

고압수 접촉상태가 수압파쇄에 미치는 영향

이상훈, 임종세, 장원일*

The Effects of High Pressure Water Contact State
on Hydraulic Fracturing

Sang Hun Lee, Jong Se Lim, Won Yil Jang*

Abstract The shale gas is emerging as one of the oil and gas resources which can replace the traditional oil and gas resources. As the shale layer where the shale gas is deposited has low permeability, the hydrofracturing method is required to improve the productivity. This study is designed to conduct the laboratory hydrofracturing test on the samples which are modeled after the drilling hole having the general drilling hole and spiral groove. And compare the initial fracturing pressure and fluid contact between them in order to the result of the hydrofracturing depending on the shape of the drilling hole. In addition, the results were compared with the numerical modeling values from 3DEC and they were also compared with the data from the advance researches. It was found from the study that rather than the contact area of the high pressures water, the force concentration depending on the form of guide hole was more effective in the hydrofracturing.

Key words Hydraulic fracturing, Guide hole, High pressure water contact state, 3DEC

초 록 본 전통석유자원을 대체할 수 있는 석유자원으로 부상하고 있는 셰일가스가 부존된 셰일층은 낮은 투과성을 가지고 있어 생산성을 향상시키기 위해 수압파쇄법이 적용된다. 본 연구는 일반 시추공과 나선형 홈을 가지는 시추공을 모사한 축소 모형 시험체에 대해 실내수압파쇄 시험을 실행하고 초기파쇄압과 유체접촉상태를 비교 분석하여 공벽형상에 따른 수압파쇄결과를 알아보았다. 또 그 결과를 3차원 개별요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석 모델링 값과 비교하였으며, 선행연구 자료와 비교하여 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다. 실험결과 고압수의 접촉면적보다는 유도홈의 형태에 의한 응력집중의 효과가 수압파쇄에 더욱 효율적이었다. 따라서 고압수의 응력집중을 높일 수 있는 인공적인 유도홈을 만들 시 적은 수압으로 큰 파쇄효과를 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

핵심어 수압파쇄, 유도홈, 고압수 접촉상태, 3DEC

1. 서 론

비전통 자원은 기존의 석유자원보다는 탐사위험은 낮지만 생산비용이 높았으나 생산기술의 발전으로 인해 전통석유자원을 대체할 수 있는 석유자원으로 부상하

고 있다. 비전통 가스 자원의 매장량은 약 3경 3000조 입방피트이며 그중 약 50%가 셰일가스다. 셰일가스는 탄화수소가 풍부한 셰일층에서 개발, 생산되는 천연가스로 저류층의 공극률이 매우 낮고 투과도가 불량하여 일반적인 시추기술로는 경제적인 생산이 어렵다. 따라서 낮은 투과성을 가진 저류층의 생산성을 향상시키기 위해 유정자극법(stimulation)이 실시된다. 유정자극법은 크게 수압파쇄법(hydraulic fracturing)과 산처리 기법(acidizing)으로 나눌 수 있다. 산처리 기법은 탄산염으로 이루어진 저류층에서 화학작용을 통해 탄산염을 용해시켜 저류층의 투과성을 향상시키는 방법이고 수압파쇄법은 유정에 높은 압력으로 유체를 주입하여 인

Received: Sep. 1, 2016

Revised: Oct. 13, 2016

Accepted: Oct. 19, 2016

***Corresponding Author:** Won Yil Jang

(Tel) +82514104438, (Fax) +82514034680

(E-Mail) jwy@kmou.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering Korea Maritime
Ocean University, Busan, Korea

위적으로 균열을 발생시켜 유체유입 경로를 확보하고 시추과정에서 이수에 의한 유정 인근의 저류층 손상을 복구함으로써 저류층의 생산지수를 극대화시키는 방법이다. 수압파쇄법은 기존 유정의 생산성 향상 방안 모색이나 최근 대형 전통유전의 발굴 감소 등으로 인한 비전통자원개발 활성화 등으로 인해 2000년대 들어서 현장에 활발히 적용되고 있다(Kim et al., 2014).

수압파쇄 매커니즘의 균열발생에 대한 연구는 Hubbert와 Willis(1957)의 선형탄성모델을 시작으로 Haimson과 Fairhurst(1967)의 공극 탄성모델, Ito와 Hayash(1991)의 점응력 모델, 또 Rummel(1987)의 선형 탄성 파괴역학 모델이 발표되었다.

그 외 국내의 연구를 살펴보면 Zoback 외(1977)는 균열개시압(crack initiation pressure), 초기파쇄압(breakdown pressure)에 유체 점도의 영향을 고찰하였으며, Lockner와 Byerlee(1977)는 미소파괴음 측정을 이용하여 균열개시압을 추정하였다. 또 Ishida (2001)는 미소파괴음 측정을 통해 균열의 성장 방향을 예측하였다. 이후 많은 연구에서 미소파괴음 측정을 통한 수압파쇄 균열의 위치 추적 및 균열 특성 분석이 이루어지고 있다.

