

천해 환경에서 소형루프 전자탐사의 적용성

송성호¹ · 김래영² · 강혜진² · 조인기^{2*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원
²강원대학교 지구물리학과

Applicability of the Small-Loop EM Method in the Shallow Marine Environment

Sung-Ho Song¹, Rae-Young Kim², Hye-Jin Kang², and In-Ky Cho^{2*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation
²Kangwon National University, Department of Geophysics

요약: 소형루프 전자탐사법은 신속한 비파괴 물리탐사법으로 천부 지반조사나 환경오염대의 조사에 매우 효과적인 방법이다. 특히 수심이 낮은 천해지역 조사의 경우에는 신호의 크기가 크고, 잡음이 적으며, 매우 신속한 조사가 가능한 매우 효과적인 조사방법중의 하나이다. 그러나 이러한 소형루프 전자탐사법의 장점에도 불구하고, 천해환경에서의 적용은 가탐심도에 대한 우려와 인식부족으로 인하여 거의 적용이 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 1차원 모델링 및 역산 프로그램을 이용하여 천해지역에서 소형루프 전자탐사 자료의 반응양상을 분석하였다. 분석결과, 소형루프 전자탐사는 수심이 깊지 않은 해양지역 조사에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한 이론 및 현장자료에 대한 수심을 고려한 1차원 역산을 통하여 해수면 하부 지층의 전기비저항 분포에 관한 정보를 보다 정량적으로 추정할 수 있었다.

주요어: 소형루프 전자탐사, 1차원 역산, 천해환경

Abstract: The small-loop electromagnetic (EM) method is one of the rapid and non-destructive geophysical methods and has been used widely for many geophysical investigations, particularly for shallow engineering and environmental surveys. Especially in the shallow marine environment, the small-loop EM technique is very effective because of rapid and convenient data acquisition, large signal and low noise level. However, the method has been rarely applied in the very conductive marine environment since its penetration or investigation depth might be considered too low. In this study, we demonstrated that the small-loop EM method can be effectively applied in the extremely conductive marine environment through the analysis of 1D small-loop EM data. Furthermore, we confirmed that the resistivity distribution under the sea bottom can be quantitatively predicted from the 1D inversion results of synthetic and field data.

Keywords: small-loop EM, 1D inversion, shallow marine environment

서론

최근 전기, 전자탐사는 육상은 물론 하상 혹은 해상탐사로 그 조사지역을 확대해 나가고 있다. 그동안 해상 혹은 하상에서는 주로 탄성과 반사법 탐사가 이루어져 왔다. 이는 탄성과 반사법 탐사가 수층하부의 층서경계면과 같은 불연속면의 조사에 효과적이기 때문이다. 최근 탄성과 반사법 탐사를 통하여 각 층의 물성에 관한 정보를 추출하려는 연구가 이루어지고 있으나 일반적으로 물성정보를 해석하는 경우는 흔치 않다. 전

기, 전자탐사는 분해능 측면에서는 탄성과 탐사에 비하여 떨어지지만 물성값(주로 전기비저항)의 추정이 가능하며, 경제적으로 저렴하다는 장점을 갖는다. 특히 최근에 이르러 전기전자 탐사기의 자동측정기능이 보강됨으로써, 해상에서 송수신기를 이동하면서 연속적인 측정이 가능하게 되었다. 또한 전기, 전자탐사의 경우 물, 특히 해수층의 경우 전기비저항이 낮아 수면 하부 지층의 탐사가 어려울 것이라는 우려에도 불구하고 성공적인 조사사례가 이미 보고된 바 있다(Snyder *et al.*, 2002; Song and Cho, 2009). 이는 해수면 하부 지층의 전기비저항도 그다지 높지 않기 때문에 충분히 하부층의 전기비저항 값 추출이 가능하기 때문이다. 물론 해상 전기비저항 탐사법은 해수층과 그 하부 지층의 전기비저항이 낮기 때문에 가탐심도의 측면에서는 불리하지만 해저 천부층의 조사에는 매우 효과적인 방법임에 틀림없다.

