경상분지내 백악기 화강암류의 정치 깊이에 관한 연구

고정선 · 윤성효 · 안지영 · 김향수 · 최유종
부산대학교 사범대학 지구과학교육과

Emplacement Depth of Cretaceous Granites in Kyeongsang Basin, E Korea

Jeong-Seon Koh · Sung-Hyo Yun · Ji-Young Ahn · Hyang-Soo Kim · You-Jong Choi
Department of Earth Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract: In Kyeongsang basin, there were very dynamic magmatic activities, resulting to form volcanic and plutonic rocks. A plutonic recycle appeared in this region. Presumption of the pressure for hornblende-bearing granitic rock among the plutonic rocks, can support important informations for the emplacement depth of Cretaceous Bulgugsa granites in Kyeongsang basin. Al^T(Al total) contents of hornblende is related to the pressure, oxygen fugacity, and compositions of other minerals having the solid solution. So we apply the Al^T content of hornblende to several empirical and experimental geobarometer systems to presume the pressure and to determine the emplacement depth of Cretaceous Bulgugsa granites in Kyeongsang basin from the inferred pressure. With the result that we applied the Al^T contents of hornblende to the various geobarometers, there was a positive relationship between the pressure and Al^T. The minimum pressure value ranges from 0.73 to 1.70kbar in Kyeongju and the maximum value from 2.02 to 3.16kbar in Kimhae. And then the tectonic setting in Kyeongsang basin has no relation to the emplacement depth of Cretaceous granites and means variations with the movement of vertical component in each area. As we suppose that the density of earth's crust is 2.8g/cm^3, the average values of the emplacement depth ranges in each area range from 2.6 to 11.4km. These data confirm the previous idea about the emplacement depth of Cretaceous granites in Kyeongsang basin, and these geobarometers using the Al^T contents of hornblende is available though they have much limits. Therefore Cretaceous Bulgugsa granites in Kyeongsang basin was the shallow depth intrusive rock, and the exposed granites was the shallow depth crust.

Key words: Cretaceous Bulgugsa granite, hornblende geobarometer, emplacement depth.

요 약: 경상분지내 백악기에는 매우 활동적인 마그마 활동이 많이 있었으며, 그 결과 여러 화산암과 심성암을 형성하였고, 반심성암의 관입에 이르는 하나의 화성윤회가 잘 나타나는 지역이다. 이러한 심성암 중 각섬석을 함유하고 있는 화강암에 대한 압력 추정은 경상분지내 백악기 불국사화강암류의 정치 깊이에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 각섬석의 성분 중 Al^T(Al total)함량은 온도, 산소분압, 그리고 고용체를 가지고 있는 광물들의 성분과 무관하고 압력에만 관계가 있다. 그래서 우리는 각섬석의 Al^T 함량을 여러 경험적, 실험적 지압계에 적용하여 압력을 유추할 수 있었고, 이 각섬석을 함유하는 암석은 주위 다른 암석과 밀접한 관련성이 있으므로, 유추된 압력으로 경상분지내 백악기 불국사화강암류의 정치 깊이를 결정할 수 있었다. EPMA 분석을 통해 구한 각섬석 Al^T값을 여러 관계식에 적용해 본 결과, 압력과 Al^T값 사이에는 정의 상관 관계가 있었고, 경상분지내 백악기 화강암류 중에서 가장 작은 압력 값을 가지는 지역은 경주지역(0.73~1.70kbar)이었고, 가장 높은 값을 가지는 지역은 김해지역(2.02~3.16kbar)이었다. 그리고 유추된 압력 값이 김해, 거제, 부산, 마산, 남해, 경주 순서로 높기 때문에 경상분지의 지구조가 백악기의 화강암류의 정치 깊이와는 상관 관계가 없음을 나타내고 각 지역마다 수직성분의 운동이 달랐음을 의미한다. 그리고 지각의 밀도가 2.8g/cm^{3}로 가정했을 때, 경상분지의 화강암류의 압력평균값이 약 0.73~3.16kbar의 범위를 가졌고, 경상분지내 백악기 화강암류의 정치 깊이는 2.6~11.4km범위를 가졌다. 이는 경상분지 화강암류에 대해 유추된 기존의 정성적인 생각과 일치한다는 것을 알 수 있었고, 각섬석의 Al^T함량을 이용한 여러 경험적, 실험적인 압력계가 많은 제한점이 있지만 경상분지의 백악기 불국사화강암류에는 정성적으로 유효함을 알 수 있었다. 우리는 최종적으로 경상분지내 백악기 화강암류는 천부관입암체이고 노출된 화강암류가 천부지각이라는 것을 알 수 있었다.

