

울산-언양 지역 화강암체 주변의 퇴적암류에 대한 접촉변성작용에 관한 연구

이상원* · 이준동** · 김정진**

Contact Metamorphism from the Aureoles of the Granitic Rocks, Ulsan-Eonyang Region

Sang Won Lee*, Joon Dong Lee** and Jeong Jin Kim**

ABSTRACT: The study area consists of sedimentary and volcanic rocks of Gyeongsang Supergroup, granitoid intrusives, and hornfelses around the granitoids. Granitoid intrusives occur in small stocks in Nijeon-ri, Uggog-ri, and Yul-ri area. The masses in Nijeon-ri and Uggog-ri are hornblende-biotite granodiorite, biotite granodiorite respectively, and Yul-ri mass is biotite granite. Surrounding sediments of these masses were thermally metamorphosed and contact aureoles were formed. The studied granitoids are considered to be formed by sequential crystallization-differentiation from calc-alkalic granitoid magma. Metamorphic minerals occurring in contact aureole are chlorite, actinolite, epidote, and biotite. Diopside and hornblende are observed in small amount in some lithology around contact aureole. The lithology of contact aureole is predominantly silty and sandy, and characteristic metamorphic minerals were poorly developed because of low temperature metamorphism. Low temperature in contact aureole could be deduced from the facts that the intrusions were small size, shallow depth, low temperature, and rare movement of volatiles from magma.

서 언

본 연구는 경상분지 내의 언양과 울산 사이 지역에 분포하는 화강암질암과 주변 접촉변성대의 호른펠스의 암석학적 연구 및 접촉변성작용을 규명하기 위해 수행되었다.

그 동안 경상분지 내의 화강암류에 대해서는 많은 연구가 수행되었지만, 접촉변성암과 변성작용에 대한 연구는 별로 많지 않았다 (김규진, 1983; 고태열, 1984; 이상원, 1987; 이상원 외, 1989; 이준동, 1987). 이런 현상은 경상분지에 분포하는 화강암체의 규모가 작고, 대체로 천층 관입 양상을 하고 있어 상대적으로 현저한 접촉변성작용이 결여된 이유로 생각된다. 그러나 화강암체의 관입 온도는 낮았다고 하더라도 접촉변성대의 범위는 지역에 따라 3 km 정도까지 나타나고 있어 (고태열, 1984; 이상원, 1987, 1989), 접촉변성대의 분대, 광물조합, 변성상에 대한 연구

가 필요하다.

일반지질

연구 지역의 지질은 경상누층군의 퇴적암류와 치슬령 지역의 화산암류 및 이들을 관입한 화강암류 및 관입접촉대의 호른펠스로 구성되어 있다 (Fig. 1).

본 역의 퇴적암류는 언양도폭 (이윤중 외, 1972)에서 대구층으로, 울산도폭 (박양대 외, 1968)에서 울산층으로, 그리고 양산도폭 (이민성 외, 1964)에서는 대양동층으로 명명된 바 있으며, 마산 및 진동 지역의 함안층에 대비된다. 또한 Choi et al. (1980, 1985)이 세분한 층서에 근거하면 사연리층에 해당하는데, 저색의 실트스톤, 사질세일, 녹회색 내지 암회색의 사암, 사질실트스톤, 사질세일 및 세일 등이 호층을 이루고 있다. 화강암질암과의 접촉대에 분포하는 호른펠스는 니전리, 옥곡리, 울리에서 화강암질암체 주위에 원형 내지 타원형으로, 암녹회색, 담녹색, 녹색 및 암녹색, 저색의 호층의 퇴적암이 접촉변성작용을 받아서 치밀 견고하게 산출하고 있다. 화산암류는 북동부의 치슬령 일대에 분포하는데, 주로 유문석영안산

* 부산대학교 지구과학교육과 (Dept. Earth Science Education, Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea)

** 부산대학교 지질학과 (Dept. Geology, Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea)

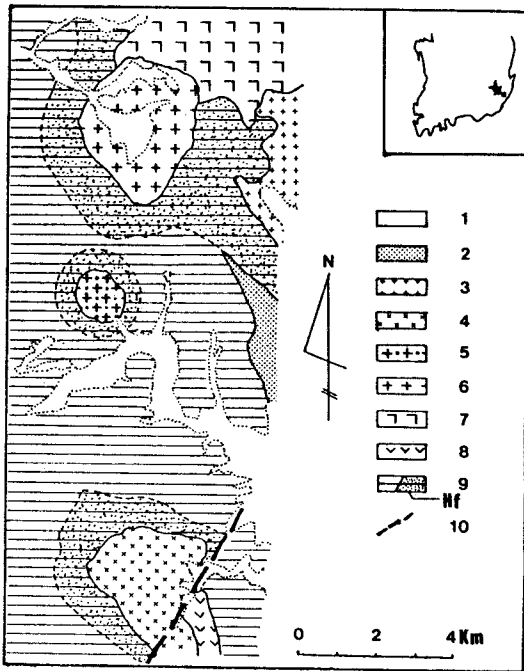


Fig. 1. Geologic map of the study area (modified from Lee and Ueda, 1976). 1; Alluvium, 2; Intrusive rhyolite, 3; Cheogkwari granite, 4; Yulri granite, 5; Ukgogri granodiorite, 6; Ni jeonri granodiorite, 7; Chisulryeong rhyodacite, 8; Andesitic rock, 9; Daegur formation (Hf: hornfels), and 10; Inferred fault.

암으로 구성되어 있고 (Park and Kim, 1985), 니전리 지역의 화강섬록암에 의해 관입 당하여 있다. 화강암질암은 니전리, 옥곡리, 울리 지역에 각각 4 km×3.2 km, 1.8 km×2.3 km, 3.5 km×3 km 범위의 소규모로 거의 원형으로 분포하고 있는데, 암상은 화강섬록암 내지 화강암에 해당한다. 니전리암체 (화강섬록암)와 울리 암체 (화강암)는 K-Ar 절대년령 측정에 의해 각각 87 Ma, 71 Ma로 밝혀져 있다 (이윤중 외, 1976).

화강암질암

연구 지역의 화강암질암체는 니전리, 옥곡리, 울리 일원에 소규모의 암주상으로 산출한다. 니전리와 옥곡리 암체는 각각 각섬석-흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강섬록암에, 울리 암체는 흑운모 화강암에 해당하며 (Table 1, Fig. 2), 주위의 퇴적암류를 접촉변성시켜 접촉변성대를 형성하고 있다.

니전리화강섬록암은 담갈색을 띠는 중립질이며 각섬석

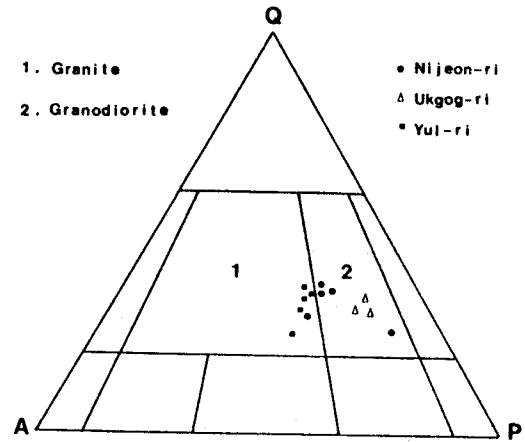


Fig. 2. Q-A-P diagram of the granitic rocks in the study area.

과 흑운모가 현저하게 관찰된다. 암체의 연변부로 갈수록 그 함량이 감소하고 중 내지 세립질의 반상조직을 보여 준다. 구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 각섬석, 흑운모, 녹니석 등이며, 흑운모가 각섬석보다 약간 많이 함유되어 있다 (Table 1). 석영은 타형이며 부분적으로 알칼리장석과 연정을 이루어 미문상조직을 보여준다. 정장석은 견운모로 변질되었으며, 사장석(An_{28-30})은 칼스바드-알바이트 쌍정, 알바이트 쌍정 및 누대구조를 보여 준다. 흑운모는 담갈색 (X), 암갈색 (Z)의 다색성을 띠며 부분적으로 녹니석화되어 있다. 각섬석은 부분적으로 녹염석으로 변질되어 있고 강한 다색성을 보여 준다 (X=담녹색, Y=녹색, Z=황녹색).

옥곡리화강섬록암은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성된 중립질이며 암체의 연변부에서 반상조직을 보여 준다. 사장석 (An_{18-20})은 알바이트 쌍정과 누대구조를 보여 준다. 흑운모는 다색성을 띠며 (X=담갈색, Z=적갈색) 부분적으로 녹니석과 불투명 광물로 변질되어 있다.

울리화강암은 전기한 두 암체에 비해 담색을 띠는 중립질의 암체로서, 부분적으로 세리에이트 석리를 보여 주는데 연변부에서는 반상조직으로 이화한다. 구성광물은 옥곡리 암체와 유사하지만 알칼리장석 (퍼다이트)의 함량이 훨씬 많다. 알칼리장석은 대부분 심하게 변질되었으며, 사장석은 알바이트 쌍정과 누대구조를 보여 준다. 암체의 연변부에서는 문상조직이 관찰되고, 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 등이 반정으로, 석영, 알칼리장석이 석기를 구성하고 있다. 석기는 니전리 암체보다 입자가 큰 편이다.

