

## 장군광산 주변의 변성이질암에서의 누진변성반응 계열

안건상\* · 정현희\* · 이현구\*

### Prograde Reaction Series in Metapelites around the Janggun Mine

Kun-Sang Ahn\*, Hyun-Hee Jeong\* and Hyun Koo Lee\*

**ABSTRACT:** The Janggun mine area is occupied by the Proterozoic and the Paleozoic meta-pelites, which are intruded by the Jurassic Chunyang granite.

The metamorphic terrain is divided into four zones of progressive metamorphism on the basis of mineral assemblages. The zones are chlorite zone, staurolite zone, andalusite zone, sillimanite zone ascending order. Boundary lines between the zones resemble outline of the Chunyang granite mass.

Isograd reactions are chlorite+chloritoid+muscovite=staurolite+biotite+quartz+water, staurolite+chlorite+muscovite+quartz=andalusite+biotite+water, and staurolite+muscovite+quartz=andalusite+biotite+garnet+water between the chlorite zone and the staurolite zone, the staurolite zone and the andalusite zone, and the andalusite zone and the sillimanite zone, respectively. They are univariant reactions in KFMASH component system. Metamorphic conditions estimated from garnet-biotite geothermometers and phase equilibria are 530°C and lower than 4 kb.

## 서 론

본 연구는 춘양화강암 동쪽 연변부에 분포하는 변성이질암에 관한 변성암석학적 연구이다. 이 변성대의 이질 및 사질암에서 출몰하는 변성광물과 광물조합을 기초로 변성분대를 재분할하고, 누진변성반응계열을 밝히는 것을 주목적으로 하였다. 또한 이 연속반응계열을 암석발생학적 그리드에 적용하여 해석하며, 6성분계에서의 불연속반응들에 대한 물리적 조건을 밝히는데 주력하였다.

연구 지역은 경상북도 봉화군 소천면 서천리 일대로, 한국 최대의 망간광산과 연·아연·은 광상으로 잘 알려진 장군광산(북위 36.51°, 동경 129.04°)이 위치하는 곳이다. 이 지역은 여러종류의 변성암류가 분포하며, 변성이질암 중에는 남정석과 십자석이 공존하는 것도 있어 변성암석학적으로도 관심이 높은 곳이다. 본 지역의 일반지질에 관하여는 김옥준(1962), 이대성(1967), 황인전(1968), 황덕환, Reedman(1975), 이현구(1980), Imai 외(1982) 등이 있다.

이 지역에 대한 변성학적 연구로는 김형식(1975)에 의한 영남육괴의 김천-울진간의 광역변성에 대한 연구

보고가 있다. 그는 변성작용의 시기를 고생대에서 중생대 초기로 판단하였으며, 변성광물 조합에 따라 A(녹색편암상), B(녹염석각섬암상), C(각섬암상)대로 나누었다. 대부분의 조사지역은 대표적인 광물조합이 흑운모-홍주석-보통각섬석-녹염석인 B대에 속한다.

접촉변성작용에 대한 연구로는 이현구(1980), Imai 외(1982)과 이것을 수정한 이현구 외(1992)이 있다. 위 연구는 장군광산 주변의 울리층을 포함한 변성암류를 대상으로, 변성지시광물의 출현과 소멸에 따라 녹니석-석류석대, 십자석대, 규선석대로 나누었다. 또한 그들은 광물조합과 조직을 자세히 기재하였다. 그러나 그들은 변성암의 기재와 변성분대에 중점을 두어, 분대 사이에서 일어나는 경계 반응과 상평형 관계에 대해서는 다소 미진한 점이 있어 본 논문에서는 이점에 중점을 두어 연구를 수행하였다.

## 지질 개요

본 연구 지역은 영남육괴의 동북단에 위치하며, 경상계의 북쪽에 인접한 지역이다. 연구지역은 재산단층을 경계로 남부는 시생대의 원남층이 분포한다. 이 단층 이북의 서쪽에는 중생대의 춘양화강암류가 넓게 분포한다. 이 화

\*충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

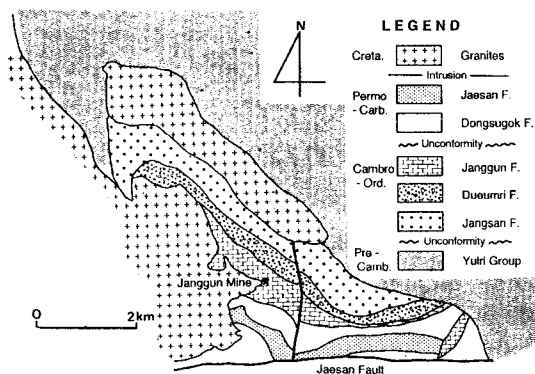


Fig. 1. Geologic map in the environs of the Janggun mine.

강암체의 동쪽 인접지역에는 원생대지층인 울리층과 고생대의 캄브로-오오도비스기에 해당하는 장산규암층, 두음리층, 장군석회암층, 석탄기의 동수곡층과 폐름기의 재산층이 분포한다 (Fig. 1). 이 층들의 층면과 편리면은 대부분 EW-NW의 주향을 가지고 분포하고 있다. 본 연구는 재산층 이북에 분포하는 변성이질암 및 사질암을 대상으로 하였으며, 석회질암으로 구성된 장군석회암층은 이번 연구에서 제외하였다. 연구지역의 층서, 지질시대 및 지질구조는 이현구 외 (1992)의 논문을 인용하였다.

중기 원생대의 울리층군은 장군광산의 북동쪽에서 동쪽에 걸쳐 넓게 분포한다. 일부 지역에서 캄브로-오오도비스기의 기저인 장산규암층에 부정합으로 덮혀 있다. 또한 북부에서는 춘양화강암과 접촉하고 있다. 구성암류는 주로 사질암, 이질암이 변성된 천매암이며, 재결정된 석회암이 협재되어 있다. 화강암체와의 접촉부 근처에서는 장경이 10 수 mm까지 성장한 홍주석의 반상변정이 관찰된다.

고생대 지층의 최하부를 이루는 장산규암층 (캄브리아기)은 울리층을 부정합으로 피복하며, 울리층과의 접촉부 근처 수 개의 층준에는 최대 장경이 20 cm를 넘는 렌즈상의 역을 포함한다. 바나디움을 함유하는 백운모가 들어 있는 일부 규암은 담녹색을 나타낸다. 그러나 본층 남쪽의 두음리층과 인접한 곳에서는 거의 역을 찾아보기 힘들다. 구성암류는 백운모를 포함하는 괴상의 규질암으로 구성되어 있으나, 곳에 따라서는 편리가 잘 발달된 백운모-석영편암이 산출된다. 화강암체와 가까운 암석에서는 석영, 백운모와 더불어 규선석이 산출되며, 소량의 전기석, 흑연, 자철석, 저어콘을 함유하는 경우도 있다.

장산규암층을 정합으로 피복하고 있는 두음리층의 구성암류는 니질 또는 사질 편암이며 두께가 얇은 수 매의 결정질석회암이 협재되어 있다. 구성광물은 석영, 백운모, 흑운모이며 곳에 따라 홍주석, 십자석이 산출된다.

연, 아연, 은 광상을 배태하고 있는 장군석회암층은 전반적으로 재결정작용을 받고 있어, 결정질 석회암, 돌로마이트, 돌로마이트질 석회암 및 석회질아암 등으로 구성되어 있다.

동수곡층은 장군석회암층을 평행부정합으로 덮고있는 석탄기 지층이다. 이 지층은 평안계의 홍점층에 대비되며, 구성암류는 비교적 조립의 이질 편암이다. 주 구성 광물은 석영, 백운모, 흑운모이며 석류석, 홍주석, 십자석의 반정들이 관찰된다. 이 층에서는 남정석의 잔유물이 관찰된다.

동수곡층을 정합으로 피복하는 재산층은 폐름기에 해당하고, 평안누층군의 사동층에 대비되며 (김옥준 외, 1962), 수 매의 무연탄층이 협재되어 있다. 본층의 구성암류는 규질-이질암 기원의 변성암류로서, 흑연-석영편암, 운모편암, 십자석-석영-운모편암 등으로 되어 있다.

본 역의 화성암류로는 서측에 광범위하게 발달한 춘양 화강암체와 북측의 두음리, 울리에 이르는 계곡을 따라 NW-SE방향으로 관입한 소규모의 화강암체, 염기성 안산암맥 및 그라노파이어 등이 있다. 상기의 두 화강암체는 모두 백운모를 이용한 K-Ar연대는  $136 \pm 4.2 \sim 147 \pm 4.5$  Ma (이현구 외, 1992)로서 주라기의 대보화강암에 해당된다. 이들 화강암류는 조립 내지 중립질의 복운모화강암과 우백질 백운모화강암 그리고 세립의 각섬석화강암으로 구성되어 있다. 염기성 안산암질 암맥은 원남층에서 춘양 화강암류에까지 광범위한 분포를 보이고 있어 본지역에서 가장 후기의 암석으로 간주된다. 또한 그라노파이어는 원남층중에 배태된 산맥 연, 아연광상 부근에 타원상의 분포를 보이고 있다. 본 암석은 카리장석, 석영, 사장석 및 알카리각섬석 등으로 구성되어 있다.

