

터널과 지하공간, 한국암반역학회  
Vol. 2, 1992. pp. 251~264

## 암석의 파괴인성 측정에서 나타나는 CB 시험편의 치수효과에 관하여

김재동<sup>1)</sup>, 백승규<sup>2)</sup>

### The Size Effect in Measuring the Fracture Toughness of Rock using Chevron Bend Specimen

Kim Jae Dong, Baik Seung Kyu

#### ABSTRACT

In this study, the size effect in measuring the fracture toughness of rock was investigated using the ISRM Suggested Method for Fracture toughness using Chevron Bend Specimens. Total 58 specimens were prepared with 4 different diameters, 29, 42, 54, 68mm and center cut-chevron notch. In addition to this, to evaluate the effect of anisotropy of Jecheon granite, which is the sample for this study, core drilling direction was adjusted perpendicular (short transverse) and parallel (arrester) to the rift plane in the sample and the measured fracture toughness for each direction were compared.

Important results obtained from this study are as follows.

Level II test condition is more adequate than Level I, because of low data scattering and precision and corrected fracture toughness of Jecheon granite measured are  $2.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  for arrester direction with minimum initial crack length 0.6cm and  $2.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  for short transverse direction with minimum initial crack length 0.7cm. From the relationship between core diameter and initial crack length presented in the ISRM testing method, the specimen diameter should be bigger than 47mm.

The fracture toughnesses measured for arrester and short transverse direction show 10% difference. This is to the anisotropy of Jecheon granite possessing rift plane.

---

\*1992년 12월 접수

1) 강원대학교 자원공학과 조교수

2) 강원대학교 자원공학과 대학원과정

## 1. 서 론

파괴역학에 대한 개념은 1920년대에 Griffith에 의해 미시적 견지에서 처음으로 연구되기 시작하였다. Griffith는 자료내에서의 균열의 성장은 응력에 의해 균열 주위에 축적된 변형에너지(strain energy)양이 새로운 균열면을 형성할 때 재료가 가지는 고유의 일정 저항치를 넘어야 이루어지며, 이 현상을 유리재료를 이용한 파괴시험에서 입증하였다.<sup>1, 3)</sup>

Orowan은 균열첨단에서의 소성변형에 필요한 에너지를 고려하여 Griffith의 이론을 수정 발표하였으며, 그 후 Irwin은 새로운 균열면을 형성할 때의 변형에너지개방률(strain energy release rate)과 직접 관계가 있는 응력확대계수(stress intensity factor)의 개념을 도입하여 균열 첨단 부근에서의 응력분포를 정량적으로 나타내었다.

이러한 이론적인 연구와 함께 파괴역학의 실용적인 적용은, 1차 세계대전 이후 금속재료의 사용이 급격히 많아지면서 주로 연성과파괴 현상을 보이는 금속재료가, 취성파괴를 일으키는 현상들이 교량, 철도레일, 금속구조물, 선박 등의 대형 구조물에서 빈번히 발생함에 따라 이러한 현상들을 이해하고 방지하기 위한 목적으로 활발해지기 시작하였다.

이후 현재까지 파괴역학은 금속합금의 재질 향상, 구조물의 설계기준의 제고, 균열로 인한 파괴에 있어서 재료의 저항정도를 나타내는 파괴인성측정법의 표준화 등의 여러 방향으로 크게 발전되었다.

파괴역학은 본래 암석재료나 암반구조물을 대상으로 발전되지는 않았다. 그러나 암석은 지질학적 생성과정에서 잠재적으로 절리, 균열, 공극 등 많은 역학적 결함들을 내포하고 있고, 취성적 성질이 뚜렷한 재료로 밝혀지고 있으

며, 실제 암반내 구조물에서 인장응력에 의해 기존의 균열로부터 새로운 균열이 생성, 전파하여 대규모 파괴에 까지 이르는 경우가 많이 발견되고 있으므로 이러한 암석의 특성과 파괴양태를 정확히 규명하기 위해서는 파괴역학의 도입은 매우 필요한 문제라 할 수 있다.

그러나 파괴역학의 암석재료에 대한 적용 연구에는 먼저 타 재료와는 달리 구분되는 암석 고유의 기본적인 물리적 성질, 역학적 성질 등의 차이에 따른 문제점들을 파악해야 할 필요가 있다.

1970년대 이후 암석내 균열의 성장, 전파과정의 특성에 관한 많은 연구결과가 발표되었고, 파괴인성에 대한 시편의 형상, 크기, 가압 방법등의 변수들이 파괴인성에 미치는 영향에 대하여 많은 측정결과들이 발표되었다.<sup>4-6)</sup> 그러나 대부분의 연구에서 적용하고 있는 시험법들은 금속재료에 대한 ASTM(American Society for Testing and Materials)파괴인성 시험법을 준용한 것이어서 암석에 대한 시험방법의 적용타당성의 검증이 부족한 상태였다. 이러한 결점의 보완과 암석의 비선형 변형거동의 보정을 포함하는 보다 적합한 암석의 파괴인성 시험법이 1988년 국제암반역학회(International Society for Rock Mechanics)의 암석시험법의 표준화를 위한 위원회(The ISRM Commission on Testing methods)에서 암석의 파괴인성 측정에 관한 시험법(Suggested methods for determining the fracture toughness of rock)이라는 제목으로 발표되었다.<sup>7)</sup>

현재 국외에서는 국제암반역학회에서 제시한 파괴인성시험법에 따라 연구한 연구논문이 다수 발표되고 있으며,<sup>8, 9)</sup> 국내에서는 이에 대한 연구가 극히 부진하여 소수의 연구논문<sup>6, 10)</sup>이 발표된 정도이다.

국제암반역학회의 파괴인성시험법에 나타난

시험 기준들을 살펴보면, 시편의 치수에 관한 사항들 중 서로 상대적인 비의 형태로 시편의 규격을 설정하고 있으나, 암석에 관한 많은 여타 물성시험 결과에서 볼 때 암석의 물성은 시편의 절대적인 치수가 크게 영향을 미치는 치수효과가 존재한다고 알려져 있으므로, 본 연구에서는 파괴인성의 측정시에 나타날 수 있는 시편의 치수효과에 대해 알아 보고자 하였다.

시편의 치수효과를 연구하기 위하여 코어형 CB(Chevron Bend)시편의 직경을 29mm에서 68mm까지 4종류로 구분하여 성형하고 시편에 가공한 Chevron notch의 초기길이를 ISRM 시험규정이 허용하는 범위내에서 변화를 주어 시험함으로써, 시험 후 나타난 초기인공균열길이(initial crack length,  $a_0$ )와 파괴인성의 결과로부터 파괴인성으로 인정할 수 있는 시편의 치수 및 초기 인공균열길이의 한계를 검토하여, 국제암반역학회에서 제시한 파괴인성측정법에 명확히 제시되어 있지 않은 시편의 치수에 대한 파괴인성 시험기준을 알아보고자 한다.

