

복운모 화강암의 암석화학적 특징 : 청산, 인제-홍천, 영주 및 남원지역의 예

좌 용 주

경상대학교 자연과학대학 지구환경과학과

요 약 : 청산, 인제-홍천, 영주 및 남원지역에 분포하는 복운모 화강암은 과알루미나질이며, 일반적으로 S-타입 및 티탄철석계열의 화강암류임을 나타내어, 지각물질로부터 유래된 마그마가 환원 환경에서 관입·고결하여 생성된 것이다. 인제-홍천과 남원 지역의 복운모 화강암은 각각 반상 흑운모 화강암과 높은 Ti/Mg 비의 흑운모 화강암으로부터 분화·파생된 잔류 마그마로부터 형성되었다. 청산과 영주지역의 복운모 화강암은 접촉하고 있는 반상 흑운모 화강암과, 화강섬록암과는 각각 성인적인 관련이 없을 것으로 판단된다. 남원과 영주지역 복운모 화강암은 비교적 물에 포화된 마그마로부터 형성되었고, 청산과 인제-홍천지역 복운모 화강암질 마그마는 물에 불포화 되었음이 나타난다. 한편, 물에 포화되었던 남원지역의 흑운모 화강암과 복운모 화강암에 있어 마그마 내의 물의 함량은 5.8 wt.% 이상으로 추정되고, 영주 복운모 화강암질 마그마의 경우 2.4~5.8 wt.% 정도의 물을 포함했을 것으로 생각할 수 있다. 인제-홍천과 영주지역의 복운모 화강암의 최소용해액 조성으로 구해지는 압력 (0.5~2 kb)과 세립질 내지 극세립질의 암석 조직은 화강암질 마그마가 지각의 얇은 곳에서 관입·배태된 양상을 나타내며, 청산과 남원지역의 복운모 화강암의 경우 최소용해액 조성 압력 (2~3 kb)과 세립~중립질 내지 조립질의 암석 조직으로부터 비교적 지하 심부에 관입·배태되었음을 알 수 있다. 화강암질 마그마의 고상선/백운모의 안정선의 교점으로부터 물에 포화된 마그마에서는 최소한 약 1.6 kb (약 6 km) 이상의 압력에서 마그마기원의 1차 백운모가 정출될 수 있으며, 그 이하에서는 고상선 아래에서 교대작용으로 2차적인 백운모가 형성된다. 반면, 물에 불포화된 마그마에서 1차 백운모가 정출되기 위해서는 보다 높은 압력이 요구된다. 백운모 형성에 대한 이 조건은 각 지역 복운모 화강암에 산출되는 백운모에 1차 백운모와 2차 백운모 양쪽이 나타남을 설명하기에 충분하다. 한편, 실험으로 구해진 백운모의 안정선의 적용에는 주의가 필요하고, 특히 순수한 합성 백운모 단성분을 이용한 실험의 경우 팔면체 배위에 Ti, Fe, Mg의 성분이 첨가됨에 따라 안정선이 높은 온도 영역으로 이동됨을 고려해야 한다.

핵심어 : 복운모 화강암, 백운모, 최소용해액 조성, 관입심도, 백운모 안정선

서 론

복운모 화강암에 대한 사전적 의미는 “어두운 운모(흑운모)와 밝은 운모(백운모) 양쪽을 포함하는 화강암”을 뜻한다(Bates and Jackson, 1987). 즉, 화강암내에 주성분 광물로서 흑운모와 백운모가 함께 나타나는 매우 특징적인 심성암이다. 여기서 반드시 산출되어야 하는 백운모는 광물학적으로 매우 중요한 의미를 지닌다. 왜냐하면 마그마 기원의 백운모가 안정할 수 있는 압력, 온도 조건이 매우 제한적이기 때문이다. 백운모의 안정영역에 대한 Yoder와 Eugster(1955)의 선구적인 연구에 따르면 물에 포화된 마그마에서 직접 정출될 수 있는 백운모의 압력, 온도 조건은 대략 1.5 kb 이상, 700°C 이상이다. 이 조건 이하이면 백운모는 고상선 아래

(subsolidus)에서 교대작용으로 말미암아 산출되는 것이 보통이다. 그러나 이 조건은 백운모 안정영역에 대한 여러 실험의 결과들로부터 조금씩 바뀌고 있으며, 최근에는 3.5 kb, 700°C 이상이라는 조건이 제시되었다(Deer *et al.*, 1992).

한편, 현미경 하에서 관찰해 보면, 마그마에서 직접 정출되었을 것으로 생각되는 자형의 백운모에 대해서도 많은 의문이 제기되기도 한다. 동일 시료라 해도 백운모가 자형의 작은 입자로 나타나기도 하고, 어떤 것들은 집합체를 이루기도 하며, 또 어떤 것들은 미세 열극을 충전시키며 나타나기도 한다. 복운모 화강암에서 산출되는 백운모가 마그마 기원인지 혹은 2차적인 산물인지를 구별하기 힘들기 때문에 백운모는 화강암류에서 가장 문제시되는 광물로 취급된다(Clarke, 1981). Miller 외 (1981)에 의

하면 기재적으로 구별되는 마그마기원의 1차 백운모는 4가지의 특징을 가지며, 그 모두를 만족할 경우 1차 백운모로 취급했다. 그 특징이란 1) 마그마에서 정출된 다른 초기 광물보다 비교적 조립일 것; 2) 자형 내지 반자형의 뚜렷한 결정 형태를 가질 것; 3) 다른 광물(혹은 변질 광물)에 의해 둘러싸여 있거나 혹은 둘러 싸지 않을 것; 4) 비변질된 암석에서 자형의 임상조직을 보일 것 등이다. 그러나 일부 특징은 불확실한 경우가 많기 때문에 기재적으로 백운모의 기원을 쉽게 단정하기란 어렵다. 백운모의 또 다른 기재적 특징으로서는 백운모에 관찰되는 누대구조를 들 수 있고, 이 누대구조가 마그마기원을 지시한다는 보고도 있다(Roycroft, 1990).

백운모 기원에 대한 보다 효과적인 해석은 백운모의 화학조성의 변화에 대한 연구로부터 구해질 수도 있다. 즉 온도 하강에 따른 백운모의 조성변화가 체계적인지 비조화적인지로부터 백운모의 정출 혹은 교대의 가능성을 논의할 수 있다(Neiva, 1983). 또 백운모의 화학조성으로부터 그 기원을 논의한 예도 있는데(Anderson and Rowley, 1981; Miller *et al.*, 1981; Monier *et al.*, 1984; Speer, 1984), 일반적으로 마그마기원의 백운모는 2차 백운모보다 Ti, Na, Al 함량이 높게 나타나지만 Mg, Si 함량은 낮게 나타난다. 그리고 백운모 내에서의 조성변화는 압력의 존성이 크기 때문에 이로부터 백운모의 정출압력을 추정할 수 있으나, 아직 백운모의 조성변화에 대한 정확한 치환관계의 설정이 어려워 그다지 신뢰성이 높지는 않다(Anderson and Rowley, 1981; Miller *et al.*, 1981).

복운모 화강암에 대한 국내에서의 연구사례는 외국에 비해 그리 많지 않다. 외국의 한 예로서는 미국의 서부지역에 분포하는 복운모 화강암체들이다(Kistler *et al.*, 1981; Lee *et al.*, 1981). 이 지역의 복운모 화강암들의 경우 그 형성이 선캄브리아기의 변성퇴적암류가 지각융해(anatexis) 과정으로 융해되어 생긴 독자적인 마그마로부터 유래된 것이며, 타 화강암체와의 성인적 관련성이 적다는 특징을 보인다. 우리나라에 분포하는 복운모 화강암은 복합 화강암체에 수반되어 나타나는 경우가 일반적이며, 기존 연구들은 복운모 화강암류의 산출이 주변 복합 화강암체와 연관이 있으며 대개가 분화 말기의 산물인 것으로 취급하고 있다(홍세선 외, 1988; Jwa, 1990; Lee and Lee, 1991). 비록 복운모 화강암에 대해 복합 화강암체의 분화 과정중에서 복운모 화강암이 차지하는 위치를 지구화학적으로 정량화시켜 다루고 있는 연구가 있음에도 불구하고(Jwa

and Moutte, 1990; Jwa *et al.*, 1990; Jwa, 1991; Kwon and Hong, 1993; 홍세선, 1994), 복운모 화강암에 나타나는 백운모의 성인을 다른 예는 거의 없으며 또한 복운모 화강암질 마그마의 조성 변화를 주변 화강암체와 결부시켜 구체적으로 논의한 예도 적은 편이다.

이 논문에서는 기존 자료들을 바탕으로 우리나라에 분포하는 일부 복운모 화강암류들(옥천습곡대의 청산지역, 경기육괴의 인제-홍천지역, 영남육괴의 영주지역과 남원지역)에 대해 기재적인 특징과 주성분원소에 대한 조성적인 비교와 더불어 그 생성 환경을 고찰해 보고자 한다.

연구지역 복운모 화강암류의 산상과 기재적 특징

복운모 화강암류의 특징을 살피기 위해 옥천습곡대의 청산지역, 경기육괴의 인제-홍천지역, 영남육괴의 영주지역과 남원지역의 복운모 화강암류를 대상으로 선택하였다(Fig. 1). 각 지역 지질에 대한 아래의 간략한 설명과 화강암류의 모드조성 등은 청산지역의 경우 사공희와 좌용주(1997), 인제-홍천지역은 Jwa(1990), 영주지역은 Lee와 Lee(1991), 남원지역은 홍세선(1994)에서 인용되었다.

