

춘천 각섬암의 지구화학과 기원: (I) 주성분원소

권성택¹, 조문섭², 전은영¹, 이승렬², 이진한¹

¹연세대학교 이과대학 지질학과, ²서울대학교 자연과학대학 지질학과, ³고려대학교 지구환경과학과

요 약: 이 연구는 경기육괴에 속하는 춘천 동부 지역의 구봉산층군내 각섬암(구봉산 각섬암) 및 그 남동부의 상갈리 지역 용두리 편마암 복합체내에 산출되는 각섬암(상갈리 각섬암)에 대한 야외관계 및 주성분 원소의 특징을 보고하며, 그 기원을 토의 한다. 많은 경우에 주변 변성퇴적암과 조화적인 산출상태를 보이는 춘천 각섬암의 화학적 특징은 화성기원임을 나타낸다. SiO₂ 함량이 45~53 wt%인 이들 각섬암의 원암은 현무암질로 대부분 비알칼리 계열의 솔리이트에 속한다. MgO 변화그림에서 Na₂O, Fe₂O₃와 Al₂O₃는 전반적으로 분산되는 반면, CaO는 MgO와 정비례하고 SiO₂, TiO₂, P₂O₅, K₂O는 MgO와 반비례하는 경향을 보인다. 이들 주성분 원소의 변화는 현무암질 마그마의 감람석, 단사회석, 사장석의 정출과 관련된 분화 결과로 해석될 수 있다. 상갈리 각섬암은 구봉산 각섬암에 비해 낮은 MgO를 가져 보다 분화된 암석임을 보이는데, 두 각섬암의 불호정원소의 비 TiO₂/P₂O₅의 차이는 모 마그마의 성인이 다름을 시사한다. 주성분 원소를 이용한 지구조 편비그림에서 춘천 각섬암은 그 원암이 판내부환경에서 정지한 현무암질암임을 시사하여, 옥천대 각섬암의 그것과 유사하다.

서 언

각섬암은 일반적으로 각섬석과 사장석이 주로 구성된 변성암으로 그 기원에 대해서 그 동안 많은 연구가 있어 왔다(Hyndman, 1984). 각섬암의 기원은 크게 화성기원과 퇴적기원으로 나뉘어 질 수 있는데, 각섬암의 야외 산출상태가 주변암과 비조화적인 관계를 보일 경우는 현무암질 암맥 혹은 암주등 화성기원의 관입암임을 알 수 있으나, 조화적인 경우는 그 근원암에 대해서 여러가지 가능성을 생각할 수 있다. 후자의 경우, 화성기원의 현무암질 용암, 응회암, 혹은 암상(sill) 등이 있을 수 있으며, 퇴적기원으로는 탄산염 성분이 풍부한 이질암이 가능하다. 또한, 심한 변형작용을 받은 지역에서는 원래 비조화적인 화성기원의 각섬암이 트랜스포지션(transposition)에 의해 조화적으로 보일 가능성도 있다(Leake and Evans, 1964; Passchier *et al.*, 1990). 이러한 가능성들은 야외증거만으로 조화적인 각섬암의 기원암을 아는 것이 쉽지 않음을 강력히 시사한다. Leake (1964)가 언급한 것처럼, 만약 야외 증거만으로도 그 기원을 알 수 있으면 각섬암의 기원에 관한 문제는 존재하지 않을 것이다. 야외증거만의 부족함을 극복하기 위해, 근원암의 화학적 특징으로부터 화성 혹은 퇴적 기원을 밝히려는 시도가 1960년대 초반부터 진행되어 왔으며, 대부분의

경우 화성기원임이 밝혀졌다(Yardley, 1989).

우리나라에도 변성암 지역에 각섬암이 흔히 산출하는데, 특히 옥천대와 경기육괴의 것이 잘 알려져 있다. 옥천대의 경우 최근 연구에서 거의 대부분의 각섬암이 화성기원으로 밝혀졌으나(이민성, 1988; Cluzel *et al.*, 1992; 권성택과 이동호, 1992), 경기육괴 각섬암의 기원에 관해서는 1970년대 중반의 기초적인 연구를 제외하면 잘 알려져 있지 않다. 이 연구의 주 대상은 경기육괴의 각섬암 중 가장 광범위한 분포를 보이고 있는 춘천지역 각섬암(이하 춘천 각섬암)이다. 이의 근원암에 관해서 So (1974)와 이문원 (1974)은 야외증거 및 화학자료를 이용하여 화성 및 퇴적 기원이 공존하는 것으로 결론짓고 있으나, 이들 연구에서 사용된 화학 자료가 빈약하여 단정적인 결론을 내리기에는 무리가 많다. 보다 최근에 노진환외 (1993)는 춘천 각섬암의 일부가 대리암 혹은 석회규산염암등 주변 변성암들과 매우 양호한 조화적 산출관계를 보이는 것에 주목하고, 각섬암의 기원이 퇴적 및 변성교대에 의한 결과라고 해석하였다. 한편 Kim(1989)은 경기지역 각섬암의 기존 화학성분을 재해석하면서 모두 화성기원임을 주장하여 위의 연구와는 상반된 견해를 보이고 있다.

이 연구의 목적은 야외관찰과 더불어 보다 많은 수의 화학 자료를 이용하여 많은 경우에 조화적관계를 보이는 춘천각섬암의 근원암이 화성기원의 현

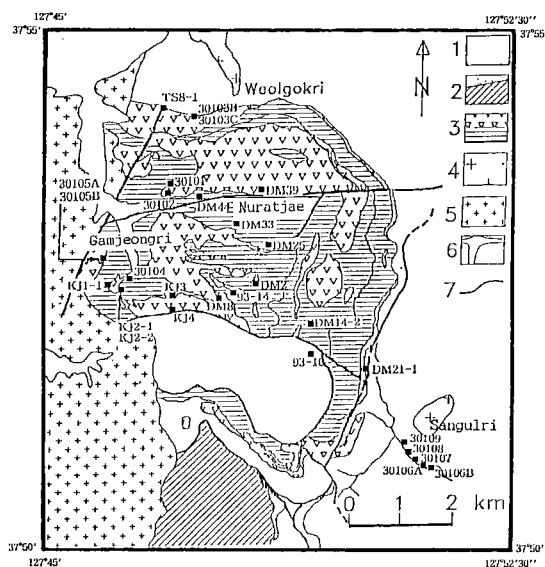


Fig. 1. Schematic geologic map of the study area modified after Park et al. (1974). Numbers indicate the sample locations.

무암질암임을 밝히며, 원암의 화학적 특징과 이로부터 지구조 환경을 유추하고자 한다. 이 논문에서는 주성분 원소를 주로 취급하며, 미량성분 및 동위원소의 특징에 대해서는 추후 발표할 예정이다.

