

# 忠南 靑陽郡 雲谷面 일원에 分布하는 片麻岩의 強度異方性 特性

— 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 關係를 中心으로 —

## The Anisotropic Mechanical Characteristics of the Metamorphic Rocks Distributed in the Samkwang-Mine Area, Cheongyang, Chungnam

배대석(Bae, Dae Seok)\*  
송무영(Song, Moo Young)  
김경수(Kim, Kyung Su)\*

\* 韓國原子力研究所 立地環境室  
忠南大學校 自然科學大學 地質學科

### 요 약

일반적으로 모든 岩石은 외전상의 특징과 무관하게 어느 정도의 구조적 및 역학적 異方性을 갖고 있다. 點載荷強度指數(point-load strength index :  $I_p$ )를 이용한 一軸壓縮強度(uniaxial compressive strength, UCS :  $\sigma_c$ )의 추정시, 이들 두 값은 암석이 갖는 脆弱面구조의 방향에 따라서 그 변화 양상에 차이가 있다. 일반적으로 載荷의 방향과 脆弱面이 이루는 각이 직교 및 평행일 때  $\sigma_c$ 는 최대치를 나타내며, 약  $30^\circ \sim 60^\circ$  범위에서 값의 변화가 심하다. 이에 대하여,  $I_p$ 의 경우 脆弱面의 방향에 따라 強度異方性 현상은  $\sigma_c$ 의 경우와 구별된다. 수직 방향으로 채취한 시추 코아에서 수평 방향으로 측정한 直徑點載荷強度指數(diametral point-load strength index :  $I_{pd}$ )는 코아의 軸방향과 脆弱面에 대한 法線과 이루는 각( $\beta$ )이  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 로 증가함에 따라 비례하여 증가하는데 반해서, 軸點載荷強度指數(axial point-load strength index :  $I_{pa}$ )는 감소하는 경향을 보인다.

靑陽郡 雲谷面 일원에 분포하는 縞狀片麻岩에서  $\sigma_c$ 와  $I_p$ 의 관계는 각  $\beta$ 가  $0^\circ \sim 40^\circ$  구간에서는  $\sigma_c$ 와  $I_{pd}$ ,  $40^\circ \sim 90^\circ$  구간에서는  $\sigma_c$ 와  $I_{pa}$ 가 각각 양호한 상관관계를 보여준다. 또한 상관비( $K = \sigma_c / I_p$ )는 약 13정도로서 일반적으로 적용되는 比, 24와 상당한 차이가 있다. 이러한 현상은 縞狀片麻岩의 구조적 및 역학적 異方性 특성으로 인한 결과라고 판단된다. 한편 脈岩類에서, K가 약 23정도로서 일반적인 比 24에 상당히 접근한다. 따라서, 異方性 구조가 뚜렷한 암석에서 상관비 24는 항상 적용할 수는 없으며 一軸壓縮強度試驗과 병행 실시하여 적용하는 것이 바람직하다.

**Abstract :** In geological media with anisotropic properties, the strength anisotropy in intact rock is the most important issue in engineering aspects.

Point-load(P/L) strength test designed to estimate the uniaxial compressive strength( $\sigma_c$ ) can be used to evaluate the anisotropic strength characteristics of rocks. The relationship between  $\sigma_c$  and P/L strength indices( $I_p$ ), obtained from the banded gneisses distributed in the Cheongyang area, varies depend mainly on the

dip angle ( $\beta$ ) of foliation. The axial P/L strength indices( $I_{sa}$ ) decreases with the increment of  $\beta$ , whereas diametral P/L strength indices( $I_{sd}$ ) increase with it. However, the  $\sigma_c$  decreases with the increments of  $\beta$  below about  $40^\circ$ , but it increases with the increments of  $\beta$  over about  $40^\circ$  in general.

The correlation between  $\sigma_c$  and  $I_s$  suggests that  $\sigma_c$  is related to the  $I_{sa}$  within low angle ( $\beta < 40^\circ$ ) and the  $I_{sd}$  within high angle ( $\beta > 40^\circ$ ), respectively. The ratios of  $I_s$  to  $\sigma_c$  are obtained as 11 to 14 in the the gneisses in the study area. The ratio of 24, which is generally adopted value, cannot always be truthworth to the gneisses in the study area. The ratio for the dykes, however, show a good correlation as 21 to 24.5 and, the value of 24 can be used for a homogeneous and isotropic materials such as dykes.

## 序 言

암석의 物性を 나타내는 基本物性(index properties) 중에서 強度는 공학적 측면에서 중요한 요소이며, 一軸壓縮強度는 이러한 측면에서 암석의 공학적 분류를 위해 널리 이용되어 왔으나 시편의 정형시 주의가 필요하고 실험실에 국한되는 제약성이 있다. 一軸壓縮強度와 연관시킬 수 있는 시험으로서 빠르고 현장에서 쉽게 이용 가능하고 보다 신뢰성있는 強度指數를 표현하기 위한 노력으로 點載荷強度試驗法(point-load strength test method)이 고안되어 현재 널리 쓰여지고 있으며, 시험결과에 대한 정확성과 신뢰성 증대를 위하여 자료처리 분야에 많은 연구가 수행되었다.

點載荷強度시험은 脆性암석의 引張強度를 측정하기 위한 간접적인 방법으로 사용되는 Brazilian test(ASTM, 1985)의 線荷重(line-loading)에 의한 시험과는 구별된다.<sup>1)</sup> 1950년 중반부터 이용되어 온 點載荷強度시험은 載荷地點(loading points) 사이에서 선명한 引張破碎面이 생성되기 때문에 신뢰성있는 一軸壓縮強度의 예측을 가능하게 한다.<sup>2,3)</sup> 引張破碎面に 직교하는 應力은 破碎面상의 모든 위치에서 引張應力이지만 이 引張應力은 載荷방향에서의 壓縮應力에 수반하여 발생한다. 이러한 간접시험방법은 생성된 引張應力보다 훨씬 더 큰 壓縮성분의 존재가 가능하므로, 실제로 간접引張시험은 직접引張시험에 의한 결과보다 더

낮은 값을 나타내는 것이 일반적이다. 그러나 指數 파악을 목적으로 하는 強度指數에의 적용에 있어서는 중요한 역할을 한다. 點載荷시험에 의한 強度는 加壓點간의 거리(D)의 제곱에 대한 載荷重(P)의 비로 표시되며,<sup>2)</sup> 시편의 형태(shape) 및 크기(size)에 제약을 받지만 실제로 시편의 모양(geometry)은 強度에 영향을 미치지 않는다.<sup>4,5,6)</sup>

點載荷強度시험에 관한 연구는 1960년 이후 계속 되어졌는데 點載荷強度시험방법,<sup>4)</sup> 軸點載荷시험시 코어 시편(core disc specimen)내 應力분포해석,<sup>7)</sup> 암석시편의 크기 및 形態效果(size and shape effect)보정,<sup>6,8,9)</sup> 點載荷強度시험을 이용한 強度異方性(strength anisotropy)특성,<sup>5,10)</sup> 습수비에 따른 點載荷強度指數의 변화,<sup>11)</sup> 強度指數 분류,<sup>12,13,14)</sup> 一軸壓縮強度, 引張強度 및 三軸壓縮強度의 추정,<sup>15)</sup> 點 및 線載荷 시험에 의한 引張強度와 強度異方性 연구,<sup>16)</sup> 點載荷強度 異方性和 암석내 葉理 발달 정도에 따른 영향,<sup>17)</sup> 등의 분야에 대하여 연구가 진행되었다.

