

## AE와 MS 이벤트를 이용한 계측기술

천대성<sup>1)</sup>, 박의섭<sup>1)\*</sup>, 정용복<sup>1)</sup>, 박철환<sup>2)</sup>, 신중호<sup>2)</sup>

### Monitoring Technique using Acoustic Emission and Microseismic Event

Dae-Sung Cheon, Eui-Seob Park, Yong-Bok Jung, Chulwhan Park, Joong-Ho Synn

**Abstract** Acoustic emission (AE) and Microseismic (MS) activities are low-energy seismic events associated with a sudden inelastic deformation such as the sudden movement of existing fractures, the generation of new fractures or the propagation of fractures. These events rapidly increase before major failure and happen within a given rock volume and radiate detectable seismic waves. The main difference between AE and MS signals is that the seismic motion frequencies of AE signals are higher than those of MS signals. As the failure of geotechnical structures usually happens as a high velocity and small displacement, it is not easy to determine the precursor and initiation stress level of failure in displacement detection method. To overcome this problem, AE/MS techniques for detection of structure failure and damage have recently adopted in civil engineering. This study deal with the basic theory of AE/MS and state of arts in monitoring technique using AE/MS.

**Key words** Acoustic emission, Microseismic, Precursor, Monitoring technique

**초 록** 미소파괴음(Acoustic Emission, AE)과 미소지진음(Microseismic event, MS event)은 응력의 재분배에 의한 균열이 생성될 때 나오는, 순간적인 에너지 방출에 의한 탄성파이다. AE/MS 이벤트는 일반적으로 대규모의 파괴에 앞서 그 발생이 현저해지는 경향이 있다. 이들은 계측영역의 주파수 대역에 따라 구분되며, MS이벤트에 비해 상대적으로 고주파의 AE 신호는 보다 미세한 파괴를 검출할 수 있다. 일반적으로 암반구조물은 파괴되기까지 작은 변형이 발생하여 종래에 사용되고 있는 변위계측으로는 그 전조현상을 포착하기 어렵기 때문에 국부적인 파괴나 갑작스러운 파괴에 대한 사전예측이 어려운 현실이다. 그러나 AE/MS 이벤트의 파형을 측정할 수 있는 경우 암반구조물의 파괴를 사전에 예측할 수 있으며, 초동이 명확한 경우 미세한 파괴위치지점과 함께 파괴메커니즘의 규명도 가능하다. 본 보고에서는 AE/MS 이벤트에 대한 기본이론과 함께 이를 활용한 계측기술 개발현황과 적용사례 등을 소개한다.

**핵심어** 미소파괴음, 미소지진음, 전조현상, 계측기술

#### 1. 서 언

암반구조물의 건설이 점차 대형화, 심부화 됨에 따라 높은 현지응력과 천공, 발파 등 굴착으로 인해 암반구조물 주변암반에는 균열들이 생성되어 손상을 받게 된다. 특히, 미세균열(microcrack)은 전파 및 결합 등에 의해 큰 규모의 균열을 생성하고 이렇게 생성된 균열들에 의해 암반구조물 주변암반에 손상영역이 형성된다. 이러한 손상영역은 암반구조물의 안정성을 감소시키며,

암반의 특성들을 변화시키기 때문에 암반구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 손상영역을 감소시키기 위한 방법과 손상영역이 발생하였을 때 이를 평가하고 적절한 대책을 마련하는 것이 필요하다. 암반구조물의 안전성 감시에는 일반적으로 암반변위계를 중심으로 한 계측이 행하여져 왔지만, 이러한 변위 계측은 부분적인 암반파괴나 갑작스러운 파괴현상을 예측하기 어렵다. 또한 암반구조물의 안정성에 중대한 영향을 주는 암반 거동에 관해서도 변위 측정을 중심으로 한 종래의 측정만으로는 충분하다고 말할 수 없다.

미소파괴음(Acoustic Emission, AE)과 미소지진음(Microseismic event, MS event)은 응력의 재분배에 의한 균열이 생성될 때 나오는 순간적인 에너지 방출에

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 선임연구원

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 책임연구원

\* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 2월 5일

심사 완료일 : 2008년 2월 15일

의한 탄성파이다. 이 미소파괴음은 지진파와 같이 재료 내에서 P파와 S파가 섞여 전파하다가 재료의 표면에 도달하면 표면파의 형태로 바뀌어 전파한다. 또한 미소파괴음은 일반적으로 대규모의 파괴에 앞서 그 발생이 현저해지는 경향이 있다고 알려져있다(Ishida, 1999). 미소파괴음은 금속분야에서 사용되기 시작하였으며, 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 뛰어난 특성을 보여 현재는 항공기, 교량 및 파이프 등의 구조물 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴 검사기술로서 이용되고 있다.

