

셰일 및 치밀 저류층의 지화학 및 암석물리 특성 연구동향 고찰

이현석, 홍성경, 최지영*, 안태웅, 진재화

한국지질자원연구원 석유해저연구본부

An overview of research trend in geochemical and petrophysical technique of shale and tight reservoirs

Hyun Suk Lee, Sung Kyung Hong, Jiyoung Choi*, Tae Woong Ahn, Jae Hwa Jin

Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약

바넷셰일에서 가스의 상업적 생산이 1998년 시작된 이후 여러 종류의 비전통 에너지 자원 중 셰일가스에 대한 관심이 고조되었다. 셰일가스의 개발 초기에는 획일적인 수평시추와 다단계 수압파쇄로 대표되는 공장형 생산기법이 우세하였다. 하지만 최근 들어 지속되고 있는 고유가와 유가와 가스의 비동조화 현상 등으로 인하여 셰일 및 치밀 저류층에 대한 지질학적 이해와 생산기법의 최적화 연구가 활발히 수행되고 있다. 셰일 및 치밀저류층의 생산성 평가를 위해서는 저류층에 배태된 가스량을 정확히 예측해야 한다. 이를 위해서는 자유가스량을 계산할 수 있는 투과도, 공극률, 수포화도가 측정되어야 하며, 탈착될 수 있는 가스량을 예측할 수 있는 총유기탄소량과 흡착성능을 측정해야 한다. 셰일 및 치밀저류층은 통상적인 저류층에 비하여 공극률과 투과도가 매우 낮기 때문에 이를 극복할 수 있는 측정방법이 필요하다. 최근에는 분쇄암석법(GRI법)을 사용하여 공극률과 투과도를 측정하고 있지만, 아직까지 표준방법이 확립되지 못한 실정이다. 공극 내 탄화수소의 체적을 제시하는 수포화도는 셰일 저류층을 대상으로 연구가 많이 미진한 상태이다. 셰일층 내 수포화도의 실측 자체에 많은 어려움이 있고, 기존 저류층에서 사용하던 관계식을 변형하여 적용하는 것에도 제약이 존재한다. 총유기탄소량은 셰일층의 석유과 가스 생성량을 평가하기 위하여 분석해 왔으며, 셰일층 내 잔류되어 있는 가스량을 추정할 수 있는 주요한 특성이다. 흡착가스량은 저류층의 압력에 따라서 셰일층 내에 흡착되는 가스량을 추정하는 것이다. 측정방법은 기존의 석탄층 메탄가스 평가에서 활용되는 방법을 사용하고 있지만, 셰일 및 치밀저류층에 적합한 흡착가스량 평가과정이 필요한 상태이다. 이처럼 셰일 및 치밀저류층이 가진 암석물리적 모호성과 특성분석의 어려움 때문에 표준화된 평가기법은 아직 미정립 상태이다. 향후 다양한 셰일 및 치밀저류층에 대한 연구를 수행하여 통합된 특성화 기법이 도출되어야 한다.

핵심어: 셰일저류층, 치밀저류층, 암석물리, 석유지화학, 평가모델

ABSTRACT

Shale reservoirs has drawn great attention among unconventional resources since the first unconventional extraction of gas from Barnett Shale by Mitchell in 1998. In the beginning, carpet drilling and hydraulic fracturing to shale reservoirs made a great benefit without detailed geological understanding. However, the sudden increase of gas supply and international economic crisis resulted in lower gas price relative to oil price, which requires more detailed development optimization and geological characterization on shale reservoirs to reduce operation cost. In order to evaluate the productivity of shale and tight reservoirs, it is necessary to accurately predict the amount of gas stored in the reservoir. To calculate exact volume of gas in reservoirs, we must reliably measure petrophysical parameters such as permeability, porosity, and water saturation to estimate free gas volume, and geochemical parameters such as total organic carbon (TOC) and adsorption capacity to estimate desorbed gas volume. Several measurement techniques have been proposed to overcome the difficulty in very low porosity and permeability of shale and tight reservoirs. Recently, the crushed rock technique have been used for porosity and permeability of shale and tight reservoir are measured, but the standard procedures have not yet been established. Water saturation is another hurdle since actual measurements are extremely difficult and time-consuming. Modified conventional equations have been tried, but there are still various limitations. We also cover currently available techniques and their limitations on TOC, a measure for gas generation potential, and adsorption capacity. Currently, measurement techniques for petrophysical and geochemical properties of shale and tight reservoirs are not fully established. There should be detailed studies for the accurate estimation of these properties, which can lead successful reservoir characterization.

Keywords: shale reservoir, tight reservoir, rock physics, petroleum geochemistry, evaluation model

1. 서론

셰일층에 대한 석유지질학적 연구는 일반적으로 셰일층을 덮개암과 근원암으로 취급하여 지화학적 특성에 대한 분석과 석유와 가스의 생성 잠재성을 파악하는데 집중되어 왔다. 또한 셰일층의 광역적 존

재를 확인하는 정도의 제한적인 탐사를 수행하여 왔다. 하지만, 셰일층에 함유된 석유와 가스에 대한 생산이 본격적으로 시작되면서 기존의 지화학적 특성 외에 추가적인 특성들에 대한 정밀한 분석이 요구되고 있다. 셰일층은 투과도가 매우 낮은 특성을 가지는데, 일반적으로 투과도가 매우 낮아 개발이 어려운 지층을 치밀 저류층이라 지칭

Manuscript received July 3, 2018; Revised December 4, 2018; Accepted December 11, 2018.

*Corresponding author: Jiyoung Choi, Tel: +82-42-868-3252, Fax: +82-868-3417, E-mail: jychoi@kigam.re.kr

© 2020 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.

한다. 셰일 저류층과 치밀 저류층은 현재 수평정 시추와 다단계 수압 파쇄를 통해서만 상업적 생산이 가능한 공통된 특징을 가지고 있다. 개발 및 생산방법의 유사성으로 인하여 셰일가스 개발 초기에는 셰일 저류층과 치밀 저류층을 혼용하여 사용하였으나, 연구가 진행되면서 차별성이 인식됨에 따라 최근에는 구분하여 사용하고 있다. 2014년 이후 지속되고 있는 현재의 저유가 상황은 셰일층으로부터 석유와 가스를 회수하는 비용을 절감하기 위한 다양한 연구를 불러오고 있다.

셰일 저류층 및 치밀 저류층 특성화의 목표는 수평정 시추궤도의 정밀한 설계와 수압파쇄 효율증대를 위하여 정확한 자원량과 취성도를 예측하는 것이다. 하지만, 이 두 가지 특성의 예측을 위해서는 전통적인 저류층에 비하여 훨씬 복잡한 분석의 수행이 필요하다. 그 이유는 셰일층은 암석물리적 특성이 모호하고, 전통적 저류층에 비하여 다양하고 복잡한 특성을 가지기 때문이다. 또한, 완성된 암석물리 모델이 부재하여 각 저류층별로 특화된 분석을 수행해야 하기 때문이다. 본 논문에서는 셰일 저류층의 자원량 평가에 필요한 특성들을 검토하고, 이들의 상관관계에 기반한 자원량 평가 기법의 다양성을 고찰하였다. 또한 주요 특성에 대한 최신 분석기법 및 해석기술의 장점과 한계를 소개하여, 향후 셰일 및 치밀 저류층 특성화 연구방향을 제안하고자 한다.

