

이중 비틀림 시험에서 유도 홈의 형상이 암석의 응력부식지수에 미치는 영향

정해식^{1)*}, 尾原 祐三²⁾, 전석원¹⁾

Influence of the Geometry of Guide Groove on Stress Corrosion Index of Rock in Double Torsion Test

Hae-Sik Jeong, Yuzo Obara and Seok-Won Jeon

Abstract Double torsion (DT) tests were carried out to investigate the influence of the geometry of guide groove on stress corrosion index of Kumamoto andesite. The fracture toughness was measured in the constant displacement rate, which was set to $2.07 \text{ MN/m}^{3/2}$ in average regardless of crack velocity. Stress corrosion indices, n were evaluated using specimens with rectangular, circular and triangular grooves and were 37, 36 and 38 in average, respectively. The n values were constant regardless of the groove geometry, however the DT specimen with triangular groove geometry showed the largest standard deviation in the relationship between crack velocity and stress intensity factor. The DT test was found to be effective in using a rectangular-grooved specimen and the width of the groove must be greater than the average grain size of minerals.

KeyWords Guide groove, Andesite, Double torsion test, Fracture toughness, Stress corrosion index

초 록 구마모토 안산암을 대상으로 이중 비틀림(DT) 시험을 통해 유도 홈의 단면 형상이 암석의 응력부식지수에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 정변위속도법에서 변위속도가 증가할수록 균열성장속도는 증가하지만 파괴인성계수는 평균 $2.07 \text{ MN/m}^{3/2}$ 로 거의 일정하였다. 정변위법을 통하여 유도 홈의 형상이 사각형, 원형, 삼각형인 시험편을 이용하여 얻은 응력부식지수는 각각 평균 37, 36, 38로 홈의 형상에 관계없이 거의 일정한 값을 보이지만 표준편차는 삼각형 홈에서 가장 크게 나타났다. 암석의 DT시험은 중앙부에 유도 홈이 있는 시험편을 이용하는 것이 효과적이지만 광물의 평균입경 이상의 폭을 가진 사각형 단면의 홈을 이용하는 것이 가장 적절하다.

핵심어 유도 홈, 안산암, 이중 비틀림 시험, 파괴인성계수, 응력부식지수

1. 서 론

금속, 유리질, 세라믹, 암석 등 대부분의 물질에서 일반적으로 나타나는 임계하 균열성장(subcritical crack growth)은 공학적인 측면에서 물질의 시간의존성 파괴(time-dependent failure)를 연구하는데 있어 가장 중요한 정보가 된다. 임계하 균열성장의 원인에 있어서는 응력부식(stress corrosion), 용해(dissolution), 확산(diffusion), 이온교환(ion-exchange), 균열선단부에서의 소규모 소성작용(microplasticity) 등이 있으며, 이 중에서도 응력부식

(stress corrosion)은 지하 천부의 임계하 균열성장을 설명하는 주 메커니즘이다(Atkinson & Meredith, 1987). 일반적으로 응력부식은 지속적인 응력이 작용하는 상태에서의 환경에 의해 기인된 임계하 균열성장으로 정의할 수 있다(Speidel, 1971). 특히 규산염 광물로 주로 이루어진 암석은 물이 주된 반응물질이 되어 응력부식(stress corrosion) 반응에 의해 임계하 균열성장이 일어난다고 알려져 있다(Anderson & Grew, 1977; Michalske & Freiman, 1982; Atkinson & Meredith, 1987; Jeong & Obara, 2002). 따라서 응력부식에 의한 임계하 균열성장에 관한 연구는 암반에 건설한 지하공동의 크립에 의한 파괴나 장기강도를 예측하는데 있어 중요한 자료로 이용될 수 있다.

일반적으로 물질의 임계하 균열성장은 Fig. 1과 같이 3개의 영역으로 나누어진다. 영역 I에서는 균열 선단

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부

²⁾ 일본 구마모토대학 환경시스템공학과

*교신저자(Corresponding Author): hsjeong@rockeng.snu.ac.kr

접수일: 2004년 10월 5일

심사 완료일: 2004년 10월 25일

부에서의 응력부식반응에 의해 균열이 성장하며, 영역 II는 균열 선단부로 전송되는 반응물질의 속도에 좌우되어 응력확대계수가 증가해도 균열은 일정한 속도로 진행되는 구간이다. 영역 III에서는 균열선단부의 응력확대계수가 파괴인성치 K_{IC} 에 가까운 상태로 주변 환경에 의한 화학적인 반응보다는 역화적인 조건에 의한 균열이 성장한다. 또한 영역 I보다 낮은 응력수준에서 응력부식한계 K_0 보다 낮은 응력확대계수에서는 균열이 성장하지 않는 구간이 존재한다(Evans, 1972). 암석에 대한 임계하 균열성장은 일반적인 시험법으로는 영역 I의 균열성장 거동만이 관찰되며 균열성장속도 V 와 응력확대계수 K_I 는 아래와 같은 관계식으로 일반화시킬 수 있다(Evans and Johnson, 1975).

$$V = \alpha K_I^n \tag{1}$$

여기서 α 는 주변환경과 관련된 상수, n 은 응력부식 지수로서 Fig. 1에서 영역 I의 기울기로 표현된다.

