

옥천화강암과 보은화강암 관입에 의한 접촉변성작용

오창환 · 김창숙 · 박영달¹

전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과, ¹고려대학교 전락광물연구소

요 약 : 옥천화강암 주변의 변성니질암에서는 관입체에 가까워 지면서 변성정도가 흑운모대에서 홍주석대를 거쳐 규선석대로 증가한다. 그리고 보은화강암 남서부 주변 변성염기성암에서는 관입체에 가까워지면서 녹색편암상-각섬암상 점이대에서 각섬암상대로 거쳐 상부각섬암상대로 변성정도가 증가한다. 보은화강암 근접부인 도이리 부근에서 규선석과 홍주석을 포함하는 광물군이 화강암 경계부로부터 500 m 이내에 위치한 변성니질암에서 관찰된다. 이러한 연구결과는 보은화강암과 옥천화강암이 주변 지역에 저압형의 접촉 변성작용을 야기시켰음을 지시한다. 옥천화강암 주변에서 석류석을 포함하는 홍주석대 시료로부터 계산된 온도-압력 조건은 $540 \pm 40^\circ\text{C}$, $2.8 \pm 0.9 \text{ kb}$ 이며 보은화강암 주변 상부각섬암상대의 변성염기성암으로부터 추정된 접촉변성 작용시의 온도는 $698 \pm 28^\circ\text{C}$ 이다. 보은화강암 주변의 변성염기성암에서 나타나는 각섬석과 사장석의 성분은 매우 넓은 범위를 갖는데 이는 각섬석과 사장석의 불혼합구간과 불안정한 변성반응에 의해 잔류된 불안정한 성분에 기인한다. 변성정도가 증가하면서 안정된 각섬석과 사장석의 성분범위는 불혼합구간의 소멸에 의해 줄어든다. 보은화강암과 옥천화강암에 의한 접촉변성 작용시 주변암에 야기된 열적변화는 2차원의 유한차분법을 이용한 CONTACT2 프로그램을 이용하여 이론적으로 계산되었다. 이론적인 계산을 위해 보은화강암의 경우 화강암의 변의 길이가 20 km인 삼각형을 그리고, 옥천화강암의 경우 지름이 10 km인 원을 관입형태로 가정하였다. 이론적인 계산결과를 화강암 주변의 변성암에서 계산된 결과와 비교하여 보면 예상되는 관입온도는 옥천화강암 경우는 800°C 그리고 보은화강암의 경우는 1000°C 보다 높았을 것으로 추정된다. 하지만 옥천 및 화강암 관입시기에 연구지역의 지온 상승율이 일반 대륙지각에서의 지온 상승율보다 높았을 경우 관입온도는 800°C 와 1000°C 보다 낮을 수 있다.

핵심어 : 옥천화강암, 보은화강암, 저압형의 접촉변성작용, CONTACT2 프로그램

서 론

한반도 남부 지역 특히 옥천변성대 주변에는 중생대 화강암이 널리 분포하고 있다. 이들 중생대 화강암은 옥천변성대를 비롯한 한반도 남부 암석에 접촉변성작용을 야기시켰으며 많은 열수광상을 형성시켰다. 따라서 한반도 남부의 지질역사의 규명과 광상의 성인을 연구하기 위하여는 이들 중생대 화강암이 관입시 야기시켰던 화강암 주변지역에서의 접촉변성작용에 대한 연구가 필요하다. 국외에서는 접촉변성작용의 연구를 위하여 EPMA 등의 정밀 분석기기에 근거한 정량적인 접근을 시도한지 오래되었지만 (e.g. Ferry, 1992), 국내에서는 화강암에 의한 접촉변성작용에 대한 연구가 매우 부족한 상태이며 제한된 기존 연구에서도 외국의 경우에서와 같이 현대화되고 종합적인 방법을 이용하여 연구된 경우가 드물어 중생대 화강암의 접촉변성작용의 영향이 아직도 확실히 규명되

지 않고 있다.

보은화강암과 옥천화강암은 옥천변성대를 관입한 중생대 화강암의 하나로서 다른 중생대 화강암에 비하여 비교적 접촉변성작용이 잘 연구된 지역이기는 하나 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 이대성과 박종심(1981)은 보은화강암 주변의 변성 돌로마이트질 석회암과 변성니질암, 변성 염기성암에 대한 연구를 통하여 보은화강암에 의한 접촉변성작용을 연구하였다. 이 연구에서는 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 각 광물에 대한 EPMA 분석이 결여되어 있어 현대적인 연구방법을 이용한 온도-압력 해석을 할 수 없었다. 둘째, 변성 돌로마이트질 석회암과 변성니질암에 대한 연구에서는 보은화강암에 의하여 화강암 주변지역의 암석들이 저압형의 접촉변성작용을 받았음을 주장한 반면 이에 상반되게 보은화강암 주변의 변성염기성암은 광역변성작용에 의해 형성된 것으로 주장하고 있다. 하지만 보은화강암 주변의 변성염기성암은 보은화강암 관입

이전에 보은화강암 주변의 변성퇴적암류를 관입하고 있기 때문에 보은화강암 주변의 변성퇴적암류가 강한 접촉변성작용을 받았다면 변성염기성암도 보은화강암에 의해 강한 접촉변성작용을 받아야한다. 이러한 상반적인 해석의 문제점은 보은화강암 남부에 접하고 있는 변성염기성암과 변성니질암 각각에 대한 권성택 및 이동호(1992)와 신국선(1987)의 연구에서도 나타난다. 권성택과 이동호(1992)는 변성염기성암에 형성된 각섬석 성분은 주로 중압형의 변성 작용시에 형성되었고 그 이후 화강암의 접촉변성작용시 각섬석 성분이 부분적으로 변질을 받을 가능성이 높다는 결론을 내리고 있다. 이에 반해 신국선(1987)은 변성니질암에서 저압형의 접촉변성작용의 증거로 홍주석과 근청석이 관찰됨을 보고하고 있으며 오창환(1992)은 보은화강암 남부의 변성염기성암이 저변성의 광역변성 작용이후 고변성의 접촉변성작용을 받았다고 주장하였다. 옥천화강암 주변에 대한 Kang *et al.* (1993)의 연구에서는 화강암으로부터 멀어지면서 규선석대에서 홍주석대로 전이하는 저압형의 접촉변성작용을 보고하고 있으나 접촉변성작용시의 온도-압력 추정은 하지 않았으며 옥천화강암 주변에서 관찰되는 일부 석류석과 십자석이 광역변성작용에 의하여 형성되었다고 주장하였다. 권성택과 이동호(1992)와 Kang *et al.* (1993)은 보은화강암 주변과 옥천화강암 주변에 화강암 관입 이전에 일어난 광역변성 작용의 최고 변성정도가 각각 각섬암상 혹은 십자석대에 해당할 것으로 예상하고 있다. 하지만 옥천변성대에 일어난 가장 중요한 광역 변성작용시 변성정도가 남동부에서 북서부로 증가한다는 오창환 외(1995)의 연구결과로 미루어 볼 때 연구지역에 일어난 광역 변성작용은 흑운모대 이하의 변성작용만을 일으켰을 것으로 예상되어 권성택과 이동호(1992)와 Kang *et al.* (1993)의 연구와 상반된다. 이들 기존연구에서의 상반된 해석은 보은화강암과 옥천화강암이 야기시킨 접촉변성작용의 정도 및 범위에 대한 연구가 충분치 않아 접촉변성작용의 효과와 접촉변성작용 이전에 일어난 광역변성작용의 영향을 구별하기 힘들었기 때문이다.

본 연구에서는 연구지역에 대한 기존의 상반된 해석의 해결에 중요한 역할을 하는 보은화강암과 옥천화강암에 의한 접촉변성작용이 주변암에 미친 변성 온도, 압력 조건과 변성범위를 밝히기 위하여 보은화강암과 옥천화강암 주변의 변성염기성암, 변성니질암에서의 변성광물군 변화를 조사하고 이들 암석내의 변성광물에 대한 EPMA 분석을 하였다. 그리

고 그 결과를 CONTACT2 프로그램을 이용하여 이론적으로 계산된 보은 및 옥천화강암이 주변암에 미친 열적영향과 비교 분석한다.

일반지질

보은도폭(김옥준 외, 1977) 남서부와 옥천도폭(김동학 외, 1978) 북부에 해당하는 연구지역은 옥천누층군으로 불리는 변성퇴적암류와 이를 관입한 시대미상의 변성염기성암 그리고 조선누층군과 평안누층군에 대비될 수 있는 고생대 전기와 후기의 변성퇴적암류로 구성되어 있으며 이들 암석들을 중생대 화강암이 관입하고 있다(김옥준 외, 1977; 김동학 외, 1978; 그림 1). 옥천누층군의 퇴적시기는 대체적으로 고생대 초기일 것으로 생각되고 있으나(이대성 외, 1972; 이대성과 이하영, 1972; 이재화 외, 1989; 이종혁, 1995) 선캠브리아기의 퇴적물일 가능성 역시 제시되고 있다(김옥준, 1970, 1982). 옥천누층군을 관입한 변성염기성암은 과거에는 해양지각인 오피올라이트로 생각되었으나 최근의 미량원소 연구 결과들은 이들 변성염기성암이 해양지각이 아니고 대륙내 기원임을 지지하고 있다(Cluzel, 1992; 권성택과 이동호, 1992). 연구지역에서 보은화강암에 의해 관입되고 있는 변성염기성암은 암상에 의하여 현무암 기원의 세립질인 변성염기성암과 반려암 기원의 조립질인 변성염기성암으로 나누인다. 옥천도폭(김동학 외, 1978)에서는 전자를 녹색암 후자를 각섬석암이라 지칭하고 있다. 이들 변성염기성암에 대한 Sm/Nd 연령분석 결과 얻어진 선캠브리아기의 연령은 관입시 마그마의 혼합에 의해 만들어진 겉보기 연령(apparent age) 일 것으로 생각되고 있다(이광식과 장호완, 1996).