2. 셰일 및 치밀 저류층의 주요 특성 및 평가모델

셰일 저류층이 가지고 있는 지질학적 특성은 입도, 구성광물을 비롯하여 탄화수소 자원의 생성능력 및 분포 형태에 이르기까지 다양하게 나타나며, 이에 대한 정성적 및 정량적 이해를 통하여 셰일가스 개발 사업의 경제성을 제고하는 노력이 활발히 진행 중이다. 이러한 연구를 통하여 셰일 저류층 특성의 다양성이 밝혀지고 있으며, 셰일가스 개발 초기단계에 활용했던 총유기탄소량(total organic carbon, TOC), 흡착성능, 취성도 등의 평가인자들은 셰일 저류층의 품질을 결정하는 요소이기보다는 개발 가능한 셰일을 결정하는 정도로 활용되고 있다.

전통 유전에서 셰일은 근원암과 덮개암으로 탄화수소자원 생성가능성에 대한 분석이 주로 수행되었다. 하지만, 수압파쇄기술의 발달로 인하여 셰일층의 투과도를 효과적으로 증진하는 기법이 확립된 이후 셰일층의 공극률과 투과도 등의 저류특성과 취성도 분포에 대하여 관심이 집중되고 있다. 또한 셰일층의 암석물리적, 지화학적, 암반공학 특성에 대한 연구는 암석자료, 시추공 물리검층자료, 탄성파 자료를 활용하여 다양한 스케일에서 수행되고 있으며, 개별적으로 발전한 기술들이 상호보완되어 통합되고 있는 실정이다. 이 연구에서는 셰일 및 치밀 저류층의 잠재성을 분석하기 위하여 공극률, 투과도, 수포화도, 총유기탄소량, 탈착가스량 등의 특성들에 대하여 고찰하였으며, 셰일 및 치밀 저류층의 차이점을 구분하고, 각각의 암석모델에 대해서 평가하고자 한다.

2.1. 공극률과 투과도

일반적인 사암층과 달리 공극들의 크기가 훨씬 더 작고 연결성도

불량한 셰일 및 치밀 저류층의 공극률과 투과도는 그 분석에 있어 오랜 시간이 소모되고 있으며, 실측의 한계가 존재한다. 특히 투과도의 경우, 측정 방법에 대한 산업 표준이 아직까지 존재하지 않으며, 측정을 수행하는 실험실에 따라 투과도 결과에서 수십 또는 수백 배에 이르는 차이를 보이기도 한다(Leefstink, 2015; Moghadam and Chalaturnyk, 2015). 이러한 한계로 인해 셰일 및 치밀 저류층 특성을 적절하게 평가하는 것은 매우 어렵고 그 결과 또한 가변적이다.

저류층 암석시료를 대상으로 투과도를 측정하는 방법은 크게 정상상태법(steady-state method)과 비정상상태법(unsteady-state method)으로 구분된다. 지난 수십 년간 석유산업에서 암석의 투과도는 다아시(Darcy) 법칙에 의존하여 측정되고 있는데, 정상상태법은 이 법칙의 정의에 의해 직접적으로 투과도를 측정하는 방법이기 때문에, 특히 사암층 투과도 측정에서 가장 대중적인 방법으로 활용된다. 그러나 셰일층과 같이 치밀한 암석의 경우, 긴 측정시간과 미세유량 측정의 어려움으로 인해 정상상태법보다 비정상상태법이 선호된다(Cui *et al.*, 2009; Tinni *et al.*, 2012; Moghadam and Chalaturnyk, 2015). 비정상상태법 중 대표적인 방법은 압력펄스 감소법(pulse-decay method)인데, 이 방법은 암석 코어시료에서 주입부의 압력 펄스 감소와 배출부의 압력 증가를 시간에 따라 측정하여 Bourbie와 Walls(1982)가 제안한 수식해로부터 간접적으로 투과도를 계산한다(Brace *et al.*, 1968; Bourbie and Walls, 1982). 이 방법을 통해 10^{-9} D(darcy) 수준의 낮은 투과도 측정이 비교적 짧은 시간(수분 ~ 수시간) 내에서 가능하다(Cui *et al.*, 2009).

셰일층의 투과도 측정을 위해 일반적으로 사용되는 방법은 GRI(Gas Research Institute) 방법이라고 알려진 분쇄암석법(crushed rock method)이다. 이 방법은 코어시료 타입의 셰일 투과도 측정을 대체하기 위해 개발되었다(Luffel *et al.*, 1993; Tinni *et al.*, 2012). 셰일 코어시료는 지층으로부터 획득되는 코어링 및 샘플링 과정에서 겪게 되는 가스팽창과 응력완화로 인한 미세균열이 쉽게 포함되는데, 이는 셰일 투과도 측정에 치명적인 영향을 미친다. GRI방법은 이러한 균열의 영향을 제거하기 위해 0.7 mm 이하의 크기로 분쇄된 셰일 시료를 대상으로 비정상상태법을 적용하여 투과도를 측정한다. Fig. 1은 GRI방법을 이용한 투과도 측정 장비를 개략적으로 보여준다. 투과도 측정의 주요 과정은 다음과 같다. 보조셀(reference volume)에 일정한 크기의 압력으로 채워진 헬륨가스를 분쇄시료가 채워진 진공압 상태의 시료셀(sample cell)로 팽창시킨다. 헬륨가스가 시료셀의 빈 공간을 채우면서 급격한 압력 감소가 발생하고, 이어서 헬륨가스가 분쇄 셰일시료에 확산/침투함에 따라 점진적인 압력 감소가 발생하며, 최종적으로 평형상태에 이르게 된다. 투과도는 실험에서 측정되는 압력 데이터로부터 히스토리매칭(history matching) 시뮬레이션 또는 해석해를 이용하여 계산된다(Luffel *et al.*, 1993; Cui *et al.*, 2009).

GRI방법은 셰일층 투과도 측정을 위한 일반적인 방법으로 산업계에서 널리 사용되고 있음에도 불구하고, 여전히 많은 한계점들을 가지고 있으며, 아직 완전히 이해되지 못한 방법이다. 동일한 실험조건

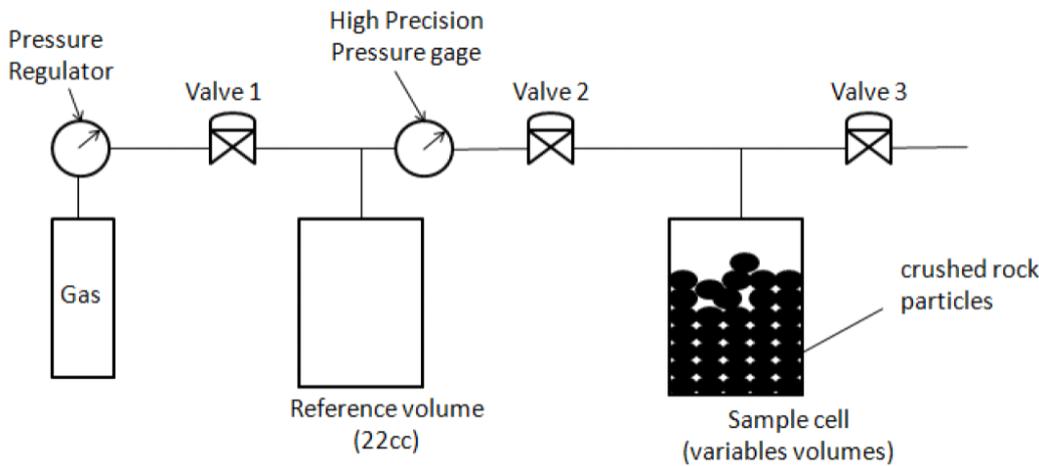


Fig. 1. Schematic diagram of permeability measurement equipment for GRI or crushed rock (Tinni *et al.*, 2015).

