

청송 부남암주의 심성암류에서 마그마 혼화작용 및 혼합작용의 화학적 증거

황상구^{1,*} · 조인화²

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

요 약

청송 부남암주는 포유체 존재, 모드 조성, 조직적 특징에 기초하여 4개 암상으로 분류된다: (1) 조립질 화강암, (2) 석영몬조섬록암, (3) 화강섬록암, (4) 세립질 화강암. 화강섬록암은 조립질 화강암과 석영몬조섬록암의 사이에 놓이며 많은 고철질 미립상 포유체(MME)을 함유한다. MME는 주인암에 비해 세립질, 암회색이고 고철질 광물이 풍부하며, 규장질과 고철질 마그마의 물리적 혼화작용과 제한적인 혼성작용의 증거를 나타낸다. MME과 고철질암에는 침상 각섬석 및 침상 인회석, 라파키비 장석, 석영 오셀리(ocelli)와 같은 비평형 조직이 관찰된다. 이 조직적 특징들은 부남암주의 형성과정에 있어 마그마의 혼화작용 및 혼합작용과 과냉각이 있었음을 암시한다. 라파키비 장석과 석영 오셀리는 규장질 마그마로부터 결정이동에 의한 외래결정이다. 고철질 마그마의 빠른 냉각작용은 MME에서 침상 각섬석과 인회석의 핵생성과 성장을 초래하였다. 규장질 마그마에서 고철질 마그마로의 화학적 이동은 MME에서 실리카와 알칼리의 농집을 초래하였다. 이 MME는 얇은 Eu 부이상을 보여주며 반면에 조립질 화강암은 깊은 Eu 부이상을 보여주고 혼성암은 중간 Eu 부이상을 나타낸다. MME의 다양한 조직 및 조성변화는 아마도 혼화작용 및 혼합작용을 의미하는 마그마의 진화 성격에 의해 지배된다.

주요어: 부남암주, 고철질 미립상 포유체, 결정이동, 화학적 이동, 마그마 혼화작용 및 혼합작용

Sang Koo Hwang and In Hwa Jo, 2016, Chemical evidence of magma mingling and mixing in plutonic rocks of the Bunam Stock, Cheongsong, Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 6, p. 863-883

ABSTRACT: The Bunam Stock is classified into four lithofacies based on presence of enclaves, modal composition and textural features: (1) coarse-grained granite, (2) quartz monzodiorite, (3) granodiorite and (4) fine-grained granite. The granodiorite, containing many mafic microgranular enclaves (MME), occurs between coarse-grained granite and quartz monzodiorite. The MME are fine-grained, dark gray and enriched in mafic minerals as comparing to the host rocks, which means physical mingling and limited hybridization of felsic and mafic magma. MME and mafic rocks show disequilibrium textures such as accicular hornblende and apatite, rapakivi feldspars and quartz ocelli. The textural features suggest mingling and mixing, and undercooling of magma in the processes of formation of the plutonic rocks of the Bunam Stock. The rapakivi feldspars and quartz ocelli are inferred to be xenocrysts by crystal transfer from the felsic magma into MME. Rapid cooling of mafic magma resulted in the nucleation and growth of accicular hornblende and apatite crystals in MME. Chemical transfer from felsic to mafic magma resulted in enrichment of silica and alkali in MME. The MME exhibit shallow negative Eu anomalies, but coarse-grained granite show deep positive anomalies and hybrid granodiorite display moderate negative anomalies. The various textural and compositional features in MME are controlled by the evolving nature that involves magma mingling and mixing.

Key words: Bunam Stock, mafic microgranular enclaves, crystal transfer, chemical transfer, magma mingling and mixing

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; In Hwa Jo, Korea Basic Science Institute, Ochang 28119, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: hwangsk@anu.ac.kr

1. 서 언

경상분지는 한반도 남동부에 위치하며 층서적으로 백악기 신동층군, 하양층군, 유전층군과 불국사관입암군으로 나뉜다. 불국사관입암군은 대부분 화강암질암(granitoid)으로 구성되며 백악기에 섭입작용에 의해 형성된 심성암류이다(Lee *et al.*, 1987).

부남암주(Bunam Stock)는 백악기 하양층군을 관입하는 심성암류로서 섭입대에서 형성되는 칼크알칼리 화강암질암이다. 이 심성암류는 하양층군의 퇴적암류를 열변성시켜 혼펠스화되었으며, 상위의 화산암류와는 부정합 관계를 가진다(Hwang *et al.*, 2016).

이 심성암체는 NW-SE 방향으로 길다란 암주로 정치되었다. 이 화강암질암에 대한 암석학적 모델은 경상분지의 다른 심성암체와 마찬가지로 섭입 지체역학적 배경을 보여준다.

부남암주는 흑운모 화강암이라는 용어로 한 통속으로 묶여놓은 채 미분류 상태로 남아있었지만, 최근에 부남암주의 심성암류는 칼크알칼리 성격의 조립질 화강암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암과 세립질 화강암으로 분대되고 그 정치시기가 77.1~75.75 Ma로 보고되었다(Hwang *et al.*, 2016).

화강암질암에 포함된 MME는 최근에 많은 지질학자들에게 연구의 중심이 되어왔다(예, Didier and Barbarin, 1991; Holden *et al.*, 1991; Kim, J.S. *et al.*, 1998, 2004, 2012; Jwa and Kim, 2000; Kim, K.-K. *et al.*, 2005). MME는 화강암질암에서 다양한 크기와 조성으로 일관되게 조합되어 있으며, 이들은 포획체와 달리 다른 방식으로 형성되었고 다른 공급지로부터 유래되었을 것이다. MME는 먼저 고철질 마그마 역할과 화강암질암의 진화에 대한 증거를 제공할 것이고 이에 따라 이들의 성인은 마그마챔버 역학을 해석하는데 있어서도 매우 중요하다(예, Barbarin, 2005).

심성암체에서 마그마 혼합작용은 화강암질 마그마에 고철질 마그마의 주입으로 일어나기 때문에 화강암과 고철질암 사이에 혼합암(mixing rock)이 존재하는 것이 맞을 것이다. 그러나 경상분지의 화강암질 심성암체에서는 주인암(host rock)과 혼합암이 흔하게 나타나지만 주입암(injection rock)이 발견되지 않는다. 그러나 청송 남부의 부남암주에서는 암상분류에 의하면 주인암과 주입암의 중간에 MME

를 다량으로 함유하는 혼합대(mixing zone)가 동시에 발견되기 때문에 마그마 혼합작용에 대한 정보를 제공해주는 체적의 장소라고 생각된다.

우리는 부남암주를 암상에 따라 기재하고 이에 포함된 포유체를 중심으로 비평형 조직을 기재하고 해석함으로써 그 형성과정에 있어 마그마 혼합과 혼화과정에 관하여 토의하고자 한다. 이러한 토의는 부남암주의 암상변화를 이해할 수 있게 할뿐만 아니라, 경상분지의 다른 백악기 심성암체의 다양성을 이해하는데 도움이 될 것이다.

2. 지질개요

부남암주는 경상분지 북동부에 놓이는 청송 남부에 위치한다. 부남암주 주변의 지질은 트라이아스기 심성암류, 백악기 하양층군, 백악기 심성암류 및 화산암류, 고신생기 암맥류와 제4기 충적층으로 구성된다(그림 1).

트라이아스기 심성암류는 소위 청송화강암으로 부르던 심성암류인데, 화강암, 화강섬록암과 섬록암으로 구성되며 북동부에 소규모로 분포되고 북서쪽으로 크게 연장된다.

백악기 하양층군은 청송 심성암류 위에 부정합적으로 놓이며 후평동층, 점곡층, 사곡층과 춘산층으로 나뉘지는 육성 퇴적암류이다.

백악기 심성암류는 하양층군을 관입한 심성암 복합체로 부남암주라 부른다. 부남암주는 조립질 화강암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암과 세립질 화강암으로 나뉜다. 이들은 SHRIMP 저어콘 연대측정을 실시한 결과 조립질 화강암이 77.1 ± 1.3 Ma ~ 75.75 ± 0.72 Ma이고, 석영몬조섬록암이 76.64 ± 0.75 Ma이며 화강섬록암이 76.20 ± 0.94 Ma을 나타낸다(Hwang *et al.*, 2016).

백악기 화산암류는 부남암주 위에 부정합적으로 놓이며(Hwang *et al.*, 2016), 안산암과 무포산용회암으로 나뉜다. 안산암은 사장석에 의한 반상 조직을 나타낸다. 무포산용회암층은 화학적으로 칼크알칼리 계열의 유문데사이트질 내지 유문암질 용회암에 속한다(Hwang *et al.*, 2006).

그리고 고신생기 암맥류는 유문암맥이 있으며 부남암주와 화산암류의 접촉부에서 대개 남북 방향으로 관입되어 있다. 이 암맥들은 부남암주와 화산암

류 간의 접촉관계를 알아내는데 장애물이 되었고, 결국 그 관계는 연령측정에 의해 알 수 있었다.

3. 부남암주의 암석기재

부남암주는 29.5 km² 면적을 가지며 야외관계, 포유체 존재, 모드 및 화학적 조성, 구조적 및 조직적 특징에 기초하여 4개의 암상으로 분류된다(그림 1). 이들 4 암상은 (1) 조립질 화강암, (2) 화강섬록암, (3) 석영몬조섬록암, (4) 세립질 화강암으로 구분된다(그림 2). 세립질 화강암을 제외하고 이들 간의 경계는 매우 점이적이며 석영섬록암을 중심으로 동심 원상 분포를 나타낸다.

3.1 조립질 화강암

조립질 화강암은 이 암주의 대부분을 차지하며, 주로 저지대에 분포하고 소규모로 고지대를 이룬다. 화강섬록암과는 매우 점이적 조성 변화를 나타내기 때문에 경계를 설정하기가 어렵다. 퇴적암류와의 경계부에서는 냉각차이로 인해 큰 사장석 반정에 의한 반상 조직을 가진다. 암상은 담회색 내지 담홍색을 띠며, 조립질 내지 중립질이고 가끔 반상 조직을 나타낸다. 반정은 흔히 사장석이고 4~7 mm 정도의 입경을 가진다.

이 암상은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 불투명광물로 구성되며, 소량의 각섬석, 저어콘과 인회석이 관찰된다(그림 3a). 사장석은 자형 혹은 반자형으로 주로 알바이트 쌍정, 드물게 칼스배드-알바이트 쌍정을 보여주며, 큰 것은 대개 누대 구조를 보여주고 그 외곽부가 알칼리장석으로 둘러싸여 과성장(overgrowth)되어 있다. 석영은 타형으로 직소광을 보여주고, 알칼리장석은 반자형내지 타형이고 대개 퍼사이트 조직을 보여주며, 드물지만 석영과 함께 미문상 조직(micrographic texture)을 나타낸다. 흑운모는 반자형으로 엽편상을 나타내며 부분적으로 녹니석화 되어있으며, 각섬석, 불투명광물과 함께 무리를 이루는 경우가 많다.

3.2 석영몬조섬록암

석영몬조섬록암은 암주 서부와 동부 두 지역에 소규모로 분포한다. 이 암석은 암록색에서 암회색을 띠며 대부분 중립질이고 부분적으로 세립질을 나타낸다. 화강섬록암과의 경계는 매우 불규칙하다. 따라서 경계부에서 이 암상은 화강섬록암이 역행맥(backvein)으로 불규칙하게 들어와 있고 이 역행맥 내에 밀집된 작은 포유체들을 형성하기도 한다. 또한 이 암상은 부분적으로 사장석과 각섬석 반정에 의한 반상 조직을 관찰할 수 있다.

