucheon-Eonyang**					
	Rock type	EPPG	ERPG	MME	ERPG			EPPG		MME
Sample No.	A-73	A-71A	A-71C	AKJ-8	SK-11	S-6	M-7A	SK-9A	H-158	H174A
SiO ₂	35.73	36.51	36.26	35.54	36.83	37.57	35.41	38.79	36.79	37.68
TiO ₂	4.07	3.99	3.54	4.22	4.41	3.34	2.19	4.15	3.92	4.03
Al ₂ O ₃	12.39	12.46	12.79	12.56	12.45	11.84	13.31	12.13	12.02	12.43
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^T	20.85	21.32	21.96	20.66	20.24	21.21	23.24	14.65	23.64	19.91
MnO	0.78	1.00	0.84	0.68	0.14	0.24	0.47	0.31	0.53	0.31
MgO	10.17	9.80	9.33	9.82	10.52	11.03	11.32	15.37	9.74	11.38
CaO	-	-	-	-	0.03	0.05	0.07	-	-	0.03
Na ₂ O	0.51	0.24	0.39	0.33	0.07	0.06	0.03	0.18	0.14	0.06
K ₂ O	9.78	10.16	10.35	9.85	9.38	9.04	7.18	9.57	9.21	9.41
H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	94.28	95.48	95.72	93.66	94.08	94.37	93.20	95.14	95.97	95.23
	cation per 22 oxygens									
Si ^{IV}	5.89	5.95	5.94	5.89	5.74	5.85	5.60	5.81	5.72	5.78
Al ^{IV}	2.11	2.05	2.06	2.11	2.26	2.15	2.40	2.14	2.20	2.22
Ti ^{IV}	0.51	0.49	0.44	0.53	-	-	-	-	-	-
T site										
Al ^{VI}	-	-	-	-	0.03	0.02	0.08	-	-	0.03
Ti ^{VI}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ⁽⁺²⁾	2.88	2.91	3.01	2.86	2.64	2.76	3.08	1.83	3.08	2.56
Mn ⁽⁺²⁾	0.11	0.14	0.12	0.10	0.02	0.03	0.06	0.04	0.07	0.04
Mg	2.50	2.38	2.28	2.43	2.44	2.56	2.67	3.43	2.26	2.60
O site										
Ca	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01
Na	0.16	0.08	0.12	0.11	0.02	0.02	0.01	0.05	0.04	0.02
K	2.06	2.11	2.16	2.08	1.87	1.79	1.45	1.83	1.83	1.84
A site										
Fe/(Fe+Mg)	0.53	0.55	0.57	0.54	0.52	0.52	0.54	0.35	0.58	0.50

Abbreviations are the same as those in Fig. 2. (*: data from Jeon, 1998; **: data from Shin, 2001).

Table 2. Continued

Area	2. Yucheon-Eonyang**			3. Gyeongju-Ulsan						
Rock type	MME			GD		EPPG	ERPG	EG	AG	
Sample No.	M-1A	M-1B	S-1A	AL56A	AL-36	H-80	AL64A	AL-5	AL72A	AL72B
SiO ₂	36.38	36.33	37.37	33.64	37.01	37.96	37.02	35.96	36.54	37.25
TiO ₂	4.11	4.14	3.18	3.47	4.36	3.71	3.25	3.96	0.73	2.06
Al ₂ O ₃	12.52	12.32	12.14	14.44	13.35	13.93	14.70	12.70	7.25	6.86
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.06	-	0.01	0.02	0.09	0.01
FeO ^T	23.34	23.46	23.33	18.81	18.31	17.15	16.79	24.02	39.59	38.65
MnO	0.37	0.31	0.31	0.40	0.31	0.65	0.34	0.97	1.47	1.30
MgO	9.39	9.31	8.89	15.26	12.81	12.84	12.40	8.59	0.51	0.86
CaO	0.03	-	0.02	0.16	0.03	0.05	0.06	-	0.04	0.05
Na ₂ O	0.06	0.08	0.05	0.08	0.14	0.08	0.10	0.34	0.10	0.23
K ₂ O	9.09	9.11	8.99	5.29	9.01	8.73	9.36	8.82	7.78	8.16
H ₂ O	-	-	-	4.01	3.97	4.01	4.00	3.85	3.56	3.59
Total	95.28	95.05	94.27	99.55	97.34	99.10	98.03	99.23	97.66	99.00
	cation per 22 oxygens									
Si ^{IV}	5.69	5.70	5.88	5.27	5.62	5.73	5.66	5.65	6.31	6.32
Al ^{IV}	2.30	2.27	2.12	2.67	2.38	2.27	2.34	2.35	1.48	1.37
Ti ^{IV}	-	-	-	0.07	-	-	-	-	0.09	0.26
T site				8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.88	7.95
Al ^{VI}	-	-	0.13	-	0.01	0.20	0.31	-	-	-
Ti ^{VI}	-	-	-	0.34	0.50	0.42	0.37	0.47	-	-
Cr	-	-	-	-	0.01	-	-	-	0.01	-
Fe ⁽⁺²⁾	3.05	3.08	3.07	2.46	2.33	2.16	2.15	3.16	5.72	5.48
Mn ⁽⁺²⁾	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.08	0.04	0.13	0.22	0.19
Mg	2.19	2.18	2.08	3.56	2.90	2.89	2.83	2.01	0.13	0.22
O site				6.42	5.78	5.76	5.70	5.77	6.08	5.89
Ca	-	-	-	0.03	-	0.01	0.01	-	0.01	0.01
Na	0.02	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.10	0.03	0.07
K	1.81	1.82	1.81	1.06	1.75	1.68	1.83	1.77	1.71	1.68
A site				1.11	1.79	1.71	1.87	1.87	1.76	1.77
Fe/(Fe+Mg)	0.58	0.59	0.60	0.43	0.45	0.43	0.42	0.61	0.98	0.97

