

심해 및 표층 지자기 자료를 이용한 라우분지 북동부의 열수 분출구 및 해저 지각 구조 연구

곽준영^{1*} · 원중선¹ · 박찬홍² · 김창환² · 고영탁²

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국해양연구원

The Study of Hydrothermal Vent and Ocean Crustal Structure of North-eastern Lau Basin Using Deep-tow and Surface-tow Magnetic Data.

Joon Young Kwak^{1*}, Joong Sun Won¹, Chan Hong Park², Chang Hwan Kim² and Young Tak Ko²

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University

²Korea Ocean Research and Development Institute

Fonualei Rift and Spreading Center(FRSC) and Mangatolu Triple Junction(MTJ) caldera are located in northeastern part of Lau basin which is the active back-arc basin. Deep-tow and surface-tow magnetic surveys are carried out in FRSC. In deep-tow magnetic survey, to compensate for influence of uneven distance between bathymetry and sensor height, magnetic anomaly is continued upward to a level plane by using the Guspì method. We calculate crustal magnetization using Parker and Huestis's inversion algorithm, and try to find the hydrothermal vent and understand the structure of ocean floor crust. The result of deep-tow magnetic survey at FRSC showed that Central Anomaly Magnetization High(CAMH) recorded the max value of 4.5 A/m which is associated with active ridge. The direction of SSW-NNE corresponds with the direction of the principal spreading ridge in Lau basin. The low crustal magnetization(174°35.1'W, 16°38.4'S) of -4.0 A/m is supposed to correlate with submarine hydrothermal vent. Surface-tow magnetic data were collected in MTJ caldera(174°00'W, 15°20'S). The prevailing SSW-NNE direction of collapsing walls and the presence of CAMH at the center of caldera strongly indicate the existence of active spreading ridge in ancient times.

Key words : Lau basin, Magnetization, Hydrothermal vent, Spreading ridge

Fonualei Rift and Spreading Center(FRSC)와 Mangatolu Triple Junction(MTJ) 칼데라는 활동성 후호분지인 라우(Lau)분지 북동쪽에 위치하고 있다. FRSC에서는 심해 견인 및 표층 자력탐사가 수행되었으며, 심해 견인 자력탐사에서 나타나는 해저 지형과 자력계 고도 사이의 거리 변화 영향을 보정하기 위해 Guspì의 상향연속법을 이용하여 동일한 고도에서 측정된 값으로 변환하였다. Parker and Huestis의 역산 알고리즘을 이용하여 해양지각의 자화를 계산하였고, 이로부터 심해저 열수 분출구 탐사와 해저지각 구조를 파악하고자 하였다. FRSC의 심해 견인 자력탐사 결과 해령에서 주로 나타나는 최대 4.5 A/m의 Central Anomaly Magnetization High(CAMH)가 관측되었으며, 남남서-북북동으로 추정되는 해령의 방향은 라우분지 내 주요 확장축의 방향과 일치하는 경향을 보인다. 또한 FRSC에서는 열수 분출구로 의심되는 -4.0 A/m의 저자화이상 발견되었다. MTJ 칼데라(174°00'W, 15°20'S)에서는 표층 자력탐사만이 수행되었고, 남남서-북북동 방향으로 함몰된 화륜과 중앙에서 나타나는 CAMH를 통해 칼데라 중심에 활동성 확장축이 존재하는 것으로 판단된다.

주요어 : 라우분지, 자화, 열수 분출구, 해령

1. 서 론

용암(lava)이 해령의 축에서 분출된 후 해수에 의해

급격히 식게 되면 상부 해양지각층은 당시의 지자기장 방향으로 자화된다. 지구조운동이나 화성활동이 증폭되기 쉬워 자기이상이 불규칙한 육지에 반하여 해양에서

*Corresponding author: toywith@knoc.co.kr

는 자기이상이 일정한 형태를 가지며, 특히 해저 상부 지각층은 풍부한 자성광물을 포함하여 전형적으로 강한 자기이상을 나타낸다. 열수 분출구에서 해양지각을 통과하는 열수유체는 자성을 잃게 되는 큐리(Curie)온도 이상의 높은 온도를 가지며 자성광물을 산화시키는 특징이 있기 때문에, 열수유체가 자성광물과 접촉하는 경우 자성광물들이 자성을 잃거나 혹은 낮은 자성을 가진 광물로 변질된다(Tivey and Schouten, 2002). 따라서 해양지각에서는 열수유체를 따라 국지적으로 0 A/m에 가까운 저자화이상이 나타나게 된다. 또한 해령의 축을 중심으로 Central Anomaly Magnetization High(CAMH)와 같은 높은 자화를 띠는 자기 고이상이 나타나는데 이는 젊은 베개용암(pillow lava)에서 초기에 강하게 자화된 합탄자철석과 같은 자성광물의 존재에 기인한다. 분출 후 자성광물은 시간에 따라 저온산화를 받음으로서 베개용암의 잔류자화를 급격히 감소시키는 요인이 되며(Schouten *et al.*, 1999), 따라서 해령의 주변은 축보다 상대적으로 낮은 잔류자화값을 나타내게 된다.

본 연구에서는 라우분지(Lau basin) 북동부에 위치하는 Fonualei Rift and Spreading Center(FRSC)와 Mangatolu Triple Junction(MTJ; King's Triple Junction이라고도 함) 칼데라(caldera)에서 2005년 12월 12일부터 2006년 1월 10일까지 30일간 수행된 해저열수광상 탐사의 일환으로서 한국해양연구원의 연구선 온누리호를 이용하여 지구물리탐사를 실시하였다(Fig. 1). 다중빔 음향측심기인 EM120을 이용하여 해저지형 자료를 획득하였고, 천부지층 탐사기(sub bottom profiler)를 이용하여 열수 퇴적물과 분출구(vent)의 존재유무를 파악하고자 하였다. 총 자기장은 5,000 m 동축(coaxial) 케이블과 500 kg의 웨이트(weight)를 이용하여 심해용 핵자력계인 SeaSPY를 해저면에 최대한 밀착하여 견인하는 심해견인 자력탐사와 해수면에서 표층 자력탐사가 동시에 수행되었다.

본 연구에서는 Parker and Huestis(1974)의 지자기역산 알고리즘을 바탕으로 자기이상으로부터 자화 분포를 산출하고, 이를 중심으로 해저지형 및 천부지층 탐사 자료와 비교·해석하여 열수 분출구(hydrothermal vent)와 해령(spreading ridge)의 존재 및 위치를 파악하고자 한다.

2. 연구 지역

라우분지는 태평양판과 인도-호주판 사이의 수렴 경

계에 위치한 활동성 배호분지(back-arc basin)이다. 연구 지역에서 라우분지의 주요한 활동성 해령은 CLSC(Central Lau Spreading Center), ELSC(Eastern Lau Spreading Center), VFR(Valu Fa Ridge)로 구분 할 수 있고, 라우분지 내에서 상대적으로 복잡한 지형분포를 보이는 북쪽에는 NWLSC(Northwest Lau Spreading Center), NELSC(Northeast Lau Spreading Center), Y자형의 해령-해령-해령 구조를 가진 MTJ가 존재한다(Fig. 1). 기존의 광역적인 지자기 탐사 결과 MTJ는 Brunhes 정자극기에 재자화된 neovolcanic zone이며, MTJ 남쪽의 경우 Brunhes 정자극대를 Matuyama 역자극대가 둘러싸고 있는 형태로 나타났다(Wright *et al.*, 2000). 라우분지 내 대부분의 해령은 북쪽 혹은 북동쪽의 방향성을 가지고 신장되어 있다.

