

서캐나다 셰일가스 분지별 맞춤형 생산성 향상 솔루션을 위한 암석역학적 특성 연구

최준형¹, 이현석¹, 김유리¹, 김정현², 이대성^{2*}

¹한국지질자원연구원 석유가스연구센터, ²동아대학교 에너지자원공학과

A study on increase the productivity optimization solution using characteristics of geomechanical property in Western Canada Shale Basin

Junhyung Choi¹, Hyun Suk Lee¹, Yuri Kim¹, Jeonghyun Kim², Dae Sung Lee^{2*}

¹Oil & Gas Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University

요 약

방향성 시추 및 다단계 완결시스템을 이용한 수압파쇄와 같은 신기술의 발달로 서부 캐나다에서의 셰일가스 생산이 늘어나고 있다. 성공적인 시추와 저류층 자극을 위해서는 분지별 암석역학적 물성 및 취성도 지수를 기초로 한 차별화된 개발 방법이 필요하다. 본 연구에서는 서부 캐나다 셰일가스 개발 유망지역인 몬트니 분지와 리아드 분지 시추공 자료를 활용하여 암석역학적 물성 및 취성도 지수 분석을 실시하였다. 이 두 분지 모두 개발에 적합한 총유기탄소 함량 및 암석역학적 물성을 가지고 있어 셰일가스 저류층으로서의 큰 개발 잠재력을 보이고 있다. 특히 몬트니 분지의 몬트니 지층과 리아드 분지의 베사리버 지층의 경우 영률 40 GPa 이상, 포아송비 0.15 이하로 수압파쇄에 적합한 취성 특성을 보이는 높은 영률과 낮은 포아송비를 보인다. 이와 같은 암석역학적 특성으로 인해 셰일가스 개발에 필요한 자극기술 중 하나인 수압파쇄 기술 적용이 용이할 것으로 판단된다.

핵심어: 비전통자원, 셰일가스, 지오미케닉스, 특성화, 취성도 지수

ABSTRACT

The shale gas production has increased in Western Canada due to development of new technologies for directional drilling and hydraulic fracturing using multistage completion system. The customized development method based on geomechanical properties and brittleness index for each shale play is necessary for successful implementation of drilling and reservoir stimulation. In this study two prospective shale plays, the Montney and Liard basins in Western Canada, has selected for geomechanical properties and brittleness index from available wellbore data. As the result of this study, these two basins has high TOC, optimal geomechanical property and shows great development potential. Montney Formation in the Montney Basin and Besa River Formation in the Liard Basin show high Young's modulus and low Poisson's ratio, which is over 40 GPa, Young's modulus and below 0.15, Poisson's ratio. These rock properties of shale gas reservoirs play an important role in reservoir stimulation, especially in hydraulic fracturing.

Keywords: unconventional resource, shale gas, geomechanics, characterization, brittleness index

1. 서론

방향성 시추 및 다단계 수압파쇄 기술이 개발되면서 전통자원(conventional resource)에서 비전통자원(unconventional resource) 개발로 자원개발의 판도가 크게 바뀌게 되었다(Sakmar, 2011; Rivard *et al.*, 2014). 2005년부터 본격적으로 북미지역에서 셰일가스(shale gas) 개발이 진행되어 치밀한 셰일 미세 공극 내에 존재하는 다량의 셰일가스를 생산하고 있다. 그러나 기존의 전통자원에 비하여 아주 낮은 투과도로 인하여 개발이 쉽지 않기 때문에 수압파쇄기법(hydraulic fracturing)과 같은 저류층 자극기술 적용이 요구된다.

수압파쇄기법은 치밀 저류층에 고압의 파쇄유체를 주입하여 인공

균열을 생성하는 방법으로 저류층의 투과도를 높여서 생산율을 높여주는 방법이다(Gandossi and Von Estorff, 2013). 이러한 수압파쇄기법을 적용할 때 발생하는 저류층 파쇄압력(fracture pressure), 인공균열의 크기 및 전파방향 등은 저류층에 작용하는 현장 주변 응력의 크기와 방향, 인장강도, 암석의 취성도 등과 같은 저류층의 암석역학적 특성에 큰 영향을 받는다(Clifton and Abou-Sayed, 1981; Sousa *et al.*, 1993; Savitski and Detournay, 2002; Liu, 2005). 저류층의 암석역학적 특성은 퇴적 당시 퇴적 환경과 지구조적 응력변형에 따라 달라지며, 인접한 지역 또는 심도에 따라 역학적 물성에 대한 차이가 발생하게 된다. 따라서 수압파쇄기법이 필수적인 셰일가스 개발을 위해서는 분지별 암석역학적 특성을 분석하여 맞춤형 솔루션

을 제안하는 것이 매우 중요하다(Gale *et al.*, 2014).

본 연구에서는 서부 캐나다 셰일가스 분지별 맞춤형 개발 솔루션을 제안하기 위해 서부 캐나다 퇴적 분지인 몬트니(Montney) 분지와 리아드(Liard) 분지의 암석역학적 물성 특성을 분석하였다. 선별된 두 개의 서부 캐나다 분지에 대한 기초 자료 확보와 심도별 물성을 분류하였고, 자극기술 적용 시 필요한 추가 물성을 도출하였다. 또한 확보된 기초자료와 도출된 물성을 이용하여 평가된 암석역학적 특성화 결과를 바탕으로 입체적인 암석역학적 저류층 특성화를 진행하였으며, 이는 셰일가스 생산성 향상을 위한 맞춤형 솔루션을 제공할 수 있다.

2. 지질 개요

서캐나다 지역 셰일가스 분지별 맞춤형 솔루션 제안을 위하여 서캐나다 브리티시컬럼비아 주(British Columbia, BC) 지역을 중심으로 셰일가스 시추공별 저류층 물성 특성화를 위한 분석을 실시하였다. 대상 셰일 분지로는 브리티시컬럼비아 주 북서부에 위치한 브리티시컬럼비아 동남부에서 앨버타 주(Alberta, AB)에 이르는 몬트니 분지 시추공 7공과 리아드 분지의 시추공 4공을 대상으로 저류층의 암석역학적 분석을 실시하였다(Fig. 1). 서캐나다 몬트니 지층은 중생대 트라이아스기(Triassic) 초기에 판게아(Pangea) 서쪽 가장자리에서부터 형성되었으며, 전반적으로 켜기형태를 지닌 해성퇴적층이다(Edwards *et al.*, 1990; Davies *et al.*, 1997; Dixon, 2000). 특히, 몬트니 분지의 경우 총유기탄소(total organic carbon, TOC) 함량이 높은 저류층이 존재하기 때문에 석유·가스와 같은 전통자원 개발뿐만 아니라, 다양한 비전통자원 개발도 활발히 이뤄지고 있다(Euzen *et al.*, 2014). 토아드 리버(Toad River) 북부에 위치한 리아드 지층은 무스카와 멤버(Muskwa member) 하부에 위치하고 있으며, 셰일가스 개발에 대한 잠재력이 높은 지층이다(Ferri *et al.*, 2011).