Ca 함량이 감소하다가 다시 증가하는 진동누대 조적을 보여주므로, 분화과정에서 염기성 성분이 첨가되었을 가능성을 시사해 주고 있다. 누대조적의 사장석은 원동지역만 제외하고는 대체로 그룹 I의 암상에서만 산출되는데, 성분은 알바이트, 올리고클레이스, 그리고 안데신의 영역에 도시되었다. 이들은 지역간의 변화 및 암상별간에도 체계적 변화양상을 잘 보여주지 않았다(그림 5a).

퍼타이트 조적을 보이는 장석을 사장석과 정장석 성분으로 분리하여 도시하고, 이들을 선으로 연결한 결과(그림 5b), 사장석 성분은 화강섬

록암에서는 올리고클레이스 내지 안데신 영역에 도시되었고, 포유암 함량이 많은 반상화강암은 올리고클레이스 영역에, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암과 등립질화강암은 알바이트 영역에 도시되었다. 일부 화강섬록암의 사장석 성분은 알바이트 영역에 도시되기도 하므로, 반드시 암상별로 체계적인 변화양상을 보인다고는 할 수 없다. 정장석 성분은 대체적으로 오쏘클레이스 영역에 도시되었지만, 언양 남부의 원동 지역에서는 일부 아놀쏘클레이스 영역에 도시되기도 하며 다소 심한 변화를 나타내었다.

Table 3. Chemical compositions and structural formulas of zoned plagioclase from the granitic rocks in study area (analyzed by EPMA)

Area	1. Busan-Yangsan*										
	GD			ERPG						MME	
	DY20			YS37-1		A-71-A			A-71-B		
Sample No.	core	middle	rim	core	rim	core	middle	rim	core	rim	
SiO ₂	60.42	60.26	60.29	64.83	65.38	61.95	64.90	65.43	60.52	63.78	
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Al ₂ O ₃	23.89	23.87	24.22	20.81	20.67	23.58	21.26	20.74	25.66	21.62	
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
FeO ^T	-	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-	
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CaO	6.00	6.26	6.13	2.54	1.76	4.91	2.74	2.55	7.21	3.31	
Na ₂ O	7.64	7.70	7.53	9.86	10.22	8.40	9.17	9.89	7.03	9.36	
K ₂ O	0.34	0.55	0.63	0.69	0.19	0.31	0.61	0.49	0.23	0.42	
Total	98.39	99.00	98.80	98.73	98.22	99.25	98.78	99.50	100.7	98.29	
	cations per 8 oxygens										
Si	2.78	2.72	2.72	2.90	2.92	2.77	2.89	2.91	2.67	2.86	
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Al	1.27	1.27	1.29	1.10	1.09	1.24	1.12	1.09	1.34	1.14	
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fe	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ca	0.29	0.30	0.30	0.12	0.09	0.24	0.13	0.12	0.34	0.15	
Na	0.67	0.67	0.66	0.86	0.89	0.73	0.79	0.85	0.60	0.81	
K	0.02	0.03	0.04	0.04	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.03	
	Mole percent (%)										
Or	2.00	3.20	3.60	3.80	1.10	1.80	3.60	2.80	1.40	2.40	
Ab	68.40	66.80	66.40	84.20	90.30	74.20	82.70	85.10	63.00	82.70	
An	29.60	30.00	29.90	12.00	8.60	24.00	13.70	12.10	35.70	14.80	

Abbreviations are the same as those in Fig. 2. (*: data from Jeon, 1998; **: data from Kim, 1993)

지온지압계

연구지역에 산출되는 각섬석의 Al^T 함량을 이용한 지질압력계를 적용시켜 화강암류의 생성압력을 추정하였고, 추정된 압력을 이용하여 페타이트의 두 엽리의 용리를 이용한 지질온도계에 적용하여 생성온도를 알아보았다.

지질압력계(Geobarometry)

연구지역 내에 산출되는 화강암질암을 각 암상별로 생성압력을 추정하기 위하여 지역별로 각섬석의 Al 함량을 이용한 지질압력계를 적용

시켜 보았다. 하지만, 각섬석은 그룹I의 세 암상과 MME에서만 관찰되므로, 그룹II와 그룹III의 암상에 대한 압력 값은 구해지지 않았다.

상물에 근거하여, 칼크-알칼리 계열의 마그마의 성분과 나타나는 광물상의 수를 계산하면, 온도-압력-산소분압의 3개의 자유도가 구해지며 (Hammarstrom and Zen, 1986), 이 중에서 산소분압은 Fe-Ti 산화광물 혹은 녹염석에 의해 완충되고, 온도 역시 H₂O로 포화된 화강암질 마그마의 경우 거의 등은 고상선으로 같다고 가정할 때, 계에서 유일한 변수는 압력이 되며, 이때 압력과 가장 밀접한 관련을 가지는 것이 각섬석의 Al^T로 알려져 있다(조동룡, 1992).

