미소파괴음을 이용한 KURT 화강암의 미시적 균열발달특성에 관한 연구

A Study on the Micro-Crack Development of KURT Granite Using Acoustic Emission Technique

이창수* · 이경수** · 김진섭*** · 최희주****

Lee, Chang-Soo · Lee, Kyung-Soo · Kim, Jeop-Seop · Choi, Hey-Joo

Abstract

In this study, moment tensor analysis in acoustic emission (AE) was adopted to analyze the tensile failure mechanism of granite under three point bending load. Source location result was in remarkable agreement with the real failure plane. However, it was showed that although the tensile failure was initiated by the tensile cracks generated from the tip of V shape notch, the failure was mainly caused by shear cracks occurred along the failure boundary. This is considered due to the irregular arrangement of mineral rock. Therefore despite the fact tensile stress was applied to the specimen, tensile and shear cracks were well distributed. In addition, shear cracks interacted with existing neighboring cracks and when the failure occurred, the cumulative volume reached approximately 62%.

Key words : Acoustic emission, Moment tensor analysis, Bending load, Failure mechanism, Micro crack, Granite

요 지

본 연구에서는 Acoustic Emission(AE) 분야의 모멘트텐서해석기법을 적용하여 굽힘하중을 받는 화강암의 인장파괴 메커니즘을 분석하였다. 해석결과 균열발생 구간은 파괴면과 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 최대하중의 70%를 초과하면서부터 인장균열이 노치첨단부, 전단균열은 파괴면을 중심으로 발생하며 파괴는 전단균열의 발달인 것으로 해석되었다. 이는 미세균열은 결합이 상대적으로 약한 광물 경계부를 따라 발생하기 때문이다. 따라서 인장응력이 시료에 가해지더라도 불규칙한 광물 배열로 인하여 인장균열과 전단균열은 복합적으로 발생하며 특히 전단균열은 미끌림 형태로 이웃하는 균열과 결합·성장을 함에 따라 파괴 시 누적 체적비는 62%로 나타났다.

핵심용어 : 미소파괴음, 모멘트텐서해석, 굽힘하중, 파괴 메커니즘, 미세균열, 화강암

1. 서 론

고준위 방사성폐기물처분장과 같은 지하 구조물을 건설하기 위해서는 안정화 상태의 암반에 발파와 굴착공법의 적용을 통한지하공간의 확보는 필수이다. 그러나 발파와 굴착은 공동 주변 근계 암반의 균열 발생을 야기하며 암반의 역학적·수리적·열적 특성 변화를 일으키기 때문에 암반의 장·단기적 안정성을 위한 모니터링 기법 적용은 필수이다(Kim et al, 2011). 이에 국내에서는 대심도 암반구조물의 안정성

향상을 위하여 Acoustic Emission(AE) 기법을 활용한 연구가 많은 관심을 끌고 있다. AE는 고체 내부에 국부적으로 형성된 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성과 또는 탄성파의 물리적 현상, 탄성파를 이용한 수동형 비파괴 시험의 일종으로(ANSI/ASTM E 610-89) 암석역학분야에서는 1930년대 후반 미국광무국에서 수행된 광산의 음파실험을 시작으로 균열의 전파와 이에 따른 구조물의 손상도 분석에 널리 이용되고 있으며(Hardy, 2003) 대표적 기법으로는 Ohtsu (1991)의 모멘트텐서해석(moment tensor analysis)이 있다.

*정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail: csll@uos.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, University of Seoul

**교신저자, 정회원, 박사과정, 서울시립대학교 토목공학과(Tel: +82-2-2210-2271 Fax: +82-2-2210-5036, E-mail: lks@uos.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D candidate, Department of Civil Engineering, University of Seoul

***한국원자력연구원 선임연구원

Korea Atomic Energy Research Institute, Senior researcher

****한국원자력연구원 책임연구원

Korea Atomic Energy Research Institute, Principal researcher

모멘트텐서해석은 지진발생 메커니즘을 규명하기 위하여 제안된 해석기법으로 지진에 따른 단층의 운동학적 해석(Kinematic analysis)이 가능한 장점이 있지만 이를 위해서는 전파특성을 설명하는 그린함수(Green's function)의 획득은 필수이다(Aki and Richard, 1980). 그러나 지진학에서 이용되는 반무한체(half space)의 그린함수(Lamb, 1904)를 제외한 모든 그린함수는 재료의 특성과 기하학적 형상에 따라 수치해석적 방법(numerical analysis)으로 결정해야하는 단점이 있다(Grosse and Ohtsu, 2008). 이에 Ohtsu(1991)는 균열 발생 시 생성되는 AE 신호 중 P파의 성분만을 고려하여 반무한체의 그린함수를 단순화한 뒤 파형 역산을 이용하여 모멘트텐서 성분을 획득하였으며 이를 토대로 콘크리트에서 발생하는 균열의 패턴, 방향성, 체적 등을 분석하였다.

