

혈암의 이방성을 고려한 비선형 강도정수 및 파괴규준식 산정 Nonlinear Strength Parameters and Failure Characteristics of Anisotropy Rock - Shales

김영수¹⁾, Young-Su Kim, 이재호²⁾, Jae-Ho Lee, 허노영³⁾, No-You Heo, 방인호⁴⁾, In-Ho Bang,
성언수⁵⁾, Eun-Su Sung.

- 1) 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
- 2) 정회원 · 경북대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Stud. Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
- 3) 정회원 · 경북대학교 토목공학과 공학박사, Ph.D, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
- 4) 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph.D, Stud. Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
- 5) 경북대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Stud. Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

SYNOPSIS : The directional response of strength and deformation on the rocks acting by external loads is called by strength and deformability anisotropy, respectively. Peak strength and its failure criteria of anisotropy rocks have been studied and reported. Many authors have investigated in detail the behavior of triaxial peak strength of anisotropic rocks (Jaeger 1960, McLamore & Gray 1967, Hoek & Brown 1980, Ramamurthy & Rao 1985). They concluded that the triaxial strength of anisotropic rocks varies according to the inclination of discontinuity in specimens. And, the minimum triaxial strength occurs in the specimen with 60° of inclination angle ; and specimens with 0° or 90° inclination have maximum triaxial strength. Based on the experimental result, the behavior triaxial strength is investigated. The triaxial compression tests due to the angle bedding plane have been conducted and the material constants, 'm' and 's', cohesion and angle of friction and nonlinear strength parameters to fit for the failure criterion were derived from the regression analysis. And, the experimental data are employed to examine three existing failure criteria for peak strength, provided by Jaeger, McLamore and Hoek & Brown and Ramamurthy & Rao. For a shale, the suitability of the failure criteria of triaxial peak strength for anisotropic rocks is discussed.

Key words : Shale, Anisotropy, Failure criteria, Discontinuity, Material constant

1. 서 론

이방성 암반의 형태 및 이방성 정도를 표현하기 위하여 일축 압축강도, 간접 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 탄성파, 혹은 파괴변형률을 적용한다. 층리가 있는 이방성 암반의 강도와 변형률에 대한 연구는 Müller(1930)에 의해서 최초로 시작되었다. 그 후 여러 학자들에 의한 다양한 이방성암반에 대한

시험을 통하여 이방성 강도의 파괴 예측기준, 그리고 강도 및 변형특성 등에 관한 연구결과들을 발표하였다. Jaeger(1960), McLamore와 Gray(1967), Hoek와 Brown(1980), Ramamurthy와 Rio(1985)등 많은 연구자들은 실내 및 실외시험을 통해 이방성암석의 삼축시험을 수행하였으며, 그 시험결과를 바탕으로 층리각도의 변화에 따른 파괴규준을 만들었다. 그 결과에서 이방성 암석의 파괴규준은 비선형적 거동을 보였다. 대구지역의 혈암에 대한 전단강도 특성은 층리가 평행한 경우에 대해서는 이영휘 등(1998)이 연구하였고, 김영수 등(1998)은 층리각도에 따른 점착력과 내부마찰각을 연구하였다. 이에 본 연구는 대구지역의 혈암에 대하여 삼축시험을 통한 파괴규준식을 지금까지 사용된 여러 외국식을 적용하여 이 지역의 이방성 암석에 타당한 파괴규준식 및 비선형 강도정수를 산정해 보았다.

2. 이방성 형태

이방성암반의 층리경사는 층리방향으로부터의 β° 로 표현된다면, 일축 압축강도사이의 형상은 그림 1과 같다. U형태의 이방성에는 최대 압축강도가 0° 에서 일어나고, 60° 에서 최소 압축강도를 갖는다. Shoulder 형태의 이방성을 갖는 암석은 퇴적상태에 기인하여 경사각이 90° 근처에서 높은 값을 보이는 혈암, 사암등에서 많이 나타났다. 굽이치는 형태(undulatory)의 이방곡선은 석탄, 구조토와 같은 생화학적인 암석들에서 볼 수 있는데 최대 강도는 0° , 최소 강도는 60° 근처에서 나타났다. 그림 1를 참조하여 대구지역 혈암의 이방성 형태는 U형태와 shoulder형태의 중간형태임을 알 수 있다.

