

해상지자기자료 및 해저정밀지형자료를 이용한 북피지분지 내 해령 및 해저 열수광상에 대한 연구

최순영¹ · 김창환^{1,*} · 박찬홍² · 김형래³

¹한국해양과학기술원 동해연구소 독도전문연구센터

²한국해양과학기술원

³공주대학교 지질환경과학과

요 약

본 연구는 한국해양과학기술원의 연구선 온누리호를 이용하여 해저열수광상 부존가능성 지역을 추정하고 자 북피지분지 내 중앙해령에 해당하는 KF-1, KF-2, KF-3 세 지역에 대해 해저지형조사 및 지자기조사를 함께 실시하였다. 연구지역인 북피지 분지는 남서태평양 지역에 있는 여러 후열도분지 중 하나로서 12 Ma 전 후열도 생성이 시작되어 몇 개의 해령을 따라 확장이 이루어지고 있는 활동성 분지이다. KF-1 지역은 북서-남동 방향으로 두 개의 지구(graben)가 있으며 두 지구 사이에 좁은 지루(horst)가 나타난다. KF-1의 자기이상분포는 구역 남부와 북동부에서 저이상대가 분포하며 구역 북부에서는 고자기이상대가 위치한다. KF-1의 자극화 변환된 자기이상에서는 확장축의 굽김 현상이 뚜렷이 나타난다. KF-2 지역은 삼중합점 지점으로 세 개의 해령이 합쳐지면서 지형이 솟아오르는 형태가 관찰되며 삼중합점에서 N-S segment로 연결되는 확장축에 뚜렷한 열곡(rift valley)이 존재한다. KF-2의 자기이상분포는 고자기이상대가 삼중합점을 중심으로 T자 형태로 분포하며 고이상대 위치가 N-S segment와 North Fiji Fracture Zone 위치에 존재한다. KF-3 지역은 전형적인 돔(dome) 구조가 나타나며 확장축 주변에 소규모의 해산들이 산재하고 있다. KF-3 지역의 자기이상분포는 구역 남부부터 중앙까지 고자기이상대가 형성되어 있으며 구역 북부는 저자기이상대가 넓게 분포한다. 세 지역 모두 확장축 지역에서 고자기이상대가 나타나고 있다. 각 지역의 자극화변환된 자기이상분포는 기존에 발간된 지질구조도와 비교하면 지구조선들의 위치와 유사성이 나타난다. 지자기자료의 역산결과를 살펴보면 세 지역 공통적으로 확장축 지역에 중앙고자화이상(Central Anomaly Magnetization High)이 나타나며 이와 더불어 열수광체 부존가능성이 높은 저자화이상대는 확장축 사면에 위치하는 것으로 확인되었다. KF-2 지역의 A-A' 축선의 2차원 순차자력모델링을 실시한 결과 RMS는 4.212 nT를 보였으며 확장축과 열수광상의 2차원 구조모델이 잘 맞는 것으로 판단된다.

주요어: 북피지분지, 해저열수광상, 해저지형, 자기이상, 자화

Soon Young Choi, Chang Hwan Kim, Chan Hong Park and Hyung Rae Kim, 2014, A Geophysical Study on Spreading Ridges and Hydrothermal Deposits in the North Fiji Basin Using Sea-Surface Magnetic and Bathymetry Data. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 50, no. 5, p. 627-641

ABSTRACT: We performed the sea-surface magnetic and bathymetry data using R/V Onnuri in the North Fiji Basin (KF-1, KF-2 and KF-3 areas) in order to investigate the submarine hydrothermal deposits. The North Fiji Basin is belong to one of back-arc basins and the active basin that has generated back-arc movement through several spreading ridges from 12 Ma. The bathymetry of KF-1 shows narrow horst between two NW-SE trending grabens. The magnetic anomaly of KF-1 exhibit high values in the northern part and low values in the southern and northeastern parts of the survey area. The RTP (Reduction to the Pole) anomaly of KF-1 displays the detachment of central spreading axis consistently. The bathymetry of KF-2 represents high topography due to the triple junction and the rift valley connecting to N-S segment from the triple junction. The magnetic anomaly of KF-2 has high values in N-S segment and North Fiji Fracture Zone, shown as T-shape anomalies over the triple junction. The bathymetry of KF-3 presents a dome structure and several seamounts scattered around the spreading axis. The magnetic anomaly of KF-3 shows high values from south to center and low values in the northern part of the area. KF-1, KF-2, and KF-3 consistently display high magnetic anomalies at spreading axes. The RTP results of the

* Corresponding author: +82-54-780-5340, E-mail: kimch@kiost.ac

study areas are similar to the result of the previous studies for the structure of the North Fiji Basin. As for magnetic data inversion, the spreading ridges of the study areas show Central Anomaly Magnetization High (CAMH) and low magnetization anomalies areas are mainly identified at the flanks along the axes, indicating possible hydrothermal deposits. The results of the 2D forward modeling along in A-A' line in KF-2, with RMS (Root Mean Square) of 4.212 nT, propose the good correlation of 2D structure model for the spreading axis.

Key words: North Fiji Basin, Submarine hydrothermal deposit, Seafloor bathymetry, Magnetic anomaly, Magnetization

(Soon Young Choi and Chang Hwan Kim, Dokdo Research Center, East Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Uljin 767-813, Republic of Korea; Chan Hong Park, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Republic of Korea; Hyung Rae Kim, Dept. of Geoenvironment Science, Kongju National University, Gongju 314-701, Republic of Korea)

1. 서론

해양지각은 주로 해령에서 마그마 분출에 의한 기작과 일부 해저화산 분출에 의해 생성되며 해구와 같은 수렴경계에서 소멸된다. 특히 발산 및 수렴경계 지역은 잦은 지각운동으로 인해 열수분출구와 같은 많은 열량이 분출 가능한 환경이 조성된다. 이러한 환경은 마그마 영향에 의한 화성활동과 밀접한 관련이 있다고 추정되는 열수광상이 만들어질 수 있는 좋은 여건이 된다. 해저열수광상은 해저화산이나 대양저 산맥의 정상부근에서 다양한 화산활동에 의해 지각 하부의 다양한 금속들이 용해된 열수가 배출하여 광상을 이루는 열수구를 중심으로 형성된 광상을 의미한다(Choi, 2012). 육지에서 발견되는 열수광상은 세월이 지남에 따라 다른 광물과 혼합, 침식 및 풍화에 의해 금속품위가 낮은 반면, 해저열수광상은 해수에 의해 열수가 급격히 식으면서 물의 저항으로 인해 밀집된 형태를 이룬다. 또한 해저열수광상은 단위면적 당 높은 금속함량(금, 은, 구리, 아연), 황화물 형태의 금속결합 등 개발에 여러 장점을 가지고 있어 개발경제성이 유망한 심해저 광물자원으로 부각되고 있다(Park *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2008).

1970년대 말 동태평양 해령과 갈라파고스 해령에서 해저열수활동이 처음 발견된 이후(Corliss *et al.*, 1978), 전 세계 여러 지역에서 열수활동에 대한 탐사가 진행되었다. 국외 연구현황을 살펴보았을 때 해저열수광상이 많이 발견되는 지역은 대표적으로 중앙해령 지역과 섭입대 지역으로 구분할 수 있으며(Kennett, 1982), 서태평양 지역에서도 다수의 탐사가 진행되어 열수활동에 대한 유사한 활동이 보고되었다(Both *et al.*, 1986; Hawkins, 1986; Hawkins and Helu, 1986; Craig *et al.*, 1987; Urabe, 1987). 특

히 남서태평양 지역은 해양지각이 소멸되는 대표적인 지역으로서 이 지역은 중앙해령에 비해 퇴적물에서 공급된 많은 양의 물이 마그마 형성에 참여함으로 인해 경제성 높은 해저열수광상 형성에 좋은 환경을 제공하며 실제로 중앙해령에 비해 금속 함량이 높은 특성을 가지고 있다(Kim *et al.*, 2009).

정밀한 해저열수광상 부존가능성지역 탐사는 통상적으로 열수분출공을 지표로 삼아 광상조사를 수행한다. 하지만 먼저 광역적으로 다중빔 음향측심기, 해상자력계 등을 활용하여 광상이 발견될만한 정밀 지형 및 광체의 밀도차, 열수로 인해 변질되어진 암석 및 광물 특성을 이용한 전통적인 지구물리조사가 선행되어야 한다. 그 후 무인잠수정(ROV), 심해저카메라와 같은 장비를 이용해서 직접적인 열수광체를 찾는 더 효율적인 탐사가 가능하다. 특히 열수유체는 유용광물을 녹이는 과정에서 큐리(Curie)온도 이상의 높은 온도를 가지게 됨으로 그 과정에서 자성광물은 자성을 잃거나 또는 낮은 자성을 띄게 된다. 따라서 해양지각에서 열수유체 작용을 따라 국지적인 저자화이상대가 나타나며 이를 열수광상부존탐사에 유용하게 사용될 수 있다(Tivey *et al.*, 1993). 이와 더불어 해령에서는 일반적으로 많은 자성물질이 포함된 용암이 분출하기 때문에 강한 자기이상을 관찰할 수 있다. 또한 베개용암에서 함유된 합티탄자철석과 같은 강자성물질로 인해 해령의 축을 중심으로 강한 고자기자화이상(Central Anomaly Magnetization High, CAMH)이 나타나지만, 분출 후에는 저온산화작용이 베개용암의 잔류자화를 급격히 감소시킨다. 따라서 해령 주변은 상대적으로 낮은 잔류자화가 관찰된다(Schouten *et al.*, 1999). 이러한 해양지각에서의 자기 특성들로 인해 광역적인 열수광상탐사에 지자기조사가 유용하게 쓰일 수 있다. 본 연구는 북피지분지

(North Fiji Basin, NFB) 지역에 대해 2012년 열수광상 부존유망 지역탐사의 목적으로 광역지구물리탐사, 열수플룸 추적탐사 및 해수 시료 채취를 수행하였다. 이 탐사 중에서 획득한 정밀지형자료와 해상지자기자료를 이용하여 자기이상을 산출하고 분석하였으며 Parker and Huestis (1974)의 역산프로그램을 통해 자화강도를 도출하여 연구지역의 지자기특성 분석 및 열수광상 개발 유망한 지역을 유추하고자 한다.

