

진삼축압축시험을 통한 마찰재료의 강도 및 변형 특성 평가

배준봉¹ · 엄정기^{2*} · 정호영²

¹부경대학교 에너지자원공학과 석사과정, ²부경대학교 에너지자원공학과 교수

Evaluation of Strength and Deformability of a Friction Material Based on True Triaxial Compression Tests

Junbong Bae¹ · Jeong-Gi Um^{2*} · Hoyoung Jeong²

¹Graduate Student, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

Abstract

Knowledge of the failure behavior of friction materials considering their intermediate principal stress is related to an understanding of situations where these materials might be used: for example, the stability of deep-seated boreholes and fault slip analysis. This study designed equipment for physically implementing true triaxial compression and used it to assess specimens of plaster, a friction material. The material's mechanical behaviors are discussed based on the results. The applicability of the 3D failure criteria are also reviewed. The tested specimens were molded cuboids of width, length, and height 52, 52, and 104 mm, respectively. A total of 24 true triaxial compression tests were performed under various combinations of σ_3 and σ_2 conditions. Conventional uniaxial and triaxial compression tests were employed to estimate the mechanical properties of the plaster for use as parameters for 3D failure criteria. Examining the stress-strain relations of the plaster materials showed that a large difference between the intermediate principal stress and the minimum principal stress indicated strong brittle behavior. The mechanical behavior of the plaster used here reflects the change of intermediate principal stress. Nonlinear multiple regression analysis on the test data in the principal space showed that the modified Wiebols-Cook failure criterion and the modified Lade failure criterion were the most suitable 3D failure criteria for the tested plaster.

Keywords: true triaxial compression test, friction material, 3-D failure criterion, principal stress



*Corresponding author: Jeong-Gi Um
E-mail: jum@pknu.ac.kr

Received: 12 December, 2022
Accepted: 14 December, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

중간주응력을 고려한 마찰재료의 파괴거동에 대한 확고한 이해는 대심도 보어홀 안정성 및 단층해석 등과 관련된 현장 적용의 고도화를 위한 필수적인 과정이다. 본 연구는 진삼축압축 조건을 물리적으로 구현하는 장비를 설계·제작하였으며 마찰재료로 제작된 석고 시료에 대한 진삼축압축시험을 통하여 재료의 파괴거동 특성을 논의하고 삼차원파괴함수의 적용성을 검토하였다. 진삼축압축시험을 위한 석고 재료는 52(w) × 52(l) × 104(h) mm의 직육면체 시료로 성형하였으며 다양한 조합의 σ_3 , σ_2 의 조건으로 총 24회의 진삼축압축시험이 수행되었다. 또한, 삼차원 파괴기준식의 파라미터로 사용되는 석고의 강도정수 측정을 위하여 전통적인 일축압축시험 및 삼축압축시험이 수행되었다. 석고 재료의 응력-변형 특성

은 중간주응력과 최소주응력의 차이가 클수록 취성거동이 더욱 강하게 나타났으며, 시료의 강도 및 변형은 중간주응력의 변화를 반영하는 것으로 평가되었다. 주응력 좌표계에서 시험 데이터에 대한 비선형 다중회귀분석을 수행한 결과 수정 Wiebols-Cook 파괴기준 및 수정 Lade 파괴기준이 석고 시료에 대한 삼차원 파괴기준으로 가장 적합하였다.

주요어: 진삼축압축시험, 마찰재료, 삼차원 파괴기준식, 주응력

서론

대심도 보어홀, 터널, 고준위 방사성폐기물 처분장 등과 같은 지중 시설물과 관련하여 암반에 작용하는 응력 상태는 직교하는 세 축 방향의 주응력으로 설명할 수 있다. 이러한 지중 시설물 주위의 암반은 암반 굴착에 따라 재배치된 유도 응력이 암석 재료의 강도를 능가하면 파괴에 이를 수 있다. 일반적인 지질공학 실무에 있어서 중간주응력(σ_2)은 암반의 응력-변형 해석에 고려되지 않는 경우가 대부분이며 현장의 엔지니어는 이차원 Mohr-Coulomb 또는 Hoek-Brown 파괴기준을 바탕으로 암석의 역학적 파괴거동을 해석하였다. Mohr-Coulomb 또는 Hoek-Brown 파괴기준은 재료의 파괴거동을 비교적 간편하게 해석할 수 있는 장점이 있지만, 중간주응력이 재료의 강도에 미치는 영향에 관한 다양한 연구 결과는 중간주응력을 고려한 해석의 중요성을 강조하고 있다.

Mogi(1967)에 의해 수행된 화강암, 석회암, 백운암에 대한 진삼축압축 조건의 실험적 연구 이후 다수 연구자에 의한 진삼축압축시험에 관한 연구 결과는 암석의 강도에 미치는 중간주응력의 영향이 매우 유의미하다는 결론을 이끌었다 (Handin et al., 1967; Takahashi and Koide, 1989; Chang and Haimson, 2000; Haimson and Chang, 2000; Colmenares and Zoback, 2002; Vachaparampil and Ghassemi, 2017). 진삼축압축 조건에서 대부분의 암석 재료는 중간주응력이 증가할수록 재료의 강도가 더욱 강해지다가 최대값을 가지며 이후 다시 점차 감소하는데, 이러한 현상은 중간주응력의 영향을 고려하지 않는 기존의 Mohr-Coulomb 또는 Hoek-Brown 이차원 파괴함수로 설명하기 어렵다.

중간주응력을 고려하기 위하여 제안된 대표적인 삼차원 파괴함수는 Drucker-Prager 기준식(Drucker and Prager, 1952), Mogi 기준식(Mogi, 1971; Al-Ajmi and Zimmerman, 2005), Jiang-Pietruszczak 기준식(Jiang and Pietruszczak, 1988), 수정 Wiebols-Cook 기준식(Zhou, 1994), 3-D Hoek-Brown 기준식(Single et al., 1998; Priest, 2005; Zhang and Zhu, 2007; Melkounian et al., 2009; Wu et al., 2018; Li et al., 2021), 수정 Lade 기준식(Ewy, 1999), 수정 Mohr-Coulomb 기준식(Singh et al., 2011; Singh and Singh, 2012) 등을 들 수 있다. 삼차원 파괴기준식은 중간주응력이 미치는 영향을 고려하여 보어홀 안정성 해석, 암반기초의 극한지지력 산정 및 단층 거동 해석과 같은 공학적 실무에 적용할 수 있지만(Lee et al., 2012), 산출상태를 달리하는 암종마다 최적의 파괴기준이 다를 수 있으며 심지어 중간주응력의 영향을 받지 않고 이차원 Mohr-Coulomb 또는 Hoek-Brown 파괴기준식이 더욱 적합한 암석도 있다(Colmenares and Zoback, 2002). 이는 그동안 제안된 여러 삼차원 파괴기준식 중에 한 파괴기준식이 다른 파괴기준식 대비 비교우위를 점할 수 없음을 의미하며, 실무에 적용하기 위해서는 현장마다 암석 재료에 대한 진삼축압축시험을 수행하여 최적의 파괴기준식이 도출되어야 한다.