이와 함께 본 연구에서는 시험대상 암석으로 선정된 제천산 화강암에 존재하는 연약면(rift plane)에 의한 이방성이 파괴인성에 미치는 영향을 검토하여 보고자 하였다.

## 2. 파괴역학의 기초이론

### 2.1 균열의 변형형태

선형 탄성체내에 균열이 존재하고 있을 때 균열은 작용하는 응력의 상태에 따라 기본적인 3가지 형태의 각각 혹은 서로 중첩된 형태로 변형을 하게 된다. Mode I(opening mode)은 균열을 형성하는 양표면에서 일어나는 변위의 방향이 균열면과 서로 직교하는 형태이다. 이 형태는 실제 공학적 문제에서 빈번히 일어나는

것이며 실험실 실험에서도 가장 용이하게 시도될 수 있다. Mode II(sliding mode 또는 in-plane mode)는 균열표면에서의 변위의 방향이 균열방향과 평행하고 응력이 작용하는 면에 수직인 형태이다. Mode III(tearing mode 또는 out-of-plane mode)는 균열표면상에서의 변위의 방향이 Mode II에서의 상태와 비교하여 볼 때 서로 직교하는 형태를 나타낸다.<sup>1,3)</sup>

### 2.2 응력확대계수

Fig.1에서와 같이 평면변형상태하의 무한 탄성체내에 균열이 응력을 받으며 존재하는 경우를 고려해 보면, 균열첨단으로부터 충분히 작은거리  $r$ 만큼 떨어져있는 한점  $P(r, \theta)$ 에서의 응력은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>1,3)</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \sigma \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

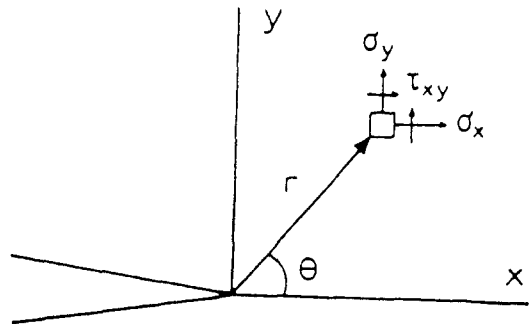


Fig. 1 General Mode I problem.

이때 응력확대계수  $K_I$ 은 다음과 같다.

$$K_I = c \sigma \sqrt{a} \quad (2)$$

- σ : 작용응력
- a : 중심균열길이의 1/2
- c : 균열이 존재하는 물체와 균열의 형상, 하중을 가하는 방법에 의해 결정되는 상수

선형탄성체내에 존재하는 균열첨단부에서의 응력에 관한 식(1)에서 볼때, 응력의 분포는 K를 제외하면 균열첨단에 접근할수록( $r \rightarrow 0$ ) 무한대로 커지며 작용하는 외부응력의 크기나 균열의 길이와는 무관한 형태로 표현되어 있다. 즉, K는 특정한 균열형태나 외부 응력조건에 대해 균열첨단에 인접한 영역에서 집중되는 응력의 크기를 결정하는 요소로서, 응력확대계수(stress intensity factor)라고 정의된다.<sup>1,3)</sup>

2.3 파괴인성(Fracture toughness)

평면변형조건에서의 응력확대계수의 극한값  $K_{Ic}$ 를 평면변형파괴인성, 또는 파괴인성이라고 한다. 파괴인성은 암석, 금속, 세라믹 및 종이, 고무 등의 광범위한 재료에 있어서 균열을 포함하는 물체의 크기나 형상, 균열의 길이 등의 외부적 요인으로 부터 영향을 받지 않는 재료 고유의 물질상수로 알려져 있다. 파괴인성의 단위는 응력단위( $FL^{-1/2}$ )에 길이의 제곱근( $L^{1/2}$ )이 곱해진 형태인 ( $FL^{-3/2}$ )로 표현된다. 파괴인성은 물질고유의 균열성장에 대한 저항도를 나타내는 물질상수로서 값이 낮을수록 균열의 성장이 용이하게 일어난다.<sup>1,3)</sup>

3. 시료, 시험장치 및 방법

본 연구에서는 국내산 석재용 화강암을 시료로 하여 석재용 화강암의 시편 치수에 따른 파괴인성의 변화와 시료내에 존재하는 이방성에 의한 파괴인성의 차이에 대하여 측정 조사하였다. 사용된 시료 및 시험방법은 다음과 같다.

3.1 시료 및 시편성형

본 연구에서는 충청북도 제천의 석재용 중립질 화강암을 시료로 사용하였다. Table 1은 시료로 사용된 제천화강암의 기본적인 물리적 성질을 측정하여 정리한 것이다.

Table 1. Physical properties of Jechon granite.

Physical properties	short transverse	arrester
Bulk density	2.677 g/cm <sup>3</sup>	
True density	2.714 g/cm <sup>3</sup>	
Shorehardness	95 ± 5	
P/S Wave Velocity	3400 ± 100m/sec/2060 ± 80m/sec	
Uniaxial Compression Strength	141 ± 10 MPa	143 ± 7 MPa
Tensile Strength	8.6 ± 1.8 MPa	9.1 ± 2.1 MPa
Shear Strength	13 MPa	15 MPa
Young's Modulus	60.64 GPa	57.83 GPa
Poisson's Ratio	0.30	0.26
Internal Friction Angle	52 degree	55 degree

1MPa = 10.20kgf/cm<sup>2</sup>

국제암반역학회(ISRM)의 암석시험법의 표준화를 위한 위원회(The ISRM Commission on Testing methods)에서는 암석의 파괴인성 측정에 관한 시험법(Suggested Methods for determining the fracture toughness of rock.

Table 2. Specimen dimensions for Chevron Bend specimen.

Geometry parameter	Value	Tolerance
Specimen diameter	D	>10 × grain size
Specimen length, L	4D	>3.5D
Support span, S	3.33D	±0.02D
Subtended chevron angle, θ	90.0°	±1.0°
Chevron V tip position, a <sub>0</sub>	0.15D	±0.10D
Notch width, t	<1.0mm	<0.03D

1988)을 발표한 바 있다.<sup>7)</sup> 여기에서는 파괴인성의 측정을 위하여 암석 코어를 이용한 3점굴곡시험을 제시하고 있으며 그 표준시편의 규격은 Table 2와 같다.

