제주도 현무암 내 각섬석의 성인에 대한 연구(I): 비석거리 하와이아이트

윤성호* · 차준석 · 고정선 · 이상원

부산대학교 지구과학교육과

Origin of kaersutite in the basalt from Jeju Island(I): Biseokgeori hawaiiite

Sung-Hyo Yun*, Jun-Seok Cha, Jeong-Seon Koh and Sang Won Lee

Department of Earth Science Education, Pusan National University, 63th-gil 2, Busandaehak-ro, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

요 약: 제주도 사라봉 부근의 산지등대, 비석거리에서 나타나는 하와이아이트에는 티탄이 풍부한 각섬석(켈수타이트)과 사장석이 반정으로 나타난다. 또한 휘석, 감람석 미반정을 포함하며, 인회석과 소량의 K장석 래스도 나타난다. 켈수타이트는 자형 또는 반자형으로 불투명광물 반응연을 가진 반정으로 주로 산출되며, 해안가 시료의 켈수타이트는 산화철 형태로 치환되어 각섬석 가상을 관찰할 수 있다. 아주 드문 형태로 휘석 결정 내에 켈수타이트가 반응연 관계로 나타나는 형태를 볼 수 있으며, 이를 통해 유체에 의한 2차적인 수화반응이 있었음이 추정된다. 압력-Al^{IV} 지질압력계 관계식에 적용하여 결정화작용 압력을 추정한 결과, 산지등대의 시료에서는 약 6.3 kb, 비석거리의 경우 약 4.9 kb의 값을 얻을 수 있었다. 이를 통해 산지등대의 각섬석은 비석거리에 형성된 각섬석보다 더 깊은 곳에서 유체의 유입이 있었으며, 자형 반정의 형태와 인회석 포유물의 존재로부터 호스트마그마로부터 결정화작용을 통해 성장되었을 것으로 추정된다.

핵심어: 켈수타이트(kaersutite), 반응연, 수화반응, 지질압력, 결정화작용

Abstract: Hawaiiite which distributed in Sanjideungdae of Sarabong cinder cone and Biseokgeori area in northern part of Jeju island, contains phenocrysts of titanium-rich hornblende (kaersutite) and plagioclase with microphenocrysts of olivine, pyroxene and very small amounts of K-feldspar lath and apatite. Kaersutite is mostly euhedral or subhedral phenocrysts having opaque reaction rim. And kaersutite in Sanjideungdae area completely replaced to opaque minerals showing pseudomorph. Also it may be seen partly replacement of pyroxene by kaersutite as reaction rim. It is considered that hydration reaction had occurred with fluids. The crystallization pressure of kaersutite using pressure-Al^{IV} geobarometer is approximately 6.3 kb in Sanjideungdae area and 4.9 kb in Biseokgeori area, respectively. As a result, fluid injection to magma and crystallization of kaersutite of Sanjideungdae hawaiiite is deeper than that of Biseokgeori hawaiiite, and it was grown to phenocrysts through crystallization. It is estimated that kaersutite of Biseokgeori hawaiiite originated from crystallization from the host magma, based on the euhedral nature of the phenocrysts and on the presence of apatite inclusions.

Key words: kaersutite, reaction rim, hydrous reaction, geobarometer, crystallization

서 론

본 연구지역은 한라산을 기준으로 제주도 북부 해안에 위치하며, 사라봉, 별도봉, 화북봉과 같은 분석

구가 분포하고 있다(Fig. 1). 이 지역에 대한 화산 층서 연구는 고보균 외(2001)의 제주도 사라봉-별도봉-화북봉 일원의 화산층서에 대한 연구와 박기화 외(1998)의 제주·애월 도폭 지질보고서에 의해 보고된 바 있다.

사라봉의 산지등대 일대와 비석거리 마을에 분포하는 현무암의 화학성분은 SiO₂는 49.46~50.34 wt%,

*Corresponding author
Tel: 051-510-2723
E-mail: yunsh@pusan.ac.kr

Fig. 1. Geological map of the study area (from Ko et al., 2001). [①; Sara-bong, ②; Byeoldo-bong, ③; Hwabuk-bong, ④; Sanjideungdae (lighthouse).]