2. 연구지역

본 연구지역은 남서태평양 지역에 속해있으며 태평양 판과 인도-오스트레일리아 판 사이의 수렴경계부에 있다. 남서태평양에 존재하는 분지 중 대표적인 분지는 마누스 분지, 우드락 분지, 북피지 분지, 라우 분지 등이 있다(Tanahashi *et al.*, 1991). 이 중 북피지 분지는 활동성 분지로서 위에 열거한 분지 중 면적이 가장 크며 서쪽으로는 New Hebrides arc, 동쪽으로는 Fiji Platform, 북쪽으로는 Vitiaz paleo-subduction zone, 남쪽으로는 북피지분지와 남피지분지를 구분하는 Hunter ridge and fracture zone 사이에 위치하고 있다. Auzende *et al.* (1995)의 연구에 의하면, 북피지 분지는 12 Ma 전 Vitiaz-New Hebrides-Fiji-Lau-Tonga arc가 분리되면서 New Hebrides arc는 시계방향으로, Fiji Platform은 반시계방향으로 회전하며 NW-SE 방향 확장축을 따라 후열도 형성이 시작되었다. 7 Ma 전에 NW-SE 확장이 멈추고 북쪽에 E-W 방향으로 새로운 확장이 시작되었고 3 Ma 전 지금의 N-S 방향 확장축이 형성되었으며 1.5 Ma 전에 이르러 North Fiji Fracture Zone (NFFZ)으로 인해 북피지분지 중앙에 삼중합점(Triple Junction)이 생겨났다. 또한 이 시기에 분지 내 북부 Hazel Holme Ridge (HHR)로 인해 북피지분지 내 서쪽분지가 확장되었다. 현세에 이르러서 중앙확장해령(Central Spreading Ridge, CSR)와 평행한 West Fiji Rift이 새롭게 형성되고 NFB 남부에 거대한 좌수향 주향이동단층(Left-lateral fracture zone)이 생겨났으며 북부의 N-S 중앙확장 일부 축은 N15°로 방향이 선회되었다(Auzende *et al.*, 1995). 그 밖에 여러 지구조활동에 의해 현재와 같은 분지의 형태를 갖추게 되었으며 몇 개의 해령을 따라 활발한 확장이 이어지고 있다.

북피지 분지에 위치한 열수분출활동을 규명하기 위하여 스크립스해양연구소, 우즈홀해양연구소, 하와이주립대학교 등 미국의 여러 기관에서 연구를 진행하였으며 SEAPSO III project (1985; ORSTOM, IFREMER, CCOP/SOPAC 참여), STARMER & NEW STARMER project (1987-1992 & 1994-2000; 일본, 프랑스, 남서태평양 국가 참여) 등 많은 국제 공동연구도 이루어진 바 있다. 대표적으로 열수분출 위치가 확인된 탐사는 1989년도의 Nautille 탐사와 1991년도의 Shinkai 6500 탐사로서 "White Lady" (173°55'E, 16°59'S)와 "Pere Lachaise" (173°56'E, 16°58'S)라는 명칭으로 두 지역이 발견되었다(Auzende *et al.*, 1995). White Lady 지역 열수 분출구는 두 개의 활성 chimney가 나타나며 각각 높이 2 m에 지름 2 m, 높이 1.5 m 지름 10 cm 정도 규모를 가지며 주로 경석고로 구성되어 있다. Pere Lachaise는 삼중합점에 근접한 지점으로 확장축의 지구(graben) 끝 자락에 위치하고 있다. 이 지역은 White Lady와는 달리 활성분출대는 발견되지 못하고 비활성 열수분출대가 많이 발견되었으며 현무암질 구성의 돌출된 형태로 2 x 2 km 지역 안쪽으로 여럿 분산되어 있다.

북피지 분지는 중앙확장 해령(Central Spreading Ridge, CRS)을 포함하여 서부 분지(Western Basin, WB), 동부 분지(Eastern Basin, EB), 북서부 분지(Northwestern Basin, NWB), 북동부 분지(Northeastern Basin, NEB) 크게 다섯 부분으로 구분할 수 있다(그림 1). 분지 중앙에 위치하는 중앙확장해령의 총 길이는 대략 880 km에 이르며 크게 Southernmost segment, N-S segment, N160° segment, N15° segment 총 4 개의 segment와 2개의 삼중합점으로 구성되어 있다. 주방향은 N-S이며 분지 남쪽에서 북쪽까지 가로 지르면서 중앙에서 북쪽으로 N15°, N160°으로 연속적인 방향 변화가 존재하고 N15°와 N160°의 변화지점에 삼중합점이 위치한다. 확장축의 평균수심은 2,500 ~ 2,800 m, N15° 확장축의 북부는 4,400 m 정도로 나타난다. 확장축에서 열곡(rift valley)진행에 의한 지구(graben)형상은 중앙확장해령의 중앙 부분에서 N15° 일부분까지 나타나며 중앙확장해령의 확장속도는 남쪽에서 북쪽까지 8.2 ~ 5.0 cm/yr 정도로 확인되었다(Lagabriele *et al.*, 1997). 본 연구는 N160° segment에 해당되는 KF-1 (경도 : 173.5° ~ 173.7°, 위도 : -16.2° ~ -16.5°), 2개의 삼중합점 중

16°50'S 위치의 삼중합점에 해당되는 KF-2 (경도: 173.7° ~ 174°, 위도: -16.8° ~ -17.2°), 그리고 N-S segment에 해당되는 KF-3 (경도: 173.4° ~ 173.6°, 위도: -18.7° ~ -19.1°) 지역에서 측정된 해저지형 및 지자기 자료를 활용하였다. 그림 2는 미국해양대기관리처 산하 국제지구물리자료센터에서 전 지구의 지형굴곡을 1 분 간격으로 표현한 ETOPO1 자료를 이용하여 북피지 분지 주변을 표현한 해저지형도와 이번 연구에 조사된 지역을 나타낸 그림이다.

3. 자료획득

2012년 4월 22일부터 2012년 5월 5일까지 14일간 한국해양과학기술원의 연구선 온누리호를 이용하여 해저정밀지형자료와 표층해상지자기자료를 획득하였다. 해저정밀지형자료는 온누리호에 장착되어 있는 Kongsberg Maritime사의 다중빔 음향측심기(Multi-beam echo sounder) EM120을 이용해 측정하였다. EM120의 주운용주파수는 12 kHz이며 최대 11,000 m까지 수심측량이 가능하고 각 빔폭은 약 1° 정도로서 심해 수심측량에 적합한 장비라 할 수 있다. 또한 EM120은 센서의 좌우를 합쳐 최대 150°까지 빔 주사각을 활용할 수 있지만, 본 연구에서는 좌우 각각 75°씩 선택하여 수심 약 2.5 ~ 3 km에서 약 6 ~ 7 km까지 측정이 가능하도록 조사를 수행하였다. 다중빔 음향측심 자료획득 시 최외각 빔

의 수심자료는 지형왜곡현상으로 인해 신뢰성이 떨어지므로 측선간격을 조절하여 약 150% 중첩률이 유지될 수 있도록 측선 간격은 3' (약 5.4 km)으로 설정하였다. 또한 다중빔 음향측심기 특성상 수층별 음파 진행속도 변화에 따라 수심값이 왜곡될 수 있다. 수심값 왜곡을 방지하기 위해, 조사지역에서의 정확한 수심측정을 위해 각 지역별로 조사 직전 XBT (Expendable BathyThermograph)를 이용하여 수층별 음파속도를 측정하였다. XBT에서 측정된 자료는 SVP editor 프로그램을 이용하여 깊이별 음파속도 변화를 반영하도록 내삽된 후, 다중빔 음향측심기 운영프로그램인 SIS (Seafloor Information System)에 입력되어 수심값 보정에 활용된다.

