

통가열도 TA26 해저산의 모암변질과 원소분산

유봉철¹ · 최현수^{2*} · 고상모¹

¹한국지질자원연구원 해외광물자원연구실, ²한국지질자원연구원 해저지질연구실

Element Dispersion and Wallrock Alteration of TA26 Seamount, Tonga Arc

Bong Chul Yoo¹, Hunsoo Choi^{2*} and Sang-Mo Koh¹

¹Oversea Mineral Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Marine Geology Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

TA26 seamount, which is located at south part of Tonga arc, occurs widely hydrothermal plume and is area that sampled hostrock, hydrothermal ore and hydrothermal alteration rock for this study. Hostrocks are basalt and basaltic andesite. Altered rocks by hydrothermal solution consists of plagioclase, pyroxene, pyrite, ilmenite, amorphous silica, barite, smectite, iron sulfates, Fe-Si sulfates and Fe silicates. Gains and losses of major, trace and rare earth elements during wallrock alteration suggest that K₂O(+0.04~+0.45 g), SiO₂(-6.52~+10.56 g), H₂O(-0.03~+6.04 g), SO₄(-0.46~+17.54 g), S(-0.46~+13.45 g), total S(-0.51~+16.93 g), Ba(-7.60~+185078.62 g), Sr(-36.18~+3033.08 g), Ag(+54.83 g), Au(+1467.49 g), As(-5.80~+1030.80 g), Cd(+249.78 g), Cu(-100.57~+1357.85 g), Pb(+4.91~+532.65 g), Sb(-0.32~+66.59 g), V(-113.58~+102.94 g) and Zn(-49.56~+14989.92 g) elements are enriched from hydrothermal solution. Therefore, gained(enriched) elements(K₂O, H₂O, SO₄, S, total S, Ba, Sr, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, V, Zn) represent a potentially tools for exploration of sea-floor hydrothermal deposits from the Tonga arc.

Key words : Tonga arc, wallrock alteration, element dispersion, gain/loss, pathfinder

통가열도의 남단에 위치하는 TA26 해저산은 열수활동이 가장 활발한 것으로 알려진 해저산으로 열수플룸이 광범위하게 존재하며 열수광석 및 열수변질암이 채취된 지역이다. 이 지역에서 채취한 암석들은 현무암내지 현무암질 안산암이다. 열수용액에 의한 변질암석시료에서는 사장석, 휘석류, 황철석, 티탄철석, 비철정질 실리카, 중정석, 녹점토, iron sulfates, Fe-Si sulfates 및 Fe silicates 등이 산출된다. 모암변질시 열수작용에 의한 변질 암석의 주원소, 미량 원소 및 희토류원소 이득 및 손실을 계산하면, K₂O(+0.04~+0.45 g), SiO₂(-6.52~+10.56 g), H₂O(-0.03~+6.04 g), SO₄(-0.46~+17.54 g), S(-0.46~+13.45 g) 및 총 S(-0.51~+16.93 g)들이 모암변질시 이득되었다. 또한 미량원소들 중 특히 Ba(-7.60~+185078.62 g), Sr(-36.18~+3033.08 g), Ag(+54.83 g), Au(+1467.49 g), As(-5.80~+1030.80 g), Cd(+249.78 g), Cu(-100.57~+1357.85 g), Pb(+4.91~+532.65 g), Sb(-0.32~+66.59 g), V(-113.58~+102.94 g), 및 Zn(-49.56~+14989.92 g)들이 모암변질시 이득되었다. 따라서 이득된 주원소 및 미량원소의 종류 및 함량(K₂O, H₂O, SO₄, S, 총 S, Ba, Sr, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, V, Zn) 등을 지시원소로서 활용하면 통가열도 심해저 열수광상 탐사시 유용하게 이용될 수 있다.

주요어 : 통가열도, 모암변질, 원소분산, 이득/손실, 지시원소

1. 서 론

광상의 형성시 열수용액과 모암과의 반응에 의한 여러 물리-화학적 변화요소에 의해 모암변질광물, 광석광

물 및 투명광물들이 형성된다. 모암변질대의 종류 및 규모는 모암의 물성(모암의 화학조성, 광물조합, 모암의 투수성, 간극률, 흡수율) 및 열수용액의 조성(열수용액의 화학조성, 온도, 압력) 등에 좌우된다. 한 예로 모

*Corresponding author: hunsoo@kigam.re.kr

암의 간극률과 흡수율을 비교하면, 편마암(0.3~2.4, 0.1~0.8)은 유문암(1~7, 0.1~5.6) 및 석회암(0.8~27, 0.1~1.8)보다 간극률과 흡수율이 작아 열수변질대의 규모가 작게 나타난다. 모암내 열수 물질의 이동은 침투와 확산에 의해 일어난다. 침투는 열수 물질이 한 방향으로 멀리 이동되는 증거가 관찰될 때 질량이동의 주된 요소가 된다. 확산은 열수 물질이 양방향으로 이동되거나 고용체 광물이 분대 사이에 규칙적인 성분변화를 보일 때, 질량이동의 주된 요소가 된다(Hofmann, 1972). 실제로 대부분의 광장에서 침투와 확산이 동시에 일어나지만, 침투는 열수용액이 지나가는 열극에 한정되어 일어나고 확산은 비활성유체가 공극이 좋은 곳(암석의 공극률이 큰 것)에서 발생된다. 앞에서 설명한 조건들을 갖춘 암석은 화산기원의 암석으로 이것을 모암으로 하는 후생성 열수광상이 비교적 넓은 범위의 모암변질대가 일반적으로 관찰된다. 현장에서 모암변질대의 구별은 광물조합, 광물화학, 조직 및 색의 변화에 의해 식별되며 한 예로 호주에서 개발된 단파장 적외선 분광분석법이란 휴대용 기기를 이용하여 현장 및 실내에서 쉽게 모암변질대를 조사하기도 한다.

해저열수광상은 지속적 채광이 가능하여 살아있는 자원으로 호칭되기도 하며 얕은 부존 수심, 육지와의

근접성, 황화물 형태의 금속결합, 단위면적 당 높은 금속함량(금, 은, 아연, 구리 등) 등 개발에 유리한 여러 가지 장점을 갖추고 있어 가장 먼저 개발될 심해저 광물자원으로 부각되고 있다(KORDI, 2010).

TA26 해저산을 포함한 통가열도는 통가-커마덥 섭입대(Tonga-Kermadec subduction system)에 해당된다(Fig. 1). 이 섭입대는 태평양 지각판과 인도-호주 지각판이 만나서 형성된 섭입대로서 서태평양의 해양지각간 열도대(intraoceanic arc front)의 40%를 차지하는 가장 긴 섭입대이다(Massoth *et al.*, 2007). 이 섭입대의 북쪽은 동쪽으로부터 통가해구(Tonga Trench), 통가해령(Tonga Ridge), 토푸아열도(Tofua Arc), 라우분지(Lau Basin)와 라우해령(Lau Ridge)의 순서로 발달되어 있다. 통가해구는 남쪽으로 커마덥해구(Kermadec Trench)와 연결되며, 토푸아열도는 통가열도와 연결된다. 라우분지는 활동성 배호분지로서 북쪽이 넓고 남쪽으로 좁아지는 썩기형으로 발달하여 있다. 이 분지의 중앙부에는 두 개의 Spreading Center가 형성되어 있다.

따라서 이 연구에서는 통가열도 TA26 해저산에서 채취한 시료들을 대상으로 열수작용에 의한 모암변질 종류, 원소 분포 특성과 분산 원소의 종류, 분산유형 및 함량 등에 대한 연구를 수행함으로써 향후 이와 유사한 광상에 대한 탐광 및 탐사의 지침으로 활용할 수 있을 것이다.

2. 시료채취 및 분석방법

통가열도의 남단에 위치하는 TA26 해저산은 기존탐사에 의하면 열수활동이 가장 활발한 것으로 알려진 해저산으로 열수플룸이 광범위하게 존재하며 열수광석 및 열수변질암이 채취된 지역이다(Fig. 1). TA26 해저산의 정상부는 동쪽 화산추와 서쪽 칼데라로 구분되며 열수활동은 두 지역에서 모두 확인된다. TA26 해저산의 동쪽 화산추의 정상부에서는 열수변질대가 광범위하게 존재하는 열수분출구도 관찰된다. 이들 열수변질대는 암석의 틈을 따라 황색 침전물이 관찰되어 주변 기반암과는 잘 구분된다. 일부 변질대는 둔덕의 형태를 띠고 있으며 그 중심부에 열수분출구가 발달한다. TA26 해저산의 서쪽 칼데라에서는 칼데라 벽과 바닥이 만나는 경계에서 300~400 m에 이르는 범위에 걸쳐 열수분출구가 분포하고 있음이 확인되었다. 이들 열수분출구는 독립적으로 분포하거나 군집을 이루며 분포한다(KORDI, 2010). 이 지역을 대상으로 GTV(Grab

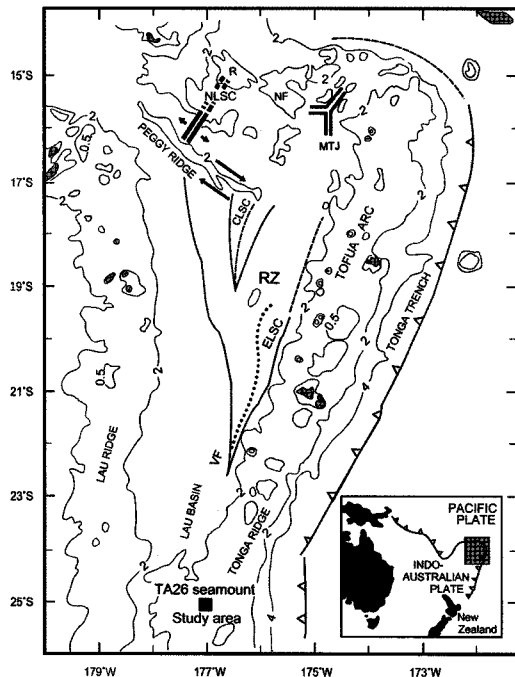


Fig. 1. Location map of the TA26 seamount, showing location and orientation of the Lau basin and Tonga ridge.

