

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 지질: II. 광물 및 지구화학

김인준* · 이규호 · 조등룡 · 이승렬 · 이사로

한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

Geology of the Kualakulun in the Middle Kalimantan, Indonesia: III. Mineralogy and Geochemistry

In-Joon Kim*, Gyoo Ho Lee, Deung-Lyong Cho, Seung-Ryeol Lee and Sa-Ro Lee

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The geology of the Kualakulun area in Middle Kalimantan, Indonesia comprises Permian to Carboniferous Pinoh Metamorphic Rocks and Cretaceous Sepauk Plutonics of the Sunda Shield, late Eocene Tanjung Formation, Oligocene Malasan Volcanics, Oligocene to early Miocene Sintang Intrusives and Quaternary alluvium. Sepauk Plutonic rocks are classified as the calc-alkaline series and the S-type granite. Sintang Intrusive rocks are basic-intermediate and intermediate rocks, and consists of basalt, basaltic andesite, basaltic trachyandesite and trachyandesite. The Malasan Volcanics are characterized by intermediate dacitic pyroclastics and minor lavas and belong to the subalkaline (calc-alkaline and tholeiitic) series. The whole-rock K-Ar ages of the fine-grained biotite granites and medium-grained granitoids were determined to be 100.5-106.5 Ma and 91.9-102.6 Ma, respectively. The whole-rock K-Ar age of the diorite is 89.1 Ma. K-Ar ages of the Malasan Volcanics and Sintang intrusives show 31.5-36.8 Ma and 24.6-34.5 Ma, respectively, and correspond to the Tertiary time.

Key words : Indonesia, calc-alkaline series, K-Ar ages

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 지질은 하부로부터 석탄-페름기의 피노변성암류, 백악기 세파옥심성암류, 에오세말기의 탄중층과 올리고세의 말라산화산암류로 구성되어 있다. 이들 중 변성암류, 화강암질암 및 화산암류 중 대표적인 시료에 대해서 광물화학 분석을 실시하였고, 백악기 심성암류 및 제3기 화성암류에 대하여 지구화학적 연구를 수행하였으며 화강암과 화성암류에 대하여 연대측정을 실시하였다. 세파옥심성암류는 칼크-알칼린 계열에 속하고, S-type 화강암 영역에 속한다. 신탕관입암류는 염기성암-중성암이고, 현무암-현무암질안산암-현무암질조면안산암-조면안산암 영역이며, 말라산화산암류는 중성 내지 산성암이면서 안산암과 석영안산암에 속한다. 이들 대부분은 비알칼리 영역인 쉐라이트 계열에 포함된다. 전암의 K-Ar 연대측정 결과는 중립질 화강암질암이 91.9-102.6 Ma, 세립질 흑운모화강암이 100.5-106.5 Ma, 심록암이 89.1 Ma의 연령을 보인다. 말라산화산암류와 신탕관입암류의 K-Ar 연대측정 결과는 각각 31.5-36.8 Ma 및 24.6-34.5 Ma를 나타내어 모두 제삼기에 해당한다.

주요어 : 인도네시아, 칼크-알칼린 계열, K-Ar 연대측정

1. 서 론

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역에 분포하는 지질의 구성암석, 층서, 분포범위, 상호관계, 지질구조 등을 조사하였고, 기존 자료들을 종합 분석하여 1:100,000 축척의 지질도를 편집 제작하였다(김인준 등, 2004). 암체 및 지층명 등을 기존 지질도록(Suetrisno

et al., 1994; Supriatna *et al.*, 1995; Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996)을 인용하였다. 이 지역에 대한 지질조사는 광상을 탐사할 목적으로 처음으로 수행되었으며, 주로 배태된 금광상에 대한 탐사가 이루어졌고, 지질 및 광화작용에 대한 연구도 일부 수행된 바 있다. 본 연구에서는 광물 및 암석에 관한 연구를 통해 기존의 지질조사를 보완하고, 본 연

*Corresponding author: ijkim@kigam.re.kr

구와 병행하여 실시된 층서 및 구조연구(김인준 등, 2004)의 결과들을 종합하여 쿠알라쿠룬 지역의 지질에 관한 연구를 완성하고자 한다.

본 연구에서는 암석의 성인과 이에 수반된 광화대 지역과의 관계를 이해하고, 층서 및 구조연구를 보완하기 위하여 조사지역내 석탄-폐름기의 피노변성암류에 대하여 광물화학 분석을 실시하였고, 백악기 세파육심성암류 및 제3기 올리고세의 화산암류에 대하여 지구화학적 연구를 수행하였으며, 화강암과 화산암류에 대하여 연대를 측정하였다.

2. 연구 방법

2.1. 전자현미분석

조사지역내에 분포하는 변성암류, 화강암질암 및 화산암류 중 대표적인 시료에 대해서 광물화학 분석을 실시하였다. 변성암의 경우 1개의 운모편암 (34-1) 및 각섬암 (H26R-B)을 포함하며, 화강암질암의 경우 대부분이 화학성분상 화강섬록암 내지 토날라이트에 해당하는 5개 시료(31-1, 57-1, 88-1, 96-1, 111-1)들이다. 화산암류의 경우 현무암질 암석에 해당하는 3개 시료(5-1, 105-1, 114-1)들이다. 광물화학 분석은 서울대학교 공동기기원이 보유하고 있는 JEOL JXA-8900R 전자현미분석기(Electron Microprobe)를 사용하였다. 분석조건은 15 kV의 가속전압, 10 nA의 beam 전류 및 5 μ m의 beam 지름을 이용하였다. 표준시료로는 천연 광물을 사용하였다. 분석자료는 컴퓨터로 자동화 된 ZAF 보정을 통하여 얻었다.

2.2. 주원소, 미량원소, 희토류원소 분석

조사지역의 백악기와 제3기 화성암에 대한 주성분, 미량성분 및 희토류원소의 분석을 XRF와 ICP를 이용하여 한국기초과학지원연구원서 실시하였다. 암석의 주원소는 XRF로, 미량원소 및 희토류원소는 ICP-MS로 각각 분석하였다.

2.3. 연대측정

화강암과 화산암류에 대한 연대측정은 암석의 성인과 이에 수반된 광화대 지역과의 관계를 이해하기 위해 한국기초과학지원센터에서 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

2.3.1. K 분석

K 분석은 2000ppm Cs 버퍼를 이용한 원자흡광분석

기(AA: absorption spectrophotometer, Unicam 989)에 의해 이루어졌다. 시료는 테프론 비이커에서 혼합산(HF:HNO₃:HClO₄ = 4:4:1)으로 용해하였다. 표준시료(RGM-1)를 사용하여 오차를 3% 이내로 하였으며, 두 번 이상의 측정값의 평균을 연대 계산에 사용하였다.

2.3.2. Ar 분석

Ar 분석은 Ar³⁸ spike와 희석동위원체를 이용하는, 가속 전압 4.5 kV, 전류 200 mA로 작동되는 질량분석기(VG5400)에 의해 측정되었다. Ar³⁸ spike의 오차는 1% 미만이다. 질량분석기는 데이터를 3-4초 간격으로 21번 측정하여 평형상태로 작동된다. 질량분석기의 감도는 약 3.5×10^{-8} ccSTP/V(1.56×10^{-12} mol/V)이며, Ar⁴⁰의 배경값은 3×10^{-14} ccSTP(1.34×10^{-18} mol)이다. Ar⁴⁰의 절차상 공백은 1×10^{-9} ccSTP(4.46×10^{-14} mol)보다 작으며, 거의 공기의 구성과 같다. 질량분석기의 판별력은 현재의 공기 아르곤으로 확인된다. 연대 및 오차의 계산은 Nagao *et al.* (1996)가 설명한 방법에 따랐다. 시료군의 아르곤 분석의 전과 후에 표준분석을 사용해서 각 연대 측정의 오차를 2% 이내로 하였다. 15 mg에서 50 mg 사이의 시료를 15 μ m 두께의 알루미늄 호일로 싸서 파이렉스 유리로 만든 시료홀더의 가지에 넣고 아르곤 추출 가마에 있는 진공라인에 연결하였다. 추출 및 정제 시스템은 공기오염을 제거하기 위해 하루 이상 약 200°C로 가열하였다. 시료홀더의 시료 역시 공기의 아르곤을 제거하기 위해 150-200°C로 가열하였다. 시료를 가열하는 몰리브데넘 도가니는 약 1,700°C로 띄워이하여 가열하여 가스를 제거하였다. 분석을 위해 시료를 도가니에 떨어뜨려서 약 1,500°C로 가열하여 용해시켰다. ³⁸Ar spike의 잔 양은 약 800°C로 유지하여 티타늄으로 만든 노에 의해 정제하였고 방출된 아르곤 가스와 혼합되며, 10분 동안 질소 용액에 의해 냉각된다. 아르곤 가스와 spike는 5분 동안 Zr-Al alloy로 만 두 개의 Sorb-AC에 의해 다시 정제된다. 아르곤 가스의 정제는 질소 용액에 의해 냉각된 목탄트랩에 저장된다. 정제 후, 목탄트랩은 아르곤 가스를 제거하기 위해 150-200°C로 가열하고, 아르곤은 진공된 질량분석기에 들어간다. ionization gauge는 정화된 라인에서 아르곤의 양을 측정해서 아르곤의 전체 압력으로 측정된다. 만약 아르곤의 양이 질량분석기로 측정 가능한 최대 한계(7×10^{-7} Torr in the purification line)를 초과하면 아르곤의 양은 평형 상태를 유지하여 부분적으로 제거한다. 질량분석기에서 아르곤 도입 후, Ar³⁶, Ar³⁸ and Ar⁴⁰의

Table 1. Representative analyses of plagioclase.