지질배경

경기육괴는 우리나라의 선캄브리아 기반암의 하나로서 퇴적 및 화성기원의 각섬암상 변성암으로 주로 구성된다. 경기육괴 내에는 각섬암이 소규모로 흔히 산출하며, 연구지역인 춘성군 동면 지역에 비교적 넓게 분포한다(So, 1974; 박희인외, 1974). 박희인외(1974)의 연구 결과를 기초로 한 연구 지역의 지질도가 Fig. 1에 나타나 있다. 연구지역 북중부의 연옥광산 주변의 지질도는 노진환외(1993)에 의해 보다 자세하게 작성되었다. 연구지역의 선캄브리아기 변성암은 주로 변성퇴적암류와 각섬암으로 이루어진 구봉산층군과 용두리 편마암 복합체의 일부로 알려져 있는 편마암류로 대별된다. 이들 두 암체의 접촉관계는 관계미상(박희인외, 1974) 혹은 구봉산층군이 상위인 부정합관계(Kim, 1989)로 알려져 왔다. 그러나, 최근 이진환(1993)은 중구조(mesoscopic structure)와 미구조(microstructure)의 분석을 통해 이 두 암체의 경계는 전단대임을 밝혔으며

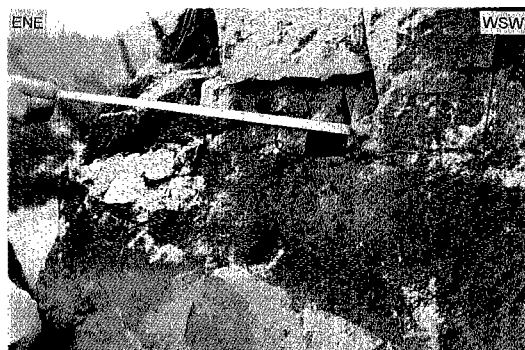


Fig. 2. An outcrop photo in Neuratjae area showing quartzite intruded by amphibolite.

이 전단대를 따라 구봉산층군이 북동 내지 동쪽으로 용두리편마암복합체 위로 이동하였음을 보고하였다. 전단운동은 이들 암체의 엽리면을 따라 일어났으며 엽리면은 경계부에서 대체로 N20°E 주향에 약 30° 각도로 북서 경사한다. 운동양상은 연성의(ductile) 전단운동이 우세하며 취성(brittle) 내지 아취성의(semi-brittle) 비교적 좁은 전단대들과 수도 타킬라이트(pseudotachylite)들이 역시 엽리면에 평행하게 발달하면서 연성의 전단구조들에 중첩되어 있어 이 지역 암체들이 용기하면서 지속적인 전단운동이 일어났음을 시사한다. 구봉산층군 내에는 북서 내지 남서 방향으로 저각으로 침강(pulnge)하는 습곡축을 가진 동축의 재습곡(coaxially refolded folds)들이 밀착(tight)내지 등사형(isoclinal)으로 잘 발달하는데 이는 전단운동 전 혹은 전단운동 초기에 최소한 두번의 습곡작용이 있었음을 지시한다. 구봉산층군은 대리암, 각섬암, 변성이질암, 규암등으로 구성되며, 하부에서 상부로 평촌리층, 신이리층, 감정리층으로 세분된다.

각섬암은 지질도에 넓게 표시된 것과는 달리 cm에서 수십 m의 폭을 가지며 주변의 여러 변성퇴적암류(대리암, 석회규산염암, 편암, 규암 등)와 조화적 혹은 비조화적 관계를 보이며 주로 암상이나, 소규모의 불규칙한 암주 형태로 나타난다. 일부 각섬암은 변성퇴적암류 내에 불연속적인 부딘(boudin)으로 나타나기도 한다. 연구지역의 각섬암 내에는 전형적인 개방-등사습곡구조와 멀리온(mullion)구조가 발달하며, 그 습곡축은 북서 내지 남서쪽으로 완만하게 침강한다. 조화적인 각섬암이 흔하나, 감정리층 내에서는 심한 등사습곡 구조를 보이는 석회규산염암을 포함한 비조화적 각섬암이 여러 곳에서 관찰

된다. 한편, 주변암과 다양한 관계를 보이는 조화적 또는 비조화적 각섬암이 한 노두상에서 드물게 관찰되기도 한다. 느릿재 터널 부근에서 석회규산암을 관입한 염기성 맥암이 변형작용에 의하여 주변 변성퇴적암류와 조화적으로 변화하는 양상을 관찰할 수 있다. Fig. 2는 느릿재 지역에서 각섬암이 규암을 관입한 것을 보여주는 노두사진이다. 연구지역 남동부의 용두리 편마암 복합체 내에서 각섬암이 보고된 바가 없으나, 이 연구에서 상걸리 지역에 부분적으로 산출함이 관찰되었다. 이 선캠브리아 암석들은 연구지역 서부에 산출하는 중생대 춘천 화강암 (약 210 Ma: 진명식의, 1993)과 소규모 규장암에 의해 관입당하고 있다(박희인의, 1974; 노진환의, 1993).

춘천 각섬암과 그 남부에 분포하는 용두리 편마암 복합체의 변성작용에 대해서는 최근 Lee and Cho (in press)와 조문섭과 김종욱(1993)에 의해 각각 연구되었다. 구봉산층군내의 변성니질암의 최대 압력은 8.5~12.9 kb로 추정되며, 거의 등온의 압력하강 후 607~641°C, 3.9~5.7 kb에서 최종 변성작용을 받았다(Lee and Cho, in press). 한편, 춘천 각섬암의 최대변성작용은 615~714°C, 5.5~10.6 kb의 온도-압력 값을 보인다. 춘천 각섬암을 포함한 구봉산층군의 변성암류는 남정석-규선석으로 규정지워지는 중압형 변성상계에서 저압형 변성상계로 전이하는 시계방향의 압력-온도-시간 경로 (P-T-t path)를 겪었다(Lee and Cho, in press). 춘천각섬암의 최대 변성작용의 시기는 아직 밝혀지지 않았지만, 각섬암의 Sm-Nd 전암연대가 852 Ma임을 고려할 때 (권성택의, 준비중), 적어도 이 시기 이후일 것으로 추정할 수 있다. 녹색편암상에 해당하는 후퇴변성작용의 시기는 Rb-Sr 흑운모 연대인 205-210 Ma (권성택의, 준비중)로 추정할 수 있는데, 이는 삼척기 후기에 해당된다.