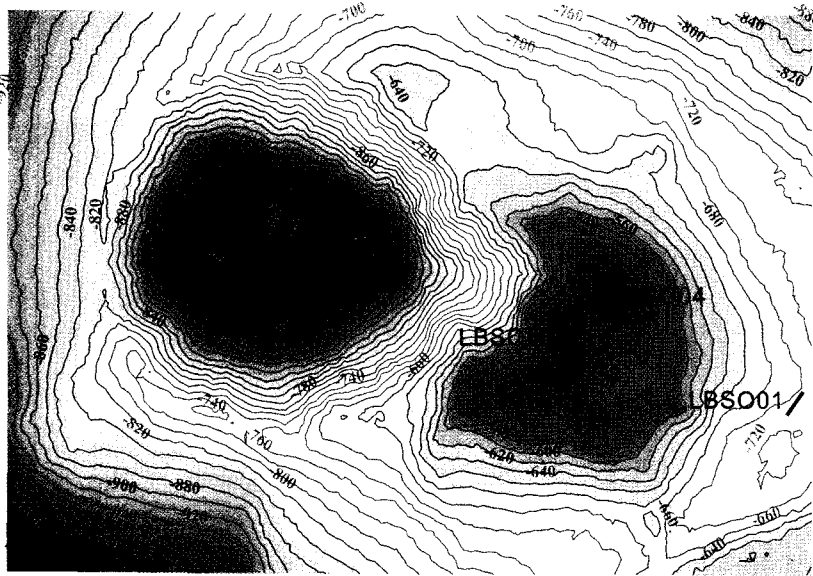


Fig. 2. Location map of samples from the TA26 seamount.

with AV camera)와 드래지(Dredge) 도구를 사용하여 붉은 갈색의 열수분출구 시료들을 다수 획득하였다. GTV의 그랩 상단에는 IXSEA사의 transponder(model: OCEANO RT 2500 light)가 설치되어 있어 채취하는 시료의 정확한 위치 자료를 제공한다. 이 장비는 한번 투하 시 약 3회의 그랩 개폐작동과 약 3시간 정도의 연속 사용이 가능하다. 드래지를 이용하여 채취된 시료들 중 일부는 모암이 다른 흑색 쇄설성 퇴적물의 입자간극을 황화광물이 충전하여 산출된다(KORDI, 2010). 이들 분출구 주변에서 채취한 시료들은 침니 형태, 광화작용과 모암이 함께 존재하는 괴상 형태 및 각력화 형태 등 여러 형태로 산출되며 일부 시료에서는 육안상 철수산화물과 비결정질 실리카는 관찰되나 황화광물은 관찰되지 않는 것도 있다(KORDI, 2010).

이들 채취된 시료들 중 열수작용에 의한 모암변질 관찰이 양호한 시료를 선택하였으며 그 선택된 시료는 LBSO ϕ 1 시료, LBSO ϕ 4 시료, GTV ϕ 7 시료 및 LBSO ϕ 3 시료이다(Figs. 2 and 3). LBSO ϕ 1 시료는 육안상 녹회색을 띠는 부분과 일부 적갈색을 띠는 부분이 관찰되며 현무암질 화산각력암을 함유한다. LBSO ϕ 4 시료는 육안상 일부에서 황화광물이 다량 관찰되며 변질된 부분에서는 녹회색내지 적갈색을 띤다. GTV ϕ 7 시료는 동쪽 화산추 남쪽 정상부의 수심 400 m 부근의 열수분출구(침니로부터 10 m 이상 떨어진 곳)에서 채취되었으며 채취 당시 상당한 고온을 유지하고 있었다. 채취 당시, 현무암의 변질물들은 퇴적물의 하

부에 분포하며 관찰되는 황철석은 주로 퇴적물 구성입자의 경계부를 따라 산출된다. GTV ϕ 7 시료가 채취된 지점에서는 다양한 형태의 암석과 암석 조각들이 채취되었으나 침니 형태의 암석은 채취되지 않았다. LBSO ϕ 3 시료는 육안상 일부 녹회색을 띠는 부분과 일부 적갈색을 띠는 부분이 관찰되며 은정질(aphyric) 조직도 관찰되는 현무암질 용회암으로 구성된다(KORDI, 2010).

TA26 해저산일대에서 채취한 시료들을 대상으로 모암과 열수변질 시료에 대한 산출광물의 종류, 공생관계, 화학조성 및 원소분산 등을 규명하기 위하여 육안 관찰, 현미경 관찰, X-선 회절분석, EPMA분석(기초과학지원연구원 전주센터 Shimadzu EPMA 1600, WDS/EDS) 등을 실시하였다. 그리고 캐나다 Actlabs에서 주원소, 미량원소, 희토류원소, SO₄, Cl, F, S^{total}, C^{total} 및 H₂O+/- 분석은 ICP, INAA, ICP-MS, XRF, ISE, Infrared, Coulometry와 Gravimetric등을 이용하였다. 분석시 분석오차는 0.001~0.01%(주원소), 0.05~5 ppm(미량원소), 0.005~0.05 ppm(희토류원소), 0.3%(SO₄), 0.01%(Cl, F, S^{total}, C^{total}) 및 0.1%(H₂O+/-)이다.

3. 결 과

3.1. 모암

TA26 해저산일대에서 채취한 시료들 중 열수작용에 의한 모암변질 관찰이 양호한 시료인 LBSO ϕ 1-1 시료,

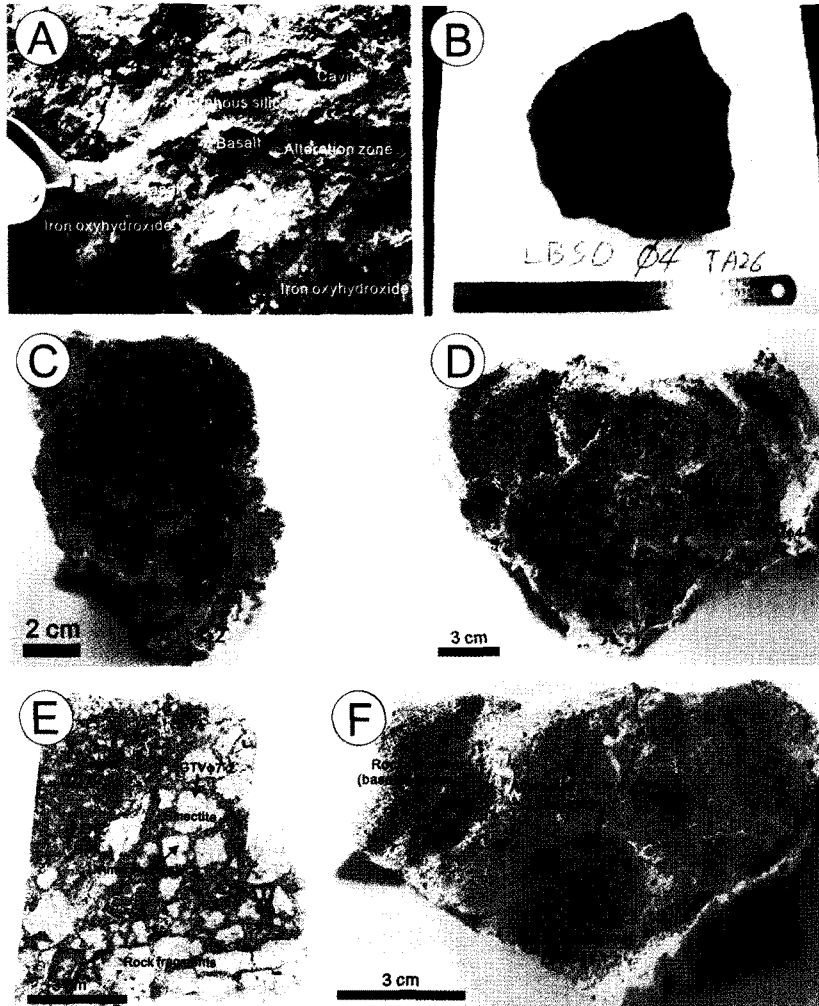


Fig. 3. Photographs of hostrock and wallrock alteration samples from the TA26 seamount. (A) Scope of wallrock alteration, iron oxyhydroxide and amorphous silica of basalt. (D) Slab of basalt. (C) and (F) Close-up of wallrock alteration of basalt and basaltic andesite. Sample numbers mean parts of geochemical analysis.

LBSO ϕ 4 시료 및 LBSO ϕ 3-1 시료들은 변질이 전혀 받지 않은 암석들이 관찰된다(Fig. 3A, B, C and E). 이 암석들은 육안상 암흑색, 암녹색내지 녹회색을 띠며 매우 치밀하고 많은 작은 기공들이 존재하며 아가력 내지 각력화되어 있다(Fig. 3A-C, F). 이 암석들은 육안상 유백색의 사장석 결정이 관찰되는 것도 일부 있으나 대부분 석기로만 구성되는 응결질 조직이 관찰되는 현무암으로 구성된다. 현미경하에서 이 암석들은 대부분 결정과 기질로 구성된다. 결정으로 산출되는 광물은 사장석 및 휘석류 등이며 석기로 산출되는 광물은 대부분 사장석이 산출된다(Fig. 4A). 사장석은 여러 입경으로 산출되며 산출형태는 대부분이 직사각형으로

산출된다. 휘석류는 정방휘석과 사방휘석으로 산출되며 그 산출빈도는 거의 비슷하다. 이 휘석류는 여러 입경으로 산출되며 일부 사장석 결정과 함께 산출된다. 또한 티탄철석 및 자철석은 소량 현미경하에서 관찰된다. X선 회절분석과 EPMA 분석 결과, 사장석은 아회장석(bytownite) 또는 조회장석(labradorite)으로 구성되며 휘석류는 피저나이트(pigeonite)와 셀라이트(salite)으로 구성된다.