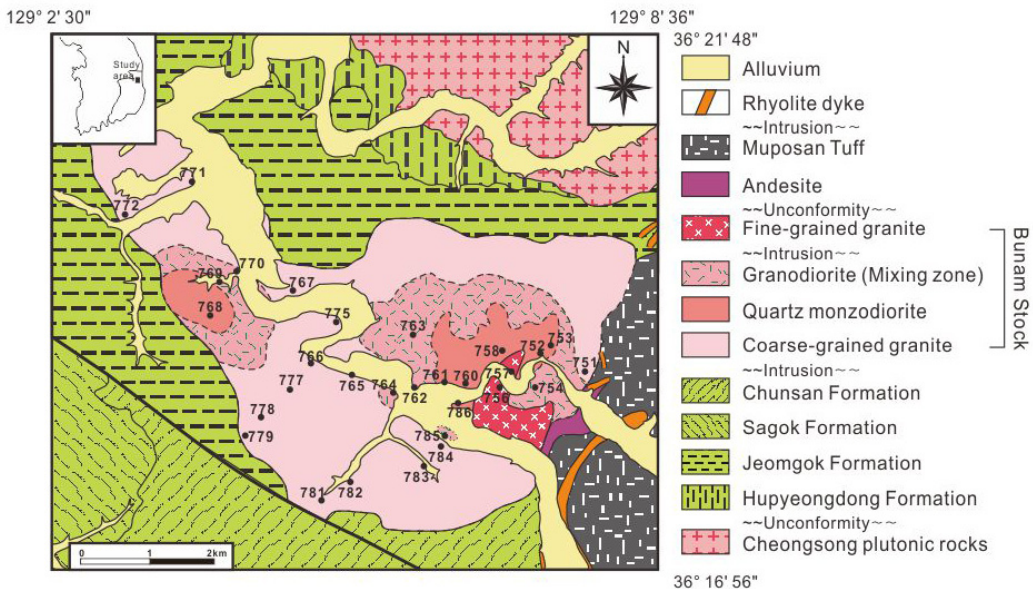


Fig. 1. Geological map of the Bunam Stock, showing sampling locations.

이 암상에서는 사장석, 각섬석, 흑운모와 석영이 우세하고 소량의 알칼리장석과 불투명광물로 구성되며 인회석, 저어콘이 수반된다(그림 3b). 사장석은 자형내지 반자형으로 흔히 누대 구조를 가지며 주로 알바이트 쌍정을 이루고 드물게 칼스배드-알바이트 쌍정을 나타낸다. 각섬석은 대부분 자형으로 나타나며, 흑운모는 반자형으로 엽편상을 보인다. 알칼리장석과 석영은 타형이며 입자들 사이에 주로 간극상으로 나타난다. 불투명광물은 유색 광물 내에 포유물로 존재하거나 주변에 독립적으로 나타난다. 인회석은 매우 작지만 흔히 침상을 보여준다. 특히 큰 각섬석은 산화와 탈수의 결과로 그 외곽부와 벽개를 따라 자철석 미립들로 혼탁된 불투명석(opacite)을 형성하고 있다(그림 3b).

특히 화강섬록암과 경계부의 세립질의 냉각연변대에서 사장석은 작은 라쓰 모양을 이루고 각섬석은 흔히 침상을 나타낸다(그림 3c). 알칼리장석은 간혹 사장석으로 둘러싸여 라파키비 장석(rapakivi feldspar)을 형성한다(그림 3d).

3.3 화강섬록암

화강섬록암은 대체로 석영몬조섬록암의 외곽부에 환상으로 분포하며 대개 산릉을 형성한다. 조립질 화강암과는 매우 점이적 조성 변화를 보여주며 석영몬조섬록암과는 매우 불규칙한 접촉을 한다. 또한 석영몬조섬록암과의 인접부에서는 고철질 미립상 포유체가 흔하게 관찰된다. 이 암상은 회색 내지 녹회색을 띠며 중립질이고 각섬석과 사장석에 의한 반상 조직을 가지며 고철질 미립상 포유체를 흔하게 함유한다.

이 암상은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석, 흑운모 등으로 구성되며, 인회석, 저어콘 등을 수반한다(그림 3e). 사장석과 각섬석은 조립질 화강암보다 상대적으로 더 많은 함량을 가지지만 석영몬조섬록암보다 더 적은 함량을 가진다. 사장석은 화강섬록암에서 가장 많은 함량의 광물로 자형 내지 반자형이며 주로 알바이트 쌍정을 이루며 특히 반정에서 뚜렷한 누대 구조를 나타낸다. 석영은 입자들 사이에 주로 간극상으로 나타난다. 알칼리장석은 주로 반자형 내지 타형으로 드물게 사장석에 둘러싸인 라파키비 장석을 형성하기도 한다(그림 3e). 각섬석은 자형 내지 반자형으로 주상과 침상 형태로 산출된

다. 흑운모는 반자형으로 주로 엽편상을 나타내고 흔히 녹니석으로 변질되어 있다.

3.4 세립질 화강암

세립질 화강암은 부남암주 남동부의 고지대에 소규모로 분포하며, 주변 암석을 관입하고 있는 뚜렷한 접촉관계를 보인다. 이 암상은 회백색 내지 황백색을 띠며, 세립질이고 등립상을 나타내며, 주변의 석영몬조섬록암과 화강섬록암에 3~10 cm 두께의 얇은 암맥으로 나타나기도 한다.

이 암상은 석영, 알칼리장석, 사장석으로 구성되고 소량의 흑운모를 가지며 고철질 광물을 드물게 함유하고, 미량의 불투명광물, 저어콘과 인회석을 수반한다. 석영은 직소광을 보이며, 알칼리장석과 함께 현저한 미문상 조직(micrographic texture)을 보인다(그림 3f). 알칼리장석은 주로 타형의 퍼사이트로 나타난다. 사장석은 자형 혹은 반자형으로 알바이트 쌍정이 우세하게 나타나며, 드물게 누대 구조를 보여준다. 흑운모는 벽개가 잘 발달해 있으며, 부분적으로 녹니석화 되어 있다.

4. MME의 암석기재

MME는 주인 화강암질암과 같은 광물을 함유하지만 구성비가 다르다(예, Dorais *et al.*, 1990; Barbarin, 1991). 연구지역의 MME는 조성이 주로 석영몬조섬

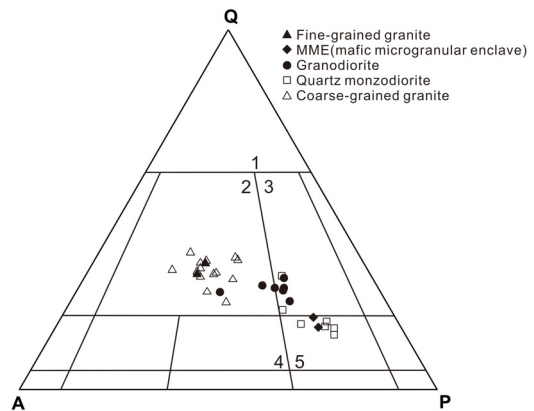


Fig. 2. Normative QAP diagram for the plutonic rocks of the Bunam Stock showing the classification of individual rock (after Streckeisen, 1976). 1, quartz-rich granitoid; 2, granite; 3, granodiorite; 4, quartz monzonite; 5, quartz monzodiorite.

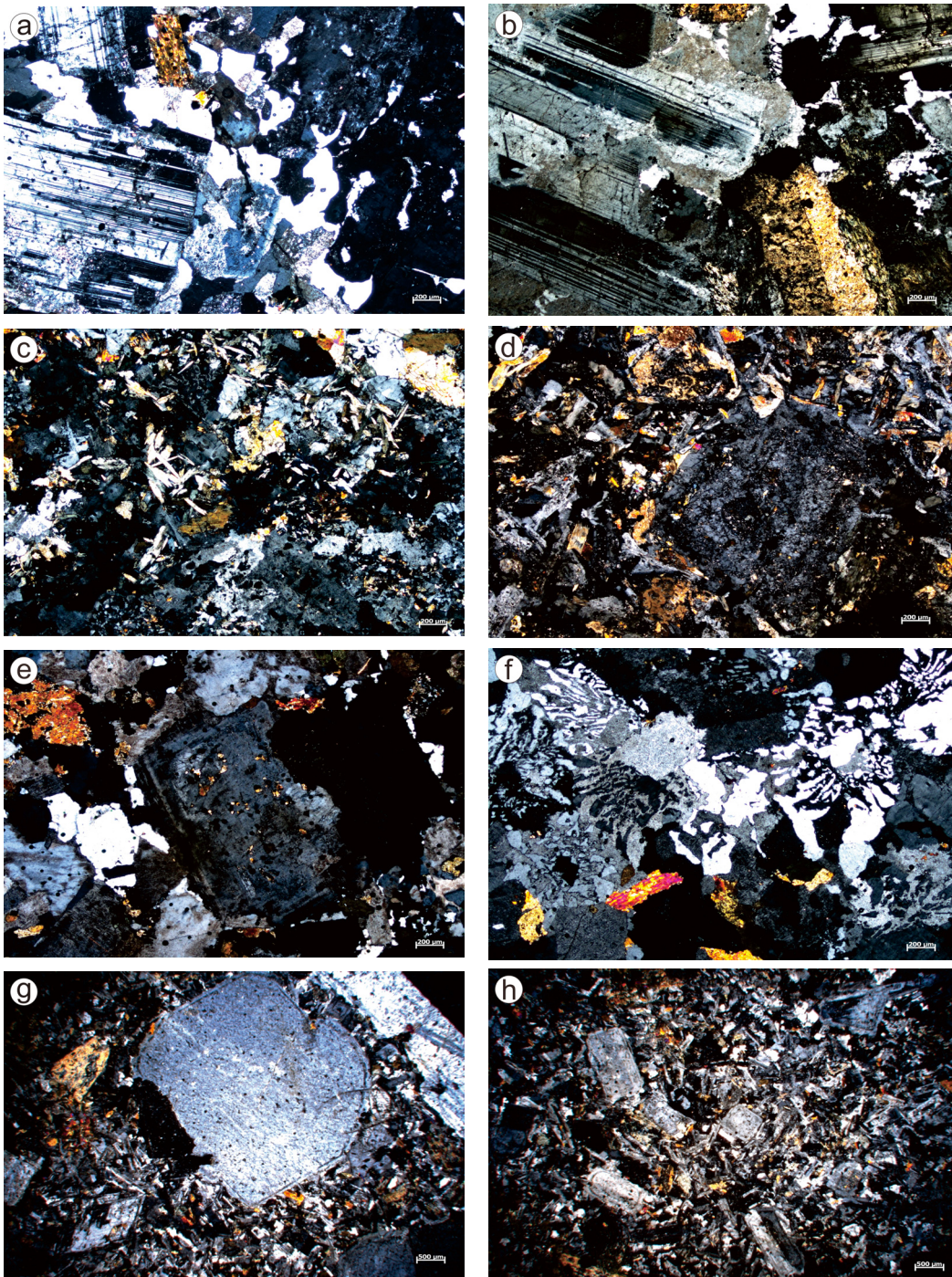


Fig. 3. Photomicrographs of lithofacies and enclaves in the Bunam Stock. (a) Coarse-grained gnanite; (b) medium-grained quartz monzodiorite rich in mafic minerals; (c) Fine-grained quartz monzodiorite composed of tiny plagioclase laths and accicular hornblendes in chilled margin; (d) A rapakivi feldspar in fine-grained quartz monzodiorite; (e) Hybrid granodiorite bearing a rapakivi feldspar; (f) Fine-grained granite showing micrographic texture; (g) Mafic micrigranular enclave including an antirapakivi feldspar; (h) Mafic micrigranular enclave showing tiny antirapakivi feldspar laths and accicular hornblendes in the chilled margin.

