



세일저류층의 다단계 수압파쇄에서 응력그림자 효과를 고려한 균열형태 분석

유정민·박혜민*·왕지훈**·[†]성원모**

한양대학교 자원환경공학과 석사, *한양대학교 자원환경공학과 박사수료,

**한양대학교 자원환경공학과 교수

(2020년 12월 30일 접수, 2021년 2월 9일 수정, 2021년 2월 24일 채택)

Analysis of Hydraulic Fracture Geometry by Considering Stress Shadow Effect during Multi-stage Hydraulic Fracturing in Shale Formation

Jeong-min Yoo · Hyemin Park · Jihoon Wang · [†]Wonmo Sung

Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University,
Seoul 04763, Korea

(Received December 30, 2020; Revised February 9, 2021; Accepted February 24, 2021)

요약

투과성이 낮은 세일층에서의 다단계 수압파쇄 시, 파쇄단계 간의 서로 근접한 균열로 인해 지층 간 응력간섭이 발생하는 ‘응력그림자효과’가 나타날 수 있다. 이로 인해 균열의 전파 방향성이 변화하거나 비정형적인 형태의 균열이 발생하게 된다. 본 연구에서는 응력그림자효과의 영향에 따른 수압파쇄 균열형태와 생산성을 분석하고자 상용 수압파쇄 시뮬레이터 full-3D모델인 ‘GOHFER’를 사용하였다. 균질한 저류층 모델에서 응력그림자효과 고려 유무에 따른 분석을 수행하였다. 또한 지력학적 물성이 다른 두 세일층에서 수압파쇄 모델링을 수행하여 영률과 포아송비에 따른 응력그림자효과를 분석하였다. 선행 파쇄단계의 균열로 인한 응력변화는 최대/최소 주응력을 역전시켜 T-방향보다는 생산성이 미비한 L-방향 균열이 주로 형성되었다. 또한 Marcellus 세일의 경우 연성 특성을 갖는 Eagle Ford 세일에 비해 높은 취성으로 인해 균열의 폭이 더 두껍게 형성되어 균열 체적이 더욱 크게 산출되었다. Marcellus 세일지층의 영률이 Eagle Ford 세일에 비해 크게 낮기 때문에 stage 2에서 응력그림자효과의 영향을 적게 받는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 응력그림자효과는 균열 간의 간격 뿐만 아니라 지력학적 물성에 따라서도 크게 달라진다. 그러므로 좀 더 정확한 균열 형태와 현실성 있는 생산성 예측하기 위해 응력그림자효과는 고려되어야 한다.

Abstract - During multi-stage fracturing in a low permeable shale formation, stress interference occurs between the stages which is called the “stress shadow effect(SSE)”. The effect may alter the fracture propagation direction and induce ununiform geometry. In this study, the stress shadow effect on the hydraulic fracture geometry and the well productivity were investigated by the commercial full-3D fracture model, GOHFER. In a homogeneous reservoir model, a multi-stage fracturing process was performed with or without the SSE. In addition, the fracturing was performed on two shale reservoirs with different geomechanical properties(Young’s modulus and Poisson’s ratio) to analyze the stress shadow effect. In the simulation results, the stress change caused by the fracture created in the previous stage switched the maximum/minimum horizontal stress and the lower productivity L-direction fracture was more dominating over the T-direction fracture. Since the Marcellus shale is more brittle than more dominating over the T-direction fracture. Since the Marcellus shale is more brittle than

[†]Corresponding author:wmsung@hanyang.ac.kr

the relatively ductile Eagle Ford shale, the fracture width in the former was developed thicker, resulting in the larger fracture volume.

And the Marcellus shale's Young's modulus is low, the stress effect is less significant than the Eagle Ford shale in the stage 2. The stress shadow effect strongly depends on not only the spacing between fractures but also the geomechanical properties. Therefore, the stress shadow effect needs to be taken into account for more accurate analysis of the fracture geometry and for more reliable prediction of the well productivity.

Key words : shale reservoir, hydraulic fracturing modeling, multi-stage fracturing, stress shadow effect, stress change, geomechanical property

I. 서 론

투과도가 매우 낮은 셰일저류층의 생산성을 높이기 위해 일반적으로 수평정 시추 후 다단계 수압파쇄를 실시한다. 수압파쇄를 실시함에 있어서 수압파쇄 유체의 종류, 프로판트(proppant)의 사이즈와 종류, 적정간격 설계 등이 매우 중요하다. 특히 균열 간 간격의 적정 설계는 경제성에 있어서 매우 중요한 요소이므로 필수적으로 고려해야 한다[1-4]. 셰일층에서의 수압파쇄 시 각 균열 간의 간격이 좁을 경우, 파쇄단계 별 균열 발생 시 ‘응력그림자효과(stress shadow effect, SSE)’가 크게 영향을 미치게 된다. 응력그림자효과는 이전 단계에서 생성된 균열로 인하여 수압파쇄가 진행되는 현 단계의 목표 지층의 응력에 간섭이 발생하는 현상을 의미한다. 지층 내 균열 발생 시, Fig. 1과 같이 균열은 지층의 최대주응력(σ_H) 방향을 향해 성장하고 수평정과 평행한 방향인 최소수평주응력(σ_h) 방향에 마주하여 균열이 두꺼워지므로 이 균열로 인한 추가적인 응력그림자는 지층의 최소수평주응력에 더해지

