

셰일 저류층에서 케로젠, GOR 변화에 따른 속도 변화 및 AVO 반응 분석

최준환 · 이재욱 · 변중무* · 김보나 · 김소영

한양대학교 자원환경공학과

Analysis of Seismic Velocity Change and AVO Response Depending on Saturation of Kerogen and GOR in Shale Reservoirs

Junhwan Choi, Jaewook Lee, Joongmoo Byun*, Bona Kim, and Soyoung Kim

Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ.

요 약: 최근 셰일 저류층의 암석물리학적 모델(Rock Physics Model)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 셰일 저류층에서는 케로젠(Kerogen)과 GOR (Gas-Oil Ratio)을 통해서 속성도를 파악할 수 있는데, 케로젠에 대한 암석물리학적 모델 연구는 활발히 진행된 반면, GOR 변화에 대한 셰일 저류층 연구는 아직 미미하다. 따라서 이 연구에서는 GOR 및 케로젠 변화에 따른 속도 및 밀도 변화와 AVO (Amplitude Variation with Offset) 반응을 분석하였다. 판상구조로 이루어진 셰일은 수직 가로 등방성(Vertical Transverse Isotropy; VTI) 성질을 갖기 때문에 Backus averaging 기법을 적용하여 셰일 저류층의 속도 및 밀도를 도출하였고 이를 기반으로 AVO 반응을 분석하였다. GOR 변화에 대해서는 속도 변화가 작았지만 케로젠 함량에 따른 속도 변화는 상대적으로 크게 나타났다. 중질오일과 경질오일을 구분할 수 있는 GOR이 180 (Litre/Litre)일 때에는 케로젠의 부피비가 5%에서 35%으로 증가할 때 층에 대해 수직방향인 P파 속도가 51%까지 증가하였다. 즉, 속도 구분을 통해 케로젠의 속성도를 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 한편, 가스와 오일을 합친 유체의 비율이 클 때에는 GOR 변화에 따른 속도 변화가 상대적으로 크게 나타났다. 케로젠의 부피비가 5%일 때에는 중질오일 (GOR 40)에서의 층에 대해 수직방향인 P파 속도가 1.46 km/s²로 측정되었지만 경질오일(GOR 300)일 때에는 1.36 km/s²로 측정되었다. AVO 반응을 분석해본 결과, GOR과 케로젠 함량을 변화시켜도 포아송 비의 변화량이 작게 나타났으므로 Class 4의 양상이 나타났다. 이를 통하여 셰일 저류층에서는 Class 4의 양상이 나타날 수 있음을 확인할 수 있었다.

주요어: 암석물리학적 모델, Backus averaging 기법, 케로젠, 가스-오일 비, AVO

Abstract: Recently, the studies about rock physics model (RPM) in shale reservoir are widely performed. In shale reservoir, the degree of the maturity can be estimated by kerogen and GOR (Gas-Oil Ratio). The researches on the rock physics model of shale reservoir with the amount of kerogen have been actively carried out but not with GOR. Thus, in this study, we analyzed the changes in seismic velocity and density, and AVO (Amplitude Variation with Offset) response depending on changes in GOR and the amount of kerogen. Since the shale consists of plate-like particles, it has vertical transverse isotropy (VTI). Therefore we estimated the seismic velocity and density by using Backus averaging method and analyzed AVO responses based on these estimated properties. The results of analysis showed that the changes in the velocity with the GOR variation are small but the velocity changes with the variation in kerogen amount are relatively larger. In case, GOR 180 (Litre/Litre) which is boundary between heavy oil and light oil, when volume fraction of kerogen increased from 5% to 35%, the P-wave velocity normal to the layering increased 51%. That is, it helps estimating maturity of kerogen through the velocity. Meanwhile, when rates of oil-gas mixture are large, the effect of GOR variation on the velocity change became larger. In case volume fraction of kerogen is 5%, the P-wave velocity normal to the layering was estimated 1.46 km/s² in heavy oil (GOR 40) but 1.36 km/s² in light oil (GOR 300). The

AVO responses analysis showed class 4 regardless of the GOR and amount of kerogen because variation of poisson's ratio is small. Therefore, shale reservoir has possibility to have class 4.

Keywords: Rock physics model (RPM), Backus averaging method, Kerogen, Gas Oil Ratio (GOR), Amplitude variation with Offset (AVO)

Received: 25 January 2016; Revised: 25 February 2016;

Accepted: 25 February 2016

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

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

©2016, 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

셰일 저류층에서 셰일 오일을 생산할 때에는 케로젠 (Kerogen) 함량과 가스-오일 비(Gas-Oil Ratio; GOR)를 파악하는 것이 매우 중요하다. 케로젠이란 유기물들이 바다나 호수에 퇴적된 후에 물리적, 화학적 작용을 받아 생성되는 탄화수소 화합물을 일컫는데 고온, 고압을 받아 숙성되면 오일 또는 가스로 변형된다. 다음으로 GOR이란 가스와 오일의 부피비를 나타내는 것으로써 투과율이 낮은 셰일에서는 생산방법에 있어서 점성도가 매우 중요한데 이 때 점성도를 결정하는 요인이 바로 GOR이다(Fig. 1). 셰일 저류층에서는 GOR에 따라 오일의 종류를 구분하고 이에 따라 생산방법이 달라진다(Fig. 2). 또한 오일 셰일이 온도와 압력을 받아 오랜 기간 숙성되면 케로젠이 오일 및 가스로 변환되면서 셰일 오일 또는 셰일가스로 생산이 가능하다. 즉, 셰일 저류층의 숙성도는 GOR과 케로젠 함량 등을 통해 추정할 수 있다.

