

탄화수소 탐지를 위한 해양 인공송신원 전자탐사

김희준¹ · 한누리² · 최지향² · 남명진³ · 송윤호^{3*} · 서정희²

¹부경대학교 환경탐사공학과

²서울대학교 지구환경시스템공학부

³한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Marine Controlled-source Electromagnetic Surveys for Hydrocarbon Exploration

Hee Joon Kim¹, Nuree Han², Jihyang Choi², Myung Jin Nam³, Yoonho Song^{3*} and Jung Hee Suh²

¹Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

²Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

³Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 탄화수소 확정매장량의 부족으로 인해, 주로 육상이나 천해에서 수행되던 탄화수소 탐사는 점차 대륙붕을 넘어 깊은 바다까지 확대되고 있다. 심해에서도 탄성과 자료의 획득이 가능하지만, 탄산염암, 화산암 등이 분포하는 해저지층, 해저 영구 동토 지역 등과 같이 탄성과의 반사 강도가 강하고 산란이 심한 지층에서 얻은 자료는 지층의 분석이 쉽지 않기 때문에 보완 탐사가 필요하다. 탄화수소의 전기비저항이 높은 특성으로 인하여 전자탐사로 그 부존 유무를 판단할 수 있으므로, 해양 인공송신원 전자탐사는 석유 탐사의 보완적인 방법의 하나로써 이용되기 시작하였다. 이 탐사 방법은 천해지역보다 오히려 심해지역에서 더 높은 감도를 얻을 수 있어서 특히 심해지역의 보완 탐사로 유용하다. 여러 석유회사에서 전자탐사가 보완 탐사로 유용함을 인식한 지는 불과 5년 밖에 되지 않았지만, 현재는 시추 지역 선정에도 전자탐사를 이용하고 있다. 전자탐사는 도입 초기부터 매우 훌륭한 결과를 얻었으며, 최근에는 여러 회사에서 탄화수소 탐사를 위해 자기지전류탐사나 전자탐사를 수행하고 있다.

주요어: 심해, 탄화수소, 인공송신원, 전자탐사

Abstract: The shortage of proven hydrocarbon reserves has resulted in exploration progressing from the offshore into progressively deeper water of the continental shelf. Despite the success of seismic acquisition at ever greater depths, there are marine geological terrenes in which the interpretation of seismic data is difficult, such regions dominated by scattering or high reflectivity that is characteristic of carbonate reefs, volcanic cover and submarine permafrost. A marine controlled-source electromagnetic (CSEM) method has recently been applied to the oil and gas exploration thanks to its high-resistivity characteristics of the hydrocarbon. In particular, this method produces better results in terms of sensitivity under the deep water environment rather than the shallow water. Only in the last five years has the relevance of CSEM been recognized by oil companies who now use it to help them make exploration drilling decisions. Initial results are most promising and several contractors now offer magnetotelluric and CSEM services.

Keywords: deep water, hydrocarbon, electromagnetic, CSEM

서 론

해양에서의 탄화수소(hydrocarbon) 탐사는 장비의 대형화, 포착하기 어려운 탐사 대상(subtle trap), 극한상황에서의 한계 탐사, 3차원 탐사와 같은 고정밀 탐사의 수행 등 탐사 환경의 어려움, 탐사 기술 상 고난도기술의 요구, 탐사의 위험도 증가

2006년 4월 21일 접수; 2006년 5월 15일 채택

*Corresponding author

E-mail: song@kigam.re.kr

Address: Department of Ground Water & Geothermal Resources,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

등으로 인하여 시간과 비용이 대단히 많이 소요된다. 탄화수소 탐사에 이용되는 탄성과탐사의 자료 획득 및 처리 기술이 최근 수십 년 동안 비약적으로 발전하였음에도 불구하고, 시추로 탄화수소를 찾을 확률은 여전히 높지 않다. 이는 탄성과자료의 층서해석기술을 이용하여 배사구조와 같이 탄화수소가 집적될 수 있는 구조 혹은 탄화수소 부존에 적합한 퇴적환경 등에 대한 정보는 알아낼 수 있지만 정작 탄화수소부존 유무에 대한 직접적인 정보는 알아낼 수 없는 한계가 있기 때문이다.

탄화수소 직접탐지법에는 편평점(flat spot), 명점(bright spot) 및 AVO (amplitude versus offset) 분석법 등과 같은 기술이 응용되고 있다. 이 기술을 적용하면 가스포화율이

5~10% 정도인 경우에도 가스의 부존 특성을 알 수 있다. 그러나 경제성 있는 양을 결정할 수 있는 방법은 아니기 때문에 적용에 한계가 있다. 그러므로 만약 경제성 있는 탄화수소 발견 확률을 높일 수 있는 탐사 방법이 개발된다면 석유와 가스 탐사가 현재보다 더욱더 활성화 될 수 있을 것이다.

전자탐사는 오랜 기간 지구 내부구조 규명이나 탄화수소 탐사 분야에 이용되어 왔다. 지난 한 세기동안 자원개발과 지하수 탐사, 환경오염 모니터링 분야 등 전자탐사의 이용범위를 넓혀왔으며 육상에서의 탄화수소 탐지에도 전자탐사를 이용하였다. 한 예로, 러시아 서시베리아에서는 분지구조를 파악하기 위하여 기초광역탐사로 자기지전류(magnetotelluric; MT)탐사를 이용하였고 이로부터 세계 최대 규모의 Urengoy 가스전을 개발하였다(Kaufman and Keller, 1983). 한편, 해양에서도 극저주파 인공송신원 전자탐사(controlled-source electromagnetic survey; CSEM탐사)를 이용하여 해양 분지와 활성 해령을 연구한 바 있다(Chave and Cox, 1982; Chave *et al.*, 1991; Constable and Cox, 1996; MacGregor *et al.*, 1998; 2001). 해양 전자탐사를 이용하면 탄화수소층의 고비저항 특성으로 인해 전자탐사 자료에 뚜렷한 신호가 나타나기 때문에 지하의 탄화수소와 그 외의 유체를 구분할 수 있다.

