

응력불변량으로 표현한 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 등가 마찰각 및 점착력

이연규*, 최병희

Equivalent Friction Angle and Cohesion of the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion in terms of Stress Invariants

Youn-Kyou Lee*, Byung-Hee Choi

Abstract Implementing the generalized Hoek-Brown failure criterion in the framework of the Mohr-Coulomb criterion requires the calculation of the equivalent friction angle and cohesion. In the conventional method based on the Balmer (1952)'s theory, the tangential instantaneous friction angle and cohesion are expressed in terms of the minimum principal stress σ_3 , which does not provide the information about the dependency of the equivalent parameters on the hydrostatic pressure and the stress path. In this study, this defect of the conventional method has been overcome by representing the equivalent parameters in terms of stress invariants. Through the example implementation of the new method, the influence of the magnitude of the hydrostatic pressure and the Lode angle on the tangential instantaneous friction angle and cohesion is investigated. It turns out that the tangential instantaneous friction angle is maximum when the stress condition is triaxial extension, while the tangential cohesion is maximum when the stress condition is triaxial compression. The dependency of the equivalent Mohr-Coulomb strength parameters on the hydrostatic pressure and the Lode angle tends to be more substantial for the favorable rockmass of larger *GSI* value.

Key words Equivalent friction angle, Equivalent cohesion, Generalized Hoek-Brown failure criterion, Stress invariants, Rock failure criteria

초 록 일반화된 Hoek-Brown 암반파괴조건식을 Mohr-Coulomb 파괴조건에 기초한 암반구조물 해석법에 적용시키기 위해서는 등가 마찰각과 등가 점착력을 계산하는 과정이 필요하다. Balmer(1952)이론에 기초한 기존의 접선 순간마찰각과 순간점착력 계산식은 최소주응력 σ_3 의 함수로 표시되므로 등가 강도정수의 정수압 의존성 및 응력경로 의존성을 이해하는 데 적합하지 않다. 이 연구에서는 응력불변량을 이용하여 일반화된 Hoek-Brown 식의 접선 순간마찰각과 순간점착력 계산하는 방법을 제시하여 기존의 방법이 갖는 단점을 극복하였다. 제시된 방법을 이용한 예제 해석을 통해 접선 순간마찰각과 순간점착력의 정수압 의존특성 및 파괴곡면의 팔면체 단면에서 Lode각의 의존성을 고찰하였다. 접선 순간마찰각은 삼축신장 응력조건에서 가장 크며, 접선 순간점착력은 삼축압축 응력조건에서 가장 큰 것으로 나타났다. 접선 순간마찰각과 순간점착력의 정수압 및 Lode각 의존성은 *GSI* 값이 큰 양호한 암반에서 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

핵심어 등가 마찰각, 등가 점착력, 일반화된 Hoek-Brown 파괴함수, 응력불변량, 암석 파괴조건

Received: Dec. 14, 2012

Revised: Dec. 19, 2012

Accepted: Dec. 20, 2012

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

Tel) +82634691864, Fax) +82634639493

E-Mail) kyoulee@kunsan.ac.kr

Dept. of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro 1170, Gunsan, Chonbuk, Korea

1. 서론

암석의 파괴조건식으로 널리 이용되고 있는 Mohr-Coulomb 식은 두 강도정수 마찰각(friction angle, ϕ)과 점착력(cohesion, c)으로 정의되며 파괴 면에 작용하는 수직응력(σ_n)과 전단응력(τ_j) 또는 파괴 시 최소주응력(σ_3)과 최대주응력(σ_1)의 관계를 다음과 같은 선형함수로 가정

한다.

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

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} + \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (2)$$

그러나 다양한 암석시료에 대한 강도시험 자료에 의하면 암석의 파괴강도는 Mohr-Coulomb 식과 같은 선형 함수보다는 비선형 파괴함수에 의해 더 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 방대한 실험실 삼축압축시험 결과를 바탕으로 제안된 Hoek-Brown 경험식은 암석구조물 해석에 활발히 활용되고 있는 대표적인 비선형 암석파괴함수이며 파괴 시 σ_1 과 σ_3 의 관계를 다음과 같이 정의한다(Hoek & Brown, 1980a,b).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad (3)$$

여기서 σ_c 는 무결암의 일축압축강도이며 m 과 s 는 암반의 강도정수이다. Hoek-Brown 경험식은 본래 취성파괴 특성을 나타내는 암질이 우수한 경암을 대상으로 개발되었으나 이 후 적용범위를 불량 암반까지 확장하기 위해 여러 번의 개정(Hoek & Marinos, 2007)을 거쳐 다음 식으로 표현되는 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식(generalized Hoek-Brown failure criterion)(Hoek et al., 2002)으로 발전하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

여기서 σ_{ci} 는 무결암의 일축압축강도이다. 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식 (4)에서 암반의 강도정수 m_b , s 및 a 는 현장의 지질조건을 정량화하기 위해 도입한 지질강도지수(Geological Strength Index, GSI)(Hoek et al., 1995)을 이용하여 다음 식으로부터 계산된다.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (5a)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (5b)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (5c)$$

식 (5)에서 m_i 는 무결암의 강도정수이다. 한편 D 는

발파손상과 응력이완의 영향을 반영하는 교란지수로서 0(비교란)과 1(완전교란) 사이의 값을 갖는다. $a = 0.5$ 인 경우 일반화된 Hoek-Brown식은 본래의 Hoek-Brown 식 (3)과 동일하다.

