

제주도 우도 화산섬의 서브알칼리 현무암의 지화학적 특징에 대하여

이진수*

한국지질자원연구원

Geochemical Characteristics of the Sub-alkaline Basalt in the Udo Island, Jeju

Jin-Soo Lee*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Udo is the site of a short-lived monogenetic submarine volcanic vent which builds basaltic clastic deposits below sea level, by early Surtseyan-type explosive eruption and later effusive lava eruptions. Mineral assemblage, major and trace element chemistry indicate that the Someori sub-alkaline lava flows were related to the WPTB (within plate tholeiitic basalt) rather than IAT (island-arc tholeiite) and that the geotectonic regime of Korean Peninsula went away from the subduction zone after the Later Miocene.

Key words : Udo, sub-alkaline, WPBT, trace element

제주도 동편의 부속섬인 우도는 일윤회 분출에 의해 형성된 단성화산체로서 해저에서 초기 서페이언형(Surtseyan-type)의 폭발성 화산분화에서 시작되고 마지막 용암분출(로 섬 전체의 형태가 완성되었다. 섬의 대부분을 차지하는 소머리현무암은 서브알칼리계열로서 미량원소 및 희토류원소의 지화학적 특성은 섭입대에서 생성되는 쉘레이아이트일 가능성보다는 지각관내부에서 생성된 쉘레이아이트임을 지시하며, 이는 마이오세 말기 이후의 한반도의 화산활동은 태평양판과 필리핀해판인 해양판의 섭입 영향을 받지 않는 지구조적 환경으로 변했음을 시사한다.

주요어 : 우도, 서브알칼리계열, 지각관내부, 미량원소

1. 서론

우도(Fig. 1)는 성산포에서 북동쪽으로 3.8 km, 구좌읍 종달리(終達里)에서 동쪽으로 2.8 km 해상에 위치하며, 제주도의 여러 부속 섬들 중 가장 큰 섬으로서 면적이 5.9 km²이고 해안선 길이가 17 km이며 최고점이 132 m이다. 1697년(숙종 23년) 국유목장이 설치되면서 국마(國馬)를 관리·사육하기 위하여 사람들의 거주가 허락되었으며 1844년(헌종 10년) 김석린 진사 일행이 입도하여 정착하였다. 원래는 구좌읍 연평리에 속

하였으나 1986년 4월 1일 우도면으로 승격하였다(Doopedia, 2010). 섬의 형태가 소가 드러누웠거나 머리를 내민 모습과 같다고 하여 우도라고 이름지어졌다.

우도의 남쪽 해안과 북동쪽 탁진포(濁津浦)를 제외한 모든 해안에는 해식애가 발달되어있고, 섬의 동남부에 위치하는 소머리오름인 분화구(응회구)가 위치하며, 섬 전체가 하나의 용암대지로서 고도 30 m 이내의 넓고 비옥한 평지를 이루고 있다.

분화구 주변에는 응회암이 분포되어 있으며, 섬의 대부분은 현무암질 용암대지를 이루는 일윤회 분출에 의

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: jsly@kigam.re.kr

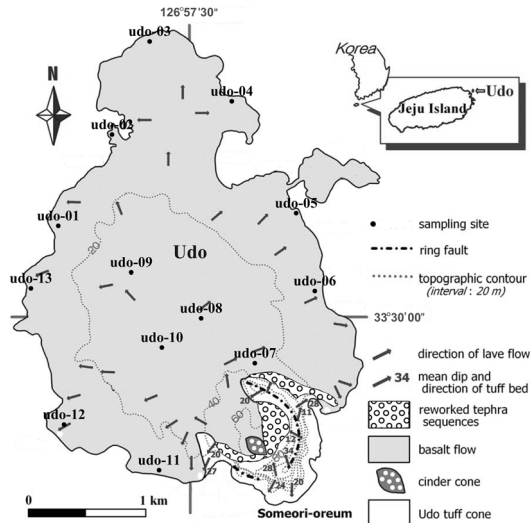


Fig. 1. Geology map of Udo(modified from Hwang, 1993; Won *et al.*, 1993; Koh *et al.*, 2005) and sample sites.

해 형성된 단성화산체(monogenetic)로서 이의 화산과정정이 비교적 상세히 밝혀져 있고(Hwang, 1992, 1993; Brenna *et al.*, 2010), 응회구의 퇴적학적 연구도 상세히 연구되었다(Sohn and Chough, 1993; Brenna *et al.*, 2010).

그리고, 1:50,000 성산도폭 지질도(Won *et al.*, 1993)에 기재된 우도의 대부분을 차지하며 분포하는 우도 소머리현무암은 암석기재적 특징과 지구성광물의 화학성분, 주성분원소의 함량 조성 특성(Koh *et al.*, 2005) 연구에 의해 서브알칼리계열의 현무암으로 쉘레이아이트암의 특징을 갖고 있으며 연대측정 자료는 0.114 ± 0.003 Ma(Koh *et al.*, 2005)와 86 Ka와 102 Ka(Koh *et al.*, 2008)등 플라이스토세의 화산활동에 의해 생성된 화산섬으로 해석하였다.

따라서 우도 소머리현무암의 광물조성 및 주원소에 대한 암석학적 특징은 과거 연구결과와 차이가 없으므로 본 연구는 미량원소 및 희토류원소의 암석학적 특징을 중점적으로 파악하였다.

2. 연구방법

본 연구지역의 암석화학적 특징을 밝히기 위해 우도 지역에 분포하는 용암류에서 13개의 시료를 채취하였고, 한국지질자원연구원에서 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소에 대한 지화학 분석을 실시하였다. 주성분원소에 대해서는 X선 형광분석기(XRF)로 분석을 하였

고, 미량원소와 희토류원소는 고해상 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였다. 주성분원소의 분석오차는 5% 미만이며, 미량원소 및 희토류 원소의 오차한계는 6% 미만이다.

