지구물리와 물리탐사
Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa
Vol. 15, No. 2, 2012, p. 75~84

가스 하이드레이트 부존양상 도출을 위한 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산

노규보 · 강서기 · 설순지 * · 변중무
한양대학교 자원환경공학과

Computation of Apparent Resistivity from Marine Controlled-source Electromagnetic Data for Identifying the Geometric Distribution of Gas Hydrate

Kyubo Noh, Seogi Kang, Soon Jee Seol*, and Joongmoo Byun
Dept. of Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang University

요 약: 해양 전자탐사의 겉보기 비저항은 해수층으로 인해 지표탐사와 그 정의가 달라지게 되며, 이를 적절히 계산할 수 있는 알고리듬의 개발은 해양 전자탐사의 출발점이 될 수 있다. 이를 위해, 1차원 층서 가스 하이드레이트 수치모형과 해수층과 그 하부의 반 무한매질로 이루어진 수치모형에서 계산한 전자기적 반응을 비교분석하였다. 겉보기 비저항을 계산하기 위해서는 실수와 허수 성분 보다는 진폭과 위상을 사용하는 것이 더 적합하였으며 해양 전자탐사 반응의 민감도를 정량적으로 분석하여, 근거리 영역에서는 위상이 원거리 영역에서는 진폭 성분이 더 안정적인 결과를 주는 것을 알았다. 또한 위상과 진폭의 선택기준으로써 유도상수의 값을 제안하였다. 이러한 분석을 토대로 격자 탐색법(grid search)을 사용하여 겉보기 비저항을 계산하는 수치알고리듬을 개발하였다. 개발된 알고리듬을 이용하여 1차원 층서 가스 하이드레이트 수치모형의 다양한 변수를 변화시켜가며 겉보기 비저항을 계산해봄으로써 알고리듬의 타당성을 검증하였다. 마지막으로, 계산한 겉보기 비저항 값을 이용한 가스 하이드레이트 부존양상 정보의 도출가능성을 살펴보았다. 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트 부존양상을 모사한 2차원 가스 하이드레이트 수치모형에서 계산된 자료의 겉치레 단면도는 가스 하이드레이트 부존양상 정보 추출이 가능함을 보여주었다.

주요어: 해양 전자탐사, 겉보기 비저항, 가스 하이드레이트, 부존양상

Abstract: The sea layer in marine Controlled-Source Electromagnetic (mCSEM) survey changes the conventional definition of apparent resistivity which is used in the land CSEM survey. Thus, the development of a new algorithm, which computes apparent resistivity for mCSEM survey, can be an initiative of mCSEM data interpretation. First, we compared and analyzed electromagnetic responses of the 1D stratified gas hydrate model and the half-space model below the sea layer. Amplitude and phase components showed proper results for computing apparent resistivity than real and imaginary components. Next, the amplitude component is more sensitive to the subsurface resistivity than the phase component in far offset range and vice versa. We suggested the induction number as a selection criteria of amplitude or phase component to calculate apparent resistivity. Based on our study, we have developed a numerical algorithm, which computes appropriate apparent resistivity corresponding to measured mCSEM data using grid search method. In addition, we verified the validity of the developed algorithm by applying it to the stratified gas hydrate models with various model parameters. Finally, by constructing apparent resistivity pseudo-section from the mCSEM responses with 2D numerical models simulating gas hydrate deposits in the Ulleung Basin, we confirmed that the apparent resistivity can provide the information on the geometric distribution of the gas hydrate deposit.

Keywords: mCSEM, apparent resistivity, gas hydrate, geometrical distribution

서 론

우리나라 동해지역의 가스 하이드레이트는 미래의 석유 대체에너지원으로 주목받고 있으며, 다채널 탄성파 탐사와 물리검층, 코어분석등을 통해 그 부존이 확인되었다(유동근 등, 2008; 김길영 등, 2010). 기존의 가스 하이드레이트 탐사에 주로 사용된 탄성파 탐사는 BSR (bottom simulating reflector)과 같이 가스 하이드레이트의 부존 가능성을 시사하는 탄성파 지시자를 이용하거나 음향 임피던스(acoustic impedance)와 같은 탄성파적 특성(seismic attribute)을 이용하여 가스 하이드레이트의 부존가능지역을 추정하고, 가스 하이드레이트를 함유하

2012년 4월 2일 접수; 2012년 4월 26일 수정; 2012년 5월 22일 채택;
*Corresponding author
E-mail: ssjdoolly@hanyang.ac.kr
Address: Hanyang Univ., Haengdang 1-dong, Seongdong-gu, Seoul, Korea

고 있는 지층의 공극률과 같은 물성정보를 추정한다. 하지만 탄성파 탐사는 가스 하이드레이트의 탐지에 있어서 간접적인 지시자라는 단점을 지니고 있으며, 이는 곧 탄성파 탐사를 통해 가스 하이드레이트의 포화도와 부존양상을 정확히 도출하는 것이 어렵다는 사실을 의미한다.

따라서 가스 하이드레이트의 부존양상 도출과 자원량 산정을 위해서는 지층 내 가스 하이드레이트의 포화도와 직접적인 관계를 갖는 물성을 이용한 탐사방법이 필요하며, 이러한 필요를 충족시켜주는 탐사방법이 해저지층의 전기비저항을 대상물성으로 하는 해양 전자탐사(marine Controlled Source Electromagnetic; mCSEM)이다. 해양 전자탐사는 탐사장비 및 해석기술에서 최근 10년간 급격한 발전을 이루어왔으며, 현재는 해양에서의 탄화수소 탐지를 위한 확립된 지구물리 탐사방법이라고 할 수 있다(Constable, 2010). 강서기 등(2010)은 이러한 해양 전자탐사를 가스 하이드레이트의 탐지에 적용하였으며, 가스 하이드레이트 층의 심도, 전기비저항 변화에 따른 해양 전자탐사의 전자기적인 반응을 체계적으로 분석하였다. 이와 비슷한 방법으로 Lee *et al.* (2011)은 선 송신원을 이용하여 가스 하이드레이트에 의한 해양 전자탐사의 전자기적인 반응을 고찰하였다. 그러나 가스 하이드레이트 부존지역의 부존 양상 및 가스 하이드레이트 포화도를 얻기 위해서는 해저지층의 전기비저항 분포를 도출해야 하며, 이를 위해서는 역산기법의 적용이 필요하다. 최근 국외에서는 가스 하이드레이트 부존지역에서 해양 전자탐사를 통해 취득된 현장자료에 2.5차원 역산을 적용하는 연구가 수행되었으며, 이를 통해 지질학적으로 타당한 전기비저항 분포를 성공적으로 도출하였다(Weitemeyer *et al*., 2010). 따라서 국내에서도 가스 하이드레이트 부존가능지역의 전기비저항 분포를 얻기 위한 역산기법에 대한 연구가 수행되어야 하며, 이에 대한 기초연구로써 취득된 자료의 겉보기 비저항(apparent resistivity)을 계산하는 것은 현장에서 취득된 자료의 검증과 현장 자료의 역산 시 초기 모형설정을 가능하게 해준다는 측면에서 중요하다.

