

## 황등화강암을 이용한 암석의 손상기준 결정방법 연구

장보안\* · 지 훈 · 장현식  
강원대학교 지구물리학과

### The Optimal Method to Determine Damage Threshold of Rock using Hwangdeung Granite

Bo-An Jang\*, Hoon Ji, and Hyun-Shic Jang  
Department of Geophysics, Kangwon National University

암석의 손상상태를 평가하기위한 여러 방법들이 제안되어 있으나, 일부의 방법은 명확한 손상기준을 제시하기도 하지만 일부의 방법은 매우 모호하여 분석자의 주관에 따라 값이 달라지기도 한다. 그러므로 이 연구에서는 황등화강암을 대상으로 현재까지 제안된 모든 손상기준 결정방법을 적용하여, 각 방법의 적용성, 오차 및 최적의 손상기준결정 방법 등을 연구하였다. 또한 암석의 균열발달 및 파괴특성의 규명에 가장 중요한 손상기준인 균열개시응력과 균열손상응력을 FSR 및 장기 정하중 시험을 이용하여 검정하였다. 황등화강암의 균열단합응력과 균열개시응력은 각각 57.5 MPa, 77.6 MPa이며 균열체적변형률에서 측정하는 것이 가장 정확한 것으로 판단된다. 2차 균열개시응력은 90.6 MPa로 측정되었으며, 미소파괴음 계수 및 계수율이 균열개시응력의 측정에 가장 효과적인 것으로 판단된다. 균열결합응력 측정은 체적강성곡선, 미소파괴음 계수 및 미소파괴음 계수율이 가장 효과적인 방법으로 판단되며, 균열결합응력은 110.3 MPa이다. 균열손상응력은 체적강성곡선 및 미소파괴음 계수율에서 가장 명확히 측정되며, 약 127.5 MPa이다. 일축압축강도에 대한 비로서 나타낸 균열개시응력은 0.47로 FSR 값 0.46과 매우 유사하며, 균열손상응력은 0.77로 장기 정하중 시험을 통하여 측정된 장기 강도 비 0.75~0.8과 거의 일치하여 균열개시응력 및 균열손상응력 값이 정확함을 검정하였다.

**주요어** : 황등화강암, 손상기준, 미소파괴음, 체적변형률, 장기 정하중 시험

Although various methods for determination of damage threshold in rock have been suggested, clear damage thresholds were determined by some methods, but different thresholds were measured by other methods. We determined the damage thresholds in Hwangdeung granite using all the methods suggested, and investigated the best methods, applicability and errors of each method. The crack initiation threshold and the crack damage threshold which are important in investigation of characteristics of crack development and failure were verified by field strength ratio method and long-term constant load test. The crack closure stress and the crack initiation stress were 57.5 MPa and 77.6 MPa, and the most exact values were yielded by crack volumetric strain. The secondary crack initiation stress was 90.6 MPa and AE event count and AE event count rate were the effective methods. The volumetric stiffness, AE event count and AE event count rate were the most effective methods for determination of crack coalescence threshold and crack coalescence stress was 110.3 MPa. The crack damage stress was 127.5 MPa and was measured correctly by volumetric stiffness and AE event count rate. The ratio between crack initiation stress and uniaxial compressive strength was 0.47 which was very similar with the FSR value of 0.46. The ratio between crack damage stress and uniaxial compressive strength was almost the same as the ratio between long-term strength and uniaxial compressive strength, indicating that the crack initiation stress and the crack damage stress measured were correct.

**Keyword** : Hwangdeung granite, Damage thresholds, Acoustic emission, Volumetric strain, Long-term constant load test

\*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

## 서 론

지중응력이 높은 지하에 지하공동을 굴착하면 응력의 재분배와 교란에 의하여 터널 주변에는 손상영역(excavation damaged zone)이 발생하고, 이 손상영역 내에 분포하는 암석의 변형특성 및 균열발달 특성은 원래의 암석과는 다른 특성을 나타낸다. 그러므로 지하수나 가스의 이동 통로인 균열의 발달특성이 매우 중요한 설계 요소 중의 하나인 액화가스 지하저장고나 핵 폐기물 지하저장고 등의 건설에서 손상영역 내에 분포하는 암석의 변형특성 및 균열발달 특성의 규명은 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 또한 깊은 심도의 취성 압반에 굴착되는 지하공동에서는 응력의 집중으로 인하여 국지적으로 암석의 파열(burst), 낙석(spalling) 및 돌파(popping)가 발생하기도 하며, 이러한 압반의 취성파괴는 지하공동의 건설에 심각한 위험요소로 작용한다. 일반적으로 암석의 파열은 암석의 일축압축강도보다 낮은 응력수준에서 발생하며 암석 내의 균열발달 상태와 밀접한 관련이 있다(Martin and Chandler, 1994).

취성암석의 변형특성 및 균열발달 특성은 지난 수 십년간 많은 연구자들에 의해 연구되었으며, 모든 연구결과에서 일축압축시험 시 얻어지는 축 방향 및 횡 방향의 응력-변형률 곡선은 균열의 닫힘, 생성 및 전파 상황에 따라 여러 구간으로 나뉘어진다(Brace et al., 1966; Bieniawski, 1967; Martin and Chandler, 1994; Eberhardt et al., 1997, 1998, 1999a, 1999b). Brace et al. (1966)과 Bieniawski (1967)는 압축시험 시 측정되는 응력-변형률 곡선을 균열닫힘구간, 선형 탄성 변형구간, 균열개시 및 안정한 균열의 전파구간, 결정적인 에너지의 방출(팽창의 시작) 및 불안정한 균열의 성장구간, 파괴 및 잔류강도 특성구간의 5 구간으로 구분하였다. 균열닫힘구간은 응력이 가해진 초기에 기존의 균열 및 공극들이 닫히면서 발생하며, 응력-변형률 곡선은 일반적으로 위로 오목한 비선형의 특성을 나타낸다. 이 비선형 구간의 범위는 초기 균열 밀도와 균열의 기하학적 특성에 의하여 결정되며, 비선형 구간이 끝나는 지점의 응력을 균열닫힘응력(crack closure stress,  $\sigma_{cc}$ )이라 한다(Fig. 1). 균열닫힘응력 이후에는 암석은 탄성변형을 하여 응력-변형률 곡선이 선형(linear)을 보이고, 이 구간에서 탄성계수와 포아송 비가 측정되어야 한다. 암석에 가해진 응력이 탄성한계를 초과하게 되면 새로운 균열들이 생성되기 시작하여 응력-변형률 곡선은 선형을 벗어나기 시작하며, 이때의 응력을 균열개시응력(crack initiation stress,  $\sigma_{ci}$ )이라 한다. 이 때 생성되는 균열은 안정된 균열(stable crack growth)이고, 가해지는 응

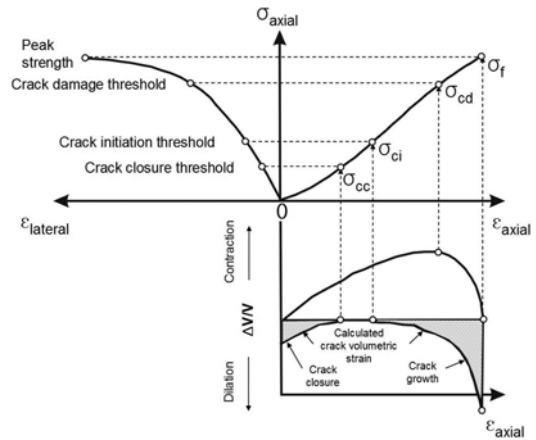


Fig. 1. Stress-strain diagram showing the stages of crack development (after Martin and Chandler, 1994).

