

ORIGINAL ARTICLE

상온 및 고온 하 진삼축압축실험을 이용한 시추공의 파괴 거동 기초 연구

윤정환¹, 민기복², 박의섭^{3*}, 정용복⁴

¹서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정, ²서울대학교 에너지시스템공학부 교수

³한국지질자원연구원 지질환경연구본부 심지층연구센터 책임연구원, ⁴한국지질자원연구원 지질환경연구본부 심지층연구센터 센터장

A Basic Study on Borehole Breakout under Room Temperature and High Temperature True Triaxial Compression

Jeonghwan Yoon¹, Ki-Bok Min², Eui-Seob Park^{3*}, and Yong-Bok Jung⁴

¹MS Student, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

²Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

³Principal Researcher, Deep Subsurface Research Center, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience of Mineral Resources

⁴Head, Deep Subsurface Research Center, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience of Mineral Resources

*Corresponding author: espark@kigam.re.kr

Received: December 10, 2020

Revised: December 23, 2020

Accepted: December 23, 2020

ABSTRACT

This paper performs laboratory experiments for borehole stability considering temperature and true triaxial stress condition, and observes a thermo-mechanical behavior of the rock under stress and temperature conditions of deep underground. China yellow sandstone and Hwangdeung granite specimens were used to perform a true triaxial compression test. Mechanical tests were carried out under nine confining pressure conditions, and thermo-mechanical tests using granite samples were carried out under six confining pressure conditions at 60-100°C. In the mechanical tests, maximum principal stress at borehole breakout was proportional to intermediate principal stress. In the thermo-mechanical tests, it was confirmed that thermal stress is added to the stress field of the borehole with the increase in temperature, resulting in additional breakout progress. To analyze the results of the laboratory experiment, Mogi-Coulomb failure criterion was used. The results of traditional triaxial compression test on cylindrical specimens and borehole breakout under true triaxial compressions matched well with Mogi-Coulomb failure criterion.

Keywords: Borehole stability, True triaxial compression experiment, Mogi-Coulomb failure criterion, Thermal stress, Borehole breakout

초록

본 연구에서는 현지 암반의 진삼축 응력 조건과 온도 변화를 고려한 공벽 안정성 실험을 수행하고, 심부 지하의 응력 조건과 압력 조건에서 암석의 열역학적 거동을 관찰하였다. 중국 황색 사암과 국내 황등 화강암 시료를 이용하여 진삼축압축실험을 진행하였다. 역학 실험은 각각 9가지 구속압 조건에서 수행되었고 열역학 실험은 화강암 시료를 이용하여 6가지 구속압 조건에서 시료를 60°C~100°C로 가열하여 수행하였다. 역학 실험 결과 공벽 파괴가 발생하는 최대 주응력은 중간 주응력에 비례하는 것을 확인하였다. 열역학 실험에서는 온도 증가에 따라 공벽의 응력장에 열응력이 추가되어 공벽 파괴가 추가적으로 발생하는 것을 확인하였다. 실내 실험 결과를 분석하기 위해 모기쿨롱 파괴 기준식을 사용하여 분석하였다. 원통형 시료에 대한 전통적인 삼축압축시험 결과와 진삼축 조건 하의 공벽 파괴 실험 결과가 모두 진삼축 파괴 기준식인 모기쿨롱 파괴 기준식에 잘 부합됨을 확인하였다.

핵심어: 공벽 안정성, 진삼축압축실험, 모기쿨롱 파괴 기준, 열응력, 공벽 파괴



1. 서론

심부 지하 조건에서 시행되는 공학적 응용 프로젝트의 대부분은 현지 응력을 받는 상태에서 시추공 또는 터널을 굴착하게 된다. 시추공을 굴착할 때 암반에 가해지고 있던 원래의 응력 상태에 변화가 생기고 공벽 근처에 응력 집중이 발생하게 된다(Hoek and Brown, 1980). 그리고 만약 그 응력 집중이 암석의 강도보다 커지게 되면 파괴가 일어나게 되고, 이를 공벽 파괴(Borehole breakout)나 스폐링(Spalling)이라 부른다. 공벽 파괴가 일어나면 수직 시추공의 경우 주로 최소수평응력 방향으로 시추공을 확대하는 현상을 관찰할 수 있다(Zoback et al., 1985, Guenot, 1989). 이러한 현상을 기반으로 공벽 파괴를 관찰하여 현지 응력 방향과 크기에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에 물리검층을 통해, 공벽 파괴를 현지 응력의 지표로 활용한다(Barton et al., 1988). 특히, 심도가 깊어질수록 수압파쇄나 오버코어링 기법 등의 적용이 어려워 공벽 파괴의 현지 응력 지표로서의 역할이 더욱 중요해진다.

심지층 공간의 개발 및 활용, 심부 지하에 존재하는 석유, 천연가스 및 지열 등 에너지 개발이나 고준위 방사성 폐기물 지층 처분 또는 이산화탄소 지층 저장에 위한 심부 시추공 굴착 시 시추공을 안정하게 유지하는 것이 필수적이다. 시추 전에 평형상태로 놓여 있던 응력장이 시추에 의해 공벽 주변 암반 응력이 교란되고 집중하게 된다. 이로 인해 시추 공벽이 불안정해지고, 공벽 파괴가 발생하게 되면 심지층 프로젝트의 경제적이고 안전한 수행에 많은 문제를 유발하게 된다. 최근에는 수직공, 수평공 및 경사공 등 시추공의 궤적이 다양해지고 있어, 시추 과정에서 공벽을 안정되게 유지하는 문제의 중요성은 더욱 증가하고 있다(Maury & Sauzay, 1987).

