

## 제주도 알칼리 현무암에 산출되는 단사휘석의 기원

### Origins of Clinopyroxenes in Alkaline Basalts from Jeju Island

양 경 희 (Kyounghee Yang) · 황 병 훈 (Byoung-Hoon Hwang)\*

부산대학교 자연과학대학 지질환경과학전공  
(Geological Environmental Science Major, College of Natural Sciences, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea)

요약: 제주도 알칼리 현무암내에 다양하게 산출되는 단사휘석에 대한 지화학, 조직, 산출상태에 의해 세 종류로 구별되어진다. I형의 단사휘석은 상부맨틀을 구성하고 있는 침정석 페리도타이트의 구성광물로 크롬이 풍부한 투휘석이다. II형은 세립의 단사휘석집합체(단사휘석이 거의 85~90%)로 산출되는 휘석암의 구성광물로서, 모암인 현무암질 마그마의 형성 이전에 상부맨틀에서 형성된 암맥이거나 변성기원의 맨틀물질의 일부가 포획되어진 것으로 Ti함량이 비교적 적은 편이며, Ca, Mg성분이 높은 augite이다. III형은 모암인 현무암에서 형성된 큐물레이트의 일부이거나 조립의 반정으로 산출되는 휘석이다. 산출상태의 차이에 의해 III형은 거정(>1 cm)의 단결정으로 산출되는 단사휘석(IIIa), 거정의 사장석 내에 조립의 사방휘석과 함께 오피틱(ophitic)조직을 형성하며 산출되는 단사휘석(IIIb), 반정(<1 cm)으로 산출되는 단사휘석(IIIc)으로 다시 구분되어진다. I형의 단사휘석은 높은 Mg#와 Si, 가장 낮은 Ti 성분을, II형은 I형과 III형의 중간조성을 보이며, 반면에 III형의 높은 Ti성분, 낮은 Si와 Mg#를 나타내고 있다. 이는 I형에서 III형으로 갈수록(Ti+Al<sup>IV</sup>)/Si와 Al<sup>IV</sup>/Al<sup>VI</sup>의 비율이 높아진 것으로, 이 세 종류의 단사휘석은 모두 높은 압력환경 하에서 형성되었으며, I형이 가장 높은 압력에서 형성되었고, III형이 상대적으로 가장 낮은 압력에서 형성되었음을 의미한다. 모암인 현무암이 고압의 환경에서 분별결정작용을 통해 단사휘석(III형)을 정출함으로 SiO<sub>2</sub>의 결핍과 상대적인 알칼리성분의 부화를 가져오게 되어 알칼리 현무암의 화학조성을 보이는 특성에 기여한 것으로 해석된다.

주요어: 제주도, 맨틀포획암, 단사휘석, 큐물레이트, 상부맨틀

**ABSTRACT:** Three types of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks from Jeju Island can be identified on the basis of geochemical and textural data. Type I is Cr-rich diopside in spinel peridotites from the upper mantle. Type II is augite in fine-grained pyroxenites which are possibly either magmatic vein or metamorphic segregations owing to anatexis of the upper mantle. The augite of Type II contains high Ca and Mg and relatively low Ti. Type III is thought to be either cumulates or cognate phenocrysts and can be subdivided into IIIa, IIIb, and IIIc based on their occurrence mode. Clinopyroxenes of Type I have the highest Mg# and Si and the lowest Ti,

\*교신저자: bhhwang@pusan.ac.kr

whereas those of Type III have lower Mg#와 Si and higher Ti. These geochemical characteristics indicate that  $(Ti+Al^{IV})/Si$  and  $Al^{IV}/Al^{VI}$  increase from Type I to Type III. It is possibly interpreted that Type I is of the highest pressure origin and Type III of the lowest. Fractionation of high-pressure clinopyroxenes would result in evolved undersaturated alkali-enriched liquids, probably producing the alkali-enriched host basaltic rocks in Jeju Island.

**Key words** : jeju island, mantle xenolith, clinopyroxenes, cumulates, upper mantle.

## 서 언

알칼리 현무암에 포획된 맨틀포획암과 거정의 결정들은 일반적으로 높은 압력의 환경에서 형성된 것으로 알려져 있으며, 상부맨틀과 하부지각에서 일어나고 있는 물리화학적 과정에 대한 중요한 정보를 제공하고 있다(Irving, 1974; Kovacs *et al.*, 2003). 이러한 맨틀포획암과 거정질의 결정에는 단사회석이 풍부하게 산출되며, 이 단사회석의 화학성분에 의해 맨틀포획암을 Type I 계열(혹은 Cr-diopside 계열)과 Type II (혹은 Al-Augite) 계열로 분류하기도 한다(Frey and Green, 1974; Frey and Prinz, 1978). Type I 계열의 포획암은 감람석과 사방회석, 크롬이 풍부한 단사회석으로 구성된 맨틀포획암으로 부분용융에 의해 불호정성원소가 결핍된 암석으로 알려져 있다. Type II 계열의 포획암에 대한 기원은 아직 많은 의문점을 제시하면서 다음과 같이 여러 가지로 해석되고 있다. (1) 지각하부에 관입하여 언더플레이트(underplated)된 현무암질 마그마에서 유래된 큐물레이트(cumulates)의 일부(Sachs and Hansteen, 2001), (2) 상부맨틀에서 형성된 암맥의 일부(Mukasa and Shervais, 1999), (3) 맨틀의 용융(anatexis)에 의한 변성기원의 물질(Chen *et al.*, 2001), 혹은 (4) 섭입된 해양지각의 파편(Allegre and Turcotte, 1986)의 일부 등이 그것이다.

본 논문은 제주도에 분포하는 현무암내에 산출되는 단사회석에 대해 지화학적, 광물학적, 암석기재학적 연구를 수행하여 이들 단사회석의 기원(origin)과 특성을 파악하고 제주도 하부지각/상부맨틀의 지질학적 진화발달체계를 이해하려고 한다.

