

영주저반의 부석심성암체 내에서 공간적 조성변화와 그 성인

황상구* · 안웅산* · 김상욱**

Spatial Compositional Variations and their Origins in the Buseok Pluton, Yeongju Batholith

Sang Koo Hwang*, Ung San Ahn* and Sang Wook Kim**

ABSTRACT: The Buseok pluton in the Yeongju Batholith is a comagmatic plutonic rocks which have concentrically compositional zoning. The lithofacies of the Buseok pluton comprise hornblende biotite tonalite in the southern part of the pluton, porphyritic and equigranular biotite granodiorite in the northern part and biotite granite in the north-central part. The compositional variations change gradually with continuity both within and between the lithofacies. The concentrically zoned pattern is relatively mafic rocks composed of high-temperature mineral assemblages in margin of the southern part, passing inward and northward gradually to more felsic rock in core of the north-central part. Changes in the textures and microstructures, as well as in the mineral content, take place between rock types of the plutons. Darker colored, generally coarse-grained, well foliated tonalite pass inward to light colored, coarse-grained, poorly foliated granodiorite, and finally give way to lighter colored, medium-grained, nearly nonfoliated granite. The foliation are best developed in the marginal part of the tonalite. Here, the regional myolitic foliation in the tonalite is steep northward and parallels to its southeastern contact with the country rock, but the magmatic foliation from disc-shaped mafic microgranitoid enclaves is subvertical and parallels the contacts with the country rock. As the tonalite approaches biotite granite in composition, the foliation is indistinct. Modal and chemical data for the pluton show quantitative compositional variation from the margin of the southern part to the core of the north-central part. Quartz and K-feldspar increase toward the core of the pluton, whereas hornblende, biotite and color index decrease. Abundances of SiO_2 and K_2O increase toward the core according to the variation in quartz and K-feldspar, whereas those of MnO , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO and P_2O_5 decrease corresponding to the variation in mafic and accessories. The compositional zonation resulted from fractional crystallization involving downward settling of earlier crystals, accompanied by upward movement of melt and volatiles, and followed by accessory marginal accretion of crystalline material in the magma to the marginal part. Although a little crustal contamination by the wall rock is recognized from the isotope data, the contamination is not only dominated over but also appropriate for forming the compositional variation in the pluton.

서 언

영주저반 (Yeongju batholith)은 부석, 춘양과 장수의 심성암체로 구성되는 심성암 복합체 (plutonic complex)이다 (황상구 외, 1999). 이 중에서 부석심성암체가 공

간적으로 가장 크며 암상에 따라 분대하면 4개 암대로 구분된다. 이들 암상은 불규칙하지만 전체적으로 동심 원상으로 누대되는 심성암체를 형성하며, 이 심성암체에서 고온 광물군으로 구성되는 토날라이트는 남측 연변부에 분포되고 보다 저온 광물군으로 구성되는 화강섬록암은 연속적으로 안쪽으로 놓이며 훨씬 더 규장질 광물로 구성되는 화강암이 이 암체의 중북부를 차지한다 (Fig. 1). 그래서 이 부석심성암체는 현위치에 관입된 후에 오랜 시간에 걸쳐 정지되었던 한 심성암체의 암석학적인 진화를 연구할 기회를 제공한다.

* 안동대 자연대학 지구환경과 (Department of Earth and Environmental Science, Andong Nat'l University, Andong 760-749, Korea

** 경북대 자연대학 지질학과 (Department of Geology, Kyungpook Nat'l University, Taegu 702-701, Korea

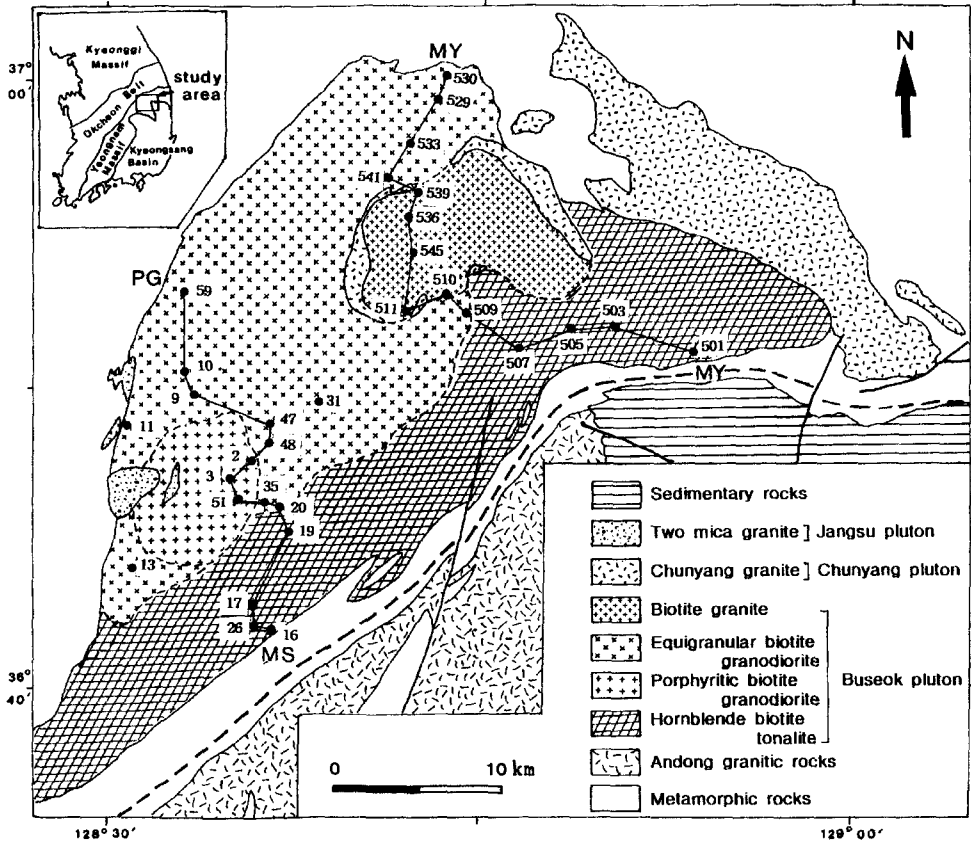


Fig. 1. Geological map showing four lithofacies of the Buseok pluton in the Yeongju granitoid batholith, and showing sample locations and traverse MS-PG and MH-MY lines across the pluton. HY is added to the head of each sample No.

마그마는 지각 심부에서 형성된 후에 마그마챔버에서 진화되고 진화된 물질이 이 곳을 떠나 그 상부에 정치되며, 다시 이 곳에서 진화되면서 결정화되고 고화될 때까지 여러 과정을 겪으면서 매우 큰 암체를 형성했을 것이다. 화성암의 이런 분야를 연구할 때 어떤 시점에서 마그마의 진화를 생각하느냐에 따라서 공시적 (synchronic)인 시점과 통시적 (diachronic)인 시점으로 나누어진다. 전자는 어떤 특정시기의 공간적인 마그마의 현상과 변화를 연구하는 것이며 후자는 시기별로 시간적인 마그마의 변천과정을 연구하는 것이다. 통시적인 연구라 하더라도 시기별로 연구결과를 비교하기 위해서는 공시적인 연구가 바탕이 되어야 한다. 그러므로 큰 심성암체의 이러한 과정 중에 현위치에 관입된 후의 마그마의 진화와 그 원인을 알아내기 위해서는 먼저 암상에 따라 심성암체를 정확하게 분대하고 이들의 내부구조를 철저히 기재하고 광물과 화학조성의 변화를 알아냄으로써 가능하다.

영주저반의 부석심성암체는 춘양도폭 (손치무와 김수진, 1963), 삼근리도폭 (김옥준 외, 1963), 예안도폭 (이대성과 이하영, 1963)에서 시대미상의 각섬석 화강암으로 기재되기 시작하였다. 이후 옥동도폭 (이대성, 1966)에서 본 암체의 북변부를 시대미상의 부석화강암으로 기재하였고, 상금곡도폭 (신병우와 최승일, 1968)에서 본 암체의 서변부를 백악기 흑운모 화강암으로 기재하였다. 또한 안동도폭 (김봉균 외, 1988)과 예천도폭 (윤석규 외, 1988)에서 본 암체의 남서 연장부를 주라기 흑운모 화강암으로 기재하였으며, 풍기도폭 (이종혁 외, 1989)과 영주도폭 (이민성 외, 1989)에서 본 암체의 서변부를 시대미상의 흑운모 각섬석 화강암, 흑운모 화강암, 반상 편마상 화강암, 세립질 화강암 등으로 기재하였다. 이들은 영주저반의 지질에 대한 윤곽을 파악하는데 큰 역할을 하였지만 저자마다 다르게 기재되어 이 암체가 다양한 암상으로 구성되어 있음을 시사해 준다. 따라서 본 암체는 옥동도폭에서 부석화

강암으로 기재한 데서 연유하지만 조성이 다양할 뿐만 아니라 분포면적에서 화강암보다 화강섬록암과 토날라이트가 훨씬 더 우세하기 때문에 부석화강암으로 칭하기는 불합리하며 공간적인 관계를 다룰 때는 모순점을 들어내기가 일쑤이다. 그리고 조성변화는 어느 한정된 공간 내에서 다루기 때문에 공간적인 의미가 매우 중요하므로 이를 부석심성암체 (Buseok pluton) 혹은 부석암체로 칭하여 공간적인 의미를 부여하는 것이 편리하다.

연구방법

본 연구는 부석심성암체를 가로지르는 도로를 따라서 시료를 채취하여 본 암체에서 공간적으로 광물과 화학조성의 변화성을 추구하였다. 이를 위하여 우리는 이 암체의 여러 암상을 횡단할 수 있는 남북 방향으로 2개 횡단선을 선정하였다 (Fig. 1). 이중에 서쪽의 MS-PG 횡단선은 문수면에서 풍기읍에 이르며 흑운모 화강암을 제외한 3개 암상을 지난다. MH-MY 횡단선은 명호면에서 몰야면에 이르며 반상 흑운모 화강섬록암을 제외한 3개 암상을 통과하여 보다 큰 조성변화를 나타낸다. 시료는 주로 도로의 절개지를 따라 채취되었다.

모우드 광물 조성은 채취된 시료로부터 박편을 만들고 연색을 실시하여 K-장석을 선택적으로 황금색으로 물들여서 등간격으로 2,000점 이상을 점산하여 결정하였다. 또한 분말 시료는 화학 조성과 동위원소 분석을 위하여 텅스텐카바이드를 이용하여 200메쉬 정도로 제조하였다. 주원소, 미량원소와 희토류원소의 화학분석은 영국 런던대학에서 ICP-MS에 의해서 결정되었다. 그리고 조성 변화의 원인을 알아보기 위해 선택된 시료에 한하여 Sr 동위원소비가 기초과학연구원연구소에서 양이온교환칼럼화학으로 시료를 전처리하여 열이온화 질량분석법에 의해 실시되었다. 시료에 대한 모우드 광물 조성은 Table 1에 주어지고 화학 조성은 Table 2, 3에 동위원소비는 Table 4에 주어져 있다.