열응력은 지하 암반의 온도 변화에 따라 변위가 구속될 때 발생하는 응력으로, 현지 응력에 추가되며 시추공 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다(Jansen et al., 1993). 예를 들어 방사성 핵폐기물을 지하에 처분할 경우 폐기물의 핵분열에 의해 고온이 발생하고 주변 암석으로 확산되어 공벽 근처의 온도 변화를 유발하여 추가적으로 열응력이 발생한다. 또한, 심부 지열에너지의 경우 시추 과정에서 주입하는 이수로 인해 암반 온도가 낮아지면서 시추공 주변에 인장 성분의 열응력이 발생하게 된다. 심부 지열에너지는 1~5 km 정도의 대심도가 필요하며, 온도 구배(Geothermal Gradient)로 인해 지하 암반의 온도는 100°C를 훌쩍 상회한다. 시추나 수압 파쇄 과정에서 주입된 이수나 유체가 공벽 주변의 암반을 냉각시키며, 시추 이후에는 냉각된 지하 암반의 온도가 서서히 회복되며 공벽의 온도가 다시 증가한다. 이러한 과정에서 열응력이 발생하게 되며, 유도된 열응력이 공벽 주변의 응력 상태를 변화시켜 파괴가 일어나기 쉬운 상태로 만든다(윤동영, 2019).

본 논문에서는 심부 시추공의 공벽 파괴 거동과 열응력의 공벽 안정성에 대한 영향을 확인하기 위해 진삼축압축실험을 통해 암석의 역학적 거동과 열역학적 거동 특성을 확인하는 것을 목적으로 하였다. 이에 역학적 실내 실험 결과를 파괴 기준식과 비교하여 공벽 파괴에 기존 파괴 기준식이 잘 부합하는지 확인하였다. 여러 파괴 기준식 중에서도 중간 주응력을 고려하는 파괴 기준식을 실험 결과와 비교하여 공벽 파괴에 중간 주응력이 미치는 영향을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 공벽 파괴

V-자형 노치는 공벽 파괴의 전단 혹은 인장 파괴로 의해 발생하는 가장 일반적으로 관찰되는 파괴 패턴이다. Fig. 1에서 V-자형 공벽 파괴를 실내 실험으로 모사할 수 있음을 보여준다. 실제 공학 분야에서는 진삼축 상태임에도 불구하고 시료 준비의 어려움과

실험 절차의 복잡성 때문에 대부분의 공벽 파괴 모사 실험은 수직응력과 봉압상태를 고려한 2축 상태로 진행되었다. 또한, 진삼축 조건에서 수행되었다 하더라도, 실험에서는 중간 주응력이 시추공 안정성에 미치는 영향에 초점을 맞추지 않았다. 실제 현장에서는 중간 주응력이 시추공 안정성에 상당한 영향을 주며, 여러 연구자에 의해 강조되어왔다(Ewy, 1999, Mogi, 1967, Single et al., 1998). 따라서 공벽 파괴에 대한 진삼축 조건에 의한 영향을 정량화하는 것이 매우 중요하다. 이전 연구에서는 대부분 역학 조건과 열역학 조건을 개별적으로 고려하여 공벽 안정성 실험을 수행하였다. 기압 및 온도 조건을 동시에 고려한 경우에는 현장 응력이 수직 응력을 포함한 삼축 응력 상태임에도 불구하고 수직 응력의 영향을 배제한 이축 시험으로 수행되었다(Haimson & Song, 1993, Lee & Haimson, 1993, Fakhimi et al., 2002). 따라서 본 연구에서는 삼축 응력 상태와 지하암반의 온도 조건을 고려한 실내 실험을 수행하고, 그 결과를 모기쿨롱 파괴 기준식을 사용하여 비교 분석하였다.

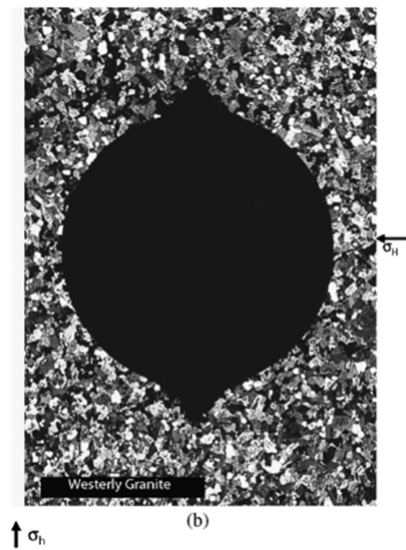


Fig. 1. V-shaped notch observed in indoor experiment with granite (Haimson, 2007)

2.2 이론(파괴 기준)

시추공 안정성을 분석하려면 공벽의 응력 상태를 파괴 기준과 비교해야 한다. 수직 시추공벽의 응력 상태는 커시(Kirsch) 해에 의해 다음과 같이 도출된다(Zheng, 1989).

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= 0 \\ \sigma_{\theta\theta} &= S_H + S_h - 2(S_H - S_h)\cos 2\theta \\ \sigma_{zz} &= S_v - 2\nu(S_H - S_h)\cos 2\theta\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 σ_{rr} 은 반경응력, $\sigma_{\theta\theta}$ 는 접선응력, σ_{zz} 는 축응력, ν 는 암석의 포아송 비이다. θ 는 S_H 방향에서 시계방향으로 측정한다. 공벽에 가해지는 접선응력, 반경응력, 축응력을 각각 최대 주응력, 최소 주응력, 중간 주응력으로 가정할 수 있다. 중간 주응력 σ_{zz} 에 만 수직응력이 반영되기 때문에 수직응력을 통해 중간 주응력의 영향을 확인할 수 있다. 실험을 통해 얻은 주응력을 파괴 조건식에 대입하여 파괴에 필요한 최대 주응력을 계산할 수 있다.

암석의 파괴 조건식으로는 모어쿨롱(Mohr-coulomb), 훅브라운(Hoek-Brown), 드러커-프레이저(Drucker-Prager) 등이 있으며 중간 주응력을 고려한 파괴 조건식으로는 모기쿨롱(Mogi-Coulomb), 위볼스-쿡(Wiebols and Cook) 등이 제시된 바 있다 (Colmenares & Zoback, 2002, Al-Ajmi & Zimmerman, 2006). 본 연구에서는 실내 실험 결과를 분석하기 위해 Mogi-Coulomb 파괴 기준이 사용되었다.