## 연구방법

맨틀포획암을 비롯한 여러 종류의 암편과 결정들을 포획하고 있는 모암인 현무암과 맨틀포획암인 스피넬레졸라이트에 대한 화학조성의 특성을 파악하기 위해 12개의 시료에 대한 X-선 형광분광분석(Phillips PW2404)을 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 실시하였다(표 1). 광물의 화학조성을 위해서는 대전의 한국기초과학지원연구원의 CAMECA SX-50 EPMA 기기를 이용하여 분석하였다. EPMA 분석조건은 조사전류 20 nA, 가속전압 15 kV, 빔직경 1  $\mu\text{m}$ , 측정시간은 피크인 경우 10초, 배경치는 5초로 설정되었다. 기기분석오차는 1% 미만이고, 측정오차는 0.3% 미만이다. 분석된 광물은 모암인 현무암과 맨틀포획암내의 감람석, 사방회석과 여러 종류의 산출상태에 따르는 단사회석이 분석되었다(표 2, 3). 본 논문에서 초점을 두고 있는 것은 산출상태에 따른 단사회석의 화학 조성 특성을 파악하기 위한 것이나, 비교를 위해 감람석과 사방회석의 화학 조성도 같이 분석되어져 있다.

## 지 질

제주도는 순상화산의 지형을 나타내며, 한라산 정상외 분화구 주변에는 돔(dome)상의 조면암이 분포하며, 현무암용암류와 화성쇄설물, 유리쇄설암 및 화산쇄설성 퇴적층, 단성화산체로 구성되어 있다. 역사시대(1002, 1007년)에도 화산폭발이나 지진이 발생했던 기록이 있지만(대한지질학회, 1999), 제주도는 제 4기 플라이스토세에서 홀로세에 걸쳐 일어난 화산활동에 의하여 분출된 현무암질 용암류로 주로 구성되어 있다(Yun *et al.*, 1986; Won *et al.*, 1993; 이문원 외, 1994). 현무암질 용암류의 기반암은 백

**Table 1.** Chemical analyses of basaltic host rocks and mantle xenoliths from Jeju Island

Sample	basaltic host rocks							
	03SS6	04SS4	SG	0204SG5	03GG2	0204GG1	SS(Y)*	SS(Ch)**
SiO <sub>2</sub>	49.89	49.07	49.04	50.36	49.40	49.80	49.93	48.69
TiO <sub>2</sub>	2.32	2.37	2.37	2.33	2.41	2.29	2.31	2.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.20	14.84	14.41	15.06	14.47	15.02	14.78	14.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.90	11.91	12.07	12.06	12.12	11.98	11.27	11.01
MnO	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.13	0.16
MgO	7.20	8.16	8.20	7.03	8.36	7.33	6.75	7.67
CaO	8.02	8.38	8.40	7.67	8.47	7.99	7.83	8.13
Na <sub>2</sub> O	3.52	3.24	3.11	3.50	3.14	3.32	3.95	3.15
K <sub>2</sub> O	1.92	1.78	1.51	1.70	1.51	1.71	1.93	1.66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.62	0.57	0.46	0.55	0.48	0.55	0.64	0.54
Mg#	57.94	60.94	60.74	57.03	61.10	58.21	57.69	61.33
Total	100.05	99.87	99.31	99.89	99.92	99.84	99.52	100.10
Sample	mantle xenoliths (spinel lherzolite)							
	SS1	SS2	03SS3	GG1	GG2	GG5	SS-1**	SG-3**
SiO <sub>2</sub>	45.53	44.89	44.74	45.18	45.15	45.65	44.72	45.26
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.10	0.16	0.03	0.08	0.12	0.08	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.68	2.95	3.90	1.11	1.35	3.73	2.87	2.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.65	9.46	9.31	9.21	9.64	8.97	8.24	9.74
MnO	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.16
MgO	41.29	40.90	39.11	44.35	43.44	38.52	39.96	38.41
CaO	1.88	2.07	2.66	0.45	0.68	3.27	2.87	2.91
Na <sub>2</sub> O	n.d	0.07	0.18	n.d	0.02	0.12	0.27	0.16
K <sub>2</sub> O	n.d	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	0.04	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03
Mg#	89.48	88.51	88.22	89.57	88.93	88.45	90.1	87.6
Total	99.75	100.08	99.71	100.03	100.11	100.21	99.2	99.7

Data sources: \* from Yun *et al.*(1998); \*\* from Choi (1998)

약기~제 3기의 화강암류와 응회암으로 되어있는 것으로 추정되며, 이 화강암과 응회암이 제4기 화산암인 현무암에서 포획암으로 산출되거나 시추코아에서 관찰되어진다(이문원 외, 1994; Kim *et al.*, 2003).

여러 종류의 암편과 결정(즉, 초염기성 맨틀 포획암, 거정질인 감람석, 휘석, 사장석 결정, 산성암질 암편)들을 포획하고 있는 현무암이 신산리 해안, 산굼부리, 송악산, 지그리오름, 그리고 여러 시추코아에서 관찰되어진다(그림 1). 이 현무암은 반상 내지 미반상조직의 세립질의 치밀한 암회색을 띠며, SiO<sub>2</sub> 성분이 49~50 wt%, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O는 4.6~5.4 wt%로 알칼리계열에 속

하며 Mg#은 57~61을 나타내고 있다(표 1). 이러한 화학조성은 다른 문헌에서 발표하는 제주도의 현무암의 화학조성과 거의 유사하다(윤성호 외, 1998; Choi, 1998). 원시 초생마그마와 비교할 때, 낮은 Mg 값과 Ni 함량을 나타내는 제주도 현무암의 특성은 맨틀포획암을 포획하기 전에 맨틀에서 이미 강하게 분별작용을 경험한 마그마로 해석되고 있다(Choi, 1998). 반정광물은 주로 Mg#가 75~84 정도인 감람석이이며, 석기는 래스(lath) 상의 사장석과 세립의 감람석, 휘석, 불투명광물, 유리질 물질로 이루어져 있다(표 2). 세립의 감람석이 석기로 비교적 풍부하게 나타나고 있어, 알칼리 현무암의 특징을

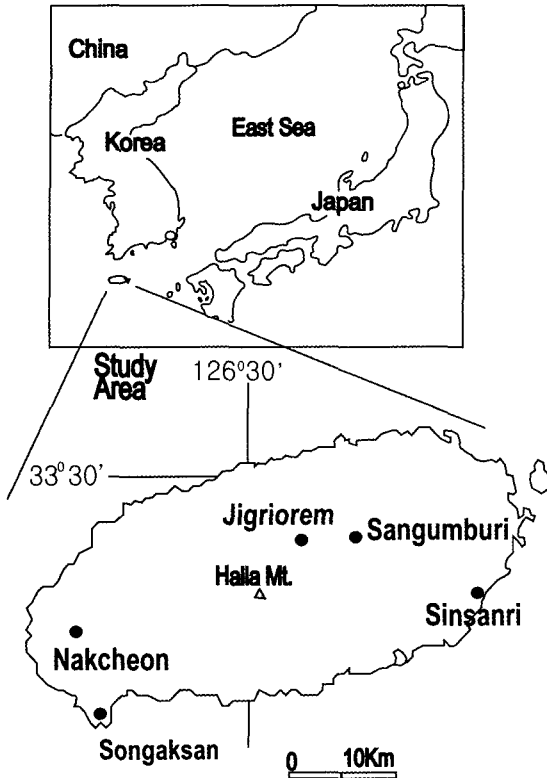


Fig. 1. Schematic geological map of the studied region showing Jeju Island and sample locations.