파괴강도 예측성능 측면에서 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 대한 비선형 Hoek-Brown 경험식의 우수성에도 불구하고 여전히 많은 암반공학적 해석이 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 기초하여 작성된 수치해석 프로그램에 의해 수행되고 있다. 전단강도감소법(shear strength reduction method)을 이용한 암반사면 안정해석이 대표적인 예이다(Dawson et al, 1999; Fu & Liao, 2010). 그러나 Hoek-Brown 파괴조건식의 등가마찰각(equivalent friction angle)과 등가점착력(equivalent cohesion)을 계산할 수 있다면 Mohr-Coulomb 식에 기초한 해석코드에서 Hoek-Brown 암반의 파괴특성을 구현하는 것이 가능하다. Hoek (1990)은 Balmer(1952)의 이론을 활용하여 Hoek-Brown 경험식에 대응하는 파괴포락선의 접선과 접선의 절편으로부터 각각 등가마찰각과 등가점착력을 계산하는 방법을 제시하였다. 그러나 Hoek(1990)의 방법은 접선 마찰각과 접선점착력을 파괴 시 주응력 σ_1 과 σ_3 의 관계식으로 표시하므로 마찰각과 점착력의 정수압 의존성과 팔면체 응력면(octahedral plane)의 파괴곡면 단면에서 나타나는 응력경로 의존성을 명시적으로 표현할 수 없다는 단점도 가지고 있다.

이 연구에서는 일반화된 Hoek-Brown 파괴식의 접선 등가마찰각 및 등가점착력을 응력불변량으로 표시하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법에서는 접선 순간마찰각 및 순간점착력을 응력불변량으로 표시함으로써 Mohr-Coulomb 강도정수의 정수압 의존성과 응력경로 의존 특성의 기하학적 의미를 명확히 이해할 수 있게 하였다. 또한 제안된 방법의 적용 예제를 통하여 정수압 크기의 변화 및 파괴곡면의 횡단면에서 Lode 각(Pietruszczak, 2010)의 변화에 따른 등가 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화 특성을 고찰하였다.

2. 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 접선 마찰각 및 점착력

Balmer(1952)에 의하면 Fig. 1과 같이 파괴 시 최대 및 최소 주응력 σ_1 과 σ_3 으로 정의되는 Mohr원에 접하는 파괴포락선은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(1 + \partial\sigma_1/\partial\sigma_3)} \quad (6)$$

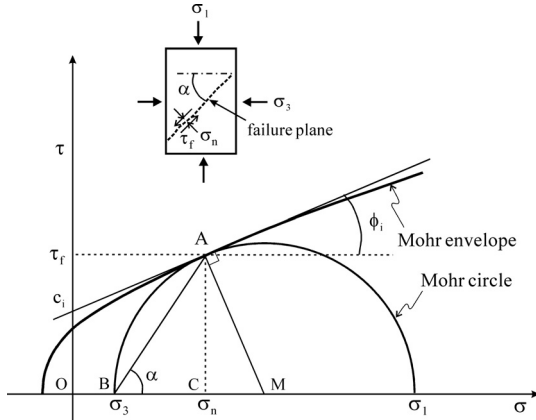


Fig. 1. Mohr envelope for the stress state at failure

$$\tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(1 + \partial\sigma_1/\partial\sigma_3)} \sqrt{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3}} \quad (7)$$

여기서 σ_n 과 τ_f 는 각각 파괴면에 작용하는 수직응력과 전단응력이다. 또한 Fig. 1의 $\triangle ABC$ 로부터 $\tan\alpha = \overline{CA}/\overline{BC}$ 임을 알 수 있으므로 파괴면의 경사각 α 는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tan\alpha = \sqrt{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3}} \quad (8)$$

따라서 Mohr 파괴포락선에 접하는 접선으로부터 구해지는 접선 순간마찰각 ϕ_i 와 순간점착력 c_i 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\phi_i = 2\alpha - 90^\circ \quad (9)$$

$$c_i = \tau_f - \sigma_n \tan\phi_i \quad (10)$$

한편 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 경우 식 (4)로부터

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (11)$$

$$\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3} = 1 + am_b \left(\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_3 + s \right)^{a-1} \quad (12)$$

