

연구논문

소형 루프형 해양 전자탐사 시스템의 무인잠수정을 이용한 실해역 현장적용 가능성 고찰

고희철^{1,5)} · 이성곤^{1,5)*} · 박인화¹⁾ · 조성준²⁾ · IJ Won³⁾ · Frank Funak³⁾ · 김현섭⁴⁾

Feasibility Study of ROV-Towed Marine Loop Electromagnetic System through Off-Shore Experiment

Hwicheel Ko, Seong Kon Lee*, In Hwa Park, Seong-Jun Cho, IJ Won,
Frank Funak and Hyunsub Kim

Abstract : We performed an off-shore experiment with a new marine small loop electromagnetic (EM) survey system, which was developed primarily for exploration of seafloor hydrothermal deposits. The system is a multi-frequency loop EM system designed to endure high pressure in deep sea up to 2000 m. In order to maintain altitude of the system from the seafloor in rough seafloor topography condition, the system was connected rigidly to ROV (Remotely Operated Vehicle) which tows the system. We performed a test with the new loop EM system by keeping altitude of ROV 2 m above from the seafloor at a depth of 300 m near Tonga off-shore. The ROV position and attitude while moving (pitch, roll, yaw) and CTD (Conductivity, Temperature, Depth) data are also recorded simultaneously with electromagnetic responses. Experimental results showed that electromagnetic anomaly was clearly identified at the location of metallic object, and the pattern of the EM responses matches well with the theoretical responses from a 3-D integral equation EM modeling code. With the test in Tonga offshore, we confirmed that the method of operation of the EM survey system by ROV was readily feasible, and the system could detect actual seafloor hydrothermal deposits in the highly conductive seafloor environment.

Key words : Marine electromagnetic survey, Seafloor hydrothermal deposit, Electrical conductivity, ROV

요약 : 해저에 존재하는 해저열수광상을 탐사하기 위하여 개발된 소형 루프형 해양 전자탐사 시스템의 현장 적용성 실험을 실해역에서 수행하였다. 이 시스템은 다중 주파수 전자탐사 시스템으로 심해 고압 환경에 견딜 수 있도록 설계되었으며 탐사 대상지역의 험한 지형적 상황에서 해저면과 일정한 고도를 유지하며 탐사할 수 있도록 ROV(Remotely Operated Vehicle)에 탐사장비를 강성 연결(rigid connection)하는 운용방법을 선택하였다. 통가 해역 수심 약 300 m 지점에서 금속 이상체를 투하한 후 해저면과 탐사장비 사이의 간격을 2 m로 유지하며 전자기 반응을 획득하는 실험을 진행하였으며 실험 시 ROV 위치, ROV 움직임(피치, 롤, 요), CTD(conductivity, temperature, depth) 등의 자료를 동시에 획득하여 자료처리에 이용하였다. 실험 결과 각 주파수에서 전자기 이상 반응이 뚜렷하게 획득되었으며 이는 3차원 적분방정식 코드를 이용한 모델링 결과와 비슷한 양상을 보여주었다. 이번 실해역 실험을 통하여 새로이 개발한 해양 전자탐사 시스템이 해양 환경에서 ROV를 통한 운용이 가능함과 동시에 금속체에 의한 전자기 이상 반응의 획득을 통해 본래 목적인 전기전도도가 높은 해저열수광상 탐사에 대한 가능성을 확인하였다.

주요어 : 해양 전자탐사, 해저열수광상, 전기전도도, ROV

서론

2012년 8월 30일 접수, 2012년 11월 23일 심사완료
2012년 12월 13일 게재확정

- 1) 한국지질자원연구원 지열자원연구팀
- 2) 한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실
- 3) Geophex, Ltd.
- 4) 한국해양과학기술원 심해자원연구부
- 5) 과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학전공

*Corresponding Author(이성곤)

E-mail; seongkon@kigam.re.kr

Address; 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350,
KOREA

우리나라의 2011년 금속 광물 자원의 수입의존도는 약 99%(Kim, 2011)로 국제 광물 자원 가격이 국가 경제에 미치는 영향은 매우 크다. 우리나라는 이러한 광물 자원의 높은 해외의존도에서 벗어나 자주적인 광물 자원 확보를 위해 해외 광물자원개발에 대한 투자를 활발히 하고 있으며, 육상에 존재하는 광상만이 아닌 심해저

에 존재하는 광상을 개발하기 위한 사업도 진행하고 있다. 특히, 최근에는 태평양판이 인도-호주판에 섭입되는 판 경계 후배호 분지(back-arc basin)인 라우 분지(Lau basin) 해저 화산 지역에서 해저 열수광상 개발을 위한 탐사 및 매장량 평가를 위한 시추 조사 등이 진행 중이며(Kim et al., 2008), 이와 더불어 남서태평양 및 인도양 등에서도 해양 광물자원 개발(Kim et al., 2008)을 위한 각종 탐사를 추진할 계획인 것으로 보고되고 있다.

해저열수광상은 해저에 괴상의 황화광물 형태로 존재하여 SMS(submarine massive sulfide)라고 불리우며 이는 육상에 존재하는 VMS(volcanogenic massive sulfide) 광상의 원형 모델로 여겨진다(Kowalczyk, 2009). 기존의 연구결과 해저 발산경계에 존재하는 해저열수광상은 황동석(Chalcopyrite, $CuFeS_2$), 황철석(Pyrite, FeS_2), 섬아연석(Sphalerite, $(Zn,Fe)S$) 등의 고농도 황화광물을 함유하고 있음이 알려져 있다(Rona, 1984). 해저열수광상 사업단의 연구 대상 지역인 라우 분지에 분포하는 해저 열수광상에서도 Zn, Cd, As, Pb 등의 유용 금속 원소의 함유량이 높은 것으로 알려져 있으며(Fouquet et al., 1991), 또한 이 지역 해저산 일대에서 채취한 시료들을 분석한 결과 모암 변질 과정에서 Ag, Au, As, Cd, Cu, Pb, Sb, V, Zn 등의 원소들의 함유량도 현저히 상승되었음(Yoo et al., 2011)이 확인되었다. 한편, Kowalczyk (2009)에 의하면 파푸아 뉴기니의 Solwara 1 지역 내에 존재하는 해저열수광상에서도 고품위의 Cu, Au가 함유되어 있음이 확인되었다.