모멘트텐서해석기법은 균열전파에 따른 구조물의 손상범위 예측과 체적분석을 통한 손상도 분석이 가능하기 때문에 처분장과 같은 지하구조물의 안정성 향상을 위한 모니터링 기법으로써 적합할 것으로 판단된다. 그러나 처분장 주변의 암반은 발파와 굴착에 의한 영향 이외에도 지질적 특성에 따른 수많은 불확실성을 내포하고 있으므로 이를 적용하기 위해서는 암반의 공학적 연구는 우선적으로 수행되어야한다.

이에 본 연구에서는 처분장의 안정성 향상을 위한 기초 연구로써 국내 고준위폐기물처분장 대상 암종인 화강암의 인장파괴 메커니즘을 분석하기 위하여 모멘트텐서해석기법을 적용하였다. 또한 해석기법의 정확성 향상을 위하여 결과에 가장 중요한 영향을 주는 균열 위치정보 알고리즘을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 모멘트텐서해석기법

탄성체 내부 y 지점에서 균열이 발생할 경우 시간 t , 점 x 에서 발생한 변위 $u(x,t)$ 는 그린함수의 공간미분 $G_{ip,q}(x,y,t)$, 컨벌루션 적분 $*$, 모멘트텐서 m_{pq} 를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x,t) = G_{ip,q}(x,y,t)m_{pq} * S(t) \quad (1)$$

$$m_{pq} = [C_{pqkl}l_k\eta_l]\Delta V$$

여기서, m_{pq} 는 3×3 대칭행렬(symetric matrix)형식으로 이루어진 모멘트텐서로써 탄성상수 C_{pqkl} , 균열의 방향벡터 l_k , 균열의 접선벡터 n_l 그리고 균열의 체적을 의미하는 ΔV 로 이루어져 있다.

균열 발생 시 생성되는 AE 신호 또한 물체의 응답함수이기 때문에 Ohtsu(1991)는 무한탄성체의 그린함수를 단순화하기 위하여 식 (2)와 같이 P파의 성분만을 고려하여 모멘트텐서성분을 획득하였다.

$$A(x) = C_s \frac{Re(t,r)}{R} r_p r_q \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $A(x)$ 는 각 센서에서 획득한 AE 신호 중 P파의 진폭, R 은 벡터 실제 음원을 나타내는 점 y 에서 센서가 위치한 점 x 까지의 거리, r 은 R 의 방향벡터, C_s 는 센서의 보정계수, $Re(t,r)$ 은 벡터 r 과 방향벡터 r 에 대한 반사계수로서 식 (3)과 같다(Landis and Shah, 1993; Groose and Ohtsu, 2008).

$$R_e(t,r) = \frac{2k^2 a(k^2 - 2[1 - a^2])}{(k^2 - 2[1 - a^2])^2 + 4a[1 - a^2]\sqrt{k^2 - 1 + a^2}} \quad (3)$$

2.2 균열의 패턴 및 방향성 분석

식 (2)에 의하여 모멘트텐서 성분들이 결정되면 균열의 패턴과 방향성은 식 (4), (5)의 모멘트텐서 고유치(eigenvalue)와 고유벡터(eigenvector)성분을 이용하여 획득할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 자코비안 행렬법을 이용하여 이를 획득하였다.

$$X = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

$$Y = \frac{2(\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{3\varepsilon_1} \quad (5)$$

$$Z = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3\varepsilon_1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e_1 &= l + n \\ e_1 &= l \times n \\ e_1 &= l - n \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 는 모멘트텐서의 최대, 중간, 최소고유치, e_1, e_2, e_3 는 최대, 중간, 최소고유치의 단위벡터, $\times$ 는 벡터의 외적, X, Y, Z 는 전단율, 편차 인장율, 등방성 인장률을 의미한다.

