

## 원환형 시험편을 이용한 간접인장실험에 관한 연구

이기락<sup>1)</sup> · 김종우<sup>2)</sup>

### Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Ring-type Specimen

Ki-Rak Lee and Jong-Woo Kim

**ABSTRACT** Disc-type and ring-type specimens of four different materials were tested to investigate the tensile characteristics and their brief results are presented. Materials tested were marble, granite, cement mortar and plaster. Uniaxial tensile strengths are compared with Brazilian and ring test strengths. It was found that Brazilian strengths were usually greater than uniaxial tensile strengths and affected by loading rates. In the ring tests, tensile strengths were generally found to be decreased as relative hole radius being increased. Ring test strengths, however, converged to some value in  $\bar{r} \geq 0.45$  of marble,  $\bar{r} \geq 0.29$  of cement mortar and  $\bar{r} \geq 0.5$  of plaster specimens. In such range of  $\bar{r}$ , furthermore, transverse cracking of specimens were observed.

#### 1. 서 론

암석은 압축응력보다는 인장응력에 취약한 물질이므로 암반 구조물의 해석과 안정성 평가에 있어서 인장강도는 매우 중요한 요소이다. 이를 구하기 위한 실내 실험법은 직접 및 간접 인장실험법으로 대별된다. 직접인장실험은 일축인장 응력조건하에서 암석의 인장강도를 구하는 것이며, 이에 비해 간접인장실험은 암석의 취성적인 성질에 기인한 분리파괴현상을 이용하여 인장강도를 구하는 특징이 있다.

압열인장실험은 가장 흔히 실시되는 간접인장실험법으로 원판형 시험편을 직경방향으로 가압하여 인장강도를 산정한다. 한편, 중공(center hole)을 가진 원판형 시험편, 즉 원환형 시험편(ring-type specimen)을 이용하는 간접인장실험법이 고려될 수 있으며, 이 방법을 링 실험(ring test)이라고 한다. 이는 원환형 시험편에 직경방향의 압축력을 가하여 중공의 선단에서 인장과 파괴를 유발시키는 것으로서, 이때 파괴개시점의 응력상태로부터 암석의 인장강도를 구하는 실험이다. Hobbs(1964)는 링실험의 이론적인 응력조건식을 제시하였고, Addinall과 Hackett(1964)은 상대공반경(relative hole radius)의 변화에 따른 응력집중계수를 조사하였다. 그러나 이에 관한 국내의 연구는 매우 미미한 상태

이다.

본 연구에서는 대리석, 화강암, 시멘트 모르타르, 석고 등 4종의 시료에 대해 일축 및 삼축압축실험, 직접인장실험, 압열인장실험, 링실험 등을 실시하였다. 직접인장실험에 의한 일축인장강도와 각종 간접인장실험에서 산출된 강도치를 비교하며, 특히 링실험에서 중공의 크기가 강도에 미치는 영향과 원환형 시험편의 변형거동에 대한 조사가 수행되었다.

#### 2. 인장강도 실험법의 특성

직접인장실험은 일축인장 응력조건하에서 암석의 강도를 구하는 전형적인 인장실험이라 할 수 있으나, 시험편 제작과 실험 방법이 까다로운 문제점이 있다. 이로 인해 여러가지 간접인장 실험법들이 발전되었으며, 이 중에서 압열인장실험의 경우 인장강도는 아래와 같은 상용 공식으로 산정된다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

여기서, P는 파괴하중이며, d와 l은 각각 원판형 시험

1) (주)신성엔지니어링 지반공학부

2) 청주대학교 자원공학과 조교수

편의 직경과 길이이다.

한편, 원판형 시험편의 응력상태는 하중점 직하부에서는 압축응력의 집중이 발생하며, 시험편 중심부에서는 인장응력의 3배에 해당하는 압축응력이 발생한다. 일반적으로 암석은 취성적인 성질을 가지므로 압축응력에 의해 파괴되기 전에 이것의 1/3에 해당하는 인장응력에 의해 먼저 파괴되기 쉬우므로 이 실험법은 암석의 인장강도를 간접적으로 구할 수 있는 것으로 인정되고 있다(Fairhurst, 1964). 그러나, 압축 및 인장응력이 시험편내에 동시에 작용하고 있으며, 특히 연암의 경우 하중 접촉점이 변형되어 집중하중 대신에 면접촉 하중이 작용하기 쉽다는 문제점이 있다.

한편, 원판형 시험편의 문제점을 해결하기 위하여 원판형 시험편을 이용하는 링 실험법이 개발되었다(Hobbs, 1964; Hudson, 1969). 시험편은 Fig. 1과 같이 반경  $r_o$ 인 원판에 반경  $r_i$ 인 작은 중공을 뚫은 형태이며 여기에 직경방향의 압축력을 가하는 것이다. 이때 원판반경  $r_o$ 에 대한 중공반경  $r_i$ 는 상대공반경( $\bar{r} = r_i/r_o$ )으로 정의된다.