한편 셰일 저류층에서의 GOR 및 케로젠 함량에 따른 속도 및 밀도 변화를 알아보기 위해 암석물리학적 모델(Rock Physics Model; RPM)을 설계하였다. 여기서 암석물리학적 모델이란 암석의 물성과 탄성파속도간의 관계를 이용한 모델로, 저류층 내 물성 변화(공극률, 압력, 온도, 유체)에 따른 암석의 탄성상수 및 속도의 변화를 정량적으로 모델링을 할 수 있는 방법이다. 셰일 저류층의 암석물리학적 모델을 설계할 때에는 이방성을 고려해주어야 한다. 셰일 저류층의 이방성은 크게 여러 개의 얇은 수평층으로 인해 수평방향으로는 동일한 값을 가지나 수직방향으로는 다른 값을 가지는 수직 가로 등방성(Vertical Transverse Isotropy; VTI)과 자연균열대에 의해 수직방향으로는 동일한 값을 가지나 수평방향으로는 다른 값을 가지는 수평 가로 등방성(Horizontal Transverse Isotropy; HTI)이 있다. 이 중에서 분석하고자 하는 셰일 저류층인 Bakken Shale은 여러 개의 얇은 수평층으로 이루어져 있는 수직 가로 등방성을 띤다. 이를 고려하여 암석물리학적 모델을 수립하는 기법으로 Backus averaging 기법(Schoenberg and Muir, 1989)을 이용하였다. Backus averaging 기법은 케

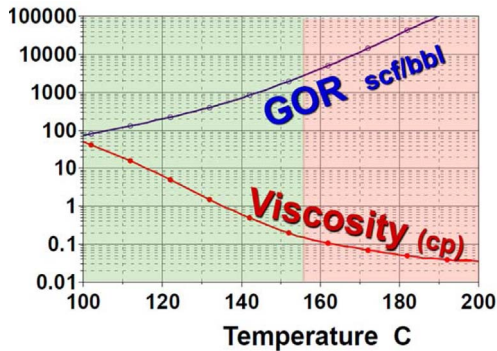


Fig. 1. Relationship between GOR and viscosity (taken from Cander, 2013).

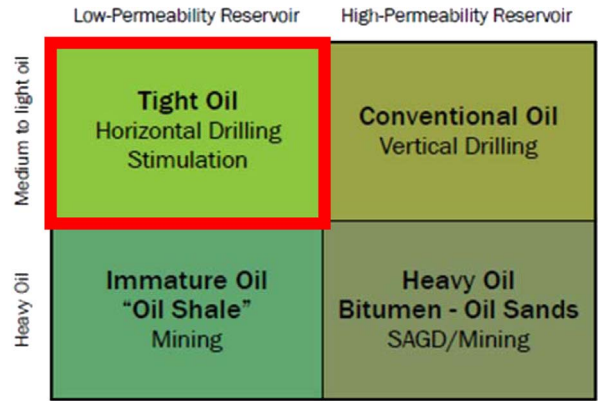


Fig. 2. Production performance in Canadian Society for Unconventional Resources (modified from <https://www.csur.com>).

로젠의 함량을 고려한 여러 개의 얇은 판상구조로 이루어진 매질의 stiffness를 구하는 방법이며 저 주파수이고 파장이 층들의 두께보다 길 때에 유효하다고 알려져 있다. 특히 정확한 값을 측정할 수는 없지만 속도의 상한과 하한에 대한 정보는 비교적 정확하게 제시해주므로 이 기법을 사용하였다 (Carcione *et al.*, 2011).

GOR 변화에 따른 속도 변화 및 AVO 반응 분석에 대한 이전의 연구는 셰일층보다 비교적 등방성을 띠고 있는 사암층에 대해서 진행되어 왔다. Hwang and Lellis (1988)는 GOR 변화에 따른 속도 변화에 대해 분석하였고 Clark (1992)은 GOR 변화에 따른 AVO 반응 분석을 실시하였다. 최근 들어 셰일 저류층 개발이 많은 관심을 받으면서 이방성을 띠는 셰일 저류층에 대해서도 연구가 진행되었는데 단지 케로젠 함량 및 유체 포화도 변화에 따른 속도 변화 및 AVO 반응 분석에 대해서만 분석이 되었다. Carcione (2001)와 Sayers *et al.* (2013)은 각각 Kimmeridge Shale과 Eagleford Shale에서의 케로젠 함량에 따른 속도 변화 및 AVO 반응 분석을 하였다. Carcione *et al.* (2011)은 Bakken Shale 및 Kimmeridge Shale에서 케로젠 함량에 따른 속도 변화를 이방성에서의 암석물리학적 모델 기법인 modified Gassmann's Equation과 Backus averaging 기법을 비교하여 분석하였다. 또한 Cacione and Avseth (2014)에서는 케로젠 함량뿐만 아니라 유체 포화도 변화에 따른 속도 변화 및 AVO 반응 분석을 하였다.

