

통가국 라우분지 TA 26 해저산의 열수변질작용

Hydrothermal Alteration Around the TA 26 Seamounts of the Tofua Volcanic Arc in Lau Basin, Tonga

조 현 구(Hyen Goo Cho)¹ · 김 영 호(Young-Ho Kim)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 석유해양연구본부(Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 통가국 라우분지(Lau Basin)의 해저열수광상 개발을 위한 해저열수광상 분포 및 산상에 관한 특성을 규명하기 위하여 X선 회절분석을 통하여 해저열수광상 해저퇴적물 및 열수변질대의 광물조성을 연구하였다. 연구에 사용된 시료는 TA 26 해저산 주변에서 채취된 코어 시료, 기반암 및 해저퇴적물 시료이고, 벌크 시료와 점토 부분을 분리한 정방위 시료를 제작하여 X선 회절분석을 실시하였다. TA 26 해저산에서 채취된 기반암은 대부분 사장석과 석영으로 이루어져 있는 데 반하여, 표층퇴적물은 대부분 카올린광물과 스멕타이트로 구성되어 있다. 열수구 퇴적물은 대부분 석고, 중정석, 섬아연석, 황철석 등 황산염광물과 황화광물로 구성된다. 기반암과 해저퇴적물의 광물조성으로 미루어 보아, TA 26 해저산의 열수광화대는 주변에 스멕타이트 또는 카올린광물을 형성시키는 정도의 이질변질작용을 일으켰음을 알 수 있다. MC08H-06 시추 코어 시료는 상부는 비변질대, 하부는 스멕타이트와 카올린광물로 구성된 이질변질대에 해당한다. 다양한 황화광물과 황산염 광물의 존재, 이질변질작용에 해당하는 열수변질대의 존재는 TA 26 해저산 내에 해저열수광상이 존재하고 있음을 지시하는 것으로 판단된다.

주요어 : 라우분지, 해저열수광상, TA 26 해저산, X선 회절분석, 이질변질대

ABSTRACT : We have researched the distribution and characteristics of seafloor hydrothermal deposits for the development of economic mineral deposits in the Lau Basin, Tonga since 2009. In this study, we interpreted hydrothermal alteration around TA 26 seamounts of the Tofua volcanic arc using X-ray diffraction analysis for bulk sample and preferred-oriented specimen of clay fraction. We used 2 core samples and several surface samples. Plagioclase and quartz are dominant mineral in the basement rock, whereas kaolin mineral and smectite are superior in marine surface sediments. Especially sulfate and sulfide minerals such as gypsum, barite, sphalerite, and pyrite are predominant in the vent sediments. When we compare the mineral composition between basement rock and sea surface sediments, argillic alteration zone composed of kaolin mineral and smectite could be produced by hydrothermal fluids. Based on the downcore variation of mineral assemblages, most portion of MC08H-06 core could be interpreted as argillic alteration zone composed of kaolin mineral and smectite except top 2 cm area.

*Corresponding author: +82-42-868-3332, E-mail: hunsoo@kigam.re.kr

Various sulfate or sulfide minerals and argillic alteration zone suggest a high probability of massive sulfide deposits in the seafloor of the TA 26 seamount.

Key words : Lau Basin, seafloor hydrothermal deposit, TA 26 seamount, X-ray diffraction analysis, argillic alteration zone

서 론

우리나라는 2008년 4월 남서태평양 통가국 EEZ 해역에 약 2만 4천 km²의 해저열수광상 개발을 위한 독점 탐사권을 획득하였고, 2011년 11월에는 피지국 EEZ 해역에서도 약 3천 km²의 해저열수광상 독점탐사권을 확보하였다. 또한 통가국 EEZ 내 Tofua arc의 해저 화산열도에서 해저열수광상 분포 및 산상에 관한 특성을 규명하기 위한 연구가 2008년부터 지속적으로 수행되고 있다(MTLM, 2009; 그림 1). 이 지역의 해저 화산들은 최근 지질학적 연구뿐만 아니라(George *et al.*, 2005; Stoffers *et al.*, 2006) 열수광상에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다(de Ronde *et al.*, 2003, 2005; Massoth *et al.*, 2007; Hekinian *et al.*, 2008). Tofua arc 화산열도는 Bismarck arc, Mariana arc 및 Sandwich arc와 같이 후열도 확장축(back arc spreading center)에 근접한 잘 알려진 화산 전진대(active volcanic front) 중의 하나이다(Martinez and Taylor, 2003). 이들 해저 화산들은 주로 현무암질 안산암(basaltic andesite)의 조성을 보이며, 많은 해산들의 정상 또는 칼데라에서 열수 분출이 확인되었다(Massoth *et al.*, 2007).

라우분지는 태평양판과 인도-호주판이 섭입하는 경계에 위치한 수심이 비교적 얕은(2,000~3,000 m) 활동성 후열도분지이다. 라우분지 내 통가 화산열도는 후열도 확장축이 활발한 화산 전진대에 매우 근접한 매우 흥미있는 장소이다(Martinez & Taylor, 2003). 지난 10여 년 동안 화산활동이 활발한 해저 화산들이(active seamounts) 많이 발견되었으며, 이중 일부는 열수분출공(hydrothermal vents)을 가지고 있다(de Ronde *et al.*, 2003, 2005; Stoffers *et al.*, 2003, 2006; Arculus, 2005). 이와 같은 열수분출공으로부터 나오는 유체는 해저 괴상 황화물 광상(seafloor massive sulfide deposits)을 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다(Massoth *et al.*, 2007).

라우분지는 판이 수렴해 들어가는 섭입대, 활발한 활동을 보이는 화산열도, 이를 돕는 지지층, 그

리고 잔여열도와 함께 상부 섭입대(suprasubduction zone, SSZ)로 이루어져 있다. 상부 섭입대에서는 맨틀에서 기인된 용융물질이 호상열도를 형성하며, 후열도지역에서는 지각의 확장에 의해 분지가 형성된다. 상부 섭입대의 열도와 후 열도분지는 경사진 지진대(seismic zone) 위에 위치한다. 라우분지의 열수분출공은 발루파(Valu Fa, VF) Ridge에서 처음 발견되었으며, 최근 체계적인 열수탐사가 발루파 Ridge와 ELSC (East Lau Spreading Center) 전체에서 수행됨에 따라 라우분지의 남부지역에서 광역적인 열수활동에 대한 증거가 새로이 발견되었다. 이들 연구에 따르면 중앙해령지역에서 관찰된 것과 마찬가지로 ELSC의 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 확장속도가 증가하면서 열수활동의 빈도가 점진적으로 증가함이 알려졌다(Stoffers *et al.*, 2006; Massoth *et al.*, 2007).

열수 기원 광상의 모양은 그를 통과하는 뜨거운 유체(열수용액)와 반응하여 열적, 화학적으로 평형 상태에 도달하게 되는데, 이 과정에서 모양의 색, 조직, 광물조성 및 화학조성 등이 변하게 된다. 이를 열수변질작용 또는 모양변질작용이라고 하며 열수의 흐름이 있는 기간 동안에 연속적으로 일어난다(Guilbert and Park, 1986). 이러한 변질작용은 열수 기원 광상과 공간적-시간적으로 밀접한 관계를 가지고 만들어지기 때문에 열수 기원 광상 탐사에서 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 열수변질작용은 열수용액과 모양 사이의 반응에 의하여 모양의 성질이 변화하는 것이므로, 모양 내에 새로운 광물이 형성된다. 열수변질작용은 변질작용의 결과 새로 형성된 광물 또는 광물군에 의해 강이질변질작용, 필릭변질작용, 질변질작용, 프로필라이트 변질작용 및 칼륨변질작용 등과 같이 일반적으로 분류되지만, 용어는 학자에 따라 다르게 사용되기도 한다(Meyer and Hemley, 1967; Rose, 1970; Barnes, 1979).