라우분지 내에서 가장 먼저 보고된 열수 분출 지역은 VFR이며(Fouquet *et al.*, 1991), 기존의 연구에서는 CLSC와 ELSC를 중심으로 많은 열수 분출구가 조사되었다(Zellmer and Taylor, 2001; Martinez *et al.*, 2006). 라우분지 북동부는 상대적으로 탐사가 덜 이루어진 지역이지만, 최근 German *et al.*(2006)은 FRSC와 NELSC에 존재하는 다수의 열수 플룸(plume)을 보고 한 바 있다. 해령의 확장속도는 18°S에서는 90 mm/yr, 21°S에서는 65 mm/yr로 남쪽으로 갈수록 느려지는 경향을 보인다(Taylor *et al.*, 1996). Morgan and Chen(1993)은 중앙해령에서 확장속도가 빠를수록 열수활동이 활발하다는 연구 결과를 제시하였는데, Baker *et al.*(2006)는 이러한 이론이 후배호의 해령에도 적용 가능함을 주장하였다. 이를 통해 상대적으로 확장속도가 빠른 라우분지 북동부의 활발한 열수활동 가능성을 추론 할 수 있다.

주요 연구지역인 FRSC는 MTJ의 남쪽 확장축의 연장선에 위치하고 있으며, 탄성파와 지자기 탐사 결과 FRSC 최남단의 확장속도는 47 mm/yr(±5), 최북단은 85 mm/yr(±5)으로 나타났다(Zellmer and Taylor, 2001). MTJ 칼데라는 NELSC와 TVA(Tofua Volcano Arc)의 사이에 존재하고 있다. NELSC는 라우분지 북동쪽 통가 해구(Tonga trench)까지 연장되며 칼데라는 이 교차점에서 정남쪽에 위치하고 있다(Wright *et al.*, 2000).

3. 연구 방법

탐사에서 획득된 표층 및 심해 총자기장에서 2005년도 IGRF(International Geomagnetic Reference

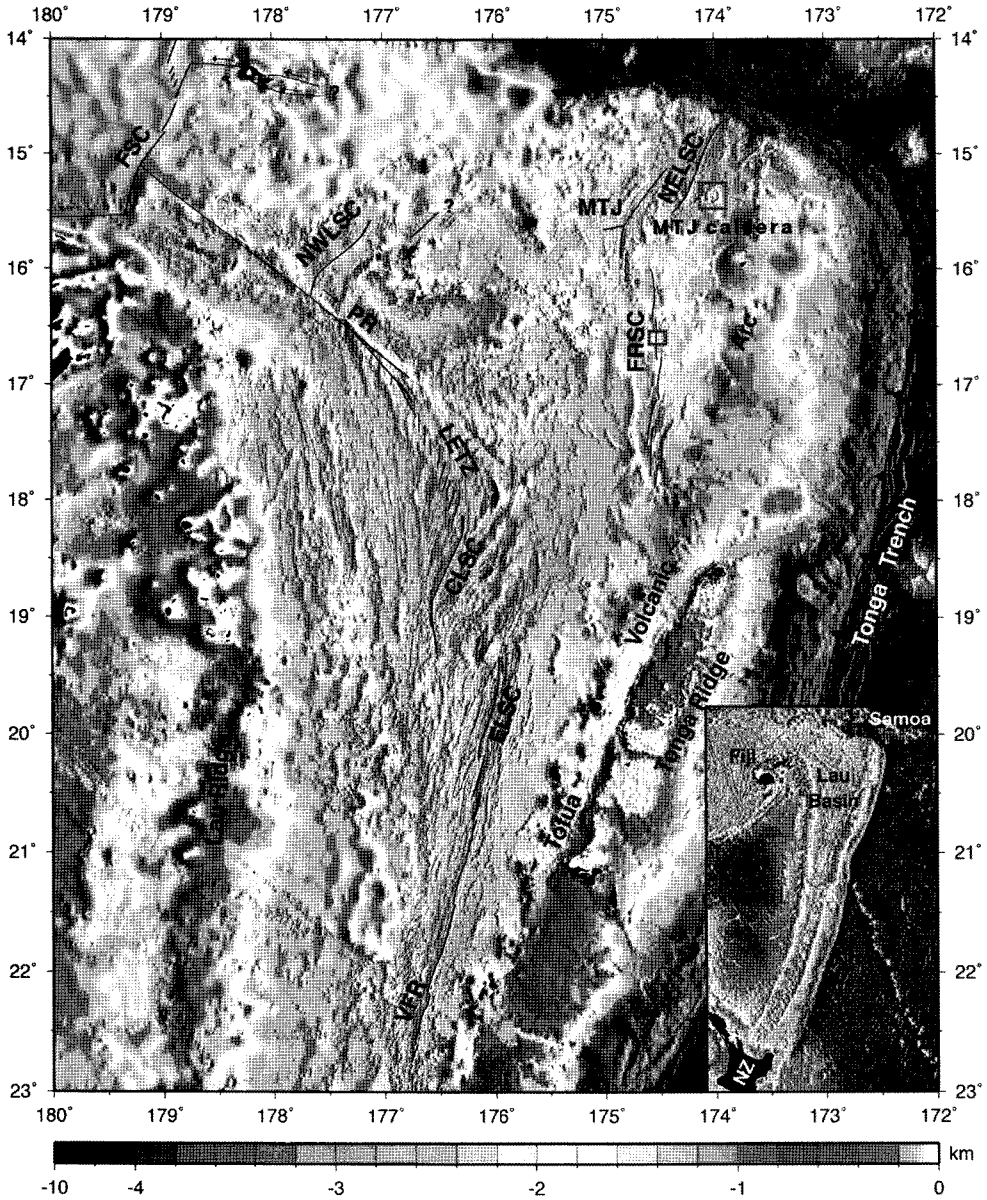


Fig. 1. Bathymetry map of the Lau basin(Zellmer and Taylor, 2001). Small red boxes indicate the locations of FRSC (Fig. 4) and MTJ caldera (Fig. 10), respectively.

VFR, Valu Fa Ridge; ELSC, East Lau Spreading Center; CLSC, Central Lau Spreading Center; LETZ, Lau Extensional Transform Zone; PR, Peggy Ridge; FSC, Futuna Spreading Center; NWLSC, Northwest Lau Spreading Center; FRSC, Fonualei Rift and Spreading Center; MTJ, Mangatolu Triple Junction; NELSC, Northeast Lau Spreading Center.

Field)값을 소거하여 자기이상치를 획득하였다. 심해권인 자력탐사의 경우 음향측심기 자료를 모니터링하면서 해저지형의 기록에 따라 자력계의 고도를 계속 조정해 주어야 한다. 따라서 각 측정마다 자력계와 해저지형 간 거리의 영향을 보정해주어야 하며, 본 연구에서는 Guspí(1987)가 제시한 방법을 이용하여 자기이상을 일

정한 수평면에서 측정된 값으로 변환하였다.

