

탄성과 탐사자료와 전자탐사자료를 이용한 저류층 물성 동시복합역산

유정민 · 변중무* · 설순지

한양대학교 자원환경공학과

Petrophysical Joint Inversion of Seismic and Electromagnetic Data

Jeongmin Yu, Joongmoo Byun*, and Soon Jee Seol

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요약: 탄성과 역산은 유가스 집적이 가능한 구조의 탐지에 고해상도의 분해능을 가지는 반면, 인공충신원을 이용한 해양전자탐사 역산은 유가스의 직접적인 탐지가 가능하다. 이런 이중의 물리탐사자료를 함께 이용한 복합역산은 단일 역산의 불확실성을 줄일 수 있고, 각각의 탐사자료가 가지는 장점 또한 함께 이용할 수 있다. 이 연구에서는 암석물리모델을 이용하여 탄성과탐사자료와 전자탐사자료가 동시에 최적화 될 때의 저류층의 물성값을 추출할 수 있는 동시복합역산 알고리즘을 개발하였다. 상호구배(cross-gradient) 방법을 적용하여 구조적인 해상도를 향상시켰으며, 최대우도추정법을 이용한 상대 가중치를 적용하여 자료간의 균형을 조절하였다. 개발된 알고리즘을 단순한 고립 가스층 모델에 적용한 결과, 동시복합역산으로 고해상도의 저류층 물성 추출이 가능함을 확인하였다. 하지만 오일 저류층을 모사한 배사구조의 모델에서는 적용된 모델 가중 행렬에 따라 전혀 다른 결과를 획득할 수 있었다. 따라서, 기존의 알고리즘을 각각의 모델 변수에 적합한 모델 가중 행렬을 사용하도록 수정하여, 평활화 기법과 감쇠항 기법을 수포화율과 공극률에 각각 적용하였다. 개선된 알고리즘을 오일 저류층 모델에 다시 적용한 결과, 저류층의 공극률과 수포화율을 성공적으로 추출할 수 있었다. 개발한 복합역산 알고리즘을 이용하여 획득한 결과는 유가스전 저류층의 매장량 계산에 직접적인 정보로 사용될 수 있을 것이다.

주요어: 동시복합역산, 상호구배, 암석물리모델, 상대 가중치, 공극률, 수포화율

Abstract: Seismic inversion is a high-resolution tool to delineate the subsurface structures which may contain oil or gas. On the other hand, marine controlled-source electromagnetic (mCSEM) inversion can be a direct tool to indicate hydrocarbon. Thus, the joint inversion using both EM and seismic data together not only reduces the uncertainties but also takes advantage of both data simultaneously. In this paper, we have developed a simultaneous joint inversion approach for the direct estimation of reservoir petrophysical parameters, by linking electromagnetic and seismic data through rock physics model. A cross-gradient constraint is used to enhance the resolution of the inversion image and the maximum likelihood principle is applied to the relative weighting factor which controls the balance between two disparate data. By applying the developed algorithm to the synthetic model simulating the simplified gas field, we could confirm that the high-resolution images of petrophysical parameters can be obtained. However, from the other test using the synthetic model simulating an anticline reservoir, we noticed that the joint inversion produced different images depending on the model constraint used. Therefore, we modified the algorithm which has different model weighting matrix depending on the type of model parameters. Smoothness constraint and Marquardt-Levenberg constraint were applied to the water-saturation and porosity, respectively. When the improved algorithm is applied to the anticline model again, reliable porosity and water-saturation of reservoir were obtained. The inversion results indicate that the developed joint inversion algorithm can be contributed to the calculation of the accurate oil and gas reserves directly.

Keywords: Simultaneous joint inversion, Cross-gradient, Rock physics model, Relative weighting factor, Porosity, Water-saturation

서론

해양 유가스전 탐사의 경우 탄성과탐사자료를 이용한 완전 파형역산(full-waveform inversion; FWI)은 복잡한 지하의 속도 구조를 고해상도로 재 구축 할 수 있는 반면에(Virieux and

Received: 11 September 2017; Revised: 23 December 2017;

Accepted: 27 December 2017

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Earth Resources & Environmental Eng., Hanyang Univ., 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Operto, 2009; Kwon *et al.*, 2015), 전자탐사자료를 이용한 인공송신원 해양전자탐사(marine controlled-source electromagnetic; mCSEM) 역산은 고비저항의 특성이 나타나는 탄화수소를 직접적으로 탐지할 수 있는 유용한 정보를 제공한다(Constable, 2010; Noh *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2012).

최근에는 이러한 다른 특성을 가지는 이중의 물리탐사자료인 탄성과탐사자료와 전자탐사자료를 함께 이용함으로써 각각의 방법들이 가지는 장점들을 서로 결합하여 향상된 역산결과를 획득하거나 저류층 물성을 직접적으로 계산해 내는 복합역산에 대한 연구들이 국내외에서 시도되고 있다. 이중의 물리탐사자료를 이용한 복합역산을 수행하는 방법은 다양한 방법으로 시도되고 있지만, 큰 틀에서 살펴보면 구조적인 제약조건을 이용하는 방법과 연결실험식을 이용하여 저류층 변수로 변환하는 방법, 크게 두 종류로 나눌 수 있다.

구조적인 제약조건을 이용하는 방법은 일반적으로 해상도가 높은 탄성과탐사 역산결과에서 획득한 지하의 구조적인 정보를 전자탐사 역산 시 제약조건으로 사용하여 상대적으로 저해상도인 전자탐사 역산결과의 해상도를 향상시키는 방법이다(Hu *et al.*, 2009a; Jeong *et al.*, 2014, Jeong *et al.*, 2015). 이 방법은 각각의 역산을 순차적으로 수행하기 때문에 메모리와 같은 장비에 대한 제약을 덜 받으며, 구조적 제약 조건으로 이용할 탄성과탐사자료 선정에 대한 유연성을 가지고 있다. 하지만 결과의 해상도 향상이 전자탐사역산에 대하여 일방적이며, 각각의 역산을 따로 수행해야 하는 번거로움이 있다.

다른 하나의 방법은 탄성과탐사자료와 전자탐사자료를 이용한 역산결과로 획득할 수 있는 탄성과속도와 전기전도도 등과 같은 물성들을 암석물리모델을 통해 상호 연결시켜 저류층 물성인 공극률, 유체포화율로 변환하여 동시복합역산을 수행하는 방법이다(Gao *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2012). 동시복합역산을 수행하기 때문에 각각의 역산을 따로 할 필요가 없으며, 직접적으로 저류층 물성을 구하기 때문에 유가스전의 매장량 평가에 관한 정보도 제공한다. 하지만 두 가지의 탐사자료를 동시에 이용하기 때문에 서로 다른 자료의 크기를 상대 가중치를 이용하여 조절해 주어야 하는 어려움이 있으며, 각각의 탐사자료에 적절한 모델제약조건 선정이 필요하다.

이 연구에서는 저류층 물성을 직접적으로 얻어낼 수 있고 탄성과탐사자료와 전자탐사자료가 동시에 최적화 될 때의 결과값을 제공하는 암석물리모델을 이용한 동시복합역산 알고리즘을 개발하였다. 또한 동시역산 시 상호구배(cross-gradient) 방법을 적용하여 구조적인 유사성을 통한 역산결과의 해상도 향상까지 확보하고자 하였다. 모델제약조건으로 탐사자료 간에 균형을 조절하기 위하여 최대우도추정법(maximum likelihood)을 이용한 상대 가중치를 적용하고자 하였으며(Drahoš, 2008), 전자탐사자료 역산에 적합한 평활화 기법과 탄성과탐사자료 역산에 주로 사용되는 감쇠항 기법을 역산 변수의 특성에 맞게 적절히 모델제약조건으로 적용하여 동시복

합역산 알고리즘을 개선하였다. 개발된 알고리즘을 고립 가스층을 모사한 단순 모델과 배사구조의 오일 저류층을 모사한 모델에 대한 2차원 수치실험을 통하여 그 타당성을 검증하고 분석하였다.

공극률과 수포화율 추출을 위한 암석물리모델

공극률과 수포화율은 매장량 평가에 신뢰할 수 있는 정보를 제공해주는 저류층 물성들이며, 탄성과탐사나 전자탐사와 같은 물리탐사방법들을 이용하여 획득되는 탄성과 속도나 전기전도도와 같은 물성들은 다양한 암석물리모델 구성법을 통하여 저류층 물성들의 추출에 활용이 가능하다. 이런 암석물리모델은 이론적 또는 경험적인 모델을 바탕으로 이루어지며 물리적인 물성의 변화를 토대로 저류층의 특성을 정량적으로 모델링 할 수 있다.

