

AE/MS 모니터링시스템개발과 적용연구

Development of AE/MS monitoring system and its application

천대성¹⁾, Dae-Sung Cheon, 정용복¹⁾, Yong-Bok Jung, 박찬²⁾, Chan Park, 신중호²⁾, Joong-Ho Synn, 장현익³⁾, Hyun-Ick Jang

- 1) 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.
- 2) 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원, Principal Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.
- 3) 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Expressway Corporation

SYNOPSIS : Acoustic emission(AE)/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. In this study, AE/MS monitoring system, which consists of sensor, data acquisition and operation program, is constructed with domestic technology. To verify and optimize the developed system, we are now carrying out the field application at an underground research laboratory and the developed AE/MS monitoring will be used in detecting of seismic events with various scales.

Key words : Acoustic emission, Microseismic, precursor, damage, monitoring system

1. 서 론

미소파괴음(Acoustic Emission, AE)은 응력의 재분배에 의한 균열이 생성될 때 나오는, 순간적인 에너지 방출에 의한 탄성파이다. 이 미소파괴음은 지진파와 같이 재료 내에서 P파와 S파가 섞여 전파되다가 재료의 표면에 도달하면 표면파의 형태로 전파된다. 미소파괴음은 금속분야에서 사용되기 시작하였으며, 미소파괴음은 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 뛰어난 특성을 보여 현재에는 항공기, 교량, 파이프 등 많은 구조물의 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴 검사기술로서 이용되고 있다.

지반구조물에의 활용은 1940년대 광산의 안정성 연구에서 시작되었으며(Obert and Duvall, 1945), 현재에는 터널과 사면, 유류비축기지의 적용뿐 아니라 지열개발과 초기응력측정의 수압파쇄, 방사성폐기물 처분장에서의 열균열 등에 이용되고 있다(Ishida, 1999).

특히 취성(brittle)을 띠는 암반구조물은 파괴되기까지 작은 변형이 발생하기 때문에 일반적으로 사용되고 있는 변위계측이나 응력계측으로는 파괴의 전조현상을 포착하기 어렵고, 이로 인해 국부적인 파괴

나 암반사면 등과 같은 구조물에서 파괴에 대한 사전예측이 어려운 현실이다. 그러나 이와 같은 암반구조물 역시 손상이 진행됨에 따라 그 내부에서 미세한 균열이 발생하여 에너지를 방출하기 때문에 미소파괴음이나 미소지진음(microseismic event, MS event)의 파형을 측정할 수 있는 경우 암반구조물의 파괴를 사전에 예측할 수 있으며, 초동이 명확한 미소파괴음이나 미소지진음의 경우 미세한 파괴위치지점과 함께 파괴메커니즘의 규명도 가능하다. 이에 본 연구에서는 국내기술을 이용하여 미소파괴음이나 미소지진음을 모니터링할 수 있는 AE/MS 모니터링시스템을 개발하였다. 개발된 AE/MS 모니터링시스템은 크게 센서부, 계측부, 운영프로그램으로 구성되어 있다. 개발된 시스템의 적용성 평가를 위하여 현장적용을 수행하였으며, 현장적용으로부터 얻어진 결과를 외국기술과의 비교를 통해 개발 시스템의 신뢰성과 측정유효성 설정 등에 대한 적정성, 그리고 작업별 파형특성을 알아보았다.

2. 미소파괴음과 국내외 개발현황

2.1 기본이론

미소파괴음 신호는 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 미소파괴음이다(Hardy, 1977).

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

(1) 미소파괴음 횟수(AE count): 미소파괴음 신호가 검출한계(threshold)를 넘어선 횟수로 일반적으로 큰 타격음들은 작은 타격음들에 비해 검출한계를 넘어서는 횟수가 많아지므로, 이러한 미소파괴음 횟수는 신호의 강도(intensity)에 대한 평가기준이 된다.

(2) 진폭(amplitude): 미소파괴음 신호에서의 최대진폭을 말하며, 이는 보통 미소파괴음을 생성하는 재료의 음원의 강도와 관련된다. 측정은 보통 로그 단위(decibels, dB)로 기록되어 큰 신호와 작은 신호 모두 정확한 측정을 할 수 있게 한다. 측정되는 진폭에 영향을 주는 수많은 인자들로 인해 진폭 분석은 동일한 증폭수준과 동일 형태의 센서를 사용하여 이루어져야 한다.

(3) 지속시간(duration): 미소파괴음 신호가 제일 처음 검출한계를 지나 마지막으로 검출한계를 지날 때까지의 시간으로, 잡음 필터링 등에 유용하게 쓰인다.

(4) 오름시간(rise time): 미소파괴음 신호가 검출한계를 초과한 후 최대진폭 값에 도달하는데 걸리는 시간으로, 음원과 센서 사이의 파 전파과정에 의해 제어되기 때문에 미소파괴음 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하기 위한 목적으로 많이 사용된다.