Table 3. continued

Area	2. Yucheon-Eonyang**									
	ERPG			EPPG			EG		MG	
	CH-78			K-92			CH-136		S-87	
Rock type										
Sample No.										
	core	middle	rim	core	middle	rim	core	rim	core	rim
SiO ₂	64.13	64.51	65.39	64.80	65.13	66.39	64.24	66.03	65.47	65.98
TiO ₂	0.04	0.04	0.04	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	21.53	21.30	20.82	22.11	21.80	21.34	21.75	20.94	20.48	20.19
Cr ₂ O ₃	0.10	0.05	0.08	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^T	0.15	0.10	0.16	0.20	0.15	0.10	0.19	0.19	0.28	0.14
MnO	0.01	0.02	-	-	0.04	0.07	0.06	-	0.06	-
MgO	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-
CaO	2.72	2.59	1.69	2.99	2.75	2.26	2.78	1.82	1.73	1.72
Na ₂ O	10.17	10.00	10.98	10.41	10.64	10.88	10.51	11.22	10.17	10.37
K ₂ O	0.50	0.58	0.22	0.09	0.10	0.16	0.11	0.08	0.45	0.36
Total	99.35	99.29	99.47	100.6	100.6	101.2	99.64	100.3	98.64	98.86
	cation per 8 oxygens									
Si	2.86	2.87	2.90	2.86	2.86	2.89	2.85	2.90	2.92	2.94
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	1.12	1.12	1.09	1.12	1.13	1.09	1.14	1.08	1.08	1.06
Cr	0.01	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-
Fe	0.01	-	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.13	0.12	0.08	0.14	0.13	0.11	0.13	0.10	0.08	0.08
Na	0.87	0.86	0.94	0.90	0.91	0.92	1.94	1.10	0.88	0.89
K	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Mole percent (%)									
Or	2.52	3.15	7.75	0.57	0.58	0.96	0.58	0.50	2.63	2.21
Ab	85.00	84.76	91.28	85.94	87.03	88.91	93.04	91.41	88.96	89.47
An	12.48	12.09	0.97	13.49	12.39	10.13	6.38	8.09	8.41	8.32

각섬석의 사면체자리(tetrahedral-site) 내의 Al^{VI}와 팔면체자리(octahedral-site) 내의 Al^{VI}의 함량을 이용하여, 각섬석이 형성될 당시의 압력에 대하여 여러 연구자들을 실험 광물학적으로 실험식을 구하였다(Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Schmidt, 1992). 본 연구에서는 Schmidt (1992)의 실험식을 이용하여 각섬석이 형성될 당시의 압력을 계산하여 보았다. 계산식은 다음과 같다.

$$P (\pm 0.6 \text{ kb}) = -0.31 + 4.76 \text{ Al}^T, r^2 = 0.99$$

계산된 값은 표(표 5)에 표시하였다. 전체적인 경향을 살펴보면, 대체로 0.4~2.9 kb로 나타났으며(표 1), 경주지역의 MME를 제외하면 대부분

0.4~1.7 kb의 낮은 압력을 나타내었고, 이 값은 기존 자료 값과 잘 일치하였다(조동룡, 1992; 조동룡과 권성택, 1994; 고정선 외, 1996). 또한, 화강암류의 전암분석치를 이용한 Ab-An-Or-Q-H₂O 계에 적용한 추정 압력값도 0.5~2 kb로 나타나므로, 기존 자료와도 잘 부합된다(진명식, 1981).

지역별로 살펴보면(표 5), 경주지역에서 1.2~2.9 kb로 타 지역보다 다소 높게 나타났으며, 지역 화강암의 압력은 0.4~1.5 kb로 가장 낮지만, 양산지역의 화강암류와 거의 유사하다. 하지만, 분석치가 주로 그룹I에 국한되어 그룹II와 그룹III 암상과는 비교가 이루어지지 않았으므로, 각 지역을 대표하는 값이라 보기는 어렵다. 따라서 이 비교는 그룹 I 화강암류와 MME 및 섬

Table 3. continued

Area Rock type Sample No.	3. Gyeongju-Ulsan									
	GD		GD			EPPG		MME		
	AL-56(A)		AL-36			H-80		AL-28		
	core	rim	core	middle	rim	core	rim	core	middle	rim
SiO ₂	58.19	59.74	55.07	57.59	60.50	62.18	64.46	58.86	59.08	60.83
TiO ₂	-	-	0.01	0.01	-	-	0.02	-	-	-
Al ₂ O ₃	26.19	25.04	28.54	26.37	24.51	23.91	21.87	25.40	24.95	23.80
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^T	0.17	0.29	0.12	0.20	0.13	0.08	0.12	0.20	0.23	0.20
MnO	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.05
MgO	-	0.02	0.02	-	-	-	-	0.01	-	-
CaO	7.76	6.42	10.35	8.09	6.01	4.88	2.98	7.13	6.75	5.31
Na ₂ O	7.24	7.86	5.70	6.47	7.89	8.66	9.78	7.46	7.59	8.27
K ₂ O	0.23	0.28	0.23	0.33	0.42	0.04	0.49	0.37	0.44	0.66
Total	99.82	99.78	100.1	99.16	99.56	100.0	99.72	99.43	99.04	99.12
	cation per 8 oxygens									
Si	2.61	2.67	2.48	2.60	2.71	2.76	2.85	2.65	2.67	2.73
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	1.39	1.32	1.52	1.40	1.29	1.25	1.14	1.35	1.33	1.26
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.37	0.31	0.50	0.39	0.29	0.23	0.14	0.34	0.33	0.26
Na	0.63	0.68	0.50	0.57	0.68	0.74	0.84	0.65	0.66	0.72
K	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04
	Mole percent (%)									
Or	1.80	1.60	1.30	1.90	2.40	2.00	2.80	2.10	2.50	3.70
Ab	62.00	67.80	49.60	58.00	68.70	74.80	83.30	64.10	65.40	71.10
An	36.70	30.60	49.40	40.00	28.90	23.40	14.00	33.90	32.10	25.20