보은도폭(김옥준 외, 1977)과 옥천도폭(김동학 외, 1978)에서의 연구에 의하면 연구지역의 옥천누층군은 향산리층군, 금강석회암층, 창리층, 문주리층, 마전리층, 황강리층으로 구성되어 있으며 주로 창리층과 마전리층이 변성염기성암에 의해 관입되고 있는 것으로 보고하고 있다. 향산리층군의 주 구성암은 규암과 사질 기원의 변성암이며 창리층과 문주리층은 주로 사질 및 니질 기원의 천매암과 점판암으로 구성되어 있다. 황강리층의 주 구성암은 역암이며 마전리층은 주로 대리암(marble)으로 구성되어 있다. Cluzel *et al.*(1990, 1991)은 이 지역 옥천누층군 암석을 충상단층(overthrust)으로 접하고 있는 보은 지구조 단위(unit)와 이화령 지구조

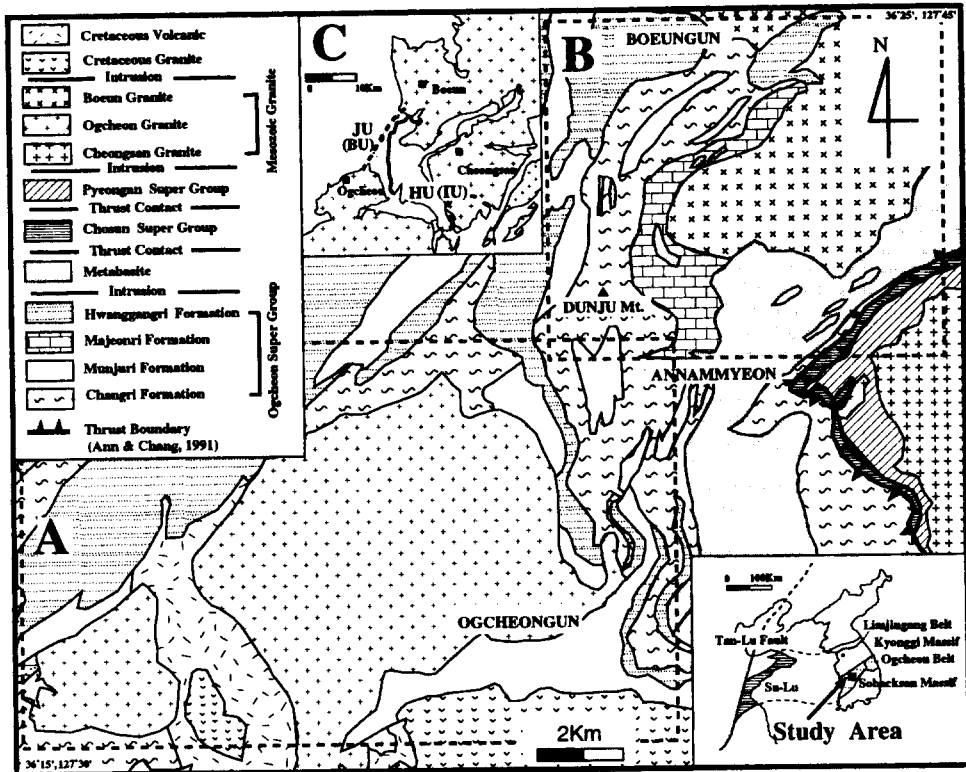


Fig. 1. The geological map of the study area(Kim, 1977; Kim, 1978). In the structural sketch map C, the solid thrust line, which divides the JU(Jiyangri Unit) and HU(Habgeumri Unit), was defined by Kang *et al* (1993). The dashed thrust line, which divides BU(Boeun Unit) and IU(Iwharyeong Unit) was defined by Cluzel(1991).

단위(unit)로 분류하였으며 이들을 대륙붕과 깊은 바다 분지와의 경계에서 퇴적된 층군으로 정의하고 있다(그림 1). 그 중 보은 지구조 단위는 이화령 지구조 단위에 비해 상대적으로 깊은 곳에서 퇴적되었으며 이화령 지구조 단위에는 많은 변성염기성암의 관입이 일어난 것이 특징이다. Kang *et al.* (1993)은 연구지역의 옥천누층군을 진양리 지구조 단위와 합금리 지구조 단위로 나누고 다음과 같은 주장을 하였다. 진양리 지구조 단위는 변성역암, 변성니질암, 그리고 변성사질암으로 구성되어 있고 등시습곡(isoclinal fold)의 형태를 보여주며 변성염기성암과 이에 의해 관입된 변성니질암으로 구성된 합금리 지구조 단위를 충상단층의 관계로 덮고 있다. 대략적으로 Kang *et al.* (1993)에 의해 정의된 진양리 지구조 단위와 합금리 지구조 단위는 각각 Cluzel *et al.* (1990, 1991)에 의하여 명명된 보은 지구조 단위 및 이화령 지구조 단위에 대비될 가능성이 있다. Cluzel *et al.* (1990, 1991)에 의해 제안된 보은 지구조 단위 및 이화령 지구조 단위를 구분

하는 충상단층과 Kang *et al.* (1993)에 의해 제안된 진양리 지구조 단위와 합금리 지구조 단위를 경계짓는 충상단층은 보은화강암의 관입에 의하여 절단되고 있으며 이는 보은화강암이 이들 지구조 단위를 경계짓는 충상단층이 일어난 이후 관입 하였음을 지시한다 (그림 1). 보은화강암과 옥천화강암 주변의 변성니질암에서 규선석과 홍주석이 발견되는 사실은 이들 화강암이 주변 옥천누층군 암석에 저압형의 접촉변성작용을 야기시켰음을 지시한다. 연구지역 남동부에는 평안누층군으로 생각되는 변성퇴적암류가 청산화강암에 의하여 관입되며 조선계에 대비되는 고생대 초기의 변성퇴적암층에 의해 충상단층으로 덮여 있으며, 고생대 초기의 변성퇴적암층은 합금리 지구조 단위에 의해 충상단층으로 덮여있다(안중열과 장태우, 1991; Kang *et al.*, 1993). 이들 충상단층은 보은화강암에 의하여 절단되지 않으나 연구지역 북동쪽에서 백악기에 관입된 화강암류에 의하여 절단되고 있다 (Kang *et al.*, 1993).

변성작용

옥천화강암과 보은화강암에 의한 접촉변성작용을 연구하기 위하여 480개의 시료를 채취하였다. 옥천화강암 주변암중 주로 변성니질암과 변성사질암으로 구성된 문주리층과 창리층에서만 규선석 혹은 홍주석의 광물을 보여주는 접촉변성대가 잘 관찰된다(그림 2). 옥천화강암 근접부에는 규선석대가 그리고 멀어지면서 화강암으로부터 1 km 이내에 홍주석대 그리고 더 멀어지면서 흑운모대가 관찰된다. 규선석대, 홍주석대 그리고 흑운모대에서는 각각 규선석+흑운모+백운모+석영, 홍주석+흑운모+백운모+석영±석류석±십자석 그리고 흑운모+백운모+석영±녹니석의 광물군이 관찰된다(그림 2, 표 1). Kang *et al.* (1993)의 연구에서도 옥천화강암 동부에 200~300 m 넓이의 매우 좁은 규선석대가 화강암의 근접부에 발달되어 있으며 화강암에서 멀어지면서 홍주석대로 전이하는 경향을 보여주는 것이 확인되었다. 홍주석대의 폭은 화강암으로부터 1 km 떨어진 곳까지 나타난다. 홍주석과 규선석은 방향성 없이 형성되어 있으며 석류석과 십

Table 1. Mineral Parageneses for metabasites and metapelites which had undergone thermal metamorphism due to the intrusion of the Boeun and the Ogcheon granites.

Mineral		BZ	AZ	SZ
MPO	Sillimanite			
	Andalusite			
	Biotite			
	Muscovite			
	Staurolite			
	Garnet			
	Quartz			
Mineral		TAG	AM	UA
MBB	Clinopyroxene	Act-Hb, Hb, Ts-Hb	Hb, Ts-Hb	Hb
	Amphibole			
	Plagioclase			
	Epidote			

MPO, metapelites metamorphosed due to the Ogcheon granite; MBB, metabasites metamorphosed due to the Boeun granite. SZ, the sillimanite zone; AZ, the andalusite zone; BZ, the biotite zone; UA, the upper amphibolite facies; AM, the amphibolite facies; TAG, the transition between amphibolite and greenschist facies; Act, actinolitic; Hb, hornblende; Ts, Tschermakitic.

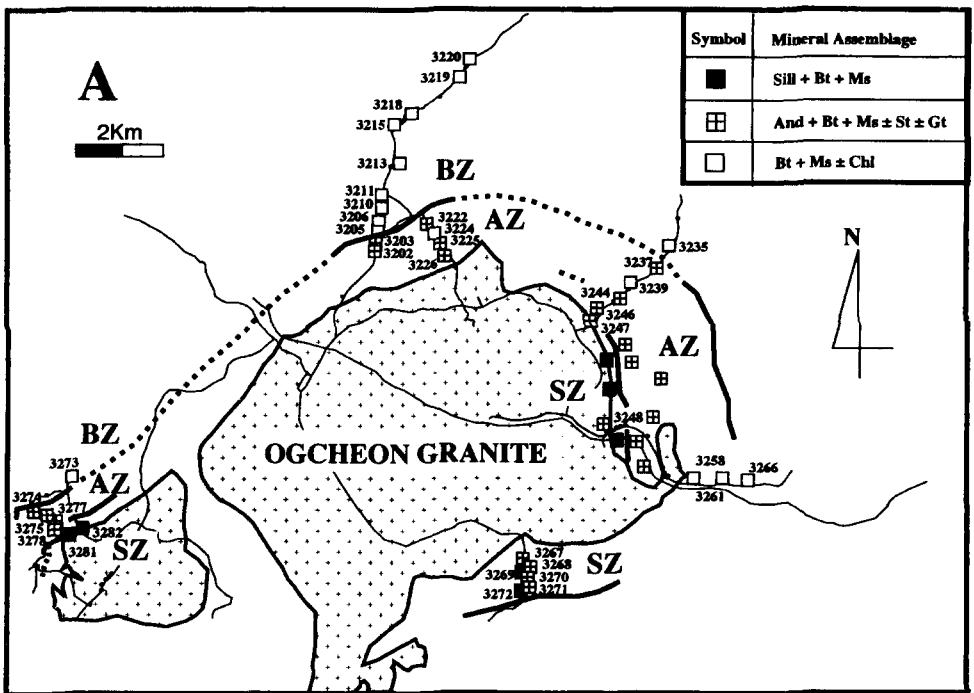


Fig. 2. The metamorphic map of metapelites around the ogcheon granite. Thin solid line represents a road. Sill, Sillimanite; And, Andalusite; Gt, Garnet; St, Staurolite Bt, Biotite; Mu, Muscovite; Chl, Chlorite; Qz, Quartz. Same abbreviations in table 1 are used.