이들 암석에 대한 화학조성을 알아보기 위해 캐나다 Actlabs에 의뢰하여 분석한 결과는 Table 1 및 2와 같다. Table 1과 2에서 보는 것과 같이, 이 주원소 자료 중 SiO₂에 대한 Na₂O+K₂O 함량을 가지고 IUGS가

Table 1. Major elements (wt.%) of hostrock and altered rocks from TA26 seamount from the Tonga arc

Sample No.	LBSOφ1-1	LBSOφ1-2	LBSOφ4-2	GTVφ7-1	GTVφ7-2	LBSOφ3-1	LBSOφ3-2
SiO ₂	45.89	40.17	45.95	46.34	37.44	54.85	58.87
TiO ₂	0.98	1.00	0.89	1.09	0.65	1.21	1.37
Al ₂ O ₃	15.91	16.45	14.32	16.94	9.94	15.07	14.58
Fe ₂ O ₃ *	13.84	14.51	11.44	9.97	9.94	9.48	6.93
MnO	0.21	0.21	0.11	0.05	0.06	0.14	0.09
MgO	6.40	8.04	2.55	2.32	1.43	2.73	1.98
CaO	9.29	7.87	4.73	1.66	0.48	9.89	8.32
Na ₂ O	2.25	2.35	2.74	1.81	1.12	4.54	4.88
K ₂ O	0.17	0.21	0.44	0.46	0.41	0.45	0.60
P ₂ O ₅	0.11	0.21	0.08	0.02	0.01	0.10	0.11
H ₂ O ⁺	2.20	4.70	4.20	4.60	3.00	0.60	0.60
H ₂ O ⁻	1.10	2.70	0.90	5.10	3.20	0.40	0.50
CO ₂	0.18	0.39	0.03	0.03	0.08	0.08	0.06
SO ₄	1.00	2.10	10.70	2.70	12.30	0.90	0.50
LOI	3.77	9.94	16.00	15.65	16.11	1.75	1.75
Total	98.81	101.00	99.26	96.31	77.59	100.20	99.47
Rock type & discription	Basalt Blackish gey Matrix	Altered rock Brown Matrix	Altered rock White Matrix	Altered rock White Matrix	Altered rock White Pebble	Basaltic andesite Blackish gey Pebble	Altered rock Greenish white Pebble & matrix

*Total Fe as Fe₂O₃

Table 2. Minor elements (ppm) of hostrock and altered rocks from TA26 seamount from the Tonga arc

Sample No.	LBSOφ1-1	LBSOφ1-2	LBSOφ4-2	GTVφ7-1	GTVφ7-2	LBSOφ3-1	LBSOφ3-2
S*	0.36	0.71	7.73	8.45	9.16	0.60	0.16
S ^{total} *	0.41	0.79	7.88	8.26	11.50	0.65	0.16
C ^{total} *	0.04	0.12	<0.01	0.02	0.03	<0.01	<0.01
F*	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
Cl*	0.25	0.45	0.31	0.39	0.42	0.29	0.38
Ag	<0.5	<0.5	<0.5	10.40	36.70	<0.5	<0.5
Au**	<1.0	<1.0	<1.0	293.00	974.00	12.00	18.00
As	8.00	24.00	2.00	743.00	689.00	7.00	10.00
Ba	66.00	73.00	92.00	6715.00	122800.00	118.00	125.00
Be	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Bi	0.20	0.40	0.20	<0.1	<0.1	0.10	0.60
Br	7.40	13.90	9.80	14.60	15.00	11.40	15.00
Cd	<0.5	<0.5	<0.5	7.90	166.00	<0.5	<0.5
Cu	180.00	206.00	232.00	271.00	1020.00	241.00	159.00
Co	81.10	53.40	46.20	56.00	22.00	68.70	55.90
Cr	6.30	7.60	3.80	7.80	10.20	10.50	8.10
Cs	<0.1	<0.1	<0.1	1.00	1.00	<0.1	0.10
Ga	17.00	15.00	16.00	19.00	18.00	20.00	19.00
Ge	1.60	1.30	1.30	0.90	1.10	1.80	1.90
Hg	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	8.00	<1.0	<1.0
In	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	<0.1
Ir**	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Mo	<2.0	<2.0	<2.0	13.00	29.00	2.00	<2.0
Ni	14.00	18.00	9.00	14.00	7.00	10.00	10.00
Pb	<5.0	12.00	9.00	598.00	226.00	<5.0	17.00

Table 2. Continued

Sample No.	LBSO ϕ 1-1	LBSO ϕ 1-2	LBSO ϕ 4-2	GTV ϕ 7-1	GTV ϕ 7-2	LBSO ϕ 3-1	LBSO ϕ 3-2
Sb	0.20	0.60	<0.1	28.10	44.30	0.50	0.20
Se	<0.5	<0.5	16.30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	<1	<1	<1	<1	<1	1.00	1.00
Sr	216.00	247.00	375.00	200.00	2155.00	496.00	584.00
V	473.00	387.00	484.00	528.00	382.00	481.00	416.00
W	129.00	49.00	53.00	29.00	36.00	123.00	69.00
Zn	87.00	93.00	34.00	2000.00	>10000.0	42.00	41.00
Rb	2.00	2.00	2.00	6.00	5.00	1.00	2.00
Tl	<0.05	0.18	0.05	16.90	13.80	0.05	<0.05
Th	0.19	0.18	0.13	0.18	0.08	0.19	0.20
U	0.60	0.60	<0.1	9.50	14.30	<0.1	0.70
Hf	1.00	1.10	0.90	1.20	0.70	1.20	1.40
Zr	36.00	33.00	28.00	38.00	22.00	39.00	44.00
Nb	0.40	0.30	<0.2	1.40	<0.2	0.20	0.30
Ta	3.30	2.90	2.10	2.60	2.00	3.60	2.30
Sc	48.50	47.60	44.40	53.00	31.90	48.10	45.70
Y	16.00	18.00	12.00	10.00	5.00	25.00	27.00
La	2.27	2.25	1.79	1.10	1.85	2.27	2.43
Ce	6.22	6.10	5.46	2.23	2.11	6.99	7.45
Pr	1.01	1.02	0.91	0.37	0.27	1.23	1.31
Nd	5.20	5.40	4.59	1.99	1.24	6.73	6.99
Sm	1.80	1.87	1.62	0.81	0.72	2.61	2.88
Eu	0.69	0.72	0.54	0.25	0.69	1.01	1.09
Gd	2.33	2.39	1.90	1.15	1.28	3.44	3.78
Tb	0.48	0.50	0.38	0.26	0.20	0.73	0.79
Dy	3.22	3.46	2.60	1.83	1.19	5.16	5.55
Ho	0.65	0.70	0.54	0.41	0.26	1.03	1.12
Er	1.93	2.06	1.55	1.28	0.85	2.92	3.23
Tm	0.30	0.32	0.24	0.21	0.13	0.45	0.48
Yb	2.02	2.21	1.63	1.53	0.95	3.06	3.18
Lu	0.32	0.35	0.27	0.26	0.16	0.49	0.48
Rock type & discription	Basalt Blackish gey Matrix	Altered rock Brown Matrix	Altered rock White Matrix	Altered rock White Matrix	Altered rock White Pebble	Basaltic andesite Blackish gey Pebble	Altered rock Greenish white Pebble & matrix

*wt.%, **ppb

제시한 암석 분류그림(Lebas and Streckeisen, 1991)에 도시하면 현무암과 현무암질 안산암에 도시되며 Winchester and Floyd(1977)이 제시한 Zr/TiO₂-Nb/Y 다이어그램에 도시하면 subalkaline 현무암에 도시된다. 이들 암석에 대한 Meschede(1986)가 제시한 Nb-Zr-Y 다이어그램에 도시하면 화산열도현무암(volcanic arc basalts)에 도시된다. 또한 주원소 자료를 가지고 CIPW norm 계산하면, 이들 암석의 구성광물은 석영 1.6~6.3%, 정장석 1.0~2.7%, 사장석 51.9~57.8%, 휘석류 22.3~30.4%, 불투명 광물 8.7~9.7%, 인회석 0.2% 및 방해석 0.2~0.4%로써 주로 사장석과 휘석류

로 구성된다.

