

통가 EEZ내 TA25 해저산에서 채취한 열수광체의 암석자기학적 특성 연구

김원년* · 박상준 · 이경용 · 문재운 · 김현섭 · 최선기

경기도 안산시 상록구 해안로 787, 한국해양과학기술원 심해저자원연구부

Rock-magnetic Properties of Chimneys from TA25 Seamount in the Tofua Arc, Southwest Pacific

Wonnyon Kim*, Sang Joon Pak, Kyeong Yong Lee, Jai-Woon Moon, Hyun Sub Kim, and Sun Ki Choi

Deep-sea & Seabed Resources Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Republic of Korea

To identify rock-magnetic properties of volcanogenic hydrothermal sulfide deposits, chimneys were obtained from the Tofua Arc in Southwest Pacific, using a remotely operated vehicle (ROV) and Grab with AV cameras (GTVs). Three different types of chimneys used in this study are a high-temperature chimney with venting fluid-temperature of about 200°C (ROV01), a low-temperature chimney of about 80°C (GTV01), and an inactive chimney (ROV02). Magnetic properties of ROV01 are dominated by pyrrhotite, except for the outermost that experienced severe oxidation. Concentration and grain-size of ROV01 pyrrhotite are relatively low and fine. For GTV01, both magnetic concentration and grain-size increase from interior to margin. Pyrrhotite, dominant in the core, becomes mixed with hematite in the rim of the chimney due to secondary oxidation. High concentration and large grain-size of magnetic minerals characterize the ROV02. Dominant magnetic phases are pyrrhotite, hematite and goethite. In particular, the outermost rim shows a presence of magnetite produced by magnetotactic bacterial activity. Such distinctive contrast in magnetic concentration, grain-size and mineralogy among three different types of chimney enables the rock-magnetic study to characterize an evolution of hydrothermal deposits.

Key words : chimney, hydrothermal deposits, magnetic mineral, rock-magnetic property, Tofua Arc

2012년 통가해저열수광상 개발 사업의 일환으로 통가아크 해저산 TA25에서 ROV와 GTV를 이용하여 열수황화물 광체를 채취하였다. 채취된 광체 중 본 연구에서는 약 200°C의 열수분출을 보인 고온성 활성침니(ROV01), 80°C의 열수분출을 보인 저온성 활성침니(GTV01), 그리고 비활성침니(ROV02)를 이용하여, 암석자기학적 특성을 규명하고 이를 바탕으로 광체의 진화과정을 알아보고자 하였다. ROV01의 자기적 특성은 주로 자류철석에 의해 나타나며, GTV01의 경우 광체내부는 자류철석이 주로 나타나지만 외곽으로 갈수록 자류철석과 적철석이 혼재하게 된다. 비활성침니인 ROV02는 오랜 산화작용으로 인해 외곽에서 적철석뿐만 아니라 침철석이 자류철석과 함께 나타나고, 최외곽에서는 magnetotactic bacteria의 작용에 의해 자철석이 존재한다. 포화잔류자화(saturation magnetic remanent magnetization, SIRM), 비자기이력잔류자화(anhyseretic remanent magnetization, ARM)/SIRM으로 나타낸 자성광물의 함량과 입자 크기 변화는 침니의 특성에 따라 뚜렷한 차이가 난다. 고온의 ROV01에서 가장 적은 함량과 작은 입자크기를 보이며, 저온의 GTV01에서 점차 증가하다가 비활성침니인 ROV02에서 가장 높은 함량과 큰 입자크기를 나타내게 된다. 이러한 결과는 자성광물의 종류, 함량, 입자크기 변화 등의 암석자기학적 특성을 이용하여 기존 광물학적 접근방법으로 추적에 한계가 있었던 열수황화물광체의 진화과정에 대한 정보를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 암석자기, 열수광체, 자성광물, 침니, 통가아크

*Corresponding author: wkim@kiost.ac

1. 서 론

해양은 새로운 지각이 생성·소멸되는 장소로서, 상부 해양지각의 경우 다양한 암석으로 구성된 대륙과는 달리 중앙해령, 해저산, 화산호, 배호분지 등에서 생성되는 화산암으로 구성되어 있다. 이러한 해양에서의 화산활동(submarine volcanism)은 마그마 챔버로부터 해수가 열수유체로서 순환할 수 있는 열을 제공하기 때문에 열수활동뿐만 아니라 이에 따른 해저열수광상 형성에 밀접한 연관이 있다(Alt, 1995; Wilcock and Delaney, 1996; de Ronde *et al.*, 2001; Hannington *et al.*, 2005). 현재까지 해저열수활동과 관련되어 철산화광상, 망간산화광상, 노트로나이트광상, 다금속황화광상, 합금속퇴적광상 등 100개 이상의 다양한 광종의 해저광체가 확인되었다. 이 중 다금속황화광상은 열수가 해저로 분출하여 해수와 급격하게 반응하면서 주상의 침니(chimney) 즉 고온성 블랙스모커(black smoker) 또는 저온성 화이트스모커(white smoker)로 형성된다. 침니를 형성하는 열수는 기반암 또는 그 위의 퇴적물과 지속적으로 반응하여 기초금속(base metal)과 귀금속(precious metal)을 광범위하게 침전시켜 광체를 형성한다(Hekinian *et al.*, 1980; Hannington *et al.*, 1991; Zierenberg *et al.*, 1998). 따라서 경제성을 고려한 해저열수광상이라는 것은 침니뿐만 아니라 함께 배태되는 황화광체를 포함하여 지칭한다. 침니형태의 광체는 해저열수광화작용에서 최상부분을 지시하는 것으로 광체가 하루로 연장되는 광체구에 그 뿌리를 두고 있다. 광체구도 계속되는 열수유체의 순환에 의해 지속적으로 두꺼워지며 기정출한 광물의 재결정작용이 반복적으로 일어난다. 광체구 위에 형성된 침니는 높이가 약 30 m까지 성장하기도 하는데, 궁극적으로는 붕괴되어 재결정화 되면서 광체구의 일부가 된다(Hekinian *et al.*, 1993).

