

## 포천 화강암의 결 이방성이 수압파쇄거동에 미치는 영향

정성규, 장리, 염선, 김광염\*, 민기복

### Influence of the Cleavage Anisotropy of Pocheon Granite on Hydraulic Fracturing Behaviour

Sung-Gyu Jung, Li Zhuang, Sun Yeom, Kwang-Yeom Kim\*, Ki-Bok Min

**Abstract** In this study, laboratory hydraulic fracturing tests are carried out to evaluate the effects of the cleavage anisotropy of Pocheon granite. Breakdown pressure is smaller when cracks are generated to the direction of rift plane in constant pressurization rate condition because of higher microcracks density. Besides not only injection rate changes but also the amount of injection pressure for fracture initiation and crack expansion is detected while testing due to internal deformation. Pressurization rate is higher while hydraulic fracture testing with constant injection rate condition in case of the specimen which has rift plane perpendicular to borehole because there are much flow paths to penetrate compared to the specimen which has hardway plane perpendicular to borehole. Observation by X-ray CT scanning shows that almost all of cracks due to hydraulic fracturing are generated to the direction of plane which has higher microcrack density that is rift plane or grain plane.

**Key words** Hydraulic fracturing, Pocheon granite, Breakdown pressure, Microcracks, X-ray CT

**초 록** 본 연구에서는 화강암 내부의 미세균열 분포에 따른 이방성이 수압파쇄실험 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 압력증가율을 일정하게 설정하여 수압파쇄실험을 수행한 결과, 원주방향(주입정 방향과 직교)으로 리프트면이 분포한 시료의 파쇄압력이 가장 낮게 측정되었고, 이는 미세균열의 밀도가 높기 때문이다. 수압파쇄실험 과정에서 시료 내부의 변화가 발생하는 주입압력의 크기와 유체 주입속도의 변화 또한 결방향에 따라 분포한 미세균열의 밀도와 관계가 있는 것으로 판단된다. 유체주입속도를 일정하게 설정하여 수압파쇄실험을 수행하였을 경우, 상대적으로 미세균열의 밀도가 높은 리프트면이 원주방향으로 분포된 시료에서 주입압력증가율이 낮게 나타났고, 유체가 침투될 수 있는 균열망이 상대적으로 적게 형성된 그레인면 및 하드웨이면이 원주방향으로 분포된 시료에서는 압력증가율이 높게 나타났다. X-ray CT 촬영을 통해 시료 내부에 생성된 균열의 방향을 확인한 결과, 대부분의 시료에서 리프트면 혹은 그레인면과 평행한 방향으로 균열이 생성된 것을 확인하였고, 이는 암석 내에 상대적으로 미세균열의 밀도가 높아서 분리성이 크기 때문이다.

**핵심어** 수압파쇄, 이방성, 미세균열, 결방향, 포천 화강암, 파쇄압력

## 1. 서 론

전 세계적으로 전통적인 에너지원의 고갈과 기후협약에 따른 온실가스 감축을 위한 대체에너지의 요구로 인해 지열에너지의 활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 지열에너지 활용 중 지열발전은 화산지대에서 주로 활용되는 전통적인 방식의 열수형 발전과 최근에 상용화가 진행되고 있는 비화산지대에서의 인공 지열 저류층 생성방식인 EGS(Enhanced Geothermal System) 방식으로 크게 분류된다. EGS방식은 높은 온도가 분포하고

**Received:** Aug. 17, 2016

**Revised:** Aug. 29, 2016

**Accepted:** Aug. 29, 2016

**\*Corresponding Author:** Kwang Yeom Kim

(Tel) +82319100225, (Fax) +82319100561

(E-Mail) kimky@kict.re.kr

(Daehwa-Dong) 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Hyeonggi-Do, 411-712, Korea, Korea Institute of civil Engineering and Building Technology, Geotechnical Engineering Research Division

있는 땅 속에 시추작업을 통해 지열정을 생성하고 수압을 통해 인공적으로 균열을 생성시킴으로써 암반의 투수율을 증가시키는 것이 핵심 기술이다. 이미 해외에서는 1980년대부터 많은 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 유럽을 중심으로 본격적인 상업목적의 발전소가 성공적으로 건설되고 있다. 국내에서도 경상북도 포항 지역에서 EGS를 활용한 지열발전 프로젝트가 진행 중이다(Yoon et al., 2011). 현재까지 상용화 되었거나 개발이 진행 중인 EGS 지열발전 현장 대부분은 기반암이 화강암과 같은 결정질 암반이다. 결정질 암반은 조직이 매우 치밀하고 공극률과 투수계수가 매우 낮은 것이 일반적이다. 따라서, 결정질 암반에서의 투수성은 주로 주변에 분포하는 단층이나 암반 내 균열 등의 불연속구조에 의해 영향을 받는다.