셰일가스의 최적화 개발을 위해서는 저류층의 공간적 분포와 총유

기탄소, 유체 포화도 및 저류층 물성에 대한 종합적인 이해가 필요하다(Euzen *et al.*, 2014). 서캐나다 지역 셰일가스 분지별 암석역학적 저류층 특성화 연구를 위하여 셰일가스 개발이 활발히 이뤄지고 있는 두 개의 분지에 대해 조사하였다. 총유기탄소, 공극률(porosity), 투과도(permeability)와 같이 저류층의 생산성 분석과 시추공 안정성 및 수압파쇄 설계에 필수적인 저류층 물성과 영률(Young's modulus, E), 포아송비(Poisson's ratio, ν), P파속도(V_p), 일축압축강도(UCS), 내부마찰각(θ), 인장강도(σ_c) 등 암석역학적인 물성을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 셰일 분지별 저류층 물성 특성화를 진행하고, 수압파쇄와 관련된 취성도 지수(brittleness index) 분석을 통해 최적의 생산심도에서의 수압파쇄기술 적용 가능성과 높은 효율성을 획득할 수 있도록 저류층별 기초자료를 구축하고자 한다.

3. 연구 자료 및 방법

본 연구의 주요 분석자료는 캐나다 앨버타 주에 위치한 몬트니 분지의 시추공 7공과 리아드 분지 시추공 4공에서 획득한 물리검층 및 실내 실험자료를 바탕으로 분지별 암석역학적 물성을 수집 및 분석하였다.

3.1. 총유기탄소

총유기탄소는 LECO사의 C632 Carbon Determinator를 이용하여 측정하였다. 총유기탄소는 주로 근원암의 품질을 평가하는데 사용되며, 저류층의 잠재력을 평가하는 중요한 주요 변수 중의 하나이다. 본 시험의 목적은 암석 표본에 존재하는 총유기탄소의 함량을 결정하는 것으로, 일반적으로 총유기탄소와 암석의 총 가스함량은 직접적인 상관관계를 가진다. LECO사의 C632모델의 총유기탄소 실험 결과에서는 흡착등온(adsorption isotherm), 비트리나이트 반사도(vitrinite reflectance) 및 암석학(petrology)과 같은 추가 실험에 적합한 샘플을 결정하는 데에도 도움을 줄 수 있다.

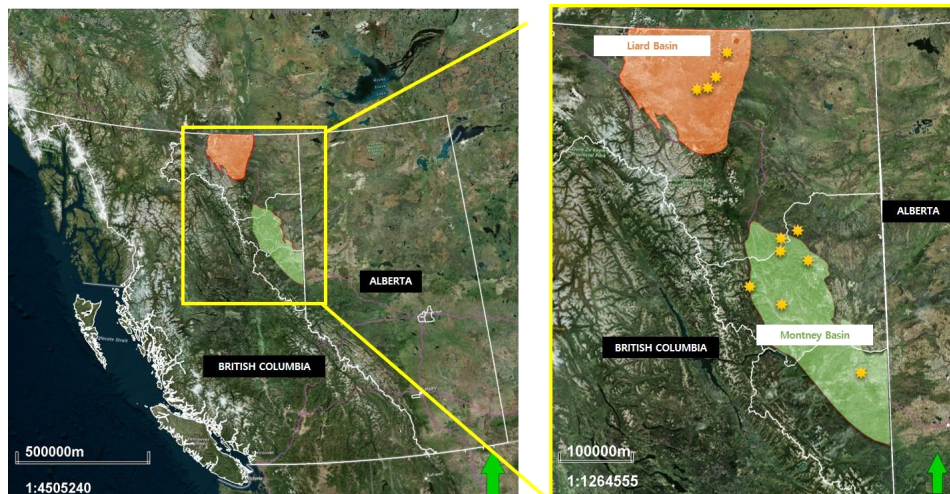


Fig. 1. Location map of the Western Canada shale play well.

3.2. 입자부피, 입자 밀도 및 공극률

다공성 매질 공극률의 경우 겉보기 부피에 대한 공극의 부피 비율로 정의되며, 저류층 암석의 저장성을 평가하는 요소 중에 하나이다. 저류층에서 공극률을 측정하는 방법으로 현재까지 다양한 방법이 활용되고 있으며, 본 연구에서는 헬륨 가스를 이용하여 세일 시료 내의 공극부피를 측정하였다.

먼저 일정한 부피를 가지는 빌릿(billet)을 이용하여 각 샘플 시료의 건조 입자(dry grain) 부피를 측정하고, 보일의 법칙(Boyle's law)을 이용하여 각 샘플에 대한 공극률을 계산하였다. 현장 세일 시료의 공극률을 측정하기 전 이미 공극률 값을 알고 있는 표준시료인 베레아 사암(berea sandstone)을 사용하여 공극률 측정장비를 검증하였으며, 현장 세일 시료의 공극률 측정이 끝나면 다시 한 번 표준시료의 공극률을 측정하여 장비에 대한 보정을 실시하였다. 5번의 공극률 실험이 끝날 때마다 새로운 보정 시험을 반복하여 측정값의 신뢰성을 높였다. 현장 세일 시료의 공극률은 반복적인 실험을 실시하고, 그 결과값을 이용하여 평균값으로 최종 공극률값을 측정하였다.

건조 입자 밀도의 경우, 샘플 무게 및 건조 입자 부피를 사용하여 아래와 같이 계산하였다.

$$\rho_{G,DRY} = \frac{w_s}{V_{G,DRY}}$$

$\rho_{G,DRY}$: Dry grain density [g/cc]

w_s : Dry weight [g]

$V_{G,DRY}$: Dry grain volume [g/cc]

공극률은 측정한 겉보기 부피($V_{B,AR}$)와 계산된 건조 입자 부피($V_{G,DRY}$)를 사용하여 총 헬륨 가스가 채워진 세일의 공극률을 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$\phi_{DRY} = \frac{V_{B,AR} - V_{G,DRY}}{V_{B,AR}}$$

ϕ_{DRY} : Total gas filled dry porosity [fraction]

$V_{B,AR}$: As - received bulk volume [cc]

$V_{G,DRY}$: Dry grain volume [cc]

추가적으로 포화도는 물과 시료 무게를 이용하여 아래 식과 같이 계산할 수 있다.

$$S_W = \frac{\frac{w_b}{p_b}}{\frac{V_P}{V_P}} \quad S_o = \frac{\frac{w_o}{p_o}}{\frac{V_P}{V_P}}$$

S_w : Water saturation [fraction]

w_b : Weight of brine [g]

ρ_b : Brine density [g/cc]

S_o : Oil saturation [fraction]

w_o : Weight of oil [g]

ρ_o : Oil density [g/cc]

V_p : P - wave velocity [km/sec]

