

갯벌 지역의 하부퇴적층에 대한 AMT 탐사의 적용 가능성 평가

권병두¹ · 이춘기² · 박계순^{1,*} · 최수영³ · 류희영¹ · 최종근¹ · 엄주영¹

¹서울대학교 지구과학교육과, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

²한국해양연구원, 426-744 경기도 안산시 상록구 사2동 1270

³한국석유공사, 431-711 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14

A Feasibility Study of AMT Application to Tidal Flat Sedimentary Layer

Byung-Doo Kwon¹, Choon-Ki Lee², Gyesoon Park^{1,*}, Su-Young Choi³,
Hee-Young Yoo¹, Jong-Keun Choi¹, and Joo-Young Eom¹

¹Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Korea Ocean Research and Development Institute, Kyeonggi 426-744, Korea

³Korea National Oil Corporation, Kyeonggi 431-711, Korea

Abstract: The marine seismic prospecting using a research vessel in the shallow sea near the coastal area has certain limits according to the water depth and survey environment. Also, for the electrical resistivity survey at seashore area, one may need a specially designed high-voltage source to penetrate the very conductive surface layer. Therefore, we have conducted a feasibility study on the application of magnetotelluric method (MT), a passive geophysical method, on investigating of shallow marine environment geology. Our study involves both theoretical modeling and field survey at the tidal flat area which represent the very shallow marine environment. We have applied the audio-frequency magnetotelluric (AMT) method to the intertidal deposits of Gunhung Bay, west coast of Korea, and analysed the field data both qualitatively and quantitatively to investigate the morphology and sedimentary stratigraphy of the tidal flat. The inversion of AMT data well reveals the upper sedimentary layer of Holocene intertidal sediments having a range of 13-20 m thickness and the erosional patterns at the unconformable contact boundary. However, the AMT inversion results tend to overestimate the depth of basement (30-50 m) when compared with the seismic section (27-33 m). Since MT responses are not significantly sensitive to the resistivity of middle layer or the depth of basement, the AMT inversion result for basement may have to be adjusted using the comparison with other geophysical information like seismic section or logging data if possible. But, the AMT method can be an effective alternative choice for investigating the seashore area to get important basic informations such as the depositional environment of the tidal flat, sea-water intrusion and the basement structure near the sea shore.

Keywords: audio-frequency magnetotelluric survey, MT inversion, tidal flat

요약: 최근 들어 환경, 자원 등과 관련하여 연안지역에서의 지구물리 탐사에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 연안 지역은 수심이 얇기 때문에 탐사선을 이용한 해양 탄성과 탐사는 많은 제약이 있다. 이러한 탄성과 탐사의 제한조건을 극복하기 위하여 상대적으로 적은 비용의 전기 및 전자탐사 기법의 활용이 유망하지만, 전기탐사의 경우는 지하매질이 해수에 포화되어 높은 전기전도도를 갖기 때문에 고출력의 송신부가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 일부 천해저 환경이 나타나는 갯벌 지역에서 자연적으로 발생하는 전자기장을 송신원으로 사용하는 자기지전류 탐사를 수행하여, 적용성 및 효용성을 평가 하였다. 서해안의 근흥만 지역에서 AMT와 탄성과 반사법 탐사를 함께 수행한 결과 근흥만 지역의 지층 구조는 갯벌을 이루는 미고화된 머드층, 홀로세 이전의 준고화된 퇴적층, 선크립리아기의 운모편암과 규암으로 구성된 기반암으로 이루어진 것으로 해석된다. AMT 탐사와 탄성과 탐사 해석 결과 모두 홀로세 이전의 준고화된 퇴적층 상부의 깊이가 13~20 m 부근으로 나타나, AMT 탐사 자료로부터 상층부 구조 해석은 타당한 것으로 보인다. 기반암의

*Corresponding author: gyesoon@paran.com

Tel: 82-2-878-7233

Fax: 82-2-874-3289

경우 전반적인 구조는 유사한 형태를 나타내지만, AMT 탐사에서는 그 심도가 약 30~50 m, 탄성파에서는 27~33 m로 해석되어, AMT 탐사 기법의 분해능과 관련하여 기반암 심도는 다소 과대평가되는 경향이 나타났다. 그러나, AMT 탐사 기법의 상부층에 대한 분해능, 간편성, 안정성, 환경친화성 등을 고려할 때, 연안지역에서 탄성파 탐사나 전기비저항 탐사를 대신할 수 있는 것으로 평가 된다.

주요어: 가청주파수 자기지전류 탐사, 자기지전류 자료 역산, 조간대

서 론

최근 들어 갯벌 보존, 방조제 건설, 간척지 공사, 대수층을 통한 해수침투 문제와 관련하여 연안지역에서의 지구물리 탐사에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 해안에 인접해 있는 지역은 수심이 매우 얇고 각종 수산물 양식을 위한 인공구조물들이 많이 설치되어 있어 탐사선을 이용하는 해양 탄성파 탐사를 수행하기가 용이하지 않다. 뿐만 아니라 탄성파 탐사와 시추 및 물리 검층 등은 상당히 많은 비용이 요구되어 경제성에 잘 부합되지 않는다. 이러한 문제점에 대한 대안으로서 저렴한 비용으로 신속한 탐사가 가능한 전기 및 전자탐사법의 활용이 시도되고 있다. 갯벌 지역에서의 전기비저항 탐사는 갯벌의 낮은 전기비저항으로 인해 고출력의 송신부를 필요로 한다(정현기 등, 2001). 반면, 자기지전류(Magnetotelluric, MT) 탐사는 자연적으로 발생하는 전자기장을 송신원으로 사용하기 때문에 고출력을 요하는 전기비저항 탐사에 비해 간편성과 안전성에 있어 장점을 가진다(Vozoff, 1972).

자기지전류 탐사는 전리층 및 자기권에서 발생하는 전류와 세계 각지의 뇌우로부터 자연적으로 전파되는 전자기장을 측정하여 심부 지각의 지전기구조를 규명하는 방법으로서, 최근 들어 해양에서의 석유 및 광물 탐사에도 적용되고 있다. MT 탐사는 50년대 후반 멕시코만의 천해에서 처음으로 시도된 이후, 80~90년대에 들어서 심해저 MT 탐사법이 개발되어 석유나 광물, 또는 지열탐사 및 해양 지각 구조의 연구에 대한 잠재력을 인정받았다(Flosadottir and Constable, 1996, Constable and Cox, 1996). 최근에는 원거리 기준점(Remote reference)을 사용하는 MT 자료처리 방법의 적용으로 인해서 보다 개선된 탐사결과를 획득하고 있으며, 특히 UCSD(University of California at San Diego)의 Scripps 연구소를 중심으로 해양지에서 활발한 탐사가 이루어지고 있다(Hoversten et al, 1998, Constable et al, 1998, Heinson et al, 2000, Key and Constable, 2002). 연근 해역에서의 경우, 가

청주파수(Audio frequency MT, AMT) 탐사를 통해 해안에서의 해수침투를 분석하기도 하였고(Mitsuahara and Uchida, 2003), 중국에서는 20~50 m의 얇은 바다에서 석유탐사를 목적으로 MT 탐사를 수행하여 심부구조에 있어서 탄성파 탐사보다 좋은 결과를 획득한 것으로 알려져 있다(Phoenix Geophysics Ltd., 2004). 본 연구에서는 해양의 지질구조에 대한 MT 탐사의 효용성과 한계를 검토해보고자 하였으며 이를 위해 연안 갯벌 지역에서 AMT 탐사를 실시하였다.