암반 내 분포하는 균열은 인장력과 전단력에 의해 발생한다. 화강암의 경우, 일반적으로 상대적인 분리성에 따라 결(rock cleavage)이라고 하는 세 방향의 직교하는 이방성이 존재한다는 것으로 알려져 있고, 형성되는 과정에서 온도와 압력에 따른 광물의 배열 및 미세균열의 형성과 관련이 높은 것으로 알려져 있다(Park et al., 2004). Osborne(1935)은 Quebec 주에 분포하는 화강암에서 인장력에 의해 쉽게 분리되는 서로 직교하는 리프트(rift), 그레인(grain), 하드웨이(hardway) 면이 존재한다고 밝혔고, 리프트면은 석영의 특성, 그레인면은 온도와 압력이 변화하면서 판상의 광물이 배열되는 방향, 하드웨이면은 지질 구조로 인한 균열 등에 의해 생성된다고 하였다. 화강암 내 발생된 균열은 이러한 결의 방향과 평행한 방향으로 발달되어 있으며, 대부분 조성광물 내에 존재하는 미세균열의 우세방향과 일치하는 것으로 보고된다. 또한, 현저응력에 의한 전단성 균열이 우세하게 발달되어 있지 않은 경우에는 거시적인 균열의 방향이 미세균열의 방향성과 관련이 높다고 알려져 있다(Lee et al., 2004). 따라서, 실험실 규모에서 결에 대한 기하학적 특성, 역학적 특성과의 상관관계, 거시적인 암반의 거동에 미치는 영향 등이 지속적으로 연구되어 오고 있다. Fujii et al.(2007)은 사진 측량으로 파쇄면의 형상을 측정하기 위해 사용한 일본의 이나다(Inada) 화강암에서도 리프트면과 그레인면, 하드웨이면이 서로 수직을 이룬다고 하였다. 국내에서도 Lee et al.(1999-1)는 차분변형률 분석을 실시, 화강암 내에 발달하는 미세균열의 이방성을 밝혔다. Lee et al.(1999-2)은 현미경 관찰에 의하여 리프트면, 그레인면 및 하드웨이면을 제시하였다. Baek et al.(1998), Jang et al.(1995)은 압축피로시험, 점하중재하시험, 박편관찰을 통해 미세균열과 암반의 거시적인 거동과의 관련성 연구를 수행하였다.

한편, 수압파쇄를 통해 형성된 균열 네트워크는 투수율을 증가시키는 역할을 하며, 이는 지열발전의 효율과 직접적인 관계가 있다. 따라서, 수압파쇄 시 대상암반의 거동 특성을 예측하고 평가하는 것은 매우 중요하다. Zoback et al.(1977)은 침투성이 높은 Weber 사암과 Ruhr 사암을 사용하여 압력 증가량에 따른 파쇄압력의 증가 양상을 확인했다. Haimson and Fairhurst(1969)와 Solberg et al.(1980)의 연구에서도 주입속도에 따른 파쇄압력의 증가가 확인되었지만, Zeng and Roegiers(2002)의 연구에서는 반대 결과를 보이기도 하였다. 또한, 주입 유체의 점도와 종류에 따라 암석의 수압파쇄 거동 및 파괴 거동에 상당한 변화가 있음을 확인한 연구도 다양하게 진행되었다(Ishida et al., 2004; Bohlooli and Pater, 2006; Shimizu et al., 2011). Ishida et al.(2012)은 초임계 CO<sub>2</sub>와 물을 주입유체로 사용한 실험 결과로부터 주입유체의 점도가 증가할수록 파쇄압력이 증가함을 보였다. 전통적인 석유와 가스 산업에서의 수압파쇄는 대상암반의 거동 특성에 대한 충분한 연구자료 및 현장 데이터가 존재하기 때문에 기술적 불확실성이 다른 분야에 비해 상대적으로 적다. 하지만 결정질암반에서의 수압파쇄는 EGS 지열발전이 도입되면서 본격적으로 연구가 진행되고 있기 때문에 아직까지 충분한 메커니즘 규명이 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 EGS 지열발전을 위한 수압파쇄 시 화강암의 결방향 특성이 수압파쇄 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 또한, 결방향에 따른 수압파쇄거동의 차이를 평가하기 위해 압력증가를 및 유체주입속도에 따른 실내 수압파쇄실험을 수행하였고, 미세균열의 분포가 파쇄압력 및 시료 내부 구조 변화에 미치는 영향을 분석하였다. X-ray CT 촬영을 통해 시료 내부에 생성된 균열의 방향과 미세균열 밀도의 관계도 고찰하였다.

## 2. 실험 조건 및 방법

### 2.1 시편 준비

본 연구에서 사용한 대상 암석은 포천화강암으로서 화강암은 국내외 많은 EGS 지열 현장에서 수압파쇄의 대상이 되고 있는 암종이다. 특히, 포천 화강암은 지금까지 많은 연구를 통해 결방향에 따른 이방성이 매우 뚜렷이 나타나는 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2014; Park, 2004). 포천 화강암은 석영(32.7%), 사장석(29.3%), 정장석(4.8%), 미사장석(15.3%), 퍼다이트(13.4%), 흑운모(3.1%) 등으로 구성되어 있다(Park et al., 2005). 일반적으로 화강암에는 직교하는 세 방향의 결이 존재하고, 암석 내부에는 결 방향에 따라 미세균열의 분포가

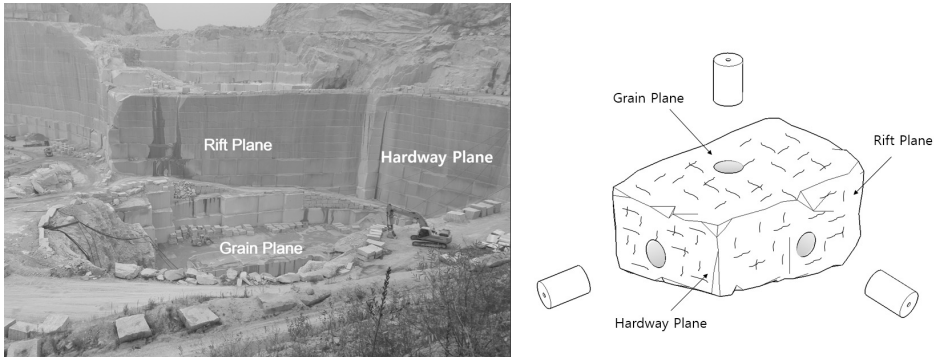


Fig. 1. Direction of rift, grain and hardway plane of granite

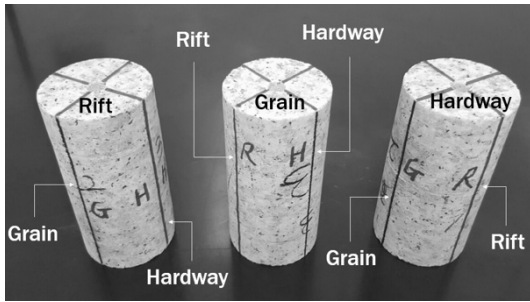


Fig. 2. Type of specimens for hydraulic fracturing tests

다르다. Fig. 1과 같이 채석장에서는 분리되는 정도가 용이한 순서대로 리프트면 (1결), 그레인면 (2결), 하드웨이면 (3결)으로 각각 명명하기도 하며, 이는 암석 내부의 미세균열 분포와 관련이 있다고 할 수 있다. 수압파쇄실험을 통해 화강암의 강도 이방성 및 미세균열 밀도에 대한 영향을 확인하기 위해 각 면에 대해 수직으로 직경 50 mm, 높이 100 mm인 시편을 추출하였다.

