한국지반공학회논문집 제24권 11호 2008년 11월 pp. 111 ~ 120

인공연약면을 따른 이암의 강도이방성에 관한 연구

Strength Anisotropy through Artificial Weak Plane of Mudstone

이 영 휘[1] Lee, Young-Huy
정 강 복[2] Jeong, Ghang-Bok

Abstract

The characteristic of induced anisotropy is investigated in this study for the Pohang mudstone involving the cut plane discontinuity. The uniaxial and triaxial compression tests are performed for anisotropic rocks with artificial joint to look into anisotropic strength characteristics. Both the uniaxial compressive strength and triaxial compressive strength show the lowest value at the angle of cut plane, β=30° and the shoulder type of anisotropy is obtained. Anisotropy ratio (Rc) in uniaxial compression measures 9.0, whereas Rc=1.29-1.98 in triaxial compression is appeared. A series of analyses are made with the test results to derive the suitable parameter values when it is applied to the Ramamurthy (1985) failure criterion. The result of uniaxial compression test is analyzed by introducing the n-index into Ramamurthy failure criterion. The result shows that, n=1 is suitable for β=0°~30° and n=3 is suitable for β=30°~90°. To analyze the result of triaxial compression test by Ramamurthy failure criterion, anisotropy ratio in uniaxial compression test is added to Ramamurthy's equation and material constants are estimated by modified Ramamurthy's equation. When these values are applied back to Ramamurthy failure criterion, the predicted values are well fitted to the test results. And strength anisotropy for failure criteria of Jaeger (1960), McLamore & Gray (1967) and Hoek & Brown (1980) are also investigated.

요 지

포항지역 일원에 분포하는 이암을 대상으로 암석의 파괴강도에 대한 유도이방성을 분석하기 위하여 인공절리면을 갖는 이방성 암석에 대한 일축 및 삼축압축시험을 수행하였다. 시험결과, 일축압축강도와 삼축압축강도의 최소치는 인공절리면의 각도 β=30°에서 나타났으며, 이방성 유형은 어깨형태(shoulder type)를 보였다. 또한 일축압축시험에서의 이방율을 산정한 결과, R_c=9.0으로 나타나 매우 높은 이방성에 속한 반면, 삼축압축시험에서 이방율은 1.29~1.98 정도의 낮은 이방성으로 나타났다. Ramamurthy(1985) 파괴규준식에 n 지수를 도입하여 일축압축시험결과를 분석한 결과 β=0°~30°에서는 n=1인 곡선과 β=30°~90°에서는 n=3인 곡선이 가장 적절한 값을 예측하는 것으로 나타났다. 또한 삼축압축시험결과를 Ramamurthy 파괴규준식을 적용하여 분석하기 위해 매개변수 산정에 관한 Ramamurthy 제안식에 일축압축강도에서의 이방율을 도입하여 제안식을 일부 수정하였다. 이를 이용하여 매개변수를 재산정하고 Ramamurthy 파괴규준식에 적용한 결과 전반적으로 실험치와 잘 일치되는 것으로 나타났다. 또한, Jaeger(1960), McLamore & Gray(1967) 및 Hoek & Brown(1980)의 파괴규준을 적용하여 이암의 파괴강도에 대한 이방성을 살펴보았다.

Keywords : Anisotropic failure criteria, Induced anisotropy, Mudstone, Triaxial compression test

1 정회원, 영남대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil & Environmental Engrg., Yeungnam Univ., younghuy@yumail.ac.kr, 교신저자)
2 정회원, (주)부계기술단, 공학 박사 (Member, Boogye Engrg. Consultants Co., Ltd., Ph. D.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

사면이나 지하구조물의 안전설계, 시공, 유지 등의 안전성문제와 관련하여 대상 암반의 역학적 거동을 이해하는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 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. 그래서 근래에 와서는 불연속면에 대한 원위치 전단시험이 실시되고 있는데 이는 막대한 시간과 경비를 필요로 하므로, 현재의 연구방향은 점차 실제 현장암반에 가까운 불연속면을 갖는 대형의 시험편을 사용한 전단시험 및 인공연약면을 갖는 비교적 소형의 시험편을 사용한 압축시험을 실시하는 경향이 있다. 암석은 미시적으로 볼 때 조암광물들의 집합체라 할 수 있으므로 암석의 성질은 그 방향에 따라 다른 경우가 일반적이다. 이와 같이 어떤 암석의 성질이 그 암석 내에서 방향에 따라 다르면 그 암석은 그 성질에 대해 이방성이 있다고 한다. 암석을 구성하고 있는 광물결정의 하나하나는 일정한 화학조성과 결정배열을 가지고 있으므로 그 결정의 방향에 따라 다른 성질을 나타내는 것이 많다. 예를 들어, 암석결정에 따라 일정한 형태로 갈라지거나 벗겨지는 벽개(cleavage), 결정 편암과 같이 결정 배열이 특이한 경우에는 현저한 이방성을 고려해야 한다. 자연계에서 볼 수 있는 이방성의 종류는 다음과 같이 두 가지로 나뉜다.

첫째, 암의 생성기원(bedding, foliation, schistosity)과 관계가 되는 고유 이방성이(inherent anisotropy) 있으며, 둘째, 암이 형성된 후에 발달하는 불연속면, 즉 응력이방성, 절리, 틈, 전단면과 단층 등의 결과로 나타나는 유도이방성(induced anisotropy)이 있다. 특히, 자연계에서 흔히 접할 수 있는 유도 이방성의 한 형태인 불연속면을 가진 암석과 암반의 역학적 성질은 그 불연속면의 방향에 따라 상이한 이방성을 가지고 있으며, 파괴양상이 취성적이고 구속압이 작용하면 강도가 상승하는 특성을 가지고 있다. 고유 이방성의 특성 또한 마찬가지다. 이러한 이방성을 포함한 암석의 파괴강도는 주로 불연속면의 방향성에 지배를 많이 받는다. 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.

