

## 간접인장강도시험을 통한 이방성 암석의 인장강도 특성

### Characterization of Tensile Strength of Anisotropic Rock Using the Indirect Tensile Strength Test

김 영 수 <sup>*1</sup>	Kim, Young-Su	정 성 관 <sup>*2</sup>	Jung, Sung-Gwan
허 노 영 <sup>*3</sup>	Heo, No-Young	최 정 호 <sup>*4</sup>	Choi, Jeong-Ho

#### Abstract

Isotropic rock and anisotropic rock have different tensile strength which has the greatest influence on rock failure. In this study, elastic modulus of anisotropic rock is obtained through uniaxial compression test, and tensile strength and tension failure behavior are analyzed through indirect tensile strength test. Stress concentration factor of a specimen at the center is obtained from anisotropic elastic modulus and strain by indirect tensile strength test. Theoretical solutions for tensile strength of isotropic and anisotropic rock are compared. Stress concentration factor of anisotropic rock is either higher or lower than isotropic rock depending on the inclination angle of bedding plane. The use of stress concentration factor of isotropic rock resulted in overestimation or underestimation of tensile strength.

#### 요 지

암반파괴의 가장 큰 영향을 미치는 인장강도는 등방의 암석과 횡등방의 암석의 경우는 분명히 다를 것이다. 본 논문에서는 일축압축강도시험에서 횡등방 암석의 탄성정수를 구하고, 간접인장강도시험을 통하여 횡등방 암석의 인장강도와 인장파괴 거동을 분석하였다. 일축압축시험에서 구한 이방성 탄성정수와 간접인장강도시험에서 얻어진 변형률로 시료중앙의 응력집중계수를 구하여, 등방으로 가정하여 구한 인장강도 값과 이방성일때의 인장강도 값을 비교 분석하였다. 실험 결과 횡등방성 암석의 응력집중계수는 층리면의 각도에 따라서 등방재료의 응력집중계수와는 크거나 작은 값을 나타내었다. 횡등방 암석의 인장강도 산정시 등방의 응력집중계수를 사용하는 것은 층리면이 이루는 각도에 따라 인장강도의 과대 혹은 과소 평가됨을 알 수 있었다.

**Keywords :** Bedding plane, Stress concentration factor, Tensile strength, Transversely isotropic

#### 1. 서 론

국토가 좁고 산악지대가 많은 우리나라에서는 최근 국토의 효율적인 활용 및 사회간접자본 확충 측면에서 지하철과 고속 전철 등의 교통시설을 위한 터널, 장대교 기초, 암반 사면 등의 대형 프로젝트와 방사성 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 불

\*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

\*2 정회원, 경북대학교 농과대학 조경학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Landscape Architecture., Kyungpook National Univ.)

\*3 정회원, (주)가야 ENG 지반공학부 (Member, Geotechnical Engrg., Gaya Engrg., Co. Ltd.)

\*4 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., oe1004@netsgo.com)

연속면, 즉 생성특성에 따라 단층, 파쇄대, 절리, 층리 등과 같은 불연속면이 나타나 실제로는 이방성을 띠고 있다. 또한 암석의 강도는 압축과 전단보다는 인장에 매우 약하게 나타난다. 그리고 인장강도는 암반의 절취, 발파 등에서 매우 중요한 영향을 미치지만 공학적 측면에서 거의 무시되고 있는 실정이므로 암반 구조물의 설계나 시공 전에 반드시 고려되어야 한다. 암반의 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 인장강도는 등방과 횡등방의 경우는 분명히 다를 것이다. 따라서 본 논문에서는 일축압축 강도 시험에서 횡등방 암석의 탄성정수를 구하고, 간접 인장강도 시험에 의해서 횡등방 암석의 인장강도를 규명하는데 목적이 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 횡등방 암석의 탄성정수 산정

5개의 탄성정수는 그림 1과 같이 수평면에 대해서 층리면이 0°, 90°, 45°로 시료를 성형하여 일축압축강도 실험을 통해서 얻어진다.

$E_2$ 와  $\nu_2$ 는 그림 1의 (a)와 같이 0°인 횡등방면이 수평으로 놓여있을 때, 식 (1)과 같이 나타난다.

$$E_2 = \frac{\sigma_y(0^\circ)}{\epsilon_y(0^\circ)}, \quad \nu_2 = -\frac{\epsilon_x(0^\circ)}{\epsilon_y(0^\circ)} \quad (1)$$

$E_1$ 와  $\nu_1$ 는 그림 1의 (b)와 같이 90°, 즉 횡등방면이 수직으로 놓여 있을 때 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$E_1 = \frac{\sigma_y(90^\circ)}{\epsilon_y(90^\circ)}, \quad \nu_1 = -\frac{\epsilon_x(90^\circ)}{\epsilon_y(90^\circ)} \quad (2)$$

전단탄성계수  $G_1$ 은  $G_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu_1)}$ 의 관계식에서 얻어지고,  $G_2$ 는 횡등방면의 방향이 45°일 때의 실험결과에서  $\epsilon_y - \epsilon_x$  으로부터 식 (3)과 같이 나타난다.

실험결과에서  $\epsilon_y - \epsilon_x$  으로부터 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\epsilon_y(45^\circ) - \epsilon_x(45^\circ) = \frac{1}{2G_2} \times \sigma_y(45^\circ),$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y(45^\circ)}{\epsilon_y(45^\circ) - \epsilon_x(45^\circ)} \quad (3)$$

### 2.2 이방성 암석의 인장강도

암석의 인장강도를 측정하기 위한 실험방법에는 직접인장시험과 간접인장시험이 있다. 직접인장시험은 균질성과 파괴면상에 실제 인장응력의 분배 때문에 암석들의 인장강도를 결정하기 위한 적당한 방법이며, 일반적으로 이론적인 방법에 의해서 인장강도를 결정하는 가장 단순하고 유효한 방법이다. 그러나 암석의 특성상 dog-bone 형태의 시료 성형이 어렵고 시험편의 물리량치 부근이 국부적인 응력 집중으로 인하여 파괴되기 쉽다. 그 결과 간접적으로 암석의 인장강도를 결정하기 위하여 Brazilian test, ring test, hoop test, bending test, hydraulic extension test 등의 많은 간접 인장시험 방법들이 개발되었다. 이러한 실험방법들 중에서 압열인장 시험으로 불리는 Brazilian test가 가장 많이 사용되어져 왔다.