Fig. 2처럼 하나의 결방향과 수직인 방향으로 나머지 두 개의 결방향인 존재하는 시료에 대해 중앙에 직경 8 mm, 길이 100 mm 인 홀을 형성하여 수압파쇄용 시료를 가공하였다. 가공 후에는 각 시료의 함수율이 실험 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 24시간 건조 후 실험을 수행하였다. 리프트면, 그레인면, 하드웨이면에 대해 수직으로 코어링한 시료는 각각 R시료, G시료, H시료로 나타내었다. 한편, Diaz et al.(2016)의 기존 연구에서는 포천 화강암에 대한 간접인장강도시험을 수행하여 결방향에 따른 강도 차이를 분석하였는데, 리프트면, 그레인면, 하드웨이면과 평행한 면에 대해 각각 6.1 MPa, 8.2 MPa, 8.8 MPa로 리프트면이 가장 낮은 응력에서 분리되었다.

### 2.2 실험 장비 및 절차

Fig. 3은 본 연구에 사용한 수압파쇄실험 장비의 개요도를 나타낸다. 수압파쇄실험 장비는 크게 유압 펌프, 압력제어장치, 삼축셀, 데이터 처리 시스템으로 나눌 수

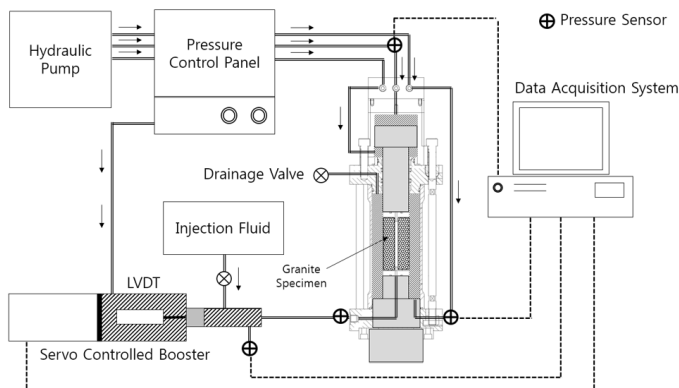
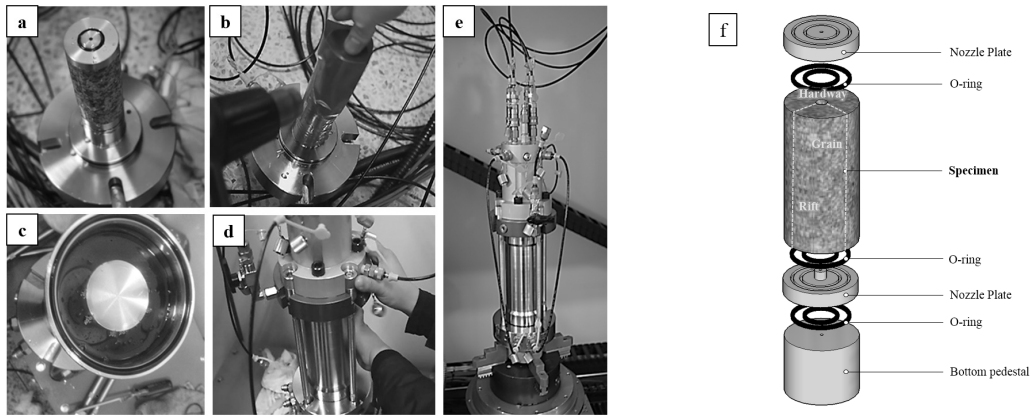


Fig. 3. Schematic diagram of laboratory hydraulic fracturing system

**Table 1.** Specifications of hydraulic fracturing equipment and X-ray CT scanning device

Size of specimen	$\Phi$ 50 mm $\times$ 100 mm
Max. confining pressure	21 MPa
Max. vertical pressure	51.2 MPa
Max. injection pressure	35 MPa
Volume of triaxial cell	875 cm <sup>3</sup>
Allowable injecting condition	Continuous & Cyclic Injection (Pressurization rate control/ Injection rate control)
Allowable injection fluid	Water & Oil
Max. size of 3-D CT scanning	$\Phi$ 300 mm $\times$ 900 mm (h)
Radiation energy of X-ray	40 kV ~ 320 kV



**Fig. 4.** Test procedure for hydraulic fracture experiment. a) locating granite specimen on pedestal, b) covering specimen with plastic membrane, c) filling oil inside of tri-axial cell, d), e) applying vertical and confining pressure to specimen, f) specimen with O-ring installation

있다. 유압 펌프에서 20 MPa의 압력을 지속적으로 공급하고, 압력제어장치에서 원하는 조건의 수평압력 및 수직압력을 조절할 수 있다. 시료 내부로는 서보 방식의 주입 장치를 통해 유체가 주입되고, 주입 장치 내부에 설치된 스트로크(stroke)의 이동거리에 따라 압력 증가 및 유체 주입량을 조절할 수 있다. 수평압력과 수직압력, 주입압력을 가하기 위해 설치된 유체 주입구에는 각각 압력 센서가 부착되어 있어 실험 과정에서 가해지는 압력을 측정할 수 있다. 수압파쇄용 삼축압축셀은 X-ray CT(Computed Tomography) 챔버 내부 혹은 외부에 설치하여 수압파쇄실험을 진행하면서 시료 내부에 발생하는 물리적 변화를 X-ray CT 촬영을 통해 확인할 수 있도록 제작되었다. Table 1에 나타난 수압파쇄실험 장비의 사양과 같이 최대 35 MPa의 주입압력, 21 MPa의 구속압력, 51.2 MPa의 수직압력을 가할

수 있고, 물과 기름을 주입유체로 사용할 수 있도록 설계되었다.