2000년에 Statoil사에서는 해양 CSEM탐사를 이용하여 심해저에서 탄화수소 직접 탐사를 시험하였으며(Ellingsrud *et al.*, 2002), 그 결과 탄화수소 포화율이 60~70% 이상에 이르는 경제적 가치가 높은 탄화수소 저류층 탐사에 해양 CSEM탐사가 효율적임을 확인하였다. 이 고무적인 결과로부터 해양 CSEM탐사를 이용하여 탄화수소 직접 탐사에 최초로 성공한 회사인 ElectroMagnetic GeoServices (emgs)사가 설립되었다. emgs사는 해양 CSEM탐사법을 'Sea Bed Logging'이라 명명하였다. emgs사의 창립 직후에 경쟁사인 Offshore Hydrocarbon Mapping (OHM)사와 AGO/Schlumberger사도 해양에서 탄화수소 탐사에 유사한 방법을 이용하기 시작하였다. 위의 두 회사는 emgs사와 마찬가지로 이동성 수평 전기쌍극자 송신원과 해저면에 배치된 전자기장 수신 센서를 사용하였다.

이 회사들은 창립 후 채 3년도 되기 전에 전세계적으로 100건 이상의 탐사를 수행하였으며, 이 가운데 많은 경우에서 시추 결과 탄화수소가 부존되어 있음을 확인하였다. 이에 따라서 Statoil, ExxonMobil, Shell과 같은 대규모의 개발 및 생산(exploration and production; E&P) 회사들은 이미 해양 CSEM법을 실용화하고 있으며, 반면, 소규모의 회사들은 여전히 이 기술이 가진 잠재적 능력을 시험하고 이를 실제 탐사에 적용하기 위한 방법들을 연구하고 있다.

이 론

최근 20여 년간 Scripps, Cambridge, Toronto, Southampton 등 여러 대학에서 많은 연구자들이 자연 전자기장과 인공 전

자기장을 이용하여 해저의 전기전도도 구조를 규명하기 위한 연구를 수행해 왔다. 시간과 주파수 두 영역 모두에서 자료 획득이 수행되어 왔으며, 수평과 수직 전기쌍극자(horizontal and vertical electric dipoles; HED and VED)에서 수평과 수직 자기쌍극자(horizontal and vertical magnetic dipoles; HMD and VMD)에 이르는 모든 종류의 송신원이 제안되어 연구에 이용되어 왔다. Chave *et al.* (1991)은 인공 송신원 전자탐사(CSEM) 영상화 기술에 대해서 정리하였으며 이러한 기술은 현재까지도 유용하게 쓰이고 있다.

최근 Statoil사에서는 심해저의 탄화수소층 탐사를 위해 해양 CSEM탐사를 상업적으로 수행하였다(Eidesmo *et al.*, 2002). 이 CSEM 기법에서는 주로 해저면에 놓인 전기쌍극자 수신기를 이용하였고 때때로 자기쌍극자 수신기를 함께 이용하기도 하였으며, 송신원으로는 이동 가능한 HED를 이용하였다. HED 송신원은 해수 및 해저층을 통해 외부로 확산되는 수십 Hz 이하의 저주파수 전자기장 신호를 보낸다. 해저층의 전기전도도는 대략 1 S/m 이하로 작기 때문에 송신 전자기파는 해수보다 해저층을 통해 전파하는 경우에 확산 비율이 더 크다. 결과적으로, 송신원으로부터 적절한 수평 거리 내에서, 해저면에 놓인 전기쌍극자 수신기에서 측정된 전기장은 해저층의 영향으로 인해 반응이 결정된다. 따라서, 해저면에서 측정된 신호의 크기와 위상을 이용하여 해저층내의 지질구조를 파악할 수 있으며, 특히 해저층에 전기비저항이 큰 탄화수소층이 있다면 지질구조 규명은 더욱 용이해진다.

CSEM탐사는 동일선법(inline mode)과 평행선법(broadside mode)의 두 가지 모드로 구분된다. 동일선법은 송수신 쌍극자를 축선과 나란하게 배치하는 것이고, 평행선법은 송수신 쌍극자를 서로 평행하게, 즉 축선과 수직하게 배열하는 것이다. 두 가지 방법에는 각각 나름대로의 장단점이 있다. 층서구조에서 전자기장의 반응은 이론적으로 TE 모드(transverse electric mode)와 TM 모드(transverse magnetic mode)로 구분된다. 대상체의 주향방향을 기준으로 두 모드를 나누는 MT탐사와는 달리, 1차원 층서구조의 경우에는 수직(z) 축을 기준으로 두 모드를 나눈다.

Galvanic 모드라고도 불리는 TM 모드는 저항성(resistive) 대상체를 찾는 데 매우 효과적이다. 이는 전기장 수직 성분이 전도성(conductive) 층에서 저항성 층으로, 또는 그 반대로 전파할 때 급격한 변화를 보이기 때문이다. 즉, 두 매질의 경계면에서 총 전류는 보존되므로 전기전도도가 감소하면 이에 반비례하게 전기장은 증가하기 때문에 전기장 수직성분의 급격한 변화가 발생하게 되는 것이다. TM 모드의 반응은 동일선법의 반응과 유사하다. 한편, inductive 모드라고도 불리는 TE 모드에서 전류는 수평 층서 내에서 흐르고 각 층의 경계에서 유도 결합(inductive coupling)을 한다. TE 모드의 반응은 평행선법의 반응과 유사하다.

해저면에서 전자탐사의 장점은 양 극에서 2.5 S/m, 적도에

서 5 S/m 정도로 전기전도도가 매우 높은 해수가 해수면 위의 전리층이나 지자기권에서 발생한 전자기파의 저주파 통과 필터 역할을 한다는 것이다. 즉, 수심이 수백 미터에 이르는 바다는 그 위에서 생성된 1 Hz 근방의 전자기장 잡음을 제거하는 역할을 수행한다. 실제로 해저면에서 전기장을 반복 측정된 결과, 1 Hz 근방의 자연적 잡음 및 인공적 잡음은 1 pV/m 수준으로 매우 작았다. 이 때 측정된 배경 잡음에는 지자기장에서 해수의 유동, 표면중력파, 지각의 미진동, 파도, 바람의 영향 등이 포함된다. 이와 같이 다양한 잡음원에도 불구하고, 송수신 간격이 먼 경우에는 반복측정을 통하여 해저면의 송신원으로부터 해저층을 전파해온 미약한 전자기 신호의 측정이 가능하다.

