

## Marine CSEM의 최근 기술 개발 및 적용 사례

송윤호<sup>1)</sup>, 김희준<sup>2)</sup>, 설순지<sup>3)</sup>

### A Review on Recent Development and Application of Marine Controlled-Source Electromagnetics

Yoonho Song<sup>1)</sup>, Hee Joon Kim<sup>2)</sup>, Soon Jee Seol<sup>3)</sup>

**Abstract:** Marine controlled source electromagnetics (CSEM) or sea bed logging (SBL) is an emerging technology which can provide quantitative information on hydrocarbon reservoir embedded in marine sediment. Electromagnetic responses to the resistive formation saturated with a certain amount of hydrocarbon can be characterized by less attenuated profile otherwise exponentially attenuated fields in conductive sea water or through sediments, and thus can be regarded as a direct indicator of hydrocarbon.

In this paper, we introduce the technology of marine CSEM in terms of its physical characteristics and in comparison of typical three-dimensional (3-D) seismic method. History and evolution of commercial marine CSEM are also briefly summarized. We then introduce a representative case history showing how marine CSEM works in reality. Outlook of future applications and technical advances to be made are discussed. Finally, we demonstrate a test example of 2.5-D inversion of synthetic data as the groundwork of 3-D inversion of field data that is to be the ultimate goal of technical development.

**Keywords:** marine CSEM, SBL, electromagnetic, electric resistivity, hydrocarbon

### 1. 서론

최근 들어 해상 3차원(3-D) 탄성파탐사의 보조수단으로서 해양 전자탐사(Marine Controlled-Source Electromagnetic: CSEM) 탐사 기술에 대한 많은 연구결과가 주요 학술지에 발표되고 있으며, 이를 특집으로 다룬 특별호 들도 자주 발간되고 있다 (Tompkins and Srnka, 2007; Srnka et al., 2006; Johansen et al., 2005; Chopra et al., 2007). Marine CSEM은 전자탐사기술을 심해저 환경에 적용하여 석유나 가스층의 높은 전기비저항 특성을 이용해 직접적으로 탄화수소 유무를 탐지한다는 점에서 탄성파탐사의 중요한 보조수단으로 간주되며 일부에서는 1980년대 3-D 탄성파탐사 기술개발 이후의 가장 주목할 만한 기술개발 사례로 까지 이야기되고 있다.

---

1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부(Groundwater & Geothermal Resources Division, KIGAM)

E-mail: song@kigam.re.kr

2) 부경대학교 환경탐사공학과(Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University)

3) 한양대학교 지구환경시스템공학과(Dept. of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University)

1990년대까지 바다에서의 전자탐사는 바닷물의 높은 전기전도도 및 탐사 대상이 되는 탄화수소층의 높은 전기비저항으로 인해 적용 가능성이 낮다고 여겨져 왔다. 그러나 1990년대 후반에 Marine MT 탐사 기술의 개발과 일부 성공적인 적용에 힘입어 2000년대에는 Exxon Mobil과 StatOil 등에서 상업적인 탐사에 성공함으로써 미국과 영국, 노르웨이 등에서는 매우 활발한 연구 및 현장탐사가 이루어지고 있다. 적용환경이 심해저라는 면에서 Marine CSEM의 실제적인 탐사기술을 확보하기란 시간적 및 비용적으로 우리나라의 현실에서는 쉽지 않아 지금까지는 이에 대한 해설논문(김희준 등, 2006) 한편 정도가 보고된 바 있다. 그러나, 최근 우리나라에서도 해외 석유개발에 대한 투자가 날로 증가하고 있으므로 최소한 자료의 해석기술에 대한 연구 개발이 필요하다고 판단된다. 이 논문에서는 Marine CSEM 기술의 원리와 특성을 간단히 소개하고 탄성과탐사와 비교한다. 2006년 및 2007년에 기본 원리에 대한 많은 우수한 논문이 발표된 바 있으므로 이의 결과를 인용하여 중요한 이론을 살펴보고 대표적인 적용사례를 소개하며, 계산자료를 이용한 2.5차원 역산 실험 결과를 바탕으로 향후 기술개발 전망에 대해 서술한다.

## 2. Marine CSEM 기술의 특성

Marine CSEM은 기본적으로 인공송신원 전자탐사 기술의 한 종류이지만, 현장탐사 자료획득의 위치와 주변 지질환경(전기전도도 분포)이 일반적으로 행해지는 전자탐사와 매우 다르다는 면에서 특별한 하나의 기술분야로 다루어지고 있다.

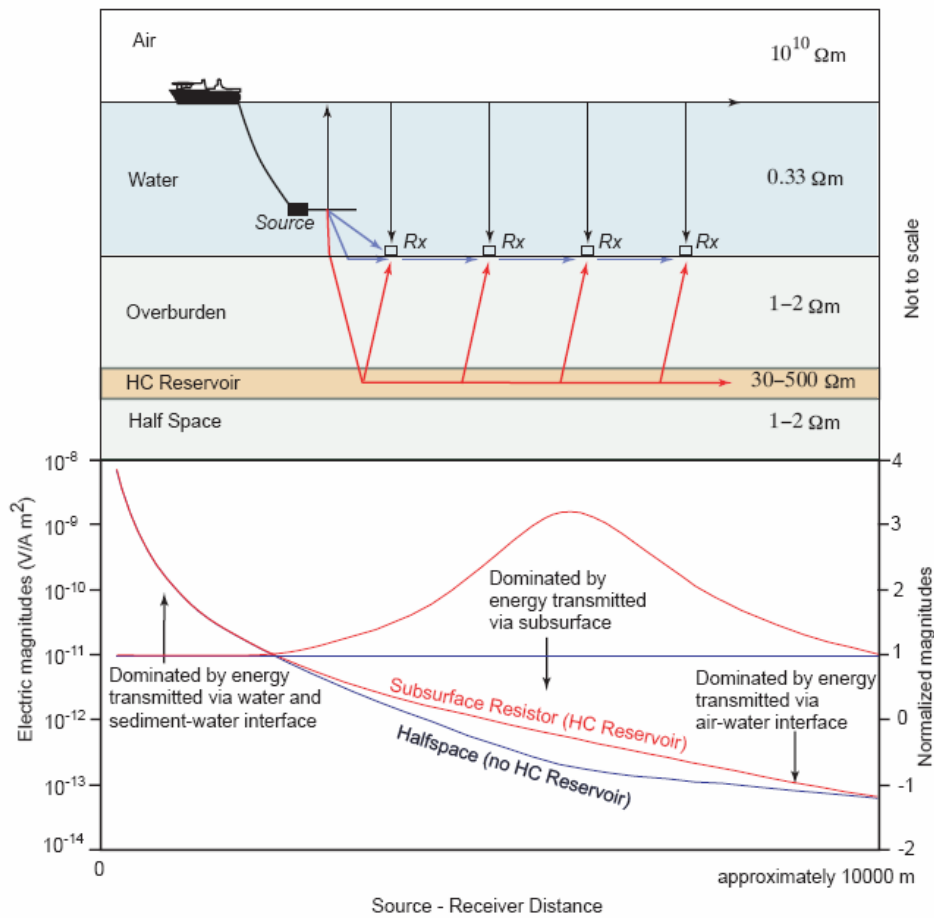
먼저 자료획득의 위치가 바다 깊은 곳이라는 측면에서 매우 특별한 탐사기기의 적용이 필요하다. 바다 속에서는 대략 10 m 깊이마다 1기압씩 압력이 증가하기 때문에 2 km 깊이의 바다에서 송수신을 하려면 200기압을 견디는 용기 내에 송수신 시스템을 장착해야 하며 이는 매우 깊은 시추공내에서의 자료획득 상황과 비슷하다. 또한 바닷물의 높은 전기전도도에 따른 전자기장의 심한 감쇠로 인해 측정 신호수준이 매우 낮아 통상적인 수준의 기기 정밀도로는 의미 있는 신호의 획득이 어렵다. 따라서 오랜 기간 동안 실질적이고 상업적인 적용은 어렵다고 여겨져 왔다.