본 연구의 목적은 이러한 點載荷시험의 시험방법, 이론적 배경 및 자료처리에 관한 기존 문헌을 토대로 연구지역에 분포하는 片麻岩類에 대하여 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 상관관계를 밝히고, 또한 암석에서 흔히 존재하는 強度異方性에 대한 특성을 구명하여 一軸壓縮強度와의 상관관계에 있어서 點載荷強度指數의 적용시 문제점을 제시하고자 한다.

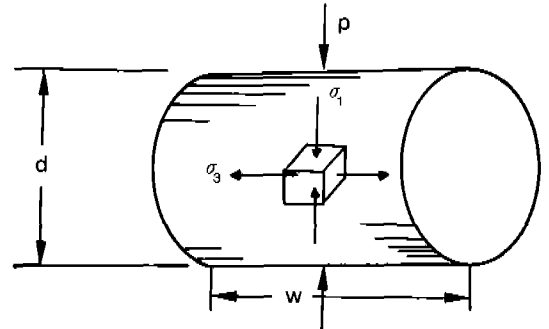
## 研究方法

### 理論的背景

脆性암석에 대한 가장 단순한 破壞理論을 구하기 위하여 세립, 균질 시편과 이 시편의 크기와 형태의 일관성을 유지한 상태에서 물체의 破壞舉動을 고려하여야 한다. 이러한 암석에서는 強度異方性 현상은 없으며 一軸壓縮強度는 一軸引張強度( $\sigma_t$ )의 약 10배까지 달한다.<sup>15,18)</sup> 脆性물체에 대한 破壞理論은 裂隙生成理論(fracture initiation criterion)의 이론적 확장으로 예견할 수 있다. 일반적으로 引張破碎(tensile rupture)의 가장 단순한 형태는 최소主應力( $\sigma_3$ )이 물질의 一軸引張強도와 동일할 때 발생하는데, 純引張破壞가 일어날 때 최대主應力( $\sigma_1$ )과 최소主應力の 관계는  $\sigma_1 \leq -\sigma_3$  때 발생함을 의미한다.<sup>18)</sup>

點載荷強度시험의 역학적 기본개념은 두 加壓點에서 壓縮力(point-load: P/L)을 가하여 이에 직교하는 방향으로 引張應力을 유발함으로써 암석의 引張破壞를 유도하는 것이다. 이러한 현상은 Brazilian test의 線荷重에 의한 破壞理論과 거의 유사하다.<sup>19)</sup> 직경 d, 두께(혹은 길이) W의 코아 시편에 點荷重P를 직경방향으로 載荷할 때(Fig. 1), 點載荷強度指數( $I_s$ )는 載荷重(P)에 대한 加壓點간의 거리 제곱의 비( $P/d^2$ )와 같이 단순화하여 적용할 수 있다.<sup>2,4,20)</sup> 시편의 중심에서 載荷방향의 壓縮應力과 수평 引張應力の 비는 3:1이며,<sup>3)</sup> 이때 발생하는 脆性破壞에 대한 破壞包絡線의 형태는 Griffith 理論에 의해 설명된다. 一軸引張強度로 표시되

는 Griffith의 破壞理論에서 최소主應力( $\sigma_3$ )이 0이고, 최대主應力( $\sigma_1$ )이 一軸壓縮強度( $\sigma_c$ )일 때 一軸壓縮強度에 대한 一軸引張強도의 비는  $8(\sigma_c = 8\sigma_t)$ 로 예측되며,<sup>3,21)</sup> 이 수치는 一軸壓縮強度에 의한 一軸引張強度를 예측하기 위하여 點載荷시험을 이용할 경우 최소치이다. 그러나 이 수치는 항상 일정한 값이 될 수 없으며 대부분의 암석에서는 10~50의 범위를 나타내고 있다.<sup>22)</sup>



Max. principal stress:  $6P/dW$  Min. principal stress:  $-2P/dW$

Fig. 1. Stresses induced at the center of a disc specimen subjected to point-loading across a diameter.

### 試片準備

軸 및 直徑點載荷시험과 一軸壓縮強度시험을 수행하기 위한 시편은 忠南 靑陽郡 雲谷面 三光鑛山 일원에 위치하는 시추공에서 채취한 코아 중 縞狀片麻岩을 중심으로 가능한한 균열이 없는 구간을 선택하였다. 強度指數를 대표할 수 있는 신뢰성을 확보하기 위하여 가능한 많은 시편수를 이용하여야 하는데, 연구

Table 1. Number of test specimen by rock types.

Rock types	$I_{sa}$	$I_{sd}$	$\sigma_c$	Thin sec.	Remark
Banded gneiss	11	13	10	2	
Talc gneiss	5	5	2	2	
Dykes	5	5	4	—	
Total	21	23	16	4	

\* $I_{sa}$  : Axial point-load strength test

$I_{sd}$  : Diametral point-load strength test

$\sigma_c$  : Uniaxial Compressive strength(UCS) test

지역에서는 軸 및 直徑點載荷시험용으로 각각 21, 23개, 一軸壓縮強度시험용 16개를 이용하였으며, 암석의 종류를 보다 정확히 구분하기 위하여 암종에 따라 대표적인 시료를 각각 2개씩 채취하여 현미경관찰을 실시하였다(Table 1). 또한 點載荷強度指數 및 一軸壓縮強度의 상호 비교를 위한 시료의 含水效果의 일관성 유지를 위해 모든 시료는 채취시부터 시험정형 및 실내시험시까지 공기중 乾燥상태(약 1개월)를 유지하였다.

### 資料處理

크기效果(size effect) : 시험의 크기가 點載荷強度에 미치는 영향은 Reichmuth(1968)에 의해 제안된 引張強度를 구하기 위한 식에 반영하였으며, Broch and Franklin(1972)은 Reichmuth의 식을 단순화하여

$$I_s = P/d^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $I_s$  : 強度指數 P : 載荷重  
d : 載荷點간의 거리

와 같이 수정하여 시험한 결과, 크기효과가 뚜렷하였는데, 직경이 작은(30mm 이하) 시험에서 변화가 심하였으며, 표준시험의 크기로서 직경 50mm의 強度指數를 제안하여 크기보정표를 작성하였다.<sup>4)</sup> 시험의 크기가 클수록 強度指數의 크기는 작아진다는 사실은 명백하며, 표준시험(50mm, dia)에 대한 보정은 直徑點載荷시험 및 軸點載荷시험에 있어서 각각

$$I_s = (0.2717 + 0.01457d) I_s(d), \quad (d < 55\text{mm}) \dots\dots (2)$$

$$I_s = (0.7540 + 0.0058d) I_s(d), \quad (d > 55\text{mm}) \dots\dots (3)$$

과 같이 각각 정리할 수 있다.<sup>6)</sup> 식 (2), (3)의 크기효과에 대한 수정안으로서 Hassani(1980)는 新크기보정표(new size correction chart)를 다음과 같이 제안하였다.<sup>15)</sup>

$$\text{Log } I_s(50) = 0.256 - 1.008 \exp(-0.0274d) + \text{Log } I_s(d) \dots\dots\dots (4)$$

식 (2), (3) 및 (4)를 비교하면, 點載荷強度指數  $I_s$ 는 표준시험의 크기 ( $d=50\text{mm}$ )를 기준

으로 하여,  $d=50\text{mm}$  이하의 시험에서 Broch and Franklin의 보정에 의한  $I_s(50)$ 이,  $d=50\text{mm}$  이상의 시험에서는 Hassani에 의한  $I_s(50)$ 이 각각 상대적으로 크게 나타난다. 한편, ISRM(International Society of Rock Mechanics, 1985)에서 제안한 크기보정법은 크기보정 상수(F)를 이용하여

$$I_s(50) = F \times I_s \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $F = \sqrt{(De/50)}$  De : 유효직경  
와 같이 보정, 제안하였다.<sup>2)</sup> 식 (5)는 식 (2), (3) 및 (4)와 비교해 볼 때 직경 40~60mm 범위의 시험에서  $I_s(50)$ 에 대한 오차가 5% 이내의 범위에 속한다. 軸點載荷시험의 경우도 전술한 방법과 같이 크기효과에 대한 보정을 할 수 있다.