위에서 언급한 잡음 외에도 해저면에서 측정된 전자기장에는 MT, 해류에 의한 전기적 유도, 측정 장비 등으로 인한 잡음이 포함되어 있다. 이러한 잡음과 자료 획득시의 불확실성, 넓은 송수신 간격으로 인하여 해양 전자탐사 자료의 해석에 많은 어려움이 있다. 심해에서의 탐사 시에는 전기전도도가 높은 해수에 의해 측정 주파수 범위에서 MT 잡음이 크게 감소된다는 장점이 있지만, 천해에서의 탐사 시에는 잡음이 증가하므로 MT와 CSEM의 통합 해석을 통하여 이를 보완할 수 있다.

암석의 전기비저항은 주로 비저항이 매우 큰 석유, 가스, 가스 하이드레이트 등의 탄화수소와 0.04 ~ 0.19 ohm-m의 저비저항 광물의 상호 작용에 의해 변화한다. 해양 CSEM탐사에서 측정된 지층의 체적 비저항으로부터 공극률을 계산하기 위해서, 저항성 입자와 전도성 공극수의 두 성분으로만 이루어진 단순한 이상(two-phase) 시스템의 경우에 Archie의 법칙을 이용할 수 있다.

$$\rho_f = a\rho_w\phi^m \quad (1)$$

여기서 ρ_f 는 측정된 지층의 비저항, ρ_w 는 공극수의 비저항, ϕ 는 공극률, a 는 상수, m 은 교결인자이다. 두 상수 a 와 m 은 실험을 통해 계산할 수 있으며, 각각의 범위는 $0.5 < a < 2.5$, $1.5 < m < 3$ 이다. 저류층 내의 탄화수소 함유량을 계산하기 위해 (1)식을 아래와 같이 변형시킨다.

$$\rho_f = a\rho_w\phi^m S_w^{-n} \quad (2)$$

여기서 S_w 는 공극수의 포화도, n 은 포화상수이고, $S_h (= 1 - S_w)$ 는 탄화수소의 포화도이다.

해양지각과 같이 단단한 결정질 암석의 전기비저항은 주로 암석 내의 균열을 채우는 유체에 따라 값이 변화하지만 일반적으로 100 ~ 1,000 ohm-m 정도로 높은 값을 갖는다. 한편, 퇴적암의 전기비저항은 암석의 공극률, 투자율, 공극의 기하학적 배열, 공극수의 특성과 온도에 따라 변화하며 대략 0.2 ~ 1,000 ohm-m로 넓은 범위의 값을 가진다. 물로 포화된 해양 퇴적암의 전기비저항은 대략 0.5 ~ 2 ohm-m로 매우 낮는데 반해 탄

화수소 저류층의 전기비저항은 최소 10배 이상으로 대략 30 ~ 500 ohm-m의 범위이다. 따라서, 잠재적인 탄화수소 매장지역의 전기비저항을 측정하면 탄성과 해석의 보완적 자료로 이용할 수 있어서 시추 실패의 위험을 줄일 수 있다. 탄화수소 탐사 시 전자탐사의 대상은 수평적인 연장에 비해 두께가 매우 얇은 비전도성의 탄화수소 저류층으로, 수평적으로는 수 킬로미터에 이르지만 두께는 20 ~ 200 m 정도이다. 또한 이 저류층은 수심과 해저면으로부터의 심도가 모두 수백 미터에서 수 킬로미터에 이르는 심부 지역에 위치한다.

해양 CSEM탐사에서는 전자기장 측정 센서를 해저면에 배치하고 HED 송신원을 관심영역 내의 측선을 따라 이동시킨다. 이 때 HED 송신원의 높이는 해저면으로부터 20 ~ 40 m를 유지하도록 한다. HED에서 송신 가능한 전류의 크기는 500 ~ 1,000 A 범위이며 송신쌍극자의 길이는 150 ~ 250 m 정도이다. 전류원으로부터 송신되어 지구 내부를 흐르는 전류는 저항성 지역을 비껴서 흐르기 때문에 전자기장의 왜곡이 발생한다(Fig. 1).

저주파수 전자기장 신호는 심도 z (m)에 따라 지수적으로 ($e^{-z/\delta}$) 감소한다. 지수항의 δ 는 전자기장 신호가 입사장의 e^{-1} (≈ 0.37)로 감소되는 거리인 표피 심도(skin depth)로, $\delta \approx 500(\rho/f)^{1/2}$ 이다. 여기서, ρ 는 전기비저항, f 는 주파수이다. 표피심도에 비해 목표물이 상대적으로 깊은 곳에 위치하는 경우에 전자탐사로 목표물을 탐지할 수 없으므로, 전자탐사 수행 시에는 사용 주파수(f)와 배경 매질의 전기비저항(ρ)에 따라 결정되는 표피심도를 반드시 고려하여야 한다. 해양 전자탐사에서 송신 가능한 최대 전류 크기와 적절한 잡음 수준을 고려할 때, 전기비저항이 1 ~ 2 ohm-m인 전형적인 해양지층 내 지하 2 km 지점에 존재하는 목표물을 찾아내기 위해서는 0.1 ~ 5 Hz 범위의 주파수를 이용하여야 한다. 이때 수직 분해능을 향상시키기 위해서는 충분히 넓은 범위의 주파수를 이용

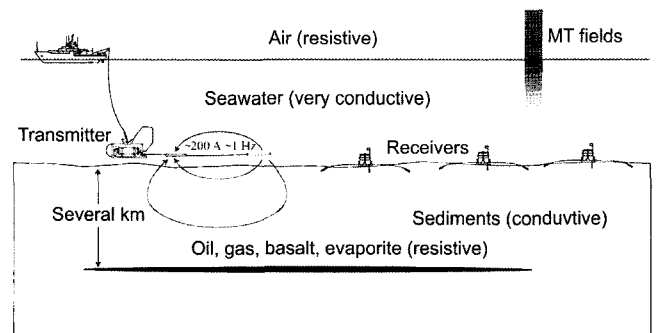


Fig. 1. Conceptual diagram of the marine CSEM method. A deep-towed transmitter close to the seafloor injects a current of several hundred amps into the seawater from an electric dipole, creating magnetic and electric fields that propagate diffusively into the seafloor (After Constable and Weiss (2006)). Electric dipole receivers record the seafloor electric fields at various ranges from the transmitter. When equipped with additional magnetic field sensors, the same receivers can record magnetotelluric signals.