(5) 미소파괴음 에너지(AE energy): 지속시간 동안의 미소파괴음 파형 포락선 밑의 면적에 해당하는 측정값으로, 지속시간과 진폭에 민감하고, 검출한계 설정값이나 주파수에는 덜 의존적이기 때문에 미소파괴음 횟수보다 더 많이 사용된다.

그림 1은 미소파괴음 측정에 관한 기본과정을 도식화한 것으로, 재료 내부의 미소파괴로 인해 발생된 탄성파는 센서를 통해 신호화되어 계측장비로 전송된다. 발생된 미소파괴음과 미소지진음은 그림 2와 같이 계측영역의 주파수 대역에 따라 나눌 수 있으며, 미소파괴음을 이용하는 경우 최대 10^3 m^3 까지 계측이 가능한 것으로 알려져 있고, 미소지진음은 이보다 더 광역의 범위(약 10^5 m^3)까지 계측이 가능한 것으로 알려져 있다(ASC, 2005; Cai et al., 2007). 이들에 사용되는 센서는 미소파괴음의 경우 압전소자(piezoelectric element)를 이용한 센서가 사용되며, 미소지진음은 가속도계(accelerometer)나 지오폰(geophone)을 주로 사용하고 있다. 가속도계는 넓은 주파수 대역에 사용하기 적합하나 낮은 주파수 대

역에 대해서는 감도가 좋지 않다. 반면 지오폰은 낮은 주파수 대역에 사용이 가능하지만 1 kHz이상의 주파수 대역에는 적절하지 않는 것으로 알려져 있다. 이러한 특징으로 인해 광범위한 영역에 대해서 미소지진음에 의한 전반적인 계측을 수행하고, 특정관심영역에 대해서는 미소파괴음에 의한 정밀한 계측이 수행되기도 한다.

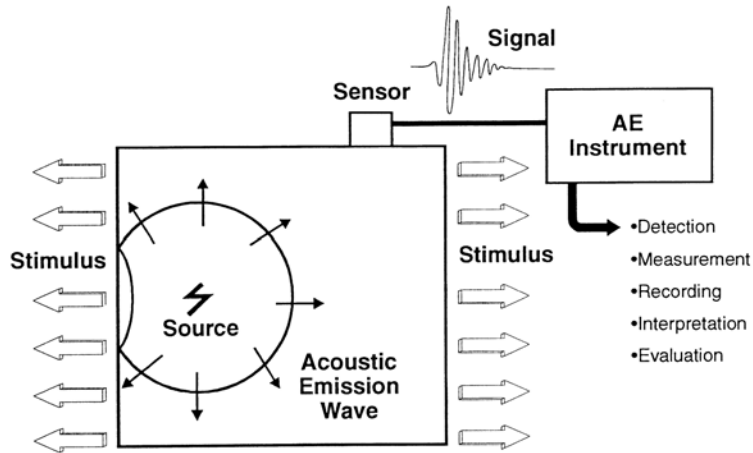


그림 1. 미소파괴음의 기본 측정과정

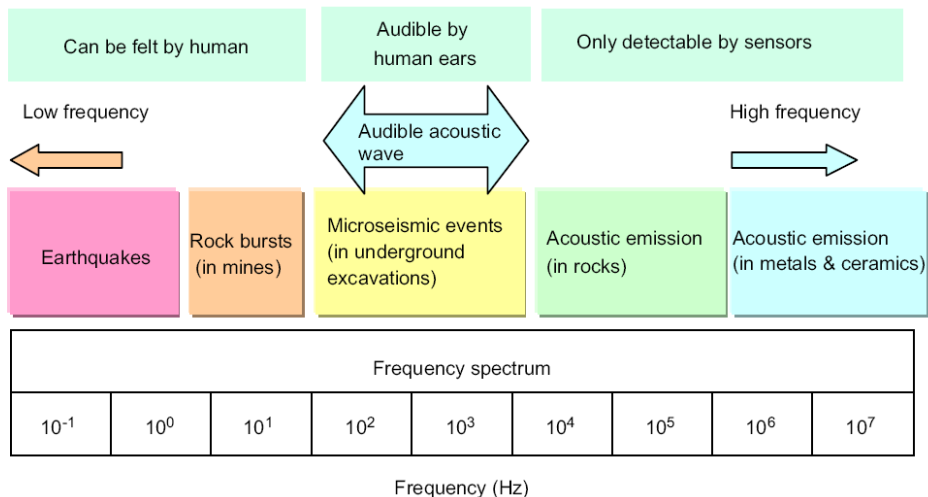


그림 2. 주파수영역과 AE/MS 기술의 적용범위(Cai et al., 2007)

