

옥천변성대 북동부 황강리 지역내 앰피블라이트의 변성작용

유영복 · 김형식* · 권용완 · 박종길

고려대학교 이과대학 지구환경과학과

Metamorphism of the amphibolites in the Hwanggangri area, the northeastern region of Ogcheon metamorphic belt, Korea

Young Bok Ryu, Hyung Shik Kim*, Yong Wan Kwon and Jong Gil Park

Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

요약: 황강리 지역내 앰피블라이트에 대해 주요 광물군으로 변성분대를 설정해 보면 각섬석-양기석대(H-AZ), 각섬석대(HZ), 투회석대(DZ) 등 세 개의 변성분대가 인지된다. 그 특성을 보면 열적 영향을 가장 많이 받은 투회석대에서 각섬석대 그리고 각섬석-양기석대가 발달하고 있어 화강암체로부터 거리가 멀어지면서 접촉변성작용의 변성도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 본암의 광물군들을 종합 분류해 보면 (1) 양기석+사장석+녹니석, (2) 양기석+각섬석+사장석+녹니석±녹염석±흑운모, (3) 양기석+각섬석+사장석±흑운모±녹염석, (4) 각섬석+사장석±흑운모±녹니석, (5) 각섬석+사장석+투회석+양기석±녹염석±녹니석, (6) 각섬석+사장석+투회석±흑운모±녹염석 등 크게 여섯 가지 그룹으로 나뉘어 진다. 이 지역의 앰피블라이트는 두 번의 변성작용을 받은 것으로 인지되고 있는데 첫 번째 변성작용은 옥천변성대에 우세하게 작용한 중압형의 광역변성작용으로 본암에서 조립질에서 중립질의 각섬석류 입자의 중앙부의 양기석을 성장시켰으며 변성도는 녹색편암상에서 녹염석-앰피블라이트상에 이르렀다. 이에 중첩된 두 번째 변성작용은 주변의 화강암체에 의한 접촉변성작용으로 변성도는 최대 상부 앰피블라이트상의 저압부에 이른 것으로 사료된다. TWEEQU 지온지압계와 각섬석-사장석 지온계에 의한 계산에 따르면 초기 광역변성작용의 변성조건은 4.6-7.3 kb의 압력하에 온도가 439-537°C의 범위를 가지며 최고 온도, 압력범위는 492-537°C, 5.2-7.3 kb의 값에 이르는 것으로 나타났다. 또한 백악기 화강암의 관입으로 인한 접촉변성작용의 변성조건은 2.6-5.2 kb의 압력하에서 온도가 588-739°C의 범위를 가지며 최고 온도, 압력범위는 697-739°C, 3.8-5.2 kb 내에 분포하고 있으며 온도상승과 압력강하의 변성진화과정을 겪은 것으로 추정되고 있다.

핵심어: 변성분대, 광역변성작용, 접촉변성작용, 상부 앰피블라이트상, 각섬석-사장석 지온계

Abstract: In the amphibolites of the Hwanggangri area, three metamorphic zones are established like hornblende-actinolite zone (H-AZ), hornblende zone (HZ) and diopside zone (DZ) by the main mineral assemblages. Hornblende zone and hornblende-actinolite zone develop away from the diopside zone that experienced the highest thermal effect. Thus, this pattern identifies the decreasing metamorphic grade of the contact metamorphism with increasing distance from the granitic pluton. The mineral assemblages of this rock are classified into six representative groups such as ① actinolite+plagioclase+chlorite, ② actinolite+hornblende+plagioclase+chlorite±epidote±biotite, ③ actinolite+hornblende+plagioclase±biotite±epidote, ④ hornblende+plagioclase±biotite±chlorite, ⑤ hornblende+plagioclase+diopside+actinolite±epidote±chlorite, ⑥ hornblende+plagioclase+diopside±biotite±epidote. Two metamorphic events are recognized in the amphibolites of the study area that the first metamorphism is the regional metamorphism dominantly occurred in the whole Ogcheon metamorphic belt, and it gave rise to the growth of actinolite at the core or center of the amphibole grains of coarse and medium size. Its metamorphic grade ranges from the greenschist facies to epidote-amphibolite facies. The second metamorphism overlapped is the contact metamorphism caused by the adjacent granitic pluton, and its metamorphic grade is thought to reach to the low pressure part of upper amphibolite facies. According to the calculation by TWEEQU thermobarometry and amphibole-plagioclase thermometry, the metamorphic temperature of initial regional

*Corresponding author: Tel. 82-2-3290-3172, E-mail. khshik@korea.ac.kr

metamorphism is 439-537°C under pressure of 4.6-7.3 kb and its peak temperature and pressure are considered to reach to the range of 492-537 and 5.2-7.3 kb. And the temperature range of contact metamorphism occurred by intrusion of cretaceous granitic body, is 588-739°C under pressure of 2.6-5.2 kb and its peak temperature and pressure are estimated as having the range of 697-739°C and 3.8-5.2 kb that this amphibolites are estimated to pass through the metamorphic evolution of both the rise of temperature and the drop of pressure.

Key words: Metamorphic zone, regional metamorphism, contact metamorphism, upper amphibolite facies, amphibole-plagioclase thermometry

서 언

황강리 지역의 앰피블라이트에는 다변성작용의 영향으로 사료되는 넓은 범위의 성분을 갖는 사장석과 여러 각섬석류가 존재하며 야외상에서는 노두의 크기가 작거나 또는 같은 노두에서도 서로 다른 광물군들이 산출되기도 한다. 본 앰피블라이트에 대해 주요 광물군을 적용하여 변성분대를 작성해 보는 것은 암석 분포상 제한되긴 하나 황강리 지역의 변성사와 연관되어 있고 앞으로의 연구에 토대가 될 수 있어 중요하다고 할 수 있다.

변성염기성암에서 거정 양기석의 가장자리에 짙은 색의 각섬석이 존재하는 사실은 세계 여러 지역으로부터 보고된 바 있다(Haast River(Cooper & Lovering, 1970); Northern Sierra Nevada(Hietanen, 1974); Scottish Daladian(Graham, 1974); Hokkaido(Grapes, 1975)). 이들 연구자들은 이러한 조직이 두 번 이상의 광물성장 시기를 갖음으로서 형성되는 것으로 보고 중앙부의 양기석은 누진 변성작용에서 초기의 낮은 변성도의 잔류물을 지시하는 것이며 주변부는 이후의 더 높은 변성온도의 변성작용으로 성장한 것으로 이런 대상(帶狀) 각섬석류의 존재는 소위 다변성작용에 기인하는 것으로 해석한 바 있다. 본암의 경우도 사장석 성분과 조직적 특징의 관점에서 고찰해 본 결과 대상 각섬석류의 존재가 다변성작용에 기인하는 것으로 판단되고 있다(유영복 외, 2000).

옥천변성대의 변성작용에 관한 기존연구들을 살펴보면, Kim(1971)은 옥천변성대의 광역변성작용이 중생대 초에 일어난 것으로 보았고 변성도에 따라 A, B, C 등 세 가지 대로 나누었다. 이 중 C대에 해당되며 연구지역 부근인 중원군 동양면에서 규선석과 납정석이 공존하는 것이 관찰되고 있음을 보고한 바 있어 황강리 지역과 같은 이 지역 주변에서 중압형의 광역변성작용의 영향이 인지되고 있음을 시사해 주었다. Oh(1997)는 옥천변성대 전체에 걸쳐 가장 우세하게 발달한 주변성작용은 중압형으로 알려진 중생대 트라이아스기의 M2

광역변성작용(216±10 Ma)으로 남동부에서 북서부로 가면서 흑운모대에서 석류석대를 지나 납정석대로 변성도가 증가하고 있으며 유라기 화강암의 주변에서는 규선석대와 홍주석대가 분포하여 저압형의 M3접촉변성작용이 인지되고 있다고 보고하였다. 또한 Cho *et al.* (1994)에 의해 옥천변성대 충주지역의 변성암류는 바로비안(Barrovian)형의 흑운모-석류석대에 해당되는 광역변성작용을 받았으며 중생대 화강암류 주변부에는 홍주석-규선석대에 해당되는 열변성대가 발달하는 것으로 규명된 바 있다. 나기창(1995)은 현재까지 알려진 옥천변성대내 광역변성작용들은 옥천변동, 송림변동, 대보변동과 관련되며 각 변동들은 구조적으로나 변성 조건에 차이가 있고 옥천변성대내에는 지역에 따라 이들 변성작용의 중첩되는 양상이 변화가 많을 것으로 지적한 바 있다. 따라서 옥천변성대를 단일 변성작용에 의하여 형성된 변성대로 본 과거의 연구들에서의 분대결과는 지역에 따라 재검토가 되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서는 황강리 지역 앰피블라이트의 광물군을 바탕으로 변성분대를 설정해 보고 이와 더불어 기존 연구를 토대로 변성상을 정의하여 본 염기성암에서 인지되는 변성작용의 특성을 기술하고자 한다. 또한 변성환경을 알아보기 위해 앰피블라이트에 대하여 다성분하에서의 상평형도를 만드는 TWEEQU 지온지압계와 각섬석-사장석 지온계를 적용하여 광역변성작용과 접촉변성작용의 온도와 압력을 추정해 보기로 한다.

일반 지질

옥천층군의 하부에 분포하여 산출시기가 고기로 보여지는 본암은 연구지역에서 대표적으로 꼬부랑재-다랑산, 금곡, 어래산, 응두산, 팽개바위 부근에 암상 내지 암맥상으로 관상관입한 형태로 관찰되고 있다. 꼬부랑재와 금곡 부근에서는 서창리층을, 어래산 부근에서는 서창리층과 석회규산염암층을, 그리고 팽개바위와 응두산 부근에서는 석회규산염암과 석회암층을 관

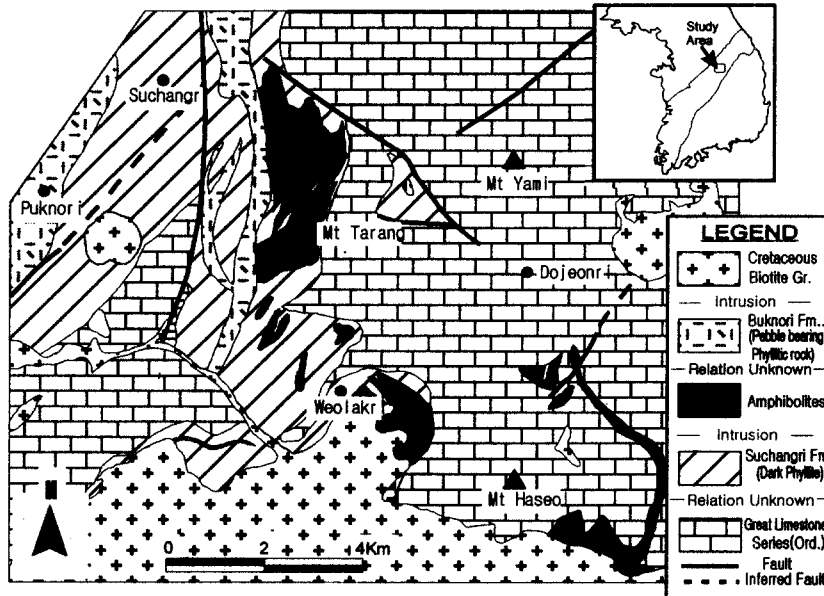


Fig. 1. Geologic map of the study area. Modified from Lee and Park (1965) and Ryu (1991).

입하고 있다. 이들 암피블라이트가 협재되어 있는 옥천계 하부지층인 서창리층은 꼬부랑재 부근에서는 북노리층에 의하여 부정합으로 피복되고 있다(이민성과 박봉순, 1965). 암피블라이트의 관입 및 변성작용의 시기에 대한 규정은 옥천층군 상하지층의 선후관계와 지구조 환경의 진화과정을 규명하는데 필요하나 아직까지 일치된 결론에 이르지 못한 실정이다.

본암은 천매암질암인 서창리층의 층리에 대해 평행하게 암상 형태로 산출되고 있으며 꼬부랑재와 넓은내 부근에서는 기존의 천매암과 흑색점판암의 협층을 북북동 방향의 밴드상으로 협재하고 있다. 넓은내와 응두산 부근에서는 흑운모 화강암이 본암을 관입하고 있으며 팽개바위에서는 암맥상의 화강암질암이 관찰되고 있다(Fig. 1). 본 암피블라이트층에는 편리가 잘 발달된 암석들도 있으며 각섬석의 주상결정이 육안으로 식별되는 조립질의 암피블라이트와 현미경상에서만 식별되는 세립질의 암피블라이트가 있다.

암피블라이트의 산상

본 연구에서는 황강리 지역에 산출되고 있는 암피블라이트에 한정하여 조직과 광물성분을 기준으로 분류된 암종들에 대하여 기술해 보고자 한다. 여기에서도 암석의 엽리의 유무에 의해 크게 두 그룹으로 나누었는데 엽리가 없이 등립상 조직을 띠는 암석들은 암피

블라이트라고 명명하고 이를 다시 입자의 크기로 세분하였고 편리를 보이는 암석들은 편암으로 명명하고 이를 주구성 광물성분으로 세분하였다. 이 지역의 엽기성암은 크게 여섯 가지 암종들로 구성되어 있다. 황강리 지역내 암피블라이트의 시료 위치는 Fig. 2에 표시되어 있으며 아래에서 설명된 현미경상의 특징을 모두 보이지는 않지만 개방니콜하에서의 각 암종별로 선정된 시료의 현미경 사진은 Fig. 3과 같다.

조립질 암피블라이트(Coarse-grained amphibolite)

본암의 산출 지역으로는 꼬부랑재, 선고리, 장보구니, 중선대, 신현리등이며 암색은 암녹색 내지 녹색을 띠고 있다. 조립질의 주상 각섬석 결정에 의해 암석표면은 괴상이며 거친면을 보여주고 있다. 주구성 광물로는 각섬석, 양기석과 다양한 성분의 사장석이 있고 부구성 광물로는 녹니석, 녹염석, 스피, 인회석, 자철석 등이 있으며 국부적으로 열수기원으로 생각되는 자류철석이 흑운모를 수반하며 존재한다. 엷은 녹색 또는 녹색의 주상 각섬석이 4-11 mm×1-4 mm의 입도를 보여주고 있다. 여러 시료의 거정의 입자에서 연녹색의 양기석 중앙부와 녹색-청녹색, 녹색의 각섬석 주변부가 관찰되고 있으며 매트릭스(matrix)에는 여러 형태의 각섬석들이 발달하고 있다. 이 거정의 결정내에는 과립상의 스피, 사장석, 인회석과 드물게 저어콘과 부분적으로 스피나화된 티탄-철 산화물등이 존재하며 녹색

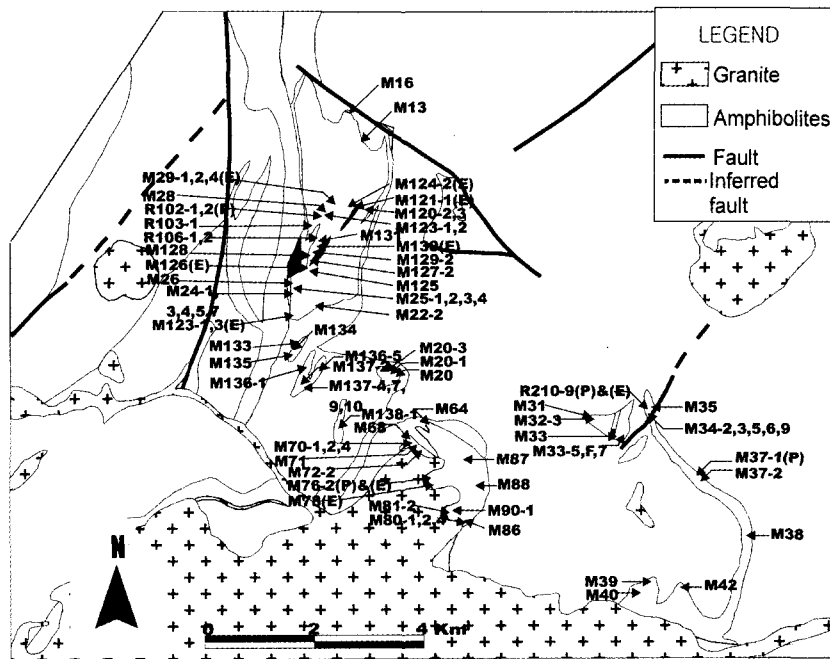


Fig. 2. Sample location map of the amphibolites in the study area. (E) indicates the samples for electron microprobe analysis and (P) indicates the samples for photomicrography.

