J. Pet. Sediment. Geol. Vol. 1, No. 1 (2018), pp. 16-31
https://doi.org/10.31697/jpsg.2018.1.1.16
ISSN 2635-7704(Online)

광물 조성 및 함량과 암석 조직이 취성도 계산에 미치는 영향: 캐나다 몬트니층을 예시로

손준현[123], 이현석[1], 권상훈[2*]

[1]한국지질자원연구원 석유해저연구본부, [2]연세대학교 지구시스템과학과, [3]포스코대우

The effect of mineral composition and rock fabric on brittleness index: an example using the Montney Formation, Canada

Junhyun Son[123], Hyun Suk Lee[1], Sanghoon Kwon[2*]

[1]Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources
[2]Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University
[3]POSCO DAEWOO Corporation

요 약

암석 내에서 균열의 거동에 영향을 미치는 중요한 암석역학의 개념적 특성인 취성을 정량적으로 표현하기 위한 방법인 취성도에 대한 연구를 진행하였다. 일반적으로, 취성이 높은 암석일수록 더 많은 균열이 발달하고 서로 연결된다. 이러한 이유 때문에, 취성은 셰일 및 치밀가스 생산을 위한 수압파쇄 기법 적용의 대상 지층을 선정하기 위한 지표로 사용된다. 취성을 정량적으로 표현하기 위해 다양한 취성도가 사용되고 있으며, 각 취성도 계산에 영향을 미치는 요소를 파악하려는 연구가 수행되어왔다. 본 연구는 광물학 기반의 취성도를 계산하는 데 있어 암석 조직의 영향을 알아보는 것을 목표로, 캐나다 몬트니층에서 취득된 자료들을 기반으로 가장 대표적으로 사용되는 취성도인 탄성계수 기반의 취성도와 광물학 기반의 취성도를 계산하였다. 탄성계수 기반의 취성도는 음파검층, 물리검층 자료로부터 계산된 영률과 포아송비를 이용하여 도출하였으며, 광물학 기반의 취성도는 X-선 회절 분석을 이용한 정량분석 결과를 바탕으로 평가하였다. 두 가지 서로 다른 방법으로 얻은 취성도를 비교한 결과, 하부 몬트니층에서는 석영이 취성도에 주요한 영향을 주는 광물일 가능성이 제시되었다. 그러나 박편 관찰 결과로부터 하부 몬트니층의 강도에 영향을 줄 수 있는 광물이 백운석 및 점토광물로 추정됨을 고려할 때, 본 연구의 결과는 암석의 강도와 취성도가 서로 다른 요인에 의해 영향을 받을 수 있음을 지시하며, 이는 광물학 기반의 취성도를 보다 정확하게 계산하기 위해서 광물 조성 및 함량뿐만 아니라, 엽층리구조에 의한 이방성, 박편관찰을 통한 입자, 교결물질, 기질을 구성하는 광물의 정량분석 등 암석이 가지는 조직에 대한 고려가 수반되어야 함을 제시한다.

핵심어: 취성도, 몬트니층, 암석 조직

ABSTRACT

This study deals with brittleness index, which is a conceptual property that affects fracture behavior in rocks. Generally, more fracture networks are developed in more brittle rocks. For this reason, brittleness has been used as a guide to decide the target formation of hydraulic fracturing stimulation for shale and tight gas productions. Previous studies have been conducted to find out which factors have influences on the estimations of various brittleness indices to represent rock brittleness quantitatively. The objective of this study is to investigate the effect of rock fabric on the estimation of the mineralogy-based brittleness index. Both elastic moduli- and mineralogy-based brittleness indices, which are the most commonly used indices, are obtained using available data from the Montney Formation, Canada. The former index is evaluated using the Young's modulus and the Poisson's ratio that are calculated from the sonic and density logs. The latter index is estimated based on the mineral composition from X-ray diffraction quantitative analysis. Comparison between the results from two different methods indicates that quartz might be the controlling mineral on the brittleness index of the lower Montney Formation. Thin section observations, however, show that the strength of the lower Montney Formation might be determined by dolomite and clay considering matrix-supported textures. This means that rock strength and brittleness may not be governed by same controlling factors. This suggests that rock fabrics, such as anisotropy due to the lamination or quantitative analysis of minerals which constitute grain, cement, and matrix through thin section observation, should be considered in addition to the mineral composition in order to evaluate mineralogy-based brittleness index more accurately.

Keywords: brittleness index, Montney Formation, rock fabric

1. 서론

최근 주목받는 비전통 에너지자원인 셰일가스와 치밀가스는 탄화수소를 다량으로 함유하고 있는 지층에서 생산하는 천연가스를 말하며, 북미 지역을 중심으로 활발한 생산이 이루어지고 있다(Alexander *et al.*, 2011; Glorioso and Rattia, 2012; Horsfield and Schulz, 2012; McGlade *et al.*, 2013). 셰일가스와 치밀가스는 전통적인 가스자원과는 달리 공극률과 투수율이 매우 낮아서 이를 극복하기 위해 인공적으로 균열을 생성하는 수압파쇄 기법의 적용이 필수적이다. 수압파쇄 기법 적용 시 균열의 발생, 전파 방향 및 크기

Manuscript received June 21, 2018; Revised July 16, 2018; Accepted July 18, 2018.
***Corresponding author:** Sanghoon Kwon, Tel: +82-2-2123-5666, E-mail: skwon@yonsei.ac.kr
© 2018 Korean Society of Petroleum and Sedimentary Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

등은 저류층에 작용하는 주응력의 상대적인 크기와 방향, 인장 강도, 취성(brittleness)과 같은 암석역학적 특성에 직접적으로 영향을 받는다(Fjær *et al.*, 2008; Slatt, 2011; Park *et al.*, 2014). 따라서 수압파쇄 기법을 이용해 균열을 생성하여 저류층의 투수율을 효과적으로 향상시키기 위해서는 저류층의 암석역학적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 다양한 암석역학적 특성 중 취성은 암석 내에서 균열의 발생, 전파 및 유지에 영향을 미치는 성질로서, 취성이 높은 암석일수록 수압파쇄 기법을 적용했을 때 더 많은 균열을 형성한다. 이런 이유 때문에 취성은 수압파쇄 기법의 적용 대상을 선정하기 위한 기준으로 사용된다.

암석의 취성을 정량적으로 표현하고 비교하기 위한 척도로써 다양한 취성도(brittleness index)가 사용되고 있기 때문에(e.g. Hucka and Das, 1974; Grieser and Bray, 2007; Jarvie *et al.*, 2007; Rickman *et al.*, 2008; Wang and Gale, 2009; Altindag, 2010; Herwanger *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016), 각 방법에서 취성도 계산에 영향을 미치는 요소들을 규명하고, 서로 다른 취성도 계산 방법 사이의 상호연관성을 확인하려는 연구들이 수행되어 왔다(e.g. Guo *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2017). 이 중, 탄성계수인 영률과 포아송비를 이용하는 탄성계수 기반의 취성도와 암석을 구성하는 광물의 조성, 함량 및 유기물 함량을 이용하여 계산하는 광물학 기반의 취성도가 대표적인 방법으로 사용되고 있다(Table 1)(e.g. Grieser and Bray, 2007; Jarvie *et al.*, 2007; Rickman *et al.*, 2008; Wang and Gale, 2009; Guo *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015).

본 연구에서는 서부 캐나다 퇴적분지(Western Canada Sedimentary Basin)의 알버타 분지(Alberta Basin)에 위치한 치밀가스층인 몬트니(Montney)층을 대상으로 탄성계수와 광물학 기반의 방법으로 취성도를 각각 계산하고, 두 취성도를 비교한 결과와 박편 관찰 결과를 종합하여 광물학 기반의 취성도 계산에 고려해야 할 요소들을 알아보고자 하였다.

먼저, 시추공에서 획득한 음파검층, 밀도검층 자료로부터 영률과 포아송비를 도출하고, 이를 사용하여 탄성계수 기반의 취성도를 계산하였다. 다음으로, 몬트니층의 시추코어 샘플에 대해 X-선 회절분석을 이용한 정량분석 결과를 바탕으로 광물학 기반의 취성도를 계산하였다. 두 가지 서로 다른 방법을 기반으로 구한 취성도를 비교하여 취성도 계산에 영향을 미치는 광물을 추정하고자 하였다. 이후 시추코어 샘플에 대한 박편 관찰 결과로부터 몬트니층 주구성광물들의 분포 양상을 확인하고, 이를 바탕으로 몬트니층의 강도를 결정할 수 있는 광물의 종류를 파악하였으며, 취성도 계산에 영향을 미치는 요인에 대해 고찰하였다.

2. 지질 개요

서부 캐나다 퇴적분지는 Canadian Cordillera의 동부 및 두 개의 거대한 퇴적분지인 알버타 분지와 윌리스톤 분지(Williston Basin)로 이루어져 있다(Fig. 1)(Wright *et al.*, 1994). 알버타 분지는 Canadian Cordillera와 캐나다 순상지(Canadian Shield) 사이의 전면지(foreland)에 해당하는 북서-남동 방향으로 뻗어있는 분지이고, 윌리스톤 분지는 이보다 더 동쪽에 위치한 강괴상 분지(cratonic basin)이다(Wright *et al.*, 1994). 서부 캐나다 퇴적분지의 트라이아스기 지층들은 지리적으로 4개 주에 걸쳐 분포한다(Fig. 1). 브리티시컬럼비아(British Columbia) 주의 북동부와 알버타 주의 서부에 걸쳐 나타나는 로키 산맥(Rocky Mountains), 로키 산맥 풋힐즈(Rocky Mountain Foothills) 및 내부 평원(Interior Plains)인 알버타 분지, 그리고 서스캐치원(Saskatchewan) 주와 매니토바(Manitoba) 주 남부에 위치한 내륙 평원인 윌리스톤 분지에서 트라이아스기 지층들이 존재함이 확인되었다(Fig. 1)(Edwards *et al.*, 1994).

몬트니층은 알버타 분지 내 소분지인 피스리버 만(Peace River Embayment) 지역에 나타나는 최하부 트라이아스기의 전통 및 치밀가스 저류층으로, 캐나다 알버타 주의 서쪽으로부터 브리티시 컬럼비아 주의 북동쪽까지 약 130,000 km^2의 면적에 걸쳐 분포하고 있다(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3)(Edwards *et al.*, 1994; Kendall, 1999; National Energy Board, 2013). 피스리버 만의 트라이아스기 지층은 아래로부터 몬트니층, 도이그(Doig)층, 하프웨이(Halfway)층, 찰리레이크(Charlie Lake)층, 발도넬(Baldonnel)층, 파도넷

Table 1. Examples of reported brittleness indices based on elastic moduli and mineralogy (modified after Zhang *et al.*, 2016 and references therein).