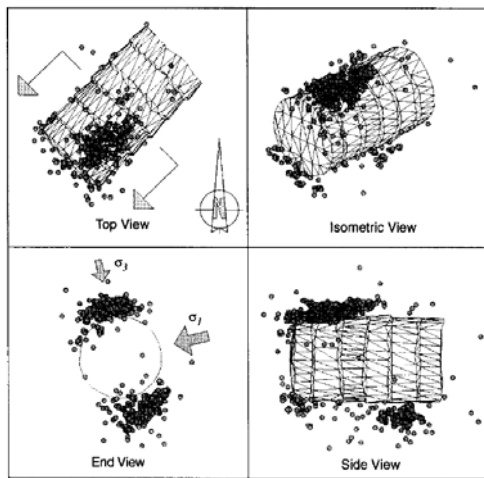
2.2 국내외 기술개발 현황

2.2.1 국외 기술개발 현황

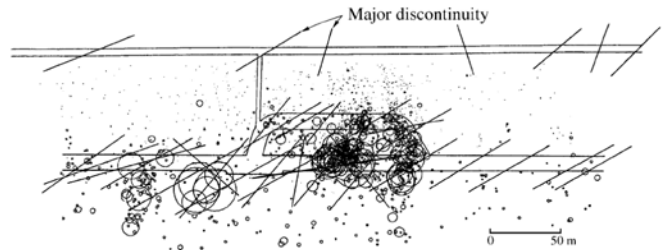
미소파괴음에 관한 연구는 1940년대부터 광산의 록버스트(rock burst) 발생예측연구에서 시작된 이래, 응력증가에 따른 미소파괴음 변수 분석을 통한 암석의 변형단계, 미소파괴음 발생과 암석의 변형관계 분석(Mansurvo, 1994; Eberhardt, 1998 등), 카이저효과를 이용한 현지응력 측정에 관한 연구(Holcomb, 1983; Seto, 1998) 등의 실내시험이 수행되어 왔다.

또한 미소파괴음 또는 미소지진음을 이용한 계측기술은 캐나다, 영국, 일본, 유럽 등 선진국에서 이미 URL(underground research laboratory)이나 지하발전소, 터널, 사면 등에 적용하고 있다(그림 3). 특히 캐나다의 경우 1980년대 후반부터 1990년대까지 대규모의 록버스트 연구가 캐나다 연방정부, 온타리오주 정부 및 주요 광산회사의 후원하에 수행되었으며, 순수한 연구를 넘어 지하구조물의 안전과

지반제어를 위한 기본 모니터링 수단으로 활용되었다. 더욱이 캐나다는 URL 시험터널에서 발생한 파괴 현상과 미소파괴음 계측결과를 비교분석하여 고심도에서 발생하는 취성파괴에 대한 파괴기구에 대한 연구를 수행하였다. AE/MS 기술은 지반공학분야와 지구물리탐사분야를 융합한 기술로서 방재에 대한 중요성과 융합/복합기술의 발전으로 인해 지속적으로 발전하고 있는 추세에 있다.



(a) 캐나다 지하연구실험실 계측사례
(after Martin et al., 1997)



(b) 일본 Kan-etsu 터널 계측사례
(after Hirata et al., 2007)

그림 3. 국외 AE/MS 기술 적용사례

2.2.2 국내 기술개발 현황

국내에서 수행된 미소파괴음에 관한 연구는 주로 실내압축시험(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 파괴위치 및 파괴기구를 위한 연구가 수행되었다. 한편, 한국지질자원연구원(2006)에서는 국내의 독자적인 기술을 이용하여 AE/MS 모니터링시스템을 개발하였으며, 지하연구실험실(URL)과 사면 등의 지반구조물에 대한 현장적용에 대한 연구를 수행하고 있다.

또한, 국내에서도 지하구조물의 유지관리 및 방재에 대한 관심이 증가함에 따라 외국기술을 이용하여 지반침하나 국부파괴에 대한 모니터링 시스템을 이용한 사례가 보고되었다. 그 예로 캐나다 ESG의 기술을 도입하여 여수의 유류비축기지에서 발생한 취성파괴에 의한 스폐링을 모니터링하기 위한 MS 모니터링시스템이 도입되어 적용된 바가 있다(그림 4와 그림 5).

