

## 암석 내의 자연균열과 인공균열의 진행특성 Characteristics of Natural and Experimental Fracture Propagation in Rocks

백 환 조 (Baek, Hwanjo)

강원대학교 공과대학 자원공학과

### 요약 / ABSTRACT

암석의 파괴역학적 특성은 암반 내의 자연균열들의 분포를 예측하거나 혹은 불연속면을 포함하는 암사면이나 지하구조물의 안정성을 해석하기 위한 중요한 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 암석의 파괴역학적인 특성의 차이를 측정하여 암종에 따른 제한적인 분포를 나타내는 자연균열에 대한 연구를 수행하였다. 자연균열과 인공균열의 진행특성을 정성적 및 정량적인 기준에 의하여 분석한 결과, 기원이 다른 균열들은 성장특성에 있어서 뚜렷한 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서, 암석파괴역학의 이론을 이용하여 암반 내에 분포하는 균열들의 기원이나 공학적 특성을 예측하기 위해서는 먼저 충분한 지질학적인 이론과 근거가 요구됨을 알 수 있다.

Fracture mechanics properties of rock materials can be applied to predict the distribution of natural fractures in rock masses, and also to assess the safety of rock slopes and underground structures. In this study, rock fracture toughness and other fracture mechanics properties of some lithologies showing apparently rock-property-controlled distribution of natural fractures were measured. Propagation behaviors of natural and experimental fractures were also characterized both qualitatively and quantitatively, in terms of the propagation types and some statistical parameters. It was concluded that the application of fracture mechanics theories to the geologic materials should be based on the geological background and evidences.

### 서론

Griffith(1920)가 처음 도입한 미세균열의 성장에

의한 파괴이론은 원래 취성파괴를 나타내는 대표적인 재료인 유리에 대하여 시도되었다. 균열의 성장에 따른 에너지의 균형을 기초로한 이 이론은 이후

금속과 같이 일반적으로 연성파괴를 나타내는 물질에 대하여도 적용되기 시작하였으며 파괴역학이라는 새로운 학문으로 자리잡게 되었다. 파괴역학에서는 균열의 성장에 대한 재료의 저항을 나타내는 파괴인성계수(fracture toughness,  $K_c$ )를 기본으로 한다. 즉, 외부로부터 가해진 하중에 의하여 기존의 균열첨단(crack-tip)에 형성되는 응력확대계수(stress intensity factor,  $K$ )가 재료의 파괴인성계수보다 큰 경우에는 균열의 성장이 일어나며 이로 인하여 궁극적인 파괴에 이르게 된다는 것이다(Kanninen과 Popelar, 1985). 이러한 파괴역학의 이론들은 1960년대 이후 암석이나 콘크리트, 모르타르 등과 같이 준취성(quasi-brittle)의 파괴특성을 나타내는 물질에 대하여도 활발하게 적용되고 있다(Jenq와 Shah, 1985). 특히 암석 및 암반공학의 경우에는 수압파쇄(hydraulic fracturing), 암반이나 지하공간의 안정성 해석, 미세균열의 분포와 성장, 지진의 발생, 광역적인 파쇄대의 분포에 대한 예측 등 여러 방면에서 활용되고 있다 (Schmidt, 1976; Rice, 1980; Rudnicki, 1980; Labuz 등, 1985; Ouchterlony, 1990)

실험실에서 측정된 암석의 파괴역학적 특성은 암석의 불균질성이나 이방성에 의하여 영향을 받는다. 또한 시험편의 형태나 크기, 혹은 시험방법에 따라서 상당한 자료의 분산을 나타낸다. 그러므로, 암석파괴역학 이론들을 현장에서 적용하기 위해서는 암석의 광물·암석학적인 특성이나 암석조직의 영향 등을 고려해야 하며, 이를 위하여 광물입자나 공극의 크기, 광물입자들 사이의 상호결합의 특성 등과 관련한 암석 내의 균열의 분포와 진행에 관한 연구가 뒷받침되어야 한다 (Baek, 1994).

본 연구에서는 일련의 퇴적층 중 주로 특정한 암층에만 국한된 자연균열의 분포를 해석하기 위하여 암석파괴역학 계수들을 측정하였다. 또한 실험 과정에서 형성되는 인공균열과, 실제 암반에서의 자연균열의 진행형태의 특성을 정성적 및 정량적인 기준에 의하여 구분하였다.

