적분방정식 기반의 3차원 모델링을 이용한 소형 루프형 해양 전자탐사 자료의 반응 분석

고휘철^{3,1} · 박인화¹ · 이성곤^{1,2*}

¹한국지질자원연구원 지열자원연구실

²과학기술연합대학교 물리탐사공학

³한국광물자원공사

Response Analysis of Data Acquired by Marine Loop Electromagnetic System Using Three-Dimensional Modeling Based on Integral Equation

Hwicheol Ko, In Hwa Park, and Seong Kon Lee*

¹Geothermal Resources Department, KIGAM (Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources)

²Geophysical Exploration Major, UST (University of Science and Technology)

³Korea Resources Corporation (KORES)

요 약: 심해탐사를 위해 새롭게 개발된 소형 루프형 해양 전자탐사 시스템의 실험 결과의 반응 양상을 적분방정식 기반의 3차원 모델링을 통하여 분석하였다. 수심 약 300 m 해저환경에서 획득한 금속 이상체의 전자기 반응 양상에 대한 영향인자를 분석하기 위해 이상체의 크기와 모양을 다르게 설정하여 모델링을 수행하였다. 모델링 결과 분석을 통하여 이상체의 모양이 크기보다 반응 양상에 더 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 탐사고도와 주파수에 따른 반응값 변화를 알아보기 위해 모델링을 수행하였고 이를 통해 일정한 탐사 고도 유지의 필요성과 주파수 대역에 따른 허수부의 민감도를 확인하였다. 또한 탐사 고도와 주파수에 따른 반응값을 단면 그래프로 나타내어 시스템에 사용되는 주파수 대역에 대한 적절한 탐사고도를 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 해저 열수광상 실험 탐사 설계 시 매개변수 설정에 있어 유용한 정보를 줄 것으로 예상된다.

주요어: 소형 루프형 전자탐사, 3차원 모델링, 전자기 반응양상, 주파수, 탐사고도

Abstract: We analyzed response patterns of test field data acquired with new small loop electromagnetic (EM) system using three-dimensional (3D) electromagnetic modeling code. The size and shape of a conductor was adopted as experimental parameters for EM modeling to understand influencing factors of the response patterns due to a metallic object on the seafloor. Obtaining the responses for four models of difference sizes and shapes through 3D EM modeling, we confirmed that the shape of the object have a more critical factor on the response pattern than size. We also calculated “ppm” values with respect to different altitudes of the sensor and source frequencies. The modeling results show that the consistency of sensor altitude is important and imaginary part of ppm response is more sensitive than real part. We also visualized the contour map of the real and imaginary part of ppm value as a function of frequency and altitude so that we can estimate proper altitude for source frequency band of our survey system. The results of this paper are anticipated to give proper parameters in survey construction for seafloor massive sulfide deposit.

Keywords: small-loop electromagnetic survey, three-dimensional modeling, electromagnetic response pattern, frequency, altitude

서론

전자탐사는 전자기 유도(electromagnetic induction) 현상을 이용하여 지하의 전기전도도 분포를 알아내는 물리탐사 방법이다. 전자탐사 방법 중 특히 소형 루프형 전자탐사는 다른 탐사법과 비교하였을 때 상대적으로 탐사 장비의 이동이 편리하며 지표면과 접지를 하지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 소형 루프형 전자탐사는 주로 육상환경에서 지하의 전도체 탐사

