

평면이방성 Mohr-Coulomb 암석 강도의 중간주응력 의존성

이연규*

Intermediate Principal Stress Dependency in Strength of
Transversely Isotropic Mohr-Coulomb Rock

Youn-Kyou Lee*

Abstract A number of true triaxial tests on rock samples have been conducted since the late 1960 and their results strongly suggest that the intermediate principal stress has a considerable effect on rock strength. Based on these experimental evidence, various 3-D rock failure criteria accounting for the effect of the intermediate principal stress have been proposed. Most of the 3-D failure criteria, however, are focused on the phenomenological description of the rock strength from the true triaxial tests, so that the associated strength parameters have little physical meaning. In order to confirm the likelihood that the intermediate principal stress dependency of rock strength is related to the presence of weak planes and their distribution to the preferred orientation, true triaxial tests are simulated with the transversely isotropic rock model. The conventional Mohr-Coulomb criterion is extended to its anisotropic version by incorporating the concept of microstructure tensor. With the anisotropic Mohr-Coulomb criterion, the critical plane approach is applied to calculate the strength of the transversely isotropic rock model and the orientation of the fracture plane. This investigation hints that the spatial distribution of microstructural planes with respect to the principal stress triad is closely related to the intermediate principal stress dependency of rock strength.

Key words Rock strength, Intermediate principal stress, Mohr-Coulomb criterion, Anisotropy, Critical plane approach, True triaxial compression test

초 록 1960년대 후반 이래로 수행된 여러 진삼축압축시험 결과에 의하면 암석의 파괴강도는 중간주응력의 크기에 상당한 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 이러한 실험적 결과를 바탕으로 지금까지 중간주응력이 파괴에 미치는 영향을 고려할 수 있는 다양한 3차원 파괴조건식들이 제안되고 있다. 그러나 문헌에 보고된 대부분의 3차원 파괴기준식들은 암석의 진삼축압축 강도를 현상학적으로 재현하기 위한 목적으로 개발되었기 때문에 관련된 강도정수들의 역학적 의미가 명확하지 않다. 이 연구에서는 암석강도의 중간주응력 의존성이 암석 내에 포함된 연약면들의 공간적 분포특성과 관련성이 있다는 가능성을 확인하기 위해 평면이방성 암석모델을 대상으로 수치 진삼축압축시험을 수행하였다. 미소구조텐서 개념을 활용하여 이방성 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 개발하였으며 이를 강도기준식으로 활용하고 임계면법을 적용하여 평면이방성 암석의 파괴강도 및 파괴면 방향의 중간주응력 의존성을 분석하였다. 분석결과는 암석에 포함된 미시적 연약면들의 주응력 방향에 대한 방향성이 암석강도의 중간주응력 의존성과 밀접한 관련성이 있음을 암시해준다.

핵심어 암석강도, 중간주응력, Mohr-Coulomb 식, 이방성, 임계면법, 진삼축압축시험

Received: Oct. 7, 2013

Revised: Oct. 28, 2013

Accepted: Oct. 28, 2013

***Corresponding Author:** Youn-Kyou Lee

Tel) +82634691864, Fax) +82634691861

E-Mail) kyoulee@kunsan.ac.kr

Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro 558, Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea

1. 서론

주어진 응력조건에서 암석의 파괴 여부는 암석의 파괴기준식을 이용하여 판단할 수 있으며 암석역학 분야에서 가장 널리 활용되고 있는 선형 및 비선형 파괴기

준식은 각각 Mohr-Coulomb (M-C)식과 Hoek-Brown (H-B)식이다. 두 파괴기준식은 삼축압축응력조건 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)을 가정한 파괴기준식이므로 파괴 시 최대 주응력 (σ_1)은 구속압 (σ_3)의 함수이며 중간주응력 (σ_2)의 영향을 고려하지 못한다. 그러나 Mogi (1967)의 선구적 연구 이래로 지금까지 여러 연구자들이 수행한 진삼축압축응력조건 ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)의 암석강도시험 결과는 중간주응력의 크기도 암석의 파괴강도에 상당한 영향을 미친다는 사실을 잘 보여주고 있다 (Takahashi & Koide, 1989; Chang & Haimson, 2000a,b; Mogi, 2007; Haimson & Rudnicki, 2010; Descamps, et al., 2012). 그러므로 지하 암반의 초기지압과 암반구조물 주변에 재분배된 2차 응력이 일반적으로 진삼축응력조건이라는 점을 고려하면 정밀한 암반구조물 안정성 평가를 위해서는 중간주응력의 영향을 고려할 수 있는 암석파괴조건식의 도입이 필요하다.

다양한 암종에 대한 진삼축압축시험 결과의 축적과 함께 중간주응력의 크기가 암석의 강도에 미치는 영향을 고려할 수 있는 여러 파괴함수들이 제안되고 있으며 전통적인 M-C 및 H-B 파괴기준과 구분하기 위해 3차원 (3-D) 파괴기준식 혹은 다축(polyaxial) 파괴기준식으로 불린다. Colmenares & Zoback (2002), Benz & Schwab (2008), Liolios & Exadaktylos (2013)는 최근까지 제안된 3-D 파괴조건식들의 특징과 장단점을 비교 분석하였다. 국내에서도 Lee (2011), Lee et al. (2011), Lee (2012)에 의해 M-C 및 H-B 파괴기준식을 3차원 기준식으로 확장한 사례가 보고되었다.