일반적으로 VMS 광상의 경우 모암에 비해 높은 전기전도도(electrical conductivity)를 나타내어(Ford et al., 2007) 이 같은 지구물리적 특성을 이용한 여러 물리탐사 방법들이 수행되어 왔다(Craven et al., 1985; Ford et al., 2007; Morgan, 2012). 이와 마찬가지로 해저열수광상 내의 황화광물도 섬아연석을 제외한 대부분은 높은 전기전도도를 갖는 것으로 알려져 있으며(Schon, 1996), Lee and Lee (2010)은 실내 실험을 통해 통가 및 북 피지 해저열수광상 주변에서 채취된 시료를 대한 분석한 결과, 금속광물이 매우 높게 농집되어 있어 모암의 전기전도도에 비해 침니(chimney) 시료의 전기전도도가 약 390~1020배 정도로 높음을 밝힌 바 있다. 또한, 이러한 높은 전기전도도 특징 이외에 해저열수광상에서는 black smoke, white smoke 등의 형태로 열수가 분출되어 침니 모양으로 성장하게 되는데 이후 주변으로 무너지면서 열수의 분출구를 막음으로써 구릉(mound) 형태 혹은 렌즈 형태의 광상을 이루게 되어(Evans, 1993) 해저 광상이 해저면 근처에 넓게 얇은 심도로 분포하는

경향을 보이는 특징을 가지고 있다. 따라서, 이러한 해저열수광상의 높은 전기전도도 및 광상 분포 특징은 전기전도도가 매우 높은 해양 환경 내의 유가스전을 탐지하기 위해 개발된 고출력의 해양전자탐사(marine CSEM) 방법보다는 저출력이지만 간단한 루프-루프형태의 전자탐사 방법이 훨씬 효율적으로 적용될 수 있는 환경을 제공하고 있다.

해저열수광상 탐사에 해양전자탐사 방법이 적용된 첫 번째 사례는 Nautilus Minerals Inc.에 의하여 파푸아 뉴기니의 Sowala 1 해저열수광구에서 해양 전자탐사를 실시한 것이며, 이 결과 해저면의 전기전도도의 상대적 분포를 영상화한 바 있다(Nautilus Minerals, 2009). 이때 사용된 장비는 하나의 전기장 송신 루프와 전기장 측정 전극으로 구성된 매우 간단한 단일 주파수 전자탐사 방법으로, 루프 전류원 송신에 따른 전기장의 크기 변화만을 측정하여 탐사를 수행하였다. 최근에는 Nakayama and Saito(2011) 등이 시간영역 해양전자탐사 기기를 개발하고 일본 내 해저열수광상에 적용 한 바 있으며, Swidinsky et al.(2012)은 모델 연구를 통하여 시간영역에서 해양전자탐사의 적용성 연구를 수행한 바 있다.

국내의 해저열수광상 탐사를 위한 해양 지구물리학적 접근 방법으로는 열수에 의한 저자화 이상대를 파악하기 위하여 심해 견인 및 표층 자력탐사를 이용하는 방법(Kwak et al., 2008; Kim et al., 2008)이나 심해 3성분 자력계를 ROV(Remotely Operated Vehicle)에 부착하여 운용하는 삼성분 자력탐사(Kim and Park, 2011)를 시도한 바 있으나, 아직 해양전자탐사를 적용한 사례는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 해저면 근처에 구릉 형태로 넓게 분포하는 SMS 광상의 연장성을 탐사하는데 적합한 소형 루프형 해양전자탐사의 본격적인 현장 적용을 위한 전단계로서, ROV를 이용한 소형 루프형 다중주파수 전자탐사의 해저열수광상 탐사에 대한 적용성을 고찰하고자 현장 해역에서 실험연구를 수행하였다. 이를 위해 새로이 개발된 해양전자탐사기기를 ROV에 부착하고 해양전자탐사기기를 해저면으로부터 일정 고도를 유지하여 운용함으로써 탐사 모션, ROV 및 해양전자탐사기의 연결이나 응용 등 해양전자탐사 현장 자료 획득 방법을 점검하였으며, 또한 수심 약 300 m 지점에 금속체를 설치하고 해저면에서 일정 고도를 유지하여 수평탐사 실험을 수행하여 전도성 바다 내에서의 금속체에 대한 반응을 살펴봄으로써 소형 루프형 다중주파수 전자탐사 방법의 해저 열수광상 탐지를 위한 현장 적용성을 살펴보았다.

해양 전자탐사 장비

일반적인 전자탐사는 송신기에서 발생된 1차 전자기장(primary field)이 지하 내부의 전기비저항 이상대에서 유도전류를 발생시키고 이에 따른 2차 전자기장(secondary field)을 수신기로 측정하는 원리를 이용한다. 이러한 전자탐사 장비는 송신기와 수신기가 일정 거리 이격 하여 배치한 bistatic 구조와 송신기 내부에 수신기를 동심원(concentric configuration) 구조로 배치한 monostatic 구조가 있을 수 있는데, 본 실험에서는 새로이 개발된 monostatic 구조의 전자탐사 장비를 사용하였다. monostatic 구조의 전자탐사 장비는 송신기와 수신기가 같은 위치에서 움직임에 따라 송수신기의 공간적인 왜곡에 따른 반응 이상의 우려가 줄어든다. 또한 이로 인하여 높은 공간 분해능을 가질 수 있는 장점을 지니며(Swidinsky et al., 2012; Won et al., 1997), 또한 송신루프 모멘트의 증가를 통한 고출력 탐사가 가능하다(Choi, 2012).

실험에 사용된 monostatic 형태의 전자탐사 장비는 송신원 내 수신원이 존재하는 구조이므로 장비를 실제적으로 적용하기 위해서는 상대적으로 매우 큰 1차 전자기장에 의한 영향을 최소한으로 줄여야만 2차 전자기장의 수신 감도를 높일 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하는 방법에는 일반적으로 시간영역에서 일차장을 보내고 단락(off)시킨 직후부터 2차장을 수신하는 방법을 취하나(Nakayama and Saito, 2011; Swidinsky et al., 2012) 본 연구에서 사용된 장비는 주파수영역에서 소위 'bucking' 개념(Müller et al., 2012; Won et al., 1997)을 이용하고 있다. 즉, Fig. 1에서와 같이 송신 코일(Tx1) 안쪽에 송신코일과 반대방향의 전류가 흐르는 버킹 코일(bucking

coil, Tx2)이 위치하고 이를 통하여 수신 코일(Rx)은 1차장이 없는 무자기장 공간(magnetic null space) 상태에서 전자기 반응을 획득할 수 있다.

