

보은 지역의 옥천 변성염기성암에 대한 암석·지구화학적 연구

권성택·이동호

연세대학교 지질학과

요 약: 옥천 변성염기성암의 변성작용, 원암의 화학적 특징과 생성 당시의 지구조 환경을 유추하기 위하여, 보은과 문경지역에 분포하는 암석을 대상으로 암석기재, 각섬석과 사장석의 광물성분 그리고 전암의 주성분 및 미량성분 원소의 특징에 대한 연구를 수행하였다. 조사지역 변성염기성암내에는, 비록 원래의 광물은 나타나지 않지만, 화성암의 잔류조직이 비교적 흔히 관찰된다. 이들 암석이 나타내는 광물조합은 주로 각섬석(양기석+보통각섬석)+사장석+녹렴석+녹니석+스핀+불투명 산화광물 등으로 녹렴석-각섬암상의 변성조건을 지시한다. 한편, 각섬석과 사장석의 화학성분은 중압 변성상계의 녹색편암상(혼합성 결핍이 존재할 경우 녹렴석-각섬암상) 내지 각섬암상에 해당됨을 시사한다. 조립의 각섬석들은 흔히 내부에 양기석의 조성을 갖고 결정의 외부와 벽개를 따라 보통 각섬석의 성분을 가진다. 이는 혼합성 결핍 혹은 복합변성작용에 의한 것으로 해석될 수 있는데, 각섬석의 조직, 성분 및 옥천대에서 추정되는 두번 이상의 변성작용(광역 및 접촉)은 후자일 가능성이 높음을 시사하나, 이 문제에 대해서는 앞으로의 보다 자세한 연구가 필요하다. 전암의 주성분과 미량성분 원소의 특징은 옥천 변성염기성암이 판내부 환경에서 형성된 변이질에서 슬레이이트질 현 무암임을 지시한다. 심해 환경을 지시하는 증거들이 관찰되지않는 것으로 보아 옥천 변성염기성암이 안정지괴의 내부, 아마도 대륙열곡 환경에서 생성되었으며, 이 열곡의 발달이 해양지각을 형성할 만큼 지속되지 못한 채 정지되었음을 시사하는 것으로 생각된다. 이후에 관입한 화강암질암의 접촉변성 작용이 변성염기성암의 화학성분에 미친 영향을 알아보기 위하여 살펴본 성분 변화유형에서는 화강암체에 가까운 시료들에서 K의 손실이 관찰된다. 따라서 K를 이용한 해석에는 주의가 요구된다.

핵심어: 옥천 변성염기성암, 광물성분, 전암화학성분, 판내부 환경, K의 손실

서 론

판구조론이 등장한 이래, 최근 화성암의 화학 성분은 이들이 산출되는 지구조 환경에 따라 특징적이라는 것이 잘 알려져 있다(예, Wilson, 1989의 제 1 장과 2 장). 예를 들어, 판의 침강지역과 관련된 호상 환경(arc environment)에서는 칼크알칼리(calc-alkaline) 성분의 마그마가 특징적이다. 마그마 성분과 지구조 환경과의 상관관계는 주성분 원소 뿐만 아니라 미량성분에서 더욱 뚜렷이 나타난다. 이러한 연구의 중요성은 서로 다른 지구조 환경에서의 마그마 생성기구에 관한 차이점을 밝히고자하는 것도 있으나, 또 다른 중요한 것은 과거(예, 선캄브리아기)에 일어난 화성활동의 산물인 화성암의 화학성분을 이용해 역으로 그 산출 지역의 지구조 환경을 유추하고자 하는 것이다. 특히, 많은 경우 과거의 화성암은 정치후 변성 및 변질 작용으로 화학성분이 변했을 가능성이 있기 때문에 가능한 한

이러한 작용의 영향을 덜 받고 원래의 함량을 그대로 유지하는 원소들을 이용하는 방법이 많이 제안되었다(Pearce and Cann, 1973; Pearce and Norry, 1979; Pearce, 1982; etc.).

우리나라의 지질 역사를 해석하는데 가장 두드러진 문제점 중의 하나인 옥천대에는 주된 암석인 변성퇴적암과 관련되어 변성염기성암이 산출되는데, 옥천대 자체의 지구조 환경이 문제가 되는 바, 화성기원 변성염기성암의 화학성분을 이용하여 지구조 환경의 유추 가능성을 시험하기에 적합하다. 그동안 이같은 시도가 행하여졌으나, 주로 주성분 원소의 특징에 대한 해석에 지나지 않았고(Lee *et al.*, 1980; 신국선, 1987), 변성작용에 의해 원래 성분이 변화하였을 가능성이 있기 때문에 해석의 신빙성이 결여되었다. 최근 Cluzel *et al.* (1989)은 불유동성 원소(immobile element)를 이용하여 옥천 변성염기성암의 지구조 환경을 간단하게 보고한 바 있다. 지금까지 이들 암석에 대해 호상열도(Park and So,

1972), 심해저 (김옥준과 김규환, 1976), 대륙열곡 (Cluzel *et al.*, 1989) 등과 같이 다양한 생성환경이 제시되었다.

이 연구는 옥천대 변성염기성암 중 보은 및 문경지역에 분포하는 것들에 대해 주성분 및 미량성분 자료를 이용하여, 1) 변성염기성암의 화학적 특징-솔레아이트질 (tholeiitic), 변이질 (transitional), 알칼리질 (alkaline)-을 보다 정확히 규정하고자 하며, 2) 불유동 원소의 특징으로부터 이 지역의 염기성 화성활동에 대한 지구조 환경을 유추하여 이를 기존 연구와 비교 검토하고자 하며, 3) 이들이 가지는 옥천대의 퇴적환경에 대한 의미에 대해 토의하고자 한다. 위의 목적을 위해, 이 지역을 나중에 관입한 화강암의 열변질 작용이 변성염기성암의 화학성분에 어느 정도 영향을 주었는가를 추정하였으며, 주된 변성광물인 각섬석과 사장석의 성분을 분석하여 변성정도를 보다 정량적으로 해석하고자 하였다.

지질 배경

옥천 변성염기성암은 남한의 중부를 북동-남서방향으로 가로 지르는 옥천대의 남쪽 경계부를 따라 주로 산출된다 (그림 1). 기존 연구에 의하면, 이들 변성 염기성암은 옥천대 전반에 걸친 광역변성작용을 받았으며 나중에 옥천대를 관입한 화강암질암에 의해 부분적으로 접촉변성작용의 영향을 받은 것으로 생각되어지는데 (Kim, 1971; 이대성과 박종심, 1981), 지역적인 산출상태와 광물조성에 따라 녹색암 (green rock), 보통각섬암 (hornblendite), 각섬암 (amphibolite), 변성반려암 (metagabbro) 등 여러 가지 명칭으로 불리어왔다 (이대성과 우영균, 1970; So and Kim, 1975; 이대성과 박종심, 1981; 안건상, 1985; 신국선, 1987). 전반적으로 옥천 변성염기성암은 입자의 크기에 따라 조립질암과 세립질암으로 구분될 수 있는데, 조립질암은 암주 혹은 암상 형태의 관입암이 거의 확실한 것으로 생각되나, 세립질암은 흔히 주위 변성퇴적암과 정합적인 접촉관계를 가지며 변성작용으로 인해, 암상, 용암류, 응회암 등 가능한 원래의 산출상태의 확인이 그리 용이하지 않다. 따라서, 여기서는 보다 일반적인 명칭인 변성염기성암으로 칭한다. 이들은 주성분 원소의 특징으로 원암이 화성기원의 현무암질암으로 밝혀졌다 (So and Kim, 1975; 안건상, 1985; 신국선, 1987).

옥천층군의 지질 시대에 관해서는 현재까지 많은

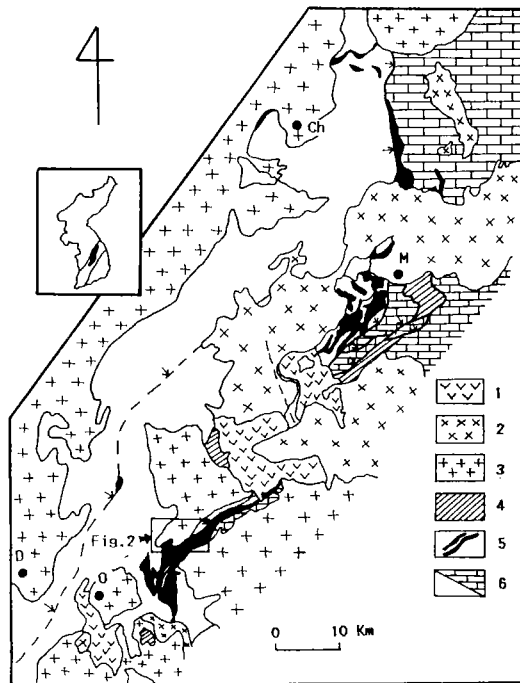


Fig. 1. Distribution of metabasites in Ogcheon Zone after Lee (1988). Ch: Chungju, D: Daejeon, O: Ogcheon, M: Mungyeong. 1: Acidic dike and flow of Cretaceous, 2: Granitic plutons of Cretaceous, 3: Granitic plutons of Early Cretaceous to Jurassic, 4: Terrestrial sedimentary rocks of Cretaceous and Jurassic, 5: Metabasites, 6: Pre-Jurassic sedimentary rocks.

논란이 있다. 이 문제에 대한 자세한 것은 권성택과 藍晶瑩 (1991)에 요약되어 있다. 기존연구의 대부분이 구조적인 해석과 암상대비로 옥천층군의 퇴적시기를 현생이언으로 간주하고 있으나, 권성택과 藍晶瑩 (1991)은 문경지역의 관입암이라 생각되는 조립질 변성염기성암의 Sm-Nd 광물 동시선 연대로 $677 \pm 91 \text{ Ma}$ (1σ)를 얻었다. 이 자료는 비록 원생대 말기에 해당하나, 오차가 커 고생대일 가능성을 배제하지는 않는다.

본 논문의 주 대상인 보은-옥천 지역의 지질도는 그림 2에 나타나 있다. 이 지역의 옥천층군은 석회암을 협재하고 있는 변성퇴적암 (소위 창리층)과 이를 암상 형태로 관입하고 있는 변성염기성암으로 구성된다. 변성염기성암이 우세한 지역에서 나오는 퇴적암류의 산출 상태는 동쪽의 인접 지역에서 연속성이 있는 것으로 기재되어 있으나 (김옥준 외, 1977; 신국선, 1987), 본 지역에서는 층의 연속성에 대한 확인이 쉽지 않았기 때문에 큰 포획물 형태로

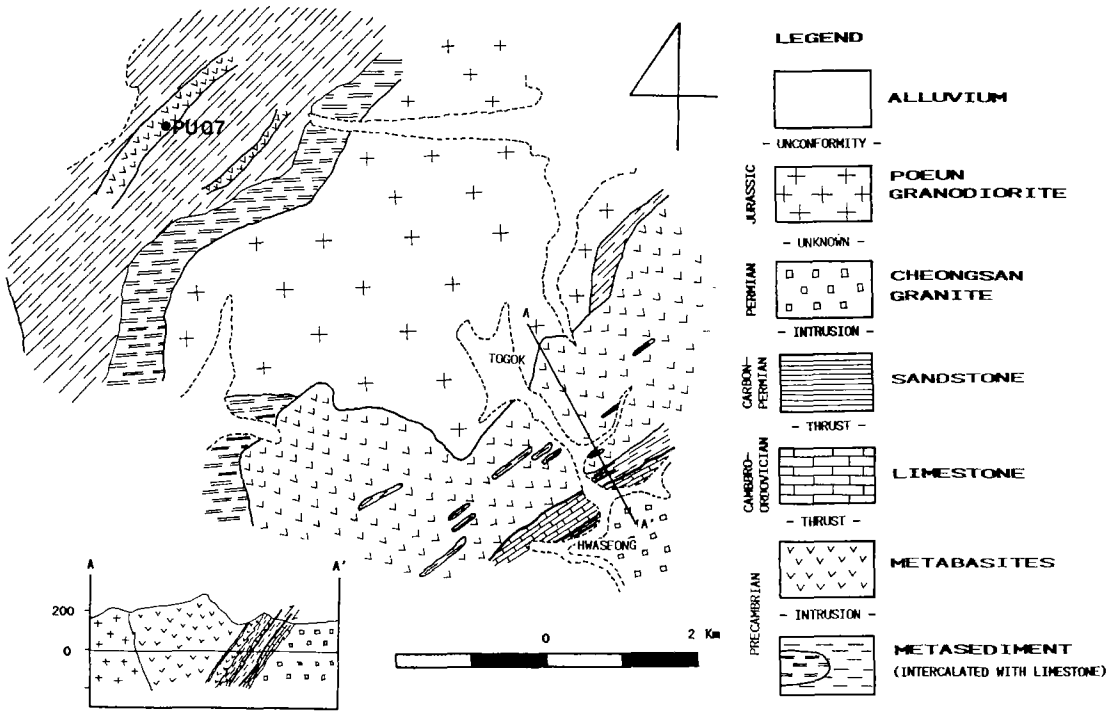


Fig. 2. Geologic map of the study area, modified from Kim *et al.* (1977).

