

통가열도 TA 25 해저산의 열수변질

Hydrothermal Alteration around the Tofua Arc (TA) 25 Seamounts in Tonga Arc

조 현 구(Hyen Goo Cho)^{1,*} · 김 동 호(Dong-Ho Kim)¹ · 구 호 진(Hyo Jin Koo)¹ ·
엄 인 권(In Kwon Um)² · 최 현 수(Hunsoo Choi)²

¹경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소

(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science,
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

(Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 우리나라는 2008년부터 심해저 광물자원 확보를 위하여 남서태평양 통가국 EEZ 내 Tofua arc의 해저 화산열도에서 해저열수광상에 관한 조사를 지속적으로 수행하고 있다. 통가국 라우분지 TA 25 해저산에서 해저 열수 활동에 의하여 형성된 광물들의 특성과 분포를 규명하기 위하여 X선회절분석, 주사전자현미경 관찰, X선형광분석과 유도결합 플라즈마 방출분광분석을 실시하였다. 연구에 사용된 시료는 TA 25 해저산 주변에서 채취된 7개의 코어 시료와 9개의 해저퇴적물 시료이다. 열수분출구 모든 지역에서 중정석, 섬아연석, 칼리노클레이스 등이 존재하고, 열수분출구 A 지역에는 석고, 스펙타이트 및 카올린 광물, 열수분출구 B와 C 지역에는 스펙타이트, 카올린 광물, 황동석과 황철석, 열수분출구 D 지역에는 석고, 황동석, 황철석, 침철석 등이 분포한다. 점토부분에 대한 분석 결과 칼데라 중심부 지역을 제외한 모든 지역에서 스펙타이트와 소량의 카올리나이트가 포함되어 있는 것으로 보아 이질변질작용에 해당하는 열수변질이 있었음을 알 수 있다. 열수분출구 B, C, D 지역은 여러 가지 종류의 황화광물과 비소화광물이 존재한다. 광물조성, 주성분과 미량성분 분석 결과로 판단할 때 열수분출구 B, C, D 지역이 비교적 강한 고온의 열수변질작용, 열수분출구 A와 칼데라 중심부 지역은 열수의 영향을 적게 받았거나 저온의 열수변질작용을 받은 것으로 판단된다. 추후 열수광상 탐사는 열수분출구 B, C, D 지역에서 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

주요어 : 해저열수광상, TA 25 해저산, X선회절분석, 열수분출구, 황동석, 섬아연석, 스펙타이트

ABSTRACT : Korea government has consistently investigated the development of economic mineral deposits in the Tofua volcanic arc, Tonga since 2008 for the secure of sea floor mineral resources. We studied the composition and distribution of minerals formed by hydrothermal activity around TA 25 seamounts of the Tofua volcanic arc, Lau Basin, Tonga, using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, X-ray fluorescence spectrometry, and inductively coupled plasma atomic emission

*Corresponding author: +82-55-772-1474, E-mail: hgcho@gsnu.ac.kr

spectrometry. We used 7 core samples and 9 surface sediment samples. Barite, sphalerite, and clinoclase are present in the most volcanic vent area. Gypsum, smectite, and kaolin mineral are distributed in vent A area, chalcopyrite, pyrite, smectite, and kaolin mineral are in vent B and C area, and gypsum, chalcopyrite, pyrite, and goethite are in vent D area. From the study of clay fraction, smectite and few kaolinite are detected in the most studied area except inner part of caldera, which suggest that argillic alteration are dominant in the volcanic vent areas. Various sulfide or arsenide minerals were found in the hydrothermal vent B, C, and D. The mineralogy and geochemistry suggest higher hydrothermal activities in volcanic vent B, C, and D compared to vent A and inner caldera area. Therefore higher probabilities of massive sulfide deposits may occur in hydrothermal vent B, C, and D.

Key words : seafloor hydrothermal deposit, TA 25 seamount, X-ray diffraction analysis, hydrothermal vent, chalcopyrite, sphalerite, smectite

서 론

해저열수활동은 얇은 부존 수심, 육지와의 근접성, 황화물 형태의 금속결합, 단위면적당 높은 금속함량 등 개발에 유리한 여러 가지 장점을 가지고 있으므로, 가장 먼저 개발될 수 있는 심해저 광물자원으로 부각되고 있다(Kim *et al.*, 2008). 국내 부존자원이 적은 우리나라는 2008년부터 심해저 광물자원 확보라는 전략 아래 남서태평양 통가국 EEZ 내 Tofua arc의 해저 화산열도에서 해저열수 광상에 관한 조사를 지속적으로 수행하고 있다(MTLM, 2009).

태평양판과 인도-호주판이 섭입하는 경계에 위치한 라운분지(Lau Basin)는 후열도확장축을 가지고 있다. 이 지역은 중앙해령에 비해 퇴적물에서 공급된 많은 양의 물이 마그마 형성에 참여하기 때문에 경제성 높은 해저열수광상 형성에 좋은 환경을 제공한다. 이 지역에서는 열수분출구(hydrothermal vent)를 가지는 해저화산들이(active seamounts) 많이 발견되었으며(de Ronde *et al.*, 2003, 2005; Stofferes *et al.*, 2003, 2006; Arculus, 2005), 해저괴상 황화물 광상(seafloor massive sulfide deposits)을 형성할 가능성이 매우 높은 것으로 보고되고 있다(de Ronde *et al.*, 2003, 2005; Massoth *et al.*, 2007; Hekinian *et al.*, 2008).

해양지각을 이루는 암석이나 해저 퇴적물과 해양 지각을 뚫고 분출하는 열수와의 반응에 의하여 형성되는 변질광물(군)은 열수의 조성을 알게 해주어, 해저열수광상 형성의 메카니즘을 이해할 수 있는 주요한 요소이다(Guilbert and Park, 1986; Goodfellow and Blaise, 1988; Barrett *et al.*,

1988; Massoth *et al.*, 2007). 광화대 주변 해저퇴적물의 광물조성 연구는 해저열수광상 형성의 2가지 요소인 모암과 열수의 조성을 추정하게 한다. 열수변질작용에 의하여 형성된 열수변질대는 열수변질광상의 위치와 규모를 쉽게 추정하게 하는 중요한 지질학적 요인이다(Meyer and Hemley, 1967; Rose, 1970; Barnes, 1979; Guilbert and Park, 1986).