기본적인 수압파쇄실험 절차는 Fig. 4에 나타내었다. 먼저, 화강암 코어 시료를 삼축셀 하부에 위치시키고(Fig.4(a)), 수축 테이프를 사용하여 고정시킨다(Fig.4(b)). 이때, 시료 상하부로 누수가 발생하지 않도록 O-링이 결합된 노즐 플레이트를 시료 중앙에 각각 삽입한다(Fig.4(f)). 구속압력을 가하기 위해 삼축셀 내부에 기름을 채운 후(Fig.4(c)), 삼축셀 상부를 조립하면 실험 준비가 완료된다(Fig.4(d)). 수압파쇄실험 시 사용한 시료의 결방향, 구속압력, 수직압력, 유체의 주입속도 조건은 Table 2에 나타내었고, 수압파쇄실험이 완료된 후에는 시료 내부에 발생한 균열을 X-ray CT 촬영을 통해 확인하였다.

**Table 2.** Test conditions for hydraulic fracturing tests

Specimen #	Plane Direction	Vertical Pressure (MPa)	Confining Pressure (MPa)	Pressurization Rate (MPa/s) or Injection Rate (mm <sup>3</sup> /s)	Breakdown Pressure (Maximum Pressure) (MPa)
1	Rift	25.6	5	0.1 MPa/s	13.6
2	Rift				14.1
3	Rift				14.0
4	Rift				14.1
5	Grain				11.6
6	Grain				12.1
7	Grain				11.8
8	Grain				12.8
9	Grain				12.7
10	Hardway				12.4
11	Hardway				10.5
12	Hardway				10.6
13	Rift		0	25 mm <sup>3</sup> /s	8.1
14	Rift			50 mm <sup>3</sup> /s	7.2
15	Rift			10 mm <sup>3</sup> /s	4.2 (Not failed)
16	Hardway			10 mm <sup>3</sup> /s	3.1 (Not failed)
17	Hardway			50 mm <sup>3</sup> /s	6.0
18	Hardway			25 mm <sup>3</sup> /s	5.8 (Not failed)

### 3. 실험 결과

#### 3.1 압력제어에 따른 파쇄압력 평가

압력제어로 수압파쇄실험을 수행하는 경우에는 단위 시간에 따른 압력 증가량이 일정하게 실험 조건을 설정한다. 시료의 결방향에 따른 수압파쇄 거동 차이를 평가하기 위해 구속압력 5 MPa, 수직응력 25.6 MPa 조건에서 주입유체의 압력 증가율을 0.1 MPa/s 로 일정하게 설정하여 파쇄압력(breakdown pressure)을 평가하였다. 본 연구에서는 수평응력과 수직응력의 비는 고려하지 않았으며, 수직응력은 수압파쇄를 위한 주입압력 가압시 공 상하부의 패커 역할을 위해 적용하였다. 압력이 급격히 감소하는 지점에서의 압력을 파쇄압력으로 간주하여 시료의 결방향에 따른 파쇄압력의 크기 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 누적된 유체 주입량에 따른 주입압력의 변화를 나타내는 곡선에서 주입압력이 증가하다가 순간적으로 압력이 급격히 감소하는 형태를 확인할 수 있다. 이는 균열 발생으로 인해 시료 내부의 공극이 확장되어 부피가 증가하여 발생하는 현상이고,

압력이 감소한 이후에는 시험 조건으로 설정한 압력 증가율(0.1 MPa/s)을 유지하기 위해 주입되는 유체의 양이 급격히 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 시험 결과, R 시료 4개, G 시료 5개, H 시료 3개의 파쇄압력의 평균값은 각각 13.9 MPa, 12.2 MPa, 11.2 MPa으로 R 시료에서 가장 높은 파쇄압력을 나타낸 것을 확인하였다. R 시료에는 그레인면과 하드웨이면이 균열 생성이 가능한 면에 해당되는데, 미세균열의 밀도가 낮으므로 상대적으로 높은 압력에서 균열이 발생하였다. 반면, G 시료 및 H시료에서는 미세균열의 밀도가 높은 리프트면으로 균열이 발생하였으므로 상대적으로 낮은 압력에서 균열이 발생하였다고 판단된다.

한편, 유체를 주입시키기 시작한 시점부터 일정 구간까지는 압력의 증가와 관계없이 주입되는 유량의 변화가 거의 없는데, 시료 내부에서 균열이 발생하기 시작하는 등 구조적으로 미세한 변화로 인해 유체 주입속도 또한 증가하는 경향을 나타내었고, 변화하기 시작하는 시점 또한 결방향에 따라 차이를 나타내는 것을 확인하였다. 이렇게 시료가 파괴되기 전에 시료 내부에서 조