하는 것이 중요하다.

전자기파의 파장은 $\lambda = 2\pi\delta$ 로 계산할 수 있으며, 전기비저항이 2 ohm-m인 퇴적층에서 송신 주파수가 0.25 Hz라면 파장은 대략 6,300 m이다. 반파장에 의해 수직 분해능이 제한(Rayleigh limit, 레일리 분해 한계)되는 탄성파탐사 자료와는 달리, 전자탐사 자료의 분해능은 전자기파의 파장에는 무관하다. 전도성 지층에서 전자기파는 Maxwell 방정식에서 유전율 상수의 영향을 거의 받지 않고 확산하므로, 전자탐사 자료의 공간 분해능은 주로 잡음 수준과 송수신 간격에 의해 결정된다.

1차원 모형 실험

오늘날까지 대부분의 연구는 바다와 해저 지층으로 이루어

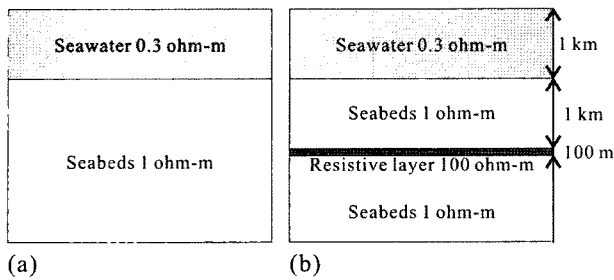


Fig. 2. (a) The two-layer case (sea and subsea). (b) The four-layer case incorporating a resistive layer situated 1 km below the seafloor, having a thickness of 100 m and a resistivity of 100 ohm-m. The sea depth is 1 km.

진 단순한 2층 구조(Chave and Cox, 1982), 또는 고비저항의 얇은 탄화수소층을 포함하는 4층 구조와 같이 1차원 모형에서 전자기파가 확산되는 양상을 다루고 있다(Fig. 2). Constable and Weiss (2006)는 1차원 모형계산을 통해 전도성 매질 속에 묻힌 얇은 저항성 지층에 대한 CSEM법의 감도를 검토하여 반경방향(radial-mode) 전기장이 방위방향(azimuthal-mode) 전기장보다 저항성 지층의 영향을 더 크게 받는 것을 보여주었다. 그리고 MT 신호는 저항성 지층에 대해 감도는 크지 않지만, MT 자료를 반경방향 전기장 자료와 함께 역산하면 전기장 자료를 단독으로 역산하는 경우에 비해 저항성 지층 분해능이 훨씬 높아짐을 보였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 두 모형에 대해 0.25 Hz에서 동일선법과 평행선법에서의 전기장 크기와 위상을 EM1D 프로그램(Pellerin et al., 1995)으로 계산한 것이다. 저항성 지층이 존재할 때에 신호 강도가 상대적으로 증가하였음을 알 수 있으며, 수심이 깊은 경우에는 신호강도가 더욱 증가한다. 또한, 전기장 크기 그래프에는 해수를 통해 바다 표면에 도달하고 바다와 공기의 경계를 따라 이동하다가 다시 해수를 통해 수신기로 들어온 공기파(air wave)의 영향을 함께 나타내었다(Fig. 3(a), (c)). 공기파에 의한 반경방향 전기장은 다음과 같이 근사할 수 있다(Constable and Weiss, 2006).