이번 연구의 목적은 2008년 이후 계속되고 있는 Tofua arc 화산열도에 대한 탐사 과정(Kim *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2012a, b; Um *et al.*, 2013)에서 해저열수광상의 존재 가능성이 부각되고 있는 해저화산 TA 25 주변 해저퇴적물 및 변질대의 광물조성을 연구하여 열수변질대의 분포와 특성을 규명하는데 있다. TA 25 해저산은 남북으로 인접한 두 개의 해저산으로 구성되며, 북쪽의 단순한 형태의 해저산과 남쪽의 칼데라(caldera)를 가지는 보다 큰 규모의 해저산으로 구분된다(Cho *et al.*, 2012b). 남쪽의 해저산은 서쪽 부분에 큰 칼데라가 존재하며, 동쪽 부분에는 작은 화산추(volcanic cone)가 발달한다. 칼데라 안쪽에서는 열수 플룸이 관측되었으며, 활발한 화성활동이 일어나는 것으로 판단되었기 때문에 열수활동에 의한 변질을 관측하기에 적당한 장소로 판단하여, 이번 연구는 칼데라 주변을 중심으로 수행하였다. 이 지역의 지질은 유문암, 부석, 현무암질 안산암 및 안산암으로 구성되며, 반정 및 휘석 반정을 가지며, 사장석 반정은 누대구조가 잘 나타나고 일부 사장석 거정은 작은 휘석 또는 감람석을 완전히 포획하기도 한다(KORDI 2009, 2011). 이번 연구는 남쪽 해저산 서쪽 부분에 존재하는 칼데라를 중심으로 실시하

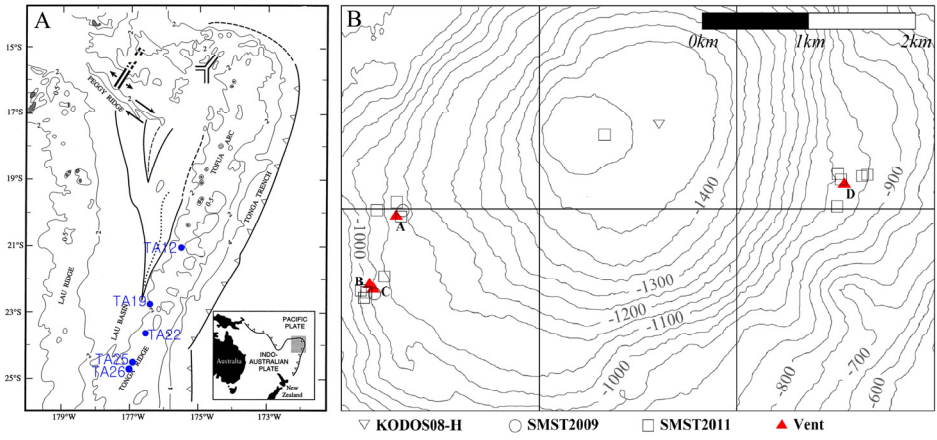


Fig. 1. (A) Location map of Tofua Arc (TA) 25 seamounts in Tonga Arc and tectonic setting of the Lau Basin. (after KORDI, 2011) (B) Sampling locations and regional bathymetry map (m) around TA 25.

였다(Fig. 1).

연구 시료 및 방법

TA 25 해저산 남부 지역의 서쪽에는 약 6.5 km의 지름을 갖는 비교적 큰 분화구를 갖는 칼데라가 존재하는데, 칼데라의 기저부의 수심은 1,100 m 이상이며, 열수광화대는 칼데라 서측 내벽과 동측 내벽에 발달되어 있다(Fig. 1). 이번 연구에 사용된 시료는 2008년 12월 7일부터 12월 24일까지 수행된 2008년 실패역 탐사(KODOS08-H), 2010년 1월 27일부터 2월 20일까지 수행된 1차년도 해저괴상황화물광상(Seafloor Massive Sulfide Deposits, SMST) 탐사(SMST2009), 2012년 1월 16일부터 1월 30일까지 수행된 3차년도 해저괴상황화물광상 탐사(SMST2011)를 통하여 채취된 코어 시료와 표층 퇴적물 시료들이다(MTLM, 2009; KORDI, 2009, 2011).

연구시료

이번 연구에서는 다중코어시료채취기(Multi Corer; MC), 무인잠수정(Remotely Operated Vehicle; ROV)을 이용한 푸쉬코어러(Push Corer; PC), 그리고 TV 카메라가 장착된 그랩시료채취기(TV-guided Grab Sampler; GTV)를 사용하여 코어 시료와 표층퇴적물 시료를 채취하였다.

MC08H-05는 다중코어시료채취기를 이용하여 TA 25 정상부에 발달한 소규모 칼데라에서 획득

하였다. 36 cm 두께의 퇴적물을 채취하였는데, 퇴적물은 암갈색(10YR3/3)의 균질한 머드로 구성되어 있다. MT110204 시료는 TA 25 지역의 열수변질을 받지 않았다고 생각되는 지점에서 다중코어시료채취기를 이용하여 약 30 cm 두께의 퇴적물을 채취하였다. 채취된 시료는 연갈색의 세립질 퇴적물이다. 3차년도 해저괴상황화물광상 탐사에서 푸쉬코어러를 이용하거나 5개의 코어 시료를 채취하였다. RT110206-2 시료와 RT110206-14 시료는 가파른 사면을 덮고 있는 회색의 니질 퇴적물이고, RT110206-11 시료는 흰색의 퇴적물 시료이다. RT110206-17 시료와 RT110206-21 시료는 평탄한 지형의 두꺼운 머드가 쌓인 곳에서 채취하였는데, 이 지역은 사면이 끝나고 분지평원이 시작되는 지점이며, 폭 수십 m, 깊이 수 m의 저지대(둥근 형태)가 발달되어 있는 지역으로 일부 저지대에서 다수의 열수분출구가 발견되었다. RT110206-2, RT110206-11, RT110206-14, RT110206-17와 RT110206-21 시료는 모두 3차년도에 푸쉬코어러를 이용하여 채취된 시료로서, 회수된 코어는 대부분 15 cm 미만이다. 이 시료들에 대한 기본적인 정보는 Table 1에 제시되어 있다.

TA 25 해저산 지역은 화산지역으로 많은 지역이 화산쇄설물 또는 암편으로 덮혀 있는 지역으로 주상시료를 얻기 어려운 곳이 많아 그랩시료채취기를 이용하여 시료를 획득하였다. 1차년도 해저괴상황화물광상 탐사에서는 TV 카메라가 장착된 그랩시료채취기를 운용하여 GTV09와 GTV10 등 2개 표층퇴적물 시료를, 3차년도 탐사에서는

Table 1. Some basic information for samples (MC, Multi Corer; P, Push Corer; G, GTV)

Station	Depth (m)	sampling type	sample thickness	area	Year
MC08H-05	1,475	MC	36 cm	center	KODOS08-H
GTV09	1,108	G		vent A	SMST2009
GTV10	1,037	G		vent C	
RT110206-02	1063.46	P	<10 cm	vent C	
RT110206-11	1047.829	P	10 cm	vent B	SMST2011
RT110206-14	1043.93	P	<10 cm	vent B	
RT110206-17	1121.35	P	15 cm	vent A	
RT110206-21	1136.12	P	15 cm	vent A	
GT110206	1084	G		vent B	
GT110207	980	G		vent D	
GT110208	962	G		vent D	
GT110210	985	G		vent D	
GT110211	945	G		vent D	
GT110212	981	G		vent D	
GT110213	1087	G		vent A	
MT110204	1554	MC	22 cm	center	

GT110206, GT110207, GT110208, GT110210, GT110211, GT110212, GT110213 등 7개 시료를 획득하였다. GTV09 시료는 침니 구조를 보이는 암석과 열수에 의해 변질된 것으로 보이는 암석, 소량의 조립한 퇴적물이 같이 채취되었다. GTV09에서 채취된 조립한 퇴적물은 대부분 흰색이며 약간의 노란색과 주황색의 입자가 혼합되어 나타났다. 나머지 표층퇴적물시료의 특징은 Um *et al.* (2013)의 Table 1에 자세하게 설명되어 있다.