임계하 균열성장을 파악하기 위한 파괴역화적인 시험법 중에서 이중 비틀림(double torsion, DT) 시험은 시험편의 형태 및 재하방법이 단순하고 균열의 길이를 측정하지 않아도 균열성장속도를 구할 수 있어 암석과 같은 불투명한 재료에 대한 시험법으로 널리 사용되고 있

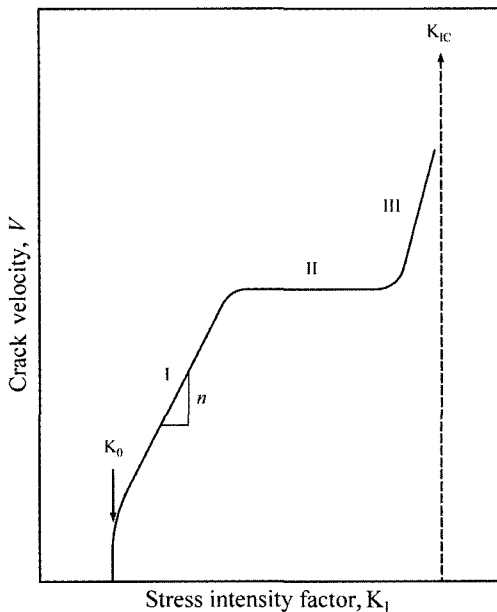


Fig. 1. A Schematic diagram of the trimodal subcritical crack growth. K_{IC} : fracture toughness, K_0 : stress corrosion limit, n : stress intensity factor (after Evans, 1972)

다. 또한 균열을 시험편의 중앙부에서 진행시킬 목적으로 일반적으로 시험편에 길이방향으로 사각형 단면의 유도 흠을 만들어 DT시험을 행하고 있지만 흠의 형상, 크기 및 그 효과에 대해서는 아직 불분명하다. 오히려 Pabst & Weick(1981)는 세라믹을 이용한 DT시험에서 유도 흠이 없는 시험편에서 적은 분산이 나타나고 있음을 보이고 있어 암석을 이용하여 흠의 형상에 관한 보다 자세한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 구마모토(熊本) 안산암을 이용하여 각기 다른 유도 흠의 단면 형상을 가진 시험편에 대하여 DT시험을 실시하였다. 유도 흠의 단면은 사각형, 원형 및 삼각형으로 제작하였으며 각각의 시험편에 대하여 흠의 형상이 균열성장속도, 응력확대계수 및 응력부식지수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. DT시험

DT시험은 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 판상의 사각형 시험편 끝 부분에 4점굴곡시험의 형태로 하중을 가하여 모멘트를 형성시킴으로써 시험편의 하부에 인장응력을 발생시켜 시험편의 길이방향으로 인장균열을 진행시키는 시험법이다. 이때의 시험편은 볼베어링 등으로 하부에서 4점으로 지지하고, 시험편 한쪽 끝부분의 상부에서 2점으로 하중을 가한다(Fig. 2(b)).

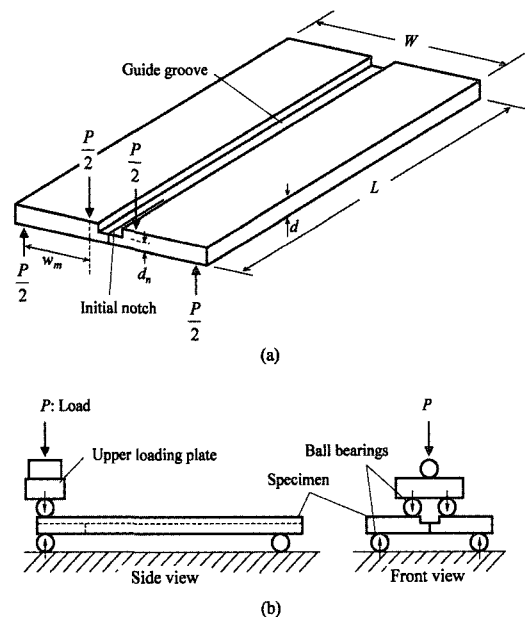


Fig. 2. Schematic view of a specimen and loading configuration during DT test

DT시험에는 정하중법, 정변위속도법, 정변위법이 있다. 정하중법 및 정변위속도법은 하중이 일정하게 된 지점에서 값을 얻는 관계로 균열성장속도/응력확대계수 그래프에서 한점 밖에 얻을 수 없기 때문에 주로 파괴 인성시험으로 이용된다. 한편 정변위법은 시험편의 수직변위를 일정하게 유지시켜 균열의 성장에 따른 하중 완화를 일으킴으로써 1회의 시험으로 균열성장속도/응력확대계수 그래프의 전 영역에 대한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 응력부식지수를 도출하기 위한 시험으로 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 파괴인성계수와 응력부식지수를 얻기 위해 정변위속도법과 정변위법을 각각 이용하였다.

William & Evans(1973)는 DT시험으로부터 응력확대계수와 균열성장속도를 계산하는 방법을 제안하였다. Fig. 2와 같이 시험편의 한쪽 끝에 상부에서 하중 P 가 작용하는 경우, 응력확대계수 K_I 는

$$K_I = Pw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{Wd^3d_n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서, Fig. 2에 기재된 바와 같이 W 는 시험편의 폭, d 는 시험편의 두께, d_n 은 시험편에서 실제 균열이 성장하는 면의 두께, w_m 은 상부 및 하부 재하점 사이의 거리(moment arm), ν 는 암석의 포아송비이다.