본 연구는 진삼축압축시험을 위한 시험장비를 설계·제작하고 석고 재료에 대한 시험을 통하여 진삼축압축 조건의 강도 및 변형 특성을 고찰하였다. 또한, 삼차원 파괴함수의 적용성을 평가하기 위하여 Jiang-Pietruszczak, 수정 Wiebols-Cook, 수정 Lade 파괴기준식에 대한 데이터 피팅을 수행하고 결과를 토의하였다. 석고 재료는 대부분의 신선암에 비하여 강도가 낮지만, 암석에 대한 기존의 진삼축압축시험 셋팅과 달리 시료의 규모효과를 제거할 수 있으며 비교적 낮은 주응력 조건에서 마찰재료의 강도특성을 연구하는데 적합할 수 있다, 또한, 시료마다 재료 자체의 기본물성이 조금씩 다를 수 있는 암석과 달리 석고는 재료 자체의 물성을 비교적 동일하게 유지할 수 있으므로 시험 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

삼차원 파괴기준식

압축에 가해지는 삼차원 응력은 직교좌표계에서 이차 텐서의 응력 성분으로 표현할 수 있다. 이러한 삼차원 응력 텐서 P 는 좌표계 변환을 통하여 주응력의 형태로 변환할 수 있으며 다음 식 (1)과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

삼차원 응력 텐서는 Fig. 1의 삼차원 주응력 공간에서 점 $P_a(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 로 나타낼 수 있다. 삼차원 주응력 공간의 원점에서 P_a 를 연결한 벡터는 편차응력(deviatoric stress) 성분 ρ 와 정수압 성분 ξ 로 분해할 수 있는데, 여기서 정수압축($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)에 수직이며 P_a 를 포함하는 평면은 편차응력면(deviatoric plane)이다. 편차응력면 상에서 임의의 점에 대한 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 합은 일정한 상수이다. 편차응력면 상에서 점 P_a 는 ρ 와 Lode각 ψ 로 정의할 수 있는데, ψ 은 $\sigma_1 > \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 > \sigma_3$ 조건의 순수전단 상태를 기준으로 반시계방향으로의 각이다(Fig. 1b). 따라서 주응력 좌표계에서 점 P_a 는 다음과 같이 응력 불변량으로 정의되는 ξ, ρ, ψ 로 표현할 수 있다.

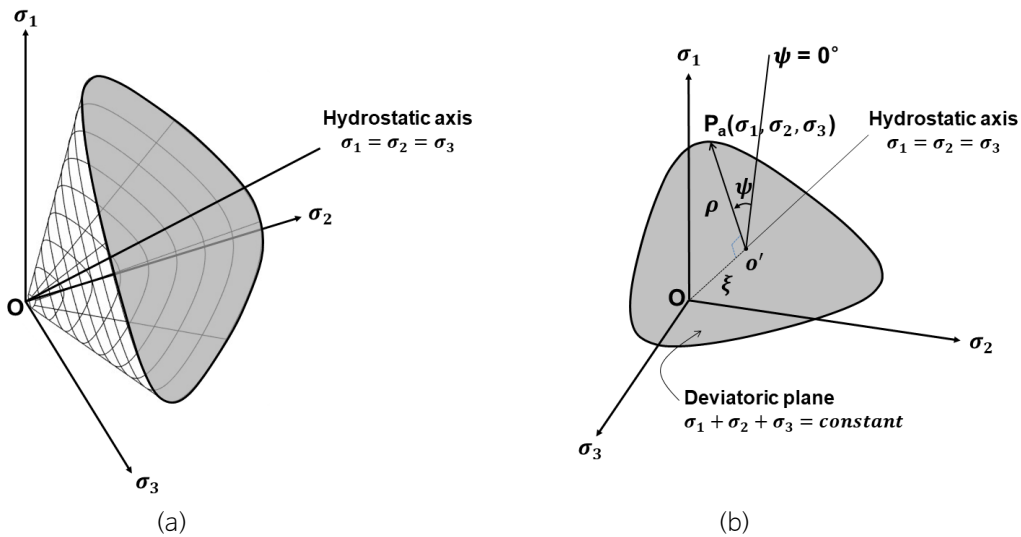


Fig. 1. A stress state in the (a) principal stress space and (b) deviatoric plane.

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad (2a)$$

$$\rho = \sqrt{2J_2} \quad (2b)$$

$$\psi = \frac{\pi}{6} - \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \quad (2c)$$

여기서, I_1 은 응력텐서의 일차 불변량이며 J_2 와 J_3 는 각각 편차응력텐서의 이차 및 삼차 불변량이다(Lee, 2011). 기본적으로 재료의 역학적 거동과 파괴에 대한 응력 의존성은 I_1, J_2, J_3 세 개의 응력 불변량으로 설명할 수 있다. I_1, J_2, J_3 을 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 로 정리하면 다음 식 (3)과 같다.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3a)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3b)$$

$$J_3 = \frac{1}{27} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 [(\sigma_2 - \sigma_3) - (\sigma_3 - \sigma_1)] + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 [(\sigma_3 - \sigma_1) - (\sigma_1 - \sigma_2)] + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 [(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_2 - \sigma_3)]] \quad (3c)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 ξ, ρ, θ 를 사용하여 정리하면 다음 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \begin{Bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \psi\right) \\ \cos\left(-\frac{\pi}{2} - \psi\right) \\ \cos\left(\frac{5\pi}{6} - \psi\right) \end{Bmatrix} + \frac{\xi}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

암석, 흙, 콘크리트 등의 마찰재료에 대한 구성모델 수립을 위한 삼차원 파괴기준은 주응력 좌표계에서 거의 평탄하지만 위로 볼록한(convex) 파괴면이 정의되어야 한다. 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb 파괴기준은 σ_2 를 고려하지 않으며 불변량 ξ, ρ, ψ 를 사용하여 다음 식 (5)와 같이 정리할 수 있다(Lee, 2011).

$$\frac{\rho}{g(\psi)} - \frac{2\sqrt{2}\sin\phi}{3 - \sin\phi} \xi - \frac{2\sqrt{6}c_0\cos\phi}{3 - \sin\phi} = 0 \quad (5a)$$

$$g(\psi) = \frac{3 - \sin\phi}{3\cos(\pi/6 - \psi) + \sqrt{3}\sin(\pi/6 - \psi) - \sin\phi\cos(\pi/6 - \psi) + \sqrt{3}\sin\phi\sin(\pi/6 - \psi)} \quad (5b)$$

Jiang and Pietruszczak(1988)은 식 (5a)의 삼차원 파괴기준식을 바탕으로 σ_2 를 고려하여 편차응력면에서 볼록성을 보장하는 파괴함수의 궤적 $g(\psi)$ 을 식 (6)으로 제안하였다.

$$g(\psi) = \frac{\beta(\sqrt{1+a} - \sqrt{1-a})}{\beta\sqrt{1+a} - \sqrt{1-a} + (1-\beta)\sqrt{1-a}\sin 3\psi}; a \rightarrow 1 \quad (6)$$

여기서, $\beta = (3 - \sin\phi) / (3 + \sin\phi)$ 이다. Fig. 2의 편차응력면에 나타난 Jiang-Pietruszczak 파괴함수의 궤적은 Mohr-Coulomb

에 근접하지만 $\psi = 30^\circ$ 인 축대칭압축 조건 또는 $\psi = -30^\circ$ 인 축대칭신장 조건에서 특이점(singular point)이 존재하지 않는다. Fig. 2는 Jiang-Pietruszczak 파괴기준과 더불어 수정 Wiebols-Cook 및 수정 Lade 파괴기준에 의한 편차응력면에서의 궤적을 보여준다.