## 암석의 역학적 특성과 자연균열의 분포

자연절리의 제한적인 분포를 해석하기 위하여

먼저 암층에 따른 파괴인성계수의 차이를 측정하였다. 이는 동일한 외부환경이라 하더라도 암석 내 균열의 발달은 파괴인성계수의 차이에 의하여 영향을 받을 수 있기 때문이다.

## Sonora Canyon 사암

Canyon Sands (late Pennsylvanian to early Permian)의 하나인 Sonora Canyon 사암은 미국 텍사스 남서부지역의 Val Verde 분지에 분포하고 있다. 현재 이 지역에서는 원유의 생산성 향상을 위한 수압파쇄법의 적용과, 이와 관련하여 광역적인 자연파쇄대의 분포와 특성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Sonora Canyon 사암은 대부분 미립질의 석영으로 구성되어 있으며 자생의 고결물질이나 치환광물들이 부성분으로 관찰된다. 주성분광물들의 평균함량은 석영 77%, 장석 4%, 암석조각(rock fragments) 19% 등이다. 장석의 대부분은 사장석으로서 전체 암석체적의 8% 정도를 차지하는 경우도 있으나 정장석은 거의 관찰되지 않는다. 퇴적성 암석조각들의 대부분은 쳐어트나 사암, 셰일 등으로 구성되어 있다. 퇴적후의 속성작용은 ①능철석이나 녹니석에 의한 고결작용, ②다짐작용, ③이차석영에 의한 고결작용, ④장석류의 용해와 일라이트, 고령석의 침전, 마지막으로, ⑤앵커라이트(ankerite)에 의한 고결작용 등으로 구분된다 (Hamlin 등, 1992).

Sonora Canyon 사암은 퇴적시기 및 고결물질의 차이에 따른 암층의 구분이 확실하다. 즉, Figure 1에 나타난 것과 같이 회색이나 암회색을 나타내는 층과 황갈색 혹은 적갈색을 나타내는 층이 호상으로 반복하여 퇴적되어 있다. 현미경관찰에 의하면 색깔의 차이는 주로 고결물질의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 회색 사암이 주로 이차석영이나 점토광물에 의하여 고결된 것에 반하여 황갈색사암은 능철석( $FeCO_3$ )에 의한 고결작용이 진행되었다. 시추자료에 의하면 회색사암층에 비하여 황갈색사암층의 두께가 훨씬 얇으며, 대략 8 내지 10 cm 이 내이고 가장 두꺼운 경우에도 25 cm 정도를 넘지 않는다. 일반적으로 능철석에 의한 고결작용은 퇴적이 진행되는 과정에서 일시적으로 형성된 환원환경하에서 이루어진 것으로 판단된다 (Hamlin 등,

1992).

Sonora Canyon 사암층에는 다양한 크기의 자연 절리들이 다량으로 분포하고 있다. 이러한 자연절리들은 보통 10cm 이하의 길이를 나타내며 대부분 수직방향으로 발달하고 있다. 절리면 틈새의 크기는 대부분 0.35 mm 이내이고 주로 방해석, 석영, 덕카이트(dickite) 등으로 충전되어 있으나 비어있는 경우도 많다. 자연절리들은 주로 능철석을 포함하는 황갈색사암층에 국한하여 분포하고 있는 것으로 관찰되며, Figure 1에 나타난 바와 같이 서로 다른 두 층 사이의 경계면에서 자연절리의 성장이 멈춘 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 자연균열들의 제한적인 분포가 주로 서로 다른 암종들 사이의 파괴역학적 특성의 차이에서 비롯된 것인지 조사하고자 하였다.

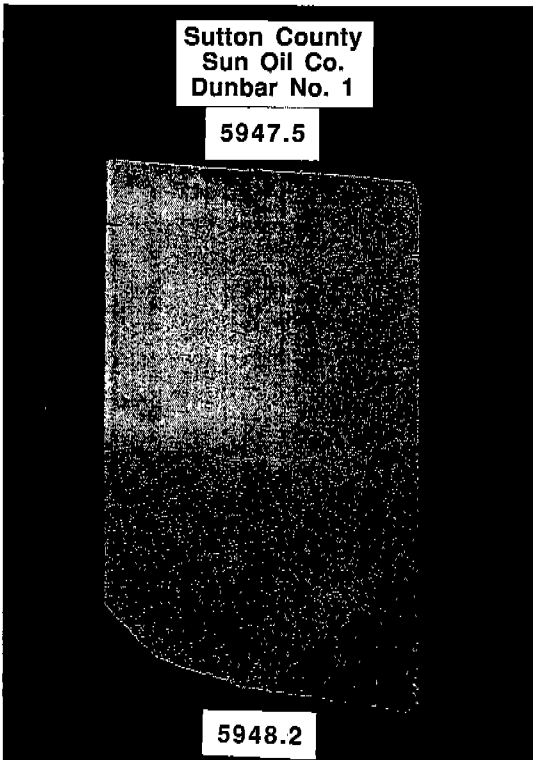


Figure 1. Slabbed core sample of the Sonora Canyon Sandstone with a vertical natural fracture (core diameter : 10 cm).