### 광물조합과 변성분대

본 지역의 분포하는 암류 중 석회질암을 제외한 변성이질암 및 변성사질암에 대한 변성 광물조합을 토대로 변성대를 나누었다. 변성대를 나눌 때 각 분대 사이에는 경계반응을 설정하였으며, 이 반응들은 6성분계에서의 불연속반응이다. 이 변성대에는 알루미늄이나 규산염광물인 홍주석, 규선석, 남정석 모두 출현하나 반응에서는 하나의 광물로 취급하였으며, 이 광물들의 출몰을 변성분대의 기준으로 하지 않았다. 세 알루미늄 규산염광물의 출몰과 변성분대의 관계는 나중에 기술한다.

Fig. 2는 관찰된 광물조합과 전자현미분석 (EPMA)을 실시한 시료의 위치를 나타낸 것이다. 각 분대에서 특징적인 광물조합을 갖는 시료들을 골라 Table 1에 나타냈다. 전체적으로는 동쪽 지역으로 부터 서쪽의 화강암체에 가

Table 1. Mineral assemblage in the four zones.

zone	Qtz	Mus	Chl	Bt	Als	Gar	St	Ctd	Sample No.
A	O	O	O	O	X	X	X	X	J1070, J1281, J1331
	O	O	X	X	O	O	X	O	J1224
	O	O	O	O	X	O	X	X	J1048, J1335
	O	O	X	X	O	X	X	O	J881224-7
B	O	O	O	O	X	X	O	X	J1124, J1330, J1328
	O	O	O	X	O	X	O	X	J1210, J1206
	O	O	X	O	X	X	O	X	J1125, J1211, J1185
C	O	O	X	O	X	O	O	X	J1212, J1024, J1176
	O	O	X	O	O	X	X	X	J1205, J1265, J1219
	O	O	X	O	O	X	O	X	J1171, J1342, J1341
	O	O	X	O	O	O	X	X	J1055
	O	O	X	O	O	X	O	X	J1216, J1128, J1199
	O	O	X	X	X	O	O	X	J1198
	O	O	X	O	X	O	X	X	J1116
	O	O	X	O	X	X	X	X	J1165
	O	O	X	X	X	X	O	X	J1121
	D	O	O	X	O	A/S	X	X	X
O		O	X	X	S	X	X	X	J1145, J1179
O		O	X	O	S	O	X	X	J1266

가워질수록 고온의 광물조합이 출현한다. 그러나 울리층에서의 광물조합은 특정한 지역적 분포를 보여주지 않고, 화강암체와의 거리와도 무관한 고온 광물조합이 분산분포하여 변성분대를 설정하기 어렵다. 울리층은 화강암체에 의한 접촉변성작용 이전의 어떤 변성작용, 예를 들어 광역변성작용의 영향이 강하게 남아 있는 것으로 해석되며, 울리층을 포함한 변성분대는 재고되어야 한다. 따라서 변성분대의 설정은 고생대의 지층에 국한하였으나, 동일 광물조합을 가진 울리층의 시료도 비교를 위해 설명에 첨부한다. 고생대 지층에서 변성광물조합과 특징적인 광물의 출현 또는 소멸을 근거로 4개로 변성분대를 설정하였다. Fig.3은 광물의 출몰상태를 도시하였고, Fig.4는 변성분대의 공간적 분포를 나타낸 그림이다. 네 변성대는 변성도가 높아지는 순서로 녹니석대, 십자석대, 홍주석, 규선석이며, 분대의 경계선은 대체적으로 화강암체의 외곽선과 유사하다. 각 변성분대에서의 광물조합과 조직을 간략히 기술한다. 이 변성대에서 취급하는 암석시료에서 석영과 백운모는 항상 존재한다.

녹니석대

변성도가 가장 낮은 녹니석대의 특징적인 광물조합은 녹니석과 흑운모이며, 여기에 석류석이 첨가된다. 그러나 여기서는 십자석이 출현하지 않는다. 이 대는 두음리층, 장산규암층, 동수곡층, 재산층의 동쪽끝에 해당하는 지역이다. 엄격하게는 울리층을 분대할 수 없으나 북부화강암의 동측에 분포하는 대부분의 암석에서는 A대와 같은 광물조합을 나타낸다.

주 구성암석은 세립질 천매암으로 곳에따라 입자의 크기가 증가하는 곳도 있다. 이층들의 암석중 화강암으로부터 가장 멀리 떨어진 곳에서는 주로 세립의 석영과 백운모에 더불어 녹니석 또는 흑운모가 관찰된다. 변성도가 상승함에 따라 백운모, 녹니석이 풍부한 박층과 흑운모, 녹니석이 풍부한 박층이 교대로 나타나는 호상구조가 발달된다. 이런 흑운모, 녹니석이 풍부한 박층에 때때로 최대 0.5 mm의 석류석이 산출된다. 동수곡층, 재산층의 일부 암석에서는 클로리토이드와 홍주석이 공존하는데, 클로리토이드는 장경 0.2~0.6 mm 크기의 타형이며 담황색 내지 담청록색의 다색성을 나타낸다. 재산층의 구성암은 세립의 세일로서 현미경하에서 석영, 백운모, 녹니석이 관찰된다. 이 분대 (zone)를 구성하는 광물조합을 Thompson (1957)의 AFM도에 나타내면 그림 7-(1)과 같다.

십자석대

이 분대에 해당하는 거의 모든 시료에는 십자석이 산출되며, 특징적인 광물조합은 십자석과 녹니석을 포함하는 조합이다. 이 대에서는 홍주석과 흑운모가 산출되지만, 두 광물이 공존하는 경우는 없다. 이 대는 장군봉을 중심으로 한 두음리층, 동수곡층, 재산층의 일부가 포함되는데, 울리층에서도 소수이지만 동일 광물조합을 나타내는 시료가 관찰된다.

십자석은 장경 0.1mm에서 1.0mm의 자형 또는 반자형의 결정으로 산출되며, 세립의 석영 입자를 포유하는 경우가 많다. 십자석의 주위나 내부의 틈새에 자형 또는 반자형의 자철석 광물이 발달되어 나타난다. 십자석, 흑운모와 더불어 산출하는 녹니석은 담황록색 내지 녹색의 다색성을 나타낸다. 이 대의 시료 중 가장 자주 관찰되는 광물조합은 십자석+흑운모이다. 이 대에서는 장경이 2 mm에 이르는 홍주석이 관찰되지만 십자석과 공존하는 것은 소수이다. 시료 J1210에서는 남정석의 커다란 가상이 관찰되는데, 대부분 홍주석으로 치환되고, 소량의 잔정이

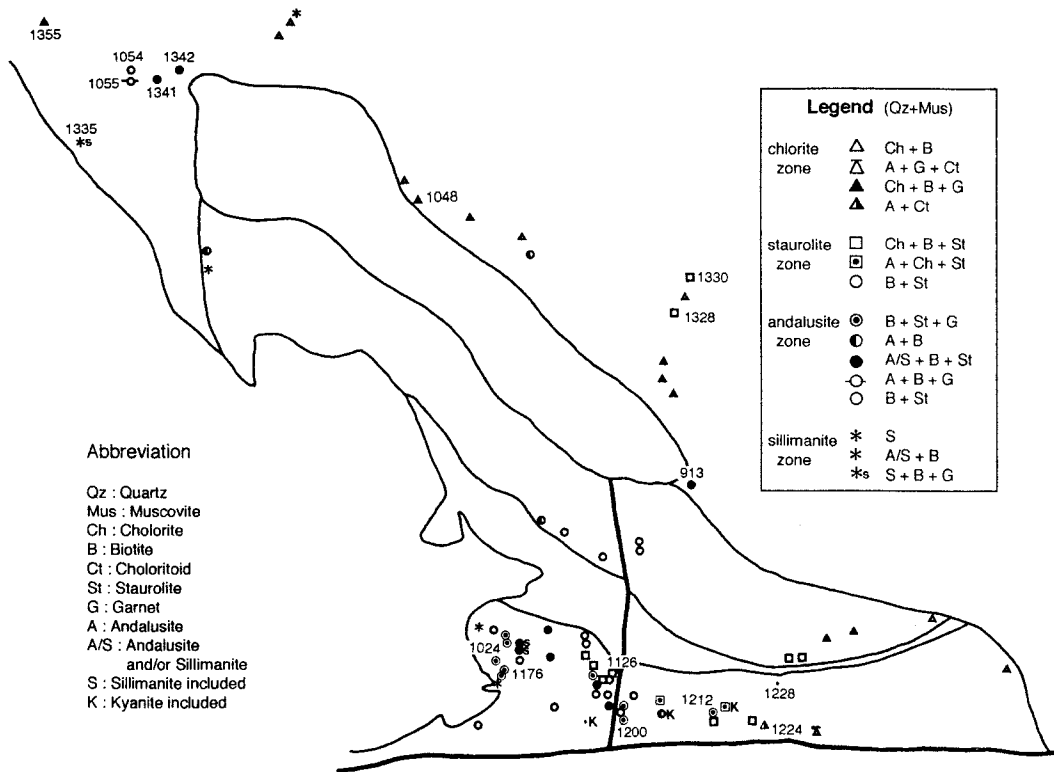


Fig. 2. Mineral assemblages of pelitic and psammitic rocks in the Janggun mine area.

	Chlorite Zone	Staurolite Zone	Andalusite Zone	Sillimanite Zone
Quartz				
Muscovite				
Chlorite				
Biotite				
Garnet				
Staurolite				
Chloritoid				
Alumino-silicates		A	S	?
		K		

Fig. 3. Metamorphic mineral zoning.