1967년에 Mogi는 암석의 파괴에 최소 주응력에 비해서는 작지만, 중간 주응력의 영향이 있다는 사실을 인식하였고, 중간 주응력을 고려하는 모기쿨롱 파괴 기준식을 제시하였다(Mogi, 1967, 1971). 모기쿨롱 파괴 기준식은 다음과 같다.

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{2}$$

$$\sigma_{m,2} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \tag{3}$$

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{m,2}) \tag{4}$$

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \tag{5}$$

여기서 σ_1 은 최대 주응력, σ_3 는 최소 주응력, σ_2 는 중간 주응력이며, a와 b는 실험으로부터 구해지는 상수이다. Al-Ajmi와 Zimmerman등은 최소 및 중간주응력이 동일한 전통적인 삼축실험으로부터도 변수 a와 b를 구할 수 있음을 보였으며 변수 a, b는 다음 식과 같이 점착력과 내부 마찰각에 관계된다 (Al-Ajmi & Zimmerman, 2005).

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3}c \cdot \cos\phi, b = \frac{2\sqrt{2}}{3}\sin\phi \tag{6}$$

Martin(1997)은 축척 효과(Scale Effect)로 인해 공벽의 크기가 작아질수록 실험실에서 측정된 강도보다 상대적으로 높은 수준의 응력에서 파괴가 관찰됨을 보인 바 있다. 이러한 축척 효과 때문에 파괴 기준을 공벽 파괴 결과에 직접 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 관찰된 축척 효과(Fig. 2)를 고려하여 각 암석의 강도를 보정하여 파괴 기준식에 적용하였다.

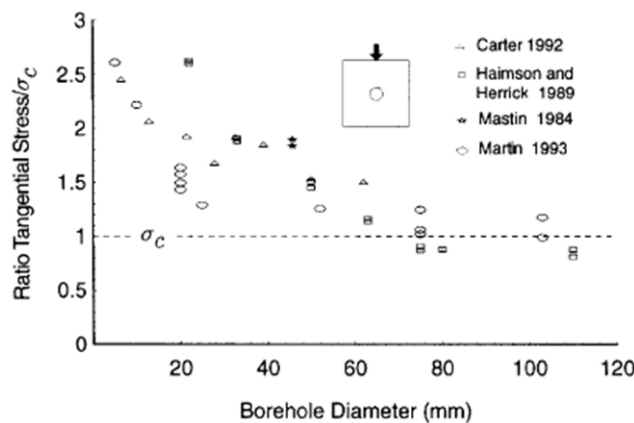


Fig. 2. Scale Effect according to the diameter of borehole (Martin, 1997)

3. 상온 및 고온 하의 진삼축압축실험에 의한 공벽 파괴

본 연구에서는 시추공 안정성에 대한 심부 지하의 암반 응력 및 온도 변화의 영향을 파악하기 위해 진삼축압축실험을 수행하였다. 진삼축 장비의 사양을 고려하여 시추공을 포함한 정육면체의 시료를 제작하여 진삼축압축실험을 수행하였다. 사암과 화강암 시료를 성형하여 시추공 형상을 모사하였으며, 진삼축 장비의 가압 한계로 인해 100 mm 크기의 정방형 시료에 20 mm 공벽을 굴착하였다(Lee & Haimson, 1993). 진삼축 장비를 활용하여 다양한 구속압 조건으로 초기 응력을 가해 공벽 파괴를 모사하였다.

3.1 시료의 역학적 기본 물성

본 연구에서는 Fig. 3의 중국 황색 사암과 국내 황등 화강암이 사용되었다. 시료의 물성을 측정하기 위해 각각 5회의 일축압축시험과 간접인장시험이 수행되었다. 원통형 시료에 대해 전통적인 삼축압축시험을 구속압 조건에 따라 사암의 경우 2회, 화강암의 경우 3회 수행하였고 그 결과를 토대로 점착력과 내부 마찰각을 계산하였다. 측정된 물성은 Table 1과 같다.

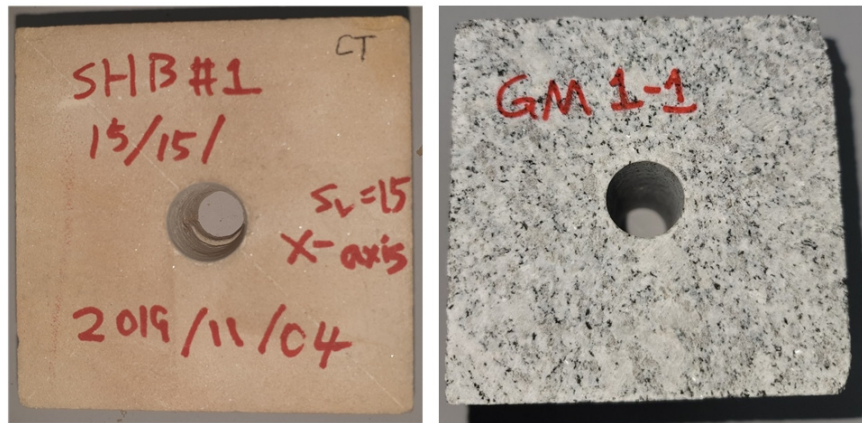


Fig. 3. China Yellow Sandstone (left), Korea Hwangdeung Granite (right)

Table 1. Mechanical properties of yellow sandstone and granite

China Yellow Sandstone			Hwangdeung Granite		
Property	Unit	Average Value	Property	Unit	Average Value
Elastic Modulus (E)	GPa	23.1	Elastic Modulus (E)	GPa	53.8
Poisson's ratio (ν)		0.28	Poisson's ratio (ν)		0.23
Density	kg/m ³	2132	Density	kg/m ³	2650
Uniaxial Compression Strength	MPa	53.7	Uniaxial Compression Strength	MPa	237
Brazilian Tensile Strength	MPa	3.2	Brazilian Tensile Strength	MPa	9
Friction angle	°	46.8	Friction angle	°	56.7
Cohesion	MPa	9.8	Cohesion	MPa	28

3.2 진삼축압축시험 장비

고온 고압 조건하의 진삼축압축실험을 수행하기 위해서 Wille Geotechnik 사의 고온 고압 진삼축압축시험 장비를 사용하였다. 실험 시스템은 하중 프레임, 하중 발생기, 가열 패널, AE 센서, 카메라, 압력 조절과 AE 모니터링을 위한 제어용 PC 등으로 구성되었다(Fig. 4). 하중 프레임의 각 판의 크기는 95 mm×95 mm의 사각 모양이며 최대 하중 용량은 1100 kN이다. x축, y축, z축 총 3방향으로 압력 제어가 가능하며 3방향의 서보 컨트롤 액츄에이터를 사용하여 시료 크기가 100 mm×100 mm인 경우에는 최대 130 MPa 정도의 축방향 가압이 가능하다. 가열 장치들은 각 판에 삽입되어 있으며 진삼축 장비에 장착된 가열 패널에 의해 조절된다. 이 시스템의 최대 가열 온도는 150°C이다.

