

## 구속압에 따른 셰일의 이방성 거동 Anisotropic Behavior of the shale with Confined Pressure

서인식\*, 김동락\*\*  
In-Shik Seo\*, Dong-Rak Kim\*\*

### <Abstract>

Foliated metamorphic, stratified sedimentary and regularity jointed rocks have properties(physical, mechanical) that vary with direction ( $\beta^\circ$ ) and are said to be anisotropic. The ground in Daegu area consists of shales, clastic sedimentary rocks. These shales have plane anisotropic or transversely isotropy characteristics. Engineering characteristics of shale in Daegu area are investigated by performing a series of rock test to the bedding( $\beta = 0, 30, 60, \text{ and } 90$  degrees). The results of tests show that the uniaxial compressive strength is a maximum at  $\beta = 0, 90^\circ$  and is a minimum when  $\beta$  is around 60 degree.

**Key words** : *Anisotropic, shale, Bedding plane, Triaxial Test, Elastic Parameter*

### 1. 서론

국토가 좁고 산악지대가 많은 우리나라에서는 최근 국토의 효율적인 활용 및 사회간접자본 확충 측면에서 지하철과 고속전철등의 교통시설을 위한 터널, 장대교량 기초, 암반사면 등의 대형 프로젝트와 방사선 폐기물 처리시설, 지하발전소등과 같은 지하공간의 활용이 점차 증대되고 있어 보다 안전하고 합리적인 지하구조물의 설계·시공 및 안정에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 기존에는 주로 균질 등방인 암석 매질의 강도측면에서 연구가 진행되어 왔으며, 암석 매질의 거동도 선형 탄성매질로 가정하여 해석을 많이 시도하였다. 그러나 위와 같은 대형 토목구조물

건설이 증가됨에 따라 갖가지 규모와 종류의 지질학적 불연속면, 즉 생성특성에 따라 단층, 파쇄지대, 절리, 층리등과 같은 불연속면을 나타나 실제로는 이방성을 띠고 있다. 이와 같은 이유로 이방성 암반으로서의 역학적 거동에 대한 특성을 연구하였다.

대구지역의 지반은 중생대 백악기에 이루어진 경상분지로 퇴적암이 주로 분포하고 있으며 이 중 셰일이 그 대부분을 차지하고 있다. 이러한 퇴적암은 생성조건, 생성 과정에 의하여 각종 불연속면을 포함하고 있고 이방성적 특징을 나타낸다. 이와 같은 층리와 같은 평면구조의 발달에 의한 이방성암반을 평면 이방성매질 또는 횡등방성 매질(Transversely isotropy)이라고 한다. 셰일은 층리면의 발달로

\* 정희원, 경동정보대학 토목공학과 교수, 공학박사  
E-mail : isseo@kdte.ac.kr

\*\* 정희원, (주)가야이엔지 지반공학부, 공학석사  
부산특별시 동구 초량동 48-1번지(2F)  
E-mail : kdr6324@naver.com

\* Prof., Department of Civil Engineering Kyungdong  
College of Techno-Information

이루어진 층상 암반으로서 생성조건, 생성과정에 의해 층리면과 이에 수직인 방향으로 이방성을 나타낸다.

이방성 암반의 설계시 입력 물성치인  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $G_2$ 의 산정에는 많은 어려움이 따른다. 또한, 암반과파의 가장 큰 영향을 미치는 인장강도는 등방과 횡등방의 경우는 분명히 다를 것이다. 이러한 이유로 이방성 암반 지대의 변형특성에 따른 역학적 거동특성은 주로 삼축시험을 통해 그 특성을 파악해야 한다. 이에 본 논문에서는 대구지역에 주로 기반암으로 분포하고 있는 세일의 구속응력을 재현한 실내 삼축압축시험을 통해 이방성 거동을 파악하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 이방성 암석

대형암체의 어떤 방향으로 시추를 하여도 그 방향에 관계없이 암석을 대표할 수 있는 물성치를 얻을 수 있다면 그 암체를 등방성(isotropy)이 있다고 한다. 즉, 임의의 방향을 향한 수많은 결정으로 구성되는 암석에서 모든 방향에 대해서 역학적으로는 완전히 동일하다고 가정하는 것을 등방성이라고 한다. 그러나, 암석은 조암광물들의 집합체라 할 수 있으므로 그 성질은 방향에 따라 다른 경우가 일반적이다.