변환을 위해서는 불균질면과 수평면 사이에 자기장 간섭을 일으키는 물질이 없음을 가정하여야 한다. $g^*(x)$ 는 지형 $z(x)$ 에서 실제 측정된 자기장이고, $g(x)$ 는 수평면에서 측정된 값으로 변환된 장이다. $G(\omega)$ 를 $g(x)$ 의 푸리에(Fourier)변환이라 하면, 각 자기장은

$$g(x) = \int G(\alpha)e^{2\alpha xi} d\alpha \tag{1}$$

$$g^*(x) = \int e^{\gamma z(x)} G(\alpha)e^{2\alpha xi} d\alpha, \gamma = 2\pi i d \tag{2}$$

로 표현되며, 따라서 변환장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(x) = g^*(x) - \int [e^{2\pi i d z(x)} - 1] G(\alpha)e^{2\alpha xi} d\alpha \tag{3}$$

식 (3)의 대괄호안을 테일러(Taylor) 전개를 하면

$$g(x) = g^*(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n(x)}{n!} \int \gamma^n G(\alpha)e^{2\alpha xi} d\alpha \tag{4}$$

로 나타낼 수 있으며, 실제 계산은 역푸리에변환으로 표현되는 식(5)를 이용한다.

$$g(x) = g^*(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n(x)}{n!} F^{-1}[\gamma^n G(\alpha)] \tag{5}$$

Guspi방법으로 변환된 자기이상을 자극화변환(reduction to the pole)과정과 필터링과정을 거쳐 Parker and Huestis(1974)가 제시한 알고리즘을 이용하여 역산을 수행함으로써 자화강도를 추정하였다. 역산을 수행하기에 앞서 다음과 같은 가정을 설정하였다. 첫째, 자화된 물질은 상대적으로 얇고(300 m) 두께가 일정한 상부 지각층으로 제한하기로 가정하였다. 일반적으로 해양지각에서 베개용암층 아래에 존재하는 반려암(gabbro)과 암맥(dike)은 해수면에서 측정된 자기이상에 영향을 주지만 그 크기가 미미하므로, 해양지각에서 측정된 대부분의 자기이상은 베개용암층의 특성과 분포에 기인한다(Gee and Kent, 1994). 연구지역의 천부지층 탐사 자료에서 퇴적층은 거의 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 만일 상부에 얇은 퇴적층이

존재하더라도 하부의 현무암에 비해 자화강도가 현저히 낮을 것이므로 퇴적층의 영향은 무시해도 좋을 것이다. 또한 천부의 현무암은 분출 후 냉각속도가 빨라 단자구입자 크기와 함티탄자철석의 양이 비교적 많기 때문에 심부 현무암보다 상대적으로 강한 잔류 자화강도 값을 가지게 된다. 본 연구지역 FRSC의 한 축선에서 자기층 두께를 100 m, 300 m, 500 m로 달리하면서 자화를 산출하여 비교한 결과, 자화 신호의 주요한 형태는 변화가 없이 진폭만 달라짐을 알 수 있으므로 (Fig. 2), 베개용암층 최하부면의 심도를 알고 있지 않다면 300 m 두께의 자화층은 역산을 위해서 유용한 가정으로 사료된다. 둘째, 자기층의 자화 방향이 일정함을 가정하였다. 이는 수천년의 시간 규모로 볼 때 지구자기장의 영년변화의 평균은 지구회전축과 일치한다는 고지자기학의 중요한 개념인 지구중심축 쌍극자(geocentric axial dipole) 가설로 뒷받침 된다(Parker and Huestis, 1974). 자화 벡터(magnetization vector)를 가정하기 위해서 Cande *et al.*(1973)는 실제 측정된 자화방향 자료가 없을 경우에 해령에서 나타나는 CAMH가 박스카(box-car) 형태를 가지는 θ 를 선택하는 방법을 제시하였다. θ 는 자화 벡터와 주변 자장 벡터로부터 계산된 왜도(skewness) 변수로서, Fig. 3은 θ 의 변화에 따라 나타나는 자화 신호를 비교한 예이다. 현재의 지자기 방향인 $\theta = -8^\circ$ 에서 박스카 형태에 가까운 신호가 나타났으며, -94° 일 때 CAMH가 한쪽으로 기울어지면서 -181° 에서는 역전된 신호가 나타난다. 따라서 본 연구지역에서는 모두 현재의 지자기장 방향으로 가정하여 역산을 수행하였다.

Parker and Huestis(1974)가 제시한 역산 알고리즘은 다음과 같다.

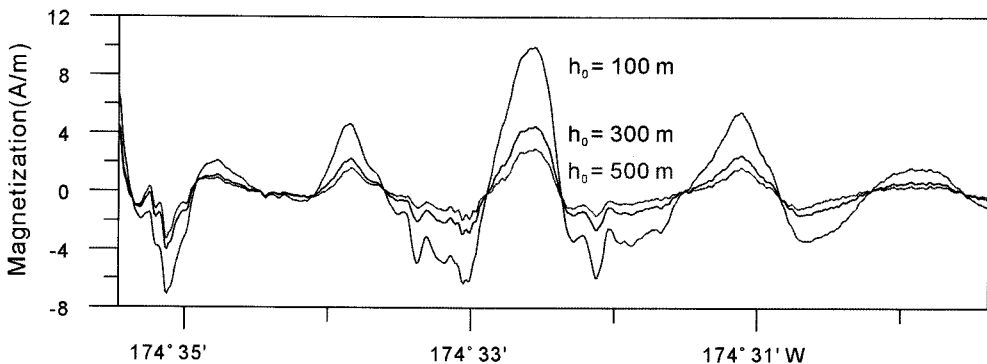


Fig. 2. Magnetizations derived from several constant thicknesses of magnetic layer. Characteristic pattern of curve is unaltered by changes in thickness.

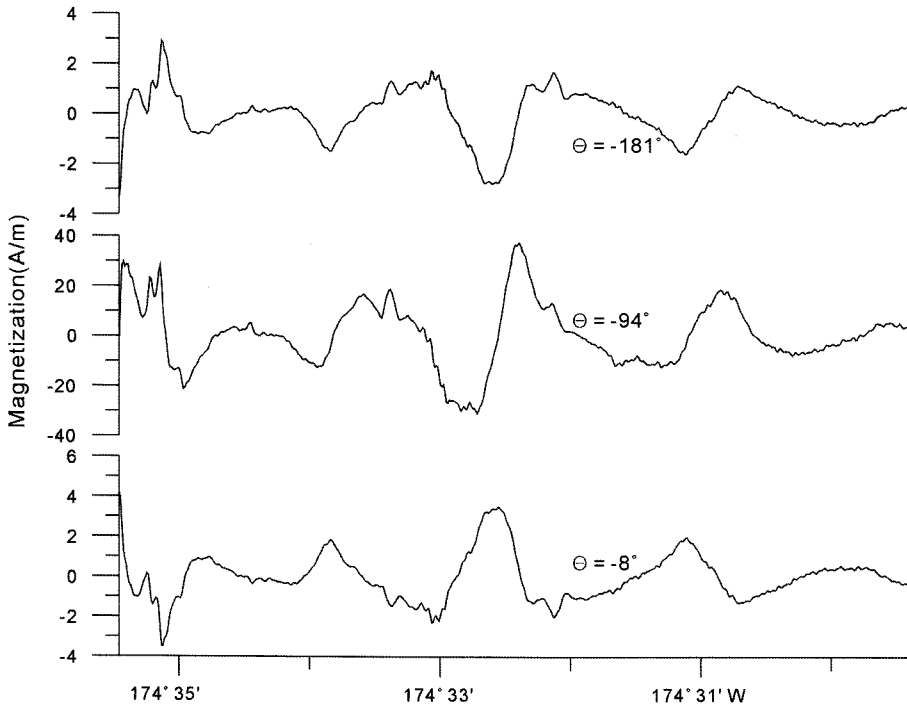


Fig. 3. Magnetizations derived from varying θ . The angle θ is skewness parameter of an anomaly.

