

## 터진고리 형태의 암석시편에 대한 인장강도 시험의 이론과 실제

최병희<sup>1)\*</sup>, 이연규<sup>2)</sup>, 박 찬<sup>1)</sup>, 박철환<sup>1)</sup>

### Theory and Practice in the Tensile Strength Test for Split Ring Shaped Rock Specimen

Byung-Hee Choi, Youn-Kyou Lee, Chan Park, Chulwhan Park

**Abstract** In this study the split ring (SR) test was investigated for its applicability to the measurement of the tensile strength of rock specimen of NX size. The concept of the SR test is the same as the half ring (HR) test (Choi et al., 2019) except that the expected fracture plane is perpendicular to the loading direction. Because of this perpendicularity, however, it was believed that the SR test could be more accurate than the HR test. Like the HR specimen, the SR specimen is a curved prismatic bar with a uniform section. Appealing to a basic bending theory in strength of materials, the tensile strength for the special bar can be calculated analytically. Numerical simulations using LS-DYNA revealed, as expected, that the strength errors were 1% and 5% for the tensional and compressional SR tests, respectively, which were much lower than that (12%) of the HR test. To identify the performance of the two SR tests, laboratory experiments were conducted. The HR and Brazilian tests were also performed for comparison. The experiments showed that the ratios of the tensional and compressional SR to Brazilian strengths were 1.2~1.4 and 1.1~1.2, respectively, which are too small compared to empirical values in ordinary bend tests. Consequently, it is concluded that the SR test is not appropriate for use in tensile strength test of rock specimen of NX size. But the ratio of the HR to Brazilian strengths was within 1.7~2.0 for both the previous and present studies, showing a good consistency in their test results.

**Key words** Split ring (SR) test, Half ring (HR) test, Brazilian test, Tensile strength, Rock specimen, LS-DYNA

**초 록** 본 연구에서는 암석의 인장강도를 측정하는 데 터진고리(split ring; SR) 형태의 시편(NX 코어)을 이용하는 굽힘시험법의 적용성을 검토하였다. SR 시험법은 반고리(half ring; HR) 형태의 시편을 이용하는 HR 시험법(Choi et al., 2019)과 개념적으로는 동일하지만 파괴면이 하중방향과 직교하는 특징이 있다. 이 직교성 때문에 SR 시험법은 HR 시험법보다 더 높은 정확성을 발휘할 수 있을 것으로 예상되었다. HR 시편과 마찬가지로 SR 시편은 균일단면을 가진 굽은 각봉이다. 이 특수한 각봉의 이론적 인장강도는 재료강도학의 굽힘이론으로부터 계산할 수 있다. 일련의 LS-DYNA 수치해석을 수행한 결과, 예상대로 인장형 및 압축형 SR 시험법의 강도오차는 1% 및 5%로서 HR 시험법의 오차(12%)에 비해 매우 낮게 나타났다. 두 SR 시험법의 성능을 확인하기 위하여 실내실험을 실시하였다. 비교를 위하여 HR 시험과 Brazilian 시험도 함께 수행하였다. 실험 결과, Brazilian 강도에 대한 인장형 및 압축형 SR 시험의 강도비는 각각 1.2~1.4 및 1.1~1.2로 나타났는데, 이는 통상적인 굽힘시험의 경험치에 비해

1) 한국지질자원연구원

2) 군산대학교

\* 교신저자 bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2020년 3월 11일

심사 완료일 : 2020년 3월 19일

게재 승인일 : 2020년 3월 26일

너무 작은 수치였다. 결과적으로 SR 시험은 NX 코어로 성형한 암석시편에 대해서는 실용성이 없는 것으로 판단하였다. 반면, HR 시험의 강도비는 선행연구와 본 연구를 통해 1.7~2.0의 범위에 속하여 높은 일관성을 보였다.

**핵심어** 터진고리형 (SR) 시험법, 반고리형 (HR) 시험법, Brazilian 시험법, 인장강도, 암석시편, LS-DYNA

### 1. 서론

선행연구(Choi et al., 2019)에서 제안된 반고리 형태의 시편을 사용하는 HR 시험법(half ring test method)은 그림 1a에 보인 바와 같이 파괴선 mn이 하중( $P$ )의 작용선과 일치한다는 단점을 지니고 있다. 비록 그 효과가 크지는 않다고 하더라도 가중점 n에서의 변형이나 파괴는 시험결과에 다소간의 영향을 끼칠 소지가 있다. HR 시편에 대한 수치모델링에서는 입력 인장강도가 11.7 MPa일 때 출력 인장강도가 13.1 MPa로 나타났다. 따라서 HR 시험법에서 인장강도의 백분율 오차는 약 12%라고 볼 수 있다.