이므로 파괴면에 작용하는 수직응력, 전단응력, 그리고

파괴면의 경사각은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{2 + am_b \left(\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_3 + s \right)^{a-1}} \quad (13)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{2 + am_b \left(\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_3 + s \right)^{a-1}} \sqrt{1 + am_b \left(\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_3 + s \right)^{a-1}} \quad (14)$$

$$\tan\alpha = \sqrt{1 + am_b \left(\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_3 + s \right)^{a-1}} \quad (15)$$

따라서 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 접선 순간마찰각과 순간점착력은 파괴 시 최소 주응력 σ_3 의 함수로 표시할 수 있음을 알 수 있다. 또한 파괴 시 σ_n 과 τ_f 의 관계적인 파괴포락선은 σ_3 를 매개변수로 한 식 (13)과 식 (14)에 의해 정의됨을 알 수 있다. 한편 $a=0.5$ 인 경우 σ_3 가 소거된 명시적 σ_n - τ_f 의 관계식을 구하는 것이 가능하다(Ucar, 1986).

3. 응력불변량으로 표현한 접선 순간마찰각 및 순간점착력

암반구조물의 안정성 해석과정에서 다루는 3차원 응력상태는 6개의 독립성분으로 구성된 2차 응력텐서로 표시된다. 앞 절에서 유도한 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 접선 순간 마찰각 및 순간점착력 계산식은 최소주응력 σ_3 의 함수로 표시되므로 수치해석 과정에서 이 관계식들을 이용하기 위해서는 주응력 σ_3 의 계산이 선행되어야 한다. 또한 σ_3 를 기반으로 한 접선 순간마찰각 및 순간점착력 계산식은 정수압 크기의 변화에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화와 팔면체 응력면에서 응력경로(stress path)의 차이에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화에 대한 정보를 제공하지 못하는 단점도 가지고 있다. Balmer(1952)의 이론에 기초한 기존 방법의 이러한 단점은 순간 접선마찰각 및 순간 점착력을 응력불변량으로 표시함으로써 극복할 수 있다.

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 을 가정할 때, Fig. 2와 같은 주응력 좌표계에서 주응력의 크기는 응력불변량 ξ , ρ , θ 를 활용하여 다음과 같이 표시할 수 있다(Nayak & Zienkiewicz, 1972).

$$\sigma_1 = \frac{\xi}{\sqrt{3}} + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \cos(\theta) \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \frac{\xi}{\sqrt{3}} + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (17)$$

$$\sigma_3 = \frac{\xi}{\sqrt{3}} + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (18)$$

여기서 $\xi = I_1/\sqrt{3}$, $\rho = \sqrt{2J_2}$, $\cos(3\theta) = 3\sqrt{3}J_3/(2J_2^{3/2})$ 이다. ξ 는 원점에서 팔면체면까지의 거리이며 정수압의 크기 p 와 $\xi = \sqrt{3}p$ 의 관계가 있다. I_1 은 응력텐서 σ_{ij} 의 일차불변량이다. ρ 는 정수압축으로부터 응력상태 점 p 까지의 거리를 의미한다. 이 때 J_2 와 J_3 는 편차응력텐서 $s_{ij} = (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_{kk}/3)$ 의 2차 및 3차 불변량이다. 팔면체면에서 응력상태 점 p 의 방향을 표시하는 Lode각 θ 의 범위는 $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ 이며, 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)의 경우 $\theta = 0$ 이고, 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)의 경우 $\theta = 60^\circ$ 이다.

응력불변량 ξ , ρ , θ 를 이용하여 파괴함수를 표시하면

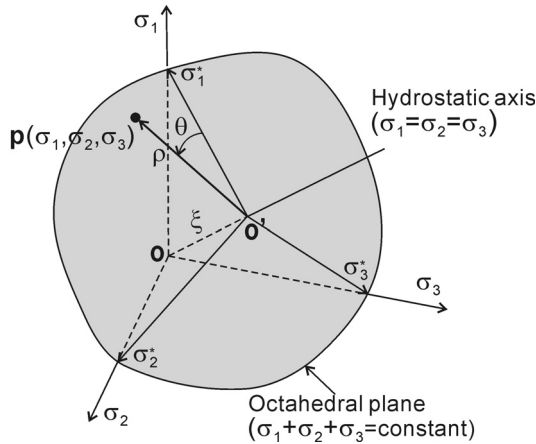


Fig. 2. Geometrical definition of stress invariants

주응력공간에서 파괴함수가 갖는 기하학적 의미를 명확히 이해할 수 있다(Lee, 2011, 2012). 이 경우 ρ 는 정수압축으로부터 ξ 와 θ 로 결정된 응력경로를 따라 파괴곡면에 이르는 거리를 의미한다. 식 (16)과 식 (18)을 식 (4)에 대입하면 응력불변량 ξ , ρ , θ 로 표시한 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left\{ \sqrt{2} \rho \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right\}^{1/a} = \sigma_{ci}^{(1-a)/a} m_b \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} \xi + \sqrt{\frac{2}{3}} \rho \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right\} + \sigma_{ci}^{1/a} s \quad (19)$$