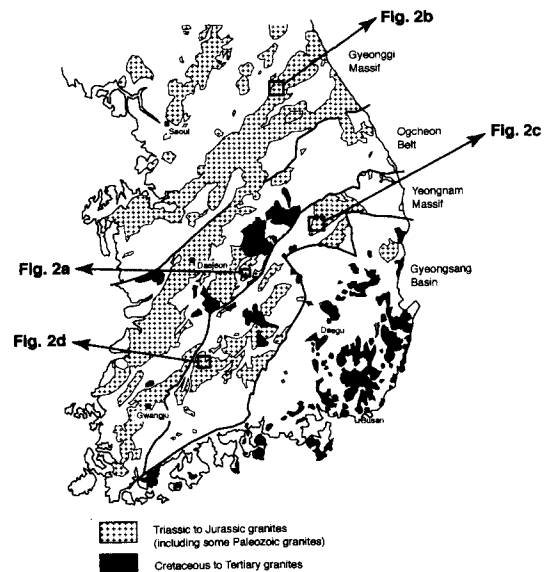


Fig. 1. Granite distribution and tectonic boundaries in South Korea. Four studied districts are indicated and the geologic map of each district is shown in Fig. 2

청산지역

청산지역의 복운모 화강암은 청산 반상 흑운모

화강암체의 중앙부에서 동쪽에 걸쳐 관입하고 있으며, 그 관입 경계는 매우 뚜렷하다(Fig. 2a). 때때로 반상 흑운모 화강암체 내에서 암맥의 형태로 나타

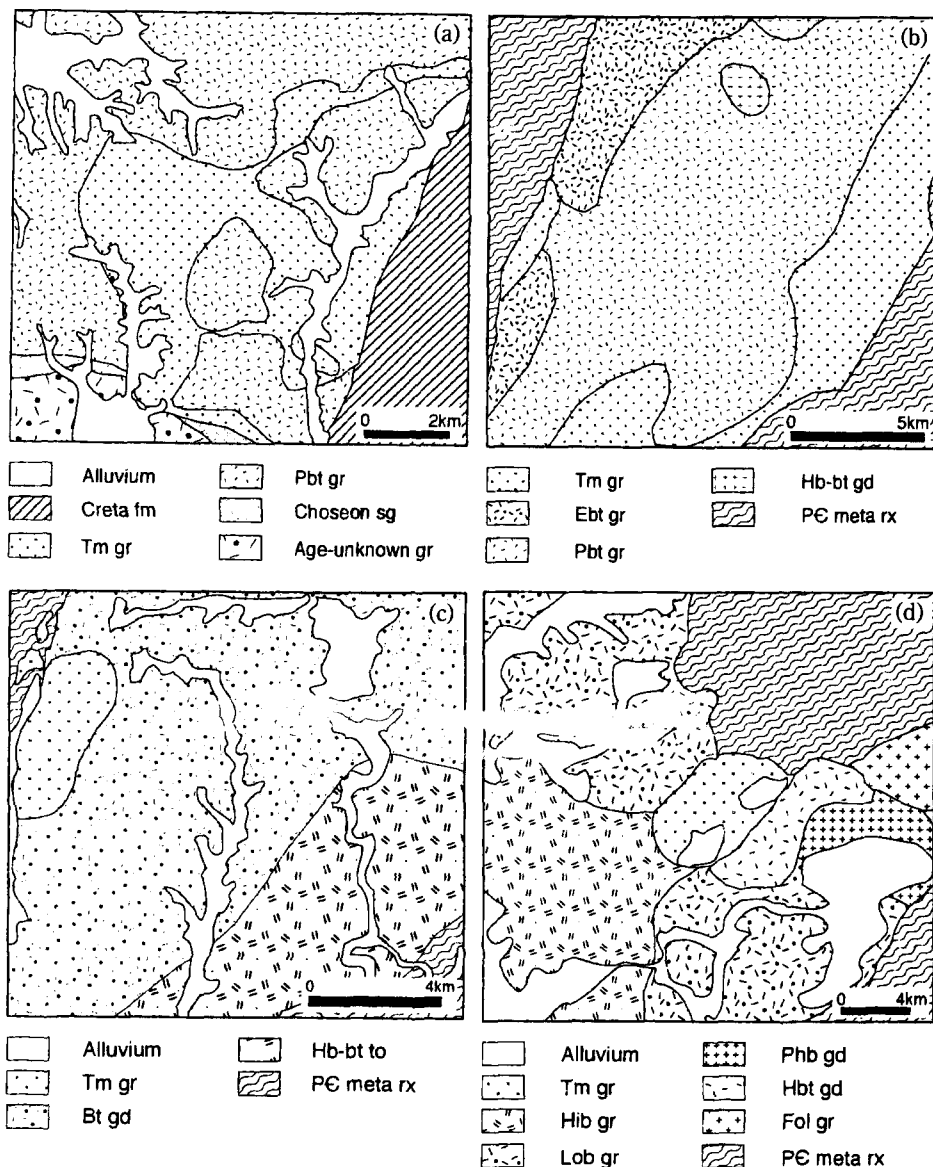


Fig. 2. Geologic map of each studied district. (a) Cheongsan (modified from Sagong and Jwa, 1997), (b) Inje-Hongcheon (from Jwa, 1990) (c) Yeongju (from Lee and Lee, 1991) and (d) Namwon district (from Kwon and Hong, 1993). Abbreviations in each district are as follows: (a) Choseon sg, Choseon Supergroup; Pbt gr, porphyritic biotite granite; Tm gr, two-mica granite; Creta fm, Cretaceous Dongjeongri formation. (b) PC meta rx, Precambrian metamorphic rocks; Hb-bt gd, hornblende-biotite granodiorite; Pbt gr, porphyritic biotite granite; Ebt gr, equigranular biotite granite; Tm gr, two-mica granite. (c) PC meta rx, Precambrian metamorphic rocks; Hb-bt to, hornblende-biotite tonalite; Bt gd, biotite granodiorite; Tm gr, two-mica granite. (d) PC meta rx, Precambrian metamorphic rocks; Fol gr, foliated granite; Hbt gd, hornblende-biotite granodiorite; Phb gd, porphyritic hornblende granodiorite; Lob gr, low Ti/Mg biotite granite; Hib gr, high Ti/Mg biotite granite; Tm gr, two-mica granite.

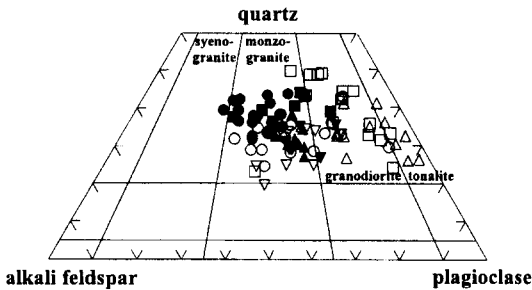


Fig. 3. Triangular diagram of modal quartz-alkali feldspar-plagioclase. Both two-mica granite and related granites in each district are plotted together. Two-mica granites enter into the field of monzogranite field. Among the related rocks, Cheongsan porphyritic biotite granites represent the modal composition of matrix (excluding the large phenocrysts). Solid symbols indicate two-mica granites, whereas open symbols related granites. Square, Cheongsan; circle, Inje-Hongcheon; triangle, Yeongju; reversed triangle, Namwon.

나기도 한다. 복운모 화강암의 내부에는 반상 흑운모 화강암의 포획체가 다수 발견된다. 청산지역의 복운모 화강암은 세립~중립질이며 등립질의 화강암이다. 주구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 인회석 및 저어콘이며, 녹니석과 견운모는 일부 변질된 암상에서 자주 관찰된다. 사장석은 반자형~자형으로 나타나며, 복합 누대구조를 보이고, 결정의 주변부에는 미르메카이트 조직이 흔히 관찰된다. 알칼리장석은 반자형~타형의 주로 미사장석 혹은 퍼사이트이다. 대개 포이킬리틱 조직을 보이며 내부에 사장석, 흑운모, 백운모 및 석영의 결정들을 포함하고 있다. 석영은 타형으로 입상조직을 보인다. 흑운모는 반자형~자형으로 주로 갈색 내지 연갈색을 띠며 강한 다색성을 보인다. 백운모는 주로 자형의 결정으로 흑운모와 연정을 이루어 나타나며, 산출형태로 볼 때 마그마 기원으로 판단된다. 2차적으로 형성된 백운모는 견운모로서 주로 사장석 내부에 발달하고 있으나 그 양은 적다. 흑운모와 백운모의 평균적인 모드 조성은 흑운모가 6.1, 백운모가 3.8 vol.%를 나타낸다. 그러나 시료에 따라서는 백운모가 흑운모보다 많이 나타나기도 한다. 인회석과 저어콘은 대개 흑운모 결정의 내부에 나타나지만, 그 양은 매우 적다. 복운모 화강암은 그 모드 조성에서 볼 때 monzogranite의 영역에 도시된다(Fig. 3).

인제-홍천지역

인제-홍천지역에는 선캠브리아기의 기반암에 각

섬석-흑운모 화강섬록암, 반상 흑운모 화강암, 등립질 흑운모 화강암 및 복운모 화강암이 관입하고 있다(Fig. 2b). 이 지역에 분포하는 화강암체는 화강섬록암으로부터 복운모 화강암에 이르기까지 일련의 분화과정으로 형성된 것으로 해석되었다(Jwa, 1990). 복운모 화강암은 이 지역의 동쪽에 비교적 넓게, 서쪽에 매우 국지적으로 분포하고 있다. 이 복운모 화강암은 선캠브리아의 기반암과는 매우 뚜렷한 관입경계를 보여주나, 반상 흑운모 화강암과는 접이적인 암상변화를 보인다. 주로 세립의 등립질 복운모 화강암은 주로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 저어콘 및 인회석으로 구성되며, 2차광물로 녹염석, 녹니석, 견운모 등을 포함한다. 백운모는 자형~반자형으로 흑운모와 연정을 이루어 나타나기도 하고, 때로는 사장석 내에서 2차적인 교대작용의 산물로 나타나기도 한다. 흑운모는 평균 4.8, 백운모는 평균 1.9 vol.%의 광물 함량을 보인다. 이 복운모 화강암은 모드 조성에서 monzogranite 영역에 속한다(Fig. 3). 인제-홍천지역의 복운모 화강암을 제외한 세 종류의 화강암류 중에서 등립질 흑운모 화강암은 주변 암석과의 동화가 매우 심해 화학적 원소들의 거동에 있어 마그마 분화의 경향성이 매우 분산적이어서 복운모 화강암과의 성인적 관련성을 고려하는데 부적합하다. 한편, 복운모 화강암이 매우 넓은 지역에 걸쳐 관입하고 있는 반상 흑운모 화강암은 마그마의 조성분화과정에 있어 복운모 화강암과는 연속적인 관계를 보이므로(Jwa, 1990), 이 반상 흑운모 화강암과 복운모 화강암의 여러 특성을 비교 검토할 것이다.