따라서 이 논문에서는 숙성도를 결정하는 요소로 케로젠뿐만 아니라 GOR이 오일을 함유하는 셰일 저류층의 속도 및 밀도를 어떻게 변화시키는가에 대해 살펴보고자 하였다. 숙성도를 결정하는 것뿐만 아니라 속도에 따른 GOR을 구분할 수 있다면 중질오일과 경질오일을 구분하는데에 유용하다. 먼저 수직 가로 등방성을 반영한 셰일 저류층의 암석물리학적 모델 중의 하나인 Backus averaging 기법을 설립하기 위해서 유체(오일, 가스)와 케로젠의 물성을 구하였다. 그러한 후에 Backus averaging 기법을 이용하여 케로젠, GOR을 변수로

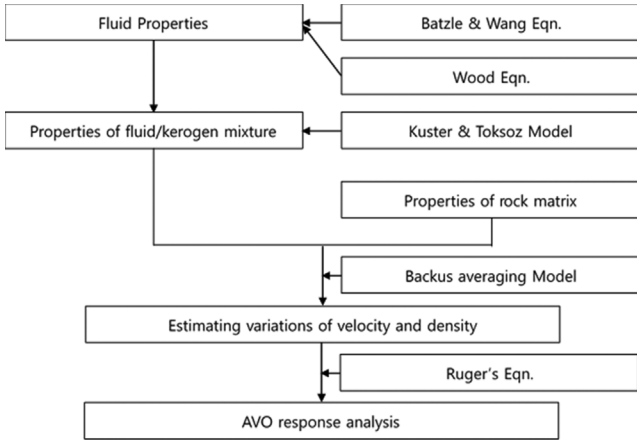


Fig. 3. The flowchart of the analysis of the change in velocity and AVO response with the saturation of kerogen and GOR in shale reservoir.

두고 속도 및 밀도값을 도출하였다. 도출한 속도 및 밀도를 이용하여 AVO 반응 분석을 실시하였다(Fig. 3).

셰일 저류층의 암석물리학적 모델 설계

셰일의 수직 가로 등방성을 고려하기 위하여 여러 개의 얇은 판상구조로 이루어진 층의 stiffness를 구하는 Backus averaging 기법을 이용하였다. Backus averaging 기법을 이용하기 위해서는 암석입자와 물, 공극을 점유하는 유체(오일, 가스)와 케로젠 각각의 stiffness 값들이 필요하다. 이 때 암석입자는 이방성으로, 공극 내 유체 및 케로젠 혼합물은 등방성이라고 가정하였다. 오일과 가스의 체적탄성률(K) 및 밀도(ρ)는 Batzle & Wang's Equation (Batzle and Wang, 1992)을 이용하여 구하였으며 오일의 체적탄성률 및 밀도는 GOR에 따라 달라진다. Batzle & Wang's Equation을 이용하여 구한 오일과 가스의 체적탄성률 및 밀도는 Wood's Equation (Avseth *et al.*, 2005)을 이용하여 전체적인 유체의 체적탄성률과 밀도를 구하는데 사용되었다. 케로젠의 체적탄성률 및 전단탄성률 (Shear Modulus; μ), 밀도는 Carcione and Avseth (2014)의 논문에서 제시한 측정값들을 이용하였다. 공극 내 유체와 케로젠의 밀도 및 탄성계수가 구해지면 Kuster & Toksoz Model (Kuster and Toksoz, 1974)을 이용하여 공극 내 유체 및 케로젠 혼합물의 stiffness를 구할 수 있다. 암석입자의 stiffness값은 Carcione *et al.* (2011)의 측정값을 이용하였다.

오일의 밀도와 체적탄성률

오일의 암석물리학적 밀도와 체적탄성률을 구하기 위해서는 용해가스를 고려해야 하며 이를 위해서는 GOR에 대한 정보가 필요하다. 또한 온도와 압력, 그리고 오일의 비중을 고려해주어야 한다. 오일의 밀도(ρ_{oil} ; g/cm³)와 속도(V_{oil} ; m/s)는 Batzle & Wang's Equation 중에서 오일에 대한 식을 이용하

여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{oil} = \frac{\rho_s + (0.00277P - 1.71 \times 10^{-7} P^3)(\rho_s - 1.15)^2 + 3.49 \times 10^{-4} P}{0.972 + 3.81 \times 10^{-4} (T + 17.78)^{1.175}} \quad (1)$$

$$V_{oil} = 2096 \sqrt{\frac{\rho_{ps}}{2.6 - \rho_{ps}} - 3.7T + 4.64P} + 0.0115 \left[\sqrt{\frac{18.33}{\rho_{ps}} - 16.97} - 1 \right] TP \quad (2)$$

P (MPa)는 압력, T (°C) 온도를 의미한다.