Rhee 외(1995)는 주입률과 온도가 암석의 수압파쇄 특성에 미치는 영향을 연구하였고, Choi와 Lee (1995)는 인공슬롯을 고려한 수압파쇄 균열의 발전양상을 연구하였으며, Choi (2011)는 수압파쇄 시험결과 해석에 대한 파괴역학모델의 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 나선형 Roundbar를 이용하여 유도층을 생성한 시추공과 유도층이 없는 일반 시추공에 케이싱, 시멘팅 처리를 하여 현장과 유사한 수압파쇄 축소 모델 시편을 만들고 각 모델의 초기파쇄압과 유체접촉 면적을 비교 검토하였다. 또 그 결과를 3차원 개별요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석 모델링 값과 비교하였으며, 선행연구 자료와 비교하여 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

2. 수압파쇄 이론

균열을 생성시키는 방법은 대상지층의 내부마찰각을 낮게 하거나 대상지층에 작용하는 유효수직응력을 낮추면 된다. 그러나 전자는 현실적으로 힘들기 때문에 공극압력을 높여 유효수직응력을 낮춤으로써 균열을 생성시킬 수 있다(Cheon & Lee, 2013).

수압파쇄 공법 시 일반적으로 시추공 축을 포함하는 균열(종균열)과 시추공과 교차하는 균열(횡균열) 중 하나의 균열이 발생하게 된다. 종균열과 횡균열 중 어느 것이 발생할 것인가는 균열의 발생이 시추공의 존재에

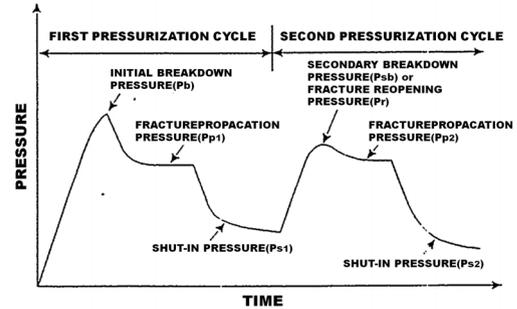


Fig. 1. Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure (Lee, 1995)

의존하는가, 천연의 균열에 의존하는가에 의해 좌우된다. 암반의 주응력 차가 작을수록 시추공의 존재에 크게 의존하며 종균열이 발생하기 쉽고 주응력 차가 클 때에는 천연의 균열에 보다 크게 의존하므로 횡균열이 발생하기 쉽다.

가압구간의 근방을 벗어나면 균열은 최소수평주응력과 수직하게 방향을 변해 가며 발전한다.

Fig. 1은 수압파쇄과정에서 볼 수 있는 전형적인 균열 압력곡선이다.

초기파쇄압(initial breakdown pressure) P_b 는 균열이 발생하는 순간의 압력을 의미하며, 가압을 중지하면 특정 압력에 머무르게 되는데 이를 균열폐쇄압(shut-in pressure) P_s 라 한다. 이 압력은 균열을 유지시키는 데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 최소 수평주응력(σ_{hmin})을 나타낸다. 이후 다시 가압을 시작하면 초기파쇄압보다 낮은 압력에서 멈추게 되는데, 이를 2차파쇄압(secondary breakdown pressure) P_{sb} 또는 균열개구압(fracture reopening pressure) P_r 이라 한다.

여기서 현지암반강도 T 는 식(1)과 같이 초기파쇄압에서 2차파쇄압을 빼면 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_{sb} \quad (1)$$

T 는 균열이 발생한 개소의 인장강도이며, 시추공 벽면의 강도는 균일하지 않으므로 T 의 값을 시험편으로 구해진 인장강도로 생각하기엔 문제가 있다.

균질 등방성이고 불투수성의 탄성체로 가정한 암반 내에 형성된 연직의 시추공에 대해 상부암반 지층에 의한 연직응력을 시추공의 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이때의 이차원적 수압파쇄조건식은 다음과 같이 주어진다(Hubbert and Willis, 1957).

