

화강암에서 SR 시편의 파괴인성과 미세구조적인 특징 이상은^{1)*}

Characterization of Microstructures and Fracture Toughness of SR Specimen in Granitic Rocks

Sang-Eun Lee

Abstract Three relatively homogeneous granitic rocks were studied to investigate the relationship between their microstructural properties and fracture toughness. Fracture toughness and ultrasonic velocity were varied with the orientation of mineral's long axis and microcrack, obtained from optical microscope. The lowest fracture toughness values are obtained, when the fracture propagates parallel to weakness planes which have the orientation of mineral's long axis and microcrack, in other words, when weakness planes develop perpendicular to the direction of tensile stress agrees with that of rift plane. The fracture toughness values, measured with the short rod method, varied from 1.63 to 2.62 MPa m^{0.5}, and their values are related with the average grain size and average microcrack length.

Key words Granitic rocks, Fracture toughness, Ultrasonic velocity, Microcrack orientation and length

초 록 비교적 균질한 3가지 화강암이 암석의 미세구조적 특성과 파괴인성 사이의 관계를 조사하기 위하여 연구되었다. 광학 현미경 관찰로 분석된 광물입자의 장축과 미세균열의 방위에 의하여 파괴인성 및 초음파 속도의 변화를 보였다. 가장 작은 값을 나타내는 파괴인성은 인장응력 방향과 수직하게 발달된 광물입자의 장축 및 미세균열의 방향이 주결에 일치할 때로서 파괴가 연약면인 광물입자의 장축이나 미세균열의 우세방향에 평행하게 전달될 때이다. SR 시편으로 측정된 파괴인성값은 1.63~2.62 MPa m^{0.5}의 변화를 보이며, 그 값들은 광물입자의 평균크기 및 미세균열의 평균길 이와 관련된다.

핵심어 화강암, 파괴인성, 초음파 속도, 미세균열의 방위 및 길이

1. 서 론

파괴역학에서 기본적인 재료상수의 하나로서 고려되는 파괴인성(K_{IC})은 균열전파에 대한 저항으로서 정의되며. 이와 같은 파괴인성은 구조물의 안정성 해석, 수압파쇄, 발파에 의한 암석의 파괴, 지진 탄성학과 같은 많은 분야에서 중요한 재료의 특성으로서 적용되어 왔다(Atkinson, 1987; Whittaker and Singh, 1992). 파괴인성상수는 균질 등방성 재료의 고유 상수로서 적용되는데, 대부분의 암석 특징이 불균질 이방성임을 고려할 때 이 값은 이방성 특성을 나타내는 재료의 미세구조적

인 특징에 의해 유일한 값을 나타내지는 않는다. 즉, 재료내 불균질성을 나타내는 미세균열이나 광물입자의 형상 등 미세구조적인 특성에 의존한다고 생각할 수 있다.

우세한 방위를 갖는 미세구조적인 특징, 특히 암석에서 미세균열의 발달은 물리역학적인 이방성 거동의 원인이 되며, 이것은 암석내에서 균열성장 및 전파를 통한 파괴과정을 나타내는 역할을 한다고 볼 수 있다. 파괴인성과 미세구조적인 특징과 관련하여 Nasserri 등(2005)은 미세균열의 길이와 파괴인성 사이에 좋은 상관성이 있음을 입증하였다.

초음파 속도의 적용에 관한 대부분의 연구는 암석의 특성과 초음파 속도 사이의 관계가 주를 이루고 있으며(Inoue and Ohomi, 1981; D' Andrea *et al.*, 1965; King *et al.*, 1995), 그 중에서도 P파 속도는 암질 평가 및 동적 탄성계수, 일축압축강도와 인장강도, 변형 특성 등의 상관성 연구를 통하여 암석의 재료를 평가하는 주요한 수