위의 두 식에서 포화밀도(ρ_s)와 유사밀도(ρ_{ps})는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_s = \frac{\rho_o + 0.0012R_G G}{B_o} \quad (3)$$

$$\rho_{ps} = \frac{\rho_o}{(1 + 0.001R_G)B_o} \quad (4)$$

R_G (Litre/Litre), ρ_o (g/cm³), 는 각각 GOR, 참조밀도이고 B_o 는 용적계수이며 다음과 같이 구한다.

$$B_o = 0.972 + 0.00038 \left[2.495R_G \sqrt{\frac{G}{\rho_o}} + T + 17.8 \right]^{1.175} \quad (5)$$

G 는 가스의 비중을 말한다. ρ_{oil} 과 V_{oil} 이 구해지면 다음 식과 같이 오일의 체적탄성률(K_{oil} ; GPa)을 구할 수 있다.

$$K_{oil} = \rho_{oil} V_{oil}^2 \times 10^{-6} \quad (6)$$

가스의 밀도와 체적탄성률

가스의 체적탄성률과 밀도 또한 온도와 압력, 그리고 비중을 고려해주어야 한다. 가스의 체적탄성률(K_{gas} ; GPa)과 밀도(ρ_{gas} ; g/cm³)는 Batzle & Wang's Equation 중에서 가스에 대한 식을 이용하여 구할 수 있다.

가스의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho_{gas} \cong \frac{28.8GP}{(ZR(T + 273.15))} \quad (7)$$

G 는 가스의 비중(API)이고 R 은 가스상수이며 Z 는 압축계수이다.

$$Z = [0.03 + 0.00527(3.5 - T_{pr})^3] P_{pr} + (0.642T_{pr} - 0.007T_{pr}^4 - 0.52) + E \quad (8)$$

$$E = 0.109(3.85 - T_{pr})^2 \exp \left\{ - \left[0.45 + 8 \left(0.56 - \frac{1}{T_{pr}} \right)^2 \right] \frac{P_{pr}^{1.2}}{T_{pr}} \right\} \quad (9)$$

이 때 유사 환산 온도(T_{pr})와 유사 환산 압력(P_{pr})을 알아야 하는데 다음과 같이 구한다.

$$T_{pr} = \frac{T + 273.15}{94.72 + 170.75G} \quad (10)$$

$$P_{pr} = \frac{P}{4.892 - 0.4048G} \quad (11)$$

가스의 체적탄성률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{gas} \cong \frac{P}{\left(1 - \frac{P_{pr}}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P_{pr}}\right)_T} \frac{\gamma_o}{1000} \quad (12)$$

여기서,

$$\gamma_o = 0.85 + \frac{5.6}{P_{pr} + 2} + \frac{27.1}{(P_{pr} + 3.5)^2} - 8.7 \exp[-0.65(P_{pr} + 1)] \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial P_{pr}}\right)_T = 0.03 + 0.00527(3.5 - T_{pr})^3 + 0.109(3.85 - T_{pr})^2 F \quad (14)$$

$$F = -1.2 \frac{P_{pr}^{0.2}}{T_{pr}} \left[0.45 + 8 \left(0.56 - \frac{1}{T_{pr}} \right)^2 \right] \exp \left\{ - \left[0.45 + 8 \left(0.56 - \frac{1}{T_{pr}} \right)^2 \right] \frac{P_{pr}^{1.2}}{T_{pr}} \right\} \quad (15)$$

이다.

공극 내 유체의 물성 계산

공극 내 유체의 전체적인 체적탄성률(K_f)과 밀도(ρ_f)는 포화도(Saturation; S)를 고려한 Wood's Equation을 통해 구할 수 있다.

$$K_f = \left(\frac{S_g}{K_g} + \frac{S_o}{K_o} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$\rho_f = S_g \rho_g + S_o \rho_o \quad (17)$$

여기서 S_g 는 가스의 포화도, S_o 는 오일의 포화도, ρ_f 는 공극 내 유체의 밀도, ρ_g 는 가스의 밀도, ρ_o 는 오일의 밀도를 의미한다.

공극 내 유체 및 케로젠 혼합물의 stiffness 계산

혼합물의 stiffness는 Kuster & Toksoz model (1974)을 이용하여 구한다.

$$\frac{c_{13}^{if} + \frac{2}{3} c_{55}^{if}}{K_k} = \frac{1 + [4\mu_k(K_f - K_k) / (3K_f + 4\mu_k K_k)] S_f}{1 - [3(K_f - K_k) / (3K_f + 4\mu_k)] S_f} \quad (18)$$

$$\frac{c_{55}^{if}}{\mu_k} = \frac{(1 - S_f)(9K_k + 8\mu_k)}{9K_k + 8\mu_k + S_f(6K_k + 12\mu_k)} \quad (19)$$

여기서 c_{xy}^{if} ($x = 1, 5, y = 3, 5$)는 공극 내 유체 및 케로젠 혼합물의 stiffness, S_f 는 유체의 포화도, K_k 는 케로젠의 체적탄성률, μ_k 는 케로젠의 전단탄성률을 의미한다.

