

셰일(혈암)의 이방성 파괴 특성

Anisotropy Failure Characteristics of Shales

김 영 수* ¹	Kim, Young-Su	허 노 영* ²	Heo, No-Young
방 인 호* ³	Bang, In-Ho	이 재 호* ⁴	Lee, Jae-Ho
성 언 수* ⁵	Sung, Eun-Su		

Abstract

The directional response of strength and deformation on the rocks acting by external loads is called strength and deformability anisotropy, respectively. Both anisotropic properties are common for stratified sedimentary, foliated metamorphic and regularly jointed rocks. Peak strength and its failure criteria of anisotropic rocks have been studied and reported. The failure criteria for the triaxial peak strength of anisotropic rocks have been well established from both empirical and theoretical standpoints. Many authors have investigated in detail the behavior of triaxial peak strength of anisotropic rocks(Jaeger,1960, McLamore & Gray,1967, Donath,1972, Nova, 1980, Hoek & Brown,1980, Ramamurthy *et al.*,1985). They concluded that the triaxial peak strength of anisotropic rocks varies according to the inclination of discontinuity in specimens. In this paper, the triaxial compression tests due to the angle bedding plane have been conducted and the material constants, cohesion and angle of friction to fit for the failure criterion were derived from the regression analysis. A failure criterion of triaxial strength for anisotropic rocks, modified from the Hoek & Brown and the Ramamurthy *et al.* failure criterion, is proposed. For a shale, the suitability of the failure criteria of triaxial peak strength for anisotropic rocks is discussed.

요 지

외부하중의 작용방향에 의한 암반의 강도 및 변형이 달라지는 것을 강도 이방성, 또는 변형이방성이라 정의되어 진다. 강도 또는 변형 이방성은 층리진 퇴적암, 박층모양의 변성암, 균일하게 절리가 나있는 암석에서 흔히 볼 수 있다. 이러한 강도이방성에 대한 경험적 및 이론적 관점에서의 파괴 규준은 Jaeger(1960), McLamore와 Gray(1967), Donath(1972), Nova(1980), Hoek과 Brown(1980), Ramamurthy(1985) 등 많은 학자들에 의해서 연구되어져 왔다. 본 논문에서는 셰일에 대한 삼축 압축시험을 통하여 층리각도에 따른 강도 이방성을 확인하고, 점착력, 내부 마찰각 및 재료상수의 물성치를 회귀분석을 통하여 구하였다. 또한, 수정된 Hoek과 Brown, Ramamurthy 등의 식을 통해 기존의 파괴규준식 및 수정된 식이 강도 이방성적 특성을 나타내는 이 지역 셰일에 대한 적용가능성을 논하였다.

Keywords : Shale, Anisotropy, Failure criteria, Discontinuity

*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사
*3 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사수료
*4 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사
*5 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

1. 서론

일반적으로 일축 압축강도는 이방성 암반의 형태를 결정하는데 사용하지만 이방성의 정도를 측정하기 위하여 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 탄성파, 혹은 파괴변형률을 적용하기도 한다. 층리가 있는 이방성 암반의 강도와 변형률에 대한 연구는 Müller(1930)에 의해서 최초로 시작되었다. Müller는 일축 압축하중하에서의 암반의 변형과 강도, 삼축 압축하중하에서의 재료의 탄성과 소성거동 등에 관한 연구를 하였다. 그 후 여러 학자가 이방성 암석에 대한 시험을 통하여 파괴 예측 기준, 파괴 형상, 그리고 강도 변형 특성 등에 관한 연구 결과를 발표하였다. Jaeger(1960), McLamore와 Gray(1967), Donath(1972), Nova(1980), Hoek과 Brown(1980), Ramamurthy 등(1985)은 삼축시험을 수행하여 층리각도의 변화에 따른 파괴규준을 제안하였다. 대구지역의 세일에 대한 전단강도 특성은 층리가 평행한 경우에 대해서는 이영휘 등(1998)이 연구하였고, 김영수 등(1998)은 층리각도에 따른 물리, 역학적인 특성을 연구하였다. 이에 본 논문은 세일에 대한 파괴규준식을 지금까지 사용된 여러 식 및 수정된 Hoek과 Brown, Ramamurthy 등의 식을 적용하였으며, 이를 바탕으로 재료 상수, 강도 정수, 지수값을 구하였다. 본 논문에서는 층리각도의 함수인 파괴규준식을 적용함에 있어 혼란을 방지하기 위해 기존의 식 및 수정된 식을 구속압 방향(시료의 직경방향)에서 층리방향으로의 각을 β° 로 표시하여 사용하였다.

