입자결합모델을 이용한 횡등방성 암석에서의 수압파쇄 특성 연구

정재웅, 허 찬, 전석원*

Study on Hydraulic Fracturing in Transverse Isotropic Rock
Using Bonded Particle Model

Jaewoong Jung, Chan Heo, Seokwon Jeon*

Abstract Hydraulic fracturing is used as a method for promoting the fluid flow in the rock and, in the energy field such as geothermal development and the development of sales gas, many studies has been actively conducted. In many cases, hydraulic fracturing is not performed in isotropic rock and especially in the case of sedimentary rocks, hydraulic fracturing is conducted in the transverse isotropic rock. The direction of the crack growth on hydraulic fracturing does not necessarily coincides with the direction of maximum principal stress in the transverse isotropic rock. Therefore, in this study, bonded particle model with hydro-mechanical coupling analysis was adopted for analyzing the characteristics of hydraulic fracturing in transverse isotropic rock. In addition, experiments of hydraulic fracturing were conducted in laboratory-scale to verify the validity of numerical analysis. In this study, the crack growth and crack patterns showed significant differences depending on the viscosity of injection fluid, the angle of bedding plane and the influence of anisotropy. In the case of transverse isotropic model, the shear crack growth due to hydraulic fracturing appeared prominently.

Key words Hydraulic fracturing, Bonded particle model, Hydro-mechanical coupling, Transverse isotropy

초 록 수압파쇄는 암반에서 유체의 흐름을 촉진시키기 위한 방법으로 사용되며 지열개발, 셰일가스의 개발 등 최근 에너지 분야에서 그 어느 때 보다 활발한 연구가 이루어지고 있다. 수압파쇄의 대상이 되는 암반은 등방성을 갖지 않는 경우가 대부분이며 일부 퇴적암층에서는 횡등방성 암반에서 수압파쇄가 이루어진다. 횡등방성 암반에서는 수압파쇄에서 발생하는 균열의 성장 방향이 반드시 최대주응력 방향과 일치하지 않으며 이방성 구조에 따라 변화하게 된다. 그러므로 이 연구에서는 입자결합모델을 이용하여 횡등방성 암석에서의 수압파쇄 특성을 고찰하고 분석하고자 하였다. 또한 실험실 규모의 수압파쇄 실험을 실시하여 수치해석 결과의 타당성을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 가압되는 유체의 점도 및 층리면의 각도 그리고 이방성에 의한 영향으로 균열의 성장 및 균열 패턴에 큰 차이를 보였으며, 횡등방성 모델의 경우 전단균열에 의한 수압파쇄 균열의 성장이 우세한 것으로 나타났다.

핵심어 수압파쇄, 입자결합모델, 수리-역학적 연계해석, 횡등방성

Received: Nov. 18, 2013

Revised: Dec. 5, 2013

Accepted: Dec. 16, 2013

***Corresponding Author:** Seokwon Jeon

(Tel) +8228808807, (Fax) +8228718938

(E-Mail) sjeon@snu.ac.kr

Seoul National University, 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea

1. 서 론

수압파쇄기술은 가스나 석유, 지열 등의 자원에너지의 회수율을 향상시키기 위해 다양한 분야에서 응용되고 있는 기술이다. 수압파쇄 메커니즘 규명 및 응용분야에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Hubbert 외 (1957)는 최초로 수압파쇄에 의한 균열이 발생하는 조

견식을 제시한 바 있으며 그 외, 수많은 연구에서 암반의 균열 생성 및 현저압반 초기응력 측정 기법에 적용되어 왔다. Haimson과 Fairhurst(1967)는 가압 유체의 침투에 의한 공극수압을 고려한 공극 탄성 모델을 제시하였다. Zoback 외(1977)는 실험을 통해 주입되는 유체의 점도에 따른 균열개시압력(crack initiation pressure), 초기파쇄압력(breakdown pressure)의 영향을 고찰한 바 있으며, 수압파쇄 실험 시 미소파괴음 측정을 통해 파쇄 이전에 균열이 개시되는 압력을 추정하였다. Lockner와 Byerlee(1977), Ishida 외(2001)는 미소파괴음 측정을 통해 수압파쇄에 의해 발생하는 균열의 성장 방향을 예측하였다. 이후 많은 연구에서 미소파괴음 측정을 통한 수압파쇄 균열의 위치 추적 및 균열 특성 분석이 이루어지고 있다. Choi와 Lee(1995)는 실험을 통해 인공굴롯에 따른 수압파쇄 균열의 거동 특성을 살펴보았으며, Choi 외(2001)는 수압파쇄 시험결과 해석에 대한 파괴역학모델의 적용성을 검토하였다.