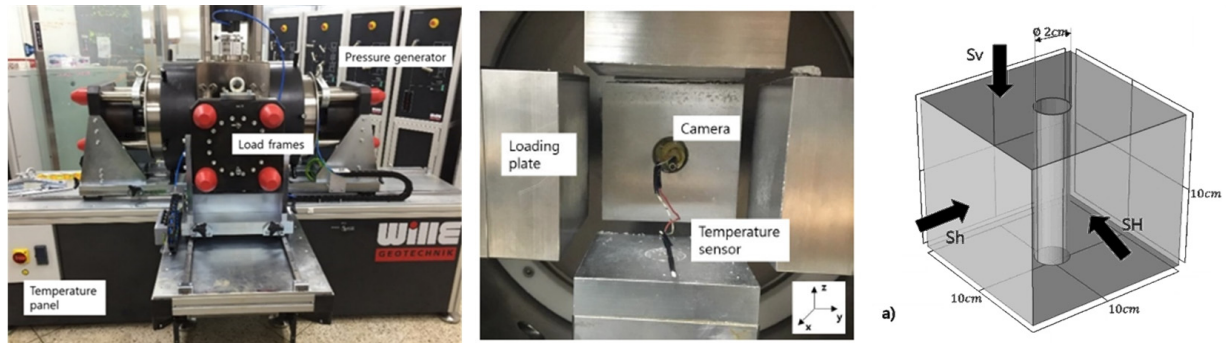


Fig. 4. High temperature true tri-axial test system and schematic diagram of loading

위 장비는 고온 고압 조건 하의 다양한 주입 조건 및 구속 응력 조건에서 파쇄 실험 수행이 가능하며 Fig. 5와 같이 가압판 내부에 한 면에 4개의 AE(Acoustic Emission) 센서를 4개의 면에 부착하여 총 16개의 센서를 이용하여 실험 과정에서 시료에 생성되는 균열로 인해 발생하는 미소 진동의 크기 및 생성 위치를 추정할 수 있다.

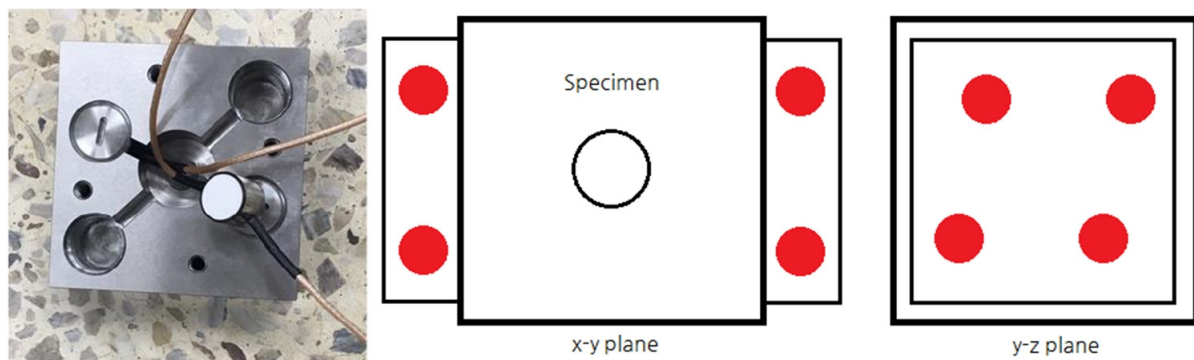


Fig. 5. AE sensor holder with schematic diagram

3.3 진삼축 응력 재현 및 가열 방법

역학적 조건만을 고려한 공벽 안정성 실험을 위하여, x, y, z 축 방향의 응력 값을 적용한 진삼축 역학 실험을 수행하였다. 열역학적 조건을 고려한 공벽 안정성 실험을 위해 시료에 압력이 가해진 상태에서 시료 외벽을 가열하여 공벽의 온도를 60°C~100°C까지

상승시키는 열역학 실험을 수행하였다. 초기균열(Initial crack) 발생이 예측되는 응력 수준(100 MPa)에서 시료에 적용되는 하중 증가를 정지시킨 이후, 유압 밸브를 폐쇄하여 시료의 팽창으로 인해 가압판이 밀리지 않도록 고정했다. 가압판을 고정한 이후 온도를 증가시키며 공벽에서 추가적인 파괴가 발생하는지 확인하였다. 경계조건의 경우 사암은 9개의 하중 실험, 화강암의 경우는 9개의 하중 실험과 열응력을 고려한 6개의 하중 실험으로 총 24개로 구성되었다. 기초 연구 단계이기 때문에 약 1 km 심부 수준의 구속압을 기준으로 설정하였다. 실험에 사용된 시료와 경계 조건은 Table 2와 3에 정리되어 있다.