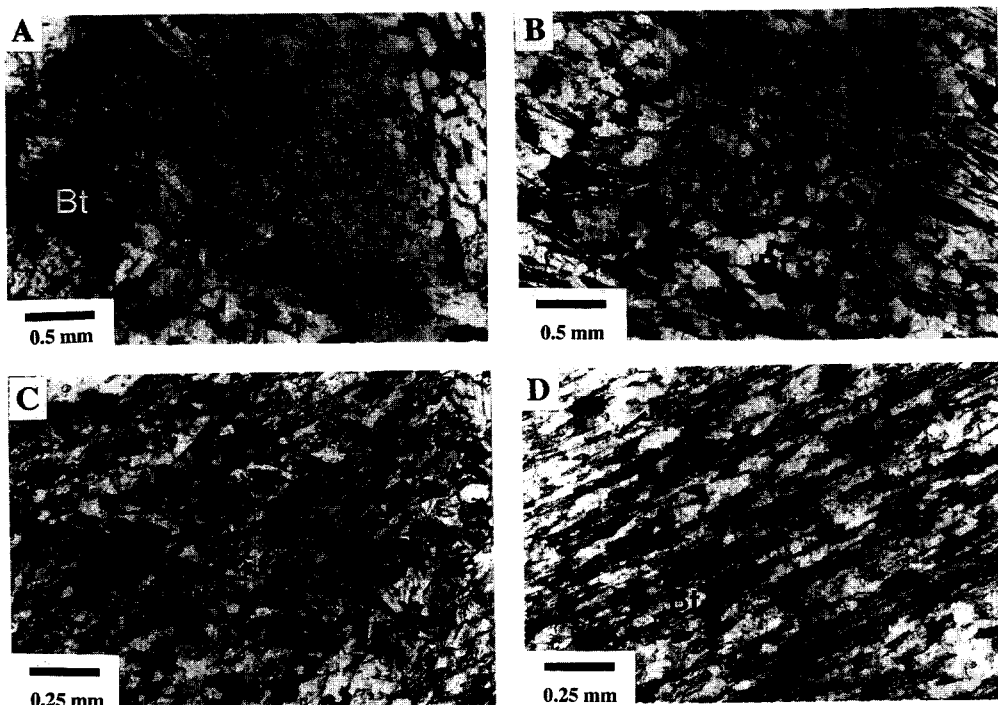


Fig. 3. The microphotos of metapelites around the Ogcheon granite. A) the overgrowth of randomly oriented silimanite and andalusite, B) the overgrowth of garnet, C) the overgrowth of randomly oriented staurolite over the matrix minerals including biotite and D) micropoto of well developed schistosity defined by biotite and muscovite. Same abbreviations in Fig. 2 are used.

자석 또한 방향성 없이 기질의 방향성을 절단하며 성장하고 있다(그림 3A, B와 C). 그리고 흑운모와 백운모는 기존의 방향을 따라 성장하기도 하고 기존방향을 절단하고 성장하기도 한다. 이들 석리들은 옥천화강암 주변 1~2 km 이내에 발달된 규산석대, 홍주석대 그리고 흑운모대의 광물군이 옥천화강암에 의한 저압형의 접촉변성작용에 의하여 형성되었음을 지시한다. 옥천 및 보은 화강암 접촉부로부터 2 km 이상 떨어진 지역에서는 알루미늄 규산염 광물이나, 석류석, 십자석 등의 변성광물이 관찰되지 않으며 흑운모대를 지시하는 흑운모+백운모+녹니석+석영±사장석의 광물군이 나타난다. 화강암으로부터 2 km 이상 떨어진 지역에서 나타나는 흑운모대 시료는 잘 발달된 편리(그림 3D)를 보여주는 점이 접촉변성작용에 의하여 형성된 흑운모대 시료와 다르다. 이들 편리가 잘 발달된 흑운모대 광물군은 접촉변성작용 이전에 연구지역이 흑운모대에 해당하는 광역변성작용을 받았음을 지시한다.

보은화강암은 대체로 각 변의 길이가 20 km 되는 삼각형의 형태를 보여주는 화강암체로서 본 논

문의 지질도에서는 보은화강암체의 남서부 일부만이 나타나 있다. 연구지역내에서 보은화강암 남부에는 변성염기성암이 주 암석으로 분포하고 있으며 보은화강암 서측에는 변성염기성암의 노두 크기가 작아 일부를 제외하고는 지질도에는 표시하지 않았지만 마전리층, 문주리층과 창리층내에 많이 협재되어 나타난다. 이들 보은화강암 주변의 변성염기성암에 나타나는 광물군에 대한 연구 결과는 다음과 같다. 화강암으로부터 대략 1.5 km 이상 떨어진 변성염기성암에서는 녹색편암상-각섬암상 점이대를 지시하는 각섬석+사장석+녹염석±녹니석의 광물군이 관찰된다(그림 4, 5, 표 1). 그리고 1.5 km 이내에 위치한 변성염기성암에서는 각섬암상을 지시하는 각섬석+사장석의 광물군이 관찰되며 보은화강암의 관입경계 부근의 변성염기성암에서 상부 각섬암상을 지시하는 단사회석+각섬석+사장석의 광물군이 관찰된다. 단사회석은 그 장경의 길이가 0.1~0.2 mm로 세립질이다. 비록 휘석을 보여주지 않더라도 보은 화강암의 관입경계 부근에 나타나는 변성염기성암은 상부각섬암상의 변성작용을 받았

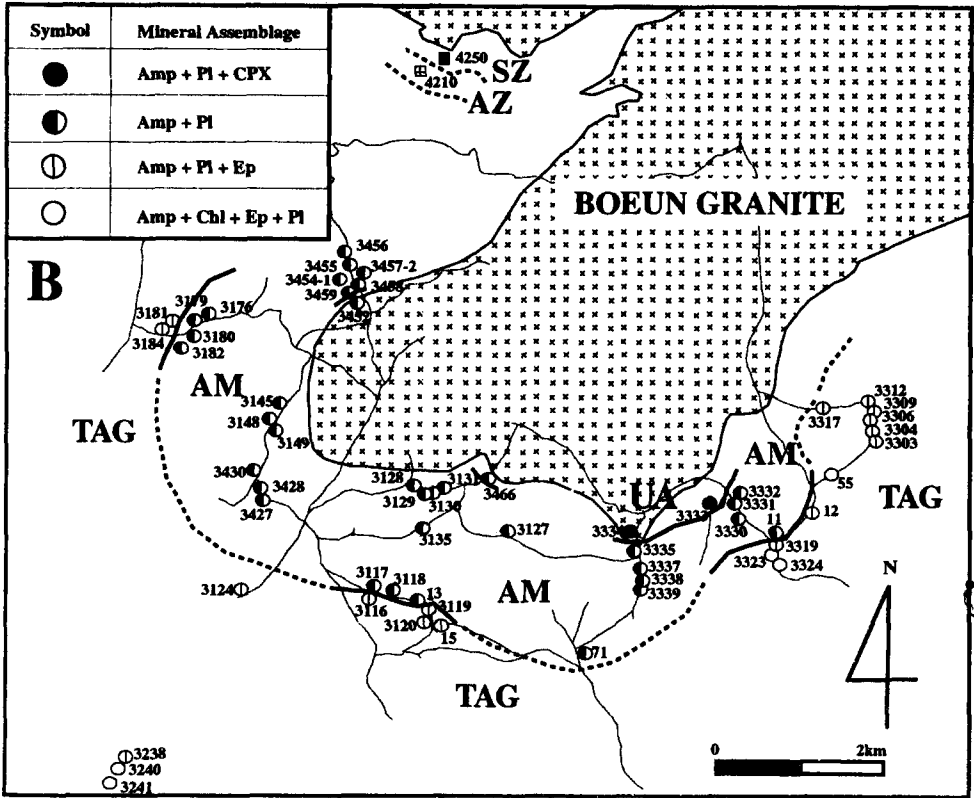


Fig. 4. The metamorphic map of metabasites around the Boeun granite. Thin solid line represents a road. Cpx, Clinopyroxene; Amp, Amphibole; Pl, Plagioclase; Ep, Epidote; Chl, Chlorite. Same abbreviations in table 1 are used.

을 것으로 추측된다. 녹색편암상-각섬암상 점이대에서는 양기석질 보통각섬석이 보통각섬석 혹은 쳐마카이트질 보통각섬석과 공존하여 나타난다. 각섬석상대에서도 양기석질 보통각섬석, 보통각섬석 그리고 쳐마카이트질 각섬석이 나타나지만 이들간의 공존관계가 불확실하다. 이는 상부각섬암상대에서는 보통각섬석만이 나타나는 사실과 연관되어 보은화강암의 접촉변성작용시 변성정도가 점차 증가하면서 각섬석 내의 불혼합구간(immiscibility gab)이 닫혀짐을 지시한다. 녹색편암상-각섬암상의 점이대에서는 접촉변성작용 이전에 형성된 편리가 인지되며 접촉변성작용시 형성된 광물들이 이들 방향을 따라 자라 나기도 하고 때로는 이들 방향을 절단하고 있다. 이들 방향성은 각섬암상대 시료에서 약해지며 휘석을 포함하는 상부각섬암 상대 내의 시료는 광물들이 방향성을 보이지 않고 입상조직(granular texture)을 보여준다. 각섬석 성분의 변화는 본 논문의 뒷부분에서 좀 더 자세히 논의된다. 도이리 부근 보은화강암 관입부에 근접한 변성니질

암에서 방향성이 없는 규선석과 홍주석을 포함한 광물군이 그리고 화강암에서 500 m 떨어진 시료에서는 역시 방향성이 없는 홍주석을 포함하는 광물군이 관찰된다(그림 4). 이러한 연구결과들은 보은화강암역시 옥천화강암과 마찬가지로 주변지역에 저압형의 접촉변성작용을 야기 시켰으며 녹색편암상-각섬암상 점이대와 각섬암상대에서 관찰되는 편리는 연구지역에서 접촉변성작용 이전에 광역변성작용이 일어났을 가능성을 지시한다.

