

## 암석파괴 국부안전율의 특성과 응력경로 의존성 고찰

이연규\*

## An Investigation on the Characteristics of Local Factors of Safety of Rock Failure and Their Dependency on the Stress Paths

Youn-Kyoo Lee\*

**Abstract** The factor of safety (*FOS*) is commonly used as an index to quantitatively state the degree of safety of various rock structures. Therefore it is important to understand the definition and characteristics of the adopted *FOS* because the calculated *FOS* may be different according to the definition of *FOS* even if it is estimated under the same stress condition. In this study, four local factors of safety based on maximum shear stress, maximum shear strength, stress invariants, and maximum principal stress were defined using the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria. Then, the variation characteristics of each *FOS* along five stress paths were investigated. It is shown that the local *FOS* based on the shear strength, which is widely used in the stability analysis of rock structures, results in a higher *FOS* value than those based on the maximum principal stress and the stress invariants. This result implies that the local *FOS* based on the maximum shear stress or the stress invariants is more necessary than the local *FOS* based on the shear strength when the conservative rock mechanics design is required. In addition, it is shown that the maximum principal stresses at failure may reveal a large difference depending on the stress path.

**Key words** Local factor of safety, Stress path, Mohr circle, Mohr-Coulomb failure criterion, Hoek-Brown failure criterion

**초 록** 다양한 암반구조물의 안전도를 정량적으로 표현하는 지수로 안전율이 흔히 사용된다. 그러므로 동일한 응력조건에서 산정된 안전율이라 할지라도 안전율의 정의에 따라 안전율 계산 값의 차이가 있을 수 있으므로 적용하는 안전율의 정의와 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 Mohr-Coulomb 파괴조건식과 Hoek-Brown 파괴조건식을 활용하여 최대전단응력, 최대전단강도, 응력불변량, 최대주응력을 기반으로 하는 4종의 국부안전율을 정의하였다. 이어서 5가지 응력경로에 따른 각 안전율의 변화특성을 고찰하였다. 암반구조물 해석시 전통적으로 많이 이용되고 있는 전단강도 기반의 국부안전율은 최대주응력 및 응력불변량 기반의 안전율에 비해 높은 안전율 값을 계산함을 보였다. 이러한 결과는 보수적 암반공학적 설계가 필요한 경우 전단강도 기반의 국부안전율보다 최대전단응력이나 응력불변량 기반의 국부안전율 도입이 필요하다는 것을 말해준다. 또한 응력경로에 따라 파괴 시 최대주응력 값도 큰 차이가 있을 수 있음을 보였다.

**핵심어** 국부안전율, 응력경로, Mohr 원, Mohr-Coulomb 파괴조건식, Hoek-Brown 파괴조건식

Received: Feb. 7, 2017

Revised: Feb. 23, 2017

Accepted: Feb. 24, 2017

\*Corresponding Author: Youn-Kyoo 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. 서 론

주어진 응력조건에서 암반이나 암석의 파괴 근접도를 표현하는 개념인 파괴안전율(Factor of Safety, *FOS*)은 암반구조물의 안정성을 정량적으로 표현하는 지수로 널리 활용되고 있다. 터널이나 암반사면 등의 건설과정에서 암반이 굴착되면 굴착면 주변 암반의 안정성이 크게 낮아진다. 이에 따라 프로젝트 발주기관이 요구하는

안전도를 확보하기 위해서는 적절한 지보설계가 필요하다. 지보설계의 적정성은 일반적으로 수치해석으로 계산된 파괴안전율로 평가한다. 그러므로 계산된 안전율 수치의 작은 차이도 지보설계량 즉, 공사비에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 안전율의 정의를 명확히 이해하는 것이 중요하다.  $FOS > 1$ 은 작용하중이 파괴조건에 도달하지 못하였음을 나타내며  $FOS = 1$ 은 파괴조건에 도달한 임계상태를 의미한다. 그러나  $FOS < 1$ 인 경우는 물리적으로 존재할 수 없다.

암반구조물의 안정성 해석과정에서는 암반구조물 전체의 파괴 가능성을 단일 안전율 수치로 표시하는 경우도 있지만 해석영역에 다수의 등안전율 분포선을 도시하여 파괴 위험성을 가시화시키기도 한다. 사면안정성 해석에 많이 활용되는 다양한 한계평형법(Duncan, 1996, Wyllie and Mah, 2004)과 강도감소법(Dawson et al., 1999, Hammah et al., 2004, Clausen and Damkilde, 2006) 등에서 계산되는 안전율이 전장에 해당하며 이는 전체안전율(global factor of safety)로 이해될 수 있다. 반면, 후자의 경우에 계산되는 안전율은 국부안전율(local factor of safety)이며 해석영역 내 임의 지점에 유도된 응력성분과 파괴함수를 이용하여 계산된다. 국부안전율 분포도에서  $FOS = 1$ 에 해당하는 곡면을 잠재적 최대 활동면 또는 파괴면으로 간주할 수 있다(Huang and Yamasaki, 1993).

암석이나 암반의 파괴안전율은 전단강도, 최대전단응력, 최대응력불변량, 최대주응력 등을 기준으로 정의할 수 있다. 이 중에서 전단강도 기반의 안전율 정의가 가장 널리 이용되고 있으며 한계평형법과 강도감소법이 그 대표적 사례들이다. Castelletto et al.(2013)은 최대전단응력 기반의 국부안전율을 활용하여 Mohr-Coulomb (M-C) 암반의 파괴가능성을 해석하였다. Lee et al.(2011)과 Roostaei(2014)은 Nayak and Zienkiewicz(1972)의 응력불변량 기반의 국부안전율을 활용하여 암반구조물의 안정성을 평가하였다. 반면에 광주(pillar)와 같은 1축 하중조건 구조물의 안정성은 축방향으로 작용하는 최대주응력에 대한 파괴주응력의 비로 안전율을 정의하는 것이 편리하다(Duncan Fama et al., 1995, Esterhuizen et al., 2011). Okubo et al.(1997)은 주응력 공간에서 원점으로부터 응력상태 점 방향의 파괴곡면까지 상대적 거리를 이용하여 국부안전율을 정의하는 방법을 제안하기도 하였다.

