

유도홀을 이용한 효과적인 수압파쇄 모델연구

문홍주, 신성렬, 임종세, 정우근, 장원일*

A Study on the Model for Effective Hydraulic Fracturing by Using Guide Hole

Hong Ju Mun, Sung Ryul Shin, Jong Se Lim, Woo Keen Jeong, Won Yil Jang*

Abstract Abstract Hydraulic fracturing technique has been applied in various fields in order to improve the recovery of energy resources such as gas, oil and geothermal energy and research about finding out hydraulic fracturing mechanism and application has been steadily proceeded. In this study, for effective hydraulic fracturing, a scale modeling was progressed to simulate similarly with the actual site. In order to analyze the development aspect of surface crack initiation pressure during hydraulic fracturing followed by different conditions, the number of guide holes hydraulic fracturing test was carried out by setting up a hydraulic fracturing test equipment. Also, through the result, we tried to derive reliable results by comparing and analyzing the value of numerical modeling which is obtained based on the physical properties and mechanical properties with 3DEC, a three-dimensional discrete element method program. As a result, it is considered possible to generate effective crack using the guide hole

Key words Hydraulic fracturing, Guide hole, Discrete element method, 3DEC

초 록 수압파쇄 기술은 가스나 석유, 지열 등 에너지자원의 회수율을 향상시키기 위해 다양한 분야에서 응용되고 있으며 수압파쇄 메커니즘 규명 및 응용분야에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 본 연구에서는 효과적인 수압파쇄를 위하여 실제 현장과 유사한 상황을 구현할 수 있는 축소모형실험을 통해 유도홀의 개수에 따른 수압파쇄시 균열발생 압력을 분석하기 위하여 수압파쇄 시험 장치를 구축하여 수압파쇄 시험을 실시하였다. 또한 그 결과를 토대로 물성과 역학적 특성을 취득하여 3차원 개별 요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석적 모델링 값과 비교·분석함으로써 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다. 그 결과 유도홀을 이용할 경우 효과적인 균열 발생이 가능할 것으로 사료된다.

핵심어 수압파쇄, 유도홀, 개별요소법, 3DEC

1. 서 론

수압파쇄기술은 가스나 석유, 지열 등 에너지자원의 회수율을 향상시키기 위해 다양한 분야에서 응용되고 있으며 수압파쇄 메커니즘 규명 및 응용분야에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Hubbert와 Willis(1957)는 최초로 수압파쇄에 의한 균열이 발생하는 조건식을 제

시한 바 있으며 그 외, 수 많은 연구에서 암반의 균열 생성 및 현지암반 초기응력 측정 기법에 적용되어 왔다.

국내의 연구들을 살펴보면 Haimson과 Fairhurst(1967)는 가압 유체의 침투에 의한 공극수압을 고려한 공극 탄성 모델, Zoback 외(1977)는 실험을 통해 주입되는 유체의 점도에 따른 균열개시압력, 초기파쇄압력의 영향을 고찰한 바 있으며, 수압파쇄 실험 시 미소파괴음 측정을 통해 파쇄 이전에 균열이 개시되는 압력을 추정하였다. Lockner와 Byerlee(1977), Ishida(2001)는 미소파괴음 측정을 통해 수압파쇄에 의해 발생하는 균열의 성장 방향을 예측하였다. Choi와 Lee(1995)는 실험을 통해 인공슬롯에 따른 수압파쇄 균열의 거동 특성을 연구 하였으며, Choi(2011)는 수압파쇄 시험결과 해석에 대한 파괴역학모델의 적용성을 검토하였다.

Received: Nov. 24, 2014

Revised: Dec. 9, 2014

Accepted: Dec. 10, 2014

***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

또한 수압파쇄 매커니즘을 규명하기 위한 수치해석적 연구도 다양하게 진행되어 왔으며, 유한요소법과 경계요소법 등을 사용한 기법이 복잡한 3차원 수압파쇄 해석에 주로 적용되었다. Hazzard 외(2000), Al-Busaidi 외(2005), Shimizu 외(2011)는 개별요소법을 사용하여 수압파쇄 균열의 성장 매커니즘을 규명하였다. Choi(2000)는 유한요소법을 사용하여 rock bridges를 고려한 수압파쇄 균열 거동을 고찰 하였으며, Choi(2011)는 수치해석 기법을 통한 균열폐쇄 압력의 정량적 산정을 위한 연구를 수행한 바 있다