形態效果(shape effect) : 直徑點載荷시험시 시험의 형태효과에 대하여 코아의 직경(d)과 길이(W)에 대한 비(W/d)가 약 1.0 이상의 시험에서는 強度指數의 변화가 거의 없음을 발견하였으며, 시험의 길이는 1.4d가 적당하다.<sup>4)</sup> 한편, Peng(1976)은 코아 시험내 應力분포 해석을 위한 軸對稱有限要素分析(axisymmetric finite element analysis method)에서 W/d가 1 주위에서 안정되는 양상을 보인다고 주장하였다.<sup>7)</sup> Hassani(1980)도 또한 이와 유사한  $W > d$ 의 시험형태를 유지하여 형태효과에 대한 영향을 최소화하였다.<sup>15)</sup>

軸點載荷시험은 直徑點載荷시험에 의한 強度指數와 대비하기 위한 시험 방법으로서, 點載荷強度指數는 直徑點載荷시( $d=50\text{mm}$ )의 強度指數값으로 정의된다. Forster(1983)는 點載荷強度指數를 直徑點載荷強度指數로 보정할 경우는 동일 직경의 표준 軸點載荷強度指數로 전환한 다음, 다시 표준 點載荷強度指數로 보정하였다. 즉  $I_{sm}(50)$ 은

$$I_{sm}(50) = (0.2717 + 0.01457d) 0.1723 \exp(1.5987W/d) I_{sm}, \quad (d < 55\text{mm}) \dots\dots\dots (6)$$

$$I_{sm}(50) = (0.7540 + 0.0058d) 0.1723 \exp(1.5987W/d) I_{sm}, \quad (d > 55\text{mm}) \dots\dots\dots (7)$$

식 (6), (7)로부터 W/d가 0.5~10 범위내의 코아시험에 대한 點載荷強度指數는 수정 가능

하지만, 예상 최대 오차는 15%정도이며 W/d 비가 낮을 수록 예상오차는 커진다.<sup>6)</sup>

본 연구에서, 點載荷強度시험 측정 결과처리는 크기 및 형태효과의 보정과 軸 및 直徑點載荷強度指數의 상호 비교에 의한 強度異方性 특성을 구명하기 위하여 식 (2), (3), (6) 및 (7)을 이용하여 點載荷強度試驗 측정치를 보정하였다.

### 試片整形 및 試驗機器

전술한 형태 및 크기효과를 최소화하기 위하여 點載荷強度 시험용 코아의 직경과 길이의 비를 가능한 한 일정하게 유지하였다(Table 2). 한편, 一軸壓縮強度 시험용 시료는 ASTM D-2938의 규정<sup>23)</sup>에 따라 정형하였는데, 應力集中 및 偏心を 방지하기 위하여 시편의 양 접측면을 연마하여 허용 오차를 0.1mm 이하로 유지하였으며 또한, 加壓面上에서 응력집중 현상을 줄이기 위하여 加壓板 상하부에 球座(spherical seat)와 접측면 사이에 濾過紙를 이용하였다.

點載荷強度시험을 위한 시험기기는 IMPERIAL PLF-10을 사용하였으며, 一軸壓縮強度 시험기기는 유압 JACK TK-100을 이용하였다.

Table 2. Size of test specimen.

Test types	Size	Remark
Axial P/L Test	W=0.9d~1.1d	ASTM D-2938 <sup>23)</sup>
Diametral P/L Test	W≥1.5d	
UCS Test	L=2.0d~2.5d	

### 試驗結果

軸 및 直徑點載荷強度指數 및 一軸壓縮強度에 대한 측정치로부터 보정한 결과를 이용하여 強度異方性 특성과 각 측정치 사이의 상관관계를 분석하였으며 또한, 軸點載荷시험시 발생하는 破碎裂隙의 발달 방향을 葉理 발달 방향과 연관시켜 연구지역에 분포하는 암석의 역학적 이방성 특성을 구명하였다.

### 縞狀片麻岩

縞狀片麻岩類로 분류한 암종들은 黑雲母縞

Table 3. P/L strength index and UCS of the banded gneiss.

Sample NO.	P/L strength index				UCS		Remarks
	$I_{sa}$ (MPa)	$I_{sd}$ (MPa)	$I_a$	$\beta$ (°)	$\sigma_c$ (MPa)	$\beta$ (°)	
1- 6	5.5	3.3	1.7	37	73.7	35	
10	2.7	3.2	0.8	55	49.3	30	
185	6.1	7.0	0.9	50	89.4	40	
189	6.2	10.3	0.6	65	—	—	
2- 20	10.6	6.7	1.6	42	52.5	42	
24	8.1	6.9	1.2	49	92.3	49	
33	8.9	6.0	1.5	33	83.7	43	
37	—	9.8	—	56	140.7	56	
51	10.7	5.6	1.9	20	124.4	20	
60	5.0	5.9	0.8	45	—	—	
85	3.0	4.6	0.7	38	84.3	35	
90	—	7.8	—	47	111.8	47	
100	4.2	2.8	1.5	35,25	—	—	
Mean	6.5	6.1			85.4		
Median	6.1	6.0			84.0		

\* $I_{sa}$  : Axial point-load strength index

$I_{sd}$  : Diametral point-load strength index

$I_a$  : P/L strength anisotropy index( $I_{sa}/I_{sd}$ )

$\beta$  : Dip angle of the weakness plane(gneissosity)

狀片麻岩, 角閃石縞狀片麻岩 및 眼球狀片麻岩으로 이루어지며, 본 역학시험에 있어서는 眼球的 크기가 0.5mm 이하의 작은 형태인 眼球狀片麻岩은 縞狀片麻岩類로 간주하였다. 軸點載荷強度指數 값은 2.7~10.7 MPa의 범위로서 (Table 3), 최소치 2.7은 시편의 風化로 인한 것으로 판단된다. 軸點載荷強度指數의 평균 및 중앙값은 각각 6.5, 6.1MPa이다. 直徑點載荷強度指數값은 2.3~10.3 MPa이며, 평균 및 중앙값은 각각 6.1, 6.0MPa로서 거의 동일한 값을 나타낸다. 一軸壓縮強度는 49.3~140.7MPa의 넓은 범위를 보이며, 평균 및 중앙값은 각각 85.4, 84MPa로서 근소한 차이를 나타낸다.

### 滑石片麻岩

소위 滑石片麻岩은 片麻岩이 열수변질에 의해 滑石광체가 배태된 구간에서 채취한 시편으로서 약간의 片麻구조가 보이기도 한다. 軸點載荷強度指數는 2.1~4.6MPa로서 매우 낮은 범위를 나타내며 평균 및 중앙값은 각각 3.3,

3.5MPa로서 비교적 유사한 값을 보여준다. 直徑點載荷強度指數는 1.6~2.7MPa로서 軸點載荷強度指數와 비슷한 범위에서 나타나며 평균 및 중앙값이 2.7MPa로 일치하였다.