### 파괴인성계수의 측정

Sonora Canyon 사암의 파괴인성계수는 Figure 2에서와 같은 NBD(notched Brazilian disc) 시험편을 사용하여 측정하였다. 원래 암석의 탄성계수나 간접인장강도 측정에 사용되는 압열인장시험편에 가압방향과 나란한 초기균열(initial notch)을 일정한 깊이로 도입하여 파괴가 일어나는 순간의 최대 하중과 시험편의 형상으로부터 다음의 식을 사용하여 파괴인성계수를 계산한다 (Szendi-Horvath, 1980).

$$K_{Ic} = 1.264 (\sin 2\theta - \theta) \cdot \frac{F_{max} \cdot a^{0.5}}{B \cdot W}$$

위의 식에서  $a$  는 초기균열의 길이,  $W$  는 가압면의 폭,  $\theta$  는 radian으로 나타낸 가압면의 중심각, 그리고  $B$  는 시험편의 두께를 나타낸다.

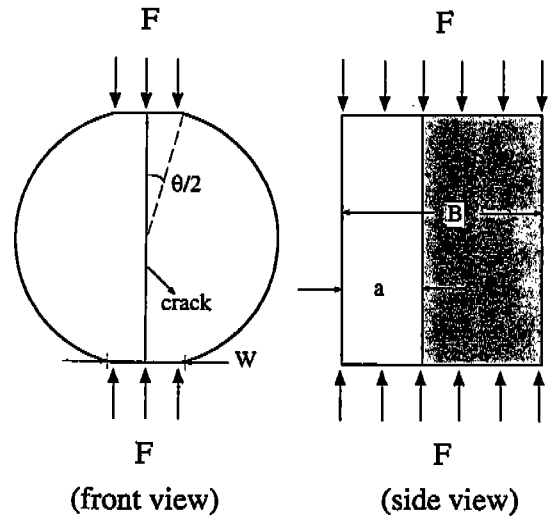


Figure 2. Geometry of notched Brazilian disc specimen.

암석의 파괴역학적 특성은 암석의 이방성에 영향을 받게 되며, 따라서 특정한 암석 및 암반에 분포하는 자연절리의 특성을 해석하기 위해서는 해당 자연절리와 동일한 방향으로 측정된 파괴역학 계수들이 요구된다. 본 연구의 대상인 자연절리들은 대

부분 수직으로 분포하고 있으므로 현장에서 수직방향으로 채취한 시추코어에서 시험편을 제작하기 위해서는 국제암반공학회에서 제안하는 CB시험편(ISRM, 1988)은 적당하지 못하다. 이는 인공균열의 진행방향이 자연균열의 방향과 다르기 때문이다. 따라서, 본 연구에 사용된 시험편은 현장 시추코어(지름: 10 cm)로부터 지름이 50.8 mm인 시험편을 수평방향으로 코어링한 후 자연균열과 나란한 수직방향의 초기균열을 암석절단기를 사용하여 제작하였다. 또한, 표면연마기를 사용하여 시험편의 상·하부위에 편평한 가압면을 성형하였다. 시험편의 두께는 40 내지 50 mm, 초기균열의 길이는 대략 시험편 두께의 절반 정도이다. 회색 사암에서 17개, 황갈색 사암에서는 13개 등 모두 30개의 시험편을 제작하였다. Figure 3은 본 연구에 사용된 시험장치를 나타낸다.