3.2. 모암변질

TA26 해저산일대에서 채취한 시료들 중 열수작용에 의한 모암변질 관찰이 양호한 시료인 LBSO ϕ 1-2 시료, LBSO ϕ 4-2 시료, GTV ϕ 7-1, GTV ϕ 7-2 및 LBSO ϕ 3-2 시료들은 각력으로 존재하는 현무암 및 현무암질 안산암 암편이 남아 있는 부분, 약하게 변질되어 있는 부분, 보통 변질되어 있는 부분 및 심하게 변질되어 있는 부분이 관찰된다(Fig. 3A, C-F). 이들 시료에서는 현무암으로 많은 것들이 각력 내지 아각력화

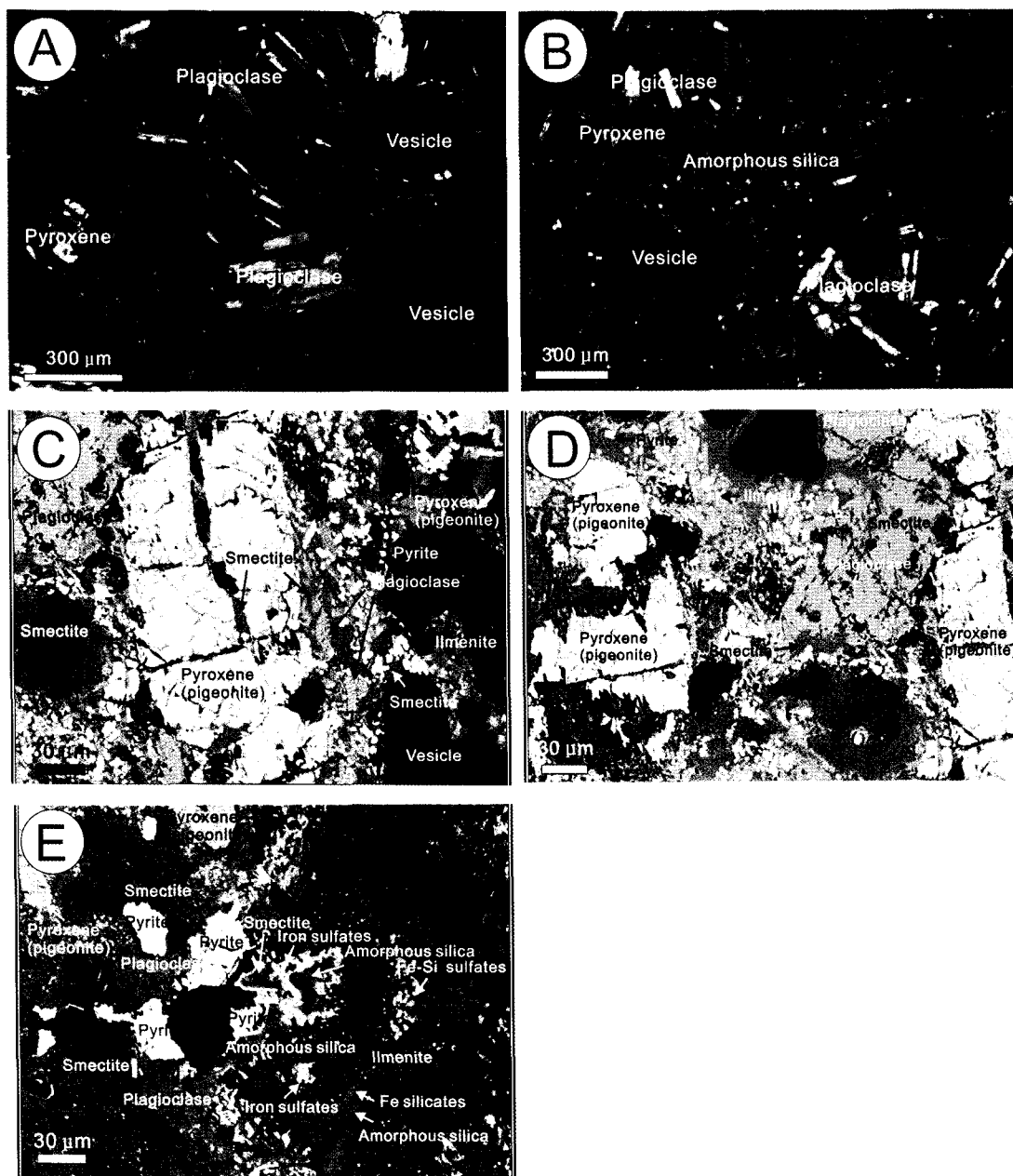


Fig. 4. Microphotographs taken in transmitted light and back-scattered images of EPMA of hostrock and wallrock alteration from TA26 seamount. (A) Plagioclase and pyroxene of basalt. (B) Plagioclase and pyroxene are replaced by mainly amorphous silica in the wallrock alteration. (C) and (E) Plagioclase and pyroxene are replaced by mainly smectite, amorphous silica, Fe silicates and Fe-Si sulfates in the wallrock alteration showing pyrite and iron sulfates.

되어 있으며 그 사이를 황철석과 맥석광물(비결정질 실리카, 중정석(?)) 등이 관찰된다(Fig. 3A). 이 시료에서 흰색의 변질물은 모암인 현무암이 완전히 변질된 것으로 주로 점토광물로 구성된다(Fig. 3D-F). 광석광물은 일부 육안상 주로 황철석이 관찰되며 다른 광물의 관

찰은 힘들다. 황철석은 육안상 단결정으로 산출되며 미립내지 중립 정도이며 망상으로 황철석이 주로 산출된다(Fig. 3E).

변질대 부분에서는 육안 관찰상 유백색, 녹색, 황갈색내지 일부 암녹색을 띠며 결정은 관찰되지 않는다

(Fig. 3A, C-F). 현무암 암편은 대부분 유백색으로 변질된 부분에선 단결정질이 관찰되며 이는 비결정질 실리카로 구성된다. 현미경 관찰시 대부분의 변질암석시료에서는 사장석, 휘석류, 녹점토(smectite), 비결정질 실리카, 황철석, 티탄철석, 함철 황산염광물(iron sulfates), 함철-규소 황산염광물(Fe-Si sulfates) 및 함철 규산염광물(Fe silicates) 등이 산출된다(Figs. 3D-E and 4B-E). 사장석은 녹점토화작용 및 비결정질 규화작용에 의하여 녹점토 및 비결정질 실리카 산점상으로 잔존물로 변질정도에 따라 다양한 입경으로 산출된다(Fig. 4B-E). 휘석류는 일부 녹점토화작용에 의해 변질되어 관찰되나 사장석에 비해 변질되지 않고 남아 있다(Fig. 4C-E). 녹점토는 결정 및 석기로 산출되는 사장석의 주변부를 따라 산출되며 일부는 휘석류의 간극을 따라 산출되기도 한다(Fig. 4C-E). 녹점토는 사장석의 주변부를 따라 녹점토화작용이 주로 관찰되며 일부 사장석은 서로 다른 화학조성을 갖는 녹점토에 의해 변질되어 산출되는 것도 관찰된다. 비결정질 실리카는 X선 회절 분석에 의한 검출이 되지 않으며 WDS 분석시 SiO_2 99.88 wt.%만 검출된다. 이 비결정질 실리카는 모암변질암석내에 산출되는 대부분의 광물과 함께 산출되며 일부는 함철 황산염광물 및 함철 규산염광물 주변부를 따라 산출되기도 한다(Fig. 4B-E). 황철석은 가장 많이 산출되는 황화광물 중의 하나이며 변질대내에서 산출빈도 및 산출량이 많다. 이 광물의 입경은 다양하며 모든 변질광물과 함께 산출된다(Fig. 4C-E). 티탄철석은 황철석과 더불어 산출빈도와 산출량이 많으며 변질대내 다양한 입경 형태로 산점상으로 산출된다(Fig. 4C-E). 함철 황산염광물은 녹점토, 비결정질 실리카, 티탄철석, 함철-규소 황산염광물 및 함철 규산염광물과 함께 산출되며 WDS 분석시 화학조성은 FeO 58.83 wt.%, SO_3 37.25 wt.%와 소량 K_2O 2.93 wt.%를 갖는다(Fig. 4E). 함철-규소 황산염광물은 녹점토, 비결정질 실리카, 티탄철석, 함철 황산염광물 및 함철 규산염광물과 함께 산출되며 WDS 분석시 화학조성은 FeO 41.26 wt.%, SiO_2 24.61 wt.%, SO_3 27.96 wt.%와 소량 K_2O 2.81 wt.%, Na_2O 2.36 wt.%를 갖는다(Fig. 4E). 함철 규산염광물은 녹점토, 비결정질 실리카, 티탄철석, 함철-규소 황산염광물 및 함철 황산염광물과 함께 산출되며 WDS 분석시 FeO 및 SiO_2 만 검출된다(Fig. 4E).

3.3. 화학조성 및 원소분산

모암(LBSO ϕ 1-1 시료, LBSO ϕ 3-1 시료)내 원소들의

함량을 살펴보면, H_2O 함량은 1.00~3.30 wt.%, CO_2 함량은 0.08~0.18 wt.%, SO_4 함량은 0.90~1.00 wt.% 및 LOI 함량은 1.75~3.77 wt.%를 갖는다(Table 1). 또한 S 함량은 0.36~0.60 wt.%, 총 S 함량은 0.41~0.65 wt.%, 총 C 함량은 <0.01~0.04 wt.%, F 함량은 <0.01 wt.% 및 Cl 함량은 0.25~0.29 wt.%로써 H_2O 및 SO_4 함량이 다소 높게 나타난다(Tables 1 and 2).

이 암석내의 친석원소들 중 불호정성 원소(incompatible element)에 대한 해양열도 현무암(ocean island basalts)으로 표준화한 함량을 살펴보면(Sun and McDonough, 1989), 이 암석들내 Ta 원소는 부화되어 있으나 다른 불호정성 원소들(Cs, Ba, Rb, Th, Nb, K, Sr, Zr, Hf)은 상대적으로 결핍된 특징을 보여준다. 이들 현무암 및 현무암질 안산암내에 미량원소 함량을 살펴보면, Ag 함량은 <0.5 ppm, Au 함량은 <12 ppb, As 함량은 7~8 ppm, Ba 함량은 66~118 ppm, Cd 함량은 <0.5 ppm, Cu 함량은 180~241 ppm, Co 함량은 68.7~81.1 ppm, Hg 함량은 <1.0 ppm, Mo 함량은 <2.0 ppm, Ni 함량은 10~14 ppm, Pb 함량은 <5.0 ppm, Sb 함량은 0.2~0.5 ppm, Se 함량은 <0.5 ppm, Sn 함량은 <1.0 ppm, Sr 함량은 216~496 ppm, V 함량은 473~481 ppm, W 함량은 123~129 ppm, Zn 함량은 42~87 ppm, Tl 함량은 <0.05 ppm, U 함량은 <0.6 ppm, Zr 함량은 36~39 ppm, Nb 함량은 0.2~0.4 ppm, Ta 함량은 3.3~3.6 ppm, Sc 함량은 48.1~48.5 ppm, Y 함량은 16~25 ppm를 갖는다(Table 2). 이들 미량원소에 대한 평균 해양 현무암내 미량원소 함량과 비교할 때, Au, Ba, Cu, Co, Sr 및 V 함량은 높고 U, Zr 및 Y 원소들의 함량은 낮다. 또한 이들 미량원소에 대한 해양열도 현무암(ocean island basalts)의 값과 비교할 때 다소 낮은 값을 갖는다(Table 2). 이 암석내의 희토류원소 함량에 대한 해양열도 현무암(ocean island basalts)으로 표준화한 값들을 살펴보면 경희토류 원소들은 상대적으로 결핍된 특징을 보여주나 중희토류 원소들은 상대적으로 부화된 특징을 보여준다. 그러나 평균 해양 현무암내 미량원소 함량과 비교할 때 이들 암석내 REE 원소들의 함량은 낮다.