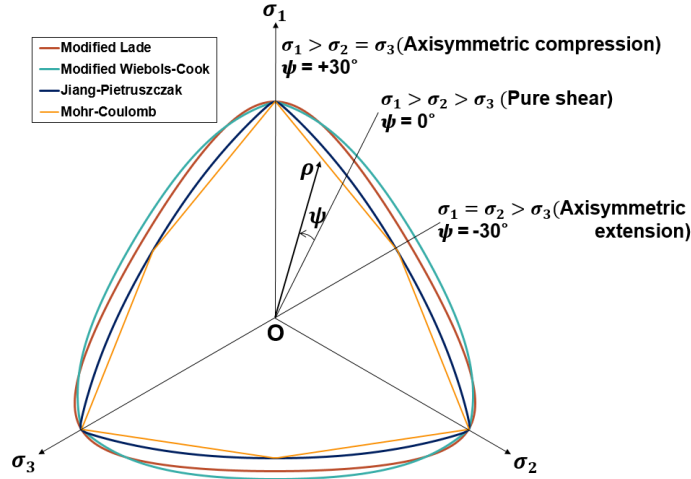


Fig. 2. Failure surfaces plotted in the octahedral plane.

점착력이 없는 마찰재료에 대해 제안된 Lade 기준식(Lade, 1977)은 비선형 파괴포락을 만족하는 흙을 대상으로 제안된 삼차원 파괴기준이며 식 (7)과 같다.

$$\left[\left(\frac{I_1^3}{I_3} \right) - 27 \right] \left(\frac{I_1}{P_{at}} \right)^{m'} = \eta_1 \tag{7}$$

여기서, P_{at} 는 응력과 같은 단위의 대기압이며 m' 및 η_1 은 재료상수이다. Lade 기준식에서 응력텐서의 불변량 I_1 및 I_3 는 유효응력 개념을 바탕으로 결정된 것이 아니며 후에 Ewy(1999)는 암석에 적용하기 위한 수정 Lade 기준식을 다음 식 (8)과 같이 제시하였다.

$$\frac{I_1'^3}{I_3'} = 27 + \eta \tag{8a}$$

$$I_1' = (\sigma_1 + S) + (\sigma_2 + S) + (\sigma_3 + S) \tag{8b}$$

$$I_3' = (\sigma_1 + S)(\sigma_2 + S)(\sigma_3 + S) \tag{8c}$$

$$S = c_0 / \tan \phi \tag{8d}$$

$$\eta = \frac{4 \tan^2 \phi (9 - 7 \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \tag{8e}$$

여기서, S 및 η 는 점착력(c_0)과 내부마찰각(ϕ)으로 산정된다. 수정 Lade 기준식은 중간주응력을 고려할 수 있으며 주응력 좌표계에서 삼각뿔 형태로 나타난다. 이때 Fig. 2의 편차응력면에서 볼록성은 η 의 값에 따라 달라진다.

Wiebols and Cook(1968)은 미세균열의 전단변형 에너지를 고려하여 암석의 강도에 미치는 σ_2 의 영향을 설명하는 모델을 제시하였다. Zhou(1994)는 Drucker-Prager 모델을 확장하여 수정 Wiebols-Cook 기준식을 다음 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$\sqrt{J_2} = A + B \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} + C \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \right]^2 \tag{9}$$

여기서, A, B, C는 Mohr-Coulomb 기준의 일축압축강도(σ_c)와 $q = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$ 를 이용하여 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$C = \frac{\sqrt{27}}{2C_1 + (q-1)\sigma_3 - \sigma_c} \left[\frac{C_1 + (q-1)\sigma_3 - \sigma_c}{2C_1 + (2q+1)\sigma_3 - \sigma_c} - \frac{q-1}{q+2} \right] \tag{10}$$

$$B = \frac{\sqrt{3}(q-1)}{q+2} - \frac{C}{3} [2\sigma_c + (q+2)\sigma_3] \tag{11}$$

$$A = \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} - \frac{\sigma_c}{3} B - \frac{\sigma_c^2}{9} C \tag{12}$$

여기서, $C_1 = (1 + 0.6 \mu_i) \sigma_c$ 이며 μ_i 는 마찰계수이다.

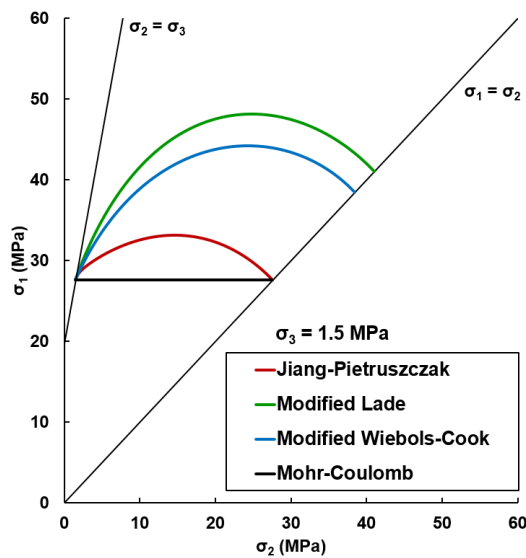


Fig. 3. 3-D failure criteria in σ_1 - σ_2 plane.

Fig. 3은 $\sigma_c = 19.7$ MPa, $\phi = 42.6$ 인 마찰재료에 대하여 $\sigma_3 = 1.5$ MPa일 때 Mohr-Coulomb, Jiang-Pietruszczak, 수정 Lade, 수정 Wiebols-Cook 기준식으로 산정된 σ_1, σ_2 를 σ_1 - σ_2 평면에 도시한 결과이다. Mohr-Coulomb 파괴기준은 σ_2 의 변화를 고려하지 않으므로 σ_2 의 증가에도 일정한 σ_1 의 값을 유지한다. 반면에 Jiang-Pietruszczak, 수정 Lade, 수정 Wiebols-Cook 기준식은 σ_2 의 변화에 따라 σ_1 의 변화가 특징적이다. $\sigma_2 = \sigma_3$ 조건에서 세 가지 기준식은 같은 σ_1 를 도출하였지만, σ_2 가 증가하여 σ_1 과 같아지는 구간까지 기준식별로 서로 다른 차이의 σ_1 변화를 인지할 수 있다.