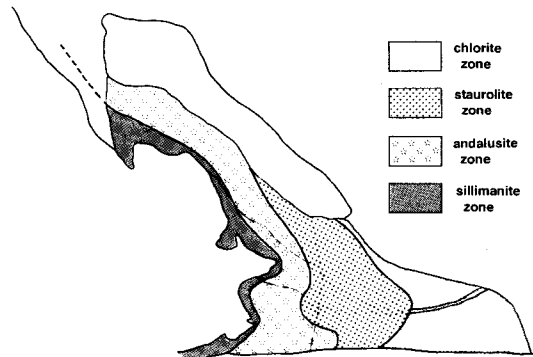


Fig. 4. Map showing the areal distribution of metamorphic zones in the Janggun mine area.

보인다. 이 분대의 광물조합을 근거로 한 AFM도는 Fig. 7-(4)와 같다.

**홍주석대**

이 분대 역시 십자석의 산출이 현저하며, 홍주석+흑운모를 포함하는 광물조합이 특징적이다. 이 분대는 홍주석+흑운모의 공생 이외에도 가장 다양한 광물조합을 보여준다. 즉, 흑운모+석류석+십자석과 홍주석+흑운모+십자석의 광물조합도 자주 관찰되며, 십자석대에서 자주

관찰되는 흑운모+십자석의 조합도 다수 있다. Fig. 2에는 표시하지 않았으나 석류석+십자석 (J1198), 흑운모+석류석 (J1116)의 광물조합이 나타나며, 사질암에서는 흑운모 또는 십자석이 백운모, 석영과 함께 산출된다. 홍주석대와 규선석대의 경계를 규선석의 출현으로 하지않고 십자석의 소멸로 하였기 때문에, 이 분대에는 홍주석과 규선석이 공존하는 경우가 있다 (J1171, J1172). 시료 J1187에서는

남정석의 잔정이 홍주석과 함께 산출하나, 규선석과 공존하는 경우는 없다. 울리층의 시료 J1055에서는 홍주석이 흑운모, 석류석과 함께 산출된다. 또한 시료 J1342, J1341도 홍주석대와 같은 광물조합을 보여준다.

이 분대에서의 홍주석은 장경 0.8~2.0 mm의 자형 내지 반자형의 반상변정으로 다량의 석영을 포유하며, 세립의 탄질물이 결정 중앙부에 농집되어 있다. 흑운모의 상당 부분도 이 홍주석에 포유되어 산출한다. 여기에 공존하는 십자석은 0.4~0.8 mm의 반자형 내지 타형으로 홍주석의 반상변정 사이에 접재하여 분포한다. 이 대의 석류석은 직경 1.2~3.0 mm의 자형 내지 반자형의 반상변정으로 세립의 석영, 백운모, 십자석을 포유한다. 이 분대를 구성하는 광물조합에 대한 AFM도는 Fig. 7-(6)이다.

### 규선석대

이 분대에서의 특징은 십자석이 산출되지 않으며, 홍주석이 불안정한 점이다. 이 대에서는 규선석과 흑운모를 포함하는 광물조합이 특징적이지만, 때때로 홍주석의 잔류물이 규선석과 함께 산출된다. 이 대에서는 춘양화강암의 외연부를 따라 좁은 대상으로 분포하나, 북부의 제비산 부근에서는 상당히 넓은 범위를 갖는다. 규선석은 침상의 집합체 또는 장주상으로 나타나며, 흑운모, 자철석을 수반하는 경우가 많다. 특히 이 대에서 규선석과 흑운모가 석류석과 공존하여 산출함은 십자석의 분해반응이 완결된 것으로 해석할 수 있다. 울리층의 시료 J1335에서는 규선석이 흑운모, 십자석과 함께 관찰된다. 이 대의 광물조합은 Fig. 7-(8)에 나타냈다.

### Alumino silicate의 공생관계

이 지역에서는 홍주석, 규선석, 남정석의 세 가지  $Al_2SiO_5$  광물이 산출된다. 홍주석은 단독으로 산출하는 경우가 많으며, 홍주석대의 고온부와 규선석대의 일부 암석에서는 규선석과 홍주석이 공존한다. 십자석은 항상 홍주석과 함께 산출되나, 규선석과 공존하는 경우는 발견되지 않았다.

이 변성대에서 가장 자주 관찰되는 것은 홍주석이며, 녹니석대에서 홍주석대까지는 안정상으로, 규선석대에서는 준안정상으로 산출된다. 대부분의 홍주석은 장경 0.8~2.0 mm의 자형 내지 반자형의 반상변정으로 산출된다. 많은 홍주석의 반정은 석영, 탄질물을 포유하며, 홍주석대에서는 흑운모 또는 십자석을 포유하기도 한다.

남정석은 십자석대와 홍주석대에 해당하는 동수곡층, 재산층에서 산출된다. 남정석은 장경 0.3~0.7 mm의 자형

내지 반자형으로 홍주석의 반상변정에 포유되어 산출한다. 즉, 시료 J1187와 J1210에서는 남정석이 홍주석으로 교대된 조직을 나타낸다. 벽개면에 주목하면 홍주석을 지나 는 벽개면은 남정석을 지나지만, 남정석을 지나 는 벽개면은 반드시 홍주석을 지나지는 않는다. 따라서 남정석은 홍주석의 생성 이전에 형성된 광물로서, 십자석대와 홍주석대에서는 불안정한 광물로서 잔류한 것으로 판단된다.

규선석은 홍주석대의 최고온부에서 출현하기 시작하여 최고온부인 규선석대의 대부분의 시료에서 관찰된다. 규선석의 산상에는 두 종류가 인지되는데, 그 하나는 미세한 침상결정들의 집합체로 출현하는 경우이며, 다른 하나는 드물기는 하지만 장주상의 자형을 나타내며 단독으로 존재하는 경우이다. 규선석의 침상결정은 흑운모를 교대하여 출현하기도 한다. 홍주석과 공존하는 규선석은 그 조직으로 판단할 때 홍주석이 전이되어 생성된 것으로 보이며, 이 변화에는 두 가지 조직이 관찰된다. 첫째는 규선석이 직접 홍주석을 교대한 조직이다. 이 경우 규선석은 모체가 되는 홍주석과 동시에 소광을 나타내기도 한다. 둘째는 거정의 홍주석 가상내에 백운모, 흑운모와 함께 산출하며, 흑운모 내부에 까지 무수한 침상의 규선석이 발달되어 있다. 시료 1335에는 두 조직이 함께 관찰된다.

규선석의 산출조직과 광물조합을 고려하면 다음과 같은 추론이 가능하다. 홍주석대의 고온부에서 홍주석과 규선석의 전이가 일어나 십자석을 포함하는 광물조합에 참가되었다. 이 때 생긴 규선석은 첫째 조직을 나타낸다. 온도가 상승함에 따라 홍주석은 더욱 불안정하게 되고, 홍주석대와 규선석대의 경계부에서 십자석의 분해반응이 일어나 전이광물이 아닌 새로운 규선석이 출현하였다.

결론적으로, Fig. 8과 같이 이 지역에서의  $Al_2SiO_5$  광물은 남정석 홍주석 규선석의 순서로 출현했다. 이 변성대는 남정석의 안정영역에서 출발한다. 십자석의 출현과 함께 십자석대가 시작되며, 비슷한 시기에 홍주석이 안정하게 된다. 이 때부터 남정석은 불안정한 상이되며, 남정석을 중심으로 홍주석이 중첩되듯이 성장하였다. 온도가 상승함에 따라 홍주석이 흑운모와 공존하는 홍주석대가 시작된다. 홍주석대의 고온부에 이르러 홍주석은 불안정하며, 규선석이 안정하게 된다. 따라서 홍주석의 일부는 규선석으로 전이되고, 온도가 좀더 상승하면 십자석이 소멸하는 규선석대가 시작된다. 이 대에서는 홍주석과는 별개의 규선석이 출현한다.

### 광물 화학

본 역에 산출되는 주요한 광물들의 화학조성을 알기

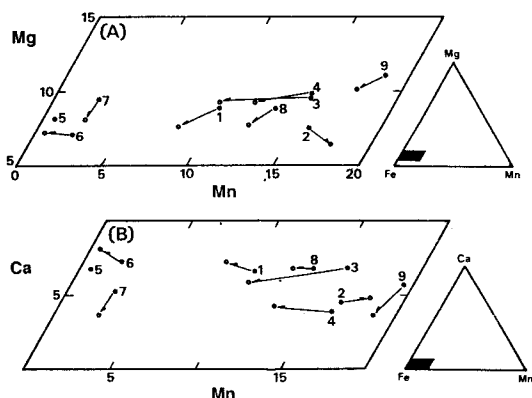


Fig. 5. Parallelogram in the Mg-Fe-Mn triangular diagram (A) and the Ca-Fe-Mn triangular diagram (B), showing the compositional variation from core to rim with single garnet grains. Close circle; core and open circle; rim. 1; J1176, 2; J1335, 3; J1055, 4; J1341, 5; J1024A, 6; J1024C, 7; J1200, 8; J1355, and 9; J1048A.

위하여, 각 분대에서 대표적인 광물조합을 갖는 시료를 선별하여, 총 15개의 시료에 대하여 EPMA에 의한 성분 분석을 실시하였다. 분석을 실시한 시료는 Fig. 2에 표시하였다. EPMA분석은 일본 와세다대학 이공학부의 JXA50-A를 사용하였다. 분석시 조건은 가속전압이 15 kv, 시료 전류가 페리크레스 (MgO)상에서  $1 \times 10^{-8}$  A, 빔 (beam)의 직경이  $3 \mu\text{m}$ 이다. 분석치에 대한 보정은 Bence & Albee법을 사용하였다. 이 논문에서는 대표적인 AFM광물만을 대상으로 그 산상과 조성을 기술하며, 불투명 광물의 상평형과 보다 자세한 광물화학은 준비중인 논문에서 취급한다.