2013년 10월 2일 접수; 2014년 1월 22일 수정; 2014년 2월 7일 채택

*Corresponding author

Address: seongkon@kigam.re.kr

E-mail: 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

©2014, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Gochioco and Ruev, 2006; Kang *et al.*, 2013)등에 활용되고 있으며 또한 비접지의 장점을 이용하여 항공탐사(Huang and Fraser, 2000, 2002) 등에 많이 활용되고 있다. 최근에는 육상 및 항공에서 뿐만 아니라 해양에서도 유전 및 가스 하이드레이트(gas hydrate) 탐사와 관련하여 인공 송신원 전자탐사(CSEM; Controlled Source Electromagnetic)에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 시도되고 있다(Constable, 2010; Lee *et al.*, 2011; Noh *et al.*, 2012). 석유탐사에서와 같이 상대적으로 규모가 큰 CSEM 탐사와는 별도로 탐사 목표의 종류와 부존상태에 따라 휴대와 운용이 쉽다는 장점을 활용하여 소형 루프형 전자탐사 또한 해양환경에서 이용되고 있다. 국내에서는 소형 루프형 전자탐사를 이용한 천해 환경에서의 적용 연구가 수행되었고(Song *et al.*, 2011) 또한 심해에 존재하는 열수광상 탐사를 위한 장비가 새로이 개발되는 등(Ko *et al.*, 2012), 해양 환경에서 전자탐사 적용 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 소형 루프형 전자탐사를 해양 환경에서 적용하는 연구들은 국내에서 뿐만 아니라 국제적으로도 시간영역(time domain) (Nakayama and Saito, 2011; Swidinsky *et al.*, 2012) 및 주파수 영역에서(Ko *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2011) 다양한 연구가 이루어지고 있는 등 최근의 관심도가 높아지고 있는 추세이다.

본 연구의 목적은 기존의 연구에서 수행된 소형 루프형 해양 전자탐사의 실험역 현장 실험 결과(Ko *et al.*, 2012)에서 나타난 반응양상에 대한 주 영향인자가 무엇이며 탐사고도와 주파수에 따른 반응 변화에 대한 원인 규명이다. 본 연구에서는 해저에 열수광상을 탐사하기 위해 개발된 전자탐사장비의 실험결과를 3차원 적분방정식을 활용한 코드를 이용해 모델링을 수행하여 심층 분석하였다. 먼저 금속 이상체의 전자기 반응양상의 주 영향인자를 분석하기 위해 이상체의 크기와 모양을 달리하여 수치 모델링을 수행하였다. 또한 탐사고도와 주파수를 변화 시키며 수행한 모델링 결과를 분석하였고, 이를 통해 실제 현장탐사 시 본 시스템의 주파수 대역에 대한 적절한 탐사고도를 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 향후 실험역 탐사 시 탐사설계 변수에 주요 지침을 줄 것으로 예상된다.

본 론

적분방정식 코드를 이용한 3차원 모델링

3차원 전자탐사 수치 모델링에는 유한요소(finite element), 유한차분(finite difference), 적분방정식(integral equation, IE)의 방법들이 주로 이용된다. 본 논문에서 핵심적으로 다루는 것은 해저면 위에 위치한 금속 이상체 모델에 대한 전자기 반응 분석이기 때문에 이들 방법 중 층서구조 내의 고립 이상체(isolated body in layered earth)에 의한 영향을 가장 효율적으로 모델링 할 수 있는 적분방정식법을 이용하였다.

전자기파 방정식은 기본적으로 아래의 맥스웰 방정식

(Maxwell equation)을 따른다 (Nabighian, 1988).

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + i\omega \epsilon \mathbf{E} + \mathbf{J}_s \\ \nabla \times \mathbf{E} &= i\omega \mu_0 \mathbf{H}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, $\mathbf{H}$ 는 자기장(magnetic field), $\mathbf{E}$ 는 전기장(electric field), σ 는 전기전도도(electric conductivity), ϵ 는 유전율(dielectric permittivity), $\mathbf{J}_s$ 는 외부에서 인가된 전류밀도(impressed electric current density), ω 는 각 주파수(angular frequency), μ_0 는 공기에서의 대자율(magnetic susceptibility)을 뜻한다.

(1)식의 자기장에 관한 항을 전기장에 관한 아래 항에 대입하여 윗 식을 전개하면 아래의 전기장에 대한 Helmholtz 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - k^2 \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{J}\quad (2)$$

여기서 k 는 전파상수(wave propagation constant)이다. 주파수가 10^5 Hz 이하일 때 $\mu_0 \epsilon \omega^2 \ll \mu_0 \sigma \omega$ 이며, 이는 변위전류가 전도전류보다 매우 작아 무시할 수 있으므로 전기장은 지하의 전기전도도에 의해서만 변화하는 함수로 볼 수 있다. 일정한 전기 전도도(σ)를 가지는 1차원 층서 구조의 배경매질에서 특정한 전기전도도를(σ')를 가지는 이상체가 있을 때 송신원에 발생시킨 1차장에 의하여 유도된 전류에 의해 발생한 2차장을 포함하여 수신기에 탐지되는 전체 전기장(total electric field; $\mathbf{E}$)은 아래와 같이 배경 매질에 의해 나타나는 1차장($\mathbf{E}^b$)과 고립 이상체에 의하여 유도된 2차장($\mathbf{E}^s$)의 합으로 나타낼 수 있다(Nabighian, 1988; Zhdanov *et al.*, 2006)