겉보기 비저항이란 불균질한 매질에서 얻은 반응을 하부 매질이 균질한 전기비저항을 갖는 반 무한매질(half-space)에서 얻은 반응에 대응 시킬 때, 반 무한매질의 전기비저항을 말한다. 겉보기 비저항은 지하하부에 존재하는 모든 매질에 대한 영향이 반영되어 나타나는 값으로서, 지하매질의 참 전기비저항을 의미하지 않으나 그 계산이 간단하여 지하구조의 변화나 이상체의 존재 유무를 겉보기 비저항 이상으로 손쉽게 확인할 수 있는 장점을 가진다(설순지 등, 2002). 일반적으로 육상에서 수행되는 소형루프 전자탐사(small-loop EM)는 송신원과 수신기가 부도체인 대기 내에 존재하며 상대적으로 높은 전기비저항을 갖는 배경매질에서 광체와 같이 낮은 전기비저항을 갖는 즉, 전기전도도가 높은 대상체의 탐지를 목표로 한다. 반면에 해양 전자탐사는 송신원과 수신기가 전도체인 해수 내에 존재하며 해저 퇴적물과 같이 낮은 전기비저항을 갖는 배경물질에서 탄화수소를 포함한 지층과 같이 높은 전기비저항을 갖는 대상물체의 탐지를 목표로 한다. 이처럼 일반적인 육상 전자탐사와 해양 전자탐사는 탐사가 수행되는 지질환경이 다르며, 이는 각 탐사의 전자기적인 반응에도 큰 차이를 야기한다. 따라서 해양 전자탐사의 겉보기 비저항을 계산하기 위해서는 육상 전자탐사와는 다른 접근방법이 필요하다. 예를 들어 대기와 반 무한매질의 반응에서 겉보기 비저항을 계산하는 육상 전자탐사와 달리, 해양 전자탐사의 겉보기 비저항은 대기와 해수 그리고 반 무한매질의 모형에서 해수 층의 전기비저항을 고정시키고 반 무한매질의 전기비저항을 계산하는 것이 합리적이다.

주파수영역 전자탐사(frequency domain EM)에서는 측정된 전기장 혹은 자기장의 실수 성분(real component)과 허수 성분(imaginary component) 그리고 진폭 성분(amplitude component)과 위상 성분(phase component)이 겉보기 비저항 계산에 사용될 수 있다. 소형루프 전자탐사(small-loop electromagnetic method)와 같은 일반적인 육상 전자탐사에서는 반 무한매질의 이론적인 해(Spies and Frischnecht, 1991; Kaufman, 1994)를 이용하여, 허수 성분만을 이용하거나(McNeill, 1980), 수신기에서 측정된 전기장과 자기장의 실수 성분과 허수 성분을 모두 이용하여(Das, 1995) 겉보기 비저항을 계산한다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 해양 전자탐사는 해수층에 송신원이 위치하고 해저면에 수신기가 위치하여 일반적인 육상 전자탐사와는 전자기적인 반응이 매우 다르므로 해양 전자탐사의 겉보기 비저항 계산에 적합한 겉보기 비저항 계산방법을 찾는 것이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항을 계산하는 수치알고리듬을 개발하였고, 개발된 알고리듬을 우리나라 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트 부존양상을 모사한 수치모형의 2차원 합성 해양 전자탐사 자료에 적용하여 가스 하이드레이트 부존양상의 도출가능성을 고찰하였다.

해양 전자탐사 자료의 반응분석

해양 전자탐사 자료에 적합한 겉보기 비저항 계산방법을 도출하기 위해서는 공기, 바다, 반 무한매질의 3층 구조로 이루어진 층서모형과 불균질한 매질에서 측정한 전자기적 반응을 분석해야 한다. 이를 위해 적분방정식을 사용하며, 광대역의 주파수에 대해 정밀도가 검증된 EM1D 코드(Lee, 2009)를 사용하여 공기, 바다, 반 무한매질의 3층 층서모형(Fig. 1 (a))과 1차원 층서 가스 하이드레이트 모형(Fig. 1 (b))의 전자기 반응을 계산하였다. 송수신기배열은 동일선법(inline mode)를 사용하였고 수평전기쌍극자 송신원(horizontal electric dipole; HED)에 대한 합성전기장 성분(total electric field)을 송신주파수 5, 15, 25 Hz에 대해 계산하였다. 현장자료취득의 한계를 고려하여 잡음수준을 10^{-15} V/Am^{2}로(Weitemeyer *et al.*, 2006)

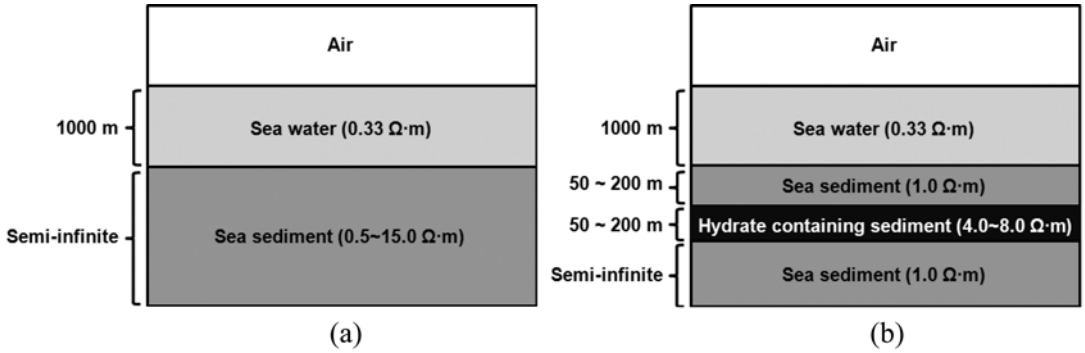

Fig. 1. Conceptual diagrams of three-layered model (a) and 1D layered gas hydrate model (b).

설정하여 계산된 값에서 잡음수준 이하의 값은 제외하였다. 해양 전자탐사에서는 송수신기가 해저면에 위치하며, 탐사 대상체는 해저면 하부에 위치한다. 이러한 경우 반 무한의 균질매질을 가정한 일반적인 방법에 의해 계산한 겉보기 비저항은 해수층의 영향을 반영하므로, 해양 전자탐사에서는 해저면 하부의 반무한 균질매질의 전기비저항 값으로 겉보기 비저항을 정의하는 것이 합리적이다. 이 연구에서는 공기, 해수, 반 무한매질로 구성된 3층 모형에서 반 무한매질의 전기비저항 변화에 따른 해양 전자탐사의 전자기반응에 대한 특성분석을 통하여 겉보기 비저항을 효과적으로 계산하는 방법을 제시하고자 하였다. 이때 공기, 바다 층의 전기비저항 값을 각각 10^8 Ω·m, 0.33 Ω·m로 고정하였고 반 무한매질의 전기비저항 값을 변화시켜가며 그 반응을 구하였다.

주파수영역 전자탐사법의 경우, 실수 성분과 허수 성분 또는 진폭 성분과 위상 성분으로 표현될 수 있다. 따라서 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항을 계산하는 전략을 수립하기 위해서는 겉보기 비저항 계산에 적합한 자료의 형태를 결정할 필요가 있다. 이를 위해, 먼저 해양 전자탐사의 반응을 실수 성분과 허수 성분의 형태로 고찰하였고, 이를 진폭 성분과 위상 성분의 형태로 표현된 경우와 비교분석하였다.

Fig. 1 (a)에 도시한 3층 층서모형에서 송신주파수를 5 Hz로 하여 수치모형실험을 수행하였고, 그 중 송수신기 거리가 2000 m 일 때 반 무한매질의 전기비저항 변화에 따른 전자기 반응의 실수 성분과 허수 성분을 실선으로 도시하였다. 또한, 이와 함께 Fig. 1 (b)에 도시한 층서 가스 하이드레이트 모형에서 가스 하이드레이트 층의 심도가 50 m, 두께 100 m, 전기비저항이 8.0 Ω·m인 경우에 전자기 반응의 실수 성분과 허수 성분을 점선으로 함께 도시하였다. Fig. 2를 보면, 층서 가스 하이드레이트 모형에서 계산된 수평 전기장을 공기, 바다, 반 무한매질로 이루어진 3층 층서모형에 대응시킬 때, 실수 성분과 허수 성분 모두 두 개 이상의 겉보기 비저항에서 동일한 반응을 만족시킬 수 있는 해를 가진다. 따라서 이 두 성분들을 각각 이용하여 겉보기 비저항을 계산하는 것은 다수의 해 중에서 특정한 기준을 이용하여, 적절한 하나의 해를 결정해야