석에 의해 치환된 조직도 보여주고 있다. 주상의 각섬석에 의해 데쿠세이트 조직(decussate texture)이 형성되어 있고 부분적으로 사장석에 의해 보여지는 잔류 다이아베이직 조직(blastodiabasic texture)이 발달하고 있는데 이 잔류화성조직은 본암이 반려암 내지 휘록암에서 유래되었음을 지시해 주고 있다.

사장석 결정은 $0.1(\approx 0.05)\text{--}0.4\text{ mm} \times 0.1\text{--}1.0\text{ mm}$ 의 다양한 입도를 가지는데 부분적으로 스펀이나 녹염석 입자에 의해 어둡게 보이며 반상변정($1.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$)으로도 발달하고 있다. 사장석은 An_{25} 에서 An_{43} , An_{55} – An_{60} 등의 성분을 보여주며 $An_{0,1}$, $An_{2,0}$ 의 알바이트도 소량 존재하고 있다. 과립이나 주상의 집합체로 발달하고 있는 녹염석은 각섬석 입자를 치환하고 있으며 녹니석과 알바이트와 접촉하면서 존재하고 있다. 녹염석의 최대 소광각은 벽계가 $\{001\}$ 에 평행할 때 33° 에서 35° 정도가 된다. 자철석은 산재되어 나타나며 부분적으로 스펀화되어 있기도 한다.

중립질 앰피블라이트(Medium-grained amphibolite)

이 암종은 조립질 앰피블라이트보다 매끄러운 표면을 갖고 암녹색을 띠고 있다. 황강리 지역에서 본암의 주요 산출지역으로는 선고리의 마들, 음지말, 도기리,

신현리 꼬부랑재, 시림교 동쪽 등이며 파쇄대를 따라 국부적으로 열수 기원의 자류철석이 관찰된다. 팽개바 위부근에서는 두께 1.5–1.7 m의 암맥상의 흑운모 화강암이 $N20\text{--}25E$, $30NW$ 의 방향으로 본암을 관입하고 있다. 주구성 광물은 각섬석, 사장석으로 이루어져 있고 부분적으로 휘석, 양기석, 석영, 녹니석등이 포함되고 있다. 각섬석은 여러 개의 작은 주상 결정이 집합되어 있는 불규칙한 형태의 비교적 큰 입자로 발달하고 있다. 부분적으로 무색 내지 연한 녹색의 각섬석과 녹색의 각섬석이 함께 나타나고 있고 매트릭스에는 세립의 침상 양기석들이 분포하며 어떤 시료에서는 각섬석 입자의 중심에 휘석이 성장해 있기도 한다. 대부분의 사장석 입자들은 심하게 재결정작용을 받아 등립질의 석영입자와 같이 보이는 입상변정질 조직(granoblastic texture) 또는 호미오블라스트릭 조직(homeoblastic texture)을 형성하고 있다. 사장석의 성분은 $An_{17}\text{--}An_{26}$ 의 범위를 갖는다. 자철석 입자는 균질하게 분포하고 있으며 스펀화 작용을 거의 보이지 않으나 작은 구형의 물방울 모양의 스펀들이 각섬석내에서 관찰되기도 한다.

여러 암석들이 잔류 오피틱 조직(blastophitic texture) 또는 잔류 다이아베이직 조직을 띠고 있어 모암이 현무암질암 또는 휘록암인 것으로 사료된다. 연녹색의 양

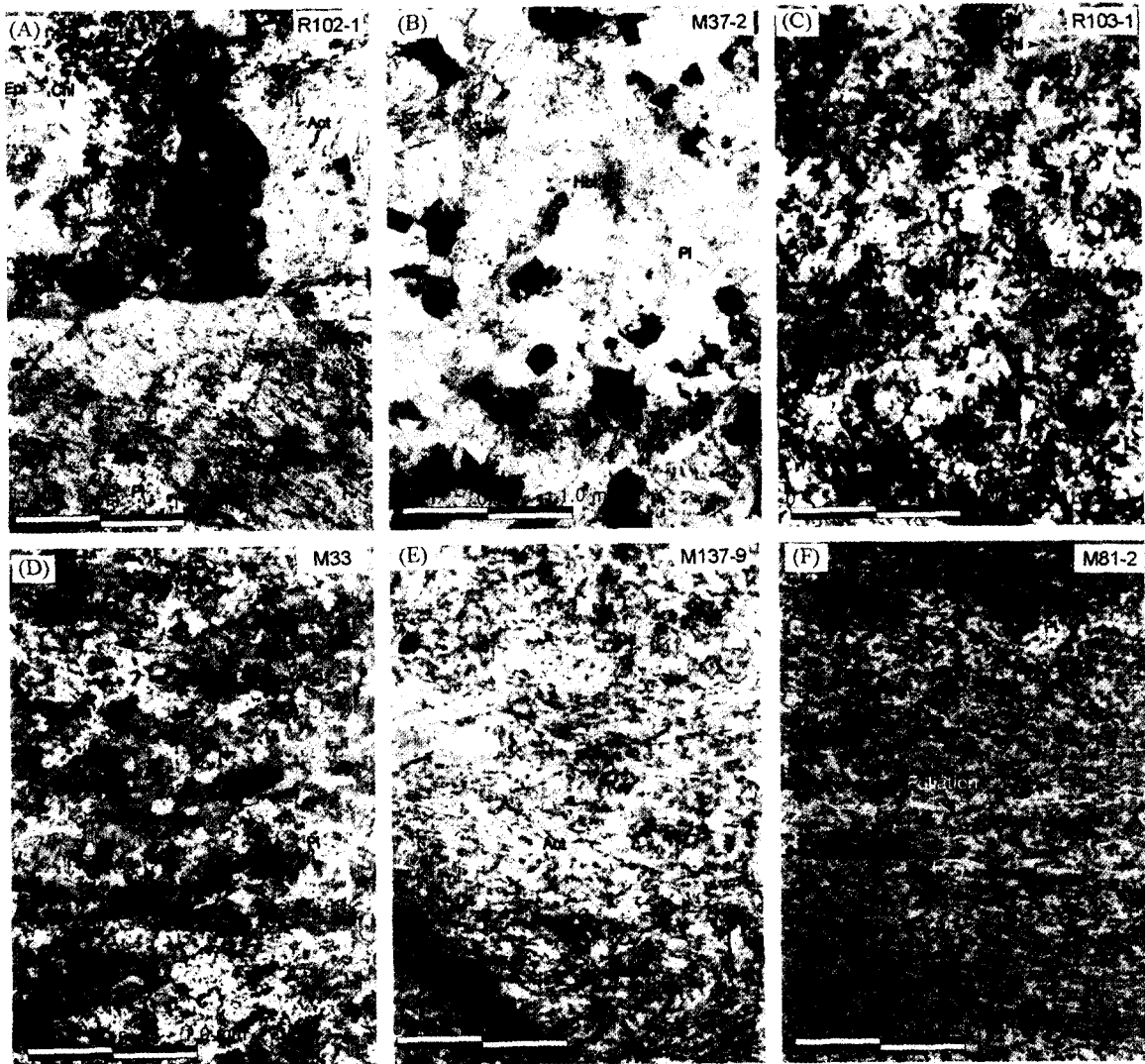


Fig. 3. Photomicrographs of the representative rock types of the amphibolites in the Hwanggangri area. All pictures are under open nicols. (A) coarse grained amphibolite, (B) medium grained amphibolite, (C) fine grained amphibolite, (D) hornblende schist, (E) hornblende actinolite schist, (F) diopside hornblende schist. Magnification is 10X4. See text for the details. Cpx=clinopyroxene, Hbl=hornblende, Act=actinolite, Pl=plagioclase, Chl=chlorite, Epi=epidote.

기석은 보통 주상의 형태로 0.1-0.3 mm×0.3-1.0 mm의 입도를 보이고 있으며 반상변정(1.5 mm×1.5 mm)으로도 발달하고 있다. 녹염석과 녹니석은 매우 드물게 관찰되며 열수기원의 자류철석에 수반된 흑운모의 일부가 녹니석으로 변질되어 있다.

세립질 앵피블라이트(Fine-grained amphibolite)

본암의 주요 노두지역은 신현리, 선고리, 금곡, 월악 광산 부근으로 암회색이나 암녹색의 암색을 띠며 각섬

석 입자들이 육안으로 식별되지 않는다. 노두의 표면은 윤택이 있기도 하며 괴상으로 폐각상의 단구를 보인다. 주구성 광물은 양기석, 각섬석, 사장석, 녹니석등으로 이루어져 있고 부구성 광물은 자철석, 녹염석, 석영등으로 나타난다. 무색에서 연녹색의 양기석은 방사상의 점유상을 띠고 보우타이(bowtie) 형태를 보여주며 벽개가 {001}에 평행하다. 녹색 또는 청녹색의 각섬석은 불규칙한 형태이거나 침상 또는 작은 주상으로 어떤 시료에서는 수지상 조직과 부분적으로 반상변정질 조직

을 보여주고 있다. 뚜렷한 알바이트 쌍정을 보이는 세립의 사장석은 잔류 오피틱 조직을 띠고 있기도 하며 심하게 재결정작용을 받은 사장석 결정은 석영입자와 같이 보이는 입상변정질 조직을 띠기도 한다. 알바이트 쌍정을 보이는 사장석의 성분을 소광각으로 측정해 보면 An_2 - An_7 , An_7 - An_{12} 의 범위를 갖는다. 이 암종은 국부적으로 잔류 행인상 조직(relic amygdaloidal texture)을 갖기도 하며 흑운모가 풍부하게 함유되어 있거나 자철석이 약한 선구조를 보여주기도 한다.

각섬석 편암(Hornblende schist)

본암은 장보구니와 월악광산 근처에서 산출되고 있다. 주구성 광물은 각섬석, 사장석이고 부분적으로 흑운모가 관찰되기도 하며 스피노와 자철석이 부구성 광물로 존재한다. 각섬석 입자가 평행 배열하면서 엽리를 형성하는 조직이 특징적으로 잘 관찰되고 있으며 사장석은 심하게 재결정되어 입상변정질 조직을 띠고 부분적으로 견운모화 작용을 받은 것이 나타난다. 엽리를 형성하고 있는 각섬석 입자들 사이로 석기상에 사장석들이 채워져 있다. 드물게 봉합상의 석영 집합체가 매트릭스에서 관찰되기도 한다.

각섬석 양기석 편암(Hornblende actinolite schist)

본암은 신현리 도로변, 금곡 부근에 산출되고 있는 암종으로 주구성 광물은 양기석, 각섬석, 사장석이며 녹염석, 스피노, 자철석등이 부구성 광물로서 소량으로 관찰되고 있다. 양기석과 각섬석에 의해 섬상변정질 조직(nematoblastic texture)이 발달하고 있으며 부분적으로 침상의 양기석도 형성되어 있으면서 엽리를 보여준다. 사장석은 0.1-0.5 mm×0.5-1.0 mm의 입도를 가지며 잔류 오피틱 조직이나 잔류 조면암질 조직(relic trachytic texture)을 형성하고 있어 본암이 현무암질암이나 조면암질암 또는 휘록암으로부터 기원했음을 지시해 주고 있다. 부분적으로 사장석이 심하게 재결정되어 있어 입상변정질 조직을 형성하기도 하며 국부적으로 소량의 석영 입자를 포함하고 있다.

투회석 각섬석 편암(Diopside hornblende schist)

본암은 월악리 넓은내 부근에서 발견되며 부분적으로 괴상의 형태로도 나타난다. 주구성 광물은 각섬석, 투회석, 사장석인데 각섬석과 투회석은 엽리를 띠게 하는 섬상변정질 조직을 형성하고 있으며 부구성 광물은 녹염석, 인회석, 자철석으로 구성되어 있다. 투회석은 엽리를 형성하는 각섬석 입자사이에서 엽리방향을 따라 반상변정으로 성장되어 있기도 하고 세립의 입자들

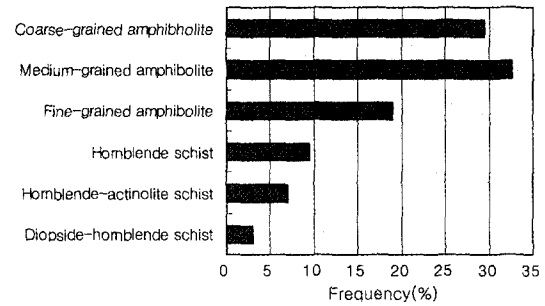


Fig. 4. Frequency of rock types of amphibolites in the Hwanggangri area. This diagram shows that the majority of amphibolites (81%) is included in the non-foliated rocks, whereas the minority (19%) is contained in the foliated rocks.

이 모여서 렌즈상의 집합체를 이루며 엽리의 형태를 이루기도 한다. 일부 사장석도 반상변정으로 존재하고 있다.

이상에서 설명된 각 암상들을 빈도수로 보면 황강리 지역에 걸쳐 채취된 전체 시료중에서 조립질 앰피블라이트와 중립질 앰피블라이트는 세립질 앰피블라이트와 함께 80% 이상을 차지하고 있는 반면 약하게 엽리를 띠는 각섬석 편암은 10% 미만에 해당되며 각섬석-투회석 편암은 매우 드물게 산출되어 가장 적은 3%의 빈도수를 보여주고 있다(Fig. 4). 이 빈도수가 노두에서 산출되는 모든 암상들의 합량을 정확하게 규정한다고 볼 수는 없을 것이며 채취된 시료들의 조직적 경향과는 다르게 황강리 지역에는 전반적으로 수많은 단층과 습곡구조가 관찰되어 여러번의 구조운동이 작용한 것으로 인지되고 있다(이민성과 박봉순, 1965).

변성분대

본 연구에서는 앰피블라이트가 보여주는 광물군으로 주요 노두에 대해 변성분대를 설정해 보았다(Fig. 5). 그림에서 H-AZ(Hornblende-actinolite zone)는 각섬석-양기석대, HZ(Hornblende zone)는 각섬석대, DZ(Diopside zone)는 투회석대로 구분되고 있어 연구지역의 앰피블라이트는 크게 세 개의 변성분대를 보이고 있다. 그림에서 H-AZ(Hornblende-actinolite zone)는 각섬석-양기석대, HZ(Hornblende zone)는 각섬석대, DZ(Diopside zone)는 투회석대로 구분되고 있어 연구지역의 앰피블라이트는 크게 세 개의 변성분대를 보이고 있다. 화강암체에서 먼곳은 대체로 각섬석-양기석대(H-AZ)를 띠고 있으며 주요 광물군은 양기석+각섬석+사장석($An_{1.0-3.7}$, An_{15-36} , $An_{21.4-41}$, $An_{1.0-2.49.9}$)+녹염석±녹염석±흑운모와 양기석+각섬석+사장석($An_{5.0-7.0}$, $An_{33.0-35.0}$)±흑

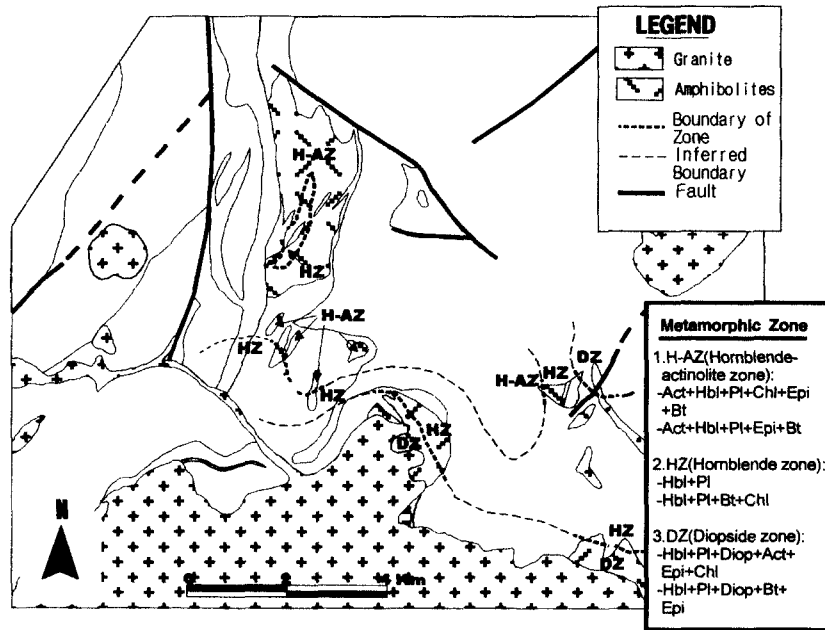


Fig. 5. Metamorphic zonation for the amphibolites in the study area. Thick dotted lines represent the boundary of metamorphic zones of the amphibolites and thin dotted lines represent the inferred boundary. H-AZ; hornblende-actinolite zone, HZ; hornblende zone, DZ; diopside zone.