영주지역

영주지역은 선캠브리아기의 기반암에 화강암류가 관입해 있는 지역이다. 화강암류는 토날라이트, 화강섬록암 및 복운모 화강암으로 이루어져 있다. 이 중에서 토날라이트와 화강섬록암이 화강암체의 대부분을 차지하고, 이 두 화강암류의 경계는 매우 접이적이며 동일 마그마로부터의 분화산물로 생각된다(Lee and Lee, 1991). 복운모 화강암은 이 지역의 북서쪽에 매우 국지적으로 나타나며, 화강섬록암과 선캠브리아기 기반암을 암주상 혹은 암맥상으로 관입하고 있다(Fig. 2c). 복운모 화강암은 매우 세립의 미정질로 육안으로는 광물 구별이 어렵다. 주구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모 및 티탄철석이며, 2차적인 광물로 녹니석, 녹염석 등이 관찰된다. 사장석은 자형~반자형

이며 알바이트 쌍정이 두드러지게 나타난다. 석영은 타형으로 등립질이며, 파동소광을 보인다. 알칼리장석은 주로 미사장석이다. 석영과 장석의 연정은 주로 미르메카이트 조직으로 나타난다. 흑운모는 연황색에서 진갈색의 다색성을 보인다. 백운모는 흑운모와 연정을 이루며 산출되나, 2차적으로 형성된 결정들은 사장석 내부에서 흔히 볼 수 있다. 흑운모의 함량은 평균 6.1, 백운모는 평균 1.5 vol.%로 나타난다. 복운모 화강암의 모드 조성은 문조화강암을 나타낸다(Fig. 3). 복운모 화강암이 직접 관입하고 있는 화강섬록암의 자료를 토대로 화강암질 마그마의 생성과 분화 경향 등을 고찰해 볼 것이다.

남원지역

남원지역에는 선캄브리아기의 기반암에 소위 남원 화강암체가 관입하고 있다. 남원 화강암체는 각섬석-흑운모 화강섬록암, 반상 화강섬록암, 흑운모 화강암 및 복운모 화강암 등으로 구분된다(홍세선의, 1988). 복운모 화강암은 선캄브리아기의 기반암과 각섬석-흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암을 관입하고 있다(Fig. 2d). 복운모 화강암은 조립질이며, 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 스펀, 갈엽석, 인회석, 저어콘 등으로 구성된다. 이 복운모 화강암에서 특징적으로 산출되는 백운모는 0.1~2 mm의 크기를 가지며 흑운모와 연정을 이루거나 다른 광물들과 입상조직을 나타내기도 하고, 장석 내부에 2차적으로 성장하기도 한다. 다른 지역의 복운모 화강암과 다른 점은 이 남원지역의 복운모 화강암에서 백운모의 양 (평균 3.2 vol.%)이 흑운모의 양 (평균 3.2 vol.%)과 유사하다는 것이다. 때로는 시료에 따라 백운모가 흑운모보다 많이 산출되기도 한다. 복운모 화강암의 모드 조성은 문조화강암을 나타낸다(Fig. 3). 최근 Kwon과 Hong (1993)과 홍세선(1994)의 연구에서는 남원 화강암체 중 흑운모 화강암에 대해 지화학적 차이를 근거로 높은 Ti/Mg 비를 가지는 흑운모 화강암과 낮은 Ti/Mg 비를 가지는 흑운모 화강암으로 세분했다. 이 중에서 복운모 화강암과 지화학적으로 밀접한 흑운모 화강암은 전자이고, 따라서 이 높은 Ti/Mg 비를 가지는 흑운모 화강암과 복운모 화강암 사이의 성인적 관련성을 살펴 볼 것이다.

주성분 원소 지화학적 특성

청산지역 반상 흑운모 화강암과 복운모 화강암에

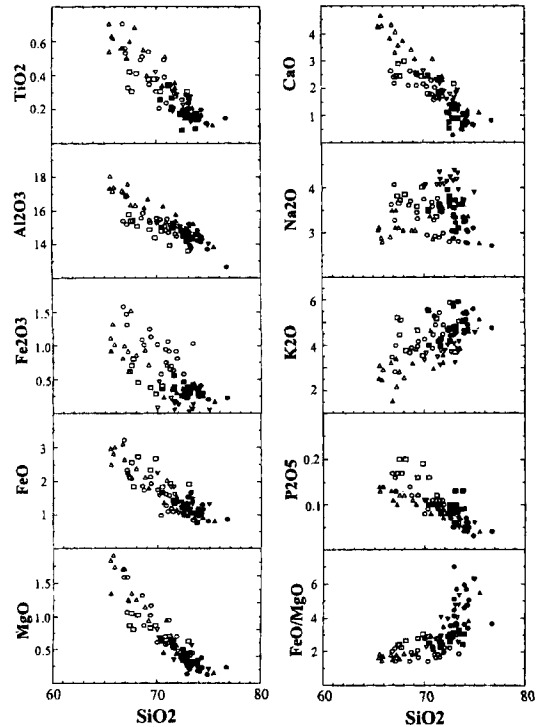


Fig. 4. SiO_2 vs. oxides and SiO_2 vs. FeO/MgO variation diagrams. Symbols are the same as Fig. 3

대한 자료는 사공희와 좌용주(1997)에서, 인제-홍천지역의 복운모 화강암과 반상 흑운모 화강암의 자료는 Jwa(1990)에서, 영주지역의 복운모 화강암과 화강섬록암의 자료는 Lee와 Lee (1991)에서, 그리고 남원지역의 복운모 화강암과 높은 Ti/Mg 비 흑운모 화강암의 자료는 홍세선(1994)에서 각각 인용하였다.

우선 하커도표를 사용하여 각각의 복운모 화강암과, 그와 관입·접촉하고 있는 화강암류들 사이의 상관관계를 검토해 보았다(Fig. 4). 이는 복운모 화강암과 인근 화강암류 사이에 마그마 분화 경로의 유사성이 있는지를 검토할 목적이다. 인제-홍천과 남원지역의 경우에 복운모 화강암과 인근 화강암류 사이에는 SiO_2 를 분화지수로 할 때, 각각 분화에 따른 산화물 함량의 연속적인 변화가 관찰되는데, 결정분화에 따른 마그마의 조성 변화로 판단할 수 있다. 특히 분화에 따른 FeO/MgO 비의 변화는 SiO_2 72 wt.%를 기준으로 복운모 화강암에서 연속적이며 또한 급속하게 증가하는데, 이는 마그마 분화 말기의 특징을 그대로 반영하는 것이며, 복운모 화강암을 형성시킨 마그마가 인근 화강암류를 형성시킨

마그마로부터 분화 산물임을 지시한다. 한편, 청산과 영주지역의 경우 복운모 화강암과 인근 화강암류 사이에 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 함량 변화 및 FeO/MgO 비의 변화에서 연속성이 관찰되지 않는다. 이 사실은 복운모 화강암과 인근 화강암류 사이의 성인적 관련성이 적고, 서로 다른 화강암질 마그마로부터 형성되었을 가능성을 제시하는 것이다.

복운모 화강암 및 그와 접촉하고 있는 화강암류는 우리나라의 화성암류의 일반적인 성질과 마찬가지로 칼크-알칼리계열의 분화 경향을 보인다(Fig. 5a). 알루미늄 포화도에 대한 도표를 살펴보면(Fig. 5b), 청산지역 반상 흑운모 화강암을 제외한 나머지 복운모 화강암과 인근 화강암류들은 모두 과알루미나질에 속함을 알 수 있다. 복운모 화강암이 과알루미나질임은 이 화강암에 나타나는 노름 조성에서 강옥의 함량으로부터도 알 수 있다(청산지역의 경우 0.8~3.4%, 인제-홍천 0.9~1.7, 영주, 1.7~

2.7, 남원 0.9~1.7). 영주지역 화강섬록암의 높은 ANK비(몰비를 나타낸 $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$)는 이 암상에서의 낮은 알칼리 함량을 반영하는 것이며, 청산지역 반상 흑운모 화강암은 메타알루미나질에 속한다. 전암 조성에 따른 I-타입/S-타입 화강암류의 구분에서는(Fig. 5b, 5c) 인근 화강암류의 경우 청산과 남원지역에서 I-타입의 화강암류를 나타내지만, 인제-홍천과 영주지역에서는 I-타입과 S-타입 양쪽에 걸친다. 복운모 화강암의 경우 대체로 I-타입과 S-타입 양쪽의 성질을 보여준다.

Fig. 5d에서는 복운모 화강암들이 일반적으로 티탄철석계열의 화강암류로 나타난다. 인근 화강암류의 경우 인제-홍천과 영주지역의 화강암류들이 자철석계열의 성질을 보이는 반면, 청산과 남원지역은 티탄철석계열을 나타낸다. 한편, 암석의 대자율 측정 결과를 보면($\times 10^6$ emu 단위) 청산지역에서 복운모 화강암이 4~10, 반상 흑운모 화강암이 7~

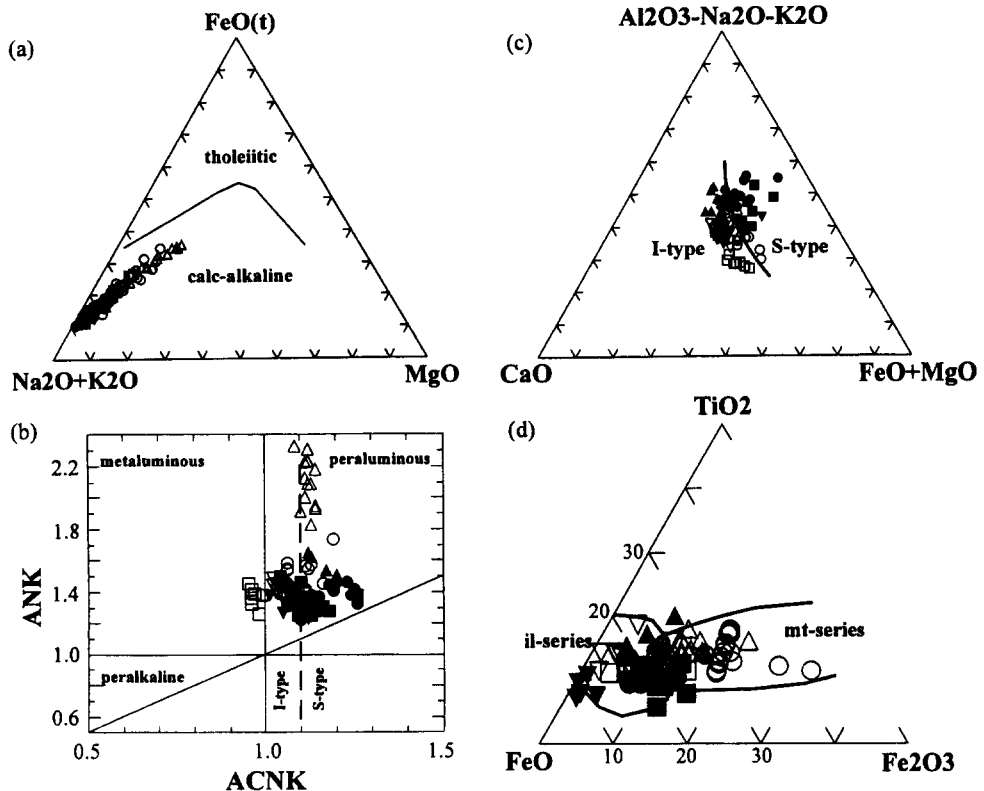


Fig. 5. Several discrimination diagrams. (a) AFM diagram, (b) $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ in mole percent, (c) triangular diagram of $(Al_2O_3-Na_2O-K_2O)-CaO-(FeO+MgO)$ in mole percent, (d) triangular diagram of $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ in mole percent. Boundary between tholeiitic and calc-alkaline is from Irvine and Baragar(1971), that between I-type and S-type is from White and Chappell(1977), that between magnetite-series and ilmenite-series from Tsusue and Ishihara(1974). Symbols are the same as Fig. 3

