

복합역산을 이용한 물리검층자료로부터의 셰일성 사암 저류층의 지층 평가

최연진^{1,2} · 정우근¹ · 하지호³ · 신성렬^{1*}

¹한국해양대학교 에너지자원공학과

²극지연구소 극지지구시스템연구부

³한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터

Formation Estimation of Shaly Sandstone Reservoir using Joint Inversion from Well Logging Data

Yeonjin Choi^{1,2}, Woo-Keen Chung¹, Jiho Ha³, and Sung-ryul Shin¹

¹Korea Maritime and Ocean University, Department of Energy & Resources Engineering

²Korea Polar Research Institute, Division of Earth-System Science

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Pohang Branch

요약: 물리검층은 시추공을 이용하여 저류층의 여러 물성을 측정하는 것으로, 암석물리모델 관계식을 이용하여 공극률, 유체포화도 등의 저류층 특성을 파악하는데 활용되어 왔다. 물리검층자료의 분석은 저류층의 조건과 특성에 맞는 적당한 암석물리모델을 선정하고, Archie식이나 시만독스법 등을 활용하여 얻은 결과를 비교함으로써 가장 신뢰성 있는 저류층 물성을 결정하게 된다. 이 연구에서는 기존에 제시된 사암 저류층에서의 물리검층자료 복합역산 알고리즘을 바탕으로, 셰일성 사암 저류층의 물성을 평가하기 위한 복합역산 알고리즘을 개발하였다. 셰일의 양을 변수로 하는 암석물리모델 관계식을 제안하였으며, 야코비 행렬을 구성하고 민감도 분석을 수행하여 물리검층자료와 모델변수의 관계를 파악하였다. 확률론적 방법을 이용한 최소제곱법을 적용하여 복합역산을 수행하였다. 개발한 알고리즘은 Colony 가스사암 지역에서 얻은 물리검층자료에 적용하였으며, 그 결과를 기존에 활용되는 시만독스법과 사암 저류층에서의 복합역산 결과와 비교해 보았다.

주요어: 복합역산, 암석물리모델, 물리검층

Abstract: Well logging technologies are used to measure the physical properties of reservoirs through boreholes. These technologies have been utilized to understand reservoir characteristics, such as porosity, fluid saturation, etc., using equations based on rock physics models. The analysis of well logs is performed by selecting a reliable rock physics model adequate for reservoir conditions or characteristics, comparing the results using the Archie's equation or simandoux method, and determining the most feasible reservoir properties. In this study, we developed a joint inversion algorithm to estimate physical properties in shaly sandstone reservoirs based on the pre-existing algorithm for sandstone reservoirs. For this purpose, we proposed a rock physics model with respect to shale volume, constructed the Jacobian matrix, and performed the sensitivity analysis for understanding the relationship between well-logging data and rock properties. The joint inversion algorithm was implemented by adopting the least-squares method using probabilistic approach. The developed algorithm was applied to the well-logging data obtained from the Colony gas sandstone reservoir. The results were compared with the simandoux method and the joint inversion algorithms of sand stone reservoirs.

Keywords: joint inversion, rock physics model, well logging

Received: 3 August 2018; Revised: 27 February 2019;

Accepted: 28 February 2019

*Corresponding author

E-mail: srshin@kmou.ac.kr

Address: Department of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, Korea

©2018, 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.

서론

저류층의 공극률과 유체포화도는 매장량을 평가하는 데 필수적인 항목으로, 물리검층을 통해 측정된 검층자료, 시추 코어 분석자료, 전자탐사나 탄성파 탐사와 같은 물리탐사 자료 등을 통해 추정하게 된다(Jeong *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2004). 특히 물리검층은 시추공을 대상으로 지층의 여러 물성을 연속적이고 자세하게 측정하는 것으로, 석유나 천연가스 탐사에서

저류층의 특성을 파악하고 평가하는 데 활용되어 왔다 (Asquith and Krygowski, 2004). 암석물리모델은 이론적, 경험적 모델을 바탕으로 저류층의 인자(공극률, 압력, 온도 등)의 변화에 따른 물성의 변화를 계산하는 관계식들으로써, 물리검층 자료에서 저류층의 물성을 구하는 데 기초가 된다(Jeong *et al.*, 2015; Park and Nam, 2014). 암석물리모델 관계식들은 이론적 배경이나 대상 저류층의 특성, 사용하는 물성에 따라 Gassman 방정식, Wyllie 시간-평균 방정식, Raymer-Hunt-Gardner 모델, 복소굴절도모델(Schön, 2015) 등 다양하며, 대상 저류층의 특징, 암석물리모델에서 이용하고 있는 매개변수 등에 따라 적합한 관계식을 사용하여야 한다(Dell'Aversana *et al.*, 2011; Park and Nam, 2014; Schön, 2015; Son *et al.*, 2007).

Son *et al.* (2007)은 암석물리모델 관계식에 기초하여 치밀 저류층의 공극률과 유체 포화도를 구하였으며, Lee *et al.* (2011)은 다중 회귀분석과 인공신경망 모델을 이용하여 오일 샌드 저류층의 공극률, 수평, 수직 유체투과도, 비투멘포화율 등을 구하는 방법을 제시하였다. 이외에도, Dobroka *et al.* (2001)은 여러 광물로 구성된 저류층에서 복합역산을 수행하기 위하여 물리검층자료의 측정 위치가 아닌, 지층 간격으로 역산을 수행하는 간격 역산 방법(interval inversion method)을 적용한 바 있으며, Dell'Aversana *et al.* (2011)은 사암 저류층을 대상으로, 음파검층, 전기전도도검층, 밀도검층 자료를 이용하여 공극률과 수포화도와 석유의 포화도를 구하기 위한 복합역산 방법을 제시하였다. 이를 위하여 사암 저류층과 물리검층자료들간의 암석물리모델 관계식을 정의하였고, Tarantola (2005)가 제안한 확률론적 모델을 이용한 최소제곱법을 적용하여 여러 물성간의 복합역산에 관한 연구를 수행하였다.

이 연구에서는 Dell'Aversana *et al.* (2011)의 연구를 바탕으로 세일성 사암 저류층을 대상으로 하는 복합역산 알고리즘을 제안하였다. 기존의 사암 저류층을 대상으로 하는 알고리즘을 세일성 사암에 적용하기 위하여, 저류층의 세일의 양을 이용하는 암석물리모델 관계식을 제안하였다. 제안한 암석물리모델 관계식을 바탕으로 목적함수를 구성하고 야코비 행렬을 계산하였다. 물리검층자료의 복합역산을 위해 Tarantola (2005)가 제안한 확률론적 방법을 이용한 최소제곱법을 적용하였고, 특이값 분해를 통해 모델변수와 관측자료의 상관관계를 파악하는 민감도 분석을 수행하였다. 제안된 복합역산 알고리즘을 검증하기 위하여 Colony 사암 지역의 물리검층자료에 적용해 보았다. 먼저 밀도검층 공극률, 시만독스법 등 전통적으로 저류층의 물성을 구하는 데 사용되는 물리검층자료 분석 방법을 통해 얻은 Colony 사암 지역의 유효공극률, 수포화도와 비교함으로써 제안한 알고리즘의 신뢰성과 타당성을 확인하였으며, 세일성분을 고려하지 않는 Dell'Aversana *et al.* (2011)의 방법과 비교함으로써 알고리즘의 현장자료에 대한 적용성을 고찰해 보았다.

세일성 사암에서의 암석물리모델 관계식

이 연구에서는 다공성 매질로써 공극에는 공극수와 탄화수소(석유나 가스)가 부존하며, 사암과 세일이 혼합된 세일성 사암으로 이루어진 저류층 모델을 가정하였다. 구하고자 하는 저류층의 매개변수는 매장량 평가에 활용되는 공극률과 유체의 포화율이며, 역산에 사용되는 저류층의 물성은 음파속도, 전기전도도, 밀도, 세일의 양이다. 앞의 세 물성은 각각 음파검층, 전기비저항검층, 밀도검층을 통해 얻을 수 있으며, 세일의 양은 자연감마선검층, 자연전위검층 자료를 통해 계산할 수 있다. 이 장에서는 Dell'Aversana *et al.* (2011)이 활용한 음파속도, 전기전도도, 밀도에 관한 암석물리모델 관계식을 소개하고, 세일의 양을 이용하여 암석물리모델 관계식을 보정하는 방법에 대하여 설명하였다. 각 암석물리모델 관계식의 첨자와 부호는 부록 1에 나타내었다.