Rock type	Schist				Amp				Volcanic Rocks				Granitoids														
	34-1	468	469		H26R-B	184			105-1	284	293	84	108	122	23	17	359	111-1	31-1	142	144	159	38	65	88-1		
Sp. no.	62.73	63.65	57.99	54.66	52.60	53.09	45.89	46.76	53.27	56.99	58.14	57.72	0.00	59.85	55.06	59.96	61.59	54.09									
Analysis no.	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.06	0.03	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02									
SiO ₂	23.04	22.58	26.08	28.55	29.21	28.11	33.46	33.47	28.63	26.83	25.85	26.13	15.33	26.14	27.77	24.61	24.02	28.55									
TiO ₂	0.05	0.02	0.09	0.35	0.39	0.90	0.63	0.61	0.48	0.40	0.05	0.11	63.10	0.11	0.08	0.06	0.07	0.04									
Al ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.04	0.07	0.08	0.03	0.07	0.02	0.08	0.00	0.00	1.87	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00									
FeO*	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	18.24	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03									
MgO	4.24	3.48	8.15	11.49	12.53	12.00	18.08	17.89	12.05	9.75	7.97	8.39	0.05	6.43	10.40	6.57	5.60	11.28									
MnO	8.93	9.47	6.70	4.89	4.01	4.71	1.35	1.65	4.79	5.84	6.83	6.67	0.01	6.97	5.55	7.49	8.22	5.04									
CaO	0.08	0.09	0.26	0.29	0.22	0.26	0.03	0.02	0.29	0.39	0.16	0.08	0.00	0.77	0.13	0.40	0.28	0.04									
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01									
K ₂ O	99.10	99.33	99.29	100.32	99.10	99.22	99.48	100.52	99.53	100.35	99.02	99.15	99.71	100.28	99.03	99.10	99.79	99.10									
Cr ₂ O ₃	cations per 8 oxygens																										
Total	2.795	2.824	2.612	2.464	2.407	2.434	2.131	2.148	2.430	2.556	2.622	2.604	0.000	2.657	2.503	2.693	2.739	2.461									
Si	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.066	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001									
Ti	1.211	1.182	1.386	1.518	1.577	1.521	1.833	1.814	1.541	1.420	1.376	1.391	1.449	1.369	1.490	1.304	1.260	1.533									
Al	0.002	0.001	0.003	0.013	0.015	0.034	0.024	0.024	0.018	0.015	0.002	0.004	4.227	0.004	0.003	0.002	0.003	0.002									
Fe ²⁺	0.000	0.001	0.000	0.003	0.005	0.006	0.002	0.005	0.001	0.005	0.000	0.000	0.223	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000									
Mg	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	1.237	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001									
Mn	0.202	0.165	0.393	0.555	0.614	0.589	0.899	0.880	0.589	0.469	0.385	0.405	0.004	0.306	0.506	0.316	0.267	0.550									
Ca	0.771	0.814	0.585	0.427	0.356	0.418	0.121	0.147	0.423	0.508	0.597	0.583	0.002	0.599	0.489	0.652	0.709	0.445									
Na	0.005	0.005	0.015	0.017	0.013	0.015	0.002	0.001	0.017	0.022	0.009	0.005	0.000	0.043	0.007	0.023	0.016	0.002									
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000									
Cr	0.207	0.168	0.396	0.556	0.625	0.576	0.880	0.856	0.572	0.469	0.388	0.408	0.719	0.322	0.505	0.319	0.269	0.551									

*Total Fe as FeO

**XAn = Ca/(Ca + Na + K)

Table 2. Representative analyses of amphibole.

Rock type	Amp		Granitoids														
	H26R-B		111-1				31-1				88-1				96-1		
Sp. no.	172	173	179	329	343	330	129	139	147	224	231	t 226	377	407	t 410		
SiO ₂	46.86	44.79	41.29	43.18	42.70	43.05	44.48	41.27	43.22	45.04	42.79	44.40	44.42	53.64	56.15		
TiO ₂	0.78	1.03	0.85	0.86	0.89	0.77	1.21	0.66	1.08	0.51	0.58	0.57	0.88	0.08	0.02		
Al ₂ O ₃	6.87	8.88	11.93	11.84	12.29	11.55	8.65	11.28	9.76	11.18	13.32	11.33	11.75	3.89	1.58		
FeO*	19.12	19.31	20.62	16.19	16.11	16.01	17.61	19.44	19.31	17.42	17.17	16.97	7.52	3.82	2.80		
MgO	10.05	8.57	7.22	10.57	10.59	10.26	10.72	8.85	9.94	10.32	9.46	10.50	17.16	21.60	22.66		
MnO	0.45	0.43	0.42	0.35	0.35	0.38	0.60	0.63	0.64	0.64	0.47	0.56	0.15	0.20	0.13		
CaO	11.73	11.95	11.57	11.88	11.88	12.06	12.07	11.85	11.62	10.61	11.91	10.75	13.07	13.16	13.50		
Na ₂ O	0.85	1.12	1.41	1.22	1.42	1.23	1.00	1.14	1.07	1.21	1.25	1.13	1.66	0.53	0.21		
K ₂ O	0.64	0.93	1.36	0.96	0.92	0.93	1.23	1.50	1.46	0.32	0.40	0.32	0.63	0.19	0.03		
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	0.05	0.37	0.00		
Total	97.36	97.04	96.67	97.04	97.17	96.25	97.57	96.62	98.11	97.26	97.41	96.52	97.27	97.49	97.09		
cations per 23 oxygens																	
Si	7.081	6.838	6.419	6.503	6.429	6.540	6.731	6.404	6.572	6.733	6.426	6.682	6.426	7.476	7.778		
Ti	0.089	0.119	0.099	0.098	0.101	0.087	0.138	0.077	0.123	0.057	0.066	0.064	0.095	0.008	0.002		
Al	1.225	1.600	2.187	2.104	2.184	2.070	1.545	2.065	1.751	1.972	2.359	2.012	2.005	0.640	0.258		
Fe ²⁺	2.416	2.465	2.681	2.039	2.028	2.034	2.228	2.522	2.455	2.177	2.156	2.136	0.909	0.445	0.324		
Mg	2.264	1.950	1.673	2.373	2.376	2.321	2.417	2.047	2.253	2.298	2.116	2.355	3.700	4.486	4.678		
Mn	0.058	0.055	0.055	0.045	0.045	0.049	0.077	0.082	0.083	0.081	0.060	0.071	0.018	0.023	0.016		
Ca	1.898	1.954	1.927	1.917	1.917	1.963	1.956	1.970	1.892	1.699	1.916	1.733	2.025	1.966	2.003		
Na	0.250	0.332	0.423	0.355	0.415	0.363	0.293	0.344	0.315	0.351	0.364	0.329	0.464	0.144	0.057		
K	0.123	0.181	0.270	0.184	0.177	0.181	0.237	0.298	0.282	0.061	0.077	0.061	0.117	0.034	0.006		
Cr	0.001	0.005	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.006	0.000	0.006	0.041	0.000		
Fe/(Fe + Mg)	0.516	0.558	0.616	0.462	0.460	0.467	0.480	0.552	0.521	0.487	0.505	0.476	0.197	0.090	0.065		

*Total Fe as FeO

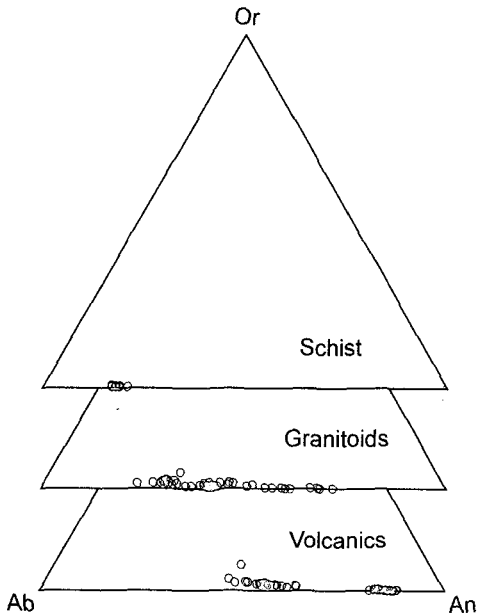


Fig. 1. Compositions of plagioclase from schist, granitoids and volcanics (Or: orthoclase, Ab: albite, An: anorthite).

최고 강도는 최고 도약 방법에 의해 측정하며, 각각의 비를 계산한다. K-Ar연대는 spreadsheet를 이용한 아르곤 동위체 분석 후에 계산한다. 풍부한 방사성 ^{40}Ar 과 실험오차는 Cox and Darlymple(1967)에 의해 주어진 형식을 사용하여 결정하였다. 정확한 오차의 한계는 Nagao *et al.* (1996)에 의해 설명되어 있다. K-Ar 연대는 the equation adopting 붕괴상수 $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10}/\text{y}$ 와 $\lambda_\beta = 4.963 \times 10^{-10}/\text{y}$ 및 원자비 $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.0001167$ 를 채택한 식에 의해 계산되었다(Steiger and Jäger, 1977).