해양에서의 화산활동지역 중 지구구조적으로 판의 수렴경계에 해당하는 화산호와 배호분지에서는 지구 전체 화산활동의 약 26%가 발생하며(Perfit and Davidson, 2000), 결과적인 열수활동과 수많은 다금속황화광상이 생성된다. 특히, 화산호의 경우 총 연장이 약 22,000 km에 달하며(Simkin and Seibert, 1994; de Ronde *et al.*, 2003), 대부분 서태평양에 분포하고 있다. 서태평양의 대표적인 화산호 중 하나인 통가-커마데크 화산호(Tofua-Kermadec volcanic arc)는 올리고세부터 태평양판이 인도-호주판 아래로 섭입되는 지판소멸 작용의 결과로 생성되었으며(Turner *et al.*, 1997; Worthington

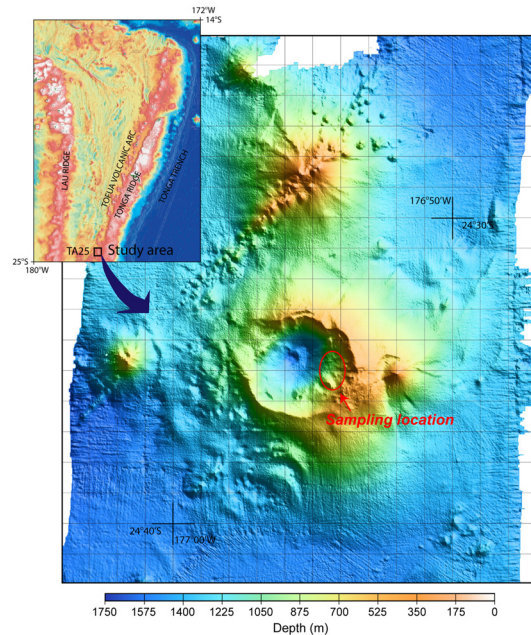


Fig. 1. Bathymetry map of study area (TA25) with the sampling location. Chimney samples were obtained by ROV and GTV during the 2012 exploration cruise in the Tofua Arc, Southwest Pacific, using R/V Sonne.

et al., 2004; Stoffers *et al.*, 2006), 총 연장길이 약 2,300 km에 달한다. 이 중, 우리나라가 2008년 해저열수광상 개발을 위한 독점적 탐사권을 획득한 지역은 상대적으로 북쪽에 위치한 통가화산호로서 남위 20°~25° 사이에 위치하는 28개의 크고 작은 활동성 해저산 및 칼데라로 이루어져 있다(Fig. 1).

암석자기학은 시료에 포함된 철을 함유하고 있는 물질의 함량, 입자크기, 종류에 의해 나타나는 자기적인 특성을 바탕으로 시료의 생성환경, 변질, 기원 등을 밝히는 연구분야로서 광상학을 포함한 지질학(Park *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2013)뿐만 아니라 환경연구(Kim *et al.*, 2007, 2012)에도 활용되고 있다. 2008년부터 진행되어온 통가화산호에 대한 해저열수광상 탐사를 통해 TA25 해저산에서 수 많은 활성/비활성 침니와 넓은 광체구들을 발견하였다(Fig. 2). 본 연구에서는 2012년 채취한 고온성 및 저온성의 활성 침니와 비활성 침니에 대해 열수분출 온도와 침니의 암석자기학적 특성 변화의 연관성을 규명하고, 이를 바탕으로 광물학적으로 구분이 어려운 광체의 성장단계에 따른 암석자기학적 특성 변화를 알아보고자 한다. 이러한 실제 광체시료를 대상으로 한 암석자기학적 특성은 해저