一軸壓縮強度시험은 2개 실시하였는데 각각 34.6, 39.6 MPa이며, 평균 37.1MPa로서 일반적인 片麻岩類의 強度 범위(50~200MPa)<sup>24,25,26)</sup>보다 훨씬 낮은 값을 보이는데 이는 滑石성분의 영향에 기인하는 것으로 판단된다(Table 4).

### 脈岩類

脈岩類는 鹽基性 및 酸性 脈岩으로 구분되며 鹽基性 脈岩에서 軸點載荷強度指數는 4.6~7.6 MPa의 범위로서, 평균 및 중앙값은 6.2MPa로서 동일한 값을 보여준다. 直徑點載荷強度指數는 5.0~8.3MPa로서 軸點載荷強度指數의 범위와 비슷하며, 평균 및 중앙값은 각각 6.8MPa 및 7.0MPa로서 거의 비슷한 값을 나타낸다. 一軸壓縮強度는 3개의 시편에서 96.9~160.6 MPa 범위로 나타났으며, 평균 137.5 MPa로

Table 4. P/L strength index and UCS of the talc gneiss.

Sample NO.	P/L strength index				U C S		Remarks
	$I_{sa}$ (MPa)	$I_{sd}$ (MPa)	$I_a$	$\beta(^{\circ})$	$\sigma_c$ (MPa)	$\beta(^{\circ})$	
1-145	3.0	2.4	1.3	52	39.6	52	
150	4.6	3.7	1.2	—	—	—	
170	3.5	2.7	1.3	32	34.6	30	
175	2.1	1.6	1.3	42	—	—	
2-149	3.5	3.2	1.1	—	—	—	
Mean	3.3	2.7			37.1		
Median	3.5	2.7			37.1		

Table 5. P/L strength index and UCS of the dykes.

Sample NO.	P/L strength index			U C S	Remarks
	$I_{sa}$ (MPa)	$I_{sd}$ (MPa)	$I_a$	$\sigma_c$ (MPa)	
1 -19	6.3	5.0	1.3	160.6	mafic
155	6.1	7.7	0.8	154.9	mafic
2-126	12.6	10.5	1.2	166.3	felsic
147	7.6	8.3	0.9	—	mafic
160	4.6	6.3	0.7	96.9	mafic
Mean	6.2	6.8		137.5	mafic
Median	6.2	7.0		154.9	mafic

측정되었다. 酸性 脈岩인 珉長質岩의 軸 및 直徑點載荷強度指數는 각각 12.5, 10.5MPa로서 鹽基性 脈岩보다는 훨씬 높은 값을 보였다. 이는 암석에 함유된 石英성분에 기인한다고 판단된다. 一軸壓縮強度는 166.3MPa로서 역시 鹽基性 脈岩에서 보다 높은 값을 보여준다 (Table 5).

### 結果分析

點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 상관관계를 구명하기 전에, 이와 같은 관계를 대표할 수 있는 신뢰성을 유지하기 위하여 直徑點載荷強度指數와 軸點載荷強度指數 사이에 強度異方性 현상이 가능한 한 없어야 한다. 이러한 強度異方性 현상을 구명하기 위하여 軸點載荷強度指數와 直徑點載荷強度指數의 상관관계를 암종별 및 葉理의 방향성에 따른 변화 특성을 밝히고 또한, 一軸壓縮強度 값에 대한 葉理의 방향성에 따른 변화를 구명한 후, 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 연관성 정도를 제시하였다.

### 強度異方性 特性

모든 암석은 외견상 아무런 脆弱面 등이 관찰되지 않더라도 역학적 성질에 있어서 어느 정도의 異方性을 갖고 있음은 일반적인 사실이다. 따라서 脆弱面의 방향과 載荷의 방향에 따라 點載荷強度指數가 달라지므로 암석의 強度 분류에 왜곡을 초래하게 된다.

點載荷強度 異方性指數(strength anisotropy index :  $I_a$ ) : 연구지역의 코아 시편에 대한 시험 결과로부터 點載荷強度 異方性指數는 수직 및 수평방향 각각에서 구한 값에 대한 비교 즉, 直徑點載荷強度指數에 대한 軸點載荷強度指數의 비( $I_a = I_{50}/I_{5d}$ )를 強度 異方性指數로 표시하고 그 값에 대한 특성을 분석하였다. 전체 시편에서 측정, 계산된 強度 異方性指數의 주분포 범위는 0.6~1.5에 속한다(Table 6).

Table 6. Strength anisotropy index by rock types.

Rock types	Range	Mean	Remarks
Banded gneiss	0.6~1.9	1.2	
Talc gneiss	1.1~1.9	1.4	
Dykes	0.7~1.3	0.9	

縞狀片麻岩에서 強度 異方性指數는 0.6~1.9의 분포로서 평균 1.2이며 點載荷強度指數가 5 MPa까지는 軸 및 直徑點載荷強度指數의 비가 큰 차이를 나타내지 않지만 5MPa 이상으로 증가할수록 軸點載荷強度指數가 상대적으로 크게 나타난다(Fig. 2).

滑石片麻岩에서 측정 계산된 點載荷強度 異方性指數는 1.1~1.9 범위이며, 평균값은 1.4로 계산되었으나 양호한 상관관계를 보여준다 (Fig. 3).

타 암종에 비해 비교적 균질·등방성 암석으로 간주되는 脈岩類의 點載荷強度 異方性指數는 0.7~1.3 범위이며 평균 0.9 정도로서 비교적 異方性 현상이 미약하게 나타난다(Fig. 3).

點載荷強度시험에서 強度 異方性指數는 일반적으로 최대치에 대한 최소치의 비( $I_a$ , max./ $I_a$ , min.)로 나타내며, 일반적인 암석의 異方性指數는 1.05~5.7의 범위를 보인다.<sup>5)</sup>

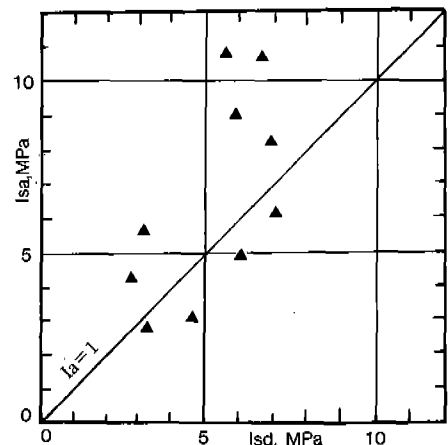


Fig. 2. The variation of P/L strength anisotropy

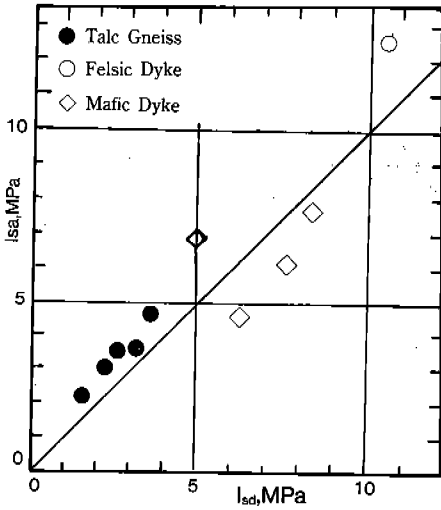


Fig. 3. The variation of P/L strength anisotropy in talc rich gneiss and dykes.