DT시험편의 컴플라이언스, 즉 하중 P 에 대한 수직변위 u 는 균열의 길이 a 와 경험적으로 선형관계를 갖기 때문에(Evans, 1972), 균열속도는 시험편의 컴플라이언스를 측정함으로써 얻을 수 있다. 정변위속도법에서는 변위속도 du/dt 를 일정하게 유지하면서 재하하여 하중이 최대치 P_{max} 에 도달한 시점의 균열성장속도 V 를 측정한다.

$$V = \frac{1}{P_{max}} \frac{du}{dt} \quad \left(B = \frac{3w_m^2}{Wd^3\mu} \right) \quad (3)$$

여기서 μ 는 강성률이다.

정변위법에서는 시험편에 하중을 급속히 가한 다음 일정한 지점에서 변위를 고정시킨 후 균열의 성장에 따른 하중완화속도 dP/dt 를 계측함으로써 균열성장속도를 얻을 수 있다.

$$V = - \frac{P_i \lambda_i}{BP^2} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

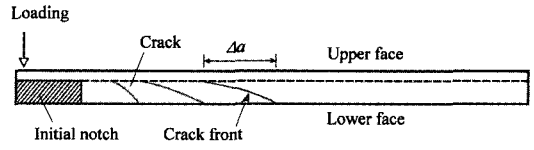


Fig. 3. Schematic drawing of the crack front shape(side view of the specimen)

여기서, P_i 는 변위를 고정한 시점에서의 하중, λ_i 는 초기 컴플라이언스이다. 그러나 실제 DT시험편에서의 균열의 성장은 Fig. 3과 같이 시험편의 상부보다 하부가 빠르게 진전되어 균열 선단부가 완만한 곡선을 이루면서 성장하기 때문에 이러한 효과를 보정하기 위해서 Evans(1972)는 보정계수 ϕ 를 도입하였다.

$$\phi = \frac{d_n}{\sqrt{\Delta a^2 + d_n^2}} \quad (5)$$

여기서 Δa 는 시험편 상부면과 하부면의 균열길이의 차이이다.

식 (3)과 (4)에서 보는 바와 같이 DT시험에서의 균열 성장속도는 균열의 길이에 의존하지 않고 시험편의 초기 컴플라이언스와 하중완화속도를 측정함으로써 얻을 수 있기 때문에, 균열의 길이를 측정하기 곤란한 불투명한 재료의 임계하 균열성장예에 관한 연구에 매우 유용한 시험법이라 할 수 있다.

또한, Pletka 등(1979), Fuller(1979), Trantina(1977)는 보다 정확한 결과를 얻기 위한 DT시험편의 크기 및 균열의 길이와의 상관관계를 제시하였다.

$$W \geq 12d$$

$$L \geq 2W$$

$$0.55 < a < L - 0.65W \quad (6)$$

여기서, L 은 시험편의 길이이며, a 는 초기균열의 길이이다.

3. 시험장치 및 시험편

DT시험은 파괴인성계수를 측정하기 위한 정변위속도법(constant displacement rate test)과 응력부식지수를 측정하기 위한 정변위법(relaxation test)을 이용하였다. 기본적인 시험방법은 Sano(1988)의 방법에 따라 수행하였다.

정변위법에 사용된 시험장치의 개요도는 Fig. 4와 같다. 연직방향으로 움직이는 전동실린더에 의해 시험편의 한쪽 끝의 상부에서 직경 4 mm의 볼베어링을 통해 2점으로 재하하여 시험편에 모멘트를 가하는 형태로 되어 있다. 상부 재하판의 재하점과 하부시험대의 지지점 간의 길이 w_m 은 18 mm이다. 시험편에 가해지는 하중과 재하점의 변위는 각각 상부재하판 위의 로드셀과 2개의 변위계를 통해 측정된다. 또한 하부시험대의 중앙부에는 간격을 두어 밑에서 현미경을 통해 인장균열을 관찰할 수 있도록 하였다.

정변위속도법은 정변위법에 사용된 시험장치 상부의 전동실린더 대신에 속도를 제어할 수 있는 전동장치를 설치하여 일정속도로 재하점에 하중을 가하는 형태이며 기본 구조는 정변위법과 같다.

본 연구에 사용된 암석은 구마모토 안산암으로 역학적으로 균질하고 등방성으로 알려져 있지만(Obara 등, 1992), 동일한 조건을 만족시키기 위해 모두 일정한 방향으로 시험편을 제작하였다. 시험편은 식 (6)을 만족하는 범위에서 파괴인성 측정을 위한 유도 흠이 없는 것과 응력부식지수 측정을 위한 유도 흠이 있는 것을 각각 제작하였다. 전자의 시험편 크기는 폭, 길이, 두께가 각각 45 mm, 130 mm, 2 mm이며, 후자의 경우는 각각 45 mm, 130 mm, 3 mm이다. 유도 흠은 시험편의 중앙부에 길이방향으로 폭 3 mm, 깊이 1 mm로 하였다. 두

종류의 시험편 모두 유도 흠의 중앙부에 시험편의 길이 방향으로 25 mm의 노치를 주었다. 정변위법에 사용된 시험편의 크기는 Fig. 5(a)와 같다. 또한 유도 흠의 형상에 따른 응력부식지수의 영향을 파악하기 위해 Fig. 5(b)와 같이 흠의 단면을 사각형, 삼각형, 원형의 세 종류로 제작하였다.