이번 연구지역에는 네 곳에서 열수분출구 (hydrothermal vent)가 밀집된 지역이 분포하는데 이를 각각 열수분출구 A-D로 명명하였다. 이번 연구에 사용된 시료들은 열수분출구 A, B, C, D와 칼데라 중심부 부근에서 채취된 것들로서, 열수분출구 A, B, C는 칼데라의 서쪽에, 열수분출구 D는 칼데라의 동쪽에 분포한다. 채취된 시료는 열수분출구 A에서 4개, 열수분출구 B와 C에서 5개, 열수분출구 D에서 5개, 칼데라 중심부 부근에서 2개씩이다.

연구 방법

전체 시료 내에 존재하는 광물의 종류를 알아보기 위하여 분말 시료를 제작하여 X선회절분석을 실시하여 그 결과를 이용하여 광물의 종류를 결정하였다. 또한 시료 내에 존재하는 점토광물의 종류와 양적인 구성비를 알아보기 위하여, 점토입자 시료를 슬라이드글라스 위에 정방위성시료를 제작하였다. 이를 상온에서 완전 건조한 후와 에틸렌글리콜로 포화시킨 후, X선회절분석을 실시하여 그 결과를 비교하여 점토광물의 종류를 결정하였다. 점토광물에 대한 시편 제작 과정은 Cho *et al.* (2012a)에 제시된 방법에 의하여 수행하였다.

X선회절분석은 경상대학교 지구환경과학과가 보유하고 있는 Siemens/Brucker D5005 고분해능 X선회절분석기와 경상대학교 공동실험관이 보유하고 있는 Siemens/Brucker D8 Advance A25 고분해능 X선회절분석기를 이용하였다. Siemens/Brucker D5005 고분해능 X선회절분석기의 경우, 흑연 단색화된 파장(CuK $\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하였으며, 벌크 시료에 대한 정성분석은 40 kV /

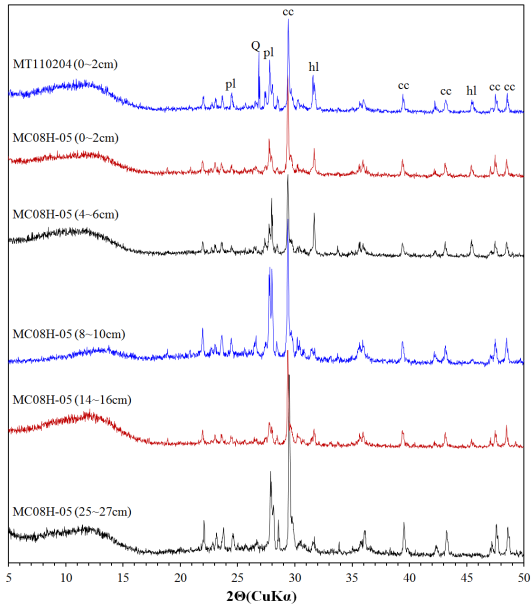


Fig. 2. X-ray diffraction patterns for center of caldera area. Top to bottom, sample MT110204 (0-2 cm), MC08H-05 (0-2 cm), MC08H-05 (4-6 cm), MC08H-05 (8-10 cm), MC08H-05 (14-16 cm), MC08H-05 (25-27 cm). cc, calcite; hl, halite; pl, plagioclase; Q, quartz.

40 mA, 3-60° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02°, 주사시간을 2초, 회전수 30 rpm으로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절 값을 기록하였다. 그리고 정방위시료의 경우 40 kV / 40 mA, 3-30° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02°, 주사시간 2초로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절 값을 기록하였다. Siemens/Brucker D8 Advance A25 고분해능 X선 회절분석기의 경우 Rings Eye XE 검출기를 사용하였으며, 40 kV / 40 mA, 4-50° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02°, 주사시간을 0.2초로 설정하여 연속 스캔 방식으로 회절 값을 기록하였다.

경상대학교 공동실험관의 JSM-7610F 전계방출형 주사전자현미경을 이용하여 미세 광물의 형태와 조직을 관찰하였으며, 여기에 부착된 EDS (Energy Dispersive spectrometer)를 이용하여 성분 분석을 실시하였다. 주원소와 미량원소 분석은 각각 한국지질자원연구원의 Shimadzu MXF-2400 X선형광분석기(X-ray Fluorescence Spectrometer)와 Perkin Elmer Optima 5,300 DV 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP-AES)를 사용하여 실시하였다. 주원소와 미량원소 분석에 대한 자세한 시료 처리

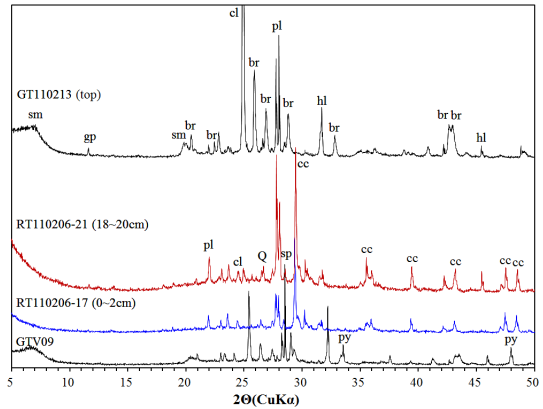


Fig. 3. X-ray diffraction patterns for volcanic vent A area. Top to bottom, sample GT110213 (top), RT110206-21 (18-20 cm), RT110206-17 (0-2 cm), GTV09. br, barite; cc, calcite; cl, clinoclase; gp, gypsum; hl, halite; pl, plagioclase; py, pyrite; Q, quartz; sm, smectite; sp, sphalerite.

과정은 Um *et al.* (2013)에 제시되어 있다.

결과 및 토의

칼데라 중심부 지역

연구 지역의 서쪽에 존재하는 칼데라 중심부 지역에서는 MC08H-05와 MT110204 등 2개의 코어 시료에 대하여 연구하였다. 소규모 칼데라 중심부 부근에서 획득한 MC08H-05 코어 시료는 0-2 cm, 4-6 cm, 8-10 cm, 14-16 cm 및 25-27 cm 등 5개 구간으로 나누어 X선회절분석을 실시한 결과 대부분 사장석과 방해석으로 구성됨을 알 수 있었다 (Fig. 2). 방해석 함량은 대체로 상부에 많은 경향을 가진다.

MT110204는 MC08H-05 서쪽, 칼데라 중심부에서 열수의 영향을 받지 않았다고 생각되는 지점에서 채취된 시료인데, 0-2 cm, 6-8 cm 및 20-22 cm 등 3개 구간으로 구분하여 연구하였다. 모든 구간의 시료는 사장석과 방해석으로 이루어져 있으며, 사장석의 함량은 하부로 갈수록 증가하는 양상을 나타낸다. 최상부인 0-2 cm 구간에서만 석영이 포함되었다(Fig. 2).