Formulae	Variable description	Based on	References
$BI = \frac{E_n + \nu_n}{2}$	E_n : Normalized Young's modulus ν_n : Normalized Poisson's ratio	Elastic moduli	(Grieser and Bray, 2007; Rickman *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015)
$BI = \frac{Q}{Q + C + Cl}$	Q : Quartz C : Carbonate minerals Dol : Dolomite Lm : Limestone Cl : Clay TOC : Total organic carbon F : Feldspar	Mineralogy	(Jarvie *et al.*, 2007)
$BI = \frac{Q + Dol}{Q + Dol + Lm + Cl + TOC}$			(Wang and Gale, 2009)
$BI = \frac{Q + C + F}{Q + C + F + Cl}$			(Lai *et al.*, 2015)

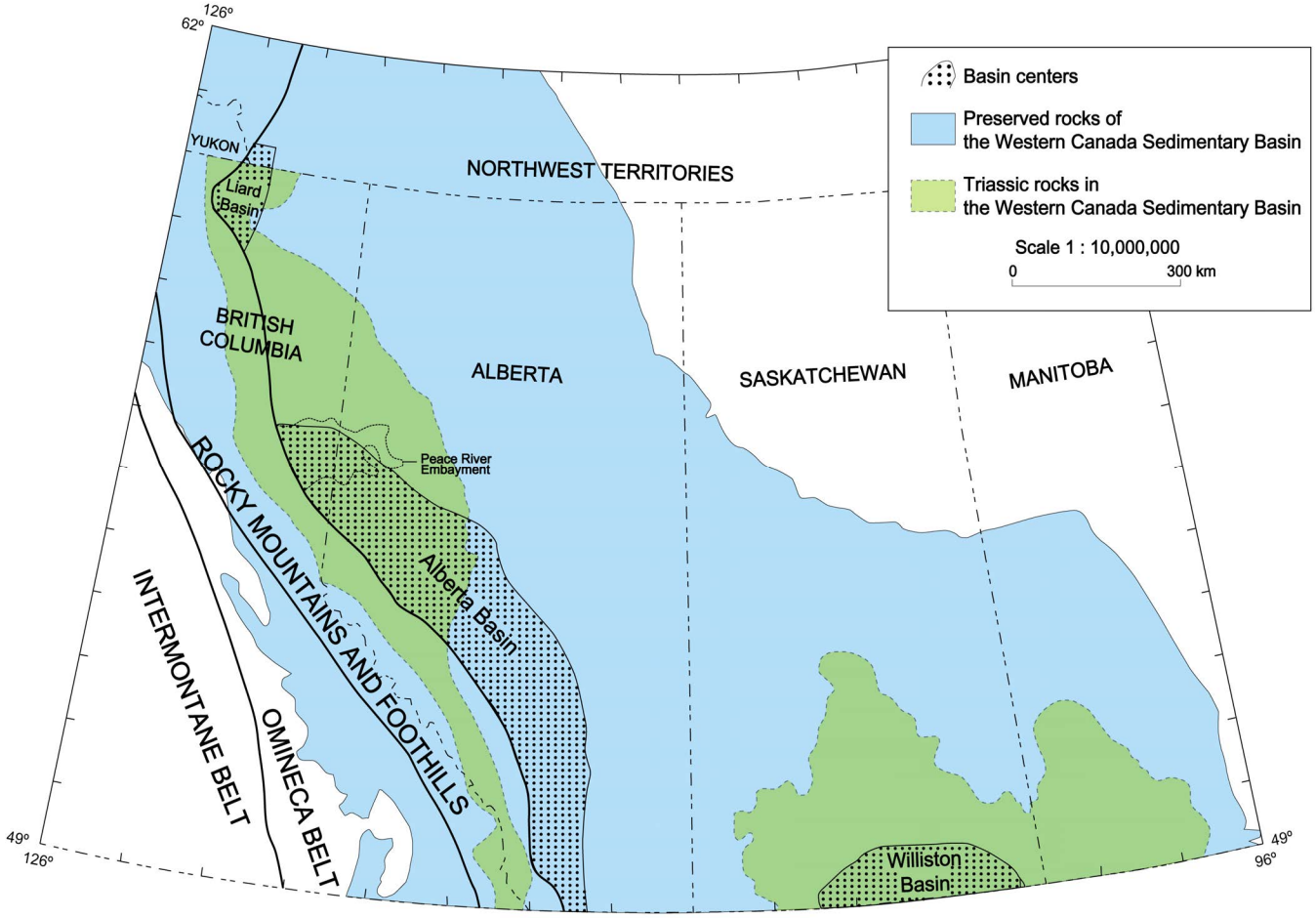

Fig. 1. Location map of the Western Canada Sedimentary Basin with the distribution of Triassic rocks and basin centers (modified after Wright *et al.*, 1994).

(Pardonet)층을 포함하며, 지층 사이의 구분은 주로 물리검층 해석을 통해 이루어진다(Fig. 3)(Edwards *et al.*, 1994; Kendall, 1999). 몬트니층은 하부의 페름기 내지 석탄기의 벨로이(Belloy)층, 디볼트(Debolt)층을 부정합으로 덮으며, 상부의 도이그층과는 정합의 관계이다(Fig. 3)(Edwards *et al.*, 1994; Kendall, 1999).

몬트니층은 서쪽으로 깊어지는 대륙붕 환경에서 퇴적된 것으로 알려지며, 서쪽은 보다 외해에 해당하는 저탁류 퇴적층 및 해저 선상지 환경, 동쪽은 보다 내해의 연안, 삼각주 및 조간대 환경에 해당하는 것으로 알려져 있다(Edwards *et al.*, 1994; Markhasin, 1997; Kendall, 1999; Golding *et al.*, 2015). 지표면부터 몬트니층의 최상부까지의 깊이는 북동쪽에서 남서쪽으로 가면서 약 500 m에서 약 4,500 m로 깊어지는 양상을 보이고, 몬트니층의 두께 역시 동쪽에서 서쪽으로 가면서 점차 두꺼워지는 쐐기 형태로 나타난다(Edwards *et al.*, 1994). 몬트니층의 암상은 주로 암회색의 돌로마이트질, 석회암질 실트암 또는 셰일로 구성되어 있으며, 지역에 따라 세립질 사암이나 백운암을 포함하기도 한다(Fig. 2)(Edwards *et al.*, 1994; Kendall, 1999; Rokosh *et al.*, 2012; National Energy Board, 2013; Golding *et al.*, 2015).

3. 연구방법

3.1. 연구 자료

본 연구는 한국석유공사로부터 제공받은 캐나다 알버타 주의 서쪽에 위치한 시추공 A의 물리검층 자료, X-선 회절 분석 자료, 시추코어 관찰 및 실험 보고서, 박편 관찰 보고서를 활용하여 연구를 수행하였다. 먼저, 감마선검층 자료와 시추코어 관찰 보고서에 근거하여 몬트니층을 상부의 도이그층으로부터 구분하였다. 감마선검층 자료 분석을 통해 시추공 A에서 몬트니층이 3,167–3,355 m의 깊이에 존재하는 것을 확인하였고, 몬트니층을 59–117 GAPI의 감마선검층 값을 가지는 상부 몬트니층과 62–160 GAPI의 값을 가지는 하부 몬트니층으로 구분하였다(Fig. 4a). 또한, 시추코어 관찰 보고서로부터 몬트니층의 암상을 확인하였다(Fig. 4b). 상부 몬트니층은 주로 돌로마이트질 실트암 또는 점토암으로 이루어져 있으며, 괴상의 형태, 직선 및 파도 모양의 엽층리, 연흔 사엽층리(ripple cross-lamination), 소구 사엽층리(hummocky lamination), 생교란 작용, 그리고 연질퇴적변형구조(soft-sediment deformation structure)와 같은 다양한 퇴적구조들이 교호하며 나타난다(Fig. 4b, Fig. 5, Fig. 6).

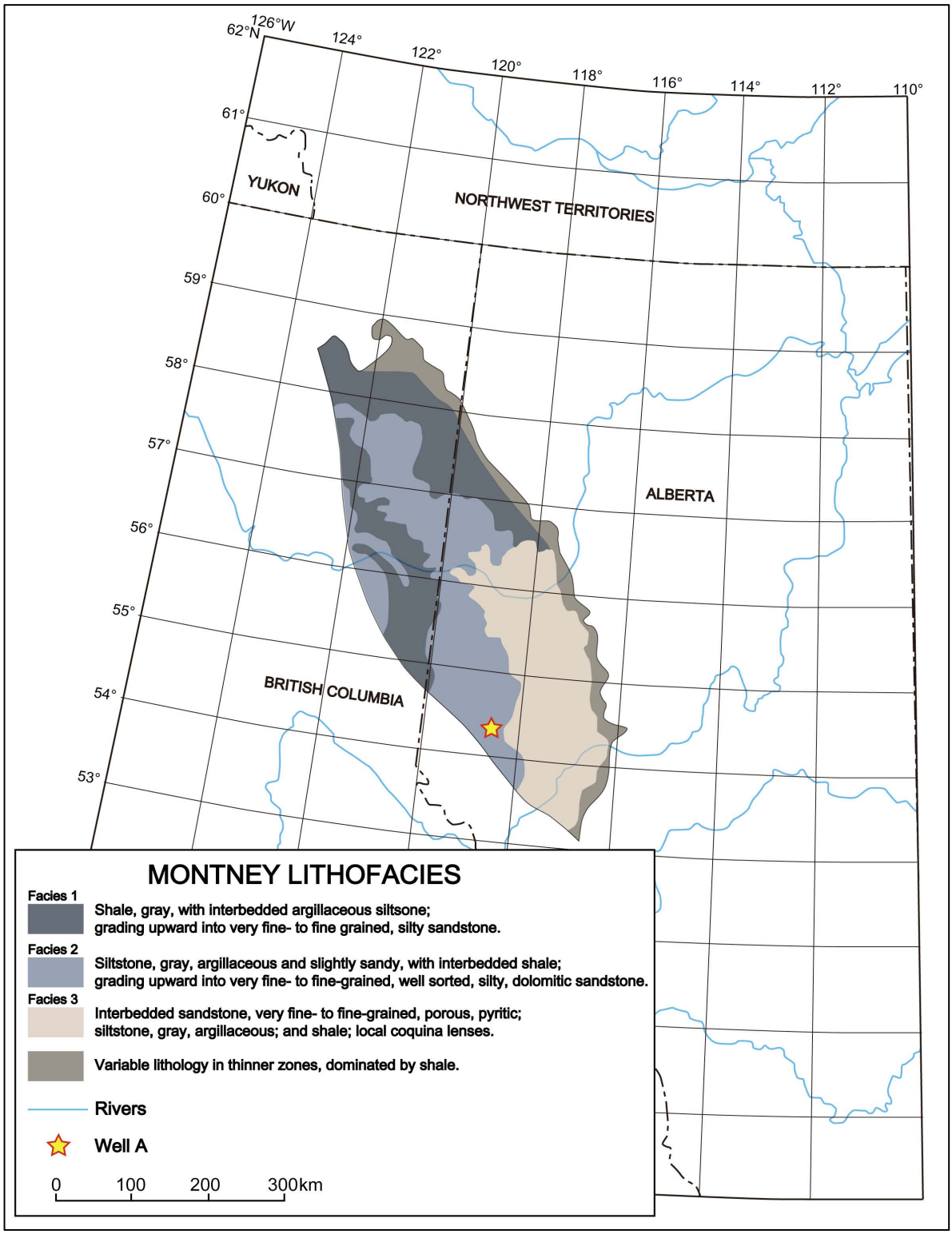

Fig. 2. Large-scale lithofacies distribution of the Montney Formation in the subsurface of Alberta and British Columbia (modified after Edwards *et al.*, 1994).

하부 몬트니층은 돌로마이트질 실트암 또는 점토암으로 이루어져 있으며, 직선 및 파도 모양의 엽층리 구조가 우세하게 나타난다(Fig. 4b, Fig. 7, Fig. 8).