지질개요

영주저반은 영남육괴의 북동부에 위치하며 변성암류를 관입한다. 이 변성암류는 영주저반의 북부와 북서부가 선캠브리아기의 소백산 변성암 복합체의 남동부에 해당되며, 저반의 남부와 동부가 변성퇴적암류의 원남층군 (원남통)과 울리층군 (울리통)에 속하며 이외에

다양한 편마암들과 편암들로 구성되어 있다. 최근에는 원남층군의 동수곡층, 장군석회암층과 두음리층을 고생대 지층으로 해석하는 경우가 많아졌다 (안건상 외, 1993; 양편석과 조문섭, 1995; 김기영 외, 1996). 그리고 이들은 남서쪽으로 가면서 화강암질 편마암과 반상 변정질 편마암 등의 편마암류를 협재하며 점차 그 규모도 커진다. 이들 변성암류는 대부분 녹색 편암상에서 녹색각섬암상으로 변성되고 (이희천, 1986; 김규상, 1988) 심성암의 인접부에서 이와 함께 압쇄화된 미구조를 나타낸다. 이러한 압쇄화 미구조는 변성암류에 혼한 압쇄화 미구조와 함께 변성작용과 심성작용 후의 일이다 (Chang, 1991).

이 영주저반은 관입 접촉부와 포획체에 의한 상호관계와, 마그마성 엽리 등의 내부구조에 의해서 3개의 관입상 (intrusive phase)으로 구분되는 심성암 복합체이다 (황상구 외, 1999). 첫번째 관입상은 부석심성암체 (Buseok pluton)이며 이 저반의 동부와 중서부를 제외한 전반에 걸쳐 매우 넓게 분포된다. 두번째 관입상은 춘양심성암체 (Chunyang pluton)이며 이 저반의 동변부를 따라 놓인다. 마지막 관입상은 장수심성암체 (Jangsu pluton)를 이루며 이 저반의 중서부에 놓인다. 부석심성암체는 K-Ar 흑운모 연대가 $171.7 \pm 3.2 \sim 162.3 \pm 3.1$ Ma 범위이고 춘양심성암체는 153.9 ± 2.9 Ma이며 장수심성암체는 145.3 ± 2.7 Ma이다 (황상구 외, 1999).

부석심성암체 정치 후의 광역적인 변형작용은 대개 $N30 \sim 80^\circ E$, $50 \sim 70^\circ NW$ 로 나타나는 압쇄엽리로서 북동-남서 내지 동서 방향으로 우세한 구조적 뼈대를 형성하였다 (Chang, 1990). 이 엽리는 춘양심성암체 속으로 연장되지 않기 때문에 이 암체의 관입 전에 압쇄작용이 끝났음을 의미한다 (황상구 외, 1999). 그리고 춘양심성암체와 장수심성암체는 영주저반의 동부, 중부와 서부에서 이전의 암석들을 관입하면서 저반 내의 암주 혹은 암맥으로 산출된다 (황상구, 1995).

암석기재

부석심성암체는 영주저반에서 가장 넓은 면적 약 $1,000 \text{ km}^2$ (서쪽 꼬리 부분을 제외한 본역에서 약 820 km^2)을 차지하며 조립질 토날라이트에서 화강암까지 다양한 조성을 나타내고 (Fig. 2) 조립질에서 중립질 범위의 입도를 가진다. 그래서 이 부석심성암체는 구성광물의 함량 차이와, 반정 유무, 입도 차이와 색지수 등에 의한 암질로부터 각섬석 흑운모 토날라이트,

Table 1. Modal analyses of the Buseok pluton in the Yeongju Batholith.

	MS-PG line													
	HY16	HY26	HY17	HY19	HM20	HY35	HY51	HY3	HY2	HY48	HY47	HY9	HY10	HY59
Distance (km)	0.6	1.5	3.0	7.3	8.2	9.3	10.9	11.8	13.6	14.2	14.7	19.4	20.2	24.1
Quartz	29.1	24.6	23.6	17.5	24.6	32.0	32.1	31.7	25.0	25.2	29.2	30.9	31.8	25.4
K-feldspars	3.6	6.0	0.6	0.4	7.2	7.5	11.4	16.5	9.4	14.1	15.0	12.7	11.4	13.0
Plagioclase	51.8	49.8	54.5	57.1	46.1	47.4	42.5	41.7	46.4	47.1	45.6	44.8	48.6	42.7
Biotite	12.3	16.0	19.3	21.4	19.6	11.6	12.1	8.8	14.4	10.1	8.9	9.5	7.2	14.3
Hornblende	0.4	0.7	0.4	0.3	0.6		0.1						0.5	1.6
Muscovite									1.9	0.4	0.2			
Allanite	2.6	0.7		0.6	0.7	0.6	1.3	1.0	1.9	0.1	0.2	1.4	0.7	2.5
Epidote		2.0	1.1	2.3	1.0	0.4			0.6	1.3	0.7			
Opaques										tr	tr			
Sphene		0.1	0.3	0.2		0.2	0.4		0.2	1.4			0.1	0.3
Apatite			tr							tr	tr			
Color index	14.8	19.5	21.1	17.3	21.9	12.8	13.9	9.8	17.1	12.9	9.6	11.4	8.0	18.7

	MH-MY line													
	HY501	HY503	HY505	HY507	HY509	HY510	HY511	HM545	HY536	HY539	HY541	HY533	HY529	HY530
Distance (km)	0.6	4.3	5.6	8.7	11.9	12.8	14.7	18.3	19.7	20.8	22.6	25.5	27.6	28.5
Quartz	23.3	20.3	19.8	22.5	27.8	27.6	29.3	31.8	35.2	28.7	23.5	25.8	27.3	29.4
K-feldspars	7.7	6.2	4.1	0.8	15.1	18.7	19.7	21.9	20.8	24.8	14.9	16.6	17.4	15.2
Plagioclase	53.7	55.4	56.7	51.4	46.8	45.4	43.6	39.0	35.9	40.0	41.4	46.2	43.8	44.2
Biotite	12.5	14.1	13.9	20.0	9.4	7.5	6.5	6.0	7.0	3.8	18.0	8.2	9.8	7.3
Hornblende	0.7	1.7	2.5	3.5	0.3			0.4			0.8	tr		0.6
Muscovite					tr		tr		0.4	1.7				
Allanite	tr			tr		tr	tr	tr	0.2	tr		tr		0.4
Epidote	1.6	1.8	1.7	1.1	0.4	0.3	0.7	0.4	0.4	0.8	1.1	2.6	0.9	2.1
Opaque					tr			tr		0.1			0.2	0.2
Sphene	0.3	0.2	0.8	0.5	tr	0.2		0.2		tr	0.2	0.3	0.3	0.4
Apatite	tr					tr	tr		tr	tr	tr	tr	tr	tr
Color index	15.0	17.8	18.9	25.1	10.1	8.0	7.2	7.0	7.6	4.7	20.0	11.1	11.2	11.0

반상 흑운모 화강섬록암, 등립상 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암 등의 4개 암상으로 분대되며 이들은 상호간에 매우 점이적인 변화를 보인다. 이들 각각에 대하여 경하에서 암석기재한다.

각섬석 흑운모 토날라이트

각섬석 흑운모 토날라이트는 주구성광물로서 석영, 사장석, K-장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성되고 부구성광물로서 녹염석, 인회석, 스피넬, 저어콘, 갈염석, 티탄철석 등으로 구성된다. 그리고 이차광물로서 녹니석, 녹염석, 방해석, 황철석 등이 산출된다.

석영은 불규칙하게 타형으로 나타나고 사장석, 흑운모, 각섬석들 사이에서 작은 입자들로서 자기네끼리 모자이크상 내지 봉합상 경계를 이루면서 집합체로 산출되며 간혹 큰 석영 내에 작은 자형 흑운모를 포유한다. 사장석은 2~4 mm의 반자형으로 산출되며 작은 자형

사장석, 흑운모, 각섬석, 석영과 녹염석 등을 둘러싸고 있어 포이킬리틱 조직을 나타낸다. 그러나 사장석에서 흔한 포유물은 사장석, 흑운모와 각섬석 등이 흔한 편이다. 사장석에서 포유물의 광물군은 토날라이트에서 화강섬록암으로 체계적인 변화를 나타내며 대체로 토날라이트 전반에 걸쳐 발견되는 고철질 광물의 분포와 일치된다. 이 포유물은 대부분 보다 자형을 나타내기 때문에 초기 형성된 결정임을 지시한다. 이 사장석이 결정작용의 초기 광물 중의 하나를 나타내기 때문에, 이 고철질 포유물의 변화는 대체로 토날라이트가 정지될 때 액상이었음을 암시한다. 이와 함께 이 토날라이트는 후술할 화강섬록암과 점이적인 변화를 보이므로 하나의 단일 분화상임을 암시한다. 사장석의 입자 경계부는 부분적으로 석영이 작은 유충상 결정으로 연결된 유상석 (myrmekite)을 형성한다. K-장석은 주로 간극에 소량으로 존재하며 대부분 미사장석이고 간혹 정장석이 발견된다. 흑운모는 연한 황갈색에서 진한 녹

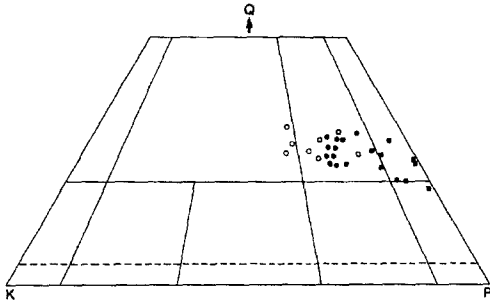


Fig. 2. IUGS classification for modes of samples that are taken across the pluton along traverse MS-PG and MH-MY line. Solid square, hornblende biotite tonalite; open square, porphyritic biotite granodiorite; solid circle, equigranular biotite granodiorite; open circle, biotite granite.

갈색의 다색성을 보이고 자형 내지 반자형으로 2~5 mm에 달하며 자형 각섬석, 녹염석, 인회석과 저어콘 등을 내포한다. 각섬석은 흑운모, 간혹 스피노와 함께 나타나고 드물게 작은 자형 흑운모와 사장석을 내포하며 황갈색에서 진한 갈색의 다색성을 보이고 드물게 재음식에 의한 만곡된 외형을 나타낸다. 녹염석은 최대 2 mm로 다양하고 때때로 흑운모를 내포하거나 갈염석과 함께 나타난다. 스피노는 2 mm 내외의 채기상으로 주로 각섬석과 함께 나타난다.

흑운모 화강섬록암

반상 흑운모 화강섬록암

흑운모 화강섬록암은 주구성광물로서 석영, 사장석,

K-장석, 흑운모 등으로 이루어지고 부구성광물로서 각섬석, 녹염석, 스피노, 저어콘, 갈염석, 티탄철석 등이 산출된다. 이차광물로서 녹니석, 녹염석, 방해석 등이 산출된다.