선행연구에서 나타난 HR 시험의 강도오차(12%)가 다소 크다고 판단되어 본 연구에서는 오차를 감소시키기 위한 하나의 시도로서 터진고리 형태의 시편을 사용하는 SR 시험법(split ring test method)을 검토하였다. 그림 1b와 c는 SR 시험법에서 생각할 수 있는 두 가지 시험방식에 대한 모식도이다: 인장형 및 압축형 SR 시험. SR 시험법은 전통적인 탄성이론에서는 이미 잘 알려져 있는 개념이다(Timoshenko and Goodier, 1970; Boresi and Chong, 2000). 다만, 본 연구에서는 암석과 같은 취성재료에도 SR 시험법이 적용될 수 있는지 그 적용성만 검토하였다.

HR 시험법은 통상적인 3점 굽힘시험의 일종이지만

SR 시험법은 2점 굽힘시험으로서 시편의 파괴하중은 모멘트쌍(moment couple)이다. 사실 이들 두 종류의 시편은 공히 사각단면의 굽은 균일단면봉(prismatic bar)이며, 이 특별한 각봉의 인장강도는 탄성이론에 의해서도 계산할 수 있지만 재료역학의 기본이론(Beer et al., 2009)에 따라서도 계산할 수 있다. 이와 같은 형태의 굽은 각봉은 편심도(eccentricity)를 지니기 때문에 높은 인장응력이 그림 1a와 b의 점 m과 그림 1c의 점 n에 집중된다. 따라서 한 개의 인장균열이 정확한 위치(점 m 또는 n)에서 개시될 가능성이 높아질 것이다. 굽힘시험의 경우, 시편의 파괴가 당초 의도된 개시점에서 시작되지 않으면 전단응력의 간섭을 받게 되므로 시험결과와 정확성이 어느 정도 떨어질 수 있다. 또한, SR 시험의 경우에는 두 개의 가중점(점 A와 B)이 파괴선 mn 상에 존재하지 않기 때문에 가중점에서의 변형이나 파괴가 시편의 파괴과정, 즉 인장균열의 진전에 별다른 영향을 끼치지 않을 것이다. 이러한 특성 때문에 SR 시험법은 HR 시험법보다 더 정확한 결과를 제공할 가능성이 높을 것으로 예상되었다.

본 연구에서는 SR 시험법의 정확성을 수치해석을 통해 이론적으로 검토한 다음, 암석시편을 제작하여 실험실 검증시험을 실시하고, 획득된 인장강도 실측치를 경험치와 비교함으로써 암석에의 적용성을 평가하였다.

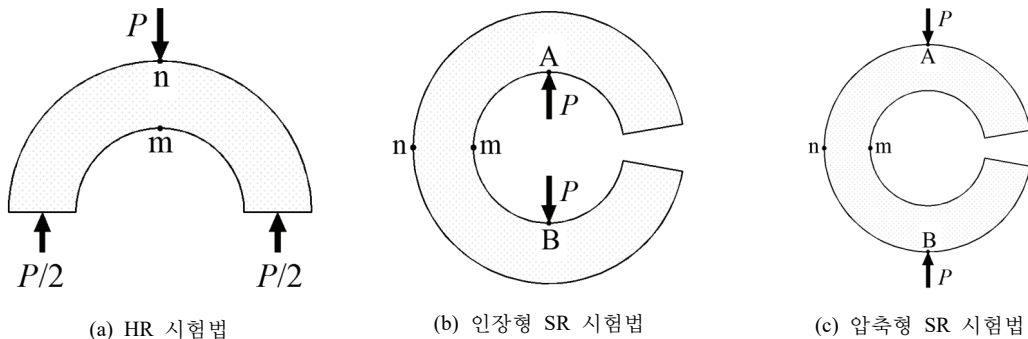


그림 1. HR 시험법과 SR 시험법의 모식도.