¹⁾ 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자원공학과 조교수

* 교신저자 : lee9367@kangwon.ac.kr

접수일 : 2010년 6월 18일

심사 완료일 : 2010년 6월 23일

게재 확정일 : 2010년 6월 25일

단으로 사용되어 왔다(Gaviglio, 1989; Yasar and Erdogan, 2004; Sano *et al.*, 1992). 암석의 초음파 속도는 암석내 존재하는 미세균열의 발달에 따라 분명히 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Nasserri 등(2008)은 화강암을 대상으로 미세균열과 광물입자의 배열 등을 조사하고 P파 속도를 관찰한 결과 미세균열의 방위와 파괴균열의 조밀도에 따라 초음파 속도의 이방성이 잘 일치하고 있음을 밝힌 바 있다. 이와 같이 암석의 초음파 속도는 암석의 이방성을 평가하는 수단으로 주로 사용되어 왔으나, 초음파 속도의 변화를 일으키는 암석내 미세구조적인 특성에 관한 연구는 세부적으로 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 광학 현미경을 이용하여 암석내 미세균열 및 광물입자의 형상 등 미세구조적인 특성을 파악하고 초음파 속도와 SR 시편의 파괴인성 변화를 알아 보고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 연구에서 사용한 시료는 국내에서 석재용으로 사용되는 입도상 중립 및 조립질에 속하는 경기도 포천 화강암, 중립질인 함열 화강암, 그리고 세립 및 중립질에 속하는 영주 화강암을 사용하였다. 이 시료에 대한 편광 현미경 관찰 결과는 Table 1과 같다. 3가지 시료의 주 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모이며, 부 구성광물은 퍼사이트, 백운모, 견운모, 녹니석, 불투명광물로 이루어져 있다. 주요 구성광물의 구성은 3가지 암석 시료에서 유사한 분포를 보이며, 광물입자의 크기는 보편적으로 포천 화강암, 함열 화강암, 영주 화강암의 순으로 나타나며, 각각의 광물입자 내에 미세균열인 벽개가 상당히 잘 발달되어 있는 것이 특징이다.

시편의 제작은 Fig. 1과 같이 기준선(master of orien-

Table 1. Mineralogical characteristics of granites

시 료	광물명	광물학적 특성
포천 화강암	석영	· 중립 내지 조립의 결정으로, 부분적으로 큰 결정을 이룸 · 대부분 봉합상 조직을 이룸
	사장석	· 신선한 경우 알바이트 쌍정을 잘 나타냄 · 풍화가 심한 경우 견운모화 작용 받음
	미사장석	· 자형내지는 반자형으로 큰 결정임 · 완전한 격자형 쌍정을 보이고 있으나 석영이 포획되어 있는 경우도 있음
	흑운모	· 갈색의 다색성을 보임 · 부분적으로 벽개면이 잘 발달되지 않은 것도 일부 산출됨
함열 화강암	석영	· 중립 내지 조립의 결정으로, 부분적으로 큰 결정을 이룸 · 대부분 파동소광을 보이며, 대부분 봉합상 조직을 이룸
	사장석	· 신선한 경우 알바이트 쌍정을 잘 나타냄 · 풍화가 심한 경우 견운모화 작용 받음
	미사장석	· 자형내지는 반자형으로 큰 결정임 · 풍화가 심한 경우 견운모화 작용이 진행된 경우도 있음
	흑운모	· 답갈색에서 갈색의 다색성 · 일부에서 녹니석과 공존
영주 화강암	석영	· 세립 내지 중립의 결정으로, 부분적으로 큰 결정을 이룸 · 대부분 파동소광을 보이나, 극히 일부는 직소광을 보임 · 대부분 봉합상 조직
	사장석	· 신선한 경우 알바이트 쌍정을 잘 나타내나, 풍화가 심한 경우 견운모화 작용 받음 · 세립의 재결정된 석영이 사장석 내에 발달하기도 하며, 심하게 견운모화 된 곳에는 백운모, 흑운모, 녹니석이 발달 · 일부에서는 누대구조가 관찰됨
	미사장석	· 자형 내지는 반자형으로 완전한 격자형 쌍정을 보임 · 풍화가 심한 경우 견운모화 작용 받음
	흑운모	· 답갈색에서 갈색의 다색성 · 부분적으로 벽개면이 잘 발달되지 않은 것도 일부 산출됨 · 일부에서 녹니석과 공존

