



셰일가스 저류층에서 지지체 분포에 따른 균열 투과도 실험 연구

유현상 · 김정균* · †이정환**

전남대학교 에너지자원공학과 박사후연구원, *한국가스공사 가스연구원

**전남대학교 에너지자원공학과 교수

(2024년 7월 26일 접수, 2024년 8월 28일 수정, 2024년 9월 14일 채택)

Experimental Study on the Fracture Permeability by Proppant Distribution in Shale Gas Reservoirs

Hyunsang Yoo · Junggyun Kim* · †Jeonghwan Lee

Dept. of Engery and Resources Engineering, Chonnam National University

**Korea Gas Corporation Research Institute, Korea Gas Corporation*

(Received July 26, 2024; Revised August 28, 2024; Accepted September 14, 2024)

요약

본 연구에서는 셰일가스 균열 지지체(proppant) 분포의 변화가 균열 투과도에 미치는 영향을 분석하기 위해 균열 지지체의 크기, 분포 함량, 그리고 하중 압력(overburden pressure) 변화에 따른 균열 투과도 측정 실험을 수행하였다. 균열 투과도 측정 실험결과, 지지체는 크기와 분포 함량이 클수록 균열 투과도가 높게 산출되었으며, 하중 압력이 증가할수록 균열 투과도는 점차 감소하였다. 40/70 mesh 지지체의 경우 지지체 분포 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 32~57%이며, 하중 압력 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 29~78%로 나타나 지지체 분포의 감소가 균열 투과도 감소에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 실험결과를 바탕으로 균열 지지체의 분포 함량과 크기에 따라 균열 전파 영역을 구분하였으며, 균열 전파 영역이 깊어질수록 균열 투과도는 감소하였다. 이러한 결과를 기반으로 균열 전파 영역에 따른 균열 투과도를 산출하였고 각 영역에서 하중 압력에 따른 균열 투과도 감소를 확인하였다. 균열 전파 영역 내 균열 투과도의 하중 압력에 따른 감소 경향은 파쇄 균열대가 발달한 셰일가스 저류층의 생산 평가에 활용될 수 있다.

Abstract - This study presents the fracture permeability measurements considering the proppant size, distribution and overburden pressure to analyze the effect of the proppant distribution on the fracture permeability in shale gas reservoirs. From the results, the fracture permeability increased with larger proppant size and higher proppant distribution, but the permeability decreased with higher overburden pressure. For the 40/70 mesh proppant, the average fracture permeability reduction with decreasing proppant distribution ranged from 32 to 57%, and those of with decreasing overburden pressure ranged from 29 to 78%, confirming that decreasing proppant distribution had a greater effect on fracture permeability reduction. Based on the experimental data, the fracture propagation regions were determined and the fracture permeability decreased with deeper propagation regions. Using these results, the fracture permeability was determined according to the fracture propagation region and the decrease in fracture permeability with overburden pressure in each region was obtained. The decreasing tendency of fracture permeability in the fracture propagation zone with overburden pressure can be applied to the production evaluation of shale gas reservoirs with developed fracture zones.

Key words : shale gas reservoir, fracture permeability, proppant distribution, overburden pressure, fracture propagation region

†Corresponding author:jhwan@jnu.ac.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

세일가스 저류층은 전통가스전과 다르게 생산 시작과 동시에 높은 가스 생산량을 나타낸 후 점차 감소하게 된다. 이는 생산이 계속됨에 따라 공극 압력이 점차 감소함으로써 하중 압력이 증가하고 균열 간극의 크기가 줄어들어 균열 및 압채 투과도가 감소하게 되기 때문이다. 또한, 세일가스 저류층에서는 수압파쇄 대에 의한 가스 유동이 가장 큰 역할을 하기 때문에 균열 투과도 분석이 매우 중요하다[1-2]. 균열대에서의 투과도 측정은 코어시료를 활용한 측정방법이 진행되고 있지만, 저류층의 파쇄형상 및 지지체(proppant) 분포 양상을 정확하게 파악할 수 없어 추정치로만 사용되고 있다[3-7].