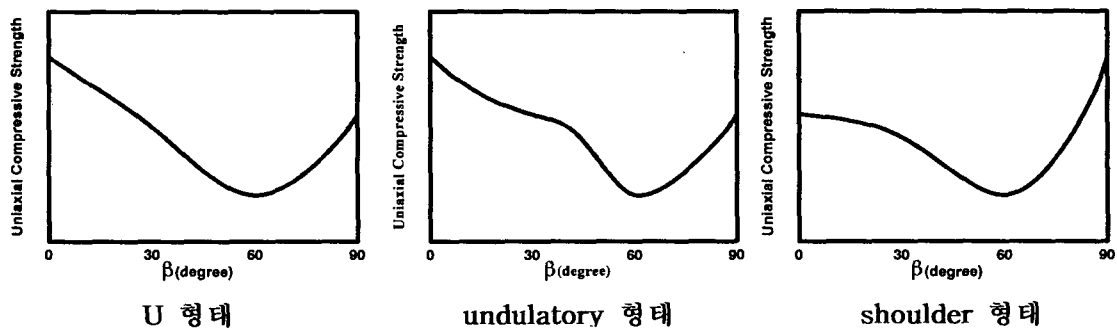


그림 1. 이방성의 형태

3. 이방성 암석의 파괴규준식

3.1 Jaeger의 파괴 규준

일반적으로 한 방향만의 벽개면을 갖고 U형태의 이방성을 띠는 점판암, 천매암 그리고 이와 비슷한 암석에 있어서 경사각 (β°)의 범위에 따른 이방성 곡선의 형상은 만약 0° , 60° , 90° 에서의 일축 압축강도를 안다면 식 (1)에 의해 예측될 수 있다.

$$\sigma_c = A - D[\cos 2(\beta - \beta_m)] \quad (1)$$

여기서, σ_c : β° 에서의 일축압축강도

β_m : 강도가 최소값을 가질 때의 경사각(일반적으로 $\beta^\circ=60$)

A, D : 상수

Jaeger는 삼축시험을 통한 이방성암석이 축차응력, 점착력, 그리고 내부마찰각의 관계식을 식 (2),(3)과

$m(\beta)$, $s(\beta)$ 의 방정식은 많은 시험자료를 정확하게 나타내기에 충분하다고 결론지었다.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{m(\beta) \sigma_c \sigma_3 + s(\beta) \sigma_c^2} \\ m(\beta) &= m_i (1 - A_1 e^{-\theta^4}) \\ s(\beta) &= 1 - P_1 e^{-\zeta^4} \\ \theta &= \frac{\beta_m - \beta}{A_2 + A_3 (90 - \beta)} \\ \zeta &= \frac{\beta_s - \beta}{P_2 + P_3 (90 - \beta)}\end{aligned}\quad (7)$$

여기서, σ_c : $\beta^0=0$ 일때의 일축 압축강도

m_i : $\beta^0=0$ 일때의 m 값

β_m : m 이 최소일때의 β 값

β_s : s 가 최소일때의 β 값

$A_1, A_2, A_3, P_1, P_2, P_3$: 상수

3.4. Ramamurthy의 비선형 파괴기준

Mohr-Coulomb이론은 Ramamurthy와 Rao등에 의해 수정되었다. 그들은 식 (8)와 같은 비선형 강도이론을 만들었다.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = B_i \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^{a_i} \quad (8)$$

여기서, σ_1, σ_3 : 최대, 최소 주응력

a_i : $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3}$ 와 $\frac{\sigma_c}{\sigma_3}$ 사이의 경사. (대부분의 암석시료에서 0.8)

B_i : 재료상수. (대부분의 암석시료에서 1.8~3)

식(8)은 σ_c 의 5%이상의 구속압하에서 구할 수 있다. 압열 인장시험을 수행할 경우 식 (8)은 식 (9)와 같이 된다. 식 (9)으로 보다 더 정확한 예측을 할 수가 있다.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_3 + \sigma_t)} = B_i \left(\frac{\sigma_c + \sigma_t}{\sigma_3} \right)^{a_i} \quad (9)$$

여기서, σ_t : 압열 인장강도

a_i : 대부분의 암석시료에서 0.67.

B_i : 재료상수.