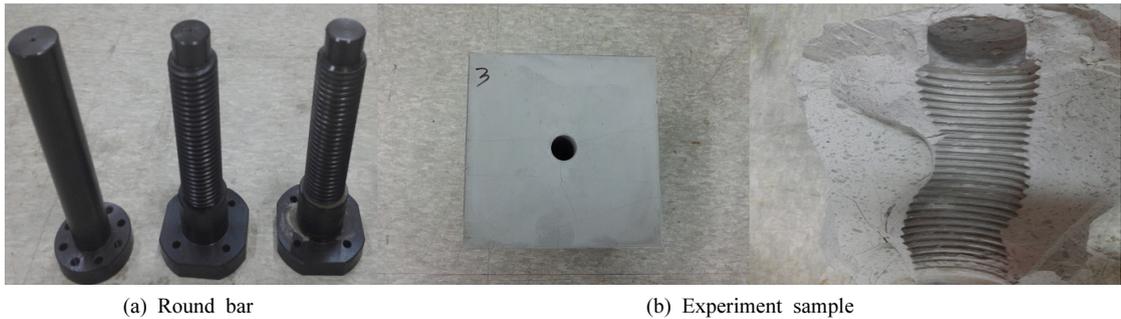


Fig. 2. A Roundbar and Experiment sample

$$\sigma_p = -\sigma_{hmax} + 3\sigma_{hmin} - P_b = -T \quad (2)$$

$$\sigma_v = \gamma h \quad (3)$$

σ_p = 시추공 벽면에 작용하는 최소접선응력(압축을 +로 함)

σ_v = 연직방향의 주응력

γ = 암반의 단위중량

h = 지표로부터의 심도.

σ_{hmax} = 최대 수평주응력

σ_{hmin} = 최소 수평주응력이다.

3. 실험방법

3-1 수압파쇄시험 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 같은 실험실에서 실시한 이전 실험결과(Mun et al., 2014)와 비교하기 위해 동일하게 제작한 인공모의암체로 1종 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)와 물의 중량혼합비를 1:0.4로 하여 3일 동안 양생한 제작한 시멘트 모르타르를 사용하였다.

시험편은 200 mm × 200 mm × 200 mm의 정육면체 모양의 몰드에 직경 46mm의 Roundbar를 조립한 채 시멘트를 굳힌 후 빼내어 수압파쇄공을 모사하였다.

Roundbar는 각각 5 mm길이의 산,골 차이를 가지고 있으며 나선형은 삼각형, 사다리꼴 나선형으로 제작하였다. 또 같은 수압접촉면적을 갖는 41 mm의 원형 Roundbar를 사용한 시험편을 제작하여 비교하였다. 그 후 외경 36 mm, 내경 26 mm의 케이싱을 이용하여 시험편의 수압파쇄공을 연결하였다.

나선형 Round bar를 사용한 경우와 같은 수압접촉면적을 갖는 일반적인 Round Bar를 사용한 경우를 비교하기 위해 일반적인 Round bar를 사용하여 만든 시험

편을 Model #1, 삼각형 유도홈을 갖는 나선형 Round bar를 Model# 2, 사다리꼴 유도홈은 Model #3 로 설정하여 각각 2개씩 시료를 만들어 초기 파쇄압을 비교하였다. 시험편에 사용된 Round bar와 시험편, 망치로 파괴한 시험편 내부는 Fig. 2와 같다.

모의암체를 제작한 후, 시멘팅 상태를 묘사하기 위해 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하여 물과 중량혼합비를 (1:0.4)로 하여 주입하고 1일 동안 양생하였다.

3-2 실험조건

본래 현장의 지반 상황을 묘사하기 위해서는 3축응력 상태로 수압파쇄실험을 실시하여야 하지만 시험편 내로 수압을 주기 위한 패커가 시험편 상부에 노출되어 있어 상부에는 압력을 주기 어렵고, 수압파쇄공과 수평한 방향으로의 재하는 수압파쇄 조건식과는 무관한 점을 고려하여 본 연구에서는 수평방향으로의 압력만 주는 이축재하실험을 실시하였다.

4개의 원형 플랫폼을 사용하여 수평압력을 가하였고 20 mm 두께의 사각 스틸판을 이용하여 시험편에 고르게 압력을 가하였다. 또 패커는 물이 새지 않도록 고무링을 끼운 스틸패커를 사용하였다. 플랫폼을 사용한 측압은 25.50 kgf/cm²로 유지하였으며 유량을 100 ml/min으로 일정하게 유지하였다. 사용한 수압파쇄 장비는 Fig. 3과 같다.

Model #1의 경우 직경 41 mm의 시추공을 갖는 원기둥형의 경우고, Model# 2,3의 경우 직경 36 mm의 원기둥형에 5 mm의 나선형 유도홈을 갖는 경우이며, 나선형 유도홈의 경우 Model #2가 높이 5 mm의 정삼각형모양이고, Model #3의 경우 윗변이 5 mm, 밑변이 10 mm의 사다리꼴 모양으로 설정하였다.