15를 나타내고(사공희와 좌용주, 1997), 인제-홍천 지역에서는 복운모 화강암이 1~9, 반상 흑운모 화강암이 36~405를 나타내며(Jwa, 1990), 영주지역에서는 복운모 화강암이 5~11, 토날라이트-화강섬록암이 10~35를 나타낸다(Lee and Lee, 1991). 암석 대자율로 구분하는 자철석계열과 티탄철석계열의 경계는 Ishihara(1977)에 의한 값은 100×10^{-6} (emu)이지만, 지역에 따라 이 경계값이 가변적이고, 우리나라의 경우 대체로 35~45 정도로 잡을 수 있다(Jwa, 1990; Cho *et al.*, 1994). 따라서 자철석계열의 값을 보이는 인제-홍천의 반상 흑운모 화강암을 제외한 나머지 복운모 화강암과 인근 화강암류들은 암석 대자율값으로부터 모두 티탄철석계열에 속하며, 이는 Fig. 5d의 결과와 조화적이다. 다만, 대자율값에서 티탄철석계열에 속하는 영주 토날라이트-화강섬록암이 Fig. 5d에서 자철석계열로 나타나는데 티탄철석계열에 속하는 다른 화강암류보다 이 화강암류의 대자율값이 약간 높음을 고려해 볼 수 있다. 남원지역의 경우 대자율 자료가 없으나, Fig. 5d에서 나타난 높은 Fe^{2+}/Fe^{3+} 의 비로부터 이 지역 화강암류는 전형적인 티탄철석계열로 생각된다. 결국 각 지역의 복운모 화강암은 인근 화강암류의 성질에 관계없이 환원적인 환경에서 고결되었음을 나타낸다.

논 의

백운모의 조성

우선 연구지역의 복운모 화강암에 나타나는 백운모가 마그마기원의 1차적인 것인지에 대한 검증이 필요하다. 각 지역 복운모 화강암내에 나타나는 백운모의 기재적인 특징(결정형태, 타 광물과의 공생관계 등)으로부터 마그마기원의 백운모와 2차적인 백운모가 혼재되어 나타남을 알 수 있다. 한편, 백운모의 화학조성으로부터 그 기원을 추정할 수 있는데, 마그마로부터 정출된 1차적인 백운모의 경우, 후마그마작용 및 열수작용에 의한 2차적인 백운모보다 TiO_2 의 양이 많음이 보고되었다(Miller *et al.*, 1981; Monier *et al.*, 1984; Speer, 1984). 각 지역에서 산출되는 1차 백운모의 화학조성을 TiO_2 - Fe_2O_3 (total iron)- MgO 의 도표에서 살펴보면(Fig. 6), 마그마기원 백운모의 조성 영역에 도시되어 마그마로부터 정출된 1차 백운모임을 나타낸다. 따라서 각 지역의 복운모 화강암에는 적어도 마그마기원의 백운모가 포함되어 있음을 알 수 있다.

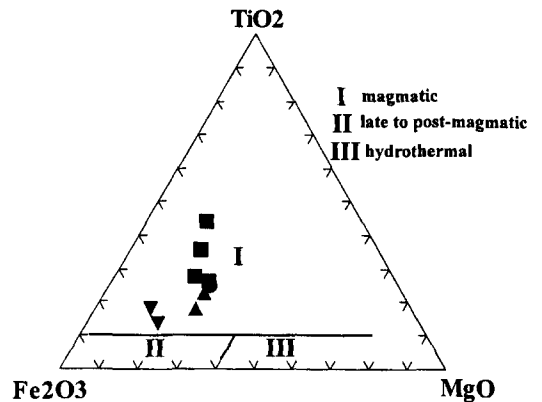


Fig. 6. Triangular Fe_2O_3 (total iron)- TiO_2 - MgO diagram of muscovites. Muscovites from the study areas enter into the field of magmatic muscovites. I, magmatic muscovite; II, late to post-magmatic muscovite; III, hydrothermal muscovite. Symbols are the same as Fig. 3.

복운모 화강암류의 압력 조성

서론에서 언급하였듯이, 마그마 기원의 백운모를 포함하는 복운모 화강암의 생성은 온도와 압력이라는 조건에 크게 영향을 받는다. 화강암질 마그마의 온도는 유사한 화학 조성에서는 거의 유사한 범위를 가리킨다(650~850°C, Whitney, 1988). 여기서는 복운모 화강암을 형성시킨 마그마의 배태 압력에 따른 조성 변화를 토대로 그 생성 조건을 검토해 본다. 이를 위해 $NaAlSi_3O_8$ (Ab)- $KAlSi_3O_8$ (Or)- SiO_2 (Qz)- H_2O 계에서 압력에 따른 최소용해액 및 공융점 조성(minimum melting and eutectic compositions)과 복운모 화강암 및 인근 화강암류의 조성들을 비교해 보기로 한다. 단, 이에 응용될 수 있는 화강암류는 그 조성의 대부분이 위의 4 성분으로 구성된 매우 단순한 화강암계(haplogranite system)여야 하는데, 특히 Ca 성분이 낮고 노름 An 함량이 3% 이하라는 조건이 제시되기도 했다(Day and Fenn, 1982). 그러나 최근에는 노름 Qz+Or+Ab 함량이 80% 이상이면 적용 가능성이 높다고 지적되고 있고(Johannes and Holtz, 1996), 여기서 검토되는 복운모 화강암과 인근 화강암류의 경우 영주 화강섬록암을 제외하고는 노름 Qz+Or+Ab 함량이 80% 이상이다. 영주 화강섬록암은 이 노름 함량이 65~75%로 낮은 대신 노름 An 함량이 15~22%로 매우 높다. 위의 화강암계에 대해 Ab-Or-Qz 도표를 사용하여 각 화강암류를 도시하면 Fig. 7과 같고, 아래에서 각 지역에 산출되는 복운모 화강암과 인근

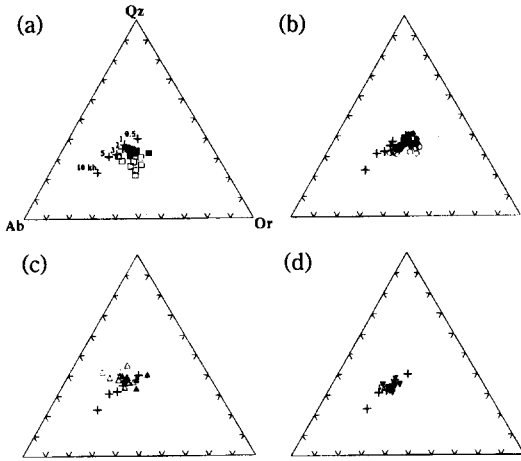


Fig. 7. Ternary diagram of normative quartz-albite-orthoclase. H₂O-saturated minimum and eutectic points are shown as '+'. For 0.5, 1 and 3 kb, the data of Tuttle and Bowen(1958) was used; for 2 and 5 kb of Holtz *et al.* (1992); for 10 kb of Luth *et al.* (1964). (a) Cheongsan, (b) Inje-Hongcheon, (c) Yeongju, (d) Namwon. Symbols are the same as Fig. 3

화강암류의 형성 조건을 살펴 보기로 한다.

청산지역 화강암류의 성분은 물의 포화상태에서 압력에 따른 최소용해액 조성과 공융점 조성에 배열되지 않는다(Fig. 7a). 이는 이 화강암류를 만든 마그마 내의 물의 함량이 포화에 필요한 함량보다 부족하다는, 즉 마그마가 물에 불포화된 상태였음을 나타낸다. 한편, 물의 포화와 불포화에 관계없이 같은 압력에 대한 노름 조성의 변화는 노름 비 Qz/(Qz+Ab+Or) 값에 거의 무관하기 때문에(Holtz *et al.*, 1992; Pichavant *et al.*, 1992) 대체적인 마그마 배태 압력을 추정할 수 있다. 마그마내에 불소와 붕소 등의 함량이 최소용해액과 공융점 조성의 위치를 변화시킬 수 있지만(Manning, 1981; Pichavant and Manning, 1984), 대상 화강암류에서는 이 원소들을 포함하는 형석과 전기석 등이 전혀 발견되지 않기 때문에 그 효과를 무시한다. Fig. 7a에서 보면, 청산 복운모 화강암은 대략 2~3 kb의 압력에 상응하는 조성을 나타내고, 반상 흑운모 화강암은 3~10 kb의 압력 조성을 나타낸다. 이 압력 조성은 마그마의 정치 심도에 관련되므로 반상 흑운모 화강암이 심부에서 배태되고 응기된 후, 복운모 화강암이 관입하였을 것으로 생각할 수 있다.

인제-홍천의 화강암류의 경우도 마그마가 물에 불포화되어 있었음을 알 수 있다(Fig. 7b). 그리고

복운모 화강암의 최소용해액 내지 공융점 조성은 0.5~2 kb, 반상 흑운모 화강암은 2~3 kb를 나타낸다. 이 둘 사이의 압력 조성에 약간의 차이는 있으나, 이 두 화강암류의 형성 시기에 마그마의 냉각 속도가 빨라졌고(Jwa *et al.*, 1990) 또 이 빠른 냉각이 빠른 지각 응기에 기인한 것이라면, 각각의 압력은 관입 순서의 차이에 따른 마그마의 서로 다른 정치 심도를 나타낸다고 할 수 있다. 즉, 반상 흑운모 화강암이 심부에서 배태되고 응기된 후, 잔류 마그마로부터 복운모 화강암이 비교적 지하 얽은 곳에서 관입·고결했을 것으로 판단된다.