또한 수압파쇄 메커니즘을 규명하기 위한 또 다른 방법으로 수치해석적 연구도 다양하게 진행되어 왔다. 유한요소법과 경계요소법 등을 사용한 기법이 복잡한 3차원 수압파쇄 해석에 주로 적용되었다. Hazzard 외(2000), Hazzard 외(2002), Al-Busaidi 외(2005), Shimizu 외(2011)는 개별요소법을 사용하여 수압파쇄 균열의 성장 메커니즘을 규명하였으며, 실험을 통한 미소파괴음 결과와 비교 분석하였다. Choi(2000)은 유한요소법을 사용하여 rock bridges를 고려한 수압파쇄 균열 거동을 고찰하였으며, Choi(2011)은 수치해석 기법을 통한 균열쇄압력배의 정량적 산정을 위한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 개별요소법을 기반으로 하는 상용프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code in 2-Dimension)을 이용한 수리-역학적 연계해석을 통해 수압파쇄를 모사하였다. PFC2D의 경우 연속체 해석과 다르게 해석 대상체에서 발생하는 손상이나 균열을 입자간의 결합이 파괴되는 것으로 모사 가능한 장점이 있고 암석역학 분야에서 암석의 비선형적 거동을 모사하는데 많이 적용된 바 있다(Potyondy와 Cundall, 2004).

수압파쇄의 대상이 되는 암반은 등방성을 갖지 않는 경우가 대부분이며 일부 퇴적암층에서는 횡등방성 암반에서 수압파쇄가 이루어진다. 그러나 선행되었던 수압파쇄에 관한 연구들은 대부분 등방성 암석을 대상으로 수행되었으며, 이방성을 고려한 수압파쇄 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 층리면이 존재하는 횡등방성 암석을 모사하였으며, 이러한 암석 내에서의 수압파쇄 균열의 성장 특성을 규명하고 수압파쇄 시 가압 유체의 점도에 따른 수압파쇄 균열의 특성을 분석

하고자 하였다. 또한 실험실 규모의 수압파쇄 실험을 실시하여 수치해석 결과의 타당성을 분석하고자 하였다.

2. 수압파쇄 실내실험

2.1 실내실험 개요

물-시멘트 비를 20 : 100으로 하여 크기 170 mm × 170 mm × 170 mm의 시멘트 모르타르 시험편을 제작하였으며, 시험편 중앙에 직경 16 mm의 시험편을 관통하는 홀을 만들어 패커를 삽입하고 유체를 주입하였다. 횡등방성 암석의 경우, 10 mm 두께로 층을 쌓아 층리면을 포함한 횡등방성 시험편을 제작하였다. Fig. 1에서와 같이 하중기와 flat-jack을 이용하여 이축압축상태($S_H = 3 \text{ MPa}$, $S_h = 1.5 \text{ MPa}$)에서 실험을 실시하였으며, 패커(Fig. 2)에는 10 ml/min의 일정 주입속도로 물(1cP)을 주입하였다. 횡등방성 시험편의 경우 등방평면과 최소수평응력 방향이 이루는 각도(θ)를 각각 0° , 30° ,

Fig. 1. Specimen, loading condition, setting positions of AE sensors and coordinate system

Fig. 2. Mechanical-type double packer

60°를 이루도록 하여 실험을 실시하였다. 또한 수압파쇄 균열의 특성을 살펴보기 위하여 6개의 AE sensor를 부착하여 미소파괴음을 측정하여 균열의 위치를 추적하였으며, 모멘트 텐서 해석을 통해 균열의 양상을 파악하였다.