그러나 한편으로는 바닷물의 높은 전기전도도가 접지저항문제를 해결하여 높은 송신출력을 가능케하고, 또한 외부 전자기적 잡음이 감쇠되어 인공적인 잡음의 영향이 거의 없는 이점이 있다. 이러한 이점에 기초하고 1990년대에 들어 이루어진 측정기기 및 위치 측정기술의 발달에 힘입어 심해저에서의 자료획득이 가능해졌으며 또한 자료처리 및 해석기술도 비약적으로 발달하여 2000년대에 들어서는 전 세계적으로 많은 탐사가 수행되고 있으며, 성공적인 사례도 속속 보고되고 있다.

### 2.1. Marine CSEM의 기본원리

Fig. 1은 현재 탄화수소 탐사 목적으로 적용되고 있는 Marine CSEM (또는 Sea Bed Logging) 탐사기술의 개요 및 원리를 개념적으로 보여준다. 전기장 및 자기장을 수신할 수 있는 수신기는 해저면에 고정되어 있고, 전기쌍극자를 길게 늘인 송신기는 해저면

으로부터 50-100 m 띄워서 이동하며 측정한다. 대부분의 송신 에너지는 바닷물의 높은 전기전도도로 인해 감쇠되지만 어느 정도 떨어진 송수신 거리에서부터는 바닷물보다 비저항이 높은 하부 퇴적층을 통해 덜 감쇠되어 전파된 전자기장이 수신된다. 또한 공기중에서 전자기장은 감쇠되지 않으므로 아주 작은 크기이지만 해저면으로부터 해수면으로 올라온 전자기장이 해수면을 따라 전파되어 다시 수신기에 도달하게 된다 (Fig. 1 위 그림). Fig. 1의 아래는 해저면에 위치한 수신기에 기록되는 전기장의 크기를 송-수신 거리의 함수로 나타낸 것으로 Marine CSEM의 기본 원리를 나타낼 때 자주 이용되는 그림이다.



**Fig. 1.** Schematic sketch of air-water-sediment geometry and source-receiver layout (top) and typical responses in terms of magnitude of electric field measured at a single receiver as a function of source-receiver distance (bottom) (Johansen et al., 2005).

송-수신거리가 증가할수록 수신되는 전기장의 크기는 지수함수적으로 감소하게 되는데, 그 크기는 주파수, 전기전도도 및 송-수신 거리의 함수이다. 먼저 송-수신 거리가 짧으면 대부분의 에너지가 바닷물을 통해 수신기에 전달되므로 송-수신 거리에 따라 급격한 감쇠를 보인다. 이러한 에너지가 해저 퇴적층에 도달하게 되면 해저 퇴적층의 전기전도도는 바닷물에 비해 1/3이하이기 때문에 감쇠정도가 덜하게 되어 상대적으로

먼거리까지 전파하게 된다. 만약 퇴적층 내부에 비저항이 높은 층(탄화수소층)이 존재하면 이 감쇠정도는 더 줄어들게 된다. 따라서 측정된 반응을 탄화수소층이 존재하지 않는 반 무한공간에 대한 반응으로 나누어주게 되면 (Fig. 1 아래의 붉은색 선), 일정 송-수신구간에서는 매우 큰 정규화 반응을 얻게 되며 이로부터 퇴적층내 고비저항층의 존재를 알 수 있게 되는 것이다. 한편 그림에서 정규화된 반응을 보면 일정거리 이상에서는 그 크기가 줄어들게 되는데, 이는 공기층을 전파하면서 감쇠되지 않고 다시 수신기로 전파되는 에너지가 상대적으로 증가하기 때문이다.

이러한 반응양상은 Marine CSEM의 반응이 매질의 전기적인 특성에 직접적으로 반응함으로써 나타나는 것으로서, 탄성파탐사와 달리 탄화수소의 유무를 판단할 수 있는 장점이 된다. 물론 탄성파탐사에서도 AVO (Amplitude Variation with Offset) 해석을 통하여 탄화수소 유무에 대한 해석을 하게 되지만, 전기비저항이 Archie의 법칙에 따라 탄화수소 포화도에 직접적으로 연관된다는 점에서 유리하며 따라서 시추공에서의 전기비저항 검층(또는 전자유도 검층)과 동일한 효과를 얻을 수 있다는 뜻으로 Marine CSEM을 SBL (Sea Bed Logging)로 부르는 이유가 여기에 있다 (Eidesmo et al., 2002; Ellingsrud et al., 2002).

Table 1에 해양 석유탐사에 기본적으로 동원되는 3-D 탄성파탐사와 Marine CSEM의 특성을 비교하여 나타내었다. 물론 이 비교는 일반적인 상황에 대한 비교이므로 특정 지질여건에 따라 상대적인 차이가 변화할 수 있겠으며, 아직도 marine CSEM은 기술 성숙도면에서는 초기 단계라 할 수 있겠다.