칼데라 중심부 지역의 시료들은 모두 사장석과 방해석으로 구성된다. 이런 결과는 이들 시료에 대한 X선형광분석(XRF)을 통한 주원소 분석 결과에서

Table 2. Major element composition for samples using XRF (wt.%)

Station	area	depth	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
GT110213	vent A		34.47	11.44	4.75	1.83	1.84	0.46	2.49	0.51	0.21	0.18
		0-2 cm	40.65	11.83	9.50	15.64	3.51	0.36	2.87	0.48	1.31	0.38
RT110206-17		4-6 cm	40.57	12.08	9.92	15.45	3.71	0.41	2.82	0.52	1.56	0.36
		13-15 cm	45.35	11.67	8.17	12.68	2.70	0.58	3.20	0.53	2.07	0.29
RT110206-21		0-2 cm	38.56	11.89	9.84	15.73	3.90	0.34	2.84	0.50	1.75	0.44
		10-12 cm	45.56	12.75	9.28	12.42	3.15	0.67	3.11	0.60	1.90	0.31
		18-20	55.72	12.23	5.80	7.45	1.62	0.87	3.64	0.45	2.37	0.24
GTV10	vent B		50.34	13.28	5.29	3.58	1.84	0.58	3.65	0.51	3.9	0.24
RT110206-02		0-2 cm	8.48	1.54	11.76	4.38	0.24	0.08	6.01	0.12	0.04	0.04
		0-2 cm	43.06	12.31	9.43	10.29	3.30	0.45	3.34	0.50	3.50	0.42
RT110206-11		4-6 cm	9.31	1.91	13.99	0.37	0.35	0.09	6.19	0.18	0.04	0.04
		7-9 cm	10.01	2.20	13.00	0.36	0.39	0.09	5.44	0.19	0.04	0.05
RT110206-14		0-2 cm	40.40	11.74	9.19	15.69	3.18	0.37	3.16	0.46	1.82	0.47
GT110206			28.59	8.49	11.61	5.35	2.45	0.24	2.70	0.43	0.99	0.56
GT110207	vent D		16.48	1.65	59.01	1.49	1.68	0.43	4.18	0.05	0.44	0.79
GT110208			12.73	3.01	41.76	0.42	1.18	0.10	1.72	0.22	0.05	0.83
GT110210			15.02	1.65	15.56	0.44	0.21	0.16	4.01	0.18	0.40	0.31
GT110211			15.96	2.59	56.69	1.14	1.26	0.41	4.66	0.12	1.75	1.75
GT110212			52.29	14.71	12.12	7.82	3.96	0.45	3.60	0.88	0.23	0.13
	center	0-2 cm	42.06	11.74	9.13	14.74	3.29	0.44	3.20	0.51	1.39	0.36
		4-6 cm	37.95	11.08	9.19	15.75	3.34	0.44	3.19	0.50	2.05	0.47
MC08H-05		8-10 cm	45.56	12.28	8.36	13.57	3.04	0.50	3.13	0.51	1.23	0.29
		14-16 cm	39.87	11.71	9.81	16.82	3.39	0.42	3.04	0.50	2.03	0.47
		25-27 cm	39.81	11.57	9.85	15.89	3.49	0.41	3.05	0.49	2.02	0.46
MT110204		0-2 cm	45.98	13.02	9.54	14.44	3.46	0.45	3.12	0.54	1.25	0.36
		6-8 cm	43.37	12.29	8.90	15.27	3.30	0.45	3.12	0.51	1.59	0.33
		20-22 cm	39.86	11.60	9.87	16.01	3.49	0.42	3.13	0.50	1.96	0.46

CaO의 함량이 MC08H-05 시료의 경우 전 구간에서 13.6-16.8%, MT110204 시료는 14.4-16.0% 등으로 높게 나타나는 것으로도 확인할 수 있다 (Table 2). 유도결합 플라즈마 방출분광기 (ICP-AES)로 분석한 미량원소 분석 결과 Cu, Zn, Pb, As, Ba 등이 MT110204 시료보다 MC08H-05 시료에서 약간 높게 검출되는 것으로 보아 (Table 3), MC08H-05 시료는 열수의 영향을 조금이나마 받은 것으로 해석된다.

열수분출구 A 지역

열수분출구 A 부근에서 1차년도 해저괴상황화물광상 탐사에서 1개, 3차년도 탐사에서 3개의 시료를 채취하였다. 1차년도 탐사에서 채취된 GTV09 시료는 방해석과 중정석으로 구성되어 있으며, 스멕타이트, 섬아연석(sphalerite, ZnS)과 중정석, 3.57Å 피크를 가지는 클리노클레이스 (clinoclase, Cu₃AsO₄(OH))가 포함된다 (Fig. 3).

Table 3. Trace element composition for samples using ICP-AES (ppm)

Station	area	depth	Cu	Zn	Pb	Ba	Cd	As	Sb
GT110213	vent A		4230	3650	690	114000	29.2	990	60.1
		0-2 cm	200	276	133	3420	<4.0	62.3	<4.0
RT110206-17		4-6 cm	205	301	141	3240	<4.0	60.8	<4.0
		13-15 cm	261	535	239	5570	<4.0	69.7	<4.0
RT110206-21		0-2 cm	216	286	154	3300	<4.0	75.3	<4.0
		10-12 cm	274	512	195	3860	<4.0	57.5	<4.0
		18-20	233	746	213	3780	<4.0	82.2	<4.0
GTV10	vent B		76.5	303	128	52200	<20.0	565	<20.0
RT110206-02		0-2 cm	21900	200000	13100	121000	1070	458	751
		0-2 cm	468	957	662	23600	<4.0	222	14.2
RT110206-11		4-6 cm	24300	195000	11200	160000	954	542	534
		7-9 cm	21400	167000	10200	187000	837	416	472
RT110206-14		0-2 cm	254	502	402	10700	<4.0	90.9	5.8
GT110206			3040	5310	3210	128000	<20.0	637	91.8
GT110207	vent D		<4.0	63.4	1840	102	<4.0	6790	13.6
GT110208			55300	9010	1800	108000	49.8	2220	182
GT110210			71600	71200	5000	15500	725	14600	878
GT110211			757	325	1090	948	<4.0	7560	83
GT110212			144	542	13	254	<4.0	86.9	<4.0
MC08H-05	center	0-2 cm	137	221	56.4	583	<4.0	59.8	<4.0
		4-6 cm	162	189	83.7	612	<4.0	76.9	<4.0
		8-10 cm	125	229	51.3	817	<4.0	54.7	<4.0
		14-16 cm	155	184	81.4	592	<4.0	74.8	<4.0
		25-27 cm	157	239	90.5	741	<4.0	71.8	<4.0
MT110204		0-2 cm	99.5	113	35.2	548	<4.0	48.3	<4.0
		6-8 cm	106	111	40.7	463	<4.0	49.5	<4.0
		20-22 cm	135	127	69.7	500	<4.0	66.9	<4.0

RT110206-17 시료는 0-2 cm, 4-6 cm 및 13-15 cm 등 3개 구간으로 구분하여 조사하였는데, 주로 사장석과 방해석으로 구성되며, 중정석이 소량 포함된다. 0-2 cm 구간에서 섬아연석과 클리노클레이스, 13-15 cm 구간에서 석영이 포함되어 있다 (Fig. 3). 일반적으로 하부 구간으로 갈수록 방해석의 함량은 감소하는데, 이것은 주성분 중 CaO의 함량 감소에 의하여 지지된다(Table 2). 점토부분의 정방위시료 X선회절분석 결과 13-15 cm 구간

에서 스�멕타이트와 소량의 카올리나이트가 존재한다. 미량성분 분석 결과 RT110206-17 시료에는 Cu, Zn, Pb, Ba 등이 각각 200-261 ppm, 276-535 ppm, 133-535 ppm, 3,240-5,570 ppm 포함되어 있다. 이들 미량원소 함량은 대체로 심도 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다(Table 3).