Table 1. Petrography of lithofacies in the Bunam Stock.

Lithofacies	Coarse-grained granite	Quartz monzodiorite	Granodiorite	Mafic microgranular enclaves	Fine-grained granite
Textures	coarse to medium grained, rarely porphyritic	medium to fine-grained, scarcely porphyritic	medium to coarse-grained, porphyritic	very fine to medium-grained, porphyritic and equigranular	fine-grained, equigranular, micrographic
Essential minerals	pl < qz < or bt >> (hb)	pl > or > qz bt > hb	pl > qz > or bt > hb	pl < qz < or bt > hb	pl < or < qz bt
Accessory minerals	magnetite, zircon, apatite	magnetite, zircon, apatite	magnetite, zircon, apatite	magnetite, zircon, apatite	magnetite, zircon
Altered minerals	chlorite, sericite	chlorite, epidote, opacite	chlorite, epidote,	chlorite, epidote, opacite	sericite
Roles in magmatic evolution	host granitic magma of magma mixing	injected mafic magma of magma mixing	mixing magma	blobs of mafic magma	late magma

록암질이며, 사장석(50-55%), 각섬석(30-35%), 흑운모(5-10%), 소량의 석영, 알칼리장석, 휘석으로 구성되고 불투명광물, 인회석과 저어콘을 수반한다.

이들은 주인 화강암에서 발견되는 것보다 더 많은 함량의 고철질 광물과 사장석, 더 적은 함량의 석영과 알칼리장석을 가진다(Ebrez and Nicholas, 1988). 조직은 등립상 세립질이 우세하고 드물게 반상 조직을 가진다. 사장석은 반정과 석기 내에서 기다란 라쓰 형태로 산출된다. 사장석 반정은 흔히 외곽부에 알칼리장석으로 둘러싸여 역라파키비 조직(antirapakivi texture)을 나타낸다(그림 3g). 석영은 간극상으로 소량 나타나지만, 곳에 따라 자형 사장석을 둘러싸는 포이킬리틱 결정으로 산출된다. 또한 반자형 내지 타형이고 직소광을 하며 아입자를 발달시킨다. 각섬석은 드물게 반정으로서 주상을 보이지만 대부분 침상으로 나타난다(그림 3h). 각섬석은 침상, 녹색 다색성을 나타내며 드물게 광학적으로 연속적인 흑운모 포유물을 가지는데 이는 흑운모를 소모하는 반응을 암시한다(Allen, 1991). 흑운모는 갈색 다색성을 나타내고 이 암석의 전반에 걸쳐 흩어져있는 반자형 엽편상과 각섬석 내에 포유물로 산출된다. 석영은 각섬석들에 의해 둘러싸여 오셀리 조직을 보이며, 역시 MME에서 발견되는 수반광물 내에 포유물로 산출된다. 알칼리장석은 간극상이고 역시 얼마의 수반광물 내에 포유물로 산출된다.

MME는 수반광물로 침상 인회석이 흔히 관찰된다. 침상 인회석은 상대적으로 가늘고 기다란 모양이다. MME를 형성하는 마그마의 빠른 결정작용은 침상 인회석 결정의 발달을 초래시킨다. 저어콘도 수반광물로 흔히 존재한다. MME 내에는 이차적 광물로 녹니석, 녹염석, 견운모 등이 소량 관찰된다.

5. 전암지구화학

5.1 분석방법

부남암주에서 총 32개 시료 가운데 조립질 화강암(주인암) 16개, 석영문조섬록암(주입암) 7개, 화강섬록암(혼성암) 5개, MME 2개, 세립질 화강암 2개를 분석하였다. 분석을 위해 선택된 MME는 크기가 30 cm 이상이고 그 중심부에서 시료를 채취하였다. 주인 화강암은 MME에서 약 50 m 이상 떨어진 곳에서 채집하였다. 주원소는 X-선형광분석기로 분석되었고, 미량원소와 희토류원소는 ICP-MS에 의해 측정되었다(표 2, 3).

5.2 주원소 변화성

모든 시료는 조산대에 속하고(그림 4) 칼크알칼리 계열을 보여준다(그림 5). 그러나 주입암 및 MME는 세립질-중립질의 고철질 석영문조섬록암이고 쏘리아이트 계열의 머리 가까이에 도시되는데, 이는 가장

Table 2. Major and trace element composition of the plutonic rocks of the Bunam Stock.

Litho -facies	Coarse-grained granite										
Sample No.	HC751	HC765	HC766	HC767	HC771	HC772	HC775	HC777	HC778	HC779	HC781
<i>wt %</i>											
SiO ₂	73.56	70.56	68.40	65.16	66.70	65.82	66.79	63.58	67.67	66.40	67.21
TiO ₂	0.23	0.37	0.42	0.65	0.54	0.57	0.51	0.66	0.55	0.63	0.65
Al ₂ O ₃	12.66	14.13	15.38	14.94	15.10	15.22	15.15	15.48	14.67	15.13	14.42
Fe ₂ O ₃	3.39	3.33	2.91	5.01	4.10	4.60	4.02	5.10	4.34	4.63	4.76
MgO	0.07	0.93	1.00	1.46	1.59	1.72	1.47	2.00	1.24	1.35	0.95
MnO	0.09	0.06	0.06	0.07	0.10	0.09	0.06	0.09	0.07	0.10	0.07
CaO	0.44	1.95	1.57	2.90	2.78	3.39	2.75	3.73	2.74	2.22	1.95
Na ₂ O	4.67	3.10	3.80	3.86	3.36	3.29	3.59	4.03	3.39	4.05	3.42
K ₂ O	4.38	4.88	5.23	3.82	4.20	4.00	4.24	3.82	4.29	4.19	4.60
P ₂ O ₅	0.03	0.08	0.07	0.15	0.11	0.12	0.10	0.14	0.12	0.14	0.16
L.O.I	0.30	0.51	1.02	1.80	1.23	1.00	1.18	1.24	0.79	1.05	1.67
Total	99.83	99.90	99.86	99.83	99.81	99.81	99.87	99.88	99.87	99.88	99.86
<i>ppm</i>											
Li	19.7	19.2	20.6	13.6	17.8	32.1	17.2	14.5	31.0	19.4	21.6
Sc	0.75	3.49	2.22	5.09	6.09	8.09	5.82	10.04	5.94	4.54	4.14
V	7.2	41.2	40.2	71.0	66.9	74.7	59.2	79.8	66.4	70.2	68.5
Cr	162.2	466.8	138.8	204.5	146.3	189.4	185.9	209.5	263.2	135.3	130.0
Co	1.07	6.81	4.95	8.46	8.96	11.48	8.18	12.88	8.23	8.23	4.25
Ni	9.05	21.46	11.53	15.20	16.09	20.02	17.54	23.18	18.87	10.44	8.79
Cu	5.00	37.75	11.73	20.22	18.80	8.19	23.64	16.23	19.65	25.21	8.88
Zn	122.2	42.2	34.7	34.7	41.8	29.0	30.7	46.3	55.3	60.6	51.5
Ga	20.3	19.1	18.5	21.4	17.4	19.1	20.6	19.5	21.6	18.4	19.2
Rb	147.9	183.8	110.6	92.1	137.7	144.1	150.8	144.3	142.6	121.4	135.1
Sr	20.6	124.1	96.6	172.8	230.6	211.7	193.8	258.4	147.0	198.7	117.2
Ba	267.4	336.6	485.6	478.4	481.2	520.6	478.0	481.6	412.8	482.5	474.5
Y	22.5	24.6	13.8	28.0	21.3	24.6	23.6	28.9	29.1	23.6	25.7
Zr	365.3	146.4	113.0	141.1	48.8	63.4	94.5	181.0	138.2	94.6	77.8
Mo	1.08	3.71	1.43	2.18	1.86	2.54	1.55	3.65	3.30	1.48	1.86
Cs	2.87	10.62	6.55	4.73	4.25	3.61	5.76	14.05	8.47	5.09	5.64
Pb	14.80	183.8	110.6	92.1	137.7	144.1	14.01	16.46	23.37	23.85	21.27
Th	5.01	25.19	10.69	10.58	13.44	14.37	17.30	15.74	14.07	10.73	12.14
U	1.71	6.78	2.00	2.17	2.47	3.80	3.23	4.33	3.94	2.14	3.17

Table 2. Continued.

Litho-facies	Coarse-grained granite			Quartz monzodiorite							MME
Sample No.	HC782	HC783	HC784	HC 752	HC 753	HC 758	HC 760	HC 761	HC 768	HC 786	HC762
<i>wt %</i>											
SiO ₂	74.80	62.98	69.28	59.51	58.52	59.75	58.41	57.30	55.98	53.61	56.64
TiO ₂	0.28	0.51	0.43	0.91	1.00	0.98	1.01	1.00	0.88	0.94	0.77
Al ₂ O ₃	13.68	14.93	14.92	15.82	16.17	16.12	16.22	16.33	16.41	16.63	16.31
Fe ₂ O ₃	1.72	6.08	1.96	8.06	8.04	7.51	7.63	7.38	8.64	8.86	8.07
MgO	0.27	3.11	1.05	2.97	2.47	2.76	2.33	2.67	3.86	4.71	4.33
MnO	0.05	0.10	0.21	0.12	0.20	0.14	0.12	0.14	0.14	0.19	0.12
CaO	0.21	3.05	1.87	4.40	4.15	5.12	5.83	4.95	6.90	6.80	4.66
Na ₂ O	1.48	3.36	1.78	3.89	4.31	3.58	3.87	3.96	3.49	3.83	4.66
K ₂ O	6.27	4.05	5.71	2.77	3.10	2.39	2.57	2.88	1.83	2.18	2.18
P ₂ O ₅	0.02	0.19	0.08	0.30	0.27	0.22	0.23	0.21	0.22	0.20	0.15
L.O.I	1.17	1.47	2.56	1.09	1.62	1.26	1.56	2.91	1.44	1.83	1.86
Total	99.94	99.84	99.87	99.84	99.85	99.82	99.78	99.72	99.79	99.78	99.74
<i>ppm</i>											
Li	11.2	24.1	24.1	17.9	32.8	15.0	12.2	24.5	19.5	30.4	29.4
Sc	1.68	13.21	2.17	14.19	14.57	16.33	16.95	15.56	22.11	23.15	21.73
V	13.2	79.2	45.9	129.4	143.8	131.3	144.0	139.9	185.5	191.6	137.6
Cr	148.6	341.6	151.7	608.2	153.8	123.8	171.5	112.2	122.6	112.5	148.3
Co	1.77	17.40	4.23	19.16	13.62	16.26	16.76	16.61	22.82	26.34	19.65
Ni	9.29	41.59	15.42	31.21	19.32	16.02	19.19	11.46	21.04	26.82	28.02
Cu	12.29	34.36	12.01	45.29	22.78	15.47	14.81	24.31	19.36	83.80	47.68
Zn	36.2	61.2	106.5	87.1	90.0	51.6	55.2	73.0	69.9	78.3	72.6
Ga	16.1	17.5	9.1	19.6	10.0	17.9	18.8	17.8	17.6	11.2	19.8
Rb	280.2	136.9	200.2	76.3	102.1	64.8	73.3	87.6	47.9	99.4	83.6
Sr	40.8	199.6	48.9	309.7	218.3	295.8	309.9	307.6	359.1	407.7	372.0
Ba	468.7	460.7	435.2	435.4	382.7	443.6	423.0	404.3	316.7	224.8	206.7
Y	20.3	34.3	16.5	34.1	34.1	35.0	34.3	30.4	32.2	24.9	31.9
Zr	105.2	126.9	110.9	104.7	107.3	99.4	177.0	79.5	89.1	64.5	85.0
Mo	2.36	2.27	5.91	2.86	3.25	1.12	1.97	0.95	1.87	1.39	1.07
Cs	12.86	5.32	14.54	4.30	2.45	2.94	7.14	3.09	1.72	10.21	3.20
Pb	16.67	20.22	17.29	21.06	16.00	12.11	13.65	18.71	47.9	13.26	21.99
Th	18.80	20.62	11.49	9.26	6.36	8.67	7.56	7.36	5.75	6.83	11.67
U	4.20	4.03	3.22	2.55	1.29	1.68	1.86	1.53	1.35	2.07	3.24

Table 2. Continued.