탄성체에서 순수 전단균열이 발생하면 $X=1, Y=Z=0$ 이고, 순수 인장균열인 경우 $X=0, Y=2/3, Z=1/3$ 이 된다. 그러나 Ohtsu(1991)는 수치해석결과를 토대로 $X>60\%$ 를 전단균열(shear crack), $40\%<X<60\%$ 를 전단균열과 인장균열의 성질을 모두 내포하는 복합균열(mixed crack), $X<40\%$ 를 인장균열(tensile crack)로 분류하였다.

2.3 탄성파속도 및 위치표정 결정 알고리즘

본 연구에서 사용된 암석시료는 광물, 공극, 균열 등으로 이루어져 있기 때문에 비균질성 물체(heterogeneity)로 간주할 수 있다. 그러나 균열 발생 시의 AE는 주파수대역과 속도는 수십 kHz, 수천m/s를 이상이기 때문에 파장은 비균질성을 야기하는 물체의 영향에서 벗어난다. 따라서 동탄성역학(elastodynamics)에서는 암석 또는 암석과 유사한 특성을 나타내는 콘크리트를 탄성체로 가정한다(Groose and Ohtsu, 2008). 이에 시료 내부에서 탄성파가 방사되더라도 매질 내 모든 방향으로 향하는 탄성파 속도(V)는 동일하므로 센서의 위치(X_i, Y_i, Z_i)와 도달시간 차(Δt_i) 그리고 탄성파속도 정보를 가지고 있을 경우 균열의 위치(X, Y, Z)는 식 (7)을 이용하여 획득 가능하다.

$$\frac{\sqrt{(X_i - X)^2} + \sqrt{(Y_i - Y)^2} + \sqrt{(Z_i - Z)^2}}{\Delta t_i} \quad (7)$$

한편, 식 (7)은 비선형방정식이기 때문에 음원의 위치정보는 격자법, 차분근사법, 분할근사법, 최소자승법 등을 이용하여 획득 가능하며(Huh, 2001; Chang, 2002) 암석역학분야에서는 Leighton and Blake(1970), Leighton and Duvall(1972)가 제안한 최소자승법을 이용하여 음원의 위치정보를 추정한다. 여기서, P파 속도는 주파수대역에 영향을 받기 때문에 균열 패턴, 체적, 구조물의 손상에 따라 다양한 결과를 나타낸다. 따라서 P파 속도는 AE 신호를 이용하여 결정되어야 하지만 미지항이 추가될 경우 해석상의 어려움으로 P파 속도는 실내탄성과 실험결과에 의존한다(Shiotani et al., 2001; Maochen, 2003; Qiaoxing, 2006).

암석은 동탄성학적 관점에서 탄성체이다. 따라서 3차원 형태의 입체 구조물 (x, y, z)에서 균열이 발생할 경우 가상의 위치정보 (x^*, y^*, z^*)가 실제 균열위치와 동일하면 각 센서에 도달된 P파 속도는 동일하게 된다. 이는 각 센서에 도달된 P파 속도가 동일한 임의의 지점을 찾는다면 이 구간이 실제 음원 발생 구간임을 의미하는 것과 동일한 의미이다. 그러나 암석의 경우 다양한 조건에 의하여 미약하지만 P파 도달시간차가 발생하기 때문에 본 연구에서는 식 (8)을 이용하여 P파 속도 분산이 최소가 되는 지점을 음원 발생지점으로 결정하였다.

$$\int_{\rightarrow \min} \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \right) = \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2} + \sqrt{(Y_i - Y_j)^2} + \sqrt{(Z_i - Z_j)^2}}{\Delta t_{ij}} \quad (8)$$

3. 실험방법

본 연구에 사용된 암석시료는 한국원자력연구원 지하처분 연구시설(KAERI Underground Research Tunnel: KAERI)에서 채취한 복운모 화강암을 이용하였다. 광물 입자는 조립질~세립질이며 일축압축실험결과 암석의 역학적 특성을 대표하는 일축압축강도, 탄성계수, 실내탄성파속도(P wave)는 평균 173 MPa, 46.5 GPa, 5277 m/s로 암질은 양호하다. 편의상 사용된 시료는 KURT 화강암으로 명칭하였으며 시료는 국제암반역학회(International society for rock mechanics: ISRM)에서 제시하는 기준을 토대로 Table 1, Fig. 1과 같은 형태로 제작하였으며 인장파괴를 유도하기 위하여 세브론 노치 굴곡실험 중 Level I 실험법을 적용하여 0.25MPa $\sqrt{m}$ /sec 이상의 하중을 일정속도로 시편에 가한 뒤 10초 이내에 파괴가 진행되도록 실험을 수행하였다(Ouchterlony, 1989).

