

횡적등방성 특성을 갖는 단양 석회암의 수평응력차비 고찰

장성형^{1,3} · 황세호^{2,3*} · 신제현² · 김태연^{1,3}

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

³한국과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

Differential Horizontal Stress Ratio for Danyang Limestone with Vertical Transversely Isotropy

Seonghyung Jang^{1,3}, Seho Hwang^{2,3*}, Jehyun Shin², and Tae Youn Kim^{1,3}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Petroleum and Marine Division

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Geological Environment Division

³University of Science and Technology, Petroleum Resources Technology

요약: 비전통 에너지 자원의 하나인 셰일가스를 개발하기 위해서는 수평시추와 수압파쇄가 필요하고 이 작업들은 수평응력차비가 낮은 곳에서 실시한다. 수평응력차비는 일반적으로 최대 수평응력과 최소 수평응력을 측정하여 구하지만 동탄성계수와 이방성변수를 활용하여 구하기도 한다. 본 연구에서는 단양 석회암 암석코어 시료실험을 통해 이방성 특성을 살펴보고 수평응력차비를 구하였다. 단양 석회암체에서 퇴적 층리면에 수직, 45도, 수평방향으로 된 암석코어 시료를 성형하고 P파 속도, S파 속도, 밀도를 측정 후 동탄성계수, 컴플라이언스계수를 구하여 수평응력차비를 계산하였다. 시료 분석결과 수평응력차비는 약 0.185로 제시하였다. 단양 석회암은 층리 대칭축에 따라서 P파, S파의 속도가 변화하여 Thomsen 매개변수 값도 이와 같은 특징을 잘 반영하고 있으며 수평응력차비는 포아송 비보다 컴플라이언스 값에 영향을 많이 받고 있다. 향후 SH파 속도를 측정할 경우 좀 더 정확한 암석물리 물성을 구할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 수평응력차비, 동탄성계수, 컴플라이언스, 단양석회암, 실내코어시험

Abstract: To develop shale play which is one of unconventional energy resources, horizontal drilling and hydraulic fracturing are necessary and those are applied to the place where the differential horizontal stress ratio (DHSR) is low. The differential horizontal stress ratio is generally calculated by the minimum and maximum horizontal stress, but it is also calculated from dynamic elastic constants and anisotropic parameters. In this study we analyzed anisotropic properties through the core samples from Danyang limestone and calculated DHSR. The three types of core samples shaped in three directions (vertical, parallel and 45 degree to bedding) were used for laboratory test. We measured P-, S-wave velocities, and density and then calculated dynamic elastic constants, compliance and DHSR. According to the results of the core sample analysis the calculated DHSR is 0.185. Thomsen parameters of the Danyang limestone used in this study are characterized by the P- and S-wave velocities varying along the bedding symmetry axis. It is observed that the DHSR value is more affected by the change in compliance value than the Poisson's ratio. It is necessary to measure SH-wave velocity for more correct petrophysical properties.

Keywords: differential horizontal stress ratio (DHSR), dynamic elastic constants, compliance, Danyang Limestone, laboratory core test

Received: 31 August 2017; Revised: 29 November 2017;

Accepted: 30 November 2017

*Corresponding author

E-mail: hwangse@kigam.re.kr

Address: 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, 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.

서 론

비전통 에너지자원중 하나인 셰일가스를 개발하기 위해서는 셰일가스 집중구간(sweet spot)에 수평시추와 수압파쇄 기술을 적용한다(Hwang and Jin, 2012; Zou, 2013; Ahmed and Meehan, 2016). 셰일가스층 집중 구간에 대한 수압파쇄 설계는 지구물리적, 지구화학적 분석이 필요하며 특히 셰일 층은 이방성 특징을 보이고 있어 이를 고려한 분석이 필요하다. 셰일 층의 탄성과 속도 이방성 특성은 이방성 측정값에 대해 복잡한 해석이 존재할 만큼 다양한 원인을 지니고 있다. 셰일 층의 탄성과 속도 이방성 원인은 판상구조를 갖는 점토의 배열상태, 유기물, 응력, 균열 등이다. Hornby (1998)와 Sayers (2008)은 셰일 층의 수직방향으로 최대 응력이 가해지면 점토 내의 압밀이 증가되고 이에 따라 판상구조 점토의 영향으로 이방성 특성이 나타나는 것으로 해석하였으며 Vernik and Nur (1992), Sondergeld *et al.* (2000)는 유기물 내용에 따라 이방성 성질이 증가한다는 연구결과를 발표한 바 있다. 셰일을 포함하여 대부분 암석은 불균질하고 이방성 특성을 지니고 있어 탄성과 속도, 탄성계수 등의 암석물성을 측정하기 위해서는 이방성 특성을 고려해야 한다. 이방성 특성은 탄성계수, 속도, 밀도 등의 물리적인 특성 값들이 방향에 따라 달라지는 현상으로 가장 단순한 형태의 이방성 특성은 횡적으로 퇴적된 구조를 갖는 횡적등방성 구조를 들 수 있다. 횡적등방성 구조는 대칭축이 수직인 수직 횡적등방성구조 (Vertical Transversely Isotropy: VTI), 대칭축이 수평인 수평 횡적등방성구조(Horizontal Transversely Isotropy: HTI) 그리고 대칭면이 임의 각도로 기울어진 경사 횡적등방성구조 (Tilted Transversely Isotropy: TTI)로 나눌 수 있다. 암석코어 특히, 셰일 층과 같은 퇴적층 암석코어의 경우, 탄성계수는 측정방향에 따라 많은 차이를 보이고 있어 세 방향(이방성 대칭축에 수직, 수평, 45도) 코어 시료를 이용하여 탄성계수를 측정해야 한다(Wang, 2002). 암석의 속도 이방성 측정 방법은 이방성 암석 시료를 다양한 방향에서 측정이 가능하도록 가공하여 측정하는 방법(Cheadle *et al.*, 1991; Wang, 2002) 또는 전통적인 방법으로 이방성 암석에서 이방성을 고려하여 각각 다른 각도에서 코어 시료를 채취하여 측정하는 방법(Johnston and Christensen, 1994; Hemsing, 2007), 그리고 이방성 암석에서 음원과 수신기를 각각 다른 면에 배치하여 입사각에 따른 속도변화를 연속적으로 측정할 후, 경사중합(slant stacking) 이용하여 이방성을 분석하는 방법을 들 수 있다. 이 가운데 세 번째는 3축의 위상속도와 파선속도를 결정하는 방법으로 시추공-지표탄성과 탐사법과 유사하다(Hwang *et al.*, 1994; Kebaili and Schmitt, 1997). 본 논문에서는 두 번째 방법을 채택하여 물성실험을 수행하였다. 이방성매질에서의 P파, S파 속도는 파동 전파방향과 입자극성에 따라 변화하고 각각 전파방향에서 하나의 P파와 직교하는 2개의 S파