력을 조절하면 균열 성장을 멈추게 할 수도 있다. 그러나 응력이 점차 증가하면 횡 방향의 변형률이 급격히 증가하여 체적변형을 곡선의 역전(reversal)이 발생하고, 이때의 응력수준을 균열손상응력(crack damage stress,  $\sigma_{cd}$ )이라 한다. 균열손상응력 수준 이상의 응력상태에서는 불안정한 균열들이 성장하여(unstable crack growth) 응력이 더 이상 증가하지 않아도 균열은 계속 성장하여 파괴에 이르게 된다.

위와 같은 암석의 손상기준은 Martin and Chandler (1994)가 캐나다 Lac du Bonnet 화강암을 대상으로 체적변형률(volumetric strain) 및 균열체적변형률(crack volumetric strain)을 이용하여 처음으로 측정된 이후, Eberhardt et al. (1997, 1998, 1999a, 1999b), Diederichs et al. (2004) 및 Ranjith et al. (2007)은 체적변형률, 균열 체적변형률 이외에도 축방향강성(axial stiffness), 횡방향 강성(lateral stiffness), 체적강성(volumetric stiffness)과 미소파괴음(acoustic emission)의 계수(event count), 에너지, 오름 시간(rise time), 지속시간(duration), 진폭(amplitude), 누적 계수(cumulative event count) 및 누적 에너지(cumulative energy) 등을 이용하여 손상기준을 측정하려고 시도하였다. 그러나 위에서 언급한 여러 가지 방법들에서 일부의 방법은 명확한 손상기준을 제시하기도 하지만 일부의 방법은 매우 모호하여 분석자의 주관에 따라 값이 달라지기도 한다. 그러므로 이 연구에서는 황등화강암에 위에서 언급된 모든 방법들을 적용하여, 각 방법의 적용성, 오차 및 최적의 손상기준결정 방법 등을 연구하였다. 또한 암석의 균열발달 및 파괴특성의 규명에 가장 중요한

손상기준인 균열개시응력과 균열손상응력을 FSR(Field Strength Ratio) 및 장기 정하중 시험(long-term constant load test)을 이용하여 검정하였다.

### 균열체적변형률

원주형 시료에 일축압축응력  $\sigma_{axial}$ 이 가해질 때 발생하는 축 방향의 변형률 및 횡 방향의 변형률이 각각  $\epsilon_{axial}$  및  $\epsilon_{lateral}$ 이면, 이 시료의 체적변형률,  $\epsilon_v$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \epsilon_{axial} + 2\epsilon_{lateral} \quad (1)$$

이 체적변형률은 탄성적인 성분과 균열에 의한 성분으로 분리될 수 있으며, 탄성적인 체적변형률,  $\epsilon_{velastic}$ 은 식 (2)로 나타나고

$$\epsilon_{velastic} = \frac{1-2\nu}{E} \sigma_{axial} \quad (2)$$

균열이 닫히거나 균열이 생성되면서 발생하는 변형률을 나타내는 균열체적변형률  $\epsilon_{vcrack}$ 은 체적변형률에서 탄성적인 체적변형률을 빼주면 구해진다.

$$\epsilon_{vcrack} = \epsilon_v - \epsilon_{velastic} \quad (3)$$

식 (3)에서 구해진 체적균열변형률 곡선은 Fig. 1의 아래쪽 그림과 같다. 시료에 응력이 가해지면 주로 축 방향의 수직에 가까운 방향으로 분포하는 미세균열이 닫히면서 축 방향 변형률이 급격히 증가하게 되고 체적변형률 또한 증가하게 되어, 균열체적변형률 곡선도 양(+)의 기울기를 보이며 증가한다. 그러나 응력이 증가하여 탄성 거동을 하는 구간에 도달하면 체적변형률 곡선과 탄성적인 체적변형률 곡선의 기울기가 일치하게 되어 균열 체적변형률 곡선은 수평을 이루게 된다. 응력이 더욱 증가하여 탄성구간을 벗어나면 축 방향과 평행한 방향의 미세균열들이 생성되기 시작하여 횡 방향 변형률이 급격히 증가하므로 체적변형률은 감소하기 시작하고, 균열체적변형률 곡선 또한 음의 기울기를 보이며 감소한다.

### 축방향강성, 횡방향강성 및 체적강성

강성(stiffness)이란 응력에 따른 변형률곡선의 기울기로 정의되며, Eberhardt et al. (1998)은 점이동회귀분석(moving point regression) 방법을 사용하여 변형률곡선의 각 지점 기울기를 계산하였다.

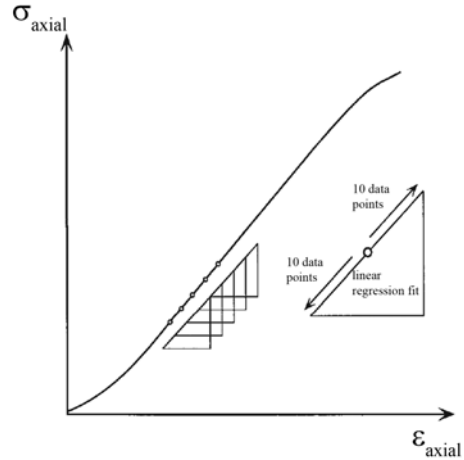


Fig. 2. Moving point regression technique (Eberhardt et al., 1998).

점이동회귀분석 방법은 Fig. 2와 같이 사용자가 회귀 분석 구간(window)을 설정하고 이 구간을 이동시키며 구간별 기울기를 연속적으로 계산하는 방법이다. 이번 연구에서는 회귀분석 구간의 크기를 민감도 분석을 통해 전체 자료수의 1% 크기로 결정하여 사용하였다. 또한 계산에 사용된 변형률의 종류에 따라 강성은 평균 축방향 강성(average axial stiffness), 평균 횡방향 강성(average lateral stiffness), 평균 체적 강성(average volumetric stiffness) 등으로 구분된다.

### 미소파괴음 (Acoustic Emission)

미소파괴음은 응력을 받는 재료 내에서 균열의 닫힘, 균열생성, 균열전파와 같이 갑작스런 변화에 의해서 발생하는 탄성파를 말한다. 미소파괴음 신호 중에서 분석에 사용되는 파라미터로는 Fig. 3과 같이 계수(event count), 에너지(energy), 진폭(amplitude), 지속시간(duration), 오름 시간(rise time) 등이 가장 일반적이다. 이중에서 가장 많이 사용되는 계수는 미소파괴음 신호가 검출한계(threshold)를 초과한 횟수이다. 최근 미소파괴음 측정기술의 발전으로 암석의 균열의 개시 및 성장에 대한 손상특성을 파악하기 위하여 미소파괴음 측정을 많이 이용하고 있으며, Eberhardt et al. (1998)은 가압 초기 구간에서 미소파괴음 계수나 에너지가 크게 증가하는 지점을 가해진 응력이 암석의 탄성한계를 초과하여 암석내부에 새로운 균열이 생성되는 균열개시응력으로 정의하고, 2차적인 균열개시가 이루어지는 2차 균열개시응력은 균열개시응력 이후에 미소파

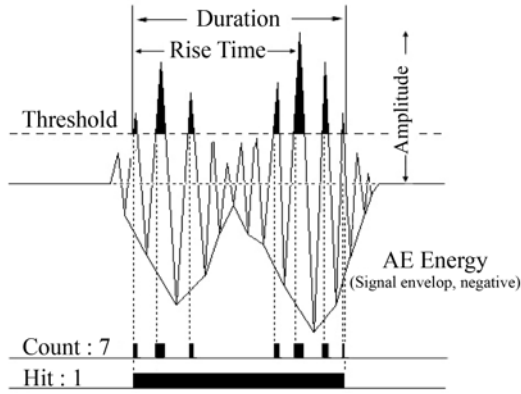


Fig. 3. Illustration of conventional AE parameters in the AE envelope monitoring (Hardy, 1977).