이방성의 원인으로는 개별광물 입자의 배열과 결합형태, 입자의 모양 등과 같은 광물학적 요인과 광물입자들의 배열과 상호간의 방향, 입자의 경계면이나 벽개와 같은 결합으로 설명되는 암석학적 요인이 있다. 특히, 보다 큰 규모로 발생하는 층리, 편리등의 거시적 요인은 암반의 이방성을 결정하는 원인이 된다. 이와같이 광물학적 요인, 암석학적 요인, 지질학적 요인에 의한 이방성을 천연이방성이라 한다면, 암석에 외부하중이 가하여 지거나 지하암반 굴착으로 인한 응력의 재분포에 따른 천연균열의 전파로 인하여 발생하는 이방성은 응력으로 인한 이방성이라 할 수 있다.

### 2.2 역학적 거동

이방성암반에 있어서 직경 방향으로부터의

각,  $\beta^\circ$ 로 표현된다면, 이방성 강도의 개념은 다음과 같은 세 가지의 경우로 표현된다.

첫째는 경사각에 따른 최대, 최소 압축강도의 위치와 둘째는 이러한 경사들에 따른 일축 압축강도의 값, 셋째로 일축압축강도와 경사각 사이의 이방곡선의 일반적 형상으로 정의된다.

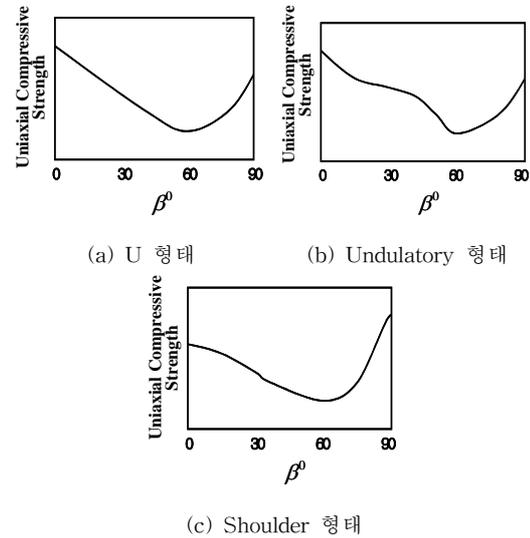


Fig. 1  $\beta^\circ$ 에 따른 이방성의 형태

Fig 1에서와 같이 기존 연구결과, 일축 압축강도는  $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ 일 때가 최대값,  $\beta = 60^\circ$  근처에서 최소값이 나타나며, 선천적 이방성이나 후천적 이방성에 무관하게 암석들은 이러한 경사에서 다른 압축강도를 갖는다.

### 2.3 Mohr-Coulomb의 이론

Mohr-Coulomb의 기준은 전단응력이 재료 고유의 값인 점착력과 그 면에 작용하고 있는 연직응력이 같게 되었을 때 항복이 발생한다고 생각하는 것이며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

식 (1)을 주응력으로 나타내면 최대주응력으로부터 법선이  $\beta^\circ$ 의 각도를 이루는 면에 작용하는 연직응력 및 전단응력은 Mohr원을 참고로 해서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

2.4 Jaeger의 단일 연약면 이론

Coulomb의 파괴규준에 기초한 Jaeger(1960)는 shoulder형태의 이방성이 존재할 때 이방성 암석의 파괴규준을 제안하였다. 횡등방성 암석에서 축압에 의한 최고 강도는 주응력방향에 대한 등방면의 방향, 암석이 얇게 갈라지는 면 또는 연약한 면인 층리가 진 면에 따라 다양하게 나타난다. Jaeger는 Fig. 2와 같이 최소 주응력방향에 대해 β°만큼 기울어진 연약한 면에 대해 구조적으로 분석을 하였다.