화강암류의 노름 조성에 의거해 추정된 압력 범위와 조동룡과 권성택(1994)의 각섬석 지압계에 의한 화강암류 배태 압력을 비교해 볼 수 있다. 우선 각섬석 지압계에 의한 인제-홍천 각섬석-흑운모 화강섬록암의 배태 압력은 5.5 kb이다. 이 화강섬록암으로부터 분화·과생된 반상 흑운모 화강암과 복운모 화강암의 압력조성이 각각 2~3 kb와 0.5~2 kb에 상응함을 설명하기 위해서는 화강암체의 빠른 응기를 생각해야 한다. 이에 대해서 최근 임진강대와 경기육괴의 고생대 말~중생대 초기의 지각 진화에 대한 연구에서 살필 수 있는 이 지역의 빠른 지각 응기를 고려할 수 있다(조문섭외, 1995; Ree *et al.*, 1996).

영주의 화강암류의 경우 복운모 화강암은 0.5~2 kb 정도의 압력에서 비교적 물에 포화된 마그마로부터 형성되었음을 예견할 수 있으나, 화강섬록암에 대한 해석은 불가능하다(Fig. 7c). 위에서 언급한 것과 같이 영주 화강섬록암의 높은 노름 An 함량 때문으로 생각된다. 이 경우에 Ab-An-Qz 도표를 사용하여 그 생성 환경을 추정해 볼 수 있다(Yoder, 1968; Johannes and Holtz, 1996). Fig. 8에서는 토날라이트질 마그마의 압력에 따른 공융선 조성을 보여준다. 단, 현재까지 이용할 수 있는 압력-조성의 관계는 2 kb와 5 kb에 불과하다. 이 도표에서 보면 영주 화강섬록암은 한 시료를 제외하고는 5 kb의 공융선(cotectic curve)의 아래에 도시된다. 만일 영주 화강섬록암이 공융선 조성의 마그마로부터 고결되었다면 압력은 5 kb 보다 더 높은 상태였을 것이다. 만일 공융선 조성이 아니라면 화강섬록암의 자료가 점시되는 영역이 사장석 영역에 따라 초기 마그마는 사장석이 풍부하고 실리카광물에 결핍된 근원암, 즉 화성기원의 암석으로부터 형성되었음을 나타낼 것이다. 그러나 영주 화강섬록암의 높은 Sr 초생값(0.71505; Lee *et al.*, 1997)은 이 후자의 가능성을 배제시킨다. 따라서

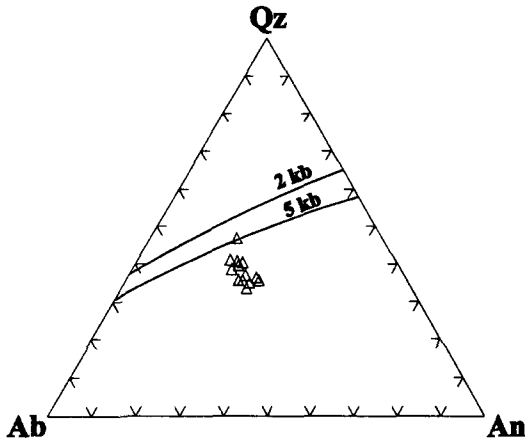


Fig. 8. Ternary diagram of normative quartz-albite-anorthite for Yeongju granodiorite. Cotectic curve for 2 kb is from Johannes and Holtz(1996) and for 5 kb from Yoder(1968).

전자의 가능성으로부터 영주 화강섬록암은 매우 높은 압력 하에서 배태되었을 것이다. 영주 토날라이트암체의 각섬석 지압계에 대한 계산으로부터(조동룡과 권성택, 1994), 이 암체의 배태 압력이 7.8 kb로 나타나, 배태 압력이 5 kb 보다 높을 것이라는 위의 추론과 조화적이다. 만일 복운모 화강암을 파생시킨 화강섬록암질 마그마가 7 kb를 넘는 심도에서 배태되었다면, 이 깊이에서 복운모 화강암이 관입한 지하 얇은 곳까지 상당히 빠른 속도로 지각 용기가 일어나지 않으면 안될 것이다. 결국 이 지역 화강암류의 생성 과정으로 지각의 매우 깊은 장소에 토날라이트-화강섬록암이 배태되고, 상당히 용기가 진행된 후에 복운모 화강암이 관입했으리라는 가능성이 제기된다.

한편, 물에 포화된 단순 화강암질 마그마(haplogranitic magma)의 경우, 최소용해액 및 공융점의 압력 조성에 따른 마그마내의 물의 용해도는 실험적으로 구해져 있다(Holtz *et al.*, 1995). 그에 따르면 영주지역 복운모 화강암질 마그마내에는 2.4 wt.% (0.5 kb)에서 5.8 wt.% (2 kb) 까지의 물이 포함될 수 있었을 것으로 추정된다.

남원지역의 화강암류는 대체로 물에 포화된 조성을 보인다(Fig. 7d). 복운모 화강암 중 노름 Qz가 높은 한 시료를 제외하고는 대체로 높은 Ti/Mg 비의 흑운모 화강암과 복운모 화강암의 공융점 조성은 2~3 kb의 압력 범위로 유사하다. 이로부터 남원지역의 높은 Ti/Mg 비의 흑운모 화강암과 복운모 화강암의 배태 심도가 거의 동일했음을 알 수 있다.

또한 이 두 화강암의 배태 기간 동안에 이 지역의 지각 용기는 타 지역에 비해 심하지 않았음을 고려할 수 있다. 한편, 각섬석 지압계에 의한 남원 각섬석-흑운모 화강섬록암의 압력이 4.8 kb(조동룡과 권성택, 1994)로 위의 결과와 차이가 있다. 이 각섬석-흑운모 화강섬록암은 여기서 다른 두 화강암류와 성인이 다르다고 알려져 있다(Kwon and Hong, 1993; 홍세선, 1994). 따라서 남원지역에서는 성인이 다른 두 종류의 심성활동이 서로 다른 심도에서 일어난 것으로 해석할 수 있다.

영주지역의 경우와 마찬가지로, 물에 포화된 남원지역 복운모 화강암질 마그마와 흑운모 화강암질 마그마내에는 실험적으로 구해진 용해도로부터(Holtz *et al.*, 1995), 5.8 wt.% 이상의 물이 포함되어 있었다고 추정된다.

복운모 화강암이 나타내는 압력 조성으로부터 지적할 수 있는 또 하나의 중요한 사실은 이 압력 조성과 화강암의 조직적 특성이 무관하지 않다는 것이다. 배태 압력, 즉 심도가 얇은 인제-홍천과 영주지역의 복운모 화강암의 입도가 세립질 내지 극세립질인 것은 마그마가 지하 천부에 관입함으로써 급랭했음을 나타낸다. 배태 심도가 비교적 깊은 청산과 남원지역의 복운모 화강암의 입도는 각각 세립~중립질과 조립질을 보여 비교적 서서히 냉각된 암체임을 지시한다.

한편, Winkler(1979)는 물에 포함된 화강암질 마그마가 최소용해액 조성의 온도를 가질 때 마그마의 상승은 매우 제한된다고 지적했다. 이는 압력이 낮아짐에 따라 최소용해액 조성에 필요한 온도가 높아지기 때문이다. 따라서 화강암질 마그마가 물에 포화될수록 상승이 제한되어 지하에서 서냉하게 되고 그에 상응하는 비교적 조립질의 조직을 보일 것이며, 남원지역 복운모 화강암의 경우 이에 해당할 것으로 생각된다. 그러나 물에 포화된 화강암질 마그마라 하더라도 지하 내의 파쇄대를 이용하여 빠르게 관입한다면, 빠른 압력 감소에 상응하여 마그마의 온도와 최소용해액 조성의 온도 사이의 온도차가 커져 급랭하게 되고 매우 치밀한 조직을 갖게 될 것이다(Johannes and Holtz, 1996). 이 경우는 일반적으로 관찰되는 반화강암의 암맥 등에서 나타나는데, 영주지역 복운모 화강암의 경우도 이에 해당할 것으로 생각할 수 있다.

지금까지 살펴본 각 지역 복운모 화강암의 특징들을 정리하면 Table 1과 같다. 아래에서는 이들 복운모 화강암에 산출되는 백운모의 생성조건을 검토하고 그에 대한 문제점을 살펴보기로 한다.

Table 1. Characteristic comparisons among the two-mica granites in the study areas

	Cheongsan	Inje-Hongcheon	Yeongju	Namwon
grain size	fine-medium	fine	very fine	coarse
mica content	biotite 6.1% muscovite 3.8%	4.8% 1.9%	6.1% 1.5%	3.2% 3.2%
muscovite type*	P & S	P & S	P & S	P & S
celadonite content**	14.3%	6.9%	17.6%	18.0%
SiO ₂ content	70.5~74.1	72.8~76.7	70.6~75.5	71.6~75.0
normative corundum	0.8~3.4%	0.9~1.7%	1.7~2.7%	0.9~1.7%
I-/S-type	I & S	I & S	I & S	I & S
mt-/il-series	ilmenite-series	ilmenite-series	ilmenite-series	ilmenite-series
P of minimum melt composition	2~3 kb	0.5~2 kb	0.5~2 kb	2~3 kb
H ₂ O-saturation	undersaturated	undersaturated	saturated	saturated

*: P, primary; S, secondary

** : relative content of Fe, Mg and Ti components in the octahedral site of pure muscovite and member

마그마기원 백운모의 생성조건

Yoder와 Eugster(1955)는 백운모와 공존하는 새니딘+강옥+물에 대한 안정 영역의 실험 결과를 Tuttle과 Bowen(1953)의 물에 포화된 화강암의 고상선과 비교하였다. 그들에 따르면 마그마에서 백운모가 정출하기 위해서는 대략 1.5 kb, 700°C 이상의 압력·온도 조건이 필요하고, 이 이하에서는 백운모가 고상선 아래(subsolidus)에서 교대작용으로 말미암아 산출될 것으로 생각했다. Yoder와 Eugster(1955)의 선구적인 실험 이래로 백운모의 안정선에 대한 새로운 실험 결과가 보고되었고, 또한 화강암의 고상선에 대한 새로운 결과도 보고되어 백운모의 형성 조건이 변화하게 되었다. 한 예로 Deer 외. (1992)는 마그마로부터의 백운모 정출 조건을 대략 3.5 kb, 700°C 이상을 제시하였다. 그러나 이 조건에 대해서는 보다 구체적으로 검토되어야 하고, 아래에서 살펴볼 것이다.