**Table 1.** Characteristic comparison of 3-D seismic and marine CSEM.

	3-D 탄성파 탐사	Marine CSEM
대상물성	밀도, 탄성파속도	전기비저항(전기전도도)
해 상 도	높 음	중 간
탄화수소탐지	간 접 적 $cf > AVO$	직 접 적
기술 성숙도	성숙단계	성장단계
비 용	높 음	중 간

## 2.2. 고 비저항층에 대한 전자탐사 반응

Marine CSEM이 탄화수소층에 대한 반응을 탐지해낼 수 있는 이론에 대해 살펴보자. 전체공간  $V$ 내 임의의 위치  $\mathbf{r}$ 에서의 전기장  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 는 이상체가 없을 때(marine CSEM의 경우 바닷물과 하부 퇴적층만의 구조)의 일차장( $\mathbf{E}^p$ )과 이상체에 의한 반응인 이차장( $\mathbf{E}^s$ )의 합이며, 이는 다음과 같이 적분방정식 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}^p(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) \\ &= \mathbf{E}^p(\mathbf{r}) - i\omega\mu \int_V \underline{\underline{\mathbf{G}}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Delta\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma(\mathbf{r}') = \sigma(\mathbf{r}') - \sigma_b \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수,  $\mu$ 는 투자율(보통 진공에서의 투자율로 가정),  $\sigma$ 는 전기전도도 ( $\sigma_b$ 는 배경매질에서의 전기전도도),  $\underline{\underline{\mathbf{G}}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 는 전기장의 Green 텐서이다.

(1)식의 우변 두번째 항과 (2)식에서 알 수 있듯이, 다른 조건이 동일할 때 이차장은 이상체와 배경매질 사이의 전기전도도 차의 함수이다. 간단하게 반 무한 공간의 전기비저항을 통상적인 해저 퇴적층의 값인 1 ohm-m로 가정하자. 이때 그 내부에 해수 대수층이 존재한다고 하면 전기전도도 차는  $3.0 - 1.0 = 2.0$  S/m 가 된다. 반대로 대수층이 탄화수소로 일정량 포화되어 있어서 100 ohm-m 이라고 가정하자. 이때의  $\Delta\sigma = 0.01 - 1.0 = -0.99$  S/m로 해수 대수층의 1/2 이하이며 부호가 반대가 된다. 좀더 일반화한다면 어떠한 경우라도 전기비저항이 높은 경우가 낮은 경우에 비해 반응의 절대적 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 이는 전기 및 전자탐사에서 전도체가 저항체에 비해 큰 반응을 나타내기 때문에 주 탐사대상이 되어왔던 이론적인 근거이다.

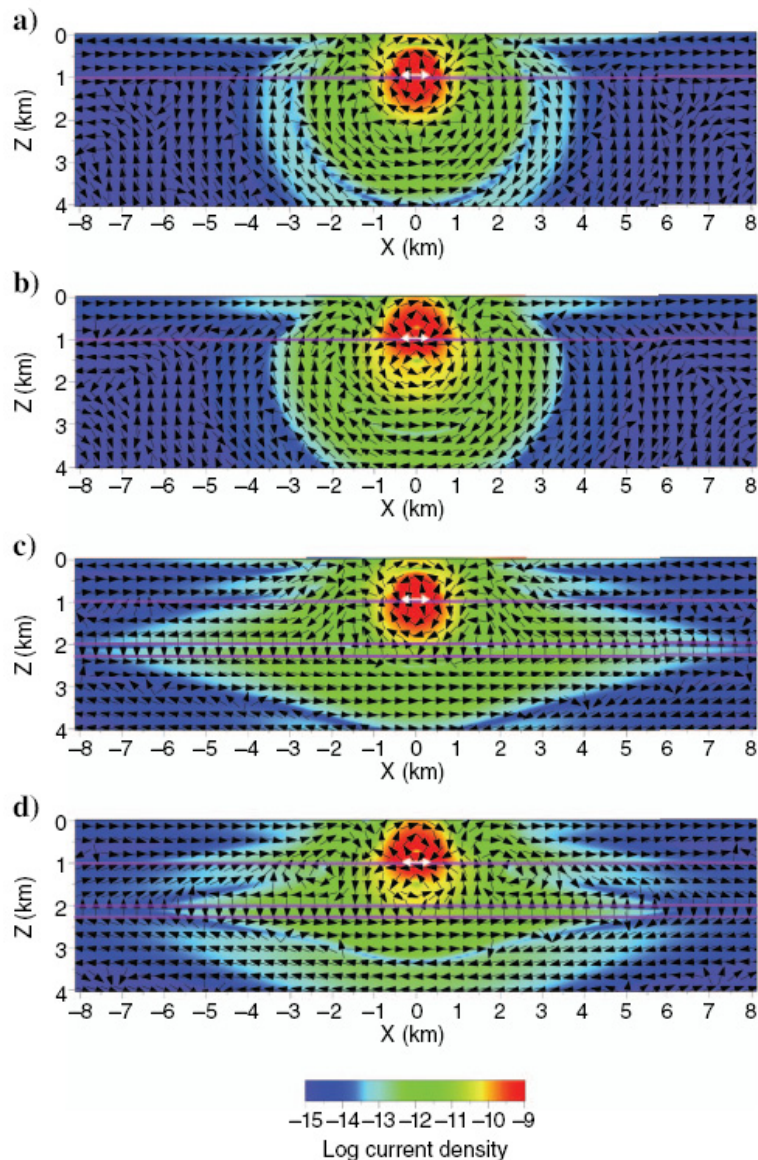
이와 같이 비저항이 높은 대상체의 상대적으로 불리한 반응은 바닷물의 높은 전기전도도로 인한 전자기장의 극심한 감쇠와 더불어 바다에서의 전자탐사에 대해 오랜 기간 동안 전문가들 사이에서 부정적인 시각을 갖게 해왔다. 물론 아직도 많은 사람들이 그 효용성에 대해 의문을 갖고 있으나, 최근의 기술적 발달과 성공사례들은 이러한 한계가 어느 정도 극복되고 있음을 증명하고 있다.

이러한 탐지가능성을 좀더 정량적으로 살펴보자. Um and Alumbaugh (2007)는 탄화수소층을 1차원으로 가정하고 매우 다양한 해석을 통하여 탐지가능성을 정량적으로 분석한 후에 3차원 구조의 경우로 이 해석을 확장한 바 있다. Fig. 2는 그 결과의 하나로서 1 Hz 송신주파수를 사용하였을 때, 탄화수소층 유무에 따른 바다 및 해저에서의 전류밀도의 크기 및 방향을 화살표로 나타낸 것이다. 사용된 모형은 수심이 1 km, 퇴적층의 1 km 하부에 100 m 두께의 탄화수소층이 위치하며, 전기전도도는 각각 3.0, 1.0, 그리고 100 ohm-m로 marine CSEM의 타당성 분석에 자주 동원되는 모형이다 (Constable and Weiss, 2006; 김희준 등, 2006). 송신은 해저면 상부 50 m에 길이 250 m, 송신 전류 200 A인 x방향 전기양극자를 통해서 이루어진다고 가정하였다.

