

제주도 알칼리 현무암에 포획된 반려암질 포획암

Gabbroic Xenoliths in Alkaline Basalts from Jeju Island

염 영 보 (Youngbo Eom), 양 경 희 (Kyounghee Yang)*, 남 복 현 (Bokhyun Nam),
황 병 훈 (Byoung-Hoon Hwang), 김 진 섭 (Jinseop Kim)*

부산대학교 자연과학대학 지구환경시스템학부
(Division of Earth Environmental System, College of Natural Sciences, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea)

요약: 제주도 동부 신산리해안과 산굼부리에 분포하는 현무암에는 최대 직경 15 cm의 개브로 노라이트 성분의 포획암과 거정의 사장석 결정이 포획되어 있다. 이 포획암은 포이킬리틱과 등립질 조직으로 산출되며, 관찰된 모든 포획암에는 사장석의 함량이 가장 우세하며(42-94 vol%), 감람석은 산출되지 않는다. 포이킬리틱조직의 포획암은 사장석을 주정(主晶, oikocryst)으로 자형의 사방휘석과 단사휘석을 포함하고 있는 큐물레이트의 특성을 잘 나타내고 있으며 등립질조직의 포획암은 반자형에서 타형의 사방휘석, 단사휘석, 사장석으로 구성되어 있다. 조직적 특성, 지화학적 특성, 야외 노두에서의 산출상태에 의해 포이킬리틱조직을 보이는 포획암은 모암인 현무암 마그마와의 관계에 있어서 폐쇄계를 이룬 고화대에서, 등립질조직의 포획암은 포이킬리틱한 것에 비해 열린계의 특성을 보이며 마그마 챔버의 회반죽대에서, 거정질의 사장석은 결정 부유대에 위치하던 암편 혹은 광물편으로 해석된다. 제주도의 반려암질포획암은 제주도를 형성한 마그마 챔버계의 일부분으로, 분화과정이 제법 진행된 마그마에서 결정화된 암석으로 임시적으로 마그마 챔버를 채웠던 마그마 배치(batch)와 관련된 결정화작용-고립화-포획과정의 암편임을 나타낸다.

주요어: 제주도, 반려암질포획암, 포이킬리틱, 큐물레이트, 마그마챔버

ABSTRACT: Gabbroic xenoliths in poikilitic and equigranular textures and plagioclase megacrysts, up to 15 cm in size, are trapped in alkaline basalts from Sinsanri and Sangeumburi, Jeju island. Gabbroic xenoliths are gabbro norite in composition. Plagioclase is the most dominantly present (42~94 vol%), while olivine crystals are absent. Poikilitic xenoliths, interpreted as cumulates, include euhedral opx+cpx in oikocryst plagioclase. Equigranular xenoliths include subhedral to anhedral opx+cpx+pl. Based on the textural and geochemical natures, occurrence mode at the outcrops, poikilitic and equigranular xenoliths and plagioclase megacrysts were from rigid zone, mushy zone and crystal-suspended zone of the magma chamber, respectively. The gabbroic xenoliths in alkaline basalts of the Juju island represent crystallization products of relatively evolved basaltic magma at the Jeju magma reservoir beneath the Jeju Island. They are gabbro fragments that represent crystal-

*교신저자: yangkyhe@pusan.ac.kr

lization-isolation-capture processes associated with magma batches temporarily occupying reservoirs.

Key words : Jeju Island, gabbroic xenoliths, poikilitic, cumulate, magma chamber

서 언

일반지질

제주도는 태평양판과 필리핀판이 유라시아판 아래로 섭입하는 섭입대환경에 가까운 곳에 위치하고 있으면서, 맨틀 플럼 활동에 의한 지판 내의 마그마(intraplate magma) 작용으로 형성된 화산섬으로 알려져 있다. 이는 판구조론적으로 상반된 환경이 서로 인접되어진 곳으로 매우 흥미로운 지역이다. 제주도는 역사시대(1002, 1007년)에도 화산폭발이 발생했던 기록이 있지만 주로 플라이스토세에서 홀로세에 걸쳐 일어난 현무암질 화산암으로 크게 용암분출/흐름에 의해 형성된 용암류와 격렬한 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암류로 구성되어 있다(대한지질학회, 1999). 최근 시추코아에서 회수된 정보는 제주도는 우리나라의 한반도와 같이 대륙지각 위에 형성된 화산으로 제시되고 있으며, 제주도를 형성하고 있는 용암의 기반암은 경상분지의 중생대의 화강암과 화산암, 영남육괴의 화강편마암과 유사한 암석으로 보고되고 있다(Kim, *et al.*, 2003).

제주도에 분포하는 현무암 중에는 맨틀포획암인 페리도타이트와 반려암질 암편, 그리고 거정의 결정들을 포획하고 있는 것이 있다. 현무암에 포획된 이들 암편이나 결정들은 일반적으로 높은 압력의 환경에서 형성된 것으로 알려져 있으며, 상부맨틀과 하부지각에서 일어나고 있는 지질학적 혹은 물리화학적 과정에 대한 중요한 정보를 제공하고 있다(Irving, 1974; Fodor, *et al.*, 1993; Kovacs *et al.*, 2003). 이 중에 반려암질 포획암은 마그마 챔버(reservoir) 내에서의 대류에 의한 마그마 혼합, 큐물레이트(cumulate)의 형성, 그리고 모암 현무암과의 관계와 관련하여 매우 중요한 의미를 내포하고 있다(Fodor, *et al.*, 1994). 본 연구에서는 제주도 현무암에 포획된 반려암질 포획암에 대한 암석 기재, 현미경관찰, 반려암질포획암을 구성하고 있는 광물에 대한 화학성분조성을 통해 반려암질 포획암의 조직적 특성과 이에 따른 모암인 현무암과의 관련성 관계를 파악하려고 한다.

제주도는 평면도상에서 장축은 동북동-서남서 방향으로 약 75 km, 단축은 북북서-남남동 방향으로 약 35 km을 이루는 타원형으로(그림 1) 제주도가 타원형의 형태를 보이는 것은 구조운동에 의해 신장된 것이 아니며, 화산활동과 관련된 지구구조운동과 분출된 용암의 흐름에 기인하는 것으로 해석되고 있다(황재하와 송교영, 2003). 제주도와 타이완을 잇는 제주-타이완 분지는 동해와 같은 배호분지의 성격을 지니는 곳으로 신생대 제3기 말경에 판들의 움직임에 의해 응력장이 형성되고 그 결과 확장되어지기 시작했으며 이때 형성된 열극대(fracture zone)를 따라서 일어난 열점활동에 의한 화산활동으로 여러 번의 사이클을 거치면서 성층화산체를 만들었다고 보고되고 있다(진명식, 2003).

