

## 단축압축 하에서 대리석의 균열전파 및 결합

박남수<sup>1)</sup> · 전석원<sup>2)</sup>

### Crack Propagation and Coalescence in Yeosan Marble under Uniaxial Compression

Namsu Park and Seokwon Jeon

**Abstract.** Rock masses are usually discontinuous in nature due to various geological processes and contain rock joints and bridges. Crack propagation and coalescence processes in rock bridge mainly cause rock failures in slopes, foundations, and tunnels. In this study, we focused on the crack initiation, propagation and coalescence process of rock materials containing two pre-existing open cracks arranged in different geometries. Specimens of 120×60×25 mm in size, which were made of Yeosan Marble, were prepared. In the specimens, two artificial cracks were cut with pre-existing crack angle  $\alpha$ , bridge angle  $\beta$ , pre-existing crack length 2c and bridge length 2b. Wing crack initiation stress, wing crack propagation angle, and crack coalescence stress were measured and crack initiation, propagation and coalescence processes were observed during uniaxial compression. Crack coalescence types were classified and analytical study using Ashby and Hallam model (1986) was performed to be compared with the experimental results.

**Keywords:** rock bridge, wing crack, crack coalescence, Ashby & Hallam model

**초 록.** 암석은 지질학적 생성과정으로 인해 많은 역학적 결함을 포함하고 있으며 이러한 결함 사이에는 암석 브릿지가 존재하게 된다. 이러한 암석 브릿지에서의 균열의 전파 및 결합(coalescence) 과정은 사면, 기초, 터널 등의 안정성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 단축압축 하에서 균열의 형상변화에 따른 암석 브릿지에서의 균열의 개시, 전파 및 결합거동 변화에 대해 알아보았다. 여산 대리석을 재료로 120×60×25 mm 크기의 시료에 균열각도  $\alpha$ , 브릿지각도  $\beta$ , 균열길이 2c, 브릿지길이 2b를 변화시키면서 2개의 인공균열을 제작하였다. 하중을 가하면서 날개형 균열 개시응력, 날개형 균열 전파각도, 균열결합 응력을 측정하였으며 균열결합 유형을 정리하였다. 또한, 정규화된 최대강도(normalized peak strength)를 구하여 Ashby & Hallam 모형(1986)의 이론해와 비교, 분석하였다.

**핵심어:** 암석 브릿지, 날개형 균열, 균열결합, Ashby & Hallam 모형

## 1. 서 론

암석은 지질학적 생성과정으로 인해 절리, 균열, 공극 등 많은 역학적 결함을 포함하고 있으며 암석 내에 포함된 균열의 개시, 성장 및 상호작용과 균열 사이의 암석 브릿지에서의 균열의 결합(coalescence)으로 인하여 암석은 비선형적으로 거동한다. 또한 암반에 작용하는 하중이 증가할수록 암반 내의 균열은 성장하여 균열 사이의 암석 브릿지 내에서 결합하게 된다. 이러한 균열결합은 암반 내에 지진으로 인해 발생하는 것과 같은

전단지역(shear zone)을 생성하고, 또한 균열의 방향, 연속성(persistence) 등과 함께 암반의 파괴요인 중 하나로 작용하여 암반구조물의 안정성에 중요한 요인으로 작용한다.<sup>1)</sup>

균열의 개시 및 전파에 관한 연구가 Griffith<sup>2)</sup>에 의해 시작된 이후로 Horii and Nemat-Nasser,<sup>3)</sup> Lajtai<sup>4)</sup> 등 여러 학자들이 실험적, 이론적으로 연구하여 왔다. 최근에는 암석 내에 존재하는 균열 사이의 암석 브릿지에서의 균열거동에 대한 연구가 Reyes and Einstein,<sup>5)</sup> Shen et al.,<sup>6)</sup> Bobet and Einstein,<sup>7)</sup> Wong et al.<sup>8)</sup>에 의해 이루어졌으며, 국내에서도 최성웅<sup>9)</sup>이 암석 브릿지를 고려한 수압파쇄 균열거동에 대해 연구하였다. 그러나 지금까지의 연구는 시료 성형의 어려움으로 인해 암석 모사 시료를 이용한 실험이 대부분이었다. 또한 몇가지 제한적인

<sup>1)</sup>학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

<sup>2)</sup>정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

접수일 : 2001년 4월 26일

심사 완료일 : 2001년 6월 16일

균열형상에 대해서만 실험이 실시되었고 실험재료에 따라 암석 브릿지에서의 균열거동은 상이하게 나타났다.

