

## 백령도에 분포하는 알칼리 현무암과 맨틀 포획암의 Nd-Sr 과 영족기체 동위원소 조성

김규한<sup>1</sup> · 長尾敬介<sup>2</sup> · 장형숙<sup>1</sup> · 角野浩史<sup>2</sup> · 정정인<sup>1</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 과학교육과, <sup>2</sup>도쿄대학 지진지화학연구소

### Nd, Sr and Noble Gas Isotopic Compositions of Alkali Basaltic Rocks and Mantle Xenoliths in the Baegryongdo

Kim Kyu Han<sup>1</sup>, Nagao Keisuke<sup>2</sup>, Jang Hyung Sook<sup>1</sup>, Sumino Hirochika<sup>2</sup> and Chung Jung In<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Science Education Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

<sup>2</sup>Laboratory for Earthquake Chemistry, Graduate School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

The rare earth elements (REE) and Nd, Sr and noble gas isotopic compositions ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) for the Quaternary alkali basaltic rocks and mantle xenoliths in the basaltic rocks from the Baegryongdo were investigated to decipher the origin of alkali basaltic magma and xenolith beneath the Sino-Korean craton. Analytical results are summarized as follows; (1) The alkali volcanic rocks with voluminous xenoliths which are represented by the Mg-olivine and clinopyroxene dominant spinel-lherzolite in the Baegryongdo consist mainly of the basalt-mugearite and basaltic andesite. (2) The REE pattern of alkali basaltic rocks characterized by high HREE is similar to that of oceanic island basalt (OIB). Relatively concordant REE patterns of the basaltic rocks suggest that the alkali basaltic magma be formed by the identical source materials. (3) The Nd-Sr isotopic data of the alkali basaltic rocks suggest that the alkali basaltic magma be originated from the depleted mantle source with a little contamination of the continental crustal materials. (4) The  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in olivines of xenoliths ranging from  $5.0 \pm 1.1\text{Ra}$  to  $6.7 \pm 1.3\text{Ra}$  are lower than that of MORB (ca.  $8.0\text{Ra}$ ). It suggest that the xenolith be derived from the subcontinental lithospheric mantle. However, the high  $^3\text{He}/^4\text{He}$  value of  $16.8 \pm 3.1\text{Ra}$  at  $1800^\circ\text{C}$  fraction (sample no OL-7) might be resulted from the post-eruptive cosmogenic  $^3\text{He}$ . The  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratios in olivines of mantle xenoliths are comparable to that of atmospheric argon, and are much lower than that of the MORB type mantle. These facts can lead to conclusion that the olivine of the xenolith in the Baegryongdo is affected by the post-eruptive atmospheric contamination during the slow degassing process.

**Key words** : Noble gas isotopic composition, Nd-Sr isotopes, mantle xenolith, alkali basalt, Baegryongdo

백령도에서 산출되는 알칼리 현무암과 현무암내의 맨틀포획암에 대하여 REE와 Nd-Sr, 영족기체의 동위원소비를 분석하여 초염기성 포획암과 알칼리 현무암질 마그마의 기원을 해석 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 스피넬-러조라이트 맨틀 포획암을 다량 함유한 알칼리 현무암은 주로 현무암-뮤저라이트(mugearite)와 현무암질 안산암으로 구성되어 있다. (2) 높은 HREE특징을 가지는 알칼리 현무암의 REE패턴은 OIB패턴과 유사하다. 그리고 상이한 시료들 간에 비교적 균일한 REE패턴은 알칼리 현무암질 마그마가 동일 기원물질에서 유래하였음을 시준하고 있다. (3)현무암의 Nd-Sr동위원소비는 알칼리 현무암질 마그마가 지각물질의 혼입영향이 없는 결핍맨틀 기원임을 가르키고 있다. (4) 포획암중 감람석의 헬륨동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )는  $5.0 \pm 1.1\text{Ra}$ ~ $6.7 \pm 1.3\text{Ra}$  로 MORB 값(ca.  $8.0\text{Ra}$ ) 보다 낮으며 대륙지각 하부 리소스피어 맨틀의 특성을 나타내고 있다. 그러나 시료 OL-7 감람석의 높은  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $16.8 \pm 3.1\text{Ra}$ ) 값은 분출후 우주선 기원  $^3\text{He}$ 의 혼입으로 추정된다. 감람석의 아르곤 동위원소비( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=300\sim 500$ )는 MORB값( $10,000\sim 30,000$ )보다 훨씬 낮은 대기 아르곤의 동위원소비(295.5)에 가깝다. 이는 백령도 포획암의 감람석이 마그마 분출후 느린 탈가스 과정에 대기의 혼입이 있었음을 암시 하고 있다.

**주요어** : 영족기체 동위원소 성분, Nd-Sr동위원소, 맨틀 포획암, 알칼리 현무암, 백령도

\*Corresponding author: kyuhan@ewha.ac.kr

### 1. 서 론

한반도 부근에는 울릉도, 독도, 제주도, 백두산, 전곡-철원, 고성, 백령도 등지에서 신생대에 분출한 알칼리 화산암류가 분포하고 있다. 특히 백령도, 고성, 백두산, 제주도 등지의 신생대의 알칼리 현무암류에는 곳에 따라 맨틀포획암(mantle xenolith)을 다량 함유하고 있다.

알칼리 화산암류와 맨틀 포획암에 대한 지화학적 자료는 알칼리 현무암질 마그마의 기원, 화성활동과 지구 조와의 연관성 그리고 하부 맨틀의 지화학적 특징에 대한 중요한 정보를 제공한다. 특히, 초염기성 맨틀포획암들은 마그마에 포획되어 지표에 급속히 도달하기 때문에 맨틀의 조성과 정보를 잘 보존하고 있다 (Kushiro *et al.*, 1976).

연구지역에 대한 선행연구 내용들은 주로 현무암과 맨틀포획암에 대한 광물, 암석 지화학적 연구이다(이문원과 나기창, 1987; 이한영, 1995; 박준범과 박계현, 1996; 원종관 등, 1998). 백령도 알칼리 현무암질 마그마의 기원과 상부맨틀 정보는 백두산, 제주도 등 한반도 기타 지역의 제4기 화산활동의 특성과의 비교 연구에 대단히 중요하다.

영족기체가스(He, Ne, Ar, Kr, Xe)의 동위원소비는

대륙지각, 상부맨틀, 하부맨틀 등 상이한 지구조세트에서 현저한 차이를 보이기 때문에 마그마 성인연구에 있어 추적자(tracer)로 대단히 유용하다(Kaneoka, 1995; Hilton *et al.*, 1993, 1999). 헬륨을 제외한 기타 영족 기체는 셋이상의 동위원소를 가지므로 상이한 기원물질간의 혼합과정을 밝히는데도 유용하다(Sumino *et al.*, 2000).