음파속도

음파속도(V_p)는 Raymer *et al.* (1980)에 의해 제안된 Raymer-Hunt-Gardner의 관계식으로 표현된다. Raymer-Hunt-Gardner 관계식에서 암석 매질은 균질한 매질을 의미하므로, 사암 입자 사이에 세일이 존재하는 세일성 사암과 같은 경우에는 균질화를 통하여 2개 이상의 구성성분을 대표하는 탄성계수를 적용할 필요가 있다(Mavko *et al.*, 1998; Lee, 2016). 이 연구에서는 Voigt-Reuss-Hill 평균을 이용하여 식 세일성 사암에서 세일과 사암의 부피비에 따라 균질화된 체적탄성률, 전단탄성률, 밀도를 다음과 같이 계산하였다(Lee, 2016).

$$K'_s = 0.5 \left(V_{sh} K_{sh} + (1 - V_{sh}) K_s + \frac{1}{V_{sh} K_{sh} + (1 - V_{sh}) K_s} \right) \quad (1)$$

$$\mu'_s = 0.5 \left(V_{sh} \mu_{sh} + (1 - V_{sh}) \mu_s + \frac{1}{V_{sh} \mu_{sh} + (1 - V_{sh}) \mu_s} \right) \quad (2)$$

$$\rho'_s = 0.5 \left(V_{sh} \rho_{sh} + (1 - V_{sh}) \rho_s + \frac{1}{V_{sh} \rho_{sh} + (1 - V_{sh}) \rho_s} \right) \quad (3)$$

세일과 사암의 균질화된 탄성률과 밀도를 식 (4)와 같이 Raymer-Hunt-Gardner 관계식에 적용하면 다음과 같이 음파속도를 계산할 수 있다.

$$V_p = (1 - \phi)^2 \sqrt{\frac{K'_s + 4/3 \mu'_s}{\rho'_s}} + \phi \sqrt{\frac{K_w S_w + K_o S_o + K_g S_g}{\rho_w S_w + \rho_o S_o + \rho_g S_g}} \quad (4)$$

이 식을 이용하여 음파속도를 계산한 결과의 예를 Fig. 1에 도시하였다. 이때 공극내 유체는 공극수와 가스로 이루어져 있다고 가정하였고, 모델링에 사용한 매질과 유체의 물성 값은 Table 1과 같으며 Dell'Aversana *et al.* (2011)가 사용한 모델을 참고하였다. Fig. 1(a)는 공극률과 수포화도에 따른 음파속도의 계산결과를 나타낸 것으로, 암석매질의 음파속도는 공극률과

Table 1. Rock and fluid parameters in a reservoir for rock physics modeling.

	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Density (g/cm ³)	Conductivity (S/m)
Sand	39	40	2.65	10 ⁻²
Shale	12	6	2.8	0.25
Water	2.25	-	1	0.4
Gas	0.3	-	0.3	10 ⁻⁵

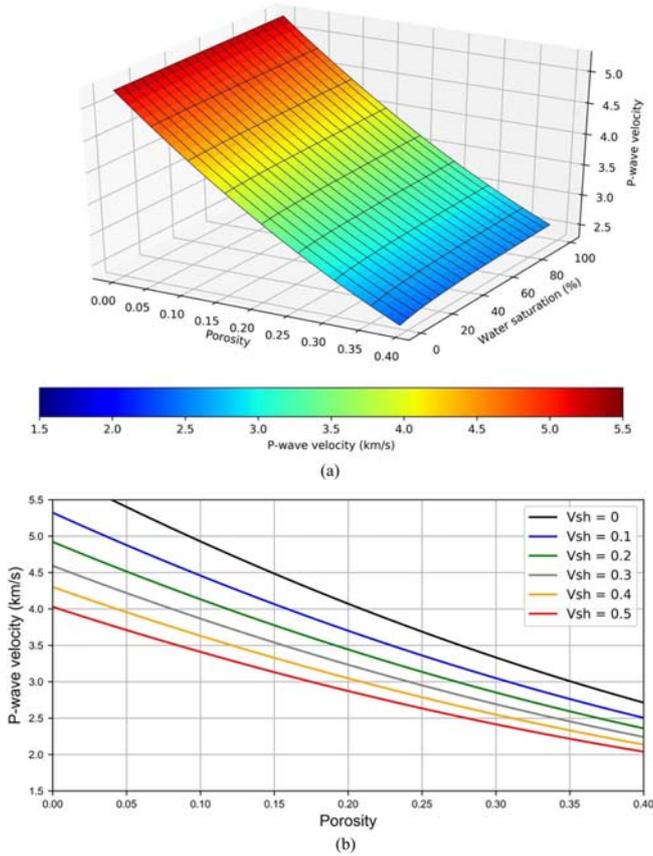


Fig. 1. Rock physics modeling of P-wave velocity for (a) clean sand, (b) shaly sand reservoir model.

반비례 관계에 있는 것을 확인 할 수 있다. 반면 수포화도의 영향은 공극률에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 공극내에 존재하는 공극수와 가스의 매질간 탄성계수의 차이가 암석과 공극내 유체간의 탄성계수 차이보다 작기 때문으로 생각된다. Fig. 1(b)는 셰일의 양과 공극률에 따른 음파속도 변화를 보여주는 것이다. 공극수는 80%, 가스는 20%로 포화되어 있다고 가정하였다. 셰일의 양이 증가할 수록 매질의 음파속도는 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

전기전도도

전기전도도(σ)는 복소굴절지수 모델(the complex refractive index model, CRIM)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다

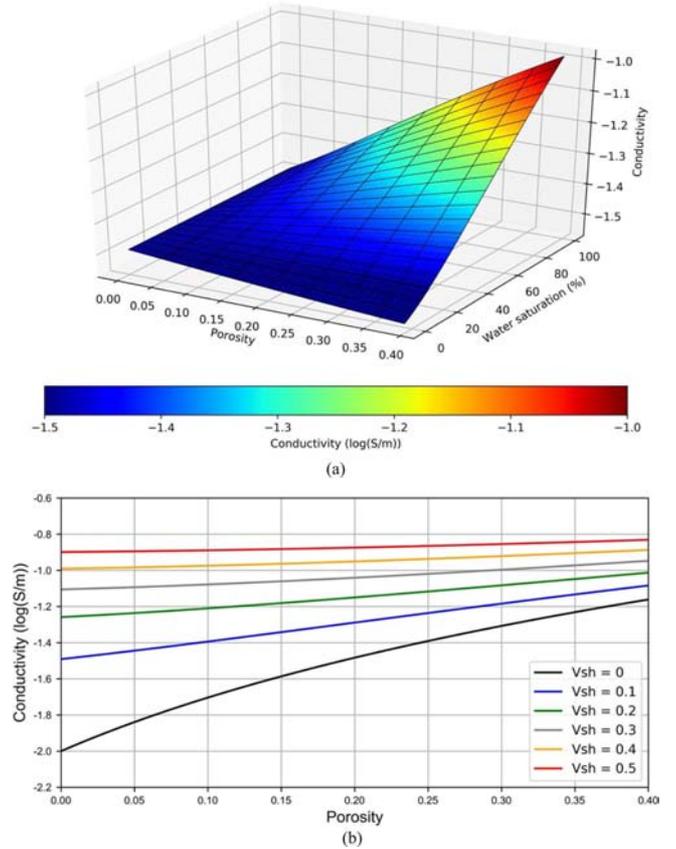


Fig. 2. Rock physics modeling of conductivity for (a) clean sand and (b) shaly sand reservoir models.