3.2. 취성도 분석 방법

암석의 취성에 대한 논의가 오랫동안 지속되고 있지만 아직까지 분명한 정의가 존재하지 않아서 다음과 같이 다양한 개념으로 받아

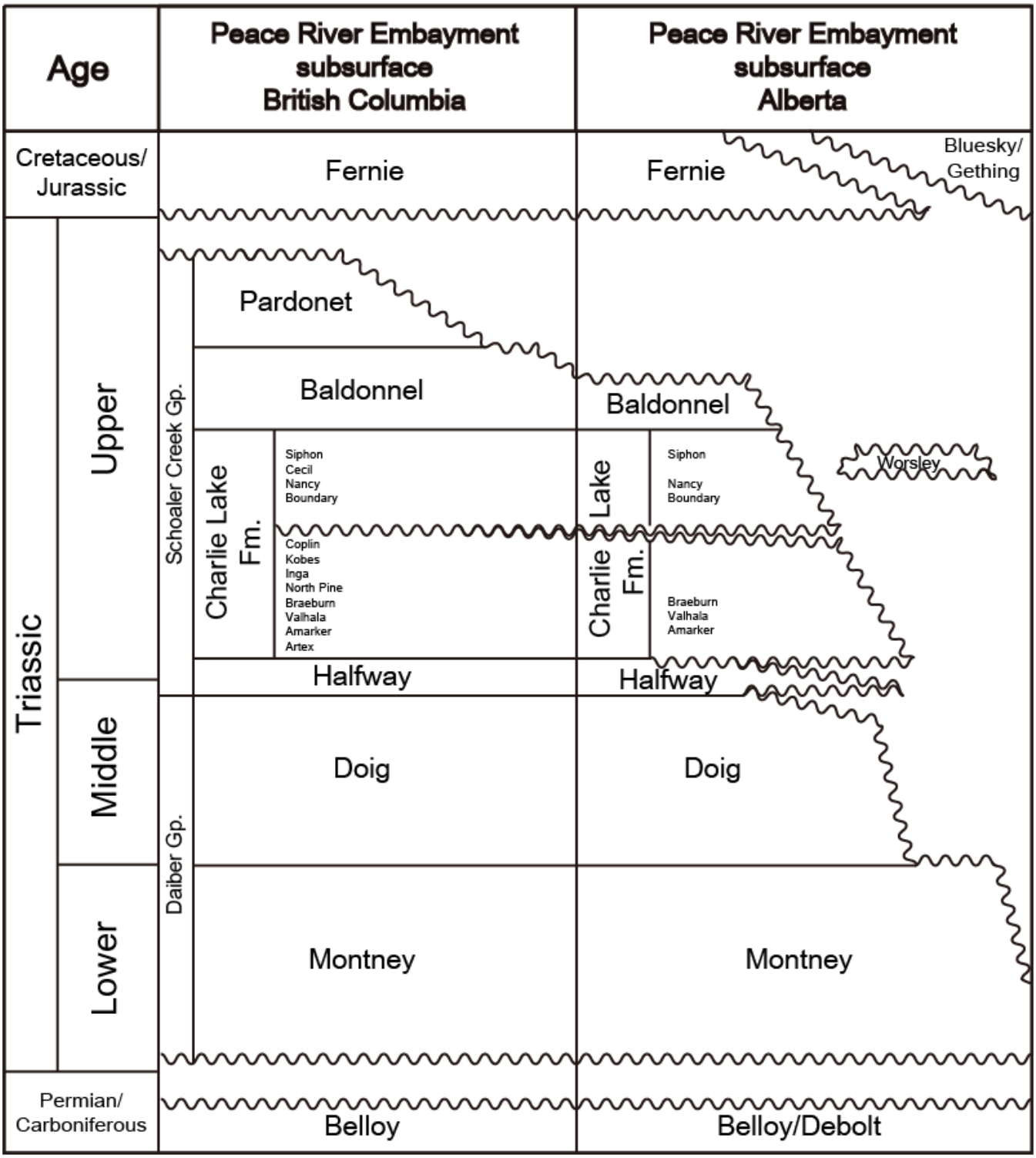

Fig. 3. Stratigraphic summary of the Triassic sedimentary units in the Peace River Embayment of the Alberta Basin (modified after Edwards *et al.*, 1994).

들여지고 있다(Altindag, 2010; Zhang *et al.*, 2016): (1) 연성의 부족(Morley, 1944; Hetényi, 1950), (2) 내부 응집력(internal cohesion)을 잃는 것(Ramsay, 1968), (3) 소성변형이 거의 없이 암석이 깨지거나 파열되는 것(Howell, 1960). 취성을 정량적으로 표현하기 위한 방법으로 취성도를 사용하지만, 취성도 역시 통일된 정의나 측정방법이 존재하지 않아서 이를 계산하기 위해 응력과 변형, 암석의 강도, 탄성계수, 광물 조성 및 함량 등에 근거한 다양한 방법을 사용하고 있다(e.g. Hucka and Das, 1974; Grieser and

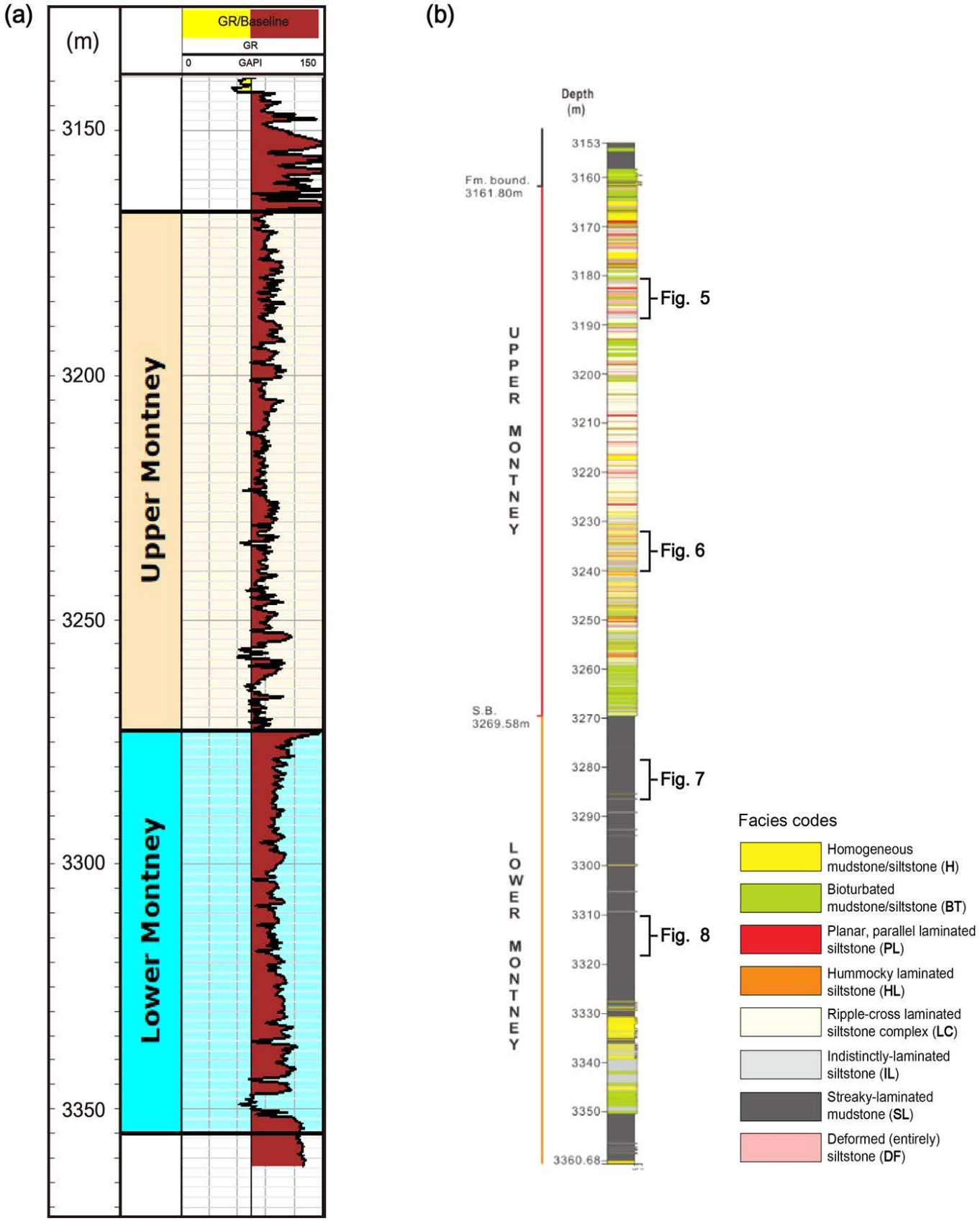

Fig. 4. Identification and subdivision of the Montney Formation. (a) Subdivision of the Montney Formation based on the gamma ray log. (b) Subdivision of the Montney Formation based on the lithofacies from the core analysis reports.

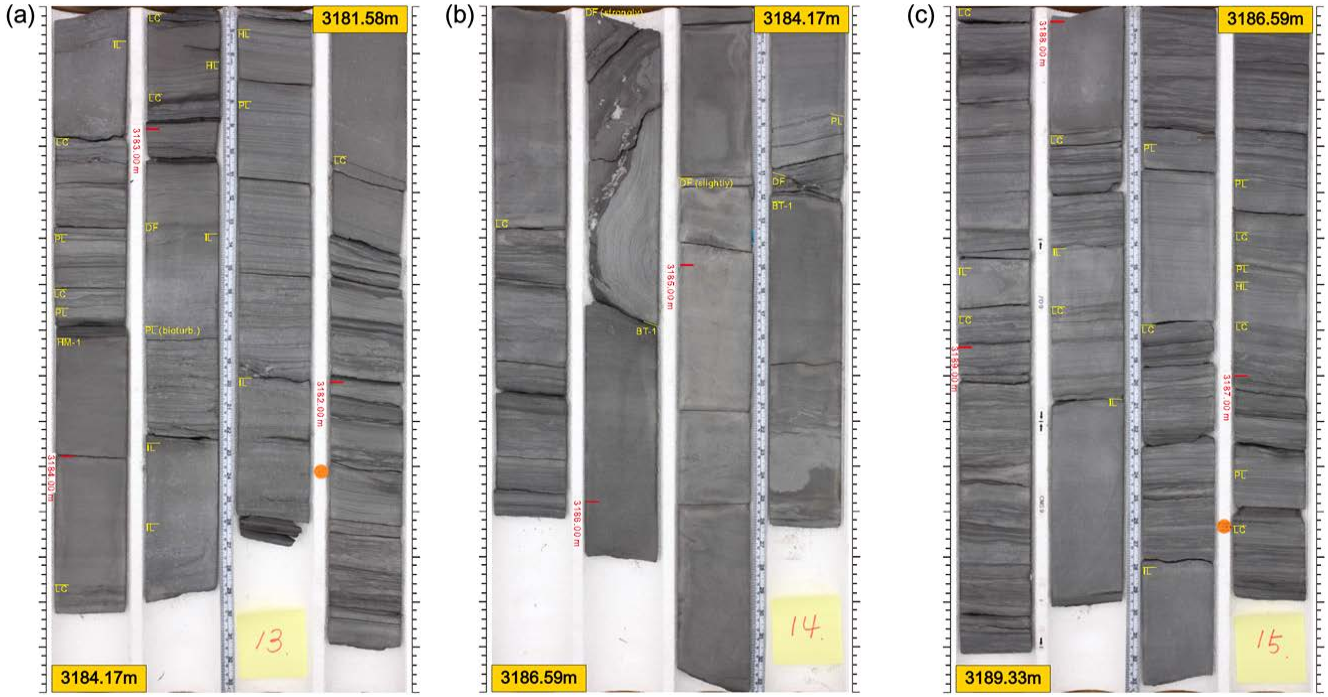

Fig. 5. Photographs of core samples of the upper Montney Formation. (a) 3,181.58–3,184.17 m. (b) 3,184.17–3,186.59 m. (c) 3,186.59–3,189.33 m.