3. 결 과

3.1. 광물화학

3.1.1. 사장석

편암 및 각섬암 내에 산출하는 사장석의 경우 대부분이 세립 내지 중립질의 반자형 내지 타형의 결정이며, 화강암류의 경우 대부분이 중립질의 반자형 내지 타형의 결정이다. 화산암류 내에 산출하는 사장석의 경우 대부분의 타형의 세립질 광물로 기질을 구성하나,

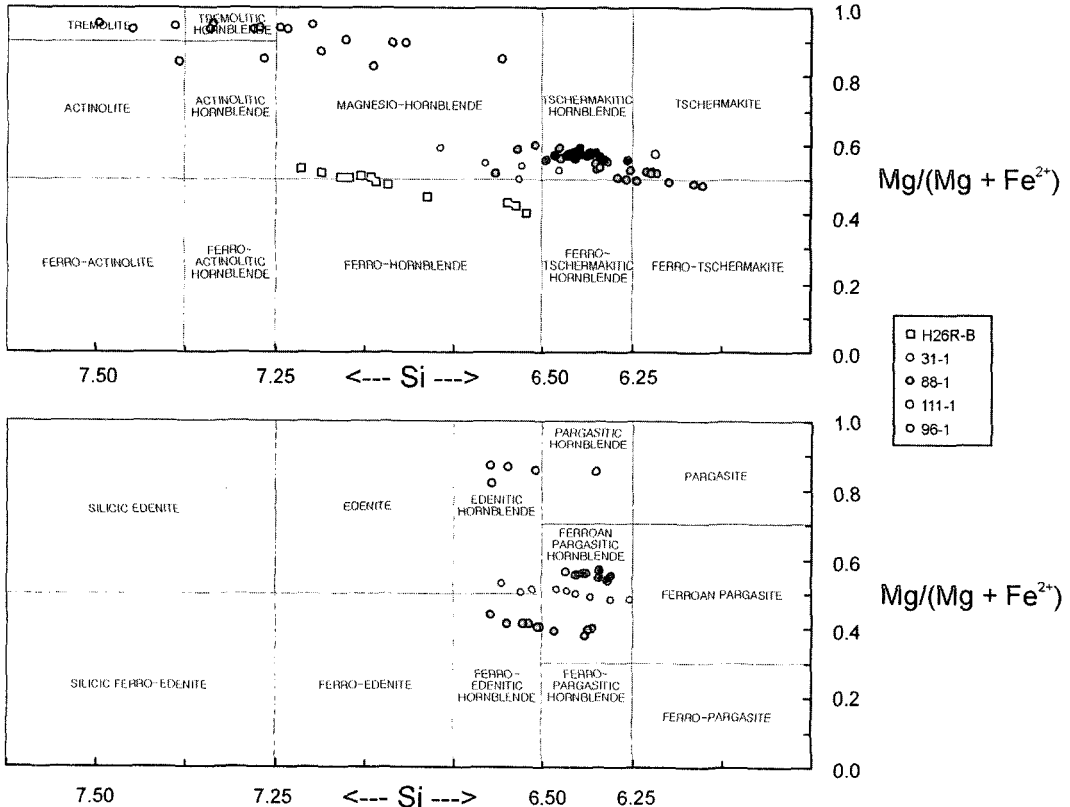


Fig. 2. Compositions of amphibole, following the discrimination scheme of Leake (1978).

Table 3. Representative analyses of mica.

Rock type	Granitoids						Schist					Schist			
	57-1		31-1		88-1		34-1		24-1						
Sp. no.	31	43	44	135	152	155	250	252	253	447	453	463	464	446	471
Analysis no.	31	43	44	135	152	155	250	252	253	447	453	463	464	446	471
	biotite														
SiO ₂	35.74	35.51	35.65	35.84	36.08	36.40	36.28	36.80	36.81	34.83	34.60	35.23	34.70	46.45	46.11
TiO ₂	2.64	2.84	2.74	2.69	2.64	2.36	1.67	1.72	1.70	2.67	3.10	2.79	2.59	0.96	0.93
Al ₂ O ₃	16.11	16.10	16.37	14.72	14.89	15.06	15.84	15.84	15.89	22.28	18.98	19.32	19.04	34.28	34.36
FeO*	19.18	18.54	19.07	19.88	19.65	19.43	17.27	17.03	17.15	20.28	22.26	22.30	22.43	0.82	0.81
MgO	11.26	10.58	11.05	11.28	10.95	11.26	13.00	13.01	12.41	6.18	6.54	6.57	6.57	0.47	0.36
MnO	0.39	0.40	0.42	0.44	0.41	0.35	0.19	0.18	0.18	0.26	0.34	0.33	0.41	0.00	0.01
CaO	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Na ₂ O	0.09	0.08	0.08	0.07	0.09	0.10	0.18	0.20	0.22	0.25	0.33	0.31	0.34	1.16	1.18
K ₂ O	10.64	10.01	9.90	10.17	10.45	10.48	9.93	9.91	9.91	8.84	9.27	9.39	9.19	10.07	10.51
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.07	0.01	0.00	0.06	0.02
Total	96.11	94.09	95.33	95.10	95.16	95.46	94.42	94.72	94.30	95.58	95.47	96.26	95.28	94.28	94.28
	cations per 22 oxygens														
Si	5.459	5.506	5.462	5.548	5.576	5.595	5.556	5.601	5.630	5.271	5.345	5.387	5.373	6.230	6.204
Ti	0.303	0.331	0.315	0.312	0.306	0.273	0.192	0.197	0.196	0.304	0.360	0.321	0.302	0.097	0.094
Al	2.903	2.945	2.959	2.688	2.716	2.731	2.862	2.844	2.867	3.978	3.460	3.486	3.479	5.424	5.454
Fe ²⁺	2.450	2.404	2.443	2.572	2.540	2.497	2.212	2.167	2.193	2.567	2.875	2.851	2.904	0.092	0.091
Mg	2.562	2.445	2.522	2.601	2.523	2.579	2.966	2.952	2.828	1.394	1.506	1.498	1.516	0.094	0.072
Mn	0.051	0.053	0.054	0.057	0.053	0.046	0.025	0.023	0.023	0.033	0.044	0.043	0.054	0.000	0.001
Ca	0.005	0.006	0.006	0.003	0.001	0.000	0.011	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
Na	0.027	0.024	0.024	0.021	0.026	0.030	0.052	0.058	0.066	0.073	0.098	0.091	0.102	0.301	0.308
K	2.072	1.979	1.934	2.007	2.060	2.055	1.939	1.924	1.934	1.706	1.826	1.830	1.814	1.722	1.804
Cr	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.004	0.002	0.000	0.009	0.001	0.000	0.006	0.002
Fe/(Fe + Mg)	0.489	0.496	0.492	0.497	0.502	0.492	0.427	0.423	0.437	0.648	0.656	0.656	0.657		

*Total Fe as FeO

Table 4. Representative analyses of pyroxene.

Rock type	Volcanics															Granitoids					
	5-1					114-1					105-1					96-1					
	Sp. no.	6	8	13	73	98	92	94	261	273	258	272	303	312	298	302	372	391	395		
Analysis no.	O*	C	C	O	O	C	C	O	O	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C		
SiO ₂	52.96	53.68	50.80	53.69	53.00	49.84	50.54	53.42	57.14	51.27	50.21	52.49	53.38	50.43	55.13	53.31	52.17	50.70			
TiO ₂	0.19	0.38	0.44	0.15	0.28	0.55	0.60	0.15	0.35	0.32	0.62	0.21	0.19	0.72	0.44	0.11	0.16	0.37			
Al ₂ O ₃	1.00	3.53	1.49	1.34	2.18	3.35	3.28	0.79	3.11	1.44	3.41	0.91	0.77	3.65	4.60	1.25	2.21	4.05			
FeO**	17.61	6.91	9.74	15.89	15.92	8.65	8.44	19.40	17.28	8.51	8.53	21.78	18.81	8.00	9.20	3.98	4.20	3.21			
MgO	25.74	13.98	14.65	26.96	26.37	14.91	15.55	24.37	16.37	14.96	16.14	22.24	24.86	14.91	11.38	16.55	15.70	16.34			
MnO	0.88	0.41	0.53	0.44	0.54	0.29	0.29	0.91	0.66	0.52	0.28	0.74	0.69	0.27	0.46	0.17	0.15	0.21			
CaO	1.47	20.17	20.97	1.50	1.42	21.10	20.27	1.03	2.99	21.99	20.25	1.83	1.56	21.38	15.76	24.69	24.43	22.89			
Na ₂ O	0.03	0.73	0.37	0.01	0.04	0.31	0.31	0.04	0.91	0.35	0.27	0.04	0.03	0.24	1.28	0.15	0.14	0.38			
K ₂ O	0.01	0.53	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	1.56	0.02	0.00	0.03			
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.06	0.96			
Total	99.89	100.33	99.05	100.00	99.76	99.01	99.28	100.11	99.49	99.37	99.74	100.28	100.29	99.64	99.80	100.26	99.22	99.13			
	cations per 6 oxygens																				
Si	1.945	1.966	1.927	1.947	1.928	1.880	1.892	1.968	2.088	1.931	1.874	1.957	1.959	1.883	2.027	1.953	1.933	1.873			
Ti	0.005	0.011	0.013	0.004	0.008	0.016	0.017	0.004	0.010	0.009	0.017	0.006	0.005	0.020	0.012	0.003	0.005	0.010			
Al	0.043	0.152	0.067	0.058	0.094	0.149	0.145	0.034	0.134	0.064	0.150	0.040	0.034	0.161	0.200	0.054	0.096	0.177			
Fe ²⁺	0.541	0.212	0.309	0.482	0.484	0.273	0.264	0.598	0.528	0.268	0.266	0.679	0.577	0.250	0.283	0.122	0.130	0.099			
Mg	1.408	0.763	0.828	1.457	1.430	0.838	0.868	1.337	0.891	0.840	0.898	1.236	1.360	0.830	0.624	0.904	0.867	0.900			
Mn	0.027	0.013	0.017	0.013	0.017	0.009	0.009	0.028	0.020	0.017	0.009	0.023	0.021	0.009	0.014	0.005	0.005	0.007			
Ca	0.058	0.791	0.852	0.058	0.055	0.853	0.813	0.040	1.117	0.887	0.810	0.073	0.061	0.855	0.621	0.969	0.970	0.906			
Na	0.002	0.052	0.027	0.001	0.003	0.023	0.023	0.002	0.064	0.026	0.020	0.003	0.002	0.017	0.091	0.011	0.010	0.027			
K	0.000	0.025	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.073	0.001	0.000	0.001			
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002			
En***	0.702	0.432	0.416	0.729	0.726	0.427	0.446	0.677	0.580	0.421	0.455	0.622	0.680	0.429	0.408	0.453	0.441	0.472			
Fs	0.269	0.120	0.155	0.241	0.246	0.139	0.136	0.303	0.344	0.134	0.135	0.342	0.289	0.129	0.185	0.061	0.066	0.052			
Wo	0.029	0.448	0.428	0.029	0.028	0.434	0.418	0.020	0.076	0.445	0.410	0.037	0.031	0.442	0.406	0.486	0.493	0.476			
Fe/(Fe+Mg)	0.277	0.217	0.272	0.249	0.253	0.246	0.233	0.309	0.372	0.242	0.229	0.355	0.298	0.231	0.312	0.119	0.130	0.099			

*O and C represent orthopyroxene and clinopyroxene, respectively.