Na₂O는 4.05~4.27 wt%, K₂O는 2.44~2.52 wt%로 하와이아이트에 해당한다는 것이 보고된 바 있다(박기화 외, 1998).

본 연구는 비석거리 하와이아이트에 존재하는 각섬석류의 한 종류인 켈수타이트(kaersutite)의 광물학적 특징을 관찰하고 지질압력계를 적용하여 각섬석을 형성한 마그마에 대한 정보를 규명하는데 목적을 두고 있다. 일반적으로 고철질 마그마는 규장질 마그마에 비해 상대적으로 함수의 비율이 낮아 함수광물의 생성이 어려움에도 불구하고 켈수타이트 결정이 반정으로 다수 존재하므로, 제주도의 화산활동사와 마그마 성인을 연구하는데 중요한 대상이 될 것으로 생각된다.

본 론

알칼리 현무암 내에 존재하는 각섬석류의 특징

일반적으로 맨틀 내에서 각섬석, 흑운모와 같은 함수 광물의 존재는 Harte(1983), Dawson(1984) 등에 의해 이전 용융 과정에서 소실되었던 주성분원소(Ti, Fe, K, P)가 재부화(reenrichment) 된 것이라고 설명된다.

맨틀 시료에서 각섬석의 화학적 변화에 대해서는 Best(1970), Wilkinson and LeMaitre(1987) 등에 의

해 연구되었다. 알칼리 현무암의 광물 조합은 일반적으로 파가사이트(titanian pargasite) 또는 켈수타이트와 같이 티탄이 풍부한 각섬석을 가지는 것이 특징이다. 이러한 각섬석은 단광물 거정(mono mineralic megacrysts) 형태 또는 타입 I, 타입 II 스피넬 페리도타이트 광물 조합 중 하나의 광물로 생성된다고 보고된 바 있다(Wilshire and Shervais, 1975).

알칼리 현무암과 연관된 각섬석의 성인 모델은 Wilkinson and LeMaitre(1987)에 의해 제안되었다. 간극충진 형태의 각섬석은 무수(anhydrous)의 페리도타이트 광물과 각섬석을 형성하는 유체와의 등화학적 상태에 가까운 수화반응에 의해 생성될 수 있다고 보고된 바 있다(Best, 1974). 이러한 각섬석은 다음과 같은 일반적인 수화반응에 의해 생성될 수 있다.

반면에 포이킬리틱, 세맥(vein), 거정 형태의 각섬석 기원은 높은 압력 하에서 실리카 용액의 결정화 작용을 포함할 것이라고 연구된 바 있다(Binns et al., 1970; Merrill and Wyllie, 1975).

켈수타이트는 calcic clino-amphibole subgroup의 ferro-kaersutite~kaersutite series(calcic group Ti > 0.5)로 분류되는 각섬석의 한 종류이며, 알칼리 화성암에

서 주로 반정의 형태로 나타나며, 산화물로 치환된 반응연이 나타나기도 한다. 본 연구지역에서 채취한 시료에 나타나는 켈수타이트는 모두 불투명 광물에 의한 반응연을 가지고 있다.

지질 개요

비석거리 하와이아이트를 구성하는 용암류는 별도봉 북동쪽 해안에서 신흥리 현무암을 피복하고, 화북봉 북쪽에서 화북봉 분석구에 의해 피복되며 산지등대 남쪽에서 사라봉 분석구에 의해 피복되는 형태로 나타난다(Fig. 1). 비석거리 하와이아이트에 대비되는 용암류는 화북봉 남쪽의 제주교육대학교 일대, 화북봉 동쪽의 비석거리마을과 북쪽, 별도봉 북쪽, 그리고 사라봉의 산지등대까지 연장된다고 보고된 바 있다.