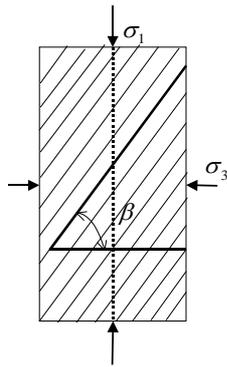


Fig. 2 삼축하에서의 횡등방성 시료

연약한 면의 활동은 주응력에 의해서 생기는 면의 전단응력이 전단강도보다 크거나 같아지면 시작이 된다. 연약면내에서의 일축압축 응력 개념에서  $\sigma_3 = \tau_{13} = 0$ 으로 식 (3)과 같은 균형식이 성립한다.

$$\sigma_n = \sigma \cos^2 \beta \quad (3)$$

여기서  $\cos^2 \beta = \frac{1 + \cos 2\beta}{2}$ 로 그 면에 일어나는 주응력 개념에서 위와 같은 균형식을 통하여 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\sigma + \frac{1}{2}\sigma \cos 2\beta \quad (4)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2}\sigma \sin 2\beta$$

이러한 이론은 2가지 기초적인 적용이 가능하다.

i) 절리가 약한 물질로 채워져 있다면, 이와 같은 연약면의 파괴이론을 적용할 수 있다.

ii) 약한면에 평행한 면을 가진 이방성은 단일 연약면 이론과 같은 거동을 한다.

하지만, 이 이론은 층리 경사각이 0°, 90° 근처에서는 내부마찰각의 활동은 일어나지 않고, 구속압력에 대한 축차응력, 점착력, 내부마찰각은 다른 역학적 요인에 의해서 지배되어지며, 한 방향에서 전단파괴는 약한면에 의한 것을 제외하고는 다른 층리경사각에는 적용되지 않는다.

3. 실내시험

3.1 시료성형

본 시험에 사용된 암석시료는 시료 채취시 불균질성을 최대한 없애며, 단지 이방성의 특성을 고려하기 위해서 불연속면(층리)이 일정한 간격으로 분포된 압괴형태의 것만을 취하였다. 현장에서 채취한 압괴형태의 시료를 실내에서 구경이 Nx-Size(D=54mm)의 Core Drill로 층리면이 주 가압면과 각각 0°, 30°, 60°, 90°가 되도록 하여 암석코어를 제작하였다. 암석시료의 성형 방법은 Fig. 3과 같다.

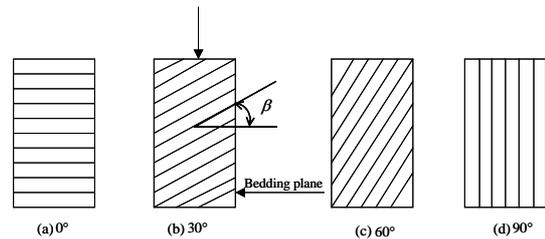


Fig. 3 β°에 따른 시료 성형 방법

3.2 X-ray 회절시험

대구지역의 세일은 주로 다량의 점토광물(Clay mineral, Cm), 석영(Quartz, Q), 장석(Albite, Ab) 및 방해석(Calcite, Cc)으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

Table 1 세일의 광물 성분

Component(%)	Q	Or	Ab	An	Wo	Cm	lim	Mt	Cc	Tn
블랙 세일	18.10	3.60	26.74	-	-	27.58	0.59	2.13	18.20	7.48
레드 세일	18.44	12.27	23.56	12.01	-	18.45	-	2.32	11.21	1.26

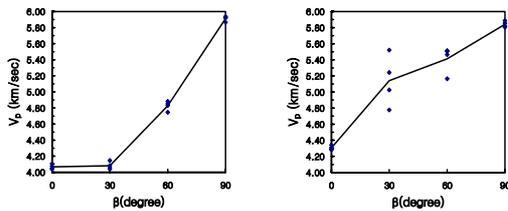
### 3.3 기본 물성치 시험

$\beta^\circ$ 에 따른 영향을 확인하기 위해 각각의 시료에 대해 실험을 하였다. 각도에 의한 차이는 크게 나타나지 않았으나, 두 시료의 값에서 블랙 세일이 레드 세일보다 겉보기 비중에서 약간 낮은 값을 나타내었고, 흡수율, 자연함수비, 자연포화도, 유효간극률에서 약간 큰 값을 나타내었다. 흡수율은 블랙 세일이 0.46~2.68%, 레드 세일이 0.51~1.89%, 자연함수비는 블랙 세일이 0.09~0.63%, 레드 세일이 0.09~0.37%, 자연포화도는 블랙 세일이 15.03~29.05%, 레드 세일이 13.86~27.18%, 유효간극률은 블랙 세일이 1.24~6.83%, 레드 세일이 1.38~4.98%로 나타났다.