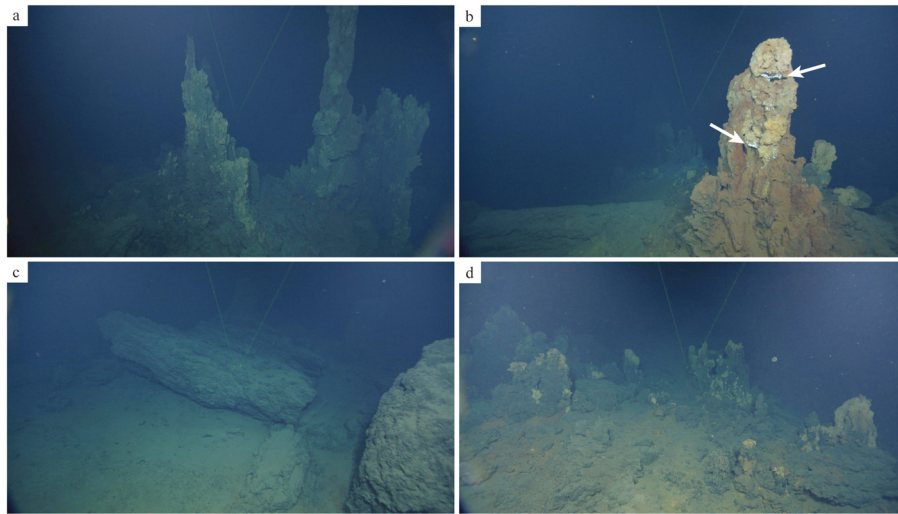


Fig. 2. Photos showing the distribution of chimneys in the seamount TA25. (a) Inactive chimneys ~3 m high with sulfide mound. (b) Wane chimney (almost dead chimney). White arrows indicate wane vents. (c) Fallen spires ~3 m long. (d) low temperature silica chimney (inactive chimney).

열수광상 탐사에 널리 사용되는 해상 지자기탐사의 자기 이상값의 보정자료로 활용될 것이다.

2. 연구지역 침니 분포 양상 및 시료채취

2012년 통가 해저열수광상 실험역 탐사는 독일 해양 조사선 R/V SONNE호를 이용하여 수행되었다. 연구지역에서는 무인잠수정(remotely operated vehicle, ROV)을 운용하여 근접해지면 탐사와 광체시료를 채취하였으며, ROV로 확인된 일부 광체들은 GTV(Grab with AV camera)를 이용하여 회수하였다.

ROV가 운용된 TA25 해저산 동측 칼데라 안쪽(수심 약 1,000 m)은 비교적 완만한 경사면을 이루고 있다 (Fig. 1). 사면에 분포하는 암석류들은 부서 및 안산암질 현무암들의 전석이 주를 이루고 있으며 일부 지역에서는 이들 전석들이 경사면에 쌓여 형성된 테프라가 관찰되기도 한다. 이 지역에 분포하는 침니는 일부 고온의 활성침니도 관찰되지만 대부분 비활동성이거나, 일부 약하게 활동하는 열수분출구로, 대부분 50~500 cm 크기(최대 10 m 이상)를 보이며, 직경은 1 m 정도로 매우 견실하게 발달하는 특징을 보인다(Fig. 2a and 2b). 열수분출구 주변부의 황화 광체구(sulfide mound)에서는 산화철-망간각 또는 쓰러진 침니들에 의해 피복되어 안산암질 현무암으로 구성되는 기반암은 관찰되지 않는다(Fig. 2c). 개별 침니는 침니 아래에서 서로

연결되어 자라며 일부 저온성 침니에서는 서로 연결된 침니가 성벽형태를 이루고 발달하기도 한다(Fig. 2d). 침니를 구성하는 주요 광물은 황동석이 우세하게 산출되는 특징을 보여 비교적 높은 온도에서 정출된 근지성 침니(proximal type)로 판단된다.

본 연구에서는 ROV를 이용하여 회수된 다양한 침니 중, 침니에서 분출되는 열수의 온도가 200°C 이상인 고온성 침니(ROV 01)와 침니의 성장이 멈추어 표면이 적색~황색의 철산화물과 비정질 실리카로 피복되어 있는 비활성 침니(ROV 02)를 활용하였다. 또한, GTV로 회수된 침니 중, ROV 탐사를 통해 약 80°C의 저온 열수분출을 보인 침니(GTV 01)를 분석하였다.

3. 연구방법

광체의 내부에서부터 최외곽까지 연속적인 자기적 특성을 알아보기 위해 가로, 세로, 높이가 약 1 cm인 정육면체 형태로 시료를 제작하였다. 총 44개의 시료가 제작되었으며, 고온성 활성 침니(ROV 01)는 13개, 저온성 침니(GTV 01)는 12개, 비활성 침니(ROV 02)는 19개이다. 시료 제작시 시료 손실을 최소화 하고 이차적인 자화획득을 방지하기 위해 두께 0.5 mm 이하의 비자성 실톱(string saw)을 사용하였다.