에너지자원의 생산성 향상을 위한 수압파쇄 기술은 수평시추와 더불어 1940년대 말부터 개발되어 현재까지 꾸준히 진보해 왔으며, 대형 전통유전의 발굴 감소 및 기존 유전의 생산성 향상 방안 모색, 고유가에 따른 비전통자원개발의 경제성 확보 등으로 2000년대 들어서 현장에서 활발히 적용되고 있다. 이러한 수평시추, 수압파쇄 기술의 발전으로 최근 비전통자원개발이 전세계적으로 급성장하고 있다(Kim et al, 2014).

따라서 본 연구에서는 효과적인 수압파쇄를 위하여 실제 현장과 유사한 상황을 구현할 수 있는 유도홀을 이용한 축소모형 실험을 통해 유도홀의 개수에 따른 수압파쇄시 균열발생 압력을 중심으로 실험을 수행하였다. 또한 그 결과를 토대로 물성과 역학적 특성을 취득하여 3차원 개별요소 프로그램인 3DEC을 이용한 수치해석적 모델링 값과 비교·분석함으로써 신뢰성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

2. 수압파쇄 기본이론

수압파쇄 공법 수행시 발생하는 균열은 최소주응력 방향에 수직하게 발생한다(Hubbert and Willis, 1957). 일반적인 저류층 환경에서는 연직응력(σ_v)이 최대 주응력이 되고 최소 수평주응력(σ_{hmin})이 최소 주응력이 되므로 최대 수평응력(σ_{hmax}) 방향으로 균열이 발생하지만 천부에 위치한 저류층에서 연직응력이 최소 주응력이 되는 경우에는 수평방향의 균열이 발생 할 수도 있다.

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, 2013).

파쇄를 위해 고압의 유체가 지층으로 주입되면, 인장력에 의한 암석의 파괴가 발생하면서 균열이 생성되기 시작한다. 생성된 균열의 방향은 지반의 초기 응력상태에 따라 상이하며 암석의 최소 주응력 방향에 수직한

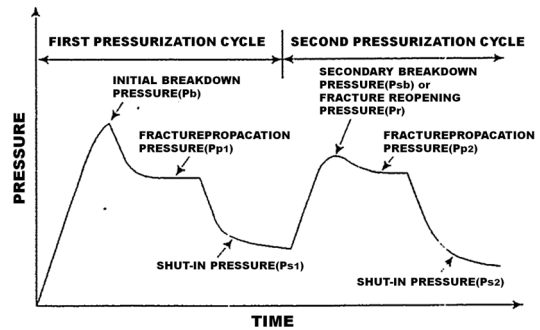


Fig. 1. Schematic diagram of time history of fluid injection pressure showing significant pressure levels (Lee, 1995)

방향으로 발생한다.

Fig. 1은 수압파쇄에 의한 압력-시간 곡선을 나타내고 있다. 여기서 초기파쇄압력(initial breakdown pressure) P_b 는 균열이 발생하는 순간의 압력을 의미한다. 가압을 중지하면 일정한 압력에 이르게 되는데, 이 압력이 균열폐쇄압력(shut-in pressure) P_s 이다. 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 대개 균열면에 수직으로 작용하는 최소 수평주응력(σ_{hmin})을 나타내게 된다. 즉,

$$\sigma_{hmin} = P_s \tag{1}$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력 보다는 낮은 일정 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 2차파쇄압력(secondary breakdown pressure) P_{sb} 또는 균열개구압력(fracture reopening pressure) P_r 이라 하며, 여기서 현지암반 인장강도 T를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_{sb} \tag{2}$$

이때의 T는 시추공 내에 균열이 발생한 개소의 인장강도이며, 또한 시추공 벽면의 강도는 균일하지 않으므로, 시험편에 대하여 직접인장시험 또는 압연인장시험으로 구한 인장강도와는 별도로 취급되는 것이 바람직하다.

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).