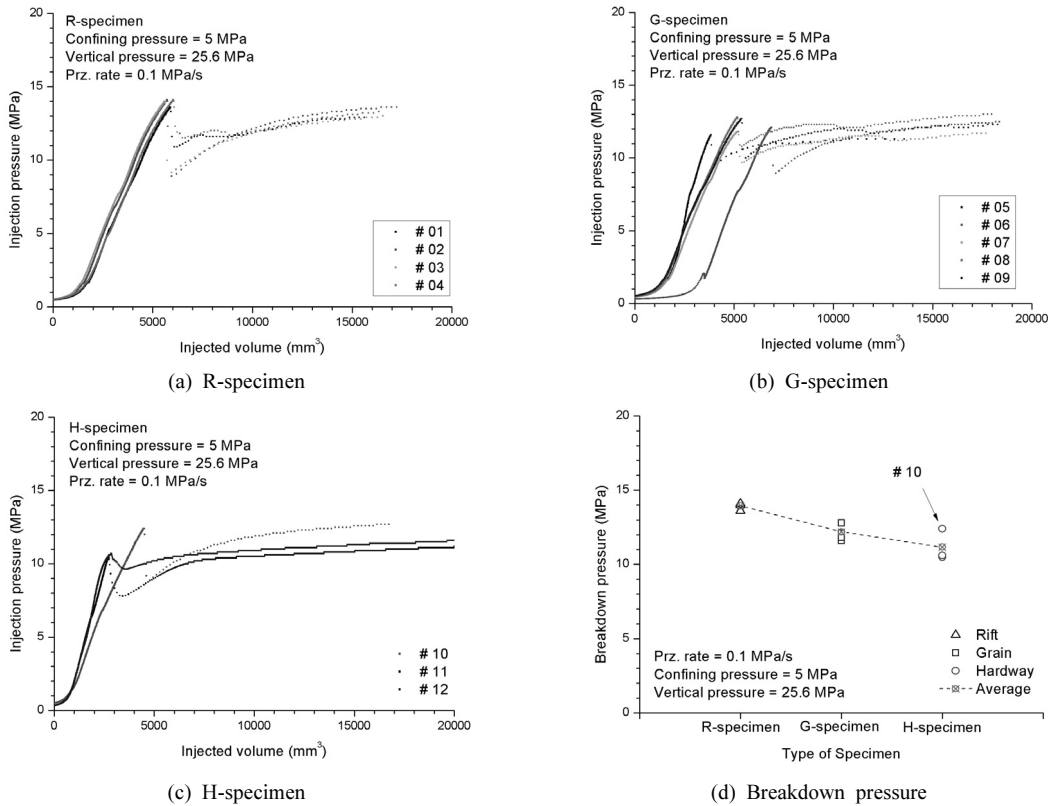


Fig. 5. Hydraulic fracturing test results in case of pressurization rate control under different plane directions of specimens

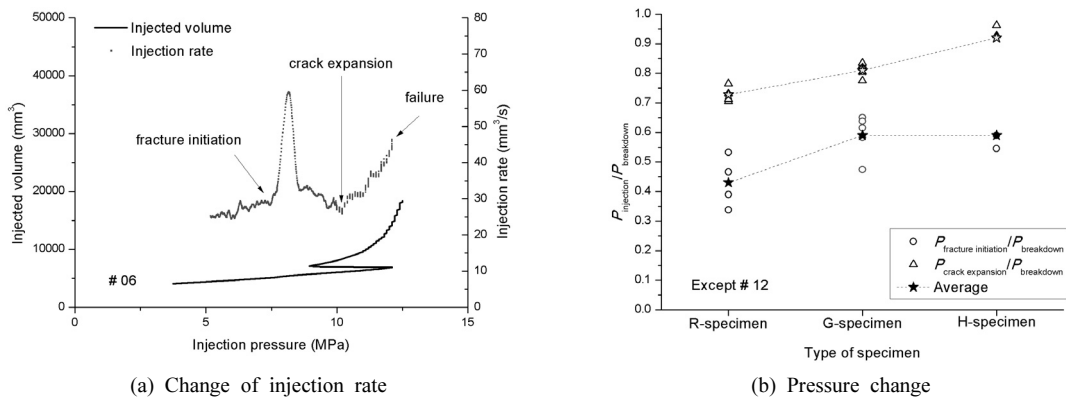


Fig. 6. The effects of microcrack density on pressure change due to crack generation

금속 균열이 생성되는 등 공극의 변화가 발생하면서 주입되는 유체의 양은 점점 증가하다가 적정 수준의 압력에 도달하게 되면 시료가 파괴된다. Fig. 6(a)와 같이 주입압력이 증가함에 따라 유체 주입 속도의 변화는 초기에 큰 변화가 없다가 특정 구간을 지나면 시료 내부로

주입되는 유체의 양이 급격하게 증가하는 구간을 확인할 수 있는데, 이렇게 주입속도가 변화하기 시작하는 지점을 시료 내부의 공극 구조에 변화가 발생하는 지점으로 간주할 수 있다. 초기에 균열이 발생하기 시작하는 시점(fracture initiation)을 지나 암석 시료가 파괴되

기 직전에는 유체 주입속도가 급격히 증가하는 구간이 발생하게 되는데, 이 구간은 초기에 발생한 균열이 점점 확장되는 구간으로 볼 수 있다. 초기 균열 발생시점이 불분명하게 나타난 10번 시료의 시험결과를 제외하고, 파쇄압력에 대한 주입속도 변화 시점의 압력을 각 시료에 대해 평가한 결과는 Fig. 6(b)와 같다. R시료의 경우, 파쇄압력에 대해 약 43%가 되는 압력에서 균열이 처음 생성되기 시작하였고, G시료, H시료의 경우에는 파쇄압력에 대해 약 59% 정도의 압력에서 균열이 발생하기 시작하였다. 균열이 생성된 이후, R시료, G시료, H시료에 대해 각각 파쇄압력 대비 평균 약 72%, 81%, 91% 수준의 압력에서 주입속도가 증가하기 시작하여 파괴에 이르는 것으로 확인되었다.

**3.2 주입속도 제어 시 파쇄압력 및 압력 증가율 평가**

시료 내부의 미세균열 분포는 수압파쇄 거동에도 영향을 미치고, 이를 확인하기 위해 결방향의 영향이 두드러지는 R시료와 H시료를 사용하여 구속응력 0 MPa, 수직응력 25.6 MPa 조건에서 서로 다른 주입속도(10 mm<sup>3</sup>/s, 25 mm<sup>3</sup>/s, 50 mm<sup>3</sup>/s)를 적용하여 수압파쇄실험을 수행하였다. Fig. 7은 각 결방향 시료(R시료 및 H

시료)의 주입유체량에 따른 주입압력의 크기와 압력증가율을 비교한 결과이다. R시료의 경우에는 주입속도가 10 mm<sup>3</sup>/s일 때, H시료의 경우에는 주입속도가 10 mm<sup>3</sup>/s, 25 mm<sup>3</sup>/s일 때에는 일정 크기의 주입압력으로 수렴하는 경향을 나타내었다. 주입속도가 낮은 경우에는 시료 내부로 침투된 주입유체가 공극을 통과하여 시료 표면으로 유출되면서 균열을 생성시키기 위한 압력의 크기까지 도달하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 동일한 주입속도 조건에서는 R시료를 사용한 경우에 최대주입압력(균열이 생성된 경우에는 파쇄압력)이 더 크게 나타난 것을 확인하였고, 압력 증가율도 R시료에서 크게 나타났다.