수압파쇄 후 자극부피(stimulated reservoir volume) 내 유체 유동 영역에서는 지지체 침투와 생산에 따른 압력 변화로 인해 균열대 물성이 균질하지 않다. 일반적으로 균열 투과도는 유정에 근접할수록 높아지는 경향을 보이므로, 이를 고려한 균열 투과도를 추정해야 한다. 따라서 생산에 따른 균열 투과도 감소 영향을 고려하기 위해 다양한 실험을 수행하여 모델에 반영하는 연구가 진행되어 왔다. Davies와 Kulper[8]는 균열 투과도는 지지체의 종류와 크기, 하중 압력, non-Darcy 효과, flush 후의 파쇄 균열대 수에 의한 영향으로 달라질 수 있다고 보고하였다. Zheng 등[9]은 암석 코어에 지지체를 다르게 분포한 실험과 유동 경로의 가스 채널 효과를 고려하기 위한 Kozeny-Carman 식을 활용하여 균열 투과도 관계식을 제안하였다. 세일가스 저류층 균열대에서 가스생산에 따른 균열 투과도 변화량 예측을 위해 Seidle 등[10]은 유효 응력과 균열대 압축률을 활용한 식을 제안하였다. Shi와 Durucan[11]과 Chen 등[12]은 압축률은 유효 응력의 범위에 따라 달라지는 현상을 기반으로 다양한 유효 응력 범위에서 균열대 압축률을 산출할 수 있는 연구를 수행하였다. Chen 등[13]은 균열대 내 지지체가 균열 간극을 유지하며, 가스를 생산할 시 시간이 지속될수록 균열대와 지지체 간 파묻힘(embedment) 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 점토(clay) 함유량에 의한 파묻힘 효과가 크게 나타나며, 실제 가스 생산에 따른 공극 압력 감소는 하중 압력이 증가하면서 파묻힘 효과로 인하여 균열 투과도 변화량이 크게 나타난다고 하였다.

실제 현장에선 수압파쇄 시 균열 자극 위치별 지지체 함량이 얼마만큼 분포되어 있으며, 하중 압력 변화에 따른 균열 투과도 변화율을 규명하기 어렵다. 또한, 실제 균열의 위치마다 침투된 지지체의 분포 함량이 다를 뿐 아니라 지지체 분포 함량에 따라 균열 투과도

의 감소량이 다르게 나타날 것이다.

따라서 본 연구에서는 실제 세일가스 현장에서 사용된 40/70 mesh, 100 mesh 지지체를 세일 코어의 인공 균열대에 적재한 후 하중 압력 변화와 지지체 분포를 고려한 균열 투과도를 측정하고자 한다. 또한, 측정된 실험 결과를 기반으로 파쇄 균열대 내 전과 영역을 구분하고 각 영역에 알맞은 지지체 종류 및 분포를 결정함으로써 각 균열 전과 영역의 하중 압력에 따른 균열 투과도의 감소 경향을 도출하고자 한다.

II. 이론적 배경

세일가스 유동은 균열대의 유동이 가장 지배적이며, 저류층 가스 생산 시 공극 압력이 점차 감소함에 따라 하중 압력이 증가하게 된다. 이때 수압파쇄공법 수행으로 발생한 균열대는 지지체가 균열 간극을 유지하고 있지만, 하중 압력이 증가함에 따라 지지체가 재배열 되거나 파묻히는 영향으로 균열 간극이 점차 줄어들게 된다. 이러한 균열 간극이 줄어드는 영향을 분석하기 위해 Seidle 등[10]은 인공석탄 균열 코어 시료를 활용하여 등방 응력(hydrostatic stress) 조건으로 균열 투과도 측정실험을 수행하였다. 균열 투과도는 하중 압력을 증가시키며 실험을 수행하였고 하중 압력의 변화와 균열대 압축률의 상관관계를 규명하여 관계식을 제안하였다. 균열 투과도의 감소는 응력에 의해 유발된 변형 또는 폐쇄의 결과로 단일 수확 표현으로 표현될 수 없다. 따라서 응력 값을 기반으로 파쇄

Table 1. Various correlations of fracture permeability by effective stress

Correlations
$k_f = k_{fi} e^{c_f \left(\frac{\phi}{\phi_i} - 1 \right)}, \phi = \phi_r + (\phi_i - \phi_r) e^{\alpha \Delta p}$ [14]
$k_f = k_{fi} e^{-b \Delta p}$ [15]
$k_f = k_{fi} (1 - m_{f0} \Delta p)$ [15]
$k_f = k_{fi} \left(\frac{\phi_f}{\phi_{fi}} \right)^n, \phi_f = \phi_{fi} (1 - m_{f0} \Delta p)$ [15, 16]
$k_f = k_{fi} \left(\frac{\phi_f}{\phi_{fi}} \right)^n, \phi_f = \phi_{fi} e^{-b \Delta p}$ [15, 17]
$k_f = k_{f0} e^{-3c_f(\sigma_e - \sigma_{\omega})}$ [10]
$k_f = k_{fi} e^{-\gamma(p_i - p)}$ [18]

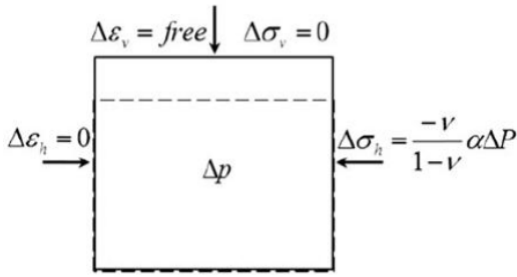


Fig. 1. Cross-section of deformation by uniaxial compression [19].

균열의 변형을 효과적으로 모델링하기 위해 서로 다른 상관관계가 제안되어야 한다. 균열 투과도와 유효 응력의 관계는 표 1에 나와 있는 지수식, 다항식 및 등차 방정식의 형태로 설명될 수 있다 [10, 14-18].