대부분의 불연속 암석이나, 이방성 암반에서 식 (9)은 적절하다. 수식 (9)을 사용하여 층리 경사각($\beta^0=j$)에 따른 비선형 파괴이론을 식 (10)과 같이 만들 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} &= B_j \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^{a_j} \\ \frac{a_j}{a_0} &= \left(\frac{\sigma_{c_j}}{\sigma_{c_0}} \right)^{1-a_0} \\ \frac{B_j}{B_0} &= \left(\frac{a_0}{a_j} \right)^{0.5}\end{aligned}\quad (10)$$

같이 제안하였다. 여기서 점착력(C)는 U타입이나 shoulder형태에 상관없이 단지 층리 경사각(β°)에만 영향을 받으며, 내부마찰각(ϕ)은 영향이 없다고 발표하였다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(C + \sigma_3 \tan \phi)}{(\sqrt{\tan^2 \phi + 1} - \tan \phi)} \quad (2)$$

$$C = A - B(\cos 2(\beta - \beta_{\min})) \quad (3)$$

여기서, $\tan \phi$: 층리각도에 따른 내부마찰각의 평균.
 β_{\min} : 점착력이 최소가 되는 각도.

3.2 McLamore의 파괴규준

McLamore는 Jaeger이론을 바탕으로 식 (4), (5)을 제안하였다. 그는 내부마찰각도 층리각도에 따라 영향을 받으며, 층리각도에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화는 n과 m의 지수에 따라 더 적합한 예측값을 가진다고 설명하였다. 식 (4), (5)에서 구한 점착력과 내부마찰각의 변화를 식 (2)에 대입하여 파괴곡선을 그릴 수 있다.

$$C = A - B (\cos 2(\beta - \beta_{\min}))^n \quad (4)$$

$$\tan \phi = t_1 - t_2 (\cos 2(\beta - \beta_{\min}))^m \quad (5)$$

여기서, A, B, t_1, t_2 : 상수
 n, m : 회귀분석을 통한 적합한 지수
 β_{\min} : 점착력(C) 및 내부마찰각(ϕ)이 최소가 되는 층리각(β°)

3.3 Hoek와 Brown의 파괴규준

Hoek와 Brown은 개념적으로 Griffith 이론에 근거를 두지만 절리암석 및 파쇄암석까지 포함하여 넓은 범위의 암석강도를 접합시키기 위해 시행착오적으로 유도한 경험식을 제안하였는데 그들에 의한 파괴기준식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)} \quad (6)$$

단, σ_1, σ_3 : 시험편에 작용하는 최대 및 최소 주응력
 σ_c : 신선한 암석 시험편의 일축 압축강도
 m : 암석의 성질, 주로 내부마찰각, 구성입자의 결합성등에 좌우되는 상수.
 s : 응력을 가하기 전의 시험편의 파손 상태로 인한 인장강도에의 영향에 좌우되는 상수.

식 (6)의 전체조건으로 암석의 절리간격이 매우 조밀해야하며, 4개 혹은 그 이상의 절리군을 포함해야 하고, 이들 절리군중 어떠한 절리군도 다른 절리군보다 약하지 않아야 한다. 암석의 불연속면 중 하나가 다른 불연속면에 비해 매우 약하다면 암반은 이방성으로 취급되어야 하고, Hoek와 Brown기준은 이방성에 대한 보정이 이루어지지 않으면 안된다. 특히 그들은 불연속면의 방향에 따른 최대, 최소 주응력이 불연속면의 활동에 영향을 끼친다고 하였다. 즉, 시료의 강도는 약한면의 방향에 따라 매우 다르며, 이 방성에서 m값과 s값은 경험적 강도 이론에서 등방성 물질과 같이 상수가 아니고, β° 에 의해서 다양하게 나타남을 알 수 있다. Hoek와 Brown은 층리를 가진 암석의 경우에 무결암 암석의 강도를 $\beta^\circ=0$ 에서의 구한 값으로 결정하였다. 또한, $\beta^\circ=0$ 일때의 s는 단위이고 암석 파괴의 정도가 아니다. 이방성 암석의 경험적인 이론과 $m(\beta)$, $s(\beta)$ 의 방정식은 식 (7)와 같다. 그들은 (7)의 방정식으로부터 결정되어진

여기서, α_j, β_j : 층리각도 $j(\beta^\circ)$ 에 따른 α, β 의 값.
 σ_{α_j} : 층리각도 $j(\beta^\circ)$ 에 따른 일축 압축강도-수식 (1)를 적용
 σ_{α_0} : 층리각도 0° 에서의 일축 압축강도.
 α_0, β_0 : 층리각도 0° 에서의 α, β 의 값.