## 2. SR 시험법

### 2.1 SR 인장강도의 정의

그림 2a에 보인 SR 시편은 굽은 균일단면봉으로서 그 단면(그림 2b)이 사각형인 각봉이다. 순수굽힘 상태에 있는 굽은 균일단면봉에 대한 정해(Beer et al., 2009)에 의하면, 직경방향의 인장하중을 받아 2점 굽힘상태에 있는 SR(그림 2a)의 인장강도  $\sigma_{SR}$ (엄밀히는, 최대인장응력)은 파괴하중을  $P$ 라 할 때 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{SR} = \frac{P}{A} + \frac{M(r_1 - R)}{Aer_1} = \frac{P}{A} \left[ 1 - \frac{r^*(r_1 - R)}{er_1} \right] \quad (1)$$

이 경우에 인장균열은 그림 2a의 점 m에서 개시되어 점 n을 향해 진전된다. HR 시편의 경우와 마찬가지로, 식 (1)에서  $R = h/\ln(r_2/r_1)$ 은 사각형 단면을 가진 굽은 각봉에서 중심점 O로부터 중립축(예. z축)까지의 거리이다. 기호  $h$ 는 단면의 높이를 표시하며,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 중심점 O로부터 각봉의 내측면 및 외측면까지의 거리를 표시한다. 각봉의 단면적은  $A = ht$ 에 의해 주어지며, 여기서  $t$ 는 각봉의 두께(깊이)이다. 기호  $e = r^* - R$ 은 편심도 또는  $r^*$ 와  $R$  간의 거리치를 표시한다. 여기서  $r^* = (r_1 + r_2)/2$ 는 중심점 O로부터 임의의 단면의 질점 또는 도심까지의 거리이다. 또,  $M = -PL = -Pr^*$ 는 대칭면 mm에 작용하는 모멘트쌍을 표시한다. 기호  $L$ 은 모멘트팔의 길이이며, 이 경우에는  $r^*$ 와 같다. 즉,  $L = r^*$ 이다.

마찬가지로, 직경방향의 압축하중을 받아 2점 굽힘

상태에 있는 SR(그림 2c)의 인장강도  $\sigma_{SR}$ (엄밀히는, 최대인장응력)은 파괴하중을  $P$ 라 할 때 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{SR} = -\frac{P}{A} + \frac{M(r_2 - R)}{Aer_2} = -\frac{P}{A} \left[ 1 - \frac{r^*(r_2 - R)}{er_2} \right] \quad (2)$$

이 경우에는  $M = PL = Pr^*$ 이며, 인장균열은 점 n에서 개시되어 점 m을 향해 진전된다. 여타의 기호들은 식 (1)의 경우와 동일하다.

그림 3은 인장형과 압축형의 SR 시험법에 대한 모식도이다. 그림 3a는 직경방향 인장하중을 사용하는 방식의 인장형 SR 시험법을 묘사하고 있다. 가중하중은 강재의 환봉을 통해 시편의 점 A에 가해지며, 점 B에서의 반력은 역시 동일한 크기의 환봉을 통해 지지된다. 실무에서는 이런 인장방식에 맞도록 특별히 고안된 장치를 사용해야만 통상의 강도시험기 상에서 직경방향 인장하중을 SR 시편에 가할 수 있을 것이다. 그림 3b는 직경방향 압축하중을 사용하는 방식의 압축형 SR 시험법이다. 이 경우에 가중하중은 강판을 통해 시편의 점 B에 가해지며, 점 A에서의 반력은 역시 동일한 크기의 강판을 통해 지지된다. 한편, 그림 3a의 인장형 SR 시편의 터진 부분(틈)의 너비  $d_1$ 에는 별다른 제약이 없는 반면, 그림 3b의 압축형 SR 시편의 틈의 너비  $d_2$ 는 인장균열이 개시되기 전까지는 틈이 닫히지 않아야 하므로 충분히 넓어야 한다.

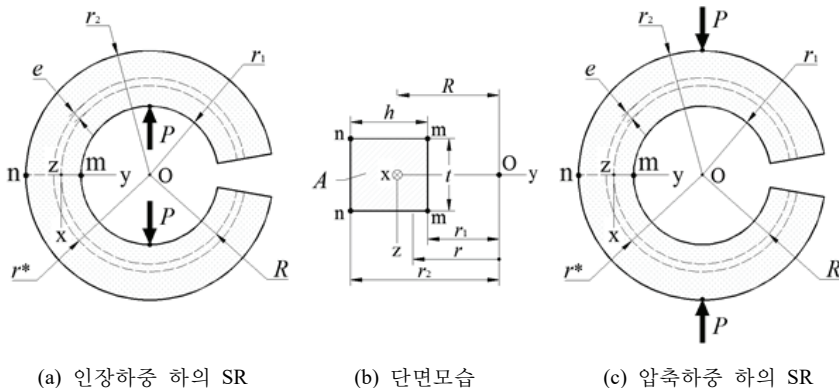


그림 2. 인장하중과 압축하중에 의해 2점 굽힘상태에 있는 SR의 모식도.