전자탐사로 획득할 수 있는 물성과 관련된 암석물리모델은 가장 대표적인 방법으로 사암층으로 이루어진 저류층 환경에 적합한 Archie의 방정식(Archie, 1942), 세일이 혼재되어 있는 저류층을 고려하기 위하여 제안된 Waxman과 Smits의 방정식(Waxman and Smits, 1968), 다양한 성분으로 구성된 암석을 표현하기 위하여 제안된 Crim (complex refraction-index model) 방정식(Wharton *et al.*, 1980)과 Self-similar 방정식(Sen *et al.*, 1981) 등 다양하게 존재한다.

또한, 탄성과탐사로 획득할 수 있는 물성과 관련된 암석물리모델은 가장 대표적인 Gassmann 방정식(Gassmann, 1951)과 Wyllie의 시간-평균 방정식(Wyllie *et al.*, 1956), 종류가 다른 유체에 적용이 가능한 Raymer-Hunt-Gardner 모델(Raymer *et al.*, 1980), Gassmann 방정식을 일반화하여 다양한 광물로 이루어진 암석에도 적용이 가능한 Brown-Korringa 모델(Brown and Korringa, 1975), 구성성분의 기하학적인 측면의 고려 없이 적용 가능한 Hashin-Shtrikman bounds (Hashin and Shtrikman, 1963) 등이 있다. 이 밖에도 구성성분이나 구성성분의 기하학적 측면에 따른 다양한 암석물리모델이 존재하며, 저류층 물성을 추정하기 위해서는 탐사방법 및 현장자료에 맞는 최적의 암석물리모델을 선정해 주는 것이 중요하다.

동시복합역산을 수행하기 위해서는 이중의 물리탐사를 연결시켜주는 모델변수가 필요하다. 하지만 각각의 역산에서 획득할 수 있는 P파 속도와 전기전도도는 서로의 연관성이 부족한 물성이기 때문에 적합한 암석물리모델을 이용하여 공통된 모델변수로 연결시키는 것이 중요하다. 이 연구에서는 대표적인 방정식인 Archie 방정식과 Gassmann 방정식을 암석물리모델로 사용하여 P파 속도와 전기전도도를 저류층 물성인 공극률과 수포화율로 변환한 후 이들을 모델변수로 사용하는 동시복합역산을 수행하였다. 암석물리모델로 사용된 Archie 방정식은 전기전도도(σ)를 공극률(ϕ)과 수포화율(S_w)에 대한 관계식으로 표현한 함수로 다음 식 (1)과 같다.

$$\sigma = \frac{1}{a} \sigma_w \phi^m S_w^n \quad (1)$$

여기서 a 는 비틀림 인자, σ_w 는 공극 내 염수의 전기전도도, m 과 n 은 각각 암석의 종류 및 상태에 따라 결정되는 공극률과 수포화율의 지수이다. 그리고 함께 사용된 Gassmann 방정식은 P 파 속도(V_p)와 공극률(ϕ) 그리고 유체포화율(S)을 서로 연결시킨 함수로 다음 식 (2) ~ (7)과 같다.

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (2)$$

$$K_{sat} = (1-\beta)K_{ma} + \beta^2 M \quad (3)$$

$$M = \left(\frac{\beta - \phi + \phi}{K_{ma} K_f} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$K_f = \left(C_w \frac{S_w}{K_w} + C_o \frac{S_o}{K_o} + C_g \frac{S_g}{K_g} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\rho_{sat} = (1-\phi)\rho_{ma} + \phi(S_w\rho_w + S_o\rho_o + S_g\rho_g) \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} \phi/\phi_c, & 0 \leq \phi \leq \phi_c \\ 1, & \phi > \phi_c \end{cases} \quad (7)$$

여기서 K 는 체적탄성계수, μ 는 전단계수, ρ 는 밀도이며, sat 은 공극 내 유체로 포화된 암석, f 는 공극 유체, ma 는 매질을 구성하는 고체 입자를 의미한다. 그리고 S 는 유체포화율, C 는 보정상수, w, o, g 는 각각 물 오일 가스를 의미한다. 또한, 식 (3)과 (4)에서 β 는 Biot 계수로 공극률의 함수이며, 이 연구에서는 식 (7)에 나타난 임계 공극률(ϕ_c) 모델(Nur, 1992)을 사용하였다.

동시복합역산 알고리즘 및 제약조건

동시복합역산 상대 가중치 선정

동시복합역산을 수행하기 위하여 Gao *et al.* (2012)은 다음 식 (8)과 같이 목적함수를 구성하였다.

$$\Phi(m) = \Phi_d^{SM}(m) + \gamma \Phi_d^{EM}(m) + \lambda \Phi_m(m) \quad (8)$$

여기서 $\Phi_d^{SM}(m)$ 는 탄성과탐사자료의 오차항, $\Phi_d^{EM}(m)$ 는 전자탐사자료의 오차항, $\Phi_m(m)$ 는 가중치가 적용된 L_2 놈 정규화(weighted L_2 -norm regularizer, van den Berg and Abubakar, 2001)를 사용한 모델변수벡터, λ 는 모델제약조건 상수이다. 그리고 γ 는 이중 탐사자료들 간의 상대 가중치 상수이다.

동시복합역산을 수행할 시 가장 중요한 점은 각각의 탐사자료의 개수가 다르며 또한 크기도 다르기 때문에 이에 대한 보정을 하지 않으면 복합역산 과정에서 어떤 한 탐사자료에 의해 지배당한 결과를 도출하게 되므로 적합한 상대 가중치를 적용하여 자료간의 균형을 맞춰주어야 한다는 것이다. 이런 상

대 가중치를 설정하는 방법은 고정된 상수를 사용하거나 새로운 함수를 구성하여 적용하는 등 일반적인 규칙이 정해져 있지 않기 때문에 다양하게 시도되고 있다. Gao *et al.* (2012)의 연구에서는 목적함수의 상대 가중치를 다음 식 (9)과 같이 구성하여 동시복합역산을 수행하였다.

$$\gamma = \frac{\Phi_d^{SM}(m_0)}{\Phi_d^{EM}(m_0)} \quad (9)$$

여기서 m_0 는 초기모델이지만 역산을 반복할 때마다 다른 값을 사용할 수도 있다. 식 (8)과 (9)를 이용한 반복적 최소자승법으로 공극률과 수포화율에 대한 동시복합역산을 수행할 수 있었다.

이 연구에서는 위와는 접근 방식을 달리하여 최대우도추정법을 이용하여 상대 가중치를 적용하는(Drahos, 2008) 동시복합역산을 수행하였다. 이 방법은 모델변수벡터 및 표준편차에 대한 최적화가 가능하며, 동시복합역산에 적용하면 기존의 목적함수는 다음 식 (10)과 같이 바뀌어진다.

$$\Phi(m) = \frac{n_1}{2} \ln \left(\frac{1}{n_1} \Phi_d^{SM}(m) \right) + \frac{n_2}{2} \ln \left(\frac{1}{n_2} \Phi_d^{EM}(m) \right) + \lambda \Phi_m(m) \quad (10)$$

여기서 n_1 과 n_2 는 탄성과탐사자료와 전자탐사자료의 개수이다.

동시복합역산 시 사용되는 제약조건

동시복합역산으로 획득되는 저류층의 공극률과 수포화율이 탄성과 P 파 속도 및 전기전도도와 갖는 연관성을 살펴보기 위하여 암석물리모델을 이용한 민감도 분석이 앞선 연구들에서 수행된 결과, 두 저류층 물성이 모두 P 파 속도와 전기전도도의 함수이기는 하지만 공극률은 P 파 속도, 수포화율은 전기전도도에 더욱 큰 민감도를 가지는 것으로 알려져 있다(Gao *et al.*, 2012; Jeong *et al.*, 2015). 이로 인하여 상대적으로 저해상도로 나타나는 전기전도도 특성을 수포화율 역시 따라가기 때문에 이는 저류층의 정확한 물성 추출 및 분포 해석에 영향을 끼치게 된다. 따라서, 이 연구에서는 상호구배 제약조건을 사용하여 수포화율의 해상도를 향상시키는 방법을 사용하였다. 상호구배 방법은 일반적으로 복합역산을 수행할 시 두 가지 변수에 대하여 구조적 유사성을 강조하기 위해서 많이 쓰이는 제약조건으로, 탄성과탐사, 전자탐사, 중력탐사, MT탐사 등 다양한 탐사방법들에 적용되어 왔다(Gallardo and Meju, 2003).