強度異方性和脆弱面의 方向性: 點載荷強度指數에 있어서 異方性 정도는 脆弱面의 法線 방향과 코아 시편의 軸방향과 이루는 각( $\beta$ ) 즉, 葉理面의 傾斜 각( $\beta$ )의 크기에 영향을 받는다. 縞狀片麻岩에서 葉理面의 傾斜각이 증가할수록 直徑點載荷強度指數는 증가하며, 반대로 軸點載荷強度指數는 감소한다(Fig. 4a, b). 따라서 각  $\beta$ 가  $0^\circ$  또는  $90^\circ$  부근에서 點載荷強度指數의 異方性 현상은 두드러지게 된다.

滑石片麻岩에서는 뚜렷한 葉理구조를 관찰할 수 없으나, 葉理구조가 관찰 가능한 시편 3개에 대한 분석 결과 葉理의 傾斜각과 軸 및 直徑點載荷強度指數사이의 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다(Fig. 5). 이는 滑石 성분의 영향으로 葉理구조와 무관하게 強度指數에 영향을 미친 것으로 판단된다.

一軸壓縮強度의 異方性: 암석에서 역학적 현상에 대한 해석은 재료가 균질·등방성이라는 가정하에서 출발한다. 그러나 암석이 갖는 특수성으로 인해 발생하는 역학적 異方性 현상은 脆弱面에 法線 방향으로 작용하는 應力과 코아의 軸方向과 이루는 각(脆弱面의 傾斜각

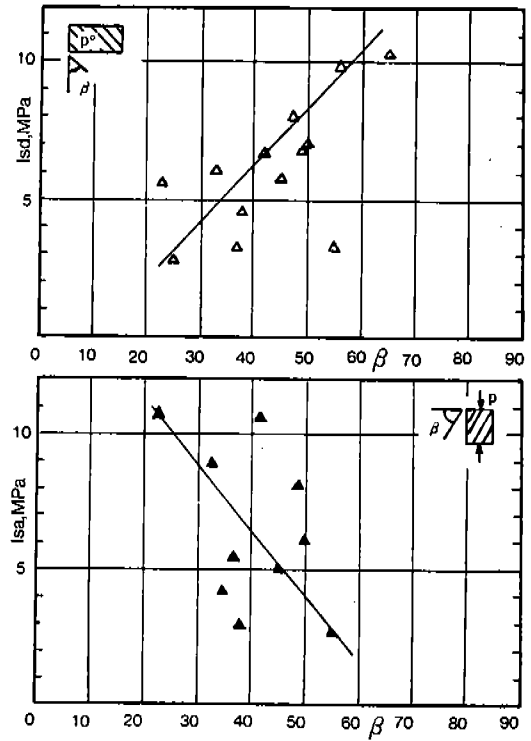


Fig. 4. The variation of (a) diametral and (b) axial P/L strength with the dip angle of foliation planes in banded gneiss.

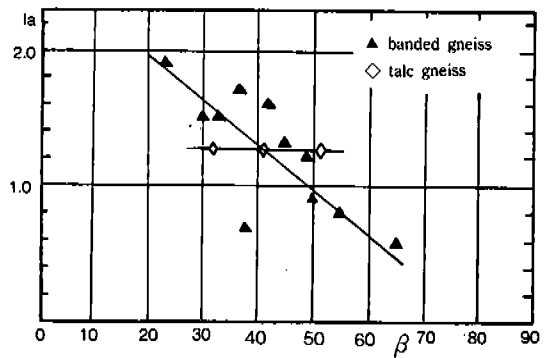


Fig. 5. The variation of P/L strength anisotropy index,  $I_a(I_{sa}/I_{sd})$  with the dip angle of foliation planes by rock types.



:  $\beta$ )의 크기에 따라서 脆弱面に 작용하는 應力の 크기가 변하게 된다. 시험 결과는 암중에 따라서 다소 차이는 있으나, 縞狀片麻岩에서 비교적 뚜렷한 현상을 관찰할 수 있다. 시험 결과를 回歸分析하여 볼 때 縞狀片麻岩은 약  $37^\circ$  부근에서 최소치를 보여 주며, 최대치와 이에 상응하는 경사각은 시편의 수가 다양하지 못하여 전반적인 현상은 정확하게 추정할 수 없었다(Fig. 6). 이와 같이, 一軸壓縮強度는 脆弱面の 방향이 수직 또는 수평 즉, 최대主應力 방향에 대하여 평행 또는 직교할 때 최대치를 나타내게 되는데, 연구지역의 縞狀片麻岩은 전체적으로  $\beta$ 가 약  $40^\circ$  부근에서 최소치를 나타낸다.

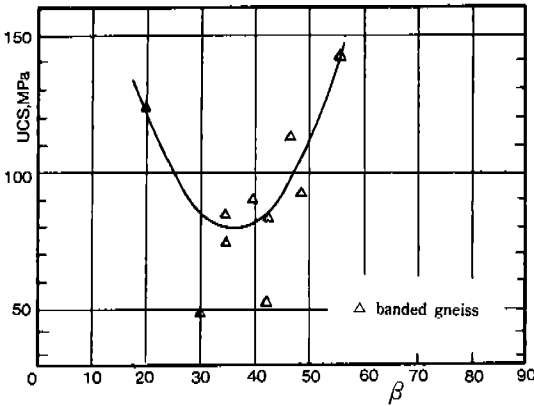


Fig. 6. The variation of UCS with the dip angle of foliation planes in banded gneiss

點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 상관관계

點載荷와 一軸壓縮強度의 상관관계는 원점을 통과하는 직선식으로 回歸分析하였다.

縞狀片麻岩 : 縞狀片麻岩에서 直徑點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 상관관계 및 軸點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 관계는 각각

$$\sigma_c = 14 I_{sd} \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_c = 11 I_{sa} \dots\dots\dots (9)$$

로서, 자료의 분산 현상(상관계수:  $r=0.6$ )이 크게 나타났다.

한편, 縞狀片麻岩에서 軸 및 直徑點載荷強度

指數가 脆弱面の 경사각의 변화에 따라 그 상관관계는  $0^\circ \sim 90^\circ$  사이에서 서로 반대의 변화 양상을 보여준다. 즉 一軸壓縮強度는 경사각이  $0^\circ \sim 40^\circ$  구간에서 軸點載荷強度指數와,  $40^\circ \sim 90^\circ$  구간에서는 直徑點載荷強度指數와 각각 비교적 좋은 상관관계를 보여주기 때문에(Fig. 4a, b; Fig. 5; Fig. 6) 이들의 脆弱面の 경사각에 대한 구간별 상관관계는

$$\beta \geq 40^\circ : \sigma_c = 13.5 I_{sd} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta < 40^\circ : \sigma_c = 12.5 I_{sa} \dots\dots\dots (11)$$

로서 비교적 유사한 결과를 보여, 전 시편에 대하여 통괄처리하는 경우보다 상대적으로 양호한 결과( $r=0.9$ )를 보여준다(Fig. 7a, b).