본 연구에서는 현장 적용성을 높이기 위해 대리석 시료를 이용하여 단축압축 하에서 암석 브릿지 및 균열 주변에서의 균열거동 특성과 재료 및 균열형상 변화가 균열거동에 미치는 영향에 대해 연구하고자 하였다. 120×60×25 mm의 직육면체 시료에 균열각도(pre-existing crack angle,  $\alpha$ ), 브릿지각도(bridge angle,  $\beta$ ), 균열길이(pre-existing crack length,  $2c$ ), 브릿지길이(bridge length,  $2b$ ) 등의 균열형상을 변화시키면서 2개의 균열을 제작하고 균열의 형상에 따른 균열의 거동 및 결합유형의 변화에 대해 살펴보았다. 또한, Ashby & Hallam 모형<sup>10)</sup>의 이론해를 본 연구에 적용하여 암석 내의 균열형상 변화가 암석의 강도에 미치는 영향에 대해 실험값의 타당성을 검토하였다.

## 2. Ashby & Hallam 모형

균열모형을 이용하여 암석의 거동을 모사하기 위한 연구는 Kemeny and Cook<sup>11)</sup>에 의해서 본격적으로 시작되었으며, 최대주응력 방향으로 균열이 성장하는 활주 균열모형(sliding crack model)과 균열이 균열면을 따라서 성장하여 전단파괴가 발생하는 전단균열모형(shear crack model)이 균열모형으로 제시되었다. 실험을 통해 자연상태의 미소균열파괴(microcracking)는 전단파괴보다는 인장파괴에 의해 발생하며<sup>12)</sup> 단축압축상태에서는 전단균열모형이 활주균열모형에 비해 거의 영향을 미치지 않는다고 밝혀졌다.<sup>13)</sup> 따라서, 단축압축상태의 본 연구에서는 활주균열모형만을 고려한 Ashby & Hallam 모형을 적용하여 실험결과를 해석하였다.

Ashby and Hallam은 아크릴 시료를 이용한 압축시험에서 응력확대계수  $K_I$ 를 균열길이  $2c$ , 마찰계수  $\mu$ , 균열각도  $\alpha$ , 균열밀도  $\epsilon_0$ 의 함수로 표현한 균열의 생성 및 전파에 관한 식을 제시하였다. Fig. 1과 같이 균열길이  $2c$ 인 2개의 균열을 포함하는 경우, 균열첨단에서의 응력확대계수  $K_I$ 는 다음과 같다.

$$\frac{K_I}{\sigma_c \sqrt{\pi c}} = \frac{\sin 2\varphi - \mu + \mu \cos 2\varphi}{(1+L)^{3/2}} \left[ 0.23L + \frac{1}{\sqrt{3(1+L)}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $L$  : 날개형 균열의 정규화된 길이 ( $L = l/c$ )

$\mu$  : 마찰계수

$\varphi$  :  $90^\circ - \alpha$

또한, 균열 간의 상호작용은 빔이론을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

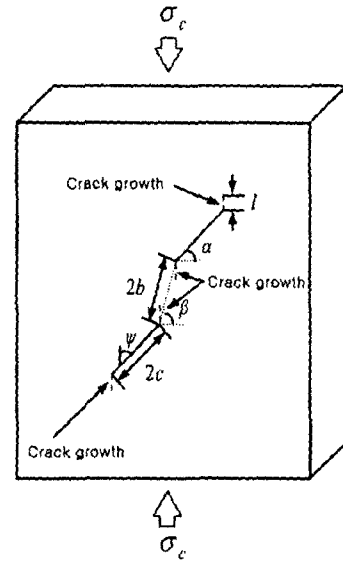


Fig. 1. Model containing two neighboring pre-existing cracks of length  $2c$ .

$$\frac{K_I}{\sigma_c \sqrt{\pi c}} = \left[ \frac{2\epsilon_0(L + \cos \varphi)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_0$ : 균열밀도

( $\epsilon_0 = c^2 N/A$ ,  $N$ : 균열의 수,  $A$ : 시료 단면적)

균열 상호작용을 고려한  $K_I$ 는 식 (1)과 (2)를 더하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{K_I}{\sigma_c \sqrt{\pi c}} = \frac{\sin 2\varphi - \mu + \mu \cos 2\varphi}{(1+L)^{3/2}} \left[ 0.23L + \frac{1}{\sqrt{3(1+L)}} \right] + \left[ \frac{2\epsilon_0(L + \cos \varphi)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (3)$$