따라서 이 연구에서는 백령도에 분포하고 있는 알칼리 현무암과 맨틀포획암의 REE, Nd-Sr과 Ar, He 등의 영족기체(noble gas)동위원소비 분석을 통하여 알칼리 현무암질 마그마와 포획암의 기원을 해석하였다.

### 2. 백령도의 지질과 맨틀포획암의 특징

#### 2.1. 일반지질

백령도에 분포하는 지층군은 상원계에 대비되는 변성퇴적암인 백령층군과 이를 관입한 맥암류, 신생대의 현무암 그리고 층적층으로 되어 있다(Fig. 1).

백령층군은 북동부 일부를 제외한 백령도의 거의 전역에 분포하고 있으며 주로 변성퇴적암인 슬레이트, 천매암, 규암 등으로 구성되어 있다(이문원과 나기창, 1987; 임순복 등, 1998).

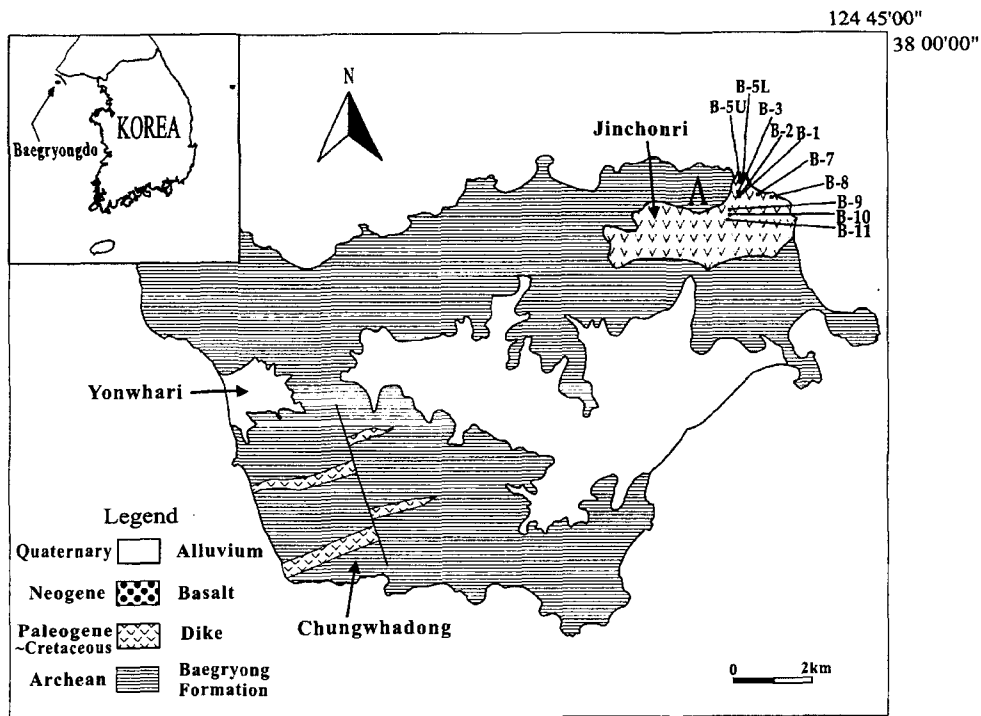


Fig. 1. The simplified geologic map showing the sampling sites of the Baegryongdo, South Korea (Lim *et al.*, 1998).

백령충군을 관입, 분출한 알칼리 현무암(진촌현무암)은 백령도 북동쪽 진촌리 마을을 중심으로 약 4 km<sup>2</sup> 면적으로 분포하고 있다. 용암류의 두께는 해안가 노두에서 최대 10 m 정도의 단일층으로 산출되며 이 현무암류내에 직경 5~10 cm(최대 30 cm) 크기의 맨틀 포획암이 다량 함유되어 있다.

진촌현무암의 지질시대는 제4기로 추정되었으나(이문원과 나기창, 1987) 박계현등(1996)에 의해 K-Ar 연대가 4.7~5.0 Ma(신제3기말, 플라이오세)로 보고되었다. 진촌현무암에는 황록색의 레조라이트(lherzolite) 맨틀 포획암이 다량 포함되어 있음이 특징적이다. 백색의 알칼리 장석의 거반정이 현무암내에 산출하기도 한다.

## 2.2. 맨틀포획암의 산출 상태와 특징

진촌동 일대에 분포하는 알칼리 현무암류는 주로 감람석, 보통휘석, 사장석, 자철석, 인회석 등으로 구성되며 사장석과 보통휘석은 오피틱 조직을 이룬다. 이문원과 나기창(1987)은 알칼리 현무암류를 장석현무암과 은정질현무암으로 구분하였고 박준범과 박계현(1996)은 감람석 반상 은정질 현무암을 추가 하였다. 백령도의 알칼리 현무암류는 반정조직(시료번호, B-10, B-5U, B-6U, B-8, B-3)과 조면암 조직(B-1, B-9)을 나타내고 있다. 현무암-뮤저라이트는 0.5~1.5 mm 크기의 반자형 감람석과 1 mm 정도의 타형의 사방휘석 반정과 4 mm 크기의 칼리장석의 교대상이 관찰된다.

현무암질 안산암은 0.5~1.5 mm 크기의 반자형 감람석과 0.5 mm의 단사휘석과 장석 반정 등으로 구성되어 있다. 현무암-뮤저라이트에서와 같이 다양한 크기의 초염기성 맨틀포획암류를 포획하고 있으며, 드물게 거정(16 cm 내외)의 알칼리 장석 반정도 포획한다. 맨틀 포획암의 형태는 등근형에서 각력형까지 다양하다. 맨틀 포획암은 주로 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 크롬스피넬로 구성되는 스피넬-러조라이트(spinel-lherzolite)이다(이한영, 1995).

## 3. 분석 방법

채취된 시료는 표면의 해수에 의한 오염물들을 제거하기 위하여 약 2~3 cm 크기의 암편을 만든 후 묽은 염산에 24시간 처리한 다음 증류수에 초음파 세척건조 후 분말화 하였다.

영국 Royal Holloway and Bedford, New College, University of London의 지질학과 J. N. Walsh박사가 ICP-MS 분석법으로 주성분과 미량 원소, REE 분석을

실시하였다. 분석 오차는 5% 내외이다.

Nd, Sr 동위원소비 분석은 분말화된 시료를 140~160°C에서 HF와 HClO<sub>4</sub>로 용해시키고 HCl을 사용한 표준 양이온 교환수지로 Sr과 REE를 분리하였다. Nd는 HIBA( $\alpha$ -hydroxy isobutylic acid)용액으로 2차 분리하여(Dosso and Murthy, 1980; Tatsumoto *et al.*, 1987) 일본 나고야 대학 지구행성과학과 열이온화 질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometry) Finnigan MAT262RPO를 이용하여 Nd과 Sr의 동위원소비를 측정하였다. <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd과 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr비는 각각 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219와 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.1194로 표준화하였으며 표준시료인 NBS 987의 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr값은 0.7102530±0.000010(2 $\sigma$ )이며 La Jolla와 나고야대학 제조 표준시료 JNdi의 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd값은 각각 0.5118291±0.0000009(2 $\sigma$ )와 0.5121025±0.0000008(2 $\sigma$ )이다.

