

# 심지층 처분암반의 AE 모니터링을 통한 손상도 정량화 기법의 검증방법론 제시

## Presentation of Validation Methodology for Damage Quantification in Rock Mass using AE Monitoring

김진섭† · 이항복\* · 최영철\* · 최희주\* · 조계춘\*\*

Jin-Seop Kim, Hang-Bok Lee, Young-Chul Choi, Heui-Joo Choi and Gye-Chun Cho

### 1. 서 론

고준위폐기물 심지층 처분시스템은 최소 수만년 이상의 기대수명을 가진 구조물로서, 이의 처분안정성 및 구조적인 안전성의 확보는 처분사업과 관련된 이해 당사자뿐만 아니라 대국민 수용성과 매우 밀접한 관계에 있다. 이러한 관점에서 처분암반의 장기 건전성을 실시간 모니터링하고 이의 구조적인 손상도를 평가하는 것은 처분시스템의 신뢰도를 확보한다는 측면에서 매우 중요한 이슈에 해당한다.

선행연구의 일환으로, 지하처분연구시설 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)를 활용하여 현장암반의 손상도 진행곡선(Damage Evolution Curve)을 실증실험을 통해 확보한 바 있다(Kim, 2013). 이는 손상도 진행곡선을 활용하여 실시간 AE(Acoustic Emission) 모니터링을 통해 계측시점의 암반의 손상도를 평가하고 강도저하를 추정하기 위한 연구이다.

본 연구에서는 이의 연장선상에서 신뢰성을 확보하기 위해, KURT 암반의 손상도 진행곡선 상의 정량적인 손상도를 새로운 접근방법으로 검증하고자 한다.

### 2. 검증방법론 제시

손상도 진행곡선은 정규화된 응력 (normalized

stress) vs. 정규화된 손상도 (계측된 AE 에너지/ 파괴시점까지의 총 AE 에너지)의 관계를 나타내 주는 함수로서 KURT 암반은 다음과 같은 함수형태로 묘사될 수 있음을 확인하였다.

$$\frac{E_{AE}}{E_{AE,T}} = a \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^b \exp \left\{ c \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서  $E_{AE}$ 는 모니터링 기간 동안 계측된 AE 파의 에너지를 의미하며,  $E_{AE,T}$ 는 파괴시까지 발생한 AE의 에너지,  $\sigma$ 는 응력,  $\sigma_c$ 는 파괴강도, 그리고  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 실험에 의해 결정되는 상수를 의미한다. 이의 검증을 위해 절리암반에서 적용할 수 있는 새로운 AE 위치표정 알고리즘을 개발하였으며(Kim et al., 2013), 현장암반 내 균열크기를 결정하기 위하여 통계기법을 활용하였고, 암반 내 파의 감쇄특성(wave attenuation) 및 프랙탈 이론(Fractal theory)을 적용하였다.

#### 2.1 AE 위치추정 알고리즘

기본적인 접근방법은 AE 파가 절리를 만나 일부는 반사 및 굴절을 할지언정 중심 주파수 성분에 해당하는 요소는 현장암반의 높은 구속압(confining pressure)으로 인해 그대로 유지된다는 원리이다(Kim et al., 2013). 이를 위해 시간-주파수 분석기법인 Wigner-Ville Distribution과 이론적인 탄성과 모델인 Biot' model을 혼합 적용하였다. 즉 현장암반의 절리 및 비균질 특성으로 인한 위치표정의 불확실성을 이론식을 통해 보완하는 방식이다. 본 개발 알고리즘은 위치표정을 위해 AE 신호들 간의 도달 시간차 및 평균적인 파 속도 (wave velocity)를 사전에 측정할 필요가 없는 특징이 있다.

† 교신저자; 한국원자력연구원

E-mail : kjs@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-2874

\* 한국원자력연구원

\*\* 한국과학기술원

## 2.2 균열크기 결정

현장암반 내에서 발생한 균열의 크기를 결정하기 위하여 통계적인 기법을 사용하였다. 동일 AE 에너지가 측정된다 할지라도 추정된 균열 크기에 따라 그 손상정도가 달라질 수 있기 때문에 균열크기는 손상도 산정에 있어 중요한 인자에 해당한다. 전형적으로 강도(strength), 강성(stiffness) 그리고 균열 길이 결정 등에 Weibul distribution model이 활용되어 왔으며(Weibul, 1951), 본 연구에서도 AE 균열크기를 결정하기 위해 이를 적용하였다.