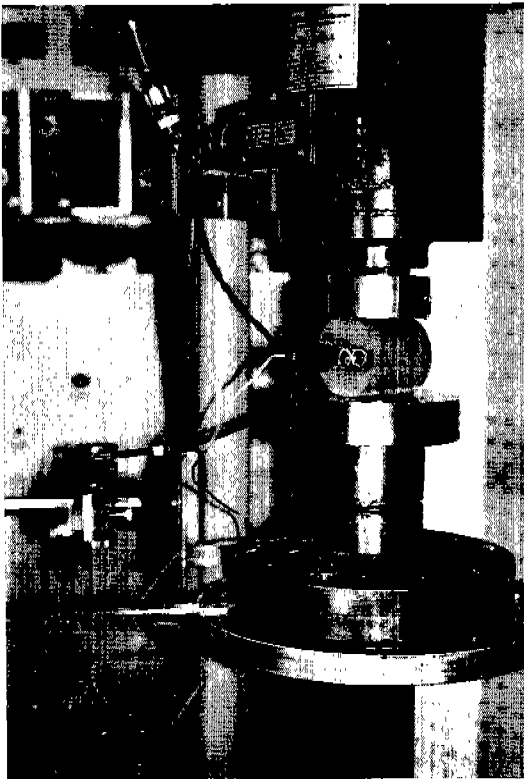


Figure 3. Test set-up for measuring the rock fracture toughness.

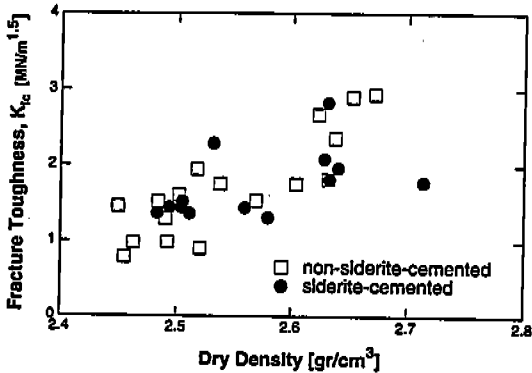
### 측정결과와 해석

본 연구의 대상인 Sonora Canyon 사암은 일반적으로 암종에 따른 공극율의 차이를 나타낸다. 즉, 능철석에 의한 고결작용이 진행된 황갈색사암은 점토광물이나 방해석, 혹은 석영 등에 의해 고결된 회색사암에 비하여 공극율이 크다. 이는 초기의 사암이 능철석에 의해 고결된 후 하중에 의한 다짐작용이나 후기의 자생석영(authigenic quartz)의 침진이 제한되었기 때문으로 판단된다 (Baek, 1994). 그러나, 황갈색사암의 경우 공극률이 비교적 크지만 점토광물이나 방해석에 비하여 밀도가 큰 능철석을 포함하고 있으므로 전체적인 건조밀도는 회색사암과 크게 다르지 않은 것으로 보인다.

시험편들의 파괴인성계수와 건조밀도 사이의 관계가 Figure 4에 나타나 있다. 이 결과로 보면 건조밀도가 증가할수록 파괴인성계수도 증가함을 알 수 있으며, 이는 조직이 치밀할수록, 즉 암석의 건조밀도가 증가할수록 파괴인성계수가 일반적으로 증가하는 경향과 동일하다. 회색사암의 경우에는 건조밀도와 파괴인성계수 사이의 상관관계가 뚜렷한 반면 ( $r^2 = 0.72$ ), 황갈색사암의 경우에는 상관관계가 비교적 낮게 나타난다 ( $r^2 = 0.26$ ). 현미경관찰 결과에 의하면 회색사암의 경우 입자와 입자 사이의 직접적인 결합이 비교적 연속적이며, 이로 인하여 파괴인성계수의 측정치는 암석 내의 공극의 분포, 즉 건조밀도와 밀접한 관련을 갖게 된다. 이와는 대조적으로 황갈색사암의 경우에는 입자들이 고결물질(능철석)에 의하여 분리되어 있는 경우가 많으며 측정된 파괴인성계수는 공극의 분포 뿐만 아니라 능철석의 함량이나 고결정도에 의하여 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 회색사암의 경우에 비하여 건조밀도와 파괴인성계수 사이의 상관관계가 낮게 나타날 수 있다.

암종에 따른 파괴인성계수의 구분은 Figure 4에 포함된 표에 나타난 바와 같이 뚜렷하지 않다. 즉, 자연절리를 많이 포함하는 황갈색사암이 자연절리의 분포도가 낮은 회색사암이 비슷한 수준의 파괴인성계수값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이에 대해서는 다음의 두 가지 해석이 가능하다. 먼저, 층의 두께가 증가할수록 분포하는 자연균열들 사이의