$$E_{air} = \frac{e^{-2h/\delta}}{2\pi\sigma r^3}, \tag{3}$$

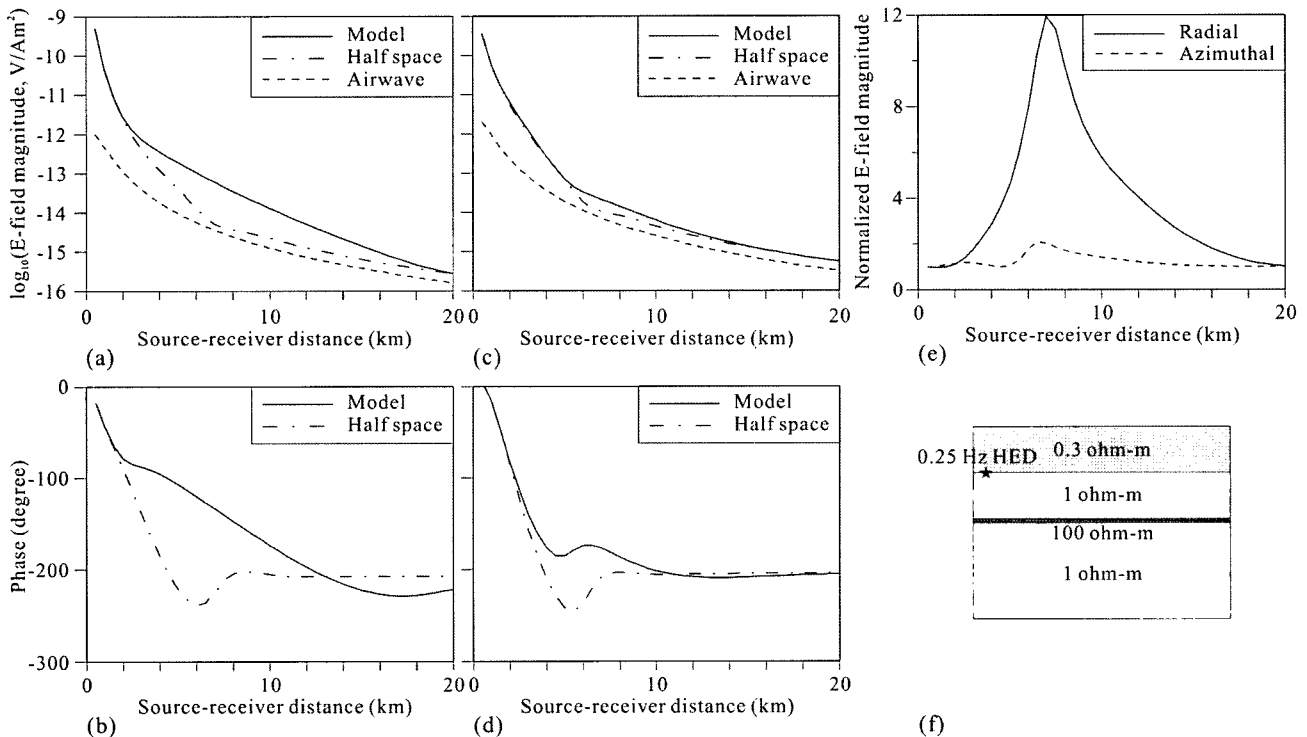


Fig. 3. (a, b) Radial- and (c, d) azimuthal-mode CSEM amplitudes and phases as a function of source-receiver range at a frequency of 0.25 Hz, calculated for the model shown in (f) with (model) and without (half-space) the thin resistive layer. In (e) we show the radial and azimuthal field amplitudes normalized by the response of the half-space.

여기서 h 는 수심, σ 는 해수의 전기전도도, r 은 송수신 간격이다.

Fig. 3(e)는 4층 구조의 전기장 크기를 2층 구조의 전기장 크기로 정규화한 반응을 나타낸 것이다. 반경방향의 경우 전기장 이상은 송수신 간격이 7 km에서 12배에 달하는 것을 알 수 있다. 주파수가 높아지면 이 전기장 이상은 더 커져서 1 Hz의 경우 송수신 간격이 5 km에서 약 60배에 달한다(Constable and Weiss, 2006).

영상화와 역산

탄화수소 저류층 탐사에 해양 CSEM탐사를 본격적으로 이용함에 따라 빠르고 정확하게 자료를 해석하기 위한 기술이 필요하게 되었다. 해양 CSEM 자료를 이용하여 지하의 전기전도도 구조를 규명하는 가장 일반적인 방법은 영상화(e.g., Tompkins, 2004)와 역산(e.g., MacGregor et al., 2001)이다.

지구물리적 영상화란 파동장의 파선연속법(continuation method)을 이용하여 지하 물성을 규명하는 방법이다. 즉, 영상화는 파동장을 일차장과 산란장으로 분리함으로써 지하 물성 대비를 규명하고, 송신 함수인 일차장과 수신기에서 측정된 산란장을 지하 매질로 외삽하고, 심도에 따라 외삽한 일차장과 산란장을 합한다. 일차장과 산란장의 간섭 현상에 의해 파동의 전파 특성을 결정하는 지하 물성의 공간적 분포를 영상화할 수 있다.

과거에는 주로 탄성파탐사의 자료 해석에 영상화 기법을 이용하였으며 단지 몇몇 연구에서만 저주파수 전자탐사 자료 해석에 영상화 기법을 이용하였다. 연구 초기에 Zhdanov and Frenkel (1983), Lee et al. (1987), Levy et al. (1988) 등은 광대역 자연 송신원(passive-source) 전자탐사 자료의 영상화를 연구하였다. 이들은 모두 주파수영역 탄성파탐사 자료의 영상화 기법을 자연 송신원 MT탐사에 적용하였다. 이후, Zhdanov et al. (1995)과 Guo et al. (1998)은 분산성 전자탐사 영상화 기법을 시간영역 전자탐사 자료에 적용하였다.

오늘날까지도 전자탐사 영상화 기법을 주파수영역 CSEM 자료에 적용하는 방법에 대한 연구가 미비하다. 주파수영역 CSEM 자료에 전자탐사 영상화 기법을 적용하기 어려운 이유는 몇 가지가 있다. 우선, 주파수영역 CSEM탐사는 주로 하나의 주파수에 대해서만 이루어지는데 반해 영상화 기법을 이용해서 지하 물성을 정확히 규명하고 분석하기 위해서는 일반적으로 많은 주파수의 자료가 필요하다. 한 예로 Lee et al. (1987)은 MT탐사 자료를 정확히 영상화 하기 위해서는 적어도 50개 주파수의 자료를 이용해야 한다고 하였다. 둘째, 비록 저주파수 전자기장은 Helmholtz 파동방정식을 만족하지만, 분산성이 매우 강하고, 파가 전파하는 주요 원인은 파동이 아닌 확산이다. 즉, 저주파수 전자기장의 전파는 확산방정식으로 표현할 수 있다. 그러므로 심도에 따른 분해능은 주파수에 크게 의존하므로 영상화 결과의 해석이 더욱 복잡해진다.

최근 해양 CSEM탐사에서는 광대역 측정 장비나 네모파(square-wave) 송신원 등의 적용으로 인해 같은 비용으로 여러 주파수의 자료를 기록할 수 있게 되었다(e.g., Schwalenberg et al., 2005). 또한, Tompkins (2004)는 파동장의 영상화 기법을 주파수 범위가 좁은 CSEM 자료에 대해서도 적용할 수 있음을 보였으며, 단지 몇 개의 주파수만을 이용하여 적절한 심도에 매장된 탄화수소를 효율적으로 영상화할 수 있음을 보였다. CSEM 자료의 영상화는 동일한 자료를 이용한 역산보다 시간이 적게 걸린다는 장점이 있다. 또한, 영상화 결과로부터 지하의 전기비저항 구조를 직접 해석하거나, 전자탐사의 역산에 필요한 매개변수를 결정할 수 있다.