록암 등의 염기성 암석에 한정된 것으로 해석되어야 할 것이다.

지질온도계 (Geothermometry)

연구지역 내 산출되는 화강암류를 각 암상별 냉각온도를 추정하기 위하여 함유광물의 조성으로부터 몇 가지 지질온도계를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 화강암질암 내에 함유된 페타이트의 분석치를 이용하여, 페타이트의 두 엽리에 대한 추정 지질 온도(Stormer, 1975, Powell and Powell, 1977)를 구하여, 각 암상별로 차이를 비교하여 보았다.

페타이트 지질 온도계는 결정화 작용이 진행되는 동안 공존하는 사장석과 알칼리 장석 사이

의 알바이트 성분이 열역학적 평형관계에 있다는 것에 기인한 것이다. Powell and Powell (1977)의 식을 근거로 하여 페타이트 내 용리된 사장석과 정장석 성분을 분석하여 그 온도를 추정하였는데, 지질온도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{-X_K^2(Af)[6330 + 0.093P + 2X_{Na}(Af)(1340 + 0.019P)]}{R \times \ln K_D + X_K^2(Af)(-4.63 + 1.54X_{Na}(Af))}$$

여기서, T는 절대온도이며, P는 압력(bar)이고, R은 상수로서 1.9872 cal이며, K_D는 사장석과 정장석 사이의 Na 몰분율에 대한 분배계수로서 K_D=X_{Na}(Af)/X_{Na}(Pl)이다. 그리고 X_K(Af)는 알칼리장석 내의 K 함량이며, X_{Na}(Af)는 알

Table 4. Chemical compositions and structural formulas of perthite from the granitic rocks in study area (analyzed by EPMA)

Area	1. Busan-Yangsan*									
Rock type	DI		GD		EPPG		ERPG			
Sample No.	A-76		DY20		A-73		YS37-1		A-71-A	
	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab
SiO ₂	64.80	66.43	62.93	62.26	64.12	65.97	63.47	64.80	64.43	64.30
TiO ₂	-	-	0.60	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	17.90	20.28	18.56	22.80	18.01	20.93	18.10	21.15	18.16	21.63
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO ^T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	-	1.23	-	4.28	-	1.43	-	2.47	-	3.32
Na ₂ O	0.94	10.44	0.49	9.02	1.00	10.56	1.20	9.74	1.04	9.44
K ₂ O	16.07	0.41	16.47	0.43	16.57	-	16.29	0.21	16.80	0.20
Total	99.71	98.89	99.15	98.89	99.70	98.99	99.16	98.47	100.4	98.99
	cation per 8 oxygens									
Si	3.01	2.95	2.95	2.79	3.00	2.92	2.98	2.89	2.99	2.88
Ti	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
Al	0.98	1.06	1.03	1.21	0.99	1.09	1.00	1.11	0.99	1.14
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	0.06	-	0.21	-	0.07	-	0.12	-	0.16
Na	0.09	0.90	0.05	0.79	0.09	0.91	0.11	1.09	0.09	0.82
K	0.95	0.02	0.99	0.03	0.99	-	0.98	0.01	0.99	0.01
	Mole percent (%)									
Or	91.86	2.37	95.63	2.42	91.59	-	89.94	1.20	91.39	1.17
Ab	8.14	91.65	4.37	77.34	8.41	93.02	10.06	86.64	8.61	82.76
An	-	5.97	-	20.24	-	6.98	-	12.13	-	16.07

Abbreviations are the same as those in Fig. 2. (*: data from Jeon, 1998; **: data from Kim, 1993)

칼리장석 내의 Na 함량을 나타낸다.

연구지역의 화강암질 암체는 대개 0.5~2 kb의 압력 하에서 정지된 것으로 사료되며, 추정된 압력 하에서 용리가 일어나는 온도를 계산하여 보면(표 5), 전체 암상에서 대략 300~600℃

의 온도가 구해졌으며, 그룹별로 약간의 차이를 나타내었다. 각 지역별로 암상별 퍼타이트 용리 온도를 구하여 보면, 대체적으로 그룹 I에 속하는 세 암상과 MME, 그리고 양산지역의 섬록암한 시료는 300~400℃ 정도의 온도에서 용리가