는 효과로 작용한다. 이에 따라 균열에 인접한 지역은 국부적으로 최대/최소수평주응력이 역전되어 균열의 성장 방향이 변화할 수 있다. 즉, 지층의 최소수평주응력 방향을 향해 시추된 수평정에서 수평정에 수직 방향인 T-방향(Transverse-direction)으로만 균열이 전파하는 것이 아니라 생산성 향상에 기여하지 못하는 L-방향(Longitudinal-direction)으로도 균열이 발생하게 되어 궁극적으로 저류층의 생산성 저하를 야기한다[5-9]. 응력그림자효과는 수압파쇄 시 균열 간 간격에 따라 그 영향이 달라질 뿐만 아니라 저류층의 지력학적 물성(geomechanical property)에 따라서도 크게 달라진다[10]. 응력그림자효과는 지층의 영률이 증가할수록 비례적으로 증가하며 영률(young's modulus)과 포아송비(poisson's ratio)의 비인 취성지수(brittleness index)에 따라 균열의 높이와 길이 등과 같은 균열의 형태가 달라질 수 있다[10-12]. 수압파쇄 모델링 시 이와 같은 응력그림자효과를 고려하지 않을 경우 정확한 균열의 성장 방향 산출이 어렵고 실제 생산성과 크게 다른 결과를 가져오는 오류를 범할 수 있다.

선행연구에서는 대부분 균열 생성이 특징 중 한 가지만 고려하여 연구를 수행하였다[11-15]. 균열의 생산성 분석에 있어서 T-방향 또는 L-방향 중 한 방향의 균열면을 가정하여 응력그림자효과에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 균열이 전파하는 도중 방향이 바뀌는 것과 응력그림자효과를 반영할 수 있는 3차원(full 3D) 균열시뮬레이터인 Halliburton사의 GOHFER 모델을 사용하였다. 셰일저류층에서의 다단계 수압파쇄 시, 전 단계의 수압파쇄에 의한 주변 지층의 응력변화에 따라 생성되는 수압파쇄 균열 형태 및 그에 따른 생산성을 분석하였다. 또한 지층의 지력학적 물성 중 영률과 포아송비의 비인 취성지수에 따른 균열형태와 생산성을 비교 분석하였다.

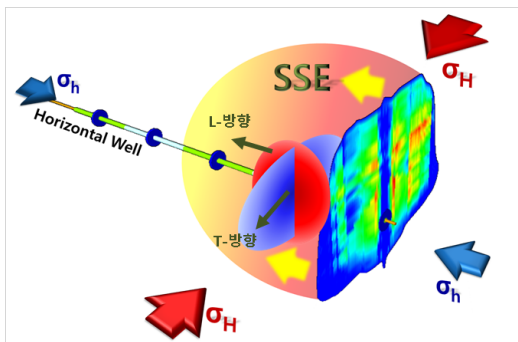


Fig. 1. Stress shadow effect in horizontal well.

II. 이론적 배경

수압파쇄 시뮬레이터인 GOHFER는 Kirsch 이론에 기반 하여 수압파쇄의 발생 여부를 결정하며 이는 시추공 외부에 작용하는 최대주응력보다 파쇄 유체의 주입압력이 커지게 되면 균열이 발생하게 된다[16]. 유정을 시추할 때 시추공 외부의 접선응력(tangential stress, σ_t) 또는 내압을 받는 시추공에서 원주 방향으로 작용하는 수직응력인 후프응력(hoop stress)이 발생한다. 이때 시추공 외부의 접선응력과 시추공 내 유체 압력의 증첩이 발생하게 되면 시추공 외부의 응력의 크기가 감소된다. 또한 내부 압력이 충분히 커지게 되면 응력이 서로 상쇄되며 지층의 인장강도(tensile stress)보다 커지면 최대수평주응력 방향으로 균열이 발생하게 된다. 따라서 Kirsch이론에서의 시추공 주변의 반경방향응력(radial stress, σ_r)과 접선응력 값은 식 (1)과 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{\sigma_h + \sigma_H}{2} \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) \\ & + \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2} \left(1 - 4 \frac{r_w^2}{r^2} + 3 \frac{r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ & + \frac{r_w^2}{r^2} (P_w - \alpha P_o) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t = & \frac{\sigma_h + \sigma_H}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) \\ & + \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2} \left(1 + 3 \frac{r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ & - \frac{r_w^2}{r^2} (P_w - \alpha P_o) \end{aligned} \quad (2)$$

균열이 발생하게 되면 지층응력에 변화가 발생하게 된다. 이러한 응력변화는 영향반경 내 균열의 성장 방향과 기하학적 형태에 영향을 미치므로 균열 주변에서 발생한 응력변화를 고려해야 한다. Boussinesq는 식 (3)과 식 (4)와 같이 선형탄성이론(linear elastic theory)에 기반 하여 응력변화를 예측하였다. 식 (3)은 방사형 시스템에서 Fig. 2와 같이 하중된 힘(P)에 의해 인접 지층의 임의의 지점에서 받는 응력변화량을 나타낸다. 균열 생성에 의한 응력은 균열 내압에 비례하고 균열로부터의 거리의 역제곱으로 감소한다.

$$\sigma_{SSE} = \frac{3P}{2\pi} \frac{\cos^2\psi}{(r^2 + z^2)} \quad (3)$$

GOHFER에서는 균열의 두께가 벌어진에 따라 최소주응력방향으로의 응력의 변화만을 계산하므로 식 (3)을 간단화하기 위해 방사형이 아닌 z축을 따라 변형된 응력을 구하는 식은 반지름(r)이 0의 값을 가지기 때문에 소거되고 z축과의 각도(ψ) 또한 0°이므로 식 (4)와 같다.