### 석류석

석류석은 전 변성대에서 자형 또는 반자형으로 출현한다. 석류석이 흑운모, 백운모와 경계를 이룰 때는 깨끗한 자형을 보이나, 석영, 홍주석, 십자석 또는 녹니석과의 경계는 다소 불규칙하며 석류석이 내부쪽으로 파인 형태를 보여준다. 반상변정으로 산출하는 경우도 있으며, 최대의 크기는 5 mm에 달하지만 보통은 1~2 mm 정도이다. 또 J1048과 같이 암석중에 한정된 층리면에만 산출하는 경우도 있다.

석류석의 화학조성은 Table 2, 3과 같다. 본역의 석류석은 알만딘 (Fe)의 단성분에 가까운 조성을 보이며 (67~86 mol %), 소량의 그로슬라 (Ca), 스페셜틴 (Mn), 파이로프 (Mg)를 포함한다. MgO, CaO는 1~2 wt% 정도로 전 변성분대를 통해 거의 변화가 없다. 그러나 MnO는

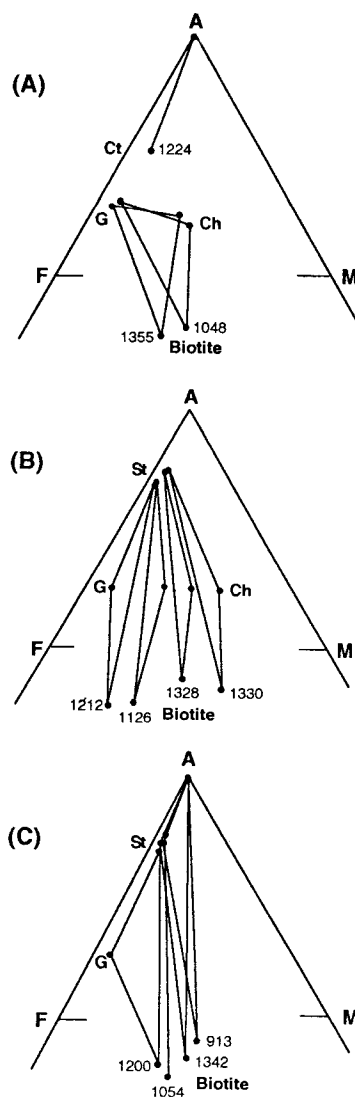


Fig. 6. Composition of minerals from the chlorite zone (A), the staurolite zone (B), and the andalusite zone (C), shown in a Thompson projection (1957).

최대 7.14 wt%에서 0.21 wt%까지 변화의 폭이 크다. 녹니석, 흑운모와 공존하는 녹니석대의 석류석에서 MnO가 최대치를 나타내지만, 이를 제외하면 변성도가 높은수목 망간의 함유량을 많다. 이런 경향은 광물의 중앙부 주변부의 어느쪽을 비교하여도 마찬가지다 (Fig. 5). 광물은 중앙부보다 주변부가 Mn성분의 함유량이 적으며, 시료 J1055의 경우는 주변부로 갈수록 Mn이 연속적으로 단조롭게 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 최고온부를 나타내는 시료 J1335 (Si+Ga+Bt)는 주변부로 갈수록 Fe와 MnO의 함유량이 증가하는데, 이는 후퇴변성작용의 결과

로 해석할 수 있다 (Tracy and Robinson, 1976).

석류석의 조성은 생성시의 P-T조건을 잘 반영하는데 (Tracy et al., 1976; Banno, 1981), 본 지역의 조성변화는 연속적이며 특별히 불연속적인 점을 발견할 수 없다. 이런 사실은 이 지역의 석류석은 단일 사이클의 온도 상승 과정에서 성장을 계속했음을 시사한다. 또한 시료 J1335 이외는 역누대구조를 가진 것이 없다는 사실은 이 변성대에서 후퇴변성작용은 그리 활발하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

### 십자석

십자석은 십자석대와 홍주석대에서 자형 내지 반자형의 반상변정으로 산출하며, 큰 결정은 1 mm에 달한다. 드물게 쌍정으로 나타나며, 포유물을 포함하는 경우도 있다. 포유물은 대부분 석영이며 특히, 백운모가 적은 시료에서 다량의 포유물을 함유한다. 분석한 화학조성은 Table 4, 5와 같다. 이 변성대의 십자석은 주로  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , FeO, MgO로 구성되어 있는 점은 다른 변성대에서의 그것과 유사하나, 미량성분인 Mn과 Zn의 함유량은 이상하게 높다. MnO함유량의 최대치는 0.84 wt.%에 이르며, ZnO의 함유량은 최대 1.31 wt.%에 달한다. 십자석의 ZnO의 함유량은 원생대 울리층 (0.66~1.31)이 고생대 지층 (0~0.17)보다 훨씬 높아, 평균으로 따지면 15배 가까이 된다.

### 흑운모

흑운모는 전 조사지역에서 자형 내지 반자형의 판상 결정으로 산출되며, 크기는 0.03~0.1 mm 정도이다. 일반적으로 편리면에 평행하게 발달하나, 울리층에서는 단독 결정으로서 편리면을 사교하거나 다른 광물내부에 포획되어 산출되기도 한다. 대부분의 흑운모는 갈색-무색의 다색성을 보이거나, 두울리층에서 산출하는 흑운모 중에는 녹색에서 무색의 다색성을 보이는 것이 있다. 녹색흑운모 중에는 녹색석을 수반하는 경우도 있다. 분석한 흑운모의 화학조성은 Table 6과 같다.

흑운모의 Fe/(Fe+Mg)값은 0.40~0.74이며, 광물조합에 따라 차가 뚜렷이 나타난다. 흑운모 중의 Ti함유량은 무수산소가 22일 때 0.2 정도로 전지역에서 거의 일정하다. 각 변성분대와 광물조합에 따른 Fe/(Fe+Mg)값을 비교하면 다음과 같다. 십자석대에서는 십자석 녹니석과 공존하는 것 (0.40~0.66) 보다 십자석 석류석과 공존하는 시료 (0.74)에서 철이 풍부하다. 홍주석대에서 십자석 석류석과 공존하는 것 (0.61), 또는 십자석과 공존하는 것 (0.58)이

십자석 홍주석과 공존하는 것 (0.48-0.53) 보다 철이 풍부하다. 이 관계는 Fig. 6에 잘 나타나 있다.

### 백운모

백운모는 석영과 함께 모든 변성대에서 다량으로 출현한다. 일반적으로 편리 방향으로 배열한 자형 내지 반자형의 판상 결정을 이룬다. 입자의 크기는 보통 0.05~0.2 mm이지만, 드물게 1.3 mm에 달하는 경우가 있다. 그러나 홍주석이 변질된 백운모는 극히 세립이다. 분석한 화학조성은 Table 7과 같다.

원생대 지층인 울리층에서는 편리를 크게 사교하여 성장한 백운모가 관찰된다. 이렇게 사교한 백운모를 경계로 편리가 어긋나 있음을 볼 수 있다. 따라서 이런 백운모는 연구 지역에서의 주된 변성작용인 접촉변성작용에 의해 새롭게 생긴 것을 의미한다. 조직으로 판단할 때, 새로운 백운모는 접촉변성작용 이전에 이미 생겼던 불연속벽계를 따라 성장한 것으로 보인다. 일반적으로 이런 불연속벽계는 약-중 정도의 변성작용에 수반되며, 변성 말기에 생긴 것으로 알려져 있다 (Iwamatsu, 1979). 그러나 고생대층에는 이런 조직이 관찰되지 않는다. 이런 조직의 차이는 고생대 지층은 울리층이 받았던 첫번째 변성을 받지 않았을 가능성과 함께 고생대 지층을 지배한 변성작용은 접촉변성작용 하나일 가능성도 시사한다.

### 녹니석

녹니석은 두 가지의 산출상태가 관찰된다. 그 하나는 편리의 방향으로 배열한 판상결정으로 출현된다. 장경은 일반적으로 0.02~0.2 mm이나, 드물게 0.4 mm에 달하는 경우도 있다. 다른 하나는 흑운모의 벽계를 따라 교대되어 나타나는 경우이다. 전자의 경우는 변성도가 증가함에 따라 산출 빈도가 줄어들지만, 후자의 경우는 전 지역에서 관찰된다. 분석한 녹니석의 조성은 Table 8과 같다. 녹니석의 Fe/(Mg+Fe)의 비율은 0.41~0.61의 범위를 보인다. 십자석 흑운모와 공존하는 녹니석 보다는 석류석 흑운모와 공존하는 쪽이 철이 풍부한 경향을 보인다 (Fig. 6).

### 클로리토이드

클로리토이드의 산상도 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그 하나는 시료 J1224에서 처럼, 편리 방향에 거의 평행하게 발달을 이루며 출현하는 경우이다. 이때 개개의 결정은 자형 판상을 나타내며, 장경은 0.05~0.3 mm이다.

Table 2. Chemical composition and cation numbers (0=12) of garnets.