맨틀 포획암 시료에서 분리된 감람석 광물 시료는 도쿄(東京)대학 지진 지화학 실험실에서 초고진공 상태에서 분쇄방법(Stuart *et al.*, 1994)과 단계적 가열방법(Nagao *et al.*, 1997)으로 가스를 추출 질량분석기로 광물내에 포함된 영속기체중 Ar(<sup>38</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar), He(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He), Ne, Kr, Xe 등의 동위원소비를 분석하였다. 0.5~2.0 mm 크기의 신선한 감람석 결정 1~3 g 시료를 진공상태에서 hydrouic press type crusher를 사용 분쇄하였다. 70 MPa까지 압력을 높힌후 1분간 추출후 정제(Nakai *et al.*, 1997)된 가스를 질량분석기(VG-5400)를 사용 동위원소비를 측정하였다. 분석 오차는 약 10% 내외이다.

## 4. 화학분석 결과

### 4.1. 현무암질암의 화학적 특성

백령도의 현무암류에 대한 주성분 원소 분석 결과는 Table 1과 같다. 현무암질암의 SiO<sub>2</sub>함량은 49.39~61.11 wt%로 보통 현무암에 비해 다소 높은 편이다. Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O함량은 3.63~7.70 wt%(평균, 5.23 wt%)이다. 미량원소인 Cr(197~348 ppm), Ni(118~239 ppm), Zr(174~371 ppm), Sr(592~1249 ppm)등의 농도가 높다. 화산암 분류(Le Bas *et al.*, 1986)에 따르면 백령도의 화산암들은 알칼리계의 현무암-뮤저라이트(mugearite)와 서브알칼리계의 현무암질 안산암 유형에 해당된다(Fig. 2).

호정원소(compatible element)인 Ni, Co, Cr, Sc, V 등이 알칼리 현무암에 부화되어 있다. 현무암류의 MgO 함량 변화에 대한 호정원소의 변화는 MgO 증가

**Table 1.** Major and trace elements of basaltic rocks and mantle xenoliths from the Baegryongdo.

Sample No.	B-1	B-2	B-3	B-5U	B-5L	B-6U	B-6L	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	OI-7	OI-8
Rock type	Basaltic andesite	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basaltic andesite	Basalt	Basalt	Basalt	Iherzolite	Iherzolite
Major elements (wt.%)														
SiO <sub>2</sub>	54.63	51.63	56.47	49.39	53.4	50.58	52.9	61.11	50.15	57.8	57.33	53.95	43.06	43.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.25	12.8	9.71	12.93	10.95	13.55	11.91	9.73	13.09	12.37	12.55	16.17	0.17	0.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.01	13.1	12.25	13.01	12.68	12.55	12.27	9.44	12.31	9.82	9.55	9.47	9.01	9.97
MgO	6.41	7.9	6.56	7.67	7.80	7.46	7.37	5.56	9.48	5.85	6.07	6.24	47.29	45.8
CaO	7.44	6.56	7.09	6.71	6.59	6.45	6.79	7.58	7.94	7.48	7.79	7.24	0.25	0.31
Na <sub>2</sub> O	3.42	3.83	2.67	4.54	3.77	4.13	4.02	2.47	3.42	3.10	3.19	3.00	0.05	0.05
K <sub>2</sub> O	1.83	1.08	2.64	3.16	2.16	2.72	1.96	1.16	1.11	1.17	1.11	1.83	0.04	0.04
TiO <sub>2</sub>	1.67	2.43	1.93	1.65	0.94	1.59	1.84	2.67	2.01	1.96	1.97	1.78	0.01	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.52	0.53	0.76	0.55	0.81	0.78	0.17	0.32	0.33	0.32	0.21	0.01	0.01
MnO	0.12	0.15	0.15	0.18	0.16	0.16	0.16	0.11	0.17	0.12	0.12	0.11	0.11	0.13
trace elements (ppm)														
Ba	198	250	250	211	227	194	231	290	215	243	245	204	7	7
Co	36	48	36	38	40	37	41	38	45	34	36	37	91	91
Cr	250	244	263	197	307	252	242	248	445	348	341	235	270	255
Cu	39	37	29	33	30	34	34	26	40	31	29	38	3	2
Li	10	12	14	16	15	15	14	7	11	9	11	10	3	2
Ni	149	194	165	183	216	207	197	118	239	157	161	145	2726	2579
Sc	19	12	10	9	11	9	11	16	24	21	22	19	2	2
Sr	592	1149	1021	1249	1117	1160	1103	1226	994	1050	1063	578	2	2
V	153	161	123	99	125	99	124	158	179	158	163	159	7	8
Y	17	18	19	21	17	20	20	15	21	18	19	21	0	0
Zn	79	124	142	153	140	148	138	112	105	85	87	83	51	47
Zr	174	297	407	380	371	339	306	344	260	262	258	177	2	3
Rb	20	34	15	19	14	23	14	9	16	13	8	20	5	4

The SiO<sub>2</sub> contents are the simply calculated values.

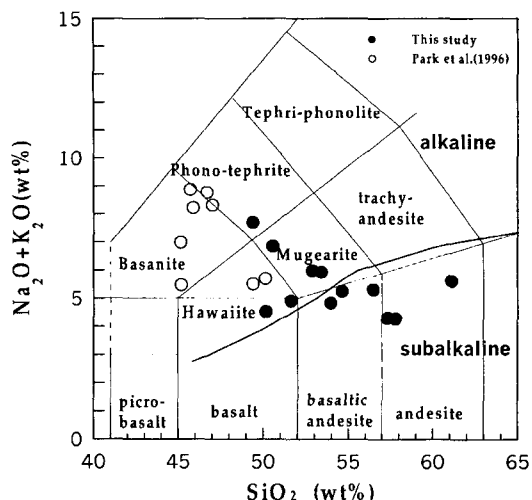
에 따라 증가하고 있다. 이같은 경향은 감람석의 분별 결정의 영향 때문으로 해석된다. Ni와 Co의 감소는 감람석이나 단사회석과 같은 광물의 정출을 반영하고 있다. 한편, Ba, Sr 등 불호정원소(incompatible element)는 MgO 증가에 따라 감소하는 경향이 있다. 백령도 화산암류의 희토류원소(rare earth element, REE)의 분석 결과는 Table 2와 같다. 백령도 알칼리 현무암은 가벼운 희토류 원소들(LREE)값은 운석에 비하여 30~200배 정도로 부화되어 있고, 중희토류 원소(MREE)값은 운석값에 비해 10~50배, 무거운 희토류 원소들(HREE)값은 4~7배 정도로 부화되어 부(-)의 상관관계를 보이고 있다(Fig. 3).