실험에 사용된 탐사장비는 다중주파수 전자탐사기로서 여러 주파수의 신호를 합성하여 일정한 송신파형을 지속적으로 송신하고 이에 의한 지하에서 오는 반사 신호를 원하는 특정 주파수에서 수신하게 된다. 송신파형을 구현하기 위하여 주파수에 따라 일정한 순서로 배열된 'bit stream'을 이용하여 H-bridge(a set of digital switches)의 스위치를 on-off 시킴으로써 샘플링 간격(1/30 혹은 1/25초)의 정수배에 해당하는 7-9개 주파수의 송신 신호를 합성하여 발생시키게 되는 것이다(Müller et al., 2012; Won et al., 1997). 또한, 송신된 전자기파로 인해 유도되는 2차장은 수신기에서 감지되며 소프트웨어에서 출력되는 전자기 반응 값은 2차장의 값을 1차장의 값으로 나눈 후 10^6 을 곱해 준 ppm 값이다. 여기서 1차장은 참조코일(reference coil)에서 측정되는 값으로, 이 코일은 1차장을 측정하는 동시에 1차장에 대한 2차장의 비를 계산할 때 전원부의 전력변화에 의한 1차장 변화량을 상쇄하기 위한 역할도 한다. 식 (1)은 반 무한공간에서 사각루프 형태의 송신기에서 발생한 송신원에 대한 ppm 단위 반응값을 나타내고 있다(Won et al., 1997). 여기서 m 은 송신원의 세로길이, n 은 송신원의 가로길이, h 는 장비와 해저면 사이의 간격, ω 는 각 주파수(angular frequency), μ 는 투자율(magnetic permeability), σ 는 전기전도도(conductivity)를 나타낸다.

$$ppm = 10^6 \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{mn}{\pi} \right)^{3/2} \int_0^\infty \lambda^2 \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + k^2}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + k^2}} e^{-2\lambda h} d\lambda$$

$$k^2 = i\omega\mu\sigma$$
(1)

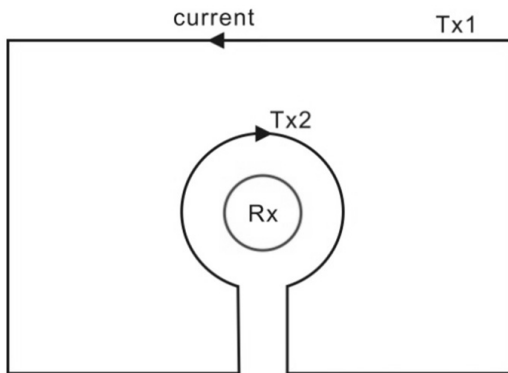


Fig. 1. Conceptual scheme of a monostatic electromagnetic survey equipment to countervail primary field (Tx1) by using bucking coil (Tx2). A receiver (Rx) is located in the bucking coil where the primary electric field is removed.

본 연구에서 사용된 장비는 이러한 기본 개념을 해양 전자탐사를 위하여 구현된 것으로 Fig. 2(a)와 같이 육상 장비에 비해 고출력을 얻기 위해서 루프 크기가 다소 큰 가로 210 cm, 세로 304 cm 사각 루프를 이용하였으며, 재질은 매우 단단한 유리섬유(fiberglass)로 이루어져 있다. 코일을 포함한 무게는 약 100 kg로 비중이 1.5임을 감안하면 물속에서의 무게는 약 30 kg 정도로 예측된다. 또한 본 시스템은 수심 2000 m 이내의 심해 환경에 부존 가능성이 있는 해저열수광상을 탐사하기 위하여 개발하였기 때문에 고압 환경인 심해에서 시스템이 작동할 수 있도록 Fig. 2(b)와 같이 탐사장비의 제어부를 수심 3000 m 까지 보호 가능한 내압 용기(pressure housing)를 이용하여 보호하였다.



Fig. 2. (a) Assembled marine small loop electromagnetic survey equipment (KIGAM-GEM3). The Rx, Tx, Bx and Ref are receiver, transmitter, bucking and reference coils. (b) Pressure housing of control unit in the KIGAM-GEM3 system.

자료획득을 위한 탐사 시스템 구성

소형 루프형 전자탐사 장비를 해양에서 운용하는 방법은 탐사하는 해양 환경에 따라 달라진다. 수심이 깊지 않고 해저면 지형의 굴곡이 심하지 않는 환경에서는 장비를 탐사 모선에 매단 채로 이동하며 탐사를 수행할 수도 있다. Muller et al. (2011, 2012)은 퇴적물이 쌓여있는 평평한 해저면 환경에서 장비를 바닥에서 끄는 방법으로 탐사를 수행하였다. 그러나 해저열수광상 탐사 현장과 같이 수심이 깊고 또한 침니와 해저협곡으로 인한 복잡한 지형적 기복을 가지는 곳에서는 시스템을 안정하게 견인하는 것이 매우 어렵게 된다. 따라서, 본 연구에서는 현장에서 해저면과 탐사장비 사이의 일정한 간격을 유지하는 안정적인 운용을 위해 ROV와 탐사장비를 강성 연결(rigid connection)하여 운용하는 방법을 선택하였다.

Fig. 3과 같이 탐사장비를 유리섬유 재질의 I-beam 2개를 이용하여 ROV의 중앙 하부와 연결하고 로프를 통해 센서의 중앙과 양끝 모서리 부분을 잡아주어 바다 속에서 진동에 의한 탐사장비의 수직 변위를 최소한으로 줄이고자 하였으며 pressure housing된 탐사장비의 제어부는 ROV 하단에 부착하였다. 탐사의 순서는 1) ROV 진수 2) 탐사 라인 설정 3) ROV 조종을 통한 탐사 4) ROV 인양으로 진행되었다. 해상에서는 파도 때문에 배의 상하 운동이 계속적으로 일어나게 되며 이로 인하여 원치에 연결된 ROV 역시 배의 운동으로 인한 영향을 받을 우려가 있다. 이와 같은 영향을 제거하기 위하여 부력체를 로프에 2~3 m 간격씩 22개를 설치하여 70~100 m의 완충 효과를 주었다.

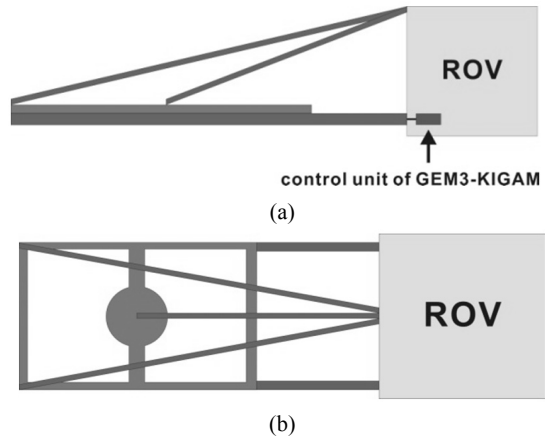


Fig. 3. Schematics of rigid connection between ROV and KIGAM-GEM3. (a) Side view and (b) plan view.