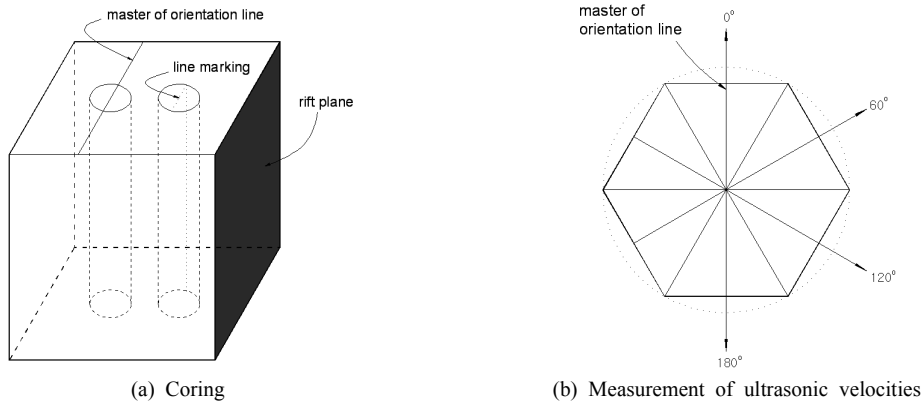


Fig. 1. Master of orientation line of the specimens and measurement of ultrasonic velocities for anisotropy check

Table 2. SR specimen dimensions of the methods suggested by ISRM

Geometrical parameter	Value	Tolerance
Specimen diameter	D	> 10×grain size
Specimen length, W	1.45D	±0.02D
Subtended chevron angle, θ	54.6°	±1.0°
Chevron V tip position, a_0	0.48D	±0.02D
Chevron length, a_1-a_0	0.97D	±0.02D
Notch width, t	< 0.03 D or 1mm ^a	

^a Whichever is greater

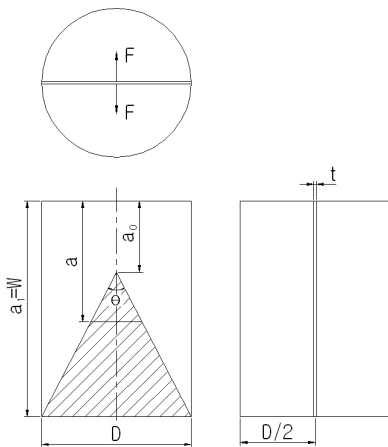


Fig. 2. SR specimens of the method suggested by ISRM

tation line)을 표시하고 석재 블록으로부터 직경 54 mm의 NX 코어를 채취하였다. 이 기준선은 주결(rift plane)의 방향과 일치하도록 하였으며, 시추코어는 상단 및 측면부에 주결의 방향을 표시하여 시편의 상, 하 구별이 가능하도록 하였다. 이 때 주결의 방향은 석산 중사

자들의 경험적인 판단으로 깨지기 쉬운 방향을 선택하였다.

석재블록으로부터 얻어진 코어를 7 cm 길이로 절단하고, Fig. 1(b)와 같이 커팅용 가이드를 이용한 절단 및 모델 DGS-520A의 자동 암석 연마기로 성형한 후 각 방향에 따른 암석의 이방성을 조사하기 위하여 초음파 속도를 측정하였다. 이 때 초음파 속도 측정기는 모델 PUNDIT를 사용하였으며, 센서의 주파수는 1 MHz이다.

2.2 파괴인성

암석의 파괴인성을 측정하기 위하여 사용된 시편은 SR이며, 이것은 ISRM (International Society for Rock Mechanics)에 의하여 암석의 파괴인성을 결정하기 위한 하나의 방법으로서 제안된 것이다(Ouchterlony, 1988). SR 시편의 치수 및 형상을 나타내면 각각 Fig. 2 및 Table 2와 같다.

이 SR 시편은 코어 축에 평행한 초기균열을 갖고 있으며, 최초 Braker(1977)에 의하여 제안되었으며, Ouchterlony (1990)에 의해 여러 번 수정되었다. 초기균열 부분은 V 형태로서 인장하중이 증가하는 동안 장기간의 안정적인

인 균열성장을 생성하게 되며, 재료의 균열 저항은 초기균열의 최초 균열성장에 따라 성장하게 된다.