이번 연구의 목적은 2008년 이후 계속되고 있는 Tofua arc 화산열도에 대한 탐사 과정에서 해저열수광상의 존재 가능성이 가장 크게 부각되고 있는

해저화산 TA 26 주변 해저퇴적물 및 변질대의 광물조성을 연구하여 열수변질대의 분포와 특성을 규명하는 데 있다.

연구 시료 및 방법

TA 26 해저화산은 우리나라 탐사광구의 제일 남쪽에 위치한 화산으로 서쪽 칼데라와 동쪽의 콘으로 구성되어 있으며, 열수광화대는 칼데라 남측기저부와 콘 정상부에 발달되어 있다(그림 1). 이번 연구에 사용된 시료는 2008년 12월 7일부터 12월 24일까지 수행된 2008년 실험역 탐사(KODOS08-H), 2010년 1월 27일부터 2월 20일까지 수행된 1차년도 해저열수광상 탐사(SMST2009), 2011년 3월 24일부터 4월 8일까지 수행된 2차년도 해저열수광상 탐사(SMST2010), 2012년 1월 16일부터 1월 30일까지 수행된 3차년도 해저열수광상 탐사(SMST2011)를 통하여 채취된 코어 시료와 표층 퇴적물 시료들이다(MTLM, 2009; KORDI, 2009, 2010, 2011; Choi *et al.*, 2011, 2012).

연구시료

이번 연구에서는 2차년도 탐사(SMST2010)에서 다중코어시료채취기(Multiple Corer, MC)를 활용하여 확보한 1개 시료(MC-T10108)와 2008년 해양연구원에서 획득한 1개의 코어 시료(MC 08H-06)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 코어 시료의 특성은 표 1에 요약되어 있다.

MC 08H-06은 TA 26 정상부에 발달한 소규모 칼데라에서 획득하였다. 회수된 코어 전체 길이는 32 cm로서, 0~3 cm 구간은 암갈색(10YR3/2) 모래로 구성되어 있으며, 구간의 하부에는 화산질 암편으로 구성된 얇은 층이 형성되어 있다. 3 cm 하부에는 황 냄새가 나는 암회색(7.5YR N3) 머드가 분포한다. 상부 모래층과의 경계는 매우 뚜렷하며, 머드층 상부에는 약 1 cm 두께의 실트질 퇴적물이 나타난다(그림 2). MC-T10108시료는 TA 25와 TA 26 사이의 수심 약 1,500 m 부근에서 채취한 약 30 cm의 니질 퇴적물 시료로 하부 약 10 cm 정도는 회색 퇴적물이고 상부 약 20 cm는 황갈색의 니질 퇴적물로 되어 있다.

연구지역은 화산지역으로 많은 지역이 화산쇄설물 또는 암편으로 덮혀 있는 지역으로 주상시료를 얻기 어려운 곳이 많아 그래프시료 채취기를 이용하

여 시료를 획득하였다. 1차년도 탐사에서는 TV 카메라가 장착된 그래프시료채취기(TV guided Grab Sampler, GTV)를 운용하여 5개 표층퇴적물 시료를 획득하였다.

2차년도에는 무인잠수정(Remotely Operative Vehicle, ROV)을 이용하여 열수침니와 열수침니의 주변부에서 총 5개의 표층시료를 채취하였다. M-T10104 시료는 TA26 화산추(volcanic cone) 북쪽 지역의 침니 집합체중 black smoke로 추정되는 침니에서 채취된 흑색 세립의 쇄설 암편 시료이다. M-T10105-C1은 해저면 암반의 균열 사이에 퇴적된 황갈색의 퇴적물로 매우 미세하여 주변 해수와 혼탁액의 형태로 퇴적되어 있다. M-T10105-C4 시료는 침니의 하부에 암석과 혼재된 황갈색의 퇴적물을 채취하였으나, 황갈색의 퇴적물은 흡입과정에서 부유되어 회수되지 않고 황갈색 퇴적물 아래 존재하는 세립의 흑색 퇴적물이 채취되었다. M-T10105-C6는 침니와 M-T10105-C4의 중간에 위치한 중립의 질은 회색 사질 암석쇄설물을 채취한 시료다. M-T10106 시료는 침니 하부의 황갈색의 퇴적물을 푸쉬코어러를 이용하여 채취하였으나, 캐처(catcher) 사이로 세립의 퇴적물은 모두 유실되고 침니 표면에서 유래된 것으로 판단되는 반고화된 흑색의 암석쇄설물이 채취되었다.

3차년도 탐사에서 표층시료를 채취하기 위하여 무인잠수정의 Ekman Grab을 이용하거나 TV 카메라가 장착된 그래프시료채취기를 이용하였다. RT110203-10 시료는 TA 26 해저산의 수심 441 m에 위치하는 가파른 사면을 덮고 있는 회색의 sticky mud 퇴적물이며, RT110203-11은 수심 413 m의 비교적 평탄한 지형에서 채취한 암색의 crust와 황색의 세립질 퇴적물 시료이다. 그러나 RT110203-11는 채취하는 과정에서 crust가 grab의 틈에 끼어, 황색 세립질 퇴적물 대부분이 유실되었다. GT110201 시료와 GT110202 시료는 각각 수심 529 m와 489 m의 crust가 덮혀 있는 지역에서 채취한 것이다. Crust 위에는 황갈색 퇴적물이 얇게 존재하였으나 시료 채취시 재부유되어 모두 유실되었으며, crust 아래에 퇴적되어 있던 조립질의 현무암질의 시료만을 채취 보관하였다. GT110203 시료는 수심 544 m의 열수구 부근에서 채취한 것으로서, 상부는 미세하지만, 하부는 조립질 퇴적물로 구성되어 있다. TA 26 수심 544 m에서 열수의 온도가 약 80 °C 인 침니 군집체 사이의 황갈색 퇴적물이 보이는 지역에서 무인잠수정을 이용하여 푸쉬코어러(RT110202-