전술한 바와 같이 파괴안전율의 정의는 사용자마다 차이가 있을 수 있으므로 안전율 수치를 바탕으로 암반구조물의 안정성을 평가할 경우 활용되는 안전율의 정의와 특성을 이해하는 것이 중요하다. 상이한 정의들

바탕으로 계산된 안전율들은 각 정의에서 가정한 응력경로(stress path)를 따라 응력이 증가 혹은 감소하여 암석이 파괴된다는 것을 전제로 한다. 그 결과 동일한 응력조건에서 계산한 안전을 값은 안전율 정의에 따라 차이를 보일 수 있다. 예를 들어 Zheng et al.(2006)은 전단강도 감소법과 활동면의 전단저항/활동력 기반의 사면 전체파괴안전율을 각각 계산하여 비교한 후 전단저항/활동력 기반의 안전율이 전단강도 감소법 기반의 안전율에 비해 높게 나타남을 보였다. 암반 굴착법 및 지보법의 다양성을 고려할 때 특정 응력조건 이후 응력경로를 예측한다는 것은 대단히 어렵다. 그러므로 암반구조물의 안정성 해석과정에서 계산된 각종 안전율은 실제 시공조건을 반영하지 못할 가능성이 있다. 따라서 안전하고 경제적인 암반공학적 설계를 위해서는 안전율 정의의 다양성과 안전율 값의 상호 차이를 이해하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 안전율의 변화특성은 응력경로(stress path)에 따라 차이를 보인다. 임의의 응력상태에서 파괴에 이르는 응력경로는 무수히 많이 존재하므로 현장 상황에 적합한 응력경로를 예측하고 이에 따른 안전율 변화특성을 고려할 경우 더욱 정밀한 암반공학적 설계가 가능하다. 이 연구에서는 M-C 파괴조건식 및 Hoek-Brown (H-B) (Hoek and Brown, 1980) 파괴조건식을 대상으로 4가지 국부안전율을 정의하고 지반공학적 실내시험에서 많이 채택되는 5가지 응력경로에 따른 각 안전율의 변화특성을 고찰하였다.

## 2. 국부안전율의 정의

### 2.1 암석의 파괴조건식

M-C 파괴조건식과 H-B 파괴조건식은 필요에 따라 파괴면에 작용하는 수직응력( $\sigma_n$ )과 전단응력( $\tau_f$ )의 관계식이나 파괴 시 작용하는 최대주응력( $\sigma_{1f}$ )과 최소주응력( $\sigma_3$ )의 관계식으로 표시할 수 있다. M-C 파괴조건식의 경우 두 관계식은 직선이지만 H-B 파괴조건식의 경우 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 비선형 곡선으로 표시된다. 여기서  $\sigma_n - \tau_f$ 의 관계식은 Mohr 파괴포락선으로 불린다.

M-C 파괴조건식의 Mohr 파괴포락선과  $\sigma_{1f} - \sigma_3$  관계식은 각각 다음 식 (1), 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi + c \quad (1)$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

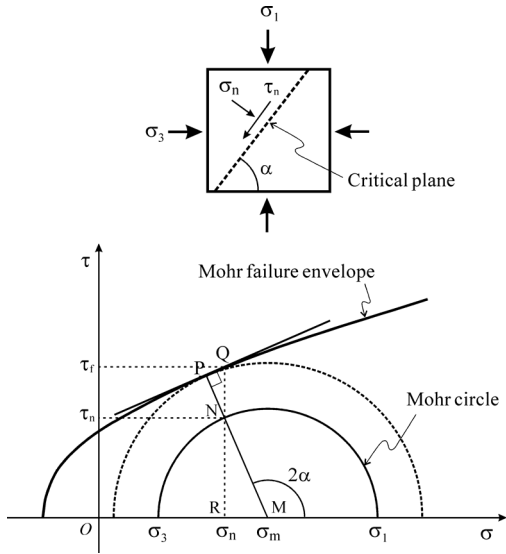


Fig. 1. Mohr failure envelope and Mohr circle for a stress state ( $\sigma_1, \sigma_3$ )

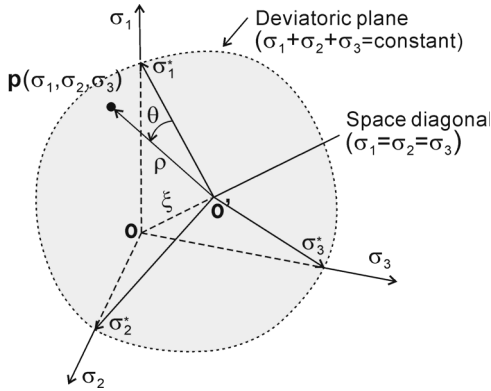


Fig. 2. Definition of stress invariants  $\xi, \rho$  and  $\theta$

여기서 두 상수  $\phi$ 와  $c$ 는 M-C 암반의 고유한 강도특성이며 각각 내부마찰각(internal friction angle)과 점착력(cohesion)으로 불린다.

H-B 파괴조건식의  $\sigma_{1f} - \sigma_3$  관계식은 Hoek and Brown (1980)에 의해 제안된 비선형 경험식으로서 다양한 압중에 대한 수많은 삼축압축시험 결과를 바탕으로 다음과 같이 제안되었다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_{ci}$ 는 무결암의 일축압축강도이며  $m$ 과  $s$ 는 H-B 암반 고유의 강도정수이다.