2011년 3월 31일 접수; 2011년 5월 11일 수정; 2011년 5월 16일 채택
*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,
Chunchon, Kangwondo, 200-710, Korea

국내의 경우 소형루프 전자탐사의 가장 큰 문제점은 전기비저항 탐사에 비하여 잡음에 취약하다는 점이다. 특히 국내에서와 같이 천부지층의 전기비저항이 높은 상황에서는 반응값이 매우 작기 때문에 전자기적 잡음수준이 낮아도 안정적 자료획득이 용이하지 않다. 일반적으로 소형루프 전자탐사 반응값은 매질의 전기비저항이 낮을수록 큰 값을 나타낸다. 따라서 해수층과 같은 전기비저항이 낮은 지역에서는 신호의 크기가 증가할 뿐만 아니라, 해양의 경우 육상에 비하여 잡음수준이 매우 낮다는 점 또한 해양에서의 소형루프 전자탐사의 적용에 긍정적이다. 더 나아가서 소형루프 전자탐사의 경우 측정시간이 매우 짧기 때문에 선박이 어느 정도 빠른 속도로 이동해도 공간적 측정간격에 문제가 없다는 장점이 있다. 이러한 소형루프 전자탐사법의 장점에도 불구하고 그간 소형루프 전자탐사가 하상 혹은 해상에서 적용이 잘 이루어지지 않은 이유는 측정장비가 해수면에 위치해야 한다는 제약점, 송수신기의 이동경로가 선박의 움직임과 파도나 해류에 의해 왜곡된다는 점 등 자료획득상의 문제점과 효과적인 해석 프로그램의 부재가 주된 원인인 것으로 판단되며, 소형루프 전자탐사법에 대한 이해 및 인식부족 또한 소형루프 탐사법의 해상적용을 제한하는 요인인 것으로 생각된다.

본 연구에서는 수심이 5 m 이내인 천해지역에서 해수면 하부 지층의 물성분포를 파악하기 위한 해양 소형루프 전자탐사법의 적용성을 타진하고자 한다. 우선 이론적 고찰을 통하여 0.3 ohm-m 정도의 해수층이 존재할 경우 소형루프 전자탐사의 반응특성을 검토하였다. 또한 1차원 모델에 대한 수치 모델링을 통하여 계산된 자료를 사용하여 해수층을 고려한 역산을 시도하였으며, 마지막으로 수심의 1, 2 및 3 m인 지점에서 얻은 현장자료를 1차원 역산하여 하부의 전기비저항 값을 제시하였다.

기본 이론

수평 다층 구조 모델에 대한 소형 루프 전자탐사 반응에 대한 이론해는 이미 여러 사람들에 의해 제시된 바 있다(Ryu *et al.*, 1970; Ward and Hohmann, 1988; Zhang and Oldenburg, 1997; Zhang *et al.*, 2000). 여기서는 논문의 이해를 돕기 위하여 HCP (horizontal coplanar) 배열 소형루프 전자탐사의 동상 및 이상성분의 결과식을 간략히 소개한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 각 층의 전기전도도 및 두께를 σ_i , t_i 라 하고 송수신기가 지표로부터 h 만큼의 높이에 위치한다고 가정하자. 또한 송수신원으로 사용된 루프를 쌍극자원으로 가정하면 2차장(H_z^S)은 다음과 같이 주어진다.

$$H_z^S = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \gamma_{TE} e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{HCP}) \quad (1)$$

(1)식에서 m 은 송신원의 자기 쌍극자 모멘트, r 은 송수신

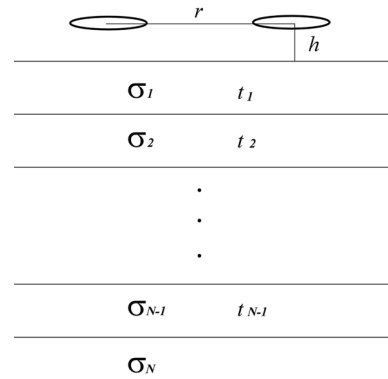


Fig. 1. Source-receiver configuration over a layered earth. Source and receiver dipole are located at height h above the earth's surface. Source-receiver separation is r , and the earth is modeled as N layers. The conductivity and thickness of the i th layer are denoted as σ_i and t_i , respectively.

간격, J_0 는 Bessel 함수, γ_{TE} 는 공기층과 제 1층 사이의 반사계수이다.

본 연구의 경우, (1)식에 주어지는 Hankel 변환은 Anderson (1979)의 ZHANKS 프로그램을 사용하여 계산하였다.