운모±녹염석으로 나타나고 있다. 화강암체에 근접한 곳에서는 녹니석이나 녹염석이 점차 소멸되고 각섬석, 투회석, 사장석이 안정한 투회석대(DZ)가 존재하는데 주요 광물군은 각섬석+투회석+사장석($An_{25.8}$, $An_{42.9-62.4}$)+양기석±녹염석±녹니석과 각섬석+투회석+사장석($An_{29.0-36.0}$, $An_{36.0-40.0}$)±흑운모±녹염석으로 이루어져 있다. 각섬석대(HZ)는 주로 투회석대와 각섬석-양기석대 사이에 분포하며 주요 광물군은 각섬석+사장석($An_{5.0-7.0}$, $An_{10.0-12.0}$, $An_{30.0-32.0}$)이나 각섬석+사장석($An_{15.0}$, $An_{33.0-37.0}$)±흑운모±녹니석으로 나타나고 있다. 이렇게 변성분대의 분포가 화강암체와 상관관계가 있는 것으로 보아 이는 접촉변성작용의 영향에 의한 결과인 것으로 생각할 수 있다. 본 앰피블라이트에서 변성분대의 변화에 따라 보여지는 광물의 공생관계는 Table 1과 같다. 이 표에는 각 분대에서 관찰되고 있는 주요 광물들은 평형상태의 상과 더불어 준평형상태로 잔류된 것으로 판단되는 상이 함께 나타난다. 녹니석과 녹염석은 각섬석-양기석대에서 안정한 것으로 나타나고 양기석은 각섬석-양기석대에서 주로 안정하나 각섬석대와 투회석대에서는 드물게 관찰되고 있다. 각섬석은 세 분대 모두에서 양호하게 산출하고 있으며 사장석은 변성도 증가에 따라 대체로 An 함량이 증가함

을 보여준다. 석영은 본암에서 거의 관찰되지 않아 이 표에는 제시되지 않았으나 시료위치의 제한성을 감안할 때 그 존재 가능성을 배제할 수는 없다. Bucher and Frey(1994)에 의해 각섬석을 생성하는 반응식은 녹니석+양기석+녹염석+석영→각섬석+ H_2O 으로 녹니석과 녹염석 그리고 석영의 소모로 양기석이 각섬석으로 상변이를 하게 되며 투회석은 각섬석+녹염석+석영→사장석+투회석+ H_2O 을 통해 녹염석과 석영의 소모가 수반되어 생성되는 것이 제안된 바 있다. 반응식에서의 석영은 초생변질(Deuteric alteration)이나 열수변질 등에 의해 화성 환경에서 안정한 감람석과 휘석등으로부터 유출되면서 반응에 참가할 수도 있는 것으로 생각된다. 본암에 석영이 존재했는지라도 그 양이 적다면 다른 반응물의 소모 이전에 석영 전부가 소멸되었을 것이다. 따라서 이 경우 석영을 수반하지 않는 반응식과 더불어 이 반응식들도 전체계내에서 부분적인 역할을 하였을 것이다.

이 지역의 변성분대가 보여주는 특성을 보면 열적 영향을 가장 많이 받은 화강암체 부근에는 투회석대가 분포하고 있으며 화강암체로부터 멀어지면서 각섬석대 그리고 각섬석-양기석대로 전이해 가는 경향이 있음을 알 수 있다. 그러나 각 변성대의 분포와 폭이 불규칙

Table 1. Mineral paragenesis of the amphibolites in the study area.

Metamorphic Zone	H-AZ	HZ	DZ
Chlorite		
Actinolite	
Hornblende
Albite		
Oligoclase	
Andesine	
Diopside		
Epidote	

*H-AZ: hornblende-actinolite zone, HZ: hornblende zone, DZ: diopside zone

한 곳도 존재하는데 이는 지하내 화강암체의 구조적 형태의 불규칙성에 따른 열적 영향의 불규칙성과 암석 성분의 차이에 의한 광물상의 다양성에 기인한 것으로 사료된다.

변성상

황강리 지역에 분포하고 있는 앵피블라이트에서 각섬석류 광물들은 무색이나 연녹색과 녹색, 갈색 등의 다양한 색을 보여주며 색이 다른 두 광물상이 혼하게 대상(帶狀)으로 나타나고 있고 사장석도 한 암석내에서 여러 칼슘 성분을 보여주는 특징을 갖고 있다. 본 암에서 관찰된 주구성 광물들을 종합 분류해 보면 아래와 같이 대표적으로 여섯 가지 광물군으로 나뉘어진다.

- (1) 양기석+사장석+녹니석
- (2) 양기석+각섬석+사장석+녹니석±녹염석±흑운모
- (3) 양기석+각섬석+사장석±흑운모±녹염석
- (4) 각섬석+사장석±흑운모±녹니석
- (5) 각섬석+사장석+투회석+양기석±녹염석±녹니석
- (6) 각섬석+사장석+투회석±흑운모±녹염석

양기석과 각섬석으로 구성된 대상각섬석류의 성인 또는 사장석 성분의 다양성의 원인 등이 다변성작용에 있는 것으로 고찰되고 있다(유영복 외, 2000). 그 결과를 토대로 각각의 광물군들은 변성상의 관점에서 다음과 같이 설명될 수 있다.

광물군(1)과 같이 양기석만을 보여주는 것은 녹색편암상을 지시해 주는 광물군으로 드물게 산출되며 알바이트 성분의 사장석을 함유하고 있다. 광물군(2)는 양기석과 녹니석이 안정할 수 있는 녹색편암상에서 녹염

석-앵피블라이트상의 저변성도의 변성작용이 있는 후 각섬석이 성장할 수 있는 중변성도에 이르는 변성작용이 중첩되면서 야기된 광물군으로 녹니석은 잔류하는 것으로 사료된다. 광물군(3)의 경우는 녹염석-앵피블라이트상과 다르게 녹니석이 부재하고 있는 것으로 보아 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상의 광물군이 생성된 이후에 더 높은 변성도의 변성작용이 중첩됨으로써 녹니석이 소멸됨과 동시에 주변부의 각섬석이 생성되어진 것으로 볼 수 있다. 광물군(4), (5)와 (6)은 중변성도의 광물군을 나타내 주고 있는데 광물군(4)는 연구지역의 노두에서 골고루 분포하며 광물군(3)과 함께 앵피블라이트상에 해당되는 후기의 변성작용을 받아 각섬석을 포함하게 된 것으로 보인다. 광물군(5)와 (6)은 주로 관입화강암체 부근에 분포하는 암석들의 광물군으로서 각섬석의 내부에 국부적으로 양기석이 남아 있는 것으로 보아 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상에 이르는 저변성도의 변성작용이 일어난 이후 화강암의 열적영향으로 상부 앵피블라이트상에 이르는 접촉변성작용이 중첩되면서 녹갈색의 각섬석과 함께 투회석이 생성된 것으로 판단된다.

광물군들이 지시해 주는 변성상을 두 차례의 변성작용으로 나누면 첫 번째 변성작용은 저변성도에 해당되며 그 변성상이 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상에 이르렀고 이에 중첩한 두 번째 변성작용은 중변성도로서 변성상이 앵피블라이트상에서 최대 상부 앵피블라이트상에 이른 것으로 정리해 볼 수 있다.

변성작용의 특성

이전 연구에서 알아보았듯이 대상각섬석류의 형성이 다변성작용에 기인하는 것으로 인지되고 있는 바 중앙부의 양기석을 생성시킨 변성작용은 기존 연구(Kim, 1971; Cho *et al.*, 1994; Oh, 1997)의 결과와 함께 중압형의 저변성도인 것으로 볼 수 있고 관입 화강암체 근처를 비롯하여 여러 노두에서 관찰되는 양기석을 치환한 녹색 내지 녹갈색의 주변부 각섬석을 성장시킨 변성작용은 저압형이면서 중변성도의 특성을 갖는 것으로 밝혀지고 있다(유영복 외, 2000). 이 사실들을 통해서 연구지역의 앵피블라이트는 크게 두 번의 변성작용을 받은 것으로 규정될 수 있다. 첫 번째 변성작용은 육천변성대 전체에 걸쳐 우세하게 작용한 광역변성작용으로 조립질에서 중립질의 각섬석류 입자의 중앙부의 양기석 및 녹니석과 녹염석등을 성장시켰을 것으로 판단되며 변성도는 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상에 이른 것으로 사료된다. 이에 중첩된 두 번

재 변성작용은 앞에서 서술했듯이 주변에 대규모로 관입한 백악기의 화강암체에 의해 야기된 접촉변성작용으로 변성도는 녹색색의 각섬석이 화강암체 부근에서 산출되는 투회석과 함께 관찰되고 있어 상부 앵피블라이트상까지 이른 것으로 사료된다.

초기 광역변성작용

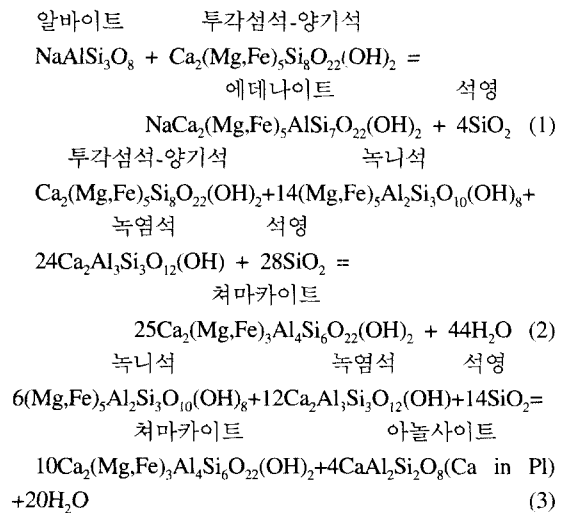
육천변성대 전체에 걸쳐 일어났고 대부분의 암층에 편리를 형성시킨 광역변성작용은 연구지역의 염기성 화성암에도 영향을 미친 것으로 인지된다. 본암에서는 부분적인 편리와 더불어 대부분의 시료(주로 조립질과 중립질 앵피블라이트에서 잘 관찰됨)에서 주변부의 녹색 각섬석에 의해 치환받은 저정의 양기석 또는 양기석질 각섬석을 성장시킨 변성작용이 이에 해당되는 것으로 판단된다. 저정의 양기석류 입자(4-11 mm×1-4 mm)가 지시하듯이 변성작용의 기간이 비교적 길었으며 이 광물이 거의 모든 시료에 산출되는 것으로 보아 광역적으로 일어났던 변성작용의 영향이며 본암에서 나타나는 변성도는 거의 균일한 것으로 보여진다. 앵피블라이트에서 관찰되는 현재의 광물군은 초기 광역변성작용에 후기의 변성작용이 중첩한 결과로 형성된 것이므로 초기의 광물군과 다르다. 즉 초기의 광물군은 중첩에 의한 변화를 고려함으로써 알 수 있으며 앞장에서 설명되었듯이 당시의 변성상도 이러한 변화를 전제로 하여 규정되어야 할 것이다.

초기의 변성작용에 의해 생성된 광물군은 양기석+알바이트+녹니석±녹염석과 양기석+각섬석+알바이트+올리고클레이즈+녹니석±녹염석으로 나타나는데 일반적으로 양기석은 녹색편암상에서 안정하며 각섬석은 올리고클레이즈와 함께 녹염석-앵피블라이트상에서부터 형성되기 시작한다. 본 광물군은 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상의 변성상을 지시해 주고 있어 이 지역의 앵피블라이트가 저변성도의 광역변성작용에 영향을 받은 것으로 사료된다.

Yardley(1989)에 의해 양기석의 생성 반응식으로 녹니석+방해석 = 녹염석+양기석+CO₂-H₂O이 제안되었는바 이 반응은 바로비안 타입의 변성작용의 최저변성도에서 일어나는 것으로 변성도 증가에 따라 녹니석과 방해석은 점차 소멸된다. 위에서 언급한 초기의 양기석을 생성시킨 이전의 상은 본암이 위치했던 지하심도에 따라 다를 것으로 생각된다. 현부암질암의 경우 지표에 가까웠다가 물리적 조건의 차이가 큰 변성환경으로 바뀌면서 화성광물인 감람석이나 휘석으로부터 초생변질(Deuteric alteration)이나 열수변질에 의한 수화작용을 거치면서 양기석과 알바이트 등이 함께 생성되

었을 것이고 만일 심도가 깊었다면(반려암 내지 휘록암) 비교적 높은 지열의 환경에서 서서히 변성환경으로 상변이를 하게 되므로 역시 수화작용을 야기하는 변질작용을 수반한 뒤 매우 낮은 변성도의 상인 불석류, 포도석, 폼펠라이트 등이 생성될 시간과 환경이 만들어졌을 것으로 보여 이들로부터 양기석으로 생성되었던 것으로 볼 수 있다. 칼슘성분이 높았던 사장석은 알바이트로 변화하면서 칼슘을 방출하여 CO₂와의 반응으로 방해석을 형성시켰을 것으로 생각된다. 야외상의 몇몇 노두에서 관찰되는 세맥의 방해석들이 이를 증명해준다. 본 연구에서는 상변화에 있어 초기 변성작용 이후의 과정에 대해 다루고자 하므로 양기석 이전 광물 및 그 변화에 대한 작용은 더 언급하지 않기로 한다.

일반적으로 각섬석의 생성반응은 복잡하며 대부분의 경우 칼슘성분이 증가한 사장석의 형성을 수반하는 반응과 상호 관련되어 있다. 알바이트는 녹염석-앵피블라이트상에서 올리고클레이즈로 점차 변화하게 되는데 이 반응에서 필요로 하는 칼슘(Ca)과 알루미늄(Al)은 부분적으로 녹염석의 붕괴로 공급된다. 알바이트는 붕괴되면서 나트륨(Na)과 규소(Si)를 방출시키게 되는데 이때 각섬석의 생성에 필요로 하는 나트륨(Na)이 저변성도의 양기석에 공급되어 알칼리 원소의 함량을 증가 시킴으로서 상변화를 야기하게 된다. 양기석은 녹니석과 녹염석과도 반응하여 각섬석을 생성시키게 된다 (Shido, 1958; Cooper, 1972; Liou *et al.*, 1974; Graham, 1974; Grapes *et al.*, 1978).



이상의 세 반응식은 각각 단독으로 일어날 수도 있고 세 반응식이 복합적으로 일어날 수 있는데 본암에

서의 자연산 각섬석이 에테나이트나 처마카이트와 같이 단종으로 존재하지 않는 것으로 보아 세 반응식이 복합적으로 일어난 것으로 볼 수 있다. 본암에서 석영이 거의 관찰되지 않는데 이러한 경우 석영은 반응식(1)에서 생성되기는 하나 반응식(2)와 반응식(3)에서 반응물로 참가하여 소모됨으로서 광물군에는 존재하지 않을 가능성이 많다. 이 세 반응식으로 인해 형성될 수 있는 광물군을 알아보면 반응물이 생성물과 함께 나타날 경우 반응식(1)에서는 각섬석+양기석+사장석, 반응식(2)에서는 각섬석+양기석+사장석+녹염석+녹니석, 반응식(3)에서는 각섬석+사장석+녹염석+녹니석으로 나타날 수 있다. 이 광물군에서 녹니석과 녹염석은 반응에 의해 모두 소멸되어 잔류되지 않을 수 있다. 반응식(1), (2), (3)을 뒷받침하는 광물공생군은 각각 Fig. 6A(R210-9), -6B(R102-1) and -6C(M37) 에서 볼 수 있다.