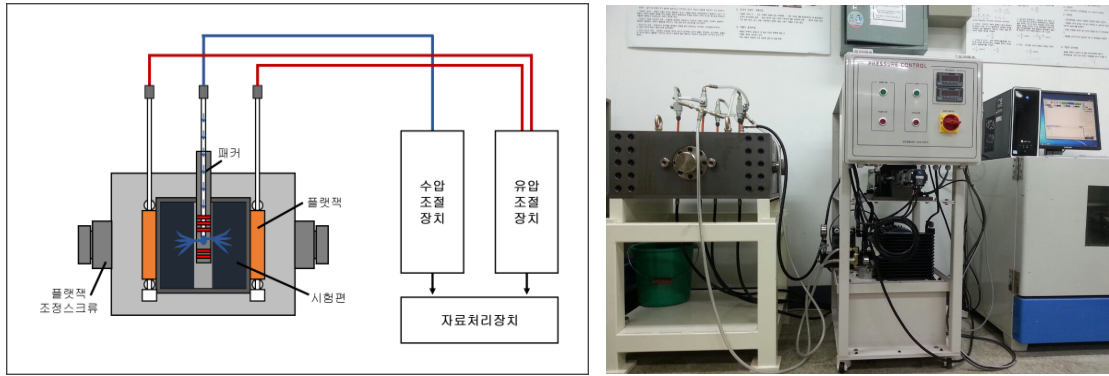


Fig. 2. A view of a hydraulic fracturing system

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

$$\sigma_v = \gamma h \quad (4)$$

여기서, σ_p 는 시추공 벽면에 작용하는 최소점선응력 (압축을 +로 함)이며, σ_v 는 연직방향의 주응력, γ 는 암반의 단위중량, h 는 지표로부터의 심도이다.

3. 수압파쇄시험

3.1 수압파쇄시험 장치구성

대개의 수압파쇄 모델실험에서는 연직방향, 즉 수압파쇄공과 평행한 방향으로의 재하는 수압파쇄 조건식과 무관하여 해석에 있어서 그다지 중요한 역할을 하지 못한다는 이유와 시험편 내로 삽입되어 있는 패커의 돌출 부분으로 인해 시험편의 상부를 재하한다는 것이 그리 쉽지 않다. 따라서 이와 같은 내용을 근거로 본 실험에서는 이축재하의 수압파쇄 모델실험을 계획하였다.

실험장치는 수압파쇄 시험을 위한 유압장치, 수압장치 및 자료처리장치로 나눌 수 있으며 수압파쇄시험의 설계에 있어 제어 가능한 유체 주입속도, 유체의 점성도, 천공, 유체유출 등을 고려하여 장치를 설계하였다.

수평방향으로 압력을 가하기 위해 4개의 원형 플랫팩을 이용하였고, 가해지는 시험편이 사각형 모양인 관계로 두께 20 mm의 사각형 스틸판을 이용하여 시험편에

압력을 가하며, 시험편에 가해지는 압력은 servo-motor를 이용하여 일정한 압력이 가해지도록 제어를 하였다. 수압장치는 주입 유량을 일정하게 유지할 수 있는 전기식 유압펌프를 사용하였다. 자료처리장치는 PCI-PID01 보드를 이용하여 시험편에 가해지는 측압과 수압장치에서 발생하는 압력을 변환하여 기록하였다. 제작된 수압파쇄시험장치의 모습은 Fig. 2와 같다.

3.2 수압파쇄시험편 제작

본 연구에서 사용된 시험편은 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 사용하였다. 실험에 사용되는 시험편은 클수록 외부조건에 따라 발생하는 물리적 변화량의 측정과 모니터링이 용이하나 제작상의 어려움과 적용되는 하중조건이 크게 증가하기 때문에 제반 조건을 종합적으로 고려하여 시멘트 모르타르 시험편을 제작하였다. 시멘트 모르타르는 1종 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며, 시험편은 시멘트와 물의 중량혼합비를 1:0.4로 양생기간을 3일로 하였다. 기초물성을 측정 한 결과는 Table 1과 같다.

시험편 중앙에 직경 26 mm의 시험편을 관통하는 홀을 만들어 수압파쇄공을 모사하고, 유도흡이 있는 시험편과 없는 시험편을 제작하였다.