Table 2. Loading conditions of Mechanical Tests

Rock type	Sandstone Mechanical Test			Rock type	Granite Mechanical Test			
	Number	Sv (MPa)	Sh (MPa)		Number	Sv (MPa)	Sh (MPa)	
China Yellow Sandstone	SHB#1	15	15	Hwangdeung Granite	GM1-1	5		
	SHB#2		20		GM1-2	7		5
	SHB#3		25		GM1-3	10		
	SHB#4		30		GM2-1	5		
	SHB#5		35		GM2-2	7		7
	SV#1	20	20		GM2-3	10		
	SV#2	25	25		GM3-1	5		
	SV#3	30	30		GM3-2	7		10
	SV#4	35	35		GM3-3	10		

Table 3. Loading and heating conditions of Thermo-Mechanical Tests

Rock type	Granite Thermo-Mechanical Test			
	Number	Sv (MPa)	Sh (MPa)	Temperature (°C)
Hwangdeung Granite	GT1-1	5	5	Room temperature → 60 → 80 → 100
	GT1-2		10	
	GT2-1	7	5	
	GT2-2		10	
	GT3-1	10	5	
	GT3-2		10	

사암에 대한 역학 실험의 경우는 수직응력을 고정시킨 경우(SHB)와 수직응력과 최소수평응력이 동일한 경우(SV)의 두 가지 방식으로 수행되었다. 화강암에 대한 역학 실험(GM)에서는 서로 다른 최소수평응력에 대해 세 종류의 수직응력이 사용되었다. 장비의 가압 한계, 화강암의 일축압축강도와 축척 효과를 고려하여 구속압이 10MPa를 초과하면 파괴가 발생하지 않을 것으로 예측되어 구속압이 10MPa를 초과하지 않도록 설정하였다. 화강암을 사용한 열역학 실험(GT)에서는 서로 다른 역학적 경계 조건에 대해 60°C, 80°C 및 100°C로 순차적으로 온도를 증가시켰다. 카메라의 내열 한계를 고려하여 100°C까지 가열하였고, 온도 구배를 고려한다면 약 3~4 km 심부의 온도를 모사한 것으로 생각할 수 있다. 모든 진삼축 실험에서 0.1 MPa/s의 일정한 속도로 가압시켰다.

공벽 파괴 양상을 확인하기 위해 AE 센서를 통해 보조 데이터를 수집하였고, 카메라와 CT촬영을 통해 시각적 데이터를 수집하였다. 장비 자체의 한계로 인해 직접 변위나 변형을 측정할 수 없었으며, AE센서가 가압판 중간에 삽입되어 있어 시료와 직접적인

접촉이 불가능하여 파괴 지점을 특정하기에 어려움이 있었다. 따라서, 누적 AE 절대 에너지와 카메라로 촬영된 시각적 데이터를 통해 간접적인 암석 파괴 지점을 추정하였다. 최초로 파괴가 발생하는 지점을 특정하기 위해 단위 시간 동안 측정된 피크 카운트 수와 누적 AE 절대 에너지를 비교하였다(Liu et al., 2015, Zhuang et al., 2020).

4. 실험 결과

4.1 AE 데이터 분석 결과

누적 AE 절대 에너지를 사용하여 파괴가 발생하는 지점을 추정하고, 시추공 내에 설치된 카메라로 공벽 파괴 지점을 유추하였다. 누적 AE 절대 에너지에서 관측되는 노이즈를 최대한 배제하기 위해 특정 진폭 이하의 피크 카운트(Peak Count) 및 AE 절대 에너지 데이터를 제외하고 분석하였다. 다만, 진삼축 장비의 가압판 면적이 81 cm^2 으로 시료의 벽면 면적 100 cm^2 보다 작기 때문에 가압 과정에서 시료의 모서리에서 전단 파괴가 발생하게 된다. Fig. 6은 단위 시간 동안 측정된 피크 카운트 수와 누적 AE 절대 에너지이며, 그래프를 통해 모서리에서 파괴되면서 발생하는 노이즈가 크게 측정된 것을 확인할 수 있다. 이에 AE 데이터와 공벽 내부를 촬영한 시각적 데이터(Fig. 7)를 비교하여 시료의 공벽 파괴가 발생하는 지점을 결정하였다. 분석 결과, 피크 카운트가 가장 크게 관측된 시점에 초기 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

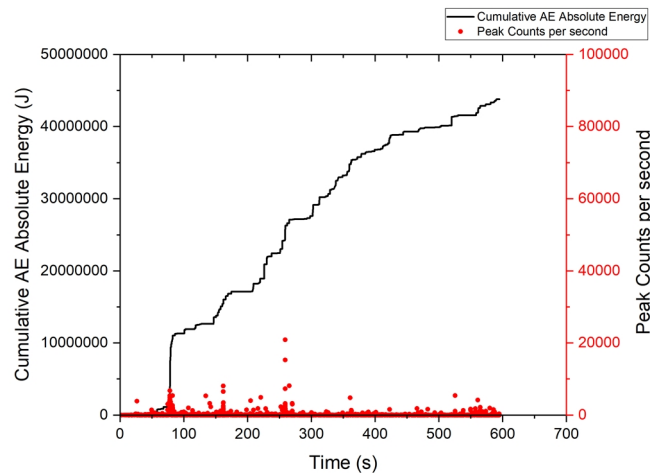


Fig. 6. Cumulative AE absolute energy and peak counts per second obtained from SHB#3 experiment

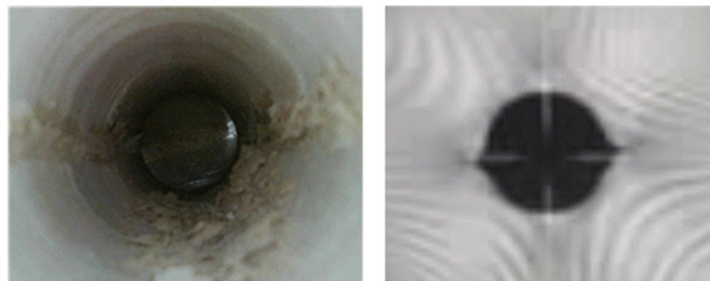


Fig. 7. Borehole breakout (left), CT scan of borehole breakout (right) from SHB#3

4.2 상온하 진삼축 실험 결과

최소수평응력의 영향을 추정하기 위해 실내온도를 유지한 상온하에서 동일한 수직응력 하에 서로 다른 최소수평응력 조건에서 실험을 수행하였고, 수직응력의 영향을 추정하기 위해 다양한 수직응력과 최소수평응력 조건에서 실험을 수행하였다. 최대수평응력이 증가함에 따라 누적 AE 절대 에너지가 급증하는 구간과 피크 카운트가 최대인 지점에서 최초로 파괴가 발생하고, 최소수평응력 방향으로 V자 형태의 공벽 파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 실험 결과는 Table 4와 Table 5에 정리되어 있다.