식 (3)에 대응되는 Mohr 파괴포락선은 Bray(Hoek, 1983), Ucar(1986), Londe(1988), Lee(2014), Lee and Pietruszczak(2016)에 의해 다양한 방법으로 유도되었고, 다음 식과 같이 매개변수 관계식으로 표시된다.

$$P = \frac{\sigma_n}{m\sigma_{ci}} + \frac{s}{m^2} \quad (4a)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{-54 + (3 + 16P)^3}{(3 + 16P)^3} \right] \quad (4b)$$

$$h = \left( 1 + \frac{16}{3}P \right) \cos \left( \frac{\theta}{3} + \frac{4\pi}{3} \right) + \left( \frac{1}{2} + \frac{8P}{3} \right) \quad (4c)$$

$$\phi_i = \sin^{-1}(h) \quad (4d)$$

$$\tau_f = \frac{m\sigma_{ci}}{8} (\cot \phi_i - \cos \phi_i) \quad (4e)$$

$$c_i = \tau_f - \sigma_n \tan \phi_i \quad (4f)$$

식 (4d, 4e)의  $\phi_i$ 는  $\sigma_n$ 에 대응되는 접선마찰각이며 식 (4f)의  $c_i$ 는 접선점착력이다.

## 2.2 최대전단응력 기반의 국부안전율

최대전단응력 기반의 국부안전율은 기하학적으로 중심이 동일한 Mohr 원들의 파괴포락선에 대한 근접도를 의미한다. 현재의 응력상태 ( $\sigma_3, \sigma_1$ )은  $\sigma - \tau$  좌표평면에서 Fig. 1과 같이 Mohr 원으로 표시된다. Mohr 원의 반지름은 최대전단응력의 크기를 의미한다. 현재의 응력상태를 나타내는 Mohr 원의 파괴포락선에 대한 근접도는 이 원과 ( $\sigma_m, 0$ )을 중심으로 하고 파괴포락선에 접하는 또 다른 원(접선으로 표시한 원)의 반지름 비로 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 이다. 그러므로 최대전단응력 기반의 국부안전율 FOS1은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$FOS1 = \frac{\overline{MP}}{MN} \quad (5)$$

M-C 파괴조건식의 경우 파괴포락선이 식 (1)로 표시되는 직선이므로 FOS1은 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$FOS1_{MC} = \frac{2\cos\phi(\sigma_m \tan\phi + c)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6)$$

반면에 H-B 파괴포락선은 식 (4)와 같이 다소 복잡한 매개변수 방정식으로 표시되므로 수치해석적 방법을 이용하여  $FOS1$ 를 계산할 수 있다. Mohr 원의 중심에서 최단거리인 파괴포락선 상의 점 P의 좌표를  $(\sigma_0, \tau_0)$  라 하면  $\sigma_0$  는 두 점 사이의 거리 제곱을 의미하는 다음 함수 값을 최소로 하는  $\sigma_n$ 의 값이다.

$$f(\sigma_n) = (\sigma_m - \sigma_n)^2 + \tau_f^2(\sigma_n) \quad (7)$$

식 (7)에 포함된  $\tau_f$ 는 식 (4e)로 표현된 전단응력을 의미한다. 이제  $\tau_0 = \tau_f(\sigma_0)$  이므로 H-B 파괴조건식의 경우  $FOS1$ 은 다음과 같다.

$$FOS1_{HB} = \frac{2\sqrt{(\sigma_m - \sigma_0)^2 + \tau_0^2}}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (8)$$

### 2.3 전단강도 기반의 국부안전율

전단강도 기반의 국부안전율은 현재 응력상태에서 전단파괴에 가장 취약한 면 즉, 임계면(critical plane)을 대상으로 이 면의 전단파괴 근접도를 표시하는 것으로 임계면에 작용하는 전단응력에 대한 임계면의 전단강도 비로 정의된다. 이는 암반공학을 포함한 지반공학 분야에서 가장 널리 활용되고 있는 국부안전율 정의이기도 하다.

Fig. 1에 표시한 각  $\alpha$ 는 임계면과 최소주응력 방향이 이루는 각으로서 M-C 파괴조건식을 적용할 경우 최소주응력  $\sigma_3$ 의 크기에 관계없이 다음 식과 같은 일정값을 갖는다.

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (9)$$

반면에 H-B 파괴조건식을 적용할 경우  $\alpha$ 는  $\sigma_3$ 의 증가에 따라 점차 감소하며 식 (9)의  $\phi$ 를 식 (4d)의  $\phi_i$ 로 치환하여 계산할 수 있다. 그러므로 Fig. 1을 참조하면 임계면의 전단강도를 기반으로 정의된 국부안전율  $FOS2$ 는 다음과 같이 표시됨을 알 수 있다.

$$FOS2 = \frac{\overline{RQ}}{\overline{RN}} \quad (10)$$

M-C 파괴조건식의 경우  $FOS2$ 는

$$FOS2_{MC} = \frac{2(\sigma_n \tan\phi + c)}{(\sigma_1 - \sigma_3)\cos\phi} \quad (11)$$

이고 H-B 파괴조건식의 경우  $FOS2$ 는 다음과 같다.

$$FOS2_{HB} = \frac{\tau_f(\sigma_n)}{\tau_n} \quad (12)$$

여기서

$$\sigma_n = \sigma_m - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin\phi_i \quad (13)$$

$$\tau_n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos\phi_i \quad (14)$$

이고, 접선 마찰각  $\phi_i$ 는 식 (4d)을 이용해 계산할 수 있다.

### 2.4 응력불변량을 이용한 국부안전율

주응력 좌표계에서 임의의 응력상태를 나타내는 점  $p(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 을 포함하고 공간대각선(space diagonal)에 수직인 평면을 편차응력면(deviatoric plane) 또는  $\pi$ -평면이라 부른다(Fig. 2). 공간대각선은  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 으로 표시되므로 정수압축(hydrostatic axis)이라 불리기도 한다. 점  $p$ 의 위치를 표시하는 방법 중 한 가지는 원점에서 편차응력면까지 거리  $\xi$ , 편차응력면에서 반경거리  $\rho$ , 그리고 편차응력면에서 회전각  $\theta$ 를 이용하는 것이다.  $\theta$ 는 Lode 각으로 불리기도 한다(Pietruszczak, 2010).  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ 는 응력불변량으로서 Nayak and Zienkiewicz (1972)에 의해 처음 사용되었으며 이를 이용하면 파괴조건식을 3차원 주응력 공간에 도식하는 것이 편리해진다.  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ 와 주응력의 관계식은 다음과 같다.