암석의 이방성에 대한 파괴인성의 차이와, 시편 치수의 변화에 따른 파괴인성의 변화 양태를 측정 조사하기 위하여 실험실에서 가로, 세로, 높이가 각각 30cm인 제천화강암 블록(block)을, 코어채취기(Coring machine, SS-C-529, Teiyo Corp.)를 사용하여 직경 29, 42, 54, 68mm의 4종의 코어로 각각 채취하였다. 이와 함께 블록의 한면과 평행한 연약면(rift plane)의 방향에 대하여 Fig.2에서 보는 바와 같이 연약면의 방향에 대해 각각 직각과 평행하게 방향성을 두어 코어를 채취한 결과 총 8종의 코어(core)를 채취하였다.

Fig.3은 파괴인성시험용 3점굴곡시험 표준시편이다. 시편의 제작은 길이가 직경의 3.5배 이상되는 코어를 택하였다.

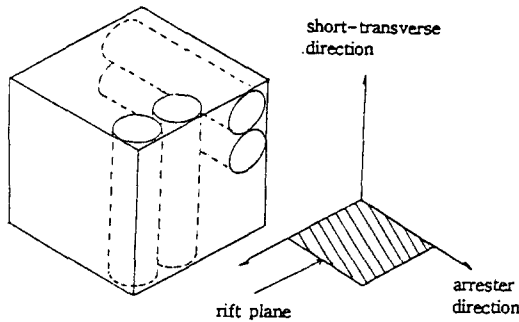


Fig.2 Cubic block of rock and two directions for drilling specimens.

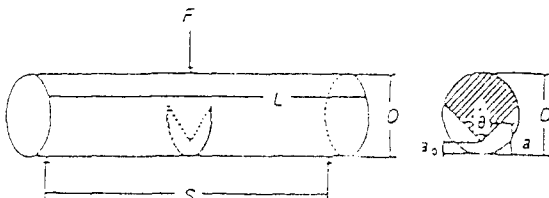


Fig.3 Standard specimen geometries for CB specimen in the ISRM Suggested method.

노치의 폭은 시편규격에 제시되어 있는 바와 같이 1mm 이하가 되도록 가공하기 위하여 두께 0.5mm의 다이아몬드 날을 암석절단기(Cutting Machine, 공신사, Model 11-R)에 장치하여 사용하였다.

### 3.2 시험장치

본 시험에 사용된 시험기는 미국 SBEL (Structural Behaviour Engineering Laboratories)사의 암석 압축시험용 서보시스템 (Servo Dynamic test system, SBEL, Model 547)으로 가압용 프레임, 조정부(Control Panel), 유압펌프(Oil pump)의 3부분으로 크게 나뉘어져 있다. 최대 가압용량은 100톤이며 재하형태와 입출력명령, 측정자료의 처리 등은 16비트 개인용 컴퓨터로 이루어진다. 시험에 적합하도록 3점굴곡시험기구(Three Point Bend Test Device)를 제작하였다. 3점굴곡시험 기구는 본체, 지지기구, 지지로울러와 가압로울러의 4부분으로 나뉘어진다. 제작한 3점굴곡시험 가압기구는 직경에 따른 지지점간의 거리를 조절할 수 있으며 지지점은 로울러(roller)로 이루어져 지지점과 시편간의 마찰력을 없앨 수 있으며, 스프링으로 고정되어져 지지기구 위에 놓인다.

노치의 개구변위(Crack Mouth Opening Displacement, CMOD)를 측정하기 위하여 미국 SBEL사에서 제작한 용량 0.25mm의 소형 LVDT(Miniature Linear Variable Differential Transducer, SBEL, Model 250)를 사용하였다.

시편에 케이블 타이(Cable tie)를 이용하여 소형 LVDT를 시편의 노치 입구에 고정시키고, 암나사와 수나사로 제작한 지지판(LVDT guide)도 역시 소형 LVDT와 직선으로 정렬시킨 후 케이블 타이로 고정하였다.

Fig.4는 시험기에 3점굴곡시험기구, 시편, 소형 LVDT, 지지판을 정렬한 모습이다. 하중과 개구변위의 기록은 XY 기록계(WX 4411-H1, Watanabe)를 사용하였다.

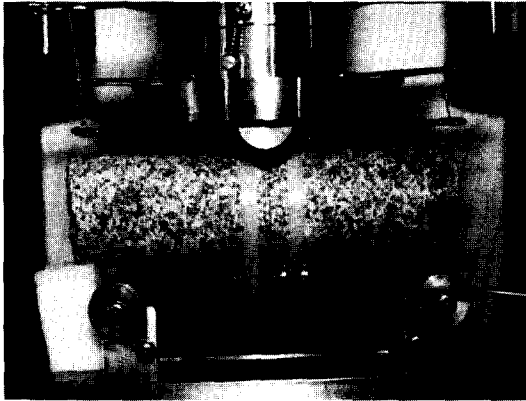


Fig.4 A view of 3-point CB fracture toughness test.

### 3.3 시험방법

국제암반역학회에서 제시한 암석의 파괴인성 측정시험법<sup>7)</sup>에는 Level I 시험과 Level II 시험이 있다. Level I 시험은  $0.25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec}$  이상의 일정 하중속도로 하중을 가하며 가압후 10초이내에 파괴되도록 하는 시험이다. Level II 시험은 일정변위속도인  $\text{CMOD} > 0.006K_{\text{CB}}/(E/D)\sqrt{\text{m}}/\text{sec}$ 로 최대하중 이후까지 반복하중(Unloading-Reloading)을 가하여 파괴인성을 측정하는 시험이다.

본 시험은 Level II 시험을 하여 암석의 파괴인성을 측정하였다. 지지점간의 거리는 시험법에 제시한 코어 직경의 3.33배로 하여 측정하였다.

가압방법은 반복하중(Unloading-Reloading)의 가압 형태와 유사하나, 점차 하중수준을 증가시키며 가압하는 방법을 사용해야 하므로, 시험기를 제어하는 컴퓨터에 가압 형태를

프로그래밍(programing)하여 입력하였다.

하중은 적어도 4회 이상 감압(unloading)과 재가압(reloading)을 반복하여야 하므로, 재가압(Reloading)때의 시작되는 하중수준은 최대하중의 10-20%정도가 되도록 시험기의 조정부에서 하중을 조절하며 가압하였다.