거리가 증가하는 일반적인 경향이다 (Ladeira와 Price, 1981). 본 연구의 경우 회색사암층에 비하여 황갈색사암층의 두께가 얇으므로 자연균열들 사이의 거리가 감소하고 따라서 수직한 시추시료에서 관찰되는 균열의 빈도가 회색사암층과 비교하여 훨씬 많을 것이라는 해석이다. 다음은 자연균열이 형성될 당시의 암석이 현재의 암석과 동일하지 않다는 해석이다. 즉, 자연균열들이 형성될 당시에는 두 층 사이의 파괴역학적인 특성에 의하여 균열의 빈도에 차이가 있었으나, 오랜 지질시대를 거치면서 이러한 역학적 특성의 차이가 감소되었다는 해석이다. 따라서 실험실에서 사용된 시험편들은 파괴역학적 특성의 차이를 과거와 같이 뚜렷하게 나타내지 않는다는 해석이 가능하다. 따라서, 균열의 분포에 대한 연구에 암석의 파괴역학적인 특성을 이용하기 위해서는 층의 퇴적과정이나 속성작용에 대한 연구 결과가 보완되어야 할 것이다. 그러나 현재의 암석을 대상으로 하는 암사면이나 지하구조물의 안정성의 해석에는 암석의 파괴역학적 특성들이 여전히 중요한 역할을 차지할 수 있을 것으로 판단된다.



Siderite-cemented sandstones :  $K_{Ic, ave.} = 1.74 \pm 0.45 \text{ MN/m}^{1.5}$   
 Non-siderite-cemented sandstones :  $K_{Ic, ave.} = 1.72 \pm 0.67 \text{ MN/m}^{1.5}$

Figure 4. Fracture toughness and dry density of the Sonora Canyon sandstone.

### 자연균열과 인공균열의 진행특성

암석의 파괴인성계수 측정치는 실험과정에서 인공적으로 형성되는 인공균열(experimental fracture)

의 진행에 대한 재료의 저항을 나타낸다. 따라서, 파괴인성계수에 의한 자연균열(natural fracture) 분포의 해석을 보완하기 위하여 인공균열과 자연균열의 진행 특성에 대한 연구가 시도되었다. 즉, 시추시료에서 얻은 5개의 자연균열과 파괴인성계수 측정시 형성된 5개의 인공균열을 포함하는 암석박편들을 제작하여 균열의 완곡성에 대한 조사가 이루어졌다.

### 균열진행의 형태

균열의 진행특성이란 박편 상에 균열의 자취가 나타내는 곡선의 완곡과 특정을 의미하며, 균열의 경로와 입자들 사이의 관계로부터 정성적 혹은 정량적인 방법으로 나타낼 수 있다. Figure 5와



Figure 5. Transgranular propagation of an experimental fracture (sample E1, long dimension of the figure = 1.6 mm).



Figure 6. Intergranular propagation of a natural fracture (sample N2, long dimension of the figure = 1.6 mm).

Figure 6는 각각 시료 E1과 N2에서 관찰되는 균열 진행의 형태를 보여준다. 시료 E1은 파괴인성계수의 측정시 시험편에 유발된 인공균열로서, 능철석에 의하여 고결된 석영입자들을 관통하여 진행하고 있다. Figure 6은 Sonora Canyon 사암에 분포하는 자연균열을 나타내며 이 경우 균열은 주로 입자들 사이의 경계면을 따라 진행하고 있다. 특히, 사진 중앙에 위치한 커다란 석영입자에 의하여 균열의 진행이 우회함을 잘 나타내고 있다.

암석박편에서 관찰되는 미세균열들은 일반적으로 그 형태에 따라 grain boundary crack, intracrystalline crack 및 intercrystalline crack 등으로 분류한다 (Simmons와 Richter, 1976). 이 중 intercrystalline, 혹은 intergranular crack은 입자들 사이의 경계로부터 광물입자 내에 이르는 균열을 의미하며, 특히 광물입자들을 완전히 관통하여 발

달되어 있는 경우에는 transgranular crack이라는 용어를 사용하기도 한다. 그러나, 본 연구의 대상이 개별적으로 독립된 균열이 아니라 연속적인 균열진행의 형태인 점을 고려할 때 이러한 분류방식은 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 Figure 7에 도시된 바와 같이 균열이 광물입자들을 통과하여 진행되는 경우를 입자관통 균열진행(transgranular crack propagation), 그리고 균열이 입자들 사이의 경계를 따라 진행되는 경우를 입자경계 균열진행(intergranular crack propagation)로 구분하였다.