본 연구에서 암석파괴강도는 암석 브릿지에서 균열이 성장하여 결합할 때의 응력으로 정의하였으며 최대 날개형 균열 길이는  $l_{max} = 2b \sin \beta$ 로 나타낼 수 있다. 최대압축강도  $\sigma_c^{max}$ 는  $K_I = K_{IC}$ ,  $L = L_{cr} = l_{max}/c$ 일 때의 값이므로 이를 식 (3)에 대입하여 정규화된 최대강도(normalized peak strength)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\sigma_c^{max} \sqrt{\pi c}}{K_{IC}} = \left\{ \frac{\sin 2\varphi - \mu + \mu \cos 2\varphi}{(1+L_{cr})^{3/2}} \left[ 0.23L_{cr} + \frac{1}{\sqrt{3(1+L_{cr})}} \right] + \left[ \frac{2\epsilon_0(L_{cr} + \cos \varphi)}{\pi} \right]^{1/2} \right\}^{-1} \quad (4)$$

### 3. 시료, 시험장치 및 실험방법

#### 3.1 시료의 준비

대리석 시료 내에 균열을 생성하기 위해 지름 3 mm의 드릴로 천공을 한 후, 톱이 상하 왕복운동을 할 수 있도록 제작된 대만 PRO-TECH사의 Model 3303에 두께 0.3 mm의 줄톱(wire saw)을 장착하고, 천공된 곳에 줄톱을 삽입하여 양쪽 방향으로 균열을 확장시켰다.

60×120×25 mm의 직육면체 시료 중앙부에 균열각도  $\alpha$ , 브릿지각도  $\beta$ , 균열길이 2c, 브릿지길이 2b를 변화시키며 두께 0.3 mm의 인공균열 2개를 제작하였다. 균열각도는 30, 45, 60, 75°로 15° 간격으로 변화시켰고, 브릿지각도를 45, 60, 90, 120, 135, 150°로 변화시켜서 중첩하지 않는 균열(non-overlapping cracks,  $\beta < 90^\circ$ )과 중첩하는 균열(overlapping cracks,  $\beta \geq 90^\circ$ )에서의 균열 및 브릿지각도 변화에 따른 균열의 전파 및 결합양상에 대해 살펴보았다. 또한, 균열길이 및 브릿지길이를 10, 15, 20 mm로 변화시켜서 길이에 따른 영향도 살펴보았다.

위와 같은 여러가지 경우의 균열 및 브릿지 조합을 나타내기 위해 첨자, 재료, 균열각도, 브릿지각도의 순서로 시료명을 표기하였다. 첨자는 균열 및 브릿지길이가 10 mm인 경우에는 표기하지 않았고, 브릿지 길이가 15, 20 mm일 때 각각 1, 2로, 균열길이가 15, 20 mm인 경우 각각 3, 4로 나타내었으며 재료는 M으로 표시하였다. 즉, 시료명이 3M49이면 균열길이 15 mm, 브릿지길이 10 mm, 균열각도 45°, 브릿지각도 90°인 시료를 나타낸다.

#### 3.2 실험장치 및 실험방법

일본 Shimadzu사의 UDH-200AR 시험기를 사용하

Table 1. Physical and mechanical properties of rock specimen.

Properties	Specimen	Yeosan Marble
Bulk specific gravity		2.71
Apparent porosity (%)		0.26
P-wave velocity (m/sec)		3,210
S-wave velocity (m/sec)		1,710
Uniaxial compressive strength (MPa)		57
Young's modulus (GPa)		39.3
Poisson's ratio		0.29
Brazilian tensile strength (MPa)		5.0
Fracture toughness, $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )		1.2847

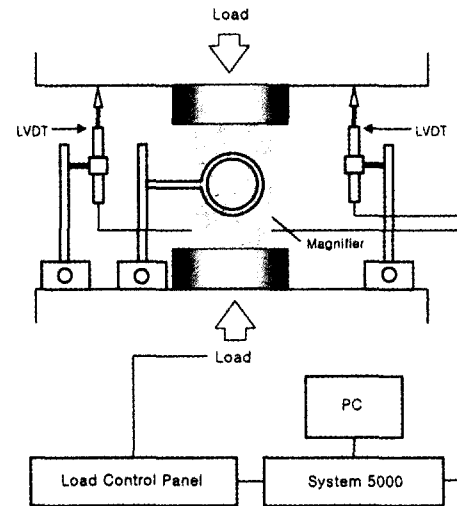


Fig. 2. Schematic diagram of test setup.

여 하중을 가하였고, 미국 Measurement Group사의 System 5000에 25 mm 용량의 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) 2개를 연결하여 변위를 측정하여 0.5초마다 데이터를 저장하였다. 0.003 kN/s의 하중속도로 하중제어를 하였으며 가압하는 동안 전면의 확대경을 통해 균열의 전파과정을 관찰하였고, 날개형 균열 개시응력, 날개형 균열 전파각도, 균열결합 응력을 기록하였다. 실험은 균열이 결합하거나 시료가 파괴될 때까지 실시하였다. Fig. 2에 실험장치의 모식도를 나타내었다.