파괴 계수나 에너지가 급격히 증가하는 응력수준으로 정의하였다. 또한 누적 미소파괴 계수가 선형적인 증가 양상을 벗어나는 지점을 균열결합응력으로 정의하고, 누적 미소파괴 계수가 두 번째 선형증가 지점을 벗어나 급격하게 증가하는 지점을 균열손상응력으로 정의하였다.

연구방법

이 연구에 사용된 시료는 전라북도 황동 지역에서 산출되는 화강암으로 석영, 사장석, K-장석 및 흑운모가 주 구성광물이며 입자의 크기가 약 0.6~2.0 mm인 세립질 화강암이다. 동일한 암석학적 특성을 보이는 하나의 암

석블록에서 직경 2.54 cm인 70개의 시료를 시추하여, 채취된 코어 시료가 동일한 역학적 특성을 갖도록 하였다. 시추된 시료는 국제암반역학회(ISRM)의 기준을 따라 길이가 직경의 2배 이상이 되도록 성형되어, 예비시험에 10개, 균열손상분석을 위한 일축압축시험에 10개, 장기 정하중 강도시험에 50개의 시료가 사용되었다. 10개의 시료에 대한 일축압축시험 결과, 일축압축강도는 평균 164.7 MPa, 탄성계수는 평균 46.7 GPa 그리고 포아송 비는 평균 0.25로 측정되었다.

국제암반역학회에서는 압축강도 시험용 시료로 NX코어 규격을 사용할 것을 추천하고 있으나 이 연구에서는 장기 정하중 강도시험에 사용되는 크립시험기의 최대가압하중이 20 ton이므로 직경이 2.54 cm인 코어를 사용하였다. 그러나 Martin and Chandler (1994)는 다양한 직경의 시료에서 측정된 균열개시응력 및 균열손상응력이 거의 동일함을 보고하였고, 이 연구와 같은 황동화강암을 사용한 장수호와 이정인(2005)의 연구에서 측정된 NX코어 시료의 일축압축강도가 평균 162 MPa, 탄성계수는 평균 50.7 GPa, 포아송 비는 평균 0.28로, 이 연구에서 사용된 직경 2.54 cm 시료의 일축압축강도, 탄성계수, 포아송 비와 큰 차이가 없기 때문에, 직경 2.54 cm 코어 시료를 사용하더라도 연구결과의 신뢰성에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

일축압축시험은 (주)에이스원(AceOne)에서 제작한 하중 및 변위제어가 가능한 서보제어 시스템(servo-control system)을 갖춘 20톤 하중용량의 압축시험기에서 수행되었

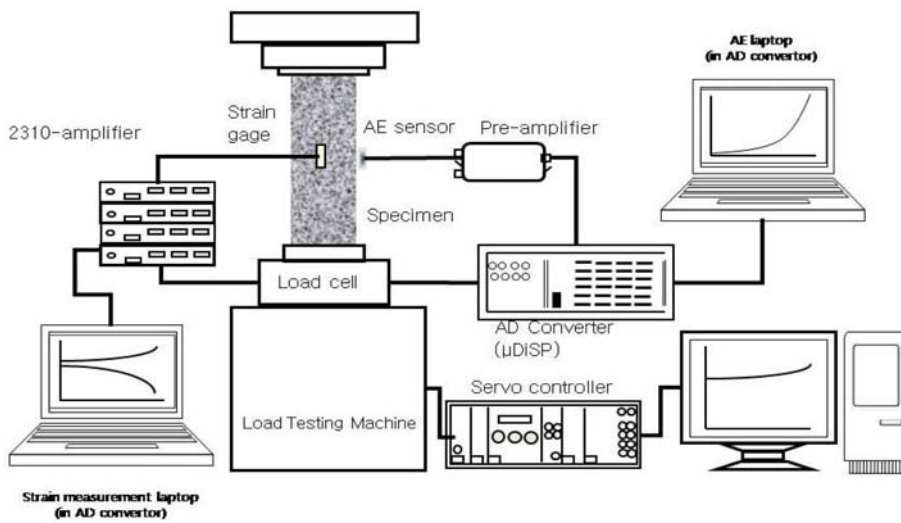


Fig. 4. A schematic diagram of measurement system.

다(Fig. 4). 하중속도는 변형률 자료와 미소파괴음 자료를 충분히 획득하기 위하여 국제압반역학회의 기준보다 다소 느린 0.2 MPa/sec로 설정하였으며, 일축압축시험 시 길이 5 mm의 교화(Kyowa)사 제품의 변형률 게이지를 사용하여 축방향 및 횡 방향의 변형률을 측정하였다. 미소파괴음은 미국의 Physical Acoustic Corporation (PAC)사의  $\mu$ DiSP 시스템을 사용하여 측정하였고, 압전센서는 주파수 대역이 125 kHz~750 kHz인 직경 0.5 cm의 소형센서(NANO30)를 사용하였다. 미소파괴음 검출한계는 실험실의 전기적, 기계적 잡음환경을 고려하여 50 dB로 설정하였으며, 미소파괴음 측정과정에서 사용되는 시간 변수인 PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) 및 HLT (Hit Locking Time)는 여러 번의 예비실험을 통하여 충분히 긴 파형을 포함할 수 있도록 각각 100 sec, 300 sec 및 200 sec로 설정하였다. 장기 정하중 강도시험은 (주)제일정밀에서 제작한 스프링타입 크립(creep) 시험기를 사용하였으며, 크립 시험기의 최대가압용량은 약 20 ton 이다.

연구결과

균열닫힘응력(Crack closure stress,  $\sigma_{cc}$ )

균열닫힘응력은 암석에 응력이 가해질 때 암석 내에 분포하고 있는 균열 및 공극이 완전히 닫히는 지점의 응력으로 정의되며 균열이 닫히는 동안 응력-축 변형률 곡선 및 체적변형률 곡선은 비선형의 특성을 나타낸다. 현재까지 제안된 균열닫힘응력의 결정 방법은 다음과 같다.

- ① 균열체적변형률 곡선이 영(zero)이 되는 지점의 응력(Martin and Chandler, 1994).
- ② 축 방향 응력변형률 곡선의 기울기인 축 방향 강성곡선이 일정한 값으로 변하는 지점 및 횡 방향 응력-변형률 곡선의 기울기인 횡 방향 강성곡선의 초기 구간에서 강성이 급격히 감소하는 지점의 응력(Eberhardt et al., 1998; Ranjith et al., 2007).
- ③ 누적 미소파괴음 곡선이 처음으로 직선이 되는 지점의 응력(Diederichs et al., 2004).