시료의 질량을 측정된 후, 모든 시료에 대해 대자율(magnetic susceptibility, χ), 비자기이력 잔류자화

(anhysteretic remanent magnetization, ARM) 값을 측정하였으며, 단계별 등온잔류자화(isothermal remanent magnetization, IRM) 획득 및 IRM 열소자 실험을 수행하였다. χ 는 Bartington사의 MS2 대자를 측정기를 사용하여 0.47 kHz의 저주파 상태에서 측정하였다. ARM은 직류자기장 발생장치가 부착된 Molspin사의 교류소자기를 사용하여, 시료에 90 mT의 교류자기장을 가하면서 동시에 지구자기장의 세기와 유사한 0.05 mT의 직류자기장을 가하여 획득시켰다. 단계별 IRM 획득 실험은 ASC Scientific사의 IM10-30 impulse magnetizer를 이용하였으며, 30 mT에서부터 최대 2.5 T까지 총 11단계로 증가하는 직류자기장을 시료에 획득시켰다. 이후 반대방향으로 300 mT의 직류자기장을 가하였다(IRM_{-300mT}). 일부시료의 경우 최대 자화장인 2.5 T에서 완전히 포화상태에 도달하지는 않았지만, 시료의 전반적인 자화특성을 알아보기 위해 포화등온잔류자화(saturation IRM, SIRM)로 활용하였다. 시료내 존재하는 자성광물의 종류를 파악하기 위해 Lowrie (1990)에 의해 제시된 3축 IRM 열소자 실험을 수행하였다. Impulse magnetizer를 이용하여 시료의 Z-, Y-, X-축을 따라 각각 2.5 T, 0.5 T, 0.15 T의 자기장을 가한 다음, Magnetic Measurement사의 MMTD-80 열소자기를 이용하여 최대 680°C까지 단계별로 온도를 증가시키며 잔류자화의 감소양상을 확인하였다. 시료의 잔류자화 세기는 Molspin사의 spinner 자력계를 이용하여 측정하였다.

상기내 실험들로부터, 시료내 포함된 자성광물 함량, 입자크기, 종류를 지시하는 암석자기 상수들을 도출하였다. χ , ARM과 SIRM 값들은 일반적으로 시료내 포함된 자성광물들의 함량과 비례하여 나타나며(Thompson and Oldfield, 1986; Evans and Heller, 2003), 특히 ARM은 세립의 자성광물에 민감하게 반응하고 SIRM은 모든 입자크기에 영향을 받기 때문에(Dunlop and West, 1969; Maher, 1988) ARM/SIRM는 입자크기 지시자로 활용된다. 즉 ARM/SIRM 값이 높을수록 세립의 자성광물임을 지시한다. 자철석, 자류철석과 같은 항자기력이 낮은 자성광물은 등온잔류자화 획득실험 시 300 mT 미만의 낮은 자화장에서 잔류자화가 포화상태에 도달하는 반면, 적철석, 침철석과 같은 항자기력이 높은 자성광물은 최대 자화장인 2.5 T에서도 포화상태에 이르지 못하게 된다. 따라서, S_{300} ($= -IRM_{-300mT}/SIRM$)은 시료내 서로 다른 항자기력을 보이는 자성광물들의 상대적인 분포상태를 나타내게 된다(Kim *et al.*, 2013). 값이 1에 가까울수록 낮은 항자기력을 갖는

자성광물 분포가 우세함을 지시한다. 자성광물들은 특징적인 온도에서 잔류자화가 소멸(큐리온도)되기 때문에, SIRM 열소자 실험을 통해서 시료내 포함된 자성광물의 종류를 파악할 수 있다. 예로써, 침철석은 약 120°C, 자류철석은 약 350°C, 자철석은 약 580°C, 그리고 적철석은 약 680°C의 큐리온도를 갖는다.

4. 결과 및 토의

자성광물의 함량지시 상수들(χ , ARM, SIRM), 입자크기 상수(ARM/SIRM), 자성광물 상수(S_{300})로 구성된 광체의 암석자기 특성을 Fig. 3에 나타내었다. 함량 상수들 중 자성광물만의 영향을 반영하는 ARM과 SIRM가 서로 유사한 변화양상을 보이며, 상관계수(R^2)가 0.8 이상으로 매우 높게 나타난다. 반면 χ 의 경우에는 시료내 높은 함량을 보이는 반자성(diamagnetic) 광물인 석영의 영향으로 전체적으로 매우 낮고 불규칙한 경향성을 보이기 때문에, 주로 ARM과 SIRM을 이용하여 광체내 자성광물 함량 변화를 살펴보고자 하였다. 전체적으로 자성광물의 함량은 고온의 활성침니인 ROV01에서 가장 낮게 나타나고(ARM = $1.4\sim 12.8 \times 10^{-7} \text{Am}^2/\text{kg}$; SIRM = $0.8\sim 7.4 \times 10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}$, Fig. 3a), 비활성침니인 ROV02에서 가장 높게 나타난다(ARM = $4.3\sim 22.6 \times 10^{-7} \text{Am}^2/\text{kg}$; SIRM = $8.5\sim 124.0 \times 10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}$, Fig. 3c). 자성광물 입자크기의 경우, ARM/SIRM 값이 ROV01에서 가장 높고($= 13.9\sim 25.2 \times 10^{-3}$), 저온의 활성침니인 GTV01에서 상대적으로 낮은 값을 보이다가($= 7.6\sim 16.1 \times 10^{-3}$) ROV02에서 가장 낮게 나타난다($= 3.0\sim 12.1 \times 10^{-3}$). 이는 고온의 활성침니에 존재하는 자성광물의 입자가 가장 작으며, 침니의 온도가 감소할수록 입자크기가 점차 증가함을 지시한다. 자성광물 상수인 S_{300} 은 모든 광체에서 0.9 내외의 비교적 높은 값을 보여 항자기력이 낮은 자성광물이 주로 존재함을 지시한다. 그러나, ROV01의 최외곽과, GTV01과 ROV02의 외곽부분에서 감소하는 S_{300} 은 해수에 의한 산화에 의해 이차적으로 항자기력이 높은 적철석 혹은 침철석이 생성되어 나타나는 현상으로 판단된다(Fig. 3).

