

청산 일대에 분포하는 화강암류의 광물조성과 주성분원소 지구화학

사공희 · 좌용주

연세대학교 이과대학 지구시스템과학과, '경상대학교 자연과학대학 지구환경과학과

요 약 : 청산지역의 화강암류는 기재적인 특징으로부터 백록 화강섬록암, 청산 반상 화강암 및 청산 복운모 화강암으로 분류할 수 있다. 백록 화강섬록암의 각섬석은 회각섬석군에 속하고, 중심부의 Mg-보통각섬석에서 주변부의 양기석질 보통각섬석으로의 조성적 변화를 보인다. 청산 지역 화강암류의 흑운모는 금운모와 애나이트의 중간 조성을 나타낸다. 복운모 화강암에서 산출되는 백운모는 그 산출상태와 조성으로부터 마그마 정출의 1차적인 백운모로 판단된다. 주성분 산화물의 변화 경향에서 각각의 화강암류는 체계적인 변화를 나타낸다. 백록 화강섬록암은 청산 반상 화강암 및 복운모 화강암과는 주성분의 변화 경향에서 매우 뚜렷한 차이를 보인다. 반상 화강암과 복운모 화강암의 경우 일부 성분에서는 연속성이 관찰되지만, 몇몇 원소에서는 뚜렷한 차이를 보인다. 따라서 청산 지역의 세 화강암류는 각각 이질적 성인의 다른 조성의 마그마로부터 형성된 것으로 판단된다. 화강암류의 전암 화학조성으로부터 청산 지역 화강암류는 칼크-알칼리질임을 알 수 있다. 한편, 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암은 그 전암 조성이 I-타입과 메타알루미나질임에 비해, 청산 복운모 화강암은 I-/S-타입 양쪽과 과알루미나질을 나타낸다. 불투명광물의 함량과 전암 대지율값으로부터 청산지역 화강암류는 모두 티탄철석계열에 속해 비교적 환원적인 환경에서 관입·고결되었음을 알 수 있다. 또한 세 화강암류는 활동성 대륙연부에서 일어난 화성활동의 결과로 형성되었음이 추정된다. 청산 반상 화강암에 나타나는 알칼리장석의 거정은 그 결정의 크기, 형태, 배열 및 포유물의 분포 양상 등으로부터 마그마 기원임을 추정할 수 있다. 반상 화강암의 조직적 특징은 2단계 정출작용으로 설명된다. 즉, 알칼리장석 거정의 크기와 형태는 과냉각 정도가 적은 상태에서 결정의 느린 핵형성과 빠른 성장속도로 말미암아 형성된 반면, 석기는 과냉각 정도가 큰 상태에서 핵형성 밀도와 속도가 증가하여 형성된 것으로 판단된다.

핵심어 : 백록 화강섬록암, 청산 반상 화강암, 청산 복운모 화강암, 이질적 성인, 알칼리장석 거정, 과냉각 정도, 2단계 정출작용

서 론

청산 일대에 분포하는 화강암류는 중부 옥천대의 화성활동을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 청산 화강암이라 알려진 반상 화강암은 일찌기 그 Rb-Sr 전암연대가 258 Ma로 보고되어 (주승환과 김성재, 1985) 국내에서도 드문 고생대 화강암으로 인지된 것을 비롯하여, 최근에는 암체 내부에 발달된 암쇄구조로 말미암아 이 지역의 지체구조 발달사를 규명하는데 중요한 대상이 되고 있다 (Kwon *et al.*, 1997). 한편, 반상 화강암의 새로운 방사성 연대가 216 ± 21 Ma로 발표되어 이 암체가 트라이아스기에 지각물질 기원의 마그마로부터 형성되었음이 밝혀졌다(정창식과 장호완, 1996). 백록 화강암으로 알려진 화강섬록암은 그 관입시기가 최근까지 알려져 있지 않았으나, 방사성 연대가 연이어서 발표되면서 그 연대가 고생대 중기 내지 말기

로 밝혀졌다(김용준 외, 1994; 좌용주 외, 1995; 정창식과 장호완, 1996). 백록 화강암 역시 그 암체 내부에 청산 화강암에서 관찰되는 것과 동일한 암쇄구조가 나타나, 연구의 대상이 되고 있다(Kwon *et al.*, 1997). 청산 화강암을 관입하고 있는 복운모 화강암은 아직 그 연구사례가 없으나, 이 지역에서 일어난 일련의 화성활동을 이해하는데 중요한 대상이 된다.

한편, 청산 일대의 화강암류에 대한 지구화학적 고찰이 일부 이루어지기는 했으나 (정창식과 장호완, 1996; Cheong, 1997), 광물학적, 암석기재적 및 지구화학적 고찰에 이르는 전반적인 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 논문에서는 청산 일대 화강암류의 광물 조성, 기재적 특징을 비롯하여 주성분원소의 지구화학적 특징을 보고함으로써 화강암류에 대한 보다 구체적인 자료를 제시하고자 한다.

지질개요

중부 옥천대의 청산 일대에는 고생대 초기의 조선 누층군과 옥천층군의 퇴적암을 비롯하여 고생대 후기의 평안누층군 및 백악기의 영동층군의 퇴적암류가 분포하고 있으며, 고생대~중생대의 화강암류와 시대미상의 각섬암이 관입암류로 분포한다(Fig. 1).

청산 일대에 분포하는 화강암류는 그 산상에 따라 세 종류의 화강암체-백록 화강섬록암, 청산 반상 화강암, 청산 복운모 화강암으로 구분된다. 연구 지역 북동부에 분포하는 백록 화강섬록암은 중립 내지 조립질이며 등립상 조직을 보인다. 야외에서 국부적으로 관찰할 수 있는 이 화강섬록암과 평안누층군의 퇴적암 사이의 지질 경계는 일견 관입 관계로 보이지만, 퇴적암에는 관입에 의한 열변성의 흔적을 찾아 볼 수 없어, 조구조운동에 의해 형성된 고체 관입 경계의 가능성을 배제할 수는 없다. 한편, 화강섬록암체 북쪽에서는 전단운동에 의해 암쇄암화되어 있

다. 이 화강섬록암은 연구 지역 북단에서 백악기 화강반암의 관입을 받았다.

청산 반상 화강암은 연구 지역의 중부와 남부에 걸쳐 분포하고 있으며, 알칼리 장석의 거정을 가지는 뚜렷한 거정질 반상조직을 보인다. 반상 화강암은 백록 화강섬록암과는 단층 접촉을 하고 있으며, 양자 사이의 관입 순서는 파악되지 않는다. 이 화강암과 평안누층군의 퇴적암 사이의 경계가 나타나는 장연리 일대에는 화강암과 퇴적암 양쪽 모두 암쇄암화되어 있어 그 전후 관계를 파악할 수 없다. 암쇄암화된 부분에서 관찰할 수 있는 전단운동의 방향은 암체의 상반이 북동쪽으로 움직인 우수향 이동의 센스를 보인다. 이 방향은 백록 화강섬록암에서 관찰되는 암쇄 방향과 유사하다.

청산 복운모 화강암은 반상 화강암체의 중부에서 동부에 걸쳐 관입하고 있으며, 그 관입 경계는 매우 뚜렷하다. 비교적 세립질의 관입암인 복운모 화강암의 내부에는 반상 화강암의 포획암이 관찰된다.

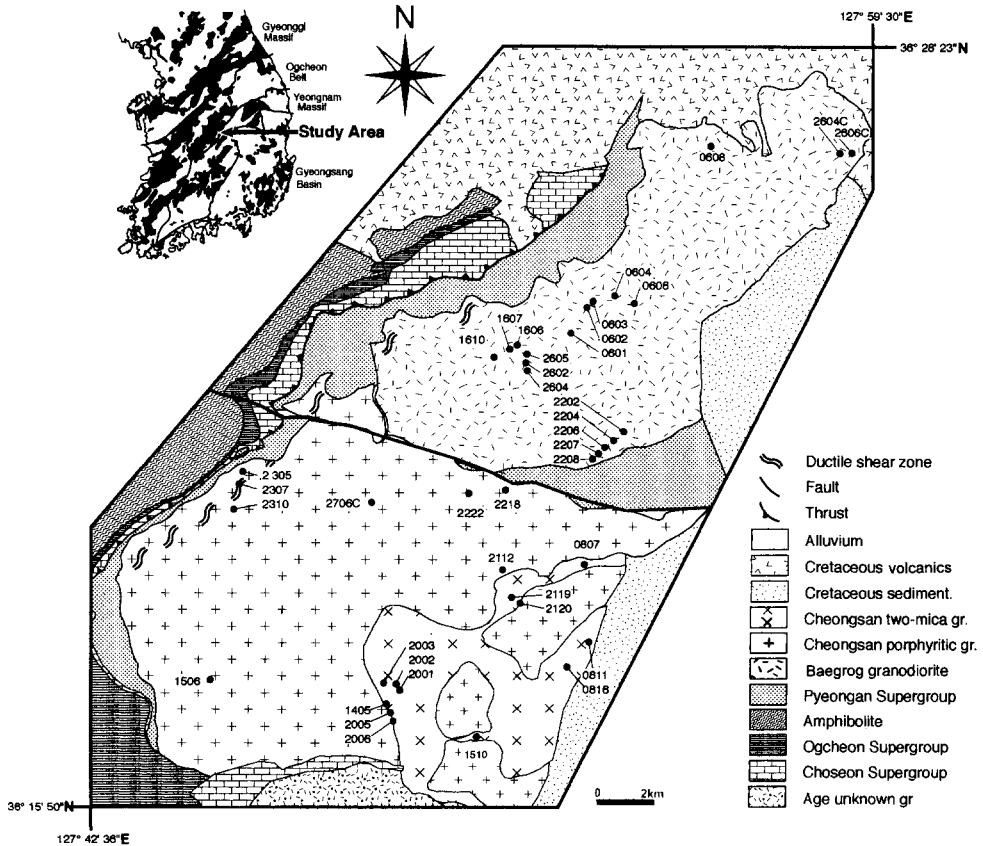


Fig. 1. Geologic map of the Cheongsan area and sample locations.

복운모 화강암의 동쪽에는 백악기 영동층군의 동정리층이 부정합으로 피복되어 있으며, 퇴적암내의 압편에는 복운모 화강암이 나타난다.

화강암류의 기재적 특징

청산 일대 화강암류의 시료위치는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 각 화강암류를 구성하고 있는 광물의 모드조성은 Table 2와 같다. 다만 반상 화강암의 경우 알칼리 장석의 거정의 크기로 말미암아 Table 2에는 거정을 제외한 석기 부분의 모드조성을 나타내었고, 거정의 크기와 함량은 Table 3에 나타내었다.

모드조성에 따른 화강암류의 분류로부터 청산 일대 화강암류는 대체로 화강섬록암과 화강암의 영역에 도시된다(Fig. 2). 백록 화강섬록암의 경우, 대체로 화강섬록암과 화강암 양쪽을 나타내지만 암체의 외부에서 내부로 향하여 화강섬록암에서 화강암의 모드로 전이되는 경향이 관찰된다. 반상 화강암의 석기 부분의 모드는 화강섬록암을 나타낸다. 그러나 알칼리장석 거정의 함량을 약 30 체적 %로 하여 평균율에 의해 계산하면 반상 화강암 전체의 조성은 화강암 영역에 속하게 된다. 복운모 화강암은 대부분이 화강암에 속한다.

백록 화강섬록암

백록 화강섬록암은 중립 내지 조립질이며 등립질을 나타낸다. 입자 크기는 암체의 외곽부로부터 내부로 향해 중립질에서 조립질로 전이되며, 암상은 내부를 향해 펠식해 진다. 암체의 곳곳에서 매퓌한 포획체가 관찰된다. 화강섬록암은 주로 사장석, 석영, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성되며, 인회석, 저어콘, 갈염석, 스펀, 티탄철석, 자철석 및 적철석 등의 부수광물을 수반하고, 녹니석, 녹염석, 견운모 등이 2차 광물로 나타난다. 각섬석의 양은 외곽부에서 중심부를 향해 감소하는 경향이 있다(Table 2).

사장석은 주로 자형 내지 반자형의 결정으로 입자 크기는 0.1 mm에서 1.5 cm 까지 다양하며, 알바이트 쌍정이다. 알칼리장석은 주로 타형의 미사장석과 퍼사이트로 나타나지만, 드물게 반자형의 정장석도 나타난다. 알칼리장석은 그 내부에 사장석, 흑운모 및 각섬석을 함유하는 포이킬리틱조직을 보이기도 한다. 석영은 주로 타형으로 파동소광을 보이지만, 암체의 내부에서는 단순소광을 하는

비교적 큰 입자로 나타난다.

각섬석은 암록색 자형의 결정으로 주상 혹은 능면체상의 입자로 나타나며 뚜렷한 라멜라쌍정을 보인다. 강한 다색성을 보이고, 일부 결정의 주변부에서는 녹염석이 발달하기도 한다. 흑운모는 녹갈색 내지 갈색을 띠며, 자형 내지 반자형의 결정으로 나타난다. 그 내부에는 인회석과 저어콘을 포함하며, 부분적으로 녹니석화되어 있다.

자형의 인회석과 저어콘은 대부분 각섬석과 흑운모내의 포획물로 나타나며, 특히 저어콘은 방사상의 할로를 보인다. 갈염석은 자형의 적갈색 결정으로 나타나며, 뚜렷한 누대구조를 보인다. 스펀은 자형 내지 반자형의 능면체 결정으로 갈색을 띠며, 각섬석에 수반되기도 한다. 주로 각섬석과 흑운모에 포함되어 나타나는 불투명광물은 대개 티탄철석이나 자철석 및 적철석도 드물게 나타난다. 그러나 암체의 내부에서는 자철석과 적철석은 발견되지 않는다.