滑石片麻岩 : 滑石片麻岩에서 一軸壓縮強度와 點載荷強度指數와의 상관관계가 脆弱面の 경사각과 무관하게 나타난다(Fig. 5). 따라서

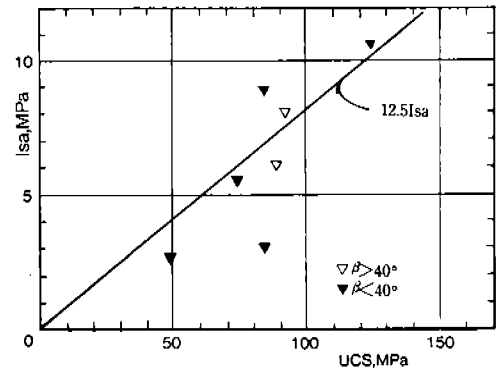
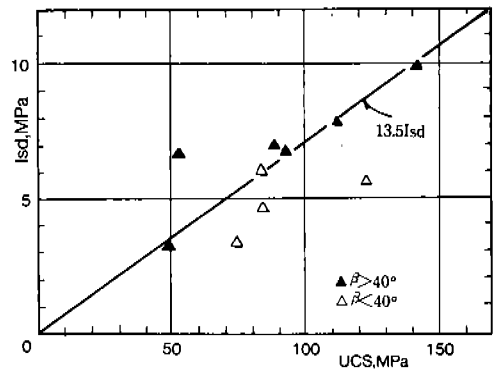


Fig. 7. The relationship between UCS and (a) diametral, (b) axial P/L strength index in banded gneiss.

이들을 回歸分析해 보면

$$\sigma_c = 14 I_{sd} \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_c = 11 I_{sa} \dots\dots\dots (13)$$

이다. 이들 상관비 14 및 11은 點載荷強度 異方性指數가 1.3인 점을 감안하면 같은 정도로 비례함을 알 수 있다(Fig. 8).

脈岩類：鹽基性 脈岩에서 一軸壓縮強度와 軸 및 直徑點載荷強度指數와의 상관관계는 각각

$$\sigma_c = 21 I_{sd} \dots\dots\dots (14)$$

$$\sigma_c = 24.5 I_{sa} \dots\dots\dots (15)$$

로서, 다소 분산 현상이 있으나 시편의 수를 감안할 때 다소 부족한 결과라 할 수 있다(Fig. 8). 한편 珉長質 脈岩類는 一軸壓縮強度시험을 1회 실시하였으므로 대표성을 갖출 수 있는 신뢰성은 희박하다(Table 5).

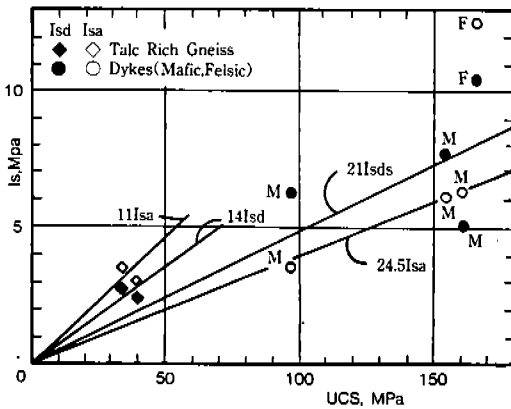


Fig. 8. The relationship between UCS and P/L strength index in talc rich gneiss and dykes.

### 破碎裂隙의 方向性

軸點載荷시험에 의해 발생되는 破碎裂隙의 방향성(preferred orientation of fractures) 특성을 규명하기 위하여, 시편에서 葉理面의 경사 방향과 이에 대한 破碎裂隙의 방향을 측정하였다. 대부분 시편에서 破碎裂隙의 방향은 葉理面의 경사 방향에 대하여 직각 방향 즉, 葉理面의 走向 방향으로 裂隙이 생성되었다(Fig. 9). 一軸壓縮 시험결과 또한, 대부분이 載荷방향에 평행한 柱狀裂隙으로서 1~3개의

主裂隙이 생성되었으며, 일부 시편에서 傾斜剪斷破碎面을 형성하였다. 이들 裂隙의 走向과 유사한 방향으로 형성되었다. 따라서, 연구지역의 縞狀片麻岩은 載荷試驗시의 破쇄역학적 이론에 의하여 葉理面의 走向방향에 직교하는 방향 즉, 葉理面의 경사 방향이 최소引張強度 방향으로 추정된다.

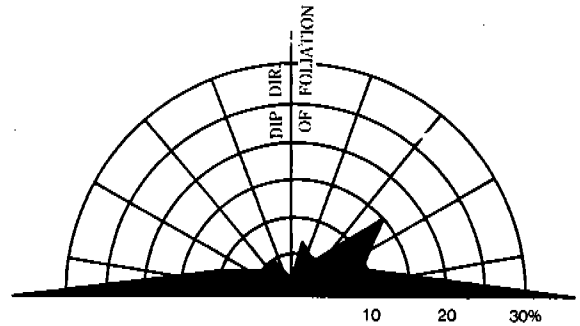


Fig. 9. The preferred orientation of fractures in core disc specimen with axial P/L test.

## 討 議

### 試驗試片의 特性

지질학적 현상의 대표값에 대한 신뢰성은 원천적으로 시료 채취에서 출발하며, 시료 채취의 객관성은 곧 시험결과의 신뢰성과 직결된다. 더우기 지질환경은 不均質·異方性 특성이 있으므로 시료의 채취에 있어서 세심한 주의가 필요하다.

연구지역에서 채취한 시편의 총수는 軸 및 直徑點載荷시험용으로 각각 21개 및 23개, 一軸壓縮強度 시험용으로 16개를 선택하여 시편수에 대한 시험결과의 신뢰성에는 충분한 것 같으나, 縞狀片麻岩 이외의 암종은 충분한 시편수가 되지 못하였다. 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度와 상관관계에 있어서 신뢰성있는 결과를 기대할 수 있는 최소 시편수는 각각 10개 및 5개 이상이 적절하며,<sup>46)</sup> 특히, 片麻岩과 같은 암석은 片岩이나 셰일과 같은 세립질 특성을 갖는 암석에 비해 시험결과의 분산현상이 크게 나타나며 시험과정상 발생 예상되는 오

차를 감안하면, 보다 충분한 수량을 대상으로 하는 것이 바람직하다. 強度指數는 평균 또는 중앙값으로 표시할 수 있는데, 일반적으로 중앙값은 평균값에 비해 극한값에 대하여 덜 민감하므로 이들 두 값을 비교함이 바람직하다.

點載荷시험용 시편의 제조는 큰 문제점이 없으며, 시험 결과에서 발생하는 분산 현상은 鑛物組成 및 내부 구조적 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나, 一軸壓縮強度시험 결과에서 발생하는 오차는 시편 제조상태, 시험 기기, 載荷속도 및 시험사의 기능 등 관련 요소들이 點載荷시험에 비해 훨씬 민감하므로 一軸壓縮強度 시험의 정확성에 대한 신뢰성을 提高하는 것이 더욱 효과적이라 생각된다. 또한, 시편은 시추 심도 200m 전 구간에서 시편을 채취하였으므로 암석의 내부구조 및 성분상 일관성을 보장할 수는 없다. 즉, 동일구간 약 1m 내에서도 葉理구조의 방향성, 縞狀구조 및 입자의 크기 등이 일정하지 않았으며, 이로 인한 시험결과의 분산 현상에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