AE 신호는 Rectuson과 Fuji ceramics에서 개발한 AE-300과 공진 주파수대역이 60 kHz $\pm$ 20%인 AE 603 SW-GA 센서를 이용하여 계측하였다. 센서와 시편의 접촉상태는 결과에 상당한 영향을 주기 때문에 고진공접촉제를 이용하여 센서를 시료 표면에 단단하게 부착시켰다. 또한 발생한 AE 신호는 매우 미세하기 때문에 프리앰프와 메인앰프에서 각각 40 dB, 20 dB를 증폭하였다. 발생한 탄성파의 중첩 및 산란

Table 1. Specimen dimensions used for this study

Geometry parameter	D	L	S	t	a_0
Value(mm)	52.00	208.00	173.16	1.56	7.80

Fig. 1. Photograph of three point bending test

Table 2. Arrangements of AE sensors

AE sensor Number	Sensor coordinates(cm)		
	X	Y	Z
1	0.00	4.00	2.60
2	0.00	-3.00	2.60
3	1.84	3.00	1.84
4	1.84	-4.00	1.84
5	0.00	-4.00	-2.60
6	-1.84	4.00	-1.84

등을 최소화하기 위하여 Peak Definition Time(PDT), Hit Definition Time(HDT), Hit Lockout Time(HLT)은 50 μ s, 100 μ s, 500 μ s로 결정하였다.

모멘트텐서해석기법을 적용하기 위해서는 6개 이상의 AE 센서가 필요하기 때문에 본 연구에서는 6개 센서를 Table 2와 같이 배열하였다. 마지막으로 발생한 AE 신호는 AE-300에 의하여 ASCII파일로 컴퓨터에 저장된 뒤 Microsoft사의 엑셀 2007 Visual Basic(VBA)기능을 이용하여 P파 도달시간과 진폭을 연구자의 주관적 개입 없이 자동으로 결정하게 프로그램화하였다. 이를 토대로 P파 정보를 토대로 균열의 위치정보와 균열의 운동학적 해석을 수행하였으며 Fig. 2는 본 연구에 사용된 AE 장비, 데이터 시트를 이용한 연구모식도이다.

4. 해석결과

4.1 균열의 위치정보

본 연구에서는 위치표정 알고리즘의 정확성 검토를 위하여 Fig. 3의 암석시료 표면에 각 3회씩 샤프심 압절실험(pencil lead break test)을 수행하였다. 실험결과 Table 3과 같이 결과의 오차는 원 위치와 5% 미만으로 이는 AE-300에 의하여 발생 가능한 시간 분해능에 의한 오차 범위(± 0.75 cm)를 만족하였다. 그러나 기존 연구방법과 같이 P파의 속도를 실

Fig. 2. A schematic diagram of measurement system

Fig. 3. Location of pencil-lead break test point in the rock specimen

Table 3. source localization result

Source location	Real source location		Averaged source localization		error (%)	
	X (cm)	Y (cm)	X (cm)	Y (cm)	X	Y
1	12.5	10	12.0	9.7	4.0	3.0
2	25.0	10.0	25.7	10.3	2.8	3.0
3	37.5	10.0	37.5	10.5	0.0	5.0

내실험 결과(5277 m/s)로 설정한 뒤(25.0 cm, 10.0 cm, 0.0 cm) 지점에서 발생한 신호에 대한 위치표정을 수행한 결과는 오차범위가 0.9 cm인 것으로 나타났다. 여기서, P파 정보는 Sedlak et al.(2009)의 Two step AIC 알고리즘을 이용하여 결정하였다.