순차적인 복합역산은 탄성과탐사역산을 먼저 수행한 후 그 결과인 P 파 속도를 전자탐사역산에 구조적 제약조건으로 사용한다(Gao *et al.*, 2012; Jeong *et al.*, 2015). 하지만 동시복합역산에서는 두 가지 자료를 한번에 역산하기 때문에, 우리는 반복 역산 시 이전 단계 역산결과에서 획득한 공극률과 수포화율에 암석물리모델을 역으로 적용하여 계산한 P 파 속도를 구조적인 제약조건으로 사용하였으며, 이 방법을 적용한 동시복

합역산의 최종적인 목적함수는 다음과 같다.

$$\Phi(\mathbf{m}_\phi^{(k)}, \mathbf{m}_{Sw}^{(k)}) = \frac{n_1}{2} \ln\left(\frac{1}{n_1} \Phi_d^{SM}(\mathbf{m})\right) + \frac{n_2}{2} \ln\left(\frac{1}{n_2} \Phi_d^{EM}(\mathbf{m})\right) \\ + \lambda \Phi_m(\mathbf{m}_\phi^{(k)}, \mathbf{m}_{Sw}^{(k)}) + \beta \Phi_{CG}(\mathbf{m}_v^{(k-1)}, \mathbf{m}_{Sw}^{(k)}) \quad (11)$$

여기서 Φ_{CG} 는 상호구배 항, β 는 비율을 조절하는 제약조건 상수, $\mathbf{m}_v^{(k-1)}$ 는 $k-1$ 번째 역산에서 획득한 P파 속도이다.

위의 식 (11)의 목적함수를 최소화하기 위하여 편미분을 적용하면 아래 식 (12)와 같이 표현할 수 있으며 여기서 사용된 $\frac{n_1}{2\Phi_d^{SM}(\mathbf{m})}$ 와 $\frac{n_2}{2\Phi_d^{EM}(\mathbf{m})}$ 가 각각의 자료에 상대 가중치 γ 로 적용된다.

$$(\Phi(\mathbf{m}))' = \frac{n_1}{2\Phi_d^{SM}(\mathbf{m})} (\Phi_d^{SM}(\mathbf{m}))' + \frac{n_2}{2\Phi_d^{EM}(\mathbf{m})} (\Phi_d^{EM}(\mathbf{m}))' \dots \quad (12)$$

또한 Gauss-newton 해에 초기모델의 의존성이 creeping 방법에 비해 비교적 낮은 jumping 방법(Scales *et al.*, 1990)을 적용하였으며 이에 따른 모델증분벡터는 아래 식 (13)와 같다.

$$\delta \mathbf{m}^{(k)} = [\mathbf{J}^T \sqrt{\gamma^T} \mathbf{W}_d \sqrt{\gamma} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{W}_m + \beta \mathbf{G}]^{-1} \\ [\mathbf{J}^T \sqrt{\gamma^T} \mathbf{W}_d \sqrt{\gamma} \delta \mathbf{d} - (\lambda \mathbf{W}_m + \beta \mathbf{G}) \mathbf{m}^{(k-1)}] \quad (13)$$

여기서 $\delta \mathbf{d}$ 는 자료의 잔차벡터, $\delta \mathbf{m}$ 은 모델변수의 증분벡터, \mathbf{J} 는 자코비안 행렬(Jacobian matrix), 상부 첨자 T는 전치 행렬(transpose matrix), γ 는 이종의 물리탐사자료에 대한 상대 가중치, \mathbf{W}_d 와 \mathbf{W}_m 은 각각 자료벡터와 모델변수벡터에 가해지는 가중 행렬(weighting matrix), \mathbf{G} 는 상호구배 행렬이다.

자코비안 행렬은 탐사자료에 대한 모델변수의 미분값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J} = \frac{\partial S(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} \quad (14)$$

전자탐사역산과 탄성파탐사역산의 경우에는 자코비안 행렬이 각각의 모델변수인 전기전도도와 속도에 대한 미분으로 표현된다. 하지만 이 연구에서는 공극률과 수포화율에 대한 역산이므로, 자코비안 행렬에 대하여 다음과 같이 연쇄 법칙(chain rule)을 적용하여 복합역산 모델변수에 대한 미분으로 바꾸어 사용한다.

$$\mathbf{J}^{EM} = \frac{\partial S^{EM}(\mathbf{m})}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{m}_{\phi, Sw}} \quad (15)$$

$$\mathbf{J}^{SM} = \frac{\partial S^{SM}(\mathbf{m})}{\partial V_p} \frac{\partial V_p}{\partial K_{sat}} \frac{\partial K_{sat}}{\partial \mathbf{m}_{\phi, Sw}} \quad (16)$$

여기서 $\frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{m}_{\phi, Sw}}$ 는 전기전도도를 공극률과 수포화율로 미분한

항이며 $\frac{\partial V_p}{\partial K_{sat}}$ 와 $\frac{\partial K_{sat}}{\partial \mathbf{m}_{\phi, Sw}}$ 는 P파 속도를 매개변수인 체적탄성계

수를 통해 공극률과 수포화율에 대한 미분을 수행하는 항을 나타낸다. 이 미분한 항들은 각각 Archie 방정식과 Gassmann 방정식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \phi} = \frac{m}{a} \sigma_w \phi^{m-1} S_w^n \quad (17)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial S_w} = \frac{n}{a} \sigma_w \phi^m S_w^{n-1} \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial K_{sat}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_{sat}}} \frac{1}{K_{sat}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial K_{sat}}{\partial \phi} = \left(-\frac{\beta^2 M^2}{K_{ma}} + 2\beta M - K_{ma} \right) \frac{\partial \beta}{\partial \phi} - \beta^2 M^2 \left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_{ma}} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial K_{sat}}{\partial S_w} = -\phi \beta^2 M^2 \left(\frac{C_w}{K_w} - \frac{C_o}{K_o} \right) \quad (21)$$

따라서, 동시복합역산에서의 자코비안 행렬은 이종의 물리탐사자료가 각각 모델변수인 공극률, 수포화율에 대한 민감도를 나타내는 행렬을 의미하며 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial d_1^{SM}}{\partial \phi_1} \dots \frac{\partial d_1^{SM}}{\partial \phi_i} \right) & \left(\frac{\partial d_1^{SM}}{\partial S_{w1}} \dots \frac{\partial d_1^{SM}}{\partial S_{wi}} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial d_{N_i}^{SM}}{\partial \phi_1} \dots \frac{\partial d_{N_i}^{SM}}{\partial \phi_i} \right) & \left(\frac{\partial d_{N_i}^{SM}}{\partial S_{w1}} \dots \frac{\partial d_{N_i}^{SM}}{\partial S_{wi}} \right) \\ \left(\frac{\partial d_1^{EM}}{\partial \phi_1} \dots \frac{\partial d_1^{EM}}{\partial \phi_i} \right) & \left(\frac{\partial d_1^{EM}}{\partial S_{w1}} \dots \frac{\partial d_1^{EM}}{\partial S_{wi}} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial d_{N_i}^{EM}}{\partial \phi_1} \dots \frac{\partial d_{N_i}^{EM}}{\partial \phi_i} \right) & \left(\frac{\partial d_{N_i}^{EM}}{\partial S_{w1}} \dots \frac{\partial d_{N_i}^{EM}}{\partial S_{wi}} \right) \end{pmatrix} \quad (22)$$

여기서 i 는 역산 블록의 개수이며, N 은 자료의 개수이다.

또한, 가외치(outlier)자료들이 역산에 끼치는 영향을 감소시키기고, 모델변수 값의 증감을 더욱 강조하기 위하여 위하여 IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares) 방법(Scales and Gersztenkorn, 1988; Ji, 2012)을 가중 행렬로 적용하였다. 이 연구에서는 자료 가중치(W_d)는 후버 가중치(Huber, 1981)를 사용하였고, 모델 가중치(W_m)는 L1 norm을 사용하였다.

또한, 앞선 모델제약조건을 적용한 역산으로 획득한 모델변수가 물리적으로 타당한 값을 갖도록 비부등식 제약조건(inequality constraint; Kim and Kim, 2008)을 적용하였다(식 (23)).

$$x = \ln\left(\frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m}\right) \quad (23)$$

여기서 x 는 제약조건으로 변환된 모델변수이며 m_{\max} 와 m_{\min} 은 모델변수의 최대 및 최소 경계값이다.