가 존재한다. S파 극성은 방향에 따라 결정되는데, 수평으로 극성을 띠는 SH파는 입자의 진동방향이 층리에 평행한 경우를 말하고 수직으로 극성을 띠는 SV파는 입자 진동방향이 층리방향에 수직인 경우이다. VTI 매질에서 전파방향이 퇴적층리면에 수직인 경우, SH파와 SV파는 어느 방위에서나 속도가 같다(Lo *et al.*, 1986).

셰일가스 개발에서 수압파쇄를 설계하기 위해서는 최대 수평응력과 최소 수평응력으로 구성된 수평응력차비(Differential Horizontal Stress Ratio: DHSR)를 활용하는데 일반적으로 시추공에서의 원위치 응력 측정값을 이용한다. 이 경우 많은 시간과 비용이 발생하므로 Gray *et al.* (2012)는 이방성 동탄성계수와 컴플라이언스 계수(compliance, 강성행렬 역수)에서 수평응력차비를 계산할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 단양 석회암 블록에서 퇴적 층리면에 수평, 수직, 45도 세 방향 코어 시료를 제작하여 탄성과속도를 측정하고 이로부터 톰슨 이방성변수(Thomsen, 1986), 동탄성계수, 컴플라이언스 계수를 구하고 이를 활용하여 수평응력차비를 구하고자 한다.

강성행렬과 톰슨 이방성 변수

횡적등방성매질(VTI)에서 탄성계수(C)를 응력(σ)과 변형률(ϵ)과의 관계로 나타내면

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

이다. 여기서 $C_{12} = C_{21} = C_{11} - 2C_{66}$, $C_{66} = 1/2(C_{11} - C_{12})$ 이며, 모두 5개 탄성계수로 이루어져 있다. 횡적등방성매질에서 탄성과속도를 구하기 위해서 일반 파동방정식에 평면 조화파를 대입하면 크리스토펠(Christoffel) 방정식을 구할 수 있고 크리스토펠 방정식을 풀면 식(2)와 같이 탄성계수로부터 탄성과 P, SV 및 SH파에 대한 위상속도를 구할 수 있다(Tsvankin, 2001).

$$2\rho V^2(\theta) = (C_{11} + C_{55})\sin^2\theta + (C_{33} + C_{55})\cos^2\theta \quad (2)$$

$$\pm \sqrt{[(C_{11} - C_{55})\sin^2\theta - (C_{33} - C_{55})\cos^2\theta]^2 + 4(C_{13} + C_{55})^2\sin^2\theta\cos^2\theta},$$

$$V_{SH}(\theta) = \sqrt{\frac{C_{66}\sin^2\theta + C_{55}\cos^2\theta}{\rho}}. \quad (3)$$

여기서 θ 는 대칭축과 파동 전파방향 사이의 각도를 의미하고 식 (2)에서 “+”는 수직방향 P파, “-”는 수직방향 SV파를 의미한다. θ 가 “0”일 경우 파동전파 방향은 대칭축과 평행 즉, 퇴

적층에 대해 수직인 경우로 이때 탄성파속도는

$$V_{p0} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad (4)$$

$$V_{sv0} = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}} \quad (5)$$

이고, θ 가 “90”일 경우 파동전파 방향은 대칭축에 수직방향이며 이때 탄성파속도는

$$V_{p90} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}, \quad (6)$$

$$V_{sv90} = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}} \quad (7)$$

이다. 암석코어의 동탄성계수를 구하기 위해서는 탄성파속도와 밀도를 이용하는데 이방성 동탄성계수를 구하기 위해서는 수평방향, 수직방향 그리고 45도 방향 코어 시료에 대한 측정이 필요하며 이로부터 VTI 매질, HTI 매질, TTI 매질에서 탄성파속도를 측정, 동탄성계수를 계산할 수 있다. Fig. 1은 암석코어로부터 시료를 채취하는 방향을 나타내는 그림으로 퇴적

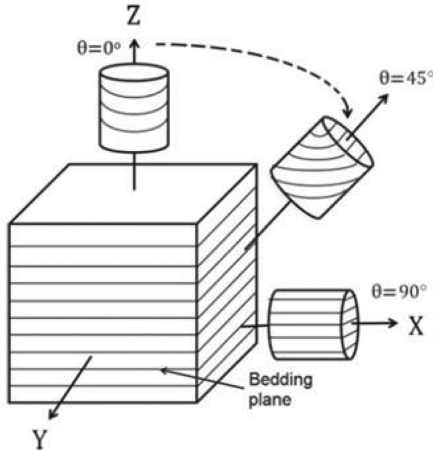


Fig. 1. Three-plug method for measuring transverse isotropy in core samples (after Martinez and Schmitt, 2013).