그림은 탄화수소층을 모사한 고비저항층이 없는 모형에 대한 전류밀도의 동상성분(Fig. 2a)과 이상성분(b), 그리고 고비저항층이 존재할 때의 경우(c, d)를 각각 보여주고 있는데, 고비저항층의 유무에 따라 해저면 하부뿐만 아니라 바닷물 속에서의 전류밀도 또한 그 크기 및 방향에서 매우 달라짐을 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 고비저항이 없는 경우에는 바닷물에 비해 상대적으로 비저항이 높은 해저퇴적층에서 강하게 퍼져나가는 전기장의 영향으로 바다에서의 전기장도 영향을 받는 정도만을 확인할 수 있는데 반해, 비저항이 높은 탄화수소층이 존재하면 이 층에서 감쇠되지 않고 전파되는 에너지에 의해 바닷물을 포함한 모든 지층에서 전류밀도가 상당히 커짐을 알 수 있다. 또한 전기장의 수평성분이

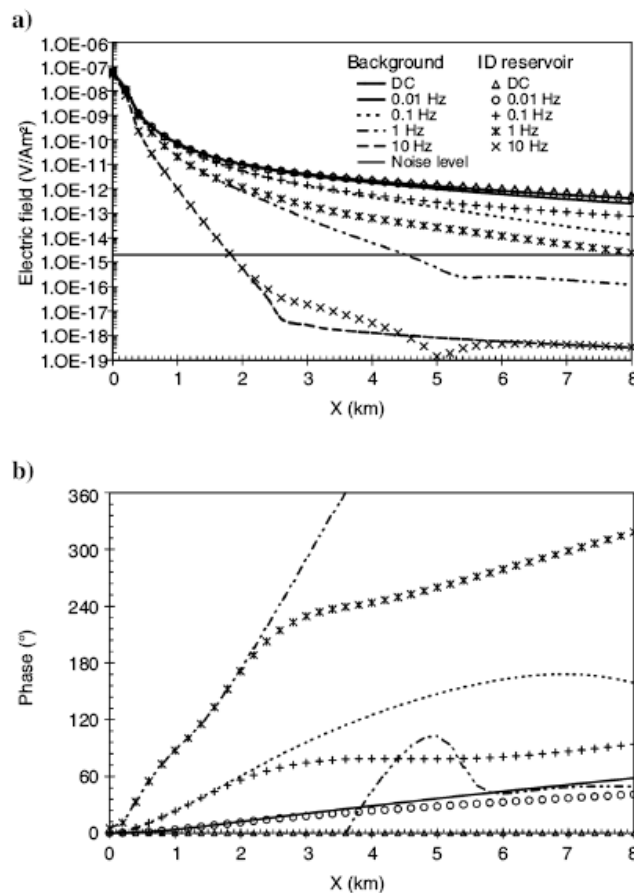
경계면에서 연속이라는 경계조건을 만족시키기 위해서 전류밀도의 방향도 고비저항층의 존재에 의해 상당히 바뀌는 것을 확인하게 된다.

한편, 실제탐사에서는 해저면에 수신기가 위치하기 때문에 이상체의 존재를 탐지하기 위해서는 해저면에서의 신호가 왜곡되어야만 한다. 이러한 면에서 Fig. 2의 1 km 심도의 반응을 살펴볼 때에도 탄화수소층의 유무에 따라 확연한 차이를 볼 수 있다. 해저면에서의 반응만을 비교하기 위하여 송신 주파수별로 송신 전류양극자로부터 거리에 따른 수신기에서의  $x$ 방향 전기장의 크기 및 위상차를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서  $2 \times 10^{-15}$  V/A·m<sup>2</sup>에 실선이 그려져 있는 것은 이 값이 현재 상용화된 시스템의 잡음수준이며 따라서 이 보다 작은 신호는 탐지 불가능하다고 볼 수 있다.



**Fig. 2.** Radial (in-line) current-density vector plots per unit-source moment in the background and 1-D reservoir models (Um and Alumbaugh, 2007). A 1-Hz source is employed. (a), (b): In-phase and out-of-phase of the background model, respectively. (c), (d): In-phase and out-of-phase of the 1-D reservoir model, respectively.

그림에는 직류, 0.01 Hz, 0.1 Hz, 1 Hz 및 10 Hz에서의 반응이 그려져 있는데, 직류와 0.01 Hz에서는 크기 및 위상 모두 탄화수소층 유무에 따른 관별이 거의 불가능하고 반면에 10 Hz에서는 감쇠가 너무 심해 송신기와 가까운 지역을 제외하고는 신호의 탐지 자체가 불가능하다. 반면, 0.1 Hz 송신주파수의 경우에는 송수신거리가 5 km 이상일 경우 두 경우의 분리가 가능하며, Fig. 2에 수신 전류밀도 분포를 나타낸 1 Hz의 경우에는 3 km 이내에서부터 뚜렷한 차이가 확인된다. 따라서 적절한 송신주파수 및 다수의 수신기를 이용한다면 Fig. 1의 아래그림과 같이 정규화된 반응으로부터 해저면 하부 탄화수소층의 존재를 탐지할 수 있음을 알 수 있으며, 실제로는 구형파(square wave) 송신을 통해 odd harmonic (기본 주파수의 3, 5, 7, 9 배 주파수) 반응을 모두 얻어 탄화수소 탐지에 이용하고 있다.



**Fig. 3.** (a) Radial (in-line)  $E_x$  amplitudes and (b) their phase plots as a function of source-receiver separation for the background and 1-D reservoir model (Um and Alumbaugh, 2007).



### 3. Marine CSEM의 역사

Marine CSEM의 개념적인 출발에서부터 현장 탐사 성공까지의 역사는 Constable and Srnka (2007)에 잘 정리되어 있는데, 여기서는 중요한 사항에 대해서 간단히 요약한다. Marine CSEM의 유래는 전기 및 전자탐사기술이 물리탐사에 도입된 초기로 거슬러 올라가는데, 1930년대 초기 Schlumberger가 해저 전기비저항탐사의 개념을 도입한 것으로부터 찾을 수 있으며 바닷물보다 전기전도도가 높은 황화광상의 탐사에 동원되었다. 이외에도 Marine IP 탐사 및 잠수함 탐지나 해저케이블 설치를 위한 조사 등 군사적인 목적으로 전자탐사의 원리가 적용된 바 있으나 이러한 모든 사례는 천해저 환경에 국한된 것이다.