### 4. 시험결과 및 분석

#### 4.1 날개형 균열

##### 4.1.1 날개형 균열 개시응력

단축압축 하에서 계속하여 가압할 경우, 균열의 내부 및 외부첨단에서 날개형 균열이 개시하게 된다. 날개형 균열은 처음에는 곡선형으로 전파하다가 하중이 계속 증가하면 가압방향에 평행한 방향으로 직선형으로 전파하게 되며, 내부 날개형 균열은 하중이 증가함에 따라 계속 전파하여 날개형 균열 간의 결합이 발생하거나, 전단균열로 인한 결합으로 성장을 멈추게 된다.

본 연구에서는 날개형 균열 개시응력을 확대경을 통하여 날개형 균열이 가시적으로 보일 때의 응력으로 정의하고 이를 측정하였다. 날개형 균열 개시응력과 균열 각도와와의 관계를 Fig. 3에 나타내었으며 균열각도가 증가할수록 날개형 균열 개시응력도 증가함을 알 수 있다.

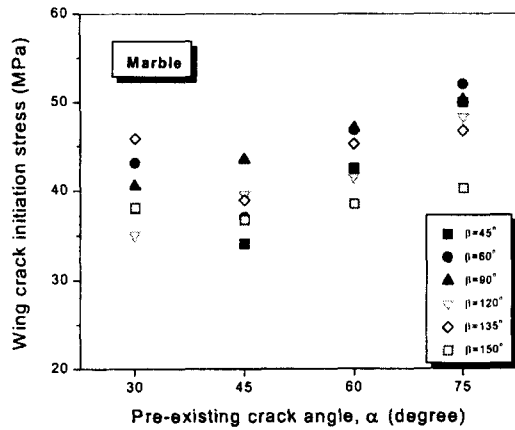


Fig. 3. Pre-existing crack angle vs. wing crack initiation stress.

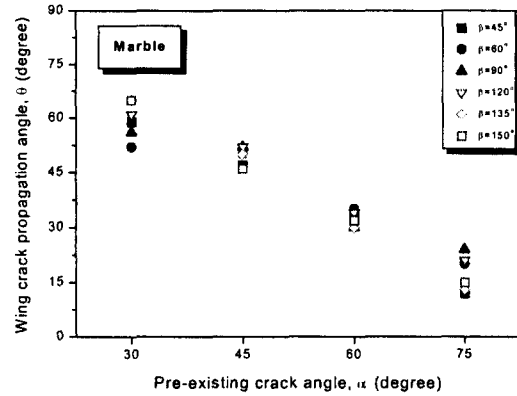
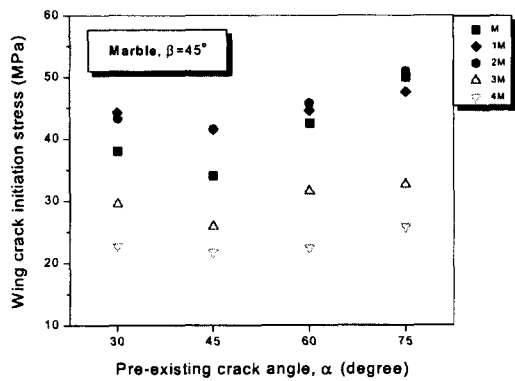


Fig. 5. Pre-existing crack angle vs. wing crack propagation angle.

Fig. 4. Effect of pre-existing crack and bridge length on wing crack initiation stress (when  $\beta=45^\circ$ ).

이는 균열이 성장하는데 필요한 균열첨단의 인장응력은 균열각도가 증가할수록 증가하지만, 균열첨단에서 거리가 멀어질수록 급격히 인장응력의 크기는 감소하기 때문이다. 즉, 균열각도가 작을 때 균열의 전파가 용이한 것이다.<sup>14)</sup> 이러한 결과는 Reyes<sup>14)</sup>의 실험 및 Vasarhelyi and Bobet<sup>15)</sup>의 DDM (Displacement Discontinuity Method)을 이용한 수치해석과 일치하는 것이다.

Fig. 4에 균열길이 및 브릿지길이가 날개형 균열 개시응력에 미치는 영향에 대해 나타내었다. 브릿지길이가 15, 20 mm로 증가하면(1M, 2M) 날개형 균열 개시응력이 증가하는 반면, 균열길이가 15, 20 mm로 증가할 경우(3M, 4M)에는 날개형 균열 개시응력은 감소하였다. 이는 브릿지길이가 증가하면 균열 사이의 인장응력장의 크기가 감소하고, 균열길이가 증가하면 시료 경계면의 영향이 증가하기 때문이라고 판단된다.