석영은 타형이며 대부분 정석들 사이에 간극상으로 나타나고 간혹 사장석과 연정을 이루어 유상석을 형성한다. 대부분 파동소광이 현저하게 나타나고 부분적으로 자기네끼리 봉합상 경계를 이룬다. 사장석은 자형 혹은 반자형으로 산출되며 부분적으로 사장석의 깨진 틈을 따라 녹염석이 충전되거나 흑운모 등이 포유되어 포이킬리틱 조직을 나타낸다. 이는 간혹 파동소광을 하고 부분적으로 이의 외곽에서 유층상 석영과 연정을 형성하여 유상석을 나타낸다. K-장석은 쌍정의 패턴에 따라 구분되는 미사장석과 정장석으로 산출된다. 미사장석은 주로 큰 결정으로 산출되며 흔히 작은 자형 사장석과 흑운모 등을 포유한다. 정장석은 주로 간극상으로 산출되며 극부적으로 작은 자형 사장석, 흑운모 등을 포유하는 큰 포이킬리틱 결정을 형성하고 간혹 재음식에 의한 공간에 등근 석영이 채워져 있다. 그러므로 K-장석에서 포유물의 광물군은 사장석과 흑운모로 구성되며 화강섬록암 전반에 걸쳐 발견되는 광물군의 분포와 일치된다. 이 포유물은 대체로 초기 형성된 결정을 나타낸다. 이 K-장석이 결정작용의 후기 광물을 나타내지만, 이 포유물의 변화는 대체로 화강섬록암이 정치될 때 액상이었으며 K-장석이 정출될 때 적어도 고상선 위에 있었음을 암시한다. 흑운모는 장석들 사이에 배열되어 산출되며 다색성이 현저하고 각섬석, 녹염석 등의 다른 유색광물과 함께 나타나며 간혹 파동소광을 하고 부분적으로 녹니석화되어 있다. 각섬석은 흔히 자형 내지 반자형으로 흑운모의 포유물로 드물게 산출된다.

동립상 흑운모 화강섬록암

흑운모 화강섬록암은 주구성광물로서 석영, 사장석, 정장석, 사장석, 흑운모 등으로 이루어지고 부구성광물로서 각섬석, 백운모, 저어콘, 인회석, 스피노, 갈염석, 티탄철석 등이 산출된다. 이차광물로서 녹니석, 녹염석, 방해석 등이 산출된다.

석영은 대부분 장석들 사이에서 타형이고 모자의상으로 산출되며 심하게 파동소광을 한다. 사장석은 자형 혹은 반자형으로 나타나고 간혹 큰 결정은 누대구조를 보이며, 부분적으로 작은 자형 사장석, 각섬석, 흑운모 등이 내포되어 포이킬리틱 조직을 나타낸다. 그러므로 사장석에서 고철질 포유물의 광물군은 화강섬

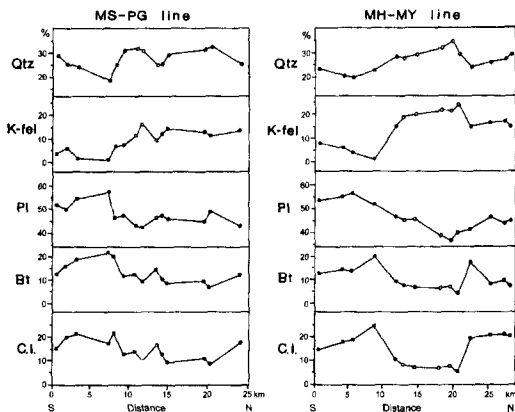


Fig. 3. Variations of modal minerals across the pluton along the traverse MS-PG and MH-MY line. Symbols are the same as in Fig. 2.

록암이나 토날라이트 전반에 걸쳐 발견되는 고철질 광물의 분포와 일치된다. 이 포유물은 초기 형성된 결정을 나타낸다. 이 사장석이 결정작용의 초기 광물 중의 하나를 나타내기 때문에, 이 포유물의 변화는 대체로 화강섬록암이 정지될 때 액상이었음을 암시한다. 이와 함께 두 암상의 화강섬록암은 전술한 토날라이트와 후술할 화강암과 점이적인 변화를 보이므로 하나의 단일 분화상을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 사장석은 드물게 부분적으로 미사장석화되어 있고 외곽에 석영과 연정된 유상석을 형성한다. 정장석은 대체로 반자형이고 종종 작은 자형 사장석과 흑운모를 포유하며 종종 파동소광을 한다. 미사장석은 흔히 정장석과 같은 양상으로 산출되며 사장석이 전이된 부분도 드물게 있다. 흑운모는 1~2 mm 크기로 사장석 사이에 가장 흔하게 산출되며 다색성이 현저하고 가끔 각섬석, 녹염석, 백운모 등과 함께 나타나며 부분적으로 녹니석화되어 있고 석영과 접한 곳에서 흔히 파동소광을 한다. 각섬석은 반자형으로 흑운모와 함께 산출된다.

흑운모 화강암

흑운모 화강암은 주로 석영, 사장석, K-장석, 흑운모 등으로 구성되고 백운모, 각섬석, 저어콘, 인회석, 스피넬, 갈염석, 티탄철석 등이 수반된다. 녹니석, 녹염석, 방해석 등이 이차광물로 산출된다.

석영은 대부분 타형이고 장석들 사이에 간극상으로 존재하면서 모자익상으로 산출되고 매우 심하게 파동소광을 한다. K-장석은 정장석과 미사장석으로 구성되고 정장석이 훨씬 우세하며 모두 간극상으로 산출된다. 정장석은 대체로 반자형으로서 대부분 크며 간혹 작은 사장석, 유상석, 흑운모와 석영 등을 포유한다. 이는 부분적으로 미사장석화되어 있고 심하게 파동소광을 한다. 미사장석은 흔히 정장석과 같은 양상을 보이면서 산출되며 정장석이 전이된 부분도 있고 타형으로서 정장석에 인접하여 단독으로 산출되는 것도 있다. 사장석은 자형 혹은 반자형으로 나타나고 간혹 가장자리에 알바이트가 둘러싸여 약한 누대구조를 이루며, 부분적으로 작은 자형 사장석, 흑운모 등이 내포된다. 그러므로 사장석에서 이 포유물들도 초기 형성된 결정을 나타내며 이들의 광물군은 화강섬록암이나 토날라이트 전반에 걸쳐 발견되는 광물들의 분포와 일치된다. 이 화강암도 하나의 단일 분화상을 나타내는 것으로 생각된다. 왜냐하면 이 사장석이 결정작용의 초기 광물 중의 하나를 나타내고, 이 포유물들의 변화는 대체로 화강

암이 정지될 때 액상이었음을 암시하기 때문이다. 또한 사장석은 드물게 정장석과 인접하는 가장자리에 부분적으로 혹은 작은 결정이 단독으로 석영과 연정된 유상석을 형성한다. 어떤 사장석은 파동소광을 하고 휘어져 있거나 미단층으로 쌍정면이 변위되어 있다. 흑운모는 장석 사이에서 가장 흔하게 산출되며 다색성을 띠고 가끔 백운모, 녹염석 등과 함께 나타나며 부분적으로 녹니석화되어 있다. 이는 흔히 파동소광을 하고 간혹 사장석 주위에서 휘어져 있다. 각섬석은 반자형으로 흑운모와 함께 드물게 산출된다.

미구조와 조직 변화

부석심성암체에서 미구조적 변화는 대체로 연변부로부터 내부로 향하여 일어난다. 연변부 암상 특히 각섬석 흑운모 토날라이트에서 일차적인 마그마성 엽리(magmatic foliation)가 흔하게 인지되지만 점차 내부 암상으로 갈수록 희미해져 결국 전혀 나타나지 않는다. 연변부 암상에서 풍부한 유색광물은 안쪽으로 석영과 K-장석이 증가됨으로써 감소된다. 외연부 암상인 각섬석 흑운모 토날라이트는 암회색이고 이의 외측 접촉부에 대체로 평행하게 엽리화되어 있다 (황상구 외, 1999). 반면에 중앙부 암상인 흑운모 화강암은 회백색이고 엽리의 식별이 어렵다. 이 엽리는 주상과 판상 광물 특히 각섬석, 장석과 흑운모의 우세한 방향성을 반영한다. 이 곳에서는 렌즈상의 고철질 미립상 내포체(mafic microgranular enclave)가 엽리에 평행하게 존재하여 엽리의 인식이 큰 도움은 준다. 이러한 엽리는 본 암체의 정치시에 이미 정출된 결정들이 운동방향에 따라 배열되고 또한 부분적으로 결정화된 부분이 압력에 의해 평편화작용의 결과인 것으로 해석된다. 이 엽리가 거의 수직이거나 급경사이며 대체로 본 암체의 외측 접촉부에 평행하고 안쪽으로 약해지는 사실은 이를 지지해준다.

본 암체에서 나타나는 모든 암상은 입도가 대부분 조립질이지만 더 구체적으로 살펴본다면 이 암체의 접촉부 근처에서 중립질이고 여기서 안쪽으로 갈수록 대부분 조립질로 증가되고 중북부의 흑운모 화강암에서 다시 중립질로 감소된다. K-장석은 연변부 암상인 각섬석 흑운모 토날라이트에서 드물지만 흑운모 화강섬록암에서 입도와 함량이 증가한다. 석영은 입도가 점점 증가되어 흑운모 화강암 근처의 등립상 흑운모 화강섬록암에서 최고 직경 1 cm의 결정으로 된다. K-장석은 흑운모 화강섬록암의 서부에서 점점 증가되어 거

정으로 나타나 반상 흑운모 화강섬록암으로 변화된다. 섬성암체의 보다 세립질 연변부를 형성하는 것은 마그마 냉각 (magma chilling)으로 초래되는 연변상으로 생각된다. 즉 보다 세립질 입도는 내부에서보다 마그마 연변부에서 온도가 더 빨리 떨어지는 벽암쪽과 지붕암쪽에서의 열손실로부터 초래된다. 여기서 핵생성이 풍부하게 일어나고 이들의 성장기간이 짧아서 결과적으로 이들이 빨리 고화되어 토날라이트에서 보다 세립질 입도의 중립질 연변부 암석을 형성하게 되었고 흑운모 화강암에서 지붕 근처의 중립질 상층부 암석을 형성하게 되었던 것으로 생각된다. 그리고 각섬석과 흑운모는 특징적으로 그 형태가 대개 거의 자형을 유지한다. 이러한 각섬석과 흑운모의 자형 형태는 마그마 내의 용융물로부터 결정화되었다는 것을 암시한다 (Presnall and Bateman, 1973).

조성 변화

모우드 조성

Fig. 3을 살펴보면 MS-PG과 MH-MY 횡단선을 따

라 사장석, 흑운모, 각섬석의 함량은 토날라이트 중심부에서 가장 풍부하고 각각 화강섬록암의 중심부와 화강암으로 향하여 감소한다. 그리고 남측 주변부에서 약간 감소를 보여준다. 그러므로 이들의 함량은 토날라이트로부터 화강섬록암을 지나 중북부의 화강암으로 갈수록 감소하여 안쪽으로 향하여 감소한다고 말할 수 있다. 그러나 대체적으로 감소율은 별로 크지 않으나 토날라이트의 안쪽 경계부 구간에서 가장 크다. 이 구간을 넘어서 감소율은 매우 적고 여기서 사장석과 흑운모 함량은 점차 떨어진다. 암상들 간의 접촉부를 지나면서 감소율이 비교적 적은 것은 접촉부를 생성시키는 중심부 마그마가 고화된 마그마를 관입하지 않고 두 암상간의 접이대를 그대로 유지했음을 지시하는 것으로 생각된다.

