

## Acoustic Emission기법을 활용한 KURT 무결암의 손상기준 및 균열패턴 분석

이경수, 김진섭, 권상기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

lks@kaeri.re.kr

### 1. 서론

지하 수백 m의 압반을 굴착하여 건설되는 방사성폐기물처분장은 생성된 공동 주변의 응력재분배와 응력교란 등으로 모암과는 다른 역학적, 수리적, 열적 특성을 가진다. 따라서 방사성폐기물처분장 주변에서 발생하는 결함의 발생 유무와 결함의 정도를 실시간으로 평가할 수 있는 모니터링 법의 개발은 필수이다. 최근 국내외에서는 방사성폐기물처분분야에 Acoustic emission(AE)법을 활용한 연구가 널리 수행되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 방사성폐기물처분장에 AE법을 적용하기에 앞서 암석시료를 이용한 실험실 규모의 실험을 통하여 시료 내부에서 발생하는 균열에 따른 암석시료의 손상기준과 균열 패턴 분석에 대한 연구를 AE법을 이용하여 수행하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 시험방법

본 연구에서 사용된 암석시료는 세립질 또는 중립질의 복운모 화강암으로 시료의 크기는 52×117mm이다. 암석시료에서 발생하는 균열에 따른 손상기준 및 균열의 패턴을 분석하기 위하여 일축압축하중을 시료에 가하였으며 하중에 의하여 균열 발생시 생성되는 AE 신호는 Rectuson사의 AE-300시스템과 Fuji ceramics사에서 제작한 8개의 60kHz 공진센서를 이용하여 시료표면에 부착하여 획득하였다. AE 센서에서 탐지한 신호는 프리엠프에서 40dB, 메인엠프에서 20dB 증폭시켰으며 AE검출한계는 주변에서 발생하는 노이즈 수준을 고려하여 80dB로 설정하였다. PDT, HDT, HLT는 관련 문헌조사와 발생파형을 고려하여 50, 100, 500μsec로 설정하였다.

#### 2.2 암석시료의 역학적 특성

본 연구에서 사용된 암석시료의 탄성계수와 포아송비는 스트레인게이지를 이용하여 변형률을 측정된 뒤 응력-변형률 곡선에서 일축압축강도의 40~60% 구간의 결과를 이용하였다. 실험결과 탄성계수는 50GPa, 포아송비는 0.19, 일축압축강도

는 164MPa인 것으로 조사되었다.

#### 2.3 암석시료의 손상기준 분석

균열 발생 시 생성되는 AE파는 균열과 직접적인 관계가 있기 때문에 AE파를 이용하여 균열 발생에 따른 물체의 손상기준에 대한 정량적 분석이 가능하다. 따라서 압축강도 시험 시 암석시료 내부에서 균열에 의하여 발생하는 AE파의 parameter 중 count를 이용하여 암석시료의 손상기준에 대한 분석을 수행하였다. 실험 결과 균열 단힘응력은 최대강도의 0.13배, 균열개시응력은 0.42배, 2차 균열개시응력은 0.69배, 균열결합응력은 0.81배, 균열손상응력은 0.91배이며 균열손상응력 이후부터는 균열 발생의 빈도가 급격히 증가하는 것으로 조사되었다.

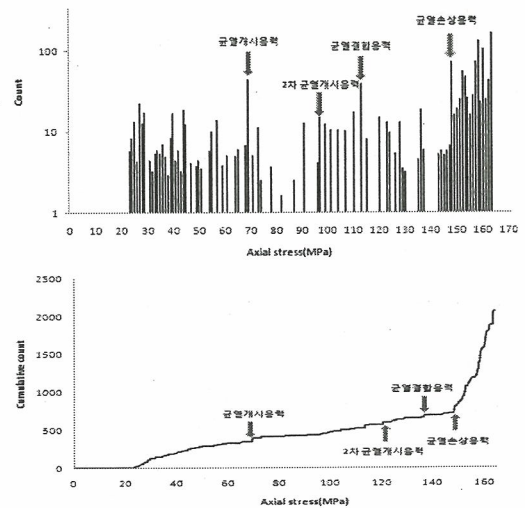


Fig. 1. AE count and cumulative count induced by rock sample under uniaxial compression

#### 2.4 모멘트텐서법

균열운동  $b(y,t)$ 에 의하여 시간  $t$ , 점  $x$ 에서 발생한 변위  $u(x,t)$ 는 균열면  $F$ 에 대한 탄성상수  $C_{pqkl}$ , 그린함수의 공간미분  $G_{i,p,q}(x,y,t)$ , \* 컨볼루션 등을 이용하여 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x,t) = \int_F C_{pqkl} G_{ip,q}(x,y,t) * [b(y)l_k S(t)] n_i dS \dots\dots (1)$$

