

대구지역 셰일 압축강도의 고유이방성에 관한 연구

Inherent Strength Anisotropy of the Shale in Daegu Region

이 영 휘[†] · 김 희 동¹⁾

Lee, Younghuy · Kim, Heedong

ABSTRACT : Triaxial compression tests on anisotropic rock specimens are carried out to investigate the failure strength characteristic of anisotropic rocks. The test core specimens were obtained in Daegu region. Test specimens are rock cores with the 7 different angles of bedding plane. The applied confining pressures were 5, 10, 20, 30, 40 MPa, and the rate of displacement was adopted 0.1%/min to fail the specimen within 5-15 min. The results were analyzed by using the failure criteria for anisotropic rocks proposed by Hoek & Brown (1980) and Jaeger (1960). The results of this study are summerised as follows: The results of inherent anisotropy show the shoulder type of anisotropy, and the effect of anisotropy is reduced as the confining pressure increases. The compressive strength of anisotropic rock shows the highest value at the β (the angle of bedding plane) = 0° and 90° and the lowest value at 30° . The Hoek & Brown failure criterion for anisotropic rocks gives a relatively good agreement with the measured strength in all the range of β angles, but the theory of Jaeger shows a reasonable agreement only in the range of $\beta = 15^\circ$ and 45° .

Keywords : Triaxial compression test, Inherent anisotropy, Shoulder type, Jaeger theory, Hoek & Brown failure criterion

요 지 : 강도이방성 암석의 파괴규준에 관한 연구를 위해 대구지역에 널리 분포되어 있는 bedding-plane을 지닌 즉, 고유 이방성 암석인 셰일(shale)을 대상으로 삼축압축시험을 수행하였다. 시험과정에 있어 구속압력은 5, 10, 20, 30, 40MPa으로 단계적으로 증가시켜 시험을 수행하였으며, 시료의 파괴를 위한 전단속도는 대상시료가 5~15분안에 파괴가 일어나도록, 0.1%/min을 적용하였다. bedding-plane을 포함한 고유 이방성 암석에 대한 시험결과는 최대주응력축과 bedding-plane사이의 각도에 따라 전형적인 shoulder-type으로 나타났으며, 구속압력이 증가할수록 이방성 효과가 줄어드는 경향을 나타내었다. 불연속면의 각도에 따른 암석의 강도 변화는 무결암 상태와 유사한 조건인 $\beta = 0^\circ$ 와 90° 에서 최대의 압축강도를 보였고, 최소의 강도를 갖는 β 값은 대략 30° 정도로 나타났다. 또한 Hoek & Brown 파괴규준은 암석의 강도이방성을 나타내는데 모든 β 값의 범위에서 실측치와 잘 부합되는 결과를 주었으나 Jaeger의 파괴규준은 $\beta = 15^\circ \sim 45^\circ$ 범위에서만 실측치에 접근하는 경향을 보였다.

주요어 : 삼축압축시험, 고유이방성, 어깨형태, Jaeger 이론, Hoek & Brown 파괴규준

1. 서 론

사면이나 지하구조물의 안전설계, 시공, 유지 등의 안전성 문제와 관련하여 대상 암반의 역학적 거동을 이해, 파악하는 것이 매우 중요한 일이다. 현지암반의 대부분은 균질한 신선암반이 아니고 암반내부에는 미시적, 거시적인 균열, 절리 등과 같은 지질분리면 또는 역학적 불연속면을 가지고 있으며, 이들은 암반의 역학적 거동에 크게 영향을 미치고 있다.

본 논문에서는 암반의 역학적 거동에 크게 영향을 미치는 불연속면을 포함하는 거동에 관한 기초연구로서, 이러한 이방성 암석의 파괴강도를 대구지역 일원에 널리 분포하고 있는 퇴적암의 일종인 bedding-plane을 포함하고 있는 셰일(shale), 즉 고유 이방성 암석을 대상으로 실내 기

본물성시험 및 축하중방향에 대하여 여러 방향의 각도로 자연적인 불연속면을 갖는 원주형 암석 공시체를 제작하여 구속압(σ_3)을 변화시켜가며 삼축압축강도시험을 실시하였다. 또한 Hoek & Brown(1980) 및 Jaeger(1960)의 파괴규준식을 적용하여 기존의 불연속면이 암석의 파괴강도 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 이방성 암석의 파괴강도

2.1 이방성의 종류와 유형

이방성의 종류는 다음과 같이 두가지로 나뉜다.