위의 식 (10)은 먼저 $\beta^\circ=0$ 에서 삼축시험을 수행한 후, $\alpha_0, \beta_0, \sigma_{\alpha_0}$ 를 찾고서, 여러 각도에 따른 삼축시험을 통해 강도 정수를 찾을 수 있다.

4. 시료성형 및 시험방법

본 시험에 사용된 암석시료인 흑색 혈암은 대구시 수성구 고산동에 위치한 종합경기장 건설현장 부근에서 채취하였다. 시료 채취시 이방성의 특성을 고려하기 위하여 층리가 일정한 간격으로 분포된 암괴 형태의 것만을 취하였다. 현장에서 채취한 암괴형태의 시료를 실내에서 구경이 NX Size(D=5.4cm)의 Core Drill로 층리면이 축하중과 각각 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ(\beta^\circ)$ 가 되도록 하여 암석코어를 제작하였다(그림 1 참조). 삼축 압축용 시험편제작은 시험편의 길이에 대한 직경의 비가 2 : 1을 기준으로 하였으며, 삼축 압축 시험은 Hoek cell을 이용하여 구속압을 20, 30, 40, 50, 60kg/cm²이 5가지로 변화시키면서 실시하였다. 압축시험기는 용량 100ton의 유압식 시험기(UTM, M200HVL, 미국)을 이용하였다.



그림 2. 성형된 시료(선은 층리 각도를 가리킨다)

5. 시험 결과

그림 3은 식(3)를 이용하여 혈암에 대한 β° 에 따른 점착력의 변화양상으로서 60° 까지 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 식 (3)의 상수 A, B 및 β_{\min} , 평균내부마찰각은 다음과 같이 구하였다.

$$C = 148.677 - 24.0515(\cos 2(\beta - \beta_{\min})) \quad (r^2 = 0.65)$$

$$\beta_{\min} = 60^\circ$$

$$\tan \phi = 1.54677$$
(11)

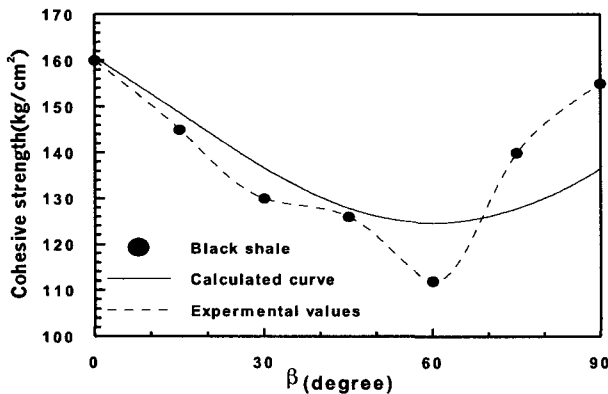


그림 3. β° 에 따른 점착력의 변화(Jaeger)

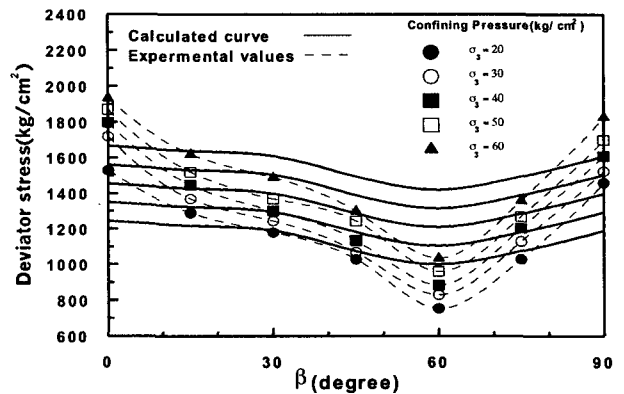


그림 4. β° 에 따른 파괴 곡선(Jaeger)