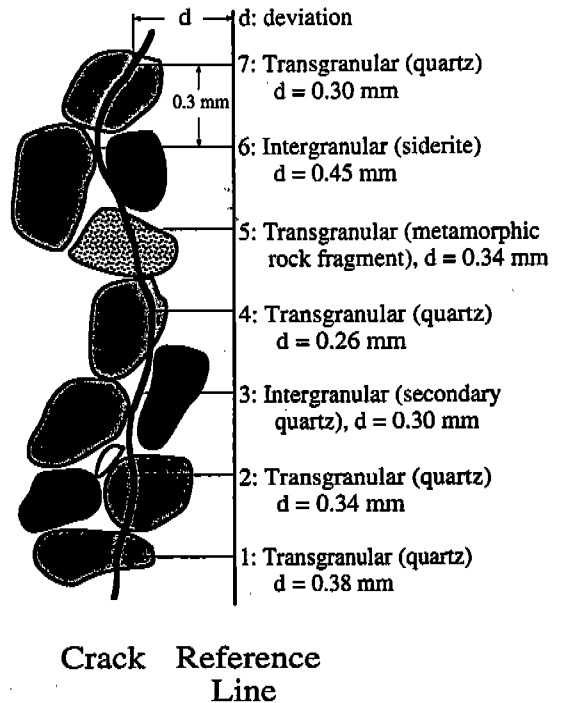


Figure 7. Schematic of the inter- and transgranular fracture propagation in rock.

Mechanical stage 위의 박편을 기준선을 따라 일정한 간격으로 이동하면서 각 측정점(대안렌즈의 중앙선)에서 관찰되는 균열진행의 특성을 기재하였다. 기준선은 자연균열의 경우 박편상에 나타난 균열의 시작과 끝을 연결한 직선이며, 인공균열의 경우에는 초기의 균열첨단에서 균열방향과 나란하게 기준선을 설정하였다. Table 1은 Figure 7에서 얻어지는 자료의 형태를 나타내는 것으로서, 누적길

## 암석 내의 자연균열과 인공균열의 진행특성

이(cumulative length)는 각각의 형태에 따른 균열 진행의 길이를 시작점으로부터 누적한 것이다. 균열 진행의 길이란 Table 1에 나타난 바와 같이, 해

당 측정점에서 관찰되는 균열진행 형태가 이전의 측정점부터 연속적인 것으로 가정하여 측정지점 사이의 길이, 즉 0.3 mm를 가산하였다.

Table 1. Data obtained from microscopic observation depicted in Figure 7.

| Observation Point               | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Propagation Type <sup>(1)</sup> | T    | T    | I    | T    | T    | I    | T    |
| Cumulative Length, I            | 0.0  | 0.0  | 0.3  | 0.3  | 0.3  | 0.6  | 0.6  |
| Cumulative Length, T            | 0.3  | 0.6  | 0.6  | 0.9  | 1.2  | 1.2  | 1.5  |
| Deviation or, Height            | 0.38 | 0.34 | 0.30 | 0.26 | 0.34 | 0.45 | 0.30 |

(1) T = Transgranular crack propagation ; I = Intergranular crack propagation

Figure 8는 균열진행의 형태를 누적길이와 전체 균열길이 사이의 백분율로 나타낸 것이다. 여기에서 입자경계 균열진행의 누적길이를 점선으로, 그리고 입자관통 균열진행은 실선으로 표시되어 있다. 예를 들어, 전체 길이가 16 mm 인 균열의 시작점에서 기준선을 따라 3 mm 이동한 위치까지 관찰된 입자경계 균열진행 길이가 1 mm, 그리고 입자관통 균열진행 길이가 2 mm 이었다면 해당 위치까지의 균열진행의 형태는 각각 6.3 %와 12.5 %로 표시된다. 박편관찰의 결과로 보면 곡선의 완곡은 주로 입자간 균열진행에 기인한 것으로 나타났다. 또한, 자연균열의 경우에는 입자경계 균열진행이 우세하나 인공균열의 경우에는 입자관통 균열진행이 더욱 우세함을 알 수 있다. 특히 초기균열에서 외부하중에 의한 균열의 전파가 시작될 때에는 입자관통 균열진행이 크게 우세하며 이후 입자경계 진행도 점차 누적됨을 알 수 있다. 균열의 기원에 따른 진행특성의 차이는 하중의 방향이나 가압속도 등과 밀접하게 연관된 것으로 판단된다. 이로부터, 균열진행 초기에 측정된 파괴인성계수로는 전체적인 균열성장의 전 과정을 충분히 설명하지 못함을 알 수 있다. 따라서, 콘크리트나 모르타르와 같이 암석과 유사한 물질에 대해서는 파괴인성계수보다는 변형률에너지 개방률(strain energy release rate,  $G$ )의 적용이 흔히 시도되고 있다 (RILEM, 1985).