희토류원소 함량변화는 현무암-뮤저라이트에서 현무암질 안산암으로 변함에 따라 전체 REE함량이 점진적으로 낮아지고 LREE가 HREE보다 상대적으로 더 부화되고 있다. 이는 감람석, 사장석 및 사방회석 등의

결정분화작용의 결과 때문으로 해석된다. Fig. 3에서와 같이 백령도의 알칼리 현무암의 희토류 원소 변화 패턴은 대단히 유사하여 알칼리 현무암질 마그마가 유사한 기원물질에서 유래하였음을 의미하고 있다. 그리고 LREE가 부화된 형태로 해양섬 현무암(OIB, oceanic island basalt)의 패턴과 유사하다.

#### 4.2. 맨틀 포획암의 화학적 특성

알칼리 현무암내의 감람석 맨틀포획암은 SiO<sub>2</sub>가 43.06~43.38 wt%이며 MgO(45.80~47.29 wt%)와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(9.01~9.97 wt%)를 제외한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.17~0.29 wt%), Na<sub>2</sub>O(0.05 wt%), CaO(0.25~0.31 wt%), K<sub>2</sub>O(0.04 wt%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.01 wt%), MnO(0.01~0.03 wt%) 등의 성분은 아주 낮다(Table 1). 주로 Mg-감람석(forsterite)으로 구성된 맨틀 포획암은 Ni(2579~2726 ppm)과 Cr(255~270 ppm) 함량이 높다(Table 1).



**Fig. 2.** Chemical classification of volcanic rocks from the Baegryongdo, South Korea. Field boundaries of the total alkali versus silica diagram after Le Bas *et al.* (1986). The curved lines subdivide volcanic rocks into alkaline and subalkaline (Kuno, 1968).

콘드라이트 값으로 표준화한 맨틀포획암 레조라이트의 희토류원소의 변화 경향은 LREE가 HREE에 비해 부화되어 약한 부(-)의 기울기를 보인다. 두 레조라이트 시료(시료번호 OL-7, OL8-2)의 REE패턴이 서로 유사하다(Fig. 3). 이는 이지역 상부맨틀 물질의 균질성을 의미하고 있다. 그러나 현무암의 REE패턴과는 현저한 차이를 나타내고 있다.

**5. 백령도 알칼리 현무암류의 Nd, Sr 동위원소 조성**

백령도 알칼리 현무암류의 Nd, Sr동위원소비는  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51273\sim 0.51294$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7034\sim 0.7043$

**Table 2.** Data of rare earth element (REE) for alkali basaltic rocks and mantle xenoliths from the Baegryongdo, South Korea.

Element (ppm)	B-1	B-6U	B-10	Ol-7	Ol-8-2
Rock type	Basaltic andesite	Basalt	Basalt	Iherzolite	Iherzolite
La	16.31 (49.44)	26.91 (193.47)	43.00 (70.07)	51.19 (1.92)	33.20 (2.34)
Ce	110.95 (39.19)	51.75 (144.71)	77.00 (54.84)	101.12 (1.52)	58.00 (2.01)
Pr	12.74 (28.4)	6.27 (107.31)	- (41.33)	10.51 (0.87)	- (1.26)
Nd	45.05 (27.76)	22.24 (90.68)	35.00 (40.76)	33.81 (1.36)	18.00 (0.7)
Sm	6.34 (18.32)	3.38 (48.23)	5.20 (25.58)	5.62 (1.12)	3.40 (1.96)
Eu	1.27 (20.18)	1.24 (42.51)	1.30 (26.2)	0.87 (0.38)	0.50 (0.57)
Gd	3.56 (13.78)	2.28 (26.96)	- (18.13)	5.07 (1.61)	- (2.44)
Dy	1.76 (9.88)	1.38 (14.06)	1.80 (10.37)	3.61 (0.21)	- (0.33)
Ho	0.26 (9.39)	0.21 (11.53)	- (10.65)	0.74 (1.15)	- (1.13)
Er	0.55 (7.59)	0.55 (7.61)	- (7.37)	2.26 (0.42)	- (0.66)
Yb	0.41 (6.8)	0.39 (4.39)	0.50 (6.3)	2.45 (0.61)	1.90 (0.91)
Lu	0.05 (6.78)	0.04 (3.8)	- (5.81)	0.36 (0.69)	0.3 (0.95)
(Eu/Sm)n	0.20	0.37	0.25	0.16	0.15
ΣREE	242.96	116.64	163.8	218.65	115.8
LREE/HREE	16.11	11.32	17.61	9.37	16.55

Numerals in parenthesis indicate chondrite normalised value based on Nakamura (1974).

**Table 3.** Sr and Nd isotopic compositions of some basaltic rocks from the Baegryongdo.

Sample No.	Rock type	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Rb/Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm (ppm)	Nd (ppm)	Sm/Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
B 1	Basaltic andesite	20	592	0.034	0.70432	6.34	45.05	0.141	0.512729
B 3	Basalt	15	1021	0.015	0.70343	n.d	n.d	n.d	0.512926
B 6L	Basalt	14	1103	0.013	0.70340	n.d	n.d	n.d	0.512941
B 6U	Basalt	23	1160	0.020	0.70336	3.38	22.24	0.152	0.512939
B 8	Basalt	9	1226	0.007	0.70342	n.d	n.d	n.d	0.512927
B 9	Basaltic andesite	16	994	0.016	0.70353	n.d	n.d	n.d	0.512923
B 10	Basalt	13	1050	0.012	0.70370	5.20	35.00	0.1491	0.512897

n.d: not determined.

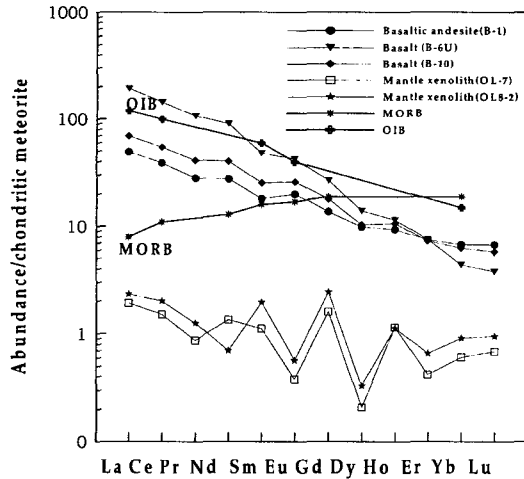


Fig. 3. Chondrite normalized REE patterns of the alkali basaltic rocks from the Baegryongdo. REE abundances were normalized by the data of Nakamura (1974). MORB data from Humphris *et al.* (1985). OIB data from Basaltic Volcanism Study Project (1981).

로 비교적 좁은 변화를 보인다(Table 3). Nd-Sr동위원소비는 울릉도, 독도, 백두산, 전곡, 제주도 알칼리 현무암에 비해 결핍된 특성을 보인다(Fig. 4). 이는 이들 현무암류의 맨틀 근원지의 특성과 마그마 진화과정의 차이를 반영하고 있는 것으로 해석된다.