접촉변성작용

초기의 광역변성작용은 많은 시료에서 주변부의 각섬석과 An 함량이 높은 사장석 그리고 투회석 등이 지시하는 바와 같이 더 높은 온도의 변성작용에 의해 중첩되어 있다. 녹색이나 갈녹색의 각섬석은 중앙부의 양기석을 둘러싸는 주변부나 매트릭스에 존재하고 있어 후기의 변성작용에 의해 각섬석이 양기석을 치환하는 조직을 나타내 주고 있다.

이 후기의 변성작용이 백악기 화강암에 의해 야기된 소위 접촉변성작용임을 시사해 주는 증거를 정리해 보면 다음과 같다.

<1> Fig. 5에서 나타낸 앰폴라이트의 변성분대를 보면 대체로 화강암체 근처는 투회석대가 분포하며 화강암체에서 멀어지면서 각섬석대를 거쳐 각섬석-양기석대로 변화해 가는 특성을 띠고 있어 화강암체와 멀어지면서 변성도가 점차로 낮아지는 경향을 보여준다.

<2> 이전 연구(유영복 외, 2000)에서 보였듯이 중앙부의 양기석은 중앙부에 주변부의 각섬석은 저압형에 가까운 화학적 특성을 나타내 주는 것은 이 대상각섬석류가 두 차례의 변성작용으로 각각 형성되었음을 시사하는데 여기서 중앙부의 변성작용은 기존연구들에서 밝혀진 바와 같이 옥천변성대에 우세하게 작용했던 광역변성작용인 것으로 또한 저압형의 변성작용은 주변 중생대 화강암에 의해 야기된 접촉변성작용으로 사료된다. 주변부의 녹색 내지 갈색의 각섬석은 중앙부의 무색 내지 연녹색의 양기석보다 더 높은 온도의 변성작용에 의해 생성된 하나의 반응면(reaction rim)이다.

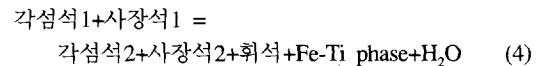
<3> 주변부 각섬석의 색이 좁은 지역내에서 변하며 단사회석이 제한되게 출현하는 광물상의 다양성이 인

지되는 것은 앞장에서의 광역변성작용과 다르게 지역적 영향범위가 좁은 접촉변성작용의 특성을 나타내 준다. 또한 화강암체에 가까울수록 주변부 각섬석의 두께가 넓어지는 경향을 띤다.

후기 변성작용의 광물군은 각섬석+사장석과 각섬석+투회석+사장석으로 중변성도의 광물군을 보여주고 있다. 양기석과 각섬석이 공존하고 있는 시료들에서 분석된 사장석의 성분(Table 6)을 보면 올리고클레이즈와 안데신이 공존(M121, M124-2, M128)하거나 알바이트가 안데신(M130)과 나타나거나 라브라도라이트(R210-9)만이 존재하기도 한다. 이러한 아놀사이트 성분이 풍부한 사장석들은 후기 접촉변성작용의 열적 영향으로 인해 형성되었을 것으로 판단되며 양기석과 알바이트는 준평형 상태로 존재하는 상으로 생각된다(유영복 외, 2000). 따라서 변성분대에서 나타나고 있는 각섬석-양기석대도 사장석 성분으로 보아 광역변성작용에 접촉변성작용이 중첩되어 형성된 것으로 볼 수 있다.

본암에서 녹니석은 소량 관찰되고 있는데 Liou *et al.* (1974)는 염기성계(Basaltic system)에서 550°C, 2 kb (Pfluid)의 조건하에서의 반응식, 즉 녹니석+스핀+석영 = 각섬석+티탄철석+H₂O를 제시하여 녹니석의 소멸조건을 제안한 바 있다. 본암이 보여주는 주요 여섯 가지 광물군중에 광물군(3), (4), (5), (6)과 같이 녹니석을 함유하지 않는 시료들이 있는데 녹니석이 소멸된 온도는 이 제안된 값과 유사한 것으로 생각할 수 있다.

또한 Spear(1981)에 의해서 휘석의 생성반응이 T=730 ± 12°C-788 ± 8°C, P_{H₂O} = 0.5-2.0 kb, QFM과 WM버퍼의 조건하에서 아래와 같이 제시되었다.



이 반응에 의해 각섬석2는 각섬석1보다 파가사이트 성분과 Ti이 더욱 풍부해지고 사장석은 아놀사이트 성분이 증가하게 된다. Fig. 6D(M76-1)에서 관찰되는 광물군으로 미루어 보아 Spear(1981)가 제시한 각섬석과 사장석이 참가하는 반응에 의해 투회석이 각섬석2와 사장석2와 함께 형성되어진 것으로 보여진다. 즉 본암과 같은 변성염기성암에서 고용체로 존재하는 각섬석과 사장석은 성분변화를 하면서 변성도 증가에 따라 투회석의 생성에 직접적으로 관련되어 있다고 할 수 있다. 본암에서 산출하는 자연산의 각섬석과 사장석 및 투회석 등의 생성에는 지금까지 제시된 단종성분으로 이루어진 모든 반응들이 복합적으로 작용했는데 각 반응들은 관찰되는 모든 상들이 서로 조합을 달리하며 해당계(염기성계)내에서 일어나는 것으로 볼 수 있다.

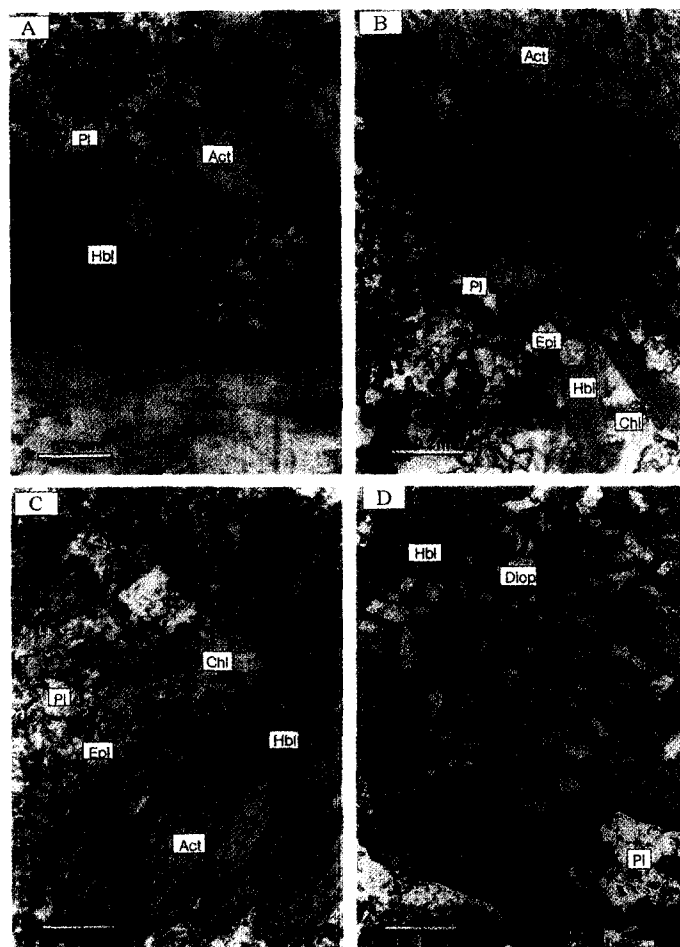


Fig. 6. Photomicrographs of the mineral assemblages for hornblende-producing reactions and cpx-in reaction (10X4). (A) reaction (1), (B) reaction (2), (C) reaction (3), (D) reaction (4). act; actinolite, hbl; hornblende, pl; plagioclase, epi; epidote, chl; chlorite, cpx; clinopyroxene (diopside). In these reactions, albite, tremolite-actinolite, quartz, chlorite and epidote acted as reactants and edenite, tschermakite, anorthite and diopside are products as viewed. It is reasonable to think that all reactions occur together to form natural hornblende of various compositions under the given metamorphic grade. Abbreviations are the same as in Fig. 3.

각 변성작용에 대한 변성상을 ACF 상다이어그램에 종합하여 나타내 보았다(Fig. 7). 열기성암의 경우 변성도 증가에 따른 반응들은 연속적인 성분변화로 보여 지는데(각섬석, 사장석, 녹니석) 주요 연속반응중 하나는 녹니석과 녹염석의 붕괴와 각섬석류의 생성으로 알려져 있다(Spear, 1993).

녹니석+녹염석 = 알루미늄 각섬석

초기 광역변성작용시 분암이 받은 변성상은 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상으로 변성도가 증가하는데 Fig. 7A는 녹색편암상에서의 광물군인 양기석+사

장석+녹니석+녹염석을 보여주고 있으며 Fig. 7B는 각섬석과 양기석이 고용체로서 공존하는 것을 보이며 녹염석-앵피블라이트상의 광물군을 나타내 주고 있다. Fig. 7C와 Fig. 7D는 광역변성작용에 중첩된 접촉변성작용시의 변성상을 나타내 주는데 Fig. 7C는 저변성도에서 안정한 녹니석이 소멸되고 각섬석과 사장석이 안정한 앵피블라이트상의 광물군을 나타내 주며 Fig. 7D는 투회석이 처음 출현하는 상부 앵피블라이트상에서의 광물군을 보여준다. 온도의 증가에 따라 사장석은 점차 칼슘성분이 증가하게 되고 각섬석류는 알루미늄과 알칼리 성분에 변화가 있게 되다가 결국 투회석을

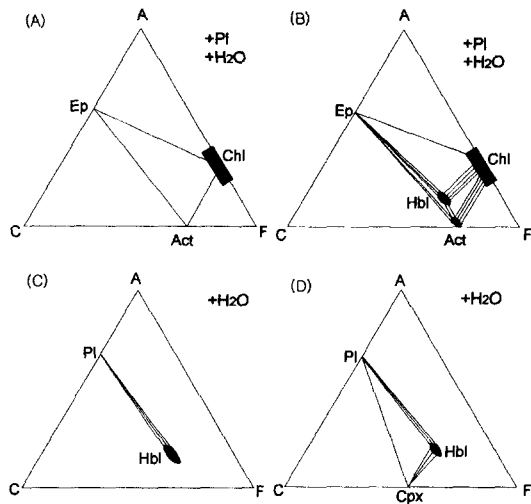


Fig. 7. ACF phase diagrams showing the transition from greenschist facies (A) to epidote-amphibolite facies (B) of the regional metamorphism as well as showing the low pressure part of amphibolite facies (C) and upper amphibolite facies (D) of the contact metamorphism. (C) shows the disappearance of chlorite and (D) indicates the first occurrence of cpx. Amphibole and chlorite are shown to be produced by the continuous reactions. Abbreviations are the same as in Fig. 3.

형성시키는 반응에 수반된다.

상기한 두 차례의 변성작용에서 후기의 접촉변성작용에 의한 상변이를 정리해 보면 우선 각섬석류에서 연녹색의 양기석이 녹색 내지 녹색의 각섬석으로 변화되었는데 각섬석의 색은 변성도 증가에 따라 알루미늄, 알칼리, 티탄 등의 성분이 증가하면서 짙어지는 경향을 갖고 있다. 둘째로는 저변성도에서 생성되었던 녹염석과 녹니석이 감소 또는 소멸되었으며 셋째로는 각섬석과 함께 투회석이 성장하였고 넷째로는 부분적으로 교대작용이 일어나면서 본암중 일부 암석 내에 흑운모가 형성되도록 한 것이다.

황강리 지역 전체에 대한 접촉변성작용의 영향을 파악하기 위해서는 지하내의 화강암의 기하학적 구조와 규모에 대한 규명 그리고 주변 변성니질암과 탄산염암의 변성작용에 대한 연구가 필요하리라 생각된다. 차후 주변에 넓게 분포하고 있는 변성니질암과 결정질 석회암에 대한 광역적인 변성분대가 정립된 후 이를 앰피블라이트가 보여주는 광물군과 대비시키게 되면 여러 성분을 보이는 각섬석류 광물과 사장석이 의미하는 변성사가 새로운 관점에서 검증되어질 수 있고 전체 지역에 대한 접촉변성작용의 영향범위의 윤곽이 확립될 수 있을 것으로 생각된다.

변성작용의 온도와 압력

다성분계 상평형도를 이용한 지온지압계

현재는 앰피블라이트나 칼크-알칼린 심성암과 같이 각섬석과 사장석을 포함하고 있는 많은 암석들에 대한 믿을만한 지온지압계가 부족한 형편이다. 이들 암석에서 유일한 철-마그네슘 상으로 흔히 존재하는 각섬석은 화성암과 변성암에서의 주요 조암광물로 마그마 환경이나 변성 환경에서 광범위하게 존재하고 있으므로 상당히 넓은 안정성을 보여주기 때문에 특정 온도-압력을 지시해 주는 반응의 인지가 어렵다. 연구지역의 앰피블라이트가 받은 변성작용의 온도와 압력을 열역학적 자료와 고용체의 활동도 모델을 이용하여 상평형도에 만들어지는 반응곡선의 교차점을 통해 구하고자 지온지압계인 TWEEQU(Thermo-barometry With Estimation of EQUilibrium state: Berman, 1991)를 본 암에 적용해 보았다. 이 지온지압계는 근래에 변성니질암과 석류석 앰피블라이트에 대해 신의철(1999)과 Jeon(1999) 등에 의해 각각 사용된 바 있다. 계산에 이용된 각섬석과 사장석의 성분은 Table 2 과 Table 3 에 각각 수록되어 있으며 각 시료들의 위치는 Fig. 2 에 표시되어 있고 이들의 광물군들과 그 조직의 특징은 Table 4 에 정리되어 있다.

각각의 시료에서 주구성 광물상이며 고용체로 존재하고 있는 각섬석류, 사장석 그리고 단사회석 등에 대해서는 그 화학성분을 사용하고 나머지 광물들에 대해서는 단종(endmember)으로 가정하여 계산하여 보았다. 단순화한 계의 성분으로 SiO₂-Al₂O₃-CaO-Na₂O-MgO-FeO-H₂O(NCFMASH system, C=7)를 사용하였고 이 계내에서 시료들의 광물군을 토대로 하여 반응물과 생성물에 해당될 수 있는 상들을 설정해 보았다. 염기성암에서 고용체들의 상변이가 반응물과 생성물의 구분 없이 연속적으로 일어나는 특성을 가지며 본암에 석류석이 부재한 점 등의 원인으로 인해 반응곡선들의 불변점(invariant point)을 구하는데 필요한 상들을 설정할 때 주의를 요한다.

본암에서 주로 관찰되는 대상각섬석류는 중앙부의 양기석과 주변부의 각섬석으로 구성되어 있는데 중앙부는 초기 광역변성작용으로 생성되었고 주변부 내지 부분적으로 이와 동반 하는 단사회석은 접촉변성작용에 의해 형성된 것으로 앞서 설명되었다. 초기 광역변성작용의 변성도는 녹염석-앰피블라이트상에 이르렀고 접촉변성작용의 변성도는 상부 앰피블라이트상까지 이른 것으로 나타나고 있다. 광역변성작용에 대해서는 양기석의 성분을 사용하는데 이는 양기석에서 각섬석으

Table 2. Chemical compositions of the amphiboles in the amphibolites of the study area.