균열체적변형률 곡선이 영이 되는 지점은 명확하여 정확한 값을 쉽게 결정할 수 있다(Fig. 5a). 그러나 누적 미소파괴음 계수곡선의 선형구간이 시작되는 지점(Fig. 5b), 축방향 강성곡선이 일정한 값으로 변하는 지점(Fig. 5c) 및 횡 방향 강성곡선이 초기구간에서 급격히 감소하는 지점(Fig. 5d)은 명확하지 않기 때문에, 분석자의 주관에 따라 A 값 혹은 B 값 혹은 C 값으로 결정될 수 있다.

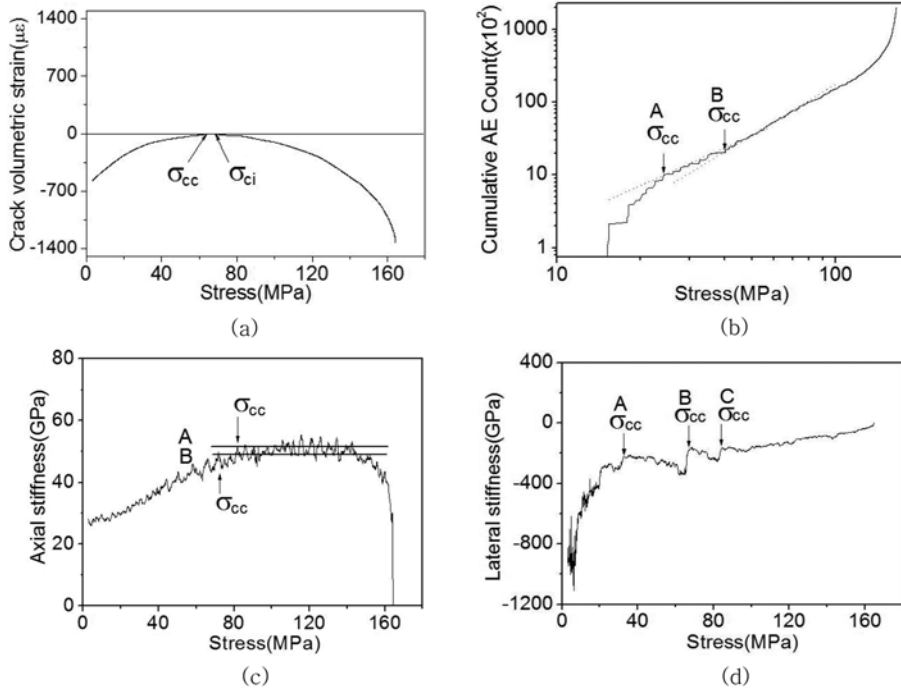


Fig. 5. Various methods to determine the crack closure stress in sample h-1. (a) Crack volumetric strain (b) Cumulative AE event count (c) Axial stiffness (d) Lateral stiffness.

**Table 1.** Crack closure stress (unit : MPa).

Methods	Specimen ID										Ave.	Stdev.	$\sigma_{cc}/\sigma_f$
	h-1	h-2	h-3	h-4	h-5	h-6	h-7	h-8	h-9	h-10			
Crack volumetric strain	62.3	66.8	51.7	58.3	53.9	54.0	59.8	57.7	53.7	56.7	57.5	4.59	0.35
Cumulative AE event count	40.2	22.3	-	25.3	27.7	20.9	27.4	26.4	29.7	44.6	29.4	7.92	0.18
Axial stiffness	81.3	69.8	70.5	78.2	83.1	74.6	80.1	71.2	79.0	-	76.4	5.02	0.46
Lateral stiffness	32.5	29.3	28.8	38.9	-	27.8	25.9	26.7	37.3	38.2	31.7	5.17	0.19

\*Stdev. : standard deviation

이 시료에서의 균열단합응력은 축 방향 및 횡 방향 강성곡선의 A점으로 판단하였으며, 누적 미소파괴음 계수 곡선에서는 B점으로 판단하였다. 각 방법에 의하여 측정된 균열단합응력은 Table 1과 같으며, 횡 방향 강성곡선에서 31.7 MPa의 최저값을 보이고, 축 방향 강성곡선에서는 최대값인 76.4 MPa, 균열체적변형률에서는 57.5 MPa, 누적 미소파괴음 계수곡선에서는 29.4 MPa로 측정되어 방법에 따라 상당한 차이를 보인다. 앞에서 설명한 바와 같이 균열체적변형률 곡선에서 균열단합응력이 가장 명확히 측정되었고 표준편차 또한 가장 작기 때문에, 균열체적변형률 곡선에서 측정된 균열단합응력이 가장 정확한 값으로 판단되며, 균열체적변형률 곡선이 균열단합응력의 측정에 가장 좋은 방법인 것으로 판단된다.

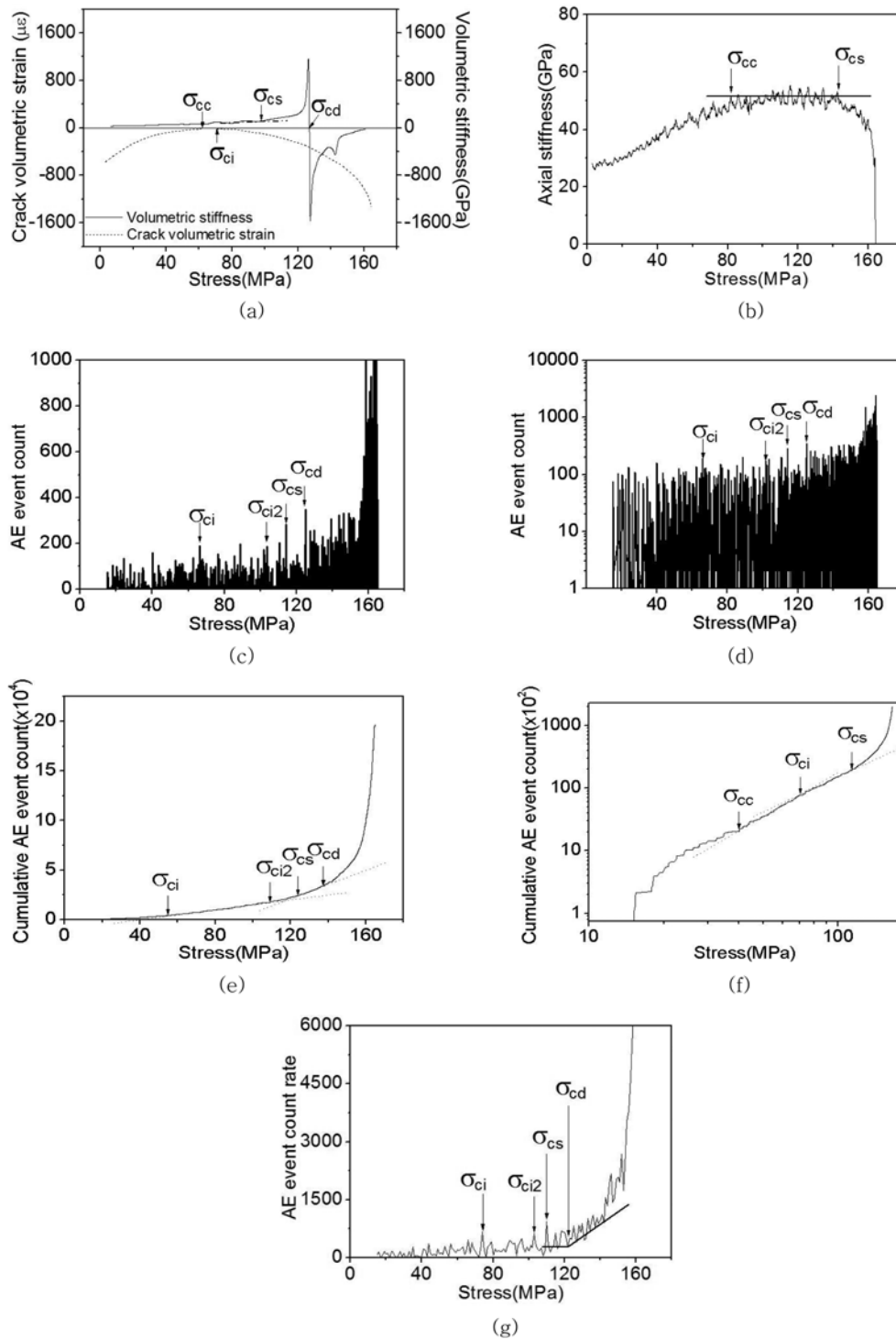
#### 균열개시응력 및 2차 균열개시응력(Crack initiation stress, $\sigma_{ci}$ ; Secondary crack initiation stress, $\sigma_{c2}$ )