생산에 따른 균열 투과도 산출 관계식은 대부분 초기 균열 투과도, 초기 균열 공극률, 균열대 압축률 등을 산출해야 하중 압력 증가에 따른 균열 투과도 값을 예측할 수 있으며, 세일의 경우 지역마다 광물 조성 및 지지체 분포 정도가 다르기 때문에 관계식과 실제 저류층의 균열 투과도 변화량은 차이가 발생하게 된다. 세일가스 저류층 지지체를 포함한 균열 투과도 측정 결과를 시뮬레이션에 반영하기 위해서는 선행연구에서 제안한 응력변화와 균열대 압축률을 고려한 관계식을 활용하는 것이 일반적이다[19, 20]. 그러나 응력 변화를 고려하기 위한 모델을 구축하기 위해서는 지구역학 (geomechanic) 모델을 구축해야 하는 복잡성과 비용이 필요하기 때문에 실험 결과를 단순화할 수 있는 과정이 필요하다. 따라서 저류층 생산에 따른 저류층 압력 변화를 활용하여 균열 투과도와 저류층 압력의 상관관계를 모델에 적용하는 것이 더 효과적이며, Settari 등[19]은 Fig. 1과 같이 유효 응력 변화에 따른 저류층의 변형을 묘사하였다.

Settari 등[19]은 변형을 차이를 식 (1)과 같이 응력과 포아송비, 영률의 관계로 정의하였다. 여기서, $\Delta\sigma$ 와 $\Delta\varepsilon$ 는 응력과 변형률의 변화이고, ν 는 포아송비 (Poisson's ratio)이며, E 는 영률 (Young's modulus)이다.

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_x - \nu(\Delta\sigma_y + \Delta\sigma_z)] \\ \Delta\varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_y - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z)] \\ \Delta\varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)] \end{aligned} \quad (1)$$

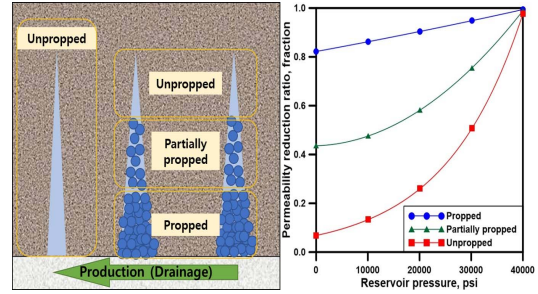


Fig. 2. Diagram of proppant distribution in fracture and permeability reduction ratio.

저류층 생산압력과 균열 투과도 변화를 고려하기 위해 아래와 같이 몇 가지 가정이 필요하다. (1) 저류층은 단축 변형 조건이다 ($\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_y = 0$). (2) 저류층 생산 시 하중 응력은 변화하지 않는다 ($\Delta\sigma_v = 0$). 단축 변형 조건과 변하지 않는 하중 응력 상태에서의 조건은 Fig. 1과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다[19].

$$\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \Delta\sigma_z = \frac{-\nu}{1-\nu} \alpha (p - p_0) \quad (2)$$

여기서, α 는 감소 지수 (reduction factor)로서 상수 값을 가지며 p 는 저류층 압력, p_0 는 초기 저류층 압력을 의미한다. 따라서 Seidle 등[10]이 제안한 균열 투과도 관계식을 아래의 식 (3)처럼 정리할 수 있다.

$$k_f = k_{f0} e^{-3c_f \Delta\sigma_m} = k_{f0} e^{-3c_f \alpha (p - p_0)} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\sigma_m$ 은 초기 응력과 저류층에서 가스 생산에 따른 응력 변화 차이이다. 유효 응력에 따른 균열 투과도 관계식을 상용 소프트웨어에 적용하기 위해서는 Fig. 2와 같이 저류층 압력에 따른 초기 균열 투과도와 균열 투과도 감소비율을 적용해야 한다. 앞선 가정에서 하중 압력은 일정하므로 식 (2)를 다시 정리하면 식 (4)와 같이 수직 하중 압력은 감소 지수와 저류층 압력차이의 곱과 같다고 할 수 있다.

$$\Delta\sigma_m = -\alpha (p - p_0) \quad (4)$$

그리고 저류층마다 압축률이 다르지만 본 연구에서는 캐나다 키위가나 (Kiwigana) 저류층의 압축률을 활용하였으며, Lee 등[20]은 키위가나 저류층의 균열대 압축률은 0.05에서 0.11 사이로 산출되어 0.09 값을 사용하였다. 결국 키위가나 저류층의 균열대 압축률을 고려하여 식 (3)을 정리하면 아래의 식 (5)와 같으며,

여기서 미지수는 α 이고 이는 실험 결과를 통해 도출이 가능하다.

$$k_f = k_{f_0} e^{-0.27\alpha(p-p_0)} \quad (5)$$

앞선 설명과 같이 Chen 등[12]과 Lee 등[20]은 하중 압력 변화를 저류층 압력 변화로 표현하였고 이를 통해 감소 지수는 균열대 내 지지체 분포 함량에 의한 상숫값으로 정의할 수 있다.