시료번호 B-1( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7043$ )을 제외한 알칼리 현무암류의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 0.7034~0.7037,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 0.51290~0.51294로서 비교적 변화 폭이 작으며 암상 변화에 관계없이 동위원소비가 유사하다. 이는 이들이 동질의 근원 물질에서 유래하였음을 지시하며 또한 근원 마그마로부터 분화되어 분출되는 일련의 과정동안 대륙지각 물질에 의해 오염되지 않았음을 지시한다. 그러나 시료B-1의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 0.7043,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 0.51273로  $^{87}\text{Sr}$ 이 다소 부화되어 있다. Rb/Sr비(0.034)도 기타시료(0.007~0.012)에서 보다 크다. 이는 지각물질 혼입의 가능성을 시준하고 있다.

백령도의 현무암류는 맨틀 배열선(mantle array) 영역에 도시되며 결핍맨틀 기원(depleted mantle source) 특성을 잘 나타내고 있다(Fig. 4).

백령도 현무암의 Rb 농도가 9~23 ppm으로 대단히 낮으며 Rb/Sr비(0.007~0.034)도 낮다. 대륙지각 물질의 혼입으로 해석된 울릉도의 화산암류의 경우 Rb의 농도는 69~249 ppm으로 이보다 현저히 높으며 Rb/Sr비 역시 0.1~15.6으로 대단히 높다(Kim *et al.*, 1999). 이 같은 사실에서도 백령도의 현무암류는 Sino-Korean

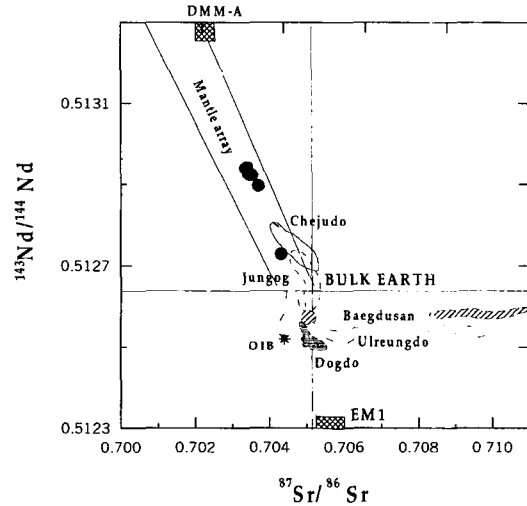


Fig. 4. Variations of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  for alkali basaltic rocks in the Baegryongdo (Isotopic data of the Junggog, Ulreungdo and Cheju-do (Kim *et al.*, 1999), Dogdo (Kim, 2000) and Baegdusan (Lee, 2000). OIB data after Saunders *et al.* (1988). Slashed area: Baegdusan, dashed area: Junggog, shaded area: Ulreungdo, double line area: Dogdo and blank area: Cheju-do.

craton 대륙지각을 통하여 분출하였음에도 지각 물질의 혼입이 대단히 낮은 것으로 해석된다.

Zindler and Hart(1986)가 제안한 맨틀 단성분들과 비교해 볼 때, 백령도의 현무암류는 부화된 맨틀 단성분인 EM I이나 EM II보다는 훨씬 더 결핍된 특성을 보인다. 박준범과 박계현(1996)은 백령도 현무암류에 대한 Sr 동위원소비( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )를 0.7033~0.7037과 0.7041~0.7048의 두 그룹으로 구분하고 서로 다른 모 마그마로부터 분화하였거나, 판내부 환경에서의 열점과 관련된 산물이라 해석한 바 있다. 그러나  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비 0.7033~0.7043의 변화는 모 마그마 기원 물질의 차이보다 마그마 생성 후 지각물질 혼입 가능성이 큰 때문으로 해석된다.

## 6. 맨틀 포획암내의 영족기체의 동위원소 조성

중앙해령 현무암(MORB)이나 플룸(plume)과 관련한 판 내부에서 분출한 현무암과 같이 맨틀에서 유래한 시료에 포획된 영족기체(He, Ne, Ar, Kr, Xe) 원소의 동위원소비를 통해 지각, 맨틀, 핵, 대기의 성분 변화와 관련된 중요한 정보가 얻어졌다(Ozima and Podosek, 1983; Porcelli and Wasserburg, 1995; Matsumoto *et al.*, 2001). 이러한 연구들에 의하면 맨틀에 적어도 두

**Table 4.** Isotopic compositions of noble gases in olivine of the mantle xenoliths from the Baegryungdo.

Sample	Iherzolite (OL-7)			Iherzolite (OL8-1)			Iherzolite (OL8-2)		
	Crush	500°C	1800°C	Crush	500°C	1800°C	Crush	500°C	1800°C
Weight (g)	0.7764	0.4753	0.4753	0.9541	0.6112	0.6112	0.9938	0.4449	0.4449
$^4\text{He}(\times 10^{-9})$	1.35	3.23	2.64	1.53	4.72	9.67	0.509	2.86	8.26
$^3\text{He}/^4\text{He}(\text{R}/\text{R}_A)$	<0.6	$1.83\pm 0.91$	$16.8\pm 3.1$	<0.6	$0.96\pm 0.78$	$5.0\pm 1.06$	<0.2	$0.86\pm 1.41$	$6.69\pm 1.3$
$^{20}\text{Ne}(\times 10^{-11})$	0.941	<1.0	11.0	3.03	7.4	5.99	2.56	<1.0	8.16
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$			$9.85\pm 0.18$			$9.83\pm 0.15$			$9.97\pm 0.19$
$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$			0.0312 $\pm 0.0025$			0.0322 $\pm 0.0032$			0.0341 $\pm 0.0039$
$^{36}\text{Ar}(\times 10^{-10})$	0.0968	0.699	3.25	0.215	0.722	2.34	0.184	0.546	2.85
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.1908 $\pm 0.0014$	0.1891 $\pm 0.0012$	0.1888 $\pm 0.0007$	0.1877 $\pm 0.0024$	0.1888 $\pm 0.0020$	0.1889 $\pm 0.0010$	0.1883 $\pm 0.0016$	0.1882 $\pm 0.0019$	0.1886 $\pm 0.0008$
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$500.6\pm 1.5$	$347.7\pm 1.0$	$320.4\pm 0.6$	$312.8\pm 0.8$	$307.3\pm 0.6$	$301.2\pm 0.5$	$299.9\pm 1.2$	$311.5\pm 1.3$	$299.4\pm 0.5$
$^{84}\text{Kr}(\times 10^{-12})$	0.346	13.4	11.4	0.524	9.3	9.4	0.361	7.1	10.9
$^{132}\text{Xe}(\times 10^{-12})$	0.084	0.24	3.69	0.063	4.89	3.31	0.042	1.72	3.56

Unit for concentrations is  $\text{cm}^3$  STP/g.\*Normalized to the atmospheric ratio= $1.4\times 10^{-6}$  (Ozima and Podosek, 1983).