서해안 조간대의 퇴적구조

갯벌(tidal flat)은 만조 시에는 바닷물로 덮여 있으나, 간조 시에는 육지로 드러나는 연안의 바다가 모래와 펄로 이루어진 평평한 지형을 뜻한다. 일반적으로는 조류로 운반되는 미사(silt)나 점토(clay) 등의 미세입자가 파랑의 작용을 적게 받는, 즉 파도가 잔잔한 해안에 오랫동안 쌓여 생기는 평탄한 지형이다. 이러한 지역은 만조 때에는 물속에 잠기고 간조 때에는 공기 중에 노출되는 것이 특징이며, 퇴적물이 운반되어 쌓여서 층서 퇴적구조를 이루고 있다. 따라서 오랜 시간이 경과하게 되면 그 지면도 점차 높아지게 된다.

황해의 갯벌은 홀로세(Holocene)의 해수면 상승과 더불어 지질학적으로 비교적 짧은 기간 동안 조수의 영향 하에 형성되었다(Zhao at al., 1979). 황해 지역 갯벌의 퇴적상은 최상부에서 하부로 가면서 퇴적단위 I, II, III와 기반암으로 이루어져 있으며, 전형적인 모식도는 Fig. 1과 같다(대한지질학회, 1999). 층서 구조에서 가장 상부 층에 퇴적되어 있는 퇴적단위 I은 홀로세 후기(late Holocene)에 형성된 고해수면 상태에서 퇴적된 구조로서, 구성 입자들은 괴상 또는 잔류 엽층리 구조의 점토질과 식물 줄기들과 그 파편으로 구성되어 있는 퇴적 단위이다. 퇴적단위 I의 아래층에 퇴적 되어 있는 퇴적 단위 II는 홀로세 초기(early Holocene)에 형성된 3~6 m 두께의 적갈색의 니질 퇴적층으로 구성되어 있다. 기반암에 이르기 전까지 상부 층으로부터 가장 아래쪽에 퇴적되어 있는

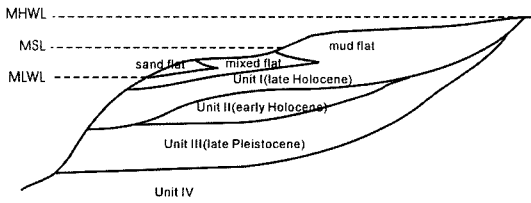


Fig. 1. The general structure model of a tidal flat in the Yellow sea.

퇴적 단위 III는 플라이스토세 후기(late Pleistocene)에 형성된 퇴적 단위이다. 이 층서 단위의 특징은 최대 10 m 이상의 두께를 갖는 노란색에서 적색 또는 황색의 퇴적물로 구성되어 있으며, 특히 니질 또는 사니질의 퇴적상이 우세하다. 퇴적 입자들의 평균입도는 5-9 $\phi(\mu\text{m})$ 이고, 높은 전단응력과 낮은 함수율, 그리고 높은 대자율을 지니는 특성을 가지고 있다. 이러한 특징들은 이 층서가 대기권에 노출되어 산화, 풍화된 산화대임을 의미하는 것이다. 상부의 퇴적단위들과 부정합에 의해서 큰 시간적 간격을 가지고 있는 기반암은 선캠브리아 변성암 또는 중생대 변성암으로 구성되어 있다.

가칭 주파수 자기지전류탐사

MT 탐사법의 일부인 가칭 주파수 자기지전류탐사법(AMT)은 1 Hz~100 kHz 대역의 자연 전자기장을 측정하여 지하에 대한 정보를 추출하는 전자탐사법이다. 주된 송신원은 적도지역에서 발생하는 뇌우에 의한 전자기파이며, 표피 심도(skin depth)보다 매우 멀리 떨어진 곳에서 발생하므로 전자기장의 평면과 가정을 만족한다. 한반도의 전기비저항 분포와 주파수 대역을 고려하여보면 일반적인 육상 환경에서는 수십 m 내지 수 km의 가탐심도를 가진다. 1 kHz 부근의 주파수 대역에서는 자연적인 전자기장의 강도가 매우 약하기 때문에 'dead band'라고 불리며 S/N 비를 높이기 위하여 인공적인 송신원을 사용하는 CSAMT (Controlled Source AMT) 방법을 사용하기도 한다.

갯벌과 같은 조간대 환경에서는 표층의 전기비저항이 매우 낮으므로 인공잡음의 감쇠가 심하여 육상에서의 탐사보다 좋은 결과를 예상할 수 있다. 그러나 전기비저항이 매우 낮은 경우 전체적인 전자기장의 강도가 매우 약해지므로 전자기장의 측정에 있어 주의가 필요하다. 전기장의 정확한 측정을 위해서는 측

정을 위한 전기 쌍극자의 길이를 보다 증가시킬 필요가 있다. 쌍극자의 길이가 증가하면 지하구조에 대한 해상도가 낮아지는 단점이 있으나 수평구조에 가까운 조간대 퇴적층 환경에서는 큰 문제가 없다. 자기장의 정확한 측정을 위해서는 자기장 센서를 매설을 하여야 하나 탐사의 효율성을 위해서 매설하는 대신 모래주머니를 이용하여 바람에 의한 진동을 방지하는 것도 좋은 방법이다.

AMT 대역의 전자기파는 지구의 자전과 뇌우 활동의 시간적 변화 때문에 일변화가 발생하게 되고, 지구의 뇌우 활동의 계절적 변화에도 영향을 받는다. AMT 대역의 자연 송신원에 대한 Garcia and Jones (2002)의 연구에 의하면 북쪽 방향의 수평 자기장 성분 스펙트럼의 경우 지역시간으로 19:00~04:00에 가장 강하고, 08:00~16:00에는 약하다. 그리고 계절적인 신호의 변화 양상에 대해서는 봄에 비해서 여름에 신호의 진폭이 증가한다. 이러한 자연 전자기장의 시간적 변화를 고려하여 AMT 탐사 시기를 결정하여야 한다.