Fig. 3. Front-view of acoustic event locations for 4 different specimens during hydraulic fracturing laboratory tests

Fig. 4. Crack classification of the located acoustic events by moment tensor analysis during hydraulic fracturing laboratory test

2.2 실험결과

Fig. 3은 수압파쇄 실내실험 시 측정된 등방성 시험편(HF1-IS)과 횡등방성 시험편(HF1-AN0, HF1-AN30, HF1-AN60)의 미소파괴음 이벤트를 도시한 그림이다. 등방성 시료의 경우 최대수평응력 방향인 수직방향으로 주된 균열이 발생하였으며, 횡등방성 시료의 경우 층리면을 따라 균열이 성장하는 것으로 관찰되었다. Fig. 4는 측정된 미소파괴음 이벤트 중, 6개의 센서에서 동시에 측정한 이벤트들을 모아 모멘트 텐서 해석을 실시하여 균열을 분류한 결과이다. 등방성 시료 및 횡등방성 시료 모두 전단균열이 우세한 것으로 나타났다. 이는 기존에 수행되었던 실험적 연구(Sasaki, 1998, Ishida, 2001, Chitralla, 2011)들과 유사한 결과이며, 이는 거시적으로는 인장파괴가 지배적이지만 미시적인 균열의 성장 및 결합에서는 인장과 전단이 혼합된 파괴 메커니즘을 보이는 결과로 판단된다(Falls 외, 1992, Ohtsu 외, 2010).

3. 수치해석 모델

3.1 횡등방성 암석 모사

세일 등과 같이 층리면을 포함하는 횡등방성 암석을 모사하기 위하여 Smooth Joint Model을 이용하여 Fig.

Fig. 5. Transverse isotropic specimens by cement mortar and PFC2D models

Table 1. PFC2D micro parameters for transversely isotropic specimens

Micro parameters	Value	Unit
Minimum ball radius, R_{min}	0.9	mm
Maximum/minimum ball radius ratio, R_{max}/R_{min}	1.66	-
Ball to ball contact modulus, E_c	40	GPa
Ball stiffness ratio, kn/ks	3.1	-
Ball friction coefficient, μ	0.5	-
Ball density, ρ	1980	kg/m ³
Contact-bond normal strength, mean	16	MPa
Contact-bond normal strength, std. dev.	3	MPa
Contact-bond shear strength, mean	16	MPa
Contact-bond shear strength, std. dev.	3	MPa
smooth-joint normal stiffness	4e6	N/m ³
smooth-joint shear stiffness	12e6	N/m ³
smooth-joint bond normal strength	16	MPa
smooth-joint bond shear strength	8	MPa

Table 2. Mechanical properties of specimens and PFC2D model

Mechanical properties	Isotropic specimen				Transversely isotropic specimen				
	UCS (MPa)	E (GPa)	ν	BTS (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_1	ν_2	G_2 (GPa)
Lab. Test	39.6	23.3	0.25	4.3	24.4	19.8	0.23	0.24	8.7
PFC2D model	18.5	22.7	0.25	4.4	23.2	19.6	0.19	0.20	9.1

5와 같이 실내시험편 크기의 모델을 구성하였으며, 입력된 미시변수는 Table 1과 같다. 서로 접하고 있는 입자 사이의 접점에서 접선방향으로 입자가 이동하는 기존 결합모델과 달리, 층리면을 모사하는데 쓰인 Smooth Joint Model은 입자 사이의 접선방향을 무시한 채 별도로 설정한 특정 각도를 갖는 절리면을 따라 입자간의 미끄러짐이 발생한다(Park, 2013). 해석 대상 시험편은 물-시멘트 비를 20 : 100으로 하여 인공적으로 만든 시멘트 모르타르이며, 층리면의 간격이 10 mm인 횡등방성 암석을 모사하였다. 우선 등방성 시험편의 인장강도 및 탄성정수를 기준으로 암석의 역학적 거동을 모사한 뒤, 실내 실험을 통해 구한 횡등방성 시험편의 5개의 탄성 정수를 기준으로 Smooth Joint의 미시변수를 설정하여 횡등방성 암석의 역학적 거동을 모사하였다. 실내 실험 및 수치해석을 통해 구한 결과 값은 Table 2와 같다. PFC2D를 이용하여 암석의 역학적 거동을 모사할 경우 실제 암석의 압축강도에 대한 인장강도의 비율을 그대로 재현하기 어려운 문제가 있다(Potyondy와 Cundall, 2004). 따라서 본 연구에서는 수압파쇄와 관련이 깊은 인장강도가 제대로 발현될 수 있도록 미시변수를 설정하여 모델을 생성하고 해석을 실시하였다.