3.3. 투과도

단상 유동의 Darcy's 법칙을 통하여 다공성 매체의 정상 유동상태 투과도를 측정하였으며, 투과도 측정의 경우 최소 구속압(confining) 조건(800 psi)에서 측정이 이뤄졌다. 현장 세일 시료를 측정하기 전에 투과도를 알고 있는 표준시료 베레아 사암을 이용하여 투과도 측정장비를 보정하였으며, 현장 세일 시료 측정 전/후 베레아 사암의 투과도를 재측정하여 현장 세일 시료의 투과도 값을 보다 정확하게 측정하였다. 5번의 투과도 측정 후 새로운 보정 시험을 반복하였다. 세일 시료의 경우 투과도 측정 직전까지 건조기에 보관되어 측정이 이뤄져 습도로 인한 오차를 최소화 하였다. 투과도는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$k = \frac{\mu QL}{AP}$$

k : Permeability [Darcy]

Q : Flow rate [cm³/sec]

μ : Fluid viscosity [mPa · s]

A : Sample cross sectional area [cm²]

L : Sample length [cm]

P : Differential pressure across sample [atm]

3.4. 일축압축강도

일축압축강도(UCS)를 측정하기 위하여 수직 코어 샘플을 이용하여 일축압축강도 실험을 실시하였으며, 이방성에 대한 암석역학적 물성값을 고려하기 위하여 수직(0°), 경사(45°), 수평(90°)의 경사 코어 샘플을 이용하여 각도별 압축강도 시험을 수행하였다. 시험 방법으로는 먼저 원기둥 형태의 플러그 세일 시료를 제작하고, 양 끝단의 편평도 오차가 0.003 mm(≈0.001 inch) 이내가 될 수 있도록 평행하게 연마한 후 시료 직경 및 길이에 대한 재원을 측정한다. 제작된 시료에 축 방향 변형률과 횡 방향 변형률을 측정할 수 있는 스트레인게이지를 시료의 측면에 부착하고 압축하중기 사이에 위치시켰다. 하중에 의해 시료가 파괴되거나 축 방향 변위가 원하는 구간까지 도달하기까지 시료에 일정한 변위 속도로 축 하중을 증가시키며, 시료가 파괴되는 임계 압력 및 각 응력 조건에서의 변형률 값을 측정한다.

일축압축강도 시험이 완료되면 시료의 일축압축강도, 영률, 포아송비 등 역학적 물성에 관한 분석을 실시하였다. 본 시험의 경우, 실험 이후 암석의 회수가 어려워 동일 시료에 대한 반복 시험이 불가능하므로, 대상 심도에 대하여 50 cm 내에서 확보한 2~3개의 시료를 대

상으로 실험을 하였다.

3.5. 취성도 지수

취성도란 셰일 저류층 및 치밀 저류층 개발에 있어 수압파쇄 설계는 물론 스위트스팟(sweet-spot) 위치 선정에 있어 주요한 변수이다 (Mews *et al.*, 2019). 그러나 취성도 지수는 광물학적 물성 및 역학적 물성을 통하여 산정할 수 있는 다양한 방법이 존재하기 때문에 정확한 추정이 힘든 실정이다(Hucka and Das, 1974; Altindag, 2002; Hajiabdolmajid *et al.*, 2003; Nygård *et al.*, 2006; Rickman *et al.*, 2008; Yagiz, 2009; Holt *et al.*, 2011; Tarasov and Potvin, 2013; Jin *et al.*, 2014a, 2014b; Zhang, 2016). 따라서 본 연구에서는 확보한 저류층 물성값을 이용하여 산출 가능한 5가지 계산식을 이용하여 셰일 저류층의 취성도 지수를 산출하였다(Table 1).

BI_1 의 경우, Jarvie *et al.*(2007)이 제안한 방법으로 셰일 내에 광물학적 성분 함량을 이용하여 석영과 같이 취성이 높은 성분이 많을 경우 취성도가 높을 것으로 추정하는 방법이다. BI_2 의 경우, Zhang *et al.*(2017)이 제안한 방법으로 XRD 기법을 통한 광물 구성 물질을 활용하여 광물학적 기반 취성도 지수를 계산하는 방법이다. BI_3 의 경우, Hucka and Das(1974)가 제안한 방식으로 암석의 일축압축강도와 인장강도의 비율에 따라 취성에 영향을 미친다는 것을 바탕으로 암석역학적 물성에 의한 취성도 지수를 간접하게 계산하는 방법이다. BI_4 의 경우, 암석의 탄성계수를 기초로 한 취성도 지수 계산 방법으로 탄성계수와 취성사이의 선형적 관계를 이용하며, 암석의 파괴거동을 해석하는데 유용한 방식이다(Mathia *et al.*, 2016). BI_5 의 경우,

BI_5 과 동일하게 Hucka and Das(1974)에 의해 제안된 방법으로 모어(Mohr)의 파괴포락선을 기초로 한 취성도 지수 계산방법이다. 모어의 암석 파괴이론에 따르면 연성을 띠는 암석의 경우 내부마찰각이 작게 나타나는데, 이 내부마찰각을 이용하여 취성도 지수를 추정할 수 있다.

4. 연구결과 및 토의

4.1. 몬트니 분지

캐나다 브리티시컬럼비아 주 남동부에서 알버타 주에 이어지는 대규모의 셰일 분지인 몬트니 분지 내 총 7개의 시추공에 대하여 총유기탄소, 수리적 및 역학적 암석물성 자료를 확보하였다(Table 2).

03-15-079-17-W6/02 시추공의 경우, 총유기탄소, 공극률, 투과도, 영률, 포아송비, P파 속도에 관한 물성값을 확보하였으며(Fig. 2a), 이 자료는 Hallway 지층(2,100 m)에서 몬트니 지층(2,600 m)까지 암석역학적 물성 측정 시험을 실시하였다. 암석역학 시험의 경우 비파괴시험인 초음파속도를 이용하여 탄성계수인 영률 및 포아송비를 측정하였으며, 특히 관심 대상 지층인 몬트니 지층에 대한 분석을 주로 실시하였다.

C-52-H/94-B-9 시추공의 경우, 암석역학 물성인 영률, 포아송비, 일축압축강도, 내부마찰각에 대한 물성 자료를 확보하였으며(Fig. 2b), 일축압축 시험을 통하여 정적 암석역학적 물성값을 확보하였다. 몬트니 지층인 심도 2,100 m에서 2,400 m까지의 8개의 코어 시료를 이용하여 실제 암석역학 물성실험을 실시하였으며, 인장강도, 경도 시험 등의 추가적인 역학적 물성 시험이 시행되었다.

Table 1. Brittleness index calculation method.