소형루프 전자탐사 반응특성

Fig. 2는 반무한 공간의 전기전도도가 변화할 경우 주파수에 따른 소형루프 전자탐사의 동상 및 이상성분의 1차장에 대한 2차장의 비를 도시한 것이다. 송수신 간격 r 은 GEM2 장비(미국 Geophex사)를 고려하여 1.66 m를 사용하였으며, 송수신기는 모두 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 균질 반무한 공간에서의 2차 자기장의 주파수에 따른 신호의 크기는 동상성분은 $(\sigma\omega)^{3/2}$ 에, 이상성분은 $\sigma\omega$ 에 비례함을 잘 보여주고 있다(Kaufman, 1994, 조인기와 임진택, 2003a). 따라서 동상 및 이상성분 모두 전기전도도가 증가하면 신호의 크기가 증가하며, 그 증가율은 동상성분이 더 크다는 것을 알 수 있다. 소형루프 전자탐사의 이러한 반응특성은 전기비저항이 낮은 환경인 해양탐사에서는 적어도 측정되는 신호의 크기가 육상에 비하여 수 10 내지 100배 정도 증가함을 의미한다. 따라서 육상에서 소형루프 전자탐사의 가장 큰 문제점 중의 하나인 저주파 대역에서의 미약한 신호문제는 해양탐사의 경우에는 문제가 되지 않는다. 즉 해수층의 전기전도도를 3.0 S/m라 하면 Fig. 2에 나타난 바와 같이 수 100 Hz 대역에서도 동상성분이 1000 ppm 정도의 값을 보이며, GEM 장비의 경우 기기의 측정한계인 100 ppm(송윤호와 정승환, 2002) 보다 충분히 크므로 안정적 자료획득이 가능해 진다.

그러나 신호가 크다고 해서 천해에서 소형루프 전자탐사의 성공적 적용을 보장하지는 못한다. 즉 전기전도도가 매우 높은 천해에서 얻어진 소형루프 전자탐사 자료로부터 해수면 하부 지층의 전기비저항에 관한 정보의 추출이 가능함을 분석해

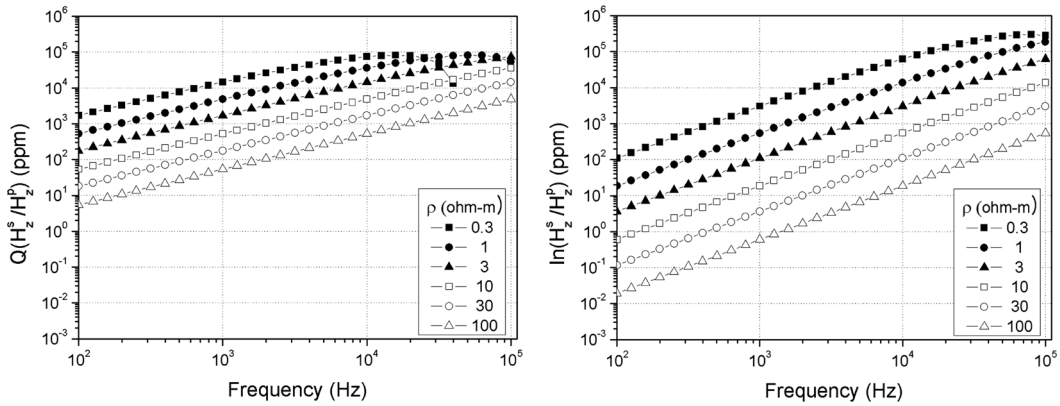


Fig. 2. Small-loop EM sounding curves of a homogeneous earth model with varying conductivity.

보아야 한다. 우선 모든 물리탐사는 가탐심도의 제한을 받는다. 소형루프 전자탐사의 가탐심도는 표피심도(skin depth)에 관련되며, 표피심도는 $(\sigma f)^{-1/2}$ 에 비례하여 감소한다. 따라서 해수층의 전기비저항이 0.3 ohm-m로 매우 낮기 때문에 육상에서 보다 가탐심도가 낮아진다. 낮은 유도상수(induction number, B) 조건을 만족하는 소형루프 전자탐사의 가탐심도는 표피심도의 0.4배 정도이며, 수평다층구조 모델에서 저유도상수 조건은 $B \leq 0.02$ 으로 알려져 있다(Spies and Frischknecht, 1990). McNeil (1980)이 주장한 바와 같이 저유도상수 대역에서 주파

