

## 층리면을 고려한 셰일의 공학적 특성

### Engineering Characteristics of Shales due to the Angle of Bedding Planes

김 영 수 <sup>*1</sup>	Kim, Young-Su	서 인 식 <sup>*2</sup>	Seo, In-Shik
허 노 영 <sup>*3</sup>	Heo, No-Young	이 재 호 <sup>*4</sup>	Lee, Jea-Ho
김 병 탁 <sup>*5</sup>	Kim, Byung-Tak		

#### 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( $\beta=0, 30, 60,$  and  $90$  degrees). The results of tests show that the uniaxial compressive strength is maximum at  $\beta=0, 90^\circ$  and is minimum when  $\beta$  is around  $60$  degree. And, Brazilian tensile strength, point load strength, P-wave velocity and S-wave velocity are maximum at  $\beta=90^\circ$  and is minimum when  $\beta=0^\circ$ . A correlation between the uniaxial compressive strength of rocks and the other properties such as Brazilian tensile strength and point load strength is proposed. In addition, engineering characteristics to the angle of bedding planes of sedimentary rocks are classified by the quantitative indices of uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, point load strength, and P, S-wave velocities.

#### 요 지

강도 또는 변형 이방성은 층리진 퇴적암, 박층모양의 변성암, 균일하게 절리가 나있는 암석에서 흔히 볼 수 있다(Amadei, 1982, 1996). 특히, 대구지역은 퇴적암의 일종인 셰일로 구성되어 층리면의 각도에 따라 역학적인 특성이 달리 산정되어져야 한다. 이에 본 연구에서는 층리면의 각도를 달리하여 시료를 성형한 후 각종 시험을 수행하였다. 그 결과 일축 압축강도는 수평면과 층리면이 이루는 각이  $0^\circ, 90^\circ$ 에서 최고 강도를,  $60^\circ$ 에서 최저 강도를 나타내었다. 또한 간접 인장시험과 점 하중시험, 탄성파시험에서는  $90^\circ$ 에서 최고값을,  $0^\circ$ 에서 최저값을 보였다. 그리고, 층리에 따른 퇴적암의 일축 압축강도를 간접 인장강도, 점하중강도와의 상관성을 분석하여 각각의 관계를 회귀분석을 통한 상관식으로 나타내었다. 추가적으로 층리에 따른 공학적 특성을 정량적으로 나타내었다.

**Keywords :** Anisotropic, Transversely isotropy, Shale, Bedding plane( $\beta^\circ$ )

\*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*2 정회원, 경동정보대학 공과대학 토목과 조교수  
\*3 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 공학박사  
\*4 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정  
\*5 정회원, 한국해양연구원 연구원

## 1. 서론

대구지역은 중생대 백악기의 퇴적암이 주가 되며 이를 분출한 안산 암질암과 백암기 최후기의 심선 관입작용에 의한 심성 화성암이 나타난다. 이러한 퇴적암 중에서 이암이 주가 되는 함안층과 세일이 주가 되는 반야월층이 가장 넓은 분포 면적을 보이고 있다(김영수등, 1995, 이영휘등, 1998). 특히 세일은 생성과정에 의해서 각종 불연속면을 포함하고 있어 이방성적 특성을 나타내므로 토목 구조물 건설시 충분한 지반조사를 통한 지층 구조, 불연속면의 확인이 선행되어야 한다. 김영수 등(1998)은 대구지역 세일의 층리에 따른 일축 압축강도, 탄성파속도, 간접 인장강도의 이방성을 규명하였다. 그러나, 시료의 깎수 부족으로 층리 각도에 따른 각종 강도정수와 물성치와의 관계를 산정하지 못하였다. 본 연구에서는 대구지역에 주로 기반암으로 분포하고 있는 흑색 및 적색 세일의 이방성 특성을 알기 위하여 층리면의 각도( $\beta^\circ$ )를  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 맞게 시료를 성형하여 기본 물성 및 일축 압축강도, 탄성파속도, 간접 인장강도, 접하중강도를 실험하였다. 그리고, 그들 각각의 특성과 서로의 상관식을 유도하였다.

## 2. 시험편 제작 및 시험방법

본 시험에 사용된 흑색 세일은 대구시 수성구 고산동에 위치한 종합경기장 건설현장 부근에서, 적색 세일은 북구 태전동에서 채취하였다. 시료 채취시 이방성의 특성을 고려하기 위하여 층리가 일정한 간격으로 분포된 압괴형태의 것만을 취하였다. 현장에서 채취한 압괴형태의 시료를 실내에서 구경이 NX size( $D=5.4\text{cm}$ )의 core drill로 층리면이 주가압면과 각각  $\beta^\circ=0, 30, 60, 90$ 가 되도록 하여 암석 코어를 제작하였다.(Fig. 1 참조)

암석의 물리적 성질 중 기본물성으로 진비중, 겉보기 비중, 자연 함수비, 자연 포화도, 유효 간극률, 흡수율을 측정하였고, 역학적 성질로서 일축 압축시험, 간접 인장시험,

