수압파쇄시험 해석을 위한 중공원통 인장시험과 압열인장시험 화강암 인장강도 비교

조영욱, 장찬동*, 이태종, 김광엽

Comparison of Tensile Strengths in Granite Using Brazilian Tests and Hollow Cylinder Tests for Hydraulic Fracturing Test Interpretation

Yeonguk Jo, Chandong Chang*, Tae Jong Lee, Kwang-Yeom Kim

Abstract We conducted hollow cylinder tensile strength tests and Brazilian tests in Seokmo granite to measure tensile strength necessary for estimating the magnitude of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing stress measurements. Two different pressurization rates were used in hollow cylinder tests. Tensile strengths were determined to be higher at higher pressurization rate, which suggests that tensile strength should be measurement at the same rate used in actual in situ hydraulic fracturing tests. Considering the effect of pressurization rate and specimen size on tensile strength, the hollow cylinder tests and Brazilian tests yield similar results each other. This demonstrates that Brazilian tests can be utilized to produce representative tensile strengths for interpretation of hydraulic fracturing test results.

Key words Hydraulic fracturing stress measurements, Hollow cylinder tests, Brazilian tests, Tensile strength, Scale effect

초 록 수압파쇄법으로 최대수평주응력 크기 규명에 필요한 요소 중 하나인 암반의 인장강도를 측정하는 방법에 대해 연구하였다. 석모도 시추공에서 회수한 화강암 시료에 대해 두 가지 실험시험(중공원통 인장시험 및 압열인장시험)으로 인장강도를 측정하고 두 결과가 차이를 보이는지 비교하였다. 중공원통 인장시험에서는 높은 수압 증가율 상태에서 더 높은 인장강도를 보여, 현장의 수압파쇄시험에서 보인 수압 증가율 상태에서 측정된 인장강도나 그 증가율로 보정된 인장강도를 이용해야한다는 점을 보였다. 인장강도에 대한 수압 증가율 효과와 크기 효과를 보정하면 중공원통 인장시험 결과는 압열인장시험 결과와 유사하게 나타났으며 이는 수압파쇄 인장강도를 위해 압열인장강도를 이용할 수도 있다는 점을 시사한다.

핵심어 수압파쇄응력측정법, 중공원통 인장시험, 압열인장시험, 인장강도, 크기효과

1. 서 론

수압파쇄 응력측정법은 지하 암반의 초기응력 텐서, 특히 수평응력의 방향과 크기를 측정하기 위한 여러 방법 중 가장 직접적으로, 응력해방법과 같이 암반의 변

형물성 정보 없이 응력을 측정할 수 있으며 지하심부에 서도 효과적으로 적용 가능한 방법으로 여겨진다(Hubbert and Willis, 1957, Haimson and Fairhurst, 1967, Rummel, 1987). 수압파쇄 응력측정법에 관한 기술적 측면들이 1980년대에 체계적으로 집약된 이후 석유, 토목업계 및 과학계에서 이 방법으로 암반 초기응력을 측정하려는 시도가 활발히 진행되어 오고 있다(Zoback and Haimson, 1983). 그럼에도 불구하고 세계응력지도(World Stress Map) 데이터베이스에 등재된 시추공 응력측정자료 중 6% 남짓만 수압파쇄법으로 규명되었고 그 외 대부분은 시추공벽 압축파쇄대(76%)로 규명한 자료들이다(Heidbach et al., 2008). 그 이유는 대부분의 수압파쇄 시험이 상

Received: Jul. 18, 2013

Revised: Aug. 19, 2013

Accepted: Sep. 3, 2013

*Corresponding Author: Chandong Chang

Tel) +82428216430, Fax) +82428235636

E-Mail) cchang@cnu.ac.kr

Chungnam National University, 99 Daehakro, Yuseong, Daejeon, 305-764, Korea

대적으로 얇은 심도에서 이루어져 자료의 질이 떨어지기 때문이기도 하고, 1990년대 말부터 수압파쇄 응력측정 자료 해석법의 신뢰성에 대한 여러 의문이 제기되었기 때문이기도 하다(Ito et al., 1999, Rutqvist et al., 2000).

수압파쇄 응력측정법은 시추공 내 격리된 구간에 수압을 가하여 암반을 인장파괴시켜 최소수평주응력에 수직인 방향의 시추공벽 마주보는 방향으로 유도된 연직 인장파괴 균열이 닫히는 순간의 압력(shut-in pressure)을 이용해 발생한 균열에 작용하는 수직응력(즉, 최소수평주응력)의 크기를 직접적으로 규명한다. Shut-in 시간대에 따른 압력변화가 점진적으로 감소하기 때문에 균열폐쇄압력 규명 시 주의를 요하지만 현재까지 개발된 다양한 객관적 방법들을 통해 비교적 신뢰할 수 있는 오차범위로 한정지을 수 있다(Evans et al., 1988).