진삼축압축시험

본 연구는 마찰재료에 대한 진삼축압축시험을 수행하기 위하여 시험장비를 설계·제작하였다. 시험장비는 52(w) × 52(l) × 104(h) mm 규격의 직육면체 시료를 거치할 수 있는 육면체의 금속재킷에 수평으로 직교하는 두 개의 유압실린더 (12 t)를 장착하여 σ_2 및 σ_3 를 방향으로 정하중을 유지하도록 제작하였다(Fig. 4). 이와 같은 수평 기압 유닛은 UTM에 설치한 가이드 레일을 이용하여 UTM 프레임 중심으로 삽입되며 σ_1 은 UTM에서 수직방향으로 가압하는 방식이다(Fig. 4a, 4b). 이때 금속재킷 내부에서 σ_2 및 σ_3 수평 축방향의 가압판(지그)은 50 × 102 mm 크기로 시료보다 약간 작게 제작하여 시험중 서로 접촉하지 않도록 유격을 두었다. σ_2 및 σ_3 축의 유압실린더는 LVDT를 장착하여 시험 중 시료의 변위를 측정하도록 고안하였다(Fig. 4c). 진삼축 시험은 수평 방향의 유압실린더를 통하여 σ_2 및 σ_3 구속압을 유지한 후 UTM의 수직 축방향(σ_1)으로 시료가 파괴할 때까지 재하하였다. 수직 방향의 힘·변위는 UTM의 데이터 로거를 통하여 서보 제어기에 기록되며 동시에 두 수평 방향의 변위 자료는 LVDT에 연결된 데이터 로거를 통하여 PC에 직접 저장한다.

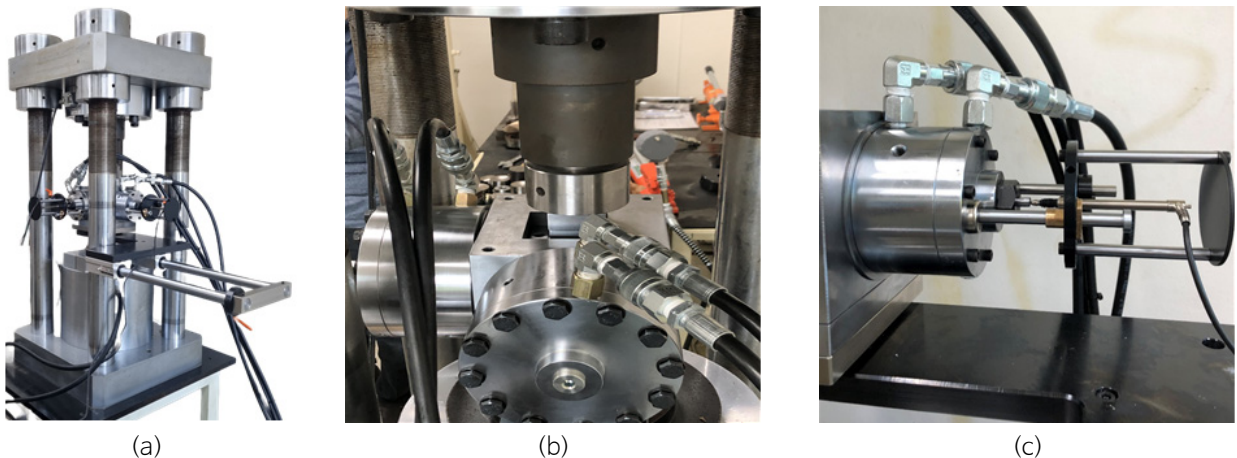


Fig. 4. The true triaxial testing equipment developed here: (a) full system, (b) horizontal loading units, and (c) attached LVDT to horizontal hydraulic cylinders.

본 연구의 진삼축압축시험을 위한 마찰재료는 문교산업의 N-2000 석고를 사용하여 52 × 52 × 104 mm 크기의 직육면체로 성형한 시료이다. 이러한 석고 시료의 규격은 일반적인 실내암석역학 시험을 위한 NX 코어의 크기에 근사한다. 석고와 물의 비율은 100:28(중량비)이며 직육면체 기둥 모양으로 성형한 시료는 상온에서 10일 동안 양생하였다.

본 연구에서 적용한 삼차원 파괴기준에 필요한 파라미터는 재료의 일축압축강도와 마찰각이다. 본 연구는 재료의 일축압축강도와 마찰각을 결정하기 위하여 실내 암석역학시험을 수행하였다. 암석역학시험에 사용된 석고 시료는 일반적인 NX 코어 크기의 원통형이며 석고 시료의 밀도, 일축압축강도, 영률, 포아송비 등의 기본물성 측정을 위하여 6회의 일축

압축시험이 수행되었다. 또한, 원통형 시료에 대한 삼축압축시험을 수행하여 c_0 와 ϕ 값을 결정하였다. Fig. 5는 일축압축 시험 및 삼축압축시험 결과를 도시하였으며 이에 따라 결정된 석고 시료의 역학적 물성은 Table 1에 요약하였다.

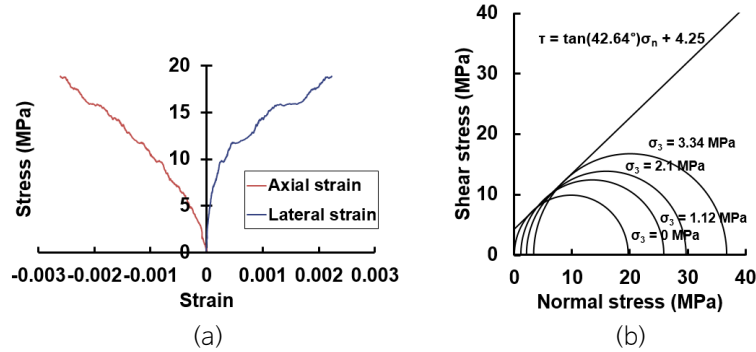


Fig. 5. Results obtained from (a) uniaxial and (b) triaxial compression tests.