1차원 퇴적층서 구조에서의 AMT 반응

조간대 퇴적층의 두께는 수십 m 이내이며 수평적으로는 최대 수 km에 이르므로 좁은 범위에서는 거의 수평층에 가깝다. 특히 서해안 조간대 퇴적층의 구조는 해수면의 상승과 하강에 따라 onlap형태의 퇴적면과 침식면이 반복적으로 나타나는 것이 일반적이지만, 전기전도도의 측면에서는 조간대 퇴적층과 기반암으로 이루어진 2층 구조 혹은 해수로 포화되어있고 고화되지 않은 상부 퇴적층, 준고화된 하부 퇴적층, 기반암으로 이루어진 3층 구조를 가정할 수 있다.

이러한 퇴적층서를 기초로 조간대 퇴적층을 수평층서구조로 가정하였을 때 나타나는 겉보기 비저항과 위상의 양상을 살펴보았다. 고화되지 않은 갯벌층은 전기비저항이 약 0.25 Ωm 인 해수로 포화되어 있어 보통 1 Ωm 내외의 전기비저항을 가진다(Constable, 2006). 하부 기반암의 경우 한반도의 평균적인 전기비저항인 1,000 Ωm 를 가정하였다. 2층 구조로 가정하는 경우 매우 큰 전기비저항의 대비로 인해 겉보기 비저항은 로그 스케일 상에서 거의 45° 방향으로 증가하며 위상은 0°에 가깝게 감소하는 양상을 보인다. 겉보기비저항이 증가하고 위상이 감소하기 시작하는 주파수는 상부층의 두께를 결정하는데 유용한

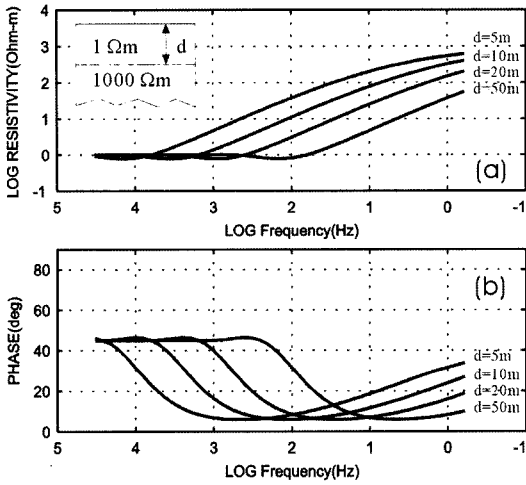


Fig. 2. (a) Apparent resistivity and (b) phase of two layer model with respect to the thickness of upper layer.

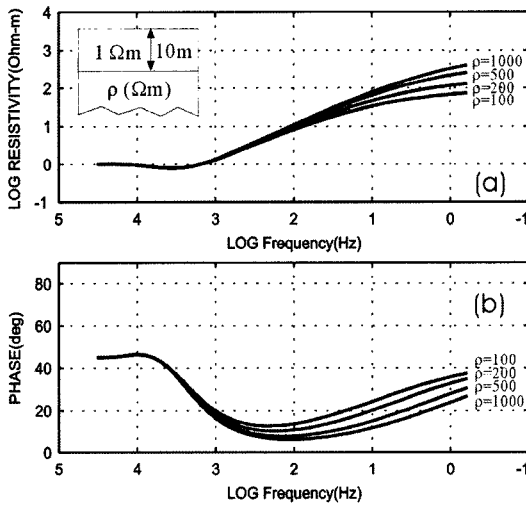


Fig. 3. (a) Apparent resistivity and (b) phase of two layer model with respect to the resistivity of lower layer.

정보를 제공한다(Fig. 2). 만약 상부층의 두께가 10 m로 일정하고 기반암의 비저항이 100~1,000 Ωm의 범위를 가지는 경우의 결과를 가정하면, 수십 Hz 이상의 주파수 대역에서는 겉보기비저항이 거의 같지만 위상은 겉보기비저항보다는 다소 큰 차이를 나타낸다(Fig. 3). 따라서 실제 탐사자료의 오차를 고려한다면 1~10 Hz 대역에서의 겉보기비저항과 위상 자료의 정확한 획득이 없이는 하부 기반암의 비저항을 정확히 결정할 수 없다.

다른 경우로 고화되지 않은 상부 갯벌층과 하부기

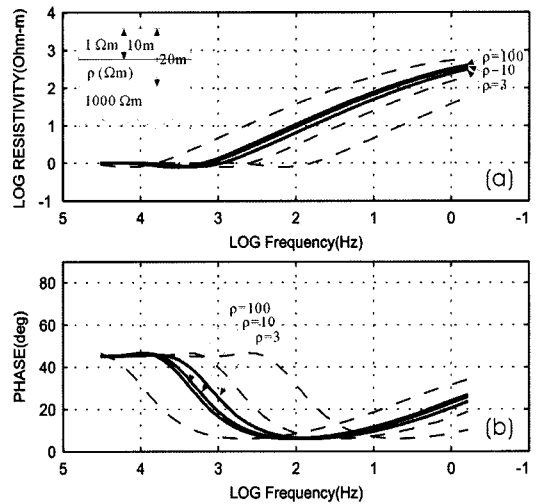


Fig. 4. (a) Apparent resistivity and (b) phase of three layer model with respect to the resistivity of middle layer (solid line). The dashed lines represent two layer model responses give in Fig. 1.

반암 사이에 준고화된 퇴적층이 존재하고 이 퇴적층의 전기비저항이 상부 갯벌층과 다를 때, AMT 반응으로부터 준고화된 퇴적층의 전기비저항을 추정하기 위하여 3층구조에 대한 AMT 반응을 계산하였다. 두 층의 두께는 모두 10 m이며, 표층의 비저항은 1 Ωm, 하부 기반암의 전기비저항은 1,000 Ωm라고 가정할 때 중간층의 전기비저항이 각각 3, 10, 100 Ωm일 경우 겉보기비저항과 위상을 Fig. 4에 도시하였다. 중간층의 비저항이 10 Ωm 이상인 경우 중간층이 기반암의 비저항을 가지는 2층 구조와 거의 차이가 없으며 중간층이 3 Ωm 인 경우에도 차이는 있으나 실제 탐사의 오차범위를 고려하면 중간층이 기반암의 비저항을 가지는 2층 구조와 거의 유사하다. 따라서 표층의 갯벌층과 준고화된 퇴적층의 전기비저항이 급격하게 변하는 구조에서는 하부 기반암의 경계를 정확히 추정하기는 어렵다.

서해안 근흥만에서의 AMT 탐사

충청북도 태안군에 위치한 근흥만의 조간대 퇴적층(위도 N36°44'41.4"~36°45'01.3", 경도 E126°09'49.6"~126°10'09.1")에서 AMT 탐사를 실시하였다. 근흥만은 해안선의 굴곡이 심하고 육지와 섬들로 보호되어 있는 만이며 조석은 반일주조로서 대조차는 630 cm이다. 해저 경사는 매우 완만하여 최대 3.5 km의 광대

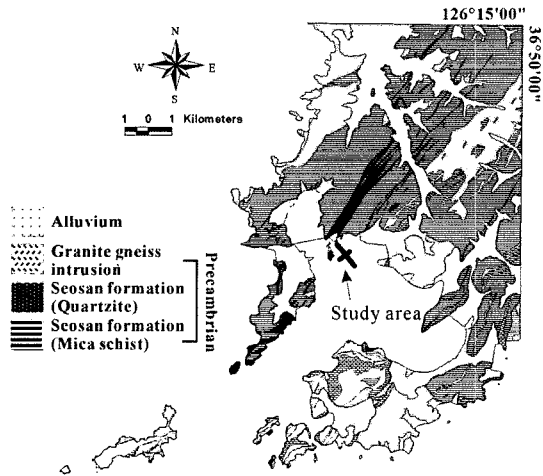


Fig. 5. Geologic map of the study area.