2. 이방성 형태 및 파괴규준

이방성 암석의 일축 압축강도사이의 형상은 Fig. 1과 같다. U형태의 이방성에는 최대 일축강도가 0° 에서 일어나

고, 60° 에서 최소값을 갖는다. 이 형태는 이방성 원인의 하나인 평형한 벽개 혹은 연약한 면들을 갖는 점판암에서 두드러진다. Shoulder형태의 이방성을 갖는 암석은 퇴적상태에 기인한 세일, 사암 등에 많이 나타난다. 이러한 암석은 90° 에서 최대 압축강도를, 그리고 60° 와 45° 사이에서 최소의 이방곡선을 나타낸다. Undulatory의 이방곡선은 석탄, 규조토와 같은 생화학적인 암석들에서 볼 수 있는데 최대강도는 0° , 그리고 최소값은 60° 근처에서 나타난다. Fig. 1을 참조한 대구지역 세일의 이방성 형태는 U형태와 shoulder형태의 중간형태임을 알 수 있다(허노영, 1998). 일반적으로 한 방향만의 벽개면을 갖고 U형태의 이방성을 띠는 점판암, 천매암 그리고 이와 유사한 특성을 가진 암석에 있어서 β° 의 범위에 걸친 이방곡선의 형상은 만약 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에서의 일축 압축강도를 안다면 식(1)에 의해 예측될 수 있다.

$$\sigma_c = A - D(\cos 2(\beta - \beta_{\min})) \quad (1)$$

여기서, σ_c : β° 에서의 일축 압축강도

β_{\min} : 강도가 최소값을 가질 때의 경사각(보통 60°)

A, D: 상수

상수 A, D는 경사각이 $0^\circ, 60^\circ$ 그리고 $60^\circ, 90^\circ$ 일때의 일축 압축강도의 두가지 값으로 결정되는데 강도의 예측은 다른 경사각에 대해서 구해질 수도 있다. Coulomb의 파괴규준에 기초하여 Jaeger는 약한 물질로 채워져 있는 절리면의 파괴는 이 면을 따라서 일어난다고 하였으며, 식(2)와(3)을 제안하였다. 식(2)는 삼축시험을 통한 축차응력, 점착력(c), 그리고 마찰 계수($\tan \phi$)의 관계식이며, 여기서 점착력은 식(3)과 같이 β° 의 함수이나, 내부마찰각(ϕ)은 β° 에 영향을 받지 않는다고 하였다

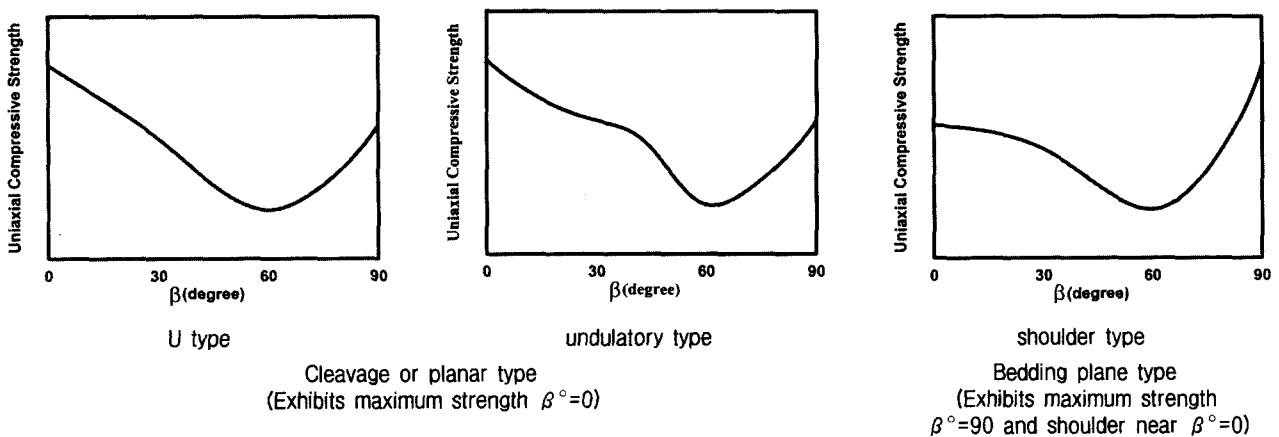


Fig. 1. Classification of anisotropies

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

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

여기서, ϕ : 각도에 따른 내부 마찰각의 평균값

β_{\min} : 점착력이 최소가 되는 각도

Jaeger 이론의 중요한 한계는 전단파괴는 약한면에 의한 것을 제외하고는 다른 층리 경사각에는 적용할 수 없다는 것에 있다. McLamore는 Jaeger 이론을 바탕으로 식 (4)을 제안하였다. 식 (4)에서 점착력, 마찰 계수는 β° 에 따른 함수이며, 점착력 및 마찰 계수를 예측하기 위해 n, m 의 지수를 사용함이 타당하다고 하였다.