주요어: 백악기 불국사화강암, 각섬석지압계, 정치깊이

서 언

지구의 지각에 많은 부분을 차지하는 화강암질암체가 정치한 깊이는 심성암 자체의 열 역사, 심성활동과 관련된 주위의 변성작용 및 광화작용 그리고 지구조 운동 등을 해석하는데 중요한 정보 중의 하나이다. 또한 압력은 마그마에서 정출하는 광물의 종류 및 정출순서를 결정하는 요인이기 때문에 마그마의 성분변화에도 영향을 끼칠 수 있는 변수이다(Swanson, 1977; Zen and Hammarstrom, 1986; Hyndman, 1981; 조등룡과 권성택, 1994). 일반적으로 우리 나라 중생대 화강암은 압력에 민감한 광물조합을 갖지 않아 압력을 직접적으로 유추하기 힘들다. 그리고 화강암과 성인적으로 직접 연관된 광상이나 접촉 변성암으로부터 압력을 유추할 수 있으나 이 경우는 광범위한 조사가 필요하고 이들이 항상 압력에 민감한 화학 조성을 가지는 것은 아니다. 그래서 Hammarstrom and Zen(1986)에 의해 제안된 각섬석의 Al^T(Al total)함량을 이용한 지압계를 이용하면, 정치 압력의 추정이 가능하다고 제안하였다(조등룡과 권성택, 1994). 이러한 방법은 화성암체의 고결압력을 정량적으로 알 수 있는 가능성을 제시한 획기적인 것이라 할 수 있다.

우리 주변 경상도 일원 경상분지내 백악기에 매우 활동적인 마그마 활동이 많이 있었으며, 그 결과 여러 화산암과 심성암을 형성하였다. 즉 경상분지는 화산활동에서부터 심성암과 반심성암의 관입에 이르는 하나의 화성윤회가 잘 나타나는 지역이다. 경상분지내 심성암이 나타나는 지역은 경주, 부산, 김해, 마산, 거제, 남해 일대이다(Fig. 1). 이러한 심성암은 주로 불국사 화성활동에 의한 수반한 관입암체이고 경상분지의 불국사화강암에 대한 K-Ar법에 의한 연대 측정 결과에 의하면, 89Ma에서 58Ma로서 연대는 백악기 말 캠파니언(Campanian)에서 고제 3기에 형성된 것으로 보고되어 있고 이러한 불국사화강암의 가장 대표적인 것은 흑운모화강암이며, 곳에 따라 각섬석화강암, 석영몬조나이트, 화강섬록암, 섬록암 등으로 넓은 범위에 걸쳐서 산출되고 있다(원종관 외, 1989). 이러한 심성암은 공간적으로 밀접하게 산출되고 있으므로, 이러한 심성암 중 각섬석을 함유하고 있는 심성암(각섬석화강암)에 대한 압력의 추정은 경상분지내 백악기 화강암류의 정치깊이에 대한 중요한 정보를 제공할 것으로 생각된다.

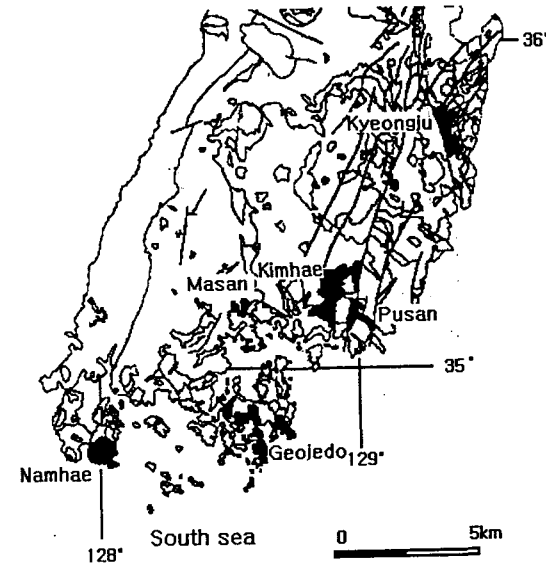

Fig. 1. Sample location map of the hornblende-bearing granites in southeast Kyeongsang basin.

그러므로 본 연구는 각섬석내 Al^T를 이용한 압력계에 대한 이론적인 배경을 검토하고, 이러한 각섬석 지압계를 이용하여 경상분지내 김해, 거제, 부산, 마산, 남해, 경주지역의 각섬석화강암류의 정치 깊이를 추정하고자 한다.