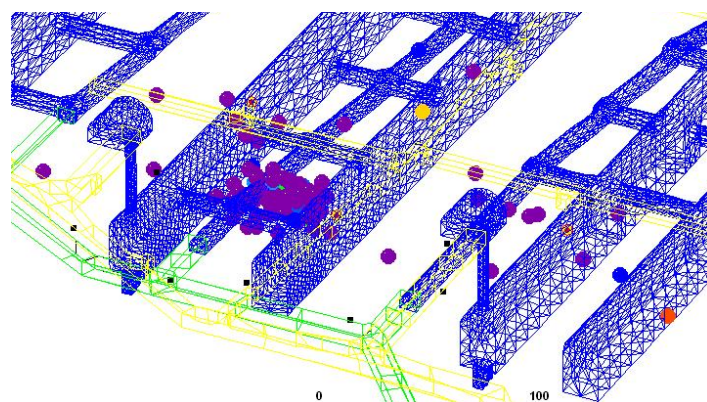


그림 4. 여수비축기지의 계측된 MS 모습(after Hong et al., 2006)

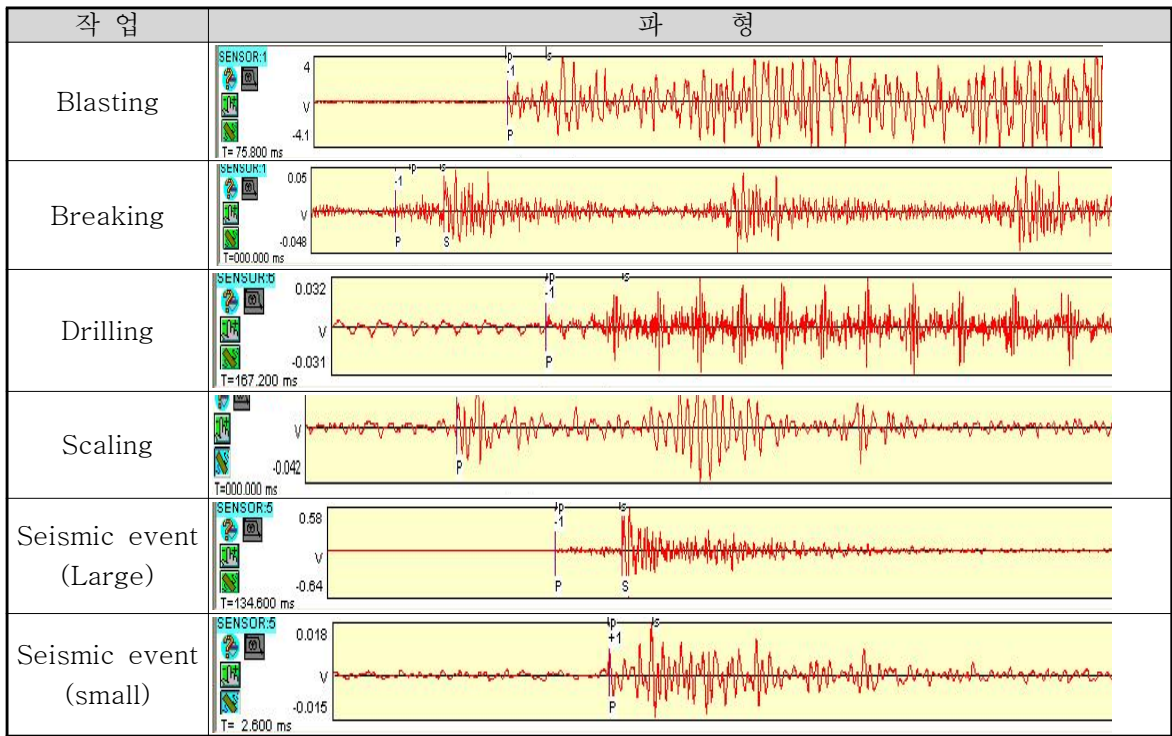


그림 5. 여수비축기지의 작업별 발생파형(after Hong et al., 2006)

3. AE/MS 모니터링시스템 개발

3.1 시스템 구성

AE/MS 모니터링시스템은 센서, 자료획득장치, 송수신장치의 세 부분과 자료처리를 위한 운영 프로그램으로 구성되어 있다(그림 6). 미소지진음의 신호를 입력받는 센서는 일방향 가속도계를 선정하였으며, 신호를 처리하는 자료획득장치는 범용과 특정 주파수의 두 가지 형태로 구성하였다. 그리고 획득된 자료는 송수신장치를 통해 실시간으로 이메일과 휴대폰으로 전송이 가능하도록 하였다.

AE/MS 모니터링시스템을 현장에 적용하는 경우, 현장조건과 계측범위, 목적 등에 따라 AE 모니터링 시스템과 MS 모니터링시스템을 동시에 사용하거나 한 종류만을 사용하게 된다. 또한 건설, 토목 현장에서 사용되기 때문에 내구성과 함께 지속적인 전원 공급이 가능해야 하며, 이동과 설치가 쉽도록 개발·제작되어야 한다. 위와 같은 요구조건을 만족시키기 위해 개발된 모니터링시스템은 내구성과 저전력의 전원사용을 위해 소형의 산업용 컴퓨터를 이용하였으며, 지속적인 전원공급은 태양전지판과 재충전이 가능한 배터리를 사용하였다. 또한 AE와 MS를 겸용으로 사용할 수 있는 AE/MS 모니터링시스템과 AE 전용 또는 MS 전용 모니터링시스템으로 구분하여 개발하였다. 현재 개발된 AE/MS 모니터링시스템은 12채널까지 측정이 가능하도록 구성되어 있으며, 필요에 따라 채널 수의 증대가 가능하다.