반면 최대수평주응력은 탄성역학 이론(Kirsch, 1898) 해법을 적용하여 간접적으로 산정하는데 이를 위해 암반의 인장강도를 이용하거나(Haimson, 1968, Cornet, 1982, Cheung and Haimson, 1989) 수압파쇄 균열 발생 후의 암반 인장강도는 0이라는 가정 하에 인장균열을 다시 여는 균열개구압력(reopening pressure)을 이용한다(Bredehoeft et al, 1976). 문제는 균열개구압력을 이용하여 최대수평주응력을 유추하는 경우에 나타난다. 먼저 수압파쇄로 발생한 균열이 완벽히 닫혔다는 가정 하에 Kirsch 해법을 적용하지만 인장파괴균열은 닫히더라도 일정 정도의 잔류폭(residual crack aperture)을 가질 수밖에 없기 때문에 Kirsch 해법으로 정의되는 시추공 주변 응력장이 완벽히 구현되지 않는다는 점이다(Rutqvist et al., 2000). 또한 극히 적은 양의 주입수가 균열 내로 침투되면서 균열이 재개방되기 때문에 실제 균열개구압력을 정확히 감지해 내기 위해서는 강성이 매우 높은 수압파쇄 시스템을 필요로 한다. 즉, 유량을 조절하는 장치(유속계)가 지표에 설치되어 수압파쇄 측정심도와 상당한 거리를 두는 대부분의 수압파쇄 시스템의 경우에 그것이 갖는 비강성 효과가 자료에 반영되어 균열의 균열개구압력을 정확히 감지해내지 못하게 된다. 이러한 최대수평주응력의 크기를 측정하는데 있어서의 수압파쇄 응력측정법의 단점과 결과 해석의 모호함 때문에 균열 발생 전의 시추공 주변 응력상태와 암반의 인장강도를 이용해 최대수평주응력을 유추하는 것이 그나마 결과에 대한 신뢰성 시비를 벗어나기 위한 합리적인 방법으로 생각된다.

일반적으로 암반의 인장강도는 다양한 방법(직접인장, 압열인장, 수압파쇄, 후프테스트, 링시험 등)으로 측정할 수 있지만 시편성형 및 시험방법의 간편성 때문에 압열인장시험(Brazilian test)이 많이 이용되고 있다(Erarslan

and Williams, 2012, Ye et al, 2012). Haimson and Cornet(2003)는 ISRM Suggested Method에서 수압파쇄법으로 최대수평주응력을 구하기 위해 암반의 인장강도가 필요하며 이를 위해 실내시험을 통해 인장강도를 직접 측정해야 한다고 하고 있다. 수압파쇄 시험조건을 정확히 모사하지는 못하여 불확실성이 있긴 하지만, 그래도 압열인장시험이 가장 흔히 사용된다고 제안하고 있다. 그러나 시험 특성상 국부적 응력집중에 기인하여 그 결과에 오차가 크게 나타날 수 있으며 더욱이 수압파쇄 응력측정을 위한 입력요소로서의 인장강도를 위해서는 시편 형태나 압력 조건 등이 수압파쇄시의 시추공 조건을 정확히 모사하지 않기 때문에 압열인장강도를 최대수평주응력을 산정할 때 직접 적용할 수 있는지에 대한 불확실성이 있다(Haimson and Cornet, 2003). 이러한 배경 하에서 본 논문에서는 수압파쇄 응력측정법에서 최대수평주응력을 유추하기 위한 시추공 암반의 인장강도를 어떻게 측정해야 하는지에 대해 초점을 두어 진행한 연구 결과를 보고하고자 한다.

수압파쇄 조건하의 암반 인장강도 측정을 위한 보다 유사한 실내시험은 시추공 형태를 모사한 중공원통(hollow cylinder) 시험을 이용한 실내 수압파쇄 인장강도 측정 시험이다(Ohoka et al., 1997). 기존의 연구 결과들은 이러한 실내 중공원통 인장시험은 압열인장강도 시험에 비해 비교적 일관된 결과를 보여주며(Ringstad et al., 1994, Yamashita et al., 2010), 일반적인 시추공 직경과 유량 시험조건에서 시편 크기 및 시간효과(Size and Time scale effect)의 영향이 크지 않은 신뢰성이 높은 시험으로 알려져 있다(Haimson and Zhao, 1991). 그러나 암석 시편의 준비와 시험절차가 압열인장시험의 경우에 비해 까다롭다는 단점이 있다. 본 논문에서는 석모도의 지열 시추공에서 채취한 화강암 코어 시험에 대해 압열인장시험과 중공원통 인장시험을 공히 실시하여 시험법에 따른 인장강도 측정 결과를 비교하고 수압파쇄 응력측정시 필요로 하는 시추공 암반 인장강도에 미치는 몇 가지 요소(특히 주입압 증가율 및 크기 효과)들에 대해 조사하였다.