Specimen No.	J1335	J1335	J1176	J1176	J1055	J1055	J1200	J1024A	J1024A	J1048A	J1335
Analysis point No.	A-5 (Rim)	A-7 (Core)	B-6 (Rim)	C-6 (Rim)	A-5 (Rim)	A-7 (Core)	B-5 (Rim)	A-7 (Rim)	A-9 (Rim)	A-17 (Rim)	A-6 (Rim)
SiO <sub>2</sub>	36.57	37.96	37.93	36.06	37.08	37.40	36.57	37.06	37.62	37.51	37.56
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.04	0.00	0.02	0.03	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.13	21.44	20.76	20.21	21.82	21.61	21.63	21.34	21.45	21.40	20.40
FeO*	31.11	31.84	34.19	34.85	33.54	30.62	38.51	37.26	37.29	31.26	33.37
MnO	7.14	6.52	3.25	3.31	3.99	6.04	1.05	0.29	0.25	7.40	5.04
MgO	1.47	1.75	1.72	1.75	2.11	2.20	1.97	1.89	1.84	2.43	1.80
CaO	1.50	1.40	2.30	2.33	1.81	2.08	1.14	2.08	2.26	1.13	2.17
Total	98.99	100.93	100.15	98.52	100.38	100.00	100.88	99.96	100.72	101.13	100.79
Si	2.997	3.034	3.056	2.986	2.980	3.006	2.953	2.998	3.015	2.999	3.022
Ti	0.005	0.002	0.000	0.001	0.002	0.003	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001
Al	2.040	2.020	1.971	1.973	2.067	2.047	2.058	2.035	2.026	2.016	1.976
Fe	2.132	2.128	2.304	2.414	2.255	2.058	2.600	2.521	2.499	2.090	2.245
Mn	0.495	0.441	0.222	0.232	0.272	0.411	0.072	0.020	0.017	0.501	0.343
Mg	0.179	0.209	0.206	0.215	0.253	0.264	0.237	0.228	0.220	0.289	0.216
Ca	0.131	0.119	0.198	0.207	0.156	0.179	0.099	0.180	0.194	0.097	0.187
Fe/(Fe+Mg)	0.923	0.911	0.918	0.918	0.899	0.886	0.916	0.917	0.919		
almandine	0.726	0.734	0.786	0.787	0.768	0.707	0.864	0.855	0.853		
spessartine	0.168	0.152	0.076	0.076	0.093	0.141	0.024	0.007	0.006		
pyrope	0.061	0.072	0.070	0.070	0.086	0.091	0.079	0.077	0.075		
grossular	0.045	0.041	0.068	0.067	0.053	0.061	0.033	0.061	0.066		

\*Total Fe as FeO.

때때로 클로리토이드의 집합체는 일부 또는 전부가 홍주석에 포유되어 산출한다. 이런 산상을 보이는 클로리토이드의 분석값은 Table 9와 같다. 다른 하나의 산상은 단독의 결정으로, 가끔 흑운모의 벽개면을 따라 산출되거나 흑운모와 십자석이 접하는 부분에서 산출된다. 이상에서 분석한 광물의 화학성분을 변성분대와 공존하는 광물상으로 나누어 Fig. 6의 AFM도 상에 나타냈다.

### 석류석-흑운모에 의한 변성온도

연구지역의 변성암류가 어떠한 변성온도에 발생하였는가를 알아보기 위하여 공존하는 석류석과 흑운모를 이용한 지온계를 사용하였다. 이 지온계는 신뢰성이 높고, 많은 모델이 제시되었다 (Thompson, 1976; Ferry and Spear, 1978; Perchuck and Lavrent'eva, 1983; Kretz, 1990). 여기에서는 Kretz (1990)의 모델을 사용하여 계산하였으며, 결과는 Table 10과 같다. 시료중 J1200은 재산층의 시료이며, 나머지는 울리층의 시료이다. 표에서 보듯이 재산층에 미친 춘양화강암체의 열적영향은 대략 531°C 내외 일것으로 추정할 수 있다. 이 온도는 양판석 (1993, 지질학회발표)이 계산한 온도 범위 (489~610°C)에 해당

된다. 그러나 울리층의 시료에서 계산된 온도는 춘양화강암체와의 거리에 관계없이 나타남을 볼 수 있다. Fig. 2와 대비하여 볼 때, 지표상의 거리가 화강암체에 가장 가까운 J1355에서 가장 낮은 온도를 나타내며, 가장 멀리 떨어진 J1048에서 상대적으로 높은 온도를 나타낸다. 울리층에서의 이런 온도분포를 북부화강암의 영향이나, 지표에 표출되어 있지 않으나 경상계에 해당하는 후기의 화성활동의 영향이라기 보다는 대보조산운동 이전의 변성작용이 반영된 것으로 추측된다.

### 누진 변성 반응 계열

울리층을 제외한 고생대의 변성암류에 출몰하는 광물과 광물조합 및 광물의 화학조성으로 볼 때, 본 지역은 단일 사이클의 누진변성작용을 받았을 것으로 사료된다. 즉, 대부분의 변성암류는 춘양화강암의 마그마 활동에 의한 접촉변성작용에 의해 형성되었다고 판단된다. 그 이유로는 (1) 춘양화강암을 향해 고온의 광물조합이 나타나며, (2) 변성분대의 경계선이 춘양화강암체의 외곽선과 유사한 점, (3) 석류석의 누대구조가 단일 사이클의 온도 상승과정에서 성장된 것으로 나타나는 점이다. 이 변성대에서 나타



Table 3. Partial microprobe analyses of garnets.

Specimen No.	J1176	J1176	J1055	J1055	J1341	J1341	J1341	J1200	J1024C	J1024C	J1024C	J1024C	J1024C	J1024C	J1048A	J1355	J1355
Analysis point	B-9	C-8	A-21**	A-22**	A-1	A-2**	A-3	B-10	C-1**	C-2**	C-3**	C-4**	C-5**	C-6**	A-16**	A-9	A-10
No.	(Core)	(Core)	(Int.)	(Int.)	(Rim)	(Int.)	(Core)	(Core)	(Core)	(Core)	(Int.)	(Int.)	(Rim)	(Int.)	(Core)	(Core)	(Core)
FeO*	33.63	34.23	32.69	32.71	34.73	33.12	33.13	36.84	37.15	36.97	37.41	37.34	37.41	37.62	29.90	32.87	33.14
MnO	4.09	4.13	5.32	5.23	5.13	6.34	6.54	1.08	0.91	0.65	0.59	0.36	0.27	0.21	7.69	5.54	5.52
MgO	2.08	2.11	2.36	2.35	2.25	2.43	2.37	2.25	1.62	1.67	1.61	1.73	1.64	1.67	2.58	2.10	2.12
CaO	2.09	2.12	1.19	1.21	1.35	0.98	1.25	1.61	2.32	2.12	2.21	2.08	2.39	2.62	1.77	2.19	2.17
Fe	2.285	2.288	2.239	2.243	2.282	2.202	2.180	2.512	2.536	2.560	2.568	2.578	2.569	2.556	2.013	2.190	2.195
Mn	0.282	0.279	0.369	0.363	0.241	0.427	0.436	0.075	0.063	0.046	0.041	0.025	0.019	0.014	0.524	0.374	0.370
Mg	0.252	0.251	0.288	0.287	0.263	0.288	0.278	0.273	0.197	0.207	0.197	0.213	0.201	0.202	0.310	0.250	0.251
Ca	0.182	0.181	0.104	0.106	0.113	0.084	0.106	0.141	0.203	0.188	0.195	0.184	0.211	0.228	0.153	0.187	0.184
Fe/(Fe+Mg)	0.901	0.901	0.886	0.887	0.897	0.884	0.887	0.902	0.928	0.925	0.929	0.924	0.927	0.927	0.867	0.898	0.897
almandine	0.761	0.763	0.746	0.748	0.787	0.734	0.727	0.837	0.846	0.853	0.856	0.859	0.856	0.852	0.671	0.730	0.732
spessartine	0.094	0.093	0.123	0.121	0.083	0.142	0.145	0.025	0.021	0.015	0.014	0.008	0.006	0.005	0.175	0.125	0.123
pyrope	0.084	0.084	0.096	0.096	0.091	0.096	0.093	0.091	0.066	0.009	0.066	0.071	0.067	0.067	0.103	0.083	0.084
grossular	0.061	0.060	0.035	0.035	0.039	0.208	0.035	0.047	0.068	0.063	0.065	0.061	0.070	0.076	0.051	0.062	0.061

\*Total Fe as FeO. \*\*Intermediate part having the minimum content of Ca in the grain. (weight %, cation numbers calculated as  $\Sigma R^{2+}=3$ ).

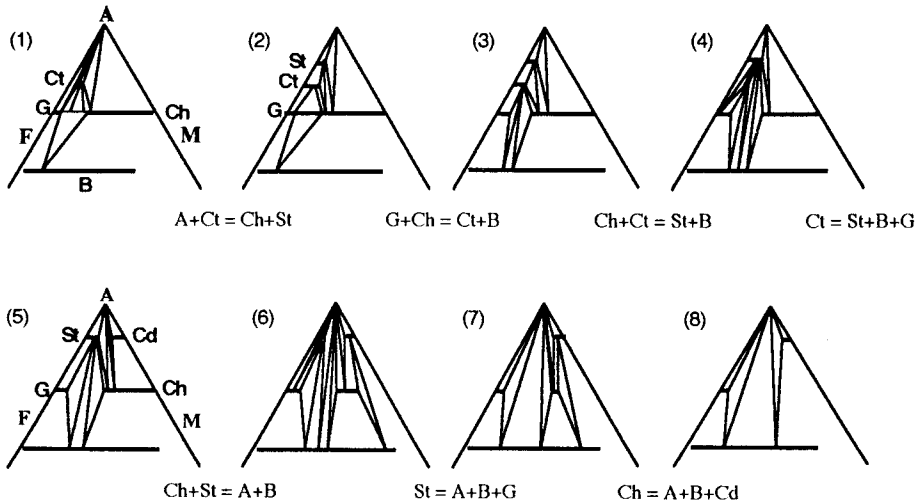


Fig. 7. Isobaric phase diagrams show the evolution of mineral assemblages for study area. Phase diagrams correspond to labeled regions shown in Fig. 8.