최근의 심부시추조사에 의해 관찰된 제주도를 구성하고 있는 용암류의 수직적인 분포 깊이는 해수면 하 40(서부지역)~140 m(동부지역)이며, 평균 3~5 m의 두께를 갖는 12~60 m의 용암류가 분포하는 것으로 알려져 있다(고기원 외, 2004). 해수면을 기준으로 평균 200 m 아래에서는 서귀포층, 미교결 사니층이 존재하며 그 아래에는 제주도 화산활동의 기반암으로 화강암류와 응회암이 분포하는 것으로 확인된다(Kim *et al.*, 2003). 이 화강암과 응회암이 모두 산출되는 곳은 제주도에서 발견되지 않으며, 제4기 화산암인 현무암에서 포획암으로 산출되거나 시추코아에서 관찰되어진다. 제주도가 만들어지는 동안에 여러 번의 빙하기가 있었으며, 빙하기에는 지금보다 해수면이 130 m 정도 낮아 여러 차례 육지와 연결되었던 적이 있었을 것이라는 해석이 있다(박기화, 2004).

화산으로서의 제주도는 미교결 사니층과 접촉하는 서귀포층으로부터 시작되어진다. 비록 약간의 시간적 단열은 있으나 제주도의 화산활동을 하나의 연속된 화산활동으로 보고되고 있으며, 대체로 4단계로 구분되어 설명되어진다(Lee, 1982). 기저현무암분출기로 알려진 제1분출기는 서귀포층에 퇴적물을 공급했던 화산

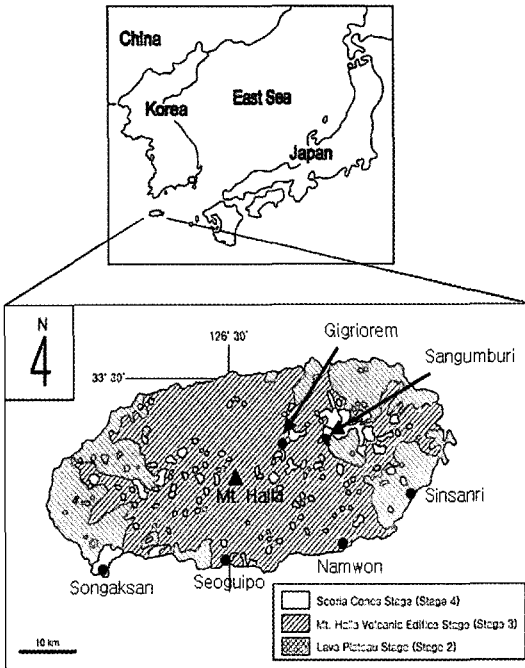


Fig. 1. Geological map of Jeju Island showing sample locations (after Lee, 1982).

활동으로 현재 해수면 하부에 분포하는 현무암류로부터 산방산 조면암까지를 형성했던 시기로 이때 형성된 화산암에 대한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연령은 1.7~0.5 Ma으로 보고된다(고기원 외, 2004). 시추코아에서 감람석-휘석 현무암 혹은 비정질 현무암으로 산출되며, 미교결 사니층을 덮고 있다. 제2 분출기는 0.6~0.4 Ma 즈음에 현재 해수면 주변부에 분포하는 장석-감람석 현무암류와 서귀포시 일대에 분포하는 조면암질 안산암류 등이 분출되었던 시기로 용암대지형성기로 구분된다. 제3 분출기는 0.3 Ma~0.2 Ma로 제주도의 중심부인 한라산체를 형성했던 시기로 중산간지역의 현무암류와 한라산조면암 등이 이에 해당한다. 제4 분출기는 0.125 Ma 이후부터의 화산활동을 의미하며, 주로 열하분출에 의한 지역적인 분석구들의 형성시기로 특정 지워진다(고기원 외., 2004). 제주도 화산암의 화학조성은 SiO_2 : 46~62 wt%, TiO_2 : 0.3~3.5 wt%, Al_2O_3 : 20~14 wt%, total Fe_2O_3 : 14~4 wt%, MnO : 0.2~0.1 wt%, MgO : 8.7~0.1 wt%, CaO : 10~1 wt%, Na_2O : 2.7~6.5 wt%, K_2O : 0.7~4.8 wt%, P_2O_5 : 1.2~0.1 wt%의 범

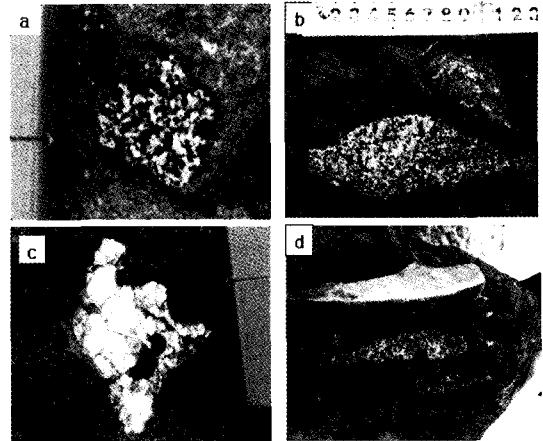


Fig. 2. Various xenoliths trapped in basaltic rocks from Jeju Island. (a) poikilitic and (b) intergranular gabbroic xenoliths. (c) Plagioclase megacryst showing the filtration of liquids, and (d) a mantle xenolith.

위에 있다(원종관 외, 1998; Choi, 1998; 진명식, 2004; Tatsumi, 2005).

모암 현무암

제주도 남동부 신산리 해안과 동부 중산간에 위치하는 산굼부리 지역에 분포하는 현무암은 반려암질포획암을 포획하고 있으며(그림 2), 분출한 용암의 분포지와 화학조성 등을 고려할 때 위의 4단계 화산층서에서 제2 분출기에 해당된다(원종관 외, 1998; 고기원 외, 2004). 현무암은 반려암질 포획암 뿐만 아니라 여러 종류의 암편과 결정, 즉, 맨틀 페리도타이트, 파이록시나이트(pyroxenite), 거정의 단사휘석과 사장석 등을 포획하고 있다(그림 2). 현무암은 미반상조직의 치밀한 암회색을 띠며, 풍부하지는 않지만(1 vol% 미만) 최대 2 cm의 길쭉하게 신장된 형태의 기공들이 산출된다. 반면에 산굼부리의 현무암은 기공이 거의 30 vol%를 육박할 정도로 다공질의 특성을 나타내고 있다.