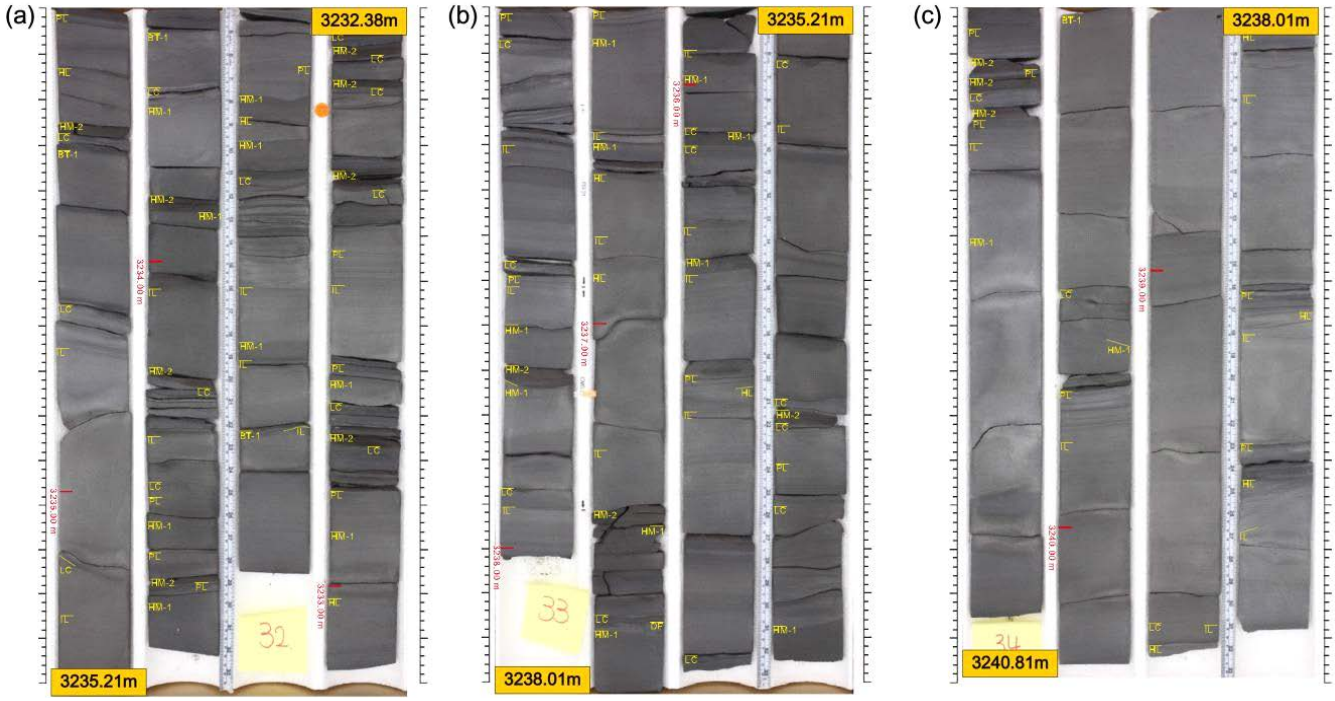

Fig. 6. Photographs of core samples of the upper Montney Formation. (a) 3,232.38–3,235.21 m. (b) 3,235.21–3,238.01 m. (c) 3,238.01–3,240.81 m.

Bray, 2007; Jarvie *et al.*, 2007; Rickman *et al.*, 2008; Wang and Gale, 2009; Altindag, 2010; Herwanger *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016). 그 중, 탄성계수를 이용한 방법과 광물 조성 및 함량을 이용한 방법이 취성도를 계산하는 가장 대표적인 방법으로 사용되고 있으며(Table 1), 본 연구에서도 이 두 가지 방법을 채택하였다.

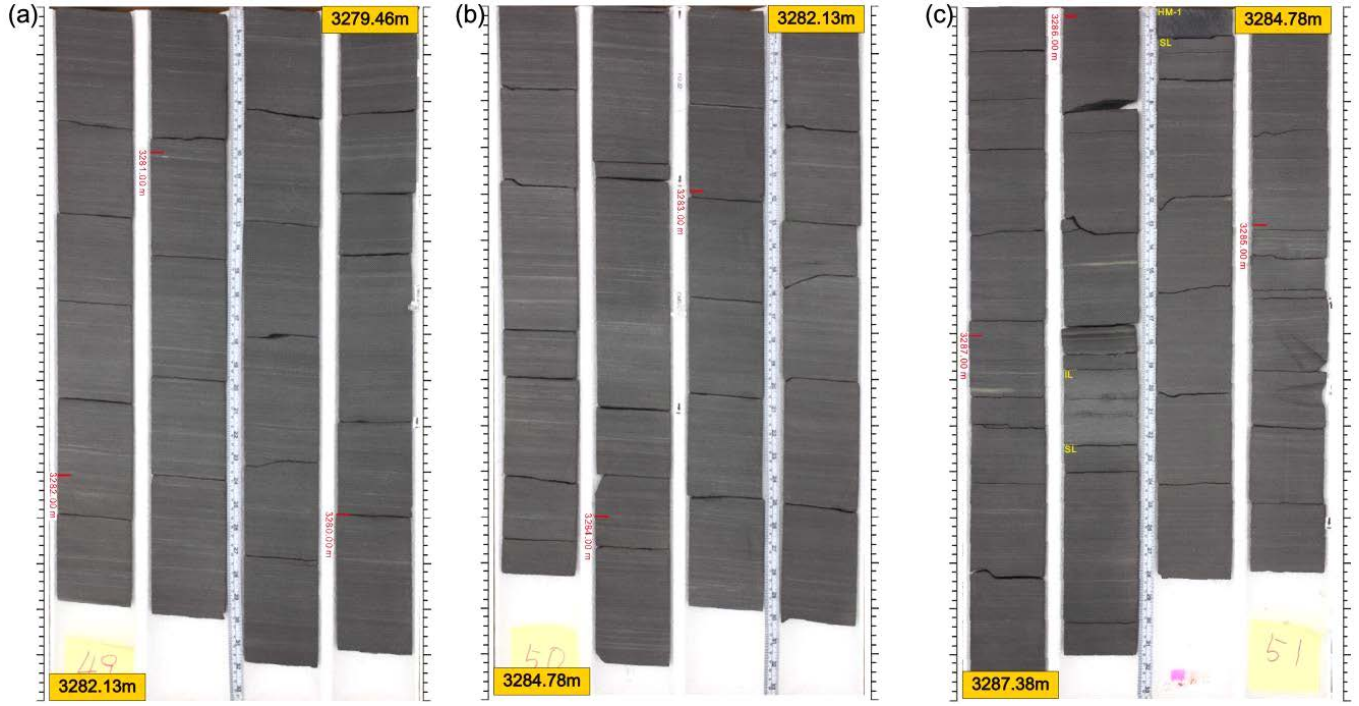

Fig. 7. Photographs of core samples of the lower Montney Formation. (a) 3,279.46–3,282.13 m. (b) 3,282.13–3,284.78 m. (c) 3,284.78–3,287.38 m.

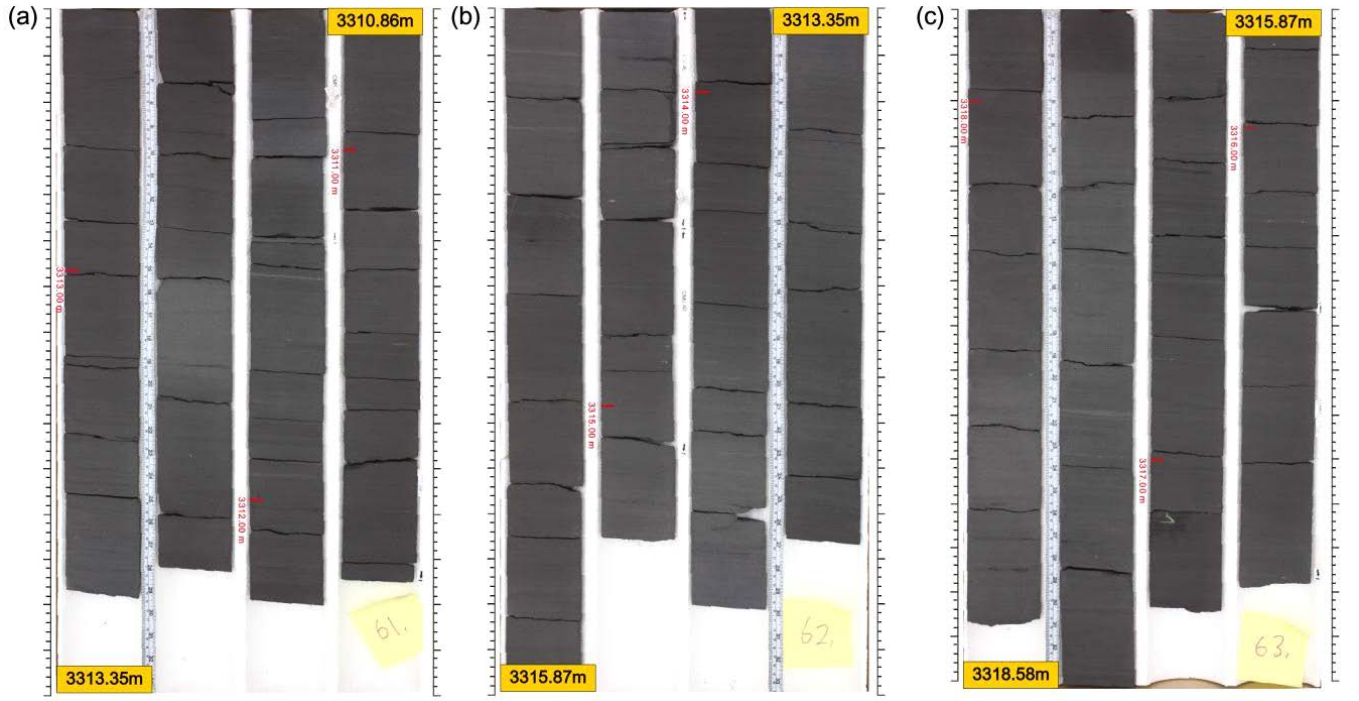

Fig. 8. Photographs of core samples of the lower Montney Formation. (a) 3,310.86–3,313.35 m. (b) 3,313.35–3,315.87 m. (c) 3,315.87–3,318.58 m.

3.2.1. 탄성계수 기반 취성도

탄성계수 기반의 취성도는 탄성계수인 영률과 포아송비를 이용하여 취성도를 계산한다(Grieser and Bray, 2007; Rickman *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015). Grieser and Bray (2007)는 바넷 셰일(Barnett Shale)에서 영률과 포아송비의 대비도표(crossplot)를 암상에 대비하여 영률이 높고 포아송비가 낮은 암

석들에서 상대적으로 균열이 더 많이 형성되는 취성의 특성이 나타나는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 시추공 A의 물리검층 자료와 시추코어 실험 자료를 사용하여 탄성계수 기반의 취성도를 계산하였다. P-파, S-파 음파검층 자료와 밀도검층 자료를 시추코어 실험으로부터 얻은 음파 및 밀도 자료에 맞추어 보정하였다(Fig. 9). 보정된 음파검층, 밀도검층 자료를 Rider and Kennedy (2011)의 음파검층, 밀도검층 자료와 탄성계수 사이의 관계식에 대입하여 영률과 포아송비를 계산하였다(Fig. 9; Table 2). 계산된 영률과 포아송비를 Lai *et al.* (2015)의 탄성계수 기반 취성도 계산식에 대입하여 몬트니층의 취성도를 도출

Table 2. Elastic moduli derived from sonic and density logs (modified after Rider and Kennedy, 2011).