접재하시험, 탄성파시험을 하였다. 기본물성의 측정방법은 국제암반역학회의 표준시험법에 의하였다(ISRM, 1979). 모든 암석시험편의 크기는 버니어 캘리퍼스로  $0.05\text{mm}$ 까지 측정하였으며, 암석시험편의 중량은  $0.01\text{g}$ 까지 측정 가능한 디지털식 중량계측기를 사용하여 측정하였다. 또한, 탄성파를 측정하기 위하여 영국 C.N.S.ELECTRONICS LTD사의 표준 주파수  $1\text{MHz}$ , 최대 하중용량  $220\text{KN}$ , 직경  $50\text{mm}$ , 무게  $700\text{g}$ 인 PS 초음파 변환기를 사용하였다. 역학시험은 길이 대 직경의 비를 일축압축시험은  $2:1$ , 간접인장과 접하중강도시험은  $1:2$ 로 하였다. 시료의 윗면과 아랫면은 하중작용시 어느 한 부분에만 집중되지 않도록 평면도를  $1/100$ 이상 되도록 하였다. 압축시험기로는 용량  $100\text{ton}$ 의 유압식 압축시험기(UTM, M200-HVL, 미국)를 이용하였다.

## 3. 시험 결과

세일에 대한 기본 물성치는 Table 1과 같다. 두 시료의 진비중(true specific gravity)은 흑색, 적색 세일 각각  $2.74, 2.69$ 로 나타났으며, 자연 상태( $G_n$ ), 강제 건조( $G_d$ ), 강제 습윤( $G_i$ ) 상태의 겉보기 비중은 흑색 세일이 적색 세일보다 약간 높게 나타났다. 자연 함수비( $W_n$ )는 흑색 세일이  $0.163 \sim 0.648\%$ , 적색 세일이  $0.249 \sim 1.692\%$ , 자연 포화도( $S_r$ )는  $59.574 \sim 82.654\%$ ,  $65.957 \sim 79.65\%$ 로 나타났으며, 유효 간극률( $n_e$ )은  $0.749 \sim 2.134\%$ ,  $1.004 \sim 7.410\%$ , 흡수율( $ab$ )은  $0.274 \sim 0.783$ ,  $0.377 \sim 2.913\%$ 으로 나타났다. Table 2는  $\beta^\circ$ 에 따른 역학적인 실험 결과이다. 층리에 따른 특성을 정량적으로 산출하기 위하여 평균값에 T표본 분포를 이용하여 95% 신뢰 구간을 결정하였다.

### 3.1 층리각도에 따른 일축 압축강도

두 가지 세일(흑색, 적색)의  $\beta^\circ$ 에 따른 일축 압축시험 결과는 Fig. 2와 같다. 세일은  $\beta^\circ=0, 90$  부근에서 최고 강

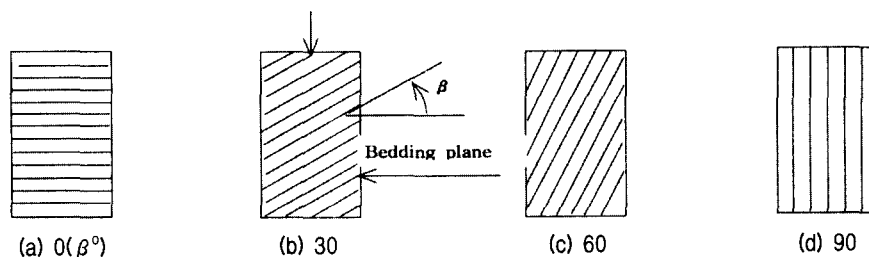


Fig. 1. Angle between principal stress and bedding plane( $\beta^\circ$ )

Table 1. Physical properties according to sedimentary rock types

Physical properties		True specific gravity	Apparent specific gravity			w <sub>n</sub> (Water content)	S <sub>r</sub> (Degree of Saturation, 100%)	n <sub>e</sub> (Porosity, 100%)	ab (Absorption, 100%)
Rock types	β°		G <sub>n</sub>	G <sub>d</sub>	G <sub>t</sub>				
Black shale	0	2.74	2.74	2.74	2.75	0.16	59.57	0.75	0.28
	30		2.74	2.72	2.75	0.65	82.65	2.13	0.78
	60		2.74	2.73	2.75	0.48	79.07	1.65	0.60
	90		2.74	2.74	2.75	0.20	62.22	0.89	0.33
Red shale	0	2.69	2.67	2.66	2.67	0.25	65.96	1.00	0.38
	30		2.67	2.65	2.68	1.00	79.65	3.34	1.26
	60		2.71	2.68	2.72	1.10	79.09	3.74	1.39
	90		2.59	2.54	2.62	1.69	68.45	7.41	2.91

Table 2. Engineering characteristics of shales due to the angle of bedding planes