Sample	M121-1	M121-1	M123-2	M123-2	M128	M128	M130	M29-2	M29-2	M76-2	M76-2	M78	M78	R102-1	R210-9	R210-9	
Analysis	33	34	35	1	9	12	13	21	45	47	50	52	38	41	4	48	50
Location	OP	core	core	matrix	core	rim	core	core	rim	core	IP	OP	matrix	rim	core	rim	core
SiO ₂	49.75	53.13	51.50	38.37	52.19	42.13	52.95	50.50	43.46	51.06	43.90	45.37	45.63	45.93	49.10	39.92	50.81
TiO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	0.38	n.d.	0.47	n.d.	n.d.	2.50	n.d.	1.40	1.14	1.23	1.08	0.06	0.38	0.06
Al ₂ O ₃	4.01	2.29	2.88	15.84	3.11	12.24	2.56	2.52	8.58	2.37	8.91	8.56	7.80	7.04	5.34	14.25	3.28
FeO	21.32	19.02	18.66	18.93	14.88	18.10	14.59	20.08	16.37	22.48	17.99	18.57	19.43	19.68	19.32	21.70	18.39
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.29	0.39	n.d.	0.38	0.36	0.29	0.34	n.d.	n.d.	n.d.	0.25	0.33	0.30
MgO	8.84	11.52	11.01	7.98	13.58	8.91	14.58	10.44	11.08	8.96	9.68	10.32	9.11	10.17	10.16	6.79	12.55
CaO	11.52	12.19	11.85	11.47	12.09	11.71	11.81	11.71	10.92	11.82	11.36	11.87	11.60	11.13	12.30	11.29	11.78
Na ₂ O	0.53	0.59	0.53	2.97	0.45	2.02	0.54	0.53	1.82	0.43	1.98	1.90	1.84	1.76	0.68	2.37	0.74
K ₂ O	0.21	n.d.	0.17	0.38	0.15	0.34	n.d.	n.d.	1.02	n.d.	0.72	0.42	0.63	0.55	0.21	0.56	0.21
Total	96.18	98.74	96.60	96.32	96.74	96.31	97.03	96.16	96.11	97.41	96.28	98.15	97.27	97.34	97.42	97.59	98.12

Number of cations are calculated by Cation 13-CNK (Robinson <i>et al.</i> , 1982)																	
Si	7.57	7.77	7.70	5.87	7.64	6.40	7.66	7.62	6.57	7.70	6.70	6.76	6.93	6.89	7.34	6.07	7.42
Al(IV)	0.43	0.23	0.30	2.13	0.36	1.61	0.34	0.38	1.43	0.30	1.30	1.24	1.07	1.11	0.66	1.93	0.56
Al(VI)	0.28	0.16	0.21	0.72	0.18	0.58	0.09	0.07	0.10	0.12	0.30	0.27	0.33	0.13	0.28	0.62	-
Fe ³⁺	0.20	0.08	0.10	0.62	0.23	0.45	0.44	0.37	0.49	0.25	0.24	0.30	0.02	0.54	0.19	0.75	0.64
Ti	-	-	-	0.04	-	0.05	-	-	0.28	-	0.16	0.13	0.14	0.12	0.01	0.04	0.01
Mg	2.00	2.51	2.46	1.82	2.96	2.02	3.14	2.35	2.50	2.01	2.20	2.29	2.06	2.28	2.27	1.54	2.73
Fe ²⁺	2.51	2.24	2.23	1.80	1.59	1.85	1.33	2.17	1.58	2.59	2.05	2.02	2.45	1.93	2.23	2.01	1.59
Mn	-	-	-	-	0.04	0.05	-	0.05	0.05	0.04	0.04	-	-	-	0.03	0.04	0.04
Ca	1.88	1.91	1.90	1.88	1.90	1.90	1.83	1.89	1.77	1.91	1.86	1.90	1.89	1.79	1.97	1.84	1.84
Na(M4)	0.12	0.09	0.10	0.12	0.10	0.10	0.15	0.11	0.23	0.09	0.14	0.10	0.11	0.21	0.03	0.16	0.16
Na(A)	0.03	0.08	0.05	0.76	0.02	0.50	-	0.05	0.30	0.03	0.44	0.45	0.43	0.30	0.17	0.54	0.05
K(A)	0.04	-	0.03	0.07	0.03	0.07	-	-	0.20	-	0.14	0.08	0.12	0.11	0.04	0.11	0.04

OP=outer part, IP=inner part
 OP and IP indicate the locations of the nearly homogeneous phase

Table 3. Chemical compositions of the plagioclases in the amphibolites of the study area.

Sample	M121-1	M121-1	M123-2	M123-2	M128	M128	M130	M29-2	M29-2	M29-2	M76-2	M76-2	M78	R102-1	R210-9	R210-9
Analysis	36	37	4	5	10	11	18	48	49	53	55	55	39	3	41	44
SiO ₂	57.73	62.64	66.58	48.21	57.94	65.84	67.66	68.29	68.09	56.54	55.48	61.86	68.69	68.69	53.03	53.06
Al ₂ O ₃	26.65	23.20	19.70	32.76	25.83	21.08	19.82	19.34	19.65	26.80	27.05	23.70	19.44	19.44	28.47	29.54
FeO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.44	n.d.	0.10	0.10	0.19	0.07
CaO	8.42	4.71	0.78	15.37	7.40	2.18	0.59	0.16	0.18	8.80	9.20	5.49	0.21	0.21	11.75	12.39
Na ₂ O	6.69	9.28	11.30	2.47	7.09	10.64	11.25	11.86	11.70	6.47	5.92	8.73	11.88	11.88	4.98	4.04
K ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.17	n.d.	0.16	n.d.	0.04	0.04	0.09	0.12
Total	99.49	99.83	98.36	98.81	98.26	99.74	99.32	99.65	99.79	98.61	98.25	99.78	100.36	100.36	98.51	99.22
Number of ions on the basis of 8O																
Si	2.59	2.78	2.96	2.23	2.63	2.90	2.98	2.99	2.98	2.57	2.54	2.75	2.99	2.99	2.44	2.42
Al	1.41	1.21	1.03	1.78	1.38	1.09	1.03	1.00	1.01	1.43	1.46	1.24	1.00	1.00	1.54	1.58
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.00	0.00	0.01	0.00
Ca	0.41	0.22	0.04	0.76	0.36	0.10	0.03	0.01	0.01	0.43	0.45	0.26	0.01	0.01	0.58	0.60
Na	0.58	0.80	0.98	0.22	0.62	0.91	0.96	1.01	0.99	0.57	0.53	0.75	1.00	1.00	0.44	0.36
K	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.01	-	-	0.00	0.01	0.01
Ab	59.00	78.10	96.30	22.50	63.40	89.80	97.20	99.20	98.20	57.10	53.30	74.20	98.80	98.80	43.20	36.90
An	41.00	21.90	3.70	77.50	36.60	10.20	2.80	0.80	0.80	42.90	45.80	25.80	1.00	1.00	56.30	62.40
Or	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	0.90	-	0.20	0.20	0.50	0.70

Ab=100*Na/(Na+Ca+K), An=100*Ca/(Na+Ca+K), Or=100*K/(Na+Ca+K)

Table 4. Mineral assemblages of the selected samples for the electron microprobe analysis.

Sample NO.	Mineral assemblage	Grain size	Zoning	Texture
M29-2	Hbl+act+pl+bt+apa+sph+oxide	C	O	R
M76-2	Hbl+diop+act+pl+apa+oxide	C	O	R
M78	Hbl+diop+act+pl+apa+oxide	C	O	R
M121-1	Hbl+act+pl+epi+bt+sph+chl+apa+oxide	C	O	R
M123-2	Hbl+act+pl+epi+bt+chl+apa+sph+zir+oxide	M	O	R
M124-2	Hbl+act+pl+chl+cal+epi+sph+oxide	M	O	R
M128	Hbl+act+pl+chl+oxide	M	O	R
M130	Hbl+act+pl+bt+apa+epi+chl+sph+oxide	C	O	R
R102-1	Hbl+act+pl+epi+bt+chl+apa+sph+oxide	C	O	R
R103-1	Hbl+pl+chl+oxide	F	none	R
R210-9	Hbl+diop+act+pl+epi+chl+bt+apa+sph+oxide	C	O	R

C: coarse grained, M: medium grained, F: fine grained, O: presence of zoning, R: relic igneous texture, Hbl: hornblende, act: actinolite, pl: plagioclase, diop: diopside, epi: epidote, chl: chlorite, apa: apatite, sph: sphene, zir: zircon
The samples R102-1, R103-1, R210-9 are from Ryu (1991).

Table 5. Estimates of temperature and pressure by TWEEQU for the amphibolites of the study area.

Sample NO.	R102-1	R210-9	M121-1	M123-2	M128	M29-2	M78	M76-2
T°C(C)	487	499	537	578	523	528		
T°C(R)		685	588	616	709	659		
T°C(RCpx)							697	739
Pkb(C)	7.1	4.9	5.2	4.6	7.3	7.0		
Pkb(R)		2.6	4.9	5.2	4.0	5.2		
Pkb(RCpx)							3.8	5.2

TWEEQU thermobarometry for the equilibrium T and P is from Berman (1991).
C: core (actinolitic), R: rim (hornblende), RCpx: rim with cpx
Uncertainties are $\pm 50^\circ\text{C}$, ± 1.0 kb (St. Onge and Lucas, 1995).

로 전이하게 될 때 당시 고용체의 평형성분이 양기석을 가정하는 것이며 접촉변성작용에 대해서는 주변부 각섬석의 성분을 사용하는데 이는 당시 양기석으로부터 전이한 각섬석이 평형성분이 되기 때문이다. 또한 입자간의 경계가 뚜렷하지 않거나 누대조직도 보이지 않는 거정의 사장석은 몇몇 시료(M121-1, M123-2, M128)에서 보면 주변부 각섬석에 가까운 부위에서 An 함량이 더 높게 나타나는 특징을 보이고 있고 변성도 증가에 따라 사장석의 칼슘성분이 증가한다는 일반적 원리를 적용하여 동일시료에서 An 성분의 값에 따라 낮은 An의 사장석은 중앙부 양기석과 평형을 이루고 높은 An의 사장석은 주변부 각섬석과 평형을 이루는 것으로 가정하여 성분대입을 하였다. 단사회석이 출현하는 경우는 동일 변성작용으로 형성된 주변부 각섬석과 평형을 이루는 것으로 본암에서 가장 높은 변성도를 보이는 것으로 볼 수 있다. 사장석과 각섬석의 활동도 계수를 계산하기 위한 활동도 모델은 각각 Fuhr-

man and Lindsley(1988)와 Mader and Berman(1992)의 모델을 적용하였고 단사회석에 대해서는 이상적 혼합(ideal mixing) 모델을 이용하였다. St. Onge and Lucas(1995)는 Essence(1989)의 제의에 근거하여 TWEEQU 지온지압계가 $\pm 50^\circ\text{C}$, ± 1 kbar의 종합적인 불확실성 오차범위를 갖는 것으로 제안하였으며 본 연구에서도 이를 적용해 보고자 한다. 대상각섬석류의 중앙부와 주변부를 형성시킨 각 변성작용의 온도, 압력의 값들이 Table 5에 계산되어 있다.

양기석의 성분을 적용함으로써 광역변성작용시의 온도와 압력으로 판단되는 상평형도상의 계산값들에 대한 설명은 다음과 같다. 시료 R102-1의 광물군은 각섬석-양기석-사장석-녹염석-녹니석인데 반응에 참여했을 것으로 사료되어 TWEEQU에서 설정된 상들은 알바이트, 판온석(antigorite), 단사녹니석(clinocllore), 포도석(prehnite), 철질 투각섬석, 쳐마카이트, 철질 쳐마카이트, 파가사이트, 클리노조이사이트, H₂O 등이다. 생성

된 다섯 개의 반응곡선(A1, A2, A3, A4, A5)이 교차하여 평형을 이루는 온도와 압력은 각각 487°C, 7.1 kb로 나타나고 있다(Fig. 8A). 시료 M121-1의 광물군은 양기석-각섬석-사장석-흑운모-녹니석-녹염석이며 지정된 상들은 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 단사녹니석, 석영, 철질 투각섬석, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트, H₂O 등 아홉 개이다. 다섯 개의 반응곡선(B1, B2, B3, B4, B5)이 교차하고 있으며 이때의 온도와 압력은 537°C, 5.2 kb으로 측정된다(Fig. 8A). 광물군으로 각섬석-양기석-사장석을 보이는 시료 M29-2에 대해서 설정된 상들은 아놀사이트, 단사녹니석, 포도석, 철질 투각섬석, 처마카이트, 철질 처마카이트, 조이사이트, H₂O 등이다. 이 시료는 상평형도상에서 네 개의 반응곡선(C1, C2, C3, C4)에 의해 528°C와 6.9 kb의 온도, 압력값을 보이고 있다(Fig. 8A). 지리적으로 근거리에서 분포하는 시료들을 함께 나타냈으며(R102-1, M121-1, M29-2/M123-2, M128, R210-9) Fig. 8A에서의 삼각형 영역은 반응곡선들의 각 불변점들을 이은 평형상태의 온도, 압력 범위의 영역을 의미하는 것으로 반응에 참여한 상들의 평형조건의 경계로 추정된다. 광물군으로 각섬석-양기석-사장석-녹염석-흑운모-녹니석을 갖는 시료 M123-2에 대해 설정된 상들은 아놀사이트, 단사녹니석, 포도석, 투각섬석, 철질 처마카이트, 파가사이트, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트, H₂O 등 아홉 개가 된다. 이때 반응곡선(D1, D2, D3, D4, D5)이 교차하는 평형상태에서의 온도와 압력은 상평형도에서 578°C, 4.6 kb으로 비교적 높은 온도를 보여준다(Fig. 8B). 시료 M128은 광물군으로 각섬석-양기석-사장석-녹니석을 함유하고 있으며 반응에 참가했을 것으로 추정되어 지정된 상들은 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 단사녹니석, 석영, 투각섬석, 철질 투각섬석, 철질 파가사이트, 조이사이트, H₂O 등이다. 이 시료에 대해 구해진 온도는 523°C이고 압력은 다른 시료들보다 비교적 높은 값인 7.3 kb에 이르고 있다(Fig. 8B). 다음은 시료 R210-9로서 광물군은 각섬석-양기석-투회석-사장석-녹염석-녹니석으로 반응물과 생성물로 추정되는 상들로는 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 단사녹니석, 석영, 철질 투각섬석, 철질 처마카이트, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트 그리고 H₂O 등 열 개인데 광물군중의 투회석은 후기의 접촉변성작용에 의해 생성된 것으로 볼 수 있어 반응식에 참가하는 상들중에 포함되지 않는다. 이 시료의 경우 다섯 개의 반응곡선(E1, E2, E3, E4, E5)에 의해 추정되는 평형상태의 온도와 압력은 각각 499°C, 5.0 kb의 값을 가진다(Fig. 8B). 상기한 시료들이 상평형도상에서 보여주는 광역변성작용

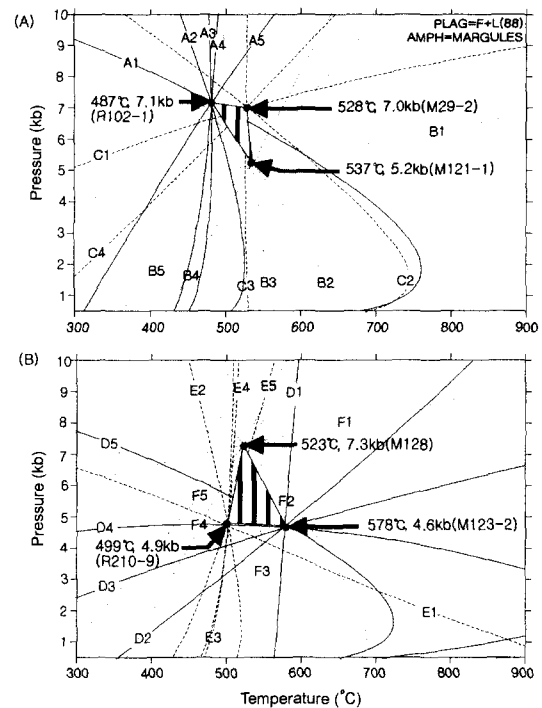


Fig. 8. Phase diagrams in the simplified chemical system NCFMASH for the amphibolites of the Hwanggangri area. Temperature and pressure results were calculated by TWEEQU (Berman, 1991). Compositions of amphibole used are actinolitic in the core of the zoned amphiboles and thus mean the P-T conditions of initial regional metamorphism. Reaction curves make the each invariant point that mean the possible equilibrium of all phases in each sample. (A) represents the triangle domain of the equilibrium P-T limit for three samples R102-1, M121-1 and M29-1, closely located each other in the field. (B) also shows the triangle domain of the equilibrium P-T limit for three samples M123-2, M128 and R210-9. Capitalized numbers demarcate the reaction curves for each sample (A for R102-1, B for M121-1, C for M29-2, D for M123-2, E for R210-9 and F for M128).