별도봉 응회암은 연갈색 내지 갈색을 띠며 주로 화산력과 소량의 화산회와 화산암괴로 구성되어 있으며, 현무암편과 최대 직경 25 cm 이하의 쥐라기(172.4 Ma) 화강암편을 함유하고 있다. 별도봉 북쪽 해안에 동서로 약 450 m 가량 연장되어 소규모로 분포하며, 해안절벽에서 비석거리 하와이아이트에 의해 피복됨이 관찰된다. 별도봉 응회암은 그 하한은 해수면 아래에 연장되어 하부층과의 관계는 알 수 없으며, 이 지역에서 있었던 수성화산활동의 산물이다.

화북봉 분석구와 사라봉 분석구는 암적색을 띠는 다공질의 분석구로 구성되며, 평균 크기 약 3 cm 내외의 화산력이 우세하며, 소량의 화산암괴를 함유한다. 이들은 각각 비석거리 하와이아이트와 건입동 하와이아이트를 피복하며, 육성화산활동의 산물이다. 분석구를 구성하는 암석내의 결정의 종류도 화북봉 분석구에서는 사장석, 켈수타이트, 그리고 소량의 단사휘석과 감람석이 관찰되나, 사라봉 분석구에서는 사장석과 감람석이 우세하며 그 함량은 소량으로, 결정을 이루는 우세한 광물은 차이를 보인다(고보균 외, 2001; 박기화 외, 1998).

암석 기재

본 연구는 제주·애월 도폭(박기화 외, 1998)과 1:5,000 지형도를 이용하여 야외지질조사를 실시하였고 야외에서 비석거리 하와이아이트의 신선한 표품을 채취[산지등대(D sample): 3곳, 비석거리: 8곳(R sample)]하여 연마편을 제작한 후, 편광현미경하에서 조직 및 구성광물을 관찰하였으며, 서울대학교 기초과학공동기기원의 전자현미분석기(EPMA; Model

Fig. 2. Outcrop of hawaiiite shows kaersutite(black) and plagioclase(white) phenocrysts in Sanjideungdae (lighthouse) and Biseokgeri, Jeju Island.

JXA 8900R)와 부산대학교 공동실험실습관의 전자현미분석기(Model Cameca SX-100)를 이용하여 전자현미분석을 실시하였다.

본 연구지역의 하와이아이트에는 켈수타이트와 사장석이 반정의 대부분을 차지한다(Fig. 2). 사장석은 반정과 석기 형태로 존재하며, 반정의 경우 대부분 장경이 2~6 mm 정도이다. 켈수타이트 반정은 대부분 3~6 mm 정도의 크기를 가지며, 장축 길이가 1 cm 이상의 크기를 가지는 것도 관찰할 수 있었으며 장주상의 자형 또는 반자형의 형태로 존재한다. 대부분이 1 mm 이하의 크기를 가지는 감람석이 관찰되며, 2 mm~3 mm의 단사휘석이 소량 관찰된다.

반정의 형태로 발견되는 켈수타이트는 불투명 광물에 의한 반응연을 가지고 있으며(Fig. 3a), 산지등대의 해안가에 존재하는 켈수타이트 반정은 모두 산화철 형태로 치환되어 각섬석의 가상 형태로 나타난다(Fig. 3b). 또한 인회석 또는 사장석을 포함한 형태의 켈수타이트도 확인할 수 있었으며(Fig. 3c), 산지등대 시료에서는 켈수타이트가 휘석의 반응연 형태로 나타나는 경우도 아주 드물게 관찰된다(Fig. 3d).

사장석 결정의 경우, 반정과 석기의 대부분이 안데신(andesine), 라브라도라이트(labradorite) 영역에 속하며, 드물게 올리고클레이스(oligoclase) 영역에 속하는 것도 관찰된다. D-1, R-4-2의 시료에서는 K-장석이 래스 형태로 소량으로 나타난다.