광물성분과 변성작용의 온도-압력 조건

중생대 화강암의 접촉변성작용에 의한 광물의 성분 변화를 연구하기 위하여 변성니질암과 변성염기성암에 대하여 전자현미분석을 실시하였다. 전자현미분석은 고려대학교의 JXA-8600SX를 사용하였다. 분석시 가속전압은 15 kv, 빔전류 3.0 nA, 빔크기는 5 μm이다. 각 원소의 분석에 사용된 천연산 혹은 합성표준광물은 알바이트(albite; Na, Al, Si),

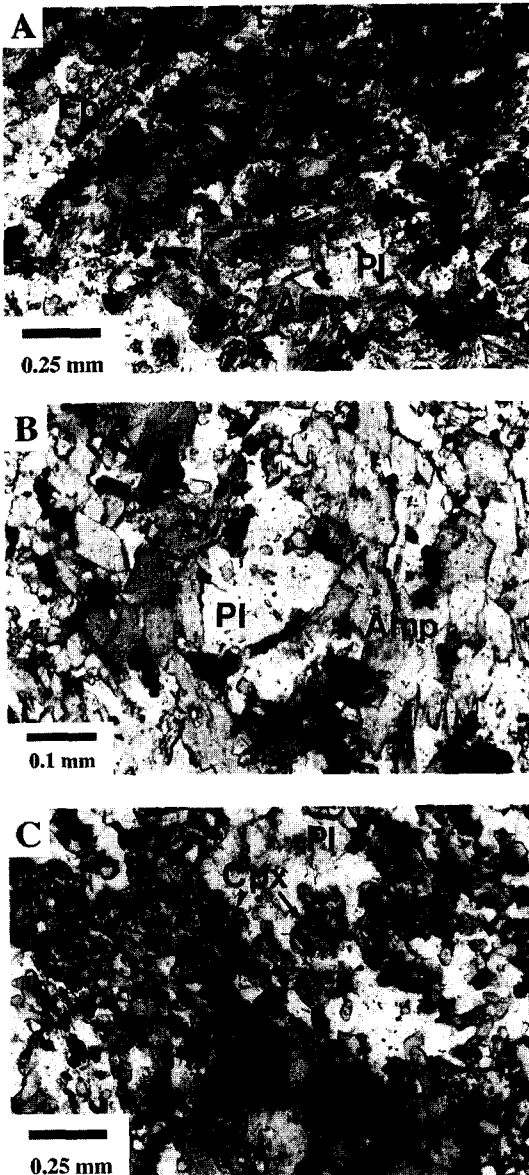


Fig. 5. The microphotos of metabasites around the Boeun granite. A) microphoto of metabasites from the transition between amphibolite and greenschist facies, B) microphoto of metabasites from the amphibolite facies and C) the microphoto of metabasites from the upper amphibolite facies. Same abbreviations in Fig. 4 are used.

규회석(Ca), 정장석(K), 알만딘(almandine; Fe), 로도나이트(rhodonite; Mn), 파이로프(pyrope; Mg), TiO₂(Ti)이다. 각섬석의 Fe²⁺와 Fe³⁺를 구별하기 위하여 MINFORM 프로그램(Papike *et al.*,

1974)을 사용하였다. 그리고 각섬석을 제외한 광물에서는 분석된 Fe 모두를 Fe²⁺로 간주하였고 원자비는 MINTAB 프로그램(Nicholas and Gray, 1990)을 이용하여 계산하였다.

육천화강암 주변에 홍주석과 함께 중압형의 접촉변성작용의 산물로서 나타나는 석류석에서는 X_G와 X_{Prp}는 거의 변화하지 않으며 각각 0.03~0.06과 0.06~0.08의 값을 갖는다. 이에 비해 X_{Am}은 석류석의 중심에서 가장자리로 가면서 0.65~0.69에서 0.71~0.75로 증가하며 X_{Sp}는 0.24~0.19에서 0.16~0.14로 감소한다. 화강암 경계부로부터 약 500 m 떨어진 곳에서 나타나는 석류석을 포함하는 시료(3277)에서 분석된 석류석, 흑운모, 사장석, 백운모, 홍주석 성분을 TWEEQU 프로그램(Berman, 1990, 1991)에 적용시켜 계산된 온도-압력 조건의 평균치는 540±40°C, 2.8±0.9 kb 이다(표 2).

각 변성대의 변성염기성암에서 나타나는 각섬석은 양기석에서 쳐마카이트질 보통각섬석에 이르는 넓은 성분범위를 보여주며 이들 간의 관계를 편광현미경 하에서는 관찰할 수 없어 BSI(Back Scattered Image)를 이용하여 관찰하였다. 녹색편암상-각섬암상 점이대와 각섬암상에 해당하는 변성염기성암에서는 양기석에서 보통각섬석을 거쳐 쳐마카이트질 보통각섬석까지 연속적이고 매우 넓은 성분의 각섬석이 나타난다(표 3, 그림 6, 7). BSI를 이용한 관찰에 의하면 녹색편암상-각섬암상 점이대에서는 양기석질 각섬석(Na_A, 0.10~0.11)가 보통각섬석(Na_A, 0.18~0.40) 혹은 쳐마카이트질 보통각섬석(Na_A, 0.38~0.42)의 성분들이 한 개의 입자내에 작게는 0.5 μm에서 크게는 5 μm의 폭을 갖으며 층상으로 섞여 나타나는 것이 관찰된다(그림 7). 그리고 양기석(Na_A, 0.00~0.06)은 이들 각섬석내에 잔유물로 나타난다. 각섬암상대의 변성염기성암에서도 양기석질 각섬석(Na_A, 0.02~0.23), 보통각섬석(Na_A, 0.17~0.44) 그리고 쳐마카이트질 각섬석(Na_A, 0.38~0.48)이 나타난다. BSI를 이용한 관찰에서 이들 성분이 서로 섞인 층상구조가 각섬석 내부에서는 희미하게 관찰되나 각섬석의 가장자리에서는 주로 보통각섬석 혹은 쳐마카이트질 보통각섬석이 관찰된다. 이는 변성정도가 증가함에 따라 각섬석이 성장하면서 보통각섬석 혹은 쳐마카이트질 보통각섬석과 공존하던 양기석질 보통각섬석이 점차 불안정하게 되어 각섬석 입자내에 잔유물로 남게 되는 현상을 지시하는 것으로 생각된다. 각섬암상대의 변성염기성암에서도 이들 성분외에 불완전한 변성반응에 의한 잔유물로 생각되는 양기석

Table 2. P-T conditions of metabasites and metapelites from the study area.

Sample No.	Garnet				Biotite			Plagioclase		Muscovite			P(kbar)	T(°C)
	X _{Alm}	X _{Prp}	X _{Grs}	X _{Spe}	X _{Mg}	X _{Fe}	X _{Al}	X _{An}	X _{Ab}	X _{Al}	X _K	X _{Na}		
3277	0.737	0.072	0.042	0.149	0.302	0.483	0.176	0.244	0.754	0.934	0.848	0.152	2.8±0.8	525±2.5
	0.737	0.072	0.042	0.149	0.319	0.495	0.158	0.244	0.754	0.934	0.848	0.152	2.9±0.8	527±17
	0.742	0.075	0.033	0.151	0.400	0.535	0.132	0.244	0.754	0.934	0.848	0.152	2.8±0.4	570±10
	0.751	0.065	0.034	0.149	0.309	0.515	0.146	0.244	0.754	0.934	0.848	0.152	2.1±0.3	515±0.5
	Si in Amp				X _{Ab}		lnK		P(kbar)			T(°C)		
3333														
Amp429-P1430	7.125				0.54		0.65		3			720		
Amp438-P1437	7.109				0.53		0.61		3			727		
3334														
Amp447-P1448	7.198				0.65		0.96		3			670		
Amp539-P1541	7.052				0.63		0.71		3			710		

X_{Alm}=Fe/(Fe+Ca+Mg+Mn); X_{Grs}=Ca/(Fe+Ca+Mg+Mn); X_{Prp}=Mg/(Fe+Ca+Mg+Mn); X_{Spe}=Mn/(Fe+Ca+Mg+Mn); X_{Mg}=Mg/(Fe+Mg); X_{Fe}=Fe/(Fe+Mg); X_{Al}=Al_{VI}/(Al_{VI}+Mg+Fe+Mn+Ti); X_{An}=Na/(Na+Ca+K); X_{Ab}=Ca/(Na+Ca+K); X_{Na}=Na/(Na+Ca+K); X_K=K/(Na+Ca+K); Amp, Amphibole; Pl, Plagioclase; K, ((Si-4)/(8-Si))×X_{Ab}.

(Na_A, 0.02~0.08)가 드물게 각섬석 내부에 나타난다. 상부 각섬암상대에 해당하는 변성염기성암에서는 한 종류의 각섬석으로 보통각섬석(Na_A, 0.2~0.42) 성분이 대부분 나타나지만 3333 시료의 경우처럼 보통각섬석내에 양기석(Na_A, 0.05~0.12)과 알루미늄이 풍부한 각섬석(Na_A, 0.31~0.42)이 잔유물의 형태로 나타나기도 한다(그림 6, 7). 이러한 사실은 보은화강암의 열변성 작용시 녹색편암상-각섬암상 접이대에서는 불혼합구간에 의하여 두 개의 각섬석이 존재하며 각섬암 상대에 들어가면서 이러한 구간이 닫히기 시작하여 휘석을 포함하는 상부 각섬암 상대에서는 구간이 완전히 닫힌 것을 지지한다. 그리고 녹색편암상-각섬암상 접이대와 각섬암상대에 잔유물 형태로 나타나는 양기석은 접촉변성작용 이전에 이 지역에 일어났던 광역변성 작용시에 형성된 각섬석 성분일 가능성이 있다.

각 변성대의 변성염기성암에서 나타나는 사장석의 성분도 각섬석과 같이 매우 넓기 때문에 BSI를 사용한 연구가 필요하다. BSI를 이용한 연구에 의하면 녹색편암상-각섬암상 접이대에서는 올리고클레이즈(X_{Na}, 0.70~0.84)와 안데신(X_{Na}, 0.51~0.69)가 함께 나타나 이들 성분간에 불합 구간이 존재하는지는 확실치 않으며 이들 장석내에 알바이트(X_{Na}, 0.94~0.95)가 나타난다(표 4). 각섬암상대의 일부 시료 3127에서는 안데신(X_{Na}, 0.51~0.68)과 라브라도라이트(X_{Na}, 0.30~0.48)가 함께 나타나며 이 두 성분 사이의 구간은 보길드 구간(Bogbild

gab)에 해당된다. 또 다른 각섬암상대 시료 3335에서는 비토나이트(X_{Na}, 0.16~0.21)와 아노르사이트(X_{Na}, 0.03~0.08)가 함께 나타나며 이 두 성분 사이에 불혼합 구간이 있는지 불확실하다. 이들 각섬암상대의 사장석내에는 알바이트(X_{Na}, 0.93~0.99)와 올리고클레이즈(0.7~0.71)가 잔유물로 나타난다. 상부각섬암상대 변성염기성암에서의 사장석 성분은 안데신(X_{Na}, 0.52~0.68)이며 일부 사장석내에 올리고클레이즈(0.78~0.84)가 잔유물로 나타난다. 상부각섬암상대의 시료에서는 다른 변성대와는 달리 사장석의 성분 변화폭이 좁게 나타나며, 그 이유는 녹색편암상-각섬암상 접이대와 각섬암상대의 시료에서 존재하던 불혼합 구간이 닫히거나 줄어 들었으며 이들 변성대보다 높은 변성온도 조건에 비해 불완전한 변성반응의 정도가 크게 감소하였기 때문으로 생각된다.