원판형 시험편내의 응력분포에 대한 근사해는 압열인장 시험편내의 응력상태와 무한원판내 원형공동에 관한 Kirsch의 해를 중첩함으로써 구해질 수 있다. 직경  $d$ , 길이  $l$ 인 원판형 시험편의 중심점에서 발생하는 인장응력  $P_s$ 와 압축응력  $Q_s$ 는 인장을 (+)로 규정할 때 다음과 같이 표시된다.

$$P_s = \frac{2P}{\pi dl} \tag{2}$$

$$Q_s = -\frac{6P}{\pi dl} \tag{3}$$

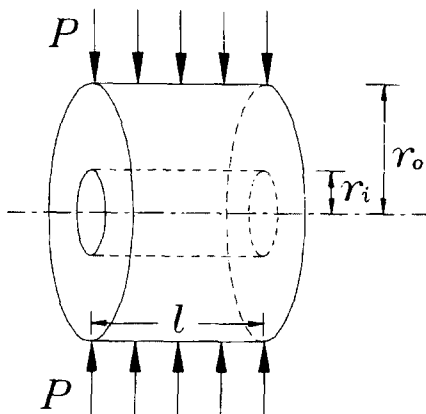


Fig. 1. Shape of ring test specimen.

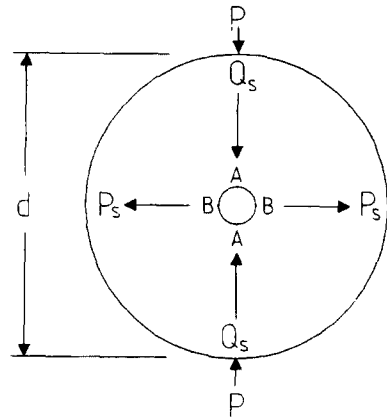


Fig. 2. Schematic diagram illustrating the variation of stress in the ring-type specimen.

여기서 원판의 중심부에 작은 중공을 가진 원판형 시험편을 생각하면, 중공 주위에는 (2)식과 (3)식으로 표시되는 인장응력과 압축응력이 작용하게 된다. Fig. 2는 중공에 작용하는 응력을 표시한 것으로서 Kirsch 해를 이용하면 중공의 상하단 A지점과 좌우단 B지점에서 발생하는 응력을 산정할 수 있다.

즉, 인장응력  $P_s$ 는 A지점에서 인장응력  $3P_s$ 와 B지점에서 압축응력  $P_s$ 를 발생시키며, 또한 압축응력  $Q_s$ 는 A지점에서 인장응력  $Q_s$ 와 B지점에서 압축응력  $3Q_s$ 를 발생시킨다. 이와 같이  $P_s$ 와  $Q_s$ 에 의해서 발생된 응력들을 조합하면 A지점에서의 인장응력  $P$ 와 B지점에서의 압축응력  $Q$ 는 다음과 같다.

$$P = -Q_s + 3P_s = \frac{12P}{\pi dl} \tag{4}$$

$$Q = 3Q_s - P_s = -\frac{20P}{\pi dl} \tag{5}$$

시험편 내부에서 최대 인장응력이 발생하는 지점은 A지점이므로 (4)식은 링실험의 기초적인 인장강도 산정식이 된다. 한편, (4)식을 압열인장실험의 강도와 비교하기 위하여 응력집중계수  $K$ 를 이용하여 일반화하면 다음과 같다.

$$S_t = K \frac{2P}{\pi dl} \tag{6}$$

Hobbs(1964)는  $K$ 를 (7)식과 같은 근사식으로 표현하였으며, Addinall(1965)은 임의의 상대공반경에 대한 응력집중계수 도표를 작성함으로써 각각  $K$ 를 정량

적으로 조사하였다.

$$K = 6 + 38\bar{r}^2 \quad (0 < \bar{r} < 0.1) \quad (7)$$

### 3. 시료와 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 시험편 제작

본 연구에서는 대리석, 화강암, 모르타르, 석고 등 4종의 시료에 대해 여러가지 실험이 실시되었다. 대리석 시료는 수입 석재인 파테말라산 알렉산드라 백색 대리석(Alexandra white marble)으로서, 신선한 암괴에 대해 직경 43.4 mm인 코어를 채취하였으며, 화강암 시료는 서울 은평구 녹번동 일대에서 채취된 직경 42 mm 코어이다.

모르타르 시험편은 KSL의 규정에 의하여 시멘트:모래:물의 중량비를 1:2.45:0.485로 혼합한 후 직경 100 mm인 원주형으로 성형하였다. 단, 직접인장 시험편은 내경 40.5 mm인 PVC파이프를 사용하여 제작하였다. 한편, 석고시험편은 물:석고의 중량비가 1:1.2로 혼합한 후 직경 52 mm인 원주형으로 성형하였다.