#### 4.1.2 날개형 균열 전파각도

압축 하에 균열이 있는 경우, 균열첨단에서의 응력  $\sigma_\theta$ 가 최대이거나  $\partial\sigma_\theta/\partial\theta=0$  일 때 균열은 성장하며 이때의 균열성장 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta} &= \frac{\sigma\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}(\sin\varphi\cos\varphi - \mu\sin^2\varphi) \\ &\quad \times \left[ -\frac{3}{2}\left(\cos\frac{\theta}{2}\cos^2\frac{\theta}{2} - 2\cos\frac{\theta}{2}\sin^2\frac{\theta}{2}\right) \right] \\ &= \frac{\sigma\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}(\sin\varphi\cos\varphi - \mu\sin^2\varphi) \\ &\quad \times \left[ -\frac{3}{2}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 - 3\sin^2\frac{\theta}{2}\right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$






따라서,  $1 - 3\sin^2(\theta/2) = 0$ 인 경우 식 (5)는 성립하며 이때  $\theta \approx 70.5^\circ$ 이다. 즉, 압축응력이 작용하는 경우에는 균열각도에 관계없이 날개형 균열 전파각도는  $70.5^\circ$ 로 일정하다.

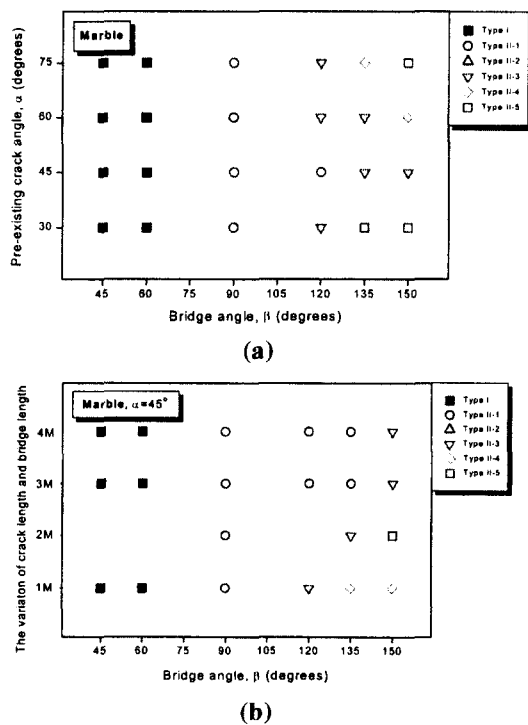
본 연구에서 측정한 날개형 균열 전파각도와 균열각도의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이론과는 달리 균열각도가 증가하면 날개형 균열 전파각도는 감소하였으며, 균열각도와 날개형 균열 전파각도의 합은 약  $90^\circ$ 가 되었다( $\alpha + \theta \approx 90^\circ$ ). 그러나 날개형 균열 전파각도와 브릿지각도, 균열길이, 브릿지길이 사이에는 상관관계가 나타나지 않았다.

#### 4.2 균열결합 유형

하중이 증가함에 따라 균열의 외부첨단에서는 날개형 균열이 전파하고 암석 브릿지에서는 인장력에 의한 날개형 균열이나 전단력에 의한 전단균열에 의해 균열

**Table 2.** Classification for three types of crack coalescence.

Type	Schematic path of coalescence	Description	Bridge angle	Mode of coalescence
I		Crack coalescence occurred by shear crack	$\beta < 90^\circ$	Shear
II-1		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by its propagation	$\beta = 90^\circ$	Tension
II-2		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by wing crack in the middle of pre-existing crack	$\beta > 90^\circ$	Tension
II-3		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by wing crack in the outer tips of pre-existing crack	$\beta > 90^\circ$	Tension
II-4		Crack coalescence occurred by tension crack which initiated in the middle of rock bridge during the wing crack propagated	$\beta > 90^\circ$	Tension

**Fig. 6.** Classification of Diastone specimens by crack coalescence type (a) Pre-existing crack and bridge length are 10 mm (b) Pre-existing crack and bridge length are varied ( $\alpha = 45^\circ$ ).

의 결합이 발생하게 된다. 날개형 균열은 인장력에 의해 발생하므로 깨진 단면이 매끄러우나, 전단균열은 전단력에 의해 균열이 미끄러지므로 깨진 단면의 암석입자들이 부스러진 울퉁불퉁한 표면을 형성한다.