표층해상지자기자료는 Marine Magnetics사의 overhouser proton magnetometer인 SeaSPY를 이용하여 측정하였다. SeaSPY 정확도는 0.1 nT, 센서 민감도는 0.01 nT, 해상도는 0.001 nT이며 필요전력

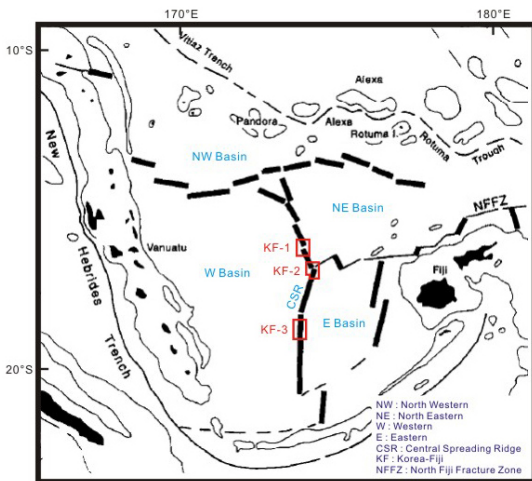


Fig. 1. Tectonic setting of the North Fiji Basin (modified from Lagabrielle et al., 1997).

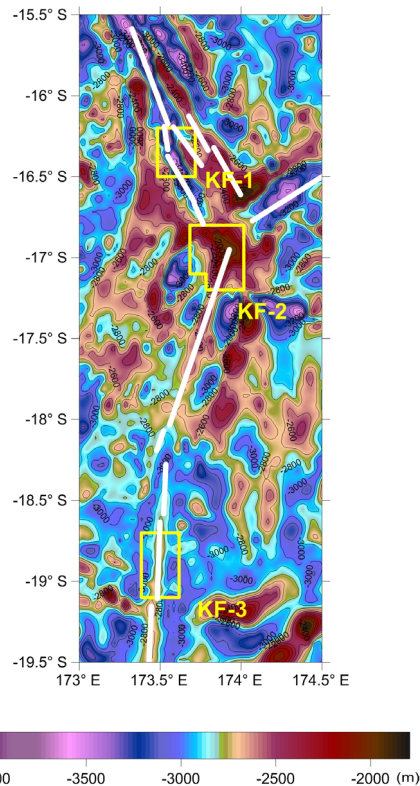


Fig. 2. The bathymetric map of the North Fiji Basin. Yellow boxes indicate survey areas for this study. Magnetic data were collected in areas of KF-1, KF-2, and KF-3.

이 낮고 운용이 쉽다는 장점이 있다. 자력계 운용 시 자력계로부터 자성물체의 하나인 온누리호(전장 60 m) 선체의 영향을 최소화하기 위해 온누리호 선체 길이의 약 3 배 이상의 길이인 200 m 거리를 두고 자력계를 예인하였으며 정확한 거리 측정 및 안정적 견인을 위해 선체 윈치를 사용하였다. 예인 중에는 자력계가 해수면에서 5 m 이내 범위에 위치하도록 하였으며 균일한 자료획득을 위해 선속을 약 10 knots로 유지하였다. 또한 SeaLINK 프로그램을 활용하여 DGPS와 연동된 선박위치, 관측시간, 지자기관측값, 예인심도 및 견인거리에 의한 실제 자력계 위치를 함께 획득하였다. 측선방향은 대부분의 확장측들이 북쪽임을 감안하여 가능한 한 확장측과 수직이 되도록 E-W방향으로 하였으며 각 지역별로 N-S방향으로 검측선을 추가하여 조사를 실시하였다.

4. 자료처리 및 분석

정밀해저지형자료처리는 Unix 운영체제 기반의 MB-system을 이용하였다. MB-system은 해저지형 및 후방산란영상자료 전문처리 프로그램으로서 SIS 프로그램으로부터 저장된 다중빔자료를 별도의 자료변환 없이 처리가 가능한 장점이 있다. 자료처리는 2단계로 구분하여 잡음 제거(noise correction)과 위치, 심도보정으로 나누어 수행하였다. 잡음 제거 자료처리는 191개의 빔으로 수신된 후방산란 강도를 중간수심에 해당하는 값을 기준으로 값들 사이의 경사도와 변화량을 구분하여 특이치 이상의 값을 제거하도록 하였다. 위치, 심도 보정은 잡음 보정된 수치에 운항 정보를 병합하고 다중빔 음향측심기에서 송수신한 음파의 각도와 전달시간을 재보정하여 지형정보를 수정하였다. 최종적으로 자료처리가 완료된 해저지형정보는 기존 선행된 연구의 지질 및 지구조자료와 함께 비교분석하였다.

해상표층지자기자료처리는 별도의 전문처리 상용프로그램을 이용하지 않고 Matlab을 이용하여 자체 작성한 프로그램을 사용하였다. 획득한 원시지자기자료는 측정된 위치 근처에 존재하는 자성물질에 대한 자기이상 뿐 아니라 그 위치에 영향을 미칠 수 있는 광역성분이 함께 포함되어 있기 때문에 자기이상 성분을 제외한 광역성분을 측정치에서 제거해야

한다. 본 연구에서는 실제 지자기장에 가장 근사시킨 국제참고지자기장(International Geomagnetic Reference Field)인 IGRF 2010을 이용하여 측정지자기자료에서 광역성분을 제거하여 지각 내 지질암상에 의한 자성차 및 지구조의 변화를 알 수 있는 자기이상을 산출하였다. 한편 자기이상은 자기장 자체가 쌍극자이며 그 외 지각 내 자기이상을 구성하는 많은 요인들이 있기 때문에 해석에 있어 중력이상과 같이 단순하지 않다. 자기이상을 좌우하는 요인은 자성물질의 형태, 자기위도에 따른 지자기장 방향, 물질의 자화방향 등이 있으며 이들이 서로 복합적으로 자기이상을 구성한다. 특히 자력은 중력과 달리 자기위도에 따라 총자기이상 분포가 달라지기 때문에 북각 및 편각으로부터 기인한 지자기장의 방향에 따라 자기이상이 변화한다(Min *et al.*, 1986). 따라서 본 연구에서는 단순 자기이상으로부터 두 방향을 지구중심에 수직하는 방향(북각 90°, 편각 0°)으로 표현하여 이상대의 해석을 좀 더 용이하게 할 수 있는 자극화 변환(Reduction to the Pole, RTP)을 수행하였다. Tivey *et al.* (1993) 연구에 의하면 열수분출대 지역에서는 높은 온도의 열수에 의해 자성광물이 자성을 잃게 되며 그 결과 열수광상의 자화강도는 3차원적으로 표현하면 폭이 좁고 깊은 원형의 저이상대의 형태로 관찰되는 것이 일반적이다. 본 연구는 자기이상을 이용해 자극화 변환을 수행하였으며 추가적으로 Parker and Huestis (1974)의 연구에서 제시된 해저지형과 함께 자기이상을 역산하여 자화분포를 구하는 방법을 사용하여 자화분포를 도출하였다. Parker and Huestis (1974)는 해저지형자료와 자기이상로부터 자화역산을 통해 자화강도를 구하는 방법을 제시하였다. Parker and Huestis (1974)의 방법은 푸리에변환을 사용하여 매우 빠른 자화역산이 가능한 분석방법이며 해저열수광상의 존재와 분포를 추정하는 데에 유용하여 본 연구에서는 이 방법을 적용하였다.

5. 결과 및 토의

본 연구에서는 연구지역을 각각 KF-1, KF-2, KF-3 세 지역으로 나누어 탐사를 수행하여 해저지형자료와 지자기자료를 획득하였으며 각 획득한 자료에 대해 자료처리 후 지역에 따라 결과도출 및 토의하였다.

5.1 KF-1 지역

그림 3(a)와 3(b)는 KF-1 지역의 해저지형을 각각 2차원과 3차원으로 표현한 그림이다. KF-1 지역은 북피지 분지에서 N160° segment에 속해있으며 수심 약 2,200 ~ 4,000 m의 범위에서 지구(graben)와 가파른 사면이 뚜렷하게 발달된 형태이다. 이 지역의 해저지형은 북서쪽으로 향해 있는 두 개의 지구(graben)와 그 두 지구 사이에 존재하는 상대적으로 좁은 지루(horst)가 특징적이다. KF-1 지역에 나타나는 두 개의 지구 중 가장 큰 지구의 폭은 구역 남부에서는 약 10 km이며 위도 16°25'S를 기점으로 큰 지구가 북쪽으로 갈수록 지구 폭이 줄어들면서 작은 지구와 합쳐진다. 확장축 지형의 복잡한 구성은 N160° segment가 하나의 연속된 확장대가 아닌 생성과정에서 확장축의 회전 및 확장속도의 변화에 따라 분절효과인 것으로 사료된다. 그림 4(a)는 KF-1 지역의 해저지형과 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-1 지역은 전체적으로 약 -300 ~ 150 nT의 범위를 보인다. 전체적인 자기이상 분포는 구역 남부에서는 저자기이상대가 넓게 분포하고 있는 반면, 구역 북부에서는 상대적으로 고자기이상대가 위치하며 구역 북부 동쪽 사면에 강한 저자기이상대가 분포한