2. 수압파쇄 최대수평주응력 규명에 대한 간략한 검토

수압파쇄 응력측정법은 시추공 내 응력측정 심도 구간 상하부를 팽창성 패커(packer)로 밀폐한 뒤 해당 구간에 일정한 유량률(injection rate)로 물을 주입함으로써 수압을 증가시켜 시추공벽에 인장 접선응력(tensile hoop stress)을 유도하고 이 응력이 암반의 인장강도를

초과할 때 인장 균열을 발생시키는 수압파쇄와 Kirsch 해법으로 모사된 시추공 주변 응력간의 관계를 이용하여 암반의 초기응력텐서를 규명하는 기술이다. 시추공벽에 인장균열이 발생하기 직전까지의 시추공 주변 응력은 Kirsch 해법으로 모사되며, 최대수평주응력의 크기는 인장과괴 발생 순간의 시추공 균열발생압력(breakdown pressure, P_c), 원거리 최대수평주응력(S_{Hmax}), 최소수평주응력(S_{Hmin}), 공극압(P_0), 인장강도(T_0)와의 관계로 표현된다.

$$S_{Hmax} = 3S_{Hmin} - P_c + T_0 - P_0 \quad (1)$$

식 (1)에서 P_c 와 S_{Hmin} 은 각각 시추공압 직접 측정과 shut-in pressure를 통해 규명하며 P_0 과 T_0 는 별도의 독립된 방법으로 측정해야 한다. 일련의 반복된 압력 사이클 동안 수압파쇄 균열이 재개방압력(P_r)에 도달하여 재개방될 때에는 암반 인장강도가 완전히 손실되었다는 가정 하에 (Bredehoeft et al., 1976, Zoback and Pollard, 1978, Karfakis, 1986) 식 (1)을

$$S_{Hmax} = 3S_{Hmin} - P_r - P_0 \quad (2)$$

로 변형할 수 있으며, 실제 많은 수압파쇄시험에 활용되어 왔다. 그러나 식 (2)는 균열이 재개방되기 전까지 완벽히 닫혀 있어 무결암(intact rock) 상태와 같은 조건이라는 가정 하에 Kirsch 해법을 그대로 적용한 것으로 그 신뢰성에 많은 의문이 제기되어 오고 있다. 서론에 간략히 기술했듯이 이미 발생한 균열이 무결암 상태와 동일한 조건으로 닫힐 수 없고 수 μm 의 잔류간격을 유지하기 때문에 균열 재개방 전에 이미 균열 내부로 수압이 침투해 나감으로써 시추공 주위의 공극압 상태가 균일하지 않아 Kirsch 해법이 정확히 적용되지 않기 때문이다(Rutqvist et al., 2000). 더구나 균열재개방이 어느 한 압력 시점에 일괄적으로 시작된다고 가정하더라도 균열 내로 누출되는 수량이 극히 적어 실제 재개방 압력(P_r)을 정확히 감지해내기 힘든 단점이 있다(Ito et al., 1999). 이러한 단점들을 보완하기 위한 여러 시도가 진행되어 왔지만 궁극적으로는 수압파쇄 응력측정법을 이용하여 최대수평주응력을 측정하는 가장 신뢰할 수 있는 방법은 원론으로 돌아가 식 (1)을 이용하는 방법이 최선이라는 의견으로 귀결된다. 즉, 수압파쇄 시험 구간의 암반 인장강도를 적절히 규명하는 것이 최대수평주응력 크기를 구하는데 중요한 요소가 된다.

3. 인장강도 시험

본 연구에서는 수압파쇄 응력측정을 위한 인장강도 측정을 위해 중공원통 인장시험과 압열인장시험을 수행하였다. 시험에 이용된 화강암 시료는 석모도에 2009년 지열수 연구목적으로 굴착된 시추공(KG-1)에서 회수된 직경 47 mm의 코어시료이다. 시추코어 확인 결과 상부(110 m) 층적층 구간을 제외하면 전 구간 중립질 혹은도 화강암이 우세하게 나타나며 시추공 심도 171 m의 풍화대를 제외하면 대부분의 구간에서 암질이 매우 양호하다. 현장에서 수압파쇄 시험이 수행되었던 7개의 심도(140, 171, 215, 273, 336, 358, 390 m)에서 회수된 화강암 시료(SM Granite)들에 대해 심도 별로 각각 3회 이상의 중공원통 인장시험과 압열인장시험을 수행하였다.