Table 4. Sandstone Mechanical Experiment Result

Specimen Number	Confining Pressure		S _H at failure		
	S _v (MPa)	S _h (MPa)	SH#1 (MPa)	SH#2 (MPa)	SH#3 (MPa)
SHB#1	15	15	56.31	53.27	52.5
SHB#2		20	57.63	56.12	-
SHB#3		25	59.19	61.12	-
SHB#4		30	59.75	63.06	-
SHB#5		35	64.05	65.39	-
SV#1	20	20	57.31	-	-
SV#2	25	25	59.68	-	-
SV#3	30	30	60.15	60.9	62.47
SV#4	35	35	64.08	-	-

Table 5. Granite Mechanical Experiment Result

Specimen Number	Confining Pressure		SH at failure (MPa)
	S _v (MPa)	S _h (MPa)	
GM1-1	5	5	120.7
GM1-2	7	5	123.27
GM1-3	10	5	-
GM2-1	5	7	120
GM2-2	7	7	124.86
GM2-3	10	7	130
GM3-1	5	10	130
GM3-2	7	10	130
GM3-3	10	10	130

4.3 고온하 진삼축역학 실험 결과

온도가 시추공 안정성에 미치는 영향을 추정하기 위해 역학 실험의 조건과 동일한 구속압 조건에서 공벽의 온도를 60°C~100°C로 단계적으로 변화시켰다. 구속압을 설정하는 과정에서 최대수평응력이 100 MPa에 도달하기 이전에 초기균열이 발생하는 경우에는 초기균열이 발생한 최대수평응력에서 가압을 중단하였고, 초기균열이 발생하지 않은 경우에는 최대수평응력을 100 MPa로

고정하였다. 실험 결과는 Table 6과 같다. 공벽의 온도를 증가시키는 과정에서 초기균열이나 공벽 파괴가 발생한 경우와 그렇지 않은 경우는 각각 ‘O’와 ‘X’로 표시되어 있다.

Table 6. Granite Thermo-Mechanical Experiment Result

Specimen Number	Confining Pressure		S_H at Initial Crack (MPa)	Temperature (°C)	S_H at failure (Severe Crack) (MPa)	Note
	S_v (MPa)	S_h (MPa)				
GT1-1	5	5	94.08	60→80→100	O	*If initial crack does not occur during the loading process, we fixed S_H to 100MPa.
GT1-2	10	5	94.39	60→80→100	O	
GT2-1	5	7	100*	60→80→100	X	"O" is when crack occurs or expands during temperature increasing
GT2-2	10	7	96.83	60→80→100	O	"X" is when crack didn't occur during temperature increasing
GT3-1	5	10	100*	60→80→100	O	
GT3-2	10	10	100*	60→80→100	O	

5. 결과 분석

공벽 파괴가 발생한 시점의 최대수평응력과 구속압을 식 (1)에 대입하여 공벽에 작용하는 접선응력, 축응력과 반경응력을 계산하였다. 공벽 파괴가 최소수평응력 방향에서 발생했기 때문에 θ 는 90도가 되며, 도출되는 커시해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= 0 \\ \sigma_{\theta\theta} &= 3S_H - S_h \\ \sigma_{zz} &= S_v + 2\nu(S_H - S_h) \end{aligned} \quad (7)$$

계산 결과, 사암의 경우 공벽 파괴 시의 접선응력이 163.6~174.4 MPa로 일축압축강도의 약 3.0~3.2배였으며 화강암의 경우는 353~383 MPa로 일축압축강도의 약 1.5~1.6배로 도출되었다. 이전의 다른 연구(Martin, 1997)에서 관찰된 20 mm 시추공 시험에서 축척 효과(Fig. 2)가 1.5~3배의 범위를 가진 것을 고려하면 과거 사례와 유사한 범위의 축척 효과가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 축척효과를 고려하여 황색 사암 시료의 접선응력과 일축압축강도의 비를 3.13으로 가정했고 화강암 시료의 접선응력과 일축압축강도의 비는 1.56으로 가정하였다. 전통적인 삼축압축시험을 통해 얻어진 데이터와 진삼축 실험을 통해 얻어진 데이터를 식 (2)~(6)을 이용하여 모기쿨롱 파괴 기준식에 적용하여 결과를 비교하였다.

5.1 상온 하의 진삼축압축실험 결과

역학 실험의 경우, 원통형 시료에 대한 전통적인 삼축압축시험과 상온 하의 진삼축압축실험 결과를 이용하여 모기쿨롱 파괴 기준식에 선형 근사(Linear fitting)를 수행하였다. 사암과 화강암의 삼축압축실험 결과와 모기쿨롱 파괴 기준식을 비교한 결과는 각각 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 역학 실험 결과와 모기쿨롱 파괴 기준식의 회귀분석에 의한 결정계수가 사암의 경우는 0.9907, 화강암의 경우는 0.9983으로 상당히 높게 도출되었다. 이를 통해 사암과 화강암 역학 실험 결과 모두 모기쿨롱 파괴 기준식과 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다.

