

# 해저 은닉 전도체 탐지를 위한 시추공전자탐사와 시추공3성분자력탐사

정현기<sup>1)</sup> · 조철현 · 최재화 · 차영호<sup>2)</sup> · 설순지<sup>3)</sup>

## 1. 서론

지하에 인위적으로 매장된 물체를 찾아내고자 하는 과제가 근래에 국내외 여러 현장에서 제시되곤 한다. 이러한 물체는 흔히 소규모의 존재범위를 나타내므로 일반적인 지표탐사에서 직접 탐지 가능한 경우는 매우 드물다. 더구나 해저면 하부 지층에 은닉되어 있는 전도체를 파악하는 과제에서는 전도체에 가장 효과적인 탐사법인 전기/전자탐사법의 적용이, 해수라는 양전도체로 인해, 제한되어 있다. 이를 극복하기 위해서는 시추공을 이용한 탐사법을 적용시켜야 한다.

시추공전자탐사시스템을 구성하고 시추공3성분자력탐사시스템을 사용하여 해저 지층내의 전도체를 탐지하려하였다. 전도체는 많은 경우 강자성체이기도 하지만 은닉물의 경우에는 자성을 띠고 있음이 오히려 배제하여야 할 조건이기도 하다. 따라서 시추공전자탐사와 시추공자력탐사를 병용하면 은닉물의 특성파악에 도움이 될 것으로 판단하였다. 보다 정밀한 국부적 해저 지층 탐사를 위해서는 토모그래피 방법이 동원되어야 하지만 이는 채굴적용을 간접적으로 추적하는 것이며 본 탐사에서 시도된 전자탐사 및 자력탐사는 전도체를 직접 탐지하는 것이다. 더구나 현재 세계적 기술로도 이 이외의 탐지 기법은 보고되고 있지 않다.

얻어진 자료가 이론반응과 부합하는가를 살펴보기 위하여, 적분방정식을 이용한 수치모형실험으로부터 이론해를 구하여 예상반응을 구하였으며, 측정된 자료와 수치모형실험 자료를 비교하였다. 한편, 현장에 투입된 시스템을 그대로 사용하여 실측 스케일의 모형실험을 야외에서도 간단히 행하여 현장 반응의 분석에 어느 정도 활용하였다.

## 2. 장비구성

시추공전자탐사시스템은 본 연구를 위해 고안되었으며, 시추공자력탐사를 위해서는 이미 상용화하여 신뢰성이 입증된 3성분 fluxgate 센서를 이용한 시스템(조철현 외, 1999)을 사용하였다. 시추공전자탐사시스템에 사용된 Lock-In Amplifier는 100kHz 이하 대역에서 140dB 이상의 매우 큰 dynamic range의 신호를 잡음환경하에서 정밀측정할 수 있게 지원하는 계측기이다. 함수발생(function generator) 기능에 의해 원하는 파형과 주파수의 송신파형을 생성할 수 있으며, 수신부에서는 amplitude/phase 혹은 동상성분/이상성분의 측정 모드 선택이 가능하여 전자탐사분야에 범용적으로 사용될 수 있는 기초계측기이다. 함수발생부에서 형성된 파형은 앰프에서 증폭되어 시추공내에 삽입되는 송신코일에 전류로 공급된다

---

주요어: 해저, 전도체, 시추공전자탐사, 시추공자력탐사

1) 한국지질자원연구원(hkjung@kigam.re.kr)

2) 지하정보기술(주)(http://geophysical.co.kr)

3) 부경대학교 환경탐사공학과/Post Doc.(ssjdoolly@netian.com)

한편 시추공내에서 송신신호와 수신신호를 전달하는 cable은 shielded twisted cable을 사용하였다. 이는 일반 동축케이블을 사용할 시, 송수신 케이블 사이에 서로 전자기적 커플링이 발생하여 신호의 왜곡이 발생될 수 있음을 방지하기 위한 것으로 Lock-In amplifier 의 A-B differential 측정기능과 연결되어 사용할 경우 상호 잡음을 120dB 이하로 감쇄시키는 특성을 지니고 있다. 개발된 시스템은 현장 투입전에 free space에서 calibration 및 송/수신 케이블간의 원치 않는 유도효과가 완전히 무시할 수 있는 정도임을 확인하였다. 한편 sonde는 시추공내 투입시 외부 수압에 의해 송신 및 수신코일의 부피가 변하지 않도록 특수재질봉을 사용하여 제작하고 stress relief 링으로 다시 보강후 방수 하우징을 마무리하였다. 사진 1은 시추공 전자탐사에 투입되기 위해 제작된 sonde 및 그 내부 구성품을 보여준다.