따라서 본 연구에서는 불연속면을 포함하는 암반의 거동에 관한 기초연구로서, 포항지역 일원에 분포하는 퇴적암의 일종인 이암을 대상으로 암석의 파괴강도에 대한 유도이방성을 알아보고자 한다. 따라서 축하중 방향에 대하여 여러 방향의 각도로 인공 절리면을 갖는 원주형 암석 공시체를 제작하여 구속압을 변화시켜가며 삼축압축시험을 실시함으로써 기존의 절리면이 암석의 파괴강도특성에 미치는 영향, 즉 암석의 강도이방성을 이방성 파괴규준에 의해 분석하였다.

2. 연구대상지역 및 시험방법

본 연구에서는 이암에 대한 강도이방성을 살펴보기 위하여 포항지역의 이암을 연구대상지역으로 선정하였으며, 이에 포항시 남구 연일읍에 분포하는 이암시료를 채취하여 일련의 실내시험을 수행하였다. 채취된 이암시료는 그 즉시 랩 처리를 하여 풍화를 방지토록 하였으며, 본 연구 대상 시료에 대한 대표적인 기본 특성치를 표 1에 나타내었다.

우선 NX규격의 이암시료를 축하중방향(최소주응력면)에 대하여 임의의 각도를 가진 인공절리면을 만들기

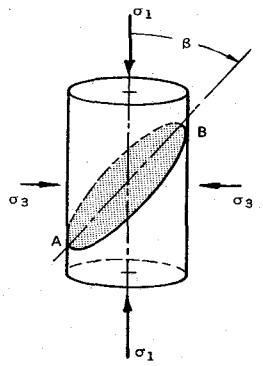


그림 1. 유도이방성

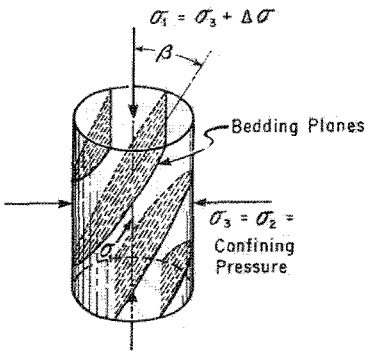
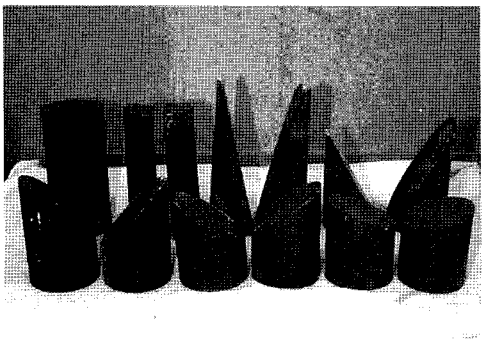
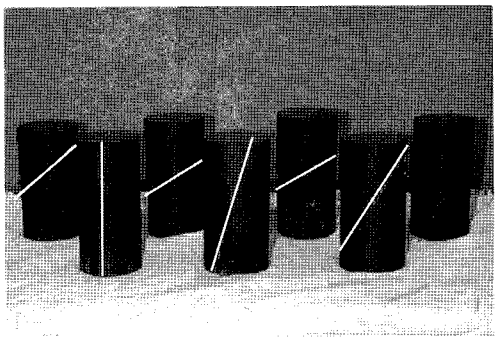


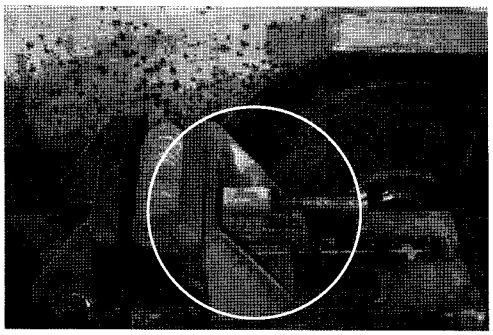
그림 2. 고유 이방성



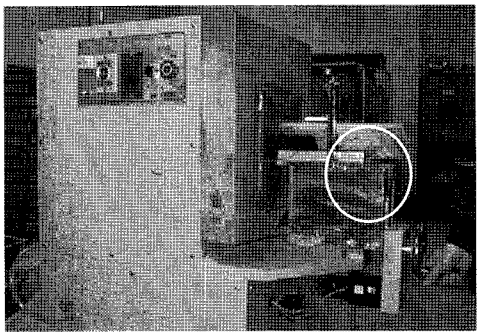
(a) 접합전의 시료



(b) 접합후의 시료



(c) 커터기



(d) 연마기

그림 3. 시료의 절단, 성형 및 연마

표 1. 연구대상시료의 기본특성치

습윤단위중량 (kN/m^3)		21.67	탄성계수 (MPa)	391.5
함수비 (%)		13.4	Poisson 비 (ν)	0.25
탄성파속도 (km/sec)	P-wave	2.32	일축압축강도 (MPa)	6.1
	S-wave	1.27		

위해 인공절리면 제작 Box를 제작하였으며, 암석시료를 인공절리면 제작 Box에 고정하여 임의의 각도로 절단하였다. 절단되어 서로 분리된 시료를 시험을 위한 공시체로 만들기 위해, 분리된 시료를 (주)LOCTITE사의 401접착제를 이용하여 접합시킨 후 암석 공시체의 양단에 편심이 발생하지 않도록 편평도를 0.02mm까지 다이아몬드로 만들어진 연마기를 이용하여 공시체를 연마하였다(그림 3). 이렇게 성형된 암석시료를 대상으로 일축 및 삼축압축시험을 수행하였으며, 본 연구에서 실시한 절리면의 경사각과 삼축압축시험에서의 구속압 조건은 다음과 같다.