다. 그림 4(b)는 KF-1 지역의 해저지형과 자극화 변환된 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-1 지역의 자극화 변환된 자기이상의 분포는 일반적인 자기 이상에 비해 서쪽 지구지역에 뚜렷한 고이상대가 분포하는 것이 관찰된다. 자극화 변환된 자기이상은 일반적으로 독립된 자성체의 분포를 파악하는 지표로서 확장축은 통상적으로 맨틀물질이 지표상으로 올라오는 지형으로 자성체가 많이 분포하는 지역이다. 따라서 KF-1 지역에서의 N160° segment에 해당하는 확장축 부분은 서쪽 큰 지구부분에 해당하는 것으로 예상할 수 있다. 한편 구역 남부를 가로지르는 중앙의 고자기이상대와 저자기이상대의 구분되는 경계가 확연히 드러나는 것과 서쪽 지구 폭이 급격히 좁아지는 지점과 어느 정도 일치함에 따라 확장축의 일부 끊김으로 이러한 자기이상형태가 나타난다고 생각된다. 그림 4(c)는 KF-1 지역의 해저지형과 자화강도를 함께 표현한 그림이다. 구역 남부는 큰 자화값을 보이지 않으나 구역 북부 사면지역에는 강한 자화이상대들이 나타나며 특히 구역 북동부 지구 부분에 고자화이상대와 저자화이상대가 나타난다. 고자화이상대와 저자화이상대는 자화성분 변화가 큰 지역으로 각각 자성체가 있을 확률이 높

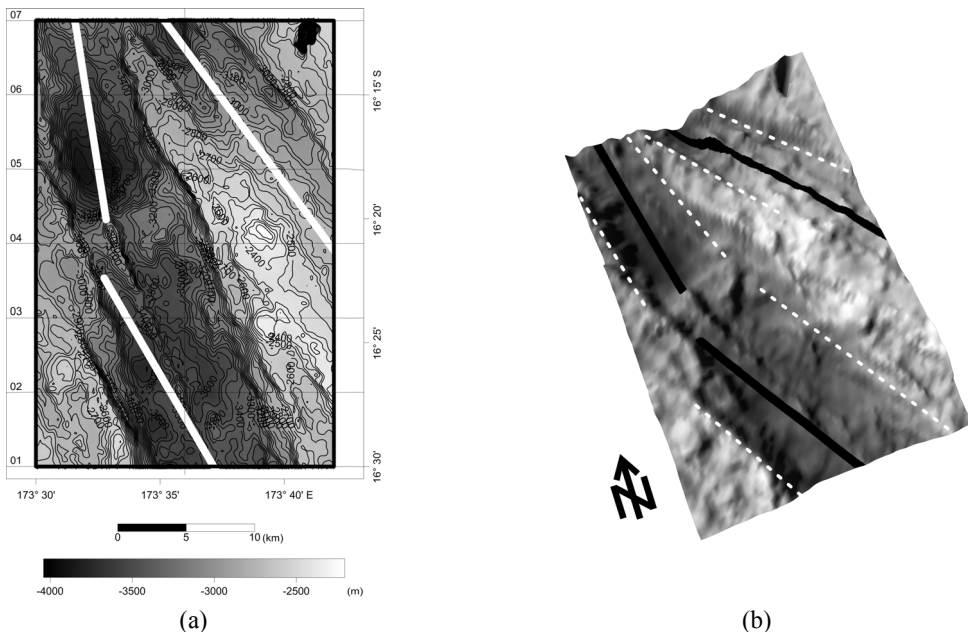


Fig. 3. Observed (a) 2D and (b) 3D bathymetry maps of the KF-1 area. The white and black lines of all Fig. 3 are boundary type axes in North Fiji Basin. The white dotted line in Fig. 3(b) is located at the flanks along axes.

은 지역으로 예측할 수 있지만 상대적인 자화크기는 암석의 자화가 생성될 때의 지구자기장 방향, 열수 용액의 온도, 지질구조, 모암의 성질 등 여러 환경 차이로 인해 달라질 수 있겠다. 이 중 Tivey *et al.*

(1993) 연구에 의하면 뜨거운 열수유체로 인해 자성이 낮아지기 때문에 열수유체로 인한 열수광상 존재성은 저자화대에서 발견될 수 있는 가능성이 크다고 생각되며 고자화이상대에서는 열수작용과 또 다른

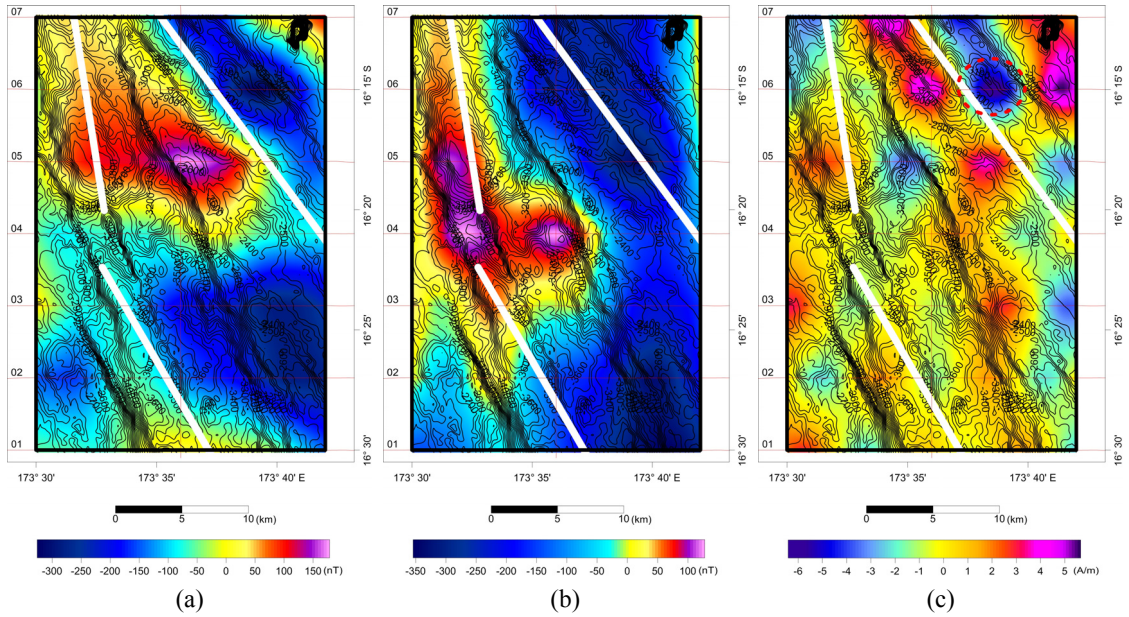


Fig. 4. (a) Magnetic anomaly, (b) RTP, and (c) calculated magnetization maps of the KF-1 area with bathymetric contours superposed. The white lines of Fig. 4 are boundary type axes in North Fiji Basin. The red dotted circle in Fig. 4(c) is a possible hydrothermal deposit.

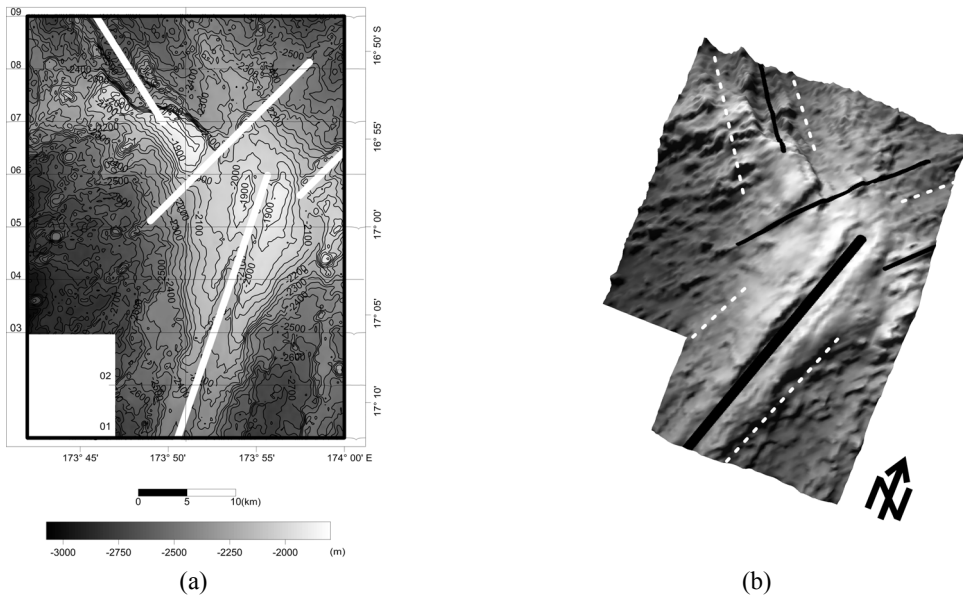


Fig. 5. Observed (a) 2D and (b) 3D bathymetry maps of the KF-2 area. The white and black lines of all Fig. 5 are boundary type axes in North Fiji Basin. The white dotted line in Fig. 5(b) is located at the flanks along axes.

원인인 자화강도가 큰 암석들로 인해 자화크기가 높은 것으로 사료된다. 한편 열수광상을 찾기 위해서는 열수작용을 위한 단층 및 열극 같은 열수통로가 있을만한 지역을 유추하는 것이 더욱 효과적일 수 있다. KF-1지역의 열수통로가 있을 것으로 예상되는 지점은 지루와 지구가 교차하면서 정단층구조가 비교적 많이 발생할 수 있는 구역 북부 지역이다(그림 10(a)). 따라서 그림 4(c)에 적색 점선으로 표현된 지역은 그 중 가장 강한 저자화이상대가 나타나는 지역으로 지형 및 자화강도를 고려하였을 때 KF-1에서는 이 지역에 열수분출 및 열수광체 존재 가능성이 있을 것으로 예상된다.