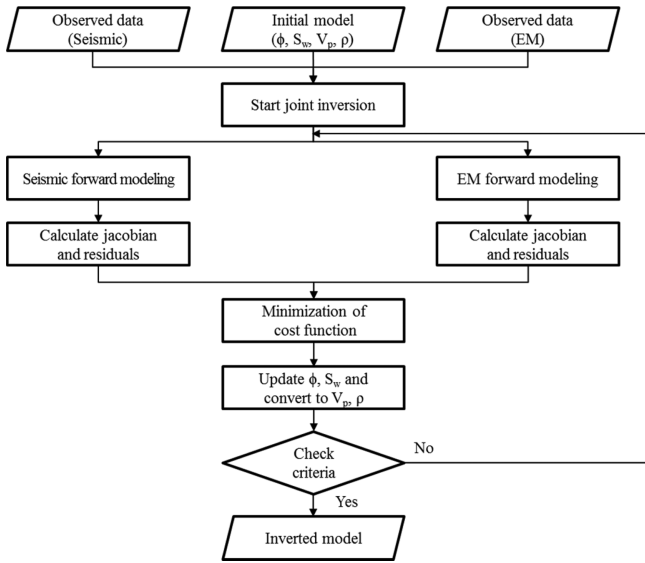


Fig. 1. Conceptual diagram of the simultaneous joint inversion process.

동시복합역산 알고리즘

위의 모델제약조건들을 적용한 이중의 물리탐사자료를 이용한 동시복합역산 알고리즘의 순서도는 Fig. 1과 같다. 탄성과 탐사자료와 전자탐사자료, 그리고 각각의 초기 전기비저항과 P파 속도, 그리고 이들을 암석물리모델로 변환한 역산의 모델 변수인 공극률과 수포화율이 입력자료로 사용된다. 이후 각각의 모델링에 의하여 합성탐사자료, 자코비안 행렬, 자료 오차 값을 생성하게 되며 자코비안 행렬은 앞서 언급한 것처럼 모델 변수에 대하여 변환시켜 적용하게 된다. 동시복합역산을 수행하여 획득한 갱신된 공극률과 수포화율은 수렴 조건을 만족할 때까지 반복계산을 진행하기 위하여 암석물리모델을 역으로 적용하여 전기비저항과 P파 속도로 변환되며 이들을 이용하여 새로운 합성탐사자료를 생성하게 된다.

수치모델을 이용한 동시복합역산 알고리즘 검증

고립이상체 구조의 가스층에 대한 수치예제

이 연구에서 개발한 알고리즘을 검증하기 위하여 두 가지의 다른 수치모델에 적용하여 결과를 분석해 보았다. Fig. 2는 노르웨이 Troll 지역을 단순화 시킨 P파 속도 및 전기비저항 2차원 모델(Jeong *et al.*, 2014, Abubakar *et al.*, 2008)로 10 × 3 km의 크기를 가지며 하부 1.8 ~ 2.0 km에 가스 저류층이 위치하고 있다. 동시복합역산 수행 시 탄성과탐사자료의 경우 파선 매개변수에 따라 기울기를 갖는 평면파 모델링(Kwon *et al.*, 2015)을 이용하였으며 전자탐사자료는 2.5차원 인공송신원 해양전자탐사 모델링(Kang *et al.*, 2012)을 사용하였다. 탄성과탐사 모델링의 평면파 모음으로의 변환을 용이하게 하고 전자탐사자료와 동일한 해저하부에서 획득된 자료를 사용하기

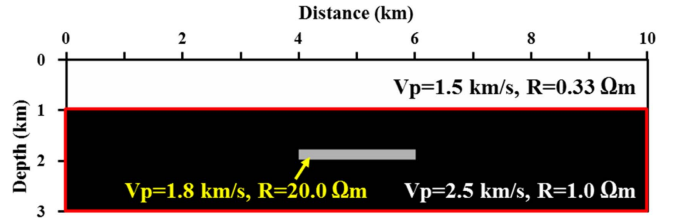


Fig. 2. True model which simulates the simplified structure of Troll gas field. P-wave velocity and resistivity of each structure are superimposed on the model.

위하여 해저면에 수신기를 설치하였다. 이에 사용된 각각의 탐사변수 및 역산변수들을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

동시복합역산은 식 (13)에 나타난 것처럼 jumping 방법을 사용하였으며, 모델변수벡터에 대한 가중 행렬인 W_m 에 평활화 기법인 $C^T C$ 를 적용하였다. 여기서 C 는 모델변수의 공간적인 미분을 의미하는 행렬이다. 또한 역산 수행에 필요한 암석물리학변수들은 Gao *et al.* (2012)의 논문을 참고하여 Archie 방정식의 경우 $a = 1, m = 1.6, n = 2, \sigma_w = 25 \text{ S/m}$ 의 값을 사용하였으며, Gassmann 방정식에서는 $K_{ma} = 32 \text{ Gpa}$,

Table 1. Parameters used in seismic modeling and joint inversion with the synthetic data of the simplified Troll field model for joint inversion.

Parameter	Value
No. of sources	197 ($x = 0.1 \sim 9.9 \text{ km} / z = 0.03 \text{ km}$)
Source wavelet	Ricker wavelet ($f_{\max} = 18 \text{ Hz}$)
No. of receivers	81 ($x = 1 \sim 9 \text{ km} / z = 1 \text{ km}$)
Type of receiver	Pressure
No. of ray-parameter / interval	41 / 0.02
Sampling interval / Recording length	0.002 s / 8.0 s
Cell size	10 × 10 m
Number of inversion blocks	24 × 17 = 408
Inversion frequency	1.3, 2.4, 4.5, 6.1, 8.5 Hz
λ_{sm}	[Maximum of $(J^T J)$] × 0.1 %

Table 2. Parameters used in mCSEM modeling and joint inversion with the synthetic data of the simplified Troll field model for joint inversion.

Parameter	Value
No. of sources	6 ($x = 1, 2, 3, 7, 8, 9 \text{ km} / z = 0.95 \text{ km}$)
Source type and measured data	J_x and E_x
No. of receivers	51 ($x = 0 \sim 10 \text{ km} / z = 1 \text{ km}$)
Cell size	100 × 50 m
Number of data	1376 (Through data selection)
Number of inversion blocks	24 × 17 = 408
Inversion frequency	0.1, 0.25, 0.5 Hz
λ_{em}	[Maximum of $(J^T J)$] × 0.1 %
λ_{cg}	2 × λ_{em}

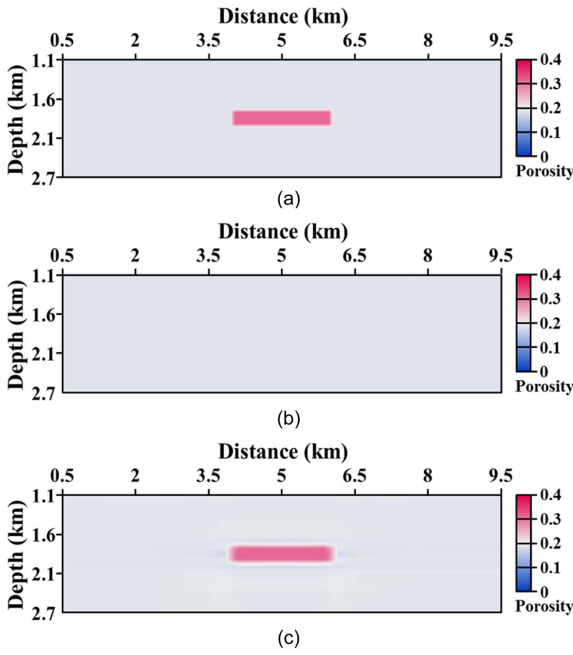


Fig. 3. (a) True porosity model, (b) initial porosity model and (c) joint inverted porosity model.

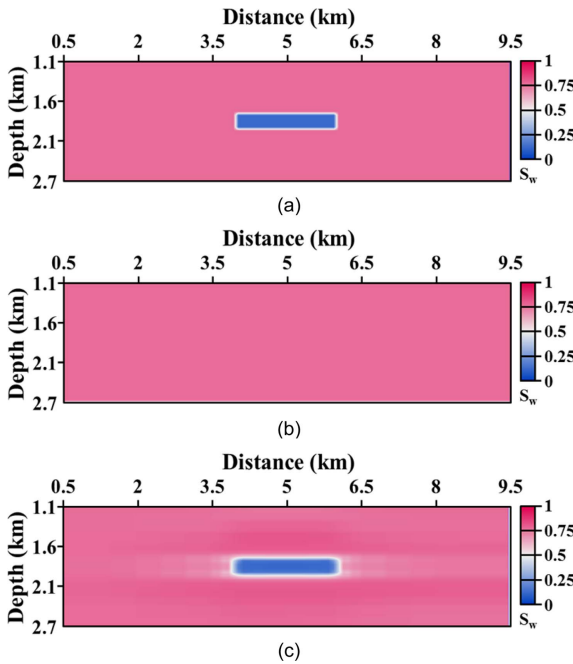


Fig. 4. (a) True water-saturation model, (b) initial water-saturation model and (c) joint inverted water-saturation model.