개별 광체에서는 ROV01의 경우(Fig. 3a), 중심부(ROV01-4)에서 낮은 자성광물 함량을 보이다가 Cu가 농집된 구간(ROV01-6~10)에서 비교적 높은 함량(SIRM = $1.8\sim 3.1 \times 10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}$)을, 해수와 접촉하여 부분 산화가 나타나는 최외곽(ROV01-13)에서 가장 높은 함량(SIRM = $7.4 \times 10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}$)을 보인다. 자성

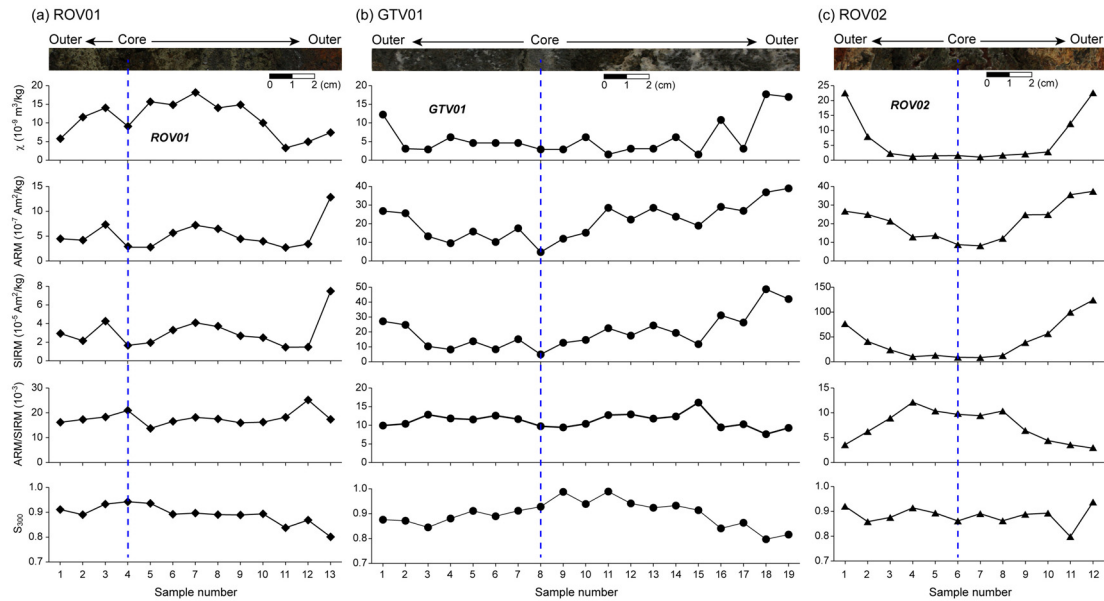


Fig. 3. Measured rock-magnetic properties including magnetic susceptibility (χ), Anhyseretic remanent magnetization (ARM), saturation remanent magnetization (SIRM) and S_{300} ($= -IRM_{-300mT} / SIRM$) for (a) a high-temperature active chimney (ROV01), (b) a low-temperature active chimney (GTV01) and (c) an inactive chimney (ROV02).

광물의 입자크기는 Cu의 농집이 나타나는 구간과 최외곽에서 비교적 낮은 ARM/SIRM을 보여(= $16.1 \sim 18.1 \times 10^{-3}$ 과 17.3×10^{-3}) 상대적으로 큰 입자크기의 분포를 지시한다. 저온의 열수분출을 보였던 GTV01(Fig. 3b)는 중심부를 제외하고는 ROV01광체와 유사한 광물조성을 보여, 초기에 고온성침니로 생성되었다가 점차 열수분출 온도가 감소하여 저온성침니로 진화된 것으로 나타난다. 자성광물 함량의 경우, 중심부에서 외곽으로 갈수록 점차 증가하고 해수와 접촉이 일어나는 최외곽에서 높은 함량을 보여 ROV01과 전체적으로 유사한 경향성이 나타난다(Fig. 3b). 또한 육안으로 관찰되는 산화의 흔적은 나타나지 않지만, 광체의 외곽부(GTV01-16~19)에서 $ARM/SIRM(= 7.5 \sim 10.2 \times 10^{-3})$ 과 $S_{300}(= 0.82 \sim 0.86)$ 의 감소가 나타나 산화에 의한 자성광물의 변질, 생성, 성장의 가능성을 내포한다. 비활성침니인 ROV02는 높은 Cu 함량을 갖는 고온성침니의 특성을 보이는 중심부와 해수와의 접촉에 의해 뚜렷한 산화작용의 흔적이 남아있는 외곽부로 구분된다(Fig. 3c). 경계부(ROV02-3, ROV02-9)에서부터 ARM과 SIRM의 뚜렷한 증가, 즉 자성광물 함량의 증가가 나타나고, 입자크기가 커진다(ARM/SIRM 감소). S_{300} 은 ROV01, GTV01과는 다르게 최외곽에서 급격한 증가를 보여(Fig. 3c) 상대적으로 항자기력이 낮은 자성

광물이 생성되었을 가능성을 지시하며, 일반적으로 저온 혹은 비활성침니 표면을 피복하고 있는 bacteria mat 중 낮은 항자기력을 갖는 자철석의 특성을 보이는 magnetotactic bacteria(Bazylinski *et al.*, 1995; Schultz and Jorgensen, 2001; Simmons *et al.*, 2004)의 영향으로 판단된다.