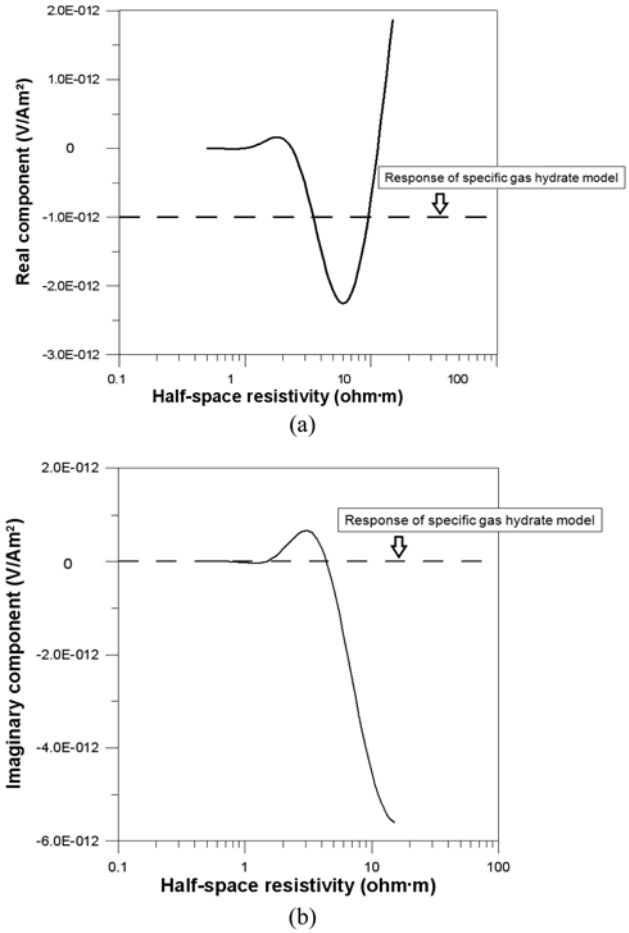

Fig. 2. The real (a) and imaginary (b) components of three-layered model shown in Fig. 1 (a) as a function of the resistivity of half-space. The real and imaginary responses of the gas hydrate model shown in Fig. 1 (b) are superimposed as dashed lines on those of the three-layered model, respectively. The transmission frequency was 5 Hz and Tx-Rx offset was 2000 m. The depth, thickness and resistivity of gas hydrate layer are 50 m, 100 m and 8.0 Ω·m.

하는 문제를 지니고 있음을 확인할 수 있다.

실수 성분과 허수 성분을 함께 사용할 경우 3층 층서모형에서 반 무한매질의 전기비저항이 변화할 때, 해양 전자탐사의 반응에 대하여 겉보기 비저항의 해가 어떤 분포를 보이는 지

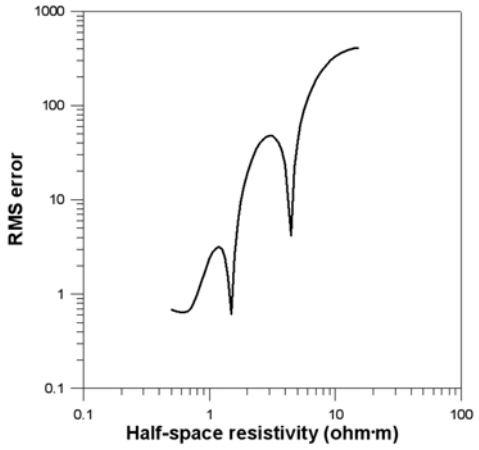

Fig. 3. The RMS error curve depending on the resistivity of the half-space with transmission frequency of 5 Hz and Tx-Rx offset of 2000 m. The RMS error values are calculated by using the equation (1).

를 고찰하기 위해 식 (1)과 같이 오차를 정의하였다.

$$Error = \sqrt{\frac{\left(\frac{Re(E_x)^{meas} - Re(E_x)^{est}}{Re(E_x)^{meas}}\right)^2 + \left(\frac{Im(E_x)^{meas} - Im(E_x)^{est}}{Im(E_x)^{meas}}\right)^2}{2}} \quad (1)$$

여기서, $Re(E_x)$와 $Im(E_x)$는 각각 계산된 수평 전기장의 실수 성분과 허수 성분을 의미하며, 위 첨자 meas와 est는 각각 층서 가스 하이드레이트 모형의 반응과 반 무한매질을 포함한 3층 층서모형의 반응을 의미한다.

Fig. 2에 도시한 실수 성분과 허수 성분의 측정에 사용한 수치모형과 동일한 모형 변수에서 반 무한매질의 전기비저항 변화에 따른 오차(식 (1))를 계산한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3을 보면, 층서 가스 하이드레이트의 반응을 잘 반영한다고 보이는 반 무한매질이 약 4.0 Ω·m의 전기비저항을 가질 때, 오차가 국소 최저치(local minimum)를 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 반 무한매질이 상대적으로 작은 전기비저항을 갖는 구간(약 0.5 ~ 2.0 Ω·m)에 전역 최저치(global minimum)는 존재하며 이 구간의 전기비저항값도 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산 시 지질학적으로 겉보기 비저항 해를 찾는 것은 어렵다. 즉, 실수 성분과 허수 성분을 함께 사용하는 것 또한 겉보기 비저항 계산에 적합한 방법이 아니라는 것을 의미한다.

다음으로 해양 전자탐사자료의 진폭 성분과 위상 성분을 이용한 겉보기 비저항 계산의 적합성을 판별하기 위하여, 층서 가스 하이드레이트 수치모형과 공기, 바다, 반 무한매질의 3층 층서모형에서 송수신기 거리를 변화시켜가며 계산한 진폭 성분과 위상 성분을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4 (a)의 진폭 성분을 보면 특정 범위 이상의 송수신기 거리에서 하부매질의 전기비저항 변화에 따라 진폭 성분이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 가스 하이드레이트의 위상 성분은 먼 송수신기 거리에서 반 무한매질의 전기비저항이 특정 값을 가질 때의 위상 성분에 근사한다. Fig. 4 (b)를 좀 더 자세히 살펴보면 층서 가스 하이드레이트 모형에서 계산되는 위상 성분이 송수신기 거리가 변화 하여도 4.45 Ω·m의 전기비저항을 갖는 반 무한매질에서 계산되는 위상 성분과 거의 유사함을 확인할 수 있다. 이는 위상 성분이 겉보기 비저항 정보에 대해서 송수신기 거리의 변화에 따른 민감도가 작다는 것을 의미한다.

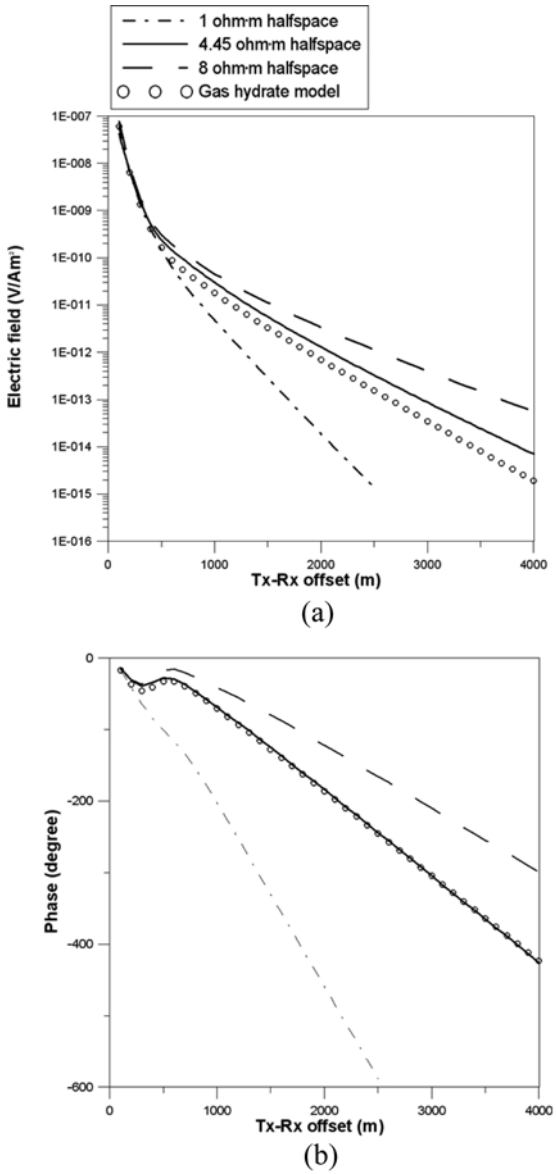

Fig. 4. The amplitude (a) and phase (b) components of half-space models with different resistivity of half-space of 1, 4.45 and 8 Ω·m. The amplitude and phase components of gas hydrate model used in Fig. 2 and 3 are also plotted. The transmission frequency is 5 Hz and Tx-Rx offset varies from 100 m to 4000 m.