$K_w = 2.81$ Gpa, $K_g = 0.75$ Gpa, $\rho_{ma} = 3500$ kg/m³, $\rho_w = 1050$ kg/m³, $\rho_g = 750$ kg/m³, $\phi_c = 0.4$ 를 사용하였다.

Fig. 3과 4는 위의 수치모델에 개발한 동시복합역산 알고리즘을 적용하여 최종적으로 획득한 공극률과 수포화율에 대하여 해저층을 제외하고 나타낸 모델이다. Fig. 3(a)는 Fig. 2의 물성에 암석물리모델을 적용하여 획득한 실제 공극률 모델이

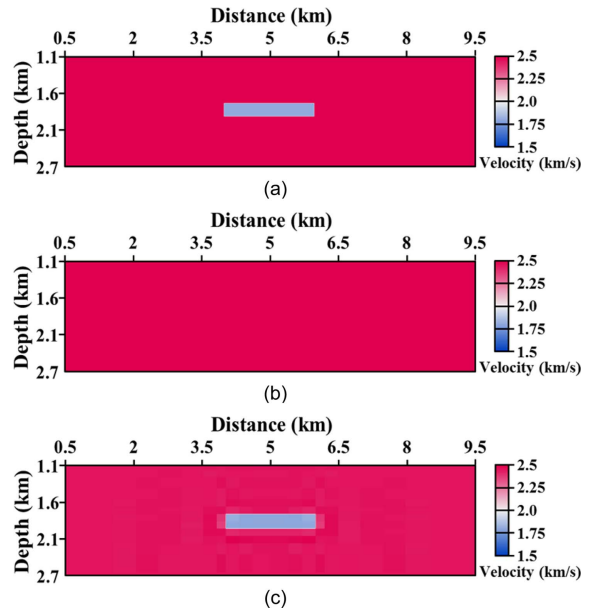


Fig. 5. (a) True P-wave velocity model, (b) initial P-wave velocity model and (c) converted P-wave velocity model from joint inversion results using rock physics model.

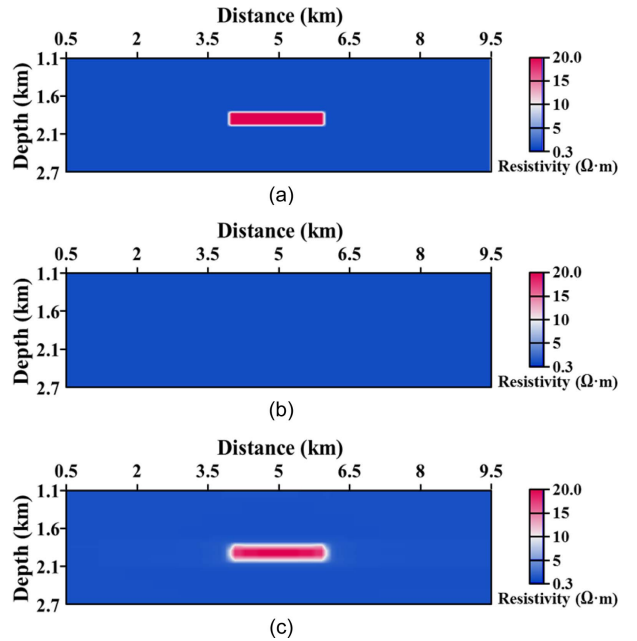


Fig. 6. (a) True resistivity model, (b) initial resistivity model and (c) converted resistivity model from joint inversion results using rock physics model.

며 해저층의 공극률은 0.185, 저류층의 공극률은 0.31이다. Fig. 3(b)는 역산에 사용 된 초기 공극률 모델이며, Fig 3(c)는 동시복합역산으로 획득한 공극률 모델이다. Fig. 4(a)는 공극률과 동일한 방법으로 획득한 실제 수포화율 모델이며 해저층의 수포화율은 0.77, 저류층의 수포화율은 0.115이다. Fig. 4(b)는 초기 수포화율 모델이며, Fig. 4(c)는 동시복합역산으로 획득한

수포화율 모델이다. 역산으로 획득한 저류층의 공극률과 수포화율 모두 실제 모델과 거의 일치하는 값을 추출하였으며, 특히 수포화율 모델이 탄성과 속도 구조를 사용한 구조적 제약 조건의 영향으로 모델의 경계가 실제 모델과 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다. Fig. 5와 6은 동시복합역산으로 획득한 공극률(Fig. 3(c))과 수포화율(Fig. 4(c))에 암석물리모델을 역으로 적용하여 P파 속도와 전기비저항으로 변환한 모델에 대한 그림이다. Fig. 5(a)는 실제 P파 속도 모델, Fig. 5(b)는 초기 속도 모델, Fig. 5(c)는 변환된 P파 속도 모델이다. 그리고 Fig. 6(a)는 실제 전기비저항 모델, Fig. 6(b)는 초기 전기비저항 모델, Fig. 6(c)는 변환된 전기비저항 모델이다. 공극률과 수포화율을 실제 물성값에 근접하게 추출하였기 때문에 변환한 P파 속도와 전기비저항 모델 역시 구조와 값이 모두 실제 모델과 거의 일치하는 모습을 나타낸다.

배사구조의 오일저류층에 대한 수치예제 및 모델가중행렬

앞 장에서는 알고리즘의 검증용 위하여 가스층이 고립이상체 구조로 존재하는 모델에서 동시복합역산을 수행하였으며 성공적으로 저류층 물성을 추출할 수 있었다. 하지만 실제로 지하에 유가스전이 고립이상체로 존재하는 경우는 극히 드물기 때문에, 두 번째 수치예제에서는 오일 저류층이 존재할 가능성이 큰 배사구조 형태의 모델에 대하여 동시복합역산을 수행하였다. 다음 Fig. 7은 해저에 덮개암이 세일층으로 존재하고 하부에 오일 저류층이 존재하는 배사구조에서 해수층을 제외하고 모사한 12 × 3.5 km의 크기 P파 속도(Fig. 7(a)) 및 전기비저항(Fig. 7(b)) 모델이다. 탄성과탐사와 전자탐사의 수치 모델에 대한 자료는 앞의 고립 가스층 모델의 경우와 동일한 방법을 사용하여 획득하였으며, 각각의 방법에 따른 탐사변수 및 역산변수들을 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

동시복합역산은 앞과 동일하게 jumping 방법과 평활화 기법을 적용하였으며, 역산 수행에 필요한 암석물리학변수들은 Archie 방정식의 경우 $a = 1, m = 1.6, n = 2, \sigma_w = 20 \text{ S/m}$,

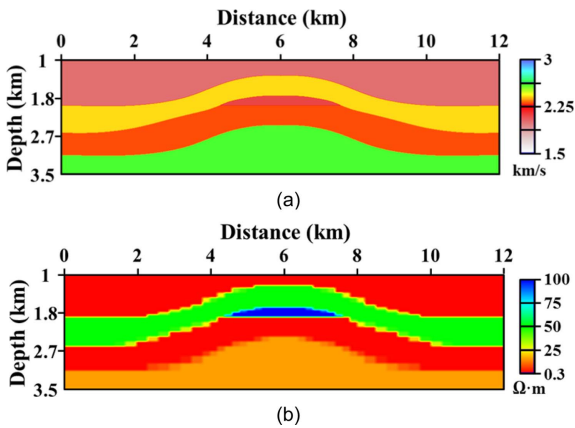


Fig. 7. True anticline model of (a) P-wave velocity and (b) resistivity.

Table 3. Parameters used in seismic modeling and joint inversion with the synthetic data of the simplified anticline model for joint inversion.

Parameter	Value
No. of sources	336 ($x = 0.4 \sim 11.6 \text{ km} / z = 0.03 \text{ km}$)
Source wavelet	Ricker wavelet ($f_{\max} = 18 \text{ Hz}$)
No. of receivers	101 ($x = 2 \sim 10 \text{ km} / z = 1 \text{ km}$)
Type of receiver	Pressure
No. of ray-parameter / interval	41 / 0.02
Sampling interval / Recording length	0.002 s / 8.0 s
Cell size	10 × 10 m
Number of inversion blocks	46 × 26 = 1196
Inversion frequency	1.3, 2.3, 4.1, 6.1, 7.3, 13.1 Hz
λ_{sm}	[Maximum of ($\mathbf{J}^T \mathbf{J}$)] × 0.1 %

Table 4. Parameters used in mCSEM modeling and joint inversion with the synthetic data of the simplified anticline model for joint inversion.