일축압축, 삼축압축, 직접인장 시험편은 직경 대 길이의 비가 약 1:2이며, 압열인장 시험편은 약 1:0.8이

Table 1. Dimension of ring type specimens

| Sample  | Diameter of Disc (mm) | Diameter of hole (mm) | Relative hole radius | Number of specimens |
|---------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Marble  | 43.4                  | 3.0                   | 0.07                 | 6                   |
|         |                       | 4.3                   | 0.10                 | 6                   |
|         |                       | 8.3                   | 0.19                 | 6                   |
|         |                       | 12.5                  | 0.29                 | 6                   |
|         |                       | 19.4                  | 0.45                 | 6                   |
| Granite | 42                    | 29.5                  | 0.68                 | 6                   |
|         |                       | 3.0                   | 0.07                 | 5                   |
|         |                       | 4.0                   | 0.10                 | 5                   |
|         |                       | 6.0                   | 0.14                 | 5                   |
| Mortar  | 100                   | 5.0                   | 0.05                 | 6                   |
|         |                       | 10.0                  | 0.10                 | 6                   |
|         |                       | 19.0                  | 0.19                 | 6                   |
|         |                       | 29.0                  | 0.29                 | 6                   |
|         |                       | 54.0                  | 0.54                 | 6                   |
|         |                       | 65.0                  | 0.65                 | 6                   |
| Plaster | 52                    | 3.1                   | 0.06                 | 6                   |
|         |                       | 5.2                   | 0.10                 | 6                   |
|         |                       | 9.9                   | 0.19                 | 6                   |
|         |                       | 14.0                  | 0.27                 | 6                   |
|         |                       | 18.8                  | 0.36                 | 6                   |
|         |                       | 26.0                  | 0.50                 | 10                  |
|         | 38.0                  | 0.73                  | 10                   |                     |

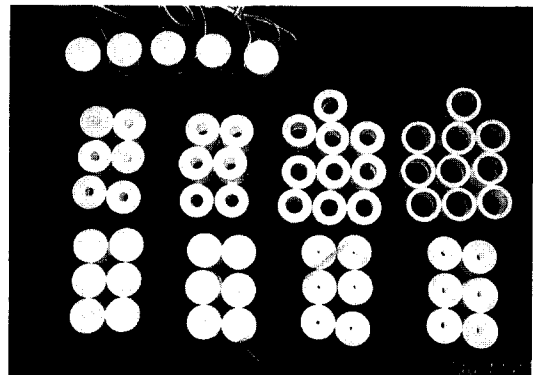


Fig. 3. View of plaster specimens.

되도록 제작하였다. 한편, 원환형 시험편은 원판의 중심부에 탁상 전기드릴과 코어 채취기를 사용하여 소정의 직경을 갖는 중공을 뚫어 제작하였으며, Table 1은 제작된 원환형 시험편의 규격을 정리한 것이다. 또한, Fig. 3은 제작된 석고 시험편의 모습을 보여준다.

#### 3.2 실험장치

본 연구에서는 Tinius Olsen사의 60톤 용량 만능시험기를 사용하였다. 이 장치는 하중 프레임, 유압동력부 그리고 제어기 등으로 구성되어 있으며 압축, 인장, 굴곡실험 등과 같은 다양한 정적하중실험을 수행할 수 있다. 이 중에서 제어기는 하부가압판에 설치된 LVDT로부터 전송된 시험편의 수직변위와 압력변환기로부터 전송된 압력 등을 이용하여 하중 및 변형률 속도를 써보조절하는 기능을 갖고 있다. 또한, 제어기는 486PC와 연결되어 미리 작성된 명령 프로그램에 의해 구동되며, 실험중 하중, 변위, 변형률 등은 16 channel amplifier를 통해 노트북 PC로 획득되었다.

#### 3.3 실험방법

일축압축, 삼축압축, 압열인장 실험 등은 원칙적으로 ISRM의 제안규정에 따라 실시되었으며, 링 실험은 압열인장실험의 방법을 원용하였다. 따라서 여기에 관한 구체적인 실험방법은 생략한다. 그러나, 직접인장실험은 시험편 성형과 실험방법이 매우 까다롭고 그 제안규정도 없는 실정이다. 국내의 경우 장기남 등(1980)이 압축장치를 변형하여 직접인장실험을 실시한 이래 순수한 의미의 직접인장실험은 거의 수행되지 못하고 있다.

본 실험에서는 실험중 시험편의 편심을 제거하기 위하여 실험기의 상하부 가압판에 구면좌를 장치하였고,



Fig. 4. View of direct tensile specimens of cement mortar.

구면좌와 물림장치(grip holder) 사이에 고강성 스프링을 설치하여 휨 현상에 의한 파괴가 일어나지 않도록 하였다. 또한, 시험편을 물림장치에 고정시키기 위해 시험편의 양단을 에폭시 레진을 사용하여 경화시켰다. Fig. 4는 모르타르의 직접인장 시험편을 보여 준다.