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

$$\tan \phi = C - D(\cos 2(\beta - \beta_{\min}))^m \quad (4)$$

여기서, A, B, C, D : 상수

n, m : 회귀분석을 통한 적합한 지수

β° : 최소 주응력과 층리가 이루는 각

β_{\min}° : 점착력(C)과 내부 마찰각(ϕ)이 최소가 되는 각

Hoek과 Brown은 개념적으로 Griffith 이론에 근거를 두지만 절리암석 및 파쇄암석까지 포함하여 넓은 범위의 암석강도를 접합시키기 위해 시행착오적으로 유도한 경험식을 제안하였는데 그들에 의한 파괴기준식은 식 (5)와 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)} \quad (5)$$

식 (5)은 암석의 절리간격이 매우 조밀하고 4개 혹은 그 이상의 절리군을 포함해야 하며, 이들 절리군중어떠한 절리군도 다른 절리군보다 약하지 않아야 한다. 만약 불연속면 중 하나가 다른 불연속면에 비해 매우 약하다면 암반은 이방성으로 취급되어야 하고, 시료의 강도는 약한 면의 방향에 따라 매우 다르게 나타나며, 이와 같은 이방성에서 m, s 값은 경험적 강도 이론에서 등방성 물질과 같이 상수가 아닌 β° 에 의해서 다양하게 나타난다고 하였다. Hoek과 Brown은 $\beta^\circ=0$ 일 때를 신선암(intact rock)으로 고려하였다. 경험적인 이론과 $m(\beta^\circ), s(\beta^\circ)$ 의 방정식은 식 (6), (7)과 같다. 여기서, $A_1, A_2, A_3, P_1, P_2, P_3$ 는 상수이다.

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

$$m(\beta) = m_i(1 - A_1 e^{-\beta^1})$$

$$s(\beta) = 1 - P_1 \zeta^4$$

$$\phi = \frac{\beta_m - \beta}{A_2 + A_3(90^\circ - \beta)}$$

$$\zeta = \frac{\beta_s - \beta}{P_2 + P_3(90^\circ - \beta)} \quad (7)$$

여기서, σ_c : $\beta^\circ=0$ 일때의 일축 압축강도

m_i : $\beta^\circ=0$ 일때의 m 값

β_m : m 이 최소일때의 β 값

β_s : s 가 최소일때의 β 값

Ramamurthy 등은 Mohr-Coulomb를 수정한 층리 경사각($\beta^\circ=j$)에 따른 비선형 파괴이론을 식 (8)과 같이 제안하였다. 식 (8)은 σ_c 의 5%이상의 구속압(σ_3)하에서 구할 수 있으며, 모든 이방성의 면, 즉 층리, 절리, 벽개면에 다 적용할 수 있다고 하였다.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = B_j \left(\frac{\sigma_c \alpha^\circ}{\sigma_3} \right)^{\alpha_j}$$

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_{0^\circ}} = \left(\frac{\sigma_{c_j}}{\sigma_{c_0^\circ}} \right)^{1 - \alpha_{0^\circ}}$$

$$\frac{B_j}{B_{0^\circ}} = \left(\frac{\alpha_{0^\circ}}{\alpha_j} \right)^{0.5} \quad (8)$$

여기서, σ_1, σ_3 : 최대, 최소 주응력.

α_j : 층리각도 $j(\beta^\circ)$ 에 따른 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3}$ 와 $\frac{\sigma_c}{\sigma_3}$ 사이의 경사.

B_j : 층리각도 $j(\beta^\circ)$ 에 따른 재료상수.

σ_{c_j} : 식(1)에서 나온 층리각도에 따른 일축 압축강도 예측식.

$\sigma_{c_{0^\circ}}$: 층리각도 0° 에서의 일축 압축강도.

$\alpha_{0^\circ}, \beta_{0^\circ}$: 층리각도 0° 에서의 α, β 의 값.

하지만, 식 (6), (8)에서 지수를 이용한 β° 에 따른 일축 압축강도(σ_c)를 고려하지 않았다. 이에 본 논문에서는 식 (1)을 참조하여 식 (9)와 같은 n 지수를 통한 일축 압축강도($\sigma_c(\beta^\circ)$)의 변화를 고려하였다. 식 (9)에서 나온 예측식을 식 (6), (8)에 대입하여 파괴강도를 예측하였다.

$$\sigma_c(\beta^\circ) = A - D(\cos 2(\beta_m - \beta))^n \quad (9)$$



(a) Black shales



(b) Red shales

Fig. 2. Specimens with different angle of bedding plane(β°)

3. 시료성형 및 시험방법

본 시험에 사용된 암석시료는 시료 채취시 불균질성을 최대한 없애며, 단지 이방성의 특성을 고려하기위해서 불연속면(층리)이 일정한 간격으로 분포된 압괴형태의 것만을 취하였다. 현장에서 채취한 시료를 실내에서 구경이 NX Size(D=5.4cm)의 Core Drill로 층리면이 각각 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°가 되도록 하여 암석코어를 제작하였다. 암석 시료의 성형 후 모습은 Fig. 2와 같다. 시험에 사

용된 흑색 셰일은 대구시 수성구 고산동에 위치한 종합경기장 건설현장 부근에서, 적색 셰일은 북구 태전동에서 채취하였다. 삼축 압축시험은 Hoek cell을 이용하여 구속압을 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 150, 200, 250kg/cm²의 11가지로 변화시키면서 실시하였다. 일축 및 삼축 시험에 사용된 압축시험기는 용량 100ton의 유압식 시험기(UTM, M200HVL, 미국)을 이용하였다.