현무암에 산출되는 반정은 반자형 내지 타형의 감람석과 단사휘석, 사장석이 대부분이다. 감람석은 약 10% 이하의 체적을 차지하고 있으며 이딩자이트화(iddinsite)되어 있으며, 융식되어 있는 것이 대부분이다(그림 3a). 사장석 반정은 거의 미반정 상태로 타형의 결정으로 산출

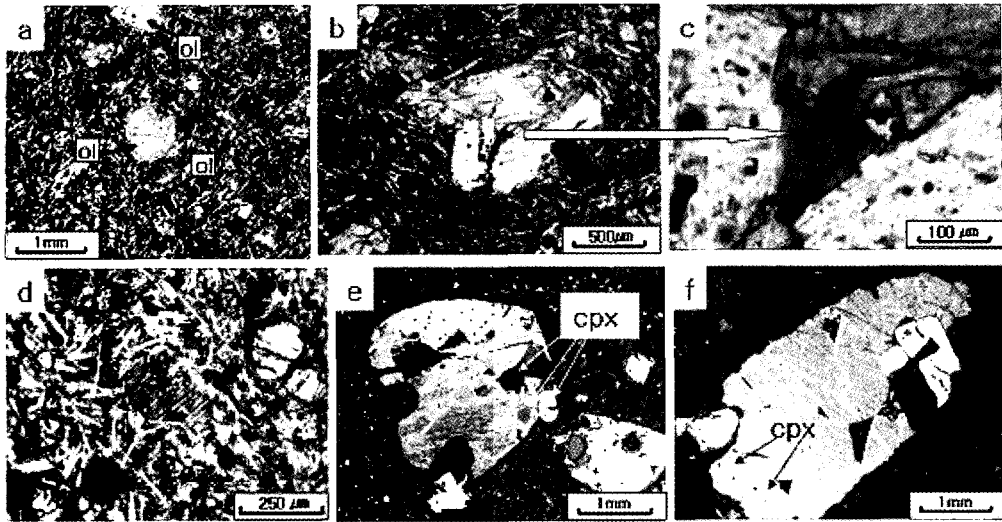


Fig. 3. The host basaltic rocks from Jeju Island. (a) The resorbed olivine phenocryst in a fine-grained groundmass. (b, c) glomerocrysts of pyroxene and plagioclase basalt with interstitial phlogopite. (d) Anhedronal phlogopite crystal. (e, f) Kaersutite megacryst including clinopyroxene within.

되는 것이 일반적이다. 일반적인 반정의 크기와는 매우 다르게 거정질의 사장석은 거의 등극하게 용식되었거나 반응연을 가지고 있어 미반정 상태로 산출되는 사장석과는 기원이 다를 것을 시사한다. 사방휘석이 반정으로 산출되는 거의 관찰되지 않으며, 단사휘석은 세립의 미반정으로 나타나거나 드물게 사장석과 함께 glomeroporphyritic 조직으로 산출되기도 한다(그림 3b, c). 석기는 래스(lath) 상의 사장석과 세립의 감람석, 휘석, 불투명광물, 유리질 물질이 등립질(intergranular)로 이루어져 있다. 세립의 감람석이 석기로 비교적 풍부하게 나타나고 있어, 알칼리 현무암의 특징을 보여주고 있다(Mc-Birney, 1993). 불투명광물은 자철석과 티탄철석으로 반사현미경하에서 용리염리를 잘 나타내고 있다.

금운모(phlogopite)는 현무암 내에서는 타형의 모습으로 다른 입자들 사이의 간극을 채우는 형태로 산출된다. 금운모의 크기가 1~2 mm에 달하는 것도 관찰되지만 반정이라기 보다는 교대작용에 의한 것이 아닌가 여겨진다(그림 3d). 커슈타이트(kaersutite)로 여겨지는 각섬석이 갈색 내지 붉은색의 다색성을 보이면서 드물지만 3~5 mm 크기의 매우 조립질로 나타나고 있다

(그림 3e, f). 이 각섬석은 금운모보다는 크기가 매우 크며 뚜렷한 {110} 혹은 {010} 방향의 벽개를 가지고 있으며, 내부에 단사휘석결정을 포함하고 있다. 용식된 사장석이 같이 산출되기도 한다. 커슈타이트의 가장자리는 불투명광물과 규산염광물이 침상의 형태로 이루어져 있으며, 이는 각섬석이 탈수화 작용에 의해 산화광물화되어 있다.

반려암질포획암

최대 직경 15 cm 이상을 넘어서는 반려암질 포획암이 현무암에 포획되어 있으며 야외노두에서도 사장석과 휘석의 흑백의 색이 대비되어 포이킬리틱(poikilitic)과 등립질(intergranular) 조직이 잘 인식된다(그림 2a, b). 포획암은 구성광물이 사방휘석 5~17 vol%, 단사휘석 3~41 vol%, 사장석 42~94 vol%으로 이루어져 있는 gabbro norite에 해당된다(표 1, 그림 4). 일반적으로 단사휘석 광물 함량이 사방휘석보다 많으며, 조사된 모든 반려암포획암에서 사장석의 함량이 가장 우세하다. 모암 현무암에는 거정의 사장석(2~5 mm)이 단독으로 포획되어 있거나 소량의 단사휘석과 함께 산출되는 것도 있

Table 1. Modal compositions (in vol%) of gabbroic xenoliths in basalt from Jeju island

Sample	04MV1	04MV2	04MV4	04MV5	04SS1	04SG1
rock name	gabbro norite	gabbro norite	gabbro norite	gabbro	gabbro norite	gabbro norite
texture	int	poi	int	int	poi	int
olivine	0	0	0.9	0	0.2	0.8
cpx	25.4	41.2	19.6	3.1	9.3	10.8
opx	5.1	16.5	12.5	0	5.5	9.1
plagioclase	44.9	42.2	66.8	93.5	85	65.4
opaque	21.1	0	0	3.2	0	13
amphibole	3.3	0	0	0	0	0.7
Total	99.8	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8
Total count	2347	2063	5758	4781	4145	2601

int = intergranular, poi = poikilitic

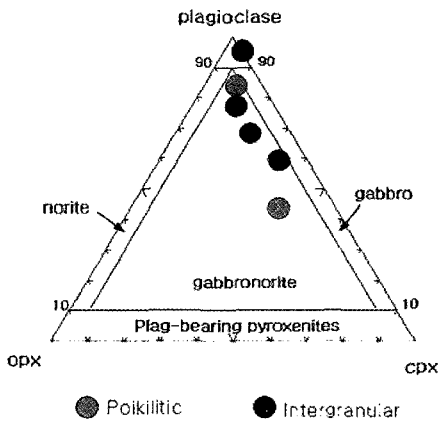


Fig. 4. Compositional plot of modal analysis of gabbroic xenoliths.