$$\xi = \sqrt{3}\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$\rho = \sqrt{3}\tau_{oct} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{3}} \quad (16)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}b}{2-b}\right); \quad b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (17)$$

응력불변량  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ 을 이용하여 표현된 M-C 및 H-B 파괴조건식은 각각 다음 두 식과 같다(Lee, 2011).

$$\rho_{\theta, f(MC)} = \frac{2\sqrt{2}\sin\phi\xi + 2\sqrt{6}c\cos\phi}{3\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta - \sin\phi\cos\theta + \sqrt{3}\sin\phi\sin\theta} \quad (18)$$

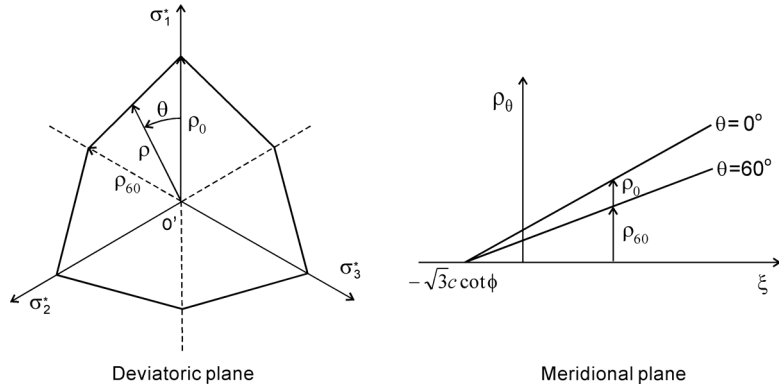


Fig. 3. M-C failure surface in the deviatoric and meridional planes

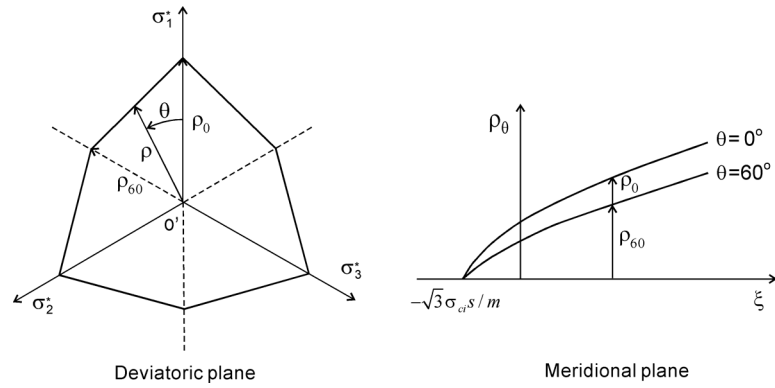


Fig. 4. H-B failure surface in the deviatoric and meridional planes

$$\rho_{\theta, f(HB)} = \frac{m\sigma_{ci} \cos(\theta + 2\pi/3) + \sqrt{m^2 \sigma_{ci}^2 \cos^2(\theta + 2\pi/3) + 4(\sqrt{3} m \sigma_{ci} \xi + 3s\sigma_a^2) \sin^2(\theta + \pi/3)}}{2\sqrt{6} \sin^2(\theta + \pi/3)} \quad (19)$$

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 식(18)과 식(19)으로 표시되는 파괴곡면 궤적을 편차응력면과 자오면(meridional plane)에 도시한 것이다. 여기서 자오면은 공간대각선을 포함하는 평면을 지칭하며 Lode 각  $\theta$ 에 의해 특정된다. 편차응력면에 도시된 육각형 형태의 궤적을 이루는 6개의 변은 M-C 함수의 경우 직선이지만 H-B 함수의 경우 완만한 곡선을 이루는 포물선이다. 정수압축에 수직하여 파괴곡면에 이르는 거리는 삼축압축응력조건 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \theta = 0^\circ$ ) 일 때 가장 최대가 되고 삼축신장조건( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3, \theta = 60^\circ$ ) 일 때 최소가 됨을 볼 수 있다.

이제 Zienkiewicz and Nayak의 응력불변량을 이용한 국부안전율  $FOS3$ 는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 편차응

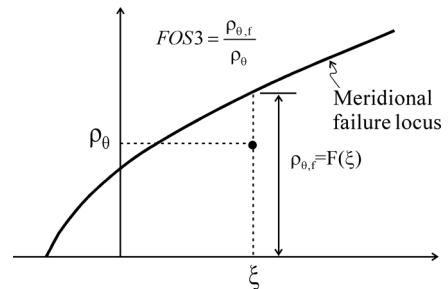


Fig. 5. Definition of local factor of safety in terms of stress invariants

력면에서 공간대각선으로부터 파괴곡면을 향한 근접도로 다음과 같이 정의할 수 있다.

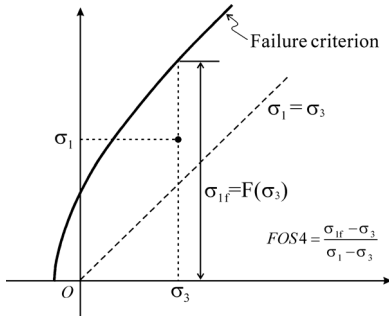


Fig. 6. Definition of local factor of safety based on maximum principal stress

$$FOS3_{MC} = \frac{\rho_{\theta, f(MC)}}{\rho_{\theta}} \quad (20)$$

$$FOS3_{HB} = \frac{\rho_{\theta, f(HB)}}{\rho_{\theta}} \quad (21)$$

2.5 최대주응력을 이용한 국부안전율

M-C 및 H-B 파괴조건식은 식 (2)와 식 (3)처럼 파괴 시 최대주응력  $\sigma_{1f}$ 가 구속압  $\sigma_3$ 의 명시적 함수로 표시되므로 삼축압축응력조건에서 국부안전율은 최대주응력과 최소주응력의 차이 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )에 대한 파괴 시 두 주응력 차이 ( $\sigma_{1f} - \sigma_3$ )의 비로 다음과 같이 정의할 수 있다(Fig. 6).

$$FOS4 = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (22)$$

이와 같은 개념의 국부안전율 정의는 주방식 채광법을 적용하는 광산의 광주 안정성 평가에 적용된 사례들이 보고되고 있다(Duncan Fama et al., 1995, Esterhuizen et al., 2011).