토날라이트에서 채취된 시료들은 사장석, 각섬석, 흑운모와 스피넬 등 자형 내지 반자형 결정을 함유하지만 석영과 K-장석의 타형 결정을 함유한다. 이 관계는 이 암상이 고화되기 시작할 때 자형 내지 반자형 광물이 마그마 내에서 결정으로 존재하였으나 석영과 K-장석은 간극상 용융물로부터 이후에 결정화되었음을 시사

Table 2. Major and trace element composition of the Buseok pluton in the Yeongju Batholith.

	MS-PG line													
	HY16	HY26	HY17	HY19	HY20	HY35	HY51	HY3	HY2	HY48	HY47	HY9	HY10	HY59
SiO ₂	64.37	64.60	62.80	62.02	64.74	67.52	64.95	67.21	69.23	68.57	69.81	68.64	69.34	66.93
Al ₂ O ₃	16.91	17.24	16.89	17.09	16.48	15.52	16.06	15.72	15.35	15.56	15.41	14.66	14.89	16.74
Fe ₂ O ₃ *	4.59	4.61	5.48	5.64	4.63	3.78	5.14	4.17	2.99	2.88	2.53	3.33	3.16	3.46
MgO	1.71	1.88	2.25	2.37	1.87	1.40	1.88	1.43	0.94	0.87	0.61	1.26	1.12	1.21
CaO	4.54	4.70	5.15	5.20	4.45	3.98	4.27	3.92	3.09	3.18	2.95	3.70	3.67	3.77
Na ₂ O	3.88	3.84	3.53	3.43	3.56	3.41	3.51	3.22	3.07	3.43	3.46	3.16	3.39	3.61
K ₂ O	2.35	3.12	2.30	2.50	3.04	2.91	2.69	3.03	3.96	4.06	4.21	3.19	2.24	3.20
TiO ₂	0.65	0.58	0.80	0.71	0.56	0.52	0.70	0.60	0.41	0.42	0.35	0.44	0.49	0.44
P ₂ O ₅	0.23	0.23	0.23	0.20	0.19	0.17	0.20	0.17	0.13	0.13	0.12	0.14	0.14	0.15
MnO	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.05	0.05	0.03	0.06	0.04	0.06
total	99.29	100.87	99.51	99.24	99.59	99.27	99.48	99.54	99.22	99.15	99.48	98.58	98.48	99.57
Ba	705	1128	396	812	758	890	685	748	1145	1110	1483	663	547	784
Co	9	10	11	13	10	8	10	9	7	7	6	7	6	9
Cr	8	11	18	12	9	8	12	8	7	5	4	6	7	7
Cu	10	7	13	16	8	6	15	8	7	7	5	3	6	8
Li	41	45	32	34	38	36	34	30	31	31	28	39	33	38
Nb	7	6	12	8	6	10	12	13	9	10	7	10	10	8
Ni	9	5	8	11	6	6	7	7	6	3	5	6	4	5
Sc	5	9	9	11	7	7	9	7	3	2	2	6	3	3
Sr	620	652	475	533	460	527	459	431	450	499	608	414	540	452
V	54	57	71	78	58	44	59	44	28	22	13	40	35	37
Y	7	8	13	10	7	12	15	18	8	9	5	14	10	5
Zn	82	83	94	88	81	67	91	80	60	59	58	57	66	67
Zr	176	193	201	153	157	210	191	194	194	194	193	169	193	164
Rb	86	97	101	93	108	80	100	98	130	118	116	94	101	110

Table 2. Continued.

	MH-MY line													
	HY501	HY503	HY505	HY507	HY509	HY510	HY511	HM545	HY536	HY539	HY541	HY533	HY529	HY530
SiO ₂	64.37	63.47	63.34	61.34	67.84	70.19	71.21	68.65	70.68	73.17	66.74	67.77	67.47	68.72
Al ₂ O ₃	17.19	16.50	17.02	17.73	15.84	15.19	14.65	15.53	15.30	15.09	15.11	15.58	15.67	15.57
Fe ₂ O ₃ *	4.60	5.28	4.98	5.80	3.61	3.02	2.84	3.21	3.02	2.19	3.82	3.66	4.02	3.43
MgO	1.63	2.08	1.88	2.32	1.19	0.83	0.60	1.02	0.84	0.43	1.42	1.20	1.31	1.23
CaO	4.31	4.63	4.58	5.45	3.43	2.72	2.40	3.06	2.67	1.99	3.38	3.36	3.76	3.48
Na ₂ O	3.47	3.23	3.52	3.62	3.32	3.43	3.39	3.56	3.27	3.22	3.03	3.26	3.40	3.36
K ₂ O	3.53	3.10	3.01	1.85	4.01	3.80	3.85	3.43	3.79	5.06	4.14	3.52	2.78	3.51
TiO ₂	0.55	0.56	0.60	0.83	0.42	0.35	0.26	0.34	0.32	0.18	0.46	0.44	0.45	0.41
P ₂ O ₅	0.19	0.16	0.18	0.19	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.07	0.14	0.12	0.17	0.15
MnO	0.06	0.08	0.07	0.08	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.07
total	99.90	99.09	99.18	99.21	99.84	99.69	99.35	98.97	100.06	101.44	98.30	98.97	99.11	99.93
Ba	1223	742	857	317	731	692	1011	535	661	756	887	585	679	597
Co	10	11	11	11	8	7	7	7	6	5	9	7	8	7
Cr	14	22	20	22	12	9	7	11	10	6	15	11	11	13
Cu	8	38	10	12	53	6	6	58	13	8	7	7	7	3
Li	32	41	37	33	45	33	36	43	79	69	56	74	44	39
Nb	9	8	11	14	9	13	8	11	10	7	10	10	8	9
Ni	13	12	12	14	10	9	8	9	11	9	11	9	9	10
Sc	8	10	9	10	5	2	2	5	3	2	8	5	6	6
Sr	572	492	527	524	405	378	420	363	372	322	416	380	546	456
V	54	70	63	78	39	26	17	33	26	16	47	41	45	45
Y	13	14	17	25	13	23	5	15	6	6	15	17	13	16
Zn	35	37	36	42	31	33	30	29	35	21	31	29	30	25
Zr	176	134	161	178	129	143	190	127	148	116	134	108	154	100
Rb	96	95	87	73	127	103	99	130	137	167	136	134	75	117

하는 것으로 해석된다. 흑운모 화강섬록암에서 나온 시료는 대체로 자형 내지 반자형 사장석, 각섬석과 스피넬 입자를 함유하고 반자형 흑운모 결정을 함유하며 반자형 내지 타형 석영과 K-장석 결정을 함유한다. 이는

각섬석과 스피넬이 각섬석 흑운모 토날라이트가 고화될 초기부터 결정으로 존재하였고 흑운모는 토날라이트가 고화될 중기에 결정화되기 시작했음을 시사하며 석영과 K-장석은 토날라이트가 고화될 중기나 말기에 결정

Table 3. Rare earth element concentration (ppm) of the Buseok pluton in the Yeongju batholith.

	MS-PG line										
	HY16	HY26	HY19	HY20	HY35	HY51	HY3	HY2	HY9	HY10	HY59
La	86.14	25.21	39.53	21.13	25.24	58.37	40.97	53.76	21.63	41.48	35.06
Ce	178.45	53.03	80.54	44.24	54.85	121.06	87.39	109.92	46.95	86.26	74.83
Pr	17.95	5.80	8.23	4.77	6.04	12.13	9.20	11.02	5.11	8.96	7.73
Nd	58.20	19.60	26.30	15.70	20.50	38.90	30.90	34.50	17.30	29.00	24.80
Sm	6.97	3.14	3.52	2.26	3.32	5.53	5.53	4.52	3.06	4.11	3.32
Eu	1.39	0.87	0.89	0.67	0.98	1.29	1.34	1.05	0.91	1.06	0.85
Gd	3.83	2.47	2.61	1.72	2.69	3.91	4.42	2.71	2.64	2.70	2.07
Dy	1.63	1.51	1.66	1.06	1.80	2.55	3.04	1.41	1.95	1.66	1.01
Ho	0.27	0.27	0.31	0.19	0.34	0.46	0.53	0.26	0.37	0.31	0.18
Er	0.42	0.56	0.68	0.47	0.73	0.87	1.15	0.49	0.92	0.69	0.39
Yb	0.35	0.40	0.59	0.41	0.71	0.87	1.00	0.51	0.90	0.74	0.39
Lu	0.06	0.06	0.09	0.06	0.12	0.13	0.14	0.09	0.14	0.12	0.07
REEs	355.66	112.92	164.95	92.68	117.32	246.07	185.61	220.24	101.88	177.09	150.70
(La/Lu) _n	153.53	44.94	46.08	37.65	21.86	46.55	30.27	62.65	15.98	36.97	53.15
(Eu/Eu*) _n	0.75	0.92	0.87	1.00	0.97	0.81	0.80	0.84	0.96	0.92	0.92

Table 3. Continued.

	MH-MY line												
	HY501	HY503	HY505	HY507	HY509	HY510	HY545	HY536	HY539	HY541	HY533	HY529	HY530
La	34.48	30.67	30.98	42.37	24.47	34.08	20.87	21.18	28.58	29.17	23.97	26.97	19.97
Ce	68.39	63.32	63.23	87.14	49.65	68.79	42.11	43.23	53.92	59.53	46.89	54.28	42.85
Pr	7.49	6.87	6.95	9.87	5.43	7.59	4.67	4.36	5.74	6.61	5.47	6.04	4.91
Nd	25.70	23.10	24.70	35.50	18.60	26.20	16.10	13.90	18.40	23.00	19.40	20.70	18.20
Sm	3.92	3.56	4.21	6.44	3.19	4.85	2.87	2.03	2.87	3.97	3.47	3.29	3.35
Eu	1.06	0.93	1.18	1.72	0.88	1.10	0.79	0.72	0.65	1.04	0.93	0.95	0.93
Gd	2.86	2.73	3.39	5.39	2.53	4.08	2.46	1.44	1.82	3.19	2.85	2.64	2.80
Dy	2.08	2.10	2.66	4.24	1.98	3.36	2.21	1.02	1.08	2.47	2.28	2.06	2.36
Ho	0.35	0.37	0.46	0.76	0.34	0.58	0.40	0.16	0.18	0.42	0.41	0.38	0.42
Er	1.02	1.12	1.37	2.12	1.06	1.59	1.33	0.61	0.62	1.29	1.25	1.18	1.39
Yb	0.82	0.96	1.17	1.88	0.91	1.26	1.27	0.51	0.61	1.16	1.14	1.06	1.32
Lu	0.12	0.14	0.17	0.28	0.13	0.17	0.20	0.08	0.11	0.18	0.18	0.17	0.21
REEs	148.29	135.87	140.47	197.71	109.17	153.65	95.28	89.24	114.58	132.03	108.24	119.72	98.71
(La/Lu) _n	29.86	22.68	19.16	15.66	19.53	21.08	10.90	27.91	27.06	17.00	13.96	16.67	9.92
(Eu/Eu*) _n	0.93	0.88	0.93	0.87	0.92	0.74	0.89	1.24	0.81	0.87	0.88	0.95	0.91

*Mean value between Smn and Gdn

화되기 시작했음을 지시한다. 그리고 흑운모 화강암에서 채취된 시료는 반자형 석영과 K-장석 결정을 함유한다. 이는 화강섬록암이 고화될 중기에 결정화되기 시작했음을 시사한다.