Fig. 6. PFC2D model for hydraulic fracturing simulation

3.2 수압파쇄 수치해석

수압파쇄를 모사하기 위하여 PFC2D를 이용한 수리-역학적 연계해석을 실시하였다. Fig. 6과 같이 가로 170 mm, 세로 170 mm 크기의 정사각형 모델을 구성하였으며, Darcy's flow test를 통하여 permeability가 $1.1 \times$

10^{-15} m^2 이 되도록 하였다. 모델의 중앙부에는 지름 1.6 cm의 시추공을 구성하였다. 3 MPa의 y-축 방향 구속압 (S_H)과 1.5 MPa의 x-축 방향 구속압(S_h)이 가해지도록 설정하였으며, 10 ml/min의 속도로 일정량의 액체가 시추공에 주입되도록 하였다. 횡등방성 암석의 경우 등방 평면과 최소수평응력 방향이 이루는 각도(θ)가 각각 0° , 30° , 60° 를 이루도록 하여 해석을 실시하였다. 또한 주입되는 액체의 점도에 따른 영향을 살펴보기 위하여 1 cP(물), 50 cP, 100 cP의 점도를 가지는 액체를 주입하여 해석을 실시하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 횡등방성에 따른 영향

이론적으로 등방성 암석의 경우 수압파쇄 균열은 최

대주응력방향으로 성장한다. 그러나 이방성 암석의 경우 시추공 주변에서의 초기응력 분포는 암석의 이방성 특성에 영향을 받으며, 이방성 정도에 따라 응력 상태가 변하게 된다(Amadei, 1982, Aadnoy, 1987). 따라서 이방성 암석에서의 수압파쇄 균열의 성장은 최대주응력 방향과 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 Amadei (1982)가 제안한 식을 이용하여 횡등방성 암석 내 시추공 주변의 초기응력을 계산하였으며, 이를 수압파쇄 수치해석 결과와 비교하였다.

Fig. 7(d)-(l)은 횡등방성 평면이 최소수평응력방향과 이루는 각도(θ)가 각각 0° , 30° , 60° 인 경우 수압파쇄 수치해석 결과를 나타내며, Fig. 8은 Amadei가 제안한 식을 바탕으로 시추공벽의 초기응력(접선방향응력) 값을 도식한 결과이다. 이론적으로 θ 값이 30° 인 횡등방성 암석의 경우, 최대수평응력방향으로부터 시계방향으

Fig. 7. Induced cracks from PFC2D simulations (marked by red/blue/black lines representing tensile/shear/smooth-joint shear cracks)

Fig. 8. Stress concentration around borehole in a transversely isotropic material (the expected fracture direction marked with solid line and the angle of bedding plane marked with dashed line)

로 약 24.2° 인 지점에서 최소점선응력을 나타내며, θ 값이 60° 인 경우 약 329.8° 인 지점에서 최소점선응력을 나타낸다. 수치해석 결과 θ 값이 30° , 60° 인 경우에 균열이 이론적인 최소점선응력 방향으로 성장함을 관찰할 수 있다.

4.2 점도에 따른 영향

본 연구에서는 가압 유체의 점도에 따른 영향으로 crack initiation pressure(균열개시압력)와 breakdown pressure(초기파쇄압력)의 변화 및 수압파쇄 균열의 특성을 관찰하였다. 모델 내에 구성된 measurement circle에서 측정된 반경방향 및 접선방향 응력과 균열의 누적개수 그래프 등을 도시하여 분석함으로써 균열개시압력 및 초기파쇄압력을 결정하였다(Fig. 9). 균열개시압력의 경우 최초로 균열이 발생되었을 시점에서의 압력으로 결정하였으나, 시추공을 이루고 있는 입자들의 배열과 크기가 일정하지 않아 일종의 팁 부분에서 균열이 먼저 발생하여 초기파쇄압력에 비해 낮게 측정 되는 경향이 있었다.

낮은 점도의 액체를 주입 할수록 암석 내의 공극으로 침투가 쉽게 발생하여 공극수압으로 작용함으로써 시추공 주변의 유효응력을 감소시키는 역할을 한다. 즉 이는 균열의 발생이 용이해짐을 의미한다(Schmitt와 Zoback, 1993). 따라서 높은 점도의 액체를 주입함에 따라 균열개시압력과 초기파쇄압력은 증가하게 된다(Zoback 외, 1977).