(1) σ_3 : 5, 10, 20, 30, 40MPa

(2) β : 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°(최소주응력면과의 경사각)

3. 이방성 암석에 대한 시험결과

3.1 일축압축시험결과

이암에 대한 일축압축상태에서의 파괴강도에 대한 이방성을 규명하기 위하여 임의의 절리면의 경사각을 가진 이암시료를 성형하여 각 경사각에 대한 일축압축시험을 수행하였다. 단, 본 연구에서는 절리면의 성질에 대한 분석은 실시되지 않았으나, 시료 제작시 각 경사각에 대한 절리면이 거의 일정한 성질을 갖도록 성형하였으며, 본 시험결과를 직접적으로 현장에 적용하기 위함이 아니라, 단지 절리면의 경사각에 따른 강도 이방성을 알아보기 위한 연구 목적이었기 때문에 절리면의 성질에 대한 분석을 실시하지 않았다. 또한, 절리면의 접착강도에 대한 영향도 다소 있을 것으로 보이나, 무결암의 강도에 비해 절리면의 접착강도는 매우 작기 때문에 그 영향은 미소할 것으로 생각되며, 절리면의 경사각이 증가할수록 (수평면에 대한 경사각이 감소할수록) 미끄럼에 대한 영향이 감소되어 β=75°의 경우, 무결암의 강도와 절리면을 따른 강도가 거의 같은 값을 보였다(그림 4).

이방성 암석에 대한 일축압축시험결과 그림 4와 같은 결과를 얻었으며, β=30° 정도에서 강도의 최소치를 보

이고 있다. 이방성 곡선의 형태를 분류해 보면 U형태 이방성, 파동형태 이방성, 어깨형태 이방성의 세 가지 형태로 분류할 수 있는데(Ramamurthy, 1993), 시험결과 인공절리면을 따른 이방성이 U 형태의 이방성을 보일 것이라는 예상과는 달리 어깨 형태(shoulder type)의 이방성을 나타내었다. 이는 이암의 무결함 강도가 매우 작아 β=60° 정도 이상에서의 파괴거동에서는 절리면을 따른 강도와 이암 자체의 강도가 유사한데 기인된 것으로 보인다. 아울러 이방성의 대표강도 값으로서 β=90°일 때의 압축강도를 고려하면, 이방율(anisotropy ratio, R_c)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 암석의 이방율에 의한 이방성 정도가 표 2에 나타나 있다. 일축압축시험 결과로부터 해당 암석의 이방율을 산정한 결과, R_c=9.0으로 나타나 매우 높은 이방성에 속함을 알 수 있다. 따라서 본 연구대상시료의 일축압축상태에서의 파괴강도는 공시체내에 내재되어 있는 절리면의 각도변화에 따라 현저한 이방성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

$$R_c = \frac{\sigma_{c(90)}}{\sigma_{c(\min)}} \quad (1)$$

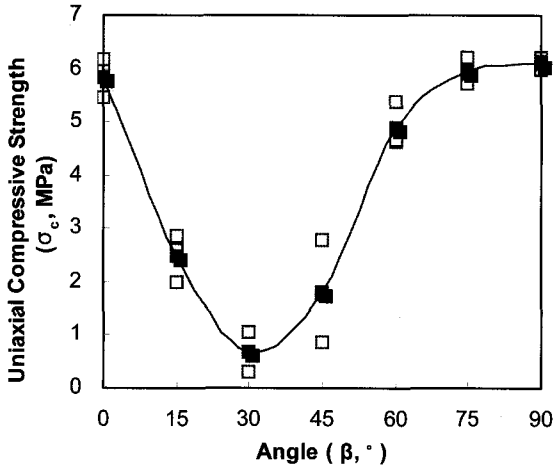


그림 4. 이방성 암석에 대한 일축압축시험결과(정강복, 2006)

표 2. 이방율에 의한 이방성 정도

Anisotropy ratio, R_c	Class	Rock types
1.0~1.1	Isotropic	Sandstone
> 1.1~2.0	Low anisotropy	Shale
> 2.0~4.0	Medium anisotropy	
> 4.0~6.0	High anisotropy	Slate, Phyllite
> 6.0	Very high anisotropy	

3.2 삼축압축시험결과

임의의 절리면 경사각을 가진 이암시료에 대한 삼축압축시험을 수행한 결과 그림 5와 같은 결과를 얻었으며, 각각의 측정치는 인공절리면 각각의 경사각에 대해 3~5개의 시험측정치로부터 구한 결과의 평균치를 표시한 것이다. 시험결과, 일축압축시험에서와 같은 어깨형태의 이방성으로 나타났고 일축압축시험에서와 같이 각 구속압력하에서의 최소강도는 β=30°에서 얻어졌다.

