

## 흑운모화강암 지역에 대한 수압암반절개기술의 현장 적용

박종오, 이달희, 우 익\*

### Field Application of Hydraulic Rock Splitting Technique to Biotite Granite

Jongoh Park, Dal-Heui Lee, Ik Woo\*

**Abstract** Hydraulic rock splitting is a technique which leads to failure of rockmass by means of water injection with a pressure higher than the tensile strength of rockmass, using straddle packer installed in boreholes drilled from free surface. Field tests were conducted in this study for several slopes of biotite granite according to various designs for borehole layout and water injection. Test results showed that new cracks were generated to connect to adjacent holes or that pre-existed cracks were propagated by injection, finally leading to failure. In particular, this study suggests the possibility of controlling the direction of generated cracks with guide slot, since new cracks were generated parallel to the guide slots carved on a borehole wall before injection. Various types of borehole layout and injection methods should be further developed for the practical uses, considering the factors influencing on crack generation.

**Key words** Hydraulic rock splitting, Guide slot, Crack generation, Layout design, Biotite granite

**초 록** 수압암반절개기술은 천공된 시추공에 설치된 이중패커의 인터벌에 암반의 인장응력 이상의 수압을 가하여 균열을 발생시킴으로써 암반을 절개시키는 방법이다. 본 연구에서는 흑운모화강암 사면에 대하여 다양한 배열설계 및 주입설계에 따라 수압암반절개기술을 현장에 적용하였다. 실험 결과, 주입에 따라 새로운 균열이 발생되어 주변 공과 연결되거나 기존 균열이 연장되어 암반이 파괴되었다. 특히, 본 실험에서는 유도 슬롯과 평행한 방향을 지닌 균열이 발생되어 균열 생성방향을 제어할 수 있는 가능성을 제시하였다. 균열생성에 대한 제어 기술을 발전시키기 위해선, 균열생성에 영향을 미치는 여러 요소를 고려한 다양한 배열설계 및 주입설계를 암반 현장에 적용하여야 할 것이다.

**핵심어** 수압암반절개, 유도슬롯, 균열생성, 배열설계, 주입설계, 흑운모화강암

## 1. 서 론

암반에 대한 수압파쇄기술은 암반 내의 응력 방향 및 크기와 밀접한 관계를 지니는 방법(Haimson, 1978, Chang et al., 2014)으로 시추공에 높은 수압을 가하여

인위적으로 암반에 균열을 발생시켜 암반의 초기응력을 측정하거나 지하심부의 암반을 분쇄하여 세일가스 및 오일을 생산(Ouchterlony, 1972, Lee, 2013, Lee, 2014)하고, 고온 건조한 암반에 균열을 통하여 물을 순환시켜 지열을 회수하기 위한 공법 등에 널리 응용되어 왔다. 수압암반절개는 수압파쇄 원리를 자유면 암반절개에 응용한 것으로 고압 및 대용량의 물을 시추공에 주입하여 균열 생성을 유도하여 암반을 파괴시키는 기술이다. 이 기술은 일반적인 터널공사 및 채석장에서 발생하는 발파 소음 및 진동, 분진과 같은 환경적인 저해요소가 없이 친환경적으로 암반을 파괴시킬 수 있는 방법이다. Park and Lee(2016)은 수압암반절개기술을 석회암과 화강섬록암 지역에 대한 실험적 연구를 수행

Received: Sep. 27, 2017

Revised: Oct. 23, 2017

Accepted: Oct. 25, 2017

\*Corresponding Author: Ik Woo

Tel) +82634691863, Fax) +82634691861

E-Mail) woo@kunsan.ac.kr

School of Architecture & Coastal Construction Engineering,  
Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk,  
54150, Korea

하여 암반 균열 생성에 관한 현장실무 적용 가능성을 평가하였다. 깊은 암반 내에서 수압파쇄법에 의해 생성된 암반의 최대수평주응력 방향과 평행하게 생성된 균열과는 달리, 자유면에서 실시하는 수압암반절개는 암반의 풍화정도와 기존 균열의 발달 상태 등과 같은 표면의 지질구조적 특성이 중요한 요소로 작용한다. 따라서 절개면의 방향을 제어하기 위해선 우선적으로 표면에 나타난 불연속면의 분포와 암반의 물리적·역학적 특성을 파악하여야 하지만, 암반의 이방성 및 불균질성 때문에 이들 요소에 대한 특성을 정확히 파악하기 어려워 절개면의 방향을 제어하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여, 다수의 연구 결과(Lee and Yang, 1997, Mun et al., 2014, Lee et al., 2016)에 근거하여 시추공 내에 인공적인 유도 슬롯을 생성하여 실험을 실시하였다. 유도슬롯을 설치한 시추공내에서 수행한 수압파쇄실험에 대한 수치해석 및 축소모형 실험 연구를 수행한 이들 연구(Lee and Yang, 1997, Mun et al., 2014, Lee et al., 2016)에서는 유도슬롯 침단부에서 응력 집중현상이 발생되어 유도슬롯을 따라 균열이 생성된다는 것을 밝혔다.