$$\sigma_{SSE} = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (4)$$

그러나 식 (4)는 균열이 전파되고 있는 경우에는 적합하지만 파쇄 유체의 주입이 중단된 후에도 남아 있는 응력그림자를 적절하게 표현하지 못한다. 압력과 관련된 식으로 지지된 균열의 넓이와 관련하여 변형된 암석 무게에 의해 발생하는 잔류응력(residual strain)이 오랜 시간 지속하여 발생한다. 그러므로 영구 변형과 관련된 잔류응력을 묘사하기 위해서 Barree 등은 식 (5)와 같이 Boussinesq식에 기반하여 식을 다음과 같이 정리하였다[17]. 식 (5)는 생성된 균열의 두께만큼의 변위가 인접 지층을 밀어내는 응력 가중치로 작용하며, 지층의 영률(Young's modulus, E)에 비례하는 관계로 구현하였고, GOHFER에서의 지층의 암석의 선형 탄성과 관련된 특성을 반영하기 위해 실험 관계식을 통해 나온 횡응력 지수(transverse stress exponent, t)를 사용하였다. 따라서 식 (5)를 통해 균열 면으로부터 거리인 Z만큼 떨어진 위치에서의 응력 변화 값을 산출할 수 있다.

$$\sigma_{SSE} = \frac{wE}{12Z^t} \quad (5)$$

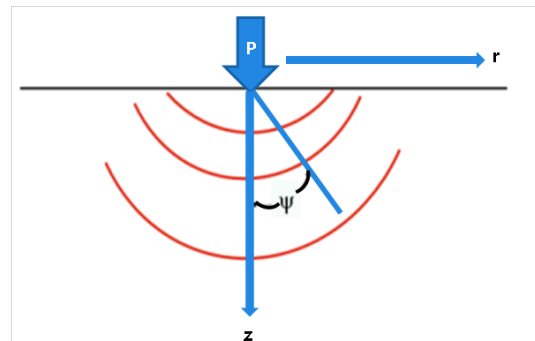


Fig. 2. Concept of Boussinesq's linear-elastic theory.

III. 수압파쇄 균열모델링 시스템

본 연구에서 사용한 상용시뮬레이터는 3차원 균열시뮬레이터인 GOHFER 모델이다. 이는 지층 모델 구축을 위해 물리검층자료를 필요로 하며 입력된 검층자료를 기반으로 지층의 공극률, 투과도, 영률, 포아송비 등의 물성과 초기 지층응력을 산출한다. 본 연구에서는 감마선 검층 자료를 사용하여 모델을 구축하였으며, 파쇄된 균열로 인한 응력그림자효과를 분석하기 위해 Fig. 3과 같이 저류층의 공극률, 투과도 등의 물성이 균질하도록 설정하였다. 저류층의 투과도는 0.017 md로 매우 저투과성의 지층이며 상하부층은 불투과성 지층으로 설정하였다. 공극률은 0.095이고 전 세계의 세일층의 물성 분포 범위를 고려하여 임의로 포아송비는 0.302, 영률은 5.533×10^6 psi로 설정하였다. 또한 수직주응력(vertical stress, σ_v)은 7000 psi이고 stress anisotropy는 359 psi로 분포하였다. 저류층의 두께는 1,000 ft이며 수평정의 시추 궤적은 수평부가 심도 7,000 ft에 위치하도록 설계하였다. 수평정의 길이는 6450 ft이고 균열 간격은 100 ft로 설정하였다.

수압파쇄 과정은 일반적으로 다음과 같다. 먼저 수평정에 파쇄구간 별로 파쇄유체를 주입하여 지층에 균열을 발생시킨다. 이어서 생성된 균열을 성

Table 1. Parameters for the study using the hydraulic fracturing model

투과도(md)	0.017	영률(psi)	5.533×10^6
공극률	0.095	σ_v (psi)	7000
포아송비	0.302	주응력 차 (psi)	359

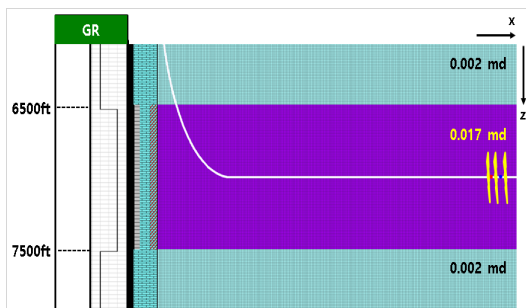


Fig. 3. Homogeneous hydraulic fracturing model in GOHFER.

장시키고 열린상태를 유지하기 위해 프로판트와 cross-linked gel을 혼합하여 프로판트의 농도를 점차 증가시키며 주입한다. 마지막으로, cross-linked gel을 제거하기 위한 플러시(flush) 유체를 주입시키는 과정까지 거치면 하나의 파쇄단계가 완성되고 이와 같은 파쇄단계를 목표 수평 구간 내에 반복한다. 본 연구에서 구축된 모델에서도 위와 같은 수압파쇄 과정으로 설계되었고, 파쇄유체로는 cross-linked gel의 한 종류인 SpecFracGel 0.25를 사용하였다. 또한 프로판트는 텍사스 주에 위치하고 있는 Badger광구에서 생산된 Badger sand 16/30 mesh를 사용하였으며, 프로판트의 농도를 0 PPG에서 3 PPG로 점차 증가시키며 주입하였다.