### 3.4 단위중량 시험

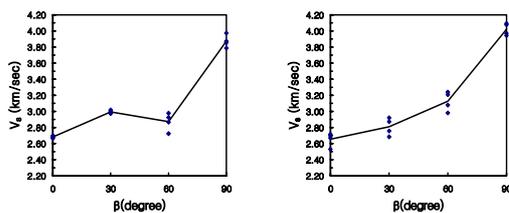
블랙 세일의 경우 2.633~2.678, 레드 세일의 경우 2.661~2.703의 범위로 블랙 세일이 레드 세일보다 약간 낮은 값을 나타내었다.

### 3.5 탄성파속도 시험



(a)블랙 세일 (b)레드 세일

Fig. 4  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 P파 속도변화 그래프



(a)블랙 세일 (b)레드 세일

Fig. 5  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 S파 속도변화 그래프

일반적으로 탄성파속도는 암석의 종류, 조직, 밀도, 간극률, 이방성, 함수율 그리고 온도 등에 의하여 영향을 받는다. 탄성파속도 시험 결과를 바탕으로 하여 Fig. 4와 Fig. 5는 같은 층리각도에 따른 P파, S파속도의 변화양상을

나타내었다. 흑색 및 적색 세일 모두  $\beta^\circ=90$ 에서 탄성파속도가 가장 빠르며,  $\beta^\circ=0$ 에서 가장 느린 값을 알 수 있다. 그 이유는 직경방향으로 발달한 층리가 전달되는 파를 방해하기 때문으로 사료된다.

### 3.6 일축 압축강도시험

일반적으로 암판정의 가장 신뢰도가 높은 방법이 일축 압축시험이다. 일축압축 시험시 하중은 분당 1.5mm의 속도로 재하하였다. 탄성정수 산정을 위해서  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 의 시료를 각도별로 1개씩 준비하여  $0^\circ, 90^\circ$ 는 사진 3.5 와 같이 x, y방향에  $30^\circ, 60^\circ$ 는 x, y, A, B, C 방향에 변형 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였고, 파괴 하중의 50%에서 측정된 변형률로 탄성정수를 산정하였다.

블랙 및 레드 세일의 층리각도에 따른 일축 압축시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 일축 압축강도

$\beta^\circ$ sample No.		Uniaxial compression Strength (kg/cm <sup>2</sup> )			
		0	30	60	90
블랙 세일	BS-1	520.46	448.09	308.71	1467.08
레드 세일	RS-1	586.00	430.33	329.70	764.80

### 3.7 삼축 압축강도시험

삼축 압축시험은 Hoek cell을 이용하여 구속 압을 가하는 것으로 실내에서 구속압을 달리 하여 암반내의 응력 상태를 재현하여 그 역학적인 거동을 파악하는데 목적이 있다.  $\beta^\circ = 0, 30, 60, 90$ 에 따라 구속압을 40, 85, 130kg/cm<sup>2</sup>의 3가지로 변화시키면서 실험을 실시하였다.

Table 3  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 삼축 압축강도

$\beta^\circ$ Rock Parameter		Uniaxial compression Strength (kg/cm <sup>2</sup> )		
		30	60	90
블랙 세일	$\sigma_3 = 40$	949.10	567.64	1863.53
	$\sigma_3 = 85$	1123.90	673.07	2122.90
	$\sigma_3 = 130$	1384.50	874.60	2397.50
레드 세일	$\sigma_3 = 40$	820.95	560.72	1035.26
	$\sigma_3 = 85$	1249.42	745.13	1270.63
	$\sigma_3 = 130$	1488.14	1079.35	1703.60

$\beta^\circ = 0, 30, 60, 90$ 에 따라 구속압을 40, 85, 130kg/cm<sup>2</sup>의 3가지로 변화시키면서 실시한 삼축 압축시험의 결과는 Table 3과 같다.