의 변성온도의 범위는 487-578°C(±50°C)이며 압력 범위는 4.6-7.3 kb(±1.0 kb)에 해당되는 것으로 추정할 수 있다.

주변부의 각섬석이나 부분적으로 동반하는 단사회석의 성분들을 적용하여 상평형도에서 접촉변성작용의 온도와 압력조건을 추정해 보면 다음과 같다. 시료 M121-1은 주변부 각섬석의 성분을 적용할 경우 설정된 상들은 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 단사녹니석, 석영, 철질 투각섬석, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트, H₂O 등으로 아홉 개가 된다. 다섯 개의 반응곡

선(G1, G2, G3, G4, G5)에 의해 구해진 온도와 압력은 588°C, 4.9 kb로 나타나 비교적 낮은 온도를 보여 준다(Fig. 9A). 시료 M29-2의 설정된 상들은 알바이트, 판온석, 단사녹니석, 포도석, 석영, 철질 투각섬석, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트 그리고 H₂O 등으로 아홉 개이며 여섯 개의 반응곡선(H1, H2, H3, H4, H5, H6)으로 추정된 온도와 압력은 659°C, 5.2 kb으로 나타난다(Fig. 9A). 시료 M123-2에 대해 설정된 반응에 참가하는 상들은 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 단사녹니석, 석영, 철질 처마카이트, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트, H₂O 등으로 불변점을 형성하는 여섯 개의 반응곡선(I1, I2, I3, I4, I5, I6)이 지시하는 온도와 압력은 616°C, 5.2 kb가 된다(Fig. 9B). 시료 M128에 대해서는 알바이트, 아놀사이트, 판온석, 석영, 철질 투각섬석, 처마카이트, 철질 처마카이트, 파가사이트, 철질 파가사이트 그리고 클리노조이사이트 등 열 개의 상들이 설정되어 적용되었고 다섯 개의 반응곡선(J1, J2, J3, J4, J5)이 형성한 불변점이 지시하는 평형상태의 온도와 압력은 709°C, 4.0 kb의 값을 갖는다(Fig. 9B). 시료 R210-9의 경우 적용된 상들은 알바이트, 판온석, 단사녹니석, 포도석, 석영, 철질 처마카이트, 철질 파가사이트, 클리노조이사이트 및 H₂O 로서 여섯 개의 반응곡선(K1, K2, K3, K4, K5, K6)이 불변점을 형성하며 685°C, 2.6 kb의 조건을 보여준다(Fig. 9B).

주변부 각섬석과 공존하는 단사휘석은 시료 M78과 시료 M76-2에서 관찰된다. 시료 M78의 광물군은 각섬석-투회석-사장석-양기석이며 반응에 참가했을 것으로 사료되어 설정된 상들은 알바이트, 아놀사이트, Ca-Al 휘석, 투회석, 석영, 철질 투각섬석, 철질 처마카이트, 파가사이트, 철질 파가사이트 등 아홉 개가 된다. 이 때 불변점을 이루는 반응곡선은 다섯 개(L1, L2, L3, L4, L5)로 697°C, 3.8 kb의 온도, 압력값을 지시해 준다(Fig. 9C). 시료 M76-2의 경우 광물군은 각섬석-투회석-사장석으로 적용된 상들은 알바이트, 아놀사이트, 투회석, 석영, 철질 투각섬석, 처마카이트, 파가사이트 그리고 철질 파가사이트 등이며 여섯 개의 반응곡선(M1, M2, M3, M4, M5, M6)이 형성하는 불변점은 평형상태의 온도와 압력이 각각 739°C, 5.2 kb임을 보여준다(Fig. 9C). 따라서 주변부 각섬석과 부분적으로 출현하는 투회석을 형성시킨 접촉변성작용의 온도와 압력은 상기한 바와 같이 588-739°C(±50°C), 2.6-5.2 kb(±1.0 kb)의 범위를 갖게되며 그 중 최고 온도는 697-739(±50)°C에 이르는 것으로 상부 암피블라이트상의 저압부에 해당됨을 알 수 있다. 시료별로 각 변성작용간의 온도와 압력차를 구해보면 광역변성작용이

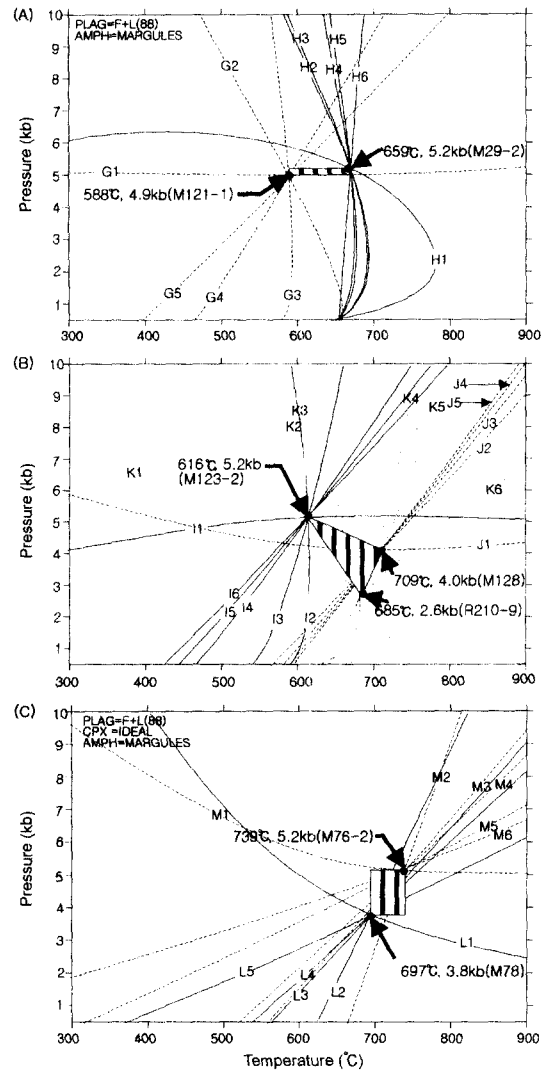


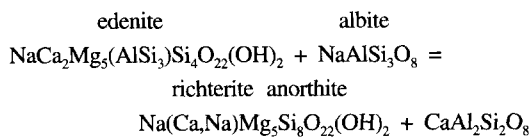
Fig. 9. Phase diagrams in the simplified chemical system NCFMASH are calculated by TWEEQU (Berman, 1991) for the amphibolites of the Hwanggangri area. Compositions of amphibole used are rim hornblende in the zoned amphiboles and thus mean the P-T conditions of contact metamorphism. Reaction curves make the invariant point that mean the possible equilibrium of all phases in each sample as in Fig. 6. (A) represents the assumed rectangular domain of the equilibrium P-T limit for the samples M121-1 and M29-1, and (B) also shows the triangle domain of the equilibrium P-T limit for the samples M123-2, M128 and R210-9. (C) represents the domain of the equilibrium P-T limit for the cpx-in samples M78 and M76-2, and it is considered to indicate area of the peak metamorphic condition. Capitalized numbers demarcate the reaction curves for each sample (G for M121-1, H for M29-2, I for M123-2, J for M128, K for R210-9, L for M78 and M for M76-2).

접촉변성작용보다 온도는 38-186°C(M123-2; R210-9)의 범위정도가 더 낮고 압력은 0.3-3.3 kb(M121-1; M128) 정도 더 높게 나타남을 알 수 있다(Table 5). 각 상평형도상에서의 반응식들은 부록에 기재되어 있다.

각섬석-사장석 지온계

많은 실험 연구에서 각섬석은 1-23 kb와 400-1150°C의 넓은 압력, 온도범위에서 여러 시작물질로부터 합성되어왔기 때문에 온도-압력의 지시자로서 상당한 잠재성을 가지고 있으나 각섬석 성분의 복잡성으로 인해 열역학적인 측정에 있어 어려움이 있다. Blundy and Holland(1990)는 몇 개의 단종 성분들에 대한 열역학적 자료가 있으나 성분상 복잡한 자연산의 각섬석에서 활동도와 성분의 관계는 불분명하다고 밝힌 바 있다. 즉 앰피블라이트의 생성온도 규명에 적절한 지온계는 각섬석의 화학구조식이 매우 복잡하고 구조식내 각 성분간의 함량변화에 대한 열역학적 특성이 쉽게 변할 수 있어 완성되기 어려운 것으로 알려져 있다.

현재까지의 각섬석 지압계들은 관입화성암(칼크-알칼리 심성암등)의 압력값을 추정하는데 이용되고 있어 본암에 적용하는데는 무리가 있을 것으로 사료된다. 문경지역에서의 백악기 월악산 화강암에 의한 변성염기성암과 변성니질암의 열변성작용의 연구(오창환 외, 1993)에서 변성니질암의 근정석대의 변성조건이 480-580°C, 1.5-3.3 kb로 추정된 바 있다. 본 연구에서는 각섬석-사장석 지온계를 이용하여 각 변성작용의 변성온도를 추정하는데 앞장에서 TWEEQU(Berman, 1991)를 이용하여 구한 압력값을 해당 시료들에 대해 적용해 보았으며 두 지온계에 의한 온도값들을 광물군과 변성상을 토대로 상호 비교하여 적절한 온도 범위를 규정해 보았다. Holland and Blundy(1994)는 Blundy and Holland(1990)의 반응식(1)로부터 수정된 에데나이트-투각섬석(Edenite-tremolite) 지온계와 함께 또 다른 반응식으로부터 에데나이트-리히터라이트(Edenite-richterite) 지온계를 제시하여 두 반응에 대한 새로운 계산식을 유도하였다.



양기석은 접촉변성작용을 받기 전 광역변성작용시의 온도를 보여줄 것으로 사료되고 있어 계산에 이용된 각 시료들에 대하여 TWEEQU에서 구한 압력값을 대입하여 온도를 구하였다. 네 개의 앰피블라이트 시료

에서 분석된 양기석으로 계산한 온도 분포(Table 6)를 보면 다음과 같다. 에데나이트-투각섬석 지온계에서는 5.2-7.0 kb의 압력값에서 각각 439-495°C의 온도 분포를 갖는 것으로 계산되어 약 50°C의 범위를 나타내 주고 있다. 에데나이트-리히터라이트 지온계에서는 시료 M121-1(34)에서 다른 분석시료의 계산값보다 특히 높은 온도 591-607°C(34)로 나타나고 있는 반면 시료 M29-2의 계산값을 보면 7.0 kb의 압력값에서 395°C로 계산되어 매우 낮은 온도로서 이 결과는 너무 넓은 온도 범위를 보여 에데나이트-리히터라이트 지온계의 결과값은 부적당한 것으로 사료되어 진다. 반면 Blundy and Holland(1990)의 각섬석-사장석 지온계에 의해 구해진 온도값을 보면 동일 압력값에서 460-492°C로 약 30°C의 폭을 갖고 있으며 에데나이트-투각섬석 지온계와 3-24°C의 온도차를 가지며 유사한 온도 분포를 보여주고 있어 이 두 지온계에 의한 결과가 지질학적으로 적절한 값인 것으로 추정된다. 동일 시료(M121-1, M123-2, M29-2)들에 대해 TWEEQU에 의해 구한 온도범위는 528-578°C를 가져 상기한 두 각섬석-사장석 지온계보다 약 50-140°C의 값만큼 더 높은 온도분포를 보인다. 이런 온도값의 차이는 각섬석-사장석 지온계가 네 개의 상이 존재하는 한 반응식이 고려된 반면 TWEEQU에서는 다수의 상(8-11개)하에서 불변점을 만드는 가능한 여러 반응들이 동시에 나타나는 조건이 전제되는 과정에서 생기게 된 것으로 판단된다. 다만 TWEEQU의 전체 범위인 487-578°C를 고려하면 400°C대에서는 유사한 값을 보이는 것으로 볼 수 있는데 이중 시료 M123-2의 578°C는 각섬석-사장석 지온계의 전체 범위를 고려했을 때 온도의 차이가 100-140°C 정도나 되고 유난히 높은 값을 보여 부적당한 값으로 사료된다. 따라서 광역변성작용시 성장한 양기석이 보여주는 변성온도는 각섬석-사장석 지온계(Blundy and Holland, 1990)와 에데나이트-투각섬석 지온계(Holland and Blundy, 1994) 그리고 TWEEQU로부터 439-537°C의 범위에 분포하는 것으로 추정되며 압력값을 고려하면 중압형에 해당되는 것으로 규정될 수 있다.

화강암체 부근의 투회석을 동반하는 각섬석으로 계산한 접촉변성작용시의 최고 온도분포를 보면 다음과 같다(Table 7). 에데나이트-투각섬석 지온계에서는 시료 M76-2가 740-754°C의 온도 범위를 보이고 시료 M78은 약간 낮은 637-699°C의 온도 범위를 보이면서 시료 M76-2의 최고온도와 시료 M78의 최고온도가 55°C의 차이를 갖는다. 에데나이트-리히터라이트 지온계에서는 시료 M76-2가 754-764°C, 시료 M78이 658-739°C의 범위로 계산되어 에데나이트-투각섬석 지온계에 의

Table 6. Temperature estimates of the regional metamorphism in the amphibolites.

Sample	M121-1	M121-1	M123-2	M130	M29-2
Amph. NO.	34	35	9	21	47
Pl. NO.	37	37	4	18	48
XabPl	0.781	0.781	0.963	0.972	0.993
P(kb)	5.2	5.2	4.6	5.6	7.0
(1) Edenite-tremolite thermometer (Holland & Blundy, 1994)					
lnK	2.779	2.855	3.709	2.945	3.588
T(C)	483	473	439	495	442
(2) Edenite-richterite thermometer (Holland & Blundy, 1994)					
lnK	-2.397	-2.555	-4.716	-5.036	-6.363
T(C)	607	591	466	480	395
(3) Amphibole-Plagioclase Thermometer (Blundy & Holland, 1990)					
Si Total	7.761	7.703	7.642	7.621	7.696
lnK	2.509	2.276	2.282	2.229	2.491
T(C)	460	474	479	492	466

Amphiboles are recalculated by Holland and Blundy (1994)

Table 7. Temperature estimates of the contact metamorphism in the amphibolites.

Sample	M76-2	M76-2	M78	M78
Amph. NO.	50	52	38	41
Pl. NO.	53	55	39	39
Location	IP	OP	matrix	rim
XabPl	0.571	0.533	0.742	0.742
P(kb)	3.8	3.8	5.2	5.2
Edenite-tremolite thermometer (Holland & Blundy, 1994)				
lnK	-2.142	-2.016	-1.501	-0.909
T(C)	740	754	637	699
Edenite-richterite thermometer (Holland & Blundy, 1994)				
lnK	-2.979	-3.136	-3.752	-3.093
T(C)	764	754	658	739

IP=inner part, OP=outer part

한 계산과 시료 M76-2는 3.8 kb의 압력하에서는 0-24°C, 시료 M78은 5.2 kb의 압력하에서는 21-40°C의 작은 온도차이를 보이며 유사한 온도 범위를 나타내 주고 있다. TWEEQU로 두 시료에 대해 구한 온도인 697-739°C는 에테나이트-투각섬석 지온계에서 41번, 50번 분석값에 의한 온도와 유사하고 에테나이트-리히터라이트 지온계로 계산한 동일시료와 비교하면 시료 M78(697°C)은 그 온도범위내(658-739°C)에 속하고 있으며 시료 M76-2(739°C)는 754-764°C의 범위와 상한 온도에 있어 15-25°C의 작은 차이를 보이며 서로 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 이 결과는 화강암의 관입시 작용한 접촉변성작용은 저압형으로서 최고변성은

도가 697-739°C의 범위안에 분포하는 것을 나타내 주고 있는 것으로 본 앵피블라이트를 이용하여 계산한 온도 범위와 오창환 외(1993)에 의해 추정되고 있는 문경지역 변성니질암의 근청석대의 변성온도인 480-580°C와는 차이를 보이나 오창환(1999)에 의해 보은화강암 주변 상부 앵피블라이트상의 변성염기성암으로부터 추정된 변성온도인 698-726°C와는 유사하다. 이렇게 본 암에서는 화강암의 관입시에 발생한 접촉변성작용의 최고온도의 상한계가 739°C 근처까지 이른 것으로 추정되고 있는데 이것은 Spear(1981)가 제시한 WM와 QFM 버퍼하에서의 각섬석이 붕괴되면서 생성되는 단사회석의 생성반응곡선이 지시하는 온도(HM, $P_{fluid} =$

3.0 kb, $738 \pm 9^\circ\text{C}$; WM, $P_{\text{fluid}} = 2.0 \text{ kb}$, $775 \pm 15^\circ\text{C}$; QFM, $P_{\text{fluid}} = 2.0 \text{ kb}$, $788 \pm 8^\circ\text{C}$)와 유사한 값을 보여주는 것이다.

