

링 시험편에 의한 인장강도시험의 수치해석

진연호¹⁾ · 양형식²⁾ · 박철환³⁾

Numerical Simulation of Tensile Strength Test by Ring-type Specimen

Yeon-Ho Jin, Hyun-Sik Yang and Chul-Whan Park

ABSTRACT Stress variation due to size variation and the eccentricity of ring type tensile specimen was analyzed by FLAC program. To get the stable tensile strength the ratio of inner to outer ring diameter should be within a certain range. Diameter ratio of 0.3 was suggested to be adequate. It seemed to be difficult to determine the tensile strength because of stress distortion if eccentricity exceeded some limit. To limit the error in 10%, lateral and axial eccentricity was analyzed to be in the limits of 3% and 10%, respectively.

Key words : ring type specimen, tensile strength, FLAC

초 록 : 링 시험편의 크기와 편심에 따른 응력변화를 FLAC으로 분석하였다. 분석 결과 중공의 크기가 일정한 범위에서만 안정된 값을 얻을 수 있었다. 중공의 크기 오차를 줄이기 위한 상대 공반경은 약 0.3이 적절할 것으로 평가되었다. 한편 중공의 편심 오차가 커지면 응력분포가 불균일하게 되어 정확한 인장강도 산정이 어려운 것으로 사료되었다. 적절한 인장강도를 얻기 위해 중공의 편차는 일정한 정도로 한정하여야 할 것으로 생각된다. 편심으로 인한 오차를 10% 이내로 제한하기 위해서는 중공의 중심은 가압방향에 수평한 방향으로 3%, 수직인 방향으로로는 10% 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 링 시험편, 인장강도, FLAC

1. 서 론

암석의 인장강도를 측정하기 위한 간접인장시험법 중 압열인장시험은 디스크형시험편에 직경방향으로 하중을 가하여 파괴시 하중을 근거로 강도를 산정하게 된다.

그러나, 링 실험은 중공을 가진 링 시험편(원환형 시험편)에 직경방향의 하중을 가하여 중공의 선단에서 인장 파괴를 유발, 이때 파괴개시점의 응력상태로부터 암석의 인장강도를 구하는 실험이다.

본 연구에서는 간접인장강도 실험법 중 링 시험편 내의 조건에 따른 응력변화를 수치해석을 통해 분석하였다. 링 실험법은 중공의 크기나 편심에 의해 응력집중계수가 변화하게 된다.^{1,4)}

본 연구에서는 FLAC을 사용하여 링실험법에 있어서 링 시험편의 중공크기의 영향과 편심의 영향을 규명하고자 하였다.

2. 링 실험

1960년대에 중공을 갖는 시험편을 이용하는 링 실험법이 개발되었다(Hobbs, 1964; Hudson, 1969). 시험편은 Fig. 1과 같이 반경 r_1 인 디스크에 반경 r_0 인 작은 중공을 뚫은 형태이며 여기에 직경 방향의 압축력을 가하는 것이다. 이때, 디스크 반경 r_1 에 대한 중공반경 r_0 는 상대 공반경 ($\bar{r} = r_0/r_1$)으로 정의된다.

링 시험편 내의 응력분포에 대한 근사해는 압열인장시험편내의 응력상태와 무한원판내 원형공동에 관한 Kirsch의 해를 중첩하여 구할 수 있다. 직경 d , 길이 l

1)학생회원, 전남대학교 대학원 자원공학과 박사과정

2)정회원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 교수

3)정회원, 한국자원연구소 책임연구원

접수일 : 2000년 8월 14일

심사완료일 : 2000년 8월 22일

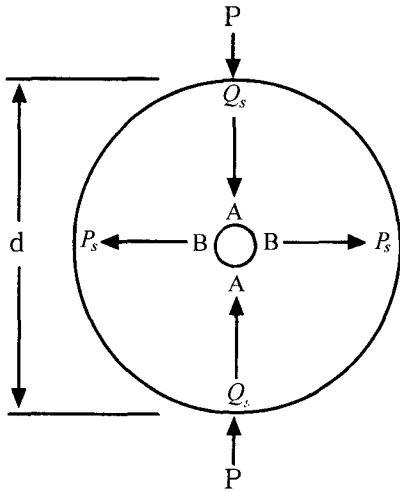


Fig. 1. Schematic diagram illustrating the variation of stresses in a ring-type specimen