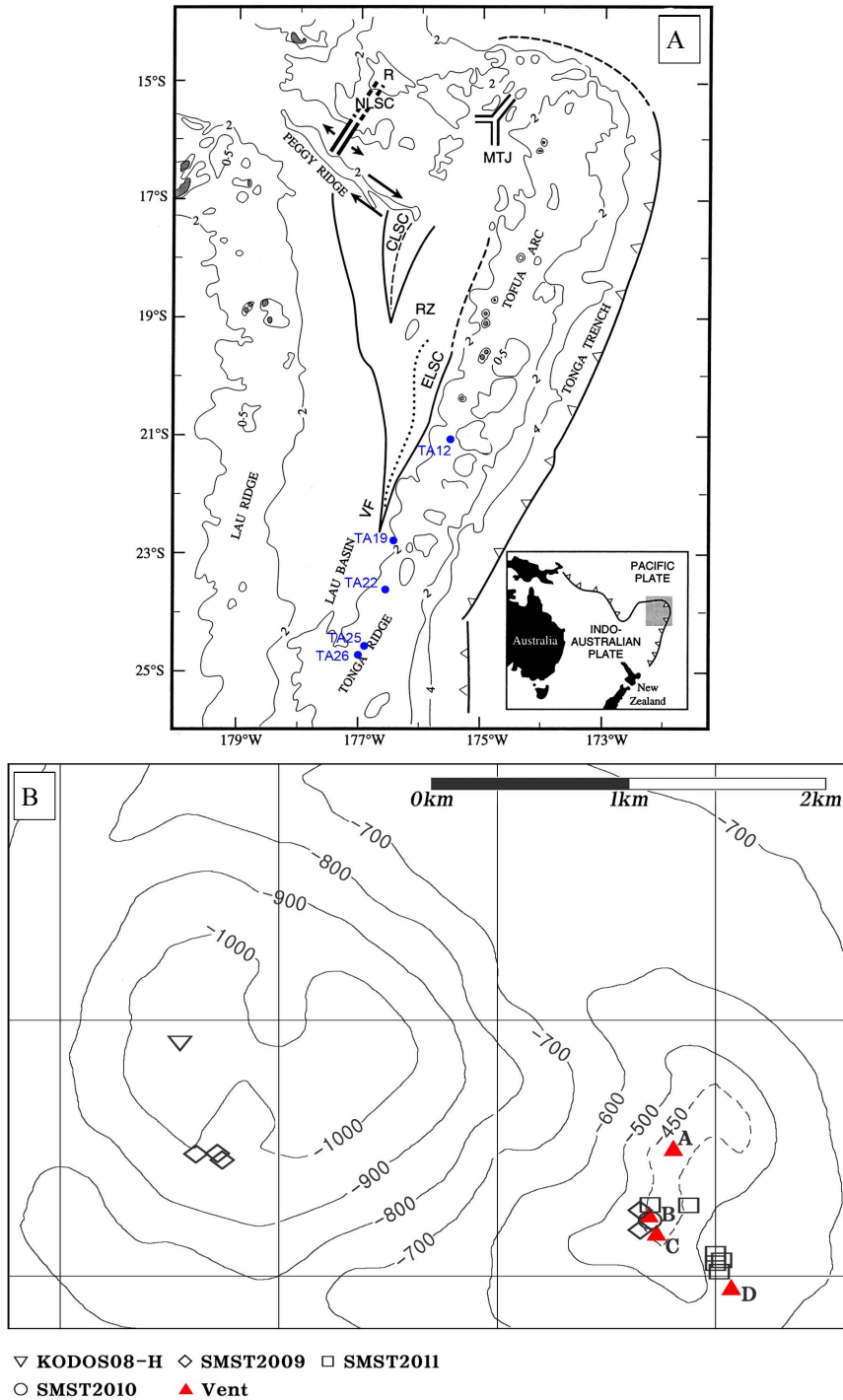


Fig. 1. (A) Regional bathymetry map (km) and tectonic setting of the Lau Basin. Plate boundaries are labeled as follows: CLSC, Central Lau Spreading Center; NLSC, Northwest Lau Spreading Center; VF, Valu Fa Ridge; MTJ, Mangatolou Triple Junction; ELSC, East Lau Spreading Center. (after KORDI, 2011) (B) Sampling locations around TA 26.

Table 1. Water depth, and core length of core samples

Station	Water depth (m)	Core length (cm)	year
MC08H-06	1,019	32	KODOS08-H
MC-T10108	1,500	30	SMST2010

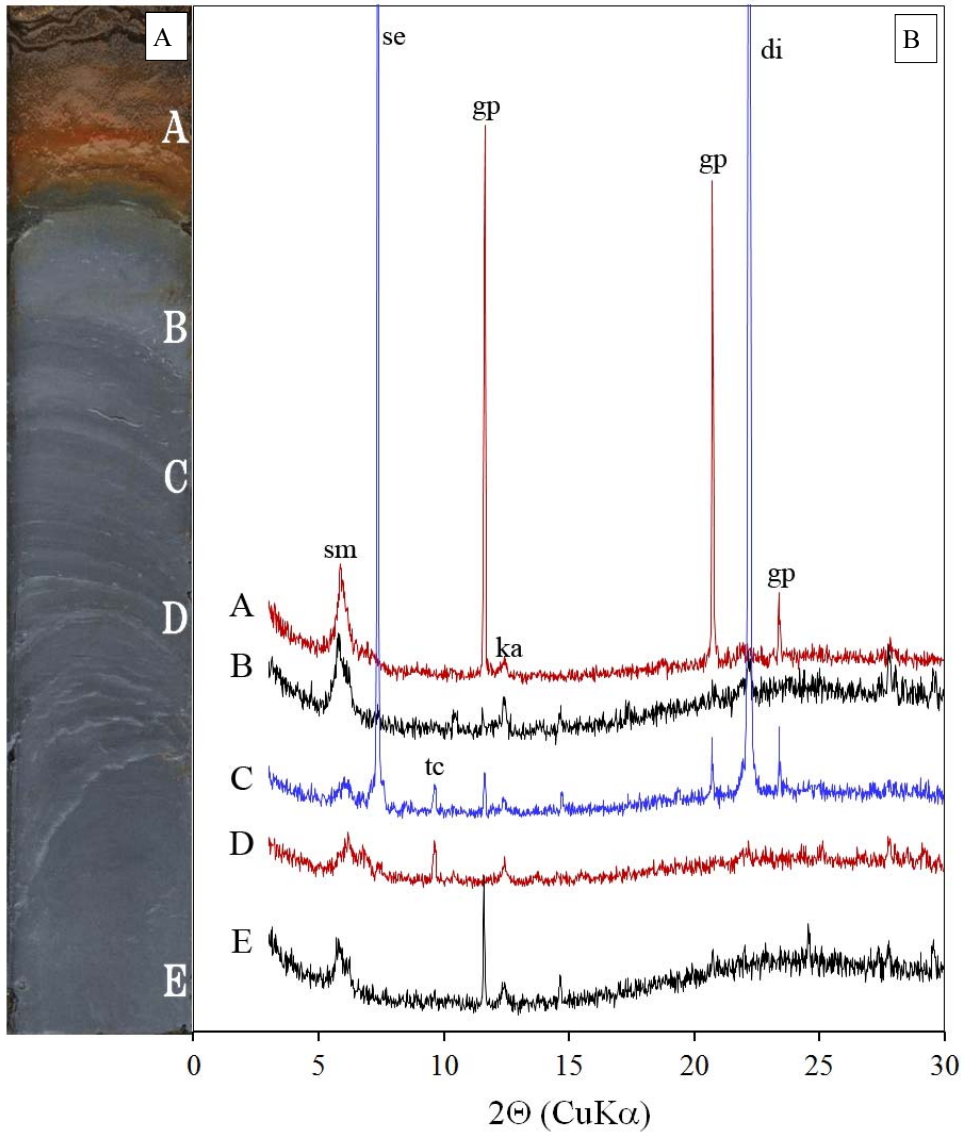


Fig. 2. (A) Photograph of MC08H-06 core. (B) X-ray diffraction patterns for air dried clay fraction of MC08H-06 core. A: 2~3 cm, B: 7~9 cm, C: 11~13 cm, D: 15~17 cm, E: 25~27 cm. sm, smectite; se, sepiolite; gp, gypsum; di, diaspore; ka, kaolin mineral; tc, talc.