수 수직탐사(frequency sounding)는 불가능하며, 송수신 간격을 변화시켜야 하는 기하학적 수직탐사(geometric sounding)가 유효하다. 그러나 본 연구에서 사용한 주파수 대역, 송수신 간격, 해수의 전기전도도를 고려할 때 저유도상수 조건을 만족시키지 않는다. 예를 들어 주파수를 500 Hz, 매질의 전기전도도를 3 S/m라 하면 표피심도는 13 m가 되며, 이 경우 $B \approx 0.13$ 이므로 저유도상수 조건을 만족시키지 않는다. 따라서 본 연구의 경우 주파수 수직탐사가 유효하며, 획득된 자료의 해석은 역산법을 사용하였다.

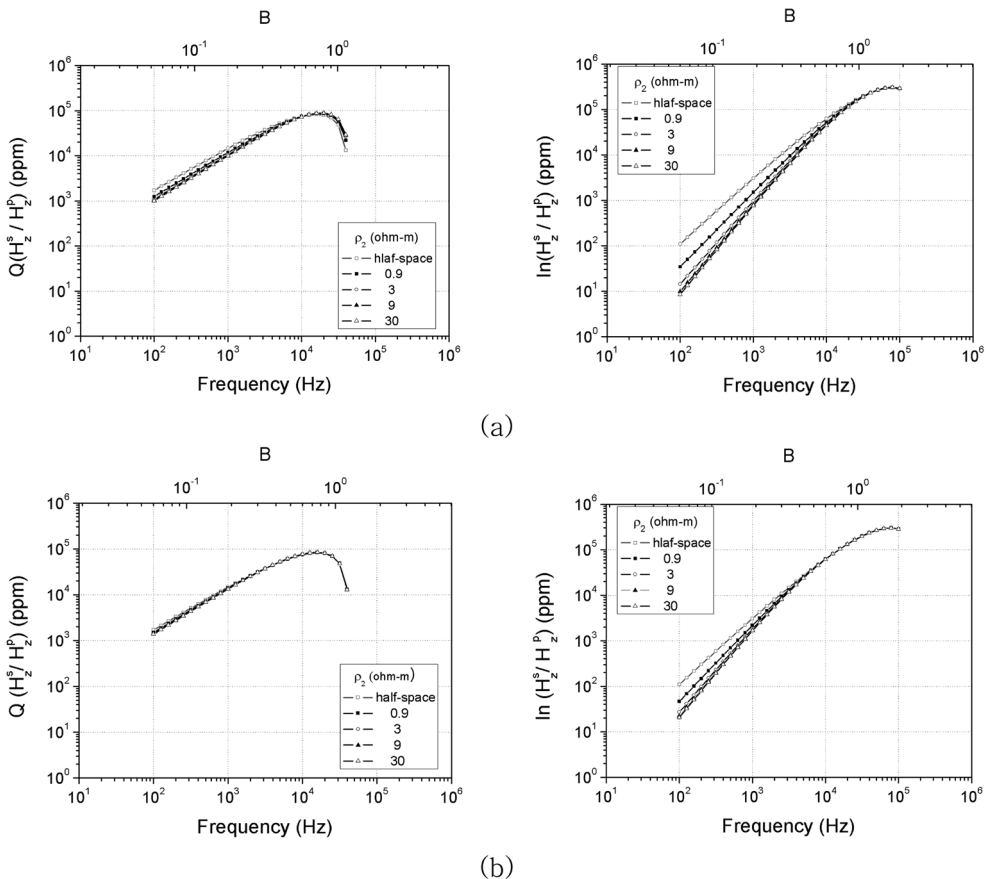


Fig. 3. Small-loop EM frequency sounding curves for (a) $d/r=1$ and (b) $d/r=2$ with varying conductivity contrast.