해양 전자탐사의 겉보기 비저항 계산을 위해 진폭 성분과 위상 성분을 사용할 경우에 대해서 해가 어떠한 분포를 보이는 지를 고찰하기 위하여 식 (2)와 식 (3)과 같이 오차를 정의

하였다.

$$E_A = \left| \frac{A(E_x)^{meas} - A(E_x)^{est}}{A(E_x)^{meas}} \right| \quad (2)$$

$$E_P = \left| \frac{P(E_x)^{meas} - P(E_x)^{est}}{P(E_x)^{meas}} \right| \quad (3)$$

여기서, $A(E_x)$와 $P(E_x)$는 각각 계산된 수평 전기장의 진폭 성분과 위상 성분을 의미하며, 위 첨자 meas와 est는 앞서와 같이 각각 층서 가스 하이드레이트 모형의 반응과 반 무한매질을 포함한 3층 층서모형의 반응을 의미한다.

Fig. 4에 도시한 진폭 성분과 위상 성분의 측정에 사용한 수치모형과 동일한 모형 변수에서 반 무한매질의 전기비저항 변화에 따른 오차(식 (2)와 식 (3))를 계산한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 진폭 성분과 위상 성분을 사용하여 계산된 오차인 Fig. 5를 보면, 반 무한매질이 각각 약 3.0 Ω·m와 4.5 Ω·m로 서로 다른 전기비저항을 가질 때이지만, 두 경우 모두 오차가 전역 최저치를 가지며 국소 최저치는 존재하지 않는다. 따라서 겉보기 비저항을 계산할 때, 진폭 성분과 위상 성분을 사용하는 것이 해를 찾기에 상대적으로 실수 성분과 허수 성분을 사용하는 것 보다는 수월한 방법이라는 것을 알 수 있다. 그러나 두 성분 중 어느 값이 더 정확히 지하매질을 대표해 줄 수 있는지를 살펴볼 필요가 있다.

따라서 진폭 성분과 위상 성분을 이용하여 계산된 겉보기 비저항 값의 신뢰도를 정량적으로 분석해보기 위해, 송수신기 거리와 송신주파수에 따른 진폭 성분과 위상 성분의 변화를 이용하여 해양 전자탐사 반응의 민감도를 다음과 같이 정의하였다.

$$amplitude\ sensitivity = \left| \frac{A(\rho+\delta\rho) - A(\rho-\delta\rho)}{2\delta\rho} \times \frac{1}{A(\rho)} \right| \quad (4)$$

$$phase\ sensitivity = \left| \frac{P(\rho+\delta\rho) - P(\rho-\delta\rho)}{2\delta\rho} \times \frac{1}{P(\rho)} \right| \quad (5)$$

여기서, $A(\rho)$와 $P(\rho)$는 각각 계산된 수평 전기장의 진폭 성분과 위상 성분을 의미한다. 공기와 1000 m 심도의 해수 그리고 반 무한매질을 가정한 3층의 층서 수치모형에서 해저면에서 50 m 이격된 수평전기쌍극자 송신원이 존재할 때, 100 m ~ 4000 m의 송수신기 거리의 위치에서 측정한 진폭 성분과 위상 성분의 중앙 차분 값을 각각 진폭 성분과 위상 성분의 값으로 정규화 하여 계산하였다. 이때, 반 무한매질은 해양환경의 배경물질인 해양 퇴적물의 일반적인 전기비저항인 1.0 Ω·m (Hyndman *et al.*, 1999)을 갖고 미소변화량은 전기비저항 값의 1%인 0.01 Ω·m로 설정하였다. 또한, 가스 하이드레이트 탐사를 위한 해양 전자탐사의 적용에서 5, 15 Hz를 사용한 Weitemeyer *et al.* (2006) 논문을 참고하여 1 ~ 30 Hz의 송신주파수 대역에서 민감도를 계산하였다.

하부매질의 전기비저항 변화에 대한 진폭 성분과 위상 성분의 민감도를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 진폭 성분은 주어진 송수신기 간격과 주파수 영역에서 송수신기 거리가 멀어질수록, 또 송신주파수가 커질수록 매질의 전기비저항의 변화에 대한 민감도가 크게 나타난다. 반면, 위상 성분은 상대적으로 낮은 송신주파수(약 1 Hz ~ 20 Hz)와 가까운 송수신기 거리(약 800 m ~ 3000 m)에서 민감도가 크게 나타난다. 정리해보면, 낮은 송신주파수와 가까운 송수신기 거리에서는 위상 성분이 진폭 성분에 비해 큰 민감도를 가지며 높은 송신주파수와 먼 송수신기 거리에서는 진폭 성분이 큰 민감도를 가진다.

해양 전자탐사와 같은 다중주파수, 다중송수신기 탐사환경에서 효과적으로 겉보기 비저항을 계산하는 알고리듬의 개발을 위해서 겉보기 비저항 계산이 가능한 각 성분들의 특성분

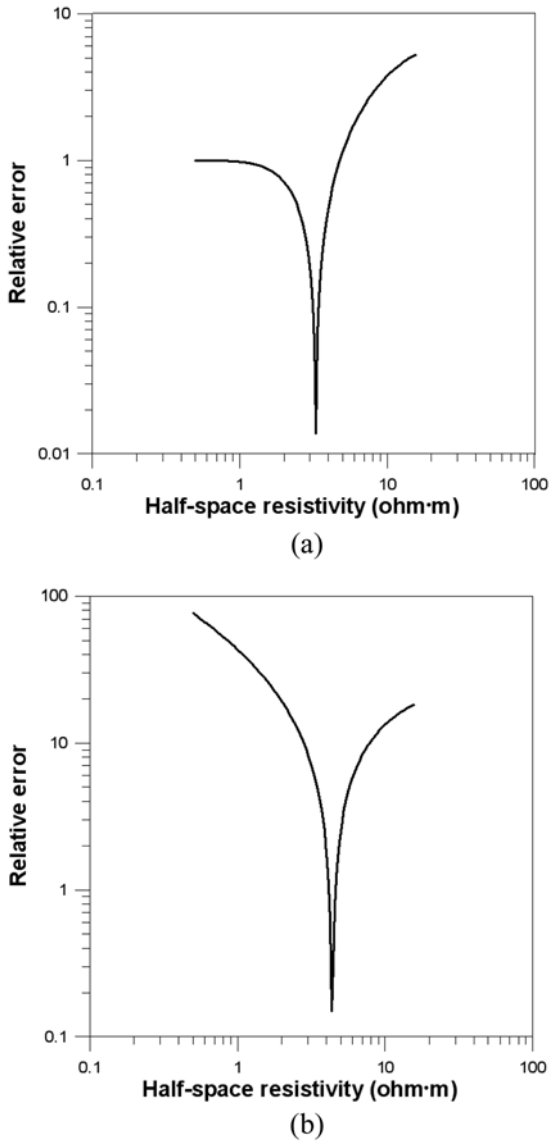

Fig. 5. The relative error curves using amplitude component (a) and phase component (b) with the resistivity of the half-space at transmission frequency of 5 Hz and Tx-Rx offset of 2000 m.