지금까지 제안된 대부분의 3-D 파괴기준식은 진삼축 압축시험 결과를 현상학적 관점에서 재현하는데 초점을 맞추어 개발되었으나 암석강도가 중간주응력의 크기에 영향을 받는 역학적 원인에 대한 연구는 아직까지 미진한 실정이다. Cai (2008)은 진삼축압축시험의 수치 해석적 모사를 통해 암석강도가 중간주응력의 크기에 영향을 받는 주요 원인이 진삼축압축조건에 불완전한 구형 때문이라는 견해를 제시하였다. 즉, 시험기 가압판과 시험편의 마찰에 기인한 시험편 양단의 측방구속과 이에 따른 불균질한 이방성 응력분포가 중간주응력 의존성의 주요 원인일 가능성이 있다는 견해를 제시하였다. 현상학적 관점에서 개발된 파괴기준식의 경우 일반적으로 기준식을 구성하는 강도정수들의 역학적 의미가 불분명하며 또한 필요한 강도정수의 수도 증가하는 경향이 있다. 이 경우 강도정수 값을 결정하기 위해서는 많은 실험적 노력이 필요하다. 반면에 암석강도의 중간주응력 의존성에 대한 역학적 이해가 전제된다면 상대적으로 간단한 파괴기준식을 활용하여 암석강도의

중간의존성을 강도해석에 반영할 수 있다.

이 연구에서는 암석조직 (rock texture)의 미시적 이방성이 암석 강도의 중간주응력 의존성에 영향을 줄 가능성을 확인하기 위하여 평면이방성 암석모델을 대상으로 수치 진삼축압축시험을 실시하여 주응력 방향에 대한 연약면의 방향이 암석의 삼축압축강도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 미소구조텐서 (microstructure tensor) 개념 (Pietruszczak & Mroz, 2001)을 적용하여 M-C 식을 이방성 파괴기준식으로 확장하였다. 또한 평면이방성 (transversely isotropic) 미소구조텐서를 가정한 후 임계면법 (critical plane approach, CPA) (Pietruszczak & Mroz, 2001; Lee, 2007)을 적용하여 진삼축압축강도와 파괴면의 방향을 계산하였다.

2. 이방성 Mohr-Coulomb 파괴기준식

2.1 미소구조텐서를 이용한 이방성 M-C 파괴기준식

암석 내 임의의 점의 응력텐서를 σ 라 할 때 이 점을 지나고 수직 단위벡터가 \mathbf{n} 을 갖는 미소평면 π (Fig. 1)에 작용하는 응력벡터 (stress vector)는

$$\mathbf{T}^{(n)} = \sigma \mathbf{n} \quad \vee \quad T_i^{(n)} = \sigma_{ji} n_j \quad (1)$$

이다. 이때 단위벡터 \mathbf{n} 은 미소평면 π 의 x_1 축에 대한 경사방향 α 와 $x_1 - x_2$ 평면에 대한 경사각(ψ)으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{n} = (\sin\psi \cos\alpha, \sin\psi \sin\alpha, \cos\psi) \quad (2)$$

응력벡터 $\mathbf{T}^{(n)}$ 은 미소면 π 에 수직인 성분과 평행한 성분의 합으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{T}^{(n)} = \mathbf{T}^{(nn)} + \mathbf{T}^{(ns)} \quad (3)$$

여기서

$$\mathbf{T}^{(nn)} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}^{(n)})\mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \sigma \mathbf{n})\mathbf{n} \quad \vee \quad T_i^{(nn)} = \sigma_{jk} n_j n_k n_i \quad (4)$$

$$\mathbf{T}^{(ns)} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}^{(n)})\mathbf{s} = (\mathbf{s} \cdot \sigma \mathbf{n})\mathbf{s} \quad \vee \quad T_i^{(ns)} = \sigma_{jk} n_j s_k s_i \quad (5)$$

여기서 \mathbf{s} 는 미소평면 π 에서 최대전단응력이 작용하는 방향의 단위벡터이다. 따라서 미소평면 π 에 작용하는 수직응력과 최대전단응력은 단위벡터 \mathbf{n} 과 \mathbf{s} 를 이용

하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} \quad \vee \quad \sigma = \sigma_{ij} n_i n_j \quad (6)$$

$$\tau = \|\mathbf{T}^{(ns)}\| = |\mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}| \quad \vee \quad \tau = |\sigma_{ij} n_i s_j| \quad (7)$$

한편 $\mathbf{T}^{(ns)}$ 는 \mathbf{s} 대신 수직 단위벡터 \mathbf{n} 을 이용하여 다음과 같이 표시하는 것이 가능하다.

$$\mathbf{T}^{(ns)} = (\mathbf{I} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} \quad \vee \quad T_i^{(ns)} = (\delta_{ij} - n_i n_j) \sigma_{kj} n_k \quad (8)$$

여기서 \mathbf{I} 는 단위행렬, \otimes 는 dyad 연산자, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 따라서

$$\tau = \sqrt{(\delta_{ij} - n_i n_j) \sigma_{kj} n_k (\delta_{ip} - n_i n_p) \sigma_{qp} n_q} \quad (9)$$