직경 약 1 mm 정도의 감람석 미반정이 관찰된 R-4-2, R-6, D-1 암석시료는 각각 비석거리, 산지등대(해안)에서 채취한 것으로 R-6의 감람석 반정은 변질되어 이딩사이트(iddingsite)로 되어 갈색을 띠었으며, R-4-2의 경우 이딩사이트화 되어가는 감람석이 관찰

Fig. 3. Photomicrograph of kaersutite. (a) kaersutite phenocrysts with reaction rims (open polar, scale bar: 1 mm). (b) kaersutite shows that they replaced oxidation materials (open polar, scale bar: 0.5 mm). (c) Inclusion of plagioclase and apatite in kaersutite (open polar, scale bar: 200 μ m). (d) reaction rim of kaersutite in pyroxene crystal (cpx) (open polar, scale bar: 0.5 mm). Pl; plagioclase, Ap; apatite, CPX; clino-pyroxene, Ks; kaersutite.

된다. 또한 최대 0.4 mm의 크기를 가지는 인회석 (apatite)도 관찰되었다(Fig. 3c).

본 연구의 각섬석은 $\text{TSi-Mg}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 성분도 (Fig. 4a)에서 켈수타이트 영역에 도시되며, 감람석은 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})\text{-Mg}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 성분도 (Fig. 4b)에서 크리솔라이트(crysolite) 영역에 일부 도시되지만 대부분은 하이알로시데라이트(hyalosiderite) 영역에 표시된다. 단사회석의 경우 대부분이 Wo-En-Fs 성분도 (Fig. 4c)에서 투회석 영역에 표시된다.

각섬석 성분

분석된 각섬석 중 광물 전체가 산화철 형태로 치환된 산지등대의 시료를 제외한 비석거리의 시료에서 나타나는 각섬석에 대한 분석결과는 Table 1과 같다.

그러나 산지등대의 해안가에서 채취한 D-1의 연마편에서 단사회석의 결정 안에 켈수타이트가 반응연의 형태로 나타나는 것을 발견하여 분석하였다(Fig. 3d). 이러한 형태는 아주 드문 형태로 판단되며, 다른 시료에서는 관찰되지 않았다.

Robinson et al.(1982)의 산출방법에 따라 23개의 산소를 기준, Cations 13-CNK 방법으로 계산하였다. 여기에서 사용된 총철함량(total iron)으로부터 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 로의 변환은 Droop (1987)에 의해 제시된 철-마그네슘 규산염 광물의 Fe^{3+} 계산법을 이용하였다. 계산 결과 대부분의 켈수타이트의 화학성분이 유사하게 나타났으나, 산지등대와 비석거리의 시료를 비교 시 산지등대(D-1) 시료에서 Al^{T} 및 TiO_2 값이 상대적으로 높게 나타났다.

Fig. 4. Classification diagrams of kaersutite (a), olivine (b) and pyroxene (c). 1: diopside, 2: hedenbergite, 3: augite, 4: pigeonite, 5: clino-enstatite, 6: clino-ferrosillite.

각섬석 지압계의 적용

압력은 마그마에서 정출하는 광물의 종류 및 정출 순서를 결정하는 요인이기 때문에 마그마의 성분변화에도 영향을 끼칠 수 있는 변수이다. 각섬석의 Al^T 함량을 이용한 지압계를 이용하여 정치 깊이를 추정한 연구는 주로 화강암에 대해 적용하였으나 염기성암에 대해서도 활발하게 적용되고 있다(김상욱 외, 1999).

본 암석에 나타나는 켈수타이트는 반정의 형태로 산출되며 D-1 시료의 한 영역을 제외하고는 모두 불투명 광물 반응연을 가지고 있는데, 이는 압력의 감소에 의해 각섬석의 안정영역을 벗어나게 되어 일어날 수 있는 현상으로 설명된다. 또한 해안가 부근인 산지등대의 경우 비석거리의 시료와 비교했을 때, 경하 관찰 상으로 각섬석 결정의 전부가 산화철 형태로 치환되어 있다는 특징을 확인했다. 이는 해안가 부근에 위치하여 해수와의 접촉이 산화반응을 촉진시켰을