Elastic moduli derived from the sonic and density logs			
G	Shear modulus (psi)	$1.34\times10^{10}\frac{\rho_b}{\Delta t_s^2}$	Eq. (1)
ν	Poisson's ratio	$\frac{\frac{1}{2}(\Delta t_s/\Delta t_c)^2-1}{(\Delta t_s/\Delta t_c)^2-1}$	Eq. (2)
E	Young's modulus (psi)	$2G(1+\nu)$	Eq. (3)

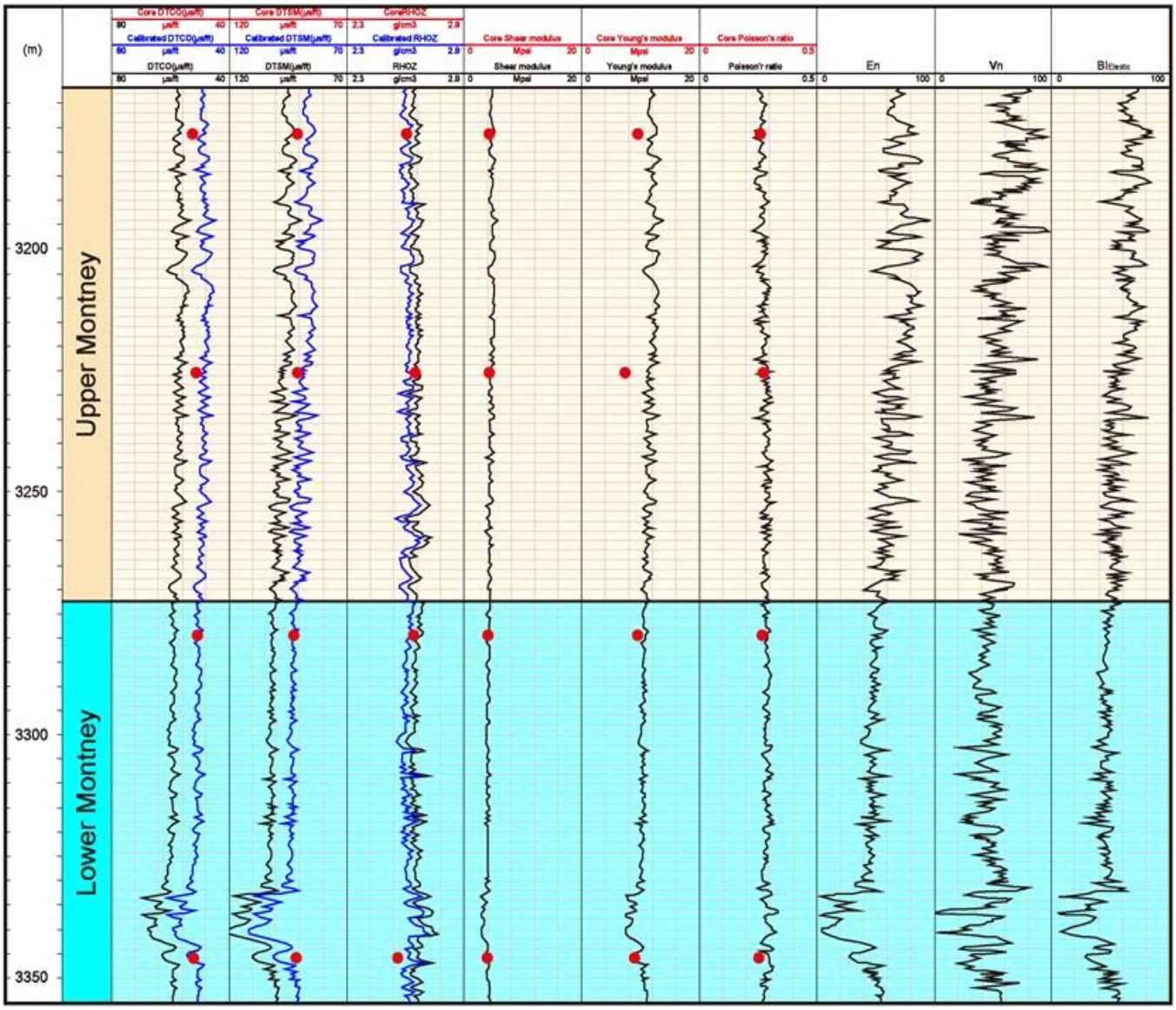

Fig. 9. Estimation of brittleness index based on elastic moduli. Track 1: Compressional slowness, Track 2: Shear slowness, Track 3: Bulk density, Track 4: Shear modulus, Track 5: Young's modulus, Track 6: Poisson's ratio, Track 7: Normalized Young's modulus, Track 8: Normalized Poisson's ratio, Track 9: Brittleness index based on elastic moduli (In track 1, 2, 3, black lines are logs before core calibration, blue lines are after core calibration, red dots are core measurements. In track 4, 5, 6, black lines are elastic moduli calculated from calibrated logs, red dots are core measurements.).

Table 3. Brittleness index estimation based on elastic moduli (after Guo *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015).

BI based on elastic moduli		
E_n	$\frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}}\times 100$	Eq. (4)
ν_n	$\frac{\nu-\nu_{max}}{\nu_{min}-\nu_{max}}\times 100$	Eq. (5)
$BI_{Elastic}$	$\frac{E_n+\nu_n}{2}$	Eq. (6)

하였다(Fig. 9; Table 3). 탄성계수 기반 취성도 계산식에 따르면, 영률과 포아송비를 각각 정규화한 뒤, 정규화 된 영률과 포아송비의 평균값이 해당 깊이에서의 취성도를 나타낸다(Table 3)(Guo *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2015).

3.2.2. 광물학 기반 취성도

취성도를 구하기 위한 또 다른 방법으로 암석의 광물 조성 및 함량을 이용한 광물학 기반의 취성도가 사용된다(Jarvie *et al.*, 2007; Wang and Gale, 2009; Lai *et al.*, 2015). 광물학 기반 취성도는 암석을 구성하는 모든 광물 및 총유기탄소(Total Organic Carbon 또는 TOC) 함량에 대한 취성 광물의 비율로 표현되며 암석 내에 취성 광물의 함량이 높을수록 더 높은 취성도 값을 가진다.

본 연구에서는 시추공 A에 대해 X-선 회절 분석으로 구한 몬트니층의 광물 조성 및 함량 자료를 제공받았으며, 이를 이용하여 광물학 기반 취성도를 계산하였다. 시추공 A의 몬트니층에서 약 4 m 간격으로 취득된 47개 시추코어 샘플에 대해 X-선 회절 분석을 이용하여 광물 정량분석을 수행하였고, 분석 방법은 다음과 같다. 시추코어 샘플들을 전암(whole-rock) 및 점토(clay-fraction)에 대한 X-선 회절 분석을 위해 막자사발과 McCrone micronizing mill을 이용하여 분말화 하였다. 분말화 된 샘플 중 일부는 건조된 후에 random whole-rock mount로 제작하였다. 그 외 분말화 된 샘플들은 희석된 인산나트륨 용액을 이용하여 분산시켰고, 부유물들은 원심분리방법을 이용하여 < 2 μm의 입도 구간으로 분리하였다. 분리된 부유물들은 silver membrane filter에 vacuum-deposit하여 oriented clay mineral aggregates를 만들었다. X-선 회절 분석은 Scintag 또는 Philips의 automated powder diffractometer를 이용하여 수행하였다. Random whole-rock mount에 대한 분석은 1°/min의 scan rate로 2°-60°의 2θ 구간에서 수행하였다. Glycol-solvated clay-fraction mount는 1.5°/min의 scan rate로 2°-50°의 2θ 구간에서 분석하였다. 전암과 층상규산염 광물의 정량분석은 integrated peak area와 본 연구에 사용된 회절분석기(diffractometer)에 대해 실험적으로 결정된 Relative Intensity Ratio (RIR) 값을 사용하여 수행하였다. 각 샘플에서 운모류를 포함한 전체 점토광물량은 점토광물의 반사면 중 (001) 또는 (hkl)면과 실험적 RIR 값을 이용한 whole-rock XRD pattern을 이용하여 결정하였다. Glycol-solvated clay-fraction 샘플도 위와 유사한 방법으로 분석하였다. Mixed layer clay ordering과 팽창도는 glycol-solvated clay aggregates로부터 얻어진 회절 데이터와 NEWMOD 프로그램을 이용해 분석된 one dimensional 회절 profile을 비교하여 결정된다.

정량분석 결과, 몬트니층은 석영(21-63 vol%), 장석(6-20 vol%), 백운석(8-41 vol%)과 일라이트-스멕타이트, 일라이트-운모류, 카올리나이트, 녹니석으로 이루어진 점토광물(4-53 vol%)을 주구성광물로 함유하며, 소량의 황철석(1-5 vol%)과 경석고(0-6 vol%)를 포함한다(Fig. 10, Table 4).

몬트니층의 광물 조성 및 함량을 바탕으로(Fig. 10; Table 4), 선행 연구들의 기존 광물학 기반 취성도 계산식(Table 1)을 수정하여 본 연구에서 사용할 취성도 계산식을 수립하였다(Table 5). Jarvie *et al.* (2007)과 Wang and Gale (2009)의 취성도 계산식에는 장석이 포함되어 있지 않지만, 몬트니층에서는 장석이 평균 13 vol%의 함량을 보이기 때문에 취성도 계산식에 장석 함량을 포함하였다. 또한 Wang and Gale(2009)의 식에서는 취성도를 계산할 때 총유기탄소 함량을 고려하였지만, 몬트니층에서는 시추코어를 이용한 열분해 실험 결과 총유기탄소 함량이 평균 0.7 vol%로 매우 낮게 나오기 때문에, 총유기탄소가 취성도에 미치는 영향이 매우 작을 것으로 보아 취성도 계산식에 포함하지 않았다. 결과적으로, 본 연구에서는 저류층의 주구성광물인 석영, 장석, 백운석, 점토광물 중 취성 광물의 비율로 취성도를 정의하였으며, Table 5와 같이 취성 광물이 (1) 석영인 경우(BI1), (2) 석영, 백운석인 경우(BI2), (3) 석영, 백운석, 장석(BI3)인 경우로 나눠서 취성도를 계산하였다.