Parameter	Value
No. of sources	12 ($x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12 \text{ km} / z = 0.95 \text{ km}$)
Source type and measured data	J_x and E_x
No. of receivers	61 ($x = 0 \sim 12 \text{ km} / z = 1 \text{ km}$)
Cell size	100 × 50 m
No. of data	3948 (Through data selection)
Number of inversion blocks	46 × 26 = 1196
Inversion frequency	0.1, 0.25, 0.5 Hz
λ_{em}	[Maximum of ($\mathbf{J}^T \mathbf{J}$)] × 0.1 %
λ_{eg}	4 × λ_{em}

Gassmann 방정식에서는 $K_{ma} = 32 \text{ Gpa}, K_w = 2.81 \text{ Gpa}, K_o = 0.75 \text{ Gpa}, \rho_{ma} = 3500 \text{ kg/m}^3, \rho_w = 1050 \text{ kg/m}^3, \rho_o = 750 \text{ kg/m}^3, \phi_c = 0.4$ 를 사용하였다.

Fig. 8은 위의 변수들을 사용하여 획득한 동시복합역산 결과인 공극률과 수포화율을 암석물리모델을 이용하여 변환한 P파 속도(Fig. 8(a)) 모델과 전기비저항(Fig. 8(b)) 모델이다. 이전

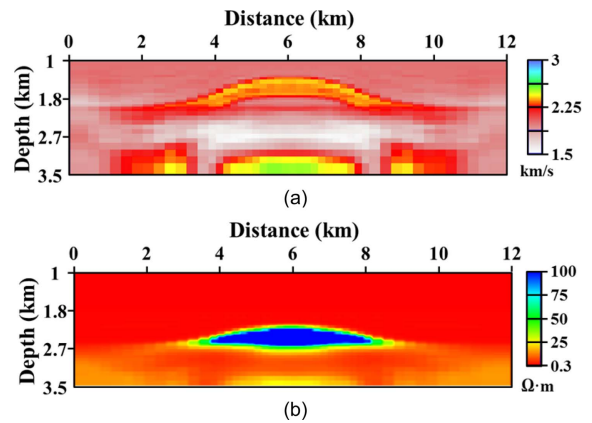


Fig. 8. Joint inversion results with smoothness constraint. (a) Inverted velocity model and (b) resistivity model.

고립 가스층의 역산결과와는 달리 전반적으로 배사구조내의 저류층 물성을 성공적으로 추출하기 어려운 결과가 나타났다. 변환된 전기비저항 모델은 실제 저류층의 규모와 물성값에 미치지 못하는 못하지만, 어느 정도 위치와 양상은 찾을 수 있었다. 하지만 변환된 P파 속도 모델은 상부의 덮개암 구조는 드러나나 심도가 깊어질수록 실제와는 전혀 다른 구조를 나타내었을 뿐만 아니라 전반적으로 물성의 값이 실제 P파 속도와 전혀 다른 값을 가지고 있었다.

획득한 전기비저항 모델이 P파 속도 모델에 비하여 전반적으로 더 나은 결과로 나타남에 따라, 전자탐사 역산에 적합한 평활화 기법이 동시복합역산에 영향을 주었을 가능성을 확인하기 위하여 다른 역산 변수들은 동일하게 설정하고 모델변수 벡터에 대한 가중 행렬인 \mathbf{W}_m 에 탄성과 역산에서 많이 쓰이는 감쇠항 기법(Marquart-Levenberg)을 적용하여 역산을 수행하여 보았다. Fig. 9는 감쇠항 기법을 사용한 동시복합역산 결과인 공극률과 수포화율을 암석물리모델을 이용하여 변환된 P파 속도(Fig. 9(a)) 모델과 전기비저항(Fig. 9(b)) 모델이다. 이번에는 평활화 기법과는 반대로 변환된 P파 속도 모델이 저류층의 구조와 물성값을 고해상도로 실제 모델에 가깝게 획득할 수 있었지만, 변환된 전기비저항 모델에서는 구조는 탄성과 속도 와 비슷한 모양을 띠지만 물성값은 전혀 다른 값으로 나타났다.

탄성과탐사자료 역산에 평활화 기법을 사용하면 복잡한 지층간의 경계나 구조 자체가 불명확해지는 결과가 나타나기 때문에 복합역산 후 획득한 P파 속도가 단순한 고립상체 모델과는 달리 배사구조 모델에서는 지하구조에 대한 고해상도 영상을 획득할 수 없었다. 감쇠항 기법을 적용한 전자탐사역산 결과는 탄성과탐사역산에 적합한 모델제약조건 상수 λ 의 사용으로 전체적으로 물성값이 크고 변동이 작게 나타났다. 또한 복합역산으로 획득한 공극률이나 수포화율 물성이 잘못된 지하정보를 포함할 경우 이들을 전기비저항과 P파 속도로 변환할 시 서로에게 영향을 끼쳐 더욱 가중되는 결과를 도출할 수

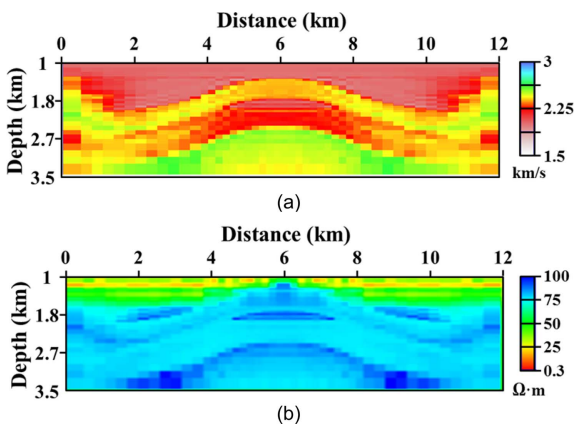


Fig. 9. Joint inversion results with Marquardt-Levenberg method. (a) Inverted velocity model and (b) resistivity model.

있음을 확인하였다.

따라서, 이 연구에서는 각각의 탐사자료에 따른 적합한 모델 가중 행렬 설정이 필요하다고 생각하여, 다음과 같이 두 종류의 모델 가중 행렬을 함께 사용하고 모델제약조건도 각각 따로 적용하도록 알고리즘을 개선하였다.

$$\mathbf{W}_m = \begin{bmatrix} (\lambda_1 \mathbf{I}) \\ (\lambda_2 \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 $\lambda_1 \mathbf{I}$ 는 감쇠항 기법으로 탄성과탐사자료에 영향을 많이 받는 공극률에 모델 가중 행렬로 들어가며, $\lambda_2 \mathbf{C}^T \mathbf{C}$ 는 평활화 기법으로 전자탐사자료에 영향을 많이 받는 수포화율에 모델 가중 행렬로 들어간다. 또한 여기서 사용된 λ_1 과 λ_2 는 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 항의 최대값의 0.1%를 사용했으며 식 (13)의 β 는 Jeong *et al.* (2014)에서 수치예제에 대한 검증을 토대로 λ_2 값의 2배를 사용하였다.

개선된 알고리즘을 이용하여 다시 동시복합역산을 수행한 결과를 Figs. 10 ~ 13에 나타내었다. Fig. 10은 역산 후 획득한 공극률에 대한 그림으로 Fig. 10(a)는 실제 공극률 모델, Fig. 10(b)는 초기 공극률 모델, Fig. 10(c)는 동시복합역산으로 획득한 공극률 모델이다. 역산으로 획득한 공극률 모델이 실제 모델의 구조를 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있으며, 저류층 공극률 역시 실제 값인 0.26에 가깝게 추출함을 확인할 수 있다. Fig. 11은 공극률과 같이 획득한 수포화율에 대한 그림으로, Fig. 11(a)는 실제 수포화율 모델, Fig. 11(b)는 초기 수포화율 모델, Fig. 11(c)는 동시복합역산으로 획득한 수포화율 모델이다. 수포화율 모델은 공극률 모델에 비하여 해상도는 약간

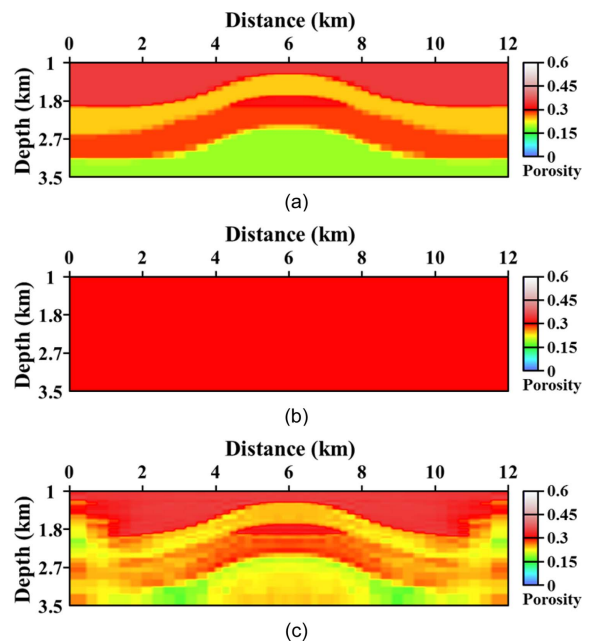


Fig. 10. (a) True porosity model, (b) initial porosity model and (c) joint inverted porosity model.