실험절차를 설명하면, 우선 물림장치의 홈과 동일한 형상을 갖도록 제작된 시험편의 양단을 물림장치의 상하 홈과 맞추고, 이를 상하부 가압판에 삽입하였다. 다음으로 실험기의 제어기를 이용하여 과도한 초기 하중이 시험편에 가해지지 않도록 10 kg/min의 저속도로 가압판이 시험편에 접촉하도록 유도하였으며, 20 kg의 미소한 초기하중이 재하된 이후부터, 대리석과 화강암

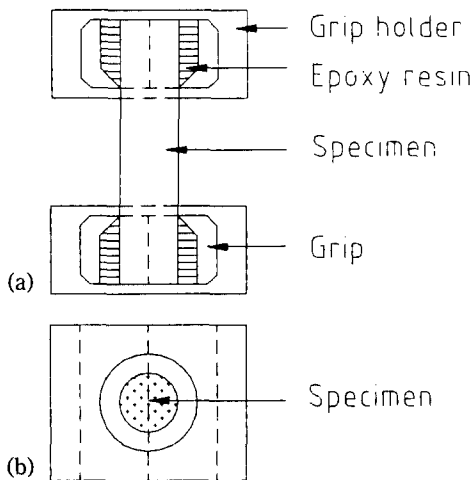


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental assembly for direct tensile test. (a) section view, (b) top view

Table 2. Loading rates in this test

| Sample  | Direct tensile test (kg/min) | Brazilian and ring test (kg/min) |
|---------|------------------------------|----------------------------------|
| Marble  | 300                          | 500                              |
| Granite | 300                          | 500                              |
| Mortar  | 100                          | 1000                             |
| Plaster | -                            | 200                              |

의 경우에는 300 kg/min의 하중속도로, 모르타르의 경우에는 100 kg/min의 하중속도로 시험편 과단할 때까지 연속적인 인장력을 가하였다. Fig. 5는 직접인장시험장치의 도면을 나타낸 것이고, Table 2는 본 실험에 적용한 하중속도를 나타낸 것이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 각 시료의 기본 물성

4종의 시료에 대해 일축압축, 삼축압축, 압열인장 실험 등의 기본 물성실험을 실시한 결과는 Table 3과 같다. 여기서 각 시료의 시험편 갯수는 5~15개 정도이며 모르타르와 석고 시료에 대해서는 삼축압축실험과 탄성파속도 측정실험이 실시되지 않았다.

##### 4.2 일축인장응력하의 특성

대리석, 화강암, 모르타르 시료에 대해 직접인장실험이 실시되었으며, 일반적으로 Dog-bone type의 시험편의 중앙부에서 과단이 일어나 본 실험의 정확성을 파악할 수 있었다.

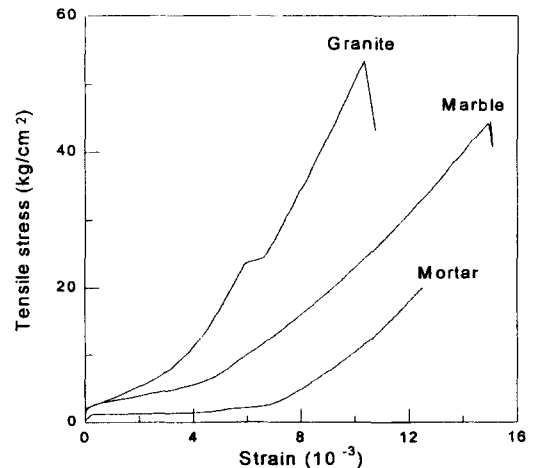


Fig. 6. Stress-strain curves in direct tensile tests.

Table 3. Mechanical properties of four different materials

| Sample  | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Uniaxial compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> ) | Young's modulus (× 10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | Poisson's ratio | Wave velocity (m/sec) |        | Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> ) | Internal friction angle |
|---------|------------------------------|---|---|-----------------|-----------------------|--------|--------------------------------|-------------------------|
|         |                              |   |   |                 | P-wave                | S-wave |                                |                         |
| Marble  | 2.64                         | 935   | 4.0   | 0.31            | 3343                  | 2030   | 160                            | 48                      |
| Granite | 2.64                         | 1769  | 5.1   | 0.25            | 4128                  | 1626   | 240                            | 55                      |
| Mortar  | 2.15                         | 333   | 0.42  | -               | -                     | -      | -                              | -                       |
| Plster  | 1.33                         | 147   | 0.27  | -               | -                     | -      | -                              | -                       |

직접인장시험의 결과 대리석의 일축인장강도는 44, 화강암은 53, 모르타르는 20 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 또한, Fig. 6은 직접인장시험을 통해 얻어진 대표적인 시료별 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 초기 재하구간의 비선형구간과 연속되는 탄성구간으로 구분할 수 있다. 여기서 재하초기부분에 과도한 변형률이 나타난 것은 본 실험장치의 상하부 가압판에 설치된 구면좌와 스프링에 기인한 것으로 생각된다. 한편, 탄성구간에 대해 인장력에 의한 탄성계수를 구하면, 대리석 4000, 화강암 7500, 모르타르 3200 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

한편, 이와 같은 인장 탄성계수는 Table 3에 제시된 압축 탄성계수에 비하여 대리석의 경우는 1%, 화강암은 1.5%, 모르타르는 7.6%의 값에 해당한다. 따라서, 암석의 인장 탄성계수는 압축 탄성계수의 1~10% 정도가 될 것으로 예상할 수 있으나, 이 분야에 대해서는 여러 가지 압축에 대한 보다 많은 실험이 필요하다고 생각된다.