Litho-facies	MME	Granodiorite								Fine-grained granite		Average
		Sample No.	HC763	HC754	HC762 (H)	HC763 (H)	HC764	HC769	HC770	HC785	HC756	
<i>wt %</i>												
SiO ₂	58.20	64.26	65.04	63.41	66.51	70.47	61.01	63.63	69.55	69.45	64.35	
TiO ₂	1.06	0.74	0.55	0.62	0.63	0.67	0.68	0.69	0.42	0.42	0.66	
Al ₂ O ₃	16.14	14.94	15.83	16.70	15.13	19.52	15.75	15.49	14.88	15.03	15.45	
Fe ₂ O ₃	8.87	5.67	4.00	5.16	4.78	2.62	6.63	5.56	3.12	3.34	5.37	
MgO	2.92	2.31	1.39	1.54	1.38	0.53	2.75	2.45	0.46	0.37	1.85	
MnO	0.15	0.09	0.06	0.09	0.08	0.02	0.09	0.11	0.08	0.10	0.10	
CaO	4.08	3.53	2.28	3.34	2.57	0.28	4.43	2.79	0.82	1.18	3.08	
Na ₂ O	3.83	3.04	4.11	4.37	3.55	1.02	3.07	3.29	4.80	4.71	3.66	
K ₂ O	2.09	4.26	5.41	2.95	4.27	3.12	3.38	4.08	4.29	4.04	3.77	
P ₂ O ₅	0.23	0.16	0.10	0.20	0.14	0.03	0.22	0.15	0.09	0.09	0.15	
L.O.I	2.26	0.77	1.04	1.42	0.78	1.52	1.86	1.56	1.22	1.01	1.34	
Total	99.84	99.78	99.81	99.81	99.80	99.80	99.87	99.80	99.74	99.75	99.82	
<i>ppm</i>												
Li	23.4	23.9	14.3	12.7	13.5	22.8	16.5	21.4	15.0	10.9	19.62	
Sc	17.81	9.44	4.62	5.63	6.32	13.53	11.54	9.60	1.95	4.31	9.49	
V	187.0	89.0	64.8	63.7	71.3	126.2	115.2	91.0	20.7	13.7	86.54	
Cr	90.5	294.6	182.3	185.2	319.6	175.7	477.9	241.3	102.7	129.0	207.22	
Co	13.82	13.47	6.98	8.26	9.19	14.74	16.78	12.89	2.51	2.02	10.98	
Ni	8.31	28.15	18.04	8.96	17.60	21.23	37.30	24.18	7.63	7.04	18.23	
Cu	17.95	41.67	20.55	15.55	21.47	29.08	34.17	22.66	7.25	4.90	22.71	
Zn	79.8	42.4	31.6	46.4	39.5	55.9	55.4	53.4	35.7	62.8	57.94	
Ga	15.8	19.0	21.3	20.7	20.6	19.9	20.5	16.7	18.1	18.6	18.11	
Rb	61.2	126.0	147.6	58.5	135.2	121.8	100.6	138.8	91.2	114.3	118.28	
Sr	397.0	153.7	199.3	306.8	183.8	285.1	285.2	213.3	96.9	78.3	210.52	
Ba	374.6	430.1	591.6	579.5	525.9	362.7	481.8	480.1	502.4	489.3	444.18	
Y	33.7	29.0	18.1	20.0	28.2	28.7	28.0	27.9	13.2	25.0	26.6	
Zr	115.2	126.3	112.8	89.3	100.9	116.2	122.7	65.2	184.4	265.1	124.22	
Mo	1.52	1.47	1.11	1.09	1.56	1.71	2.89	1.12	1.10	1.77	2.06	
Cs	5.99	9.25	4.44	3.56	5.89	5.39	5.71	3.92	2.38	2.42	5.8	
Pb	61.2	17.71	147.6	58.5	135.2	121.8	100.6	19.30	10.48	17.54	51.6	
Th	6.66	12.08	11.89	5.28	13.05	12.62	12.89	12.94	5.02	8.64	11.15	
U	1.49	2.92	2.51	1.02	2.65	2.69	2.32	2.89	1.23	2.06	2.59	

Table 3. Rare earth element abundances (ppm) of the plutonic rocks of the Bunam Stock.

Litho-facies	Coarse-grained granite										
	Sample No.	HC751	HC765	HC766	HC767	HC771	HC772	HC775	HC777	HC778	HC779
La	16.38	28.30	13.51	20.18	21.29	30.60	23.91	27.29	22.64	20.69	19.02
Ce	34.80	59.21	31.14	51.76	46.52	65.02	50.35	59.02	52.67	49.95	55.34
Pr	4.57	6.56	3.37	5.43	5.07	7.47	5.77	6.94	5.88	5.48	6.31
Nd	18.15	24.45	12.70	21.33	19.42	27.97	21.63	27.45	23.65	21.31	25.91
Sm	3.81	4.29	2.22	4.77	3.76	5.00	4.32	5.45	4.73	4.16	5.30
Eu	0.42	0.48	0.37	0.82	0.77	0.85	0.76	1.01	0.72	0.70	0.81
Gd	3.84	4.04	2.12	4.65	3.49	4.59	3.92	5.04	4.71	3.93	4.62
Tb	0.67	0.63	0.36	0.73	0.56	0.70	0.64	0.82	0.78	0.67	0.71
Dy	4.37	3.97	2.28	4.94	3.65	4.34	3.93	5.03	5.05	4.27	4.63
Ho	0.92	0.90	0.49	1.02	0.76	0.90	0.83	1.05	1.04	0.87	0.95
Er	2.72	2.66	1.50	2.90	2.29	2.67	2.48	3.25	3.18	2.65	2.93
Tm	0.43	0.43	0.24	0.44	0.35	0.40	0.39	0.45	0.47	0.42	0.41
Yb	3.12	3.07	1.82	3.30	2.48	2.78	2.81	3.25	3.64	2.78	2.91
Lu	0.46	0.47	0.27	0.49	0.36	0.39	0.41	0.48	0.48	0.42	0.44
ΣREE	94.67	139.44	72.38	122.76	110.77	153.69	122.13	146.54	129.65	118.29	130.27
(La/Lu) _n	3.68	6.25	5.25	4.25	6.02	8.03	6.05	5.89	4.82	5.11	4.50
(Ce/Yb) _n	2.84	4.91	4.34	3.99	4.76	5.94	4.56	4.62	3.68	4.56	4.84
(Eu/Eu*) _n	0.34	0.35	0.52	0.54	0.65	0.54	0.57	0.59	0.47	0.53	0.50

Litho-facies	Coarse-grained granite			Quartz monzodiorite							MME
	Sample No.	HC782	HC783	HC784	HC 752	HC 753	HC 758	HC 760	HC 761	HC 768	HC 786
La	22.45	22.72	23.62	22.81	21.20	24.98	23.75	22.12	19.60	16.39	28.83
Ce	46.49	54.22	68.70	52.38	49.55	52.87	50.91	48.42	40.98	35.46	60.24
Pr	5.31	6.03	6.26	6.65	6.17	6.80	6.48	6.14	5.31	4.73	7.41
Nd	19.21	25.07	23.10	28.38	26.43	28.38	27.68	25.51	23.50	20.29	29.04
Sm	3.59	5.33	3.69	6.01	5.83	5.94	5.89	5.17	5.02	4.53	6.07
Eu	0.31	0.76	0.29	1.18	1.39	1.32	1.42	1.22	1.28	1.13	0.97
Gd	3.05	5.47	2.66	6.22	5.99	5.94	6.20	5.21	5.54	4.51	5.71
Tb	0.52	0.92	0.41	0.95	0.95	0.92	0.90	0.84	0.83	0.69	0.89
Dy	3.37	5.65	2.41	6.06	5.95	6.03	5.98	5.31	5.40	4.38	5.56
Ho	0.71	1.19	0.53	1.25	1.25	1.22	1.23	1.10	1.16	0.94	1.16
Er	2.27	3.46	1.57	3.49	3.56	3.64	3.43	3.29	3.23	2.65	3.49
Tm	0.37	0.54	0.26	0.50	0.50	0.54	0.53	0.48	0.47	0.40	0.53
Yb	2.51	3.80	1.84	3.39	3.62	3.41	3.61	3.12	3.28	2.65	3.45
Lu	0.38	0.53	0.28	0.50	0.48	0.53	0.53	0.49	0.48	0.36	0.50
ΣREE	110.54	135.68	135.62	139.77	132.87	142.52	138.54	128.43	116.09	99.09	153.87
(La/Lu) _n	6.12	4.39	8.84	4.73	4.52	4.87	4.64	4.64	4.17	4.63	5.97
(Ce/Yb) _n	4.71	3.63	9.51	3.92	3.48	3.94	3.59	3.95	3.18	3.41	4.44
(Eu/Eu*) _n	0.29	0.43	0.29	0.59	0.73	0.68	0.72	0.72	0.75	0.77	0.51

Table 3. Continued.

Litho-facies	MME	Granodiorite								Fine-grained granite	Average
		Sample No.	HC763	HC754	HC762 (H)	HC763 (H)	HC764	HC769	HC770		
La	19.08	20.25	16.23	18.79	23.63	25.56	24.67	25.83	12.44	24.47	21.98
Ce	44.63	47.74	38.41	42.17	53.19	55.01	54.62	57.46	28.08	57.28	49.83
Pr	5.73	5.63	4.13	4.67	6.02	6.40	6.60	6.57	3.02	6.25	5.79
Nd	24.11	22.95	15.99	18.09	23.49	25.93	26.24	25.43	11.57	22.83	23.04
Sm	5.35	4.88	2.98	3.82	5.15	5.10	5.37	5.16	2.35	4.63	4.68
Eu	1.24	0.90	0.63	1.07	0.82	1.15	0.97	0.85	0.34	0.80	0.87
Gd	5.44	4.78	3.00	3.57	4.72	5.34	5.09	4.67	2.24	4.37	4.52
Tb	0.93	0.77	0.47	0.54	0.76	0.81	0.78	0.71	0.36	0.71	0.72
Dy	5.98	5.14	2.97	3.53	4.92	5.10	4.84	4.52	2.44	4.42	4.58
Ho	1.28	1.08	0.64	0.73	1.00	1.06	1.02	0.92	0.54	0.94	0.96
Er	3.75	3.18	1.87	2.17	3.11	2.98	2.93	2.75	1.63	2.94	2.83
Tm	0.56	0.46	0.31	0.32	0.46	0.45	0.43	0.40	0.27	0.46	0.43
Yb	3.78	3.16	2.07	2.19	3.19	3.08	2.96	2.84	1.95	3.41	2.98
Lu	0.56	0.49	0.31	0.34	0.46	0.43	0.45	0.43	0.30	0.50	0.44
ΣREE	122.41	121.42	90.00	102.01	130.92	138.40	136.96	138.55	67.53	134.02	123.62
(La/Lu) _n	3.52	4.26	5.33	5.74	5.31	6.14	5.64	6.15	4.33	5.03	5.28
(Ce/Yb) _n	3.00	3.85	4.72	4.90	4.24	4.54	4.70	5.14	3.66	4.27	4.37
(Eu/Eu*) _n	0.71	0.57	0.65	0.89	0.51	0.68	0.57	0.53	0.46	0.55	0.57

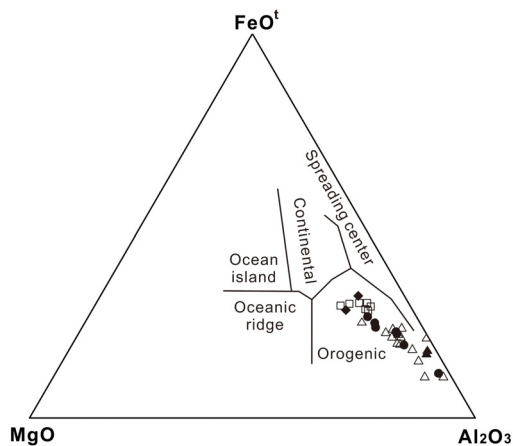


Fig. 4. FeO¹-MgO-Al₂O₃ diagram for the plutonic rocks of the Bunam Stock showing orogenic affinity(after Pearce *et al.*, 1977). Symbols as in Fig. 2.