시험의 종료는 파괴후(post failure) 거동까지의 총 CMOD가 최초 가압후 최대하중까지의 CMOD의 1.5배 정도에 이를 때 까지로 하였다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 실험결과와 해석방법

암석은 저응력 상태에서는 탄성변형을 일으키다가 파괴강도에 이르게되면 취성의 형태를 보이며 파괴된다. 이러한 암석의 거동을 감안하여 국제암반역학회는 파괴인성 측정을 위한 시험법을 제안하였다. 국제암반역학회의 파괴인성 측정방법은 암반을 탄성체로 가정하여 최대하중만을 고려한 Level I 시험 방법과 암석의 비선형 변형의 보정 과정을 포함하는 Level II 시험방법이 있다.<sup>7)</sup>

Level I 시험에 의한 파괴인성 환산식(3)은 다음과 같다.

$$K_{\text{CB}} = A_{\text{min}} \times F_{\text{max}}/D^{1.5} \quad (3)$$

$$A_{\text{min}} = [1.835 + 7.15a_0/D + 9.85(a_0/D)^2]S/D$$

$F_{\text{max}}$  : 최대하중

$a_0$  : 초기인공균열의 길이(initial crack length)

$D$  : 시편의 직경

$S$  : 지지점간의 거리

Level II 시험에서의 비선형 변형에 대한 보정 방법은 다음과 같다.

Fig.5는 실험으로 부터 얻어진 하중-균열개구변위(Load-CMOD)곡선으로 부터 파괴인성을 구하기 위한 해석과정을 나타내는 그림이

다.

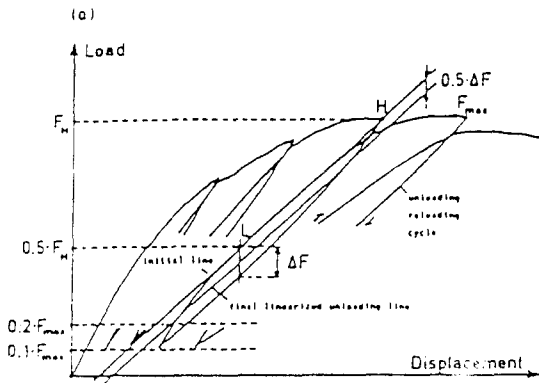
Fig.5(a)에서 반복하중을 가하는 과정에서 감압(Unloading)이 시작되는 점을 잡아 H라 하고 이때의 하중수준을  $F_H$ 라 한다. 재가압(Reloading)선과  $0.5F_H$ 의 하중이 만나는 점을 L이라 하고 이때의 하중수준을  $F_L$ ( $F_L=0.5F_H$ )이라 한다. H점과 L점을 직선으로 연결한다. 재가압 선위의 L점에서 감압-재가압(Unloading-Reloading)시에 나타나는 히스테리시스(hysteresis)의 양의 중심을 지나며 하중축과 평행한 직선을 제도하고, 이 직선과 감압시 나타나는 제하곡선과 만나는 점을 구하여 이점과 L점과의 거리를  $\Delta F$ 라 한다.

$\Delta F$ 의 1/2되는 지점을 지나며 H-L직선과 평행한 선을 히스테리시스 안쪽으로 그린다. 각 감압-재가압에 대하여 Fig.5(b)와 같이 각각의 직선을 제도한다. 하중-개구변위의 기울기가 식(4)에서 구하여진  $S_C$ 값과 근사한 두개의 직선을 찾는다.

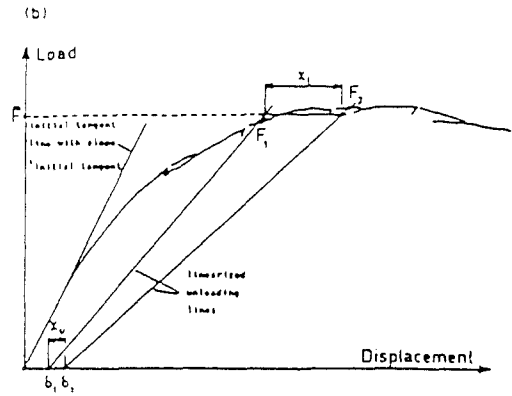
$$S_C = \{1.05 - 2.15a_0/D + 4.21(a_0/D)^2\} S_{\text{initial tangent}} \quad (4)$$

$S_{\text{initial tangent}}$  : 하중-CMOD의 초기기울기

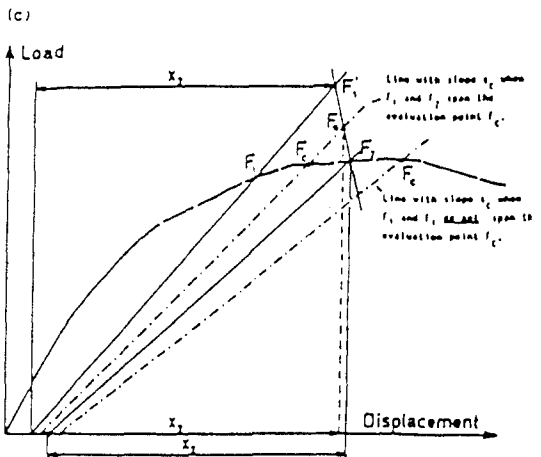
Fig.5(b)에서  $X_u$ 를 구한다.  $X_u = \delta_2 - \delta_1$ .  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 는 개구변위와 두직선과의 교점이다.



(a) Construction of linearized unloading line.



(b) Derivation of degree of nonlinearity, P.



(c) Derivation of load at evaluation point  $F_c$ .

Fig.5 The principles of nonlinearity correction of  $K_{CB}$  in load vs. CMOD record.

Fig.5(c)에서 감압-재가압의 반복되는 선들을 무시하고 하중-개구변위의 부드러운 곡선으로 연결시킨다. 두개의 직선과 하중-개구변위 곡선이 만나는 점의 하중을 각각  $F_1$ 과  $F_2$ 라 하고 평균하중을 구한다.

$$F = (F_1 + F_2) / 2 \quad (5)$$

만약 최대하중( $F_{max}$ )이  $F_1$ 과  $F_2$  사이에 놓인다면  $F_1$ 과  $F_2$ 의 하중수준을 비교하여 큰값을  $F_{max}$ 로 바꾸어 주고, 최대하중( $F_{max}$ )이  $F_1$ 과  $F_2$ 의 선 사이에 있지 않으면 최대하중을 그대로

둔다. F와 두개의 직선과 만나는 점을 찾아  $X_1$ 을 구한다.

암석의 비선형 변형거동을 보정하는 P를 비선형도(Degree of nonlinearity)라 하고  $P = (X_n/X_1)$ 를 구한다. P의 값이 음수가 나오면 잘못된 시험결과이다.