4. 연구결과

몬트니층에 대하여 탄성계수 기반의 취성도를 계산한 결과는 다음과 같다. 몬트니층의 시추코어 실험 자료에 보정한 P-파, S-파 음파검층과 밀도검층 자료는 각각 45-62 μs/ft, 81-113 μs/ft, 2.5-2.7 g/cm^{3}의 값을 가진다(Fig. 9). 보정된 음파검층과 밀도검층 자료를 Table 2의 Eq. (1)-(3)에 대입하여 얻은 영률과 포아송비는 각각 7.3-14.0 Mpsi, 0.2-0.3의 범위를 보인다(Fig. 9). 영률과 포아송비를 Table 3의 Eq. (4)-(6)에 대입하여 얻은 탄성계수 기반의 취성도는 5-84%의 값을 가지고 평균은 53%이다(Fig. 9). 탄성계수 기반의 취성도 계산 과정 중 물리검층 자료를 이용해 계산한 영률, 포아송비를 시추코어 실험으로부터 얻은 영률, 포아송비와 비교하였다. 하부 몬트니층에서는 영률과 포아송비 모두 물리검층에서 구한 값과 시추코어 실험에서 얻은 값이 비슷하지만, 상부 몬트니층에서는 물리검층으로 구한 영률이 시추코어 실험에서 얻은 값보다 더 높은 값을 가진다(Fig. 9). 탄성계수 기반의 취성도 계산식 Eq. (4)-(6)에 따르면 영률이 높고 포아송비가 낮은 암석일수록 더 높은 취성도 값을 가진다. 상부 몬트니층에서 물리검층으로 구한 영률이 시추코어 실험에서 얻은 영률보다 높게 나오는 것은 물리검층 자료를 이용

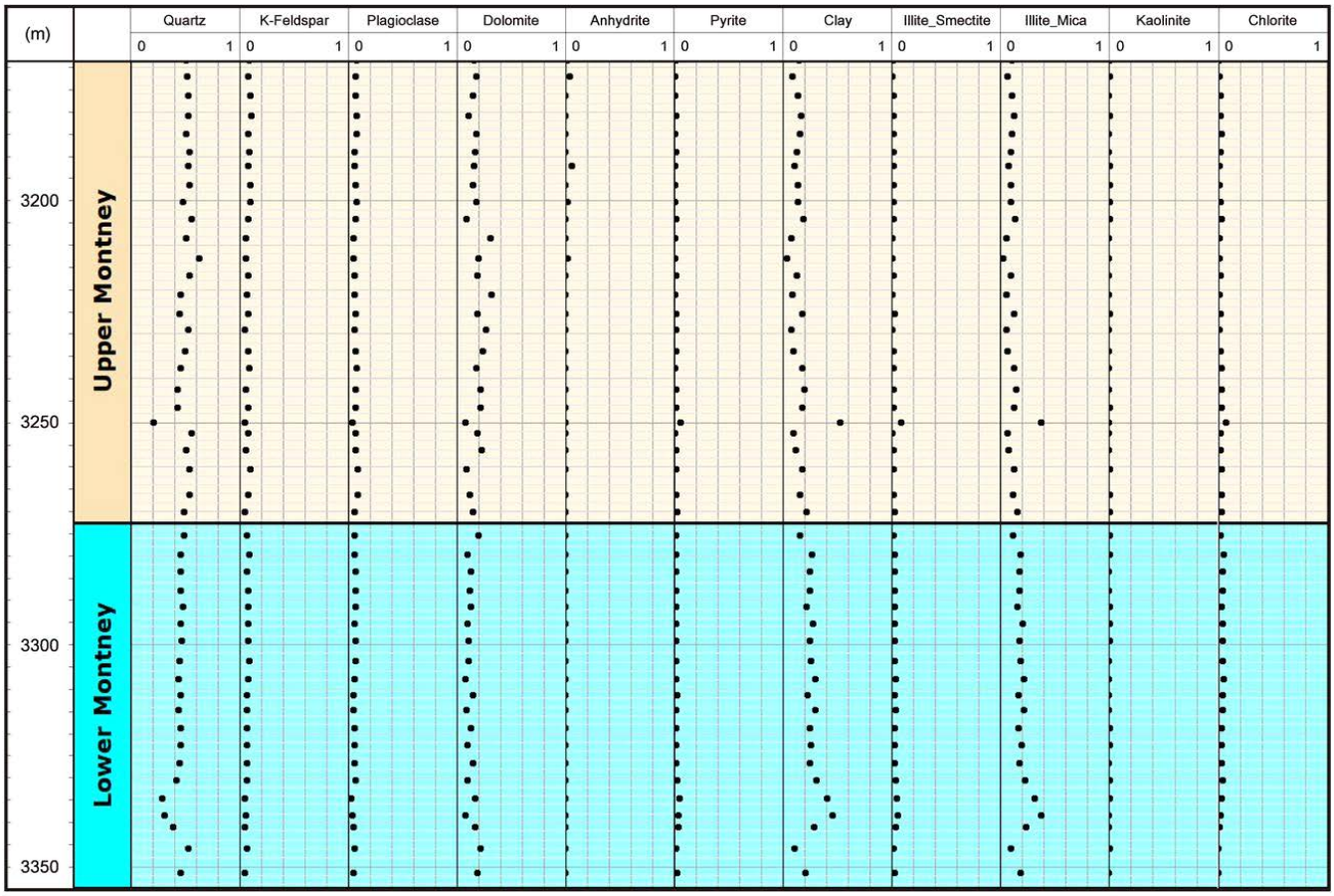

Fig. 10. Vertical variations of mineral abundances (vol%) of the Montney Formation obtained by the X-ray diffraction quantitative analysis of the borehole samples in this study. Track 1: Quartz, Track 2: K-feldpsar, Track 3: Plagioclase, Track 4: Dolomite, Track 5: Anhydrite, Track 6: Pyrite, Track 7: Clay, Track 8: Illite-smectite, Track 9: Illite-mica, Track 10: Kaolinite, Track 11: Chlorite.

해 계산한 탄성계수 기반의 취성도가 과대평가될 수 있음을 의미한다. 따라서 탄성계수와 광물학 기반의 서로 다른 두 가지 방법으로 구한 취성도의 비교를 하부 몬트니층만을 대상으로 실시하였다.

몬트니층에서 얻은 X-선 회절 분석 결과(Table 4)를 Table 5의 Eq. (7)-(9)에 대입하여 광물학 기반의 취성도를 계산한 결과는 다음과 같다(Fig. 11). BI1은 23-65%의 취성도 값을 가지고 평균은 49%이다. BI2는 31-85%의 취성도 값을 가지고 평균은 65%이다. BI3는 42-96%의 취성도 값을 가지고 평균은 79%이다. BI1에 비해 BI2, BI3는 더 많은 종류의 광물을 취성 광물로 가정하기 때문에 더 높은 취성도 값을 가진다.

몬트니층을 대상으로 탄성계수와 광물학 기반의 서로 다른 두 가지 방법으로 구한 취성도를 비교하였다(Fig. 12). 하부 몬트니층에 대한 비교 결과를 확인해 볼 때, 석영만을 취성 광물로 고려한 경우(BI1)에 탄성계수 기반의 취성도와 광물학 기반의 취성도가 가장 비슷한 값을 가진다. 백운석과 장석을 취성 광물로 고려한 경우(BI2, BI3)에는 광물학 기반의 취성도가 탄성계수 기반의 취성도에 비해 더 큰 값을 가진다. 두 가지 방법으로 계산한 취성도를 비교한 결과는 시추공 A의 하부 몬트니층에서 석영만이 취성도에 영향을 주는 광물이며, 백운석과 장석을 취성도에 영향을 주는 광물로 포함시켜 계산하면 취성도가 과대평가됨을 보여준다.

5. 토의 및 결론

하부 몬트니층에 대해 두 가지 서로 다른 방법으로 구한 취성도를 비교한 결과, 석영만을 취성도에 영향을 미치는 광물로 가정한 BI1이 탄성계수 기반의 취성도와 가장 잘 일치하였다. 두 가지 방법의 취성도 중 탄성계수 기반의 취성도는 음파검층과 밀도검층 자료를 바탕으로 계산한 방법이며, 이 중 음파검층은 암석의 강도(strength)와 밀접한 관계를 보인다. 비록 암석의 강도와 음파검층 사이의 관계를 일반화 시킬 수는 없지만, 암석의 강도는 대체로 음파검층을 통해 측정된 구간주시(interval transit time)와 지수 관계를 가지며 반비례하는 것으로 알려져 있기 때문에, 음파검층 자료는 암석의 압축 강도를 나타내기 위한 지표로 사용되어왔다(Chang *et al.*, 2006; Oyler *et al.*, 2010). 따라서 음파검층을 기반으로 계산된 탄성계수 기반의 취성도는 암석의 강도와 관련이 있는 지표로 생각할 수 있다. 하지만 본 연구의 관심인 암석의 취성은 강도와 동일한 의미를 가지

Table 4. Mineral compositions (in vol%) of the Montney Formation determined by X-ray diffraction quantitative analysis of the core samples.

Depth (m)	Whole rock mineralogy (vol%)							Clay mineralogy (vol%)				TOC (vol%)
	Qtz	Kfs	Pl	Dol	Anh	Py	Clay	I/S	Ill&Mca	Kln	Chl	TOC
3,168.50	50.5	9.2	7.3	15.4	1.3	1.4	14.7	1.5	11.0	0.5	1.7	0.4
3,172.10	51.8	8.0	7.0	18.2	4.1	1.1	9.1	1.0	6.6	0.2	1.3	0.3
3,176.30	52.4	10.1	7.2	14.8	0.0	1.1	14.1	1.2	10.5	0.0	2.4	0.5
3,180.86	52.4	11.2	8.2	10.3	0.0	1.3	16.4	1.5	12.4	0.1	2.4	0.3
3,184.95	50.6	8.1	7.3	17.6	0.0	1.0	15.2	1.4	10.8	0.0	3.0	0.2
3,189.13	53.9	9.2	6.1	16.3	0.0	1.2	12.9	1.1	9.4	0.0	2.4	0.4
3,192.27	52.7	7.9	6.1	15.9	5.5	1.0	10.3	1.1	7.3	0.1	1.8	0.4
3,196.49	53.6	10.1	6.6	14.6	0.0	1.1	13.5	1.4	9.9	0.3	1.9	0.4
3,200.37	47.8	9.4	7.5	17.9	1.8	1.1	13.9	1.2	10.0	0.1	2.6	0.5
3,204.30	56.0	8.3	6.4	9.0	0.0	1.3	18.3	1.5	13.4	0.4	3.0	0.2
3,208.46	50.4	5.6	4.6	30.5	0.0	0.7	7.8	1.0	5.1	0.0	1.7	0.2
3,213.14	63.1	6.1	4.3	19.4	1.9	1.0	4.0	0.2	2.8	0.0	1.0	0.4
3,216.90	53.8	7.6	5.5	18.4	0.0	1.2	12.9	1.5	9.2	0.0	2.2	0.5
3,221.17	46.2	6.9	5.6	31.4	0.0	0.9	8.5	1.0	5.8	0.0	1.7	0.4
3,225.57	45.2	8.0	6.9	19.0	0.0	1.4	18.0	2.1	12.9	0.4	2.6	0.5
3,229.30	53.2	4.9	5.8	26.7	0.0	1.4	7.8	0.7	5.5	0.0	1.6	0.4
3,234.01	50.3	8.0	6.6	23.5	0.0	1.2	9.7	1.1	6.6	0.0	2.0	0.6
3,237.84	45.8	8.9	7.3	17.3	0.0	1.0	17.3	1.6	12.4	0.0	3.3	0.7
3,242.51	43.2	6.1	6.7	21.3	0.0	1.6	20.1	1.8	14.6	0.0	3.7	0.6
3,246.77	43.2	7.9	6.8	22.2	0.0	1.5	18.0	1.5	12.8	0.5	3.2	0.3
3,249.97	21.3	5.2	3.7	7.5	0.0	5.2	53.1	8.6	37.2	0.0	7.3	1.0
3,252.52	55.7	7.9	6.7	18.6	0.0	0.8	10.0	1.0	6.7	0.0	2.3	0.5
3,256.39	50.9	6.3	6.5	23.0	0.0	1.3	11.7	1.2	7.8	0.0	2.7	0.6
3,260.54	53.8	10.2	8.5	9.1	0.0	1.2	17.2	1.2	12.4	0.1	3.5	0.3
3,266.45	53.5	8.1	8.9	11.9	0.0	1.2	16.1	1.3	11.5	0.1	3.2	0.4
3,270.32	48.8	5.1	5.5	14.5	0.0	2.5	21.2	2.4	15.1	0.1	3.6	0.9
3,275.44	49.0	6.4	5.4	19.5	0.0	1.6	16.0	1.3	11.7	0.4	2.6	0.9
3,279.70	45.8	8.4	5.8	9.8	0.0	1.8	26.4	2.3	18.7	0.2	5.2	0.8
3,283.67	45.7	6.8	6.3	12.9	0.0	1.4	24.7	2.3	17.6	0.0	4.8	1.1
3,287.92	46.2	7.5	6.3	11.8	0.0	1.4	24.5	2.4	17.4	0.0	4.7	1.1
3,291.47	47.6	7.9	6.5	12.8	0.0	1.5	21.4	2.1	15.3	0.6	3.4	1.2
3,295.47	45.7	8.0	5.7	10.0	0.0	1.5	28.1	2.9	20.3	0.3	4.6	0.9
3,299.18	47.1	7.4	6.4	11.2	0.0	1.7	24.8	2.5	17.4	0.8	4.1	0.9
3,303.83	44.6	8.8	6.3	11.0	0.0	1.4	26.0	2.6	18.6	0.0	4.8	1.4
3,307.83	43.8	7.8	6.1	8.0	0.0	1.9	29.8	3.2	21.2	0.0	5.4	1.0
3,311.50	46.1	6.4	4.8	14.3	0.0	2.3	23.0	2.4	16.3	0.0	4.3	1.5
3,314.83	43.8	6.4	5.2	8.7	0.0	2.0	30.1	3.3	21.9	0.0	4.9	1.8
3,318.84	46.1	6.4	6.0	12.9	0.0	1.8	24.3	2.9	17.0	0.7	3.7	1.4
3,322.83	46.3	7.3	5.4	10.2	0.0	2.1	25.9	2.7	19.5	0.5	3.2	1.3
3,326.87	44.6	6.6	5.5	14.4	0.0	1.8	24.7	2.8	18.0	0.0	3.9	1.1
3,330.64	42.2	6.6	6.6	9.4	0.0	2.8	30.4	3.2	22.8	0.1	4.3	0.5
3,334.78	29.0	4.8	2.9	16.8	0.0	4.3	40.6	4.8	31.7	0.7	3.4	0.5
3,338.49	31.3	5.7	3.5	7.6	0.0	4.0	45.5	5.6	37.2	0.0	2.7	0.6
3,341.24	39.1	5.3	4.8	17.2	0.0	3.3	28.7	3.6	23.3	0.0	1.8	1.1
3,346.09	53.0	6.6	6.1	21.3	0.0	1.5	11.1	1.3	9.4	0.1	0.3	0.6
3,351.49	46.1	5.2	4.9	18.6	0.0	2.8	21.1	2.6	18.3	0.0	0.2	1.1
3,355.32	31.2	3.3	2.6	40.7	0.0	2.1	18.0	2.3	15.4	0.1	0.2	1.0