5.2 KF-2 지역

그림 5(a)와 5(b)는 KF-2 지역의 해저지형을 각각 2차원과 3차원으로 표현한 그림이다. KF-2 지역은 북피지 분지에서 삼중합점에 해당하는 지역으로 전체적으로 수심 약 1,800 ~ 3,000 m의 범위를 보인다. 이 지역에서는 N160° segment와 N-S segment의 두 확장축이 삼중합점 지점에서 합쳐지면서 지형이 솟아오르는 형태가 특징적으로 관찰되며, 삼중합점에서는 N-S segment로 연결되는 확장축의 뚜렷한 열곡이 존재한다. 이러한 삼중합점은 R-R-F (Ridge-

Ridge-Transform fault)의 형태를 가지며(Auzende *et al.*, 1995) 변환단층의 존재와 각 N-S segment, N160° segment, NFFZ의 생성시기 차이, 그리고 두 확장축 방향이 평행이 아닌 미세한 각도차로 확장함으로 인해 삼중합점 주변 지구조는 확장축 사이로 변환단층이 섭입되어 그에 의한 지구조회전변형이 많이 작용되었을 것이라 예상된다. 그림 6(a)는 KF-2 지역의 해저지형과 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-2 지역의 자기이상은 전체적으로 약 -300 ~ 300 nT의 범위를 보인다. 전체적인 자기이상 분포는 고자기이상대가 삼중합점을 중심으로 T자 형태로 분포하며 고이상대 위치가 N-S segment 확장축과 변환단층축과 상당히 일치하는 것으로 나타난다. 그러나 N160° segment 확장축에 해당하는 지역은 고이상대분포와 거의 일치하지 않는 것으로 나타나며 이와 더불어 고자기이상대의 T자 형태 중 상단부는 변환단층대 방향으로부터 삼중합점을 가로지르는 북동-남서방향의 자력선구조가 분포한다. 이러한 자기이상 분포는 KF-2의 삼중합점에서 두 해령축 사이로 변환단층 구조선이 깊숙이 섭입되었기 때문에 이러한 선구조 형태가 형성된 것이라 추정 할 수 있겠다. 그림 6(b)는 KF-2 지역의 해저지형과 자극화 변환된 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-2 지

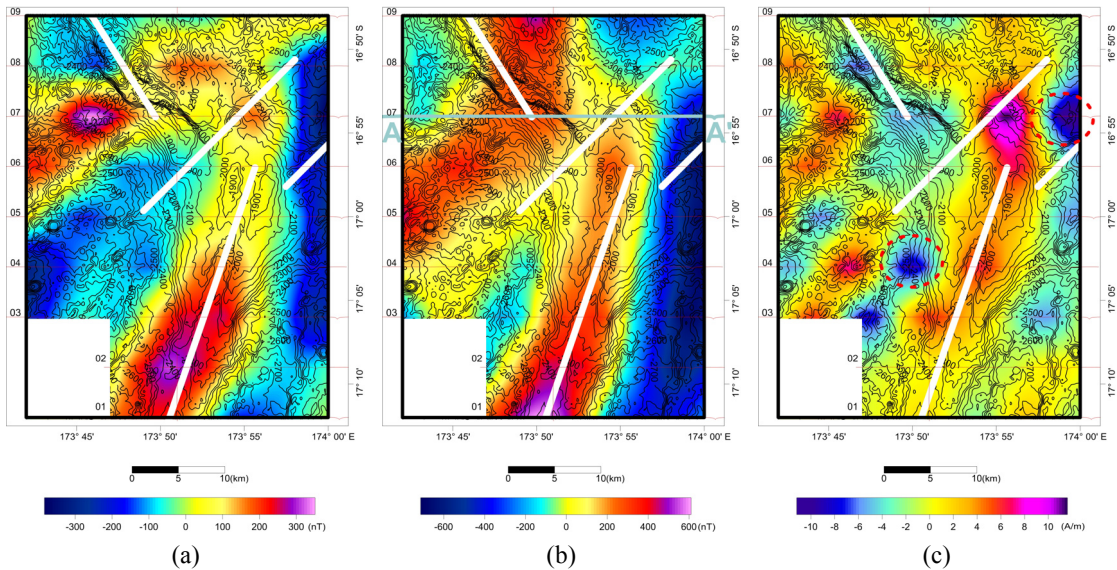


Fig. 6. (a) Magnetic anomaly, (b) RTP, and (c) calculated magnetization maps with bathymetric contours superposed. The white lines of all Fig. 6 are boundary type axes in North Fiji Basin. The red dotted circles in Fig. 6(c) are possible hydrothermal deposits.

역의 자극화 변환된 자기이상 분포는 일반 자기이상 분포에서 나타난 N-S segment 확장축 지역의 고이상대 특징을 더욱 도드라지게 나타내고 있으며, 또한 N160° segment 확장축 지역에도 자기이상에서 나타났던 고이상대 형태가 변화함으로 자극화 변환 과정을 통해 발산경계에 존재하는 자성체 분포를 좀 더 명확하게 관찰할 수 있다. 한편 구역 북동부에 존재하는 변환단층대는 고이상대가 매우 미약하게 분포하며, 이는 세 축 중에 두 개의 축은 발산유형이지만 나머지 한 축은 북동부에 존재하는 변환대이므로 이러한 경계유형 차이에 의해 약한 자기강도가 나타나는 것으로 생각된다. 그림 6(c)는 KF-2 지역의 해저 지형과 자화강도를 함께 표현한 그림이다. 삼중합점 중앙지점에서 고자화강도대가 존재하며 근처 우측 사면에 강한 저자화대가 존재하고 있고 그 외 삼중합점 남서쪽으로 소규모의 저자화대들이 나타난다. 삼중합점을 기준으로 우측 사면의 저자화대와 남서쪽의 소규모 저자화대는 자화강도로 구분했을 시 같은 저자화대이지만 광역적인 지구구조구역으로는 변환단층대 구역과 확장축 구역으로 구분할 수 있다.

하지만 해저지형, 자기이상 및 자극화 변환된 자기이상 분포로부터 유추해보면 확장축사이의 변환단층의 섭입에 의해 KF-2의 삼중합점 주변 지역은 단순 광역적 지구구조의 구분과는 다른 기존의 확장축에 의해 발생하는 정단층뿐 만 아니라 변환단층에 의한 복합적인 단층 지구구조가 이뤄졌을 것으로 예상된다(그림 10(b)). 따라서 삼중합점에 인접한 저자화대는 이러한 단층지구구조로 인해 심부 지각물질이 지표면 가까이 올라와 충분히 열수광상이 만들어 질 수 있는 열수통로 역할인 일종의 OCC (Ocean Core Complex) 와 관련 가능성이 있다고 추정된다(Park *et al.*, 2010). 하지만 명확하게 어떤 이유에서 이러한 저자화이상대가 사면 하단부에 존재하는지는 본 연구에서 획득한 결과 뿐 아니라 조사지역에 대한 탄성파탐사 또는 시추공자료처럼 직접적인 지하심부구조결과를 함께 비교할 필요가 있다. 그림 6(c)에 적색 점선으로 표현된 지역은 그 중 가장 강한 저자화대가 나타나는 지역으로 지형 및 자화강도를 고려하였을 때 KF-2에서는 이 지역에 열수분출 및 열수광체 존재 가능성이 있을 것으로 예상된다.

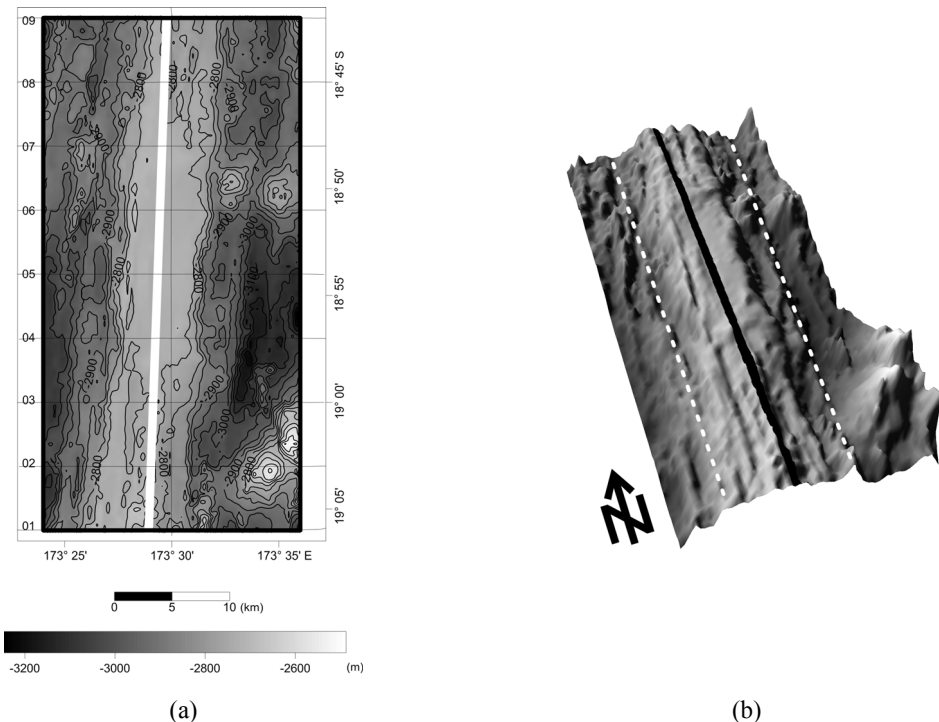


Fig. 7. Observed (a) 2D and (b) 3D bathymetry maps of the KF-3 area. The white and black lines of all Fig. 7 are boundary type axes in North Fiji Basin. The white dotted line in Fig. 7(b) is located at the flanks along axes.