인장력이 Fig. 2와 같이 시편의 축방향에 수직하게 작용할 때, SR 시편의 파괴인성은 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$K_{IC} = 24 C_k F_{\max} / D^{1.5}$$

$$C_k = 1 - 0.6 \Delta w / D + 1.4 \Delta a_0 / D - 0.01 \Delta \theta \quad (1)$$

F_{\max} : failure load

D : specimen diameter

a_0 : initial crack length

Δw : $W - 1.45D$

Δa_0 : $a_0 - 0.48D$

$\Delta \theta$: $\theta - 54.6^\circ$

한편, SR 시편의 제작은 Fig. 1(b)와 같이 초음파 속도 측정방향과 동일한 방향으로 기준선을 중심으로 각각 0° , 60° , 120° 방향으로 초기균열을 형성하였다. 파괴인성 시험을 위하여 서보 유압식 동적 재료시험기(INSTRON, FastTrack8801, USA)를 사용하였으며, 이 기기의 최대 가압용량은 10톤이고 Stroke는 150 mm이다. 이때 파괴인성 시험은 3가지 시편에 대하여 동일한 하중속도 $0.5 \text{ MPa m}^{0.5}/\text{sec}$ 로 수행하였다.

3. 미세구조적 특성

3.1 영상획득 및 처리

시편의 미세구조적인 특징을 관찰하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 기준선을 중심으로 각각의 각도별로 2 cm 크기의 정방향 박편을 제작하고, 금속 연마기로 1200 메쉬까지 연마한 후 모델 EPIPHOT-300U의 광학현미

경을 이용하여 사진 촬영을 실시하였다. 이때 광학현미경의 주사용 배율은 40배로 하였으며, 하나의 박편당 120번의 사진을 찍고 PC 컴퓨터에 저장한 후 Photoshop 7.0 소프트웨어로 각각의 사진을 합성하여 완성하였다. 또한 석영과 장석의 광물입자 구분을 위하여 연마된 시료를 불산 52% 용액에 1분동안 침전시킨 후 105°C 건조로에서 4시간을 건조시키고, 이 시료를 증류수에 포화된 소듐 코발트 니트리트(sodium cobaltinitrite)에서 1분 동안 침전시켰다. 이때 석영 입자는 짙은 회색이나 투명한 색, 미사장석은 노란색, 사장석은 밝은 회색, 그리고 흑운모와 불투명광물은 짙은 갈색이나 검은색의 색상을 보이게 되며, 전자와 동일하게 120번의 사진을 찍고 관찰된 미세균열의 사진과 합성하였다. 합성된 사진으로부터 Autocad를 이용하여 미세균열 및 광물의 형상을 그린 일례를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

4.2 미세구조적인 분석

Fig. 3의 영상에 대하여 광물의 종류, 광물입자의 장축 및 단축방향의 길이, 방위 등의 분석을 실시하였으며, 광물입자의 경계부에 존재하는 미세균열과 광물 입자내에 존재하고 있는 미세균열의 길이, 방향 등을 분석하여 Table 3, Table 4 및 Table 5에 나타내었다. 광물 입자의 형상과 관련하여 장축 및 단축방향의 길이는 광물입자를 형성하는 다각형내에서 가장 긴쪽을 장축방향의 길이로, 그리고 장축방향 길이의 중심에서 수직한 방향의 길이를 단축방향으로 설정하였다.

Table 3에서 평균 광물입자의 크기는 장축방향의 길이와 단축방향의 길이를 평균하여 나타낸 것으로, 광물입자의 크기는 포천 화강암, 함열 화강암, 영주 화강암 순으로 작게 나타났다. 광물의 구성비는 3가지 암석에서 모두 유사한 경향을 보였다.