또한 서브알칼리 계열 중 쉘레이아이트암으로 알려진 우도 용암류가 국내 알칼리계열의 용암류와 칼크-알칼리계열의 용암류들과의 미량원소 차이에 대한 특징을 파악하고자 제주도내의 알칼리용암 그리고 추가령 열곡(한탄강)의 전국 알칼리 용암, 포항지역의 칼크-알칼리 용암(연일 현무암)의 지화학자료(평균값에 가까운 대표시료)도 함께 이용하였다(Lee, 1989).

3. 우도의 지질 및 소머리현무암의 암석특징

제주도는 Lee(1982)에 의해 제시된 Na계열의 알칼리 용암류로 구성되어 있는 화산섬으로 알려져 왔다. 그러나 제주도 화산암류 중에는 비알칼리계열의 존재가 Lee(1989)에 의해 제시된 이후 Park and Kwon(1996), Lee *et al.*, (1994), Park *et al.*(1999) 등의 연구와 제주도의 1:5만도폭 조사 등(Won *et al.*, 1993, 1995)으로 제주도의 많은 지역에 광범위하게 비알칼리 계열의 용암류가 분포하고 있는 것이 확인된다. 우도는 섬의 동남부에 위치하고 있는 분화구인 소머리오름에서 해저 화산활동인 서페이언 유형의 화산활동에 의해 형성된 화산도로서 초기에 응회구 활동, 분석구 활동, 용암 분출 활동에 의한 섬의 형성 과정으로 설명된다(Hwang, 1992; 1993; Sohn and Chough, 1993). 용암류는 용암 삼각주를 이루며 섬의 대부분을 차지하며 소머리현무암을 형성하고 있다(Fig. 1). 또한 오름 주변에는 재이동 테프라층이 퇴적되어 있는데, 이 층은 우도의 생성 초기 화산의 높이를 낮추는 침식 풍화작용에 의해 퇴적된 층으로 해석된다. 소머리현무암은 과거에 표선리현무암(Won, 1976; Lee, 1982; Won *et al.*, 1993) 혹은 표선리현무암군(Yoon *et al.*, 1995, 2001)의 화산암류로 기재되어 있으나, 최근의 연구(Koh *et al.*, 2005)에서는 쉘레이아이트질 현무암으로 밝혀졌으며 이번 연구에서 채취한 우도의 12개의 현무암 시료들도 다공질을 가지는 비현정질 현무암으로서 간혹 감람석이나 휘석의 미반정을 가지며 이는 제주도 동부 지역의 쉘레이아이트 암석과 유사하다(Koh *et al.*, 2005).

용암류의 구성광물은 반정으로 감람석, 사장석, 사방휘석이며 드물게 단사휘석이 관찰된다. 석기를 이루는 광물은 사장석, 감람석 단사휘석과 불투명 광물인 티탄-철 산화광물과 유리질로 구성되어 있다. 사장석의

구성성분은 라브라도라이트에 해당하는 An_{65} 에서 An_{50} 으로 Koh *et al.*(2005)의 결과와 대동소이하다. 감람석의 성분은 반정의 경우 Fo_{78-51} , 석기의 경우 Fo_{66-41} 로서 Koh *et al.*(2005)의 연구와 성분이 거의 같은 결과를 보이므로 자료 제시는 생략한다.

단사회석의 경우 대부분 보통회석인 오자이트에 해당되나 일부 석기를 이루는 회석 결정들은 Wo 10-15의 성분을 가지는 피죤나이트(pigeonite)에 해당 되며, 이는 본 암석들이 비알칼리계열인 쉘레아이트임을 암시하고 있다.

Fe-Ti 산화광물의 구성성분은 비교적 결정이 큰 조립질들은 자철석과 티탄철석에 해당되며 석기를 이루는 미정들 중에는 울보스피넬(ulvospinel)이 확인된다.

4. 소머리현무암의 암석지화학적 특징

4.1. 주원소 지화학

SiO_2 는 45.9~51.7 wt.%의 좁은 함량범위를 나타내는데(Table 1) 이 함량은 Koh *et al.*(2005)의 논문에서 나타난 SiO_2 함량범위인 50.4-53.1 wt.%보다 다소 낮

은 값을 가진다. 이는 시료 채취 위치 차이에 따른 변화이거나 분석오차에 의한 것으로 생각된다. 이번 연구의 시료채취 지점은 해발 20 m 이상의 중앙부를 포함하고 특히 섬의 낮은 지역에서의 시료 채취도 바닷물의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 주택지보다 높은 지역의 노두에서 채취하였다.

SiO_2 함량은 저지대의 초기 분출된 용암보다 고도가 높은 지역의 말기 분출된 용암으로 갈수록 SiO_2 의 함량이 낮아지는 경향을 보인다. 따라서 Koh *et al.*(2005)의 해안가에서 채취한 시료들은 초기 분출 용암일 가능성이 높고, 또한 SiO_2 의 함량이 보다 높을 가능성이 있는 것으로 사료된다.

소머리현무암은 제주도나 추가령 열곡의 전곡 알칼리 용암류에서 보여주는 알칼리 함량(Na_2O+K_2O)이 4.3-5.02%인 것에 비해 2.31-3.43로 월등히 낮은 값을 보여준다(Lee, 1989), Le Bas *et al.*(1986), Irvine and Baragar(1971)에 의한 알칼리 성분 함량을 기준으로 분류해 보면 우도의 소머리현무암은 서브알칼리계열에 도시된다(Fig. 2).