4. 셰일의 전단 파괴 특성

4.1 Jaeger의 이론 및 McLamore의 수정 점착력, 내부마찰각

Table 1 및 Fig. 3~4는 흑색 및 적색 셰일의 β° 에 따른 점착력(c)의 변화와 평균 마찰계수($\tan \phi$)를 나타낸 것이다. Jaeger의 식 (2)를 이용하여 β° 에 따른 파괴곡선을 구하면 Fig. 5~6과 같다. Fig. 5~6을 보면 실험치와 이론치가 잘못지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 Jaeger의 파괴규준에서 β° 에 따른 내부마찰각의 변화를 고려하지 않았기 때문이다.

McLamore는 Jaeger의 식을 수정하여 β° 에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화를 고려한 식 (4)를 제안하였다. 식

Table 1. The variation of cohesion and the average values of friction angle

Rock type	Strength parameters	Predictive equation
Black shale	Cohesion(c)	$c = 268.644 - 71.720 (\cos 2(\beta - 60))$
	Average value of the coefficient of friction angle($\tan \phi$)	1.01
Red shale	Cohesion(c)	$c = 267.304 - 46.048 (\cos 2(\beta - 60))$
	Average value of the coefficient of friction angle($\tan \phi$)	0.970

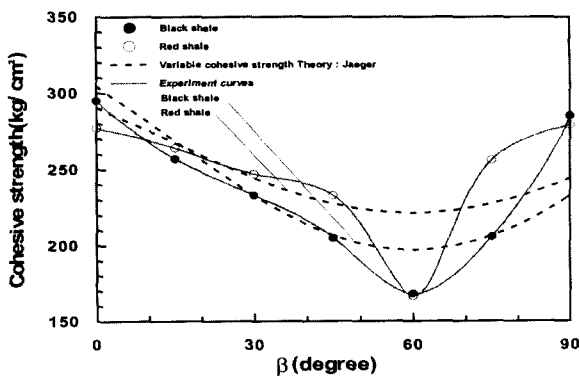


Fig. 3. Variation of cohesion with bedding angle β°

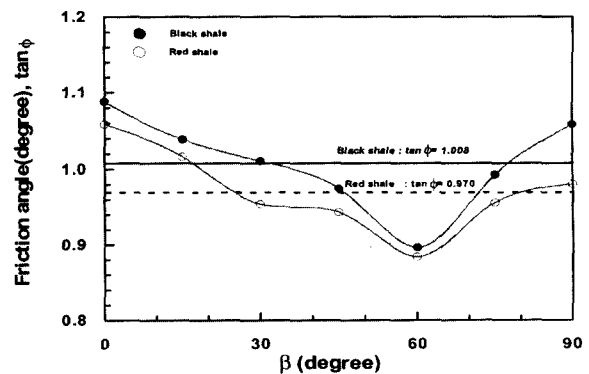


Fig. 4. Variation of friction angle with bedding angle β°

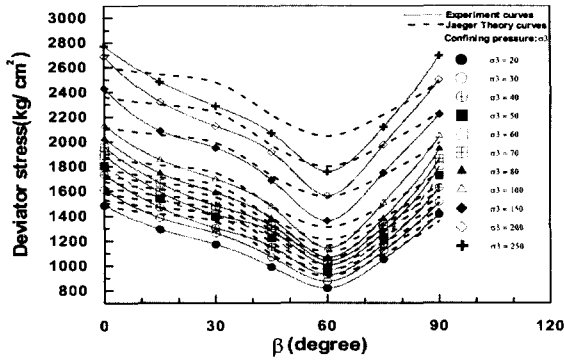


Fig. 5. Fracture strength versus bedding angle β^0 for the Jaeger' criterion with Black shale

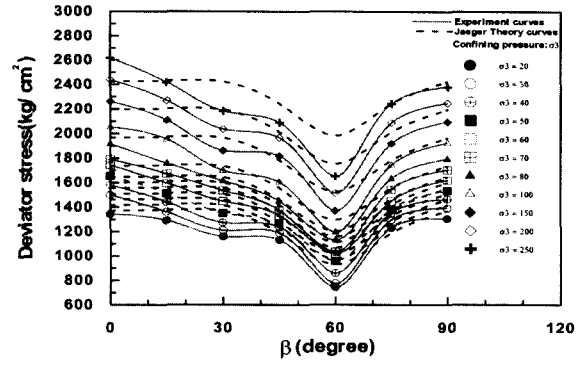


Fig. 6. Fracture strength versus bedding angle β^0 for the Jaeger' criterion with Red shale