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda x)^{\eta}} \quad (2)$$

## 2.3 탄성과 감쇄특성 고려

AE 파는 상대적으로 고주파수의 주파수 성분을 가지고 있기 때문에 현장암반의 매질을 통과하면서 급격히 감쇄하는 특성을 지니고 있다. 따라서 AE 센서에서 측정된 균열 에너지가 아닌 균열발생 위치에서의 AE 균열 에너지를 산정하기 위하여 다음과 같이 현장암반의 파 감쇄(wave attenuation) 특성을 측정하여 보정하였다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{\zeta} \exp[-\alpha(r_2 - r_1)] T \quad (3)$$

## 2.4 최대 AE 에너지 추정

위의 식 (1)에서와 같이 암반의 정량적인 손상도 추정은 특정 하중일 때까지 측정된 AE 에너지를 파괴시까지의 총 측정 AE 에너지( $E_{AE,T}$ )로 나누어 주는 원리이다. 즉 손상도를 평가하기 위해서는 분모에 해당하는 최대 AE 에너지에 대한 정보가 필요하기 때문에, 본 연구에서는 프랙탈 이론 (Fractal theory)을 적용함으로써 균열크기에 독립적인 (scale-independent) 최대 AE 에너지를 추정하였다 (Carpenter and Pugno (2002)).

$$\Gamma_{AE} = \frac{E_{max.AE}}{V^{D/3}} \quad (4)$$

상기에 제시된 방법론을 바탕으로 요약하면, 절리 암반에서 AE의 균열발생 위치를 보다 신뢰성 있게 추정하고, Kriging 기법을 이용하여 균열발생 중심 위치를 산정한다. 이를 통해 상대적인 균열발생 크기를 통계기법인 Weibul 모델을 적용하여 95%의

신뢰도로 추정한다. 그 후 측정된 AE 에너지를 현장암반의 파감쇄 특성을 고려하여 균열발생 위치에서의 AE 에너지로 보정한 후, 그 값을 균열크기에 해당하는 최대 AE 에너지로 나누어 주면 정량적인 손상도를 도출할 수 있게 된다. 아래의 Table 1에 현장실험을 통해 얻는 손상도와 본 연구에서 제시된 방법론에 의한 손상도를 비교하여 나타내었다.

**Table 1** Comparisons of the quantitative degree of damage

| No. of cycle | Damage at the damage evolution curve | Proposed method |
|--------------|--------------------------------------|-----------------|
| 3rd          | 0.041                                | 0.038           |
| 5th          | 0.128                                | 0.122           |

분석결과, 제시된 방법을 통해 도출된 암반의 정량적인 손상도가 각 반복하중 별 손상도 진행곡선(현장실험) 상의 손상도와 상당히 유사함을 알 수 있다. 따라서 AE 모니터링을 통해 현장암반 내 손상도의 정량화가 가능함을 본 검증방법으로 확인하였다.

## 3. 결 론

현장실증 실험을 통해 획득된 KURT 암반의 손상도를 새로운 접근방법을 이용하여 성공적으로 검증하였다. 본 연구에서 제시된 방법론은 검증의 목적으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 손상도 진행곡선을 이용하여 정량적인 손상도와 그 때의 암반강도 그리고 이의 향후 거동예측을 위한 방법론으로도 활용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Kim J.S., 2013, Quantitative damage assessment of in-situ rock mass using acoustic emission technique, PhD Thesis, KAIST.
- Carpinter, A. and Pugno, N., 2002, Fractal fragmentation theory for shape effects of quasi-brittle materials in compression, Mag Concr Res, 54, 473-480.
- Kim J.S., Choi Y.C., Choi J.W. and Cho G.C., 2013, A combined method of Wigner-Ville Distribution with a theoretical model for acoustic emission source location in a dispersive media, KSCE, 17(6), 1284-1292.