다. 사장석이 90% 이상으로 구성된 암편은 gabbro norite의 부분 파편으로 여겨진다. 사장석에는 자류철석으로 여겨지는 황화포유물(sulfide inclusion)이 풍부하게 포획되어 있다. 신산리해안과 산굼부리의 반력암질 포획암에는 감람석이 산출되지 않으며 사장석의 함량이 높은 포획암인 경우 분출하는 마그마에 가라앉지 않고 동등 떠있는 야외노두 모습을 보인다. 마그마 챔버에서도 이러한 상황과 유사한 모습으로 이루어져 있는 것으로 여겨진다(그림 5).

포이킬리틱조직을 보이는 반력암질포획암은 사장석이 주정(主晶, oikocryst)으로 자형의 사방휘석과 단사휘석을 포함하고 있는 큐물레이트의 특성을 잘 나타내고 있다(그림 6a, b). 포이

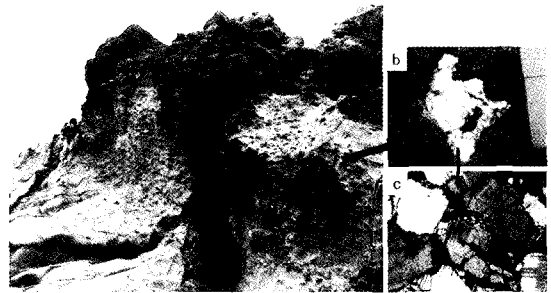


Fig. 5. Gabbroic xenoliths from Jeju Island. (a) An outcrop view showing abundant xenoliths floating in lava. (b) one of the xenoliths in Fig. 5a showing plagioclase megacryst with infiltration of basaltic liquid at the outcrop and (c) under the microscope.

킬리틱조직에서는 거의 항상 사방휘석과 단사휘석은 붙어서 한 쌍을 이루듯이 산출되는 것이 특징적이며 대체로 사방휘석의 입자가 큰 편이다. 모암인 현무암과 접촉하는 경계부에서는 사방휘석에 반응연이 더욱 잘 발달되어 있으며 반응연은 세립의 감람석, 사장석과 불투명 광물로 이루어져 있다. 반면에 단사휘석의 가장 자리는 스펀지조직이 발달되어 있다.

등립질조직을 보이는 반력암질포획암은 반자형에서 타형의 사방휘석, 단사휘석, 사장석으로 구성되어 있으며, 시료에 따라 불투명 광물의 함량의 변화가 크고 입자의 크기가 조립질에서 중립질의 변화를 보여준다(그림 6c, d, e, f). 산굼부리 지역의 경우 교대작용(metasomatism)에

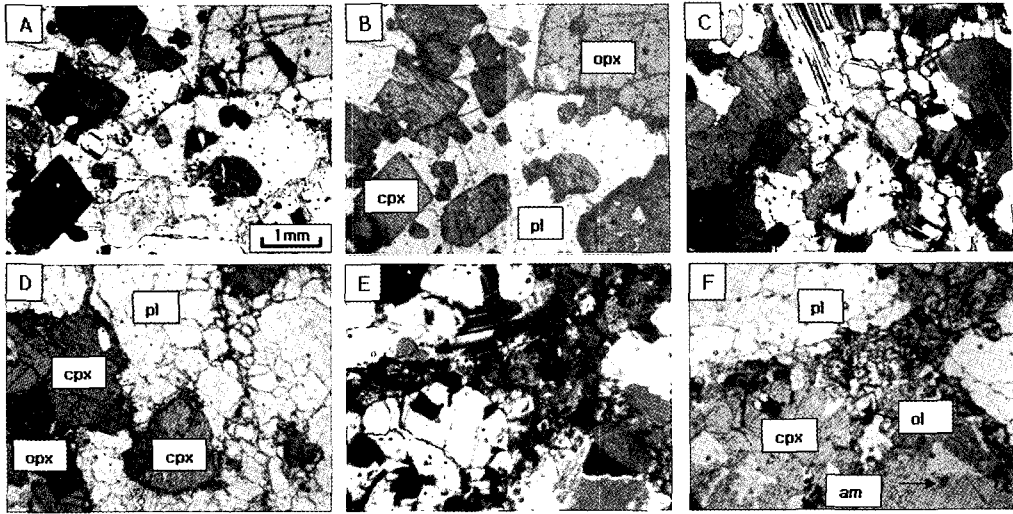


Fig. 6. Photomicrographs of (a, b) poikilitic-textured gabbroic norite xenolith. (c, d) intergranular texture. (e, f) intergranular texture showing secondary olivine along the primary crystal boundaries and small amphibole patches within the cpx grains. a, c, e = the crossed Nicols. b, d, f = open nicols. ol = olivine, am = amphibole, cpx = clinopyroxene, opx = orthopyroxene, pl = plagioclase, opq = opaque minerals.

의해 각섬석이 단사회석 내부에서 산출되고 있거나 결정입자 경계면을 따라 산출되고 있다. 조사되어진 반려암포획암 내에는 1차 감람석과 각섬석은 산출되지 않지만 2차로 형성된 감람석과 각섬석이 분포하고 있다(그림 6e, f).