$$F[A] = \frac{1}{2} \mu_0 e^{-kz_0} [1 - e^{-kz_0}] V(k) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|k|^n}{n!} F[M(x)h(x)^n] \quad (6)$$

$$V(k) = \hat{B}_0 \cdot (\hat{z} + i\hat{x}k/k) \hat{M}_0 \cdot (\hat{z} + i\hat{x}k/k) \quad (7)$$

F는 푸리에변환을 의미하며, A(x)는 측정된 자기이상, k는 파수, z_0 는 측정 고도, h_0 는 가정된 자기층 두께, M(x)는 자화의 강도이고 h(x)는 각 측정점에서 자력계 고도와 해저면 사이의 거리이다. \hat{M}_0 는 자화방향의 일정 단위 벡터이고, \hat{B}_0 는 주변 자장 방향의 단위 벡터이다. (6)식에서 $n=0$ 일 때의 값을 대입하고, 재정리 하면 다음과 같다.

$$F[M] = \frac{F[A] e^{kz_0}}{\frac{1}{2} \mu_0 [1 - e^{-kz_0}] V(k)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|k|^n}{n!} F[Mh^n] \quad (8)$$

일변화 보정은 시간에 따라 변하는 외부 지자기 효과를 보정하는 것으로, 연구지역과 가까운 위치에 고정 지자기 관측소를 설치해야 한다. 주요 탐사 지역에서 고정 지자기 관측소를 설치할 수 있는 가장 가까운 육지는 피지(Fiji)이지만, 경도가 3°정도 이격되어 있어 보정 자료로 활용하기에 무리가 있기 때문에 일변화 보정은 생략하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. Fonualei Riff and Spreading Center

FRSC에서는 표층 자력탐사와 심해건인 자력탐사가 수행되었다. 표층 자력이상의 범위는 -140~160 nT이며, 전체적으로 총 자력과 자기이상이 해저지형의 기복과 일치하는 경향을 보인다(Fig. 4, Fig. 5).

연구지역에서 세 개의 축선을 선정하여 심해건인 자력탐사를 수행하였다(Fig. 5). 관측된 자기이상치는 축선 F1에서 가장 크게 나타났으며, 그 범위는 -400~900 nT이다(Fig. 6). 축선 F2, F3은 각각 -300~400 nT와 -200~200 nT의 범위를 보이며, 이는 해저지형의 전체적인 남고북저 경향과 일치하고 있다(Figs. 7 and 8). Parker and Huestis(1974)의 역산을 수행한 결과, 축선 F1의 중앙(174°32.6'W, 16°38.4'S)에서 해령에 주로 나타나는 전형적인 CAMH가 관측되었으며 상대적으로 높은 4.5 A/m의 자화강도를 가진다(Fig. 6). 축선 F2, F3에서도 CAMH가 관측되나 그 크기가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 해령의 활동성이 약해지면서 CAMH의 신호가 미약해지는 것으로 사료된다. 각 축선에서 나타나는 해령의 위치를 해저지형도에 도시한 결과 라우분지에서 나타나는 주요 확장축의 남남서-북

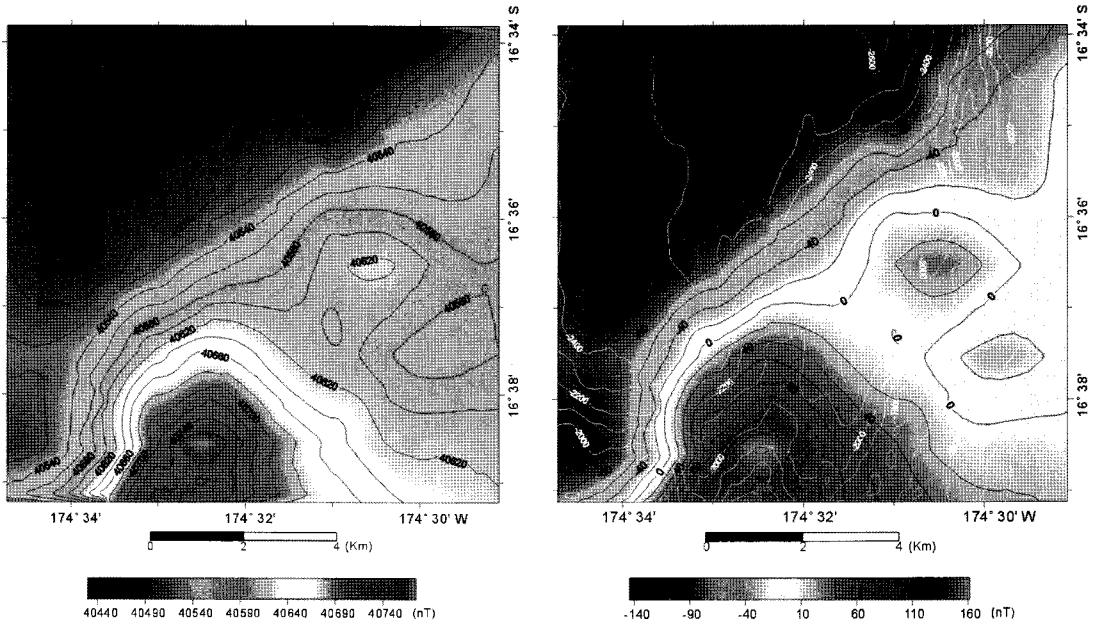


Fig. 4. Total magnetic field map(left) and surface magnetic anomaly map(right) of FRSC. White contour lines are bathymetry.