BI calculation method		
1	$BI_1 = \frac{W_{quartz}}{W_{quartz} + W_{dolomite} + W_{clay}}$	Jarvie, et al., 2007
2	$BI_2 = \frac{W_{quartz} + W_{dolomite} + W_{pyrite}}{W_{total}}$	Zhang, et al., 2017
3	$BI_3 = \frac{C_0 - T_0}{C_0 + T_0}$	Hucka and Das, 1974
4	$BI_4 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{E_{static} - E_{s,min}}{E_{s,max} - E_{s,min}} + \frac{\nu_{static} - \nu_{s,max}}{\nu_{s,min} - \nu_{s,max}} \right)$	Mathia, et al., 2016
5	$BI_5 = \sin\theta$	Hucka and Das, 1974
W_{quartz} : Quartz weight [%] $W_{dolomite}$: Dolomite weight [%] W_{clay} : Clay weight [%] W_{pyrite} : Pyrite weight [%] W_{total} : Total weight [%] C_0 : Compressive strength [MPa] T_0 : Tensile strength [MPa] E_{static} : Static Young's modulus [GPa] $E_{s,min/max}$: Static min/max Young's modulus [GPa] ν_{static} : Static Poisson's ratio [-] $\nu_{s,min/max}$: Static min/max Poisson's ratio [-] θ : Friction angle [deg]		

Table 2. Summary of properties in Montney Basin well.

UWI	Property	Map
03-15-079-17-W6/02	TOC, porosity, permeability, Young's modulus, Poisson's ratio, P-wave velocity	
C-52-H/94-B-9	Young's modulus, Poisson's ratio, UCS, internal friction angle, brittleness index	
C-04-F/94-G-8	Young's modulus, Poisson's ratio, P-wave velocity, UCS, internal friction angle, brittleness index	
C-92-G/94-G-8	Porosity, permeability, brittleness index	
D-78-G/94-H-4	Porosity, permeability, Young's modulus, Poisson's ratio, UCS	
B-66-D/94-H-12	Porosity, permeability	
C-30-I/94-B-15	Young's modulus, Poisson's ratio, P-wave velocity, UCS, internal friction angle, brittleness index	

C-04-F/94-G-8 시추공의 경우, C-52-H/94-B-9 시추공 암석 코어와 동일하게 암석역학 시험을 실시하였으며, Montney 지층, Mid Montney 지층, Montney turbidite 지층과 같이 몬트니 지층을 세 부적으로 나눈 지층에 대한 암석역학적 물성 자료를 확보하였다(Fig. 2c). 총 24개의 암석시료를 이용하여 압축강도 시험을 실시하고 역학적 물성을 도출하였으며, 동일 심도에서 유사한 물성값이 도출되었다. 하지만 광물학적 성분 값이나 역학적 물성 자료의 부족으로 인하여 취성도 지수에 대한 자세한 분석은 이루어지지 못하였다.

C-92-G/94-G-8 시추공의 경우, 암석역학 시험을 실시하지 못하였으나, 공극률, 투과도 측정시험이 실시되었으며(Fig. 2d), 광물학적 성분 분석을 통하여 취성도 지수를 계산하였다. 전반적으로 물성 측정에 관한 자료가 부족한 실정이었지만, 37개 수평 플러그 시료를 이용하여 수리적 물성인 공극률, 투과도에 대한 시험이 시행되었다. 대상 지층으로는 Charlie lake 지층(1,500 m)에서 Lower Montney 지층(1,880 m)의 심도 내에서 공극률 및 투과도에 대한 시험이 시행되었으며, 광물학적 성분 분석을 통해 몬트니 지층에 대한 취성도 지수 분석을 실시하였다.

D-78-G/94-H-4 시추공의 경우, 일축압축강도 시험을 통한 암석역학적 물성인 영률, 포아송비, 일축압축강도에 대한 물성 자료를 확보하였다(Fig. 2e). 심도별 공극률 측정 자료와 36개의 암석 코어 시료를 이용하여 투과도 측정 시험을 실시하였으며, 압축강도 시험을 통해 암석역학적 물성을 분석하였다. 하지만 취성도 지수 계산에 필요한 변수의 부족으로 인하여 취성도 지수에 대한 계산은 이행하지 못하였다. 하지만 관심 대상 지층인 몬트니 지층에 대한 공극률 및 투과도 자료를 확보함으로써 대상 지층의 생산성 분석에 요구되는 물성에 대한 입력 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

B-66-D/94-H-12 시추공의 경우, C-92-G/94-G-8 시추공처럼 암석역학적 시험에 대한 자료는 확보하지 못하였으나, 수리적 물성에 대한 시험 결과 값을 확보하였다(Fig. 2f). 수리적 물성의 경우, 64개의 암석 코어 시료를 이용하여 측정된 결과로 대상 지층인 몬트니 지층(1,400~1,600 m)을 세부적으로 구분하여(Montney D, Montney silt, Montney B, Lower Montney) 물성값을 도출하였다. 대부분의 몬트니 지층은 0.1 md 이하의 투과도 값을 나타냈으며, 평균

4.8% 정도의 공극률 값을 나타내었다.

C-30-I/94-B-16 시추공의 경우, 13개의 암석시료를 이용한 일축압축강도 시험을 실시하고, 암석역학 물성에 대한 분석을 실시하였다(Fig. 2g). 몬트니 지층의 경우, 심도 2,400 m에서 관찰되기 시작하였으며, 암석시료의 경우 Mid Montney 지층(2,500 m)부터 실험 자료를 확보하고 몬트니 지층 하부인 Belloy 지층까지 암석역학 물성 자료를 확보할 수 있었다.

몬트니 분지에서 관심 대상 지층인 몬트니 지층의 경우 지질학적으로 4개 지층으로(Montney, Mid Montney, Montney turbidite, Lower Montney)로 구분되지만, 이 연구에서는 하나의 몬트니 지층으로 표현하여 나타내었다. 시추공별 저류층 물성에 대해 살펴보면, C-30-I/94-B-15 시추공을 기준으로 동남부로 이동하면서 일축압축강도 값의 변화 폭이 작아진다. 영률 및 포아송비에 대한 분석 결과, 평균 42.8 GPa 및 0.19로 다소 높은 값을 나타냈으며, 동남쪽 방향으로 갈수록 영률 값을 줄어들지만 포아송비는 커지는 경향을 나타내었다. 취성도 지수의 경우, 광물학적 및 역학적 물성을 이용하여 추정할 수 있었으며, 대부분 높은 취성도 지수를 보였다.

4.2. 리아드 분지

캐나다 브리티시컬럼비아 주 북서부에 위치한 리아드 분지 지역을 대상으로 총 4개의 시추공에 대하여 총유기탄소, 수리적 물성 및 암석역학 물성 자료를 확보하였다(Table 3). 시추공 별 분석한 물성으로는 총유기탄소, 공극률, 투과도, 영률, 포아송비, P파속도, 일축압축강도, 내부마찰각, 인장강도가 있으며, 분석한 물성자료를 활용하여 취성도 지수를 도출하였다.