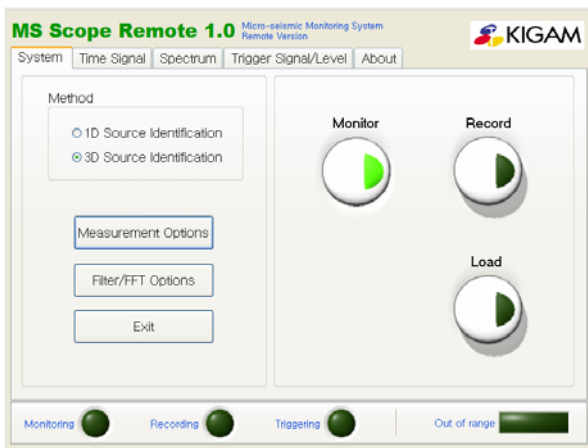
그림 6. AE/MS 겸용 모니터링시스템

3.2 운영프로그램

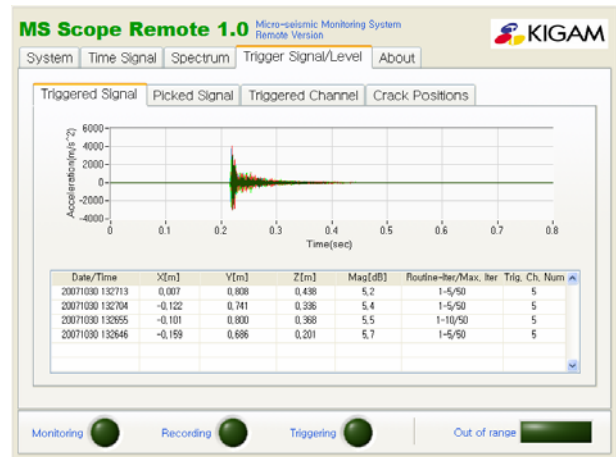
지반구조물에서 발생하는 AE/MS는 복잡한 파형을 보일 수 있으며, 이는 일반적으로 과도한 배경잡음에 기인하는 경우가 많다. 따라서 효율적인 모니터링을 위해서는 자료처리방식이 매우 중요한 작업이 된다. 본 연구에서는 계측된 자료의 처리를 위해 Labview를 이용하여 운영프로그램을 개발하였으며, 현장적용성을 위해 소형계측장비에 적용할 수 있도록 하였다. 또한 AE/MS 자료처리를 위해 다음과 같이 계측자료 필터링, 자동 picking, 트리거 방법선택기능, 그리고 음원추적기능 등을 사용하였다.

계측된 AE/MS 신호와 배경 잡음의 구분을 위해 FFT 기능을 이용하여 시간신호 분석과 함께 주파수 분석을 수행하여, 잡음에 대한 필터링이 가능하도록 하였다. 그리고 트리거 기능은 기존의 일정 크기 이상을 검출하는 단순레벨 트리거 방식에 윈도우 pickgng방법을 추가하여 트리거기능을 강화하였다. 발생한 미소과속도의 위치는 일반적으로 많이 사용하는 최소자승법을 이용하여 결정되도록 하였으며, 발생한 음원의 크기는 최대입자가속도와 RMS를 이용하여 결정되도록 하였다. 또한 음원위치는 1차원과 3차원으로 알고리즘을 구분하여 음원계산의 신뢰성을 향상하였다. 개발된 프로그램의 주요 기능과 화면은 아래와 같다(그림 7).

- 하드웨어 및 채널 설정
- 음원검출기능 : 1차원, 3차원 검출알고리즘
- 트리거 기능
 - 단순레벨 트리거
 - 단순레벨 트리거 검출 + 최대진폭에 대한 지연시간검출
 - window picking에 의한 지연시간 검출 : 최대값/RMS/Squared sum 비
- AE/MS 발생위치 디스플레이
- 원격감시 및 실시간 계측기능
- 후처리기능 : Filtering, FFT, 자동/수동 트리거에 의한 음원재계산
- 3단계 알람기능과 SMS 및 E-mail 발송