파괴면에 작용하는 수직응력 및 전단응력 그리고 파괴면의 경사각은 식 (18)을 각각 식 (13), (14), (15)에 대입하여 ξ , ρ , θ 의 함수로 표시할 수 있고 이 결과를 이용하여 식 (9)와 식 (10)으로부터 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 접선 순간마찰각 및 순간점착력을 계산할 수 있다. 이 때 파괴조건식 (19)가 응력불변량 ξ , ρ , θ 사이의 구속조건 역할을 한다. 식 (19)에서는 $a=0.5$ 일 경우에 한하여 ρ 를 ξ 와 θ 의 양함수 형태로 다음과 같이 표시할 수 있다(Lee, 2011, 2012).

$$\rho = \frac{m_b \sigma_{ci} \cos(\theta + 2\pi/3) + \sqrt{m_b^2 \sigma_{ci}^2 \cos^2(\theta + 2\pi/3) + 4(\sqrt{3} m_b \sigma_{ci} \xi + 3 \sigma_{ci}^2) \sin^2(\theta + \pi/3)}}{2\sqrt{6} \sin^2(\theta + \pi/3)} \quad (20)$$

그러나 $a \neq 0.5$ 인 경우는 ρ 를 식 (20)과 같이 ξ 와 θ 의 명시적 함수로 표현할 수 없기 때문에 수치해석적 방법을 적용하여 ρ 를 계산하였다.

4. 일반화된 Hoek-Brown 암반의 마찰각과 점착력의 정수압 및 응력경로 의존성

4.1 중간주응력에 대한 독립성

일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식 (4)는 중간주응력 σ_2 가 파괴강도에 미치는 영향을 고려하지 않는 2차원

Table 1. σ_2 -independence of the tangential friction angle and cohesion in the generalized Hoek-Brown failure criterion ($\sigma_{ci}=80$ MPa, $m_b=10.0$, $s=1$, $a=0.54$).

σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	ξ (MPa)	θ (rad)	ρ (MPa)	ϕ_i (deg)	c_i (MPa)
5.0	5.0	108.98	68.693	0.000	84.900	43.118	17.860
5.0	25.0	108.98	80.240	0.182	78.027	43.118	17.860
5.0	45.0	108.98	91.787	0.391	74.174	43.118	17.860
5.0	65.0	108.98	103.334	0.612	73.815	43.118	17.860
5.0	85.0	108.98	114.881	0.825	77.000	43.118	17.860
5.0	105.0	108.98	126.428	1.013	83.322	43.118	17.860

파괴조건식이므로 3절의 방법을 적용하여 구한 접선 순간마찰각과 순간점착력 역시 중간주응력의 영향을 받지 않는다. 강도정수 $\sigma_{ci}=80$ MPa, $m_b=10$, $s=1$, $a=0.54$ 와 $\sigma_3=5$ MPa를 가정하고 중간주응력의 크기 변화에 따른 접선 순간마찰각과 순간점착력을 3절의 방법에 의해 계산하고 이 결과가 중간주응력의 크기에 영향을 받지 않음을 보였다. 가정한 조건에서 식 (4)에 의해 계산된 파괴강도는 $\sigma_1=108.98$ MPa이다. 파괴응력조건에 해당하는 응력불변량 ξ , ρ , θ 를 이용하여 구한 접선 순간마찰각과 순간점착력은 σ_2 의 크기에 관계없이 각각 $\phi_i=43.118^\circ$, $c_i=17.860$ MPa로 계산됨을 Table 1은 잘 보여준다. 또한 중간주응력 σ_2 의 변화에 따라 응력불변량 ξ , ρ , θ 은 변화하지만 이 불변량들을 이용한 접선 순간마찰각과 순간점착력 계산결과는 중간주응력 σ_2 의 크기에 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다. 한편, 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식과 같이 중간주응력이 강도에 미치는 영향을 고려하지 못하는 파괴조건에서 파괴시 팔면체전단응력 $\tau_{oct} = \rho/\sqrt{3}$ 은 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 일 때 최소가 되며 Table 1의 ρ 값 변화 양상은 이러한 사실을 잘 뒷받침해준다.