첫째, 암의 생성기원 즉, bedding면, foliations와 schistosity와 관계가 되는 고유 이방성이 있으며 둘째, 암이 형성된

† 정희원, 영남대학교 건설환경공학부 교수(E-mail : younghuy@yumail.ac.kr)

1) 비회원, (주)건일 엔지니어링 지반공학부

후에 발달하는 즉 응력비등방성, 절리, 틈, 전단면과 단층 등의 결과로 나타나는 유도 이방성이 있다. 암석에 인공절리면의 각도(β)를 표현한 유도 이방성 시험을 위한 암석시편의 형상과 자연층리면을 표현한 고유 이방성 시험을 위한 암석시편의 형상이 그림 1과 그림 2에 나타나 있다.

또한, 이방 암석의 파괴강도 유형에는 세 가지(그림 3)가 있다. 첫 번째는 U형태 이방성으로 최대 파괴강도는 보통 $\beta=90^\circ$ 일 때 발생하며, 최소 파괴강도는 $\beta=30^\circ$ 정도에서 발생한다. 이 U형태는 주로 점판암에서 관찰된다. 두 번째는 파동형태의 이방성으로 최대 파괴강도는 보통 $\beta=90^\circ$ 일 때 발생하고, 최소 파괴강도는 $\beta=30^\circ$ 정도에서 발생하며, 주로 coal과 규조토와 같은 생화학적 암에서 발견된다. 또한, 파동형태는 서로 교차하는 연약면이 한 세트 이상이 존재할 때 발생한다. 세 번째는 어깨형태의 이방성으로 보통 $\beta=0^\circ$ 에서 최대 파괴강도를 보이고, $\beta=15^\circ$ 와 30° 사이에

서 최소 파괴강도를 보이며, 주로 셰일과 사암에서 이러한 특성을 볼 수 있다.

2.2 이방성 암석의 파괴강도규준

1960년 이전, 암석의 이방성에 대한 초기의 실험적 연구 및 이론적 연구는 아주 미흡하며, 암석의 이방성 특성을 잘 표현하지 못했다. 그러나, 1960년대 초부터 많은 연구자들(Jaeger, 1960 ; McIlmore & Gray, 1967 등)에 의해 암석의 이방성 특성에 대한 폭넓은 연구가 시작되었다. 최근에 들어와서는 특히, Hoek & Brown(1980) 등이 무결함 암석의 파괴기준을 나타내는데 필요한 재료정수 m 과 s 를 수정하여, 보다 합리적인 경험식을 제안하기에 이르렀다.