시료성형틀을 사용하여 유도흡의 길이가 좌, 우 각각 13 mm 높이가 10 mm가 되도록 수압파쇄시험편을 제작하였다. 각 시험편은 200 mm×200 mm×200 mm의

Table 1. Property value from the laboratory test

Property	Uniaxial compressive strength (MPa)	Brazilian tensile strength (MPa)	Porosity (%)	Density (kg/m^3)	Poisson's ratio
value	28	2.34	6.90	1955	0.25

정육면체 모양이 되게 제작하였다.

3.3 수압파쇄시험 결과

유도홈이 있는 경우와 없는 경우의 수압파쇄시 발생 균열을 파악하기 위해 먼저 유도홈이 없는 일반적인 모델에서 수압파쇄에 의한 발생균열을 확인하였다. 시험편 model #1은 유도홈이 없는 경우로 시험편 중앙에는 직경 26 mm, 길이 200 mm의 시추공간 존재한다. 시험편에 가해지는 측압은 2.5MPa로 일정하게 유지 시키면서 패커에는 100 ml/min의 일정 주입속도로 물을 주입하였다. 유도홈이 있는 모델(model #2, model #3)은 높이가 10 mm인 유도홈을 각각 2개, 3개씩 만들어 수압파쇄시험을 실시하였다.

시험의 정지 기준을 최대주입압력의 90%로 설정한 실험모델에 대한 수압파쇄 결과는 Table 2와 같이 나타났으며 각각에 대한 균열발생 압력 그래프는 Fig. 3과 같다.

최대압력을 균열발생 압력이라 하였을 때 유도홈이 없는 경우는 40.27 MPa까지 나타났으며, 유도홈이 2개인 경우 8.13 MPa, 유도홈이 3개인 경우 7.04 MPa로 낮게 측정되었다. 이를 통해 유도홈이 있을 경우 균열 발생압력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 패커에 주입되는 유량을 일정하게 조절을 하였지만 유도홈의 개수가 증가 할수록 시험에 사용되는 전체 유량이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 패커를 통해 흘러나온 유체가 유도홈 부분을 채우고 시험편에 압력이 가해지기 때문에 측정되는 최대 유량이 증가 한 것으로 예상된다. 즉, 유도홈에 의해 균열발생의 원인이 되는 고압수가 접촉하는 면적이 증가할수록 균열발생압력이 낮아진다.

시험의 정지 기준을 최대주입압력의 70%로 설정한 실험모델에 대한 수압 파쇄 시험 결과는 Table 3과 같이 나타났으며 각각에 대한 균열발생 압력 그래프는 Fig. 4와 같다.

최대주입압력을 90%로 시험하였을 때 유도홈이 없는

경우의 균열개시 최대유량/시간은 303.93 ml/mim, 유도홈이 있는 경우의 최대유량/시간은 주입속도와 거의 일치하며, 최대주입압력의 70%로 설정한 실험모델에서는 유도홈이 있는 경우 주입속도와 거의 일치하나 유도홈이 없는 경우 조금 높게 나타났다. 따라서, 유도홈이 없는 경우는 정지기준을 높게 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 유도홈이 있는 경우도 정지기준을 높게 설정하는 것이 균열 발생압력을 감소시키는데 유리한 것으로 나타났으나, 이 경우는 차후 정지기준을 다양하게 변화시키면서 실험을 수행할 필요가 있는 것으로 사료된다.

4. 수치해석 모델링

개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램 3DEC을 이용하여 수압파쇄시험을 모델링하였다. 수압파쇄시험과 동일한 조건을 나타내기 위해 Fig. 5와 같이 각각의 모델을 설계하였다.

수치해석 모델링에 사용된 물성값은 기초물성 측정 및 일축압축강도, 압열인장강도 등을 이용하여 구하였으며 그 결과는 Table 4와 같다.

시험모델편은 deformable body로 제작하여 압축 및 팽창이 가능하게 하였고 시험편 내에 압력이 가해졌을 때 변위의 파악이 가능하도록 모델링 하였다.

수압파쇄 시험모델의 형상과 변위를 파악하기 위한 grid point는 패커의 위치를 고려하여 패커의 최하단부와 유도홈의 벽면, 유도홈과 유도홈 사이에 배열하여 각 지점의 변위 분포 결과를 파악하고자 하였다. 각 지점에서의 발생된 변위는 Fig. 6과 같다.