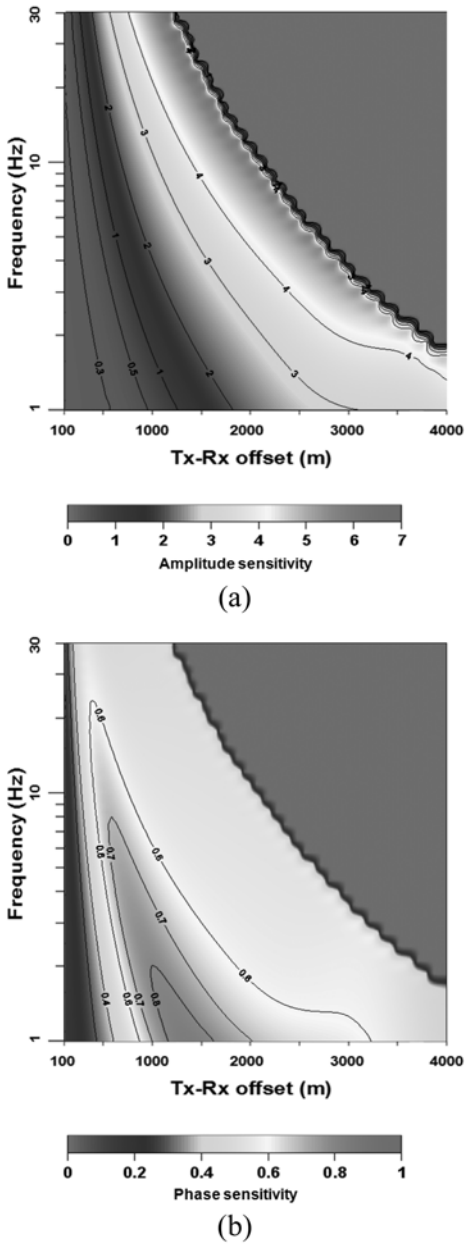

Fig. 6. The normalized sensitivity of amplitude (a) and phase (b) components corresponding to 1% perturbation in the resistivity for the half-space with the resistivity of 1.0 Ω·m.

석을 통해 진폭 성분과 위상 성분이 적합함을 알았다. 또한 정량적 민감도 분석을 통해 진폭 성분과 위상 성분이 사용되면 유리한 송신주파수와 송수신기 거리 구간을 확인하였다. 이를 바탕으로 다양한 층서 가스 하이드레이트 모형에 대해 겉보기 비저항을 계산하여 지질학적 타당성 및 연속성을 판단하였고, 실험적으로 정규화된 진폭 성분의 민감도가 0.5일 때가 해양 전자탐사의 겉보기 비저항 계산을 위해 진폭 성분을 사용하느냐 위상 성분을 사용하느냐의 선택의 기준이 될 수 있음을 알 수 있었다. 송신주파수에 따라 진폭 성분의 민감도가 0.5가 되는 송수신기 거리 및 그때의 유도상수(Induction number; Ryu *et al*., 1970)를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 볼 수 있듯이 진폭 성분의 민감도가 0.5가 되는 영역의 유도상수는 대략 2.0의 값을 가진다. 따라서 이 논문에서는 송신주파수와 송수신기거리에 따른 겉보기 비저항 계산을 위한 전기장 성분의 선택기준으로써 유도상수의 값을 2.0으로 제안한다. 이 기준에 의해 유도상수가 2.0보다 작은 영역에서는 위상 성분을 사용하고, 2.0 이상의 송수신기 거리에서는 진폭 성분을 사용하여 겉보기 비저항을 계산하는 수치 계산 알고리듬을 개발하였다.

Table 1. Induction numbers with the variation of the transmission frequency and the Tx-Rx offset when the normalized sensitivity of amplitude equals to 0.5.

Transmission frequency (Hz)	1	3	5	9	15	21	25	27
Offset (m)	970	565	444	335	262	221	202	193
Induction number	1.93	1.94	1.97	2.00	2.02	2.01	2.01	1.99

Weitemeyer (2008)는 가스 하이드레이트 탐사를 목적으로 하는 해양 전자탐사 자료에서 진폭 성분만을 사용하여 겉보기 비저항을 계산하였으나, 작은 송신주파수와 가까운 송수신기 거리에서는 정규화된 진폭 성분의 민감도가 0.5 이하로 작은 것과 저류층에 비해 천부에 존재하는 가스 하이드레이트의 특성을 고려하면 유도상수를 기준으로 한 전자기장 성분의 선택을 통한 겉보기 비저항계산이 가까운 송수신기 영역의 정보를 추출하기에 더 적절하다.

개발된 알고리듬은 겉보기 비저항 계산을 위한 방법으로 주어진 구간 안에서 안정적으로 해를 구한다고 알려진 격자 탐색법(grid search)을 두 단계로 나누어 적용함으로써 계산속도와 정밀도를 향상시켰으며, Fig. 7과 같은 순서도를 가진다. 개발된 알고리듬은 첫째로, 해수층의 두께, 해수층의 전기비저항 분포, 송신주파수, 송수신기 거리 그리고 측정한 진폭 성분과 위상 성분을 입력받는다. 둘째로, 두 단계로 나누어진 격자 탐색법을 위한 입력변수로 첫 단계의 격자 탑색법을 위한 전기비저항의 범위와 해당 범위 내 격자의 수, 첫 단계에서 계산된 겉보기 비저항을 이용하여 재분할할 두 번째 격자 탐색법의 범위와 해당 범위내 격자의 수를 입력받는다. 그 다음으로는 입력받은 송신주파수와 송수신기 거리를 통해 유도상수를 기준으로 하여 진폭 성분 또는 위상 성분을 이용하는 목적함수를 설정한다. 겉보기 비저항계산을 위한 격자 탐색법으로서 공기, 바다, 반 무한매질로 이루어진 3층 구조에서 반 무한매질의 전기비저항을 앞서 입력받은 넓은 구간에서 대수적 간격으로 변화시키면서 목적함수로 정의된 오차를 계산함으로써 가장 작은 오차를 보이는 반 무한매질의 전기비저항을 겉보기 비저항으로써 저장한다. 마지막으로 앞서 저장된 겉보기 비저항값을 중심으로 축소된 구간을 설정하여 선형적으로 나눈 뒤 격자 탐색법을 이용함으로써 다시 겉보기 비저항을 계산한다.

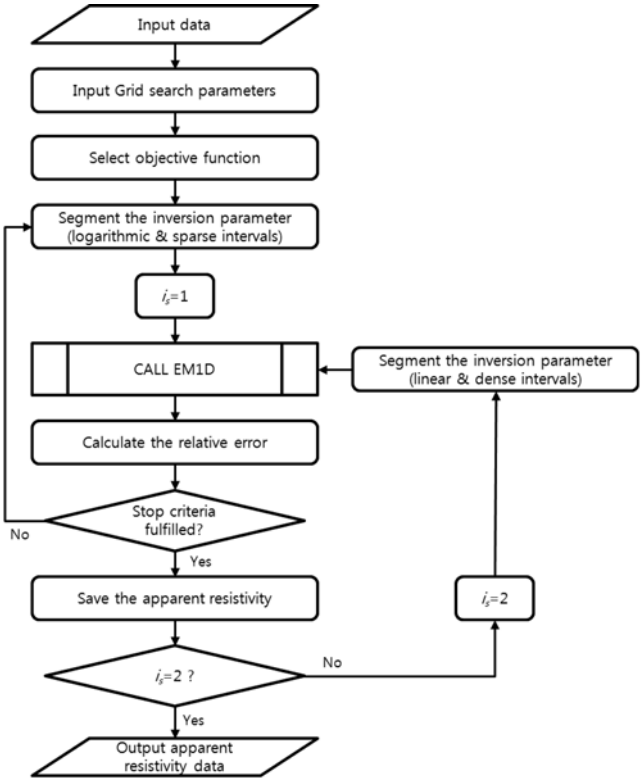

Fig. 7. A flow chart of apparent resistivity computation algorithm using the mCSEM data. The auxiliary parameter i_s represents the stage of inversion process. Model parameters are discretized logarithmically in the first stage ($i_s = 1$) and then, linearly in the second stage ($i_s = 2$). We used the estimated apparent resistivity in the first stage as a reference for the central value of the model parameter interval in the second stage.