표시하였다. 이들 변성퇴적암과 변성염기성암은 연구지역 북쪽에서 중생대 보은 화강암질암에 의해 관입당하고 있다. 조사 지역의 동남부 쪽에는 옥천층군의 암석과 충상단층으로 접하고있는 조선계(?)의 탄산염암이 분포하고 있고, 탄산염암과 다시 충상단층으로 접하는 평안계의 변성퇴적암이 분포한다(이 연구; 안중열과 장태우, 1991). 이들 남동쪽 지역의 퇴적암들을 그림 2의 남동부끝 부분에 분포하는 청산 화강암질암이 관입하였는데, 옥천층군의 암석과 직접 접하고 있지는 않다. 주승환과 김성재(1985)는 청산 화강암질암의 Rb-Sr 전암 연대로 약 260 Ma를 얻었다.

기존연구에 의하면, 연구지역 변성염기성암의 변성 정도는 녹색-각섬암상에, 협재하는 변성이질암은 녹색편암상에 해당하는 것으로 보고되었는데(Kim, 1971; 신국선, 1987), 인접하는 암석들이 교호로 서로 다른 변성정도를 보이는 것은 변성작용후 변형운동이 확인되지않는 한 문제점을 제시한다. 한편, 이대성과 박종심(1981)은 보은 화강암 서북부 지역에서 화강암질 관입체에 의한 접촉변성작용을 보고하였으며, 신국선(1987)은 보은 화강암체의 남

부에서 접촉변성작용에 의하여 이질암내에 홍주석과 근청석이 관찰됨을 보고하였다. 따라서, 연구 지역의 변성작용을 보다 확실히 하기 위해서는 보은 화강암에 의한 접촉변성작용의 효과에 대한 연구가 필요함을 시사한다.

시료 및 실험 방법

본 연구의 주된 목적의 하나인, 화강암의 관입에 부수되는 변성작용이 변성염기성암의 화학성분의 변화에 끼친 영향을 알아보기 위해 연구지역의 청산 화강암과 보은 화강암사이에서 남북방향으로 시료를 채취하였다(그림 3). 이 논문에서는 변성염기성암을 위치에 따라 보은 화강암에 가까운 북부지역 시료(PU-31, PU-51), 중부 시료(PU-06, PU-44, PU-04, PU-43, PU-35, PU-01, PU-27-1), 남부 시료(PU-19, PU-21)로 분류해서 기술한다.

채취된 시료들을 박편관찰을 통해 신선도의 여부를 확인한 후, 신선한 시료들에 대해 텅스텐 카바이드 분쇄기를 이용하여 분말 시료로 만들었다. 분말 시료는 영국 런던대학의 Royal Holloway and Bed-

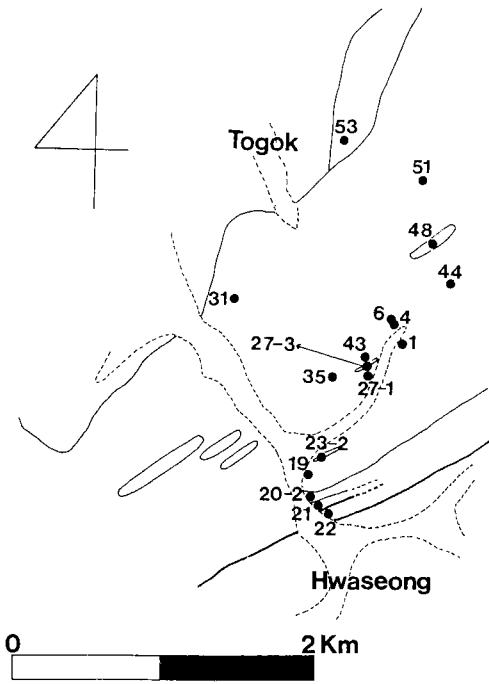


Fig. 3. Sample location map. Sample location of Mungyong area can be seen in the paper of Kwon and Lan (1991). The location of sample PU-07 is shown in Fig. 2.

ford College 지질학과와 J.N. Walsh 교수에 의하여 ICP-AES (inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry) 방법으로 주성분 및 미량성분 원소가 분석되었다. 이 분석방법의 질을 알기 위해 동일 방법으로 일본 표준시료인 JB-1을 세 번 분석하여, 그 평균치와 상대오차를 표 3에 나타내었다. 표준시료에 대한 주성분 원소 분석치는 내부정밀도 (internal precision)가 7%의 상대오차를 가지는 K_2O 를 제외하고는 대부분 2% 이하의 상대오차를 가진다. 평균값을 추천값 (recommended value)과 비교하면, 전체적으로 내부정밀도 한계내에서 잘 일치하는 편인데, K_2O 가 추천값보다 약 10% 정도 낮은 값을 가진다. 미량 원소의 분석치는 Li (10%)과 Zn (20%)를 제외하면 전반적으로 약 5% 이내의 상대오차를 가진다. 추천값과 비교할 때 전체적으로 잘 일치하나 Co, Cr은 낮은 값을 가진다. 희토류 원소의 분석치는 Walsh 박사에게 의하면 반정량적인 값이지만, 전체적으로 내부정밀도가 5% 이내로 비교적 신빙성이 높는데, 추천값과 비교했을 때도 비교적 잘 일치하는 편이나, 오직 Nd이 약간 낮은 값을

보이고, Eu이 약 30% 낮은 값을 보여 희토류 패턴 해석에서 Eu 이상을 논할 때 주의를 요한다. 한편 동위원소 희석법에 의한 Sm과 Nd 값 (권성택과 藍晶瑩, 1991)과 비교하면 Nd은 약 15%의 차이를 보이지만 Sm 값은 비교적 잘 일치한다. 미량 원소 분석에 원래 Zr 값이 포함되어 있으나, Cluzel *et al.* (1989)에 의해 보고된 분석치 중, 본 연구의 시료와 유사한 주원소 성분을 가지는 시료의 Zr 값 (124~428 ppm)과 비교했을 때, 본 연구의 Zr 함량이 비정상적으로 낮은 값 (50 ppm 이하)을 가지기 때문에 보고하지 않았다. 이는 ICP 분석을 위한 시료 용해 ($HF+HClO_4$) 과정에서 Zr을 함유하는 광물이 완전히 녹지 않았을 것이기 때문이라고 생각되지만, 현무암질암에서 Zr을 함유하는 광물은 흔하지 않기 때문에, Zr 값이 낮은 이유는 분명하지 않다. 분석치 중에서 SiO_2 함량은 이 과정에서 직접 구해지지 않았기 때문에, 신국선 (1987)의 논문에서 보고된 인접지역의 변성염기성암의 휘발성분 (Loss on ignition) 값의 평균값인 2.1 ± 1.0 (1σ) wt%를 각 시료의 분석치에 더한 값을 100 wt%에서 감산해 구하였다. 이 휘발성분의 평균값은 신선한 현무암질암에 비해 훨씬 높은 것으로 변성작용 동안 유체가 암석내 유입하였음을 지시한다. 이와같이 구한 SiO_2 의 함량은 휘발성분 값의 변화가 적기 때문에 실제 값에 접근할 것으로 생각된다.

광물의 화학분석을 위해서는 연세대학교 지질학과에 있는 JEOL JCX-733 전자현미분석기 (electron microprobe)를 사용하였다. 분석 조건은 10 nA의 조사전류 (probe current), 5 μm 의 빔 직경, 15 kv의 가속전압을 이용하였으며, 피크 (peak)는 10초간 3회, 바탕값 (background)은 5초간 2회 측정하였다. 측정 결과는 Bence and Albee (1968)의 방법에 의해 보정되었다.

암석기재 및 광물화학

변성염기성암

연구지역의 변성염기성암은 변성광물인 각섬석과 사장석으로 주로 구성되며, 원래의 광물은 관찰되지 않았다. 그러나, 전체적으로 화성암의 잔류조직으로 여겨지는 잔류반상조직 (blastoporphyritic texture), 잔류집적조직 (blastocumulate texture) 등이 간혹 관찰된다. 예를 들면, 그림 4에서 각섬석이 반정에

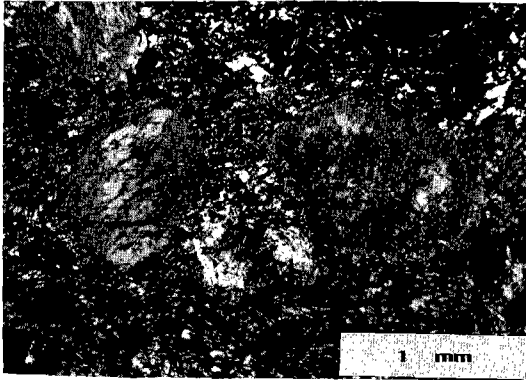


Fig. 4. Microphotograph (crossed nicols) of PU-35. Note octagonal shape of amphibole pseudomorph after probable clinopyroxene.

해당하는 잔류반상조직을 보이며, 또한 이 각섬석은 팔각형의 단사휘석의 가형을 가지는 것으로 해석된다. 이들 암석은 입자의 크기에 따라 조립질암과 세립질암으로 분류될 수 있다. 조립질암에는 본 지역의 가장 남쪽에서 산출되는 PU-21 및 PU-19 시료와 문경지역의 SN-3 및 SN-4가 해당되고, 나머지 암석들은 모두 세립질에 해당하는데, 이들은 다시 변정을 가지는 것과 등립질인 것으로 세분될 수 있다. 암석의 현미경하 특징이 부록에 요약되어 있다.

전체적인 광물 조합은 각섬석+사장석+불투명산화광물+인회석±녹렴석±녹니석±흑운모±석영±스핀넬 방해석이며, 연구 지역에서 시료의 위치에 따른 변성광물군의 체계적인 변화는 보이지 않는다.

각섬석과 사장석의 광물화학

본 연구에서 구체적인 변성암석학적 연구는 하지 않았으나 주구성 광물이고 변성염기성암의 변성조건을 유추하는데 유용한 각섬석과 사장석에 대한 성분 분석결과를 보고한다. 분석된 각섬석과 사장석의 대표적인 화학 성분이 표 1과 2에 각각 나타나 있다.

각섬석은 조립질 경우 (조립질암과 세립질암의 변성반정), 결정의 내부는 양기석으로, 주변부와 벽개면을 따라서 보통각섬석으로 구성되어 있는 것이 흔히 관찰되고 세립의 각섬석은 주로 보통각섬석이지만, 표 1에서 보는 것처럼 시료에 따라 반드시 그렇지는 않다. Leake (1978)에 의한 각섬석의 분

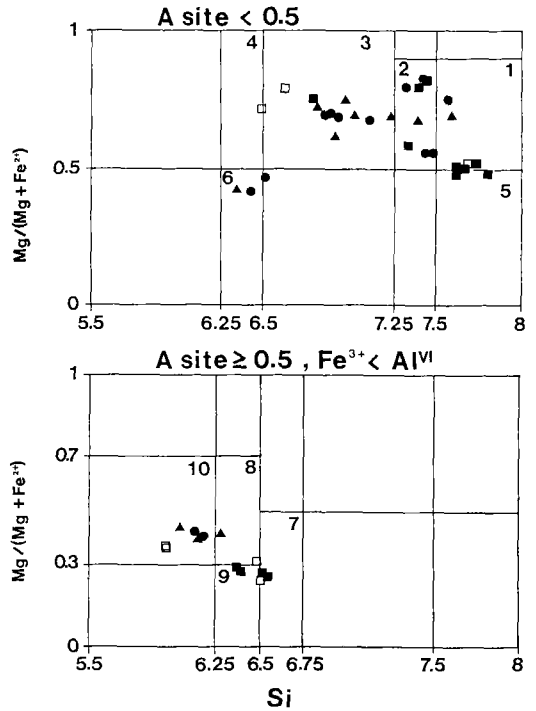


Fig. 5. Classification of amphiboles in metabasites (after Leake, 1978). Numbers: 1, actinolite; 2, actinolitic hornblende; 3, magnesio-hornblende; 4, tschermakitic hornblende; 5, ferro-actinolite; 6, ferro-tschermakitic hornblende; 7, ferro-edenitic hornblende; 8, ferroan pargasitic hornblende; 9, ferro-pargasitic hornblende; 10, ferroan pargasite. Symbols: solid circle, fine-grained; open square, margin of phenocryst; solid triangle, core of phenocryst; solid triangle, fine-grained inclusion in plagioclase.