3.1 중공원통 인장시험

중공원통 인장시험으로 인장강도를 측정하기 위해서 직경 47 mm, 평균 길이 88 ± 22 mm의 원주형 코어 시편을 이용하였다. 시편의 상단 중앙에 코어 축과 평행한 내공(공경 6.5 mm)을 약 60 mm 깊이로 시공한 후 시험 중 주입수의 누출을 방지하기 위한 목적과 시편 내공의 중심부에만 수압이 가해지도록(현장 수압파쇄 시 측정구간 상하부 밀폐효과) 상부 일정 부분에 스테인리스 스틸 튜브(길이 약 22 mm)를 삽입하고 에폭시로 견고히 고정시켜 시편을 완성하였다(Fig. 1a). 시편의 상부에 물을 주입시킬 수 있는 튜브가 장착된 캡을 씌운 후 시편 축 방향으로 10~15 MPa의 응력을 유지한 상태에서 공내 주입(injection)하여 인장파괴를 유도하였다. 수압 증가율에 따른 결과의 차이를 파악하기 위하여 두 압력 증가율(0.4 ± 0.05 , 0.03 MPa/sec)로 공내압을 증가시키며 시험을 수행하였다(Fig. 2). 구속압이 없는 상태에서 인장파괴가 발생하였으므로 이 때 얻어진 암석의 인장강도는 원거리 수평응력 효과가 배제된 수압파쇄 인장강도(T_{hf})이며, 인장파괴가 발생할 때의 최대 공내압(P_i)과 인장강도는 한정된 시편 크기가 보정된

$$T_{hf} = P_i \frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \quad (3)$$

의 관계를 갖는다(Jaeger and Cook, 1976). 위 식(3)에서 D_o 와 D_i 는 각각 시편의 외경과 내공의 공경이다. 참고로 수압파쇄 응력측정법에 대한 ISRM Suggested Method(Haimson and Cornet, 2003)에는 이 관계식이

Fig. 1. Test setups showing (a) hollow cylinder tensile strength test and (b) Brazilian test

$T_0 = P_i$ 로 표현되어 있는데 이는 단지 외경이 내경에 비해 상당히 큰 경우에 근사적으로 사용될 수 있다.

3.2 압열인장시험

압열인장시험은 표준시험법(ISRM, 1978, KSRM, 2006)에 따라 시편을 성형하여 시험을 수행하였다. 시편은 시추 코어 직경(47 mm)을 유지한 채 두께 17.1-22.2 mm 범위의 디스크 시편으로 성형하여 압열인장시험 기구(Fig. 1b)에 위치시킨 후 시편의 직경방향으로 선하중을 일정한 재하속도(6×10^{-4} MN/sec)로 증가시켜 인장파괴를 유도하였다. 일반적인 경우 압열인장강도는 시편에 포함된 미세균열 분포양상 또는 특정 선구조에 의한 비등방성을 보일 수 있기 때문에(Chen et al., 1998), 이를 판단하기 위하여 시편에 따라 적어도 세 다른 방향으로 하중을 가하여 인장강도를 측정하였다. 시편의 인장파괴가 발생할 때의 파단하중(F_{peak})을 측정하고

$$T_0 = \frac{2F_{peak}}{\pi Dt} \quad (4)$$

Fig. 2. Typical experimental data as a function of time from two type of hollow cylinder tensile strength test: (a) flow rate controlled test and (b) pressurization rate controlled test

의 관계를 통해 압열인장강도(T_0)를 산정하였다. 식 (4)에서 D 와 t 는 각각 시편의 직경과 두께이다.

4. 시험 결과

4.1 중공원통 인장시험

중공원통 인장시험에서 공내압 상승으로 인해 증가하는 내공 벽 인장응력이 암석의 인장파괴 조건에 도달하게 되면 암석이 인장파괴되며, 인장균열을 통해 공내수가 누출되면서 압력이 급격히 감소하는 양상이 관찰된다. 모든 시편의 내공벽에서 마주보는 두 방향의 인장균열이 발생하였으며(Fig. 3) 수압이 가해진 내공의 상부부터 공저까지 준 선형의 인장균열이 발달하였다.

Fig. 3. Tensile fractures induced by internal pressure in a borehole, simulating hydraulic fracturing tests. (a) and (b) photograph image of a failed specimen and (c) CT scanned image of a horizontal cross section of fractures

Table 1. Summary of results from hollow cylinder tensile strength tests

Specimen depth (m)	Sample number	Flow rate controlled	Pressurization rate controlled
		T_{hf} (MPa)	T_{hf} (MPa)
171	SM171-1	5.4	4.6
	SM171-2	6.8	5
	SM171-3	7.3	5.2
215	SM215-1	13.8	9
390	SM390-1	11.8	8.3
	SM390-2	12.7	8.3
	SM390-3	14.1	10.4

현장 수압파쇄시의 압력 증가율과 비슷하게 모사하도록 수행한 유량제어 시험의 경우 일정한 유량률(1.6×10^{-4} l/sec)로 물을 주입하여 공내압을 증가시킨 경우 압력-시간 곡선의 선형부분에서 압력 증가율 평균 0.4 ± 0.05 MPa/sec를 보였으며(Fig. 2a) 이는 석모도 현장 수압파쇄 시험시의 압력 증가율과 유사한 값이다. 반면 인장강도에 대한 압력 증가율 효과를 파악하기 위해 수행된 압력제어 시험에서는 0.03 MPa/sec의 압력 증가율로 공내압을 증가시키며 시험을 진행하였다(Fig. 2b).