삼축압축시험 후 공시체의 파괴형상은 β=0°와 β=90°의 인공절리면을 갖는 시료의 경우 평균 60~65°(최대주응력면과 파괴면이 이루는 각, θ) 사이의 파괴각을 나타내었으며, β=15°~60°의 인공절리면을 내포하고 있는 시료는 구속압의 변화에 관계없이 대부분 인공절리면을 따라 파괴가 발생하였다. 또한, 삼축압축시험결과로부터 이방성의 대표강도값으로서 β=90°일 때의

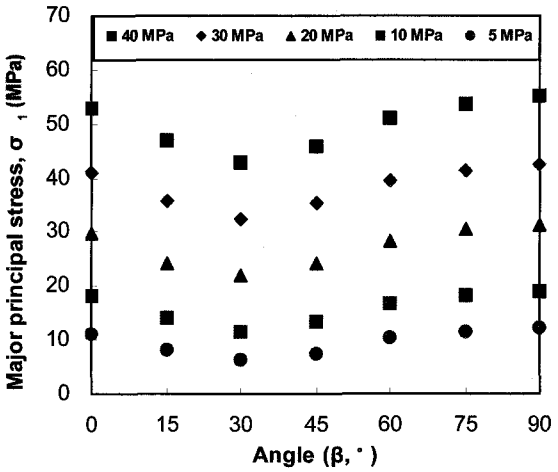


그림 5. 이방성 이암에 대한 삼축압축시험결과

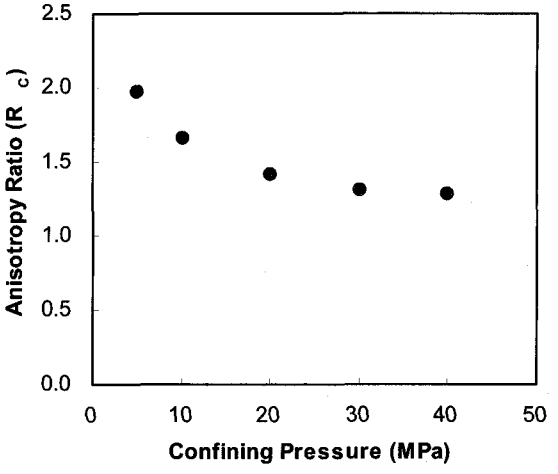


그림 6. 구속압에 따른 이방율

압축강도를 고려하면 각각의 구속압에서의 해당 암석의 이방율을 산정할 수 있다. 그 결과 일축압축시험에서 9.0의 매우 높은 이방성으로 나타난 것과는 달리 1.29~1.98 정도의 낮은 이방성으로 나타났다(그림 6). 따라서 본 연구대상시료의 절리면의 경사각에 따른 이방성은 구속압에 현저한 영향을 받음을 알 수 있으며, 구속압이 약 20MPa 이후에는 이방율 감소경향이 둔화됨을 알 수 있었다.

이상의 일축 및 삼축압축시험결과를 바탕으로 Ramamurthy (1985)의 파괴규준, McLamore & Gray(1967), Hoek & Brown(1980)의 파괴규준을 이용하여 이암의 파괴강도에 대한 이방성을 분석하고자 한다.

4. Ramamurthy 파괴규준에 의한 분석

4.1 일축압축강도의 이방성

일축압축시험결과를 바탕으로 Ramamurthy 파괴규준식에 의한 분석을 실시하였다. 우선 기존의 Ramamurthy 파괴규준식에 식 (2)와 같이 지수 n을 도입시켜 지수 n=1, 3, 5를 대입하여 각각에 대한 재료상수와 일축압축강도의 추정치를 산정한 결과, 그림 7과 같은 결과를 얻었다.

$$\sigma_c = A - D[\cos 2(\beta_m - \beta)]^n \quad (kgf/cm^2) \qquad (2)$$

여기서, σ_c : 층리각(β)의 변화에 따른 일축압축강도

β_m : 강도가 최소가 될 때의 층리각의 값(보통 30°)

A, D : 상수

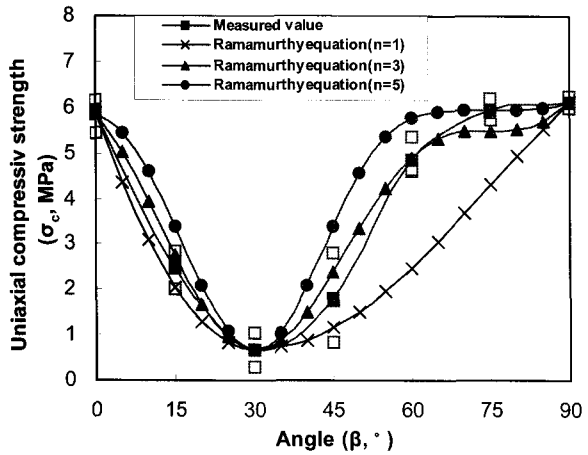


그림 7. n 지수에 따른 예측치와 실험치의 비교

그림 7에서 일축압축강도의 예측곡선과 실험곡선을 비교한 결과, 경사각 β=0°~30°에서는 n=1인 곡선이, β=30°~90°에서는 n=3인 곡선이 가장 적절한 값을 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구대상시료의 경우 β=0°~30°에서는 n=1, β=30°~90°에서는 n=3을 적용한 식 (2)를 적용함이 타당할 것으로 판단되어 일축압축강도에 대한 예측식을 표 4와 같이 결정하였다.