Brazilian test는 수십년 동안 Pomeroy와 Morgan(1956)에 의해 석탄 종류의 암석, Mellor and Hawkes(1971); Hudson et al.(1972)에 의해 화강암 과 대리석, 그리고 Hondros(1959)에 의해 콘크리트의 인장강도를 측정하는데 사용되어져 왔다. 또한 이 방법은 Bieniawski and Hawkes(1978)에 의해서 암석의 인장 강도를 결정하기 위한 표준방법으로서 ISRM에 규정되었다.

시료의 직경을 D, 두께를 t, 시료 파괴시의 수직하중을  $W_f$ 라고 가정하면 등방의 경우 인장강도  $\sigma_t$ 는 식 (4)와 같이 된다.

$$\sigma_t = 2 \frac{W_f}{\pi D t} \quad (4)$$

그림 2는 하중재하각에 따른 응력집중계수의 변화를 나타낸 그림이다 Chen et al.(1996,1998). 그림 2에서와 같이 등방의 경우  $\alpha$  각이 7.5° 보다 작을 때 수평방향의 응력집중계수가 -2로 나타났다. 그러나 이방성 암석의 응력집중계수는 등방일때와는 다르게 나타나므로 식 (4)를 이방성 암석의 간접인장강도 산정에 사용하는 것은 맞지 않다.

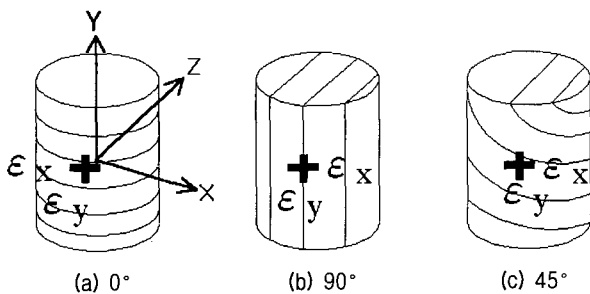


그림 1. 일축압축강도 시료

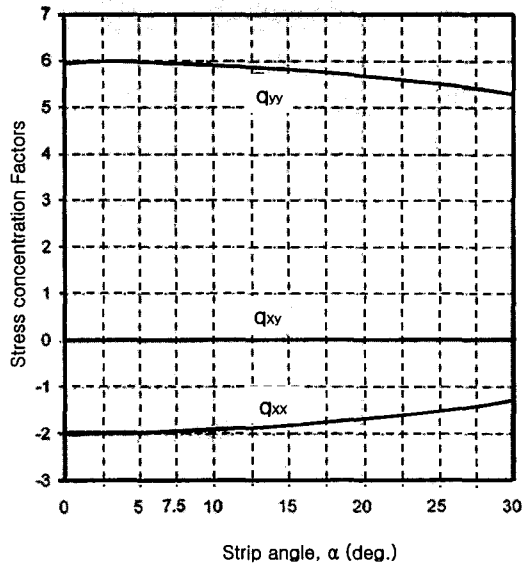


그림 2. 하중재하각에 따른 응력집중계수

Amadei et al.(1983)과 Chen et al.(1996, 1998)은 이방성 탄성론을 바탕으로 횡등방성과 직교이방성의 재료에 대해서 시료의 내부의 응력 성분을 해석적 방법으로 식 (5)와 같이 표현했다.

$$\sigma_t = -q_{xx} \frac{W_f}{\pi D t} \quad (5)$$

여기서,  $q_{xx}$ 는 시료의 중앙( $x=y=0$ )에서 계산된 응력집중계수이며, 5개의 탄성정수( $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_2$ )와 하중재하각과 수평축과 층리면의 각도( $\varphi$ )에 영향을 받는다.

그림 3의 형상과 같이 선형탄성, 균질, 횡등방성을 가지는 재료를 고려해보면 시료의 표면을 따라서 작용하는 단위면적당 표면력의 x, y 방향의 성분을  $X_n, Y_n$ 이라 하고 표면력은 평형상태에 있다고 할 수 있다.  $x'$ 는 횡등방면에 수직한 방향이며,  $y'$ 는 횡등방면에 수평한 방향의 좌표계로 두면  $\varphi$ 는 x축과 횡등방면이 이루는 각도이다.

두께(t)의 영향이 아주 미소하여 표면력에 의해서 하

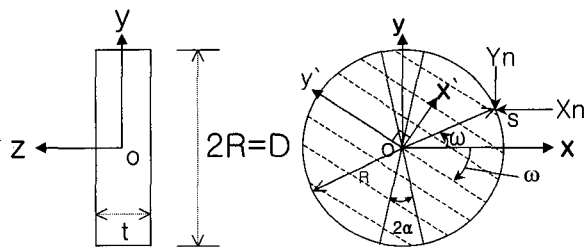


그림 3. Brazilian test의 이방성 재료의 좌표계

중에 재하되고, 변형이 미소하게 발생한다고 가정하면 일반적인 평면 응력 상태로 나타내질 수 있다. 이러한 평면 응력 상태에서 응력 평형 방정식, 변형을 적합 방정식, 변형률과 변위의 관계, 구성방정식과 경계조건의 문제들은 재료의 두께 t에 걸쳐서 나타나는 응력, 변형률, 변형의 평균값으로 표현되어진다. 또한 평균응력 ( $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ), 평균변형률( $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ ),과 평균변위의 성분들은 일반적인 평면 응력상태를 만족한다고 할 수 있다. x-y 평면에서의 재료의 구성관계는 식 (6)과 같이 표현되어진다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