4.3 원판형 및 원환형 시험편의 강도 특성

대리석, 화강암, 모르타르, 석고 등 4종의 시료에 대해 원판형 시험편을 이용한 압열인장시험을 실시한 결

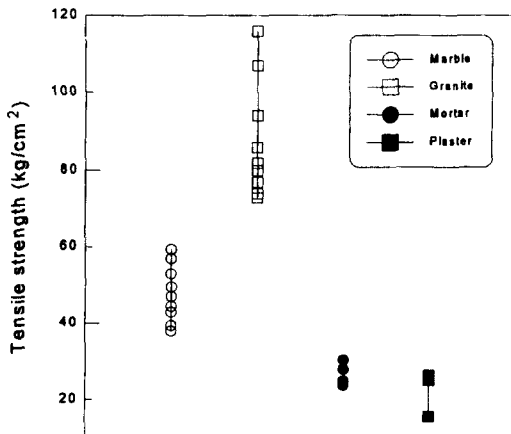


Fig. 7. Brazilian tensile strength of four different materials.

과 인장강도의 분포는 Fig. 7과 같다. 여기서 화강암은 가장 큰 강도값을 나타내며 또한 흠어짐도 가장 크게 나타났다. 이는 화강암이 가장 불균질한 물질임을 시사해준다고 할 수 있다.

Table 4는 시료별로 압열인장강도 및 일축인장강도의 평균값을 비교하여 나타난 것으로, 모든 시료에서 압열인장강도값이 더 크게 조사되었다. Sundaram (1980)은 압열인장강도가 일축인장강도에 비해 과대평가 될 수 있음을 발표한 바 있으며, 본 실험의 결과는 이에 부합한다.

일반적으로 하중속도는 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 대리석 시험편에 대하여 하중속도에 따른 강도효과를 관찰하기 위하여 50, 250, 500, 2500, 10000 kg/min의 5가지 속도를 시험편에 적용시켜 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 50~500 kg/min의 하중속도까지는 인장강도가 증가하는 것으로 관찰되었고 그 이상의 속도에서는 급격한 증가현상이 나타나지 않았다. 따라서, 본 실험에서는 500 kg/min의 하중속도를 압열인장 및 링 실험에 각각 적용하였다.

한편, 이 두 실험은 실험방법 및 조건이 유사한 편으로 시험편의 형상에 다소 차이가 있을 뿐이다. 그러나, 두 실험에서 얻어진 파괴하중으로부터 대상시료의 인장강도를 구하는 방법은 탄성학적 전지에 바탕을 두고 있기 때문에 (1)식 및 (6)식에서와 같이 큰 차이가 있다. 본 연구에서는 원환형 시험편의 응력집중계수를

Table 4. Comparison between uniaxial and Brazilian tensile strength

| Sample  | Uniaxial (kg/cm <sup>2</sup> ) | Brazilian (kg/cm <sup>2</sup> ) | Ratio |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-------|
| Marble  | 44                             | 47                              | 1.07  |
| Granite | 53                             | 88                              | 1.66  |
| Mortar  | 20                             | 26                              | 1.30  |
| Plaster | -                              | 23                              | -     |

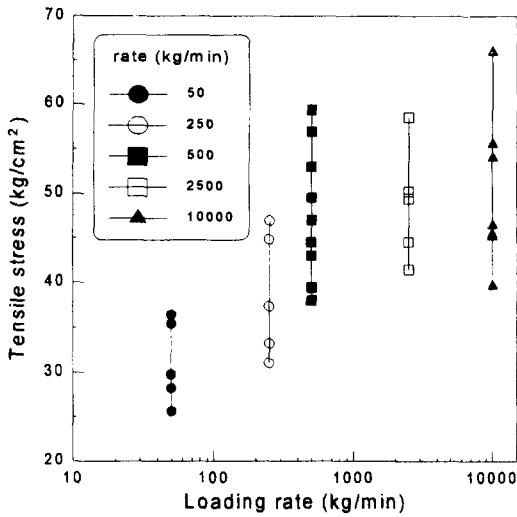


Fig. 8. Variation of Brazilian tensile strength with loading rate.