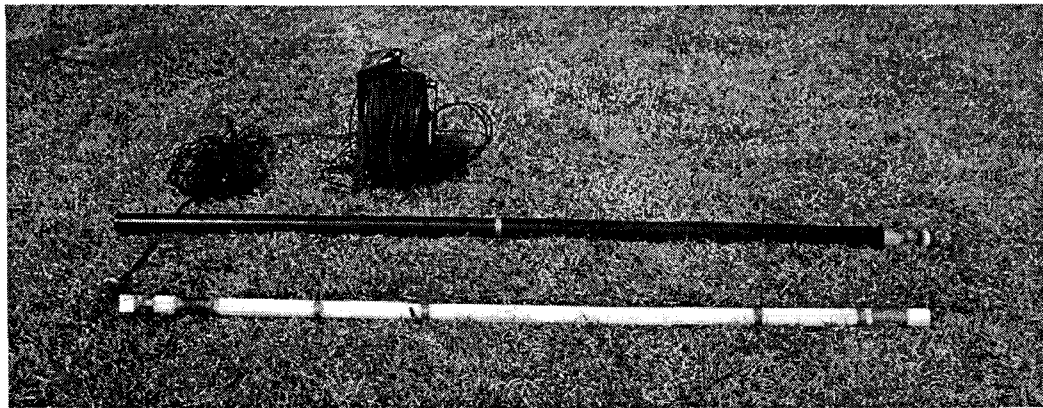


사진 1. 시추공 전자탐사에 투입되기 위해 제작된 sonde 및 그 내부 구성품.

### 3. 수치모형실험

전도도가 높은 소규모의 고립 이상체에 대한 정확한 모형 반응을 계산하기 위하여 적분 방정식을 이용한 접근방법인 WSHEET (Song and Lee, 1998) 코드를 사용하였다. 이 코드는 이상체를 얇은 판상도체로 가정하고 단극 전기장 또는 자기장에 의해 유기 되는 전자기장을 계산해 내는 것으로 이상체의 개수는 하나 혹은 두 개가 가능하다.

계산에 사용된 조건은 현장조건에 가장 흡사하게 설정하였다. 일반 수치모형실험의 조건은 다음과 같다.

- 1) 송신 : 주파수 20 kHz. 수직자기쌍극자
- 2) 수신 : 수직자기쌍극자 - 1차장과 2차장의 합성장 측정
- 3) 송수신 간격 : 1.5m
- 4) 전도체
  - (1) 1 m x 0.2 m 수평판상전도체, 2개 상하 20cm 이격
  - (2) 3m 두께의 전도성지층 (1ohm-m)
  - (3) 12 m x 24 m 수직판상전도체 (sheet pile)

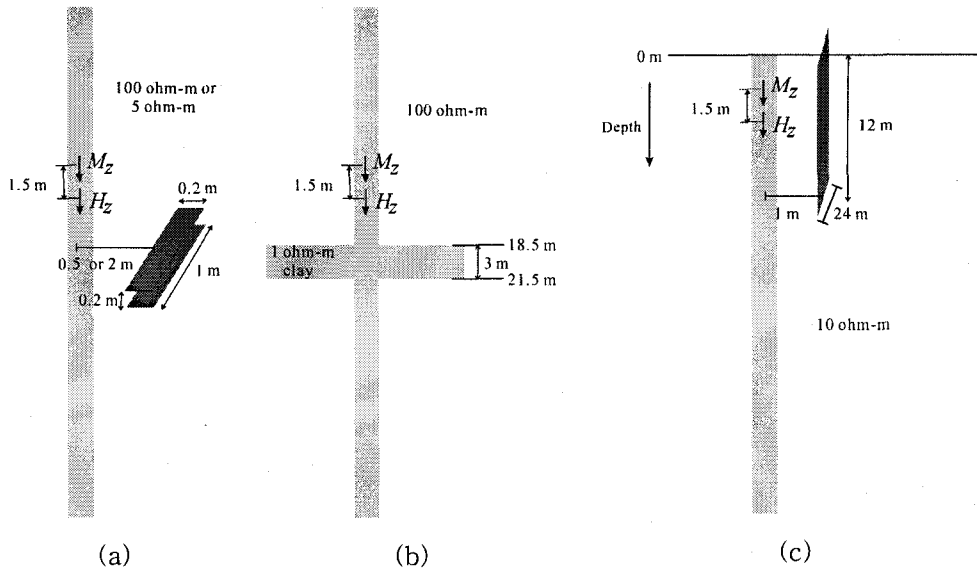


Fig.1 3 types of conductor model considered. (a) horizontal plates, (b) horizontal layer, (c) vertical plate