횡등방 물체에서의 독립적인 탄성정수는  $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_2$ 로 5개가 존재한다. 여기서  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각각 횡등방면의 탄성계수와, 횡등방면에 수직한 방향의 탄성계수를 의미하고,  $\nu_1$ 과  $\nu_2$ 는 횡등방면에 수평, 수직방향으로 응력이 작용했을 때의 포와송비이다. 그리고  $G_2$ 는 횡등방면에 수직인 면에서의 전단탄성 계수이다.  $G_1$ 은 횡등방면의 전단탄성 계수로서  $E_1 / (2(1+\nu_1))$ 으로 표현되어지며, 좌표 변환 법칙을 사용하면  $a_{11}, a_{12}, a_{16}, a_{22}, a_{26}, a_{66}$ 은 식 (7)과 같이  $\nu_1$ 과는 관계없는  $E_1, E_2, \nu_2, G_2$ 의 항으로 표현되어짐을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{\sin^4 \varphi}{E_2} + \frac{\cos^4 \varphi}{E_1} + \frac{\sin^2 2\varphi}{4} \left( \frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2} \right) \\ a_{12} &= -\frac{\sin^2 2\varphi}{4} \left( \frac{1}{E_2} + E_1 - \frac{1}{G_2} \right) - \frac{\nu_2}{E_2} (\cos^4 \varphi + \sin^4 \varphi) \\ a_{16} &= \sin 2\varphi \left[ \left( -\frac{\sin^2 \varphi}{E_2} - \frac{\cos^2 \varphi}{E_1} \right) + \left( \frac{1}{2G_2} - \frac{\nu_2}{E_2} \right) \cos 2\varphi \right] \\ a_{22} &= -\frac{\cos^4 \varphi}{E_2} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_1} + \frac{\sin^2 2\varphi}{4} \left( \frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2} \right) \\ a_{26} &= \sin 2\varphi \left[ \left( -\frac{\cos^2 \varphi}{E_2} - \frac{\sin^2 \varphi}{E_1} \right) - \left( \frac{1}{2G_2} - \frac{\nu_2}{E_2} \right) \cos 2\varphi \right] \\ a_{66} &= \sin^2 2\varphi \left( -\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} + \frac{2\nu_2}{E_2} \right) + \frac{\cos^2 2\varphi}{G_2} \end{aligned} \quad (7)$$

Amadei et al(1983)는 원형 시료의 임의의 점에서의 응력 상태를 식 (8)과 같이 표현하였다.

$$\sigma_x = \frac{P}{\pi} q'_{xx}, \quad \sigma_y = \frac{P}{\pi} q'_{yy}, \quad \tau_{xy} = \frac{P}{\pi} q'_{xy} \quad (8)$$

식 (8)에서  $q'_{xx}, q'_{yy}, q'_{xy}$ 는 x, y좌표와 하중재하

각과  $a_{11}, a_{12}, a_{16}, a_{22}, a_{26}, a_{66}$ 에 의해서 결정되어지는 응력집중계수이다.

하중 재하각이 작아서  $P$ 가  $W/(\alpha Dt)$ 와 같아진다면 원형시료의 임의의 점  $x, y$ 에서 응력 성분은 식 (9)와 같이 표현되어질 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{W}{\pi Dt} q_{xx}, \quad \sigma_y = \frac{W}{\pi Dt} q_{yy}, \quad \tau_{xy} = \frac{W}{\pi Dt} q_{xy} \quad (9)$$

여기서,  $q_{xx} = q'_{xx}/\alpha, q_{yy} = q'_{yy}/\alpha, q_{xy} = q'_{xy}/\alpha$

응력집중계수는  $\alpha$ 와 경사각  $\varphi$  그리고 탄성계수의 비  $E_1/E_2, E_1/G_2$ 와  $\nu_2$ 에 의해서 결정되어지는 상수임을 알 수 있다.

식 (9)를 식 (6)에 대입하면 식 (10)과 같이 전개되어진다.

$$\frac{\pi Dt}{W} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_{xx} \\ q_{yy} \\ q_{xy} \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 Brazilian test시 측정된 변형률로 횡등방성 암석의 시료 중앙의 응력집중계수  $q_{xx}, q_{yy}, q_{xy}$ 를 계산 할 수 있다.

### 3. 시험편제작 및 시험방법

#### 3.1 일축압축강도시험

일축압축강도 시험시 하중은 분당 1.5mm의 속도로 재하하였다. 탄성정수 산정을 위해서  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 의 시료를 각도별로 3개씩 준비하여 사진 1과 같이  $x, y$  방향

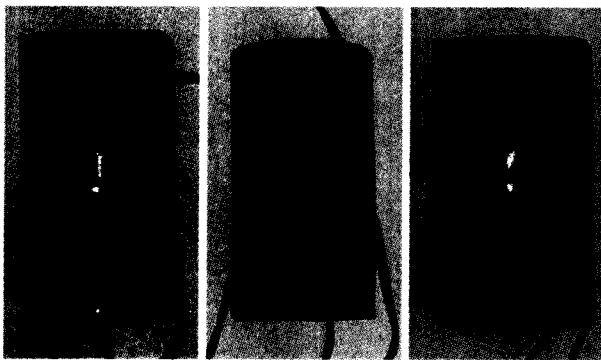


사진 1. 시료성형 및 변형률 게이지 부착

에 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였고, 파괴 하중의 50%에서 측정된 변형률로 탄성정수를 산정하였다.

#### 3.2 간접인장강도시험

구경이 NX-size의 코아 드릴로 층리면이 주 가압면과 각각  $0^\circ, 90^\circ$ 가 되도록 암석코어를 뚫고 그림 4와 같이 층리면에 수평한 방향과 층리면에 수직인 방향으로 두께 2.5cm되도록 제작하였다.