암석 내부의 수분은 암석 고유 성분의 화학적 혹은 물리적 변화에 의하여 強度에 영향을 미치며, 또한 수분이 공극압력으로 작용할 경우 암석의 強度는 감소할 것이다. 한편, 濕潤 정도 즉, 完全濕潤과 부분濕潤 시편에서 強度指數는 예상보다 비교적 작은 변화를 나타내지만, 部分濕潤과 完全乾燥 상태에서의 결과는 현저한 차이를 보이며, 濕潤으로 인한 點載荷強度의 감소는 암중에 따라 현저한 차이를 나타내는데, 50% 이상의 습수상태에서 습수比 변화에 따른 強度指數에의 영향은 크지 않으며 乾燥상태에서의 시험이 특별히 요구되지 않을 경우 濕潤상태(50% 이상)에서의 시험이 바람직하다.<sup>2)</sup> 強度 감소율의 변화는 鹽基性 鑛物 含量的 증가에 따라 좌우되며 葉理 등의 異方性 구조의 발달정도에 의해 더욱 크게 영향을 받는다.<sup>4,11)</sup> 乾燥상태하에서 強度指數(dry strength)는 oven 乾燥시 비이상적인 높은 결과치가 발생할 수도 있으므로 자연 상태에서의 시험이 바람직하다. 그러나, 광범위한 분류에 적

용할 경우 完全濕潤 상태에서의 시행함이 타당하며, 습윤의 유지는 약 1주일 정도의 시간이 적절하다.<sup>4)</sup>

### 資料處理

點載荷시험 결과의 처리에 있어서 크기효과와 보정을 위한 Broch & Franklin(1972)<sup>4)</sup>과 Hassani et al.(1980)<sup>15)</sup> 등이 크기효과 보정식(식 2, 3 및 4)은 표준시편(d=50mm)에 대한 보정식으로서 상당한 신뢰성이 있다. 또한, ISRM(1985)<sup>2)</sup>의 보정식(식 5)은 전술한 두 값과 비교할 때 자료 처리 결과는 5% 이내의 오차에 불과하므로 현장에서의 이용도를 감안하여 볼 때 보다 간편하고 신속한 자료 처리를 위해서 ISRM(1985)의 크기 보정법이 보다 이상적이라 판단된다.

直徑點載荷시험에 의한 형태효과는 코아 시편의 길이를 1.4d 이상으로 할 때 해소할 수 있으므로 큰 어려움은 없다. 軸點載荷強度指數는 直徑點載荷強度指數 값으로 전환·비교하여야 하므로 Forster(1983)<sup>6)</sup>에 의한 보정(식 6, 7)이 이상적이다.

### 強度異方性 特性

암석의 強度 異方性指數는 암석 자체가 갖는 불균질 및 異方性 특성에 따라 좌우된다. 연구 지역의 縞狀片麻岩에서 葉理面 경사각과 直徑點載荷強度指數는 陽의 상관관계, 軸點載荷強度指數와 陰의 상관관계가 성립된다는 것은 명백한 사실이다. 그러나 변화정도의 한계(角)를 찾아내는 것은 어려운 일이며, 보다 다양한 각도와 일관성있는 암석시편의 특성을 필요로 한다.

一軸壓縮強度시험시 발생하는 強度異方性 현상은 Mclamore & Greg(1967) 및 Donath(1972)에 의해 잘 알려져 있으며,<sup>27,28)</sup> 縞狀片麻岩에서도 그 유사한 특징을 발견할 수 있다.

이러한 一軸壓縮強度의 強度異方性 현상은 點載荷強度指數와 상이한 변화 양상을 보이며, 脆弱面の 경사각이 0°~40° 범위에서는 軸點

載荷強度와, 40°~90° 범위에서는 直徑點載荷強度指數와 각각 양호한 상관관계를 나타냄은 명백한 사실이다. 따라서, 片麻岩 혹은 堆積岩 등과 같이 脆弱面 구조가 발달하는 암석에 있어서 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度的 상관관계는 이러한 역학적 異方性 현상을 고려하여 적용하는 것이 이상적이다.

### 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度的 關係

強度異方性 현상이 뚜렷한 암석에서 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度的 상관관계는 시험 결과치를 일괄 처리할 수 없으며, 전술한 바와 같이 脆弱面의 경사각의 변화에 따라 구간별로 처리하여 비교하는 것이 이상적이라 하겠다.

縞狀片麻岩에서 두 값의 관계는 點載荷強度指數에 대한 一軸壓縮強度的 비는 약 13, 滑石片麻岩 역시 11~14로 대표된다. 일반적으로 두값에 대한 상관계수 K는 24로 널리 알려져 있으나,<sup>4,8,12)</sup> 異方性 현상이 뚜렷한 암석에서는 이 계수를 일반적으로 적용할 수 없다는 사실은 분명한 것으로 판단된다. Forster(1983) 역시 玄武岩 및 砂岩에 대한 일련의 시험에서 상관계수가 각각 11.8~14.0 및 14.8~17.6의 범위로서, 계수 24는 일반적으로 적용할 수 없다고 주장하였다.<sup>6)</sup> 한편, 脈岩類 경우, K값이 24에 상당히 접근하는 값으로, 시험과정에서 발생 예상되는 영향요소를 감안하면 비교적 신뢰성이 있는 결과로 판단된다.

따라서, 脈岩類와 같은 비교적 균질·등방성이 양호한 암석에서는 일반적인 계수 24를 이용한 一軸壓縮強度的 추정은 상당한 신뢰성이 있는 것으로 판단되지만, 縞狀片麻岩과 같은 強度異方性 현상이 뚜렷한 암석에서는 항상 적용할 수는 없다.

### 破碎裂隙의 方向性

일반적으로 균질·등방성 암석 시편에서 點載荷시험에 의한 破碎裂隙의 방향성은 외부의 應力 상태에 따라 결정된다. 異方性 암석의 경우 破碎裂隙의 방향은 최소引張強度 방향에

대하여 직교 방향으로 발생하며 내부의 구조적 특성에 따라 좌우된다.

연구지역에서 실시한 軸點載荷시험시 발생한 裂隙의 방향은 葉理의 走向 방향이 우세하게 나타났다. 한편, Friedman and Logan(1970)은 암석의 引張 및 剪斷裂隙의 방향성에 관한 殘留彈性變形(residual elastic strain)의 영향을 규명하기 위한 연구에서 引張裂隙은 최소引張強度 방향에 대하여 직교하는 방향으로 발생하고, 層理面에서 최소壓縮先行變形(least compressive prestrain) 또는 최대引張先行變形(greatest tensile prestrain) 방향과 관련하여 발생하며, 殘留彈性先行變形(residual elastic prestrain)에 근거를 두고 있다고 주장했다.<sup>29)</sup>

이러한 현상을 연구 지역의 片麻岩類에 동일하게 적용할 수는 없지만 葉理面의 경사방향이 최소引張強度 방향으로 간주할 수 있으며, 이는 암석 자체가 갖는 脆弱面의 구조 및 殘留彈性先行變形 등과 상당한 연관관계가 있다고 판단된다.

一軸壓縮強度시험시 발생하는 破碎裂隙의 형태는 크게 3가지로 구분되는데,<sup>30)</sup> 구조, 암석 시편의 크기, 加壓面의 형태 등의 경계 조건에 의해 야기되는 결과이다. 연구 지역의 片麻岩類 중, 柱狀裂隙 및 공액상 剪斷裂隙으로 破壞된 시편의 대부분이 葉理의 走向 방향으로 형성되었으며, 이 경우도 葉理구조의 경사 방향이 최소引張強度的 방향으로 추정된다.