Hobbs(1964)와 Addinall(1965)의 연구결과 자료를 근거로 하여 최소자승법을 이용하여 산출하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5와 (6)식을 이용하면 링시험에 의한 인장강도를 산정할 수 있으며, Fig. 9는 4종의 시료에 대하여 각각의 상대공반경에 대한 인장강도값의 분포를 나타낸 것이다. 모든 시료에서 상대공반경이 작을수록 강도값이 크고 값의 흩어짐도 크게 나타났으며, 상대공반경이 커질수록 강도가 대체로 감소하며 흩어짐도 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 각 상대공반경에서의 강도값을 평균하여 표시한 것으로, Fig. 9의 그림들을 요약한 것에 해당한다. 상대공반경이 커질수록 강도가 대체로 감소하여 일정치에 수렴하는 경향을 나타내는데, 대리석의 경우는  $\bar{r} \geq 0.45$ , 모르타르의 경우  $\bar{r} \geq 0.29$ , 석고의 경우  $\bar{r} \geq 0.5$ 의 범위에서는 강도가 수렴해 가는 경향을 보이고 있

Table 5. Stress concentration factors of ring test in this study

| $\bar{r}$ | K      | $\bar{r}$ | K       |
|-----------|--------|-----------|---------|
| 0.05      | 6.0950 | 0.36      | 11.8974 |
| 0.06      | 6.1368 | 0.45      | 16.5237 |
| 0.07      | 6.1862 | 0.50      | 20.3107 |
| 0.10      | 6.3847 | 0.54      | 24.3638 |
| 0.14      | 6.7630 | 0.65      | 42.1424 |
| 0.19      | 7.4342 | 0.68      | 52.6532 |
| 0.27      | 9.0409 | 0.73      | 75.8402 |
| 0.29      | 9.5619 |           |         |

다. 단, 화강암의 경우는 중공을 뚫는 작업이 원활하지 못하여  $\bar{r}$ 의 값이 0.14 보다 큰 범위의 링시험을 수행할 수 없었으므로 강도값의 수렴 여부를 파악할 수 없었다.

한편, 3종 시료의 강도 수렴값은 Table 5에 제시된 시료별 평균 압열인장강도값에 비하여, 대리석은 4.06배, 모르타르는 2.69배, 석고는 1.04배로 나타났다. Hudson(1969)은 링시험에 의해 얻어진 인장강도는 압열인장강도값의 3배에 가까운 값을 나타낸다고 발표하였는데, 본 실험에서 대리석과 모르타르의 실험결과와는 이와 거의 부합한다고 볼 수 있다. 그러나, 석고의 링시험 강도 수렴값은 압열인장강도와 거의 유사하였으며, 이는 석고시료가 다른 시료에 비해 비교적 등방, 균질하며 취성도가 작은 물질인 것에 기인한 것으로 생각된다.

#### 4.4 원환형 시험편의 고찰

매우 미소한 중공을 갖는 원환형 시험편을 고려할 경우 상대공반경이 0에 가까우므로 (1)식과 (6)식 중에서 어떤 것을 선택해야 하는가는 문제점이 있다. 실제로 (1)식과 (6)식의 적용 여부는 매우 미묘한 문제이다. 암석은 탄점소성적인 복잡한 거동을 나타내는 물질이며 작은 광물 결정들의 집합체이므로 자체내에 공극을 포함하여 이것이 미소한 중공의 역할을 할 수 있기 때문이다.

실제로 원환형 시험편을 이용한 링시험은 압열인장시험에서 하중점축부의 응력집중을 다소 완화시킬 수 있는 특징이 있으나 그 이론적 수식과정에서 탄성, 균질, 등방성인 물질을 가정해야 하기 때문에 응력집중계수가 6배의 큰 차이가 발생하게 된 것이다.

본 실험에서 대리석 압열인장시험의 평균파괴하중은 1110 kg이었으며, 중공의 직경이 3 mm로서 상대공반경이 가장 작은  $\bar{r}=0.07$ 의 경우 평균 파괴하중은 940 kg으로 나타났다. 이를 모두 (1)식에 적용하여 대리석의 인장강도를 구하면, 각각 47 kg/cm<sup>2</sup>, 40 kg/cm<sup>2</sup>에 해당한다. 여기서 대리석의 일축인장강도가 44 kg/cm<sup>2</sup>임을 감안하면 원환형 시험편을 사용하는 링시험의 의의를 짐작할 수 있다. 즉, 링시험 강도는 압열인장강도가 일축인장강도에 비하여 과대평가될 가능성을 보완해 줄 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, 본 실험의 경우 중공의 크기가 3 mm미만인 원환형 시험편에 대해서는 실험이 수행되지 못하였으며, 차후 암석내 공극 크기를 감안한 보다 작은 중공을 가진 원환형 시험편에