한편 학계에서는 미국 UC (University of California) San Diego의 Scripps 해양 연구소가 Marine CSEM의 선구자로 인정받고 있으며 현재까지도 전세계적인 연구개발을 이끌고 있다. Scripps에서는 Charles Cox가 1970년대 말부터 태평양 중앙해령의 지구물리학적 조사에 실제적으로 Marine CSEM을 동원한 이후로 꾸준히 연구개발에 노력해왔으며, Steve Constable이 1990년대에 상업적인 Marine MT 탐사 기술을 개발하면서 이를 현재의 Marine CSEM으로 발전시켰다. 특히 Marine MT 탐사 기술의 상업적인 개발은 CSEM의 발전에 큰 공헌을 하였는데, 심해저용 수신기의 개발과 이를 발전시킨 24 bit A/D 변환 및 대용량 solid-state 메모리 장착 등을 통해 미약한 신호의 정밀 수신과 장시간 자동 측정 등이 가능하게 되었다.

학계에서의 연구개발의 또 다른 한 축으로 영국 Southampton University를 들 수 있는데, 이 그룹을 이끌고 있는 Martin Sinha는 1980년대 중반에 Scripps 시스템을 도입하여 Cambridge University에서 연구개발을 수행하다가 이 대학으로 옮겨서 현재 MacGregor 등과 함께 활발한 연구를 진행하고 있다. 또한 캐나다 Toronto 대학의 Edwards 등은 위 두 그룹과 달리 시간영역 전자탐사 기술을 해저에 적용하는 독자적인 연구를 수행해오고 있는데 현장에서 활발히 적용되고 있지는 않다.

실제 현장 적용면에서 본다면 메이저 석유사인 ExxonMobil이 대표적인데, Leonard Srnka가 주도하고 있으며 1980년대에 연구개발에 착수하여 1990년대 중반까지는 수심 1,000 m 이내에서의 석유탐사를 시도하였다. 당시만 해도 기기의 한계로 인하여 뚜렷한 성과를 얻지 못하였으나 1990년대 후반에 Scripps 시스템의 도움을 받아 시스템을 향상시켜 2001년 말에 Scotland와 서부 아프리카 off-shore에서 시험탐사에 성공하였으며 2002년에 서부 아프리카 off-shore 세 지역에서 탄화수소 탐지 성능을 확인하였다. 현재에도 ExxonMobil은 전세계 유망지역에서 지속적으로 자료를 획득하고 있으며 수신기의 감도 향상 및 3차원 영상화 기술의 개발에 주력하고 있다.

또 다른 석유회사로 노르웨이의 Statoil을 들 수 있는데, 이 회사는 1999년 말에 Scripps의 Constable을 초청하여 Marine CSEM의 가능성을 확인하고 막대한 액수의 연구개발비를 투입하여 2000년 말에 Angola off-shore에서 시험탐사를 수행하기에 이르렀다. 또한 이러한 성공에 힘입어 독자적인 탐사회사인 emgs (ElectroMagnetic GeoService)를 발족하였는데, 이 회사에서 나름대로 붙인 이름인 Sea Bed Logging (SBL)이 현재 Marine



CSEM 기술의 또 다른 기술명으로 통용되고 있다. 그 외 Offshore Hydrocarbon Mapping (OHM)사가 상업적 탐사 서비스를 제공하고 있으며 Marine MT 탐사의 상업적 적용을 이끌었던 AGO/Schlumberger 사도 시장에 참여하고 있다.

모든 상업적인 탐사는 그 기술의 뿌리를 Scripps 시스템에 직간접적으로 두고 있는데, Fig. 4는 연도별 Marine CSEM 기술의 상업화 정도를 도표로 나타낸 것이다 (Chopra et al., 2007). 그림에서와 같이 현재 상업적으로 조사된 사례는 300 건에 육박하는 것으로 보고 있으며 조사 건수는 급격하게 증가하고 있고 앞으로도 이러한 추세는 계속될 것으로 예상된다.

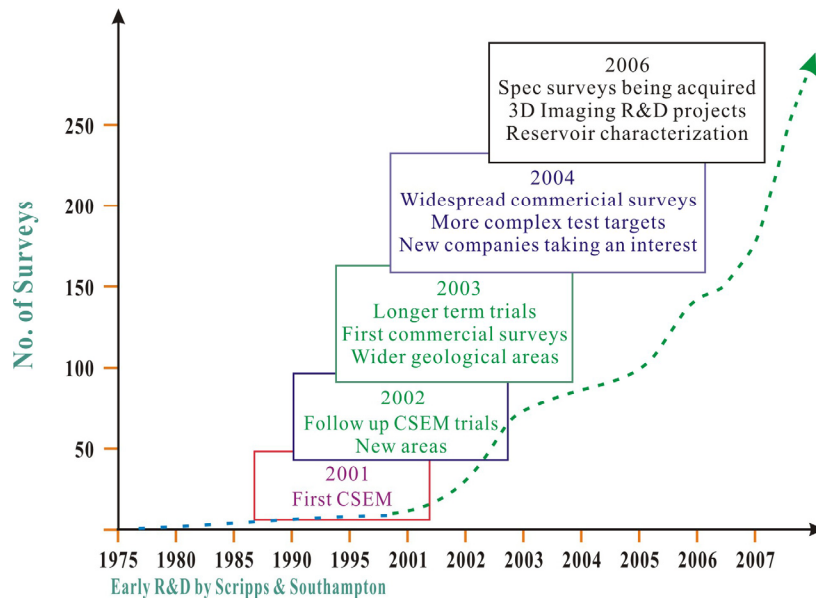


Fig. 4. Evolution of commercial CSEM (Chopra et al., 2007).

#### 4. 대표적인 적용사례: Troll West Gas Province

현재 상업적으로 사용되고 있는 시스템은 송신모멘트가 수백~1,000 A × 100~300 m인 전기양극자를 송신원으로 사용하고 송신주파수는 보통 0.25 Hz 기본주파수를 갖는 구형파를 사용하는 등 0.1 – 10 Hz 범위에 걸친다. 또한 송신기의 이동이 가능하도록 해지면 상부 50 m 에 띄워서 1.5 knot의 속도로 이동시킨다. 바닥에 고정시키는 수신기는 10 m 길이의 전기쌍극자를 채택하여 3성분 전기장과 3성분 자기장을 모두 측정한다. 측정 자료는 24 bit A/D 변환기를 통해 대용량 solid-state 메모리에 저장되며 잡음 수준은 0.1 – 1.0 nV/√Hz로서 송신모멘트를 고려할 때 1~2×10<sup>-15</sup> V/A·m<sup>2</sup> 정도이다.