Table 1. Summary of mechanical properties of the friction material studied here

Mechanical property	Value	Remark
Density, ρ (kg/m ³)	1,850	
Uniaxial compressive stress, σ_c (MPa)	19.7	Average of six specimens
Young's modulus, E (GPa)	7.8	
Poisson's ratio, ν	0.31	
Internal friction angle, ϕ (degree)	42.6	Based on triaxial tests
Cohesion, c_0 (MPa)	4.3	

석고에 대한 진삼축압축시험은 52(w) × 52(l) × 104(h) mm 규격의 직육면체 시료를 사용하여 σ_3 를 0.4 MPa, 1.5 MPa, 2.3 MPa로 설정하고 각각의 σ_3 조건에서 σ_2 를 3 MPa, 3.8 MPa, 4.5 MPa, 5.3 MPa의 네 단계로 증가시키면서 총 12 구속압 조건을 고려하였다. 본 연구는 각각의 구속압 조건당 2회씩 총 24회의 진삼축압축시험을 수행하였다. Fig. 6은 $\sigma_3 = 1.5$ MPa일 때 σ_2 가 3 MPa, 3.8 MPa, 5.3 MPa인 조건에서 얻은 σ_1 -수평변형률 관계인데, σ_2 가 증가함에 따라 σ_1 이 증가하며 이는 σ_2 가 마찰재료의 강도에 영향을 미친다는 것을 시사한다. 또한, σ_1 이 증가함에 따라 σ_2 방향보다 σ_3 방향으로 더욱 많은 변형이 발생하였으며 응력-변형 곡선은 중간주응력과 최소주응력의 차이가 클수록 더욱 연성에서 취성거동으로 전이함을 알 수 있다.

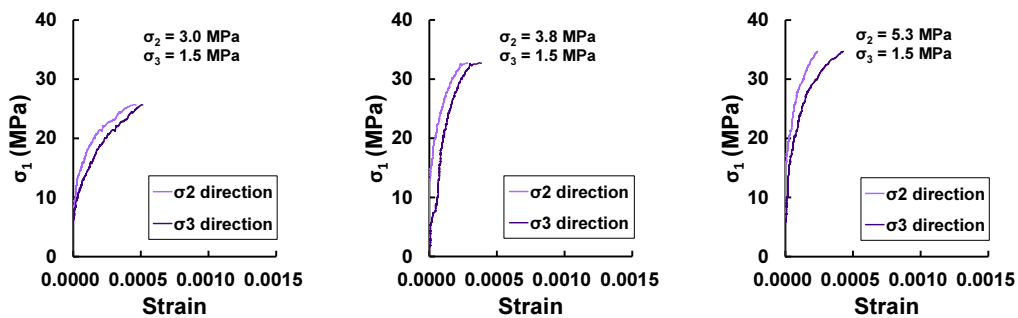


Fig. 6. σ_1 with respect to horizontal strain obtained from true triaxial compression tests.

Fig. 7은 σ_2 와 σ_3 가 각각 5.3 MPa, 2.3 MPa인 구속압 조건에서 두 수평축 방향의 변형률과 수직축 변형률 사이의 관계를 보여주는데, 수평축 방향의 변형은 σ_3 방향으로의 더욱 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존의 삼축 압축시험에 더하여 $\sigma_2 > \sigma_3$ 의 진삼축 조건에서 재료의 강도 및 변형 특성을 파악하는 것이 매우 유의미하며 σ_2 를 고려한 삼차원 파괴조건에 관한 논의가 필요함을 시사한다. Table 2는 석고 시료에 대하여 설정한 σ_2 , σ_3 조건에서 진삼축압축시험을 통한 파괴 시의 σ_1 값을 수록하였다.

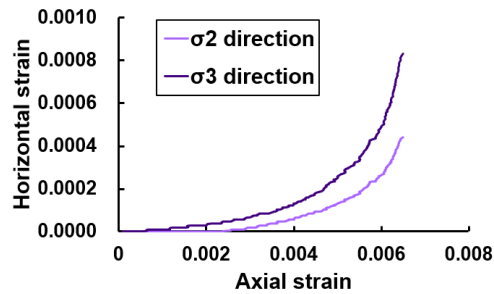


Fig. 7. Axial strain with respect to horizontal strains at $\sigma_2 = 5.3$ MPa and $\sigma_3 = 2.3$ MPa.

Table 2. Results obtained from true triaxial compression tests

σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)
0.4	3.0	24.3	1.5	4.5	33.3
0.4	3.0	24.2	1.5	4.5	33.4
0.4	3.8	27.8	1.5	5.3	34.3
0.4	3.8	28.1	1.5	5.3	35.8
0.4	4.5	29.3	2.3	3.0	33.7
0.4	4.5	33.8	2.3	3.0	34.7
0.4	5.3	30.1	2.3	3.8	35.1
0.4	5.3	30.9	2.3	3.8	35.7
1.5	3.0	28.2	2.3	4.5	33.7
1.5	3.0	30.4	2.3	4.5	37.0
1.5	3.8	30.1	2.3	5.3	37.7
1.5	3.8	34.6	2.3	5.3	38.5

삼차원 파괴기준식의 적용성

본 연구는 석고 재료에 대한 진삼축압축시험 결과를 바탕으로 기존에 제안된 삼차원 파괴기준식의 적용성을 평가하기 위하여 시험 데이터에 대한 Jiang-Pietruszczak, 수정 Lade, 수정 Wiebols-Cook 비선형 파괴함수를 검토하였다. Fig. 8은 석고 시료에 대한 진삼축압축시험 결과(Table 2)를 σ_1 - σ_2 평면에 도시한 것이다. 동일한 σ_3 수준에서 σ_1 은 σ_2 가 증가함에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 8a에서 볼록한 실선은 $\sigma_c = 19.7$ MPa, $\phi = 42.6^\circ$ 인 본 연구의 석고 재료에 대하여 Jiang-Pietruszczak 파괴기준식을 적용하여 본 연구에서 설정한 σ_3 값에 따라 σ_1 과 σ_2 의 관계를 작도한 것인데, 진삼축 압축시험 결과는 σ_2 의 변화에 따라 작도된 Jiang-Pietruszczak 파괴기준식과 잘 부합하지 않는 것을 정성적으로 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 8b 및 Fig. 8c에 도시된 수정 Wiebols-Cook 및 수정 Lade 파괴기준식은 시험결과에 더욱 적합함을

알 수 있다. 이와 같은 세 가지 비선형 파괴기준식과 시험결과의 적합성을 정량적으로 평가하기 위하여 산정한 결정계수(R^2) 값은 Jiang-Pietruszczak, 수정 Wiebols-Cook, 수정 Lade 파괴기준이 각각 0.0221, 0.8460, 0.8649로 산정되었다. 이는 본 연구의 마찰재료에 대한 파괴기준으로 수정 Lade 및 수정 Wiebols-Cook 파괴기준의 적용성이 우수한 것으로 평가할 수 있다.