나선형 유도홈 모델의 유체접촉면적은 시료의 시추공 내 가압구간을 4 cm로 고려하여, 나선형 유도홈의 반복

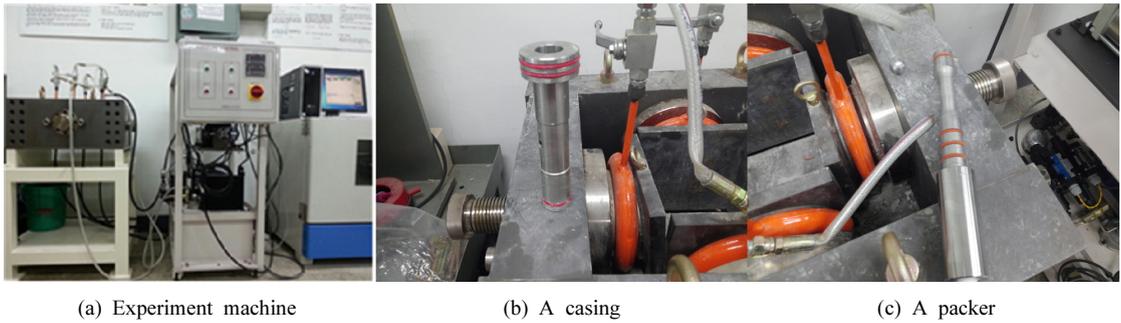


Fig. 3. A view of the hydraulic fracturing machine

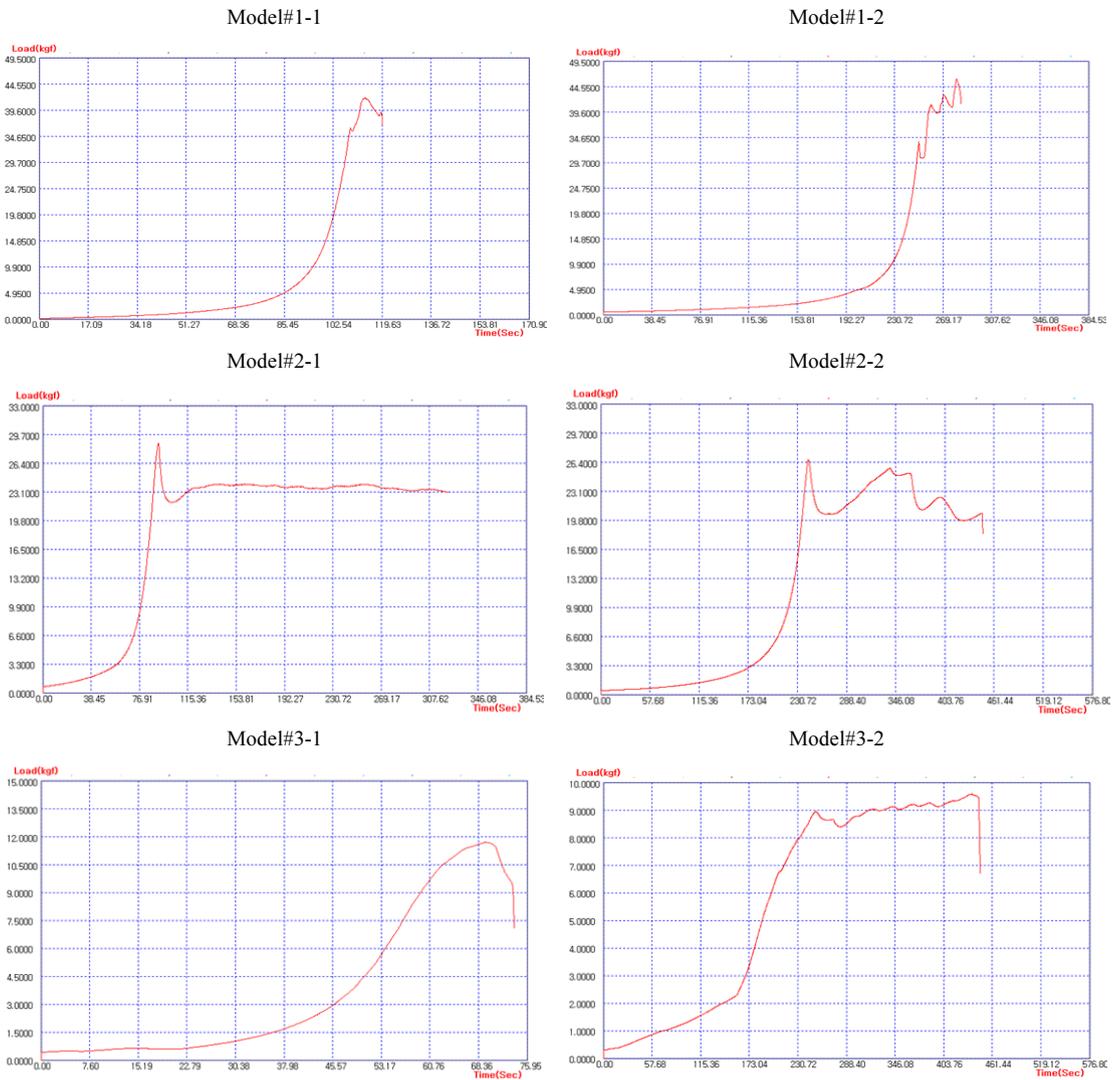


Fig. 4. The result of time verse pressure curve for model #1,2,3

Table 1. The result of Hydraulic fracturing for model #1,2,3

	최대압력(kgf/cm ²)		주입량(ml)	유체 접촉면적(cm ²)
Model #1	41.94	45.04	192.1	51.52
	48.14		472.4	
Model #2	28.71	27.73	155	103.02
	28.75		411	
Model #3	11.71	10.64	702.4	72.83
	9.59		738.2	