발생된 변위를 살펴보면 Table 5에서와 같이 유도홈이 없는 model #1의 경우 노즐외곽에서 최대변위(21.06 mm, 21.86 mm)가 발생하며 패커에 가까울수록 감소한다. 유도홈이 2개인 model #2의 경우 패커의 최하단부에서 10.28 mm, 유도홈 벽면에서 발생하는 변위 12.56

Table 2. Result of hydraulic fracturing test (1)

	Guide hole	Side pressure (MPa)	Max. pressure (MPa)	Max. flow (ml)	Time (sec)	Flow rate (ml/min)
Model #1	0	2.5	40.29	144.32	28.49	303.94
		2.5	40.24	151.00	29.81	303.92
Model #2	2	2.5	7.88	341.81	201.95	101.55
		2.5	8.37	362.82	216.34	100.62
Model #3	3	2.5	6.94	727.34	432.60	100.88
		2.5	7.14	309.02	185.27	100.08

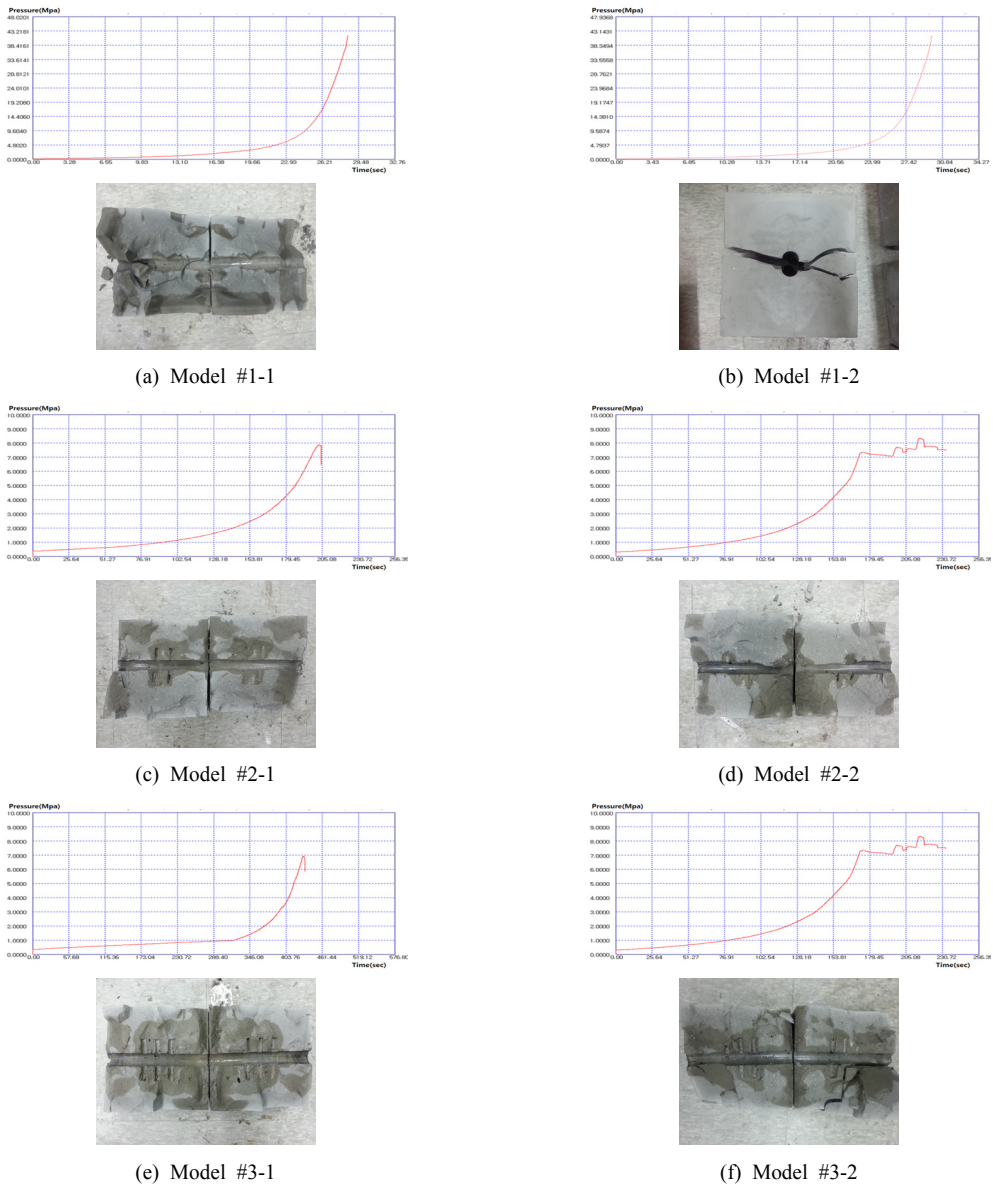


Fig. 3. The result of hydraulic fracture for model #1,2,3 (1)