암반구조물 안전성감시에 AE와 MS 이벤트를 이용한 연구는 주로 광산의 록버스트(rock burst)의 예지나 예측을 목적으로 활발하게 행하여져오고 있으며 단층면 해석이나 모멘트텐서 해석을 수행하여 파괴메커니즘을 규명하기도 하였다. 그러나 이러한 측정은 지하 1,000 m를 넘는 심부나 이에 상응하는 높은 지압 조건을 가지는 광산을 주된 대상으로 하고 있다. 이에 반하여 지표에 가까운 토목분야의 암반구조물에서 단층면 해석 등을 수행한 AE의 측정 예는 거의 보고된 적이 없다. 이는 천부에 위치한 암반구조물은 지표에 가까워 지압이 작고, 또 굴착되는 암반구조물의 규모가 광산과 비교해서 작기 때문이다. 또한 신중한 시공과 충분한 보강이 행하여졌기 때문에 록버스트와 같은 현저한 암반파괴가 발생하는 경우는 드물고, 3차원적인 발생위치의 결정이나 단층면 해석을 적용할 수 있는 규모의 큰 AE나 MS 이벤트의 발생이 적기 때문이다. 그러나 비교적 좁은 영역에서 미소한 파괴를 대상으로 한 고감도의 AE 측정을 수행할 경우 이와 같은 비교적 지표에 가까운 암반구조물에 있어서도 AE 측정은 가능하고, 또한 웨이브가이드를 이용한 AE 측정이나 AE보다 낮은 주파수를 갖는 MS 이벤트를 이용하는 경우 그 활용성은 더욱 증가될 것이다. 최근 일본에서 지하양수발전소나 사면 등에 적용한 사례(Ishida, 1999; Shiotani, 2006)는 이러한 예를 잘 보여준다.

내공변위나 응력의 측정이 암반구조물의 역학적 거동을 전반적으로 분석하기 위한 것이라면, AE 측정은 예상하지 못한 국부적 암반 블록의 미끄러짐이나 균열의 생성 등을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 변위와 같은 기존의 계측항목에 AE 측정을 추가하여 지하구조물 안전감시시스템의 한 항목으로 적용할 경우 변위 계측을 통한 불연속 암반구조물의 전반적인 거동과 더불어 국부적 파괴나 변형 거동에 대해서도 계측이 가능하다. 따라서 보다 정밀한 안전감시시스템이 필요한 경우에는 AE 계측항목을 안전감시시스템의 기본적인 요소로 선정할 필요가 있다.

본 보고에서는 미소파괴음을 이용한 계측기술의 소개와 함께 국내기술을 이용하여 개발된 AE/MS 계측시스템을 소개하고자 한다.

## 2. 기본이론

AE 신호(그림 1)는 재료의 손상과 관련된 갑작스런 변형에너지 방출 시에 발생하는 탄성파로서, 대부분이 결정 및 교결 입자들로 구성된 암석에서는 결정이나 입자의 전위(dislocation), 입자 경계부의 활동, 미세 균열의 발생 및 전파 등이 발생할 경우 파괴면의 형성과 함께 각종 에너지가 발생하는데, 이러한 에너지 방출의 한 형태로서 발생하는 탄성파가 AE이다(Hardy, 1977).

최근 AE 감지장치와 기록장치의 발달로 인해 취득된 신호의 파형뿐만 아니라 얻어진 파형을 각종 AE 변수들로 변환하여 보다 효과적으로 계측하거나 분석할 수 있다. 주된 AE 변수로는 AE 횟수 (AE count), 진폭 (amplitude), 지속시간 (duration), 오름시간 (rise time), 에너지 (AE energy) 등이 일반적으로 사용되며 각각의 변수에 대한 정의는 다음과 같다.

- (1) AE 횟수 (AE count): AE 신호가 검출한계(threshold)를 넘은 횟수를 의미한다. 일반적으로 큰 타격음은 작은 타격음에 비해 검출한계를 초과하는 횟수가 많으므로, 이러한 AE 횟수는 신호의 강도(intensity)에 대한 평가기준이 된다.
- (2) 진폭 (amplitude): AE 신호에서의 최대 진폭을 말하며, 이는 보통 AE를 생성하는 재료의 음원 강도와 관련된다. 측정은 보통 로그 단위 (decibels, dB)

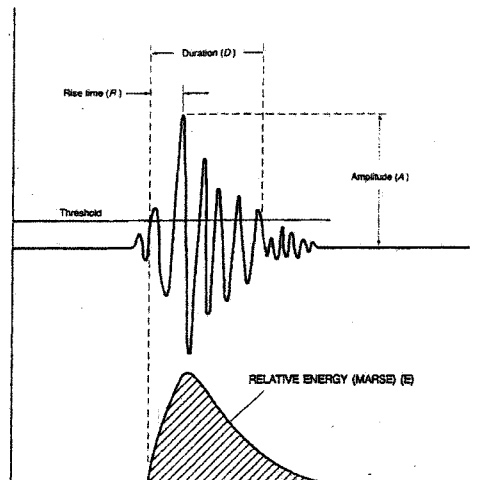


그림 1. AE 파형과 변수

로 기록되어 큰 신호와 작은 신호 모두 정확한 측정을 할 수 있다. 진폭 분석은 측정하는 진폭에 영향을 주는 수많은 인자들로 인해 동일한 증폭 수준과 동일한 형태의 센서를 이용하여 수행하여야 한다.