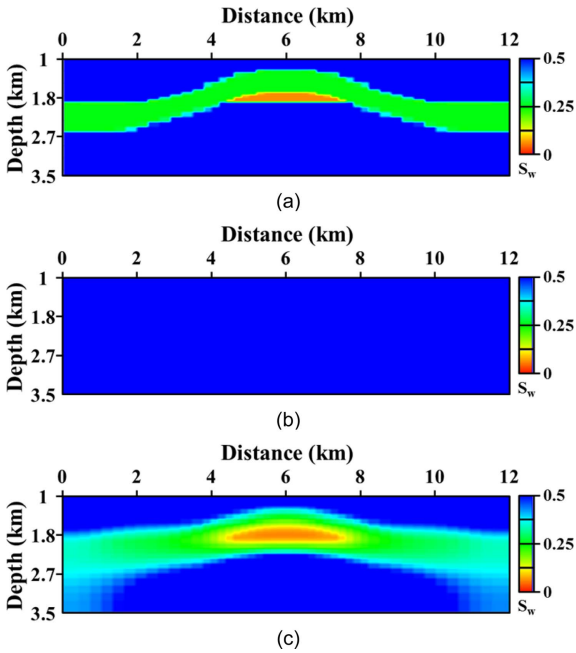


Fig. 11. (a) True water-saturation model, (b) initial water-saturation model and (c) joint inverted water-saturation model.

떨어짐을 확인할 수 있지만, 저류층의 위치나 물성값이 실제값인 0.07에 상당히 비슷한 모습으로 나타났다. 위 두 역산 결과를 함께 살펴보면, 획득한 공극률 모델은 일반적으로 저류층의 공극률은 오일이 있는 부분과 없는 부분이 같은 지층이라 서로 큰 차이가 없이 나타지만 해상도가 높아 지하 구조에 대한 파악에 용이하다. 반면에 수포화율 모델과 함께 비교하면 지층

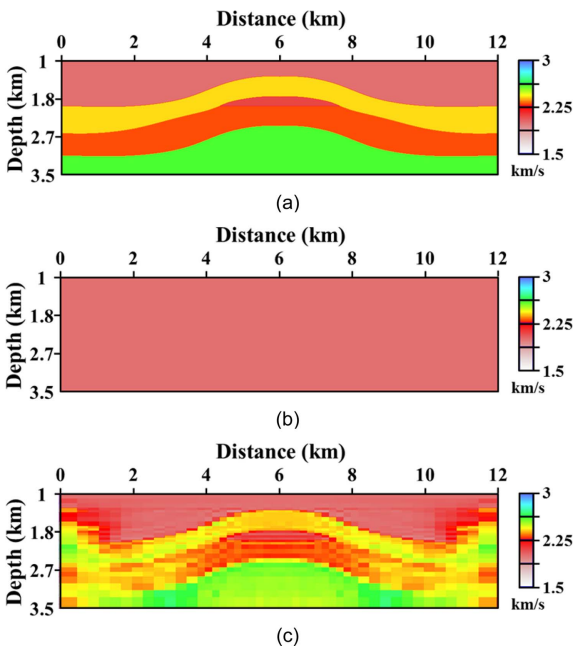


Fig. 12. (a) True P-wave velocity model, (b) initial P-wave velocity model and (c) converted P-wave velocity model from joint inversion results using rock physics model.

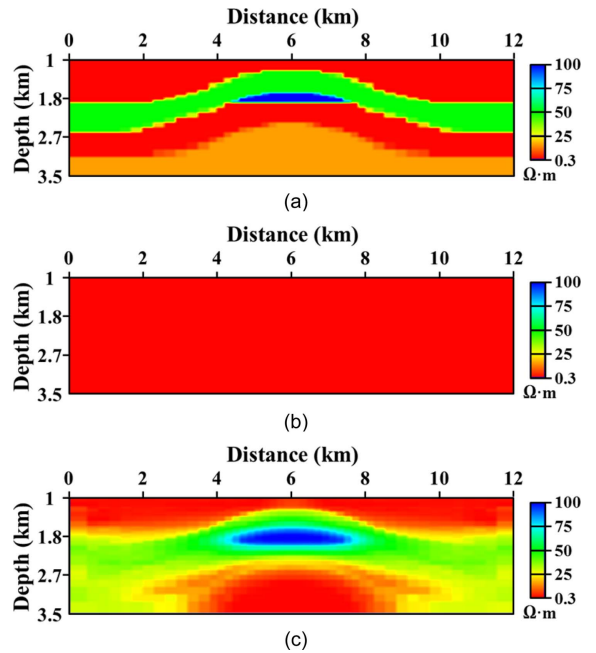


Fig. 13. (a) True resistivity model, (b) initial resistivity model and (c) converted resistivity model from joint inversion results using rock physics model.

간의 경계를 선명하게 찾을 수는 없지만 구조 내의 오일의 존재 여부를 판단할 수 있는 지표가 됨을 확인할 수 있다. Fig. 12와 13은 획득한 저류층의 공극률과 수포화율을 암석물리모델을 이용하여 변환한 그림으로, Fig. 12(a)는 실제 P파 속도 모델, 12(b)는 변환된 P파 속도 모델이며, Fig. 13(a)는 실제 전기비저항 모델, Fig. 13(b)는 변환된 전기비저항 모델이다. P파 속도 모델은 공극률 모델과 유사하게 높은 해상도로 지하 구조를 잘 반영하고 있으며, 가스층이 아닌 오일층이기 때문에 저류층의 속도 변화는 크게 없는 것을 확인할 수 있다. 전기비저항 모델도 역시 수포화율과 유사하게 구조적인 면에서는 뛰어난 결과를 보여주지는 못하지만, 저류층의 고비저항 값을 실제 모델과 유사하게 나타내었다. 또한 동시복합역산을 반복함에 따라 탄성과탐사자료와 전자탐사자료의 정규화시킨 RMS(root mean square) 오차 곡선을 Fig. 14에 각각 나타내었으며 역산이 진행됨에 따라 RMS 오차들이 성공적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

동일한 모델에 대하여 순차적인 역산방법을 수행하여 획득한 탄성과 P파 속도와 전기비저항 결과(Jeong *et al.*, 2014)를 암석물리모델에 적용하여 공극률과 수포화율을 격자 탐색법으로 획득한 결과(Jeong *et al.*, 2014)와 비교하였을 시 결과적으로는 각각의 방법으로 획득한 저류층의 물성이 거의 유사함을 확인하였다. 하지만 격자 탐색법을 이용하였기 때문에 격자의 크기에 따른 국부 최소점(local minima)이 발생할 수가 있으며 모델의 크기, 변수 및 차원의 증가 등에 따른 2차적인 계산시간이 기하급수적으로 증가하게 되는 단점이 있다. 또한 순차적

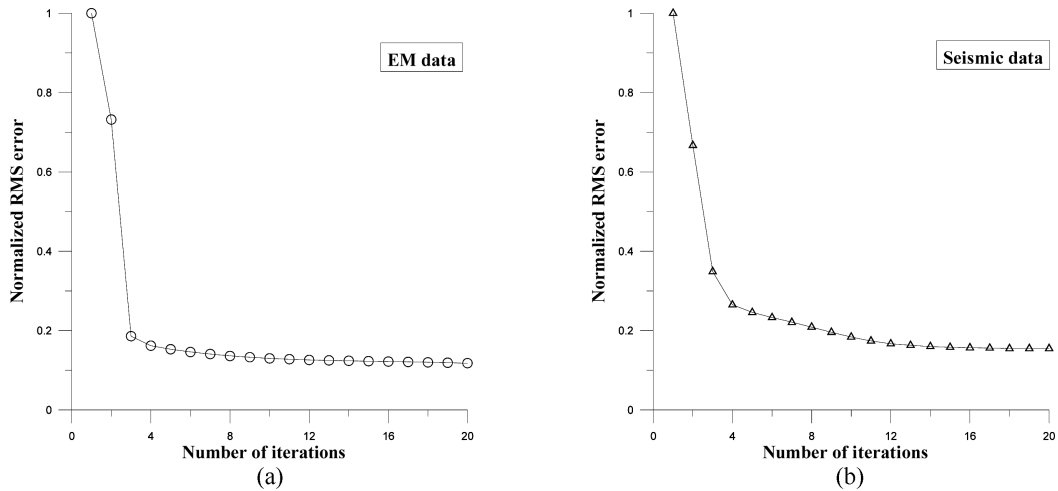


Fig. 14. Normalized data misfit curves of (a) EM data and (b) seismic data, respectively, in simultaneous joint inversion.