광체의 단계별 IRM 획득 양상은 크게 두 종류로 구분된다. 300 mT 미만의 자화장에서 포화자화의 90%이상을 획득하여 낮은 항자기력을 갖는 자성광물이 주로 존재함을 지시하는 경우(Fig. 4a의 왼쪽 열)로서, 광체의 중심부와 Cu의 농집을 보이는 시료에서 관찰된다. 예외적으로 해수와 접촉하여 산화의 흔적이 뚜렷한 ROV02의 최외곽 시료인 ROV02-12 또한 낮은 자화장에서 빠른 자화획득을 보인다. 3축 IRM 열소자 실험 결과, 빠른 자화획득을 보인 대부분의 시료는 약 350°C 온도 단계에서 대부분의 자화를 상실하여 주 자성광물이 자유철석으로 나타났다(Fig. 4a의 가운데 열). ROV02-12 시료에서는 X, Y, Z-축을 따라 획득된 모든 자화성분이 온도가 증가함에 따라 점차 감소하다가, 약 580°C에서 자화가 소멸되었으며 이는 자철석이 주 자성광물임을 지시한다(Fig. 4a의 오른쪽 열). 이러한 결과는 ROV02 광체의 S_{300} 값의 변화와도 잘 일치하며, 비활성침니의 표면에서 bacteria의 영향으로 자철석이

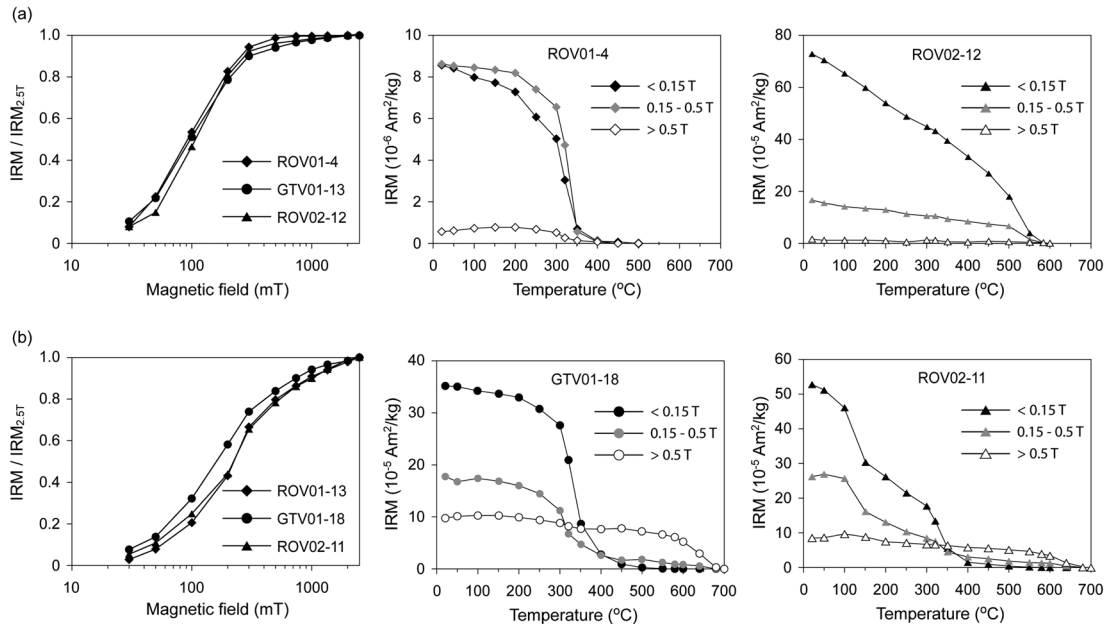


Fig. 4. Behavior of stepwise IRM acquisition (left panel) and thermal demagnetization of 3-axis IRM (center and right panels) for the representative samples showing (a) the dominance of low-coercivity magnetic minerals and (b) the mixture of low- and high-coercivity magnetic minerals.