과 실험시스템을 사용한 투과도 측정 결과들에서조차도 매우 큰 차이를 보이기도 한다(Passey *et al.*, 2010). 최근에는 다양한 측정방법들 간의 비교 연구를 통해 GRI방법의 한계가 보다 명확하게 규명되고 있다. 대표적인 한계점들은 다음과 같다. 1) 실험에서 봉압(confining pressure)을 고려하지 않으므로 실제 지층의 유효응력의 영향을 반영하지 못한다. 2) 분쇄 입자크기에 따라 투과도 결과가 달라진다. 3) 분쇄된 입자에서도 여전히 미소균열이 존재하여 투과도에 대한 균열의 영향을 완전히 배제하지 못한다. 4) 투과도의 수평/수직 방향성을 반영하지 못한다. 이와 같은 한계로 인해 GRI방법에 의한 투과도 결과를 세일 저류층 생산성 예측에 직접적으로 사용하는 것에 대한 회의적인 시각이 존재한다(Tinni *et al.*, 2012; Cui and Glover, 2014).

세일층의 공극률은 Fig. 1에서 설명한 GRI방법을 통해 측정 가능하데, 그 기본 원리는 보일의 법칙(Boyle's law)을 근거로 하는 암석 공극률 측정의 가장 대표적인 방법인 가스팽창법(gas expansion method)과 유사하다. GRI방법에서 측정대상으로 하는 분쇄시료는 넓은 표면적 확보가 가능하기 때문에 가스 침투가 용이하여 코어시료의 경우보다 효율적인 공극률 측정이 가능하다. 그리고 투과도에 비해 측정결과의 일관성 확보가 가능하여 세일층 공극률 측정을 위한 가장 일반적인 방법으로 활용된다(Leeflink, 2015).

이러한 측정법들의 한계를 극복하기 위한 한 방법으로 컴퓨터단층촬영(computed tomography, CT)이나 주사형전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 등과 같은 첨단 전자장비의 활용이 최근 들어 적극 모색되고 있다. 특히 CT는 시험 대상 물질의 내부 구조를 투과력이 강한 X선(X-ray)를 이용하여 비파괴적으로 삼차원 복원할 수 있으므로, 세일 또는 치밀 저류층의 공극 특성을 삼차원 가시화하는데 점증적으로 활용되고 있다(예: Verba *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017). 그러나 치밀 또는 세일 저류층의 공극 크기가 마이크론 규모를 넘어 수 나노 규모에 이르므로 현재 십나노(sub-nano) 규모의 해상력을 보이는 CT 기술로는 이러한 목적 달성에 한계가 있다. 이러한 해상력 한계에도 불구하고, CT는 주어진 해상도 안에서 시료로부터 측정되는 CT 값들을 시료의 또 다른 측정값, 즉 밀도나 총유기탄소량 등과 연관시킴으로써 목표 저류층의 공극률 및 투과도 특성을

보다 정밀하게 규명하는데 그 활용의 폭을 넓혀가고 있다(Tovar *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2018).

한편, SEM을 활용하는 경우에는 기기의 높은 해상도 덕분에 세일 또는 치밀 저류층의 나노 규모의 공극까지 관찰이 가능하고, 또 SEM 이미지 기반으로 공극률을 비교적 용이하게 도출하여 활용할 수 있다(Norbisrath *et al.*, 2017). 이때 SEM 관찰에 사용되는 시료의 크기가 여타 공극 측정 방법들에 비해 매우 작을 수밖에 없어서 시료의 대표성을 의심받게 되는데, 이를 극복하기 위해서는 보다 넓은 면적의 이미지를 활용하는 방법이 제시된 바 있다(Tran *et al.*, 2017). 이렇게 SEM을 활용하는 경우에는 일반적인 2D SEM 이미지에 기반하기 보다는 FIB-SEM을 활용하여 3D 큐브형으로 이미징하는 것이 공극 구조를 보다 쉽게 이해할 수 있고, 공극률 측정에 보다 높은 정확성을 기할 수 있다(Fig. 2).

이러한 시도들의 주요한 목적 중 하나는 자연 저류층 시료의 공극

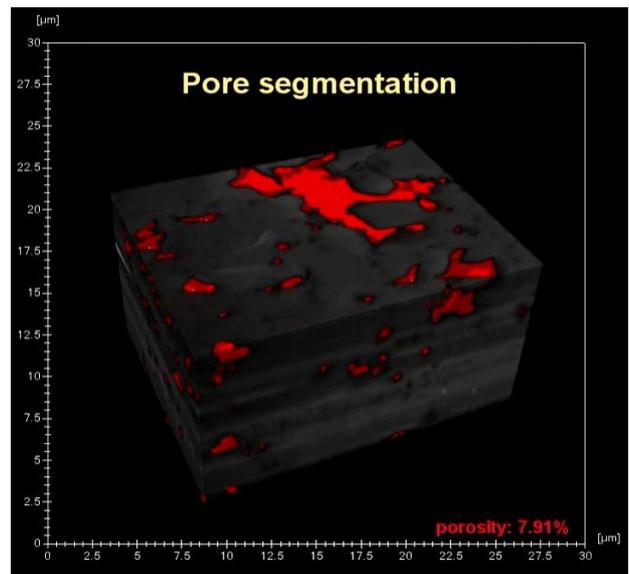


Fig. 2. Porosity structure and measured porosity of shale samples using FIB-SEM.

구조들을 가능한 한 그대로 복원한 디지털 암석을 얻고자 하는 것인데, 그 이유는 일단 이러한 디지털 암석이 확보되면 가상적 방법으로 투과도 측정이나 유체 유동 모사가 매우 용이할 것으로 기대되기 때문이다(Landry *et al.*, 2017). 그러나 전술한 바와 같이 CT에서는 현재 해상력의 한계에 봉착하고 있고, SEM에서는 시료 대표성의 문제가 대두되는 등 여러 가지 난제들이 극복되어야 한다.

2.2. 수포화도

저류층의 수포화도는 공극 내 탄화수소의 체적을 결정하는 주요한 요소이다. 통상적인 저류층에서는 아치관계식(Archie, 1964)을 이용하여 저류층 전체의 수포화도를 계산하고 시추공에서 채취된 지층수의 비저항을 측정하여 비교 검증한다. 아치관계식은 양질의 사암층을 모델로 개발된 실험식으로 이후 이질 사암층에 적용 가능한 다양한 변형식들이 도출되었다. 이러한 변형식들은 점토광물에 존재하는 초과 전하로 인한 비저항치의 감소량을 보정하는 방식으로 개량되었다.

이러한 수포화도 계산방법은 셰일 저류층의 특성상 쉽게 적용하기 어렵다. 실제로 셰일 저류층의 수포화도 계산 및 측정은 아직까지 표준화된 방법이 알려지지 않은 난해한 분야이다. 그 이유로, 첫 번째는 셰일 저류층 내 지층수의 채취가 어렵기 때문이다. 저투과도로 인해 자연적인 지층수를 채취하기 어려우며, 수압파쇄시에는 파쇄수와 혼합되기 때문에 지층수의 특성을 상실한다. 두 번째로 셰일층 내 지층수의 특성도 통상적인 저류층에 비하여 훨씬 가변적이다. 예를 들어, 애파래치안(Appalachia) 지역의 데본기 후론층(Huron Formation)의 염도는 12,000–222,000 ppm의 분포를 나타낸다(Luffel *et al.*, 1992). 미시간 분지의 앤트림 셰일(Antrim Shale)은 3,000–215,000 ppm, 일리노이분지의 뉴알바니 셰일(New Albany Shale)은 10,000–90,000 ppm의 염도 변화를 보여준다(Martini *et al.*, 2008). 이처럼 넓은 염도 분포 때문에 셰일층 내 지층수의 대표적인 비저항치를 추정하기 어렵다. 세 번째로 셰일층 내 점토광물의 체적 또한 변화하기 때문에 점토광물로 인한 비저항 감소치를 추정하는데도 어려움이 존재한다.