한편, 전파형 역산은 필요한 계산시간 및 컴퓨터용량이 너무나 방대하여 실용화하기 어려운 문제가 있지만, CSEM 자료를 이용하여 지하의 전기적 물성을 규명하는 가장 일반적인 방법이다(MacGregor et al., 2001; Oldenburg et al., 2005). Oldenburg et al. (2005)은 탄화수소층을 포함하는 해저지층 모형에 대한 합성 CSEM 자료를 이용하여 3차원 역산의 가능성을 보였다. 합성 자료를 계산하는 데 사용한 모형은 Fig. 4와 같다(Oldenburg et al., 2005). 이 때, 사용 주파수는 1 Hz와 5 Hz이고, 두 개의 서로 직교하는 축선상의 9개 측정점에서 자료를 계산하였다. 송신원은 500 m 간격의 동서방향 축선들을 따라 이동시켰다. Oldenburg et al. (2005)은 Gauss-Newton 법을 이용하여 역산하였고, 계산의 효율을 높이기 위해 거대 조밀(large-dense) 감도행렬을 산재행렬들의 곱으로 표현하였으며, 행렬식의 계산에는 선처리를 포함한 conjugate gradient 알고리즘을 이용하였다. 수치실험 결과 역산 단면에서 저류층 위아래로 전기전도도가 약간 왜곡되는 지역이 있었지만, 대체로 저류층의 모양과 전기전도도를 잘 규명하였다.

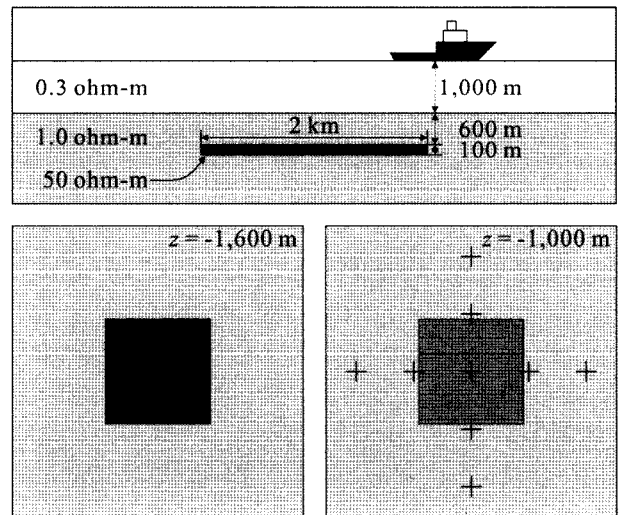


Fig. 4. Profile and plan-view sections for a synthetic model for a marine CSEM survey (Redrawn from Fig. 12 in Oldenburg et al. (2005)). The pattern of receiver locations on the seafloor is shown by crosses.

CSEM법을 이용하면 실제로 물로 포화된 저류층(저비저항)과 탄화수소로 포화된 저류층(고비저항)을 구별할 수 있기 때문에 시추시의 실패 위험이 감소된다. 또한, 적절한 조건 하에서 CSEM 자료는 저항성 지층의 유무를 확인할 뿐 아니라 이층의 수평 경계를 확인할 수 있으므로, 저류층 내의 탄화수소의 수평적인 연장도 알 수 있다. 모형실험을 통해 해저면에서의 전자탐사가 저류층의 위치 확인은 물론이고, 전기비저항의 측정에도 탁월함을 확인하였다. 더 나아가, 탄성과 자료 해석 결과 얻은 제한 조건들을 이용하여 전자탐사 자료를 역산하면 더욱 양질의 자료를 얻을 수 있을 것이다. 즉, 탄성과탐사와 전자탐사 자료가 상호 보완적인 정보를 제공하게 될 것이다.

사례 연구

해양 CSEM 기술은 지속적으로 발전하고 있다. Statoil (emgs-ElectroMagnetic GeoServices)사 뿐만 아니라, ExxonMobil, Southampton 대학(OHM-Offshore Hydrocarbon Mapping) 등에서도 해양 CSEM탐사에 투자하고 있으며, 최근에 Schlumberger사는 AOA Geomarine Operations사를 인수하였다. 2004년 8월 30일에 모건 스탠리(Morgan Stanley)사는 몇 년 내에 CSEM에 투자하는 비용이 현재 해양 탄성과탐사에 쓰이는 비용의 25%에 육박할 것이라고 예견하였다(McBarnet, 2004). 이와 같은 성장에 발맞추어 해양 CSEM 기술을 정확히 설명하기 위한 몇몇 사례 연구가 발표되었으며, 이 절에서는 그 중 Angola 해역, 노르웨이의 대륙붕에 있는 Troll 필드, 캐나다 서해의 연근해 지역의 예를 설명하고자 한다.

Angola 해역

2000년 11월에 확정된 탄화수소 저류층이 있는 Angola 해역에서 RRS Charles Darwin 탐사선을 이용하여 대규모의 시험 탐사를 수행하였다(Ellingsrud *et al.*, 2002). 이 프로젝트는 Statoil사와 Scripps 해양연구소, Southampton 해양센터의 합작으로 이루어졌으며, 탐사 목적은 해저면 하부의 탄화수소층 탐사에 대한 해양 CSEM탐사의 적용성을 검증하는 것이었다.

Angola 해역에서 석유 매장 가능성이 높은 지역은 대략 10~20 km 두께의 사암과 셰일층으로 이루어진 심부 제 3기층이다. 이 지역에는 Aptian 시대에 외부에서 유입된 암염층이 있고, 심해에 석유 매장 확률이 높은 사암층이 있다. 탐사 지역은 해저면 하부 1,100 m 지점에 석유층이 존재하는 대륙사면으로, 수심은 1,200 m이다. 탐사 지역의 북동쪽에는 천부에 암염층이 존재한다.

송신원은 100 m 길이의 수평전기쌍극자(HED)이고, 심부의 이동 장비에 의해 해저면으로부터 40~50 m 높이를 유지하며 이동되었다. 송신파는 가 네모파로 기본 송신주파수에서 최대 진폭 차이는 305 A, 송신쌍극자 모멘트는 16,500 Am이다. 해저면에 26개의 수신쌍극자를 배치하였으며, 각 수신쌍극자는

플라스틱 봉의 양 끝에 매달린 두 개의 저잡음(low-noise) 은-염화은 전극으로 이루어져 있다.