3. 응력경로에 따른 국부안전율 변화특성 분석

3.1 응력경로의 종류

주응력 공간에 표시한 임의의 응력상태 점에서 출발하여 재하(load)를 통해 파괴곡면에 도달하는 방법은 무수히 많다. Fig. 7은 암반공학이나 지반공학적 시험에서 흔히 채택하는 응력경로들을 자오면과 편차응력면에 표시한 것으로 모두 정수압 상태에 해당하는 점  $o'$ 에서 추가 재하가 시작되는 것을 가정하고 있다. CTC (Conventional Triaxial Compression,  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ )는

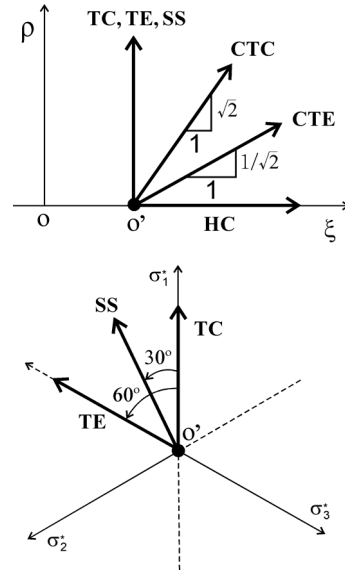


Fig. 7. Various stress paths in the principal stress space

통상적 삼축압축응력 조건의 경로를 의미하며 CTE(Conventional Triaxial Extension,  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ )는 통상적 삼축신장응력 조건의 경로를 나타낸다. HC(Hydrostatic Compression)는 정수압 조건의 응력경로로서 이 경로를 따라 재하하면 파괴곡면에 도달할 수 없다. TC(Triaxial Compression), TE(Triaxial Extension), SS(Simple Shear)는 점  $o'$ 를 지나고 공간대각선 즉, 정수압축에 수직인 편차응력면 상의 응력경로를 나타내며 각각 Lode 각  $\theta = 0^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 30^\circ$ 에 해당하는 응력경로들이다. 이들 자오면들은 또한 식 (17)에서 도입된 응력이방성 변수  $b$ 를 이용하여 각각  $b=0, b=1, b=1/2$ 로 특정될 수도 있다.

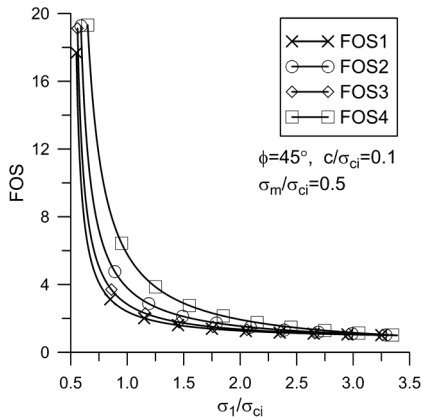
이 연구에서는 응력경로 TC, TE, SS를 초기 응력상태 점을 포함하는 편차응력면 상의 경로로 제약하였으나 이들 응력경로들을 지칭할 때는 일반적으로 이러한 제약을 두지 않는다(Chen and Saleeb, 1982). 즉,  $\theta = 0^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 30^\circ$ 에 해당하는 자오면 상의 모든 응력경로를 각각 TC, TE, SS 응력경로로 지칭하는 것이 더 일반적이라는 사실에 주의할 필요가 있다. 그러므로 CTC와 CTE는 각각 TC와 TE 응력경로의 특수한 경우이다.

정수압 응력상태 점  $o'$ (Fig. 7 참조)에서 시작하여 각 응력경로를 따라 점증적으로 재하를 시작할 경우 3개 주응력 성분의 증가 비를  $\Delta\sigma_1 : \Delta\sigma_2 : \Delta\sigma_3 = 1 : \gamma_1 : \gamma_2$ 라 할 때 각 응력경로에 해당하는  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 의 값을 Table 1에 제시하였다. 응력경로 TC, TE, SS의 경우  $\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 = 0$

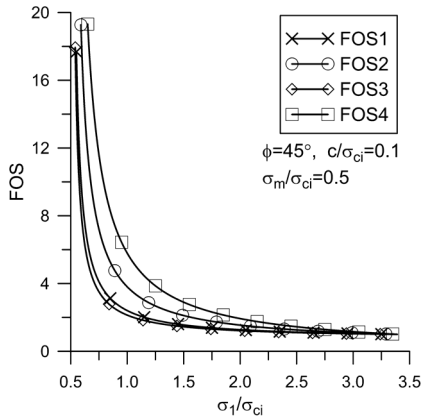
**Table 1.** Stress increment ratio for various stress paths

Stress path	$\gamma_1$	$\gamma_2$	Lode angle $\theta, (b)$
CTC	0	0	$0^\circ, (0)$
CTE	1	0	$60^\circ, (1)$
TC	-0.5	-0.5	$0^\circ, (0)$
TE	1	-2	$60^\circ, (1)$
SS	0	-1	$30^\circ, (0.5)$

$\Delta\sigma_1 : \Delta\sigma_2 : \Delta\sigma_3 = 1 : \gamma_1 : \gamma_2$



**Fig. 8.** Variations of local factors of safety with M-C criterion along the stress path CTC

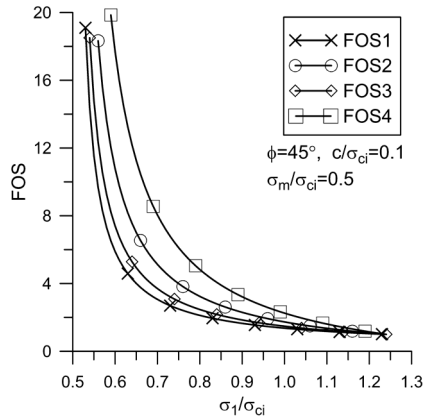


**Fig. 9.** Variations of local factors of safety with M-C criterion along the stress path CTE

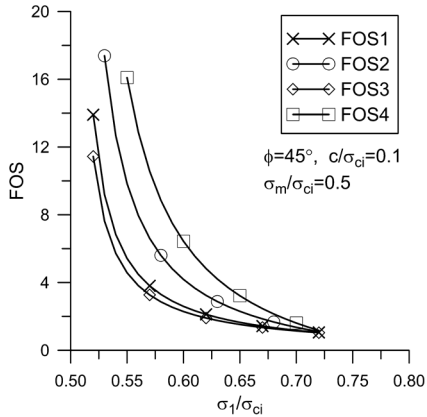
을 만족한다. 즉,  $1 + \gamma_1 + \gamma_2 = 0$  을 만족해야한다.