셰일층 내 수포화도를 계산하기 위한 연구는 공극률을 정량화하는 시도에 비하여 매우 적기는 하지만 꾸준히 수행되고 있다. 셰일층 내 분포하는 유기물에 의한 전기비저항을 고려하기 위하여 기존의 아치관계식을 변형하는 방법이 제안되었다(Kadkhodie & Rezaee, 2016).

$$R_t = \frac{R_o}{S_w^n} - (V_{sh} - V_{kr})^2 \times R_{sh} + V_{kr}^2 \times KRF$$

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{R_o}{R_t + [(V_{sh} - V_{kr})^2 \times R_{sh}] - V_{kr}^2 \times KRF}}$$

$$V_{kr} = \frac{w_{loc}}{\rho_b} \times \rho_{loc} = 0.342 \times VR + 0.972$$

| |
|--|
| KRF : Kerogen resistivity factor |
| S_n : Saturation exponent |
| ρ_b : Bulk density |
| ρ_{loc} : Density of organic matter |
| R_o : Resistivity of a rock fully saturated with formation water ($S_w=1$) |
| R_{sh} : Shale resistivity |
| R_t : True formation resistivity when $S_w=1$ |
| S_w : Water saturation |
| TOC : Total organic carbon |
| VR : Vitrinite reflectance |
| V_{kr} : Volume of kerogen |
| V_{sh} : Volume of shale (clay) |
| W_{loc} : Weight of organic matter |
| V_p : P-wave velocity |
| V_s : S-wave velocity |
| \emptyset : Porosity |

이 관계식에서 총유기탄소의 무게는 ΔLogR 방법으로 추정할 수 있다. 이 방법에서는 셰일층 내 분산되어 분포하는 케로젠(kerogen)의 전기비저항을 추정하여 사용해야 하는 불완전성이 있다. 하지만, 셰일층의 비저항 특성을 계산하는데 있어서 케로젠의 영향을 효과적으로 고려한 관계식으로 사료된다. 또 다른 셰일층 수포화도 계산식으로 아치관계식과 달리 P파와 S파의 속도비와 공극률 사이의 관계를 활용한 실험식도 제안되었다(Liu *et al.*, 2018).

$$\frac{V_p}{V_s} = a_1 \times \phi^{a_2} \times S_w^{a_3}$$

$$S_w = 0.21 \times \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} / V_p V_{so} \right)^{2.1}}{\rho_b^{0.4}}$$

이 관계식은 속도와 공극률의 관계에 기반한 계산식으로 지층의 비저항 및 지층수의 염도를 측정해야 하는 아치관계식에 비하여 활용성이 높은 장점이 있다. 하지만 실험에 기반한 계산식이기 때문에 저류층 또는 광구별로 최적화가 반복되어야 한다.

저류층 내 수포화도에 대한 직접적인 측정을 위하여 핵자기공명을 이용한 NMR(nuclear magnetic resonance) 검층을 활용하는 연구도 진행 중이다. 이 경우 비저항 기반의 수포화도 계산의 어려움을 극복할 수 있는 대안으로서의 연구가 활발하지만, 이 방법 또한 흡착가스와 자유가스를 구분하지 못하는 한계가 존재한다.

2.3. 총유기탄소량

총유기탄소량은 셰일가스 저류층의 주요한 특성을 나타내는 요소로서 셰일층 내 존재하는 케로젠의 부피와 연관성이 높다. 총유기탄소량으로부터 유추한 케로젠의 총량은 유기공극의 체적과 탄화수소 자원 생산성과 밀접하게 연관된다. 따라서, 셰일 저류층에 대한 평가에서 총유기탄소량은 주요한 특성이 된다(Hackley, 2012). 총유기

탄소량은 시추공의 물리검층 자료를 활용하여 정량화가 가능한데, 이것은 세일가스 저류층의 지화학적 특성을 이해하고 잠재성을 평가하는데 중요하다. 물리검층 자료를 활용한 총유기탄소량 계산은 암심시료에 대해 지화학분석으로 측정된 총유기탄소량과 비교검증이 필요하다. 이러한 총유기탄소량 계산치는 저류층 내에서 연속적인 자료를 제공하며, 3차원 탄성파 탐사자료와 대비하여 저류층 내 케로젠의 분포를 예측할 수 있다(Close *et al.*, 2012).

암심시료를 이용하여 저류층 내 총유기탄소량을 분석하는 방법으로 주로 록-에발(Rock-Eval) 열분석기를 활용한다. 록-에발 열분석기는 근원암 시료의 석유/가스 생성 잠재력(petroleum potential)을 평가하기 위한 장비로서 암심시료 내의 유리 탄화수소(free hydrocarbon, S₁), 케로젠(S₂) 및 총유기탄소량 등을 측정한다. 록-에발은 크게 열분해 오븐(pyrolysis oven)과 산화 오븐(oxidation oven)으로 구성되어 있고, 암심시료는 열분해 오븐에서 먼저 분석된 후 산화 오븐으로 이동되어 분석된다(Lafargue *et al.*, 1998). 이때, 열분해 오븐에서 분석된 유기탄소 함량은 열분해 유기탄소(pyrolysable organic carbon, PC), 산화 오븐에서 분석된 유기탄소 함량은 잔류 유기탄소(residual organic carbon, RC)로 정의한다. 총유기탄소량은 열분해 유기탄소와 잔류 유기탄소의 합이다. 각각의 유기탄소 함량은 아래 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$PC \text{ (wt\%)} = \left[(S_1 + S_2) \times 0.83 \right] + \left[S_3 \times \frac{12}{44} \right] + \left[\left(S_3 CO + \frac{S_3' CO}{2} \right) \times \frac{12}{28} \right]$$

$$RC \text{ (wt\%)} = RCCO + RCCO_2$$

$$TOC \text{ (wt\%)} = PC + RC$$

록-에발을 이용한 분석방법은 암심시료내의 총유기탄소량을 빠르고 정확하게 측정할 수 있기 때문에 가장 일반적으로 수행되는 방법이다. 다만, 시추시 유성이수(oil-based mud)를 이용한 경우 분석 결과를 해석할 때 주의해야 한다. 암심시료에서 유성이수를 제거하기 위해서 유기용매를 이용하여 세척을 하는데, 이때 대부분의 휘발성 물질이 제거되어 S₁ 값이 낮아질 수 있다. 결과적으로 암심시료 내 S₁ 값은 유기용매로 세척한 경우에는 과소평가될 수 있고, 유성이수를 제거하지 않고 분석한 경우에는 과대평가될 수 있다. 다만, 암심시료 내 S₁ 값의 비율(~ 0.3%, Philp, 2014)은 상당히 낮아 무시할 수 있는 수준이지만, 그럼에도 불구하고 총유기탄소량의 절대값에 영향을 줄 수 있기 때문에 해석에 주의를 기울여야 한다.