F가  $0.98F_{max}$ 보다 크다면 다음식(6)을 사용하여 비선형보정 파괴인성을 구한다.

$$K_{CB}^C = \sqrt{[(1+P)/(1-9)]} K_{CB} \quad (6)$$

F가  $0.98F_{max}$ 보다 작다면  $F_2$ 의 하중에서 하중축과 평행한 직선을 제도하여, 개구변위축과 만나는 점을 구하여 복구된 변위량  $X_2$ 를 구한다.  $F_1$ 직선과 개구변위 축과의 교점을 지나며 하중축과 평행한 직선을 제도하여 개구변위축에 평행하며  $X_2$ 와 같은 크기를 갖는 점을 찾아 이때의 하중수준을  $F_1'$ 라 한다.  $F_1'$ 와  $F_2$ 점을 연결시킨 직선에서  $S_c$ 의 기울기를 갖고  $X_2$ 의 복구된 변위량을 갖는,  $F_c$ 의 하중수준을 구하여 기울기가  $S_c$ 이며  $F_c$ 점을 지나는 직선을 제도한다.  $F_c$  직선과 하중-개구변위 곡선과 만나는 점  $F_c$ 를 구한다. 이상에서 구한  $F_c$ 를 사용한 보정파괴인성을 구하는 식(7)은 다음과 같다.

$$K_{CB}^C = \sqrt{[(1+P)/(1-P)]} F_c/F_{max} \times K_{CB}(7)$$

#### 4.2 균열의 변형거동

본 연구에서는 총 58개의 시료를 사용하여 시험을 하였다. 시험결과의 해석은 앞에서 예시한 국제암반역학회에서 제안한 파괴인성의 결정을 위한 시험법을 따라 해석을 하였다.

Fig.6은 시험법중 Level II 시험법(일정변위 속도  $CMOD > 0.006K_{CB}/(E/D) \sqrt{m}/sec$ )에 의하여 시험을 하여 구하여진 하중-CMOD의 전형적인 예이다. 이때 X축은 CMOD, Y축은 하중으로 하여 시험하였으며, 사용한 시편의 직경은 54mm이다.

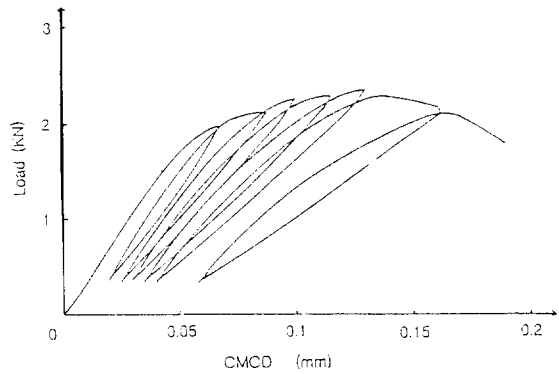


Fig.6 Typical load vs. CMOD curve for Jechon granite.

본 시험은 하중을 증가시키는 과정에서 감압과 가압과정을 반복하여 균열의 변형과 발달이 단계적으로 이루어질 수 있도록 하중조건을 조절하여야 한다. 첫번째 감압에서 최대하중의 10% 정도의 하중수준까지 감압한 결과, 감압시의 하중-CMOD 곡선은 초기 기울기와 비슷한 기울기를 가지며 감소한다. 재가압에서 곡선은 초기 기울기와 유사한 정도의 기울기를 가지며 증가하다가 첫번째 감압을 시작한 하중수준에 이르면 감압전의 곡선거동과 일치되는 연속적인 경향의 거동을 보이며 증가한다. 하중의 수준을 점차 증가시키면서 단계적으로 감압-재가압을 반복한 결과, 감압시와 가압시의 기울기는 점차 초기 기울기보다 감소하는 경향을 보인다.

최대하중점 이후에는 CMOD가 급격히 증가하여 곡선의 기울기는 상당히 감소하는 경향이 나타나며, 최대하중점 이후에서도 감압-재가압을 계속하며 시편을 파괴시킨다.

Fig.7은 노치의 방향과 시료내 결의 방향이 직각인 arrester방향의 시편에 대한 시험결과 중 직경 29, 42, 54, 68mm인 각각의 치수에 대한 하중-개구변위 곡선들의 전형적인 예를 나타낸 것이다. 그림의 곡선들은 Fig.6과 같은



방법에 의해 구한 것이나, 그림상에서의 혼란을 피하기 위해 감압과 가압시의 곡선 부분들은 생략하고 도시하였다.

Fig.7에서 보인 바와 같이 시편에 가하여진 최대하중수준은 시편의 직경이 커짐에 따라 최대하중수준도 증가한다. 각 지름에 대한 곡선의 기울기는 시편의 직경이 29mm에서 68mm까지 커짐에 따라 CMOD축과 이루는 기울기도 다소 증가하는 경향을 보인다. 각 곡선의 최대하중점 이후의 기울기는 54mm, 68mm에서는 급격히 감소하였으며 29mm, 42mm는 완만한 기울기를 나타내었다.

Fig.8은 노치의 방향과 연약면의 방향이 평행한 short transverse방향의 시편들로 부터 얻어진 하중-CMOD를 Fig.7과 같은 방법으로 나타낸 것이다.

Fig.8에서 시편에 가하여진 최대하중수준은 시편의 직경이 커짐에 따라 최대하중수준도 역시 증가하며, 각 지름에 대한 곡선의 기울기 역시 시편의 직경이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 각 곡선의 최대하중점 이후의 기울기는 29mm시편에서 수평에 가까운 기울기를 가졌으며, 42mm와 54mm의 시편은 기울기가 다소 감소하는 경향을 보이며 파괴되었다. 68mm의 시편은 최대하중점 이후 기울기가 급하게 변하며 파괴되었다.

Fig.7과 Fig.8에서 시편에 가하여진 최대하중수준은 arrester방향의 하중수준이 short transverse방향의 하중수준보다 전반적으로 높게 나타나고 있어, arrester 방향의 저항 강도가 더 큰 것임을 알 수 있다.

4.3 파괴인성의 측정결과

본 연구에서는 제작한 총 58개의 시편을 대상으로 국제암반역학회의 파괴인성시험법에 따

라 시험하여, 측정된 하중-노치의 개구변위 (Load-CMOD)곡선들로 부터 Fig.5의 비선형

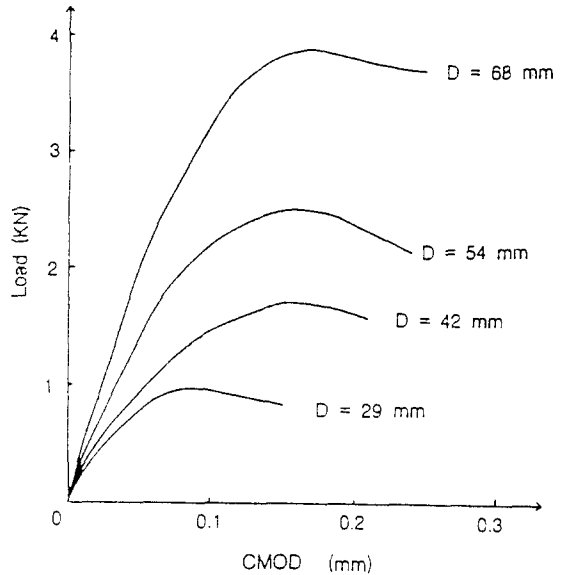


Fig.7 Load vs. CMOD curves for arrester direction for each diameter.