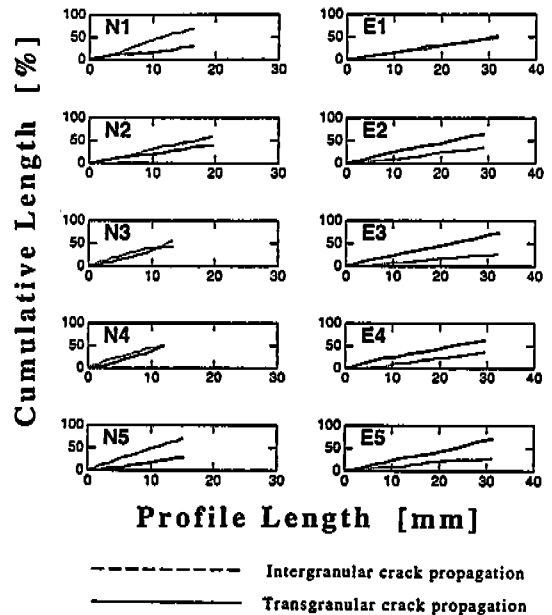


Figure 8. Propagation characteristics of natural(N) and experimental(E) fractures.

### 통계학적 지수의 적용

본 연구에서는 Lam과 Johnston(1985)이 제시한 통계학적 지수들을 사용하여 자연균열과 인공균열들의 완곡성을 정량적으로 표시하였다. 균열의 완곡성은 앞의 Figure 7와 Table 1에 나타난 것과 같이 mechanical stage 위에서 암석박편을 0.3 mm 씩 이동하면서 기준선으로부터 균열의 위치로 표시

하였다.

통계학적인 지수들은 Figure 9에서와 같이 균열의 진행방향에 수직인 단면에 나타나는 곡선으로부터 계산된다. 여기에는 각 측정점에서 곡선의 높이를 나타내는  $h_{max}$ , 곡선높이의 평균값인  $h_{ave}$ , 곡선높이의 표준편차  $SD_h$ , 각 측정점에서 곡선의 기울기를 나타내는 완곡각의 평균  $i_{ave}$ , 완곡각의 표준편차  $SD_i$  등이 있다. 각각의 지수들을 계산하는 식은 다음과 같다 (Lam과 Johnston, 1985).

$$h_{ave} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y| dx$$

$$i_{ave} = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \left( \frac{dy}{dx} \right) dx \right]$$

$$SD_h = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L \{ |y| - h_{ave} \}^2 dx}$$

$$SD_i = \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L \left( \frac{dy}{dx} - \tan i_{ave} \right)^2 dx} \right]$$

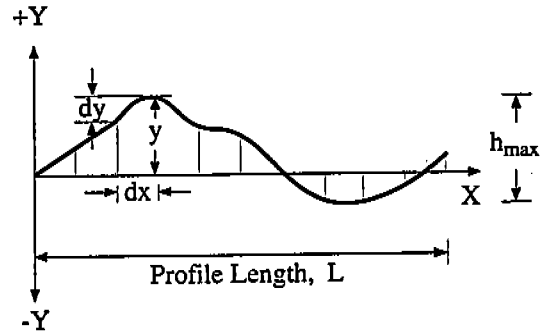


Figure 9. Roughness profile of the fracture surface (after Lam and Johnston, 1985).

이러한 지수들을 사용하여 각각 5개의 자연균열과 인공균열들의 완곡성을 정량적으로 나타낸 결과가 Table 2이다. 이 표에 나타난 바와 같이 인공균열의 경우에는 특징적으로  $SD_i$ 가 자연균열에 비하여 매우 낮게 나타나며, 이에 의하여 인공균열과 자연균열의 차이를 확인할 수 있다. 인공균열의 경우에는 각 측정점에서 나타난 곡선의 기울기의 변화가 적지만, 자연균열의 경우에는 완곡의 정도가 심하며 이것은 주로 입자간 균열진행의 결과로 판단된다.