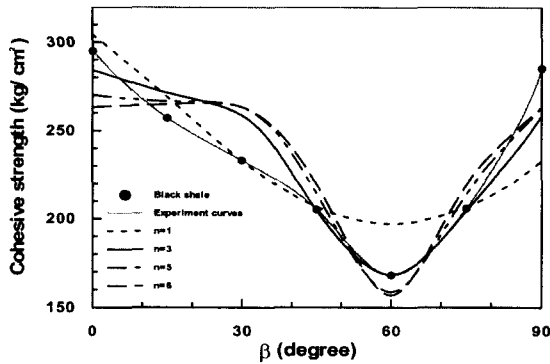


Fig. 7. Variation of cohesion with bedding angle β^0 for various values of n with Black shale

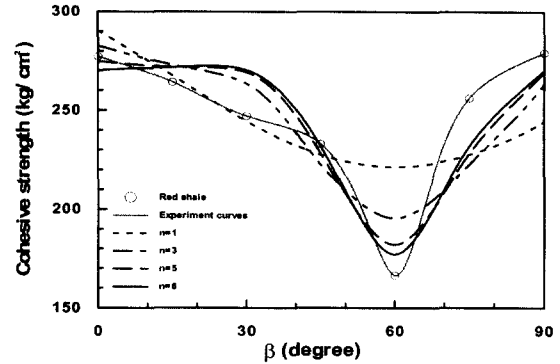


Fig. 8. Variation of cohesion with bedding angle β^0 for various values of n with Red shale

(4)에서 세일에 적합한 n, m값은 Table 2와 같다. 각각의 세일에서 점착력과 내부마찰각이 최소가 되는 β^0 은 각각 60° 이다. Table 2에서 흑색 세일은 점착력의 경우 n=3, 내부 마찰계수의 경우 m=5, 적색 세일은 점착력의 경우

n=6, 내부 마찰계수의 경우 m=1이 회귀분석을 통한 상관 정도가 가장 높은 지수 값을 알 수 있다. Figs. 7~8은 흑색 및 적색 세일의 n지수에 따른 점착력의 변화를 나타낸 그림이며, Figs. 9~10는 흑색 및 적색 세일의 m지수에 따

Table 2. The variation of cohesion and friction angle for various values of n, m

Rock type	Strength parameters	Facter	Predictive equation	R-squared(R ²)	
Black shale	Cohesion(c)	n	1	$c = 268.644 - 71.720 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.705
			3	$c = 271.209 - 102.990 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.869
			5	$c = 266.407 - 107.785 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.817
			6	$c = 264.683 - 107.946 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.768
	Average value of the coefficient of friction angle ($\tan \phi$)	m	1	$\tan \phi = 1.053 - 0.096 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.687
			3	$\tan \phi = 1.057 - 0.141 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.877
			5	$\tan \phi = 1.052 - 0.152 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.878
			6	$\tan \phi = 1.050 - 0.155 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.855
Red shale	Cohesion(c)	n	1	$c = 267.304 - 46.048 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.414
			3	$c = 272.847 - 77.372 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.700
			5	$c = 271.792 - 89.887 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.811
			6	$c = 271.591 - 94.598 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.842
	Average value of the coefficient of friction angle ($\tan \phi$)	m	1	$\tan \phi = 1.015 - 0.097 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.877
			3	$\tan \phi = 1.011 - 0.119 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.798
			5	$\tan \phi = 1.005 - 0.121 (\cos 2(\beta - 60))^n$	0.711
			6	$\tan \phi = 1.003 - 0.121 (\cos 2(\beta - 64))^n$	0.666

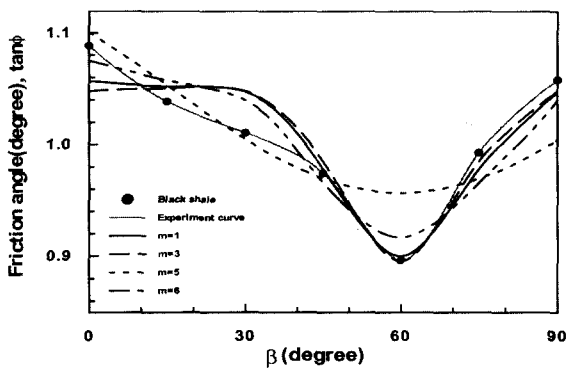


Fig. 9. Variation of friction angle with bedding angle β^0 for various values of m with Black shale

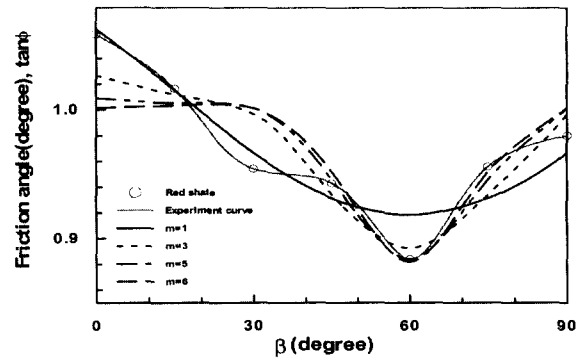


Fig. 10. Variation of friction angle with bedding angle β^0 for various values of m with Red shale