실험 운용에 사용된 ROV는 많은 부분이 금속 재질이며, 또한 프로펠러에 의한 잡음이 되기 때문에 해양 전자탐사 반응에 잡음 요소로 작용할 가능성이 있다. 그러나, ROV와 탐사장비는 강성 연결되어 있기 때문에 상대적인 기하학적 위치는 변하지 않으므로 ROV의 금속성분에 의한 영향은 고정된 배경영향, 즉 정적성분(static effect)으로 간주할 수 있다. 또한 이동 시 프로펠러의 회전에 의한 영향은 그 주파수가 탐사 장비의 전자기파 주파수 대역에 비해 훨씬 높은 것으로 알려져 있어 자료 획득 시 영향은 매우 작은 것으로 판단되었다. Fig. 4는 본 탐사에서 운용된 전체적인 자료 획득 흐름과 시스템 연결 상태를 나타내며 그림에서 볼 수 있듯이 KIGAM-GEM3 센서의 제어부는 내압 용기에 의해 pressure housing 되

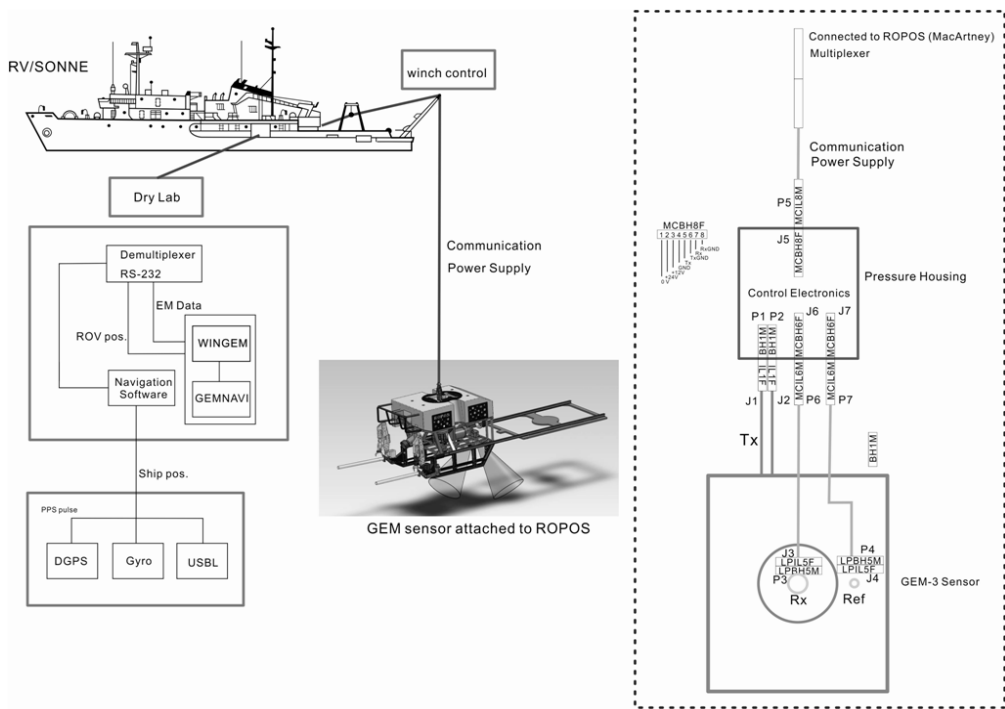


Fig. 4. Conceptual diagram of data stream and physical connections.



Fig. 5. Map near offshore Tonga. Red dot indicates study area

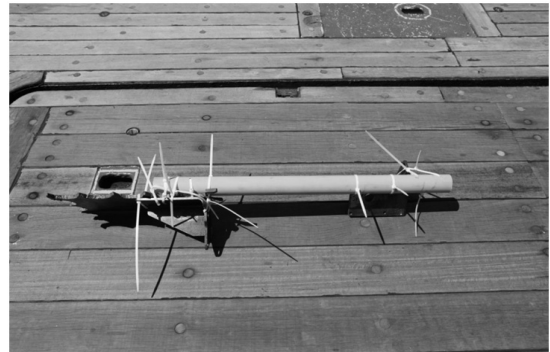


Fig. 6. Metal target consisting of aluminium rod and massive iron object

어 ROV의 윈치 시스템 전원 및 광섬유 통신 포트와 연결되어 있다. 그리고 이 연결은 ROV 윈치 시스템 및 Dry lab 내의 멀티플렉서를 거쳐 제어 컴퓨터와 연결되어 해양 전자탐사 자료 획득 소프트웨어에 연결된다.

2012년 1월 16일부터 30일까지의 탐사 기간 중 1월 28, 29일에 걸쳐 독일 연구선 R/V SONNE호와 캐나다의 ROPOS ROV를 이용하여 통가 인근해역인 Fig. 5의 연구 지역에서 해양 전자탐사 시스템 실험을 진

행하였다. 총 2가지의 실험을 수행하였으며, 실험의 주목적은 시스템의 금속체에 대한 이상 반응을 확인하여 센서 고도에 따른 반응 양상을 살펴봄으로써 실험에서 해양전자탐사 자료 획득 방법을 검증하는 것이다. 이를 위하여 먼저 알루미늄 봉과 금속판을 이용하여 만든 Fig. 6의 금속 이상체를 실험 현장 해저면으로 투하하였다. 그 후 Fig. 7(a)와 같이 해저면의 이상체를 중심으로 가로세로 10 m의 탐사 공간을 설정하고 축선 간격 1 m

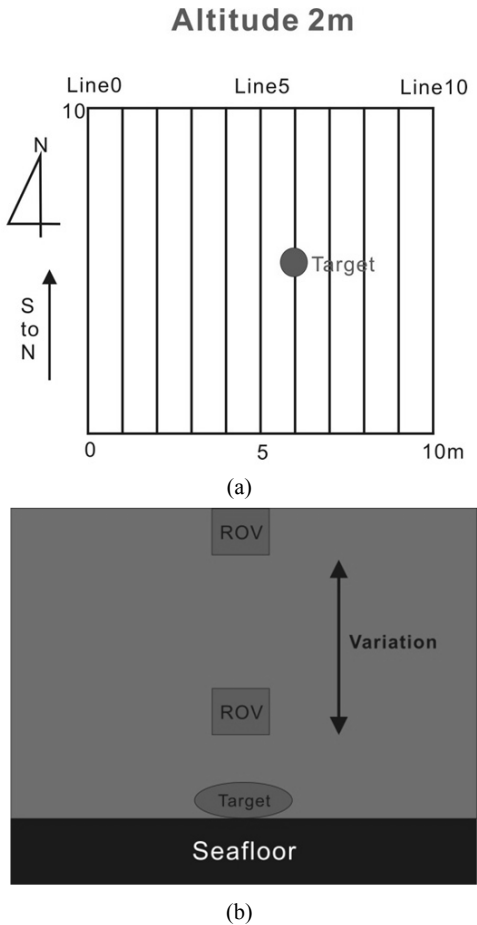


Fig. 7. (a) Survey lines in test 1. The red dot represents the metal target and the distance between seafloor and ROV is 2 m. (b) Scheme representing test 2. Position of ROV above the target is changed up and down.