한 조간대를 형성하고 있다. 주 조류는 만의 입구에 NE-SW 방향으로 발달하며 그 깊이는 10 m에 달한다(국립지리원, 1979). 기반암은 대부분 선캠브리아기의 서산층군에 속하는 변성 퇴적암류이며 화강편마암의 관입이 광범위하게 이루어져 있다. 서산층군은 주로 운모편암, 규암 및 호상편마암으로 구성되어 있다(Fig. 5)(장태우와 이상용, 1982).

탐사장비로는 EMI사의 MT24HF를 사용하였으며 탐사여건상 원거리기준점을 운용하지 않고 단일 측정점으로 탐사를 수행하였다. 육지에서 해양 방향으로 1.2 km 길이의 측선과 수직으로 교차하는 600 m 길이의 보조 측선에서 각각 50 m와 100 m의 측정 간격으로 총 29 측정점의 자료를 획득하였다(Fig. 6). 전기장 측정을 위한 쌍극자 길이를 50 m로 하여 측정간에 연속적인 전기장의 측정이 이루어졌다.

자료 편집 과정을 통해 1 kHz 부근의 dead band와 전력선에 영향을 받는 60 Hz 대역의 자료를 제거한 후 겹보기 비저항과 위상의 가단면도를 Fig. 7에 도시하였다. 탐사 결과, 수 kHz 이상에서는 1 Ωm 이하의 겹보기비저항과 45°에 가까운 위상을 나타내고 있어 표피심도를 고려하면 약 10 m 이내 심도에서는 1 Ωm 이하의 전기비저항을 가지는 균일한 층이 존재함을 알 수 있다. 또한 1 kHz 이하에서는 매우 가까운 기울기로 겹보기비저항이 증가하며 위상은 0°에 가까워지거나 0° 이하의 위상을 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 상부 퇴적층과 하부 기반암의 전기비저항 차이에 의한 효과와 주변의 전기적 잡음에 의한 근거

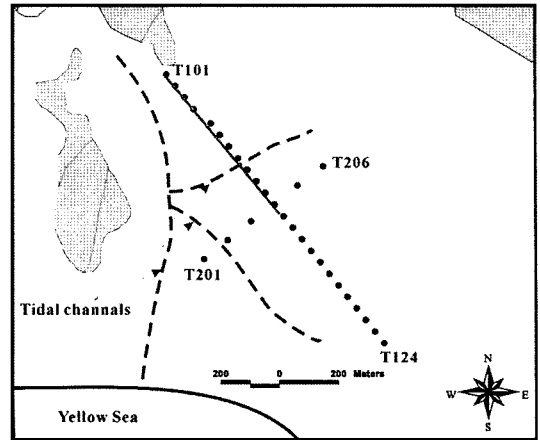


Fig. 6. Location map with sites of MT survey (circle), seismic survey (solid line) and tidal channels (dashed line) on the tidal flat.

리장 효과가 혼합되어 나타나는 것으로 이해할 수 있다. 조간대 퇴적층은 거의 1차원 층서에 가까우므로 TE 모드와 TM 모드 간의 뚜렷한 차이는 관찰되지 않으나 주변 잡음의 영향으로 인하여 TM 모드보다 TE 모드가 보다 좋은 결과를 보인다. 측정점 별로 미세한 비저항 차이가 나타나는데 육지에 가까운 측정일수록 보다 고비저항을 나타내는 경향이 있으며 조석 수로(tidal channel) 부근에 위치한 T109 측정점과 T202 측정점에서 다소 낮은 비저항이 나타나고 있다. 조석 수로 부근에는 간조시에도 해수가 흐르고 있으므로 공극내의 해수의 양이 상대적으로 많아 다른 지역에 비해 저비저항을 나타내는 것으로 생각된다.

조간대 퇴적층의 1차원 층서 구조를 정량적으로 해석하기 위하여 1차원 역산 기법 중 Occam(이하 OCC) 역산과 Marquardt-Levenberg(이하 ML) 역산 방법을 적용하였다. OCC 역산은 다수의 층으로 이루어진 지하구조를 가정하고 가장 부드러운 전기비저항의 해를 구해내는 방법이며 ML 역산은 소수의 층으로 이루어진 지하구조를 가정하고 층의 전기비저항과 깊이의 해를 구해내는 방법이다. OCC 역산의 경우 1 km 이내에 31개의 층을 설정하였고 ML 역산의 경우 5개의 층상구조를 가정하고 역산을 수행하였다. Fig. 8은 육지로부터의 인공잡음의 영향이 적고 부드러운 겹보기비저항과 위상의 변화를 보이는 T114 측정점에서의 역산 결과를 보여주고 있다. OCC 역산의 경우, 10 m 두께를 가지는 1 Ωm 의 퇴적층 하부에 점진적으로 전기비저항이 증가하는 층이 100 m 깊이