보여주고 있다(McBirney, 1993).

초염기성 맨틀포획암은 크기가 1~15 cm이며, 각상에서 아각상의 작은 파편에서 둥근 형태의 단괴로 포획되어 있으며, 육안식별로는 연초록의 감람석, 검은 갈색의 사방회석, 짙은 초록의 단사휘석, 소량의 암흑색의 침정석으로 구성되어 있는 침정석 페리도타이트에 속한다(그림 2a). 침정석 페리도타이트는 SiO<sub>2</sub> 성분이 45~46 wt%, MgO는 39~44 wt%, FeO는 9~10 wt%, Mg#은 88~90을 나타내고 있다(표 1) 감람석이 가장 풍부한 구성광물이고, 가장 조립질로 산출되는 것이 사방회석이다. 이들 광물의 Mg#은 90~91로 나타난다(표 2). 침정석 페리도타이트에는 프로토그라놀라, 반상쇄성, 등립질의 조직이 관찰되며(Yang, 2004), 이러한 조직의 존재는 제주도의 상부맨틀에 전단체계가 형성되어 있음을 나타낸다(Mercier and Nicolas 1975). 프로토그라놀라 조직에서는 거정의 사방회석 결정들 주변에는 침정석, 2차적 미세립의 감람

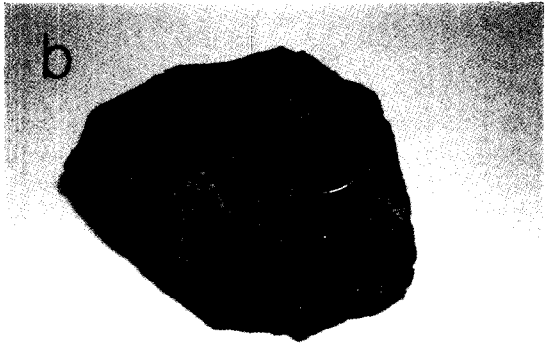
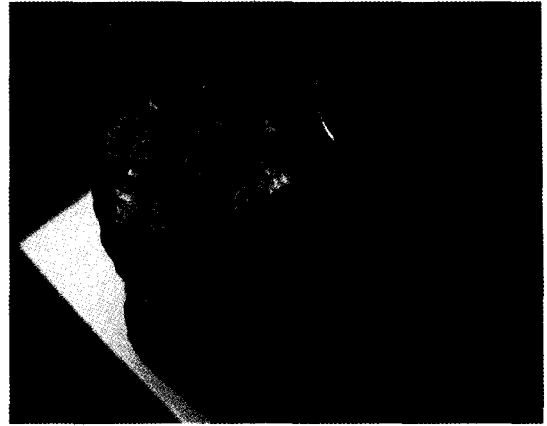


Fig. 2. Photographs of hand specimens of (a) alkali basalts containing mantle xenoliths from Sinsanri, (b) a megacryst of fine-grained pyroxenite from Sinsanri, and (c) an aggregate of plagioclase + clinopyroxene + orthopyroxene from Sinsanri in Jeju Island.

석과 미세립의 사장석이 공간적인 연관성을 지니고 항상 같이 산출되어지는데 이는 침정석,

**Table 2.** Microprobe analyses of olivines and orthopyroxenes in host basaltic rocks, mantle xenoliths and megacrysts from Jeju Island. Opx=orthopyroxene, Pl=plagioclase and Cpx=clinopyroxene

Sample	olivine phenocrysts in host basaltic rocks						olivine in mantle xenoliths				
	SS22	SS33	SS86	SS21	ss-host(Ch)**		04ssA13	04ssA14	04ss22	02ss28	ss-5(Ch)**
					core	rim					
SiO <sub>2</sub>	40.00	39.33	38.02	37.78	39.42	38.24	40.28	40.72	40.33	40.19	40.39
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.06	0.00	0.04	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.05	0.07	0.05	0.04	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01
FeO	15.78	15.01	21.47	23.25	15.27	21.66	9.00	9.33	9.84	9.77	9.83
MnO	0.22	0.17	0.30	0.35	0.16	0.30	0.14	0.19	0.11	0.15	0.15
MgO	45.20	45.74	39.83	38.64	44.78	39.39	50.14	50.36	49.71	50.03	49.59
CaO	0.17	0.18	0.17	0.16	0.17	0.25	0.06	0.07	0.07	0.05	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
K <sub>2</sub> O	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.32	0.29	0.19	0.16	0.19	0.17	0.45	0.32	0.39	0.43	0.41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.02	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01
Mg#	83.6	84.5	76.8	74.8	84.0	76.4	90.9	90.6	90.0	90.1	90.0
Total	100.77	100.90	100.11	100.45	100.10	100.10	100.11	101.03	100.49	100.66	100.50
Sample	Opx in mantle xenoliths					Opx in Pl+Opx+Cpx cumulates					
	04ssA11	04ssA16	02ss21	04ss215	04ss111	04ss115	04ss81	04ss11	04ss12	04ss110	
SiO <sub>2</sub>	55.99	56.08	55.06	55.01	52.15	50.53	51.10	51.79	51.28	51.72	
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.00	0.08	0.06	0.59	0.56	0.52	0.42	0.47	0.55	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.83	1.89	3.98	4.41	3.46	4.76	4.08	3.25	3.54	3.72	
FeO	5.83	5.85	6.11	6.30	15.61	15.39	15.60	14.64	15.11	15.65	
MnO	0.15	0.20	0.16	0.16	0.19	0.24	0.27	0.21	0.16	0.19	
MgO	34.77	34.84	33.55	33.90	26.27	25.35	25.78	26.69	26.65	26.03	
CaO	0.60	0.68	0.66	0.73	1.72	1.63	1.49	1.75	1.75	1.64	
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
NiO	0.11	0.10	0.08	0.11	0.08	0.00	0.00	0.11	0.08	0.05	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.61	0.34	0.36	0.07	0.09	0.08	0.20	0.07	0.13	
Mg#	91.4	91.4	90.7	90.6	75.0	74.6	74.7	76.5	75.9	74.7	
Total	99.86	100.34	100.12	101.10	100.24	98.65	98.96	99.14	99.18	99.74	