시추공 물리검층(well logging) 자료를 활용하여 총유기탄소량을 추정하기 위하여 단일검층 및 이중검층자료를 활용한 계산식이 제안되었다. 물리검층 중 감마선 검층 또는 우라늄 감마선 검층과 총유기탄소량의 상관관계를 분석하여 선형회귀법으로 총유기탄소량을 추정할 수 있다(Schmoker, 1981). 하지만 퇴적 이후에는 우라늄 침전체가 생성될 수 있으며, 이 경우 선형회귀 분석으로는 총유기탄소량 추정이 어렵다. 1970년대 전자를 이용한 밀도검층이 개발된 이후 세일층에 대한 평가도 활발히 이루어지고 있으며, 특히 근원암으로써 세일층의 밀도 분석이 활발히 진행되고 있다. 점토광물, 쇠설성 퇴적물과 달리 유기물은 밀도가 낮기 때문에 밀도검층에서 인지가 유리하다(Fig. 3). 다만, 밀도가 가변적(1.0–1.24 g/cc 정도)이고, 물과 비슷하여 공극수와 구별이 쉽지 않다(Schmoker, 1979). 감마선과 밀도 검층을 총유기탄소량과 회귀분석하면 상관관계가 높지 않다. 이는 저류층의 감마선 방출량과 체적밀도가 시추공내 총유기탄소량을 직접적으로 반영하기보다는 간접적으로 연관되어 있기 때문이다. 이를 보완하기 위하여 두 종류의 검층을 조합한 총유기탄소량 계산법이 제

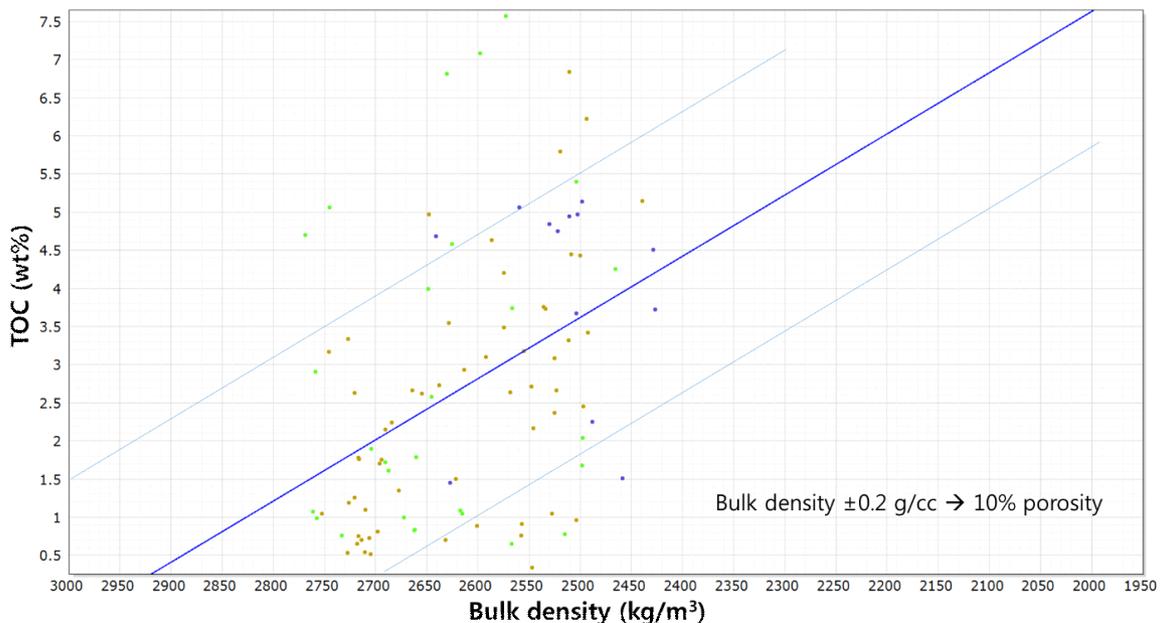


Fig. 3. Cross-plot of the density (X-axis) and TOC (Y-axis) measured in the North American shale reservoir.

안되었다(Passey *et al.*, 1990). 탄화수소 자원을 생성할 수 있는 케로젠의 양은 밀도, 중성자 공극률, 속도 검층에서 인지할 수 있으며, 근원암으로부터 가스의 생성 여부는 비저항 검층에서 나타난다. 이러한 특성을 조합하여 $\Delta \text{Log} R$ 방법이 제안되었다. 이 방법은 케로젠의 음파속도가 느리고 셰일 내에 가스 생성시 비저항이 증가하는 특성에 착안하여, 비저항과 속도검층을 한 개의 검층트랙에 표시하여 그 차이를 비교하는 것이다. 이 방법에서는 케로젠이 포함되지 않은 일반적인 셰일을 기준선으로 설정하여 두 개 검층을 일치시킨다. 케로젠에 따라서 두 검층이 분리되는 정도와 열적성숙도에 따라서 총유기탄소량을 계산할 수 있다.

$$\Delta \text{Log} R = \log_{10} \left(\frac{R}{R_{\text{baseline}}} \right) + 0.02 (\Delta t - \Delta t_{\text{baseline}})$$

$$\text{TOC (wt\%)} = \Delta \text{Log} R \times 10^{(2.297 + 0.1688 \times \text{LOM})}$$

LOM = Level of maturity
 R_{baseline} = 'gray shale' resistivity
 $\Delta t_{\text{baseline}}$ = 'gray shale' slowness

이 방법은 셰일층 내 가스와 케로젠의 영향을 받는 두 개의 검층을 조합하여 총유기탄소량을 계산한다는 점에서 단일 검층에 의한 회귀 분석보다 정확성이 높다. 속도 검층 외에 중성자 공극률, 밀도 검층을 대신하여 사용할 수 있으며, 최근에는 감마선 검층을 활용하기도 한다. 기존의 검층자료를 활용하는 측면에서 보면 대부분의 시추공에서 총유기탄소량을 추정해 볼 수 있는 장점이 있지만, 몇 가지 문제점이 존재한다. 셰일층 내 가스의 경우, 성숙도가 일정수준 이상으로 증가하게 되면, 비저항치가 다시 감소하게 된다. 즉, R_0 수치가 1.1%보다 증가하면 셰일층 내 가스량이 줄어들고 비저항이 점차 감소하며 $\Delta \text{Log} R$ 수치 역시 감소하게 된다. 또한, 총유기탄소량과 성숙도의 상관관계 또한 성숙도 6과 9 사이에서 최적화되어 있으며, 그 외의 구간에서는 외삽(extrapolation)으로 추정하고 있어 정밀도가 떨어진다.