Table 2. The result of Hydraulic fracturing for model #4,5,6 (Mun et al., 2014)

	최대압력(kgf/cm ²)		주입량(ml)	유체 접촉면적(cm ²)
Model #4	40.29	40.27	144.32	32.67
	40.24		151.00	
Model #5	7.88	8.13	341.81	49.01
	8.37		362.82	
Model #6	6.94	7.04	727.34	65.35
	7.14		309.02	

주기의 유체접촉면적을 나누어서 예측한 값을 사용하였다.

3-3 수압파쇄실험 결과

나선형 시추공의 초기파쇄압 감소효과를 파악하기 위해 먼저 기존의 시추공 형태인 Model #1의 초기파쇄압을 측정후 삼각형 나선의 모양을 갖는 Model #2, 사다리꼴 모양의 모양을 갖는 Model #3의 초기파쇄압을 측정하였다.

Fig. 4는 초기파쇄압의 양상을, Table 1은 각 모델의 수압파쇄실험, 유체접촉면적 계산 결과이며, 모델 별 평균 초기파쇄압은 Model #1가 45.04 kgf/cm², Model #2가 27.73 kgf/cm², Model #3가 10.64 kgf/cm²으로 나왔으며, 삼각형과 사다리꼴 나선형 유도홈을 사용한 시추공이 일반추공보다 낮은 압력으로 수압파쇄가 이루어짐을 확인할 수 있었다. Model #1의 경우 최대압력에 이르기 전까지 몇 번의 작은 파쇄가 일어남을 확인할 수 있었는데, 이는 암반을 나타내는 시험편이 파괴에 이르기 전에 시멘팅이 먼저 파괴되어 나타나는 현상으로 사료된다.

또한 같은 모델의 주입량이 약 300 ml가 차이가 나는 경우는 시멘팅처리를 한 부분이 굳어가면서 미세한 균열이 발생하여 가압 동안 약간의 고압수가 유출되는 경우가 발생하였기 때문에 사료된다.

Table 2는 선행연구(Mun et al., 2014)의 수압파쇄실험

결과, 유체접촉면적 계산 결과이며 모델별 평균 초기파쇄압은 직경 26 mm 원기둥형의 Model #4는 40.27 kgf/cm², 유도홈을 2개 가진 Model #5는 8.13 kgf/cm², 유도홈을 3개 가진 Model #6은 7.04kgf/cm²의 초기 파쇄압을 나타내었다.

같은 원기둥형 시추공 형태를 가진 Model #1과 선행 연구에서의 Model #4의 초기파쇄압은 각각 45.04, 40.27 kgf/cm²로 직경, 유체 접촉면적이 더 큰 Model #1이 약간 더 큰 파쇄압을 나타내었으나 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

삼각형 나선 시추공 Model #2는 사다리꼴 나선 Model #3에 비해 비해 41% 더 큰 유체접촉면적을 가지고 있으며 초기파쇄압은 각각 27.73 kgf/cm², 10.64 kgf/cm²으로 Model #2가 더 큰 초기 파쇄압을 나타낸다. Model #1, Model #4의 결과와 비교해 봤을 때 유도홈이 있을 경우 초기파쇄압은 감소하는 것을 알 수 있고 그 이유는 응력집중에 의한 것으로 판단된다.

비슷한 형태의 유도홈 3개의 Model #6은 유도홈 2개의 Model #5에 비해 33% 큰 유체접촉면적을 가지고 있지만 초기 파쇄압은 7.04 kgf/cm², 8.13 kgf/cm²으로 Model #6이 더 작은 초기파쇄압을 나타냈다. 이 역시 접촉면적보다는 응력집중이 파쇄압에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 시추공의 유체접촉면적의 비와 초기파쇄압의 비를 나타낸 것이다. 가로축은 비교한 두 모델의 유