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^b + \mathbf{E}^s\quad (3)$$

수신기에서 획득하는 1, 2차 전기장은 송신기에서 출력된 전자기장에 의해 배경 매질과 고립 이상체에 의한 반응이며 이는 단위 임펄스 신호에 대한 출력 반응인 그린 함수(Green's function; $\mathbf{G}$)를 이용하여 표현 가능하다(Zhdanov, 2006). 각각의 전기장을 그린 함수를 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{E}^s(r) = \int (\sigma^e - \sigma^b) \mathbf{G}(r, r') \cdot \mathbf{E}(r) dv\quad (4)$$

본 모델링에서 산출되는 반응값은 수신기에서 획득되는 2차 전기장의 값을 1차장으로 나누어 준 값에 10^6 을 곱해준 값(ppm) (Won *et al.*, 1997)이기 때문에 식 (4)를 이용해 구할 수 있다. 오른쪽 항에 표현된 적분 안에 구하고자 하는 전기장($\mathbf{E}$)을 포함하므로 이는 적분방정식의 형태를 띄게 된다. 이상체내부의 전기장 해를 구하기 위해 본 연구에서는 적분방정식(Integral Equation) 방법을 이용하였다.

해양에서의 전자기 반응

Fig. 1. The real (left) and imaginary (right) part of the normalized responses (on ppm unit) of the off-shore experiment test data acquired by marine small-loop electromagnetic system (modified from Ko *et al.* (2012)). Note that the anomaly appears as a face-to-face ellipses shape and is marked in a circle.

해양 환경에서 송신원으로부터 방사된 전자기파는 해수의 높은 전기전도도로 인하여 에너지가 빠르게 감쇄하는 특징을 가진다. 따라서 해양 환경에서 일정 수준 이상의 반응 값 측정을 위해 해양 전자탐사 장비는 육상 장비보다 큰 출력 모멘트를 요구한다. 출력 모멘트를 높이기 위한 방법으로는 송신 코일에 흐르는 전류의 세기를 증가시키거나 혹은 출력 코일의 단면적을 크게 해야 하는데 크기를 키우는 것은 운용적인 면에서 제약이 따른다. 2012년에 수행된 현장 실험에서는 시스템의 모멘트를 크게 하면서 해상에서의 효율적 운용을 위하여 송신 루프 안에 수신 루프가 존재하는 구조, 즉 monostatic 구조로 장비를 설계하였으며, 송신 루프의 크기는 약 세로 3 m, 가로 2 m이며 수신 루프는 16 cm 지름의 원모양으로 사각루프 내부에 위치한다. 2012년 현장 실험 결과 해저면에 투하된 막대 모양의 금속 이상체에 의한 반응을 약 2 m 센서 고도에서 획득하여 일차적으로 해양 환경에서 소형 루프 탐사 시스템의 출력 모멘트가 적절함을 알 수 있었다(Ko *et al.*, 2012). 탐사 시스템은 ROV (Remotely Operated Vehicle)에 시스템을 부착하여 모선 상에서 원격조종 하는 방법으로 운용되었고 수심 약 300 m의 해역에서 막대모양의 금속 이상체를 해저에 투하하고 이상체를 중심으로 1 m의 탐사라인을 설계한 후 고도 2 m를 유지하며 탐사를 수행하였다. Fig. 1은 현장 실험결과 중 570 Hz에서의 반응을 나타낸 것이다. 검은 원으로 표시된 금속체에 의해 나타난 이상반응 양상을 관찰해보면 하나의 막대 현상의 금속체임에도 불구하고 전자기 반응이 이상체를 중심으로 대칭적인 두 갈래의 타원 형태로 나뉘어 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 반응양상은 90 Hz를 제외한 570, 3330, 20010 Hz 주파수 대역에서 관찰되었고 이런 반응양상의 요인을 분석하기 위해 이상체의 크기와 모양을 변화시키면서 수치

모델링을 수행하였다.