그리고 공극 내 유체 및 케로젠 혼합물의 밀도(ρ_{if})는 다음과 같이 구한다.

$$\rho_{if} = (\phi_k \rho_k + \phi_f \rho_f) / (\phi_k + \phi_f) \quad (20)$$

포화암석의 탄성파속도 계산

세일층은 암석입자와 공극 내 유체 및 케로젠 혼합물로 구성되는데, 이 때 두 구성물들은 판상구조를 이루면서 존재하고 있다고 가정한다. Backus averaging 기법을 이용하면 수직가로 등방성을 띠는 층에서의 각 방향에 대한 대표적인 stiffness ($\overline{c_{xy}}$)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{c_{11}} &= \langle c_{11} - c_{13}^2 c_{33}^{-1} \rangle + \langle c_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle c_{33}^{-1} c_{13} \rangle^2 \\ \overline{c_{13}} &= \langle c_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle c_{33}^{-1} c_{13} \rangle \\ \overline{c_{33}} &= \langle c_{33}^{-1} \rangle^{-1} \\ \overline{c_{55}} &= \langle c_{55}^{-1} \rangle^{-1} \\ \overline{c_{66}} &= \langle c_{66} \rangle \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle$ 는 가중평균을 의미한다. 유체 및 케로젠 혼합물의 비율은 $\phi_k + \phi_f$ 이고 암석입자 및 물의 비율은 $1 - \phi_k - \phi_f$ 이다. 이 때 각 방향에 대한 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{33} &= V_p(0^\circ) = \sqrt{\overline{c_{33}} / \rho} \\ V_{11} &= V_p(90^\circ) = \sqrt{\overline{c_{11}} / \rho} \\ V_{55} &= V_s(0^\circ) = \sqrt{\overline{c_{55}} / \rho} \\ V_{66} &= V_s(90^\circ) = \sqrt{\overline{c_{66}} / \rho} \end{aligned} \quad (22)$$

P 는 P파, S 는 S파를 의미하고 0° 은 층에 대해 수직방향, 90° 은 층과 수평방향을 의미한다. 그리고 포화된 암석의 밀도(ρ , g/cm³)는 다음과 같다.

$$\rho = (1 - \phi) \rho_m + \phi \rho_{if} \quad (23)$$

ρ_m 은 암석입자의 밀도를 나타낸다.

케로젠, GOR에 따른 속도 및 밀도 변화

다음으로 세일 저류층에서의 케로젠과 GOR의 변화에 따른 속도 및 밀도 변화를 계산하였다. 케로젠-오일-가스 혼합물의

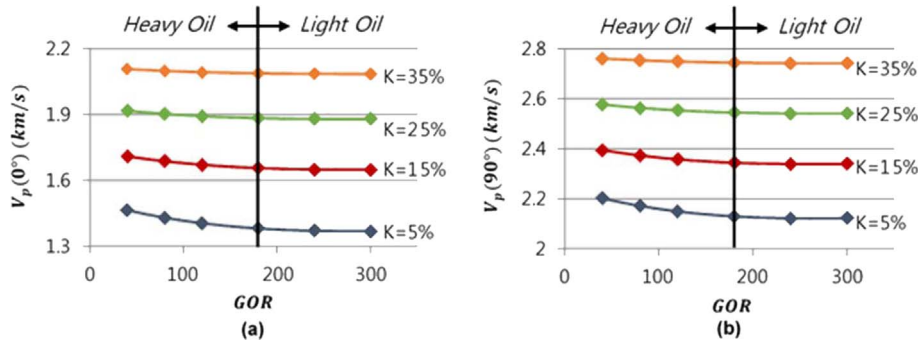


Fig. 4. (a) Bedding-normal P-wave velocities ($V_p(0^\circ)$) versus GOR for different values of kerogen contents. (b) Bedding-parallel P-wave velocities ($V_p(90^\circ)$) versus GOR for different values of kerogen contents.

부피비는 $\phi_k + \phi_f = \phi_k + \phi_o + \phi_g$, 암석입자와 물의 부피비는 $\phi_s + \phi_w$ 로 나타낼 때 공극률은 $\phi = \phi_w + \phi_o + \phi_g$ 이고 $\phi_s + \phi_w + \phi_k + \phi_o + \phi_g = 1$ 로 나타낼 수 있다(Carcione and Avseth, 2014). 속도 및 밀도는 암석물리학적 모델방법 중의 하나인 Backus averaging 기법을 이용하여 구하는데, 이 기법은 케로젠-오일-가스과 암석입자-물을 하나의 대표적인 stiffness를 구하는 것이다. 또한 암석입자의 stiffness와 밀도가 필요한데 이 연구에서는 Carcione *et al.* (2011) 논문에서 측정된 Bakken Shale에서의 물성 값을 참조하였다. 또한 케로젠의 체적탄성률, 전단탄성률, 밀도는 Carcione and Avseth (2014) 논문을 참조하여 체적탄성률은 6.6 GPa 전단탄성률은 2.7 GPa, 밀도는 1.4 g/cm³으로 설정하였다. 오일과 가스의 밀도와 체적탄성률을 구하기 위해서는 압력, 온도, 가스비중, 오일의 참조밀도를 알아야 하는데 이들 또한 Carcione and Avseth (2014)의 논문을 참조하여 $P = 80$ MPa, $T = 126$ °C, $G = 0.95$ API, $\rho_o = 0.779$ g/cm³으로 설정하였다. 전체 매질 중 케로젠-오일-가스가 차지하는 부피비는 0.4, 암석입자에 속박되어 있는 물이 차지하는 전체 매질에 대한 부피비는 0.05로 고정하였다. GOR 값은 40, 80, 120, 180, 240, 300 (Litre/Litre), 케로젠 함량은 5%, 15%, 25%, 35%로 두고 계산하였다. 먼저 케로젠, GOR 변화에 대한 속도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 케로젠과 GOR에 따른 층에 대해 수직방향의 P파 속도(Fig. 4a)와 수평방향의 P파 속도 (Fig. 4b) 모두 비슷한 변화 양상을 보였다. GOR이 증가함에 따라 속도는 약간 감소하는 반면, 케로젠이 증가할수록 유체의 부피비가 작아지는 효과를 가져오므로 속도가 상대적으로 증가한다. 중질오일과 경질오일의 경계점이 되는 GOR이 180 (Litre/Litre)일 때 케로젠이 5%에서 35%로 증가함에 따른 속도의 변화를 비교해보면, 층에 대해 수직방향인 P파 속도는 1.38 km/s²에서 2.09 km/s²까지 51% 증가하였고, 층에 대해 수평방향인 P파 속도는 2.13 km/s²에서 2.74 km/s²까지 29% 증가하였다. 즉, 속도 구분을 통해 케로젠의 숙성도를 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 한편, 케로젠 함량이 감소할수록 유체의 부피비가 증가하는데 이로 인해 유체의 영향을 많이 받으므로 GOR에 따