청산 반상 화강암

청산 반상 화강암은 자형의 거정질 알칼리장석이 특징적인 암석으로 다른 화강암류와는 쉽게 식별된다. 알칼리장석 거정의 크기와 함량은 Table 3에 나타내었다. 거정은 그 크기가 10 cm에 이르는 것도 있다. 때때로 거정 주위로 흑운모가 둘러 싸고 있으며, 거정들은 대개 일정한 방향으로 배열되기도 한다. 석기는 중립 내지 조립질이며 주로 석영, 사장석, 알칼리장석 및 흑운모로 구성된다. 부수광물로는 인회석, 저어콘, 스펀, 갈염석, 티탄철석 등이 나타나며, 2차광물로는 녹니석, 녹염석, 백운모, 견운모 및 황철석 등이 나타난다.

알칼리장석은 거정 뿐만 아니라 석기로도 나타난다. 입자의 크기는 석기의 작은 결정으로부터 거정의 큰 결정에 이르기까지 다양하다. 거정은 주로 자형의 퍼사이트질 미사장석이다. 거정내에 포함된 자형의 사장석과 흑운모 결정들은 주로 알칼리장석의 성장면을 따라 분포하고 있다. 석기에 분포하는 알칼리장석은 타형의 미사장석으로 나타난다.

사장석은 자형 내지 반자형의 결정으로, 석기를 구성하는 주된 광물이며, 또한 반정내의 포획물로도 나타난다. 누대구조를 뚜렷이 보이고, 알바이트 쌍정을 보인다. 입자는 0.2 mm에서 5 mm에 이르는 다양한 크기로 나타난다. 사장석의 주변부에서는 석영과 연정을 이루어 미르메카이트조직을 보이기도 한다. 석영은 타형이며 파동소광을 보인다.

Table 1. Sample locations (sheet name, longitude/latitude, location)

Sample	sheet name (1:50,000)	longitude/latitude	location
Baegrog granodiorite			
1606	Gwangi	127°52'04"/36°23'31"	Chungbug/Boeun/Maro/Hadun
1607	Gwangi	127°51'45"/36°23'27"	Chungbug/Boeun/Maro/Hadun
1610	Gwangi	127°51'17"/36°23'15"	Chungbug/Boeun/Maro/Hadun
2602	Gwangi	127°52'06"/36°23'06"	Chungbug/Boeun/Maro/Hanjung
2604	Gwangi	127°52'13"/36°22'57"	Chungbug/Boeun/Maro/Hanjung
2605	Gwangi	127°51'58"/36°23'11"	Chungbug/Boeun/Maro/Hanun
2604C	Gwangi	127°58'38"/36°26'31"	Gyeongbug/Sangju/Hwaseo/Sanggog
2606C	Gwangi	127°58'56"/36°26'31"	Gyeongbug/Sangju/Hwaseo/Sanggog
2202	Gwangi	127°53'27"/36°21'54"	Gyeongbug/Sangju/Moseo/Deugsu
2204	Gwangi	127°53'14"/36°21'31"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Myeongchi
2206	Gwangi	127°52'56"/36°21'24"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Myeongchi
2207	Gwangi	127°52'47"/36°21'11"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Myeongchi
2208	Gwangi	127°52'29"/36°20'58"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Myeongchi
0601	Gwangi	127°52'43"/36°23'49"	Gyeongbug/Sangju/Hwanam/Jungnul
0602	Gwangi	127°53'26"/36°24'02"	Gyeongbug/Sangju/Hwanam/Jungnul
0603	Gwangi	127°53'32"/36°24'06"	Gyeongbug/Sangju/Hwanam/Jungnul
0604	Gwangi	127°53'54"/36°24'17"	Gyeongbug/Sangju/Hwanam/Jungnul
0606	Gwangi	127°54'14"/36°24'18"	Gyeongbug/Sangju/Hwanam/Jungnul
0608	Gwangi	127°55'52"/36°26'41"	Gyeongbug/Sangju/Hwaseo/Sangyong
Cheongsan Porphyritic granite			
1506	Gwangi	127°45'26"/36°23'09"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Gungchon
2706	Gwangi	127°48'50"/36°21'00"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Baeun
2112	Gwangi	127°51'26"/36°19'49"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Uiji
2218	Gwangi	127°51'28"/36°21'13"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Sambang
2222	Gwangi	127°50'46"/36°21'06"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Sambang
2305	Gwangi	127°46'02"/36°21'39"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Jangyeon
2307	Gwangi	127°45'59"/36°21'32"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Jangyeon
2310	Gwangi	127°45'56"/36°21'08"	Chungbug/Ogcheon/Cheongseong/Jangyeon
Cheongsan two mica granite			
1405	Gwangi	127°49'01"/36°18'49"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
1510	Gwangi	127°50'39"/36°16'08"	Chungbug/Yeongdong/Yongsan/Deogjin
2001	Gwangi	127°49'27"/36°19'03"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
2002	Gwangi	127°49'28"/36°19'06"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
2003	Gwangi	127°49'21"/36°19'10"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
2005	Gwangi	127°49'03"/36°18'44"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
2006	Gwangi	127°49'04"/36°18'39"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Hyomog
2119	Gwangi	127°51'44"/36°19'09"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Uiji
2120	Gwangi	127°51'46"/36°19'06"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Uiji
0807	Gwangi	127°53'08"/36°19'57"	Gyeongbug/Sangju/Moseo/Deugsu
0811	Gwangi	127°52'44"/36°18'06"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Jeongsan
0816	Gwangi	127°52'14"/36°17'32"	Chungbug/Ogcheon/Cheongsan/Jeongsan

Table 2. Modal compositions of the granitic rocks in the Cheongsan area

Sample	Af	Pl	Qz	Hb	Bt	Zir	Apt	Chl	Cc	Mus	Ep	All	Sph	Myr	Opq
Baegrog granodiorite															
outer part															
2603C	19.2	32.2	19.8	13.1	12.3		0.3	1.0		0.3	0.3		0.2		0.7
2604C	10.4	43.8	15.5	14.3	1.7		0.4	11.0			1.7		0.1	0.4	0.2
2605C	15.5	40.5	15.2	15.6	6.2		0.3	4.4		0.3	0.9		0.4		0.1
2606C	7.1	47.1	16.3	16.0	7.6		0.6	2.7			0.6	0.4		0.4	0.4
2708	17.9	42.7	23.4	11.8	1.8			1.7			0.1		0.2		
2202	19.6	44.7	9.7	19.7	0.8	0.1	0.1	4.3			0.7				
2204	4.2	48.4	12.4	18.0	13.2			1.3			1.4	0.2			0.2
2206	5.6	52.0	14.9	20.6	5.3		0.2	0.7			0.3			0.3	
2207	20.9	42.5	13.5	12.0	0.9			7.2		0.2	0.9			1.3	
2208	12.0	45.9	18.7	11.0	8.4						0.8		0.1	2.6	
0608	6.1	48.8	19.5	14.0	10.8		0.2				0.1				0.1
inner part															
0601	17.3	32.9	30.9	5.0	11.5		0.2	0.5			0.7			0.3	0.2
0602	20.9	41.6	29.7	2.2	3.9			0.3			0.8			0.3	
0603	22.6	35.6	28.1	3.4	8.1			0.1	0.1	0.4	0.1			1.2	
0604	10.3	53.4	29.0	1.6	4.6			0.3			0.3	0.2	0.2		
0605	25.4	32.6	31.5	3.4	6.6										
0606	21.3	33.2	34.0	4.0	6.6						0.5				
1606	22.8	33.9	21.1	6.0	13.7	0.2	0.4	0.2			1.0		0.2	0.4	
1607	15.1	37.9	33.2	3.8	7.7	0.2	0.2	0.8			0.7	0.1			
1608	12.9	35.5	36.2	3.4	9.9	0.1	0.3			0.2	0.7	0.2	0.1		
1610	22.9	31.7	28.6	2.2	9.6	0.1	0.6	0.5	0.2	0.3	2.6	0.2			
2605	35.6	22.8	19.5	0.5	19.1		0.2	0.2		0.4	1.2	0.1	0.2		
Cheongsan porphyritic granite															
1404	9.9	37.9	35.6		10.7		0.1	0.3		1.2	0.1			3.7	0.1
1506	12.7	34.4	26.7		16.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	6.1	0.2
3016	4.4	46.4	25.2		19.3	1.0	1.1	1.2			0.4	0.1	0.5	0.2	
3110	7.1	48.9	17.9		18.9	0.4	0.4				0.3	0.5		4.6	
2106	10.4	29.3	38.3		16.3	0.1	0.1	1.3				0.1			
2112	7.6	51.9	27.2		9.6	0.1	0.2	0.2				0.1		3.1	
2217	9.3	38.2	38.1		9.7	0.1	0.2	0.5	0.1	1.7				1.9	
2218	10.5	38.8	36.0		9.3			3.2		0.5				1.4	0.8
2219	15.9	29.4	34.7		9.7	0.1	0.1	1.9		1.3				6.4	0.2
2220	36.0	30.3	19.8		4.1		0.1	2.9		3.8	0.2	0.2	0.1	2.4	
2221	15.0	32.2	44.6					6.2		0.3				1.4	0.1
2222	17.0	25.2	41.7		9.5	0.1	0.1								
2305	6.8	37.3	35.3		9.9	0.2	0.3	0.9		1.6		0.2		7.0	0.1
2306	11.0	27.8	36.7		15.0	0.2	0.1	0.4				0.3			
2307	6.9	41.9	26.9		15.0	0.1	0.1	0.8		0.2	1.1	0.2		6.2	0.1
2310	8.6	43.9	25.5		15.0		0.3			0.6	0.4		0.1	5.1	0.1
Cheongsan two mica granite															
2001	17.8	31.4	37.0		4.0			0.1		5.2				4.2	
2006	14.4	38.8	33.8		3.4	0.1		3.4		4.4				1.8	

Table 2. Continued

Sample	Af	Pl	Qz	Hb	Bt	Zir	Apt	Chl	Cc	Mus	Ep	All	Sph	Myr	Opq
1510	17.8	30.1	37.6		9.1		0.1	0.2		2.6				2.1	0.1
2813	33.8	19.5	32.2		6.6					4.6				2.9	
2119	26.3	27.6	30.9		8.1			0.2		2.9	0.1			4.0	
2120	20.8	31.2	35.5		7.8			0.1		2.2				2.0	
0811	28.5	25.5	34.9		3.5			0.5		4.8				2.3	

Abbreviations: Af, alkali feldspar; Pl, plagioclase; Qz, quartz; Hb, hornblende; Bt, biotite; Zir, zircon; Apt, apatite; Chl, chlorite; Cc, calcite; Mus, muscovite; Ep, epidote; All, allanite; Sph, sphene; Myr, myrmekite; Opq, opaque minerals.

Table 3. Size and content of alkali feldspar megacrysts from the Cheongsan porphyritic granite

Sample	Contents of Phenocryst (%)	Average Length (cm)	Average Length of upper 30%(cm)	Maximum Length (cm)
1405	41.67	2.53	4.32	8.3
1506	24.91	3.45	5.28	8.7
3015	29.25	2.05	3.33	4.6
3016	32.14	2.87	4.81	6.8
3105	26.87	2.22	3.36	4.4
3108	24.66	2.26	4.15	8.8
3109	27.44	3.05	5.32	9.0
3110	31.88	2.39	3.93	7.3
2102	29.39	2.84	4.97	8.3
2103	29.22	2.40	4.20	7.3
2105	21.60	2.74	4.20	6.8
2106	24.83	2.18	3.28	4.3
2107	17.01	2.24	3.70	6.0
2109	25.17	3.11	5.00	6.2
2111	26.87	2.52	3.92	9.1
2112	32.82	2.58	4.56	8.4
2215	26.87	2.28	3.59	6.3
2216	25.68	2.30	3.58	6.7
2217	27.00	2.82	4.41	9.9
2220	25.00	2.57	3.85	7.0
2221	19.69	2.34	3.29	4.3
2222	29.08	2.13	2.99	3.8
2301	36.22	2.77	4.45	7.0
2302	33.50	3.15	5.49	9.8
2305	31.46	2.61	4.28	6.2
2306	29.25	2.45	3.98	7.3
2307	30.10	3.14	5.23	8.9
2308	29.76	2.93	5.00	8.1
2310	25.85	2.72	4.76	7.3
0801	39.63	2.68	4.65	7.1
0901	29.59	2.28	3.77	6.7
2801	22.65	2.61	4.23	7.4
2802	29.62	2.32	3.74	6.4

Table 3. Continued

Sample	Contents of Phenocryst (%)	Average Length (cm)	Average Length of upper 30%(cm)	Maximum Length (cm)
2803	27.96	2.44	3.88	5.7
Average	28.37	2.59	4.22	7.1

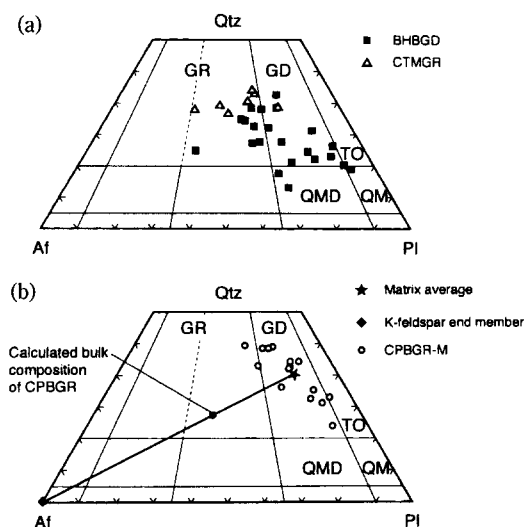


Fig. 2. Triangular diagrams of modal quartz-alkali feldspar-plagioclase (IUGS subcommission, 1977). a) Baegrok granodiorite and Cheongsan two mica granite. b) Cheongsan porphyritic granite. Matrices of the porphyritic granite show granodioritic compositions. The averaged bulk composition of the porphyritic granite calculated by lever rule between the average matrix composition (70 vol.%) and alkali feldspar end member (30 vol.%) indicates granite composition. Symbols: ■, Baegrok granodiorite; △, Cheongsan two mica granite; ○, matrix of Cheongsan porphyritic granite; ★, average matrix composition of the porphyritic granite; ◆, K-feldspar end member; ●, average bulk composition of the porphyritic granite. Abbreviations: GR, granite; GD, granodiorite; TO, tonalite; QMD, quartz monzodiorite; QM, quartz monzonite.