Fig. 3은 2층구조 모델에 대한 소형루프 전자탐사에서 송수신 코일의 간격(r)과 제 1층의 두께(d)의 비, $d/r=1$ 과 2일 경우, 주파수 변화에 따른 동상 및 이상성분 변화곡선이다. 이때 제 1층의 전기비저항은 해수층을 고려하여 0.3 ohm-m의 고정된 값을 사용하였으며, 제 2층은 1~30 ohm-m로 변화시켰다. 우선 $d/r=1$ 일 경우를 살펴보자. 반무한 공간의 경우와 유사하게 주파수 증가에 따라 동상 및 이상성분 모두 증가하는 양상을 보이며, 이상성분이 동상성분에 비하여 매우 크게 나타나고 있다. 그러나 동상성분은 비록 그 크기는 작지만 고주파에서는 상부층의 비저항을 갖는 반무한 공간의 반응곡선에 접근하며, 저주파에서는 하부층의 비저항을 갖는 반무한 공간의 반응곡선에 접근한다. 즉 고주파 대역에서는 송신원에서 방사된 대부분의 전자기파 에너지가 제 1층에 머무르기 때문에 반응값은 제 2층의 정보를 거의 내포하지 않게 되며, 저주파 대역에서는 상당부분의 에너지가 심부까지 전파하게 되므로 제 2층의 전자적 물성에 대한 정보가 자료에 내포된다. 이상성분의 경우에도 이러한 현상이 나타나기는 하지만, 그 대비는 동상성분에 비하여 매우 미미하다. 따라서 제 2층의 전기비저항을 해석하기 위해서는 이상성분보다 동상성분을 사용하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다(조인기와 임진택, 2003a).

한편 $d/r=2$ 일 경우에도 $d/r=1$ 의 경우와 유사한 반응양상을 나타낸다. 단지 이 경우 제 1층의 두께가 증가하였기 때문에 반무한 공간의 반응곡선과 일치하는 주파수 대역의 하한이 $d/r=1$ 의 경우보다 낮게 나타나고 있다.

수심을 고려한 역산

소형루프 전자탐사의 자료의 해석에는 1차원 역산법이 널리 사용되고 있다. 특히 다중 주파수를 사용하는 주파수 수직탐사의 1차원 역산법에 관해서는 다수의 연구결과가 보고된 바 있다(Glenn and Wards, 1976; Fullagar and Oldenburg, 1984; 설순지 등, 2002; Zang *et al.*, 2000; 임진택과 조인기, 2003b). 여기서는 천부에 낮은 비저항의 해수층의 두께를 알고 있을 경우의 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산결과에 관하여 고찰하기로 한다.

이론자료의 역산

천해 조건에서 획득된 소형루프 전자탐사 자료로부터 과연 하부 지층의 전기비저항에 관한 정보의 추출이 가능한가 여부를 알아보기 위하여 3층 및 4층 구조에 대하여 이론자료를 계산하고, 이들 자료에 대한 역산을 수행하였다. 송수신 간격은 GEM2 장비를 고려하여 1.66 m로 설정하였으며, 수면에서 자료를 획득하는 것으로 가정하였다. 또한 신호원은 500 Hz ~ 20,000 Hz 사이의 대수 함수적으로 균등한 간격의 6개 주파수를 갖는 것으로 가정하였다. 모든 경우에 제 1층의 전기비저항은 해수를 고려하여 0.3 ohm-m로 설정하였다. 역산방법은

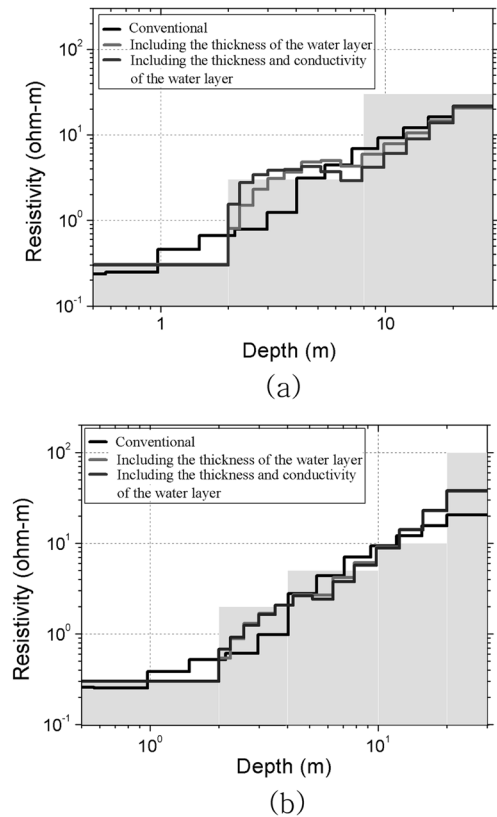
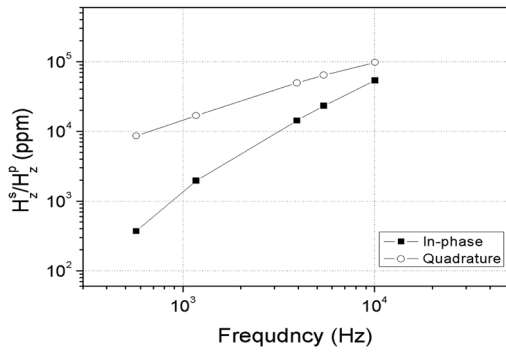