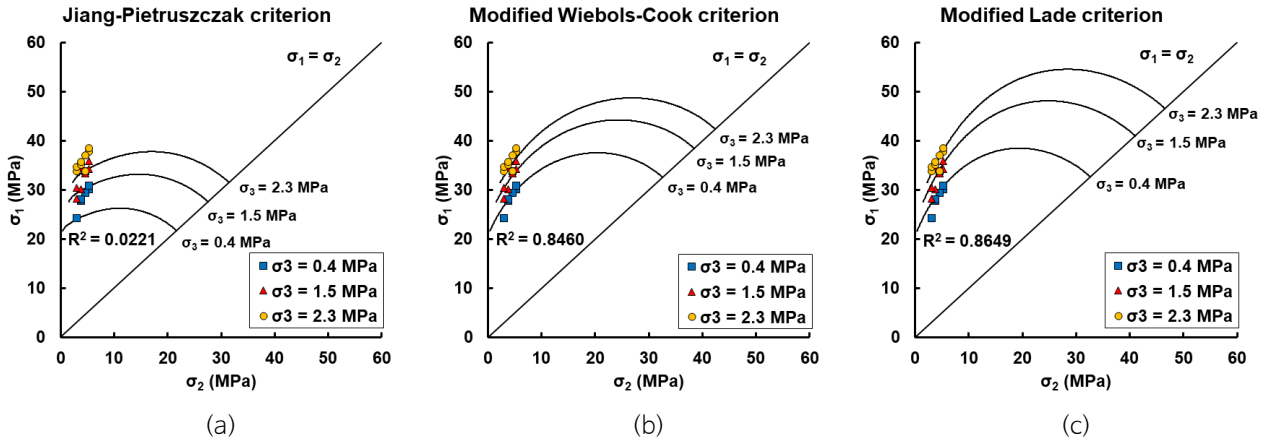


Fig. 8. Experimental data compared with various 3D failure criteria.

Fig. 9는 본 연구의 진삼축압축시험 데이터를 사용하여 주응력 좌표계에서 각각의 비선형 파괴함수에 대한 다중회귀분석을 수행한 결과이다. Fig. 9a에서 시험 데이터에 대한 최적의 Jiang-Pietruszczak 함수로부터 역으로 추정된 강도정수는 $\sigma_c = 21.7$ MPa, $c_0 = 4.7$ MPa, $\phi = 43.1^\circ$ 이며, 석고 시료의 실제 강도정수(Table 1)보다 σ_c 는 10.1%, c_0 는 10.6%, ϕ 는 1.2% 높은 값이다. Fig. 9b에 도시한 최적의 수정 Wiebols-Cook 함수는 σ_c, c_0, ϕ 가 각각 20.1 MPa (1.9% 증가), 4.4 MPa (3.5% 증가), 42.6° (동일)이며 이는 석고 시료의 실제 강도정수와 매우 유사하게 산정되었다. 또한, Fig. 9c의 수정 Lade 함수는 σ_c, c_0, ϕ 가 각각 19.6 MPa (0.7% 감소), 4.3 MPa (1.4% 증가), 42.4° (0.4% 감소) 일 때 시험 데이터에 대한 최적의 R^2 값을 도출하였다.

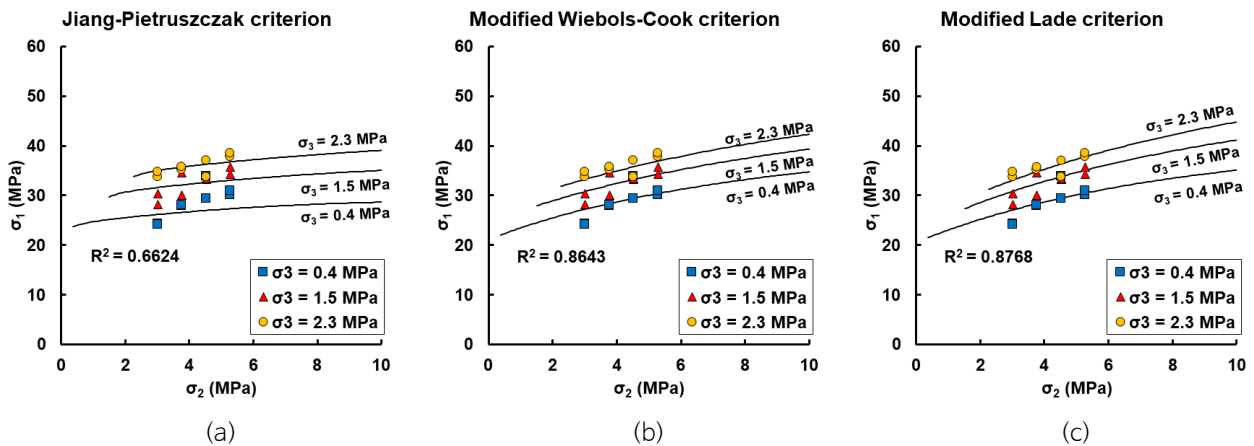


Fig. 9. Best fitting solutions for experimental data in the σ_1 - σ_2 plane.

Colmenares and Zoback(2002)은 기존의 여러 연구자에 의하여 수행된 다섯 가지 압축의 진삼축압축시험 결과에 다양한 삼차원 파괴기준을 적용하여 파괴기준의 적합성을 평가한 바 있는데, 일반적으로 수정 Wiebols-Cook 파괴기준과 수정 Lade 파괴기준이 대부분의 시험 결과에 잘 부합하는 것으로 보고하였다. 특히 파괴거동이 σ_2 에 영향을 많이 받는 압축 일수록 수정 Wiebols-Cook 및 수정 Lade 파괴기준이 적합하였다. Fig. 9에 포함된 R^2 값은 본 연구에서 피팅한 삼차원 파괴함수 중 수정 Lade 파괴기준식($R^2 = 0.8768$)이 정량적으로 가장 적합함을 지시하지만, 수정 Wiebols-Cook 파괴기준식($R^2 = 0.8643$)도 본 연구의 마찰재료에 대한 파괴함수로 적용성이 높다고 평가할 수 있다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 논의한 삼차원 파괴기준식을 이론적으로 비교한 Fig. 3을 참고하면 수정 Wiebols-Cook 및 수정 Lade 파괴함수가 Jiang-Pietruszczak 함수보다 중간주응력 변화에 더욱 민감하며 낮은 중간주응력 구간에서는 수정 Wiebols-Cook과 수정 Lade 파괴함수가 서로 간에 유의미한 차이를 나타내지 않기 때문이다. 따라서 이들 두 기준식 간에 완전한 의미의 비교는 더욱 높은 중간주응력 조건에서의 시험결과가 도출되어야 가능하다. 현재 연구진은 수평축 방향의 유압펌프 용량을 늘리고 시료 체적을 40% 정도 줄이는 방안으로 높은 중간주응력 시험 조건을 만족하도록 시험장비의 수정을 모색하고 있으며 궁극적으로 압축 시료에 대한 시험이 가능하도록 장비를 개량할 계획이다.