소머리현무암의 주성분 원소의 특성은 SiO_2 의 함량

Table 1. Major element data and CIPW norm of the basalt flows in the study area (unit in wt%)

No.	udo-01	udo-02	udo-03	udo-04	udo-05	udo-06	udo-07	udo-08	udo-09	udo-10	udo-11	udo-12	udo-13
SiO_2	51.28	49.98	50.23	51.71	48.96	50.16	48.48	47.41	48.55	45.93	47.29	48.81	51.23
TiO_2	1.99	2.06	2.02	1.95	1.82	2.06	2.18	2.25	2.21	2.39	2.31	2.15	1.99
Al_2O_3	14.67	15.2	14.96	14.76	13.96	14.82	14.98	15.98	15.42	15.94	15.85	15.01	14.30
$Fe_2O_3^T$	12.34	12.76	12.39	11.96	12.25	12.94	13.53	13.69	13.38	14.65	14.11	13.2	12.51
MnO	0.16	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.16
MgO	6.82	7.00	6.52	6.45	8.56	6.94	7.28	7.06	6.91	7.46	7.3	7.03	6.68
CaO	8.70	9.01	9.03	8.79	9.00	8.71	7.91	8.19	8.29	7.70	7.75	8.34	8.62
K_2O	0.48	0.35	0.36	0.54	0.35	0.36	0.38	0.24	0.35	0.23	0.23	0.30	0.55
Na_2O	2.88	3.04	2.83	2.89	2.68	2.76	2.38	2.37	2.47	2.08	2.29	2.87	2.87
P_2O_5	0.23	0.23	0.26	0.23	0.23	0.23	0.28	0.21	0.24	0.2	0.19	0.26	0.25
Igl	0.14	0.52	0.88	0.02	1.73	0.42	2.05	2.12	1.84	3.41	2.07	1.36	0.23
Total	99.69	100.32	99.64	99.45	99.70	99.56	99.62	99.69	99.83	100.17	99.57	99.5	99.39
CIPW norm													
Q	2.83	0.12	3.78	4.97	0.71	3.60	3.87	2.62	3.51	2.21	2.94	2.06	4.48
Or	5.45	4.68	2.13	3.19	2.07	2.13	2.25	1.42	2.07	1.36	1.36	1.77	3.25
Pl	48.75	51.21	51.00	50.16	47.70	50.34	49.21	52.31	50.85	51.08	51.67	51.47	48.80
Di	13.98	14.33	13.00	13.27	14.58	11.92	6.75	5.67	7.78	2.77	3.98	10.11	13.46
Hy	18.45	19.02	18.16	17.56	22.74	20.17	23.87	23.87	22.27	26.94	25.60	21.37	18.50
Il	3.78	3.91	3.84	3.70	3.46	3.91	4.14	4.27	4.20	4.54	4.39	4.08	3.78
Mt	5.36	5.55	5.39	5.21	5.34	5.63	5.89	5.96	5.81	6.38	6.13	5.74	5.44
Ap	0.53	0.53	0.60	0.53	0.53	0.53	0.65	0.49	0.56	0.46	0.44	0.60	0.58
Total	99.13	99.35	97.90	98.59	97.13	98.23	96.63	96.61	97.05	95.74	96.51	97.20	98.29

Total iron recalculated according to $Fe_2O_3/FeO=0.20$ (Middlemost,1989).

Igl : Ignition loss

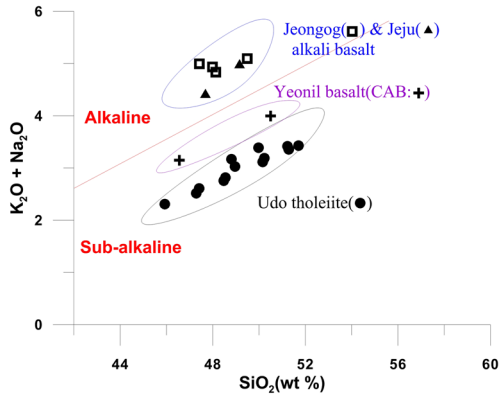


Fig. 2. Total alkali vs. SiO₂ diagram for Udo Someori basalt.

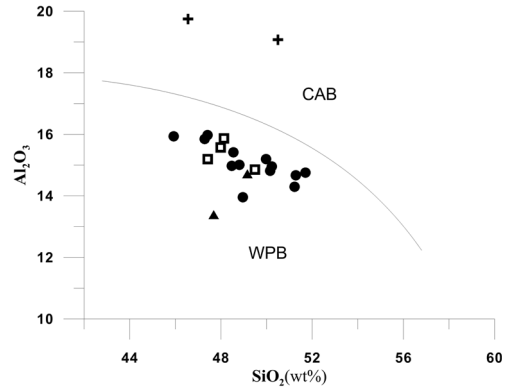


Fig. 4. Al₂O₃ vs. SiO₂ variation diagram for Udo Someori basalt. WPB:within plate basalt, CAB:calc-alkaline basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

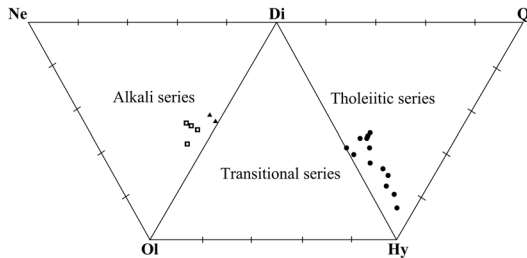


Fig. 3. Normative composition of Udo Someori basalt projected in the basalt tetrahedron(Yoder and Tilley, 1962). Symbols are the same as in Fig. 2.