층서 가스 하이드레이트 수치모형을 이용한 알고리듬의 검증

개발된 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산 알고리듬을 검증하기 위하여 Fig. 1 (b)에 나타낸 1차원 층서 가스 하이드레이트 수치모형을 적용하였다. 강서기 등(2010)이 층서 가스 하이드레이트 모형에 대한 해양 전자탐사의 반응을 분석한 것을 토대로 하여, 송신주파수, 가스 하이드레이트 층의 심도, 전기비저항, 두께를 변화시켜가며 겉보기 비저항의 계산결과를 비교분석하였다. 이 때, 송신주파수는 각각 5 Hz와 15 Hz를 사용하였다.

층서 가스 하이드레이트 모형에서 가스 하이드레이트 층의 심도와 두께를 100 m로 고정하고 가스 하이드레이트 층의 전기비저항을 4, 6, 8 Ω·m로 변화시킬 때의 겉보기 비저항 계산결과를 Fig. 8에 나타내었다. 송수신기 거리가 증가함에 따라 거리 수직탐사(geometric sounding)의 효과에 의해 겉보기 비저항 계산결과가 증가 후 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 가스 하이드레이트 층의 전기비저항이 증가함에 따라 계산된 겉보기 비저항 값도 증가한다. 겉보기 비저항 계산결과에서 송수신기 거리의 변화에 따라 겉보기 비저항의 분포가 다소 불연속적으로 보이는 것은 겉보기 비저항계산을 위해 사용된 격자 탐색법의 격자 간격으로 인한 영향이다. 이러한 불연속적 변화가 가스 하이드레이트로 대표되는 이상체의 영향을 나타내기에 큰 지장이 없고 겉보기 비저항계산이 측정된 전자기장 값인 현장탐사 자료를 전기비저항의 체계로 빠르게 계산해 내기 위해 이 연구에서는 이러한 구간을 사용했으나 좀 더 부드러운 곡선을 얻기 위해서는 좀 더 작은 격자 간격을 사용해야 한다.

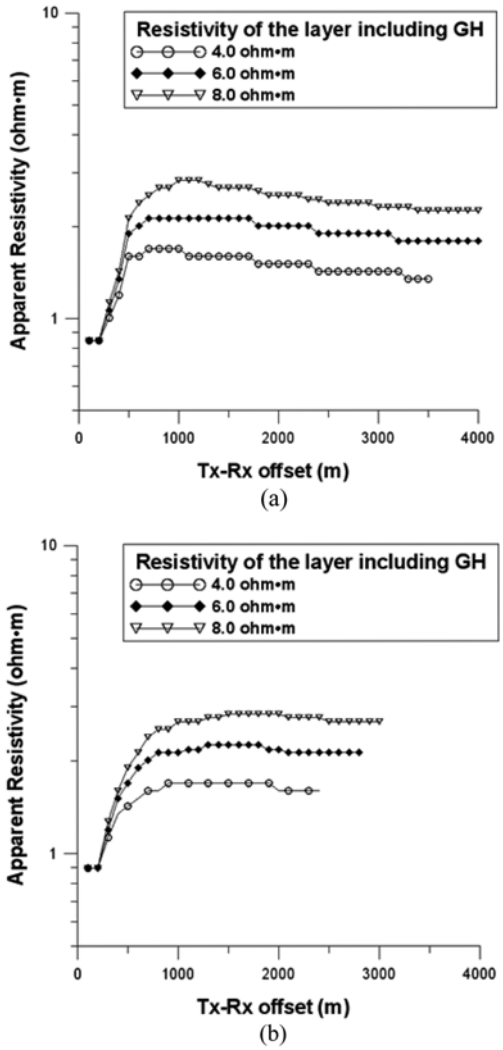

Fig. 8. The computed apparent resistivity curves when the resistivity of the layer including gas hydrate varies. Both depth and thickness of the layer including gas hydrate are set to 100 m. Transmission frequencies are 15 Hz (a) and 5 Hz (b), respectively.

Fig. 9는 송신주파수가 5, 15 Hz일 때, 가스 하이드레이트 층의 두께와 전기비저항을 각각 100 m와 8 Ω·m로 고정하고 부존 심도를 50, 100, 200 m로 변화시킬 때의 겉보기 비저항 계산 결과이다. 5 Hz의 송신주파수를 사용한 Fig. 9 (a)에서 가스 하이드레이트 층의 부존 심도가 50, 100, 200 m로 변화함

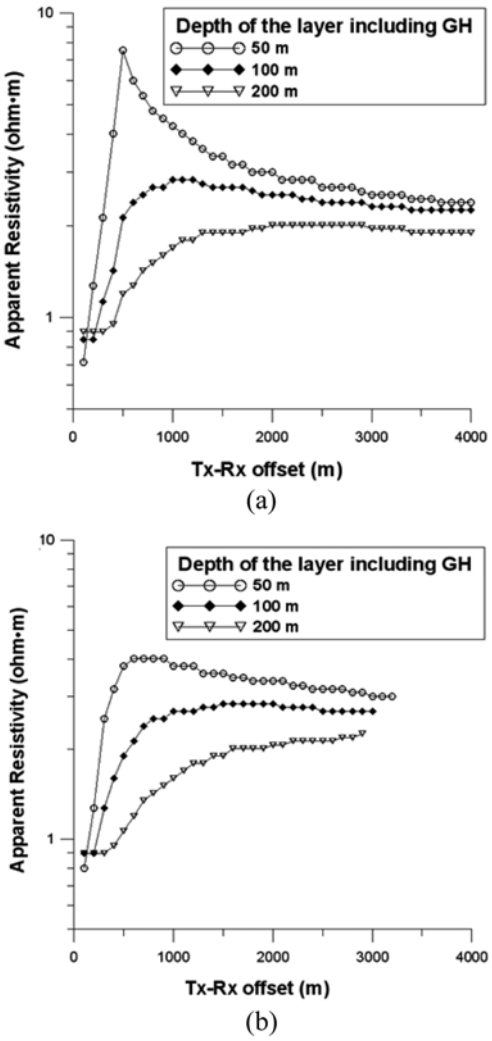

Fig. 9. The computed apparent resistivity curves when the depth of the layer including gas hydrate varies. The thickness and resistivity of the layer including gas hydrate are set to 100 m and 8.0 Ω·m, respectively, Transmission frequencies are 15 Hz (a) and 5 Hz (b), respectively.

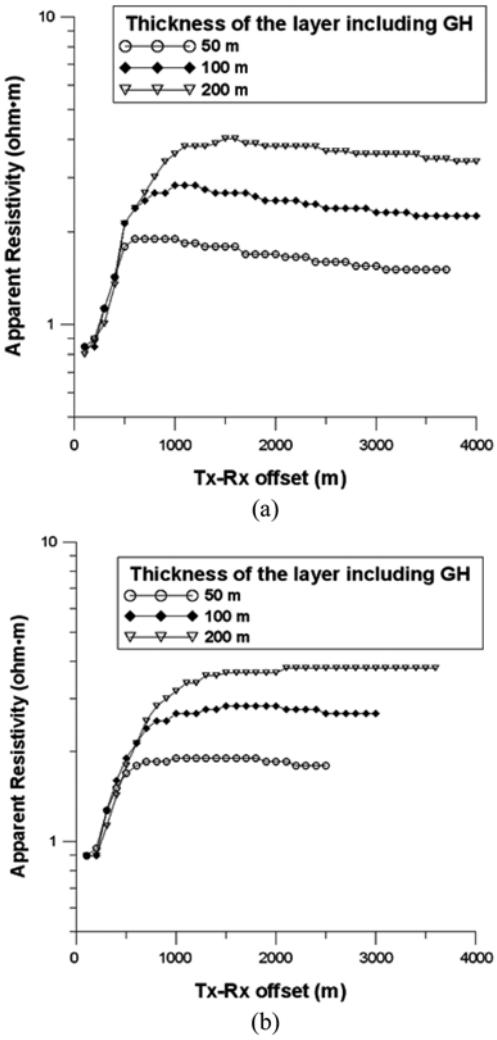

Fig. 10. The computed apparent resistivity curves when the thickness of the layer including gas hydrate varies. The depth and resistivity of the layer including gas hydrate are set to 100 m and 8.0 Ω·m. Transmission frequencies are 15 Hz (a) and 5 Hz (b), respectively.