Fig. 2는 두 개의 판상 도체가 0.2 m 떨어져 아래위로 존재 할 때(Fig.1 (a)) z 방향으로 0.2 m 간격으로 profiling 해서 얻은 결과이다. 계산 결과는 일차장과 이차장의 합인 합성장의 진폭과 위상으로 표시하였다. 도체와 송수신기간의 거리는 2 m 로 설정하였다.

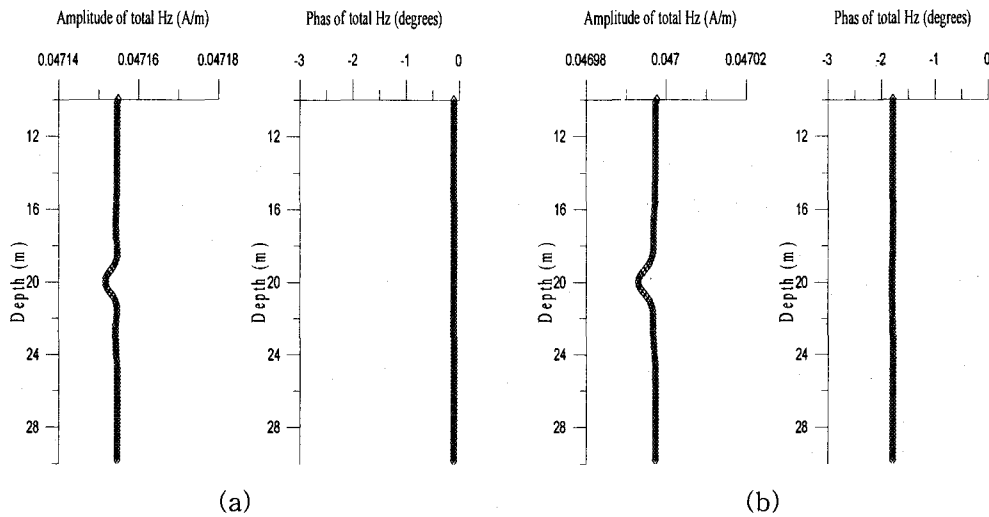


Fig.2 EM responses for the horizontal plates when the distance between the borehole and the plates is 2m. (a) the resistivity of the back-ground medium is 100 ohm-m, (b) 5 ohm-m

한편 양전도성 지층을 시추공이 관통하는 경우는 다음과 같이 보다 반응이 넓고 크게 나타난다. 1 ohm-m를 갖는 점토층이 3 m의 두께로 존재할 때(Fig.1 (b))의 양상을 Fig. 3에 나타내었다. 고립된 전도체 반응 보다 훨씬 명확하게 나타남을 알 수 있다.