## 2. 수압암반절개기술

수압암반절개기술은 자유면에서 암반을 절개하는 기술로 시추공 내에 이중패커를 삽입하고 패커에 수압을 가하여 암반에 고정시킨 후, 상부패커와 하부패커 사이의 인터벌에 암반의 인장응력 이상의 수압을 가해 균열을 발생시키는 방법이다. 일반적으로 수압파쇄실험의 주입압력과 시간에 대한 전형적인 이력곡선에 나타나듯이, 주입압 증가와 감소를 반복하면 균열개구압력 및 균열폐쇄압력을 측정할 수 있고, 이를 이용하면 암반의 수평주응력 성분을 산정할 수 있다(Lin et al., 2008). 특히, 수압파쇄실험에서 실험 초기단계에서 무결암 구간에서 균열을 생성시키는 균열생성압력은 암반의 인장응력 및 주응력의 크기와 매우 밀접하게 관련되어 있다.

그러나 수압암반절개는 지표면의 자유면에서 이루어지기 때문에, 암반의 주응력의 방향 및 크기보다는 암석의 이방성 및 구조지질학적, 암석역학적 변수가 영향을 많이 미친다. 균열이 다소 분포한 지역에 큰 유량으로 주입하는 수압암반절개에 의해 새롭게 발생하는 균열 또한 암반의 주응력 성분보다는 암반 내에 분포하는 균열의 방향에 의존한다. 따라서 수압절개기술에 의한 균열의 발생은 시추공 간의 간격, 공경, 주입 심도와 같은 인자에 관련되며, 주입 유량과 주입 압력의 크기에 따라 균열의 연장이 좌우되지만 현장의 불연속면 특성

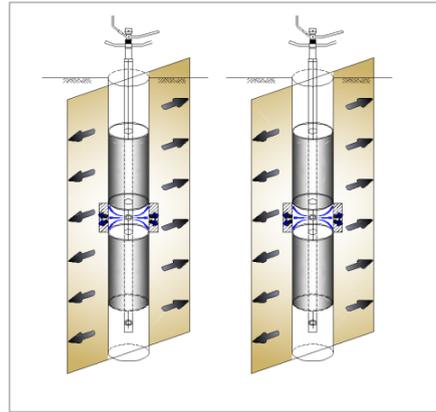


Fig. 1. A schematic diagram of hydraulic rock splitting with a guide slot parallel to the borehole axis

과 지질공학적 특성을 고려하여 균열의 방향을 제어하기는 어렵다. 그러나 균열 생성에 대한 방향 제어는 여러 연구 결과(Lee and Yang, 1997, Mun et al., 2014, Lee et al., 2016)에서와 같이 균열 침단부의 응력이 무한대로 커져 응력 집중되어 균열 성장과 전파가 일어나는 원리를 이용하면 가능하다. 이를 위하여, 본 연구에서 수행한 현장 배열설계 중 일부 설계에서는 수압공급장치에서 공급되는 수압을 이용한 워터젯 방법으로 시추공 벽면에 유도 슬롯을 원하는 방향으로 생성시킨 다음, 고압 및 고 유량의 물을 주입하여 균열 생성을 유도하였다. Fig. 1는 상하부 패커 사이의 인터벌 구간의 공벽면에 시추공 축과 평행한 직선형 유도 슬롯을 형성한 후 수압을 가하여 유도 슬롯 방향으로 균열을 발생시키는 수압암반절개 과정을 보여준다. 수압암반절개를 위한 일반적인 천공 심도는 이중패커의 제원-상부 패커 길이 60 cm, 인터벌 구간 30 cm, 하부 패커 길이 60 cm과 패커 하단부 구간 30 cm를 고려하여 총 180 cm로 설정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 수압암반절개를 위한 장비인 고압 펌프, 고압 패커 그리고 유도슬롯 생성을 위한 워터젯 장치를 나타내고 있다.