RT110206-21 시료 역시 0-2 cm, 10-12 cm 및 18-20 cm 등 3개 구간으로 구분하여 X선회절분석을 실시한 결과, 대부분 사장석과 방해석, 석영으

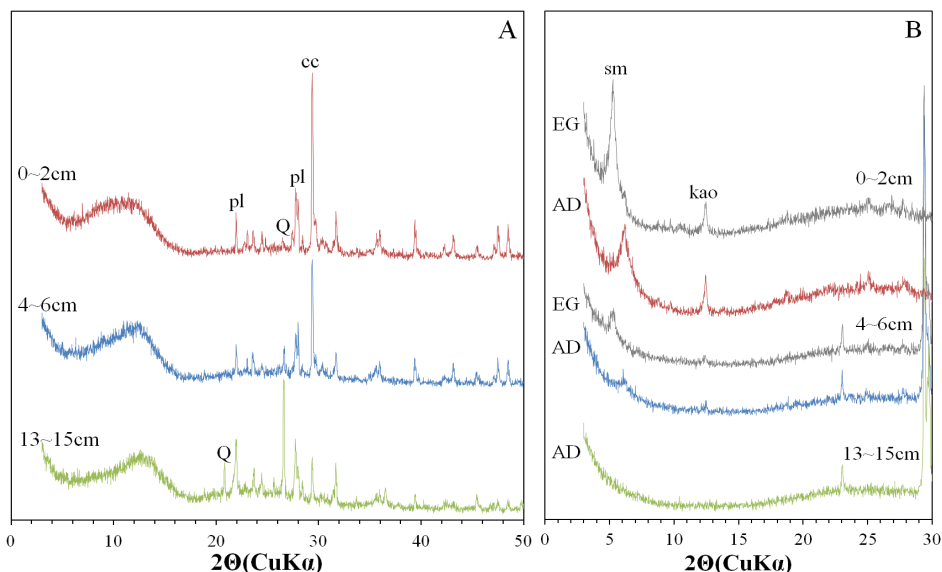


Fig. 4. X-ray diffraction patterns for RT110206-21 sample. (A) bulk sample, (B) preferred oriented sample for clay fraction. AD: air-dried, EG: ethylenglycolated. cc, calcite; kao, kaolin mineral; pl, plagioclase; Q, quartz; sm, smectite.

로 구성되며, 섬아연석과 클리노클레이스가 소량 포함된다. 일반적으로 하부 구간으로 갈수록 방해석의 함량은 감소하고, 석영의 함량은 증가한다. 수심에 따른 방해석 함량의 감소는 주성분 중 CaO의 함량 감소에 의하여, 석영 함량의 증가는 주성분 중 SiO₂의 함량 증가에 의하여 뒷받침된다 (Table 2). 점토부분의 정방위시료 X선회절분석 결과 18-20 cm 구간을 제외하고 전 구간에서 스멕타이트와 카올리나이트가 존재하는 것으로 보아 이 질변질작용에 해당하는 열수변질작용을 경험한 것으로 판단된다(Guilbert and Park, 1986; Cole, 1988; Seyfried *et al.*, 1988; Giorgetti *et al.*, 2009). 하부 구간으로 갈수록 스멕타이트의 함량은 감소하는 경향을 가진다(Fig. 4). 미량성분 분석 결과 RT110206-21 시료 역시 RT110206-17 시료와 같이 Cu, Zn, Pb, Ba 등이 각각 216-274 ppm, 286-746 ppm, 154-213 ppm, 3,300-3,860 ppm 포함되어 있다. 이들 미량원소 함량은 일반적으로 심도가 깊어지면 증가하는 경향을 나타낸다(Table 3)

GT110213 시료는 상부와 하부로 나누어 분석하였는데, 모두 석고와 중정석이 다량으로 포함되어 있다(Fig. 3). 이 시료는 열수분출구 A 지역의 모든 시료들이 가지고 있는 방해석이 포함되어 있지 않아 다른 시료와 구별된다. 석고와 중정석은 상부

보다 하부 시료에 더 많이 포함되어 있다. 하부 시료에는 섬아연석과 클리노클레이스가 다량 존재하며, 스멕타이트도 다량 포함되어 있다. 미량성분 분석 결과 이 시료에는 열수분출구 A 지역에서 가장 많은 Cu (4,230 ppm), Zn (3,650 ppm), Pb (690 ppm), Ba (114,000 ppm)이 포함되어 있으며, As 함량 역시 990 ppm으로 가장 높다. 이와 같은 높은 미량원소 함량은 이 시료 내에 많은 클리노클레이스의 존재 이유가 되는 것으로 여겨진다.

열수분출구 A 지역의 시료는 대부분 사장석, 방해석, 석영 등으로 구성되며 열수로부터 생성된 것으로 생각되는 광물로는 중정석, 석고, 섬아연석, 클리노클레이스 등이 존재한다. 구리를 포함하는 광물인 클리노클레이스가 많이 함유되어 있는 시료는 GT110213 하나 밖에 없는 것으로 보아 이 지역 대부분은 열수에 의한 영향을 비교적 약하게 받은 것으로 생각된다. 이러한 결과는 이들 시료에 대한 미량원소 분석 결과에서도 나타나는데, GT110213 시료에서만 매우 높은 Cu (4,230 ppm), Zn (3,650 ppm), Pb (690 ppm), Ba (114,000 ppm) 함량을 나타내고 나머지 시료들은 이 시료에 비하여 모두 1/5 이하인 사실에 의해서도 입증된다 (Table 3). 점토 부분에 대한 XRD 분석 결과에서 카올리나이트가 매우 소량 포함되어 있고 대부분

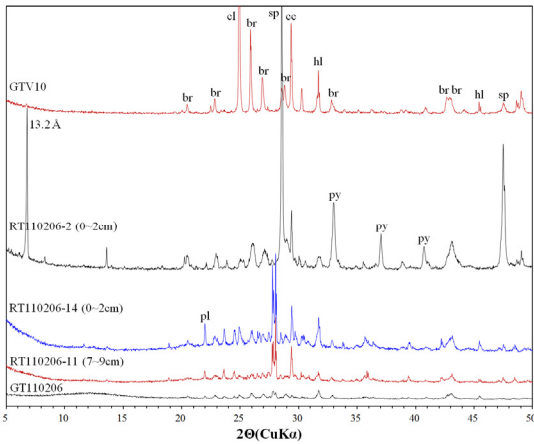


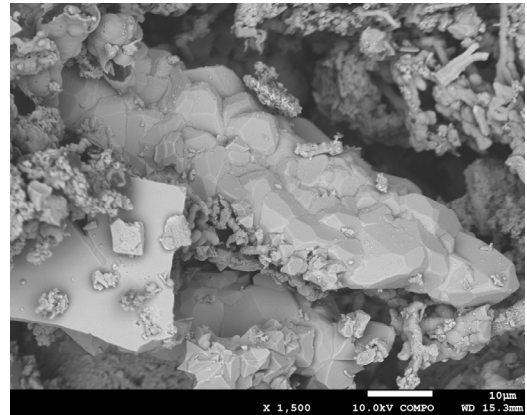
Fig. 5. X-ray diffraction patterns for volcanic vent B and C area. Top to bottom, sample GTV10, RT110206-02 (0-2 cm), RT110206-14(0-2 cm), RT110206-11 (7-9 cm), GT110206. br, barite; cc, calcite; cl; clinoclase; hl, halite; pl, plagioclase; py, pyrite; sp, sphalerite.