\*\* : data sources from Choi (1998)

감람석, 그리고 사장석이 사방회석에서 용리되어진 것으로 여겨진다. 이러한 사방회석에서 침정석, 감람석과 사장석이 용리되어진 이러한 조직은 프로토포그라놀라조직이 형성되기 이전에 고온에서 알루미늄 함량을 많이 지닌 암석이 평형상태를 유지했음을 암시한다(Tracy, 1980).

단사회석의 산출상태

현무암내에 산출되는 단사회석은 야외에서의 육안관찰과 현미경 관찰에 의한 조직적 특성에

의해 다음과 같이 분류되어진다.

① I형: 맨틀포획암인 침정석 페리도타이트의 구성광물로 산출되는 단사회석으로 육안으로는 짙은 초록색을 보인다(그림 2a). 단사회석은 입자크기가 상대적으로 작고 대체로 간극을 충전하는 모습으로 산출된다. 단사회석은 재결정작용을 경험한 변성기원의 조직으로 산출되는 경향이 더욱 뚜렷하며, 특히 스피넬과 접하는 곳에서 부분적으로 용융되어 재결정되어진 조직을 보여준다(그림 3a, b).

② II형: II형은 세립의 휘석암(그림 2b)의 구

성광물로, 단사회석이 거의 85~90%, 그 외에 사방회석과 불투명광물로 이루어져 있다. 세립의 단사회석과 소량의 사방회석이 미약한 등립질 조직을 보인다(그림 3c). 재결정작용이 광범위하게 이루어진 삼중점(triple junction)과 킹크 밴딩(kink banding)이 발달되어 있어 모암인 현무암에 포획되기 이전에 고체상태였음을 나타내고 있다.

③ **III형**: III형은 산출상태에 따라 다시 세 그룹으로 나누어진다. IIIa형은 거정질 단결정으로 산출되는 것으로 크기는 4~5 cm 정도가 주를 이루며, 큰 것은 10 cm 이상인 것도 관찰된다. 육안으로는 유리질 광택을 보이면서 암흑색을 띠고 있으며, 반자형의 등근 결정형을 나타내고 있는 것이 일반적이다(그림 3d). 모암인 현무암과 접촉하고 있는 가장자리는 대체로 스펀지조직이 발달되어 있으며, 용리엽리가 없다. IIIb형의 단사회석은 사장석±사방회석과 함께 산출되고 있다(그림 2c). 사장석을 배경으로 사방회석과 단사회석이 여러 곳에 흩어져 있는 오피틱(ophitic) 조직은 이 광물들이 큐물레이트(cumulate)되어진 것임을 나타내고 있다(그림 2c, 3e, f). 오피틱조직에서는 거의 항상 사방회석과 단사회석은 붙어서 한 쌍을 이루듯이 산출되는 것이 특징이며, 유독 사방회석만이 반응연(reaction rim)이 매우 발달되어 있으며, 이 반응연은 감람석과 사장석으로 이루어져 있다(그림 3e, f). 반면에 단사회석의 가장자리는 감람석과 사장석으로 이루어진 반응연 대신에 스펀지조직이 발달되어 있다. IIIc형은 모암인 현무암내의 반정으로 산출되는 단사회석으로 결정면이 용식되어 타형의 등근 결정형을 보여준다. 반응연, 체조직(seiving), 포유물이 없는 것이 특징적이다.

#### 단사회석의 화학 조성

분석된 단사회석에 대한 전체적인 화학 조성 특성은 Mg#가 증가함에 따라 Si, Ca, Cr 성분이 증가하고, Ti와 Fe가 감소하고 있다(표 3, 그림 4).

**I형**: 맨틀포획암에 산출되는 단사회석의 화학 조성은 대체로 SiO<sub>2</sub>: 51 wt%, TiO<sub>2</sub>: 0.4~0.5 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 6~7 wt%, FeO: 3 wt%, MgO: 15~16 wt%, CaO: 20~21 wt%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 1.0 wt%