서로 다른 압력 증가율 조건하에서 측정된 화강암의 인장강도 결과를 Table 1에 나타내었다. 측정된 인장강도는 압력 증가율이 큰 시험에서 약 $40 \pm 12\%$ 정도 더 크게 나타났으며 이 결과는 수압파쇄 인장강도 측정시에 압력 증가율이 상당히 중요함을 시사한다.

이러한 압력 증가율(R_p)에 따른 인장강도의 효과는 Haimson and Zhao(1991)에 의해서도 실험적으로 규명된 바 있다. 이들은 Lac du Bonnet 화강암과 Indiana 석회암의 중공원통 인장시험에서 각각

$$T_{hf} = 9.6 + 2.2 \log R_p \quad (\text{Lac du Bonnet granite}) \quad (5)$$

Fig. 4. Normalized tensile strength as a function of normalized pressurization rate for Seokmo (SM) granite, Lac du Bonnet (LdB) granite and Indiana limestone

$$T_{hf} = 12 + 2.5 \log R_p \quad (\text{Indiana limestone}) \quad (6)$$

의 인장강도-압력증가율 경험식을 유도하였다. 경험식 유도에 이용되었던 두 암석의 자료와 본 연구에서의 석모도 화강암 자료를 Fig. 4의 현장 수압파쇄 인장강도($T_{hf,0}$)와 압력증가율(R_0)로 정규화시킨 인장강도-압력증가율 관계로 도시한 결과 자료들이 일정정도 분산되어 있는 가운데 근사적으로 지수의 상관관계를 보임을 알 수 있다. 이들 자료를 총괄하는 최적의 지수함수는

$$T_{hf}/T_{hf,0} = 0.23 \log(R_p/R_0) + 1 \quad (7)$$

으로 주어지며 이는 압력증가율이 10배 증가함에 따라 인장강도가 23% 증가함을 의미한다. 식 (7)의 관계식으로 본 연구에서 얻은 인장강도를 현장 수압파쇄 압력증가율 조건으로 보정한 결과 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 두 다른 압력증가율 하에서 측정된 인장강도가 상당

히 일치하게 됨을 알 수 있다.

앞에서 간단히 기술하였듯이 중공원통 인장시험에서 발생한 인장균열은 모든 시편에서 내공에서 마주보는 두 방향으로 발생하였으며 실제 측정된 방향은 160-180° 범위를 보였다. 실제 현장 수압파쇄의 경우에는 최대-최소 수평 주응력에 의해 유도되는 공벽 접선응력의 이방성에 따라 인장균열 방향이 조절되므로 대부분 180° 간격으로 시추공벽 마주보는 방향의 파괴 면이 발달하게 되지만, 외부응력이 없는 조건에서는 인장균열의 발생이 기존 미세균열 등에 기인한 강도 불균질성에 의하여 가장 약한 한 방향으로 발생할 가능성이 높음에도 불구하고 시험 시편에서 항상 내공에서 마주보는 두 방향으로 인장파괴가 발생한 점이 흥미롭다. 이러한 시험편 내 일관된 균열발달 양상은 미세균열 분포양상이 수평 응력에 의해 제어되었을 가능성을 내포하며, 이는 또

다른 수평응력의 방향 지시자가 될 수 있기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 수압파쇄 인장균열은 CT스캔 단면을 통해 보다 선명히 관찰할 수 있었다(Fig. 3c). 수압파쇄 인장균열은 전체적으로 준평면의 파괴면으로 여겨지지만 부분적으로 두 개 이상의 가치를 치며 발달해 있고 파면 또한 부분적으로 두 개 이상의 가치를 치며 발달해 있고 급격한 방향 전환 등이 동반되어 있는 양상을 보인다. 특히 CT스캔 결과 다른 색으로 구분되는 광물 경계에서 이러한 방향의 킹크현상이 보이는 점은 외부응력의 이방성이 없을 경우 인장 균열의 전파가 개개 광물의 역학적 특성에 의해 상당히 조절되고 있음을 지시한다(Kranz, 1983, Wong, 1985).