2.2.1 Hoek & Brown의 경험적 파괴규준

Hoek & Brown(1980)은 Griffith이론에 개념적으로 기초

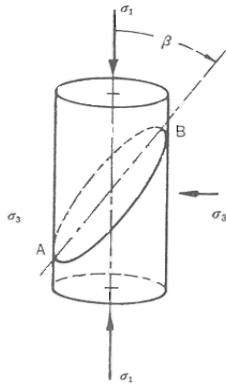


그림 1. 유도 이방성 β

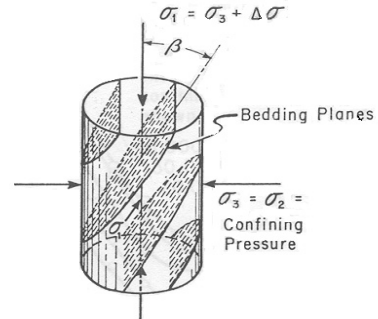


그림 2. 고유 이방성 β

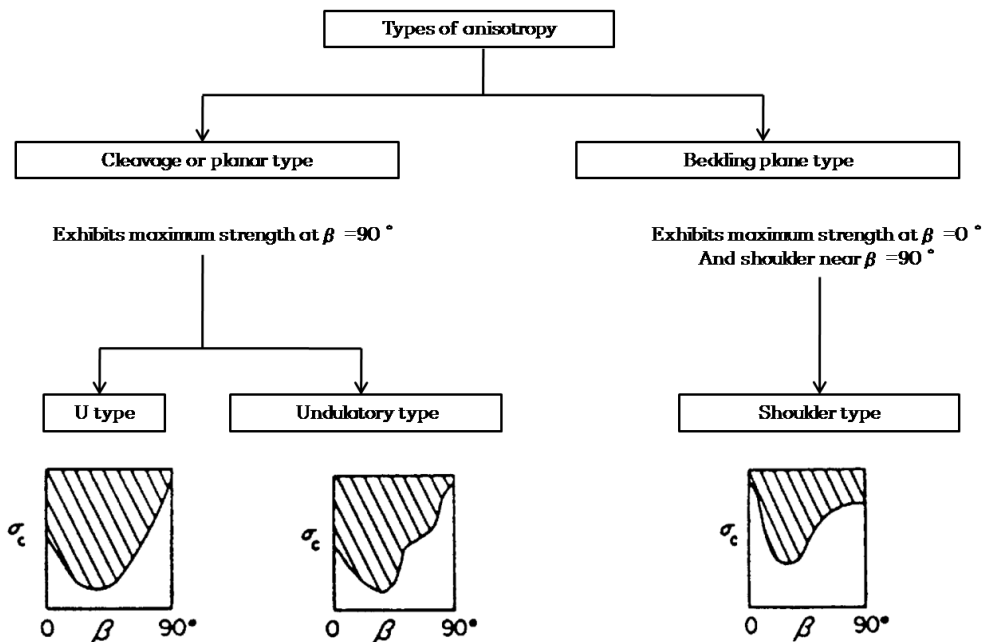


그림 3. 암석의 층리면각과 압축강도사이의 파괴강도 유형

를 둔 경험적 파괴규준을 제시하였다. 이 파괴규준은 균질한 암반에서의 파괴강도 뿐만 아니라 풍화암반과 불연속면이 혼재하는 경우의 파괴강도도 추정할 수 있다. Hoek & Brown은 등방압식의 파괴시 주응력들간의 일반적인 관계를 다음과 같은 경험식으로 제안하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

여기서, σ_1 ; 파괴시 최대주응력

σ_3 ; 암석에 작용하는 구속압력

σ_c ; 무결함 암석의 일축압축강도

m ; 내부마찰각, 구성입자의 결합성 등에 의하여 좌우되는 상수

s ; 응력을 가하기 전, 시험편의 파손상태로 인한 인장강도의 영향에 좌우되는 상수

또한, Hoek & Brown(1980)은 불연속면을 가진 암석강도의 비등방성에 대하여 재료상수 m, s 를 수정하여 이용한 경험식을 제안하였다. 수정된 m, s 에 대한 식들은 다음과 같다.

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

여기서, $m = m_i(1 - Ae^{-\theta^4})$

$s = 1 - Pe^{-\zeta}$

m_i ; 균질암석(무결함 암석)에 대한 m 값.

A, P ; 상수

위의 식 (2)를 이용하려면, 먼저 아래와 같은 식 즉, 식 (3)와 식 (4)의 변환된 식을 풀어야 한다.

$$\theta = [\log_e(\frac{A}{1 - m/m_i})]^{1/4} \quad (3)$$

$$\zeta = [\log_e(\frac{P}{1 - s})]^{1/4} \quad (4)$$

여기서, $A = (m_i - m_{\min})/m_i$, $P = 1 - s_{\min}$ 이다.

위에서 구한 θ 와 ζ 를 다음의 식 (5, 6)에 대입하여, 시행착오법으로 A_2, A_3, P_2, P_3 를 결정한다.

$$\theta = \frac{\beta - \xi_m}{A_2 + A_3\beta} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{\beta - \xi_s}{P_2 + P_3\beta} \quad (6)$$

여기서, ξ_m : m 이 최소가 되는 β 의 값.

ξ_s : s 가 최소가 되는 β 의 값.

A_2, A_3, P_2, P_3 는 시행착오적인 방법으로 결정하는 상수들.

Hoek & Brown에 의해 제안된 회귀분석 접근은 수많은 매개 변수를 수반한다. 그 매개 변수들의 일부는 시행착오법을 통해서 결정되며, 합리적인 매개변수의 도출 여부가 모형의 예측결과를 좌우한다고 볼 수 있다.