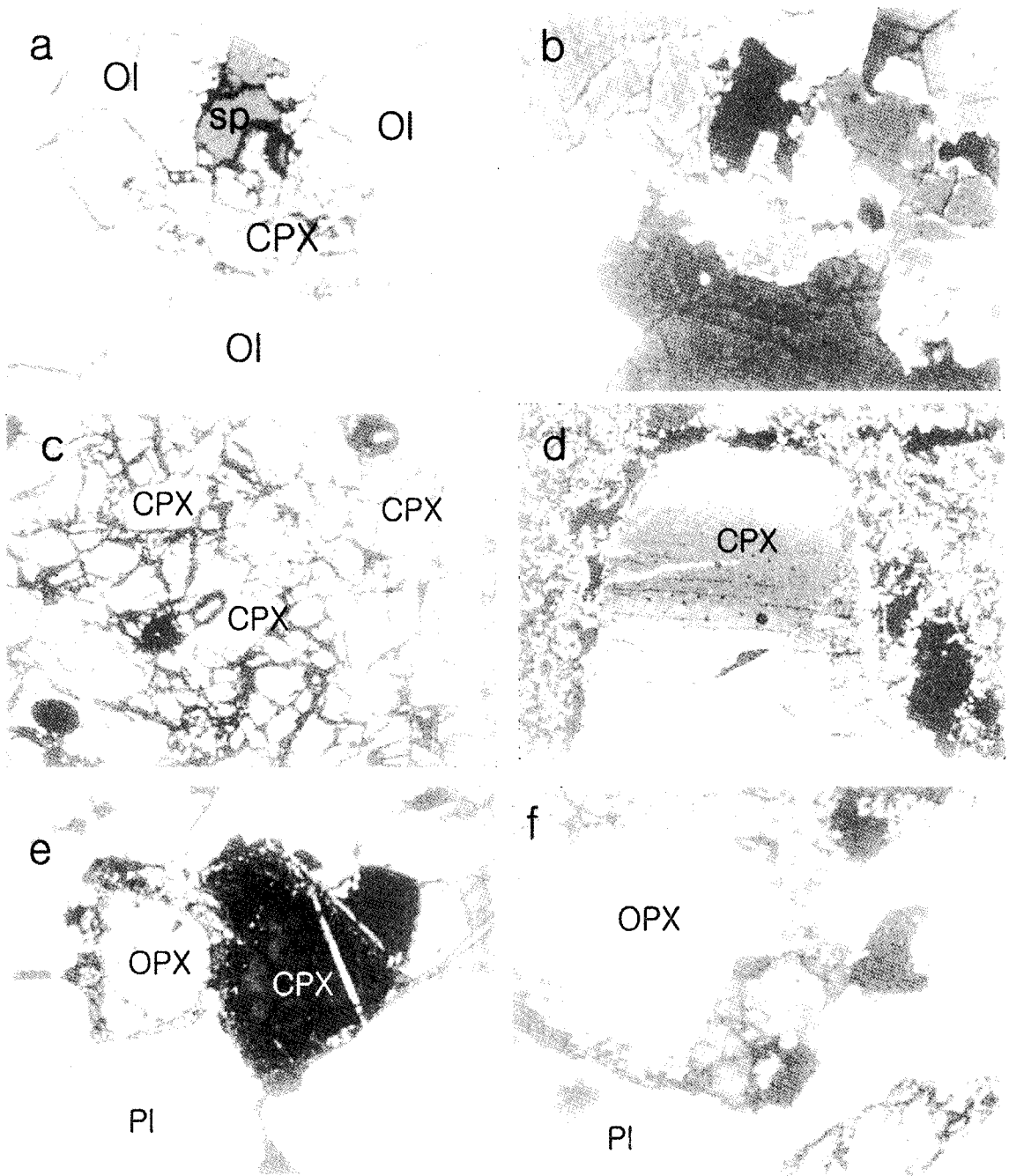
를 나타내고 있다(표 3). I형의 단사회석은 매우 좁은 범위의 화학 조성을 보여 주며 이는 이전에 발표된 단사회석의 화학 성분과 유사하다(Choi, 1998). I형의 단사회석은 본 연구에서 분석된 다른 유형의 단사회석에 비해 SiO<sub>2</sub>과 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 높고 TiO<sub>2</sub>와 FeO가 낮은 Cr-diopside 계열 휘석의 화학 성분을 나타내고 있다(그림 4). Mg#은 91~92 정도로 매우 높다.

**II형**: 세립의 단사회석들의 집합으로 산출되는 것으로 SiO<sub>2</sub>: 약 50 wt%, TiO<sub>2</sub>: 0.9 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 4.5 wt%, FeO: 6 wt%, MgO: 15.5 wt%, CaO: 20 wt%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.3 wt%, 그리고 Mg#은 82~83 정도를 나타내고 있다(표 3). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분이 매우 낮고 다른 성분들은 I형과 III형의 단사회석과의 중간에 놓여 있다(그림 4).

**III형**: 단결정의 단사회석으로 산출되는 IIIa형은 주 성분 조성의 특성은 SiO<sub>2</sub>: 약 48~50 wt%, TiO<sub>2</sub>: 1.3~1.7 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 6~7 wt%, FeO: 9 wt%, MgO: 14~15 wt%, CaO: 19 wt%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.2 wt%, 그리고 Mg#은 73~75 정도를 나타내고 있다. IIIb형은 주로 거정의 사장석+단사회석+사방회석으로 산출되는 것으로 SiO<sub>2</sub>: 약 47~49 wt%, TiO<sub>2</sub>: 1.1~1.9 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 5~7 wt%, FeO: 8~11 wt%, MgO: 14~15 wt%, CaO: 18~21 wt%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.3 wt%, 그리고 Mg#은 70~77 정도를 나타내고 있다. 높은 TiO<sub>2</sub>, FeO와 낮은 Mg#로 특징 지워진다(그림 4). IIIc형은 모암인 현무암에 반정으로 산출되는 단사회석으로 SiO<sub>2</sub>: 약 49 wt%, TiO<sub>2</sub>: 1.2 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 5 wt%, FeO: 10~11 wt%, MgO: 14 wt%, CaO: 18.6 wt%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0 wt%, 그리고 Mg#은 71~75 정도를 나타내고 있다. 티탄이 풍부한 augite로 SiO<sub>2</sub> 성분이 비교적 낮고, TiO<sub>2</sub>가 부화되어 있다(그림 4).

#### 토의 및 결론

본 논문에서 관찰되어진 단사회석은 화학 성분의 특성과 산출 상태, 조직에 의해 서로 다른 3종류의 기원으로 나누어진다. 즉, (1) 상부맨틀을 구성하고 있는 맨틀포획암의 일부인 I형, (2) 모암인 현무암질 마그마의 형성 이전에 상부맨틀에서 형성된 암맥의 일부이거나 혹은 변성기원의 맨틀물질의 일부가 포획된 II형, 그리고 (3) 모암인 현무암에서 형성된 큐물레이트의 일



**Fig. 3.** (a) A mantle xenolith showing protogranular texture with recrystallized clinopyroxene between orthopyroxenes and olivines in plane-polarized light. (b) The same picture of (a) under crossed polars. (c) A megacryst of fine-grained pyroxenite. (d) An aggregate of plagioclase+clinopyroxene+orthopyroxene showing ophitic texture. All pictured were taken in  $2\times 10$  magnitude. CPX=clinopyroxene, OPX=orthopyroxene, Ol=olivine, SP=spinel and Pl=plagioclase.