등방성 모델 및 횡등방성 모델의 점도에 따른 수치해석 결과를 Fig. 7과 Table 3에 도시하였다. 점도가 높아질수록 crack initiation pressure(균열개시압력)와 breakdown

Fig. 9. Example of determination of crack initiation pressure and breakdown pressure

pressure(초기파쇄압력)가 증가하는 경향을 나타내고 있으며 선행 연구들과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다(Zoback 외, 1977, Ishida 외, 2004). 수압파쇄 균열의 경우, 가압 유체의 점도가 높아질수록 층리면을 따라 성장하는 경향을 보인다. 초기에 유체 압력이 증가함에 따라 시추공 주변의 층리면을 따라 전단균열이 발생하며 어느 정도 균열이 성장한 후 전단균열의 선단에서 최대수평응력 방향으로 인장균열이 성장하였다. Fig. 10은 층리면의 각도가 30° , 가압 유체의 점도가 100 cP인 모델의 시간의 따른 균열의 성장 과정을 나타낸다. 균열개시압력 이후에 시추공 주변에 인장균열이 발생하고 층리면을 따라 전단균열이 성장하게 된다. 전단균열의 성장이 어느 정도 진행된 후 전단균열의 선단에서 인장균열이 성장하는 모습을 관찰할 수 있다.

Fig. 10. Propagating hydrofractures for HF100-AN30 (marked by red/blue/black lines representing tensile/shear/smooth-joint shear cracks)

Table 3. Summary of the simulation results

Specimens	Viscosity of injecting fluid (cP)	Number of tensile cracks after breakdown (%)	Number of shear cracks after breakdown (%)	Crack initiation pressure (MPa)	Breakdown pressure (MPa)
HF1-IS	1	136 (94)	8 (6)	9.9	19.5
HF50-IS	50	133 (90)	15 (10)	10.7	24.4
HF100-IS	100	172 (86)	28 (14)	11.2	26.4
HF1-AN0	1	97 (63)	57 (37)	11.8	16.8
HF50-AN0	50	146 (29)	366 (71)	13.8	25.8
HF100-AN0	100	247 (33)	506 (67)	13.6	27.6
HF1-AN30	1	131 (52)	122 (48)	10.6	15.6
HF50-AN30	50	124 (33)	252 (67)	11.8	21.8
HF100-AN30	100	105 (31)	230 (69)	12.2	22.0
HF1-AN60	1	168 (48)	181 (52)	11.8	16.8
HF50-AN60	50	122 (39)	187 (61)	12.8	23.7
HF100-AN60	100	139 (42)	194 (58)	12.8	23.4

4.3 수압파쇄 균열 성장 특성

Table 3에서 볼 수 있듯이, 등방성 모델의 경우 수압파쇄 균열 중 인장 균열은 85% 이상의 비율을 차지하며 최대수평응력 방향으로 성장하였다. 통상적으로 수압파쇄 균열은 최대주응력방향으로 성장한 인장균열에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다(Hubbert와 Willis, 1957). 횡등방성 모델의 경우 전단균열의 비율이 인장균열의 비율과 유사하거나 더 크게 나타났다. 이는 균열이 상대적으로 취약한 층리면을 따라 성장하면서 전단 미끄러짐이 발생하여 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 기존의 연구에 따르면, 수압파쇄 균열이 기존에 존재하던 균열과 접촉할 때, 균열 상호간의 접촉각 및 구속압의 편차 등에 따라 기존의 균열을 통과하거나 혹은 기존의 균열을 따라 수압파쇄 균열이 성장하게 되는데, 이때 전단 미끄러짐이 발생하여 전단균열이 발생하

게 된다고 연구된 바 있다(Zhou 외, 2008, Zhao와 Young, 2009).

횡등방성 모델에서 1 cP의 점도를 가지는 유체를 주입할 경우, 층리면과 최소수평응력이 이루는 각도인 θ 가 0인 모델(HF1-AN0)에 비해 θ 가 30°, 60°인 모델(HF1-AN30, HF1-AN60)의 경우에 전단균열의 비율이 더 크게 나타났다. 그러나 상대적으로 점도가 높은 50 cP, 100 cP의 유체를 가압할 경우, 초기에 층리면을 따라 전단균열이 성장하고 이후에 전단균열의 선단에서 인장균열이 성장하게 되는데, θ 가 작을수록 초기에 성장하는 전단균열이 길게 성장하여 θ 가 큰 모델에 비해 전단균열의 비율이 더 크게 나타났다.