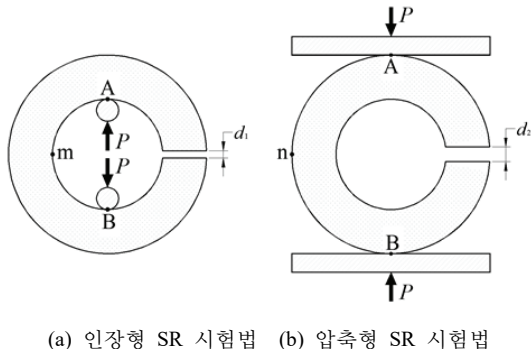


그림 3. SR 시험법의 모식도.

### 2.2 SR 암석시편의 제작과정

SR 암석시편은 그림 4에 보인 과정을 따라 제작한다. 먼저, 비교적 짧은 암석코어의 중심부에 시추구멍을 낸다. 원칙적으로 구멍의 중심은 암석코어의 중심축과 일치해야 한다. 하지만 실무에서는 주어진 오차한계 내에서 약간의 유격도 허용된다. 구멍이 뚫린 코어를 횡방향으로 절단한 후, 틈을 절삭해 내면 SR 시편이 완성된다.

## 3. 수치해석

### 3.1 해석모델

실험실 검증을 실시하기 전에 수치적인 시뮬레이션을 통해 SR 시험법이 암석시료에 대해서도 잘 작동할 것인지 여부와 함께 그 정확성을 검증하였다. 정확성의 검증은 수치해석의 계산결과가 재료역학의 정해와 잘 일치하는지 여부로 확인하였다. 본 수치해석에서 주로 파악하고자 하는 것은 SR 시편의 단면크기의 변화가 인장강도에 미치는 영향이다.

상업용 FEM 코드인 ANSYS LS-DYNA를 사용하여 SR 시편의 파괴과정을 모사하였다. 그림 5a 및 b에 예시한 것은 직경방향으로 각기 인장 및 압축을 받고 있는 SR 시편을 모사한 전형적인 해석모델이다. 모든 해석에서 SR 시편의 바깥반경과 두께는 각각  $r_2 = 27 \text{ mm}$  및  $t = 27 \text{ mm}$ 로 고정하였다. 시편 단면의 높이  $h = r_2 - r_1 = 9 \sim 18 \text{ mm}$  범위에서 변화시켰다. 여기서  $r_1$ 은 시편의 안쪽반경이다. 여타의 모든 해석조건들은 선행연구(Choi et al., 2019)의 HR 시험과 동일하다.

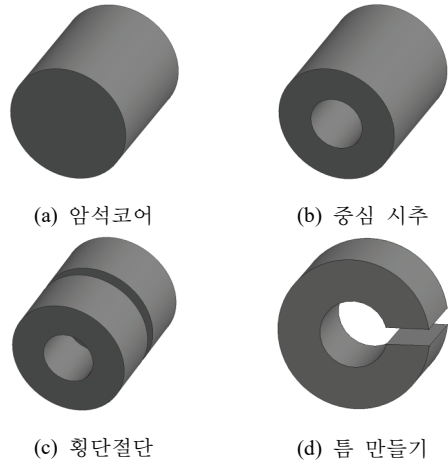


그림 4. SR 암석시편의 제작과정.

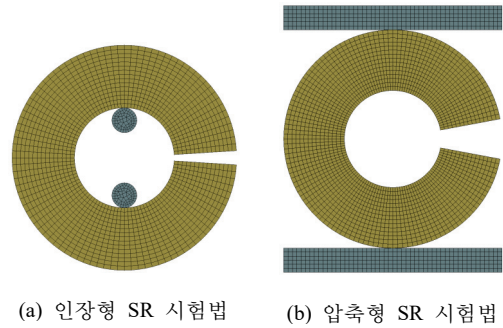


그림 5. SR 시험법 해석모델의 전형적인 예.