Table 1. Modal composition of the granitic rocks in the study area.

Sample	Nigeonri mass					Ukgogri mass			Yulri mass				
	O5-1	K-1	O5-2	O5-4	K-3	B-10	O5-11	B-8	19-2	U-16	14-4	U-15	P-9
Quartz	28.8	32.7	27.2	30.4	31.6	29.6	31.5	28.7	22.9	32.8	29.6	31.2	33.5
K-feldspar	9.1	19.8	23.2	20.5	19.5	12.8	11.6	13.2	28.9	21.7	24.6	23.5	24.1
Plagioclase	44.8	36.8	36.0	36.7	37.8	48.0	48.7	47.3	36.3	37.0	39.8	36.1	37.2
Hornblende	6.0	3.0	6.4	5.3	2.8	—	—	—	—	—	—	—	—
Biotite	8.7	6.8	5.9	6.3	7.3	9.2	7.7	10.2	10.3	8.0	5.9	8.5	4.9
Opagues	2.0	0.9	1.3	0.8	1.0	0.5	0.4	0.6	1.7	0.6	0.1	0.7	0.3
Others	0.6	tr	tr	tr	tr	tr	0.3	tr	tr	tr	tr	tr	tr

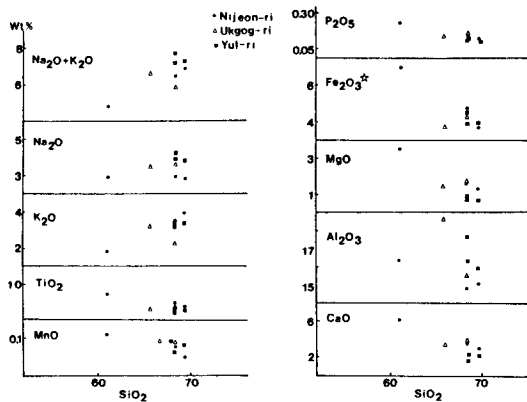


Fig. 3. Variation diagram of oxides vs SiO₂ of granitic rocks (*; total Fe₂O₃). Symbols are the same as those in Fig. 2.

화강암질암의 화학조성

연구 지역의 화강암질암의 화학분석 결과는 Table 2와 같다.

주성분 원소는 SiO₂가 증가함에 따라 K₂O는 증가하는데 비해 Na₂O는 거의 변화가 없으며, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃ (total), MgO, TiO₂, P₂O₅는 감소하는 경향을 보여준다 (Fig. 3). 암석 계열은 비알칼리 계열로서 칼크-알칼리 계열의 특성을 보여 준다 (Fig. 4). 미량원소는 니전리화강섬록암에서 울리화강암으로 갈수록 Nb, Li, Ba, Y는 증가하고 Cu, Co, V, Sr은 감소하며, Zr, Zn, Sc는 뚜렷한 경향을 보여 주지 않는다. 미량원소의 함량을 언양화강암, 유천화강암 (Hong, 1985)과 비교해 보면, Sr, V, Y는 다소 높은 반면에 Nb, Zr은 낮다. 희토류원소는 LREEs가 HREEs에 비해 부화되어 있고, Eu의 negative anomaly를 보여 준다.

이들 화강암질암은 칼크-알칼리 화강암질마그마에서 분화하여 순차적인 정출작용을 거쳐서 형성된 것으로 사료된다.

접촉변성암

울산 지역 화강암질암체 주위에 원형 내지 타원형이나 arc 형태로 호온펠스가 접촉변성대를 형성하고 있다. 이 접촉변성대의 폭은 관입암체의 규모에 비례해서 1 km 내외의 범위이나 니전리 지역은 동쪽의 척과리화강섬록암의 관입 영향으로 보다 넓은 분포를 보여 준다.

호온펠스는 원래의 퇴적구조인 층리를 잘 보여 주며, 녹회색, 암회색, 저색 등을 띤다. 육안으로는 결정을 식별하기가 불가능하고 대단히 치밀, 견고하다. 현미경하에서 흑운모가 미세하게 산발적 내지 집합체로 관찰되고, 석영 입자들이 재결정되어 관입암체와의 접촉대에 가까운 부분에서는 보다 입자가 커지면서 함량도 증가하는 경향을 보여 준다.

구성광물은 석영, 사장석, 백운모, 흑운모, 녹니석, 양기석, 각섬석, 투회석, 불투명 광물 외에 소량의 방해석, 백운석, 인회석, 저어콘 등이다. 이들 광물의 종류와 함량은 원암의 성분과 변성도에 따라 변화하며, 미세하기 때문에 X-선 회절 분석을 실시하여 보완하였다. 일부 석회질 nodule에서는 각섬석과 투회석 등이 산출되어 변성상 결정에 도움을 준다.

접촉변성암의 화학조성

호온펠스 11개, 비변성퇴적암 2개 총 13개의 시료에 대해 화학분석한 결과는 Table 3과 같다. SiO₂와 Al₂O₃의 함량은 각각 60.24~68.53%, 13.46~18.14% 범위이며, Clarke (1924)와 다른 지역의 세일과 변성니질암 (Ronov and Migdisov, 1971; Gromet et al., 1983)의 평균치에 비해서 전자는 함량이 비슷하거나 약간 높고 후자는 상대적으로 낮다. Mason et al. (1982)의 퇴적암 분류도에서 사암과 세일의 중첩 영역에 접시된다. 접촉변성대의 관입

Table 2. Chemical composition of the granitic rocks in the study area.

Sample	Nijeonri mass			Ukgogri mass		Yulri mass		
	O5-1	K-1	O5-2	B-10	O5-11	19-2	U-16	14-4
Oxides & elements								
wt% SiO ₂	61.21	69.76	68.49	68.50	66.03	69.78	68.40	68.50
TiO ₂	0.73	0.39	0.48	0.40	0.31	0.37	0.33	0.40
Al ₂ O ₃	16.36	15.01	14.74	15.44	18.59	15.85	17.57	16.25
Fe ₂ O ₃ *	6.97	3.67	4.65	4.31	3.67	3.88	3.89	4.46
MnO	0.11	0.05	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06	0.09
MgO	3.42	1.24	1.56	1.60	1.31	0.66	0.60	0.74
CaO	6.21	2.98	3.43	3.69	3.31	2.10	1.51	2.23
Na ₂ O	2.97	2.87	2.93	3.61	3.44	3.81	4.12	3.88
K ₂ O	1.84	3.94	3.47	2.23	3.14	3.38	3.44	3.29
P ₂ O ₅	0.18	0.09	0.11	0.13	0.11	0.09	0.08	0.10
PPm Ba	346	590	527	434	497	665	645	758
Co	42	12	17	11	15	8	10	10
Cu	31	23	32	12	88	11	30	12
Li	21	22	23	23	17	29	31	38
Nb	4	.8	7	4	3	9	7	8
Sc	20	8	11	10	7	10	11	13
Sr	403	244	269	358	378	167	172	173
V	158	64	85	71	64	33	32	38
Y	27	29	31	18	12	47	48	57
Zn	57	28	49	31	36	99	49	47
Zr	10	13	15	9	8	17	11	7
La	20	37	30	14	19	28	41	39
Ce	35	58	52	24	32	53	80	68
Nd	22	27	27	17	18	18	.37	34
Sm	3.7	4.7	4.9	2.6	2.6	5.4	7.2	6.8
Eu	0.9	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9
Dy	2.0	2.1	2.6	1.0	0.2	3.7	4.0	4.9
Yb	2.2	2.1	2.5	1.5	1.1	3.7	3.8	4.1
CIPW normative minerals								
q	19.20	29.32	34.84	28.36	24.63	28.75	26.70	27.06
or	10.86	23.27	20.49	13.19	18.54	19.99	20.32	19.43
ab	25.12	24.28	25.28	30.52	29.11	32.26	34.88	32.83
an	25.90	14.19	16.30	17.47	15.69	9.85	6.93	10.43
c	-	0.83	0.10	0.68	3.78	2.51	4.53	2.49
D.I.	55.18	76.87	80.61	72.07	72.28	81.00	81.90	79.32

* Total Fe treated as Fe₂O₃

접촉대에서 비변성대 쪽으로의 성분 변화에서 어떤 경향성은 거의 보이지 않고 불규칙적이다. 이는 원암의 화학조성이 다양한 데 기인하는 것으로 해석되며, 화강암류의 관입시에 주위 모암에 마그마로부터 성분의 공급이 거의 없었거나 미약했음을 의미한다. 관입암체와의 접촉부에 부분적인 소량의 성분 교환이 있었을 가능성이 있지만, 호른펠스의 동일 층준에서 표품의 채취가 불가능하므로 변성작용시의 교대작용 유무는 판단 곤란하다.

변성광물

접촉변성대에서 산출되는 변성광물은 녹니석, 양기석, 녹염석, 흑운모 등이 안정하고, 접촉대에 접한 좁은 지역에서 암상에 따라 투회석과 각섬석이 소량 관찰된다. 근정석이나 석류석, Al₂SiO₅ 광물은 거의 출현하지 않는다.