(a) 하드웨어 설정 및 음원결정 화면

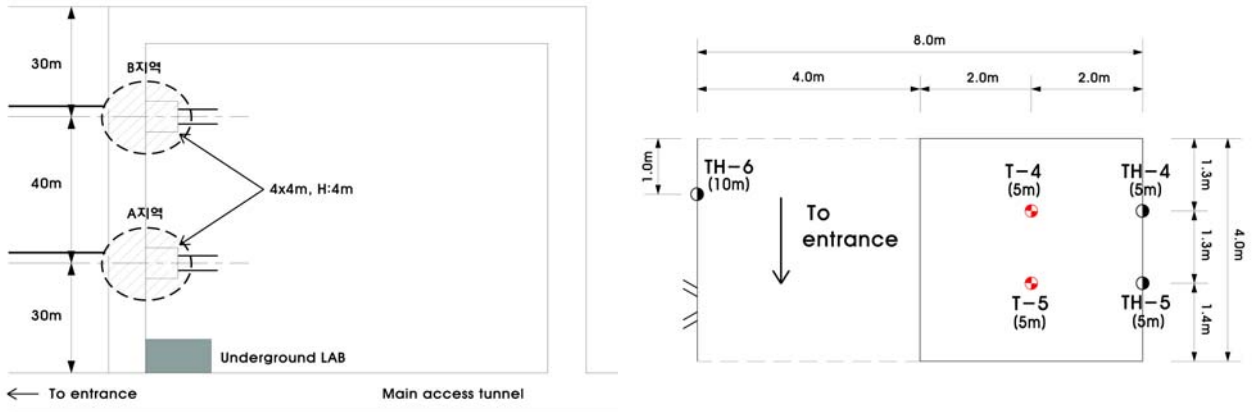


(b) 계측파형과 음원계산 화면

그림 7. AE/MS 운영프로그램

4. 현장적용

개발된 모니터링시스템의 적용성 평가를 위해 토피고가 500 m의 고심도 조건의 지하연구실험실(Underground Research Laboratory, URL)에 총 8개의 일방향 가속도계를 설치하였다. 사용된 일방향 가속도계는 캐나다 ESG사의 A1030으로서 30V/g의 민감도를 갖는다. 센서의 설치를 위해서 접근 가능한 구간을 중심으로 NX크기의 심도 5 m의 수직공(T-1, T-2, T-4, T-5)과 수평에서 15도 하향을 갖는 경사공(TH-1, TH-2, TH-4, TH-5)을 각각 4개씩 천공하였다. 암반 내 센서의 고정은 레미탈을 이용한 그라우팅을 통해 구현되었으며, 미소지진음의 전파속도는 현장탄성과 속도시험을 통해 결정하였다.



(a) 지하연구실험실 실험갱도 모식도

(b) 센서설치를 위한 B지역 시추위치도

그림 8. 미소지진음 센서 설치위치

4.1 현장탄성과 속도측정

탄성과속도는 지반 중에 전파되는 인공지진파의 전파속도에 의해 지반의 성상을 조사하는 방법으로, 관측되는 지진파로는 종파(P파)와 횡파(S파)가 있다. 현장탄성과 전파속도는 암석강도와 관련되는 암석 자체의 속도뿐 아니라 불연속면의 빈도에 영향을 받고 있으므로, 현장암반을 대상으로 하는 현장탄성과 속도의 측정은 미소지진음의 전파속도를 결정하기 위해 필요한 시험이다.

현장탄성과 측정은 OYO사의 Handy viewer인 Mcseis-3를 사용하였으며, 측정방법은 그림 9와 같이 지오폰을 일직선으로 배열하여 측정하고자 하는 암반에 고정시킨 후 본체에 연결하고, 해머를 본체의 트리거 커넥터에 연결한 다음 타격하여, 지오폰과 타격지점사이의 거리와 시간차를 이용하여 결정한다. 그림 10과 그림 11은 현장탄성과 파형의 한 예와 시험모습을 나타낸 것이다. 측정된 탄성과속도는 약 6,120 m/s로 상대적으로 빠른 전파속도를 나타내고 있으나, 이는 측정위치의 암반상태가 매우 양호하기 때문인 것으로 판단된다.