이제 암석의 내부마찰각 ϕ 와 점착력 c 가 상수가 아니라 방향에 따라 변화한다고 가정하면 이방성 M-C 파괴기준식은 다음과 같이 방향벡터 \mathbf{n} 의 함수로 표시할 수 있다.

$$F = \tau(\mathbf{n}) - \sigma(\mathbf{n}) \tan \phi(\mathbf{n}) - c(\mathbf{n}) = 0 \quad (10)$$

내부마찰각과 점착력의 방향 의존성은 Pietruszczak & Mroz (2001)이 제안한 것과 유사하게 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\phi(\mathbf{n}) = \phi_0 (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega} \mathbf{n}) \quad \vee \quad \phi(\mathbf{n}) = \phi_0 (1 + \omega_{ij}^{\phi} n_i n_j) \quad (11)$$

$$c(\mathbf{n}) = c_0 (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega} \mathbf{n}) \quad \vee \quad c(\mathbf{n}) = c_0 (1 + \omega_{ij}^c n_i n_j) \quad (12)$$

여기서 ϕ_0 , c_0 는 각각 내부마찰각과 점착력의 방향 평균이다. 또한 ω_{ij}^{ϕ} , ω_{ij}^c 는 대각항의 합이 0인 대칭 2차 텐서로서 각각 내부마찰각 및 점착력의 방향 평균에 대한 방향 편차를 반영하기 위해 도입된 미소구조텐서이다. 등방성 암석의 경우 $\omega_{ij} = 0$ 이다. $\omega_{ij} n_i n_j$ 는 미소구조텐서 $\boldsymbol{\omega}$ 의 \mathbf{n} 방향 투영을 의미한다.

이제 식 (6), 식 (9), 식 (11), 식 (12)를 식 (10)에 대입하면 미소구조의 방향에 대한 이중 작용방향의 변화에 따라 강도가 달라지는 이방성 Mohr-Coulomb 파괴함수를 얻을 수 있다. 이제 M-C 강도정수인 내부마찰각과 점착력이 응력 작용방향과 암석구조면 방향의 상대적 변화에 따라 다른 값을 갖게 되므로 등방성 M-C 파괴기준식의 경우와 달리 이방성 파괴기준식 (10)은

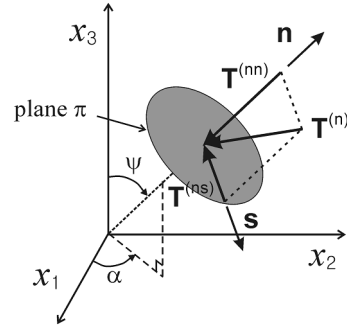


Fig. 1. Stress vector and its components on a plane π

중간주응력의 크기가 파괴강도에 미치는 영향을 반영할 수 있다.

2.2 임계면법을 이용한 이방성 암석의 강도 계산

주어진 응력조건에서 이방성 파괴함수 F 의 값이 최대가 되는 면 즉 임계면의 방향 \mathbf{n} 은 구속조건 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 1$ 을 적용한 적절한 최적화 방법을 이용하여 수치해석적으로 결정할 수 있다.

$$\max_{\mathbf{n}} F = \max_{\alpha, \psi} [\tau(\mathbf{n}) - \sigma(\mathbf{n}) \tan \phi(\mathbf{n}) - c(\mathbf{n})] = 0 \quad (13)$$

$$\wedge \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} = 1$$

Fig. 1에 표시한 바와 같이 공간 평면의 방향 \mathbf{n} 은 경사방향(α)과 경사각(ψ)으로 표시되므로 이방성 파괴함수 F 가 최대가 되는 α 와 ψ 를 수치해석적으로 탐색하여 파괴면의 방향을 결정할 수 있다. $F=0$ 을 만족하는 임계면의 방향 \mathbf{n} 은 파괴면의 방향으로 간주할 수 있고 이때 최대주응력은 암석의 진삼축압축강도로 간주할 수 있다.

3. 평면이방성 Mohr-Coulomb 파괴기준식

퇴적암이나 변성암에서는 층리(bedding)나 엽리(foliation)에 평행한 연약면(weak plane)이 존재하여 일반적으로 평면이방성 강도 특성이 나타난다. 또한 등방성 연암의 경우도 편차 응력의 작용에 의해 2차적으로 미시적인 평면이방성 구조가 형성될 수 있다. M-C 파괴기준식을 기반으로 한 평면이방성 파괴함수는 식 (11)과 식 (12)의 미소구조텐서 $\boldsymbol{\omega}$ 의 성분을 적절하게 선택하여 유도할 수 있다.