Table 2. Description of surface sediments

Station	Depth (m)	Sample description	year
GTV01	987	Blackish rock fragments and small amount of brownish fine mud	
GTV02	983	Yellowish sediment with large rock fragments	
GTV03	994	Yellowish surface sediment	SMST2009
GTV07	435	Rock fragments (hot temperature)	
GTV08	414	Rock crust (small amount of Fe hydroxide (?) inside the crust) and Algal mat (?)	
M-T10104	440	Chimney, Blackish fine rock fragment	
M-T10105-C1	432	Far from the chimney, Yellowish sediment inside rock crusts	
M-T10105-C4	440	Bottom site of the chimney, Yellowish sediment	SMST2010
M-T10105-C6	440	Bottom site of the chimney, Grayish coarse sediment	
M-T10106	440	Bottom site of the chimney same site with M-T10105-C4, Yellowish sediment	
GT110201	529	Several centimeters crust covers blackish rock fragments. Blackish rock fragments sample only.	
GT110202	489	Several centimeters crust covers blackish rock fragments. Blackish rock fragments sample only.	
RT110203-10	441	White-colored sticky mud, centimeter-thick mud covered steep slope area	
RT110203-11	413	Yellowish-colored fine sediments with dark-colored thin crust, relative flat ridge-edge area	SMST2011
GT110203	544	Chimney site. 2 samples from surface (fine, low temperature) and below (coarse, high temperature)	
RT110202-4	544	Vent D site, Brownish fine sediments upper blackish rock fragments. Disturbed.	
RT110202-5	544	Vent D site, Brownish fine sediments upper blackish rock fragments. Less sample.	

4)와 드릴코어러(RT110202-5)로 시료 채취를 시도 하였다. 그러나 푸쉬코어러는 시료 채취 후 무인잠수정에 시료를 적재하는 과정에서 시료가 교란되었었으며, 드릴코어러로 채취한 시료는 하부로 시료가 유실되어 매우 적은 양만 채취되었다. 두 시료는 동일 지점에서 채취한 것으로 두 시료 모두 채취

된 양이 적어 혼합하여 보관하였다. 본 연구에 사용된 표층퇴적물의 특성은 표 2에 요약되어 있다.

연구 방법

전체 시료 내에 존재하는 광물의 종류를 알아보

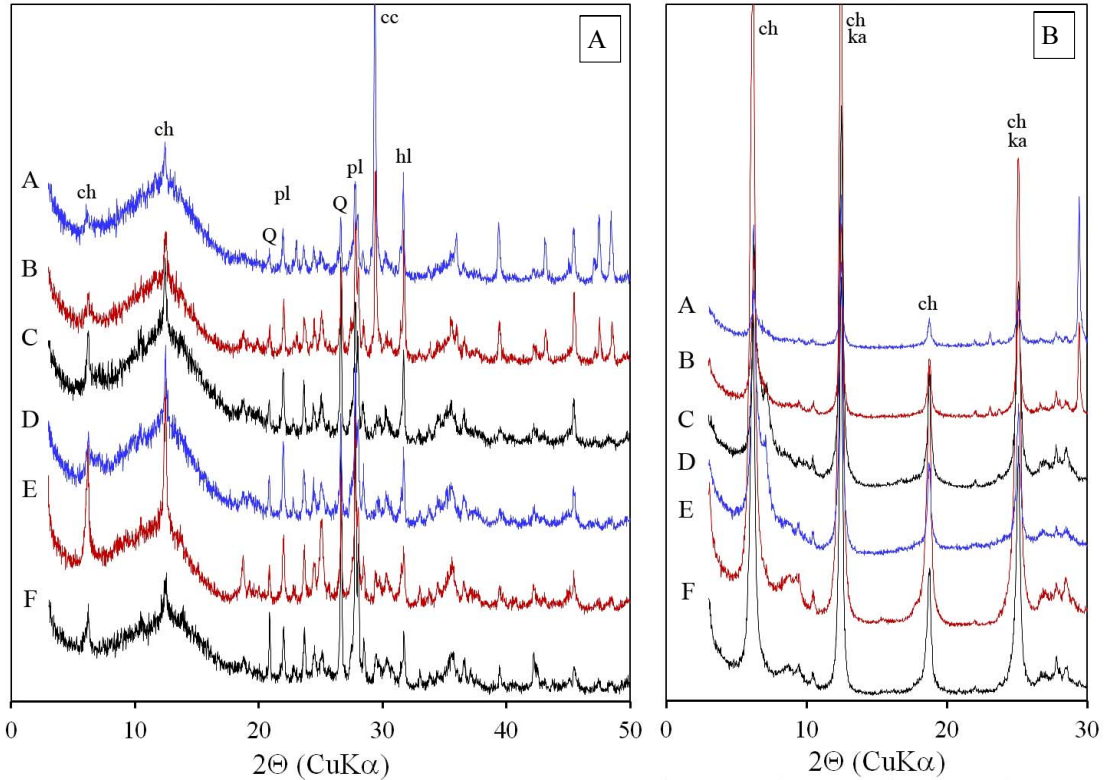


Fig. 3. X-ray diffraction patterns for MC-T10108 core. (A) bulk sample, (B) air dried clay fraction. A: 0~2 cm, B: 6~8 cm, C: 13~15 cm, D: 15~17 cm, E: 20~22 cm, F: 26~28 cm. ch, chlorite; Q, quartz; pl, plagioclase; ka, kaolin mineral; cc, calcite; hl, halite.

기 위하여 분말 시료를 제작한 다음 X선 회절분석을 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, X선 회절분석을 실시하여 그 결과를 비교하여 점토광물의 종류를 결정하였다. 점토광물에 대한 반정량분석법과 시편 제작 과정은 Cho *et al.*(2012)에 제시된 방법에 의하여 수행하였다. 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스�멕타이트 등 4가지 중요 점토광물의 상대적인 함량은 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료에서 각 광물의 특징적인 (001) 피크의 면적비를 이용하여 계산하였다 (Biscaye, 1965).

X선 회절분석은 경상대학교 지구환경과학과가 보유하고 있는 Siemens/Brucker D5005 고분해능 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색화된

파장($CuK\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하였다. 벌크 시료에 대한 정성분석은 40 kV/40 mA, 3~60° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02°, 주사시간을 2초, 회전수 30 rpm으로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절값을 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.

결과 및 토의

코어 시료

TA26 해저화산 콘 정상부에서 획득한 MC 08H-06 코어 시료의 단면을 육안으로 관찰하여 그 특징에 따라 네 부분으로 구분하였다. 0~4.5 cm 구간은 암갈색-적갈색 모래로 구성되어 있으며, 4.5~9 cm 구간은 암회색의 머드에 부분적으로 암갈

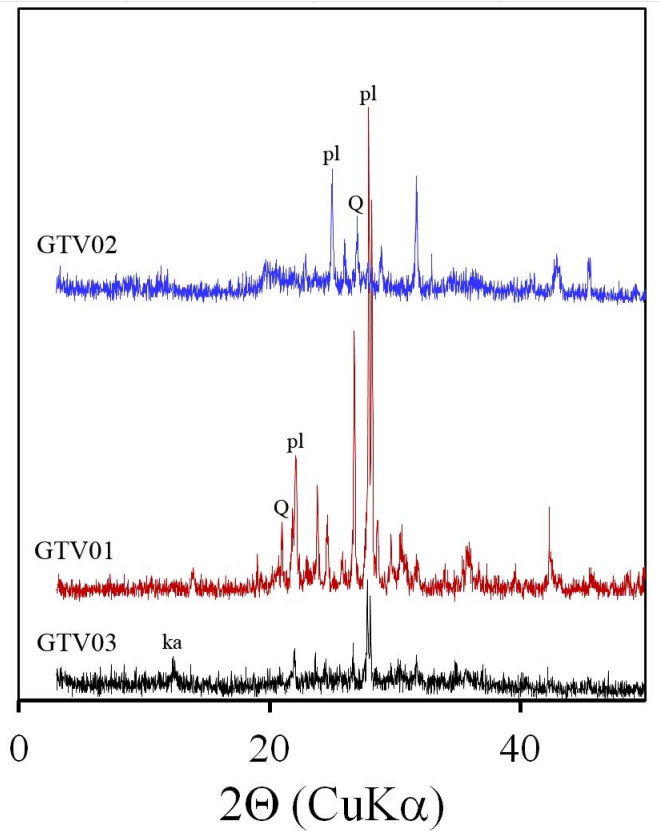


Fig. 4. X-ray diffraction patterns for surface samples in the western part of TA 26. Q, quartz; pl, plagioclase; ka, kaolin mineral.