**Table 3.** Microprobe analyses of clinopyroxenes from Jeju Island

Sample	I type				II type				IIIa type				
	02SS3	02SS4	4SS2-9	04SS51	04SS52	04SS53	04SS54	04SS31	03SS23	SS1-2	SS1-3	SS1-3	SS1-4
SiO <sub>2</sub>	51.07	51.16	51.40	50.09	50.44	50.61	50.30	47.96	48.80	48.21	48.57	48.75	49.53
TiO <sub>2</sub>	0.40	0.39	0.52	0.87	0.86	0.91	0.85	1.69	1.43	1.54	1.50	1.37	1.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.89	5.80	6.44	4.55	4.41	4.58	4.51	6.71	5.94	6.23	6.12	6.35	5.75
FeO	2.77	2.51	2.87	6.09	6.06	5.69	6.10	9.35	8.64	9.12	9.25	8.66	8.98
MnO	0.08	0.09	0.05	0.18	0.19	0.16	0.18	0.07	0.12	0.09	0.18	0.13	0.23
MgO	15.12	15.45	15.44	15.59	15.65	15.44	15.66	13.94	14.32	14.13	14.34	14.73	15.23
CaO	20.68	21.26	20.33	20.41	20.55	20.36	20.27	19.15	19.20	18.58	18.57	18.62	18.54
Na <sub>2</sub> O	1.34	1.34	1.57	0.70	0.67	0.68	0.65	0.68	0.67	0.73	0.71	0.64	0.66
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02
NiO				0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	0.06				
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	1.02	0.89	0.27	0.29	0.30	0.30	0.16	0.34	0.10	0.07	0.13	0.02
Mg#	90.7	91.7	90.6	82.0	82.2	82.9	82.1	72.7	74.7	73.4	73.4	75.2	75.1
Al <sup>IV</sup> /Al <sup>VI</sup>	0.83	0.98	0.87	1.99	1.92	1.45	1.79	2.29	2.08	1.98	2.00	1.85	1.95
Total	99.22	99.05	99.52	98.87	99.22	98.73	98.80	99.73	99.52	98.78	99.34	99.40	100.22
Sample	IIIb type							IIIc type					
	04SS11-2	04SS1-5	04SS1-9	04SS2-1	04SS2-2	04SS1A1	04SS-82	04SS8-4	SS3-4	ss-host** (Ch)			
SiO <sub>2</sub>	47.53	47.03	49.46	47.90	48.28	49.05	48.38	48.27	48.73	49.26			
TiO <sub>2</sub>	1.61	1.76	1.13	1.61	1.66	1.23	1.40	1.29	1.30	1.20			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.36	7.06	5.24	6.13	6.14	5.05	5.48	5.40	4.76	4.50			
FeO	9.10	9.30	8.89	10.20	10.58	9.31	9.33	9.50	10.33	11.38			
MnO	0.22	0.21	0.16	0.27	0.16	0.19	0.21	0.16	0.24	0.22			
MgO	13.83	13.56	15.40	13.73	13.68	15.05	14.18	14.31	14.37	13.88			
CaO	18.53	18.59	18.23	18.35	18.42	18.03	18.47	18.63	18.55	18.59			
Na <sub>2</sub> O	0.76	0.74	0.61	0.75	0.70	0.59	0.67	0.69	0.59	0.61			
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00			
NiO	0.07	0.05	0.06			0.05	0.00	0.11	0.05	0.02			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.20	0.17	0.03	0.05	0.01	0.15	0.20	0.00	0.01			
Mg#	73.0	72.2	75.5	70.6	69.7	74.2	73.0	72.9	71.3	74.7			
Al <sup>IV</sup> /Al <sup>VI</sup>	1.91	2.21	2.03	2.25	2.20	2.08	2.18	2.46	2.79				
Total	99.10	98.50	99.36	98.98	99.68	98.56	98.28	98.56	98.93	99.70			

\*\* : a data source from Choi (1998)

부분이거나 반정의 일부인 III형으로 구분되어진다.

(1) 상부맨틀을 구성하고 있는 맨틀포획암의 일부인 I형: I형의 단사휘석은 그림 4와 5에서 다른 단사휘석과는 화학조성이 뚜렷하게 다르게 도시되고 있다. 화학조성은 맨틀포획암을 구성하고 있는 Cr-투휘석(diopside)이며, 다른

문헌(Choi, 1998)에 보고되는 맨틀기원의 침정석 레졸라이트내의 단사휘석 성분과 유사하다. I형의 단사휘석이 높은 Mg#와 Si를 가지고 있으며, 가장 낮은 Ti 성분을 보이고 있다. 사면체(tetrahedral atomic site)내에 Al<sup>IV</sup>도 0.1 이상으로 높게 차지하고 있으며, 현무암에 포획된 포획암물질 영역에 도시되어진다(그림 5b).