암석기재

춘천 각섬암은 각섬암상의 광물조합을 보이며, 석류석의 존재 유무에 따라 크게 두 종류의 각섬암으로 나뉜다. 석류석 각섬암은 각섬석+사장석+석영+석류석+흑운모, 그리고 석류석을 포함하지 않는 각섬암은 각섬석+사장석+석영+흑운모±투회석의 광물조합으로 대표된다. 부성분 광물로는 녹렴석, 녹니석, 스피넬, 방해석이 흔히 두 각섬암

모두에서 산출된다. 이러한 광물조합의 차이는 각섬암의 전암성분의 차이, 특히 Fe양에 의하여, 또는 변성용액의 조성차이에 의해 설명될 수 있다. 많은 각섬암에서 녹색편암상의 후퇴변성작용 때문에 양기석, 녹렴석, 녹니석, 흑운모, 알바이트, 포도석 (prehnite)등의 이차 광물들이 흔히 관찰된다.

양기석 녹렴석+포도석+녹니석의 광물조합으로부터 후퇴변성작용은 약 2 kb이하의 압력조건하에서 일어났음을 알 수 있다(Liou *et al.*, 1987). 석류석을 포함하는 각섬암과 포함하지 않는 각섬암의 공간적 분포는 연구 지역 전체에 걸쳐 뚜렷한 차이를 보이지 않으며, 또한 산출상태(조화적 혹은 비조화적)에 따른 상관 관계도 나타나지 않는다.

각섬암의 구성광물에 대한 광물화학적 연구결과는 Lee and Cho (in press)에 의해 보고되었으며, 주요광물의 특징을 아래에 요약한다. 각섬석은 세립 내지 중립질의 반자형 결정으로 산출하며, Mg-각섬석에서 Fe-파가사이트에 이르는 다양한 성분을 보인다. 구봉산층군의 중심부에서 외곽으로 갈수록 각섬석 내의 Na(A)양은 증가하는 반면, Na(M4)의 양은 감소하는 경향을 보이는데, 이는 연구지역 내에서 어느 정도 변성온도, 압력 및 산소분압의 차이가 존재하였음을 지시한다(Lee and Cho, in press). 사장석은 세립 내지 중립질의 타형 결정으로 나타나며, 대부분이 올리고클레이즈 내지 라브라도 라이트이다. 알만딘-석류석은 중립 내지 조립의 반자형 혹은 등근 반정으로서, 흔히 각섬석, 사장석, 녹렴석, 석영 및 스피넬의 타형-반자형 세립 결정들을 포획하고 있다.

시료 및 분석방법

각섬암 시료는 구봉산층군과 상걸리 지역 용두리 편마암 복합체로 부터 각각 채취하였다. 각섬암내 석류석의 산출과 전암성분의 관련성을 밝히기 위한 노두에서 석류석이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분을 동시에 채취하여 분석하였다(시료 KJ 2-1과 KJ2-2). 채취된 시료는 텅스텐 카바이드 볼 밀에 의해 분말로 제작되었으며, 분말 시료의 주성분 원소는 기초과학지원센터의 이석훈 연구원에 의해 X선 형광분석법(XRF)으로 분석되었다. 그 결과는 Table 1에 수록되어 있다.

해석과 토의

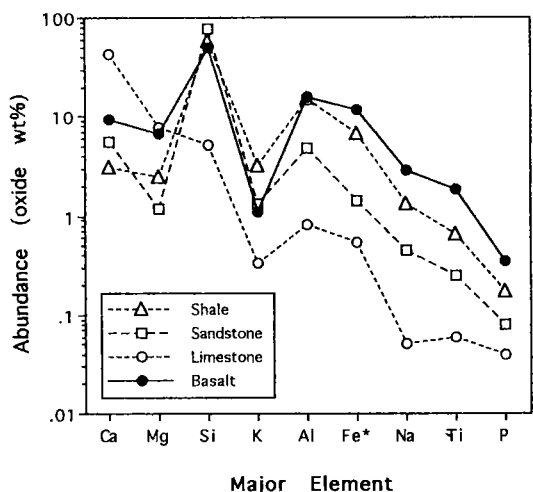


Fig. 3. Comparison of average abundances of major elements among shale, sandstone, limestone and basalt Data are from Mason and Moore (1984). Note that concentrations of total Fe (Fe*), Na, Ti and P are higher in basalt than in typical sedimentary rocks.

각섬암의 기원

춘천 각섬암의 기원을 논하기 전에 화성기원과 퇴적기원 각섬암이 화학적으로 어떻게 차이가 나는가를 알아 본다. 만약에 이들 사이에 차이가 있을 경우 중요한 판단의 기준이 될 수 있을 것이다. 일반적으로 변성작용동안 유체의 성분을 제외하고는 암석의 화학성분은 폐쇄계를 유지한다고 가정된다. 물론, 유체/암석 비가 매우 큰 탄산염암의 접촉변성작용이나, 해양저변성작용 (ocean floor metamorphism) 등 원소의 이동이 매우 중요한 예외들이 없는 것은 아니다. 퇴적 기원 각섬암 중 가장 중요한 근원암으로 생각되는 탄산염암질 이질암의 경우 기본적인 가정은 탄산염암과 이질암 성분의 적절한 조합으로부터 화성기원 각섬암의 현무암질 성분과 유사한 주성분 원소 조성이 만들어질 수 있다는 점이다. Fig. 3은 퇴적 또는 화성기원 각섬암의 원암과 관련된 셰일, 사암, 석회암, 다양한 현무암의 주성분 원소의 평균 함량을 비교한 것이다. 이 그림에서 Ca, Mg, Si, K, Al 등은 탄산염암과 이질암의 혼합으로 설명될 수도 있으나, Fe, Na, Ti, P 등은 퇴적기원 암석들이 화성기원 암석보다 일률적으로 그 함량이 적기 때문에 혼합으로 설명하기 힘들다. 이러한 사실은 후자의 원소들이 각섬암의 원암을 밝히는데

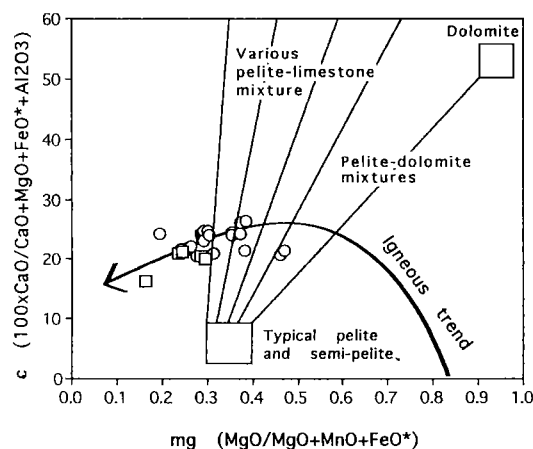


Fig. 4. mg vs. c diagram modified after Leake (1964) showing that the variation trend of the Chuncheon amphibolites follows the igneous trend, but crosses the mixing trend between pelite and carbonates. Symbols: circle, Gubongsan amphibolite; square, Sangguli amphibolite.