스펙타이트인 것도 이 지역이 약한 이질변질작용을 받은 것을 뒷받침하는 것으로 생각된다(Meyer and Hemley, 1967; Barnes, 1979; Guilbert and Park, 1986).

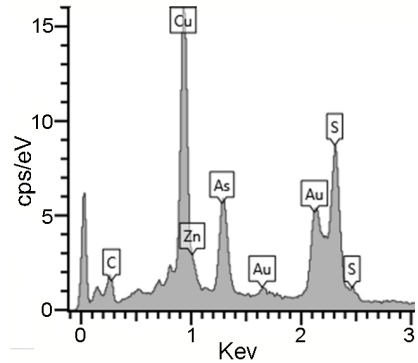
열수분출구 B와 C 지역

열수분출구 B와 C는 매우 인접한 지역인데, 여기에서 1차년도 해저괴상황화물광상 탐사에서 1개, 3차년도 탐사에서 4개의 시료를 채취하였다. GTV10 시료는 사장석과 방해석으로 구성되고 소량의 중정석, 섬아연석과 클리노클레이스가 존재한다(Fig. 5). 점토 부분의 정방위시료 X선회절분석 결과 스펙타이트와 소량의 카올리나이트가 포함되어 있다. 주사전자현미경 분석을 통하여 Cu, As, O로 구성된 클리노클레이스의 존재를 확인할 수 있다(Fig. 6). 미량원소 분석 결과 매우 높은 Ba (52,200 ppm) 함량과 다소 높은 Zn 함량(303 ppm)에 비해 Cu와 Pb는 각각 76.5 ppm과 128 ppm으로 다소 낮은 함량을 나타낸다(Table 3).

GT110206 시료는 주로 사장석과 중정석으로 구성된다. 중정석의 존재는 주원소 중 매우 낮은 SiO₂ 함량(28.59%)과 미량원소 중 매우 높은 Ba 함량(128,000 ppm)에 의하여 입증된다. 이 시료에는 섬아연석, 황동석, 황철석 등 다양한 황화광물



(A)



(B)

Fig. 6. (A) SEM microphotograph of clinoclase, (B) EDS pattern of clinoclase.

이 존재하는데, 미량원소 분석에서 높은 Zn (5,310 ppm), Cu (3,040 ppm), Pb (3,210 ppm) 함량에 의하여 지지된다(Table 3).

RT110206-02 시료는 두 개의 시료로 구분되는데, 주로 방해석, 사장석 및 중정석으로 구성된다. 이 시료에는 섬아연석과 황철석 등 다양한 종류의 황화광물이 존재하며, 13.2Å 피크를 가지는 광물이 존재한다. 이 시료는 매우 낮은 SiO₂ 함량 (8.48%), 매우 높은 Zn (200,000 ppm), Cu (21,900 ppm), Pb (13,100 ppm), Cd (1,070 ppm), Ba (121,000 ppm) 함량을 나타내는 것으로 보아 황화물 광석이 매우 많이 포함된 것으로 여겨진다. 특히 Zn과 Pb의 양은 연구된 모든 시료 중 가장 높은 함량을 나타낸다.

RT110206-11은 0-2 cm, 4-6 cm 및 7-9 cm 등 3개 구간으로 구분하여 연구하였다. 전체 구간에서 방해석이 존재하였고, 0-2 cm 구간과 4-6 cm 구간

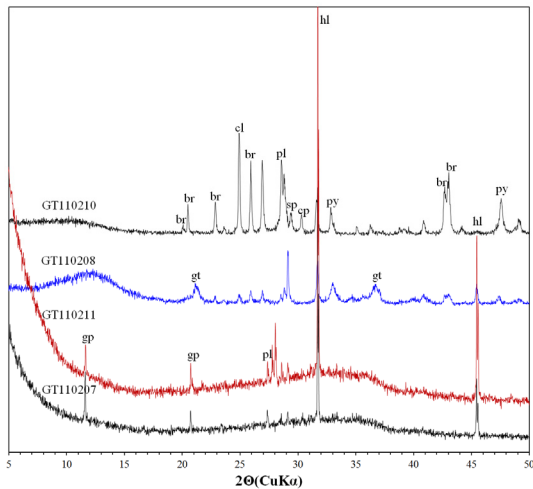


Fig. 7. X-ray diffraction patterns for volcanic vent D area. Top to bottom, sample GT110210, GT110208, GT110211, GT110207. br, barite; cl; clinoclase; cp, chalcopyrite; gp, gypsum; gt, goethite; hl, halite; pl, plagioclase; py, pyrite; sp, sphalerite.

에서는 사장석, 4-6 cm 구간과 7-9 cm에서는 중정석과 황철석, 섬아연석이 존재하였다. 하부로 갈수록 섬아연석의 함량이 증가하였다. 또 4-6 cm 구간에서는 12.9Å의 회절선을 가지는 광물이 포함되었다. 정방위시료 X선회절분석 결과 스�멕타이트가 존재하였다. 심도에 따라 구분한 세 시료 모두 많은 양의 기본 금속 원소(base metal)을 포함하고 있다. 특히 4-6 cm 및 7-9 cm 구간에 매우 높은 Zn (167,000-195,000 ppm), Cu (21,400-24,300 ppm), Pb (10,200-11,200 ppm), Cd (837-954 ppm), Ba (160,000-187,000 ppm) 함량을 나타내는데, 이러한 높은 함량은 황화물 광석이 매우 많이 포함되어 있기 때문으로 판단된다(Table 3). 이와 같은 사실은 이들 시료에서 확인되는 매우 낮은 SiO₂ 함량 (9.31-10.01%)에 의해서도 지지된다(Table 2).

RT110206-14 시료는 두 구간으로 구분되는데, 두 구간 모두 사장석과 방해석으로 구성되고 중정석이 포함되어 있다(Fig. 5). 점토 부분의 정방위시료 X선회절분석 결과 소량의 스�멕타이트가 존재는 것으로 보아 이질변질작용에 해당하는 열수변질작용이 있었음을 알 수 있다. 이 시료는 열수분출구 A 지역의 다른 시료에 비하여 다소 낮은 Zn (502 ppm), Cu (254 ppm), Pb (402 ppm), Ba (10,700 ppm) 함량을 가지고 있는 것으로 보아 광석광물의

함량이 매우 낮은 사실과 부합된다.