### 3.2 응력경로에 따른 국부안전율을 변화

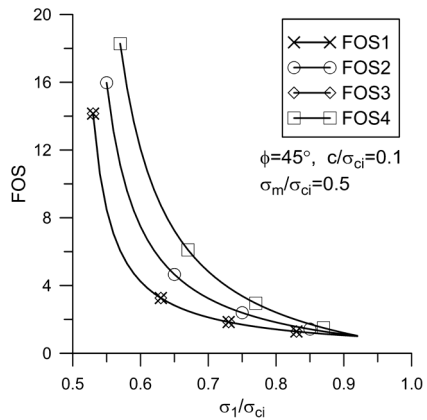
Fig. 8~Fig. 12는 M-C 파괴조건식의 경우에 대해 Table 1에 제시된 5개 응력경로를 따라 파괴 시까지 최



**Fig. 10.** Variations of local factors of safety with M-C criterion along the stress path TC



**Fig. 11.** Variations of local factors of safety with M-C criterion along the stress path TE



**Fig. 12.** Variations of local factors of safety with M-C criterion along the stress path SS

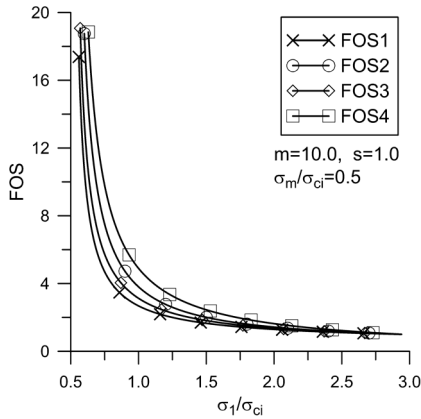


Fig. 13. Variations of local factors of safety with H-B criterion along the stress path CTC

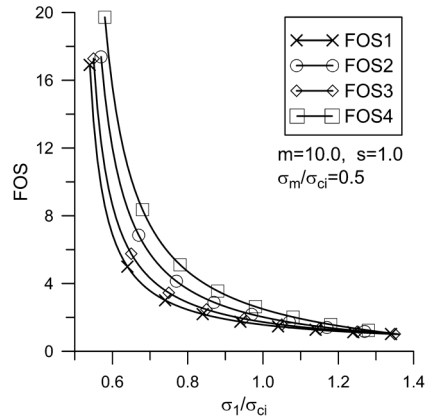


Fig. 15. Variations of local factors of safety with H-B criterion along the stress path TC

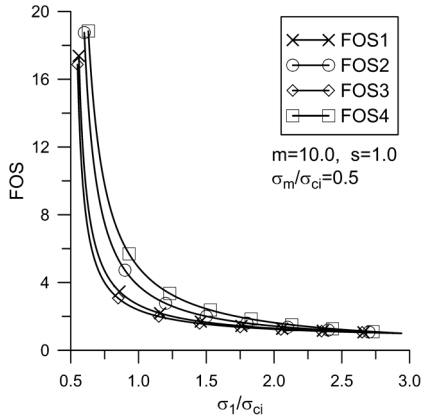


Fig. 14. Variations of local factors of safety with H-B criterion along the stress path CTE

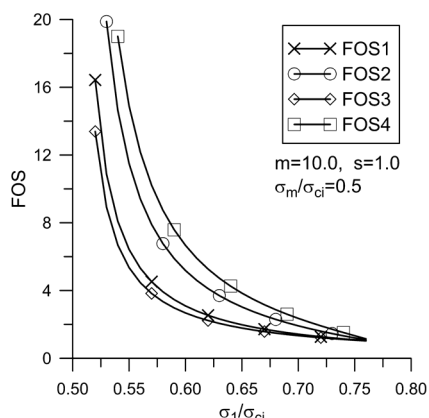


Fig. 16. Variations of local factors of safety with H-B criterion along the stress path TE

대주응력  $\sigma_1$ 을 점증적으로 증가시키에 따른 각 응력경로별 4가지 국부안전율의 변화를 도시한 것이다. M-C 강도정수 값으로  $\phi = 45^\circ$ ,  $c/\sigma_{ci} = 0.1$ 을 가정하였고 초기 정수압의 크기는  $\sigma_m/\sigma_{ci} = 0.5$ 을 가정하였다. Fig. 13~Fig. 17은 H-B 파괴조건식의 경우 5개 응력경로에 따른 국부안전율 변화를 보여준다. H-B 강도정수 값으로  $m = 10.0$ ,  $s = 1.0$ 을 가정하였고 초기 정수압의 크기는 M-C 파괴조건식의 경우와 동일하게 가정하였다.