자생적으로 성장함을 의미한다. 상대적으로, 광체의 외곽시료들은 300 mT까지는 포화자화의 50~80% 정도로 빠르게 자화를 획득하다가 이후 최대 자화장인 2.5 T 까지 점차적인 자화획득을 보인다(Fig. 4b의 왼쪽 열). 이러한 특성은 낮은 항자기력을 갖는 자성광물과 높은 항자기력을 갖는 자성광물이 공존하고 있음을 지시한다. 3축 IRM 열소자 실험 결과, 0.5 T 이하의 항자기력을 갖는 자화성분은 대부분 350°C 부근에서 소멸되고, 0.5 T 이상의 항자기력을 갖는 성분은 적철석의 큐리온도인 680°C의 온도 단계에서 소자되었다(Fig. 4b의 가운데 열). 이는 자류철석이 주로 존재하는 상태에서 광체의 외곽으로 갈수록 해수와의 반응, 산화작용으로 인해 적철석이 이차적으로 생성되었음을 지시한다. ROV02-11의 경우, 자류철석과 적철석의 큐리온도 부근에서 자화감소 이외에도 100~150°C의 온도구간에서 자화의 급격한 감소를 보여(Fig. 4b의 오른쪽 열), 침철석도 함께 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 광체의 내·외부적인 자성광물 종류 및 조합의 변화는 활성침니에서부터 비활성침니로 광체가 전이되는 과정과 밀접한 연관성이 있음을 의미하며, 광체의 진화과정을 이해하는데 활용될 수 있음을 시사한다.

자성광물 함량(SIRM)에 따른 입자크기(ARM/SIRM)

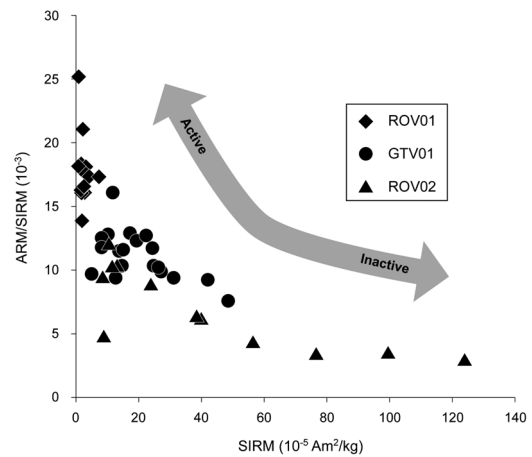


Fig. 5. A biplot of SIRM and ARM/SIRM. Samples of active chimney are placed in the upper left corner, whereas those of inactive chimney are in the lower right corner.

의 변화를 이용하여, 광체별 자기적 특성을 정리하였다(Fig. 5). 특징적으로 고온의 활성침니인 ROV01은 상대적으로 자성광물의 함량이 낮고 입자크기 또한 가장 작게 분포한다. 저온의 활성침니(GTV01)로 갈수록 자성광물 함량과 입자크기가 증가하고, 비활성침니

(ROV02)에서 가장 큰 자성광물함량과 입자크기를 보인다. 활성침니의 변질이 상대적으로 적은 부분과 비활성침니의 내부는 특히 자성광물 함량이 적고(SIRM <math> < 18 \times 10^{-5} \text{Am}^2/\text{kg}</math>), 해수와의 접촉을 통해 변질이 진행될수록 자성광물 함량은 뚜렷하게 증가하게 된다. 이러한 경향성은 황화물광체가 고온에서 생성되어 비활성침니로 변화하면서 나타나는 자기적 특성을 반영하는 것으로서, 암석자기학적 연구방법이 열수광체의 진화과정을 밝히는 데 중요한 단서를 제공할 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

연구지역인 TA25해저산에는 다양한 형태의 고온 및 저온의 활성침니와 비활성침니들이 관찰된다. 이러한 침니들은 상태별로 뚜렷한 자기적 특성을 보인다. 고온의 활성침니의 자기적 특성은 주로 자류철석에 의해 나타나며, 자류철석의 함량과 입자크기는 상대적으로 작다. 저온의 활성침니의 경우, 광체내부는 자류철석이 주로 나타나지만 외곽으로 갈수록 자류철석과 적철석이 혼재하게 된다. 비활성침니에서는 오랜 산화작용으로 인해 외곽에서 적철석 뿐만아니라 침철석이 자류철석과 함께 나타나게 되며, 자성광물의 함량과 입자크기가 증가하게 된다. 특징적으로 최외곽에서는 magnetotactic bacteria의 작용에 의해 자철석이 생성되게 된다. 이러한 자성광물의 함량과 입자크기 변화를 기반으로 한 SIRM과 ARM/SIRM의 상대적인 변화를 이용하여, 기존 광물학적 접근방법으로 추적에 한계가 있었던 열수황화물광체의 진화과정에 대한 정보를 획득할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 해양과학기술원의 신진연구자 지원과제(PE98835) 및 통가 해저열수광상 개발사업(PM57061)의 일환으로 수행되었습니다. 연구지역의 정밀 해저지형도를 작성해주신 양승진 선생님께 감사드립니다. 또한, 이 논문을 세심하게 심사해주신 충남대학교 유용재 교수님, 고려대학교 김창성 박사님, 그리고 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

Alt, J.C. (1995) Subseafloor processes in mid-ocean ridge

hydrothermal systems. In Humphris, S.E., Zierenberg, R.A., Mullineaux, L.S. and Thomson, R.E.(eds.) Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 91, p.178-193.