것으로 판단된다. 이러한 특징으로 인해 본 암 내의 각섬석 중 반응연을 갖지 않는 각섬석은 산출되지 않아, 최연변부의 화학성분을 분석할 수 없었고 반응연의 형성과정에서 내부 성분 또한 변화 가능성을 무시할 수는 없을 것이다. 그렇지만 분석치를 통해 켈수타이트가 누대구조가 나타날 정도로 큰 화학변화가 있지 않았음을 확인할 수 있었다. 그러므로 반응연 내부의 각섬석 성분변화는 거의 무시될 수 있으며, 반응연의 형성과정에서 Al^T 함에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다(Rutherford, 1993). 또한 Johnson and Rutherford(1989)의 실험에 의하면 석영이 정출되지 않는 암석 내 각섬석인 경우 압력 관계식에서 1.2 kb가 높게 계산된다는 것을 밝힌 바 있으며, 본 시료의 경우에도 계산된 압력 값에서 1.2 kb를 최소로 하여 감소한 값을 구하는 것이 보다 신빙성이 있을 것으로 판단된다(김상욱 외, 1999). Table 1을 토대로

Table 1. Representative electron microprobe analyses of kaersutite in the Sarabong and Biseokgeori area, Jeju. [D series : Sanjideungdae, R series : Biseokgeori]. Cation number on the basis of 23 oxygens.

Sample No.	D-1	R-2				R-4-2				R-6				
	1-3	1		4		1-1	1-5	1-6	5-2	1-8	2		4-1	4-3
		core	rim	core	rim						core	rim		
SiO ₂	39.456	40.44	40.68	40.80	40.61	39.07	39.26	39.62	39.28	39.19	38.94	39.70	39.63	39.10
TiO ₂	5.796	4.95	4.96	5.09	5.05	5.43	5.17	4.82	4.86	5.29	5.26	4.99	5.28	5.40
Al ₂ O ₃	15.18	12.38	12.49	12.52	12.37	12.96	12.13	12.60	12.45	14.30	12.83	12.51	13.63	13.45
FeO	10.848	14.88	14.88	14.64	15.01	12.68	13.60	14.00	14.52	11.03	13.35	14.08	11.91	12.42
Cr ₂ O ₃	0.177	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.13	0.07
MnO	0.177	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.13	0.07
MgO	13.35	11.30	11.28	11.27	11.40	12.27	11.84	11.48	11.18	12.87	11.71	11.47	12.80	12.09
CaO	10.959	10.78	10.96	10.94	10.98	11.30	11.17	10.97	10.98	10.95	11.34	11.04	11.16	11.65
Na ₂ O	2.833	3.01	2.85	2.87	3.10	2.85	2.99	3.09	3.16	2.87	2.82	2.96	3.08	2.94
K ₂ O	0.73	1.05	1.00	1.04	1.06	0.90	0.97	0.99	1.06	1.01	1.06	1.02	0.91	0.99
Total	99.33	98.79	99.1	99.17	99.58	97.48	97.18	97.57	97.49	97.54	97.31	97.77	98.53	98.11
TSi	5.701	6.032	6.039	6.055	6.019	5.854	5.938	5.975	5.956	5.813	5.878	5.975	5.844	5.836
TAl	2.299	1.968	1.961	1.945	1.981	2.146	2.062	2.025	2.044	2.187	2.122	2.025	2.156	2.164
CAI	0.284	0.206	0.223	0.243	0.178	0.141	0.098	0.213	0.179	0.310	0.159	0.192	0.211	0.200
CCr	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.006	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.015	0.008
CFe ³⁺	0.313	0.166	0.158	0.124	0.141	0.142	0.116	0.120	0.105	0.190	0.094	0.120	0.174	0.038
CTi	0.630	0.555	0.554	0.568	0.563	0.612	0.588	0.547	0.554	0.590	0.597	0.565	0.586	0.606
CMg	2.876	2.513	2.496	2.493	2.519	2.741	2.670	2.581	2.527	2.844	2.635	2.573	2.814	2.690
CFe ²⁺	0.867	1.560	1.569	1.571	1.600	1.362	1.519	1.539	1.635	1.059	1.514	1.550	1.192	1.453
CMn	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.008	0.004
BFe ²⁺	0.132	0.130	0.120	0.122	0.120	0.086	0.086	0.107	0.101	0.119	0.077	0.103	0.103	0.059
BMn	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.008	0.004
BCa	1.697	1.723	1.743	1.740	1.744	1.814	1.810	1.773	1.784	1.740	1.834	1.780	1.763	1.863
BNa	0.161	0.147	0.136	0.138	0.136	0.099	0.101	0.121	0.115	0.138	0.088	0.117	0.126	0.073
ANa	0.633	0.723	0.684	0.688	0.755	0.729	0.776	0.783	0.814	0.689	0.737	0.747	0.755	0.778
AK	0.135	0.200	0.189	0.197	0.200	0.172	0.187	0.190	0.205	0.191	0.204	0.196	0.171	0.189