개의 영축기체 가스 저장소가 존재하는 것으로 가정하고 있다. 즉, 상대적으로 탈가스가 많이 일어나고 있는 상부맨틀 저장소인 MORB형( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비= $8.18\pm 0.73\text{Ra}$ , Hilton et al., 1993과  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비 1500이상, Sumino et al., 2000)과 다른 한 유형은 이보다 높은 헬륨 동위원소비(9~32Ra, Porcelli and Wasserburg, 1995)와 낮은 아르곤 동위원소비를 갖는 열점과 같은 화산활동에 의해 탈가스가 덜 일어나는 맨틀 저장소이다. Sumino et al.(2000)의 일본 다카시마 맨틀 포획암 연구에서 MORB형( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비=7.0Ra,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ =2000)과 플룸형( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비=16.6,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ =400)으로 구분하였다.

본 연구에서는 백령도의 맨틀포획암에 대해 영축기체의 아르곤(Ar), 헬륨(He), 네온(Ne), 크세논(Xe), 크립톤(Kr) 등의 동위원소비를 측정 하였다(Table 4). 헬륨, 아르곤 이외의 동위원소의 분석자료 해석은 본 연구에서는 다루지 않았다.

### 6.1. 헬륨 동위원소비

헬륨의 양과 헬륨 동위원소비에 따라 두 개의 맨틀 저장소의 존재를 가정하고 있다. 즉, 낮은  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비의 (8.0Ra) MORB의 기원이 되는 저장소와 높은  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비(35.7 Ra)를 가지는 판 내부나 플룸과 관련한 저장소이다(Kurz et al., 1982; Allegre et al., 1983; Rison and Craig, 1983; Staudacher et al., 1986; Sarda et al., 1988; Hiyagon et al., 1992; Sumino et al., 2000). 정상적인 맨틀에서는  $^3\text{He}$ 의 생성이 되지 않기 때문에 맨틀 기원의 시료에서 보이는  $^3\text{He}$ 는 초기의 값이라 할

수 있다. 반대로  $^4\text{He}$ 는 맨틀의 우라늄(U)과 토륨(Th)의 방사성 붕괴에 의해 생성된다. 그러므로 MORB와 OIB 시료의  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비가 다양한 것은 맨틀의 우라늄과 토륨에 대한 원시 헬륨( $^3\text{He}/\text{U}+\text{Th}$ )의 비가 지질시대에 따라 다양하였음을 의미한다.

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 가 상대적으로 낮은 MORB의 기원 맨틀은 상대적으로 탈가스가 많이 진행되었거나, 원래 높은  $^3\text{He}$  때문으로  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비가 크고 탈가스가 적은 전형적인 플룸기원의 맨틀에서보다 낮은  $^3\text{He}/\text{U}+\text{Th}$ 비를 가진다(Allegre et al., 1983; Kurz et al., 1983; Hart et al., 1985).

이처럼 헬륨동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )는 하부맨틀 성분을 유추하는데 중요한 추적자로 이용되고 있다. 일반적으로 중앙해령현무암(mid-oceanic ridge basalt, MORB)은 대단히 균일한  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비( $8\pm 1\text{Ra}$ , Ra는 대기의  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비  $1.4\times 10^{-6}$ 을 가르킴)를 가지는 반면 하와이, 아이스랜드, 리뉴니온(Reunion) 등의 열점기원의  $^3\text{He}/^4\text{He}$  비는 9~32 Ra로 큰 값을 나타내고 있다(Porcelli and Wasserburg, 1995). Sumino et al.(2000)에 의하면 서남 일본 다카시마의 맨틀포획암의 감람석에서 추출한 헬륨동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )가 9.4~16.6Ra로 이 지역 화산활동이 맨틀플룸(mantle plume)에 기원한 것으로 해석하였다.

백령도의 맨틀 포획암의 감람석에서 측정된 헬륨 동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )는 초진공과쇄법과 500°C와 1800°C의 단계별 가열추출 실험에서  $0.86\pm 1.41\text{Ra}$ ~ $16.8\pm 3.1\text{Ra}$ 까지 변화가 있다(Table 4). 1800°C에서 추출된

헬륨동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )는  $5.0 \pm 1.06 \sim 16.8 \pm 3.1 \text{ Ra}$ 이다 (Table 4). 두 시료(OL8-1, OL8-2)의  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비는 MORB값과 유사하며 이 값은 대륙지각 하부 리소스피어 맨틀(subcontinental lithospheric mantle)기원 물질에 해당되는 값이다(Fig. 5). 제주도의 포획암의 헬륨동위원소비(Sumino, 2000)도 MORB보다 다소 낮다(Fig. 5). 그러나 한 감람석 시료(시료번호, OL-7)의  $^3\text{He}/^4\text{He}$  비는  $16.8 \pm 3.1 \text{ Ra}$ (Table 4)로 MORB값보다 훨씬 큰값으로 보통 심부 맨틀 플룸기원으로도 해석되는 값이다. 그러나 이 값은 마그마가 지표로 분출 후 우주선 기원의  $^3\text{He}$ (Craig and Poreda, 1986)때문으로 생각할 수 있다. 왜냐하면 파쇄 추출법에 의한  $^3\text{He}/^4\text{He}$  비가 대단히 낮기 때문이다. 위의 시료 OL8-1과 OL8-2 두 시료의 평균  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 값  $8 \times 10^{-8}$ 을 OL-7시료의 초기  $^3\text{He}/^4\text{He}$  값으로 가정하면 우주선기원의  $^3\text{He}$ 의량은  $4.1 \times 10^{-14} \text{ ccSTP/g}$ 으로 계산된다. 이 생산율( $4.1 \times 10^{-14} \text{ ccSTP/g}$ )을 사용하면 10000년 정도만 지표에 노출되어도 OL-7시료의  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 값은 우주선  $^3\text{He}$ 의 축적으로도 가능해진다. 물론 마그마 분출 후의 방사성기원의  $^4\text{He}$ 의 추가도 고려될 수 있지만, 백령도 지역의 포획암은 지각 하부 리소스피어 맨틀에서 유래한 가능성이 큰 것으로 해석된다.