류가 그림 5에 나타나 있다. 세립질암에서는 actinolitic hornblende, ferro-tschermakitic hornblende, ferro-hornblende 등이다. 변성반정 조직을 가지는 세립질암에서는 주로 actinolite, actinolitic hornblende, magnesio-hornblende 등에 속하는데, 그림 5에 나타나있지는 않지만 드물게 (2 자료) magnesian hastingsite에 속하는 것도 있다. 조립질암의 경우 주로 ferroan pargasitic hornblende에 속한다. 조립질암이나 세립질암의 사장석 변성반정내 세립의 포획물로서도 각섬석이 나타나는데, 이들의 성분은 각 시료의 조립 입자의 성분과 유사하다. 세립질암에서 세립의 각섬석의 경우 각 시료내에서의 성분 변화는 거의 관찰되지 않지만, 시료에 따른 변화는 현저하게 나타난다 (표 1과 그림 5).

일반적으로 각섬석 성분의 변화는 변성조건과 관

련된 것으로 생각되지만 (Laird and Albee, 1981; Plyusnina, 1982; Blundy and Holland, 1990), 본 연구 지역의 경우 그림으로 나타내지는 않았지만 열변성작용을 주었을 것으로 생각되는 화강암체로부터의 거리와 각섬석의 성분 (특히 Al)이 특별한 관계를 보이지 않고, 오히려 전암의 Al₂O₃ 함량과 어느 정도 비례 관계를 보인다. 이는 각섬석의 성분이 온도와 압력 등 조건외에 전암의 화학 성분에도 영향을 받음을 시사한다.

Laird and Albee (1981)는 미국 버몬트 (Vermont) 지역에 분포하는 전형적인 변성염기성암과 호층을 이루는 변성퇴적암의 변성상과 대비함으로써 변성염기성암의 변성조건에 따른 각섬석의 성분변화를 유추할 수 있는 몇 가지 방법을 제시하였다. 이런

방법 중 Al^{IV}-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti) 그림 (그림 6)에서 저압형으로 갈수록 (Al^{VI}+Fe³⁺+Ti) 값이 비교적 체계적으로 낮아져 변성상계를 구분하기가 보다 용이하다. 이 그림에서 연구 지역 각섬석은 거의 대부분 중압형의 분포에 속하는 것을 나타낸다. 또한 변성정도를 추정하기 위해 각섬석의 성분 자료를 Na/(Na+Ca)-Al/(Al+Si) 그림에 표시하였다 (그림 7A). 이 그림에서 각섬석 성분의 전반적인 분포는 1:1 선을 따르는데, 이는 스코트랜드의 달라디안 (Dalradian) 지역의 분포와 유사해 그림 6과 마찬가지로 중압형의 변성상계를 시사하지만, 저압형도 분포상 중첩되기 때문에 이 그림으로 압력형을 단정하기는 어렵다. 그림 6이 나타내는 중압형의 변성작용을 가정할 때, 변성정도는 대부분 흑운모대와

Table 1. Representative chemical composition of amphibole from the Ogcheon metabasites

	POUN AREA												
	PU-43		PU-01		PU-19			PU-35			PU-31		
	F.G.	F.G.	I	P-C	P-C	P-C	P-M	P-M	I	F.G.	F.G.	P-M	P-C
SiO ₂	50.32	43.19	42.43	42.53	49.39	52.79	45.39	41.15	46.49	51.61	47.10	44.04	46.58
TiO ₂	0.23	0.67	1.19	0.54	0.32	0.24	0.50	0.70	0.42	0.23	0.40	0.58	0.60
Al ₂ O ₃	4.60	12.27	15.23	13.77	6.49	4.51	9.89	14.58	9.24	5.84	9.13	12.01	9.99
FeO(T)	17.51	19.48	18.25	18.21	15.29	9.57	12.64	15.17	12.97	10.23	14.98	14.35	12.63
MnO	0.28	0.21	0.16	0.10	0.21	0.33	0.29	0.31	0.38	0.23	0.40	0.33	0.34
MgO	11.41	8.16	7.01	8.42	11.63	17.85	14.38	11.42	13.85	16.60	12.98	12.44	13.78
CaO	11.86	11.32	10.83	11.39	11.42	11.57	11.49	11.57	11.16	11.60	9.88	10.12	10.65
Na ₂ O	0.48	1.65	2.24	2.14	1.36	0.72	1.47	2.47	1.79	1.07	1.48	2.05	1.48
K ₂ O	0.12	0.24	0.18	0.18	0.04	0.07	0.21	0.26	0.16	0.07	0.00	0.03	0.03
Total	96.81	97.19	97.52	97.28	96.15	97.65	96.26	97.63	96.46	97.48	96.35	95.95	96.08
Number of ions on the basis of 23 oxygens													
Si	7.476	6.509	6.348	6.384	7.339	7.450	6.628	6.059	6.812	7.328	6.892	6.490	6.790
Al(IV)	0.524	1.491	1.652	1.616	0.661	0.550	1.372	1.941	1.188	0.672	1.108	1.510	1.210
Al(VI)	0.282	0.689	1.034	0.820	0.476	0.200	0.330	0.590	0.407	0.306	0.466	0.576	0.506
Ti	0.026	0.076	0.134	0.061	0.036	0.025	0.055	0.078	0.046	0.025	0.044	0.064	0.066
Fe ³⁺	0.162	0.306	0.124	0.226	0.050	0.293	0.695	0.629	0.416	0.307	0.590	0.650	0.525
Fe ²⁺	2.014	2.149	2.160	2.060	1.850	0.836	0.849	1.239	1.173	0.908	1.243	1.119	1.015
Mn	0.035	0.027	0.020	0.013	0.026	0.039	0.036	0.039	0.047	0.028	0.050	0.041	0.042
Mg	2.527	1.833	1.564	1.884	2.576	3.755	3.130	2.507	3.025	3.514	2.831	2.733	2.995
Subtotal	5.046	5.080	5.035	5.064	5.014	5.149	5.094	5.081	5.115	5.087	5.224	5.184	5.148
XM1-3	0.046	0.080	0.035	0.064	0.014	0.149	0.094	0.081	0.115	0.087	0.224	0.184	0.148
Ca	1.888	1.828	1.736	1.832	1.818	1.749	1.798	1.825	1.752	1.765	1.549	1.598	1.663
Na(M4)	0.066	0.092	0.229	0.104	0.168	0.101	0.108	0.094	0.133	0.149	0.228	0.218	0.188
Subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na(A)	0.072	0.390	0.421	0.518	0.224	0.096	0.308	0.612	0.376	0.146	0.192	0.367	0.230
K	0.023	0.046	0.034	0.034	0.008	0.013	0.039	0.049	0.030	0.013	0.000	0.006	0.006
Subtotal	0.095	0.436	0.455	0.553	0.232	0.108	0.347	0.661	0.406	0.159	0.192	0.373	0.236

Fe³⁺ and Fe²⁺ were calculated after the method of Spear and Kimball (1984).

Abbreviations: F.G.; fine grain, P-C; core of phenocryst, P-M; margin of phenocryst, I; fine-grained inclusion in coarse-grained plagioclase.

Table 1. Continued

	POUN AREA				MUNGYEONG AREA							
	PU-06				SN-3				SN-4			
	I	I	F.G.	F.G.	P-M	P-M	P-C	F.G.	P-C	P-M	P-M	
SiO ₂	51.06	46.97	52.44	48.74	41.28	38.42	50.91	39.69	51.37	41.33	50.99	
TiO ₂	0.20	0.37	0.65	0.26	0.01	0.31	0.06	0.41	0.06	0.89	0.09	
Al ₂ O ₃	5.54	8.97	3.59	7.23	8.97	15.92	3.33	14.42	2.33	9.60	2.46	
FeO(T)	13.34	15.67	10.60	13.72	28.14	21.03	19.16	19.28	18.67	24.52	19.54	
MnO	0.41	0.50	0.43	0.31	0.79	0.24	0.26	0.28	0.20	0.21	0.25	
MgO	13.95	11.72	16.00	13.49	4.25	6.16	10.29	7.37	10.62	5.85	10.48	
CaO	11.95	11.60	12.24	12.25	12.05	11.28	12.43	12.25	12.44	12.33	11.83	
Na ₂ O	0.77	1.26	0.46	1.03	2.25	3.01	0.41	2.71	0.42	2.00	0.45	
K ₂ O	0.14	0.24	0.10	0.19	0.12	0.25	0.18	0.24	0.11	0.79	0.15	
Total	97.36	97.30	96.51	97.22	97.86	96.62	97.03	96.65	96.22	97.52	96.24	
Number of ions on the basis of 23 oxygens												
Si	7.399	6.916	7.572	7.116	6.505	5.946	7.618	6.113	7.733	6.479	7.684	
Al(IV)	0.601	1.084	0.428	0.884	1.495	2.054	0.382	1.887	0.267	1.521	0.316	
Al(VI)	0.345	0.473	0.183	0.360	0.171	0.850	0.205	0.730	0.146	0.253	0.121	
Ti	0.022	0.041	0.071	0.029	0.001	0.036	0.007	0.047	0.007	0.105	0.010	
Fe ³⁺	0.166	0.306	0.108	0.229	0.574	0.319	0.151	0.182	0.126	0.217	0.232	
Fe ²⁺	1.450	1.624	1.172	1.446	3.135	2.403	2.247	2.301	2.224	2.998	2.231	
Mn	0.050	0.062	0.053	0.038	0.105	0.031	0.033	0.037	0.026	0.028	0.032	
Mg	3.013	2.573	3.444	2.936	0.998	1.421	2.295	1.692	2.383	1.367	2.355	
Subtotal	5.047	5.079	5.031	5.039	4.984	5.060	4.937	4.990	4.912	4.967	4.981	
XM1-3	0.047	0.079	0.031	0.039	0.000	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ca	1.855	1.830	1.894	1.916	2.034	1.870	1.993	2.021	2.006	2.071	1.910	
Na(M4)	0.098	0.091	0.076	0.045	0.000	0.069	0.007	0.000	0.000	0.000	0.090	
Subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.034	2.000	2.000	2.021	2.006	2.071	2.000	
Na(A)	0.119	0.269	0.053	0.247	0.687	0.834	0.112	0.809	0.123	0.608	0.042	
K	0.026	0.045	0.018	0.035	0.024	0.049	0.034	0.047	0.021	0.158	0.029	
Subtotal	0.144	0.314	0.071	0.282	0.712	0.883	0.146	0.856	0.144	0.766	0.070	

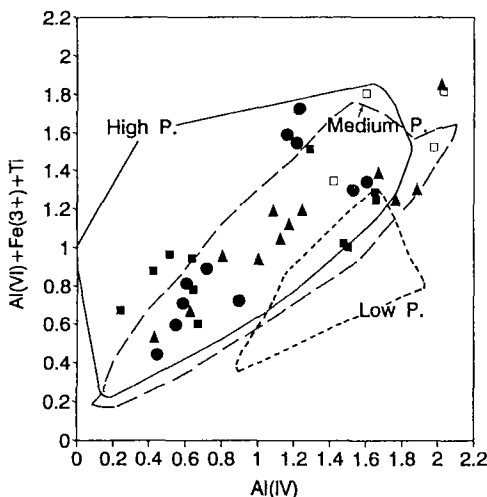


Fig. 6. Al^{IV}-Al^{VI}+Fe³⁺+Ti diagram (Laird and Albee, 1981). Symbols are the same as in Fig. 5.

석류석대에 해당됨을 나타낸다. 그러나, 일부는 십자석-납정석대에 속하는데, 이들은 주로 조립질암의 사장석내 세립의 포획물로 존재하는 것이 특징적이다. 그림 7B는 시료 PU-35가 다양한 각섬석 성분 변화를 가지는 것을 나타내는데, 변성반정의 중심부와 연변부의 성분이 판이하게 다름을 보이며, 기질부의 세립 입자와 반정의 중심부가 유사한 성분을 가지는 반면, 사장석내 포획물로 존재하는 세립의 각섬석은 오히려 반정 연변부와 유사함을 나타낸다.