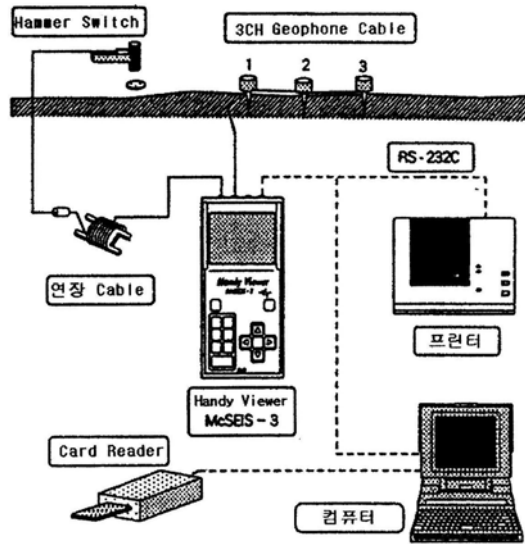


그림 9. 현장탄성과 측정장치의 연결모습

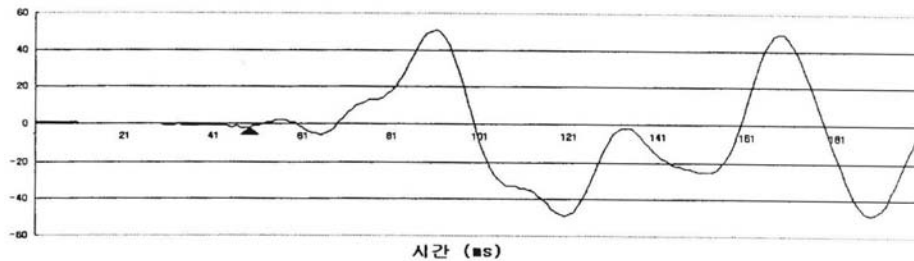


그림 10. 현장탄성과 측정파형의 예



그림 11. 현장탄성과 측정용 지오폰과 측정모습

4.2 미소지진음 센서설치 및 계측

미소지진음 측정을 위해 캐나다 ESG사의 일방향 가속도계(A1030)를 사용하였으며, 제한된 공간에서의 3차원 계측과 효율적인 충진을 위하여 15° 하향수평공과 수직공을 천공하고 센서를 설치하였다. 그림 12는 센서설치과정을 나타낸다. 제작된 MS 모니터링시스템을 현장에 설치한 후, 주변 잡음에 대한 사전분석을 통해 실제 신호와 잡음을 구분할 필요가 있다. 그림 13은 기본 잡음에 대한 파형으로, 잡음은 최대 0.008 m/s^2 이하로 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 표 1은 지하연구실험실에 설치된 MS 모니터링시스템의 계측에 사용된 설정값을 요약한 것이다.



(a) 센서부착



(b) 센서삽입



(c) 충전



(d) 설치 후 모습

그림 12. 미소지진음 센서 설치모습

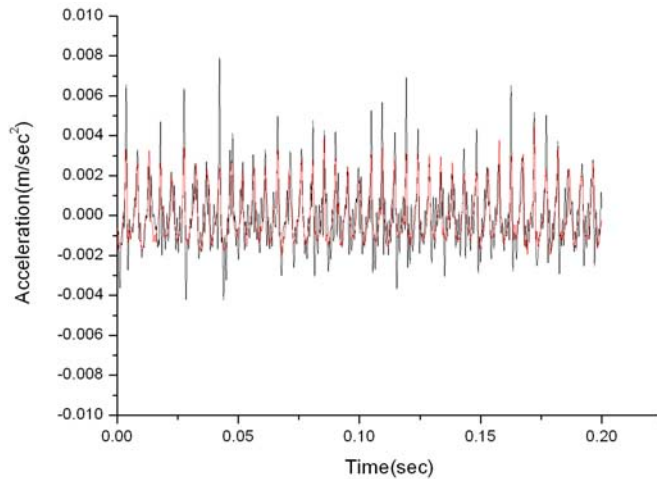


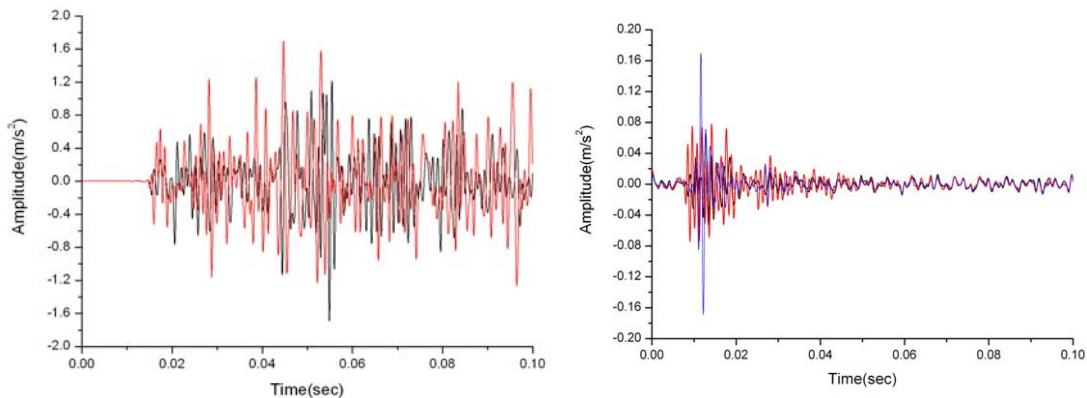
그림 13. MS 모니터링시스템 잡음설정

표 1. MS 모니터링시스템 설정값

항목	설정값	항목	설정값
감도 (mV/g)	30,000	트리거 기울기	rising
샘플링속도 (kHz)	50	기록시간 (ms)	100
버퍼사이즈	10,000	필터	Bandpass(100-1000)
트리거 레벨 (m/s ²)	0.2	최소 트리거채널수	6
프리트리거 (ms)	10	최소 반복회수	100