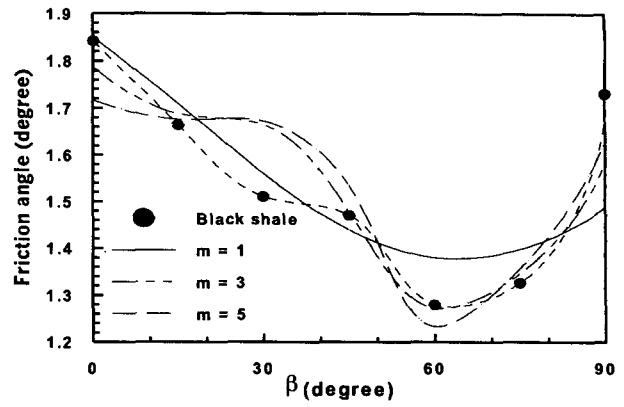
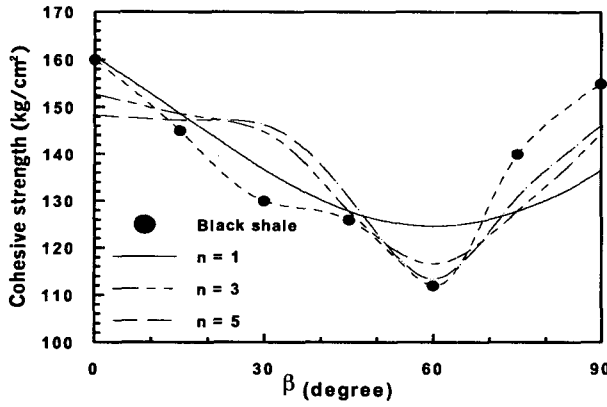


그림 5. β° 에 따른 점착력의 변화(McLamore) 그림 6. β° 에 따른 마찰각의 변화 (McLamore)

그림 4는 식(11)을 식(2)에 대입하여 층리각도에 따른 파괴곡선을 나타낸 그림이다. 그림 4를 통해 이 기준은 잘못지 않음을 알 수 있다. 이와같이 Jaeger의 파괴 기준에서는 각도에 따른 내부마찰각의 변화 요소를 고려하지 않았기 때문이다. McLamore는 Jaeger의 식을 수정하여 식(4), (5)을 제안하였다. 이를 이용하여 대구지역 블랙 혈암에 대하여 표 1를 구하였다. 여기서, 지수, $n=3$, $m=3$ 은 회귀분석을 통해 상관정도가 가장 높은 것으로 보아 Jaeger의 식보다 더 적합한 값을 알 수 있다. 점착력과 내부마찰각이 최소가 되는 β° 은 각각 60° , 64° 이다.

표 1. McLamore의 지수 함수식

| | 회귀분석 식 | 상관정도(r^2) |
|-------|---|---------------|
| 점착력 | $C_i = 148.677 - 24.0515 (\cos 2(\beta - 60))$ | 0.65 |
| | $C_i = 148.675 - 32.0646 (\cos 2(\beta - 60))^3$ | 0.69 |
| | $C_i = 147.273 - 33.8607 (\cos 2(\beta - 60))^5$ | 0.66 |
| 내부마찰력 | $\tan \phi = 1.6692 - 0.291427 (\cos 2(\beta - 64))$ | 0.7 |
| | $\tan \phi = 1.68746 - 0.426824 (\cos 2(\beta - 64))^3$ | 0.814 |
| | $\tan \phi = 1.67607 - 0.464497 (\cos 2(\beta - 60))^5$ | 0.78 |

표 1에서 찾은 지수, $n=3$, $m=3$ 를 이용하여 Jaeger의 식 (2)에 대입하면 그림 7과 같은 파괴 곡선을 구할 수 있다. 그림 4, 7를 비교해볼 때, β° 에 따른 내부마찰각의 변화 및 지수를 이용한 McLamore의 식을 적용하여 구한 파괴곡선이 더 잘못음을 알 수 있다. 이와 같은 사실을 통해서도 이방성 암석은 비선형적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 이론식보다는 경험식을 사용함이 더 타당하다고 사료된다. Hoek와 Brown의 이방성 파괴기준식은 먼저 층리각에 따른 $m(\beta)$, $s(\beta)$ 를 구하여야 한다. $m(\beta)$, $s(\beta)$ 를 구하기 위한 선형 회귀분석에 의한 식은 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 Y &= (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \\
 X &= \sigma_3 \\
 m &= \frac{1}{\sigma_c} \left[\frac{\sum x_i \sum y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right] \\
 s &= \frac{1}{\sigma_c} \left[\frac{\sum y_i}{n} - m \sigma_c \frac{\sum x_i}{n} \right]
 \end{aligned} \tag{12}$$

또한, 식 (7)이용하여 다음 식을 얻을 수 있다. 여기서 $A_1 = (m_i - m_{\min})/m_i$, $P_1 = 1 - s_{\min}$ 이다.