동일 박편 내에서도 다양한 광물조성이 관찰되는데, 이는 화학조성이 다른 대단히 얇은 박층이 교호되거나

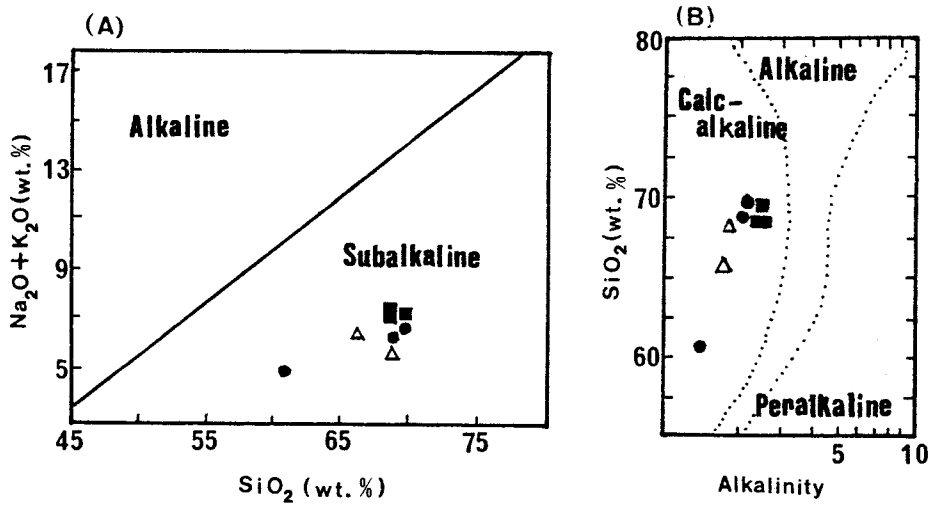


Fig. 4. (A); Diagram on $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 (wt.%) and (B); SiO_2 (wt.%) vs. alkalinity ratio variation diagram for granitic rocks in the studied area (Wright, 1969).

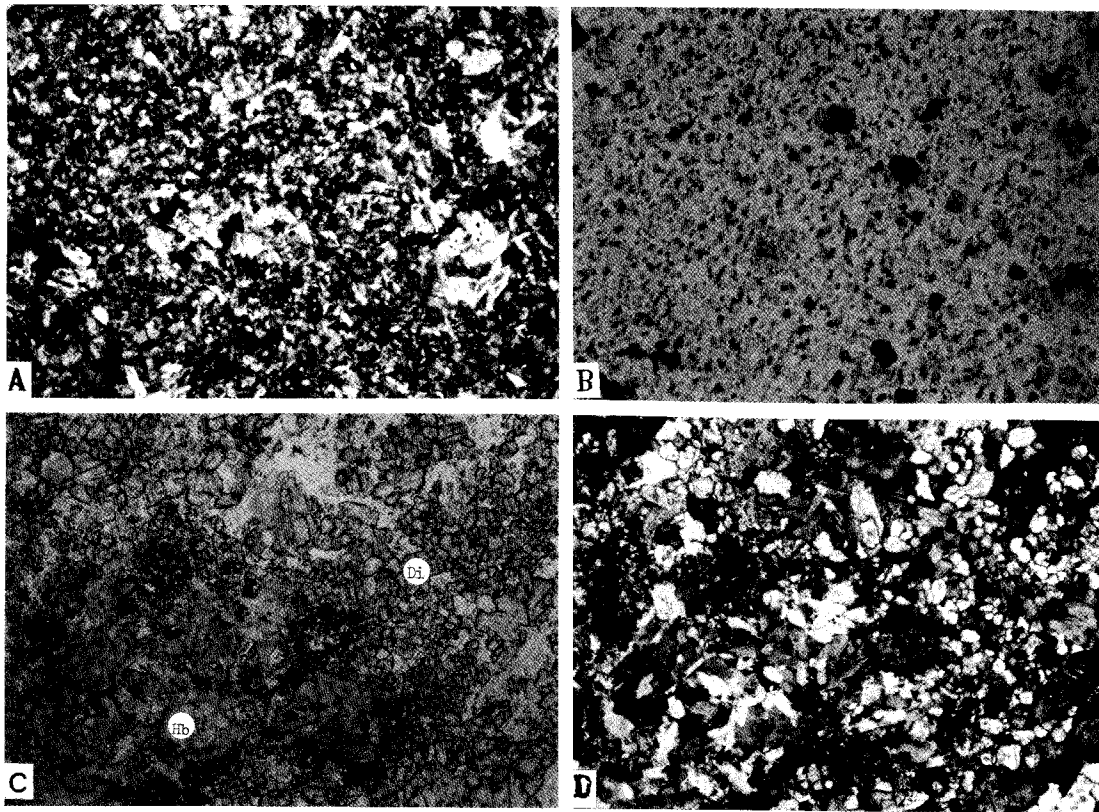


Fig. 5. A; Photomicrograph of hornfels showing actinolites, crossed polars, x 50, B; photomicrograph of hornfels showing fine-grained biotites, plane-polarized light, x 50, C; photomicrograph of hornfels (calcareous nodule) mainly consisting of diopside (Di) and hornblende (Hb), plane-polarized light, x 50, D; Same photomicrograph as (C) under the crossed polars, x 50.

Table 3. Chemical composition of the hornfelses and the pelitic rocks in the study area.

Sample	Nijeonri area					Yulri area					Ukgogri area		
	NJ1	NJ2	NJ3	NJ4	NJ5 ¹	YU1	YU2	YU3	YU4	YU5 ²	UK1	UK2	UK3
SiO ₂	61.29	64.40	60.24	68.53	64.04	65.73	63.21	60.82	63.30	60.64	68.25	66.40	57.01
TiO ₂	0.76	0.56	0.79	0.37	0.59	0.61	0.57	0.62	0.52	0.66	0.43	0.56	0.78
Al ₂ O ₃	14.97	14.48	17.66	15.08	15.49	13.46	14.32	15.07	17.00	18.14	12.54	13.62	19.86
Fe ₂ O ₃ *	5.01	4.11	7.34	3.62	5.23	4.45	4.10	6.08	3.73	5.72	4.60	6.27	7.55
MnO	0.09	0.06	0.08	0.11	0.10	0.09	0.19	0.12	0.09	0.08	0.11	0.09	0.15
MgO	4.33	4.32	3.56	1.70	2.81	3.41	4.21	4.38	3.48	3.06	3.14	2.76	2.80
CaO	5.05	4.32	4.01	3.08	5.12	6.68	5.10	4.43	3.44	2.78	5.04	3.92	3.46
Na ₂ O	5.27	5.43	2.32	5.59	3.72	3.54	3.72	4.04	4.97	4.18	1.98	2.82	3.59
K ₂ O	3.02	2.21	3.80	1.81	2.72	1.88	4.52	4.25	3.33	4.59	3.79	3.39	4.62
P ₂ O ₅	0.21	0.11	0.20	0.11	0.18	0.15	0.15	0.19	0.14	0.15	0.12	0.17	0.18
q	5.73	11.91	18.87	21.10	18.79	22.62	10.80	7.80	9.90	8.67	29.27	25.82	7.37
c	0.00	0.00	2.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	23.09
or	17.85	12.47	22.45	10.70	16.07	11.11	26.71	25.11	19.68	27.12	22.40	20.03	27.30
ab	44.59	45.94	19.63	47.30	31.48	29.95	31.48	3.18	42.05	35.37	16.75	23.86	30.38
an	8.27	8.98	18.59	10.71	17.53	15.28	9.03	10.43	14.24	12.81	14.14	14.19	15.99

* Total Fe treated as Fe₂O₃. NJ5¹ and NJ5²; pelitic rock.

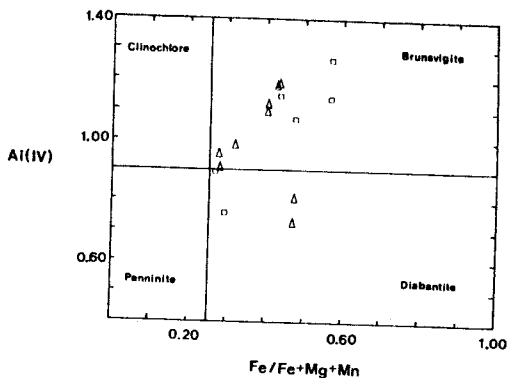


Fig. 6. Nomenclature of chlorite proposed by Foster (1962). Cross; biotite zone and open rectangular; diopside zone.

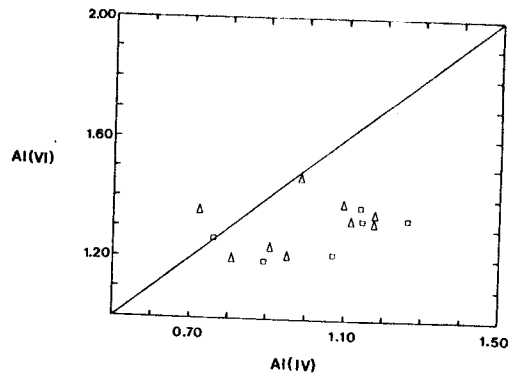


Fig. 7. Al(VI) vs Al(IV) diagram for chlorites. Symbols are the same as those in Fig. 6.

암석의 성분이 다양함에 기인한 것이다.