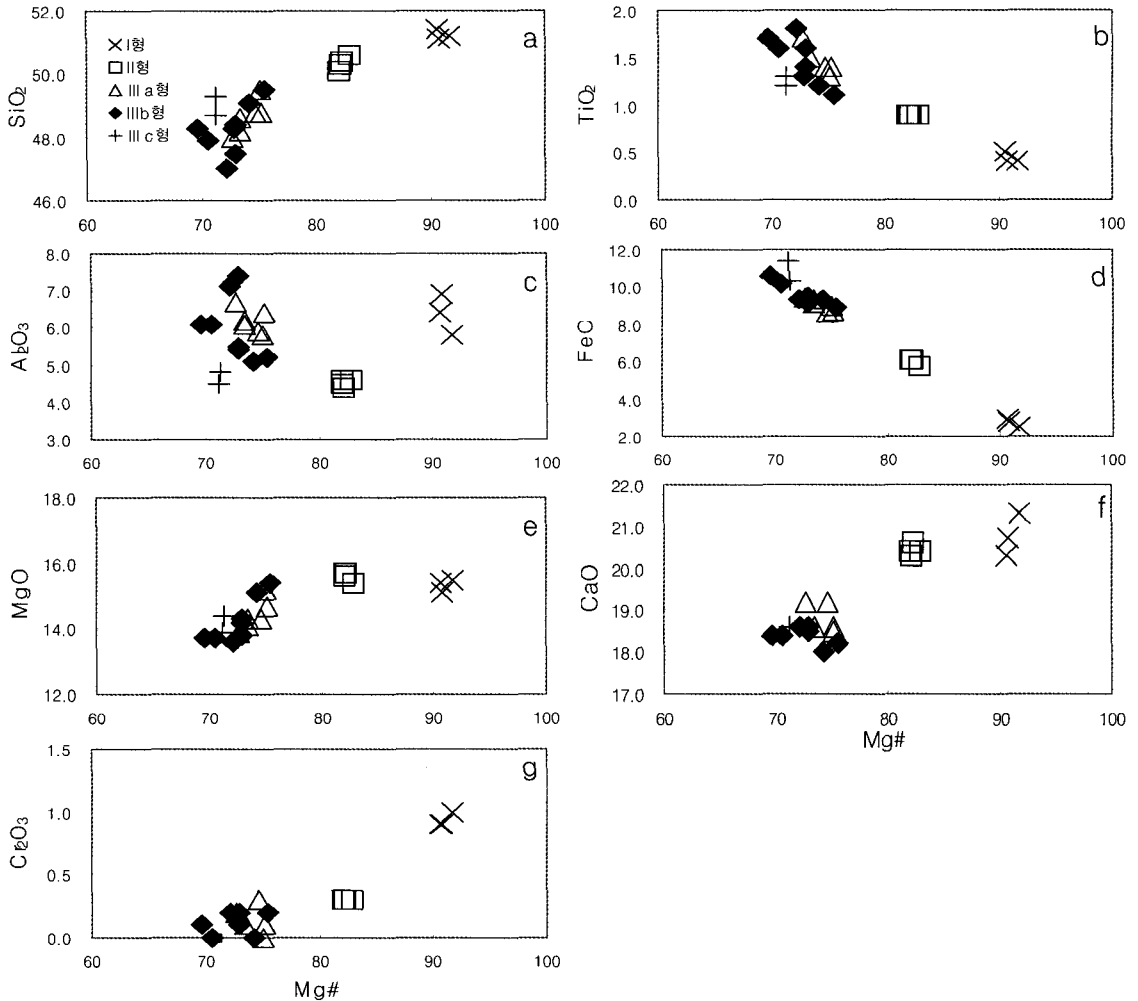


Fig. 4. Variation in Mg# value with some oxides of clinopyroxenes.

(2) 상부맨틀에서 형성된 암맥이나 변성기원의 맨틀물질의 일부가 포획된 II형: II형의 단사휘석은  $TiO_2$  함량이 비교적 적은 편이며, CaO, MgO 성분이 높은 단사휘석 성분을 나타내고 있다. II형의 단사휘석은 고체 상태에서 변형 받은 조직인 삼중점, 킹크밴딩 등을 나타내고 있어 모암인 현무암에 포획되기 이전에 상부맨틀에의 부분용융에 의해 형성된 암맥이나 세맥의 파편의 일부가 포획되었거나 혹은 맨틀물질의 용융(anatexis)에 의한 변성기원의 단사휘석이 포획되어진 것으로 여겨진다.

(3) 모암인 현무암에서 형성된 큐물레이트의 일부분이거나 반정으로 산출되는 III형: III a형, III b형, III c형의 화학조성은 거의 한 범위

에 속하며 이들 사이에 일정한 경향을 나타내고 있지 않는다(그림 4). 또한 고체상태에서 변형되어진 조직적 특성이 관찰되지 않으며, III b형은 뚜렷한 큐물레이트 조직을 보여주고 있는 것으로 모암인 현무암에서 형성되어진 단사휘석으로 여겨진다. 그러나 이 세 종류의 단사휘석이 하나의 현무암 단위 내에서 하나의 분화과정 속에서 형성된 휘석은 아닌 것으로 여겨진다. 이들 단사휘석들의 화학조성이 직선상의 형태를 나타내지 않고 있는데, 성분조성이 서로 겹쳐지는 것은 하나의 현무암 flow에서 샘플링되어진 것이 아님을 의미한다.

I형의 단사휘석은 높은 Mg#와 Si, 가장 낮은 Ti 성분을 나타내고, II형은 I형과 III형의 중간

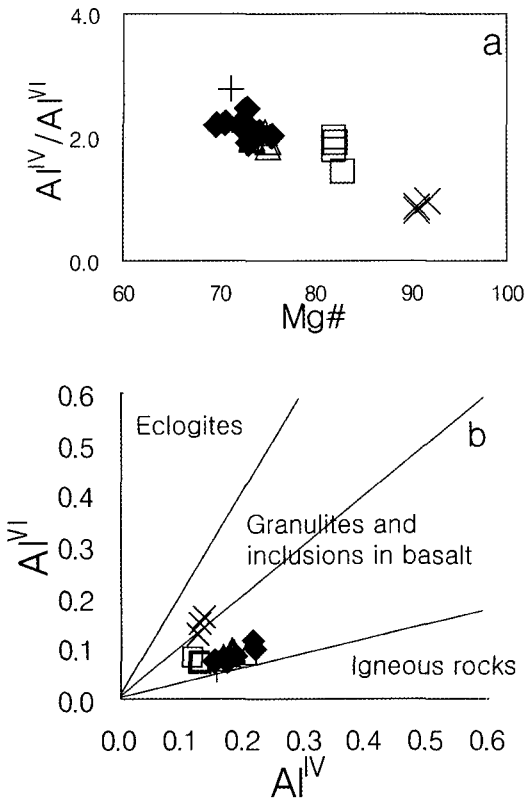


Fig. 5. Variation in (a) Mg# with  $Al^{IV}/Al^{VI}$  and (b)  $Al^{IV}$  and  $Al^{VI}$  in clinopyroxenes. Symbols are the same as those in Fig. 4.

조성을 보이며, 반면에 III형의 단사휘석은 높은 Ti 성분, 낮은 Si, 낮은 Mg#을 보인다. Velde와 Kushiro(1978)는 Na-Al-Si-O 멜트(melt)에서  $Al^{IV}/Al^{VI}$ 는 압력의 함수로서 압력이 증가할수록 단사휘석내의  $Al^{IV}$ 에 비해  $Al^{VI}$ 가 증가한다고 보고했다. 본 연구에서는 Mg#이 높아질수록  $Al^{IV}/Al^{VI}$ 가 낮아지는 경향을 보여주고 있다(그림 5a). 즉, Mg#이 높아질수록  $Al^{VI}$ 의 함량이 증가했음을 나타내고 있다. 이는 I형의 단사휘석이 가장 높은 압력에서 형성되었고, 그 뒤를 이어 II형, 그리고 III형이 상대적으로 낮은 압력에서 형성되었다는 해석을 가능하게 하고 있다. 본 연구에서 분석된 단사휘석은  $Al^{IV}:Al^{VI}$ 의 다이어그램에서 대부분 현무암내에 포획된 포획암의 영역내에 들어가며, IIIc형은 화성암 영역과 현무암내에 포획된 포획암 영역의 경계선에 도시되고 있어 이들 단사휘석이 고압의 환경에서 형성되었음을 의미한다.