A-38-B/94-N-08 시추공의 경우, 역학적인 물성 측정값만이 존재하였고, 관심 대상 지층인 베사 리버 지층(4,000 m)부근을 기준으로 상하부 층에 대한 영률, 포아송비, 일축압축강도, 내부마찰각이 존재한다(Fig. 3a). 총 27개 시료를 이용하여 암석역학적 시험을 실시하였으며, 동일 심도를 대상으로 반복 실험을 통해 분석 결과 값에 대한 신뢰도를 확보하였다. 특히 역학적 물성에 대한 취성도 지수를 계산하였으며, 베사 리버 지층의 취성도 지수의 경우 최소 0.4 이상의 값을 보이고, 평균 0.67 정도의 취성도 지수 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

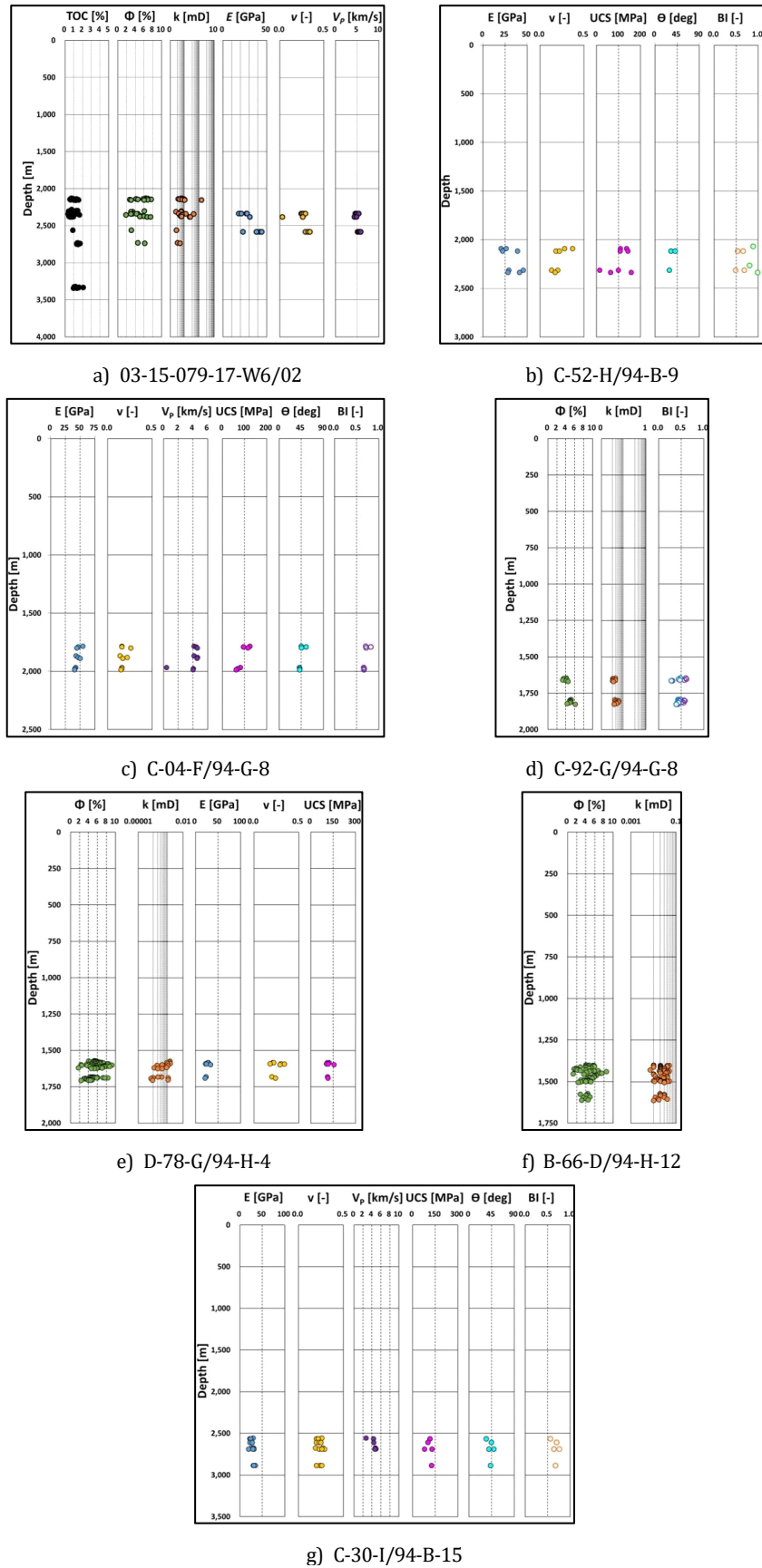
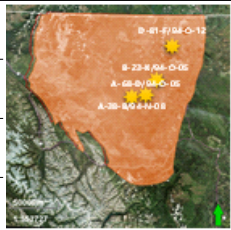


Fig. 2. Core analysis data in Montney Basin well.

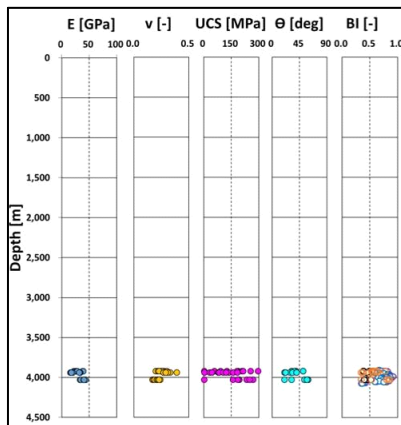
Table 3. Summary of properties in Liard Basin well.

UWI	Property	Map
A-38-B/94-N-08	Young's modulus, Poisson's ratio, UCS, Internal friction angle, Brittleness index	
B-23-K/94-O-05	TOC, porosity, permeability, Young's modulus, Poisson's ratio, P-wave velocity, UCS, internal friction angle, brittleness index	
A-68-D/94-O-05	TOC, porosity, permeability, brittleness index	
D-81-F/94-O-12	Porosity, permeability, Young's modulus, Poisson's ratio, P-wave velocity, UCS, tensile strength, brittleness index	

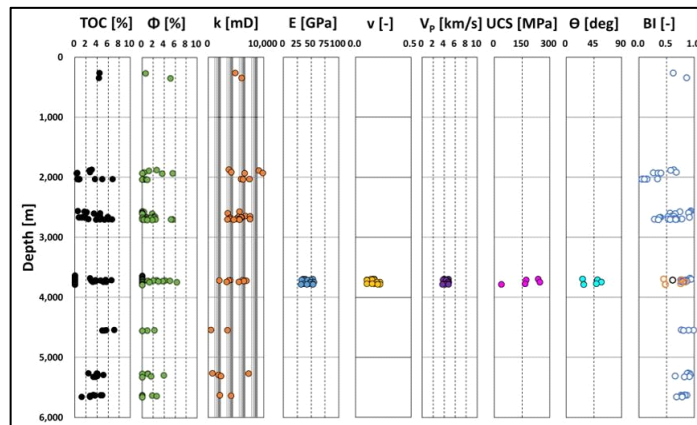
B-23-K/94-O-05 시추공의 경우, 총유기탄소, 공극률, 투과도, 영률, 포아송비, P파속도, 일축압축강도, 내부마찰각에 대한 자료를 확보하였다(Fig. 3b). 심도별 저류층 물성에 대하여 살펴보면 Chinkeh silt 지층(2,000 m)부근, Flett 지층(2,700 m)부근, 1st Black shale 지층(3,700 m) 부근을 대상으로 총유기탄소, 공극률, 투과도 측정에 대한 물성값을 확보하였으며, 특히 1st Black shale 지층의 경우 암석역학적 물성 분석이 추가로 이루어졌다. B-23-K/94-O-05 시추공은 대부분 심도에서 공극률이 5% 이내로 낮게 측정되었지만 투과도 값은 1 darcy 수준의 매우 높은 투과도를 나타내었

다. 취성도 지수 분석 결과에서도 높은 값을 보여 수압파쇄 시 높은 효율을 보일 것으로 사료된다.