단일 회귀분석법과 $\Delta \text{Log} R$ 기법을 통하여 물리검층자료를 활용한 총유기탄소량 추정이 어느 정도 가능하지만 근본적인 문제점이 존재한다. 탄화수소자원을 생성할 수 있는 케로젠은 특정한 화합물이 아니라 유기물의 복합체이다. 따라서, 특정한 화학식이 없으며 지층별로 상이하게 나타난다. 케로젠의 밀도는 약 1.0—1.1 g/cc 정도이며, 중성자 공극률이 50%—65%, 음파속도는 약 160 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 내외이다. 이처럼 케로젠의 물리적 특성이 가변적이기 때문에, 광물조성에 기반한 정량화가 어렵다. 이는 밀도가 1 g/cc인 공극수와 케로젠을 구분하기 어렵다는 뜻이며, 지층 내 공극수의 체적을 정확히 알아야 케로젠의 체적을 추산할 수 있다. 밀도와 중성자 공극률, 음파속도치가 일정한 광물들의 조성공극의 체적이 정해져야 가변적인 특성을 가진 케로젠의 총량을 계산할 수 있게 된다. 하지만, 셰일층 내 공극의 체적을 정량화하는 것은 미세공극, 유기공극의 존재로 인해 지난한 일이며, 일반적 물리검층 자료만으로는 어렵다. 밀도검층을 활용한

회귀분석시 총유기탄소와 밀도검층의 상관관계가 낮은 이유는 이처럼 공극수의 영향 때문이다. 셰일층 내 케로젠과 공극수가 동일하게 밀도를 떨어뜨리기 때문에, 공극수의 양을 일정하다고 전제하고 케로젠과 밀도검층의 상관관계를 분석하여 케로젠의 양을 추정한다. 하지만, 셰일층 내 공극의 체적 역시 가변적이기 때문에, 케로젠 체적계산의 오차가 발생한다. Fig. 3에서와 같이, 체적밀도와 총유기탄소량의 상관관계에서 밀도추정치가 넓게 분포하는 이유는 총유기탄소량 외에 공극수의 체적 또한 변화하기 때문이다(Fig. 3).

전통형 검층을 활용한 총유기탄소량 계산에서 발생하는 오차 때문에, 최근 들어 원소검층장비(Elemental Capture Spectroscopy)와 수치해석에 기반한 광물조성 분석기법을 활용하여 저류층 내 광물조성을 측정하고, 공극체적을 계산한 후 케로젠 체적을 확정하는 기법이 사용되고 있다. 원소검층장비는 아메리슘-베릴륨(Americium-Beryllium)을 저류층에 방사하여 규소, 탄소, 철, 황, 마그네슘, 알루미늄을 검출하게 된다(Lewis *et al.*, 2004). 각 원소량을 바탕으로 결정론적으로 광물조성을 해석한다. 철과 황의 양에서 황화철, 초과 철은 능철석, 탄소는 탄산염광물, 여분의 규소, 탄소, 마그네슘, 알루미늄은 점토광물, 나머지는 석영과 장석 및 운모류로 구분된다. 이런 광물조성을 분석한 후 밀도, 중성자 공극률, 광전효과, 감마선 검층 등과 조합하여 수치해석적으로 공극률, 수포화도, 케로젠 체적을 계산한다. 현재 활용되는 방법 중 셰일층의 광물조성을 고려한 정밀한 분석법이지만, 원소검층이 필요한 단점이 있다.

2.4. 흡착가스량

셰일과 치밀 저류층에는 점토광물이나 유기공극에 가스들이 흡착되어 존재하며, 이로 인한 추가적인 가스생산량이 발생한다. 이러한 저류층 내 흡착가스량 분석은 석탄층 메탄가스 분석기법을 차용하여 이루어진다. 랭뮤어가 제안한 흡착가스량 측정기법을 활용하여, 저류층 내 가능한 흡착량의 최대치를 측정하고, 저류층 압력을 입력하여 흡착되어 있는 가스량을 예측하게 된다(Langmuir, 1918). 하지만 셰일층은 석탄층과 달리 유기물의 특성이 다르고, 다양한 입도분포와 점토광물을 포함하고 있다. 따라서 공극 크기의 분포가 탄리(cleat)와 유기공극으로 대분되는 석탄층에 비하여 복잡하고, 가스를 흡착시키는 광물의 성분도 다양하다(Yang and Lee, 2018).

일반적으로 유기물은 열적성숙과정을 거쳐 석유와 가스를 생성하게 되며, 다수의 유기공극을 형성한다. 이러한 유기공극은 탄화수소 분자를 흡착시키는 주요한 기질이 된다. 이와는 달리 퇴적형 또는 자생형 점토광물의 경우에도 많은 가스분자를 흡착할 수 있다. 셰립질 입자 사이 또는 미세공극에 포집된 석유와 가스분자의 경우도 유동성이 매우 낮아 탈착되는 gas와 유사하게 유동한다. 복잡하고 연속적인 공극 분포로 인하여 셰일 또는 치밀 저류층의 흡착성능과 탈착가스량을 예측하는데 어려움이 존재한다. 캐나다의 혼리버(Horn River)층의 경우, 총유기탄소량과 공극률은 비례하는 성향을 보여주지만 인근지역의 몬트니(Montney)층의 경우 총유기탄소량과 공극률이 반비례하기도 한다(Fig. 4). 몬트니층의 탈착가스량(canister gas)와

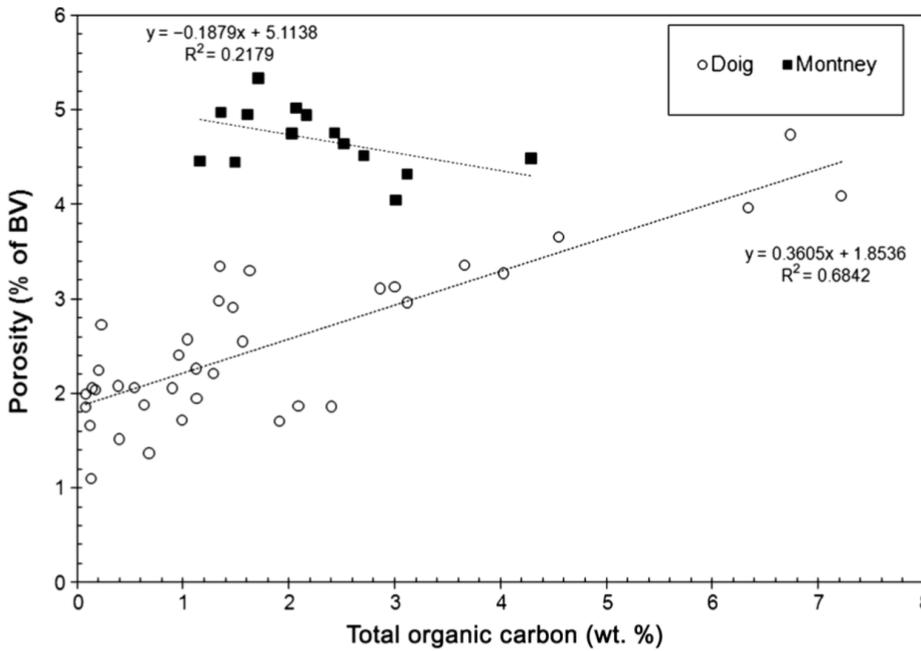


Fig. 4. Correlation between TOC and porosity of Montney and Doig formation in Canada (Jarvie, 2012).

점토광물의 비율을 비교하면, 상당한 상관관계($R_0 = 0.5 \sim 0.7$)가 있음을 보여준다(Fig. 5). 이처럼 단일 지층 내에서도 다양한 광물이 가스의 흡착에 기여하고 있다. 이러한 특징은 저류층별로 석유와 가스의 생성부터 흡착까지 다양한 요인에 의하여 조절된다.