III. 실험 방법 및 절차

세일코어 균열 투과도 측정실험을 위해 CoreTest社의 투과도 측정 장비 (BPS-805)를 활용하였으며, 가스 투과도 측정을 위해 가스 유량계 (flow meter)를 장치 후단에 설치하여 가스 투과도 측정을 가능하게 Fig. 3과 같이 수정하였다. 투과도 측정 장비는 9,500psi의 하중 압력과 5,000psi 공극 압력, 코어 직경은 1.5 inch, 코어길이는 1에서 4 inch를 활용할 수 있게 설계되었다. 주입 유량은 최대 15 l/min이며, 최대 측정 가능한 차압은 100 psi로 다양한 범위에서 가스 투과도를 측정할 수 있다. 또한, 가스를 이용한 투과도 측정 시 가스의 미끄러짐 현상 (slippage effect)이 발생하여 투과도 값의 신뢰성을 떨어트리게 된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 Klinkenberg 보정을 수행하여 투과도 값을 산출하였다.

키위거나 세일가스 저류층의 공극률은 5~9%이며, 투과도는 180~330 md이다. 또한, 총 유기물 함량 (total organic carbon, TOC)은 3.8%이며, 석영질이 50~70%로 수압파쇄공법 적용에 유리하고, 탄산연암 광물이 10~16%, 점토 광물이 6~10%로 확인되었다. 세일 코어 인공 균열대 제작을 위해 코어의 수직 방향으로 시편 절단기를 활용하여 균열대를 제작하였고 균열대에 주입할 지지체는 실제 세일가스 저류층에 주입한 40/70 mesh, 100 mesh 지지체를 활용하였다. 세일 코

어의 인공 균열대에 지지체를 적재하고 지지체가 유실되는 문제를 해결하기 위해 인공 균열대에 지지체를 적재한 후 테플론 테이프로 코어 주변을 감쌌다. 또한, heating tube와 heating gun을 활용하여 코어 주변을 한 번 더 감쌌으므로 인공 균열대 내의 지지체 유실을 방지하였다.

세일가스 저류층의 수압파쇄 공법 수행 시 지지체를 주입하게 되면 지지체의 mesh 사이즈가 높을수록 입자 크기가 작기때문에 지지체는 깊은 균열까지 침투하고 mesh 사이즈가 작을수록 입자 크기가 크므로 깊게 침투하지 못한다. 실제 수압파쇄 공법 설계 시 지지체 입자 크기를 고려하여 파쇄가 일어난 후 입자 크기가 작은 지지체를 먼저 주입하고 균열이 발생한 마지막 지점까지 지지체가 침투하여 간극을 유지할 수 있게 하며, 그 이후 입자 크기가 큰 지지체를 주입하여 공저 근처의 유동 경로 향상에 도움을 주도록 설계한다.

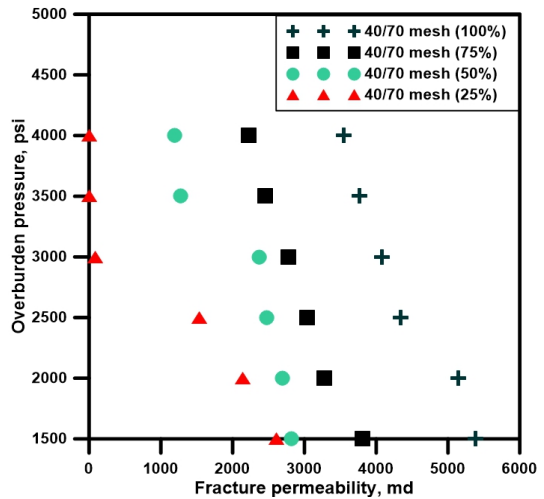


Fig. 3. Schematic diagram of gas permeability apparatus.

Table 2. Experimental conditions

Parameter	Value
Rock type	Kiwigana Shale
Proppant type	40/70 mesh, 100 mesh
Proppant distribution	25 ~ 100%
Overburden pressure	1,500 ~ 4,000 psi
Gas flow rate	Maximum 15 l/min
Differential pressure	Maximum 100 psi

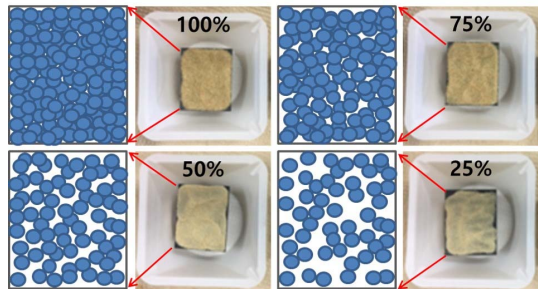


Fig. 4. Proppant distribution in fractured zone.