5.3 KF-3 지역

그림 7(a)와 7(b)는 KF-3 지역의 해저지형을 각각 2차원과 3차원으로 표현한 그림이다. KF-3 지역은 북피지 분지에서 N-S segment에 해당하는 지역으로 전체적으로 수심 약 2,500 ~ 3,300 m의 범위를 보인다. KF-3 지역 북부 일부는 소규모의 열곡 및 지구가 나타나지만 구역 남부에서부터 북부까지는 KF-1 지역과 다르게 확장축의 지형이 높고 평평하며 확장축에서 멀어질수록 지형이 낮아지는 전형적인 돔(dome) 형태를 보여준다. 돔 양옆에는 V자 형태의 소규모 지구가 형성되어 있는 것이 특징이다. 이는 KF-3 지역이 KF-1 지역보다 상대적으로 확장축에 대한 분절이 없으며 전체적으로 균일한 확장속도를 가지고 때문인 것으로 추정된다. 한편 KF-3 지역의 확장축 우측중앙과 우측 남단에 소규모의 해산들이 산재하고 있다. 그림 8(a)는 KF-3 지역의 해저지형과 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-3 지역의 자기이상은 약 -160 ~ 80 nT의 범위를 보인다. 전체적인 자기이상분포는 확장축을 따라 구역 남부부터 중앙까지 고자기이상대가 형성되어 있으며 구역 북

부는 저자기이상대가 넓게 분포하고 있고 북서쪽은 북동-남서 경향의 저자기이상대가 분포한다. 또한 확장축 우측남단 해산에 해당하는 곳은 고자기이상대가 있으며 확장축과 해산 사이에 저자기이상대가 분포한다. 그림 8(b)는 KF-3 지역의 해저지형과 자극화 변환된 자기이상을 함께 표현한 그림이다. KF-3 지역의 자극화 변환된 자기이상분포는 확장축 우측에 형성된 남북방향 지구(graben)와 구역 북서부에 저자기이상대가 더욱 뚜렷하게 분포하며 자기이상과 마찬가지로 구역 남부부터 중앙까지 확장축 부분에 고자기이상대가 나타난다. 이는 KF-1, KF-2 지역과 마찬가지로 확장축 부분에 대한 자성체 효과가 잘 나타나는 것으로 생각된다. 한편 자기이상과 자극화 변환된 자기이상에서 공통적으로 나타나는 구역 남부에서 중앙까지 고자기이상대가 존재하다가 더 이상 이어지지 못한 자기이상 선구조는 Auzende *et al.* (1990)의 연구에 나타난 구조도에서 중앙축의 단절부분 위치와 상당히 유사한 것으로 확인되었으며 또한 KF-3 구역의 상단에 인접하는 두 개의 횡단단층(transverse fault) 위치와 자기이상분포 경계부분이 상당부분

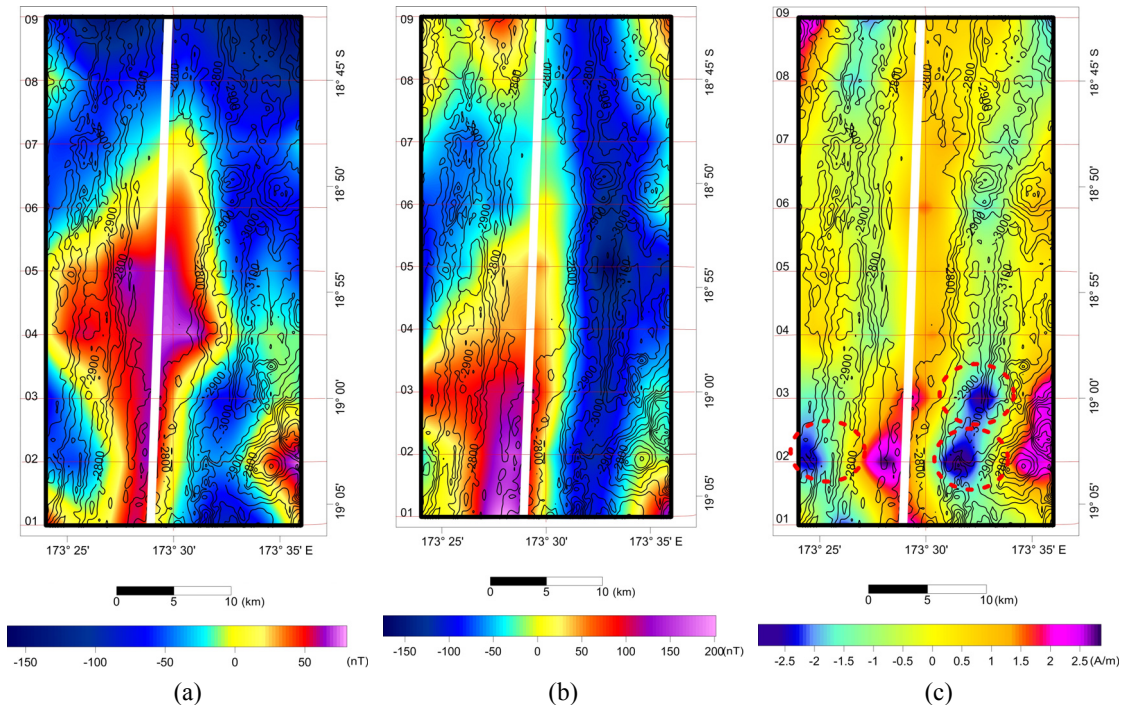


Fig. 8. (a) Magnetic anomaly, (b) RTP and (c) calculated magnetization maps with bathymetric contours superposed. The white lines of all Fig. 8 are boundary type axes in North Fiji Basin. The red dotted circles in Fig. 8(c) are possible hydrothermal deposits.

중첩되는 것으로 확인되었다(그림 10(c)). 전체적으로 KF-3 구역을 지나가는 횡단단층들의 방향으로 인해 확장축 중앙에서의 자기이상과 북동-남서 경향의 단층으로 인한 자기분포에 대한 영향이 큰 것으로 사료된다. 그림 8(c)는 KF-3 지역의 해저지형과 자화강도를 함께 표현한 그림이다. 구역 남부 사면에 동서방향에 걸쳐 고자화이상대와 저자화이상대가 나타나고 있다. KF-3 지역은 KF-1,2 지역에 비해 자화값의 절대폭이 크지 않고 두 횡단단층이 지나가는 사이에 위치함으로 광역적인 지구조변화가 비교적 적은 것으로 예상되어 이 지역은 열수광상이 존재할 유망한 지역 위치가 타 지역보다는 적을 것으로 추정된다. 한편 구역 남부에서 분포하는 고자화대는 확장축이 단절되면서 소량이 마그마 챔(chamber)이 잔류하고 그로인해 산화철 및 산화티타늄 성분이 많이 포함된 현무암질이 고립됨으로 강한자화가 형성되는 것으로 추정된다(Sempere, 1991). 그림 8(c)에 적색 점선으로 표현된 지역은 이 지역에서 나타난 자화값 중 가장 강한 저자화이상대가 나타나는 지역으로 지형 및 자화강도를 고려하였을 때 KF-3 지역에서는 이 지역에 열수분출 및 열수광체 존재 가능성이 있을 것으로 예상된다.

5.4 2차원 자력 모델링

한편, 본 연구는 현장조사에서 획득한 자기이상으로부터 연구지역의 대략적인 지구조를 파악하여 열수광상 유망가능성지역에 대한 지하구조를 예상하기 위해 KF-2 지역의 A-A' 측선에 대하여 Geosoft사의 GM-SYS 2차원 forward 모델링 기법을 적용하였다. 포텐셜자료의 특성상 비유일성 문제 때문에 통상 여러 타 지구물리 자료와 연계하여 모델링을 실시하지만 본 연구에서 획득한 지구물리자료는 자력자료밖에 없었으며 북피지 분지에서의 기존 연구는 대부분 1990년대에 연구되어져 고해상도의 탄성파 자료를 찾기 어려운 측면이 있었다. 따라서 본 연구에서는 2013년 캘리포니아 샌디에이고 캠퍼스에서 전 지구를 1분 간격으로 총 8개의 층으로 나누어 하부지각까지 지각구조를 표현한 CRUST 1.0에서 참고한 맨틀 및 하부 지각층 자료, 기존 연구에서 지각층이 언급된 논문들(Tanahashi *et al.*, 1991; Kisimoto *et al.*, 1994) 및 탄성파자료를 활용한중앙해령 연구 논문들(Kent *et al.*, 2000; Carbotte, 2005; Toomey *et al.*, 2007)을 참고하여 2차원 forward 모델링을 수행하였다. 그림 9는 KF-2 지역 A-A' 측선을 모델링하여 산출한 결과이다. 모델링한 A-A' 측선은 삼중합