이 현무암의 영역인 45.9-51.7% 이고 MgO의 함량이 비교적 높은 값(6.45-8.56%)을 가진다. 그럼에도 불구하고 CIPW 노움 광물(normative minerals)의 함량을 계산해보면 소머리현무암 전체시료가 노움 감람석이 없는 대신 석영이 계산된다. 판내부에서 일어나는 화산 활동에 대한 알칼리계열과 비알칼리계열의 암석분류는 노움 광물을 계산함으로써 어느정도 구분이 가능할 것이다. 노움 광물에서 SiO₂ 결핍으로 계산되는 네펠린(nepheline) 광물이 나오는 경우에는 알칼리계열로 구분이 되고, SiO₂ 과포화로 석영이 계산되는 암석은 서브알칼리계열로 명확하게 분류가 되나, SiO₂가 포화된 시료에서는 알칼리계열, 서브알칼리계열 또는 전이 계열(transitional series)모두가 감람석과 휘석이 계산된다. 그러나 우도의 소머리현무암에 대한 노움 광물 계산에서는 12개 전 시료가 석영이 계산되므로 SiO₂ 과포화된 서브알칼리 계열의 화산암(Yoder and Tilley, 1962)인 솔레이아이트질 현무암이 분명한 반면 전국과 제주지역의 알칼리 현무암들은 silica 불포화 화산암으로서 CIPW 노움 광물 계산에서 네펠린이 계산됨을

알 수 있다(Fig. 3).

서브알칼리계열중 지각판 내부의 솔레이이트 계열과 섭입대에 형성되는 칼크-알칼리계열의 용암류는 Al₂O₃의 함량차이에 의해 확연히 구분이 가능하다. 일반적으로 섭입대에서 형성된 칼크-알칼리계열은 Al₂O₃의 함량이 18-19 wt%에 달하나(Lee, 1989) 우도의 소머리현무암은 14-16 wt%로서 판 내부에서 생성되는 서브알칼리계열의 특징을 보여주고(Fig. 4), 또한 CaO의 함량은 섭입대의 서브알칼리 계열이 판내부의 서브알칼리 계열보다 높은 함량을 보이는 특징을 가진다(Basaltic Volcanism Study Project, 1981).

4.2. 미량원소 지화학

소머리현무암의 미량원소 화학분석자료는 Table 2와 같으며 SiO₂변화에 따른 미량원소의 성분변화는 SiO₂가 증가함에 따라 미량원소의 변화는 크지 않으나, Sr, Rb, Cs의 함량은 증가하는 경향을 보이는 반면 V, Sc는 미약하게 감소하고, Zr, Nb, Y는 정출광물에 대해서 불호정성원소임에도 불구하고 분화가 진행됨에 따라 변화가 없거나 미약하게 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5, 6).

소머리현무암의 미량원소 함량 중에 Rb(2-11 ppm), Sr(215-373 ppm), Zr(74-95 ppm), Nb(12.9-17.3 ppm), Ba(96-150 ppm) 원소들은 제주도의 알칼리용암류의 Rb(33-36 ppm), Sr(471-501 ppm), Zr(205-209 ppm), Nb(36.8-51.4 ppm), Ba(401-438 ppm) 원소 함량(Lee, 1989)에 비해 상대적으로 확연히 낮은 값을 보인다(Fig. 6). 또한 추가령지역에 분포하는 전국 알칼리 용암류의 Rb(17-20 ppm), Sr(496-565 ppm), Zr(155-172 ppm),

Table 2. Trace element data of the basalt flows in the study area(unit in ppm)

No.	udo-01	udo-02	udo-03	udo-04	udo-05	udo-06	udo-07	udo-08	udo-09	udo-10	udo-11	udo-12	udo-13
Rb	9.0	5.1	5.1	10.6	5.8	5.3	6.6	2.8	5.6	2.0	1.9	3.5	10.8
Sr	296	305	318	314	373	291	246	244	256	215	239	262	288
Zr	86	82	83	83	74	89	95	85	88	85	91	89	81
Nb	14.7	14.4	14.4	14.7	12.9	16.0	17.3	14.8	15.1	14.9	15.8	15.5	14.2
Cs	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Ba	131	99	163	126	96	127	117	109	113	132	150	118	143
Hf	2.2	2.1	2.2	2.2	2.0	2.5	2.6	2.2	2.3	2.3	2.3	2.5	2.1
Ta	1.9	1.3	2.0	1.8	2.0	2.6	2.3	1.1	1.0	0.8	1.9	1.9	1.1
Pb	2.3	1.9	2.7	2.0	2.4	2.3	1.6	1.6	1.8	1.6	4.8	2.4	3.3
V	162	171	168	162	158	161	169	173	174	184	171	162	155
Cr	282	280	273	274	284	268	282	274	278	297	282	269	259
Co	58	62	53	62	53	60	54	51	51	55	52	53	51
Ga	21	22	22	21	21	21	22	22	22	23	23	21	20
Sc	21	24	24	22	22	22	23	23	24	26	23	22	20
Ni	278	298	248	244	281	273	290	241	247	283	280	282	300
Cu	33	27	24	30	35	31	27	32	28	31	33	37	32
Se	20	20	19	19	18	20	20	20	20	22	21	21	19
Y	22	23	21	22	21	21	22	29	20	25	23	22	24
Th	3.4	2.6	2.5	2.5	2.3	3.4	2.5	2.6	2.5	3.1	2.7	2.5	2.3
U	0.5	0.5	0.6	0.5	1.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5

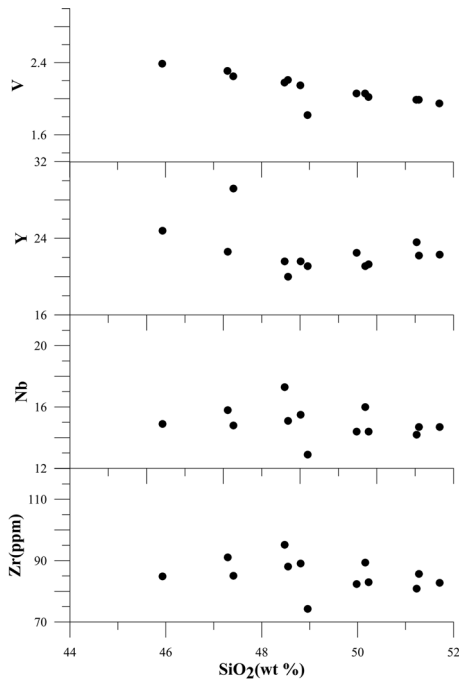


Fig. 5. Zr, Nb, Y and V vs. SiO₂ variation diagram for Udo Someori basalt.