사용될 수 있음을 지시한다. 이들 중 Ti와 P은 고장력원소 (high field strength element)로서 변성작용동안 불유동적이므로 특히 유용할 수 있다. 그러나, 현무암질 마그마의 성분은 매우 다양하여 위의 관계가 반드시 성립하는 것은 아니다. 예를 들어, 섭입대와 관련된 칼크알칼리 계열의 현무암질암은 다른 지구조 환경에서 산출되는 현무암에 비해 Ti, P 등의 함량이 특징적으로 낮다. 이 문제점을 해결하기 위해 Leake (1964)는 각섬암 성분의 변화 경향을 밝힘으로서 기원을 구분하는 방법을 제안하였다.

Fig. 4는 Leake (1964)가 제안한 Ca, Mg, Fe, Al 등 주성분원소를 이용하여 각섬암의 원암을 판별하는 그림인데, 마그마 분화에 주로 좌우되는 화성기원 및 이질암과 탄산염암의 혼합에 의해 좌우되는 퇴적기원 각섬암의 변화 경향이 서로 두드러지게 다름을 이용한 것이다. 즉, 이 그림에서 퇴적기원의 각섬암은 이질암과 탄산염암의 혼합 성분으로 정의되는 거의 수직에 가까운 변화를 보이는데 반해, 화성기원의 현무암질 마그마의 분화는 수평에 가까운 곡선의 변화경향을 보인다. 춘천 각섬암의 경우 전형적인 현무암질 마그마의 분화 경향을 보여 준다. Fig. 5는 Leake (1964)의 TiO₂-Ni의 상관관계 그림이다. 이 그림에서 이질암의 TiO₂와 Ni의 함량이

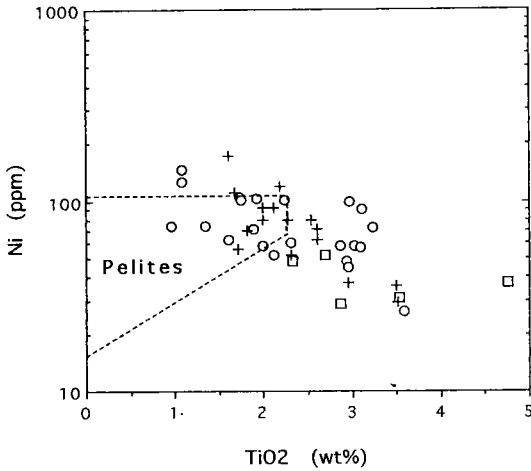


Fig. 5. TiO₂-Ni diagram for Chuncheon (circle, Gubongsan; square, Sanggui) and Ogcheon (plus) amphibolites. These amphibolites show a negative trend in the diagram, which is expected for the differentiation of basaltic magma but not for the pelite-carbonate mixtures.

돌로마이트와 석회암의 그것들 보다 훨씬 많기 때문에 이질암-돌로마이트 혹은 이질암-석회암의 혼합물은 정의 상관관계를 가질 것이 기대되는데 반해, 춘천각섬암 자료는 전반적으로 부의 상관관계를 보여 전형적인 현무암질 마그마의 변화경향을 나타낸다. 이와같은 화학성분의 특징은 춘천각섬암이 화성기원임을 강력히 시사한다. 참고로 옥천대 각섬암의 자료(Cluzel *et al.*, 1992)도 같이 점시하였는데, 춘천각섬암과 유사한 경향을 보인다. Orville (1969)은 여러 변성암지역에 흔히 나타나는 조화적인 박층의 각섬암의 기원에 대하여 이질암-탄산염암 사이의 변성교대작용으로 설명가능하다는 모델을 제안하였으나, 이 모델은 변성교대 기원의 각섬암의 존재를 증명한 것이 아니며, 주성분 원소의 교대작용에 한정되어 있는 약점을 가지고 있다. 또한, Ti-Ni과 같은 불유동 미량원소의 함량 차이나 변화를 설명하기 힘들기 때문에 우리는 더 이상 이 모델을 고려하지 않는다.

Shumakov *et al.* (1978)은 변성작용을 아주 심하게 받은 남부 Tien-Shan의 Garm 육괴에 산출하는 각섬암을 통계적인 방법 (자료 수: 33개)으로 그 기원을 구분하고자 시도하였으며, 분석된 각섬암을 주성분이 정각섬암 (ortho-amphibolite), 준각섬암 (para-amphibolite)와 두 각섬암의 중간성분을 보

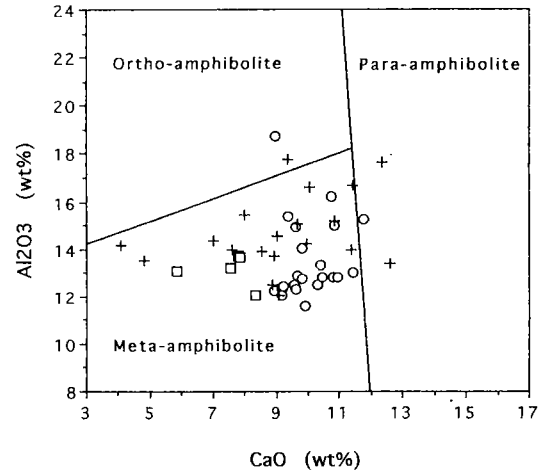


Fig. 6. CaO-Al₂O₃ diagram of Schumakov *et al.* (1978) discriminating three different origins of amphibolite. Symbols are the same as in Fig. 5. See text for the definition of the three amphibolites.

이는 메타각섬암(meta-amphibolite) 등 3개의 그룹으로 구분될 수 있음을 보였다. 여기서 정각섬암은 일반적인 정의와는 달리 돌레라이트, 석영 반력암 등 심성암 기원에 한정시킨 것으로 보이며, 메타각섬암은 염기성 화산암과 그레이와케 (greywacke)를 기원암으로 하는 것으로 해석하였다. Fig. 6의 CaO-Al₂O₃ 판별그림은 Shumakov *et al.* (1978)이 제안한 방법들 중의 하나로서 춘천 각섬암은 거의 대부분이 메타각섬암 영역에 속한다.

이 그림에 이미 화성기원으로 잘 알려진 옥천각섬암의 자료 (Cluzel *et al.*, 1992)도 함께 표시하였는데, 춘천각섬암과 유사한 영역에 속한다. 비록 Shumakov *et al.* (1978)의 자료가 한정된 지역에서 나온 것이고, 그 원래암의 특징이 확실하게 밝혀지지 않은 시료들로부터 얻어졌기 때문에 다른 지역에서도 적용될 수 있는가는 의문이나, 춘천 각섬암의 기원암이 염기성 화산암 또는 그레이와케에 속한다는 것은 흥미롭다. 기존 경기육괴의 각섬암 자료들이 판별그림에 점시했을 때 대부분이 정각섬암 혹은 메타각섬암 영역에 속하여 (Kim, 1989) 이 연구의 결과와 전반적으로 일치한다.