암반에 대한 수압파쇄에서 균열생성압력은 암반의 인장강도에 영향을 받으며 일반적으로 압축강도보다 1/10 이하이다(Yim and Seo, 2009). 국내에서 수행한 수압파쇄실험에서 측정된 균열생성압력은 심도에 따라 변화를 보이지만 7.0~20.0 MPa의 범위에 있으며 대부분 10 MPa 내외이다(Choi et al., 1999). 본 연구에서는 지표면의 암반에 균열을 발생시키기 위하여 국내의 천부에 적용된 수압암반파쇄에서 보여주는 균열생성압력보다 높은 22.0 MPa의 수압을 시추공에 적용하였다. 본 연구는 수압암반절개에 적합하도록 수압공급장치, 30

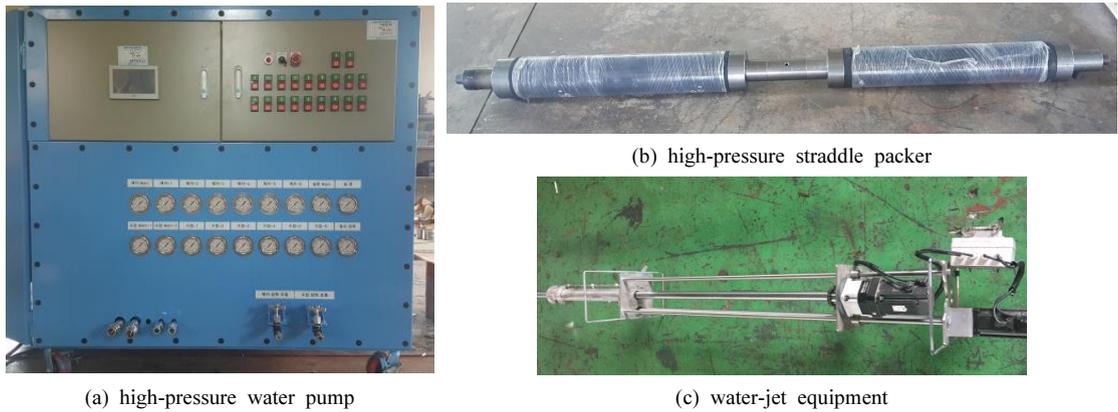


Fig. 2. Photographs of the equipment for rock splitting technique

MPa 이상의 수압에 견딜 수 있는 스테인리스 강철과 고무를 조합한 이중패커를 개발하였으며, 이를 이용하여 현장에서 수압암반절개실험을 수행하였다. 현장실험을 통해 암반 균열을 유도하고 제어할 수 있는 다양한 배열설계를 적용하여 균열의 연장성 및 방향성에 대하여 고찰하였고, 기존의 균열과의 상관관계 등도 파악하였다.

### 3. 현장 시험

세종시 부강면에 위치한 채석장에 있는 2자유면의 돌출된 흑운모 화강암 사면에 대하여 수압암반절개실험을 실시하였다(Fig. 3). 본 실험은 다양한 배열설계를

따라 시추공을 천공하여 본 연구에서 개발한 이중패커를 삽입하여 수압으로 공벽에 밀착시킨 후, 인터벌에 수압을 가하여 균열을 발생시켜 그 연장성을 측정하였다. 수압암반절개를 위한 시추공은 공경 10.5 cm, 심도 180 cm 로 천공하였으며, 경우에 따라 시추공벽에 약 50 MPa 수압의 워터젯 장치를 이용하여 유도 슬롯을 생성하여 실험하였다. 또한 수압암반절개에 적합한 수압공급장치와 최소 30 MPa 이상의 수압에 견딜 수 있는 이중패커가 암반절개에 효율적으로 사용할 수 있는 가능성에 대해서도 알아보려고 본 실험을 수행하였다.

실험 대상 암반에는 전반적으로 절리가 발달하고 있지 않지만, 일부 구간에서는 수직 및 수평절리가 부분적으로 분포하고 닫힌 미세균열이 미약하게 발달하고 있다.

수압암반절개실험을 위하여 대상 암반을 3개 구역-A, B, C-으로 구분하고, 서로 다른 배열설계를 적용하여 총 26개의 시추공을 천공하였다(Fig. 4). 즉, A구역, B구역 그리고 C구역에 각기 5개, 7개, 14 개의 시추공을 각기 다른 배열설계로 적용하였다. A구역에는 중앙공을 중심으로 상·하 그리고 좌·우 방향으로 총 4개의 공을 30 cm 간격으로 설치하였고, B구역에는 중앙공을 중심으로 주위에 6개 공을 육각형 형태로 30 cm 간격으로 설치하였다. C구역은 3개의 열로 이루어져 있으며, 상부열에는 70 cm 간격의 4개의 공이 설치되었고, 중간 및 하부열에는 50 cm 간격의 5개의 공이 각기 위치하고 있다(Fig. 5). 수압공급장치에서 발생하는 최대유량은 26 LPM이다. A구역의 5개 공에 대해서는 동시에 최대유량을 주입하였기 때문에 각 공에는 5.2 LPM의 유량이 적용되었으며, B 및 C구역에서는 1개의 공에 대해서만 주입하였으므로 최대유량 26 LPM으로 주입하였다.