4.2 압열인장시험

Fig. 6a는 압열인장시험을 통해 얻은 시간-하중 그래

Fig. 5. Tensile strengths determined from hollow cylinder tests with two different control modes. (a) pristine tensile strength data and (b) adjusted tensile strengths with an arbitrarily chosen pressurization rate of 0.4 MPa/sec

Fig. 6. Typical Brazilian test result and a failed specimen. (a) experimental data as a function of time and (b) extensile fractures induced by an axial line load

Table 2. Summary of results from Brazilian tests and hollow cylinder tests

Specimen depth (m)	No. of tests	T_b (MPa)	No. of tests	T_{hf} (MPa) effect of pressurization rate adjusted	T_{hf} (MPa) effects of pressurization rate and size adjusted
140	3	9.7±2.1	3	11.8±1.9	9.9±1.9
171	3	4.8±1.0	6	6.5±0.7	5.5±0.7
215	3	11.2±1.5	4	13.8±2.1	11.6±2.1
273	3	10.3±0.7	3	10.9±1.2	9.1±1.2
336	3	10.6±1.7	3	12.9±0.4	10.8±0.4
358	3	9.9±2.8	3	11.7±1.3	9.8±1.3
390	3	8.9±2.2	6	12.6±1.4	10.5±1.4

프이다. 시간에 따라 선하중이 일정한 속도(6×10^{-4} MN/sec)로 증가하다가 인장파괴가 발생한 후 급격히 감소한다. 시험에 이용된 재하속도는 압력으로 환산 시에 실제 시추공에서의 주입에 의한 압력증가율과 유사한 값이다. 압열인장시험 대부분의 시편에서 선하중 축방향으로 준선형의 균열이 발달하며 인장파괴가 발생하였으나 하중제어에 따른 급격한 인장파괴로 인해 파괴 후에 추가적으로 균열면이 발생하며 파괴되었다(Fig. 6b). 압열인장시험에 의한 인장균열은 그 위치 및 발달 양상이 시편 내 선구조 방향성 및 미세균열의 분포에 따라 다양하게 나타나는데(Lanaro et al., 2009, Nicksiar and Martin, 2013), 하중 방향을 달리하며 수행된 본 압열인장시험에서의 모든 시편들은 하중 방향과 평행한 비교적 일관된 양상으로 균열을 발생시키며 파괴되어 이용된 화강암이 대체로 신선한 상태를 보여준다.

석모도 화강암의 압열인장강도 결과는 Table 2에 열거하였다. 각 심도에서 세 다른 방향으로 측정된 압열인장강도는 0.7-2.8 MPa의 표준편차를 보이는데 이는 평균적으로 19%의 표준편차에 해당하며 이는 이 화강암의 강도 비등방성 척도로 여겨진다.

두 시험법(중공원통 및 압열인장시험)으로 측정된 인장강도를 비교한 결과를 Table 2에 제시하였으며 모든 시편에 대한 결과들을 Fig. 7에 비교 도시하였다. 동일 심도 시편에 대한 압열인장강도는 수압파쇄 인장강도에 비해 평균 $24 \pm 12\%$ 낮게 측정되었다(Fig. 7a). 이 차이는 압열인장과 중공원통 인장시험 설정에서의 다른 하중 유형의 차이에 기인한 것일 수도 있고 하중이 가해지는 압면 크기 차이에 기인한 것일 수도 있다. 특히 압열인장시험 시편의 크기에 비해 중공원통 인장시험 시편의 내경이 상당히 작기 때문에 발생하는 크기 효과에 의한 강도 차이일 가능성에 초점을 맞추어 이를 보정해 주기 위한 시도를 하였다. 중공원통 인장시험의

Fig. 7. Comparison between Brazilian tensile strengths and hollow cylinder tensile strengths. Tensile strengths from hollow cylinder tests are corrected (a) with pressurization rate effect taken into account and (b) with effects of pressurization rate and size taken into account

Fig. 8. Normalized tensile strength as a function of borehole diameter (D_i) for Lac du Bonnet (LdB) granite and Indiana limestone, modified from Haimson and Zhao (1991)

내경 크기에 따른 인장강도 변화에 대한 실험 연구도 Haimson and Zhao(1991)에 의해 수행되었는데 Lac du Bonnet 화강암과 Indiana 석회암에서의 내경 크기에 따른 인장강도의 변화는 각각

$$T_{hf} = e^{-0.22D_i+2.0} + 8.3 \text{ (Lac du Bonnet granite)} \quad (8)$$

$$T_{hf} = e^{-0.28D_i+2.1} + 9.6 \text{ (Indiana limestone)} \quad (9)$$

의 경험식으로 주어졌다. 이 두 암석에 대한 크기 효과를 통합하여 관찰하기 위하여 NX구경에서의 인장강도로 정규화 시킨 인장강도를 내경의 크기의 함수로 Fig. 8에 도시하였다. 시편의 인장강도는 내경이 증가함에 따라 급격히 감소하다가 약 30 mm 이상의 내경부터는 크기 효과가 약해지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 내경 크기에 대한 인장강도 감소 추세는

$$T_{hf}/T_{hf,0} = 1.44D_i^{-0.1} \quad (10)$$

로 표현되며 이를 근거로 볼 때 본 연구의 중공원통 인장시험의 시편(내경 6.5mm)의 인장강도는 NX 크기 내경의 시편의 경우에 비해 약 19% 높게 측정되었을 수 있다는 점을 알 수 있었다. 이 크기 효과를 보정하여 압열인장강도와 비교해 보면 Fig. 7b와 같이 두 다른 인장시험에서 얻어진 결과가 상당히 일치함을 볼 수 있다.