- (3) 지속시간 (duration): AE 신호가 맨 처음 검출한계를 지나 마지막으로 검출한계를 지날 때까지의 시간으로, 잡음 필터링 등에 유용하게 쓰인다.
- (4) 오름시간 (rise time): AE 신호가 검출한계를 초과한 후 최대 진폭 값에 도달하는데 걸리는 시간으로, 음원과 센서 사이의 파 전파과정에 의해 제어되기 때문에 AE 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하는 목적으로 많이 사용한다.
- (5) AE 상대에너지 (AE relative energy): 지속시간 동안의 AE 파형 포락선 밑의 면적에 해당하는 측정값으로, 지속시간과 진폭에 민감하고 검출한계 설정 값이나 주파수에는 덜 의존적이기 때문에 AE 횟수보다 더 많이 사용된다.

그림 2는 AE 측정에 관한 기본과정을 도식화한 것으로, 재료 내부의 미소파괴로 인해 발생된 탄성파는 센서를 통해 신호화되어 계측장비로 전송된다. 발생된 AE과 MS 이벤트는 그림 3과 같이 계측영역의 주파수

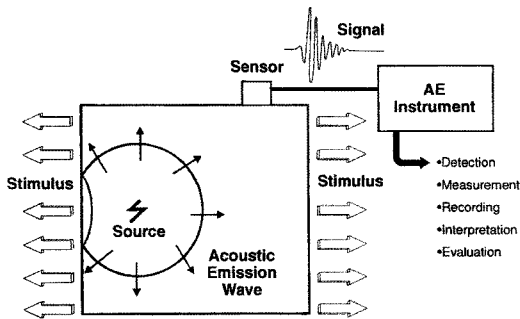


그림 2. AE의 기본 측정과정

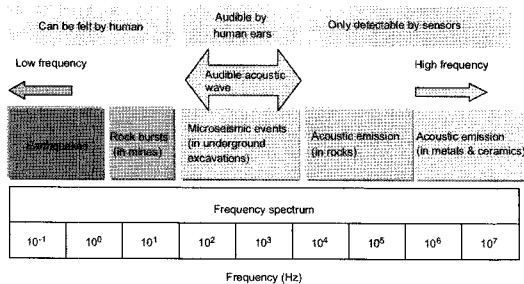


그림 3. 주파수영역과 AE와 MS 기술의 적용범위(Cai et al., 2007)

대역에 따라 구분하며, AE는 최대  $10^3 \text{m}^3$ 까지, MS 이벤트는 이보다 더 광역의 범위(약  $10^5 \text{m}^3$ )까지 계측 가능한 것으로 알려져 있다(ASC, 2005; Cai et al., 2007). 사용되는 센서는 AE의 경우 압전소자(piezoelectric element)를 이용한 센서가 사용되며, MS 이벤트는 가속도계(accelerometer)나 지오폰(geophone)을 주로 사용하고 있다. 가속도계는 넓은 주파수 대역에 사용하기 적합하나 낮은 주파수 대역에서는 감도가 좋지 않다. 반면 지오폰은 낮은 주파수 대역에 사용 가능하지만 1 kHz이상의 주파수 대역에서는 적합하지 않는 것으로 알려져 있다. 이러한 특징으로 인해 광범위한 영역에 대해서 MS 이벤트에 의한 전반적인 계측을 수행하고, 특정 관심영역에 대해서는 AE에 의한 정밀한 계측을 수행하는 것이 일반적이다.

### 3. 효율적 계측을 위한 요구사항

AE/MS를 이용하여 암반구조물의 안전성을 효율적으로 감시하기 위해서는 계측계획, 자료처리 및 음원추적에 대한 기술이 확립되어야 한다(Ge, 2005).

#### 3.1 계측계획

신중한 계획은 효율적인 계측 프로그램을 확립하는데 기초가 되며, 시스템의 장기 성능에 지대한 영향을 미친다. 이 단계에서는 계측목적에 대한 공학적 평가, 계측 시스템 규모(채널 수)의 결정 및 센서 배치의 최적화가 이루어진다.

##### 3.1.1 계측 목적에 대한 공학적 평가

계획 단계에서 첫 번째 작업은 대상 지역과 계측 정밀도에 관련된 계측 조건을 포함하여 계측 목적을 철저히 평가하는 것이다. 굴착은 동적인 과정이기 때문에 이러한 평가는 단기 및 장기 계측에 대한 필요성을 고려해야만 한다. 공학적 평가의 결과로서 계측 시스템의 규모가 결정될 수 있다.

##### 3.1.2 대규모 채널 시스템

요구되는 채널 수는 계측 영역의 규모, 요구되는 계측 정밀도, 예상되는 신호 레벨 및 암상(rock formation)에 의해 결정된다. 일반적으로 상대적으로 많은 채널의 시스템을 사용하는 것은 좋은 결과를 가져온다. 신호 감지를 위한 대규모 채널 시스템의 효율성은 두 가지 메커니즘에 의해 설명된다. 하나는 대규모 채널시스템으로 잠재적인 음원과 센서와의 거리를 단축시킨다는 것이다. AE/MS 이벤트의 에너지가 감쇠 및 기하학적 분

산 효과에 의해 급격히 감소한다는 사실을 고려할 때 신호의 이동거리 단축은 이 문제의 유일한 해결책이다. 둘째로 AE/MS 이벤트의 발생은 일반적으로 방향과 연결된 신호강도의 현저한 변화를 동반하며 방향성을 가진다는 것이다. 이 문제에 대한 유일한 해결책 역시 잠재적 음원을 둘러싸는 충분한 센서를 보유하는 것이다.