결론적으로 춘천 각섬암은 주성분 원소를 이용한 기원 판별에서 화성기원에 속하며, 정합적관계를 보이는 각섬암의 기원은 현무암질 암상, 용암, 응회암, 혹은 그레이와케(?)에 해당된다고 생각된다. 특

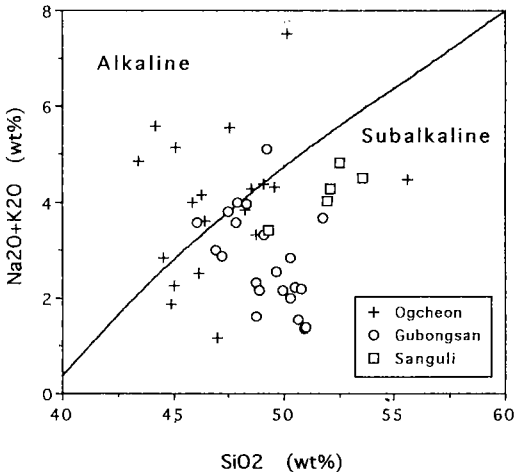


Fig. 7. SiO₂-total alkali diagram of Irvine and Baragar (1971) for the Chuncheon amphibolite.

히, 상결리 부근의 구봉산 각섬암 중 수 cm 폭의 연장성이 좋은 각섬암층은 현무암질 응회암층으로 생각될 수 있다. 한편, 연구 지역에 심한 변형작용이 관찰되는 것으로 미루어 보아 트랜스포지션에 의해 조화적인 구조를 보이는 각섬암도 존재하는 것으로 생각된다.

주성분원소의 지화학적 특징

춘천 각섬암의 SiO₂ 함량은 45~53 wt%로 그 원암이 대부분 현무암질 성분에 해당된다. 이들은 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 그림 (Irvine and Baragar, 1971)에서 대부분 비알칼리 계열에 속하며 (Fig. 7), AFM그림 (Irvine and Barager, 1971)에서 솔리아이트 계열에 속한다(Fig. 8). Fig. 7에서 옥천각섬암의 자료도 함께 표시하였는데, 이들은 춘천각섬암과는 달리 주로 전이질 현무암 (transitional basalt) 임을 밝힌 것 (Cluzel *et al.*, 1992; 권성택과 이동호, 1992)과 일치하는데, 비록 변형작용을 받았으나, 주 성분 원소가 원래의 성질을 어느 정도 유지하고 있는 것을 보여주는 예라고 할 수 있다.

현무암질 마그마의 경우 SiO₂의 변화 정도가 작기 때문에 MgO를 분화 지수로 이용하는 것이 보다 효과적이다. 이러한 방법은 옥천 각섬암의 연구에 비교적 성공적으로 적용되었다(권성택과 이동호, 1992). 춘천 각섬암의 화학성분은 지리적 분포와도 깊은 관련을 가지는데(권성택외, 1993), 구봉산층군

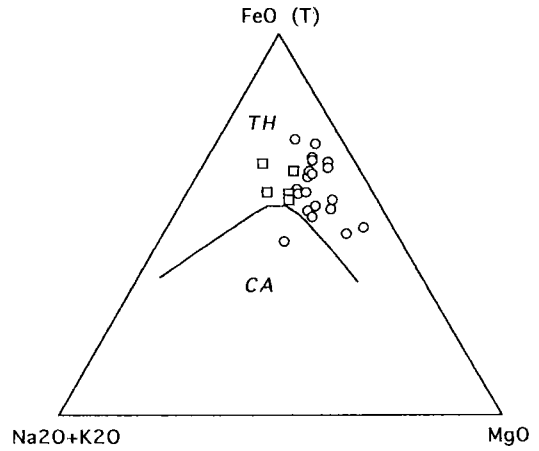


Fig. 8. Total alkali-FeO (T)-MgO (AFM) diagram of Irvine and Baragar (1971) for the Chuncheon amphibolite. Symbols are the same as in Fig. 5.

의 각섬암 (구봉산 각섬암)과 상결리 지역 용두리 편마암 복합체 내에 산출하는 각섬암 (상결리 각섬암)을 구분하여 Fig. 9에 표시하였다. 구봉산 각섬암의 MgO 함량이 대부분 5~10 wt%의 범위인데 비해, 상결리 각섬암은 5 wt% 이내의 함량을 보인다.

MgO 양이 감소함에 따라 SiO₂는 전반적으로 증가하는 경향을 보이거나 분산이 심하다. Na₂O, MnO, Fe₂O₃* (전체 철)역시 크게 분산되는 경향을 보여 변형작용동안 이들 원소의 상대적인 이동이 심하였음을 지시한다. Al₂O₃ 역시 분산되나, 구봉산 각섬암은 MgO 함량이 약 8 wt% 이하인 경우 두개의 상반되는 변화경향을 보인다. 즉, MgO가 감소함에 따라 Al₂O₃는 증가하거나 감소한다. Al₂O₃가 감소하는 경향은 일반적으로 사장석의 정출과 관련된 것으로 해석될 수 있으며, 증가하는 경향은 사장석 집적과 관련된 것으로 보인다. 특히, 시료 TS8-1은 가장 높은 Na₂O 및 Al₂O₃ 함량을 보이는데, 이는 사장석의 심한 집적현상에 의한 것으로 해석될 수 있다. CaO는 MgO양이 약 8 wt% 이하인 경우 MgO가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보이는데 이 역시 사장석의 정출과 관련된 것으로 추정된다. 반면 TiO₂, P₂O₅, K₂O 등의 원소는 사장석 집적을 보이는 시료 TS8-1을 제외하고는 MgO와 반비례하는 경향을 보이는데, 이는 각각 티탄철석, 인회석 혹은 알칼리 장석이 정출하지 않았음을 지시한다. 유동성이 높은 원소로 알려진 K가 불유동적인 Ti, P등과

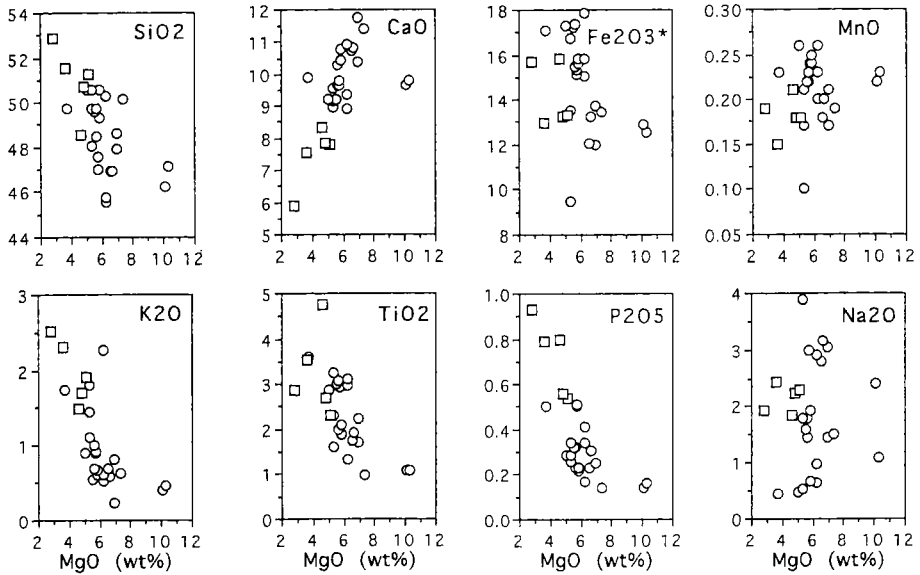


Fig. 9. MgO-variation diagrams for the Chuncheon amphibolite.