4.2 정수압의 크기 및 GSI 값이 접선 순간마찰각과 순간점착력에 미치는 영향

$m_i=10$, $\sigma_{ci}=80$ MPa, $D=0$ 을 가정한 후 정수압의 크기와 GSI 값의 변화가 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식

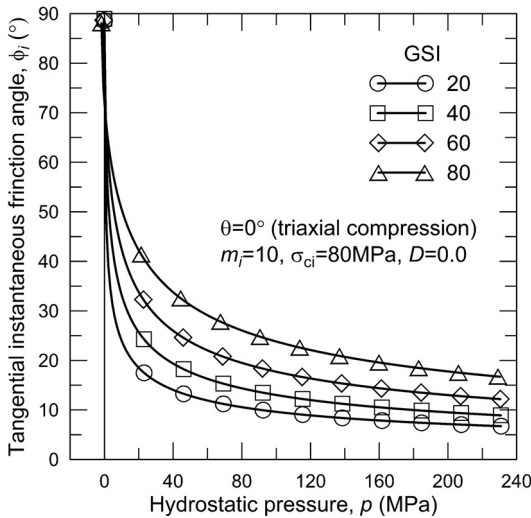


Fig. 3. Dependence of friction angle on hydrostatic pressure and GSI

의 접선 순간마찰각에 미치는 영향을 살펴보았다. 3절에서 제시한 방법을 적용하여 4가지 GSI 값(20, 40, 60, 80)에 대해 정수압 $p = \xi/\sqrt{3}$ 의 변화에 따른 접선 순간마찰각을 계산하였다. Fig. 3은 삼축압축조건($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $\theta=0$)에서 순간마찰각을 정수압의 함수로 표시한 것으로 정수압의 증가에 따라 지수함수적으로 마찰각이 감소하고 있음을 보여준다. 이러한 마찰각 감소경향은 비선형암석 암석파괴조건식의 공통된 특징이다. 정수압의 크기가 낮은 범위에서 급격한 마찰각의 저하가 발생한

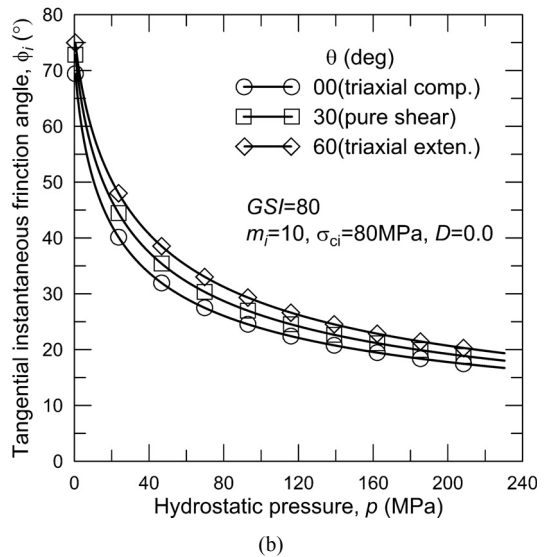
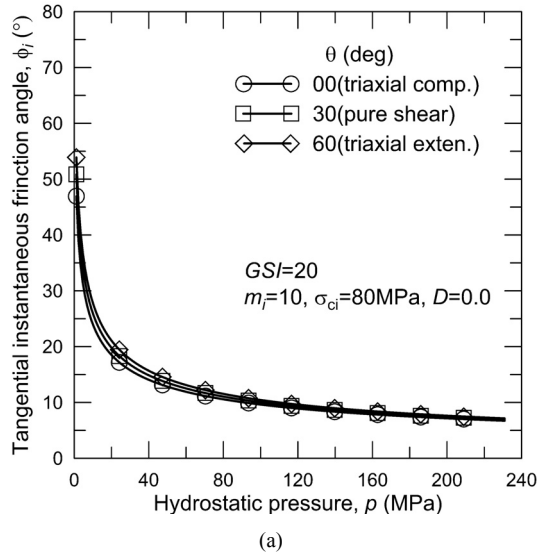


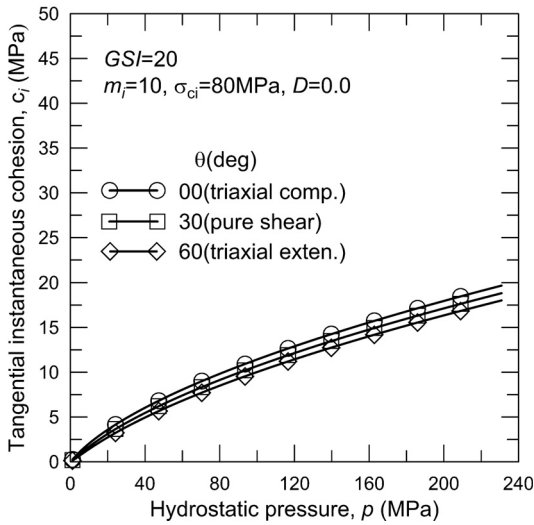
Fig. 4. Lode angle dependence of instantaneous friction angle; (a) GSI=20, (b) GSI=80

다는 사실은 Mohr-Coulomb 강도식을 적용하여 천부 암반구조물을 설계하는 경우 설계 마찰각의 선정에 신중을 기해야함을 암시해준다. 정수압이 양수(압축)인 범위에서는 *GSI* 값의 증가 즉, 암반의 양호성 증가에 따라 순간마찰각도 증가하는 경향을 보인다.