Table 3. Result of hydraulic fracturing test (2)

	Guide hole	Side pressure (MPa)	Max. pressure (MPa)	Max. flow (ml)	Time (sec)	Flow rate (ml/min)
Model #1	0	2.5	50.35	609.41	361.27	101.21
		2.5	57.43	318.65	189.08	101.12
Model #2	2	2.5	64.67	135.29	80.38	100.99
		2.5	46.38	129.65	77.19	100.77
Model #3	3	2.5	49.49	135.67	80.63	100.96
		2.5	43.77	143.89	85.95	100.45

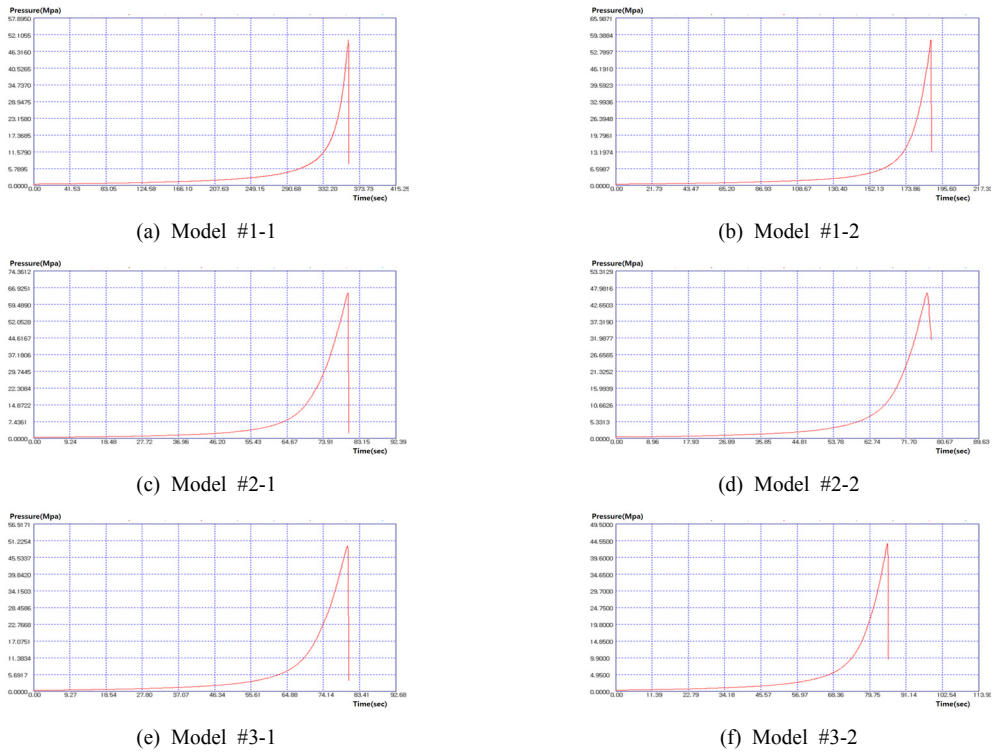


Fig. 4. The result of hydraulic fracture for model #1,2,3 (2)

Table 4. Input parameters from laboratory tests

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	22.43 GPa	13.46 GPa	57.75°	4.05 MPa	2.34 MPa