에 따라 최대 겉보기 비저항 값이 약 8, 3, 2 Ω·m로 감소하고, 그 값이 계산되는 송수신기 거리는 약 500, 1200, 2500 m로 증가한다. 즉, 이상대의 심도가 증가함에 따라 겉보기 비저항에서 이상대의 영향을 많이 받는 송수신기 거리는 증가하며 그 때 계산된 겉보기 비저항은 감소한다.

가스 하이드레이트 층의 심도와 전기비저항을 각각 100 m와 8 Ω·m로 고정하고 가스 하이드레이트 층의 두께를 50, 100, 200 m로 변화시킬 때의 겉보기 비저항 계산 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 5 Hz의 송신주파수를 사용한 Fig. 10 (a)를 보면 가스 하이드레이트 층의 두께가 증가하면, 100 ~ 500 m의 송수신기 거리에서는 거의 유사한 겉보기 비저항을 가지나 최대 겉보기 비저항 값과 그 값이 계산되는 송수신기 거리는 각각 약 2, 3, 4 Ω·m와 약 800, 1200, 1600 m로 증가한다. 즉, 가스 하이드레이트 층의 두께가 증가할수록 이상대의 영향을 많이 받으며 그 영역이 증가한다.

1차원 층서 가스 하이드레이트 수치모형의 가스 하이드레이트 층의 전기비저항, 부존심도, 두께를 변화시켜가며 겉보기 비저항 계산 알고리듬에 적용하여 겉보기 비저항이 물리적으로 타당하게 계산되는 것을 확인하였다.

동해 울릉분지 가스 하이드레이트를 모사한 2.5차원 수치모형 반응 분석

동해 울릉분지에서 수행된 다채널 탄성파 탐사자료를 토대로 분류된 동해 울릉분지 상의 가스 하이드레이트 부존유형(강동효 등, 2009)과 물리검층 자료(김길영 등, 2010)을 참고하여 동해 울릉분지의 2차원 가스 하이드레이트 수치모형을 구성하였다. 겉보기 비저항 계산을 통한 부존유형 도출가능성을

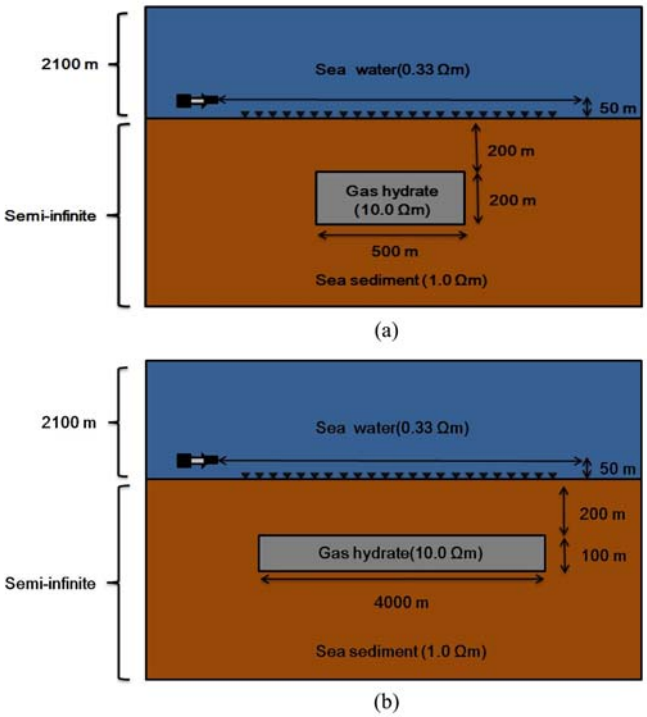

Fig. 11. The conceptual diagrams of two different 2D gas hydrate models. The model (a) represents gas hydrate formed in column structure and (b) represents gas hydrate formed in sandy layer just above BSR.

알아보기 위해 가스 하이드레이트가 칼럼구조 내부에 존재하는 유형과 위쪽 확산으로 인해 BSR 직상부인 가스 하이드레이트 안정영역(Gas Hydrate Stability Zone; GHSZ)내 사질층에 존재하는 유형을 각각 Fig. 11 (a)와 (b)에 나타내었다. 두 모형에서 해수의 전기비저항은 0.33 Ω·m이고, 해양 퇴적물의 전기비저항은 1.0 Ω·m이다. 가스 하이드레이트 층의 전기비저항은 UBGH-10 시추공의 물리검층자료를 토대로(김길영 등, 2010) 10.0 Ω·m로 설정하였다. 송수신기 배열은 동일선법이고, 수신기는 해저면에 200 m 간격으로 31개를 배치하였으며, 수신기 배열의 중앙 하부에 가스 하이드레이트가 부존하고 있다. 송신원은 해저면 상부 200 m에 존재하며 수신기 배열의 좌측 1000 m부터 우측 1000 m까지 200 m 간격으로 41개의 송신원이 있다(Fig. 11).

2차원 모형에 의한 해양 전자탐사의 반응을 계산하기 위해, 개선된 2차장 방법에 대해 유한요소법을 이용하는 2.5차원 전자기 수치모형알고리듬(Kang *et al.*, 2012)을 이용하였다. 전자기 수치모형실험을 수행하여 수평전기쌍극자 송신원(J_x)에 의한 수평전기장(E_X)을 계산하였다. 이를 개발된 알고리듬에 적용하여 겉보기 비저항 값을 계산하였다. 계산된 겉보기 비저항의 공간적인 분포를 분석하기 위해 이상체의 수직적, 수평적 영향을 함께 확인할 수 있는 겉치레 단면도(pseudo-section)를 작성하였다. 겉치레 단면도의 작성은 일반적인 전기비저항 탐사의 겉치레 단면도 작성법을 따랐으며, 이 과정에서 송신원이

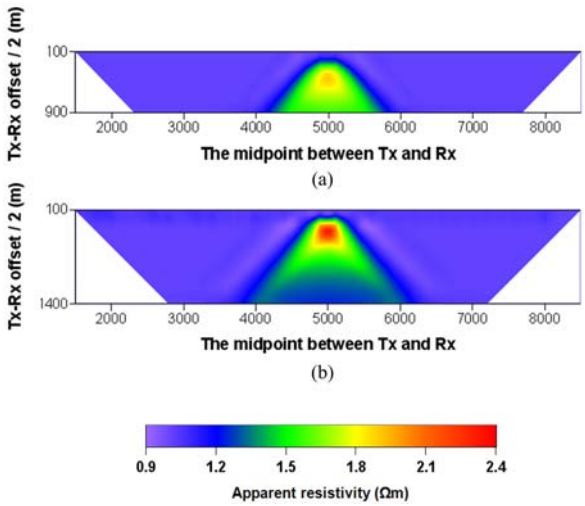

Fig. 12. The pseudo-sections of the apparent resistivity for gas hydrate model formed in column structure shown in Fig. 11 (a) for the transmission frequency of 15 Hz (a) and 5 Hz (b).