사장석은 알바이트에서 안데신까지의 성분을 갖는다 (그림 8). 신국선 (1987)이 보고한 라브라도라이트-바이토나이트 (An65-An81) 성분의 사장석은 관찰되지 않았다. 반정이나 조립질암의 큰 결정에서는 결정의 바깥 부분과 내부가 성분의 차이를 보이기도 하는데, 결정의 내부에서 보다 높은 An 함량을 보이고, 이러한 변화는 각섬석에서와는 달리

Table 2. Representative chemical composition of plagioclase from the Ogcheon metabasites

	POUN AREA											
	PU-43		PU-01		PU-35				PU-06			
	F.G.	F.G.	F.G.	F.G.	F.G.	F.G.	P-C	P-M	P-M	P-M	P-C	F.G.
SiO ₂	61.83	58.66	60.29	64.86	63.24	62.75	62.84	64.59	60.06	60.01	66.97	59.96
Al ₂ O ₃	23.60	25.57	25.33	21.74	22.17	23.36	22.77	21.81	24.80	24.73	19.90	24.71
FeO(T)	0.15	0.13	0.08	0.11	0.16	0.09	0.09	0.04	0.14	0.08	0.13	0.22
CaO	5.48	7.34	7.08	2.83	3.87	5.10	4.38	3.13	6.57	7.47	1.24	6.81
Na ₂ O	8.66	7.49	7.75	10.50	9.55	8.73	9.61	10.07	7.86	7.17	11.37	7.67
K ₂ O	0.06	0.02	0.07	0.06	0.08	0.04	0.04	0.11	0.07	0.05	0.07	0.08
Total	99.78	99.21	100.60	100.10	99.07	100.07	99.73	99.75	99.50	99.51	99.68	99.45
Number of ions on the basis of 8 oxygens												
Si	2.751	2.640	2.671	2.859	2.822	2.776	2.792	2.855	2.687	2.685	2.950	2.686
Al	1.238	1.356	1.323	1.129	1.166	1.218	1.193	1.136	1.308	1.304	1.033	1.305
Fe	0.006	0.005	0.003	0.004	0.006	0.003	0.003	0.001	0.005	0.003	0.005	0.008
Subtotal	3.994	4.001	3.997	3.992	3.994	3.998	3.988	3.993	4.001	3.992	3.988	3.999
Ca	0.261	0.354	0.336	0.134	0.185	0.242	0.209	0.148	0.315	0.358	0.059	0.327
Na	0.747	0.654	0.666	0.897	0.826	0.749	0.828	0.863	0.682	0.622	0.971	0.666
K	0.003	0.001	0.004	0.003	0.005	0.002	0.002	0.006	0.004	0.003	0.004	0.005
Subtotal	1.012	1.009	1.006	1.034	1.016	0.993	1.039	1.018	1.001	0.983	1.034	0.998
Or	0.3	0.1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5
Ab	73.8	64.8	66.2	86.8	81.3	75.4	79.7	84.8	68.1	63.3	94.0	66.8
An	25.8	35.1	33.4	12.9	18.2	24.3	20.1	14.6	31.5	36.4	5.7	32.8

Abbreviations: F.G.;-fine grain, P-C; core of phenocryst, P-M; margin of phenocryst.

Table 2. Continued

	POUN AREA						MUNGYEONG AREA			
	PU-31			PU-19			SN-4			
	F.G.	P-M	P-C	P-M	P-C	F.G.	P-M	P-C	P-M	P-C
SiO ₂	56.56	54.98	56.14	61.56	60.44	61.46	62.01	68.86	70.10	67.83
Al ₂ O ₃	27.33	27.32	27.12	23.64	24.68	24.40	22.92	20.29	20.19	20.42
FeO(T)	0.14	0.06	0.02	0.08	0.12	0.04	0.23	0.09	0.10	0.07
CaO	9.04	9.97	9.45	5.19	6.58	6.23	5.01	0.62	0.28	0.56
Na ₂ O	6.11	5.63	6.00	9.69	7.52	8.10	8.39	11.59	11.67	11.41
K ₂ O	0.06	0.04	0.00	0.04	0.02	0.03	0.06	0.05	0.03	0.04
Total	99.24	98.00	98.73	100.20	99.36	100.26	98.62	101.50	102.37	100.33
Number of ions on the basis of 8 oxygens										
Si	2.553	2.521	2.549	2.737	2.702	2.722	2.783	2.968	2.989	2.957
Al	1.454	1.476	1.451	1.239	1.300	1.274	1.212	1.031	1.015	1.049
Fe	0.005	0.002	0.001	0.003	0.004	0.001	0.009	0.003	0.004	0.003
Subtotal	4.013	4.000	4.001	3.978	4.007	3.997	4.004	4.002	4.007	4.009
Ca	0.437	0.490	0.460	0.247	0.315	0.296	0.241	0.029	0.013	0.026
Na	0.535	0.501	0.528	0.835	0.652	0.696	0.730	0.969	0.965	0.964
K	0.003	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002
Subtotal	0.976	0.993	0.988	1.085	0.968	0.993	0.974	1.000	0.979	0.993
Or	0.4	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2
Ab	54.8	50.4	53.5	77.0	67.3	70.1	74.9	96.9	98.5	97.1
An	44.8	49.3	46.5	22.8	32.6	29.8	24.7	2.9	1.3	2.6

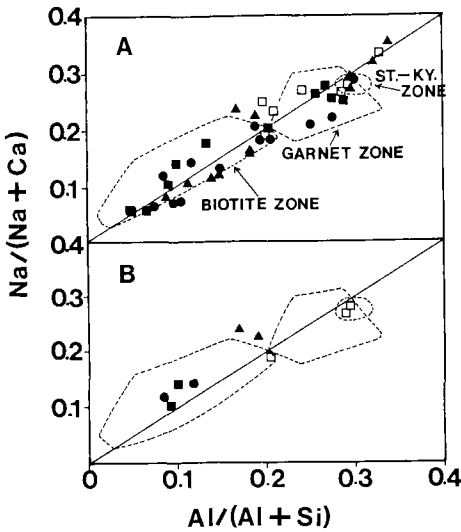


Fig. 7. Na/(Na+Ca)-Al/(Al+Si) diagram (Laird and Albee, 1981), showing that the majority of amphiboles in the Ogccheon metabasites belong to biotite to garnet zone. Symbols are as for Fig. 5. Fig. A is for all data and Fig. B is for the sample PU-35 only, showing wide compositional variation in a single sample.

점적으로 나타난다. 그러나, 반정의 내부에 알바이트 성분을 가지는 경우 (PU-06)와 조립질 사장석의 대부분이 알바이트인 경우 (SN-4)도 있다. 보은 지역에서 북쪽 보은 화강암에 가장 가깝게 있는 시료 PU-31의 사장석은 An 성분이 가장 높으며, 좁은 범위 (An45-An49)를 갖지만, 남부와 중부의 사장석 성분은 중첩되어 지역에 따른 분대는 이 연구에서 확실하지 않다.

조립의 각섬석 결정에서 내부와 가장자리의 화학 성분이 뚜렷이 다른 것은 혼합성 결핍 (miscibility gap)의 존재 혹은 복합 변성작용 두 가지 해석이 가능하다 (Robinson *et al.*, 1981). 이는 녹색편암상과 각섬암상의 점이대 변성작용 (녹렴석-각섬암상)을 받은 열기성암에서 흔히 관찰되는 현상이며 위의 두 가지 해석에 대해서는 논란이 많다. 연구지역에서 (1) 각섬석의 현미경 관찰에서 용리 (exsolution) 조직이 관찰되지 않는 점, (2) 보통각섬석이 결정의 바깥부분과 벽개면을 따라 주로 나타나는 점, (3) 동일 시료내에 혼합성 결핍이 흔히 정의하는 분명한 두 성분보다 다양한 성분의 각섬석이 공존하는 점, (4) 연구지역이 옥천계 전반에 걸친 광역변성작용의 중생대의 화강암 관입에 따른 접촉변성작용을 받은

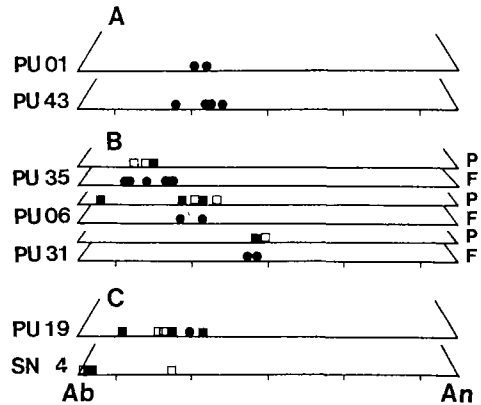


Fig. 8. Variation of plagioclase composition in the Ogccheon metabasites. Fig. A is plot for fine-grained rocks, B for porphyritic rocks, and C for coarse-grained rocks. F: fine-grained, P: phenocryst. Symbols are as for Fig. 5.

것이 추론되는 점 등은 복합 변성작용에 의한 현상일 가능성이 큼을 시사하나, (1)과 (3)은 혼합성 결핍에서도 나타날 수 있기 때문에 현재의 자료로 이를 단정하기에는 이르다. 전자의 경우 초기의 비교적 저온 변성작용에 후기의 고온의 변성작용이 중첩된 것으로 해석될 수 있다. 그러나, 문제는 보다 복잡할 수도 있다. 이 지역의 지질관계에서 적어도 두 번의 변성작용이 추론되기 때문에 각각의 변성작용에 대한 정확한 이해가 없는 한 단정적인 해답은 어렵다. 예를 들어, 초기의 변성작용에서 혼합성 결핍이 존재하였고 나중의 접촉변성작용에서 각섬석 성분이 어느 정도 변화되었을 가능성도 충분히 있기 때문이다. 이와같은 문제에 대해서는 앞으로 보다 자세한 변성암석학적 연구가 요구된다.

변성퇴적암

변성열기성암에 의해 관입되어 나타나는 변성퇴적암의 광물군은 석영+백운모+녹니석+사장석+녹렴석+흑운모+스핀+불투명광물로 전형적인 녹니석대 내지 흑운모대의 녹색편암상을 나타낸다. 변성열기성암과의 접촉부에서는 접촉변성작용의 결과라고 생각되는 반점 (spot)이 관찰되기도 한다. 이 반점은 최고 약 1cm의 크기를 가지기도 하는데 주로 녹니석과 백운모 (견운모)로 구성되어 있으며 흑운모, 석영, 전기석이 소량 존재한다.

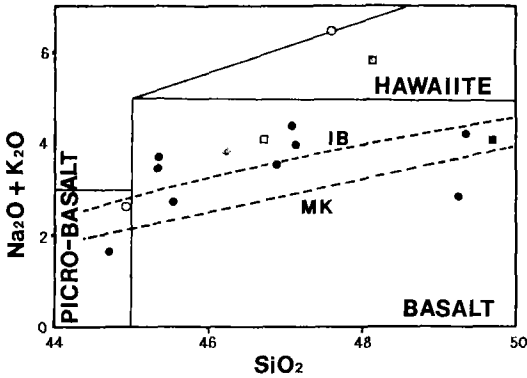


Fig. 9. Total Alkali-SiO₂ diagram for classification of parental rocks of the Ogcheon metabasites. Broken curves, MK and IB, represent the boundary between tholeiite and alkali basalt, as proposed by Macdonald and Katsura (1964) and Irvine and Baragar (1971) respectively. Symbols: circle, sample from Poun area; square, sample from Mungyong area; open symbol, coarse-grained rock; solid symbol, fine-grained or porphyritic rock.

변성도

변성염기성암의 경우 녹색편암상 내지 각섬암상 정도의 변성작용에서는 이질암의 경우의 불연속적 변성반응과는 달리 연속적 반응이 주된 것이기 때문에 변성조건의 정확한 추정이 쉽지 않은 것이 잘 알려져 있다. 연구지역 변성염기성암의 경우 변성 광물군으로 판단했을 때 보은화강암 접촉부 근처의 PU-31을 제외한 대부분의 시료에서 양기석과 보통 각섬석이 공존하는 점은 녹색편암상-각섬암상에 해당됨을 나타낸다. 각섬석의 화학성분은 이 지역이 중압의 변성상계에 속하며, 앞에서 토의된 혼합성 결정의 존재유무가 문제되지만, 녹색편암상에서 각섬암상까지의 변성을 받았음을 시사한다. 한편 사장석 성분이 올리고크레츠와 안데신이 주된 것을 고려하면 각섬암상 (특히, 보은 화강암에 가장 가까운 PU-31)까지의 변성정도를 추정할 수 있다. 또한 문제가 되는 것은 변성염기성암과 이에 협재되는 변성퇴적암 사이의 변성도의 관계인데, 변성퇴적암이 녹색편암상의 녹니석대 내지 흑운모대에 해당하는 광물군을 보여 인정하는 변성염기성암에서 추론되는 변성상과는 차이를 보인다. 이에 대해서 현재 자료로서 설명하기는 힘들지만, 이들 변성퇴적암의 성분이 전형적인 이질암이 아닐 가능성과 변성염기성암에서 유추된 복합변성작용과 관련된 문제일 가능성이 추

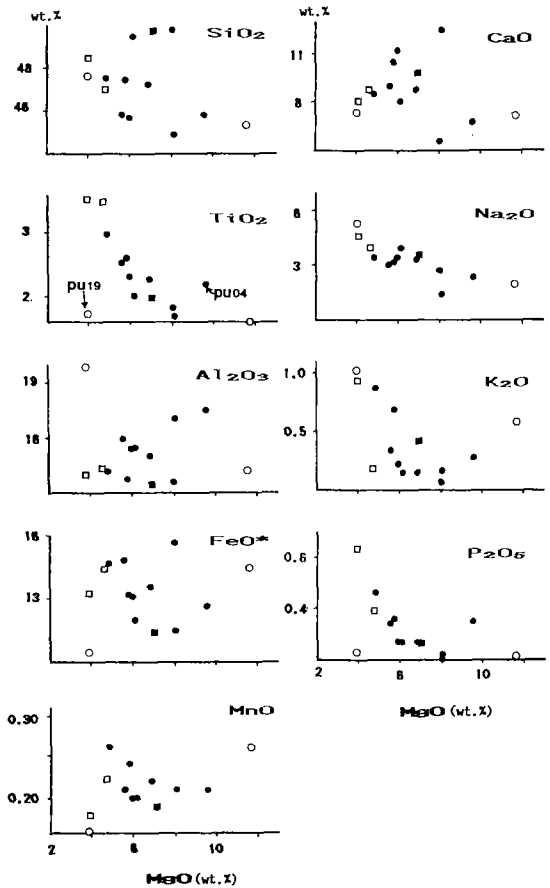


Fig. 10. MgO-major oxide chemical variation diagrams. Symbols are the same as in Fig. 9.