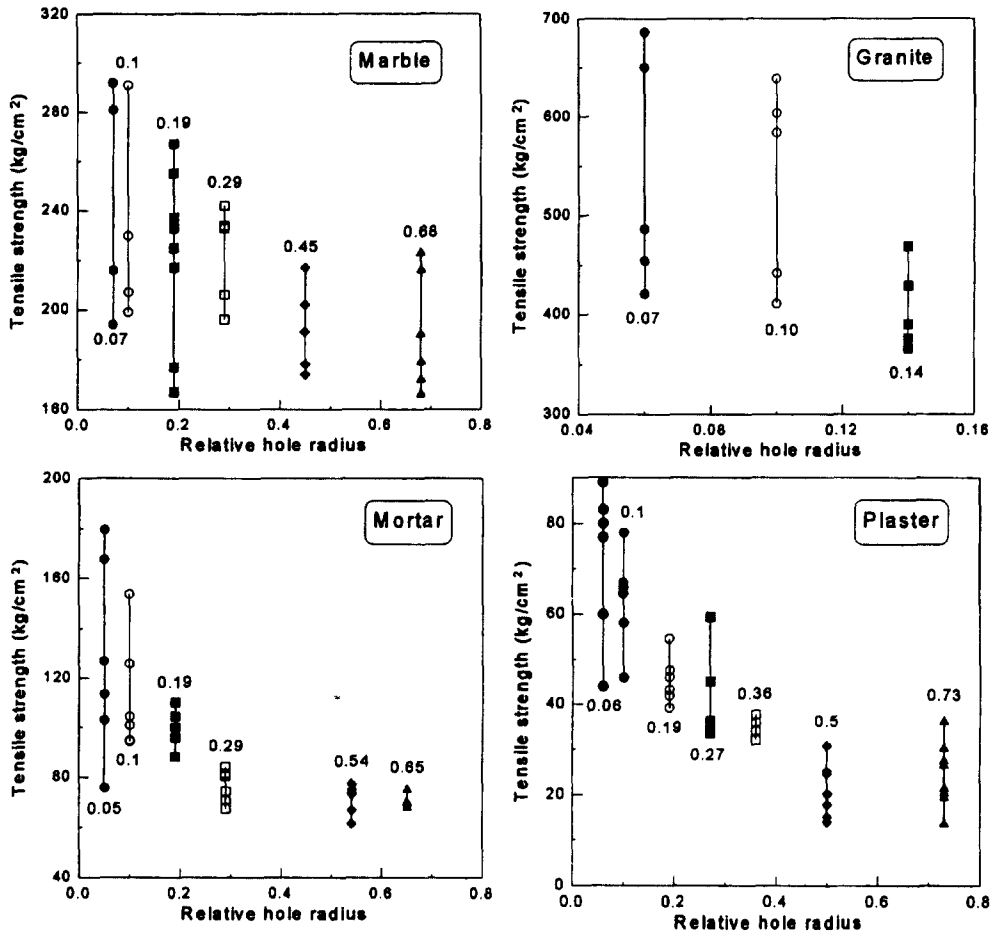


Fig. 9. Variation of tensile strength with relative hole radius.

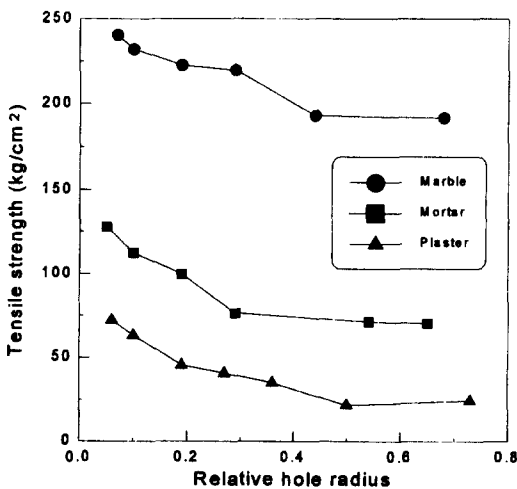


Fig. 10. Variation of tensile strength for three different materials.

대한 연구가 필요하다.

#### 4.5 원판형 및 원환형 시험편의 변형 특성

Fig. 11은 대리석 시료에 대하여 압열인장시험과 링 시험을 통해 얻어진 원판형과 원환형 시험편의 하중 대 변위 관계의 한 예를 나타낸 것으로서, 압열인장시험편이 가장 큰 파괴하중과 변위를 나타낸다. 그러나 원환형 시험편의 경우에는 파괴하중이 작기 때문에 발생 변위가 작게 나타난 것으로서, 동일한 크기의 하중이 작용할 경우 두 시험편의 변위 발생량을 조사하기 위해서는 약간의 계산과정이 필요하다.

본 연구에서는 압열인장시험편의 평균 파괴하중과 변위를 기준으로 하여 링시험에서 각 상대공반경에 따른 평균 파괴하중을 환산하여 그에 따른 변위를 구하고, 이를 압열인장시험편의 발생 변위와 비교하였다.