**Total Fe as FeO

***En = Mg/M, Fs = Fe/M, Wo = Ca/M, where M = Mg + Fe + Ca

중립 내지 거정의 반정광물도 흔하게 산출한다. 사장석의 성분은 암종에 따라 뚜렷한 차이를 보인다 (Table 1, Fig. 1). 편암 내에 산출하는 사장석의 경우 An₁₇₋₂₁에 해당하는 Na-사장석이다. 화강암질암 내에 산출하는 사장석의 경우 An₂₇₋₇₂에 해당하는 넓은 성분 변화를 보인다. 화산암의 경우 현무암질 암석에서 산출하는 사장석(An₈₀₋₈₈)이 조면암질 암석에서 산출하는 사장석(An₄₆₋₆₃)에 비해서 상대적으로 Ca의 양이 많은 것을 알 수 있다. 또한 동일 암석 내에서도 사장석 반정의 An 함량이 기질의 사장석 보다 높게 나타난다.

3.1.2. 각섬석

각섬석은 각섬암 및 화강암질암을 구성하는 주요한 구성광물이며, 대부분이 Ca-각섬석에 해당한다(Table 2, Fig. 2). Ca-각섬석의 분류를 Ca, Na 및 K를 제외한 나머지 양이온들의 수를 13으로 보정하여 계산하였다 (Robinson *et al.*, 1982). 이러한 보정법은 경험적으로 Ca-각섬석 내에 존재하는 Fe³⁺의 양을 가장 잘 나타내는 방법으로 알려져 있다. Leake (1978)의 각섬석 분류 표에 의하면, 각섬암 내에 산출하는 각섬석의 경우 대부분이 magnesio- 내지 ferro-hornblende에 해당한다. 화강암질암 내에 산출하는 각섬석의 경우 시료들간 뿐만 아니라 동일 시료 내에서도 다양한 성분변화를 보인다(Fig. 2). 그러나, 대부분이 edenitic- 내지 pargasitic-hornblende 및 tschermakitic-hornblende 영역에 도시된다. 일부 각섬석의 경우 magnesio-hornblende에서 tremolite에 해당하는 영역에 산점적으로 도시되는데 이는 화강암질암의 관입 이후에 일어난 녹색편암상 (greenschist facies)에 해당하는 저변성작용을 받았음을 알 수 있다.

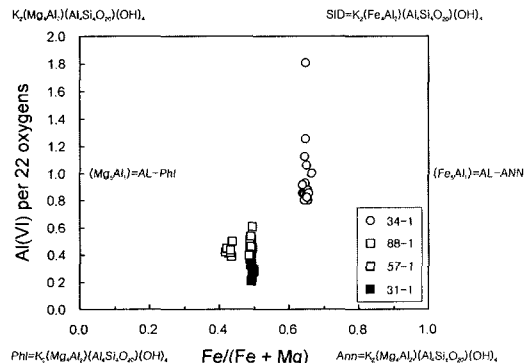


Fig. 3. Compositions of biotite from schist and granitoids (Phl: phlogopite, Ann: annite, Sid: siderite).

3.1.3. 운모류

운모편암 내에 산출하는 흑운모의 경우 백운모와 함께 엽리를 형성하는 주요한 광물이다. 화강암질암 내에 산출하는 흑운모의 경우 화학성분상 화강암 내지 화강섬록암에 해당하는 암석의 경우 주요한 부구성광물이나, 토날라이트의 경우 각섬석에 비해 상대적으로 적은 양으로 산출한다. 운모편암과 화강암질암 내에 산출하는 흑운모의 경우 각각 특징적인 성분 분포를 보인다. 운모편암 내 흑운모의 경우 상대적으로 Tschermak 치환((Fe²⁺, Mg)+Si^{IV}=Al^{IV}+Al^{VI})이 많이 일어난 성분변화를 보이며 또한 Fe/(Fe+Mg) 비는 약 0.6으로 화강암질암 내의 흑운모들 보다 약 0.2 정도 높게 나타남을 알 수 있다(Table 3, Fig. 3). 운모편암내 흑운모들의 Ti 함량은 0.26-0.36(per 22 oxygens)이며, 이들의 Fe/(Fe+Mg) 비와 함께 고려하여 볼 때 정성적으로 sillimanite-muscovite zone 혹은 sillimanite-

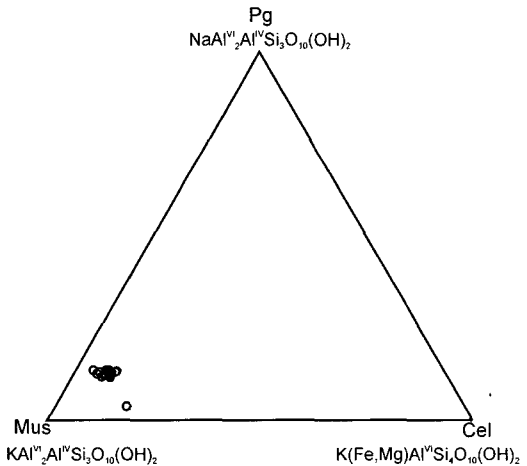


Fig. 4. Compositions of muscovite from schist (Mus: muscovite, Cel: celadonite, Pg: paragonite).

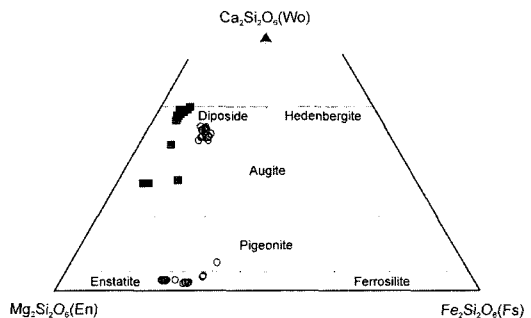


Fig. 5. Compositions of pyroxene from granitoids and volcanics (Wo: wollastonite, En: enstatite, Fs: ferrosilite).

muscovite-K-feldspar zone(약 600-650°C)에 해당하는 변성작용을 받았음을 알 수 있으며 (Guitotti *et al.*, 1977), 이는 운모류들을 부분적으로 치환하는 규석의 산출과 잘 일치한다. 운모편암 내에 산출하는 백운모는 paragonite 함량이 약 0.15 정도되며, celadonite 함량은 약 0.1 정도이다(Fig. 4).

3.1.4. 휘석

휘석은 대부분이 현무암질 화산암 내에 자형 내지 반자형의 반정광물로 산출하나, 일부 섬록암질 화강암질암 내에서 각섬석에 의해 치환된 잔류물로 산출하기도 한다. 현무암질 화산암 내에 산출하는 휘석의 경우 대부분이 diopside에 가까운 augite 내지 enstatite이나 부분적으로 pigeonite가 나타나기도 한다(Fig. 5). 일반적으로 Ca-휘석의 Fe/(Fe+Mg) 비가(Fe, Mg)-휘석 보다 약 0.05 정도 낮게 나타난다(Table 4). 화강암질암

내에 산출하는 휘석의 경우 전부 Ca-휘석이며 대부분이 diopside에 해당하는 성분을 보인다. 그러나, 일부 휘석은 augite 영역에 도시되기도 한다. 화강암질암 내의 휘석은 화산암 내의 휘석에 비해 낮은 Fe/(Fe+Mg) 비를 보인다(Table 4). 현무암질 화산암 내에서 상호 공존하며 산출하는 Ca- 및(Fe, Mg)-휘석의 반정 광물 조합은 thoeiites 계열에 해당하는 전암화학 조성과 잘 일치한다.

3.1.5. 녹염석

녹염석은 대부분의 화강암질암 내에 반자형 내지 타형의 1차 혹은 2차 광물로 산출한다. 기질내에 독립적인 결정 혹은 집합체로 산출하는 경우 대부분이 1차 광물로 생각되며, 사장석을 치환하며 나타나는 경우 2차 광물로 생각된다. 그러나, 대부분은 조직적으로 상호관계가 불명확한 경우가 많다. 화강암질암 내에 산출

Table 5. Representative analyses of epidote and chlorite.