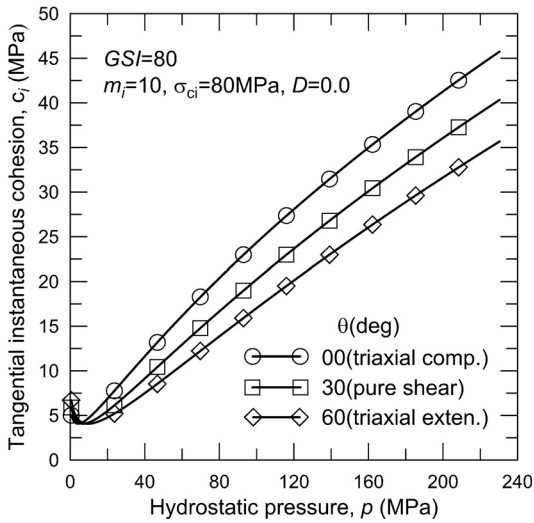
Fig. 4는 *GSI*값이 20과 80인 암반에 대해 3가지 Lode 각 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 을 가정한 후 정수압의 변화에 따른 접선 순간마찰각을 계산한 것이다. 이 때 $\theta=0^\circ$ 은 삼축압축조건 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), $\theta=30^\circ$ 은 순수전단조건($\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$),

$\theta=60^\circ$ 은 삼축신장조건($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)을 의미한다. 2가지 경우 모두 Lode각의 증가에 따라 접선 순간마찰각이 증가함을 볼 수 있다. 따라서 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식으로부터 계산한 접선 순간마찰각은 응력조건이 삼축신장조건을 만족할 때 가장 크게 계산되는 것을 알 수 있다. 주어진 정수압 조건에서 Lode각의 증가에 따른 접선 순간마찰각 증가율은 *GSI* 값이 80인 경우가 20인 경우에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 순간마찰각의 Lode각에 대한 민감도가 상대적으로 불량한 암반에서 작다는 것을 의미한다.

접선 순간점착력은 원점 부근을 제외한 압축 정수압 영역에서 정수압의 증가와 함께 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 한편 곡선의 시점 부근에서 관찰되는 최소 극점은 등가 Mohr 파괴포락선이 전단강도 축을 지나는 응력조건에 해당하므로 이 최소 점의 좌측에서는 정수압이 감소함에 따라 접선 순간점착력은 증가한다. 접선 순간마찰각과는 반대로 순간점착력은 Lode각의 증가에 따라 감소하며 삼축신장조건에서 최소 값을 나타내는 것으로 나타났다. 또한 순간마찰각의 경우와 마찬가지로 *GSI* 값이 큰 양호한 암반에서 정수압 증가에 대한 순간점착력 증가가 상대적으로 불량한 암반의 경우에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a)

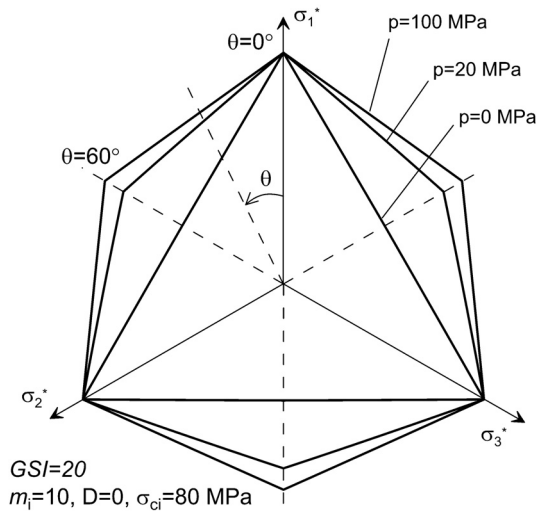


(b)

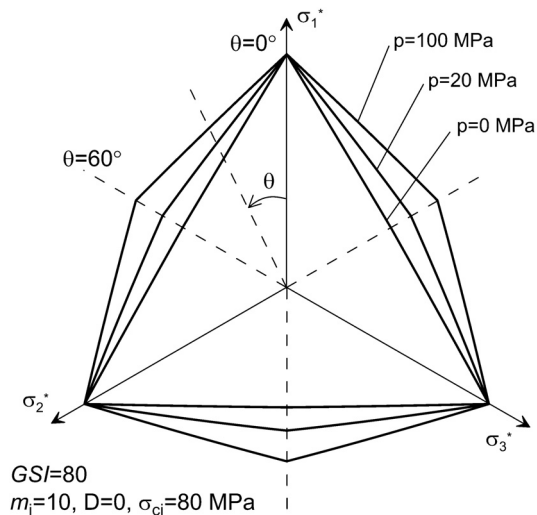
Fig. 5. Lode angle dependence of instantaneous cohesion; (a) *GSI*=20, (b) *GSI*=80