4.4 구속압에 따른 영향

앞에서 서술한 바와 같이, 이방성 정도나 주입 유체의

Fig. 11. Induced cracks for HF100-AN0 model under $K_H = 5$ (marked by red/blue/black lines representing tensile/shear/smooth-joint shear cracks)

점도에 따라 수압파쇄 균열의 성장 방향이 최대수평응력방향과 일치하지 않는 경향을 보였다. 이와 관련하여 구속압의 편차에 따른 수압파쇄 균열의 성장 특성을 살펴보기 위하여 구속압의 편차를 달리하여 수치해석을 실시하였다. 크기 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 인 횡등방성 모델을 구성하였으며 주입 유체의 점도에 따른 영향을 가장 크게 보인 θ 가 0° 인 모델을 구성하여 점도가 100 cP인 유체를 주입하였다. 구속압 편차는 $K_H = 5$ ($S_H = 7.5$, $S_h = 1.5$)가 되도록 하여 수치해석을 실시하였다(Fig. 11). 해석 결과에서 보여 지는 바와 같이 구속압의 편차가 클 경우 초기에 시추공 주위의 층리면을 따라 전단균열이 성장함과 동시에 최대수평응력 방향으로 수압파쇄 균열이 성장하였으며 전단균열의 성장이 멈춘 후에 최대수평응력 방향으로 균열의 성장이 지속되었다. 즉 구속압의 편차에 의한 영향으로 수압파쇄 균열이 최대수평응력방향으로 성장함을 알 수 있다. 추후 이방성 정도, 주입 유체의 점도 및 구속압의 편차 등이 수압파쇄 균열의 성장 방향에 미치는 영향의 정량적인 평가에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 입자결합모델 프로그램인 PFC2D를 이용한 수리-역학적 연계해석을 통하여 수압파쇄를 모사하였으며, 횡등방성 암반 내에서의 수압파쇄 시 발생하는 균열의 특성 및 가압되는 유체의 점도에 따른 균열 발생 특성을 살펴보고자 하였다. 또한 실험실 규모의 수압파쇄 실험을 실시하여 수치해석 결과의 타당성을 분석하고자 하였다.

횡등방성 특성에 따른 시추공 주변의 응력 분포를 Amadei의 이론식을 이용하여 계산한 결과, 최소점선응력이 나타나는 방향이 최대주응력방향과 편차가 있었으며 수치해석 결과 수압파쇄 균열이 최소점선응력방향으로 성장하는 것을 확인할 수 있었다.

주입 유체의 점도를 1 cP, 50 cP, 100 cP로 하여 해석을 수행하였으며, 등방성 모델과 횡등방성 모델에서 점도가 증가할수록 균열개시압력 및 초기파쇄압력이 증가하는 경향을 보였다. 횡등방성 모델의 경우, 가압된 유체의 점도가 커질수록 층리면을 따라 수압파쇄 균열이 성장을 시작하며, 그 이후에 전단균열의 선단에서 최대수평응력 방향으로 성장하였다. 이에 따라 전단균열의 비율도 함께 증가함을 보였으며, 가압 유체의 점도가 크고 최대수평응력 방향과 층리면이 이루는 각이 클수록 그 영향이 더 크게 나타났다. 시험편에 가해지는 두 축 방향 응력의 차이가 클 경우에는 전단균열과 인장균열이 동시에 성장하였으며, 전단균열의 성장이 진행된 후에 최대수평응력 방향으로 수압파쇄 균열이 성장하였다. 이러한 결과는 실험적으로 뒷받침할 필요가 있으며 현재 본 연구의 연장으로 점도에 따른 영향을 평가하기 위한 실험이 진행 중이다.