녹니석

녹니석은 담녹색을 띠며 관입체와 바로 접촉하는 영역을 제외한 접촉변성대의 전역에 걸쳐 산출된다. 양기석 또는 백운모와 밀접하게 공생하며, 흑운모가 출현함에 따라 그 함량이 감소하거나 소멸된다. 비변성대에 가까운 지역에서는 변성 기원인지 구별이 쉽지 않으며 현미경하에서 인지되는 부분을 경계로 설정했다.

녹니석의 화학조성에서 Fe/(Fe+Mg+Mn) ratio가 0.22~0.65의 범위이며 (Table 4), Foster (1962)의 Al(VI)-Fe/(Fe+Mg+Mn) 관계도에 점시하면 diabantite 내지 brunsvigite에 해당한다 (Fig. 6). 한 박편에서도 성분 변화가 큰 경우도 있어 변성도에 따라 성분 변화의 상관 관계가 잘 나타나지 않는다. 녹니석의 Al(VI)-Al(IV) 상관도 (Fig. 7)에서 1:1보다 Al(IV) 측에 치우치면서 분산되는 경향을 보여준다. 이러한 성분 변화의 폭이 크고 분산되는 것은 녹니석의 조성이 모암의 성분에 규제된 것으로 해석된다.

Table 4. Chemical composition of chlorites by EPMA(oxygen=14).

	421-22	421-24	421-4b	421-4d	421125	421126	91-7d	91-7h	N2B-f	N2B-j	N3-11	N3-17	N4-30	N4-33	414-29
SiO ₂	31.66	30.30	26.82	26.84	30.72	30.14	25.30	26.68	31.75	33.04	27.72	27.26	28.14	27.89	29.56
TiO ₂	0.00	0.62	0.13	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.65	1.05	0.69	0.11	0.05	0.05	0.01
Al ₂ O ₃	17.06	16.11	20.34	20.08	18.06	18.09	20.33	19.84	18.04	17.50	18.31	20.02	20.38	20.00	20.41
FeO	23.03	23.47	22.29	21.78	15.04	15.28	29.04	28.45	14.34	14.68	24.11	22.64	20.81	21.32	15.96
MnO	0.19	0.25	0.69	0.61	0.25	0.14	0.68	0.61	0.09	0.09	0.26	0.28	0.38	0.28	0.07
MgO	14.49	14.37	16.06	16.03	21.85	22.19	11.97	11.88	21.90	19.57	14.87	16.27	17.05	17.38	18.99
CaO	0.43	1.32	0.07	0.91	0.11	0.05	0.00	0.04	0.06	0.39	0.95	0.17	0.06	0.09	0.02
Na ₂ O	0.07	0.05	0.02	0.02	0.12	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.03
K ₂ O	0.31	0.18	0.03	0.11	0.03	0.03	0.01	0.01	2.92	3.35	0.04	0.01	0.11	0.03	0.39
Tatal	87.24	86.68	86.46	86.45	86.24	86.00	87.39	87.56	89.80	89.71	86.97	86.80	86.99	87.07	85.43
Si(IV)	3.28	3.19	2.82	2.83	3.09	3.06	2.74	2.86	3.11	3.24	2.93	2.85	2.90	2.89	3.02
Al(IV)	0.72	0.81	1.18	1.17	0.91	0.95	1.26	1.14	0.89	0.76	1.07	1.15	1.10	1.11	0.98
T site	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Al(VI)	1.36	1.19	1.34	1.32	1.24	1.20	1.33	1.37	1.19	1.26	1.21	1.32	1.38	1.32	1.47
Ti	0.00	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe+2	1.99	2.07	1.96	1.92	1.27	1.29	2.63	2.55	1.17	1.20	2.13	1.98	1.80	1.84	1.36
Mn+2	0.02	0.02	0.06	0.05	0.02	0.01	0.06	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
Mg	2.24	2.26	2.52	2.52	3.28	3.35	1.93	1.90	3.19	2.86	2.34	2.54	2.62	2.68	2.89
Ca	0.05	0.15	0.01	0.10	0.01	0.11	0.00	0.00	0.01	0.04	0.11	0.02	0.01	0.01	0.00
Ma	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
K	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.42	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
O site	5.71	5.78	5.91	5.93	5.85	5.88	5.97	5.89	5.99	5.88	5.88	5.91	5.86	5.90	5.78
Fe/Fe+Mg	0.47	0.48	0.44	0.43	0.28	0.28	0.58	0.57	0.27	0.30	0.48	0.44	0.41	0.41	0.32
Fe/Fe+Mg+Mn	0.47	0.48	0.43	0.43	0.28	0.28	0.57	0.57	0.27	0.30	0.47	0.44	0.40	0.41	0.32
Mg/Fe	1.12	1.09	1.28	1.31	2.59	2.59	0.73	0.74	2.72	2.38	1.10	1.28	1.46	1.45	2.12

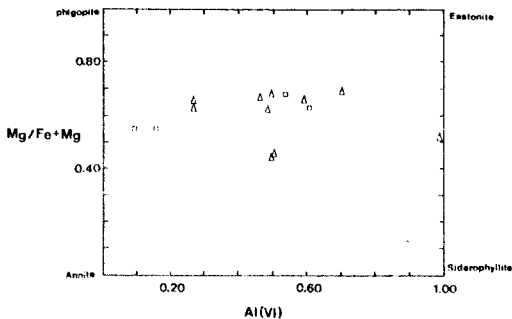


Fig. 8. Mg/Fe+Mg vs Al^(VI) diagram for biotites. Symbols are the same as those in Fig. 6.

백운모

미세한 백운모들이 전반적으로 안정한 것으로 사료되나 비변성대와 근접한 지역의 백운모들은 쇠설성으로 판단된다. 화학조성 (Table 5)에서 Mg/(Mg+Fe), Na/(Na+K) ratio의 범위는 각각 0.44~0.67, 0.01~0.06이다. Al^(VI)-Al^(IV) 상관도, (Fe+Mg)-Si^(IV) 상관도에 점시하면 분산되는 경

향을 보여주며, Na-K-Ca 삼각도에서 K 코너에 집중된다 (그림 미표시).

흑운모

흑운모는 접촉변성대의 전역에서 관찰되지만 외곽부의 것은 쇠설성 기원이며, 관입체에 접근하면서 미세한 갈색의 변성 산물의 흑운모들이 출현하고 바로 접촉대에 접하는 부분에서는 다량으로 관찰되며 일부는 집합체로 나타난다. 흑운모의 화학조성 (Table 6)에 있어서 Mg/Fe+Mg ratio는 0.40~0.70 범위이며 보편적인 흑운모의 영역에 점시된다 (Fig. 8). 일반적으로 변성도의 증가에 따라 TiO₂ 및 MgO의 함량이 증가하는 것으로 밝혀져 있지만 (Guidotti, 1970; Evans and Guidotti, 1966; Engel and Engel, 1962; Miyashiro, 1958; Lambert, 1959; Oki, 1961), 연구 지역의 경우에 그 함량이 비교적 높은 반면에 TiO₂-Mg/Fe 상관도 (Fig. 9)에서 분산되는 경향을 보여주고 있다. 한편 Ti-Al^(VI) 상관도 (Fig. 10)에서는 반비례 관계를 보여 주고 상대적으로 관입체의 접촉대에서 출현하는 흑

Table 5. Chemical composition of muscovites by EPMA (oxygen=22).

	421-33	421-34	421-4n	421-4q	N-11-1	N-11-2
SiO ₂	49.13	49.06	49.45	48.78	47.00	48.98
TiO ₂	0.36	00.33	0.32	0.29	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	31.02	30.75	26.33	26.18	30.76	31.44
Cr ₂ O ₃	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	—
FeO	2.15	2.35	5.41	5.53	3.89	3.02
MnO	0.06	0.05	0.06	0.05	—	—
MgO	1.65	1.70	2.76	2.56	4.08	3.51
CaO	0.02	—	0.05	0.01	0.07	0.07
Na ₂ O	0.31	0.29	0.17	0.31	0.17	0.22
K ₂ O	9.53	9.79	10.63	10.48	8.14	8.63
Total	94.29	94.32	95.18	94.22	94.15	95.88
Si(IV)	6.57	6.58	6.73	6.72	6.34	6.45
Al(IV)	1.43	1.42	1.27	1.28	1.66	1.55
T site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al(VI)	3.47	3.44	2.96	2.96	3.22	3.33
Ti(VI)	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	—
Fe	0.24	0.26	0.62	0.64	0.44	0.33
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	—	—
Mg	0.33	0.34	0.56	0.53	0.82	0.69
O site	4.08	4.08	4.17	4.17	4.48	4.35
Ca	0.00	—	0.01	0.00	0.01	0.01
Na	0.08	0.07	0.04	0.08	0.05	0.06
K	1.63	1.67	1.85	1.84	1.40	1.45
A site	1.71	1.75	1.90	1.92	1.46	1.52
Fg/Fe+Mg	0.58	0.56	0.48	0.45	0.65	0.67
Na/Na+K	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04
Mg/Fe	1.36	1.29	0.91	0.83	1.87	2.07
Mn/Fe	0.03	0.02	0.01	0.01	—	—
Fe+Mg	0.57	0.60	1.18	1.16	1.26	1.02

운모의 Ti 함량이 다소 높은 경향을 보여 준다. Al^(VI)-Al^(IV) 상관도에서는 이상적인 치환 관계에서 벗어나 분산되는 경향을 보여준다 (Fig. 11). 이러한 화학조성의 경향성은 원암의 조성에 기인된 것으로 해석된다.