실제 균열대 내 지지체가 어느 정도의 혼합비율로 분포하고 있으며, 그 함량이 얼마인지 추측하기는 매우 어려울 뿐만 아니라 수평정에서 균열의 깊이에 따른 지지체의 분포 역시 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 키워가나 세일가스 저류층에 주입한 지지체 40/70 mesh, 100 mesh 사이즈를 이용하여 하중 압력에 따른 균열 투과도 변화량을 측정하였다. 하중 압력은 1,500에서 4,000 psi 까지 500 psi 간격으로 증가시키면서 순차적으로 실험을 수행하였다. 지지체 분포 함량 설정을 위해 세일 코어 인공 균열대의 단면적을 전부 지지체로 채울 수 있는 양을 100%라고 설정하였고 100%를 기준으로 75%, 50%, 25%의 지지체 함량을 설정하여 실험을 수행하였다(Fig. 4). 앞서 설명한 실험 조건은 Table 2에 정리하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

4.1. 균열 투과도 측정

실제 실험 중 높은 하중 압력으로 인해 세일코어 단면에 균열이 발생하여 균열 투과도 결과가 예측과 다르게 측정될 수 있다. 이를 위해 측정된 투과도 값을 거듭제곱 함수로 표현하여 추세선을 이용한 보정을 수행하였다. 40/70 mesh 지지체를 주입한 균열 투과도 측정 결과는 Table 3, Fig. 5와 같으며, 모든 지지체 분포에서 하중 압력이 증가할수록 균열 투과도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 균열대에 지지체 분포 함량이 클수록 높은 균열 투과도가 산출되었으며, 이는 지지체 분포 함량이 클수록 균열 간극이 크기 때문이다. 지지체 분포 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율의 경우 32~57%이며, 하중 압력 감소에 따른

평균 균열 투과도 감소율의 경우 29~78%로 나타나 지지체 분포의 감소가 균열 투과도 감소에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Fig. 5에서 지지체 분포 함량이 100%, 하중 압력이 2,500 psi일 때와 지지체 분포 함량이 50%, 3,500 psi일 때 투과도 감소가 급격히 발생하였는데, 이는 세일 코어의 균열 내부에 추가적인 균열이 발생하여 지지체 채배율로 유동 흐름을 막거나 균열 파면이 유동 흐름에 영향을 미친 것으로 분석된다. 또한, 지지체 분포

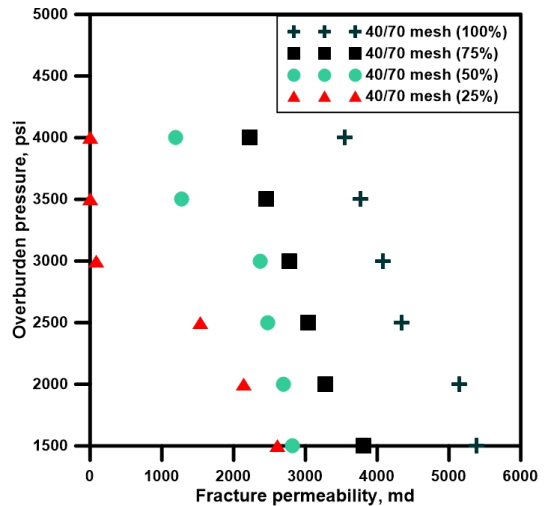


Fig. 5. Experimental result of fracture permeability with 40/70 mesh proppant distribution and overburden pressure.

Table 3. Experimental result of fracture permeability with 40/70 mesh proppant

Overburden pressure (psi)	Fracture permeability (md)			
	100%	75%	50%	25%
	3.72 g	2.79 g	1.86 g	0.93 g
1,500	5,380	3,810	2,820	2,610
2,000	5,140	3,280	2,690	2,140
2,500	4,340	3,040	2,470	1,540
3,000	4,080	2,780	2,370	87
3,500	3,770	2,450	1,280	1.6
4,000	3,550	2,220	1,190	0.237

Table 4. Experimental result of fracture permeability with 100 mesh proppant

Overburden pressure (psi)	Fracture permeability (md)			
	100%	75%	50%	25%
	3.72 g	2.79 g	1.86 g	0.93 g
1,500	1,970	1,830	1,580	1,090
2,000	1,670	1,450	960	865
2,500	1,470	1,070	881	661
3,000	1,390	975	694	526
3,500	1,290	883	618	382
4,000	1,200	825	554	292

함량이 가장 적은 25%의 경우는 하중 압력 2,500 psi 이후 투과도 감소 경향이 급격하게 증가하는데, 이는 지지체가 코어 시료 균열대로 파문하는 영향으로 균열 간극의 크기가 급격히 줄어들어 투과도가 감소했을 것으로 판단된다.