상부각섬암상대의 변성염기성암에서는 불혼합구간의 닫힘과 불완전한 변성반응 정도의 감소에 의해 한 종류의 사장석과 각섬석이 안정되어 나타나기 때문에 Blundy와 Holland(1990)가 제시한 사장석-각섬석 지온계를 사용할 수 있다. 연구지역의 남동부쪽을 관입한 중생대 화강암으로부터 얻어진 압력이 3.4~3.8 kb (조등룡과 권성택, 1994)이며 옥천화강암 주변의 변성니질암으로부터 계산된 접촉 변성작용시의 압력조건이 2.8±0.9 kb이다. 따라서 본 연구에서는 보은화강암 관입깊이에 해당하는 압력으로 3 kb를 가정한 상태에서 상부각섬암상대

Table 3. The compositions of amphiboles in metabasites from the study area.

Sample No.	3333		3334		3333		3335		3335		3127		3127		3127		3124		3124		3124		3238		3238		3238	
	UA	UA(R)	UA	UA(R)	AM	AM(R)	AM	AM(R)	AM	AM(R)	AM	AM(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG(R)
SiO ₂	47.010	55.200	47.470	43.200	48.530	44.900	52.920	42.080	45.870	52.920	42.740	42.740	51.300	52.930	50.110	50.110	44.790	53.020	44.790	53.020	44.790	53.020	44.790	53.020	44.790	53.020	44.790	53.020
Al ₂ O ₃	7.390	1.290	7.580	10.320	7.460	10.040	2.560	16.170	11.490	2.560	15.110	15.110	5.650	4.080	5.310	5.310	10.810	2.670	10.810	2.670	10.810	2.670	10.810	10.810	10.810	10.810	10.810	10.810
FeO*	15.470	9.310	13.740	16.500	16.400	17.910	13.920	18.110	16.970	13.920	16.560	16.560	14.020	12.650	15.160	15.160	16.230	13.640	16.230	13.640	16.230	13.640	16.230	16.230	16.230	16.230	16.230	16.230
MgO	12.900	17.410	13.220	10.740	11.900	10.030	14.900	7.650	9.610	14.900	8.670	8.670	13.730	14.550	13.010	13.010	10.180	15.310	10.180	15.310	10.180	15.310	10.180	15.310	10.180	15.310	10.180	15.310
CaO	12.240	12.800	11.700	12.050	11.710	11.560	11.690	11.410	11.540	11.690	11.620	11.620	11.440	11.490	10.940	10.940	11.540	10.700	11.540	10.700	11.540	10.700	11.540	10.700	11.540	10.700	11.540	10.700
Na ₂ O	1.200	0.300	1.370	1.470	1.120	1.390	0.470	1.810	1.290	0.470	1.890	1.890	0.990	0.670	1.200	1.200	1.620	0.700	1.620	0.700	1.620	0.700	1.620	0.700	1.620	0.700	1.620	0.700
K ₂ O	0.460	0.000	0.190	0.710	0.350	0.470	0.000	0.250	0.190	0.000	0.240	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TiO ₂	0.460	0.000	0.790	0.820	0.460	0.790	0.000	0.430	0.350	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MnO	0.000	0.380	0.570	0.330	0.000	0.330	0.360	0.000	0.000	0.360	0.330	0.330	0.480	0.000	0.000	0.000	0.430	0.500	0.430	0.500	0.430	0.500	0.430	0.500	0.430	0.500	0.430	0.500
Cr ₂ O ₃	0.400	0.000	0.000	0.330	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	97.530	96.690	96.630	96.470	97.911	97.425	96.826	97.913	97.300	96.826	97.160	97.160	97.610	96.363	96.176	96.176	95.923	96.533	96.176	96.533	96.176	96.533	96.176	96.533	96.176	96.533	96.176	96.533

Number of cations based on 23 oxygens																											
Si	6.931	7.868	6.996	6.518	7.200	6.800	7.770	6.282	6.875	7.563	6.369	7.407	7.691	7.425	6.767	7.740	7.425	6.767	7.740	6.767	7.740	6.767	7.740	6.767	7.740	6.767	7.740
Al ₄	1.069	0.297	1.004	1.482	0.800	1.200	0.230	1.718	1.125	0.437	1.631	0.593	0.309	0.575	0.000	1.725	0.575	0.000	1.725	0.575	0.000	0.575	0.000	0.575	0.000	0.575	0.000
Al ₆	0.315	0.165	0.313	0.354	0.504	0.594	0.213	1.126	0.905	0.347	1.023	0.369	0.390	0.351	0.692	0.200	0.351	0.692	0.200	0.351	0.692	0.351	0.692	0.351	0.692	0.351	0.692
Fe ₂	1.558	1.153	1.445	1.692	1.776	1.930	1.447	1.981	1.899	1.549	1.870	1.432	1.392	1.600	1.817	1.462	1.600	1.817	1.462	1.600	1.817	1.462	1.600	1.817	1.462	1.600	1.817
Fe ₃	0.193	0.000	0.250	0.390	0.055	0.111	0.091	0.070	0.015	0.152	0.194	0.261	0.000	0.268	0.196	0.196	0.268	0.196	0.196	0.268	0.196	0.268	0.196	0.268	0.196	0.268	0.196
Mg	2.863	3.640	2.904	2.415	2.631	2.264	3.261	1.703	2.146	2.982	1.926	2.954	3.152	2.874	2.293	3.332	2.874	2.293	3.332	2.874	2.293	3.332	2.874	2.293	3.332	2.874	2.293
Ca	1.982	1.972	1.848	1.948	1.862	1.876	1.839	1.824	1.853	1.780	1.856	1.770	1.788	1.737	1.868	1.673	1.737	1.868	1.673	1.737	1.868	1.673	1.737	1.868	1.673	1.737	1.868
Na(M ₄)	0.009	0.028	0.082	0.028	0.123	0.092	0.104	0.141	0.143	0.150	0.221	0.156	0.188	0.197	0.078	0.132	0.197	0.078	0.132	0.197	0.078	0.132	0.197	0.078	0.132	0.197	0.078
Na(A)	0.371	0.081	0.310	0.405	0.198	0.315	0.030	0.388	0.232	0.050	0.414	0.121	0.000	0.146	0.064	0.064	0.146	0.064	0.064	0.146	0.064	0.064	0.146	0.064	0.064	0.146	0.064
K	0.042	0.000	0.036	0.137	0.066	0.091	0.000	0.048	0.037	0.000	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.079	0.000	0.089	0.093	0.051	0.090	0.000	0.049	0.039	0.037	0.000	0.000	0.000	0.049	0.037	0.000	0.049	0.037	0.000	0.049	0.037	0.000	0.049	0.037	0.000	0.049	0.037
Mn	0.000	0.000	0.071	0.042	0.000	0.043	0.045	0.000	0.000	0.039	0.042	0.059	0.000	0.000	0.055	0.062	0.000	0.055	0.062	0.000	0.055	0.062	0.000	0.055	0.062	0.000	0.055
Cr	0.000	0.000	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total Cation	15.412	15.204	15.348	15.543	15.263	15.406	15.030	15.329	15.269	15.086	15.592	15.122	14.910	15.222	14.227	16.586	15.222	14.227	16.586	15.222	14.227	16.586	15.222	14.227	16.586	15.222	14.227

FeO*, total FeO: R, relict. Same abbreviations in Table 1 are used.

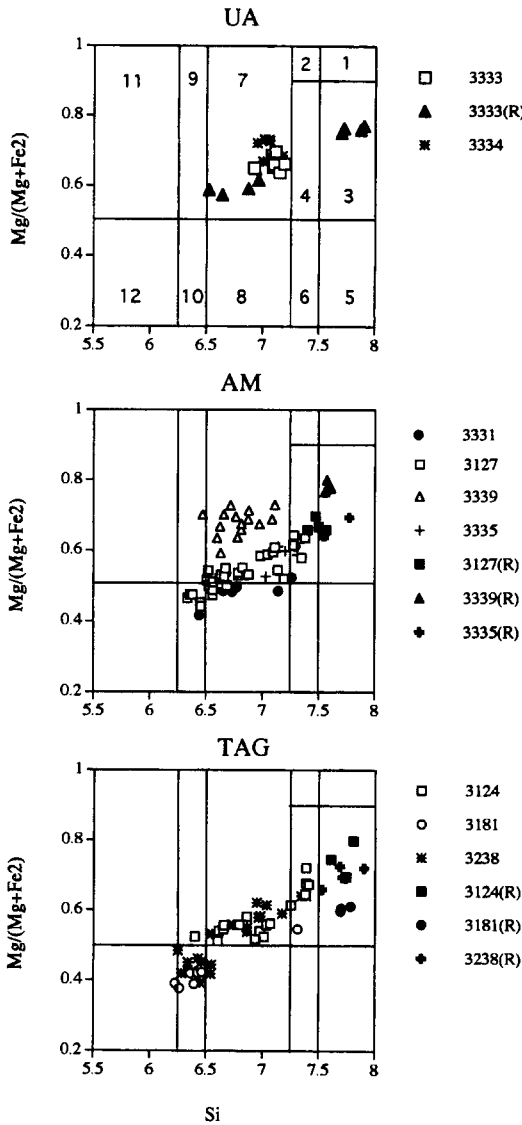


Fig. 6. The amphibole compositions of metabasites plotted in Leake's diagram (Leake, 1978). 1, Tremolite; 2, Tremolitic Hornblende; 3, Actinolite; 4, Actinolitic Hornblende; 5, Ferro Actinolite; 6, Ferro Actinolitic Hornblende; 7, Magnesio Hornblende; 8, Ferro Hornblende; 9, Tschermakitic Hornblende; 10, Ferro Tschermakitic Hornblende; 11, Tschermakite; 12, Ferro Tschermakite. R, relict. Same abbreviations in table 1 are used.