$\text{Fe}^{\text{T}}/(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mg})$ 값이 0.313~0.425의 값을 보였다. 산소 분압이 매우 낮은 조건에서 정출된 Fe가 많은 각섬석은 M2자리를 점유하는데 있어 Al^{IV} 와 치환될 Mg가 적기 때문에 압력이 매우 높게 계산된다. 그러므로 Anderson and Smith(1995)는 각섬석 지압계로 적합한 각섬석은 $\text{Fe}^{\text{T}}/(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mg})$ 값이 0.65 이하이어야 한다고 제시한 바 있다. 그러므로 본 연구의 시료는 이 조건을 만족한다고 볼 수 있다.

마그마의 정치 깊이 추정

본 암석의 경우 고철질 마그마로부터 산출되었으므로 높은 증기압하에서 정출되었을 것으로 추정되지만, 현무암질 마그마의 특성상 수분으로 포화되었을 가능성은 낮은 것으로 판단되어 혼합된 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 유체를 이용하여 2~13 kb, 고온 하에서의 압력을 추정하는 Johnson and Rutherford(1989)의 관계식을 사용하는 것이 상대적으로 옳은 값을 산출할 수 있을 것이다.

$$P(\pm 0.5\text{kb}) = -3.46 + 4.23 \times \text{Al}^{\text{T}}$$

이 관계식을 적용한 결과, 비석거리에 나타나는 켈수타이트의 경우 Al^{T} 평균값 2.257에 대해 약 6.1 kb로 계산되며, 산지등대의 경우($\text{Al}^{\text{T}}=2.583$) 약 7.5 kb로 계산된다. 여기에 1.2 kb를 보정하면 각각 약 4.9 kb, 6.3 kb 정도 되는 압력 계산 값을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 방법은 Johnson and Rutherford(1989) 실험의 소수에 대한 결과를 근거로 하였으므로, 보다 많은 실험결과를 근거로 하는 계산식이 유추되어야 할 것으로 생각된다(김상욱 외, 1999). 정확한 마그마의 정치 깊이를 판단하기 어려울지라도 상대적인 비교를 통하여 산지등대에 존재하는 켈수타이트를 정출한 마그마의 정치 깊이가 상대적으로 깊은 곳이었음을 유추할 수 있다.

토의 및 결론

고보균 외(2001), 박기화 외(1998)의 연구에서 언급한 산지등대, 비석거리에 나타나는 현무암 내에 존재하는 각섬석은 켈수타이트 임을 EPMA 분석을 통해 확인하였다. 또한 현무암 내의 각섬석이 반응을 이루고 있는 점을 근거로 상당 수준의 H_2O 가 마그마에 용해되어 있었음을 짐작할 수 있었다.

본 연구지역에 존재하는 각섬석은 다음과 같은 형성과정을 추론할 수 있다.