변질암석내 주원소, 미량원소 및 희토류원소들의 함량을 살펴보기 위해 LBSO ϕ 1-2 시료, LBSO ϕ 4-2 시료, GTV ϕ 7-1 시료, GTV ϕ 7-2 시료 및 LBSO ϕ 3-2 시료에 대해 분석하였다(Tables 1 and 2; Fig. 3). 이들 Table에서 보는 것과 같이, 열수작용에 의한 모암변질에 의하여 시료에 따라 주원소 및 미량원소의 종류

및 함량 변화가 크다. SiO₂ 함량은 모암내 원소의 함량과 비교할 때 변화 폭이 크며 Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO 및 Na₂O 함량은 전반적으로 모암내 이들 원소의 함량과 비교할 때 낮은 값을 갖는다. K₂O 함량은 모암내 원소의 함량과 비교할 때 전반적으로 높은 값을 갖는다(Table 1). 또한 변질암석내 H₂O 함량은 1.00~3.30 wt.%, CO₂ 함량은 0.08~0.18 wt.%, SO₄ 함량은 0.90~1.00 wt.% 및 LOI 함량은 1.75~3.77 wt.%, S 함량은 0.36~0.60 wt.%, 총 S 함량은 0.41~0.65 wt.%, 총 C 함량은 <0.01~0.04 wt.%, F 함량은 <0.01 wt.% 및 Cl 함량은 0.25~0.29 wt.%로써 모암내 이들 원소의 함량보다 높으며 특히, H₂O, SO₄, S, 총 S 및 Cl 함량이 높게 나타난다(Tables 1 and 2). 육안상 황갈색 변질대는 모암 현무암에 비해 Fe₂O₃, MgO, H₂O, CO₂ 및 SO₄ 함량이 증가하고 SiO₂ 함량은 감소한다. 육안상 유백색 및 녹백색을 띠는 변질대는 K₂O, H₂O, SO₄ 함량은 증가하고 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO 및 Na₂O 함량은 감소한다. 특히, 현무암의 암편이 완전히 변질된 부분(GVT_φ7-2)과 기질부분(GTV_φ7-1)에서 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO 및 Na₂O 함량이 현저히 감소하고 H₂O 및 SO₄ 함량이 현저히 증가됨을 알 수 있다(Table 1).

친석원소들중 불호정성 원소에 대한 모암으로 표준화한 함량을 살펴보면, 모암변질에 의한 변질암석내 Ba, Sr 및 K 원소는 모든 시료에서 부화되어 있으며 일부 불호정성 원소들(Cs, Rb, Nb, Zr, Hf)은 변질암석에 따라 부화와 결핍된 특징을 보여주고 Ta 및 Th 원소는 결핍된 특징을 보여준다(Table 2). 이들 변질암석내 미량원소 함량을 살펴보면, Ag 함량은 <0.5~36.7 ppm, Au 함량은 <1~974 ppb, As 함량은 2~743 ppm, Ba 함량은 73~122800 ppm, Bi 함량은 <0.1~0.6 ppm, Br 함량은 9.8~15.0 ppm, Cd 함량은 <0.5~166 ppm, Cu 함량은 159~1020 ppm, Hg 함량은 <1.0~8.0 ppm, Mo 함량은 <2.0~29 ppm, Ni 함량은 7.0~18.0 ppm, Pb 함량은 9.0~598 ppm, Sb 함량은 <0.1~44.3 ppm, Se 함량은 <0.5~16.3 ppm, Sr 함량은 200~2155 ppm, Zn 함량은 34~>10000 ppm, Tl 함량은 <0.05~16.9 ppm, U 함량은 <0.1~14.3 ppm를 갖는다(Table 2). 이들 미량원소에 대해 모암내 미량원소 함량과 비교할 때, Ag, Au, As, Ba, Cd, Cu, Mo, Pb, Sb, Se, Sr, Zn, Tl 및 U 원소들의 함량 변화는 변질암석시료에 따라 큰 폭으로 존재한다(Table 2). 이 변질암석시료내의 희토류원소 함량에 대해 모암으로 표준화한 값들을 살펴보

면 모든 희토류원소들은 상대적으로 결핍된 특징을 보여준다(Table 2).

5. 토 론

TA26 해저산일대에서 채취한 암석들은 현무암내지 현무암질 안산암이다. 이들 암석은 결정으로 사장석 및 휘석류로 산출되며 석기는 대부분 사장석으로 산출되며 사장석의 조성은 아회장석 또는 조회장석이며 휘석류는 피저나이트와 셀라이트로 구성된다. Stoffers *et al.* (2006)에 의하면 이 해저화산은 3.5×2.5 km 정도의 칼데라 규모를 가지며 괴상 용암류로 구성되며 이 화산에서 채취한 14개의 암석에 대한 화학분석 결과 현무암내지 현무암질 안산암에 해당한다고 보고하였다. Hekinian *et al.* (2008)에 의하면 통가열도내 화산칼데라들은 괴상 또는 다공질 용암으로 산출되며 안산암내지 데사이트로 구성된다. 이들 암석은 주로 피저나이트와 셀라이트 휘석류, 중성장석(andesine)-조회장석에서 아회장석의 조성을 갖는 사장석으로 구성되며 이들 암석들은 칼데라평원하부에 위치한 마그마 챔버내에서 결정-액체 분별작용(crystal-liquid fractionation)을 지속한 후에 분출되어 형성된 것들이다(Hekinian *et al.*, 2008).

TA26 해저산일대에서 채취한 시료인 LBSO_φ1-2 시료, LBSO_φ4-2 시료, GTV_φ7-1, GTV_φ7-2 및 LBSO_φ3-2 시료들은 열수작용에 의한 모암변질 및 황화광물이 관찰된다. 이들 시료에서는 사장석, 휘석류, 황철석, 티탄철석, 비결정질 실리카, 중정석, 녹점토, 합철 황산염광물, 합철-구소 황산염광물 및 합철 규산염광물 등이 산출된다. 주 구성광물로 산출되는 사장석과 휘석류는 녹점토화작용 및 비결정질 규화작용에 의하여 주로 녹점토 및 비결정질 실리카로 변질되어 산출된다. 채취 당시 대부분의 시료들은 저온의 열수분출에 의해 형성되었으나 일부 GTV_φ7-1와 GTV_φ7-2 시료는 상당한 고온을 유지하고 있었다(KORDI, 2010). TA26 해저산에는 두 개의 열수지역이 존재하며 이 열수 지역에서 관찰되는 광물은 합철 옥시수산화물(Fe-oxyhydroxide), 중정석, 경석고, 점토광물, 비결정질 실리카, Fe-산화물, Mn-산화물, 황철석, 백철석, 섭아연석, 황동석, 섭유아연석(wurtzite), 방연석 및 As-sulphides 등이다(Stoffers *et al.*, 2006; Schwarz-Schampera *et al.*, 2007). 이들 광물들은 최대 온도 270°C 및 pH 4.6~6.1의 열수용액이 해저로 상승하면서 비등에 의한 상분리, 해수와의 혼입(mixing)에 의한 희석 및 냉각과

탄화수소의 산화작용에 의해 형성된 것으로 보고하였다(Stoffers *et al.*, 2006; Schwarz-Schampera *et al.*, 2007). 또한 Mottl and Holland (1978)에 의하면 녹점도는 현무암의 변질시 일반적인 변질광물이며 200°C에서 500°C까지 모든 온도에서 변질광물로써 산출된다.