2.2.2 Jaeger의 파괴규준

Jaeger는 암석의 비등방성에 대해 두 가지의 파괴이론을 제안하였다(Jaeger, 1960). 첫 번째 파괴이론은 단일 연약면 이론으로서, 주변 암체보다 낮은 $c, \tan\phi$ 값을 갖는 단일 연약면 또는 여러 개의 평행한 연약면을 지닌 등방 암체에 대한 파괴이론이다. 두 번째 파괴이론은 Mohr-Coulomb 파괴이론의 확장된 이론이며, 점착강도(c)의 값이 비등방성을 나타내는 불연속면의 방향에 따라, 연속적으로 변한다는 파괴이론이다.

(1) Single plane of weakness 이론

이 이론은 우리들에게 잘 알려진 Mohr-Coulomb의 선형 파괴포락이론의 일반화된 형태이며, 파괴가 불연속면을 따라 발생하는 경우를 고려하였다. 불연속면은 다음의 식으로 나타낸 전단강도를 갖는다고 가정한다.

$$\tau = c_0 + \mu\sigma \quad (7)$$

여기서, σ 와 τ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(90 - \beta) \quad (8)$$

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2(90 - \beta) \quad (9)$$

위의 식 (8)과 (9)를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma = \sigma_m + \tau_m \cos 2\beta \quad (10)$$

$$\tau = -\tau_m \sin 2\beta \quad (11)$$

여기서, σ_m 과 τ_m 은 다음과 같다.

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (12)$$

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (13)$$

또한, $\mu = \tan\phi$ 라 놓고, 식 (10)과 (11)을 식 (7)에 대입하면

$$\tau_m(\sin 2\beta - \tan \phi \cos 2\beta) = c_0 + \sigma_m \tan \phi \quad (14)$$

위 식 (14)에 σ_m 과 τ_m 를 대입하여 정리를 하면 아래의 식 (15)와 같이 연약면을 따른 활동 즉, 연약면을 따른 파괴가 발생할 때의 주응력과 각도(β)와의 관계가 나타난다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2c_0 + 2\mu\sigma_3}{[1 - \mu \cot(90 - \beta)] \sin 2(90 - \beta)} \quad (15)$$

여기서, c_0 와 μ 값은 각도(β)에 따른 주응력차의 값이 최소가 될 때 즉, 가장 critical한 방향(보통 $\beta = 30^\circ$ 일 때)에서의 서로 다른 구속압력(σ_3)하에서 시험한 한 세트(보통 3~5개의 시험 data)의 결과로부터 나타낸 점착력과 내부마찰각이다. 또한, 이 이론에 의하면 각도 $(90 - \beta)$ 가 $\frac{1}{2}\pi$ 또는 ϕ 에 근접함에 따라 주응력차 ($\sigma_1 - \sigma_3$)의 값이 무한대로 나타난다.

앞에 나타낸 식 (15)는 암석의 파괴가 기존의 불연속면을 따른 활동 즉, 불연속면을 따른 파괴가 발생할 때를 나타내는 식이며, 각도 $(90 - \beta)$ 가 $\frac{1}{2}\pi$ 또는 ϕ 에 근접할 때 발생하는 파괴강도를 나타내는 식 즉, 파괴가 기존의 불연속면을 따라 발생되지 않을 때(matrix failure)를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2c_0 + 2\sigma_3 \tan \phi}{\sin 2\theta - \tan \phi + \cos 2\theta \tan \phi} \quad (16)$$

여기서, c_0 와 $\tan \phi$ 는 불연속면의 각도 즉, $\beta = 0^\circ$ 와 90° 인 암석 공시체 각각의 삼축압축시험결과로 얻어지는 점착강도와 마찰계수값이며, θ 는 $\beta = 0^\circ$ 와 90° 인 암석 공시체 각각의 파괴시 파괴면이 최소주응력의 방향과 이루는 각도이다. 위 식 (16)은 두 부분에 적용을 한다. 즉, $\beta = 0^\circ$ 부근의 파괴강도를 나타낼 때와 $\beta = 90^\circ$ 부근의 파괴강도를 나타낼 때로 구분되어 적용된다.