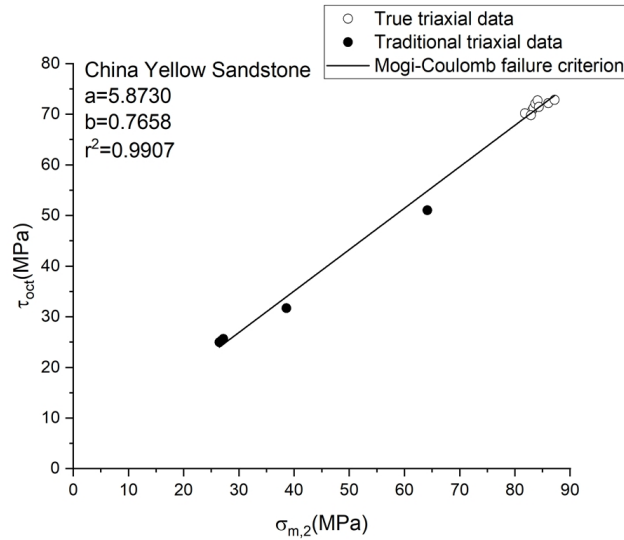


Fig. 8. Mogi-Coulomb failure criterion (black line), fitted to sandstone triaxial data (solid circles), and then compared to sandstone true triaxial test data (open circles)

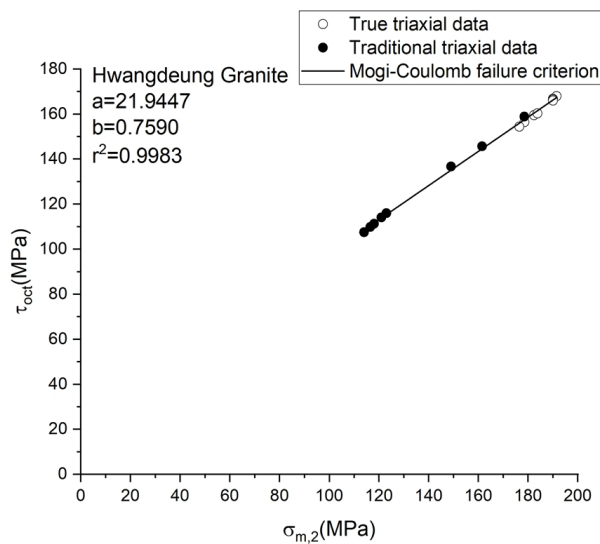


Fig. 9. Mogi-Coulomb failure criterion (black line), fitted to granite triaxial data (solid circles), and then compared to granite true triaxial test data (open circles)

5.2 고온 하의 진삼축압축실험 결과

열역학 실험의 경우, 공벽의 크기가 20 mm로 내부 변위나 열응력을 측정하기 힘들기 때문에 가열과정에서 공벽의 균열에 발생하는 변화를 관찰하였다. 공벽에 미약한 균열이 생기거나 생기기 직전에 가압을 멈추기 때문에 가열 과정에서 생기는 추가적인 균열이나 파괴의 확장은 열응력으로 인해 발생하는 것으로 가정했다. 공벽의 온도를 증가시키는 과정에서 누적 절대 AE에너지(Fig. 10)와 미세 균열의 수가 급증하는 것을 확인할 수 있었다. 열응력으로 인한 공벽 파괴가 발생한 이후 추가적인 가열로 발생하는 공벽 파괴는 최초의 파괴에 비해 비교적 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 가열 직전과 비교하여 박리의 넓이와 발생하는 부분이 증가하며, 공벽에서 박리의 정도가 심해지며 이전의 파편들에 비해 상대적으로 큰 파편들이 떨어져 나가는 것을 관찰하였다(Fig. 11).

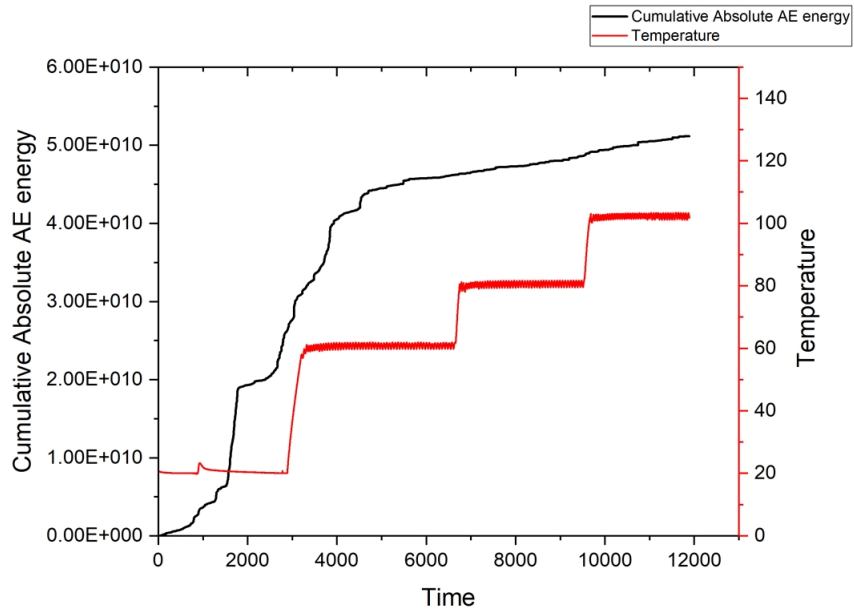


Fig. 10. Cumulative AE absolute energy obtained from GT1-2 experiment

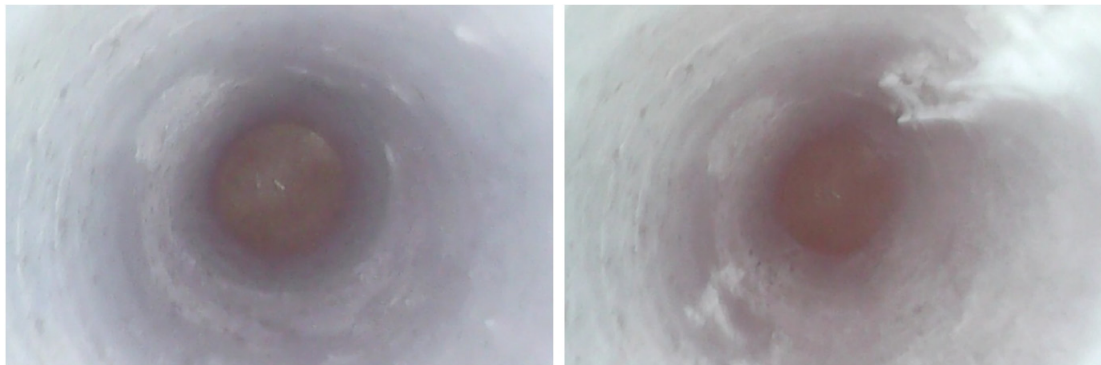


Fig. 11. Initial Crack of borehole (left), After heating to 100°C (right)