토 의

옥천변성대는 Liu(1993)과 Liou *et al.*(1994)에 의해 중국-한국 지괴(sino-korea)와 양쯔판 간의 분할대 중 하나일 가능성이 있는 것으로 제의된 바도 있어 옥천 변성대의 지질연대는 한반도의 지구조적 진화를 이해 하는데 중요하다. 그러나 현재까지 옥천변성대내의 절대연령 측정에 대한 기존연구에서 선캠브리아대, 고생대, 중생대에 걸친 넓은 연령이 측정되었으며 이들 서로 다른 절대연령의 의미가 무엇인지 정확히 밝혀져 있지 않다. Kim(1971)은 옥천변성대의 변성상, 평안계의 변성작용과 화성활동의 연구를 통하여 옥천변성대의 광역변성작용이 일어난 시기를 중생대초인 것으로 처음으로 밝혔다. 권성택과 藍晶瑩(1991)은 문경 지역의 앵피블라이트의 연대를 Sm-Nd방법으로 $677 \pm 91 \text{ Ma}$ 로 추정하고 이 연대는 초기변성작용 혹은 정치시기를 나타내는 것으로 해석하였는데 근래에 박계현과 정창식(1998)에 의하면 변성광물이 원래의 Sm/Nd 비율을 유지하기 힘들며 변성작용시 전암의 동위원소 조성으로 구성 광물의 초기치가 바뀌기 때문에 권성택과 藍晶瑩(1991)의 전암-각섬석-사장석 연대는 변성연대로 해석되어야 함을 제의하였다. 민경원 외(1995)는 문주리층에 분포하는 각섬석 편암에 대해 $675 \pm 30 \text{ Ma}$ 의 K-Ar 각섬석 연령을 구하고 이를 원생대 말기의 변성작용을 시사하는 것으로 보고 옥천층군의 일부는 적어도 675 Ma 이전에 퇴적된 것으로 추정하였다. 앵피블라이트 전암 시료들의 Sm-Nd 동위원소 자료를 연대로 환산하여 $1270 \pm 220 \text{ Ma}$ 의 연대치를 얻은 Lee(1997)는 이 연대가 실제 관입연대 보다 더 오래된 겉보기 연대일 가능성이 매우 큼을 시사하였고 문주리층의 조면암 시료에서 U-Pb 동위원소 분석을 실시하여 $755.8 \pm 1.3 \text{ Ma}$ 를 얻고 원생대 말 옥천대에서 일어난 화성활동의 시기를 나타낸다고 제안하였다.

본 지역의 앵피블라이트는 초기의 광역변성작용과 후기의 접촉변성작용을 겪은 것으로 나타나고 있다. 관찰되는 양기석 또는 양기석 중앙부는 조립질에서 세립질로 발달하며 앵피블라이트에 전반적으로 존재하고 있는 것으로 보아 그 형성시기는 오창환 외(1995, 1997)의 연구에 따르면 3차에 걸친 변성작용(M1, M2 및 M3)중 전체 옥천변성대에 가장 우세하게 가해진 M2 중압형 광역변성작용에 해당되는 것으로 판단된

다. 오창환 외(1995)에 의하면 변성작용 M2는 각섬석 편암내의 각섬석의 K-Ar 변성연령을 통해 그 시기가 206-220 Ma로 삼척기말-쥬라기초에 일어난 것으로 평가되고 있는데 이는 Kim(1971)에 의해 보고된 광역변성작용의 시기에 대한 규정과도 대비되며 나기창(1995)에 의해 언급된 옥천변동, 송림변동 그리고 대보변동 중에 송림변동과 시기적으로 유사하나 아직 변성작용과의 관계가 명확하지 않다. 변성작용 M3는 중생대 화강암체에 의해 주변암에 야기된 접촉변성작용을 지시하는데(오창환 외, 1995) 황강리 지역에서는 화강암체가 백악기에 관입하였으므로 후기의 접촉변성작용의 시기가 백악기에 해당되는 것으로 볼 수 있으며 변성분대를 보면 알 수 있듯이 화강암체에 인접한 앵피블라이트가 받은 접촉변성작용시에 투회석과 각섬석 그리고 아놀사이트 성분이 높은 사장석등이 형성되었다. 변성상의 관점에서 광역변성작용(변성작용 M2)은 중압형으로 녹색편암상에서 녹염석-앵피블라이트상 사이에 접하며 백악기의 접촉변성작용은 저압형으로 상부 앵피블라이트상에 이르고 있다.

본 연구에서 광역변성작용시 성장한 양기석이 보여주는 최고 변성온도는 5.2-7.3 kb의 압력하에서 $492-537^\circ\text{C}$ 의 범위 내에 속하는 것으로 계산되고 있어 중압형의 변성작용을 지시해 주고 있다. 나기창(1995)은 Reedman *et al.*(1973)의 황강리 일대의 광역변성작용 연구에서의 변성도 변화의 패턴을 보고 이것을 쥬라기의 대보변동 변성작용과 관련된 것으로 생각하였으며 이 사실과 더불어 나기창 등(1982)에 의한 5 kb, 590°C , Hong(1984)에 의한 $500-545^\circ\text{C}$, Cho *et al.*(1994)에 의한 변성 조건들을 참고하여 변성작용시 최고의 변성조건은 5-9.5 kb, $590-630^\circ\text{C}$ 를 넘지 않은 것으로 언급한 바 있다. 또한 본 앵피블라이트에 대해 구해진 접촉변성작용의 온도는 TWEEQU 지온지압계의 측정에 의하면 3.8-5.2 kb의 압력조건하에서 $697-739^\circ\text{C}$ 의 범위에 이르고 있어 고온 저압형의 변성작용을 의미해 준다.

연구지역 앵피블라이트가 보여주는 상기한 두 차례 변성작용의 온도 압력조건과 기존의 변성시기에 대한 결과들로부터 압력-온도-시간 경로(P-T-t path)에 의한 변성진화과정을 종합해 볼 수 있다(Fig. 10). 그림에서 접촉변성작용의 온도-압력 조건이 단사휘석의 생성(cpx-in)곡선(A)과 겹치는 것은 본암에 투회석이 존재하는 것으로 확인된다. 또한 녹니석의 소멸(chlorite-out)곡선(B)은 녹염석-앵피블라이트상과 앵피블라이트상간의 경계를 의미하는 것으로 광역변성작용이 녹염석-앵피블라이트상에 이르렀던 것을 보여준다. 기존의 연구들로부터 옥천변성대에 가장 우세하게 작용한 광역변성작

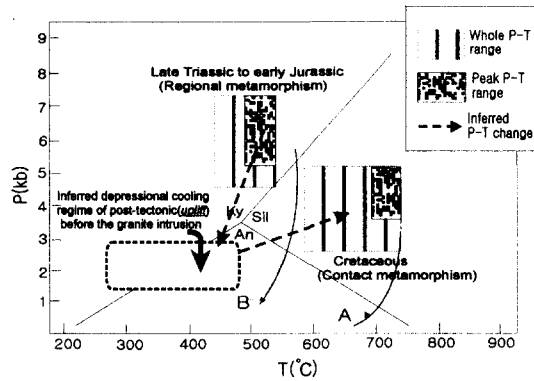


Fig. 10. P-T diagram summarizing the results of this study on the P-T evolution of the amphibolites with the geochronologic constraints suggested by Oh *et al.* (1995). Two metamorphic events and their P-T ranges are recognized in the diagram. Assumed depressional cooling regime is thought to occur by tectonic thinning (uplift and erosion) before the intrusion of cretaceous granitic body. P-T relationship of both the regional and contact metamorphism indicates the clockwise path. A (cpx-in) curve is at HM buffer from Spear (1981). B (chlorite-out) curve is at QFM buffer from Liou *et al.* (1974). An; andalusite, Ky, kyanite, Sil; sillimanite.

용의 시기는 삼첩기말-쥬라기초로 설정할 수 있다. 이 시기에 지각이 두꺼워지면서(crustal thickening) 지하의 어떤 면적을 갖으며 본 앰피블라이트를 포함하는 지점에 최대 7.3 kb에 이르는 중압형의 광역변성작용이 발생하게 되었다. 변동 후 계속하여 이 지점이 용기작용으로 인하여 압력강화와 냉각작용으로 낮은 온도-압력 (<2.6 kb)의 환경하(assumed dotted domain in Fig. 10)에 놓이게 되는데(tectonic thinning) 이것은 중압형의 광역변성작용 이후 더 낮은 압력을 갖는 저압형의 변성작용을 야기한 화강암체의 관입작용, 즉 상승이동이 가능한 환경이 형성되었던 것으로 볼 수 있다. 이 변화된 환경에 놓이게 된 구간의 하부에 접하고 있던 화강암질 마그마가 상부의 낮은 압력의 지점으로 상승이동하여 관입이 일어나면서 지온구배의 변동이 수반되었을 것으로 보인다. 백악기(114.8-70.8 Ma; 진명식, 1995)에 이르러서는 화강암체의 관입으로 녹색색 각섬석 내지 투회석의 생성을 야기한 보다 낮은 압력/온도 비의 온도-압력 범위를 갖는 접촉변성작용이 일어나게 된 것이다. TWEEQU의 열역학적인 계산에 의하면 관입체의 냉각이 일어나는 접촉부 근방의 주변암에는 2.6 kb에서 4.0-5.0 kb에 달하는 압력의 상승이 일어난 것으로 나타나는데 이를 깊이로 환산하면 최대 12-15 km이며 보통의 지열구배에서도 400°C 이상의 온도를 갖는

심부환경으로 추정된다. 이 환경에서는 관입 마그마와 주변암과의 온도차가 적어 접촉경계가 모호하고 미그마타이트도 수반될 수 있을 것인데 야외에서는 지질도에서와 같이 주변암을 예리하게 절단하는 산상을 보이고 있어 이 압력값이 지시하는 현상과 맞지 않는 것으로 사료된다(송용선, 개인통신). 이것은 이 연구에서 계산된 압력이 열역학적 지온지압계의 불안전성 내지 한계등으로 인해 실제 압력보다 더 높은 값으로 규정되었을 가능성이 있어 엄밀하게 보아 압력값의 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 다른 한편으로는 마그마가 상승이동하면서 갖는 압력이 주변암에 부분적으로 압력 증가를 야기하는 경우도 생각할 수 있으나 이 경우 화강암체와 주변암에 변형의 증거를 보여야 할 것인데 아직 확실히 관찰되진 않았다. 그러나 야외관찰이 지역적으로 제한적인 것을 감안할 때 그 존재의 가능성을 배제할 수는 없다. 본암이 겪은 압력-온도의 변화 과정을 보면 전체적으로 초기 광역변성작용에서 접촉변성작용으로 가면서 온도는 상승하고 압력은 감소하는 변성진화과정을 겪었음을 알 수 있다. Oh(1997)의 연구에서도 온도-압력 범위는 다르더라도 옥천변성대 서남부에 해당되는 전주-금산-대전지역에 분포하는 변성니질암의 압력-온도 변화과정(M2→M3)이 본 연구지역과 유사한 패턴을 보여주고 있어 본 연구의 결과를 지지해 주고 있다. 옥천변성대의 변성온도 냉각속도에 관해서 Oh(1997)는 남서부와 중부지역에서 216±10 Ma 시기에 일어난 M2변성작용 이후 207±3 Ma까지는 15°C/Ma로 급속한 반면 207 Ma와 164±4 Ma 사이는 1.6°C/Ma로 완만함을 보고한 바 있다.

과거연구에서 밝혔듯이 남정석을 수반하는 중압형의 변성작용이 옥천변성대의 주변성작용인 바 이는 트라이아스기에 대륙충돌과 같은 압력을 상승시킬 수 있는 조구조 운동이 발생했음을 시사하는 것으로 보여지며 변성도의 변화양상이 남쪽에서 북쪽으로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 사실은 옥천변성대가 중국의 북중국과 남중국의 충돌대인 친링-다비 조산대의 연장선에 해당될 수 있는 가능성을 시사하나 임진강변성대(Imjingang belt)와 경기육괴 연천충군에서도 남정석이 출현하고 있다. 특히 근래에 Liou *et al.*(1994)과 Cho *et al.*(1995) 그리고 Ree *et al.*(in press) 등에 의해 임진강변성대가 그 연장선일 수도 있을 것으로 언급되고 있다. 한반도에서 친링-다비 조산대의 연장 여부와 범위에 대한 규정을 위해서는 변성작용과 구조운동의 특성과 그 시기의 관점에서 이들 지역에 대한 자세한 연구가 필요할 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서 알아본 앰피블라이트의 암석학적 특성을 종합·정리하면 다음과 같다.

1. 황강리 지역내 앰피블라이트는 크게 여섯 가지 암상으로 산출되는 바 조립질 앰피블라이트, 중립질 앰피블라이트, 세립질 앰피블라이트, 각섬석 편암, 각섬석-양기석 편암, 각섬석-투회석 편암 등이 있다.

2. 본암에서 관찰되는 대표적인 광물군은 ① 양기석+사장석+녹니석, ② 양기석+각섬석+사장석+녹니석±녹염석±흑운모, ③ 양기석+각섬석+사장석±흑운모±녹염석, ④ 각섬석+사장석±흑운모±녹니석, ⑤ 각섬석+사장석+투회석+양기석±녹염석±녹니석, ⑥ 각섬석+사장석+투회석±흑운모±녹염석 등 여섯 가지로 종합 분류된다.

3. 앰피블라이트의 주요 광물군으로 변성분대를 설정해 보면 각섬석-양기석대(H-AZ), 각섬석대(HZ), 투회석대(DZ)등 크게 세 개의 변성분대가 인지된다. 변성분대가 보여주는 특성을 보면 열적 영향을 가장 많이 받은 화강암체 부근의 투회석대에서 각섬석대 그리고 각섬석-양기석대로 전이해 가는 것이 인지되므로 화강암체로부터 멀어지며 접촉변성작용의 변성도가 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

4. 연구지역의 앰피블라이트는 크게 두 번의 변성작용을 받은 것으로 인지되고 있다. 첫 번째 변성작용은 옥천변성대 전체에 걸쳐 우세하게 작용한 중생대초의 광역변성작용으로 본암에서는 조립질에서 중립질의 각섬석 입자의 중심 또는 핵부위의 양기석을 성장시켰고 중압형으로서 녹색편암상에서 녹염석-앰피블라이트상에 이르렀고 이에 중첩된 두 번째 변성작용은 주변 대규모의 백악기 화강암에 의한 저압형의 접촉변성작용으로 투회석이 존재하는 것으로 보아 상부 앰피블라이트상까지 이른 것으로 사료된다.

5. 초기 광역변성작용은 전체 온도-압력 범위 439-537°C, 4.6-7.3 kb에서 최고변성온도가 5.2-7.3 kb의 압력하에 492-537°C의 범위에 분포하는 것으로 추정되며 화강암체의 관입에 의한 접촉변성작용은 전체 온도-압력 범위 588-739°C, 2.6-5.2 kb에서 최고온도는 3.8-5.2 kb의 압력하에 697-739°C의 범위에 분포하는 것으로 추정되고 있다.