Troll 가스전은 북해의 북동부에 해당하는 노르웨이 대륙붕에 부존하는 가장 큰 가스전으로서 비교적 천해에 해당한다. Johansen et al. (2005)은 이 가스전 중의 일부분인 Troll West Gas Province (TWGP)에 SBL을 적용하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 이상적인 반응을 얻을 결과를 발표하였으며 여기서는 그 결과를 간략히 소개한다. 현장자료 획득은 앞에서 서술한 바와 같은 방식으로 수행되었는데, 총 24개의 수신기를 해저면에 고정시킨 후 길이 230 m의 전기양극자를 송신원으로 사용하였다. 송신전류는 1,000 A 가량이며 0.25 Hz의 구형파를 발생시켜 odd harmonic 주파수의 자료도 해석에 사용할 수 있도록 하였다.

Fig. 5의 위는 수신기 Rx 24의 자료를 가스전에서 떨어진 곳에 위치시킨 기준점 수신기 Rx 2에서의 반응으로 나누어준 값(붉은 원), 이미 알고 있는 지질구조 정보로부터 계산한 결과(네모), 그리고 계산값으로 정규화한 기준점 수신기에서의 반응(푸른 원)을 보여주고 있다. 먼저 푸른색 원을 보면, 탄성파탐사 및 검층을 통해 얻어진 지층 변수를 가지고 계산한 값으로 정규화 시킨 기준점에서의 측정값이 1.0에 근접하고 있어서 사전정보 및 계산값, 그리고 측정이 상당히 정확하게 이루어졌음을 확인할 수 있다. 물론 송수신 거리가 7 km 이상이 되면서 신호 수준이 미약해져 잡음의 영향으로 자료의 연속성이 떨어지긴 하지만, 실제 측정값을 정규화 시킨 붉은 색 원과 계산값이 매우 훌륭한 일치를 보여주고 있으며, 또한 하부에 고비저항 층이 부존함을 보여주고 있다. 이러한 실제 탐사결과는 Fig. 1에 도시한 탐지 원리가 실제 물리적 현상을 정확하게 설명하고 있음을 입증하므로 Marine CSEM의 타당성을 증명한 사례라 하겠다.

한편 자료의 해석 측면에서 본다면 인공송신원이 동원되는 탐사법이기에 때문에 그림의 위에 나타낸 그래프만으로는 해저면 하부 고비저항체의 수평적인 위치에 대한 정보가 부족하게 된다. 이를 해결하기 위한 간단한 방법으로 각 수신기별로 송수신 거리가  $6.5 \pm 0.5$  km 되는 자료를 추출하여 공통중심점에 표시한 결과(전기비저항탐사에서 가단면도 그리는 방식)를 Fig. 5의 아래에 실제 지층구조와 함께 나타내었다. 그림에서 보면 정규화된 반응이 실제 가스전의 위치에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 TWGP에서 SBL의 성능을 확실하게 보여준 하나의 사례이다.

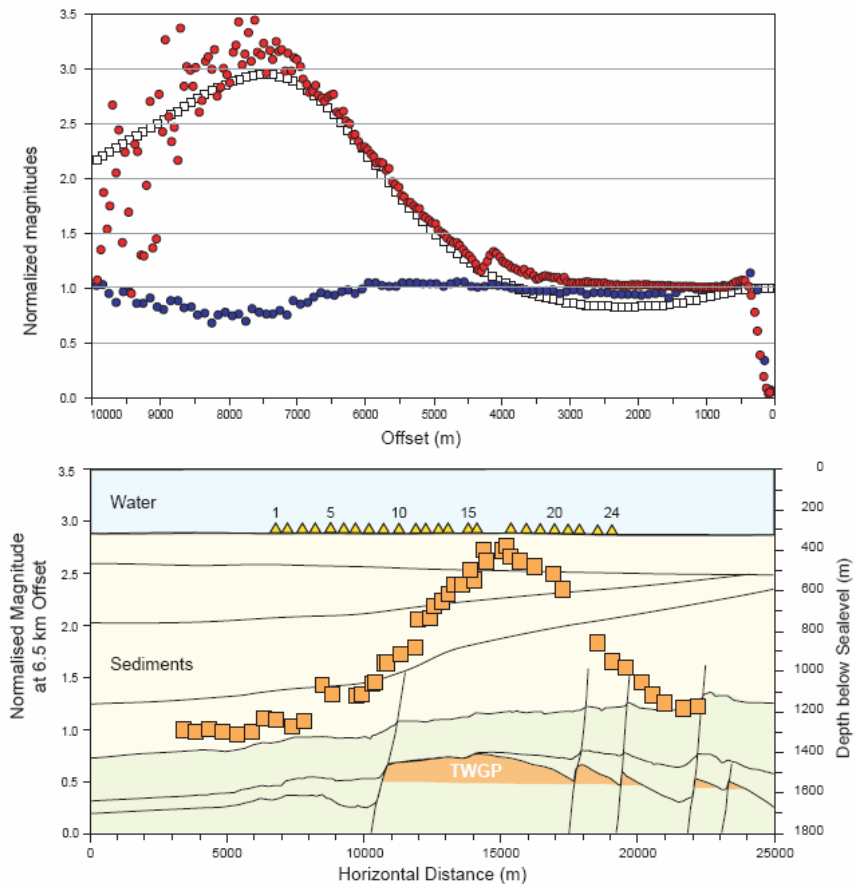


Fig. 5. Example of measured data at Troll West Gas Province (Johansen et al., 2005).

## 5. 기술적 과제 및 앞으로의 전망

지금까지 Marine CSEM의 특성 및 원리, 기술개발 추이, 그리고 대표적인 현장 적용사례를 통한 적용성 입증 결과를 간략히 살펴보았다. 여기서 소개한 것 이외에도 많은 성공사례들이 보고되고 있고 또한 Fig. 4에 현장 적용 건수가 급격히 증가함을 보인 것과 같이 앞으로도 많은 지역에서 해저 석유 및 가스탐사를 위해서 활발히 적용될 것이다. 그러나 Table 1의 탄성과탐사와의 특성비교에 나타내었듯이 Marine CSEM은 아직까지 기술발전단계 면에서 도입기를 막 벗어나 성장기에 진입한 상태로 판단되며 이것이 성숙단계에 진입하여 표준화된 해저 탄화수소 탐사 기술로 발전하기 위해서는 해결해야 할 많은 문제점과 연구과제가 남아있는 것 또한 사실이다.