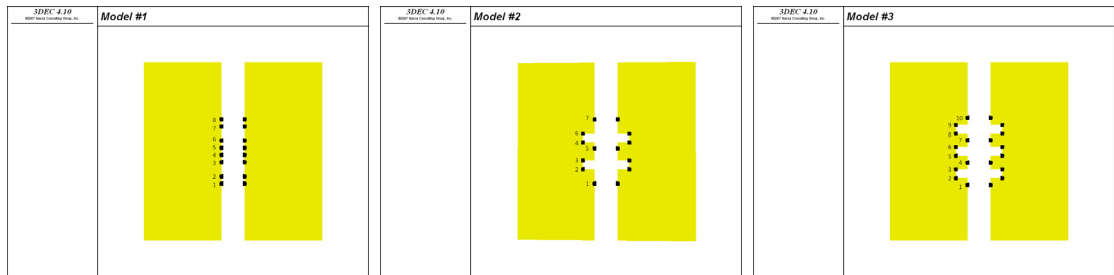


Fig. 5. Numerical model for hydraulic fracturing

mm, 유도홈과 유도홈 사이에서는 13.49 mm로 유도홈과 유도홈사이에서 최대치를 나타내고 있다. 유도홈이 3개인 model #3의 경우도 유도홈과 유도홈사이 4, 7 grid point에서 최대변위(16.96 mm, 18.43 mm)가 발생한다 따라서 유도홈 개수가 증가할수록 균열발생의 효

율이 높아질 것으로 사료된다.

Fig. 7은 수치해석 모델링이 끝난 후의 모습이며 수압파쇄 시험 결과와 비교하여 보았을 때 변위의 분포양상이 비교적 잘 일치한 결과를 보이고 있다. 이에 따라 3DEC를 이용한 수치해석 모델링이 수압파쇄 시험을

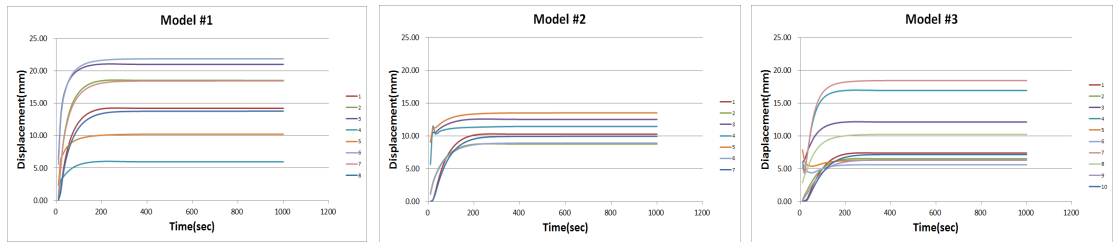


Fig. 6. Time verse displacement for hydraulic fracturing of numerical modeling results

Table 5. Displacement of numerical modeling results

Model #1		Model #2		Model #3	
Point	Displacement (mm)	Point	Displacement (mm)	Point	Displacement (mm)
1	14.26	1	10.28	1	7.39
2	18.58	2	8.79	2	6.52
3	21.06	3	12.56	3	12.14
4	6.03	4	11.43	4	16.96
5	10.23	5	13.49	5	7.88
6	21.86	6	8.89	6	5.99
7	18.44	7	9.92	7	18.43
8	13.77			8	10.22
				9	6.32
				10	7.15

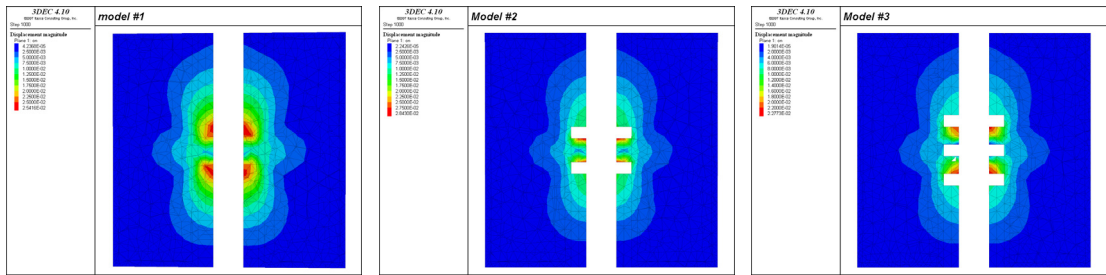


Fig. 7. Numerical modelling results

구현할 수 있는 적합한 방법이라고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 실내 수압파쇄시험을 실시하여 유도흡이 있는 경우와 없는 경우를 비교분석하여 유도흡에 따른 균열의 발전양상에 대하여 파악하고 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC을 사용하여 수압파쇄시험을 수치적으로 모사했다. 기초물성 및 실내시험과 수행된 수압파쇄시험 결과의 역산을 통해 얻은 시험편의 역학적 물성