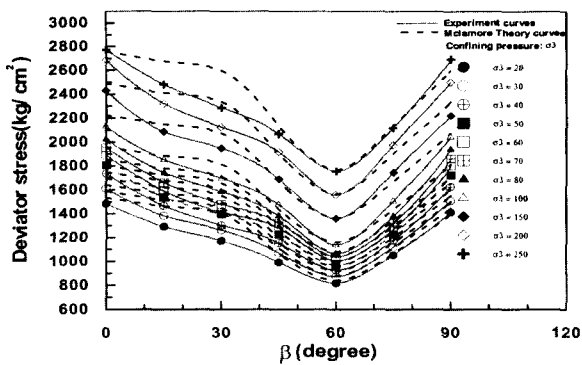


Fig. 11. Fracture strength versus bedding angle β^0 for the McLamore' criterion with Black shale

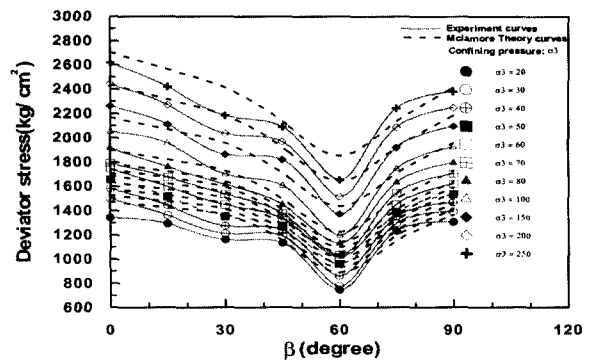


Fig. 12. Fracture strength versus bedding angle β^0 for the McLamore' criterion with Red shale

른 내부 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다.

Table 2에서 구한 지수를 이용하여 Jaeger의 식(2)에 대입하면 Fig. 11~12의 파괴곡선을 구할 수 있다. Fig. 5~6과 Fig. 11~12를 비교하면 β^0 에 따른 내부마찰각의 변화 및 지수를 이용한 McLamore의 예측곡선이 실험치의 결과와 더 적합함을 알 수 있다. 여기서, 점선은 McLamore의 이론식이며, 실선은 실험치를 나타낸 것이다.

4.2 수정된 Hoek과 Brown 및 Ramamurthy 등의 비선형 파괴이론을 통한 강도지수

McLamore의 수식은 회귀분석을 통한 c , ϕ 값을 예측한 다음 파괴곡선을 구하는 번거로움이 있다. 수정된 Hoek과 Brown의 경험적 파괴이론 및 Ramamurthy 등의 비선형 파괴이론의 식은 일축, 삼축시험 결과치를 통해 파괴곡선을 예측할 수 있는 장점이 있다. 일축 압축강도의 지수식(9)을 통해 Table 3을 구하였다. 일축 압축강도는 흑색 셰일의 경우 $n=3$, 적색 셰일의 경우 $n=7$ 인 경우 실험치를 가장 잘 예측하였다. Fig. 13~14은 Table 3를 나타낸 그림이다.

수정된 Hoek과 Brown의 파괴규준식은 먼저 응리각에 따른 $m(\beta)$, $s(\beta)$ 를 최소자승법에 의한 방법으로 산정

Table 3. The variance of uniaxial compression for various values of n

Rock type	Factor	Predictive equation	R-squared(R^2)
Black shale	$n=1$	$\sigma_c = 1282.57 - 376.539(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.685
	$n=3$	$\sigma_c = 1301.78 - 557.772(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.898
	$n=5$	$\sigma_c = 1279.14 - 594.932(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.878
	$n=7$	$\sigma_c = 1258.07 - 601.409(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.830
Red shale	$n=1$	$\sigma_c = 1248.84 - 240.052(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.446
	$n=3$	$\sigma_c = 1272.74 - 389.256(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.701
	$n=5$	$\sigma_c = 1266.45 - 448.402(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.799
	$n=7$	$\sigma_c = 1257.86 - 482.628(\cos 2(\beta - 60))^n$	0.856

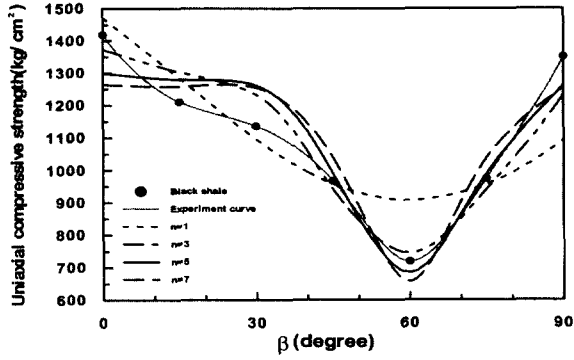


Fig. 13. The variation of uniaxial compression for bedding angle β° with Black shale