4.3 파괴곡면의 횡단면에서 접선 순간마찰각과 순간점착력의 변화

일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식을 주응력좌표계에 도시할 경우 파괴곡면은 정수압축을 중심축으로 하는 볼록한 육각추 형태로 나타난다. Fig. 6은 삼축압축조건 ($\theta=0$)에서 파괴 시 p 의 값이 1이 되도록 세 위치($p=0, 20, 100$ MPa)의 파괴곡면 단면을 팔면체 단면에 투영한 것이다. 추의 꼭지점 부근에 가까워질수록 단면형상(octahedral section, 팔면체응력면에 나타나는 단면형상)은 삼각형에 가깝고 정수압의 크기(p)가 증가함에 따라 점차 정육각형에 가까워짐을 알 수 있다. 파괴곡면의 꼭지점에 해당하는 정수압의 크기는 $p = -\sigma_{ci} s / m_b$ 이다. 육각형 형태를 이루는 각 변은 Mohr-Coulomb 파괴조건식의 경우처럼 직선이 아니라 약간 볼록한 곡선이라는 점을 주의할 필요가 있다(Lee & Bobet, 2012). *GSI*=20일 때는 정수압의 증가에 따라 빠르게 육각형 형태에 가까워지는 것을 볼 수 있으며, *GSI*=80일 때는 정수압의 증가에 따라 상대적으로 서서히 육각형 형태에 가까워지고 있음을 잘 보여준다. 이는 *GSI*가 작은 불량한 암반의 경우 낮은 정수압 범위에서 강도 비선형성이 크게 나타남을 의미한다. 한편 동일한 정수압 크기를 갖



(a)

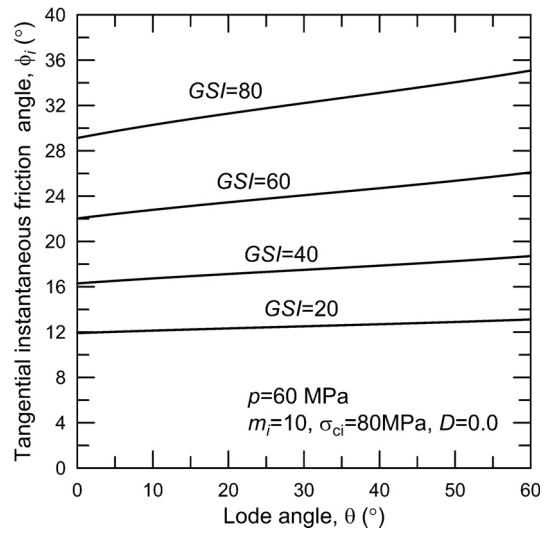


(b)

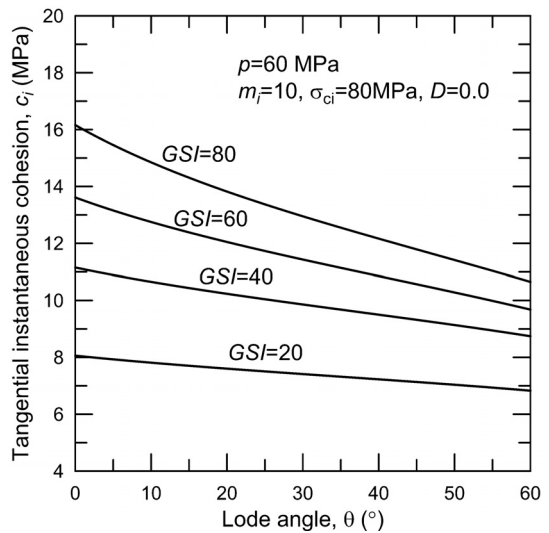
Fig. 6. Projected shape of octahedral sections in the generalized Hoek-Brown criterion; (a) $GSI=20$, (b) $GSI=80$

는 파괴곡면 단면에서 파괴 시 팽면체응력 $\tau_{ocd} = \rho / \sqrt{3}$ 의 θ 에 대한 이방성은 GSI 값이 큰 양호한 암반에서 크게 나타나는 것을 보여준다.

Fig. 7은 정수압 $p=60$ MPa에 해당하는 파괴곡면 단면에서 Lode각의 증가에 따른 접선 순간마찰각과 순간점착력의 변화를 보여준다. 4.2절에서 논의한 바와 같이 순간마찰각은 Lode각의 증가와 더불어 증가하는 반면 순간점착력은 반대로 감소하는 경향을 보여준다. 두 경우 모두 약간 비선형적 변화 형태를 보이며 변화의



(a)



(b)

Fig. 7. Variations of instantaneous (a) friction angle and (b) cohesion in the octahedral plane

비선형성은 GSI 값이 커짐에 따라 증가함을 보여준다. 또한 Lode각의 변화에 대한 순간마찰각과 순간점착력의 변화율은 GSI 값이 커질수록 즉 암반이 양호할수록 더 크다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 Hoek-Brown 암반의 파괴거동을 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 채용하여 해석할 경우 해석결과와 응력경로 의존성이 양호한 암반의 경우에서 더 크게 나타날 가능성이 있음을 암시한다.