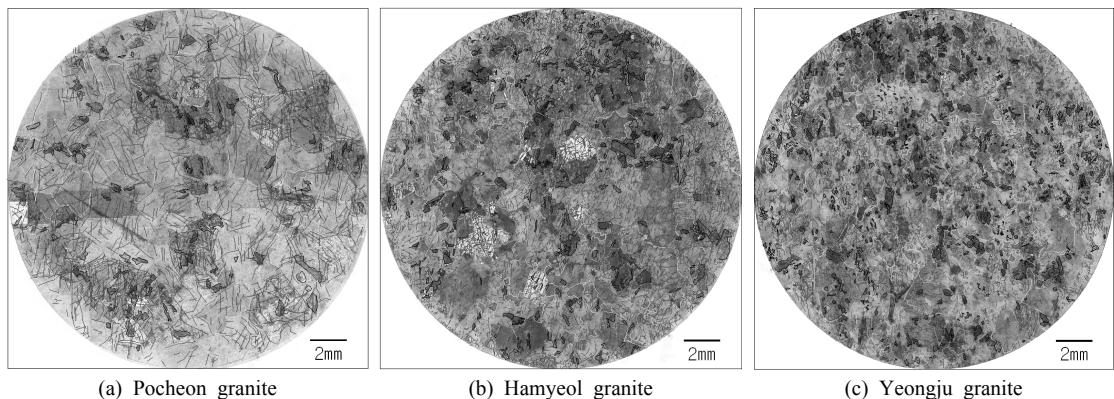


Fig. 3. Mineral and microcracks traced from 0° orientation in Fig. 1(b)

Table 3. Mineral composition of the granites

Rock type	Orientation (degree)	Minerals					
		Quartz		Feldspar		Mica & Opaque	
		Av. grain size (mm)	%	Av. grain size (mm)	%	Av. grain size (mm)	%
Pocheon granite	0	1.78	28.2	1.73	63.1	0.47	8.7
	60	1.61	21.3	1.80	67.1	0.51	11.6
	120	1.98	26.4	1.79	67.9	0.44	5.8
Hamyool granite	0	1.52	29.3	1.21	63.5	0.45	7.2
	60	1.19	22.8	1.25	74.2	0.43	3.0
	120	0.89	31.4	1.07	65.7	0.42	2.9
Yeoungju granite	0	1.01	28.5	0.82	65.7	0.26	5.8
	60	1.02	20.4	0.77	71.5	0.29	8.1
	120	0.99	29.9	0.69	65.7	0.26	4.4

Table 4. Microstructural features of the granities

Rock type	Orientation (degree)	Grain mean shape		Shape ratio (a/b)	No. of grains	Average microcrack length (mm)	No. of microcracks
		long axis(a) (mm)	short axis(b) (mm)				
Pocheon granite	0	1.56	0.85	1.83	219	0.85	1816
	60	1.64	0.79	2.07	193	0.68	2114
	120	1.79	0.84	2.13	170	0.63	2268
Hamyool granite	0	1.21	0.53	2.28	368	0.39	5486
	60	1.18	0.50	2.36	333	0.45	3938
	120	1.16	0.50	2.32	367	0.47	3704
Yeoungju granite	0	0.81	0.34	2.38	842	0.25	8672
	60	0.74	0.33	2.24	882	0.29	8601
	120	0.69	0.31	1.93	978	0.26	9178

Table 4는 화강암의 미세구조적인 특징을 나타낸 것으로, 광물입자의 형상비는 3가지 암석에서 유사한 값을 보이고 있다. 평균 미세균열의 길이는 광물입자의 크기가 작고 미세균열의 수가 많을수록 작은 값이 관찰되었다.

4. 결과 및 고찰

Table 5는 광물입자의 장축 및 미세균열의 방위와 초음파 속도 및 파괴인성값을 나타낸 것이다. 여기서 방위는 초기균열을 형성한 방향을 수직축으로 설정하여 로즈다이아그램으로 나타낸 것이다. 광물입자의 장축과 미세균열에 대한 우세 방위는 Fig. 4에서 나타낸 방법과 같이 결정하였다. 이 그림은 영주 화강암 60°의 광물입자 방위를 나타낸 예로서 로즈다이아그램의 윤곽을