포이킬리틱조직을 보이는 포획암은 현무암 멜트가 포획암 내부에 입자사이를 침투한 흔적이 거의 없으며, 포획암과의 경계부분에서만 관찰되고, 포획암은 현무암질 마그마에 포획된 후 모암인 현무암으로부터는 대체로 폐쇄계를 이룬 것으로 여겨진다(그림 6a, b). 반면에 등립질 조직을 보이는 포획암은 비교적 폐쇄계를 이룬 것(그림 6c, d)과 열린계를 이룬 것(그림 6e, f)의 두 종류로 관찰된다. 어떤 경우에는 현무암이 침투하여 포획암 내부로 등글게 만(basalt lobes)을 형성하거나 주정인 사장석의 결정면을 등글게 용식하기도 한다. 동일한 현무암에 맨틀 포획암과 반려암 포획암이 같이 포획되어 있는 경우도 있는데, 맨틀포획암과는 달리 반려암포획암에서는 고체 상태에서 변형되어진 조직적 특성, 즉, 킹크밴딩, 파동소광 등이 관찰되지 않는다. 또한 거정질의 사장석 단결정은 매우 용식되어 있거나 마그마가 결정 깊숙이 침입한 모습이 야외 노두에서도 잘 관찰된다(그림 2c).

화학조성

모암인 현무암의 주성분, 미량원소의 함량은 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 XRF 및 ICP-MS로 분석하였다. 반려암질포획암을 구성하고 있는 광물과 현무암에 산출되는 반정광물에 대한 화학조성은 대전의 한국기초과학지원연구원의 CAMECA SX-50 EPMA 기기와 SHIMADZU 1610 EPMA 기기를 이용하여 분석하였다. CAMECA SX-50 EPMA 기기를 사용한 경우 EPMA 분석조건은 조사전류 20 nA, 가속전압 15 kV, 빔 직경 1 μm , 측정시간은 피크인 경우 10 sec, 배경치는 5 sec로 설정되었다. 기기분석오차는 $\pm 1\%$ 미만이고, 측정오차는 $\pm 0.3\%$ 미만이다. SHIMADZU 1610 EPMA 기기인 경우 빔 직경을 0.5 μm 으로 하였으며, 그 이외에는 CAMECA SX-50 EPMA 기기와 동일하게 설정하였다.

모암현무암

신산리 해안과 산굼부리에 분포하는 현무암의 화학조성은 거의 유사하며 SiO_2 49~50 wt%, Al_2O_3 14.5~15.2 wt%, MgO 7~8 wt%,

Table 2. Major and trace element compositions of the host basalt

Sample	basalt			
	SG	0204SG5	03SS6	04SS4
SiO ₂	49.04	50.36	49.89	49.07
TiO ₂	2.37	2.33	2.32	2.37
Al ₂ O ₃	14.41	15.06	15.20	14.84
Fe ₂ O ₃	12.07	12.06	11.90	11.91
MnO	0.16	0.15	0.16	0.16
MgO	8.20	7.03	7.20	8.16
CaO	8.40	7.67	8.02	8.38
Na ₂ O	3.11	3.50	3.52	3.24
K ₂ O	1.51	1.70	1.92	1.78
P ₂ O ₅	0.46	0.55	0.62	0.57
Total (wt%)	99.31	99.89	100.05	99.87
Ni(ppm)	181	147	138	154
Cu	43.9	44.9	31.6	41.9
Rb	41.5	44.7	54.9	49.3
Y	23.3	23.4	24.3	22.5
Nb	36.9	36.1	32.4	24.3
Th	5.4	6.0	7.5	6.8
Zr	286	306	338	297
Sr	498	509	570	533
Ba	393	429	506	465
Zn	105	108	112	102

Na₂O+K₂O 4.6~5.4 wt% (표 2)로 알칼리계열과 서브알칼리계열의 경계지역에 도시된다(그림 7). 또한 Tasumi *et al.* (2005)에서 분류한 세 그룹(e.g., high-Al 알칼리, low-Al 알칼리, 서브알칼리계열) 중에서 low-Al 알칼리에 속한다. 다른 문헌에서 제시된 제주도의 현무암에 대한 주성분원소와 미량원소의 성분과 비교하면 제주도 성분진화의 방향과 일치한다. 또한 감람석 반정은 Mg#₈₅₋₇₃, 사장석은 An₅₅₋₄₇, 단사휘석은 Wo₄₀₋₃₇에 Fs₁₆₋₁₈, Al₂O₃ (5~6 wt%)와 TiO₂ (1~2 wt%) 성분을 나타내고 있다(표 3). 이러한 반정들의 성분은 다른 문헌에서 보고하는 성분과 유사한 범위에 속한다(Choi, 1998; 윤성효 외., 2002; Tatsumi, 2005).

반려암질포획암

사방휘석은 SiO₂ 51~53 wt%, Al₂O₃는 3~5%, FeO성분이 15~17 wt%, MgO성분이 25~27 wt%, CaO성분이 1.6~1.8 wt%, Wo₂₋₃에

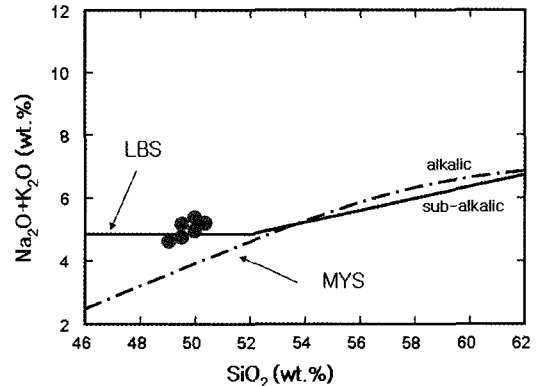


Fig. 7. SiO₂ vs Na₂O+K₂O diagram indicating the boundaries between alkalic and sub-alkalic series after Le Bas & Streckeisen (1991) (= LBS) and Miyashiro (1978) (= MYS).

Fs₂₃₋₂₇, Mg#는 72~77로 나타난다(표 4). 사방휘석의 반응연을 이루고 있는 감람석은 SiO₂ 성분은 약 37~38(모암에서는 38~40 wt%), FeO 성분은 약 23~25(15~25) wt%, MgO 성분은 36~39(37~46)로써 모암에 산출되는 감람석 반정과 유사한 범위이지만 약간은 분화가 더 진행된 화학조성을 나타내고 있다(표 4).