전자기 반응양상 분석

현장 상황을 유사하게 모사하기 위해 모델은 공기, 바다 및 기반암으로 이루어진 수평 다층구조로, 수심은 300 m로 설정하였다. ROV에 의한 센서 견인 시 센서의 고도(altitude)는 해저면으로부터 2 m로 설정하였다. 송신원과 주파수 대역 또한 현장실험에서와 유사하게 4개의 이극자(bipole)를 사각 루프로 구성하여 모델링을 수행하였으며, 주파수는 실험에서 사용했던 4개의 주파수 외에 15 Hz를 추가하였다. 금속 이상체의 크기와 형태를 변수로 하여 4개의 모델을 설정하였고 모델에 대한 상세한 설정 값은 Table 1에 나타내었다. FPSB (Form Plate Size Bigger)와 FRSB (Form Rod Size Bigger)는 이상체의 크기가 송신원(3×2)보다 큰 크기이며 각각 판상과 막대모양의 형태를 띄고 있다. FRSS (Form Rod Size Smaller)와 FPSS (Form Plate Small Size)는 송신원의 크기보다 작으며 각각 막대모형과 판상의 형태를 가진다. 모델에서 설정한 금속 이상체의 전기 전도도는 모두 20 S/m 이다. 각 모델에 대한 모델링의 결과 중 570 Hz에서의 반응 양상을 실수 부분과 허수 부분을 나누어 Fig. 2에 나타내었다. FPSB와 FRSB의 반응

Table 1. Parameters of modeling. There are 4 models with respect to target size and shape.

Model	Target size	Target shape	Electric conductivity
FPSB	$6 \times 6 \times 2$	Plate	20 S/m
FRSB	$6 \times 2 \times 2$	Rod	
FRSS	$1 \times 0.2 \times 0.2$	Rod	
FPSS	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$	Plate

Fig. 2. Response patterns depending on four combinations of model and source sizes at the frequency 570 Hz. The (a) real and (b) imaginary parts are displayed in the left and right columns, respectively. One can easily find that response pattern is more dependent on the shape of object, rather than relative size of an object and a sensor.

양상을 비교해보면 FPSB는 관상 모양의 이상체 중심으로 반응이 원의 형태를 띠는 반면, FPSB는 막대모양의 이상체를 중심으로 양쪽으로 길쭉한 타원형의 반응이 대칭적으로 나타난다. FRSS와 FPSS의 반응 양상 또한 FPSB와 FRSB와 유사하게 금속 이상체의 모양에 따라 좌우되어 나타난다. 이는 이상체의 모양에 따라 반응 형태가 다르게 나타나고 있음을 보여주는 것이다. 이상체의 모양은 같고 크기가 다른 FPSB와 FPSS, FRSB와 FRSS를 각각 비교해보면 반응양상이 유사하

게 나타남을 확인 할 수 있으며 이상체의 크기가 클수록 획득되는 반응값이 증가하는 것을 알 수 있다. 결론적으로 현장 실험 결과인 Fig. 1과 수치 모델링 값을 비교해보면 현장에서 막대모양의 금속 이상체에 의한 특징적인 반응 양상은 이상체의 크기보다 모양에 영향을 받아 쌍극자(dipole) 형태의 전자기 반응이 일어난 것임을 확인할 수 있다. 여기서 쌍극자 형태의 반응이란 N극에서 S극으로의 자기력선 분포 형태와 같이 두 개의 극에서 나타나는 반응 양상을 의미한다.

Fig. 3. Schematic diagram of numerical experiments according to the distance between the system and a metallic object on the seafloor. Conductivity of a metal object is 20 S/m and the dimension of the object is $1 \times 0.2 \times 0.2$ m.

시스템 운용 시 탐사고도와 주파수

본 전자탐사 시스템은 ROV에 연결되어 운용되기 때문에 해저면과 일정한 고도를 유지하며 탐사할 수 있다. 센서의 일정한 고도 유지가 자료에 있어 미치는 영향과 적정 고도에 대한 정보를 알아보기 위해 수치 모델링을 수행하였다. 모델링은 Fig. 3과 같이 수심 300 m 환경에서 금속 이상체 ($1 \times 0.2 \times 0.2$ m, 막대 모양)를 해저면 위에 설정하고 탐사장비의 고도를 1 ~ 15 m로 변화시키며 모델링 하였다. 금속의 전기전도도는 20 S/m 이다. Fig. 4에 계산된 ppm값의 절대값을 취한 후 log 스케일에서 각 주파수 별로 나타내었다. 수치 계산된 반응 값 ppm의 실수부(Fig. 4a), 허수부(Fig. 4b) 두 반응값 모두 탐사