암반 인장강도의 크기는 시험방법 및 속도, 시편성형 상태, 미세균열 여부 등에 의해 크게 좌우되기 때문에 (Rocco et al., 1999a, Rocco et al., 1999b, Claesson and Bohlooli, 2002, Cho et al., 2003), 본 연구에서 측

정된 압열인장강도와 수압파쇄 인장강도의 크기는 비교적 일치하는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 수압파쇄 응력측정법에 적용할 시 최대수평주응력의 크기에 대한 또 다른 불확실성을 야기할 수 있기 때문에 인장강도의 차이를 결정할 요인에 대해서는 여러 시험조건(시편크기 또는 시험시간 등)에 대한 보다 많은 실험을 수행하여 분석할 필요가 있을 것이다. 시험 결과들을 종합해 보면 수압파쇄 응력측정으로 최대수평주응력의 크기를 규명하고자 할 때 암반 인장강도는 시추공 형태를 모사한 중공원통 인장시험으로 측정된 결과를 이용하는 것이 가장 좋겠지만 시추환경 및 코어회수 조건에 따라 비교적 쉽게 접근 가능한 압열인장강도를 이용하여도 그 크기를 일정 오차범위 내로 제한시킬 수 있을 것이라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 수압파쇄 응력측정법으로 최대수평주응력의 크기를 규명하고자 할 때 필요한 요소 중 하나인 암반의 인장강도를 실내시험(중공원통 인장시험 및 압열인장시험)을 통해 측정하고 각 시험법으로 측정된 인장강도 간에 어느 정도의 차이가 나타나는지 관찰하였다. 수압파쇄시험으로부터 최대수평주응력을 산정함에 있어서 인장강도의 크기를 정확히 측정하는 것은 매우 중요하며 실제 수압파쇄와 유사한 조건하에서 인장강도를 측정할 수 있는 시험은 중공원통 인장시험이다. 하지만 ISRM(2003)에서는 시험조건등의 제약을 고려할 때 몇 가지 불확실성을 감안하더라도 압열인장시험으로부터 구해지는 간접인장강도를 사용하여도 무방한 것으로 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서는 중공원통 인장시험과 압열인장시험을 공히 실시하여 그 크기의 차이에 대해 실험적으로 재조명하였으며, 시험결과 수압파쇄시험결과 해석을 위한 인장강도로 압열인장강도를 이용하여도 무방함을 확인하였다. 또한 본 연구에서 중공원통 인장시험의 경우 주입압 증가속도가 높을수록 인장강도가 높게 측정됨을 확인하였으며 이는 실제 현장 수압파쇄에서 보인 압력증가율 하에서 시험된 인장강도 또는 그 압력증가율로 보정된 인장강도를 사용해야 한다는 점을 시사한다. 또한 시험편 내경의 차이에 의한 크기효과도 인장강도에 영향을 미치는 것으로 보이며 이러한 점을 고려하였을 때 압열인장강도와 결과가 유사한 것으로 나타났다. 이를 통해 중공원통 인장시험법으로 측정한 인장강도와 더불어 시편성형 및 시험적용이 부득이할 경우 압열인장강도를 이용하더라도 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