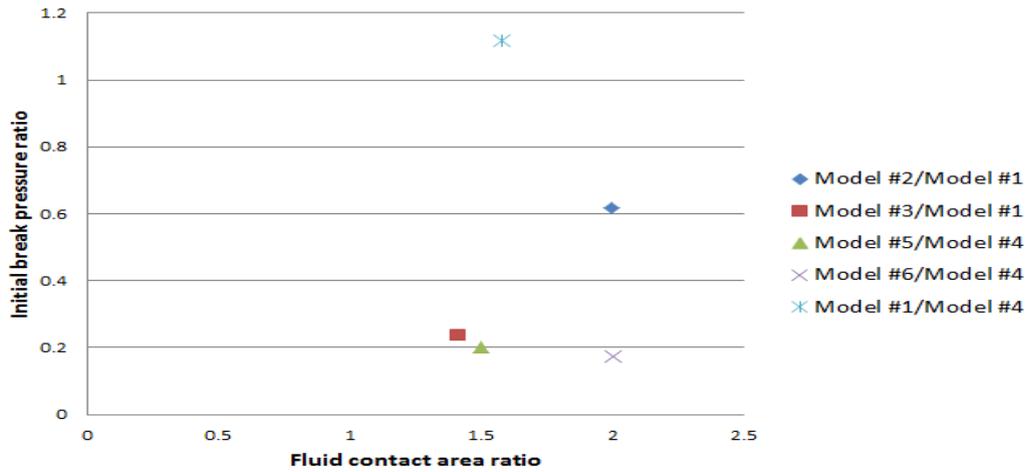


Fig. 5. The result of Fluid contact area ratio verse Initial break pressure ratio

Table 3. Physical property values from laboratory tests.(Mun et al., 2014)

Property	block mass density	bulk modulus of block	shear modulus of block	friction angle of block	cohesion of block	tensile strength of block
Value	1955 kg/m ³	22.87×10 ⁴ kgf/cm ²	13.46×10 ⁴ kgf/cm ²	57.75°	41.30kgf/cm ²	23.86kgf/cm ²

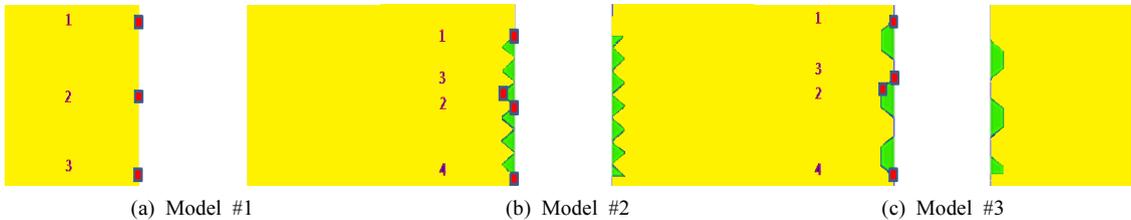


Fig. 6. Grid point of models

체적접촉면적비, 세로축은 비교한 두 모델의 초기파쇄압 비이다. 유도홀이 없는 기존의 시추공 형태에서 직경을 키워 유체접촉면적을 증가시킨 경우(Model #1/Model #4) 유체접촉면적 증가량에 비해 초기파쇄압은 큰 차이를 보이지 않지만, 유도홀을 사용한 시추공과 기존 형태의 시추공을 비교한 경우 유체접촉면적이 증가한 양에 비해 큰 초기파쇄압 차이를 보였다. 대부분의 유도홀 모델의 경우 20% 전후로 비슷하나 삼각형 나선형의 Model #2는 60%의 초기파쇄압 비를 보인다. 이는 역시 유도홀 형태에 따른 응력집중의 차이로 보인다.

4. 수치해석 모델링

수치해석 프로그램은 개별요소법에 기초한 3차원 수

치해석 프로그램인 3DEC을 이용하여 수압파쇄시험을 모델링하였다. 시험 모델은 deformable body로 제작하여, 시험편 내에 압력이 가해졌을 때의 정해진 Gridpoint에서의 변위를 파악했다.

수치해석 모델링에 사용된 물성은 수압파쇄실험의 경우와 마찬가지로 선행연구와 동일하며 Table 3과 같다.

수압파쇄의 위치는 시추공 내 80 mm~120 mm의 깊이라고 가정하였으며, Model #1의 Gridpoint는 가압구간의 처음과 끝, 중간지점이고 Model #2,3의 Gridpoint는 가압구간의 처음과 끝, 가압구간 중간의 안쪽 꼭지점과 바깥쪽 꼭지점으로 설정하였다. 모델의 Gridpoint는 Fig. 6과 같다.