동일한 양의 유체가 주입될 경우, 시료 내부로 유체가 확장될 수 있는 경로가 넓을수록 압력의 증가율은 낮아지는데, R시료의 경우에는 횡방향으로 미세균열의 밀도가 낮은 그레이면 및 하드웨이면이 분포되어 있어 압력 증가율이 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 동일한 유체 주입속도 하에서 미세균열의 밀도가 높은 리프트면 및 그레이면이 횡방향으로 분포한 H시료에 비해 미세균열의 밀도가 낮은 그레이면 및 하드웨이면이 횡방향으로 분포한 R시료에서 상대적으로 높은 파쇄압력을

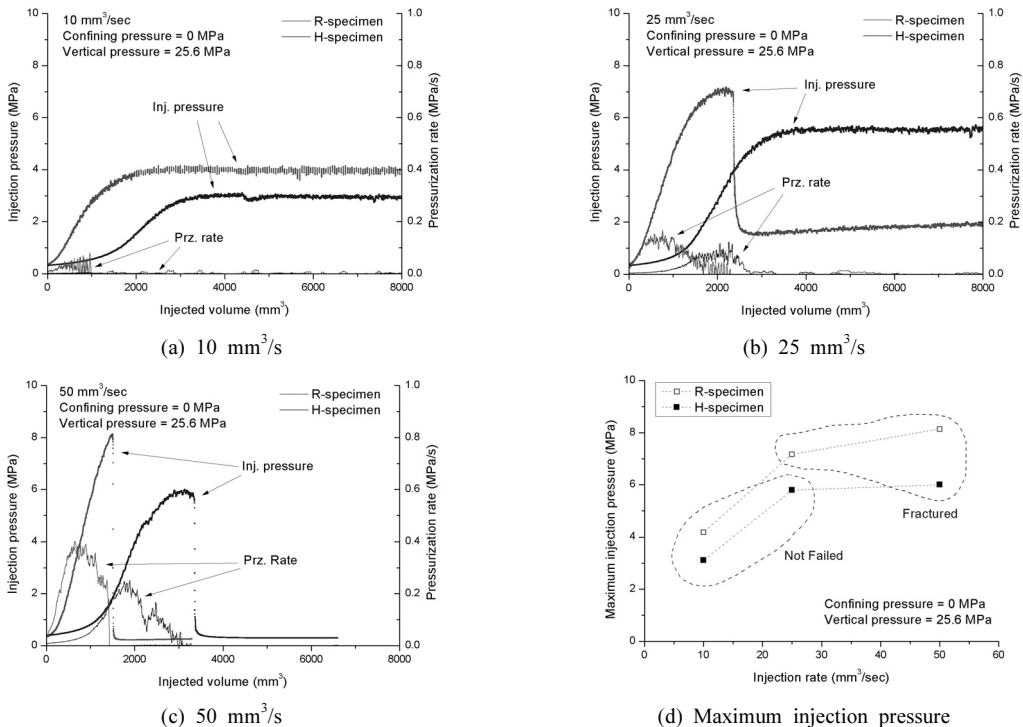


Fig. 7. Hydraulic fracturing test results in case of injection rate control

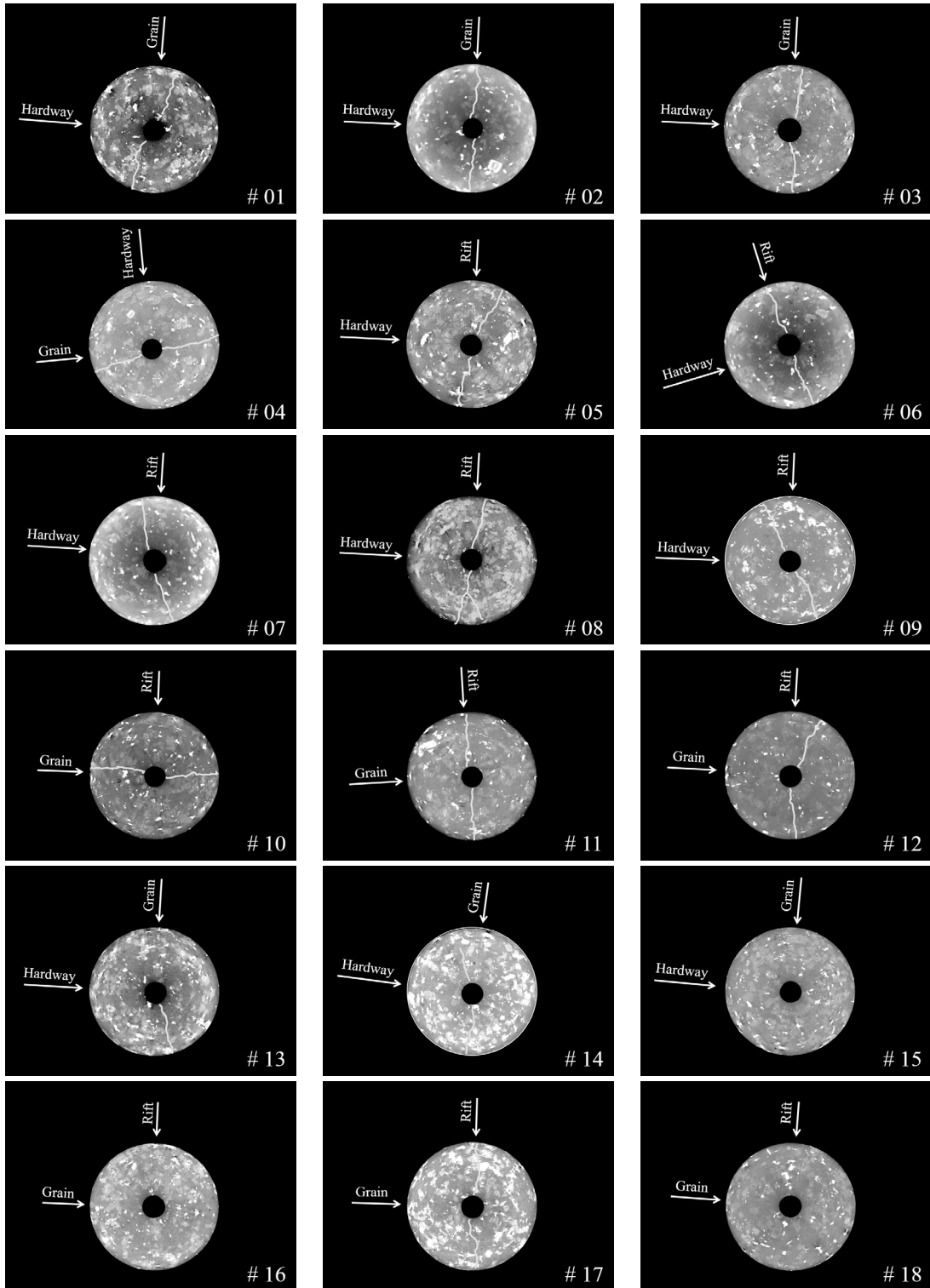


Fig. 8. Fracture induced by hydraulic fracturing in Pocheon granite



나타내었다. 한편, 유체 주입속도가 낮은 경우에는 파쇄 압력에 도달하기 전에 내부로 침투된 유체가 외부로 유출되면서 시료가 파괴되지 않고 주입압력이 수렴하는 경향을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 시료의 결방향에 따라 생성된 균열의 방향

수압파쇄실험 시 시료의 수직방향으로 작용하는 응력이 횡방향 응력보다 클 경우에는 주입공과 평행한 방향으로 균열이 생성된다. 또한, 시료 내부에 분포한 결 중 상대적으로 결합력이 약한 결방향과 평행하게 균열이 발생할 확률이 높다. 이를 확인하기 위해 수압파쇄실험이 종료된 시료에 대해 X-ray CT 촬영을 수행하였고, Fig. 8의 시료 단면 촬영 사진을 통해 시료 내부에 생성된 균열의 방향을 확인하였다. 촬영 결과에서 확인할 수 있듯이, 주입속도가 작아 시료가 파괴되지 않은 실험(15번, 16번, 18번)을 제외한 총 15개의 시료 중, 10번 시료를 제외한 14개의 시료 (90% 이상)에 대해 수직 방향으로 형성된 결방향 중 결합력이 약한 방향으로 균열이 생성되었다. 즉, R시료의 경우에는 하드웨이면에 비해 결합력이 약한 그레인면과 평행한 방향으로 균열이 생성되었고, G시료, H시료의 경우에는 그레인면과 하드웨이면에 비해 상대적으로 결합력이 약한 리프트면과 평행한 방향으로 균열이 생성된 것을 알 수 있다. 