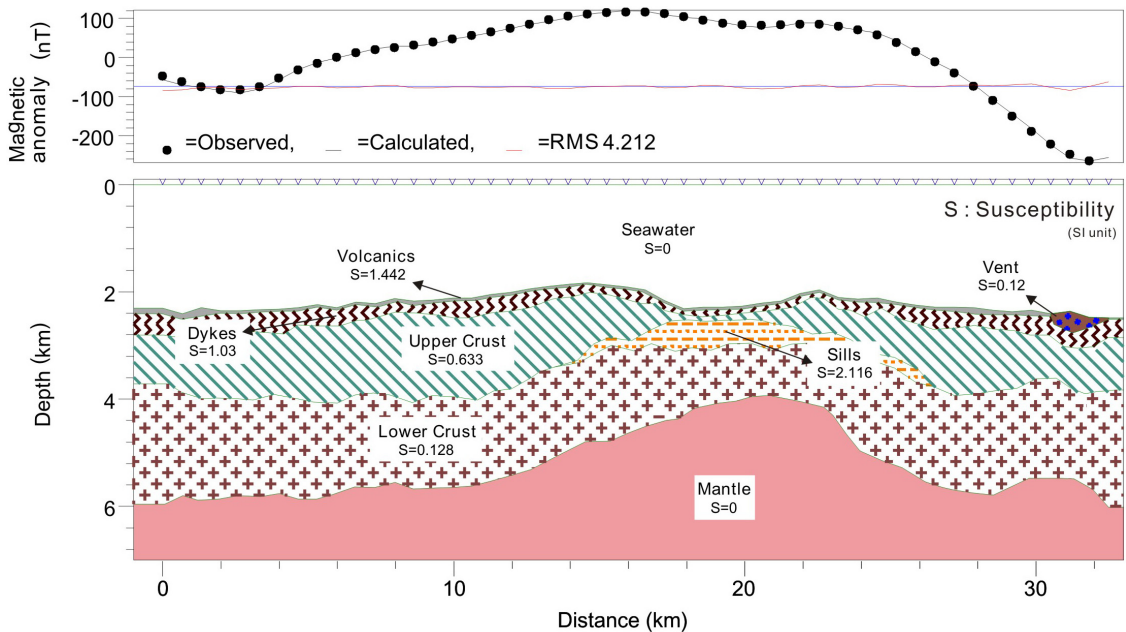


Fig. 9. Observed and calculated magnetic anomalies along line A-A in the KF-2 area and 2D Geologic model. For location, see Fig. 6(b).

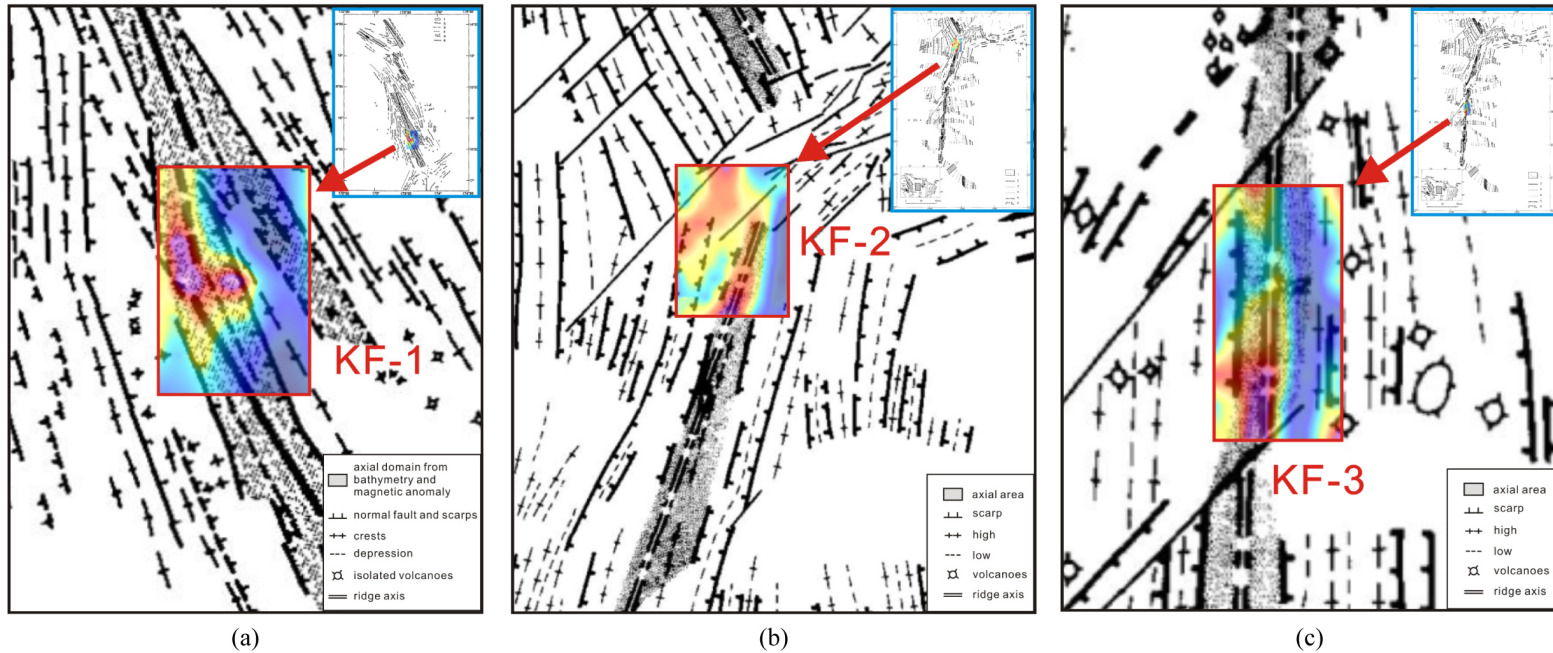


Fig. 10. (a) A overlapped map to RTP of KF-1 area and structure map of the N160° segment and of the 14°50' triple junction (modified from Auzende *et al.*, 1995). (b) A overlapped map to RTP of KF-2 areas and structure map of the central part of North Fiji Basin between 16°S and 22°S (modified from Auzende *et al.*, 1990). (c) A overlapped map to RTP of KF-3 areas and structure map of the central part of North Fiji Basin between 16°S and 22°S (modified from Auzende *et al.*, 1990).

점 구조의 중심을 지나는 지역으로써 맨틀이 가장 올라오는 지역으로 가정하였으며, 그로 인해 하부지각이 같이 올라가며 마그마 렌즈로 인해 하부지각 상단에 관입암상(sill) 구조가 형성되어 있는 것으로 모델을 설계하였다. 전체적으로 북피지 분지의 삼중합점 지역은 E-MORB 구성의 암석들이 많이 분포되어 있어(Kim *et al.*, 2006) 그로 인해 철, 황화물, 구리, 납 등의 광물들이 많이 부존하고 있을 것으로 판단하였으며 열수분출구 시료를 분석한 결과에서 각 분출구마다 크게 3가지 분류로 철-구리, 아연, 황철석, 황동석 등 광물조성 차이가 나타남으로 열수분출대는 이러한 광물들이 많이 함유된 암석들의 평균 대자율로 예측하여 모델링하였다. 모델링 수행 시 대자율은 SI 단위계를 기준으로 하부지각(lower crust)은 약 0.128, 상부지각(upper crust)은 약 0.633, 암맥들(dykes)은 약 1.029, 분출암체(volcanics)는 약 1.442, 관입암상들(sills)은 약 2.116, 열수분출대(vent)는 약 0.120으로 설정하였다(Min *et al.*, 1986; Lide (ed), 2005). 본 연구에서 실시한 자력모델링 결과, 모델값과 측정값 분포가 유사하게 나타나며 모델값과 측정값과의 차이인 RMS값은 4.212 nT 정도의 작은 값을 보여 모델링결과가 측정값과 잘 부합되는 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구는 북피지 분지에서 KF-1, KF-2, KF-3 세 지역에 대해 해상지자기자료 및 정밀해저지형자료를 통해 조사지역의 전반적인 지구조 및 열수광상 부존 가능성을 조사하였다.