단사휘석의 SiO₂ 성분은 48~50 wt%, Al₂O₃는 4~7%, FeO 성분이 8~11 wt%, MgO 성분이 13~15%, CaO 성분이 18~21 wt%으로 되어 있다. Mg#는 70~77, Wo₄₁₋₃₆에 Fs₁₃₋₁₉를 나타내고 있으며, Al₂O₃(4~7 wt%)와 TiO₂(0.5~1.6 wt%)으로 모암의 단사휘석 반정성분에 비해 비교적 넓은 범위의 조성을 나타내고 있으나 거의 유사한 성분 조성을 나타내고 있다. 포이킬리틱조직에 산출되는 단사휘석이 가장 염기성의 특성을 나타내고 있다 (표 5, 그림 8a).

사장석의 화학조성은 SiO₂ 53~55 wt%, Al₂O₃ 28~29%, CaO 10~12wt%, Na₂O 5~6%, K₂O 0.29~0.43 wt%으로 현무암에서 산출되는 사장석 반정의 화학조성과 거의 동일하다(표 6). An조성은 57에서 51의 범위에 나타나며, 포이킬리틱 조직의 사장석이 가장 염기성의 특성을 나타내고 등립질조직의 사장석의 성분은 현무암의 사장석 반정과 거의 동일하게 나타난다(그림 8b).

Table 3. Average compositions of phenocryst from the host basaltic rocks

Sample	olivine								plagioclase			cpx			
	04SS 33	03SS 22	04SS 86	03ss 21	04MV 2	4MV 21	04MV 3	04MV 31	04ss 3	04ss 85	04MV 1	ss 34	04MV 2		
SiO ₂	39.33	40.00	38.02	37.78	37.88	37.92	38.90	38.88	53.47	55.52	54.14	48.73	48.36		
TiO ₂	0.06	0.00	0.00	0.04	0.07	0.11	0.00	0.02	0.15	0.06	0.06	1.30	1.62		
Al ₂ O ₃	0.05	0.06	0.07	0.05	0.04	0.18	0.09	0.04	28.29	27.10	28.83	4.76	6.36		
FeO	15.01	15.78	21.47	23.25	24.11	22.85	19.59	19.68	0.58	0.31	0.41	10.33	9.41		
MnO	0.17	0.22	0.30	0.35	0.32	0.29	0.23	0.18	0.00	0.00	0.07	0.24	0.18		
MgO	45.74	45.20	39.83	38.64	36.58	38.31	40.78	40.91	0.00	0.00	0.07	14.37	13.97		
CaO	0.18	0.17	0.17	0.16	0.26	0.24	0.23	0.24	11.17	9.55	11.01	18.55	18.69		
Na ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.00	0.06	0.04	0.02	0.00	5.06	5.83	4.85	0.59	0.69		
K ₂ O	0.03	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.36	0.49	0.36	0.02	0.01		
NiO	0.29	0.32	0.19	0.16	0.03	0.24	0.03	0.05	0.00	0.02	0.00	0.05	0.17		
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.02	0.00	0.08	0.16	0.21	0.25	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03		
Mg#	84.5	83.6	76.8	74.8	73.0	74.9	78.8	78.8				71.3	72.6		
Total	100.90	100.77	100.11	100.45	99.47	100.35	100.08	100.24	99.08	99.87	99.85	98.93	99.48		
									An	53.90	46.83	54.47	Wo	37.3	40.02
									Or	2.13	2.95	2.14	En	44.7	42.65
									Ab	41.03	48.51	43.39	Fs	18.0	16.33

Table 4. Average compositions of OPX of the gabbroic xenoliths from Jeju basalts

Sample	Opx in gabbro xenolith							Olivine in reaction rim in OPX		
	04ss 11	04ss 13	04ss 12	04ss 110	04MV 231	04MV 24	04MV 241	04ss 14	4ss 11	4ss 10
Texture	poi	poi	poi	poi	poi	poi	poi	poi	poi	poi
SiO ₂	52.15	51.79	51.28	51.72	53.16	52.36	51.73	37.47	37.59	37.27
TiO ₂	0.59	0.42	0.47	0.55	0.43	0.59	0.64	0.05	0.03	0.05
Al ₂ O ₃	3.46	3.25	3.54	3.72	3.44	3.46	4.33	0.02	0.04	0.04
FeO	15.61	14.64	15.11	15.65	15.97	17.14	16.60	23.65	23.62	24.52
MnO	0.19	0.21	0.16	0.19	0.22	0.27	0.18	0.37	0.32	0.32
MgO	26.27	26.69	26.65	26.03	25.95	25.05	24.88	38.33	38.17	36.96
CaO	1.72	1.75	1.75	1.64	1.65	1.70	1.61	0.23	0.23	0.27
Na ₂ O	0.10	0.08	0.07	0.06	0.07	0.09	0.07	0.02	0.02	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01
NiO	0.08	0.11	0.08	0.05	0.10	0.08	0.07	0.03	0.00	0.03
Cr ₂ O ₃	0.07	0.20	0.07	0.13	0.11	0.06	0.03	0.18	0.10	0.14
Mg#	75.0	76.5	75.9	74.7	74.3	72.3	72.8	74.3	74.2	72.9
Total	100.24	99.14	99.18	99.74	101.10	100.82	100.16	100.39	100.13	99.59
Wo	2.4	2.6	3.1	1.7	3.27	3.39	3.27			
En	73.2	74.5	73.6	73.5	71.69	69.58	70.24			
Fs	24.4	22.9	23.4	24.8	25.04	27.03	26.50			

토의 및 결론

반려암질포획암을 만들어낸 근원마그마는 크게 세 가지 중의 하나로 생각할 수 있다. 하나는 해양지각을 구성하고 있는 반려암질암의 일부가 상승하는 마그마에 의해 포획될 수 있는

며, 두번째는 제주도 지하 깊은 곳에 관입하여 정치하고 있는 반려암체의 일부를 포획할 수도 있다. 세 번째는 제주도를 형성한 마그마시스템의 마그마첼버에서 결정화되어진 반려암의 일부가 상승하는 마그마에 포획되어질 수 있는 것이다.