에 해당하며 보은화강암 경계부로부터 대략 500 m 떨어진 변성염기성암 3333과 3334 내의 사장석과 각섬석의 성분을 Blundy와 Holland(1990) 지온계에 적용시켜 계산된 온도조건은 $698 \pm 28^\circ\text{C}$ 이다(표 2).

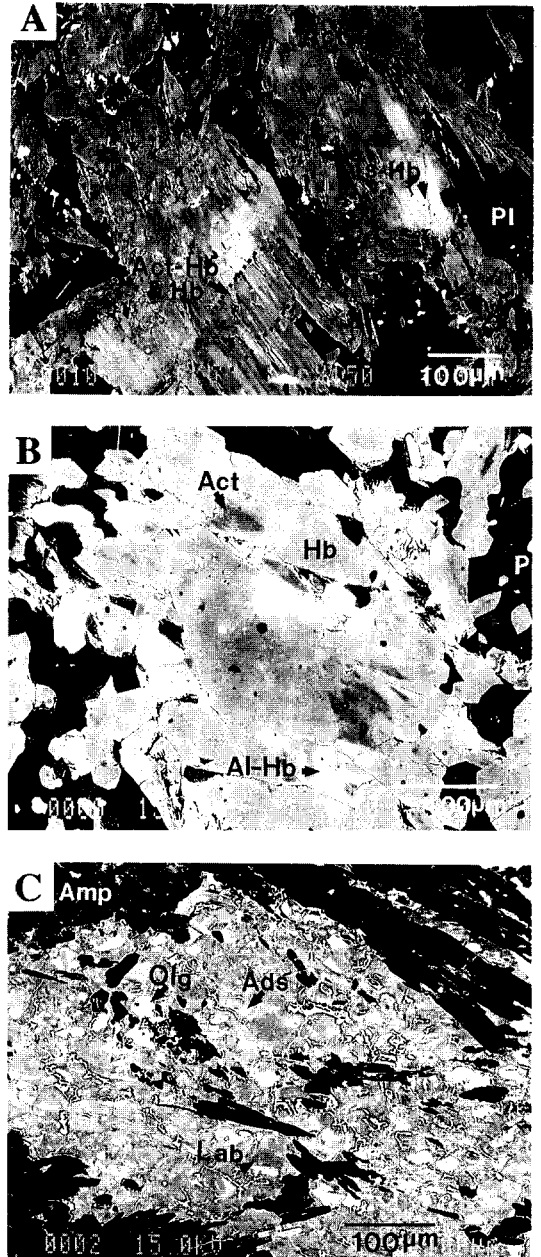


Fig. 7. The microphotos of Back Scattered Image (BSI). A) In the metabasites from the transition between amphibolite and greenschist facies, actinolitic hornblende (Act-Hb) and hornblende (Hb) are interlayered each other indicating coexistence of two amphiboles and actinolite (Act) occurs as relict. B) In the upper amphibolite facies metabasites, actinolite and Al rich hornblende (Al-Hb) occur as relicts within hornblende. C) In the metabasites from the amphibolite facies, andesine (Ads) and labradorite (Lab) coexist and oligoclase (Olg) occurs as relict.

Table 4. The compositions of plagioclases and clinopyroxenes in metabasites from the study area.

Sample No.	Plagioclase												Clinopyroxene				
	UA	UA(R)	UA	AM	AM	AM(R)	AM	AM	AM(R)	TAG	TAG(R)	TAG	TAG	TAG	TAG(R)	UA	UA
SiO ₂	57.820	62.820	60.120	58.860	53.390	61.200	44.990	47.100	68.920	61.610	60.450	59.420	59.820	61.920	67.650	53.160	53.260
Al ₂ O ₃	26.580	22.680	24.670	26.080	30.010	24.420	34.920	33.800	19.330	24.130	24.600	24.980	25.390	24.620	20.060	1.330	1.390
FeO*	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.330	0.000	0.000	0.000	0.320	0.000	0.000	0.430	0.000	0.000	7.420	7.240
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.950	13.480
CaO	9.120	3.810	7.100	8.270	11.780	5.870	17.890	16.460	0.500	5.750	6.010	7.570	7.690	5.740	0.990	24.150	23.740
Na ₂ O	6.400	7.640	7.370	6.930	4.760	8.070	8.830	1.780	10.170	8.030	7.560	7.000	7.240	8.230	10.350	0.620	0.610
Total	99.920	96.960	99.260	100.14	99.945	99.889	98.633	99.433	98.915	99.820	98.615	98.970	100.57	100.52	99.052	100.14	100.21
	Number of cations based on 8 oxygens																
Si	2.590	2.836	2.690	2.630	2.412	2.721	2.096	2.170	3.023	2.740	2.174	2.670	2.660	2.792	2.976	1.980	1.976
Al	1.400	1.207	1.300	1.370	1.598	1.279	1.918	1.835	0.999	1.260	1.302	1.320	1.330	1.279	1.040	0.058	0.061
Fe ₂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.231	0.225
Ca	0.440	0.184	0.340	0.400	0.000	0.279	0.000	0.000	0.000	0.270	0.289	0.360	0.370	0.271	0.046	0.964	0.944
Na	0.560	0.669	0.640	0.600	0.570	0.696	0.893	0.812	0.024	0.690	0.658	0.610	0.620	0.704	0.888	0.045	0.044
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.719	0.745
Total Cation	4.990	4.896	4.970	5.000	4.580	4.987	4.907	4.817	4.046	4.970	4.964	4.960	5.000	4.983	4.946	4.013	4.009
Albite	55.960	78.380	65.250	60.260	42.242	71.351	7.787	16.354	97.338	71.350	70.209	62.610	63.030	72.189	95.006		
Anorthite	44.050	21.620	34.750	39.740	57.758	28.649	92.213	83.646	2.662	28.350	29.791	37.390	36.970	27.811	4.994		
Orthoclase	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		

Same abbreviations in Tables 1 and 3 are used

접촉변성시의 온도진화사

보은화강암과 옥천화강암의 관입에 의한 접촉변성작용시 변성대의 온도진화사를 추론하기 위하여 수치해석을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션이 시도되었다. 본 연구에서 사용한 컴퓨터 프로그램인 CONTACT2의 알고리즘은 Spear와 Peacock(1990)의 CONTACT 프로그램을 기초로 하였지만, 일차원 시뮬레이션인 CONTACT 프로그램과는 달리 이차원에서의 열전도를 계산하는 프로그램이다(Park and Oh, in press). 일차원 대신 이차원에서의 계산을 한 이유는 다음과 같다. 1) 일차원 계산의 경우 열전도 방향이 한 방향으로만 일어나기 때문에 이차원적인 열전도 작용에 비해 "비효율적"이며, 온도의 상승효과와 암석이 상승된 온도에서 존재하던 시간이 과대하게 평가된다. 2) 일차원 계산의 경우 길이가 무한히 긴 슬랩(infinitely long slab) 모양이 관입체의 모양으로 가정되지만, 이러한 가정은 연구 지역 화강암의 관입모양과 다르기 때문에 열전도 미분 방정식의 경계조건으로 사용하기에는 부적절하다. 전술한 이유로 이차원에서의 열전도를 계산할 수 있는 CONTACT2라는 프로그램이 작성되었다. 이 프로그램의 특징은, 1) 맥켄토시의 그래픽 프로그램을 사용하여 관입체와 모암간의 경계형태가 디지털화한 파일로 입력되며, 2) 온도 진화사를 구하고 싶은 위치 또한 디지털화한 파일로 입력되고, 3) 출력으로는, 어느 지역의 온도 진화사뿐만 아니라 온도 프로파일을 삼차원적으로 나타내는 것이 가능하다. 이 프로그램에서는 열전도의 계산을 위해 유한 차분법(finite difference, explicit method)을 이용하며, 유한 차분(finite difference)의 계산은 다음식을 이용한다(Crank, 1975).

$$C_{i,j,n+1} = C_{i,j,n} + D\delta t (C_{i-1,j,n} - 2C_{i,j,n} + C_{i+1,j,n}) / (\delta x)^2 + D\delta x (C_{i,j-1,n} - 2C_{i,j,n} + C_{i,j+1,n}) / (\delta y)^2$$

여기에서 i 와 j 는 각각 x 와 y 방향으로의 노드(node)의 위치를 나타내며, C 와 D 는 온도(T)와 열확산계수(k)이다. δx , δy , δt 는 각각 x 방향으로의 노드간의 거리, y 방향으로의 노드간의 거리, 시간간격(time step)을 나타내며, n 은 시간을 나타내는 첨자이다.

보은화강암과 옥천화강암 주변의 열진화사를 계산하기 위해서 필요한 자료는 화강암체의 형태와 크기, 마그마 관입시의 온도, 마그마의 고화온도, 관입 이전의 주변암의 온도, 마그마의 결정화에 필요한 열량, 열전도율, 비열, 밀도이다. 지질도를 참

고하여 한번이 20 Km인 정삼각형과 반경이 5 Km인 원을 각각 보은화강암과 옥천화강암의 모양으로 가정하였다. 계산상 예상되는 접촉변성 작용시의 주변암의 온도 변화는 여러 입력 변수중 관입암체의 온도와 관입전 모암의 온도에 가장 민감하게 영향을 받는다. 본 연구에서 사용한 관입이전의 모암의 온도는 360°C로 이는 변성온도 계산에서 사용한 3 kb를 보은화강암의 관입 깊이로 생각하고 3 kb에 해당하는 지하에서 예상되는 온도를 대륙지각에서의 평균 지온구배를 가정하여 구하였다. 옥천변성대에 분포하는 중생대 화강암의 대부분이 화강섬록암 성분을 갖는다. 따라서 중생대 화강암이 순수한 액체상태나 완전한 고체상태로 관입하지 않는다는 가정하에서 관입시 가능한 마그마의 최고온도는 화강섬록암질 마그마의 액상온도일 것이며 관입시 가능한 최저온도는 고상 온도일 것이다. 화강섬록암질 마그마가 2~4%의 H₂O를 포함하고 있다는 가정하에 Naney(1983)의 실험결과를 적용하면 보은화강암과 옥천화강암의 관입시 가능한 최고온도는 약 1000°C로 예상할 수 있다. 조동룡(1992)에 의해 국내 중생대 화강암의 각섬석으로부터 추정된 온도와 Naney(1983)의 실험에서의 고상선의 온도로부터 예상되는 관입시의 최저온도 즉 마그마의 고화온도는 대략 600~700°C이다.