Table 4. Continued

Area	1. Busan-Yangsan*				2. Yucheon-Eonyang**					
	EG		MME		ERPG		EPPG		EG	
	A-75		AKJ8		CH-78		K-92		CH-136	
Sample No.	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab
SiO ₂	65.52	68.51	64.21	66.48	64.30	67.66	64.61	60.81	64.03	65.82
TiO ₂	-	-	-	-	0.05	0.02	0.06	0.05	0.06	0.03
Al ₂ O ₃	18.82	19.22	17.99	20.29	18.25	19.55	18.62	17.39	18.25	20.39
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.07	0.09	0.08	0.74	0.09	0.05
FeO ^T	-	-	-	-	0.05	-	0.01	0.28	-	0.10
MnO	-	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-
CaO	0.21	0.18	-	1.57	-	0.51	0.02	0.85	-	0.91
Na ₂ O	4.41	11.23	0.94	10.63	1.17	11.70	1.47	10.38	1.68	11.33
K ₂ O	11.19	0.16	16.59	0.29	15.87	0.07	15.50	0.10	15.16	0.43
Total	100.1	99.30	99.73	99.36	99.82	99.60	100.4	90.61	99.37	99.16
	cation per 8 oxygens									
Si	2.98	2.41	2.39	2.34	2.99	2.97	2.97	2.95	2.98	2.93
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	1.00	0.80	0.79	0.84	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.07
Cr	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.03	0.01	-
Fe	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.04	0.01	-	0.06	-	0.02	-	0.04	-	0.04
Na	1.55	0.77	0.06	0.73	0.11	1.00	0.13	0.97	0.15	0.98
K	2.60	0.01	0.79	0.01	0.94	0.01	0.91	0.01	0.90	0.03
	Mole percent (%)									
Or	61.95	1.27	92.10	1.65	89.83	0.58	87.36	0.58	85.71	2.49
Ab	37.07	97.47	7.90	90.94	10.17	97.08	12.64	95.12	14.29	93.40
An	0.98	1.27	-	7.41	-	2.34	-	4.30	-	4.11

일어난 것으로 추정되고, 나머지 그룹II와 그룹 III에 속하는 등립질화강암과 알칼리장석화강암은 이보다 높은 500~600℃ 내외로 나타났다. 경주지역의 미문상화강암 한 시료를 제외하고는 대체로 그룹II와 그룹III의 화강암질암 내의 퍼타이트 용리온도가 그룹I보다 높은 것으로 나타났는데, 이는 그룹별 화강암질암의 성인과 관련하여 앞으로 더 연구가 필요할 것으로 판단된다.

토 론

연구지역에 산출되는 화강암류 내에 산출되는 각섬석의 Al 함량을 이용한 지질압력계를 적용시켜 화강암류의 생성압력을 추정하였고, 추정된 압력을 이용하여 퍼타이트의 두 엽리의 용리를 이용한 지질온도계에 적용하여 생성온도를 알아보았다.

각섬석은 그룹 I 과 그룹III의 화강암질암 내

Table 4. Continued

Area	2. Yucheon-Eonyang**							3. Gyeongju-Ulsan		
Rock type	MG							GD		
Sample No.	CH-50			S-9A		S-9B		AL-56A		
	K-f	Ab		K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	
SiO ₂	65.98	62.97	73.45	64.19	66.74	65.10	67.52	63.75	60.91	59.87
TiO ₂	0.03	0.06	0.04	0.03	0.02	0.04	-	0.01	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	19.13	22.75	17.82	18.31	19.57	18.43	19.74	18.48	24.39	25.31
Cr ₂ O ₃	0.05	0.14	0.11	0.08	0.02	0.19	-	0.04	0.04	0.05
FeO ^T	0.02	1.15	0.11	0.52	-	0.56	0.07	0.09	0.22	0.53
MnO	0.02	0.04	0.02	0.04	-	0.02	0.04	-	-	-
MgO	-	0.04	-	0.01	-	0.02	-	-	-	0.01
CaO	0.22	0.30	0.15	0.09	0.38	0.03	0.48	0.04	5.82	6.76
Na ₂ O	7.64	9.48	11.68	3.06	10.22	5.40	11.84	1.27	8.15	7.78
K ₂ O	6.21	2.80	0.33	12.79	3.47	9.06	0.04	14.35	0.34	0.30
Total	99.30	99.73	103.1	99.12	100.4	98.85	99.73	98.03	99.90	100.6
	cation per 8 oxygens									
Si	2.98	2.82	3.10	2.97	2.96	2.98	2.97	3.00	2.71	2.66
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	1.02	1.20	0.64	1.00	1.02	1.00	1.02	1.02	1.28	1.33
Cr	-	0.01	0.01	0.01	-	0.01	-	-	-	-
Fe	-	0.04	0.01	0.02	-	0.02	-	-	0.01	0.02
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	-	0.02	-	0.28	0.32
Na	0.67	0.82	0.95	0.27	0.88	0.48	0.50	0.12	0.70	0.67
K	0.36	0.16	0.02	0.76	0.20	0.53	-	0.86	0.02	0.02
	Mole percent (%)									
Or	34.59	16.25	2.04	73.11	17.93	52.33	-	88.00	2.00	1.70
Ab	64.35	82.45	97.45	26.31	80.33	47.37	95.45	11.80	70.30	66.50
An	1.06	1.30	0.51	0.58	1.74	0.30	4.55	0.20	27.80	31.90