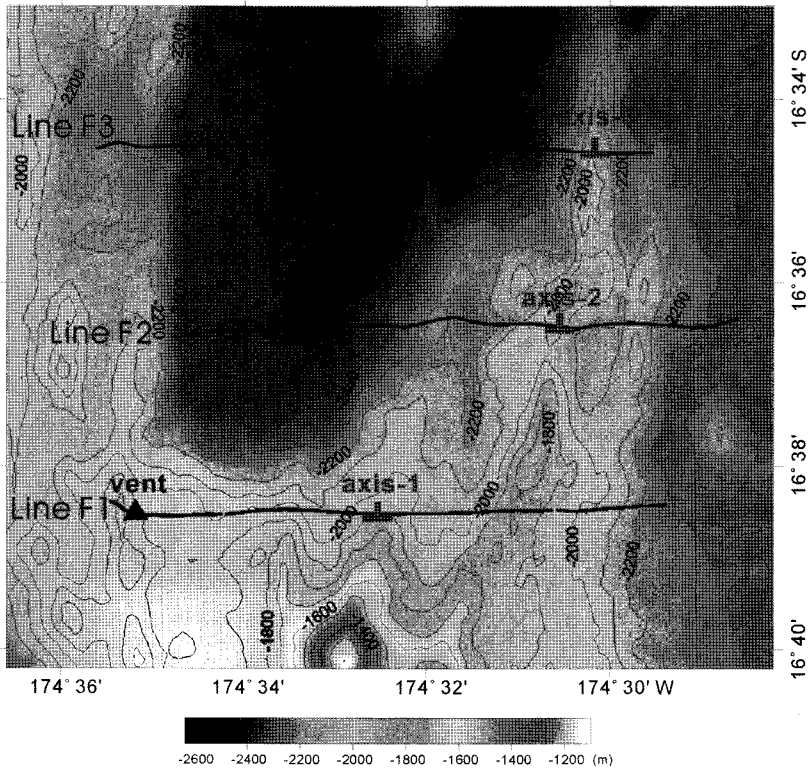


Fig. 5. Topography and deep-tow magnetic survey tracks of FRSC. Red convexnesses and a purple triangle denote the location of spreading axes and hydrothermal vent, based on the Fig. 6, respectively.

북동 방향과 잘 부합하고 있다(Fig. 5). 하지만 라우분지 북쪽으로 갈수록 확장속도가 빨라지는 경향과 일치하지 않으며, 세 측선의 CAMH만으로 확장축의 연결성을 확신하기에는 어려움이 있으므로 각각 서로 다른 확장축일 가능성도 배재할 수 없다.

또한 FRSC의 측선 F1에서는 저자화이상이 관측(174°35.1'W, 16°38.4'S)되었는데, 주변에 비해 상대적으로 낮은 -4.0 A/m의 자화강도와 좁은 폭은 하부의 이상체가 열수 분출구일 가능성을 제시하고 있다. 본 연구에서는 드레지(dredge)를 통해 저자화이상대에서 열수 분출구 확인을 시도하였으나, 열수변질 시료를 획득할 수 없었다. 그 이유는 첫 번째로 관측된 저자화이상이 다른 요인에 의해서 생겼을 가능성에 대해 생각해 볼 수 있다. 정단층에 의해 베개용암층 밑의 반려암이나 암맥들이 해저면에 노출 되었거나 국지적으로 두꺼운 퇴적층이 존재할 경우에도 저자화이상이 관

측이 가능하다(Smith *et al.*, 1999). 하지만 저자화이상이 나타나는 위치에 천부지층 자료가 누락되어 있어 해저면 지층 특성을 파악하는데 어려움이 있다. 저자화이상이 나타나는 또 다른 원인은 역자극기에 분출된 해양지각의 존재에 있다. 하지만 확장축을 중심으로 대칭적인 저자화이상이 나타나지 않고, 기존 FRSC의 최대(85 mm/yr), 최소(47 mm/yr) 확장속도를 이용한 저자화이상대의 연대 추정 결과 0.053~0.097 Ma로 나타나, 이 지역은 Brunhes 정자극기에 분출된 neovolcanic zone으로 사료된다.

정자극기에 분출했음에도 불구하고 연구지역에서 나타나는 음의 자화이상 분포는 우선 annihilator에 의한 효과로 추정할 수 있다. Annihilator는 자기장에 영향을 주지 않는 자화값이며, 따라서 annihilator의 존재는 자기 역산과정에서 무한한 해가 존재할 수 있음을 의미한다(Parker and Huestis, 1974). 예를 들어, 일정

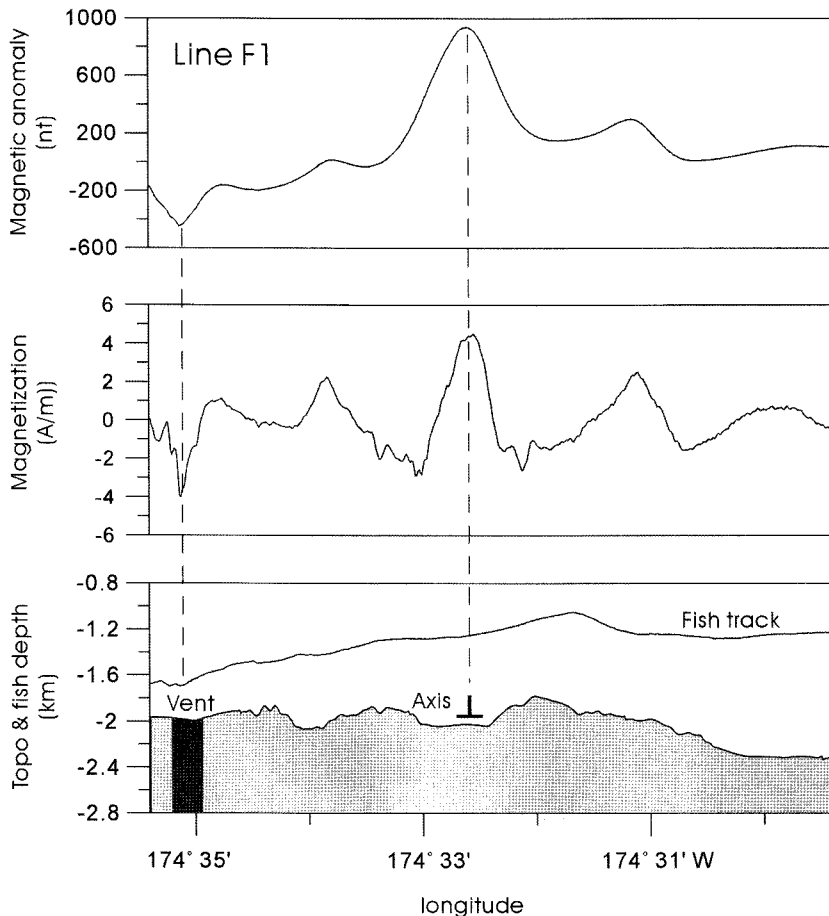


Fig. 6. Deep-tow magnetic anomaly(top), magnetization(middle) and bathymetry and fish tracks(bottom) profiles for line F1 of FRSC. A convexness and a dark gray bar denote the locations of the spreading axis and hydrothermal vent, respectively.

한 자화를 가지는 무한한 수평판이나 일정한 대자율로 자화된 구각(spherical shell)의 경우 자화 분포에 의한 자기장이 외부에 나타나지 않는다(Maus and Haak, 2003). 일반적으로는 일정한 자화값을 가지는 자기층을 가정하고 해저지형 자료를 토대로 annihilator를 산출하여, 역산된 자화 평균이 암석 샘플 자료에서 측정된 연구지역의 평균 자화와 같아지는 양만큼 annihilator를 더하게 된다. 본 연구에서는 자화 측정 자료가 없기 때문에 측선 F1에서 음의 자화값이 나타나지 않을 때까지 원래의 자화값에 annihilator를 더해주었다(Fig. 9). 그 결과 저자화이상, CAMH 등과 같은 주요한 자화신호 특성은 변화 없이 전체적으로 자화값이 높아졌음을 알 수 있다. 음의 자화이상을 일으키는 또 다른 원인은 자기층 경계면 효과에 있다. Currie and Davis(1994)는 양의 자화값을 가지는 자기층으로 둘러싸인 0 A/m에 가까운 자화층을 모델링한 결과, 음의

자기이상이 나타남을 보였다. 이런 0 A/m에 가까운 자기층은 두꺼운 퇴적층이 존재하거나, 자화광물이 고온의 열수에 의해 변질된 경우 나타날 수도 있다.