### 3.1.3. 센서 배열 설계

센서 배열 형태는 음원 추적을 위해 사용된 센서의 배치를 의미한다. 기술적 관점에서 이것이 계측 정밀도와 신뢰도에 영향을 주는 가장 중요한 요소이다. 이는 센서 배열이 시스템의 안정성을 결정하기 때문이다. 일반적으로 도달시간, 속도, 센서좌표 등과 같은 입력 자료에서 오차의 발생이 불가피하므로 음원추적의 정밀도는 이러한 초기 오차에 크게 의존한다. 따라서 좋은 센서 배열은 신뢰성 있는 정밀한 음원 추적에 있어서 필수적이다.

## 3.2 자료처리

현장에서 기록된 자료는 일반적으로 과도한 배경 잡음에 의해 매우 복잡할 수 있다. 가끔 AE/MS 이벤트 신호는 부분적으로 또는 전체가 잡음에 잠겨버리며 도달 신호의 도착 시간을 식별하기가 어렵게 된다. 따라서 이들 자료처리에 있어 필터링과 도달 형태의 식별이 가장 중요하다.

### 3.2.1 주파수 분석 및 자료 필터링

자료처리의 주요 작업은 배경 잡음을 필터링하는 것

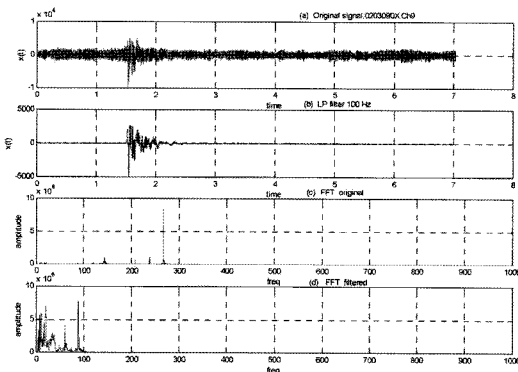


그림 4. 100Hz 로패스필터에 의해 배경잡음이 제거된 MS 이벤트 신호 (after Ge, 2005)

- 잡음이 혼재된 신호,
- 필터링된 신호,
- 잡음이 혼재된 신호의 주파수스펙트럼,
- 필터링된 주파수 스펙트럼

으로, 이를 위해 신호와 잡음의 주파수 분포에 대한 연구가 필요하다. 신호의 주요 주파수 대역이 잡음과 다르면 필터를 사용하여 잡음을 필터링할 수 있다. 자료 필터링에는 하이패스 필터, 로패스 필터, 밴드 필터, 노치 필터 등을 사용한다. 그림 4는 필터링에 의해 배경잡음이 제거된 사례를 보여준다.

### 3.2.2. 도달신호의 형태

AE 신호의 도달 형태를 구분하는 것은 잡음 제거와 함께 중요한 자료처리 기술이다. 센서에 의해 감지되는 최초 도달은 대부분의 AE/MS 관련연구에서 가정하는 것처럼 P파에 의한 것일 필요는 없다. P파 외에도 S파나 outlier(물리적 소스에 기인하지 않은 도달 신호)에 의해 감지될 수 있다. 따라서 도달 신호의 형태를 구분할 수 있어야 하며, 이들에 따라 음원해석을 달리 수행해야 한다.

## 3.3 음원추적

AE 계측기술의 효율성은 대부분 음원위치의 정밀도와 신뢰도에 의해 좌우된다. 음원추적을 위해 다수의 다른 접근법과 모델들이 이용되고 있다. 암반구조물을 대상으로 AE/MS 기술을 적용할 경우 다음 사항에 특별한 주의를 기울여야 한다.

### 3.3.1 탐색 알고리즘의 수렴 특성

음원 추적방법을 선택함에 있어서 주된 고려사항 중 하나는 탐색 알고리즘의 수렴 특성이다. 여기서 수렴 특성은 반복적으로 해를 탐색하는 과정의 안정성을 의미한다. 만약 탐색 알고리즘이 나쁠 경우 발산문제가 발생하고, 계측시스템의 기능 역할을 수행할 수 없다. 일반적으로 암반구조물의 AE/MS 이벤트 계측에는 USBM 법, Geiger 법, Simplex 법 등의 알고리즘이 대표적으로 이용되어 왔다.

USBM 법은 광산에서 많이 사용하는 음원 추적법으로 미광무국의 연구자들에 의해 1970년초에 개발되었다(Leighton와 Blake, 1970). 이 방법은 비반복적인 알고리즘이기 때문에 단순하며 사용하기 쉽고 발산문제를 가지지 않는다. 그러나 이 방법은 P파와 S파를 동시에 고려할 수 없어 다소 제한적이다.

Geiger 법(Geiger, 1912)은 약 100년 전에 개발된 것으로, 가장 잘 알려져 있고 널리 사용되는 음원추적법이다. 지진학에서는 지역적 지진 위치를 파악하는데 광범위하게 사용된다. 이 알고리즘은 효율적이며 유연하지만, 발산하기 쉽다는 단점이 있다.