#### 4. 시험결과 분석

##### 4.1 일축 압축강도시험

Fig. 6은 층리각도에 따른 일축압축강도의 변화양상을 나타내었다. 이 지역 세일은  $\beta^\circ = 90$ 부근에서 최고 강도특성을 보였으며, 가장 낮은 강도는  $\beta^\circ = 60$ 에서 나타났다. 즉, 하중방향과 층리면과의 각도가 증가함에 따라 크기는 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 흩어짐의 정도는  $\beta^\circ = 60$ 로 갈수록 작아지다가 다시 커지는 경향을 나타내었다. 이는  $\beta^\circ = 60$ 일 때의 파괴각과 층리각이 일치하면서 쉽게 부서지므로 강도의 흩어짐이 적음을 알 수 있다.

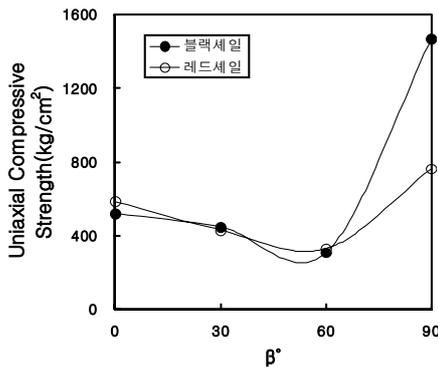


Fig. 6  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 일축압축강도 변화 그래프

##### 4.2 삼축 압축강도시험

블랙 및 레드 세일의  $\beta^\circ$ 에 따른 삼축 압축 시험의 결과를 이용하여 최대 파괴강도점에서의 Mohr의 응력원과 그 파괴 포락선으로 강도 정수  $c$ ,  $\phi$ 값을 산출하였다. 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4에서 블랙 세일은  $\phi = 39.09 \sim 54.43^\circ$ ,  $C = 84.30 \sim 171.50 \text{kg/cm}^2$ , 레드 세일은  $\phi = 41.06 \sim 50.97^\circ$ ,  $C = 87.52 \sim 142.76 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 각각의 강도정수를 위한  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 의 관계에서 결정계수( $R^2$ )는 0.968이상으로 아주 양호한 결과를 얻었다. Fig. 7과 Fig. 8은

$\beta^\circ$ 에 따른 구속압과 최대 주응력의 상관관계를 나타낸 그림으로서  $0^\circ$ 에서 최대 기울기와 Y절편,  $60^\circ$ 에서 최소의 기울기와 Y절편이 나타남을 알 수 있다.

Table 4  $\beta^\circ$ 에 따른 세일의 점착력과 내부마찰각

Rock Type	$\beta^\circ$	Relationship between $\sigma_3(X)$ and $\sigma_1(Y)$	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Friction angle ( $\phi^\circ$ )	Coefficient of friction angle (tan $\phi$ )	R-squared ( $R^2$ )
블랙 세일	0	$Y=7.0013X+663.15$	84.30	40.23	0.8461	0.989
	30	$Y=4.8378X+741.29$	86.66	49.09	1.1539	0.987
	60	$Y=3.4107X+415.2$	75.85	39.09	0.8124	0.968
	90	$Y=5.9330X+1623.7$	171.50	54.43	1.3984	0.999
레드 세일	0	$Y=8.5338X+436.83$	142.76	44.48	0.9820	0.997
	30	$Y=7.4132X+556.05$	124.80	46.35	1.0483	0.974
	60	$Y=5.7626X+305.25$	87.52	41.06	0.8711	0.973
	90	$Y=7.4260X+705.29$	107.30	50.97	1.2336	0.972