본 연구에서는 관입온도가 800°C, 900°C, 1000°C인 세 경우에 대하여 접촉변성 작용시의 열변성사를 계산하였다. Spear와 Peacock(1990)이 제시한 값을 기준으로 하여 마그마의 결정화에 필요한 열량으로 화강암질 마그마에 필요한 열량인 200000 J/Kg, 열전도율과 비열로는 지각의 대표치에 해당하는 2.75 W/m-K와 1000 J/kg-K을 사용하였다. 그리고 밀도값으로 3000 kg/m³을 사용하였다. 열변성사에 대한 관입체의 크기의 영향을 연구하기 위하여 옥천화강암의 경우 실제반경인 5 km 이외에 2.5 km의 반경을 갖는 원형의 관입체에 대한 계산을 하였다. 그리고 보은화강암과 같이 삼각형에 가까운 관입체의 경우 여러 다른 지점에서의 열변성사의 차이를 연구하기 위하여 삼각형 관입체의 꼭지점 부근, 꼭지점에 가까운 변 그리고 변의 중앙부에서 일어난 열변성사를 계산하였다.

위의 가정들을 토대로 한 계산 결과는 그림 8에 나타나 있다. 보은화강암과 옥천화강암의 두 경우 공통적으로 마그마의 관입온도가 높을 수록 주변암에 야기시키는 최고 변성온도가 높아진다. 보은화강암 같은 삼각형에 가까운 관입체의 경우 꼭지점 부근에 가까워 질수록 주변암에 미치는 변성온도가

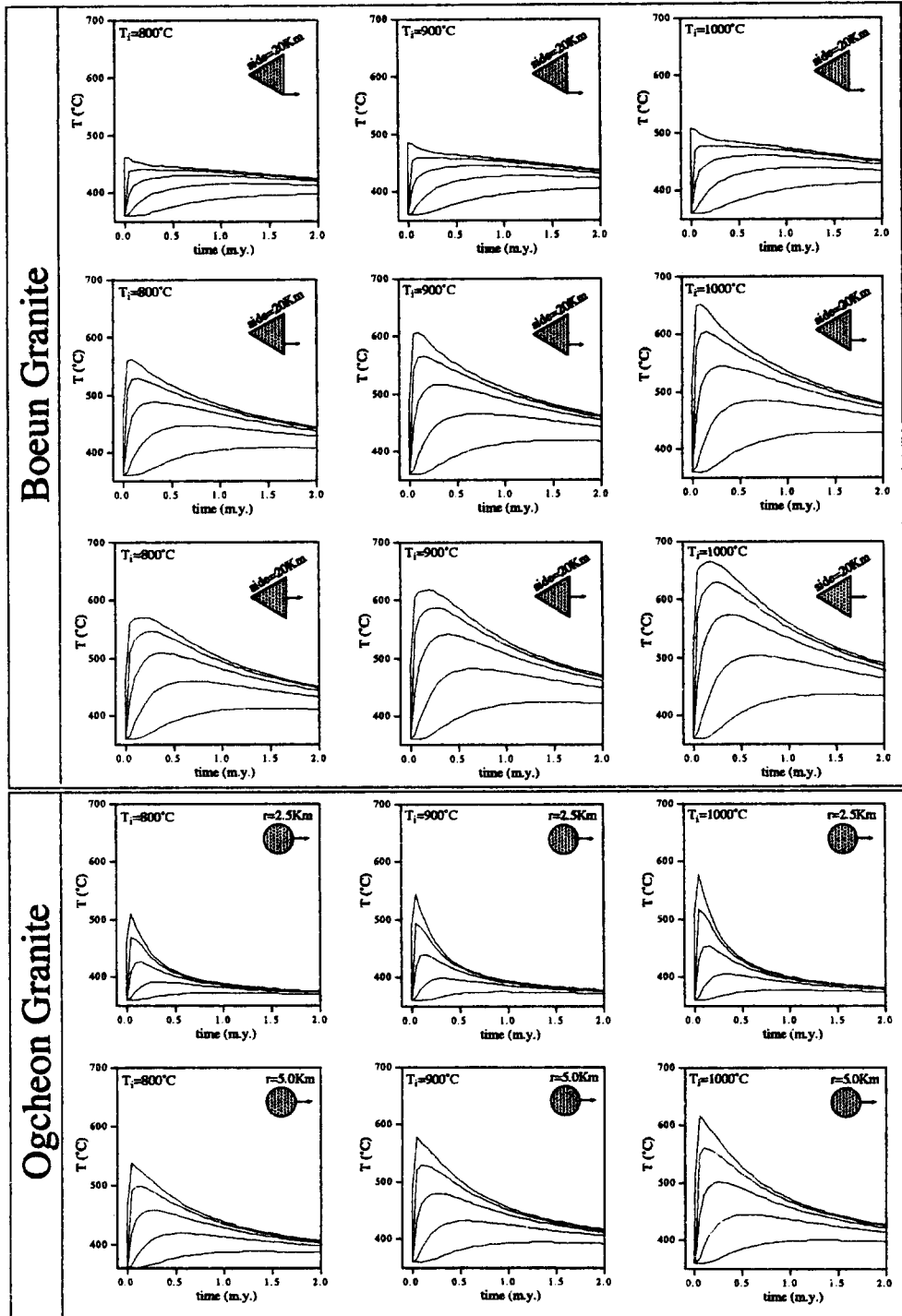


Fig. 8. Thermal evolution in the contact aureoles of the Boeun and Ogcheon granites, calculated using the CONTACT2 program T_i , side, and r represent the intrusion temperature, the side-dimensional of the triangular Boeun granite and the radius of the circular Ogcheon granite, respectively. The time-temperature curves represent the temperatures measured at locations of 0.5, 1, 2, 4 and 8 Km (from top) away from the contact in the direction of the arrows.

낮아짐을 알 수 있다. 보은화강암에 대한 본 연구지역은 세 경우중 꼭지점에 가까운 변에 해당하는 경우로 생각할 수 있으며 이때에 관입온도가 800°C, 900°C, 1000°C 인 경우 화강암 경계부로부터 약 500 m 떨어진 지점인 주변암에 야기시킬 수 있는 최고 변성온도는 각각 약 550°C, 600°C, 650°C이다. 옥천화강암의 경우 관입온도가 800°C, 900°C, 1000°C 일때 역시 경계부로부터 약 500 m 떨어진 주변암에 야기시킬 수 있는 최고 변성온도는 각각 530°C, 580°C, 620°C이다. 반경을 실제보다 짧은 2.5 km를 사용하여 옥천화강암의 열변성사를 계산한 경우 주변암에 야기되는 최고변성온도조건과 최고변성온도조건이 유지되는 기간이 5 km의 경우에 비하여 감소함을 알 수 있다.

토 의

본 연구지역에서 보은화강암과 옥천화강암의 주변부 1~2 km 이내에서만 각섬암상 혹은 홍주석대 이상의 변성작용이 관찰되며 화강암 경계부 방향으로 변성정도가 증가함은 화강암 주변의 변성대가 보은 및 옥천화강암 관입에 의하여 발생된 저압형의 접촉변성작용에 의하여 형성되었음을 지시한다. 이러한 접촉변성작용은 다음과 같은 편광현미경하의 석리에 의하여 뒷받침된다. 옥천화강암 주변에서 저압형의 접촉변성 작용시에 형성된 변성반정인 규선석, 홍주석, 석류석, 십자석은 대부분 기질에 발달된 방향성을 절단하며 방향성 없이 성장하고 있다. 또한 보은화강암 주변 변성 염기성암에서도 화강암 경계부로 가까워 지면서 변성암내의 광물의 방향성이 전반적으로 감소하며 상부각섬암상에는 방향성이 없는 입상조직이 관찰되며 가장 변성정도가 낮은 녹색편암상-각섬암상 점이대에서는 접촉변성 작용시 형성된 광물이 기존의 방향성을 절단하며 때로는 기존 방향성을 따라서 성장한 구조를 보여준다. 화강암 경계로부터 1~2 km 이상 떨어진 변성니질암과 변성사질암에서는 접촉변성작용 이전에 형성된 편리를 보여주는 혹은모대의 광물군이 나타난다. 이러한 사실들은 연구지역의 암석들이 화강암 관입 이전에 혹은모대의 변성도에 해당하는 광역변성작용을 받았을 가능성을 지시한다.

보은화강암 주변 변성염기성암에 나타나는 각섬석과 사장석은 성분 범위가 매우 넓다. 극단적인 예로서 각섬암상대의 한 샘플에서는 알바이트에서 아노르사이트에 걸친 매우 광범위한 사장석 성분과

양기석에서 처마카이트질 보통각섬석에 걸친 넓은 각섬석 성분인 인지 되었다. 이들 간의 관계는 일반 편광현미경 관찰에 근거한 EPMA 분석만으로는 해석할 수 없었으며 BSI 관찰에 근거한 EPMA 분석을 통해서만 밝힐 수 있음이 인지되었다. 그 이유는 사장석의 성분 변화는 편광현미경하에서 전혀 관찰되지 않으나 BSI 관찰에 의하면 한 개의 사장석내에 여러 다른 성분이 관찰되기 때문이다. 각섬석의 경우도 한 개의 각섬석내에 여러 다른 성분이 매우 불규칙하게 혼재 되어 있는 경우 때로는 성분의 변화가 편광현미경하에서 구분 되어지기는 하지만 편광현미경 사진과 BSI를 비교한 결과 모든 성분 변화가 편광현미경하에서 관찰되지 않음이 확인되었다. 본 연구에서 BSI를 활용함으로써 연구지역의 변성염기성암에서 나타나는 매우 넓은 범위의 각섬석과 사장석 성분중 안정된 광물성분과 잔유물 형태의 불안정한 광물성분을 구별할 수 있었다. 그 예로서 양기석과 알바이트는 항상 안정된 광물이 아닌 잔유물로 나타남을 확인할 수 있었으며 녹색편암상-각섬암상 점이대에서는 두 개의 각섬석 성분이 층상으로 교호되어 나타나며 불혼합 구간에 의해 공존하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 앞으로 다변성을 받은 지역의 변성 염기성암에 대한 EPMA 분석시 BSI를 이용하는 것이 필수적임을 입증하였다.