제작된 시험편은 수분 제거를 위해 건조로에서 약 80 일간 완전 건조시켰으며 대기 중의 수분과의 접촉을 피하기 위해 데시케이터에 밀폐 보관하였다.

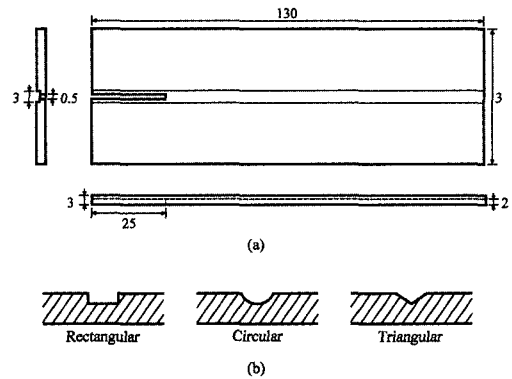


Fig. 5. Dimension of DT specimen used in this research (unit: mm)

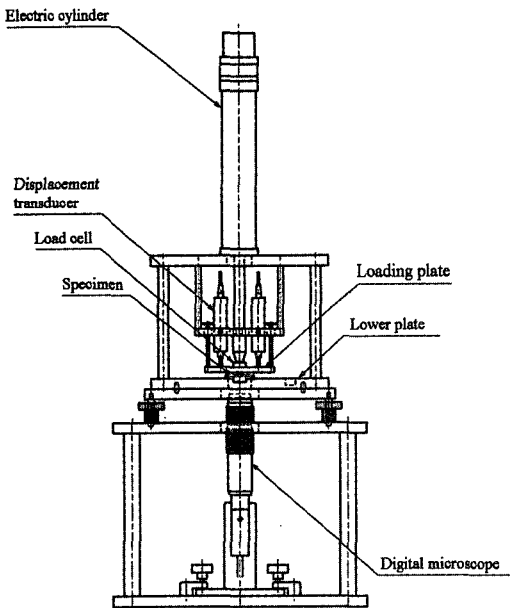


Fig. 4. An illustration of apparatus for DT test

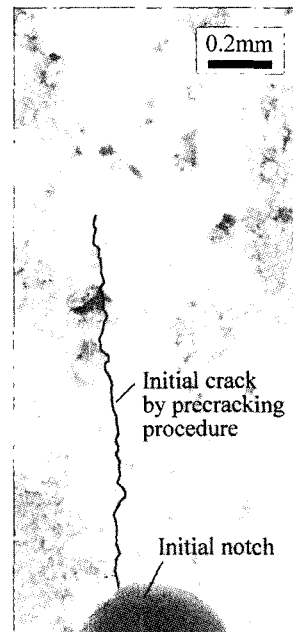


Fig. 6. Micrographic photograph of the precracked specimen

4. 시험방법

DT시험을 행하기 이전에 노치의 끝부분에 자연균열 (natural crack)에 가까운 초기균열을 만들 필요가 있다. 초기균열을 만드는 방법은 Pletka 등(1979)의 방법을 따랐다. 정변위 시험장치에 시험편을 설치한 후, 시험편에 느린 속도로 시험편에 하중을 가하고 변위를 고정하는 과정을 반복하여 변위를 고정한 상태에서 하중의 감소가 발생함을 통해 초기균열이 형성되었음을 인지하였다. 초기균열이 형성된 시점의 하중과 변위는 시험편에 따라 다소 편차가 있으나 유도 흠이 없는 시험편의 경우 약 25 N, 0.14 mm, 유도 흠이 있는 시험편의 경우 약 28 N, 0.05 mm의 하중과 변위를 보였다. 또한 시험편 하부의 디지털 현미경을 통해 초기균열의 발생을 확인하였다(Fig. 6).

첫번째로, 유도 흠이 없는 시험편을 이용하여 정변위 속도시험을 실시하였다. Bruce & Koepke(1977)는 빠른 균열성장으로 인해 파괴에 이를 수 있을 정도로 충분한 속도로 재하하여 파괴인성계수를 얻어야 한다고 주장하였으며, 그의 방법에 따라 측정이 이루어졌다. 정변위속도시험 중 재하점에 가해진 하중의 변화를 나타내면 Fig. 7(a)와 같다. 충격하중이 시험편에 영향을 미치는 것을 방지하고 재하점에 하중이 정확히 전달되도록 하기 위해 약 7 N의 하중을 미리 가한 후, 시험편이 파괴에 이를 때까지 일정한 변위속도로 재하한다. 본 연구에서는 변위속도가 파괴인성계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 0.10 mm/sec과 0.23 mm/sec의 두 종류로 설정하였다. 이 때 얻어진 최대하중 P_{max} 를 이용하여 파괴인성계수와 균열성장속도를 얻을 수 있다.