Simplex 법은 Nelder와 Mead(1965)에 의해 개발된

것으로 함수 비교를 통해 수학적 함수의 최소값을 찾는다. 이 방법은 1980년대 후반에 음원추적 목적으로 Prugger와 Gendzwil(1989)에 의해 소개되었다. 다른 반복법에 비하여 Simplex법의 가장 큰 장점은 좋은 수렴 특성이다. 효율성과 유연성 등의 장점으로 인해 Simplex법이 암반구조물의 일상 계측 목적에 가장 적합하다고 할 수 있다.

### 3.3.2 P파와 S파 도달 동시 사용

P파와 S파 도달의 동시사용은 자료처리의 효율성을 증대시킨다. 지진이나 AE 계측에 있어 자주 관찰되는 중요 현상은 S파의 높은 진폭이다. 많은 경우 P파 도달 대신에 S파 도달만을 보게 된다. 또한 대부분의 AE 이벤트는 아주 작으며 대부분 5~6개의 도달신호를 가진다. P파 속도만을 사용하는 음원추적의 경우 S파 도달되는 경우 계측된 자료를 사용하지 못하거나 모든 도달신호에 대해 P파 도달을 가정해야 한다. P파 도달의 가정을 사용하면 큰 오차를 발생시킬 수 있으며, S파를 사용하지 못할 경우 센서배열을 제한시킨다.

### 3.3.3 최적화 방법

정확한 음원추적은 초기 오차의 영향을 제한하는 능력에 크게 의존하며, 여기에는 센서 배열의 최적화와 자료 최적화의 두 가지 접근법이 있다. 앞서 언급한 배열 최적화의 중요성은 초기 오차에 민감하지 않은 안정한 수학적 시스템을 만드는 것이다. 이에 반해 자료 최적화는 통계적 분석을 통해 계측 자료의 최적화된 해를 찾는 것이다. 음원추적의 효율성은 최적화된 해를 규정하는 데 사용된 오차가 분석신호를 얼마나 잘 특성화하느냐에 달려 있다.

AE/MS 음원추적의 경우 일반적으로 최소자승법과 절대값법이 사용된다. AE/MS 음원추적의 적용에 있어 최소자승법의 단점은 오차에 대한 가우시안 분포의 가정과 이벤트의 수가 적을 경우 음원추적을 수행하기 어렵다는 것이다. 또한 큰 오차에 대해 과도하게 민감하여 그 기능을 상실하는 것이다. 전체 오차를 불일치의 자승근의 합으로 정의하는 최소자승법과는 달리 절대값법은 총 오차를 불일치의 절대값의 합으로 정의한다. 이 방법은 큰 오차에 대해서 상대적으로 덜 민감하다.

## 4. 국내·외 기술개발현황과 적용사례

### 4.1 국외 기술개발현황과 적용사례

AE/MS 이벤트에 관한 연구는 1940년대부터 광산의

록버스트 발생예측연구에서 시작된 이래, 응력증가에 따른 AE 변수 분석을 통한 암석의 변형단계, AE 발생과 암석의 변형관계 분석(Mansurvo, 1994; Eberhardt, 1998 등), 카이저효과를 이용한 현지응력 측정에 관한 연구(Holcomb, 1983; Seto, 1998) 등의 실내시험이 수행되어 왔다.

또한 AE/MS 이벤트를 이용한 계측기술은 캐나다, 영국, 일본, 유럽 등 선진국에서 이미 URL(underground research laboratory)이나 지하발전소, 터널, 사면 등에 적용하고 있다(Ishida, 1999; Young, 1999; Shiotani, 2006; Hirata 등, 2007). 특히 캐나다의 경우 1980년대 후반부터 1990년대까지 대규모의 록버스트 연구가 캐나다 연방정부, 온타리오주 정부 및 주요 광산회사의 후원 하에 수행되었으며, 순수한 연구를 넘어 지하구조물의 안전과 기반제어를 위한 기본 계측 수단으로 활용되어 왔다. 더욱이 캐나다는 URL 시험터널에서 발생한 파괴현상과 AE/MS 계측결과를 비교 분석하여 고심도에서 발생하는 암반의 취성파괴에 관한 메커니즘 연구를 수행하였다. AE/MS 이벤트를 이용한 계측기술은 지반공학분야와 지구물리탐사분야를 융합한 기술로서 방재에 대한 중요성과 융합/복합기술의 발전으로 인해 지속적으로 발전하는 추세에 있다.

#### 4.1.1 캐나다 적용사례

캐나다에 위치한 AECL(Atomic Energy of Canada Limited's)의 지하연구실험실(URL)내의 TSX(Tunnel Sealing Experiment) 터널에 대해 AE를 이용한 파괴 메커니즘 연구가 수행되었다(Young 등, 1999). AECL의 지하실험터널은 초기에 균열이 발생하지 않은, 비교적 균질한 Lac du Bonnet 화강암 암반내에 위치하고 있으며, 이 중 TSX 터널은 주응력 방향과 나란하며 4.4m x 3.5m의 타원형으로 굴착되었다. 탄성 해석에 의한 최대 주응력은 105 MPa이었으며 바닥과 천단부에서 발생하였다. 그림 5는 420 m 심도에 위치한 TSX 터널의 형상 및 센서 배열 위치를 표시한 것이다. 총 24개의 센서가 감시용 시추공에 설치되었으며, 센서의 주파수 범위는 50~250 kHz였다.