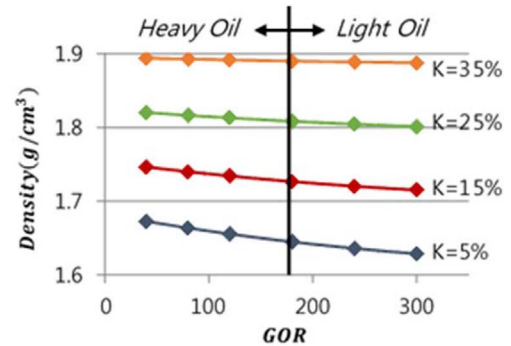


Fig. 5. Density versus GOR for different values of kerogen contents.

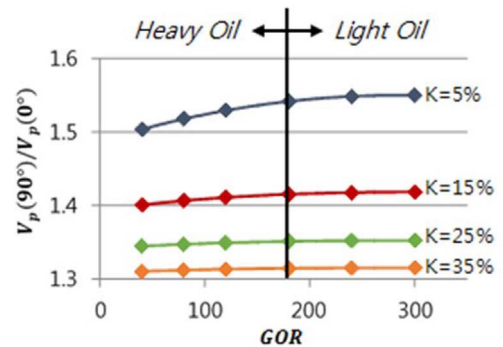


Fig. 6. The ratios of bedding-normal to bedding-parallel velocities versus GOR for different values of kerogen contents.

른 속도 변화가 증가한다. 케로젠이 5%일 때를 보면, 중질오일(GOR 40)에서의 층에 대해 수직방향인 P파 속도는 1.46 km/s²로 측정되었지만 경질오일(GOR 300)에서는 1.36 km/s²으로 측정되었다. 즉, 현장에서 속도를 측정함으로써 GOR을 구분하는 데에 도움이 될 수 있다. Fig. 5에서 보면, GOR이 증가함에 따라 밀도가 약간 작아지는 반면, 케로젠이 증가하면서 유체가 차지하는 부피비는 감소하므로 밀도가 증가한다. Fig. 6에서 보면, 케로젠 함량이 높을 때에는 속도가 거의 일정한 반면에 케로젠 함량이 낮을 때에는 속도의 변화율이 크므로 케로젠 함량이 낮을 때에 수직방향과 수평방향의 P파

속도비 ($V_p(90^\circ)/V_p(0^\circ)$)의 변화율이 더 크게 나타난다. 케로젠 함량이 5%일 때에는 속도비가 1.5에서 1.55까지 3.3% 증가 하였지만 케로젠 함량이 35%일 때에는 거의 일정한 값으로 측정되었다.

케로젠, GOR에 따른 AVO 반응 분석

세일 저류층에서의 AVO

AVO란 오프셋변화에 따른 진폭변화를 의미한다. AVO 반응은 입사각에 따른 반사계수의 변화양상에 따라 Class 1, Class 2, Class 3 그리고 Class 4로 나뉜다(Fig. 7). AVO 반응 분석을 통하여 하부층의 임피던스를 구할 수 있는데 이에 따라 암석의 유체, 공극률, 밀도, 그리고 S파에 대한 정보를 구할 수 있다. 이 중에서 Class 4는 신호의 위상이 음의 부호를 가지며 오프셋이 증가할수록 진폭의 절대값이 작아지는 양상을 보인다(Fig. 7). Castagna *et al.* (1995)에 따르면 수직 입사 반사계수에 해당하는 Y-절편의 절대값이 매우 크고 그에 비해 포아송비의 변화량이 작을 경우 Class 3가 역전되는 Class 4의 양상이 나타난다고 했다. Yenugu and Han (2013)의 논문에서 따르면 숙성도에 따른 AVO 반응 분석을 수행한 결과, Class 4 양상을 띠었고 Carcione와 Avseth (2014)의 논문에서도 가스포화도에 따른 AVO 반응 분석을 수행한 결과, Class 4의 양상을 띠었다고 했다.

