

In-loop 시스템을 이용한 해양 전자탐사 모델링

최지향^{1),2)}, 송윤호¹⁾, 김희준³⁾, 이태종¹⁾, 이성곤¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 국토지질연구본부, cecile137@gmail.com

²⁾서울대학교 에너지자원공학과

³⁾부경대학교 에너지자원공학과

Marine EM Modeling using In-loop System

Jihyang Choi^{1),2)}, Yoonho Song¹⁾, Hee Joon Kim³⁾, Tae Jong Lee¹⁾, and Seong Kon Lee¹⁾

¹⁾Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²⁾Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University

³⁾Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

1. 서론

해양 전자탐사는 바닷물의 전기전도도 특성 때문에 적용 가능성이 낮게 평가되어 왔으나 1990년대 후반 이후로 탄화수소 개발에 탄성과 탐사의 보조 수단으로 이용되면서 연구 결과가 지속적으로 발표되고 있다. 해양 전자탐사의 적용 대상은 해저 지각 하부의 고비저항성 탄화수소층 뿐 아니라 심해저의 천부 퇴적층과 해저 열수광상층까지 포함할 수 있다(Song et al., 2009). 다중주파수 소형 루프형 전자탐사법의 해저 열수광상 탐지 가능성이 송수신기가 분리된 bi-static 형태의 안테나에 대한 반응 계산으로 확인되었으나(최지향 등, 2009) 실제 탐사에서 운용하기에는 안테나가 너무 크고, 출력과 해상도도 충분하지 않다. 육상 탐사용 다중주파수 전자탐사 기기인 GEM-3 시스템(Won et al., 1997)은 송신루프 속에 수신루프가 들어있는 일체형의 mono-static 형 안테나 시스템을 채택하여 더 작은 루프를 이용하여 송신 모멘트를 높일 수 있고 고해상도 결과를 얻을 수 있다. 이러한 in-loop 형태의 안테나 시스템에서 해양 환경의 전자기 반응을 계산하려면 효과적으로 2차장 반응을 분리하는 기술이 필요한데, Bucking 코일(Won et al., 1997)의 활용은 그 한 예이다. 이 연구에서는 해저 층서구조에서 bucking 코일을 활용하는 mono-static 시스템을 이용할 경우 열수광상층의 두께에 따른 전자기 반응을 계산하고, 열수광상 탐지 가능성을 다시 한번 확인하고자 하였다.

2. In-loop 시스템의 전자탐사

전류가 시계 방향으로 회전하는 반지름 a 인 송신루프 Tx 안에 수신루프 Rx가 있는 in-loop 시스템(Fig. 1)에서 Tx 내부의 임의 지점에서 측정되는 수직 자기장을 계산해 보기로 한다. Tx와 중심점이 동일한 수신루프 Rx-C에서 수평거리 ρ 만큼 떨어진 Rx-L에서의 수직방향 자기장 H_z 은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$H_z(\rho, z) = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{u_1} R_{TE}(1) J_1(\lambda a) J_0(\lambda \rho) d\lambda \quad (1)$$

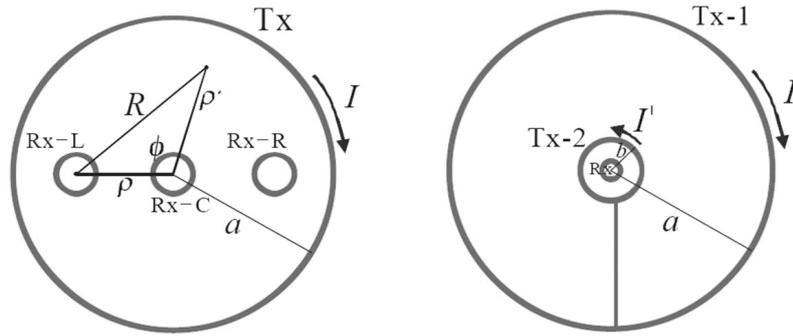


Fig. 1. Loop configurations in mono-static antenna system. Vertical magnetic field can be calculated at an arbitrary point in a transmitter coil (left). In this study (right), bucking coil, Tx-2 is co-axial with transmitter coil, Tx-1 and receiver coil, Rx is located at the center.

식(1)에서 z 는 루프가 위치하는 심도, I 는 전류의 크기, λ 는 파장의 길이, u 는 수직 파수, R_{TE} 는 반사계수이며, J_0 과 J_1 는 Bessel 함수이다. 구현하고자 하는 mono-static 형태의 안테나에서는 수신루프 Rx가 Fig. 1의 오른쪽과 같이 송신루프의 중심에 위치하게 되므로($\rho=0$) 수직 자기장은 좀 더 간단히 정리된다.