진삼축 조건에서 시료의 파괴특성

Fig. 10은 진삼축압축시험에 의한 시료의 파괴양상을 보여준다. 사진은 0.4 MPa 및 2.3 MPa의 σ_3 조건과 σ_2 가 3.0 MPa 또는 5.3 MPa인 진삼축 조건에서 시험 종료 후에 σ_2 방향으로 촬영한 것이다. 사진에서 두 수평주응력 간의 차이가 상대적으로 작은 경우(Fig. 10a, 10c)에는 불규칙한 패턴으로 파괴면이 발달한 모습이지만, 차이가 상대적으로 큰 경우(Fig. 10b, 10d)에는 경사방향이 σ_3 방향(주향이 σ_2 방향)인 하나의 주 파괴면이 형성되었는데, 이는 σ_2 증가에 따라 미세균열의 성장 및 연결이 한 방향으로만 제한되어 축진된 데에 기인한 것으로 판단된다.

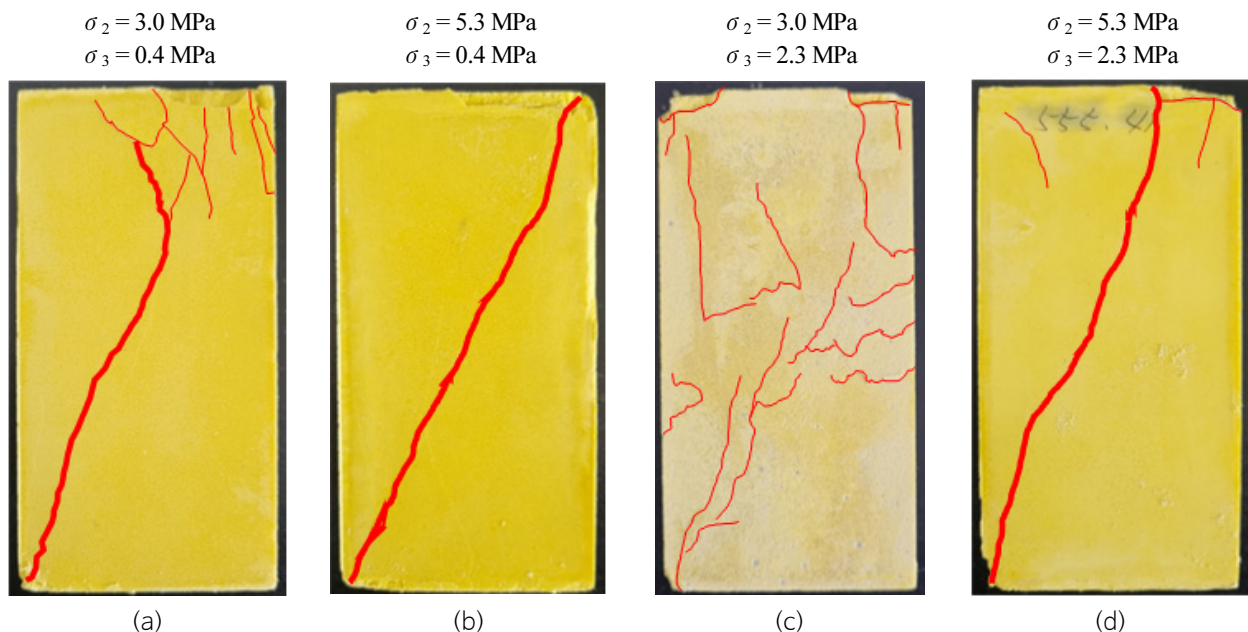


Fig. 10. Photographs of selected specimens after true triaxial compression tests at various σ_2 and σ_3 conditions.

다수의 취성(brittle) 퇴적암에 대한 일반적인 $\sigma_2 = \sigma_3$ 조건의 삼축압축시험 결과는 구속압이 증가할수록 재료의 연성(ductility)이 더욱 강하게 발현됨을 지시한다(Handin et al., 1963). Fig. 10c는 본 연구의 전체 실험 조건 중 σ_2 와 σ_3 의 차이가 가장 작은 경우인데, 파괴균열의 발달 양상은 다른 시료에 비하여 개수가 더욱 많고 시료 전 영역에 걸쳐 퍼져있는 형태로 확장된 것이 특징적이다. 이는 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 의 축대칭압축(axisymmetric compression, ASC) 조건에 가까울수록 더 많은 소성유동(plastic flow)이 허용될 수 있기 때문이며 Vachaparampil and Ghassemi(2017)의 연구에서도 유사한 결과가 언급된 바 있다. 또한, Fig. 10b는 본 연구의 시험 조건 중 σ_2 와 σ_3 의 차이가 가장 큰 경우이며 시료의 표면에서 거의 선형인 단일 파괴 자취를 확인할 수 있다. 이러한 시험결과는 Fig. 10a의 시료와 비교할 때 중간주응력의 증가에 따른 취성의 증대와 파괴 메커니즘이 ASC에서 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 의 전단으로 더욱 전이됨에 기인한 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 11은 동일한 σ_3 조건에서 σ_2 의 변화에 따른 파괴면의 표면형상을 보여준다. 앞에서 언급하였듯이 Fig. 10c와 같이 본 연구에서 두 수평 주응력 간의 차이가 작아 ASC 조건에 근접한 경우의 시료는 완전한 전단 파괴면을 형성하지 못하고 다수의 구부러진 균열이 발달된 상태로 시험이 종료되었다. 이렇듯 ASC 조건에 근접할수록 파괴면이 매끄럽지 못하고 굴곡이 심해지며 때로는 압편 조각으로 분리될 가능성이 크다. Fig. 11a와 Fig. 11b를 비교하여 살펴보면 두 시료 중에 ASC 조건에 더욱 근접한 Fig. 11a 시료의 파괴면이 더욱 거칠고 굴곡이 심함을 인지할 수 있다. 본 연구의 전체 시험 조건 중 σ_2 와 σ_3 의 차이가 가장 큰 Fig. 11b 시료의 파괴면은 사진상으로 명확하진 않지만 비교적 매끄러운 전단 슬립의 흔적이 관찰되었다. 이는 Fig. 11b 시료의 파괴면에 대한 수직응력(σ_n)이 Fig. 11a 시료보다 더욱 강하게 작용하였음을 의미하며 중간주응력이 파괴거동에 미치는 영향을 간과할 수 없음을 시사한다.

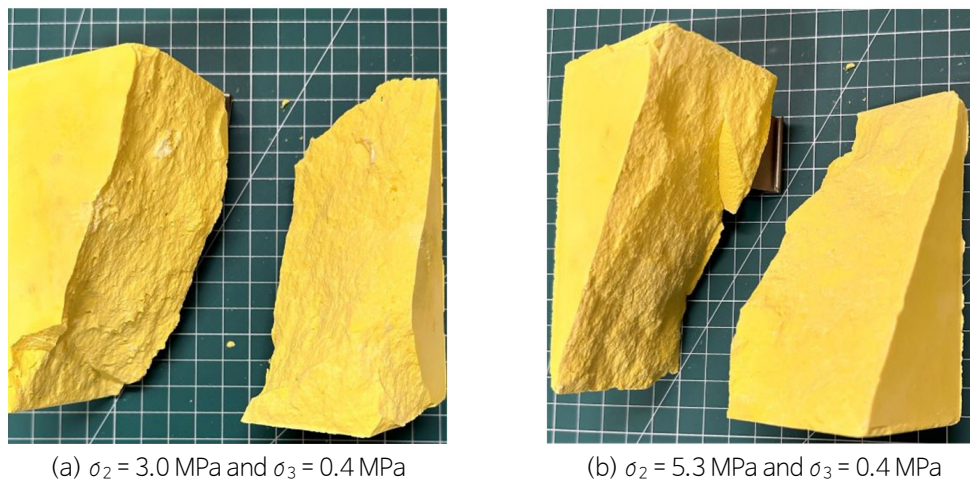


Fig. 11. Comparison of failure planes resulting from different σ_2 conditions.