Aki-Richard's Equation을 이방성 변수인 δ 와 ε 를 고려하면 수직 가로 등방성일 때의 반사계수를 구할 수 있다고 하였다(Thomsen *et al.*, 1993). 이에 Ruger (2002)가 이방성 변수들을 적용한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$R_m(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_{p0}}{V_{p0}} - \left(\frac{2V_{s0}}{V_{p0}} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \Delta\delta \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_{p0}}{V_{p0}} + \Delta\varepsilon \right) \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (24)$$

여기서,

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}}, \quad \delta = \frac{(c_{13} + c_{55})^2 - (c_{33} - c_{55})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{55})}, \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1,$$

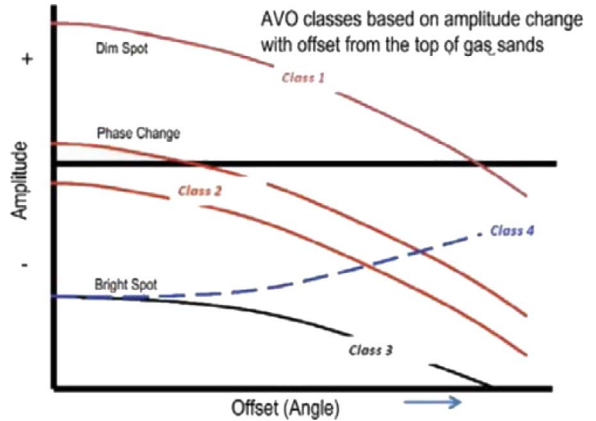


Fig. 7. The four AVO classes related to specific geologic settings (modified from Forrest *et al.*, 2010).

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 \quad (25)$$

이고 Z는 P파 임피던스, G는 S파 임피던스 그리고 θ 는 입사각을 의미한다.

케로젠, GOR에 대해 입사각에 따른 반사계수

Bakken shale 상부에서의 입사각에 따른 반사계수를 구하기 위해선 Bakken shale 상부의 석회암의 속도를 알아야 하는데 이는 Yenugu and Han (2013)의 논문을 참조하여 P파 속도($V_p = 5.28$ km/s), S파 속도 ($V_s = 2.81$ km/s), 밀도($\rho = 2.5$ g/cm³)를 정하였다. 또한 석회암층은 등방성을 띠다고 가정하므로 이방성 변수 값(δ, ε)을 0으로 두었다. 세일층의 속

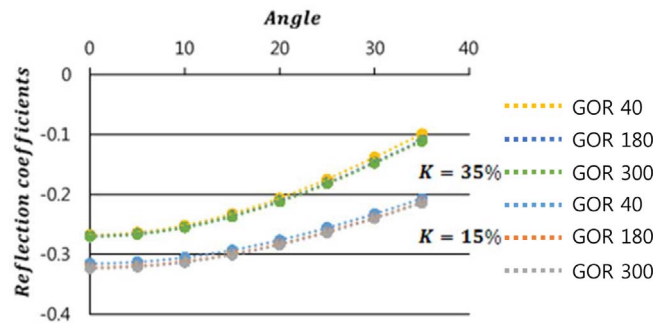


Fig. 8. Reflection coefficients versus incidence angle depending on different values of kerogen and GOR.

Table 1. Material properties of Bakken shale.

Kerogen Volume Fraction	GOR	P-wave velocity (km/s)	S-wave velocity (km/s)	Density (g/cm ³)	ε	δ
15%	40	1.71	0.61	1.75	0.48	0.48
	180	1.66	0.60	1.73	0.50	0.48
	300	1.65	0.59	1.72	0.51	0.47
35%	40	2.11	1.09	1.89	0.36	0.88
	180	2.09	1.05	1.89	0.36	0.83
	300	2.08	1.04	1.89	0.37	0.82

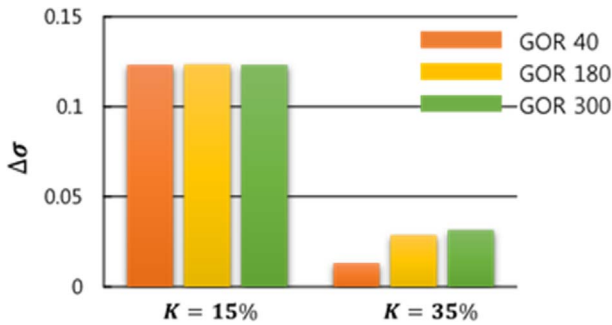


Fig. 9. Change in Poisson's ratio depending on kerogen contents and GOR. $\Delta\sigma$ is difference of Poisson's ratio between limestone and shale.

도, 밀도, 이방성 변수 값은 앞 장에서 분석 결과를 사용하였다(Table 1). Fig. 8에서 그래프의 양상을 보면 Class 4의 경향이 나타났다. Y-절편 값은 -0.3 내외 였으나 포아송비의 변화량은 0.03에서 0.12밖에 되지 않아 기울기가 항상 양수로 나왔다. 케로젠 함량이 높을 때 포아송비의 변화율이 매우 작으므로(Fig. 9) 기울기가 더 크게 나타났다. 케로젠 함량이 15%일 때에는 35%일 때보다 Y-절편의 절대값이 더 크게 나타났다. 케로젠 함량이 15%일 때에는 Y-절편의 절대값이 약 0.32였지만 케로젠 함량이 35%일 때에는 0.27이었다. 또한 GOR이 증가할수록 속도가 감소하므로 상부층과의 임피던스 차이가 커지고, 이로 인해 Y-절편의 절대값이 더 커졌다(Fig. 8).