전체적으로 살펴보았을 때, 세 지역 모두 확장축 지역에서는 고자기이상대가 분포하며 자극화 변환된 자기이상으로 더욱 확실한 고자기이상대를 확인할 수 있었다. 그리고 각 지역에 나타난 선구조들이 Auzende *et al.* (1990, 1995)의 연구에 나온 지질구조도에 나타난 구조선과 비교했을 때 상당히 유사한 위치에 있는 것으로 파악되었다(그림 10(a), 10(b), 10(c)). 지질구조도에서 나타난 확장축 주변에서 고자기이상대가 분포하는 특징이 나타났으며, 확장축이 단절되거나 지구조의 변화가 있는 부분에서 고자기이상대에서 저자기이상대로 급격히 변화함이 확인되었다. 이러한 지자기분포와 지질구조도의 비교를 통해 확장축

의 일부 끊김현상, 삼중합점에서의 변환단층대 섭입 위치를 파악하기 용이했으며 이와 같이 해령 및 삼중합점 같은 복합적인 활동이 존재하는 곳에는 좀 더 해상도가 정밀한 지자기조사와 지구조연구를 병행하는 것이 해저지구조 및 지각이동 연구에 있어 좀 더 좋은 결과가 있을 것으로 예상된다. 또한 Schouten *et al.* (1999)의 연구에서처럼 세 지역 공통적으로 확장축 지역에 중앙고자화이상(CAMH)이 나타나며 이와 더불어 열수광체 부존가능성이 높은 저자화이상대는 확장축 사면에 위치하는 것으로 확인되었다. 이러한 사면지역에서는 확장축의 발산운동으로 축(axis) 주변의 암석이 밀려나면서 그 주위에 정단층이 생길 수 있다. 특히 이러한 지역은 정단층의 형태 뿐 아니라 대규모의 단절단층(detachment fault)을 따라 심부 지각물질이 해지면 가까이 올라올 수 있는 일종의 OCC (Ocean Core Complex)와 관련 가능성이 있을 수 있다(Park *et al.*, 2010). 하지만 명확하게 어떤 이유에서 이러한 저자화이상대가 사면 하단부에 존재하는지는 본 연구에서 획득한 결과 뿐 아니라 조사지역에 대한 탄성파탐사 또는 시추공자료처럼 직접적인 지하심부구조결과를 함께 비교할 필요가 있다. 이를 통하여 열수광체가 지하에서부터 지표면 가까이 까지 이동될 수 있는 지구조적 연결고리를 확인할 수 있을 것이다. 한편 KF-2 지역은 전체적으로 여러 많은 경계형태들과 지구조가 복잡하고 그로 인해 자화강도의 변화가 다양하기 때문에 열수분출 및 열수광체 부존 지역을 예측함에 있어 매우 신중히 고려해야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서 자력자료로부터 설계한 모델링 결과가 측정값과 잘 부합되는 것으로 보이며 향후 고해상도 탄성파 자료와 정밀한 중력자료 등이 합쳐진다면 더 좋은 모델링 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 2013년 해양수산부 “남서태평양 및 인도양 해양광물자원(해저열수광상,망간각) 개발(PM56462)” 과제와 한국해양과학기술원 “동해 해양환경 및 생태계 변동감시체제구축(PE99201)” 과제의 연구 지원을 받아 수행되었습니다. 이 연구를 위해 많은 도움을 주신 한국해양과학기술원 연구원분들과 온누리호 승조원분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Auzende, J.M., Honza, E., Boespelug, X., Deo, S., Eissen, J.M., Hashimoto, J., Huchon, P., Ishibashi, J., Iwabuchi, Y., Jarvis, P., Joshima, M., Kisimoho, K., Kuwahara, Y., Lafoy, Y., Matsumoto, T., Maze, J.P., Mithuzawa, K., Monma, H., Naganuma, T., Nojiri, Y., Ohta, S., Otsuka, K., Okuda, Y., Ondreas, H., Otsuki, A., Ruellan, E., Sibuet, M., Tanahashi, M., Tanaka, T. and Urabe, T., 1990, Active Spreading and Hydrothermalism in North Fiji Basin (SW Pacific). Results of Japanese French Cruise Kaiyo 97. *Marine Geophy. Res.*, 12, p. 269-283.
- Auzende, J.M., Pelletier, B. and Eissen, J.P., 1995, The North Fiji Basin Geology, Structure, and Geodynamic Evolution. *Backarc Basin : Tectonics and Magmatism*, edited by Barian Talyor, Pelnum Press, New York, 139-175 p.
- Both, R., Crook, K., Taylor, B., Brogan, S., Chappell, B., Frankel, E., Liu, L., Sinton, J. and Tiffin, D., 1986, Hydrothermal chimneys and associated fauna in the Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *EOS, Trans. AGU (Abstracts)*, 67, 489-490 p.
- Carbotte, S.M., 2005, Seismic Structure At Mid-Ocean Ridges, *Encyclopedia of Geology*, 405-417 p.
- Carbotte, S.M., 2005, Seismic Structure At Mid-Ocean Ridges. *Encyclopedia of Geology*, 407-417 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.03029-3.
- Choi, J.H., 2012, Small-loop EM application for the exploration of marine hydrothermal deposits and the data analysis. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2 p (in Korean with English Abstract).
- Corliss, J.B., Myle, M. and Dymond, J., 1978, The chemistry of hydrothermal mounds near the Galapagos rift. *Earth Planet Science Letter*, 40, 12-24 p.
- Craig, H., Horibe, Y., Farley, K.A., Welhan, J.A., Kim, K.-R. and Hey, R.N., 1987, Hydrothermal vents in the Mariana Trough; Results of the first Alvin dives, *EOS, Trans. AGU (Abstracts)*, 68, 1531 p.
- Hawkins, J., 1986, "Black smoker" vent chimneys. *EOS, Trans. AGU (Abstracts)*, 67, 430 p.
- Hawkins, J. and Helu, S., 1986, Polymetallic sulphide deposits from "black smoker: chimney, Lau Basin. *EOS, Trans. AGU (Abstracts)*, 37, 378 p.
- Kennett, J., 1982, *Marine Geology*, Prentice-Hall, 747 p.
- Kent, G.M., Singh, S.C., Harding, A.J., Sinha, M.C., Orcutt, J.A., Barton, P.J., White, R.S., Bazin, S., Hobbs, R.W., Tong, C.H. and Pye, J.W., 2000, Evidence from three-dimensional seismic reflectivity images for enhance melt supply beneath mid-ocean-ridge discontinuities. *Nature*, 406, 614-618 p.
- Kim, C.H., Kim, H., Jeong, E.Y., Park, C.H., Go, Y.T. and Lee, S.H., 2009, A Study on the Hydrothermal Vent in the Mariana Trench using Magnetic and Bathymetry Data. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 14(1), 22-40 p (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., Jung M.-S., Kim, C.H., Kim, J.U. and Lee, K.-Y., 2008, The Exploration Methodology of Seafloor Massive Sulfide Deposit by Use of Marine Geophysical Investigation. *Mulli-Tamsa*, 11(3), 167-176 p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.G., Lee, I.S., Halbach, P., Lee, K.Y., Ko, Y.-T. and Kim, K.H., 2006, Formation of hydrothermal vents in the North Fiji Basin: Sulfur and lead isotope constraints. *Chemical Geology*, 233, 257-275 p (in Korean with English abstract).
- Kisimoto, K., Tanahashi, M. and Auzende, J.M., 1994, Crustal structure variation along the central rift/ridge axis in the North Fiji Basin : Implication from seismic reflection and refraction data. *Marine Geology*, 116, 101-111 p.
- Lagabrielle, Y., Goslin, J., Martin, H., Thirot, J.L. and Auzende, J.M., 1997, Multiple active spreading centers in the hot North Fiji Basin (Southwest Pacific): a possible model for Archean seafloor dynamic?. *Earth and Planetary Science Letters*, 149, 1-13 p.
- Lide, D.R.(ed), 2005, *Magnetic Susceptibility of the Elements and Inorganic Compounds*. CRC Handbook of Chemistry and Physics (86th edition), CRC Press, Boca Raton, Florida, Section 4, 143-148 p.
- Min, K.D., Seo, J.H. and Kwon, B.D., 1986, *Applied Geophysics*. Woosung Press, 135-227 p (in Korean).
- Park, S.J., Kim, J.U., Kim, H.S., Jang, U.G., Son, J.W., Son, S.K. and Moon, J.W., 2010, A geological characteristic of ocean core complex in Central-Indian Ridge. 2010 Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Kyeongju, October, 27-30, 140 p (in Korea).
- Park, S.W., Lee, Y.H. and Kwon, M.S., 2003, A Study on the Considerations Relating to the Regulations for Prospecting and Exploration for Hydrothermal Polymetallic Sulphides and Cobalt-rich Ferromanganese Crusts in the Area. *Ocean and Polar Research*, 25(2), 227-235 p (in Korean with English abstract).
- Parker, R.L. and Huestis, S.P., 1974, The inversion of Magnetic Anomalies in the Presence of Topography. *Journal of Geophysical Research*, 79(11), 1587-1593 p.
- 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 and Planetary Science Letters*, 169, 37-50 p.
- Sempere, J.-C., 1991, High-magnetization zones near spreading center discontinuities. *Earth and Planetary*

- Science Letters, 107, 389-405 p.
- Tanahashi, M., Kisimoto, K., Joshima, M., Jarvis, M., Iwabuchi, Y., Ruellan, E. and Auzende, J.M., 1994, 800-km-long N-S spreading system of the North Fiji Basin. *Marine Geology*, 116, 5-24 p.
- Tanahashi, M., Kisimoto, K., Joshima, M., Lafoy, Y., Honza, E. and Auzende, J.M., 1991, Geological structure of the central spreading system, North Fiji Basin. *Marine Geology*, 98, 187-200 p.
- Tivey, M.A., Rona, P.A. and Schouten, H., 1993, Reduced crustal magnetization beneath the active sulfide mound, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge at 26°N. *Earth and Planetary Science Letters*, 115, 101-115 p.
- Toomey, D.R., Jousset D., Dunn, R.A., Wilcock, W.S.D. and Detrick, R.S., 2007, Skew of mantle upwelling beneath the East Pacific Rise governs segmentation. *Nature*, 446, 409-414 p.
- Urabe, T., 1987, Kuroko deposit modeling based on magnetic hydrothermal theory. *Mining Geol.*, 37, 159-176 p.
-
- 투 고 일 : 2014년 6월 16일
 심 사 일 : 2014년 6월 20일
 심사완료일 : 2014년 9월 23일