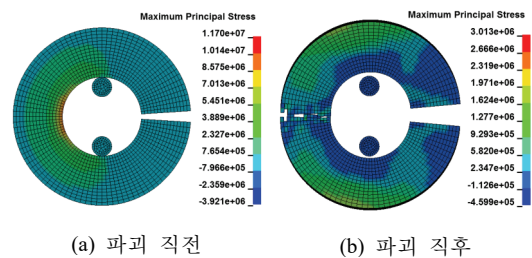


그림 6. 인장형 SR 시험모델( $h = 15 \text{ mm}$ ,  $L = 19.5 \text{ mm}$ )의 전형적인 해석결과.

### 3.2 해석결과

#### 3.2.1 인장형 SR 시험

그림 6은 앞의 그림 5a에 보인 인장형 SR 시험모델의 파괴 전후의 모습이다. 그림 7의 그래프들은 꼭대기 및 바닥 지지대에서 각기 감지된 가중하중과 반력이다. 이들 하중곡선이 갑자기 떨어지는 것은 인장

균열이 극히 짧은 시간 동안에 생성되었음을 보여주며, 이 결과는 암석시편의 취성파괴를 의미한다.

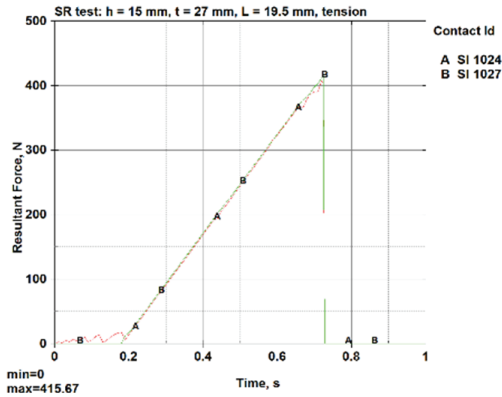


그림 7. 인장형 SR 시험모델( $h = 15 \text{ mm}$ ,  $L = 19.5 \text{ mm}$ )의 하중곡선.

그림 7에서 보듯이, 이 해석모델의 파괴하중  $P = 415.7 \text{ N}$ 이다. 이 파괴하중 값과  $r^* = 19.5 \text{ mm}$  ( $0.0195 \text{ m}$ )를 식 (1)에 대입하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\sigma_{SR} = \frac{415.7}{4.050 \times 10^{-4}} \left[ 1 - \frac{0.0195(0.012 - 0.0185)}{(0.001)(0.012)} \right] \quad (3)$$

$$= 11.8 \text{ MPa}$$

식 (3)의 계산에 쓰인 매개변수  $R$ 이나  $e$ 의 값은  $r_1 = 12 \text{ mm}$  ( $0.012 \text{ m}$ )인 상태에서 앞에서 제시한 식들에 따라 계산하였다. 계산 결과, 이 예의 인장형 SR 시험모델의 인장강도는  $\sigma_{SR} = 11.8 \text{ MPa}$ 로 나타났다. 이 강도 값은 입력 인장강도 값인  $11.7 \text{ MPa}$ (참값)과 거의 일치하는 결과이다(Choi et al., 2019).

HR 시편의 경우와 마찬가지로 SR 시편도 그 재질이 암석인 경우에는 적절한 단면크기를 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 SR 시편의 단면두께(깊이)  $t = 27 \text{ mm}$ 로 고정하였으므로 단면의 높이( $h$ )만 적절한 범위에서 변화시키면서 인장강도의 변화를 살펴보았다.

해석으로부터 얻은 주요결과를 표 1에 요약하였다. 이 표를 보면 한 개의 인장균열이 항상 의도된 위치(그림 3a의 점 m)에서 생성됨을 알 수 있다. 아울러 인장형 SR 시험모델의 단면높이( $h$ )를 시편의 바깥반경( $r_2$ )에 대해 다음 식의 범위 내에서 변화시켰을 때 인장강도 값은 평균  $11.9 \text{ MPa}$  정도로 비교적 일정하게 나타났다.