點載荷強度시험으로 一軸壓縮強度的 추정과의 상관관계를 규명함에 나아가서 點載荷시험이 갖는 역학적 현상은 지질작용과정(geological process)에서도 흔히 발생하는 것으로서 節理의 成因 규명의 이해에 도움이 된다고 판단된다. 點載荷시험은 비교적 균질·등방성인 암석에서는 一軸壓縮強度的 추정에 있어서 直徑點載荷시험이 가장 신속하고 편리한 방법이라는 사실은 분명하지만, 이 시험에 의한 결과가 신뢰성이 낮은 여건 즉, 脆弱面 구조 및 역학적 異方性 현상이 현저한 암석에서는 軸點載荷시험을 병행 실시하는 것이 더욱 효과

적이다.

## 結 論

본 연구는 忠南 靑陽郡 雲谷面 일원에 분포하는 片麻岩類를 대상으로 點載荷強度시험과 一軸壓縮強度 시험을 통하여 強度異方性 특성을 밝히고 이들 두 시험 결과의 상관관계를 구명하여 點載荷強度 시험의 신뢰성을 提高하기 위한 것으로서 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 點載荷強度指數의 범위는 각 암종별로 약간의 차이는 있으나 縞狀片麻岩에서 2.7~10.7MPa이며, 滑石片麻岩에서 상대적으로 낮은 수치(1.6~4.6MPa)를 보인다. 또한, 脈岩類는 4.6~12.6MPa의 범위를 나타낸다.

(2) 암종별 一軸壓縮強度는 葉理구조가 갖는 구조적 및 역학적인 異方性 영향을 많이 받았는데, 縞狀片麻岩에서 49.3~140.7MPa 및 滑石片麻岩에서 매우 낮은 수치(34.6~39.6MPa)를 나타내며, 脈岩類에서 96.9~166.3MPa의 범위를 보인다.

(3) 點載荷시험 결과, 強度異方性 현상은 縞狀片麻岩에서 가장 두드러지게 나타났으며, 즉, 軸點載荷強度指數는 脆弱面 경사각의 크기가 증가할수록 감소하는데 반해서, 直徑點載荷強度指數는 증가한다. 이에 비하여 비교적 균질·등방성 성질을 갖는 脈岩類에서는 異方性 현상이 비교적 약하게 나타났다.

(4) 一軸壓縮強度시험 결과 強度異方性 현상은 脆弱面 경사각이 0° 및 90° 부근에서 최대치, 약 40° 부근에서 최소치를 각각 나타내었다.

(5) 點載荷強度指數와 一軸壓縮強度의 상관비, K는 縞狀片麻岩에서 약 13, 脈岩類에서 약 24로 구명되었다. 한편, 縞狀片麻岩에서 상관비 13은 縞狀片麻岩이 갖는 구조적 및 역학적 異方性 정도의 차이에 의한 현상으로 판단되며, 상관비 24는 일반적으로 항상 적용할 수는 없으며, 脈岩類에 국한하여 그 적용이 가능하다.

(6) 軸點載荷強度 시험 및 一軸壓縮強度시험 결과, 연구 지역의 縞狀片麻岩 코아 시편에

서 발생하는 破碎裂隙面의 방향성은 葉理구조의 走向 방향과 동일한 主破碎裂隙 방향을 나타낸다. 이는 암석 시편에 대하여 軸방향 載荷시 葉理面의 走向에 직교하는 방향(경사방향)이 最小引張強度 방향으로 추정된다.

## 參考文獻

1. ASTM, 1985, American Society for Testing and Materials. C496-71.
2. ISRM, 1985, Commission on Testing Methods. Suggest Method for Determining Point Load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, p.51-60.
3. Hoek, E., 1977, Rock Mechanics Laboratory Testing in the Context of a Consulting Engineering Organization. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.14, p.93-101.
4. Broch, E. and Franklin, J. A., 1972, The Point-Load Strength Test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.9, p.669-697.
5. Greminger, m., 1982, Technical Note: Experimental Studies of the Influence of Rock Anisotropy on Size and Shape Effects in Point-Loading Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sic. & Geomech. Abstr., Vol.19, p.241-246.
6. Forster, I. R., 1983, Technical Note: The Influence of Core Sample Geometry on the Axial Point-Load Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.20, p.291-295.
7. 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, p.97-101.
8. Brook, N., 1980, Technical Note: Size Correction for Point Load Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, p.231-235.
9. Brook, N., 1985, The Equivalent Core Diameter Method of Size and Shape Correction in Point Load Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, p.61-70.
10. Broch, E., 1983, Estimation of Strength Anisotropy Using the Point-Load Test. Int. J.

- Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.20, p.181-187.
11. Broch, E., 1979, Changes in Rock Strength Caused by Water, Proc. 4th ISRM Congr., Montreux, Vol. 1, Balkema, Rotherdam, p.71-75.
  12. Bieniawski, Z. T., 1975, The Point-Load Test in Geotechnical Practice. Engineering Geology, p.1-11.
  13. Deere, D. U., 1968, Geological Considerations, In Rock Mechanics in Engineering Practice(Edited by Stagg K. G. & Zienkiewicz O. C.). Wiley, London, p.1-20.
  14. Goodman, R. E., 1989, Introduction to Rock Mechanics. 2nd ed., p.36-37.
  15. Hassani, F. P., Scobie, M. J. and Whittaker, B. N., 1980, Application of the Point-Load Index Test to Strength Determination of Rock and Proposals for a New Size-Correction Chart. Proc. 21st U.S. Symp. on Rock Mechanics, Rolla, Missouri, p.543-553.
  16. Lajtai, E. Z., 1980, Tensile Strength and Its Anisotropy measured by Point- and Line-Loading of Sandstone. Eng. Geol., Vol.15, p. 163-171.
  17. Tsidzi, K. E. N., 1990, The Influence of Foliation on Point Load Strength Anisotropy of Foliated Rocks. Eng. Geol., Vol.29, p.49-58.
  18. Hoek, E., 1968, Brittle Failure of Rock, in Rock Mechanics in Engineering Practice(Edited by Stagg K.G. & Zienkiewicz O.C.). Wiley, London, p.99-124.
  19. Mellor, M. and Hawkes, I., 1971, Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Discs and Annuli. Eng. Geol., Vol. 5, p.173-225.
  20. 日本土質工學會, 1989, 岩の調査と試験. p. 293-298.
  21. Griffith, A. A., 1924, Crack Theory after Brittle Fracture of Rock(Leonard Obert, 1972) in Fracture and Advanced Treatises of Nonmetal and Composites(Edited by H. Liebowitz, 1972). p.129-137.
  22. Obert, L., 1972, Brittle Fracture of Rock in Fracture and Advanced Treatises of Nonmetals and Composites(Edited by H. Liebowitz, 1972).
  23. ASTM, 1985, American Society for Testing and Materials. Section 4, Vol.04.08, D-2938.
  24. 日本土木工學會, 1978, 岩盤力學. p.9-19.
  25. 建設部, 1979, 技術指導書 60. 62, 岩石と岩盤基礎應用篇, p.48-52.
  26. Hunt, R. E., 1986, Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation. p.101-116.
  27. Paterson, M. S., 1978, Experimental Rock Deformation-The Brittle Field. p.42-50.
  28. Brady, B. H. G. and Brown, E. T., 1985, Rock Mechanics for Underground Mining. p. 113-115.
  29. Friedman, M. and Logan, J. M., 1970, Influence of Residual Elastic Strain on the Orientation of Experimental Fractures in the three Quartzose Sandstones. J. Geophys. Res., Vol. 75, p.387-405.
  30. Vutukur, V. S., Lama, R. D. and Saluja, S. S., 1974, Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Testing Techniques and results, Vol.1, Trans. Tech. Pub., p.26-31.