Bazylinski, D.A., Frankel, R.B., Heywood, B.R., Mann, S., King, J.W., Donaghay, P.L. and Hanson, A. K. (1995) Controlled biomineralization of magnetite (Fe₃O₄) and greigite (Fe₃S₄) in a magnetotactic bacterium. Applied Environmental Microbiology, v.61, p.3232-3239.

de Ronde, C.E.J., Baker, E.T., Massoth, G.J., Lupton, J.E., Wright, I.C., Feely, R.A. and Greene, R.G. (2001) Intra-oceanic subduction-related hydrothermal venting, Kermadec volcanic arc, New Zealand. Earth and Planetary Science Letters, v.193, p.359-369.

de Ronde, C.E.J., Massoth, G.J., Baker, E.T. and Lupton, J.E. (2003) Submarine hydrothermal venting related to volcanic arcs. In Simmons, S.F. and Graham, I.J.(eds.) Giggenbach Memorial Volume: Volcanic, Geothermal and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth. Society of Economic Geologists, Special Publication 10, p.91-109.

Dunlop, D.J. and West, G.F. (1969) An experimental evaluation of single domain theories. Reviews of Geophysics, v.7, p.709-757.

Evans, M.E. and Heller, F. (2003) Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. Academic Press, Oxford, 299p.

Hannington, M.D., Herzig, P., Scott, S., Thompson, G. and Rona, P. (1991) Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges. Marine Geology, v.101, p.217-248.

Hannington, M.D., de Ronde, C.E.J. and Petersen, S. (2005) Seafloor tectonics and submarine hydrothermal systems. In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P.(eds.) 100th anniversary Volume 1905-2005 of Economic Geology. Society of Economic Geologists, p.111-142.

Hekinian, R., Fevrier, M., Bischoff, J.L., Picot, P. and Shanks, W.C. (1980) Sulfide deposits from the East Pacific Rise near 21°N. Science, v.207, p.1433-1444.

Hekinian, R., Hoffert, M., Larque, P., Chemine, J.L., Stoffers, P. and Bideau, D. (1993) Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from South Pacific Intraplate volcanoes and East Pacific Rise Axial and off-axial regions. Economic Geology, v.88, p.2099-2121.

Kim, W., Doh, S.-J., Park, Y.-H. and Yun, S.-T. (2007) Two-year magnetic monitoring in conjunction with geochemical and electron microscopic data of roadside dust in Seoul, Korea. Atmospheric Environment, v.41, p.7627-7641.

Kim, W., Doh, S.-J. and Yu, Y. (2012) Asian dust storm as conveyance media of anthropogenic pollutants. Atmospheric Environment, v.49, p.41-50.

Kim, W., Doh, S.-J., Yu, Y. and Lee, Y.I. (2013) Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy c-means cluster analysis. Marine Geology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.01.001>

Lowrie, W. (1990) Identification ferromagnetic minerals

- in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophysical Research Letter*, v17, p.159-162.
- Maher, B.A. (1988) Magnetic properties of some synthetic submicron magnetite. *Geophysical Journal*, v.94, p.83-96.
- Park, Y.-H., Doh, S.-J., Kim, W. and Suk, D. (2005) Deformation history inferred from magnetic fabric in the southwestern Okcheon metamorphic belt, Korea. *Tectonophysics*, v.474, p.684-695.
- Perfit, M.R. and Davidson, J.P. (2000) Plate tectonics and volcanism. In Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. and Ballard, R.D.(eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, p.89-113.
- Schultz, H.N. and Jorgensen, B.B. (2001) Big bacteria. *Annual Review of Microbiology*. v.55, p.105-137.
- Simkin, T. and Seibert, L. (1994) *Volcanoes of the World*. 2nd(ed), Smithsonian Institution, Geoscience Press, Arizona, 349p.
- Simmons, S.L., Sievert, S.M., Frankel, R.B., Bazylinski, D.A. and Edwards, K.J. (2004) Spatiotemporal distribution of marine magnetotactic bacteria in a seasonally stratified coastal pond. *Applied Environmental Microbiology*, v.70, p.6230-6239.
- Stoffers, P., Worthington, T., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M., Massoth, G. and Shipboard Scientific Party (2006) Submarine volcanoes and high-temperature hydrothermal venting on the Tonga Island arc, S.W. Pacific. *Geology*, v.34, p.453-456.
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986) *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London, 217p.
- Turner, S., Hawkesworth, C., Rogers, N., Bartlett, J., Worthington, T., Hergt, J., Pearce, J. and Smith, I. (1997) 238U-230Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec island arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.61, p.4855-4884.
- Wilcock, W.S.D. and Delaney, J.R. (1996) Mid-ocean ridge sulfide deposits: Evidence for heat extraction from magma chambers or cracking fronts?. *Earth and Planetary Science Letters*, v.145, p.49-64.
- Worthington, T., Stoffers, P., Timm, C., Zimmerer, M. and Garbe-Schonberg, D. (2004) Effects of subducting the Louisville Ridge and Osbourn Trough beneath the south Tonga arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.68, p.A614.
- Zierenberg, R.A., Fouquet, Y., Miller, J. and Shipboard Scientific Party (1998) The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit. *Nature*, v.392, p.485-488.

2013년 3월 11일 원고접수, 2013년 5월 29일 게재승인