Fig. 2와 같이 층리면에 수직한 방향을 x_2' 축으로 설

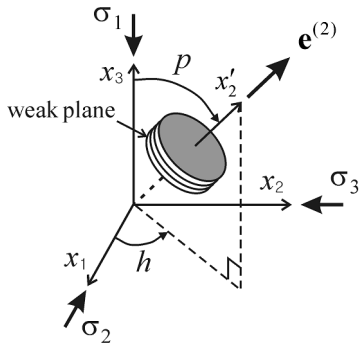


Fig. 2. Orientation of weak plane with respect to principal stress triad

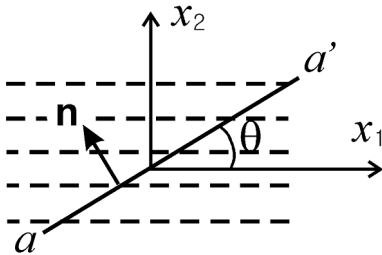


Fig. 3. Inclined physical plane with respect to horizontal weak plane

정하면 x_2' 축 방향의 단위 벡터 $e^{(2)}$ 는 다음과 같다.

$$e^{(2)} = (\sin p \cosh, \sin p \sinh, \cos p) \quad (14)$$

여기서 h 는 좌표축 x_1 을 기준으로 측정한 연약면의 경사방향이고 p 는 경사각이다. 그러므로 전체좌표계 x_i 와 재료주축 (principal material triad) 좌표계 x_i' 사이의 변환행렬은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$R = \begin{pmatrix} \cos p \cosh & \cos p \sinh & -\sin p \\ \sin p \cosh & \sin p \sinh & \cos p \\ \sinh & -\cosh & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

재료주축 좌표계에서 평면이방성 암석의 미소구조텐서 ω'_{ij} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega' = \begin{pmatrix} \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\omega_0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

이는 좌표변환행렬 식 (15)를 이용하여 다음과 같이

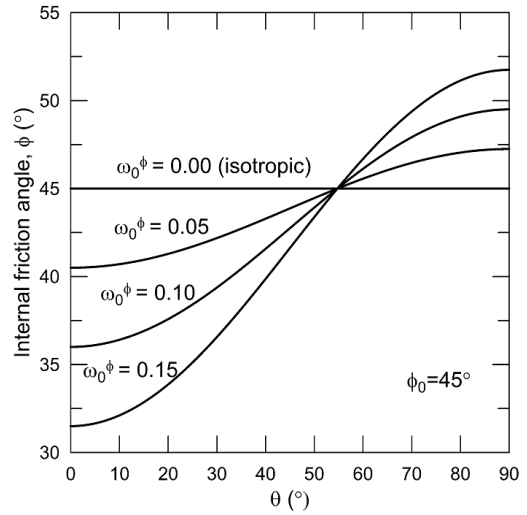


Fig. 4. Internal friction angle varying with the orientation of a physical plane

전체좌표계에서 표시된 미소구조텐서로 변환시킬 수 있다.

$$\omega = R^T \omega' R \quad \forall \quad \omega_{ij} = R_{pi} R_{qj} \omega'_{pq} \quad (17)$$

이제 식 (17)을 식 (11)과 식 (12)에 대입하면 식 (10)은 평면이방성 M-C 파괴기준식이 된다.

예를 들어, Fig. 3과 같이 연약면이 $x_1 - x_3$ 평면과 평행한 경우 연약면과 θ 각을 이루는 평면 $a - a'$ 의 단위 방향벡터는 $n = (-\sin\theta, \cos\theta, 0)$ 이므로 이 평면의 내부마찰각은 식 (11)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\phi(\theta) = \phi_0 (1 + \omega_{ij}^{\phi} n_i n_j) = \phi_0 [1 - \omega_0^{\phi} (1 - 3\cos^2\theta)] \quad (18)$$

내부마찰각의 공간 평균값 ϕ_0 가 45° 일 때 4가지의 ω_0^{ϕ} 값 즉 0.0, 0.05, 0.10, 0.15를 가정하고 θ 의 변화에 따른 내부마찰각의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 여기서 $\omega_0^{\phi} = 0.0$ 은 등방성 암석을 의미한다. 그림에서 $\theta = 0^\circ$ 일 때 값은 연약면과 평행한 면의 내부마찰각을 의미하며 $\theta = 90^\circ$ 일 때 값은 연약면과 수직인 면의 내부마찰각을 의미한다. ω_0^{ϕ} 의 값이 커질수록 내부마찰각의 이방성이 증가함을 보여준다. 식 (12)에 의한 점착력의 방향 의존성도 내부마찰각의 경우와 유사한 거동을 나타낸다.