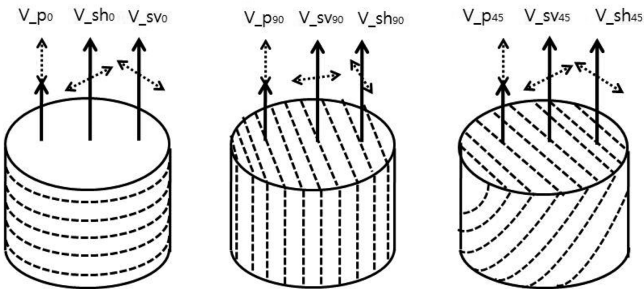


Fig. 2. Type of velocities measurements. Solid arrows represent directions of wave propagation; dashed arrows represent direction of particle motion; dashed lines in the sample indicate bedding planes in rock samples (after Lo et al., 1986).

방향에 대해 수직, 수평, 45도 방향으로 채취하는 것을 보여준다(Martinez and Schmitt, 2013). 세 방향에서 채취한 코어 시료는 Fig. 2와 같이 각각의 이방성매질에서 P파, SV파, SH파 측정방향에 따라 전파하는 탄성파속도를 측정할 수 있다(Lo et al., 1986).

탄성파속도로부터 동탄성계수를 구하기 위한 VTI 매질과 HTI 매질에서 강성행렬은 식 (8)과 (9)와 같이 표현된다.

$$C^{VTI} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11}-2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11}-2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$C^{HTI} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{33} & C_{13}-2C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{33}-2C_{44} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

여기서 VTI매질에서는 $C_{44} = C_{55}$, HTI 매질에서는 $C_{55} = C_{66}$ 이다.

위상속도와 탄성계수의 관계식은 Daley and Hron (1977), Thomsen (1986)에 따르면

$$V_p(\theta) = \left\{ \frac{C_{11}\sin^2\theta + C_{33}\cos^2\theta + C_{44} + \sqrt{M}}{2\rho} \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

$$V_{SV}(\theta) = \left\{ \frac{C_{11}\sin^2\theta + C_{33}\cos^2\theta + C_{44} - \sqrt{M}}{2\rho} \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

$$V_{SH}(\theta) = \left\{ \frac{C_{66}\sin^2\theta + C_{44}\cos^2\theta}{2\rho} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

이다. 여기서 M 은 $M = \{(C_{11}-C_{44})\sin^2\theta - (C_{33}-C_{44})\cos^2\theta\}^2 + (C_{13}+C_{44})^2\sin^2 2\theta$ 이고 θ 는 전파방향과 대칭회전축과의 사이 각도, ρ 는 밀도이다. 이로부터 VTI 매질에서 탄성계수는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$C_{11} = \rho V_{p90}^2, \quad (13)$$

$$C_{33} = \rho V_{p0}^2, \quad (14)$$

$$C_{44} = \rho V_{s0}^2, \quad (15)$$

$$C_{66} = \rho V_{SH,90}^2, \quad (16)$$

$$C_{13} = \sqrt{\frac{(4\rho V_{p45}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{44}) - (C_{11} - C_{33})^2}{4}} - C_{44}, \quad (17)$$

$$C_{12} = C_{11} - \rho V_{SH,90}^2 \quad (18)$$

여기서 V_{p0} , V_{p90} , V_{p45} 는 이방성 대칭축에 평행, 수직 그리고 45도 방향으로 진행하는 P파를 의미하고 $V_{SH,90}$ 는 이방성 대칭축에 수직으로 진행하는 SH파를 의미한다. 수직방향 대칭축을 갖는 코어 시료는 전형적인 VTI 매질 특성을 나타내며 이때 톰슨변수(Thomsen, 1986)는

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \quad (19)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} + C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}, \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, \quad (21)$$

으로 표현된다. 일반적으로 VTI 매질에서 대칭축이 0도인 경우, S파 수직성분 V_{SV} 속도와 S파 수평성분 V_{SH} 속도는 같으며, 대칭축이 90도인 경우는 V_{SH} 가 V_{SV} 보다 속도가 빠르다. 파동전파 방향과 입자진동 방향을 고려할 때 대칭축이 0, 45, 90로 증가 할수록 P파 속도도 증가한다. 이로 인해 탄성계수 C_{11} 이 C_{33} 보다 크고 C_{66} 이 C_{44} 보다 크게 나타나는 경향이 있다. 식 (21)과 같이 이방성 계수 γ 는 C_{44} , C_{66} 과 관계가 있고 C_{66} 은 SH파와 관계가 있어 SH파를 구해야 함을 알 수 있다.

한편, 수평방향 대칭축을 갖는 HTI 매질에서 톰슨 이방성 변수와 탄성계수와의 관계식은

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \quad (22)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{33} + C_{55})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{55})}, \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{55}}{2C_{55}}, \quad (24)$$

$$K = \frac{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{33}^2}{C_{11} + 2C_{33} + C_{12} - 4C_{13}}, \quad (25)$$

$$C_{33} = \rho V_{p0}^2, \quad (26)$$

$$C_{11} = \rho V_{p90}^2, \quad (27)$$

$$C_{44} = \rho V_{SH}^2, \quad (28)$$

$$C_{66} = \rho V_{SV}^2, \quad (29)$$

$$C_{13} = \sqrt{\frac{(4\rho V_{p45}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{44}) - (C_{11} - C_{33})^2}{4}} - C_{44}, \quad (30)$$

$$C_{12} = C_{11} - \rho V_{SH}^2 \quad (31)$$

이다. 따라서 이방성 암석코어의 동탄성계수는 Fig. 2와 같이 세 방향의 코어 시료에서 9개 탄성파속도를 측정해야 계산할 수 있음을 보여준다.