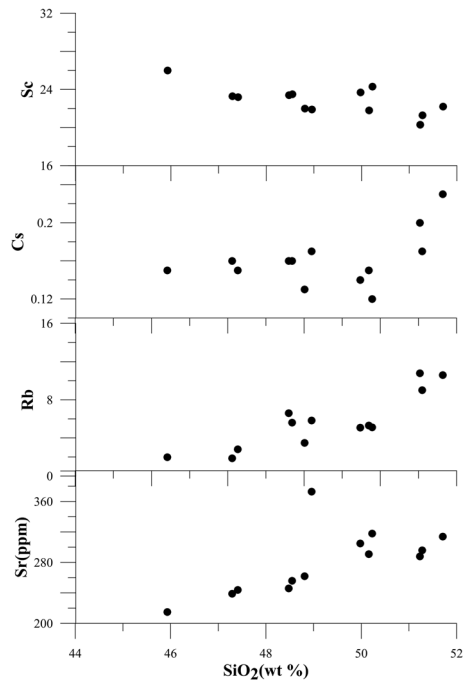


Fig. 6. Sr, Rb, Cs and Sc vs. SiO₂ variation diagram for Udo Someori basalt.

Nb(26.9-34.2 ppm), Ba(273-297 ppm)원소 함량(Lee, 1989)들은 제주도의 알칼리 용암류와 마찬가지로 비알

칼리 소머리현무암보다 그 함량이 2배 정도로 부화되어 나타나는 특징을 보인다(Fig. 6).

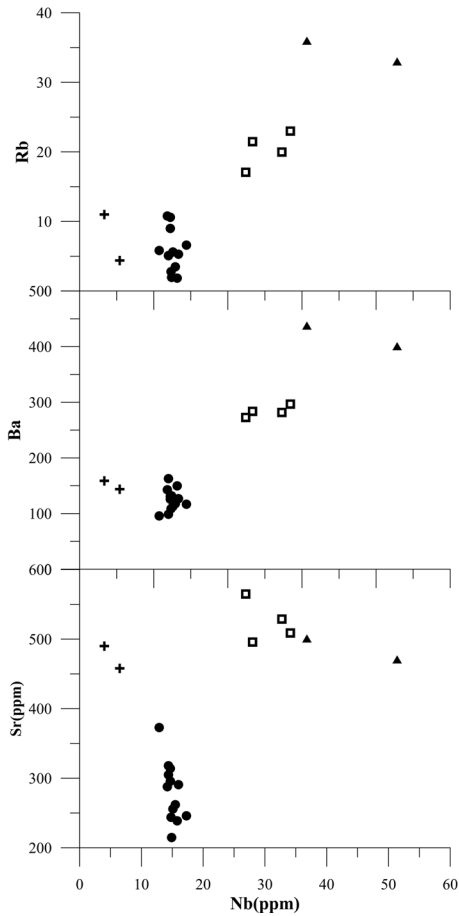


Fig. 7. Sr, Ba and Rb vs. Nb variation diagram for Udo Someori basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

관내부에서 생성되는 화산암을 비알칼리계열과 알칼리계열을 구분 짓는 지화학적특징은 Nb 등의 불호정 미량원소(incompatible trace element)의 거동으로 확인 된다(Pearce, 1982). Fig. 7에서 소머리현무암의 미량원소의 함량이 제주지역의 알칼리 계열과 전곡알칼리 현무암과 명확하게 구분됨을 보여주고 있다.

우도의 소머리현무암의 희토류원소 화학조성은 Table 3에 표시하였으며, 대부분의 시료들은 비슷한 함량을 보이나, 우도섬의 가운데인 중앙동에서 채취한 시료(udo-08)는 채취 위치가 다른 시료에 비해 제일 높고 항공사진에서 확인되는 용암의 흐름으로 볼 때, 소머리 용암류 중에 분출시기가 상대적으로 제일 마지막에 해당되는 시료로서, 다른 시료들에 비해 희토류의 함량이 약간 높은 경향을 보인다. 이는 시추코아에서 확인된 섬의 하부에 존재하고 있는 알칼리계열의 암석(Koh *et al.*, 2008)이나 마그마에 오염되었거나 분석 오차에 따른 결과일 것으로 보이나, 주원소와 미량원소 함량에서는 다른 시료들과는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 희토류 분석과정을 재확인할 필요가 있는 것으로 판단된다.

총희토류의 함량(Σ REE)은 소머리현무암이 76.3-96.8 ppm으로 추가령 전곡알칼리용암(115-273 ppm)이나 제주도 알칼리 용암(128-371 ppm)보다 낮은 값을 보이고 칼크-알칼리계열(calc-alkaline series)에 해당하는 연일현무암(43.8-65.0 ppm)보다는 높은 값을 보여주고 있다(Lee, 1989).

콘드라이트 값(Sun and McDonough, 1989)에 표준

Table 3. Rare earth element data of the basalt flows in the study area(unit in ppm)