(Calvert *et al.*, 1977; Lichtenecker and Rother, 1933; Schön, 2015).

$$\sigma = [(1-\phi)\sigma_s^\gamma + \phi(S_w\sigma_w^\gamma + S_o\sigma_o^\gamma + S_g\sigma_g^\gamma)]^{1/\gamma} \tag{5}$$

여기서 γ 는 무차원 변수로써 일반적으로 0.5의 값을 사용한다. 사암내에 존재하는 셰일은 전기비저항을 감소시키기 때문에, 셰일성 사암의 석유나 가스의 포화도는 실제보다 과소평가될 수 있다. 이 연구에서는 층상 셰일 모델을 가정하여 다음과 같이 셰일성 사암에서의 전기전도도를 계산하였다.

$$\sigma = (1-V_{sh})\sigma + V_{sh}\sigma_{sh} \tag{6}$$

이 식을 이용하여 앞서 음파속도와 동일한 모델에 대해 전기전도도를 계산한 결과를 보면, 전기전도도는 공극률과 유체 포화도에 따라 복잡한 관계를 보인다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2(a)) 공극률이 큰 경우에는 수포화도가 높을수록 전기전도도가 커지는 반면, 공극률이 작은 경우에는 수포화도는 전기전도도에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 한편 셰일의 양과 공극률에 따른 전기전도도 값의 변화를 보면(Fig. 2(b)), 셰일의 양이 증가할수록 전기전도도가 커짐을 확인할 수 있으며, 셰일의 양이 증가할 수록 공극률이 전기전도도에 주는 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

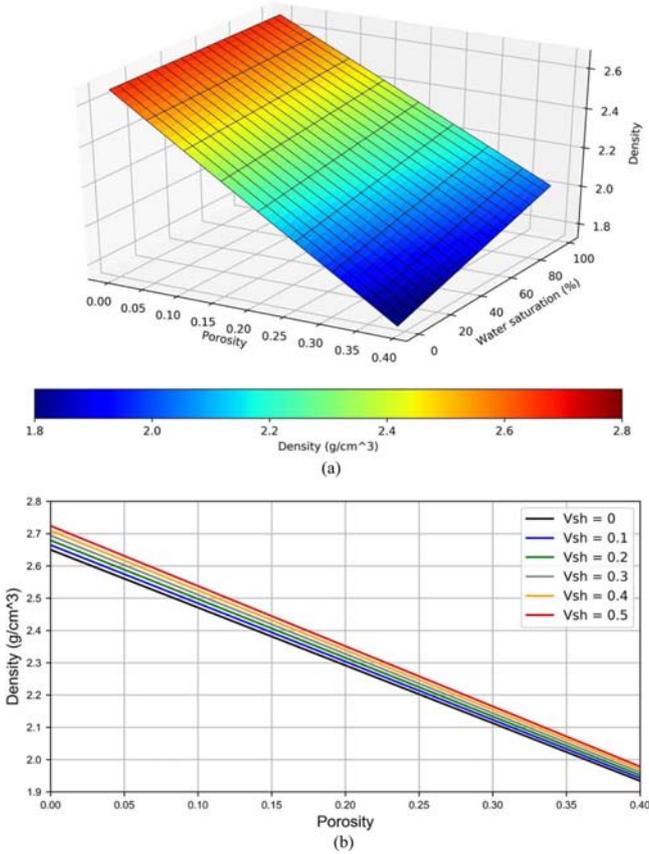


Fig. 3. Rock physics modeling of density for (a) clean sand and (b) shaly sand reservoir models.

밀도

밀도는 공극률, 유체 밀도, 매질 밀도 간의 관계식을 바탕으로, Voigt-Reuss-Hill 평균으로 균질화한 밀도를 적용하여 다음과 같이 계산하였다(Mavko *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 2003).

$$\rho' = (1-\phi)\rho'_s + \phi(S_w\rho_w + S_o\rho_o + S_g\rho_g) \quad (7)$$

이 식을 이용하여, 앞서 음파속도 전기전도도 계산에 이용한 모델에 대해 계산한 밀도는 공극률에 반비례하며, 수포화도에는 비례하는 관계를 보인다(Fig. 3(a)). 한편 셰일의 양에 따른 밀도의 암석물리모델링 결과를 보면(Fig. 3(b)), 셰일의 양이 증가할수록 밀도는 일정한 비율로 작아지는 것을 확인할 수 있으나, 셰일의 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

암석물리모델의 기초 복합역산

자료벡터와 모델벡터

이 연구에서 역산에 적용하기 위해 사용된 자료벡터(d)는 각각 음파검층, 전기비저항검층, 밀도검층을 통해 획득한 음파속도, 전기전도도, 밀도로서 다음과 같이 정의한다.

$$d = [V_p, \log(\sigma), \rho]^T \quad (8)$$

이때 전기전도도 값은 로그값을 이용하였다. 이 자료 벡터를 역산하여 얻게 되는 모델벡터(m)는 공극률, 수포화도, 탄화수소(석유나 가스) 포화도로 다음과 구성하였다.

$$m = [\phi, S_w, S_h]^T \quad (9)$$

이 연구에서 가정한 저류층 모델은 공극이 공극수와 탄화수소로 완전히 포화된 모델로서 $S_w + S_h = 1$ 의 관계식을 만족하며, 탄화수소의 포화도를 $S_h = 1 - S_w$ 로 치환함으로써 모델벡터를 공극률과 수포화도의 2개의 저류층 매개변수로 표현 가능하다. 그러나 이 연구에서는 탄화수소의 포화도를 독립적인 변수로 둬으로써, 역산에 필요한 야코비 행렬을 등방행렬로 구성할 수 있게 함으로써 역행렬을 쉽게 계산할 수 있도록 하였다.

모델벡터에서 자료벡터를 계산하는 예측자료벡터(u)는 암석 물리모델 관계식($v_p = f(m, V_{sh})$; $\sigma = g(m, V_{sh})$; $\rho = h(m, V_{sh})$)으로 구성된 순반향 모형응답 함수($g(m)$)를 통해 계산한다.

$$u = g(m) = [f(m, V_{sh}), g(m, V_{sh}), hf(m, V_{sh})]^T \quad (10)$$

이때 셰일의 양(V_{sh})은 자연감마선검층, 자연전위검층이나, 코어의 실내 실험 등을 통해 얻을 수 있다.

최소제곱법을 이용한 물리검층자료 복합역산

잡음이 포함된 관측자료가 정규분포를 따른다고 가정할 경우, 사전정보(a priori information)에 따른 모델벡터와 자료벡터의 사전 확률 밀도(ρ)는 각각 다음과 같이 표현가능하다.

$$\rho_D(m) = \exp(-0.5(d-g(m))^T C_D^{-1}(d-g(m))) \quad (11)$$

$$\rho_M(m) = \exp(-0.5(m-m_{pri})^T C_M^{-1}(m-m_{pri})) \quad (12)$$

여기서 m_{pri} 는 사전정보에 기초하여 구성한 a priori 모델을 나타낸다. 이때 베이저안 정리에 의하면 사후 확률 밀도(σ)는 다음과 같이 사전 확률 밀도의 곱으로 표현할 수 있으며,

$$\sigma_M(m) = \frac{\rho_M(m)\rho_D(g(m))}{\int \rho_M(m)\rho_D(g(m))dm} \quad (13)$$

Tarantola (2005)는 최소제곱법을 적용하여 사후 확률 밀도가 최대가 되는 모델벡터를 역산하였다. 사후 확률 밀도함수를 최대로 만들기 위하여, 다음과 같이 모델벡터와 자료벡터의 지수승의 합을 목적함수(R)를 구성할 수 있다.

$$R(m) = (d-u)C_D^{-1}(d-u)^T + (m-m_{pri})C_M^{-1}(m-m_{pri})^T \quad (14)$$

위 식에서 왼쪽 항은 자료 벡터의 사전정보를 가중치로 사용한 평균제곱 오차항이며, 오른쪽 항은 정규항으로써 모델벡터의 사전정보를 가중치로 사용한 오차항이다. 여기서 C_D^{-1} 와 C_M^{-1} 은 자료벡터와 모델벡터의 공분산 행렬으로써, 자료벡터와 모델벡터에 가해지는 가중 행렬과 같은 효과를 가지게 된다.

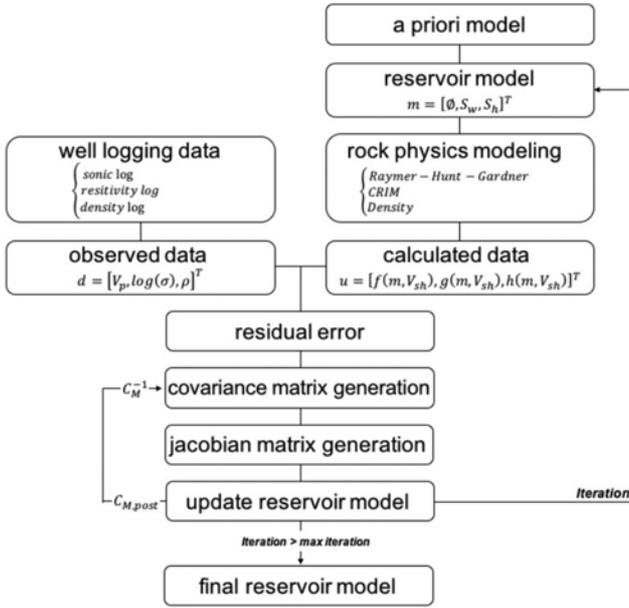


Fig. 4. Flowchart for joint inversion procedures.