화강암질 마그마의 고상선의 경우, 석영과 장석으로 이루어진 단순한 화강암계 (haplogranite system)는 Tuttle과 Bowen (1953, 1958)의 자료에 Luth 외. (1964), Merrill 외. (1970), Huang과 Wyllie(1975), Ebadi와 Johannes(1991) 등의 자료가 첨가되어 보다 넓은 압력 범위에서의 고상선이 만들어졌다(Fig. 9의 고상선 I). 이 고상선이 높은 온도 영역으로 이동하는 두가지 경우가 있는데, 첫째는 마그마가 물에 불포화

되는 경우이다(Ebadi and Johannes, 1991). Fig. 9의 고상선 V는 그 한 예로 마그마내의 물의 물분율이 0.5일 때의 고상선을 나타낸다. 두 번째로는 마그마의 조성이 보다 매편해질 경우이다(Piwinskii, 1968; Lambert and Wyllie, 1970; Fig. 9의 토날라이트질 마그마 고상선 IV). 한편, 마그마내의 알루미늄이나 포화도가 증가할 경우에는 고상선은 낮은 온도 영역으로 이동한다(Abbott and Clarke, 1979). Fig. 9의 고상선 II는 알루미늄에 포화된 화강암질 마그마의 고상선이며(Johannes and Holtz, 1996), 고상선 III은 물에 포화된 백운모 화강암의 고상선이다(Huang and Wyllie, 1973). 따라서 화강암질 마그마의 고상선은 물의 포화정도, 알루미늄의 포화정도 및 마그마의 화학 조성에 따라 달라지게 된다. 대체적으로 물에 포화된 화강암질 마그마의 고상선으로 사용되는 것들은 Fig. 9의 고상선 I과 II 사이에 위치한다(Piwinskii, 1968; Boettcher and Wyllie, 1968).

Yoder와 Eugster(1955) 이래로 백운모 및 백운모+석영의 안정 영역에 대한 여러 실험 결과들이 구해졌다(Crowley and Rustum, 1964; Evans, 1965; Velde, 1966; Storre and Karotke, 1971, 1972; Chatterjee and Johannes, 1974). 이 중에서 화강암질 마그마의 고결과정에서 일어날 것으로 생각하는 백운모 ↔ 새니딘+강옥+H₂O (vapor)의 상 관계에 대해 보고된 두가지 실험결과, 즉 Chatterjee와 Johannes (1974)와 Evans(1965)의 자료를 가지고 고찰해 보기

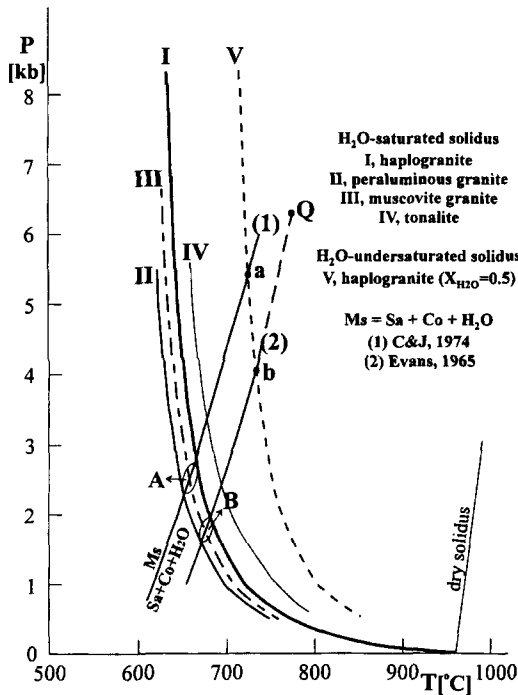


Fig. 9. Pressure-temperature diagram showing the relationships between the muscovite stability and granite solidus. Curves I, II, III and IV represent water-saturated solidi: I, haplogranite (Tuttle and Bowen, 1958; Luth *et al.*, 1964; Merrill *et al.*, 1970; Huang and Wyllie, 1975; Ebadi and Johannes, 1991); II, alumina-saturated haplogranite (Johannes and Holtz, 1996), muscovite granite (Huang and Wyllie, 1973); IV, tonalite (Piwinski, 1968; Lambert and Wyllie, 1970). Curve V represents water-undersaturated ($X_{H_2O}=0.5$) solidus for haplogranite (Ebadi and Johannes, 1991). Muscovite stability curve (1) is from Chatterjee and Johannes (1974) and the curve (2) from Evans (1965). Shaded area A and B indicate the pressure-temperature range deduced from the intersections of water-saturated solidi/muscovite stabilities. Points a and b represent the intersections of water-undersaturated solidus/muscovite stabilities. Point Q means an invariant point for the assemblage of muscovite + sanidine + corundum + sillimanite + H_2O (vapor) + liquid (Huang and Wyllie, 1974).

로 한다. 여기서 전자의 경우는 실험의 출발물질로서 순수한 백운모 조성 단성분의 합성물질을 사용했고, 후자의 경우는 자연산 백운모를 사용하였다.

첫 번째로 Chatterjee와 Johannes(1974)가 구한 백운모의 안정선(stability curve, 백운모 분해선 breakdown curve라고도 함)을 이용하여 백운모의 형성조건을 살펴보자(Fig. 9의 백운모 안정선 (1)). 물에 포화된 단순한 화강암질 마그마(I)와 백운모

안정선(1)의 교점은 대략 2.8 kb, 670°C 정도이며, 알루미늄에 포화된 마그마의 경우(II), 교점은 대략 2.2 kb, 650°C 정도이고, 백운모 화강암질 마그마의 경우 이 두 범위 사이에 속한다(Fig. 9의 영역 A). 따라서 이 교점들 이상에서는 백운모는 마그마로부터 정출되며, 이하에서는 고상선 아래에서의 교대작용으로 형성된다. 여기서 물에 포화되고 과알루미나질인 복운모 화강암질 마그마의 경우, 마그마 기원의 백운모가 정출될 수 있는 일반적인 조건을 가늠할 수 있다. 반면, 마그마의 조성이 보다 매찍해지고, 마그마가 물에 불포화되는 정도가 심해질수록 마그마기원의 백운모가 정출될 압력과 온도는 더욱 높아진다(고상선 IV, V와 백운모 안정선 (1)의 교점들). 두 번째로 Evans(1965)의 안정선에서는(Fig. 9의 (2)) 그 교점 압력과 온도 범위가 대략 1.6~2.0 kb, 670~680°C로 첫 번째의 경우보다 낮은 압력까지도 마그마기원 백운모가 정출될 수 있음을 알 수 있다(Fig. 9의 영역 B). 여기서 과연 어떤 백운모 안정선이 보다 타당할 것인가에 대한 검토가 있어야 하며, 아래에서 이 문제를 고찰해 볼 것이다.

문제점과 고찰

Fig. 7에 나타난 압력 조성은 마그마기원의 백운모가 안정할 수 있는 압력 조건을 살피는데 유용하다. 남원지역의 경우, 물에 포화된 최소용해액 조성으로부터 2~3 kb의 압력이 추정되므로(Fig. 7d) 마그마기원의 백운모가 정출할 조건을 영역 A, B 중 어느 것을 잡더라도 백운모의 정출은 가능하며, 따라서 남원 복운모 화강암내에는 비교적 많은 양의 백운모가 정출되었던 것으로 생각된다. 영주지역 복운모 화강암의 경우 비교적 물에 포화된 상태를 보이지만 압력이 0.5~2.0 kb로(Fig. 7c) 영역 A의 조건에서는 마그마기원 백운모가 안정할 수 없는 압력을 나타낸다. 반면, 영역 B의 조건이라면 어느 정도의 마그마기원 백운모와 2차적인 백운모 양쪽이 형성될 가능성이 있다.

청산과 인제-홍천의 경우, 복운모 화강암을 형성한 마그마는 물에 불포화된 상태이다(Fig. 7c, 7b). 화강암질 마그마가 물에 불포화된 경우 그 고상선은 보다 높은 온도 쪽으로 이동한다(Fig. 9). 정량적인 논의는 불가능하지만 정성적으로는 높은 온도 쪽으로 이동된 고상선과 백운모 안정선의 교점 압력들은 영역 A, B가 나타내는 압력보다 훨씬 높아질 것이다(Fig. 9에서 물의 몰분율이 0.5인 고상선에서 교점 압력 a, b는 각각 대략 5.4, 4.1 kb). 청산

복운모 화강암이 나타내는 2~3 kb의 압력은 물에 포화된 마그마의 경우 마그마기원 백운모를 정출시킬 수 있으나, 불포화된 마그마의 경우 그 가능성이 줄어든다. 특히 백운모 안정선 (1)의 경우에 마그마기원 백운모의 정출은 거의 불가능하다. 그러나 백운모 안정선 (2)가 고려되고, 마그마내의 물의 물분율이 0.5 보다 큰 경우라면 마그마기원 백운모의 정출이 대체로 가능할 것이다. 한편, 인제-홍천 복운모 화강암이 나타내는 0.5~2 kb의 압력은 물에 불포화된 고상선의 이동을 고려할 때, 백운모 안정선 (1)의 경우에는 마그마로부터 백운모가 정출할 수 있는 압력 조건에서 크게 벗어난다. 그러나 청산지역의 경우와 마찬가지로 백운모 안정선 (2)가 고려되고, 물의 물분율이 큰 경우에는 마그마기원 백운모의 정출이 소량이나마 가능할 것이다.

여기서 제기되는 문제는 백운모의 기재적인 특징 및 화학조성과, 고상선/백운모 안정선 (1)에서 구해지는 마그마기원 백운모의 정출 조건 사이에 나타나는 심한 불일치성이다. 즉, 각 지역 복운모 화강암에는 백운모의 기재적 특징과 조성으로부터 적어도 일정량의 마그마기원 백운모가 포함되어 있으나, 이들 화강암류의 압력 조성에서 구해지는 압력은 남원지역을 제외하고는 마그마기원 백운모가 정출되었을 조건을 거의 만족하지 않는다. 따라서 백운모 안정선 (1)과 (2)의 각각에 대해 적용성 여부를 고찰해 볼 필요가 있다.