정된다.

암석화학

보은 지역에서 채취된 시료 11 개와 문경 상내리 지역의 시료 3개에 대한 주성분 및 미량성분 원소의 분석치가 표 3에 나타나 있다. 모든 시료의 SiO₂ 함량은 44~49 wt%로 현무암질암에 해당된다. 이들은 Le Bas *et al.* (1986)에 의한 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 암석 분류 그림 (그림 9)에서 피크로현무암 (picrobasalt), 현무암 (basalt), 하와이아이트 (hawaiiite)에 속하는데, 변성작용 동안의 유동성을 고려하면 이 그림을 이용한 원암의 분류는 오류가 있을 수 있음을 짐작할 수 있다. 본 연구에서 처럼 변성작용을 받은 화성암일 경우, 분화지수로 사용가능한 조건은 변성작용에 그다지 영향을 받지 않을 것과 분화 정도를

Table 3. Major and trace element data of the Ogcheon metabasites in Poun and Mungyeong area

	POUN AREA												MUNGYEONG AREA				Standard(JB-1) ^e	
	PU-21	PU-19	PU-27-1	PU-43	PU-01	PU-04	PU-06	PU-44	PU-51	PU-31	PU-07	SN-1	SN-3	SN-4	Recommended	Measured		
SiO ₂ ^a	43.99	46.60	46.10	46.15	44.39	44.58	44.39	48.31	48.22	43.77	45.90	48.65	45.72	47.14				
TiO ₂	1.60	1.72	2.96	2.60	2.53	2.19	2.31	2.00	1.82	1.68	2.27	1.99	3.50	3.51	1.34	1.30		
Al ₂ O ₃	14.28	19.93	14.14	13.72	15.97	17.51	15.37	15.47	13.59	17.06	15.02	13.53	14.32	13.87	14.53	14.89		
Fe ₂ O ₃ ^b	16.02	11.64	16.25	14.64	16.42	14.04	14.53	13.31	17.35	12.77	15.07	12.57	16.18	14.70	8.97	9.08		
MnO	0.26	0.16	0.26	0.24	0.21	0.21	0.20	0.20	0.31	0.21	0.22	0.19	0.22	0.18	0.16	0.15		
MgO	11.61	3.93	4.83	5.78	5.60	9.55	5.94	6.13	7.99	8.06	6.87	7.02	4.75	3.94	7.73	7.98		
CaO	7.31	7.36	8.59	10.52	9.05	6.80	11.25	8.10	5.63	12.53	8.81	9.68	8.81	8.17	9.29	9.21		
Na ₂ O	2.05	5.32	3.45	3.21	3.06	2.40	3.43	3.97	2.73	1.44	3.33	3.60	3.82	4.85	2.79	2.82		
K ₂ O	0.58	1.02	0.87	0.69	0.34	0.28	0.22	0.15	0.07	0.17	0.15	0.42	0.19	0.89	1.42	1.20		
P ₂ O ₅	0.21	0.23	0.46	0.36	0.34	0.35	0.27	0.27	0.20	0.22	0.27	0.26	0.40	0.66	0.26	0.26		
L.O.I. ^c	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09				
Ba	26	70	124	92	68	33	53	64	30	28	23	98	138	239	490	493		
Co	55	31	43	42	46	49	42	39	53	45	45	44	45	39	38.7	28		
Cr	88	121	33	76	115	122	131	184	114	182	136	157	29	49	469	355		
Cu	12	181	4	14	12	3	87	14	51	10	326	5	152	54	56.3	54		
Li	44	57	16	9	29	57	13	18	22	20	10	50	26	38	11.5	15		
Nb	11	14	38	29	15	20	14	12	8	9	17	18	28	36	34.5	31		
Ni	172	56	37	62	80	120	52	80	70	110	79	92	36	29	139	141		
Sc	24	25	30	34	26	26	37	32	35	31	35	34	34	27	27.4	26		
Sr	213	384	443	589	436	425	501	391	337	1107	526	289	469	222	435	441		
V	212	233	343	332	277	217	301	292	337	244	324	296	407	288	212	205		
Y	20	28	49	43	37	33	35	31	26	24	30	35	40	54	24	27		
Zn	191	51	129	127	117	120	93	117	180	148	130	127	108	115	83	85		
La ^d	18	22	46	33	23	28	19	23	18	12	21	24	35	40	38	38		
Ce	28	38	88	65	42	49	37	41	29	26	40	39	66	78	67	62		
Nd	13	19	38	30	20	22	18	19	14	15	20	22	35	39	27	22		
Sm	3.8	4.5	9.5	7.8	5.7	6.0	5.5	5.6	4.1	3.7	5.4	6.0	8.7	10.1	5.0	4.8		
Eu	1.0	1.3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.2	0.9	0.9	1.7	1.2	2.1	2.1	1.52	1.0		
Dy	3.2	4.0	7.7	6.6	5.4	5.0	5.1	4.8	4.0	3.6	4.6	5.3	6.6	8.5	4.0	3.9		
Yb	1.4	2.0	3.0	3.0	2.5	2.2	2.4	2.2	1.7	2.0	2.0	2.4	2.5	3.4	2.1	2.0		

^aSiO₂ has not been measured directly. It is calculated by subtracting other oxides and L.O.I. from 100.

^bIron is reported as total Fe₂O₃.

^cAssumed average (2.09±1.0%) of the data in Ahn (1985) and Shin (1987).

^dThe rare earth element data are semi-quantitative.

^eJB-1 standard was analyzed by the same method (ICP-AES). Recommended values are shown for comparison.

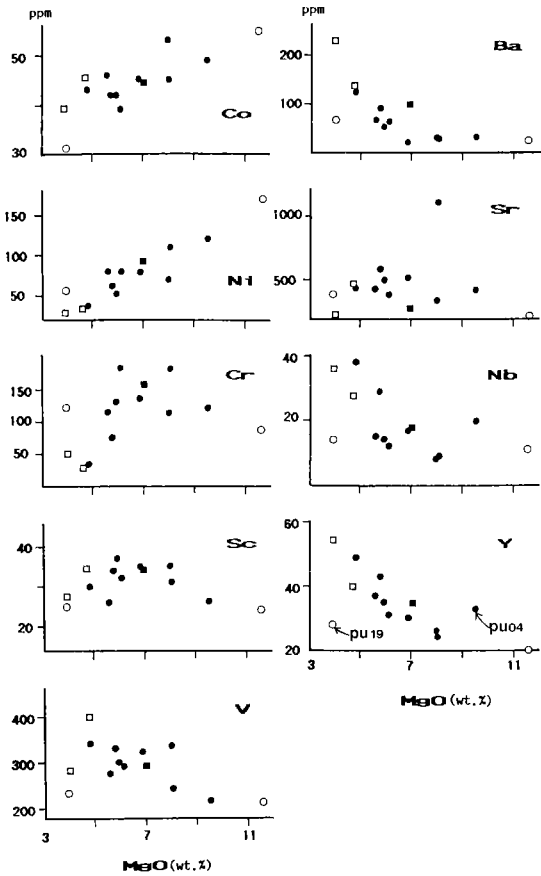


Fig. 11. MgO-trace element variation diagrams. Symbols are the same as in Fig. 9.

잘 나타낼 것 등 두 가지가 필요하다. 분석된 시료의 SiO₂ 함량 변화가 적기 때문에 전통적인 하커 그림 (Harker diagram)과는 달리, 마그마 분화의 지수로 MgO를 이용해 주성분 및 미량성분 원소의 성분 변화를 표시한 것이 그림 10과 11에 각각 나타나 있다. 물론 다른 성분을 지수로 이용하는 것도 가능하지만, 현무암질암의 성분 변화는 주로 감람석, 휘석, 사장석의 분별 정출에 기인하기 때문에, 이들 중 앞의 두 광물의 정출은 MgO의 변화에 영향을 크게 미쳐 분화 유형을 유추하는데 유용하다. 또한 MgO가 나중에 언급되는 예외적인 2 시료를 제외 하고는 전반적으로 TiO₂, P₂O₅, Nb, Y 등과 같이 불유동 원소이며 동시에 현무암질 마그마에서 불호정적 (incompatible) 원소와 단조로운 변화를 보이기 때문에 변질작용 동안 비교적 불유동 원소로 행동 했다는 것을 뒷받침한다.

우선 주성분 원소의 변화를 보면 (그림 10), SiO₂, Al₂O₃, FeO (=FeO total), CaO, MnO 등은 MgO의 변화에 대해 뚜렷한 상관 관계를 보이지 않는다. 일반적으로 변성작용을 받지 않은 현무암질암의 산출지역에서 주성분 원소가 비교적 일정한 변화경향을 보이는 것을 고려하면 변성작용동안 이들 원소가 유동적이었음을 나타낸다. 반면에, TiO₂, P₂O₅, Na₂O 등은 2 시료 (PU-04와 PU-19)를 제외하면 전반적으로 MgO 양이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이는데, 이는 이들 원소가 불호정 원소로 행동했다는 것을 시사한다. K₂O는 P₂O₅ 등과 유사한 경향을 보이기는 하나, 분산 정도가 심하다. 특히 MgO 11 wt% 이상을 가지는 시료가 높은 K₂O 값을 가지는 것이 두드러진다.

미량성분 원소의 변화에서 (그림 11), Co와 Ni이 MgO 함량과 정의 상관 관계를 보이는 것은 이들 원소가 감람석 및 휘석에 호정적이기 때문에 이들 광물의 정출이 중요하였음을 나타낸다. Cr, Sc, V 등 +3가를 가지는 원소들은 MgO가 감소함에 따라 처음에는 증가하다가 약 7 wt%에서부터 감소하는 패턴을 보인다. 이들 원소 역시 감람석 및 휘석의 정출에 관련이 있는데, 처음 증가하는 패턴은 이들 원소가 불호정적으로, 나중에 감소하는 패턴은 호정적으로 행동한 것으로 해석될 수 있다. 특히 나중에 감소하는 경향은 이들 원소에 대해 상당히 호정적인 휘석의 정출이 중요하였음을 나타낸다. Ba, Nb, Y 등 원소들은 Ti, P와 같이 부의 상관 관계를 보여 불호정적으로 행동했음을 지시하나, Sr은 MgO에 대해 뚜렷한 관계를 보이지 않아 이 원소와 친밀하게 거동하는 Ca과 마찬가지로 변성작용동안 유동적이었음을 시사한다. 다음에서는 앞에서 언급된 MgO에 대한 불호정적 원소 변화그림에서 전체 경향에서 두드러지게 벗어나는 두 시료, 즉 PU-19와 PU-04에 대해 살펴보고자 한다.

PU-19는 조립질암으로 사장석이 전체적으로 우세한 시료이다. 이 시료의 화학성분에서 MgO가 낮은데 비해 Al₂O₃가 예외적으로 높은 것은 암석기재와 일치한다. 더불어, TiO₂, P₂O₅, Nb, Y 등 불호정적 원소의 함량이 낮은 특징을 가지고 있다. 따라서, 암석기재학적으로는 사장석 집적암 (cumulate rock) 이거나 혹은 후기 분화물 등 두 가지 해석이 가능 한데, 화학적 특징은 전자를 지시한다. 이외는 달리, 이 시료와 암석기재학적으로 비슷하고 MgO 함량도 낮지만, 불호정적 원소의 함량이 훨씬 높은 문경

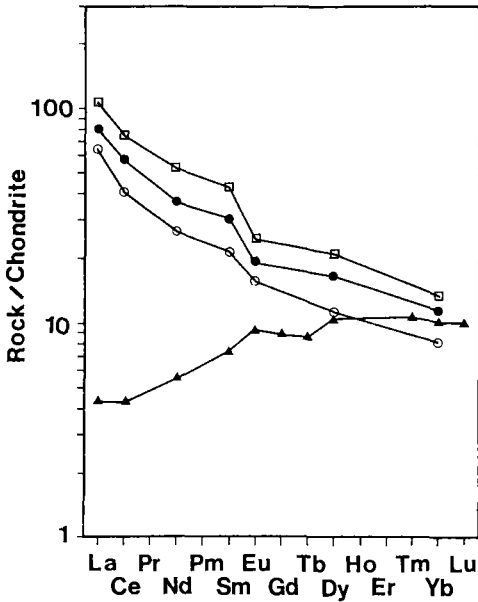


Fig. 12. Chondrite-normalized rare earth element pattern of average fine-grained rocks in Poun (closed circle), average of coarse grained rocks in Poun (open circle), and average of metabasites from the Mungyong area (open square). Also shown for comparison (solid triangle) is the data for normal-MORB (Humphris *et al.*, 1985).