정변위시험은 균열성장속도와 응력확대계수의 관계를 얻기 위하여 사용된다. 유도 흠이 위로 향하도록 시험편을 하부시험대의 볼베어링 위에 설치한 다음, 먼저 시험편의 초기 컴플라이언스를 측정한다. 시험편에 약 16 N까지 천천히 하중을 가하여 가해진 하중과 그때의 변위를 동시에 측정함으로써 초기 컴플라이언스를 얻을 수 있다. 이후 연속적으로 정변위시험을 실시한다. 정변위속도시험과 마찬가지로 약 12 N~15 N 정도 미리 하중을 가한 후, 재하점의 변위를 0.27 mm만큼

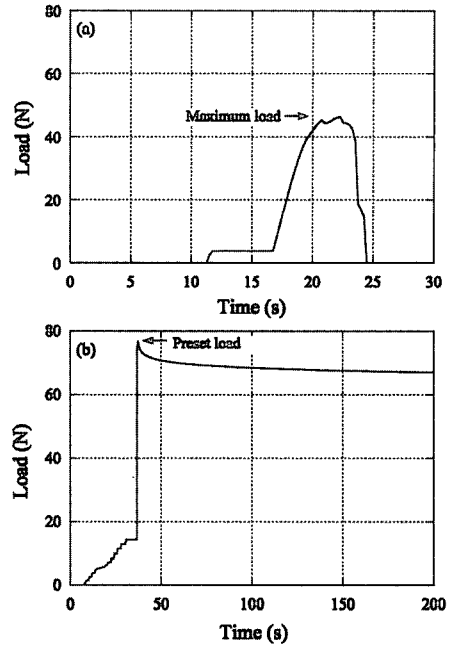


Fig. 7. Change of the load during the DT test. (a) constant displacement rate test and (b) relaxation test (constant displacement test)

급속히 발생시킨 뒤 곧바로 변위를 고정한다. 변위를 고정하였으므로 Fig. 7(b)와 같이 균열이 성장함에 따라 하중완화(load relaxation)가 발생하게 된다. 이 상태를 약 2시간 동안 유지하고 시간에 따른 하중 변화를 측정함으로써 응력확대계수와 균열성장속도를 얻을 수 있다.

정변위속도시험 및 정변위시험이 이루어지는 동안 시험편 주위의 온도와 상대습도를 일정하게 유지하기 위해 시험은 항온실에서 이루어졌으며 각 시험에 대한 온도와 상대습도는 Table 2~5에 표시한 바와 같다.

5. 결과 및 고찰

먼저 DT시험에 이용한 동일 압축을 이용하여 P파 속도 측정 및 일축압축시험을 실시하였으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다. P파 속도는 서로 직교하는 세 방

Table 1. P-wave velocity and uniaxial compression test for Kumamoto andesite

P-wave velocity (m/s)	Crack opening direction (O)	Crack propagating direction (P)	Loading direction (L)
		4840 ± 20	4890 ± 20
Uniaxial compression test	Strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
	162.7 ± 11.0	31.9 ± 3.2	0.27 ± 0.03

Table 2. Fracture toughness measurement using specimens without groove

	T (°C)	R. H. (%)	P_{max} (N)	du/dt (mm/s)	K_{Ic} (MN/m ^{3/2})	V (mm/s)
KIC-N-1	23.2	33	46.4	0.10	2.07	9.34
KIC-N-2	23.3	36	46.5	0.10	2.07	9.34
KIC-N-3	23.9	37	44.5	0.10	1.99	9.73
KIC-N-4	24.1	37	49.0	0.23	2.17	20.7
KIC-N-5	24.3	38	46.8	0.23	2.08	21.7
KIC-N-6	24.3	39	46.3	0.23	2.06	21.9
Average			46.6		2.07	

* T: temperature, R.H.: relative humidity

향에 대하여 수 차례 측정하여 그 평균값을 표시하였다. O 방향은 시험편의 폭방향 즉, 인장균열이 열리는 방향, P 방향은 시험편의 길이방향 즉, 인장균열이 진행되는 방향, L 방향은 O와 P 두 방향에 수직된 방향, 즉 수직 하중이 가해지는 방향이다. 측정결과 세 방향에 대한 속도이방성은 거의 나타나지 않으며, Obara 등(1992)의 결과와 같이 등방성을 가지는 것으로 고려된다. 일축압 축시험은 수증기압을 제어할 수 있는 진공챔버 내에서 일정 변형률속도로 3회 실시하였다. 주위의 수증기압은 100 Pa~1000 Pa, 변형률속도는 약 2×10^{-6} /s로 설정하였다. 시험 결과 일축압축강도는 평균 163 MPa, 영률과 포아송비는 각각 평균 32 GPa, 0.27인 것으로 나타났다.

파괴인성계수는 총 6개의 시험편을 이용하여 측정하였으며 각 시험에서의 설정온도와 수증기압, 그리고 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 최대하중은 변위속도에 관계없이 평균 46.6 N으로 대체로 일정한 값을 보인다. 파괴인성계수와 균열성장속도는 각각 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산되었으며 탄성계수와 포아송비는 Table 1의 일축압축시험의 결과를 이용하였다. 시험편에 가해진 수직하중은 로드셀에서 측정된 하중에 상부재하판의 무게 3.49 N을 합하여 계산하였으며 균열성장속도

의 보정계수 ϕ 는 편의상 1로 계산하였다. 변위속도 du/dt 가 증가할수록 균열성장속도는 이에 비례하여 증가하지만 파괴인성계수는 거의 일정한 값을 보이며 평균 2.07 MN/m^{3/2}인 것으로 나타났다.