(2) Variable cohesive strength 이론

Jaeger에 의해 제안된 이 이론은 전단파괴강도가 불연속면의 β 각도에 따라 다양한 c(cohesive strength)값에 의해 규명된다는 이론이다. 그러나 $\tan \phi$ 값은 가장 critical한 방향인 $\beta = 30^\circ$ 일 때의 값으로 일정하다는 가정하에서 파괴기준식은 다음과 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{(2c + 2\sigma_3 \tan \phi)}{\sqrt{\tan^2 \phi + 1} - \tan \phi} \quad (17)$$

여기서, $c = A - B[\cos 2(\xi - \beta)]$

$$\tan \phi \cong \text{constant}$$

A, B는 상수

ξ : c값이 최소가 될 때의 β 각도. 일반적으로 30° 이다.

3. 삼축압축시험

3.1 시험시료 및 시험방법

본 연구의 고유 이방성 시험을 위해 사용된 암석 공시체는 대구광역시 수성구 시지동 일원(대구 종합경기장 신축공사)의 현장에서 채취한 암블력을 실험실로 운반하여 코어링 기계로 NX규격의 코어를 직접 만들었다. 그림 2에 나타나 있듯이 암블력의 bedding면을 시험에 필요한 임의의 각도($\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$)로 코어링 기계에 안착을 시킨 다음, 코어링을 실시하여 암석 공시체를 성형한다. 그리고 나서, 다이아몬드 날로 된 커터기에 코어 양단의 표면이 축에 직각이 되도록 고정하여 길이/직경(L/D)비를 2~2.5배 사이의 크기로 절단한다. 또한, 암석 공시체의 양단에 편심이 발생하지 않도록 편평도를 0.02mm 까지 다이아몬드로 만들어진 연마기를 이용하여 공시체를 연마하였다.

삼축시험장치는 Structural Behavior Engineering Laboratories, Inc.에서 제작한 장비이며, 시험기의 최대 구속압은 70MPa이고 응력제어와 변형률제어 시험이 모두 가능한 시험 장치이다. 본 연구의 시험에서는 변형률제어로 시험을 수행하였으며, ASTM Standard D2664(1995)에 준하여 간극수압을 배제한 비배수 조건으로 일정한 구속압력하에서 축차응력을 증가시키면서 전단시키는 압축시험을 실시하였다. 그리고, 구속응력의 증가에 따른 강도이방성 특성을 규명하기 위해 구속응력을 5MPa, 10MPa, 20MPa, 30MPa, 40MPa로 증가시키면서 시험을 수행하였다. 또한, 변형률 속도는 ASTM Standard D2664에서 제안한 2~15분 사이에 암석 공시체의 파괴가 발생되도록 0.1%/min으로 설정하여 시험 공시체가 대체로 10분 정도에서 파괴가 일어나도록 하였다.

본 시험에 기본적으로 사용된 암석 공시체의 수는 각 β 값에 대하여 5개 이고, 시험 결과에 이상이 있다고 판단되는 경우에는 추가의 공시체를 제작하여 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 기본물성 시험결과

본 연구에 사용된 대상시료는 시지동 일원의 공사현장

표 1. 대상시료의 기본물성 시험결과

Unit weight (kN/m ³)	27.0
Young's modulus (×10 ⁴ MPa)	1.24
Poisson's ratio	0.14
P-wave velocity (m/s)	2.46
absorption (%)	0.61
uniaxial tensile strength (MPa)	17.5
uniaxial compressive strength (MPa)	136.0

(대구 종합경기장 신축공사)에서 채취한 퇴적암중 셰일을 대상으로 실내 작업을 통하여 암석코어시료를 직접 제작하여 시험 공시체로 사용하였으며, 이 대상시료에 대한 기본물성치 시험결과는 다음의 표 1과 같으며, 시험시 시료의 상태는 공기건조상태였다.

4.2 이방성 암석의 시험결과 및 분석

4.2.1 시험결과

대상 시료를 이용하여 고유 이방성 시험을 수행한 결과를 그림 4와 표 2에 나타내었다. 그림 4는 총 7개의 β 값을 가진 시료에 대하여 크기가 각기 다른 5개의 구속응력 (5MPa~40MPa)을 가하여 삼축압축시험을 수행한 결과이며 파괴시의 축응력(σ₁)을 각기 다른 기호로 표시하였다.