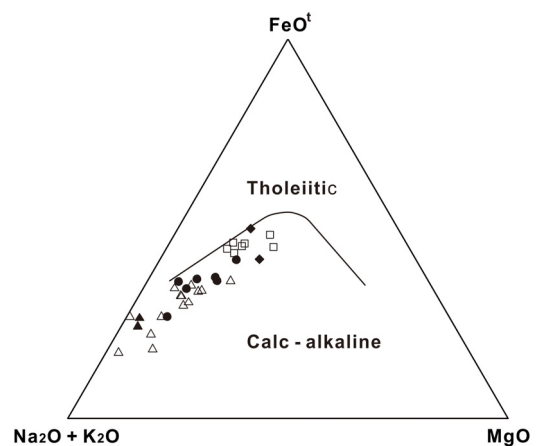


Fig. 5. AFM diagram for the plutonic rocks of the Bunam Stock showing calc-alkaline affinity(after Irvine and Baragar, 1971). Symbols as in Fig. 2.

적게 수정된 MME-형성 마그마를 나타낸다. AFM 다이어그램에서 화강섬록암 시료는 석영몬조섬록암-조립질 화강암의 분포영역에 흠어져 분포하고 조립질 화강암의 분포영역으로 더 많이 집중되는 양상을 보여준다(그림 5).

주입암(석영몬조섬록암) 및 MME, 주인암(조립질 화강암), 혼성암(화강섬록암)은 SiO_2 에 대해 TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\dagger}$, MgO , CaO , P_2O_5 가 대체로 부의 상관관계를 가지고 직선상 트렌드를 나타낸다(그림 6). 그러나 Al_2O_3 , K_2O 와 Na_2O 함량은 흠어지는 양상을 나타내고 SiO_2 를 따라 일정한 상관성이 부족하지만 Al_2O_3 은 완만한 부의 상관성을 보이고 K_2O 는 정의 상관성을 보인다(그림 6). 관찰되는 직선상 변화는 아마도 고철질 마그마와 규장질 마그마 단구성원 간의 다양한 비율로의 혼합에 의해 생성된다(예, Kumar and Rino, 2006). 주입암 및 MME, 주인 화강암, 혼성암에서 SiO_2 에 대해 TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\dagger}$, MgO , CaO , P_2O_5 의 변화를 고려할 때, 혼성암이 두 구성원 사이에 놓이는 것을 관찰할 수 있다(그림 6). 4개의 화강섬록암 시료는 SiO_2 함량이 61.01~70.47 wt% 범위를 가지는데, 이 범위는 기타 주입암 및 MME, 주인암 시료와 비교할 때 규장질도 고철질도 아니라는 것을 지시하기 때문에 아마도 강력한 마그마 혼합작용의 증거를 암시하고 있다. SiO_2 의 증가에 따라 TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\dagger}$, MgO 의 부의 상관성(그림 6)은 마그마 혼합과정과 결부되는 규장질 마그마와 MME의 내부 분화작용 동안에 흑운모의 분별작용에 의해 부분적으로 조정될 것이다(Kumar and Rino, 2006). 화강암질 주인암은 주입암 및 MME와 혼성암에 비해 더 낮은 TiO_2 와 P_2O_5 을 기록하고 있다(표 2).

5.3 미량원소 변화성

SiO_2 함량의 증가에 따른 Rb의 점진적인 농집과 V, Sc, Sr, Co의 점진적 고갈은 모든 시료에 대해 주목할 만하며, 반면에 Zr과 Th과 같은 고장력원소(HFSE)는 흠어진다(그림 7).

주입암 및 MME에서 주인암으로 가면서 SiO_2 함량의 증가에 따라 V, Sc과 Co는 점진적인 고갈을 나타내는데(그림 7), 이는 주입암 및 MME의 고철질 성격을 잘 시사해준다. 그러나 혼성암 중에서 특이한 시료(HC769)는 큰 편차를 보이는 것이 주목되는데, 이는 V, Sc과 Co 함량이 주인암의 각각보다 더

많기 때문이다. 이러한 V, Sc과 Co 함량의 현저한 증가는 혼성암이 MME와 더 많이 상호작용하여, 규장질 주인암 각각에 비해 V, Sc과 Co가 농집되었다는 것을 암시한다.

SiO_2 와 Y 간의 상관성은 주입암 및 MME 시료에서 정의 관계를 나타내지만 주인암과 혼성암에서 부의 관계를 보여준다(그림 7). Y과 SiO_2 간의 부의 상관성은 인회석과 같은 Ca이 풍부한 수반광물의 초기 결정작용 때문일 것이며, 이들 인회석은 SiO_2 의 증가에 따라 관찰되는 P_2O_5 의 감소와도 일치한다(그림 6).

SiO_2 에 대해 Rb은 정의 상관성을 가지는 규칙적 변화를 보여준다(그림 7). 그러나 이 Rb 함량은 주인암에 비해 혼성암에서 결핍되는 양상을 보여주는데, 이러한 Rb 함량의 결핍은 MME가 주인암과의 상호작용으로 규장질 주인암에 비해 Rb가 결핍되었다는 것을 암시한다.

대표적인 주입암 및 MME와 주인 화강암에 대해서 미량원소 및 희토류원소를 원시맨틀로 표준화하여 그린 거미도(그림 8)는 이들 간에 부분적 내지 완전한 평형 유지를 시사해준다(Kumar and Rino, 2006). 더 원시적인 MME 시료는 맨틀에서 유래되는 고철질 마그마의 성분을 많이 가진 유동성원소들 때문에 이의 주인암과 별로 영향을 받지 않는 것 같다. 비록 MME가 맨틀 성분을 어느 정도 가질지라도, 이들은 지각심부에서 분화작용, 동화작용, 정출동시의 원소이동과 같은 고상선 아래 과정(subsolidus process)에 의해 대부분 수정되었을 것이다(Kumar and Rino, 2006).

주입암 및 MME는 대부분 맨틀값에 비해 Cs, Th, Zr 및 REE의 농집을 보여준다(그림 8). 주입암 및 MME, 주인 화강암과 혼성암은 모두 Ba, Sr과 Ti이부의 이상을 나타내며, 반면에 주입암 및 MME는 주인 화강암에 비해 Sr 농집을 보여준다. 지각 암석에서 Cs는 흔히 운모와 K-장석에서 많이 함유되며, 운모는 K-장석에 비해 높은 Cs 함량을 가진다.

5.4 희토류원소 변화성

주입암 및 MME, 혼성암과 주인 화강암의 희토류원소를 콘드라이트로 표준화하여 그린 REE 패턴은 이들 사이에 다양한 정도의 REE 평형을 읽을 수 있다. 이 그림에서 석영몬조섬록암으로부터 화강암 영역으로 가면서 조성변화에 따라 REE 패턴이 상당히

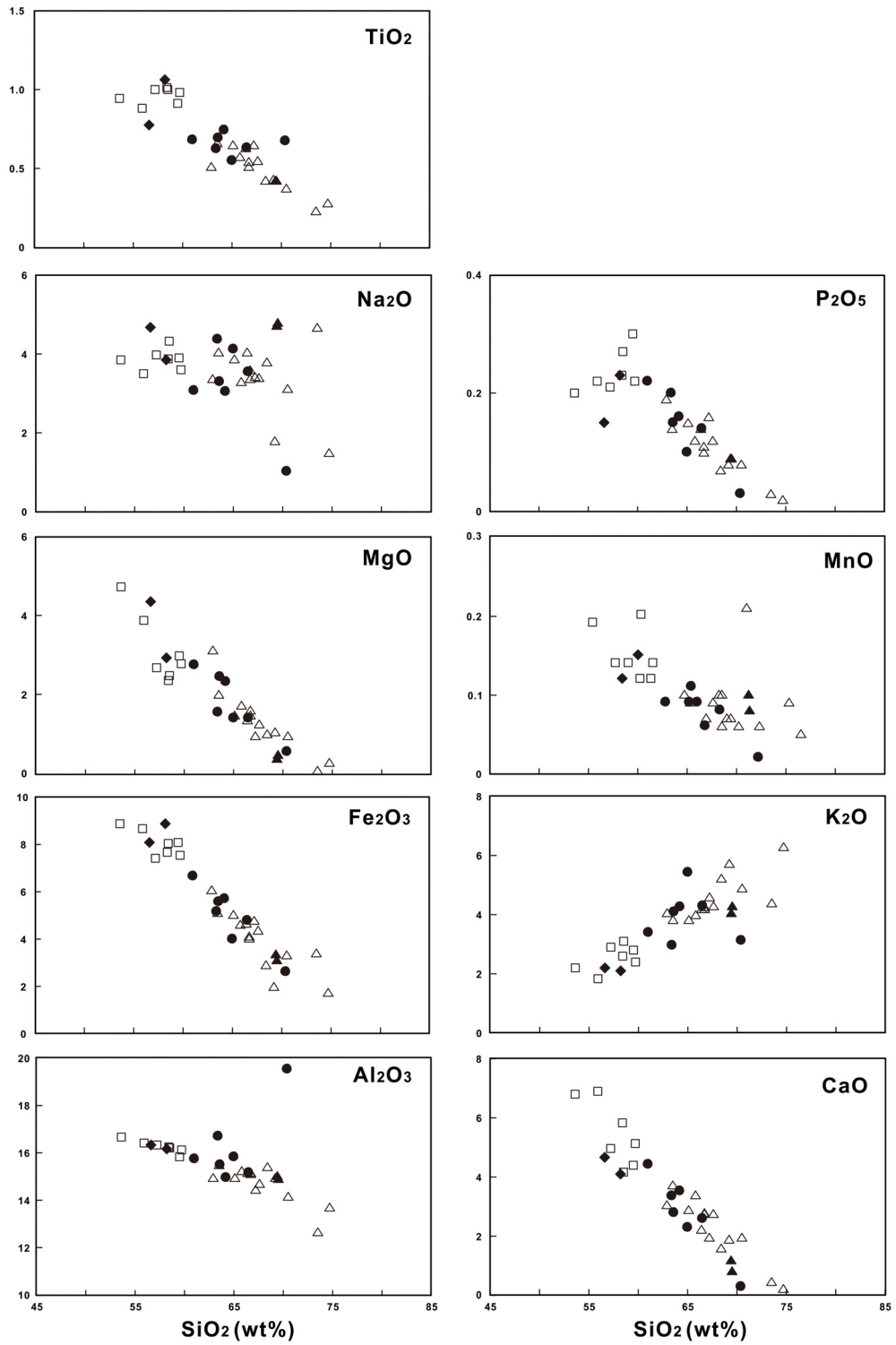


Fig. 6. Harker's variation diagrams as SiO₂ versus major oxides plotted for the plutonic rocks of the Bunam Stock. Symbols as in Fig. 2.