식 (14)에 정의된 목적함수를 최소화 하기 위한 물리검층자료 복합역산은 Fig. 4의 모식도에 따라 진행하였다. 물리검층 관측값인 자료벡터와, a priori 모델에서의 모델벡터를 이용하여 모델링 벡터를 계산한다. 구성된 자료벡터와 모델링벡터를 이용하여 잔차와 공분산 행렬을 계산하고, 다음과 같이 야코비 행렬(G_k)을 구한다.

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_p}{\partial \phi} & \frac{\partial V_p}{\partial S_w} & \frac{\partial V_p}{\partial S_o} \\ \frac{\partial \log(\sigma)}{\partial \phi} & \frac{\partial \log(\sigma)}{\partial S_w} & \frac{\partial \log(\sigma)}{\partial S_o} \\ \frac{\partial \rho}{\partial \phi} & \frac{\partial \rho}{\partial S_w} & \frac{\partial \rho}{\partial S_o} \end{bmatrix} \quad (15)$$

이때 야코비 행렬은 암석물리모델 관계식을 모델벡터의 각 변수로 1차 편미분하여 구성된다. 모델벡터는 다음과 같이 매 반복 단계에서 업데이트 한다.

$$m_{k+1} = m_{pri} - [G_k^T C_d^{-1} G_k + C_M^{-1}]^{-1} G_k^T C_d^{-1} [(u-d) - G_k(m_k - m_{pri})] \quad (16)$$

여기서 아래첨자 k 는 반복횟수이다. 사후 공분산 행렬 ($C_{M,post}$)은 아래의 식과 같으며, 다음 반복단계에서 사전 공분산 행렬(C_M^{-1})로 이용된다.

$$C_{M,post} = [G_k^T C_d^{-1} G_k + C_M^{-1}]^{-1} \quad (17)$$

민감도 분석

지구물리자료의 역문제는 비선형적이고, 불량조건을 가지기 때문에, 관측자료의 작은 오차에도 역산결과에 큰 차이를 보인다

(Backus and Gilbert, 1967; Jupp and Vozoff, 1974). 따라서 역산을 수행하기 전, 민감도 분석을 실시하여 모델변수와 관측 자료의 관계를 파악하여야 한다(Jupp and Vozoff, 1974). 이 연구에서는 특이값 분해를 이용한 민감도 분석을 수행하여 복합 역산의 민감도와 안정성을 확인하였다. 특이값 분해를 이용한 민감도 분석은 야코비 행렬에 특이값 분해를 적용하여 모델변수와 관측자료간의 상호관계를 파악하는 방법이다. 특이값 분해의 정의에 따르면 야코비 행렬(G_k)는 다음과 같이 표현된다

$$G = U \Lambda V^T = \sum_{i=1}^N u_i s_i v_i^T \quad (18)$$

여기서 행렬 U 는 자료 공간, V 는 모델 공간의 직교행렬이며, Λ 는 야코비 행렬의 특이값 행렬로써 특이값 s_i 를 행렬값으로 가지는 대각행렬이다. u_i, v_i 는 행렬 U 와 V 의 행렬값이다. 야코비 행렬은 식 (15)와 같이 측정된 관측자료를 모델변수로 편미분한 것으로, 모델변수의 변화량에 따른 관측자료의 변화량을 표현한 것이다. 만약 특이값 행렬의 행렬값이 매우 작은 경우, 그 부분을 제거함으로써 행렬의 차원을 줄일수 있음을 고려하면, 야코비 행렬의 특정 모델변수에 해당하는 특이값이 매우 작은 경우에 해당 모델변수는 관측자료에 독립적인 것이며 역산에 불필요한 변수(Irrelevant parameter)라고 할수 있다(Jupp and Vozoff, 1974).

민감도 분석을 위하여 공극률 0.29, 공극수와 가스의 포화율이 각 98%, 1.9%인 지하모델을 설정하였다(Dell'Aversana et al., 2011). 이때 세일이 존재하지 않는 사암으로 가정하였다. 야코비 행렬의 특이값은 [7.55, 0.83, 0.089]으로 모델변수를 역산하는데 관측자료가 모두 이용됨을 확인할 수 있었으며, 공극률의 특이값이 가장 큰 것으로 보아 야코비 행렬은 공극률에 가장 큰 영향을 받으며, 밀도의 영향은 가장 작은 것으로 파악된다. 각 모델변수별 민감도를 확인하기 위하여 모델벡터의 고유벡터를 Fig. 5에서 나타내었다. 공극률의 경우 음과속

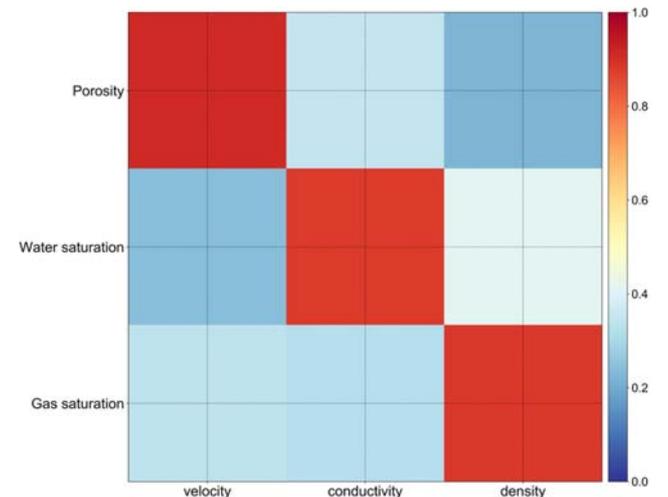


Fig. 5. Absolute values of eigenvectors in the model space.

도에 가장 큰 영향을 받으며, 전기전도도와 밀도의 영향은 크지 않은 것으로 보인다. 반면 수포화도는 전기전도도에 가장 큰 영향을 받으며, 밀도에 약간의 영향을 받지만 음파속도의 영향은 그리 크지 않은 것으로 생각된다. 석유의 포화도는 밀도에 큰 영향을 받으며 전기전도도, 음파속도의 순으로 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

현장자료 적용

이 연구에서 개발된 세일성 사암 저류층 모델에서의 물리검층자료 복합역산 알고리즘을 캐나다 알버타주의 Colony 사암 지역에 적용하여 보았다. Colony 사암은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 초기 백악기에 퇴적된 퇴적그룹으로 맨빌리 그룹의 최상단에 위치하며, 상부는 콜로라도 그룹의 해양 세일에 의해 덮혀 있다(Putnam, 1982). 사암은 세일과 실트암, 사암으로 구성된 광범위하고 복잡한 하도사암으로 구성되어 있으며, 하도사암층은 실트암, 세일, 얇은 판상의 사암층에 의하여 둘러싸여

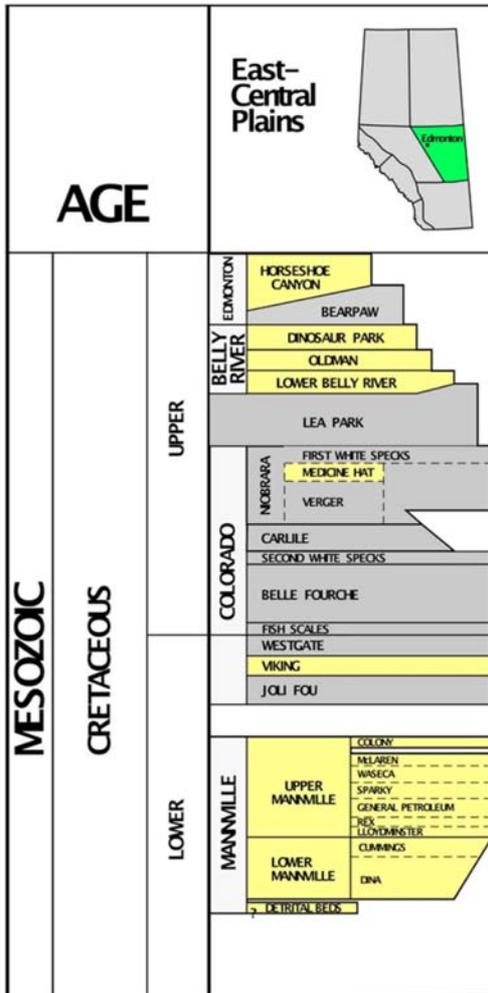


Fig. 6. Stratigraphic summary of the Colony sand units (modified after Alberta Geological Survey (2015)).