2절에서 정의한 4가지 국부안전율 중  $FOS1$ ,  $FOS2$ ,  $FOS4$ 는 최대 및 최소주응력의 크기에 의해 결정된다. M-C 파괴조건식과 H-B 파괴조건식의 경우 중간주응력  $\sigma_2$ 가 파괴 최대주응력  $\sigma_{1f}$ 의 크기에 영향을 미치지 않으므로  $\sigma_3 = \sigma_m$ 이 유지되는 CTC와 CTE 경로에서 국부안전율  $FOS1$ ,  $FOS2$ ,  $FOS4$ 의 변화는 정확히 일치

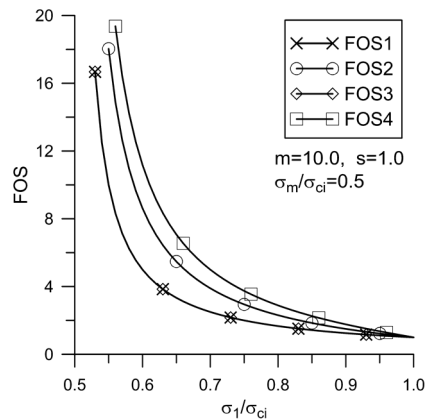


Fig. 17. Variations of local factors of safety with H-B criterion along the stress path SS



한다. Fig. 8과 Fig. 9, Fig. 13과 Fig. 14가 이를 잘 보여준다. 반면에 중간주응력  $\sigma_2$ 의 크기에 영향을 받는 응력불변량  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ 를 이용해 정의된  $FOS3$ 의 경우는 응력경로 CTC와 CTE에서 국부안전율 변화의 차이를 보여준다.  $FOS3$  값은 CTE 경로보다 CTC 경로에서 크게 계산되는 것을 알 수 있다. 예를 들어  $\sigma_1/\sigma_{ci} = 1.0$ 일 때  $FOS3_{MC}$ 는 CTC 경로의 경우 2.84이고 CTE 경로의 경우 2.14이며,  $FOS3_{HB}$ 는 CTC 경로의 경우 3.13이고 CTE 경로의 경우 2.38로 계산되었다. CTC 응력경로를 가정할 경우  $FOS2$ ,  $FOS3$ ,  $FOS1$  순서로 국부안전율 값이 작아짐을 보여준다. 반면에 CTE 응력경로의 경우  $FOS2$ ,  $FOS1$ ,  $FOS3$  순서로 국부안전율 값이 작아짐을 나타내고 있다. 또한  $FOS4$ 는 4개의 안전율 정의 중 가장 큰 안전율 값을 계산함을 볼 수 있다. 그러므로 설계 정밀성이 고도로 요구되는 암반구조물의 경우 CTC와 CTE 응력경로가 예상되는 상황에서는 암반공학적 설계 과정에서 흔히 적용되는 전단강도 기반의 안전율  $FOS2$ 를 적용하는 것보다 Mohr 원의 파괴포락선 근접도를 의미하는 국부안전율인  $FOS1$ 이나 응력불변량 기반의 안전율 정의인  $FOS3$ 의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 4개 안전율의 차이는 파괴에 근접함에 따라 즉, 안전율이 1에 가까워짐에 따라 점차 소멸된다는 사실도 확인할 수 있다. CTC와 CTE 응력경로의 경우 가정한 강도정수 조건에서 M-C 암석의 파괴강도는  $\sigma_{1f}/\sigma_{ci} = 3.40$ , H-B 암석의 파괴강도는  $\sigma_{1f}/\sigma_{ci} = 2.95$ 로 계산된다.

편차응력면에 포함된 3개의 응력경로 즉, TC, TE, SS 경로에 따른 4가지 국부안전율 변화를 M-C 파괴조건식과 H-B 파괴조건식의 경우에 대해 각각 Fig. 10~Fig. 12와 Fig. 15~Fig. 17에 나타내었다. 편차응력면에 포함된 응력경로들은 3개 주응력의 합이 변하지 않는다는 특징 즉,  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_m$ 을 만족한다.  $FOS1$ ,  $FOS2$ ,  $FOS3$ 의 변화를 비교할 때 TC 응력경로에서는  $FOS1$ 가 가장 작은 값을 나타내지만 TE 경로에서는  $FOS3$ 이 가장 작은 값을 나타내는 특징을 보여준다. SS 응력경로에서는  $FOS1$ 과  $FOS3$ 의 변화가 동일하다는 사실을 Fig. 12와 Fig. 17이 잘 보여주고 있다. 이는 SS 응력경로에서는  $\Delta\sigma_2 = 0$ ,  $\Delta\sigma_3 = -\Delta\sigma_1$ 이므로  $FOS1$ 과  $FOS3$ 의 기하학적 의미가 정확히 일치하기 때문이다. 즉, 현재 응력상태를 나타내는 Mohr 반경에 대한 파괴시 Mohr원의 반경비가 응력불변량 비  $\rho_{30,f}/\rho_{30}$ 와 일치하기 때문이다. 편차응력면에 포함된 3개의 응력경로에서도  $FOS4$ 가 가장 큰 안전율 값을 계산하는 것으로 나타났다.

M-C 파괴조건식을 적용할 경우 가정한 강도정수 조

건에서 경로 TC, SS, TE에서 얻어지는 파괴강도는 각각  $\sigma_{1f}/\sigma_{ci} = 1.24, 0.92, 0.72$ 로 나타났다. 또한 H-B 파괴조건식을 적용할 경우 가정한 강도정수 조건에서 경로 TC, SS, TE에서 얻어지는 파괴강도는 각각  $\sigma_{1f}/\sigma_{ci} = 1.36, 1.00, 0.76$ 로 나타났다. 그러므로 편차응력면 상의 응력경로를 택할 경우 Lode 각  $\theta$ 의 값이 큰 응력경로일수록 파괴강도가 낮게 산정된다는 것을 알 수 있다. 이 파괴강도 값들은 전술한 CTC 및 CTE 경로조건의 M-C 파괴강도 값 3.40 및 H-B 파괴강도 값 2.95와 큰 차이를 보인다. 따라서 암석의 최종 파괴강도 값 산정 시 응력경로를 가능한 정확히 예측하는 것이 중요하다는 것을 이러한 해석결과가 잘 보여준다.