1) 각섬석을 만들 수 있을 정도의 H_2O 함량을 충족하는 호스트(host) 마그마의 결정화 작용

2) 2차적인 유체의 유입으로 인해 휘석으로부터 각섬석을 만들 수 있을 정도의 H_2O 함량이 충족된 마그마 + 수화반응

경우 1

1)의 경우 본론에서 제시한 것처럼 각섬석은 높은 압력 하에서 실리카 용액의 결정화작용을 통해 형성되었다고 연구된 바 있다. 또한 Cross and Holloway(1974)의 연구에 따르면 그들의 연구지역에 나타나는 켈수타이트 거정이 자형으로 나타나며, 인회석을 포함한 형태로 나타난다는 것이다. 이것을 근거로 호스트 마그마로부터의 결정화작용에 의해 각섬석이 형성되었다고 추정한다. 이 외에도 작은 자형 결정으로 산출되는 인회석과 켈수타이트가 아놀소클레이스 영역에 존재하는 장석에 포유체(inclusion)로 포획되어 있는 것을 증거로 제시하고 있다. 본 연구지역의 각섬석 또한 켈수타이트 반정이 자형의 거정으로 산출되며, 켈수타이트 내에 인회석을 포함한 형태가 관찰되었기에 이와 같은 각섬석 형성을 의심해 볼 필요가 있다. 그러나 본 암석에서 채취한 시료에서는 K-장석 영역에 속하는 장석들이 극소량이며, 래스 형태로만 관찰되므로 그들의 증거와 일치하지 않는 부분도 존재한다. 그러므로 더욱 많은 유사점을 찾기 위해서는 더 많은 양의 시료를 분석해 볼 필요가 있을 것이다.

경우 2

산지등대의 경우 채취한 D-1 시료에서 자형을 띠는 거정과 함께 아주 특이한 형태의 켈수타이트도 발견된다(Fig. 3d). 휘석의 결정 내에서 휘석의 반응연 형태로 각섬석이 나타나는 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구지역의 암석에서 나타나는 켈수타이트는 유체의 유입으로 수화반응에 의한 2차적인 형성 과정으로 판단할 수 있을 것이다. 물론 이러한 형태는 본 시료의 연마편에서 하나의 휘석 결정에서만 나타났을 정도로 아주 드물게 나타나므로 일반화하기에는 어려움이 있다. 그러나 이러한 증거가 발견되었으므로 무시할 수는 없을 것이다. 또한 이러한 형태가 나타난 산지등대의 시료는 계산 결과 상대적으로 더 높은 압력 값이 나왔으므로 이 지역의 켈수타이트가 더 깊은 곳에서 형성되었음을 지지한다.

이러한 근거를 토대로 마그마 성인을 가정한다면,

약 6.3 kb의 압력에 해당하는 깊이에서 H_2O 의 유입이 있었으며, 이를 통해 spinel + diopside + fluid = amphibole(Popp et al., 1995) 반응의 진행과정이 관찰된 것으로 판단(D-1 시료)되며, D-1 시료에서 자형을 띠는 거정 형태의 각섬석 반정도 많이 발견되므로 호스트 마그마에서 무수광물이 정출된 후 각섬석과 같은 함수광물을 만들 수 있는 만큼의 상대적인 H_2O 함량을 가지게 된 것으로 추정할 수 있다.

1)의 경우라고 하더라도 산지등대의 시료에서 관찰된 증거를 통해 수화반응 또한 수반되어야 할 것이다. 각섬석을 만들 수 있는 만큼의 H_2O 가 존재하는 상태에서 추가적인 유체의 유입이 있었다면, 희박하지만 운모류의 생성도 가능할 것으로 추정된다. 그러나 특이한 형태의 각섬석의 검출도 희박한 확률로 검출되므로, 이러한 증거를 찾기란 매우 어려울 것이다.

그러나 켈스타이트 반응이 사장석과 함께 비석거리 하와이아이트에서 가장 많이 관찰되므로, 각섬석의 결정화 작용이 반드시 수반되어야 할 것이다. 그러므로 결정화 작용에 필요한 호스트 마그마의 H_2O 함량이 2차적인 유체의 유입에 의해 충족되었는지, 또는 기본적으로 충족되어 있는 H_2O 함량에 2차적으로 유체가 추가되었는지에 대한 검토는 보다 많은 연구가 이루어져 신중을 기해야 할 것이다. 이러한 결과가 더욱 신빙성이 있기 위해서는 H_2O 의 기원에 대한 다양한 연구를 통하여 마그마 성인과의 연관성에 더욱 구체적으로 접근해야 할 것이며, 또한 불투명 반응연이 존재하는 각섬석에 대한 압력 관련 실험 연구가 더욱 활발히 실시되어 보정 값의 신뢰도가 높아져야 할 것이다. 산지등대의 더 많은 시료의 분석을 시도하여 분석 가능한 거정 형태의 켈스타이트를 발견하여 지압계의 결과의 평균치를 낼 정도로 신뢰성을 구축해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었다. 본 논문을 심사하고 건설적인 비평과 문장을 개선해 주신 황상구 교수님과 익명의 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