간접인장강도시험의 암석시료 성형 후 모습은 그림 5와 같다.

그림 6의 (a)와 같이 횡등방면에 수평방향으로 하중이 작용하고 하중 재하각  $2\alpha$ 가  $15^\circ$ 보다 작다면 시료 중앙의 응력집중계수는 등방재료와 같이  $q_{xx}=-2, q_{yy}=6, q_{xy}=0$ 이 된다.

일축압축시험에서 구해진 탄성정수로 그림 6의 (a)와 같이 횡등방면에 수평방향으로 하중이 작용하는 경우  $x, y$  방향에 변형 게이지를 부착하여 파괴시 하중의 50%에

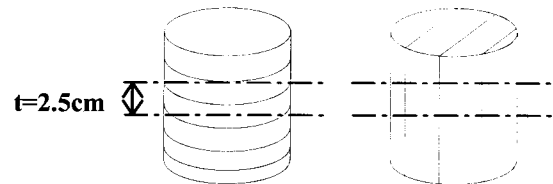
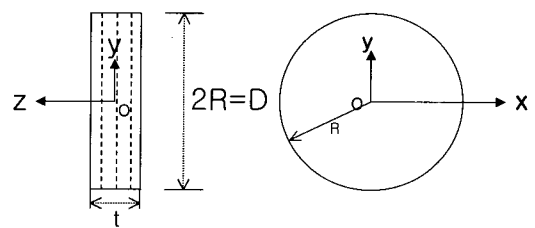
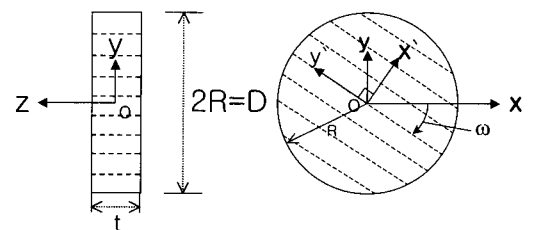


그림 4. 간접인장강도시험 시료성형



(a) 층리면에 수평한 방향



(b) 층리면에 수직인 방향

그림 5. 시료성형 후 형상

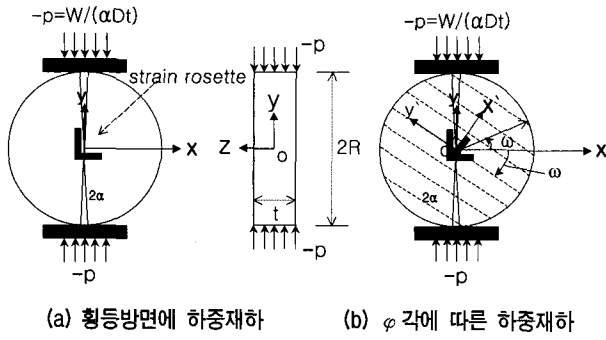


그림 6. 하중재하 방법

서 측정된 변형률을 이용하여 시료 중앙의 응력집중계수를 등방재료인 경우의 응력집중계수와 비교해 보았다.

그림 6의 (b)와 같이 횡등방면에 수직인 방향으로 성형한 시료에 대하여  $\varphi$  각에 따른 하중재하시 각도별로 중앙의 응력집중계수 산정을 위해서  $\varphi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 의 시료를 각도별로 3개씩 준비하여 x, y, 45° 방향에 변형 게이지를 부착하여 시료가 파괴될 때까지 변형률을 측정하였다. 시험시 하중은 분당 1.5mm의 속도로 재하하였으며, 파괴 하중의 50%에서 측정된 변형률로 시료 중앙의 응력 집중 계수를 구하였다.

## 4. 시험결과

### 4.1 탄성정수

표 1은 일축압축강도시험 결과 탄성정수를 나타낸 것

표 1. 흑색 세일의 탄성정수

$\beta^\circ$	Sample No.	Unconfined Comp. Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\nu_1$	$E_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\nu_2$	$G_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0°	A	903	142,000	-	-	142,000	0.15	-	-
	B	873	157,000	-	-	157,000	0.20	-	-
	C	842	128,000	-	-	128,000	0.14	-	-
Average		<b>873</b>	<b>142,000</b>			<b>142,000</b>	<b>0.16</b>		
90°	D	760	279,000	279,000	0.21	-	-	115,000	-
	E	700	286,000	286,000	0.29	-	-	111,000	-
	F	637	282,000	282,000	0.22	-	-	116,000	-
Average		<b>699</b>	<b>282,000</b>	<b>282,000</b>	<b>0.24</b>			<b>114,000</b>	
45°	G	614	138,000	-	-	-	-	-	106,000
	H	582	118,000	-	-	-	-	-	91,000
	I	512	120,000	-	-	-	-	-	84,000
Average		<b>569</b>	<b>126,000</b>						<b>94,000</b>

이다. 시험 결과 대구지역 블랙 세일의 일축압축 강도는 0°의 시료가 840~900 kg/cm<sup>2</sup>으로 가장 크게 나왔고, 90° 시료가 640~760 kg/cm<sup>2</sup>이며, 45° 시료가 510~610 kg/cm<sup>2</sup>로 가장 작게 나타났다. 0°와 90°의 시료는 수직 균열로 인하여 파괴가 일어났으며 90°에서는 균열의 방향과 층리면의 방향이 일치하여 0°에 비하여 압축 강도 값이 작게 나타났고, 45°일때 일축압축 강도의 최소값이 나타난 것은 파괴각과 층리면의 방향이 일치하였기 때문인 것으로 사료된다.  $E_y$ 는 수직방향의 탄성계수를 나타낸 값으로 45° 시료의 평균값이 126,000 kg/cm<sup>2</sup>로 가장 작게 나타났다. 0° 시료에서 측정된 변형률로 구한  $E_2$ 와  $\nu_2$ 의 평균값은 각각 142,000 kg/cm<sup>2</sup>, 0.16로 나타났고, 90°에서 구한  $E_1$ 과  $\nu_1$ 의 평균값은 282,000 kg/cm<sup>2</sup>, 0.27, 그리고, 45° 실험에서 구한  $G_2$ 는 94,000 kg/cm<sup>2</sup>,  $G_1$ 은 112,000 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