에서만 산출되었으며, 그룹II의 화강암질암에서는 나타나지 않았다. 그러나 그룹III의 알칼리장석화강암 내의 각섬석도 Al의 함량이 낮아 지암계에 적용할 수 없었으므로, 그룹 I의 세암상에 대해서만 계산되었다. 그룹 I의 세암상은 마그마 혼합의 영향을 받은 암상들이며(그림 2), 이들의 화학성분은 지역 및 암상별 차이가 없이 서로 중첩되고(그림 3), 추정압력은 0.4 내지 2.9 kb로 낮은 압력을 나타내었다(표 5). 한

편, 그룹II와 그룹III 화강암류의 정치압력은 전암 화학분석을 통한 CIWP 노움치에 근거한 Q-Ab-Or 도표를 이용하여 구하였는데(황병훈, 2004), 그룹 I과 유사한 0.5 내지 2 kb 정도로 나타났다. 따라서 연구지역 내 화강암류들은 낮은 압력하에서 정치된 천소관입암체로 추정해 볼 수 있으며, 경상분지 화강암류에 대한 기존의 연구결과(조동룡과 권성택, 1994 : 0.8~2.8 kb, 좌용주, 1997 : 0.5~2 kb, 고정선 외, 2000

Table 4. Continued

Area	2. Gyeongju-Ulsan									
Rock type	EPPG		ERPG		EG		MG		AG	
Sample No.	H-80		AL-64-A		AL-5		AL-34		AL-72	
	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab	K-f	Ab
SiO ₂	64.47	66.45	64.60	67.13	65.67	65.55	64.08	63.01	67.01	67.94
TiO ₂	-	-	0.03	0.01	-	0.01	0.03	-	-	-
Al ₂ O ₃	18.48	20.94	18.74	20.02	18.99	21.40	18.21	18.42	19.05	19.44
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	-	0.02	-	-	0.04
FeO ^T	0.06	0.10	0.14	0.04	0.06	0.06	0.12	0.06	0.14	0.22
MnO	-	-	-	-	0.01	-	-	-	0.07	-
MgO	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO		1.35	0.04	0.43	0.14	2.22	0.04	0.22	-	-
Na ₂ O	0.86	10.80	1.54	11.55	4.45	9.89	0.20	10.59	6.54	11.98
K ₂ O	15.33	0.15	14.93	0.17	10.28	1.49	16.76	0.75	7.53	0.24
Total	99.21	100.0	100.0	99.35	99.51	100.6	99.56	93.15	100.3	99.96
	cation per 8 oxygens									
Si	2.99	2.92	2.98	2.96	2.99	2.88	2.99	2.97	3.00	2.98
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	1.01	1.08	1.02	1.04	1.02	1.11	1.00	1.02	1.00	1.01
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-	-	0.01	-	-	-	0.01	-	0.01	0.01
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	0.07	-	-	0.01	0.11	-	0.01	-	-
Na	0.08	0.92	0.14	0.99	0.39	0.84	0.02	0.97	0.57	1.02
K	0.91	0.01	0.88	0.01	0.60	0.08	1.00	0.05	0.43	0.01
	Mole percent (%)									
Or	92.20	0.90	86.30	0.90	59.90	8.10	98.00	4.40	43.10	1.30
Ab	7.80	91.90	13.60	97.10	39.40	81.80	1.80	94.50	56.90	98.70
An	-	7.20	0.20	2.00	0.70	10.10	0.20	1.10	-	-

: 0.73~3.16 kb)와도 조화적이다. 하지만 그룹 I의 세 암상 내의 각섬석은 마그마혼합의 영향을 고려해서 해석되어야 할 것이며, 그룹 II 및 그룹 III은 각섬석 지압계를 설정하지 못했으므로 전체적인 비교는 어려워 보인다. 하지만 그룹 I과 그룹 III의 각섬석은 화학성분이 매우 다르므로(그림 3a), 성인적으로 확실한 차이가 날 것으로 판단된다.

흑운모는 그룹들 간에 뚜렷한 차이를 잘 보여

주는데(그림 4), 그룹 I의 세 암상에서 흑운모의 화학성분은 각섬석의 경우와 마찬가지로 서로 중첩되며, 지역 및 암상 간에 뚜렷한 차이를 잘 나타내지 않는다(그림 4a). 그러나 전암 SiO₂ 성분은 MME, 화학섬록암, 그리고 반상화강암 순으로 증가하며, 암상별로 군집을 잘 나타낸다(그림 4b). 하지만, 포유암 함량이 많은 반상화강암과 포유암 함량이 적은 반상화강암은 역시 중첩되어 구분이 되지 않는다. 이것은 그룹 I

Table 5. Estimated pressure and temperature for hornblende geobarometry and perthite geothermometry of the granitic rocks in study area

method	Study area		1. Busan- Yangsan	2. Yucheon- Eonyang	3. Gyeongju- Ulsan
P (kb)	Total range		0.61~1.18	0.42~1.46	1.15~2.87
	Group I	MME	0.61~0.85	0.42~0.60	2.87
		GD	1.18	-	1.15~1.73
		ERPG	-	0.98~1.02	-
		EPPG	-	1.46	-
T (°C)	Total range		325~562	389~604	226~624
	Group I	DI	370~384	-	-
		MME	368~383	-	-
		GD	325~338	-	430~493
		ERPG	383~427	389~405	420~434
		EPPG	375~389	-	344~357
	Group II	EG	544~562	434~561	605~624
		MG	-	498~604	226~237(?)
	Group III	AG	-	-	536~553

Abbreviations are the same as those in Fig. 2.