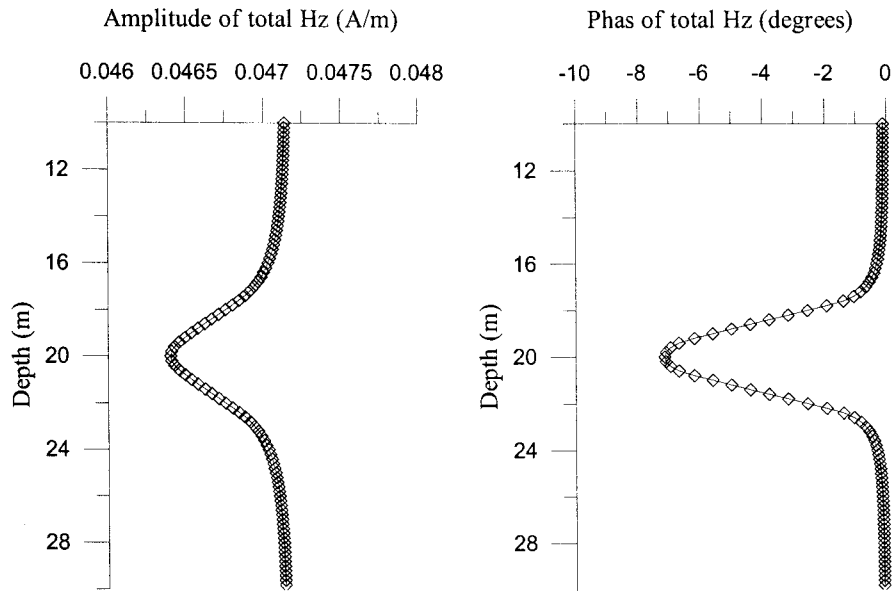


Fig. 3 EM responses for the conductive layer which is 3m thick and 1 ohm-m when the borehole passes through the layer.

Fig. 1 (c) 모형은 가물막이용 sheet pile의 반응을 살펴보기 위함이다. 이의 반응은 Fig 4에 나타내었다. 향후에 살펴볼 현장자료와 비교해 보면, 위상은 수직전도체가 존재하는 구간에서 계속 음(-)의 이상값을 보이다가 수직전도체의 하단에서 정상값을 회복하는 형상이 서로 일치함을 알 수 있다. 진폭도 수직전도체가 존재하는 구간에서 양(+)의 이상값을 보이다가 수직전도체와 멀어지면서 감소하는 형상이 서로 유사하다. 수직전도체의 하단 부근에서는 서로 일치하는 결과를 보이지 않으나, 실제 가물막이 현장은 수직 sheet pile 이외에도 이들을 서로 엮어주는 다양한 형상의 H형강 등이 존재하고 있으므로 이러한 복잡한 전도체의 영향으로 서로를 정확히 비교할 수는 없다고 사료되어, 대체적인 양상의 일치를 확인한 것으로 만족해야 한다고 판단된다.

이상 수치모형실험에 고려된 판상전도체의 두께  $x$  전기전도도는  $10^5$  S이다.

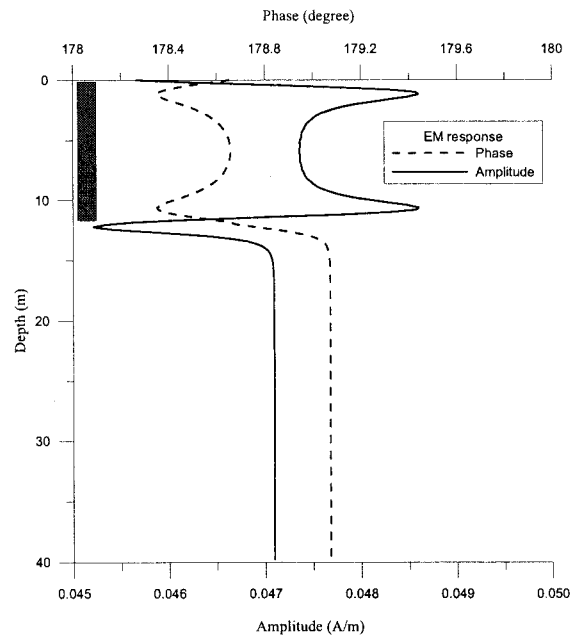


Fig.4 EM responses for the vertical plate when the distance between the borehole and the plates is 1m, and the resistivity of the back-ground medium is 10 ohm-m.

#### 4. 현장자료

현장 자료는 섬 가까이에 철재 sheet pile로 가물막이를 설치한 상태에서 수행하였다. 측 정면에서 수면까지의 높이는 5m 이었다. 가물막이용 sheet pile의 심도는 측정면 기준으로 약 12m 내외이었다. 사진 2는 탐사 현장 관련 사진들을 보여준다.

##### 1) 시추공 A

쉬트파일(sheet pile)의 심도범위는 회색 막대로 표시된 부분으로 하단심도는 측정면 기준 으로 약 12m 이다. 진폭은 쉬트파일의 중심에서 최대값을 나타내며 쉬트파일을 벗어나 심 도가 깊어질수록 감소되는 양상을 보인다. 두 가지 탐사법 모두에서 쉬트파일 이외에 자성 체 혹은 전도체의 존재로 해석될 만한 반응이 나타나지 않았다.