Thompson(1974)는 액상선의 단사휘석의 성분은 압력이 증가함에 따라 Ti 성분이 감소하고 있음을 보고했다. 분별결정작용을 하는 현무암질 마그마는  $SiO_2$  활동도가 낮아짐에 따라 단사휘석이 만들어지면서 사면체 내에  $Al^{3+}$ 와  $Ti^{4+}$ 를 치환하게 된다. 그 결과 압력이 낮아질수록 단사휘석내에 Ti 함량과  $Al^{IV}$ 이 증가하는 경향을 나타나게 되어있다. 본 연구에서는 I형의 단사휘석이 높은 Mg#와 Si, 가장 낮은 Ti 성분을 보이고 있으며, 반면에 모암인 현무암에서 형성된 쿼츠의 일부분으로 여겨지는 III형에서는 I형과는 다르게 높은 Ti 성분, 낮은 Si, 낮은 Mg#가 나오고 있다. 즉, I형에서 III형으로 갈수록  $Ti+Al^{IV} : Si$  비율이 높아지고 있다. 이는 I형이 가장 높은 압력에서, III형이 상대적으로 낮은 압력에서 형성되어졌다는 해석을 가능하게 하고 있다.

제주도에 분포하는 화산암은 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면암, 그리고 솔리아이트 현무암으로 화학성분이 알칼리계열에서 비알칼리계열에 걸쳐 산출된다. 특히 이 중에 맨틀포획암과 거정의 단사휘석을 포획하고 있는 현무암은 알칼리현무암의 화학조성을 보인다. 이러한 알칼리현무암의 조성은 현무암이고 압의 환경에서 분별결정작용을 통해 단사휘석(III형)을 정출함으로써 마그마의  $SiO_2$ 가 결핍되고, 상대적으로 알칼리성분을 부화시키게 된 요인 중의 하나라고 해석된다.

결론적으로, 연구되어진 단사휘석이 고압의 환경에서 형성된 3종류의 기원으로 분류가 되었지만 마그마에서 분별결정작용이 이루어질 때, 광물의 화학조성이 압력의 영향에만 좌우되는 것이 아니라, 마그마의 원래의 화학성분, 소량으로 존재하지만 단사휘석의 성분에 영향을 주는 원소들의 서로 상호간의 중요성, 당시의 온도, 산화상태 등이 함께 해석이 되어야 하고, 덧붙여, 미량원소의 거동도 함께 이루어지면 좀 더 정확한 정량적인 물리화학적 환경이 파악될 것이다.

## 사 사

본 논문을 심사해 주신 윤성호 교수님과 익명의 심사자에게 깊은 감사를 보냅니다. 본 논문의 부족한 많은 부분을 두 분의 심사위원님이 수정·조언하여

주셨기에 논문의 질을 보다 높일 수 있었으며, 저자들이 많은 것을 배우게 되었음에 감사드립니다. 또한 본 논문의 데이터와 표 정리, 그리고 그림을 위한 컴퓨터 작업에 인내심을 가지고 도와준 부산대학교 지질학과 석사과정의 임동규군에게 깊은 감사를 보냅니다. 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R04-2002-000-20045-0)지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 대한지질학회 (1999) 한국의 지질. 802p.
- 윤성효, 고정신, 안지영 (1998) 제주도 동부 알칼리 현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구. 자원 환경지질, 31권 5호, 447-458.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭 (1994) 제주도 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질 학회지, 30, 521-541.
- Allegre, C.J. and Turcotte, D.L. (1986) Implications of a two-component marble-cake mantle. *Nature*, 323, 123-127.
- Chen, S., O'Reilly, S.Y., Zhou, X., William L. G., Zhang, G., Sun, M., Feng, J., and Zhang, M. (2001) Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean craton, China: evidence from xenoliths. *Lithos*, 56, 267-301.
- Choi, S-H. (1998) Geochemical study of ultramafic xenoliths in basalts from Cheju Island, Korea. Ph.D thesis, Seoul Nat'l Univ. 203p.
- Frey, F.A. and Green, D.H. (1974) The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 1023-1059.
- Frey, F.A. and Prinz, M. (1978) Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: Petrologic and geochemical data bearing their petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 38., 129-176.
- Irving, A.J. (1974) Megacrysts from the newer basalts and other basaltic rocks of southeastern Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1503-1514.
- Kim, K.H., Nagao, K., Suzuki, K., Tanaka, T., and Park, E.J. (2003) Radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks in Jeju volcanic Island, South Korea: evidences of presence of continental basement. *Proceedings of the 1st Symposium, Jeju Volcanological Institute*, 26-32.
- Kovacs, I., Zajacz, Z., and Szabo, C. (2003) Type-II xenoliths and metasomatism beneath the Nograd-Gomor volcanic field, Carpathian-Pannonian region. *Proceedings of 2003 Korea-Hungary International Joint Seminar*, 62-68.
- McBirney, R.B. (1993) *Igneous petrology* (2nd ed), Jones and Bartlett Publishers, 580p.
- Mercier J.C.C. and Nicolas A. (1975) Textures and fabrics of upper-mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *J. Petrol.*, 16, 454-487.
- Mukasa, S.B. and Shervais J.W. (1999) Growth of subcontinental lithosphere: evidence from repeated dike injections in the Balmuccia lherzolite massif, Italian Alps. *Lithos.*, 48, 287-316.
- Sachs, P.M. and Hansteen, H.T. (2001) Pleistocene underplating and metasomatism of the lowercontinental crust: a xenolith study. *J. Petrol.*, 41, 331-356.
- Thompson, R.H. (1974) Some high-pressure pyroxenes. *Mineral. Mag.*, 39, 768-787.
- Tracy, R.J. (1980) Petrology and genetic significance of an ultramafic xenolith suite from Tahiti. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48, 80-96.
- Velde, B. and Kushiro, I. (1978) Structure of sodium aluminosilica melts quenched at high pressure; infrared and aluminium K-radiation data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 4, 137-140.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y., and Shon, Y.K. (1993) Explanatory text of the geological map of Seongsan. Jeju Province Office. pp. 104.
- Yang, K. (2004) Fluid and melt inclusions trapped in xenoliths from the lower crust/upper mantle beneath Jeju Island (I): A preliminary study. *J. Petrol. Soc. Korea*, 13, 34-45.
- Yun, S.K., Han, D.S., and Lee, D.Y. (1986) Quaternary geological survey of southern Jeju Island. KIGAM, KR-86-2(B)-2, pp. 64.

2005년 2월 28일 원고접수, 2005년 3월 16일 게재승인.