인 탐사 측선을 정하였다. 이때 해저면과 탐사장비 사이의 거리를 약 2 m로 유지하며 설정된 측선을 따라 ROV를 조종하며 남북으로 이동하며 실험 1을 수행하였다. 또한, 센서 및 이상체 사이의 거리에 따른 전자기 반응의 변화 양상을 알아보기 위해 Fig. 7(b)와 같이 이상체 위로 ROV의 고도를 변화시키며 전자기 반응을 획득하는 실험 2를 수행하였다.

실험자료 획득

시스템은 다중주파수 송신원을 사용하는 것이 특징이며 탐사에 사용된 주파수는 4개로 90, 570, 3330, 20010 Hz이다. 4개의 주파수는 1/30s의 샘플링 간격의 정수배

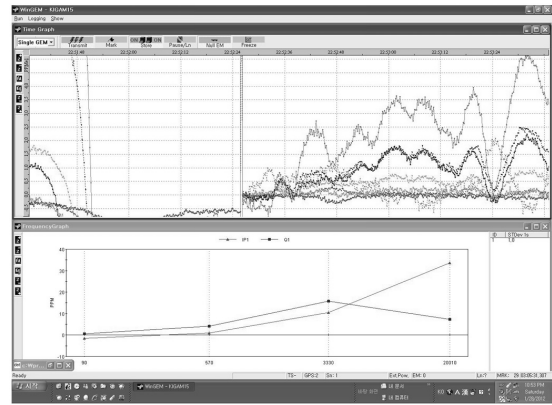


Fig. 8. Data acquisition program of KIGAM-GEM3. The upper panel shows ppm data over time at four frequencies (90, 570, 3330, and 20010 Hz) and the lower panel displays ppm data at the measuring moment for those responses.

가 되는 것으로 로그 스케일에서 동일한 간격을 가진다. 자료 취득 소프트웨어는 시간 경과에 따라 주파수 별로 2차장의 값을 1차장 값으로 나눠준 ppm 단위의 반응값의 실수부(in-phase)와 허수부(quadrature)를 기록하며 Fig. 8의 상부의 그래프에서 가로 축은 시간, 세로 축은 ppm 단위값이며, 하부의 그래프는 측정하는 당시의 각 주파수에서 실수부, 허수부의 ppm 단위값을 나타낸다. 전자기 반응값 획득 시 DGPS를 이용한 ROV의 위치값, gyro를 통한 ROV의 움직임(피치, 롤, 요), CTD (Conductivity, Depth, Temperature)를 이용하여 해수의 염도, 온도, 깊이를 동시에 기록하며 최종적으로 시간경과와 위치변화에 따른 전자기 반응값, ROV좌표 및 움직임, CTD 자료가 3가지의 파일로 저장된다.

실험 1에서 획득된 전자기 반응을 Fig. 9와 같이 주파수 별로 실수부와 허수부를 나누어 10개 측선에 대한 결과값을 mapping하여 나타내었다. 결과를 보면 각각의 주파수에서 금속 이상체가 위치할 부근에 전자기 이상 반응이 나타남을 확인할 수 있다. 특히 90 Hz 보다 큰 주파수에서는 전자기 이상 반응이 두 갈래로 나뉘어져서 나타나는데 이와 같은 결과가 발생하는 이유를 수치적 모델링 결과와 비교해 보기 위하여 3차원 적분방정식 코드 (Hursan and Zhdanov, 2002; Zhdanov et al., 2006)를 이용하여 3차원 모델링 하였다. 모델은 본 실험과 유사한 환경을 모사하기 위하여 Fig. 10과 같이 해수, 해저면의 전기비저항이 0.33, 1 ohm·m이고 수심 300 m 환경에서 전기 비저항이 0.05 ohm·m인 세로 1 m, 가로 20 cm, 높이 20 m의 금속 이상체를 설정한 후 가로세로 10 m의 공간에서 1 m간격으로 탐사라인을 설계하고 해저