이러한 in-loop 시스템에서는 1차장의 크기가 너무 커서 우리가 얻고자 하는 2차장의 신호를 성공적으로 얻기 위해서는 1차장의 처리가 꼭 필요하다. Primary bucking이라고 하는 개념은 송신코일 Tx-1 내부에 전류의 회전방향이 반대이고 중심점이 같은 bucking 코일 Tx-2를 추가하여 중심점에서 측정되는 1차장을 제거하는 방법이다. 반지름 b 인 Tx-2를 반지름 a 인 Tx-1에 두면 Tx-1의 감은수는 $N=a/b$ 이어야 한다. 식(2)의 적분을 Hakel 변환을 이용하여 Tx-1과 Tx-2의 중심점에서의 수직 자기장을 각각 계산하면

$$H_{z1}(0, z) = \frac{NI}{2a}(1+ika)e^{-ika} + \frac{NIa}{2} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{u_1} R_{TE} J_1(\lambda a) d\lambda,$$

$$H_{z2}(0, z) = -\frac{NI}{2a} \left(1 + \frac{ika}{N}\right) e^{-ika/N} - \frac{Ia}{2N} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{u_1} R_{TE} J_1\left(\frac{\lambda a}{N}\right) d\lambda$$

과 같고 Rx에서 측정되는 전자기 반응은 두 수직 자기장의 합으로 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} H_z &= H_{z1} + H_{z2} \\ &= \frac{NI}{2} \left\{ (1+ika)e^{-ika} - \left(1 + \frac{ika}{N}\right) e^{-ika/N} \right\} \\ &\quad + \frac{NIa}{2} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{u_1} R_{TE} J_1(\lambda a) d\lambda - \frac{Ia}{2N} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{u_1} R_{TE} J_1\left(\frac{\lambda a}{N}\right) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

이때 우변의 첫번째 항은 육상 탐사에서는 0이 되지만 해양환경에서는 0이 되지 않는다. 하지만 동일한 주파수대역에서는 일정한 값을 갖게 되므로 처리 가능하고, 두번째 항에 나타나는 이차장 반응을 구분하기 쉽게 된다.

3. 전자기장 반응 계산

송수신기 일체형인 in-loop 시스템(Fig. 2)은 열수광상층이 존재하는 해저면에 수평으로 위치하며 떠 있는 높이는 H이다. 충분히 깊은 바다 아래 해저 층서가 존재하여 공기층의 영향은 무시된다고 가정하고, 반지름이 각각 5 m, 1 m인 송신코일 Tx, bucking 코일 Bx의 동일중심점에 쌍극자 형태의 Rx를 놓는다. 열수광상층의 두께 h_2 와 in-loop 시스템의 높이 H의 값을 바꿔가며 bucking된 전자기 반응의 변화를 Fig. 3에서 나타내었다. 안테나가 해저면에 붙어있는 경우($H=0$), 전 주파수 영역에서 열수광상층의 두께에 따라 전자기 반응의 양상이 달라짐을 확인할 수 있다. 열수광상층이 얇을 때($h_2 < 5$ m)에는 열수광상 부존 여부에 따라 반응이 확연히 달라지지만 층이 두꺼워질수록 구분이 어렵다. 안테나가 해저면에서 떨어지게 되면 이 구분은 더욱 어려워지고, 열수광상층 두께에 따른 차이를 확인할 수 있는 주파수 대역도 좁아지게 된다. 안테나의 높이가 10 m 정도로 뜨게 되면(Fig. 3 오른쪽) 동상성분은 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 미약한 차이를 보이고 이상성분은 거의 층의 두께 차이를 구별할 수가 없다. 따라서 현재 시스템의 전자기 반응 신호로 해저 지각을 해석하기 위해서는 탐사기기의 높이를 최대한 낮추어야 할 것이다.

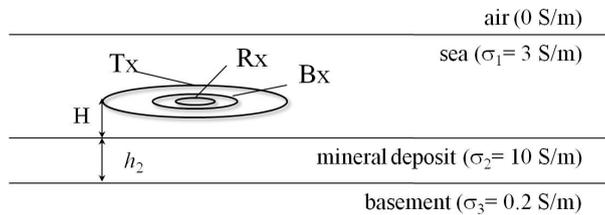


Fig. 2. Conceptual model of marine small-loop EM survey. Mineral deposit under the deep sea lies on the basement. In-loop system including a bucking coil in a transmitting coil is located in the sea layer.