물에 포화된 화강암질 마그마의 고상선은 여러 실험결과로부터 크게 차이가 나지 않는다(Tuttle and Bowen, 1958; Piwinski, 1968; Lambert and Wyllie, 1970; Huang and Wyllie, 1973; Johannes and Holtz, 1996). 그러나 백운모의 안정선은 Fig. 9의 (1)과 (2)의 경우처럼 차이를 보여 백운모 정출의 압력조건이 달라지게 된다. 두 안정선의 차이는 근본적으로 실험에 사용한 백운모의 출발물질에 있고 이것이 백운모 안정에 대한 압력에 차이를 야기시켰다고 생각된다. 백운모의 안정선 (1)은 순수한 성분의 합성 백운모 $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ 를 출발물질로 하여 구한 실험 결과이며 안정선 (2)는 자연산 백운모를 사용한 결과이다. 순수한 백운모의 조성에 셀라도나이트 혹은 티탄-셀라도나이트(백운모의 팔면체 배위에 Fe, Mg 및 Ti 성분이 들어감) 성분이 포함될 경우 백운모의 안정선이 달라짐을 정성적으로 제시한 여러 연구가 있다 (Anderson and Rowley, 1981; Miller *et al.*, 1981; Zen, 1988; Roycroft, 1990). 그에 따르면, 백운모에 셀라도나이트성분 혹은 티탄-셀라도나이트성분

이 첨가됨에 따라 백운모의 안정선은 동일 압력에서 높은 온도 쪽으로 이동하게 되어, 결국 마그마기원 백운모의 안정영역은 압력이 낮은 쪽으로 확장될 것이다. 따라서 보다 낮은 압력에서도 마그마기원의 백운모가 정출될 가능성이 제기된다. Anderson와 Rowley(1981)의 열역학적 계산에서는 복운모 아다멜라이트-토날라이트에서 산출되는 백운모(셀라도나이트 성분 19.5~32.3%)의 경우 압력이 2.6~3.1 kb까지 떨어져야 함을 지적했고, Miller 외. (1981)는 다시 화강섬록암질 마그마에서 2 kb까지 떨어질 것으로 생각했다. 이들의 계산을 마그마의 조성이 펠시해 진 화강암질 마그마의 경우로 확장시키면, 압력은 2 kb 보다 더 낮은 쪽에서 교점 압력이 설정되어야 한다. Evans(1965)의 안정선 (2)는 출발물질로 사용한 백운모의 조성이 약 27.7%의 티탄-셀라도나이트의 성분을 포함한 경우이다. 따라서 순수 백운모의 안정선이 이 성분들로 말미암아 높은 온도 쪽으로 이동할 것이라는 결과와 매우 조화적이다.

각 지역 복운모 화강암에 산출되는 백운모에는 대략 7~18% 까지의 티탄-셀라도나이트 성분이 포함되어 있기 때문에(Table 1) 실제 백운모의 안정선은 (1)보다 높은 온도쪽으로 움직여 마그마기원 백운모의 정출 압력이 낮아질 것으로 생각된다. 따라서 각 지역의 복운모 화강암에 나타나는 1차 백운모를 마그마기원으로 생각하는 이상, 백운모의 안정선 (1)은 화강암질 마그마의 고상선과의 교점 압력이 적어도 2 kb 이하로 떨어지는 쪽으로 이동할 필요가 있다. 이러한 압력 조건에서는 청산, 인제-홍천, 영주, 남원지역의 복운모 화강암에 산출되는 백운모는 마그마기원과 2차적인 백운모 양쪽을 형성시킬 수 있으며, 이는 기재적인 사실과도 부합되는 것이다. 이와 더불어 미국 서부지역에서 1차 백운모를 포함하는 복운모 화강암의 관입심도가 5~10 km (1.4~2.7 kb)로 보고되어, 마그마기원 백운모의 정출압력이 낮은 쪽에서 형성되어야 함도 고려해 볼 필요가 있다(Nelson and Sylvester, 1971; Swanson, 1978; Sylvester *et al.*, 1978).

한편, 백운모 ↔ 새니딘+강옥+H₂O(vapor)의 반응에 대한 백운모의 안정선은 다른 5개의 1변 반응(univariant reaction)과 더불어 일정한 압력과 온도에서 백운모+새니딘+강옥+규선석+H₂O(vapor)+액(liquid)으로 이루어지는 상들의 조합에 대해 불변점(invariant point)을 형성해야 한다(Huang and Wyllie, 1974). Huang과 Wyllie (1974)는 Lambert 외. (1969)의 실험결과를 토대로 이 불변점을 설정

하고(Fig. 9의 점 Q), 백운모 \leftrightarrow 새니딘+강옥+H₂O (vapor)의 반응으로 구해지는 백운모의 안정선은 이 불변점에서 종결되어야 함을 지적했다. 백운모 안정선 (1)과 (2) 중에서 이 불변점까지 확장되는 것은 Evans(1965)의 안정선 (2) 이다(Fig. 9에서 안정선 (2)의 외삽에 의한 점선은 점 Q 부근을 지난다). 이것은 위의 일련의 고찰들로부터 백운모의 안정선으로 Evans (1965)가 제시한 것이 보다 타당할 것이라는 또 하나의 근거가 될 것이다.

결국 펠식하고 과알루미나질의 복운모 화강암 내에 존재하는 마그마기원의 백운모는 물에 포화된 상태에서 1.6 kb (약 6 km) 이상, 물에 불포화된 상태에서는 그보다 높은 압력이 필요할 것이다. 이는 복운모 화강암의 고결 심도가 비교적 깊을 것이라는 것을 시사한다. 우리나라 화강암체의 배태 깊이에 대한 조등룡과 권성택(1994)의 고찰에 따르면, 주라기 화강암류는 깊은 곳에 배태된 반면 백악기 화강암류는 배태 깊이가 매우 얕다. 또한 우리나라에서 주라기의 화강암류에는 복운모 화강암이 수반되지만 백악기 화강암류에 복운모 화강암이 나타나지 않는 관찰 사실들은 위의 고찰 결과와 조화적으로 생각된다.

결 론

1) 우리나라 복운모 화강암은 과알루미나질이며, 일반적으로 S-타입 및 티탄철석계열의 화강암류임을 나타내어, 지각물질로부터 유래된 마그마가 환원 환경에서 관입·고결하였다.

2) 네 지역에 분포하는 복운모 화강암은 접촉하고 있는 각각의 인근 화강암류와 성인적인 관련성이 있거나 혹은 없음을 나타낸다. 인제-홍천과 남원 지역의 복운모 화강암은 각각 반상 흑운모 화강암 및 높은 Ti/Mg 비의 흑운모 화강암으로부터 분화·파생된 잔류 마그마로부터 형성되었다. 청산과 영주지역의 복운모 화강암은 접촉하고 있는 반상 흑운모 화강암, 화강섬록암과는 각각 성인적인 관련이 없을 것으로 판단된다.

3) 남원과 영주지역 복운모 화강암은 비교적 물에 포화된 마그마로부터 형성되었고, 청산과 인제-홍천지역 복운모 화강암질 마그마는 물에 불포화되었음이 나타난다. 한편, 물에 포화되었던 남원지역의 흑운모 화강암과 복운모 화강암에 있어 마그마 내의 물의 함량은 5.8 wt.% 이상으로 추정되고, 영주 복운모 화강암질 마그마의 경우 2.4~5.8 wt.% 정도의 물을 포함했을 것으로 생각할 수 있다.

4) 인제-홍천과 영주지역의 복운모 화강암의 최소용해액 조성으로 구해지는 압력 (0.5~2 kb)과 세립질 내지 극세립질의 암석 조직은 화강암질 마그마가 지각의 얇은 곳에서 관입·배태된 양상을 나타내며, 청산과 남원지역의 복운모 화강암의 경우 최소용해액 조성 압력 (2~3 kb)과 세립~중립질 내지 조립질의 암석 조직으로부터 비교적 지하 심부에 관입·배태되었음을 알 수 있다.

5) 화강암질 마그마의 고상선/백운모의 안정선의 교점으로부터 물에 포화된 마그마에서는 최소한 약 1.6 kb (약 6 km) 이상의 압력에서 마그마기원의 1차 백운모가 정출될 수 있으며, 그 이하에서는 고상선 아래에서 교대작용으로 2차적인 백운모가 형성된다. 반면, 물에 불포화된 마그마에서 1차 백운모가 정출되기 위해서는 보다 높은 압력이 요구된다. 백운모 형성에 대한 이 조건은 각 지역 복운모 화강암에 산출되는 백운모에 1차 백운모와 2차 백운모 양쪽이 나타남을 설명하기에 충분하다.

6) 백운모의 안정선에 대한 고찰에서 실험의 출발물질에 따른 결과의 차이가 확인되기 때문에 백운모의 안정선의 적용에는 주의가 필요하다. 특히 순수한 합성 백운모 단성분을 이용한 실험의 경우 팔면체 배위에 Ti, Fe, Mg의 성분이 첨가됨에 따라 안정선이 높은 온도 영역으로 이동될 수 있음을 고려해야 한다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 기초과학연구소 학술연구비 (BSRI-96-5404)에 의해 연구되었다. 논문의 심사를 맡아 자세한 지적을 주신 민명식 박사님, 권성택 교수님, 김용준 교수님, 정창식 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 사공회, 좌용주, 1997, 청산일대에 분포하는 화강암류의 광물조성과 주성분원소 지구화학. 암석학회지, 6, 185-209.
- 조등룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각두께의 진화. 지질학회지, 30, 41-61.
- 조문섭, 권성택, 이진한, Nakamura, E., 1995, 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암. 암석학회지, 4, 1-19.
- 홍세선, 1994, 남원 화강암질암의 광물학적 및 암석지화학적 연구. 연세대학교 박사논문, 117pp.
- 홍세선, 김용준, 김정민, 1988, 남원지역에 분포하는 남