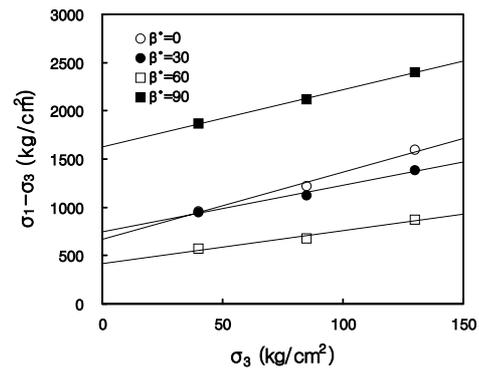


Fig. 7  $\beta^\circ$ 에 따른 블랙 세일의  $\sigma_1 - \sigma_3$ 와  $\sigma_3$ 관계

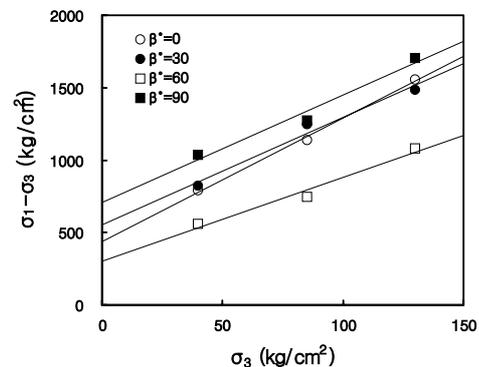


Fig. 8  $\beta^\circ$ 에 따른 레드 세일의  $\sigma_1 - \sigma_3$ 와  $\sigma_3$ 관계

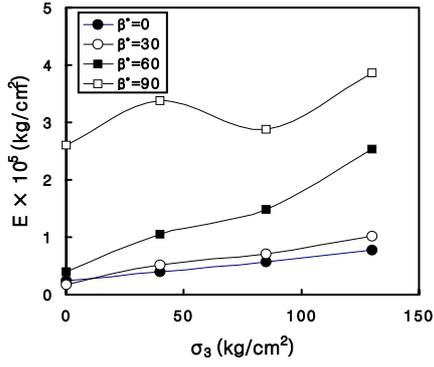


Fig. 9  $\sigma_3$ 에 따른 블랙 세일의 일축압축강도 변화 그래프

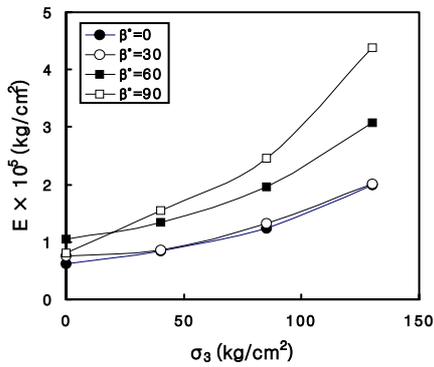


Fig. 10  $\sigma_3$ 에 따른 레드 세일의 일축압축강도 변화 그래프

Fig 9와 Fig. 10은 구속압에 따른 탄성계수의 변화양상을 나타낸 그래프로서 구속압이 증가할수록 탄성계수가 증가함을 알 수 있다.