Table 2. Statistical parameters for natural(N) and experimental(E) crack propagation.

| Specimen | Cement        | $h_{max}$ [mm] | $h_{ave}$ [mm] | $SD_h$ [mm] | $SD_i$ [degrees] |
|----------|---------------|----------------|----------------|-------------|------------------|
| N1       | siderite      | 0.83           | 0.28           | 0.16        | 12.0             |
| N2       | siderite      | 0.82           | 0.24           | 0.17        | 17.8             |
| N3       | siderite      | 1.10           | 0.24           | 0.15        | 17.6             |
| N4       | clays, quartz | 0.70           | 0.18           | 0.12        | 10.3             |
| N5       | siderite      | 0.63           | 0.20           | 0.16        | 12.1             |
| E1       | siderite      | 1.16           | 0.23           | 0.16        | 2.2              |
| E2       | siderite      | 1.09           | 0.17           | 0.19        | 3.4              |
| E3       | siderite      | 1.09           | 0.30           | 0.23        | 4.7              |
| E4       | clays, quartz | 0.83           | 0.15           | 0.13        | 2.7              |
| E5       | clays, quartz | 0.85           | 0.17           | 0.14        | 2.6              |



## 결 론

본 연구에 의하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 자연균열과 인공균열은 균열진행의 형태에서 뚜렷한 차이를 보여준다. 자연균열의 경우에는 특히 입자들의 경계를 따른 균열진행이 우세하며 진행경로의 완곡이 비교적 심하다. 이와는 대조적으로 인공균열의 경우는, 특히 균열발달의 초기에는 매우 직선적이며 입자들을 관통하여 균열진행이 우세하다. 이러한 차이는 특히 완곡각의 표준편차에 의하여 명확하게 나타난다.

2. 암종에 따른 자연균열의 제한적인 분포를 해석하기 위하여 시도된 파괴인성계수의 비교는 본 연구 대상암석의 경우 만족스러운 결과를 나타내지 않았다. 지질학적인 환경의 변화에 의하여 현재의 암석이 절리들이 형성되었던 시기의 암석과는 다른 역학적 특성을 나타낼 가능성을 고려할 때, 자연균열 및 파쇄대의 분포에 대하여 파괴역학적 이론을 적용하기 위해서는 충분한 지질학적 이론과 근거가 요구됨을 알 수 있다.

3. 파괴인성계수의 측정을 위하여 국제암반공학회에서 제시한 CB 시험방법은 정교하고 복잡한 실험과정 및 자료처리가 요구된다. 이에 비하여 NBD 시험방법은 시험편의 크기가 작고 시험방법도 비교적 간단하다. 따라서, 표준 CB 시험방법에 의한 파괴인성계수치들과의 보정이 이루어진다면 현장에서의 파괴인성계수 측정에 널리 적용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

Baek, H., 1994, Evaluation of fracture mechanics properties and microstructural observations of rock fractures, Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 200 p.

Barton, N and Choubey, V., 1972, The shear strength of rock joints in theory and

practice, Rock Engineering, Vol. 10, No. 1, 1-54.

Griffith, A. A., 1920, The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 221, 163-198.

Hamlin, H. S., Clift, S. J., and Dutton, S. P., 1992, Stratigraphy and diagenesis of Sonora Canyon deep-water sandstone, Transactions, AAPG, Southwest Section, 209-220.

ISRM Commission on Testing Methods, 1988, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, No. 2, 71-96.

Jenq, Y. S. and Shah, S. P., 1985, A fracture toughness criterion for concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 5, 1055-1069.

Kanninen, M. F. and Popelar, C. H., 1985, Advanced Fracture Mechanics, Oxford University Press, New York, 563 p.

Labuz, J. F., Shah, S. P., and Dowding, C. H., 1985, Experimental analysis of crack propagation in granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 2, 85-98.

Lam, T. S. K. and Johnston, I. W., 1985, A scanning device to quantify joint surface roughness, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 8, No. 3, 117-124.

Ouchterlony, F., 1990, Fracture toughness testing of rock with core based specimens, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1/2/3, 351-366.

Rice, J. R., 1980, The mechanics of earthquake rupture: Physics of the earth's interior, Proceedings of the international school of physics, 555-649.

RILEM Draft Recommendations, 1985, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests

백환조

- on notched beams, *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 106, 285-290.
- Rudnicki, J. W., 1980, Fracture mechanics applied to the earth's crust, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 8, 489-525.
- Schmidt, R. A., 1976, Fracture-toughness testing of limestone, *Experimental Mechanics*, Vol. 16, No. 5, 161-167.
- Simmons, G. and Richter, D., 1976, *Microcracks in Rock: The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*, Wiley, 105-137.
- Szendi-Horvath, G., 1980, Fracture toughness determination of brittle materials using small to extremely small specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 13, No. 4, 955-961.

백 환 조

강원대학교 공과대학 자원공학과 조교수

강원도 춘천시 효자2동 192-1 (우 : 200-701)

TEL : (0361) 250-6257