Qtz: Quartz, Kfs: K-feldspar, Pl: Plagioclase, Dol: Dolomite, Anh: Anhydrite, Py: Pyrite, I/S: Illite/Smectite, Ill&Mca: Illite & Mica, Kln: Kaolinite, Chl: Chlorite.

Table 5. Mineralogy-based brittleness indices used in this study.

Mineralogy-based brittleness indices		
BI1	$\frac{Q}{Q+Dol+F+Cl}$	Eq. (7)
BI2	$\frac{Q+Dol}{Q+Dol+F+Cl}$	Eq. (8)
BI3	$\frac{Q+Dol+F}{Q+Dol+F+Cl}$	Eq. (9)

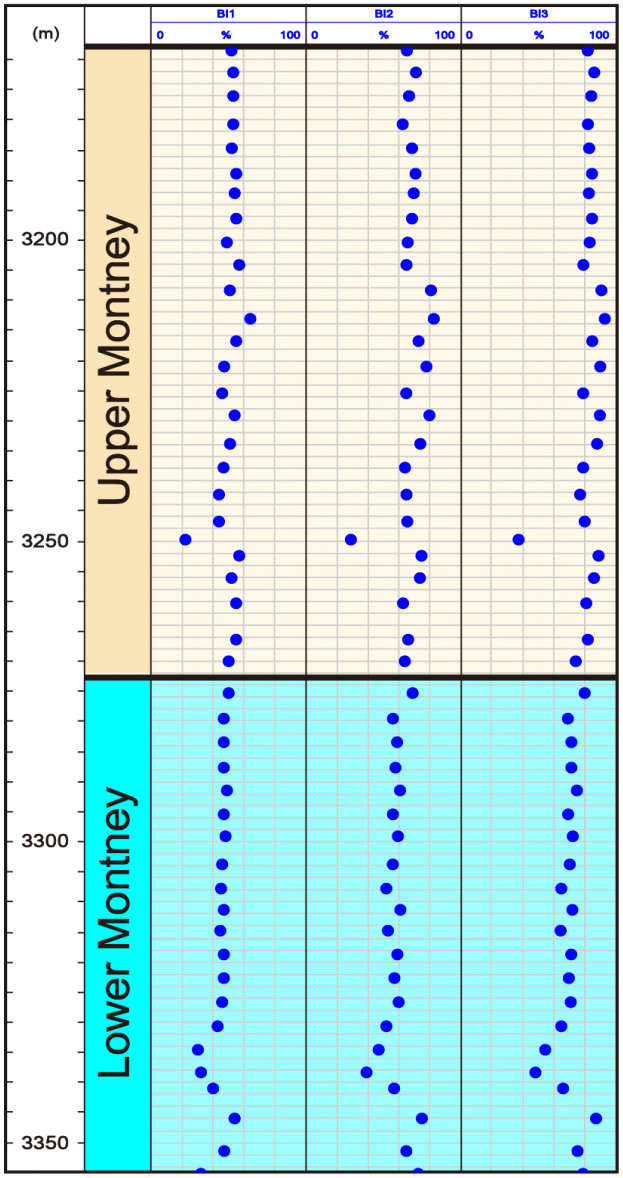

Fig. 11. Results of brittleness index estimations based on mineralogy. Track 1: BI1, Track 2: BI2, Track 3: BI3.

지는 않는다. 강도는 암석이 파괴되거나 항복점(yield point)에 도달할 때까지 암석이 견딜 수 있는 응력의 양을 의미한다(Van der Pluijm and Marshak, 2004; Fossen, 2010). 반면, 수압파쇄 기법

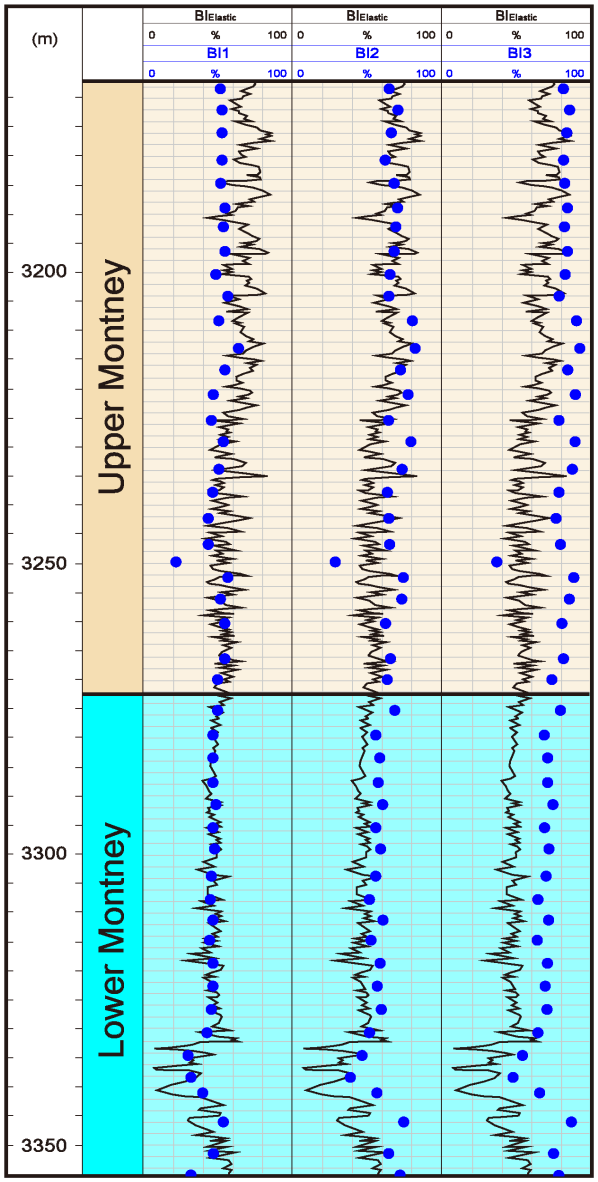

Fig. 12. Comparison between brittleness indices based on elastic moduli and mineralogy. Track 1: $BI_{Elastic}$-BI1, Track 2: $BI_{Elastic}$-BI2, Track 3: $BI_{Elastic}$-BI3.

의 효율을 결정하는 취성은 암석 내에서 다수의 미세한 균열이 발달함으로써 공극 사이의 연결성을 높일 수 있는 능력의 의미를 가진다. 따라서 암석의 강도에 영향을 미치는 요인과 취성에 영향을 미치는 요인은 서로 같지 않을 수 있다.

본 연구에서는 먼저 하부 몬트니층에 대한 박편 관찰 결과를 바탕으로, 암석 조직을 고려하여 하부 몬트니층의 강도에 영향을 미칠 수 있는 광물에 대해 고찰해 보았다. 하부 몬트니층은 여러 가지 광물들로 구성된 다종 광물 암석(polymineralic rock)이다. 다종 광물 암석의 강도는 암석 내에서 경질 광물(hard mineral)과 연질 광물(soft mineral)들의 응력지지 관계(stress-supporting network)에 의해 결정되며, 암석의 강도는 경질 광물의 함량과 선형으로 비례하

여 증가하지 않는다(Passchier and Trouw, 2005). 연질 광물의 함량이 경질 광물보다 많아서, 암석 내에서 경질 광물 사이에 응력지지 관계가 형성되지 못하고, 경질 광물이 연질 광물들에 의해 분리되어 있다면, 암석의 강도는 연질 광물들에 의해서 결정된다(Passchier and Trouw, 2005). 하부 몬트니층의 시추코어 샘플에 대한 박편 관찰 결과, 하부 몬트니층에서는 경도가 높은 석영이 보다 경도가 낮은 백운석과 점토광물에 의해 둘러싸여 있는 형태로 존재하는 것이 확인된다(Fig. 13). 이런 조건에서 하부 몬트니층의 강도는 석영보다는 백운석 또는 점토광물에 의해서 결정될 것이다. 이는 하부 몬트니층의 취성도에 영향을 미치는 것으로 추정한 광물인 석영과는 차이를 보이는데, 그 원인은 암석의 강도와 취성도의 개념이 달라 두 성질에 영향을 미칠 수 있는 요소가 서로 다르기 때문이다.