균열결합은 균열 및 브릿지의 형상에 따라 이러한 날개형 균열과 전단균열이 각각 혹은 같이 발생하게 되며, Bobet and Einstein<sup>7)</sup>은 석고 시료를 시험한 결과 전단균열 및 인장균열로 이루어진 5가지 결합유형을 제시하였고 Wong and Chau<sup>8)</sup>는 전단, 인장, 혼합형의 3가지 결합유형을 제시하였다.

본 연구에서는 크게 (1) 유형 I: 전단, (2) 유형 II: 인장의 2가지 균열결합 유형이 관찰되었으며, 유형 II는 다시 4가지 세부 유형으로 나눌 수 있다(Table 2). 본 연구에서 관찰된 균열결합 유형을 브릿지각도에 따라 Fig. 6에 도시하였고, 균열결합이 발생한 대리석시료를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에서 브릿지각도에 따라 결합유형이 변화하였음을 알 수 있다. 중첩하지 않는 균열( $\beta < 90^\circ$ )에서는 유형 I이 나타났으며, 중첩하는 균열( $\beta \geq 90^\circ$ )에서는  $\beta = 90^\circ$ 일 때 유형 II-1이 모든 경우에서 발생하였고  $\beta > 90^\circ$ 일 때에는 나머지 유형의 인장결합이 나타났다(Fig. 6(a)). 또한, Fig. 6(b)에서 균열길이의 증가가 균열결합 유형에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 균열 길이가 10 mm, 브릿지길이 20 mm인 2M시료에서는  $\beta =$

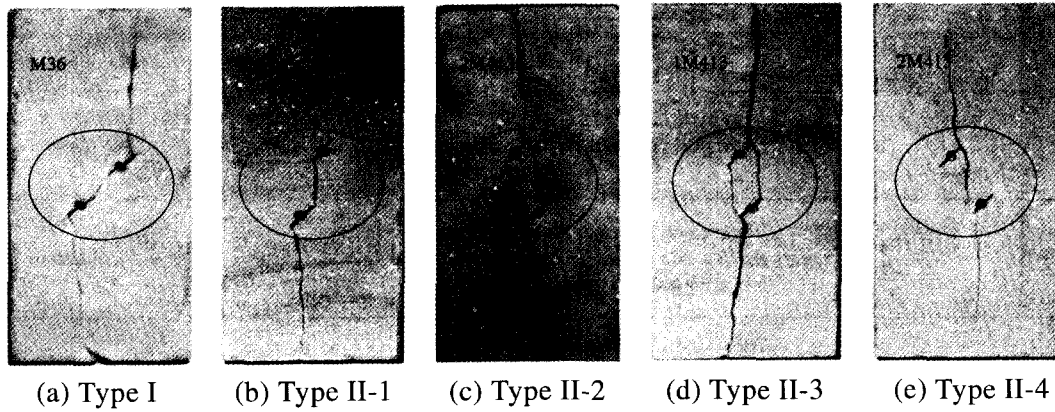


Fig. 7. Crack coalescence type of Marble specimens.

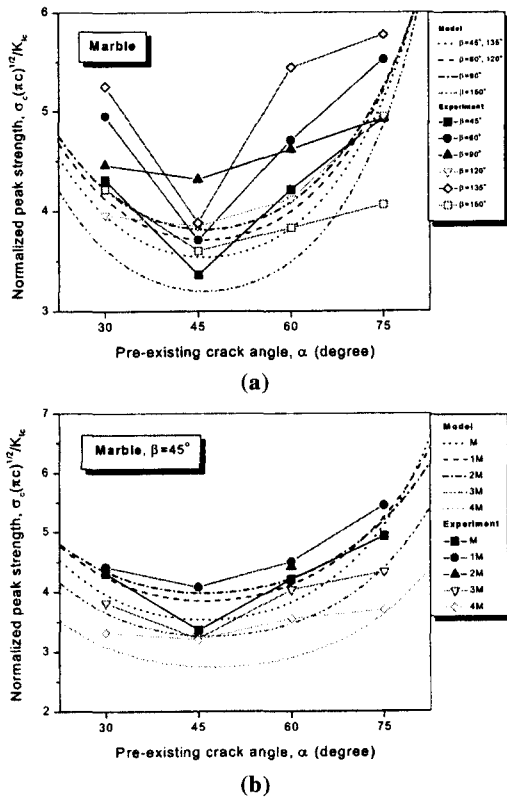


Fig. 8. Pre-existing crack angle vs. normalized peak strength  
(a) Pre-existing crack and bridge length are 10 mm (b) Pre-existing crack and bridge length are varied ( $\beta = 45^\circ$ ).

45, 60, 120°인 경우 균열결합이 나타나지 않았으며 이는 균열결합이 발생하는 경계값이 브릿지길이가 균열길이의 1.5배와 2배 사이인 지점에 위치함을 나타낸다.