흑운모는 자형 내지 반자형으로 나타나며 그 내부에 침상의 인회석과 저어콘을 포함하고 있다. 흑운모는 때때로 작은 결정들이 모여 집합상을 이루기도 한다. 스펀은 갈색의 능면체 결정으로 나타나고, 때때로 사장석, 석영 등과 연정을 이루기도 한다. 갈염석은 자형의 결정으로 흑운모의 주변에서 관찰된다. 인회석과 저어콘은 흑운모내에 자형의 포획물로 나타난다. 저어콘은 방사상의 halo를 보인다. 불투명광물은 주로 티탄철석과 황철석이다. 백록 화강섬록암에 비해 인회석과 저어콘의 함량은 높게 나타나지만, 불투명광물의 함량은 낮다.

청산 흑운모 화강암

청산 흑운모 화강암은 세립 내지 중립질이며 등립질의 화강암이다. 주로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 인회석 및 저어콘으로 구성되며, 2차 광물로는 녹니석과 견운모가 관찰된다.

사장석은 반자형 내지 자형으로 입자는 대개 0.6~0.8 mm의 크기를 가진다. 대개 알바이트쌍정과 칼스바드쌍정의 복합적인 쌍정을 나타내며, 결정의 주변부에서는 석영과 연정을 이루어 미르메카이트조직을 보인다. 알칼리장석은 주로 반자형 내지 타형의 미사장석이지만, 때때로 퍼사이트가 나타나기도 한다. 결정의 내부에는 사장석, 흑운모, 백운모, 석영 등을 포함하여 포이킬리틱조직을 잘 나타낸다. 석영은 타형으로 나타나고 파동소광을 보인다.

흑운모는 반자형 내지 자형의 결정으로 나타나며, 암갈색 혹은 담갈색을 띠고 강한 다색성을 보인다. 흑운모의 내부에는 소량의 인회석, 저어콘, 불투명광물 등이 관찰되지만, 그 함량은 매우 낮다. 백운

모는 자형의 결정으로, 종종 흑운모와 연정을 이루며 산출되는데, 그 산출양상으로부터 1차적인 백운모일 것으로 추정된다. 이 백운모는 사장석 내부에서 나타나는 2차 광물인 견운모와는 뚜렷이 구별된다.

이상에서 살펴본 청산 일대 화강암류의 기재적 특징을 비교·정리하여 Table 4에 나타내었다.

산출광물의 화학조성

화강암류의 조암광물에 대한 전자현미분석을 일본 이바라기대학의 EPMA (JEOL 733)를 사용하여 실시하였고, 그 결과는 Table 5~9에 나타내었다.

백록 화강섬록암에서 산출되는 각섬석에 대해서는 결정의 중심부, 내부 및 주변부 각각의 조성을 구하였다. 각섬석의 구조식은 산소 23에 대한 규정값에 의하여, 13개 양이온에서 Ca, Na, K를 제외한 인자로부터 계산되었다(Table 5). 한편 Fe³⁺는 전체 양이온의 전하가 46이 되도록 한 Robinson 외. (1982)의 방법으로부터 계산되었다. 백록 화강섬록암에 나타나는 각섬석은 대체로 회각섬석군(calcic amphibole group)의 Mg-보통 각섬석(magnesian hornblende) 내지 양기석질 보통각섬석(actinolitic hornblende)을 나타낸다(Fig. 3a). 한편 각 결정의 중심부에서 주변부로 갈수록 SiO₂ 성분은 증가하지만, TiO₂와 Al₂O₃의 성분은 감소한다(Table 5). 이러한 성분의 변화는 중심부에서 주변부로 갈수록 Mg-보통 각섬석에서 양기석질 보통각섬석으로 바뀜을 지시한다(Fig. 3a). 양이온으로 계산된 Si의 값이 0.725~0.730 이상이면 각섬석은 마그마에서 정출된 것이라기 보다는 고상선 이하에서의 재결정작용으로 형성된

Table 4. Descriptive characteristics of the granitic rocks in the Cheongsan area

	Baengnok granodiorite	Cheongsan porphyritic granite	Cheongsan two mica granite
grain size	· center:coarse · margin:medium	· matrix:coarse · megacryst:euhedral	· medium to fine
enclave	· mafic enclaves	· mafic enclaves	· porphyritic granite xenoliths
texture	· poikilitic	· porphyritic, poikilitic, myrmekitic	· poikilitic, myrmekitic
alkali feldspar	· perthitic microcline	· matrix:microcline · megacryst:perthitic microcline	· perthitic microcline
plagioclase	· zoning	· zoning	· zoning
amphibole	· euhedral	· none	· none
biotite	· weakly deformed	· aggregated, euhedral, not deformed	· weakly deformed
muscovite	· secondary	· secondary	· primary, euhedral
accessory minerals	· sphene, allanite	· sphene, allanite	

Table 5. Representative chemical compositions of amphibole from the Baegrog granodiorite

	1606			1607			2206			2604C		
	core	inside	rim	core	inside	rim	core	inside	rim	core	inside	rim
SiO ₂	47.07	47.12	49.05	48.48	49.48	50.24	46.83	47.04	49.98	45.21	45.01	47.93
TiO ₂	1.80	1.60	1.04	0.83	0.84	0.71	1.36	1.21	0.82	1.16	1.37	1.03
Al ₂ O ₃	7.48	6.96	5.23	6.07	5.17	5.05	7.26	6.95	4.16	7.87	7.79	6.75
FeO*	15.08	15.36	14.51	14.63	14.51	14.54	15.37	14.92	15.25	16.19	15.77	15.55
MnO	0.27	0.25	0.42	0.42	0.37	0.35	0.34	0.43	0.66	0.45	0.36	0.42
MgO	11.57	11.80	13.16	12.40	12.81	12.79	12.74	12.67	12.72	11.88	12.37	12.62
CaO	11.84	11.94	11.66	11.75	11.57	11.68	11.21	11.32	11.89	11.22	11.47	11.06
Na ₂ O	1.26	1.25	1.16	0.88	0.86	0.73	1.31	1.24	0.65	1.49	1.38	1.31
K ₂ O	0.74	0.70	0.46	0.60	0.55	0.51	0.68	0.53	0.41	0.82	0.96	0.79
Total	97.11	96.98	96.69	96.06	96.16	96.60	97.10	96.31	96.54	96.29	96.48	97.46
O = 23												
Si	7.008	7.027	7.238	7.217	7.331	7.440	6.876	6.960	7.403	6.757	6.714	7.015
Al(IV)	0.992	0.973	0.762	0.783	0.669	0.560	1.124	1.040	0.597	1.243	1.286	0.985
Sum_T	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(VI)	0.319	0.250	0.147	0.281	0.233	0.321	0.131	0.171	0.128	0.142	0.083	0.178
Fe3+	0.000	0.054	0.279	0.200	0.225	0.086	0.66	0.555	0.249	0.659	0.648	0.593
Ti	0.202	0.179	0.115	0.093	0.094	0.079	0.150	0.135	0.091	0.130	0.154	0.113
Mg	2.568	2.623	2.895	2.752	2.829	2.824	2.789	2.795	2.809	2.647	2.751	2.753
Fe2+	1.878	1.862	1.511	1.621	1.573	1.668	1.223	1.291	1.640	1.365	1.320	1.310
Mn	0.034	0.032	0.052	0.053	0.046	0.022	0.042	0.054	0.083	0.057	0.045	0.052
Sum_C	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.889	1.908	1.843	1.874	1.837	1.853	1.764	1.794	1.887	1.797	1.833	1.734
Na	0.111	0.092	0.157	0.126	0.163	0.078	0.236	0.206	0.113	0.203	0.167	0.266
Sum_B	2.000	2.000	2.000	5.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.252	0.269	0.175	0.128	0.084	0.131	0.137	0.150	0.074	0.228	0.232	0.106
K	0.141	0.133	0.087	0.114	0.104	0.096	0.124	0.100	0.077	0.156	0.183	0.147
Sum_A	0.393	0.403	0.262	0.242	0.188	0.228	0.264	0.250	0.151	0.385	0.415	0.253
Mg/Mg+Fe	0.58	0.58	0.66	0.63	0.64	0.63	0.70	0.68	0.63	0.66	0.68	0.68
Al(tot)	1.31	1.22	0.91	1.06	0.90	0.88	1.26	1.21	0.73	1.39	1.37	1.16

FeO* : total iron as FeO

것으로 판단된다(Leake, 1978; Chivas, 1981). 따라서 백록암체의 각섬석은 그 주변부가 후마그마 작용으로 말미암아 재결정 되었을 가능성이 매우 높다.

화강암류의 흑운모는 대체로 금운모(phlogopite)와 애나이트(annite)의 중간 조성을 나타낸다(Table 6, Fig. 3b). 한편, 백록 화강섬록암에 산출되는 흑운모는 다른 화강암류의 흑운모보다 Fe/(Fe+Mg) 비가 낮다. 청산 복운모 화강암의 흑운모는 다른 두 화강

암류의 흑운모보다 약간 높은 Al^{IV}의 값을 가진다.

청산 복운모 화강암의 백운모는 그 조성에서 볼 때 1차적인 백운모를 지시한다(Table 7). Miller 외. (1981)과 Monier 외.(1984)에 의하면, 마그마로부터 정출된 1차적인 백운모의 경우, 후마그마작용 및 열수작용에 의한 2차적인 백운모 보다 TiO₂의 양이 많음이 보고되었다. 한편, 청산 반상 화강암에 나타나는 2차적인 백운모는 TiO₂의 양에서 청

Table 6. Representative chemical compositions of biotite of the granitic rocks in the Cheongsan area

	Baegrog granodiorite				Cheongsan porphyritic granite				Cheongsan two mica granite			
	1606	1607	2206	2604C	1506	2112	2218	2307	1510*	2119	2120	0816
SiO ₂	37.56	37.37	36.18	35.54	35.80	36.09	34.75	34.99	34.60	34.99	34.12	34.48
TiO ₂	1.20	1.25	3.01	3.85	2.85	2.13	2.43	1.68	2.51	2.05	1.44	2.40
Al ₂ O ₃	15.43	16.98	15.58	14.55	17.11	16.72	17.13	16.86	17.85	17.89	18.15	18.02
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO*	17.63	17.67	18.18	18.46	20.08	21.94	23.09	21.71	21.94	22.73	23.47	24.63
MnO	0.09	0.19	0.28	0.06	0.20	0.12	0.25	0.17	0.33	0.30	0.28	0.21
MgO	11.95	11.06	11.11	11.29	8.00	7.78	7.12	8.18	7.56	6.82	7.60	5.76
CaO	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00
Na ₂ O	0.05	0.13	0.06	0.04	0.12	0.19	0.08	0.13	0.07	0.08	0.12	0.08
K ₂ O	10.29	9.92	10.03	10.03	9.63	9.52	9.67	9.13	9.50	9.07	8.54	8.84
Total	94.20	94.57	94.45	93.87	93.79	94.49	94.52	92.87	94.36	93.93	93.80	94.42
24(O, OH, F)												
Si	6.022	5.947	5.822	5.780	5.828	5.876	5.716	5.799	5.661	5.749	5.632	5.684
Al(IV)	1.978	2.053	2.178	2.220	2.172	2.124	2.284	2.201	2.339	2.251	2.368	2.316
Al(VI)	0.935	1.129	0.775	0.567	1.108	1.082	1.034	1.089	1.101	1.210	1.160	1.183
Ti	0.145	0.150	0.364	0.471	0.349	0.261	0.301	0.209	0.309	0.253	0.179	0.298
Cr	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.364	2.352	2.447	2.511	2.734	2.988	3.176	3.009	3.002	3.123	3.240	3.396
Mn	0.012	0.026	0.038	0.008	0.028	0.017	0.035	0.024	0.046	0.042	0.039	0.029
Mg	2.856	2.624	2.665	2.737	1.941	1.888	1.746	2.021	1.844	1.670	1.870	1.416
Ca	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.014	0.000
Na	0.016	0.040	0.019	0.013	0.038	0.060	0.026	0.042	0.022	0.025	0.038	0.026
K	2.105	2.014	2.059	2.081	2.000	1.978	2.029	1.930	1.893	1.901	1.798	1.859
Mg/Mg+Fe	0.55	0.53	0.52	0.52	0.42	0.39	0.35	0.40	0.38	0.35	0.37	0.29

FeO* : total iron as FeO

산 백운모 화강암의 1차적인 백운모와 조성에서 차이가 있음을 알 수 있다(Fig. 3c).

화강암류의 사장석 조성은 대체로 올리고클레이스의 조성을 나타낸다(Table 8). 한편, 사장석 결정의 중심부로부터 주변부로 갈수록 An 함량이 미약하나 감소하는 경향이 확인된다.

청산 반상 화강암에서 산출되는 알칼리장석의 거정에 대해서 결정의 주변부로부터 중심에 이르는 9점에 대한 분석으로부터 그 조성의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다(Fig. 4, Table 9). 비록 거정 내부의 성장면과 그 주위에 사장석, 흑운모 등의 포획물이 관찰되지만, 성장면을 경계로 조성의 변화는 나타나지 않는다. 한편, 마그마로부터의 결정작용 동안 알칼리장석 거정에 대한 Ba의 조성적 누대

구조가 보고되었는데(Long and Luth, 1986), 청산 반상 화강암의 경우 결정의 주변부에서 중심부에 이르기까지 Ba 함량은 정량적으로 구할 수 없을 정도의 낮은 값을 보였다.

주성분원소 지구화학

화강암류의 주성분원소에 대한 화학분석은 한국 해양연구소의 X선 형광분석기기(XRF)를 이용하여 실시하였다. 분석과정과 분석오차 등에 대한 상세한 기술은 이종익(1994)에서 찾을 수 있다. 한편, Fe²⁺/Fe³⁺ 비는 습식분석에 의해 구해졌다. 분석의 결과와 계산된 CIPW 노름값은 Table 10에 나타내었다.