### 5.1 자료획득 및 처리에서의 과제

무엇보다 먼저 현장 자료획득 기술면에서 기기 잡음 수준을 현재보다 10배 향상된  $10^{-16}$  V/A- $m^2$  정도로 낮추어야 한다. 물론 현재에도 여러 조건이 양호하다면 이러한 잡음 수준을 만족한다고 이야기하기도 하지만 보편적으로 받아들여지지 않고 있다. 기기의 잡음 수준을 낮추게 되면 그 만큼 더 해지면 하부 심부에 부존하는 소규모 저류층도 탐지할 능력을 갖추게 될 것이며, 이는 현재 받아들여지고 있는 해지면 하부 1 km 정도의 탐지능력의 한계를 넘어서는 계기를 마련하게 될 것이다. 기기 잡음 수준을 낮춤으로써 천해저에서의 적용성도 증가시키게 될 것인데, Fig. 1의 개념도에 나타낸 바와 같이 수심이 낮아지면 공기층을 통과해서 다시 바다로 들어오는 에너지가 상대적으로 증가하여 해지면 하부에 대한 반응의 분리가 어렵게 되는 문제가 있다. 물론 공기층을 통해 전파한 에너지의 궁극적인 제거를 위해서는 높은 S/N 비 확보와 더불어 역산기술의 발전을 동시에 요구한다.

S/N비 향상을 위해서는 기기 정밀도 향상과 더불어 신호처리 기술도 진보되어야 하는데, 해저 환경에서도 측정되는 100 Hz 미만의 MT 신호는 그 주파수 대역에서 일관성있는 (coherent) 잡음원으로 작용하기 때문에 적절히 떨어진 지역(적어도 탄화수소층이 부존하지 않는 지역)에 위치한 기준점 수신기에서 전자기장을 수신하고 이를 이용하여 자료처리를 함으로써 원하는 신호 즉, 탐사지역 하부로부터만의 반응에 대한 감도를 높이는 방법도 개발되어야 할 것이다.

해석의 대상이 되는 전자기장 신호의 성분도 지금까지 주로 다루어지고 있는 동일선(in-line) 자료 즉, 측선방향 송신전류에 대한 동일한 방향의 전기장에서 벗어나 현재 수신되고 있는 모든 전자기장 성분(3성분 전기장 및 3성분 자기장)이 포함되어야 한다. 전자탐사 원리상 측선방향과 직교하는 전기장 성분은 지하 구조에 대한 감도가 떨어지는 단점이 있으나(Um and Alumbaugh, 2007), 근본적으로 지하구조가 3차원적이라는 점에서 이 자료의 해석은 다 차원 지하구조의 유무를 밝히는데 유용하다. 또한 수직 전기장은 지표탐사에서는 원리적으로 존재하지 않기 때문에 지금까지 무시되어 왔지만 고비저항대의 해석에서는 비록 크기는 작더라도 매우 유용하며 해지면에서는 수직성분 전기장이 존재하기 때문에 측정되는 중요한 물리량이다. 이와 더불어 자기장 성분 또한

추가적인 정보를 제공하거나 해석의 오류를 방지할 제약조건으로 사용할 수 있으므로 중요한 고려대상이며 앞서 서술한 잡음 수준의 저하는 이러한 자기장 신호의 정량적인 활용에 있어서 더 없이 중요한 사항이 될 것이다.

## 5.2 영상화 기술의 개발

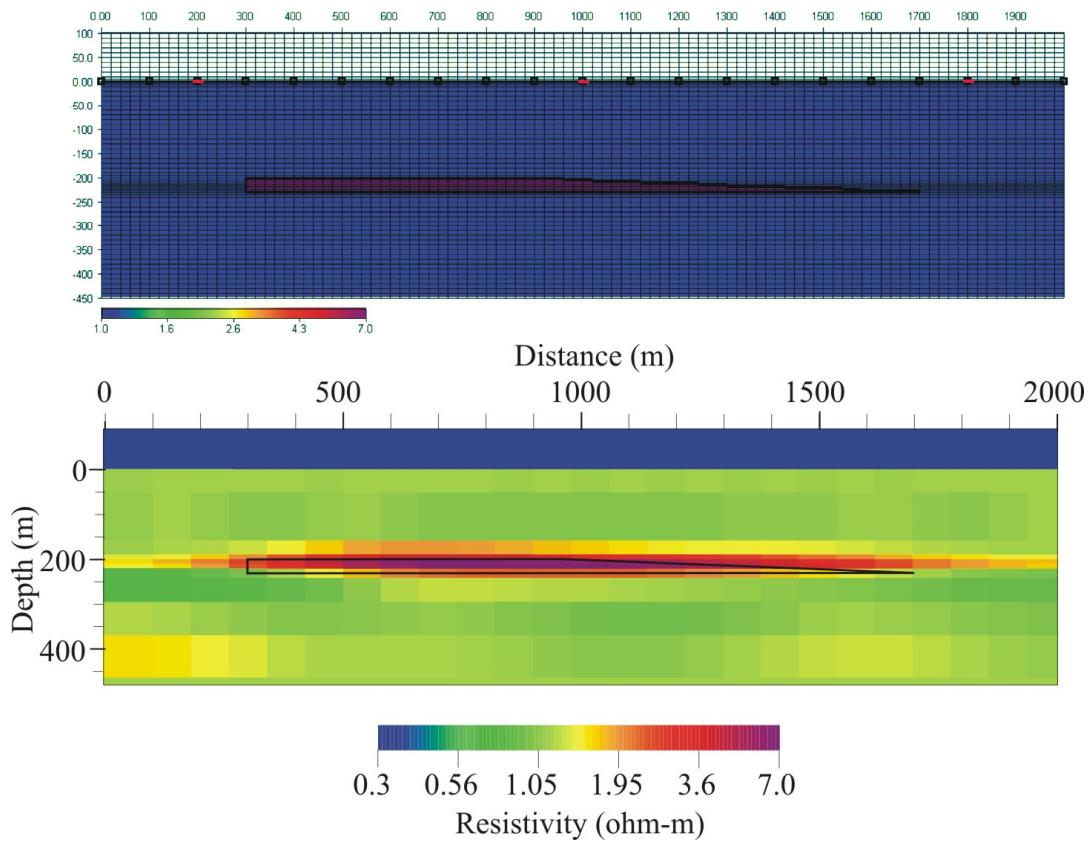
궁극적으로 Marine CSEM이 성숙된 기술로서 상용화되기 위해서는 해저면 하부 고비저항대를 3차원으로 영상화하는 기술이 확보되어야 한다. 전자탐사자료의 역산에 관해서는 최근에 3차원 역산 알고리즘 개발 결과들이 보고되고 있으나, 현장탐사자료에 대한 표준화된 기법으로는 아직 자리잡지 못하고 있다. Marine CSEM의 경우에는 반복적 모델링을 통한 3차원 구조 영상화(Srnka et al., 2006) 정도가 보고되고 있는 실정이다. 그러나 기본적인 이론이나 알고리즘은 여러 개가 이미 확보되어 있는 상태이므로 해저환경에 적합한 변수 설정 등 다양한 시도가 이루어지고 있어 멀지 않은 장래에 현실적인 기술이 공개될 수 있을 것으로 기대된다.