각 지점의 변위 분포 결과는 Fig. 7과 같다. 발생된 변위를 보면 일반 시추공 형태의 Model #1의 경우 Hist

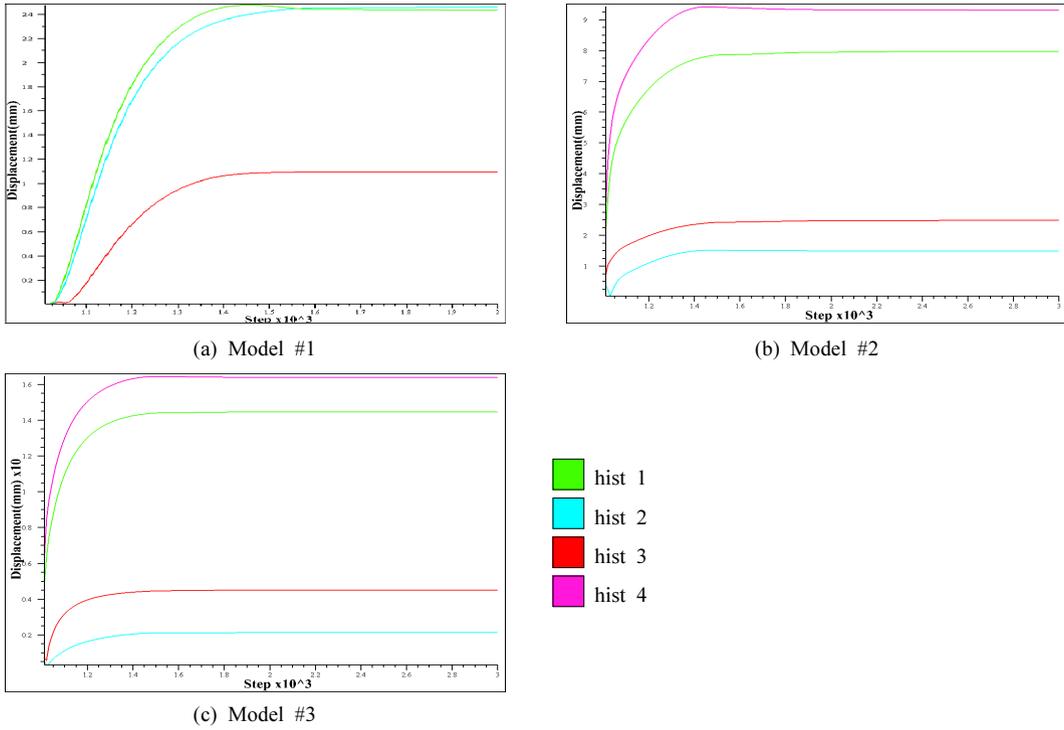


Fig. 7. Displacement histories of models

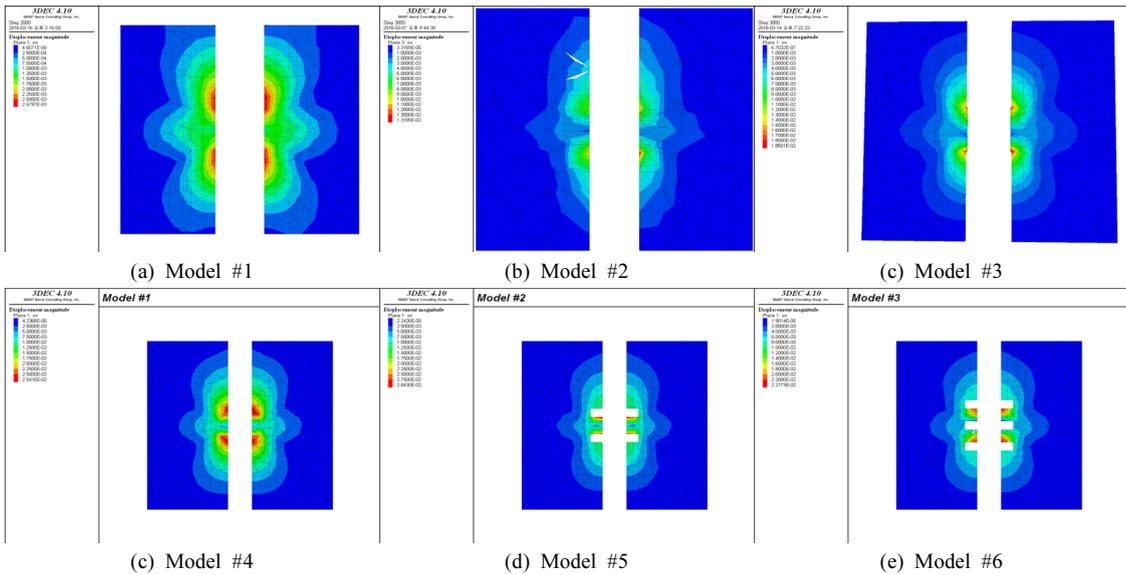


Fig. 8. A displacement distribution of Numerical modeling results

1지점에서 2.48 mm의 최대 변위가, 패커 중심부에서 1.10 mm의 변위가 나타났다. 삼각형 나선 모델의 Model

#2의 경우 Hist 4 지점에서 9.42 mm의 최대 변위가, 패커 중심부에서 2.49 mm의 변위가 나타났다. 사다리형

나선 모델의 Model #3의 경우 Hist 4지점에서 16.46 mm의 최대 변위가 패커 중심부에서는 4.53 mm의 변위가 나타났다. 세 모델 모두 공통적으로 패커 최외각 부에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 또 나선형 시추공을 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 같은 압력을 주었을 때 더 큰 변위가 발생하였다. 따라서 나선형 시추공을 이용할 시 적은 수압으로 효과적인 균열을 생성할 것으로 보여진다.