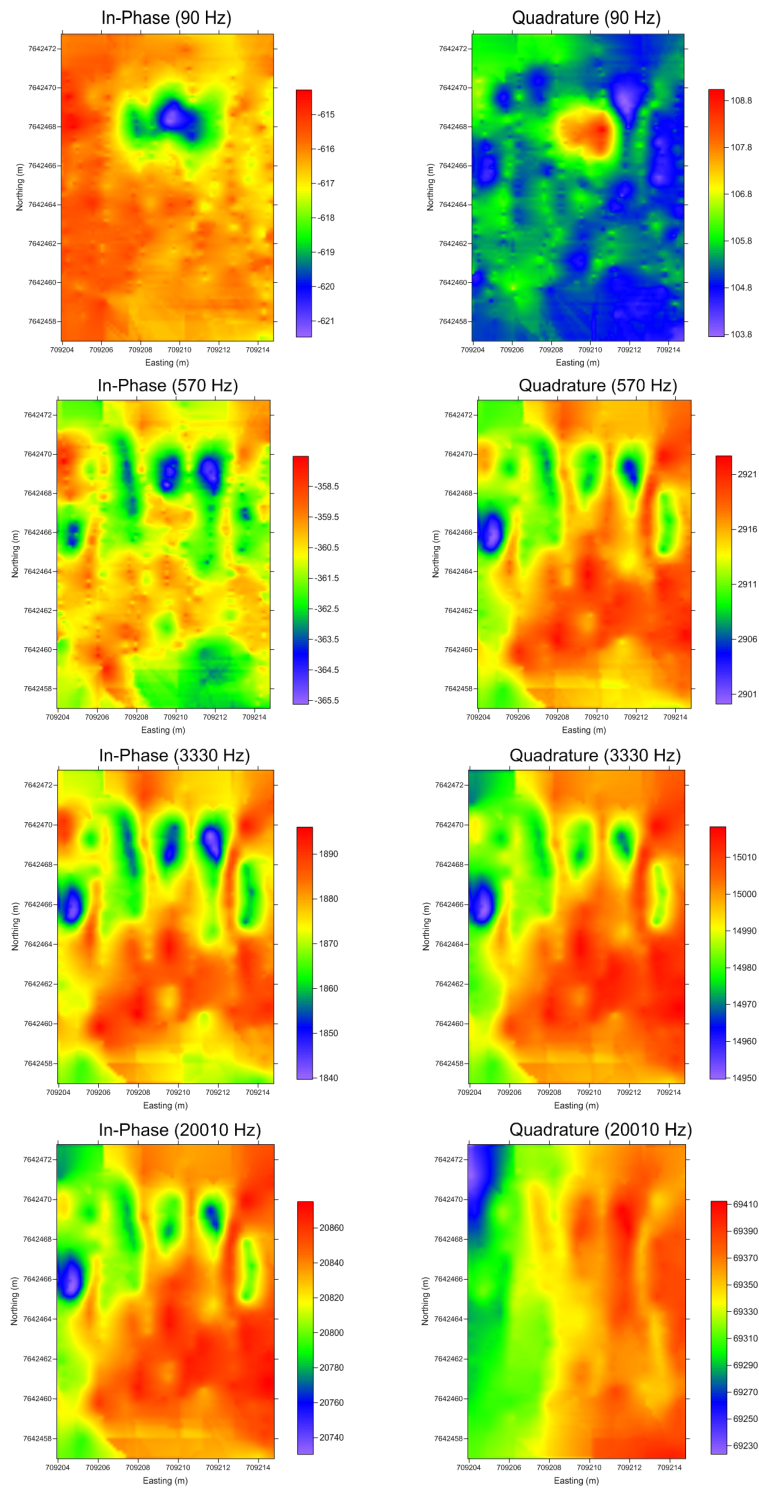


Fig. 9. In-phase and quadrature components of magnetic responses from KIGAM-GEM3 at four frequencies: 90, 570, 3330, and 20010 Hz.

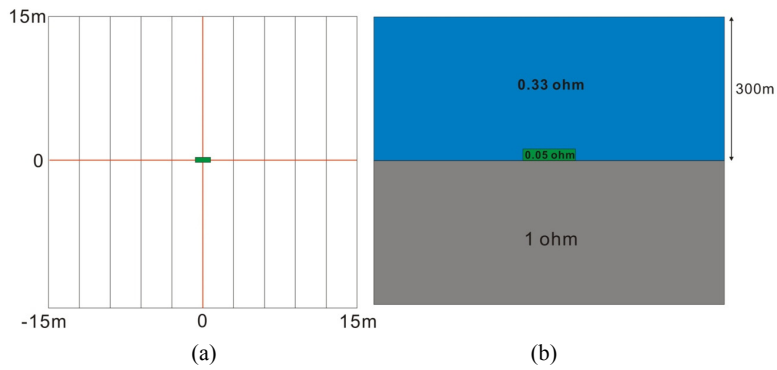


Fig 10. Model setup for 3-D integral equation modeling. Metal target is located in the center of grid. (a) Plan view and (b) depth section.

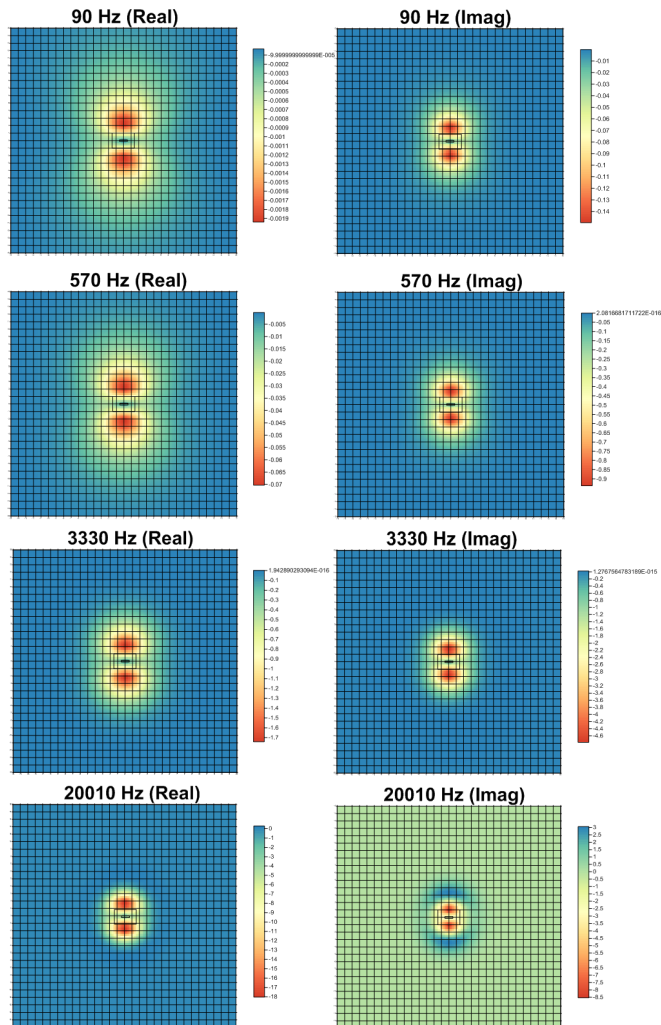


Fig 11. Results of 3-D modeling by using the integral equation code developed by Zhdanov et al. (2006) at four frequencies: 90, 570, 3330, and 20010 Hz.

면과 시스템 사이의 거리를 2 m로 설정하였다. Fig. 11에 나타난 모델링 결과에서 동상, 이상 성분 모두 현장 실험 결과와 비슷한 양상으로 사용된 모든 주파수에서 반응들이 두 갈래로 나뉘어짐을 확인할 수 있다. 이런 양상이 일어나는 이유는 금속이상체가 막대모양의 형태를 띄고 있음으로 인하여 하나의 dipole과 같은 방사 패턴 (radiation pattern)이 나타남에 의한 것으로 생각되며 모델링 결과와 다른 현장에서의 90 Hz에서의 반응 양상은 상대적으로 긴 파장으로 인한 분해능의 감소로 인한

결과로 생각된다. Fig. 12는 실험 2의 반응값을 깊이에 따른 함수로 표현한 것이다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 ROV가 금속 이상체에서 가까워질수록 급격하게 반응값이 변화하며 일정 간격 이상 이격되면 값이 거의 변화하지 않는다. 이와 같은 결과는 전도성 매질의 바다에서 급격한 전자기장의 감쇄로 인하여 해저면과 장비 사이의 일정 간격 이상에서 2차장이 획득되지 못함을 시사하는 것이며 이는 해저열수광상 탐사 시 해저면과 탐사 장비 사이의 간격을 일정 간격 이내로 하는 것이 성공적