시료 자체가 비교적 균질하다면 일반적으로 주입공을 기준으로 대칭하는 양방향 균열이 생성되는데, 실제로 수압파쇄실험시 생성되는 균열의 형상과 생성 방향, 개수는 원석 채취시의 정확도, 구성 광물의 분포, 시료 코어 링의 정밀도, 주입공 가공의 정밀도, 시료 손상 여부, 주입 유체의 종류와 주입 방식 등 다양한 원인에 의해 결정될 수 있다. 이와 같은 원인으로 본 실험 결과에서도 비대칭 형태로 균열이 생성되거나 상대적으로 결합력이 강한 방향과 평행한 균열이 생성(10번 시료)되는 현상이 일부 발견되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 화강암 내부의 미세균열 분포에 따라 나타나는 강도 이방 특성을 평가하기 위해 포천지역에서 추출한 화강암 시료를 사용하여 수압파쇄실험을 수행하였다. 수압파쇄실험 시 결방향에 따른 파쇄압력의 크기, 시료 내부의 변화에 따른 변화 및 시료 내부에 생성된 균열의 방향을 평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

시료의 원주방향으로 그레인면 및 하드웨이면이 분포되어 있는 시료의 파쇄압력이 가장 높게 측정되었고, 원주방향으로 리프트면이 포함된 시료의 파쇄압력은

서로 유사하게 평가되었다. 수직압력이 구속압력보다 높은 경우에는 종방향으로 균열이 발생하게 되는데, 압력이 증가하면서 생성되는 균열은 미세균열의 밀도가 높은 방향으로 형성된다. 따라서 미세균열의 밀도가 상대적으로 높은 리프트면으로 균열이 발생하면 파쇄압력이 상대적으로 작고, 미세균열의 밀도가 낮은 그레인면 및 하드웨이면이 분포한 시료의 파쇄압력은 높게 나타난 것이다.

암석 내부의 미세균열 분포는 시료 내부로 주입되는 압력증가율의 변화에도 영향을 미친다. 동일한 유체 주입속도 조건에서는 시료의 원주방향으로 그레인면 및 하드웨이면이 분포했을 경우에는 리프트면이 분포했을 때에 비해 압력증가율이 높게 나타났고, 원주방향으로 유체가 침투할 수 있는 경로가 상대적으로 적게 분포한다고 볼 수 있다. 한편, 시료의 종류에 따라 파쇄압력 대비 균열이 생성되는 시점의 압력과 균열이 확장되는 시점의 압력에도 차이가 있는 것을 확인하였다.