### 4.2 응력집중계수

#### 4.2.1 횡등방면에 수평하중 재하

횡등방면에 수평방향으로 하중을 작용시키는 등방의 경우 시료 3개에 대하여 중심에 x, y 방향의 변형률 게이지를 부착하여 파괴시 하중의 50%에서 측정된 변형률과 일축압축시험에서 구해진 탄성정수를 이용하여 시료 중앙의 응력집중계수를 식 (11)로 산정하였다.

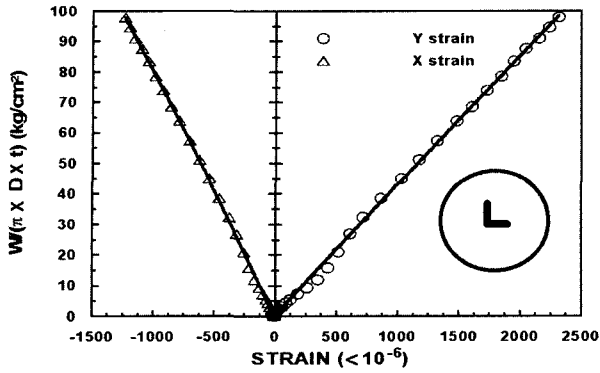


그림 7. 수평하중 재하시 응력과 변형을 곡선

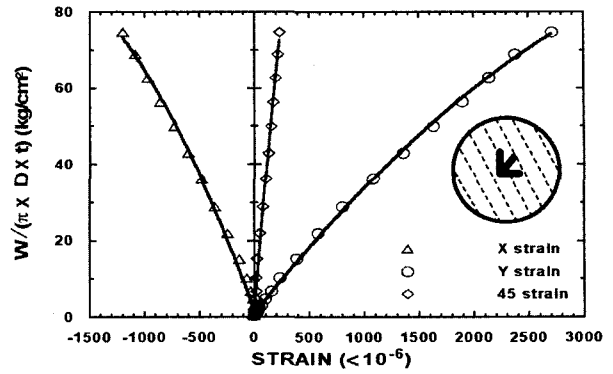


그림 8. φ 각도별 하중재하시 응력과 변형을 곡선

표 2. 수평하중재하 시험시 응력집중계수

Sample No.	D (cm)	t (cm)	Failure stress w/πDt(kg/cm²)	ε <sub>x</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	ε <sub>y</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	q <sub>xx</sub>
A	5.4	2.5	98	600	1140	-1.99
B	5.4	2.5	93	570	1080	-2.02
C	5.4	2.4	93	550	1000	-1.96

$$\frac{\pi Dt}{W} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{xx} \\ q_{yy} \end{pmatrix} \quad (11)$$

그림 7은 횡등방면에 수평으로 하중을 재하하였을 경우 A 시료에 대한 x, y방향의 응력과 변형을 곡선이며 B, C 시료에서도 유사한 거동을 보였다.

표 2는 횡등방면에 수평으로 하중재하 시험시 시료의 크기, 파괴 하중, 변형률, x 방향의 응력집중계수를 나타낸 것으로 q<sub>xx</sub> 값은 -1.96~-2.02로 등방재료의 응력집중계수 -2와 거의 유사한 값을 나타냈다.

#### 4.2.2 각도별 하중재하

횡등방면에 수직방향으로 성형한 이방성의 경우 각도별로 3개의 시료를 준비하여 시료 중심에 x, y, 45° 방향에 변형률 게이지를 부착하여 파괴시 하중의 50%에서 측정된 변형률과 일축 압축 실험에서 구해진 탄성정수를 식 (12)에 대입하여 시료 중앙의 응력집중계수를 구해보았다.

$$\frac{\pi Dt}{W} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{xx} \\ q_{yy} \\ q_{xy} \end{pmatrix} \quad (12)$$

그림 8은 φ 각도에 따른 하중재하 시험시 x, y, 45° 방향의 응력과 변형률을 나타낸 대표적인 곡선이다.