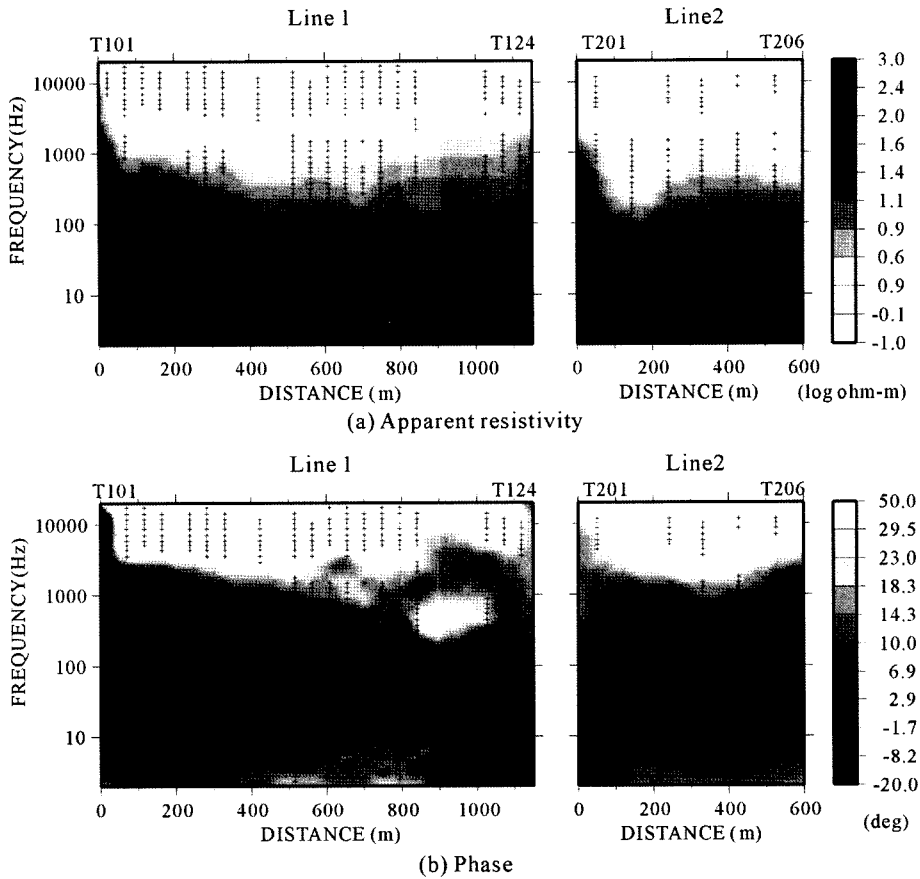


Fig. 7. Pseudosections of MT survey: (a) TE apparent resistivity and (b) TE phase.

까지 존재하며 100 m 이하에서는 비저항의 변화가 거의 없다. ML 역산에서는 5개의 층을 가정하였으나 거의 3개의 층으로 분해되었으며 그 경계의 깊이는 13 m와 55 m이며 각 층은 1.5, 170, 1040 Ωm의 전기비저항을 가진다. 다른 측정에서의 OCC 역산의 결과에서 5~13 m 범위의 두께와 1 Ωm 내외의 전기비저항을 가지는 최상부층을 확인할 수 있으며 최하부층은 1,000~10,000 Ωm의 비저항을 가지고 있다. ML 역산에서도 비슷한 두께의 최상부층이 확인되며 측정점에 따라 2층 구조와 3층 구조의 역산결과를 보인다.

조간대 퇴적층의 구조가 거의 1차원 구조에 가까우나 자료의 질과 1차원 역산의 특성 상 측정점에 따라 역산 결과가 다소 차이가 나는 경우가 있어 퇴적층 구조를 영상화하는데 1차원 역산은 부족한 면이 있다. 조간대 퇴적층 구조의 보다 명확한 영상화를 위하여 Non-Linear Conjugate Gradient(NLCG) 방법

을 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 일반적인 2차원 MT 역산 알고리즘을 수행하는 과정에서는 매우 큰 행렬의 계산을 필요로 하기 때문에, 많은 시간이 소요된다. NLCG 알고리즘은 conjugate gradient 알고리즘을 사용하여 반복적인 계산을 수행함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있다(Rodi and Mackie, 2001). 역산 결과 1차원 역산에서와 같이 10 m 내외의 두께를 가지는 최상부층의 형태를 확인할 수 있다(Fig. 9). T104의 ML 역산 결과와 2차원 역산 결과를 비교해 보면 최상부층과 두 번째 층의 경계는 2차원 역산 결과의 약 2 Ωm 경계에 해당한다. 따라서 최상부층은 전체적으로 5~15 m의 두께를 가지고 있으며 육지로부터 해양 방향으로 400~500 m 거리까지 점진적으로 최상부층의 두께가 증가하는 양상을 보인다. T114~T115 측정점에서 가장 두꺼워지며 T118 이후로는 다시 약 5 m로 알아지는 경향이 있다. 반면, 2~50 Ωm의 전기비저항을 가지는 중간층의 경우,

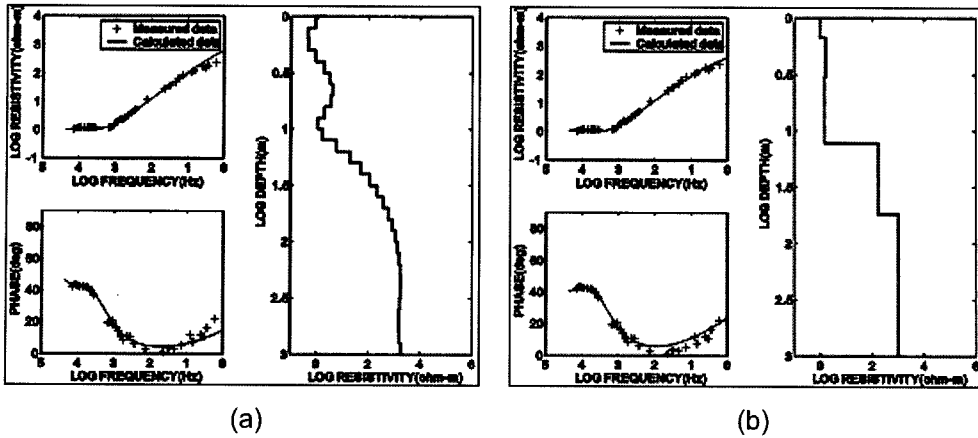


Fig. 8. One-dimensional inversion results of site T114 from using the Occam (a) and Marquardt-Levenberg inversion (b).

해양방향으로 갈수록 점진적으로 두꺼워지는 경향을 보이고 있으며 T123 측정에서는 그 두께가 50~60 m 에 이른다.

근흥만의 남쪽 지역에서 실시되었던 기존의 단일채널 탄성과 탐사에서는 이질 혹은 혼합퇴적상을 가지는 고화되지 않은 상부퇴적층과 사질이토층으로 이루어진 하부퇴적층이 약 10 m의 깊이에서 부정합으로 경계를 이루고 있음이 밝혀진 바 있다(김여상과 박수철, 1992). 또한 이 연구에서는 상부퇴적층과 하부퇴적층 사이의 부정합 면에는 많은 V자형의 침식면이 존재하며, 이 침식면은 지난 빙하기의 낮은 해수면 동안에 형성된 고수로로 지시해 준다고 보고하였다. 한편, 최근 서해안 민어포 지역 갯벌에서 실시되었던 다중채널 탄성과 탐사는 뚜렷한 침식부정합면이 수 m에서 최대 15 m 깊이에 존재함을 보여주고 있다(주형태 외, 2002). 일반적으로 지표면으로부터 처음 관찰되는 부정합면은 15,000년 전에서 18,000년 전에 있었던 빙하기 동안에 해수면이 하강하면서 형성된 것으로 해석하고 있으므로 이 부정합면은 홀로세 이전(pre-Holocene)과 홀로세(Holocene)의 경계를 의미한다.

AMT 탐사의 1차원 및 2차원 역산에서 보이는 10 m 내외의 경계면은 홀로세의 경계를 지시해주는 것으로 보이며 상부의 홀로세 퇴적층은 고화되지 않아 높은 함수율로 인해서 1 Ωm 이하의 낮은 전기비저항을 가지는 것으로 생각된다. 2차원 역산에서 나타나는 상부층의 굴곡은 빙하기에 형성된 고수로 등에 의한 침식의 양상을 지시하는 것으로 보이며 T114~T115 측정 부근에 고수로가 발달했을 가능성이 높다.