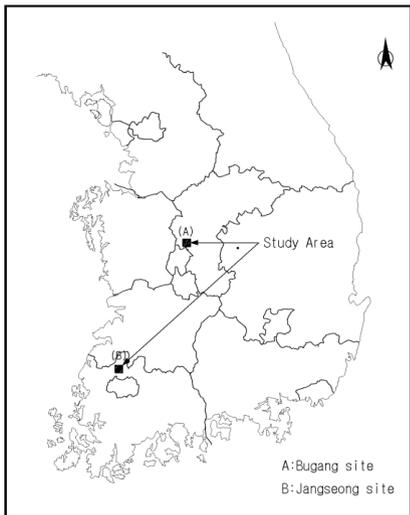


Fig. 3. Location of study area



Fig. 4. Photography of test sections-A, B and C- of the excavated sloop in biotite granite of Bugang site, Sejong City

### 3.1 A구역

A구역의 5개 공 모두에 이중패커를 삽입하고 동시에 동일한 유량 및 수압을 가하여 균열을 생성과 그 연장성을 파악하였다. 터널에서 일반적으로 사용하는 심발 패턴을 적용시킨 B구역의 배열설계는 중앙의 1개 공에 대해서만 주입하여 중앙공으로부터 생성된 균열과 주변 공들과의 간섭을 관찰하였다. C구역의 3중 축선으로 구성된 배열에서 각 축선 당 2~3개의 공에 대하여 Fig. 5(c)와 같이 주입공을 선정하여 각 공에 대하여 순차적으로 주입하였으며, 생성된 균열과 기존 균열의 관계 및 주위 공의 영향에 대하여 관찰하였다.

A구역의 암반 표면에는 전반적으로 균열 발달이 없는 괴상이지만, 2번 공 상부에서 1번 공과 5번 공 사이로 수평의 단면 미세균열이 나타난다. A구역에 설치한 5개의 공 모두에 이중패커를 삽입하여 22.0 MPa의 수압을 패커에 가하여 공벽에 밀착시켰으며, 각 공의 인터벌에 22.0 MPa의 수압을 5.2 LPM의 유량으로 동시

에 주입하였다(Fig. 6(a)). 그 결과, 중앙공을 중심으로 주위의 4개 공 방향으로 뚜렷한 연장성을 지닌 새로운

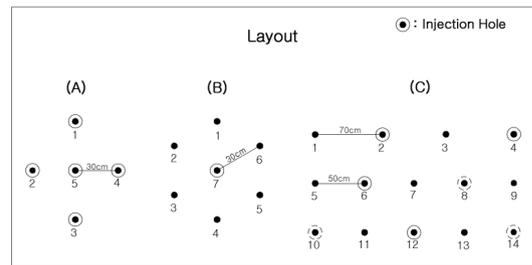


Fig. 5. Array layouts for A, B and C test sections in Bugang site. The boreholes marked with solid line indicate the injection holes for the test and the boreholes marked with dotted line indicate the holes that had been originally assigned to injection hole but were not injected due to borehole problem

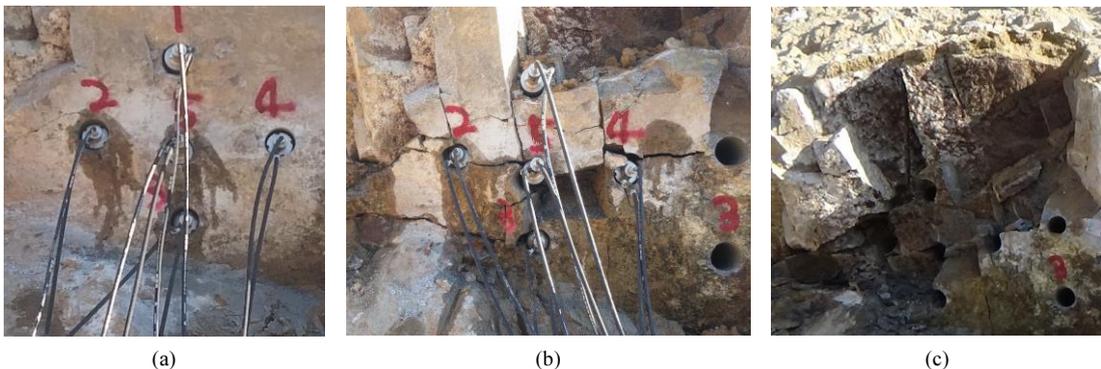
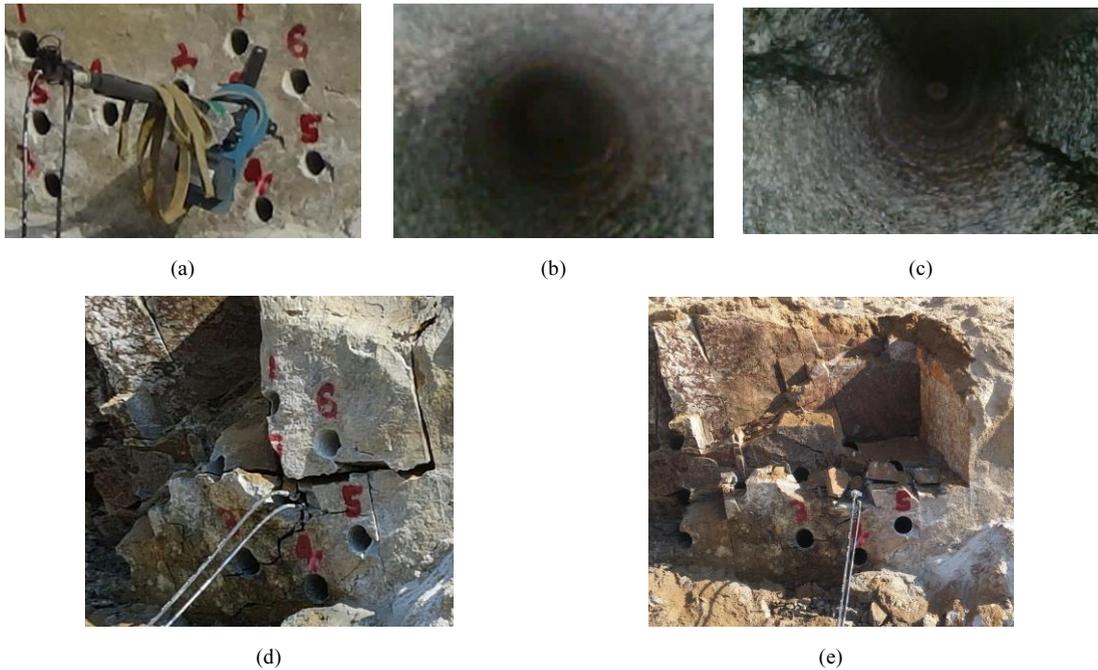