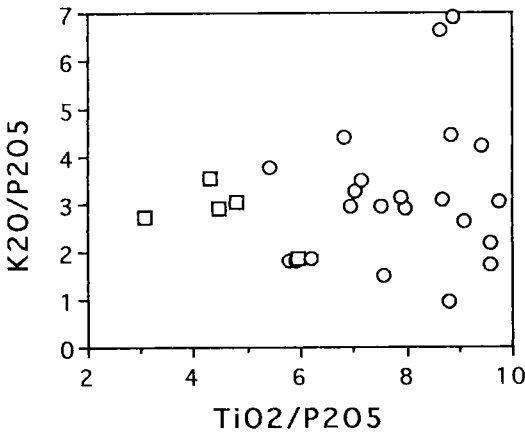


Fig. 10. K_2O/P_2O_5 - TiO_2/P_2O_5 diagram for the Chuncheon amphibolite. Note the difference in TiO_2/P_2O_5 ratio between the Gubongsan and Sangguli amphibolites.

유사한 변화를 보이는 것은 K가 변성작용동안 비교적 폐쇄계로 거동했음을 지시한다. 그러나, 이들 불호정적 원소에 대하여 보다 자세히 살펴본 TiO_2/P_2O_5 - K_2O/P_2O_5 그림에서 전반적으로 크게 분산 되는데 (Fig. 10), 춘천 각섬암은 전반적으로 유사한 K_2O/P_2O_5 비를 보이는 반면, TiO_2/P_2O_5 비는 구봉산 각섬암이 상경리 각섬암에 비해 높은 값을 가져 두 각섬암이 서로 다른 기원임을 시사한다. 전반적으로

위에서 기술한 주성분 원소의 변화는 솔리아이트질 마그마에서 혼한 광물인 감람석, 휘석, 사장석의 정출에 따른 분화로 해석될 수 있다.

연구 지역의 각섬암은 석류석의 유무에 따라 구분될 수도 있는데, 석류석의 유무가 전암 성분차이에 기인하는 것인가를 알기 위해 동일 암체에서 석류석이 존재하는 부분과 없는 부분을 같이 분석하였다(예, KJ2-1와 KJ2-2). Table 1에서 보는 것처럼, 이들의 화학 성분이 서로 매우 유사하기 때문에 석류석의 유무에 전암의 화학성분은 그리 중요하지 않은 것으로 생각된다. 각섬암 노두에서 석류석은 주변암과의 접촉부에서 잘 발달하는 것이 여러 지역에서 관찰된다. 이는 각섬암내 석류석의 발달이 유체의 존재와 밀접한 것을 시사하며, 또한 변성작용 당시 유체의 양 그리고/혹은 성분이 중요함을 시사한다. 특히, 각섬암의 주변에는 탄산염암이 공존하기 때문에 탄산염암의 변성작용시 방출되는 CO_2 의 존재는 유체의 성분을 변화시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

지구조환경

화성암의 화학 성분은 이들이 산출되는 지구조 환경에 따라 특징적이라는 점이 잘 알려져 있다. 일반적으로 변성작용을 받은 현무암질 마그마가 정치

Table 1. Major element data (in wt%) for the Chuncheon amphibolite

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI#	TOTAL	Ni(ppm)
Gubongsan amphibolite													
DM25	50.30	1.34	12.80	15.85	0.26	6.21	10.91	0.99	0.53	0.17	0.63	99.99	62
93-14	50.18	0.97	13.03	13.46	0.19	7.31	11.43	1.52	0.63	0.14	0.68	99.54	89
30102	46.27	1.08	14.93	12.93	0.22	10.09	9.63	2.41	0.39	0.14	1.21	99.30	139
DM2	49.76	1.99	12.53	15.46	0.23	5.64	10.29	1.79	1.00	0.23	0.72	99.63	53
DM8	49.28	2.11	12.82	15.80	0.24	5.86	10.42	1.92	0.61	0.23	0.50	99.79	49
DM14-2	49.75	3.24	12.31	16.72	0.21	5.30	9.16	0.52	1.45	0.34	0.73	99.73	60
DM21-1	46.92	1.92	15.01	13.23	0.20	6.60	10.82	3.17	0.58	0.31	0.49	99.24	95
DM33	49.73	3.59	11.59	17.08	0.23	3.72	9.89	0.45	1.75	0.50	0.88	99.42	15
DM39	48.63	2.23	13.33	13.75	0.21	6.93	10.37	3.05	0.24	0.25	0.69	99.69	98
KJI-1	50.60	2.31	12.53	13.54	0.10	5.33	9.56	1.79	1.80	0.26	1.32	99.14	48
KJ2-1	46.92	1.75	16.22	12.03	0.18	6.56	10.71	2.81	0.69	0.23	1.23	99.33	96
KJ2-2	47.92	1.73	15.26	11.98	0.17	6.92	11.76	1.46	0.81	0.25	1.06	99.31	103
KJ4	45.75	2.97	12.27	17.86	0.23	6.25	8.90	0.63	2.27	0.34	1.87	99.34	97
TS8-1	48.03	1.60	18.73	9.48	0.17	5.35	8.95	3.88	1.11	0.29	1.26	98.85	56
30101	47.15	1.08	14.07	12.54	0.23	10.24	9.79	1.08	0.46	0.16	2.63	99.43	165
30103B	47.00	2.93	12.75	15.32	0.24	5.71	9.80	3.00	0.90	0.50	0.97	99.12	46
30103C	47.58	2.95	12.87	15.11	0.23	5.70	9.67	2.98	0.92	0.51	0.89	99.41	45
30104	50.57	1.89	12.80	15.60	0.25	5.87	10.77	0.67	0.67	0.22	0.48	99.79	67
30105A	49.62	3.02	12.07	17.24	0.22	5.55	9.19	1.59	0.55	0.32	0.30	99.67	56
30105B	48.51	3.09	12.31	17.39	0.22	5.67	9.63	1.45	0.70	0.32	0.36	99.65	59
93-16	50.60	2.87	12.42	17.28	0.26	4.99	9.20	0.48	0.90	0.29	0.63	99.93	53
DM44	45.53	3.12	15.40	15.08	0.20	6.23	9.37	2.90	0.61	0.41	0.66	99.51	88
Sangguli amphibolite													
30108	48.57	4.76	12.02	15.86	0.21	4.67	8.33	1.86	1.49	0.80	0.43	99.00	29
30109B	52.86	2.86	13.08	15.66	0.19	2.81	5.86	1.94	2.51	0.93	0.48	99.18	24
30106A	51.27	2.32	13.69	13.32	0.18	5.12	7.79	2.28	1.91	0.54	0.65	99.07	41
30106B	50.72	2.69	13.68	13.21	0.18	4.78	7.86	2.23	1.69	0.56	1.46	99.06	41
30107	51.54	3.53	13.20	12.99	0.15	3.63	7.56	2.43	2.30	0.79	0.43	98.55	20