모암변질시 열수용액과 모암사이에는 성분의 이동에 의해 이득/손실이 존재한다. 일반적으로 열수용액과 모암사이의 열수변질시 부동(immobile)원소들은 Al_2O_3 , TiO_2 , Zr, Nb, Y 및 Yb 등이다(Maclean and Kranidiotis, 1987; Maclean and Barrett, 1993). TA26 해저산일대 열수작용에 의한 모암변질시 가장 좋은 부동원소를 선택하기 위해 몇몇 호정성(compatible)-불호정성(incompatible) 및 호정성-호정성 부동원소 쌍에 상관계수를 체크하였으며 TiO_2 -Zr의 회귀분석 결과 0.9598의 높은 상관계수를 보여 TiO_2 를 부동원소로써 채택하였다. TiO_2 를 이용한 모암변질시 구성성분-부피의 상관관계를 기초로 변질과 비변질 광물 및 암석에 대한 화학분석치 및 비중으로 물질의 이득 및 손실을 계산하는 방정식으로 사용하여 열수작용 후의 변질 암석의 원소 이득 및 손실을 계산하면(Gresens, 1967; Grant, 1986) Table 3 및 Fig. 5와 같다. 이 Table 및 Figure에서 보는 것과 같이, 변질암석시료에서 증가한 주원소는 $K_2O(+0.04\sim+0.45\text{ g})$ 이며 증가와 감소를 한 주원소는 $SiO_2(-6.52\sim+10.56\text{ g})$, $Fe_2O_3(-4.88\sim+1.15\text{ g})$, $Na_2O(-0.62\sim+0.77\text{ g})$ 이고 나머지 주원소들은 감소하였다. 이것은 모암변질시 사장석 및 쉘라이트의 해리에 의한 CaO , Na_2O 손실로 해석되며 현미경하에선 관찰되지 않았지만 일부 일라이트와 같은 점토광물의 형성에 의해 K_2O 의 증가한 것으로 해석된다. $H_2O(-0.03\sim+6.04\text{ g})$, $SO_4(-0.46\sim+17.54\text{ g})$, $S(-0.46\sim+13.45\text{ g})$, 총 $S(-0.51\sim+16.93\text{ g})$ 및 $Cl(+0.05\sim+0.38\text{ g})$ 원소들은 모암변질시 증가하였는데 특히 황과 관련된 원소들의 증가가 현저하다(Table 3). 그러나 CO_2 및 총 C 원소들은 모암변질시 전반적으로 감소하였다. 여기에서 H_2O 은 모암변질시 녹점도 형성에 이용된 것으로 해석되며 황과 관련된 원소들은 중정석, 황화광물 및 황산염광물의 형성에 이용된 것으로 해석된다.

친석원소들 중 불호정성 원소들의 이득 및 손실을 살펴보면, $Ba(-7.60\sim+185078.62\text{ g})$, $Sr(-36.18\sim+3033.08\text{ g})$, $Cs(+1.41\text{ g})$, $Rb(-0.04\sim+5.54\text{ g})$, $Nb(-0.11\sim+0.86\text{ g})$, $Zr(-5.17\sim-0.14\text{ g})$, $Hf(-0.01\sim+0.08\text{ g})$, $Ta(-1.57\sim-0.28\text{ g})$ 및 $Th(-0.07\sim-0.01\text{ g})$ 로써 모암변질시 대부분의 불호정성 원소는 일부 손실되었으나 Ba 및 Sr 원소들은 열수용액에 의해 이득 되었다(Table 3 and

Fig. 5). 변질암석시료에 따라 미량원소의 이득 및 손실은 다르지만 전반적으로 $Ag(+54.83\text{ g})$, $Au(+1467.49\text{ g})$, $As(-5.80\sim+1030.80\text{ g})$, $Cd(+249.78\text{ g})$, $Cu(-100.57\sim+1357.85\text{ g})$, $Hg(+11.06\text{ g})$, $Mo(+41.72\text{ g})$, $Pb(+4.91\sim+532.65\text{ g})$, $Sb(-0.32\sim+66.59\text{ g})$, $Se(+17.45\text{ g})$, $V(-113.58\sim+102.94\text{ g})$, $Zn(-49.56\sim+14989.92\text{ g})$, $Tl(+20.76\text{ g})$, $U(-0.01\sim+20.96\text{ g})$ 로써 Ag , Au , As , Cd , Cu , Pb , Sb , V 및 Zn 원소들이 현저히 이득 되었다(Table 3 and Fig. 5). 또한 $Co(-47.93\sim-19.33\text{ g})$, $Ge(-0.79\sim+0.06\text{ g})$, $Ni(-4.09\sim+3.64\text{ g})$, $W(-102.93\sim-62.06\text{ g})$, $Sc(-0.85\sim+0.39\text{ g})$, $Y(-8.46\sim+1.64\text{ g})$ 원소들은 모암변질시 일부 시료에서는 약간의 이득을 보이기도 하지만 전반적으로 손실되었다. 이 변질암석시료내의 희토류원소의 이득 및 손실을 살펴보면, LBSO_q-2 시료에서만 일부 이득이 있고 다른 모든 변질암석시료에서는 손실되었다(Table 3 and Fig. 5).

국내 일부 금은광상에 대한 이득 자료와 비교해 보면, 삼광광상은 TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , As , Ag , Cu , Zn , Ni , Co , W , V , Br , Cs , Rb , Sc , Bi , Nb , Sb , Se , Sn , Lu , 대봉광상은 Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Ba , Sr , Cr , Sc , V , Pb , Zn , Be , Ag , As , Ta , Sb , 백운광상은 Fe_2O_3 , MnO , MgO , K_2O , Ag , Cd , Co , Cr , Cs , Cu , Ga , Ge , In , Nb , Ni , Pb , Rb , S , Sb , Sc , Sn , Ta , W , Y , Zn , Gd , Dy , Ho , Er , Tl , CO_2 , 팔공광상은 MnO , K_2O , TiO_2 , Ag , Co , Cs , Cu , Ge , Nb , Ni , Rb , S , Sc , U , Y , Gd , Tb , Dy , Ho , Er , Tl , Tm , Yb , CO_2 , 무극광상은 SiO_2 , K_2O , Cu , Rb , Nb , Dy , Ho , Ga , Sm , Yb , Er , Lu 및 나림광상은 TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , P_2O_5 , K_2O , Pb , As , Ni , Cu , Zr , Ag , V , Sb , Cd , Co , Sc , Hf , Sm , Nd , La , Ce , Rb , Cr , Y , Ba , Sr 등의 원소들이 이득되었으나 각 광상마다 원소의 종류 및 이득정도에는 차이가 있다(Yoo *et al.*, 2009).

따라서 TA26 해저산일대 모암(현무암 및 현무암질 안산암)과 열수용액(270°C 및 pH 4.6~6.1)의 반응에 의해 형성된 변질작용(녹점도화작용의 정도)과 이득된 주원소 및 미량원소의 종류 및 함량(SiO_2 , K_2O , H_2O , SO_4 , S , 총 S , Ba , Sr , Ag , Au , As , Cd , Cu , Pb , Sb , V , Zn) 등을 지시원소로서 활용하면 통가열도 심해저 열수광상 탐사 시 유용하게 이용될 수 있다.

6. 결 론

1. TA26 해저산일대에서 채취한 암석들은 현무암내

Table 3. Gains and losses of major (wt.%), trace and rare earth elements (ppm) of the altered basalt and andesite from TA26 seamount from the Tonga arc

	LBSO φ1-1	LBSO φ1-2	LBSOφ1-2 gain and loss(g)	LBSOφ1-2 gain and loss(%)	LBSO φ4-2	LBSOφ4-2 gain and loss(g)	LBSOφ4-2 gain and loss(%)	GTV φ7-1	GTV φ7-1 gain and loss(g)	GTVφ7-1 gain and loss(%)	GTV φ7-2	GTVφ7-2 gain and loss(g)	GTVφ7-2 gain and loss(%)	LBSO φ3-1	LBSO φ3-2	LBSOφ3-2 gain and loss(g)	LBSOφ3-2 gain and loss(%)
SiO ₂	45.89	40.17	-6.52	-14.22	45.95	4.71	10.26	46.34	-4.23	-9.21	37.44	10.56	23.01	54.85	58.87	-2.86	-5.21
TiO ₂	0.98	1.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	1.09	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	1.21	1.37	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	15.91	16.45	0.21	1.33	14.32	-0.14	-0.89	16.94	-0.68	-4.27	9.94	-0.92	-5.80	15.07	14.58	-2.19	-14.55
Fe ₂ O ₃ *	13.84	14.51	0.38	2.74	11.44	-1.24	-8.98	9.97	-4.88	-35.23	9.94	1.15	8.28	9.48	6.93	-3.36	-35.44
MnO	0.21	0.21	0.00	-2.00	0.11	-0.09	-42.32	0.05	-0.17	-78.59	0.06	-0.12	-56.92	0.14	0.09	-0.06	-43.22
MgO	6.40	8.04	1.48	23.11	2.55	-3.59	-56.13	2.32	-4.31	-67.41	1.43	-4.24	-66.31	2.73	1.98	-0.98	-35.94
CaO	9.29	7.87	-1.58	-16.98	4.73	-4.08	-43.94	1.66	-7.80	-83.93	0.48	-8.57	-92.21	9.89	8.32	-2.54	-25.70
Na ₂ O	2.25	2.35	0.05	2.36	2.74	0.77	34.09	1.81	-0.62	-27.67	1.12	-0.56	-24.95	4.54	4.88	-0.23	-5.06
K ₂ O	0.17	0.21	0.04	21.06	0.44	0.31	185.00	0.46	0.24	143.28	0.41	0.45	263.62	0.45	0.60	0.08	17.76
P ₂ O ₅	0.11	0.21	0.10	87.09	0.08	-0.02	-19.92	0.02	-0.09	-83.65	0.01	-0.09	-86.29	0.10	0.11	0.00	-2.85
H ₂ O ⁺	2.20	4.70	2.41	109.36	4.20	2.42	110.21	4.60	1.94	87.99	3.00	2.32	105.59	0.60	0.60	-0.07	-11.68
H ₂ O ⁻	1.10	2.70	1.55	140.55	0.90	-0.11	-9.91	5.10	3.49	316.85	3.20	3.72	338.60	0.40	0.50	0.04	10.40
CO ₂	0.18	0.39	0.20	112.33	0.03	-0.15	-81.65	0.03	-0.15	-85.02	0.08	-0.06	-32.99	0.08	0.06	-0.03	-33.76
SO ₄	1.00	2.10	1.06	105.80	10.70	10.78	1078.20	2.70	1.43	142.75	12.30	17.54	1754.46	0.90	0.50	-0.46	-50.93
S	0.36	0.71	0.34	93.28	7.73	8.15	2264.36	8.45	7.24	2010.35	9.16	13.45	3736.24	0.60	0.16	-0.46	-78.45
S ^{total}	0.41	0.79	0.36	88.83	7.88	8.27	2016.31	8.26	7.02	1711.32	11.50	16.93	4128.89	0.65	0.16	-0.51	-78.45
C ^{total}	0.04	0.12	0.08	194.00	<0.01	0.00	0.00	0.02	-0.02	-55.05	0.03	0.01	13.08	<0.01	<0.01	0.00	0.00
F	<0.01	<0.01	0.00	0.00	<0.01	0.00	0.00	<0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	201.54	<0.01	<0.01	0.00	0.00
Cl	0.25	0.45	0.19	76.40	0.31	0.09	36.54	0.39	0.10	40.26	0.42	0.38	153.29	0.29	0.38	0.05	15.73
LOI	3.77	9.94	5.97	158.39	16.00	13.85	367.32	15.65	10.30	273.23	16.11	20.52	544.27	1.75	1.75	-0.20	-11.68
Total	98.81	101.00			99.26			96.31			77.59			100.20	99.47		
Ag	<0.5	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	10.40	8.85	1770.09	36.70	54.83	10966.46	<0.5	<0.5	0.00	0.00
Au**	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	293.00	262.43	26243.12	974.00	1467.49	146749.23	12.00	18.00	3.90	32.48
As	8.00	24.00	15.52	194.00	2.00	-5.80	-72.47	743.00	660.02	8250.23	689.00	1030.80	12885.00	7.00	10.00	1.83	26.17
Ba	66.00	73.00	5.54	8.39	92.00	35.30	53.49	6715.00	5971.34	9047.48	122800.00	185078.62	280422.14	118.00	125.00	-7.60	-6.44
Be	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	<1.0	0.00	0.00
Bi	0.20	0.40	0.19	96.00	0.20	0.02	10.11	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	0.10	0.60	0.43	429.93
Br	7.40	13.90	6.22	84.08	9.80	3.39	45.82	14.60	5.73	77.39	15.00	15.22	205.61	11.40	15.00	1.85	16.21
Cd	<0.5	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	7.90	6.60	1320.55	166.00	249.78	49955.38	<0.5	<0.5	0.00	0.00
Cu	180.00	206.00	21.88	12.16	232.00	75.46	41.92	271.00	63.65	35.36	1020.00	1357.85	754.36	241.00	159.00	-100.57	-41.73
Co	81.10	53.40	-28.77	-35.47	46.20	-30.23	-37.27	56.00	-30.75	-37.92	22.00	-47.93	-59.10	68.70	55.90	-19.33	-28.13
Cr	6.30	7.60	1.15	18.22	3.80	-2.12	-33.58	7.80	0.71	11.31	10.20	9.08	144.10	10.50	8.10	-3.35	-31.87
Cs	<0.1	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	1.00	0.80	799.08	1.00	1.41	1407.69	<0.1	0.10	0.00	0.00
Ga	17.00	15.00	-2.30	-13.53	16.00	0.62	3.64	19.00	0.08	0.49	18.00	10.14	59.64	20.00	19.00	-3.22	-16.09
Ge	1.60	1.30	-0.33	-20.38	1.30	-0.17	-10.53	0.90	-0.79	-49.43	1.10	0.06	3.65	1.80	1.90	-0.12	-6.77