고보균, 원종관, 이문원, 손인석, 2000, 제주도 사라봉-별도

- 봉-화북봉 일원의 화산층서 및 화산암의 특성. 한국지구과학회 2000년도 추계학술발표 논문요약집, 94p.
- 고보균, 원종관, 이문원, 손인석, 2001, 제주도 사라봉-별도 봉-화북봉 일원의 화산층서와 화산암의 특성. 한국지구과학회지, 22(1), 1-9.
- 김상욱, 황상구, 양관석, 이윤중, 고인석, 1999, 채약산 현 무암질암류의 암석학적인 특징 및 각섬석 지질압력계의 적용. 암석학회지, 8(2), 92-105.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 1998, 제주 · 애월도폭 지질보고서(1:50,000). 제주도, 한국자원연구소, 290 p.
- Anderson, J.L. and Smith, D.R., 1995, The effects of temperature and oxygen fugacity on the Al-in hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80, 549-559.
- Best, M.G., 1970, Kaersutite-peridotite inclusions and kindred megacrysts in basaltic lavas, Grand Canyon, Arizona. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 27, 25-44.
- Best, M.G., 1974, Mantle-derived amphibole within inclusions in alkali basaltic lavas. *Journal of Geophysical Research*, 79, 2107-2113.
- Binns, R.A., Duggan, M.B. and Wilkinson J.F.G., 1970, High pressure megacrysts in alkaline lavas from north-eastern New South Wales with chemical analyses by G.I.Z. Kalocsai, *American Journal of Science*, 269, 132-168.
- Cross, C. and J. R. Holloway, 1974, A megacryst bearing alkali basalt, San Carlos, Arizona. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 6, 437.
- Dawson, J.B., 1984, Contrasting types of upper mantle metasomatism?. In Kornprobst, J. (Ed.) *Developments in Petrology*, vol. II: Kimberlites. Elsevier Science, Amsterdam, 289-294.
- Droop, G.T.R., 1987, A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51, 431-435.
- Harte, B., 1983, Mantle peridotites and processes: The kimberlite sample. In C.J. Hawkesworth and M.J. Norry, Eds., *Continental basalts and mantle xenoliths*, Shiva, Nantwich, U.K., 46-91.
- 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(9), 837-841.
- Merrill, R.B. and Wyllie, P.J., 1975, Kaersutite and kaersutite eclogite from Kakanui, New Zealand: Water-excess and water-deficient melting to 30 kilobars. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 555-570.
- Popp, R.K., Virgo, D., Yoder, H.S.Jr., Hoering, T.C. and Phillips, M.W., 1995, An experimental study of phase equilibria and Fe oxy-component in kaersutitic amphibole: Implications for the f_{H_2} and a_{H_2O} in the upper mantle.

- American Mineralogist, 80, 534-548.
- 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 occurrence and theory, in Veblen, D.R. and Ribbe, P.H. ed., Amphiboles: Petrology and experimental phase relations. Reviews in Mineralogy, 9B, 1-227.
- Rutherford, M.J., 1993, Experimental Petrology applied to volcanic process. EOS, 74(5), 49, 55.
- Wilkinson, J.E.G. and LeMaitre, R.W., 1987, Upper mantle amphiboles and micas, and TiO_2 , K_2O , and P_2O_5 abundances, and $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ ratios of common basalts and andesites: Implications for modal mantle metasomatism and undepleted mantle compositions. Journal of Petrology, 28(1), 37-73.
- Wilshire, H.G. and Shervais, J.W., 1975, Al-augite and Cr-diopside ultramafic xenoliths in basaltic rocks from western United States: Structural and textural relationships. Physics and Chemistry of the Earth, 9, 257-272.

2012년 5월 28일 접수
 2012년 5월 30일 심사개시
 2012년 8월 13일 채택