경상분지 지구조적 환경

경상분지는 유라시아판과 태평양판이 판구조 운동에 의해 서로 부딪치는 압력이 작용하는 판경계부(compressive plate boundary)이므로, 밀도가 높은 태평양 판이 저밀도의 대륙지각으로 구성된 유라시아판 아래로 섭입하는 베니오프대에서 마찰에 의한 결과, 많은 지진과 부분용융에 의해 마그마가 생성되고 이 마그마에 의해 활동적인 화성활동이 있었던 지역이다. 이렇게 생성된 마그마는 칼크-알카리 마그마계열의 분화 경로를 겪으면서 진화하였으며, 마그마가 진화하는 동안 이 지역 지각의 두께는 약 30km 안팎이었던 것으로 생각되고 있고 경상분지의 백악기 심성암류들은 구성광물의 차이에 따라 섬록암, 토날라이트, 석영몬조나이트, 화강섬록암, 화강암, 각섬석흑운모화강암, 알칼리장석화강암 등으로 분류되고 있으며 부산, 김해 창원 등지에 소규모의 반려암이 산출하고 있다. 이 반려암들은

화강암에 선행하여 관입하였다고 기재되고 있다(김중욱과 이윤종, 1984; 윤성효와 황인호, 1990; 김희남, 1992; Fletcher and Rundle, 1997). 우리가 연구하고자 하는 각섬석은 흑운모화강암과 알칼리장석 화강암에서 발견하기 어렵고 화강섬록암, 각섬석흑운모화강암에 많이 나타나고 있다.

각섬석의 화학조성

연구지역 화강암질암체의 각섬석에 대한 분석은 기초과학지원연구소 대전본소의 전자현미분석기(EPMA)로 분석하였고, 이 분석방법은 자기장 렌즈에 의해 발생된 미세한 전자선을 광물표면에 조사(照射)하여 거기에서 나오는 2차 X-선스펙트럼의 파장과 강도를 분해함으로써 광물에 들어있는 원소들을 측정하는 방법이다. 이 분석방법은 지름이 1μm인 점을 분석할 뿐만 아니라 광물입자 전체에 대한 원소들의 분포의 변화도 분석할 수 있는 특징을 가진다. 시료가 파괴되지 않으므로 광물 연구에서 가장 좋은 분석기기 중의 하나이다. 그래서 잘 연마된 각섬석 박편에 전자선을 투과하여 나오는 2차 X-선 스펙트럼을 분해하여 광물에 들어 있는 원소들을 측정하였다(Table 1). 부산, 김해, 마산지역의 화강암류내의 각섬석 분석자료는 Lee(1991)에서 인용하였다. 그리고 EPMA 광물분석에 의해 얻어진 화학성분에 근거하여 표준각섬석(standard amphibole)의 화학성분을 나타내면 다음과 같은데 물과 수소성분이 결정되었거나 각섬석이 oxy-amphibole이라는 증거가 있는 경우는 22(O), 2(OH, F, Cl)로 계산하고 H_2O^+, F, Cl 등을 정확히 결정할 수 없을 때는 23(O)로 계산한다.

각섬석의 standard formula:

$A_{0-1}B_2C_5^{VI}T_8^{IV}O_{22}(OH, F, Cl)_2$

$A_{0-1}=Na;\ B_2=Na, Li, Ca, Fe^{2+}, Mn;\ C_5=Mg, Fe^{2+}, Mn, Al, Fe^{3+};\ T_8=Si, Al$

위의 계산이 부적당하다고 생각되면, OH+F+Cl의 수를 적당한 다른 수로 변화시켜서 적용한다. 그리고 화강암류에 함유된 각섬석의 성분을 각섬석에 함유된 B site의 Ca양과 Na양에 따라 각섬석을 크게 아래와 같은 4개의 그룹(Leake, 1978)으로 나눌 수 있다(Fig. 2).

$(Ca+Na)_B < 1.34$

→ Iron-magnesium-manganes group

$(Ca+Na)_B \geq 1.34,\ Na_B < 0.67$

→ Calcic amphibole group

$(Ca+Na)_B \geq 1.34,\ 0.67 \leq Na_B < 1.34$

→ Sodic-calcic amphibole group

$Na_B \geq 1.34$

→ Alkali amphibole group

Fig. 2에서 보듯이 연구지역 화강암류의 각섬석은 Ca 각섬석군(Calcic amphibole group)에 속한다.

각섬석지압계의 이론적 배경 및 적용

각섬석 지압계의 이론적 배경은 상률(phase rule)이다(Hammarstrom and Zen, 1986). 각섬석의 성분 중 Al^T는 온도, 산소분압, 고용체를 가지고 있는 광물들의 성분과 무관하고 압력에만 관계가 있다(Spear, 1984). (Table 2)

칼크-알칼리 계열의 화강암질 마그마에서 주성분의 수는 일반적으로 11개이다. 화강암질 마그마의 결정화 작용의 최종단계에서, 즉 고상선(solidus) 근처에서 일반적으로 최후의 멜트와 멜트에서 분리된 H_2O를 함유하는 유체상(fluid phase)이 존재한다고 가정할 수 있기 때문에 상의 수는 각섬석, 흑운모, 사장석, 알칼리 장석, 석영, 인회석, 스핀 및 Fe-Ti 산화광물과 더불어 모두 10개가 된다. 이 경우 깁스(Gibbs)의 상률에 적용해 보면 다음과 같다.