이 장비로 측정된 자료는 CSEM탐사뿐 아니라 해저 MT탐사 연구에도 이용할 수 있다. MT탐사를 수행하는 이유는 배경 매질에 대한 독립적인 정보를 제공하기 위함이다. MT 신호는 얇은 저항성 지층에 대한 감도가 좋지 않으므로, MT탐사 자료를 배경 매질의 값으로 취급하여 CSEM 자료에 대한 정규화 인자로 이용할 수 있다. 또한, MT 자료를 이용하면, CSEM탐사에서 반경방향 전기장 측정 시 얇은 저항성 지층의 영향과 비슷하게 나타나는 심부의 전기비저항 증가를 제거할 수 있다.

이 탐사는 탄화수소 직접 탐지에 CSEM 기법을 실제로 적용한 첫 번째 현장 탐사이다. 이 탐사를 수행하기 이전에는 간단한 1차원 모델링과 가상 영상화 기법의 결과를 이용하여 정규화된 반경방향 전기장이 정규화된 방위방향 전기장에 비해 큰 값을 나타내고, 진폭의 차이가 덮개암의 물성 변화로 인한 경우보다 더 크게 나타나는 것을 예상할 뿐이었다. 이 탐사를 통해서 CSEM탐사가 해저지층 내의 탄화수소 저류층 탐사에 적합함을 확인하였다.

Troll West 가스전

대규모 단지인 Troll 필드는 북해의 북동쪽에 수심이 300~360 m로 비교적 천해인 노르웨이 대륙 봉에 위치한 최대의 가스 개발 필드이다. 이 필드는 세 부분으로 나뉘어져 있다. 그 중 Troll East는 가장 규모가 크고 이 필드의 전체 탄화수소 저장량의 2/3가 매장되어 있는 지역이다. 한편, CSEM법의 적용성을 확인하기 위한 시험 탐사는 Troll West 가스전(Troll West Gas Province; TWGP)에서 수행하였다(Johansen *et al.*, 2005; Bhuiyan *et al.*, 2006). 이 지역의 저류층은 최대 160 m 두께의 가스층을 포함하는 쥘라기의 사암층(Sognefjord Fm.)으로 이루어져 있다. 탄화수소로 포화된 사암층은 해수면으로부터 대략 1,100~2,500 m 하부에 존재하고 전기비저항은 대략 300 ohm-m(200~500 ohm-m)로 고비저항이다. 반면, 물로 포화된 사암층과 이를 덮고 있는 포토층의 전기비저항은 대략 0.5~2 ohm-m 범위이다. 이와 같은 저류층의 고비저항 특성과 덮개암의 상대적으로 작고 일정한 비저항, 범위가 명확히 알려진 필드, 일정한 수심, 해저면 심도의 완만한 변화, 저류층에 포화된 탄화수소의 고른 분포 덕분에 TWGP는 해양 CSEM탐사를 수행하기에 가장 적합한 장소로 꼽힌다.

HED 안테나는 서로 220 m 정도 떨어져서 해수에 접지되어 있는 두 개의 전극으로 이루어져 있다. 전극들은 일정 심도에 떠 있을 수 있도록 설치한 스트리머의 단면상에 위치하고 피시(tow fish) 뒤로 끌려가도록 설치되어 있으며, 각각의 전극은 피시에 있는 송신기에 전기적으로 연결되어 있다. 송신원은 0.25 Hz의 연속적인 네모파를 송신하고 송신원 전류의 최대진폭은 0에서 1,000 A까지 변화하며, 해저면으로부터 송신원까

지의 높이는 대략 40 m 정도로 유지하였다.

TWGP 전 지역에 24개의 전자기장 수신기가 배치되었다. 적당한 위치에서 수신기를 바다에 떨어뜨리면 해저면에 가라앉게 되고, 수신기에 연결된 콘크리트 닻에 의해서 한 지점에 정착하게 된다. 측정이 끝난 후에 본선에서 음파 송신으로 이를 알리면, 각 수신기는 닻과 분리되어 본선이 있는 해수면으로 떠오른다.

CSEM 자료는 시계열로 기록되었으며 Fourier 변환을 거친 후 기본 송신 주파수에서 송수신 간격에 대해 정규화된 전기장 크기(V/Am²)의 그래프로 도시하였다. TWGP 지역에서 탐사 결과 송수신 간격이 8 km가 될 때까지는 양질의 자료를 얻을 수 있었다. CSEM탐사 결과 TWGP 펄드의 가스가 매장되어 있는 부근에서는 수신기에 탐지되는 지하의 신호 강도가 무려 170%나 증가하였으며, 이 결과로부터 해저면에서의 전자탐사가 심부에 매장된 탄화수소의 직접 탐지에 유용함을 처음으로 증명하였다.

Cascadia 지역

가스 하이드레이트는 막대한 양의 메탄 가스의 원천이자 중요한 미래의 에너지원이다. 2004년 여름에 해양 CSEM탐사를 지름이 수백 미터에 이르는 탄성과 공백대(seismic blank zone)가 있는 지역의 ODP 프로젝트 889번과 890번 측정 근처에서 수행하였다(Schwalenberg *et al.*, 2005). Hyndman *et al.* (2001)은 이 지역에서 과거에 수행된 물리탐사 연구를 정리하였다. 탐사 기기로는 Toronto 대학에서 개발한 해양 탐사용 시간영역 전자탐사 시스템을 이용하였다. 이 시스템에서 송수신기는 본선에 연결되어 해저면에서 측선을 따라 이동하며 신호를 측정한다. 본선에 탑재된 송신원에서 네모파 전류 신호를 송신하고, 송신파는 동축 원치 케이블을 통해 해저면에 놓인 송신 쌍극자에 전달된다. 수신기는 은-염화은 전극 쌍으로 이루어져 있으며 각 전극은 고유의 증폭기, 동기화(synchronous) 시계, 자료 처리부와 저장부로 이루어져 있다.