*Total Fe as Fe₂O₃, **ppb

Table 3. Continued

	LBSO ϕ 1-1	LBSO ϕ 1-2	LBSO ϕ 1-2 gain and loss(g)	LBSO ϕ 1-2 gain and loss(%)	LBSO ϕ 4-2	LBSO ϕ 4-2 gain and loss(g)	LBSO ϕ 4-2 gain and loss(%)	GTV ϕ 7-1	GTV ϕ 7-1 gain and loss(g)	GTV ϕ 7-1 gain and loss(%)	GTV ϕ 7-2	GTV ϕ 7-2 gain and loss(g)	GTV ϕ 7-2 gain and loss(%)	LBSO ϕ 3-2	LBSO ϕ 3-2 gain and loss(g)	LBSO ϕ 3-2 gain and loss(%)
Hg	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	8.00	11.06	1106.15	<1.0	0.00	0.00
In	<0.1	<0.1	0.00	0.00	<0.1	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	0.10	0.05	50.77	<0.1	<0.1	0.00
Ir**	<1.0	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00	<1.0	0.00	0.00
Mo	<2.0	<2.0	0.00	0.00	<2.0	0.00	0.00	13.00	9.69	484.40	29.00	41.72	2086.15	2.00	<2.0	0.00
Ni	14.00	18.00	3.64	26.00	9.00	-4.09	-29.21	14.00	-1.41	-10.09	7.00	-3.45	-24.62	10.00	10.00	-1.17
Pb	<5.0	12.00	6.76	135.20	9.00	4.91	98.20	598.00	532.65	10653.03	226.00	335.74	6714.77	<5.0	17.00	10.01
Sb	0.20	0.60	0.39	194.00	<0.1	0.00	0.00	28.10	25.06	12532.11	44.30	66.59	33295.38	0.50	0.20	-0.32
Se	<0.5	<0.5	0.00	0.00	16.30	17.45	3489.66	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00	<0.5	0.00	0.00
Sn	<1	<1	0.00	0.00	<1	0.00	0.00	<1	0.00	0.00	<1	0.00	0.00	1.00	1.00	-11.68
Sr	216.00	247.00	26.06	12.06	375.00	196.92	91.17	200.00	-36.18	-16.75	2155.00	3033.08	1404.20	496.00	584.00	19.80
V	473.00	387.00	-93.74	-19.82	484.00	59.94	12.67	528.00	1.72	0.36	382.00	102.94	21.76	481.00	416.00	-113.58
W	129.00	49.00	-80.98	-62.78	53.00	-70.64	-54.76	29.00	-102.93	-79.79	36.00	-74.72	-57.92	123.00	69.00	-62.06
Zn	87.00	93.00	4.14	4.76	34.00	-49.56	-56.97	2000.00	1711.17	1966.86	>10000.0	14989.92	17229.80	42.00	41.00	-5.79
Rb	2.00	2.00	-0.04	-2.00	2.00	0.20	10.11	6.00	3.39	169.72	5.00	5.54	276.92	1.00	2.00	0.77
Tl	<0.05	0.18	0.13	252.80	0.05	0.00	0.00	16.90	15.14	30288.99	13.80	20.76	41512.31	0.05	<0.05	0.00
Th	0.19	0.18	-0.01	-7.16	0.13	-0.05	-24.66	0.18	-0.03	-14.82	0.08	-0.07	-36.52	0.19	0.20	-0.01
U	0.60	0.60	-0.01	-2.00	<0.1	0.00	0.00	9.50	7.94	1323.55	14.30	20.96	3493.33	<0.1	0.70	0.52
Hf	1.00	1.10	0.08	7.80	0.90	-0.01	-0.90	1.20	0.88	7.89	0.70	0.06	5.54	1.20	1.40	3.04
Zr	36.00	33.00	-3.66	-10.17	28.00	-5.17	-14.36	38.00	-1.83	-5.10	22.00	-2.83	-7.86	39.00	44.00	-1.14
Nb	0.40	0.30	-0.11	-26.50	<0.2	0.00	0.00	1.40	0.86	214.68	<0.2	0.00	0.00	0.20	0.30	0.06
Ta	3.30	2.90	-0.46	-13.88	2.10	-0.99	-29.93	2.60	-0.96	-29.16	2.00	-0.28	-8.62	3.60	2.30	-1.57
Sc	48.50	47.60	-0.01	-2.00	44.40	0.39	0.80	53.00	-0.85	-1.75	31.90	-0.40	-0.83	48.10	45.70	-0.06
Y	16.00	18.00	1.64	10.25	12.00	-2.79	-17.42	10.00	-7.01	-43.81	5.00	-8.46	-52.88	25.00	27.00	-1.15
La	2.27	2.25	-0.06	-2.86	1.79	-0.30	-13.17	1.10	-1.28	-56.43	1.85	0.52	22.87	2.27	2.43	-0.12
Ce	6.22	6.10	-0.24	-3.89	5.46	-0.21	-3.34	2.23	-4.22	-67.77	2.11	-3.04	-48.85	6.99	7.45	-0.41
Pr	1.01	1.02	-0.01	-1.03	0.91	-0.01	-0.79	0.37	-0.68	-67.06	0.27	-0.60	-59.70	1.23	1.31	-0.07
Nd	5.20	5.40	0.09	1.77	4.59	-0.15	-2.80	1.99	-3.41	-65.59	1.24	-3.33	-64.05	6.73	6.99	-0.56
Sm	1.80	1.87	0.03	1.81	1.62	-0.02	-0.90	0.81	-1.07	-59.54	0.72	-0.71	-39.69	2.61	2.88	-0.07
Eu	0.69	0.72	0.02	2.26	0.54	-0.10	-13.83	0.25	-0.47	-67.42	0.69	0.35	50.77	1.01	1.09	-0.05
Gd	2.33	2.39	0.01	0.52	1.90	-0.24	-10.21	1.15	-1.30	-55.62	1.28	-0.40	-17.17	3.44	3.78	-0.10
Tb	0.48	0.50	0.01	2.08	0.38	-0.06	-12.83	0.26	-0.25	-51.30	0.20	-0.18	-37.18	0.73	0.79	-0.03
Dy	3.22	3.46	0.17	5.30	2.60	-0.36	-11.09	1.83	-1.57	-48.90	1.19	-1.43	-44.28	5.16	5.55	-0.26
Ho	0.65	0.70	0.04	5.54	0.54	-0.06	-8.52	0.41	-0.28	-43.29	0.26	-0.26	-39.69	1.03	1.12	-0.04
Er	1.93	2.06	0.09	4.60	1.55	-0.22	-11.57	1.28	-0.78	-40.37	0.85	-0.65	-33.60	2.92	3.23	-0.07
Tm	0.30	0.32	0.01	4.53	0.24	-0.04	-11.91	0.21	-0.11	-37.06	0.13	-0.10	-34.67	0.45	0.48	-0.03
Yb	2.02	2.21	0.15	7.22	1.63	-0.23	-11.15	1.53	-0.64	-31.90	0.95	-0.59	-29.09	3.06	3.18	-0.25
Lu	0.32	0.35	0.02	7.19	0.27	-0.02	-7.09	0.26	-0.09	-26.95	0.16	-0.08	-24.62	0.49	0.48	-0.07