*total iron as Fe₂O₃

#loss on ignition

한 지구조 환경을 유추하기 위해서는 불유동적이며, 불호정적인 미량원소가 많이 이용되지만(Pearce and Cann, 1973; Pearce, 1979), 주성분원소만을 이용한 시도도 가능하다(Pearce *et al.*, 1975; Pearce, 1976; Pearce *et al.*, 1977). 비록 주성분이 미량성분의 판별력보다 선택의 폭은 좁지만, 변성작용동안 어느정도 폐쇄계를 이루었을 경우 유용할 수 있다.

Pearce (1976)는 주성분원소 8개에 대한 통계적인 분석에서 판별함수(discriminant function)를 도출하여 현무암질암의 지구조환경을 유추하는 방법을 제안하였다. Fig. 11은 Pearce (1976)의 그림 중의 하나인데, 춘천각섬암은 많은 시료가 판내부 현무암에 속하며, 일부는 칼크알칼리 현무암, 저칼륨

(low-K)솔리아이트, 혹은 쇼쇼나이트에 속한다. 한편, 옥천각섬암의 자료는 대부분 판내부 현무암에 속하여 Cluzel *et al.* (1992)이 불유동 미량원소를 이용하여 유추한 지구조 환경과 잘 일치한다. K₂O-TiO₂-P₂O₅ 그림은 (Fig. 12) Pearce *et al.* (1975)가 제안한 해양성 현무암과 비해양성 현무암을 구분하는 것이다. 이 그림에서 춘천 각섬암은 양쪽 영역 모두에 점시되어, 그 판별이 모호하다. 이는 옥천각섬암의 경우도 유사하다. 그외, 이 논문에서 보이지는 않았지만, Pearce *et al.* (1977)의 FeO*-MgO-Al₂O₃ 판별그림에서 현무암질 안산암 성분의 시료들은 대륙 환경 혹은 해양도 환경의 현무암질암임을 시사한다.

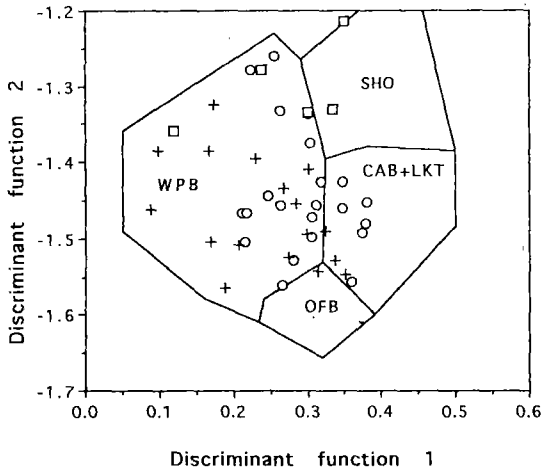


Fig. 11. Tectonic discrimination function diagram of Pearce (1976) for the Chuncheon amphibolite. Symbols are the same as in Fig. 5. Abbreviations: WPB, within-plate basalt; OFB, ocean floor basalt; CAB, calc-alkaline basalt; LKT, low-K tholeiite; SHO, shoshonite.

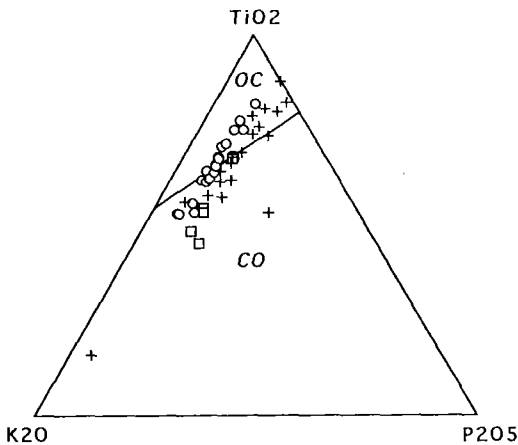


Fig. 12. TiO_2 - K_2O - P_2O_5 discrimination diagram of Pearce et al. (1975) for the Chuncheon amphibolite, dividing oceanic (OC) vs. continental (CO) basalt. Symbols are the same as in Fig. 5. The Gubongsan amphibolite spreads into the two fields, while the Sangguli one is confined to continental field.

결론적으로 춘천각섬암에 대한 주성분 원소의 지구조 판별은 변성작용 동안 원소들이 유동적이었을 가능성 때문에 비록 제한적이긴 하지만, 전반적으로 춘천 각섬암의 원암인 현무암질 마그마가 정치한 환경이 판내부 환경이었을 가능성을 시사하며, 대륙

혹은 해양 환경에 대한 세분은 현재의 자료로서는 불확실하다. 이러한 주성분 원소의 특징은 옥천대 각섬암의 그것과 전체적으로 유사하다고 할 수 있으나, 그 성분이 보다 솔리아이트질이라는 점에서 차이를 보인다.

결론

우리나라 선캠브리아 경기육괴 내에 산출하는 춘천 각섬암의 성인을 지화학적 방법으로 밝히고자 하는 이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주변 변성퇴적암과 조화적인 관계를 흔히 보이는 춘천 각섬암의 주성분원소 변화 패턴이 퇴적기원 각섬암의 그것과는 두드러진 차이를 보이며, 이는 그 원암이 화성기원임을 강력하게 시사한다. 따라서, 조화적인 야외 산출상태는 암상으로서의 관입, 현무암질 응회암과 용암, 혹은 관입이후 변형 작용동안 트랜스포지션에 의한 재배열로 설명될 수 있다.