해양층의 전기비저항은 주로 공극에 포함된 해수의 양에 의해서 결정되며, 천부의 전기비저항은 대략 1~2 ohm-m의 범위이다. 하이드레이트는 전기적으로 절연체이고, 하이드레이트 안정영역(hydrate stability zone)에서는 공극내의 전도성 유체를 하이드레이트로 대체하여 이 층의 전기비저항을 증가시키는 역할을 한다. Cascadia 지역의 탄성과 공백대에서 CSEM 탐사를 수행한 결과 전기비저항은 배경 매질의 전기비저항인 1.1~1.5 ohm-m 범위의 값보다 무려 5 ohm-m나 증가한 값을 나타내었으며, 이는 해양층의 상부 지층에서 일반적으로 찾아보기 힘든 값이다. 이와 같은 고비저항 이상은 공백대에 고밀도의 하이드레이트가 자유 가스와 함께 밀집되어 있기 때문에 나타난 것으로 파악된다. 전기비저항 이상대에서 하이드레이트의 양은 평균적으로 공극의 25%, 최대로 50%에 달하는 것으로 측정되었으며, 이상대에 포함된 가스는 부피가 수억 세제

곱 미터에 달하는 엄청난 양이다.

맺음말

오늘날 해양 CSEM 기술이 탄화수소 직접 탐사에 유용함이 확인되었지만, 이와 관련하여 앞으로 장비 개발 및 탐사 설계, 3차원 및 4차원 모델링과 역산, 탄성과파탐사 자료 및 지질 자료와의 복합 역산, 그리고 해양 CSEM 자료를 E&P 업체의 공정에 적용하는 방법 등의 연구가 이루어져야 한다. 이와 같은 연구를 바탕으로 해양 전자탐사 기술의 발전을 도모하고, 저류층 모니터링을 위해서 보다 복잡한 현장 및 생산과정에 해양 CSEM 기술의 적용을 도모할 수 있을 것이다.

지난 수년간 지하공간의 영상화를 위하여 다양한 분야의 자료 및 연구를 통합하는 것은 매우 중요한 연구 과제였으며, 이를 목표로 탄화수소 E&P 회사들은 통합 연구팀을 만들었다. 게다가, 새롭게 개발된 해석 기술들로 인해 탄성과 탐사 자료 및 검층 자료, 지질 자료, 저류층 모니터링, 그리고 더 나아가 저류층 거동 양상 분석 자료에 이르기까지 모든 자료의 통합 해석이 가능해졌다. 이제 기존의 통합 해석에 CSEM 자료까지 가세하여, 탄화수소 직접 탐사의 길을 열었다. 또한, 통합 해석은 CSEM 자료를 포함함으로써 최대의 효과를 이끌어 낼 수 있는 향상된 작업 공정의 설계를 가능하게 할 것이다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업 심부 지열에너지 개발 사업 및 한국과학재단(R05-2004-12529-0)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bhuyian, A. H., Wicklund, T., and Johansen, S., 2006, High-resistivity anomalies at Modgunn arch in the Norwegian Sea, *First Break*, **24**, January, 39-44.
- Chave, A. D., Constable, S., and Edwards, N., 1991, Electrical exploration methods for seafloor, in Nabighian, M. N., ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol II, 931-966.
- Chave, A. D., and Cox, C., 1982, Controlled electromagnetic sources for measuring electrical conductivity beneath the oceans. 1. Forward problem and model study, *Journal of Geophysical Research*, **87**, 5327-5338.
- Constable, S., and Cox, C., 1996, Marine controlled source electromagnetic sounding - II: The PEGASUS experiment, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 5519-5530.
- Constable, S., and Weiss, C. J., 2006, Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modeling, *Geophysics*, **71**, G43-G51.
- 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, *Leading Edge*, **21**, 972-982.
- Guo, Y., Ko, H. W., and White, D. M., 1998, 3D localization of buried objects by nearfield electromagnetic holography, *Geophysics*, **63**, 880-889.
- Hyndman, R. D., Spence, G. D., Chapman, N. R., Riedel, M., and Edwards, R. N., 2001, Geophysical studies of marine gas hydrate in northern Cascadia, in Paull, C. K., and Dillon, W. D., eds., *Natural Gas Hydrates, Occurrence, Distribution and Detection*, Geophysical Monograph Series No. 124, American Geophysical Union (AGU), 273-295.
- 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.
- Kaufman, A. A., and Keller, G. V., 1983, *Frequency and transient soundings*, Elsevier.
- Lee, S., McMechan, G. A., and Aiken, C. L., 1987, Phase-field imaging: The electromagnetic equivalent of seismic migration, *Geophysics*, **52**, 678-693.
- Levy, S., Oldenburg, D., and Wang, J., 1988, Subsurface imaging using magnetotelluric data, *Geophysics*, **53**, 104-117.
- MacGregor, L. M., Constable, S., and Sinha, M. C., 1998, The RAMESSES experiment—III: Controlled source electromagnetic sounding of the Reykjanes Ridge at 57°45', *Journal of Geophysical Research*, **135**, 773-789.
- MacGregor, L. M., Constable, S., and Sinha, M. C., 2001, Electrical resistivity structures of the Valu Fa Ridge, Lau basin, from marine controlled source electromagnetic sounding, *Geophysical Journal International*, **146**, 217-236.
- McBarnet, A., 2004, All at Sea with EM, *Offshore Eng.*, **29**, 20-22.
- Oldenburg, D., Eso, R., Napier, S., and Haber, E., 2005, Controlled source electromagnetic inversion for resource exploration, *First Break*, **23**, July, 67-73.
- Pellerin, L., Labson, V. F., and Pfeifer, M. C., 1995, VETEM - A very early time electromagnetic system, *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*, pp. 725-731.
- Schwalenberg, K., Willoughby, E., Mir, R., and Edwards, N., 2005, Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones, *First Break*, **23**, April, 57-63.
- Tompkins, M. J., 2004, Marine controlled-source electromagnetic imaging for hydrocarbon exploration: interpreting subsurface electrical properties, *First Break*, **22**, August, 45-51.
- Zhdanov, M. S., and Frenkel, M. A., 1983, The solution of the inverse problems on the basis of the analytical continuation of the transient electromagnetic field in reverse time, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **35**, 745-765.
- Zhdanov, M. S., Traynin, P., and Portniaguine, O., 1995, Resistivity imaging by time domain electromagnetic migration (TDEMM), *Exploration Geophysics*, **26**, 186-194.