$$\theta = \left[\log_e \left(\frac{A_1}{1 - m/m_i} \right) \right]^{0.25}$$

$$\zeta = \left[\log_e \left(\frac{P_1}{1 - s} \right) \right]^{0.25}$$
(13)

식 (13)에서 구한 θ , ζ 이 식 (7)을 만족하도록 반복해서 계산한다. 이렇게 해서 구한 혈암의 경험적 강도 정수는 다음과 같다

$$A_1 = 0.3172, A_2 = 23, A_3 = 0.2966, P_1 = 0.413, P_2 = 14, P_3 = 0.11$$

그림 9은 위에서 구한 강도 정수를 이용하여 이방성 암석의 파괴곡선을 나타낸 그림이다. 그림 9에서 각도에 따른 축차응력의 예측값과 실측치가 잘 일치하므로 Hoek와 Brown의 식은 이방성 혈암의 파괴규준식으로 적당함을 알 수 있다.

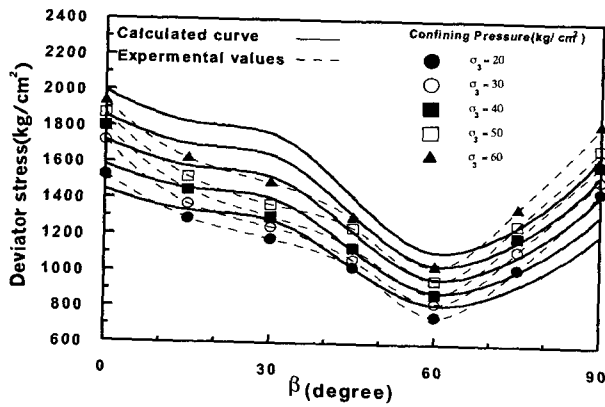


그림 7. β° 에 따른 파괴 곡선(McLamore)

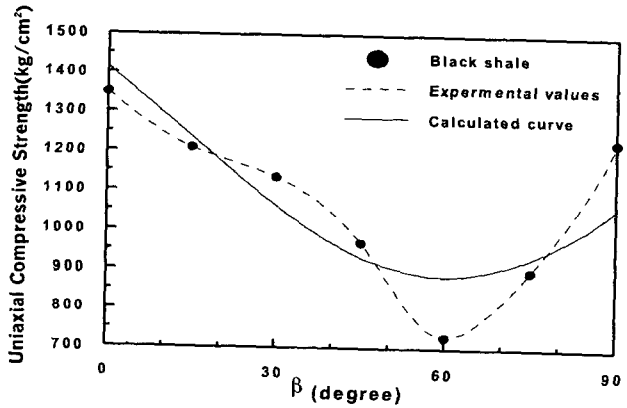


그림 8. β° 에 따른 일축 압축강도 변화-식(1)

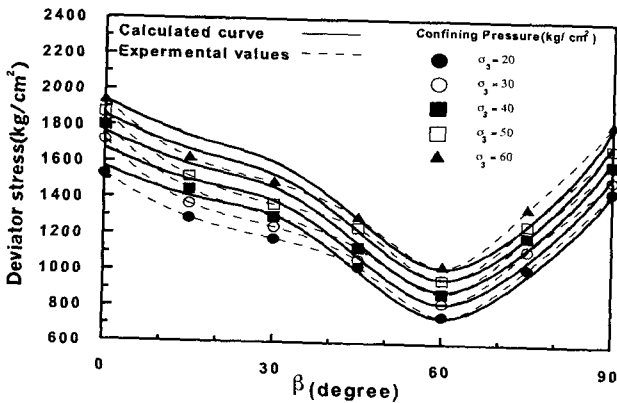


그림 9. β° 에 따른 파괴 곡선(Hoek와 Brown)

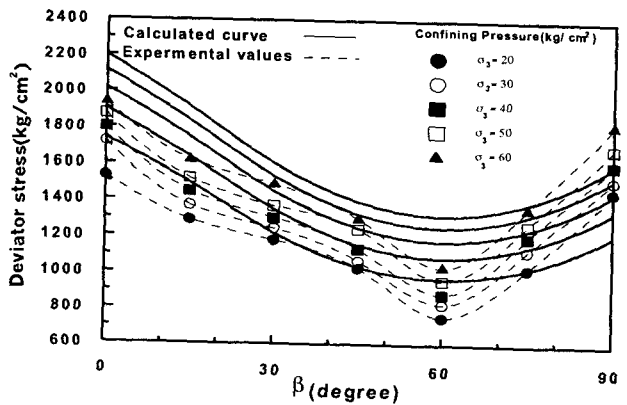


그림 10. β° 에 따른 파괴곡선(Ramamurthy와 Rao)