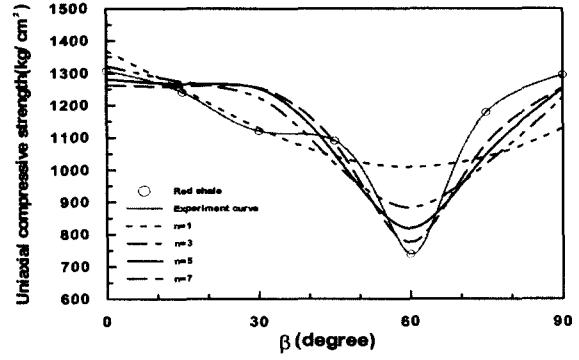


Fig. 14. The variation of uniaxial compression for bedding angle β° with Red shale

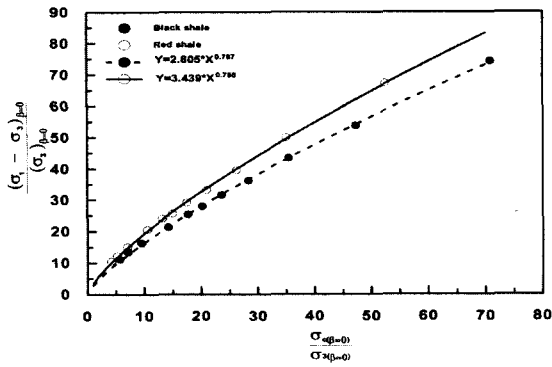


Fig. 15. Fitting curves of the plot between $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_3)$ and $(\sigma_c)/(\sigma_3)$

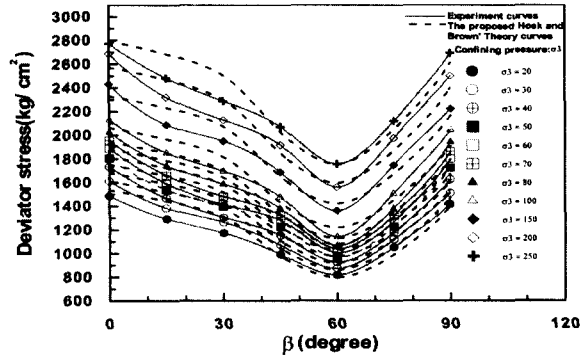


Fig. 16. Fracture strength versus bedding angle β° for the proposed Hoek and Brown's criterion with Black shale

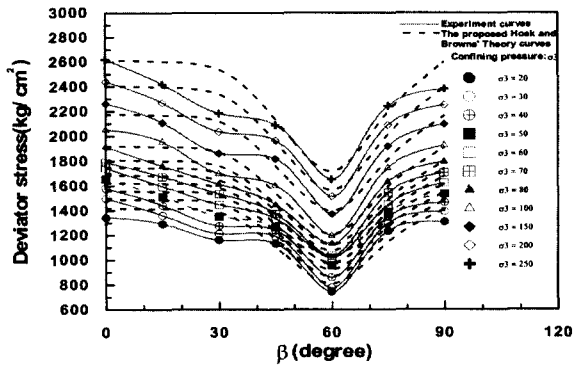


Fig. 17. Fracture strength versus bedding angle β° for the proposed Hoek and Brown's criterion with Red shale

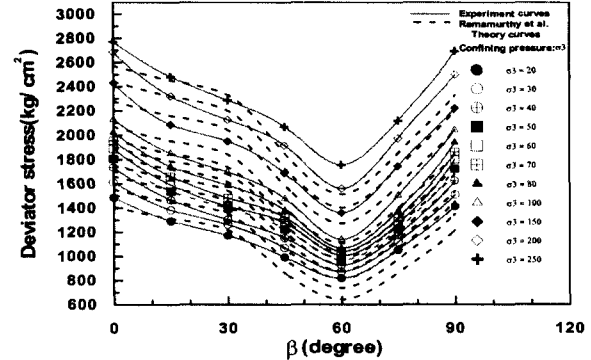


Fig. 18. Fracture strength versus bedding angle β° for the proposed Ramamurthy and Raos' criterion Black shale

한 후 이 값과 ϕ , ζ 이 만족하도록 반복해서 계산한다. 이렇게 해서 구한 정수값은 Table 4와 같다. Table 3에서 구한 $\sigma_c(\beta)$ 에 적합한 지수와 Table 4에서 구한 정수값을 이용

하여 수정된 Hoek과 Brown의 파괴곡선은 Fig. 16~17와 같다. Ramamurthy 등의 비선형 파괴규준식은 먼저 $\beta^{\circ} = 0$ 일 때의 $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_3)$ 와 $(\sigma_c)/(\sigma_3)$ 의 지수 관계식을 찾

Table 4. Constants of the Hoek and Brown's criterion

Rock type	Constants					
	A1	A2	A3	P1	P2	P3
Black shale	0.169	19	0.186	0.244	20	0.248
Red shale	0.220	16	0.183	0.246	15	0.170