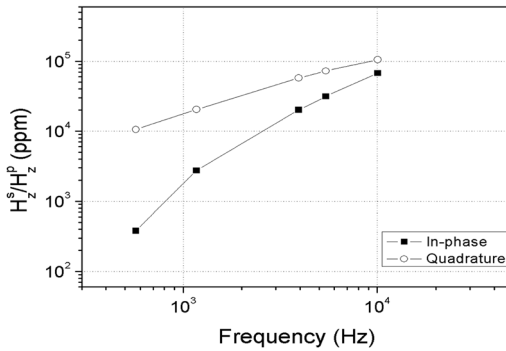
Fig. 4. Inversion results of synthetic small-loop EM data over (a) tree- and (b) five-layered earth. The shaded region represents the true model.

평활화 제한 최소자승법(Constable *et al.*, 1987)을 사용하였으며, ACB 법(Yi *et al.*, 2003)을 적용하였다. 각 층의 두께는 감도(sensitivity)가 심부로 갈수록 감소하는 점을 고려하여, 각 층의 두께가 심도에 따라 지수함수적으로 증가하도록 설정하였다. 역산 시 층의 총 수는 13개로 고정하였으며, 라그랑지 곱수의 최소값은 0.02로 하였다.

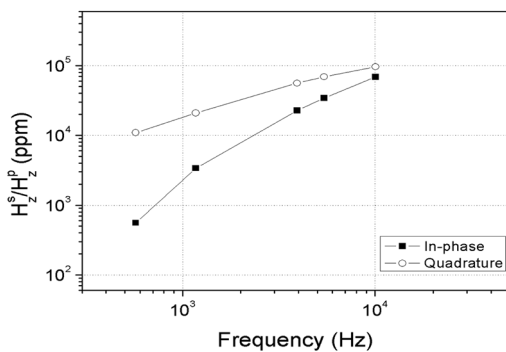
Fig. 4는 수평 3층과 5층 구조 모델에 대한 이론자료를 통상적인 역산, 해수층의 수심을 고려한 역산, 해수층의 수심과 전기비저항을 모두 고려한 역산 결과이다. 해수층의 수심을 고려하지 않은 통상적인 역산결과는 해수층과 제 2층의 전기비저항이 실제 모델값에 비하여 상당한 차이를 나타내고 있다. 반면 해수층의 심도를 고려한 경우에는 해수층의 전기비저항을 매우 정확하게 추정하고 있으며, 제 2층의 전기비저항 값도 통상적인 방법에 비하여 훨씬 잘 추정하고 있다. 5층구조의 경우에는 제 2층의 전기비저항도 실제값에 비하여 낮게 추정하고 있으나, 해수층을 고려하지 않는 통상적인 역산결과보다는 실제 모델값에 더 접근한 값을 보인다. 마지막으로 해수층의 수심과 전기비저항을 모두 고려한 역산결과는 수심만을 고려한 결과와 매우 유사하게 나타나고 있다. 해수층의 전기비저항까지 역산에 사용하기 위해서는 EC meter 등을 사용하여 현장 조사 시 물의 전기비저항이 정확히 측정되어야 한다. 만약



(a)



(b)



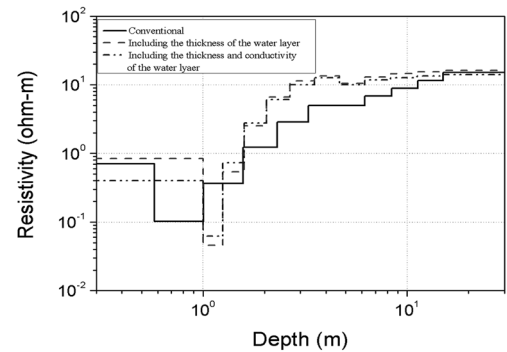
(c)

Fig. 5. Small-loop EM data with varying depths to the sea bottom, (a) 1 m, (b) 2 m and (c) 3 m, respectively.