그림 6은 측정된 AE 신호로부터 음원을 추적하여 위치를 표시한 것이다. AE는 대부분 터널 바닥부에서 발생했으며 수치해석 결과에 의한 응력집중 영역에 주로 분포하였다. 이 결과 및 실험실 시험 결과로부터 국부적으로 발생한 AE는 먼저 불연속면의 돌출부 파괴로 발생하며 이로 인해 불연속면이 전단거동을 보이며 탄성파를 발생시키고 이 불연속면이 다시 안정화되면서 추가적인 AE가 발생하는 것으로 해석하였다.

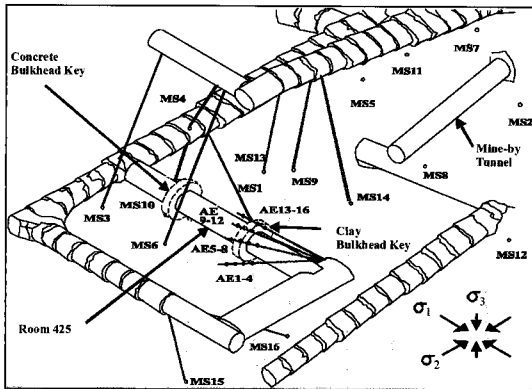


그림 5. TSX 터널 형상 및 센서 배치도(After Young et al.,1999)

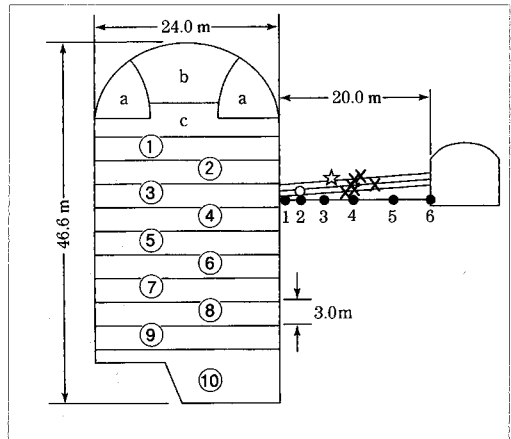


그림 7. 일본의 지하발전소공동에 대한 AE 계측 사례(After Ishida,1999)

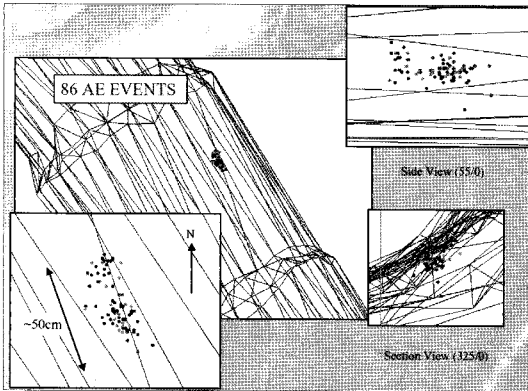


그림 6. TSX 터널에 대한 AE계측 결과(After Young et al., 1999)

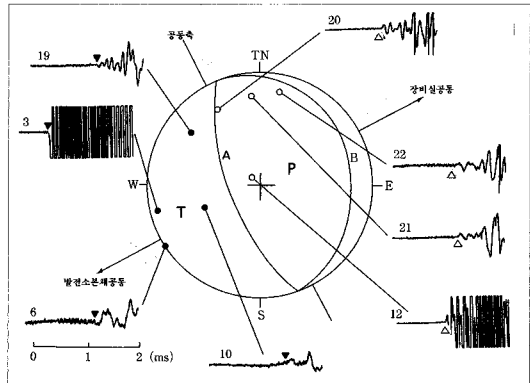


그림 8. AE 신호 분석 사례(After Ishida,1999)

4.1.2 일본 적용사례

일본의 경우 Ishida(1999)가 지하 280 m에 위치하는 지하양수발전소 공동의 측벽부에서, 공동 굴착과 함께 발생하는 AE를 측정하여 분석한 사례가 있다(그림 7). 이 경우 규모가 큰 AE 발생은 많지 않았지만, 비교적 좁은 영역에서 미세한 파괴를 대상으로 한 고감도 AE 측정을 통해서 몇 가지 AE에 대해 그 음원을 3차원적으로 결정하였고 동시에 단층면 해석을 수행하여 발생 메커니즘을 연구하였다. 그 결과 AE 발생 원인이 된 파괴면의 주향경사나 그 파괴를 발생시킨 주응력의 방향은 암반 내의 주 절리면의 주향·경사, 초기지압의 측정결과, AE 발생시의 공동 형상, 암반변위계의 측정결과 등과 합리적으로 대응하는 것으로 보고하였다(그림 8). 이것은 AE 계측이 지하양수발전소와 같은 비교적 지표에 가까운 토목분야의 암반구조물에도 기본적으로 적용이 가능하고, 안정성 평가에 유용하다는 것을 의미하는 것이다.