References

- Hubbert, K. M. and Willis, D. G., 1957, Mechanics of hydraulic fracturing, *Petrol. Trans. AIME*, T. P. 4597, 210, 153-166.
- Haimson, B. C. and Fairhurst, C., 1967, Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks, *Society of Petroleum Engineers*, 7, 310-318.
- Rummel, F., 1987, Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements, in Atkinson, B. K., eds., *Fracture Mechanics of Rocks*, Academic Press, London, 217-239.
- Zoback, M. D. and Haimson, B. C., (Eds), *Proc. Workshop on Hydraulic fracturing measurements*, U.S. National Committee for Rock Mechanics, National Academy press, Washington, D. C.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfieb, D., Muller, B., 2008, Release of the world stress map available online at www.world-stress-map.org, 2008.
- Ito, T., Evans, K., Kawai, K., Hayashi, K., 1999, Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 36, 811-826.
- Rutqvist, J., Tsang, C. F., Stephansson, O., 2000, Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 37, 107-120.
- Evans, K. F., Scholz, C. H., Engelder, T., 1988, An analysis of horizontal fracture initiation during hydrofracturing stress measurements in granite at North Conway, New Hampshire, *Geophysics*, 93, 251-264.
- Kirsch, G., 1898, Theorie der elastizitat und die Bedurfnisse der festigkeitslehre, *Zeit. Ver. dt. Ingenieure*, 42, 797-807.
- Haimson, B. C., 1968, Hydraulic fracturing in porous and nonporous rock and its potential for determining in situ stresses at great depth, Ph. D. Thesis, Univ. of Minnesota, 234p.
- Cornet, F. H., 1982, Analysis of injection tests for in-situ stress determination, In: *Proceedings of Workshop Hydraulic fracturing Stress Measurement*, Menlo Park, 1982, 414-443.
- Cheung, L. S. and Haimson, B. C., 1989, Laboratory study of hydraulic fracturing pressure data-How valid is their conventional interpretation?, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, 595-604.
- Bredehoeft, J. D., Wolff, R. G., Keys, W. S., Shutter, E., 1976, Hydraulic fracturing to determine regional in situ stress field, in the Piceance Basin, Colorado, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, 250-258.
- Erarslan, N. and Williams, D. J., 2012, Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 49, 21-30.
- Ye, J. H., Wu, F. Q., Zhang, Y., Ji, H. G., 2012, Estimation of the bi-modulus of materials through deformation measurement in a brazilian disk test, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 52, 122-131.
- Haimson, B. C. and Cornet, F. H., 2003, ISRM suggested methods for rock stress estimation-Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures(HTPF), *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 40, 1011-1020.
- Ohoka, M., Funato, A., Takahashi, Y., 1997, Tensile test using hollow cylindrical specimen, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34, 1-11.
- Ringstad, C., Brevik, I., Addis, M. A., Santarelli, F. J., 1994, Scale effects in hollow cylinder tests, *Proc 2nd conference on Scale Effects in Rock Masses*, Lisbon.
- Yamashita, F., Mizoguchi, K., Fukuyama, E., Omura, K., 2010, Reexamination of the present stress state of the Atera fault system, central Japan, based on the calibrated crustal stress data of hydraulic fracturing tests obtained by measuring the tensile strength of rocks, *Journal of Geophysical Research*, 115, B04409.
- Haimson, B. C. and Z. Zhao, 1991, Effect of Borehole Size And Pressurization Rate On Hydraulic Fracturing Breakdown Pressure, in *Rock Mechanics Contribution and Challenges: Proc. 31st US Symposium on Rock Mechanics*, 191-199.
- Zoback, M. D. and Pollard, D. D., 1978, Hydraulic fracture propagation and the interpretation of pressure-time records for in situ stress determination. *Proc. 19th U.S. Symp. on Rock Mech.* 14-22.
- Karfakis, M. G., 1986, A critical review of fracture mechanics as applied to hydraulic fracturing stress measurements. *Proc. 1986 SEM Spring Conf. on Expl. Mech.*, 141-147.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W., 1976, *Fundamentals of rock mechanics*, 2nd ed., 513 pp, Methuen, London.
- ISRM, 1977, International society for rock mechanics, Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, 99-103.
- KSRM, 2006, Korean Society for Rock Mechanics, Standard test method for indirect tensile strength of rock by the Brazilian tests, *Tunnel and Underground Space*, 16, 279-280.
- Chen, C. S., Pan, E., Amadei, B., 1998, Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using brazilian tests, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 35, 43-61.
- Kranz, R. L., 1983, Microcracks in rocks: A review, *Tectonophysics*, 100, 449-480.
- Wong, T. F., 1985, Geometric probability approach to the characterization and analysis of micro cracking in rocks, *Mech. Materials*, 4, 261-276.
- Lanaro, F., Sato, T., Stephansson, O., 2009, Microcrack modelling of brazilian tensile tests with the boundary

- element method, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 46, 450-461.
30. Nicksiar, M. and Martin, C. D., 2013, Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks, Engineering geology, 154, 64-76.
 31. Rocco, C., Guinea, V., Planas, J., Elices, M., 1999a, Size effect and boundary conditions in the brazilian test: Experimental verification, Materials and Structures, 32, 210-217.
 32. Rocco, C., Guinea, V., Planas, J., Elices, M., 1999b, Size effect and boundary conditions in the brazilian test: Theoretical analysis, Materials and Structures, 32, 437-444.
 33. Claesson, J. and Bohlooli, B., 2002, Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 39, 991-1004.
 34. Cho, S. H., Ogata, Y., Kaneko, K., 2003, Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 40, 769-777.

조 영 욱

2011년 충남대학교 자연과학대학 지질
환경과학과 이학사

Tel: 042-821-7563
E-mail: yeonguk316@cnu.ac.kr
현재 충남대학교 대학원 지질학과 응용
지질학전공 석사과정

이 태 중

1990년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1992년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학석사
1998년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학박사

Tel: 042-868-3051
E-mail: megi@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 지질자원연구팀 책임연구원

장 찬 동

1989년 서울대학교 자연과학대학 지질
학과 이학사
1991년 서울대학교 대학원 지구물리학
이학석사
2001년 미국 위스콘신 메디슨 지질공학
공학박사

Tel: 042-821-6430
E-mail: cchang@cnu.ac.kr
현재 충남대학교 자연과학대학 지질환
경과학과 부교수

김 광 영

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사

Tel: 031-910-0225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 SOC성능연
구소 Geo인프라연구실 수석연구원