AutoCAD로 그린 후 원의 중심에서 양쪽의 단면적이 동일한 방향을 선정하여 광물입자 우세방위를 결정하였다. 광물입자의 방위와 미세균열의 방위는 Nasser와 Mohanty(2008) 연구결과와 동일하게 서로 유사한 방향을 가지는 것으로 분석되었으며, Fig. 1과 같이 주결에 평행한 방향의 박편에서 3가지 암석 모두 주결에 평행한 방위를 나타내고 있다. 초음파 속도는 포천 화강암의 경우 0° 방향에서 3480 m/sec이고, 60°와 120°에서 각각 3270 m/sec와 3260 m/sec로 나타나 그 차이는 6.7% 정도이고, 함열 화강암은 9.4%, 영주 화강암은 7.6% 정도이다. 3가지 암석에서 초음파 속도는 광물입자 및 미세균열의 크기가 작을수록 크게 나타났으며, 파괴인성값이 클수록 크게 나타났다. 파괴인성값은 각각의 방향별로 3회 실시하였고, 그 평균값은 포천 화강암이 1.73 MPa m^{0.5}, 함열 화강암은 1.92 MPa m^{0.5}, 영

Table 5. Microstructural features and fracture toughness

Rock type	Orientaion (degree)	Mineral's long axis orientation	Microcrack orientation	Ultrasonic velocity (m/sec)	K_{IC} ($MPa m^{0.5}$)	K_{IC} average
Pocheon granite	0	1°		3°	3480	1.63±0.06
	60	147°		145°	3270	1.73±0.02
	120	35°		51°	3260	1.82±0.06
Hamyeol granite	0	179°		7°	3710	1.63±0.05
	60	149°		170°	3390	2.07±0.40
	120	121°		143°	3510	2.06±0.42
Yeoungju granite	0	178°		179°	4120	2.30±0.06
	60	146°		158°	3830	2.62±0.31
	120	15°		30°	3860	2.61±0.35

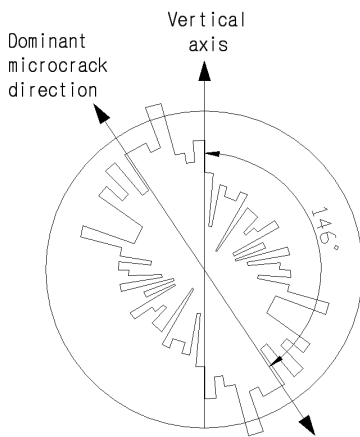


Fig. 4. An example for determination of dominant orientation of long axis in mineral grains and microcracks

주 화강암은 2.51 $MPa m^{0.5}$ 로 산출되었으며, 포천 화강암과 비교하였을 때 각각 11%, 45% 증가한 값을 보이고 있다. 포천 화강암은 각 방향별로 파괴인성값의 변화는 12%, 함열 화강암은 27%, 영주 화강암은 14%의 변화를 보였다. 포천 화강암에서 파괴인성의 변화가 작은 것은 각각의 방위에서 광물입자 장축 및 미세균열의 방향에 대한 분산이 크기 때문인 것으로 생각된다. 파괴인성값의 표준편차는 함열과 영주 화강암의 60°와 120° 방향에서 크게 나타났는데, 이것은 광물입자 장축의 우세방향과 미세균열의 우세방향의 차이가 크기 때문인 것으로 추측된다. 각각의 방향에 따른 파괴인성값은 3가지 암석 모두에서 0° 방향에서 가장 작게 나타났으며, 이 결과는 Douglass(1969) 연구결과와 마찬가지로 주결과 평행한 방향을 갖는 광물입자의 장축 및 미