- 원화강암체에 대한 암석지화학적 연구. 지질학회지, 24(특별호), 132-146.
- Abbott, R.N., Jr. and Clarke, D.B., 1979, Hypothetical liquidus relationships in the subsystem Al_2O_3 -FeO-MgO projected from quartz, alkali feldspar and plagioclase for $a(H_2O) \leq 1$. Canadian Mineral., 17, 549-560.
- Anderson, J.L. and Rowley, M.C., 1981, Synkinematic intrusion of peraluminous and associated metaluminous granitic magmas, Whipple Mountains, California. Canadian Mineral., 19, 83-101.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1987, Glossary of Geology (3rd ed.). Am. Geol. Inst., Alexandria, Virginia, 788p.
- Boettcher, A.L. and Wyllie, P.J., 1968, Melting of granite with excess water to 30 kbars pressure. J. Geol., 76, 235-244.
- Chatterjee, N.D. and Johannes, W., 1974, Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic $2M_1$ -muscovite, $KAl_2[AlSi_3O_{10}(OH)_2]$. Contrib. Mineral. Petrol., 48, 89-114.
- Crowley, M.S. and Roy, R., 1964, Crystalline solubility in the muscovite and phlogopite groups. Am. Mineral., 49, 348-362.
- Cho, W.S., Jwa, Y.-J., Lee, J.I. and Lee, M.S., 1994, Petrography and mineral chemistry of the granitic rocks in Pooun-Sogrisan area, Korea. J. Petrol. Soc. Korea, 3, 220-233.
- Clarke, D.B., 1981, The mineralogy of peraluminous granites: a review. Canadian Mineral., 19, 3-18.
- Day, H.W. and Fenn, P.M., 1982, Estimating the P-T- X_{H_2O} conditions during crystallization of low calcium granites. J. Geol., 90, 485-507.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992, An introduction to the rock-forming minerals (2nd ed.). Longman Science & Technical, Hong Kong, 696p.
- Ebadi, A. and Johannes, W., 1991, Beginning of melting and composition of first melts in the system Qz-Ab-Or- H_2O - CO_2 . Contrib. Mineral. Petrol., 106, 286-295.
- Evans, B.W., 1965, Application of a reaction rate method to the breakdown equilibria of muscovite and muscovite plus quartz. Am. J. Sci., 263, 647-667.
- Holtz, F., Behrens, H., Dingwell, D.B. and Johannes, W., 1995, Water solubility in haplogranitic melts. Composition, pressure and temperature dependence. Am. Mineral., 80, 94-108.
- Holtz, F., Pichavant, M., Barbey, P. and Johannes, W., 1992, Effects of H_2O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 2 and 5 kbar. Am. Mineral., 77, 1223-1241.
- Huang, W.L. and Wyllie, P.J., 1973, Melting relations of muscovite-granite to 35 kbar as a model for fusion of metamorphosed subducted oceanic sediments. Contrib. Mineral. Petrol., 42, 1-14.
- Huang, W.L. and Wyllie, P.J., 1974, Melting relations of muscovite with quartz and sanidine in the K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O system to 30 kilobars and an outline of pargonite melting relations. Am. J. Sci., 274, 378-395.
- Huang, W.L. and Wyllie, P.J., 1975, Melting relations in the system of $NaAlSi_3O_8$ - $KAlSi_3O_8$ - SiO_2 to 35 kilobars, dry and with excess water. J. Geol., 83, 737-748.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining Geol., 27, 293-305.
- Johannes, W. and Holtz, F., 1996, Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks. Springer-Verlag, Berlin, 335p.
- Jwa, Y.-J., 1990, Petrography and major element geochemistry of the granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. J. Min. Pet. Econ. Geol., 85, 98-112.
- Jwa, Y.-J., 1991, A study on Jurassic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. II. Effect of wallrock assimilation. J. Geol. Soc. Korea, 27, 13-23.
- Jwa, Y.-J. and Moutte, J., 1990, A study on Jurassic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. I. Trace and rare earth elements geochemistry. J. Geol. Soc. Korea, 26, 418-427.
- Jwa, Y.-J., Nakajima, T., Uchiumi, S. and Shibata, K., 1990, Geochronology and cooling history of Mesozoic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. Geochem. J., 24, 93-103.
- Kistler, R. W., Ghent, E. D. and O'Neil, J.R., 1981, Petrogenesis of garnet two-mica granites in the Ruby Mountains, Nevada. J. Geophys. Res., 86, 10591-10606.
- Kwon, S.-T. and Hong, S.-S., 1993, Contrasting TiO_2/MgO ratios in the Namwon granitic complex. J. Petrol. Soc. Korea, 2, 41-52.
- Lambert, I.B. and Wyllie, P.J., 1970, Melting in the deep crust and upper mantle and the nature of the low velocity zone. Phys. Earth Planet. Int., 3, 316-322.
- Lambert, I.B., Robertson, J.K. and Wyllie, P.J., 1969, Melting reactions in the system $KAlSi_3O_8$ - SiO_2 - H_2O to 18.5 kilobars. Am. J. Sci., 267, 609-626.
- Lee, D.E., Kistler, R.W., Friedman, I. and Loenen, R.E., 1981, Two-mica Granites of Northeastern Nevada. J. Geophys. Res., 86, 10607-10616.

- Lee, J.I. and Lee, M.S., 1991, Mineralogy and petrology on the granitic rocks in the Youngju area, Kyoungsang Buk-Do, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 626-641.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Kagami, H. and Uchiumi, S., 1997, New radiometric ages of the granitic rocks in the Yeongnam Massif. *Korea Soc. Econ. Environ. Geol. 30th Annual Meeting Abst.*, 61-62.
- Luth, W.C., Jahns, R.H. and Tuttle, O.F., 1964, The granitic system at pressure of 4 to 10 kilobars. *J. Geophys. Res.*, 69, 759-773.
- Manning, D.A.C., 1981, The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76, 206-215.
- Merill, R.B., Robertson, J.K. and Wyllie, P.J., 1970, Melting relations in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O to 20 kilobars compared with results for other feldspar-quartz- H_2O and rock- H_2O systems. *J. Geol.*, 78, 558-569.
- Miller, C.F., Stoddard, E.F., Bradfish, L.J. and Dollase, W.A., 1981, Composition of plutonic muscovite: genetic implications. *Canadian Mineral.*, 19, 25-34.
- Monier, G., Mergoil-Daniel, J. and Labernardiere, H., 1984, Generations successives de muscovites et feldspaths potassiques dans les leucogranite du massif de Millevaches (Massif Central francais). *Bull. Mineral.*, 107, 55-68.
- Nelson, C.A. and Sylvester, A.G., 1971, Wall rock decarbonation and forcible emplacement of Birch Creek pluton, southern White Mountains, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 2891-2904.
- Neiva, A.M.R., 1983, Geochemistry of granitic rocks and their micas from the west border of the Alvaio Plateau, northern Portugal. *Chemie Erde*, 43, 31-44.
- Pichavant, M. and Manning, D.A.C., 1984, Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: the contribution of experimental data. *Phys. Earth Planet. Int.*, 35, 31-50.
- Pichavant, M., Holtz, F. and McMillan, P., 1992, Phase relations and compositional dependence of H_2O solubility in quartz-feldspar melts. *Chem. Geol.*, 96, 303-319.
- Piwinskii, A.J., 1968, Experimental studies of igneous rock series, Central Sierra Nevada Batholith, California. *J. Geol.*, 76, 548-570.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Roycroft, P., 1990, Magmatically zoned muscovite from the peraluminous two-mica granites of the Leinster batholith, southeast Ireland. *Geology*, 19, 437-440.
- Speer, J.A., 1984, Micas in igneous rocks. In *Micas* (ed. Bailey). *Reviews in Mineralogy* v. 13, Mineral. Soc. Am. 299-356.
- Storre, B. and Karotke, E., 1971, An experimental determination of the upper stability limit of muscovite+quartz in the range 7-20 kb. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh. Jahrb.*, 5, 237-240.
- Storre, B. and Karotke, E., 1972, Experimental data on melting reactions of muscovite+quartz in the system K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O to 20 kb water pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 36, 343-345.
- Swanson, S.E., 1978, Petrology of the Rocklin pluton and associated rocks, western Sierra Nevada, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 679-686.
- Sylvester, A.G., Oertel, G., Nelson, C.A. and Christie, J.M., 1978, Papoose Flat pluton: a granitic blister in the Inyo Mountains, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1205-1219.
- Tsue, A. and Ishihara, S., 1974, The iron-titanium oxides in the granitic rocks of southwest Japan. *Mining Geol.*, 24, 13-30. (in Japanese with English abstract)
- Tuttle, O.F. and Bowen, N.L., 1953, Annual report of the director of the geophysical laboratory. *Carnegie Inst. Wash. Year Book No. 52*, 39-96.
- Tuttle, O.F. and Bowen, N.L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O . *Geol. Soc. Am. Mem.*, 74, 153p.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1977, Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7-22.
- Whitney, J.A., 1988, The origin of granite: the role and source of water in the evolution of granitic magmas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1886-1897.
- Winkler, H.G.F., 1979, *Petrogenesis of metamorphic rocks* (5th ed.). Springer, Berlin.
- Yoder, H.S., 1968, Albite-anorthite-quartz-water at 5 kbar. *Carnegie Inst. Wash. Yearb.*, 66, 477-478.
- Yoder, H.S. and Eugster, H.P., 1955, Synthetic and natural muscovites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 8, 225-280.

(책임편집 : 진명식)

Petrological Characteristics of Two-Mica Granites : Examples from Cheongsan, Inje-Hongcheon, Yeongju and Namwon areas

Yong-Joo Jwa

*Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University,
Chinju 660-701, Korea*

ABSTRACT : From their general natures of peraluminous, S-type and ilmenite-series granites, two-mica granites in the Cheongsan, Inje-Hongcheon, Yeongju and Namwon areas were originated from crust-derived granitic magma and solidified under reducing condition. Each two-mica granite in Inje-Hongcheon and Namwon districts was differentiated from the the residual magma of porphyritic biotite granite and high Ti/Mg biotite granite, respectively. The genetic relationships between two-mica granite and porphyritic biotite granite in Cheongsan district and between two-mica granite and biotite granodiorite in Yeongju district are ambiguous. In Namwon district granitic magmas were water-saturated and possible water solubilities in magmas were more than 5.8 wt.%. In Yeongju district two-mica granitic magma was nearly water-saturated and showed possible water solubilities between 2.4~5.8 wt.%. Two-mica granitic magmas in Cheongsan and Inje-Hongcheon districts were water-undersaturated. Pressure-dependent minimum melt compositions (0.5~2 kb) and petrographic textures of two-mica granites in Inje-Hongcheon and Yeongju districts represent that the granites intruded and solidified at shallow level, whereas those in Cheongsan and Namwon districts exhibit relatively deeper level of granitic intrusion (2~3 kb). The intersection of granite-solidus/muscovite stability indicates that magmatic primary muscovite can be crystallized from the water-saturated magma above 1.6 kb (ca. 6 km), but below the pressure muscovite can be formed by the subsolidus reaction. On the other hand, more pressure would be necessary for the crystallization of primary muscovite from the water-undersaturated magma. This pressure condition can explain the occurrence of primary and secondary muscovites from the two-mica granites in the areas considered. The experimental muscovite stability must be cautious of the application to examine the origin of muscovite. The muscovite stability can move toward high temperature field with adding of Ti, Fe and Mg components to the octahedral site of pure muscovite end member.

Key words : two-mica granite, muscovite, minimum melt composition, intruding level, muscovite stability