Table 5. Average compositions of CPX of the gabbroic xenoliths from Jeju basalts

Sample	CPX in gabbro xenolith							
	04SS112	04SS16	04SS19	04MV1	04MV25	04MV4	04SG1	04SS22
texture	poi	poi	poi	int	poi	int	int	int
SiO ₂	47.53	49.17	49.46	49.40	48.86	49.69	51.03	48.28
TiO ₂	1.61	1.51	1.13	1.40	1.43	0.46	0.93	1.66
Al ₂ O ₃	7.36	3.87	5.24	4.60	6.54	5.88	3.57	6.14
FeO	9.10	7.74	8.89	10.26	8.96	8.96	0.00	10.58
MnO	0.22	0.09	0.16	0.18	0.16	0.22	10.32	0.16
MgO	13.83	14.55	15.40	13.99	14.26	13.82	0.24	13.68
CaO	18.53	21.10	18.23	19.31	18.39	19.17	13.58	18.42
Na ₂ O	0.76	0.43	0.61	0.58	0.65	0.51	18.79	0.70
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.54	0.01
NiO	0.07	0.46	0.06	0.01	0.18	0.00	0.01	
Cr ₂ O ₃	0.11	0.07	0.17	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05
Mg#	73.0	77.0	75.5	70.8	73.9	73.3	70.10	69.7
Total	99.10	99.02	99.36	99.74	99.42	98.75	99.01	99.68
Wo	34.7	42.3	35	41.17	40.57	38.7	40.87	35.7
En	47.7	44.4	49.1	41.53	43.78	43.7	41.15	44.8
Fs	17.6	13.3	15.9	17.28	15.65	17.6	17.98	19.4

Table 6. Average compositions of plagioclase of the gabbroic xenoliths from Jeju basalts

Sample	Plagioclase in gabbro xenolith								Pl megacrystal	
	04ss13	04ss83	04sg12	04sg13	04MV12	04MV13	04MV26	04MV27	04ss61	04ss71
texture	poi	poi	int	int	int	int	poi	poi	61	71
SiO ₂	52.67	52.99	54.26	54.67	54.60	54.59	54.22	54.10	53.68	53.66
TiO ₂	0.21	0.08	0.08	0.04	0.02	0.09	0.09	0.11	0.05	0.07
Al ₂ O ₃	28.67	28.60	28.47	28.14	28.91	28.80	29.00	28.92	28.64	28.65
FeO	1.09	0.38	0.30	0.18	0.27	0.28	0.41	0.49	0.49	0.31
MnO	0.04	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.10	0.00	0.00
CaO	11.83	11.39	10.87	10.24	10.99	10.71	11.25	11.18	10.99	11.52
Na ₂ O	4.69	4.8	5.20	5.58	4.90	5.07	4.65	4.72	5.01	4.95
K ₂ O	0.29	0.33	0.31	0.43	0.36	0.37	0.34	0.35	0.33	0.38
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.01
Total	99.53	98.53	99.52	99.36	100.06	99.99	100.04	99.98	99.19	99.54
An	56.61	56.32	53.67	50.78	54.67	53.18	55.76	55.46	54.97	55.09
Or	1.71	1.95	1.83	2.54	2.13	2.13	2	2.07	1.95	2.25
Ab	37.82	40.13	43.28	44.45	41.55	42.9	39.35	39.93	41.9	40.18

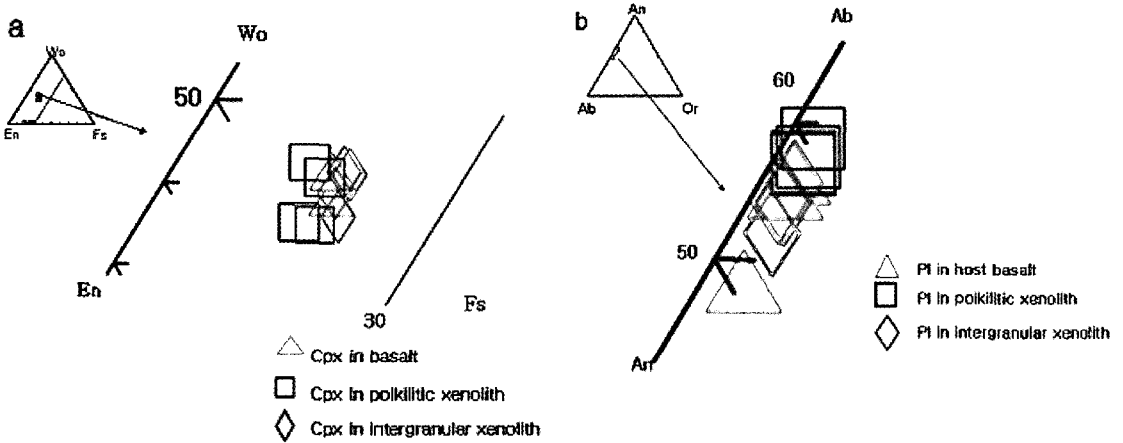


Fig. 8. Compositional plots for clinopyroxene and plagioclase in the host basalt, poikilitic xenolith and intergranular xenolith.

연구된 반러암질 포획암이 해양지각의 일부인지 아닌지를 식별할 수 있는 방법 중의 하나는 사장석의 K 함량으로 해양지각을 형성한 반러암질암의 K₂O 함량은 매우 적어 대체로 0.05 wt% 이하를 나타낸다(Fodor and Moore, 1994). 제주도 반러암질포획암을 구성하고 있는 사장석은 An₅₁₋₅₇에 K₂O 함량이 0.43~0.29로 해양지각의 거의 9배에서 6배 이상의 화학조성을 보인다. 이는 연구된 반러암질포획암이 해양지각의 일부가 아님을 나타내고 있다. 그러나 해양지각의 파편의 경우도 후에 발생하는 마그마와의 반응 혹은 교대작용의 영향으로 K 함량은 충분히 부화될 가능성이 있을 것이다. 하지만 제주도는 해양지각이 아닌 대륙지각 위에 형성된 화산도로서 해양지각이 포획될 확률은 거의 불가능하다.

또한 엄청난 양의 반러암질 포획암이 모암인 현무암에 등등 떠 있는 것과 같이 보이는 야외 노두 산출상태(그림 5)는 포획암이 지하 깊은 곳에 관입하여 정치하고 있는 반러암체의 일부일 수 있다는 가능성을 배제하고 있다. 또한 그동안 제주도에 관한 많은 논문이 보고되었으나 지표면에서 관찰되거나 시추코어에서 회수된 암석 중에 반러암질 관입암체에 대한 보고는 없었으며, 연구자들의 야외조사 중에도 제주도에 반러암질 관입암체가 지표면에서 발견되지 않았다.

