

해양 소형 루프 전자탐사 적용을 위한 전자기 반응 계산

최지향^{1),2)}, 송윤호¹⁾, 이태종¹⁾, 이성곤¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 국토지질연구본부, ccile137@gmail.com

²⁾서울대학교 에너지자원공학과

Numerical Responses of Marine Small-loop EM Surveys

Jihyang Choi^{1),2)}, Yoonho Song¹⁾, Tae Jong Lee¹⁾, Seong Kon Lee¹⁾

¹⁾Geological Research Division, KIGAM

¹⁾Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University

요약: 송수신기 일체형인 소형 루프 시스템을 채택한 해저 전자탐사 기술의 적용 가능성을 확인하는 과정의 시작 단계로 자기 쌍극자 송신원을 이용한 층서구조에서의 전자기 반응을 계산하였다. 전도성인 해양 환경에서 측정되는 신호의 크기가 작은 한계가 있지만 전자기장 반응 해석을 통해 지하 하부의 정보를 얻을 수 있었다. 기반암 위의 층이 바닷물보다 저항성인 해저 지각인 경우와 전도성인 열수광상인 경우에 따라 반응이 달라짐을 확인하였고, 그 층의 두께에 따라서 변화하는 전자기 반응을 계산하여 탐지 가능한 층의 두께를 예상할 수 있었다. 송수신기가 모두 바다 속에 위치하기 때문에 송수신기의 배치 방법과 송수신기가 해저면에서 떨어지게 될 때 신호의 반응 변화를 파악하였다. 해양 소형 루프 전자탐사의 실제 적용을 위해서 이상의 연구들이 기초가 될 것으로 기대된다.

주요어: 해양 전자탐사, 소형 루프 탐사, 열수광상, 자기 쌍극자, 층서구조

1. 서론

전자탐사는 가장 오래된 물리탐사법의 하나로 지하 구조 분석이나 전도성 이상대 탐지에 이용되어 왔다. 특히 소형 루프 전자탐사는 송수신기로 소형 루프를 이용하는 비접촉식 탐사법으로 기동성과 편의성이 크다는 장점 덕분에 적용도가 가장 높은 천부탐사법 중 하나이다. 송수신기 일체형 탐사기기가 개발된 이후 소형 루프 전자탐사는 환경 오염대 탐지와 모니터링 등에 활발히 적용되고 있다(Song et al., 2001; Song, 2006). 보급기기인 GEM-2 시스템(Won et al., 1996)은 휴대용 다중주파수 탐사기기로 천부 육상 탐사에서 널리 쓰이고 있다. 우리는 이미 검증된 GEM-2 시스템을 이용해 해저 열수광상을 탐지하는 소형 루프 전자탐사 시스템을 구성하고자 한다. 그러나 해양환경에서는 탐사기기 운용을 위한 기술적인 연구뿐 아니라 전도성 환경의 신호대역에 대한 고찰이 필요하다. 이번 연구에서는 해저면에 넓은 광상으로 분포하는 전도성 열수광상의 존재 여부를 확인하고 층의 두께를 탐지하여 광상 규모를 예측할 수 있는 해석 기술의 기초 단계로 해양 층서구조에 대한 전자기 반응을 계산한다. 해저 기반암 위층의 두께와 전도도 변화에 따른 신호의 감쇄 특성을 송수신기 배열에 따라 비교해 본다. 또한 실제 탐사의 경우 송수신기가 해저면 위로 이동하게 될 것이므로 송수신기의 높이가 신호에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

2. 모델링

현재 널리 쓰이고 있는 휴대용 전자탐사 기기인 GEM-2 시스템의 구조를 기본으로 하여 관상 구조물 안에 송신 루프와 수신 루프를 고정한 형태를 가정하였다. 송수신기 일체형이므로 수평 동일면(Horizontal Co-Planar, HCP) 배열과 수직 동일면(Vertical Co-Planar, VCP) 배열(Fig. 1)을 사용할 수 있다. 공기층의 영향을 무시하기 위해 충분히 깊은 바다 아래 해저층수가 존재한다고 가정한다. 바다와 해저 기반암 사이의 제 2층이 10 S/m의 열수층 또는 1 S/m의 해저지각이며 층의 두께는 h_2 이다. 송수신기 간 거리는 r , 송수신기가 해저면에서 떠 있는 높이는 H 이다. 이 세가지 변수들을 변화시키며 송수신기 배열에 따른 임피던스를 계산하여 탐지 가능한 측정 범위를 파악하려 한다.