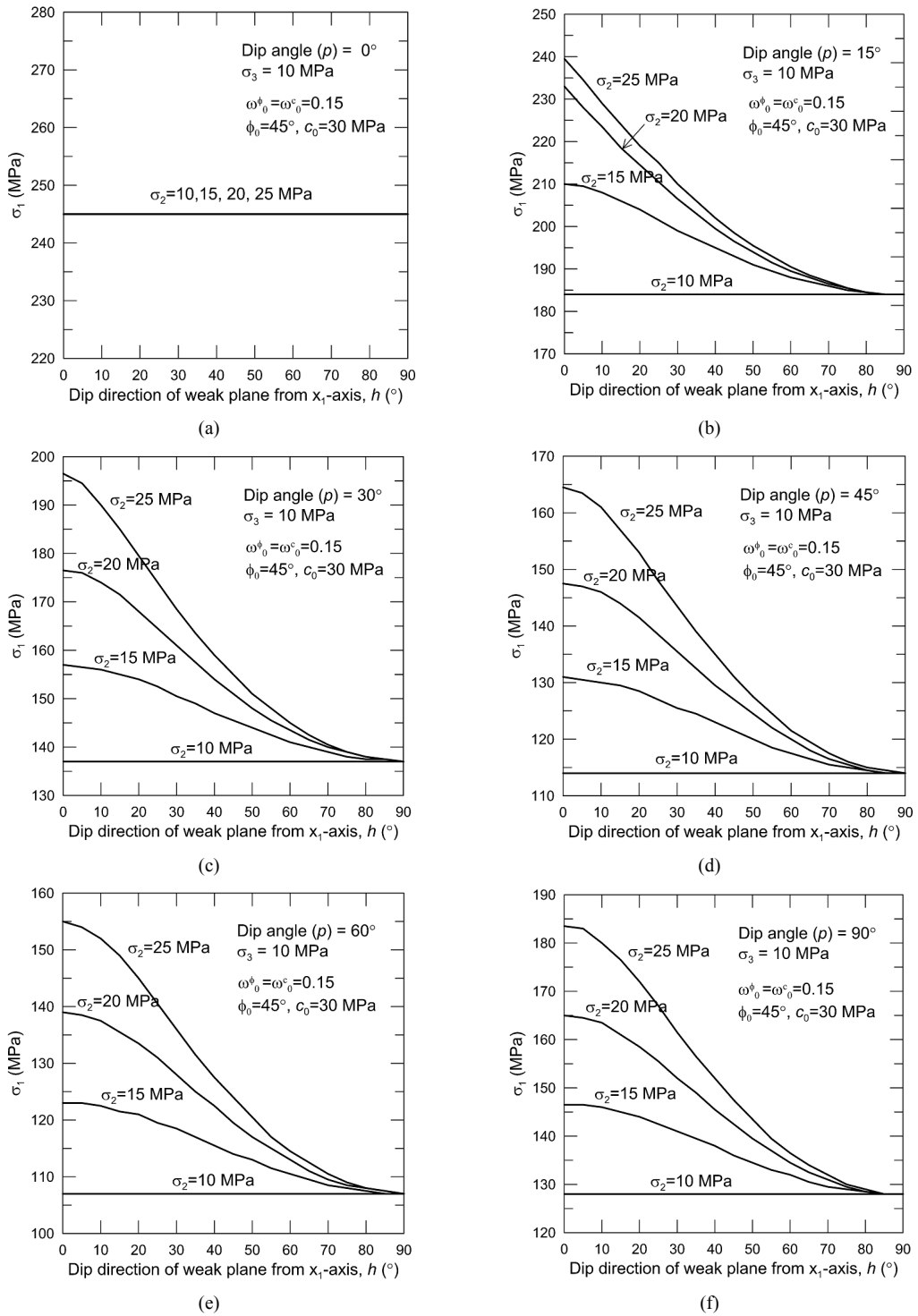


Fig. 5. Effects of σ_2 on the failure stress σ_1 in transversely isotropic M-C criterion; dip angles of weak plane are (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° , (e) 60° and (d) 90°