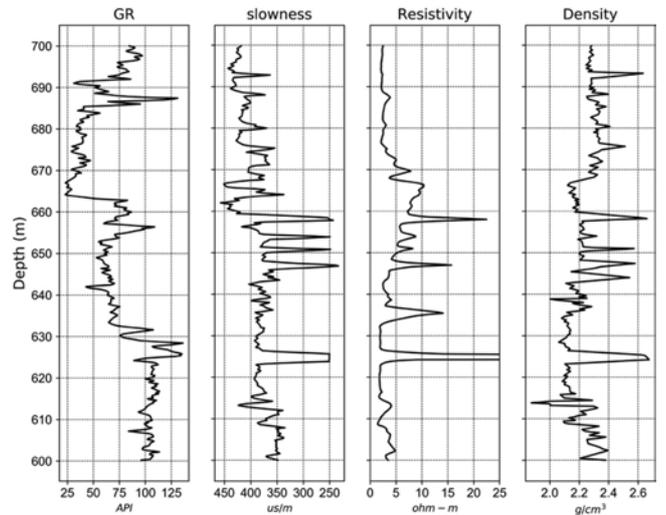


Fig. 7. Well log data of Colony gas sand.

져 있다(Putnam and Oliver, 1980). Colony 그룹은 탄화수소에 의한 명점(Bright spot)이 탄성과 단면에서 잘 나타나기 때문에, 자원탐사나 채널구조 파악 등을 목적으로 많은 탄성과 탐사시추공 탐사가 수행되었다.

이 연구에서 사용한 물리검층 자료는 Fig. 7과 같다. 물리검층자료는 심도 600 ~ 700 m에 존재하며, 심도 630 ~ 640 m에 가스가 부존된 가스저류층이 있는 것으로 알려져 있다. 현장자료의 적용하기 위하여, Larionov (1969)의 관계식과 밀도검층 공극률, 시만독스법 등, 기존에 활용되어온 물리검층자료를 분석 방법을 이용하여 저류층의 물성을 계산하였으며, 역산 알고리즘 적용에 필요한 저류층 물성 매개변수를 설정하였다. 다음으로 세일성 사암 저류층에서의 물리검층자료 복합역산 알고리즘에 적용하였으며, 마지막으로 Dell'Aversana *et al.* (2011)가 제안한 사암 저류층에서의 역산 방법을 이용하여 사암 저류층 모델을 가정하였을 때의 역산 결과를 비교해 보았다.

물리검층자료 분석법을 이용한 저류층 물성 계산

Colony 사암 지역의 저류층 물성 계산을 위하여, 기존에 활용되는 저류층 물성과 물리검층간의 관계식을 활용하여 저류층의 물성을 계산하였다. 세일성 사암의 물리검층자료를 분석하기 위해, 먼저 저류층 내에 존재하는 세일의 양을 계산하였다. 저류층의 세일의 양은 자연감마선검층, 자연전위검층, 중성자-밀도검층 자료를 이용하여 계산할 수 있다. 이 연구에서는 다음과 같이 자연감마선검층 자료를 이용하여 세일의 양을 계산하였다.

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (19)$$

$$V_{sh, Tertiary Rock} = 0.083(2^{3.7I_{GR}} - 1) \quad (20)$$

여기서 I_{GR} 은 감마선 지수로써, 자연감마선과 셰일의 양의 관계를 선형적으로 나타낸 것이며, Colony 사암의 퇴적시기를 고려하여 신생대 3기 이전 시기에 적용가능한 Larionov (1969)의 관계식을 이용하여 셰일의 양을 계산하였다(Asquith and Krygowski, 2004).

저류층의 공극률은 음파검층, 밀도검층, 중성자-밀도검층 등의 방법을 사용하여 구할수 있으며, 이 연구에서는 아래와 같이 셰일의 영향을 제거한 밀도검층 공극률을 계산하였다.

$$\phi = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_f} - V_{sh} \left(\frac{\rho_s - \rho_{sh}}{\rho_s - \rho_f} \right) \quad (21)$$

여기서 ρ_s 은 암석매질의 밀도로써, 사암의 주 성분인 석영의 밀도인 2.65 g/cm^3 를 설정하였으며 ρ_f 는 공극수의 밀도 1.0 g/cm^3 로 적용하였다.

저류층의 수포화도는 다음과 같이 시만독스법(Simandoux method)을 이용하여 계산하였으며, $S_w + S_g = 1$ 의 관계식을 이용하여 저류층내 가스포화도를 계산하였다.

$$S_w = \frac{0.4 \times R_w}{\phi^2} \left(\sqrt{\frac{5\phi^2}{R_w \times R} + \left(\frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right)^2} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right) \quad (22)$$

여기서 R_w 는 공극수의 전기전도도로써, 시추공 내의 공극수는 이수에 의해 오염되어 있기 때문에, 정확한 값을 측정하기 힘들고 이수의 종류나 전기전도도, 이수가 침투한 정도에 따라 민감하게 반응한다. 따라서 공극수의 전기전도도는 일반적으로 SP 검층이나, Archie의 식 등을 이용하여 간접적으로 계산하게 된다(Asquith and Krygowski, 2004). 이 연구에서는 Quijada (2009)가 제시한 Colony 사암의 전기전도도 값인 0.15 ohm-m 의 값을 사용하였다.

물리검층 자료를 이용하여 계산한 저류층의 물성은 Fig. 8과 같으며, Table 2과 같이 4개 구역으로 구분하여 분석하였다. 구역 1은 심도 600 ~ 630 m 구역으로써 평균 셰일의 함량은 0.479이며 셰일의 함량이 비교적 높은 사암성 셰일로 구성되어 있는 것으로 생각된다. 평균 공극률은 0.138, 평균 수포화도는 0.976으로써 대부분 공극수로 포화되어 있는 것으로 사료된다. 구역 2는 심도 630 ~ 640 m에 위치하는 가스저류층 구간으로, 셰일의 양이 평균 0.189인 셰일성 사암으로 구성되어 있는 것으로 생각된다. 이 구역의 평균 공극률은 0.25이며, 평균 수포화도는 0.484로써 공극수와 가스가 약 51% 포화되어 있는것으로 보인다. 구역 3은 가스저류층 하부 지역으로 심

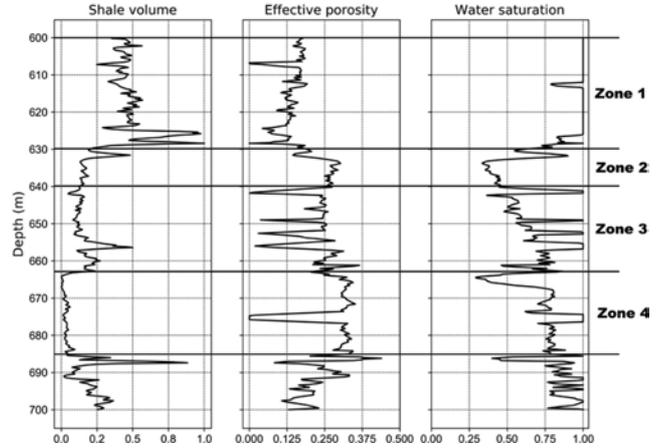


Fig. 8. Estimation of reservoir properties using the simandoux method.

도 640 ~ 663 m에 위치한다. 이 지역의 셰일의 양은 0.16으로 구역 2와 유사한 셰일성 사암으로 생각된다. 평균 공극률은 0.21이지만 부분적으로 공극률이 매우 낮은 얇은 판상의 층이 존재하는 것으로 생각된다. 평균 수포화도는 0.696으로 나타났다. 구역 4은 663 ~ 685 m에 존재하며 평균 셰일의 양이 0.03으로써 셰일이 거의 존재하지 않는 사암층으로 생각된다. 평균 공극률은 0.28로써 셰일성 사암층에 비해 공극률이 크게 나타났으며, 평균 수포화도는 0.739로써 대부분 공극수와 약간의 가스가 포화되어 있음을 확인할 수 있었다.