Rock types		Uniaxial compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Brazilian tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Point load strength (kg/cm <sup>2</sup> )	P-wave velocity (km/sec)	S-wave velocity (km/sec)	
Black shale	0°	Average values(extent)	1045(613~1479)	57(21~110)	22(11~30)	5.07(4.65~5.40)	2.47(2.17~2.69)
		95% confidence interval	840~1240	35~80	17~27	4.90~5.30	2.36~2.60
	30°	Average values(extent)	789(550~1205)	68(23~132)	24(12~38)	5.54(5.05~5.77)	2.61(2.31~2.85)
		95% confidence interval	620~920	42~92	18~29	5.34~5.70	2.50~2.72
	60°	Average values(extent)	538(361~759)	88(28~128)	28(15~36)	5.62(5.02~5.99)	2.81(2.41~3.18)
		95% confidence interval	410~610	60~120	19~33	5.35~5.81	2.60~2.94
	90°	Average values(extent)	1002(424~1890)	104(34~175)	29(16~41)	5.73(5.24~6.15)	2.90(2.51~3.45)
		95% confidence interval	720~1280	65~142	21~33	5.52~5.9	2.61~3.12
Red shale	0°	Average values(extent)	1004(653~1555)	67(23~125)	23(12~38)	5.24(5.07~5.5)	2.72(2.42~2.87)
		95% confidence interval	800~1220	45~90	16~30	5.15~5.3	2.63~2.81
	30°	Average values(extent)	662(410~950)	85(26~134)	27(15~39)	5.39(5.03~5.68)	2.84(2.58~3.33)
		95% confidence interval	510~800	60~110	21~33	5.24~5.52	2.65~3.02
	60°	Average values(extent)	557(347~755)	102(35~160)	31(15~43)	5.64(5.2~6.0)	2.93(2.7~3.5)
		95% confidence interval	500~660	70~132	23~37	5.45~5.82	2.72~3.12
	90°	Average values(extent)	1100(779~1502)	119(56~180)	33(21~49)	5.78(5.4~6.11)	3.11(2.73~3.74)
		95% confidence interval	950~1250	94~144	24~38	5.57~5.91	2.82~3.34

도특성을 보였으며, 가장 낮은 강도는 β°=60에서 나타난다. 즉, 층리면의 수평축과 이루는 각도가 증가함에 따라 크기는 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 이는 경사각이 파단각과 일치할 때 강도가 최저가 됨을 알 수 있다 (Jaeger, 1960).

### 3.2 층리각도에 따른 간접 인장강도

Fig. 3은 흑색, 적색 셰일의 β°에 따른 간접 인장시험 결과이다. 사암이나 셰일, 기타의 성층암과 같이 층리가 존재하는 암석에서는 층리가 발달된 방향과 인장력이 작용하는 방향의 관계에 따라 인장강도는 매우 차이가 나며, 인장강도가 최저가 되는 대단히 약한 방향이 있다. 이 방향은

인장이 작용하는 방향과 층리면이 수직일 때 임을 시험을 통해 알 수 있다. Fig. 3에서 간접 인장강도는 β°=90에서 최대값이 발생하고, 0°에서 최소값이 발생하였다. 곡선 모양은 수평면에 대해 층리각도가 커짐에 따라 강도는 증가하였으며, Fig. 2의 일축 압축강도와 비교해서 다른 강도 특성임을 알 수 있다.

### 3.3 층리각도에 따른 수정 점하중강도

점하중강도시험은 현장에서 할 수 있는 간단한 역학시험 중의 하나로서 일축 압축강도를 추정하기 위해 쓰이는 간접 강도시험중 가장 많이 사용되는 시험이다. 일반적으로 점하중강도시험을 통하여 얻어지는 강도는 무수정