결론

이 연구에서는 수직 가로 등방성을 띠는 세일 저류층에서 케로젠의 함량과 GOR에 따른 탄성파속도의 변화와 AVO 반응을 암석물리학적 모델을 이용하여 분석하였다. 암석물리학적 모델을 만들 때 수평방향과 수직방향에 대한 P파 속도와 S파 속도는 Backus averaging 기법을 이용하여 구하였다. GOR이 증가함에 따른 속도는 약간 작아지는 반면, 케로젠이 증가함에 따른 속도는 커졌다. GOR이 180 (Litre/litre)일 때 케로젠이 5%에서 35%로 증가함에 따른 속도의 변화를 비교해보면, 층에 대해 수직방향인 P파 속도는 1.38 km/s²에서 2.09 km/s²까지 51% 증가하였고, 층에 대해 수평방향인 P파 속도는 2.13 km/s²에서 2.74 km/s²까지 29% 증가하였다. 즉, 속도 차이를 통해 케로젠의 숙성도를 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 한편 케로젠 함량이 낮을수록 유체의 영향이 커지므로 GOR에 대한 속도 변화량이 커진다. 케로젠이 5%일 때를 보면, 중질오일(GOR 40)에서의 층에 대해 수직방향인 P파 속도는 1.46 km/s²로 측정되었지만 경질오일(GOR 300)에서는 1.36 km/s²로 측정되었다. 케로젠 함량이 높을 때에는 속도 차이를 통하여 중질오일과 경질오일을 구분하기는 힘들지만 케로젠 함량이 낮을 때에는 비교적 중질오일과 경질오

일을 구분할 수 있었다. AVO 반응 분석을 해본 결과, GOR이나 케로젠 함량 변화와 관계없이 이 연구에서는 Class 4 양상을 띠었다. 다만, 케로젠 함량이 클수록 Y-절편의 절대값이 감소하고 기울기가 증가하였다. GOR의 증가는 Y-절편의 절대값을 증가시켰지만 그 정도는 매우 작았다. 케로젠 함량이 낮고 GOR이 클수록 Y-절편 값이 음으로 크므로 이를 통해 케로젠 함량을 비교할 수 있으므로 숙성도를 어느 정도 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134010200520)입니다.

References

Aki, K., and Richards, P. G., 1980, *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, WH Freeman and Co.

Avseth, P., Mukerji, T., and Mavko, G., 2005, *Quantitative seismic interpretation*, Cambridge University Press.

Batzle, M. L., and Wang, Z., 1992, Seismic properties of pore fluids, *Geophysics*, **57**, 1396-1408.

Canada Society for Unconventional Resources, Understanding tight oil, Available from <http://www.csur.com/resources/understanding-booklets> [accessed 01.09.15]

Cander, H., 2013, Finding Sweet Spots in Shale Liquids and Gas Plays with Lessons from the Eagle Ford Shale, *AAPG Geoscience Technology Workshop*.

Carcione, J. M., 2001, AVO effects of a hydrocarbon source-rock layer, *Geophysics*, **66**, 419-427.

Carcione, J. M., Helle, H. B., and Avseth, P., 2011, Source-rock seismic-velocity models Gassmann versus Backus, *Geophysics*, **76**, N37-N45.

Carcione, J. M., and Avseth, P., 2014, Rock-physics templates for hydrocarbon source rocks, *Geophysics*, **80**(5), D481-D500.

Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Han, D.-H., 1995, Fluid effects on bright spot and AVO analysis, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1119-1121.

Clark, V. A., 1992, The effect of oil under in-situ conditions on the seismic properties of rocks, *Geophysics*, **57**(7), 894-901.

Forrest, M., Roden, R., and Holeywell, R., 2010, Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends, *The Leading Edge*, **29**(5), 570-574.

Hwang, L. F., and Peter J. Lellis, 1988, Bright Spots related to High GOR Oil Reservoir in Green Canyon, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 761-763.

Kuster, G. T., and Toksoz, M. N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, Part I. Theoretical formulations, *Geophysics*, **39**, 587-606.

Ruger, A., 2002, Reflection coefficients and azimuthal AVO

- analysis in anisotropic media, *Society of Exploration Geophysicists*, **10**, 39-62.
- Sayers, C. M., Guo, S., and Silva, J., 2013, Sensitivity of the elastic anisotropy and seismic reflection amplitude of the Eagle Ford Shale to the presence of kerogen, *Geophysical Prospecting*, **63**(1), 151-165.
- Schoenberg, M., and F. Muir, 1989, A calculus for finely layered media, *Geophysics*, **54**, 582-590.
- Thomsen, L., Castagna, J., and Backus, M., 1993, Weak anisotropic reflections, in Offset dependent reflectivity, *Eds, Soc. Expl. Geophys*, 103-114.
- Yenugu, M., and Han, D.-H., 2013, Seismic characterization of kerogen maturity, An example from Bakken shale, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.