분출구 B와 C 지역의 시료는 사장석과 방해석으로 구성되며, 중정석, 클리노클레이스, 섬아연석, 황동석, 황철석 등 다양한 황화 및 황염광물들이 포함되어 있다. 미량원소 분석 결과 중정석이 검출된 시료에서는 모두 Ba의 함량이 52,200-187,000 ppm 정도로 높은 값을 나타내고 있다(Table 3). 섬아연석이 검출된 시료들인 GT110206, RT110206-02, RT110206-11에서는 모두 높은 Zn 함량이 나타나고, 황동석이 검출된 GT110206에서는 Cu가 21,900 ppm으로 역시 높게 나타남을 알 수 있다. 이런 황화광물의 존재를 통하여 분출구 B와 C 지역은 칼데라 지역이나 분출구 A 지역에 비하여 보다 높은 열수변질을 겪었거나 겪고 있는 중임을 예상할 수 있다.

열수분출구 D 지역

GT110207-GT110212 등 5개 시료는 오래된 침니 군집체가 매우 우세한 지역에서 채취된 것이다. 이 지역의 대부분은 침니 혹은 열수 crust의 표면에 얇게 황갈색의 퇴적물이 퇴적되어있는 지역이다. 그러나 표면에 황갈색 퇴적물은 GTV를 이용하여 시료를 채취하는 과정에서 채부유되어 대부분 제거되었고 채취된 시료는 침니와 붉은색의 철산화물이 우세하게 나타났다. 이런 산화물의 우세는 X선회절도형에서 배경값이 높게 나타나는 것과 매우 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다(Fig. 7).

GT110207와 GT110211시료는 석고와 사장석으로 주로 구성되지만, 주성분 중 Fe₂O₃ 함량이 각각 59.01%와 56.69%로 매우 높은 것으로 보아 비정질 내지 매우 결정도가 낮은 철(수)산화물이 존재할 것으로 판단된다. GT110211시료에는 1.75%의 MnO 성분도 포함하기 때문에 철(수)산화물 이외에 망간(수)산화물도 존재할 것으로 여겨진다. 두 시료는 모두 미량성분 중 Pb (1,840, 1,090 ppm)와 As (6,790, 7,560 ppm)만 높게 나타난다. GT110212 시료는 사장석으로 주로 구성되며, 미량성분 중 Zn의 함량(542 ppm)만 높게 나타난다(Table 3).

GT110208 시료는 섬아연석, 황철석, 중정석 및 침철석(goethite)으로 주로 구성되며, 클리노클레이스도 존재한다. 이 시료는 매우 높은 Cu (55,300 ppm)를 가지며, Zn (9,010 ppm), Pb (1,800 ppm), Ba (108,000 ppm), As (2,220 ppm)도 많이 포함한다. GT110210 시료는 방해석과 중정석, 섬아연

석과 황동석으로 구성되며, 클리노클레이스와 황철석을 소량 포함한다. 이 시료는 분석된 시료 중 가장 높은 Cu 함량(71,600 ppm)을 가지는데, 이것은 황동석과 클리노클레이스의 존재에 의하여 확인된다. 이 시료는 Cu 이외에도 높은 Zn (71,200 ppm), Pb (5,000 ppm), As (14,600 ppm), Sb (878 ppm), Ba (15,500 ppm) 함량을 가지고 있다(Table 3).

분출구 D 지역에서도 분출구 B와 C 지역에서와 같이 섬아연석, 황철석, 중정석, 클리노클레이스 및 침철석 등 다양한 종류의 열수광물인 존재한다. GT110207, GT110208 및 GT110211 시료의 XRD 도형에서 배경값이 매우 높게 나타나는데, 주성분 분석 결과 이들 시료에는 철의 함량이 42-59% 정도로 매우 높기 때문인 것으로 여겨진다. 구리의 황염광물인 클리노클레이스를 포함하고 있는 시료들인 GT110208과 GT110210에서는 As의 함량이 각각 2,220 ppm과 14,600 ppm으로 매우 높은 값을 나타낸다(Table 3). 섬아연석을 함유하는 시료에서는 높은 Zn 값, 황동석을 함유하는 시료에서는 높은 Cu 값을 나타내고 있어 X선회절분석 결과와 일치된 결과를 나타낸다. 분출구 D 지역 역시 분출구 B와 C 지역과 같이 열수의 영향을 강하게 받고 있음을 알 수 있다.

Cu가 풍부한 침니는 300°C 이상 고온 열수로부터 형성되는데 반해, Zn이 풍부한 침니는 다소 낮은 온도(261°C)의 열수 유체에 의하여, Cu 함량이 낮고 Pb 함량이 높은 침니는 250°C 이하의 매우 낮은 열수의 영향에 의하여 생성된다(Koski *et al.*, 1994). 블랙 스모커(black smoker)에 의하여 생성된 해저열수광상의 경우 과상 황화물 광체는 심부에서 천부로 감에 따라(황동석-황철석대)/(섬아연석-방연석대)/(황철석-중정석대)의 대상 분포를 나타내는 것으로 보아(Lydon, 1988), Cu-Fe 광석은 Zn-Pb 광석에 비하여 높은 온도에서 형성되는 것으로 여겨진다(Hannington and Scott, 1988; Scott, 1997).

열수분출구 D 지역의 경우, GT110208과 GT110210 시료는 Cu와 Zn 함량은 높지만, Pb 함량이 낮은 것으로 보아 고온의 열수에 영향을 받았음을 유추할 수 있다. 반면 GT110212 시료는 적은 양의 Zn만 포함하는 것으로 보아 온도가 상대적으로 낮은 저온의 열수에 영향을 받았다고 판단된다(Hannington and Scott, 1988; Scott, 1997). GT110207와 GT110211의 경우 Pb와 As를 제외하고 대부분의 미량 원소의 농도가 낮은데(Table 3), 이것은 이들 시료들이 다량의 Mn/Fe 수산화물

로 구성된 시료로 판단된다(Table 2). Mn/Fe 수산화물 내 Cu와 Zn의 농도는 일반적인 열수 침전물에 비해 낮은 특징을 가지고 있다(Usai and Someya, 1997; Um *et al.*, 2013).

열수분출구 B와 C 지역의 경우, RT110206-02와 RT110206-11 시료는 매우 높은 Cu, Zn, Pb 함량을 가지는 것으로 보아 비교적 고온의 열수에 의하여 영향을 받아 생성된 것으로 여겨진다. RT110206-14와 GT110206 시료는 Cu 함량은 낮지만 Zn과 Pb 함량이 상당히 높은 것으로 보아 저온의 열수 영향 하에서 생성된 것으로 간주된다.

결론

이번 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 열수분출구 A 지역에는 중정석, 석고, 스�멕타이트, 카올린 광물, 섬아연석, 클리노클레이스, 열수분출구 B와 C 지역에는 중정석, 스�멕타이트, 카올린 광물, 섬아연석, 황동석, 황철석, 클리노클레이스, 그리고 열수분출구 D 지역에는 중정석, 석고, 황동석, 섬아연석, 황철석, 침철석, 클리노클레이스 등이 존재한다. 이를 통하여 열수분출구 지역에는 활발한 열수활동이 있었음을 알 수 있다.