4.2 삼축압축강도의 이방성

삼축압축시험시 임의의 경사각에 따른 파괴강도를 규정하는 비선형 전단강도식은 Ramamurthy(1985)에 의해 식 (3a) 및 식 (3b)로 제안되었다. 여기서 그 적용에 필요한 매개변수 B_j와 α_j는 실험결과를 이용하여 각각 구할 수 있다.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = B_j \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_3} \right)^{\alpha_j} \qquad (3a)$$

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_{90}} = \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{c90}} \right)^{1-\alpha_{90}} \qquad \frac{B_j}{B_{90}} = \left(\frac{\alpha_{90}}{\alpha_j} \right)^{0.5} \qquad (3b)$$

여기서, α_j, B_j = 층리각도 $j(\beta°)$에 따른 α, B의 값

α_{90}, B_{90} = 층리각도 90°에서의 α, B 값

σ_{cj} = 식 (2)에서 나온 층리각도에 따른 일축압축강도 예측치

σ_{c90} = 층리각도 90°에서의 일축압축강도

식 (3a)를 이용하여 매개변수 B_j와 α_j를 산정하는 것은 각 경사각에 대한 실험이 모두 수행되어야만 하기 때문에 실질적인 문제에 있어 그 효용성이 떨어진다고

표 3. n지수에 따른 재료상수

경사각 (°)		A	D
n=1	0°~30°	11.01	10.33
	30°~90°	4.30	3.62
n=3	0°~30°	6.58	5.90
	30°~90°	5.51	4.83
n=5	0°~30°	6.01	5.33
	30°~90°	5.95	5.27

표 4. 수정 Ramamurthy의 일축압축강도 예측식

경 사 각	예 측 식
β= 0° ~ 30°	$\sigma_c = 11.01 - 10.33[\cos 2(\beta_m - \beta)]$
β= 30° ~ 90°	$\sigma_c = 5.51 - 4.83[\cos 2(\beta_m - \beta)]^3$

표 5. Ramamurthy 제안식에 의한 매개변수

일축압축강도 예측시 지수	매개 변수	경사각 (β, °)						
		0	15	30	45	60	75	90
n=1 (0°~30°) n=3 (30°~90°)	α_j	0.66	0.46	0.32	0.48	0.62	0.64	0.67
	B_j	1.26	1.50	1.81	1.47	1.30	1.28	1.25

표 6. 수정 Ramamurthy 제안식에 의한 매개변수

일축압축강도 예측시 지수	매개 변수	경사각 (β, °)						
		0	15	30	45	60	75	90
n=1 (0°~30°) n=3 (30°~90°)	α_j	0.66	0.64	0.61	0.64	0.66	0.66	0.67
	B_j	1.26	1.28	1.31	1.28	1.26	1.26	1.25

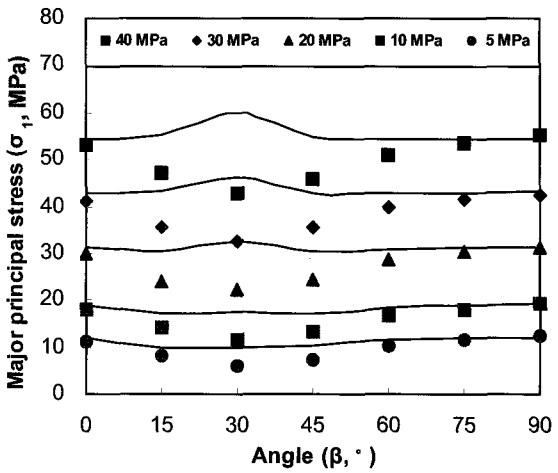


그림 8. 실험치와 Ramamurthy 제안식에 의한 예측치 비교

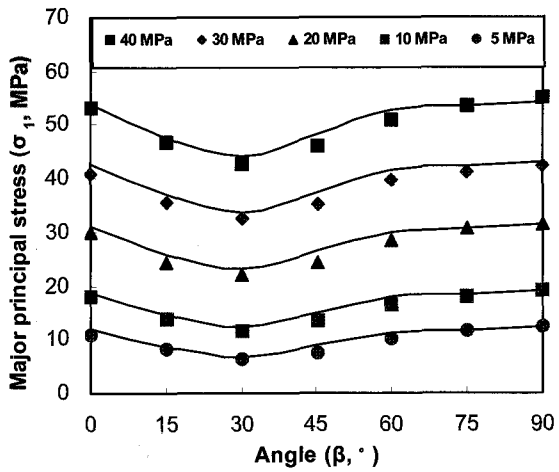


그림 9. 실험치와 수정 Ramamurthy 제안식에 의한 예측치 비교

볼 수 있다. 따라서 식 (3b)를 이용하여 매개변수를 구하는 방법이 보다 현실적이며, β=90°에 대한 실험결과로부터 매개변수 B_{90}과 α_{90}을 우선 산정한 후 나머지 경사각에 대한 매개변수를 산정할 수 있는 방법이다. 매개변수 산정시 수정된 Ramamurthy 일축압축강도식을 적용하였으며, 이로부터 매개변수를 산정한 결과 표 5와 같이 나타났다. 이러한 매개변수를 Ramamurthy 파괴규준식에 적용한 결과, 그림 8에 나타난 바와 같이 실험결과와 예측치가 많은 차이를 나타내고 있다. 이 주된 이유는 매개변수 α_j의 산정에 필요한 일축압축강도에서의 이방율이 너무 크게 나타나 경사각에 따른 α_j 값과 B_j 값의 차이가 많이 남으로써 나타난 결과로 생각된다.

이상의 결과를 바탕으로 살펴볼 때 본 연구대상시료에 대하여 삼축압축상태에 대한 Ramamurthy 파괴규준식을 적용함이 불합리한 것으로 보이며, 따라서 매개변수 산정시 사용된 제안식의 수정이 필요할 것으로 판단되어 식 (4)와 같이 기존의 제안식에 이방율을 도입하였다.

$$\frac{(\sigma_1-\sigma_3)}{\sigma_3}=B_j\left(\frac{\sigma_{c90}}{\sigma_3}\right)^{\alpha_j} \tag{4a}$$

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_{90}}=\left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{c90}}\right)^{[(1-\alpha_{90})\times 1/R_c]} \qquad \frac{B_j}{B_{90}}=\left(\frac{\alpha_{90}}{\alpha_j}\right)^{0.5} \tag{4b}$$

여기서, R_c = 일축압축시험으로부터 구한 이방율

식 (4b)로부터 각각의 경사각에 대한 매개변수를 산정한 결과 표 6과 같이 나타났으며, 이 매개변수를 Ramamurthy 파괴규준식에 적용한 결과 그림 9와 같이 나타났으며, 실험결과와 예측치가 비교적 잘 부합됨을 알 수 있다.