Fig. 6. Photographs of field test for hydraulic rock splitting in the section A of 2-free faces in biotite granite showing (a) straddle packers inserted into boreholes, (b) crack development by the hydraulic rock splitting and (c) rock failure after test



**Fig. 7.** The field test for hydraulic rock splitting in B area of the 2-free face in biotite granite showing (a-c) equipment, the borehole wall, and slot creation in both sides of borehole wall, (d) crack development by hydraulic rock splitting in center borehole and (e) failure of upper block after test

수직 및 수평 균열이 형성되었다(Fig. 6(b)). 또한 주변 공들간의 균열은 생성되지 않았지만, 기존의 닫힌 미세 균열은 수압에 의해 균열 간극이 넓어지고, 닫힌 미세 균열의 주향 방향으로 균열이 연장되어 발달하는 것을 관찰할 수 있었다. 경계조건인 자유면에 가까운 1번 공과 2번 공은 인터벌에 가해진 수압에 의해 표면 암반이 붕락되었으며, 3번 공에서 기존의 닫힌 미세균열 방향을 따라 수평으로 자유면에 연장되었다. 그 결과 Fig. 6(b)와 (c)에 나타난 것과 같이, 수압절개에 의해 중앙공을 중심으로 수직 및 수평 균열이 주위 공들 쪽으로 발생되어 표면 및 주위 암석들이 붕괴되었다. 붕괴된 암반 내부에 발달한 균열은 기존의 닫힌 미세균열 및 수압으로 유도된 균열을 따라 자유면까지 연장되어 나타나고 있다.