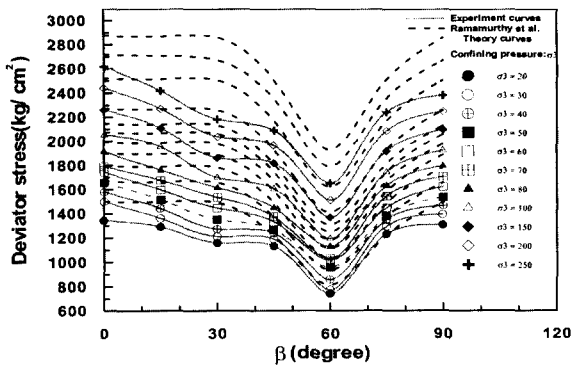


Fig. 19. Fracture strength versus bedding angle β° for the proposed Ramamurthy and Raos' criterion Red shale

아야 한다. Fig. 15는 $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_3)$ 와 $(\sigma_c)/(\sigma_3)$ 의 지수 관계식을 나타낸 것으로서, $\beta^\circ=0$ 일 때의 α_0 , B_0 는 그림을 통해 흑색 셰일은 0.767, 2.805, 적색 셰일은 0.750, 3.439임을 알 수 있다. Table 3에서 구한 $\sigma_c(\beta)$ 와 Fig. 17의 지수값을 이용하여 구한 Ramamurthy 등의 비선형 파괴곡선은 Fig. 18~19와 같다. 수정된 Hoek과 Brown, Ramamurthy 등의 비선형 파괴이론은 일축 압축강도(σ_c)를 각도에 따라 예측된 식을 이용하여 파괴곡선식을 나타내었다. Fig. 11~12와 비교해서 근사적인 예측곡선을 나타냄을 알 수 있다.

6. 결론

대구 지역에 분포하고 있는 흑색 및 적색 셰일의 이방성적 파괴 특성을 파악하기 위해서 β° 에 따라서 일축, 삼축 압축시험을 수행하였다. 이 시험 결과를 Jaeger, McLamore, 그리고 수정된 Hoek과 Brown, Ramamurthy 등의 식에 적용해본 결과는 다음과 같다.

- (1) 각각의 셰일에서 점착력과 내부마찰각이 최소가 되는 β° 은 각각 60° 이다.
- (2) Jaeger의 식을 바탕으로 셰일의 파괴 곡선을 구해 본 결과 대체적으로 잘 일치하지 않았다.

- (3) McLamore의 식에 근거한 지수는 흑색 셰일의 경우, 점착력은 $n=3$, 마찰 계수는 $m=5$, 적색 셰일은 점착력의 경우 $n=6$, 마찰 계수의 경우 $m=1$ 이 실험치를 가장 잘 예측하는 지수값이다. 이를 이용한 셰일의 파괴 곡선은 Jaeger의 이론에 의한 파괴곡선보다 잘 일치하였다.
- (4) 일축 압축강도를 예측하는 지수값은 흑색 셰일의 경우 $n=3$, 적색 셰일의 경우 $n=7$ 로 나타났다. 수정된 Hoek & Brown의 파괴 기준식에서 구한 강도 정수 $A1, A2, A3, P1, P2, P3$ 은 흑색 셰일의 경우는 0.169, 19, 0.186, 0.24, 20, 0.248, 적색 셰일의 경우는 0.220, 16, 0.183, 0.246, 15, 0.170로 나타났다. 수정된 Ramamurthy 등의 비선형 파괴식에서 $\beta^\circ=0$ 일 때의 α_0 , B_0 는 흑색 셰일은 0.767, 2.805, 적색 셰일은 0.750, 3.439임을 알 수 있다. 각각의 파괴곡선은 실험 결과치와 비슷한 경향을 나타내었다.

참고 문헌

1. 김영수, 허노영, 서인식(1998), "퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구 (대구지역)", 한국지반공학회지, 제14권, 제4호, pp.5-15.
2. 이영휘, 오세봉, 임광옥, 허진석(1998), "삼축시험에 의한 전단강도 특성", 토목학회 학술발표회 논문집(II) 토질/터널, 서울, pp.131-134.
3. 허노영(1998), "퇴적암 기반 Tunnel의 비등방 탄소성 해석", 박사학위 논문, 경북대학교.
4. Müller, J.(1930), "Der Felsbau, Ferdinand Enke".
5. Jaeger, J. C.(1960), "Shear failure of anisotropic rocks. Geol", Mag. 97, pp.65-72.
6. McLamore, R. and Gray, K. E.(1967), "The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks", J. Eng. Ind. 89, pp.62-76.
7. Donath, F. A.(1972), "Effects of cohesion and granularity on deformational behavior of anisotropic rock.", In Studies in Mineralogy and Precambrian Geology, (Edited by Doe B.R. and Smith D.K.) Geol. Soc. Am. Memoir. 135, pp.95-128.
8. Nova, R.(1980), "The failure of transversely isotropic rocks in triaxial compression", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 17, pp.325-332.
9. Hoek, E. and Brown, E.T.(1980), "Empirical strength criterion of rock masses.", J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civil Eng., 106, pp. 1013-1035.
10. 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.

(접수일자 2000. 3. 17)