지역의 SN-4 시료는 후기 분화물로 간주된다. 그러나, PU-04 시료는 그 해석이 분명하지 않다. 암석기재학적으로 이 시료는 다른 시료와 비교할 때 녹련석과 녹니석이 많다는 것의 광물조성에서 큰 차이를 보이지 않는다. 이 시료는 MgO가 비교적 높으나 (9.55 wt%), 전체적인 경향에 비해 불호정적 원소 즉, TiO₂, P₂O₅, Nb, Y, REE 등이 예외적으로 높다. 여기에 대해서는 몇 가지 가능성을 고려할 수 있다. 즉, 1) 이 마그마의 근원이 이 지역의 다른 마그마의 그것들에 비해 위에서 언급된 불호정적 원소의 양이 높았을 가능성, 2) 보통의 마그마에 불호정적 원소가 매우 부화된 잔류액이 섞여졌을 가능성, 3) 변성작용 동안 이러한 원소를 많이 함유하는 스피넬 및 인회석의 성분이 유입되었을 가능성, 4) 반대로 우리가 MgO 성분은 변성작용 동안 유동성이 적다고 가정했으나, MgO를 많이 함유하는 녹니석, 녹련석 등 변성광물의 생성과 관련되어 실제로는 유동성이 컸을 가능성 등을 고려할 수 있다. 첫번째 경우 이들 불호정적 원소 간의 비가 다른 암석의 그것과 유사하여 이 지역 암석이 동일한

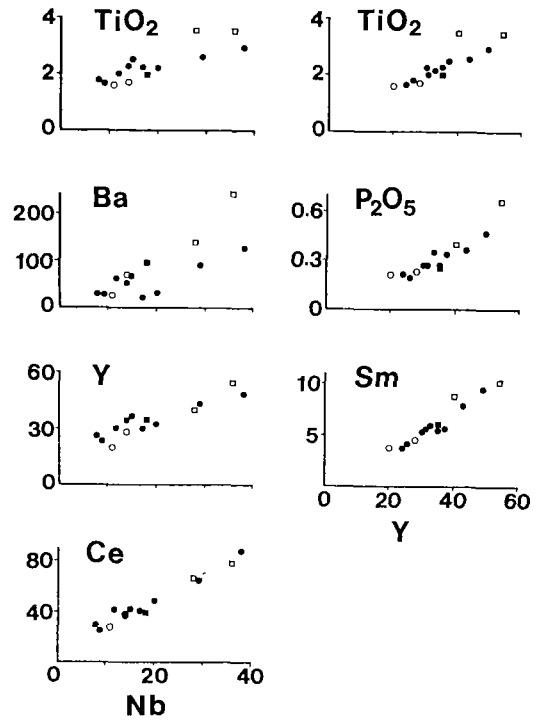


Fig. 13. Nb-TiO₂, Ba, Y and Ce diagrams, and Y-TiO₂, P₂O₅, Sm diagrams. Symbols are the same as in Fig. 9.

근원물질에서 유래하였음을 시사함으로 이 가능성은 배제될 수 있을 것이다. 세번째의 경우는 고려되는 미량 원소가 일반적으로 변성작용동안 비유동적이기 때문에 역시 배제될 수 있다고 생각된다. 한편, 두번째의 경우는 현재 자료로는 평가가 쉽지 않다. 이를 제외한 3가지 가능성 중 암석기재학적인 면을 고려하면 네번째 가능성이 가장 높은 것으로 생각된다.

보은 지역의 세립질암과 조립질암 그리고 문경 지역 암석에 대한 희토류 원소 함량의 평균값을 콘드라이트의 함량에 대해 표준화한 것이 그림 12에 나타나있다. 전체적으로 가벼운 희토류 원소 (LREE)가 무거운 희토류 원소 (HREE)에 비해 부화된 비교적 일정한 유형을 보인다. 이는 Cluzel *et al.* (1989)의 자료와 잘 일치한다. 앞에서 언급된 것처럼 이들 희토류 원소 자료가 반정량적인 것이기는 하지만, 일반적으로 희토류 원소 유형은 분별정출작용에 크게 영향을 받지않기 때문에, 전체적으로 유사한 유형은 변성염기성암의 원암에 대한 근원물질이 유사함을 시사한다.

변성작용 동안에도 별로 영향을 받지 않는 불호 정적 원소 중 근원물질의 부분용융동안 성질이 다른 Nb과 Y에 대한 다른 원소들과의 변화 중 대표적인 것만 그림 13에 표시되어 있다. 일반적으로 변성작용을 받지 않은 지역의 현무암질암이 아주 일관성 있는 화학변화를 보이는데 비해, 전반적으로 어느 정도 분산되어 표시되는 것은 변성작용의 영향이 작지만 있었던 것으로 생각된다. Nb에 대해 TiO_2 , Y, Ce 등은 정의 상관관계를 보이는데, 이들 중 TiO_2 와 Y이 수직축에서 0 이상의 절편을 가지는 것은 희토류 원소의 변화에서 유추되는 동일 기원의 마그마일 경우 분별 정출 과정 동안 이 두 원소의 전체 분배계수가 Nb에 비해 컸음을 나타낸다. Nb-Ba 그림에서는 두 개의 패턴을 보이는데, 이는 Ba이 알칼리원소인 것을 고려하면 변성작용동안 일부 시료에서 유동적이었음을 시사한다. Y에 대한 TiO_2 , P_2O_5 , Sm 등은 비교적 좋은 정의 상관관계를 보이며 0에 가까운 절편을 가지는데, 이는 이들 원소가 마그마의 생성에서 정지 및 변성까지 화학성분을 변화시킬 수 있는 모든 과정에 대해 거의 영향을 받지 않았다는 것을 시사한다. 특히, Ti와 P가 비교적 좋은 상관관계를 보이는데 이는 Ti-철석 그리고/혹은 인회석 등의 정출이 없었음을 시사한다.

위치에 따른 화학 성분의 변화

이 지역을 나중에 관입한 화강암류의 변성작용이 변성염기성암의 화학성분 (특히 알칼리와 같은 유동적인 원소)에 끼친 영향을 알기 위해 대표적인 화학성분의 변화를 북부, 중부, 남부로 나누어 살펴 보았다. 알칼리 원소 (K, Na, Ba 등)는 일반적으로 불호정적이지만 유동적인 반면, Ti은 불호정적이며 동시에 불유동적이기 때문에 변성작용이 없을 경우 이들 원소와의 비는 일정할 것이므로 변성작용 동안의 유동성을 시험하기에 적합하다. 그림 14에서 TiO_2 의 변화에 대한 K_2O/TiO_2 , Na_2O/TiO_2 , P_2O_5/TiO_2 비의 변화를 나타내었다. 그림 14에서 유추되는 것처럼 P_2O_5/TiO_2 비는 0.11~0.16으로 비교적 일정하다. 또한, 사장석 집적물로 유추되는 PU-19 시료가 높은 값을 가지는 것을 제외하면, 다른 시료의 Na_2O/TiO_2 비는 대략 0.8~2.0로 비교적 일정한 Na의 유동이 제한적이었음을 나타낸다. 그러나, K_2O/TiO_2 비는 대략 북부에서는 0.1 이하, 중부에서는 0.1~0.3, 남부에서는 0.3 이상으로 남쪽에서 북쪽으로 갈수록

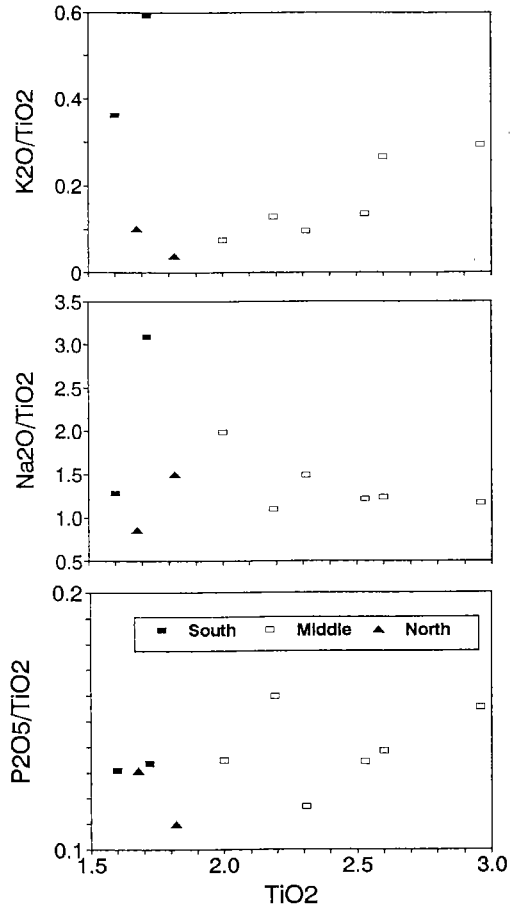


Fig. 14. Variation of chemical compositions with distance from the Poun granite.

그 비가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향에 대해서는 연구 지역의 남과 북에 두 개의 화강암체가 존재하기 때문에 두 가지 해석이 가능하다. 즉, 남쪽의 청산화강암에 의한 K 유입 혹은 북쪽의 보은 화강암에 의한 K 손실이다. 일반적으로 화강암질암의 관입에 따른 연구 지역의 염기성암과 같은 주변암에 대한 변질작용은 화강암질암에 K이 훨씬 많기 때문에 주변암에 K이 부화되는 경향을 가지는 것을 고려할 수 있으나, 이는 오직 화강암질 마그마로부터 유래된 K이 많은 유체가 주변암으로 유입되었을 경우에 한하며, 이러한 유체의 유입이 없는 한 변성염기성암의 화학성분의 유동성은 변성작용 동안 인접하는 작은 규모의 유체의 성질에 달려있을 것이다. 이 지역의 경우 변성염기성암에 화강암질 마그마로부터 유래된 유체의 유입이 반드시 수반되

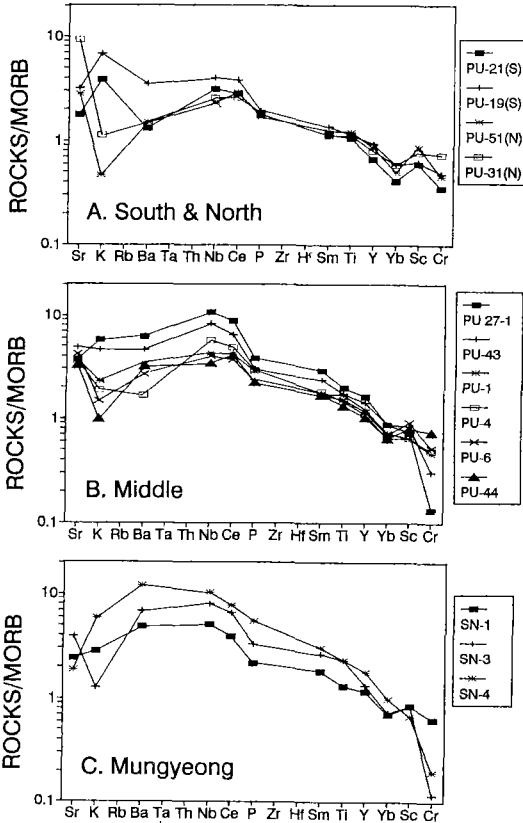


Fig. 15. Trace element tectonic discrimination diagram (Pearce, 1982).

는 것이 아니라는 것은 북쪽 보은 화강암에 가까운 시료들이 가장 낮은 K 함량을 가지는 것으로부터 알 수 있다. 그림 14에서 우리가 K의 원래 함량을 알지 못하기 때문에 K의 손실 혹은 부화를 분명히 알 수는 없다. 그렇지만, 그림 15의 지구조 환경 판별그림에서 변질을 받지않은 열기성암의 일반적인 변화유형, 즉 상대적인 원소 함량이 잘 알려져 있기 때문에, K의 원래 함량을 정성적으로 추정할 수 있다. 이 그림에서 특히 북부 시료의 경우 K 함량이 Sr 및 Ba 과 같은 주변 다른 원소에 비해 두드러지게 적은 것은 이들 시료로부터 K이 손실되었음을 강하게 시사한다. 이러한 현상은 북부 2 시료에만 한정되는 것이 아니고 중부 시료 중 PU-06, PU-44 등도 유사한 패턴을 보인다. 이러한 관찰은 이 지역 변성열기성암의 화학적 특성을 논할 때, K이 이용될 경우 주의가 필요하다는 것을 말한다.