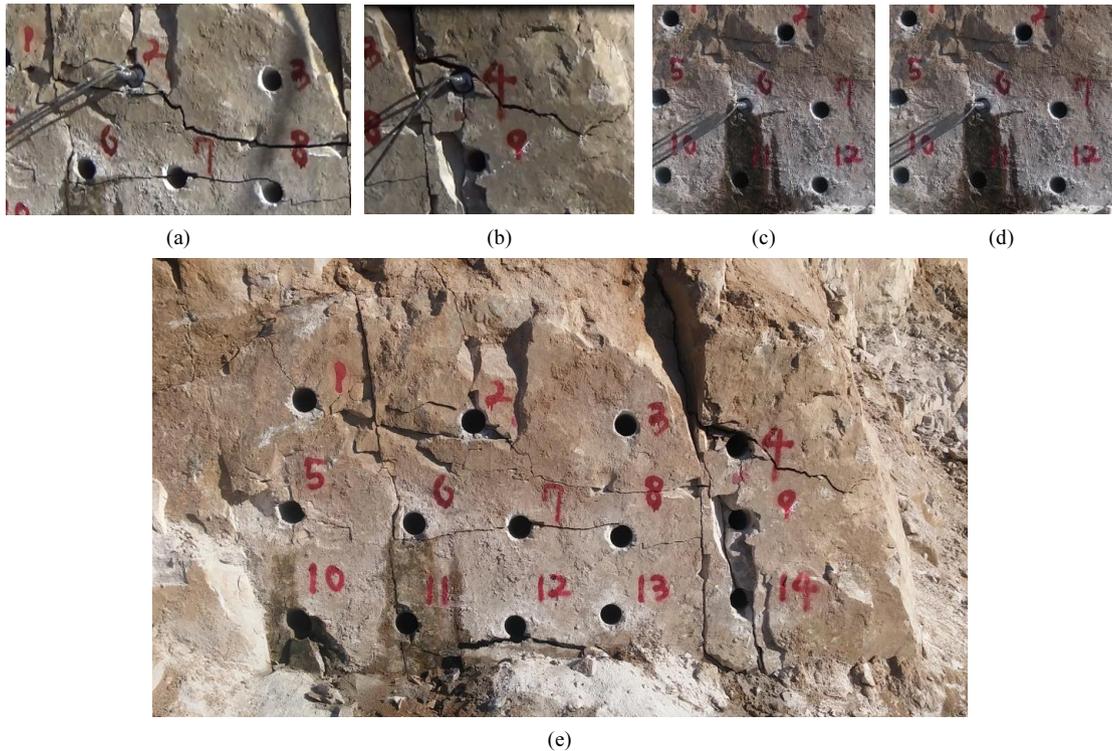
### 3.2 B구역

B구역의 암반 표면에는 전반적으로 균열 발달이 없지만, 5번 공과 6번 공 우측에 수직의 닫힌 미세균열이 분포하고 있다. B구역에서는 중앙공을 중심으로 30 cm의 간격으로 6개의 공을 육각형 형태로 설치하였으며,

유도슬롯을 생성한 중앙공 1개의 공에 대해서만 이중패커를 삽입하여 실험을 수행하였다(Fig. 7(a)). Fig. 5(B)에 나타난 배열설계에 따라 시추한 후, Fig. 7(b) 및 (c)와 같이, 중앙공에 49.0 MPa 수압의 워터젯 장치를 이용하여 인터벌구간(심도 60~90 cm)의 구간의 시추공 양측 벽면에 시추공 축과 평행한 방향의 수평방향의 유도 슬롯을 1 cm 정도의 깊이로 생성하였다. 22.0 MPa의 수압을 패커에 가하여 공에 밀착시킨 후, 인터벌에 주입펌프의 최대 용량인 26.0 LPM을 22.0 MPa의 수압으로 주입하여 실험을 수행하였다. 실험 결과, 중앙공에 수압을 가하여 발생시킨 균열들은 거의 수평 및 수직 방향으로 연장성을 가지며 기존의 우측에 있는 미세 균열의 폭을 확장시키며 생성되었다(Fig. 7(d)). 즉, 유도 슬롯의 방향과 일치한 수평방향의 주균열이 주입공인 중앙공으로부터 발생하였으며, 수직의 기존 미세균열이 벌어진에 따라 중앙공 상부의 암반 블록이 붕락되었다(Fig. 7(e)).

### 3.3 C구역

C구역의 암반 표면에 분포하는 150 cm 간격의 2개의 수직 균열이 암반 상부에서 수평 방향의 균열과 교



**Fig. 8.** The field test for hydraulic rock splitting in C area at a slope surface of 2-free face in biotite granite showing (a~d) straddle packers installed into the boreholes of No.2, No.4, No.6 and No.12, and (e) slope surface after test

차하고 있다. C구역에서는 Fig. 5(C) 및 Fig. 8에 나타난 것과 같이 총 14개의 공을 3열로 구성된 배열설계를 사용하였으며, 시추공 내에 유도 슬롯을 설치하지 않고 실험을 수행하였다. Fig. 5(C)와 같이 실험 전의 실험 주입설계는 1 공을 띄어 실험공을 선정하여 주입에 따른 공들간의 간섭을 확인하려 하였다. 그러나, 시공상의 문제로 8번 공, 10번 공 및 14번 공(Fig. 5(c)의 점선으로 표시된 공) 내에 이중패커 삽입이 불가능하여 2번 공, 4번 공, 6번 공, 12번 공(Fig. 5(C)의 실선으로 표시된 공)에 대해서만 실험을 수행하였다. 동시 주입을 하는 A구역 주입방법과는 달리, C구역에서는 각각의 공에 대하여 별도로 실험을 수행하였다. 즉, 한 주입공에 대하여 이중패커를 삽입하여 공벽에 밀착하고 인터벌에 수압을 가하여 파괴가 발생할 때까지 실험을 수행한 다음, 다음 실험공에 대하여 동일한 실험을 수행하였다. 이중패커 및 인터벌에 가해진 유량은 26 LPM으로 동일하였지만, 수압은 각 주입공마다 최대 압력을 달리하였다. 즉, 2번 공에 9.5 MPa, 4번 공에 2.0 MPa, 6번 공에 9.5 MPa, 12번 공에 22.0 MPa의 수압이 작용하