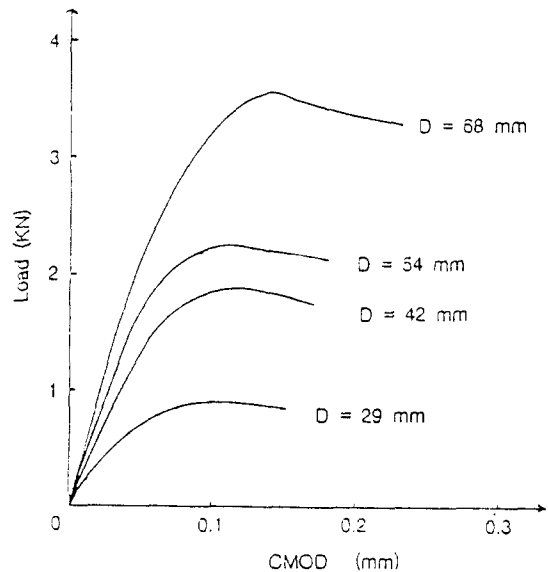


Fig.8 Load vs. CMOD curves for short transverse direction for each diameter.

변형정도를 보정하는 해석방법을 이용하여 보정된 파괴인성을 구하였다. Table 3은 22개의 arrester방향 시편에 대한 자료들과 시험 후 얻어진 파괴인성이며, Table 4는 24개의 short transverse방향 시편에 대한 결과이다.

Fig.9는 연약면과 노치가 직각이 되도록 가공한 arrester방향의 시편을 제시된 시험법에 따라 시험하여 계측된 결과를 Level I 결과해석식(3)에 대입하여 구하여진 파괴인성과 초기인공균열길이( $a_0$ , initial crack length)를 나타낸 것이다. Fig.9에서 초기인공균열길이에 대한 파괴인성은 초기인공균열길이 0.9cm이상에서 점차 안정된 값을 보이거나 약간의 분산이 있

으며, 0.9cm이하에서는 분산이 심하다.

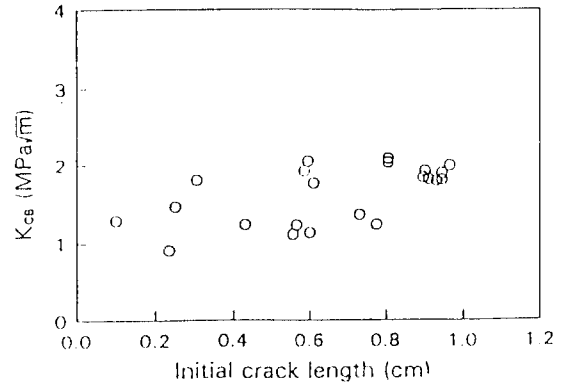


Fig.9 Relationship between Fracture toughness and initial crack length for arrester direction.

Table 3. Specimen data and toughness test results for Arrester direction.

SPECIMEN NO.	DIA (mm)	A <sub>0</sub> (mm)	NOTCH DEGREE	SPAN (mm)	F-max (KN)	P	A min	K <sub>CB</sub> (MPa√m)	K <sub>CB</sub> <sup>c</sup> (MPa√m)
B3AA-1	29.72	2.50	89.5	98.90	0.902	0.235	8.339	1.469	1.867
B3AA-2	29.39	1.00	89.3	97.85	0.932	0.387	6.957	1.287	1.937
B3AA-3	29.79	4.30	90.1	99.20	0.618	0.288	10.231	1.229	1.654
B3AA-6	29.80	2.35	90.0	99.10	0.596	0.409	8.181	0.905	1.397
B4AB-2	42.19	5.55	90.2	140.05	0.981	0.457	9.779	1.107	1.813
B4AB-3	42.21	3.05	89.3	140.55	1.961	0.071	8.001	1.810	1.943
B4AB-4	42.26	5.65	90.5	140.75	1.079	0.428	9.881	1.227	1.940
B4AB-5	42.34	5.85	90.4	141.00	1.667	0.143	10.027	1.919	2.216
B4AB-6	42.38	5.95	89.4	141.15	1.765	0.100	10.102	2.044	2.260
B4AB-7	42.53	6.00	90.0	141.60	0.981	0.538	10.121	1.132	2.065
B4AB-8	42.59	6.10	89.6	141.80	1.520	0.200	10.192	1.763	2.159
B5AE-1	55.99	8.95	89.9	186.50	2.256	0.143	10.758	1.832	2.115
B5AE-2	55.98	9.45	90.4	186.50	2.158	0.182	11.070	1.803	2.168
B5AE-3	55.98	9.30	90.0	186.50	2.158	0.176	10.976	1.788	2.136
B5AE-4	55.95	9.00	90.1	186.30	2.354	0.086	10.788	1.919	2.092
B5AE-5	55.97	9.65	90.2	186.40	2.354	0.100	11.192	1.989	2.199
B5AE-6	55.92	9.10	89.3	186.20	2.207	0.125	10.853	1.811	2.054
B5AE-7	55.94	9.45	89.9	186.20	2.256	0.120	11.064	1.886	2.128
B6AB-1	67.79	7.30	90.2	225.75	2.648	0.429	9.055	1.358	2.149
B6AB-3	67.96	7.75	89.6	226.30	2.354	0.474	9.252	1.229	2.058
B6AB-4	67.98	8.05	90.6	226.40	2.923	0.091	9.391	2.078	2.277
B6AB-5	67.93	8.05	89.8	220.00	2.922	0.083	9.135	2.023	2.199

Table 4. Specimen data and toughness test results for Short-transverse direction.