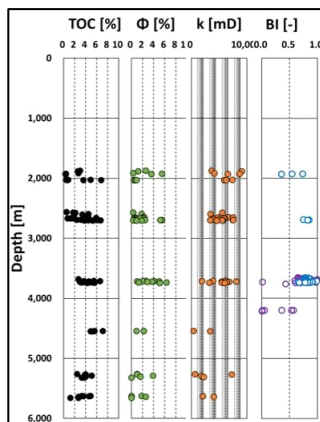
A-68-D/94-O-05 시추공의 경우, 총유기탄소, 공극률, 투과도에 대한 자료를 확보하였다(Fig. 3c). 심도별 저류층 물성에 대해 살펴보면 Tord 지층(2,000 m) 부근, Grayling 지층(2,700 m) 부근, 베사 리버 지층(3,700 m)부근을 대상으로 총유기탄소, 공극률, 투과도 측정값을 확보하였으며, 관심 대상 지층인 베사 리버 지층의 경우, 수 darcy 수준의 높은 투과도 값을 가지는 것으로 확인되었고, 대부분 0.1 mD 이상의 투과도 값을 보였다. 특히 광물학적 성분을 통한



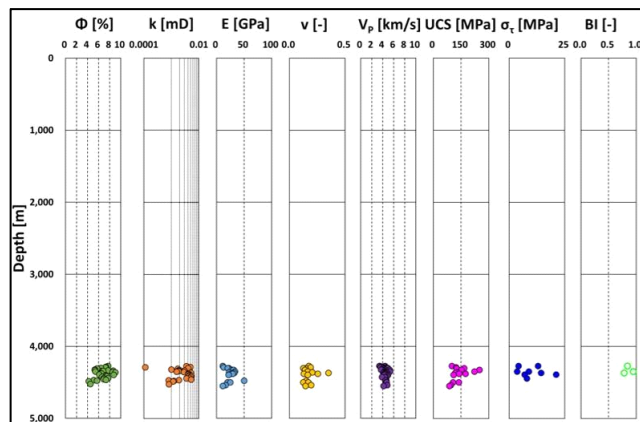
a) A-38-B/94-N-08



b) B-23-K/94-O-05



c) A-68-D/94-O-05



d) D-81-F/94-O-12

Fig. 3. Core analysis data in Liard Basin well.

취성도 지수 분석 결과, 관심 대상지역인 베사 리버 지층에서 충분한 취성을 보일 것으로 예상된다.

D-81-F/94-O-12 시추공의 경우, 공극률, 투과도 및 역학적 물성에 대한 자료를 확보할 수 있었으며(Fig. 3d), 1st Black shale 지층(4,400 m) 부근을 대상으로 역학적 물성에 대한 시험 결과를 확보하였다. 특히 전단 강도에 대한 분석이 추가적으로 수행되었으며, 이를 통하여 취성도 지수 값을 분석하였다.

브리티시 컬럼비아 주 북서부에 위치한 리아드 분지 4개의 시추공에서 확보한 암석역학 물성 및 총유기탄소, 공극률, 투과도 자료를 확보하였으며, 리아드 분지의 3차원적 물성값 도출을 위하여 각 시추공에서 확보한 물성 자료를 지질학적 지층 구분에 따라 분류하여 나타내었다(Fig. 4). 확보한 자료를 통하여 관심 지층인 베사 리버 지층 내에서 역학적 물성을 살펴보았다. 먼저 베사 리버지층 상부에 위치한

Exshaw 지층의 경우 동일 심도에서 다양한 일축압축강도 값을 나타냈으며, Lower Besa river 지층 및 1st Black shale 지층에서는 일반적인 셰일 암석의 일축압축강도인 35~70 MPa (Koncagül and Santi, 1999)보다 높은 150 MPa 이상의 일축압축강도 값을 나타내었다. 영률 및 포아송비의 경우 평균값이 32.7 GPa과 0.19로 나타났으며, 서북쪽으로 이동할 때 값이 줄어드는 경향을 나타내었다. 취성도 지수의 경우, 베사 리버 지층을 기준으로 상하부 지층에서 대부분 높은 취성도 지수를 나타내었다.

셰일가스 맞춤형 평가 솔루션을 위해 브리티시 컬럼비아 주에서 앨버타 주에 걸친 몬트니 분지 내 7개 시추공에 대한 저류층 물성 특성화를 진행하였으며, 몬트니 시추공에서 시추공별 암석역학 물성, 총유기탄소, 공극률, 투과도 자료를 확보하였다. 확보한 자료를 활용하여 3차원적 물성값을 나타내기 위하여 시추공 위치 및 지층에 대한