*Total Fe as Fe₂O₃, **ppb

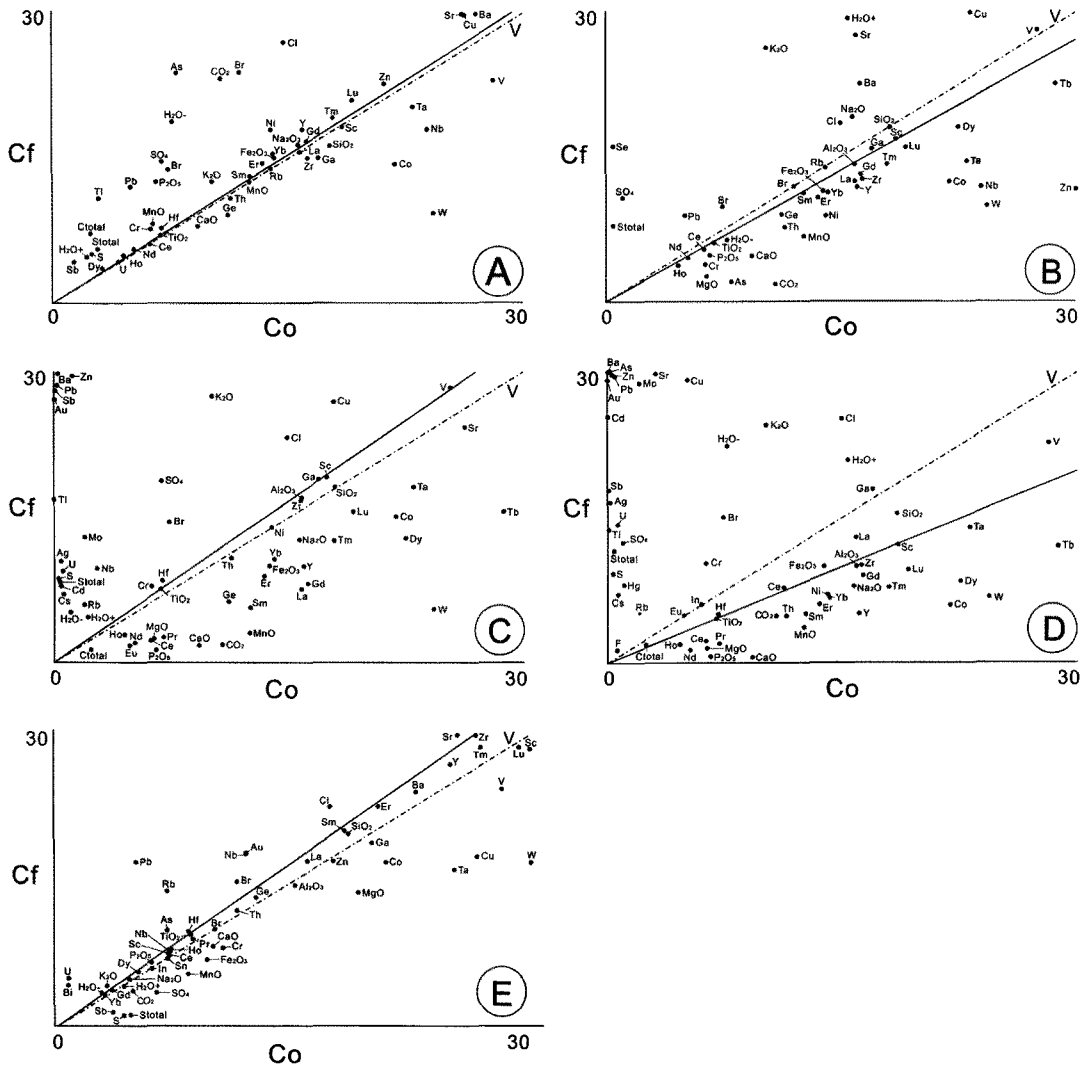


Fig. 5. Isochron diagrams showing chemical changes that occur during wallrock alteration from the TA26 seamount. (A) LBSOφ1-2 sample. (B) LBSOφ4-2 sample. (C) GTVφ7-1 sample, (D) GTVφ7-2 sample. (E) LBSOφ3-2 sample. Co and Cf refer to unaltered and altered rocks, respectively. V indicates constant volume condition.

지 현무암질 안산암으로써 사장석 및 휘석류가 일부 결정으로 산출되고 석기는 대부분 사장석으로 산출된다. 사장석은 아회장석 또는 조회장석이며 휘석류는 피쳐나이트와 쉘라이트의 조성을 갖는다.

2. 변질암석시료의 변질대 부분에서는 육안 관찰상 유백색, 녹색, 황갈색내지 일부 암녹색을 띠며 사장석, 휘석류, 황철석, 티탄철석, 비결정질 실리카, 중정석, 녹점토, 함철 황산염광물, 함철-구소 황산염광물 및 함철 규산염광물 등이 산출된다. 사장석과 휘석류는 녹점토화작용 및 비결정질 규화작용에 의하여 주로 녹점

토 및 비결정질 실리카로 변질되어 산출된다.

3. 변질암석시료에서 증가한 주원소는 K_2O 이며 증가와 감소를 한 주원소는 SiO_2 , Fe_2O_3 및 Na_2O 이고 나머지 주원소들은 감소하였다. 또한 H_2O , SO_4 , S, 총 S 및 Cl 원소들은 모암변질시 증가하였는데 특히 황과 관련된 원소들의 증가가 현저하다.

4. 모암변질시 친석원소들 중 대부분의 불호정성 원소는 일부 손실되었으나 Ba 및 Sr 원소들은 열수용액에 의해 이득 되었다. 희토류원소의 경우, 일부 시료에서만 이득이 있고 모든 변질암석시료에서 손실되었다.

5. 모암변질시 미량원소 Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, V 및 Zn 원소들은 현저히 이득 되었고 Co, Ge, Ni, W, Sc 및 Y 원소들은 전반적으로 손실되었다. 따라서 TA26 해저산일대 이득된 주원소 및 미량원소의 종류 및 함량(SiO₂, K₂O, H₂O, SO₄, S, 총 S, Ba, Sr, Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, V, Zn) 등을 지시 원소로서 활용하면 통가열도일대 심해저 열수광상 탐사 시 유용하게 이용될 수 있다.

사 사

이 연구는 해저열수광상개발사업단의 지원으로 한국 지질자원연구원 “해저열수광상 해저퇴적물 및 기반암의 열수변질대 연구(10-9112)” 과제의 일부로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다. 심사과정에서 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 권순진 심사위원님, 익명의 심사위원님 및 박상준 책임위원님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Grant, J.A. (1986) The isocon diagram-A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, v.81, p.1976-1982.
- Gresens, R.L. (1967) Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, v.2, p.47-65.
- Hekinian, R., Muhe, R., Worthington, T.J. and Stoffers, P. (2008) Geology of a submarine volcanic caldera in the Tonga Arc: Dive results. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.176, p.571-582.
- Hofmann, A. (1972) Chromatographic theory of infiltration metasomatism and its application to feldspar. *American Journal of Sciences*, v.272, p.69-90.
- KORID (2010) 2009 report: Tonga sea-floor hydrothermal deposit development. 139p.
- Lebas, M.J. and Streckeisen, A.L. (1991) The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, v.148, p.825-833.
- Maclean, W.H. and Barrett, T.J. (1993) Lithogeochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, v.48, p.109-133.
- Maclean, W.H. and Kranidiotis, P. (1987) Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, v.82, p.951-962.
- Massoth, G., Baker, E., Worthington, T., Lupton, J., de Ronde, C., Arculus, R., Walker, S., Nakamura, K., Ishibashi, J., Stoffers, P., Resing, J., Greene, R. and Lebon, G. (2007) Multiple hydrothermal sources along the south Tonga arc and Valu Fa Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.8, Q11008, doi:10.1029/2007GC001675.
- Meschede, M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, v.56, p.207-218.
- Mottl, M.J. and Holland, H.D. (1978) Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater-I. Experimental results for major and minor components of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.42, p.1103-1115.
- Schwarz-Schampera, U., Botz, R., Hannington, M., Adamson, R., Anger, V., Cormany, D., Evans, L., Gibson, H., Haase, K., Hirdes, W., Hocking, M., Juniper, K., Langley, S., Leybourne, M., Metaxas, A., Mills, R., Ostertag-Henning, Chr., Rauch, M., Rutkowski, J., Schmidt, M., Shepherd, K., Stevens, C., Tamburri, K., Tracey, D. and Westernstroer, U. (2007) Cruise report Sonne 192/2. 92p.
- Stoffers, P., Worthington, T.J., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M.D., Massoth, G.J., Hekinian, R., Schmidt, M., Lundsten, L.J., Evans, L.J., Vaiomounga, R. and Kerby, T. (2006) Submarine volcanoes and high-temperature hydrothermal venting on the Tonga arc, southwest Pacific. *Geology*, v.34, p.453-456.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds.) *Magmatism in ocean basins*. Geological Society, London, Special Publication, v.42, p.313-345.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, v.20, p.325-343.
- Yoo, B.C., Lee, G.J., Lee, J.K., Ji, E.K. and Lee, H.K. (2009) Element dispersion and wallrock alteration from Samgwang deposit. *Economic and Environmental Geology*, v.42, p.177-193.