Table 7. Representative chemical compositions of muscovite from the Cheongsan two mica granite and porphyritic granite

	two mica granite				porphyritic granite	
	1510	2119	2120	0816	2112	2218
SiO ₂	45.31	46.46	45.87	45.18	45.74	46.41
TiO ₂	2.21	1.66	1.12	1.70	0.41	0.98
Al ₂ O ₃	33.13	31.76	34.01	33.59	31.18	31.67
Cr ₂ O ₃	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO*	1.82	2.77	1.88	1.98	3.93	2.70
MnO	0.00	0.04	0.00	0.00	0.13	0.00
MgO	0.77	1.58	0.83	0.86	1.37	1.31
CaO	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02
Na ₂ O	0.57	0.37	0.42	0.40	0.20	0.26
K ₂ O	10.60	10.99	10.46	10.81	10.85	10.95
Total	94.41	95.74	94.59	94.52	93.81	94.30
24(O, OH, F)						
Si	6.134	6.238	6.174	6.115	6.298	6.312
Al(IV)	1.866	1.762	1.826	1.885	1.702	1.688
Al(VI)	3.416	3.263	3.565	3.469	3.354	3.384
Ti	0.225	0.168	0.113	0.173	0.042	0.100
Cr	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.206	0.311	0.212	0.224	0.453	0.307
Mn	0.000	0.005	0.000	0.000	0.015	0.000
Mg	0.155	0.316	0.167	0.174	0.281	0.266
Ca	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.003
Na	0.150	0.096	0.110	0.105	0.053	0.069
K	1.831	1.884	1.796	1.867	1.906	1.900

FeO* : total iron as FeO

각 화강암류의 마그마과정의 차이를 이해하기 위해 하커도표를 사용하여 고찰하였다(Fig. 5). 분화지수로 사용된 SiO₂ 함량은 백록 화강섬록암이 57.0~70.8%, 청산 반상 화강암이 67.3~73.0%, 청산 복운모 화강암이 70.4~74.0%의 범위를 나타낸다. 반상 화강암의 경우, 거정의 크기로 인한 자료의 이질성을 우려하여 전암분석의 자료와 석기와 반정을 각각 따로 분석한 자료로부터 계산된 전암의 추정값을 서로 비교하여 고찰하였다.

Fig. 5에서 보면 SiO₂ 함량이 증가함에 따라, 즉 분화가 진행됨에 따라 각 화강암류의 주성분원소 함량은 비교적 체계적인 감소 내지 증가의 경향을 보여, 각각의 화강암류는 마그마의 결정분화에 의해 생성되었음을 알 수 있다. 한편, 일부 주성분원

소에서 각 화강암류는 함량의 차이를 보인다. 같은 SiO₂의 함량 범위에서 청산 반상 화강암은 백록 화강섬록암에 비해 TiO₂, FeO, MnO 및 P₂O₅의 함량이 많고, MgO의 함량이 적음을 알 수 있다. 이러한 차이는 두 화강암류의 마그마가 성인적으로 관계가 없음을 지시하는 것이다. 청산 복운모 화강암의 경우 매우 좁은 SiO₂의 범위에서만 나머지 두 화강암류와 비교되어 변화 경향의 차이를 알기 어렵다. 그럼에도 불구하고 Al₂O₃, K₂O, 및 Na₂O+K₂O 함량의 다른 변화 경향으로부터 복운모 화강암 역시 또 다른 지구화학적 성질을 가진 마그마로부터 유래되었음을 알 수 있다. 이 결과는 주성분원소 함량의 비에서도 확인된다. 백록 화강섬록암은 대체로 낮고 완만한 증가를 보이는 FeO*/MgO의 비를 가지는 반면, 청산 반상 화강암과 복운모 화강암은 각각 높고 급격하게 증가하는 비를 나타낸다.

분화지수를 MgO로 잡아 세 화강암류의 분화 경향의 차이를 살펴 보았다(Fig. 6). 이 경우 위에서 살펴본 경향 보다 훨씬 뚜렷한 차이가 파악되는데, 특히 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암 및 복운모 화강암 사이에는 현저한 분화 경향의 차이가 존재한다. 이러한 차이는 세 종류의 화강암류는 각각 다른 마그마로부터 분화·고결되었음을 지시한다.

AFM 도표에서는 세 종류의 화강암류가 칼칼알 칼리계열의 화성암류임을 나타내는데(Fig. 7a), 여기서도 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암 및 복운모 화강암의 변화 경향에서 뚜렷한 차이가 나타나 앞의 결과와 조화적이다. 화강암류의 전암조성으로부터, 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암은 메타알루미나질, 복운모 화강암은 과알루미나질임을 알 수 있다(Fig. 7b). 그리고 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암은 대체로 I-타입의 화강암류에 속하며, 복운모 화강암은 I-타입과 S-타입의 양쪽에 속한다(Fig. 7b, c).

논 의

화강암류의 생성환경

백록 화강섬록암은 전형적으로 암체의 내부를 향 한 분화 양상을 보인다. 암체 주변부에서의 상대적으로 세립질이며 매끈한 암상은 암체 내부를 향해 조립질과 펠식한 암상으로 변화하며, 이는 화강암질 마그마의 관입시에 마그마 주변부와 내부에서의 조성적 누대구조 및 냉각속도에 기인한 것으로 생각된다.

기존의 연구에서 백록 화강섬록암에 산출되는 각

Table 8. Representative chemical compositions of plagioclase of the granitic rocks in the Cheongsan area

	Baegrog granodiorite						Cheongsan porphyritic granite						Cheongsan two mica granite									
	1606		2206		2604C		1506		2112		2218		2307		1510		2119		2120		0816	
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim
SiO ₂	58.54	58.89	60.52	65.06	61.77	60.95	60.39	60.93	59.21	60.57	63.17	63.90	61.44	62.37	60.82	61.73	59.37	59.95	60.53	61.82	59.73	59.92
Al ₂ O ₃	25.65	24.55	24.50	22.15	23.64	24.19	24.30	24.04	24.35	23.92	22.56	22.24	23.69	22.98	24.25	22.89	25.09	25.13	24.27	22.94	24.62	24.39
FeO*	0.15	0.15	0.05	0.02	0.09	0.21	0.00	0.10	0.00	0.06	0.00	0.00	0.13	0.00	0.06	0.09	0.06	0.04	0.05	0.00	0.04	0.04
CaO	7.51	6.70	5.22	3.20	4.96	3.48	6.10	5.61	6.12	5.45	3.91	3.31	4.86	4.42	5.83	4.21	6.61	6.58	6.13	4.50	6.05	5.88
Na ₂ O	7.22	8.23	8.56	10.24	8.86	8.34	8.86	8.88	8.92	8.96	9.77	9.97	9.05	9.61	8.90	9.73	8.33	8.42	8.78	9.58	8.95	9.04
K ₂ O	0.22	0.20	0.61	0.04	0.17	1.50	0.18	0.28	0.14	0.13	0.11	0.10	0.15	0.07	0.11	0.17	0.09	0.10	0.12	0.07	0.09	0.06
Total	99.29	98.72	99.46	100.71	99.49	98.67	99.83	99.84	99.44	99.09	99.52	99.52	99.02	99.45	99.97	98.82	99.55	100.22	99.88	98.91	99.48	99.93
O = 8																						
Si	2.635	2.668	2.710	2.849	2.754	2.745	2.699	2.720	2.690	2.721	2.808	2.834	2.743	2.780	2.711	2.774	2.663	2.670	2.703	2.773	2.681	2.692
Al	1.361	1.331	1.293	1.143	1.242	1.284	1.280	1.265	1.289	1.266	1.182	1.162	1.252	1.207	1.274	1.212	1.326	1.319	1.277	1.213	1.302	1.291
Fe	0.006	0.006	0.002	0.001	0.003	0.008	0.000	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.005	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.000	0.002	0.002
Ca	0.362	0.325	0.250	0.150	0.237	0.168	0.292	0.268	0.294	0.262	0.186	0.157	0.234	0.211	0.278	0.203	0.318	0.314	0.293	0.216	0.291	0.283
Na	0.630	0.723	0.743	0.870	0.766	0.783	0.768	0.768	0.777	0.780	0.842	0.857	0.787	0.831	0.769	0.848	0.724	0.727	0.760	0.833	0.779	0.787
K	0.013	0.012	0.035	0.002	0.010	0.086	0.010	0.016	0.008	0.007	0.006	0.006	0.009	0.004	0.006	0.010	0.005	0.006	0.007	0.004	0.005	0.003
Sum	5.006	5.044	5.033	5.015	5.012	5.075	5.050	5.040	5.058	5.040	5.025	5.017	5.029	5.033	5.040	5.049	5.039	5.037	5.042	5.039	5.060	5.058
An	36.0	30.6	24.3	14.7	23.4	17.1	27.3	25.4	27.3	25.0	18.1	15.5	22.7	20.2	26.5	19.2	30.4	30.0	27.7	20.6	27.1	26.4
Ab	62.7	68.3	72.3	85.1	75.6	74.1	71.8	73.0	71.9	74.3	81.3	84.0	76.4	79.4	72.9	79.9	69.1	69.4	71.6	79.1	72.5	73.3
Or	1.3	1.1	3.4	0.2	1.0	8.8	0.9	1.6	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9	0.4	0.6	0.9	0.5	0.6	0.7	0.3	0.4	0.3

FeO* : total iron as FeO

Table 9. Chemical compositions of alkali feldspar across ad megacryst from the Cheongsan porphyritic granite(2307)

	1*	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	63.83	63.40	63.77	63.95	64.17	63.79	63.99	63.64	63.64
Al ₂ O ₃	18.28	18.17	18.10	18.21	18.18	17.96	18.21	18.30	18.27
FeO*	0.00	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
Na ₂ O	1.01	0.67	0.85	0.86	0.86	0.78	0.68	0.72	0.83
K ₂ O	16.07	16.24	15.84	15.60	16.04	16.17	15.89	15.88	15.81
Total	99.19	98.52	98.59	98.65	99.25	98.70	98.77	98.57	98.57
O = 8									
Si	2.983	2.984	2.992	2.994	2.993	2.995	2.994	2.986	2.986
Al	1.007	1.008	1.001	1.005	0.999	0.994	1.004	1.012	1.010
Fe	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Na	0.092	0.061	0.077	0.078	0.078	0.071	0.062	0.066	0.076
K	0.958	0.975	0.948	0.932	0.954	0.968	0.949	0.951	0.946
Sum	5.039	5.030	5.020	5.009	5.024	5.028	5.009	5.016	5.019
Or	91.3	94.1	92.4	92.3	92.4	93.2	93.8	93.6	92.6
Ab	8.7	5.9	7.6	7.7	7.6	6.8	6.2	6.4	7.4

FeO*: total iron as FeO

#: analytica points shown in Fig. 4

섬석 지압계는 관입 심도가 약 12 km 일 것으로 추정되었다(조등룡과 권성택, 1994). 하지만 이 연구에서 알 수 있듯이 각섬석의 화학조성은 결정의 중심부와 주변부에서 매우 변화가 심하고, 또 주변부에서의 Al(tot)의 양이 매우 적어 보고된 지압계가 타당할 것인지에 대한 의문이 있다. 결정의 중심부에서 주변부를 향한 조성 변화는 마그마 정출 당시의 변화라기 보다는 2차적인 요인으로 판단할 수 있으며, 이 원인에 대한 자세한 연구가 앞으로 있어야 할 것으로 생각된다.

블투명광물의 함량과 전암의 대자율값에서 화강암류 배대의 산화·환원환경 조건을 살펴볼 수 있다. 석영과 알칼리장석에 대한 블투명광물의 함량비에서 청산 일대의 화강암류는 대체로 티탄철석계열에 속함을 알 수 있다(Fig. 8). 전암의 대자율값은 백록 화강섬록암이 8~18 (단위: 10⁻⁶emu/g), 청산 반상화강암이 7~15, 복운모 화강암이 4~10 정도를 나타낸다. 자철석계열과 티탄철석계열의 경계를 100 (Ishihara, 1977) 혹은 35 (Jwa, 1990)의 어느 쪽을 잡더라도 이들 화강암류는 티탄철석계열에 속한다. 따라서 청산지역 화강암류는 비교적 환원적인 환경에서 배대·고결된 암체로 생각된다.

화강암류가 관입·고결된 대략적인 지체구조적 환경을 조성분원소를 사용한 도표에서 생각해 볼 수 있다(Maniar and Piccoli, 1989). Fig. 9를 보면,

청산지역 화강암류가 관입한 환경은 대체로 도호/육호/대륙충돌대의 넓은 범위에 속함을 알 수 있다. 이를 AFM 도표의 결과와 결부시켜 생각하면 청산지역의 화강암류를 생성시킨 당시의 화성활동은 활동성 대륙연변부에서 일어난 칼크-알칼리질의 화성활동이었을 것으로 판단된다.