4.2 모멘트텐서해석결과

Fig. 4는 굽힘하중에 의하여 KURT 화강암 시료에서 발생한 AE 신호 중 대표적 신호로써 균열의 발생 위치, P파 속도는 각각(-1.08 cm, 0.13 cm, -1.15 cm), 2489 m/s, 모멘트텐서해석 결과는 Table 4와 같이 전단률(shear component)은 60%를 초과하기 때문에 전단균열, 운동방향 벡터 l 을 분

석한 결과 균열은 X축에서 Z축 방향으로 36° 기울었고 체적은 $331,340 \mu\text{m}^3$ 인 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 모멘트텐서해석기법을 이용한 암석시료에서 발생한 균열전파특성을 2차원적으로 묘사한 결과이다. 균열의 체적은 각각의 균열을 대표하는 도형의 크기를 달리하였으며 균열의 방향성은 운동방향 벡터 l 을 직선화하였고 거시적 인장균열 전파에 따른 파괴면은 점선으로 나타났다.

해석결과 재하시작부터 최대하중의 약 30%까지는 Fig. 5(a)와 같이 롤러(roller)가 접촉하는 시료 상부면을 중심으로 균열이 발생하지만 손상의 미약함으로 AE 신호의 발생빈도와 체적은 미약한 것으로 해석되었다. 반면에 시료에 가해지는 하중이 이를 초과하면서부터 균열은 Fig. 5(b)와 같이 노

Fig. 4. P wave arrival determination by two step AIC

Table 4. Moment tensor analysis result

Normalized moment tensor			Crack pattern (%)		Crack motion	Volume (μm^3)
0.48	1.00	-0.21	X	87.6	Shear	331,340
1.00	-0.15	0.14	Y	1.01		
-0.21	0.14	0.09	Z	11.4		

치침단부와 파괴면을 중심으로 발생하기 시작하며 균열의 발생빈도 또한 재하초기와 비교할 때 3배 이상 증가하였다. 최대하중의 70%를 초과하는 하중 수준에서부터는 Fig. 5(c)와 같이 균열의 발생빈도가 급격히 증가함과 동시에 체적이 상대적으로 큰 인장균열이 노치침단부를 중심으로 우세하게 발생하는 것으로 나타났다. Chang(2002)는 이러한 현상을 거시적 인장균열의 시작점으로 간주하였다. 따라서 해석결과 또한 재하수준이 증가할수록 균열은 파괴면에서 시료 상부면을 따라 계속적으로 전파되었다. 그러나 최대하중의 70%를 초과하면서부터 전단균열의 발생구간은 파괴면을 중심으로 전파하며 Table 5에 나타난 바와 같이 인장균열의 발생빈도가 전단

균열보다 우세하지만 누적 체적비는 Fig. 6과 같이 전단균열이 인장균열보다 2배 이상 우세한 총 누적 비의 62%를 차지하였다. 또한 균열의 운동 방향성을 분석한 결과 인장균열은 Fig. 7(a)와 같이 하중방향과 평행하지만 전단균열은 Fig. 7(b)와 같이 방향성이 다양한 것으로 나타났다.

4.3 미시적 관점에서의 인장파괴 메커니즘

굽힘하중을 받는 시료의 경우 Fig. 8과 같이 노치침단부에 집중되는 인장응력이 인장강도를 초과함에 따라 인장균열이 발생하며 하중수준이 증가할수록 인장균열은 시료상부 방향으로 전파되어 인장파괴가 발생하는 것으로 해석된다. 여기서,

Fig. 5. Crack locations, crack orientations, and crack classifications using moment tensor at each stage of loading; (a) Less than 30% (b) 30~70% (c) more than 70% of maximum load

Table 5. Crack generation ratio at each stage of loading

Loading stage	Crack mode (%)		
	Shear	Tensile	Mixed
<30%	57	36	7
30~70%	43	37	20
>70%	37	47	16
Total	42	42	16

Fig. 6. Normalized cumulative crack volume at each stage of loading

Fig. 8은 Itasca사에서 유한차분해석(finite difference method : FDM)을 기초로 연속체 해석을 위하여 개발된 FLAC 2D를 적용하여 균열전파를 모사하였다. 사용된 암석의 역학적 특성은 Table 6과 같고 균열은 Mohr-coulomb 모델을 적용

Fig. 7. Direction of crack motion in a KURT granite under bending load; (a) tensile crack (b) shear crack

여 모사하였다. 균열전파를 2차원적으로 모사하였기 때문에 파괴인성(fracture toughness: K_{IC})은 실험결과와 수 배 이상의 차이를 나타냈다. 그러나 본 연구에서는 수치해석적 기법을 토대로 KURT 화강암의 파괴인성을 결정하는 것이 아닌 KURT 화강암에서 발생한 인장파괴 특성을 모사하기 위함이다.