Rock type	Granitoid									
	Mineral	Epidote				Chlorite				
		Sample no.	57-1	31-1		57-1		111-1		
Analysis no.	58	60	160	163	35	36	316	320	321	
SiO ₂	37.56	37.50	37.33	37.61	26.58	28.21	31.57	29.11	32.82	
TiO ₂	0.03	0.13	0.00	0.11	5.09	11.69	0.93	0.18	2.04	
Al ₂ O ₃	21.10	21.94	23.52	25.04	17.88	13.94	16.06	17.09	15.82	
Fe ₂ O ₃ *	15.43	13.76	11.51	9.24						
FeO*					19.77	15.17	21.29	22.98	18.58	
MgO	0.04	0.02	0.02	0.02	14.93	9.91	16.65	18.28	14.61	
MnO	0.12	0.46	0.57	0.49	0.54	0.36	0.30	0.31	0.23	
CaO	23.77	23.69	23.47	24.11	1.52	10.40	0.16	0.11	0.09	
Na ₂ O	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.09	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.06	2.51	0.15	5.21	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	
Total	98.09	97.49	96.43	96.66	86.35	89.75	89.50	88.21	89.49	
Oxygens	12.5	12.5	12.5	12.5	14	14	14	14	14	
Si	3.018	3.017	3.012	3.005	2.790	2.869	3.211	3.004	3.337	
Ti	0.002	0.008	0.000	0.006	0.402	0.894	0.071	0.014	0.156	
Al	2.000	2.083	2.239	2.360	2.215	1.673	1.928	2.081	1.898	
Fe ³⁺	0.933	0.833	0.699	0.556						
Fe ²⁺					1.735	1.291	1.811	1.983	1.579	
Mg	0.005	0.002	0.003	0.003	2.335	1.502	2.524	2.811	2.213	
Mn	0.008	0.031	0.039	0.033	0.048	0.031	0.025	0.027	0.020	
Ca	2.046	2.043	2.029	2.064	0.171	1.134	0.017	0.012	0.010	
Na	0.004	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.005	0.002	0.018	
K	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.008	0.326	0.020	0.675	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	
Fe.(Fe+Mg)					0.426	0.462	0.418	0.414	0.416	

*Total Fe as Fe₂O₃ and FeO, respectively, for epidote and chlorite.

하는 대부분의 녹염석은 조직적인 특성과 상관 없이 유사한 성분을 보이며, pistacite 성분이 약 0.3-1.0에 해당한다. 일부 녹염석의 경우 적철석과 밀접한 관련을 가지며 산출하며, 이들의 높은 Fe^{3+} 함량을 함께 고려할 때 상대적으로 fo_2 활성도가 높은 환경에서 생성되었음을 지시한다. 일부 녹염석의 경우 M2 octahedra site에 상당한 양의 Fe^{3+} 가 치환하는 piemontite의 형태로 산출하기도 한다(Table 5).

3.1.6. 녹니석

녹니석은 대부분의 화강암질암 내에 흑운모 혹은 각섬석을 치환하는 2차 광물로 산출하며, 상대적으로 흑운모가 우세하게 치환받고 있다. 녹니석 내의 Fe/(Fe+Mg) 비는 약 0.40-0.46이며, Si 함량은 약 2.8-3.4(per 14 oxygens)의 범위를 가진다(Table 5). 이러한 성분의 변화는 Hey(1954)의 Total Fe vs Si 도표

에 의한 분류를 따르면 대부분이 pycnochlorite 영역에 도시된다.

3.2. 화성암의 지구화학

3.2.1. 심성암류

전술한 바와 같이 조사지역의 백악기 세파옥심성암류는 광물학적 성분과 산상에서 중립질 화강암질암(Ksgr), 세립질 흑운모화강암(Ksgr) 및 섬록암과 각섬암(Ksdi)으로 세분된다. 중립질 화강암질암과 세립질 흑운모화강암의 SiO_2 함량은 약 58-66 wt.%와 69-71 wt.%의 범위로서 각각 중성 내지 산성암과 산성암의 성분 영역을 가지며, 섬록암과 각섬암은 48-53 wt.%의 중성암 내지 염기성암에 해당한다(Table 6). 연구지역의 심성암류는 Irvine and Baragar(1971)의 $Na_2O+K_2O : SiO_2$ 판별도에서 비알칼리 영역인 칼크-알칼린과 솔리아이트 계열에 포함되며(Fig. 6a),

Table 6. Major oxides (wt.%) and trace elements (ppm) compositions of igneous rocks from the study area.

	Ksgr					Ksgr		
	H21R	H-24	HTGR	B6R	K1R	H2R-3	J5R	K13
SiO ₂	66.07	61.77	57.61	57.54	57.62	71.03	70.09	68.91
TiO ₂	0.48	0.61	0.71	0.58	0.65	0.27	0.30	0.38
Al ₂ O ₃	16.84	17.06	18.10	16.49	16.85	15.67	16.57	16.66
Fe ₂ O ₃	4.66	6.51	7.93	8.07	8.30	2.28	2.48	3.21
MnO	0.12	0.19	0.18	0.16	0.20	0.07	0.08	0.12
MgO	1.96	2.63	3.54	4.15	3.45	0.76	0.80	0.99
CaO	4.55	5.89	5.46	7.77	6.43	2.26	2.78	3.70
Na ₂ O	3.27	2.68	2.63	2.14	2.44	3.05	3.58	3.34
K ₂ O	1.59	1.79	1.30	0.75	2.96	2.85	2.89	2.24
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.17	0.08	0.16	0.07	0.09	0.12
LOI*	0.35	0.69	2.29	0.87	0.74	0.69	0.35	0.40
Total	100.03	99.96	99.92	98.60	99.80	99.00	100.01	100.07
Cr	37	46	35	56	28	25	31	30
Co	10	15	16	22	15	5	5	7
Ni	15	17	14	22	9	9	10	10
Cu	15	38	30	79	31	88	23	30
Zn	72	66	87	80	63	89	54	77
Rb	58	96	49	28	89	151	143	92
Sr	658	230	477	338	425	523	511	669
Y	6	28	24	21	27	4	5	4
Zr	4	8	9	9	11	23	23	25
Cs	3	6	2	2	7	11	10	5
Ba	483	252	401	185	573	752	723	726
Hf	0	1	1	1	1	1	1	1
Pb	14	14	14	14	25	33	29	25
Th	5	2	8	3	7	7	5	6
U	1	8	3	1	2	2	4	1

*LOI : Loss on ignition

Table 6. Continued.

	Ksdi			Tsi				Tmv
	HTR	H22-2	J82	H14R	H37	H45R	H49R	H35
SiO ₂	52.91	47.61	50.12	51.84	54.11	57.95	54.61	64.24
TiO ₂	0.88	0.51	0.87	0.84	0.84	0.72	0.80	0.38
Al ₂ O ₃	18.50	10.74	15.90	19.68	17.93	18.02	19.53	15.83
Fe ₂ O ₃	9.76	8.85	13.46	9.58	9.07	7.62	7.70	4.65
MnO	0.26	0.19	0.19	0.20	0.23	0.23	0.19	0.13
MgO	5.05	17.13	6.27	9.15	8.51	3.49	5.42	4.21
CaO	8.44	11.8	10.81	4.38	4.92	2.34	3.02	1.57
Na ₂ O	1.75	0.8	1.29	0.72	1.12	1.53	2.35	2.23
K ₂ O	1.04	0.61	0.30	2.69	2.71	4.48	3.39	1.91
P ₂ O ₅	0.18	0.11	0.06	0.13	0.17	0.21	0.22	0.10
LOI*	1.20	1.58	1.17	0.76	0.37	3.36	2.77	4.73
Total	99.97	99.93	100.44	99.97	99.98	99.95	100.00	99.98
Cr	78	848	56	42	67	18	18	32
Co	24	49	45	24	22	14	11	7
Ni	27	22	15	13	22	9	7	14
Cu	53	49	73	5	69	12	43	28
Zn	96	63	77	93	82	96	85	75
Rb	45	22	13	21	34	37	44	76
Sr	267	161	266	342	369	404	359	641
Y	19	12	14	21	25	24	28	18
Zr	6	23	15	81	117	148	143	63
Cs	4	1	2	1	1	4	1	7
Ba	230	111	88	252	164	469	507	814
Hf	1	1	1	3	4	5	4	2
Pb	23	12	6	12	7	10	8	16
Th	2	2	1	3	5	4	4	5
U	1	1	0	1	1	1	1	1

*LOI: Loss on ignition

Miyashiro(1974)의 SiO₂:FeO/(FeO+MgO) 판별도에서 칼크-알칼린 계열에 속한다(Fig. 6b). 심성암류의 알칼리지수[alkaline index: mol(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃]는 모두 1 이하로서 비알칼리 계열로 분류되며, 섬록암과 각섬암(0.15-0.22), 중립질 화강암질암(0.26-0.43), 세립질 흑운모화강암(0.48-0.54) 순으로 커진다. 알루미늄포화지수(aluminum saturation index: mol Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)) 역시 같은 순서로 커지는데, 섬록암과 각섬암이 0.75-1.00, 중립질 화강암질암이 0.90-1.19, 세립질 흑운모화강암이 1.16-1.31의 범위를 각각 보인다(Fig. 6c). 즉 심성암에서 일반적으로 나타나는 분화작용에 따른 알칼리지수와 알루미늄포화지수의 증가를 잘 반영한다. 이러한 SiO₂ 증가에 따른 알루미늄지수의 영향을 배제하기 위해 섬록암과 각섬암을 제외하면 중립질 화강암질암은 저알루미늄질(metaluminous)과 고알루미늄질(peraluminous)에 걸쳐있고, 세립질 흑운모화