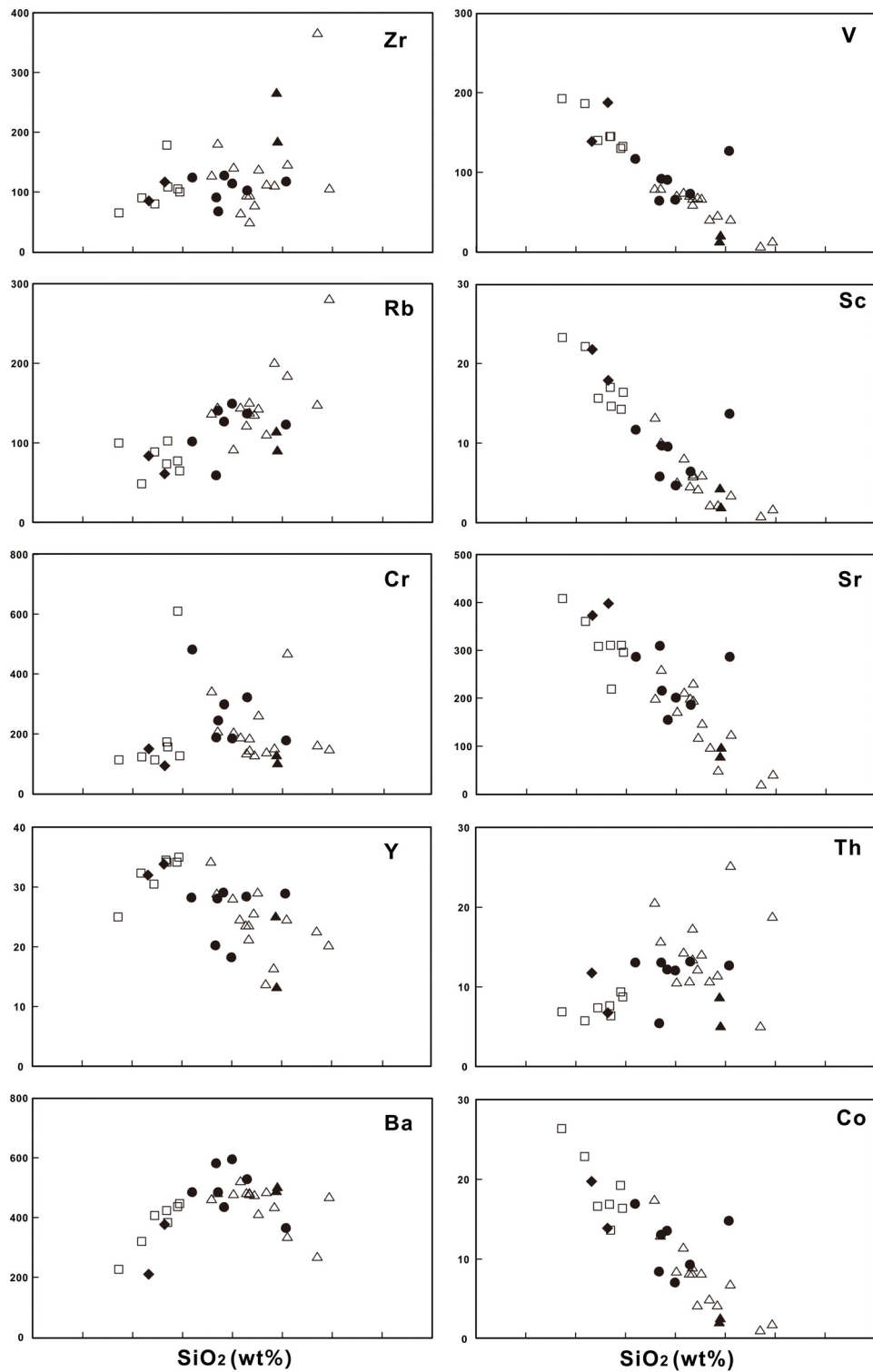


Fig. 7. Harker's variation diagrams as SiO_2 versus trace elements plotted for the plutonic rocks of the Bunam Stock. Symbols as in Fig. 2.

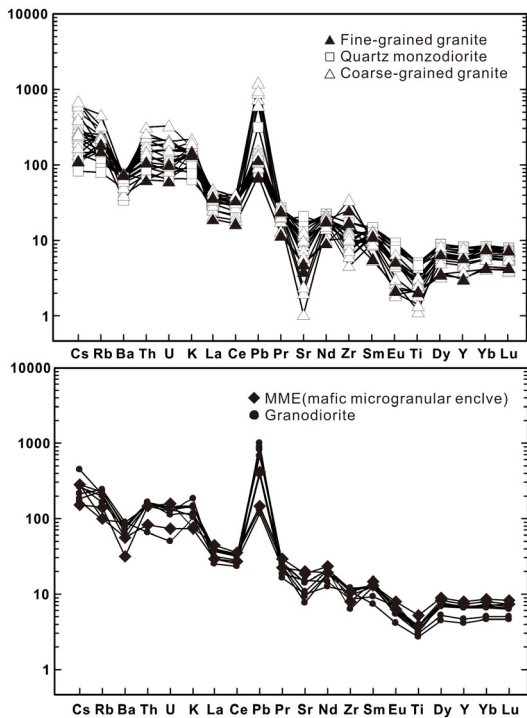


Fig. 8. Trace element distributions for the plutonic rocks of the Bunam Stock normalized to primitive mantle values (Sun and McDonough, 1989).

넓은 변화폭($\Sigma\text{REE}=72\sim154$)을 보여준다(그림 9). 또한 이 패턴은 $\text{La}_n/\text{Lu}_n=3.7\sim8.8$ 범위(표 3)로서 일반적으로 높은 LREE와 낮은 HREE 함량을 가지는 기울기를 나타낸다(그림 9).

주입암 및 MME는 $\text{Eu}_n/\text{Eu}^*_n=0.51\sim0.77$ 범위(표 3)로서 다소 낮은 부의 Eu 이상(그림 9)을 보여주고 정의 이상을 나타내지 않는다. 패턴은 $\text{La}_n/\text{Lu}_n=3.52\sim5.97$ 범위(표 3)로서 기울어진 LREE와 평평한 HREE의 패턴을 보여준다(그림 9).

주인 화강암은 중간 정도의 부의 Eu 이상($\text{Eu}^*=0.29\sim0.65$)을 보여주고 HREE에 비해 LREE의 농집($\text{La}_n/\text{Lu}_n=3.68\sim8.84$)을 나타낸다.

주입암 및 MME, 혼성암과 주인 화강암에 대해 SiO_2 과 ΣREE 의 관계는 2개의 선상 변화트렌드를 보여주는데(그림 10), 주입암 및 MME에 대한 트렌드와 주인 화강암에 대한 트렌드가 서로 다르고 그 중간에 혼성암이 놓인다. 트렌드 1은 주입암 및 MME의 분화작용에 의한 것이고 트렌드 2는 주인 화강암이 마그마챔버에서 일어났던 분화작용에 의한 것으로

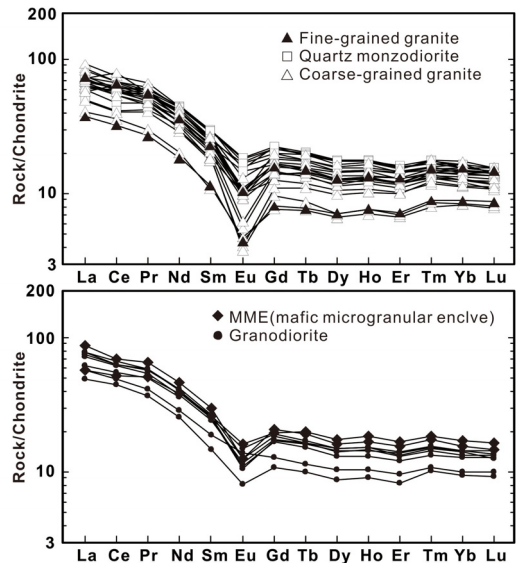


Fig. 9. Rare earth element patterns for the plutonic rocks of the Bunam Stock normalized to Chondrite values (Nakamura, 1974).

생각된다. 그리고 혼성암이 중간에 놓이는 것은 아마도 고철질과 규장질 마그마의 혼합작용에 의한 원인으로 판단된다(Poli and Tommasini, 1991; Kumar and Rino, 2006).

고철질-풍부 주입암 및 MME 시료는 더 높은 ΣREE 를 함유하고 높은 SiO_2 함량을 가진 주인 화강암은 낮은 ΣREE 함량을 기록한다(그림 9). 부남암주의 주인 화강암, 혼성암, 주입암 및 MME에서 관찰되는 Eu 이상은 REE 평형을 반영해준다고 할 수 있다. 왜냐하면 주입암 및 MME는 얇은 부의 Eu 이상을 보여주고 주인 화강암은 깊은 부의 이상을 보여주며 혼성암은 중간정도의 부의 이상을 나타내기 때문이다(그림 9). 주인 화강암에서 깊은 부의 Eu 이상은 규장질 마그마에서 고철질 마그마로의 사장석 이동의 결과일 것이다. 반면에 주입암 및 MME에서 얇은 부의 Eu 이상은 상대적으로 많은 사장석의 존재를 의미한다.

6. 토 의

대부분 암석학자들은 MME가 마그마 혼합 및 혼화작용에 의해 형성된다는 것에 동의하고 있으며, 이 과정은 많은 칼크알칼리 규장질 관입체의 특징이

다(예, Didier and Barbarin, 1991; Blundy and Sparks, 1992; Wiebe *et al.*, 1997; Perugini *et al.*, 2003; Kumar and Rino, 2006). 부남암주는 심성암 복합체로서 그 자체의 특징적 형상을 가지고 공간적으로 다양하게 진화하였다. 부남암주에서 화도를 나타내는 동시 심성의 고철질 암체와 MME는 마그마 진화에서 혼합작용의 개입을 지시하는 중요한 구성원이다. 야외 및 암석학적 증거에 의하면 MME는 마그마가 유동적인 상태에 있을 때 결정작용의 중간 단계에 있는 주인 규장질 마그마 속으로 주입된 동시심성 고철질 화도와 외래기원의 마그마 방울이었음을 암시한다(Hwang and Seo, 2016). 야외관계, 미구조와 화학적 자료에 의하면 이 MME는 고철질과 규장질 마그마 간에 혼성작용(액체+결정의 혼합작용)에 의해 형성되었다는 것을 암시한다. 심성암체의 연변부는 두꺼운 퇴적암체에 의해 경계되고 드물지만 직경이 수 cm에서 수 10 cm 범위의 주변암 포획체를 갖는다.