내의 암상들의 암석기재적 특징 및 전암 화학성분의 결과와도 유사한 양상을 나타낸다(황병훈, 2004). 그룹II의 화강암질암 내에 나타나는 흑운모는 나머지 두 그룹의 중간성분에 해당되며, 그룹III은 철 함량이 높은 철질 앤나이트의 영역에 도시된다. 특히 그룹III의 알칼리장석화강암은 신장환경 하에서 형성되는 A-형 화강암체로 알려져 있으므로(윤성효와 황인호, 1990; 고정선, 1994; 이미정 외, 1995; 고정선 외, 1996; Kim and Kim; 1997; Koh, 2001), 그룹들 간의 성인관계는 매우 흥미로운 주제가 아닐 수 없다.

마지막으로 장석의 화학성분을 살펴보면, 사장석의 경우는 암상 또는 그룹별로 잘 구분되지 않으며, 지역적으로도 뚜렷한 구분이 되지 않는다(그림 5a). 하지만 페타이트의 용리온도를 이용한 지온계를 설정하여 보면, 지역에 상관없이 그룹 I 내의 화강암질암의 경우(300~400°C)보다 그룹II의 등립질화강암과 그룹III의 알칼리장석화강암 내 페타이트 용리온도(500~600°C)가 더 높은 것으로 나타났다(표 1). 이것은 이들이 천소에 관입하는 동안 비교적 낮은 외부 압

력에 의해 챔버 내 수증기압이 증가하게 되고 이에 따라 용리 온도가 상승한 것으로 추정된다(McBirney, 1993; Raymond, 1995). 하지만, 경주지역의 미문상화강암 한 시료에서는 오히려 용리온도가 더 낮아, 200°C 내외로 나타나는데, 이것은 미문상화강암의 급격한 압력감소에 의한 급랭(Lee, 1991)에 기인한 것으로 해석된다. 하지만, 화강암 내에 미문상조석이 다양하게 나타나므로(황병훈, 2004), 이들의 성인에 대해서는 보다 더 진행된 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 그룹II의 등립질화강암의 용리온도가 그룹III의 알칼리장석화강암과 유사하고, 그룹 I의 세 암상과는 다르게 높게 나타나는 점은 이들 그룹별 성인과 관련된 기존연구와의 유사성을 일부 제시해주고 있다. 즉 그룹별 동위원소 연구에 의하면(Koh, 2001; 황병훈, 2004), 그룹 I의 세 암상은 절대연령과 근원물질이 나머지 그룹들과 다르게 나타났으며, 그룹II와 그룹III의 두 암상은 서로 유사하게 나타났다. 하지만 그룹II와 그룹III의 두 암상은 지화학적 조성이 매우 다르므로 이들의 성인은 앞으로 해결되어야 할 연구과제로 남아있다.

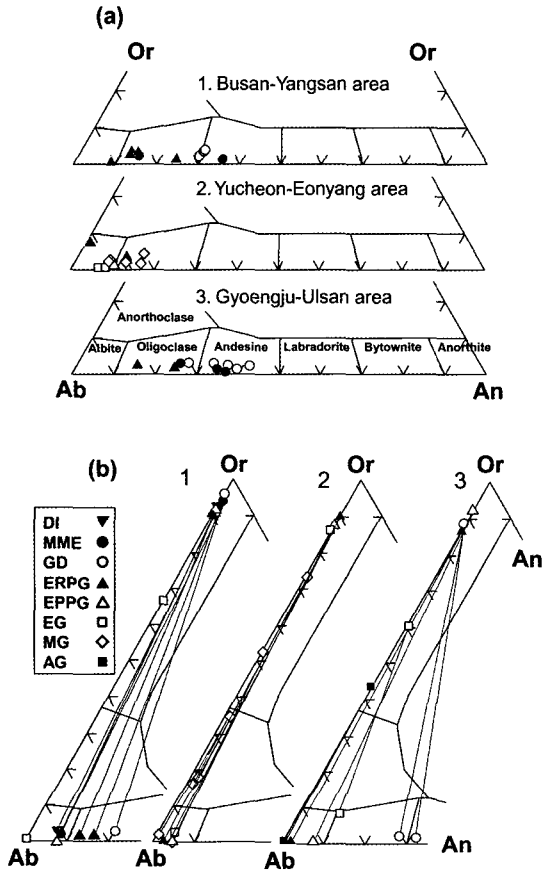


Fig. 5. Chemical compositions of the feldspars of the granitic rocks in the study area. Or-Ab-An triangular diagram of zoned plagioclase (a), and perthite (b). Tied lines are joined by Ab-Or in perthite. Abbreviations are the same as those in Fig. 2. 1. Busan-Yongsan area, 2. Yucheon-Eonyang area, 3. Gyeongju-Ulsan area.

결론

1) 연구지역 화강암질암은 암석기재적 특징에 따라 세 그룹으로 나눌 수가 있는데, 그룹 I 은 마그마혼합의 영향을 받은 암체로 염기성 미립 포유암 및 염기성광물 집합체를 다양하게 함유하며, 그룹 II 는 낮은 압력하에서 형성된 친소관 입암의 특징을 나타내며, 그룹 III 은 확장환경에서 형성된 A-형 화강암류의 특징을 보인다.