수평응력차비

수평응력 분포를 나타내는 수평응력차비는 최대 수평응력 (σ_H)과 최소 수평응력(σ_h)에서 계산할 수 있다. 수직응력(σ_V)과 최대/최소 수평응력관계가 $\sigma_V < \sigma_h < \sigma_H$ 인 경우는 대부분 역단층(트러스트) 지역에서 나타나며, 상재하중(overburden)이 많지 않은 지역에서는 수평균열이 수평방향으로 이동하는 경향을 보인다. $\sigma_h < \sigma_V < \sigma_H$ 경우에는 전단력이 발생하는 지역으로 수직균열이 수평으로 이동하는 경향을 보인다. $\sigma_h < \sigma_H < \sigma_V$ 경우에, 수직균열은 수직방향으로 이동하는 경향을 보인다(Wikel, 2011; Lei *et al.*, 2012). 최대 수평응력과 최소 수평응력이 같은 경우 DHSR은 0이 되어 모든 방향에서 인장력에 의한 미세균열(crack)이 발생하며 최대 수평응력이 최소 수평응력 보다 큰 경우, 전단력과 인장력에 의한 균열이 최대 수평응력방향으로 발생하게 된다. 이와 같이 수평응력과 수직응력은 수평시추와 수압파쇄에서 DHSR을 구하는데 필요한 기본 자료이며 수압파쇄는 DHSR이 낮은 지점에 실시한다. 수직, 수평 응력 값은 직접 측정해야 하지만 많은 비용과 시간이 필요하다. 따라서 수직 및 수평응력의 측정 대신에 동탄성계수와 이방성변수를 이용하여 수평응력차비를 구하기도 한다(Gray *et al.*, 2012; Jang, 2015).

수평응력차비는

$$DHSR = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H} \quad (32)$$

의 관계식으로 표현되며 식 (32)에서 DHSR 값은 $0 < DHSR < 0.05$ 범위에서 수압파쇄에 의한 균열생성이 양호하며 보통 탄성계수 영률(E)이 높은 경우와 포아송 비(ν)가 작은 구간을 수압파쇄 구간으로 선정한다(Gray *et al.*, 2012).

식 (32)에서 σ_H 는 최대 수평응력, σ_h 는 최소 수평응력을 나타내며 각각

$$\sigma_h = \sigma_V \frac{\nu(1+\nu)}{1+EZ_N - \nu^2}, \quad (33a)$$

$$\sigma_H = \sigma_V \frac{1+EN_N + \nu}{1+EZ_N - \nu^2} \quad (33b)$$

이다. 여기서 Z_N 은 수직방향 컴플라이언스 계수, E 는 영률, ν 는 포아송 비, σ_z 는 수직응력을 나타내고 일반적으로 식 (34)와 같이 밀도와 중력가속도의 함수로 구한다.

$$\sigma_V = G \int_0^z \rho(h) dh. \quad (34)$$

여기서 G 는 중력가속도, ρ 는 밀도, z 는 해당 지층의 깊이이다. 식 (33)을 식 (32)에 대입하여 수평응력차비를 강성행렬 역수로 나타내면

$$DHSR = \frac{EZ_N}{EZ_{N+1} + \nu} \quad (35)$$

이다. 암석 내부의 균열은 다양한 형태로 존재하지만 약이방성 (weak-anisotropy) 매질에서 균열이 수직으로 발달한 것으로 가정하면 즉 HTI 매질인 경우 수직방향 컴플라이언스 계수는 수직방향 균열변수와 라메상수로 표현할 수 있다. Bakulin *et al.* (2000)이 정의한 수직방향 컴플라이언스 계수는

$$Z_N = \frac{\Delta_N}{(\lambda + 2\mu) - \Delta_N(\lambda + 2\mu)} \quad (36)$$

이다. 여기서 Δ_N 는 수직방향 연약변수, λ 와 μ 는 라메상수를 나타낸다. 균열에 유체로 포화되지 않은 경우, 수직방향 연약변수를 P파, S파 속도, 이방성변수 ε 로 표현 할 수 있으며

$$\Delta_N = -\frac{\varepsilon}{2g(1-g)} \quad (37)$$

이 된다. 여기서 $g \equiv \mu/(\lambda + \mu) = V_s^2/V_p^2$ 이다. 따라서 식 (37)과 같이 수직방향 연약변수를 구하고, 식 (36)에서 수직 방향 컴플라이언스 계수를 구하여 식 (35)에 영률, 포아송 비, 수직방향 컴플라이언스 계수를 입력하면 수평응력차비를 구할 수 있다.

본 연구에서는 단양 석회암 블록에서 퇴적 층리면에 세 방향 코어 시료를 가공하여 탄성파속도를 측정하였고 동탄성계수와 이방성변수를 구하고 이로부터 수평응력차비를 계산하였다.

암석코어 시료의 물성실험

본 연구에서는 초음파 송수신기를 이용하여 암석코어 시료에 대한 P파, S파 속도, 밀도를 측정하여 동적 이방성 탄성계수를 계산하고자 하였다. 방향에 따른 동탄성계수의 변화특성을 확인하기 위해 퇴적 층리면에 0도, 45도, 90도 방향의 단양 석회암 코어 시료를 채취하여 P파, S파, 밀도를 측정하였다. 단양 석회암을 실험의 대상으로 선택한 이유는 퇴적층의 층리가 잘 확인되고 또한 실험에 필요한 시료확보에 용이하기 때문이다. 대형 석회암 블록에서 전문가의 도움을 받아 퇴



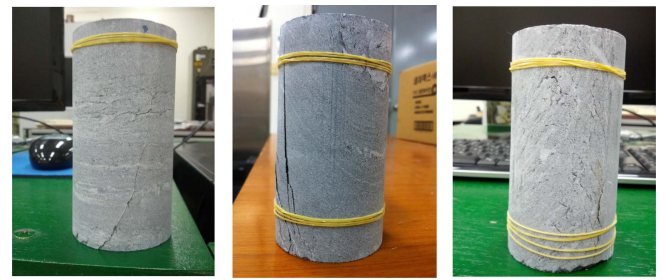
Fig. 3. Core samples from Danyang limestone after compressive experiment.