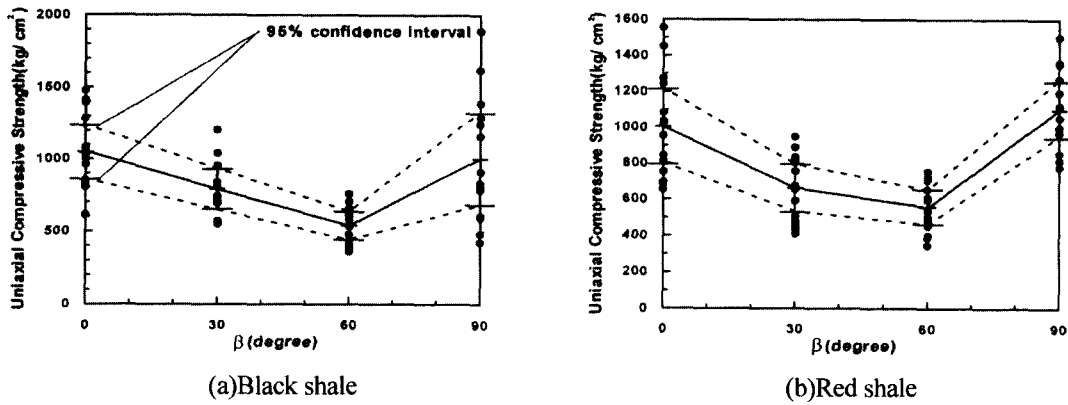


Fig. 2. Uniaxial compression strength of shales

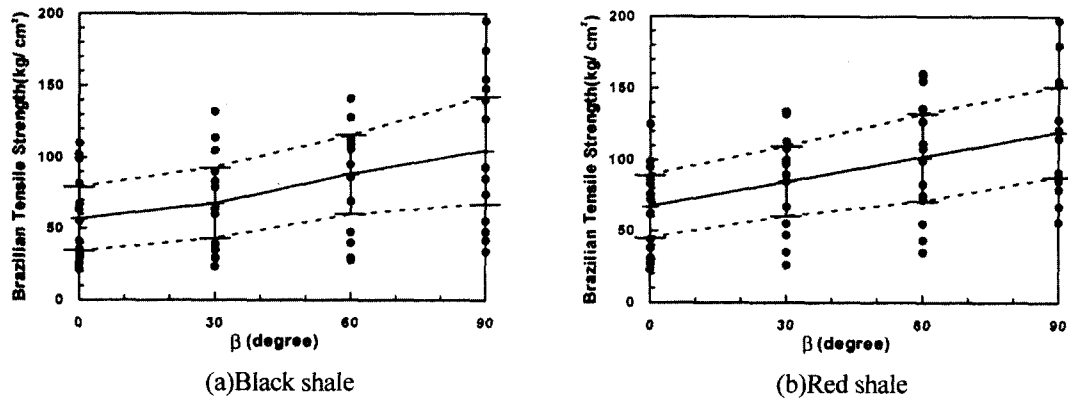


Fig. 3. Brazilian tensile strength of shales

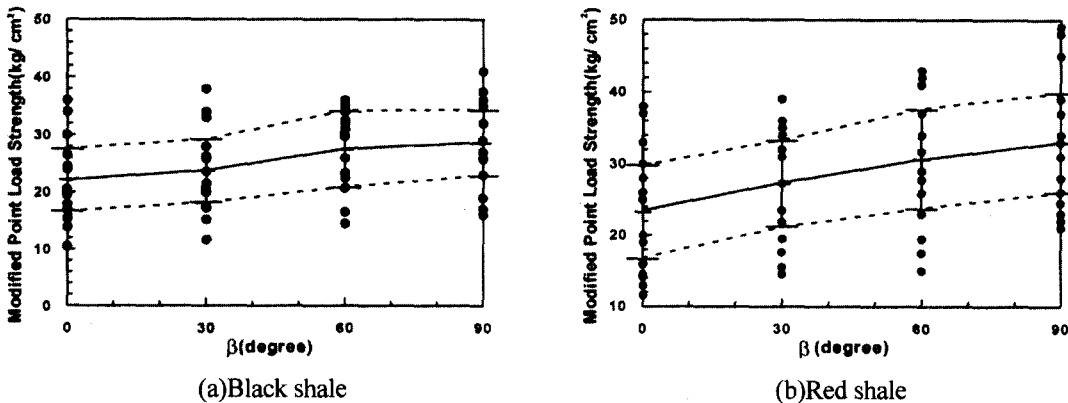


Fig. 4. Modified point Load strength of shales

점하중강도  $I_s$ 로 표시되며, 직경 50mm에 대한 시료의로 환산된 수정 점하중강도  $I_{s(50)}$ 을 얻어 일축 압축강도와 비교를 한다. 이때 점하중강도를 산정하는 식은 (1), (2)와 같다.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}, \quad D_e^2 = 4WD/\pi \quad (\text{축방향시험}) \quad (1)$$

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, \quad F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (2)$$

여기서,  $W$ 는 시료두께,  $D$ 는 시료직경,  $F$ 는 크기보정 계수, 지수  $m=2(1-n)$ 이다.  $n$ 은  $\log P - \log De^2$ 의 기울기이며 크기가 다른 동일한 암석에 대해서 실험을 통해 얻어지는 값이다. 본 연구에서는 크기보정계수 ( $F$ )를 ISRM에서 제안된 지수  $m=0.45$ 를 이용하여 산정하였다(ISRM, 1985). 파괴양상은 재하점 사이를 연결하는 직선을 포함한 면에서 깨어지는 것이 보통이다. Fig. 4는  $\beta^\circ$ 에 따른 흑색, 적색 셰일의 수정 점하중강도의 결과로서 간접 인장시