IV. 결과 및 분석

4.1. 응력그림자효과

세일저류층에서의 응력그림자효과에 의한 균열 형태 및 전파방향을 분석하기 위해 먼저 응력그림자효과를 고려하지 않았을 때(None stress shadow effect, NSSE)의 결과를 분석하였다. 전체적인 모델은 최대수직주응력, 최대수평주응력, 최소수평주응력이 Fig. 4와 같이 분포하고 있으며, 최대수평주응력 방향은 수평정과 수직인 y축 방향(T-방향)이며 최소수평주응력은 수평정과 평행한 x축 방향(L-방향)이다. 응력그림자효과를 고려하지 않은 경우에는 Table. 1과 같이 균열의 길이는 T-방향으로 360 ft, L-방향으로 30 ft로 T-방향으로 주로 균열이 형성되었다. 형성된 T-방향의 균열은 모든 단계에서 동일한 형태로 산출되었으며, 균열의 두께는 수평정의 중심부에서 0.2 in로 가장 두껍게 형성되었고 균열의 끝부분으로 갈수록 점점 얇아졌다. 프로판트로 지지된 균열의 체적 또한 모든 단계의 균열에서 T-방향으로 3,000 ft³, L-방향으로 6.45 ft³의 동일한 체적이 산출되었다(Fig. 5).

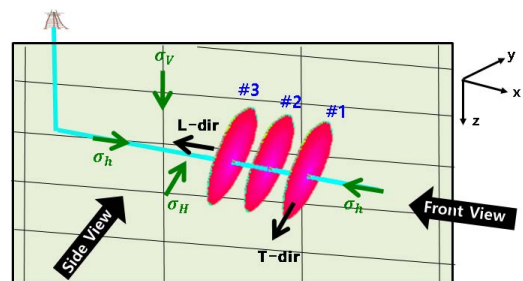


Fig. 4. Geometry of generated hydraulic fractures in 3 stages without SSE.

Table 2. Fracture half length and width of NSSE

		균열 길이(ft)	균열 두께 (in)
stage 1,2,3	T-방향	360	0.02-0.20
	L-방향	30	0.01-0.12

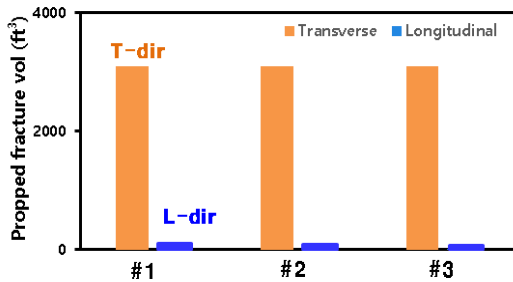


Fig. 5. Propped fracture volume of transverse and longitudinal hydraulic fractures for each stage without SSE.

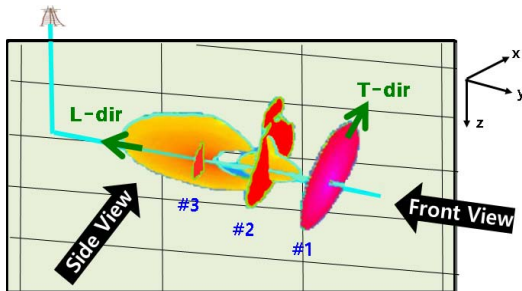


Fig. 6. Geometry of generated hydraulic fractures in 3 stages with SSE.

실제 현장에서의 다단계 수압파쇄 수평정과는 다르게 응력그림자효과만을 보기 위해 임의로 만든 균질한 저류층에서의 수압파쇄 모델링에서 응력그림자효과를 고려했을 때(Stress shadow effect, SSE)의 균열형태 및 생산성을 분석하였다. Fig. 6은 균열의 중첩으로 인해 붉은색 면을 T-방향, 노란색 면을 L-방향 균열로 표현하였다. 응력그림자효과를 고려하지 않은 경우(NSSE)와 달리 stage 1에서 발생한 T-방향 균열로 인해 주변 지층의 응력이 변화하고 그 영향이 stage 2와 3에 미치게 되어 생산성이 떨어지는 L-방향으로의 균열도 발생하였다. 응력그림자효과를 반영한 모델링 결과를 x방향(front

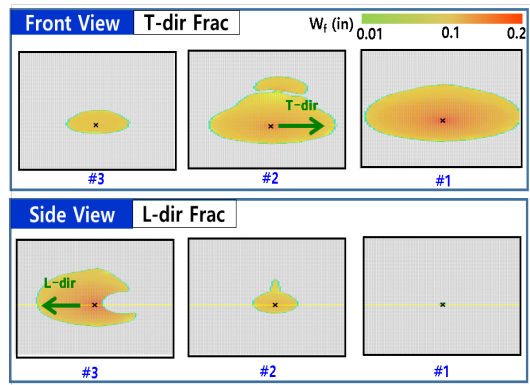


Fig. 7. Geometry of transverse and longitudinal fracture (SSE).

view)과 y방향(side view)으로 균열을 바라보면 Fig. 7과 같다. Stage 3으로 갈수록 T-방향을의 균열의 크기는 감소하고 L-방향을의 균열은 증가하였으며 stage 3에서는 L-방향을의 균열이 주로 발생하는 것으로 나타났다. 이는 전 단계에서 생성된 균열로 인한 응력그림자효과 때문이다.