화강암 경계로부터 약 500 m 떨어진 변성암에서 지온계를 이용하여 계산된 변성온도 조건(옥천화강암 접촉변성작용에 의한 온도: $540 \pm 40^\circ\text{C}$, 보은화강암 접촉변성작용에 의한 온도: $698 \pm 28^\circ\text{C}$)을 본 연구에서 이론적으로 계산된 500 m 떨어진 지역에서의 가능한 최고 변성온도와 비교하여 보면 예상되는 관입 온도는 옥천화강암의 경우는 800°C 그리고 보은화강암의 경우는 1000°C 이상이다. 보은화강암의 관입온도가 옥천화강암의 관입온도보다 높을 것으로 예상되며 관입체의 규모도 커 최고온도와 그 유지기간이 길기 때문에 보은화강암이 옥천화강암에 비해 넓은 변성대를 형성하는 것으로 생각된다. 광역적인 중생대 화강암의 관입이 옥천변성대 주변과 내부에서 관찰됨은 중생대 화강암으로 예상되는 옥천 및 보은화강암 관입시기에는 연구지역의 지온상승률이 일반 대륙지역에서의 지온상승률 보다 높았을 가능성이 높다. 따라서 모암의 온도가 연구에서 사용된 360°C 보다 높을 수 있으며 그럴 경우 옥천화강암과 보은화강암의 관입온도는 800°C와 1000°C 보다 낮을 수도 있다.

결 론

본 연구에서 야외조사와 실내분석을 이용한 연구와 이론적인 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 옥천화강암과 보은화강암은 주변암에 저압형의 접촉변성작용을 야기시켰으며 주변암은 접촉변성작용이전에 흑운모대의 변성정도에 해당하는 광역 변성작용을 받았다.

2) 저압형의 접촉변성작용시 옥천화강암 주변 변성니질암에서 변성정도가 화강암 경계부를 향하여 흑운모대에서 홍주석대를 거쳐 규선석대로 증가하며 보은화강암 주변의 변성염기성암에서는 경계부 쪽으로 녹색편암상-각섬암상 점이대에서 각섬암상대를 거쳐 상부각섬암상대로 증가한다.

3) 옥천화강암 주변의 홍주석대에서 석류석을 포함하는 시료로부터 계산된 온도-압력 조건은 $540 \pm 40^\circ\text{C}$, $2.8 \pm 0.9 \text{ kb}$ 이다. 보은화강암 주변 상부각섬암상대의 변성염기성암으로부터 추정된 접촉변성작용시의 온도는 $698 \pm 28^\circ\text{C}$ 이다.

4) 보은화강암 주변 변성염기성암내의 넓은 각섬석과 사장석의 성분범위는 각섬석과 사장석내의 불혼합 구간과 불완전한 변성반응에 의해 잔류된 성분에 기인하며 안정된 각섬석과 사장석의 성분은 녹색편암상-각섬암상 점이대에서 상부각섬암상대로 가면서 성분범위가 줄어든다.

5) 예상되는 관입 온도는 옥천화강암의 경우는 800°C 그리고 보은화강암의 경우는 1000°C 이상이다. 하지만 옥천 및 보은 화강암 관입시 연구 지역의 지온상승율이 일반 대륙지각에서의 지온상승율보다 높았을 경우 관입온도는 800°C 와 1000°C 보다 낮을 수 있다.

사 사

이 연구는 전략광물자원 연구센터와 기초과학육성지원과제(BSRI-96-5425), 그리고 95핵심연구과제(951-0404-002-2)의 지원으로 수행되었다. 이 연구를 위하여 야외조사와 실내작업에 협조한 전북대학교 지구환경과학과 학생들과 연구에 중요한 조언을 주신 해양연구소의 이종익 박사와 연세대학교의 권성택 박사님에게 감사드린다. 그리고 심사과정 중 여러 문제점을 지적해 주신 부경대학교 송용선 박사님과 조선대학교의 안건상 박사님 그리고 고려대학교의 김형식 박사님에게도 감사드린다.

참고문헌

김동학, 장태우, 김원영, 황재하, 1978, 옥천도폭(1:50,000), 자원개발연구소, 21p.
 김옥준, 1970, 남한중부지역의 지질과 지구조. 광산지질, 1, 35-46.
 김옥준, 이대성, 이하영, 1977, 보은도폭(1:50,000), 자원개발연구소, 35p.
 김옥준, 1982, 한국의 지질과 광물자원. 연세대학교 지질학과 동문회, 33-44.
 권성택, 이동호, 1992, 보은지역의 옥천 변성 염기성암에 대한 암석 지구화학적 연구. 암석학회지, 1, 104-123.
 신국선, 1987, 충북 보은군 관기-화성간에 분포하는 변성염기성암류의 암석학적 연구. 연세대학교 미발간 석사학위논문, 69p.
 이광식, 장호완, 1996, 옥천 각섬암의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구. 자원환경지질학회지, 29, 35-43.
 이대성, 이하영, 1972, 옥천계 내에 협재된 석회질 지층에 관한 암석학적 및 미고생물학적 연구. 손치무 교수 송수 기념 논문집, 89-111.
 이대성, 장기홍, 이하영, 1972, 옥천계 내 향산리 돌로마이트 층에서의 Archaeocyatha의 발견과 그 의의. 지질학회지, 8, 191-197.
 이대성, 박종심, 1981, 보은화강섬록암 서남부 접촉부에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 14, 55-76.
 이재화, 이하영, 유강민, 이병수, 1989, 황강리층의 석회질역에서 산출된 미화석과 그의 층서학적 의의. 지질학회지, 25, 1-15.
 이종혁, 1995, 옥천누층군의 지질, 서남옥천대의 지질. 강원대학교 자연과학대학 지질학과 동문회, 17-123.
 안중열과 장태우, 1991, 보은 탄전 서부지역의 지질구조. 광산지질, 24, 287-299.
 오창환, 1992, 옥천구조대내에 분포하는 변성염기성암류의 기원 및 변성친화과정의 연구 및 그 결과의 지체구조운동 해석에의 응용. 기초과학, 전북대학교 기초과학 연구소, 15, 391-440.
 오창환, 김진태, 이정후, 1995, 옥천변성대 남서부 지역에서의 변성친화과정. 지질학회지, 31, 21-31.
 조동룡, 1992, 남한에 분포하는 현생 화강암류의 기원에 대한 광물 및 암석학적 연구. 연세대학교 박사학위논문, 189p.
 조동룡과 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 변화. 지질학회지, 30, 41-61.
 Berman, R. G., 1990, Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. Am. Mineral., 75, 328-344.
 Berman, R. G., 1991, Thermobarometry using multiequilibrium calculations: A new technique with petrologic applications. Can. Mineral., 29, 833-855.
 Blundy, J. D. and Holland, T. J. B., 1990, Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contrib. Mineral. Petrol., 104,

- 208-224.
- Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). In: Geodynamic Evolution of the Eastern Eurasian Margin (Edited by Angelier, J.). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Cluzel, D., Lee, B. J. and Cadet, J. P., 1991, Indosinian dextral ductile system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 194, 131-151.
- Cluzel, D., 1992, Early middle paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon belt (South Korea): A new insight on the paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, 10, 1130-1151.
- Crank, J., 1975, *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 414p.
- Ferry, J. M., 1992, Regional metamorphism of the Waits River Formation, Eastern Vermont: delineation of a new type giant metamorphic hydrothermal system. *J. Petrol.*, 19, 211-214.
- Kang, J. H., Hara, K., Hayasaka, Y., 1993, Time-relationship between deformation and metamorphism of the Ogcheon zone in the Ogcheon district, South Korea. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 42, 63-90.
- Leake, B. E. 1978, Nomenclature of amphiboles. *Canadian Mineral.*, 16, 501-520.
- Naney, 1983, Phase equilibrium of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic system. *Am. J. Sci.*, 283, 993-1033.
- Nicholas, M. S. R. and Gray, W. C., 1990, MINTAB: A general-purpose mineral recalculation and tabulation program for Macintosh microcomputer. *American Mineralogist*, 75, 424-430.
- Papike, J. J., Cameron, K. L. and Baldwin, K., 1974, Amphiboles and pyroxenes: characterization of other than quadrilateral components and estimates of Fe⁺³ iron from microprobe data. *Geol. Soc. Am.*, Abstract with Program, 6, 1053-1054.
- Park, Y. and Oh, C. W., 1997, A macintosh program for calculating heat conduction in a contact aureole. *Computer & Geosciences*, in press.
- Spear, F. S. and Peacock, S. M., 1990, Program manual and computer exercises for the calculation of metamorphic phase equilibria, pressure-temperature-time paths and thermal evolution of orogenic belts. A.G.U., 188p.

(책임편집 : 송용선)

The Contact Metamorphism Due to the Intrusion of the Ogcheon and Boeun granites

Chang Whan Oh, Chang Suk Kim and Youngdo Park¹

*Department Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University,
¹Center for Mineral Resources Research, Korea University,*

ABSTRACT : In the metapelites around the Ogcheon granite, the metamorphic grade increases from the biotite zone through the andalusite zone to the sillimanite zone towards the intrusion contact. In the metabasites around the Boeun granite, the metamorphic grade increases from transitional zone between the greenschist and amphibolite facies through the amphibolite facies to the upper amphibolite facies towards the intrusion contact. In the Doiri area locating near the intrusion contact of the Boeun granite, sillimanite- and andalusite-bearing metapelites are found within 500 m away from the contact. The evidence described above indicates that the Ogcheon and Boeun granites caused low-P/T type contact metamorphism to the country rocks. The P-T condition of contact metamorphism due to the intrusion of the Ogcheon granite is $540 \pm 40^\circ\text{C}$, $2.8 \pm 0.9 \text{ kb}$. The temperature condition of contact metamorphism due to the intrusion of the Boeun granite is $698 \pm 28^\circ\text{C}$. The wide compositional range of amphibole and plagioclase in the metabasites around the Boeun granite is due to the immiscibility gap of amphibole and plagioclase and unstable relict composition resulted from an incomplete metamorphic reaction. The compositional range of stable amphibole and plagioclase decreases as a metamorphic grade increases due to a close of immiscibility gap. The thermal effect of contact metamorphism due to the intrusion of the Ogcheon and Boeun granites, are calculated using the CONTACT2 program based on a two dimensional finite difference method. In order to estimate the thermal effect of an intruded pluton, a circle with 10 km diameter and a triangle with 20 km side are used for the intrusion geometries of the Ogcheon granite and the Boeun granite, respectively. The results from the field and modelling studies suggest that the intrusion temperatures of the Ogcheon granite close to 800°C and the intrusion temperature of the Boeun granite is higher than 1000°C . However, the intrusion temperatures can be lower than the suggested temperatures, if the geothermal gradient prior to the intrusion of the Ogcheon and Boeun granites was higher than the normal continental geothermal gradient.

Key words : the Ogcheon granite, the Boeun granite, low-P/T type contact metamorphism, the CONTACT2 program