적 방향을 결정하고 가로×세로×높이 각각 30 cm의 정사각형으로 가공하여 방향에 따른 코어링으로 이방성 시료를 제작하였다. 세 방향 코어의 크기는 평균적으로 길이 105 mm, 지름 53 mm, 무게 634 g이며 수직방향으로 21개, 수평방향으로 22개, 45도 방향 18개로 Fig. 3과 같이 전체 59개를 제작하였다. 암석시료에 대한 물성측정은 한국인정기구(KOLAS: Korea Laboratory Accreditation Scheme) 지정 기관인 한국지질자원연구원(기관인정번호(Accreditation number) KT013, 규격번호(Standard number) ASTM D 2845-08, ASTM C 97/C, 97M-15)에서 수행하였다.

결과 및 토의

물성시험 결과

Fig. 4는 세 방향에 대한 코어 시료 중의 하나로 (a)는 $\theta = 0^\circ$ 방향의 시료(시료 번호 2-1), (b)는 $\theta = 45^\circ$ 방향의 시료



(a) vertical core (b) 45 degree core (c) Horizontal core

Fig. 4. Photographies of core samples after compressive strength experiment.

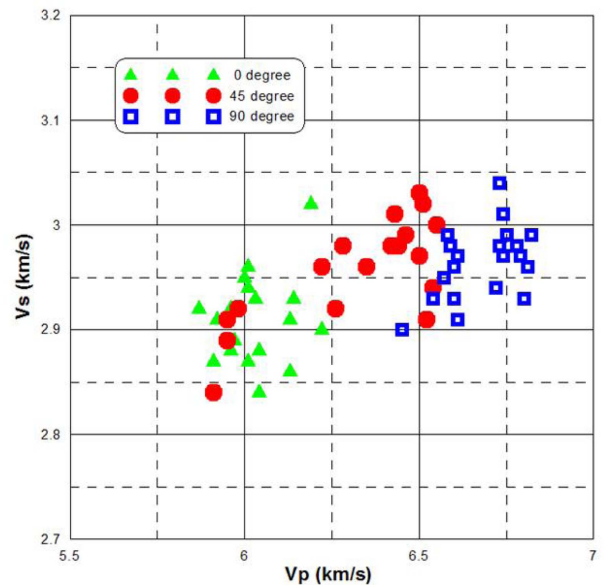


Fig. 5. Results of P and S wave measurements from 59 core plug samples. P-S wave velocities cross plot with different symmetry axis. Triangle, circle, and rectangular symbols are for vertical, 45 degree, and 90 degree symmetry axis, respectively.

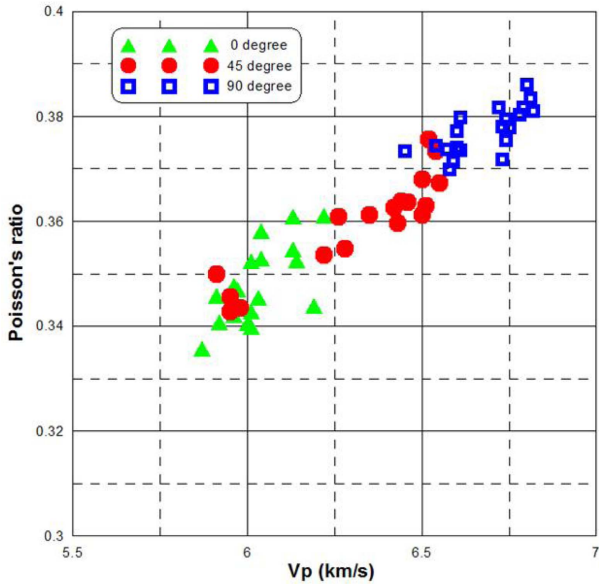


Fig. 6. Cross plot for P wave velocity, V_p and Poisson's ratio with different symmetry axis. Triangle, circle and rectangular symbols are for vertical, 45 degree, and 90 degree symmetry axis, respectively.

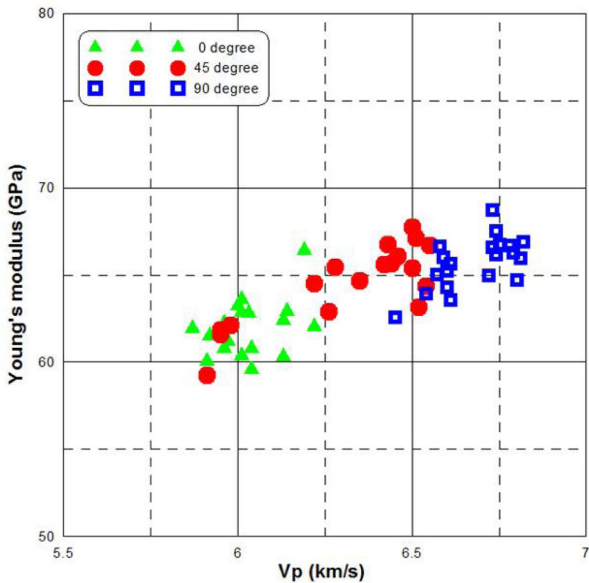


Fig. 7. Cross plot for P wave velocity, V_p , and Young's modulus with different symmetry axis. Triangle, circle and rectangular symbols are for vertical, 45 degree, and 90 degree symmetry axis, respectively.