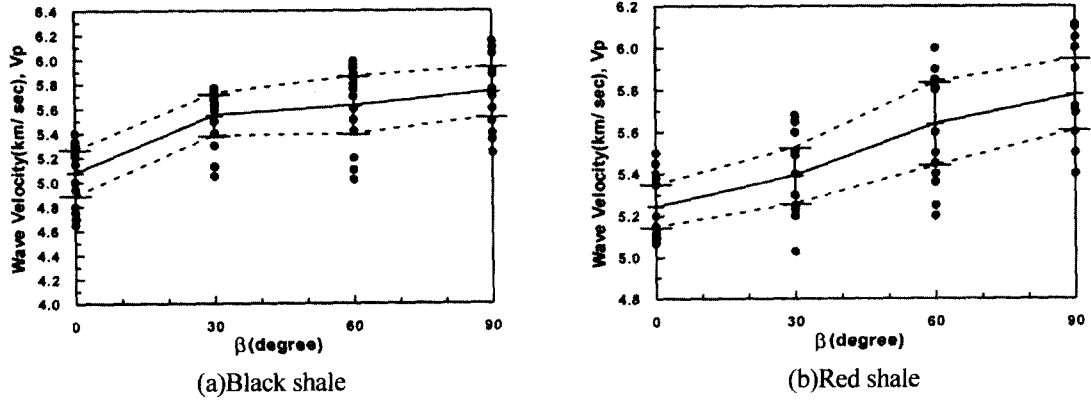


Fig. 5. Primary(P) wave velocity of shales

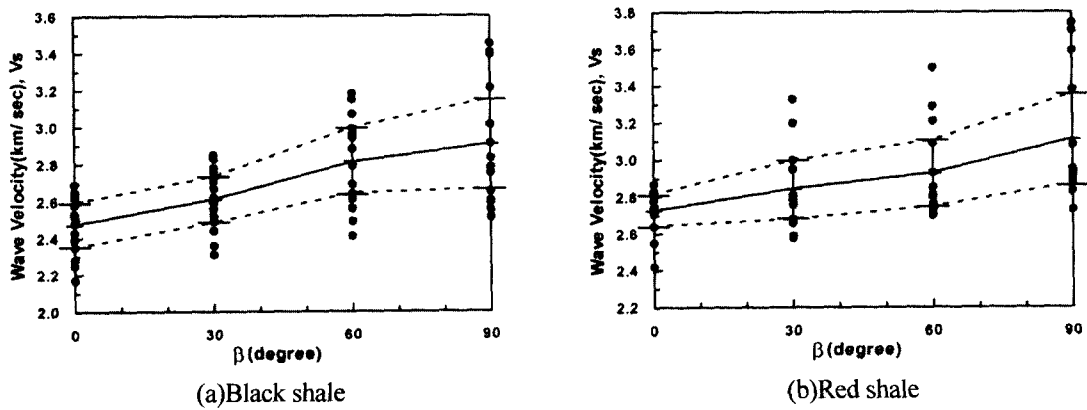


Fig. 6. Secondary(S) wave velocity of shales

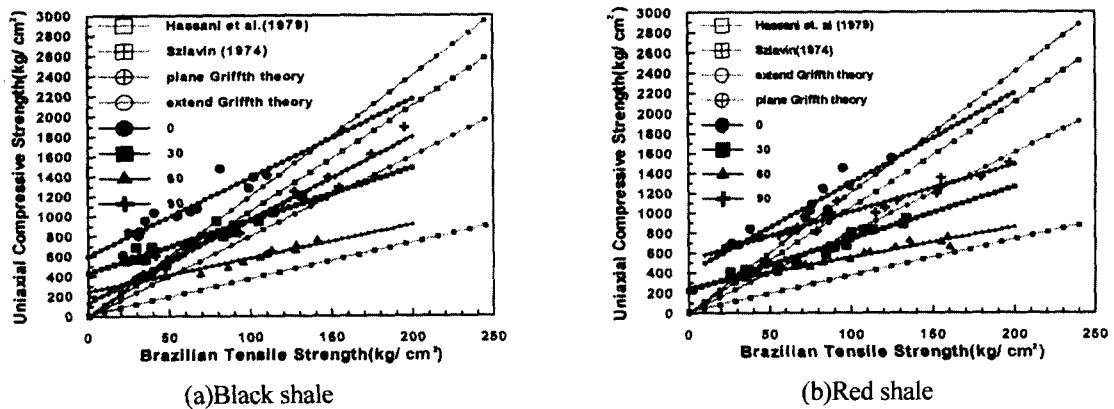


Fig. 7. Relationship between uniaxial compressive and Brazilian tensile strength

협과 비슷한 곡선모양을 보인다. 즉,  $\beta^\circ$ 가 커질수록 수정 점하중강도는 증가하였다.

### 3.4 층리각도에 따른 탄성파

일반적으로 탄성파속도는 암석의 종류, 조직, 밀도, 간극률, 이방성, 함수율 그리고 온도 등에 의하여 영향을 받

는다. Lama 와 Vutukuri(1978)에 의하면 이방성 암석은 층리의  $\beta^\circ=90$ 에 대한 탄성파속도와  $\beta^\circ=0$ 에 대한 탄성파속도가 다르다고 하였다. Fig. 5~6은 흑색, 적색 셰일의  $\beta^\circ$ 에 따른 P파, S파 속도를 나타낸 것이다. 흑색 및 적색 셰일 모두  $\beta^\circ=90$ 에서 탄성파속도가 가장 빠르며,  $\beta^\circ=0$ 에서 가장 느림을 알 수 있다. 그 이유는 직경방향으로 발달한 층리가 전달되는 파를 방해하기 때문으로 사료된다.

#### 4. 강도정수들의 상관성 분석

일축 압축강도는 이방성의 형태를 결정하는 중요한 변수이며, 암석의 강도분류를 위해 가장 널리 이용되고 있으나, 층리가 잘 발달된 퇴적암에서 강도를 평가하기에 적합한 암석코어를 채취하는 것은 대단히 어렵다. 이러한 경우 일축 압축시험 이외에 점하중강도시험, 간접 인장시험을 실시하여 일축 압축강도를 추정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 일축 압축강도를 간접적으로 추정하는 값을 제시하기 위해 일축 압축강도와 강도정수들의 상관성을 회귀분석을 통해 유도하였다. Table 3은 강도정수들간의 상관식을 나타낸 외국 자료로서 본 연구에서 구한 상관식과 각각의 식을 비교하였다.

##### 4.1. 일축압축강도와 간접인장강도

Hassani et al(1980), Szlavin(1974), Hobbs(1964)은 일축 압축강도와 간접 인장강도 사이의 경험식을 발표하였다. Hassani et al.의 식은 간접 인장, Szlavin, Hobbs의 식은 링인장시험을 통하여 결정된 것이다. 또한, 암석의 직접 인장강도와 일축 압축강도의 특정한 관계를 예측하는 2차원 상의 plane Griffith이론에서 최소주응력을 0으로 두면, 일축 압축응력은 직접 인장강도의 8배가 된다. 또한, plane Griffith이론이 3차원으로 확장된 extended Griffith이론에서는 최소 주응력과 중간 주응력을 0이라면, 일축 압축강도는 인장강도의 12배가 된다. Fig. 7은 본 연구에서 구한 간접 인장강도와 일축 압축강도의 상관그래프로서 여러 외국식과 비교하였다. 흑색 셰일의 경우 0°, 90°는 Hassani et. al의 식, 30°는 plane Griffith이론, 60°는 Szlavin의 식을 따르는 경향을 보였다. 적색 셰일의 경우 0°는 Hassani et. al의 식, 30, 90°는 plane Griffith이론, 60°는 Szlavin의 식을