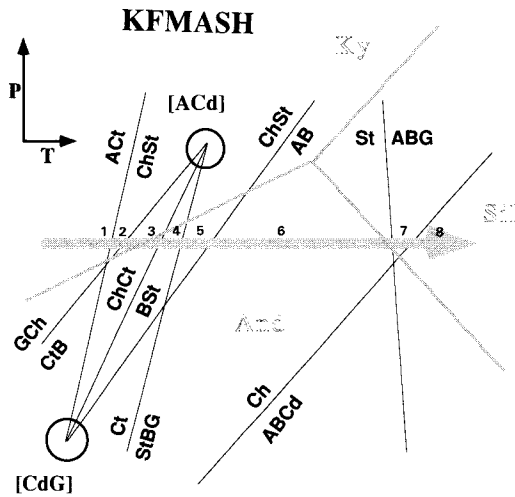


Fig. 8. Petrogenetic grid for the study area in KFMASH component system.

나는 연속반응계열을 Thompson (1957)의 AFM투영도를 이용하여 해석하였다. 이 변성대에서 출몰하는 광물을 AFM도에 투영하고, KFMASH의 6성분계에서의 반응으로 취급할 수 있는 이유는 (1) 사장석이 출현하지 않아 Na 성분을 제한할 수 있고, (2) 극히 일부의 재산출을 제외하고는 녹염석, 방해석, 인회석이 출현하지 않아 Ca와 P 성분을 제한할 수 있다. (3) 석류석은 대부분 알만딘의 단성분에 가까와 MnO가 반응을 지배할 정도는 아니라고

판단하였다.

각 변성분대의 광물조합 (Fig. 2, 3)과 광물의 화학조성을 나타낸 AFM도 (Fig. 6)를 근거로, 이 변성대에서 온도상승에 따라 발생할 수 있는 상평형 관계를 Fig. 7과 같이 정리할 수 있다. 여기서의 반응은 6성분계에서 불연속반응을 AFM도에서 기하학적으로 해석하고, 관찰된 광물조합 및 화학조성을 연관시켜 설명한다. AFM도에 나타나는 광물들 사이의 상대적인 Fe/(Mg+Fe)비의 순서는 Ahn and Nakamura (1992)에 따르며, 그 순서는 다음과 같다. 석류석 (Ga) > 십자석 (St) > 클로리토이드 (Ct) > 흑운모 (Bt) > 녹니석 (Ch) > 근청석 (Cd). 설명의 번잡을 피하기 위해 광물상은 약어를 사용한다.

각 변성분대에서의 광물공생관계와 변성분대사이에서 일어나는 Isograd 반응을 정리하면 다음과 같다. Fig. 7은 이 지역에서의 광물조합의 변화를 기초로, 동일 압력하에서 온도 상승에 따른 광물공생관계의 변화와 그 사이에서 발생할 수 있는 변성반응을 AFM도를 이용하여 작성한 것이다. 여기서 흑운모의 A값은 시료마다 차가 심하나 (Fig. 6 참조) 그림의 복잡성을 피하기 위하여 -2.5의 값을 일괄적으로 사용하였으며, 이는 이하의 해석에 어떤 영향도 미치지 않는다.

녹니석대에서의 특징적인 공생관계는인 녹니석과 석류석, 홍주석과 클로리토이드의 조합은 Fig. 7-1에서 각각 G-Ch과 Ct-A의 tie line으로 나타냈으며, 십자석대는 공생관계는 그림7-4에서 tie line St-B으로 표식하였다. 기하학적으로 볼 때 십자석대에서 St-B line이 안정하려면,

Table 4. Chemical composition and cation numbers(0=47) of staurolites.

Specimen No.	J1176	J1342B	J1054B	J913	J1055	J1200	J1024A	J1126	J1328	J1330	J1212	J1341
Analysis No.	D-13	B-2	B-2	A-5	A-11	B-7	A-11	A-5	A-4	A-6	A-8	A-9
SiO <sub>2</sub>	29.02	29.08	28.89	27.37	29.55	27.26	28.44	28.68	29.44	27.77	28.07	28.40
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.52	0.49	0.59	0.50	0.44	0.59	0.62	0.76	0.58	0.47	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54.39	55.53	55.39	55.51	54.83	55.05	53.79	53.50	55.72	56.12	53.14	54.52
FeO*	14.24	13.04	11.45	12.65	12.89	15.26	13.89	14.70	11.38	10.69	14.88	11.79
MnO	0.21	0.44	0.30	0.44	0.24	0.03	0.06	0.22	0.41	0.84	0.05	0.26
MgO	1.30	0.96	0.93	1.26	1.21	1.45	1.27	1.18	1.11	1.52	0.95	1.03
CaO	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
ZnO	0.05	0.73	1.31	0.66	1.09	0.17	0.11	0.01	0.66	0.83	0.00	0.84
Total	99.83	100.32	98.77	98.49	100.31	99.67	98.17	98.92	99.49	98.36	97.56	97.41
Si	8.063	8.021	8.052	7.700	8.151	7.645	8.028	8.066	8.114	7.762	8.010	8.029
Ti	0.126	0.108	0.103	0.125	0.105	0.092	0.126	0.130	0.158	0.122	0.101	0.120
Al	17.809	18.054	18.194	18.403	17.825	18.197	17.893	17.732	18.099	18.485	17.873	18.162
Fe	3.309	3.008	2.669	2.975	2.973	3.579	3.279	3.456	2.624	2.498	3.551	2.786
Mn	0.049	0.103	0.072	0.105	0.056	0.007	0.015	0.053	0.095	0.198	0.012	0.063
Mg	0.537	0.393	0.387	0.529	0.499	0.605	0.533	0.493	0.455	0.633	0.405	0.435
Ca	0.003	0.009	0.001	0.000	0.000	0.002	0.003	0.003	0.000	0.005	0.000	0.000
Zn	0.011	0.148	0.270	0.136	0.222	0.036	0.022	0.002	0.134	0.171	0.000	0.176
Fe/(Fe+Mg)	0.860	0.884	0.873	0.849	0.856	0.855	0.960	0.875	0.852	0.802	0.987	0.865

\*Total Fe as FeO.

적어도 G-Ch line과 Ct-Ch line이 소멸되어야 한다. 전자가 소멸되는 반응은  $G + Ch + Mus = Ct + B + Qz + H_2O$ 이며, 후자가 소멸되는 반응은  $Ch + Ct + Mus = St + B + Qz + H_2O$  (Isograd reaction 1)이다. 십자석대의 특징 광물조합을 십자석과 흑운모가 공생한 것임으로, 녹니석대와 십자석대의 경계반응을 후자로 하였다. 홍주석대에서는 알루미늄 규산염광물과 흑운모가 안정한 영역임으로 A-B tie line이 성립한다. 이 안정관계가 성립하기 위하여는 십자석대서 안정한 St-Ch line이 소멸되어야 한다. 따라서 십자석대와 홍주석대의 경계 반응은  $Ch + St + Mus + Qz = A + B + H_2O$  (Isograd reaction 2)이다. 또한 홍주석대에서 십자석+석류석+흑운모의 조합과 홍주석+십자석+흑운모의 조합이 관찰된다는 사실은 두번째 경계 반응이 일어나기 전에 클로리토이드의 분해 반응 ( $Ct + Mus + Qz = St + B + G + H_2O$ )이 일어났다는 것을 의미한다.

이 변성대에서 최고온부에 해당하는 규선석대에서 안정한 광물조합은 규선석과 흑운모의 공생이다. 과거의 연구에서는 규선석의 출현으로 분대하였으나, 여기서는 십자석의 소멸로 그 기준을 삼았다. 그 이유는 이제까지 설명한 광물조합을 안정성을 AFM광물들 사이의 반응에 의하여 일관성있게 설명할 수 있기 때문이다. 따라서 홍주석대와 규선석대의 경계반응은 십자석의 분해반응인  $St + Mus + Qz = A + B + G + H_2O$  (Isograd reaction 3)이다.

Table 5. Partial microprobe analyses of staurolites.

Specimen No.	J1228	J1228
Analysis No.	A-1	A-2
FeO*	14.05	14.20
MnO	0.08	0.04
MgO	0.96	0.91
CaO	0.01	0.00
ZnO	0.07	0.02
Fe	3.534	3.576
Mn	0.019	0.010
Mg	0.430	0.409
Ca	0.002	0.000
Zn	0.015	0.005
Fe/(Fe+Mg)	0.891	0.897

\*Total Fe as FeO. (weight %, cation numbers calculated as  $\Sigma R^{2+} = 4$ ).