상부층 하부의 홀로세 이전의 퇴적층은 준고화되어 있을 가능성이 높아 전기비저항이 다소 높을 것이며 기반암은 선캠브리아기의 운모편암과 규암으로 구성되어 있으므로 1000 Ωm 이상의 높은 전기비저항을 가질 것으로 생각된다. 그러나 앞서 언급했듯이(Fig. 3, Fig. 4) 급격하게 증가하는 전기비저항 구조에서의 AMT 반응은 하부층의 두께와 전기비저항에 민감하지 못하므로 홀로세 이전 퇴적층의 두께와 전기비저항을 명확히 결정하기는 어렵다. 다만 홀로세 이전 퇴적층과 기반암 경계의 정성적인 분포 양상의 추정 은 가능하다. 예를 들어, T114 측정의 1차원 역산을 기준으로 삼는다면, Fig. 9의 2~50 Ωm의 전기비저항을 가지는 층을 홀로세 이전 퇴적층으로 볼 수 있으며, 육지 쪽 약 10 m, 해양 쪽에서는 최대 40~50 m의 두께를 가진다고 할 수 있다. 홀로세 이전 퇴적층과 기반암의 경계를 보다 정확하게 판단하기 위해서는 같은 지역에서의 탄성과 탐사 혹은 시추공 자료와의 복합해석이 필요하다.

탄성과 탐사를 통한 AMT 탐사의 효용성 검증

AMT 탐사가 이루어진 동일 지역에서 조간대예의 AMT 탐사 효용성을 검증하기 위하여 AMT 측정 T101에서 T113까지 천부 육상 탄성과 탐사를 수행하였다(Fig. 6). 음원으로는 5 kg의 햄머를 사용하였으며, 12채널의 지오폰을 이용하여 2 m 간격으로 약 720 m의 자료를 McSeis-SX system을 이용하여 획득하였다(Table 1). 탐사 현장이 물에 의해 포화되어 있

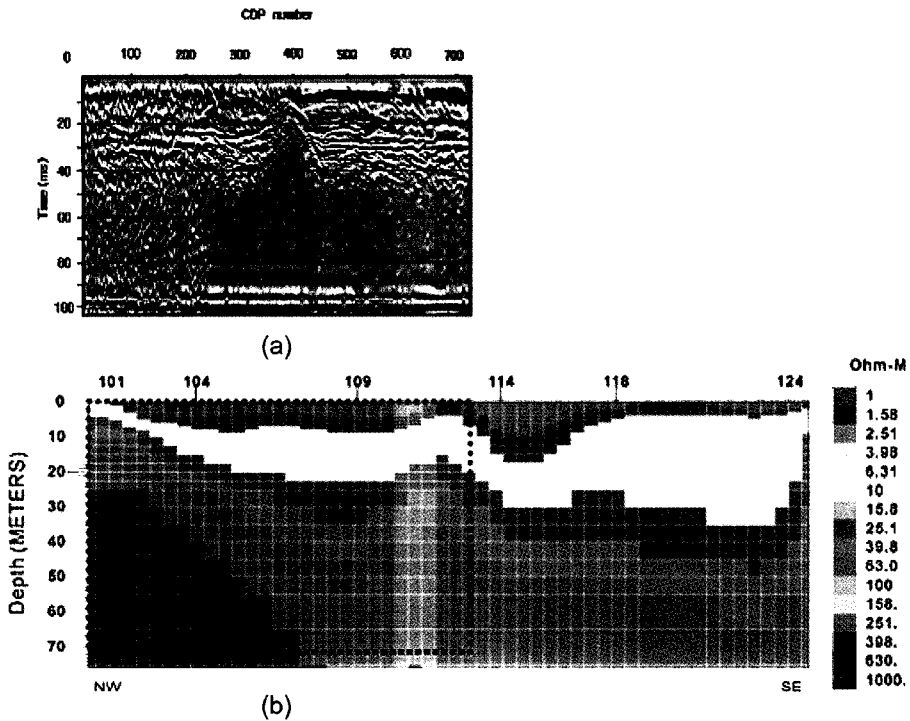


Fig. 9. Stack section of seismic survey (a) and TE mode 2-D inversion result using NLCG method (b). The smoothness parameter, τ used in AMT inversion is 30.

는 조간대이기 때문에 ground roll의 발생이 억제되었으나, 지오폰과 표면사이에 존재하는 물 때문에 제어하기 어려운 잡음이 존재하였다. 그러나, 탐사 지역이 물에 의해 포화된 지역이기 때문에 일반적인 육상탐사와 달리 잡음의 분리가 용이하여 신호대 잡음비가 좋은 탄성과 단면을 획득할 수 있었다.

탄성과 단면상에 나타나는 속도 불연속면은 왕복주시로 약 10 ms와 20~30 ms 부근에서 나타나고 있으며, 이는 홀로세 이전의 준고화된 퇴적층의 상부와 기반암의 상부를 지시하는 것으로 생각된다. 또한, 연구지역의 탄성과 속도가 분석결과 약 1,500 m/s로 나타나기 때문에 준고화된 홀로세 이전의 퇴적층 상부인 첫 번째 불연속면의 깊이는 13~20 m이며, 기반암으로 예상되는 두 번째 불연속면의 깊이는 27~33 m로 해석된다.

탄성과 해석 단면을 바탕으로 조간대에서의 AMT 탐사의 효용성을 살펴보면, 첫 번째 불연속면은 AMT 2차원 역산결과의 2Ωm의 경계와 일치하고 있으나, 그 하부의 경계면에서는 AMT 탐사의 결과가 심도 예측 부분에서 탄성과 단면에 비하여 과대평가

되는 경향을 나타낸다. 이는 상부의 전기전도도가 좋은 층에 의한 효과로 조간대에서의 AMT 탐사 자료 해석시 유의해야 될 부분으로 생각된다.