5. Jaeger 파괴규준에 의한 분석

Jaeger(1960)가 제안한 단일 연약면 이론에 근거하여 본 연구대상시료에 대한 삼축압축시험결과를 이용·분석한 결과 그림 10과 같이 나타났다. 공시체의 파괴가

절리면을 따라 파괴가 발생할 경우 식 (5)를 적용하여 시험결과를 분석하며, 시험결과분석에 적용하는 강도정수 c_o와 μ 값은 표 7에 나타나 있다.

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{2c_o+2\mu\sigma_3}{[1-\mu\cot(90-\beta)]\sin 2(90-\beta)} \quad (5)$$

여기서, c_o와 μ값은 경사각에 따른 주응력차의 값이 최소가 될 때, 즉 가장 취약한 방향(보통 β=30°일 때)에서의 점착력과 내부마찰각이다.

또한, 절리면을 따라 파괴가 발생되지 않을 경우(matrix failure) 식 (6)을 적용하여 시험결과를 분석하며, 적용변수 값들을 표 8에 나타내었다.

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{2c_o+2\sigma_3\tan\phi}{\sin 2\theta-\tan\phi+\cos 2\theta\tan\phi} \quad (6)$$

여기서, c_o와 $\tan\phi$는 절리면의 각도, 즉 β=0°와 90°인 암석 공시체 각각의 삼축압축시험결과로 얻어지는 점착강도와 마찰계수 값이며, θ는 β=0°와 90°인 암석 공시체 각각의 파괴시 파괴면이 최소주응력의 방향과 이루는 각도이다.

Jaeger의 파괴규준식에 의한 분석결과치를 비교해 본 결과, β=90°와 β=0°~30°에서는 시험결과가 예측치와 어느 정도 일치하는 것으로 나타났으나, 나머지 구간에서는 실험치와 예측치 사이에 많은 차이를 보이고 있다. 또한, 그림 10의 그래프 형태에 있어 오목한 부분의 그래프 폭이 상당히 넓게 나타나 절리면을 따라 파괴가 발생한 경우의 β 각도의 범위가 매우 넓다는 것을 추측할 수 있었으며, 실제 파괴각과 비교해 볼 때 유사한 결과를 나타내었다.

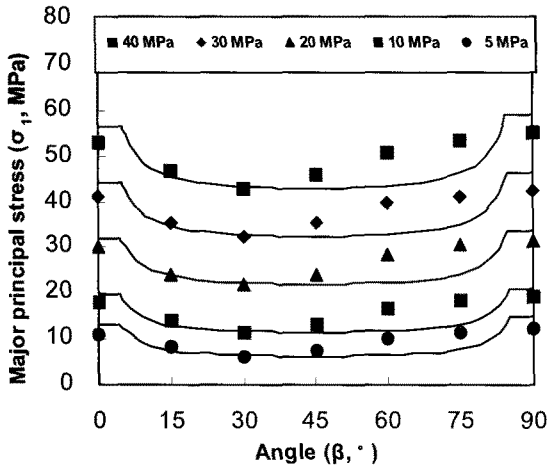


그림 10. 실험치와 Jaeger 식에 의한 예측치 비교

표 7. Jaeger 파괴규준식의 c_o 및 μ 값

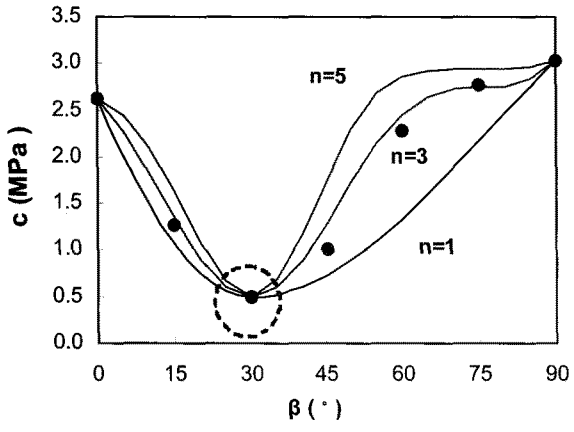
c_o (MPa)	μ
0.50	0.023

표 8. Jaeger 파괴규준식의 c_o, $\tan\phi$ 및 θ 값

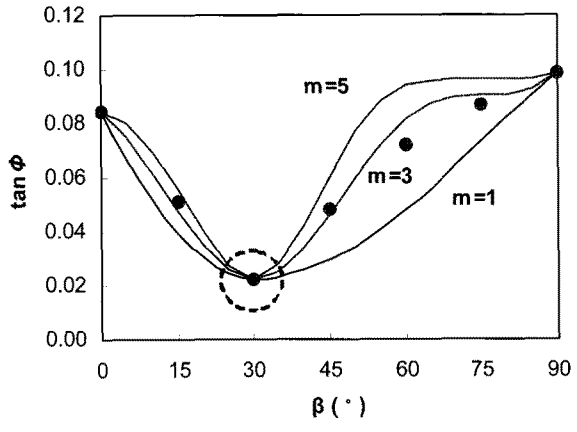
구 분	c_o (MPa)	$\tan\phi$	θ (°)
0°	2.62	0.085	65
90°	3.02	0.098	66