2. 화성기원으로서 춘천각섬암의 주성분원소의 전반적인 특징은 비알칼리 계열의 솔리아이트질 현무암질암에 속한다. MgO 변화그림에서 Na_2O , Fe_2O_3 와 Al_2O_3 는 전반적으로 분산되는 반면, CaO는 MgO와 정비례하고 SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O 는 MgO와 반비례하는 경향을 보인다. 비례 관계를 보이는 후자 원소들의 변화 경향은 춘천 각섬암이 상부 각섬암상의 변성작용을 받았음에도 불구하고 원래의 성분을 유지하고 있다고 해석되며, 이는 현무암질 마그마의 감람석, 단사휘석, 사장석의 정출과 관련된 분화의 결과로 해석될 수 있다.

3. 춘천각섬암은 분포지역과 화학적 차이에 의해 구봉산층군내 구봉산 각섬암과 구봉산층군 남동부 용두리 편마암 복합체 내에 산출하는 상갈리 각섬암으로 세분될 수 있다. 후자는 전자에 비해 낮은 MgO를 가져 보다 분화된 암석임을 보이는데, 두 각섬암의 불호정원소의 비 TiO_2/P_2O_5 의 차이는 모마그마의 성인이 다름을 시사한다.

4. 주성분원소를 이용한 여러 종류의 지구조 판별그림에서 춘천각섬암의 자료는 전반적으로 판내부 환경의 현무암질 화성활동이었음을 시사한다. 그러나, 그 중 대륙 혹은 해양 환경인지는 확실하지 않다. 지구조 환경을 보다 자세히 구분하기 위해서는 불유동 미량원소에 대한 자료가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사한다. 이진한은 전략광물자원연구센터의 연구비 지원을 감사한다. 건설적인 비평으로 이 논문을 심사해 준 강원대학교 노진환 박사과 전북대학교 오창환 박사에게 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 권성택, 조문섭, 전은영, 이승열, 1993, 춘천 각섬암의 지구화학과 기원, 한국암석학회 제 2 차 학술발표회 초록. 암석학회지, v. 2, p. 57.
- 노진환, 1993, 춘천 연옥 광물의 성인. 지질학회지, 29, 199-224.
- 이문원, 1974, 춘천부근에 분포하는 각섬암의 성인에 관한 연구. 지질학회지, 10, 149-170.
- 이민성, 1988, 옥천대 각섬암의 화학조성과 그 성인. 제 34 차 정기 학술발표회 요약.
- 이진한, 1993, 춘천부근 용두리편마암과 구봉산층군과의 접촉관계: 예비결과, 대한지질학회 제 48 차 학술발표회 초록집, 23.
- 조문섭, 김종욱, 1993, 춘천-홍천 지역 용두리 편마암 복합체내에 산출하는 남정석: 변성지구조직의. 암석학회지, 2, 1-8.
- 진명식, 신성천, 김성재, 주승환, 1993, 경기도내 춘천 화강암체의 생성연대와 열사. 암석학회지, 2, 122-129.
- 박희인, 장기홍, 지정만, 고인석, 1974, 한국지질도(1: 50,000), 내평 도폭 및 설명서. 국립지질광물연구소, 13p.
- 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, J.Y., 1989, A study on metamorphism of the metamorphic rocks in the central part of Gyeonggi massif. Unpublished Ph.D. thesis, Seoul National University, 278p.
- Kim, O.J., 1973, The stratigraphy and geologic structure of the metamorphic complex in the northwestern area of the Gyeonggi massif. J. Kor. Inst. Mining Geol., 201-218.
- Kim, S.J., Lee, D.J. and Chang, S.W., 1986, A mineralogical and geological characterization of the Korean jade from Chuncheon, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 22, 278-288.
- Leake, B.E., 1964, The chemical composition between ortho- and para-amphibolites. J. Petrol., 5, 238-254.
- Lee, S.R. and Cho, M., in press, Tectonometamorphic evolution of the Chuncheon amphibolite, central Gyeonggi massif, Korea. J. Metamorphic Geol.
- Liou, J.G., Maruyama, S. and Cho, M., 1987, Very low-grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks- mineral assemblages and mineral facies. In: Low temperature metamorphism (ed. Fery, M.), Blackie, Glasgow, pp. 59-113.
- Na, K.C., 1976, Origin and metamorphic facies of amphibolites in Gyeonggi metamorphic belt. Research Review of Chungbuk Univ., 12, 121-138.
- Orville, P.M., 1969, A model for metamorphic differentiation origin of thin-layered amphibolites. Am. J. Sci., v. 267, 64-86.
- Passchier, C.W., Myers, J.S., and Kroner, A., 1990, Field Geology of High-Grade Gneiss Terrains. Springer-Verlag, Berlin, 150 pp.
- Pearce, J.A., 1976, Statistical analysis of major element patterns in basalts. J. Petrol., 17, 15-43.
- 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.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1975, The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 diagram: a method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts. Earth Planet. Sci. Lett., 24, 419-426.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 121-132.
- So, C-S., 1974, Geochemistry and origin of amphibolites in Gyeonggi metamorphic belt, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 10, 189-205.
- Schumakov, V.G., Adamchuk, I.D. and Pachadzhanov, D.N., 1978, Differentiation of amphibolites of the Garm massif (southern Tien-Shan) by methods of mathematical statistics. Int. Geol. Rev., 21, 1317-1324.
- Yardley, B.W.D., 1989, An Introduction to metamorphic petrology. Longman Scientific & Technical, 248p.

(책임편집 : 오창환)

Geochemistry of the Chuncheon amphibolite and its origin : (1) major elements

S.-T. Kwon¹, M. Cho², E.Y. Jeon¹, S.R. Lee² and J.H. Ree³

¹*Department of Geology, Yonsei University, Seoul, Korea*

²*Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*

³*Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, Korea.*

ABSTRACT : We report major element chemistry of the Chuncheon amphibolite in the Precambrian Kyonggi massif and discuss its origin. On the basis of areal distribution and chemical difference, the Chuncheon amphibolite can be divided into the Gubongsan amphibolite in the Gubongsan Group east of Chuncheon city and the Sangguli amphibolite in the Yongduri gneiss complex occurring to the southeast of the Gubongsan Group. Overall major element characteristics of the Chuncheon amphibolite indicate an igneous precursor, although it shows concordant relationship with meta-sedimentary rocks in many cases. The parental rock of the amphibolite has tholeiitic composition with 45~53 wt% SiO₂. The Sangguli amphibolite has lower MgO than the Gubongsan one. The difference in TiO₂/P₂O₅ ratio between the two amphibolites suggests that they are not genetically related. In MgO variation diagrams, Na₂O, Fe₂O₃ and Al₂O₃ show scattered pattern, while MgO has positive correlation with CaO and negative one with SiO₂, TiO₂, P₂O₅ and K₂O. These variations can be interpreted as the result of differentiation of basaltic magma with fractionation of olivine, pyroxene, and plagioclase. Tectonic discrimination using major elements generally suggest within-plate environment for the Chuncheon amphibolite which is similar to that of the amphibolite in the Ogcheon belt.

Key words : Chuncheon amphibolite, field relation, major element, parental rock