한편, 암석에서의 미세균열 발달은 수치해석 결과와 Fig. 9와 같이 응력이 집중되는 구간의 광물 경계부(mineral grain boundary) 또는 공극, 기존 균열 등이 존재하는 구간을 중심으로 발달한다. 이 때 광물, 미세 균열은 불규칙한 형태로 배열되어 있기 때문에 모멘트텐서 해석결과 재하초기의 균열 발생구간은 산발적이며 운동 방향성은 불규칙한 것으로 해석되었다.

암석의 직접적 손상은 균열면의 전단이나 미끄러움이 발생하는 불안정한 균열이 성장하는 균열손상응력 이 후 구간부터

Fig. 8. Crack propagation patterns simulated by numerical analysis with load rate; (a) early stage of loading, (b) early stage of crack propagation, (c) intermediate stage of crack propagation, (d) final stage of crack propagation

Table 6. Physical and mechanical properties of KURT granite

Bulk density (g/cm ³)	Uniaxial Compression strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Cohesion (MPa)	internal Friction angle (°)
2.68	173.4	46.5	0.32	10.5	16.3	56

이며 이를 초과하는 응력이 시료에 가해지면 암석 내부에는 대규모 균열 전파가 진행된다(Martin and Chandler, 1994). Ouyang et al. (1991), Landis and Shah(1995)는 모르타르와 콘크리트 시료를 이용한 연구 결과 미시적 관점에서의 굽힘하중을 받는 시료의 파괴는 전단균열 발달과 직접적 관계가 있는 것으로 보고하였다. Kranz(1997)는 주사현미경을 이용한 결과 암석 미세균열 배열은 En echelon 형태나 En passant 형태로 우세하게 발생하며 균열들 사이의 암교(rock bridge)에서 전단파괴가 발생하여 균열의 결합이 이루어진다고 주장하였다(Chang, 2002).

굽힘하중을 받는 KURT 화강암을 이용한 모멘트텐서해석 결과 또한 파괴강도의 70%를 초과하는 하중이 시료에 가해지면서부터 균열의 체적은 급격히 증가하는 것으로 해석되었다. 이 때 인장균열의 운동 방향성을 고려하면 이는 균열의 쪼개짐 또는 균열개시와 직접적 관계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 미시적 관점에서는 불규칙한 광물 배열로 인장응력이 시료에 가해짐에도 불구하고 방향성은 하중 방향과 유사하며 이에 따라 누적 체적은 미약한 것으로 해석되었다. 반면에, 재하가 증가할수록 미끌림 형태의 전단균열은 결합이 약한 광물 경계부를 중심으로 이웃하는 균열과의 결합, 성장을 반복하기 때문에 균열손상응력 이 후부터 전단균열은 파괴면을 중심으로 발생하며 파괴 시 누적 체적은 인장균열의

Fig. 9. Illustrative sketch of fractured crack tip region by microscopic observation (Atkinson, 1987)

2배 이상인 62%인 것으로 해석되었다. 여기서, 모멘트텐서해석에서 정의하는 균열은 육안관찰 또는 수치해석에서 제시하는 밀리미터 이상의 거시적 균열(macro crack)이 아닌 마이크로미터 단위의 미세균열(micro-crack)을 의미한다(Landis and Shah, 1993).