유도 흠의 단면 형상이 사각형, 원형, 삼각형인 시험편에 대해 각각 4 또는 5회의 정변위시험을 실시하였으며, 각 시험편에 대해 초기 컴플라이언스 및 응력확대계수와 균열성장속도 측정이 이루어졌다. 초기 컴플라이언스의 측정은 값의 정확성을 위해 7 N 이상의 값만을 이용하여 하중의 증가에 따른 수직변위의 변화량을 측정하여 최소자승법에 의해 기울기를 구하였다. 사각형, 원형, 삼각형 단면의 시험편에 대한 초기 컴플라이언스는 각각 평균 2.11 m/N, 2.27 m/N 그리고 2.05×10^6 m/N이었다.

정변위법에서 하중완화곡선의 접선의 기울기에 해당하는 하중완화속도는 Pletka 등(1979)에 의해 제안된 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 로드셀의 최소 출력값이 0.04 N이기 때문에 정확성을 위해 0.2 N의 하중완화분에 해당하는 데이터에 대한 선형회귀분석을 통해 얻은 기울기를 하중완화속도로 정의하여 구하였으며 그 때의 하중은 사용된 하중데이터의 평균값을 취

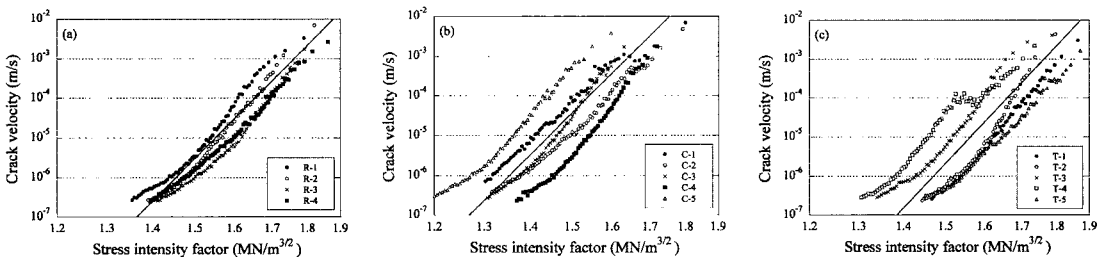


Fig. 8. Double logarithmic plot of crack growth/stress intensity factor data using specimens with (a) rectangular, (b) circular and (c) triangular groove

Table 3. DT Testing conditions for rectangular-grooved specimens and their results

	T (°C)	R. H. (%)	p (Pa)	λ_I (10^6 m/N)	n
R-1	10.9	43	561	2.08	38
R-2	10.9	44	574	2.07	39
R-3	10.9	44	574	2.13	36
R-4	10.9	43	561	2.13	33
Average				2.10	37

Table 4. DT Testing conditions for circular-grooved specimens and their results

	T (°C)	R. H. (%)	p (Pa)	λ_I (10^6 m/N)	n
C-1	10.8	43	557	2.19	31
C-2	11.0	43	565	2.21	32
C-3	11.0	42	551	2.40	40
C-4	11.1	43	568	2.25	40
C-5	11.0	43	565	2.30	36
Average				2.27	36

Table 5. DT Testing conditions for triangular-grooved specimens and their results

	T (°C)	R. H. (%)	p (Pa)	λ_I (10^6 m/N)	n
T-1	11.0	43	565	2.01	40
T-2	11.0	42	551	2.13	46
T-3	11.0	42	551	2.11	38
T-4	11.2	45	599	2.16	32
T-5	11.2	45	599	1.95	35
Average				2.05	38

하였다. 정변위시험에서의 응력확대계수 및 균열성장속도는 각각 식 (2) 및 (4)을 이용하여 계산되며 계산의 편이를 위해 보정계수 ϕ 를 1로 계산하였다. 각 시험편에 대한 응력확대계수와 균열성장속도와의 관계를 양대수 그래프에 나타낸 결과는 Fig. 8과 같다. 사각형 홈의 시험편의 경우, 거의 선형의 거동을 보이는 반면 원형이나 삼각형 홈의 시험편은 일부 구간에서 다소 굴곡을 보이기도 한다.

Fig. 8에서 선형회귀분석을 통하여 얻은 직선의 기울기는 식 (1)에서의 응력부식지수 n 과 일치한다. 사각형, 원형 및 삼각형 단면의 홈을 가진 시험편에 대한 정변위시험 시의 시험조건, 초기 크랙라이언스 및 응력부식지수의 결과를 각각 Table 3~5에 정리하였다. 구마모토 안산암의 응력부식지수는 사각형 단면의 홈의 경우 평균 37, 원형 홈의 경우 36, 삼각형 홈의 경우 38로 유도 홈의 형태에 관계없이 거의 일정한 값을 보인다. 하

지만 응력부식지수의 분포범위를 살펴 볼 때, 그 편차가 사각형, 원형, 삼각형의 순으로 커지고 있음을 알 수 있다.

정변위법에서 균열성장속도는 시험편에 작용하는 하중과 하중완화속도의 함수이다. 0.2 N의 일정하중감소분에 대한 하중을 획득하였으므로 균열성장속도에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 하중완화속도라 할 수 있다.