4.2. 수압파쇄 시 주변 지층의 응력변화

초기 지층의 최소수평주응력은 4,340 psi이며 균열의 전파방향은 최대수평주응력과 최소수평주응력의 차이를 통해 결정된다. Fig. 8은 각 stage별 균열 발생으로 인한 각각의 균열 표면으로부터 70 ft 떨어진 지점에서의 추가적인 지층에서의 응력 값을 나타낸 그림이다. Stage 1에서 최대수평주응력 방향인 T-방향으로의 균열이 발생함에 따라 최소수평주응력 방향으로의 응력이 균열의 표면으로부터 70 ft 떨어진 지점에서 약 565 psi가 추가적으로 발생한다. 이로 인해 균열의 방향성을 결정하게 되는 지층의 최대수평주응력과 최소수평주응력의 차가 감소하여 균열은 T-방향뿐만 아니라 L-방향으로도 생성되었다. stage 1의 균열생성으로 인해 stage 2 위치에서 6.9% 만큼 가중된 최소수평주응력으로 인해 최대/최소수평주응력의 대비(σ_H/σ_h)가 1.08에서 1.01로 작아짐을 확인하였다. 또한 본 시스템의 경우, stage 3에서는 stage 1과 stage 2의 균열 생성에 의한 응력그림자효과와 누적으로 최대/최소수평주응력 관계가 0.98로 역전되어 T-방향보다는 효율성이 크게 떨어지는 L-방향균열이 지배적으로 발생된 것으로 나타났다. 그로인해 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 전 단계에서 발생한 균열로 인한 응력 변화로 stage 3으로 갈수록 T-방향을의 균열은 감소

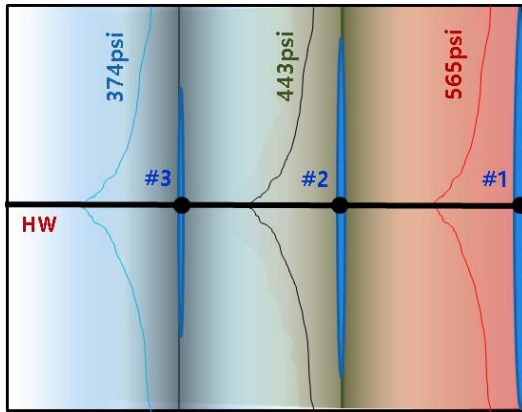


Fig. 8. Stress change around the wellbore due to the occurrence of stage 1, 2, 3 fracture.

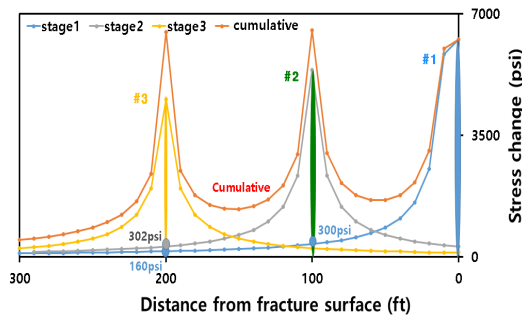


Fig. 9. Stress change with distance from fracture surface.

하고 L-방향의 균열은 증가함을 확인하였다. 균열발생으로 인한 응력변화를 종합적으로 살펴보면 Fig. 9와 같다. Stage 1로 인해 발생한 응력의 변화는 stage 2가 발생하는 지점에서는 약 300 psi 정도의 추가적인 응력을 증가시켰다. 또한 응력그림자효과의 영향은 stage 1의 균열로부터 약 200 ft 떨어진 stage 3까지 영향을 미쳤으며 stage 3이 발생하는 지점에서는 stage 1과 stage 2의 균열발생으로 인한 응력그림자효과의 누적으로 약 460 psi의 영향을 받았다. 이로 인해 stage 3으로 갈수록 L-방향으로 균열이 전과되었다. 이렇게 형성된 세일저류층에서의 응력그림자효과를 고려한 균열 중 프로판트로 지지된 균열의 체적을 보면 Fig. 10과 같다. Stage 1에서는 T-방향 균열의 체적이 주로 발생하였으며 stage 3으로 갈수록 L-방향으로의 균열부피가 커짐을 확인하였다. 또한 이를 수치적으로 비

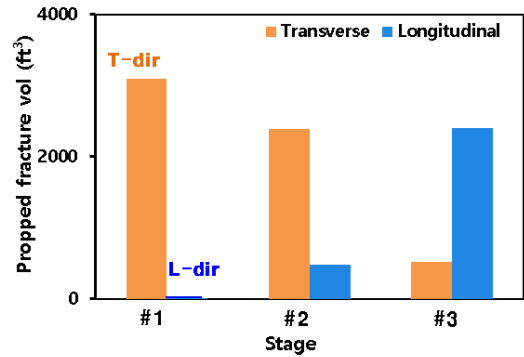


Fig. 10. Propped fracture volume of transverse and longitudinal hydraulic fractures for each stage with SSE.

교해보면 응력그림자효과를 고려하지 않은 경우에는 균열의 길이가 stage 1부터 stage 3까지 L-방향으로는 거의 발생하지 않았다. 하지만 응력그림자효과를 고려한 경우에는 L-방향으로의 길이가 점차 증가하여 stage 3에서는 320 ft까지 증가함을 확인하였다.