이 반응의 전후에 출현하는 알루미늄 규산염광물은 규선석이다. 최고온부인 규선석대에서는 매우 드물지만 규선석과 녹니석의 조합이 관찰된다. 만약 이 녹니석이 누진 변성작용에 의해 형성된 것이라면, 녹니석의 분해반응 ( $Ch + Mus + Qz = A + B + Cd + H_2O$ )은 홍주석대와 규선석대의 경계 반응보다 좀더 고온에서 발생할 것으로 예상된다. 어느 이질변성암류에서도 정장석을 발견할 수 없었다는 사실은 변성작용의 최고 온도가 백운모의 분해반응이

Table 6. Chemical composition and cation numbers ( $O=22$ ) of biotites.

Specimen No.	J1335	J1342A	J1342B	J1054B	J913	J1055	J1055	J1055	J1200	J1342	J1126	J1328	J1330	J1212	J1048A	J1048B	J1355
Analysis No.	A-2	A-1	B-1	B-1	A-2	A-18	A-19	B-1	B-1	A-7	A-2	A-2	A-1	A-3	A-11	B-9	A-3
SiO <sub>2</sub>	35.04	36.49	36.71	36.47	36.41	36.27	36.42	35.63	36.61	35.99	37.29	36.77	34.42	36.97	36.36	36.60	
TiO <sub>2</sub>	2.03	1.78	1.47	2.00	1.58	1.77	1.78	1.68	1.68	1.81	1.56	1.36	1.94	1.75	1.86	1.71	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.45	20.41	20.95	19.46	19.94	19.80	19.71	19.55	18.97	19.25	20.06	20.00	18.53	19.70	18.79	19.57	
FeO*	20.91	19.90	19.20	20.12	18.24	20.42	21.11	22.33	20.20	23.64	18.61	15.04	25.67	18.93	20.38	20.90	
MnO	0.23	0.18	0.11	0.09	0.14	0.09	0.04	0.02	0.15	0.12	0.17	0.33	0.09	0.31	0.20	0.15	
MgO	7.96	9.38	9.78	8.25	10.88	8.28	8.43	8.04	8.98	6.90	9.68	12.66	5.16	9.85	9.66	8.06	
CaO	0.03	0.07	0.03	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.05	0.00	0.02	
Na <sub>2</sub> O	0.33	0.10	0.13	0.13	0.16	0.25	0.24	0.24	0.09	0.09	0.17	0.20	0.07	0.10	0.09	0.19	
K <sub>2</sub> O	8.66	8.25	8.72	8.90	7.81	9.16	8.74	8.61	8.59	8.79	8.05	8.58	8.60	9.07	8.79	9.21	
Total	94.65	96.56	97.11	95.45	95.16	96.06	96.51	96.10	95.28	96.62	95.60	94.94	94.50	96.72	96.13	96.41	
Si	5.393	5.426	5.415	5.519	5.443	5.473	5.471	5.415	5.545	5.475	5.549	5.453	5.435	5.492	5.477	5.512	
Ti	0.235	0.198	0.164	0.227	0.177	0.201	0.201	0.192	0.191	0.207	0.174	0.152	0.230	0.195	0.211	0.194	
Al	3.527	3.577	3.643	3.471	3.513	3.522	3.489	3.502	3.386	3.451	3.518	3.496	3.448	3.450	3.336	3.474	
Fe	2.691	2.475	2.369	2.547	2.280	2.576	2.652	2.839	2.559	3.008	2.316	1.866	3.389	2.351	2.567	2.632	
Mn	0.030	0.022	0.014	0.012	0.018	0.012	0.006	0.003	0.020	0.015	0.021	0.041	0.012	0.039	0.025	0.020	
Mg	1.827	2.080	2.151	1.861	2.424	1.861	1.887	1.821	2.027	1.565	2.147	2.798	1.216	2.180	2.169	1.810	
Ca	0.005	0.011	0.005	0.002	0.000	0.002	0.006	0.000	0.000	0.005	0.002	0.000	0.003	0.007	0.000	0.004	
Na	0.099	0.029	0.036	0.039	0.045	0.072	0.070	0.072	0.028	0.027	0.050	0.056	0.022	0.028	0.025	0.057	
K	1.700	1.565	1.641	1.729	1.489	1.764	1.675	1.669	1.659	1.707	1.528	1.623	1.733	1.718	1.690	1.770	
Fe/(Fe+Mg)	0.60	0.54	0.53	0.58	0.48	0.58	0.58	0.61	0.56	0.66	0.52	0.40	0.74	0.52	0.54	0.59	

\* Total Fe as FeO.

Table 7. Chemical composition and cation numbers (0=22) of muscovites.

Specimen No. Analysis No.	J1335 A-4	J1176 D-5	J1176 D-6	J1176 D-10	J1024A A-3	J913 A-4	J1055 A-16	J1126 A-4	J1328 A-1	J1330 A-3	J1212 A-2	J1048B B-5	J1355 A-2
SiO <sub>2</sub>	45.38	47.09	46.52	47.72	45.66	47.66	47.95	46.89	47.65	45.87	46.44	47.52	48.10
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.29	0.38	0.47	0.41	0.51	0.38	0.35	0.54	0.75	0.36	0.26	0.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.85	35.77	35.81	35.73	35.45	34.88	35.33	34.05	35.51	35.65	34.87	35.66	34.98
FeO*	0.93	0.88	1.01	1.00	1.16	0.86	1.20	1.67	0.94	0.73	1.61	0.95	1.51
MnO	0.04	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
MgO	0.41	0.39	0.45	0.54	0.45	0.65	0.48	0.60	0.69	0.74	0.45	0.76	0.81
CaO	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O	1.23	0.98	1.08	0.93	0.92	0.44	1.31	0.44	0.65	1.12	0.34	1.23	0.52
K <sub>2</sub> O	9.02	9.14	8.88	9.10	9.54	9.32	9.65	10.42	10.14	9.45	9.71	9.86	10.21
Total	93.12	94.62	94.19	95.53	93.61	94.34	96.35	94.48	96.12	94.31	93.82	96.29	96.50
Si	6.129	5.240	6.195	6.261	6.154	6.323	6.274	6.293	6.248	6.126	6.244	6.226	6.296
Ti	0.026	0.029	0.038	0.046	0.042	0.051	0.037	0.036	0.053	0.075	0.036	0.026	0.036
Al	5.706	5.586	5.620	5.525	5.631	5.454	5.448	5.386	5.487	5.612	5.525	5.506	5.396
Fe	0.105	0.098	0.112	0.110	0.131	0.095	0.131	0.188	0.103	0.082	0.181	0.104	0.165
Mn	0.005	0.007	0.003	0.001	0.001	0.001	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
Mg	0.083	0.077	0.090	0.106	0.090	0.129	0.093	0.119	0.134	0.147	0.090	0.149	0.159
Ca	0.001	0.003	0.006	0.001	0.002	0.000	0.007	0.001	0.000	0.002	0.004	0.001	0.002
Na	0.321	0.251	0.278	0.238	0.241	0.113	0.333	0.115	0.165	0.289	0.090	0.313	0.132
K	1.553	1.545	1.509	1.523	1.640	1.577	1.611	1.784	1.697	1.610	1.666	1.648	1.700
Fe/(Fe+Mg)	0.56	0.56	0.55	0.51	0.59	0.42	0.58	0.61	0.43	0.36	0.67	0.41	0.51

Total Fe as FeO.

Table 8. Chemical composition and cation numbers (0=28) of chlorites.

Specimen No. Analysis No	J1342A A-4	J1126 A-7	J1132B A-7	J1330 A-7	J1048A A-9	J1048B B-6	J1355 A-8
SiO <sub>2</sub>	24.72	24.03	25.71	25.90	26.97	27.56	24.66
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.15	0.09	0.14	0.04	0.04	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.73	22.29	23.30	23.20	19.14	18.54	22.62
FeO*	25.22	30.55	24.60	18.88	27.31	28.01	28.42
MnO	0.31	0.10	0.29	0.47	0.40	0.27	0.17
MgO	13.74	10.79	14.86	19.66	14.11	13.55	12.34
CaO	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.04	0.01
Total	88.85	87.92	88.87	88.24	87.97	88.00	88.38
Si	5.120	5.198	5.303	5.235	5.719	5.852	5.236
Ti	0.018	0.025	0.014	0.021	0.006	0.007	0.027
Al	6.037	5.684	5.664	5.527	4.782	4.640	5.660
Fe	4.370	5.527	4.244	3.191	4.843	4.975	5.047
Mn	0.055	0.018	0.051	0.081	0.071	0.048	0.030
Mg	4.242	3.479	4.571	5.925	4.460	4.290	3.905
Ca	0.002	0.005	0.005	0.000	0.003	0.008	0.002
Fe/(Fe+Mg)	0.507	0.614	0.481	0.350	0.521	0.537	0.564

\* Total Fe as FeO.

일어나기 전임을 의미한다. 이 변성대에서 출현하는 광물 조합, 변성분대와 위에서 논한 경계반응의 관계를 알루미나 규산염광물의 공생관계를 고려하여 Fig. 8과 같이 부분적인 petrogenetic grid를 작성하였다. 이 그리드는 1992년 발표한 Ahn and Nakamura의 그리드와 일관성을 갖

는다. Fig. 8에서의 번호는 Fig. 7의 번호에 대응하는 상평형관계를 나타낸다.

### 토 의

이상과 같이 기술한 자료를 근거로 이 지역의 변성경

Table 9. Chemical composition and cation numbers (0=6) of chloritoids.