열수변질 시료가 확인되지 않은 두 번째 이유는 위치 오차문제로 사료된다. 심해건인 자력탐사는 케이블의 길이와 센서의 해저고도 자료, 선내의 DGPS를 이용하여 위치를 환산한다. 하지만 조류에 의해 선미의 케이블(2,000~2,500 m)에 횡적인 변동이 나타날 경우 그 오차는 최대 수 백미터 이상이 될 것으로 추정된다. 이로 인해 음향측심기와의 위치 오차를 야기하여 저자화이상이 발견되었더라도, 그 위치에서 열수변질 시료를 채취하는데 어려움이 있다.

4.2. Mangatolu Triple Junction Caldera

MTJ 칼데라에서는 11개의 측선을 설정하여 표층 자력탐사만이 수행되었다(Fig. 10). 칼데라는 지름이 약

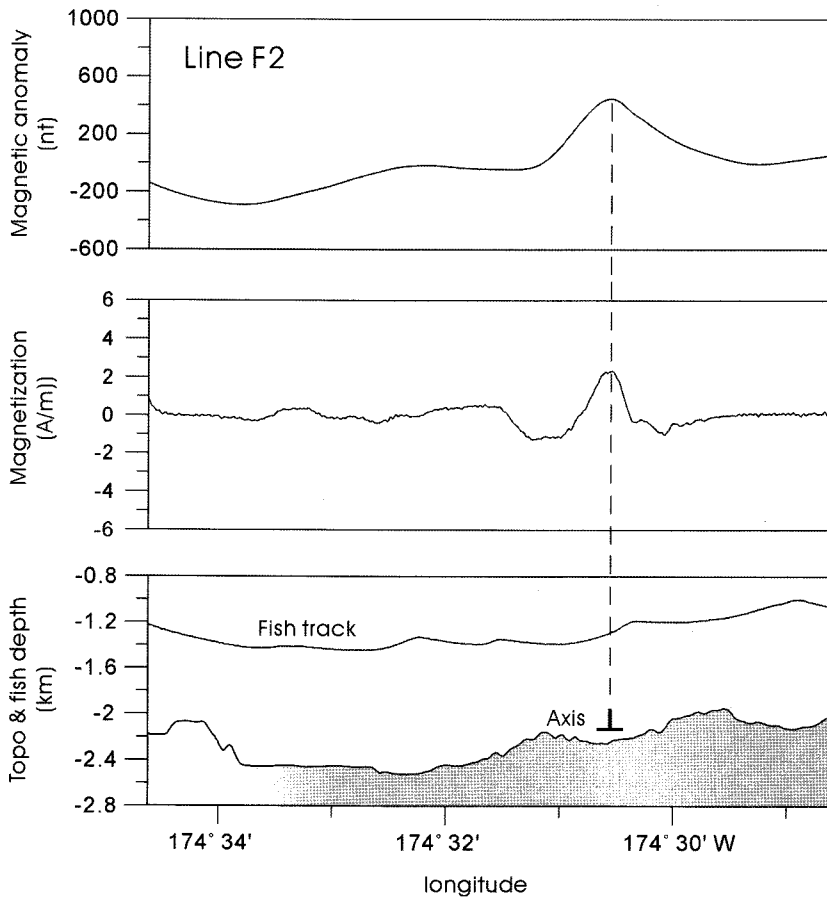


Fig. 7. Deep-tow magnetic anomaly(top), magnetization(middle) and bathymetry and fish tracks(bottom) profiles for line F2 of FRSC. A convexness denotes the location of the spreading axis.

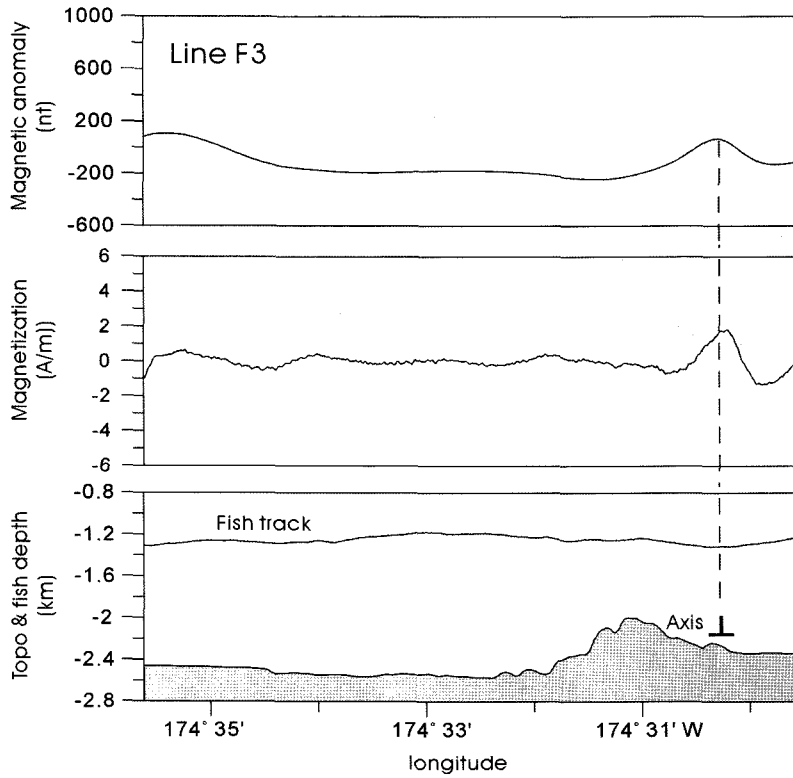


Fig. 8. Deep-tow magnetic anomaly(top), magnetization(middle) and bathymetry and fish tracks(bottom) profiles for line F3 of FRSC. A convexness denotes the location of the spreading axis.