$$P+F=C+2$$

여기서, P는 상(phase)의 수, F는 자유도(degree of freedom), C는 성분(component)의 수이다. 따라서 자유도의 수는 3개인데, 변수는 온도, 압력, 산소분압, 그리고 고용체를 가지고 광물들(특히, 사장석, 각섬석, 흑운모)의 성분이다. 일반적으로 산소분압은 위의 광물조합에 의해 완충된다고 생각되고, 물이 포화된 멜트의 고상선은 2kb 이상의 압력에서 비교적 일정한 온도범위(100℃ 미만)를 보이기 때문에 자유도의 수를 하나로 줄일 수 있다. 이 경우, 압력은 고용체를 이루는 광물의 성분과 밀접한 관계를 가지는데, 광물 중 흑운모의 성분은 흔히 산소 분압과 밀접하게 관계되어 있다고 생각되고, 위의 광물조합을 가지는 대부분의 칼크-알칼리계

Table 1. Representative microprobe analyses of amphiboles in granites from the Kyeongsang basin.

	Kyeongju			Pusan			Kimhae			Masan			Geoje			Namhae		
Sample	AL-36-2	713C	004C	605-1c*	608c*	608r*	201-1c*	211Orc*	608r*	303-1c*	812c*	908r*	GE-122	GE-18	GE-18A	NA26-C	NA28	NA40
SiO_2	47.618	50.24	48.67	43.97	44.85	45.16	44.54	45.58	44.13	47.56	45.44	46.62	45.779	44.906	47.06	48.321	46.311	47.446
TiO_2	1.168	1.33	0.73	0.68	1.52	1.34	1.93	1.68	1.58	1.41	1.78	1.58	1.766	1.823	1.555	1.092	0.876	1.557
Al_2O_3	5.774	5.89	6.44	6.39	6.91	6.54	7.78	7.89	7.44	6.8	8.09	6.97	6.435	8.056	6.566	5.373	6.587	5.963
FeO	15.026	12.68	13.99	28.44	22.26	24.51	19.46	20.65	22.66	15.7	17.55	17.3	17.96	14.915	13.377	16.521	20.558	15.534
MnO	0.766	0.5	0.5	1.75	0.96	1.26	0.39	0.65	0.56	0.3	0.38	0.36	0.517	0.453	0.638	0.468	0.533	0.727
MgO	13.321	14.38	13.45	4.77	8.55	7.1	9.81	9.15	7.66	13.12	11.33	11.75	11.216	12.629	14.338	13.152	10.027	13.683
CaO	11.303	11.22	10.78	9.39	9.98	10.23	10.38	10.29	10.27	11.11	10.58	10.79	10.73	10.872	11.145	10.114	10.154	9.574
Na_2O	1.362	0.95	1.4	1.98	2.25	1.98	1.95	1.69	1.98	1.56	1.81	1.46	1.573	1.803	1.61	1.626	1.801	2.807
K_2O	0.437	0.56	0.48	0.73	0.7	0.73	0.87	0.51	0.84	0.47	0.63	0.59	0.733	0.707	0.547	0.443	0.73	0.481
Total	96.77	97.75	96.44	98.1	97.98	98.85	97.11	98.09	97.12	98.03	97.59	97.42	96.71	96.16	96.84	97.11	97.58	97.77
Number of ions on the basis of 23 oxygen																		
TSi	7.112	7.283	7.212	6.97	6.891	6.953	6.805	6.893	6.854	7.015	6.82	6.982	6.961	6.78	6.982	8.203	7.041	7.037
TAl	0.888	0.717	0.788	1.03	1.109	1.047	1.195	1.107	1.146	0.985	1.18	1.018	1.039	1.22	1.018	0.797	0.959	0.963
CAl	0.128	0.288	0.336	0.163	0.141	0.138	0.205	0.298	0.214	0.197	0.25	0.211	0.113	0.213	0.129	0.146	0.221	0.079
CTi	0.131	0.145	0.081	0.081	0.176	0.155	0.222	0.191	0.185	0.156	0.201	0.178	0.202	0.207	0.174	0.122	0.1	0.174
CMg	2.966	3.108	2.971	1.127	1.958	1.63	2.234	2.063	1.773	2.885	2.535	2.623	2.542	2.843	3.171	2.923	2.273	3.025
CFe^{2+}	1.775	1.459	1.612	3.628	2.725	3.077	2.339	2.448	2.828	1.762	2.014	1.988	2.142	1.738	1.526	1.809	2.406	1.722
BFe^{2+}	0.102	0.078	0.122	0.142	0.135	0.079	0.148	0.164	0.116	0.175	0.189	0.79	0.142	0.146	0.134	0.25	0.208	0.205
BMn	0.097	0.061	0.063	0.235	0.125	0.164	0.05	0.083	0.074	0.037	0.048	0.046	0.067	0.058	0.08	0.059	0.069	0.091
BCa	1.801	1.743	1.712	1.595	1.643	1.687	1.699	1.667	1.709	1.756	1.701	1.731	1.748	1.759	1.772	1.615	1.654	1.521
BNa	0	0.118	0.104	0.028	0.097	0.07	0.103	0.086	0.102	0.032	0.062	0.044	0.044	0.038	0.014	0.075	0.069	0.182
ANa	0.394	0.149	0.299	0.581	0.573	0.521	0.475	0.41	0.494	0.415	0.465	0.38	0.42	0.49	0.449	0.395	0.462	0.625
AK	0.083	0.104	0.091	0.148	0.137	0.143	0.17	0.098	0.166	0.088	0.121	0.113	0.142	0.136	0.104	0.084	0.142	0.091

* Data from Lee(1991).