단일측점 AMT 탐사의 문제점

MT 탐사는 자연적인 전자기장을 송신원으로 사용하기 때문에 자연 전자기장이 약하거나 주변의 인공적인 전자기장이 강할 경우 왜곡된 임피던스 추정이 이루어질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 원거리 기준점 기법이 도입되어 임피던스 추정의 정확도가 획기적으로 개선되었다(Gamble et al., 1979). 특히, 한반도는 고압송전선, 전력선 및 기타 전기시설물들로부터 발생하는 인공잡음이 심할 뿐만 아니라 높은 전기비저항 구조를 가지고 있어서 잡음원으로부터 먼 거리까지 인공잡음의 영향이 크다. 이러한 인공잡음의 영향을 최소화하기 위해서는 원거리 기준점(remote reference)을 운영하여야 한다(송윤호 외, 2003). 그러나 비용 문제나 정확한 측정시간 동기화의 문제로 인해 우리나라에서는 최근까지 단일

Table 1. Acquisition parameters in the seismic reflection survey

- Energy Source	5 kg sledge hammer on a metal plate	
- Recorder	McSEIS-SX system (OYO Co.)	
- Survey Layout	shooting method	End-on
	Vertical stack	2 stacks
	Minimum offset	2 m
	Shot interval	2 m
	Geophone interval	2 m
	Number of channels	12

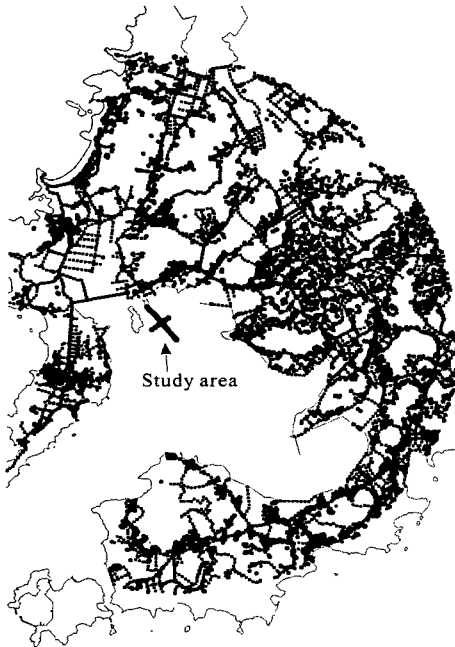


Fig. 10. Distribution of buildings and roads within 5 km from the study area.

측점(single station) AMT 탐사가 주로 이루어져 왔으며 본 연구에서도 탐사 여건상 단일측점 AMT 탐사를 실시하였다. 낮은 비저항의 갯벌환경에서는 인공잡음의 감쇠로 인해 일반적인 육상 환경보다는 좋은 결과를 얻었으나 인공잡음의 영향이 크게 나타나고 있음을 겉보기 비저항과 위상 자료로부터 알 수 있다(Fig. 7). 일반적으로 표피심도의 3-4배 이내에 있는 송신원은 평면파 가정을 만족하지 않기 때문에 저주파로 갈수록 겉보기 비저항이 로그스케일에서 45° 방향으로 증가하며, 특히, 위상이 0° 이하의 값을 가지는 경향은 전형적인 인공잡음의 근거리장 효과로 알려져 있다. 주변 잡음원의 위치에 따라 V자형 겉보기 비저항 양상을 나타내기도 하며 선행 연구들에

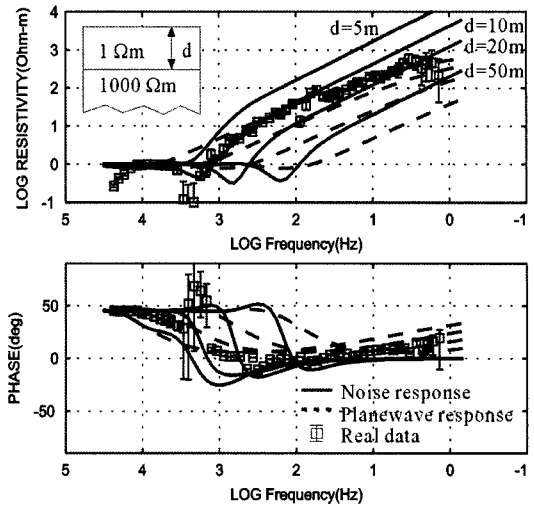


Fig. 11. Comparison among the calculated noise response, plane wave response and real data response at site T107.

의하면 전기, 철도, 도시 등이 이러한 심각한 왜곡 현상을 일으키는 것으로 알려져 있다(Qian and Pederson, 1991; Iliceto and Santarato, 1999).

연구지역에 전기, 철도나 대도시가 인접한 것은 아니지만 주변의 주거지역이나 도로가 밀집되어 있어 건물이나 도로에 설치된 전기 시설물이 잡음의 송신원 역할을 하는 것으로 보인다. 이러한 주변 잡음 송신원의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 연구지역 주변 5 km 이내의 건물과 도로에서 발생하는 인공잡음을 계산하여 이 인공잡음에 의해 나타나는 겉보기 비저항과 위상의 양상을 살펴보았다(Fig. 10). 건물과 도로의 위치는 수치 지형도로부터 추출하였으며 접지된 수평 전기 쌍극자의 형태로 잡음원을 가정하였다. 쌍극자의 방향은 균등 분포를 가지는 무작위 변수로 가정하여 계산을 수행하고 모든 잡음원에 의한 전기장과 자기장을 합하여 임피던스를 계산하였다.

Fig. 11은 수평 2층 구조에서 잡음에 의하여 나타나는 겉보기 비저항과 위상을 평면파에 의한 반응, 실제 측정된 반응과 비교한 것이다. T107 측정의 경우 근거리장 효과가 나타나기 시작하는 약 3 kHz부터 60 Hz까지의 대역에서 주변 잡음원의 반응과 유사함을 볼 수 있다. 60 Hz 이하에서는 잡음원에 의한 전자기장이 존재하지만 자연 전자기장에 대한 비율이 작아지므로 잡음에 의한 효과가 점점 줄어들기 때문에 근거리장 반응에서 벗어나 평면파 반응과 유사해지는 것을 알 수 있다. 수평 쌍극자의 근거리장 반응

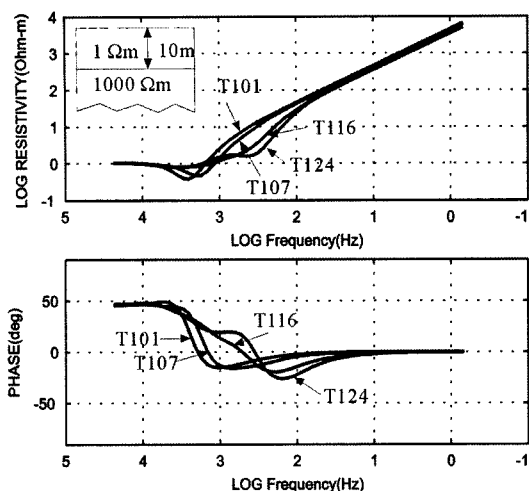


Fig. 12. Variations of the calculated noise responses with respect to the site position.

은 방향에 따라 다른 양상을 나타내기 때문에 측점에 따라서도 반응이 달리 나타날 수 있다. Fig. 12는 앞서서와 같은 구조에서 각 측점에 따른 겉보기 비저항과 위상의 변화 양상을 나타낸다. 이러한 차이는 역산결과에도 심각한 영향을 미칠 수 있으며 지하구조의 영상화를 왜곡시킬 가능성이 있다. 근홍만의 탐사결과에서는 해안선으로부터 700~800 m 이내 지역에서는 인공 잡음의 영향이 뚜렷이 관찰되며 더 먼 지역에서는 그 영향이 약하다. 따라서, 해안선으로부터 수백 m 이내의 연안에서는 원거리 기준점 기법의 적용을 통해 S/N비를 향상시킬 필요가 있으며 1 km 이상의 지역에서는 단일 측정 탐사 방법도 유용한 것으로 판단된다.