강암은 모두 고알루미늄질이며 값이 1.1 이상인 S-type 화강암 영역(Chappell and White, 1974)에 속한다(Fig. 6d). SiO₂ 증가에 따른 원소의 거동을 살펴보기 위해 하커 다이어그램을 작성하였다(Fig. 7). 심성암의 일반적인 경우와 같이 주성분 원소의 거동에서 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO는 SiO₂ 함량이 많아짐에 따라 이들의 함량이 적어지는 경향을 나타내며, 섬록암과 각섬암의 일부는 변화 경향에서 벗어나 다소 불규칙적인 양상을 보인다. Na₂O는 SiO₂와 양호한 정의 상관관계를 보이나, K₂O는 다소 불규칙적으로 증가한다. P₂O₅ 함량 변화는 SiO₂와 어떠한 상관관계도 발견하기 어렵다. 미량원소의 경우 전이족금속원소인 Cr, Co, Ni은 SiO₂ 값이 증가함에 따라 함량이 적어지는 경향을 나타낸다. 반면 Rb, Sr, Cs, Ba, Pb, U의 함량은 대체로 SiO₂ 값과 정의 상관관계이다. Cu, Zn, Y, Zr, Hf, Th의 함량은 SiO₂ 값의 변화와 무관하거나 암

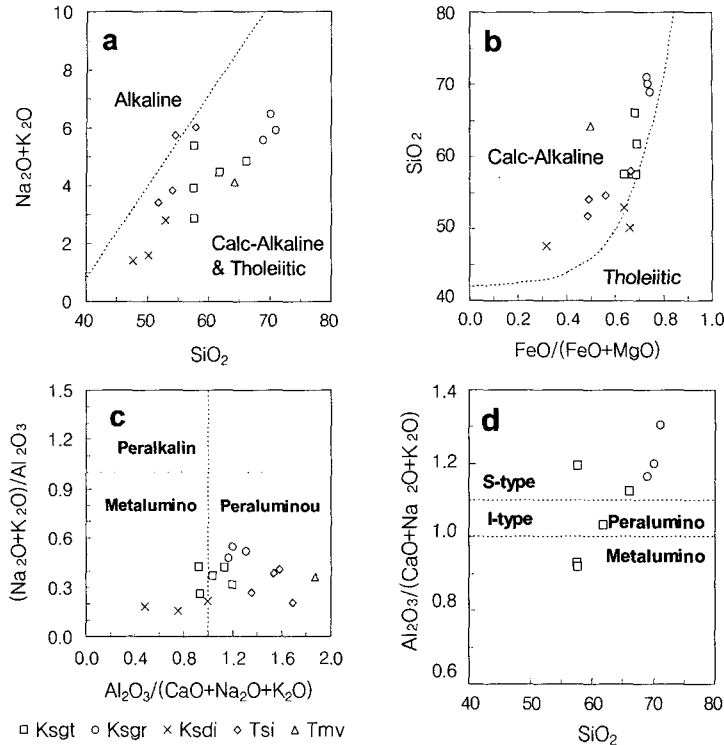


Fig. 6. (a) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 (after Irvine and Baragar, 1971), (b) SiO_2 vs. $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (after Miyashiro, 1974), (c) alkaline index [mol $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$] vs. aluminum saturation index [mol $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$], and (d) aluminum saturation index vs. SiO_2 plots for the igneous rocks from the project area. Division of the I-type and S-type granite is after Chappell and White (1974).

석군 별에 따른 함량의 차이를 보인다. 심성암체에서 분석된 희토류원소의 전체적인 함량은 중립질 화강암 질암이 68-119 ppm, 세립질 흑운모화강암이 91-136 ppm으로 서로 중첩되며, 섬록암과 각섬암은 36-96 ppm으로서 낮은 값을 보인다(Table 7). $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{CN}}$ 값은 중립질 화강암질암이 1.6-4.3의 범위이나 이상적으로 높은 H21R 시료를 제외하면 1.6-4.2의 범위이고, 세립질 흑운모화강암은 32.6-61.9, 섬록암과 각섬암은 3.1-5.5 사이이다(Table 7). 따라서 세립질 흑운모화강암이 상대적으로 가장 분별결정화작용의 영향이 강했음을 지시한다. 콘드라이트 값으로 보정한 희토류원소의 변화 패턴을 살펴보면 전반적으로 LREE이 부화되고 HREE이 결핍된 일반적인 화성암과 같은 유형이다. 상당 부분 중첩되는 경우도 있지만 전반적으로 세립질 흑운모화강암, 중립질 화강암질암, 섬록암과 각섬암의 순으로 LREE가 부화되어 있으며, HREE의 경우는 중립질 화강암질암, 섬록암과 각섬암, 세립질 흑운모화강암의 순서로 부화되는 양상을 보인다(Fig. 8a). Eu의 부 이상(Eu/Eu^*)은 중립질 화강암질암이 0.58-0.80, 세

립질 흑운모화강암이 0.59-0.75이 서로 중첩되는 범위를 갖고, 섬록암과 각섬암은 이들에 비해 높은 0.71-0.75의 범위를 보여(Table 7) 사장석의 분별결정화작용에 의한 영향이 가장 강했음을 나타낸다.

3.2.2. 관입암류와 화산암류

조사지역의 제3기 관입암류(Tsi) 시료와 화산암류(응회암, Tmv) 시료에 대한 주성분, 미량성분 및 희토류원소 분석치는 Table 6 및 7과 같다. 관입암류는 SiO_2 함량이 약 52-58 wt.%인 염기성암 내지 중성암이고, 화산암은 64 wt.%의 산성암에 해당한다(Table 6). Le Maitre *et al.* (1989)의 $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 화산암 명명도에서 관입암류는 현무암, 현무암질안산암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 영역에 걸쳐있으며, 화산암은 테사이트에 해당한다(Fig. 9). Irvine and Baragar (1971)의 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ 판별도에서 관입암류와 화산암 대부분은 비알칼리 영역인 쏘리아이트 계열에 포함된다(Fig. 6a). SiO_2 증가에 따른 원소의 거동은 분석된 시료의 수가 충분하지 않아 논의하기 어렵지만(Fig.

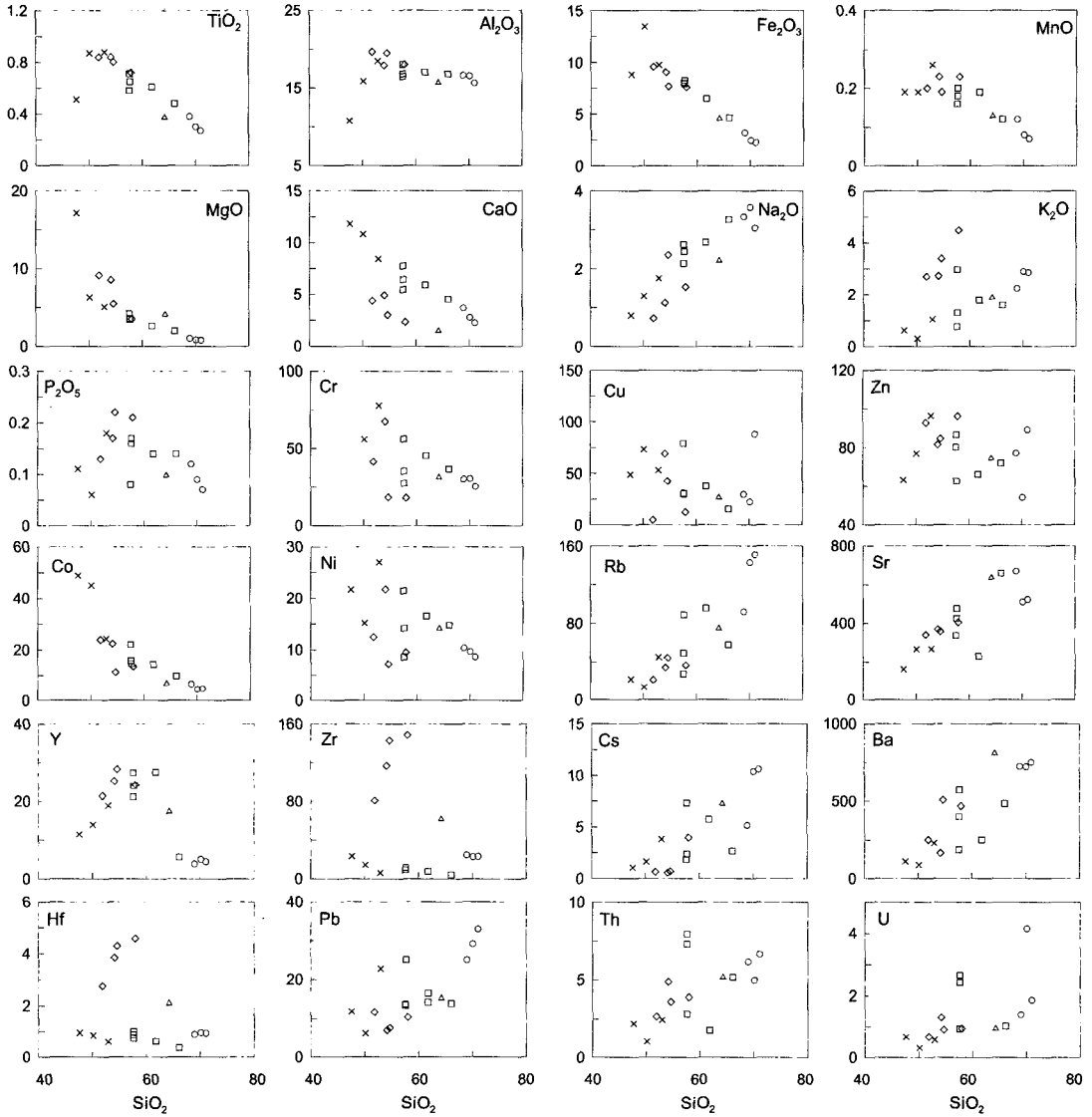


Fig. 7. Harker diagrams of major oxides (wt.%) and trace elements (ppm) for the igneous rocks from the project area. Symbols are the same as those in Fig. 6.