#### 4.3 세일의 탄성정수 산정

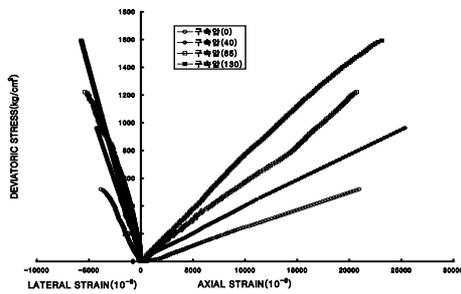


Fig. 11  $\beta = 0^\circ$ 일 때 구속압에 따른 블랙 세일의 응력-변형을 곡선

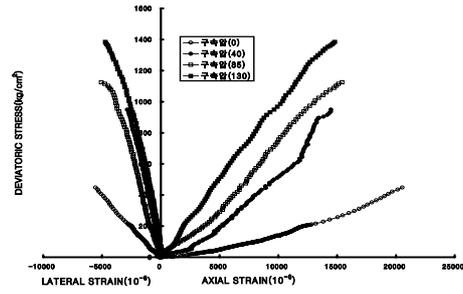


Fig. 12  $\beta = 30^\circ$ 일 때 구속압에 따른 블랙 세일의 응력-변형을 곡선

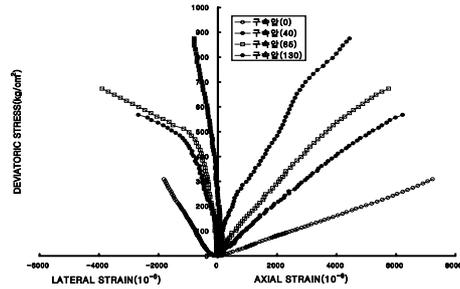


Fig. 13  $\beta = 60^\circ$ 일 때 구속압에 따른 블랙 세일의 응력-변형을 곡선

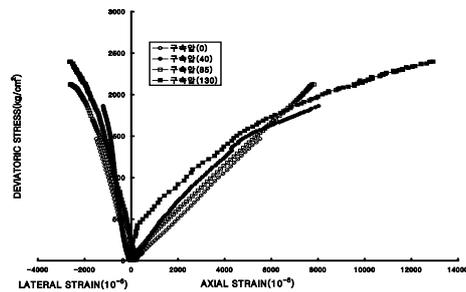


Fig. 14  $\beta = 90^\circ$ 일 때 구속압에 따른 블랙 세일의 응력-변형을 곡선

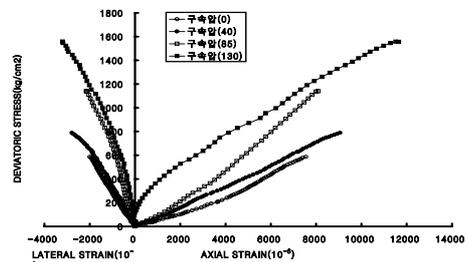


Fig. 15  $\beta = 0^\circ$ 일 때 구속압에 따른 레드 세일의 응력-변형을 곡선

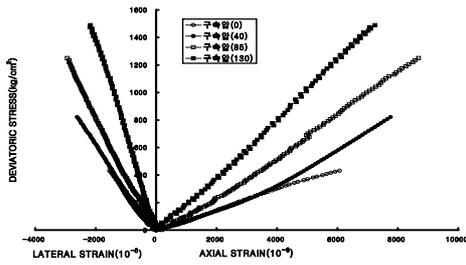


Fig. 16  $\beta = 30^\circ$ 일 때 구속압에 따른 레드 셰일의 응력-변형률 곡선

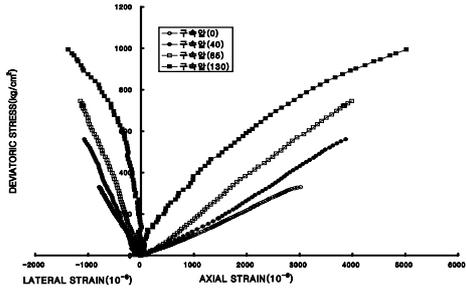


Fig. 17  $\beta = 60^\circ$ 일 때 구속압에 따른 레드 셰일의 응력-변형률 곡선

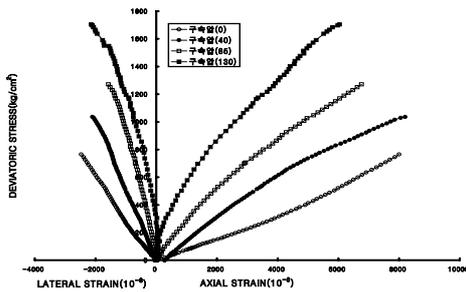


Fig. 18  $\beta = 90^\circ$ 일 때 구속압에 따른 레드 셰일의 응력-변형률 곡선

Table 5 셰일의 탄성정수 산정

$\beta^\circ$		$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
블랙 셰일	$E_1(\text{kg/cm}^2)$	330377	274593	199298	330377
	$E_2(\text{kg/cm}^2)$	154500	134291	129166	154500
	$\nu_1$	0.198	0.184	0.195	0.198
	$\nu_2$	0.205	0.250	0.294	0.205
	$G_2(\text{kg/cm}^2)$	82858	67050	55454	82858
	$E_Y(\text{kg/cm}^2)$	154500	158914	193348	154500
레드 셰일	$E_1(\text{kg/cm}^2)$	226340	187893	147054	226345
	$E_2(\text{kg/cm}^2)$	94008	80521	69235	94003
	$\nu_1$	0.151	0.125	0.210	0.153
	$\nu_2$	0.196	0.201	0.229	0.198
	$G_2(\text{kg/cm}^2)$	64229	43899	35815	64330
	$E_Y(\text{kg/cm}^2)$	94000	105000	133132	226352