Table 3. Correlations for the strength parameters

Refrence	Strength parameters	Predictive equation
Hassani et al.	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Brazilian tensile strength( $\sigma_t$ )	$\sigma_c = 10.5\sigma_t + 1.2$
Szlavin	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Ring tensile strength( $\sigma_t$ )	$\sigma_c = 3.6\sigma_t + 15.2$
Hobbs	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Ring tensile strength( $\sigma_t$ )	$\sigma_c = 2.84\sigma_t - 3.34$
plane Griffith	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Direct tensile strength( $\sigma_t$ )	$\sigma_c = 8\sigma_t$
extended Griffith	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Direct tensile strength( $\sigma_t$ )	$\sigma_c = 12\sigma_t$
Broch and Franklin	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 24I_{s(50)}$
Bieniawski	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 23I_{s(50)}$
Hassani et al.	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 29I_{s(50)}$
D'Andrea	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 15.3I_{s(50)} + 16.3$
Franklin and Chandra	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 16I_{s(50)}$
Wyllie	Uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_c = 15I_{s(50)} \sim 50I_{s(50)}$
ISRM	Direct and Brazilian tensile strength( $\sigma_t$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_t = 1.25I_{s(50)}$
Peng	Direct tensile strength( $\sigma_t$ )-Point load strength( $I_s$ )	$\sigma_t = 2I_s$
Brook	Direct tensile strength( $\sigma_t$ )-Point load strength( $I_{s(50)}$ )	$\sigma_t = 1.5I_{s(50)}$

Table 4. Relationship between uniaxial compressive( $\sigma_c$ ) and Brazilia tensile strength( $\sigma_t$ ).

Rock types	$\beta^\circ$	Predictive equation	R-squared( $R^2$ )
Black shale	0°	$\sigma_c = 7.84 \times \sigma_t + 601.21$	0.86
	30°	$\sigma_c = 5.27 \times \sigma_t + 432.67$	0.90
	60°	$\sigma_c = 3.35 \times \sigma_t + 244.57$	0.94
	90°	$\sigma_c = 8.31 \times \sigma_t + 134.24$	0.97
Red shale	0°	$\sigma_c = 8.95 \times \sigma_t + 405.92$	0.89
	30°	$\sigma_c = 5.20 \times \sigma_t + 221.33$	0.92
	60°	$\sigma_c = 3.03 \times \sigma_t + 250.54$	0.94
	90°	$\sigma_c = 4.76 \times \sigma_t + 532.19$	0.91

Table 5. Relationship between uniaxial compressive( $\sigma_c$ ) and modified point load strength( $I_{s(50)}$ )

Rock types	$\beta^\circ$	Predictive equation	R-squared( $R^2$ )
Black shale	0°	$\sigma_c = 32.42 \times I_{s(50)} + 328.42$	0.87
	30°	$\sigma_c = 23.96 \times I_{s(50)} + 220.49$	0.91
	60°	$\sigma_c = 18.29 \times I_{s(50)} + 36.93$	0.90
	90°	$\sigma_c = 52.60 \times I_{s(50)} - 497.97$	0.89
Red shale	0°	$\sigma_c = 30.66 \times I_{s(50)} + 292.82$	0.91
	30°	$\sigma_c = 21.57 \times I_{s(50)} + 75.67$	0.94
	60°	$\sigma_c = 13.38 \times I_{s(50)} + 147.86$	0.94
	90°	$\sigma_c = 20.86 \times I_{s(50)} + 414.10$	0.84

따르는 경향을 보였다. Table 4는 본 연구에서 구한 층리에 따른 세일의 간접 인장강도와 일축 압축강도의 상관식과 상관도를 나타낸 것이다. 상관도는 0.86이상으로 나타났다.

#### 4.2. 일축압축강도와 수정 점하중지수

일축 압축시험은 실내시험에만 국한되는 제약성을 갖고 있다. 이러한 점을 고려하여 실험실에서 성형된 암석 시험편 뿐만 아니라 현장에서 비성형 암괴 상태로 신속하고 경제적으로 점재하시험을 수행, 원위치 암반의 공학적 강

도분류를 실시하는데 필요한 압축강도를 추정하는 지표로 이용할 수 있도록 점재하시험법을 발전시켰다. Broch와 Franklin(1974)등은 이방성 암석에서 일축 압축강도와 50mm크기의 코아를 갖는 수정 점재하강도지수에서 구한 관계식을 발표하였으며, Bieniawski(1975)는 직경 54mm 코아를 이용해서 점재하시험과 Broch와 Franklin등의 이론을 검토해서 일축 압축강도는 수정 점재하강도의 23배에 해당된다고 하였다. Hassani(1980)등은 50mm크기의 코아부터 다른 크기를 갖는 여러 종류의 코아까지 많은 수의 암석시료에서 점재하시험을 수행, 크기보정차트를 개발하였다. 이 크기보정차트에서 수정 점재하강도지수를