## 6.2. 아르곤 동위원소비

아르곤은 지구물질의 대기 기원 물질의 혼입에 대한 아주 중요한 정보를 주는 추적자(tracer)이다. 맨틀의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비는 지구의 탈가스에 대한 모델에서 주요 매개변수가 되어, 대기보다 값이 크면 빠르면서도 거의 완전한 탈가스를 의미하고 작은 값은 느리고도 불완전한 탈가스를 의미한다. 따라서  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비의 차이에서 대기에 의한 오염에 의한 영향을 추정할 수 있다. 많은 화산암의 포획암의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 은 대기의 값보다 높게 나타난다(Steiger and Jager, 1977). 백령도의 맨틀포획암의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 은 300, 310, 490으로 분석되었고 이것은 오염되지 않은 MORB의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (10,000~30,000; Staudacher and Allegre, 1989; Ozima, 1994)값보다 상대적으로 훨씬 작은 값으로 대기의 값( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$ 와  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 0.1880$ , Ozima and Podosek, 1983)과 유사하다. 일반적으로  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비가 MORB와 비교해서 낮게 나타나는 것은 시료가 대기의 오염 영향을 받았음을 의미한다. Matsuda and Marty(1995)는  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ ,  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ,  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ ,  $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 의 그래프를 이용하여 하부 맨틀에서의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비는 3,000과 28,000 사이의 값으로 대기의 값보다 커야 한다고 제안하였다

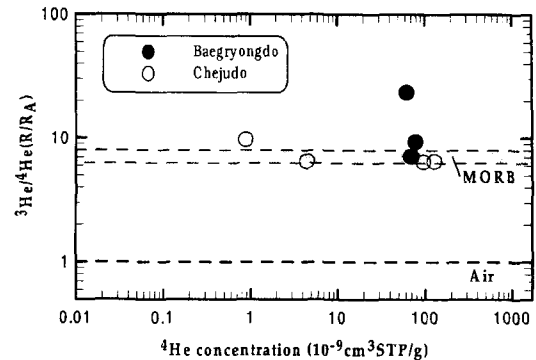


Fig. 5.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios plotted against  $^4\text{He}$  concentrations for xenoliths from the Baegryongdo. Data of the Chejudo after Sumino (2000). Shaded area indicates the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio of MORB ( $8.18 \pm 0.73 \text{ Ra}$ , Hilton *et al.*, 1993).

Ozima(1994)는 또한 탈가스가 덜 된 맨틀에서  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비는 3,000이상 정도 될 것이라고 결론지었다. 그러나 많은 맨틀 물질이 분출 전후에 방사성기원 성분 또는 우주선 기원 성분에 의한 오염을 겪기 때문에 맨틀 기원의 시료 데이터를 지구물질의 영속기체가스의 변화에 적용하기 전에 반드시 이같은 2차 성분의 영향을 고려해야한다.

OIB와 MORB에서 대기와 비슷한 영속기체 가스의 기원에 대해 수 년 동안 논의되어 왔고, 대기와 비슷한 OIB의 영속기체 가스는 해수의 대기오염으로 설명이 되었다(Patterson *et al.*, 1990; Honda *et al.*, 1993; Burnard *et al.*, 1994; Matsumoto *et al.*, 2001). 참고로 제주도 맨틀 포획암의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 는 651~4426로 상부맨틀과 대기의 혼합형에 해당된다(Sumino, 2000).

백령도의 맨틀 포획암을 형성한 상부맨틀 지온구배는 해양지온 구배에 속한다(이한영, 1995). 중국 동부 지역에서 산출되는 맨틀 포획암들도 같은 결과를 보여 주고 있다(Fan and Hooper, 1989).

## 7. 결 론

백령도 지역의 제4기 알칼리 현무암과 맨틀포획암 시료에 대하여 주성분, 미량성분, 희토류원소(REE), Nd, Sr 등의 동위 원소 분석을 실시하였다. 특히 현무암 내에 포획된 맨틀 포획암인 리조라이트내의 영속기체 가스의 동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  등) 분석으로 이 지역의 상부맨틀의 지화학적 특성과 알칼리 현무암질 마그마의 기원과의 관련성을 검토하였다. 분석 연구 결과는 다음과 같다.



1. 백령도의 현무암류는 뮤저라이트와 같은 알칼리암 계열과 현무암질 안산암의 비알칼리암 계열로 구분된다. 알칼리 현무암내에 맨틀포획암이 다량 산출되며 포획암은 Mg-감람석(Mg=45.8~47.3%)과 사방회석이 우세한 스피넬-러조라이트(spinel-lherzolite)이다.

2. 알칼리 현무암류의 REE 패턴은 HREE가 LREE보다 큰 값을 가지는 해양섬 현무암(oceanic island basalt)과 유사하며, 유사한 REE변화 경향은 유사한 기원물질에서 유래하였음을 시사한다.

3. 백령도의 현무암류의 Nd-Sr 동위원소비는 결핍 맨틀기원(depleted mantle source)을 지시하고, 지각 물질의 혼입 영향을 받지 않은 것으로 해석된다.

4. 맨틀포획암의 헬륨동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}=5.0\sim 6.7\text{ Ra}$ )는 MORB(8.0Ra)값보다 낮다. 이는 백령도 포획암이 대륙지각 하부 리소스피어 맨틀(subcontinental lithospheric mantle)기원 물질에서 유래하였음을 가르킨다. 그리고 높은  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비(16.8Ra)를 나타내는 시료(OL-7)는 마그마 분출후 우주선 기원의 혼입 때문으로 해석된다. 맨틀 포획암의 감람석의  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비(310~490)는 대기의 값과 유사하다. 이는 알칼리 현무암질 마그마가 상승시 대기의 영향을 받은 느린 탈가스가 있었던 것으로 사려된다.

## 사 사

이 연구는 학술진흥재단 지원 연구비(과제번호: KRF-2001-0079-1)에 의해 수행되었다. Nd, Sr동위원소 분석에 협력하여준 일본 나고야대학 지구행성과학과 田中 剛교수에게 사의를 표한다. 논문 심사시에 유익한 의견을 주신 분께 사의를 표한다.