결론

본 연구는 진삼축압축시험을 위한 시험장비를 설계·제작하고 유사 암석으로 선정된 마찰재료에 대한 시험을 통하여 진삼축압축 조건의 강도 및 변형 특성을 고찰하였다. 또한, Jiang-Pietruszczak, 수정 Lade, 수정 Wiebols-Cook 등의 비선형 파괴함수에 대한 데이터 피팅을 수행하여 삼차원 파괴기준식의 적용성을 평가하였다.

본 연구의 마찰재료로 선택된 석고에 대한 진삼축압축시험 결과 중간주응력의 증가에 따라 시료 강도의 증가가 뚜렷하게 관찰되었으며 시료 파괴 시의 횡 방향 변형은 중간주응력 방향보다 최소주응력 방향으로 더욱 많이 발생하였다. 시험

을 통한 응력-변형 특성은 중간주응력과 최소주응력의 차이가 클수록 취성거동이 더욱 강하게 나타났다. 시료에서 파괴 균열의 발달 양상은 축대칭압축 조건에 근접할수록 파괴면의 굴곡이 심해지며 균열이 시료 전 영역에 걸쳐 퍼져있는 형태이다. 반면에 중간주응력과 최소주응력의 차이가 증가하여 $\sigma_1 > \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 > \sigma_3$ 의 순수전단 조건으로 전이할수록 시료는 비교적 평탄한 단일 파괴면을 형성하였는데, 이는 본 연구의 마찰재료에 대한 파괴거동이 중간주응력의 변화에 영향을 받는다는 것을 지시한다.

진삼축압축시험 결과를 사용하여 주응력 좌표계에서 파괴함수에 대한 비선형 다중회귀분석을 수행한 결과 수정 Wiebols-Cook 파괴기준 및 수정 Lade 파괴기준에 대한 R^2 값이 각각 $R^2 = 0.8643$ 및 $R^2 = 0.8768$ 로 산정되어 본 연구의 마찰재료에 대한 파괴함수로 적용성이 높게 평가되었다. 이는 수정 Wiebols-Cook 및 수정 Lade 파괴함수가 Jiang-Pietruszczak 함수($R^2 = 0.6624$)보다 중간주응력 변화에 더욱 민감하며 낮은 중간주응력 구간에서 수정 Wiebols-Cook과 수정 Lade 파괴함수가 서로 간에 유의미한 차이를 나타내지 않기 때문으로 판단된다. 중간주응력이 암석의 강도에 미치는 영향은 산출 상태를 달리하는 암종마다 다를 수 있으므로 삼차원 파괴기준식을 실무에 적용하기 위해서는 현장마다 고유의 최적 파괴함수가 도출되어야 한다.

본 연구에서 논의한 진삼축압축시험 결과는 낮은 중간주응력 구간에서 수행된 시험 데이터에 근거한 한계도 있으며, 더욱 높은 중간주응력 구간에서의 시험결과가 도출되어야 현장 적용성이 확보될 수 있다. 현재 연구진은 시료 체적을 40% 정도 줄이고 수평축 방향의 유압펌프 용량을 늘리는 방안으로 더욱 높은 중간주응력 시험 조건을 만족하도록 시험장비의 수정을 모색하고 있으며 궁극적으로 암석 재료에 대한 시험이 가능하도록 장비를 개량할 계획이다.

사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2021R1F1A1062585).

References

- 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, 431-439.
- Chang, C., Haimson, B., 2000, True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTB) deep hole amphibolite, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, 18999-19013.
- 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, 695-729.
- Drucker, D.C., Prager, W., 1952, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 10, 157-165.
- Ewy, R.T., 1999, Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion, *SPE Drilling & Completion*, 14, 85-91.
- Haimson, B., Chang, C., 2000, A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 285-296.
- Handin, J., Hager, R.V., Friedman, M., Feather, J.N., 1963, Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Pore pressure tests, *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 47, 717-755.
- Handin, J., Heard, H.A., Magouirk, J.N., 1967, Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates, *Journal of Geophysical Research*, 72, 611-640.

- Jiang, J., Pietruszczak, S., 1988, Convexity of yield loci for pressure sensitive materials, *Computers and Geotechnics*, 5, 51-63.
- Lade, P.V., 1977, Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces, *International Journal of Solids and Structures*, 13, 1019-1035.
- Lee, Y.K., 2011, Study on a 3-dimensional rock failure criterion approximating to Mohr-Coulomb surface, *Tunnel and Underground Space*, 21, 93-102 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.K., Pietruszczak, S., Choi, B.H., 2012, Failure criteria for rocks based on smooth approximations to Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure functions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 146-160.
- Li, H., Guo, T., Nan, Y., Han, B., 2021, A simplified three-dimensional extension of Hoek-Brown strength criterion, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13, 568-578.
- Melkounian, N., Priest, S.D., Hunt, S.P., 2009, Further development of the three-dimensional Hoek-Brown yield criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, 835-847.
- Mogi, K., 1967, Effect of the intermediate principal stress on rock failure, *Journal of Geophysical Research*, 72, 5117-5131.
- Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *Journal of Geophysical Research*, 76, 1255-1269.
- Priest, S.D., 2005, Determination of shear strength and three-dimensional yield strength for the Hoek-Brown criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38, 299-327.
- Singh, M., Raj, A., Singh, B., 2011, Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 546-555.
- Singh, M., Singh, B., 2012, Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of jointed rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, 43-52.
- 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, 71-79.
- Takahashi, M., Koide, H., 1989, Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000 m, *Proceedings of the ISRM International Symposium*, Pau, France, 19-26.
- Vachaparampil, A., Ghassemi, A., 2017, Failure characteristics of three shales under true-triaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, 151-159.
- Wiebols, G.A., Cook, N.G.W., 1968, An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 5, 529-549.
- Wu, S., Zhang, S., Zhang, G., 2018, Three-dimensional strength estimation of intact rocks using a modified Hoek-Brown criterion based on a new deviatoric function, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107, 181-190.
- Zhang, L., Zhu, H., 2007, Three-dimensional Hoek-Brown strength criterion for rocks, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, 1128-1135.
- Zhou, S., 1994, A program to model the initial shape and extent of borehole breakout, *Computers & Geosciences*, 20, 1143-1160.