암석은 균열이 닫힌 후 탄성변형을 보이게 되나 응력이 증가하여 탄성한계를 초과하면, 암석내부에 정장석과 같은 약한 광물입자에서 새로운 균열들이 생성되기 시작하며 이 지점의 응력이 균열개시응력으로 정의된다. 이 후 응력이 계속 증가하면 석영과 같은 강한 광물입자에서도 균열이 생성되기 시작하며, 이 지점의 응력이 2차 균열개시응력으로 정의된다. 현재까지 제안된 균열개시응력 결정 방법은 ①과 ②와 같으며, 2차 균열개시응력을 결정하기 위한 방법은 ③과 같다.

- ① 균열체적변형률곡선이 영(zero)을 벗어나는 지점의 응력(Martin and Chandler, 1994).
- ② 체적강성곡선이 일정한 값에서 벗어나는 지점의 응력 및 미소파괴음 계수가 주변 발생수준에 비해서 처음으로 갑자기 증가한 지점의 응력(Eberhardt et al., 1998; Ranjith et al., 2007).
- ③ 균열개시응력 이후에 미소파괴음 에너지나 계수가 급격히 증가하는 지점의 응력 (Eberhardt et al., 1998).

균열체적변형률 곡선의 영점을 벗어나는 지점은 매우 명확하여 정확한 균열개시응력을 쉽게 결정할 수 있다 (Fig. 6a). 미소파괴음 계수 곡선 및 반대수 척도(Semi-log scale)로 그린 미소파괴음 계수 곡선에서 Eberhardt et al. (1998)과 Ranjith et al. (2007)이 균열개시응력으로 제안한 미소파괴음 계수가 갑자기 증가하는 지점은 명확하지 않다 (Fig. 6c, Fig. 6d). Diederichs et al. (2004)이 제안한 누적 미소파괴음 계수 곡선이 선형특성을 벗어나는 지점과 장수호와 이정인(2005)이 제안한 반대수 척도로 그린 누적 미소파괴음 계수 곡선이 선형특성을 벗어나는 지점 또한 명확하지 않아서 정확한 균열개시응력을 결정하는 것은 어려운 것으로 판단된다(Fig. 6(e), (f)). 이와 같이 미소파괴음을 이용한 균열개시응력의 결정이 용이하지 않기 때문에 응력이 1 MPa 증가하는 동안에 발생하는 미소파괴음 계수인 미소파괴음 계수율(count rate)을 계산하여 Fig. 6(g)에 나타내었고, 미소파괴음 계수율이 급등하는 지점은 비교적 명확하게 나타나 균열개시응력과 2차 균열개시응력을 좀 더 명확히 결정할 수 있는 방법으로 판단된다.

각 방법에 의하여 결정된 균열개시응력은 Table 2와 같으며, 반대수 척도로 그린 미소파괴음 계수 곡선에서는 정확한 균열개시응력의 결정이 불가능하여 측정하지 않았다. 10개의 시료에서 측정된 균열개시응력은 미소파괴음 계수에서 평균 57.6 MPa로 최저값을 보이고 반대수 척도의 누적 미소파괴음 계수에서 최대값인 평균 84.5 MPa를 나타내고 있다. 균열체적변형률과 미소파괴음 계수율에서 측정된 균열개시응력이 비교적 유사한 72.4~77.6 MPa 범위의 값을 보이는 반면에, 누적 미소파괴음 계수 곡선과 미소파괴음 계수곡선에서는 57.6~59.1 MPa의 비교적 좁은 범위를 보이거나 상당히 낮은 값을 보인다. 표준편차는 균열체적변형률에서 3.51 MPa로 가장 낮으며 누적 미소파괴음 계수에서 19.12 MPa로 가장 크다. 미소파괴음 계수율에서는 균열체적변형률과 유사한 값으로 보이거나 표준편차가 매우 크기 때문에 신뢰성이 높지는 않은 것으로 판단된다. 전체적으로 체적균열변형률에서 균열개시응력이



**Fig. 6.** Various methods to determine the damage thresholds in sample h-1. (a) Volumetric crack strain and volumetric stiffness (b) Axial stiffness (c) AE event count (d) AE event count in semi-log scale (e) Cumulative AE event count (f) Cumulative AE event count in semi-log scale (g) AE event count rate.

**Table 2.** Crack initiation and secondary crack initiation stress (unit : MPa).

Methods		Specimen ID										Ave.	Stdev.	$\sigma_{ci}/\sigma_f$
		h-1	h-2	h-3	h-4	h-5	h-6	h-7	h-8	h-9	h-10			
$\sigma_{ci}$	Crack volumetric strain	70.1	77.6	76.3	77.4	78.5	77.3	-	83.6	78.6	79.3	77.6	3.51	0.47
	AE event count	67.3	64.6	49.8	59.4	57.7	51.8	50.7	50.7	68.4	55.5	57.6	7.14	0.35
	Cumulative AE event count in log-log scale	70.4	107.4	62.4	60.0	99.0	103.0	66.4	108.2	88.3	79.9	84.5	19.12	0.51
	Cumulative AE event count	54.7	73.8	88.7	69.8	44.9	36.9	86.5	34.9	56.5	44.7	59.1	19.65	0.36
	AE event count rate	74.0	65.0	69.0	58.0	-	79.0	-	84.0	69.0	81.0	72.4	8.78	0.44
$\sigma_{c2}$	AE event count	101.9	86.2	101.1	86.0	76.7	80.7	88.1	81.7	83.6	97.7	88.4	8.85	0.54
	Cumulative AE event count	109.2	102.0	112.0	99.9	108.0	101.7	120.6	93.1	110.1	-	106.3	8.03	0.65
	AE event count rate	103.0	87.0	94.0	93.0	77.0	95.0	102.0	96.0	79.0	91.0	91.7	8.63	0.56

명확히 나타나며 표준편차 또한 작기 때문에 체적균열 변형률을 이용하여 균열개시응력을 구하는 것이 가장 정확할 것으로 판단된다.