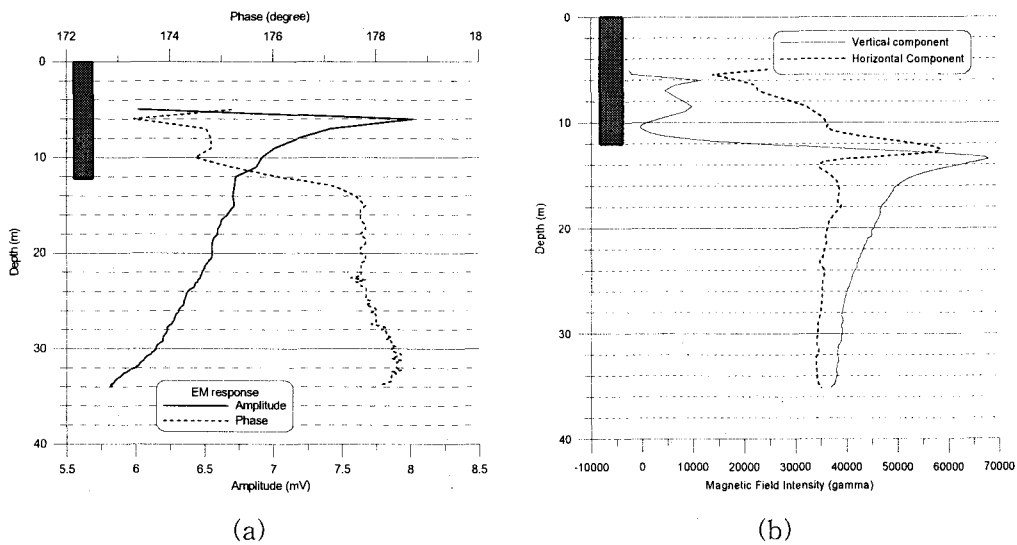


Fig. 5 Borehole geophysical data measured at borehole A (a) EM. (b) magnetic.

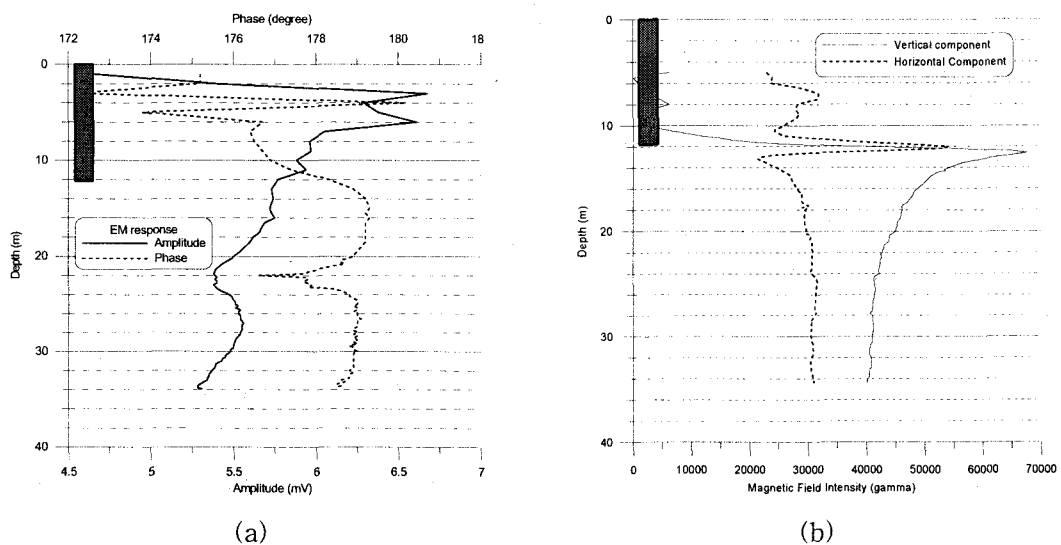
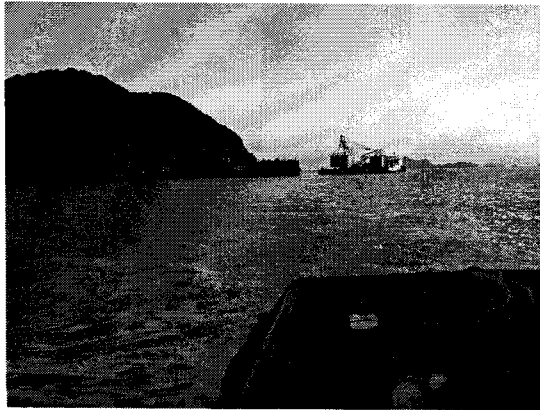
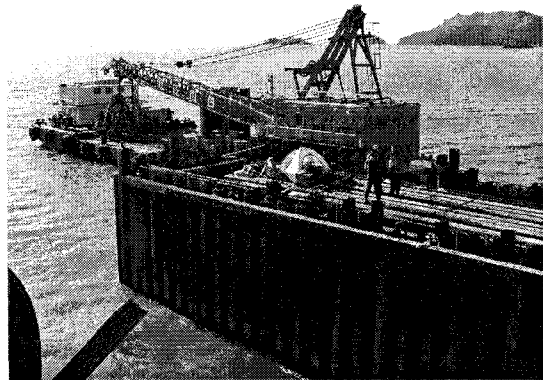