셰일성 사암 저류층 모델에서의 물리검층자료 복합역산을 이용한 저류층 물성 계산

이 연구에서 제안된 셰일성 사암에서의 물리검층자료 복합역산을 이용하여 Colony 사암 저류층의 물성을 역산해 보았다. 사용한 자료벡터는 음파속도, 전기전도도, 밀도이며, 각 음파검층, 전기비저항검층, 밀도검층 자료를 이용하여 계산하였다. 셰일의 양은 식 (20)를 이용하여 자연감마선검층 자료로부터 구하였다. Table 3은 역산에 사용된 저류층의 물성 값이다. 이때 기존 연구를 바탕으로 사암의 물성을 선정하고(Smith et al., 2003), 셰일은 저류층의 물성계산 결과를 바탕으로 셰일이 100% 포화된 지점(625 m)의 값을 셰일의 물성으로 가정하여 물성 값을 계산하였다. 역산에 사용한 초기 모델벡터는 $m_{pri} = [0.1, 0.9, 0.1]$ 로 설정하였으며, 역산은 총 125회 반복 계산하였다.

Table 2. Average reservoir properties at each zone using the simandoux method.

	Depth	Lithology	Shale volume	Porosity	Water saturation	Gas saturation
Zone1	600 ~ 630 m	sand shale	0.478	0.138	0.972	0.028
Zone2	630 ~ 640 m	shaly sand	0.189	0.252	0.484	0.516
Zone3	640 ~ 663 m	Shaly sand	0.160	0.212	0.696	0.304
Zone4	663 ~ 685 m	sand	0.031	0.284	0.739	0.261

Table 3. Rock and fluid parameters for the joint inversion in the shaly sand reservoir.

	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Density (g/cm ³)	Conductivity (S/m)
Sand	37	44	2.65	10 ⁻²
Shale	13.62	3.35	2.84	0.25
Water	2.25	-	1.1	6.66
Gas	0.3	-	0.3	10 ⁻⁵

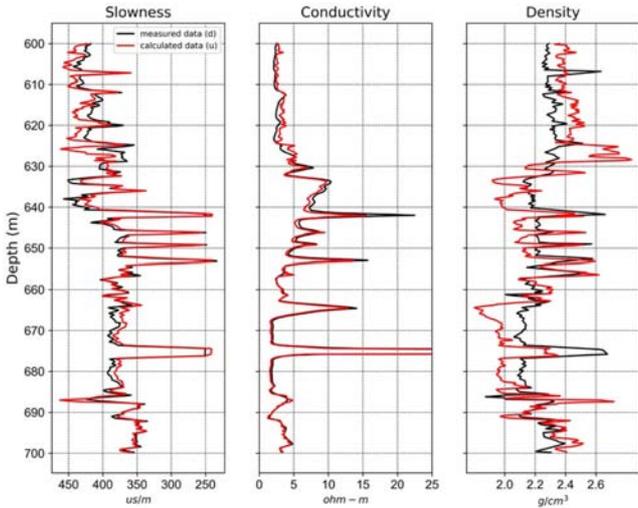


Fig. 9. Measured and calculated data for the joint inversion in the shaly sand reservoir model.

이 연구에서 개발한 셰일성 사암 저류층에서의 물리검층자료 복합역산 결과를 살펴보면, Fig. 9와 같이 자료벡터와 최종 계산한 모델링벡터가 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 음파속도와 전기전도도의 경우 실제 자료벡터와 모델링 벡터가 일치하는 것으로 보임에 반하여, 밀도검층 자료의 경우 구역 1에서는 실제자료에 비해 높은 밀도 값을 보이지만, 셰일성 사암층인 구역 2와 3에서는 밀도검층 자료와 모델링 자료의 결과가 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 가스저류층인 구역 2에서는 실제 밀도보다 약간 낮은 값이 나왔는데, 이는 가스저류층에 존재하는 가스가 밀도검층 모델링에 영향을 주었기 때문이라 사료된다. 사암층인 구역 4에서는 실제 물리검층 자료보다 낮은 모델링 결과가 나왔다.

역산된 저류층모델은 Fig. 10과 같으며 각 구간별 역산 결과는 Table 4에 나타내었다. 공극률의 경우 구역 1에서는 평균

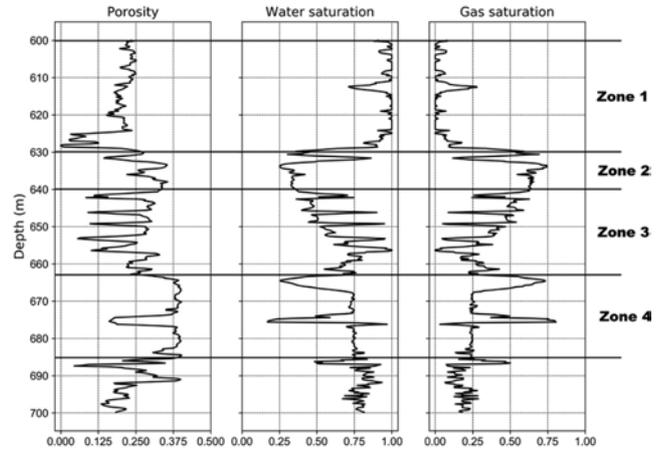


Fig. 10. Estimation of reservoir properties using the joint inversion in the shaly sand reservoir model.

0.193, 구역 2의 가스저류층에서는 평균 0.288이며, 구역 3에서는 평균 0.23으로써 구역 2에 비해 약간 작은 값을 나타냈다. 사암 지역인 구역 4에서는 평균 0.355로 가장 큰 공극률을 가짐을 확인하였다. 수포화도의 경우, 저류층 상부 구역 1에서는 0.947로써 대부분 공극수로 포화되어 있는것으로 보이며, 구역 2에서는 0.395이며 이때 가스의 포화도는 평균 0.582로 나타났다. 구역 3에서는 평균 0.634, 구역 4에서는 평균 0.646의 포화도를 가지는 것으로 나타났다.

사암 저류층 모델에서의 물리검층자료 복합역산을 이용한 저류층 물성 계산

셰일의 영향을 비교하기 위하여 Dell'Aversana *et al.* (2011) 이 제안한 사암 저류층에서의 물리검층자료 복합역산 결과와 비교해 보았다. 역산에 사용한 지층의 물성값은 Table 4와 같으며, 초기 모델벡터는 $m_{pri} = [0.1, 0.9, 0.1]$ 로 설정하였으며, 역산은 총 125회 반복 계산하였다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 자료벡터와 모델링 벡터를 비교해 보면, 음파속도와 전기전도도는 유사한 경향을 보이지만, 밀도검층의 경우, 모델링 벡터가 전반적으로 작게 계산됨을 확인하였다. 이는 높은 밀도를 가지는 셰일의 영향을 반영하지 못한 결과로 사료된다. 역산 결과를 살펴보면, Fig. 12과 Table 5과 같이 평균 공극률은 각 구역별로 0.256, 0.338, 0.288, 0.372로써 다른 방법에 비해 비교적 높은 공극률 결과를 얻었음을 확인하였다. 유체포화도의

Table 4. Average reservoir properties at each zone using the joint inversion in the shaly sand reservoir.

	Depth	Lithology	Shale volume	Porosity	Water saturation	Gas saturation
Zone1	600 ~ 630 m	sand shale	0.478	0.193	0.947	0.048
Zone2	630 ~ 640 m	shaly sand	0.189	0.288	0.395	0.582
Zone3	640 ~ 663 m	Shaly sand	0.160	0.239	0.634	0.343
Zone4	663 ~ 685 m	sand	0.031	0.355	0.645	0.339

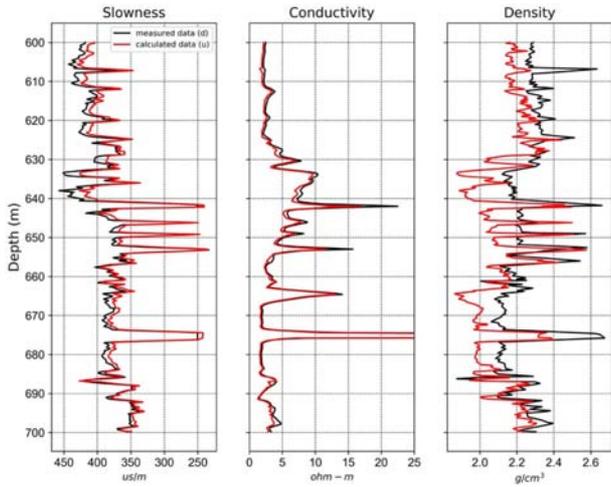


Fig. 11. Measured and calculated data for joint inversion in sand reservoir model.