여 균열을 생성시켰다(Fig. 8). 이는 암반 내에 존재하는 기존의 미세균열이 균열생성압력을 달리하였을 뿐만 아니라, 순차적 실험으로 이전 실험공에서 생성된 균열의 영향으로 파악된다. Fig. 8(a)부터 (d)까지는 2번과 4번, 6번, 12번 공에 나타난 실험한 결과를 영역별로 보여주고 있으며, Fig. 8(e)는 실험 이후에 나타난 C구역의 전반적인 균열발생을 보여주고 있다. 수압암반절개실험에 의해 2번 공 주위의 기존 균열이 연장되었고, 상부에는 새로운 수직 균열이 생성되었다. 4번 공 주위에는 기존의 수직균열과 교차하는 새로운 균열이 자유면을 향해 발생되었다. 6번 공에서는 수평방향으로 새로운 균열이 생성되어 7번 및 8번 공까지 연장되어 기존의 수직 균열과 교차하였다. 12번 공 주위에는 수압절개실험으로 하부로 발달하는 새로운 균열이 발생되었으나 이 균열은 6번 공 같이 주위에 인접한 공들과의 연결되지는 않았다. 즉, 기존 균열의 영향을 받은 2번과 4번 공은 낮은 균열생성압력을 보이고 있으며, 주위 공들과 연결되는 수평 균열이 생성된 6번 공에서도 균열생성압력이 낮게 측정되었다. 반면, 12번 공은 기

존 균열 및 다른 공과의 연결성이 없는 새로운 균열이 생성되어 균열생성압력이 다른 공보다는 높게 기록된 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 토의

수압암반절개는 수압파쇄 원리를 자유면 암반절개에 응용한 것으로, 표면에 시추된 공에 대용량의 물을 암반의 인장강도 이상의 수압으로 주입하여 균열 생성을 유도하여 암반을 파괴시키는 기술이다. 본 연구에서는 수압암반절개에 적합한 수압공급장치, 이중패커 및 유도 슬롯 생성을 위한 워터젯장치를 개발하여 수압파쇄에서 나타나는 균열생성압력보다 높은 30 MPa 이상의 수압과 26 LPM의 유량을 이용하여 암반균열을 발생하였다. 암반균열을 유도하고 제어할 수 있는 다양한 배열설계를 적용하여 균열의 연장성 및 방향성에 대한 고찰 및 기존 균열의 상관관계 등을 파악하기 위하여 세 종시 부강면에 위치한 화강암 사면을 세 개의 구역(A, B, C 구역)으로 구분하여 현장실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. A구역에서는 5개의 공에 대하여 동시에 5.2 LPM의 유량으로 22.0 MPa의 수압을 가한 결과, 중앙공부터 주위 공에 이르는 수직 및 수평 방향의 뚜렷한 연장성을 지닌 새로운 균열이 형성되었으며, 기존 닫힌 미세균열은 균열 간극이 넓어지고 주향 방향으로 연장되어 암반이 파괴되었다.
2. B구역에서는 주입공인 중앙공의 인터벌구간 공벽에 시추공 축과 평행한 수평방향의 유도 슬롯을 생성하고 이중패커에 22.0 MPa의 수압을 가하고 인터벌에 26 LPM의 유량과 22.0 MPa의 수압을 가하였다. 실험 결과, 중앙공을 중심으로 균열들이 수평 및 수직 방향으로 생성되어 연장되어 암반이 붕락되었으며, 수평방향 균열은 유도슬롯과 평행하게 형성되어 유도슬롯에 의해 제어된 것으로 판단된다.
3. C구역에서는 상부, 중간 및 하부열에 시추한 공 중 일부 공들에 대해서만 개별적으로 실험하여 결과를 관찰하였다. 새로운 균열이 기존 균열로부터 연장되어 발생되거나 주위 공과 간섭되어 나타날 경우, 낮은 균열발생압력이 균열이 생성된 반면, 12번 공과 같이 주위의 공과의 간섭 및 기존 균열의 영향이 없는 새로운 균열이 생성되는 경우는 높은 균열발생압력이 발생하였다.