시험결과를 살펴보면, 무결암 상태와 유사한 조건인 β = 0°

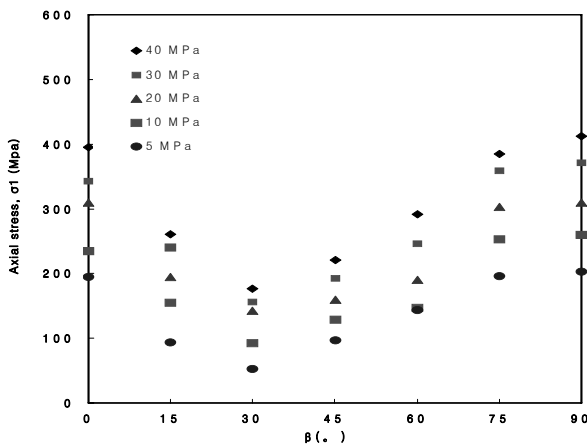


그림 4. 고유 이방성 시험결과

표 2. 대구 종합경기장 셰일의 시험결과

angle of bedding plane (β°)	0	15	30	45	60	75	90
confining pressure (MPa)	axial stress at failure (MPa)						
5	194.7	93.0	52.1	96.6	143.3	195.5	202.9
10	234.4	155.0	92.5	128.7	146.5	252.4	259.5
20	309.5	194.7	142.5	159.4	190.3	303.4	309.4
30	342.4	240.7	156.5	192.6	246.4	358.9	371.1
40	395.1	260.2	176.6	220.7	291.6	384.4	411.7

와 90°에서의 압축강도가 최대치를 보이고 있으며, 최소의 강도를 갖는 β값은 대략 30° 정도 이다. 흙에 대한 삼축시험 결과와 같이 구속응력을 증가 시키면 압축강도가 증가하고 있음을 확인할 수가 있다. 연직축에 대한 bedding면의 각도(β)의 변화에 따른 파괴시의 축응력(σ₁)의 크기는 대략적으로 어깨형태의 강도 이방성을 나타내었다. 그리고 그림 4에 나타난 각각의 측정치는 bedding면 각각의 경사각에 대해 5개 이상의 시험 측정치로부터 구한 결과의 평균치를 표시한 것이다.

McLamore & Gray(1967)은 일축압축강도가 100.8MPa인 Green river shale에 대하여 구속압력 (σ₃)의 크기를 7.0MPa에서 176.0MPa 까지 변화시켜 삼축압축시험을 수행하였으며, 이 시험결과도 전반적으로 본 연구에서 얻은 시험결과와 같은 경향을 보이고 β =30°에서 최소의 강도를 보였다. Green river shale의 최소강도의 크기는 β=30°에서 140.0MPa(σ₃=35MPa)인 반면, 본 연구에서 측정된 대구지역 셰일의 최소강도는 156.5MPa(σ₃=30MPa)정도로 비교된다. 구속압력이 최소강도 크기에 미치는 영향을 고려하여도 본 연구대상 시료인 대구지역 셰일의 최소강도가 Green river shale의 강도보다 크게 나타나며, 이것은 대구지역 셰일의 일축압축강도가 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

또한 이방성의 대표강도 값으로서 β=90°일때의 압축강도를 고려하면, 이방율(R_c)은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_c = \frac{\sigma_{f(90)}}{\sigma_{f(\min)}} \quad (18)$$

여기서, σ_{f(90)} : β=90° 일때의 파괴강도

σ_{f(min)} : 최소 파괴강도

표 3은 암석의 종류에 따른 이방율을 나타내고 있으며, 대개의 경우에 최대 압축강도는 β=90°일 때 발생한다. 여기에서 변성기원암(예, slates, phyllites, and coal)은 이방율(R_c)이 셰일과 사암 같은 퇴적기원암보다 높은 값을 나타내고 있다.