6. McLamore & Gray 파괴규준에 의한 분석

McLamore & Gray(1967)의 다양한 점착력과 마찰계수 이론을 이용하여 본 연구대상시료에 대한 시험결과치를 분석해 본 결과, 그림 12에 나타난 바와 같이 그래



(a) c 값의 변화



(b) $\tan\phi$ 값의 변화

그림 11. 지수 n, m 값의 산정

프의 오른쪽 부분, 즉 β=75°를 전·후로 해서 강도증가의 변화를 보이는 어깨형태의 이방성을 보였다. 또한, 임의의 각도변화에 따라 서로 다른 구속압력 하에서 시험한 결과 나타난 c와 $\tan\phi$ 값이 각각 그림 11에 나타나 있으며, c와 $\tan\phi$ 값은 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 의하여 산정되었다. 시험결과 c의 최소값을 나타내는 연약면의 각도(ξ)는 β=30°로 나타났으며, $\tan\phi$의 최소값을 나타내는 연약면의 각도(ξ') 또한 β=30°로 나타났다.

그리고 시험결과의 분석은 식 (7)을 적용하여 분석을 실시하였으며, 시험결과의 분석에 있어 c와 $\tan\phi$ 값들을 나타내기 위해 필요한 상수값($A_{1,2}$, $B_{1,2}$, $C_{1,2}$, $D_{1,2}$)은 표 9와 같이 얻어졌다. 그림 11에서 지수, 즉 'anisotropy type' factor 값 n, m을 1~5까지 변화시켜 산정한 결과 보통의 planar type에 속하는 n=3과 m=3의 값으로 나타났으며, 이상의 계수값들을 근거로 하여 McLamore & Gray 파괴규준식에 의해 분석한 결과, 그림 12에 보이는 바와 같이 시험결과치와는 아주 잘 부합되는 것으로 나타났다.

$$(\sigma_1-\sigma_3) = \frac{2c+2\sigma_3\tan\phi}{\sqrt{\tan^2\phi+1}-\tan\phi} \qquad (7)$$

여기서, $c = A_{1,2} - B_{1,2}[\cos 2(\xi-\beta)]^n$

$\tan\phi = C_{1,2} - D_{1,2}[\cos 2(\xi'-\beta)]^m$

ξ, ξ' : c, $\tan\phi$값이 각각 최소일 때의 각도.

A_1, B_1, C_1, D_1 : $0° \le \beta \le \xi°$ 사이에서 결정되어지는 상수.

A_2, B_2, C_2, D_2 : $\xi° \le \beta \le 90°$ 사이에서 결정되어지는 상수.

n, m : "anisotropy type" factor.

- "planar" type of anisotropy(cleavage and possibly schistosity) ⇒ 1 or 3
- "linear" type of anisotropy(bedding planes) ⇒ 5 or 6 (or greater)

7. Hoek & Brown 파괴규준에 의한 분석

Hoek & Brown(1980)의 경험파괴식을 적용하여 본 연구대상시료에 대한 시험을 분석한 결과 그림 13과 같이 나타났으며, β=0°와 β=45° 부근의 값들과 약간의 차이를 나타낼 뿐 실험치와 예측치가 잘 부합되었다. 그리고 Hoek & Brown의 경험파괴식인 식 (8)을 적용하기 위한 시험결과에 따른 상수값들을 식 (9), (10)에 의하여 시행착오적인 방법으로 산정한 결과 표 10과 같이 나타났으며, 이러한 상수값들을 식 (8)의 Hoek & Brown의 경험파괴식을 이용하여 시험 결과에 적용한 결과, 합리

표 9. McLamore & Gray 파괴규준식의 상수값

A_1	B_1	C_1	D_1
2.93	2.43	0.094	0.071
A_2	B_2	C_2	D_2
2.74	2.24	0.087	0.064

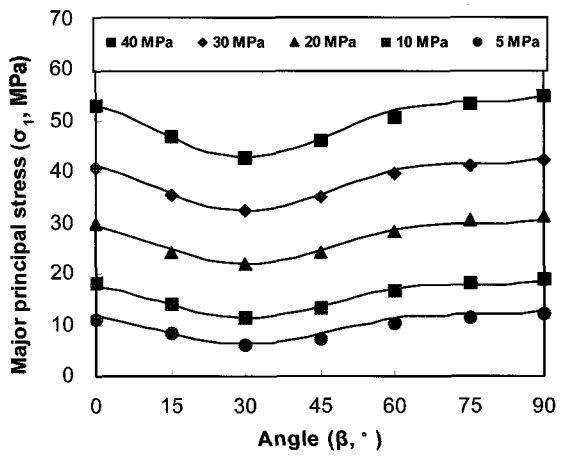


그림 12. 실험치와 예측치의 비교(McLamore & Gray)

표 10. Hoek & Brown 경험파괴식의 상수값

A	A_2	A_3
0.96	21.64	0.18
P	P_2	P_3
0.99	25.22	0.18

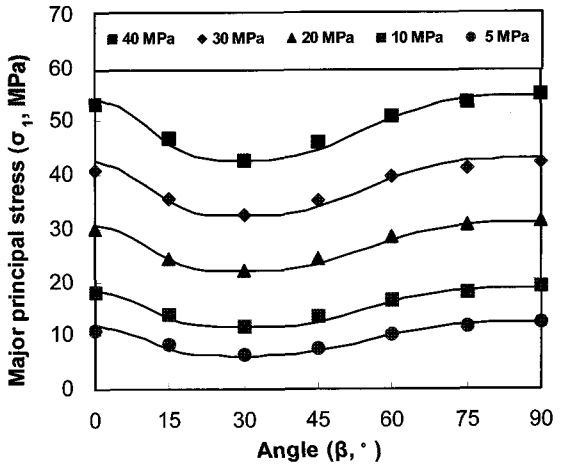


그림 13. 실험치와 Hoek & Brown 파괴경험식에 의한 예측치 비교

적인 값을 도출하기 위해서 많은 상수값들을 시행착오적인 방법으로 도출하기 때문에 다소 복잡하지만 시험결과와는 잘 일치 되었다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \tag{8}$$

여기서, $m = m_i\left(1 - Ae^{-\theta^4}\right)$

$s = 1 - Pe^{-\zeta^4}$

m_i : 균질암석(무결암)에 대한 m 값.