$$\frac{1}{3} \leq \frac{h}{r_2} \leq \frac{2}{3} \quad (4)$$

이 결과는 인장형 SR 시험의 경우에 시편의 단면 높이( $h$ )를 식 (4)에서 정한  $h/r_2$ 의 범위 내에서 자유롭게 설정할 수 있음을 의미한다. 하지만 인장형 SR 시험이 하나의 시험법으로 정착되기 위해서는 최적의 단면높이를 규정하는 것이 바람직한 것이다. 물론 이것은 향후의 연구에서 실험실 시험을 통해 결정해야 할 과제이다. 한편, 이들 해석으로부터 얻은 인장강도 평균치  $11.9 \text{ MPa}$ 는 요소제거 옵션(Choi et al., 2019)에 의해 할당된 입력 인장강도  $11.7 \text{ MPa}$ (참값)과 거의 일치하고 있다. 이 결과는 강도오차가 1%에 불과하다는 뜻이므로 인장형 SR 시험은 HR 시험(강도 오차 12%)에 비해 정확도가 훨씬 높음을 알 수 있다. 여기서 요소제거(element erosion) 옵션이란 어떤 강도 수준을 넘어설 때 요소를 제거하는 파괴기준을 의미한다.

표 1. 단면높이( $h$ )가 인장형 SR 시편의 인장강도( $\sigma_{SR}$ )에 미치는 영향 (NX 코어;  $r_2 = 27 \text{ mm}$ )

해석 구분	Case I	Case II	Case III	Case IV
$h$ (mm)	9	12	15	18
$h/r_2$	1/3	1.3/3	1.7/3	2/3
$\sigma_{SR}$ (MPa)	12.4	12.3	11.8	11.2
파괴 양상				



3.2.2 압축형 SR 시험

인장형 SR 시험모델의 경우와 마찬가지로, 압축형 SR 시험모델(그림 5b)에 대해서도 파괴해석을 실시하였으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다. 압축형 SR 시험모델로부터 얻은 인장강도 값은 평균 11.1 MPa이었다. 이 값은 대응되는 인장형 SR 시험모델의 평균치 11.9 MPa보다는 낮은 수치이다. 그렇다 하더라도 요소제거 옵션에서 할당한 입력 인장강도 11.7 MPa(참값)에 대한 강도오차는 5%에 불과하므로 HR 시험(강도오차 12%)보다는 정확도가 더 높다고 볼 수 있다.

압축형 SR 시험모델의 경우에도 인장균열은 모든 경우에 항상 의도된 위치(그림 3b의 점 n)에서 개시되었다. 하지만 Case VII과 VIII의 경우에는 약간 다른 거동이 나타났다. 예를 들어, Case VII의 경우에는 최초의 균열은 그림 3b의 점 n에서 발생되었지만 곧 이어서 수직방향의 균열들도 나타났는데, 이 수직균열은 Brazilian 시험 원판에서 나타나는 현상과 매우 유사하다. 굽힘시험에서는 인장균열(수평균열)이 최초로 개시되는 것이 중요하기 때문에 이후에 수직균열이 발생하더라도 시험결과에는 영향이 없겠지만 이와 같은 수직균열이 발생한 원인에 대해서는 추가적인 분석이 이루어져야 할 것으로 보인다.

4. 실험적 검증

수치해석적으로는 SR 시험법이 HR 시험법보다 훨씬 높은 정확도를 보여주었지만 실제의 암석시편에 대해서도 동일한 결과가 나타나는지를 살펴보기 위해 여러 개의 SR 암석시편을 제작하여 일련의 실험실 검증시험을 실시하였다. 시험결과를 비교하기 위하여 HR 시험과 Brazilian 시험도 함께 수행하였다. 실험에 사용된 암석시료는 황등화강암과 보령사암으로서 이는 선행연구(Choi et al., 2019)에서 사용했던 것과 같은 암종이지만 새로 채취된 것들이다. 본 시험에 사용된 암석재료들에 대한 물리적 성질과 역학적 성질은 표 3과 같다.

표 3의 황등화강암과 보령사암을 대상으로 단면높이  $h = 12, 15, 18$  mm의 HR, 인장형 SR, 압축형 SR 암석시편 총 90개, Brazilian 암석시편 20개를 제작하였다. 모든 시편의 명목 직경과 두께는 각각  $D = 54$  mm ( $r_2 = 27$  mm),  $t = 27$  mm이다. 그림 8은 시험기(MTS 815)에 세팅된 시편들의 모습이다. HR 시험과 SR 시험의 경우, 상대적으로 크기가 작은 하중을 보다 정확하게 제어하기 위해 로드 셀(10 kN, Kyowa)을 추가적으로 사용하였다. 그림 9는 시험결과 나타난 시편들의 대표적인 파괴양상을 보여준다.