NaAlSi₃O₈(Ab)-KAlSi₃O₈(Or)-SiO₂(Qz)-H₂O 계에서의 압력에 따른 최소용해액 및 공융점 조성과 청산지역 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 청산지역 반상 화강암과 복운모 화강암은 노름 Qz+Or+Ab 함량이 80% 이상이다. 다만, 백록 화강섬록암의 경우 노름 An 함량이 높아 Ca의 효과를 배제하기 어렵기 때문에 검토하지 않았다. 위의 화강암계에 대해 Ab-Or-Qz 도표를 사용한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

반상 화강암과 복운모 화강암의 성분은 물의 포화상태에서 압력에 따른 최소용해액 조성과 공융점 조성('로 표시)에 배열되지 않는다. 이는 이 화강

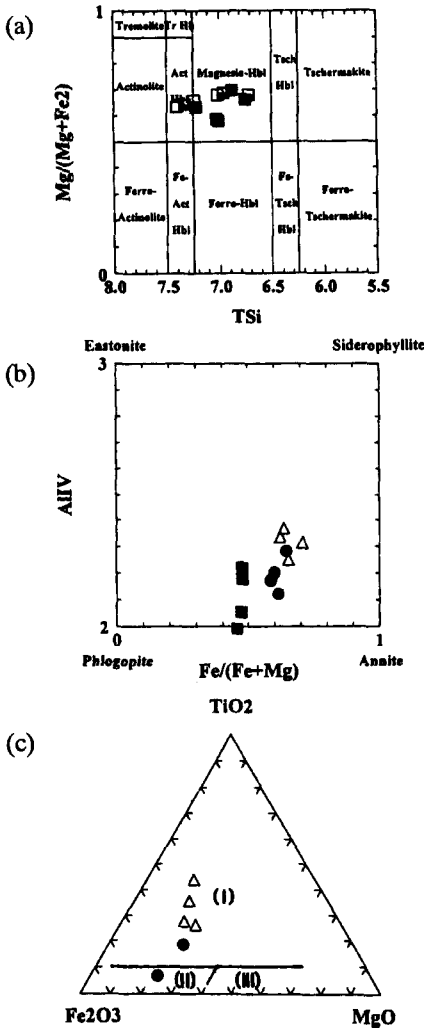


Fig. 3. Classification diagrams of minerals. a) classification of calcic amphiboles. Amphiboles from the Baegnok granodiorite enter into the fields of magnesian-hornblende and actinolitic hornblende. Amphibole composition generally changes from magnesian-hornblende in the core part to actinolitic hornblende in the rim part. Symbols: filled square, core part; half-filled square, inner part; open square, rim part. b) classification of biotites. Biotites of the granitic rocks in the Cheongsan area have the intermediate composition between phlogopite and annite. Symbols: ■, Baegrok granodiorite; ●, Cheongsan porphyritic granite; △, two mica granite. c) triangular Fe₂O₃(total iron)-TiO₂-MgO diagram of muscovites. Muscovites from the two mica granite (△) enter into the field of magmatic muscovite (I), whereas those from the porphyritic granite (●) show both magmatic and late to post-magmatic muscovite (II). Field of (III) indicates hydrothermal muscovite. The boundary is modified from Fig. 22 of Speer (1984)

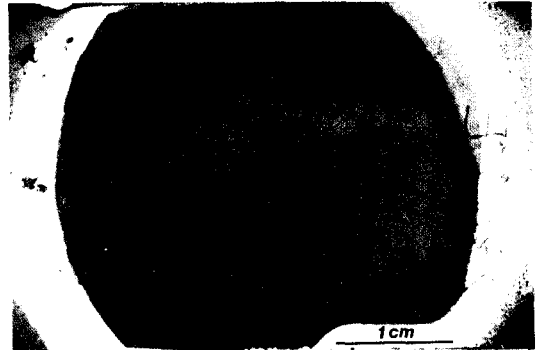


Fig. 4. Microphotograph of alkali feldspar megacryst (sample 2307) in the Cheongsan porphyritic granite. Numbers indicate analyzed points (see Table 9). Plagioclase and biotite crystals are arranged along the growth plane of alkali feldspar.

암류를 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. 마그마 내에 불소와 붕소 등의 함량이 최소용해액과 공융점 조성의 위치를 변화시킬 수 있지만(Manning, 1981; Pichavant and Manning, 1984), 청산지역 화강암류에서는 이 원소들을 포함하는 형석과 전기석 등이 전혀 발견되지 않기 때문에 그 효과를 무시한다. Fig. 10에서 보면, 청산 복운모 화강암은 대략 2~3 kb의 압력에 상응하는 조성을 나타내고, 반상 흑운모 화강암은 3~10 kb의 압력 조성을 나타낸다. 이렇게 관입·접촉하고 있는 두 화강암류의 공융점 조성이 크게 다른 점과 더불어, 이 둘 사이의 주성분 원소 변화 경향에서의 차이 등을 고려할 때, 이들이 하나의 마그마로부터 분화했을 가능성은 부정된다. 한편, 압력 조성이 마그마의 정치 심도에 관련되므로 반상 흑운모 화강암이 심부에서 배태되고 용기된 후, 다른 기원의 마그마가 관입하여 복운모 화강암을 형성했을 것으로 생각할 수 있다.

알칼리장석의 거정

화강암류에 나타나는 알칼리장석 거정의 형성에 대해서는 아직도 여러 가지 논의가 진행되고 있는데, 이 알칼리장석의 거정이 반정이나 아니면 반상변정이나에 대한 논의이다. 반상변정으로 생각하는

Table 10. Chemical compositions of major elements and calculated CIPW normative compositions of the granitic rocks in the Cheongsan area

Rock Type	Baegrog granodiorite									
Sample	1606	1607	1610	2602	2604	2605	2604C	2606C	2708	2202
SiO ₂	65.15	66.81	65.92	63.66	63.20	64.67	65.11	58.35	62.15	59.21
TiO ₂	0.45	0.33	0.35	0.45	0.54	0.47	0.53	0.66	0.56	0.62
Al ₂ O ₃	15.04	15.26	15.10	16.15	14.99	15.07	15.04	16.77	15.28	16.20
Fe ₂ O ₃	1.44	0.71	0.93	1.10	1.58	1.44	0.37	1.83	2.15	2.20
FeO	2.41	2.22	2.36	2.76	2.54	2.62	3.60	3.13	3.67	3.27
MnO	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.10	0.10
MgO	2.30	1.72	1.95	2.40	2.70	2.60	2.60	3.67	3.25	3.77
CaO	3.91	3.26	3.37	4.33	3.10	3.29	3.30	5.87	4.25	5.48
Na ₂ O	3.67	3.78	3.46	3.47	4.02	4.14	4.10	4.00	3.65	4.22
K ₂ O	3.83	4.10	4.42	3.85	3.46	3.45	3.45	2.44	3.97	3.17
P ₂ O ₅	0.18	0.13	0.15	0.18	0.19	0.20	0.19	0.24	0.23	0.28
H ₂ O-	0.39	0.02	0.39	0.32	0.29	0.43	0.44	0.38	0.35	0.38
H ₂ O+	0.93	0.06	1.23	1.19	1.17	1.28	1.24	1.86	1.08	1.15
Total	99.75	98.44	99.68	99.91	97.84	99.72	100.04	99.29	100.68	100.04
normative minerals										
Q	18.02	19.49	18.81	15.70	16.18	16.57	15.96	8.61	11.89	5.57
Or	22.98	24.63	26.63	23.10	21.24	20.82	20.73	14.85	23.64	18.66
Ab	31.51	32.49	29.84	29.87	35.25	35.75	35.25	34.84	31.12	35.57
An	13.48	12.78	12.87	17.38	13.12	12.58	12.67	21.25	13.68	20.45
Di	4.07	2.29	2.57	2.63	1.25	2.19	2.23	5.79	4.91	3.86
Hy	6.53	6.34	6.86	8.40	9.06	8.58	11.15	10.09	10.03	10.69
Mt	2.12	1.05	1.37	1.62	2.38	2.13	0.55	2.73	3.14	3.18
Il	0.87	0.64	0.68	0.87	1.06	0.91	1.02	1.29	1.07	1.36
Ap	0.43	0.31	0.36	0.43	0.47	0.48	0.46	0.56	0.55	0.66
Baegrog granodiorite										
Sample	2204	2206	2207	2208	0601	0602	0603	0604	0606	0608
SiO ₂	57.16	57.04	60.77	62.57	66.77	70.12	67.86	70.84	68.75	59.02
TiO ₂	0.72	0.61	0.58	0.56	0.38	0.31	0.22	0.30	0.31	0.58
Al ₂ O ₃	17.88	16.74	15.66	16.15	14.50	14.30	14.86	14.33	14.79	16.94
Fe ₂ O ₃	2.07	1.50	1.47	1.72	0.78	0.64	0.60	0.99	0.97	1.36
FeO	4.02	4.32	3.35	2.97	2.34	1.70	1.81	1.51	1.65	3.77
MnO	0.10	0.11	0.09	0.09	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09
MgO	3.94	3.91	3.03	2.77	1.73	1.25	1.35	1.30	1.37	3.69
CaO	6.38	6.10	5.10	4.18	2.38	2.74	2.70	2.54	2.61	5.58
Na ₂ O	4.12	3.95	4.23	3.95	3.44	3.66	3.72	3.63	3.76	3.84
K ₂ O	2.13	2.63	2.63	3.09	4.19	4.00	4.35	3.74	4.28	3.34
P ₂ O ₅	0.26	0.26	0.21	0.19	0.13	0.10	0.11	0.11	0.12	0.27
H ₂ O-	0.26	0.33	0.32	0.39	0.24	0.22	0.27	0.13	0.27	0.42
H ₂ O+	1.04	1.60	1.96	1.37	1.49	0.93	1.17	0.98	1.10	1.20
Total	100.07	99.11	99.42	100.00	98.40	100.02	99.07	100.45	100.03	100.10

Table 10. continued-1

Sample	2204	2206	2207	2208	0601	0602	0603	0604	0606	0608
normative minerals										
Q	5.46	5.10	11.38	15.72	22.76	25.86	22.27	27.45	22.97	6.33
Or	12.77	15.99	16.02	18.92	25.58	23.92	26.45	22.37	25.65	20.02
Ab	35.26	34.39	36.87	34.61	30.10	31.31	32.42	31.11	32.25	33.26
An	24.30	20.77	16.44	13.15	11.33	10.91	9.86	11.88	10.98	19.28
Di	4.85	7.03	6.66	5.69	0.00	1.80	2.60	0.12	1.10	5.72
Hy	12.32	12.66	8.83	7.78	7.69	4.44	4.82	4.78	4.76	11.64
Mt	3.04	2.24	2.19	2.58	1.17	0.94	0.90	1.45	1.43	2.00
Il	1.38	1.19	1.11	1.10	0.75	0.60	0.43	0.58	0.60	1.12
Ap	0.62	0.63	0.51	0.47	0.32	0.24	0.27	0.26	0.29	0.65
Cheongsan porphyritic granite										
Sample	1506	2706C	3008	2112	2218	2222	2305	2307	2310	1506M [#]
SiO ₂	67.52	70.47	71.20	67.73	69.85	73.04	69.31	67.38	68.15	67.45
TiO ₂	0.42	0.31	0.34	0.31	0.38	0.31	0.38	0.33	0.41	0.48
Al ₂ O ₃	15.38	14.81	13.96	15.45	14.42	13.61	14.90	15.79	15.10	15.15
Fe ₂ O ₃	0.71	0.40	0.65	0.80	0.29	0.36	0.38	0.62	0.46	0.83
FeO	2.55	1.84	1.94	1.84	2.67	1.92	2.34	2.11	2.72	2.84
MnO	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
MgO	1.05	0.63	0.70	0.81	0.87	0.63	0.83	0.87	1.02	1.16
CaO	2.86	1.81	1.71	2.43	2.43	2.17	2.54	2.44	2.97	3.40
Na ₂ O	3.66	3.52	3.36	3.72	4.01	3.55	3.58	3.82	3.85	4.20
K ₂ O	4.46	5.52	5.18	5.11	3.53	3.70	4.65	5.21	3.76	2.33
P ₂ O ₅	0.20	0.16	0.12	0.17	0.19	0.13	0.16	0.17	0.20	0.24
H ₂ O-	0.24	0.16	0.19	0.19	0.24	0.16	0.16	0.19	0.17	0.22
H ₂ O+	0.89	0.17	0.62	0.93	0.93	0.55	0.73	0.97	0.82	0.89
Total	99.98	99.83	100.00	99.55	99.86	100.17	100.00	99.84	99.69	99.26
normative minerals										
Q	20.79	23.36	26.45	20.04	25.48	31.98	23.19	18.18	22.57	24.41
Or	26.63	32.75	30.82	30.71	21.12	22.01	27.72	31.17	22.50	14.03
Ab	31.27	29.95	28.68	32.01	34.32	30.17	30.55	32.70	33.02	36.20
An	12.53	7.96	7.73	10.52	10.97	9.96	10.93	10.69	12.98	15.58
C	0.00	0.14	0.01	0.00	0.04	0.14	0.00	0.00	0.00	0.11
Di	0.40	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	0.61	0.39	0.51	0.00
Hy	6.06	4.30	4.43	4.03	6.47	4.32	5.34	4.94	6.48	6.95
Mt	1.04	0.58	0.95	1.18	0.43	0.53	0.56	0.91	0.68	1.23
Il	0.81	0.59	0.65	0.60	0.73	0.59	0.73	0.63	0.90	0.93
AP	0.48	0.38	0.29	0.41	0.46	0.31	0.38	0.40	0.48	0.58