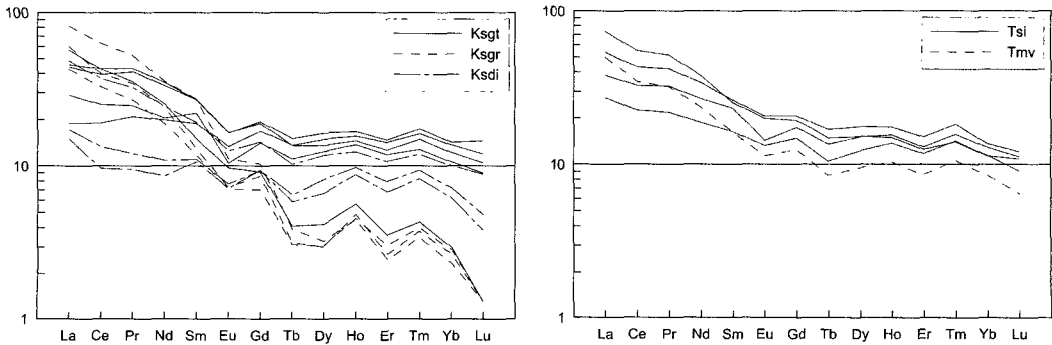


Fig. 8. Chondrite normalized rare earth elements patterns for (a) the plutonic rocks and (b) the intrusives and volcanic rock from the project area.

7), 주원소의 경우 TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO 는 SiO_2 함량이 커짐에 따라 이들의 함량이 작아지는 경향을 보인다. 반면 MnO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 의 함량은 SiO_2 의 변화에 대해 불규칙적이다. 미량원소는 Co와 Zn의 경우 SiO_2 값이 증가함에 따라 이들 함량이 적어지는 경향을 나타내고, Rb, Sr, Ba, Th의 함량은 대체로 SiO_2 값과 정의 상관관계이다. 나머지 미량원소의 함량은 SiO_2 값의 변화와 무관하다. 분석된 희토류원소의 전체적인 함량은 관입암류가 70-122 ppm의 범위에

며, 화산암류는 91 ppm이다(Table 7). $(La/Lu)_{CN}$ 값은 관입암류가 3.0-6.8의 범위이고, 화산암류는 상대적으로 큰 7.8로서 분별결정화작용의 영향이 강했음을 나타낸다. 콘드라이트 값으로 보정한 희토류원소의 변화 패턴은 전반적으로 LREE이 부화되고 HREE이 결핍된 일반적인 화성암과 같은 양상이다 (Fig. 8b). Eu의 부 이상 (Eu/Eu^*)은 관입암류가 0.70-0.89이고 화산암은 0.79로서 (Table 7) 사장석의 분별결정화작용에 의한 영향이 서로 다르지 않음을 나타낸다.

Table 7. Rare earth elements (ppm) compositions of the igneous rocks from the study area.

	Ksgt					Ksgr		
	H21R	H-24	HTGR	B6R	K1R	H2R-3	J5R	K13
La	20.9	6.9	16.3	10.6	16.8	22.0	15.7	29.8
Ce	41.0	18.2	37.6	24.0	41.2	38.1	31.3	60.2
Pr	4.9	2.9	5.6	3.4	5.9	4.7	3.7	7.2
Nd	18.0	14.2	23.7	14.6	24.8	17.1	13.4	25.3
Sm	3.5	4.4	6.3	5.1	6.2	3.0	2.7	6.3
Eu	0.8	1.2	1.4	0.9	1.4	0.6	0.6	1.0
Gd	2.8	5.2	5.8	4.3	5.9	2.6	2.1	3.2
Tb	0.2	0.8	0.8	0.6	0.9	0.2	0.2	0.2
Dy	1.4	5.1	4.7	4.3	5.6	1.0	1.0	1.1
Ho	0.5	1.3	1.2	1.2	1.4	0.4	0.4	0.4
Er	0.9	3.5	3.2	2.9	3.7	0.7	0.8	0.6
Tm	0.2	0.6	0.5	0.5	0.6	0.1	0.1	0.1
Yb	0.7	3.4	3.0	2.6	3.5	0.7	0.7	0.6
Lu	0.1	0.5	0.4	0.3	0.6	0.1	0.1	0.1
Total REE	95.8	68.1	110.5	75.4	118.7	91.3	72.8	136.0
$(La/Lu)_{CN}$	43.4	1.6	4.2	3.2	3.1	45.6	32.6	61.9
Eu/Eu^*	0.80	0.75	0.72	0.58	0.71	0.67	0.75	0.59
	Ksdi			Tsi				Tmv
	HTR	H22-2	J82	H14R	H37	H45R	H49R	H35
La	17.8	6.3	5.5	10.0	14.0	26.9	19.8	18.4
Ce	35.5	12.7	9.2	21.6	31.3	52.8	41.2	33.1
Pr	4.4	1.7	1.3	3.0	4.4	7.1	5.7	4.4
Nd	17.3	7.8	6.1	13.3	19.0	26.9	24.2	16.8
Sm	4.4	2.6	2.5	3.8	5.4	5.8	6.1	3.7
Eu	1.1	0.7	0.6	1.2	1.2	1.7	1.8	1.0
Gd	4.4	2.9	2.9	4.5	5.3	5.9	6.4	3.8
Tb	0.6	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	0.5
Dy	4.0	2.3	2.8	4.2	5.2	5.2	6.0	3.2
Ho	1.1	0.7	0.8	1.2	1.3	1.3	1.5	0.9
Er	2.7	1.7	2.0	2.9	3.2	3.1	3.8	2.1
Tm	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4
Yb	2.5	1.5	1.8	2.8	3.2	2.8	3.4	2.1
Lu	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2
Total REE	96.5	41.6	36.3	69.9	95.4	141.5	121.9	90.7
$(La/Lu)_{CN}$	5.5	4.5	3.1	3.0	3.4	6.8	4.5	7.8
Eu/Eu^*	0.75	0.75	0.71	0.85	0.70	0.89	0.88	0.79

Table 8. Representative K/Ar ages of the igneous rocks from the study area.

Sample	Type	K (wt.%)	³⁶ Ar (10 ⁻¹⁰ ccSTP/g)	⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Age (Ma)	Air (%)
K1R	Ksqt	2.479	78.346	1016.082±0.181	102.6±3.0	18.56
K24	Ksqt	1.506	48.209	581.013±0.112	96.7±2.8	19.69
165-1	Ksqt	0.163	15.835	59.658±0.076	91.9±2.7	43.96
HTR	Ksdi	0.889	64.867	315.046±0.146	89.1±2.6	37.83
K13	Ksgr	1.935	32.276	776.213±0.095	100.5±2.9	10.94
J5R	Ksgr	2.470	36.171	1029.568±0.138	104.3±3.0	9.41
H2R-3	Ksgr	2.579	39.076	1098.387±0.136	106.5±3.1	9.51
TRD2-37	Tmv	2.844	22.173	410.003±0.064	36.8±1.1	13.78
TRD3-27	Tmv	1.180	44.991	145.602±0.094	31.5±0.9	47.73
TRD1-33	Tmv	2.143	33.999	263.969±0.103	31.5±0.9	27.57
H45R	Tsi	1.297	44.352	124.908±0.121	24.6±0.7	51.20
H49R	Tsi	1.989	30.604	227.653±0.096	29.2±0.9	28.43
H14R	Tsi	0.614	28.015	82.033±0.109	34.1±1.0	50.23
H37	Tsi	0.946	25.229	128.054±0.094	34.5±1.0	36.80
165	Tsi	1.285	15.531	146.011±0.065	29.0±0.9	23.92
166	Tsi	1.010	20.711	120.878±0.057	30.6±0.9	33.61
Standard sample analysis						
Bern4M-2	Mus	9.68	137.567	625.457±0.337	18.468±0.368	39.39
GA1550-2	Bt	7.626	73.206	3057.170±0.252	100.425±0.205	6.61

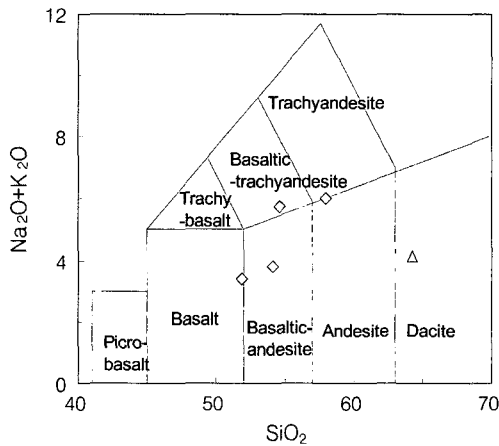


Fig. 9. Na₂O+K₂O vs. SiO₂ plot for chemical classification and nomenclature of the intrusives and volcanic rock from the project area (after Le Maitre, 1989). Symbols are the same as those in Fig. 6.

3.3. 연대측정

K-Ar 연대측정 결과는 Table 8과 같다. 조사지역에 대하여는 지금까지 연대측정에 대한 자료가 없으며, 따라서 최초로 이 지역에 대한 정확한 암석연대가 규명되었다는 것에 그 의미가 매우 크다고 할 수 있다. 세콰리아암류는 야외산상과 암석 및 광물의 지구화학적

조성에 의해 중립질 화강암질암(Ksqt), 세립질 흑운모 화강암(Ksgr) 및 섬록암과 각섬암(Ksdi)으로 세분된다. 이들 암석군에 대한 전암의 K-Ar 연대측정 결과는 중립질 화강암질암이 91.9-102.6 Ma, 세립질 흑운모화강암이 100.5-106.5 Ma, 섬록암이 89.1 Ma의 연령을 보인다. 세립질 흑운모화강암의 K-Ar 연대가 가장 고기로 측정되었지만 야외산상에서는 세립질 흑운모화강암이 중립질 화강암질암을 관입하는 암맥의 형태로 산출하고 있어 서로 상반된다. 이는 K-Ar 계의 폐쇄온도가 서로 다른 장석, 흑운모, 백운모, 각섬석의 조성비가 다른 것에 기인한 것일 수 있다. 또 다른 가능성은 두 암군의 냉각속도의 차이에 기인한 것으로서, 세립질 흑운모화강암이 소규모 암맥으로 관입하여 급냉한 반면 중립질 화강암질암은 보다 심부에 정지하여 천천히 식어 K-Ar 연령이 짧을 것이다. 말라산화산암류와 신탕관입암류의 K-Ar 연대측정 결과는 각각 31.5-36.8 Ma 및 24.6-34.5 Ma를 나타내어 모두 제삼기에 해당한다. 그 동안 신탕관입암류의 지질시대는 마이오세 초로만 알려져 왔으나(Suetrisno *et al.*, 1994; Supiatna *et al.*, 1995; Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996), 이 연구의 K-Ar 연대측정 결과를 고려한다면 이들의 관입은 기준에 알려진 시기보다 약간 더 고기에 시작되었다.