2.5. 가스자원량 평가 모델

셰일층의 암석물리적 특성분석의 편리를 위하여 상기에 기술한 복잡한 특성을 단순화하여 해석하고 있다. 대표적인 예로 아치(Archie,

1964)가 제안한 사암 저류층 모델을 수정한 다양한 이질사암층 모델이 존재하고 있다. 이러한 모델을 바탕으로 각 물질치를 계산하는 방법들도 매우 다양하게 발전하고 있으며, 최근에는 셰일 저류층 특성 화기법 연구에서도 다수의 모델이 제안되어 실험되고 있는 상태이다 (cf. Holmes model, SLB model). 셰일 모델에서 유의할 점은 유기물의 존재인데, 석유를 생성하는 매우 중요한 요소인 유기물은 다른 구성요소인 광물과 달리 밀도가 가변적이며 물과 유사치를 가지고 있으므로, 정확한 공극률을 계산하기 위해서는 우선적으로 측정해야 한

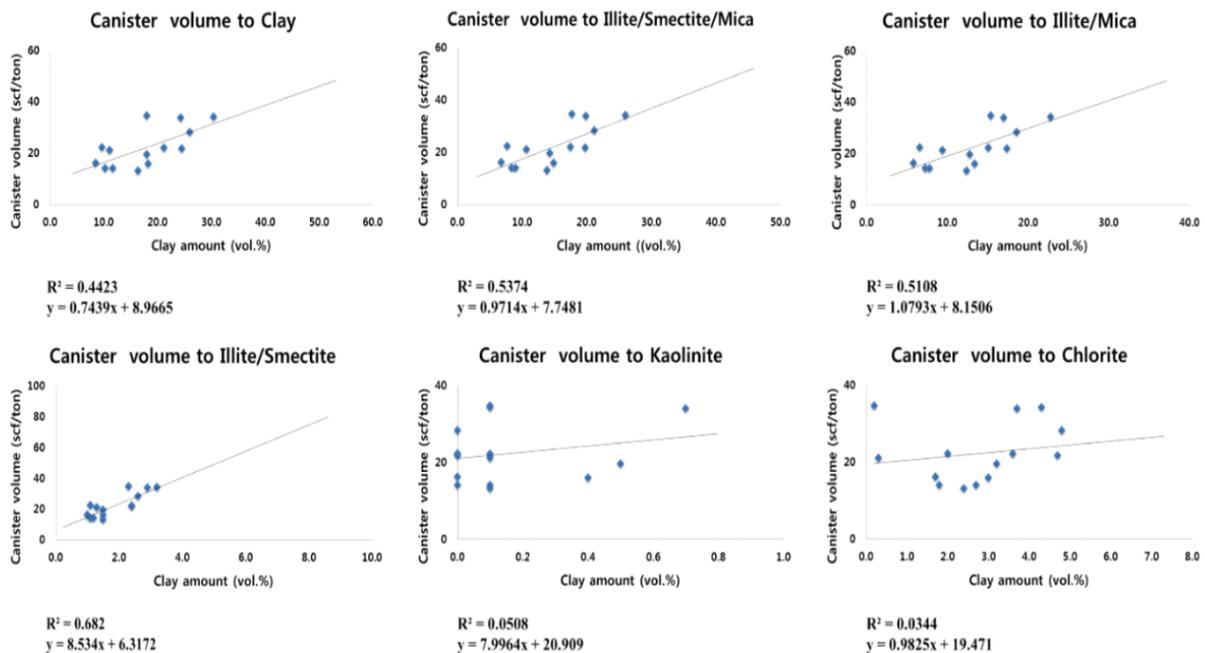


Fig. 5. Correlation between desorption gas and mineral composition in Montney formation (Yang and Lee, 2018).

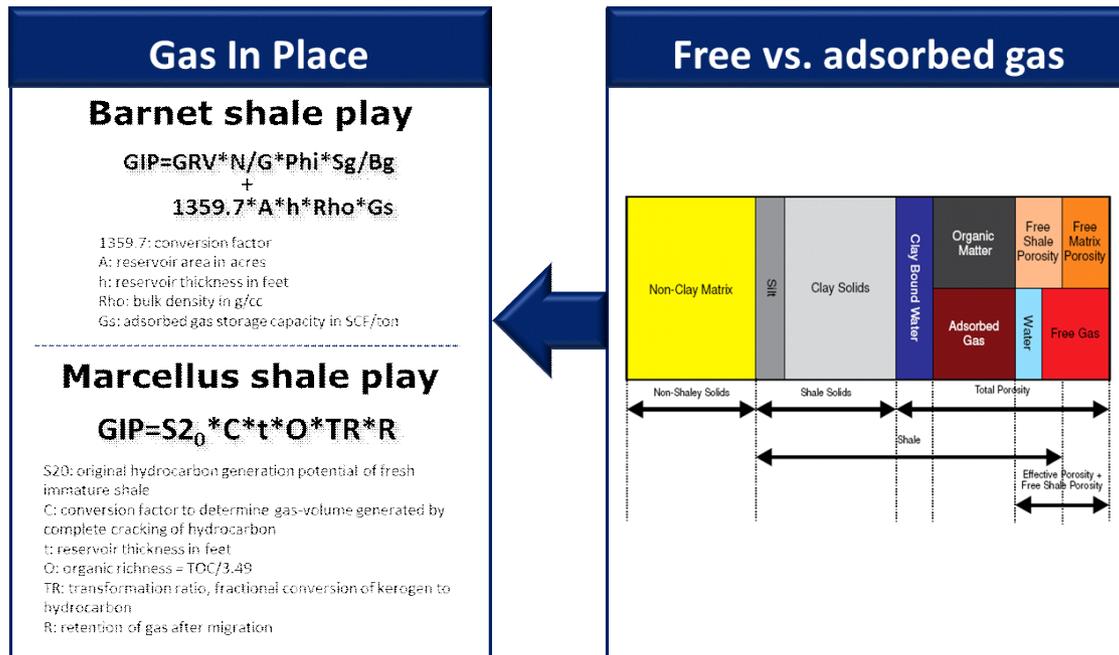


Fig. 6. How to calculate gas in place from Barnett and Marcellus shale play.

다. 상대적으로 다양한 분석기법이 존재하고 있는 유기물의 체적계산은 비교적 용이한 편이다. 셰일 저류층은 전통적인 쇄설성 및 탄산염 저류층과 달리 점토광물을 비롯한 다양한 광물이 복잡하게 구성되어 있어, 밀도, 중성자 공극률, 음파속도 등의 저류층 특성치를 단순화하기 어려우며, 이를 활용한 해석 시 세심한 보정이 필요하다. 보정작업은 확정된 암석물리 모델이 없기 때문에 개별 저류층별로 수행되어야 하며, 결국 암석시료에 대한 방대한 분석을 동반하게 된다.

대표적인 암석물리 모델을 확립하기 위하여, 1차적으로 저류층의 암상에 대한 명확한 구분이 필요하다. 즉, 유기공극에 흡착된 가스를 생산할 것인지, 아니면 투과도가 낮은 미세공극 내의 가스가 주요 생산대상인지 판단해야 한다. 유기공극이 주요한 가스의 저장소라면 유기물의 함량에 기반한 마르셀러스(Marcellus) 셰일형 가스자원량 계산식을 고려할 수 있다. 그렇지 않으면, 저류층 내 가스를 자유가스와 흡착가스로 판단하여 바넷(Barnett) 셰일형의 자원량 계산식을 활용할 수 있다(Fig. 6). 물론 다양한 특성을 가지는 셰일 저류층을 두 개의 대표적 형태로 구분하는 것에는 한계가 존재하며, 저류층의 발달과정, 가스의 생성량, 가스의 충전과정 등을 고려하여 최적의 자원량 평가공식을 도출할 필요가 있다. 향후 셰일층에 대한 지속적인 연구가 진행되면 그에 따라 다양한 평가방식이 제안될 것으로 사료된다.