흑운모 화강섬록암에서 반자형 석영과 K-장석 결정이 나타나는 것은 핵생성 시작의 가시적인 증거가 되고, 그리고 이들의 함량이 안쪽으로 증가되는 것은 과냉각에 의한 핵생성과 결정성장의 증가율로 인해 이들의 결정화 증가율을 나타낸다. 각 암상 단위 내에서 석영과 K-장석의 함량이 대체로 일정한 것은 이들의 비율이 거의 일정한 곳에서 결정화되었음을 지시한다. 석영과 K-장석의 함량이 안쪽으로 점진적으로 증가시키는 것은 두 개의 다른 기구를 생각해 볼 수 있다 (Bateman and Chappell, 1979). 첫 번째 기구는 온도가 최저인 마그마 챔버의 연변부에서 두 광물이 결정화되기 시작하였고 암체 내부의 냉각에 따라 이 결정작용이 안쪽으로 점차 확대 진행되었다는 것이다. 두 번째 기구는 석영과 K-장석이 결정화되기 시작할 때 이 광물의 결정이 마그마에 존재하지 않았지만 이들의 비율은 새로운 광물들이 결정화될 때 증가되고 또한 마그마에 이미 존재하던 다른 결정들이 제거될 때 더욱 증가된다는 것이다. 각섬석과 흑운모는 토날라이트와 화강섬록암의 경계부에서 다소 가파르게 감소되고 이보다 안쪽에서 더 완만하게 감소된다. 이들의 가파른 감소는 각섬석과 흑운모의 결정화 비율이 두 암상 사이에서 빨리 감소되었음을 지시하고 완만한 감소는 이들의 결정화 비율이 서서히 감소되거나 거의 정지된

상태임을 시사한다.

사장석 함량은 토날라이트에서 가장 풍부하고 안쪽의 화강암으로 갈수록 대체로 점점 감소되는데, 이 점진적인 변화는 이 암체에서의 마그마 진화가 결정분별 작용에서 초래되었거나 아니면 마그마혼합작용으로부터 유래되었다는 것을 시사한다. 그러나 초기 성장한 사장석 위에 다른 광물로 과성장되거나 얼룩진 사장석 핵부가 없는 것은 현재 노출된 암석에서 대부분 결정이 마그마의 용융물로부터 결정화되었음을 지시하지 혼합작용에 의한 것이 아니라는 것이다. 결정분별작용은 먼저 정출된 결정이 잔류 용융물로부터 서로 분리되는 것을 의미하는데, 따라서 이는 비혼합작용 (unmixing) 이라고도 할 수 있으며 이때 사장석과 용융물의 두 물질의 조성은 변화한다. 그러므로 이는 성분의 변화를 일으키는 결정이 성분의 변화가 일어나는 용융물로부터 분리되는 것을 의미한다. 그래서 결정분별작용에서 초래되는 조성에 대한 변수는 결정과 용융물간의 함량 변화와 마찬가지로 결정과 용융물 내의 성분변화를 반영한다. 이러한 해석은 이 결정과 함께 각섬석과 흑운모 결정의 자형 형태로부터 내린 해석과도 일치된다.

K-장석 거정은 흑운모 화강섬록암의 서부에서 함량이 다소 풍부해지고 크기가 증가한다. 대부분의 거정은 장방형의 자형을 보이지만 불규칙하고 거칠은 결정면을 가진다. 이 거정들은 작은 사장석과 흑운모 결정을 포유하고 드물게 석영 결정도 포유한다. 포유된 결정들은 종류에 따라 중심부에서 외연부로 그 위치가 다르게 포유되는데, 이는 거정의 성장시의 포유 단계

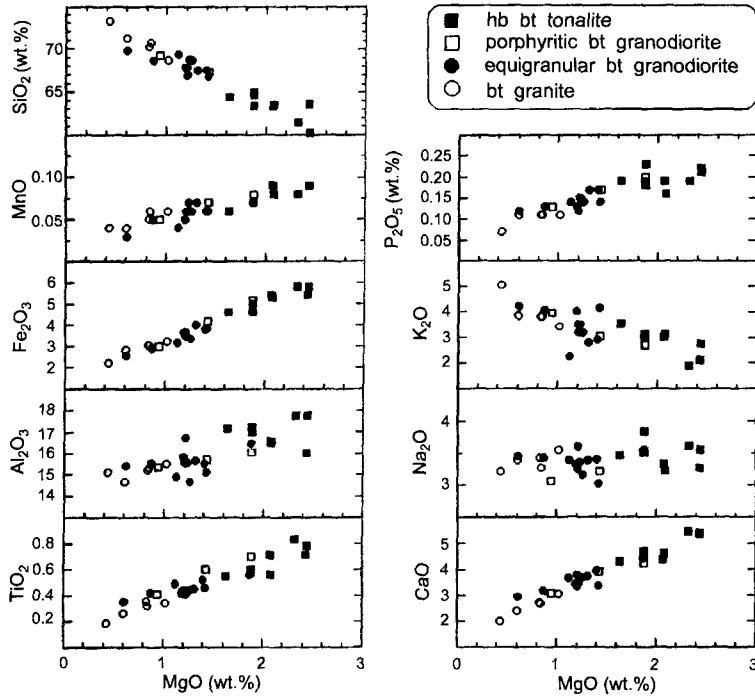


Fig. 4. Major element Harker's diagram composite.

를 나타낸다. 거정의 크기와 함량은 지역에 따라 크게 변화함에도 불구하고, 반정과 석기에서 K-장석의 전체 함량은 크게 변화되지 않고 비교적 일정한 편이다. 이 거정들은 화강암질암체 내에서 중기에 형성된 암석에서 흔하게 나타나는 경향이다 (Bateman and Chappell, 1979; Vernon, 1986). 즉 동원 마그마성 암체 내의 구성원 중에서 초기의 가장 고철질인 암석은 등립질이고, 다음 중기의 암석은 거정을 함유하여 반상이며, 후기의 가장 규장질인 암석은 등립질을 보인다. 이러한 분포양상은 본 암체 내의 화강섬록암의 정치시기와 일치된다. 한편 Swanson (1977)은 실험으로 화강섬록암질 조성의 마그마에서 K-장석의 성장속도가 핵생성의 시작온도보다 약간 더 낮은 온도에서 최고에 달한다는 것을 보여준 바 있다. 이러한 마그마 조성은 본 암체 내에서도 일치되는 양상을 나타낸다.

전암 화학 조성

두 횡단선에 따른 대표적 시료에 대한 주원소, 미량원소 희토류원소의 분석치는 Table 2, 3에 주어졌다. SiO_2 의 조성은 60.2~74.3%이며 토날라이트에서 화강섬록암을 거쳐 화강암 조성에 이른다. SiO_2 의 조

성이 증가할 때 MgO, MnO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 와 CaO 등의 조성이 대체로 각섬석 혹은모 토날라이트로부터 혹은모 화강섬록암과 혹은모 화강암으로 점차 연속적으로 감소하는 선형 배열을 보인다 (Fig. 4). 반면에 K_2O 과 Na_2O 등은 각섬석 혹은모 토날라이트로부터 혹은모 화강암으로 가면서 다소 산재되지만 대체로 연속적으로 증가되는 선형 배열을 나타낸다.

미량원소의 함량은 SiO_2 조성의 증가에 따라 V, Sc, Co, Ni, Cr, Sr, Zr, Y, Zn 등의 조성은 연속적으로 감소되는 선형 배열을 보이고, 반대로 Ba과 Rb 등의 조성은 산재되지만 대체로 증가되는 양상을 보인다 (Fig. 5). 여기서도 대부분 원소들이 연속성을 나타내는 선형 배열을 나타낸다.

이 두 허커 변화도는 부석심성암체 내에서 뚜렷한 선형 진화 경향을 보여준다. 어느 부분에서도 큰 격차를 가지는 단절된 양상을 보여주지 않는다. 이 심성암체 내의 변화 경향에서 불연속적인 단절이 나타나지 않고 연속적인 것은 네 암상 모두가 현위치에 관입된 후에 동일 마그마의 분화로부터 유래되는 분화상임을 암시한다.

그러면 이 화학자료가 모우드 자료와 같이 각 횡단선의 거리에 따른 변화를 살펴보면 S자형 파상곡선을

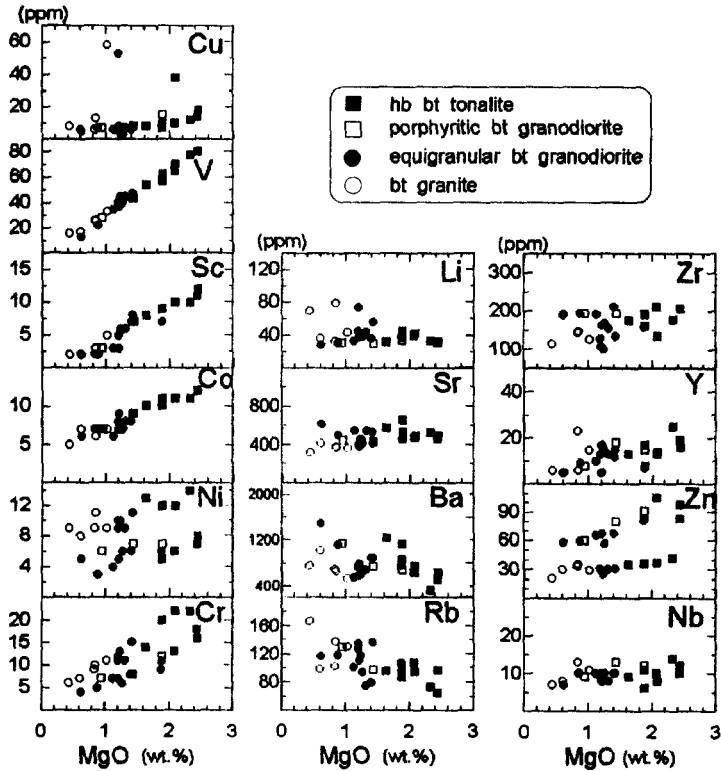


Fig. 5. Trace element Harker's diagram composite.