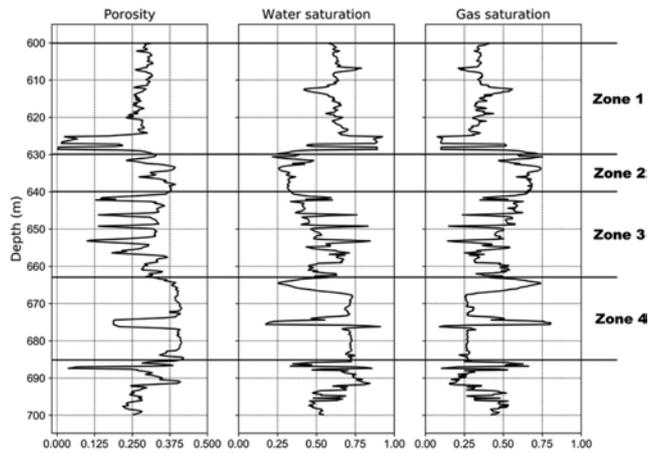


Fig. 12. Estimation of reservoir properties using the joint inversion in the sand reservoir model.

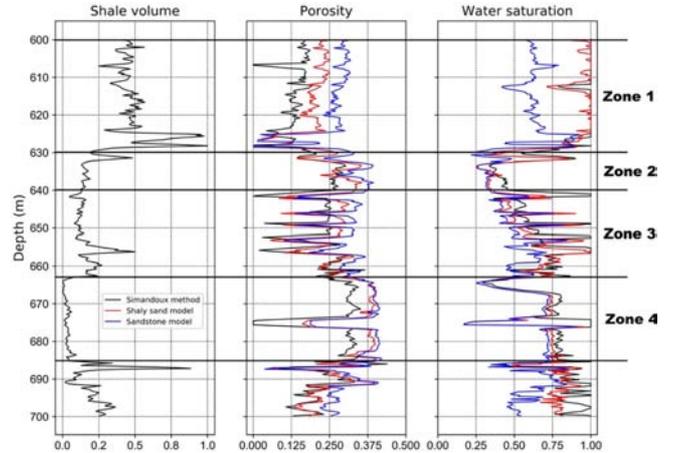


Fig. 13. Estimation of reservoir properties for the Colony gas sand.

경우에도, 모든 구역에서 최소 0.25의 가스가 포화되어 있는 것으로 보인다.

저류층 물성 평가 결과 비교

물리검층자료를 이용하여 계산한 저류층의 물성과 셰일성 사암 저류층에서의 역산 결과를 비교해 보았으며, 결과는 셰일의 양, 공극률과 수포화도만을 표시하였다(Fig. 13, Table 6). 각 구역 별로 계산결과를 비교해보면, 구역 1에서 밀도검층 공극률은 평균 0.138, 셰일성 사암 저류층 모델에서의 역산결과는 0.193으로 0.055의 차이를 보임을 확인하였으나, 셰일성 사암으로 구성된 구역 2와 3에서는 차이가 0.035, 0.027로써 구역 1에 비하면 차이가 작게 남을 확인 할 수 있었다. 반면 사암으로 되어 있는 구역 4에서는 0.07의 오차가 발생함을 보였다. 수포화도의 경우, 시만독스 방법과 셰일성 사암 저류층에서의 복합역산 결과는 유사한 경향을 보임을 확인 할 수 있었다.

Table 5. Average reservoir properties at each zone using the joint inversion in the sand reservoir.

	Depth	Lithology	Shale volume	Porosity	Water saturation	Gas saturation
Zone1	600 ~ 630 m	sand shale	0.478	0.257	0.632	0.343
Zone2	630 ~ 640 m	shaly sand	0.189	0.338	0.331	0.654
Zone3	640 ~ 663 m	Shaly sand	0.160	0.288	0.519	0.459
Zone4	663 ~ 685 m	sand	0.031	0.372	0.618	0.366

Table 6. Average porosities and water saturations at each zone.

Depth	Porosity			Water saturation		
	Well log analysis	Joint inversion (Shaly sand)	Joint inversion (Sand)	Well log analysis	Joint inversion (Shaly sand)	Joint inversion (Sand)
Zone1 600 ~ 630 m	0.138	0.193	0.257	0.972	0.947	0.632
Zone2 630 ~ 640 m	0.252	0.288	0.338	0.484	0.395	0.331
Zone3 640 ~ 663 m	0.212	0.239	0.288	0.696	0.634	0.519
Zone4 663 ~ 685 m	0.284	0.355	0.372	0.739	0.645	0.618

다음으로 이 연구에서 개발한 셰일성 사암 저류층의 복합역산 결과와 기존의 사암 저류층 모델에서의 복합역산 결과와 비교해 보았다. 각 구역 별로 살펴보면, 셰일이 존재하지 않는 구역 3에서는 두 방법 모두 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 반면에 셰일의 양이 증가할 수록 두 방법의 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 특히 평균 셰일의 양이 0.478인 구역 1에서는 평균 공극률이 0.06, 평균 수포화도는 0.309의 차이가 발생하였다. 이는 사암 저류층에서의 복합역산 알고리즘의 경우, 저류층내에 존재하는 셰일의 영향을 보정하기 위해 발생하는 오차로 생각된다.

세 방법으로 얻은 결과를 비교해 보면, 공극률은 밀도검층 공극률이 가장 작은 값을 보였으며, 다음으로 셰일성 사암 저류층에서의 복합역산, 사암 저류층에서의 복합역산 결과는 공극률을 가장 크게 평가하는 것으로 보인다. 셰일의 경우 부존 지역과 함유한 점토광물의 성분에 따라 큰 범위의 물성 값을 가지며, 이 연구에서 사용한 셰일의 값이 실제 셰일 물성과 차이가 나기 때문으로 생각된다. 코어 실험 등을 통해 보다 정확한 셰일의 물성 값을 사용한다면 보다 신뢰성 있는 역산 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다. 또한 민감도 분석 결과에서 보는 것과 같이, 제안된 알고리즘은 공극률은 암석의 음파속도에 큰 영향을 받으며 밀도의 영향은 작은 것을 고려할 때, 밀도검층 공극률과 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 이는 향후, 음파검층 공극률이나, 중성자검층을 이용하여 얻은 공극률과 비교함으로써 정확한 공극률을 결정할 수 있을 것으로 생각된다.

세가지 방법을 통한 역산 결과의 비교할 통하여, 이 연구에서 제안한 셰일성 사암 저류층에서의 복합역산 신뢰성 있는 저류층 물성을 구할 수 있다고 생각된다. 또한 셰일의 양이 0.4 이하인 지역에서는 셰일성 사암 저류층이나 사암 저류층을 이용한 복합역산이 둘다 활용될 수 있을 것으로 보이나, 셰일의 양이 0.4 이상인 저류층을 대상으로는 셰일성 사암을 바탕으로 하는 복합역산 알고리즘을 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

결 론

이 연구에서는 Dell'Aversana *et al.* (2011)가 제안한 사암 저류층에서의 물리검층자료 복합역산 알고리즘을 바탕으로 셰일성 사암 저류층에 적용하기 위한 물리검층자료 복합역산 방법을 개발하였다. 개발한 복합역산 알고리즘은 Colony 사암 지역의 물리검층결과에 적용하고, 그 결과를 기존에 활용되던 관계식을 이용한 저류층 물성 계산 결과와 사암 저류층 모델에서의 복합역산 결과와 비교해 보았다. 자세한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이 연구에서는 셰일성 사암 저류층을 대상으로 저류층의 물성을 파악하기 위한 물리검층자료 복합역산 방법을 제시하