5. 요약 및 결론

Mohr-Coulomb 식은 다양한 암반구조물의 안정성 해석과정에서 암반 파괴기준으로 널리 활용되고 있으나 암석의 강도시험에서 흔히 관찰되는 강도 비선형성을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 1980년 비선형 Hoek-Brown 파괴식이 제안되었으며 이후 수 회의 수정과정을 거쳐 오늘날의 일반화된 Hoek-Brown 경험식으로 발전하였다. 그러나 사용의 간편성 때문에 여전히 많은 암반공학적 해석이 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 기초하여 이루지고 있다. 이에 따라 비선형 Hoek-Brown 파괴식의 등가 마찰각과 등가 점착력을 계산한 후 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 적용하는 해석 틀 안에서 비선형 Hoek-Brown 파괴식의 특성을 구현하려는 노력이 시도되었다. 등가 Mohr-Coulomb 강도정수 계산법 중 기존의 점선 순간마찰각 및 순간점착력 계산법은 계산결과를 최소주응력 σ_3 의 함수로 표시하므로 점선 순간마찰각과 순간점착력의 정수압 크기 의존성 및 응력경로 의존성에 대한 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 이 연구에서는 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 점선 순간마찰각과 순간점착력을 응력불변량으로 표시하여 기존의 방법이 갖는 단점을 극복하였다.

제안된 방법에 의해 계산된 점선 순간마찰각은 정수압 크기의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 특징을 보이며 순간점착력은 대부분의 압축정수압 영역에서 포물선 형태의 증가를 나타내었다. 두 등가 강도정수의 정수압 증가에 대한 변화율은 GSI 값이 큰 양호한 암반에서 더 크게 나타났다. 파괴곡면의 횡단면에서 점선 순간마찰각은 Lode각의 증가에 따라 비선형적으로 단조 증가하며 점선 순간점착력은 단조 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 순간마찰각은 삼축신장조건에서 가장 크게 계산되며 순간점착력은 삼축압축조건에서 가장 크게 계산되는 것으로 나타났다. 팔면체 파괴단면에서 두 강도정수의 Lode각에 대한 변화율 역시 GSI 값이 큰 양호한 암반에서 크게 나타났다.

이상의 연구결과는 일반화된 Hoek-Brown 암반에 건설되는 암반구조물의 안정성을 Mohr-Coulomb 파괴조건을 적용한 해석 틀 안에서 평가하는 경우 응력조건에 따른 적절한 마찰각 및 점착력 산정의 유용한 근거로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년 한국지질자원연구원 자체연구사업인 ‘에너지 지하저장시설 설계를 위한 심부 암반의 강도 해석용 3차원 파괴함수 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Balmer, G., 1952, A general analytical solution for Mohr's envelope. American Society of Testing and Materials Vol. 52, pp. 1260-1271.
- Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A., 1999, Slope stability analysis by strength reduction, *Géotechnique*, Vol. 49(6), pp. 835-840.
- Fu, W., and Liao, Y., 2010, Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation, *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 288-298.
- Hoek, E. and Brown E.T., 1980a, Underground excavations in rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1980b, Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol.106 (GT9), pp. 1013-1035.
- Hoek, E., 1990, Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 27(3), pp. 227-229.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam:Balkema
- Hoek, E., Carranza-Torres and C., Corkum, B., 2002, Hoek-Brown criterion - 2002 edition. *Proc NARMS-TAC Conf, Toronto*, Vol. 1, pp. 267-273.
- Hoek, E., and Marinos, P., 2007, A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion, *Soils and Rocks*, No. 2, pp. 1-13.
- Lee, Y.-K., 2012, Comparative study on the rock failure criteria taking account of the intermediate principal stress, *Tunnel & Underground Space (J. Korean Society for Rock Mechanics)*, Vol. 22, pp. 12-21.
- Lee, Y.-K., 2011, Study on a 3-dimensional rock failure criterion approximating to Mohr-Coulomb surface, *Tunnel & Underground Space (J. Korean Society for Rock Mechanics)*, Vol. 21, pp. 93-102.
- Lee, Y.K. and Bobet, A., 2012, Instantaneous friction angle and cohesion of 2-D and 3-D Hoek-Brown rock failure criteria in terms of stress invariants, *Rock Mech. and Rock Eng.* (submitted).
- Nayak, G.C. and Zienkiewicz, O.C., 1972, Convenient forms of stress invariants for plasticity, *J. Struct. Div. ASCE*, Vol. 98, pp. 949-953.
- Pietruszczak, S., 2010, *Fundamentals of plasticity in geomechanics*, CRC Press.
- Ucar, R., 1986, Determination of shear failure envelope in rock masses. *J. Geotech. Eng.*, Vol. 112(3), pp. 303-315.



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
 현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수



최병희

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3237
 E-mail: bhchoi@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원