나타낸다 (Fig. 6~9). 주원소의 변화에서 SiO_2 , K_2O 등은 대체로 남부 (왼쪽)에서 아래로 오목하고 북부 (오른쪽)에서 위로 볼록한 파상곡선을 보여주고, 이와

반대로 MnO , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3^t , MgO , P_2O_5 등은 대체로 남부에서 위로 볼록하고 북부에서 아래로 오목한 파상곡선을 보여준다 (Fig. 6, 7). 즉 고철질 광물

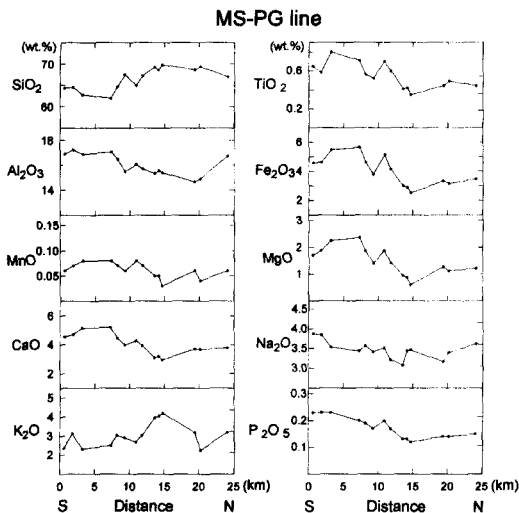


Fig. 6. Variations of major elements across the pluton along the traverse MS-PG line.

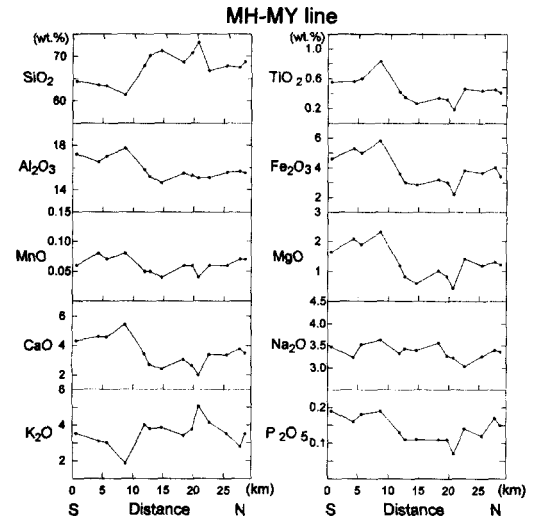


Fig. 7. Variations of major elements across the pluton along the traverse MH-MY line.

형성 원소들은 남연부에서 점차 증가되어 남중부에서 최고치를 이루며 중앙부에서 반대로 감소되어 북중부에서 최소치를 이루고 북연부에서 다시 점점 증가되는 양상을 보인다. 반면에 규장질 광물을 주로 지배하는 원소들은 이와 반대 양상을 보이거나 혹은 변화폭이 작아서 그 규칙성이 인지되지 않는다. 이러한 오목-볼록 혹은 볼록-오목의 파상곡선은 MS-PG 횡단선보다 MH-MY 횡단선에서 더 현저한 양상을 나타낸다. 왜냐하면 MH-MY 횡단선은 북부에서 흑운모 화강암 구역을 통과하기 때문에 더 뚜렷하고 MS-PG 횡단선은 화강암 구역을 통과하지 않고 매우 넓은 흑운모 화강섬록암 구역을 통과하기 때문이다. 이러한 변화는 SiO₂, K₂O 등이 대개 석영과 K-장석의 지배를 주로 받고 MnO, CaO, TiO₂, Fe₂O₃⁺, MgO, P₂O₅ 등이 대체로 고철질 광물의 지배를 받는 데서 연유된다.

이 화학적 변화는 대부분 토날라이트에서 화강섬록암으로 전이되거나 화강섬록암에서 화강암으로 전이되면서 일어나며, 이곳에서 화학적 구배가 다소 커진다. 현저한 화학적 변화는 고철질 광물의 형성으로 제거된 원소들이 북중부로 가면서 감소되는 것이다. 그러나 MS-PG 횡단선을 따라 채취된 시료는 이들의 화학성이 뚜렷한 변화 없이 보다 산만하게 흩어진 불규칙한

변화를 보여준다. 왜냐하면 화강섬록암 구역을 통과하는 구간이 길 뿐만 아니라 반상 암상 구역을 통과하기 때문에 규칙성이 결여되기 때문이다.

미량원소들의 거동 패턴은 주요 규산염 광물의 거동에 따라 변화하게 된다. Cr, Ni, Co, Sc, V, Cu, Zn 등의 원소는 남부에서 북부로 가면서 대체로 볼록-오목 파상곡선을 형성한다 (Fig. 8, 9). 이들 전이금속 미량원소는 TiO₂, Fe₂O₃⁺, MgO, MnO, CaO 등의 주원소 거동에 따라게 된다. 따라서 이 미량원소들은 모두 고철질 광물에서 추출되며 이들 광물이 정출되어 제거됨으로써 화학적 변화를 일으키게 된다. 반대로 Rb, Ba 등의 미량원소는 대개 K₂O의 거동에 좌우된다. 따라서 이 미량원소는 주로 K-장석의 거동 즉 증감에 따라 남부에서 아래로 오목하고 북부에서 위로 볼록한 곡선을 형성한다. Sr은 장석의 함량에 따라 비교적 복잡한 거동을 보여준다. 이 원소는 사장석 함량이 떨어질 때 함께 감소하다가 북부에서 K-장석 함량이 풍부하게 나타날 때 이 광물에 통합되어 거의 일정한 거동을 유지하게 된다.

희토류원소의 함량 (Table 3)을 콘드라이트로 표준화한 REE 패턴은 Fig. 10과 같다. 이 패턴은 이 암

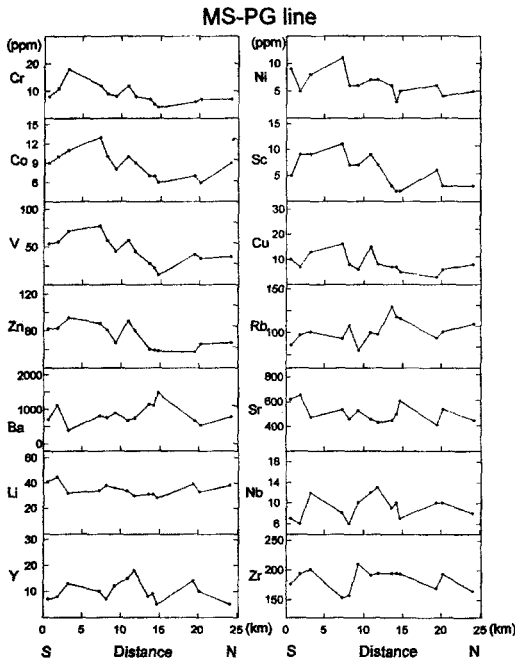


Fig. 8. Variations of trace elements across the pluton along the traverse MS-PG line.

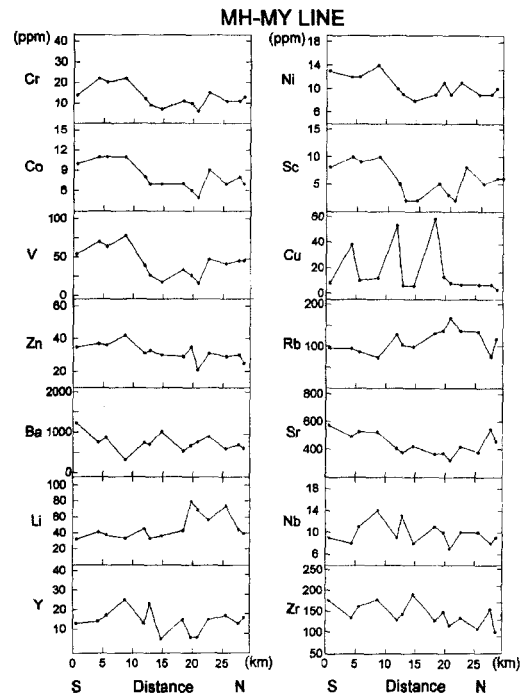


Fig. 9. Variations of trace elements across the pluton along the traverse MH-MY line.

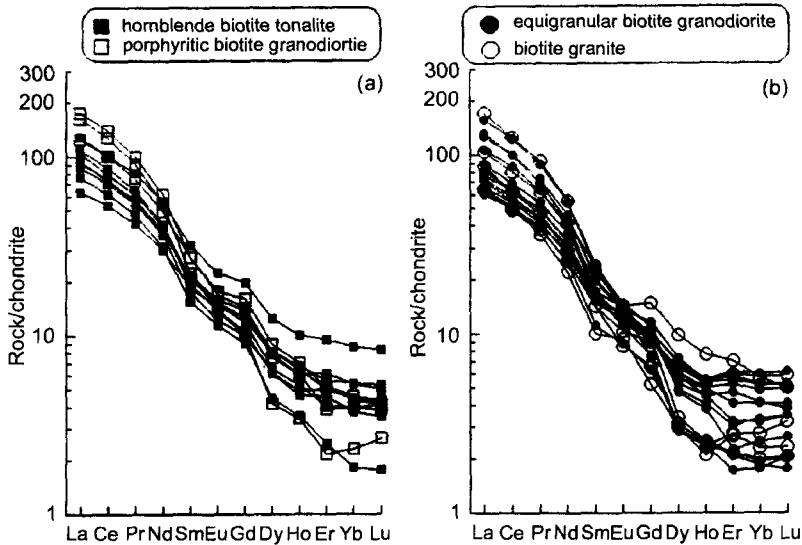


Fig. 10. Variations of chondrite-normalized REE patterns for samples that are taken across the pluton along traverse MS-PG and MH-MY line.

체 내에서 여러 암상에 따라 큰 차이가 없다. 대부분 $(La/Lu)_n$ 가 9.92 이상으로써 LREE가 심하게 부화되고 HREE가 결핍되는 LREE/HREE 비의 강한 분별양상을 보이며, LREE가 급경사를 나타내고 HREE가 거의 수평에 가까우며, $(Eu/Eu)_n$ 가 0.75 이상으로써 매우 작은 Eu의 네거티브 이상치를 나타내거나 거의 없다. 이러한 패턴은 대륙 주변 환경에서 나왔다는 것을 입증해 주는 것이다 (Henderson, 1984). 매우 작은 Eu 네거티브 이상치는 마그마로부터 사장석의 이동이 강하지 않았음을 의미한다. 그리고 이들의 거동을 살펴보면 각 암상의 REE 패턴이 전체적으로 평행한 배치를 보이면서 토날라이트에서 화강암으로 갈수록 높아진다. 즉 화강섬록암에서의 REE 패턴이 토날라이트에서의 것들과 겹치면서 전체적으로 보다 위에 놓이고 화강암에서보다 아래에 놓인다. 각 암상에서 REE 패턴이 평행하게 분포하는 것은 동원마그마에서 유래되었다는 것을 지지하고 분포 차이는 조성구배를 의미한다. 그러므로 전술한 바와 같이, 이 조성구배는 아마도 관입된 후 고화되기 전에 마그마의 분별결정작용에 의해 조성이 분대된 것을 시사한다. 이때 분별결정작용에 기여한 광물은 각섬석, 사장석과 흑운모의 복합적인 분별작용인 것으로 생각된다. 흔히 Eu 네거티브 이상치는 진화가 진행될수록 커지는 것이 일반적이지만 여기서 크기의 변화가 거의 없는 것은 각섬석의 분별작용이 Eu 이상치를 거의 변화시키지 않았고 HREE

를 고갈시킨 것 (Frey *et al.*, 1978; Henderson, 1984)으로 생각된다. 그러나 HY16 시료는 LREE/HREE 비가 매우 크고 $(La/Lu)_n=153.53$, HY536 시료는 Eu 이상치가 포지티브 이상을 나타내고 $(Eu/Eu)_n=1.24$, 절대 REE 함량도 본 암체에서 가장 낮는데, 이러한 패턴은 선캠브리아기 고변성 편마암에서 흔하다는 것 (Henderson, 1984)에 관련 있는 것으로 생각된다. 이는 위의 분별작용에 국부적으로 추가되는 동화작용에 의한 지각혼염을 지시하는 것으로 판단할 수 있다.