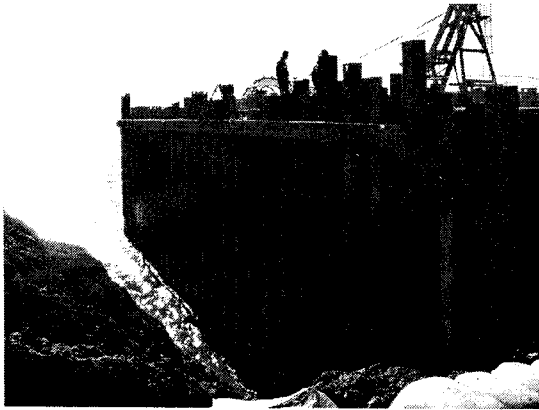
Fig. 6 Borehole geophysical data measured at borehole B (a) EM. (b) magnetic.



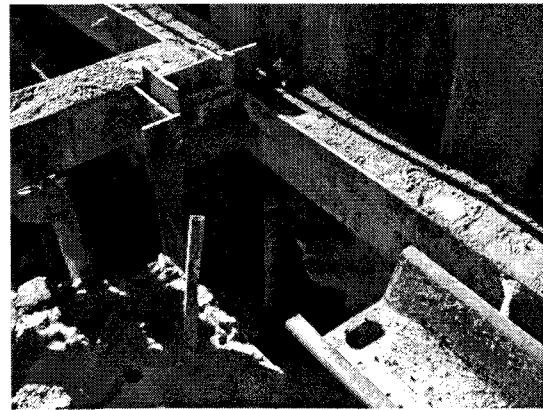
멀리서 본 탐사 현장



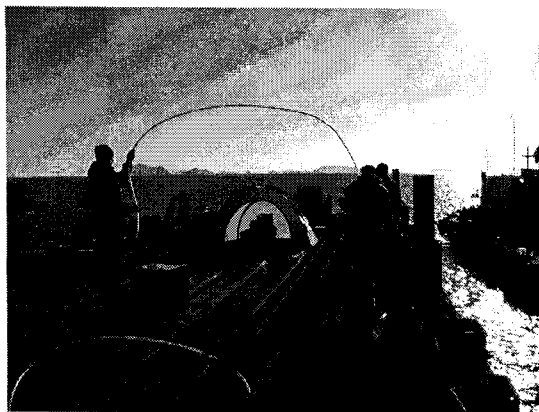
물막이 쉬트파일상의 탐사 현장



물막이 쉬트파일의 가까운 모습



PVC 케이싱 탐사 시추공의 가까운 모습



시추공내 sonde 투입 장면



자료 획득 탐사 시스템

사진 2. 탐사 현장 관련 사진들.

## 2) 시추공 B

쉬트파일의 심도범위는 회색 막대로 표시된 부분으로 하단심도는 측정면 기준으로 약 12m 이다. 진폭은 쉬트파일의 중심에서 최대값을 나타내며 쉬트파일을 벗어나 심도가 깊어질수록 감소되는 양상을 보인다. 진폭과 위상곡선 모두에서 심도 22m를 중심으로 20~24m 구간에 이상반응이 나타났다. 이러한 이상반응은 진폭과 위상 모두에서 대단히 두드러진 규모를 나타내고 있다. 지표 Loop-to-Loop 전자탐사 반응 경험에서 원용하면 일반적으로 소규모 전도체가 가까이 있으며 그 반응이 쌍봉형태를 띄고, 상대적으로 멀어짐에 따라 점점 단봉의 profile 반응을 보인다. 따라서 본 시추공의 전자탐사 반응은 쌍봉이 아닌 단봉형태이므로 송수신간의 코일 간격의 1/2인 75cm이상의 이격에 본 반응을 유기시키는 고립형 전도체를 상정할 수 있다(정현기 외, 2000).