고도가 낮아질수록 급격히 증가한다. 다만, 20010 Hz의 주파수에서는 반응값이 양에서 음으로, 혹은 음에서 양으로 변화하는 높이가 존재함을 알 수 있다. 이는 해양 탐사 시 센서의 탐사 고도에 따라 반응값이 상당히 달라짐을 의미하는 것으로 실제 탐사 시에 일정한 고도유지가 양질의 자료획득에 꼭 필요한 사항임을 의미한다.

해양 전자탐사의 반응의 크기는 또한 주파수에 따라 달라지며 주파수의 영향 정도를 분석하기 위해 탐사고도를 1 m 설정한 후 주파수에 따른 반응값을 계산하여 Fig. 5에 표현하였다. 그림에서 허수부와 실수부 모두 주파수가 증가함에 따라 반응값이 증가하지만 허수부가 실수부 보다 주파수의 변화에 따른 변화도가 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 허수부가 주파

Fig. 5. The value of real and imaginary parts of the ppm for the same model as in Fig. 4. Note that the imaginary part is more sensitive to the frequency variation than real part.

Fig. 4. The absolute values of response for a model shown in Fig. 3 with respect to altitude. The (a) real and (b) imaginary parts are shown, respectively. The response is sharply decreased with increasing altitudes.

Fig. 6. Contour map of the ppm as function of altitude and frequencies, (a) is real part and (b) is imaginary part of ppm, respectively. There are distortions of response when altitude goes beyond 2.5 m in real part and 4 m in imaginary part.

수에 대해 민감하다는 것을 뜻하는 것으로 이는 실수부 보다 다중주파수 탐사 해석 시 유리한 정보를 제공함을 나타낸다.

주파수와 탐사고도 사이의 관계

이상에서 모델링 결과 분석을 통하여 탐사 고도와 주파수 대역이 탐사 반응값에 끼치는 영향이 크다는 것을 확인하였으며, 여기에서는 현장 탐사 시 적절한 고도와 주파수 대역에 대한 지침을 마련하기 위해 주파수와 탐사장비 고도에 따른 금속 이상체 판별 정도를 분석하였다. 분석은 획득되는 반응값이 1차장과 2차장의 상관비임을 착안하여 Kang *et al.* (2010)이 제시한 설계변수 설정방법을 응용해서 얻은 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 수평축은 탐사고도, 수직축은 주파수이며 이 두 변수에 따른 반응의 ppm 값을 실수부와 허수부로 나누어 나타낸 것이다. 주파수가 높을수록 탐사고도가 낮을수록 획득되는 반응값이 커짐을 확인할 수 있다. 허수부는 Fig. 5에서의 결과와 같이 주파수에 더욱 민감하게 반응하므로 실수부 보다 등고선의 기울기가 주파수 쪽으로 급하게 나타난다. 또한 일정 탐사고도 이상으로 가면 반응값의 왜곡이 나타나기 시작한다. 이런 왜곡현상은 고주파수일수록 낮은 탐사고도에서 나타나며 저주파수 대역에서는 나타나지 않는다. 실수부의 경우 약 2.5 m에서부터, 허수부는 약 4 m에서부터 반응값의 왜곡이 나타난다. 이를 통해 해양환경에서 20 kHz 주파수 대역까지의 탐사를 위해서는 2.5 m 이하의 탐사고도를 유지해야 한다는 결론을 도출해 낼 수 있다.

결 론

해저열수 광상 탐사를 위해 새롭게 개발된 소형 루프형 전자탐사장비의 테스트 결과를 삼차원 적분방정식 코드를 이용하여 심층적으로 분석하였다. 분석결과를 통해 3가지의 결론을 도출하였으며, 본 연구에서 얻은 결과들은 향후 실험역 탐사 시 주요 지침이 될 것이다.