색의 모래가 혼재해 있고, 9~24 cm 구간은 암회색의 머드에 밝은 회색의 머드가 부분적으로 혼재되어 있으며, 24~27 cm 구간은 암회색의 머드로 구성되어 있다(그림 2).

각 구간에 대하여 대표 시료를 선정하여 X선 회절 분석을 실시한 결과 구간에 상관없이 대부분 사장석과 석영으로 구성되어 있다. 피크의 크기가 너무 작아 뚜렷하게 구별되지는 않지만 하부로 갈수록 15 °C 이하 구간에서 피크가 조금씩 커지는 것을 인지할 수 있는데, 이것은 점토광물의 함량이 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

MC08H-06 코어의 심도별 부시료의 점토 부분만을 분리하여 정방위 시료를 제작하여 X선 회절 분석을 실시한 결과 각 구간별로 차이가 확실하게 있음을 알 수 있다. 상부 0~3 cm 구간에는 석고가 다량 존재하고 있으며, 2 cm 구간부터 스멕타이트가 존재하기 시작한다. 스멕타이트 함량은 하

부로 감에 따라 조금씩 증가하며, 3 cm 구간부터 카올린광물이 존재한다. 9~15 cm에서는 해포석(sepiolite)과 다이아스포어(diaspore)가 존재한다. 15~17 cm, 19~27 cm 구간에서는 스멕타이트와 활석, 카올린광물이 존재하고 이 구간 사이에 끼여 있는 17~19 cm 구간에서는 해포석이 함께 존재한다(그림 2).

TA 26 해저산 하부에 대한 열수변질 양상을 MC08H-06 시료의 점토 부분에 대한 심도 변화에 따른 광물조성의 변화로부터 유추할 수 있다. 2 cm 하부부터 스멕타이트가 나타나는 것으로 보아 이 질변질대에 해당하는 열수변질이 일어났으며, 3 cm 이후 구간부터 카올린광물이 존재하는 것을 토대로 보다 고온의 이질변질작용에 해당하는 열수변질작용을 받은 것으로 해석된다. 상부 2 cm까지 존재하는 갈색 실트층만 비변질대에 해당하고, 하부의 암회색 머드층은 이질변질대에 해당되는 것

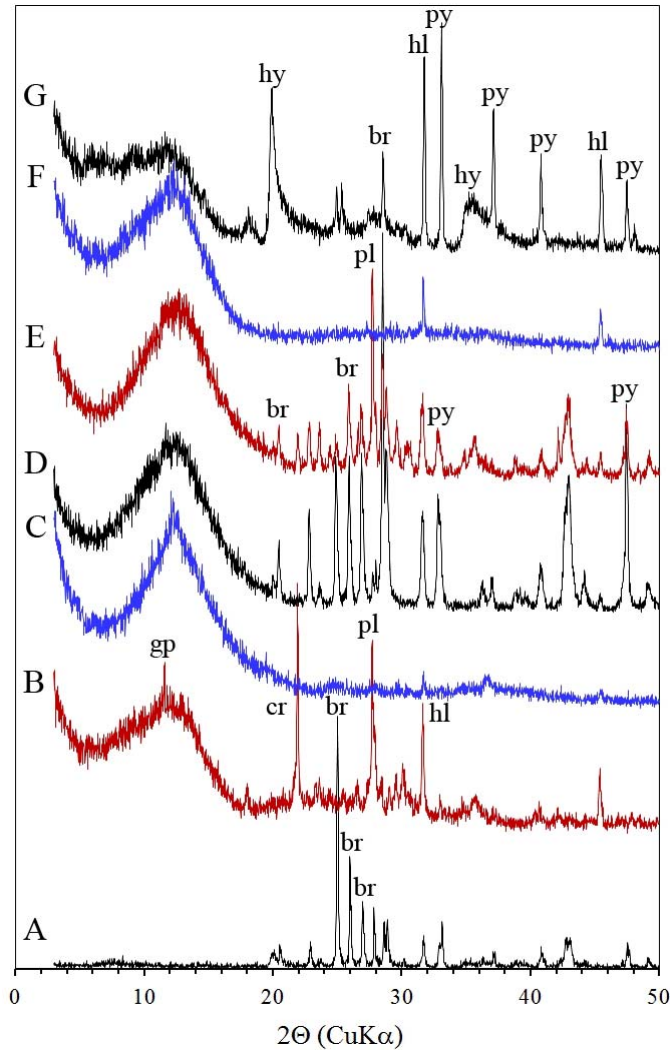


Fig. 5. X-ray diffraction patterns for surface samples around vent B of TA 26. A: GTV07, B: M-T10104, C: M-T10105-C1, D: M-T10105-C4, E: M-T10105-C6, F: RT110203-11, G: RT110203-10. br, barite; hy, halloisite; gp, gypsum; hl, halite; py, pyrite; pl, plagioclase; cr, cristobalite.

으로 판단된다(Cho *et al.*, 2010).

변질되지 않은 해저퇴적물을 획득하고자 Tofu arc의 해산들 중에서 광화작용이 확인되고 개발의 대상이 되는 두 개의 해산인 TA 25와 TA 26 두 해산 사이 수심 1,500 m의 해저평원에서 다중코어 시료채취기를 이용하여 약 30 cm 길이의 MC-T10108 코어시료를 획득하였다. 이 시료는 상부 16 cm의 황갈색 이질 퇴적층과 그 하부의 회색 니질 퇴적층으로 구성되어있다. X-선 사진에 의하면 상부의 니질 퇴적층은 거의 균질한 특성을 보이며, 약 10

cm 하부에서는 약간 조립화되는 경향을 보인다. 하부의 회색 니질 퇴적층은 매우 미립의 니질 퇴적층으로 내부에는 생체교란(bioturbation)에 의한 burrow가 발달되어 있다(Choi *et al.*, 2012).

이 시료를 심도에 따라 6개의 구간으로 나누어 부시료를 채취하였다. 이에 대한 X-선 회절분석에 의하면(그림 3A), 대부분의 시료는 사장석과 석영으로 구성되며, 녹니석과 카올리나이트가 소량 존재한다. 방해석은 상부구간인 0~2 cm와 6~8 cm 구간의 퇴적물에서만 산출되며 심도에 따라 감소