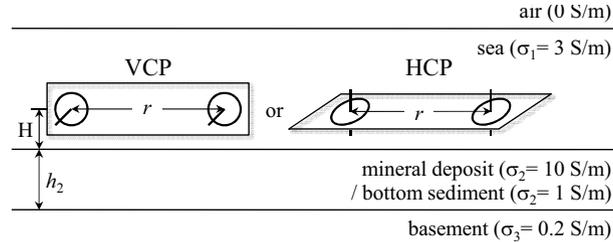
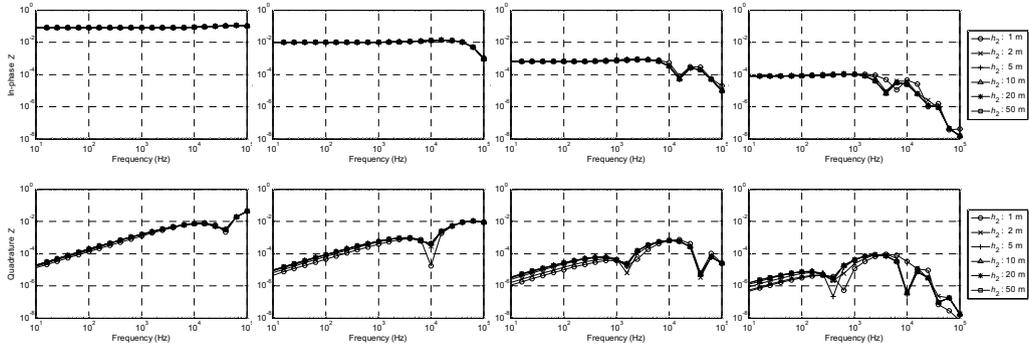


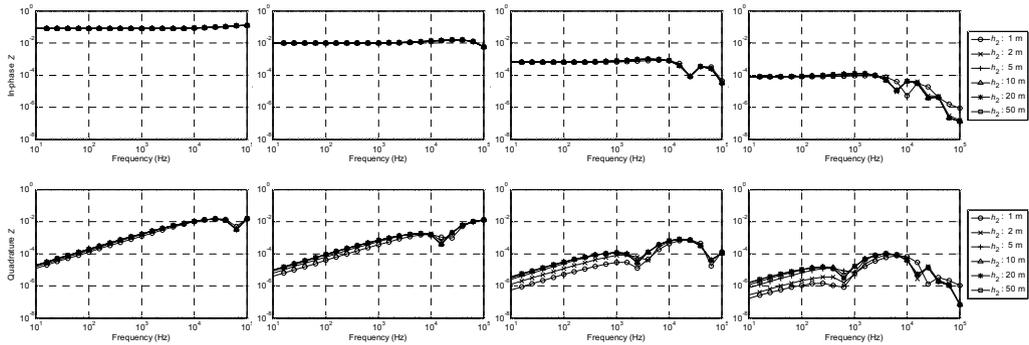
Fig. 1. Conceptual model of marine small-loop EM survey. Mineral deposit or bottom sediment under the deep sea lies on the basement. A source/receiver integrated EM survey system in the sea layer can be adopted as HCP and VCP configurations.

3. 전자기장 반응

해양 전자탐사는 전도성인 바다 속에서 전자기 감쇄가 크게 일어나기 때문에 기기적으로 탐지 가능한 범위 내의 전자기 반응을 해석해야 한다. 반무한 공간에서의 1차 자기장은 주파수와 송수신 간격의 함수로 나타나게 되는데, 송수신 간격이 r 로 고정되었을 때 동상(in-phase) 성분은 $1/4\pi r^3$ 의 크기로 일정한 값을 유지하고 이상(quadrature) 성분은 log-log 축에서 선형 증가한다. 그리고 두 성분 모두 주파수가 어느 이상 증가하면 감쇄 반응이 나타나게 된다. 이와 유사한 양상을 해양 층서구조의 전자기 반응에서도 확인할 수 있다. 아래의 Fig. 2는 2층이 열수광상이고 송수신기가 해저면에 붙어있는 경우를 가정하여 주파수의 증가에 따른 임피던스의 절대값을 보여준다. 송수신기 일체형 기기의 크기 제약 때문에 송수신기 간 거리의 최대값은 10 m로 제한했다. 송수신기 간 거리가 가까울수록, 주파수가 낮을수록 전자기 반응은 위에서 말한 반무한 공간의 반응과 유사하다. 그러나 송수신기 간 거리가 증가함에 따라 더 낮은 주파수 대역까지 유도영역에 포함되어 2층의 두께 변화에 따른 구분이 나타나게 된다. 전체적으로 VCP 배열이 HCP 배열보다 2층의 두께 차이에 대한 반응이 조금 크게 나타났지만 두 경우 모두 비슷한 감쇄 패턴을 보이면서 h_2 가 10 m 이상이 되면 반응의 구분이 어려울 정도로 차이가 거의 보이지 않았다. 송수신기 간 거리의 제한으로 10 m 이상의 두께에 대한 열수광상의 탐지는 어려울 것으로 예상할 수 있다. 또한 송수신 간격 증가에 따른 신호의 감소를 탐사 시 고려해야 할 것이다. 다음으로 Fig. 3은 h_2 를 5 m로 고정하고 송수신 간격이 5, 10 m로 일정할 때 해저면에 대한 송수신기의 높이(H)에 따른 전자기장 반응이다. 여기서 HCP 배열의 반응을 보면 H 가 증가했을 때 전자기 감쇄가 상대적으로 고주파에서 시작되며 이는 송수신기 아래의 바다물에 의한 신호의 손실로 보인다. 한편 VCP 배열의 경우에는 임피던스의 크기에만 작은 변화가 있다. 실제 탐사 시 두 가지 송수신기 배열을 함께 파악하면 전자기 반응에서 송수신기 높이의 영향을 분리해 낼 수 있을 것이다.