이에 본 연구에서는 암석의 취성에 영향을 미칠 수 있는 요소에 대해 고찰해보았다. 앞서 설명했듯이 암석의 취성은 입자 사이에 미세한 균열을 형성하여 공극을 연결할 수 있는 현상을 나타내므로, 취성이 높은 암석은 깨지기 쉬운 광물이 깨지거나 입자의 경계를 따라서 균열이 발생할 것으로 생각된다. 암석 내에서 입자 사이의 미세균열은 intragranular, transgranular, intergranular 형태로 발달할 수 있다(Passchier and Trouw, 2005). Intragranular fracture는 단일 입자 내에서 발달하는 균열을 의미한다. Transgranular fracture는 서로 접하고 있는 입자 내부를 가로질러서 발달하는 균열을 뜻하고, intergranular fracture는 서로 접하고 있는 입자들의 경계를 따라서 발달하는 균열을 의미한다(Passchier and Trouw, 2005). 수압파쇄 시에는 상대적으로 연성환경에서 발달하는 intragranular fracture를 제외한 transgranular 및 intergranular fracture의 형태로 균열이 발달할 것으로 추정할 수 있다. 암석 내에서 미세균열 발달의 유형을 결정하는 요인 중 하나의 예시로 교결물질의 영향이 있을 수 있다. 암석이 교결물질 없이 입자로만 이루어진 경우에 응력은 입자-입자 접촉면에 집중되고 균열은 입자 내부를 관통하는 transgranular fracture 형태로 발달하게 된다(Gallagher *et al.*, 1974). 하지만 입자 사이의 공극에 교결물질이 채워지게 되면, 입자-입자 접촉면에 집중되던 응력이 분산되고, 입자와 교결물질의 경도 차이에 따라 transgranular fracture 또는 intergranular fracture 형태로 균열이 발달하게 된다(Gallagher *et al.*, 1974). 즉, 동일한 광물 조성과 함량을 가진 암석이라도 암석 내에서 어떤 광물이 입자, 교결물질, 기질의 형태로 존재하는지에 따라서 입자지지(grain-supported) 또는 기질지지(matrix-supported)와 같은 암석 조직의 특성이 달라질 수 있고, 이는 암석의 취성도에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구의 하부 몬트니층에서는 석영 입자와 백운석, 점토광물로 이루어진 교결물질의 경계를 따라 intergranular fracture 형태의 균열이 발달할 것으로 예상된다.

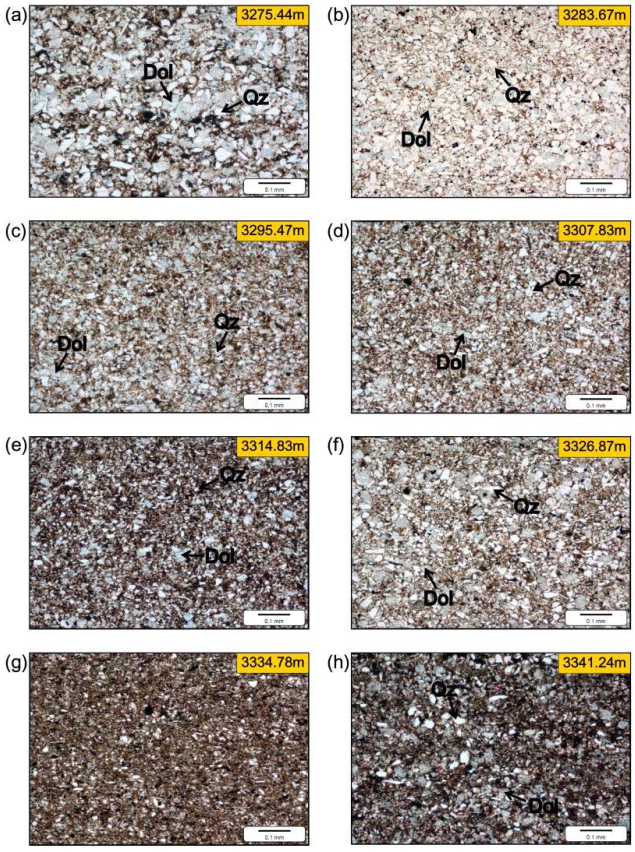

Fig. 13. Photomicrographs of the lower Montney Formation. Quartz grains are surrounded by dolomite and clay. (a) 3,275.44 m. (b) 3,283.67 m. (c) 3,295.47 m. (d) 3,307.83 m. (e) 3,314.83 m. (f) 3,326.87 m. (g) 3,334.78 m. (h) 3,341.24 m. Qz-quartz; Dol-dolomite.

이처럼 암석의 취성도를 결정하는 데 있어서는 광물 조성 및 함량 뿐만 아니라, 암석 조직의 영향을 고려해야 한다. 하지만 기존의 광물학 기반 취성도는 분말화 된 샘플에 대한 X-선 회절 분석을 통해 이루어지는 방법이기 때문에, 암석 조직에 대한 영향을 고려할 수 없다. 따라서 보다 정확한 취성도를 도출하기 위해서는 광물 조성 및 함량에 대한 분석 이외에도 박편 관찰을 통한 입자, 교결물질, 기질을 구성하는 광물의 정량분석, 직선 및 파도 모양의 엽층리 구조에 의한 이방성 등 암석이 가지는 조직에 대한 고려가 반드시 수반되어야 할 것으로 생각된다.

사사

본 연구 한국에너지기술평가원(No.20178510030880)과 한국지질자원연구원(GP2017-024)의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 사용된 자료를 제공해 주신 캐나다 하베스트사에 감사드립니다. 또한 퇴적학적 특성을 분석해준 한국지질자원연구원 양일호 연구원에게 감사드립니다. 마지막으로 논문의 초고를 검토해주신 두 분의 심사자와 안동대학교 조형래 교수님께 감사드립니다.

References

Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Clark, B., Waters, G.,

Jochen, V., Calvez, J.L., Lewis, R., Miller, C.K., Thaeler, J., Toelle and E., 2011, Shale gas revolution. Oilfield Review Autumn, 23, 3, 40-55.

Altindag, R., 2010, Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, 3, 361-370.

Chang, C., Zoback, M.D. and Khaksar, A., 2006, Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering, 51, 223-237.

Dong, T., Harris, N.B., Ayranci, K. and Yang, S., 2017, The impact of rock composition on geomechanical properties of a shale formation: Middle and Upper Devonian Horn River Group shale, Northeast British Columbia, Canada. AAPG Bulletin, 101, 2, 177-204.

Edwards, D.E., Barclay, J.E., Gibson, D.W., Kvill, G.E. and Halton, E., 1994, Triassic strata of the Western Canada Sedimentary Basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin. Canadian Society of Petroleum Geologists and the Alberta Research Council, 259-275.

Fjær, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. and Risnes, R., 2008, Petroleum Related Rock Mechanics (2nd Edition). Elsevier, Amsterdam, 491 p.

Fossen, H., 2010, Structural Geology. Cambridge University Press, Cambridge, 463 p.

Gallagher, J.J., Friedman, M., Handin, J. and Sowers, G.M., 1974, Experimental studies relating to microfracture in sandstone. Tectonophysics, 21, 3, 203-247.

Glorioso, J.C. and Rattia, A., 2012, Unconventional Reservoirs: Basic Petrophysical Concepts for Shale Gas. SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 38 p.

Golding, M.L., Orchard, M.J., Zonneveld, J.P., Wilson, N.S. F. and Reinson, G., 2015, Determining the age and depositional model of the Doig Phosphate Zone in northeastern British Columbia using conodont biostratigraphy. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 63, 2, 143-170.

Grieser, B., Bray, J., 2007, Identification of Production Potential in Unconventional Reservoirs. SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 6 p.

Guo, Z., Li, X. Y., Liu, C., Feng, X. and Shen, Y., 2013, A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale. Journal of Geophysics and Engineering, 10, 2, 1-10.

Herwanger, J.V., Bottrill, A.D. and Mildren, S.D., 2015, Uses and abuses of the brittleness index with applications to hydraulic stimulation. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas, USA, 1215-1223.

Hetényi, M., 1950, Handbook of Experimental Stress Analysis. Wiley, New York, 15 p.

Horsfield, B. and Schulz, H.M., 2012, Shale gas exploration and exploitation. Marine and Petroleum Geology, 31, 1, 1-2.

Howell, J.V., 1960, Glossary of Geology and Related Sciences. American Geological Institute, Washington, D.C., 325 p.

Hu, Y., Gonzalez Perdomo, M.E., Wu, K., Chen, Z., Zhang, K., Yi, J., Ren, G. and Yu, Y., 2015, New Models of Brittleness Index for Shale Gas Reservoirs: Weights of Brittle Minerals and Rock Mechanics Parameters. SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 12 p.

Hucka, V., and Das, B., 1974, Brittleness determination of rocks by different methods. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 11, 389-392.

Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E. and Pollastro, R.M., 2007, Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. AAPG Bulletin, 91, 4, 475-499.

Kendall, D.R., 1999, Sedimentology and stratigraphy of the Lower Triassic Montney Formation, Peace River Basin, Subsurface of Northwestern Alberta. M.S. thesis, University of Calgary, Calgary, 368 p.

Lai, J., Wang, G., Huang, L., Li, W., Ran, Y., Wang, D, Zhou, Z. and Chen, J., 2015, Brittleness index estimation in a tight shaly sandstone reservoir using well logs. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27, 1536-1545.

Markhasin, B., 1997, Sedimentology and Stratigraphy of the Lower Triassic Montney Formation, subsurface of Northwestern Alberta. M.S. thesis, University of Calgary, Calgary, 153 p.

McGlade, C., Speirs, J. and Sorrell, S., 2013, Unconventional gas–a review of regional and global resource estimates. Energy, 55, 571-584.

Morley, A., 1944, Strength of Materials. Longmans, Green,

London, 571 p.

National Energy Board, 2013, The Ultimate Potential for Unconventional Petroleum from the Montney Formation of British Columbia and Alberta. National Energy Board, 17 p.

Oyler, D.C. Mark, D. and Molinda, G.M., 2010, *In situ* estimation of roof rock strength using sonic logging. International Journal of Coal Geology, 84, 484-490.

Park, J.A., Park, B. and Min, K.B., 2014, Comparisons of brittleness indices of shale and correlation analysis for the application of hydraulic fracturing. Tunnel and Underground Space, 24, 4, 325-333 (in Korean with English abstract).

Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 2005, Microtectonics. Springer-Verlag, Berlin, 366 p.

Ramsay, J.G., 1968, Folding and Fracturing of Rock. McGrawy-Hill, New York, 562 p.

Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B. and Kundert, D., 2008, A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 11 p.

Rider, M. and Kennedy, M., 2011, The Geological Interpretation of Well Logs. Rider-French Consulting Ltd., Scotland, 432 p.

Rokosh, C.D., Lyster, S., Anderson, S.D.A., Beaton, A.P., Berhane, H., Brazzoni, T., Chen, D., Cheng, Y., Mack, T., Pana, C. and Pawlowicz, J.G., 2012, Summary of Alberta's shale-and siltstone-hosted hydrocarbon resource potential. Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Open-File Report, 6, 327 p.

Slatt, R. M., 2011, Important geological properties of unconventional resource shales. Central European Journal of Geosciences, 3, 4, 435-448.

Van der Pluijm, B.A. and Marshak, S., 2004, Earth Structure. W. W. Norton and Company. Inc, New York, 656 p.

Wang, F.P. and Gale, J.F., 2009, Screening criteria for shale- gas systems. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 59, 779-793.

Wright, G.N., McMechan, M.E. and Potter, D.E.G., 1994, Structure and architecture of the Western Canada Sedimentary Basin. In: Mossop, G.D., Shetsen, I. (eds.), Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin. Canadian Society of Petroleum Geologists and the Alberta Research Council, 25-40.

Zhang, D., Ranjith, P.G. and Perera, M.S.A., 2016, The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 143, 158-170.