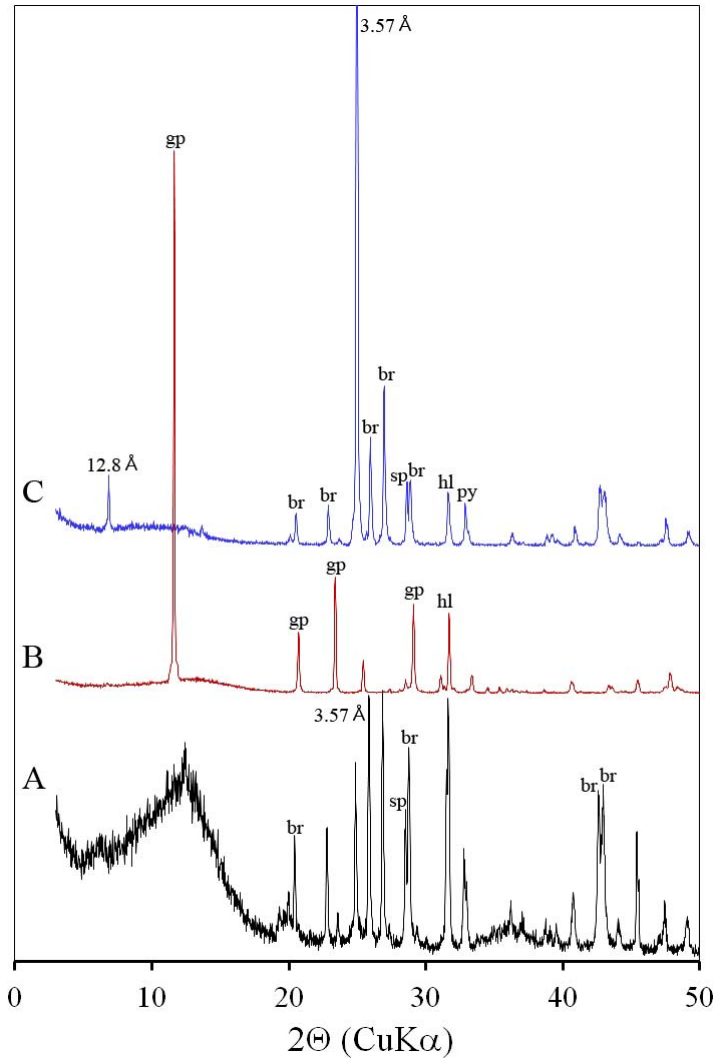


Fig. 6. X-ray diffraction patterns for vent samples in TA 26. A: GT110203, B: M-T10104 (vent), C: M-T10106. br, barite; gp, gypsum; hl, halite; py, pyrite; sp, sphalerite.

하는 경향을 보인다. 각 부시료의 점토광물의 정확한 감정과 함량을 분석하기 위하여, 점토부분만 분리하여 건조시료 및 EG 처리한 시료에 대하여 X 선회절분석을 실시하였다. 14 Å 피크의 위치가 건조시료와 EG 처리한 시료에서 차이가 없고 14 Å 피크보다 7.2 Å 피크가 월등하게 큰 것으로 미루어 이 피크는 녹니석에 의한 것으로 판단되었다. 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료에서 각 광물의 특징적인 (001) 피크의 면적비를 이용하여 계산한 결과(Biscaye, 1965), 녹니석과 카올리나이트의 비는

0~2 cm 구간에서는 68 : 32, 6~8 cm 구간에서는 82 : 18, 그 이하 구간에서는 모두 녹니석으로 결정되었다(그림 3B). 하부로 갈수록 녹니석의 함량은 증가하고 카올리나이트 함량은 감소하였다.

두 해산 사이에서 채취된 비변질 주상시료의 상부에는 석회석의 침전이 있었으나, 10 cm 하부에는 석회석의 침전이 없음을 알 수 있다(그림 3). 이로 미루어 현재 이곳의 탄산염 보상 심도(CCD)가 1,500 m 이상이지만, 과거에는 이곳의 탄산염 보상 심도가 1,500 m 이하이었거나 또는 이곳의 심

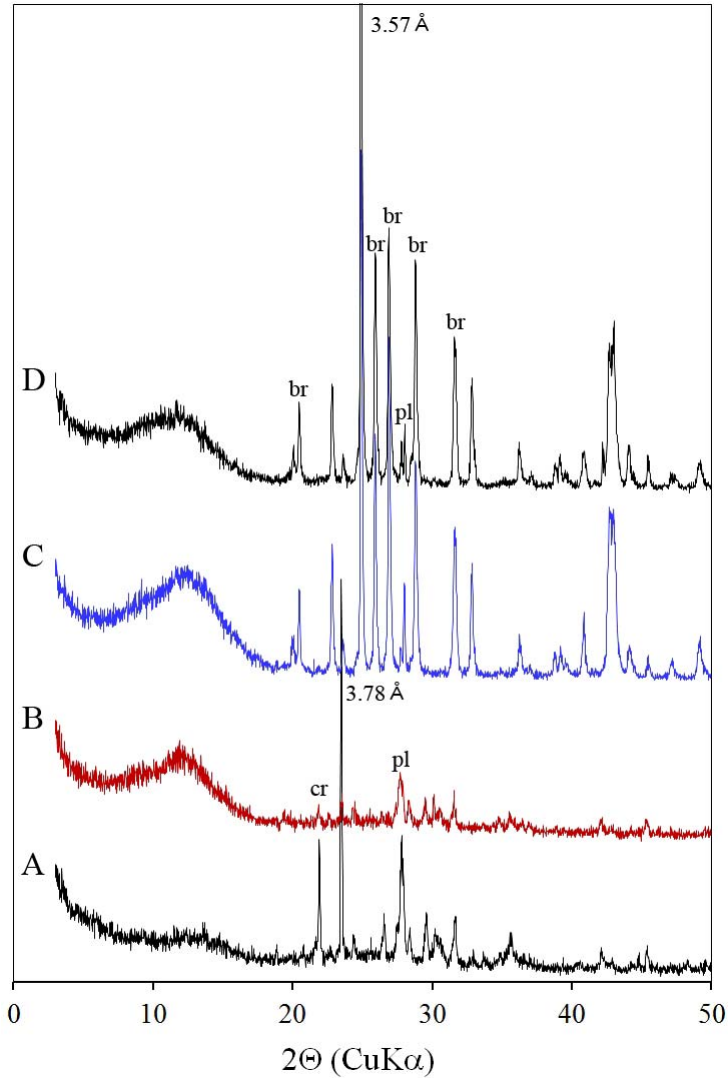


Fig. 7. X-ray diffraction patterns for surface samples around vent D of TA 26. A: GT110201, B: GT110202, C: RT110202-4, D: RT110202-5. br, barite; pl, plagioclase; cr, cristobalite.

도가 보다 깊었던 것으로 생각된다. 이에 대한 자세한 연구는 연도측정 등과 같은 연구가 더 진행되어야 할 것이다. 또한 16 cm를 경계로 퇴적상의 변화와 화학조성의 변화가 뚜렷이 나타난다(Choi *et al.*, 2012). 이는 이를 경계로 퇴적환경이 환원 환경에서 산화환경으로 바뀌었음을 시사한다. 점토 광물의 함량도 심도에 따라 변화하지만 열수변질에 의한 영향으로는 보이지 않는다.

표층퇴적물

TA 26 해저산 서쪽의 칼데라 남쪽 수심 1,000 m 부근에서 채취된 GTV01, GTV02 그리고 GTV03 등 3개 표층퇴적물 시료에 대한 X선 회절분석 결과, 대부분 사장석과 석영으로 구성되어 있다(그림 4). 석영 함량은 GTV01 시료에서 가장 많고, 나머지 두 시료에서는 소량 존재하는 것으로 판단된다. GTV03 시료에 대한 점토 부분의 정방위시료의 X선 회절분석 결과 다량의 카올린광물과 소량의 스