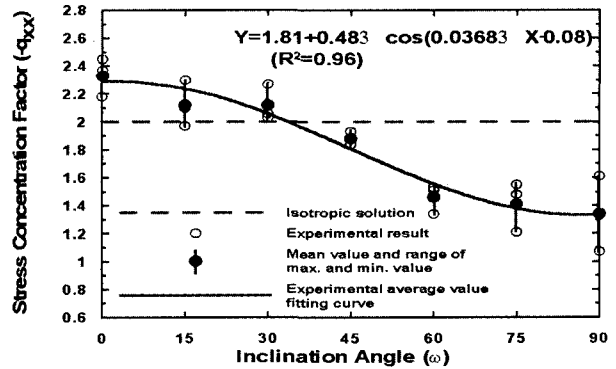


그림 9. 응력집중계수 q<sub>xx</sub>

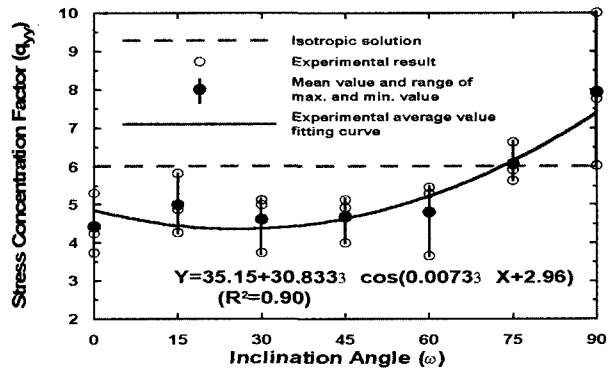


그림 10. 응력집중계수 q<sub>yy</sub>

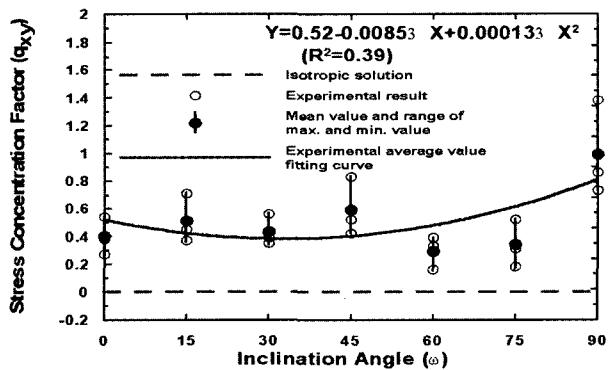


그림 11. 응력집중계수 q<sub>xy</sub>

그림 9~11은 이방성 시험편 중앙의 응력집중계수인  $q_{xx}$ ,  $q_{yy}$ ,  $q_{xy}$  값을 등방의 경우와 각도에 따른 시험 결과를 나타낸 것이며, 곡선은 각도별 응력집중계수의 평균값으로 응력집중계수와 시료의 각도와의 상관관계를 나타낸 것이다.

그림 9의 시험 결과  $q_{xx}$  값은  $0^\circ$ 에서 -2.33으로 나타나 등방인 경우의 -2에 비하여 큰 값을 보였고, 각도가 증가할수록 감소하여  $35^\circ$ 에서는 -2를 나타내어 등방의 경우와 같은 값을 보였으며,  $90^\circ$ 에서는 -1.34의 최소 값을 보였다.

그림 10의  $q_{yy}$  값은  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 에까지는 비슷한 값을 나타내었고,  $60^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지는 증가하는 양상을 보였다.  $90^\circ$ 에서는 7.13으로 최고 값을 나타냈고,  $30^\circ$ 에서 최소값을 보였다.

그림 9와 그림 10의  $q_{xx}$ ,  $q_{yy}$  값은 각도 증가에 따라서 감소, 증가하는 경향을 나타내었는데 반하여, 그림 11의  $q_{xy}$  값의 경우 일정한 증감의 양상 없이 등방의 경우에 비하여 모든 각도에서 크게 나타났다.

$q_{xx}$  값에 비하여  $q_{yy}$ ,  $q_{xy}$ 의 분산 정도는 크게 나타났다. 이는 시료 내부의 층리 개수 및 간격, 암석의 불균질성으로 인한 것으로 추정되며, 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해서는 보다 많은 실험이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

블랙 세일의 간접인장시험 결과  $\varphi$  각에 따른  $q_{xx}$  값의 변화에서 등방 재료의 시료 중앙의 응력집중계수인 -2와는 각도에 따라서 크거나 작은 값을 보였다.

이와 같은 결과에서 등방의 응력집중계수를 세일과 같은 이방성을 나타내는 암석의 간접인장강도산정에 적용시키는 것은 적합하지 않음을 알 수 있다.

### 4.3 간접인장강도

#### 4.3.1 각도별 파괴응력

변형률과 파괴하중을 측정하기 위하여 각도별로 3개의 시험을 실시 하였고, 추가로 변형률을 측정하지 않고 파괴하중만 측정하기 위해서 각도별로 2개의 간접인장강도시험을 하였다.

그림 12는 각도에 따라서 각각 5개의 시료에 대한 파괴 응력  $W/(\pi Dt)$ 과,  $\varphi$ 와 파괴응력 평균값의 회귀식을 나타낸 것이다.

파괴 응력은  $0^\circ$ 에서 가장 큰 값을 보였고 각도의 증가에 따라서 선형적으로 감소하여  $90^\circ$ 에서 가장 작은

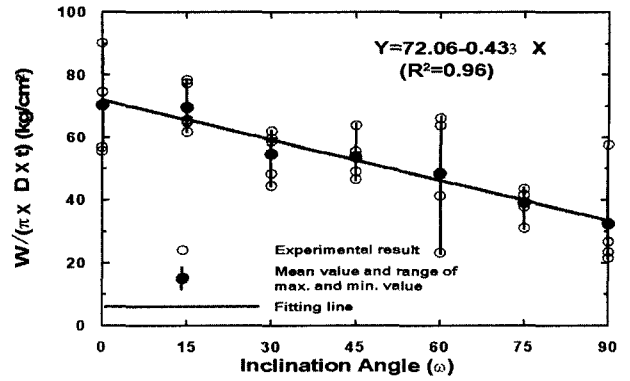


그림 12. 각도에 따른 파괴 응력

값을 나타냈다.

파괴시 전단파괴와 인장파괴가 같이 발생한  $60^\circ$  시료에서 파괴응력의 분산 정도가 크게 나타났고,  $75^\circ$ 에서는 층리면을 따르는 전단파괴만이 발생하여 파괴응력의 분산 정도가 작게 나타났음을 알 수 있다. 나머지 각도의 시료에서 파괴응력의 분산이 크게 나타난 것은 암석시료의 불균질성이 그 원인으로 사료된다.

세일과 같이 층리가 존재하여 횡등방적 성질을 띠는 암석의 파괴응력은 층리의 방향과 인장응력의 작용 방향에 따라 차이가 있으며, 이는 간접인장시험시 인장응력이 작용하는 방향이 층리면에 수직인 방향일 때 최소값이 됨을 알 수 있다.