을 이용하여 수치해석 결과를 획득하고, 실험실 수압파쇄시험과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

수압파쇄 시험의 결과 정지기준을 90%로 하였을 때 유도흡이 없는 경우 균열의 발생압력이 40.27MPa, 유도흡이 2개인 경우 8.13 MPa, 유도흡이 3개인 경우 7.04 MPa로 유도흡이 있는 경우가 유도흡이 없는 경우에 비해 최대 약 80%까지 감소하였다. 따라서 현장에서 수압파쇄를 실시할 때 유도흡을 이용하면 효과적인 균열 발생 결과를 나타낼 수 있을 것이라 사료된다. 다

만, 정지기준을 다르게 설정할 경우는 이에 대한 추가 실험이 필요한 것으로 판단된다.

수치해석 결과 발생하는 변위를 살펴보면 유도홈이 없는 경우 노즐외곽에서 최대변위 21.06 mm와 21.86 mm가 발생하며 패키에 가까울수록 감소한다. 유도홈이 2개인 경우 유도홈과 유도홈 사이에서 13.49 mm, 유도홈이 3개인 경우 유도홈과 유도홈 사이에서 16.96 mm와 18.43 mm로 유도홈이 있는 경우 유도홈과 유도홈 사이의 변위가 가장 많이 발생하였다. 따라서 유도홈 개수가 증가할수록 균열발생의 효율이 높아질 것으로 보여진다.

3차원 수치해석 프로그램인 3DEC를 이용하여 수압 파쇄 모델을 구현할수 있었으며, 이를 토대로 실제 수압파쇄 시험을 하기 위해 현장의 지반물성을 토대로 균열의 발생 압력을 추정하는 것이 가능하다고 사료된다.

실제로 발생하는 균열의 양상을 표현하기 위해서는 균열의 분포를 구체적으로 표현할수 있는 방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료되며, 본 연구 결과를 이용하여 실제 현장에서의 균열의 발생 압력 및 균열의 발전 양상을 3차원 수치해석을 통해 보다 정확하게 구현할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

1. Al-Busaidi, A., Hazzard, J.F. and Young, R.P., 2005, Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite, *Journal Geophysical Reserch* 110, B06302, DOI:10.1029/2004JB003297.
2. 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, 538-546.
3. Choi, S.O., 2000, A Numerical Study of Hydraulic Fractures Propagation with Rock Bridges, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 10, 447-456.
4. 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, 128-137.
5. 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, 251-265.
6. Haimson, B.C. and Fairhurst, C., 1967, Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, *SPE*, 7, 301-318.
7. Hazzard, J.F., Young, R.P. and Maxwell, S.C., 2000, Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks, *J. Geophys. REs.*, 105(B7), 16683-97.
8. Hubbert, M. K. and Willis, D.G., 1957, Mechanics of hydraulic fracturing, *Trans. AIME.*, 201, 153-163.
9. Ishida, T., 2001, Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field, *Construction and Building Materials*, 15, 283-295.
10. 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), 154-165.
11. Lee, H.K., 1995, A Study on the Development of the Geothermal Energy through the Hydraulic Fracturing Method, KOSEF.
12. Lockner, D., Byerlee, J.D., 1977, Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress, *J. Geophys. Res.*, 82(14), 2018-2026.
13. Shimizu, H., Murata, S., Ishida, T., 2011, The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 712-727.
14. 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, 49-58.



문 홍 주

2012년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사

Tel: 051-410-4843
E-mail: hj_0210@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정



임 중 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



신 성 렬

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 051-410-4681
E-mail: srshin@kmou.or.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수



정 우 근

2006년 서울대학교 공과대학 지구환경 시스템공학부 공학사
2008년 서울대학교 대학원 공학석사
2011년 서울대학교 대학원 공학박사

Tel: 051-410-1689
E-mail: wkchung@kmou.or.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 조교수