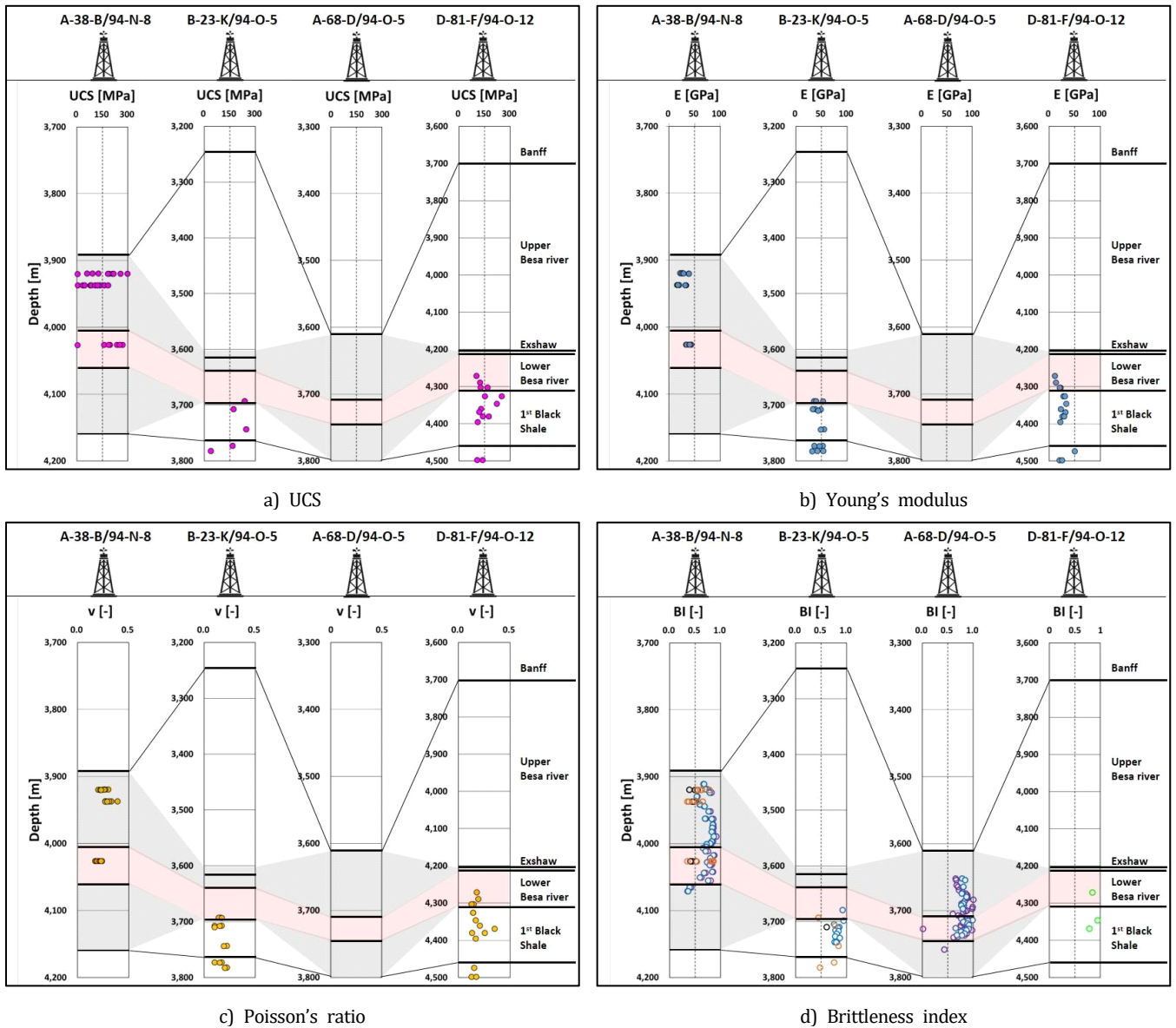


Fig. 4. Reservoir properties in Liard Basin.

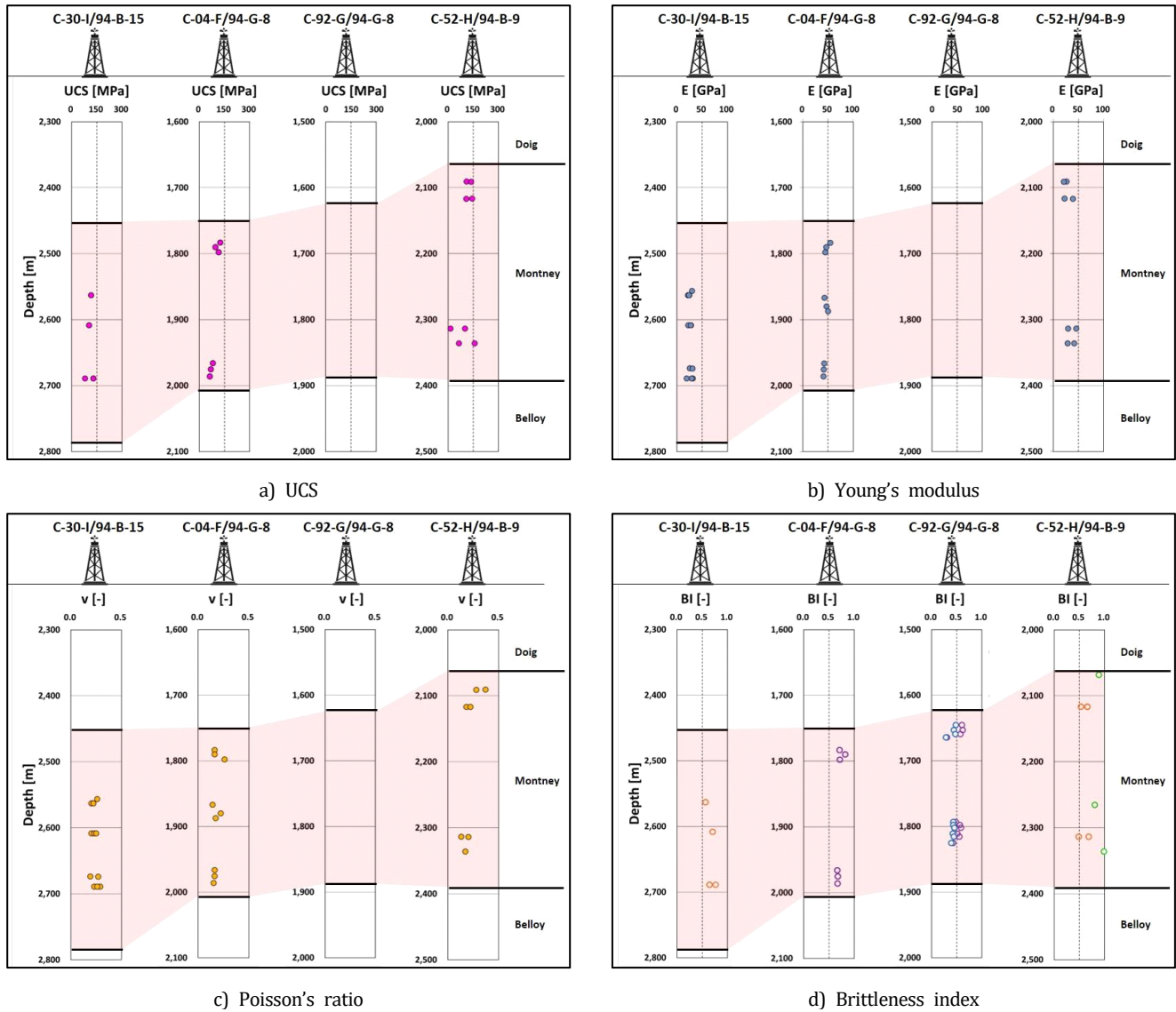


Fig. 5. Reservoir properties in Montney Basin.

여 저류층 물성 자료를 분석하였다(Fig. 5). 특히 수압파쇄 설계의 필수 요소인 취성도 지수 분석을 위해 7개 시추공에서 취성도 지수 도출이 가능한 시추공 4개를 선정하여 암석역학적 저류층 특성화 분석을 실시하였다. 본 연구는 한정된 시추공 자료를 통하여 수압파쇄 적용 대상지역을 선정하기 위한 필수적인 물성 및 취성도 지수를 분석하였다. 분석된 자료를 이용하여 셰일가스 생산성 향상을 위한 3차원 물성 분석도 실시하였으며, 대상 분지별 스위트스팟(sweet-spot) 선정을 위한 암석역학적 물성을 제공하였다. 추가적으로 암석역학적 물성 및 생산 자료를 병합한 솔루션 제안이 요구되나, 본 연구에서는 자료의 한계로 인하여 제외하였다.