Ramamurthy와 Rao의 비선형 파괴규준식을 구하기 위해 먼저 식(1)에 적합한 일축 압축강도 예측식을 찾아야 한다. 그림8는 혈암의 층리 각도에 따른 일축 압축강도 곡선으로서 예측되는 식은 다음과 같다.

$$\sigma_{c_j} = 1237.2 - 351.31[\cos 2(\beta - 60)] \quad (r^2 = 0.78)$$

또한, 수식 (10)에서 사용된 a_o, B_o 는 선형 회귀분석을 통해 각각 0.78, 3.04임을 알 수 있다. 그림 10은 Ramamurthy와 Rao의 비선형 강도 정수 a_j, B_j 를 이용하여 구한 파괴강도 곡선이다. 그림 9와 그림 10을 비교하였을 때 Hoek와 Brown의 파괴규준식이 더 적합함을 알 수 있다. 하지만, Ramamurthy와 Rao의 방법은 여러 각도에서의 일축 압축강도와 0°에서의 삼축시험만으로 파괴규준식을 구할 수 있는 장점이 있다.

6. 결 론

대구 지역에 분포하는 혈암의 파괴 특성을 파악하기 위해서 β^0 에 따라서 일축 및 삼축 압축시험을 수행하였다. 이 결과를 이론식에 근거한 Jaeger, Mclamore, 경험식인 Hoek와 Brown, 비선형적 해석인 Ramamurthy와 Rao의 파괴기준식에 적용하여 혈암에 적합한 파괴규준식을 제안하였다. 그 결과는 아래와 같다.

- (1) Jaeger의 식을 바탕으로 혈암의 파괴 곡선을 구해 본 결과 대체적으로 잘 일치하지 않았다.
- (2) Mclamore의 식을 이용한 대구지역 혈암에 대한 지수, $n=3, m=3$,를 찾았다. 이는 혈암의 파괴 곡선에서 Jaeger의 식보다 잘일치함을 알 수 있다.
- (3) Hoek와 Brown의 파괴 규준식에서 구한 재료 상수 $m(\beta), s(\beta)$ 은 층리에 따라 변화하였으며, 그 때에 사용된 정수는 $A_1=0.3172, A_2=23, A_3=0.2966, P_1=0.413, P_2=14, P_3=0.11$ 를 구하였다. 이를 이용하여 파괴곡선을 그려본 결과 축차응력의 결과치와 예측치가 잘일치하였다. Ramamurthy와 Rao의비선형 강도 정수 a_o, B_o 는 각각 0.78, 3.04이며, 이를 이용한 파괴곡선을 그려본 결과 실험치와 잘 맞지 않았다. 위의 4가지 파괴규준 중 대구지역의 블랙 혈암에는 Hoek와 Brown의 파괴곡선이 더 잘 일치함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김영수, 허노영, 서인식(1998), "퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구(대구지역)", 한국지반공학회지, 제 14권, 제4호, pp.5-15.
2. 이영휘, 오세봉, 임광욱, 허진석(1998), "삼축시험에 의한 전단강도특성". 토목학회학술발표회 논문집 (II) 토질/터널, 서울, pp.131-134
3. Mclamore R., Gray K. E.(1967), "The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks", J. Eng. Ind. 89, pp.62-76.
5. Donath F. A.(1964), "Strength variation and deformation behavior of anisotropic rocks", Elsevier, New York.
6. Chenevert M. E. & Gratlin C.(1965), "Mechanical anisotropies of laminated Sedimentary Rocks", Soc. Pet. Eng. J. 5, pp.67-77.
7. Jaeger J. C.(1960), "Shear failure of anisotropic rocks. Geol". Mag. 97, pp.65-72.
8. Ramamurthy T., Rao G. V. and Rao K. S.(1985), "A strength criterion for rocks". In Proc. Indian Geotech. Conf., Roorkee, Vol. 1, pp.59-64.
9. Hoek E., Brown E. T.(1980), "Underground Excavation in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, London. p. 137.