반러암질 포획암을 구성하고 있는 광물들은

모암인 현무암을 구성하고 있는 광물들과 거의 유사한 지화학적 특성을 보이고 있다. 포획암이 제주 마그마 플러밍계(Jeju magma plumbing system)에 속한다는 것을 명확하게 증명하기 위해서는 미량원소와 동위원소 조성이 밝혀져야 하겠지만, 이러한 지화학적 특성과 야외노두 산출상태, 현미경관찰 등은 반러암질포획암이 제주도 지하의 마그마저수지(magma reservoir)에 존재하고 있던 반러암질암이 상승하는 마그마에 의해 포획되어 지표면으로 노출된 것임을 지시하고 있다.

마그마챔버에 도달한 마그마는 챔버의 벽(wall)으로부터 냉각이 시작되면서 마그마의 결정화작용이 시작되었을 것이다. 마그마챔버는 결정/액체의 비율에 의해 55% 이상이면 고화대(rigid zone), 25% 이상이면 액체와 결정이 범벅이 되어있는 부분 회반죽대(mushy zone), 25% 이하이면 액체 속에 결정들이 부유하고 있는 결정부유대(crystals-suspended zone)로 구분되어진다(Marsh, 1988). 제주도의 반러암질포획암의 조직과 야외 산출특성에 의해 포이킬리틱 조직의 포획암은 rigid zone을, 등립질의 포획암은 mushy zone을 거정의 사장석은 suspended zone의 특성을 나타내고 있다. 포이킬리틱조직을 보이는 포획암은 마그마챔버 내의 큐물레이트대에서 형성되어 rigid zone에 위치하고 있다가 포획되어졌으며, 후기의 마그마 침입을 전혀 받지 않은 폐쇄계를 형성했다. 이 포획암은 결정

화단계에서 비교적 높은 위치에 속하며 지화학적으로도 더 염기성의 특성을 나타내고 있다. 한편 등립질조직의 포획암은 포이킬리틱한 것에 비해 열린계의 특성을 보이며 액체가 포획암 내부까지 침입하였거나 이미 결정화된 부분이 마그마 챔버의 더 뜨거운 부분으로 이동되어 응식된 특성도 가지고 있다. 그러나 노두에서는 마그마의 침입의 흔적이 분명하게 인식되지 않으나 현미경하에서는 뚜렷하게 열린계를 형성하였음이 나타난다. 거정의 사장석인 경우 마그마가 결정내부에 포획되어 유리질화 되어 있다(그림 2c). 그러나 이러한 포획암들이 하나의 마그마에서 점진적인 조직적 특성을 반영하며 결정화 작용을 이루었는지 아닌지는 알 수가 없다.

반려암질 포획암에는 감람석이 전혀 산출되지 않는다는 것은 이는 포이킬리틱 조직과 등립질 조직의 암석을 형성하기 이전에 마그마가 이미 분별결정작용을 받았음을 의미한다. 즉, 제주도의 신산리 해안과 산굼부리에 분포하는 반려암질 포획암은 분화과정을 어느 정도 경험한 마그마가 마그마챔버에서 결정화된 생산물이며, 임시적으로 마그마챔버를 채웠던 마그마 배치(batch)들과 관련된 결정화작용-고립화-포획과정의 생산물이다.

감사의 글

본 논문을 심사하여 주신 박기화 박사님과 익명의 심사자께 깊은 감사를 보냅니다. 또한 많은 토론을 통해 논문의 질을 높여주신 헝가리의 사보교수님께도 감사드립니다. 본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

고기원, 박윤석, 박언배 (2004) 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대, 2004 대한지질학회 춘계학술담사, 대한지질학회, 29-50.
 대한지질학회 (1999) 한국의 지질. 802p.
 박기화, 2004, 제주도 형성사, 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대, 2004 대한지질학회 춘계학술담사, 대한지질학회, 1.
 원종관, 길영우, 이문원 (1998) 제주도 동북사면에 분포하는 화산암류의 암석학적 연구. 지구과학회지, 19(3), 329-342.
 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균 (1998) 제주도 남동

부 표선 지역 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34(3), 172-191.
 윤성효, 고정선, 박정미 (2002) 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 11(1), 17-29.
 진명식 (2003) 화산형성 및 연령측정 자료로 본 제주도의 화산활동, 제1회 학술심포지엄, 제주화산연구소 개소기념, 제주화산연구소, 100-102.
 진명식 (2004) 한국의 화성활동. 한국암석학회 추계 학술심포지엄 논문집, 한국의 화성활동, 한국암석학회, 3-104.
 황재하, 송교영 (2003) 제주도의 지구조운동, 제1회 학술심포지엄, 제주화산연구소 개소기념, 제주화산연구소, 1-6.
 Choi, S-H. (1998) Geochemical study of ultramafic xenoliths in basalts from Cheju Island, Korea. Ph.D thesis, Seoul Nat'l Univ. 203p.
 Fodor, R.V., Rudek, E.A. and Bauer, G.R. (1993) Hawaiian magma-reservoir processes as inferred from the petrology of gabbro xenoliths in basalt, Kahoolawe Island. Bull Volcanol., 55, 204-218.
 Fodor, R.V., Moore, R.B. (1994) Petrology of gabbroic xenoliths in 1960 Kilauea basalt: crystalline remnants of prior (1955) magmatism. Bull Volcanol, 56, 62-74.
 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) Evidences of the presence of old continental basement in Jeju volcanic Island, South Korea, revealed by Radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. Geochem. J., 36, 421-441.
 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.
 Le Bas, M.J., Streckeisen, A. L. (1991) The IUGS systematics of igneous rocks. J. Geol. Soc., 148, 825-833.
 Lee, M.W. (1982) Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci. Rep. Tohoku Univ. Series 3, 15, 177-256.
 Marsh, BD (1988) Crystal capture, sorting, and retention in convective magma. Geol Soc Am. Bull., 100, 1720-2737.
 McBirney, R.B. (1993) Igneous petrology (2nd ed), Jones and Bartlett.
 Miyashiro, A. (1978) Nature of alkalic volcanic rock series. Contribution to Mineralogy and Petrology

66, 91-104.
Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M., Chang,
Q., Sato, K. and Lee, M.W. (2005) The petrology
and geochemistry of volcanic rocks on Jeju Island:
Plume magmatism along the Asian continental

margin. *J. Petrol.* 46(3), 523-553.

2007년 5월 17일 원고접수, 2007년 6월 15일 게재승인.