인 디스크형 시험편의 중심점에서 발생하는 인장응력 P_s 와 압축응력 Q_s 는 인장을 (+)로 규정할 때 다음과 같이 표시된다.

$$P_s = \frac{2P}{\pi d} \tag{1}$$

$$Q_s = -\frac{6P}{\pi d} \tag{2}$$

여기서 디스크의 중심부에 작은 중공을 가진 링 시험편을 생각하면, 중공 주위에는 (1)식과 (2)식으로 표시되는 인장응력과 압축응력이 작용하게 된다.

Fig. 1은 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 P와 B지점에서의 압축응력 Q는 다음과 같다.

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

$$Q = 3Q_s - P_s = -\frac{20P}{\pi d} \tag{4}$$

시험편 내부에서 최대 인장응력이 발생하는 지점은 A 지점이므로 (3)식은 링 시험의 기초적인 인장강도 산정식

이 된다.

한편, (3)식을 압열인장시험의 강도와 비교하기 위하여 응력집중계수 K를 이용하여 일반화하면 다음과 같다.

$$S_t = K \frac{2P}{\pi d} \tag{5}$$

Hobbs(1964)는 K를 (6)식과 같은 근사식으로 표현하였다.

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

3. FLAC 해석

3.1 모델 설정

본 연구에서는 파괴기준으로서 Mohr-Coulomb 모델을 채택하였으며, 중공의 크기를 변화시켜 안정된 결과를 얻는 중공의 크기를 상대 공반경으로서 확인하였으며 이 때 결정된 상대 공반경을 가진 링 모형의 중심을 좌우(또는 상하)로 이동시켜 편심의 영향을 평가하였다.

해석후 인장영역이나 소성영역의 발생을 확인하여 파괴 발생을 가정하고 이 때 중공의 선단에서 발생한 응력 상태와 변위를 계산하여 링 암석시험편의 인장강도를 산출하였다. 중공 크기의 영향을 평가할 때는 단순한 응력-변형률 선도를 이용하여 파괴강도를 산출할 수 있었지만, 중공의 위치효과를 평가할 때는 파괴지점이 정확히 중공의 선단이 아니어서 파괴지점의 응력상태로 파괴강도를 산출하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 적용된 링 시험편의 모델이다.

Table 1은 본 연구에서 적용된 세가지 암석시험에 대한 물성자료(이기락, 김종우, 1997)이다.

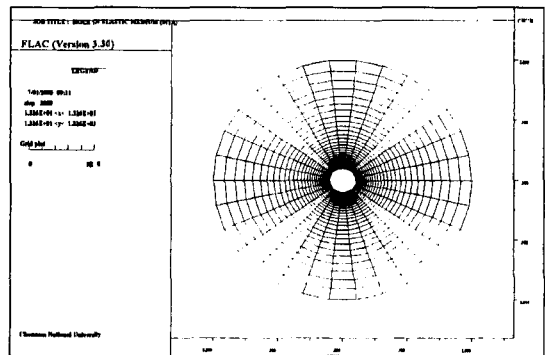


Fig. 2. Model

Table 1. Mechanical properties of three different materials

Sample	Density (g/cm ³)	Uniaxial compressive strength(kg/cm ²)	Brazilian tensile strength (kg/cm)	Young's modulus (×10 ⁵ kg/cm ²)	Poisson's ratio	Cohesion (kg/cm ²)	Internal friction angle
Marble	2.64	935	47	4.0	0.31	160	48
Granite	2.64	1769	88	5.1	0.25	240	55
Concrete	2.21	213	21	1.3	0.23	22	41