100 mesh 지지체를 활용한 균열 투과도 측정 결과, 40/70 mesh 결과와 마찬가지로 하중 압력이 증가할수록 균열 투과도가 감소하는 양상을 나타냈으며, 지지체 분포 함량이 적을수록 초기 균열 투과도는 더 낮게 나타났다(Table 4). 지지체의 크기가 더 작은 100 mesh의 경우 40/70 mesh 사이즈의 지지체보다 더 낮은 유동 흐름을 확보하기 때문에 40/70 mesh보다 더 낮은 균열 투과도를 보였다. 지지체 분포 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 46~76%이며, 하중 압력 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 47~71%로 나타났다. 이를 통해 40/70 mesh 결과와 달리 100 mesh 지지체의 경우 지지체 분포의 감소와 하중 압력의 감소가 균열 투과도 감소에 미치는 영향은 비슷한 것으로 사료된다.

Fig. 6과 같이 지지체 분포 함량이 50%인 경우, 하중 압력이 2,000 psi일 때 균열 투과도 감소가 발생하는데, 이는 실험 진행 중 하중 압력 증가에 따라 지지체가 재배열 되거나 파문하는 영향으로 투과도 감소 경향이 크게 나타난 것으로 판단된다. 지지체 분포 함량이 25%인 경우, 1,500 psi일 때부터 균열이 발생하여 균열 투과도가 급격히 감소하게 나타났다. 이는 지지체가 균열대 전체 면적을 지지하지 못함으로써 하

중 압력 증가에 따라 피로도가 누적되어 균열이 추가로 발생함을 확인하였다.

4.2 균열 전파 영역에 따른 균열 투과도 변화

세일가스 저류층에서 작은 입자의 지지체는 균열의 끝까지 침투하고, 큰 입자의 지지체는 공저 부근이나 인근에 배치되어 균열 간극을 최대한으로 확장해 유동성을 향상합니다. 이러한 과정은 유체의 이동을 촉진하여 세일가스의 생산을 효율적으로 도와줍니다. 이때, 실제 균열 내에 주입된 지지체의 분포를 예측할 방법이 없으며, 최근 들어 실험실 규모의 세일층을 대상으로 소규모 수압파쇄를 통한 지지체 분포 및 बैं킹(banking) 실험을 수행하고 있지만, 실제 저류층 균열대의 지지체 분포 양상과 비교할 때 한계점이 있다. 본 연구에서는 지지체의 입자 크기가 작을수록 전파되는 거리가 길고 입자 크기가 클수록 공저 인근에 배치된다는 가정하에 Fig. 7과 같이 지지체 침투 및 분포 양상을 가정하였다. 따라서 실험 결과를 활용하여 세일가스 수압파쇄 균열대의 지지체 침투 및 분포양상에 따라 수압파쇄 지역을 1번부터 8번까지 구분할 수 있다.

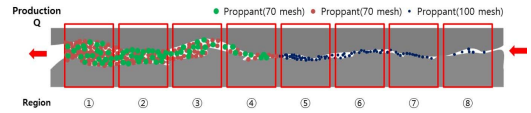


Fig. 7. Proppant distribution in hydraulic fractured shale gas reservoir.

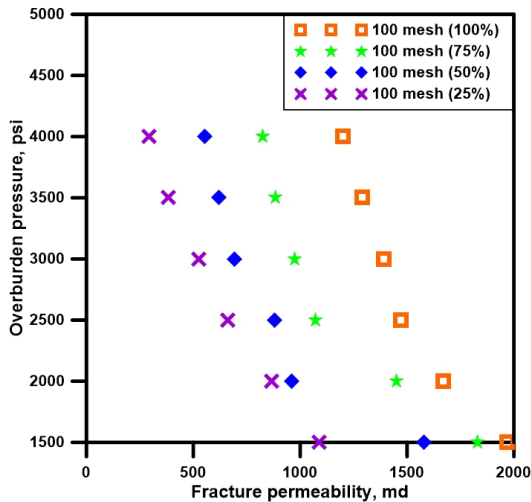


Fig. 6. Experimental result of fracture permeability with 100 mesh proppant distribution and overburden pressure.

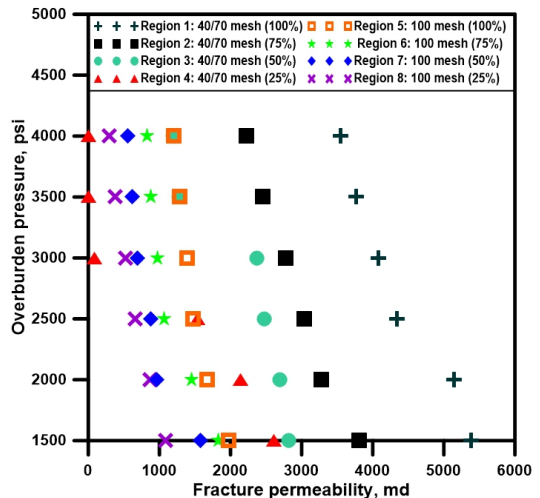


Fig. 8. Experimental result of fracture permeability with propagation region.