A, P : 상수

$$\theta = \left[\log_e\left(\frac{A}{1-m/m_i}\right)\right]^{1/4} \quad \zeta = \left[\log_e\left(\frac{P}{1-s}\right)\right]^{1/4} \tag{9}$$

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

$$\theta = \frac{\beta - \xi_m}{A_2 + A_3\beta} \quad \zeta = \frac{\beta - \xi_s}{P_2 + P_3\beta} \tag{10}$$

여기서, ξ_m : m이 최소가 되는 β의 값

ξ_s : s가 최소가 되는 β의 값

A_2, A_3, P_2, P_3는 시행착오적인 방법으로 결정하는 상수들

8. 결 론

본 연구에서는 불연속면을 포함하는 암반의 거동에 관한 기초연구로서, 포항지역 일원에 분포하는 이암을 대상으로 암석의 파괴강도에 대한 유도이방성을 규명하고자 축하중방향에 대하여 임의 각도로 인공 절리면을 갖는 이방성 이암에 대하여 일련의 실험과 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이방성 이암에 대한 일축압축시험 및 삼축압축시험을 실시한 결과, β=30°에서 최소강도를 보였으며 인공절리면을 따른 이방성이 어깨형태(shoulder type)로 나타났다. 이는 이암의 무결함 강도가 매우 작아 β=60°정도 이상에서의 파괴거동에서는 절리면을 따른 강도와 이암자체의 강도가 유사한데 기인된 것으로 보인다.

(2) 일축압축시험에서의 이방율을 산정한 결과, R_c=9.0으로 나타나 매우 높은 이방성에 속한 반면, 삼축압축시험에서 이방율은 1.29～1.98 정도의 낮은 이방성으로 나타났다. 이와같이 삼축압축시험에서의 이방율이 낮은 원인은 시료에 가해지는 구속압의 효과로 판단된다.

(3) Ramamurthy 파괴규준식에 n 지수를 도입하여 일축압축시험결과를 분석한 결과, β=0°～30°에서는 n=1인 곡선이, β=30°～90°에서는 n=3인 곡선이 가장 적절한 값을 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 삼축압축시험결과를 기존의 Ramamurthy 파괴규준식을 적용하여 분석한 결과, 실험치와 많은 차이를 나타내었다.

(4) 매개변수 산정에 관한 Ramamurthy 제안식에 일축압축강도에서의 이방율을 도입하여 제안식을 일부 수정한 후 매개변수를 재 산정하였으며, 이를 적용한 결과 전반적으로 실험치와 잘 부합되는 결과를 얻었다.

(5) 추가적으로 Jaeger(1960), McLamore & Gray(1967) 및 Hoek & Brown(1980)의 파괴규준을 적용하여 이암의 파괴강도에 대한 이방성을 분석하였다. 먼저 Jaeger의 파괴규준에 의한 분석결과, β=90°와 β=0°～30°에서는 시험결과가 예측치와 어느 정도 일치하는 것으로 나타났으나, 나머지 구간에서는 실험치와 예측치 사이에 많은 차이를 보였다. 또한, McLamore & Gray 파괴규준에 의한 분석결과, "anisotropy type" factor 값은 보통의 planar type에 속하는 n=3과 m=3의 값으로 나타났으며, 시험결과와는 아주 잘 부합되는 것으로 나타났다. Hoek & Brown의 파괴규준에 의한 분석결과, 합리적인 값을 도출하기 위해서 많은 상수값들을 시행착오적인 방법으로 도출하기 때문에 다소 복잡하지만 시험결과와는 잘 일치되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 정강복 (2006), *포항지역 이암의 공학적 특성 및 변형거동에 관한 연구*, 영남대학교 대학원 박사학위 논문, 292p.
2. Goodman, R. E. (1989), "Introduction to rock mechanics", 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
3. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), "Empirical strength criterion for rock masses", *Journal of the Geotechnical Engineering Division* ASCE 106 (GT9), pp.1023-1035.
4. Hoek, E. (1983), "23rd Rankine lecture : Strength of jointed rock masses", *Geotechnique*, Vol.33, pp.187-223.
5. Hoek, E. (1998), "Rock engineering, Course notes by Evert Hoek", pp.161-190.
6. Jaeger, J. C. (1960), "Shear failure of anisotropic rock", *Geological Magazine*, Vol.97, pp.65-72.

7. Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1976), "Fundamentals of rock mechanics", 2nd Ed., Chapman and Hall, London.
8. 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.
9. Ramamurthy, T., Rao, G. V. and Seshagiri, R. K. (1985), "A strength criterion for rocks," *Indian Geotechnical Conference (IGC-85)*, Roorkee, December 16~18, Vol.1, pp.59-64.
10. Ramamurthy, T. (1993), "Strength and modulus responses of anisotropic rocks", *Comprehensive Rock Engineering*, Vol.I-1, Pergamon Press, pp.313-329.

(접수일자 2008. 9. 3, 심사완료일 2008. 10. 24)