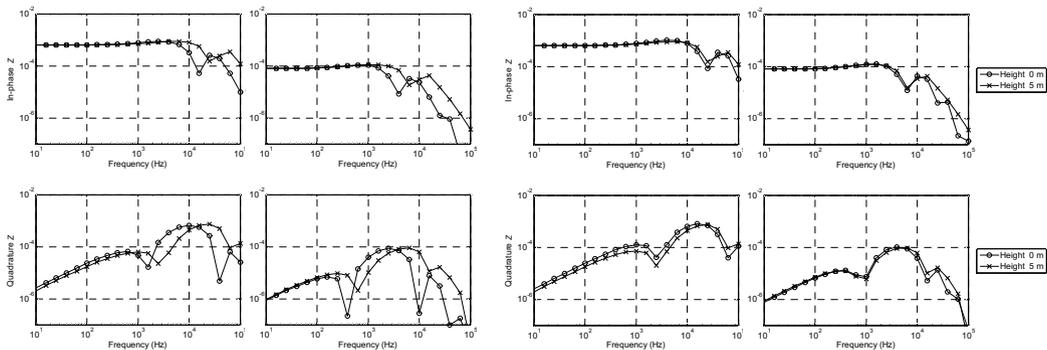


(a) HCP



(b) VCP

Fig. 2. HCP (a) and VCP (b) responses in terms of impedance as a function of frequency when the thickness of the mineral deposit layer (h_2) of 10 S/m varies. Sources and receivers are located right on the sea bed ($H = 0$ m). Each column represents EM responses when the separations between source and receiver are 1, 2, 5, and 10 m (left to right).



(a) HCP

(b) VCP

Fig. 3. HCP (a) and VCP (b) responses in terms of impedance as a function of frequency when the height (H) of a source-receiver varies. The thickness of the marine hydrothermal deposits (10 S/m) is bounded as 5 m. Left and right columns show EM responses when separations between source and receiver are 5 and 10 m, respectively.

4. 결론

탐사 대상인 열수광산의 부존 여부와 규모를 성공적으로 추정하기 위해서는 열수광상층 또는 해저 지각의 두께를 명확히 탐지할 수 있어야 한다. 현실적으로 제작가능한 규모인 10 m 이내의 송수신기 간격으로 제한된 긴 판상의 일체형 소형 루프형 탐사 기기를 가정하여 전자기 반응을 계산하였다. 주파수에 따라 변하는 임피던스 반응을 통해 해양환경에서 전기전도도 0.2 S/m의 해저 기반암 위층의 두께가 10 m 이상인 경우에는 구분이 어려움을 확인하였다. 그리고 송수신기 배열방법에 따라 송수신기가 해저면으로부터 떠 있는 높이 변화가 주는 영향이 다르므로 이를 실제 탐사 환경에 적용할 수 있는 기술정보를 얻었다. 그러나 현재 계산된 시스템으로는 기기의 제작과 운용이 어렵고, 측정신호와 기기잡음의 크기가 비슷한 정도라서 이대로는 실제 적용이 어려운 것이 사실이다. 앞으로 우리 연구진은 실제 적용가능한 시스템 구축을 위해서 송신신호의 크기를 증가시키는 송수신기 배열방법, 탐사 대상에 대한 반응 정보를 포함하는 이차장 계산, 실제 운용가능한 크기의 시스템 가정 등의 추가적인 연구를 계속할 예정이다.

사사

이 논문은 국토해양부의 해양과학기술연구개발사업 '소형 루프형 해양 전자탐사 기술 개발'과 한국지질자원연구원의 기본사업, Brain Korea 21 Project의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- Song, S.-H., 2006, Spatial analysis of small-loop electromagnetic survey data in a seawater intrusion region, *Exploration Geophysics*, **37**, 114-120.
- Song, Y., Park, S. G., Seol, S. J., Cho, S.-J., Chung S.-H., 2001, A geophysical survey result over a hydrocarbon contaminated site, *Proceedings of 2001 KSEG Special Symposium*, 112-140. (in Korean with English abstract)
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor, *Journal of Environment & Engineering Geophysics*, **1**, 129-137.