Fig. 8은 수치해석 모델링이 끝난 후 변위분포 양상을 나타낸 그림이다. (a), (b), (c)의 변위양상은 선행연구 (d), (e), (f)와 비교해 보았을 때, 시험편 내 변위 분포의 형상이나 전체적으로 벽면 부근보다 패커부근에 높은 변위를 나타내는 점으로 비슷한 변위 분포 양상을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Roundbar를 이용하여 나선형 유도홀을 만든 후 실내 수압파쇄시험을 실시하여 수압파쇄 효과에 유도홀이 미치는 영향을 검토하고, 이를 동일한 형상으로 접촉면적을 달리한 선행연구의 초기파쇄압, 고압수 접촉면적과 비교하였다. 또한 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC으로 수압파쇄시험을 모사하여 특정지점에서 발생하는 변위를 관찰하였다.

수압파쇄시험 결과 일반 시추공 형태의 Model #1이 평균 45.04 kgf/cm²의 초기파쇄압을 나타냈으며, 삼각 나선형의 Model #2가 27.73 kgf/cm²로 Model #1의 62.97%의 압력으로, 사다리형 나선의 Model #3가 10.64 kgf/cm²로 Model #1의 24.16%의 압력으로 파쇄되었다. 이는 유도홀이 수압파쇄효과에 효율적임을 알 수 있다.

동일한 형상의 유도홀의 경우는 접촉면적에 따라 수압파쇄 효과가 다르나 유도홀의 형태에 따른 수압파쇄 효과는 고압수 접촉면적 보다는 응력집중을 발생시킬 수 있는 형태에 의해 수압파쇄 효과가 결정되었다. 따라서 유도홀을 응력집중을 고려한 형태로 주어지는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3DEC을 이용한 수치해석 결과는 일정압력을 가했을 때 최대변위가 공통적으로 패커 최외각부에서 일어났으며 Model #1의 경우 2.48 mm, Model #2의 경우 9.42 mm, Model #3의 경우 16.46 mm를 갖는다. 패커 중심부에서는 Model #3가 4.53 mm로 가장 큰 변위가 발생하였고, Model #2는 2.49 mm로 Model #3의 54.97%, Model #1의 경우 1.10 mm로 Model #3의 24.28%를 나타냈다.

References

1. Cheon, D.S. and Lee, T.J., 2013, Theoretical Background and Design of Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Production, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 23, No. 6, pp. 538-546.
2. Choi, S.O. and Lee, H.K., 1995, The Analysis of Fracture Propagation in Hydraulic Fracturing using Artificial Slot Model, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 5, pp. 251-265.
3. Choi, S.O., 2011, Numerical Approach for Determination of shut-in Pressure in Hydrofracturing Test, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 21, No. 2, pp. 128-137.
4. Haimson, B.C. and Fairhurst, C., 1967, Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, *SPE*, 7, pp. 301-318.
5. Hubbert, M. K. and Willis, D.G., 1957, Mechanics of hydraulic fracturing, *Trans. AIME.*, 201, pp. 153-163.
6. Ishida, T., 2001, Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field, *Construction and Building Materials*, 15, pp. 283-295.
7. Ito T Hayashi K. Physical background to the breakdown pressure in hydraulic fracturing tectonic stress measurements. *Int J Rock Mech Min Sci* 1991;28: pp. 285-93.
8. Kim, G.T., Chung, K.Y. and Park, J.K., 2014, Recent Water Treatment Technology for Unconventional Natural Resource Development, *Korean Chem. Eng. REs.*, 52(2), pp. 154-165.
9. Lockner, D., Byerlee, J.D., 1977, Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress, *J. Geophys. Res.*, 82(14), 2018-2026.
10. Mun H.J. Jang W.Y Shin S.R Lim J.S and Jeong W.K., 2014 A Study on the Model for Effective Hydraulic Fracturing by Using Guide Hole, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE* Vol. 24, No. 6, 2014, pp. 440-447.
11. Rhee, C.G. Song, M.Y Choi, W.H Chang, C.J and Lee, J.U., 1995, Effects of Injection and Temperature Variations on the Breakdown Pressure of Rocks, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 5, No 2, September., 1995, pp. 129-138.
12. Rummel, F., 1987, 'Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements'. *Fracture mechanics of rock*, Academic press, pp. 217-239.
13. Zoback, M.D., Rummel, F., Jung, R. and Raleigh, C.B., 1977, Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 14, pp. 49-58.

이 상 훈

2014년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사



Tel: 051-410-4843
E-mail: dndd300@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

임 증 세

1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사



1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 051-410-4682
E-mail: jslim@kmou.or.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수

장 원 일

1977년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사



1980년 서울대학교대학원 자원공학과 공학석사
2008년 전남대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 051-410-4438
E-mail: jwy@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수