따라서 본 연구에서 수행한 수압암반절개 현장실험에

서는 암반 내에 균열이 내재할 경우에도 인터벌에 균열의 투수계수보다 많은 유량을 주입하면 기존의 균열을 따라 균열이 연장될 뿐만 아니라 새로운 균열이 발생할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 특히 A구역에서 수행한 실험과 같이, 모든 공에 동시에 주입하면 공 사이의 간섭이 극대화되어 공들 사이에 균열이 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 C구역의 12번 경우와 같이, 한 공에만 주입을 할 경우에 발생한 새로운 균열은 기존 균열이나 자유면의 방향과는 상관없는 무작위의 방향으로 발달할 수 있다. 따라서 B구역에서 수행한 유도슬롯을 이용한 주입 실험 결과처럼 유도슬롯을 활용하면 수압암반절개기술에서 균열 방향을 제어할 수 있고, 수압 및 유량을 조절하면 균열의 연장성도 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 실험에서 균열발생은 시추공 간의 연장성보다는 기존의 미세균열을 따른 신규균열들이 연장되는 경향을 보였으며, 암반블록의 붕락으로 패커가 암반블록 사이에 협착되는 문제점이 나타나기도 하였다. 향후 연구에서는 다양한 배열설계와 주입설계를 통하여 여러 요소를 제어하는 실험이 수행되어 보다 효율적인 현장 적용이 이루어져야 할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 환경산업선진화 기술개발 사업 중, 생활환경질 향상 기술 사업(RE201604004) “생활환경질 개선을 위한 암반 굴착시 수압절개를 이용한 소음진동 저감 기술개발”과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

1. Chang, C., Jo, Y., Oh, Y., Lee, T.J., and Kim, K.-Y., 2014, Hydraulic Fracturing In Situ Stress Estimations in a Potential Geothermal Site, Seokmo Island, South Korea, *Rock Mech Rock Eng*, 47 1793-1808.
2. Choi, S., Shin, H., Park, C.-S., Bae, J., Lee, H., Park, J., and Jeon, H., 1999, In-situ stress determinations by hydraulic fracturing in deep inclined boreholes for the design of underground oil storages, *Korean Geotechnical Society*, 15(4), 185-205 (in Korean with English abstract).
3. Haimson, B., 1978, The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15, 167-178.
4. Haimson, B., Lee, M.-Y., and Song, I., 2003, Shallow hydraulic fracturing measurements in Korea support tectonic and seismic indicators of regional stress, *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 1243-1256.
5. Lee, H. and Yang, H., 1997, *Applied Rock Mechanics*, Seoul National University Press.
6. Lee, J.C., 2013, Shale-gas production optimization by

- fluid selection: incorporating laboratory analysis of fluid rheology in Korea domestic polymers, The Graduate School in Sejong University.
7. Lee J.C., 2014, Shale Gas Prospecting, Development of the Latest Technology Trends, High-Tech Intelligence Analysis, 1-6.
  8. Lee, S.H., Lim, J.S., and Jang, W.Y., 2016, The Effects of High Pressure Water Contact State on Hydraulic Fracturing, Tunnel and Underground Space, 26(3), 409-417 (in Korean with English abstract).
  9. Lin, W., Yamamoto, K., Ito, H., Masago, H., and Kawamura, Y., 2008, Estimation of Minimum Principle Stress from an Extended Leak-off Test Onboard the *Chikyu* Drilling Vessel and Suggestions for Future Test Procedures, Scientific Drilling, 6, 43-47.
  10. Mun, H.J., Shin, S.R., Lim, J.S., Jeong, W.K., and Jang, W.Y., 2014, A Study on the Model for Effective Hydraulic Fracturing by Using Guide Hole, Tunnel and Underground Space, 24(6) 440-448 (in Korean with English abstract).
  11. Ouchterlony, F., 1972, Analysis av Spanning still standet Krugig Nogra Olika Geometrier Med Radiellt Riktade Sprickor 1 Ett Oandlight Plant Medium Under Inverkanav Expansion krafter, Swedish Tectonic Research Foundation Report, DS.
  12. Park, J.O. and Lee, D.H., 2016, Development of Hydraulic Rock Splitting Technique for Rock Excavation, The Journal of Engineering Geology, 26(3), 353-360 (in Korean with English abstract).
  13. Yim, S.B. and Seo, Y.S., 2009, A new method for the analysis of measured displacements during tunnelling using control charts, The Journal of Engineering Geology, 19(3), 261-268 (in Korean with English abstract).

---

### 박종오



1986년 충남대학교 이과대학 해양학과 이학사  
 1988년 충남대학교 대학원 지질학과 이학석사  
 2004년 충남대학교 대학원 지질학과 이학박사

Tel: 042-825-9172  
 E-mail: parkjongoh@hanmail.net  
 현재 영인산업(주) 전무이사

---

### 이달희



1982년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사  
 1987년 연세대학교 대학원 지구물리학 이학석사  
 1995년 미국 Iowa State Univ. M.S.  
 1999년 미국 Iowa State Univ. Ph.D.

Tel: 02-2123-2665  
 E-mail: dalheui@yonsei.ac.kr  
 현재 연세대학교 이과대학 지구시스템 과학과 (연구)교수

---

### 우익



1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사  
 1994년 연세대학교 대학원 지구물리학 이학석사  
 2004년 프랑스 Ecole des Mines de Paris 지질공학 박사

Tel: 063-469-1863  
 E-mail: woo@kunsan.ac.kr  
 현재 군산대학교 산학융합공과대학 건축해양건설융합공학부 교수

---