4.3. 오일생산성 분석

응력그림자효과를 고려했을 시와 하지 않았을 때를 비교하며 응력그림자효과로 인한 균열의 형태에 따른 저류층의 생산성을 예측하기 위해 Wattenberger type curve를 이용하여 RTA(Rate Transient Analysis)를 적용하였다. 이는 수평정에서 다단계 수압파쇄의 거동을 예측하는데 일반적으로 사용되는 모델은 선형 흐름(linear flow) 모델이다. 유량이 선형이고 균열의 전도성이 높으며, 유효 균열의 끝(tip)부분의 바깥에서는 생산이 이루어지지 않는다는 가정을 한다[18].

GOHFER에서 RTA의 입력 값으로는 생산량에 상대적으로 기여를 하지 않는 L-방향의 균열은 포함시키지 않았으며 T-방향의 균열의 값을 사용하였다[5]. Wattenberger type curve에 들어가는 인자인 균열의 길이와 높이는 프로판트로 지지된 값을 사용하였으며 넓이와 프로판트의 농도는 평균값을 사용하였다. 또한 365일 동안 생산을 하였으며 정두압(wellhead pressure, WHP)는 300 psi로 설정하여 생산성 분석을 수행하였다.

NSSE와 SSE의 누적오일생산량과 오일 생산속도는 Fig. 11과 같다. NSSE와 SSE의 누적오일생산량 차이는 365일이 지난 시점에서 응력그림자효과에 의한 효과가 56% 정도임을 알 수 있다. 이는 응

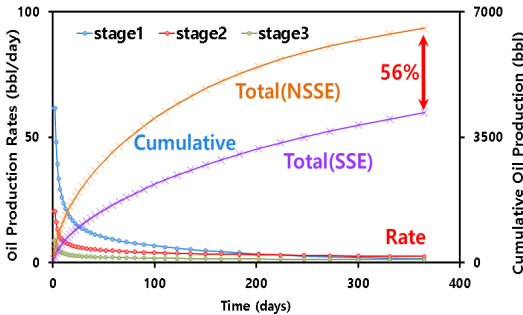


Fig. 11. Comparison of cumulative oil production between NSSE and SSE.

력그림자효과를 고려한 모델링 결과 생산성 효율을 저감시키는 L-방향으로의 균열이 T-방향 균열보다 훨씬 크게 발생하여 생산량이 저하되었기 때문이다.

4.4. 셰일지층의 취성지수에 따른 분석

균열 간의 간격뿐만 아니라 지층의 지력학적 물성에 따라 균열의 길이, 두께 등이 달리 형성되므로 이에 대한 영향성을 분석하였다. 지력학적 물성 중 대표적인 영률과 포아송비의 비인 취성지수는 암석의 단단함과 깨짐의 정도를 나타내는 인자로서 취성지수 값에 따라 균열의 형태가 달라지고 균열의 생산성이 달라진다.

본 연구에서는 셰일저류층인 Marcellus 셰일과 Eagle Ford 셰일의 영률과 포아송비의 평균값을 사용하여 균열모델링을 수행하였다. Marcellus 셰일의 경우 포아송비는 0.17, 영률은 3.05×10^6 psi 이며 Eagle Ford 셰일은 포아송비 0.3, 영률 7.00×10^6 psi로 Marcellus 셰일보다 영률과 포아송비 모두 값이 크다 (Table 1). Fig. 12의 취성지수를 이용하여 균열모델링의 결과를 분석하면 Marcellus 셰일의 경우에는 Eagle Ford 셰일에 비해 취성(brittle)의 특성을 가지므로 더욱 잘 깨지고 Eagle Ford 셰일은 연성(ductile)의 특성을 가지는 암석에 속하는 것을 볼 수 있다.

깨짐성(brittleness)에 대한 특성이 다른 Marcellus 셰일과 Eagle Ford 셰일지층에 100 ft 간격으로 수압파쇄를 수행한 결과 포아송비가 낮아 더욱 잘 깨지는 성질을 갖는 Marcellus 셰일(Fig. 13)은 Eagle Ford 셰일(Fig. 14)과는 달리 stage 1의 균열부터 일정하지 않은 형태의 균열이 형성되는 것을 확인하였다. 응력그림자의 효과를 받지 않은

Table 3. Poisson's ratio and Young's modulus of shale formations[19]

Shale formation		Poisson's ratio	Young's modulus (10 ⁶ psi)
Marcellus	Range	0.11~0.28	2.32~4.06
	Mean	0.17	3.05
Eagle Ford	Range	0.20~0.37	4.93~8.99
	Mean	0.30	7.00

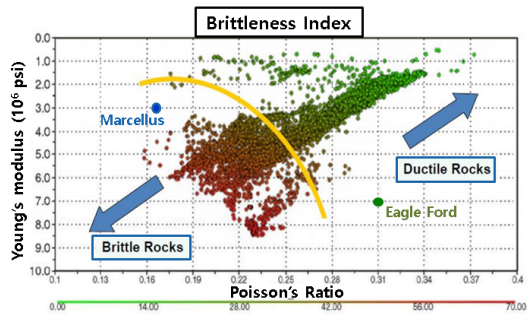


Fig. 12. Brittleness index of Marcellus shale and Eagle Ford shale[20].