No.	udo-01	udo-02	udo-03	udo-04	udo-05	udo-06	udo-07	udo-08	udo-09	udo-10	udo-11	udo-12	udo-13
La	12.4	13.0	12.2	13.1	12.0	11.6	11.0	23.1	9.5	14.7	14.6	12.0	13.4
Ce	27.8	27.5	27.3	28.3	25.4	28.1	26.0	33.5	23.6	29.4	33.1	27.2	28.8
Pr	3.8	3.9	3.7	3.8	3.5	3.7	3.5	6.2	3.2	4.2	4.5	3.6	3.9
Nd	16.5	17.2	16.0	16.9	15.0	16.3	15.7	25.5	14.0	18.7	19.6	16.1	17.8
Sm	4.9	4.8	4.6	4.6	4.2	4.7	4.6	7.3	4.2	5.2	5.6	4.7	5.0
Eu	1.7	1.7	1.6	1.7	1.5	1.7	1.7	2.2	1.6	1.9	2.0	1.7	1.7
Gd	5.0	5.1	4.8	4.9	4.8	4.9	5.0	7.1	4.6	5.6	5.7	4.9	5.4
Tb	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	1.2	0.8	1.0	1.0	0.8	0.9
Dy	4.5	4.5	4.3	4.4	4.2	4.3	4.5	6.2	4.2	5.0	5.0	4.4	4.7
Ho	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.2	0.8	1.0	1.0	0.9	0.9
Er	2.1	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.8	2.0	2.4	2.3	2.0	2.3
Tm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
Yb	1.7	1.8	1.6	1.7	1.5	1.7	1.7	2.2	1.6	1.9	1.9	1.7	1.8
Lu	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
Σ REE	82.7	84.1	80.2	83.8	76.3	81.3	78.1	119.3	70.5	91.8	96.8	80.5	87.1
La/Yb	4.8	4.8	5.1	5.2	5.3	4.7	4.4	7.1	4.1	5.1	5.3	4.8	5.0

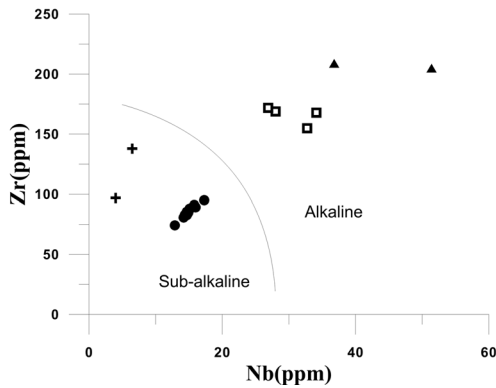


Fig. 8. Zr vs. Nb variation diagram for Udo Someori basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

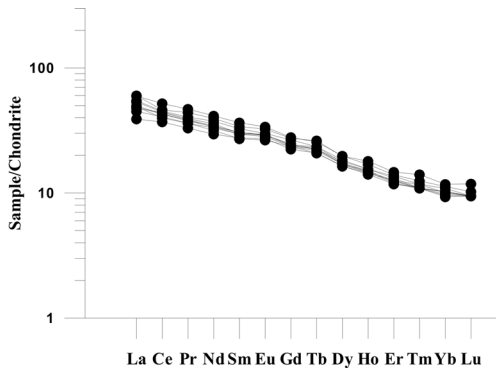


Fig. 9. Chondrite-normalized REE patterns for Someori basalt in Udo island. Normalization factors after Sun and Mcdonough(1989).

화한 희토류원소의 패턴은 경희토류(LREE)가 중희토류(HREE)에 비하여 부화되어 나타나는 알칼리 용암류보다 경희토류의 부화가 낮은 패턴을 나타낸다(Fig. 8).

희토류 원소의 분포는 (La/Yb)CN의 비가 4.1-5.3으로 추가령 전곡알칼리 용암류 10.4-15.7, 제주 알칼리 용암류 9.4에 비해 낮은 값을 가지는 걸로 보아서 쏄레이아이트 계열의 암석을 지시하고 있으며(Fig. 9), 판내부가 아닌 섭입대에서 생성된 연일현무암은 2.6-4.5로 낮은 값을 보인다(Lee, 1989).

5. 토 의

우도의 소머리현무암을 형성시킨 지구조적 환경을 알아보기 위하여 미량원소(Nb-Zr-Y)를 이용한 판별분석도(discrimination diagrams)에서 소머리현무암은 판내부의 쏄레이아이트 영역에 도시될 뿐만 아니라 제주

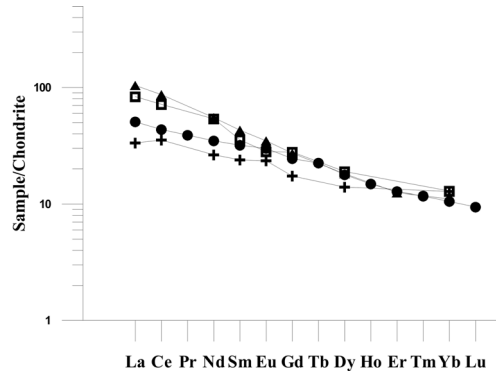


Fig. 10. Chondrite-normalized REE patterns for Udo Someori basalt, Jeongog and Jeju alkali basalts and Yeonil basalt. Normalization factors after Sun and Mcdonough(1989). Symbols are the same as in Fig. 2.

도의 알칼리용암류나 전곡의 알칼리 용암류와 확연히 구분된다(Fig. 10).

Ti-Zr-Sr와 Ti-Zr-Y 삼각도(Pearce and Cann, 1973)에서도 제주도와 전곡 알칼리계열과 포항지역의 연일현무암과 달리 판내부의 쏄레이아이트질 암류 영역에 도시되는 특징을 잘 보여준다(Fig. 11, 12).

이들 판별도에서 소머리현무암은 판내부의 서브알칼리계열 쏄레이아이트질 마그마(WPBT)이고 제주 알칼리용암과 전곡현무암은 판내부에서 근원되었지만 소머리용암류와는 달리 알칼리계열(WPBA)임을 지시하고 있다. 한편 연일현무암은 섭입대(subduction zone) 화산열도(VAB)에서 기원한 화산활동으로 해석된다.

우도 소머리현무암의 미량원소 함량을 대서양 중앙해령의 MORB의 값(Pearce, 1982)성분으로 표준화하여 거미 그림(spider diagram)에 도면화한 하였다(Fig. 13). 이 그림에서 우도의 쏄레이아이트질 용암류는 LILE (Large Ion Lithophile Element) 원소들은 상대적으로 부화되어 있고 반면에 고장력원소인 Zr과 Hf, Yb와 Sc의 뚜렷한 부이상(negative anomaly)을 보여주는 특징을 가지는데, 이러한 일부 고장력원소의 부이상대의 특징은 아프리카 동부의 Gregory rift의 용암류와 비슷한 패턴을 보여준다(Pearce, 1982).