Specimen No.	J1224	J1224
Analysis No.	A-1	A-2
SiO <sub>2</sub>	25.04	24.55
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.31	40.34
FeO*	23.34	23.26
MnO	0.19	0.23
MgO	2.92	2.92
Total	92.80	91.31
Si	1.021	1.020
Ti	0.000	0.001
Al	1.985	1.975
Fe	0.796	0.808
Mn	0.006	0.008
Mg	0.178	0.181
Fe/(Fe+Mg)	0.817	0.816

\*Total Fe as FeO.

Table 10. Garnet-biotite geothermometry.

Sample No.	J1200	J1055	J1335	J1341	J1048
X <sub>Fe, Gar</sub>	0.916	0.899	0.920	0.897	0.878
X <sub>Fe, Bt</sub>	0.609	0.581	0.596	0.558	0.519
X <sub>Gas</sub> *	3.29	5.31	4.46	3.90	5.10
X <sub>Sps</sub> *	2.39	9.26	16.85	8.31	17.47
InK	1.946	1.859	2.090	1.898	1.931
K(°C)	531	552	499	535	542

X<sub>Fe, Gar</sub> = Fe/(Fe+Mg) ratio of garnet.X<sub>Fe, Bt</sub> = Fe/(Fe+Mg) ratio of biotite.X<sub>Gas</sub>\* = 100 Ca/(Fe+Mn+Mg+Ca).X<sub>Sps</sub>\* = 100 Mn/(Fe+Mn+Mg+Ca).

력을 종합하면 다음과 같다. 변성지역의 이질암 및 사질암은 남정석이 안정한 온도 압력 조건에서 변성작용이 시작되었다. 이 조건에서 녹니석과 흑운모 또는 여기에 석류석이 첨가된 광물조합이 안정하였다 (녹니석대). 온도가 증가함에 따라 홍주석의 안정영역으로 옮겨가 기존의 남정석은 홍주석으로 전이하였으며 홍주석+클로리토이드의 광물조합이 형성된 후, Isograd 1 반응이 발생하여 십자석대가 시작된다. 홍주석의 안정영역인 십자석대에서 십자석 흑운모를 포함하는 광물조합을 이룬다. 온도가 더욱 증가하여 Isograd 2 반응이 일어나고 홍주석대가 시작된다. 여기서는 주로 홍주석과 흑운모를 포함하는 광물조합이 안정하지만, 고온부에 이르러 홍주석이 불안정하고 십자석이 안정한 영역이 된다. 규선석의 안정영역에서 본 지역에서 최고온 반응인 Isograd 3 반응이 발생한다. 이

후로는 어느 정도의 후퇴변성작용이 일어났을 것으로 보인다. 그림 8에서 보여주듯이, 이 지역의 고생대 지층에서의 압력-온도 경로는 거의 동일한 압력하에서 진행된 것으로 보여진다. 더욱이 알루미늄 규산염광물의 삼중점보다 저압부분을 통과하는 것으로 판단할 때, 변성압력은 4 kb 이하였음을 시사한다. 양편석 (1993년 지질학회 발표)은 세 알루미늄 규산염광물이 공존하는 시료를 보고 하였으나, 적어도 사진상으로는 세 광물이 인접하여 공존하지는 않는다. 따라서 그 시료가 알루미늄 규산염광물의 삼중점에 해당하는 온도 압력조건을 지시한다고 해석하기는 곤란하다. 또한 과거의 연구에서는 울리층을 포함시켰으나, 울리층과 고생대 지층의 변성경력은 서로 다를 것으로 보여진다. 즉, 울리층은 캄브리아기 이전에 변성작용을 받았으며, 이후 춘양화강암체의 관입으로 열적 영향을 받은 복변성암체로 사료된다.

## 결론

장군광산 주변에 분포되는 고생대의 변성니질암을 대상으로 변성광물조합과 특징적인 광물의 출현 또는 소멸을 근거로 4개의 변성대로 나누었다. 네 변성대는 변성도가 높아지는 순서로 녹니석대, 십자석대, 홍주석대, 규선석대이며, 분대의 경계선은 대체적으로 화강암체의 외곽선과 유사하다. 과거의 연구에서는 변성분대를 설정할 때 울리층을 포함시켰으나, 울리층은 단순한 접촉변성암으로 보기는 어렵다.

네 개의 변성분대 사이에는 6성분계의 불연속반응인 경계반응이 존재한다. 녹니석대와 십자석대 사이에서의 경계반응은  $Ch + Ct + Mus = St + Bt + Qz + H_2O$ 이며, 십자석대와 홍주석대 경계반응은  $Ch + St + Mus + Qz = Als + Bt + H_2O$ 이다. 홍주석대와 규선석대의 경계반응은 십자석의 분해반응 ( $St + Mus + Qz = Als + Bt + Ga + H_2O$ )이다. 고생대지층에 대한 석류석-흑운모의 지온계에 의한 변성온도는 530°C이며, 이 온도는 춘양화강암체에 의한 것으로 사료된다. 변성광물조합의 변화 및 광물의 화학조성을 기초로 부분적인 암석발생학적 그리드를 작성하였으며, 이 그리드는 1992년 발표한 Ahn and Nakamura의 그리드와 일관성을 갖는다. 또한 알루미늄 규산염광물의 공생관계와 Isograd 반응들의 상호관계를 판단할 때, T-P path는 알루미늄 규산염광물의 삼중점보다 저압부를 통과하여, 적어도 4 kb이하일 가능성이 크다.

## 사사

이 연구를 위하여 야외조사와 실내작업을 도와준 충남

대학교 지질학과 김상중씨께 심심한 감사를 드리며, 실내 작업을 도와준 학부 학생 이창우, 박종철, 노기숙, 신미애, 홍지선, 류선이 학생들에게도 감사드린다. 논문작성에 여러가지 편의를 제공해 주신 충남대학교 지질학과 윤혜수 교수님과 대학원생들게도 감사드린다. 이 연구는 전략광물연구소의 연구비와 일부는 1990년 목격기초연구비 (연구책임자 이현구)의 지원에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원해준 한국과학재단에 감사를 드린다.

### 참고문헌

- 김옥준, 홍만섭, 김기태, 박희인 (1962) 1/50,000 삼근리지질도 폭. 한국지질조사소.
- 김형식 (1975) 김천-울진 일대의 광역변성작용에 관한 연구. 고려대학교 이공논총, 16권, p. 1-16.
- 안건상 (1993) 이질변성암에 대한 KFMASH 성분계에서의 암석발생학적그리드. 한국지구과학회지, 3권, p. 358-368.
- 양판석, 조문섭 (1993) 장군광산 부근 변성퇴적암류의 접촉변성작용: 대수학적분석. 대한지질학회 48차 학술발표회 요약집, p. 66.
- 이광진, 조문섭 (1992) 가평-청평 지역 경기육괴의 변성작용. 암석학회지, 1권, p. 1-24.
- 이대성 (1967) 장군 망간광산의 지질과 광상. 대한지질학회지, 3권, p. 51-59.
- 李鉉具 (1980) 韓國·將軍鑛山における複雑硫化物·硫酸鑛石の鑛床學的並びに鑛物學的 研究, 早稻田大學博士學位論文, p. 328.
- 이현구, 박노영, 이마이나오야 (1992) 장군광산 주변의 지질과 변성작용. 이석 남기상 선생 논문집, p. 21-44.
- 황덕환, A. J. Reedman (1975) 삼한장군광산조사보고서. 한국지질광물연구소, 지질광물 조사보고서, p. 187-216.
- 황인건 (1968) 삼한장군광산 조사보고서. 광산지질, 1권, p. 9-30.
- 岩松 暉 (Iwamatsu) (1979) 岩石の劈開. 植松 武ほか編. [地球科學] 岩波書店.
- Ahn, K. S. and Nakamura, Y. (1992) New biotite isograd and petrogenetic grid in pelitic system. Abstract in 29th IGC, v. 2, p. 591.
- Ganguly, J. (1972) Staurolite stability and related parageneses: theory, experiments, and applications. J. Petrol., v. 13, p. 335-365.
- Ferry, J. M. and Spear, F. S. (1978) Experimental calibration of the partitioning of Fe and garnet. Contr. Mineral. Petrol., v. 66, p. 113-117.
- Holdaway, M. J. (1971) Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. Am. Jour. Sci., v. 271, p. 97-131.
- Imai, N., Park, N. Y., Lee, H. K., Machida, M. and Higashihara, Y. (1982) Geology and Metamorphic Rocks in the Environs of the Janggun Mine, Republic of Korea. With Some Comments Relating to the Unazuki Metamorphic Rocks in Japanese. Island Arc. In Geology of Japan Sea, p. 227-255, (in Japanese).
- Kretz, R. (1990) Biotite and garnet compositional variation and mineral equilibria in Grenville gneisses of the Otter Lake area, Quebec. Jour. Metamorphic Geol., v. 8, p. 493-506.
- Perchuk, L. L. and Lavrent'eva, I. V. (1983) Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In advances in physical geochemistry, 3 (ed. S.K. Saxena), Springer-Verlag, New York, p. 199-239.
- Spear, F. S. and Cheney, T. (1989) A petrogenetic grid for pelitic schists in the system  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ . Contrib. Mineral. Petrol., v. 101, p. 149-164.
- Thompson, A. B. (1976) Mineral reactions in pelitic rocks. II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. Am. Jour. Sci., v. 276, p. 425-454.
- Thompson, J. B. (1957) The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schist. Amer. Miner., v. 42, p. 842-858.
- Tracy, R. J. and Robinson (1976) Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. Am. Mineral., v. 61, p. 62-775.

1993년 8월 16일 원고접수