SPECIMEN NO.	DIA (mm)	A <sub>0</sub> (mm)	NOTCH DEGREE	SPAN (mm)	F-max (KN)	P	A min	K <sub>CB</sub> (MPa√m)	K <sub>CB</sub> <sup>c</sup> (MPa√m)
B3LC-4	29.78	2.50	90.5	99.15	0.726	0.364	8.339	1.178	1.725
B3LC-5	29.80	2.70	90.5	100.05	0.638	0.400	8.607	1.067	1.629
B3LC-6	29.60	2.20	89.8	98.40	0.902	0.148	8.048	1.426	1.655
B3LC-7	29.63	2.10	89.9	98.50	0.726	0.364	7.946	1.131	1.656
B3LC-8	29.62	4.75	90.2	98.75	0.608	0.250	10.785	1.286	1.660
B3LC-9	29.62	2.30	89.5	98.55	0.775	0.292	8.150	1.239	1.673
B3LC 10	29.65	2.15	90.2	98.60	0.843	0.176	7.999	1.321	1.579
B4LC-1	42.62	3.50	90.8	141.00	1.814	0.185	8.233	1.698	2.047
B4LC-2	42.61	3.60	90.1	141.90	1.667	0.188	8.357	1.584	1.916
B4LC-3	42.66	3.50	89.7	142.05	1.324	0.238	8.284	1.245	1.587
B4LC-4	42.71	3.95	89.6	142.20	1.814	0.125	8.592	1.766	2.003
B5LF-1	52.35	6.60	90.0	174.30	1.765	0.294	9.632	1.420	1.922
B5LF-2	54.10	3.50	89.7	180.15	2.060	0.200	7.788	1.275	1.561
B5LF-3	54.51	9.85	89.6	181.50	1.716	0.227	11.483	1.549	1.951
B5LF-4	54.83	5.05	90.4	181.60	2.090	0.214	8.536	1.390	1.727
B5LF-6	55.06	5.30	90.2	183.35	2.207	0.250	8.706	1.487	1.920
B5LD-1	55.31	11.10	89.6	184.20	1.961	0.100	12.211	1.841	2.036
B5LD-2	55.98	10.90	90.3	183.80	1.814	0.235	11.822	1.619	2.058
B6LC-1	66.00	5.80	90.0	219.80	3.432	0.143	8.457	1.714	2.357
B6LC-2	66.53	5.40	89.6	221.55	3.040	0.222	8.259	1.463	1.834
B6LC-3	67.87	7.65	89.2	226.00	3.334	0.182	9.211	1.737	2.088
B6LC-4	67.95	7.70	89.7	226.30	3.629	0.083	9.231	1.891	2.055
B6LC-5	68.1	7.80	89.7	226.75	3.482	0.111	9.267	1.815	2.030
B6LD-1	68.11	8.35	90.0	225.80	3.236	0.154	9.480	1.726	2.016

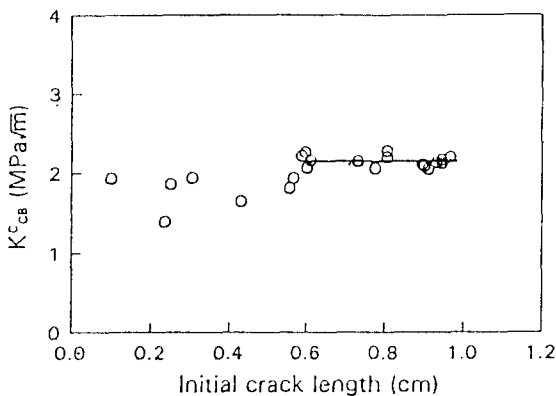


Fig.10 Relationship between corrected Fracture toughness and initial crack length for arrester direction.

Fig.10은 Fig.9의 결과와 대비하기 위하여 Level II 결과해석식(7)에 의해 구하여진 보정

된 파괴인성과 초기인공균열길이를 나타낸 것이다. Fig.10에서는 초기인공균열길이가 0.6cm 이상일 때 파괴인성은 2.2MPa√m 로 일정한 경향을 보이고 그 분산도 줄어드는 경향을 보인다.

Fig.10의 보정된 파괴인성은 일정한 초기인공균열길이 이상에서 안정된 경향을 나타내고 일정한 경향을 보인다. 그러므로 암석의 비선형 변형거동을 보정한 보정된 파괴인성을 파괴인성으로 인정하는 것이 타당하다고 판단된다.

Fig.11은 연약면과 동일한 방향으로 노치를 가공한 short transverse방향의 시편에 대한 시험 결과로부터 Level I 결과해석식(3)에 의해 구하여진 파괴인성과 초기인공균열길이를 나타낸 것이다. Fig.11에서 초기인공균열길이

에 대한 파괴인성은 초기인공균열길이가 커지며 안정된 경향을 보였으나 약간의 분산이 있었고 초기인공균열길이가 작을때의 파괴인성은 분산이 심하다.

Fig.12는 short transverse방향의 시험 결과를 Level II 결과해석식(7)에 의해 보정한 파괴인성과 초기인공균열길이를 나타낸 것이다. Fig.12에서는 초기인공균열길이가 0.7cm이상 일때 파괴인성은  $2.0\text{MPa}/\sqrt{\text{m}}$  일정한 경향을 보이며 분산도 Fig.11에 비해 줄어들었음을 알 수 있다.

Fig.12의 보정된 파괴인성은 일정한 초기인공균열길이 이상에서 안정된 경향을 나타내고 일정한 경향을 보였다. 그러므로 short transverse 방향에서도 역시 비선형 변형거동을 보정한 보정된 파괴인성을 파괴인성으로 인정할 수 있다.

4.4 이방성의 영향

본 절에서는 시료인 제천화강암 내에 존재하는 결(연약면, rift plane)에 의해 나타나는 이방성이, 측정된 기본 물성들과 본연구에서 중점적으로 측정한 파괴인성등에 미치는 영향을 고찰해 보기로 한다.

Table 1에 수록된 바와 같은 시료의 기본물성 조사결과 연약면의 방향에 의한 이방성의 차이가 일축압축강도에서는 매우 미미하였다. 그 이유는 암석을 일축압축시험을 할 경우 시편의 파단면은 대부분 코어(core)의 축에 대하여 대각선으로 기울어진 방향을 가지므로 암석 내 연약면의 방향이 시편의 축과 평행하거나 직각일경우 그 방향이 일치하지 않아 일축압축강도에 대한 영향이 측정되지 않은 것으로 생각된다. 반면 인장강도는 short transverse방향일 경우  $8.6\text{Mpa}$ 이고 arrester방향일 경우  $9.1\text{Mpa}$ 로, arrester방향이 short transverse방

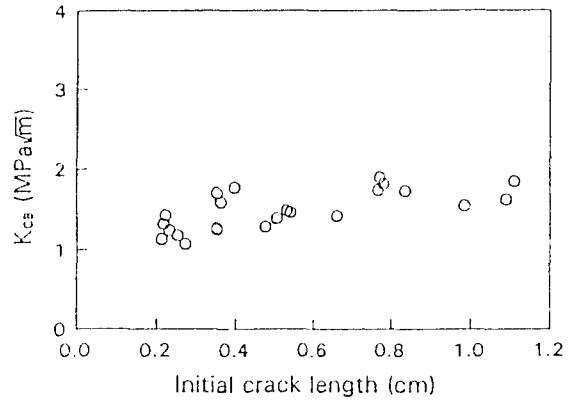


Fig.11 Relationship between Fracture toughness and initial crack length for short transverse direction.