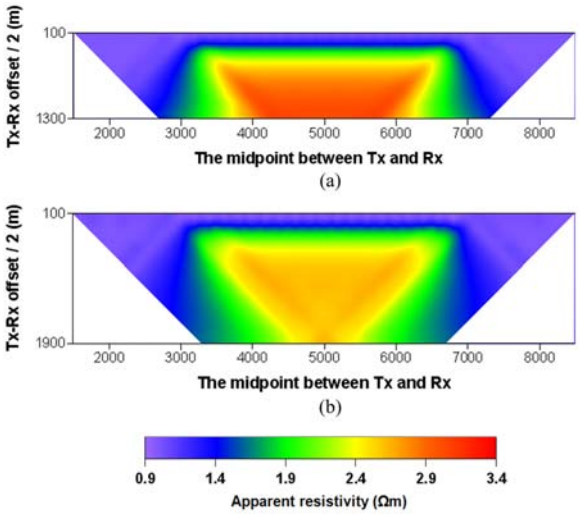

Fig. 13. The pseudo-sections of the apparent resistivity for gas hydrate model formed just above BSR shown in Fig. 11 (b) for the transmission frequency of 15 Hz (a) and 5 Hz (b).

해저면에 있다고 가정하였고 송수신기 한 쌍에 의해 같은 점에 두 개의 값이 놓이는 경우 두 값의 산술평균값을 사용하였다.

칼럼구조 모형과 BSR 직상부 모형의 겉치레 단면도를 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12를 보면 고비저항 이상대가 겉치레 단면도의 중앙에 나타나며, 고립 이상체에 의한 영향이 겉치레 단면도 상에 나타나는 바짓가랑이 효과(pant-leg effect)가 잘 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 저주파수의 송신주파수 일수록 좀 더 심부의 정보를 많이 포함하게 되는 것을 잘 보여준다.

한편, 칼럼구조 모형에 비해 BSR 직상부 모형에서 가스 하이드레이트 층의 두께는 더 작으며 수평적인 분포는 더 넓다. 이러한 가스 하이드레이트 부존양상의 차이가 각 부존양상의 겉보기 비저항 계산 결과인 Fig. 12와 Fig. 13에 잘 나타남을

확인 할 수 있다. 즉, BSR 직상부 모형의 경우, 겉치레 단면도상에서 생각되는 이상대의 영역이 칼럼구조 모형보다 더 넓은 수평적 분포를 가진다.

개발된 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산알고리듬에 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트를 모사한 2차원 수치모형을 적용하고 계산결과를 겉치레 단면도상에 표시함으로써 가스 하이드레이트 부존양상 도출가능성을 확인하였다. 또한, 이를 통해 개발된 알고리듬의 결과인 겉보기 비저항이 현장에서 취득한 자료의 검증과 전기비저항 분포에 대한 초기 해석에 충분히 사용될 수 있음을 확인하였다. 하지만 겉보기 비저항이 실제 심도에 대한 정보를 제공하지 않고 실제 전기비저항값은 아니라는 점은 보다 정확한 전기비저항 영상화를 위한 2.5차원 역산의 적용필요성을 역설한다.

결 론

이 연구에서는 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산알고리듬을 개발하였고, 개발된 알고리듬에 가스 하이드레이트 모형을 적용함으로써 겉보기 비저항 계산을 통한 가스 하이드레이트 부존양상 도출가능성을 확인하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 해양 전자탐사 자료에 적합한 겉보기 비저항 계산방법을 찾기 위해 1차원 층서 가스 하이드레이트 모형을 이용하여 계산된 전자기 반응을 분석한 결과, 해양 전자탐사 자료의 겉보기 비저항 계산을 위하여 낮은 주파수와 가까운 송수신기 거리에서는 위상 성분을 이용하는 것이 적당하며 높은 주파수와 먼 송수신기 거리에서는 진폭 성분을 이용하는 것이 적당하다. 또한 자료구조 선택의 기준으로써 유도상수의 값을 2로 제안하였다.

2. 격자 탐색법(grid search)를 이용하는 겉보기 비저항 계산알고리듬을 개발하였으며, 알고리듬의 검증을 위하여 1차원 층서 가스 하이드레이트 모형을 개발된 알고리듬에 적용하였다. 층서 가스 하이드레이트 모형의 가스 하이드레이트 층의 심도, 두께 그리고 전기비저항과 송신주파수를 변화시키고 계산결과를 비교함으로써, 계산결과가 물리적으로 타당하게 나오는 것을 확인하여 개발된 알고리듬의 신뢰성을 확인하였다.

3. 동해 울릉분지의 가스 하이드레이트의 부존양상에 따른 2차원 가스 하이드레이트 수치모형을 구성하고, 2.5차원 수치모형 반응계산을 통해 계산된 전자기 반응을 개발된 알고리듬에 적용함으로써 겉보기 비저항 계산을 통한 이상대의 부존양상 정보의 도출가능성을 확인하였다.

4. 겉보기 비저항은 가정을 통해 계산된 지하매질의 정보이므로 하부 매질의 전기비저항 분포를 정확히 구현할 수 없다. 따라서 2.5차원 역산을 이용한 지하매질의 전기비저항의 분포를 얻는 연구가 필요하며 역산 시 초기모형으로써 개발된 알고리듬을 이용하여 계산한 겉보기 비저항이 사용될 수 있다.

참고문헌

강동효, 유동근, 박장준, 류병재, 구남형, 김원식, 박관순, 박근필, 김지수, 2009, 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존 형태, 지질학회지, **45**, 143-155.

강서기, 설순지, 변중무, 2010, 가스하이드레이트 탐사를 위한 해저 CSEM탐사 설계변수 고찰, 한국지구시스템공학회, **47**, 139-150.

김길영, 유동근, 류병재, 2010, 물리검층 자료를 이용한 동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유지층의 물성특성 해석, 지질학회지, **46**, 275-290.

유동근, 강동효, 구남형, 김원식, 김길영, 김병엽, 정순홍, 김영준, 이호영, 박근필, 이광훈, 박수철, 2008, 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 부존 지구물리증거, 지질학회지, **44**, 645-655.

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화, 물리탐사, **5**, 309-315.

Constable, S., 2010, Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration, *Geophysics*, **75**(5), A67-A81.

Das, U. C., 1995, Apparent resistivity curves in controlled-source electromagnetic sounding directly reflecting true resistivities in a layered earth, *Geophysics*, **60**(1), 53-60.

Hyndman, R. D., Yuan, T., and Morgn, K., 1999, The concentration of deep sea hydrates from down-hole electrical resistivity logs and laboratory data, *Earth Planet Science Letter*, **172**, 167-177.

Kang, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, A feasibility study of CO_2 sequestration monitoring using the mCSEM method at a deep brine aquifer in a shallow sea, *Geophysics*, **77**, E117-E126.

Kaufman, A. A., 1994, Geophysical field theory and method, Part C, *Academic Press*, Inc. 41-57.

Lee, K. H., 2009, Personal communication.

Lee, K. H., Jang, H., Jang, H., and Kim, H. J., 2011, Sensitivity analysis of marine controlled-source electromagnetic methods to a shallow gas-hydrate layer with 1D forward modeling, *Geosciences Journal*, **15**(3), 297-303.

McNeill, D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers, *Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Toronto*

Ryu, J., Morrison, H., and Ward, S., 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current, *Geophysics*, **35**, 862-896.

Spies, B. R. and Frischknecht, F. C., 1991, Eletromagnetic Sounding, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetics in Applied Geophysics, Vol. III, *Soc. Expl. Geophys.*, 285-425.

Weitemeyer, K., Constable, S., and Key, K., 2006, Marine EM techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation, *The Leading Edge*, **25**, 629-632.

Weitemeyer, K., 2008, Marine Electromagnetic Methods for Gas Hydrate Characterizations, Ph. D. thesis, *University of California, San Diego.*

Weitemeyer, K., Gao, G., Constable, S., and Alumbaugh, D., 2010, The practical application of 2D inversion to marine controlled-source electromagnetic data, *Geoeophysics*, **75**(6), F199-F210.