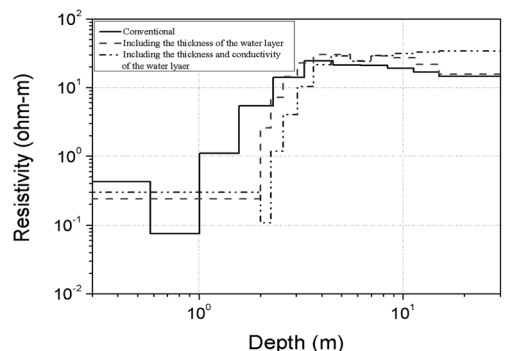
측정이 부정확하게 이루어질 경우 전체적인 역산결과에 지대한 영향을 미칠 수 있으며, 경우에 따라서는 역산오차가 너무 커질 수도 있으므로 유의해야 한다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 해수층의 수심을 알고 있다면, 해수층의 전기비저항은 매우 정확하게 추정할 수 있으므로 별도로 해수층의 전기전도도를 측정하지 않는다고 해도 큰 문제는 없을 것으로 보인다.

현장자료의 역산

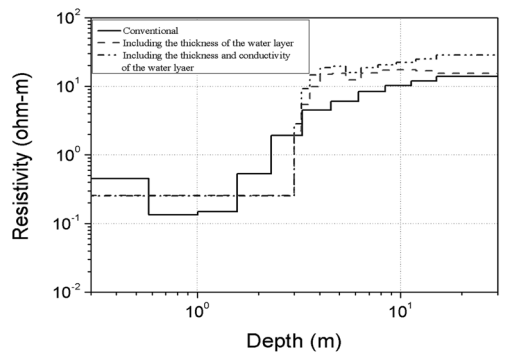
해수층의 수심을 고려할 수 있는 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산 프로그램을 사용하여 현장자료에 대한 역산을 수행하였다. 수심은 echo sounder를 사용하여 획득하였다. Fig. 5는 수심이 1 m, 2 m 및 3 m인 지점에서 얻어진 소형루프 전자



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. 1D Inversion results of small-loop EM data with varying depths to the sea bottom, (a) 1 m, (b) 2 m and (c) 3 m, respectively.

탐사 자료로, 신호원의 주파수는 570, 1170, 3930, 5430 및 10050 Hz이다. 송수신 간격은 1.66 m이며, GEM2 장비를 탑재한 스치로폼 판을 배로 끌면서 측정을 수행하였다. 배와 측정기기 사이의 간격은 약 20 m이며, 잡음분석을 통하여 배에서 발생하는 전자기적 잡음은 무시할 수 있음을 확인하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 세 경우 모두 저주파에서 동상성분도 매우 큰 값을 나타내고 있으며, 동상과 이상성분 모두 주파수에 따라 증가하는 양상을 보이고 있다.

Fig. 6는 Fig. 5에 나타낸 자료의 1차원 역산 결과이다. 역산은 동상과 이상성분을 모두 사용하였으며, 이론자료와 현장자료간의 rms 오차는 10% 내외였다. 전반적으로 해수층의 전기비저항은 매우 낮은 0.25 ~ 0.54 ohm-m 범위내의 값을 보이고

있으며, 하부 지층은 심도가 증가할수록 점진적으로 증가하여 수 10 ohm-m의 값에 수렴하고 있다. 특이한 점은 수심 1 m 인 경우, 해지면 바로 아래 부분에 비록 얇기는 해도 해수보다 낮은 비저항 층이 출현하고 있다는 점이다. 아직 이 부분에 관한 해석은 시추 등의 추가 조사 자료가 없기 때문에 단정할 수는 없으나 어느 정도 두께의 점토층이 해수에 완전히 포화된 것으로 예상된다. 그러나 수심이 2 m 및 3 m 일 경우에는 이러한 저비저항 층이 나타나지 않는다. 여기서는 단지 해수층의 수심 혹은 전기비저항을 고려한 역산이 현장자료의 경우에도 훌륭하게 적용될 수 있다는 점에 중점을 두었으며, 지질 또는 퇴적모델에 대한 해석은 향후 추가적인 조사와 현장 시료에 대한 분석이 이루어진 후이나 가능할 것으로 판단된다.