(시료 번호 5-2), 그리고 (c)는 $\theta = 90^\circ$ 방향의 시료(시료 번호 8-3)로 1축 압축 시험 후의 사진이다. Fig. 5는 3개 축 방향에 따라 측정된 P파 속도와 S파 속도 교차도시(cross-plot) 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 대칭축 방향이 0도, 45도, 90도로 증가 할수록 P파 속도, S파 속도 모두 빨라짐을 알 수 있다. 이는 파동진행 방향이 수평방향으로 퇴적된 VTI 매질에서 퇴적방향과 같은 경우 속도가 빠르다는 것을 의미한다.

Table 1. Physical properties for $\theta = 0^\circ$ from laboratory test.

Sample No	Density (g/cm^3)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
1-1	2.71	6.180	3.240
1-2	2.71	6.190	3.020
1-3	2.71	6.010	2.940
1-4	2.72	5.970	2.890
1-5	2.71	5.780	2.740
1-6	2.72	5.960	2.880
1-7	2.71	6.040	2.880
1-8	2.71	6.010	2.870
2-1	2.71	5.920	2.910
2-2	2.71	6.130	2.860
2-3	2.72	6.130	2.910
2-4	2.72	5.870	2.920
2-5	2.71	5.910	2.870
2-6	2.71	6.000	2.950
2-7	2.72	6.040	2.840
3-1	2.72	6.030	2.930
3-2	2.71	6.140	2.930
3-3	2.71	6.010	2.960
3-4	2.72	5.960	2.920
3-5	2.71	6.220	2.900
3-6	2.71	6.220	2.900

Table 2. Physical properties for $\theta = 45^\circ$ from laboratory test.

Sample No	Density (g/cm^3)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
4-1	2.71	6.460	2.990
4-2	2.71	6.440	2.980
4-3	2.71	6.500	2.970
4-4	2.71	6.540	2.940
4-5	2.71	6.520	2.910
5-1	2.72	6.280	2.980
5-2	2.72	5.950	2.910
5-3	2.72	5.910	2.840
5-4	2.7	6.510	3.020
5-5	2.71	5.980	2.920
5-6	2.71	6.350	2.960
5-7	2.72	6.220	2.960
5-8	2.71	6.260	2.920
5-9	2.74	5.950	2.890
6-1	2.71	6.430	3.010
6-2	2.71	6.550	3.000
6-3	2.71	6.500	3.030
6-4	2.71	6.420	2.980

코어 시료 방향은 입사각에 따른 탄성과속도를 의미하므로 P파 속도와 S파 속도 상관관계로부터 탄성과 전파방향에 따라 속도차이가 있음을 확인할 수 있다. 단양 석회암의 경우 P파 속도는 5.8 ~ 6.7 km/s 범위를 보이고 S파의 범위는 2.8 ~ 3.1 km/s 이다. 국내 석회암의 물성분포는 P파의 경우 4.8 km/s, S파의 경우 3.1 km/s로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2012). Fig. 6은 P파 속도와 포아송 비 관계를 나타낸 것이다. P파 속도는 대칭축 방향이 증가하여 평행에 가까울수록 속도가 빨

Table 3. Physical properties for $\theta = 90^\circ$ from laboratory test.

Sample No	Density (g/cm ³)	V _p (km/s)	V _s (km/s)
7-1	2.72	6.810	2.960
7-2	2.72	6.800	2.930
7-3	2.72	6.780	2.980
7-4	2.71	6.740	3.010
7-5	2.72	6.740	2.970
7-6	2.72	6.610	2.910
7-7	2.72	6.790	2.970
8-1	2.71	6.820	2.990
8-2	2.72	6.730	2.980
8-3	2.72	6.720	2.940
8-4	2.71	6.750	2.990
8-5	2.71	6.730	3.040
9-1	2.72	6.570	2.950
9-2	2.71	6.610	2.970
9-3	2.71	6.600	2.960
9-4	2.71	6.450	2.900
10-1	2.72	6.580	2.990
10-2	2.71	6.590	2.980
10-3	2.72	6.600	2.930
10-4	2.71	6.540	2.930

라지고 포아송 비는 P파 속도에 비례하므로 본 실험을 통해 이를 확인할 수 있었다. 단양 석회암의 포아송 비 분포범위는 0.33 ~ 0.39 정도로 상당히 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 7 은 P파 속도와 영률과의 관계를 나타낸 것이다. P파 속도는 전파방향과 대칭축 사이의 각도가 평행(90도 코어 시료에 해당)에 가까울수록 빨라지고 영률은 P파 속도에 비례하므로 실험결과는 이에 상응한 결과를 보여준다. 본 그림을 통해 파동전파 방향에 따른 P파 속도변화를 확인하고 P파 속도변화에 따른 영률변화를 확인할 수 있었다. 단양 석회암의 영률의 범위는 60 ~ 70 GPa 이고 P파 속도 증가에 따라 동시에 증가함을 알 수 있다. 측정된 값으로부터 산술평균한 결과는 Table 4에 있다. Table 4에서 대칭축 각도가 “0”도인 것은 수직대칭축을 말하며 이때 이용된 코어 시료는 21개이다. 대칭

축 “90”도는 수평대칭축을 말하며 이때 코어 시료는 20개이다. 대칭축 “45”도 일 때 코어 시료는 18개이다. Table 4의 측정된 탄성파속도를 비교하면 대칭축에 따라 속도 값이 달라짐을 알 수 있고 P파의 경우 파동전파 진행방향과 대칭축이 평행할 때(대칭축 90도) 전파속도가 가장 빠르게 나타남을 알 수 있다. 측정된 P파, S파, 밀도로부터 포아송 비, 영률, 체적탄성률, 전단계수, 라메 상수 등 5개 탄성계수를 구할 수 있다(Table 4). Table 4에서 보듯이 대칭축에 따라 동탄성계수 변화가 발생하고 그 크기는 수직대칭축보다 수평대칭축일 때 더 커짐을 알 수 있다.