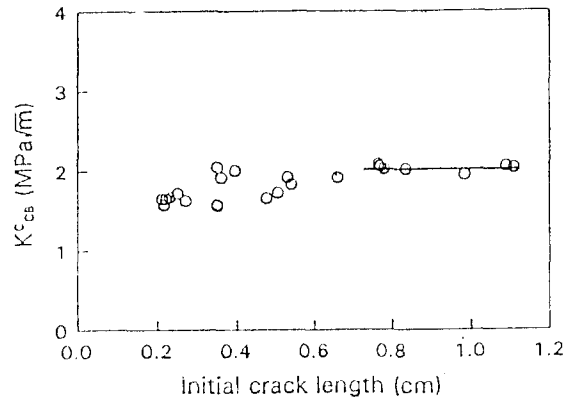


Fig.12 Relationship between corrected Fracture toughness and initial crack length for short transverse direction.

향에 대하여 5%정도 인장강도가 컸다.

그 이유는 인상파괴가 일어나는 면과 시편의 연약면의 방향이 일치하기 때문에 파괴가 원활히 일어날 수 있었기 때문이다.<sup>6)</sup>

파괴인성과 이방성의 관계는 short transverse방향의 파괴인성이 arrester방향의 파괴인성보다  $0.2\text{MPa}/\sqrt{\text{m}}$  낮았으며 이는 short

transverse방향 파괴인성의 약10%에 해당된다. 파괴인성이 낮다는 것은 균열의 성장이 더 쉽게 일어날 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 결과들에서 볼 때 시료의 기본물성들 중 강도들과 파괴인성에 대한 이방성의 영향은 파괴인성에 대한 것이 매우 뚜렷하다고 판단되며 이는 파괴인성이 기존균열의 발달, 전파에 대한 재료 고유의 내성이라는 점에서 매우 타당한 결과인 것으로 생각할 수 있다

암석의 이방성을 역학적으로 정량화시키는데 있어서 파괴인성이 매우 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

암석의 파괴인성 측정에서 나타나는 CB 시편의 치수효과를 알아보기 위하여 본 연구에서는 직경 29mm에서 68mm까지의 4단계로 구분된 CB 시편 58개를 제작하여 Chevron notch를 성형한 후 3점굽곡시험을 실시하였다.

연구 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 국제암반역학회 파괴인성시험법에 따라 Level I 시험과 Level II 시험을 실시한 결과, Level I 시험에서 구한 파괴인성 보다 Level II 시험에서 구한 보정된 파괴인성이 일정한 초기인공균열길이 이상에서 측정치의 분산이 감소된 안정된 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러므로 암석의 비선형 변형거동을 보정할 수 있는 Level II 시험에 의한 파괴인성의 측정이 보다 측정결과에 대한 신뢰도가 높다고 판단된다.
- 2) 시료내 연약면 방향에 대해 arrester 방향으로 노치가 성형된 시편들의 시험결과, 보정된 파괴인성은 초기인공균열길이(initial crack length,  $a_0$ )가 0.6cm 이상일 때 약  $2.2 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ 로 일정치에 접근되는 경향을 보여 이값을

파괴인성으로 인정할 수 있으며, 초기인공균열길이와 연관된 시편치수의 영향이 존재함을 뚜렷이 알 수 있다. short transverse방향에 대한 시험 결과, arrester방향의 시험결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 측정된 보정파괴인성은 초기인공균열길이가 0.7cm 이상일 때  $2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 일정치에 접근되는 경향을 보여 이 값을 파괴인성으로 인정할 수 있었다.

3) short transverse방향에서 초기인공균열길이 0.7cm이상일 경우 파괴인성으로 인정할 수 있었으며, arrester방향에서는 초기인공균열길이가 0.6cm 이상이어야 하는 것으로 나타났다. 이는 시편의 규격( $a_0=0.15D$ )에 대하여 볼때 직경 약47mm 이상의 시편에서는 파괴인성을 측정할 수 있다고 판단된다. 따라서 현재 암석의 여타 물성시험의 표준시편규격으로 정하여진 직경 54mm 원주형 시편을 사용하는 경우 파괴인성 측정시험에 필요한 치수의 조건을 충분히 만족한다고 판단된다.

4) 암석내 연약면의 방향에 따른 이방성의 영향은 인장강도의 경우 방향에 따라 약 5% 정도의 차이가 있었으나 파괴인성의 경우 약 10%정도의 차이가 있었으므로 파괴인성 측정시험에서 이방성의 영향이 보다 뚜렷이 나타났다고 판단된다. 따라서 암석의 이방성을 역학적으로 정량화 시키는데 있어서 파괴인성이 매우 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 1) David Broek, "Elementary engineering fracture mechanics", 4th ed., Netherland. Martinus Nijhoff Pub., 1986.

- 2) J.F.Knott, "Fundamentals of fracture mechanics", London, Butterworths & Co. Ltd., 1979.
- 3) 김상철, 파괴역학, 초판, 서울, 민음사, 1985.
- 4) P.Halleck and A.J.Kumnick, "The Influence of Orientation on Fracture on Fracture Toughness and Tensile Moduli in Barkeley Granite". Proc.21st U.S.Symposium on Rock Mech.:235-242. 1980.
- 5) Richard A. Schmidt, "Fracture Toughness Testing of Limestone", Experimental mechanics, Vol.16(5):161-167, 1976.
- 6) 김재동, "암석의 파괴인성측정과 균열전파에 관한연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교, 1988.
- 7) F. Ouchterlony, "Suggested Method for Determining the Fracture Toughness of Rock". Int. J. Rock Mech. Sci. and Geochem. Abstr., Vol.25(1):71-96, 1988.
- 8) Chunlin Li, "Fracture Toughness Determination for Marble Using a Round Specimen", Int.J.Rock Mech.Sci. and Geochem. Abstr., Vol.27(1):71-75, 1990.
- 9) K. matsuki, S.S.Hasibuan and H.Takahashi, "Specimen Size Requirements for Determining the Inherent Fracture Toughness of Rocks According to the ISRM Suggested Methods", Int.J.Rock Mech.Sci.and Geochem. Abstr., Vol.28(5):365-374, 1991.
- 10) 조병순, "암석의 파괴인성에 관한연구", 공학석사 학위논문, 청주대학교, 1990.