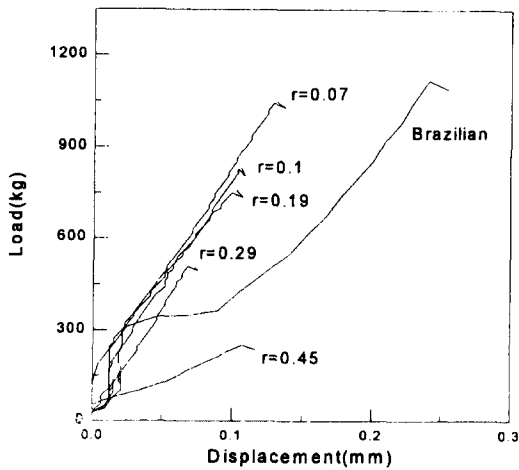


Fig. 11. Load-displacement relationship in Brazilian and ring tests.

그 결과  $\bar{r}=0.07$ 인 원환형 시험편의 변위는 원판형 시험편의 변위보다 1.34배 크게 나타났으며,  $\bar{r}=0.1$  일 때 1.78배,  $\bar{r}=0.19$  일 때 2.06배,  $\bar{r}=0.29$  일 때 3.48배 그리고  $\bar{r}=0.45$  일 때는 5.71배 크게 나타났다. 즉, 상대공반경이 커질수록 파괴 하중은 작아지고 파괴시까지 변위발생비율은 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 대리석 시료가 상대공반경 증가에 따른 변위 증가율이 가장 크게 나타났으며, 석고 시료가 가장 작게 조사되었다.

한편, 원환형 시험편에서의 파괴균열은 항상 시험편의 중공을 지나 발생하였다. 또한, 연암의 압열인장시험에서 흔히 발생하는 하중접촉부에서의 면접촉 하중에 의한 썩기파괴 현상은 관찰되지 않았다. 균열 생성 상태를 조사한 결과 중공 주위의 균열이 상 하부 가압 접촉부 방향으로 갈수록 미세해 지는 것으로 관찰되어 중공에서의 인위적인 응력집중 효과가 확인되었다.

또한, 대리석의 경우는  $\bar{r}=0.45$ , 모르타르는  $\bar{r}=0.29$ , 석고는  $\bar{r}=0.5$  이상의 시험편들에 있어서는 하중축 방향의 중균열 이외에도 이와 직교하는 횡균열이 발생하였다. 시료에 따라 횡균열이 발생하는 상대공반경의 크기는 각 시료에 있어 인장강도가 수렴해 가는 상대공반경 크기와 거의 동일한 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대리석, 화강암, 모르타르, 석고 등

4종의 시료에 대해 여러 가지 인장실험을 실시하였다. 여기서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시료별 일축인장강도는 대리석 44, 화강암 53, 모르타르  $20 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 압열인장강도는 대리석 47, 화강암 88, 모르타르  $26 \text{ kg/cm}^2$ 로서 압열인장강도가 과대평가될 수 있음을 알 수 있다.

2. 암석의 인장 탄성계수는 압축 탄성계수의 1~10% 정도의 범위에 있다.

3. 대리석의 압열인장시험에서 다양한 하중속도를 적용시킨 결과  $500 \text{ kg/min}$ 의 하중속도까지는 인장강도가 증가하였고 이보다 큰 속도에서는 급격한 증가현상이 나타나지 않았다.

4. 원환형 시험편의 경우 상대공반경이 작을수록 인장강도가 크고 값의 흠어짐도 크게 나타났으며, 상대공반경이 커질수록 강도와 흠어짐이 감소하는 경향을 나타내었다.

5. 링실험에 의해 얻어진 인장강도는 압열인장강도값의 3배에 가까운 값을 나타내어 외국의 다른 연구 결과와 부합하였다.

6. 링실험에서 대리석은  $\bar{r} \geq 0.45$ , 모르타르는  $\bar{r} \geq 0.29$ , 석고는  $\bar{r} \geq 0.5$ 의 범위에서 인장강도가 수렴해 가는 경향을 보였으며, 이 범위에서 원환형 시험편의 파괴과정에 횡균열이 관찰되었다.

## 참 고 문 헌

1. 장기남, 이정인, 1980, 암석의 하중조건에 따른 인장실험하에서의 변형거동 및 강도에 관하여, 대한광산학회지, 17권, 1호, p. 20-29.
2. D. W. Hobbs, 1964, The tensile strength of rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 1, p.385-396.
3. J. A. Hudson, 1969, Tensile Strength and the ring test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 6, p. 91-97.
4. J. A. Hudson, E. T. Brown and F. Rummel, 1972, The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 9, p. 241-247.
5. J. A. Hudson, 1970, A critical examination of indirect tensile strength tests for brittle rock, Ph. D Thesis, University of Minnesota, p. 147.
6. C. Fairhurst, 1964, On the validity of the brazilian test for brittle materials, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 1, p. 535-546.



7. J. A. Hudson, E. T. Brown and F. Rummel, 1972, The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 9, p. 241-247.
8. J. C. Jaeger, 1966, Failure of rocks under tensile conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 4, p. 219-227.
9. P. N. Sundaram, J. M. Corrales, 1980, Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 17, p. 131-133.