본 연구에서 수행한 고유 이방에 대한 구속압의 변화에 따른 이방율의 시험결과는 그림 5와 같고, 이방율(R_c)은 구

표 3. 이방율(R_c)에 의한 이방성 분류(Ramamurthy, 1993)

Anisotropy ratio, R_c	Class	Rock types
1.0 ~ 1.1	Isotropic	Sandstone
> 1.1 ~ 2.0	Low anisotropy	Shales
> 2.0 ~ 4.0	Medium anisotropy	
> 4.0 ~ 6.0	High anisotropy	Slates, phyllites
> 6.0	Very high anisotropy	

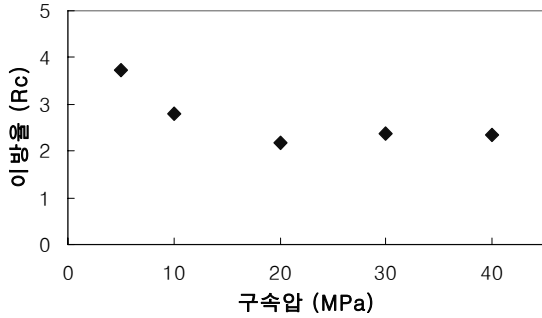


그림 5. 구속압의 변화에 따른 이방율



그림 6. 공시체의 파괴형상(고유 이방성 시험)

속압이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 그 값은 대략 2.3~3.7 범위로서 중간정도의 이방성으로 나타났다.

또한, 고유 이방성 시험에 의한 공시체의 파괴형상이 그림 6에 나타나 있으며, $\beta=0^\circ$ 의 bedding면을 지닌 공시체는 구속압의 변화에 따라 $0^\circ \sim 25^\circ$ (최대 주응력축과 파괴면이 이루는 각)사이의 파괴각을 나타내었으며, $\beta=15^\circ \sim 45^\circ$ 의 bedding면을 내포하고 있는 공시체는 구속압의 변화에 상관 없이 bedding면을 따라 파괴가 일어났다. 그리고, $\beta=60^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 bedding면을 지닌 공시체의 파괴각은 모두 무결 암석의 파괴각(보통 $\beta=30^\circ$ 에 가깝게)과 같이 나타났다.

4.2.2 Hoek & Brown 파괴기준에 의한 분석

Hoek & Brown(1980)의 경험파괴식을 적용하여 이방성 시험을 분석한 결과가 그림 7에 나타나있다. 이 그림에서

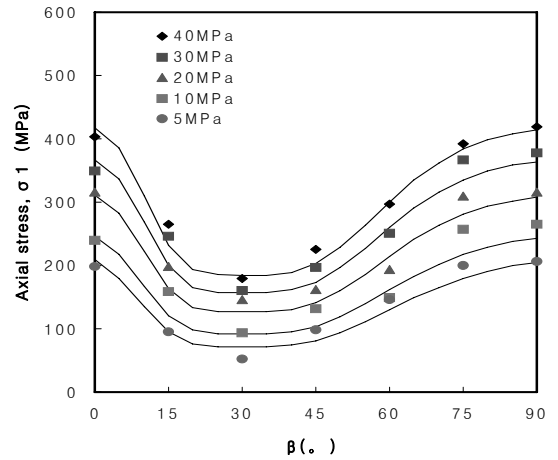


그림 7. Hoek & Brown 파괴기준에 의한 분석결과

표 4. Hoek & Brown 경험파괴식의 상수값

A	P	A_2	A_3	P_2	P_3
0.84	0.93	20	0.25	25	0.3

각기 다른 기호로 나타낸 점들은 시험치이고, 5개의 구속 응력하에서 β 값의 변화에 따른 파괴시의 축응력을 Hoek & Brown 경험식을 이용하여 계산한 값을 실선으로 나타내었다. 시행착오법을 이용하여 산정한 Hoek & Brown 파괴기준의 상수값들은 표 4와 같다. 다소 복잡한 시행착오법을 사용하여 상수값을 결정해야하는 문제점은 있지만, Hoek & Brown의 이방성 파괴기준에 의한 강도는 비교적 실측결과와 잘 부합되는 것을 그림에서 확인할 수 있다.