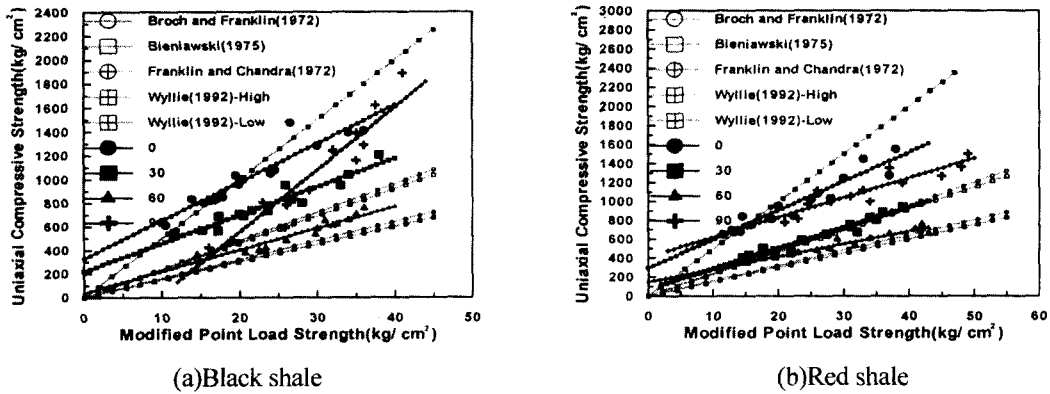


Fig. 8. Relationship between uniaxial compressive and modified point load strength

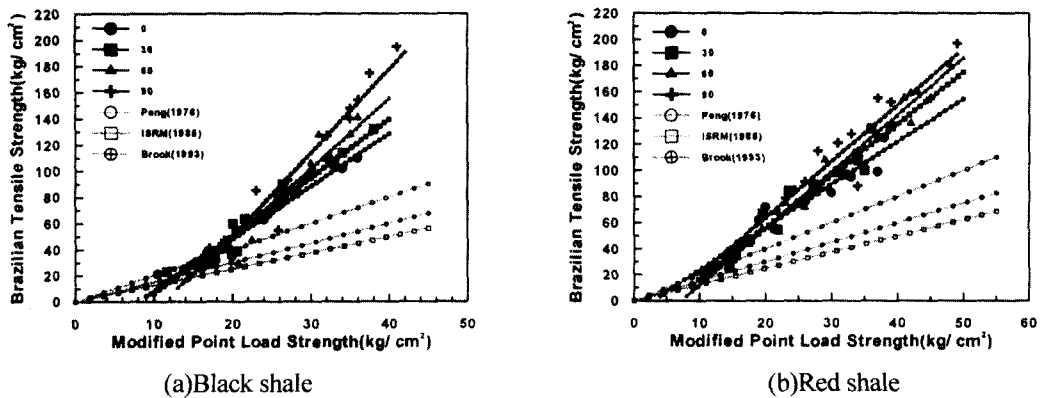


Fig. 9. Relationship between Brazilian tensile and modified point load strength

Table 6. Relationship between Brazilian tensile( $\sigma_t$ ) and Modified point load strength( $I_{s(50)}$ )

Rock types	$\beta^\circ$	Predictive equation	R-squared( $R^2$ )
Black shale	0°	$I_{s(50)} = 4.02 \times \sigma_t - 32.20$	0.95
	30°	$I_{s(50)} = 4.42 \times \sigma_t - 37.36$	0.96
	60°	$I_{s(50)} = 5.36 \times \sigma_t - 59.04$	0.92
	90°	$I_{s(50)} = 6.37 \times \sigma_t - 77.80$	0.94
Red shale	0°	$I_{s(50)} = 3.27 \times \sigma_t - 9.02$	0.94
	30°	$I_{s(50)} = 3.96 \times \sigma_t - 22.99$	0.93
	60°	$I_{s(50)} = 4.34 \times \sigma_t - 31.40$	0.97
	90°	$I_{s(50)} = 4.30 \times \sigma_t - 22.17$	0.89

구하고, 이를 통해 일축 압축강도는 수정 점재하강도지수의 29배에 달한다고 발표하였다. 한편, 비등방 이암에서 일축 압축강도는 점하중강도의 16배인 것으로 밝혀졌으며(Franklin 와 Chandra, 1972), Wyllie(1992)는 여러 종류의 비등방성 암석에서 일축 압축강도는 점하중강도의 15~50배 범위에 있다고 주장하였다. 따라서 점하중강도로 일축압축강도를 추정하기 위해서 제안된 상관식들을 사용하기 전에 대상 암석에 대하여 기존의 제안식들이 신뢰성 있게 사용될 수 있는지를 검토하여야 된다.

Fig. 8에서 본 연구에서 구한 일축 압축강도와 수정 점재하강도 사이의 상관관계로서 여러 외국식과 비교한 것이다. 셰일의 일축 압축강도와 수정 점하중강도의 모든 상관식은 Wyllie가 제시한 15~50배 범위에 들었다. 아래의 Table 5에서는 본 실험에서 구한 셰일의 일축 압축강도( $\sigma_c$ )와 수정 점하중강도( $I_{s(50)}$ )의 상관식과 상관도를 나타내었다. 상관도는 0.84이상의 값을 나타내었다.