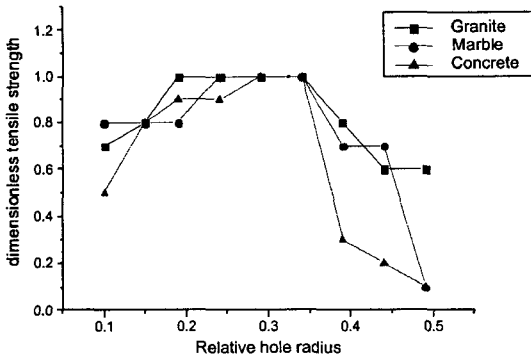


Fig. 3. Variation of tensile strength with respect to the relative hole radius

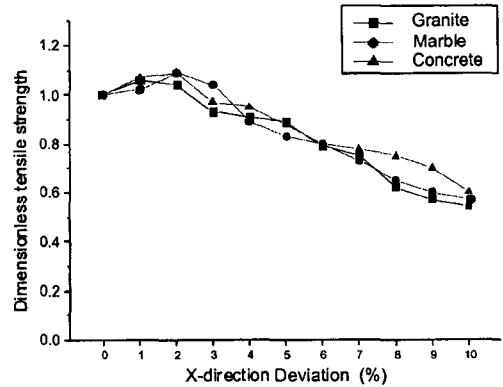
3.2 중공의 크기효과

본 연구에서는 먼저 링 시험편 내 중공크기의 영향을 검토하였다.

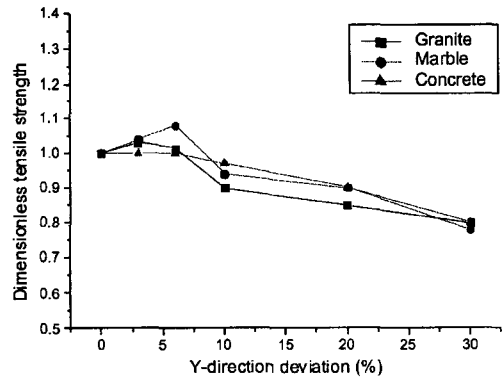
Fig. 3은 상대 공반경(\bar{r})을 0.1에서 0.49까지 9단계로 나누어 상대 공반경의 변화에 따른 무차원화 인장강도의 변화 추이를 분석한 결과이다. 그림에서 보면 각 시험편 공히 상대 공반경이 약 0.3일 때 인장강도가 수렴하는 경향을 보였다. 이와 김(1997)은 대리석의 경우 $\bar{r} = 0.45$, 모르타르는 $\bar{r} = 0.29$ 에서 인장강도가 수렴한다고 하였다. 기존의 연구와 수치해석 결과의 차이는 중공의 크기 영향보다는 중공 천공시 오차나 암석시료의 불균질성에서 기인한다고 사료된다.

대체로 링 시험편의 경우 파괴는 중공 선단의 종방향 변위의 증가로 파괴가 발생하였으나 중공의 크기가 증가할수록 중공 측면의 인장변위가 증가하였다. 따라서, 중공의 크기가 크다면 중공 측면의 인장응력을 고려해야만 한다.

한편, Hudson(1969)은 링 실험에 의해 얻어진 인장강도는 압열인장강도의 3배에 가까운 값을 나타낸다고 발표하였는데, 본 수치해석을 통하여 산정된 3종류의 시료의 경우 입력자료로 사용한 압열인장강도의 1.6~4.8 배로 이와 거의 부합한다고 볼 수 있다.