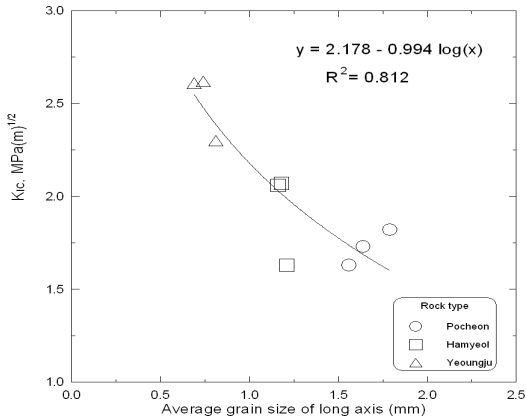


Fig. 5. Variation of fracture toughness with average grain size of long axis

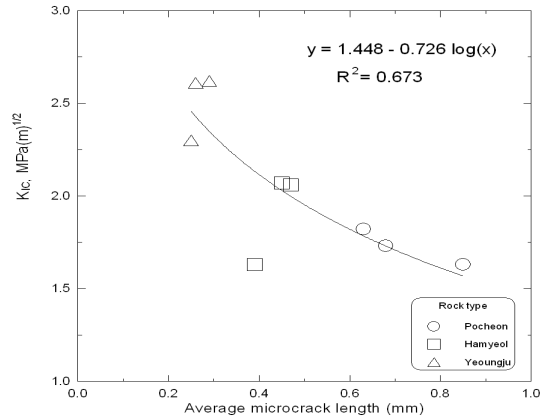


Fig. 6. Variation of fracture toughness with average microcrack length

세균열의 방위와 잘 일치한다. 이것은 파괴인성 시험시 파괴가 진행되는 방향을 투영할 수 있도록 기준선 0°에 수직한 방향으로 박편을 제작하였으므로, 인장응력의 방향은 광물입자 및 미세균열을 나타내는 로즈다이아그램에서 수평축이 되기 때문에, 즉 파괴 전달의 원인이 되는 인장응력이 우세하게 발달한 미세균열과 광물입자의 윤곽이 우세하게 발달한 방향을 포함하는 면에 수직하게 작용하는 것이다. 그러므로 우세한 미세균열에 평행하게 파괴가 진행되는 과정은 보다 우세한 방위를 갖는 광물입자 경계나 동일한 방향에서 방위를 갖는 광물입자 내부의 미세균열을 따라가는 것으로 생각할 수 있다. 60° 방향과 120° 방향의 파괴인성을 살펴보면, 포천 화강암의 경우 120° 방위에서 보다 큰 파괴인성값을 보이는데, 이것은 광물입자의 장축 및 미세균열의 우세방향이 120° 방위에서 수직축과 큰 각을 이루며 발달하고 있고 광물입자 및 미세균열의 우세방향에 대한 분산이 120° 방위에서 60° 방위보다 크기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 함열 화강암의 경우는 거의 동일한 파괴인성값을 보이는데, 이것은 60° 방위에서의 광물입자 장축과 미세균열의 우세방향이 120° 방위보다 수직축과 작은 값을 보이지만 광물입자 및 미세균열의 우세방향에 대한 분산이 크기 때문에 나타난 결과로 예상된다. 영주 화강암 역시 거의 동일한 파괴인성값을 보이는데, 이것은 120° 방위에서 미세균열의 우세방향에 대한 분산이 크지만 광물입자는 120°가 수직축과 작은 각을 이루고 있기 때문인 것으로 생각된다.

한편, Table 3에서 보는 바와 같이 포천 화강암의 광물입자의 평균크기는 석영 25.3%로 1.79 mm, 장석 66.0%로 1.77 mm, 운모 및 불투명 광물 8.7%로 0.47 mm이며, 함열 화강암은 석영 27.8%로 1.20 mm, 장석

67.8%로 1.17 mm, 운모 및 불투명 광물 4.3%로 0.43mm이고, 영주 화강암은 석영 26.3%로 1.01 mm, 장석 67.6%로 0.76 mm, 운모 및 불투명 광물 6.1%로 0.27 mm이다. 3가지 암석에 대하여 광물의 구성비는 석영과 장석의 경우 유사한 경향을 보이거나 운모 및 불투명 광물은 포천 화강암이 많이 함유되어 있다. 본 연구에서는 광물의 구성비에 따라 파괴인성값이나 초음파 속도에는 변화를 보이지 않는 것으로 관찰되었다.

Fig. 5는 광물입자 장축방향의 길이에 따른 파괴인성값의 변화에 대한 상관성을 나타낸 것으로, 광물입자의 평균크기가 클수록 파괴인성은 지수적으로 감소하고 있다. Fig. 6은 암석내 미세균열의 평균길이와 파괴인성과의 관계를 도시한 것으로, Fig. 5와 비교하였을 때 광물입자의 평균크기와 파괴인성이 보다 좋은 상관성을 보이고 있다.