Diederichs et al. (2004)은 FSR (Field Strength Ratio)를 제안하였고, FSR 값이 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비( $\sigma_{ci}/\sigma_f$ )와 유사하다고 보고하였다. FSR은 4개의 변수의 곱으로 계산되며( $FSR = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4$ ),  $F_1$ 은 암석의 종류,  $F_2$ 는 입자크기,  $F_3$ 는 주 구성광물,  $F_4$ 는 부구성광물에 의해 결정된다. 박편현미경 관찰을 통한 모달 분석을 통하여 황등화강암의  $F_1$ 과  $F_2$ 는 0.8,  $F_3$ 과  $F_4$ 는 0.85로 측정되어 FSR은 0.46으로 계산되었다. 이 값은 균열체적변형률에서 측정된 균열개시응력 비인 0.47과 유사한 값을 보이므로 균열체적변형률을 이용한 방법이 균열개시응력의 측정에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

2차 균열개시응력은 누적 미소파괴음 계수, 미소파괴음 계수 및 미소파괴음 계수를 곡선에서 측정이 가능하며 (Fig. 6(c), 6(d), 6(e), 6(f)), 각각 106.3 MPa, 88.4 MPa 및 91.7 MPa의 값으로 측정되었다(Table 3). 미소파괴음 계수 및 미소파괴음 계수율에서 측정된 2차 균열개시응력이 서로 유사하고 시료별 측정 편차 또한 비교적 작아서,

이 방법이 2차 균열개시응력의 측정에 효과적인 것으로 판단된다.

#### 균열결합응력(Crack coalescence stress, $\sigma_{cs}$ )

균열결합응력은 균열개시응력 이 후에, 생성된 균열들이 서로 연결되기 시작하는 지점의 응력으로 정의되며, 이 응력 이 후에 발생하는 균열들은 불안정한 균열로서 (unstable crack propagation) 응력이 증가하지 않아도 균열이 계속 전파된다. 현재까지 제안된 균열결합응력을 결정하는 방법은 다음과 같다.

- ① 축 방향 강성곡선이 일정한 값에서 감소하기 시작하는 지점의 응력 및 체적강성곡선의 큰 불규칙성이 나타나는 지점의 응력(Eberhardt et al., 1998).
- ② 균열개시응력 이후 미소파괴음 계수가 급등하는 지점의 응력(Eberhardt et al., 1998).
- ③ 누적 미소파괴음 계수가 선형적 증가양상을 벗어나는 지점의 응력(Diederichs et al., 2004; 장수호와 이정인, 2005).

축 방향 강성곡선이 일정한 값에서 감소하기 시작하는 지점과 체적강성곡선의 큰 불규칙성이 나타나는 지점은

**Table 3.** Crack coalescence stress (unit : MPa).

Methods		Specimen ID										Ave.	Stdev.	$\sigma_{cs}/\sigma_f$
		h-1	h-2	h-3	h-4	h-5	h-6	h-7	h-8	h-9	h-10			
Axial stiffness		144.2	138.2	145.8	150.7	152.5	148.8	139.2	140.2	145.0	133.6	143.8	5.99	0.87
Volumetric stiffness		99.8	104.6	96.0	118.4	101.6	-	110.8	121.8	103.1	106.7	107.0	8.56	0.65
AE event count		114.2	120.7	118.6	102.0	109.8	112.4	109.6	124.2	113.8	106.3	113.2	6.71	0.69
Cumulative AE event count in log-log scale		113.4	148.5	144.8	-	130.8	132.7	-	140.9	135.0	119.7	133.2	12.03	0.81
Cumulative AE event count		124.0	118.2	113.7	123.9	131.5	130.1	129.2	111.5	129.1	-	123.5	7.40	0.75
AE event count rate		110.0	109.0	-	102.0	110.0	111.0	110.0	121.0	116.0	111.0	111.1	5.16	0.67



명확하지 않다(Fig. 6(a), Fig. 6(b)). 그러나 균열개시응력이 후 체적강성곡선의 기울기가 변하는 지점은 비교적 명확하여 이 지점의 응력이 균열결합응력을 지시하는 것으로 판단된다(Fig. 6(a)). 미소파괴음 계수가 균열개시응력 이후 급등하는 지점의 응력은 비교적 명확하게 결정할 수 있으나(Fig. 6(c)) 반대수 척도의 미소파괴음 계수 곡선에서는 매우 모호하다(Fig. 6(d)). 누적 미소파괴음 계수곡선 및 반대수 척도로 그린 누적 미소파괴음 계수곡선에서는 선형구간 선택에 따라 결정되는 손상응력의 값이 달라질 수도 있으므로 균열결합응력을 결정하기 매우 어려운 것으로 판단된다(Fig. 6(e), Fig. 6(f)). 미소파괴음 계수율에서 2차 균열개시응력 이후에 처음 나타나는 급등점은 비교적 명확하다(Fig. 6(g)). Table 3은 각 방법에 의하여 측정된 균열결합응력을 보여주고 있다. 체적강성곡선, 미소파괴음 계수 및 미소파괴음 계수율에서 측정된 균열결합응력이 107.0~113.2 MPa로 유사한 범위를 보여주고 있으며 표준편차 또한 5.16~8.56 MPa로 낮아서, 이 방법들이 균열결합응력의 측정에 가장 효율적인 것으로 판단된다. 축 방향 강성곡선에서 측정된 균열결합응력은 표준편차는 5.99 MPa로 비교적 낮으나 143.8 MPa의 아주 높은 값을 보여 정확한 균열결합응력을 지시하지 못하는 것으로 판단된다.

**균열손상응력(Crack damage stress,  $\sigma_{cd}$ )**

균열손상응력은 균열면의 전단이나 미끄러짐이 발생하는 불안정한 균열이 성장을 시작하는 지점의 응력으로 정의된다. Martin and Chandler (1994)는 이 응력 수준을 초과한 응력이 암석에 가해지면 암석 내에는 대규모의 균열이 발생하여 더 이상 증가하는 하중을 견딜 수 없게 되므로, 균열손상응력은 취성암석의 장기 강도(long term strength)와 높은 상관관계를 가진다고 보고하였다. 현재까지 제안된 균열손상응력을 결정하는 방법은 다음과 같다.

- ① 체적변형률 곡선의 기울기가 역전되는 지점의 응력 (Martin and Chandler, 1994).
- ② 체적강성곡선의 기울기가 양(+)에서 음(-)으로 변

하는 지점의 응력(Eberhardt et al., 1998).

- ③ 미소파괴음 계수곡선이 두 번째 선형증가양상을 벗어나 급격히 증가하는 지점의 응력(Ranjith et al., 2007).

체적변형률 곡선의 기울기가 역전되는 지점은 명확하지 않으나(Fig. 1), 체적변형률 곡선의 기울기인 체적강성곡선이 양의 값에서 음의 값으로 변하는 지점은 매우 명확하여 정확한 균열손상응력을 결정할 수 있다(Fig. 6(a)). 균열결합응력 이 후에 미소파괴음 계수가 급등하는 지점 또한 비교적 명확하여 균열손상응력의 결정이 용이하나(Fig. 6(c)), 누적 미소파괴음 계수곡선의 기울기는 점이적으로 변하기 때문에 선형적인 증가 양상을 벗어나는 지점으로 정의된 균열손상응력을 누적 미소파괴음 계수곡선에서 결정하기는 매우 어렵다(Fig. 6(e)). Fig. 6(g)의 미소파괴음 계수율 곡선에서 아래쪽 포락선(lower envelope)의 기울기가 변하는 지점은 비교적 명확하여 이 지점이 균열손상응력을 지시하는 것으로 판단된다.