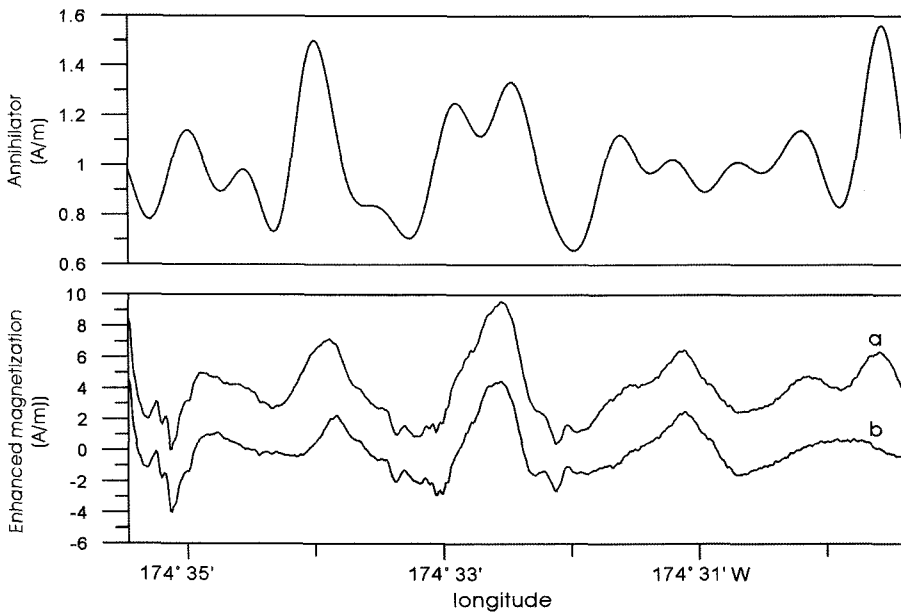


Fig. 9. Top panel shows the annihilator corresponding to the near bottom magnetic anomaly of line F1. Bottom panel shows original and enhanced magnetizations. Magnetization curve b is produced by the Parker and Huestis(1974) inversion and upper curve a has been adjusted by addition of an arbitrary amount of annihilators.

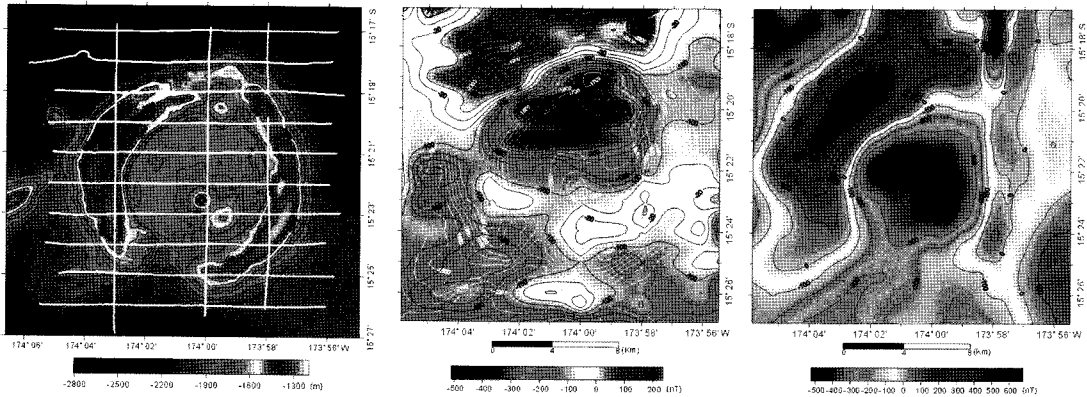


Fig. 10. Bathymetry with tracks(left), surface magnetic anomaly(middle) and reduction to the pole(right) map of MTJ. White contour lines are bathymetry(middle). The RTP anomaly is consistent with bathymetry.

15 km이며, 중앙에는 2차 분출에 의한 것으로 생각되는 콘(volcanic cone)이 생성 되어있다. 특징적으로 남남서-북북동 방향으로 외륜이 함몰되어 있다. 자기이상은 -500~200 nT의 범위를 가지며 중앙에 칼데라 함몰에 의한 저이상이 나타나고 북쪽으로 높은 자기이상이 나타난다. 자극화변환을 실시하여 저위도의 자기왜곡 효과를 보정한 결과 상대적으로 해저지형과 잘 부합하고 있다(Fig. 10).

Fig. 11은 MTJ 칼데라의 표층 자력이상으로부터 역산된 자화분포이다. 칼데라의 양쪽 벽을 따라서 높은 자화이상이 관측되었고, 특징적으로 칼데라의 남남서쪽과 중심부에서 CAMH가 관측되었는데 이를 통해 칼데라의 중심부를 가로지르는 확장대가 존재 하는 것으로 사료된다. CAMH의 방향은 칼데라의 남남서 및 북북동 함몰대의 방향 및 주변의 NELSC 방향과도 일치하고 있으므로, 칼데라의 중심부에 존재 할 것으로 생각되는 확장대는 NELSC에서 파생된 것으로 추측된다. 칼데라의 생성기원 및 구조에 관해서는 아직 연구가 미미한 실정이나 Bloomer *et al.*(1996)는 칼데라에서 채취한 석영안산암(dacite) 용암들이 인접한 TVA와 확장축 모두에서 기원되었음을 주장하였다.

수심이 깊은 대양에서의 표층 자력탐사는 관측되는 총 자기장 값이 고주파 필터링되는 효과를 받기 때문에 천부 해양지각의 지자기 특성을 명확히 반영하지 못한다. 연구지역인 FRSC보다 북쪽(16°20')에서 수행된 동일 축선의 심해건인 자력탐사와 표층 자력탐사의 자기 이상을 비교한 결과, 신호의 진폭과 양상이 상이하며, 특히 표층 자기이상에서는 열수 분출 활동을 가늠할 수 있는 국지적으로 낮은 자기이상이 나타나지 않고 있다(Fig. 12). 따라서 MTJ 칼데라에서 활동성

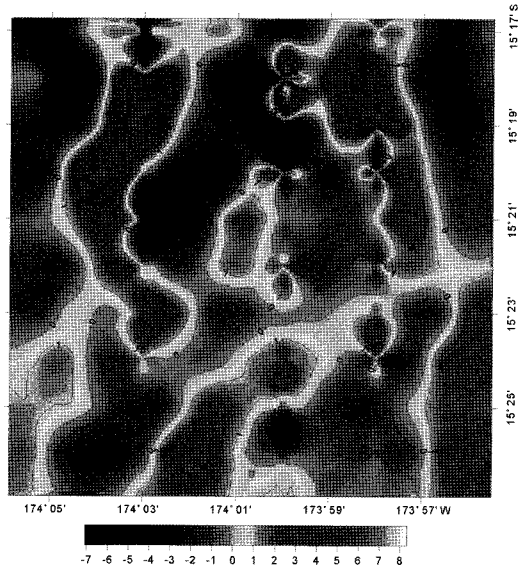


Fig. 11. Crustal magnetization of MTJ caldera calculated from surface magnetic anomaly by assuming a constant thickness layer(300 m).

확장대의 존재 유무와 칼데라의 생성기원을 파악하고 나아가 이 지역에 존재하는 열수 분출구를 탐사하기 위해서는 심해건인 자력탐사가 필수적으로 요구된다.

5. 결 론

남태평양 라우분지 북동쪽 FRSC와 MTJ 칼데라에서 획득된 심해건인 및 표층 자력탐사 자료를 이용하여 열수 분출구와 해령의 존재 및 위치를 파악하고자 하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. FRSC에서는 CAMH가 확연히 나타나고 있고, 최

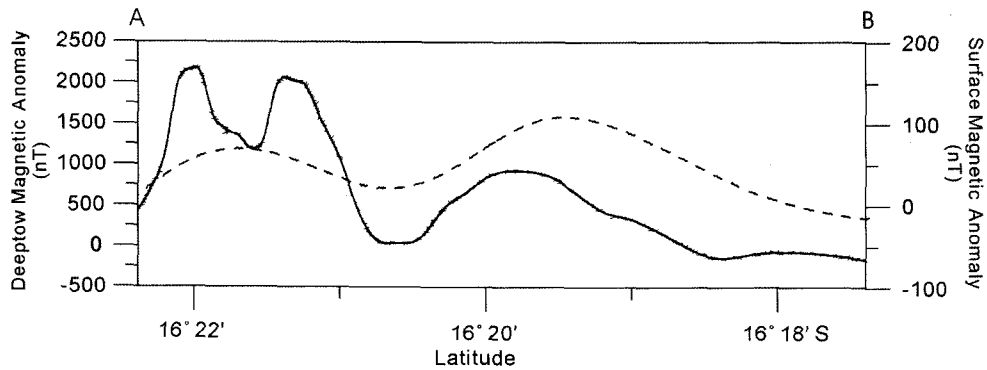


Fig. 12. A comparison of deep(solid line) and surface(dotted line) tow magnetic anomaly.