식 1의 우변에 있는 탄성상수와 균열운동에 대한 방향벡터, 접선벡터, 균열운동벡터에 대한 항정리를 실시하면 식 2와 같이 모멘트텐서  $m_{pq}$ 를 획득할 수 있다.

$$\int_F C_{pqkl} [b(y)l_k] n_i dS = [C_{pqkl} l_k n_k] \left[ \int_F b(y) dS \right] \dots\dots (2)$$

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

균열 발생시 AE센서에 의하여 탐지되는 AE파의 초동 진폭  $A(X)$ 는  $m_{pq}$ 을 활용하여 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x) = C_s \frac{Re(t,r)}{R} r_p r_q m_{pq} \dots\dots (3)$$

여기서,  $C_s$ 는 보정계수,  $R$ 은 AE 발생위치에서 AE센서까지의 거리,  $r$ 은  $R$ 의 방향벡터,  $Ref(t,r)$ 은 벡터  $r$ 과 센서민감도의 방향벡터  $t$ 에 대한 반사계수이다.

식 3을 이용하여 모멘트텐서를 획득한 뒤 모멘트텐서의 고유치를 식 4에 대입하면 전단균열비  $X$ , 편차인장균열비  $Y$ , 인장균열비  $Z$ 를 획득할 수 있다.

$$X = \frac{e_2 - e_3}{e_1}, Y = \frac{2(e_1 - 2e_2 + e_3)}{3e_1}, Z = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3e_1} \dots\dots (4)$$

순수 전단균열인 경우  $X=1, Y=Z=0$ , 순수 인장균열인 경우  $X=0, Y=2/3, Z=1/3$ 이나 Ohtsu는 수치해석을 통하여  $X<40\%$ 인 경우를 인장균열,  $X>60\%$ 인 경우를 전단균열로,  $40\%<X<60\%$ 인 경우를 복합균열로 분류하였다.

따라서 본 연구에서는 Ohtsu가 제안한 바와 같은 방법으로 균열패턴을 분류하였으며 균열단힘응력에서부터 균열손상응력까지의 결과만을 해석하였다. Fig 2는 모멘트텐서해석을 통한 균열패턴분석 결과이다.

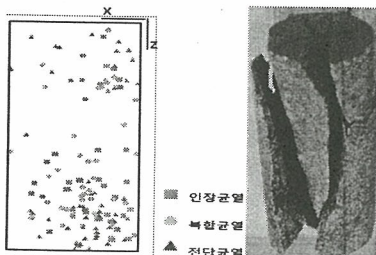


Fig. 2. Crack mode by moment tensor analysis

모멘트텐서해석을 수행한 결과 총 발생한 159개의 균열 중 인장균열은 52개(33%), 복합균열은 44개(27%), 전단균열은 63개(40%)가 발생한 것으로 분석되었다. 또한 하중 초기에는 시료의 하단부에서 인장균열의 발달이 우세하였으나 하중이 증가함에 따라 시료의 중·하단부에서 복합균열과 전단균열의 발달이 우세한 것으로 해석되었다.

또한 식 2에 있는 균열의 체적  $\Delta V$ 는 라메상수와 균열면의 방향벡터와 운동벡터의 내적, 모멘트텐서의 대각 성분들의 합을 통하여 획득할 수 있다. 따라서 발생한 균열체적을 분석한 결과 Fig 3과 같이 2차 균열개시응력수준이 지남에 따라 전단균열의 체적이 급속히 증가하였으며 모멘트텐서해석을 토대로 균열의 전파와 결합은 전단균열에 의해서 이루어지는 것을 유추할 수 있다.

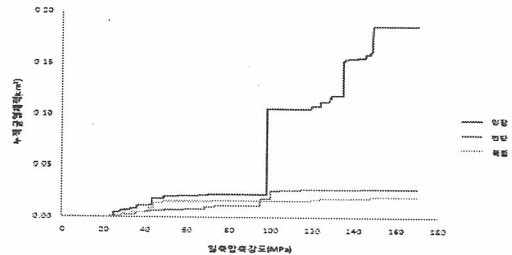


Fig. 3. Crack volume estimation

### 3. 결론

일축압축하중을 받는 암석시료의 손상기준과 발생한 균열패턴에 대하여 AE법을 이용하여 연구를 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

일축압축하중에 의한 시료의 손상기준에 대한 분석결과 균열단힘응력은 최대강도의 0.13배, 균열개시응력은 0.42배, 2차균열개시응력은 0.69배, 균열결합응력은 0.81배, 균열손상응력은 0.91배인 것으로 조사되었다.

모멘트텐서 해석을 통하여 발생한 균열 패턴을 분석한 결과 하중 초기에는 인장균열의 발생이 우세하였으나 하중이 증가함에 따라 전단균열의 발생이 점진적으로 많아졌다. 다시 말해서 균열들의 전파와 결합 그리고 파괴에 직접적으로 영향을 주는 균열은 전단균열에 의한 것으로 유추할 수 있다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.