Table 5. Fracture permeability based on the experimental results (40/70 mesh)

Pressure (psi)	$k_{f_{n=1 \sim 6}}$ (md)			
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
1,500	5,380	3,810	2,820	2,610
2,000	5,140	3,280	2,690	2,140
2,500	4,340	3,040	2,470	1,540
3,000	4,080	2,780	2,370	87
3,500	3,770	2,450	1,280	1.6
4,000	3,550	2,220	1,190	0.237

Table 6. Fracture permeability based on the experimental results (100 mesh)

Pressure (psi)	$k_{f_{n=1 \sim 6}}$ (md)			
	Region 5	Region 6	Region 7	Region 8
1,500	1,970	1,830	1,580	1,090
2,000	1,670	1,450	960	865
2,500	1,470	1,070	881	661
3,000	1,390	975	694	526
3,500	1,290	883	618	382
4,000	1,200	825	554	292

또한, Fig. 7과 같이 지지체 크기에 따른 분포 함량과 하중 압력에 따른 균열 투과도 변화를 Fig. 8과 같이 나타냈다. 본 연구에서 도출한 지지체 분포 함량 및 하중 압력 변화에 따른 균열 투과도 분포 양상을 분석하면 지지체 크기가 큰 40/70 mesh의 경우 지지체 함량이 100%이며, 하중 압력이 1,500 psi 일 때 균열 투과도가 가장 크게 산출되었다.

일반적으로 수평정 수압파쇄는 공저 인근에서 균열 간극의 크기가 크고 균열 전파 끝 지점으로 향할수록 전달하는 힘이 약해져 점차 간극이 감소한다. 따라서 실험 결과를 활용하여 Fig. 7과 같은 셰일가스 수압파쇄 균열대의 지지체 침투 및 분포 양상에 따라 수압파쇄 균열대 지역을 1번부터 8번까지 구분할 수 있다. 그리고 1번부터 8번의 수압파쇄 지역은 지지체 분포 함량과 크기 및 저류층 압력 변화에 따라 균열 투과도

변화율이 다르게 나타나기 때문에 균열 투과도 변화율을 구분할 필요가 있다. 이를 위해 실험에서 지지체 분포 함량 및 크기별 균열 투과도를 하중 압력 변화에 따라 산출하였으며, 각 실험별 결과를 정리하면 Table 5와 6과 같다.

V. 결론

본 연구에서는 셰일가스 저류층의 균열 내 지지체 분포 함량 및 하중 압력에 따른 균열 투과도 측정 실험을 수행하였으며, 해당 영향 인자의 변화에 따른 균열 투과도의 감소 경향을 산출하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 균열 투과도 측정 실험 결과, 인공 균열 코어 시료에 주입한 지지체는 크기와 분포 함량이 많을수록 균열 투과도가 높게 산출되었으며, 하중 압력이 증가할수록 균열 투과도는 점차 감소하였다.

(2) 40/70 mesh 지지체의 경우 지지체 분포 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 32~57%이며, 하중 압력 감소에 따른 평균 균열 투과도 감소율은 29~78%로 나타나 지지체 분포의 감소가 균열 투과도 감소에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

(3) 지지체 분포 함량이 가장 적은 25%의 경우, 높은 하중 압력에서 투과도가 급격하게 감소하는 경향이 나타났다. 이는 균열 단면을 지지하는 지지체가 충분히 분포되지 않아 코어 시료의 균열대에 파문히는 현상이 일어나 균열 간극의 크기가 급격하게 줄어들어 균열 투과도가 감소했을 것으로 추정된다.

(4) 지지체의 분포 함량과 크기에 따라 균열 전파 영역을 구분하였으며, 균열 전파 영역이 깊어질수록 균열 투과도는 감소하였다. 이러한 결과를 기반으로 균열 전파 영역에 따른 균열 투과도를 산출하였고 각 영역에서 하중 압력에 따른 균열 투과도 감소 경향을 도출하였다.

(5) 본 연구에서 제시된 균열 투과도 감소 경향은 파쇄 균열대가 형성된 셰일 가스 저류층의 생산성을 평가하기 위한 시뮬레이션의 주요 입력 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2022-00143541). 또한, 본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 20212010200010).