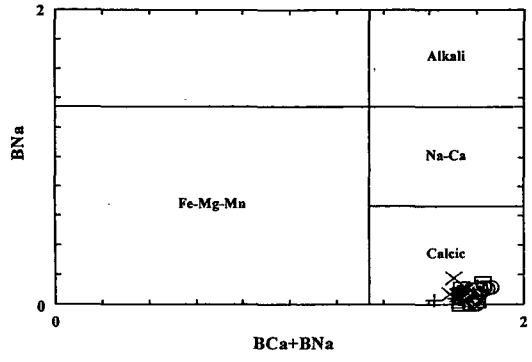

Fig. 2. Classification of amphiboles according to NaB vs. NaB+CaB [after Leake(1978)].

열의 화강암질암에서는 사장석의 연변부 성분은 거의 일정하므로 변수에서 제외될 수 있다. 따라서, 압력이 각섬석 연변부의 Al^T 함량과 밀접한 관계를 가지는 것을 유도할 수 있다(Hammarstrom and Zen, 1986; 조등룡과 권성택, 1994).

그러므로 이러한 이론적 배경에서 여러 경험적, 실험적인 지압계를 각섬석에 적용할 수 있고 경상분지내 백악기 화강암류의 정량적인 정치 압력을 추정할 수 있다.

Table 2. Examples of the compositional dependence of amphibole on T, P, f_{O_2}, and bulk composition(after Hammarstrom and Zen, 1986).

Increasing value of	T	P	f_{O_2}	Concentration
Si			+	
Aliv	+			
Alvi	−	+		
Ti	+		−	+
Mn	−			
$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$	−			
$Mg/(Mg+Fe^{2+})$	+		+	+
A-site	+			
Alkalis				+
Al^T		+		

* E.g., Ti in amphibole tends to increase with increasing T and increasing concentration of Ti in the system, whereas Ti in amphibole tends to decrease with increasing f_{O_2}

1. Hammarstrom and Zen(1986)

$$P(\pm 3\text{kbar}) = -3.92 + 5.03\ Al^T,\ r^2 = 0.80$$

2. Johnson and Rutherford(1989)

$$P(\pm 0.5\text{kbar}) = -3.46 + 4.23\ Al^T,\ r^2 = 0.99$$

3) Hollister 외(1987)

$$P(\pm 1\text{kbars}) = -4.76 + 5.64\ Al^T,\ r^2 = 0.97$$

4) Schmidt(1992)

$$P(\pm 0.6\text{kbar}) = -3.01 + 4.76\ Al^T,\ r^2 = 0.99$$

Hammarstrom and Zen(1986)은 화강암의 관입에 의해 형성된 각섬석의 Al^T 함량에서 식을 구하였고, Hollister(1987)는 브리티시 콜롬비아(British Columbia)의 심성암을 대상으로 각섬석 지압계가 성공적으로 이용될 수 있음을 확인하였고, 2~8kb의 자료를 보강하여 보다 오차가 줄어든 식을 제시하였다. 나중에 Johnson and Ruthrtford(1989)와 Schmidt(1992)는 실험적으로 위의 경험적인 관계식이 유효함을 증명해 보였다.

위의 지압계에서 Johnson and Rutherford(1989)의 관계식과 Schmidt(1992)의 관계식은 실험적 관계식이며, 두 실험식이 차이나는 것은 실험식에 사용된 유체의 성분차에 기인한다. 그리고 Johnson and Rutherford (1989)는 H_2O-CO_2의 혼합물을 사용한 반면, Schmidt (1992)는 순수한 H_2O를 사용하였는데, 유체상에서 H_2O의 활동도 각섬석 Al 함량을 좌우할 수 있는 요인임을 보여주고 있다. 물의 활동도가 작을 경우 동일 압력에서 각섬석의 Al 함량은 많아진다. 두 실험적 관계식과 경험적 관계식을 비교할 때, Schmidt(1992)의 실험식이 경험적 관계식보다 일반적으로 잘 일치하는 것은 칼크-알칼리계열의 화강암이 물의 활동도가 1에 가까웠음을 의미하며 Hammarstrom and Zen(1986)의 가정이 적절했음을 의미한다(조등룡과 권성택, 1994).