수평 응력차이 계산

VTI 매질에서 강성행렬계수 C_{ijkl} 는 식 (13) ~ 식 (18)과 P

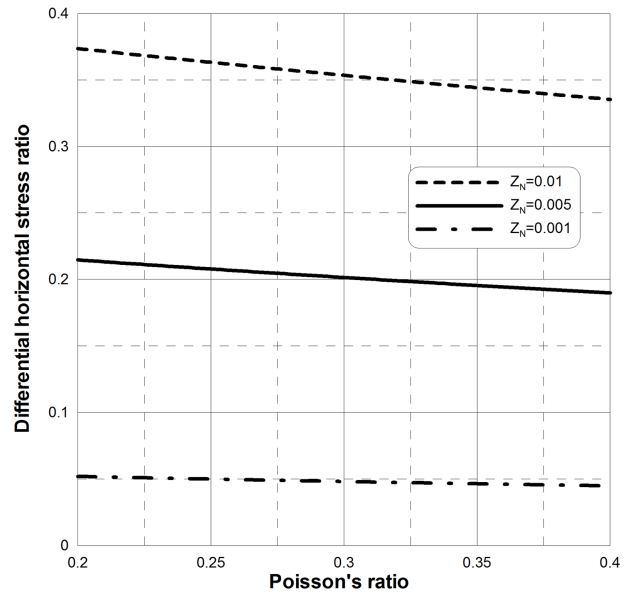


Fig. 8. Relationship between Poisson's ratio and Differential horizontal stress ratio. In this figure, Z_N values are assumed to be 0.01, 0.005, and 0.001. It can be seen that the DHSR value is more affected by the change in Z_N value than the Poisson's ratio.

Table 4. Average velocities, density, and dynamic elastic constants from laboratory core test.

Direction (Degree)	No. of Samples	V _p (km/s)	V _s (km/s)	Density (g/cm ³)	ν	E (GPa)	K (GPa)	μ (GPa)	λ (GPa)
0°	21	6.040	2.913	2.71	0.35	62.02	68.20	23.00	52.86
45°	18	6.377	2.967	2.71	0.36	64.96	78.39	23.85	62.49
90°	20	6.663	2.965	2.71	0.38	65.59	88.52	23.82	72.65

Table 5. Dynamic stiffness coefficients, Thomsen anisotropic parameter, and DHSR from laboratory core test (Unit for stiffness coefficients: GPa).

C_{11}	C_{33}	C_{13}	C_{44}	ϵ	δ	η	Δ_N	Z_N	DHSR
121.82	98.63	23.30	58.31	0.12	0.10	0.05	0.33	0.005	0.185

파 및 S파의 수평 및 수직 속도를 이용하여 구할 수 있다. 수직 코어 시료에서 C_{33} 과 C_{44} 를 구하고, 45도 코어 시료로부터 C_{13} 을, 수평 코어 시료로부터 C_{11} 과 C_{44} 를 그리고, C_{66} 는 SH파를 측정하면 구할 수 있다. 이로부터 톱슨 이방성변수 ε , δ 를 구할 수 있으며 η 는 ε , δ 관계식으로부터 구할 수 있다(Alkhalifah and Tsvankin, 1995). 측정된 물성 값으로부터 구한 강성행렬 계수는 Table 5와 같으며 $C_{11} = 121.34$ GPa, $C_{33} = 98.85$ GPa, $C_{44} = 23.30$ GPa, $C_{13} = 59.54$ GPa, 톱슨 이방성계수 ε 는 0.12, δ 는 0.10, η 는 0.05 이다. 이들 톱슨 이방성 값들은 단양 석회암 층리 방향에 따라서 탄성과 속도가 변하는 특징을 잘 반영하고 있다. 이로부터 단양석회암 실험에 산출된 수직방향 연약변수 Δ_N 는 0.30, 수직방향 컴플라이언스 계수 Z_N 은 0.005 그리고 DHSR은 식 (35)에 따라 0.185로 계산된다. 일반적으로 톱슨 이방성 변수 ε 는 δ 보다 크게 나타내며 1 보다 작은 값을 지니고 있다(Wang, 2002). 단양 석회암에 대한 수평응력차비는 0.185로 0.05 이하 값을 취성이 높은 구간으로 선정하는 기준으로 보면 매우 높은 값을 보이고 있다. 식 (35)에 영률 65.59 GPa 값과 Z_N 값을 0.001, 0.005, 0.01을 대입하여 포아송 비 변화에 따른 DHSR 값의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 DHSR 값은포아송 비의 변화보다는 컴플라이언스의 값에 따라서 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같이 탄성과 이방성계수를 활용하여 구한 DHSR 값은 현장 수평응력 측정값과 비교하여 적용의 신뢰도를 높이는 노력이 필요할 것으로 생각된다.