Fig. 13은 소머리현무암을 제주도 및 추가령지역의 전곡 알칼리 현무암과 연일현무암을 함께 도시한 결과 LILE는 알칼리 현무암들이 소머리용암과 연일현무암에 비해 더 많이 부화되는 경향을 보이고 불호정성 미량원소들의 함량은 낮은 양상을 보이나, 연일현무암에서는 고장력원소중 Ta-Nb의 결핍을 보여주는 네커티브 곡선을 보여주는데 이러한 현상은 섭입대의 비알칼

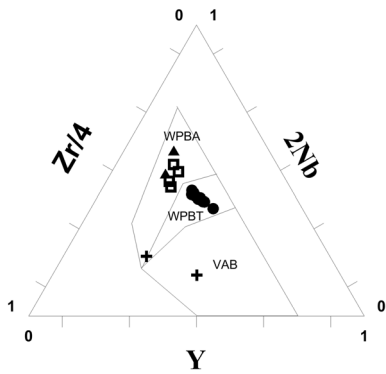


Fig. 11. Discrimination diagram using Nb, Zr and Y(Meschede, 1986). WPBA:within-plate alkali basalt. WPBT:within plate tholeiitic basalt. VAB:volcanic-arc basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

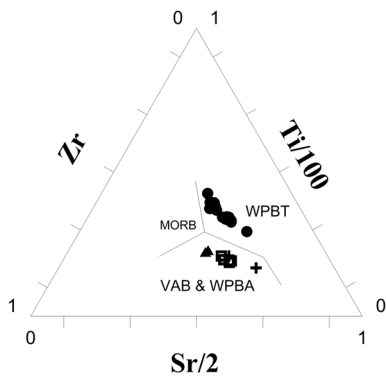


Fig. 12. Discrimination diagram using Ti, Zr and Sr(Pearce and Cann, 1973). WPBA:within-plate alkali basalt. WPBT:within plate tholeiitic basalt. VAB:volcanic-arc basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

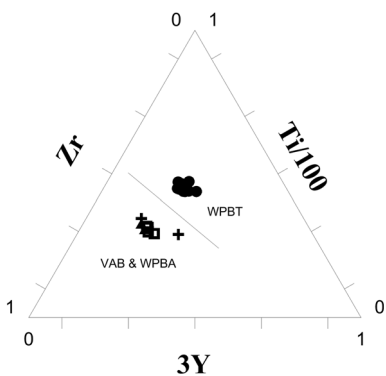


Fig. 13. Discrimination diagram using Ti, Zr and Y(Pearce and Cann, 1979). WPBA:within-plate alkali basalt. WPBT:within plate tholeiitic basalt. VAB:volcanic-arc basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

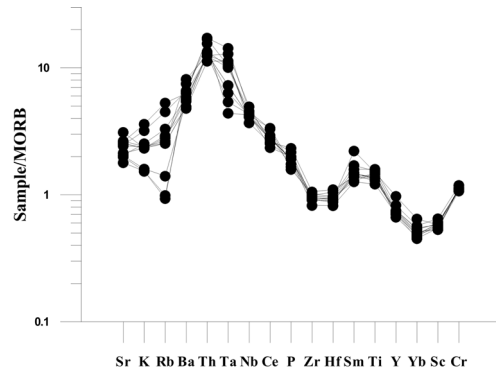


Fig. 14. Mid-ocean ridge basalt-normalized trace element patterns for Udo basalt flows. Normalized factors after Pearce(1982).

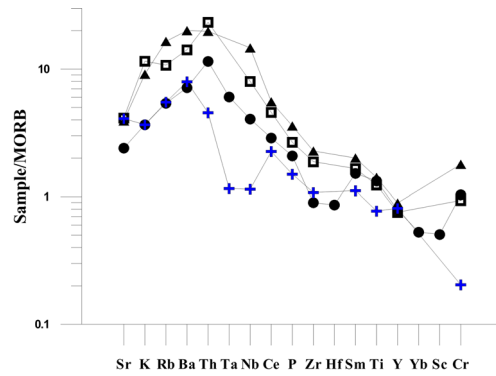


Fig. 15. Mid-ocean ridge basalt-normalized trace element patterns for Udo, Yeonil, Jeongog and Jeju basalts. Normalized factors after Pearce(1982). Symbols are the same as in Fig. 2.

리계열의 특징으로 WPBT와 IAT(Island Arc Tholeiite)와 판별 도구로 많이 이용한다(Lee, 1989).

Brenna *et al* (2012)는 섭입대를 따라 일어나는 규슈 화산대의 칼데라형 대규모 화산활동에 따른 구조적 확장과 응력의 변화가 제주도의 판내부의 화산활동을 야기한 것으로 해석하였고, Pearce and Stern (2013)은 섭입대의 화산대를 기준으로 전면부(fore-arc)쪽으로는 IAT(island arc tholeiite), 중앙부인 호상에서는 CAB(calc-alkali basalt), back-arc 지역에서는 칼크알칼리 내지 쏘레이아이트 성분의 BABB(back-arc basin basalt) 화산활동, 화산대와 보다 먼쪽에서는 판내부 화산활동(intraplate volcanism)의 특성을 가진다고 하였다.

따라서 우도에 분포하는 소머리현무암은 지각판 내부에서 일어나는 화산활동을 지시하고 있으므로 한반도의 제4기 이후의 화산활동은 현재 유라시아 대륙판 밑으로 섭입하고 있는 태평양판이나 필리핀해판의 해

양관으로 인해 형성된 화산대(volcanic arc)의 배후에서 일어난 판내부 화산활동으로 해석된다. 이는 마이오세(15 Ma) 이후에 동해의 확장과 더불어 해양판의 섭입이 활성화되면서 배후 분지의 확장으로 한반도는 섭입대로부터 영향을 받지 않는 지구조적 환경에 놓였음을 의미한다(Lee, 1989).