각 시료에서 측정된 균열손상응력은 Table 4에 제시되었다. 체적강성, 미소파괴음 계수 및 미소파괴음 계수율에서 측정된 균열손상응력은 124.5 MPa~127.5 MPa로 매우 유사하고 표준편차 또한 3.61 MPa~6.65 MPa로 낮아서, 이 방법들을 이용하여 균열손상응력을 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 누적 미소파괴음 계수는 표준편차는 5.56 MPa로 비교적 낮으나 측정값이 138.9 MPa로 매우 높아서 정확한 균열손상응력을 지시하지 못하는 것으로 판단된다.

**선행 연구 결과와 비교**

현재까지 보고된 화강암의 손상기준은 거의 대부분 캐나다의 URL (Underground Rock Laboratory)에서 채취된 Lac du Bonnet 화강암에서 측정되었다. Martin and Chandler (1994)가 URL의 420 m 심도에서 채취된 Lac du Bonnet 화강암에 대하여 균열체적변형률 및 체적변형률을 이용하여 처음으로 균열개시응력과 균열손상응력을 측정하였으며, 이 후 Eberhardt et al. (1997, 1998, 1999a,

**Table 4.** Crack damage stress (unit : MPa).

Methods	Specimen ID										Ave.	Stdev.	$\sigma_{cd}/\sigma_f$
	h-1	h-2	h-3	h-4	h-5	h-6	h-7	h-8	h-9	h-10			
Volumetric stiffness	127.0	122.5	123.8	140.9	-	-	130.1	132.1	122.8	121.1	127.5	6.65	0.77
AE event count	129.8	128.3	129.5	117.3	119.8	118.5	121.2	129.2	123.1	128.2	124.5	5.01	0.76
Cumulative AE event count	137.5	141.5	128.5	138.3	147.4	143.2	137.0	134.1	142.5	-	138.9	5.56	0.84
AE event count rate	122.0	132.0	131.0	-	126.0	127.0	125.0	132.0	128.0	124.0	127.4	3.61	0.77

**Table 5.** Crack damage thresholds measured in this research and others.

	Granite							Granodiorite
	This Study	Chang and Lee (2005)	Martin and Chandler (1994)	Eberhardt et al. (1997)	Eberhardt et al. (1998)	Eberhardt et al. (1999a)	Eberhardt et al. (1999b)	Eberhardt et al. (1999a)
$\sigma_{cd}/\sigma_f$	0.35	0.04	-	0.21	0.22	0.25	0.23	0.21
$\sigma_{cl}/\sigma_f$	0.47	0.33	0.36	0.38	0.37	0.36	0.39	0.36
$\sigma_{c2}/\sigma_f$	0.55	0.65	-	-	-	0.47	0.50	0.47
$\sigma_{cs}/\sigma_f$	0.67	0.75	-	-	0.47	0.58	0.64	0.75
$\sigma_{cd}/\sigma_f$	0.77	0.89	0.81	0.73	0.71	0.67	0.75	0.88

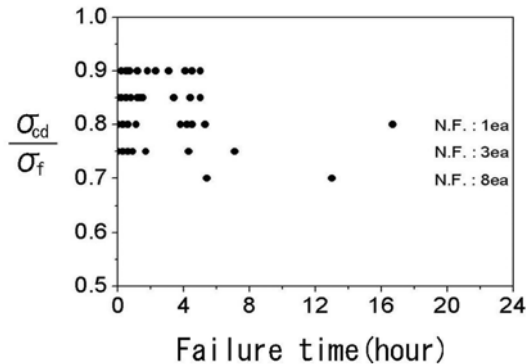
1999b)은 URL의 심도 130 m 및 240 m에서 채취된 Lac du Bonnet 화강암의 균열손상기준을 균열체적변형률, 체적변형률, 체적강성, 축 방향 강성, 횡 방향 강성 및 미소 파괴음 등의 다양한 방법을 이용하여 측정하였다(Table 5). 일축압축강도의 비로 나타난 균열개시응력 비( $\sigma_{cl}/\sigma_f$ )는 0.36~0.39이고 균열손상응력 비( $\sigma_{cd}/\sigma_f$ )는 0.67~0.81의 범위를 보이고 있으나 Martin and Chandler (1994)에 의한 측정값을 제외하면 0.67~0.75의 비교적 좁은 범위를 보여, 동일한 암종에서도 채취된 심도에 따라 손상기준이 달라질 수 있음을 지시한다. 또한 URL에서 채취된 화강섬록암의 균열개시응력 비는 화강암과 유사한 반면에 균열손상응력 비는 매우 높은 0.88을 보여 동일한 심도에서도 암종에 따라 손상기준이 차이가 남을 보여준다. 국내에서는 장수호와 이정인(2005)이 황동화강암의 균열손상기준을 측정하였으나, 균열탄성응력 비가 0.04로 지나치게 낮은 값으로 측정되었으며, 균열손상응력 비는 0.89로 매우 높은 값으로 측정되었다. 이 연구에서 측정된 황동화강암의 균열개시응력 비는 0.47로 다른 연구에 비하여 비교적 높은 값을 보이나, 균열손상응력 비는 0.77로 Lac du Bonnet 화강암과 거의 유사한 값을 보이고, 장수호와 이정인(2005)의 연구에 비하여 낮은 값을 보인다. Cai et al. (2004)은 일반적으로 균열개시응력 비는 일축압축강도의 0.3~0.5 범위를 보이고 균열손상응력 비는 0.7~0.8 범위임을 보고하여, 이 연구에서 측정된 범위와 유사함을 보여준다.

**장기 정하중 시험(Long term constant load test)**

암석에 균열개시응력보다 큰 응력이 가해지면 암석 내에는 균열이 생성되기 시작하나, 이 때 생성되는 균열은 응력이 더 이상 증가하지 않고 동일한 수준을 유지하면 균열의 성장을 멈추는 안정된 균열성장(stable crack propagation)이다. 그러나 균열결합응력보다 큰 응력이 암석에 가해지면, 응력이 더 이상 증가하지 않고 동일한 응

력 수준을 유지하여도 균열이 계속 전파되는 불안정한 균열 성장(unstable crack propagation)이 시작되고, 균열손상응력 이상의 응력이 가해지면 암석 내에는 대규모의 균열이 생성되어 빠른 시간에 암석의 파괴가 발생한다. Martin and Chandler (1994)는 캐나다의 Lac du Bonnet 화강암에 파괴강도의 0.65~1.0에 해당하는 응력을 장기간 가하는 장기 정하중 시험을 실시하였고, 일축압축강도의 약 0.7 이상의 응력이 가해지는 경우 대부분의 시료는 24시간 이내에 파괴되어 이 응력수준이 균열손상응력 비임을 보고하였다.

장수호와 이정인(2005)은 황동화강암의 균열손상응력 비를 일축압축강도의 0.89에 해당하는 응력 값으로 보고 하였으나, 이 연구에서 측정된 황동화강암의 균열손상응력 비는 일축압축강도의 0.77이다. 장수호와 이정인(2005)이 측정된 균열손상응력 비는 이 연구에서 측정된 균열손상응력 비 및 캐나다의 Lac du Bonnet 화강암보다 약 0.13~0.18 높은 값이므로(Table 5), 황동화강암의 정확한 균열손상응력 비를 측정하기 위하여 장기 정하중 시험을 실시 하였다. 장기 정하중 시험은 시료에 일정한 수준의 응력을 장기간에 걸쳐서 재하하는 시험으로, 직경이 2.54 cm, 길이가 6 cm 정도인 50개의 시료를 10개씩 5개의 그룹으로



**Fig. 7.** Result of long-term constant load test. N.F. means no failure.

나눈 후, 각 그룹에 일축압축강도의 70%, 75%, 80%, 85% 및 90%의 응력을 24시간동안 재하하였다.