수압파쇄 실내실험을 실시한 결과, 횡등방성 시험편의 경우에는 모두 전단균열이 우세하게 발생하였으며, 등방성 시험편의 경우에도 수치해석 결과와 달리 전단균열이 우세한 것으로 나타났다. 이는 거시적으로는 인장파괴가 지배적이지만 미시적인 균열의 성장 및 결합에서는 인장과 전단이 혼합된 파괴 메커니즘을 보이는 결과로 판단된다. 추후 이러한 파괴 메커니즘 및 수리적 이방성을 고려한 추가적인 수치 해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 지식경제 기술혁신 사업인 ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발’ 과제(과제 번호 : 2012T100201733)의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Aadnoy, B., S., 1987, Stresses around boreholes drilled in sedimentary rocks, SPE 17119.
2. Al-Busaidi, A., Hazzard, J.F., Young, R.P., 2005, Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite, Journal Geophysical Research 110, B06302, DOI:10.1029/2004JB003297.
3. Amadei, B., 1982, The influence of rock anisotropy on measurement of stresses in situ, Ph.D. Thesis, University

- of California Berkeley.
4. Chitralla, Y., Moreno, C., Sondergeld, C., Rai, C., 2011, Microseismic and microscopic analysis of laboratory induced hydraulic fractures, CSUG/SPE 147321.
 5. Choi, S.O., Lee, H.K., 1995, The analysis of fracture propagation in hydraulic fracturing using artificial slot model, Tunnel and Underground Space, 5, 251-265.
 6. Choi, S.O., 2000, A numerical study of hydraulic fractures propagation with rock bridges, Tunnel and Underground Space, 10, 447-456.
 7. Choi, S.O., 2011, Numerical approach for determination of shut-in pressure in hydrofracturing test, Tunnel and Underground Space, 21, 2, 128-137.
 8. Choi, Y., Bae, S., Park, P., Lee, C., Jeon, S., 2001, Analysis of hydro-fracturing test results using a mechanical crack model, Tunnel and Underground Space, 11, 3, 237-247.
 9. Falls, S.D., Young, R.P., Carlson, S.R., Chow, T., 1992, Ultrasonic tomography and acoustic emission in hydraulically fractured Lac du Bonnet granite, J. Geophys. Res., 97, 6867-6884.
 10. Haimson, B.C., Fairhurst, C., 1967, Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, Soc. Pet. Eng. J., 9: 310-318.
 11. Hazzard, J.F., Young, R.P., Maxwell, S.C., 2000, Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks, J. Geophys. Res., 105(B7): 16683-97.
 11. Hazzard, J.F., Young, R.P., 2002, Moment tensors and micromechanical models, Tectonophysics, 356(1-3): 181-197.
 12. Hubbert, M.K., Willis, D.G., 1957, Mechanics of hydraulic fracturing, AIME, 210: 153-66.
 13. Ishida, T., 2001, Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field, Construction and Building Materials, 15, 283-295.
 14. Ishida, T., Chen, Q., Mizuta, Y., 2004, Influence of fluid viscosity on hydraulic fracture mechanism, Transaction of ASME, J. Energy Resource Technology, 126: 190-200.
 15. Lockner, D., Byerlee, J.D., 1977 Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress, J. Geophys. Res., 82(14): 2018-2026.
 16. Ohtsu, M., Kawasaki, Y. 2010, AE-SiGMA analysis in brazilian test and accelerated corrosion test of concrete, Journal of AE, 28: 204-214.
 17. Park, B.N., 2013, Discrete element modeling of anisotropic mechanical behaviors for transversely isotropic rock, M.S. Thesis, Seoul National University.
 18. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004, bonded particle model for rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41: 1329-64.
 19. Sasaki, S., 1998, Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at the Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Tectonophysics, 289(1-3), 171-188
 20. Schmitt, D.R., Zoback, M.D., 1993, Infiltration effects in the tensile rupture of thin walled cylinders of glass and granite: implications for hydraulic fracturing, breakdown equation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr., 14: 49-58.
 21. 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.
 22. Zhao, X.P., Young, R.P., 2009, Numerical simulation of seismicity induced by hydraulic fracturing in naturally fractured reservoirs, SPE 124690.
 23. Zhou, J., Chen, M., Jin, Y., Zhang, G., 2008, Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a triaxial fracturing system in naturally fractured reservoirs, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 45(7): 1143-1152.
 24. Zoback, M., Rummel, F., Jung, R., Raleigh, C., 1977, Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14: 49-58.

정재웅

2006년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2008년 서울대학교 에너지시스템공학
부 공학석사

Tel: 02-880-8703

E-mail: panda77@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 박사과정

허찬

2012년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사

Tel: 02-880-9304

E-mail: chans11@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 석사과정

전석원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학
원 공학석사

1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807

E-mail: sjeon@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 교수