2) 화강암질암 내에 산출되는 광물들의 화학 조성은 지역별로 뚜렷한 변화양상을 보여주지 않지만, 암상 및 그룹별로는 흑운모의 성분 및

퍼타이트의 용리온도 등에서 비교적 체계적인 화학성분 변화를 보여주었다.

3) 그룹 I 내의 각섬석은 칼식-각섬석 영역에 속하며 추정압력은 0.4~2.9 kb의 범위에 해당되었으며, 그룹 II 에서는 각섬석이 산출되지 않았고, 그룹 III 내의 각섬석은 알칼리-각섬석 영역의 리베카이트에 해당되었다. 흑운모의 화학 조성은 비교적 그룹별로 군집을 잘 이루며, 그룹 I 에서부터 그룹 III 의 철질-앤나이트까지 연속적인 변화양상을 보여주었다.

4) 누대조직을 보이는 사장석은 지역 및 암상별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않으며, 대체로 알바이트, 올리고클레이스, 그리고 안데신의 영역에 해당되었다.

5) 그룹별 퍼타이트의 용리 온도를 살펴보면, 그룹 I 이 대체로 300~400℃ 정도이며, 그룹 II 의 등립질화강암과 그룹 III 의 알칼리장석화강암에서는 500~600℃ 정도로 높게 나타났다.

사 사

논문심사과정에서 여러 문제점을 지적하고 논문전개에 많은 유익한 도움을 주신 윤성효 교수님과 익명의 심사자님께 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)에 의해 수행된 연구입니다.

참고 문헌

고정선 (1994) 경주 남산일대의 A-type 화강암류의 지화학적 특징 및 성인. 부산대학교 교육학석사 학위논문, 62p.

고정선, 윤성효, 이상원 (1996) 경주 남산일대의 A-형 화강암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5(2), 142-160.

고정선, 윤성효, 안지영, 김향수, 최유종 (2000) 경상 분지내 백악기 화강암류의 정지깊이에 관한 연구. 한국지구과학회지, 21(1), 59-66.

김중선 (2001) 경상분지 남부 지역의 화강암류에 산출되는 포유체의 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 관한 고찰. 부산대학교 이학박사 학위논문, 211p.

김창호 (1993) 경남 양산군 배태고개-석계 일대에 분포하는 화강암류에 관한 연구. 부산대학교 이학석사 학위논문, 68p.

신기철 (2001) 유천화강암체내에 산출되는 화강암질 마그마와 염기성 마그마의 상호작용에 관한 연구. 부산대학교 이학석사 학위논문, 106p.

- 신성천, 진명식 (1995) 한국지질도(1:1,000,000). 한국 지질자원연구소(KIGAM).
- 윤성효, 황인호 (1990) 경주 남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 한국지구과학회지, 11(1), 51-66.
- 이미정, 이종익, 이민성 (1995) 경주지역의 A-형 알칼리화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31(6), 583-607.
- 조동룡 (1992) 남한에 분포하는 현생 화강암류의 기원에 대한 광물 및 암석화학적 연구. 연세대학교 이학박사 학위논문, 189p.
- 조동룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30(1), 41-61.
- 좌용주 (1997) 남해지역 금산 미분상화강암에 대한 암석기재. 한국지구과학회지, 18(5), 426-432.
- 진명식 (1981) 남한의 백악기 화강암류에 관한 암석학적, 지화학적 연구. 서울대학교 이학박사 학위논문, 144p.
- 진미정 (1998) 양산시 원효산 남부의 화강암질암체에 대한 암석학적 연구. 부산대학교 이학석사 학위논문, 1-61.
- 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성 (2000) 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9(3), 142-167.
- 황병훈 (2004) 경상분지 남부지역에 분포하는 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 박사학위논문, 309p.
- 황병훈, 이준동, 양경희 (2004) 양산단층 주변에 분포하는 화강암질암의 암석학적 연구: 양산단층의 수평 변위량. 지질학회지, 40(2), 161-178.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E. (1986) Aluminium in hornblende: An empirical igneous geobarometer. American Mineralogist, 71, 1297-1313.
- Hollister, L.S., Grisson, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., and Sisson, V.B. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. American Mineralogist, 72, 231-239.
- Kim, C.S. and Kim, G.S. (1997) Petrogenesis of the early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Kyongsang Basin, Korea. Geoscience Journal, 1(2), 99-107.
- Koh, J.S. (2001) Mineralogical, geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of the Namsan A-type and Gyeongju I-type granitic rocks in the Gyeong-sang basin, Korea. Ph.D. Thesis, Pusan National University, 173p.
- Lee, J.I. (1991) Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Gyeongsang basin Korea: Origin of micrographic granite. Ph.D. thesis, Univ. of Tokyo, 197p.
- McBirney, A.R. (1993) Igneous petrology. Jones and Bartlett Publishers, 508p.
- Powell, M. and Powell, R. (1977) Plagioclase-alkali-feldspar geothermometry revisited. Mineralogical Magazine, 41, 253-256.
- Raymond, L.A. (1995) Igneous petrology. Wm. C. Brown Publishers, 742p.
- Schmidt, M.W. (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contribution to Mineralogy and Petrology, 110, 304-310.
- Stormer, J.C.Jr. (1975) To each plutonic rock its proper name. Earth Science Review, 12, 1-33.

2004년 12월 1일 원고접수, 2004년 12월 23일 게재승인.