Fig. 7은 장기 정하중 시험의 결과를 보여준다. 일축압축강도의 90% 및 85%의 응력이 가해진 경우 모든 시료가 6시간 이내에 파괴되었으며, 80%의 응력에서는 9개의 시료가 또한 75%의 응력에서는 7개의 시료가 24시간 이내에 파괴되어, 황등화강암에 일축압축강도의 75% 이상의 응력이 가해지면 대부분의 암석은 24시간 이내에 파괴될 것으로 판단된다. 위의 결과는 황등화강암의 균열 손상응력비가 일축압축강도의 0.75~0.80임을 지시하여 변형률 및 미소파괴음에서 측정된 균열손상응력이 비교적 정확함을 지시한다.

### 결론 및 고찰

취성암석의 변형특성 및 균열발달 특성은 오랜 시간 동안 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 이러한 연구결과를 바탕으로 암석의 손상상태를 평가하는 방법들도 다양하게 제안되었다. 그러나 제안된 평가방법들 중에는 분석방법 자체가 모호하거나 분석자의 주관이 개입되어 야하는 정성적인 분석법들이 많다. 따라서 이 연구에서는 다양한 방법을 이용하여 암석의 단계별 손상응력 결정하고 각 방법의 적용성 및 결정값의 분산정도를 분석하여 손상응력 단계별 최적의 결정방법을 선택하였다.

이 연구에서는 균열손상응력 분석을 위해 전라북도에서 산출되는 황등화강암을 사용하였으며, 분석방법에는 응력에 따른 균열체적변형률, 체적강성, 축방향 강성, 미소파괴음 계수, 누적 미소파괴음 계수, 미소파괴음 계수율 등의 곡선을 이용하였다. 균열단합응력( $\sigma_{cd}$ )의 경우 균열체적변형률 곡선을 이용하여 결정하는 방법이 가장 용이하고 정확한 값을 도출하는 것으로 나타났으며, 분석값은 평균 57.5 MPa이고 일축압축강도와의 비로 나타내는 균열단합응력비는 0.35로 분석되었다. 균열개시응력( $\sigma_{ci}$ )의 경우도 균열체적변형률을 이용하는 것이 가장 용이하였고 미소파괴음 계수율을 이용한 방법도 비교적 용이하였다. 분석값은 72.4~77.6 MPa 범위이며, 균열개시응력비는 0.44~0.47 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 검정을 위해 계산된 황등화강암의 FSR(0.46) 값과 매우 유사하여 분석방법과 결과가 적절함을 알 수 있다. 2차 균열개시응력( $\sigma_{c2}$ )의 경우는 미소파괴음 계수 및 계수율에서 측정된 결과가 서로 유사하고 분산정도도 작아 이 방법들이 효과적인 것으로 판단된다. 분석값은 평균 88.4~91.7 MPa 범위이며, 응력비로는 0.54~0.56 범위에 분포

하였다. 균열결합응력( $\sigma_{cs}$ )은 체적강성곡선, 미소파괴음 계수 및 계수율에서 측정된 결과가 서로 유사하고 분산정도도 낮아 이 방법들이 측정에 가장 적합한 것으로 판단되었으며, 분석값은 107.0~113.2 MPa 범위이고 응력비로는 0.65~0.69 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 균열손상응력( $\sigma_{cd}$ ) 역시 균열결합응력과 마찬가지로 체적강성곡선과 미소파괴음 계수 및 계수율을 이용하는 것이 가장 용이하고 서로 유사한 값을 도출하였으며, 다른 손상응력들에 비해 매우 명확하게 결과를 도출할 수 있었다. 분석값은 124.5~127.5 MPa 범위이며, 응력비로는 0.77 범위에 분포하였다. 균열손상응력은 균열개시응력과 함께 암석의 공학적 안정성을 판단하는데 중요한 의미를 지니며, 특히 균열손상응력의 경우 지중에서의 현장강도(in-situ strength)나 장기 강도를 추정하는데 사용된다. 따라서 균열손상응력 분석결과를 검정하기 위하여 황등화강암에 대한 장기 정하중 시험을 실시하였으며, 황등화강암의 장기 강도는 일축압축강도의 0.75~0.80 범위에 분포하는 것으로 분석되어 균열손상응력 비인 0.77과 거의 일치함을 알 수 있었다.

황등화강암의 각 단계별 손상응력 분석 과정과 결과를 통해 볼 때 균열단합응력, 균열개시응력, 균열손상응력의 경우는 균열체적변형률, 체적강성, 미소파괴음 계수율을 사용하여 비교적 명확하게 결정할 수 있었다. 특히, 공학적으로 중요한 의미를 갖는 균열개시응력과 균열손상응력의 경우 FSR과 장기 정하중 시험결과와의 비교에서도 매우 유사한 결과가 도출되어 측정방법이 매우 적절함을 알 수 있었다. 그러나 2차 균열개시응력과 균열결합응력의 경우는 상대적으로 측정하기 어려웠으며, 축방향 또는 횡 방향 강성곡선이나 누적 미소파괴음 계수율을 이용하는 방법의 경우 모든 손상응력 단계에서 분석결과를 도출하기 모호한 경우가 많았다.

### 참고문헌

장수호와 이정인, 2005, 응력수준에 따른 암석의 손상기준 결정에 관한 실험적 연구, 대한화약발표공학회, 23, 31-44.  
 Bieniawski, Z.T., 1967, Mechanism of brittle fracture of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 4, 407-423.  
 Brace, W.F., Paulding, B.W., Jr and Scholz, C., 1966, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, 71, 3939-3953.  
 Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H. and Minami, M., 2004, Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*,

- 41, 833-847.
- Diederichs, M.S., Kaiser, P.K. and Eberhardt, E., 2004, Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 785-812.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. and Read, R.S., 1997, Change in acoustic event properties with progressive fracture damage, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 633.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. and Read, R.S., 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, *Can. Geotech. J.*, 35, 222-233.
- Eberhardt, E., Stead, D. and Stimpson, B., 1999a, Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures, *Rock Mech. Rock Eng.*, 32, 81-99.
- Eberhardt, E., Stead, D. and Stimpson, B., 1999b, Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 361-380.
- Hardy, H. R., 1977, Emergence of acoustic emission/microseismic activity as a tool in geomechanics, *Proc. 1st Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geol. Struc. and Mat.*, The Pennsylvania University, Trans Tech Publication, 13-31.
- Martin, C.D. and Chandler, N.D., 1994, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 643-659.
- Ranjith, P.G., Jasinge, D., Song, J.Y. and Choi, S.K., 2007, A study of the effect of displacement rate and moisture content on the mechanical properties of concrete: Use of acoustic emission, *Mech. of Materials*, 40, 453-469.

---

2010년 2월 24일 원고접수, 2010년 3월 25일 게재승인

#### 장보안

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 192  
Tel : 033-250-8583  
Fax : 033-244-8580  
E-mail : bajang@kangwon.ac.kr

#### 지훈

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 192  
Tel : 033-244-9275  
Fax : 033-244-9276  
E-mail : jh821220@nate.com

#### 장현식

강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 192  
Tel : 033-244-9275  
Fax : 033-244-9276  
E-mail : whitennull@kangwon.ac.kr