(a) x-direction deviation



(b) y-direction deviation

Fig. 4. Variation of tensile strength with respect to the hole deviation ($\bar{r} = 0.32$)

3.3 중공의 편심 효과

중공의 위치 즉 천공시 발생할 수 있는 편심의 영향을 검토하였다. 먼저, Fig. 4는 x축 및 y축 편심 즉 좌우와 상하 오차를 변화시켜 무차원 인장강도를 평가하였다. 이 때의 상대 공반경은 0.32로 고정하였다.

Fig. 4(a)의 경우 x축 편심이 반경의 10%일 때, 인장강도는 편심이 없는 경우의 인장강도에 대해 대리석은 53%, 화강암은 58%, 콘크리트는 63% 수준이었다. x축 편심이 증가하면 중공 천정부(Fig. 1의 A부분)의 종방향 변위보다 중공 측벽부(B 부분)의 횡방향 변위가 크게 발

생하게 된다. x축 편심이 5% 이상일 경우 인장파괴 개시점은 A점에서 B점 쪽으로 이동하며 선형적인 인장강도의 감소를 나타내었다.

y축 편심의 영향을 나타낸 Fig. 4(b)의 경우 편심이 직경의 10%인 경우 강도는 원래 강도의 90~100%로서 x축 편심의 경우보다 오차가 작게 나타났다. 한편 y축 방향 편심이 커질수록 즉 천장영역의 두께가 바닥부분의 두께보다 얇아질수록 천장부의 응력 집중이 심화되었으며 이로 인하여 편심이 없는 경우의 인장강도보다 낮아졌다. 한편 벽체방향(B 부분)의 응력집중은 거의 변화가 없으며 따라서 파괴개시점의 위치도 변화가 없고 전체적으로 편심의 영향이 x방향보다 적게 나타났다.

이상과 같은 수치해석 결과를 종합해볼 때, 편심으로 인한 오차를 10% 이내로 제한하기 위해서는 중공의 중심은 가압방향에 수평한 방향으로 3%, 수직인 방향으로 10% 이내가 되어야 하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 FLAC을 이용해 링 시험편의 인장강도에 대한 중공의 크기와 편심의 영향을 평가하였다. 모델의 물성은 화강암, 대리석, 콘크리트 등 3종의 자료를 이용하였다.

1. 상대 공반경이 일정 범위를 벗어나면 인장강도의 값이 감소하는 경향을 보였다. 3종의 모델에 대해 약 0.3의 상대 공반경에서 인장강도가 수렴하는 경향을 보였다.

2. 상대 공반경이 0.32일 때 편심의 영향을 평가한 결과 x축 편심이 y축 편심보다 강도에 미치는 영향이 컸다. 편심으로 인한 강도 오차를 10% 이내로 제한하기 위해서는 중공의 중심점은 가압방향에 수평한 방향(x축 오차)으로 3%, 수직인 방향(y축 오차)으로는 10% 이내로 유지해야 하는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 이기락, 김종우, 1997, 원환형시험편을 이용한 간접인장 시험에 관한 연구, 터널과 지하공간, 7, 221-229.
2. Hobbs, D.W., 1964, The tensile strength of rocks, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., 1, 385-396.
3. Hudson, J.A., 1969, Tensile strength and the ring test, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., 6, 91-97.

양 형 식



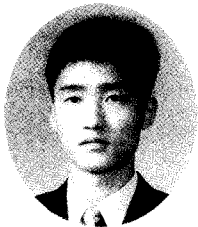
1979년 서울대학교 공과대학 자원공학
학과, 공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학박사

Tel : 062-530-1724

E-mail : hsyang@chonnam.ac.kr

현재 전남대학교 공과대학 자원공학과 교수

진 연 호



1998년 전남대학교 공과대학 자원
공학과, 공학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사

Tel : 062-530-1724

E-mail : u0030380@chonnam.ac.kr

현재 전남대학교 대학원 자원공학과 박사과정

박 철 환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학박사

Tel : 042-868-3244

E-mail : cwpark@rock25t.kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원