#, M indicates matrix composition

##, P indicates alkali feldspar megacryst composition

Table 10. continued-2

Sample NO.	Cheongsan porphyritic granite					Cheongsan two mica granite				
	2307M	2310M	1506P**	2307P	2310P	1405	1510	2001	2002	2003
73.09	69.27	69.87	64.36	64.28	64.41	72.35	70.46	73.09	73.78	73.93
SiO ₂	0.43	0.48	0.00	0.00	0.00	0.17	0.26	0.17	0.09	0.14
TiO ₂	14.81	14.02	18.24	18.22	18.43	14.85	15.05	14.70	14.60	14.60
Al ₂ O ₃	0.74	0.48	0.00	0.00	0.00	0.26	0.36	0.30	0.37	0.36
Fe ₂ O ₃	2.33	2.99	0.00	0.00	0.00	1.23	1.66	1.16	0.78	1.04
FeO	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
MnO	0.96	1.08	0.00	0.00	0.00	0.42	0.66	0.32	0.32	0.34
MgO	2.76	3.11	0.45	0.90	0.40	1.11	2.46	1.44	0.50	0.72
CaO	4.21	3.90	2.10	2.04	2.19	3.96	3.48	3.72	3.64	3.73
Na ₂ O	2.97	2.48	14.96	14.71	15.07	4.67	3.99	4.70	5.04	5.10
K ₂ O	0.21	0.22	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.13	0.13	0.09
P ₂ O ₅	0.14	0.20	0.19	0.29	0.15	0.19	0.36	0.25	0.24	0.18
H ₂ O-	1.10	0.78	0.48	0.90	0.63	0.92	0.92	0.70	0.71	0.70
Total	99.98	99.65	100.74	101.33	101.27	100.20	99.78	100.70	100.20	100.94
normative minerals										
Q	25.52	28.50	0.00	0.00	0.00	27.40	28.86	29.61	32.09	30.28
Or	17.76	14.84	88.18	86.83	88.65	27.77	24.04	27.87	30.01	30.11
Ab	36.06	33.40	7.95	8.02	6.33	33.69	30.03	31.58	31.00	31.56
An	12.56	13.61	0.00	0.00	0.00	6.52	11.76	6.29	1.62	2.96
C	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.80	1.19	1.19	1.86
Di	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	5.62	7.02	0.00	0.00	0.00	2.83	3.24	2.41	1.52	2.23
Mt	1.09	0.70	0.00	0.00	0.00	0.38	0.53	0.44	0.69	0.52
Il	0.81	0.92	0.00	0.00	0.00	0.32	0.50	0.32	0.17	0.27
Ap	0.48	0.53	0.00	0.00	0.00	0.19	0.24	0.31	0.31	0.21
Ne			1.67	2.03	2.42					
Ns			1.64	1.26	1.77					
Cheongsan two mica granite										
Sample	2005	2006	2119	2120	0807	0811	0816			
SiO ₂	72.52	72.50	71.53	71.58	71.64	72.83	73.42			
TiO ₂	0.08	0.17	0.20	0.27	0.21	0.15	0.16			
Al ₂ O ₃	14.59	14.85	14.98	15.01	15.17	14.22	14.36			
Fe ₂ O ₃	0.36	0.47	0.35	0.56	0.39	0.39	0.39			
FeO	1.03	1.33	1.44	1.44	1.35	1.20	1.06			
MnO	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02			
MgO	0.34	0.51	0.55	0.63	0.53	0.38	0.32			
CaO	0.76	0.54	1.85	2.32	1.88	0.89	0.90			
Na ₂ O	3.69	3.81	3.62	3.59	3.49	3.04	3.11			
K ₂ O	4.74	4.19	4.21	3.95	4.30	5.87	5.92			
P ₂ O ₅	0.09	0.10	0.10	0.10	0.08	0.09	0.09			
H ₂ O-	0.39	0.34	0.29	0.14	0.20	0.19	0.17			
H ₂ O+	1.23	1.23	0.91	0.72	0.83	0.83	0.62			
Total	99.83	100.06	100.06	100.32	100.10	100.09	100.54			

Table 10. continued-3

Sample	2005	2006	2119	2120	0807	0811	0816
normative minerals							
Q	31.15	32.36	29.28	29.33	29.78	30.20	30.10
Or	28.54	25.16	25.19	23.48	25.65	25.65	35.08
Ab	31.81	32.70	30.98	30.54	29.79	29.79	26.37
An	3.24	2.08	8.62	10.93	8.89	8.89	3.91
C	2.26	3.36	1.36	0.85	1.57	1.57	1.41
Di	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	1.81	3.09	3.44	3.30	3.16	3.16	1.90
Mt	0.83	0.69	0.51	0.82	0.57	0.57	0.71
Il	0.15	0.33	0.38	0.52	0.40	0.40	0.30
Ap	0.22	0.24	0.24	0.24	0.19	0.19	0.21

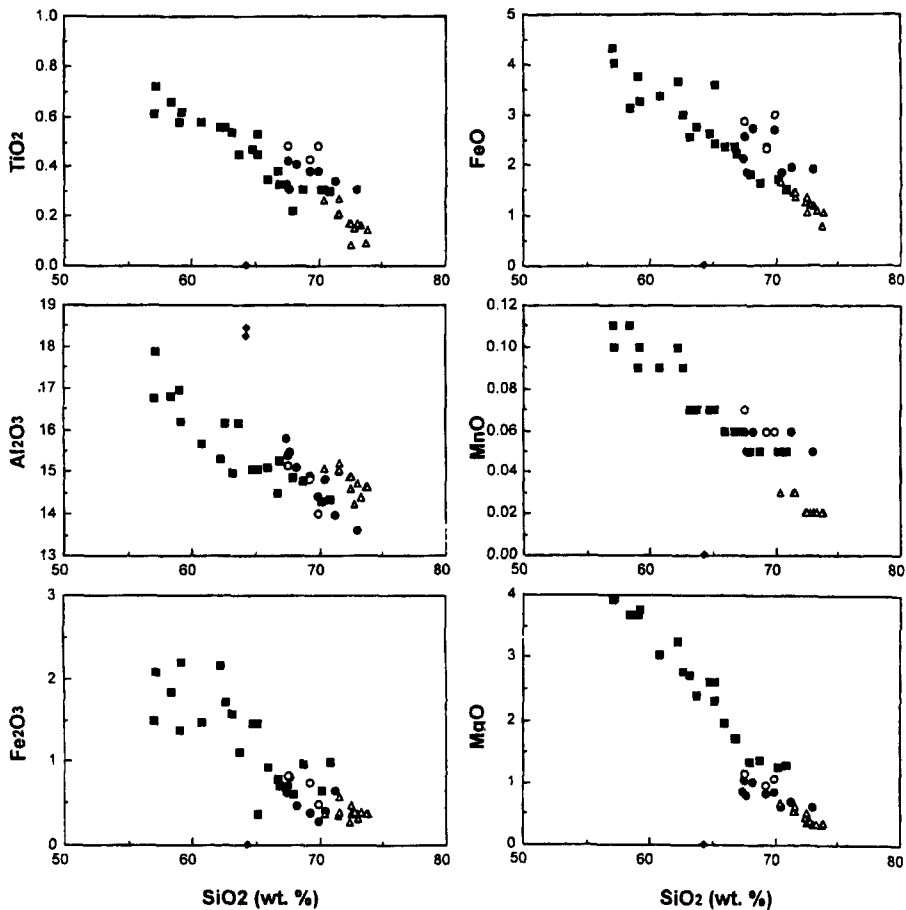


Fig. 5. SiO₂ vs. oxides variation diagrams. Symbols : ■, Baegrog granodiorite ; ●, bulk composition of the Cheongsan porphyritic granite ; ○, matrix of the Cheongsan porphyritic granite ; ◆, alkali feldspar megacryst ; △, Cheongsan two mica granite.

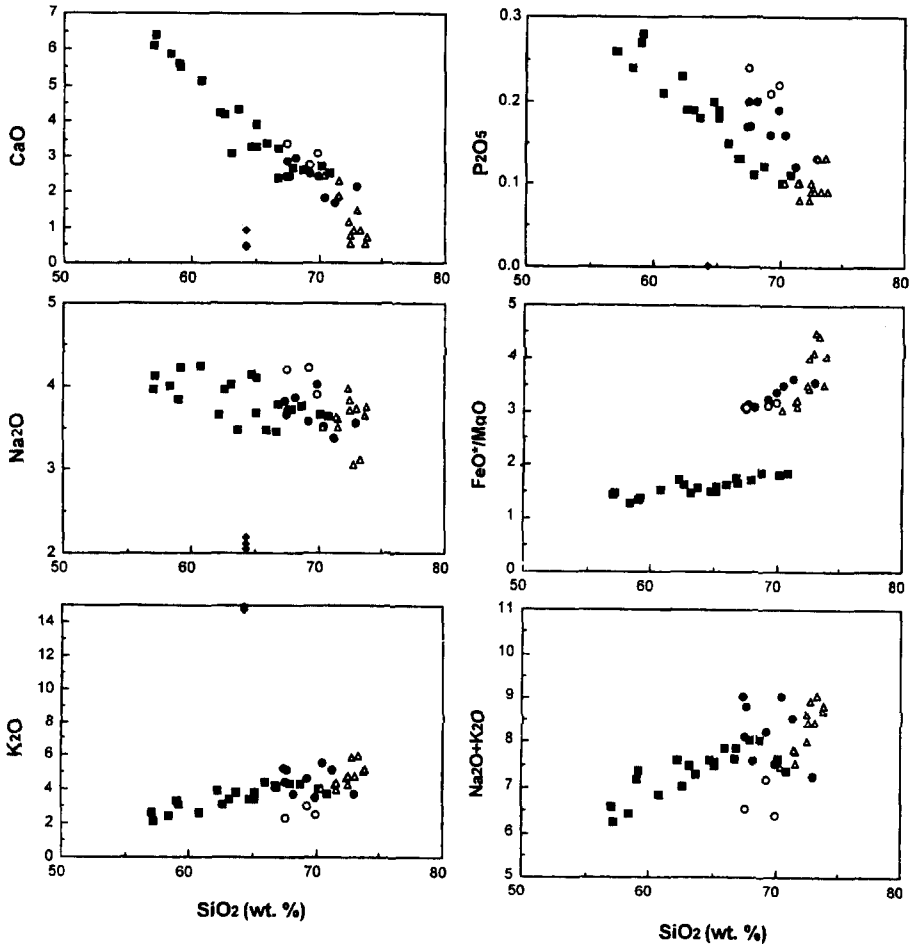


Fig. 5. Continued

근본적인 이유로는 첫째 거정이 석기 입자에 비해 크기가 매우 크다는 것, 둘째 거정이 화강암내의 포획암이나 나중에 관입한 반화강암의 경계부를 가로질러 성장한 경우가 발견되는 것, 셋째 일반적으로 화강암질 마그마에서 알칼리장석은 정출순서가 거의 마지막에 속하여 반정으로 정출되기 어렵다는 것 등을 들 수 있다 (Dusel-Bacon and Aleinikoff, 1985; Vernon, 1986). 한편, 결정의 형태, 배열, Ba 함량, 누대구조, 포유물, 쌍정 등과 같은 광물학적이고 조성적인 면으로부터 알칼리장석의 거정이 마그마기원일 것으로 주장하는 경우도 있다 (Hibbard, 1965, 1979, 1981, 1987; Kerrick, 1969; Higgins and Kawachi, 1977; Bateman and Chappell, 1979; Long and Luth, 1986; Vernon, 1986).

청산 반상 화강암은 알칼리장석의 거정을 포함하

는 것이 특징이다. 이 거정에 대해 Lee(1971)과 김용준 외(1994)는 K 성분은 풍부한 주변암에 의한 혼연작용 내지는 K-고대작용에 의해 생성되었을 것으로 생각했다. 하지만, 이 거정이 마그마로부터 정출되었음을 나타내는 증거들이 발견된다. 먼저 청산 반상 화강암의 알칼리장석의 거정은 그 형태가 매우 뚜렷한 자형을 이루고 있고, 이는 일반적인 반상변정과는 구별이 된다(Vernon, 1986). 거정들의 크기와 함량은 비교적 다양하다(Table 3). 거정들의 평균 장경은 2.1에서 3.5 cm(평균 2.6 cm)이지만, 보다 큰 거정(크기로 상위 30%)들은 3.0에서 5.5 cm(평균 4.2 cm)에 달함을 알 수 있다. 하지만 한 노두에서 나타나는 거정의 최대 크기는 상위 30% 평균 크기와 반드시 비례하지는 않는다. Fig. 11에 나타낸 반상 화강암체내의 거정에 대한

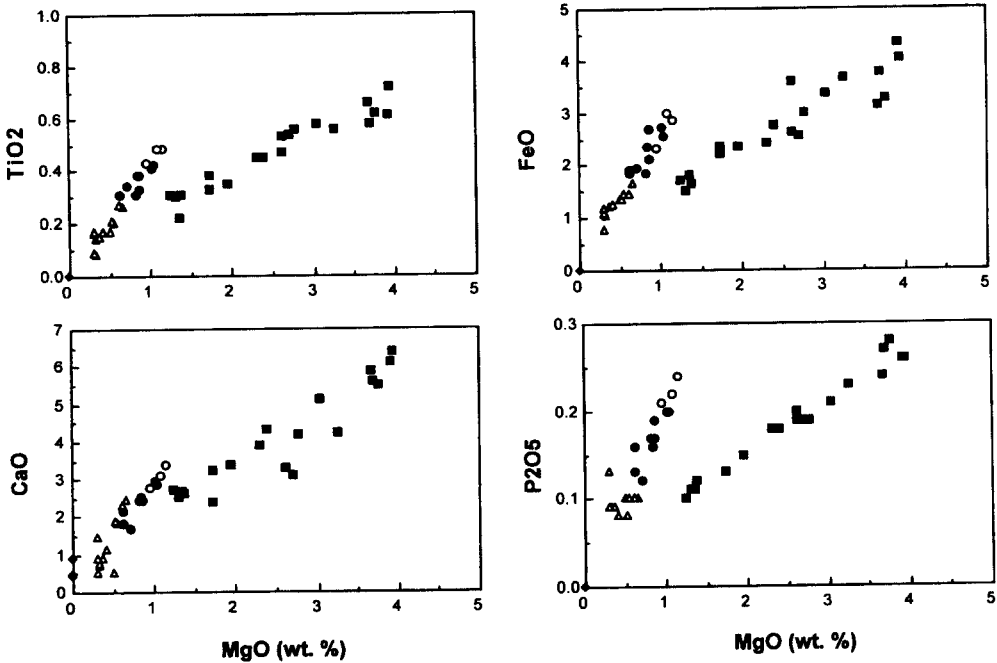


Fig. 6. MgO vs. oxides variation diagrams. Symbols are the same as Fig. 5.

크기 분포도는 거정의 상위 30% 평균 크기로부터 구한 것이다. 비록 암체의 내부에 층적층의 분포와 복운모 화강암의 관입으로 자료의 분포 범위가 충분하지는 않지만, 암체의 중심부를 향해 거정의 크기와 함량이 증가함을 쉽게 알 수 있다.

알칼리장석 거정의 크기는 반상변정기원을 선호하게 한다. 그러나 알칼리장석의 크기와 형태는 마그마 내에서의 결정의 핵형성과 성장속도와 관련된다는 실험결과가 보고되었다(Fenn, 1977; Swanson, 1977). 상관관계에 대한 실험에서 다른 광물들과 동시에 성장을 하는 알칼리장석은 다른 광물에 비해 핵형성 속도는 느리고 성장속도는 빨라서 핵형성 밀도가 낮은 채 알칼리장석의 성장은 최대로 되어, 거정이 발달하게 된다. 거정의 크기와 판상의 뚜렷한 외곽을 지닌 결정의 형태는 과냉각의 정도가 작았음을 지지하는 것이다(Swanson, 1977). 물에 불포화된 멜트에서 알칼리장석 거정의 정출작용은 Weiss와 Troll(1989)에 의해 검토되었는데, 그들의 결과는 물에 불포화된 상태에서 알칼리장석이 매우 빨리 성장한다는 다른 실험 결과와 일치한다(Fenn, 1977; Swanson, 1977). 청산 반상 화강암을 만든 마그마의 물에 불포화된 조성(Fig. 10)은 이 실험 결과들과 조화적이다.