Fig. 9는 삼각형 홈의 T-4 시험편에 대해서 가장 심한 굴곡을 보이는 부분의 균열성장속도/응력확대계수 그래프와 그 데이터가 획득된 부분의 하중완화곡선을 확대하여 표시한 것이다. 전체적으로 시간에 따른 하중완화곡선의 변화가 나타나는 약 67 N~63 N의 하중구간 내에서도 하중이 급속히 감소하는 부분과 완만히 감소하는 부분이 반복적으로 나타나고 있으며, 그 결과 균열성장속도/응력확대계수 그래프에서 균열성장속도의 감

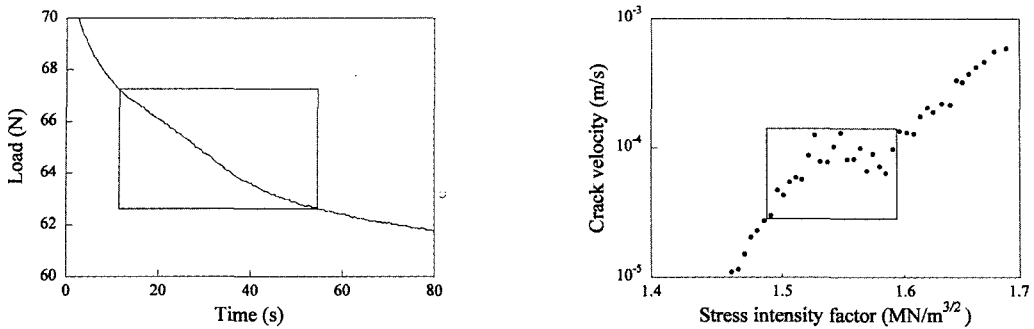


Fig. 9. Load relaxation curve and crack velocity/stress intensity factor plot of the triangular-grooved specimen T-4

소와 증가가 반복적으로 나타난 것으로 보인다. 이렇게 일부 구간에서 균열성장속도의 증감으로 인해 데이터의 분산이 발생하였으며 이 때문에 같은 단면의 다른 시험편에 비해 응력부식지수가 낮게 평가된 것으로 사료된다.

이러한 현상은 사각형 흠의 시험편에서는 거의 나타나지 않고 원형의 경우는 일부 구간에서 약간 나타나기도 하지만 삼각형의 경우에는 거의 나타나지 않는 시험편이 있는가 하면 매우 심한 비선형의 굴곡이 나타나기도 한다.

암석 내에서 균열은 성장함에 따라 선형으로 전파해 나가는 것이 아니라 도중에 단단한 광물과 만나면 비켜가게 마련이다. 그러나 원형이나 삼각형 흠과 같이 균열의 진행폭이 좁은 경우에는 흠의 기저부분을 따라 성장하던 균열의 방향이 바뀌면 균열의 두께 d_n 또한 커지게 되므로 하중의 감소가 둔화되어 하중완화속도가 감소하게 되고 결과적으로 균열성장속도의 감소로 이어진다. 반대로 균열이 흠의 기저부분으로 되돌아오면 다시 균열성장속도가 증가하게 된다. 이러한 효과는 균열의 진행폭이 좁고 방향이 균열의 진행방향이 바뀌에 따라 d_n 의 변화가 급격하게 나타나는 삼각형 단면의 흠에서 특히 두드러진다.

Pabst & Weick(1981)는 유도 흠의 단면 형상이 사각형 및 원형인 시험편과 흠이 없는 시험편을 이용하여 DT시험을 실시한 결과, 균열성장속도와 응력확대계수의 그래프에서 사각형 흠의 분산이 원형 흠이나 흠이 없는 시험편보다 훨씬 크게 나타나며 응력부식지수도 크게 나타난다고 하였다. 비슷한 결과는 Wakai et al. (1986)에서도 나타난다.

하지만 이는 산화알루미늄이나 질화규소와 같이 입자의 크기가 극히 세립이거나 없는 세라믹을 통해 얻은 결과로서 일정 크기 이상의 광물들이 존재하는 암석에

서는 이와는 반대되는 결과가 나타남을 본 연구결과를 통해 알 수 있다. 이들 물질은 균열의 진행이 입자의 영향을 받지 않기 때문에 유도 흠의 폭이 좁거나 없을 경우 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 크기 및 종류가 다른 광물들이 분포하는 암석과 같이 균열의 성장방향이 불규칙한 재료에 대해서는 유도 흠의 형상은 응력부식지수에 큰 영향을 미친다.