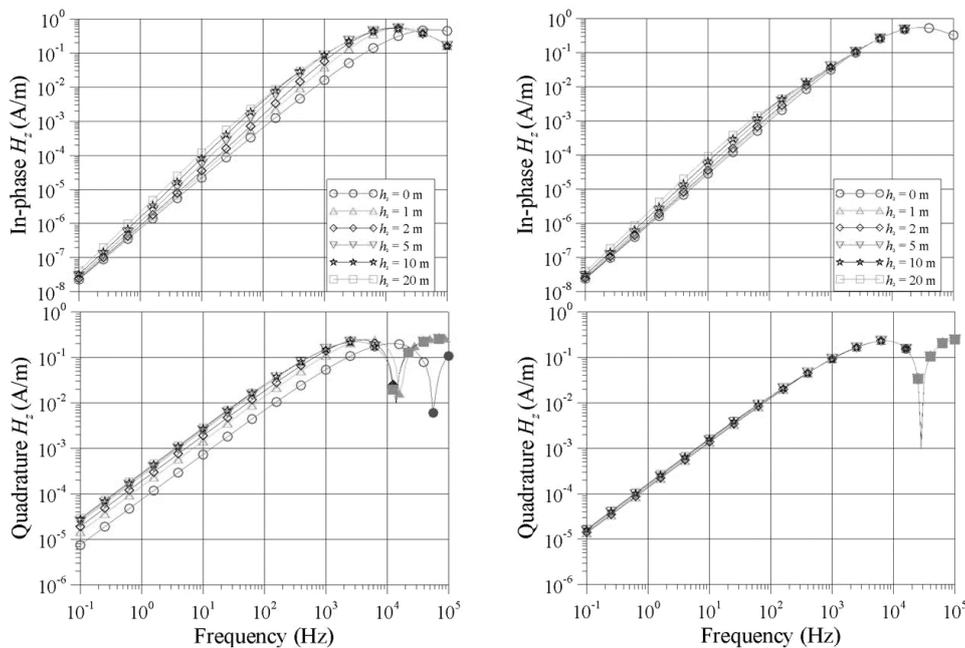


Fig. 3. Bucked-out EM responses as a function of the thickness of the mineral deposit layer (h_2) of 10 S/m varies. Antenna systems are located at the heights of 0 m (left) and 10 m (right) from marine subsurface. Solid symbols represent positive responses otherwise negative.

4. 결론

해양 환경에서 운용가능하고 고해상도 자료를 얻을 수 있는 in-loop 시스템의 다중 주파수 소형루프형 탐사기기의 전자기 반응 계산을 통해 해저 열수광상층의 두께에 따른 임피던스의 변화 양상을 확인 하였다. 열수광상의 부존 여부에 대한 반응이 확실히 나타나며 열수광상층의 두께가 5 m 미만인 경우에는 층의 두께에 대한 반응 차이도 꽤 뚜렷하게 나타나지만 층의 두께가 그 이상 두꺼워지면 더 이상의 명확한 반응 차이를 볼 수가 없었다. 안테나가 해저면에서 떨어지게 되면 층 두께의 구분은 더욱 어려워지고, 10 m 정도에서는 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 층서 구분이 나타나게 되어 안테나와 해수면 간의 거리가 전자기 신호의 신뢰성에 큰 영향을 미친다는 것을 확인했다. 안테나를 해수면에 가깝게 유지하며 탐사를 진행할 수 있게 되더라도 실제 탐사 기기의 크기 변화에 따라 송신루프의 모멘트를 더 높일 수 있는 방법을 고려해야 한다. 실제 해양 열수광상 탐지에 운용하기 위한 전자탐사 기기의 개발을 위해서는 안테나의 출력과 탐사 방법에 대한 추가적인 연구가 지속적으로 필요할 것이다.

사사

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

참고문헌

- 최지향, 송윤호, 이태종, 이성곤, 2009, 해양 소형 루프 전자탐사 적용을 위한 전자기 반응 계산, 2009 한국지구물리·물리탐사학회 학술대회 초록집, 67-70.
- Song, Y., Choi, J., and Kim, H. J., 2009, A sensitivity analysis of marine small-loop EM survey, *Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium*, 87.
- 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*, 53-64.