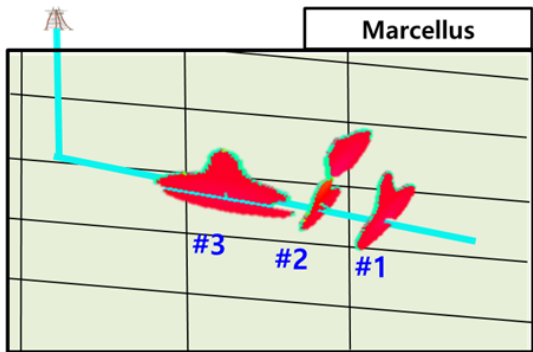


Fig. 13. Geometry of generated hydraulic fractures in 3 stages for Marcellus shale.

stage 1에서의 균열의 두께 또한 Marcellus 셰일은 평균 0.21 in, Eagle Ford 셰일은 0.13 in로 보다 훨씬 두껍게 형성되었다.

생성된 균열이 프로판트로 지지된 부피(propped fracture volume)를 비교해보면, Fig. 15와 Fig. 16과 같다. Marcellus 셰일의 경우에는 앞서 발생한 T-방

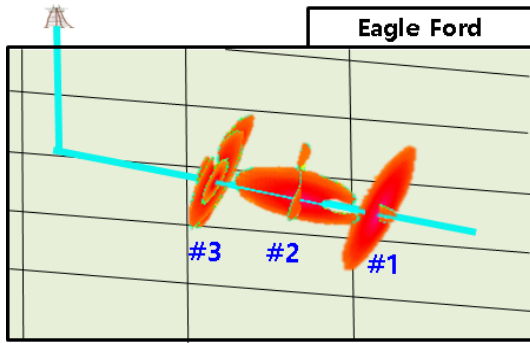


Fig. 14. Geometry of generated hydraulic fractures in 3 stages for Eagle Ford shale.

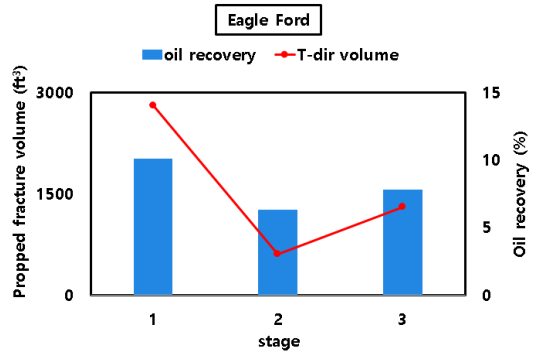


Fig. 16. Propped fracture volume and oil recovery of transverse hydraulic fractures for each stage in Eagle Ford shale.

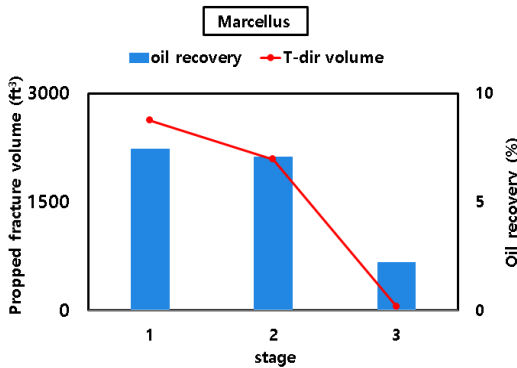


Fig. 15. Propped fracture volume and oil recovery of transverse hydraulic fractures for each stage in Marcellus shale.

향 균열들로 인한 응력그림자효과의 누적으로 인해 stage 3에서는 L-방향으로 주로 균열이 발생하였다. 하지만 Eagle Ford 셰일의 경우에는 Marcellus 셰일에 비해 지층의 영률이 크기 때문에 파쇄간격이 100 ft로 같지만 Marcellus 셰일의 경우보다 응력그림자효과의 영향을 많이 받아 stage 2에서 L-방향으로 균열이 주로 전파되었다.

각 균열별 시간에 따른 오일누적생산량을 보면 전체적으로 T-방향에 비해 L-방향으로의 균열이 작게 발생한 Eagle Ford 셰일이 Marcellus 셰일에 비해 생산성이 양호한 것으로 나타났다. 단계에 따른 균열의 생산성을 비교하면 응력그림자효과의 영향을 받지 않는 stage 1이 가장 생산성이 높은 것으로 나타났다. 반면에 L-방향으로 균열이 크게 형성된 Marcellus 셰일의 stage 3과 Eagle Ford 셰일의 stage 2에서는 거의 생산에 기여하지 못함을 확인

할 수 있었다. 파쇄단계 간 간격뿐만 아니라 지층의 지력학적 물성도 복합적으로 작용하여 응력그림자효과에 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 셰일지층에서 다단계 수압파쇄 시 응력그림자효과가 파쇄균열의 형태 및 균열의 성장과 생산성에 미치는 영향성을 분석하였고 수압파쇄 모델링을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

셰일저류층에서 다단계 수압파쇄 진행 시, stage 1의 균열생성으로 인해 stage 2 위치에서 가장된 최소수평주응력으로 인해 최대/최소수평주응력의 대비(σ_{Hh}/σ_h)가 감소하는 것을 확인하였다.

이로 인해 다음 균열은 T-방향뿐만 아니라 L-방향으로도 생성되었으며 stage 3에서는 stage 1과 stage 2의 응력그림자효과 누적으로 최대/최소수평주응력 관계가 역전되어 L-방향 균열이 주로 발생하였다. L-방향 균열은 수평정을 따라 전파되어 T-방향 균열에 비해 저류층 파쇄 효과가 떨어져 생산 효율성이 크게 낮았다. 이에 따라 SSE와 NSSE의 경우 누적오일생산량에서 응력그림자효과에 의한 생산성 예측 오차가 발생함을 확인할 수 있었다.