사 사

본 논문의 심사를 맡아 유익한 비평과 조언을 해주신 충북대학교 지구환경과학과 나기창 교수님과 부경

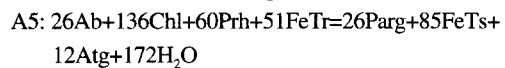
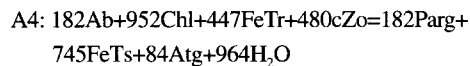
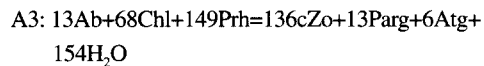
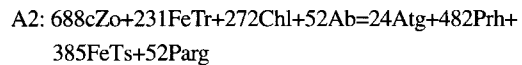
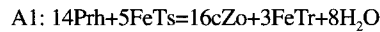
대학교 환경지질과학과 송용선 교수님 그리고 조선대학교 지구과학교육과 안건상 교수님께 감사를 드린다. 그리고 본 논문은 2001년도 고려대학교 특별연구비에 의해 수행되었으며 이에 사의를 표한다.

Appendix

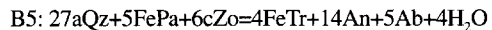
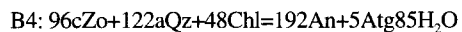
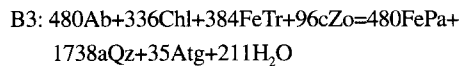
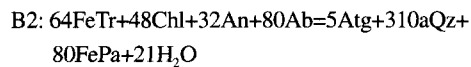
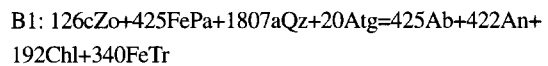
Supposed reactions achieving the invariant point calculated by TWEEQU(Fig. 8 and Fig. 9), are listed as belows. Actinolitic compositions are used for the regional metamorphism, and hornblende compositions are used for the contact metamorphism in the zoned amphiboles. Phases of the reactions in each sample are considered to be in equilibrium state during metamorphism. (Abbreviation of end-members: Ab=albite, An=anorthite, Atg=antigorite, Chl=clinocllore, Prh=prehnite, Tr=tremolite, FeTr=ferrotremolite, Tsc=tschermakite, FeTs=ferrotschermakite, Parg=pargasite, FePa= ferropargasite, cZo=clinzoisite, Zo=zoisite)

(1)All possible reactions for the selected end-member component during regional metamorphism

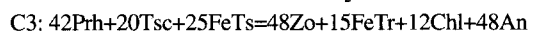
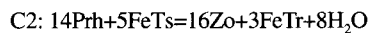
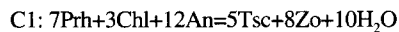
[R102-1]



[M121-1]



[M29-2]



- C4: $24An+6Chl+3FeTr=5FeTs+10Tsc+12H_2O$
[M123-2]
- D1: $56Prh+60FeTs+45Parg=64cZo+45FePa+20Tr+16Chl+64An$
- D2: $32An+8Chl+4Tr+15FePa=15Parg+20FeTs+16H_2O$
- D3: $15FePa+28Prh+12Chl+48An=20FeTs+15Parg+32cZo+40H_2O$
- D4: $4An+Chl+7Prh=8cZo+Tr+6H_2O$
- D5: $56Prh+20FeTs+15Parg=64cZo+15FePa+12Tr+32H_2O$
[R210-9]
- E1: $FeTs+FeTr+2Ab=8aQz+2FePa$
- E2: $96cZo+384FeTr+336Chl+480Ab=35Atg+1738aQz+480FePa+211H_2O$
- E3: $182Ab+1344Chl+667FeTr+384cZo=182FePa+869FeTs+140Atg+844H_2O$
- E4: $336Chl+182aQz+144FeTr+96cZo=240FeTs+35Atg+211H_2O$
- E5: $336Chl+1334aQz+288FePa+96cZo=384FeTs+35Atg+288Ab+211H_2O$
[M128]
- F1: $425Ab+422An+192Chl+340FeTr=126cZo+425FePa+1807aQz+20Atg$
- F2: $64FeTr+48Chl+32An+80Ab=5Atg+310aQz+80FePa+21H_2O$
- F3: $480Ab+336Chl+384FeTr+96cZo=480FePa+1738aQz+35Atg+211H_2O$
- F4: $96Zo+122aQz+48Chl=192An+5Atg+85H_2O$
- F5: $27aQz+5FePa+6Zo=4FeTr+14An+5Ab+4H_2O$

(2) All possible reactions for the selected end-member component during contact metamorphism

- [M121-1]
- G1: $425Ab+422An+192Chl+340FeTr=126cZo+425FePa+1807bQz+20Atg$
- G2: $64FeTr+48Chl+32An+80Ab=5Atg+310bQz+80FePa+21H_2O$
- G3: $480Ab+336Chl+384FeTr+96cZo=480FePa+1738bQz+35Atg+211H_2O$
- G4: $96cZo+122bQz+48Chl=192An+5Atg+85H_2O$
- G5: $27bQz+5FePa+6cZo=4FeTr+14An+5Ab+4H_2O$
[M29-1]
- H1: $7Prh+20bQz+5FePa=8cZo+4FeTr+5Ab+4H_2O$
- H2: $60Ab+48Chl+12Prh+48FeTr=60FePa+214bQz+5Atg+37H_2O$
- H3: $26bQz+96Prh+48Chl=5Atg+96cZo+85H_2O$

- H4: $52FeTr+869Prh+480Chl+65Ab=50Atg+65FePa+856cZo+798H_2O$
- H5: $480Ab+336Chl+384FeTr+96cZo=480FePa+1738bQz+35Atg+211H_2O$
- H6: $296cZo+340FeTr+192Chl+425Ab=20Atg+211Prh+1596bQz+425FePa$
[M123-2]
- I1: $126cZo+340FeTs+20Atg+255Ab=422An+192Chl+913bQz+255FePa$
- I2: $32An+48Chl+202bQz+48FePa=64FeTs+5Atg+48Ab+21H_2O$
- I3: $336Chl+1334bQz+288FePa+96cZo=384FeTs+35Atg+288Ab+211H_2O$
- I4: $96cZo+122bQz+48Chl=192An+5Atg+85H_2O$
- I5: $366Ab+240Chl+488FeTs+1212cZo=366FePa+25Atg+2668An+913H_2O$
- I6: $6cZo+4FeTs+3Ab=14An+5bQz+3FePa+4H_2O$
[M128]
- J1: $6Ab+3FeTr+8Tsc=6Parg+5FeTs+24bQz$
- J2: $96Ab+676An+8Atg+93FeTr=180cZo+96Parg+155FeTs+610bQz$
- J3: $678Ab+2440Tsc+335FeTs+2160cZo=678Parg+201FeTr+96Atg+8112An$
- J4: $676An+8Atg+45FeTr=180cZo+75FeTs+128Tsc+226bQz$
- J5: $45Ab+124Tsc+90cZo=45Parg+67bQz+4Atg+338An$
[R210-9]
- K1: $3Ab+7Prh+4FeTs=8cZo+3FePa+12bQz+4H_2O$
- K2: $39Ab+288Chl+667Prh+52FeTs=680cZo+39FePa+30Atg+562H_2O$
- K3: $26bQz+96Prh+48Chl=5Atg+96cZo+85H_2O$
- K4: $48Chl+12Prh+170bQz+36FePa=48FeTs+5Atg+36Ab+37H_2O$
- K5: $336Chl+1334bQz+288FePa+96cZo=384FeTs+35Atg+288Ab+211H_2O$
- K6: $296cZo+255FePa+1124bQz+192Chl=255Ab+20Atg+211Prh+340FeTs$
[M78;cpx-in sample]
- L1: $FeTs+FeTr+2Ab=8bQz+2FePa$
- L2: $3FePa+Parg+12bQz+4An=4Ab+4Di+4FeTs$
- L3: $2Parg+3FeTr+8An=2Ab+8Di+5FeTs$
- L4: $Parg+2FeTr+4An=4Di+4bQz+2FeTsFePa$
- L5: $4Ab+4An+4FeTr+Parg=5FePa+20bQz+4Di$
[M76-2;cpx-in sample]
- M1: $4Tsc+4FeTr+8Ab=32bQz+3Parg+5FePa$

- M2: $An+3 bQz+Parg=Tsc+Di+Ab$
 M3: $32An+12FeTr+23Parg=15FePa+20Tsc+32Di+8Ab$
 M4: $5Parg+4FeTr+8An=8Di+8bQz+4Tsc+5FePa$
 M5: $4Ab+4An+4FeTr+Parg=5FePa+20bQz+4Di$
 M6: $Tsc+4FeTr+3An+5Ab=3Di+23bQz+5FePa$

참고문헌

- 권성택, 藍晶瑩, 1991, 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원소연 구: 예비보고서, 광산지질, 24, 277-285.
- 나기창, 1995, 옥천변성대의 변성암 및 변성작용. 이종혁교 수 정년퇴임기념논집, 270-271.
- 나기창, 이동진, 이상현, 1982, 충주층군과 옥천층군의 비 교연구. 광산지질, 15, 177-188.
- 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, 나가오, 나카무라, 1995, 충주 지역에 분포하는 변성암류의 K-Ar 연대: 원생대 말 기(675Ma)의 옥천대 변성작용. 지질학회지, 31, 315-327.
- 박계현, 정창식, 1998, 옥천변성대 변성퇴적암의 스트론튬 동위원소 조성 및 연대. 지질학회지, 34, 83.
- 신의철, 1999, 단양-풍기일대 소백산 편마암 복합체의 백립 암상 변성작용과 진화과정. 고려대학교 박사학위논문, 95-105.
- 오창환, 1999, 보은화강암의 접촉변성작용의 특성 및 시기 에 관한 현대화된 종합적인 연구. 한국과학재단.
- 오창환, 김선태, 이정후, 1995, 옥천변성대 서남부 지역의 주변성작용 시기와 온도-압력에 관한 연구. 지질학회지, 31, 4, 343-361.
- 오창환, 김성원, 김종섭, 1993, 문경지역에 분포하는 변성 염기성암과 변성퇴적암에 대한 백악기 화강암의 열변성 작용. 암석학회지, 2, 74-94.
- 유영복, 권용완, 김형식, 2000, 옥천변성대 북동부 황강리 지역내 앵피블라이트에 나타나는 대상(帶相) 각섬석의 광 물화학 및 조직. 암석학회지, 9, 99-118.
- 이민성, 1988, 옥천대의 각섬암의 화학조성과 그 성인(요약 문). 지질학회지, 24, 518-519.
- 이민성, 박봉순, 1965, 한국지질도(1:50,000), 황강리도폭설 명서, 국립지질조사소.
- 진명식, 1995, 옥천습곡대에서의 중생대 화강암류의 암석학 적 및 지화학적 특징과 화성활동. 이종혁교수 정년퇴임 기념논집, 197.
- Berman, R.G., 1991, Thermobarometry using multiequilib rium calculations: a new technique with petrologic appli cations. Canadian Mineralogist, 29, 833-855.
- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B., 1990, Calcic amphibole equilibrium and a new amphibole-plagioclase geothermome ter. Contrib. Mineral. Petrol., 104, 208-224.
- Bucher, K. and Frey, M., 1994, Petrogenesis of metamor phic rocks. 6th Edition Springer-Verlag, 268.
- Cho, M., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Nakamura, E., 1995, High pressure amphibolite of the Imjingang belt in the Yeoncheon-Cheongok area. J. Petrol. Soc. Korea, 4, 1-19.
- Cho, M., Min, K. and Kim, H., 1994, Metamorphism in the central Ogcheon belt. In: Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T. and Kim, J.H. (eds), Structure and metamorphism of the Ogcheon belt-Field trip guidebook, IGCP 321 Fourth International Symposium and Field Excursion, Ham Lim, Seoul, 97-120.
- Cooper, A.F., 1972, Progressive metamorphism of metabasic rocks from the Haast schist group of Southern New Zealand. J. Petrol., 281, 457-492.
- Cooper, A.F. and Lovering, J.F., 1970, Greenschist amphiboles from the Hasst River, New Zealand. Contrib. Mineral. Petrol., 27, 11-24.
- Essene, E.J., 1989, The current status of thermobarometry in metamorphic rocks. In: Daly, J.S., Cliff, R.A. and Yardly, B.W.D., (eds), Evolution of metamorphic belts. Geol. Soc. London Spec. Pub., 43, 1-44.
- Furman, M.L. and Lindsley, D.H., 1988, Ternary-feldspar modeling and thermometry. Am. Min., 73, 201-216.
- Graham, C.M., 1974, Metabasite amphiboles of the Scottish Dalradian. Contrib. Mineral. Petrol., 47, 165-185.
- Grapes, R.H., 1975, Actinolite-hornblende pairs in metamorphosed gabbros, Hidaka Mountains, Hokkaido. Contrib. Mineral. Petrol., 49, 125-140.
- Grapes, R.H. and Graham, C.M., 1978, The actinolite-hornblende series in metabasites and the so-called miscibility gap: A review. Lithos, 11, 85-97.
- Hietanen, A., 1974, Amphibole pairs, epidote minerals, chlorite, and plagioclase in metamorphic rocks, Northern Sierra Nevada, California. Am. Min., 59, 22-40.
- Holland, T.J.B. and Blundy, J.D., 1994, Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contrib. Mineral. Petrol., 116, 433-447.
- Hong, Y.K., 1984, Geochemistry of Garnet-Biotite Mineral Pairs in the Hwanggangri Area, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 20, 115-126.
- Jeon, E.Y., 1999, Petrologic, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Study for the Amphibolites from the Imjingang Belt and the Central-Northern Gyeonggi Massif, Korea: Implications for the Eastward Extension of Triassic Suture Zone in China. Ph.D. Thesis, Yonsei Univ., 71-91.
- Kim, H.S., 1971, Metamorphic Facies and Regional Meta morphism of Ogcheon Metamorphic Belt. J. Geol. Soc. Korea, 7, 221-256.
- Lee, D.S. and Woo, Y.K., 1970, A study of basic metamorphic rocks in the Chungsan-Okcheon area. J. Geol. Soc. Korea, 6, 29-52.
- Lee, K.S., 1997, Geochemical and isotopic studies of metavolcanic rocks from the central Ogcheon Belt, Korea. Seoul National University, Ph. D. thesis, 155-163.
- Liou, J.G., Kuniyoshi, S. and Ito, K., 1974, Experimental studies of the phase relations between greenschist and amphibolite in a basaltic system. Am. J. Sci., 274, 613-632.

- Liou, J.G., Zhang R.Y. and Ernst W.G., 1994, The triassic Qinling-Dabie collision and ultrahigh-P metamorphism in East-Central China: Implication for a similar collision in the Korean Peninsula. abstract volume of IGCP 321, 76-78, Seoul.
- Liu, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, 2, 9-18.
- Mader, U.K. and Berman, R.G., 1992, Amphibole thermobarometry: a thermodynamic approach. *Current Research, Part E, Geological Survey of Canada Paper*. 92-1E: 393-400.
- Oh, C.H., 1997, The polymetamorphism and their metamorphic ages in the Okcheon metamorphic belt and its application to the interpretation of the tectonic evolution of the Okcheon metamorphic belt. KOSEF.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T. and Nakamura, in press, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Rhyu, H.S., Jeong, S.H. and Park, J.N., 1973, Geology of the Hwangangri mining district. Republic of Korea, Geol. Min. Inst. Korea.
- Ryu, Y.B., 1991, Metamorphism and tectonic environment of Ogcheon metabasites in the Ogcheon Metamorphic Belt, South Korea. M.S. Thesis, Korea Univ., 66p.
- Shido, F., 1958, Plutonic and metamorphic rocks of the Nakoro and Iritono districts in the central Abukuma Plateau. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, 11, 131-217.
- Spear, F.S., 1981, An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *Am. J. Sci.*, 281, 697-734.
- Spear, F.S., 1993, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. of Am., Washington, D. C., 411-415.
- St. Onge, M.R. and Ijewliw, O.J., 1996, Mineral corona formation during high-P retrogression of granulite rocks, Ungava Orogen. *Can. J. Petrol.*, 37, 553-582.
- Yardley, B.W.D., 1989, *An introduction to metamorphic petrology*. Longman Science & Technical, New York.

(2001년 3월 15일 접수, 2001년 5월 25일 게재승인)