결론

전기 및 전자 탐사는 전기전도도가 높은 지하매질의 구조를 탐지하는데 효과적인 방법이다. 조건대 퇴적층에서는 홀로세에 퇴적이 이루어진 상부퇴적층은 1 Ωm 내외의 낮은 전기비저항을 가지므로 이 층의 두께를 탐지하는데 전기 및 전자 탐사가 유용하게 이용될 수 있다. 또한, 낮은 전기비저항의 환경에서 전기 및 전자 탐사를 적용하기 위해서는 일반적으로 매우 강한 인공 송신원을 사용하여야 하지만 MT 탐사는 다른 전기 및 전자 탐사와는 달리 인공 송신원이 필요 없기 때문에 효율적인 탐사가 가능하다.

서해안 근홍만 일대에서의 AMT 탐사 결과 최상부 층인 홀로세 퇴적층은 10 m 내외의 두께를 가지는 것으로 보이며 침식부정합면의 형태와 과거 고수로의 위치 파악도 가능하였다. 근홍만의 홀로세 이전 퇴적층은 수 m에서 수십 m의 두께를 가지고 있으며 육지로부터 멀어질수록 두께가 점진적으로 증가하는 양상을 보인다. 기반암의 명확한 깊이 및 전기비저항의 산출은 탄성과 탐사 결과를 통해 검증해 본 결과, AMT 탐사의 분해능과 관련되어 과대평가되는 경향성이 나타나지만, 정성적인 해석이 가능하며 탄성과 탐사나 시추공 자료 등 다른 자료와의 복합적인 해석을 하는 경우 기반암의 형태를 보다 정확히 파악할 수 있을 것이다.

다만, 서해안의 해안지역은 관광 및 주거 지역의 발달로 인해 해안선을 따라 도로나 전기시설물이 밀집되어 있는 경우가 많아 이러한 전기시설물에 의한 인공잡음은 겉보기 비저항과 위상을 왜곡시키는 결과를 초래하며 해안선으로부터 수 백 m 이내의 지역에서는 그 영향을 무시할 수 없다. 인공잡음에 의한 근거리장 효과는 수 kHz에서 수십 Hz 대역에서 강하게 나타나므로 최상부층 하부의 구조를 정확하게 파악하기가 어렵게 된다. 따라서, 해안선에 인접한 지역에서의 보다 정확한 탐사를 위해서는 원거리 기준점 기법의 적용이 필요한 것으로 나타났다.

사사

이 연구는 해양수산부에서 시행하는 배타적 경제수역 해양광물자원 조사 사업의 지원에 의해 수행된 것으로 관계 기관에 감사드리며, 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았 습니다. 또한, 이 논문의 원고를 세세하게 검토하여, 부족한 부분을 보완하도록 조언을 해주신 한국해양연구원 김성렬 박사님, 경인교육대학교 이희순 교수님과 다른 헌분의 심사자님께 감사드립니다.

참고문헌

국립지리원, 1979, 연안해역 지형 측량 보고서(근홍해역), 국립지리원, 56 p.
 김여상, 박수철, 1992, 한국 서해안 근홍만의 조건대 퇴적층 연구: 층서 및 형성과정. 한국지구과학회지, 13(1), 41-52.
 대한지질학회, 1999, 한국의 지질. 시그마프레스, 서울, 802 p.

- 송윤호, 이성근, 손정술, 조성준, 황세호, 박인화, 임성근, 2003, 경상북도 포항시 북부에서의 심부 전자탐사 사례. 한국지구시스템공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 159-162.
- 장태우, 이상용, 1982, 한국 지질도. 서산, 모항 도록. 한국동력자원연구소, 30 p.
- 정현기, 이동구, 주형태, 2001, 고출력 쌍극자 비저항탐사에 의한 갯벌하부 지반조사. 대한자원환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회 2001년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 69-73.
- 주형태, 김한준, 이광훈, 최동림, 김민지, 조현무, 2002, 갯벌 지역에서의 탄성파 탐사: 민어포 조간대 지역의 사례. 한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지움, 67-84.
- Constable, S. and Cox, C.S., 1996, Marine controlled-source electromagnetic sounding 2: The PEGASUS experiment. *Journal of Geophysical Research*, 101, 5519-5530.
- Constable, S., Orange, A., Hoversten, G.M., and Morrison, H.F., 1998, Marine magnetotellurics for petroleum exploration Part 1: A sea-floor equipment system. *Geophysics*, 63, 816-825.
- Constable, S., 2006, Marine electromagnetic methods - A new tool for offshore exploration. *The leading edge* 25, 438-444.
- Flosadottir, A.H. and Constable, S., 1996, Marine controlled-source electromagnetic sounding 1: Modeling and experimental design. *Journal of Geophysical Research*, 101, 5507-5517.
- Gamble, T.D., Gaubau, W.M., and Clarke, J., 1979, Error analysis for remote reference magnetotelluric. *Geophysics*, 44, 959-968.
- Garcia, X. and Jones, A.G., 2002, Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding. *Geophysics*, 67 (2), 448-458.
- Heison, G., Constable, S., and White, A., 2000, Episodic melt transport at Mid-Ocean Ridges inferred from magnetotelluric sounding. *Geophysical Research Letters*, 27, 2317-2320.
- Hoversten, G.M., Morrison, H.F., and Constable, S., 1998, Marine magnetotellurics for petroleum exploration, Part II: Numerical analysis of subsalt resolution. *Geophysics*, 63, 826-840.
- Iliceto, V. and Santarato, G., 1999, On the interference of man-made EM fields in the magnetotelluric 'dead band'. *Geophysical Prospecting*, 47, 707-719.
- Key, K. and Constable, S., 2002, Broadband marine MT exploration of the East Pacific Rise at 9°50' N. *Geophysical Research Letters*, 29, 2054-2057.
- Mitsuhara, Y. and Uchida, T., 2003, Application of electromagnetic methods to the investigation of seawater intrusion into coastal aquifer - A case study in the Hasunuma area, Chiba prefecture, Japan. *International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration*, 335-339.
- Phoenix Geophysics Ltd., 2004, The Phoenix. Phoenix Geophysics Ltd., Issue 34, p. 6.
- Qian W. and Pedersen L.B., 1991, Industrial interference magnetotellurics: An example from the Tangshan area, China. *Geophysics*, 56, 265-273.
- Rodi, W. and Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 174-187.
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basin. *Geophysics*, 37, 98-141.
- Zhao X., Geng X., and Zhang J., 1979, Sea level changes of eastern China during the past 20000 years. *Acta Oceanologica Sinica*, 1, 269-281

2006년 11월 29일 접수
 2007년 1월 19일 수정원고 접수
 2007년 1월 25일 채택