한편, 거정의 크기와 함량의 체계적인 변화가 화

강암의 K₂O 성분과는 반드시 조화적이지는 않다. 이 사실은 거정이 마그마기원일 것이라는 데 대한 하나의 증거가 될 수 있는데, 왜냐하면 알칼리장석 거정의 크기와 함량은 마그마 혹은 멜트의 국부적인 K₂O 함량보다는 위에서 언급한 바와 같이 결정의 성장 속도에 의해 지배되기 때문이다(Fenn, 1977; Swanson, 1977; Vernon, 1986). 반면, K-교대작용 등에 의한 알칼리장석의 성장은 멜트내의 K₂O 함량에 좌우된다. 더욱이 마그마기원의 알칼리장석 거정은 화강암류의 조성에도 밀접한 관계가 있다. 즉, 거정의 산출은 암석의 조성이 화강암보다는 화강섬록암에서 보다 보편적인데(Swanson, 1977; Vernon, 1986), 그 이유는 화강섬록암의 조성에서 알칼리장석의 성장속도는 화강암의 조성보다 커지기 때문이다. 청산 반상 화강암의 경우, 석기의 조성이 화강섬록암에 속한다는 것은 위의 사실과 조화적으로 생각된다(Fig. 2).

청산 반상 화강암의 알칼리장석 거정들은 마그마의 유동 엽리를 나타내고 있다. 이 엽리는 암체의 주변부에 평행하게 발달한다. 거정들의 판상의 정향 배열은 관입 주변부에서의 마그마 유동(magmatic flow) 혹은 국지적 교란 유동(local turbulent flow)에 관련된다(Booth, 1968). 그리고 이러한 배열은 30% 이상의 멜트 조건에서 형성되므로(Arzi, 1978;

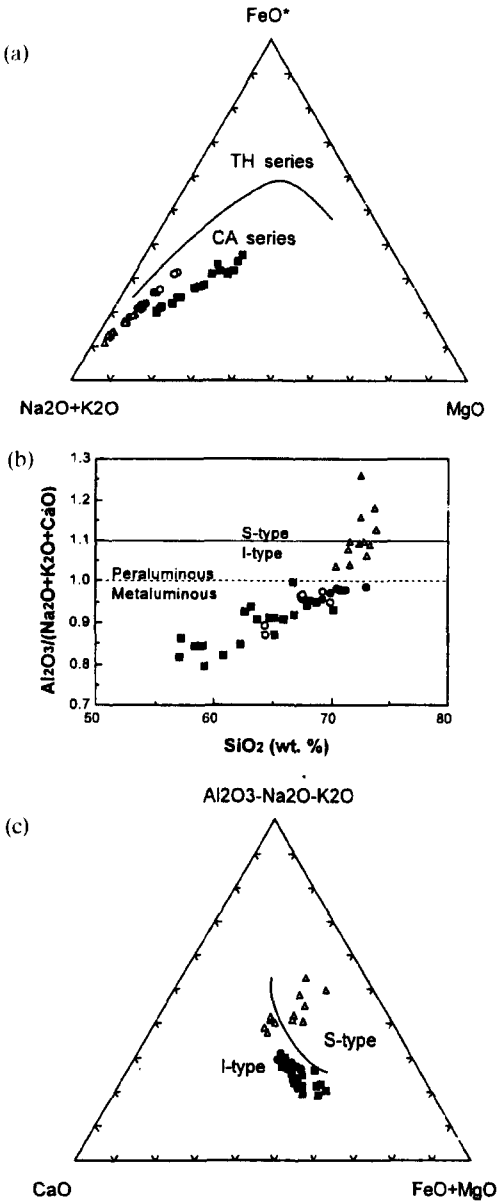


Fig. 7. Discrimination diagrams for the granitic rocks in the Cheongsan area. a, AFM diagram. The granitic rocks show calc-alkaline characteristics, but the variation trend of Baegrog granodiorite is different from those of Cheongsan porphyritic granite and two mica granite. Boundary between tholeiitic and calc-alkaline is from Kuno (1968). b, SiO₂ vs. molar Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO) diagram. Baegrog granodiorite and Cheongsan porphyritic granite show metaluminous nature, whereas Cheongsan two mica granite does peraluminous one. c, triangular diagram of CaO-(Al₂O₃-Na₂O-K₂O)-(FeO+MgO) in mole percent. Symbols are the same as Fig. 5.

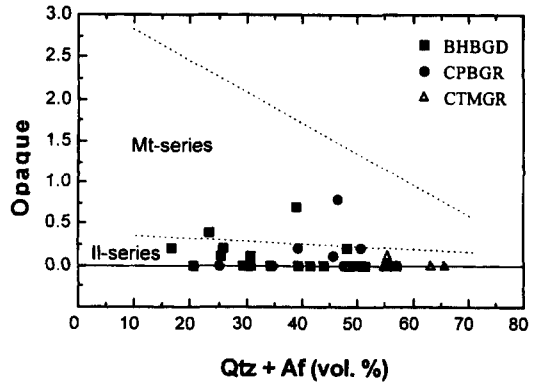


Fig. 8. Quartz+alkali feldspar vs. opaque mineral contents in modal percent. The granitic rocks in the area generally represent ilmenite-series nature. Symbols are the same as Fig. 5.

Vernon, 1986), 거정들의 마그마기원에 대한 하나의 증거가 된다.

알칼리장석의 결정 내부에는 일정한 성장면을 따라 흑운모와 사장석 결정들이 배열되어 있으며 (Fig. 4), 이 또한 거정이 마그마기원임을 지시한다 (Hibbard, 1965, 1979). 특히 포유물로 나타나는 사장석의 자형적 형태와 누대구조는 사장석이 알칼리장석내에서 성분의 용리로 말미암아 생성된 것이 아님을 지시한다. 거정의 성장면을 따라 분포하는 이 포유물들은 거정의 빠른 성장속도에 떠 밀려 결정의 외곽부에 분포하다가 최종적으로 거정 내부에 포획당하게 된다. 즉, 비교적 과냉각 정도가 낮은 상태에서 알칼리장석의 빠른 성장속도와 낮은 밀도의 핵형성은 사장석이 거정내에 포획되는 이상적 조건을 제공한다. 또한 석기에 나타나는 사장석보다 알칼리장석 내부의 포유물로 나타나는 사장석의 크기가 작는데, 이는 포유물의 사장석이 마그마 정출작용의 비교적 초기에 정출된 것임을 나타내며 (Higgins and Kawachi, 1977), 화강섬록암의 조성에서 알칼리장석의 성장속도가 최대일 때의 과냉각 정도에서 사장석의 성장속도는 알칼리장석의 그것보다 매우 느려 크게 성장할 수 없었음을 지시한다 (Swanson, 1977).

알칼리장석의 거정이 마그마기원임을 나타내는 또 다른 증거는 알칼리장석이 Ba 함량에 대해 조성적 누대구조를 보이는 것이다. Long과 Luth(1986)는 뉴멕시코 북부의 선캠브리아 화강암체에 산출되는 알칼리장석 거정에서 확인되는 Ba 함량의 변화와 모델계산으로부터 마그마기원의 거정에는 Ba함량의 정상/역전 누대구조가 있음을 지적했다. 거정

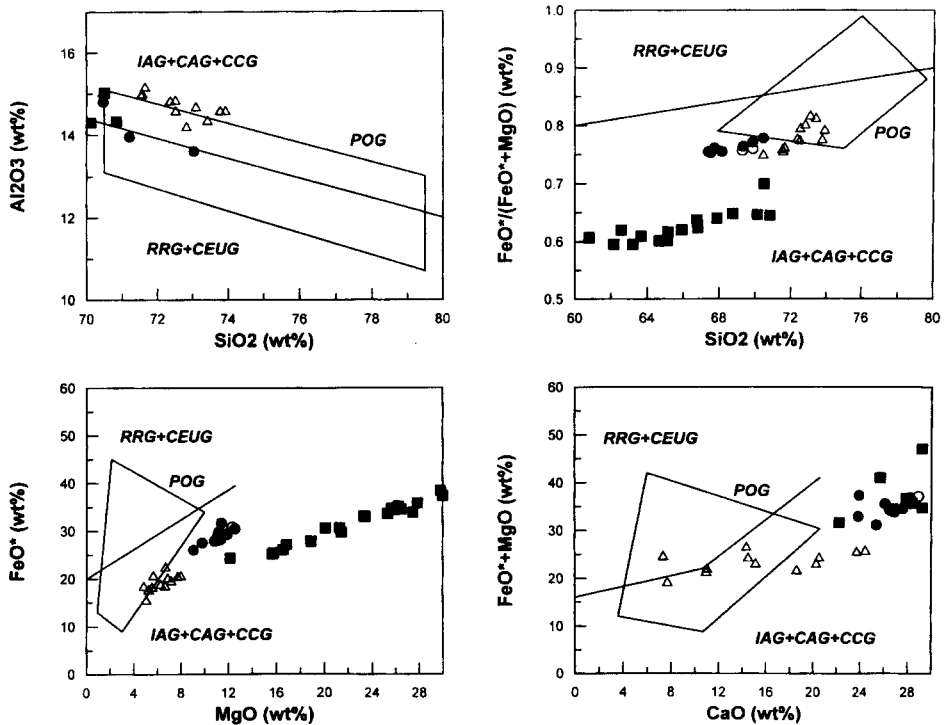


Fig. 9. Tectonic discrimination diagram (Maniar and Piccoli, 1989). The granitic rocks in the Cheongsan area represent the granite type from arc and/or collisional environments. Abbreviations : RRG, rift related granite ; CEUG, continental epeirogenic uplift granite ; POG, post-orogenic granite ; IAG, island-arc granite ; CAG, continental-arc granite ; CCG, continental collision granite. Symbols are the same as Fig. 5.

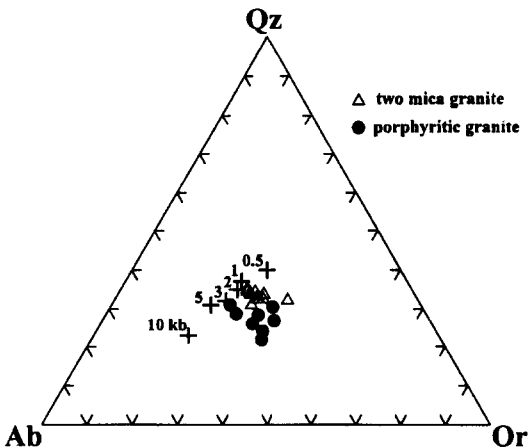


Fig. 10. Ternary diagram of normative quartz-albite-orthoclase. H₂O-saturated minimum and eutectic points are shown as '+'. For 0.5, 1 and 3 kb, the data of Tuttle and Bowen (1958) was used ; for 2 and 5 kb of Holtz *et al.* (1992) ; for 10 kb of Luth *et al.*, (1964). Symbols are the same as Fig. 5.

의 중심부에서 주변부를 향해 관찰 혹은 예측되는

Ba 함량의 체계적 변화는 알칼리장석과 멜트 사이에서 일어나는 Ba의 분배에 기인하는 것으로 반상 변정이나 열수작용에 의한 장석에서는 나타나지 않는다는 것이다. 청산 반상 화강암의 알칼리장석에서는 정성적이거나 Ba 함량의 변화는 관찰되지 않아, 이에 대한 마그마기원의 증거를 구할 수 없었다. 한편, Long과 Luth(1986)가 지적하고 있듯이 알칼리장석에 대한 Ba의 분배는 여러가지 요인 -Ba의 규산염 멜트에 대한 확산계수, 멜트 내의 물의 함량, 결정의 성장속도 등- 에 영향을 받는다. 따라서 그들의 결과는 Ba 함량의 누대구조가 보이는 것은 마그마기원으로 취급해도 문제가 없다는 정도이며, Ba에 대한 조성적 누대구조가 없다는 것으로부터 마그마기원이 아니라는 결론에는 무리가 있다. 한편, 청산 반상 화강암의 알칼리장석 거정에서 중심부와 주변부에서 Or/Or+Ab 값의 차이가 발견되지 않는데 대한 하나의 해석으로서 거정의 매우 빠른 성장속도로 말미암아 마그마의 K₂O/Na₂O 값의 변화가 거정의 조성에 영향을 미치지 못했을 가능성이 제기된다.

청산 반상 화강암에서 알칼리장석 거정은 화강암

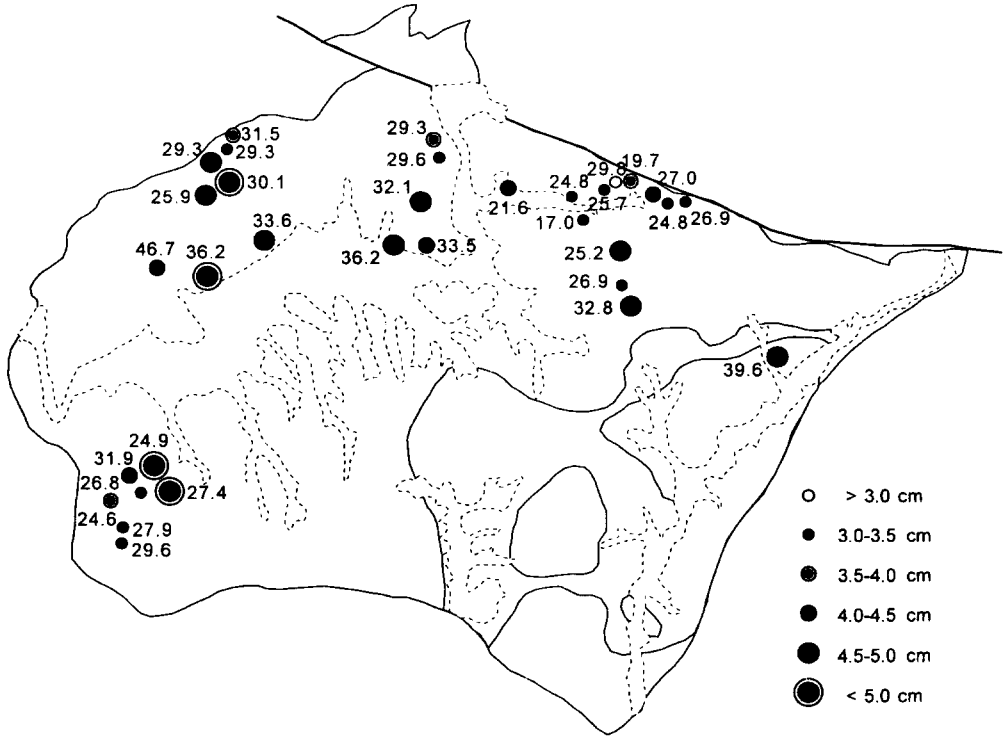


Fig. 11. Distribution of size and content of alkali feldspar megacrysts within the Cheongsan porphyritic granite body.