(2) 점토부분에 대한 분석 결과 칼데라 중심부 지역을 제외한 모든 지역에서 스�멕타이트와 소량의 카올리나이트가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이런 열수변질광물의 존재는 열수분출구 지역에서 이질변질작용에 해당하는 열수변질이 있었음을 지시한다.

(3) 광물조성, 주성분과 미량성분 분석 결과로 판단할 때 열수분출구 B, C, D 지역이 비교적 강한 고온의 열수변질작용을 받아 구리와 비소가 부화되었으며, 열수분출구 A와 칼데라 중심부 지역은 열수의 영향을 적게 받았거나 저온의 열수 작용을 받아 아연이 일부 부화된 것으로 판단된다. 그러므로 유용한 열수광상 탐사는 열수분출구 B, C, D 지역에서 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

사사

본 연구는 2012년-2013년 한국지질자원연구원의 위탁 과제(과제명: 광화대 주변 해저퇴적물의 광물조성 연구)에 의해 진행되었으며, 연구비를 지원하여 준 한국지질자원연구원에 감사드립니다. 부족한 원고를 읽고 세심하게 심사하여 주신 김건영 박사님, 서정훈 박사님과 익명의 심사위원께도 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Arculus, R.J. (2005) Arc-backarc systems of northern Kermadec-Tonga. *New Zealand Minerals Conferences Proceedings*, 45-50.
- Barnes, H.L. (1979) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed.). John Wiley & Sons, 798p.
- Barrett, T.J., Jarvis, I., Longstaffe, F.J., and Farquhar, R. (1988) Geochemical aspects of hydrothermal sediments in the Eastern Pacific Ocean: An update. *Canadian Mineralogist*, 26, 841-858.
- Cho, H.G., Kim, S.-H., and Yi, H.-Y. (2012a) Clay mineral distribution and characteristics in the southeastern Yellow Sea mud deposits. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 25(3), 163-173. (in Korean with English abstract)
- Cho, H.G., Kim, Y.-H., Um, I.-K., and Choi, H. (2012b) Hydrothermal alteration around the TA 26 Seamounts of the Tofua Volcanic Arc in Lau Basin, Tonga. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 25(4), 233-247. (in Korean with English abstract)
- Cole, T.G. (1988) The nature and origin of smectite in the Atlantis II Deep, Red Sea. *Canadian Mineralogist*, 26, 755-763.
- de Ronde, C.E.J., Massoth, G.J., Baker, E.T., and Lupton J.E. (2003) Submarine hydrothermal venting related to volcanic arcs. *Economic Geology Special Publication*, 10, 91-110.
- de Ronde, C.E.J., Hannington, M.D., Stoffers, P., Wright, I.C., Ditchburn, R.G., Reyes, A.G., Baker, E.T., Massoth, G.J., Lupton, J.E., Walker, S.L., Greene, R.R., Soong, C.W.R., Ishibashi, J., Lebon, G.T., Bray, C.J., and Resing, J.A. (2005) Evolution of a submarine magmatic-hydrothermal system: Brothers volcano, southern Kermadec arc, New Zealand. *Economic Geology*, 100, 1097-1133.
- Giorgetti, G., Monecke, T., Kleeberg, R., and Hannington, M.D. (2009) Low-temperature hydrothermal alteration of trachybasalt at Conical Seamount, Papua New Guinea: Formation of smectite and metastable precursor phases. *Clays and Clay Minerals*, 57, 725-741.
- Goodfellow, W.D. and Blaise, B. (1988) Sulfide formation and hydrothermal alteration of hemipelagic sediment in Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge. *Canadian Mineralogist*, 26, 675-696.
- Guilbert, J.M. and Park, C.F. Jr. (1986) *The Geology of Ore Deposits* (2nd ed.). W.H. Freeman and Company, 985p.
- Hannington, M.D. and Scott, S.D. (1988) Gold and silver potential of polymetallic sulphide deposits on the sea floor. *Marine Minerals*, 7, 271-282.
- Hekinian, R., Mühe, R., Worthington, T.J., and Stoffers, P. (2008) Geology of submarine volcanic caldera in the Tonga Arc: Dive results. *Journal of Volcanic and Geothermal Research*, 176, 571-582.
- Kim, H.S., Jung, M.-S., Kim, C.H., Kim, J., and Lee, K.-Y. (2008) The exploration methodology of sea-floor massive sulfide deposit by use of marine geophysical investigation. *Mulli-Tamsa*, 11(3), 167-176. (in Korean with English Abstract)
- KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute) (2009) Cruise report on SMST2009 (KODOS09-H). (in Korean)
- KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute) (2011) Cruise report on SMST2011 (KODOS11-H), 210p. (in Korean)
- Koski, R.A., Jonasson, I.R., Kadko, D.C., Smith, V.K., and Wong, F.L. (1994) Compositions, growth mechanisms, and temporal relations of hydrothermal sulfide-sulfate-silica chimneys at the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 99, 4813-4832.
- Lydon, J.W. (1988) Volcanogenic massive sulphide deposits. Part 2: Genetic models. *Geoscience Canada*, 15, 43-65.
- 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 and Geosystems*. 8(11), 26pp.
- Meyer, C. and Hemley, J.J. (1967) Wall rock alteration: In Barnes, H.L. (ed) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Holt, Rinehart and Winston, 166-235.
- MTLM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009) Report on the development of mineral resources (submarine hydrothermal deposits, manganese crust) in southwestern Pacific area. I. Exploration. 244p. (in Korean)
- Rose, A.W. (1970) Zonal relations of wall rock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 65, 920-936.
- Scott, S.D. (1997) Submarine hydrothermal systems and deposits. In: Barnes, H.L. (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (3rd Ed.), John Wiley, 797-875.

- Seyfried, W.E.Jr., Berndt, M.E., and Seewald, J.S. (1988) Hydrothermal alteration processes at Mid-Ocean Ridges: Constraints from diabase alteration experiments, hot-spring fluids and composition of the oceanic crust. *Canadian Mineralogis*, 26, 787-804.
- Stoffers, P., Worthington, T., and the Shipboard Scientific Party (2003) Cruise Report SONNE 167, Louisville Ridge: Dynamics and magmatism of a mantle plume and its influence on the Tonga-Kermadec subduction system: Reports of the Institut für Geowissenschaften, Universität Kiel, No. 20, 276p.
- Stoffers, P., Worthington, T.J., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M., Hekinian, R., Schmidt, M., Lundsten, L.J., Evans, L.J., Vaiomo'unga, R., and Kerby, T. (2006) Submarine volcanoes and high-temperature hydrothermal venting on the Tonga arc, south-west Pacific. *Geology*, 34, 453-456.
- Um, I.-K., Chun, J.-H., Choi, H., and Choi, M.S. (2013) Chemical characteristics for hydrothermal alteration of surface sediments from submarine volcanoes of the Tonga Arc. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 26(4), 245-262. (in Korean with English abstract)
- Usai, A., and Someya, M. (1997) Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the north-west Pacific. In: Nicholson, K., Hein, J.R., Buhn, B., and Dasgupta, S. (Eds.), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*, Geological Society of London, vol. 119. Special Publication, 177-198.
-
- Received May 19, 2014, Revised November 20, 2014, Accepted November 27, 2014, Responsibility Editor: JeongHun Seo