4. 결 론

제주도 동편의 부속섬인 우도에 대한 역사기록, 기존 연구 자료의 검토와 소머리현무암의 주성분원소, 미량원소, 희토류원소에 대한 지화학적 특성으로 유추한 마그마의 성인 및 지구조적 환경은 다음과 같다.

1. 우도는 섬의 대부분이 현무암질 용암대지를 이루는 일원회 분출에 의해 형성된 단성화산체로서 해저에서 초기 폭발성 화산활동에서 시작되고 마지막으로 용암분출로 섬 전체의 형태가 완성되었다.
2. 우도에 분포하는 암석의 화학적 구성성분의 특성은 소머리현무암류가 서브알칼리계열의 화산암류로서 쉘레이아이트질 현무암에 속한다.
3. 미량원소 및 희토류원소를 이용한 조구조 판별도를 도시한 결과, 우도의 현무암은 화산호에서 생성된 쉘레이아이트보다는 지각관 내부에서 생성된 쉘레이아이트의 영역에 도시되며 마이오세 말기 이후의 한반도는 해양판의 섭입 영향권을 받지 않는 지구조적 환경으로 변했다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원의 주요사업의 지원으로 이루어진 연구결과이며, 이 논문을 위하여 많은 도움을 주신 고상모박사, 이승렬박사, 김재곤박사께 감사드린다.

아울러 이 논문을 자세하게 검토해 주신 편집위원과 심사위원들께 심심한 사의를 표하고자한다.

References

Basaltic Volcanic Study Project (1981) Basaltic Volcanism in Terrestrial Planets. Pergamon Press, Inc., New York. 1286p.
 Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Nemeth, K. (2010) Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. Contributions to Mineralogy and Petrology, v.160, p.931-950.

Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R. (2012) Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. Lithos, v.148, p.337-352.
 Dalrymple, G.B. (1969) ⁴⁰Ar/³⁶Ar analyses of historic lava flows. Earth Planet. Sci. Lett. 6, 47-55.
 Doopedia (2010) Doosan Encyclopedia(<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1130240&cid=40942&categoryId=33281>; April 4, 2014)
 Hwang, S.K. (1992) Eruptive mechanisms and processes at Udo tuff cone, Udo island, Korea. Jour. Petrol Soc Korea, v.1, p.91-103.
 Hwang, S.K. (1993) One-cyclic Volcanic processes at Udo Crater, Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v.26, p.55-65.
 Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, v.8, p.523-548.
 Kelly, S. (2002) Excess argon in K-Ar and Ar-Ar geochronology. Chemical Geology, v.188, 1-22.
 Koh, J.S., Yun, S.H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.W. (2005) Petrology of the basalt in the Udo monogenetic volcano, Jeju Island. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.14, p.45-60.
 Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S. (2008) The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from bore holes in the eastern lowland of Jeju Island. Economic and Environmental Geology, v.41, p.93-113.
 Kokelaar, B.P. and Durant, G.P. (1983) The submarine eruption and erosion of Surtla(Surtsey), Iceland. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.19, p.239-246.
 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. Journal of Petrology, v.27, p.745-750.
 Lee, J.S. (1989) Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of South Korea; geodynamics implications on the East-Eurasian Margin. Thesis of Doctor degree, Orleans University. 349p.
 Lee, M.W. (1982) Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci Rep., Tohoku Univ., Ser., 315p.
 Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S. (1994) Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in Southern Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v.30, p.521-541.
 Meschede, M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-oceanic ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chemical Geology, v.56, p.207-218.
 Middlemost, E.A.K. (1989) Iron oxidation ratios, norms and the classification of the volcanic rocks. Chemical Geology, v.77, p.19-26.
 Ozawa, A., Tagami, T. and Kamata, H. (2006) Argon isotopic composition of some Hawaiian historical lavas. Chemical Geology, v.226, p.66-72.
 Park, J.B. and Kwon, S.T. (1996) Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea. Journal of Petrological Society of

- Korea, v.5, p.66-83.
- Park, J.B., Park, K.H., Cho, D.L. and Koh, G.W. (1999) Petrochemical classification of the Quaternary volcanic rocks in Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.35, p.253-264.
- Pearce, J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. in "Andesite", ed. Thorpe, R.S., p.525-548.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, v.19, p.290-300.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1979) Petrogenesis implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.69, p.33-47.
- Pearce, J.A. and Stern, R.J. (2013) Origin of Back-Arc Basin Magmas: Trace Element and Isotope Perspectives, in *Back-Arc Spreading Systems: Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions* (eds D. M. Christie, C. R. Fisher, S.-M. Lee and S. Givens), American Geophysical Union, Washington, D. C. doi: 10.1029/166GM06
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K. (1993) The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic con slope. *Sedimentology*, v.40, p.769-786.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In "Magmatism in the ocean basin", Geological Society Special Publication, v.42, p.313-345.
- Won, C.K. (1976) Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.12, 207-226.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K. (1993) Explanatory text of the geological map of Sungsan Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation. 104p.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Yun, S.H. (1995) Explanatory text of the geological map of Pyoseon Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation. 59p.
- Yoder, H.S. and Tilley, C.E. (1962) Origin of basaltic magma: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Journal of Petrology*, v.3, p.342-532.
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T. (1995) Development history of Cheju Island. *Bulletin of Chejudo Provincial Government*, v.98, p.148-164.
- Yoon, S., Jung C.Y., Song, S.T. and Yang, K.H. (2001) Volcanic debris avalanche and epiclastic deposits in the Seongeup area, Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, v.5, p.47-55.

2014년 7월 31일 원고접수, 2014년 8월 26일 1차수정,
2014년 11월 28일 게재승인