5. 결론

ISRM에서 제안하는 표준시험법인 SR 시편을 이용하여 파괴인성시험이 3가지 암석시료에 대하여 수행되었으며, 암석의 미세구조적인 특징이 금속용 광학 현미경에 의하여 분석되었다. 분석결과 광물입자의 평균 크기는 포천 화강암이 0.44~1.98 mm, 함열 화강암 0.42~1.52 mm, 영주 화강암 0.26~1.02 mm까지 변화를 보였다. 미세균열의 평균길이는 3가지 암석시료에 대하여 0.25~0.85 mm까지 변화를 보이는데 광물입자의 평균 크기가 클수록 미세균열의 평균길이 역시 크게 나타났다. 미세구조적 특징을 관찰한 결과 3가지 암석시료에서 분명히 파괴인성 및 초음파 속도와 밀접한 관련성이 있는 것을 확인하였다. 초음파 속도 및 파괴인성값은

광물입자의 평균크기 및 미세균열의 평균길이가 큰 포천 화강암에서 낮은 값이 산출되었다. 각각의 시료내에서는 인장응력 방향과 수직하게 발달된 광물입자의 장축 및 미세균열의 방향이 주결에 일치할 때 보다 작은 값을 보였다. 즉, 연약면인 광물입자의 장축이나 미세균열의 우세방향에 평행하게 전달되는 파괴는 가장 작은 파괴인성값을 나타내었다. 또한 평균 파괴인성값은 광물입자의 평균 크기 및 미세균열의 평균길이와 관련성이 있음을 입증하였다.

위와 같이 동일한 암종내에서 측정된 초음파속도 및 파괴인성값의 변화는 암석내에 존재하는 미세구조적인 특징에 의해 결정되므로, 미세역학 및 미세물리학 분야에서 보다 그 관계를 심층적으로 연구하는 기초를 제공하는데 그 의미가 있다.

사 사

본 연구는 강원대학교 2008년도 신진교수 자체학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Atkinson, B. K., 1987, Fracture mechanics of rock, New York, Academic Press.
- Whittaker, B. N., R. N. Singh and G. Sun, 1992, Rock fracture mechanics; principles, design and application, Amsterdam, Elsevier.
- Nasseri, M. H. B., B. Mohanty and P. Y. F. Robin, 2005, Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 42, pp. 450-460.
- Inoue, M. and M. Ohomi, 1981, Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock, Proceedings of the int'l Symp. on Weak Rock, Tokyo, pp. 9-13.
- D'Andrea, D. V., R. L. Fisher and D. E. Fogelson, 1965, Prediction of compressive strength from other rock properties, US Bureau of Mines Report of Investigations, Vol. 6702.
- King, M. S., N. A. Chaudhry and A. Shakeel, 1995, Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks, Int'l J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 32(2), pp. 155-163.
- Gaviglio, P., 1989, Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density, Rock Mech. Rock Eng., Vol. 22, pp. 299-306.
- Yasar, E. and Y. Erdogan, 2004, Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, Int'l J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, pp. 871-875.
- Sano, O., Y. Kudo and Y. Mizuta, 1992, Experimental determination of elastic constants of Oshima granite, Barre granite, and Chelmsford granite, J. Geophys. Res., Vol. 97, pp. 3367-3379.
- Nasseri, M. H. B. and B. Mohanty, 2008, Fracture toughness anisotropy in granitic rocks, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 45, pp. 167-193.
- Barker, L. M., 1977, A simplified method for measuring plane strain fracture toughness, Eng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 361-369.
- Ouchterlony, F., 1988, Suggested method for determining the fracture toughness of rock, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 25, pp. 71-96.
- Ouchterlony, F., 1990, Fracture toughness testing of with core based specimens, Eng. Fract. Mech., Vol. 35, pp. 351-366.
- Nasseri, M. H. B., A. Schubnel and R. P. Young, 2007, Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 44, pp. 601-616.
- Douglass, P. M. and B. Voight, 1969, Anisotropy of granite: a reflection of microscopic fabric. Geotechnique, Vol. 19, pp. 376-398.



이 상 은

1991년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1993년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 033-570-6306
 E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr
 현재 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자원공학과 조교수