5. 결론

셰일가스 분지별 최적화된 개발 방법을 적용하기 위해서는 셰일가

스 저류층에 대한 공간적인 총유기탄소, 공극률, 투과도 분포뿐만 아니라, 암석역학적인 특성화 및 취성도 지수 분석이 필수적이다. 본 연구에서는 서캐나다 셰일가스 분지에서 확보된 코어 자료에 대하여 저류층 물성을 특성화하고, 광물학적 성분 및 암석역학적 물성을 토대로 취성도를 분석하였다. 저류층 물성은 현지 연구기관의 보고서에서 제공되는 물성값을 취합하고 분석하여 각 분지에 대한 심도별 저류층 물성을 특성화하였다. 취성도 지수의 경우, 다각적 해석을 위해 광물학적 성분 및 암석역학적 물성에 의하여 5가지 계산방법을 사용하여 도출하였다.

본 연구는 셰일가스 개발의 생산성 향상을 위해 암석역학적 물성 및 취성도를 분석하였으며, 분석된 자료를 토대로 셰일가스 분지별 맞춤형 솔루션을 제안하고자 하였다. 특히 셰일가스 저류층 시추 시 필요한 시추공 안정성 분석 및 수압파쇄 설계에 필요한 암석역학적 물성을 확보하고, 저류층 취성도 지수를 추가적으로 분석함으로써 수

압파쇄 적용이 용이한 대상 저류층 선정에 필요한 기초 자료를 분석하였다. 분석 결과, 몬트니 분지의 몬트니층 셰일 저류층과 리아드 분지의 베사 리버 셰일 저류층은 총유기탄소함량, 공극률, 투과도 모두 높은 값을 보였으며, 다양한 방법을 통한 취성도 지수 분석 결과에서도 높은 취성을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 몬트니 분지와 리아드 분지의 셰일층은 셰일가스 개발 잠재력이 높을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 본 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20178510030 880). 또한 한국지질자원연구원 주요 연구사업(GP 2020-006)과 동아대학교 위탁연구과제의 지원으로 수행되었습니다. 기초물성 자료를 제공해준 캐나다 British Columbia Oil and Gas Commission (BCOGC)에 감사드립니다.

References

- Altindag, R., 2002, The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(1), 61-66.
- Clifton, R.J. and Abou-Sayed, A.S., 1981, A variational approach to the prediction of the three-dimensional geometry of hydraulic fractures. In *SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*. Society of Petroleum Engineers. 1-9 p.
- Davies, G.R., Moslow, T.F. and Sherwin, M.D., 1997, The lower Triassic Montney formation. west-central Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 45(4), 474-505.
- Dixon, J., 2000, Regional lithostratigraphic units in the Triassic Montney Formation of Western Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 48(1), 80-83.
- Edwards, D.E., Barclay, J.E., Gibson, D.W., Kvill, G. and Halton, E., 1990, Triassic strata of the Western Canada sedimentary basin. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 38(1), 163-163.
- Euzen, T., Power, M., Crombez, V., Rohais, S., Petrovic, M. and Carpentier, B., 2014, Lithofacies, organic carbon and petrophysical evaluation of the Montney and Doig Formations (Western Canada): Contribution of quantitative cuttings analysis and electrofacies classification. In *CSPG CSEG CWLS Joint Annual Convention*, Calgary, 12-16 p.
- Falode, O. and Manuel, E., 2014, Wettability effects on capillary pressure, relative permeability, and irreducible saturation using porous plate. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014(5), 1-12.
- Ferri, F., Hickin, A.S. and Huntley, D.H., 2011, Besa River Formation, western Liard Basin, British Columbia (NTS 094N): Geochemistry and regional correlations. *Geoscience Reports*, 1-18 p.
- Gale, J.F., Laubach, S.E., Olson, J.E., Eichhubl, P. and Fall, A., 2014, Natural fractures in shale: A review and new observations natural fractures in Shale: A review and new observations. *AAPG Bulletin*, 98(11), 2165-2216.
- Gandossi, L. and Von Estorff, U., 2013, An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production. *European Commission, Joint Research Centre, Technical Reports*, 7-8.
- Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P. and Martin, C.D., 2003, Mobilised strength components in brittle failure of rock. *Geotechnique*, 53(3), 327-336.
- Holt, R.M., Fjaer, E., Nes, O.M. and Alassi, H.T., 2011, A shaly look at brittleness. In *45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association, 1-10.
- Hucka, V. and Das, B., 1974, Brittleness determination of rocks by different methods. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Pergamon, 11(10), 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.
- Jin, X., Shah, S.N., Roegiers, J.C. and Zhang, B., 2014a, Fracability evaluation in shale reservoirs—an integrated petrophysics and geomechanics approach. In *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers, 1-14.
- Jin, X., Shah, S.N., Truax, J.A. and Roegiers, J.C., 2014b, A practical petrophysical approach for brittleness prediction from porosity and sonic logging in shale reservoirs. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Amsterdam, The Netherlands, October, 1-18 p.
- Koncagil, E.C. and Santi, P.M., 1999, Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*

- Sciences, 36(2), 139-153.
- Liu, E., 2005, Effects of fracture aperture and roughness on hydraulic and mechanical properties of rocks: Implication of seismic characterization of fractured reservoirs. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(1), 8-47.
- Mathia, E., Ratcliffe, K. and Wright, M., 2016, Brittleness index-A parameter to embrace or avoid?. In *Unconventional Resources Technology Conference*, San Antonio, Texas, August, 1156-1165 p.
- Mews, K.S., Alhubail, M.M. and Barati, R.G., 2019, A review of brittleness index correlations for unconventional tight and ultra-tight reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 1-20.
- Nygård, R., Gutierrez, M., Bratli, R. K. and Høeg, K., 2006, Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks. *Marine and Petroleum Geology*, 23(2), 201-212.
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E., Grieser, W.V. and Kundert, D. 2008, A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, Denver, Colorado, USA, January, 21-24 p., 1-11 p.
- Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Sejourne, S., Lamontagne, C. and Duchesne, M., 2014, An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns. *International Journal of Coal Geology*, 126, 64-76.
- Sakmar, S.L., 2011, Shale gas development in North America: An overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry. In *North American Unconventional Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Savitski, A.A. and Detournay, E., 2002, Propagation of a penny-shaped fluid-driven fracture in an impermeable rock: asymptotic solutions. *International Journal of Solids and Structures*, 39(26), 6311-6337.
- Sousa, J.L., Carter, B.J., and Ingraffea, A.R., 1993, Numerical simulation of 3D hydraulic fracture using Newtonian and power-law fluids. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 30(7), 1265-1271.
- Tarasov, B. and Potvin, Y., 2013, Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59, 57-69.
- Yagiz, S., 2009, Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 66-74.
- Zhang, C., Dong, D., Wang, Y. and Guan, Q., 2017, Brittleness evaluation of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Southern Sichuan Basin, China. *Energy Exploration and Exploitation*, 35(4), 430-443.
- 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.