1. 현장실험을 통해 획득된 금속 이상체에 대한 이상반응 양상에 대한 모델링 결과, 탐사장비와 금속 이상체 간의 상대적인 크기 차이 보다는 금속 이상체의 모양에 따라 획득되는 반응 양상이 달라짐을 확인 하였다. 이를 통해 현장 실험에서 나타난 쌍극자 폐턴의 반응 양상은 막대모양의 금속 이상체에 의한 것을 확인하였다.

2. 해양 전자탐사 시 획득되는 반응값은 탐사 고도에 민감하게 변화하므로 일정한 탐사고도가 정확한 탐사에 중요한 요소이며, 특히 반응값의 허수부는 주파수 대역에 따라 변화 정도가 높으므로 다중주파수 탐사 시 허수부의 자료분석이 실수부 보다 뚜렷한 정보를 줄 것이다.

3. 주파수와 탐사고도 사이를 변수로 한 모델링을 통해 본 탐사 시스템의 최대 주파수 대역인 20 kHz를 이용한 탐사를 위해서는 2.5 m 이하의 탐사고도를 유지해야 한다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 한국해양과학기술진흥원의 국토해양기술연구개발사업인 통가 해저열수광상개발사업단의 협동과제로서 수행되었으며 이에 감사드립니다. 아울러 3차원 적분방정식 코드(INTEM3D) 사용에 협조해주신 유타대학교(Univeristy of Utah, CEMI)의 Michael Zhdanov 교수에게도 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- Constable, S., 2010, Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration, *Geophysics*, **75**(5), 75A67-75A81.
- Gochioco, L., and Ruev, F., 2006, Detecting and imaging hard-to-find abandoned wells and pipelines, *The Leading Edge*, **25**(3), 358-361.
- Huang, H., and Fraser, D. C., 2000, Airborne resistivity and susceptibility mapping in magnetically polarizable areas,

- Geophysics*, **65**(2), 502-511.
- Huang H., and Fraser, D. C., 2002, The use of quad-quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping, *Geophysics*, **67**(2), 459-467.
- Kang, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2010, An Investigation in operating and design parameters for gas hydrate exploration using marine CSEM, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **47**(2), 139-150.
- Kang, S., Seol, S. J., Chung, Y., and Kwon, H.-S., 2013, Pitfalls of 1D inversion of small-loop electromagnetic data for detecting man-made objects, *Journal of Applied Geophysics*, **90**, 96-109.
- Ko, H. C., Lee, S. K., Park, I. H., Cho, S.-J., Won, I. J., Funak, F., and Kim, H. S., 2012, Feasibility study of ROV-towed marine loop electromagnetic system through off-shore experiment, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **49**, 766-777.
- Lee, K. H., Jang, H., Jang, H., and Kim, H., 2011, Sensitivity analysis of marine controlled-source electromagnetic methods to a shallow gas-hydrate layer with 1D forward modeling, *Geosciences Journal*, **15**(3), 297-303.
- Müller, H., Dobeneck, T. V., Hilgenfeldt, C., Filipo, B. S., Rey, D., and Rubio, B., 2012, Mapping the magnetic susceptibility and electric conductivity of marine surficial sediments by benthic EM profiling, *Geophysics*, **77**(1), 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*, **31**(2), 123-140.
- Nabighian, M. N., 1988, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Volume 1, Theory, Soc of Exploration Geophysicists.
- Nakayama, K., and Saito, A., 2011, Marine time-domain electromagnetic technologies using ROV, *BUTSRI-TANSA*, **64**(4), 255-266.
- Noh, K., Kang, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, Computation of apparent resistivity from marine controlled-source electromagnetic data for identifying the geometric distribution of gas hydrate, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **15**(2), 75-84.
- Song, S.-H., Kim, R.-Y., Kang, H.-J., and Cho, I.-K., 2011, Applicability of the small-loop EM method in the shallow marine environment, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **14**(2), 152-157.
- Swidinsky, A., Hölz, S., and Jegen, M., 2012, On mapping seafloor mineral deposits with central loop transient electromagnetics, *Geophysics*, **77**(3), E171-E184.
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Hanson, D. R., and Hall, T. M., 1997, GEM-3: A monostatic broadband electromagnetic induction sensor, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **2**(1), 53-64.
- Zhdanov, M. S., Lee, S. K., and Yoshioka, K., 2006, Integral equation method for 3D modeling of electromagnetic fields in complex structures with inhomogeneous background conductivity, *Geophysics*, **71**(6), 333-345.