토 의

부석심성암체는 남쪽 연변부에서 중북부의 안쪽으로의 암상 변화는 대체로 마그마체 내부에서 분별결정작용으로 설명된다. 결정작용이 일어나는 동안 더 많은 유체성 마그마는 주기적으로 위로 이동하여 벽암과 지붕암을 외측부와 상층부로 밀어붙임으로써 인접부 고화된 암석을 잠식하면서 혹은 마그마체 내부의 면적을 확장시켜 나간다. 먼저 토날라이트가 고화되기 시작할 때, 마그마는 사장석, 각섬석, 흑운모와 스피인의 결정이 풍부해지지만 석영과 K-장석 결정은 풍부하지 않다. 토날라이트에서 석영과 K-장석 결정이 자형이나 반지형으로 나타나지 않고 선형 광물의 간극에 타형으로만 나타나는 것은 이 광물들이 토날라이트가 대체로 고화

Table 4. Sr isotopic data for the typical samples of the rock units in the Buseok pluton.

Sample	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sr (ppm)	Rb (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i^*$	Lithologic zone
HY16	0.716220	620	86	0.4016	0.7151	hb bt tn (in contact)
HY19	0.717684	533	93	0.5052	0.7163	hb bt tn
HY2	0.718235	450	130	0.8365	0.7160	por bt gd
HY51	0.717910	459	100	0.6309	0.7162	por bt gd
HY11	0.717343	447	136	0.8810	0.7150	equ bt gd (in contact)
HY13	0.718005	404	87	0.6236	0.7163	equ bt gd
HY31	0.718217	475	139	0.8474	0.7159	equ bt gd
HY47	0.718093	608	116	0.5525	0.7166	equ bt gd

*Initial ratios are calculated from an assuming intrusion age of 190 Ma.

되기까지 결정화되지 않고 마지막에 결정화되었다는 것을 지시한다. 사장석은 그 함량이 토날라이트에서 매우 풍부하지만 안쪽의 화강암에서 감소한다. 각섬석과 흑운모는 토날라이트에서 풍부하며, 반면에 안쪽으로 석영과 K-장석이 증가됨에 따라 감소한다. 마찬가지로 고철질 광물에 포함된 미량원소도 안쪽의 화강암쪽으로 감소되는 큰 함량 범위를 보여준다. 그리고 각섬석과 흑운모 등의 함수광물이 안전하게 산출되는 것은 아마도 마그마의 용융물에 용존된 H_2O 함량이 충분했던 것을 암시한다.

사장석의 누대와 각섬석과 흑운모의 자형 모양은 이 결정의 대부분이 마그마의 용융물에서 정출되었음을 암시한다. 왜냐하면 결정 내에 고철질 광물이 풍부하지 못하고 사장석 내에 얼룩진 핵부를 가질 수 있는 마그마 혼합작용이나 동화작용의 흔적이 나타나지 않기 때문이다. 그리고 이러한 광물의 함량과 자형 모양이 안쪽의 화강암으로 갈수록 부족한 것은 대부분 결정질 물질이 고화되기 전에 이들이 마그마로부터 분리되었음을 암시한다. 이러한 점은 역시 온도가 떨어짐에 따라 사장석과 고철질 광물의 결정이 토날라이트가 고화되기 전에 분리되고 침전되었다는 것을 암시한다.

본 암체 내에서 각 암상의 조성은 이들이 고화될 때 마그마의 조성과의 관계를 결정지어준다. 그래서 이러한 관계를 설명하기 위해서는 앞에서 제기되었던 분별 결정작용이 매우 중요하다 (Min and Kim, 1996). 분별결정작용 동안에 일어나는 결정의 하방낙하와 주변누적은 본 암체의 조성변화를 해석하는데 있어 매우 중요한 기구라 할 수 있다. 하지만 이들 중에서 어떤 한 기구가 다른 한 기구보다 더 중요한지, 아니면 어떤 한 기구가 무시될 정도로 다른 한 기구가 우세하게 작동했는지를 가늠하기는 어렵다. 그러나 본 암체에서 주변누적보다도 결정의 하방낙하와 용융물의 상방이동이 지배적인 것으로 보인다. 왜냐하면 모암과의 접촉

부 근처에서 초기 고철질 광물의 누적현상을 거의 볼 수 없으며, 하물며 국부적으로 초기 광물이 접촉부로 갈수록 적어지는 역현상을 볼 수 있기 때문이다. 결정의 낙하가 결정분별작용의 유일한 기구라면 각 암상은 이들이 고화될 때 마그마와 같은 조성을 가질 것이다. 그래서 주변부 암상인 토날라이트의 조성은 이 암상이 고화되기 시작할 때 마그마 조성을 대표하게 될 것이며, 연속적으로 내측부의 암상은 이 암상이 고화될 때 변화된 마그마의 조성을 나타낼 것이다. 그러나 만일 선택적인 결정의 주변누적이 일어났다면, 동시에 결정의 낙하가 있건 없건 간에 어느 암상도 고화시 마그마의 진짜 대표가 되지 못한다. 만일 선택적인 주변누적이 일어났다면, 결정의 하방낙하나 용융물과 휘발분의 상방이동이 없이도 이 암상의 평균조성은 이 암상이 고화되기 시작할 때 전체 마그마 조성을 나타낼 것이다.

이 부석심성암체는 K-Ar 흑운모의 연대가 162~172 Ma로 측정된 바 있다 (황상구 외, 1999). 흑운모 연대는 연령 보존온도가 약 270°C 내외로 낮기 때문에 관입시기를 나타낸다고 볼 수 없다. 그래서 여기서 본 암체의 관입시기는 흑운모 연대보다 더 오래된 190 Ma를 가정하였다. 그리고 Sr 동위원소 자료는 Table 4에 나타나 있으며, 이 자료에 대한 등시선 그림은 Fig. 11과 같다. 이 그림에서 보듯이 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비의 변화폭이 작고 다소 산재되어 있지만 두 시료 HY11과 HY16을 제외하고 큰 의미 없지만 가동시선을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 동화작용에 대한 것을 알아보기 위해서 가정된 관입시기를 이용하여 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기치도 계산하였으며, 이 계산된 초기치와 1/Sr과의 상관도를 Fig. 12에 나타냈다. 이 그림에서 보듯이 HY11과 HY16을 제외하면 다소 산재되어 있어도 불규칙한 수평적 분포를 보인다. 따라서 0.7159~0.7166 사이에서 불규칙한 수평적 분포를 보이는 것은 아마도 분별 결정작용에 따른 Sr 함량변화라는 것을 배제할 수 없

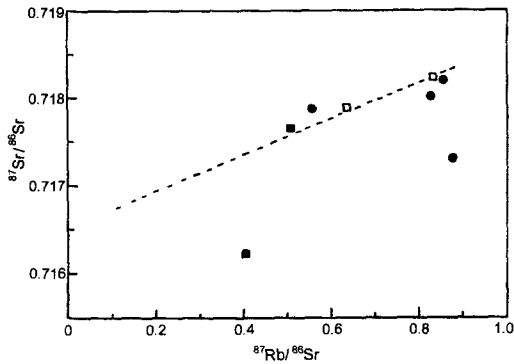


Fig. 11. Measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diagram for lithofacies of the pluton, showing pseudo-isochron except for HY11 and HY16. Symbols are the same as in Fig. 2.

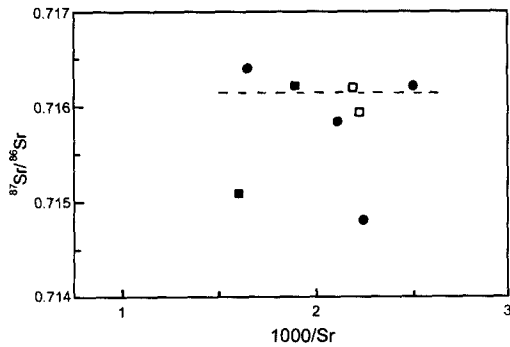


Fig. 12. Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $1/\text{Sr}$ diagram for lithofacies of the pluton, showing no change in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio with increasing $1/\text{Sr}$ except for HY11 and HY16. Symbols are the same as in Fig. 2.

다. 그리고 다소 산재 분포하는 것은 일반적으로 분별 결정작용에 추가되는 지각물질의 동화작용에 의한 혼염물로 설명될 수 있다 (Jwa, 1991; 권성택 외, 1992; 정창식과 장호완, 1996). 이와 같이 대규모 화강암질 마그마 속에 추가적인 혼염물은 분별결정작용이 일어나는 마그마계의 주원소 조성을 크게 변화시키지 못할 것이다 (Pitcher, 1993). 그리고 전체적으로 높은 초기치는 이 마그마의 기원이 근원적으로 지각의 부분용융이거나 지각물질이 많이 기여했다는 것을 암시한다. 광역적인 기존 연구에 의하면 본 심성암체는 조산운동에 의해 형성된 I형의 칼크알카리 마그마에 그 근원을 두고 있는 것으로 나타났다 (Lee and Lee, 1991; Lee et al., 1998; 황상구 외, 1999). 그러므로 본 심성암체에서 각 암상 간에 초기치 차이가 매우 작고 조성 차이가 큰 것은 본 칼크알카리 마그마가 주로 분별결정작용에 의한 분화에 의해 지배되었다는 것을 지시한다. 그

리고 특히 HY11과 HY16은 두 그림에서 이탈되는 것은 아마도 정치된 후에 챔버벽 가까이에서 지각물질과의 동화작용으로 국지적으로 큰 지각혼염이 있었다는 것을 암시한다. 왜냐하면 이 두 시료는 변성암류와의 접촉부 근처에서 나왔기 때문이다. 그러므로 이 두 시료와 REE 패턴에서 이탈을 보이는 시료를 제외하면 대부분의 조성분대는 관입된 후에 지각혼염의 차이에 의한 것이 아니고 대부분 분별결정작용에 의해 지배되는 것으로 생각해야 한다.