#### 4.3.2 파괴거동

사진 2는 간접인장강도 시험시 각도별 시료의 파괴 형상을 나타낸 것이고 초기균열 발생지점을 점선으로 표시하였다. 시료의 파괴 형상은 크게 두가지의 파괴형상을 보였다. 하나는 하중작용 방향과 평행한 수직방향의 균열에 의한 인장파괴였고, 다른 하나의 형상은 층리면을 따라서 발생된 균열에 의한 전단파괴의 형상으로 나타났다. 횡등방면,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 시료에서는 시료의 중앙이 갈라지는 인장파괴만 관찰되었고,  $30^\circ$ 와  $60^\circ$ 의 시료에서는 시료중앙의 인장 균열에 의한 인장파괴와 층리면에 평행한 균열로 인한 전단파괴가 같이 발생했다.  $75^\circ$ 의 시료는 층리면을 따라서 전단파괴만이 일어났다.

이와 같은 결과에서 블랙 세일의 간접인장시험시  $75^\circ$ 의 시료에서는 층리면을 따라서 전단파괴만이 발생하였으므로  $75^\circ$ 의 파괴하중을 인장강도로 보는 것은 맞지 않을 것이다. 나머지 각도의 모든 시료에서는 시료 중앙의 인장균열로 파괴가 발생하였음을 알 수 있다.

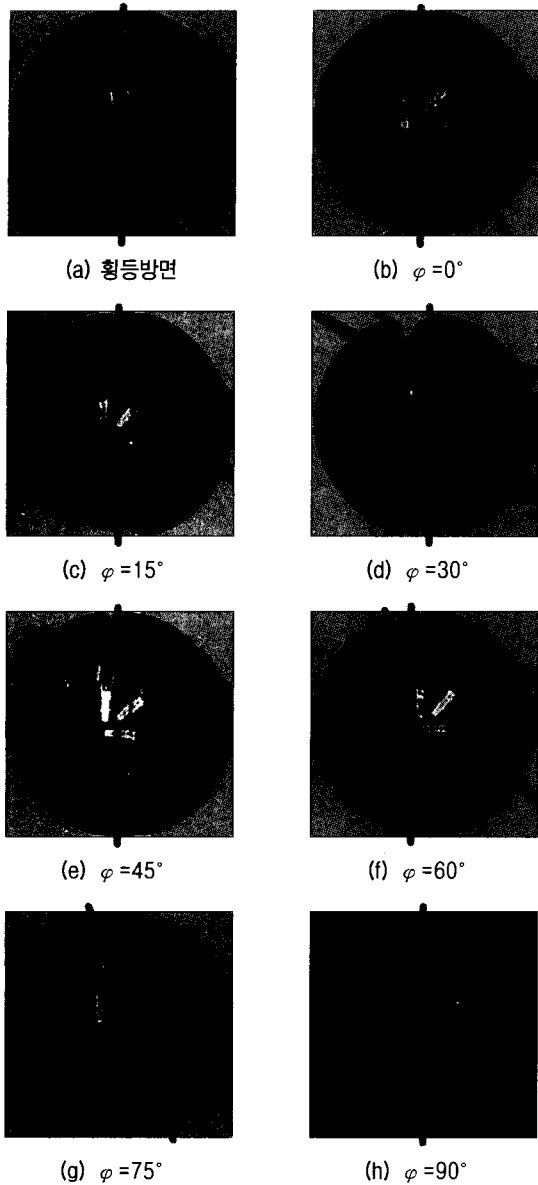


사진 2. 간접인장강도 시험 후 시료의 파괴양상

### 4.3.3 인장강도

간접인장강도 시험결과 구하여진 각도별 시료 파괴 응력의 평균값으로 세일의 간접인장강도를 식 (13)과 식 (14)로 산정하였다.

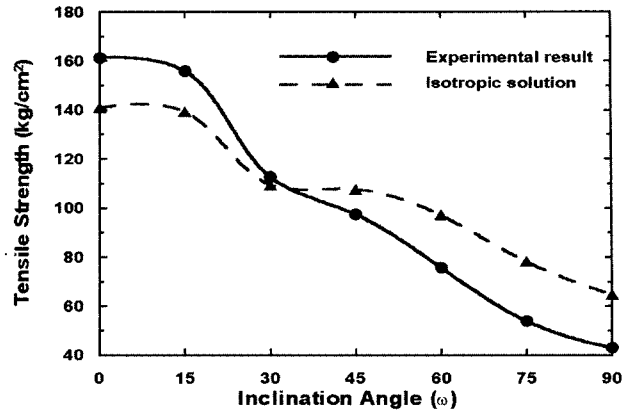


그림 13. 등방, 이방해석의 간접인장강도

$$\sigma_t = 2 \frac{W_f}{\pi D t} \quad (13)$$

$$\sigma_t = -q_{xx} \frac{W_f}{\pi D t} \quad (14)$$

식 (14)의  $q_{xx}$  값은 실험에서 구한 각도별 시료의 x 방향의 응력집중계수이다.

세일의 등방 해석에 의한 간접인장강도와 시험에서 얻어진  $\varphi$ 에 따른 응력집중계수로 구한 간접인장강도 값과 파괴양상은 표 3과 같다.

그림 13은 간접인장시험시 각도에 따른 파괴응력의 평균값으로 응력집중계수를 등방인 -2로 가정하여 구한 간접인장강도와 실험에서 구하여진 각도에 따른  $q_{xx}$  값으로 구한 간접인장강도를 나타낸 것이다.

$q_{xx}$ 값이 -2인 등방 해석에 의한 간접인장강도와 실험 결과의 이방성을 고려한  $q_{xx}$ 값으로 구한 값은 약 34°에서 동일한 값을 나타내었다. 0°~34°까지는 이방성을 고려한 간접인장강도가 등방해석의 값에 비하여 크게 나타났고, 34°~90°까지는 이방성을 고려한 값이 등방 해석에 비하여 작게 나타났다.