대 4.5 A/m의 크기를 가진다. 또한 각 축선에서 나타나는 CAMH를 연결한 방향은 알려져 있는 FRSC의 남남서-북북동 방향과 잘 부합한다.

2. FRSC의 축선 F1에서는 -4.0 A/m의 저자화이상대가 나타났으며, 이는 열수 분출구에 의한 것으로 사료된다. 하지만 기 설명 하였듯이 다른 요인에 의하여 저자화이상이가 나타날 가능성도 있으므로 암석 샘플 및 타 지구물리탐사 자료를 참고하는 등 해석에 주의하여야 한다.

3. MTJ 칼데라의 지형 및 자화 분포를 통해 칼데라의 중심에 확장대가 존재할 것으로 유추된다. 이 확장대는 NELSC에서 파생된 것으로 사료되나, 정밀한 분석을 위해서는 고해상도 심해견인 자력탐사가 수행되어야 한다.

4. 천부지층의 정밀한 자화를 산출하기 위해서는 우선적으로 양질의 심해견인 자력탐사 자료가 획득되어야 하고, Parker and Huestis(1974)의 역산을 수행하기 위한 자기층 두께, 자화 방향 등 적절한 가정을 설정하는 것이 필수적이다.

5. 일반적으로 열수 분출구는 해령주변에서 잘 발달하기 때문에 해령의 존재 및 방향성을 파악하는 것은 열수 분출구 탐사에서 매우 중요하며, 따라서 지자기 특성을 이용한 자력탐사는 다른 지구물리탐사보다 열수 분출구 탐사에 효율적으로 수행될 수 있다.

6. 사 사

본 연구는 한국해양연구원 ‘2005 남서태평양 광물자원 개발사업’의 지원으로 진행되었습니다. 자료 획득에 힘써주신 연구원 및 은누리호 승조원 여러분께 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

Baker, E.T., Resing, J.A., Walker, S.L., Martinez, F., Taylor, B. and Nakamura, K. (2006) Abundant hydrothermal venting along melt-rich and melt-free ridge segments in the Lau back-arc basin. *Geophys. Res. Lett.*, v. 33, L07308, doi:10.1029/2005GL025283.

Bloomer, S.H., Wright, D.J. and Boomerang LEG 8 Shipboard Scientific Party (1996) Geology of the Tonga Forearc: A supra-subduction zone ophiolite. *EOS Trans. AGU.*, 77, F325.

Cande, S.C., LaBrecque, J.L. and McCamy, K. (1973) Application of linear filtering to marine magnetic anomalies: Paleo-poles and ridge crest processes. *EOS Trans. AGU.*, 54, 252.

Currie, R.G. and Davis, E.E. (1994) Low crustal magnetization of the middle valley sedimented rift inferred from sea-surface magnetic anomalies. *Proceeding of the ODP, Scientific Result*, v. 139.

Fouquet, Y., Stackelberg, U.V., Charlou, J.L., Donval, J.P., Foucher, J.P., Erzinger, J., Herzig, P., Muehe, R., Wiedicke, M., Soaka, S. and Whitechurch, H. (1991) Hydrothermal activity in the Lau back-arc basin: Sulfides and water chemistry. *Geology*, v. 19, p. 303-306.

Gee, J. and Kent, D. (1994) Variation in layer 2A thickness and the origin of the central anomaly magnetic high. *Geophys. Res. Lett.*, v. 21, no. 4, p. 297-300.

German, C.R., Baker, E.T., Connelly, D.P., Lupton, J.E., Resing, J.A., Prien, R.D., Walker, S.L., Edmonds, H.N. and Langmuir, C.H. (2006) Hydrothermal exploration of the Fonualei rift and spreading center and the northeast Lau spreading center. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 7, no. 11, ISSN:1525-2027.

Guspi, F. (1987) Frequency-domain reduction of potential field measurements to a horizontal plane. *Geoprospection*, v. 24, p. 11-19.

Martinez, F., Taylor, B., Baker, E.T., Resing, J.A. and Walker, S.L. (2006) Opposing trends in crustal thickness and spreading rate along the back-arc Eastern Lau Spreading Center: Implications for controls on ridge morphology, faulting, and hydrothermal activity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 245, p. 655-672.

- Maus, S. and Haak, V. (2003) Magnetic field annihilators: invisible magnetization at the magnetic equator. *Geophys. J. Int.*, v. 155, p. 509-513.
- Morgan, P.J. and Chen, Y.J. (1993) The genesis of oceanic crust: Magma injection, hydrothermal circulation, and crustal flow. *J. Geophys. Res.*, v. 98, p. 6283-6297.
- Parker, R.L. and Huestis, S.P. (1974) The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *J. Geophys. Res.*, v. 79, p. 1587-1594.
- Schouten, H., Tivey, M.A., Fornari, D.J. and Cochran, J.R. (1999) Central anomaly magnetization high: constraints on the volcanic construction and architecture of seismic layer 2A at a fast-spreading mid-ocean ridge, the EPR at 9°30'-50'N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 169, p. 37-50.
- Smith, D.K., Tivey, M.A., Schouten, H. and Cann, J.R. (1999) Locating the spreading axis along 80 km of the Mid-Atlantic Ridge south of the Atlantis Transform. *J. Geophys. Res.*, v. 104, p. 7599-7612.
- Taylor, B., Zellmer, K., Martinez, F. and Goodlife, A.M. (1996) Seafloor spreading in the Lau back-arc basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 144, p. 35 -40.
- Tivey, M.A. and Johnson, H.P. (2002) Crustal magnetization reveals subsurface structure of Juan de Fuca Ridge hydrothermal vent field. *Geological Society of America*, v. 30, no. 11, p. 979-982.
- Tivey, M.A. and Schouten, H. (2003) A near-bottom magnetic survey of the Mid-Atlantic Ridge axis at 26°N: Implications for the tectonic evolution of the TAG segment. *J. Geophys. Res.*, v. 108, no. B5, 2277, doi:10.1029/2002JB001967.
- Wright, D.J., Bloomer, S.H., Macleod, C.J., Taylor, B. and Goodlife, A.M. (2000) Bathymetry of the Tonga Trench and Forearc: a map series. *Marine Geophysical Researches*, v. 21, p. 489-511.
- Zellmer, K. and Taylor, B. (2001) A three-plate kinematic model for Lau Basin opening. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 2, 200GC000106, ISSN: 1525-2027.

2007년 12월 17일 원고접수, 2008년 2월 15일 게재승인.