녹염석

녹염석은 양기석, 녹니석과 공생하며 안정한 상을 보여주고, epidote 내지 clinozoisite에 해당한다. 대표적인 2개의 시료 (Table 7)에서 분산된 성분 분포를 나타내고 있어 모암의 조성에 따른 변화로 해석된다 (Fig. 12).

각섬석

접촉변성대의 전 지역에 걸쳐 양기석이 안정된 상으로

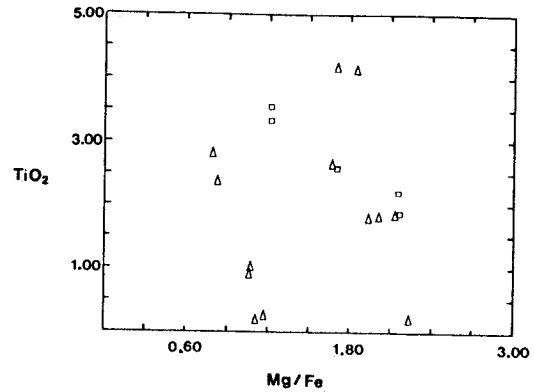


Fig. 9. TiO₂(wt. %) vs Mg/Fe diagram for biotites. Symbols are the same as those in Fig. 6.

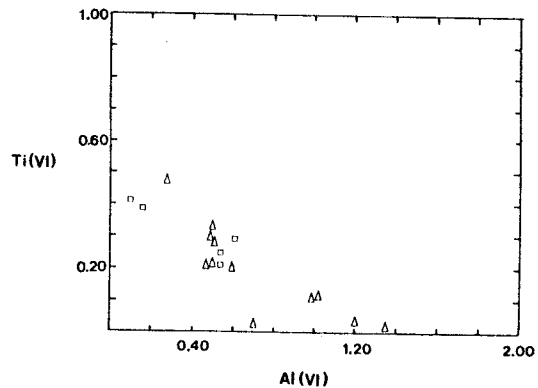


Fig. 10. Ti vs Al^(VI) diagram for biotites. Symbols are the same as those in Fig. 6.

관찰되며 국부적으로 관입체와의 접촉대에서 각섬석의 소량 관찰된다. 특히 석회질 nodule(?)에서 현저하게 산출되며 투회석과 공존하기도 한다. 각섬석류의 화학조성 (Table 8)을 Leake (1978)의 분류표에 적용하면 actinolite 내지 actinolite-hornblende 영역에 점사되고 (Fig. 13), Ca-Mg-Fe 삼각도에서 tremolite-actinolite series에 집중된다 (Fig. 14).

투회석

관입암체와의 접촉대에서 소량 관찰되며 동일 박편에서 각섬석 또는 흑운모와 함께 산출되기도 한다. Ca, Mg, Fe와 (Ca+Mg+Fe)의 ratio는 각각 0.43~0.48, 0.29~0.34, 0.19~0.23 범위이며 (Table 9), Ca-Mg-Fe 삼각도에 점사하면 Fig. 15와 같다.

Table 6. Chemical composition of biotites by EPMA (oxygen = 22).

	421-3b	421-3e	421-41	421-4m	42112e	42112f	N2B-23	N2B-27	414-1m	414-1p	414-2b	414-2f	414-4d	414-4p	N11-7	N11-29	L12-3	L12-4
SiO ₂	37.51	38.39	41.01	39.72	36.40	36.75	38.12	37.53	37.64	37.22	37.52	37.98	37.56	37.92	36.64	36.20	35.58	35.60
TiO ₂	0.91	0.96	0.18	0.26	1.85	1.80	1.86	2.20	3.53	3.31	2.57	2.61	0.22	1.78	4.12	4.14	2.82	2.37
Al ₂ O ₃	18.17	17.84	20.15	19.81	16.48	16.37	16.63	17.09	12.77	13.45	16.80	16.24	17.68	17.67	15.40	15.20	16.93	17.00
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	0.03	0.08	0.06	0.03	0.03	0.07	—	0.05	0.26	0.02	0.01	0.08	0.06	0.09
FeO	17.20	16.64	14.81	15.98	12.79	13.46	12.73	12.79	18.23	18.26	14.05	14.96	12.62	13.59	14.10	14.75	21.12	21.39
MnO	0.08	0.09	0.35	0.19	0.17	0.13	0.10	0.05	0.14	0.17	0.07	0.05	0.17	0.18	0.04	0.04	0.52	0.43
MgO	10.30	9.99	9.26	10.57	15.31	15.23	15.47	15.50	12.40	12.42	13.51	14.04	16.90	14.79	14.60	14.09	9.36	9.94
CaO	0.37	0.07	1.81	1.42	0.07	0.04	0.34	0.00	0.04	—	0.04	0.04	0.07	0.21	0.05	0.00	0.28	0.03
Na ₂ O	0.12	0.07	1.81	0.82	0.14	0.14	0.07	0.12	0.05	0.03	0.10	0.14	0.03	0.08	0.14	0.07	0.09	0.02
K ₂ O	8.50	9.60	6.69	6.82	9.28	9.70	9.43	9.51	9.48	9.24	9.16	9.06	9.66	8.90	8.22	7.72	9.29	9.27
Total	93.16	93.63	96.07	95.61	92.52	93.70	94.80	94.82	94.31	94.17	93.81	95.17	94.17	94.22	93.32	92.30	96.06	96.12
Si(IV)	5.72	5.83	5.92	5.79	5.54	5.55	5.64	5.55	5.78	5.72	5.63	5.64	5.59	5.65	5.53	5.53	5.44	5.44
Al(IV)	2.28	2.17	2.08	2.21	2.46	2.45	2.36	2.45	2.22	2.28	2.37	2.36	2.41	2.35	2.47	2.47	2.56	2.56
T site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al(VI)	0.99	1.02	1.35	1.20	0.50	0.46	0.54	0.54	0.10	0.16	0.61	0.49	0.70	0.59	0.27	0.27	0.50	0.50
Ti(VI)	0.10	0.11	0.02	0.03	0.03	0.21	0.20	0.21	0.24	0.41	0.38	0.29	0.03	0.20	0.47	0.48	0.32	0.27
Cr	—	—	—	—	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	—	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe+2	2.19	2.11	1.79	1.95	1.63	1.70	1.57	1.58	2.34	2.35	1.76	1.86	1.57	1.69	1.78	1.88	2.70	2.73
Mn+2	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.07	0.06
Mg	2.34	2.26	1.99	2.30	3.47	3.43	3.41	3.42	2.84	2.85	3.02	3.11	3.53	3.28	3.28	3.21	2.14	2.26
O site	5.64	5.52	5.19	5.50	5.83	5.82	5.75	5.79	5.71	5.76	5.69	5.76	5.88	5.79	5.81	5.86	5.74	5.84
Ca	0.06	0.01	0.28	0.22	0.01	0.01	0.05	0.00	0.01	—	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.05	0.00
Na	0.03	0.02	0.51	0.23	0.04	0.04	0.02	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01
K	1.65	1.86	1.23	1.27	1.80	1.87	1.78	1.80	1.86	1.81	1.76	1.72	1.84	1.69	1.58	1.51	1.81	1.81
A site	1.75	1.89	2.02	1.72	1.85	1.92	1.85	1.83	1.88	1.82	1.79	1.76	1.85	1.75	1.63	1.89	1.82	1.82
Mg/Fe+Mg	0.52	0.52	0.53	0.54	0.68	0.67	0.68	0.68	0.55	0.55	0.63	0.63	0.69	0.66	0.65	0.63	0.44	0.45
Mg/Fe	1.07	1.07	1.11	1.18	2.13	2.02	2.17	2.16	1.21	1.21	1.71	1.67	2.24	1.94	1.84	1.70	0.79	0.83
Mn/Fe	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02

Table 7. Chemical composition of epidotes by EPMA (oxygen=12.5).