간접인장강도시험에 사용한 대구지역 세일의 경우 75°의 시료를 제외한 나머지 각도에서는 하중이 작용하는 방향에 수직 방향으로 발생하는 인장응력에 의해서 파괴가 일어났다. 75°의 시료를 제외한 파괴의 주 요인

표 3. 총리면 각도에 따른 간접인장강도의 변화

$\varphi$		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Failure mode		T	T	T&S	T	T&S	S	T
Tensile Strength (kg/cm²)	Experimental result	161	156	113	97	76	54	40
	Isotropic solution	141	139	109	108	97	78	65

\*T = tensile failure, S = shear failure



이 인장파괴인 시험편에 대해서 간접인장강도를 구할 수 있었으며, 그림 13과 같이 x방향 응력집중계수를 등방의 -2로 가정하여 세일과 같은 이방성 암석의 인장 강도를 산정 하는 것은 횡등방면이 이루는 각도에 따라서 과대 혹은 과소 평가 됨을 알 수 있다.

## 5. 결론

대구지역에 기반암으로 분포하고 있는 흑색 세일을 채취하여 일축압축강도시험을 통하여 횡등방성의 탄성정수를 구하였다. 층리면이 이루는 각도에 따라서 간접인장시험을 하여 이방성 성질을 가지는 세일의 인장강도를 구하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일축압축강도시험에서 구한 블랙 세일의 탄성정수는  $E_1=282,000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_2=142,000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\nu_1=0.24$ ,  $\nu_2=0.16$ ,  $G_2=94,000 \text{ kg/cm}^2$ 이고 이방비가 2인 암석으로 나타났다.
- (2) 간접인장강도시험의 각도별 시료의 파괴 응력값은 각도 증가에 따라서 선형적으로 감소하였으며  $0^\circ$ 에서  $70 \text{ kg/cm}^2$ 로 가장 큰 값을 보였고  $90^\circ$ 에서  $32 \text{ kg/cm}^2$ 로 가장 작은 값을 나타냈다. 세일과 같은 이방성 암석의 간접인장강도시험에서 인장강도가 최저가 되는 각도는  $90^\circ$ 이며, 이는 인장응력의 작용 방향이 층리면에 수직일 때 임을 알 수 있다.
- (3) 암석의 간접인장강도시험에서 등방과 횡등방면인 경우 시료 중앙의 응력집중계수  $q_{xx}$ 는 -2와 같지만, 이방성일 경우의 간접인장강도시험에서 얻어진  $q_{xx}$ 의 절대값은  $0^\circ$ 에서  $35^\circ$ 까지는 2보다 큰 값을 보였으며,  $35^\circ$ 에서  $90^\circ$ 에서는 2보다 작은 값을 나타냈다. 이와 같이 등방의 응력집중계수를 세일과 같이 이방성 암석의 인장강도 산정에 사용하는 것은 적합하지 않음을 알 수 있다.
- (4) 각도에 따른 간접인장강도시험의 파괴거동 양상을 살펴보면  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 시료에서는 중앙의 수직 균열로 인한 인장파괴가 발생하였고,  $75^\circ$ 의 시료에서는 횡등방면을 따라서 전단파괴만이 발생하였으며,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ 에서는 인장파괴와 전단파괴의 복합적인 파괴가 일어났다.
- (5) 전단파괴만이 발생한  $75^\circ$ 를 제외한 시료에서는 파괴의 주요인이 시료 중심의 수직균열로 인한 인장

파괴임을 알 수 있었다. 세일과 같이 층리면을 포함하고 있는 암석에서는 파괴후의 양상도 고려하여 인장파괴가 발생한 시료에 한하여 간접인장강도를 산정해야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 김기주(1986), "연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구", 공학박사학위 논문, 서울대학교 대학원.
2. 박시현(1996), "퇴적암의 역학적 특성에 관한 연구", 공학석사학위 논문, 경북대학교 대학원.
3. 이인호(1998), "대구 지역 지하수에 대한 지화학적 연구-GIS의 활용", 이학박사학위 논문, 경북대학교 대학원.
4. 이재호(2001), "이방성 암석의 파괴거동 및 탄성정수 산정 연구", 공학석사학위 논문, 경북대학교 대학원.
5. 진연호(2000), "링 시험편에 의한 인장강도시험의 수치해석", 한국암반공학회지, Vol.10, pp.316-319.
6. 허노영(1998), "퇴적암 지반 Tunnel의 비등방 탄소성해석", 공학박사학위 논문, 경북대학교 대학원.
7. Amadei, B., Rogers, J.D., Goodman, R. E.(1983), "Elastic constant and tensile strength of the anisotropic rock.", *Proc. 5th Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Melbourne, Australia, pp.189-196.
8. Bieniawski Z.T., Hawkes, I.(1978), "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.99-103.
9. Chen, C. S.(1996), "Characterization of Deformability, Strength, and Fracturing of Anisotropic Rocks Using Brazilian Test." Ph.D. thesis, *Dept. of Civil Eng., University of Colorado, Boulder.*
10. Chen, C. S., Pan E, Amadei B.(1998), "Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.35, pp.43-61.
11. Hondros G.(1959), "The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of material of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete." *Aust. J. Appl. Sci.* ;10:243-268.
12. Hudson, J. A., Brown, E. T. and Rummel, F.(1972), "The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.9, No.2, pp.241-248.
13. Lekhnistskii, S.G.(1981), *Theory of elasticity of an anisotropic body*, mos cow :mir publishers.
14. Lekhnistskii, S. G.(1957), *Anisotropic Plates* (S. W. Tsai, Trans.), Gordon and Breach, New York.
15. Mellor, M. and Hawkes, I.(1971), "Measurement of tensile strength by diametral compression of disc and annuli." *Engineering Geol.*, Vol.5, pp.173-225.
16. 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.
17. Pomeroy, C. D., Morgan, W.T.A.(1956), "The tensile strength of coal." *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol.7, pp.243-246.

(접수일자 2002. 6. 18, 심사완료일 2002. 10. 5)