결론 및 토의

천해환경에서 소형루프 전자탐사법의 적용성을 검토하였다. 우선 1차원 모델링을 통하여 전기비저항이 극히 낮은 해수층이 존재할 경우 소형루프 전자탐사 자료의 반응 특성을 분석하였다. 해수층의 낮은 전기비저항으로 인하여 가탐심도는 낮아지지만, 육상에서보다 신호의 크기는 매우 커짐을 확인할 수 있었다. 특히 해수면 하부층의 물성추정에 결정적인 역할을 하는 저주파 대역에서의 동상성분도 안정적 측정이 가능하다는 점을 확인하였다. 또한 수심을 고려한 소형루프 전자탐사자료의 1차원 역산 프로그램을 개발하고, 이를 이론자료 및 현장 자료에 적용하여 해수면 하부 지층의 전기비저항을 보다 효과적으로 추정할 수 있었다.

천해환경에서 소형루프 전자탐사법은 여러 가지 측면에서 그 효용성이 뛰어난 방법이다. 우선 신속한 자료획득이 가능하며, 신호의 크기가 육상에 비하여 매우 크다. 또한 잡음도 육상과 비교할 때 거의 무시할 수 있는 수준이다. 비록 가탐심도가 낮기 때문에 수심이 깊어질 경우 적용이 불가능하다는 단점이 있으나 수심 5 m 이내의 천해저 조사에는 매우 효과적인 방법인 것으로 판단된다. 따라서 향후 천해저 조사에 활발한 적용이 기대된다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부의 연구비 지원에 의한 “GPS기반의 전기 및 전자탐사법을 이용한 담수호 내 퇴적물 분류기법 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화, 물리

탐사, **5**, 309-315.
 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정, 물리탐사, **5**, 299-308.
 조인기, 임진택, 2003a, 소형루프 전자탐사법에서의 주파수 수직 탐사, 물리탐사, **6**, 119-125.
 조인기, 임진택, 2003b, 주파수 수직 전자탐사 자료의 1차원 역산, 물리탐사, **6**, 180-186.
 임진택, 조인기, 2003, 소형루프 전자탐사법에 의한 지하 영상화, 물리탐사, **6**, 187-194.
 Anderson, W. L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering, *Geophysics*, **44**, 1287-1305.
 Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
 Dey, A., and Ward, S. H., 1970, Inductive sounding of a layered earth with a horizontal magnetic dipole, *Geophysics*, **35**, 660-703.
 Fullagar, P. K. and Oldenburg, D. W., 1984, Inversion of horizontal loop electromagnetic frequency sounding, *Geophysics*, **49**, 150-164.
 Glenn, W. E., and Wards, S. H., Statistical evaluation of electrical sounding methods, Part-I-experimental design, *Geophysics*, **41**, 1207-1221.
 Kaufman, A. A., 1994, *Geophysical field theory and method, Part C*: Academic Press, Inc. 41-57.
 McNeill, D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers, *Technical Note TN-6, Geonics Ltd., Toronto*.
 Ryu, J., Morrison, F. H., and Ward, S. H., 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current, *Geophysics*, **35**, 892-896.
 Snyder, D., MacInnes, S., Raymond, M., and Zonge, K., 2002, Continuous resistivity profiling in shallow marine and fresh water environments, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL4.
 Song, S. H. and Cho, I. K., 2009, Application of streamer resistivity survey in shallow brackish water reservoir, *Exploration Geophysics*, **40**, 206-213.
 Spies, B. R., and Frischknecht, F. C., 1988, Electromagnetic sounding in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Vol 2, Soc. Expl. Geophysics, 285-407.
 Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least-square inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.
 Zhang, Z., and Oldenburg, D. W., 1997, Recovering magnetic susceptibility from electromagnetic data over 1D earth, *Geophysical Journal International*, **130**, 422-434.
 Zhang, Z., Routh, P. S., Oldenburg, D. W., Alumbaugh, D. L., and Newman, G. A., 2000, Reconstruction of 1-D conductivity from dual-loop EM data, *Geophysics*, **65**, 492-501.