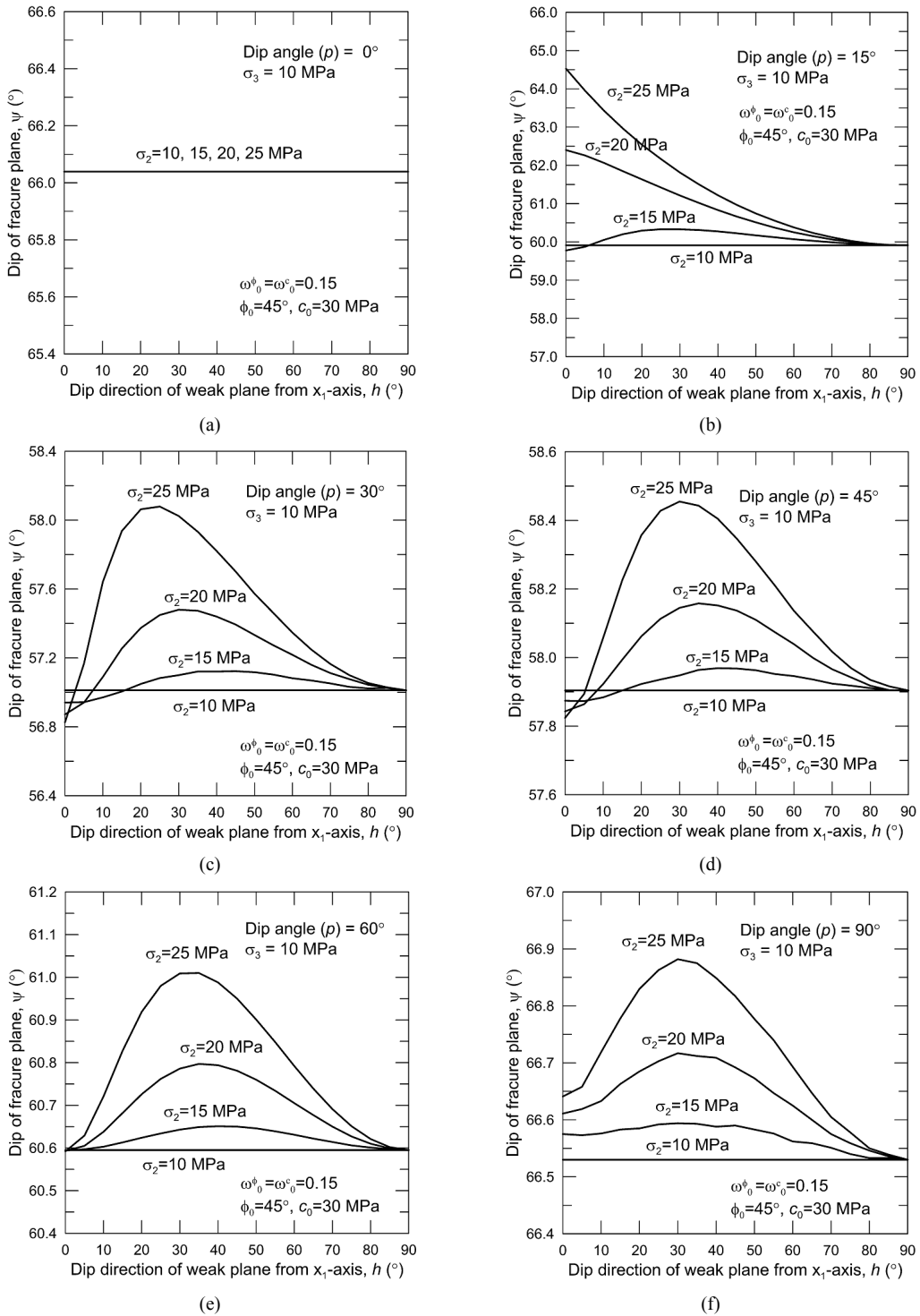


Fig. 6. Effects of σ_2 on the dip angle of fracture plane in transversely isotropic M-C criterion; dip angles of weak plane are (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° , (e) 60° and (d) 90°

4. 평면이방성 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 적용한 진삼축압축시험

4.1 수치 진삼축압축시험 조건

등방성 M-C 파괴기준식이 예측하는 파괴 시 최대주응력 σ_1 은 최소주응력 σ_3 에 의해 결정되며 중간주응력 σ_2 의 크기에 영향을 받지 않는다. 반면에 2절과 3절에서 기술한 이방성 M-C 파괴기준식은 3차원 응력성분을 모두 고려하므로 중간주응력의 크기가 파괴 시 최대주응력에 미치는 영향을 반영하고 있다.

제시한 평면이방성 M-C 파괴기준식을 적용할 경우 중간주응력이 파괴강도 및 파괴면의 방향에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 2와 같이 주응력 방향을 설정한 후 진삼축압축시험을 수치적으로 모사하였다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 중간주응력 σ_2 는 x_1 축 방향으로 작용하며 최소주응력 σ_3 는 x_2 방향으로 작용한다. 파괴기준식을 만족할 때까지 x_3 축 방향의 σ_1 을 증가시키면서 파괴 시 최대주응력 σ_1 과 파괴면의 경사각(ψ)을 임계면법을 적용하여 수치적으로 계산하였다. 연약면의 경사각 $p=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 대해 각각 경사방향 h 를 0부터 90° 까지 변화시키면서 파괴 최대주응력 σ_1 의 변화를 계산하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 대응되는 경사각(ψ)의 변화는 Fig. 6에 도시하였다. 해석의 입력자료로 $\omega_0^c = \omega_0^t = 0.15$, $\phi_0 = 45^\circ$, $c_0 = 30$ MPa, $\sigma_3 = 10$ MPa를 가정하였고 σ_2 는 4가지 경우 즉 $\sigma_2 = 10, 15, 20, 25$ MPa를 고려하였다.

4.2 결과 분석

수치 진삼축압축시험 모사 결과 수평 연약면 ($p=0^\circ$)을 갖는 시료의 축강도가 245MPa로 가장 크지만 이 경우 축강도는 σ_2 의 영향을 받지 않는다 (Fig. 5(a)). 파괴면의 경사각(ψ) 또한 중간주응력의 크기에 관계없이 약 66.04° 로 일정하다 (Fig. 6(a)). 수평 연약면을 갖는 시료에 대한 이러한 해석결과는 직관적인 예측과 일치한다. 반면에 경사진 연약면을 갖는 시료의 축강도는 중간주응력의 크기에 영향을 받고 있음을 잘 보여준다 (Fig. 5(b)~(f)). 경사진 연약면을 갖는 시료의 축강도는 σ_2 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 또한 σ_2 의 영향은 연약면의 경사방향이 σ_2 의 방향과 일치할 때 가장 크게 나타나며 경사방향이 σ_3 의 방향에 가까워짐에 따라 점차 감소한다. 궁극적으로 경사방향이 σ_3 의 방향과 일치할 때 즉, $h=90^\circ$ 일 때는 σ_2 의 영향이 사라

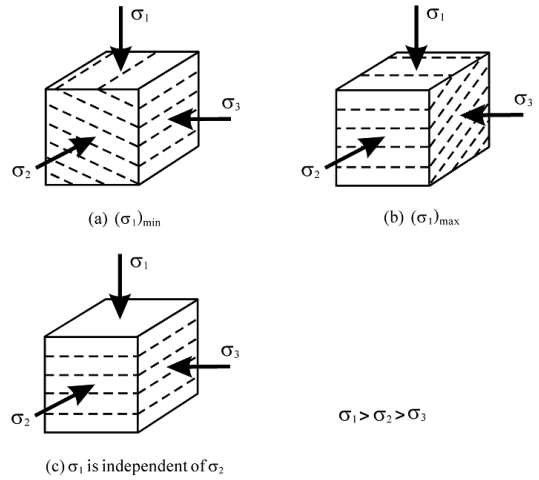


Fig. 7. σ_1 at failure for different orientation of weak plane with respect to principal stress triad

지는 특징을 보인다. 따라서 Fig. 7에 도시한 것과 같이 파괴 시 삼축압축강도 σ_1 은 연약면의 주향이 σ_2 의 방향과 평행할 때 가장 작으며 연약면의 주향이 σ_2 의 방향과 수직일 때 가장 큰 것으로 예측된다.