5. 결 론

본 연구에서는 모멘트텐서해석기법을 적용하여 굽힘하중을

받는 암석의 인장파괴 메커니즘을 미시적 관점에서 설명하였으며 이와 관련된 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 모멘트텐서해석은 균열의 위치정보를 토대로 균열의 운동학적 정보를 추정함에도 불구하고 해석상의 어려움으로 P파 속도는 실내실험 결과에 의존한다. 따라서 본 연구에서는 P파의 도달시간 차와 센서 좌표를 이용하여 각 센서에 도달된 P파 속도를 결정된 뒤 이에 대한 분산을 최소화하여 위치정보를 추정하였으며 알고리즘의 정확성 검토를 위하여 사프심 압결 실험을 수행하였다. 실험결과 실제실험 수행구간과 위치표정의 오차는 실험 장비에 의하여 발생 가능한 오차 범위(± 0.75 cm)를 만족하는 것으로 해석되었다. 반면에 P파 속도를 실내실험 결과에 의존하여 위치표정을 수행한 결과에서는 P파 속도의 차이로 인하여 장비에 의한 발생 가능 오차 범위를 초과하는 0.9 cm인 것으로 나타났다.
- 2) 모멘트텐서해석기법을 적용한 결과 인장파괴는 최대하중의 70%를 초과하면서부터 노치첨단부에서 발생한 인장균열에 의하여 시작되었으나 파괴면을 따라 발생한 전단균열에 의하여 파괴가 발생한 것으로 해석되었다. 이는 미시적 관점에서 균열전파는 광물경계면을 따라 형성되기 때문이다. 따라서 인장응력이 시료에 가해지더라도 경계면을 따라 균열이 전파되기 때문에 인장균열과 함께 전단균열 또한 우세하게 발생하며 손상이 진행될수록 전단균열은 이웃하는 균열과 결합·성장을 반복함에 따라 파괴 시 총 누적 체적비는 인장균열의 2배 이상인 62%를 차지하였다.
- 3) 모멘트텐서해석기법은 미소 파괴메커니즘을 규명하기 위하여 제안된 기법임에도 불구하고 이를 이용한 손상구간 정보는 실제 파괴면과 유사하며 파괴가 진행될수록 상대적으로 체적이 큰 균열이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 현장암반에 모멘트텐서해석기법을 적용할 경우 국지적 암반파괴구간 예측이 가능할 뿐만 아니라 균열 체적 분석을 토대로 구조물의 손상도 분석 또한 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

References

Aki, K. and Richards, P.G. (1980) *Quantitative seismology: Theory and method: Vol. I*, WH freeman and company, San francisco.

- Akinson, B.K (1987) *Fracture mechanics of rock*, Academic press, London.
- Chang, S.H. (2002) Characterization of stress-induced damage in rock and its application on the analysis of rock damaged zone around a deep tunnel, Ph.D. Dissertation, Seoul national university, Korea.
- Grosse, G.U. and Ohtsu, M. (2008) *Acoustic Emission Testing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hardy, H.R. (2003) *Acoustic emission/Microseismic activity: Vol. I: Principle, Techniques, and Geotechnical Applications*, Taylor & Francis publishers, London.
- Huh, J.S. (2001) Measurement of Acoustic Emission and the Characteristics of Deformation and Fracturing of Rock under Triaxial compression, Ph.D. Dissertation, Seoul national university, Korea.
- Kim, J.S., Kwon, S., Sanchez, M. and Cho, G.C. (2011) Geological storage of high level nuclear waste, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 721-737.
- Lamb, H. (1904) On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A*, 203 pp. 1-42.
- Landis, E.N. and Shah, S.P. (1993) Recovery of microcrack parameters in mortar using quantitative acoustic emission, *Journal of nondestructive evaluation*, Vol. 12, No. 4. pp. 19-232.
- Leighton, F. and Blake, W. (1970) *Rock noise source location techniques*, USBM RI 7432.
- Leighton, F. and Duvall I. (1972) *A least squares method for improving rock noise source location techniques*, USBM RI 7626.
- Maochen, G. (2003) Analysis of source location algorithms Part I: Overview and non-iterative methods, *J. Acoustic Emission*, Vol. 21, pp. 14-24.
- Martin, C.D. and Chandler, N.D. (1994) The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, pp. 643-659.
- Ohtsu, M. (1991) Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: application to in situ hydrofracturing test, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. B4, pp. 6211-6221.
- Ouchterlony, F. (1989) On the background to the formulae and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 26, No. 1, pp. 13-23.
- Qiaoxing, L. (2006) Strength degradation and damage micromechanism of granite under long-term loading, PhD thesis, The university of Hong Kong, Hong Kong.
- Sedlak, P., Hirose, Y., Khan, S.A., Enoki, M. and Sikula, J. (2009) New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates, *Ultrasonics*, Vol. 49, pp. 254-262.
- Shiotani, T., Ohtsu, M. and Ikedam, K. (2001) Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation, *Construction and Building Materials*, Vol. 15, pp. 235-246.

© Received November 23, 2012

© Revised November 29, 2012

© Accepted January 16, 2013