표 2. 단면높이( $h$ )가 압축형 SR 시편의 인장강도( $\sigma_{SR}$ )에 미치는 영향 (NX 코어:  $r_2 = 27$  mm)

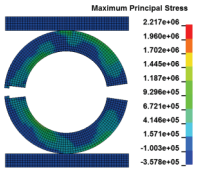
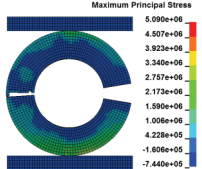
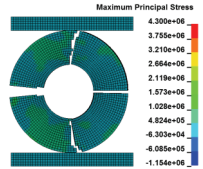
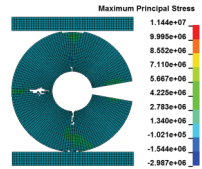
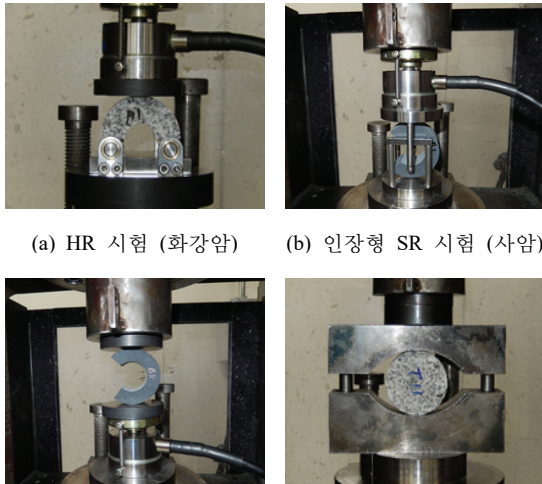
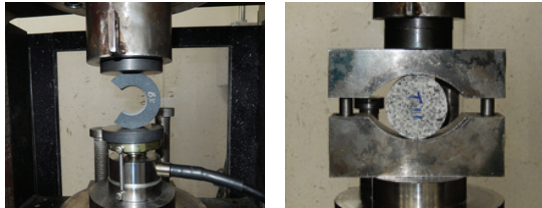
해석 구분	Case V	Case VI	Case VII	Case VIII
$h$ (mm)	9	12	15	18
$h/r_2$	1/3	1.3/3	1.7/3	2/3
$\sigma_{SR}$ (MPa)	11.4	11.2	10.9	10.7
파괴양상				

표 3. 시험에 사용된 암석들의 주요 물리적 성질과 역학적 성질

암종	밀도	흡수율 (%)	파속(m/s)		압축강도 (MPa)	영률 (GPa)	포아송비
			S파	P파			
황등화강암	2.66 ±0.01	0.25 ±0.00	2340 ±60	3330 ±30	235 ±8	48.6 ±2.4	0.23 ±0.03
보령사암	2.69 ±0.00	0.06 ±0.00	3660 ±90	5640 ±60	351 ±7	56.7 ±2.2	0.20 ±0.01



(a) HR 시험 (화강암) (b) 인장형 SR 시험 (사암)



(c) 압축형 SR 시험 (사암) (d) Brazilian 시험 (화강암)

그림 8. 황등화강암과 보령사암에 대한 인장시험.

표 4는 실험실 시험결과를 요약한 것으로 각 수치는 특정한 명목규격으로 제작된 시편들의 인장강도 평균치이며, 밑줄을 그은 수치는 각 압축 및 시험방법별 전체 평균치이다. 또한, 괄호 내의 수치는 선행연구(Choi et al., 2019)의 측정치이다. 이 표의 결과들을 취하여 SR 강도를 Brazilian 강도에 대한 비로 표시해보면, 인장형 SR 시험은 강도비가 1.2~1.4, 압축형 SR 시험은 강도비가 1.1~1.2로 작았다. 반면, HR 시험의 강도비는 1.7~2.0으로 컸다. 참고로, 일반적인 3점 굽힘시험은 강도비가 1.4 정도로 작은 경우도 있지만 대체로 2.1~2.4 전후의 값을 보인다(Obert and Duvall, 1967; Jaeger and Cook, 1976).



그림 9. 시편의 파괴양상.