	421-21	421-22	421-24	421-25	91-7a	91-7c	91-7i
SiO ₂	37.77	37.94	37.62	38.26	38.13	37.88	38.83
TiO ₂	0.19	0.33	0.25	0.15	0.05	0.06	0.07
Al ₂ O ₃	23.31	24.03	24.40	23.97	22.43	22.31	22.58
Fe ₂ O ₃	12.68	11.84	12.01	11.73	14.09	13.78	13.37
MnO	0.31	0.34	0.69	0.23	0.11	0.35	0.49
CaO	22.87	22.82	21.97	22.82	23.01	22.79	21.77
Na ₂ O	0.04	0.02	0.06	0.16	0.02	0.02	0.06
Total	97.17	97.31	97.00	97.30	97.84	97.20	97.16
Si(IV)	3.02	3.02	3.00	3.04	3.04	3.04	3.10
Z site	3.02	3.02	3.00	3.04	3.04	3.04	3.10
Al(VI)	2.20	2.25	2.30	2.25	2.11	2.11	2.12
Fe+3	0.76	0.71	0.72	0.70	0.85	0.83	0.80
Ti	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Mn+3	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03
Y site	2.99	3.00	3.06	2.97	2.96	2.97	2.96
Mn+2	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	1.96	1.95	1.88	1.94	1.97	1.96	1.86
Ka	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
X site	1.97	1.96	1.91	1.97	1.97	1.97	1.87

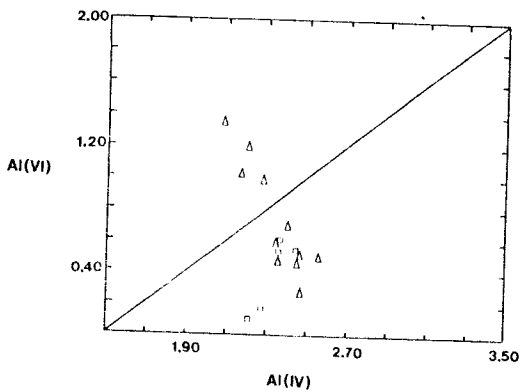


Fig. 11. Al(VI) diagram for biotites. The line indicates the ideal Tschermakitic substitutions. Symbols are the same as those in Fig. 6.

장 석

사장석은 전체 접촉변성대에서, K-장석은 몇몇 암석에서 관찰되나 대부분 쇠설성 기원으로, 원암의 잔존 물질로 추정되며 화학 조성에 있어서도 다양한 조성을 나타낸다. 변성반응으로 생성된 것으로 추정되는 장석의 화학 조성 (Table 10)에서 낮은 An content 범위를 보여준다.

기타

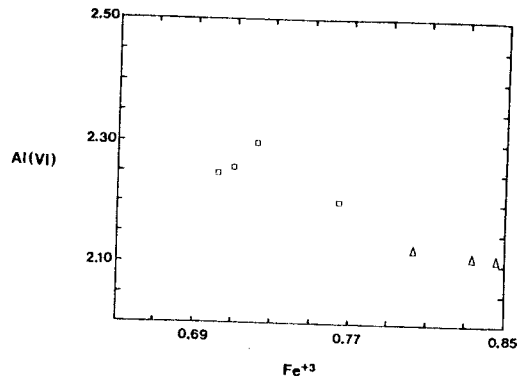


Fig. 12. Al(IV) vs Fe⁺³ diagram for epidotes. Symbols are the same as those in Fig. 6.

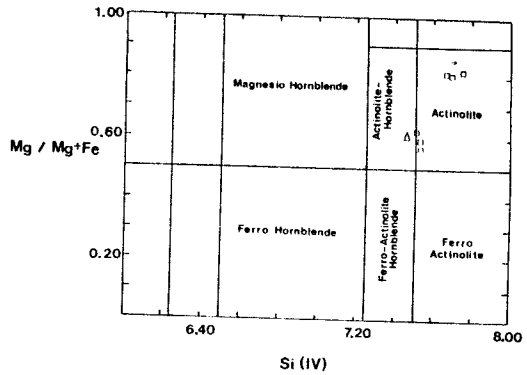


Fig. 13. Classification of amphiboles by Leake (1978). Symbols are the same as those in Fig. 6.

방해석, 백운석 등이 국부적으로 소량 출현하고, 불투명 금속광물들이 전반적으로 타광물과 공존하며 때로는 다량으로 농집되는 경우도 있다.

변성분대

이러한 광물조합을 근거로 하여 접촉변성대를 관입암체의 접촉부에서 외곽부의 비변성암 쪽으로 분대하면 zone 1, zone 2, zone 3, zone 4 (비변성대)로 구분된다 (Table 11, Fig. 16). 분대의 근거는 녹니석, 운모, 투회석, 각섬석 등의 index mineral의 존재 유무에 두었고, 동시에 운모류의 종류와 공생 관계도 염두에 두었다. 모든 zone에서 석영과 사장석은 공존한다.

Zone 4 : 비변성대. 비변성 퇴적암으로 속성작용 내지 쇠설성 기원의 석영, 장석, 운모, 녹니석, 방해석 등으로 구성되어 있다.

Table 8. Chemical composition of amphiboles by EPMA(oxygen=23).

	421-2	91-7p	91-7p	91-7s	N3-15	N3-25	N3-26
SiO ₂	50.63	54.38	54.31	5.10	51.35	51.49	50.76
TiO ₂	0.19	0.25	0.34	0.22	0.65	0.40	0.47
Al ₂ O ₃	3.84	3.22	3.22	2.78	4.57	4.20	4.41
Cr ₂ O ₃	—	0.09	0.03	0.04	—	—	—
FeO	16.15	7.62	7.76	7.54	16.18	16.19	15.70
MnO	0.41	0.56	0.66	0.68	0.35	0.45	0.36
MgO	12.60	18.11	18.33	18.56	11.94	13.59	12.55
CaO	12.02	12.40	12.30	12.15	11.90	10.99	11.29
Na ₂ O	0.62	0.44	0.37	0.34	0.46	0.67	0.61
K ₂ O	0.27	0.20	0.25	0.17	0.40	0.33	0.43
Total	97.73	97.27	97.58	97.58	97.80	98.31	96.58
Si(IV)	7.46	7.69	7.67	7.75	7.53	7.50	7.53
Al(IV)	0.54	0.31	0.33	0.25	0.47	0.50	0.47
T site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al(VI)	0.13	0.23	0.20	0.21	0.32	0.23	0.30
Ti	0.02	0.03	0.04	0.02	0.07	0.04	0.05
Cr	—	0.01	0.00	0.00	—	—	—
Mg	2.99	3.62	3.86	3.89	2.61	2.95	2.77
Fe+2	1.67	0.90	0.90	0.87	1.98	1.78	1.88
Mn	—	0.02	—	—	0.01	—	—
M1,2,3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Fe+2	0.12	—	0.01	0.02	—	0.19	0.07
Mn	0.05	0.05	0.08	0.08	0.03	0.06	0.05
Ca	1.83	1.88	1.86	1.83	1.87	1.72	1.79
Na	—	0.07	0.05	0.07	0.10	0.03	0.09
M4 site	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.18	0.05	0.06	0.02	0.03	0.16	0.08
K	0.05	0.04	0.04	0.03	0.08	0.06	0.08
A site	0.23	0.09	0.10	0.05	0.11	0.22	0.17
Mg/Mg+Fe	0.62	0.81	0.81	0.82	0.57	0.62	0.60
Mg/Fe	1.60	4.23	4.28	4.48	1.32	1.66	1.48

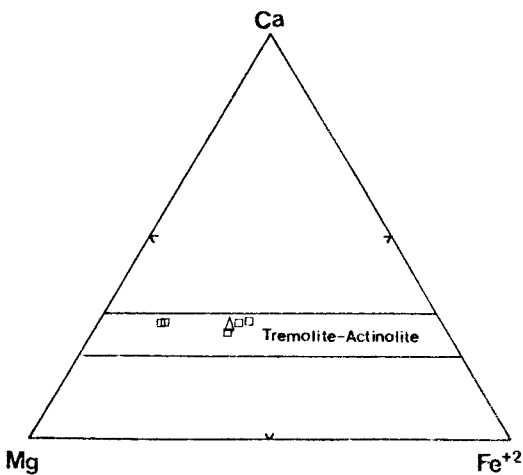


Fig. 14. Ca-Mg-Fe diagram for amphiboles. Symbols are the same as those in Fig. 6.

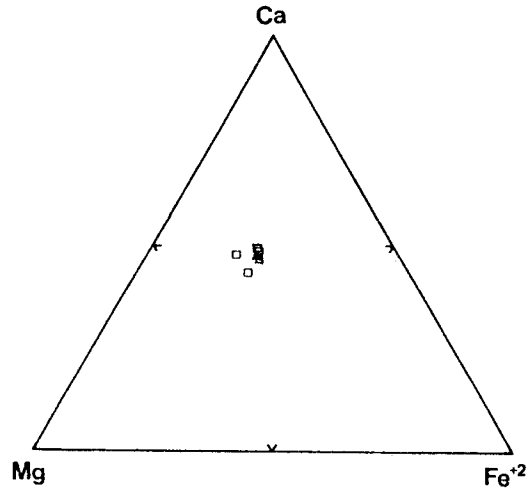


Fig. 15. Ca-Mg-Fe diagram for pyroxenes. Symbols are the same as those in Fig. 6.

Zone 3 : 녹니석대. 녹니석-백운모, 녹니석-양기석 (-녹염석) 조합이며, 일부 암석에서 방해석이 수반된다. 이는 알바이트-녹염석 호온펠스상에 해당하며 (Fyfe et al., 1958) 녹니석대로 분류된다.

Zone 2 : 흑운모대. 흑운모의 출현으로 흑운모대로 분류되고, 녹니석-백운모-흑운모, 녹니석-양기석-녹염석의 광물조합이 안정하다. Zone 2 역시 알바이트-녹염석 호온펠스상으로서 zone 3보다 고온부에 해당할 것으로 사료된다.