4.2 국내 기술개발 현황

국내에서 수행된 AE/MS에 관한 연구는 주로 실내암 측시험(이규상, 1996; 심현진과 이정인, 2000; 이상은, 1999; 허종석, 2001; 장수호, 2002)에 한정되어 이루어졌으나, 최근 모형실험(성백옥, 2004; 배성호 등, 2007; 천대성 등, 2007)에서 파괴 위치 및 파괴 메커니즘을 위한 연구가 수행되었다. 한편, 한국지질자원연구원(2006)에서는 국내의 독자적인 기술을 이용하여 AE/MS 계측 시스템을 개발하였으며, 지하연구실험실과 사면 등의 암반구조물에 대한 현장적용에 대한 연구를 수행하고 있다. 그림 9는 사면현장에 설치된 계측시스템의 모습이다.

또한, 국내에서도 암반구조물의 유지관리 및 방재에 대한 관심이 증가함에 따라 외국기술을 이용하여 지반 침하나 국부파괴에 대한 계측시스템을 이용한 사례가 보고되었다(Hong et al, 2006). 그 예로 캐나다 ESG의 기술을 도입하여 여수의 지하유류비축기지에서 스플링

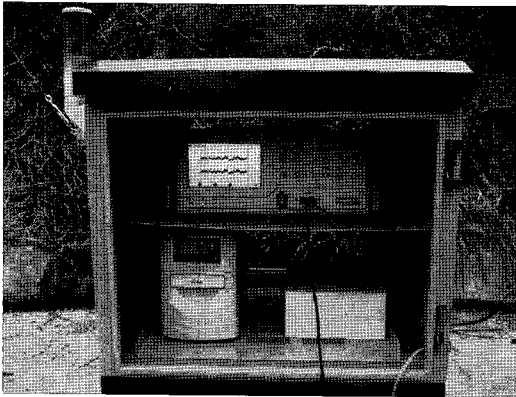


그림 9. 개발된 AE/MS 계측시스템 현장적용모습

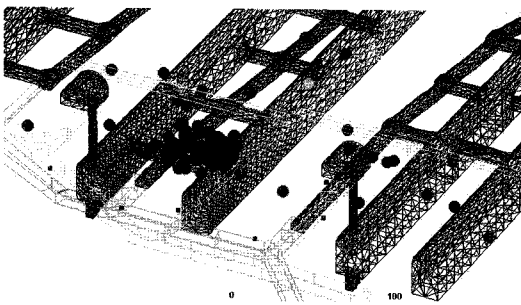


그림 10. 여수의 지하유류비축기지에서 측정된 MS 이벤트 (after Hong et al., 2006)

(spalling)의 발생여부를 감지하기 위한 MS 계측시스템이 도입되어 적용된 바가 있다(그림 10과 그림 11). 표 1은 현장에서 사용한 MS 계측시스템의 경고기준과 그에 따른 대처방안을 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 경고기준을 설정하기 위해서는 일정기간동안 계측을 통해 이벤트의 발생과 암반구조물의 손상 및 위험 정도에 관련되는 기준을 만들어야 한다. 또한 발생하는 이벤트의 음원에 대한 분석을 통해 시공 중인 암반구조물인 경우 발파나 드릴링과 작업에 의한 잡음여부를 판단해야 한다.

### 5. 결 언

AE는 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 적합한 기술로서, 많은 구조물의 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴검사 기술로서 이용되어 왔다. AE/MS 기법을 이용한 암반구조물 계측은 기존의 암반 변위계를 중심으로 한 계측에서 감지할 수 없었던 부분적인 암반파괴 또는 갑작스러운 파괴현상을 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 국내의 AE와 MS에 관한 연구는 주로 실내시험 위주의 연구가 대부분이어서, 센서와 자료 획득장치를 비롯한 계측장비의 개발,

작업	파형
Blasting	
Breaking	
Drilling	
Scaling	
Seismic event (Large)	
Seismic event (small)	

그림 11. 여수비축기지의 작업별 발생파형(after Hong et al., 2006)

표 1. 여수 유류비축기지에 적용된 ME 계측시스템의 경고기준과 조치사항 (Hong et al, 2006)

Event 발생지역 및 시간		Event 강도	강도별 Event 발생빈도		
			평상시 측정기준	1차 주의수준	2차 주의수준
발파영향권 이내	발파 후 3시간 이내에 발생하는 Event	-3.2~-2.2	30회 이내	> 30회	
		-2.2~-1.2	2회 이내	> 2회	
		-1.2~-0.2	1회 이내	> 1회	
		>-0.2	×	1회 이상	
	발파 후 3시간 이후에도 지속되는 Event (3시간 내 계측치)	-3.2~-2.2		11~20회	> 20회
		-2.2~-1.2		3~4회	> 4회
		-1.2~-0.2		2~3회	> 3회
		>-0.2		1~2회	> 2회
발파영향권 이외	발파와 무관하게 특정지역에서 발생하는 Event (3시간 내 계측치)	-3.2~-2.2	10회 이내	11~20회	> 20회
		-2.2~-1.2	2회 이내	3~4회	> 4회
		-1.2~-0.2	1회 이내	2~3회	> 3회
		>-0.2	×	1~2회	> 2회
조치사항			감리단 일일보고	감리 및 감독보고 후 주의 관찰	감리 및 감독보고 및 보강조치 수립

그리고 이를 활용한 다양한 연구를 통해 이미 상용화기술을 보유하고 있는 선진외국과의 기술적 격차가 존재한다. 이러한 이유로 최근까지 국내 현장에 적용된 기술은 모두 외국기술에 의존하였다.