경사 연약면을 갖는 시료의 파괴면 경사각(ψ)도 중간주응력의 크기에 영향을 받고 있음을 볼 수 있다 (Fig. 6(b)~(f)). 전반적으로 σ_2 의 증가에 따라 파괴면의 경사각(ψ)이 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 연약면의 경사각 $p=30^\circ$ 인 경우 $h=0^\circ$ 부근에서 중간주응력의 증가에 따른 ψ 의 변화 양상이 다소 복잡하게 나타나고 있음을 보여준다. $p=45^\circ$ 인 경우에도 이와 유사한 거동을 보였다. 파괴면의 최대 경사각(ψ)은 대체로 $h=20^\circ \sim 40^\circ$ 범위에서 나타나고 있음을 보여준다. 그러나 $p=15^\circ$ 의 경우는 $\sigma_2=20$ MPa, 25 MPa 일 때 경사방향 $h=0^\circ$ 에서 파괴면의 경사각(ψ)이 최대가 되며 이후 h 의 증가에 따라 서서히 감소하는 특징도 나타내었다. 연약면의 경사각(p)이 45° 이하인 경우 파괴면 경사각(ψ)의 크기는 연약면의 경사방향(h)에 더 민감한 것으로 나타났다. Fig. 6(b)~(d)에서 볼 수 있는 것처럼 이러한 경향은 연약면의 경사방향이 중간주응력 방향과 유사할 때 더 뚜렷하게 나타났다. 연약면의 경사각(p)이 45° 이상인 경우 연약면의 경사방향(h) 변화에 따른 파괴면 경사각(ψ)의 크기 변화는 1° 이내로 미세하게 나타나고 있음을 보여준다 (Fig. 6(d)~(f)).

Fig. 8은 삼축압축조건 즉, $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa일 때 연약면의 경사각(p) 변화에 따른 축강도 변화를 보여준다. 연약면의 경사각 $p=60^\circ$ 부근에서 축강도가 최소가 됨

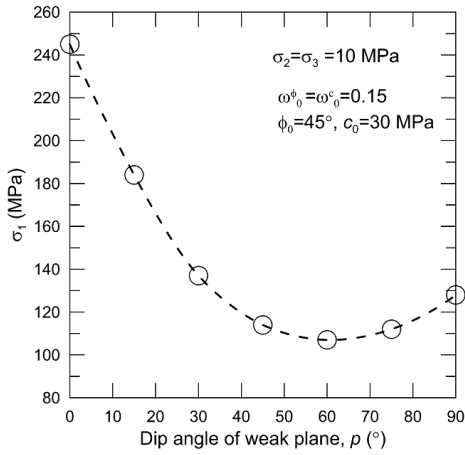


Fig. 8. Variation of triaxial compression strength with varying dip angle of weak plane

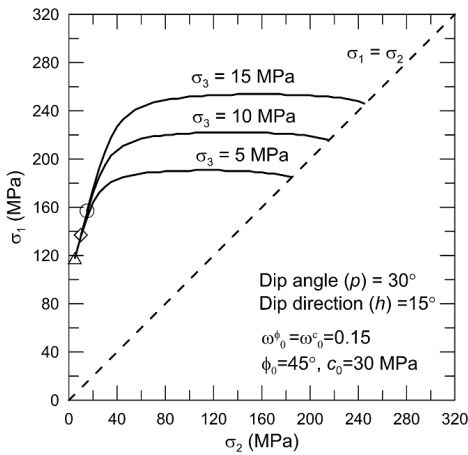


Fig. 9. Variation of σ_1 at failure with increase of σ_2

을 보여준다. 이는 $p=60^\circ$ 부근에서 연약면과 파괴면의 경사각 차이가 최소가 됨을 의미한다.

Fig. 9는 $p=30^\circ, h=15^\circ$ 를 가정하였을 때 진삼축압축시험 결과를 $\sigma_1-\sigma_2$ 평면에 도시한 것이다. 그림에 표시한 도형기호는 각 그래프의 시작점을 나타낸다. 최소주응력은 3가지 경우 즉 $\sigma_3=5\text{MPa}, 10\text{MPa}, 15\text{MPa}$ 을 고려하였다. 이 그림은 평면이방성 M-C 파괴기준식이 내포하고 있는 암석강도의 중간주응력 의존성 특성을 명확히 보여준다. 파괴강도 σ_1 은 σ_2 의 증가와 함께 증가하는 경향을 보여주며 삼축신장 조건 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) 에 가까워짐에 따라 소폭 감소하는 경향을 보여주고 있다. σ_2 의 증가에 따른 σ_1 의 이러한 변화 경향은 실험실

진삼축압축시험에서 관찰되는 것과 일치한다. 이 그림은 또한 그래프의 초반부 즉, 삼축압축조건 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 부근에서 파괴강도의 중간주응력 의존성이 크게 나타나며 이 후 중간주응력 의존성은 약해진다는 사실을 보여준다.