6.1 결정들의 기계적 이동

MME와 석영몬조섬록암에서 알칼리장석 반정의 존재는 종종 외래결정을 나타내는 특징이다(그림 3d, 3e). 이러한 결정들은 기계적으로 유입된 양상을 보여주는데, 이는 결정이 부족한 고철질 마그마와 결정이 풍부한 규장질 마그마의 혼합작용을 암시한다(예, Hyndmann and Foster, 1988; Vernon *et al.*, 1988). 경우에 따라 MME와 규장질 주인암 간의 접촉면에서 알칼리장석 반정이 나타나는 것은 MME 방울의 혼화작용 동안 주인 규장질 마그마에서 고철질 마그마로 결정들이 기계적으로 이동했음을 암시한다. MME와 고철질 주입암에서 관찰되는 알칼리장석, 사장석과 석영 반정은 그 형태가 대부분 원상 내지 타원상이고, 연변부는 경우에 따라 용식되어 있다(그림 3e). MME를 형성하는 마그마에서 우세한 고철질 조성은 알칼리장석, 소디 사장석과 석영 반정을 결정화시키기에는 매우 불리하다. 그러므로 MME와 주입암에서 이들 반정이 나타나는 것은 공존하는 고철질 마그마와 규장질 마그마의 국지적 혼화작용과 혼합작용을 고려해 하는 증거이다. MME와 주입암에서 알칼리장석 반정의 존재는 이들이 쉽게 결정화되는 규장질 주인 마그마로부터 기계적으로 이동되었다는 것을 암시해준다. 알칼리장석은 간혹 사장석으로 둘러싸여 라파키비 장석을 형성하는데

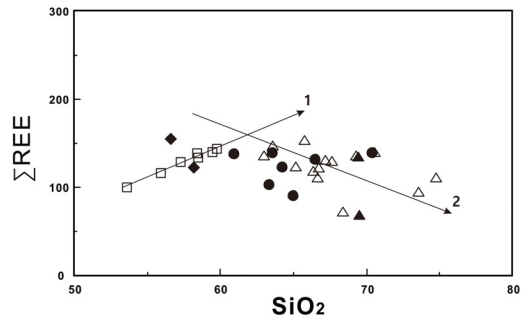


Fig. 10. SiO₂ versus ΣREE diagram for the plutonic rocks of the Bunam Stock. Symbols as in Fig. 2.

(그림 3d), 이는 주인암에서 흘러들어온 외래결정이라는 것을 지지해준다. 이러한 결정(반정)이 MME와 주입암 내의 그 자리에서 성장한 것인지 아니면 주인 마그마에서 유래된 외래결정인지에 대해서는 오랫동안 지속되었던 문제이다. 그러나 최근에는 마그마-마그마를 가로지르거나 혼성대(hybrid zone) 내에서 어떤 종류의 기계적 결정 상호교환이 일어날 수 있다는 것을 쉽게 받아들여지고 있다.

사장석에서 누대의 존재(그림 3h)는 사장석이 조성적 및 조직적으로 비평형을 유지하는 것인데, 이는 빠른 결정작용과 불완전한 혼합작용에 의해 형성된다. 마찬가지로, 화강섬록암질 주인암에서 산출되는 어떤 사장석 결정(그림 3g)은 그 외연부에 알칼리장석으로 선명하게 피복되어 있다. 이것은 사장석의 '정누대' 조직과는 다르다. Chen *et al.* (2009)는 이 사장석 핵부가 이전에 MME 혹은 주입암에서 결정화되었고 주위의 규장질 마그마로 이동했던 것으로 해석하였다. 그래서 이들 자료는 포유체-형성 마그마와 주인 규장질 마그마 사이의 경계부에서 결정들의 기계적 이동이 상호 보완적으로 있었음을 강하게 암시해준다. 이러한 상호 보완적인 이동과정은 다시 포유체-형성 마그마와 규장질 주인 마그마의 공존을 입증해주고, 이 두 마그마가 마그마 간의 결정 이동을 허용할 만큼 충분한 시간 동안 공존할 수 있었다는 것을 암시해준다. MME에서 Al과 Na(그림 6)이 대체로 풍부한 것은 아마도 부분적으로 주인 마그마에서 상대적으로 Na이 풍부한 사장석이 MME쪽으로 이동한 결과일 것이다.

MME는 수반광물로서 간극상 석영(그림 3h)과 드물게 석영 오셀리 조직(ocellar texture)을 보여주

고 있다. 석영 오셀리 조직에 대한 최근 해석(Vernon 1990, 1991; Hibbard, 1991)은 고철질 및 규장질 마그마가 혼합될 때 규장질 계에서 나온 석영 결정이 새로운 혼성대, 즉 이들이 불안정한 환경 속으로 유입된 것을 시사한다고 결론을 내렸다. 석영 외래결정의 연변부에서 일어나는 용해는 인접한 용융체로부터 결정작용을 위한 잠재열을 뽑아냄으로서, 국지적으로 과냉각(undercooling)의 원인이 될 것이다. 이는 각섬석의 핵생성을 촉진시키며 석영이 각섬석 외연부에서 결정화되는 것을 막을 것이다. 이와 같이 오셀리의 산출은 성인적으로 마그마 혼합작용을 만족스럽게 설명해주는 유일한 과정(Palicova *et al.*, 1995)이라는 결론을 내리게 한다.

MME에서 침상 인회석은 소량의 뜨거운 고철질 마그마와 상대적으로 더 차가운 화강암질 마그마가 상호작용하는 동안 과냉각에 의해 빠르게 성장했다는 증거를 나타낸다(Vernon, 1984, 1991). 이러한 특징들은 이 MME가 액체의 결정작용으로부터 형성되었다는 것을 증명해준다(Vernon, 1991). 침상 인회석은 MME에서 흔한 특징이며(Reid *et al.*, 1983), 이 인회석의 형태와 기타 모든 주광물에 있는 인회석 포유물은 인회석이 과냉각의 결과로서 초기에 결정화되었다는 것을 암시한다.

6.2 화학적 혼합작용과 확산작용

조직적 및 화학적 증거는 주인암에서 MME의 진화에 대한 상세한 과정으로서 마그마 혼합 및 혼합작용을 지지한 이후로, MME에서 관찰되는 직선상 조성변화에 의해 마그마 혼합작용을 설명하는데 흔히 이용된다, 그러나 부남암주의 조립질 화강암 내에서 직선상 변화는 약간의 분별결정작용에 의해 설명되지만 지배적인 작용이 아니다. MME와 화강섬록암에서 K_2O , Na_2O , Al_2O_3 는 약간 분산되는 경향을 보여주는데 이는 마그마-혼합과 혼합 사건 동안에 확산작용과 결정이동이 조합된 효과 때문일 것으로 생각된다. AFM 다이어그램에서 화강섬록암의 뚜렷한 조성변화는 고철질 마그마가 규장질 마그마와 상호작용하는 결과로 해석된다. 실험에 의하면 휘발성분과 어떤 이동성 친석원소들(LILE)은 역시 마그마 혼화사건 동안에 MME쪽으로 이동한다는 것이다(Watson and Jurewicz, 1984; Johnson and Wyllie, 1988; Baker, 1990).

결정들의 기계적 이동 외에, 화학적 이동도 역시 MME의 화학적 조성을 수정하는 중요한 역할을 한다. MME와 주인암 간의 화학적 이동은 휘발성분의 이동 및/혹은 조성구배를 이용하여 심성계 연구의 많은 연구 주제로 삼아왔다(예, Bussy, 1991; Orsini *et al.*, 1991; Blundy and Sparks, 1992). 규장질 심성암체에서 MME는 다량의 함수광물(각섬석, 흑운모)에 의해 특징지어진다. 이는 화강암질 마그마와 적은 점성 및 온도 차이를 초래케 하여, 냉각을 막고 주인 규장질 마그마로부터 포유체 마그마로 유체를 유도한다(Orsini *et al.*, 1991; Blundy and Sparks, 1992; Wiebe *et al.*, 1997). 고철질-규장질 마그마의 상호작용 시기에 유체 유입과정 동안, 이동성 원소의 화학적 이동은 불가피할 것이다. 고철질-규장질 마그마의 경계부에서 주원소 확산작용에 관해 수행된 실험작업에 의하면, Si, 알칼리, P, Zr, Rb는 규장질에서 고철질 마그마로 이동한다(Watson and Jurewicz, 1984; Johnston and Wyllie, 1988). 그래서 부남암주에서는 주입 고철질암에서 Na_2O 함량(3.49~4.31 wt%)에 비해 MME에서 Na_2O 함량(3.83~4.66 wt%)이 농집되어 있는데, 이는 부분적이지만 이들 원소의 MME쪽으로의 확산작용에 관련된다(표 2와 그림 6). 이러한 특징은 몇몇 MME에서 사장석을 둘러싸는 포이킬리틱 석영과 누대 사장석에 소디 외연(그림 3g)이 나타나는 조직적 특징에 부합된다. 주입암에서의 CaO (4.15~6.90 wt%)에 비해 MME에서의 CaO (4.08~4.66 wt%)가 결핍(표 2와 그림 6)되는 것도 역시 유체와 더불어 인회석에 의한 P 이동의 결과로 볼 수 있다. 이 해석은 MME에서 사장석 외곽부에 소디 외연을 가지는 것에 의해 지지된다(그림 3g).

만약 주입암 및 MME가 이들의 주인 화강암질암 각각과 비교한다면, Y, Sm, Yb과 같은 원소들은 부화되고 반면에 Sr, Ba은 다시 고갈된다(표 3과 그림 7, 8). 이는 단지 이들 원소가 확산적인 질량이동 동안에 평형을 이루지 못했다는 것을 의미할 수 있다. MME에서 Co의 농집(표 2와 그림 7)은 예측되는 이들의 모암(석영몬조섬록암)에서 발견되는 것보다 약간 더 적지만, 이들의 주인암과 비교될 수 있으며, 확산작용으로 인해 이들 원소의 평형이 일어났음을 의미한다.

많은 연구에 의하면 K의 유입은 K (Rb와 Ba)의

배출구로 작용하는 흑운모 형성을 유도할 수 있으며, 따라서 주인 규장질 마그마에서 포유체를 형성하는 마그마로 이들 원소의 더 많은 확산을 촉진시키고 MME에서 이들의 본질적인 농집을 초래할 것이다(Johnston and Wyllie, 1988; Bussy, 1991; Orsini *et al.*, 1991; Blundy and Sparks, 1992). 그러나 이러한 K 유입은 이 연구의 포유체에서는 상당히 적었던 것으로 생각된다. 왜냐하면 주인암에 비해 MME에서 K, Rb, Ba의 큰 농집을 보여주지 않기(그림 7, 8) 때문이고, 이미 보고된 바와 같이 특히 MME의 연변에서도 흑운모 농집이 없기 때문이다(예, Bussy, 1991; Debon, 1991). 이는 아마도 주인 마그마에서 흑운모가 높은 용융체 부분과 조합되어 있는데, 이로 인해 이 마그마의 잔류 용융체에서 K가 덜 부화되고 더구나 고갈된다는 것으로 설명된다(Blundy and Sparks, 1992). 또한, 기타 많은 포유체에서 Zr의 농집(Bussy, 1991; Orsini *et al.*, 1991; Blundy and Sparks, 1992; Donaire *et al.*, 2005)과 반대로, Zr은 이 연구의 MME에서 고갈되는 편이다(그림 7). Chen *et al.* (2009)은 많은 저어콘 결정이 MME-형성 마그마의 주입 시기에 주인 마그마에서 이미 결정화되었으며 잔류 주인 마그마에서 Zr의 농집을 낮추었고 그래서 Zr의 확산을 막았다고 해석하였다. 그리고 혼성암에서 중간정도의 부의 Eu 이상(그림 9)은 규장질 주인 마그마와 MME-형성 고철질 마그마의 기계적 및/혹은 화학적 상호작용의 증거를 더욱 더 지지하고 있다.