사용기호

a : empirical exponent [1/Pa]
 b : model parameter of Rock 1 [1/psi]
 c_1 : experimental coefficient
 c_f : fracture volume compressibility [1/psi]
 E : Young's modulus [Pa]
 k_f : fracture permeability [md]
 k_{f0} : reference fracture permeability [md]
 k_{fi} : initial fracture permeability [md]
 m_f : model parameter of Rock 2 [1/psi]
 n : power-law exponent
 p : pore fluid pressure [Pa]
 p_i : initial pore fluid pressure [Pa]

그리스 문자

α : reduction factor
 ϵ : compressive strain
 σ : compressive stress [psi]
 σ_e : effective stress [psi]
 σ_{e0} : reference effective stress [psi]
 ϕ : porosity [fraction]
 ϕ_f : fracture porosity [fraction]
 ϕ_{f0} : reference fracture porosity [fraction]
 ϕ_{fi} : initial fracture porosity [fraction]
 ϕ_i : initial porosity [fraction]
 ϕ_r : residual porosity [fraction]
 ν : Poisson's ratio

REFERENCES

- [1] Yan, T., Li, W., and Bi, X., "An Experimental Study of Fracture Initiation Mechanisms during Hydraulic Fracturing", *Petroleum Science*, 8, 87-92, (2011)
- [2] Li, J. H., Li, B. B., Cheng, Q. Y., and Gao, Z. "Characterization of the fracture compressibility and its permeability for shale under the effects of proppant embedment and compaction: A preliminary study", *Petroleum Science*, 19(3), 1125-1138, (2022)
- [3] Kern, L. R., Perkins, T. K., and Wyant, R. E., "The Mechanics of Sand Movement in Fracturing", *Journal of Petroleum Technology*, 11(7), 55-57, (1959)
- [4] Daneshy, A. A., "Numerical Solution of Sand Transport in Hydraulic Fracturing", *Journal of Petroleum Technology*, 30(1), 132-140, (1978)
- [5] Ouyang, S., Carey, G. F., and Yew, C. H., "An Adaptive Finite Element Scheme for Hydraulic Fracturing with Proppant Transport", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 24, 645-670, (1998)
- [6] Dontsov, E. V. and Peirce, A. P., "Proppant Transport in Hydraulic Fracturing: Crack Tip Screen-out in KGD and P3D Models", *International Journal of Solids and Structure*, 63, 206-218, (2015)
- [7] Jia, B. and Xian, C. G., "Permeability measurement of the fracture-matrix system with 3D embedded discrete fracture model", *Petroleum Science*, 19(4), 1757-1765, (2022)
- [8] Davies, D. R. and Kulper, T. O. H., "Fracture Conductivity in Hydraulic Fracture Stimulation", *Journal of Petroleum Technology*, 40(5), 550-552, (1988)
- [9] Zheng, X., Chen, M., Hou, B., Ye, Z., Wang, W., Yin, C. and Chen, X., "Effect of Proppant Distribution Pattern on Fracture Conductivity and Permeability in Channel Fracturing", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149, 98-106, (2017)
- [10] Seidle, J. P., Jeansonne, M. W. and Erickson, D. J., "Application of Matchstick Geometry to Stress Dependent Permeability in Coal", *SPE Rocky Mountain Regional Meeting*, Casper, Wyoming, USA, (1992)
- [11] Shi, J. Q. and Durucan, S., "Exponential Growth in San Juan Basin Fruitland Coalbed Permeability with Reservoir Drawdown: Model Match and New Insight", *SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference*, Denver, Colorado, USA, (2009)
- [12] Chen, D., Pan, Z. and Ye, Z., 2015, "Dependence of Gas Shale Fracture on Effectives Stress and Reservoir Pressure: Model Match and Insights", *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 139, 383-392, (2009)
- [13] Chen, D., Ye, Z., Pan, Z., Zhou, Y. and Zhang, J., "A Permeability Model for the Hydraulic Fracture Filled with Proppant Packs under Combined Effect of Compaction and Embedment", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149, 428-435, (2017)
- [14] Rutqvist, J., Wu, Y. S., Tsang, C. F., and Bodvarsson, G., "A Modeling Approach for Analysis Multiphase Fluid Flow, Heat Transfer, and Deformation in Hydraulic Fracturing", *Journal of Petroleum Technology*, 30(1), 132-140, (1978)

- mation in Fractured Porous Rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 429-442, (2002)
- [15] Raghavan, R., and Chin, L. Y., "Productivity Changes in Reservoirs with Stress-Dependent Permeability", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, USA, (2004)
- [16] Min, K., Rutqvist, J., Tsang, C., and Lanru, J., "Stress-Dependent Permeability of Fractured Rock Masses: a Numerical Study", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1191-1210, (2004)
- [17] Celis, V., Guerra, J., and Da Prat, G., "A New Model for Pressure Transient Analysis in Stress Sensitive Naturally Fractured Reservoirs", *SPE Advanced Technology Series*, 2(1), 126-135, (1994)
- [18] Yilmaz, O., and Nur, A., *Pore Pressure Fronts in Fractured Rock System*, Department of Geophysics, Stanford University, (1985)
- [19] Settari, A. T., Bachman, R. C. and Walter, D. A., "How To Approximate Effects of Geomechanics in Conventional Reservoir Simulation", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, USA, (2005)
- [20] Lee, T., Park, D., Shin, C., Jeong, D. and Choe, J., "Efficient Production Estimation for a Hydraulic Fractured Well Considering Fracture Closure and Proppant Placement Effects", *Energy Exploration Exploitation*, 34(4), 643-658, (2016)