였다. 이를 위하여 셰일성 사암 저류층에 적용할 수 있도록 암석물리모델 관계식을 보정하였으며, Tarantolar (2005)가 최소 제곱법을 이용하여 복합역산을 수행하였다. 제안된 알고리즘에 대하여 특이값 분해를 이용한 민감도 분석 결과, 공극률은 음파검층 자료에 큰 영향을 받으며 수포화도는 전기전도도검층과 밀도검층에 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

2. 제안된 물리검층자료의 복합역산 알고리즘은 캐나다 알버타 주의 Colony의 가스사암 저류층을 대상으로 적용해 보았다. 저류층 상부의 600 ~ 630 m 구역은 셰일의 함량이 높은 지역으로써 저류층의 물성 파악에 활용되는 물리검층자료 분석방법을 이용하여 공극률과 수포화도를 계산해본 결과, 평균 공극률은 0.13이며 유체는 0.971 이상 공극수로 포화됨을 확인할 수 있었다. 제안된 셰일성 사암에서의 복합역산 알고리즘을 사용하여 저류층의 물성을 계산해본 결과, 저류층의 공극률은 평균 0.19이며 0.947 이상 공극수로 포화된 것으로 나타났으며, 이는 암석물성 산출법과 유사한 결과였다. 반면 사암 저류층 모델을 가정한 복합역산을 적용한 결과, 공극률은 평균 0.25이며 평균 수포화도는 0.632로 다른 방법에 비해 큰 차이를 보였다. 이는 40% 이상으로 높은 함량을 가지는 셰일의 영향으로 사료된다.

3. 630 ~ 640 m 심도의 가스저류층은 평균 0.189의 셰일 함량을 가지는 셰일성 사암으로 구성되어 있으며, 3가지 방법으로 저류층 물성을 계산한 결과 평균 공극률은 0.25 ~ 0.34이며 평균 가스포화도는 0.33 ~ 0.4, 최대 0.581임을 확인할 수 있었다. 비교적 셰일의 양이 작은 구역 2-3에서는 3가지 방법 모두 유사한 경향을 보이며, 사암층인 구역 4에서는 셰일성 사암 저류층과 사암 저류층에서의 복합역산이 같은 결과를 얻음을 확인 하였다.

현장자료의 적용을 통하여, 셰일성 사암 저류층 모델에서의 복합역산은 셰일의 양이 0.4 이상일때에도 좋은 결과를 보임을 확인하였으며, 그 이하에서도 사암 저류층 모델에서의 복합역산과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 통하여 다양한 저류층을 대상으로도 신뢰성 높은 역산 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 또한 기존에 활용되는 물리검층자료 분석 방법을 보완하거나, 기존 자료로써 활용될 여지가 있을 것으로 사료된다. 향후 사용하는 물리검층 자료의 종류를 증가시키거나, 다양한 종류의 저류층 모델을 대상으로 하는 복합역산 알고리즘에 대한 연구가 진행된다면 셰일의 양, 투수율 등 다른 유용한 저류층의 물성을 얻을 수 있을 것이라 생각된다. 아울러 이렇게 구해진 저류층 모델을 탄성과 탐사나 전자탐사 등의 지구물리 방법과 결합함으로써 광범위한 지역의 저류층 특성 파악에 활용가능할 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원(KIMST 과제번호: 20160247)

과 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20182510102470)입니다. 또한 논문의 수정과 보완에 많은 조언을 해주신 편집위원장님과 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

References

- Alberta Geological Survey, 2015, Alberta table of formations, Alberta Energy Regulator
- Asquith, G., and Krygowski, D., 2004, *Basic well log analysis*, 2nd Ed., Am. Assoc. Pe. Geol.
- Backus, G. E., and Gilbert, J. F., 1967, Numerical application of a formalism for geophysical inverse problems, *Geophys. J. Int.*, **13(1-3)**, 247-276.
- Calvert, T. J., Raw, R. N., and Wells, L. E., 1977, Electromagnetic propagation—A new dimension logging, *Paper SPE 6542 presented at the Annual California Regional Meeting, Soc. of Pet. Eng.*, Bakersfield, California, April 13-15.
- Dell'Aversana, P., Bernasconi, G., Miotti, F., and Rovetta, D., 2011, Joint inversion of rock properties from sonic, resistivity and density well-log measurements, *Geophys. Prospect.*, **59(6)**, 1144-1154.
- Jeong, S., Seol, S. J., and Byun, J., 2015, Effective estimation of porosity and fluid saturation using joint inversion result of seismic and electromagnetic data. *Geophys. and Geophys. Explor.*, **18(2)**, 54-63 (in Korean with English abstract).
- Jupp, D. L. B., and Vozoff, K., 1975, Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, *Geophys. J. Int.*, **42(3)**, 957-976.
- Kim, J. H., Yi, M. J., and Hwang, S. H., 2004, Automatic inversion of normal resistivity logs for horizontally stratified Earth, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **41(4)**, 271-284 (in Korean with English abstract).
- Larionov, V. V., 1969, Borehole radiometry: Moscow, U.S.S.R., Nedra.
- Lee, D. G., Seo, K., and Lim, J. S., 2011, 3D Geostatistical modeling using well data of oil sand reservoir in the Leismer Field, Canada, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **48(6)**, 687-700 (in Korean with English abstract).
- Lee, G. H., 2016, Rock physics modeling: Report and a case study, *Econ. Environ. Geol.*, **49(3)**, 225-242 (in Korean with English abstract).
- Lichtenecker, K., and Rother, K., 1931, Die herleitung des logarithmischen mischungs-gesetzes aus allgemeinen prinzipien der stationaren stromung, *Phys. Z.*, **32**, 255-260.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 1998, *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*, Cambridge University Press.
- Park, C., and Nam, M. J., 2014, A review on constructing seismic rock physics models based on gassmann's equation for reservoir fluid substitution, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **51(3)**, 448-467 (in Korean with English abstract).
- Putnam, P. E., and Oliver, T. A., 1980, Stratigraphic traps in channel sandstones in the Upper Mannville (Albian) of east-central Alberta, *B. Can. Petrol. Geol.*, **28(4)**, 489-508.
- Putnam, P. E., 1982, Aspects of the petroleum geology of the Lloydminster heavy oil fields, Alberta and Saskatchewan, *B. Can. Petrol. Geol.*, **30(2)**, 81-111.
- Quijada, M. F., 2009, Estimating elastic properties of sandstone reservoirs using well logs and seismic inversion, MSc thesis, University of Calgary, 27p
- Raymer, L. L., Hunt, E. R., and Gardner, J. S., 1980, An improved sonic transit time to porosity transform, *21st Annual Logging Symposium, Transactions of the Society of Professional Well Log Analysis*, Expanded Abstract, 546p.
- Schön, J. H., 2015, *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*, 2nd Ed., Elsevier.
- Smith, T. M., Sondergeld, C. H., and Rai C. S., 2003, Gassmann fluid substitutions: A tutorial., *Geophysics.*, **68(2)**, 430-440.
- Son, H. R., Lee, W. S., and Kim, H. T., 2007, Rock properties evaluation of tight gas reservoir using geophysical well logs in chimney butte field, wyoming, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **44(5)**, 418-427 (in Korean with English abstract).
- Tarantola, A., 2005, *Inverse problem theory.*, SIAM.

부록 1. 부호

암석물리모델 관계식을 정의하는데 사용한 부호와 그 의미는 다음과 같다. 이때 아래첨자 s 는 암석 매질을 뜻하며, sh 는 세일, w 는 지층내 공극수, o 는 지층내 석유, g 는 지층내 가스를 나타낸다.

GR_{log} : Gamma ray from shaly sand

GR_{max} : Gamma ray maximum

GR_{min} : Gamma ray minimum

I_{GR} : Gamma ray index

$K_s, K_w, K_o, K_g, K_{sh}$: Bulk modulus, GPa

R_w : Formation water resistivity, ohm-m

S_w, S_s, S_g : Saturation, %

V_p : P-wave velocity, km/s

V_{sh} : Volume of clay, %

μ_s, μ_{sh} : Shear modulus, GPa

ρ_b : Bulk density, g/cm³

ρ_f : Fluid density, g/cm³

$\rho_s, \rho_w, \rho_o, \rho_g, \rho_{sh}$: Density, g/cm³

$\sigma_s, \sigma_w, \sigma_o, \sigma_g, \sigma_{sh}$: Conductivity, S/m

ϕ : Porosity