Fig. 11 ~ Fig. 18은 블랙 셰일과 레드 셰일에 대하여 각각의  $\beta^\circ$ 에 따라 구속압을 달리하여 응력과 변형율을 나타낸 그림이다. Table 5에서 블랙 및 레드 셰일의 탄성계수의 이방비 ( $E_1/E_2$ )는  $\beta^\circ$ 에 따라  $60^\circ$ 까지 감소하다 증가하는 양상을 나타내고 있다.

### 5. 결론

대구지역에 기반암으로 분포하고 있는 블랙 셰일, 레드 셰일을 채취하여 층리면의 각도가 다른 시료에 대한 각종 물리적 특성 시험 및 역학시험을 실시하여 이방성 파괴특성을 파악하였으며, 한 시료에 방향에 따라 다섯 개의 변형률 게이지를 부착하여 일축 압축시험과 삼축압축시험을 통한 탄성정수를 구하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 셰일의 이방성 특성중 일축 압축강도와 삼축 압축강도는  $0, 90^\circ$ 에서 최고 강도를,  $60^\circ$ 에서 최소 강도가 나타났다. 탄성파속도는  $90^\circ$ 에서 최대값이 발생하고,  $0^\circ$ 에서 최소값이 발생하였다.
2. 각종 시험결과 탄성과 속도와 탄성계수는  $\beta$ 값이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 삼축 압축시험 결과 구속압이 증가함에 따라 응력과 탄성계수는 증가하고 변형율은 감소하는 경향이 나타났다.
4. 블랙 및 레드 셰일의 탄성계수의 이방비 ( $E_1/E_2$ )는  $\beta^\circ$ 에 따라  $60^\circ$ 까지 감소하다 증가하는 양상을 나타내었으며, 이방비는 약 2인 암석으로 나타났다.
5. 대구·경북지역의 퇴적암은  $\beta$ 값에 따라 기본 물성치와 강도정수의 이방성 특성이 두드러지게 나타나므로 터널 굴착시 이러한 특성을 고려한 합리적인 설계가 이루어져야 한다.

참고문헌

- 1) Müller, j.(1930), *Der Felsbau, Ferdinand Enke.*
- 2) Jaeger, j. C.(1960) "Shear failure of anisotropic Rocks." , *Geol. Mag.* 97, pp. 65-72.
- 3) 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.
- 4) Pinto, J.L.(1979) "Determination of the elastic constants of anisotropic bodies by diametral compression test." , *Mroc. 4th ISRM Cong., Montreux, Vol. 2*, pp. 359-363.
- 5) Amadei, B.(1982) "The influence of rock-anisotropy in measurement of stresses in-situ" , ph.d. thesis, *university of california, berkeley*, January.
- 6) Brook, N.(1993) "The Measurement and Estimation of Basic Rock Srength", in *Compressive Rock Engineering* (edited by John A. Hudson), Vol. 3-1, Pergamon Press, pp. 41-66.
- 7) Deere, D. U. and Mille., R. P,(1966), *Engineering classification and index properties for intact rock.*, Technical Report No. AFNL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.
- 8) 허노영,(1998) "퇴적암 기반 Tunnel의 비등방 탄소성해석" , **공학박사학위 논문**, 경북대학교 대학원.
- 9) 이재호 (2001), "이방성 암석의 파괴거동 및 탄성정수 산정 연구", **공학석사학위 논문**, 경북대학교 대학원.
- 10) 최정호 (2002), "간접인장강도시험을 통한 암석 인장강도의 이방성 특성", **공학석사학위 논문**, 경북대학교 대학원.

---

(2004년 11월 2일 접수, 2005년 5월 20일 채택)