Zone 1 : 투회석대. 투회석이 출현함에 따라 투회석대로 분류된다. 흑운모-백운모 (-K-장석), 휘석-양기석-녹염석, 투회석-각섬석 조합을 보여주며, 각섬석은 접촉대의 내측에서 관찰된다. 녹니석은 소멸되고 양기석이 소량 수반되기도 한다. 흑운모가 보다 큰 입자로 산출되고, 특히 석회질 부분에서 투회석과 각섬석이 현저하게 산출된다. Seki (1957, 1961)에 의하면 투회석이 석회질암에서 녹색편암상과 각섬암상의 점이상에서 각섬석보다 저온에서 출현하고, 각섬석도 전형적인 각섬석호온펠스상 이전부터 출현한다. 또 Weeks (1956)는 $\langle \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{CO}_2 \rangle$ 반응에서 투회석이 400°C 이하 ($P_{\text{CO}_2} < 500 \text{ bar}$)에서도 안정함을 밝혔다. 본 역의 zone 1은 각섬석 호온펠스상으로 해석할 수 있겠으나 완전한 평형을 이루지 못한 상태에서, 각섬석 호온펠스상으로 진행되는 경계부의 전이상에 해당하는 것으로 사료된다. 그 범위는 관입암체와의 접촉대에 연해서 좁게 분포한다.

Table 9. Chemical composition of pyroxenes by EPMA(oxygen=6).

	414-1b	414-1g	414-1i	414-1j	414-1k	414-1o	414-1q	414-1r
SiO ₂	53.75	52.20	54.27	51.79	52.51	50.89	52.94	5.190
TiO ₂	0.15	0.21	0.13	0.13	0.05	0.09	0.10	0.10
Al ₂ O ₃	2.48	1.05	3.79	1.30	0.71	2.88	0.29	0.53
Cr ₂ O ₃	—	0.05	0.03	0.04	—	0.04	—	—
FeO	13.38	13.91	12.16	13.20	13.38	13.51	11.27	13.90
MnO	0.53	0.48	0.36	0.61	0.40	0.54	0.49	0.65
NiO	—	0.01	—	—	0.02	0.04	0.02	—
MgO	9.47	9.79	8.80	9.67	9.91	11.04	11.61	10.32
CaO	21.02	22.10	19.90	21.78	22.77	19.72	22.25	21.87
Na ₂ O	0.74	0.14	1.74	0.34	0.22	0.19	0.14	0.21
K ₂ O	0.06	0.02	0.02	0.03	0.01	0.05	0.01	0.00
Total	101.58	99.95	101.21	98.89	99.97	98.99	99.12	99.48
Si(IV)	2.00	1.99	2.01	1.99	2.00	1.95	2.01	2.00
Al(IV)	—	0.01	—	0.01	—	0.05	—	0.00
T site	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00
Al(VI)	0.11	0.04	0.17	0.05	0.03	0.08	0.01	0.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	—	0.00	0.00	0.00	—	0.00	—	—
Fe	0.42	0.44	0.38	0.43	0.43	0.43	0.36	0.45
Mn	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
Ni	—	0.00	—	—	0.00	0.00	0.00	—
Mg	0.53	0.56	0.49	0.56	0.56	0.63	0.66	0.59
Ca	0.84	0.90	0.79	0.90	0.93	0.81	0.91	0.90
Na	0.05	0.01	0.12	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M1,M2	1.97	1.98	1.96	1.98	1.98	1.99	1.97	2.00
Ca/Ca+Mg+Fe	0.47	0.47	0.48	0.48	0.48	0.43	0.47	0.46
Mg/Ca+Mg+Fe	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.34	0.34	0.30
Fe/Ca+Mg+Fe	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.19	0.23

Table 10. Chemical composition of the feldspars by EPMA.

Oxides	421-3	421-4	N-3	414-4	421-12	N-2B	L-12
SiO ₂	68.884	63.358	65.372	67.920	68.499	68.256	63.570
TiO ₂	0.023	0.064	—	0.065	0.030	0.001	0.009
Al ₂ O ₃	19.431	19.151	18.380	19.803	19.964	19.628	19.510
FeO*	0.253	0.485	0.103	0.424	0.063	0.079	0.151
MnO	—	0.016	0.003	0.025	—	0.016	0.013
MgO	—	0.017	—	0.224	—	—	—
CaO	0.912	0.027	0.026	0.182	0.569	0.479	0.860
Na ₂ O	10.181	0.754	0.730	11.109	11.392	11.248	1.559
K ₂ O	0.197	15.181	15.573	0.920	0.223	0.112	14.028
An	4.7	0.1	0.1	0.9	2.7	2.3	4.2
Ab	94.1	7.0	6.6	94.0	96.1	97.1	13.8
Or	1.2	92.8	93.2	5.1	1.2	0.6	81.9

이러한 분대 결과 각 zone은 관입암체와의 접촉부에 거의 평행하게 나타나지만, 옥곡리 접촉대에서는 zone 2만 좁은 범위로 분포한다. 이는 관입암체의 규모가 작기 때

문으로 해석된다. 한편 니전리 접촉변성대는 동부에서 zone 2가 아주 넓은 폭으로 분포하고, zone 3은 소규모인데, 이는 동쪽에서 관입한 척과리 화강섬록암의 관입에 따른 열적 효과를 받은 때문으로 사료된다.

변성작용의 고찰

관입암체 주변의 접촉변성암은 그 원암의 조성에 있어서 실트 내지 사질암들이 우세하고, 낮은 변성 온도 때문에 특징적인 변성 광물의 출현이 빈약하다. 한편으로 한 암석 내에도 일반적으로 공존하기 어려운 광물들이 함께 산출되고 있어 변성 교대작용의 가능성을 시사하고 있으나, 원암의 동일 층준을 추적할 수 없어 관입암체와의 거리에 따른 성분 변화를 해석하기 곤란하다. 그러나 특징적인 교대 광물의 출현 및 공생이 없고 반면에 동일 박편에서 대단히 얇은 박층이 교호하거나 상호 조성이 다른 박층이 있어, 원암의 조성 및 박층의 성분 차이 즉 원암의 불균

Table 12. Temperatures estimated from chlorite solid solution geothermometer at $P_1=2\text{ Kb}$.

Contact Aureole	Nijeonri Mass			Yuli Mass	
Zone	Diopside zone		Biotite zone		Biotite zone
Sample	91-7	N-3	N-4	421-4	414-2
T (°C) at 2 Kb	281.5 (1)	262±6 (3)	260±0 (2)	251±16 (4)	225.6 (1)

* (3) Number of analyzed samples

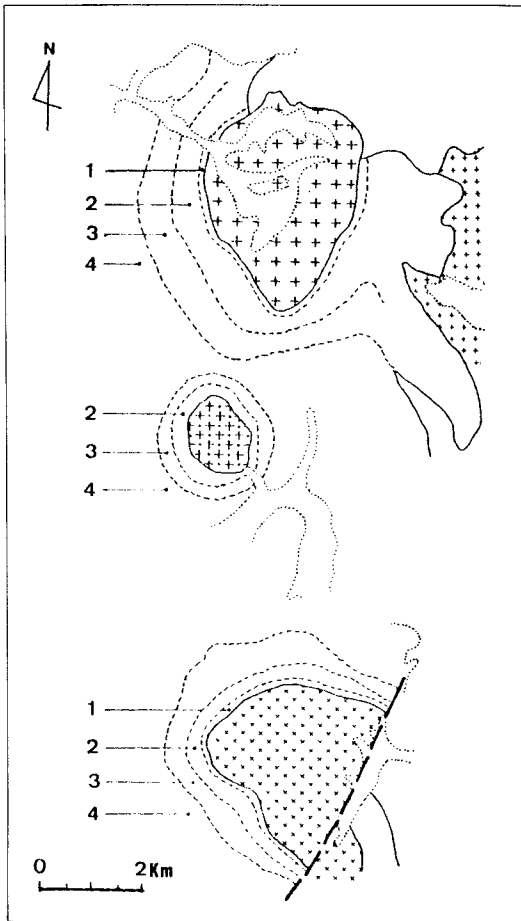


Fig. 16. Metamorphic zoning map of the contact aureoles in the study area. Zone 1; Diopside zone (transitional facies to hornblende hornfels facies), Zone 2; Biotite zone (upper part of albite-epidote hornfels facies), Zone 3; Chlorite zone (albite-epidote hornfels facies), and Zone 4; Unmetamorphosed zone (original sedimentary rocks).

질성에 따라 광물 종류의 변화가 생긴 것으로 해석함이 타당하며, 변성교대는 거의 없었던 것으로 보인다.

본 연구지역을 포함한 언양 지역의 화강암류는 P_{H_2O} 가

Table 11. Mineral parageneses and metamorphic zones of hornfelses from the contact aureoles in the study area.

Zone	Zone 3	Zone 2	Zone 1
Mineral	Chlorite zone	Biotite zone	Diopside zone
Quartz			
Plagioclase			
K-feldspar			---
Chlorite			---
Muscovite			
Biotite			
Epidote	---		
Actinolite			---
Hornblende			---
Diopside			---
Calcite			---
Metamorphic facies	Albite-epidote hornfels facies		Transitional facies ⁽¹⁾

* (1) Transitional facies albite-epidote hornfels to hornblende hornfels facies

0.5 내지 3 Kbr 정도의 범위로 비교적 수증기압이 낮은 것으로 밝혀져 있고, 이것은 화강암류가 천체에 관입한 것으로 관입 심도가 얕았음을 의미한다 (차문성, 1976; Min et al., 1982; Hong, 1985; 김재영, 1990).