최근 들어 암반구조물의 계측 및 유지관리의 중요성과 필요성이 점차 증가하는 추세를 감안하면, 많은 비용이 소요될 뿐 아니라 빠르고 지속적인 기술서비스를 받기 어려운 외국 기술을 국내 현장에 계속 사용하는 것은 문제가 있다. 따라서 암반구조물을 포함한 국가기간시설물의 안정적 유지관리를 위해서는 AE와 MS 계측기술의 국산화가 필요하고, 지금까지 수행되었던 실험실규모의 연구와 국내기술로 개발된 AE/MS 계측시스템을 바탕으로 다양한 현장적용을 통한 기술자립이 이루어져야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구’과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 배성호, 전석원, 박의식, 2007, 모형시험과 개별요소법을 이용한 단면 형상에 따른 공동 주변 취성파괴에 관한 연구, 터널과지하공간, Vol. 17, pp.389-410.
2. 성백옥, 2004, 이축압축 시험에 의한 원형공동주변 암석

의 취성파괴 특성, 석사학위논문, 서울대학교.

3. 심현진, 이정인, 2000, 암석 및 콘크리트의 압축변형거동과 미소파괴음 측정에 관한 연구, 터널과지하공간, Vol. 10, pp.59-69.
4. 이규상, 1996, 암석의 이방성 속도를 고려한 미소파괴음 발생의 3차원 음원추적, 석사학위논문, 서울대학교.
5. 이상은, 1999, Acoustic emission에 의한 암석의 파괴원위 위치 결정과 미소파괴 메커니즘 관한 연구, 공학박사학위논문, 강원대학교.
6. 장수호, 2002, 응력수준에 따른 암석의 손상특성과 심부 터널 주변 암반 손상영역의 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교.
7. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원, 2007, 취성파괴수준과 파괴개시시점에 관한 진삼축 모형실험연구, 터널과지하공간, Vol.17, pp.128-138.
8. 허종석, 2001, 삼축 압축하에서 암석의 미소파괴음 측정과 변형파괴 특성, 공학박사학위논문, 서울대학교.
9. 한국지질자원연구원, 2006, 지하구조물의 통합 안전감시 시스템 개발 연구, p.152.
10. ASC, 2005, Workshop on microseismic monitoring systems and software.
11. Cai, M., Kaiser, P.K., Morioka, H., Minami, M., Maejima, T., Tasaka, Y. and Kurose, H., 2007, FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavation, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol.44, pp.550-564.
12. Eberhardt, E., 1998, Brittle rock fractures and progressive damage in uniaxial compression, Ph.D dissertation, University of Saskatchewan.
13. Ge, M., 2005, Efficient mine microseismic monitoring, International Journal of coal geology, Vol.64, pp.44-56.
14. Geiger, L., 1912, Probability method for the determination of earthquake epicentres from the arrival time



- only. Bull. St. Loui Univ. Vol.8, pp.60-71.
15. Hardy, H.R., 1977, Emergence of Acoustic Emission/ Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics, Proc. of 1st Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic structures and Materials, Pennsylvania University, Tran Tech Publication, pp.13-31.
  16. Hirata, A., Kameoka, Y. and Hirano, T., 2007, Safety management based on detection of possible rock bursts by AE monitoring during tunnel excavation, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.40, pp.563-576.
  17. Holocmb, D.J. and Costin, L.S., 1986, Detecting damage surface on brittle materials using acoustic emissions, Trans. of the ASME, Vol.53, pp.536-544.
  18. Hong, J.S., Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y., Choi, Y.T. and Park, Y.J., 2006, Microseismic event monitoring of highly stressed rock mass around underground oil storage caverns, Tunnelling & Underground Space Technology, No.214.
  19. Ishida, T., 1999, An Introduction to Acoustic Emission of rock, Kinmiraiasha Nagoya, p.213.
  20. Leighton, F., Blake, W., 1970, Rock noise source location technique, USBM RI 7432.
  21. Mansurov, V.A., 1994, Acoustic emission from failing rock behavior, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.27, pp.173-182.
  22. Nelder, J.A., Mead, R., 1965, A simplex method for function minimization, Comput. J., Vol. 7, pp. 308-313.
  23. Prugger, A., Gendzwill, D., 1989, Microearthquake location: a non-linear approach that makes use of a simplex stepping procedure, Bull. Seismol. Soc. Am. Vol.78, pp.799-815.
  24. Seto, M., Utagawa, M., Katsuyama, K., and Kiyama, T., 1998, In Situ stress determination using AE and DRA techniques, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.35, pp.4-5.

### 천대성



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
 Tel: 042-868-3248  
 E-mail: cds@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

### 박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
 Tel: 042-868-3098  
 E-mail: espark@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

### 정용복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
 Tel: 042-868-3097  
 E-mail: ybjung@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

### 박철환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
 Tel: 042-868-3244  
 E-mail: cwpark@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

### 신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
 1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사  
 Tel: 042-868-3242  
 E-mail: jhsynn@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원