B공의 이상 반응을 야기시킬 수 있는 조건을 고찰해 보기로 한다. 모든 가능성을 살펴보면 시추공주변에 전도성 인공매장물의 존재, 시추공의 굴곡에 따른 전자장변화, 전도성 지층의 존재를 고려할 수 있다. 이들을 각각 상세히 고찰해 보기로 한다.

(1) 인공 전도체의 존재 : 만약 예상되는 전도체의 규모- 직경 20cm, 길이 100cm의 원통 24개 -라면 수치모형실험시 가정된 판상전도체보다 더 큰 유효 “전기전도도 x 두께” 가 되므로 본 탐사에서 얻어진 이상반응이 나올 수 있다. 더구나 시추코아 자료에 의하면 거의 모든 탐사 시추공들이 비슷한 깊이에서는 비슷한 지질상황을 보여주었으나 당 시추공에서만 특이한 전자반응이 포착되었다.

(2) 시추공 굴곡에 따른 전자장변화 : 수신코일에서 측정되는 것은 주변 전도체에 의한 2차장만이 아니라 송신되는 1차장과 주변 전도체의 반응인 2차장의 합성장이다. 1차장은 2차장보다 엄청난 규모- 통상 수 백만배-의 크기를 나타낸다. 따라서 시추공이 휘어있는 경우에는 수신코일에서 측정되는 1차장의 변화가, 주변에 전도체가 있는 경우의 크기보다 더 크게 나타나게 된다.

(3) 전도성 지층의 영향 : 이론부에서 살펴보았듯이 시추공이 전도성지층을 통과하는 경우에는 이러한 규모의 이상반응을 보일 수 있다. 실제 지층은 진흙층 이외에도 파쇄대나 균열부가 비교적 높은 전기전도도를 나타낼 수 있다. 더구나 본 현장은 해수면 하부이므로 균열부에 해수가 침투하여 전체적인 전기전도도를 1 ohm-m 정도로 낮게 형성시킬 수 있으므로 이론시 검토된 지층조건과 유사한 반응을 보일 수 있다. 한편 매몰된 인공동굴에 어떠한 경로로든 해수가 침입하여 이러한 반응이 감지될 가능성도 배제할 수 없다.

## 5. 결과 고찰

지하에 소규모로 존재하는 전도성물체를 파악하는 일은 일반 지표물리탐사로는 큰 제약을 받을 수밖에 없다. 더구나 해저면 하부 지층에 은닉되어 있는 전도체를 파악하기 위해서는 시추공탐사가 거의 유일한 대안일 수밖에 없다. 그러나 시추공자력탐사기나 특히 시추공전자탐사기는 아직 만족할 만한 상업용 제품이 나와 있지 못한 상태이다. 본 연구에서는 기초 계측기를 이용한 시추공전자탐사시스템을 구성하여 시추공전자탐사의 활용성을 검증하여 보았다.

실제 해양 조건에서 시추공전자탐사 및 시추공자력탐사를 실시하여 얻은 자료와 적분방정식을 이용한 이론치의 양상을 비교하여 유사성을 발견할 수 있었다. 시추공전자탐사시 고립

된 유한한 크기의 이상체에 의한 수치계산의 진폭과 위상은 현장에서 측정되기에는 너무 작은 양으로 계산되었으나 이는 판상체에 대한 이론식이므로 괴상 혹은 구형 전도체에 의한 이론식으로 비교하여야 좀 더 정확한 검증을 내릴 수 있다고 사료된다.

#### 참고문헌

- 정현기, 서정희, 주형태, 2000, 자기 쌍극자원에 의한 구형도체의 주파수영역 전자반응 역산, 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 171-174.
- 조철현, 정현기, 조광호, 1999, 시추공자력계를 이용한 기초파일 근입심도 추정, 1999, 한국구조물진단학회, 제3권, 제 2호, 161-167.
- Song, Y., and Lee, K. H., 1998, A wide-band integral equation solution for EM scattering by thin sheets, 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 436-439.