#### 4.3 균열결합 응력

균열의 형상변화가 균열결합시의 응력수준에 미치는 영향을 알아보기 위해 균열결합시의 응력을 측정하였으며 이를 Ashby & Hallam 모형의 이론해와 비교하여 검증하였다. 두 균열 사이의 브릿지에서 균열결합이 발생할 때의 응력을 암석의 최대강도로 정의하고, 균열의 형상 및 시험재료에 따른 영향을 정량화하기 위해 최대강도에  $\sqrt{\pi c}/K_{IC}$ 를 곱하여 정규화된 최대강도 (normalized peak strength,  $\sigma_c \sqrt{\pi c}/K_{IC}$ )를 구하였다.

##### 4.3.1 균열각도 및 브릿지각도의 영향

균열각도와 정규화된 최대강도와의 관계를 Fig. 8에 도시하였다. Ashby & Hallam 모형에 의한 이론해와 실험에 의한 값은 비교적 일치하였으나, 부분적으로 편차를 보였다. 이에 대한 이유로는 여러가지가 있을 수 있겠으나 시료 내에 포함된 미세균열의 발달 정도와 균열에 작용하는 마찰력 산정의 차이로 인해 발생한 편차로 추정된다. 브릿지각도가 일정할 경우 정규화된 최대강도는  $\alpha = 45^\circ$ 에서 최소값을 가진 좌우대칭형의 포물선으로 나타났다. Wong and Chau<sup>8)</sup>의 연구에서는  $\alpha = 65^\circ$ 에서 최소값을 갖는 포물선으로 나타났으며, 이는 균열형상 및 재료 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한, 브릿지각도와 정규화된 최대강도와의 관계를 나타낸 Fig. 9에서 브릿지각도는 균열각도에 비해 최대강도에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

##### 4.3.2 균열길이 및 브릿지길이의 영향

브릿지길이를 15, 20 mm로 증가시키고(1M, 2M) 균열길이를 15, 20 mm로 증가시켜서(3M, 4M) 균열 및 브릿지길이가 암석의 강도에 미치는 영향에 대해 살펴 보았다(Fig. 8(b) and 9(b)). 브릿지길이가 증가한 경우 정규화된 최대강도는 증가한 반면에 균열길이가 증가할

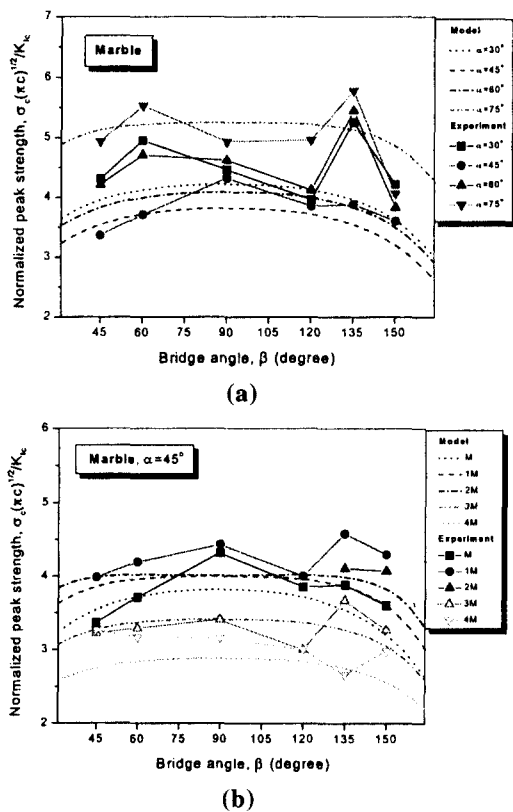


Fig. 9. Bridge angle vs. normalized peak strength (a) Pre-existing crack and bridge length are 10 mm (b) Pre-existing crack and bridge length are varied ( $\alpha = 45^\circ$ ).

수록 정규화된 최대강도는 감소하였다. 이는 브릿지길이 증가할 경우 균열의 결합에 필요한 거리가 증가하여 균열이 전파하는데 필요한 응력도 증가하기 때문이며, 균열길이가 증가하는 경우는 균열길이가 증가할수록 시료 경계면의 영향이 증가하기 때문에 낮은 응력수준에서 균열결합이 발생하기 때문으로 판단된다.

## 5. 결 론

1) 날개형 균열이 가시적으로 나타나는 날개형 균열 개시응력은 균열각도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 균열이 성장하는데 필요한 균열첨단의 인장응력은 균열각도가 증가할수록 증가하지만, 균열첨단에서 거리가 멀어질수록 급격히 인장응력의 크기는 감소하기 때문이다. 즉, 균열각도가 작을 때 균열의 전파가 용이한 것이다.