지구조 환경 분별

화성암의 화학성분을 이용해서 지구조 환경의 판별을 위한 방법이 그 동안 많이 제안되어왔다 (Pearce and Cann, 1973; Mullen, 1983; Floyd and Winchester, 1975; Butler and Woronow, 1986). 변성작용을 받은 화성암일 경우 Ti, Zr, Y 등과 같이 불유동 원소를 이용하는 것이 좋으나, 본 연구에서는 많이 사용되는 Zr의 함량이 분석되지 않았기 때문에 제한이 있다. 또 앞에서 언급된 것처럼 일부 시료에서 K이 손실되었을 가능성이 있기 때문에, 이 원소를 이용할 경우 잘못된 결론에 도달할 수도 있다 (예를 들어, 신국선 (1987)의 $K_2O-P_2O_5-TiO_2$ 그림 참조). 뿐만 아니라, 연구 지역의 변성열기성암이 아래에서 토의되는 것처럼 변이질암에 속하기 때문에 몇 개의 원소를 이용한 판별그림에서는 그 구분이 확실치 않은 경우가 예상된다.

따라서, 이 연구에서는 지구조 환경에 따른 보다 전반적인 화학성분의 변화를 보기 위해, Pearce (1982)가 제안한 보통-중앙해령현무암 (normal-MORB)의 화학성분에 표준화된 지구조 환경의 판별그림을 이용한다 (그림 15). 이 그림에서 보는 지역과 문경지역의 암석의 화학성분에 대한 변화가 각각 도시되어 있으나, 서로 유사한 유형을 보인다. 전체적인 유형은 알칼리 원소, Nb, Ti, P 등 HFSE (high field strength element)와 Ce, Sm 등 가벼운 희토류 원소 함량이 높은 반면, Y, Yb, Sc, Cr 등 호정적인 원소의 함량이 낮은, 흑모양을 가지는데, 이는 전형적인 판내부 환경의 현무암질암의 패턴과 유사하다. 앞에서 언급된 것처럼 일부 시료에서 K 양이 낮은 것은 변성작용의 영향으로 생각된다.

원암의 알칼리성

그림 9의 $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 그림에서, 본 연구의 시료들은 알칼리질과 비알칼리질의 경계 부근에 찍히는 변이질에 속한다. 앞에서 보인 것처럼 K이 변성작용 동안 손실되었을 가능성이 높기 때문에 원암은 보다 알칼리질이었을 가능성이 있지만, Si, Na 등 다른 원소에 대한 변성작용의 효과도 고려해야 하기 때문에 이 그림에서 원암의 알칼리성에 대한 정확한 추정은 어렵다. 그렇지만, 만약 변성작용의 효과가 이들 원소의 거동에 대해 무작위적 (random)이고, 또 그리 심하지 않았다고 가정하면, 이 그림에서 나타난 것처럼 변이질에 해당할 것이 추정된다. 이 연구에서는 신국선 (1987)이 서부 인접

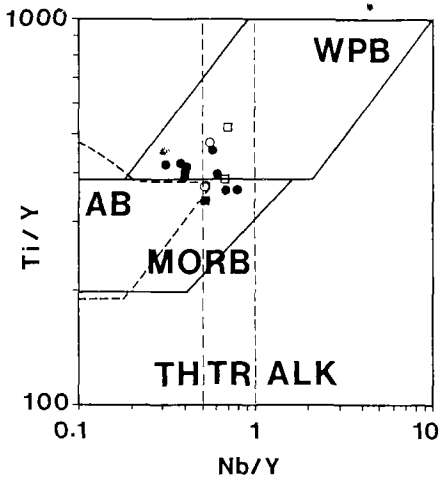


Fig. 16. Nb/Y-Ti/Y diagram after Pearce (1982), showing that the Ogcheon metabasites are tholeiitic to transitional and mostly belong to within plate basalt. AB: arc basalts, MORB: midocean ridge basalt, WPB: within plate basalt, TH: tholeiitic, TR: transitional, ALK: alkalic. Symbols are the same as in Fig. 9.

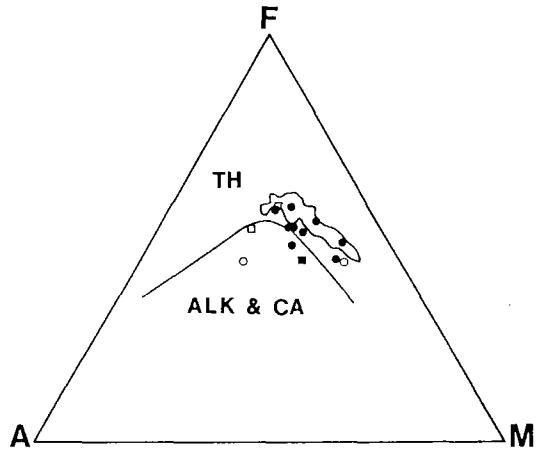


Fig. 17. A (total alkali)-F (total Fe as FeO)-M (MgO) diagram. The boundary curve is after Irvine and Baragar (1971). The closed field represents the transitional basalts from Mauna Kea, Hawaii (Frey *et al.*, 1990), showing that transitional basalts may have a variation trend toward slight iron enrichment in this diagram. Symbols are the same as in Fig. 9.

지역에서 스피라이트화작용 (spilitization)의 증거로 보고한 높은 알칼리 함량을 가지는 시료는 보이지 않았다.

옥천 변성염기성암과 같이 변성작용을 받은 경우, 원암의 대한 알칼리성을 알기 위한 하나의 방법으로 변성작용 동안에 불유동 원소로 거동하는 Y과 Nb이 암석의 알칼리성과 밀접한 관계를 가지는 것을 이용할 수 있다. Pearce and Cann (1973)은 판내부 환경의 현무암질암의 경우, 슐레아이트질은 Nb/Y 비가 0.5보다 작고, 알칼리질은 1보다 크며, 그 사이는 변이질에 속함을 보였다. 분석된 암석들의 Nb/Y 비는 0.3~0.8 사이의 값을 가지는데, 이것은 본 지역의 암석들이 슐레아이트질 내지 변이질에 속함을 나타낸다 (그림 16). 이들 중 많은 것들이 변이질에 속하는 것은 주성분 원소에서 유추된 것과 비교적 잘 일치한다.

(Na₂O+K₂O)-FeO-MgO 삼각그림 (그림 17)에서도 암석들이 슐레아이트질과 비슐레아이트질사이의 경계선근처에 찍히어 변이질임을 나타내는 것은 앞의 (Na₂O+K₂O)-SiO₂ 그림의 결론과 일치함을 보인다. 미약하나마 Fe 성분의 부화경향을 보이는 것은 변이질 현무암에서 흔히 볼 수 있기 때문에 이것만으로 이들을 슐레아이트질이라고 말하는 것은 무리가 있을 것이다. 참고로, 전형적인 변이질 현무암이지만 Fe 부화현상을 보이는 화와이섬의 마우나

케이 화산의 화학성분 범위 (Frey *et al.*, 1990)가 그림에 같이 표시되어 있다.

토 의

연구지역의 변성염기성암은 주성분 및 미량성분 원소의 특징으로 볼 때 전체적으로 원래 화성암의 화학성분의 변화를 유지하고 있으며, 변이질 현무암에 속하는 것으로 판내부 환경에서 생성되었을 것을 시사한다. 이 결과는 본 연구와 유사한 방법에 의한 Cluzel *et al.* (1989)의 옥천대 전반에 걸친 예비적인 지화학적 연구와 일치하며, 권성택과 藍晶瑩 (1991)의 Nd 동위원소 ($\epsilon Nd = +2.4 \sim +3.5$) 연구에서 지지하는 것과도 일치한다. 따라서 이 연구의 결과는 기존 연구에서 옥천 변성염기성암이 호상열도 환경에서 생성된 것이라든가 (Park and So, 1972) 혹은 해양지각의 지구조적 정치에 기인한 오피올라이트군의 일부일 것 (김옥준과 김규한, 1976)이라는 해석을 지지하지 않는다. 특히 기존 연구에서 오피올라이트군의 일부일 것이라는 이유 중, 중요한 것은 주성분 원소의 특징이 해양성 슐레아이트질일 가능성과 주변 암석 중 초트질암 및 탄산염암 등이 심해성 기원의 퇴적암일 가능성 때문이었다. 첫번째 가능성은 이미 살펴본대로 화학적 특징을 논할 때 주성분 원소가 변성작용으로 변화했을 수 있음과

변이질일 수 있음을 고려하지 않은데서 기인하였을 것으로 생각된다. 물론 심해저 현무암과 관련된 변이질일 가능성도 있지만, 지구조판별그림 (그림 15)에서 두 지구조 환경에서 나타나는 변이질의 미량 원소 Ce, P, Sm, Ti, Zr 등의 함량이 판내부 환경의 현무암에 비해 높은 특징을 가지는 것은 (Pearce, 1982) 옥천 변성염기성암의 원암이 판내부 환경의 변이질암임을 뒷받침한다. 두번째 이유는 전형적인 오피올라이트군의 중요 멤버인 벼개 현무암, 초염기성암 등이 관찰·보고된 적이 없으며, 또한 흔히 지구조적인 정치기구 때문에 나타나는 멜란지 (melange) 구조나 고압 변성작용 등이 보고되지도 않았기 때문에 그 가능성이 희박하다 할 수 있다 (Chough, 1981). 옥천대 내에서 보고된 초염기성암의 산출 (김옥준 외, 1977)은 오직 조곡리 알칼리 현무암의 초염기성암 포획체 (김윤규 외, 1988)로 마그마의 상승동안 맨틀 암편조각이 끌려온 것이기 때문에, 지구조적 운동에 의한 오피올라이트군에 속하는 초염기성암체와는 그 정치기구가 전혀 다르다.

본 연구의 결과가 판내부 환경임을 시사하나, 여기에도 대륙환경과 해양환경 두 가지 경우가 있을 수 있다. 그러나, 언급된 것처럼 전형적인 심해저 환경을 지시하는 화성활동이나 다른 증거가 없는 것은 대륙환경이었을 가능성이 높음을 시사한다. 이러한 것은 옥천대가 안정지괴 환경에서 열곡과 관련된 퇴적 분지였을 가능성이 크고, 이 열곡의 발달이 해양 지각의 생성을 유도할 만큼 성숙되지 않은채 정지되었음을 시사한다.

결 론

1. 보은 지역 옥천 변성염기성암에서는 원래 광물 (primary mineral)은 남아있지 않으나 화성암의 잔류조직이 때때로 관찰된다. 전반적인 변성광물군은 각섬석+사장석+불투명광물+인회석±녹렴석±녹니석±흑운모±석영±스핀±방해석이며, 보은 화강암 부근의 것을 제외한 대부분의 시료에서 양기석과 보통각섬석이 공존하는 것으로부터 녹렴석-각섬암상의 변성작용을 추정할 수 있으나, 협재되는 변성 퇴적암의 광물군에서 유추되는 녹색편암상의 녹니석대-흑운모대의 변성정도와는 대조되어 문제점을 제시한다.

2. 조립의 각섬석에서 내부는 양기석으로 외부와

벽개면은 보통각섬석으로 구성되어 있는 것이 흔히 관찰된다. 그 기원에 대해서는 혼합성 결핍과 복합 변성작용을 고려할 수 있는데, 각섬석의 조직, 성분, 연구지역의 지질 관계 등은 후자의 가능성을 시사하나, 적어도 두 차례의 변성작용이 유추되는 이 지역의 변성광물 성분 변화를 이해하기 위해서는 보다 자세한 연구가 필요하다.

3. 각섬석의 화학성분은 중압의 변성상계와 녹색편암상 (혼합성 결핍이 존재할 경우는 녹렴석-각섬암상)에서 각섬암상까지의 변성도를 시사하며, 사장석의 화학성분은 대부분 올리고클레즈에서 안데신으로 녹렴석-각섬암상 내지 각섬암상의 변성도를 나타낸다.

4. 주성분 및 회토류를 포함하는 미량성분 원소에 의한 옥천 변성염기성암의 원암의 화학적 특성은 판내부 환경의 슬래아이트질 내지 변이질 현무암질 암에 속하는데, 변이질이 우세하다.

5. 연구지역에 관입한 화강암의 접촉변성작용에 의한 변성염기성암의 화학성분의 변화 추세에서 북부 보은 화강암체에 가까운 시료의 K이 손실되는 경향이 나타난다. 이는 이 지역 변성염기성암의 원암의 화학적 특징을 논할 때 K을 이용하는 해석에 주의를 요함을 의미한다 (예, $K_2O-TiO_2-P_2O_5$).

6. 옥천 변성염기성암의 화학적 특징으로 유추되는 옥천대의 퇴적환경은 해양지각의 존재 등 심해 환경을 나타내는 지시자가 보고되지 않은 것으로 미루어 아마도 대륙내 열곡과 관련되었을 것으로 추정된다.