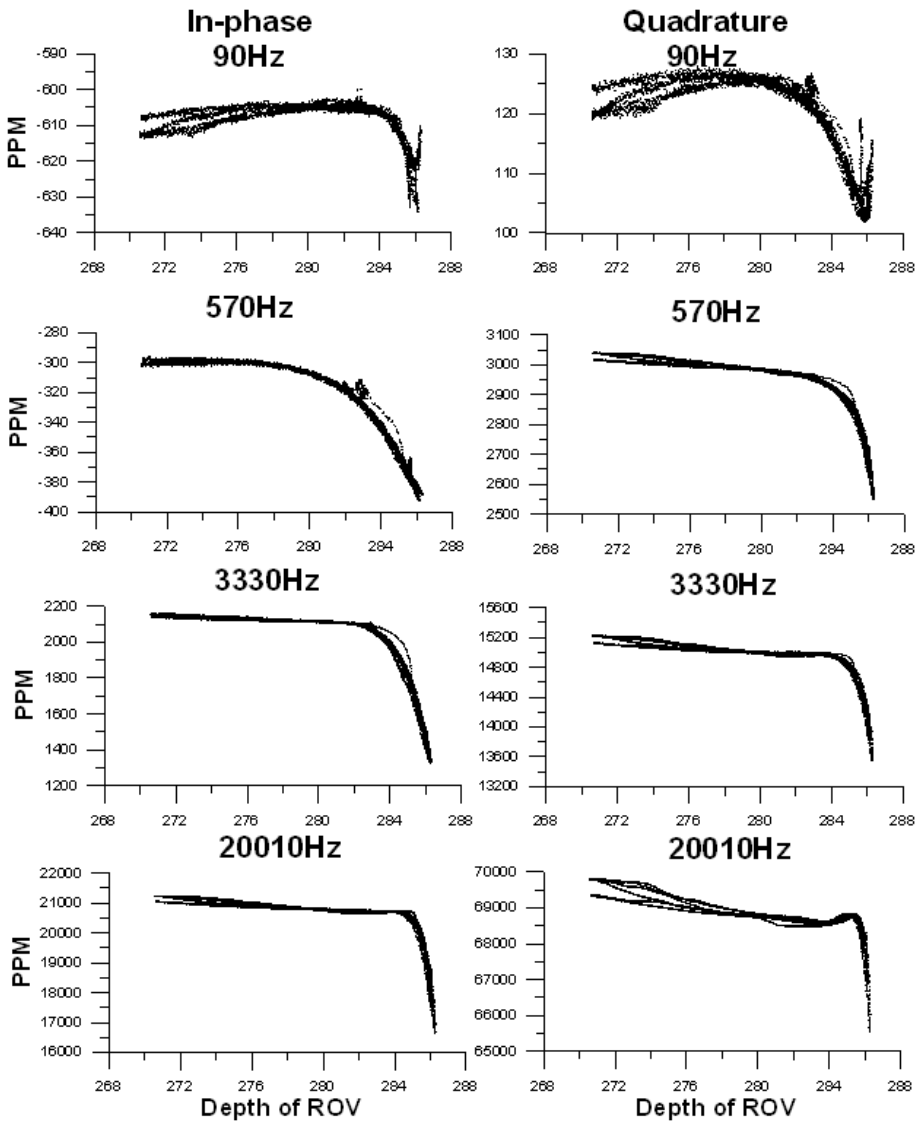


Fig 12. Responses with the variation of the altitude of the system obtained through the test 2. One can see rapid change of responses due to change in the depth of ROV

인 탐사를 위한 기준임을 보여준다고 할 수 있다.

결 론

해저열수광상을 탐사하기 위하여 새로이 개발된 소형 루프형 전자탐사 시스템의 본격적인 현장 적용 이전 단계로 통가 인근 해역 수심 약 300 m 지점에서 실험역 현장실험을 수행하였다. 이 실험의 목적은 탐사선 및 ROV를 이용한 소형 루프형 전자탐사 기기의 운용 방법을 점검하고 전도성이 높은 해양 환경에서 금속광상탐사에 대한 적용성을 살펴보기 위함이다. 해저열수광상의 복잡한 지형적 기복 및 수심을 고려하여 ROV를 이용하여 해양 전자탐사 시스템을 강성 연결하여 운용하였고 금속체에 대한 전자기 반응의 민감도를 분석하기 위하여 금속 이상체를 해저에 투하하여 전자기 반응을 획득하였다. ROV를 일정한 고도로 운용하는 실험 1의 결과 ROV와의 연결을 통한 시스템의 현장 운용이 성공적으로 이루어졌으며 10개 축선의 전자기 반응값을 mapping 한 결과 뚜렷하게 금속 이상체에 대한 이상 반응이 획득됨을 확인하였다. 또한 획득된 금속 이상체에 의한 전자기 이상 반응의 양상은 3차원 적분방정식을 이용한 수치적 모델링 결과와 유사하게 나타났으며 이를 통해 시스템의 현장실험 결과가 성공적임을 확인하였다. 또한 ROV를 상하로 운용하는 실험 2를 통하여 해저열수광상 탐사 시 전도성 해양환경에서의 센서와 해저면 사이의 거리에 대한 기준의 적절한 지침도 추정할 수 있었다. 해저열수광상에 존재하는 광물들은 육상 광상에 비해 높은 집적도로 인하여 비교적 높은 전기전도도의 특성을 가지고 있을 것으로 추정되며 이는 전자탐사를 통한 광상탐사가 가능함을 시사한다. 본 실험 결과 매우 작은 금속 이상체에 대한 전자기 이상 반응이 뚜렷이 획득됨이 확인되었고 이를 통하여 상대적으로 큰 규모와 높은 전기전도도의 특성을 가지는 실제 해저열수광상에 새로이 개발한 본 시스템을 적용하였을 때 성공적인 탐사가 이루어질 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나, 현장 실험역 탐사 시 비교적 큰 해양전자탐사 기기를 안정적으로 진수 및 인양, 견인 등에 좀 더 개선된 방법이 필요함을 알 수 있었으며, 또한 이와 동시에 획득된 실험역 자료에 대한 정밀 해석(잡음제거, 자료처리, 역산 등) 방법 등에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 한국해양과학기술진흥원의 국토해양기술연구개발사업인 “통가 해저열수광상개

발사업단”의 협동과제로서 수행되었으며 이에 감사드립니다. 아울러, 현장 실험 시 ROV 운용에 도움을 준 캐나다의 CSSF(Canadian Scientific Submersible Facility) 관계자에게도 감사드립니다.