Hong (1985)은 언양화강암의 페다이트질 알칼리장석의 용리에 의한 지질온도계의 변화폭이 작으며, 약 1 Kbr의 가상 압력하에서 350~446°C의 온도 조건에서 정확한 평형을 취한 것으로 해석하고, parental magma가 지표 환경에 가까운 천체까지 관입하여 급속히 결정화 되었음을 시사한다고 하였다.

일반적으로 접촉변성대의 열 (온도)은 관입암체의 규모와 특성 (마그마의 종류), 관입 심도 및 피관입암체의 특성에 따라 달라진다. Jaeger (1957)의 계산에 따르면 (단순한 암석의 열전도에 의한) 관입암체와 접하는 지점의 온도는 <모암의 지중 온도+관입암체의 온도>의 60% 정도이고, 관입암체 두께 (직경)의 1/10 정도 떨어진 거리

에서는 50%, 외곽부는 점점 낮아져 1/2 지점에서는 관입 암체 온도의 1/3에 불과하다.

연구 지역의 관입암체가 소규모이고, 관입 심도가 얇은 점, 관입암체의 온도가 낮은 점 (중심부의 중립의 입상조직에서 외연부의 반상조직으로 변화), 또한 마그마로부터 휘발성 물질의 이동이 거의 없었던 점 등이 접촉변성대의 온도 분포가 낮았음 (400°C 내지 이하)을 시사한다. 이러한 환경에서 접촉변성대의 광물간의 화학반응이 미약하였으며, 온도 구배가 낮음으로써 새로운 광물의 출현이 어려웠다고 해석된다.

결 론

1) 본 연구 지역의 화강암질암은 화강섬록암 (니전리, 옥곡)과 화강암 (울리)으로 분류되며, 칼크-알칼리계열의 화강암질 마그마에서 분화된 것으로 순차적인 정출작용을 시사하고 있다.

2) 접촉변성대는 비변성대에서 관입암체와의 접촉부에 이르면서 녹니석대, 흑운모대, 투회석대로 세분되며, 녹니석대는 녹니석-백운모, 녹니석-양기석 (-녹염석)의 조합을, 흑운모대는 녹니석-백운모-흑운모, 녹니석-양기석-녹염석 조합을, 투회석대는 흑운모-백운모 (-K-장석), 투회석-양기석-녹염석, 투회석-각섬석 조합을 보여준다.

3) 녹니석대와 흑운모대는 알바이트-녹염석 호온펠스상에 해당하고, 투회석대는 각섬석 호온펠스상으로 전이하는 경계부의 전이상으로 해석된다.

4) 접촉변성작용의 온도는 관입암체의 규모, 천치 관입 및 호온펠스의 구성 광물 등을 고려하면 매우 낮았을 것으로 추정된다 (400°C 또는 그 이하).

5) 호온펠스의 화학조성에서 다소 불규칙적인 것은 모암의 다양한 성분에 기인한 것으로서, 접촉변성작용에 따른 물질의 교대는 거의 없었던 것으로 해석된다.

감사의 글

본 연구는 1990년도 교육부 기초과학 육성연구비 (BSRI-90-503)의 지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 당국에 감사를 드린다. 또한 화학분석에 많은 도움을 준 일본 Tsukuba 대학의 김근수 박사와 야외 조사와 도면 제작을 위해 수고해 준 김재영 석사, 그리고 분석치를 처리하는 컴퓨터 프로그램을 제공해 준 캐나다 Memorial

대학의 성기웅 석사에게 심심한 사의를 표하는 바이다.

참고문헌

- 고태열 (1984) 경남 마산 부근 일대에 분포하는 화강암류의 암석학적 및 접촉변성작용에 관한 연구. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-59.
- 김규진 (1983) 경남 의창군 진동 부근 일대에 분포하는 화강암류와 니질암의 접촉변성작용에 대한 연구. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-54.
- 김재영 (1991) 경남 언양일대의 언양화강암체에 관한 암석학적 연구. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-38.
- 박양대, 윤희대 (1968) 울산도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 이민성, 강필중 (1964) 양산도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 이상원 (1987) 창녕 지역에 분포하는 접촉변성암의 변성상에 대하여. 부산대학교 사범대학 과학교육연구소보, 제 14권, p. 93-115.
- 이상원, 김병환, 김수철 (1989) 부곡-마금산 지역의 화강암질암과 접촉변성암에 관한 연구 (II) -호온펠스-. 부산대학교 사대논문집 제 20집, p. 227-248.
- 이윤중, 植田良夫 (1976) 한국 경상남도 언양도폭 및 북서부 울산도폭 지역산 화강암질암의 K-Ar 연대. 광산지질, 9권 3호, p. 127-134.
- 이윤중, 이인기 (1972) 언양도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 이준동 (1987) 경남 진동-마산 일대에 분포하는 화강암류와 접촉변성작용에 관한 연구. 서울대학교 대학원 이학박사 학위논문. p. 1-116.
- 차문성 (1976) 부산지역의 불국사 산성화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9권 2호, p. 85-106.
- Choi, H.I. (1985) Sedimentology and its implication for stratigraphic classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. J. Geol. Soc. Korea, v. 21, p. 26-37.
- Choi, H.I., Oh, J.H., Shin, S.C and Yang, M.Y. (1980) Geology and geochemistry of the Gyeongsang strata in Ulsan area. Korea Res. Inst. Geosci. & Min. Resources.
- Clarke, F.W. (1924) The data of geochemistry. U.S. Geol. Surv., Bull. 770p.
- Engel, A.E.J. and Engel. C.G. (1962) Progressive metamorphism of amphibolite, northwest Adirondack Mountains, New York. In Petrologic Studies (Buddington Vol.), Ed. Engel, A.E.J. et al., Geol. Soc. Am., p. 37-82.
- Evans, B.W. and Guidotti. C.V. (1966) The sillimanite-potash feldspar isograd in western Maine, U.S.A. Contrib. Mineral. Petrol., v. 12, p. 25-62.
- Foster, M.D. (1962) Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 414A, p. 27.
- Fyfe, W.S., Turner, F.J. and Verhoogen, J. (1958) Metamorphic reactions and metamorphic facies. Geol. Soc. Am. Memoir, v. 73, p. 259.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F. Haskin, L.A. and Korotev, R.L. (1983) The "North American shale composite" compilation, major and trace element characteristics (unpublished).
- Guidotti, C.V. (1970) The mineralogy and petrology of the transition from the lower to upper sillimanite zone in the Oquossoc area, Maine. J. Petrol., v. 11, p. 277-336.
- Hong, Y.K. (1985) Geochemistry of the Cretaceous Eonyang

- and Yucheon granites in the southeastern Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 21, p. 90-108.
- Irvine, T.N. and Barager, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, v. 8, p. 528-548.
- Jaeger, J.C. (1957) The temperature in the neighborhood of a cooling intrusive sheet, *Am. J. Sci.*, v. 255, p. 306-318.
- Lambert, R.St.J. (1959) The mineralogy and metamorphism of the Moine schists of the Morar and Knoydart districts of Inverness-shire. *Trans. R. Soc. Edinb.*, v. 63, p. 553-588.
- Leake, B.E. (1978) Nomenclature of amphiboles. *Mineral. Magazine*, v. 42, p. 533-563.
- Mason, B. and Moore, C.B. (1982) Principles of geochemistry (4th ed.).
- Min, K.D., Kim, O.J., Yun, S.K., Lee, D.S. and Joe, S.W. (1982) Applicability of plate tectonics to the post-late Cretaceous igneous activities and mineralization in the southern part of South Korea (I). *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 15, p. 123-154.
- Miyashiro, A. (1958) Regional metamorphism of the Gosai-sayo-Takanuki district in the central Abukuma Plateau. *Tokyo Univ. Fac. Sci.*, sec. 2, p. 219-272.
- Oki, Y. (1961) Metamorphism in the northern Kiso Range, Nagano prefecture, Japan. *J. Geol. Geogr.*, 32, p. 479-496.
- Park, K.H. and Kim, S.E. (1985) Ash-flow tuffs of the Chisul-ryoung volcanic formation and associated welded tuff intrusion, Weolseong district, southern Korea. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 18, p. 125-134.
- Ronov, A.B. and Migdisov, A.A. (1971) Geochemical history of the crystalline basement and sedimentary cover of the Russian and North American platforms. *Sedimentology*, v. 16, p. 137-185.
- Seki, Y. (1957) Petrological study of hornfelses in the central part of the Median Zone of Kitakami Mountainland, Iwate Prefecture. *Saitama Univ. Sci. Rep., Ser.B*, 2, p. 307-361.
- Seki, Y. (1961) Calcareous hornfelses in the Arisu district of the Kitakami mountains, northeastern Japan. *Jap. Geol. Geogr.* 32, p. 55-78.
- Streckeisen, A. (1976) To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, v. 12, p. 1-33.
- Weeks, W.F. (1956) A thermodynamical study of equilibrium relations during metamorphism of siliceous carbonate rocks. *J. Geol.*, v. 64, p. 245.
- Wright, J.B. (1969) A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geol. Mag.*, 106, p. 370-384.