결 론

본 연구에서는 단양 석회암체의 퇴적 층리면에 0, 45, 90도의 세 방향 코어 시료 물성 값(P파 속도, S파 속도, 밀도)을 측정하여 동적 톱슨 이방성변수 ε , δ , η 와 연약균열변수, 컴플라이언스 계수(강성행렬 역수), 수평응력차비를 정량화하였다. 총 59개 코어 시료(평균 직경 53 mm, 길이 102 mm, 무게 634 g)에서 측정된 단양 석회암의 P파 속도는 퇴적 층리면에 대칭축이 수직인 코어 시료의 경우 6.040 km/s, 대칭축과 45도인 경우 6.376 km/s, 90도인 경우 6.662 km/s로 대칭축과 전파방향 사이의 각이 증가할수록 점점 증가하여 전형적인 횡적 등방성매질 특징을 보이고 있다. S파 속도도 0도에서 2.910 km/s, 45도에서 2.970 km/s, 90도에서는 2.970 km/s로 측정되어 P파 속도와 유사한 경향을 보이고 있다. 측정된 물성 값으로부터 구한 강성행렬계수는 $C_{11} = 121.34$ GPa, $C_{33} = 98.85$ GPa, $C_{44} = 23.30$ GPa, $C_{13} = 59.54$ GPa, 톱슨 이방성계수 ε 는 0.12, δ 는 0.10 그리고 η 는 0.02이다. 이들 값을 이용하여 산출한 단양석회암의 수직방향 연약균열변수는 0.30, 수직방향 컴플라이언스 계수 0.005 그리고 DHSR은 0.185 이다. 톱슨 이방성 값들이 높은 것은 단양 석

회암 층리 방향에 따라서 탄성과 속도가 변하는 특징을 잘 반영하는 것이며 또한 DHSR 값은 포아송 비의 변화보다는 컴플라이언스의 값에 따라서 차이가 있음을 알 수 있다. 향후 SH파 속도를 측정할 경우 C_{66} 그리고 γ 를 구할 수 있어 좀 더 정확한 수압파쇄 설계변수를 구할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과의 일부입니다 (No. 20122010300060, 20142510101810).

References

- Ahmed, U., and Meehan, D. N., 2016, *Unconventional oil and gas resources exploration and development*, CRC Press.
- Alkhalifah, T., and Tsvankin, I., 1995, Velocity analysis for transversely isotropic media, *Geophysics*, **65**, 1239-1250.
- Bakulin, A., Grechka, V., and Tsvankin, I., 2000, Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Part I: HTI model due to a single fracture set, *Geophysics*, **65**, 1788-1802.
- Cheadle, S. P., Brown, R. J., and Lawton, D. C., 1991, Orthorhombic anisotropy: A physical seismic modeling study, *Geophysics*, **56**, 1603-1613.
- Daley, P. F., and Hron, F., 1977, Reflection and transmission coefficients transversely isotropic media, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **67**, 661-671.
- Gray, D., Anderson, P., Logel, J., Delbecq, F., Schmidt, D., and Schmid, R., 2012, Estimation of stress and geomechanical properties using 3D seismic data, *First break*, **30**, 59-68.
- Hemsing, D. B., 2007, *Laboratory determination of seismic anisotropy in sedimentary rock from the Western Canadian Sedimentary Basin*, MSc thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
- Hornby, B. E., 1998, Experimental laboratory determination of the dynamic elastic properties of wet, drained shales, *J. Geophys. Res.*, **103**, B12, 29945-29964, doi:10.1029/97JB02380.
- Hwang, S., Yang, S. J., Jang, S., and Kim, J., 1994, A study on interpretation of seismic reflection traveltimes in anisotropic layers, *Econ. Environ. Geol.*, **27**, 201-207 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S., and Jin, G., 2012, Unconventional reservoirs: Review on geophysical well logging for shale plays, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **49**, 248-260.
- Jang, S., 2015, Work flow for differential horizontal stress ratio from seismic reflection data, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **52**, 158-170 (in Korean with English abstract).
- Johnston, J. E., and Christensen, N. I., 1994, Elastic constants and velocity surfaces of indurated anisotropic shales: Surveys in *Geophysics*, **15**, 481-494, doi:10.1007/BF00690171.
- Kebaili, A., and Schmitt, D. R. 1997, Ultrasonic anisotropic phase velocity determination with the Radon transformation,

- J. Acoust. Soc. Am.*, **101**, 3278-3286.
- Kim, J. W., Kim, M. S., Kim, P. G., Nor, S. J., Park, C., Jo, Y. D., and Park, S. G., 2012, The Mechanical Properties of Limestones Distributed in Jecheon, *Tunnel & Underground Space*, **22**, 354-364 (in Korean with English abstract).
- Lei, T., Sinha, S. F., and Sanders, M., 2012, Estimation of horizontal stress magnitudes and stress, coefficients of velocities using borehole sonic data, *Geophysics*, **77**, WA181-WA196.
- Lo, T., Coyner, K., and Toksoz, N., 1986, Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite, *Geophysics*, **51** 164-171.
- Martinez, J. M., and Schmitt, D. R., 2013, Anisotropic elastic moduli of carbonates and evaporites from the Weyburn-Midale reservoir and seal rocks, *Geophys. Prospect.*, **61**, 363-379.
- Sayers, C. M., 2008, The effect of low aspect ratio pores on the seismic anisotropy of shales, *78th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts*, 2606-2611.
- Sondergeld, C. H., Rai, C. S., Margesson, R. W., and Whidden, K. J., 2000, Ultrasonic measurements of anisotropy on Kimmeridge shale, *70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 1858-1861.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51**, 1954-1966.
- Tsvankin, I., 2001, *Seismic signatures and analysis of reflection data in anisotropic media*, Pergamon, 2-17.
- Vernik, L., and Nur, A., 1992, Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks, *Geophysics*, **57**, 727-735, doi:10.1190/1.1443286
- Wang, Z., 2002, Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single-plug laboratory method, *Geophysics*, **67**, 1415-1422, doi:10.1190/1.1512787.
- Wikel, K., 2011, Geomechanics: Bridging the gap from geophysics to engineering in unconventional reservoirs, *First Break*, **29**, 71-81.
- Zou, C., 2013, *Unconventional petroleum geology*, Elsevier.