각섬석지압계의 적용

앞에서 각섬석 지압계의 이론적 배경에 대해 검토해 보았는데 각섬석의 성분 중 Al^T는 온도, 산소분압, 고용체를 가지고 있는 광물들의 성분과 무관하고 압력에만 관계가 있다는 것을 알 수 있었고(Table 2), 여러 경험적, 실험적 관계식의 차이점에 대해서도 알아 보았다. 이론적 배경에 제시된 경험적, 실험적인 압력계에 각섬석 Al^T 함량을 적용하여 연구 지역인 경주, 부

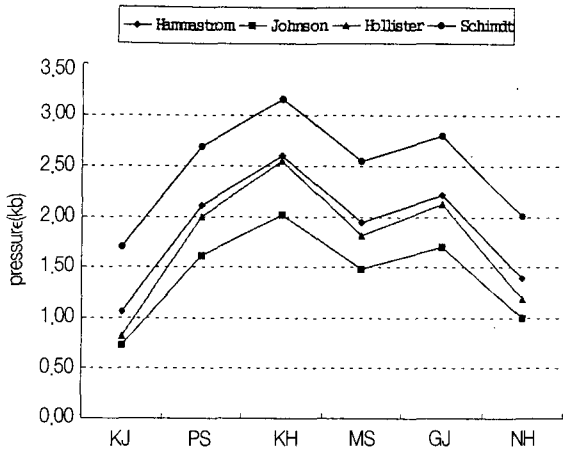

Fig. 3. The pressure(kb) of amphibole in Cretaceous granites in Kyeongsang basin. KJ, Kyeongju; PS, Pusan; KH, Kimhae; MS, Masan; GJ, Geoje; NH, Namhae.

산, 김해, 마산, 거제, 남해의 연구지역에 대한 압력을 분석해서 경상분지내 백악기 화강암류의 깊이를 추정하고자 한다.

지역별로 각각의 시료에 대한 압력값을 여러 경험적, 실험적 관계식에서 구하고 각각의 관계식에 대한 각 지역 압력평균값을 구하였다.

각 지역별 압력값을 Table 3에서 비교해 보면, 압력과 Al^T값 사이에는 정의 상관 관계가 있었고, 경상분지내 백악기 화강암류 중 경주 지역 백악기 화강암류의 압력값이 0.73~1.70kbar, 부산 지역이 1.61~2.69kbar, 김해 지역이 2.02~3.16kbar, 마산 지역이 1.48~2.55kbar, 거제 지역이 1.70~2.80kbar, 남해 지역이 1.00~2.01kbar의 압력값을 나타낸다. 그리고 경주 지역의 평균 Al^T값은 0.99로 가장 낮은 값을 가지며, 김해 지역이 1.30으로 가장 높은 수치를 보인다. 그리고 김해, 거제, 부산, 마산, 남해, 경주 순으로 높은 Al^T값을 가진다. Al^T값과 이를 적용한 압력계의 압력값은 정의 상관관계가 있기 때문에 압력값 또한 위의 지역순으로 높은 값을 가짐을 알 수 있다(Fig. 3). 그리고 Fig. 3에서 각 관계식을 보면, Hammarstrom and Zen(1986)의 압력계가 가장 높은 수치를 나타내고 Johnson(1989)의 압력계가 가장 낮은 수치를 나타내는 데 Hammarstrom and Zen(1986)의 압력계는 접촉변성암의 압력과 각섬석의 Al^T값에서 계산한 경험적 관계식이고 오차 범위가 ± 3kbar이므로 추정하고자 하는 경상분지내 압력값이 너

Table 3. The pressures and Al total of the amphibole in Cretaceous granites from Kyeongsang basin.