내의 매픽 포획암 내부와 포획암과 화강암의 경계에서도 발견된다. 특히 경계부를 가로질러 성장해 있는 거정은 반상변정의 형태로 파악될 수도 있다. 하지만 매픽 포획암이 거정을 포함한 반상 화강암의 마그마와 혼합된 매픽 마그마 액적 (blob)으로부터 유래되었다고 생각하면 거정의 산출 양상이 마그마 기원이라는 가능성도 충분하다(Vernon, 1986).

청산 반상 화강암은 위에서 언급한 여러 사실과 더불어 알칼리장석 거정과 석기 입자의 2원적인 크기 분포로부터 화강암질 마그마의 2단계 정출작용으로 말미암아 형성되었을 가능성이 있다. 즉, 지하심부에 관입한 화강암질 마그마가 초기에 서서히 냉각하면서 과냉각 정도가 작을 때 핵형성 밀도는 낮은 반면 결정의 성장속도는 빨라져 알칼리장석의 거정이 형성된다. 또 이 시기에 잔류 멜트의 양도 풍부하여 거정으로 이루어진 마그마 염리가 발달된다. 또한 매픽 마그마 액적과의 혼합은 거정이 매픽 포획암의 내부와 그 경계부에 발달하게 된 하나의 과정이었을 것이다. 한편, 마그마 온도의 급속한 하강 등의 원인으로 말미암아 과냉각의 정도가 커지면, 핵형성 밀도가 증가하여 여러 광물들이 다발적

으로 정출되기 시작하여 석기에는 보다 작은 입자의 광물들로 채워지게 될 것이다.

한편, 2단계의 정출작용에 필요한 차별적인 과냉각 정도는 화강암질 마그마의 생성으로부터 관입에 이르는 과정에서 설명될 것이다. 정창식과 장호완(1996)이 제시한 동위원소 자료에 의하면, 반상 화강암은 높은 Sr 초생값 (0.7144)를 가져 지각물질 기원의 마그마로부터 유래되었음을 알 수 있다. 따라서 지각하부에서 부분용융이 일어난 시기에 화강암질 마그마와 주변과의 온도차는 작을 것이고, 마그마 형성의 초기는 비교적 냉각이 느리게 진행된다. 그러나 마그마의 상승이 진행되어 관입·고결되는 심도에 이르면 마그마와 주변 사이의 온도차가 커져 빠른 냉각이 일어날 것이다. 지각물질 기원의 화강암질 마그마에서 초기의 느린 냉각속도와 후기의 빠른 냉각속도는 인제-홍천 암체에서도 지적된 바 있다(Jwa et al., 1990).

결론

- 1) 청산지역의 화강암류는 기재적인 특징으로부

터 백록 화강섬록암, 청산 반상 화강암 및 청산 복운모 화강암으로 분류할 수 있다.

2) 백록 화강섬록암의 각섬석은 회각섬석군에 속하고, 중심부의 Mg-보통각섬석에서 주변부의 양기석질 보통각섬석으로의 조성적 변화를 보인다. 청산 지역 화강암류의 흑운모는 금운모와 애니이트의 중간 조성을 나타낸다. 복운모 화강암에서 산출되는 백운모는 그 조성으로부터 마그마 정출의 1차적인 백운모로 판단된다.

3) 주성분 산화물의 변화 경향에서 각각의 화강암류는 체계적인 변화를 나타낸다. 백록 화강섬록암은 청산 반상 화강암 및 복운모 화강암과는 모든 성분의 변화 경향에서 매우 뚜렷한 차이를 보인다. 반상 화강암과 복운모 화강암의 경우 일부 성분에서는 연속성이 관찰되지만, 몇몇 원소에서는 뚜렷한 차이를 보인다. 따라서 청산 지역의 세 화강암류는 각각 서로 다른 조성의 마그마로부터 형성된 것으로 판단된다.

4) 화강암류의 전암 화학조성으로부터 청산 지역 화강암류는 칼크-알칼리질임을 알 수 있다. 한편, 백록 화강섬록암과 청산 반상 화강암은 그 전암 조성이 I-타입과 메타알루미나질임에 비해, 청산 복운모 화강암은 I-/S-타입 양쪽과 과알루미나질을 나타낸다. 불투명광물의 함량과 전암 대자율값으로부터 청산지역 화강암류는 모두 티탄철석계열에 속해 비교적 환원적인 환경에서 관입·고결되었음을 알 수 있다. 또한 세 화강암류는 활동성 대륙연변부에서 일어난 화성활동의 결과로 형성되었음이 추정된다.

5) 청산 반상 흑운모 화강암에 나타나는 알칼리장석의 거정은 그 결정의 크기, 형태, 배열 및 포유물의 분포 양상 등으로부터 마그마기원임을 추정할 수 있다. 알칼리장석 거정의 크기와 형태는 결정의 느린 핵형성과 빠른 성장속도에 기인하며, 거정과 석기가 2단계의 정출작용으로 형성된 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 기초과학연구소 학술연구비(BSRI-96-5404)에 의해 연구되었다. 논문에 대한 자세한 지적을 해 주신 한국자원연구소의 진명식 박사님, 연세대학교의 권성택 교수님과 기초과학지연연구소의 정창식 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

김용준, 박영석, 강상원, 1994, 호남 전단대 내에 분포하

는 염리상 화강암류의 지질시대와 생성과정에 관한 연구. *자원환경지질학회지*, 27, 247-261.

이종익, 1994, X-선 형광분석기를 이용한 화강암류의 정량분석 프로그램 개발에 관한 연구. *한국해양연구소*, BSPE 00431-671-7, 43pp.

정창식, 장호완, 1996, 중부 옥천 변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 조구조적 연관성 연구(I): 보은지역 화강암류의 암석화학과 동위원소 지구화학. *지질학회지*, 32, 91-116.

조동룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각두께의 진화. *지질학회지*, 30, 41-61.

좌용주, 이종익, Kagami, H., 1995, 중부 옥천대 화강암류의 새로운 연대. *대한지질학회 제 50차 학술발표회 요약집*, 17.

주승환, 김성재, 1985, Rb-Sr법에 의한 영남육괴 연대 측정 연구(I). *국토기초지질조사연구* 85-24, 한국동력자원연구소, 7-40.

Arzi, A. A., 1978, Critical phenomena in the rheology of partially melted rocks. *Tectonophysics.*, 44, 173-184.

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.*, 90, 465-482.

Booth, B., 1968, Petrogenetic significance of alkali feldspar megacrysts and their inclusions in Cornubian granites. *Nature*, 217, 1036-1038.

Cheong, C.S., 1997, Sr, Nd, and Pb isotope systematics and geochemistry of granitic rocks in the central Ogcheon Belt, Korea. Unpub. PhD thesis, Seoul National University, 142pp.

Chivas, A.R., 1981, Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization. Part I. Mafic silicates from the Koloula igneous complex. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 389-403.

Day, H.W. and Fenn, P.M., 1982, Estimating the P-T-X_{H₂O} conditions during crystallization of low calcium granites. *J. Geol.*, 90, 485-507.

Dusul-Bacon, C. and Aleinikoff, J. N., 1985, Petrology and tectonic significance of augen gneiss from a belt of Mississippian granitoids in the Yukon-Tanana terrain, east-central Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, 411-425.

Fenn, P. M., 1977, The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts. *Can. Mineral.*, 15, 135-161.

Hibbard, M. J., 1965, Origin of some alkali feldspar phenocrysts and their bearing on petrogenesis. *Am. J. Sci.*, 263, 245-261.

Hibbard, M. J., 1979, Myrmekite as a maker between peraqueous and postaqueous phase saturation in granitic systems. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, 1047-1062.

- Hibbard, M. J., 1981, The magma mixing origin of mantled feldspars. *Contrib. Min. Petrol.*, 76, 158-170.
- Hibbard, M. J., 1987, Deformation of incompletely crystallized magma systems: granitic gneisses and their tectonic implications. *J. Geol.*, 95, 543-561.
- Higgins, N.C. and Kawachi, Y., 1977, Microcline megacrysts from the Green Lake granodiorite, eastern Fiordland, New Zealand. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, 20, 273-286.
- Holtz, F., Pichavant, M., Barbey, P. and Johannes, W., 1992, Effects of H₂O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 2 and 5 kbar. *Am. Mineral.*, 77, 1223-1241.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, 27, 293-305.
- IUGS subcommission on the systematics of Igneous Rocks, 1973, Classification and nomenclature of plutonic rocks: recommendations. *Geol. Newslett.*, 2, 110-127.
- 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., 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.
- Kerrick, D. M., 1969, K-feldspar megacrysts from a porphyritic quartz monzonite central Sierra Nevada, California. *Am. Mineral.*, 54, 839-848.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basaltic magmas: In *Basalt*. Interscience, John Wiley & Sons, New York, 623-688.
- Kwon, S.H., Park, Y.D., Park, C.S. and Kim, H.S., 1997, Microstructural, mineralogical and chemical changes during ductile deformation of the Cheongsan granite. In *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent* (eds. Lee, Y.I. & Kim, J.H.), *Geol. Soc. Korea 50th Anniv. Int'l Symp.*, 195-200.
- Leake, 1978, Nomenclature of amphiboles. *Am. Mineral.*, 63, 1023-1052.
- Lee, D.S., 1971, Study on the igneous activity in the middle Ogcheon geosynclinal zone, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 7, 153-216.
- Long, P.E. and Luth, W.C., 1986, Origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks: Implications of a partitioning model for barium. *Am. Mineral.*, 71, 367-375.
- 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.
- Maniar, P. and Piccoli, P. M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101, 635-643.
- 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.
- 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.
- 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, 1992, Phase relations and compositional dependence of H₂O solubility in quartz-feldspar melts. *Chem. Geol.*, 96, 303-319.
- Robinson, P., Spear, F.S., Schumacher, J.C., Laird, J., Klein, C., Evans, B.W. and Doolan, B.L., 1982, Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrences and theory. *Mineral. Soc. Am., Reviews in Mineralogy* 9B, 1-227.
- Speer, J.A., 1984, Micas in igneous rocks. In *Micas* (ed. Bailey, S.W.), *Reviews in Mineralogy* 13. *Mineral. Soc. Am.*, 299-356.
- Swanson, S. E., 1977, Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. *Am. Mineral.*, 62, 966-978.
- Tuttle, O. F. and Bowen, N. L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 74, 153pp.
- Vernon, R. H., 1986, K-feldspar megacrysts in granites-phenocrysts, not porphyroblasts. *Earth Sci. Rev.*, 23, 1-63.
- Weiss, S. and Troll, G., 1989, The Ballachulish igneous Complex, Scotland: petrology, mineral chemistry and order of crystallization in the Monzodiorite-quartz diorite suite and in the granite. *J. Petrol.*, 30, 1069-1115.

(책임편집 : 권성택)

Mineral chemistry and major element geochemistry of the granitic rocks in the Cheongsan area

Hee Sagong and Yong-Joo Jwa¹

Department of Earth System Science, Yonsei University,

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University

ABSTRACT : Granitic rocks in the Cheongsan area consist of three plutons-Baegrog granodiorite, Cheongsan porphyritic granite, and two mica granite. Amphiboles from the Baegrog granodiorite belong to the calcic amphibole group and show compositional variations from magnesio-hornblende in the core to actinolitic hornblende in the rim. Biotites from the three granites represent intermediate compositions between phlogopite and annite. Muscovites from the two mica granite are considered to be primary muscovite in terms of the occurrence and mineral chemistry. Each granitic rock reveals systematic variation of major oxide contents with SiO₂. Major oxide variation trends of the Baegrog granodiorite are fairly different from those of Cheongsan porphyritic granite and two mica granite. The latter two granitic rocks are also different with each other in variation trends for some oxides. Thus three granitic rocks in the Cheongsan area were solidified from the independent magmas of chemically different, heterogeneous origin. The granitic rocks in the area show calc-alkaline nature. The whole rock geochemistry shows that the Baegrog granodiorite and Cheongsan porphyritic granite belong to metaluminous, I-type granite, whereas the two mica granite to peraluminous, I-/S-type granite. The opaque mineral contents and magnetic susceptibility represent that the granitic rocks in the area are ilmenite-series granite, indicating that each magma was solidified under relatively reducing environment. The tectonic environment of the granitic activity in the area seems to have been active continental margin. Alkali feldspar megacryst in the Cheongsan porphyritic granite is considered to be magmatic, judging from the crystal size, shape, arrangement, and distribution pattern of inclusions. The petrographical characteristics of the Cheongsan porphyritic granite can be explained by two stage crystallization. Under the smaller degree of undercooling the alkali feldspar megacrysts rapidly grew owing to slow rate of nucleation and fast growth rate. At the larger degree of undercooling the nucleation rate and density drastically increased and the small crystals of the matrix were formed.

Key words : Baegrog granodiorite, Cheongsan porphyritic granite, two mica granite, heterogeneous origin, alkali feldspar megacryst, degree of undercooling, two stage crystallization