수압파쇄실험을 통해 생성된 균열의 방향은 X-ray CT 촬영으로 확인하였다. 시료의 원주방향으로 리프트면이 분포한 시료에서는 대부분 리프트면과 평행한 방향으로 균열이 생성되었고, 원주방향으로 그레인면 혹은 하드웨이면이 분포한 시료에서는 모두 그레인면과 평행한 방향으로 균열이 생성되었다. 이와 같은 결과를 통해 미세균열의 밀도가 높아 분리성이 큰 결방향으로 균열이 생성되는 것을 알 수 있다.

## 사 사

본 연구는 산업통상자원부 지원으로 한국에너지기술평가원에서 주관하는 신재생에너지융합원천기술개발 핵심기술개발사업(과제번호: 20133030000240), 한국에너지기술평가원 지식경제기술혁신사업(과제번호: 20123010110010)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. Baek, H. J., Kim, D. H., Choi, S. B., 1998, Study on the prediction of the occurrence and distribution of the microcracks in rock, *J. Tunnel and Underground Space*, Vol. 8, 226-233.
2. Bohloli, B., and De Pater, C. J. 2006. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 53, 1-12.
3. Diaz, M. B, Jung, S. G., Zhuang, L., Kim, K. Y., Shin, H. S., 2016, Effect of cleavage anisotropy on hydraulic fracturing behavior of Pocheon granite. *Proceedings of*

- the 50th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Houston, Vol. 1, 26-29.
4. Fujii, Y., Takemura, T., Takahashi, M., and Lin, W. 2007, Surface features of uniaxial tensile fractures and their relation to rock anisotropy in Inada granite. *Int J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, 98-107.
  5. Haimson, B., and Fairhurst, C., 1969, Hydraulic fracturing in porous-permeable materials. *J. Petroleum Technology*, Vol. 21, 811-817.
  6. Ishida, T., Chen, Q., Mizuta, Y., and Roegiers, J. C., 2004, Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism. *J. Energy Resources Technology*, Vol. 126, 190-200.
  7. Ishida, T., Aoyagi, K., Niwa, T., Chen, Y., Murata, S., Chen, Q., and Nakayama, Y. 2012, Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39.
  8. Kang, T. H., Kim, K. Y., Park, D. W., Shin, H. S., 2014, Influence of anisotropy of microcrack distribution in Pocheon granite rock on elastic resonance characteristics, *J. Eng. Geology*, Vol. 24, 363-372.
  9. Lee, B. D., Jang, B. A., Yun, H. S., Lee, H. Y., Jin, M. S., 1999-1, Characteristics of microcrack development in granite of the Mungyeong area in Korea, *J. Petrological Society of Korea*, Vol. 8, 24-33.
  10. Lee, S. E., Cho, S. H., Yang, H. S., Park, H. M., 1999-2, Estimation of micro-discontinuity distribution using scanline survey in granites, *J. Tunnel and Underground Space*, Vol. 9, 364-372.
  11. Lee, H. S., Shen, B., Stephansson, O., 2004, A boundary element analysis for damage and failure process of brittle rock using FRACOD, *J. Tunnel and Underground Space*, Vol. 14, 248-260.
  12. Jang, B. A., Kim, J. D., 1995, Microcrack development in gabbro, sandstone and marble due to fatigue stress, *J. Tunnel and Underground Space*, Vol. 5, 240-250.
  13. Osborne, F. F. 1935, Rift, grain, and hardway in some Pre-Cambrian granites, *Economic Geology*, Vol. 30, 540-551.
  14. Park, D. W., 2005, Mechanical anisotropy of Pocheon granite under uniaxial compression, *J. Eng. Geology*, Vol. 15, 337-348.
  15. Park, D. W., Kim, H. C., Lee, C. B., Hong, S. S., Chang, S. W., Lee, C. W., 2004, Characteristics of the rock cleavage in Jurassic granite, Pocheon, *J. Petrological Society of Korea*, Vol. 13, 133-141.
  16. Shimizu, H., Murata, S., and Ishida, T., 2011, The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution. *Int J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, 712-727.
  17. Solberg, P., Lockner, D., and Byerlee, J. D., 1980, Hydraulic fracturing in granite under geothermal conditions. *Int J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 17, 25-33.
  18. Yoon, W. S., Song, Y. H., Lee, T. J., Kim, K. Y., Min, K. B., Cho, Y. H., Jeon, J. U., 2011, Research background and plan of enhanced geothermal system project for MW power generation in Korea, *J. Tunnel and Underground Space*, Vol. 21, 11-19.
  19. Zeng, Z., and Roegiers, J. C., 2002, Experimental Observation of injection rate influence on the hydraulic fracturing behavior of a tight gas sandstone. In *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. Proc. Society of Petroleum Engineers*. Vol. 1.
  20. 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 Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 14, 49-58.



### 정성규

2012년 한동대학교 공간환경시스템공학부 공학사  
2014년 과학기술연합대학원대학교(UST) 지반신공간공학과 공학석사

Tel: 031-9100-237  
E-mail: fortheothers@kict.re.kr  
현재 과학기술연합대학원대학교(UST) 지반신공간공학과 박사과정



### 염선

2004년 원광보건대학교 방사선학 공학사

Tel: 031-9950-863  
E-mail: duatjs@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구소 X-ray CT 안전관리자



### 민기복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
2004년 스웨덴 왕립공과대학(Royal Institute of Technology) 공학박사

Tel: 02-880-9074  
E-mail: kbmin@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 부교수



### Li Zhuang

2004년 Southwest Jiaotong 대학교 토목공학과 공학사  
2009년 Tongji대학교 대학원 도로 및 철도공학과 공학박사  
2013년 Yamaguchi대학교 대학원 지반환경공학과 박사

Tel: 031-9100-260  
E-mail: zhuangli@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원



### 김광염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 031-9100-225  
E-mail: kimky@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원