우리가 조사한 자료는 본질적으로 수평적인 변화이지 고도에 관련시킬수 있는 변화의 증거는 없지만 분별결정작용에 의해서 잘 설명되고 있다. 즉 본 암체는 적어도 초기에 결정화된 무거운 고철질 광물은 아래로 가라앉았을 것이다. 중력에 의한 결정의 낙하는 보다 규장질이 풍부한 용융물을 이동시키는 원인이 될 것이다. 약간의 사장석과 고철질 광물의 낙하된 결정은 남은 용융물과 휘발분을 결정이 축적되는 곳으로부터 변위시킨다. 그리고 적지만 주변의 마그마 온도에서 형성된 결정들은 역시 어느 정도 끈적끈적할 만큼 점성을 가져서 마그마챔버의 벽에 달라붙을 수도 있을 것이다 (Karner, 1968). 그러므로 용융물과 휘발분은 위쪽으로 그리고 안쪽으로 이동시킬 것이다 (Karner, 1968; Bateman and Chappell, 1979). 부석심성암체와 같이 연속적 변화를 갖는 동원마그마성 암체의 마그마 진화는 아마도 원래 수직적 성분누대를 형성했을 것이다. 즉 초기에 형성된 무거운 고철질 광물과 얼마의 사장석은 아마도 아래로 가라앉고 용융상과 휘발성 물질은 위로 떠오름으로써 조성분리를 일으켰을 것이다. 만일 결정의 하방낙하와 주변누적이 함께 일어난다면 모우드 변화는 심도에 따른 상하변화와 수평거리에 따른 측방변화로 복합되어 나타날 것이다. 따라서 각섬석과 흑운모에 관한 등입경도는 하방낙하와 주변누적의 효과 때문에 위로 벌어진 포물선 형태를 가질 것이다.

그러나 부석심성암체에서는 대체로 위와 같은 형태를 가지면서 더 복잡한 형태를 나타낸다. 즉 조성 변화가 토날라이트에서 화강암으로 변하는 형태를 가지지만, 더 자세히 보면 토날라이트에서 위로 블록하면 화강암에서 아래로 오목한 형태를 가지고 반대로 토날라이트에서 오목하면 화강암에서 블록한 형태를 가진다. 이러한 사실은 위에서 토의한 마그마의 진화 이후에 또다른 복잡한 정치기구에 의해 설명되어야만 한다.

그리고 K-Ar 혹은도 연대는 그 범위가 넓고 토날라이트에서 가장 오래이고 다음으로 화강암이며 마지막으로 화강섬록암으로 가면서 젊어지는데, 이는 분별작

용에 따른 마그마 분화에 의해 조성이 다른 암상이 나타났지만 각 암상마다 고화시기가 달랐음을 의미한다. 구체적으로 보면 K-Ar 흑운모 연대는 각섬석 흑운모 토날라이트가 171.7 ± 3.2 Ma로서 가장 오래이고 그다음에 흑운모 화강암이 167.1 ± 3.1 Ma, 반상 흑운모 화강섬록암이 166.7 ± 3.1 Ma이며 등립상 흑운모 화강섬록암이 162.3 ± 3.1 Ma로서 가장 젊다 (황상구 외, 1999). 이에 따르면 본 암체에서의 토날라이트 부분은 분별작용에 의해 가장 먼저 분리되므로써 고화작용도 가장 먼저 시작되었으며, 이어서 화강암 부분은 가장 나중에 남은 분화 산물이지만 지붕에 가까운 까닭으로 어느 부분보다 상대적으로 빨리 고화되었다. 이때 화강섬록암 부분은 K-장석이 빠른 성장속도로 인해서 국지적으로 반정이 많은 반상 화강섬록암을 형성하였으며, 그리고 나머지 화강섬록암 대부분은 서서히 결정화되면서 가장 나중에 고화되었다. 즉 각 암상은 그 분화순서와 함께 냉각속도에 따라 고화시기가 달랐음을 의미한다. 이러한 결정작용과 고화작용은 마그마가 현재 노출된 위치에 정치하는데 매우 긴 시간이 걸렸음을 반영한다.

결 론

영주저반에서 부석섬성암체는 4개 암상으로 구분되는 동원마그마성 심성암체이다. 이 암체는 전체적으로 남쪽에 각섬석 흑운모 토날라이트가 놓이고 이의 북쪽에 반상 흑운모 화강섬록암과 등립상 흑운모 화강섬록암이 놓이며, 이 암상이 중북부에서 흑운모 화강암을 둘러싼다. 결과적으로 이들은 중북부를 중심으로 하는 동심원상 분포를 하며, 남부에서 고온 광물군의 고철질 암석이 우세하고 안쪽으로 갈수록 보다 저온 광물군의 규장질 암석이 우세한 조성누대를 나타낸다.

이 암체의 모우드와 화학 자료는 남부에서 중북부로 조성변화를 보여준다. 이 조성변화는 인접하는 암상 사이 뿐만 아니라 암상 내에서도 점이적으로 변화한다. 각 석석과 흑운모 등의 고철질 광물은 남부의 토날라이트에서 가장 풍부하고 중북부로 가면서 감소한다. 석영과 K-장석 등의 규장질 광물은 이와 반대로 변화한다. 화학적으로도 SiO_2 와 K_2O 는 대체로 남부에서 아래로 오목하고 중북부에서 위로 볼록한 파상곡선을 보여주고, 이와 반대로 MnO , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3^+ , MgO , P_2O_5 는 대체로 남부에서 위로 볼록하고 중북부에서 아래로 오목한 파상곡선을 보여준다. 즉 고철질 광물을 지배하는 원소들은 남연부로부터 점차 증가되어 남중부에

서 최고치를 이루고 중앙부에서 반대로 감소되어 북중부에서 최소치를 이루고 북연부에서 다시 약간 증가되는 양상을 보이며, 반면에 규장질 광물을 주로 지배하는 원소들은 이와 반대 양상이다.

이 조성누대는 분별결정작용에 의해 초래되었으며, 이 작용은 초기에 초기 정출광물이 아래로 내려앉고 상대적으로 용융물과 휘발분이 위로 이동하는 기구에 의해 지배되었고 후기에 부수적으로 연변부에서 초기 결정질 물질이 연변누적되므로써 용융물이 점차 안쪽으로 이동하는 기구가 뒤따랐다. 이 분별결정작용 동안에 부수적으로 지각물질의 동화작용에 의한 지각혼염이 수반되었지만 조성분대를 지배할 만큼 크지는 않았다. 이 지각혼염은 특히 접촉부 가까이에서 현저하다.

사 사

본 논문의 심사를 통하여 건설적인 비평을 해주신 전남대학교 김용준 교수님과 강원대학교 민경원 교수님에게 감사드린다. 컴퓨터로 여러 도면을 제작하는데 도움을 준 이보현과 조남식 대학원생에게 사의를 표한다.

참고문헌

- 권선택, 진명식, 주성환 (1992) 체천 화강암의 기원 : 스트론튬 동위원소 자료의 재고. 암석학회지, 1권, p.132-137
- 김규상 (1988) 영주-안동간의 소위 "원남층군"에 관한 변성암석학적 연구. 고려대학교 이학석사 학위논문, 42p.
- 김기영, 김형식, 오창환, 반찬수, 강지훈, 류영복 (1996) 장군봉 일대 선편브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성작용 : 북부 소백산육괴의 중앙부 지역의 지각진화 및 환경지질. 암석학회지, 5권, p.168-187.
- 김봉균, 이하영, 김수진, 정지곤 (1988) 안동도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 김옥준, 홍만섭, 김기태 (1963) 한국지질도 삼천리도폭. 국립지질조사소, 36p.
- 손치무, 김수진 (1963) 한국지질도 춘양도폭. 국립지질조사소, 28p.
- 신병우, 최승일 (1968) 한국지질도 상금곡도폭. 국립지질조사소, 15p.
- 안건상, 정현희, 이현구 (1993) 장군광산 주변의 변성이질암에서의 누진변성반응 계열. 광산지질, 26권, p.473-478.
- 양관석, 조문섭 (1995) 춘양 화강암체 주변 두음리층에 산출되는 십자석-흑운모-홍주석-석류석 광물조합: 대수학적 분석. 암석학회지, 4권, p.49-60.
- 윤석규, 차문성, 김정진, 이종덕 (1988) 예천도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 12p.
- 이대성 (1966) 한국지질도 옥동도폭. 국립지질조사소, 30p.
- 이대성, 이하영 (1963) 한국지질도 예안도폭. 국립지질조사소, 22p.

- 이민성, 박봉순, 김정환 (1989) 영주도폭 지질보고서. 한국 동력자원연구소, 20p.
- 이중혁, 이상현, 장태우 (1989) 풍기도폭 지질보고서. 한국 동력자원연구소, 14p.
- 이희천 (1986) 경북 안동군 일대에 분포하는 변성암류의 변성작용에 관한 연구. 서울대학교 석사 학위논문, 41p.
- 정창식, 장호완 (1996) 중부 육천 변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 조구조적 연관성 연구 (I): 보은지역 화강암류의 암석화학과 동위원소 지구화학. 지질학회지, 32권, p.91-116.
- 황상구 (1995) 영주 장수지역 세립질 복운모 화강암에 대한 용융암석학적 연구 (I): 암질과 구조. 안동대학교 논문집, 17권, p.49-67.
- 황상구, 김상욱, 장태우, 김정민, 이상근 (1999) 영주저반의 관입상과 화성과정. 자원환경지질, 29권, p.669-688.
- Bateman, P.C. and Chappell, B.W. (1979) Crystallization, fractionation, and solidification of the Tuolumne Intrusive Series, Yosemite National Park, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 90, p.465-487.
- Chang, T.W. (1990) Relative timing of shear zone formation and granite emplacement in the Yechon shear zone, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 23, p.453-463.
- Chang, T.W. (1991) On the microstructures of mylonitic rocks with special reference to Yechon shear zone, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p.177-190.
- Frey, F.A., Chappell, B.W. and Roy, S.D. (1978) Fractionation of rare-earth elements in the Tuolumne Intrusive Series, Sierra Nevada batholith, California. *Geology*, v. 6, p.239-242.
- Henderson, P. (1984) Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 510p.
- 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*, v. 27, p.13-23.
- Karner, F.R. (1968) Compositional variation in the Tunk Lake Granite Pluton, southeastern Maine. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 79, p.193-222.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, J.-H., Lee, M.J. and Moute, J. (1998) Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. *Geoscience Journal*, v. 2, p.1-14.
- 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*, v. 27, p.626-641.
- Min, K.-W. and Kim, S.-B. (1996) Geochemistry and petrogenesis of the granitic rocks in the vicinity of the Mt. Sorak. *J. Petrol. Soc. Korea*, v. 5, p.35-51.
- Pitcher, W.S. (1993) The nature and origin of granite. Chapman and Hall, London, 321p.
- Presnall, D.C. and Bateman, P.C. (1973) Fusion relationships in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ and generation of granitic magmas in the Sierra Nevada batholith. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 84, p.3181-3202.
- Swanson, S.E. (1977) Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. *Am. Mineralogist*, v. 62, p.966-978.
- Vernon, R.H. (1986) K-feldspar megacrysts in granites - phenocrysts, not porphyroblasts. *Earth Sci. Rev.*, v. 23, p.1-63.