결론

셰일 저류층의 특성화 연구는 현재도 활발하게 진행되고 있으며, 셰일 저류층의 암석물리 모델을 확립하기 위하여 다양한 요소들에 대한 분석이 시도되고 있다. 1900년대 초기의 캘리포니아와 텍사스에서 있었던 유전개발 열풍의 시기에도 다수의 시추와 생산이 선행되

고, 이후에 생산효율이 감소하면서 저류층에 대한 석유지질학적 연구가 시작된 것처럼, 현재의 셰일 저류층 연구 상황도 흡사하다. 현재까지 생산성과 관련된 셰일 저류층의 두 가지 요소는 탄화수소가 최대한 집적되어 있는 구간과 파쇄효율이 제일 높은 구간을 인지하는 것에 있다. 본 논문에서 고찰한 바와 같이 셰일층 내 가스의 최대 집적구간은 암석물리 및 석유지화학적 특성의 종합적 분석을 통하여 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 셰일층에 대한 해석은 규격화된 방법이 없기 때문에 개별 저류층별로 최적화된 해석방법을 도출해야 하는 실정이다. 향후, 다양한 셰일 저류층에 대한 해석기법들이 축적되면, 셰일 저류층 평가의 표준기법이 마련될 것으로 기대된다.

사사

본 연구 한국에너지기술평가원(No.20178510030880)과 한국지질자원연구원(GP2017-024)의 지원으로 수행되었습니다. 논문의 초고를 검토해 주신 두 분의 심사자와 안동대학교 조형래 교수님께 감사드립니다.

References

- Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. AIME, 146, 54-62.
- Asquith, G. and Krygowski, D., 2003, Basic well log analysis 2nd Ed. AAPG Methods in Exploration Series 16, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa,

- Oklahoma, 244 p.
- Bourbie, T. and Walls, J., 1982, Pulse decay permeability: Analytical solution and experimental test. SPE Journal 9744-PA.
- Brace, W., Walsh, B. and Frangos, W., 1968, Permeability of granite under high pressure. Journal of Geophysical Research. 73(6), 2225-2236.
- Close, D., Perez, M., Goodway, B. and Purdue, D., 2012, Integrated workflows for shale gas and case study results for the Horn River Basin, British Columbia, Canada. The Leading Edge, 31, 556-569.
- Cui, A.X., Bustin, M.M. and Bustin, R.M., 2009, Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications. Geofluids, 9, 208-223.
- Cui, A.X. and Glover, K., 2014, A practical recommendation for permeability measurement in tight-sand and shale reservoir. Search and Discovery Article #41407 presented at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, 6-9 April.
- Hackley, P.C., 2012, Geological and geochemical characterization of the Lower Cretaceous Pearsall Formation, Maverick Basin, south Texas: a future shale gas resources. AAPG Bulletin, 96(8), 1449-1482.
- Kadhodaie, A. and Rezaee, R., 2016, A new correlation for water saturation calculation in gas shale reservoirs based on compensation of kerogen-clay conductivity. Journal of Petroleum Science and Engineering, 146, 932-939.
- Kuuskraa, V.A., Stevens, S.H. and Moodhe, K.D., 2013, World shale gas and shale oil resource assessment. U.S. Energy Information Administration (EIA) report, 730 p.
- Landry, C.J., Prodanovic, M., Reed, R., Eichhubl, P. and Mohanty, K., 2017, Estimating oil-water relative permeability curves using digital rock physics. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC) DOI 10.15530/urtec-2017-2691701.
- Langmuir, I. 1918, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of American Chemistry Society, 40, 1361-1403.
- Leeftink, T.N., 2015, Comparative analysis of shale permeability measurements. Master thesis, Delft University of Technology.
- Lewis, R., Ingraham, D., Percy, M., Williamson, J., Sawyer, W. and Frantz, J., 2004, New evaluation techniques for gas shale reservoir. Reservoir Symposium 2004, New Orleans, USA.
- Liang, T., Luo, X., Nguyen, Q. and DiCarlo, D., 2018, Computed-tomography measurements of water block in low-permeability rocks: scaling and remedying production impairment. June 2018 SPE Journal.
- Liu, K., Sun, J., Zhang, H., Liu, H. and Chen, X., 2018, A new method for calculation of water saturation in shale gas reservoirs using V_p -to- V_s ratio and porosity. J. Geophys. Eng., 15, 224-233.
- Luffel, D.L., Guidry, F.K. and Curtis, J.B., 1992, Evaluation of Devonian shale with new core and log analysis methods. Journal of Petroleum Technology, 44, 1192-1197.
- Luffel, D.L., Hopkins, C.W., Holditch, S.A. and Schettler, P.D., 1993, Matrix permeability measurement of gas productive shales. SPE 26633 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 3-6 October.
- Martini, A.M., Walter, L.M. and McIntosh, J.C., 2008, Identification of microbial and thermogenic gas components from Upper Devonian black shale cores, Illinois and Michigan basins. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 92, 327-339.
- Moghadam, A.A. and Chalaturnyk, R., 2015, Laboratory investigation of shale permeability. SPE 175919 presented at SPE/CSUR Unconventional Resources Conference held in Calgary, Alberta, Canada, 20-22 October.
- Norbisrath, J.H., Grammer, G.M., Berg, B.V., Tenaglia, M., Eberli, G.P. and Weger, R.J., 2017, Nanopore imaging in Vaca Muerta mudrocks to evaluate controls on complex resistivity spectra in unconventional reservoir. November 2017 SPE Reservoir Evaluation & Engineering.
- Passey, Q.R., Bohacs, K.M., Esch, W.L., Klimentidis, R. and Sinha, S., 2010, From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir - Geologic and petrophysical characterization of unconventional shale-gas reservoirs. SPE 131350 presented at the CPS/SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition held in Beijing, China, 8-10 June.
- Rider, M. and Kennedy, M., 2011, The geological interpretation of well logs 3rd Ed. Bell and Bain. Glasgow, U.K., 432 p.
- Schmoker, J.W., 1979, Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from formation density logs. AAPG Bulletin, 63, 1504-1509.
- Schmoker, J.W., 1981, Determination of organic-matter

- content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs. AAPG Bulletin, 65, 1285-1295.
- Schmoker, J.W. and Hester, T.C., 1983, Organic carbon in Bakken formation, United States portion of Willistone Basin. AAPG Bulletin, 67, 2165-2174.
- Tinni, A., Fathi, E., Agarwal, R., Sondergeld, C., Akkutlu, Y. and Rai, C., 2012, Shale permeability measurements on plugs and crushed samples. SPE 162235 presented at SPE Canadian Unconventional Resources Conference held in Calgary, Alberta, Canada, 30 October-1 November.
- Tovar, F.D., Barrufet, M.A. and Schechter, D.S., 2017, Non-destructive measurement of porosity, compressibility and gas sorption in core plugs from the Wolfcomp Shale: SPE-185604-MS.
- Tran, H.T., Jernigen, J.D., Curtis, M.E., Sondergeld, C.H. and Rai, C.S., 2017, Investigating microstructural heterogeneity in organic shale via large-scale, high-resolution SEM imaging: Unconventional Resources Technology Conference (URTeC) doi:10.15530/urtec-2017-2647048.
- Verba, C., Crandall, D., Johnathan, M. and Lopano, C., 2017, Petrophysical characterization of the Bakken Shale for carbon storage investigation. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC) doi:10.15530/urtec-2017-2668489.
- Zhao, B., Shang, Y., Jin, L. and Jia B., 2017, Characterizing connectivity of multiscale pore structure in unconventional reservoirs by the complex network theory: Unconventional Resources Technology Conference (URTeC) doi:10.15530/urtec-2017-2665304.