사암과 화강암 역학 실험을 통해 모기쿨롱 파괴 기준식이 진삼축 실험 결과와 상당 수준 일치하는 결과를 확인하였다. 따라서, 모기쿨롱 파괴 기준식이 공벽 파괴를 평가하는 기준으로 적합하다는 가정하에, 향후 여러 암석을 사용하여 검증할 예정이다. 화강암 역학 실험의 경우, 장비의 한계로 인해 실제 심부에 비해 낮은 구속압 조건에서 실험을 수행하였다. 향후 연구에서는 시료의 크기를 축소하여 더 높은 구속압 조건에서 역학 실험을 수행할 예정이다. 열역학 실험의 경우에는 장비의 한계로 인해 직접적으로 열응력, 변위와 변형을 측정할 수 없었기 때문에 향후 실험에서는 로드셀(Load Cell) 등 여러 부가 장치를 추가하여 공벽 안정성에서 열응력의 영향에 대한 신뢰성을 보강할 예정이다. 본 연구에서는 시료 제작의 어려움과 제작한 시료에 결함이 발생하여 각 실험 별로 1~3회의 실험을 수행하였다는 한계가 있어, 향후 추가적인 실험을 통해 신뢰성을 보강할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 고온 고압 조건에서 심부 암석의 열, 역학적 거동 특성을 파악하기 위해 진삼축압축실험을 수행했다. 심부 암석의 온도와 응력 조건 등을 고려하여 실험을 설계하였다. 실내 실험에는 중국의 황색 사암과 국내 화강암이 사용되었다. 역학 조건에서는 최소수평응력과 수직응력의 영향을 확인하기 위해 다양한 구속압 조건에서 역학 실험을 수행했다. 공벽 안정성에 온도의 영향을 확인하기 위한 열역학 실험을 수행했다.

실험 결과, 최소수평응력 방향으로 V-자형 노치 공벽 파괴가 관찰되었다. 누적 AE 절대 에너지가 급증하는 구간과 피크 카운트가 최대인 지점에서 공벽 파괴가 발생하였고, 최소수평응력 방향에서 발생하는 것을 확인하였다. 역학 실험에서 중간 주응력에 비례하여 공벽 파괴가 발생하는 최대 주응력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 열역학 실험에서는 공벽 내부를 가열함에 따라 열응력이 발생하여 추가적인 공벽 파괴가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

공벽 파괴를 분석하기 위해 모기쿨롱 파괴 기준을 사용하여 실험 결과를 비교하였다. 비교 결과, 역학 실험에서 사암의 경우는 모기쿨롱 파괴 기준과 일정 수준 부합하였고, 화강암의 경우는 모기쿨롱 파괴 기준과 상당히 잘 부합하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 중국 황색 사암은 상대적으로 중간 주응력의 영향을 적게 받으며, 황등 화강암은 중간 주응력에 더 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 향후, 추가적인 실험을 통해 신뢰성을 보완하고 반려암과 편암 등 다른 여러 암석을 이용하여 추가적인 공벽 안정성 실험을 수행하여 모기쿨롱 파괴 기준의 적합성을 검증할 예정이다.

사사

본 논문은 한국지질자원연구원(KIGAM)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(GP2020-010). 논문 작성을 위한 서울대학교 공학연구원의 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- 윤동영, 2019, Thermomechanical borehole stability analysis by true triaxial experiment and discrete element modeling (Master's thesis, Seoul National University).
- Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W., 2005, Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3), 431-439.
- Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W., 2006, Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi –Coulomb failure criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1200-1211.
- Barton, C. A., Zoback, M. D., & Burns, K. L., 1988, In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton Geothermal Site, New Mexico, determined from wellbore breakouts, *Geophysical Research Letters*, 15(5), 467-470.
- Colmenares, L. B., & Zoback, M. D., 2002, A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 695-729.
- Ewy, R. T., 1999, Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion, *SPE Drilling & Completion*, 14(02), 85-91.

- Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T., & Labuz, J. F., 2002, Simulation of failure around a circular opening in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), 507-515.
- Guenot, A., 1989, Borehole breakouts and stress fields, In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(3-4), 185-195.
- Haimson, B., 2007, Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 157-173.
- Haimson, B. C., & Song, I., 1993, Laboratory study of borehole breakouts in Cordova Cream: a case of shear failure mechanism, In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 30(7), 1047-1056.
- Hoek, E., and E.T. Brown, *Underground Excavations in Rock*, Institute of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- Jansen, D. P., Carlson, S. R., Young, R. P., & Hutchins, D. A., 1993, Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12), 22231-22243.
- Lee, M., & Haimson, B., 1993, Laboratory study of borehole breakouts in Lac du Bonnet granite: a case of extensile failure mechanism, In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 30(7), 1039-1045.
- Liu, Q., Xu, J., Liu, X., Jiang, J., & Liu, B., 2015, The role of flaws on crack growth in rock-like material assessed by AE technique, *International Journal of Fracture*, 193(2), 99-115.
- Martin, C. D., 1997, Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength, *Canadian Geotechnical Journal*, 34(5), 698-725.
- Maury, V. M., & Sauzay, J., 1987, Borehole instability: case histories, rock mechanics approach, and results, SPE/IADC drilling conference, Society of Petroleum Engineers. SPE/IADC 16051, 11-24.
- Single, B., Goel, R. K., Mehrotra, V. K., Garg, S. K., & Allu, M. R., 1998, Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(1), 71-79.
- Mogi, K., 1967, Effect of the intermediate principal stress on rock failure, *Journal of Geophysical Research*, 72(20), 5117-5131.
- Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1255-1269.
- Zheng, Z., Kemeny, J., & Cook, N. G., 1989, Analysis of borehole breakouts, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B6), 7171-7182.
- Zhuang, L., Kim, K. Y., Diaz, M., & Yeom, S., 2020, Evaluation of water saturation effect on mechanical properties and hydraulic fracturing behavior of granite, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 130, 104321.
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L., & Anderson, R. N., 1985, Wellbore breakouts and in situ stress, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5523-5530.