## 참고문헌

- 김규한 (2000) 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar연대와 Nd-Sr 조성. 지질학회지, 36권, p. 313-324.
- 박계현, 김윤중, 이인성, 박준범, 최만식, 이광식, 정창식, 한정희, 이석훈, 신형선 (1996) 지질 및 해양시료의 미량조성 및 구조분석법 연구(II). 기초과학지원연구소, 미발간 연구보고서, UCPN 00016-070-4, 254p.
- 박준범, 박계현 (1996) 한반도 중부의 신생대 알칼리 화산암류에 대한 암석학 및 암석성인적 연구(I): 암석기체, 광물학 및 전암 주성분원소. 자원환경지질, 32권, p. 223-249.
- 원종관, 이문원, 윤성호, 고보균 (1998) 제주도 남동부 표선지역의 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34권, p. 172-191.
- 이문원, 나기창 (1987) 백령도에서 확인된 제4기 알칼리 현무암류의 의미. 광산지질, 20권, p. 211-211.
- 이은호 (2000) 백두산 알칼리 화산암류의 미량원소 지구화학 및 Nd-Sr동위원소 조성. 이화여자대학교 교육대학원 석사학위 논문, 49p.
- 이한영 (1995) 남한의 알칼리 현무암에 분포하는 맨틀포획암의 암석화학적 연구: 상부맨틀의 온도 및 압력추정. 암석학회지, 4권, p. 104-123.
- 임순복, 최현일, 김복철, 김정찬 (1998) 분지별 퇴적 시스템 연구(I)-원생대 백령층군 및 태안층. 한국자원연구소, 98기관고유 연차보고서, p. 17-38.
- Allegre, C.J., Stardacher, T. and Sarda, P. (1983) Constraints on evolution of Earth's mantle from rare gas systematics. Nature, v. 303, p. 762-766.
- Basaltic Volcanism Study Project (1981) Basaltic volcanism on the terrestrial planets. Pergamon press, New York, 1286p.
- Burnard, P., Stuart, F.M., Turner, G. and Osakarsson, H. (1994) Air contamination of basaltic magma: Implications for high  $^3\text{He}/^4\text{He}$  mantle Ar isotopic composition. J. Geophys. Res., v. 99, p. 17705-17715.
- Craig, H. and Poreda, R.J. (1986) Cosmogenic  $^3\text{He}$  in terrestrial rocks: the summit of lavas of Maui. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., v. 86, p. 1970-1974.
- Dosso, L. and Murthy, V.R. (1980) A Nd isotope study of the Kerguelen islands: inferences on enriched oceanic mantle sources. Earth Planet. Sci. Lett., v. 48, p. 268-276.
- Fan, Q. and Hooper, P.R. (1989) The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleotherms. J. Petrol., v. 30, p. 1117-1158.
- Hart, S.R., Hogan, I. and Dymond, J. (1985) The closed-system approximation for evolution of Argon and Helium in the mantle crust and atmosphere. Chem. Geol., v. 52, p. 45-73.
- Hilton, D.R., Hammerschmidt, K., Loock, G. and Friedrichen, H. (1993) Helium and argon isotope systematics of the central Lau Basin and Valu Fa Ridge: Evidence of crust/mantle interactions in the back-arc basin. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 57, p. 2819-2841.
- Hiyagon, H., Ozima, M., Marty, B., Zashu, S. and Sakai, H. (1992) Noble gases in submarine glasses from mid-oceanic ridges and Loihi seamount: Constraints on the early history of the Earth. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 56, p. 1301-1316.
- Honda, M., Mcdougall, I., Patterson, D.B., Doulergies, A. and Clague (1993) Noble gases in submarine pillow basalt glasses from Loihi and Kilauea, Hawaii: a solar component in the Earth. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 57, p. 859-874.
- Humphris, S.E., Thomson, G., Schilling, J.G. and Kinsley, R.A. (1985) Petrological variations along the Mid-Atlantic Ridge between 46 S and 32 S: influence of the Tristan da Cunha mantle plume. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 49, p. 1445-1464.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Nagao, K. and Jang, S.K. (1999) Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Uireungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. Geochem. Jour., v. 33, p. 317-341.
- Kuno, H. (1968) Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. Geol. Surv. Can. Paper, v. 66-15, p. 317-336.
- Kurz, M.D., Jenkins, W.J., Schilling, J.G. and Hart, S.R.

- (1982) Helium isotopic variations in the mantle beneath the central North Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 58, p. 1-14.
- Kurz, M.D., Jenkins, W.J., Hart, S.R. and Claude, D. (1983) Helium isotopic variations in volcanic rocks from Loihi Seamount and the Island of Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 66, p. 388-406.
- Kushiro, I., Yoder, H.S. and Maysen, B.O. (1976) Viscosities of basalt and andesite melts at high pressures. *J. Geophys. Res.*, v. 81, p. 6351-6356.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Jour. Petrol.*, v. 27, p. 745-750.
- Matsuda, J. and Marty, B. (1995) The  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio of the undepleted mantle; a reevaluation. *Geophys. Res. Lett.*, v. 22, p. 1937-1940.
- Matsumoto, T., Chen, Y. and Matsuda, J. (2001) Concomitant occurrence of primordial and recycled noble gases in the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 185, 1-2, p. 35-47.
- Nagao, K., Nakamura, Y., Miura, N. and Takaoka, N. (1997) Noble gases and mineralogy of primary igneous materials of the Yamato-793605 shergotite. *Antarct Meteorite Res.*, v. 10, p. 125-142.
- Nakai, S., Wakita, H., Nuccio, M. and Italiano, F. (1997) MORB type neon in an enriched mantle beneath Etna, Sicily. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 153, p. 57-66.
- Nakamura, N. (1974) A determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 38, p. 757-773.
- Ozima, M. (1994) Noble gas state in the mantle. *Rev. Geophys.*, v. 32, p. 405-426.
- Ozima, M. and Podosek, F.A. (1983) Noble gas geochemistry. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 367p.
- Patterson, D.B., Honda, M. and McDougall, I. (1990) Atmospheric contamination: a possible source for heavy noble gases in basalts from Loihi seamount, Hawaii. *Geophys. Res. Lett.*, v. 17, p. 705-708.
- Porcelli, D.R., Stone, J.O.H. and O'Nions, R.K. (1987) Enhanced  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios and cosmogenic Helium in ultramafic xenoliths. *Chem. Geol.*, v. 64, p. 25-33.
- Porcelli, D. and Wasserburg, G.J. (1995) Mass transfer of helium, neon, argon, and xenon through a steady-state upper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 59, p. 4921-4937.
- Rison, W. and Craig, H. (1983) Helium isotopes and mantle volatiles in Loihi Seamount and Hawaiian Island basalts and xenoliths. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 66, p. 407-426.
- Sarda, P.H., Stadaucher, T.H. and Allegre, C.J. (1988) Neon isotopes in submarine basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 31, p. 369-385.
- Saunders, A.D., Norry, M.J. and Tarney, J. (1988) Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints. *J. Petrol.*, Special Lithosphere Issue, p. 414-445.
- Stadaucher, T., Kurz, M.D. and Allegre, C.J. (1986) New noble gas data on glass samples from Loihi seamount and Hualalai and on dunite samples from Loihi and Reunion island. *Chem. Geol.*, v. 56, p. 193-205.
- Stadaucher, T. and Allegre, C.J. (1989) Noble gases in glass samples from Tahiti: tahitia, Rocard and Meheita. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 93, p. 210-222.
- Steiger, R. and Jager, H. (1977) Subcommission on geochronology: convection on the use of decay constraints in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 182, p. 577-578.
- Stuart, M., Turner, G. and Taylor, R. (1994) He-Ar isotope systematics of fluid inclusions: resolving mantle and crustal contributions to hydrothermal fluids. In Matuda J.(ed.) Noble gas Geochemistry and Cosmochemistry. p. 261-277.
- Sumino, H. (2000) Origin of alkaline basalt volcanism inferred from noble gas isotopic systematics: Implications for mantle dynamics in back arc region of subduction zone. PhD dissertation, University of Tokyo, 185p.
- Sumino, H., Nakai, S., Nagao, K. and Notsu, K. (2000) High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio in xenoliths from Takashima: evidence for plume type volcanism in Southwestern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, v. 27(8), p. 1211-1214.
- Tastumoto, M., Henger, E. and Unruh, E.M. (1987) Origin of the west Maui volcanics inferred from Pb, Sr, and Nd isotopes and mafic component model for oceanic basalts. USGS. Prof. Pap., v. 1356, p. 723-744.
- Zindler, A. and Hart, S.R. (1986) Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 14, p. 493-571.