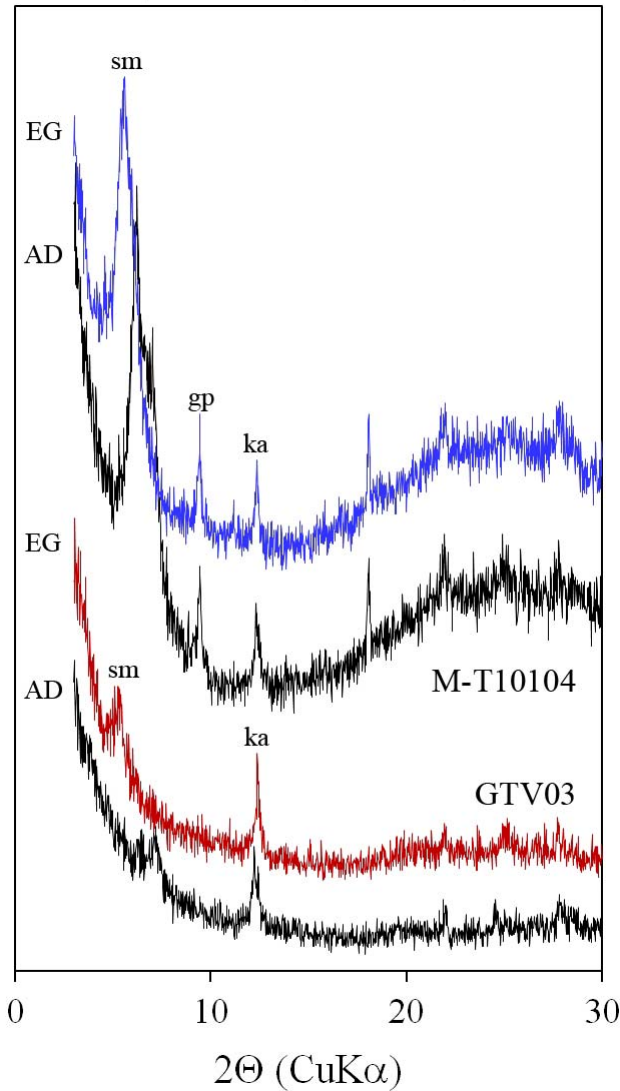


Fig. 8. X-ray diffraction patterns for clay fraction of GTV03 and M-T10104. AD: air-dried, EG: ethylenglycolated. sm, smectite; gp, gypsum; ka, kaolin mineral.

멕타이트가 포함되어 있음을 확인할 수 있다(그림 8). 이러한 사실로 보아 이들 시료는 이질변질 작용에 해당하는 열수변질작용을 겪었음을 유추할 수 있다.

TA 26 해저산 남동쪽 vent B 부근에서 GTV07, GTV08, M-T10104, M-T10105-C1, M-T10105-C4, M-T10105-C6, RT110203-10, RT110203-11, M-T10106 등 9개 시료를 채취하였다. 화산추 남쪽 정상부의 수심 400 m 부근에서 채취된 GTV07와 GTV08 등 2개 표층퇴적물 시료에 대한 X선

회절분석 결과, 대부분 사장석과 석영으로 구성되어 있으며, GTV07 시료에는 많은 양의 중정석 (barite)이 검출되었다(그림 5). 이것으로 이 지역은 이질변질작용에 해당하는 열수변질작용을 겪었음을 유추할 수 있다.

M-T10104 시료는 TA 26 해저산의 남동쪽 화산추의 정상부에서 발견한 블랙스모크에서 채취한 시료이다. 이 시료는 주로 흑색의 세립질 암편으로, X-선 회절분석에 의하면 사장석과 크리스토파라이트(cristobalite)로 주로 구성되어 있으며, 소량

의 석고(gypsum)를 함유하고 있다(그림 5). 그러나 같은 침니에서 열수와 함께 채취된 미립의 침전물은 대부분 석고로 이루어져 있다(그림 6). 이는 열수가 분출되며 해수와 반응하여 석고를 형성하였기 때문으로 생각된다. X선 회절도형의 저각도에서 배경값이 높은 것으로 보아 철이나 망간 산화광물 또는 황화광물들이 포함되어 있음을 예상할 수 있다. M-T10104 시료로부터 점토 부분을 분리하여 점토광물 반정량분석을 실시하였다. 건조시료와 EG로 처리한 시료에 대한 X선 회절분석 결과로 미루어 14.5 Å에 해당하는 광물은 대부분 스�멕타이트이고, 7.2 Å에 해당하는 광물은 카올리나이트임을 확인할 수 있었으며, 스�멕타이트가 매우 우세하고, 카올리나이트가 소량 포함되어 있다(그림 8).

M-T10105 시료는 M-T10104 시료를 획득한 침니의 주변 해저면의 퇴적물 시료를 ROV를 이용하여 흡입하여 채취한 시료이다. M-T10104 지역에서 약간 이동한 지역에 암반의 균열 사이에 퇴적된 곳에서 채취한 M-T10105-C1은 황갈색을 띠는 퇴적물인데, 이 시료는 XRD 감정이 불가능한 광물로 이루어져 있는데, X선 회절도형의 저각도에서 배경값이 높은 것으로 보아 철이나 망간 광물들을 많이 포함되어 있음을 예상할 수 있다(그림 5). M-T10104를 채취한 침니의 하부에 암석과 혼재된 곳에서 채취된 황갈색의 퇴적물, M-T10105-C4는 사장석과 중정석으로 구성되며, 황철석이 다량 포함되어 있다. M-T10104와 M-T10105-C4의 중간에 위치한 지역에 분포하는 곳에서 채취된 M-T10105-C6 시료는 중립사 크기의 질은 회색의 암석쇄설물인데, M-T10105-C4와 비슷하게 사장석, 중정석 및 황철석으로 이루어져 있다(그림 5).

RT110203-10 시료는 수심 441 m에 위치하는 가파른 사면에서 사면을 덮고 있는 회색의 sticky mud 퇴적물에서, RT110203-11 시료는 수심 413 m의 비교적 평탄한 지형에 있는 암색의 crust와 황색의 세립질 퇴적물을 ROV를 이용하여 ekman grab으로 채취하였다. RT110203-10 시료는 할로이사이트(halloysite), 황철석 및 섬아연석(sphalerite)으로 구성된다. 특히 고령토균 점토광물인 할로이사이트가 다량 포함돼 매우 특이한 것으로 판단된다. RT110203-11 시료는 배경값만 높게 나타날 뿐 암염 이외에 인지할만한 광물이 감지되지 않았다.

M-T10104와 같은 지역에서 푸쉬코어를 이용하여 채취된 M-T10106 시료는 중정석과 섬아연석으로 구성되며, 3.57 Å의 강한 회절선을 가지는

광물과 12.8 Å 회절선을 가지는 광물이 존재한다(그림 5). 열수분출구 주변에 형성된 황화물 마운드에서 분출구에서 가장 가까운 시료인 M-T10106 시료는 고온성 열수광물인 섬아연석이 많아 Zn의 함량이 높으며, 최외각의 황갈색을 띠는 각시료 M-T10105-C1은 높은 Fe₂O₃와 MnO의 함량으로 보아(Choi *et al.*, 2012) 철 망산 산화물을 주 구성광물로 하며, 이의 영향으로 X선 회절도의 저각도에서 높은 배경치를 보인다(그림 5). 이러한 경향을 볼 때, 열수용액에서 만들어지는 Cu, Zn 및 Pb 황화물은 빨리 침전되어 열수분출구 주변에 주로 산출되며, 이외 열수에 포함된 Ca와 Ba과 같은 원소는 열수구 주변에서 해수 중의 SO₄ 이온과 반응하여 석고나 중정석을 열수구 주변 광범위한 영역에 침전시키는 것으로 보인다. 이동성이 높은 원소인 Fe나 Mn은 해수의 산소와 반응하여 수산화물을 형성하여 열수분출구로부터 비교적 먼 지역에 배태되고 있다(Choi *et al.*, 2011, 2012). 열수분출구 주변의 점토광물은 대부분이 스�멕타이트로 구성되어 있으며, 카올리나이트가 소량 함께 산출된다(그림 8). 이러한 광물조성으로 미루어 보아, vent B 열수구 주변은 스�멕타이트가 우세한 이질변질작용에 해당하는 열수변질 작용이 있었음을 알 수 있다.