location	Sample	Al Total	Hammarstrom	Johnson	Hollister	Schmidt
KJ	AL-36-2	1.02	1.19	0.84	0.97	1.83
	AL-36-3	0.94	0.82	0.53	0.56	1.48
	713C	1.01	1.14	0.79	0.91	1.77
	004C	1.12	1.73	1.29	1.58	2.34
	008C	0.94	0..83	0.53	0.56	1.48
	008R	0.91	0.65	0.38	0.36	1.31
	Average	0.99	1.06	0.73	0.82	1.70
PS	605-1c	1.19	2.08	1.59	1.97	2.67
	605-1r	1.16	1.93	1.46	1.80	2.53
	608c	1.25	2.37	1.83	2.29	2.94
	608r	1.19	2.04	1.55	1.92	2.63
	Average	1.20	2.11	1.61	2.00	2.69
KH	101c	1.29	2.56	1.99	2.51	3.13
	101r	1.29	2.55	1.98	2.50	3.12
	201c	1.40	3.12	2.46	3.14	3.65
	201r	1.29	2.57	2.00	2.52	3.14
	210c	1.38	3.00	2.36	3.00	3.54
	210r	1.35	2.88	2.25	2.86	3.42
	2110r	1.41	3.15	2.48	3.16	3.68
	2810i	0.98	0.99	0.67	0.75	1.64
	2811i	0.95	0.84	0.54	0.58	1.49
	3212-1c	1.23	2.27	1.75	2.18	2.85
	3212-1r	1.29	2.56	1.99	2.51	3.13
	32214c	1.43	3.28	2.59	3.31	3.80
	32214r	1.37	2.95	2.31	2.94	3.49
	32215c	1.36	2.92	2.29	2.91	3.46
	32215r	1.42	3.24	2.56	3.27	3.79
	809r	1.32	2.70	2.11	2.67	3.26
	Average	1.30	2.60	2.02	2.55	3.16
MS	2304i	0.91	0.67	0.40	0.38	1.33
	230ri	0.90	0.63	0.36	0.34	1.29
	303c	1.18	2.03	1.54	1.91	2.62
	303r	1.16	1.92	1.46	1.79	2.52
	304c	1.18	2.00	1.51	1.87	2.59
	304r	1.06	1.39	1.01	1.20	2.02
	306r	0.90	0.59	0.33	0.30	1.26
	310-1r	1.34	2.84	2.22	2.81	3.38
	812c	1.43	3.27	2.59	3.31	3.80
	812r	1.30	2.59	2.02	2.54	3.15
	817r	1.14	1.82	1.37	1.68	2.42
	908c	1.23	2.26	1.74	2.17	2.84
	908r	1.22	2.21	1.70	2.12	2.79
	915c	1.30	2.64	2.06	2.59	3.20
	915r	1.26	2.43	1.88	2.36	3.00
	Average	1.17	1.95	1.48	1.82	2.55
GJ	GE-121	1.11	1.66	1.24	1.50	2.27
	GE-122	1.15	1.87	1.41	1.74	2.47
	GE-18	1.43	3.29	2.60	3.32	3.81
	GE-18A	1.15	1.85	1.39	1.71	2.45
	GE-6	1.39	3.09	2.43	3.10	3.62
	GE-A18	1.09	1.56	1.15	1.39	2.18
	Average	1.22	2.22	1.70	2.13	2.80
NH	NA26-C	0.94	0.82	0.53	0.56	1.48
	NA28	1.18	2.02	1.53	1.90	2.61
	NA40	1.04	1.32	0.95	1.12	1.95
	Average	1.05	1.39	1.00	1.19	2.01

무 낮기 때문에 적용의 타당성이 낮다. 그리고 Johnson (1989)과 Rutherford(1989)의 관계식과 Schmidt(1992)의 관계식은 실험적 관계식이며, 실험식에서 차이가 나는 것은 실험에 사용된 유체의 성분차에 기인하고, 유체상에서 H_2O의 활동도가 각섬석 Al^T 함량을 좌우할 수 있는 요인이기 때문이다. 물의 활동도가 작을 경우 동일 압력에서 각섬석의 Al 함량은 많아지므로 어느 정도 오차가 있음을 감안하여야 한다.

지각의 밀도를 2.8g/cm^{3}로 가정하면 경상분지의 화강암류의 압력평균값이 Table 3과 Fig. 3에서 보듯이 약 0.73~3.16kbar의 범위를 가짐을 알 수 있고, 깊이로 환산하면 2.63~11.37km 범위를 가진다. 이는 노출된 경상분지의 백악기 화강암류는 천부관입암체이고 노출된 화강암류가 천부지각임을 알 수 있다. 이는 경상분지 화강암류에 대해 유추된 기존의 정성적인 생각과 일치한다는 것을 알 수 있고, 각섬석의 Al^T 함량을 이용한 여러 경험적, 실험적인 압력계가 많은 제한점이 있지만 경상분지의 백악기 화강암류에는 정성적으로 유효함을 알 수 있다. 그리고 각 지역별로 보면, 유추된 압력이 김해, 거제, 부산, 마산, 남해, 경주 순서로 높기 때문에 경상분지의 지구조가 백악기의 화강암류의 정치 깊이와는 상관 관계가 없음을 나타내고, 각 지역마다 수직성분의 운동(융기 비 등)이 달랐거나 침식작용의 정도가 달랐음을 의미한다.

결론 및 토의

본 연구에서는 지금까지 각섬석의 Al^T값으로 여러 실험식을 적용해 경상분지내 백악기 화강암류의 정치 압력을 구하고 정치깊이를 연구하였다. 이런 생각을 할 수 있었던 것은 지구의 암석 중 많은 부분을 화강암질 암체가 차지하고, 이 화강암질 암체가 정치한 깊이는 심성암 자체의 열 역사, 심성활동과 관련된 주위의 변성작용 및 광화작용 그리고 지구조 운동 등을 해석하는데 중요한 정보 중의 하나이며, 또한 압력은 마그마에서 정출하는 광물의 종류 및 정출순서를 결정하는 요인이기 때문이다. 그리고 우리나라 경상분지내 백악기 화강암은 압력에 민감한 광물조합을 일반적으로 갖지 않고, 다른 연구로 압력을 유추할 수 있으나 이 경우는 광범위한 조사가 필요하고 이들이 항상 압력에 민감한 화학 조성을 가지는 것은 아니기 때문에, 각섬석의 Al^T 함량을 이용한 지압계가 획기적인 것이다.