#### 4. 결론

주어진 응력조건의 파괴조건에 대한 근접도를 의미하는 안전율은 암반구조물의 안정성을 판단하는 기준으로 활용될 뿐만 아니라 발주자가 요구하는 안전율 값을 암반공학적 설계의 경제성을 좌우하는 중요한 설계변수이다. 그러므로 안전율의 개념을 정확히 이해하고 상황에 맞는 안전율 정의를 적용하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 M-C 파괴조건식 및 H-B 파괴조건식을 대상으로 현재까지 여러 문헌에 보고된 4가지 형태의 국부안전율을 정의한 후 여러 응력경로에 따른 각 안전율의 변화특성을 고찰하였다. 이 연구에서 고려된 4가지 국부안전율 정의에서는 각각 파괴조건을 최대전단응력( $FOS1$ ), 최대전단강도( $FOS2$ ), 최대응력불변량( $FOS3$ ), 최대주응력( $FOS4$ )으로 설정하였다.

이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. TC 및 CTC 응력경로에서는  $FOS2$ ,  $FOS3$ ,  $FOS1$  순서로 국부안전율 값이 작았으며 TE 및 CTE 응력경로에서는  $FOS2$ ,  $FOS1$ ,  $FOS3$  순서로 국부안전율 값이 작게 나타났다.  $FOS4$ 의 경우 5가지 응력경로 모두에서 4가지 안전율 정의 중 가장 큰 안전율 값을 계산하였다.
2. 지금까지 암반공학적 안정성 해석과정에서 널리 적용되고 있는 전단강도 기반의 국부안전율  $FOS2$ 는 5개 응력경로에서 모두  $FOS1$ 이나  $FOS3$ 에 비해 높은 안전율을 계산하였다. 그러므로 보다 안전한 암반공학적 설계를 위해서는  $FOS1$ 이나  $FOS3$ 의 도입이 필요한 것으로 판단되었다.
3. 편차응력면에서 응력경로 별 파괴 최대주응력  $\sigma_{1f}/\sigma_{ci}$

을 계산한 결과 CTC(CTE), TC, SS, TE 경로 순서로 작은 값이 계산되었다. 특히 CTC와 CTE 경로에서 얻어진 최대 파괴주응력값은 나머지 3가지 경로의 경우에 비해 2배 이상 큰 값으로 나타났다. 그러므로 암석의 파괴강도를 예측하는 경우 가능한 응력경로를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.

## 사 사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1D1A1A09917357).

## References

- Castelletto, N., Gambolati, G. and Teatini, P., 2013, Geological CO<sub>2</sub> sequestration in multi-compartment reservoirs: Geomechanical challenges, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 118, 2417-2428.
- Chen, W.F. and Saleeb, A.F., 1982, Constitutive equations for engineering materials Vol.1: Elasticity and Modeling, John Wiley & Sons.
- Clausen, J. and Damkilde, L., 2006, Slope safety factor calculations with non-linear yield criterion using finite elements, In: *Num. Meth. Geotech. Eng. - Schweiger (Ed.)*, 491-496, Taylor & Francis Group, London.
- Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A., 1999, Slope stability analysis by strength reduction, *Geotechnique*, 49, 835-840.
- Duncan Fama, M.E., Trueman, R. and Craig, M.S., 1995, Two- and Three-dimensional elasto-plastic analysis for coal pillar design and its application to highwall mining, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 32(3), 215-225.
- Duncan, J.M., 1996, State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, *J. Geotech. Eng. ASCE*, 122.7, 577-596.
- Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. and Ellenberger, J.L., 2011, Pillar strength in underground stone mines in the United States, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 42-50.
- Hammah, R.E., Curran J.H., Yacoub, T. and Corkum, B., 2004, Stability analysis of rock slopes using the finite element method, In: *Proc. ISRM Regional Sympo. EUROCK 2004 & 53<sup>rd</sup> Geomech. Colloq.*, Salzburg, Austria.
- Hoek, E. and Brown E.T., 1980, *Underground excavations in rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., 1983, Strength of jointed rock masses, *Geotechnique*, 33(3), 187-223.
- Huang, S.L. and Yamasaki, K., 1993, Slope failure analysis using local minimum factor-of-safety approach, *J. Geotech. Eng.*, 119(12), 1974-1987.
- Lee, Y.K., 2011, Study on a 3-dimensional rock failure criterion approximating to Mohr-Coulomb surface, *Tunnel & Underground Space*, 21(2), 93-102.
- Lee, Y.K., Song, W.K., Park, C. and Choi, B.H., 2011, Stability analysis of concrete plugs using 3-D failure criterion, *Tunnel & Underground Space*, 21(6), 526-535.
- Lee, Y.K., 2014, Derivation of Mohr envelope of Hoek-Brown failure criterion using non-dimensional stress transformation, *Tunnel & Underground Space*, 24(1), 81-88.
- Lee, Y.K. and Pietruszczak, S., 2016, Analytical Representation of Mohr Failure Envelope Approximating the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* (submitted).
- Londe, P., 1988, Discussion on the determination of the shear stress failure in rock masses, *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, 14(3), 374-376.
- Nayak, G. C. and Zienkiewicz, O. C., 1972, Convenient forms of stress invariants for plasticity. *J. Struct. Div. ASCE*, 98, 949-953.
- Pietruszczak, S., 2010, *Fundamentals of plasticity in geomechanics*, CRC Press.
- Okubo, S., Fukui, K. and Nishimatsu, Y., 1997, Local safety factor applicable to wide range of failure criteria, *Rock Mech. Rock Eng.*, 30(4), 223-227.
- Roostaei, R., 2014, Quantifying the error associated with the use of triaxial rock strength criterion in rock stability assessment around underground openings, Master's Thesis, University of Toronto.
- Ucar, R., 1986, Determination of shear failure envelope in rock masses, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, 112(3), 303-315.
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W., 2004, *Rock Slope Engineering (4th Ed.)*, Spon Press, New York.
- Zheng, H., Tham, L.G. and Liu, D., 2006, On two definitions of the factor of safety commonly used in the finite element slope stability, *Computers and Geotechnics*, 33, 188-195.



**이연규**

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사

1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

1994년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 063-469-1864

E-mail: [kyoulee@kunsan.ac.kr](mailto:kyoulee@kunsan.ac.kr)

현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설  
공학과 교수

---