TA26 해저산 남동쪽 vent D 부근에서 GT110201, GT110202, GT110203, RT110202-4, RT110202-5 등 5개 시료를 채취하였다. 시료 GT110201와 GT110202는 각각 수심 529 m와 489 m의 crust가 덮여 있는 지역에서 GTV를 이용하여 채취한 것이다. Crust 위에는 황갈색 퇴적물이 얇게 존재하였으나 시료 채취 시 재부유되어 모두 유실되었으며, crust 아래에 퇴적되어 있던 조립질의 현무암질의 시료만을 채취 보관한 것이다. 이 시료들은 모두 사장석으로 구성되며, 크리스토파라이트가 소량 포함되어 있다(그림 7). Bernalite로 판단되는 3.78 Å 피크를 가지는 광물이 모두 존재하는데, 특히 GT110201 시료에 양적으로 더 많이 존재한다.

Chimney site에서 채취된 GT110203 시료는 중정석, 황철석, 섬아연석, 3.57 Å 피크를 가지는 광물과 bernalite로 판단되는 3.78 Å 피크를 가지는 광물이 존재한다. 이 시료에는 점토광물도 다량 포함되어 있어 점토 부분만 분리하여 분석을 실시하였다. 스�멕타이트 : 녹니석 : 카올리나이트 비가 약 80 : 7 : 13으로 결정되었다.

시료 RT110202-4는 TA26 해저산의 침니 군집체 사이에서 채취한 RT110202-4와 RT110202-5는

시료채취 과정에서 문제가 있어 함께 보관한 것이므로 분석 결과도 동일하다. 이들은 모두 사장석과 중정석으로 구성되며, 배경값이 매우 높게 나타나므로, 철이나 망간 광물들이 혼재되어 있을 가능성이 높다(그림 7). 3.78 Å와 3.57 Å에서 높은 피크를 보이는 광물이 있는데, 이 광물들은 각각 *bernalite*와 *clinoclase* ($\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})_3$)로 판단되는데 이의 확인을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. Vent D 열수구 주변 역시 스펙타이트가 우세한 이질변질작용에 해당하는 열수변질 작용이 있었음을 알 수 있다.

결 론

우리나라가 탐사권을 획득한 통가국 EEZ 내의 Tofua arc의 해저화산들에 대한 해저열수광산 탐사의 일환으로 해저 열수에 의한 기반암과 주변 해저퇴적물의 열수변질대에 관한 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) TA 26 해저화산 큰 정상부에서 획득한 MC 08H-06 코어는 상부 2 cm까지 존재하는 갈색 실트층만 비변질대에 해당하고, 하부의 암회색 머드층은 이질변질대에 해당되는 것으로 판단된다. TA 26 해저산은 스펙타이트와 카올린광물 이외에도 다이아스포어와 해포석 등 보다 다양한 열수변질 광물들이 형성되어 있다.

2) TA 25와 TA 26 두 해산 사이에서 채취한 MC-T10108 코어는 녹니석이 우세한 것으로 보아 열수변질의 영향이 약한 것으로 판단된다. TA26 해저산에서 채취된 표층퇴적물은 대부분 카올린광물과 스펙타이트로 구성되어 있는데, 이로 미루어 광범위한 이질변질대가 형성되어 있는 것으로 판단된다. 열수구 퇴적물은 대부분 석고, 중정석, 섬아연석, 황철석 등 황산염광물과 황화광물로 구성된다.

3) 기반암과 해저퇴적물의 광물조성을 비교 분석하여 보았을 때, Tofua arc 해저산의 열수광화대는 주변에 스펙타이트 또는 카올린광물을 형성시키는 정도의 변질작용을 일으켰음을 알 수 있다. 그러므로 이 지역은 이질변질대에 해당되며, 그 하부에는 보다 높은 정도의 변질대가 존재할 수도 있으며 이를 확인하기 위한 시추탐사가 필요하다.

사 사

본 연구는 해저열수광산개발사업단의 지원으로 2010~

2012년 한국지질자원연구원의 위탁과제(과제명: 해저열수광산 해저퇴적물 및 열수변질대의 광물조성, 통가 해저열수 광화대 주변 해저퇴적물의 광물조성 연구)에 의해 진행되었으며, 연구비를 지원하여 준 해저열수광산개발사업단과 한국지질자원연구원에 감사드립니다. 부족한 원고를 세심하게 심사하여 주신 황진연 교수님과 손병국 박사님께도 감사를 드립니다.

참고문헌

- Arculus, R.J. (2005) Arc-backarc systems of northern Kermadec-Tonga. *New Zealand Minerals Conference Proceedings*, 45-50.
- Barnes, H.L. (1979) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed.). John Wiley & Sons, 798p.
- Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of clay minerals in recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 76, 803-832.
- Cho, J.K., Kim, K.H., Cho, H.G., Kim, S.-O., and H. Choi (2010) Hydrothermal alteration in the drilling core from TOFUA ARC seamounts around Tonga Trench. *Annual Autumn Meeting of the Geological Association in Korea*, Kyeongju, 2010.10.27-30, 26. (in Korean)
- Cho, H.G., Kim, S.-H., and Yi, H.-Y. (2012) Clay mineral distribution and characteristics in the southeastern Yellow Sea mud deposits. *J. Miner. Soc. Korea*, 25(3), 163-173. (in Korean with English abstract)
- Choi, H., Chang, S.W., Ko, S.M., Kong, K.S., Chang, T.S., Kim, J.H., Rhu, B.C., Um, I.K., and Lee, K.J. (2011) Hydrothermal alteration of marine sediments and basement in seafloor hydrothermal deposits. *KIGAM Report*, 33p. (in Korean)
- Choi, H., Chang, Kim, J.H., Um, I.K., Rhu, B.C., S.W., Ko, and Cheon, J.H. (2012) Hydrothermal alteration of marine sediments and basement in seafloor hydrothermal deposits. *KIGAM Report*, 49p. (in Korean)
- de Ronde, C.E.J., Massoth, G.J., Baker, E.T. and Lupton J.E. (2003) Submarine hydrothermal venting related to volcanic arcs, *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, 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, *Econ. Geol.*, 100, 1097-1133.
- George, R., Tuner, S., Morris, J., Plank, T., Hawkesworth, C. and Ryan, J. (2005) Pressure-temperature-time paths of sediment recycling beneath the Tonga-Kermadec arc. *Earth Planet. Sci. Lett.* 233, 195-211.
- Guilbert, J.M. and Park, C.F. Jr. (1986) *The Geology of Ore Deposits* (2nd ed.). W.H. Freeman and Co., 985p.
- Hekinian, R., Mühe, R., Worthington, T.J. and Stoffers, P. (2008) Geology of submarine volcanic caldera in the Tonga Arc: Dive results. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 176, 571-582.
- KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute) (2009) Cruise report on SMST2009 (KODOS09-H). (in Korean)
- KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute) (2010) Cruise report on SMST2010 (KODOS10-H), 153p. (in Korean)
- KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute) (2011) Cruise report on SMST2011 (KODOS11-H), 210p. (in Korean)
- Martinez, F., and Taylor, B. (2003) Controls on back-arc crustal accretion: Insights from the Lau, Manus and Marina basins. In: *Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes*, edited by R.D. Larter and P.T. Leat, *Spec. Publ. Geol. Soc.*, 219, 19-54.
- 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. *G3 AGU*, 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. *Econ. Geol.*, 65, 920-936.
- 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., Vaiomóunga, R., and Kerby, T. (2006) Submarine volcanoes and high-temperature hydrothermal venting on the Tonga arc, southwest Pacific. *Geology*, 34, 453-456.

접수일(2012년 11월 29일), 수정일(1차 : 2012년 12월 13일),
 게재확정일(2012년 12월 13일), 책임편집위원 : 손병국