이상의 해석결과는 암석의 진삼축압축시험에서 관찰되고 있는 암석강도의 중간주응력 의존성이 미소 평면조직(planar texture)의 존재 및 그 방향성과 관련성이 크다는 것을 말해준다. 이러한 평면조직은 일반적으로 암석의 생성과정에서 조암광물들의 방향성 배열에 의해 형성되지만 편차 응력의 작용에 의한 균열생성으로 2차적으로 나타날 수 있다. 후속 연구를 통하여 진삼축압축시험 시료의 파괴전 방향성 절단면에 대한 미시적 관찰이 가능하다면 이 연구의 결과를 실험적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 M-C 파괴함수의 강도정수인 내부마찰각과 점착력에 이방성 변화규칙을 부여하여 등방성 M-C 파괴함수를 평면이방성 파괴함수로 확장하였다. 확장된 이방성 파괴함수를 파괴조건으로 활용하고 임계면법을 적용하여 평면이방성 암석의 진삼축압축강도를 수치해석적으로 계산한 후 주응력방향에 대한 연약면의 방향 변화가 평면이방성 암석의 강도변화에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 평면이방성 M-C 파괴함수로 예측한 파괴강도는 뚜렷한 중간주응력 의존성을 나타내었다. 연약면의 주향 방향이 중간주응력의 방향과 평행할 때 최소 강도를 나타내었으며 수직일 때 최대 강도를 나타내었다. 또한 평균 수직응력의 크기가 작은 영역에서 상대적으로 암석강도의 중간주응력 의존성이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

이러한 분석결과는 진삼축압축시험에서 흔히 관찰되는 암석강도의 중간주응력 의존성의 원인을 설명하는 이론적 근거의 하나로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 암석 강도의 중간주응력 의존성은 암석 조직(texture)의 고유한 이방성 또는 작용 응력의 이방성에 의한 2차적 조직 이방성에 기인할 수 있다는 가능성을 암시한다. 육안으로 판단할 때 균질, 등방인 암석시료에서도 암석 생성 당시부터 존재하는 미시적 결함들의 공간분포 특성은 이방성을 나타낼 수 있다. 또한 암석은 최대주응력 방향으로 가장 많이 압축되므로 작용하중의 이방성은 암석 조직(texture)에 2차적 이방성을 발생시킬 가능성이 있다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2013 R1A1A2013261). 또한 이 논문은 2012년 한국지질자원연구원 자체연구사업(외부)의 일부 지원으로 수행되었음.

References

1. Benz, T. and Schwab, R., 2008, A quantitative comparison of six rock failure criteria, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45, 1176-1186.
2. Cai, M., 2008, Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries - Insight from numerical modeling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45, 763-772.
3. Chang, C. and Haimson, B.C., 2000a, A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37, 285-296.
4. Chang, C. and Haimson, B.C., 2000b, True triaxial strength and deformability of the German Continental deep drilling program (KTB) deep hole amphibolite, *J. Geophys. Res.*, 105, 18999-19013.
5. Colmenares, L.B. and Zoback, M.D., 2002, A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, 695-729.
6. Descamps, F., da Silva, M.R., Schroeder, Verbrugge, J.-C. and Tshibangu, J.-P., 2012, Limiting envelopes of a dry porous limestone under true triaxial stress states, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 56, 88-99.
7. Haimson, B.C. and Rudnicki, J.W., 2010, The effect of the intermediate principal stress on fault formation and fault angle in siltstone, *J. Structural. Geology.*, 32, 1701-1711.
8. Lee, Y.-K., 2007, Prediction of strength for transversely isotropic rock based on critical plane approach, *Tunnel and Underg. Space (J. Korean Soc. Rock. Mech.)*, 17(2), 119-127.
9. Lee, Y.-K., 2011, Study on a 3-dimensional rock failure criterion approximating to Mohr-Coulomb surface, *Tunnel and Underg. Space (J. Korean Soc. Rock. Mech.)*, 21(2), 93-102.
10. Lee, Y.-K., Song, W.-K., Park, C. and Choi, B.-H., 2011, Stability analysis of concrete plugs using a 3-D failure criteria, *Tunnel and Underg. Space (J. Korean Soc. Rock. Mech.)*, 21(6), 526-535.
11. Lee, Y.-K., 2012, Comparative study on the rock failure criteria taking account of the intermediate principal stress, *Tunnel and Underg. Space (J. Korean Soc. Rock. Mech.)*, 22(1), 12-21.
12. Liolios, P. and Exadaktylos, G., 2013, Comparison of a hyperbolic failure criterion with established failure criteria for cohesive-frictional materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 63, 12-16.
13. Mogi, K., 1967, Effect of the intermediate principal stress on rock failure, *J. Geophys. Res.*, 72, 5117-5131.
14. Mogi, K., 2007, *Experimental rock mechanics*, Taylor & Francis.
15. Pietruszczak, S. and Mroz, Z., 2001, On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 25., 509-524.
16. Takahashi, M. and Koide, H., 1989, Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000m, *Rock at great depth (V. Maury & D. Fourmaintraux Ed.)*, 1, 19-26.

이 연 규



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864

E-mail: kyouleee@kunsan.ac.kr

현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수