따라서 암석의 DT시험은 유도 흠을 넣은 시험편을 이용하는 것이 효과적이지만 균열이 흠의 벽면에 부딪히거나 흠을 넘어 진행하는 것을 막기 위해 광물의 평균입径 이상의 폭을 가진 흠을 이용하거나 균열의 진행방향이 변해도 d_n 의 변화가 없는 단면 형상이 사각형 흠의 시험편을 이용하는 것이 데이터의 분산을 최소화시키며 임계하 균열성장 연구에 효과적이라 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 유도 흠의 형상이 암석의 임계하 균열 성장에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 구마모토 안산암을 이용하여 흠의 단면 형상이 사각형, 원형 및 삼각형인 시험편을 제작하여 일정 온도 및 수증기압 하에서 DT시험을 실시하였다. DT시험은 파괴인성을 얻기 위한 정변위속도법과 응력부식지수를 얻기 위한 정변위법의 두 종류의 시험이 이루어졌으며 이를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 정변위속도법은 총 6개의 시험편을 이용하였으며 최대하중은 변위속도에 관계없이 평균 46.6 N으로 일정한 값을 보이며 파괴인성계수는 평균 2.07 MN/m^{3/2}인 것으로 나타났다.
- 2) 유도 흠의 단면이 사각형인 시험편의 경우, 정변위법을 통해 얻은 균열성장속도와 응력확대계수 그래프는 거의 선형의 거동을 보이는 반면 원형이나 삼각

형 흠의 시험편은 일부 구간에서 다소 굴곡을 보이기도 한다.

- 3) 구마모토 안산암의 응력부식지수는 사각형 단면의 흠의 경우 평균 37, 원형 및 삼각형 흠의 시험편의 경우는 각각 36, 38로 흠의 형상에 관계없이 거의 일정한 값을 보이거나 분산 정도는 사각형, 원형, 삼각형 흠의 순으로 커진다.
- 4) 원형이나 삼각형 흠과 같이 균열의 진행폭이 좁은 시험편은 흠의 기저부분을 따라 성장하던 균열의 방향이 바뀌고 동시에 균열의 두께 d_n 또한 변화함에 따라 하중완화속도의 증감이 발생하고 결과적으로 균열성장속도의 변화로 이어진 것으로 생각된다.
- 5) 암석의 DT시험은 중앙부에 유도 흠을 넣은 시험편을 이용하는 것이 효과적이지만 균열의 진행방향이 변해도 균열 두께의 변화가 없도록 광물의 평균입경보다 넓은 사각형 단면의 흠을 이용하는 것이 데이터의 분산을 최소화시키기 위해 가장 적절할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Anderson, O.L. and P.C. Grew, 1977, Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 15, 77-104.
2. Atkinson, B.K. and P.G. Meredith, 1987, The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks, in *Fracture Mechanics of Rock*, edited by Atkinson, B. K., Academic press, London, 111-166.
3. Bruce J.G. and B.G. Koepke, 1977, Evaluation of K_{Ic} by the double-torsion technique, *J. Am. Ceram. Soc.*, 60, 284-285.
4. Evans, A.G., 1972, A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials and its application to polycrystalline alumina, *J. Mater. Sci.*, 7, 1137-1146.
5. Evans, A.G. and H. Johnson, 1975, The fracture stress and its dependence on slow crack growth, *J. Mater. Sci.*, 10, 214-222.
6. Fuller Jr., E.R., 1979, An evaluation of double-torsion testing : Analysis, *ASTM STP*, 678, 3-18.
7. Jeong, H.S. and Y. Obara, 2002, Strength of Kumamoto andesite in non-atmospheric environments, *Shigen-to-Sozai*, 118, 599-604(in Japanese).
8. Michalske, T.A. and S.W. Freiman, 1982, A molecular interpretation of stress corrosion in silica, *Nature*, 295, 511-512.
9. Obara, Y., K. Sakaguchi, T. Nakayama and K. Sugawara, 1992, Anisotropy effect on fracture toughness of rock, *Proc. ISRM Symposium, Eurock '92*, Telford, T., London, 7-12.
10. Pabst R.F. and J. Weick, 1981, Double-torsion measurements with and without a guiding notch, *J. Mater. Sci.*, 16, 836-838.
11. Pletka, B.J., E.R. Fuller and B.G. Koepke, 1979, An evaluation of double-torsion testing experimental, *ASTM STP*, 678, 19-37.
12. Sano, O., 1988, A revision of the double-torsion technique for brittle materials, *J. Mater. Sci.*, 23, 2505-2511.
13. Speidel, M.O., 1971, Current understanding of stress corrosion crack growth in aluminum alloys, In: *The theory of stress corrosion cracking in alloys*, ed. Scully, J.C., North Atlantic Treaty Organization, Brussels, 289-344.
14. Trantina, G.G., 1977, Stress analysis of the double-torsion specimen, *J. Am. Ceram. Soc.*, 60, 338-341.
15. Wakai, F., H. Sakuramoto, S. Sakaguchi and Y. Matsuno, 1986, Evaluation of crack propagation in ceramics by double-torsion, *Zairyo*, 35, 898-903 (in Japanese).
16. Williams, D.P. and A.G. Evans, 1973, A simple method for studying slow crack growth, *J. Test. Eval.*, 1, 264-270.



정해식

1997년 부산대학교 자연과학대학
지질학과 이학사
1999년 강원대학교 자연과학대학
대학원 지질학과 이학석사
2003년 일본 구마모토대학(熊本大學)
대학원 공학박사

Tel: 02-880-7230

E-mail: hsjeong@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
연구원



尾原 祐三

1980년 구마모토대학 대학원
공학연구과 공학석사
1986년 나고야대학 대학원 공학박사

Tel: +81-96-342-3686

E-mail: obara@gpo.kumamoto-u.ac.jp

현재 일본 구마모토대학
환경시스템공학과 교수



전석원

1987년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원
자원공학과 공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학
공학박사

Tel: 02-880-8807

E-mail: sjeon@snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
교수