6.3 MME 진화의 성인적 모델

야외-암석기재와 주원소 지구화학적 증거들은 조립질 화강암으로 정출된 규장질 마그마가 고철질(포유체) 마그마와 상호작용할 때 얼마의 초기 결정도를 가졌다는 것을 암시한다. 그러므로 고철질-규장질 광물의 얼마는 기계적으로 혼합되고 혼성(포유체) 마그마대를 형성하였으며(Hwang and Seo, 2016), 고철질 및 규장질 마그마 간에 열적 평형과 최소 유동적 차이를 얻은 후에, 다음 대류적 역전과 같은 기타 역학적 힘을 발생시켰다(Huppert *et al.*, 1984). 마그마 혼합물의 열적 평형을 얻기 위해서는 초기 온도, 열용량, 용해열, 결정도 변화와 혼합작용에 관여하는 각 마그마의 질량에 좌우될 것이다(Sparks and Marshall, 1986). 마그마 방울로서 MME는 대류를

통해 주입마그마 혹은 불균질한 혼성마그마로부터 분리될 것이고 상대적으로 더 차가운 화강암질 마그마 속으로 통합될 것이다(예, Dorais *et al.*, 1990; Neves and Vauchez, 1995). 큰 MME는 실제로 더 작은 MME (수 cm 내지 30 cm)로 해체될 것이며, 전단력으로 인한 MME의 신장작용은 상호작용하는 용융물의 점성차이와 상대속도(유동)와 조합되어 일어날 것이다. 규장질 주인 마그마의 결정함량, 점성과 항복강도는 MME가 완전히 고화되는데 필요한 시간동안에 화도 아래로 침하되는 것을 막을 것이다(Furman and Spera, 1985). 고철질 마그마에서 규장질 마그마로 열과 휘발성분의 이동은 MME 균을 형성하게끔 유도하는 유동성을 촉진했을(예, Blundy and Sparks, 1992) 뿐만 아니라 동시에 이동성 원소 특히 알칼리의 운반자로서의 역할을 했을 것이다.

7. 결론

부남암주에서 백악기 칼크알칼리 준알루미나성 심성암 복합체는 4개 암상으로 분대되며 그 중에 조립질 화강암은 주인 규장질 암주로 산출되고 석영문 조섬록암은 주입된 고철질 화도로 산출되며 화강섬록암은 풍부한 고철질 마그마성 포유체(MME)와 조합되어 혼합대로 산출된다. MME와 동시심성 고철질 화도는 시공간적으로 화강암질암의 진화에 관련되어 있다.

MME를 함유하는 화강섬록암은 동시성 고철질과 규장질 마그마의 혼합작용, 혼합작용과 화학적 과정에 의해 형성되었다. MME-형성 마그마와 주인 화강암질 마그마의 공존은 MME의 신장, MME와 주인 화강암을 횡단하여 기계적 및 화학적 교환에 의해 입증된다. 고철질 마그마는 부남암주의 마그마 챔버를 형성하는 주인 화강암질 마그마의 결정작용이 진행되는 어떤 중간단계에 주입하였다. 주인암과 MME의 관계 및 공간적 분포에 의하면 고철질 포유체는 고철질 마그마가 규장질 마그마챔버 속으로 화도를 통해 주입하여 MME 방울로 분산되었다는 것을 암시해준다.

부남암주에서 MME의 암석기재적 특징은 고철질 및 규장질 마그마의 동시적 성격을 지시해주며, 혼합작용에 의해 심부환경에서 혼성대를 생성시켰

다. 직선상의 화학적 변화는 화강섬록암과 MME가 고철질 및 규장질 마그마의 혼합물이라는 것을 암시 해준다. 또한 상대적으로 더 차가운 규장질 주인 마그마 내에 고철질 MME의 혼화작용이 있었다. 규장질에서 고철질 구성원으로 규장질 원소의 확산작용은 고철질-규장질 마그마 혼합작용 동안에 일어났을 뿐만 아니라, MME-혼성암계가 완전히 고화되기 전에 MME가 형성되는 혼화작용 동안에도 일어났다.

사 사

이 논문에서 주원소는 부경대학교 공동실험관에서 X-선형광분석기에 의해 분석되었고 미량원소 및 희토류원소는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 ICP-MS에 의해 측정되었다. 심사과정을 통하여 건설적인 비평과 지적을 해주신 두분의 심사위원과 관계 편집위원께 감사드립니다. 그림제작에 있어서 암석학 연구실 이소진 양의 도움이 있었다.

REFERENCES

- Allen, C.M., 1991, Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, southeast California: Mineral, chemical and isotopic evidence. *American Mineralogist*, 76, 574-588.
- Baker, D.R., 1990, Chemical inter-diffusion of dacite and rhyolite: Anhydrous measurements at 1 atm and 10 Kbar, application of transition state theory, and diffusion in zoned magma chamber. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104, 407-423.
- Barbarin, B., 1991, Enclave of the Mesozoic calc-alkaline granitoids of the Sierra Nevada batholith, California. In: J. Didier and B. Barbarin (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology. Development in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 135-154.
- Barbarin, B., 2005, Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80, 155-177.
- Blundy, J.D. and Sparks, R.S.J., 1992, Petrogenesis of mafic inclusion in granitoids of the Admello Massif, Italy. *Journal of Petrology*, 33, 1039-1104.
- Bussy, F., 1991, Enclaves of the Late Miocene Monte Capanne granite, Elba Island, Italy. In: J. Didier and B. Barbarin (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 167-178.
- Chen, B., Chen, Z.C. and Jahn, B.M., 2009, Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, north China craton. *Lithos*, 110, 343-358.
- Debon, F., 1991, Comparative major element chemistry in various "microgranular enclave-plutonic host" pairs. In: Didier, J., Barbarin, B. (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 293-312.
- Didier, J. and Barbarin, B., 1991, *Enclaves and Granite Petrology. Development in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 625 p.
- Donaire, T., Pascual, E., Pin, C. and Duthou, J.L., 2005, Microgranular enclaves as evidence rapid cooling in granitoid rocks: the case of the Los Pedroches granodiorite, Iberian Massif, Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149, 247-265.
- Dorais, M.J., Whiteny, J.A. and Rodden, M.F., 1990, Origin of mafic enclave in the Dinkey Creek Pluton, Central Sierra Nevada batholith, California. *Journal of Petrology*, 31, 853-881.
- Ebrez, G.W. and Nicholas, I.A., 1988, Microgranitoids enclaves from Swift Creek pluton, SE Australia: textural and physical constrain on the nature of the magma mingling process in plutonic environment. *Geologische Rundschau*, 77, 713-736.
- Furman, T. and Spera, F.J., 1985, Co-mingling of acid and basic magma with implication for the origin of mafic I-type xenoliths, field and petrological relations of an usual dyke complex at Eagle Peak Lake, Sequoia National Park, California, USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 24, 151-178.
- Hibbard, M.J., 1991, Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In: Didier, J. and Barbarin, B. (eds.), *Enclaves and Granite Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam. 431-444.
- Holden, P., Halliday, A.N., Stephems, W.E. and Henney, P.J., 1991, Chemical and isotopic evidence for major mass transfer between mafic enclaves and felsic magma. *Chemical Geology*, 92, 135-152.
- Huppert, H.E., Sparks, R.S.J. and Turner, J.S., 1984, Some effects of viscosity on the dynamics of replenished magma chamber. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6857-6877.
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2016, SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Stratigraphical Relationship of the Bunam Stock and Muposan Tuff, Cheongsong. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 405-419 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.H., 2006, Magmatic processes of the Muposan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42,

- 253-271 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Seo, S.H., 2016, Field Evidence of Magma Mixing from Concentric Zonings and Mafic Microgranular Enclaves Hosted in Bunam Stock, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 349-360 (in Korean with English abstract).
- Hyndmann, D.W. and Foster, D.A., 1988, The role of tonalite and mafic dykes in the generation of the Idaho batholith. *Journal Geology*, 96, 31-46.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Johnston, A.D. and Wyllie, P.J., 1988, Interaction of granitic and basaltic magmas: experimental observations on contamination processes at 10 kbar with H₂O. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98, 352-362.
- Jwa, Y.-J. and Kim, K.-K., 2000, Petrology of host granites and enclaves from the Bohyeonsan area, Euisong basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 187-203 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Kim, K.-K., Jwa, Y.-J. and Lee, J.-D., 2004, Petrographical study for the enclaves of the granitic rocks, in the Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 13, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Kim, K.-K., Jwa, Y.-J. and Son, M., 2012, Cretaceous to early Tertiary granites and magma mixing in South Korea: Their spatio-temporal variations and tectonic implications (multiple slab window model). *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 203-216 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Lee, J.-D. and Yun, S.-H., 1998, Magma mingling evidence of the granitic rocks in the Geoje-island: Petrological characteristics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 105-121 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-K., Kim, J.S. and Jwa, Y.-J., 2005, Petrological study of Cretaceous granitic rocks in the Waryongsan area, southwestern Gyeongsang Basin: Compositional change of granitic rocks by magma mingling. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 12-23 (in Korean with English abstract).
- Kumar, S. and Rino, V., 2006, Mineralogy and geochemistry of microgranular enclaves in Palaeoproterozoic Malanjkhand granitoids, central India: evidence of magma mixing, mingling, and chemical equilibration. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, 591-609.
- Lee, S.-M., Kim, S.-W. and Jin, M.-S., 1987, Igneous activities of the Cretaceous to the early Tertiary and their tectonic implications in South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 338-359 (in Korean with English abstract).
- abstract).
- Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757-773.
- Neves, S.P. and Vauchez, A., 1995, Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of northeast Brazil. *Lithos*, 39, 275-299.
- Orsini, J.B., Cocirca, C. and Zorpi, M.J., 1991, Genesis of mafic microgranular enclaves through differentiation of basic magmas, mingling and chemical exchanges with their host granitoid magmas. In: J. Didier and B. Barbarin (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology*. *Developments in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 445-464.
- Palicova, M., Waldhausrova, J. and Ledvin kova, V., 1995, Ocelli in mafic rocks of granitic complexes. *Krystalinikum*, 22, 149-186.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element geochemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 121-132.
- Perugini, D., Poli, G., Christofides, G. and Eleftheriadis, G., 2003, Magma mixing in the Sithonia plutonic complex, Greece: evidence from mafic microgranular enclaves. *Mineralogy and Petrology*, 78, 173-200.
- Poli, G.E. and Tommasini, S., 1991, Model for the origin and significance of microgranular enclaves in calc-alkaline granitoids. *Journal of Petrology*, 32, 657-666.
- Reid, J.R., Evans, O.C. and Fates, D.G., 1983, Magma mixing in granitic rocks in the central Sierra Nevada, California. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 243-261.
- Sparks, R.J.S. and Marshall, L.A., 1986, Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 99-124.
- Streckeisen, A., 1976, To each plutonic rocks its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1-33.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., and Norry, M.J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basin*. *Geological Society Special Publication*, 42, 313-345.
- Vernon, R.H., 1984, Microgranitoid enclave in granites-globules of hybrid magma quenched in plutonic environment. *Nature*, 309, 438-439.
- Vernon, R.H., 1990, Crystallisation and hybridism in microgranitoid enclave magma: microstructural evidence. *Journal of Geophysical Research*, 95, 17849-17859.
- Vernon, R.H., 1991, Interpretation of microstructures of

- microgranitoid enclaves. In J. Didier and B. Barbarin (eds.), *Enclaves and Granite Petrology, Developments in Petrology*, 13, Elsevier, Amsterdam, 277-291.
- Vernon, R.H., Etheridge, M.A. and Wall, V.J., 1988, Shape and microstructures of microgranitoids enclaves: indicators of magma mingling and flow. *Lithos*, 22, 1-11.
- Watson, E.B. and Jurewicz, S.R., 1984, Behavior of alkalis during diffusive interaction of granitic xenoliths with basaltic magma. *Journal of Geology*, 92, 121-131.
- Wiebe, R.A., Smith, D., Sturm, M., King, E.M. and Seckeler, M.S., 1997, Enclaves in the Cadillac Mountain granite (Coastal Maine): Samples of hybrid magma from the base of the chamber. *Journal of Petrology*, 38, 393-423.
-

Received : December 2, 2016

Revised : December 26, 2016

Accepted : December 27, 2016