감사의 글

초고에 대하여 많은 충고를 준 조문섭 교수, 상기남 교수와 광물성분 분석을 도와준 조동룡, 분쇄기 사용을 기꺼이 허락한 장호완 교수, 전암 분석을 도와준 Walsh 교수에게 감사드리며, 이 논문을 면밀히 검토해 준 오창환 교수와 박계현 박사 두 심사위원들에게 심심한 사의를 표한다. 이 연구는 1989년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비 및 전략광물자원연구센터에 의하여 부분적으로 지원되었다.

참고문헌

권성택, 藍晶瑩, 1991, 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원

- 소연구: 예비보고서. 광산지질, 24, 277-285.
- 김옥준, 김규환, 1976, 옥천지향사대내에 분포하는 염기성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 13-26.
- 김옥준, 이대성, 이하영, 1977, 한국지질도 보은도폭 (1:50,000). 자원개발연구소.
- 김윤규, 이대성, 송윤구, 김선영, 1988, 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 24 특별호, 57-66.
- 신국선, 1987, 충북 보은군 관기-화성간에 분포하는 변성염기성 암류의 암석학적 연구. 연세대학교 미발간 석사학위논문, 69.
- 안건상, 1985, 문경 서남부에 분포하는 각섬암에 관한 연구. 연세대학교 미발간 석사학위논문, 58.
- 안중열, 장태우, 1991, 보은탄전 서부지역의 지질구조. 광산지질, 24, 287-299.
- 이대성, 박종섭, 1981, 보은화강섬록암 서남부 접촉대에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 14, 55-76.
- 이대성, 우영근, 1970, 청산·옥천간 염기성변성암에 관하여. 지질학회지, 6, 29-52.
- 주승환, 김성재, 1985, Rb-Sr법에 의한 영남육괴 연대 측정연구 (1). 국토기초지질조사연구, 85-24, 7-40.
- Bence, A.E. and Albee, A.L., 1968, Empirical correction factors for the electron probe microanalysis of silicates and oxides. Jour. Geol., 76, 382-403.
- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B., 1990, Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contrib. Mineral. Petrol., 104, 208-224.
- Butler, J.C. and Woronow, A., 1986, Discrimination among tectonic settings using trace element abundances of basalts. J. Geophys. Res., 91, 10289-10300.
- Chough, S.K., 1981, Submarine debris flow deposits in the Ogcheon basin, Korean Peninsula. UN ESCAP, CCOP Tech. Bull., 14, 17-29.
- Cuzel, D., Lapiere, H. and Cadet, J.-P., 1989, Evidence for an early Paleozoic rift magmatism in the Ogcheon belt (South Korea). C. R. Acad. Sci. Paris, 308, 1473-1480.
- Floyd, P.A. and Winchester, J.A., 1975, Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. Earth Planet. Sci. Lett., 27, 211-218.
- Frey, F.S., Wise, W.S., Garcia, M.O., West, H., Kwon, S.T. and Kennedy, A., 1990, Evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: Petrologic and geochemical constraints on post-shield volcanism. J. Geophys. Res., 95, 1271-1300.
- Humphris, S.E., Thompson, G., Schilling, J.-G. and Kingsley, R.H., 1985, Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge between 46° S and 32° S: Influence of the Tristan da Cunha mantle plume. Geochim. Cosmochim. Acta, 49, 1445-1464.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.
- Kim, H.S., 1971, Metamorphic facies and regional metamorphism of Ogcheon metamorphic belt. Jour. Geol. Soc. Korea, 7, 221-256.
- Laird, J. and Albee, A.L., 1981, Pressure, temperature, and time indicators in mafic schist: Their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. Am. Jour. Sci., 281, 127-175.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J. Petrol., 27, 745-750.
- Leake, B.E., 1978, Nomenclature of amphiboles. Can. Mineral., 63, 1023-1052.
- Lee, D.-S., 1988, Neoproterozoic to Late Paleozoic igneous rocks. In Geology of Korea, 2nd edition (ed. D.-S. Lee), Kyohak-Sa Publishing Co, Seoul, 305-311.
- Lee, H.Y., Lee, M.S. and Um, S.H., 1980, Geochemistry of amphibolites in the Hwanggangri area, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 16, 93-104.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian lavas. J. Petrol., 5, 82-133.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discrimination for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. Earth Planet. Sci. Lett., 62, 53-62.
- Park, B.-K. and So, C.-S., 1972, The Ogcheon system in the central part of southern Korean Peninsula as an ancient island arc. Jour. Geol. Soc. Korea, 8, 198-210.
- Pearce, J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In Andesites: orogenic andesites and related rocks (ed. R.S. Thorpe), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 525-548.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. Earth Planet. Sci. Lett., 19, 290-300.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contrib. Mineral. Petrol., 69, 33-47.
- Plyusnina, L.P., 1982, Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages. Contrib. Mineral. Petrol., 80, 140-146.
- Robinson, P., Spear, F.S., Schmacher, J.C., Laird, J., Klein, C., Evans, B.W. and Doolan, B.L., 1981, Phase relations of metamorphic amphiboles: natural occurrence and theory. In Reviews in Mineralogy 9B (ed. D. R. Veblen and P. H. Ribbe), Mineral. Soc. Am., 1-211.
- Spear, F.S. and Kimball, K.L., 1984, RECAMP-A Fortran IV program for estimating Fe³⁺ contents in amphiboles. Computers and Geosciences, 10, 317-325.
- So, C.-S. and Kim, S.-M., 1975, Geochemistry, origin and metamorphism of mafic metamorphic rocks in the Ogcheon Geosynclinal Zone, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 11, 115-138.
- Wilson, M., 1989, Igneous Petrogenesis: A global tectonic approach. Unwin Hyman Ltd., London, 466.

(책임편집 : 오창환)

Appendix. A summary of petrography for the Ogcheon metabasites and metasediments.

A) Metabasites

- PU-21:** c.-g.; Abundant amph (Hb+Act), and minor Chl, Plag, Qz, Opq, Epi and Apt; Equigranular (about 1 cm size); Amph is actinolite in the core, but hornblende along margin and cleavage. Plag has inclusions of very f.-g. Epi and Amph.
- PU-19:** c.-g.; Plag, Amph, Epi, Chl, Apt, Cal, Opq; Plag is euhedral to subhedral, and has upto 1 cm size. Amph occurs mostly as inclusion inside Plag and shows light green to green pleochroism. Chl and Epi are associated with veinlet.
- PU-27-1:** f.-g.; Amph, Plag, Bt, Qz, Apt, Opq; Schistosity is well developed. Amph is green and weakly pleochroic. Plag rarely occurs as microphenocryst of 0.3-0.4 mm size. Bt is brown and strongly pleochroic, and occurs as bands parallel to schistosity. Occasionally, Amph veinlet crosscuts schistosity.
- PU-43:** f.-g.; Amph, Plag, Bt, Epi, Qz, Apt, Opq; Similar to PU-27-1. Bt is brown, but is less abundant than PU-27-1. Epi veinlets are observed.
- PU-35:** f.-g., Po.; Amph (Hb+Act), Plag, Epi, Chl, Bt, Qz, Apt, Opq; Phenocrysts are composed of 0.5-3 mm size Amph and Plag. Octagon-shaped Amph is observed, which is thought to be pseudomorph of clinopyroxene (Fig. 4). Phenocrystic Amph is actinolite in the core and hornblende along the margin and cleavage, as in the sample PU-21. Matrix Amph is green and strongly pleochroic. Phenocrystic Plag show albite and carlsbad twin, but no zoning. Chl and Bt are associated with Epi veinlet.
- PU-01:** f.-g.; Amph, Plag, Epi, Chl, Qz, Apt, Opq; Plag phenocryst of 1 mm size is rarely observed. Amph occurs as platy or needle form, and is green. Chl is associated with Epi veinlet.
- PU-04:** f.-g., Po.; Amph, Chl, Plag, Epi, Qz, Apt, Opq; Green Amph occurs mostly as microphenocryst of 0.7-0.8 mm size, and is green and closely associated with Chl. Chl is abundant next to Amph, and is pale green and weakly pleochroic. Plag occurs among Epi and Chl in small amounts. Epi is relatively abundant, compared to other samples.
- PU-06:** f.-g., Po.; Amph, Plag, Epi, Qz, Sph, Apt, Opq; Phenocrysts are 0.5-5 mm size Plag. No Amph phenocrysts. Amph occurs in matrix or as inclusion in Plag.
- PU-44:** f.-g., Po.; Amph (Hb+Act), Plag, Chl, Bt, Epi, Qz, Opq; Pale green Chl is associated with

Qz aggregates, along with greenish brown Bt. The aggregates could be sedimentary fragment included in metabasite.

- PU-51:** f.-g.; Amph, Plag, Qz, Epi, Opq, Apt; Plag phenocryst of 1 mm size is rarely observed. Qz aggregates of upto 3 mm size occur as irregular to oval shape and consist of Qz, Epi, Amph, and Plag, but sometimes of Qz only.
- PU-31:** f.-g., Po.; Amph, Plag, Qz, Epi, Chl, Apt, Opq; Amph and Plag occur as 1 to 1.5 mm size microphenocryst. Microphenocrystic Amph is euhedral in many cases and cuts f. g. matrix Amph, which may suggest that the large Amph is porphyroblastic.
- PU-07:** f.-g.; Amph, Plag, Qz, Apt, Cal, Opq; Plag rarely occurs as 0.7-0.8 mm irregular-shaped phenocryst and has abundant f.-g. Amph inclusions. Cal veinlets are observed.
- SN-1:** f.-g.; Amph, Plag, Chl, Apt, Opq, Qz; Amph in part is replaced by Chl.
- SN-3:** c.-g.; Amph (Act+Hb), Plag, Bt, Apt, Qz, Opq; Amph is up to 1 cm size, and is composed of actinolite in the core and hornblende along margin and cleavage. Plag is mostly euhedral. Bt occurs as aggregates in matrix.
- SN-4:** c.-g.; Amph (Act+Hb), Plag, Sph, Apt, Chl, Epi, Bt, Opq; Plag is upto 1 cm size and euhedral. Amph occurs as phenocryst and in matrix. The phenocrystic Amph has composition similar to that of sample SN-3.

B) Metasediments

- PU-20 and PU-22:** Qz, Ms, Chl, Plag, Epi, Bt, Sph, Opq; Schistose; Minor Bt is greenish brown and is associated with Chl. Epi has larger grain size compared to others and forms aggregates with Chl.
- PU-23-2 and PU-27-3:** Qz, Bt, Ms, Chl, Apt, Tm, Opq; These samples have spots presumably formed by contact metamorphism of the metabasites and consist mostly of Qz and Ms, except for the spots which have maximum size of about 1 cm. The spots consist of mostly Chl and Ms, and of minor Bt, Qz and Tm.
- PU-48:** Ms, Opq, Qz, Epi; Epi is associated with veinlets.
- PU-53:** Banded; light green layer consists of mostly Epi and minor Qz, while white layer consists of mostly Ms and minor Epi and Qz.

(Abbreviations: Amph, amphibole; Hb, hornblende; Act, actinolite; Qz, quartz; Plag, plagioclase; Epi, epidote; Bt, biotite; Chl, chlorite; Ms, muscovite; Apt, apatite; Sph, sphene; Opq, opaque minerals; Cal, calcite; Tm, tourmaline; c.-g., coarse grained; f.-g., fine grained; Po., porphyroblastic.)

Petrology and geochemistry of the Ogcheon metabasites in Poun, Korea

Sung Tack Kwon and Dong Ho Lee

Department of Geology, Yonsei University, Seoul, Korea

ABSTRACT : We present petrography, mineral chemistry of amphibole and plagioclase, and major and trace element chemistry for the Ogcheon metabasites occurring in the Poun and Mungyong areas to understand metamorphism, and to define chemical characteristics of parental rocks and their implication for tectonic environment. The Ogcheon metabasites often preserve relict igneous textures, although no primary phases are observed. They are mainly composed of amphibole (actinolite + hornblende) + plagioclase + epidote + chlorite + sphene + opaque oxides, indicating epidote amphibolite facies metamorphism. Coarse-grained amphiboles frequently have actinolitic composition in the core, and hornblende along the margin and cleavage, which can be interpreted either as miscibility gap or as result of polymetamorphism. Although presumed polymetamorphic events in the Ogcheon supergroup favor the latter possibility, further metamorphic studies are necessary to solve the problem. Amphibole and plagioclase chemistries suggest greenschist (epidote-amphibolite, if miscibility gap is present) to amphibolite facies metamorphism of possibly medium pressure. The major and trace element data of whole rocks indicate that the Ogcheon metabasites are transitional to tholeiitic basalts belonging to within-plate environment. Absence of evidences indicating deep sea environment suggests that the Ogcheon metabasites emplaced in an intra-cratonic, possibly rift environment which failed to proceed to an oceanic rift. Chemical variation of the metabasites toward a granitic pluton indicates K loss closer to the pluton, suggesting that caution should be taken when K is involved in a discussion.

Key Words : Ogcheon metabasites, mineral chemistry, whole rock chemistry, within-plate environment, K-loss