지금까지 언급한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 경상분지내 백악기 불국사화강암류의 각섬석은 대부분 Ca각섬석군($(Na+Ca)_B \geq 1.34$, $Na_B < 0.67$)에 속하고 각섬석의 성분 중 Al^T 함량은 온도, 산소분압, 고용체를 가지고 있는 광물들의 성분과 무관하고 압력에만 관계가 있다.
2. 여러 실험적, 경험적 압력계에 각섬석의 Al^T 함량을 적용하여 압력을 유추할 수 있고, 각섬석을 함유하는 암석은 주위 다른 암석과 밀접한 관련성이 있으므로 유추된 압력으로 경상분지내 백악기 불국사화강암류의 정치 깊이를 결정할 수 있었다.
3. EPMA분석을 통해 구한 각섬석 Al^T값을 여러 관계식에 적용해 본 결과, 압력과 Al^T값 사이에는 정의 상관관계가 있었다. 경상분지내 백악기 불국사화강암류 중에서 가장 작은 압력 값을 가지는 지역은 경주지역(0.73~1.70kbar)이었고, 가장 높은 값을 가지는 지역은 김해지역(2.02~3.16kbar)이었다. 그리고 유추된 압력값이 김해, 거제, 부산, 마산, 남해, 경주, 순서로 높기 때문에 경상분지 지구조가 백악기의 불국사화강암류의 정치 깊이와는 상관 관계가 없음을 나타낸다. 이는 각 지역마다 수직성분의 운동이 달랐음을 의미한다.
4. 지각의 밀도를 2.8g/cm^{3}로 가정했을 때, 경상분지의 불국사화강암류의 압력평균값이 약 0.73~3.16kbar의 범위를 가지므로 경상분지내 백악기 화강암류의 정치 깊이는 2.63~11.37km 범위를 가짐을 알 수 있었다. 이는 경상분지 화강암류에 대해 유추된 기존의 정성적인 생각과 일치한다는 것을 알 수 있었고, 각섬석의 Al^T 함량을 이용한 여러 경험적, 실험적인 압력계가 많은 제한점이 있지만 경상분지의 백악기 화강암류에는 정성적으로 유효함을 알 수 있었다. 우리는 최종적으로 경상분지내 백악기 화강암류는 천부관입암체이고 노출된 화강암류가 천부지각이라는 것을 알 수 있다.

사 사

이 연구를 수행하는 데 있어서 야외지질조사와 자료정리를 도와 준 부산대학교 사범대학 지구과학교육과의 지질학연구회의 학생들에게 감사드립니다. 또 논문

을 읽고 심도있는 토의와 수정을 해 주신 경북대학교 이윤종 교수님과 부산대학교 이준동 교수님께 감사드린다.

참고문헌

김중욱, 이윤종, 1984, 화왕산 및 영취산 일대 화강암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 20, 1-14.

김희남, 1992, 우리 나라 남부지역에 분포하는 생산성 심성암체에 대한 암석지화학적 연구: 광양, 돌산, 남해지역을 중심으로. 한국지구과학회지, 13(2), 226-246.

원종관, 이하영, 지정만, 박용안, 김정환, 1989, 지질학 원론. 우성문화사.

윤성효, 황인호, 1990, 경주 남산 일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 지구과학회지, 11(1), 51-66.

조등룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30, 41-61.

Fletcher and Rundle, 1997, Age of mineralization of Sanne and Ilkwang mines, Kyeonsang Basin, Republic of Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 13, 2, 71-75.

Hammarstrom, J.M., and Zen, E., 1986, Aluminium in hornblende: An empirical igneous geobarometer. American Mineralogist, 71, 1297-1313.

Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., and Sisson, V.B., 1987, Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of calc-alkaline plutons. American Mineralogist, 72, 231-239.

Hyndman, D.W., 1972, Petrology of igneous and metamorhpic rocks. 33-167.

Johnson, M.C. and Rutherford, M.J., 1989, Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. Geology, 17, 837-841.

Leake, B.E., 1978, Nomenclature of amphiboles. Min. Magazine, 42, 533-563.

Lee, J. I., 1991, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyeongsang basin, Korea, - Origin of micrographic granite -. Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo, 197p.

Schmidt, M.W., 1992, Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contrib. Mineral. Petrol., 110, 304-310.

Spear, F.S. and Kimball, K.L., 1984, RECAMP-A fortran IV profram for estimating Fe^{3+} contents in amphiboles. Computers and Science, 10, 317-325.

Swanson, S.E., 1977, Relations of nucleation and crystal growth to the development of granitic structures. American Mineralogist, 62, 966-978.

1999년 12월 13일 원고 접수