지금까지 서술한 바와 같이 Marine CSEM은 매우 전기전도도가 높은 바다에서 송수신이 이루어지고 탐지 대상은 저비저항 해저퇴적층내의 매우 얇은 고비저항층이므로 가능한 많은 사전정보(*a priori information*)를 동원하여야만 지하구조에 대한 올바른 영상을 얻어낼 수 있다. 다행히도 많은 경우 3차원 탄성파탐사가 이미 이루어져 있거나 동시에 수행하게 되므로 탄성파탐사로부터 얻은 층서구조에 대한 정보를 역산의 제약조건으로 활용하게 되면 지하구조에 대한 의미있는 영상을 얻을 수 있다.

Fig. 6은 사전정보를 제약조건으로 활용함으로써 지하구조의 영상화가 가능해짐을 보여주는 하나의 예이다. 그림은 소위 2.5차원 문제에 대한 이론적인 시험 결과를 보여주는데 즉, 주향방향으로 무한한 구조를 가정하고 수심 2,000 m 하부 퇴적층내의 비교적 천부에 부존하는 고비저항체에 대한 이론적 계산 자료를 역산한 결과이다. 사용한 주파수는 0.15, 1, 3 Hz이고  $x$ 방향 전기쌍극자 송신원이 -400 m, 200 m, 1,000 m, 1,800 m, 그리고 2,400 m로 5개 지점에 순차적으로 위치하며 수신기는 송신기별로 14-21개씩 수신하고 역시  $x$ 방향 전기장만 측정하는 경우이다. 위 그림은 고비저항체의 모양과 송수신기의 위치를 보여주며 아래 그림은 역산한 결과이다.

역산에서는 지하구조가 수직적으로보다 수평적으로 훨씬 덜 변하는 제약조건을 가했다. 즉, 대상지역이 대체적인 층서구조 형태이고 이미 한 지점에서 시추에 의해 수직적인 전기비저항 분포에 대해 대략적인 정보가 있다는 가정하에 고비저항 층이 존재하는 심도에서 역산 블록을 수직적으로 좀더 세밀하게 분할하고, 평활화 역산에 사용하는 라그랑지 곱수를 수평과 수직이 서로 다르게 설정함으로써( $\lambda_x > \lambda_z$ ) 수평적으로 넓게 퍼진 얇은 고비저항층의 영상화가 가능해졌다. 동일한 자료를 가지고 아무런 사전 정보없이 역산을 수행하였을 때는 전혀 의미없는 결과가 얻어졌을 뿐이다.

위의 결과는 지금까지 우리나라에 축적되어있는 기술 수준으로 Marine CSEM 탐사자료의 모델링 및 역산이 일정 수준 가능하며, 현장 탐사자료에 대한 구체적인 정보를 통해 변수들을 조정하고 3차원으로 확장시키는 작업을 통해서 충분히 기술수요에 대응할 수 있음을 보여주고 있다.



**Fig. 6.** An example of 2.5-D inversion of synthetic marine CSEM data. Used model with locations of sources and receivers (top) and resultant image of a sharp vertical constraint inversion (bottom) are shown.

지금까지는 Marine CSEM을 주로 해저퇴적층내 탄화수소 직접 탐지 응용면에서 살펴보았다. 물론 현재 Marine CSEM이 상업적으로 적용될 수 있는 중요한 대상이 석유, 가스 또는 가스하이드레이트 탐사(Weitemeyer et al., 2006)이고 최근의 극심한 고유가 상황이 지속될 가능성이 높아 당분간 탄화수소 탐사가 주 대상이 될 것임은 확실하다. 추가적으로 최근 환경분야에서 가장 큰 관심사항으로 자리잡은 이산화탄소 지중저장을 위해 해저에 격리 저장하는 방안이 가장 효율성있다고 인식되고 있으므로, 전기비저항 특성에 직접 좌우되는 Marine CSEM이 중요한 탐사 및 모니터링 기술로 이용될 가능성이 높다고 판단된다. 따라서 앞으로 예상되는 이러한 모든 기술 수요에 대응하기 위해서라도 우리나라의 전문가들이 이 분야에 대한 연구를 활발히 수행하여야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김희준, 한누리, 최지향, 남명진, 송윤호, 서정희, 2006, 탄화수소 탐지를 위한 해양 인공송신원 전자탐사, 물리탐사, **9**, 163-170.
- Chopra, S., Strack, K., Esmersoy, C., and Allegar, N., 2007, Introduction to this special section: CSEM, *The Leading Edge*, **26**, 323-325.

- Constable, S., and Weiss, C. J., 2006, Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modeling, *Geophysics*, **71**, G43-G51.
- Constable, S., and Srnka, L. J., 2007, An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon, *Geophysics*, **72**, WA3-WA2.
- Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L. M., Constable, S., Sinha, M. C., Johansen, S., Kong, F. N., and Westerdahl, H., 2002, Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas, *First Break*, **20**, 144-152.
- Ellingsrud, S., Eidesmo, T., Johansen, S., Sinha, M. C., MacGregor, L. M., and Constable, S., 2002, Remote sensing of hydrocarbon layers by seabed logging (SBL): Results from a cruise offshore Angola, *The Leading Edge*, **21**, 972-982.
- Johansen, S., Amundsen, H. E. F., Rosten, T., Ellingsrud, S., Eidesmo, T., and Bhuyian, A. H., 2005, Subsurface hydrocarbons detected by electromagnetic sounding, *First Break*, **23**, March, 31-36.
- Srnka, L. J., Carazzone, J. J., Ephron, M., and Eriksen, E. A., 2006, Remote reservoir resistivity mapping, *The Leading Edge*, **25**, 972-975.
- Tompkins, M. J., and Srnka, L. J., 2007, Marine controlled-source electromagnetic methods – Introduction, *Geophysics*, **72**, WA1-WA2.
- Um, E. S., and Alumbaugh, D. L., 2007, On the physics of the marine controlled-source electromagnetic method, *Geophysics*, **72**, WA13-WA26.
- Weitemeyer, K., Constable, S., and Key, K., 2006, Marine EM techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation, *The Leading Edge*, **25**, 629-632.