### 5. 결론

LS-DYNA 상에서 SR 암석시편에 대한 인장파괴 모델링을 수행하여 시험방법별로 발생오차를 분석하였다. 그 결과, 인장형 SR 시험은 발생오차가 1%, 압축형 SR 시험은 5% 정도였다. 이에 비해 기존의 HR 시험의 경우에는 발생오차가 12%였다. 따라서 수치해석 결과로는 SR 시험법이 HR 시험법에 비해 훨씬 우월한 것으로 나타났다. 하지만 실험실 검증시험 결과에서는 SR 강도보다 HR 강도가 굽힘시험의 일반적 강도수준에 더 가까운 것으로 나타났다. 이 실험결과는 수치해석 결과와 상반된 것으로 그 원인은 크게 두 가지일 것으로 추측된다. 첫째, SR 시험법의 경우에는 파단면을 따라 굽힘 모멘트가 달라지므로 종횡비가 작은 암석시편의 경우에는 재료역학 이론의 가정(모멘트 일정)을

표 4. 실내시험결과 획득된 시험방법별 인장강도 (괄호 내의 수치는 선행연구(Choi et al., 2019)의 시험결과)

암종	시편의 단면높이 (mm)	HR 시험 (MPa)	인장형 SR 시험 (MPa)	압축형 SR 시험 (MPa)	Brazilian 시험 (MPa)
황등화강암	$h = 18$	20.98	13.27	12.74	<u>11.9</u> (9.9)
	$h = 15$	21.55	14.14	12.62	
	$h = 12$	19.05	14.60	13.37	
		<u>20.5</u> (19.8)	<u>14.0</u>	<u>12.9</u>	
보령사암	$h = 18$	50.97	34.45	30.35	<u>26.5</u> (22.4)
	$h = 15$	45.37	37.99	30.46	
	$h = 12$	46.16	37.88	33.89	
		<u>47.5</u> (41.4)	<u>36.8</u>	<u>31.6</u>	

위반할 소지가 있다. 둘째, 실제의 암석시편은 불연속적인 입자의 결합체인데, SR 시편은 HR 시편에 비해 힘이 커서 시험 시의 파괴위치가 예상 파단면을 벗어날 소지가 더 크다는 점이다.

결론적으로, 선행연구에서 제안된 HR 시험법은 본 연구에서도 강도의 일관성을 보여주었지만 본 연구에서 시도된 SR 시험법은 수치해석 결과와는 달리 실제 강도의 오차가 커서 NX 크기의 암석시편에 대해서는 실용성이 없는 것으로 나타났다. 하지만 암석시험에 관한 이들 새로운 시도는 아직까지는 시험대상 암종과 크기, 표본수가 너무 적기 때문에 암석이라는 특수한 재료의 시험과정에서 나타날 수 있는 여러 가지 문제들을 충분히 고려하였다고는 볼 수 없다. 따라서 긍정적인 결과이든 부정적인 결과이든 모든 시험과정은 추후에 반복재현을 통해 재검증함으로써 결과에 대한 신뢰도를 높여갈 필요가 있다고 본다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(과제코드 GP2020-010)과 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Beer, F. P., E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf and D. F. Muzurek, 2009, Mechanics of Materials, 5th ed., McGraw-Hill, Inc., pp. 285-306.
2. Boresi, A. P. and K. P. Chong, 2000, Elasticity in Engineering Mechanics, 2nd ed., John Wiley & Sons, Singapore, pp. 473-495.
3. Choi, B. H., Y. K. Lee, C. H. Park, C. H. Ryu and C. Park, 2019. Measurement of tensile strength of brittle rocks using a half ring shaped specimen, Geosciences Journal, Vol. 23, No. 4, pp. 649-660.
4. Jaeger, J. C. and N. G. W. Cook, 1976, Fundamentals of rock mechanics, 2<sup>nd</sup> ed., Chapman and Hall, London, p. 191.
5. Obert, L. and W. I. Duvall, 1967, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons, New York, pp. 327-330.
6. Timoshenko, S. P. and J. N. Goodier, 1970, Theory of Elasticity, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, pp. 71-75.



**최 병 희**

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr



**이 연 규**

군산대학교 교수

Tel: 063-469-1864

E-mail: kyulee@kunsan.ac.kr



**박 찬**

한국지질자원연구원 심지층연구센터

Tel: 042-868-3245

E-mail: chan@kigam.re.kr



**박 철 환**

한국지질자원연구원 심지층연구센터

Tel: 042-868-3244

E-mail: cwpark@kigam.re.kr