2) 이론상 단축압축 하의 날개형 균열 전파각도  $\theta$ 는

약  $70.5^\circ$ 이다. 그러나, 본 연구에서는 균열각도가 증가할수록 날개형 균열 전파각도가 감소하는 것으로 나타났다. 균열각도와 날개형 균열 전파각도의 합은 약  $90^\circ$ 이다( $\alpha + \theta \approx 90^\circ$ ).

3) 압축하중이 증가하면 기존 균열에서 새로운 균열이 전파하여 암석 브릿지에서 결합하였다. 본 연구에서는 전단, 인장의 2가지 균열결합 유형이 관찰되었으며, 브릿지각도에 의해 균열결합 유형을 분류할 수 있다.

4) 균열형상 및 실험재료에 따른 영향을 정규화하기 위해 정규화된 최대강도  $\sigma_{rc}/\sqrt{\pi c}/K_{IC}$ 를 구하여 Ashby & Hallam 모형의 이론해와 비교하였다. 실험결과와 이론해는 비교적 일치하였으나, 부분적으로 편차를 보였으며 이는 시료 내에 포함된 미세균열의 발달 정도 차이와 균열에 작용하는 마찰력 산정의 차이로 인해 발생한 편차로 추정된다. 정규화된 최대강도는 균열각도가  $45^\circ$ 일 때 최소값을 갖는 이차곡선의 형태로 나타났다.

5) 브릿지길이가 증가할수록 날개형 균열 개시응력과 정규화된 최대강도는 증가한 반면, 균열길이를 증가시킨 경우는 날개형 균열 개시응력과 정규화된 최대강도는 감소하였다.

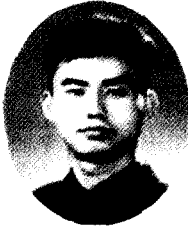
## 참고문헌

1. Segall, P. and Pollard, D., 1983, Nucleation and growth of strike slip faults in granite, J. Geophys. Res., 88.B1, 555-568.
2. Sun, G.X., Whittaker, B.N. and Singh, R.N., Rock Fracture Mechanics: Principles, design and application, 1992, Elsevier Science Publ..
3. Nemat-Nasser, S. and Horii, H., 1982, Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockburst, J. Geophys. Res., 87.B8, 6805-6821.
4. Lajtai, E.Z., 1974, Brittle fracture in compression. Int. J. Frac., 10.4, 525-536.
5. Reyes, O. and Einstein, H.H., 1991, Failure mechanism of fractured rock - A fracture coalescence model, Proc. 7th Int. Cong. of Rock Mech., 1, 333-340.
6. Shen, B., Stephansson, O., Einstein, H.H. and Ghahreman, B., 1995, Coalescence of fractures under shear stress experiments, J. Geophys. Res., 100.6, 5975-5990.
7. Bobet, A. and Einstein, H.H., 1998, Fracture coalescence in rock-type materials, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., 35.7, 863-888.
8. Wong, R.H.C. and Chau, K.T., 1998, Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 35.2, 147-164.
9. 최성웅, 2000, Rock bridges를 고려한 수치 해석적 수압파쇄 균열거동 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학

- 회지, 10.3, 447-456.
10. Ashby, M.F. and Hallam, S.D., 1986, The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, *Acta Metall.*, 34.3, 497-510.
  11. Kemeny, J.M. and Cook, N.G.W., 1987, Crack models for the failure of rock under compression, *Proc. 2nd Int. Conf. Constitutive Laws for Eng. Materials*, 2, 879-887.
  12. Tapponnier, P. and Brace, W.F., 1976, Development of stress-induced microcracks in Besterly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr.*, 13, 103-112.
  13. Nickerson, M.D. and Kemeny, J.M., 1996, Coupling of radial permeability and uniaxial loading of a saturated sandstone, *Proc. 2nd North American Rock Mech. Symp.*, 1673-1680.
  14. Reyes, O., 1991, Experimental study and analytical modeling of compressive fracture in brittle materials, PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA.
  15. Vasarhelyi, B. and Bobet A., 2000, Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 33.2, 119-139.

---

### 박 남 수



1999년 서울대학교 자원공학과 학사  
2001년 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사  
E-mail : rock99@rockeng.snu.ac.kr  
현재 University of Texas at Austin,  
Dept. of Petroleum and Geosystem  
Engineering 박사과정

---



---

### 전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1991년 미국 캘리포니아 주립대학 공학석사  
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사  
Tel : 02-880-8807  
E-mail : sjeon@rockeng.snu.ac.kr  
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

---