인 역산과 상호구배를 사용하지 않은 동시복합역산을 비교하였던 Abubakar *et al.*, (2012)는 정확한 암석물리모델 변수가 상호구배 보다 더욱 강력한 제약조건으로 적용되기 때문에 동시복합역산이 순차적인 역산 보다 더욱 향상된 결과를 나타낼 수 있다고 언급한 바 있다. 그러나 동시복합역산이 암석물리모델 변수에 대한 의존성이 크다는 의미도 되기 때문에 암석물리모델의 변수 설정에 더욱 신중한 고려가 필요하다는 것을 알 수 있다.

이 논문에서는 수치예제를 통하여 이 연구에서 제안한 동시복합역산 알고리즘과 정확한 암석물리모델 변수를 이용하면 신뢰성있는 저류층 물성값에 대한 직접적인 예측이 가능함을 확인할 수 있었다. 공극률과 수포화율 물성 결과를 함께 비교 및 분석하면 각각의 탐사자료의 특징을 모두 가져올 수 있는 장점이 있기 때문에 저류층의 위치의 추정과 매장량 계산에 보다 확실한 정보를 줄 수 있을 것이다.

결 론

이 연구에서는 탄성파탐사자료와 전자탐사자료를 함께 이용하여 저류층의 물성을 직접적으로 획득할 수 있는 동시복합역산 알고리즘을 개발하였다. 암석물리모델인 Archie 방정식과 Gassmann 방정식을 함께 이용하여 P파 속도와 전기전도도를 저류층의 물성인 공극률과 수포화율로 변환시켜 서로 연관성이 부족한 물성을 연결시켰으며, 동시복합역산 시 최대우도추정법을 이용한 상대 가중치를 적용하여 두 탐사자료간의 균형을 조절해 주었다. 또한 복합역산 시 이전 단계의 P파 속도 모델을 이용한 상호구배 방법을 적용하여 공극률과 수포화율의 구조적인 유사성을 향상시켰다.

단순한 가스층을 모사한 모델에 알고리즘을 적용한 결과, 공극률과 수포화율 모두 실제 모델의 구조와 물성값에 유사하게 성공적으로 추출할 수 있었다. 하지만 보다 복잡한 오일 저류

층 모델에 적용한 역산 결과는 사용된 모델 가중 행렬에 따라 결과값이 다른 양상을 보여주어, 모델변수에 따른 적합한 모델 가중 행렬을 각각 적용하도록 알고리즘을 개선하였다. 개선된 알고리즘을 이용하여 다시 동시복합역산한 결과, 오일 저류층의 공극률과 수포화율을 성공적으로 추출할 수 있었으며, 두 자료를 함께 분석하면 저류층의 위치 추정 및 매장량 계산에 더욱 신뢰성 있는 정보를 제공할 것으로 보인다. 또한, 향후 다양한 종류의 탐사자료 또는 암석물리모델을 함께 사용한다면 저류층의 여러 물성에 대한 정량적인 정보를 보다 정확하게 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20164010201120).

References

- Abubakar, A., Habashy, T. M., Druskin, V. L., Knizhnerman, L., and Alumbaugh, D., 2008, 2.5D forward and inversion modeling for interpreting low-frequency electromagnetic measurements, *Geophysics*, **73**, F165-F177.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transactions of the AIME*, **146**, 54-62.
- Brown, R., and Korrington, J., 1975, On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid, *Geophysics*, **40**, 608-616.
- Constable, S., 2010, Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration, *Geophysics*, **75**, 75A67-75A81.
- Drahos, D., 2008, Determining the objective function for geophysical joint inversion, *Geophysical Transactions*, **45**,

- 105-121.
- Gallardo, L. A., and Meju, M. A., 2003, Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data, *Geophys. Res. Lett.*, **30**.
- Gao, G, Abubakar, A., and Habashy, T., 2010, Joint inversion of crosswell electromagnetic and seismic data for reservoir petrophysical parameters, *SPE Ann. Tech. Conf. Exhibit, SPE*, 135307.
- Gao, G, Abubakar, A., and Habashy, T., 2012, Joint petrophysical inversion of electromagnetic and full-waveform seismic data, *Geophysics*, **77**, WA3-WA18.
- Gassmann, F., 1951, Über die Elastizität poröser Medien: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, **96**, 1-23.
- Hashin, Z., and Shtrikman, S., 1963, A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials, *J. Mechan. Phys. Solids*, **11**, 127-140
- Hu, W., Abubakar, A., and Habashy, T. M., 2009a, Joint electromagnetic and seismic inversion using structure constraints, *Geophysics*, **74**, R99-R109.
- Huber, P. J., 1981, *Robust statistics*, John Wiley & Sons.
- Jeong, S., Byun, J., and Seol, S. J., 2014, Joint electromagnetic inversion with structure constraints using full-waveform inversion result, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **17**, 187-201 (in Korean with English abstract).
- Jeong, S., Byun, J., and Seol, S. J., 2015, Effective estimation of porosity and fluid saturation using joint inversion result of seismic and electromagnetic data, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **18**, 54-63 (in Korean with English abstract).
- Ji, J., 2012, Robust inversion using biweight norm and its application to seismic inversion, *Explor. Geophys.*, **43**, 70-76.
- Kang, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, A feasibility study of CO2 sequestration monitoring using the mCSEM method at a deep brine aquifer in a shallow sea, *Geophysics*, **77**, E117-E126
- Kim, H. J., and Kim, Y. H., 2008, Lower and upper bounding constraint of model parameters in inversion of geophysical data, *77th Ann. Internat. Mtg., SEG Expanded Abstracts*, 692-696.
- Kwon, T., Seol, S. J., and Byun, J., 2015, Efficient full-waveform inversion with normalized plane-wave data, *Geophys. J. Int.*, **201**, 53-60.
- Noh, K., Kang, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2012, Computation of apparent resistivity from marine controlled-source electromagnetic data for identifying the geometric distribution of gas hydrate, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **15**, 75-84 (in Korean with English abstract).
- Nur, A., 1992, Critical porosity and the seismic velocities in rocks, *EOS Transactions AGU*, **73**, 43-66.
- Raymer, L. L., Hunt, E. R., and Gardner, J. S., 1980, An improved sonic transit time-to-porosity transform, *SPWLA 21st Annual Logging Symposium*, 1-12.
- Scales, J. A., and Gersztenkorn, A., 1988, Robust methods in inverse theory, *Inverse Probl.*, **4**, 1071-1091.
- Scales, John A., Paul Docherty, and Adam Gersztenkorn, 1990, Regularisation of nonlinear inverse problems: imaging the near-surface weathering layer, *Inverse Probl.*, **6**, 115.
- Sen, P. N., Scala, C., and Cohen, M. H., 1981, A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads, *Geophysics*, **46**, 781-795.
- Van den Berg, P. M., and Abubakar, A., 2001, Contrast source inversion method: State of art, *PIER*, **34**, 189-218.
- Virieux, J., and Operto, S., 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, **74**, WCC1-WCC26
- Waxman, M. H., and Smits, M. J. L., 1968 electrical conductivities in oil bearing shaly sands, *SPE*, **8**, 107-122.
- Wharton R. P., Hazen G. A., Rau R. N., and Best D. L., 1980, Electromagnetic propagation logging: Advances in technique and interpretation, *SPE Ann. Tech. Conf. Exhibit, SPE*, 9267.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1956, Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media, *Geophysics*, **21**, 41-70.