참고문헌

- Choi J.H., 2012, Small-loop EM application for exploration of marine hydrothermal deposits and the data analysis, Ph.D Thesis, Seoul National University, Seoul.
- Craven, B. L., Hayden, W. B. and Smith, M. J., 1985, “A comparison of electromagnetic prospecting results at the Scuddles Cu?Zn massive sulphide deposit Golden Grove area Western Australia,” *Exploration Geophysics*, Vol. 16, No. 3, pp. 194-197.
- Evans, A.M., 1993, *Ore geology and industrial minerals: An introduction*, 3th ed., Wiley, pp. 71-74.
- Fouquet, Y., Stackelberg, U., Charlou, J. L., Donval, J. P., Foucher, J. P., Erzinger, J., Herzig, P., Mühe, R., Wiedicke, M., Soakai, S. and Whitechurch, H., 1991, “Hydrothermal activity in the Lau back-arc basin: Sulfides and water chemistry,” *Geology*, Vol. 19, No. 4, pp. 303-306.
- Ford, K., Keating, P. and Thomas, M. D., 2007, “Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits: exploration methods,” *Geological Association of Canada*, v. Mineral Deposits Division, Special Publication 5, pp. 939-970.
- Hursan, Gabor. and Zhdanov, Michael S., 2002, “Contraction integral equation method in three-dimensional electromagnetic modeling,” *Radio Science*, Vol. 37, No.6, pp. 1089.
- Kim C. H. and Chan Hong Park, 2011, “Deep Sea Three Components magnetometer Survey using ROV,” *Jigu-Mulliva-mulli-Tamsa*, Vol. 14, No. 4, pp. 298~304.
- Kim D. H., 2011, “The 4th National program for Overseas Resources Development,” *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 6, pp. 813-820.
- Kim H. S., Mee-Sook Jung, Chang Hwan Kim, Jonguk Kim and Kteong-Yong Lee, 2008, “The Exploration Methodology of Massive Sulfide Deposit by Use of Marine geophysical Investigation,” *Mulli-Tamsa*, Vol. 11, No. 3, pp. 167-176.
- Kowalczyk, P., 2009, “The geophysical exploration of SMS deposits - a case study of the Solwara 1 submarine massive sulfide deposit,” *Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium -Imaging and Interpretation*, Sapporo, Japan, October 12-14.
- Kwak J. Y., Joong Sun Won, Chan Hong park, Chang Hwan Kim and Young Tak Ko, 2008, “The Study of Hydrothermal Vent and Ocean Crustal Structure of North-eastern Lau Basin Using Deep-tow and Surface-tow Magnetic data ,”

- Econ. Environ. Geol.*, Vol. 41, No 1, pp. 81-92.
- Lee S.K. and Seong Kon Lee, 2010, "The Prototype study of resistivity and Porosity Measurement for the samples Collected Near Marine hydrothermal Deposit," *Jigu-Mulli-wa-mulli-Tamsa*, Vol. 13, No. 4, pp. 378-387.
- Morgan, 2012, "Geophysical characteristics of volcanogenic massive sulfide deposits in volcanogenic massive sulfide occurrence model," U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-C chap. 7, p. 16.
- Müller, H., T. v. D., , C. H., , B. S., Rey, D. and a. B. R., 2012, "Mapping the magnetic susceptibility and electric conductivity of marine surficial sediments by benthic EM profiling," *Geophysics*, Vol. 77, No. 1, pp. 43-56.
- Müller, H., von Dobeneck, T., Nehmiz, W. and Hamer, K., 2011, "Near-surface electromagnetic, rock magnetic, and geochemical fingerprinting of submarine freshwater seepage at Eckernförde Bay (SW Baltic Sea)," *Geo-Marine Letters*, Vol. 31, No. 2, pp. 123-140.
- Nakayama, K. and Saito, A., 2011, "Marine time-domain electromagnetic technologies using ROV," *BUTSYRI-TANSA*, Vol. 64, No. 4, pp. 255-266.
- Nautilus Minerals, 2009, "Electromagnetic survey results outline continuity and extensions at Solwara," <http://www.nautilusminerals.com/s/Media-NewsReleases.asp?reportid=272841>.
- Rona, P. A., 1984, "Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers," *Earth-Science Reviews*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-104.
- Schon, J., 1996, "Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics, Handbook of geophysical exploration-seismic exploration," Vol. 18, Elsevier, pp. 389-390
- Swidinsky, A., Hölz, S. and Jegen, M., 2012, "On mapping seafloor mineral deposits with central loop transient electromagnetics," *Geophysics*, Vol. 77, No. 3, pp. 171-184.
- Yoo B. C., Hunsoo Choi, Sang-Mo Koh, 2011, "Alement Dispersion and Walleock Alteration of TA26 Seamount, Tonga arc," *Econ. Environ. Geol*, Vol. 44, No 5, pp. 359-372.
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Hanson, D. R., Novikova, E. and Hall, T. M., 1997, "GEM-3: A Monostatic Broadband Electromagnetic Induction Sensor," *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 2, No. 1, pp. 53-64.
- Zhdanov, Michael S., Lee, Seong Kon. and Yoshioka, Ken., 2006, "integral equation method for 3D modeling of electromagnetic fields in complex structures with inhomogeneous background conductivity," *Geophysics*, Vol .71, No.6, pp. 333-345.

고 휘 철

현재 과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학 석사과정
(本 學會誌 第48卷 第6号 参照)

박 인 화

2005년 대전대학교 지구시스템공학과 석사



현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지열자원연구팀 선임기술원
(E-mail; pih@kigam.re.kr)

IJ Won

1967 Seoul national University, Korea, B. Eng.
1971 Columbia University, New York, Geophysics M. Eng.
1973 Columbia University, New York, Geophysics Ph.D



Chief Scientist, Geophex, Ltd.
(E-mail; ijwon@geophex.com)

김 현 섭

1990년 서울대학교 자원공학과 학사
1992년 서울대학교 자원공학과 석사
2007년 서울대학교 자원공학과 박사



현재 한국해양과학기술원 심해저자원연구부 책임연구원
(E-mail; hyskim@kiost.ac)

이 성 곤

1991년 서울대학교 자원공학과 학사
1993년 서울대학교 자원공학과 석사
1998년 서울대학교 자원공학과 박사



현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지열자원구팀 책임연구원
과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학전공
(E-mail; seongkon@kigam.re.kr)

조 성 준

1991년 서울대학교 자원공학과 학사
1993년 서울대학교 자원공학과 석사
2000년 서울대학교 자원공학과 박사



현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구팀 책임연구원
(E-mail; mac@kigam.re.kr)

Frank Funak

Senior Software Engineer
Senior Scientist in Physics



Geophex, Ltd., USA
(E-mail; funak@geophex.com)