#### 4.3. 간접 인장강도와 수정 점하중강도

수정 점재하강도와 간접 인장강도의 상관 관계를 여러 외국식과 비교해서 Fig. 9에 나타내었다. ISRM(1985)에서 제안한 간접 인장강도나 직접 인장강도는 점하중강도의 약 1.25배라고 제안하였으며, Peng(1976)은 점하중을 받는 암석시료의 응력분포에 대한 유한요소 해석을 실시하여 파괴면내에서 접선인장력의 합은 점하중의 2배 정도임을 발표하였다. Brook(1993)은 직접 인장강도는 점하중강도의 1.5배인 것으로 나타내었다. 그러나, 본 연구에서는 외국 연구자료들의 제안된 식보다 기울기가 크게 나왔다. 이는 위의 ISRM, Peng, Brook가 제시한 식은 이방성을 고려하지 않은 식이기 때문이다. Table 6는 간접 인장강도와 점하중강도와의 상관식과 상관도를 나타낸 것이다. 상관도는 0.89이상의 값을 나타내었다.

#### 5. 결론

흑색 및 적색 셰일을 채취하여 총리면의 각도( $\beta^\circ$ )에 따른 각종 물리적 시험과 역학시험을 실시하여 이방성을 파악하였다. 시험 결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 이방적 특성 중 일축 압축강도는 0, 90°에서 최고 강도를, 60°에서 최저 강도가 나타났다. 탄성과속도, 간접 인장강도와 수정 점하중강도는 90°에서 최대값이 발생하고, 0°에서 최소값이 발생하였다.
- (2) 일축 압축강도와 간접 인장강도의 상관관계에서 흑색 셰일의 경우 0, 90°는 Hassani et. al의 식, 30°는 plane Griffith이론, 60°는 Szlavin의 식을 따르는 경향을 보였다. 적색 셰일의 경우 0°는 Hassaniet. al의 식, 30, 90°는 plane Griffith이론, 60°는 Szlavin의 식을 따르는 경향을 보였다. 상관도는 0.86이상의 값을 나타내었다.
- (3) 일축 압축강도와 수정 점하중강도의 상관식에서 기울기는 Wyllie가 제시한 15~50배 범위에 들었다. 상관도는 0.84이상의 값을 나타내었다.
- (4) 간접 인장강도와 수정 점하중강도의 상관관계에서 ISRM, Brook, Peng이 제시한 식보다 기울기가 크게 나타났다. 이는 ISRM, Brook이 제시한 식은 이방성을 고려하지 않았기 때문이다. 상관도는 0.89이상의 값을 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 대학 분설연구소 과제(과제번호 97-005-E00 001)의 연구비를 지원받아 실시하였으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.



## 참 고 문 헌

1. 김영수, 이상복, 정성관(1995), "퇴적암 풍화도의 공학적 특성", 한국지반공학회지, 제 11권, 제4호, pp.63-74.
2. 김영수, 허노영, 서인식(1998), "퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구 (대구지역)", 한국지반공학회지, 제14권, 제4호, pp.5-15.
3. 허노영(1998), 퇴적암 지반 Tunnel의 비등방 탄소성 해석, 박사학위논문, 경북대학교.
4. 이영휘, 박영목, 김용준, 금병술(1998), "퇴적암의 풍화도에 따른 특성과 일축압축강도와 계반지수와의 상관관계". 토목학회 학술발표회 논문집(II) 토질/터널, 서울, pp.131-134.
5. 창우출판(1993), 암반역학과 계측해석, pp.120~125.
6. Jaeger, J. C.(1960), "Shear failure of anisotropic rocks.", Geol. Mag. 97, pp.65-72.
7. Bieniawski, Z.T.(1975), "Point-load test in geotechnical practice", Eng. Geol. Vol 9, No. 1, pp.1-11
8. Broch, E. and Franklin, J.A.(1972), "Point-load strength test", Int. J. Rock Mech & Min Sci., Vol. 9, No. 6, pp. 669-697.
9. ISRM(1979), "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and Slake-durability index properties", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, No.2, pp.141-156.
10. Lama, R.D. and Vutukuri, V.S.(1978), "Handbook on mechanical properties of rocks", Trans Tech. Publications, Vol.2, pp.35-37.
11. Szlavin, J.(1974), "Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 11, No. 2, pp.53-59.
12. Hassani, F.P., Scoble, M.J. and Whittaker, M.J.(1980), "Application of point-load index test to strength determination of rock and proposals for new size correction chart", Proc. 21st U.S Symp. pp. 543-564.
13. Hobbs, D.W.(1964), "Simple method for assessing uniaxial compressive strength of rock", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 1, No. 1, pp.53-59.
14. Brook, N.(1993), "The Measurement and Estimation of Basic Rock Strength", in Compressive Rock Engineering (edited by John A. Hudson), Vol. 3- I, Pergamon Press, pp.41-66.
15. Franklin, J. A. and Chandra, A.(1972), "The Slake-durability Test", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 9, pp.325-341.
16. ISRM(1985), "Suggested Methods for Determining Point Load Strength", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22. No. 2, pp.51-60.
17. Peng, S. S.(1976), "Stress Analysis of Cylindrical Rock Discs Subjected to Axial Double Point Load", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 13., pp.97-101.
18. Wylie, D. C.(1992), Foundations on Rock, Chapman & Hall, England, pp.54-56.
19. Amadei, B.(1982), The influence of rock-anisotropy in measurement of stresses in-situ, ph.d.thesis, university of california, berkeley, January.
20. Amadei, B.(1996), "Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock.", Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Geomech. Abstr., 33, pp.293-325

(접수일자 2000. 5. 4)