4. 토의 및 결론

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 변성암류, 화강암질암 및 화산암류 중 대표적인 시료에 대해서 광물화학 분석을 실시하였고, 백악기 심성암류 및 제3기 화성암류에 대하여 지구화학적 연구를 수행하였다. 말라산화산암류는 칼크-알칼리 계열의 중성 화산쇄설암류 및 용암류로 구성되며, 쇄설성 퇴적암을 일부 협재한다. 신탕관입암류는 상기 지층들을 관입한 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열의 현무암, 현무암질 안산암, 현무암질 조면안산암, 안산암 등의 플러그 또는 암맥상으로 산출된다. 광물화학분석은 조사지역에 분포하는 대표적인 암석들에 포함된 사장석, 각섬석, 운모, 휘석, 녹염석, 녹니석을 대상으로 실시하였다. 사장석의 경우 편암에서는 An_{17-21} , 화강암질암에서는 An_{27-72} , 현무암질암에서는 An_{80-88} , 그리고 조면암질암에서는 An_{46-63} 의 성분을 보인다. 각섬석은 각섬암에서는 대부분 magnesio- 내지 ferro-hornblende에 해당하며, 화강암질암에서는 edenitic- 내지 pargasitic-hornblende 및 tschermakitic-hornblende에 속한다. 운모편암 내 혹은 운모의 경우 $Fe/(Fe+Mg)$ 비는 약 0.6으로 화강암질암 내의 혹은 운모들 보다 약 0.2 정도 높게 나타나며, Ti 함량은 0.26-0.36(per 22 oxygens) 정도이다. 운모편암 내에 산출하는 백운모는 paragonite 함량이 약 0.15 정도되며, celadonite 함량은 약 0.1 정도이다. 휘석의 경우 현무암질 화산암의 것은 대부분이 diopside에 가까운 augite 내지 enstatite이나 부분적으로 pigeonite가 나타난다. 화강암질암 내의 휘석은 Ca-휘석으로서 대부분이 diopside에 해당하는 성분을 보이며, 일부는 augite 영역에 도시된다. 화강암질암 내의 녹염석은 조직적인 특성과 상관없이 유사한 성분을 보이며, pistacite 성분이 약 0.3-1.0에 해당한다. 녹니석은 대부분의 화강암질암 내에 혹은 운모 혹은 각섬석을 치환하는 2차 광물로 산출하며, $Fe/(Fe+Mg)$ 비는 약 0.40-0.46이며, Si 함량은 약 2.8-3.4 (per 14 oxygens)의 범위를 가진다.

세파옥심성암류에서 중립질 화강암질암과 세립질 혹은 운모화강암은 각각 중성-산성암과 산성암의 성분이며, 섬록암과 각섬암은 중성암-염기성암에 해당한다. 이들은 칼크-알칼리 계열에 속하고, 중립질 화강암질암은 저알루미늄질-고알루미늄질, 세립질 혹은 운모화강암은 모두 고알루미늄질이면서 값이 1.1 이상인 S-type 화강암 영역에 속한다. 희토류원소의 $(La/Lu)_{CN}$ 값은 세립질 혹은 운모화강암이 상대적으로 가장 분별결정화작용의 영향

이 강했음을 지시한다. 희토류원소의 변화 패턴은 전반적으로 세립질 혹은 운모화강암, 중립질 화강암질암, 섬록암과 각섬암의 순으로 LREE가 부화되고, HREE의 경우는 중립질 화강암질암, 섬록암과 각섬암, 세립질 혹은 운모화강암의 순서로 부화된다. Eu의 부 이상(Eu/Eu^*)은 섬록암과 각섬암이 사장석의 분별결정화작용에 의한 영향이 가장 강했음을 나타낸다. 한편 신탕관입암류는 염기성암-중성암이고, 현무암-현무암질안산암-현무암질조면안산암-조면안산암 영역이며, 말라산화산암류는 중성 내지 산성암이면서 안산암과 석영안산암에 속한다. 이들 대부분은 비알칼리 영역인 쏘리아이트 계열에 포함된다. $(La/Lu)_{CN}$ 값은 화산암류가 상대적으로 분별결정화작용의 영향이 강했음을 나타낸다. 희토류원소의 변화 패턴은 LREE이 부화되고 HREE이 결핍된 심성암류의 경우와 같다. Eu의 부 이상(Eu/Eu^*)은 관입암류와 화산암이 사장석의 분별결정화작용에 의한 영향이 서로 다르지 않음을 나타낸다.

전암의 K-Ar 연대측정 결과는 중립질 화강암질암이 91.9-102.6 Ma, 세립질 혹은 운모화강암이 100.5-106.5 Ma, 섬록암이 89.1 Ma의 연령을 보인다. 세립질 혹은 운모화강암의 K-Ar 연대가 가장 고기로 측정되었지만 야외 산상에서는 세립질 혹은 운모화강암이 중립질 화강암질암을 관입하는 암맥의 형태로 산출하고 있어 서로 상반된다. 이는 K-Ar 계의 폐쇄온도가 서로 다른 장석, 혹은 운모, 백운모, 각섬석의 조성비가 다른 것에 기인한 것일 수 있다. 또 다른 가능성은 두 암군의 냉각속도의 차이에 기인한 것으로서, 세립질 혹은 운모화강암이 소규모 암맥으로 관입하여 급냉한 반면 중립질 화강암질암은 보다 심부에 정착하여 천천히 식어 K-Ar 연령이 젊을 것이다. 말라산화산암류와 신탕관입암류의 K-Ar 연대측정 결과는 각각 31.5-36.8 Ma 및 24.6-34.5 Ma를 나타내어 모두 제삼기에 해당한다. 그 동안 신탕관입암류의 지질시대는 마이오세 초로만 알려져 왔으나 (Suetrisno *et al.*, 1994; Supiatna *et al.*, 1995; Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996), 이 연구의 K-Ar 연대측정 결과를 고려한다면 이들의 관입은 기존에 알려진 시기보다 약간 더 고기에 시작되었다.

사 사

이번 연구는 당 연구원이 인도네시아 중부 칼리만탄 지역에 대하여 1998년부터 2000년까지 한국국제협력단 개발조사사업 연구과제인 “인도네시아 중부 칼리만

탄 지질도작성" 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김인준, 기원서, 송교영, 김복철, 이사로, 이규호 (2004) 인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 지질: I. 층서 및 구조. 자원환경지질, 37권, 437-457.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R. (1974) Two contrasting granite type. *Pacific Geol.*, 8, 173-174.
- Cox, A. and Dalrymple, G. B. (1967) Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of Potassium-Argon dating. *J. Geophys. Res.*, v. 72, 2603-2614.
- Guidotti, C. V., Cheney, J. T. and Guggenheim, S. (1977) Distribution of titanium between coexisting muscovite and biotite in pelitic schists from northwestern Maine. *American Mineralogists*, v. 62, 438-448.
- Hey, M. H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, v. 30, 277-292.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. B. (1971) A guide to chemical classification of the common igneous rocks. *Can. J. Earth. Sci.*, 8, 523-548.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Serensen, H., Streckeisen, A., Woolley A. R. and Zanettin B., (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.
- Leake, B. E. (1978) Nomenclature of amphiboles. *Mineralogical Magazine*, v. 42, 533-563.
- Margono, U., Sujitno, T. and Santosa, T. (1995) Geological map of the Tumbanghram Quadrangle, Kalimantan (1:250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).
- Miyashiro, A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274, 321-355.
- Nagao, K., Ogata, A., Miura, Y.N., and Yamaguchi, K. (1996) Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG5400 mass spectrometer- I: isotope dilution method. *J. Mass. Spectrom. Soc. Jpn.*, 44, 39-61.
- Robinson, P., Spear, F. S., Schumacher, J. C., Laird, J., Klein, C., Evans, B. W., and Doolan, B. L. (1982) Phase relations of metamorphic amphiboles: natural occurrence and theory. In: *Amphiboles: Petrology and Experimental Phase Relations*, Reviews in Mineralogy, Vol. 9B (eds Veblen, D. R. and Ribbe, P. H.), pp. 1-227. Mineralogical Society of America.
- Steiger, R. H. and Jager, E. (1977) Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 359-362.
- Suetrisno, Supriatna, S., Rustandi, E. and Sanyoto, P. (1994) Geological map of the Buntok Quadrangle, Kalimantan (1:250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).
- Sumartadipra A. S. and Margono, U. (1996) Geological map of the Tewah Quadrangle, Kalimantan (1:250,000). Geological Research and Development Centre (GRDC).
- Supriatna, S., Sudradjat, A. and Abidin, H. Z. (1995) Geological map of the Muarotewe Quadrangle, Kalimantan (1:250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).

2004년 7월 19일 원고접수, 2004년 10월 14일 게재승인.