또한 응력그림자효과가 지력학적 특성이 다른 Marcellus 셰일과 Eagle Ford 셰일 지층에서의 균열 생성에 미치는 영향을 분석한 결과 영률이 큰 Eagle Ford의 경우 응력그림자효과가 큰 것을 확인하였으며 이에 따라 균열의 체적 및 형태 또한 크게 달라짐을 확인하였다. 본 연구는 영률과 포아송비에 따른 응력그림자효과를 보기 위한 연구로 균

질하지 않은 실제 현장 생산 자료를 완벽히 반영한 것은 아니므로 추후에 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 연구과제(비전통 유가스정 생산성 향상 스마트 관리기술 개발 및 현장실증, 20192510102510)로부터 지원받아 수행되었습니다.

사용기호

- P_o = pore pressure
- P_w = wellbore pressure
- P_{ob} = overburden pressure
- r = distance from wellbore
- r_w = wellbore radius
- θ = angle from direction of minimum stress
- E = young's modulus
- Z = distance from the fracture surface
- w = fracture width
- σ_r = radial stress
- σ_t = tangential stress
- σ_h = minimum horizontal stress
- σ_H = maximum horizontal stress

REFERENCES

- [1] Cipolla, C., E. Lolon, and M. Mayerhofer. "The Effect of Proppant Distribution and Un-propped Fracture Conductivity on Well Performance in Unconventional Gas Reservoirs.", *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, (2009).
- [2] Chen, R., Xue, X., Datta-Gupta, A., Yu, H., and Kalyanaraman, N. "The Impact of Cluster Spacing on Multi-Fractured Well Performance.", *SPE Liquids-Rich Basins Conference-North America*, (2019).
- [3] El Sgher, M., Aminian, K., and Ameri, S., "The Stress Shadowing Impact on the Production Performance of Marcellus Shale.", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (2019).
- [4] Wu, K., and Olson, J. E., "Investigation of the impact of fracture spacing and fluid properties for interfering simultaneously or sequentially generated hydraulic fractures.", *SPE Production & Operations*, 28(04), 427-436, (2013).
- [5] Yang, F., Britt, L. K., and Dunn-Norman, S., "Performance Comparison of Transversely and Longitudinally Fractured Horizontal Wells Over Varied Reservoir Permeability.", *SPE Journal*, 21(05), 1-537, (2016).
- [6] Dohmen, T., Zhang, J., and Blangy, J. P., "Measurement and analysis of 3D stress shadowing related to the spacing of hydraulic fracturing in unconventional reservoirs.", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (2014).
- [7] Tan, Y., Cuervo, S., Malhotra, S., and Wang, S. "Stress Inversion using Microseismic Moment Tensors in the Vaca Muerta Shale.", *Unconventional Resources Technology Conference*, (2019).
- [8] Pankaj, P., Shukla, P., Kavousi, P., and Carr, T., "Determining optimal well spacing in the Marcellus shale: A case study using an integrated workflow.", *SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium*, (2018).
- [9] Economides, M. J., and Nolte, K. G. *Reservoir stimulation* Vol. 2. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, (1989).
- [10] Suarez-Rivera, R., Burghardt, J., Edelman, E., Stanchits, S., and Surdi, A., "Geomechanics considerations for hydraulic fracture productivity.", *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, (2013).
- [11] Liu, N., Zhang, Z., Zou, Y., Ma, X., and Zhang, Y., "Propagation law of hydraulic fractures during multi-staged horizontal well fracturing in a tight reservoir.", *Petroleum Exploration and Development*, 45(6), 1129-1138, (2018).
- [12] He, Q., Suorineni, F. T., Ma, T., and Oh, J., "Effect of discontinuity stress shadows on hydraulic fracture re-orientation.", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 91, 179-194, (2017).
- [13] Daneshy, A., "Analysis of Front and Tail Stress Shadowing in Horizontal Well Fracturing: Their Consequences with Case History.", *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*, (2017).
- [14] Daneshy, A., "Analysis of Horizontal Well Fracture Interactions, and Completion Steps for Reducing the Resulting Production Interferen-

- ce.”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (2018).
- [15] Wei, Y., and Economides, M. J., “Transverse hydraulic fractures from a horizontal well.”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (2005).
- [16] Barree, R. D., Gilbert, J. V., and Conway, M., “Stress and rock property profiling for unconventional reservoir stimulation.”, *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. (2009).
- [17] Barree, R. D., “stress Shadowing and Fracture Interference in GOHFER.”, *Barree & Associates*, (2015).
- [18] Liang, P., Mattar, L., & Moghadam, S. Analyzing variable rate/pressure data in transient linear flow in unconventional gas reservoirs. *In Canadian Unconventional Resources Conference*, (2011).
- [19] Jang, Y., Kim, J., Wang, J., and Sung, W., “Analysis of Hydraulic Fracture Propagating Performance with Geomechanical Characteristics in Naturally Fractured Shale Formations.”, *SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference*, (2016).
- [20] Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., and Kundert, D., “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*, (2008).
- [21] Rafiee, M., Soliman, M. Y., Pirayesh, E., and Emami Meybodi, H., “Geomechanical considerations in hydraulic fracturing designs.”, *SPE Canadian Unconventional Resources Conference*, (2012).
- [22] Roussel, N. P., & Sharma, M. M., “Strategies to minimize frac spacing and stimulate natural fractures in horizontal completions.”, *SPE annual technical conference and exhibition*, (2011).