4.2.3 Jaeger 파괴기준에 의한 분석

Jaeger(1960)가 제안한 단일 연약면 이론에 근거하여 고유 이방성에 대한 삼축압축시험 결과를 이용하여 분석한

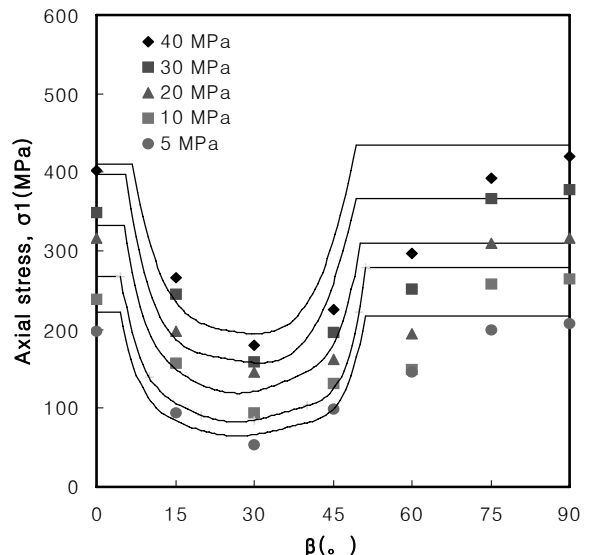


그림 8. 고유 이방성 시험 분석결과

표 5. Jaeger파괴규준식의 c_0 와 μ 값

c_0 (MPa)	12.3
μ	0.682

표 6. Jaeger 파괴규준식의 c_0 , $\tan\phi$ 와 θ 값

β°	0°	90°
c_0 (MPa)	36.7	38.3
$\tan\phi$	0.982	0.997
θ°	75	68

결과를 그림 8에 도시하였다.

고유 이방성의 시험결과를 분석하기 위해 불연속면을 따라 파괴가 발생할 때 적용하는 식 (16)의 강도정수 c_0 와 μ 값은 표 5에 나타내었다.

또한, 불연속면을 따라 파괴가 발생되지 않을 때(matrix failure)에 적용하는 식 (17)의 변수값들을 비교한 결과를 표 6에 나타내었다. Jaeger(1960)의 파괴규준식에 의한 고유 이방성의 분석결과치를 해석해 본 결과, 고유 비등방 시험분석결과에서는 불연속면을 따라 파괴가 발생한 경우 즉 $\beta=15\sim45^\circ$ 사이에서 비교적 실측치와 잘 부합되지만, 그 외의 β 값에서는 실측치와 다소의 차이를 보이고 있다.

단, 위의 표 6에 있는 θ 는 시험공시체의 파괴시 파괴면이 최소 주응력과 이루는 각도를 일컫는다.

5. 결론

본 연구에서는 대구·경북지역에 널리 분포되어 있는 퇴적암중 셰일을 대상으로 고유 이방성 암석의 파괴강도특성을 규명하고자 삼축압축강도시험을 수행하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 불연속면의 각도에 따른 암석의 강도 변화는 무결암 상태와 유사한 조건인 $\beta = 0^\circ$ 와 90° 에서 최대의 압축 강도를 보였고, 최소의 강도를 갖는 β 값은 대략 30° 정도로 나타났다.
- (2) 고유 이방성에 대하여 시험을 수행한 결과, 일반적으로 셰일과 사암 등에서 볼 수 있는 전형적인 어깨형태(shoulder-type)의 파괴강도 유형을 보였다.
- (3) 이방율(Rc)은 구속압력이 5MPa일 때 3.7의 값을 나타냈으며, 구속압력이 40MPa로 증가함에 따라 그 값이 2.3으로 감소하였으며 구속압력의 증가에 따른 이방성의 효과는 줄어드는 경향을 나타내었다.
- (4) Hoek & Brown 파괴규준은 암석의 강도이방성을 나타내는데 모든 β 값의 범위에서 실측치와 잘 부합되는 결과를 주었으나 Jaeger의 파괴규준은 $\beta = 15^\circ\sim45^\circ$ 범위에서만 실측치에 접근하는 경향을 보였으며 그 외의 β 값에서는 실측치와 다소의 차이를 확인하였다.

참고 문헌

1. ASTM (1995), D2664-95a, Standard test method for triaxial compressive strength of undrained core specimens without pore pressure measurements, *ASTM*, Vol. 04.08.
2. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), *Underground excavations in rock*, Inst of Mining and Metallurgy, pp. 157~165.
3. Jaeger, J. C. (1960), Shear failure of anisotropic rock, *Geological Magazine*. Vol. 97, pp. 65~72.
4. McLamore, R. and Gray, K. E. (1967), The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks, *American Society of Mechanical Engineers Transaction*, Series B, pp. 62~76.
5. Ramamurthy, T. (1993), Strength and modulus responses of anisotropic rocks, *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. I, pp. 313~329.

(접수일: 2008. 9. 1 심사일: 2008. 9. 23 심사완료일: 2008. 10. 24)