MS 모니터링에 있어 잡음에 대한 분석과 필터링은 계측의 정밀도와 신뢰도 측면에서 매우 중요한 작업으로, 계측에 앞서 이에 대한 평가가 반드시 수행되어야 한다. 개발된 MS 모니터링시스템이 적용된 지하연구실험실에서는 발파작업과 해머타격작업에 대한 파형을 획득하였으며, 이 결과를 캐나다 ESG의 Paladin과 Hyperion에 의해 계측한 결과와 비교하여 연구원에서 개발한 제품의 신뢰성과 측정옵션 설정의 적정성 등을 알아보았다. 또한 여러 작업에 대한 파형특성을 분석함으로써 향후 계측될 MS 이벤트에 대한 해석자료로 사용할 예정이다.

그림 14 (a)는 충주 URL에서 발파작업으로부터 생성된 파형을 계측한 그래프이며, 그림 14 (b)는 해머타격에 의해 생성된 파형을 계측한 그래프이다. 발파작업에서 발생한 파형의 경우 계측시간으로 설정한 10 ms 이상까지 파형이 계측되고 있으며, 계측된 파형의 최대 진폭은 1.6 m/s²(약 5 V)이며, 계측 시간동안 지속적으로 높은 진폭을 갖는다. 이에 반하여 해머타격의 경우 짧은 시간동안 최대값에 도달하고, 파형의 유지시간은 2~3 ms로 나타났다.



(a) 충주 URL의 발파작업시 발생된 파형

(b) 충주 URL의 해머타격시 발생된 파형

그림 3.6.17 작업별 MS 계측 파형

2절의 그림 5는 캐나다 ESG사가 여수비축기지에 설치하여 작업별 발생파형을 계측한 것으로 발파작업에서의 계측한 파형의 최대진폭은 4V이며, 파형의 형태는 지하연구실험실과 유사하게 계측시간동안 지속적으로 높은 진폭을 보임을 알 수 있다. 그리고 파쇄(breaking) 또는 드릴링(drilling)작업에서 발생한 파형은 주기적으로 발생하고 진폭은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 최대 관심대상인 미소파괴음의 경우 해머타격과 같이 짧은 시간동안 발생하며, 일반적으로 초기에 최대 진폭에 도달한 후 감쇠하는 형태를 보였다.

국내기술로 개발한 MS 모니터링시스템으로부터 계측된 파형자료와 외국선진기술을 적용하여 계측된 여수비축기지의 파형을 비교분석한 결과, 개발된 장비가 신뢰도 있는 계측파형을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 또한 작업에 따라 발생한 파형을 사전에 분석함으로써 향후 계측되는 파형을 통해 굴착과 관련된 일련의 작업에 의한 미소파괴음인지 국부적인 파괴에 의해서 발생한 미소파괴음인지를 구별할 수 있는 기본정보를 획득할 수 있었다. 개발된 시스템의 적용성과 신뢰성 등을 보다 향상시키기 위해 다양한 지반구조물에 대한 현장적용과 함께 실내시험을 병행한 연구를 수행할 예정이다.

5. 결론

지반구조물은 손상이 진행됨에 따라 그 내부에서 미세한 균열의 발생하고 이로 인해 미소파괴음(AE)나 미소진음(MS event)를 발생시키며, 이들을 계측함으로써 지반구조물의 파괴를 사전예측할 수 있다.

본 연구에서는 국내기술로 AE/MS 모니터링시스템을 개발하였다. 개발된 AE/MS 모니터링시스템은 센

서, 자료획득장치, 송수신장치의 세 부분과 자료처리를 위한 운영 프로그램으로 구성되어 있다. 미소지진음의 신호를 입력받는 센서는 일방향 가속도계를 선정하였으며, 신호를 처리하는 자료획득장치는 범용과 특정 주파수의 두 가지 형태로 구성하였다. 그리고 획득된 자료는 송수신장치를 통해 실시간으로 이메일과 휴대폰으로 전송이 가능하도록 하였다. 계측된 자료의 처리를 위한 운영프로그램은 Labview를 이용하여 개발하였으며, 계측자료 필터링, 자동 picking, 트리거 방법선택기능, 그리고 음원추적기능 등의 기능을 갖는다.

개발된 시스템의 현장적용성과 신뢰성을 평가하기 위하여, 토피고 500 m의 지하연구실험실에 설치하고, 발파작업과 해머타격 등으로부터 계측된 파형자료와 외국장비로부터 계측한 파형을 비교분석하였다. 그 결과, 측정에 사용된 옵션설정의 적정성과 개발된 장비가 신뢰도 있는 계측파형을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 또한 작업에 따라 발생한 파형을 사전에 분석함으로써 향후 계측되는 파형을 통해 굴착과 관련된 일련의 작업에 의한 미소파괴음인지 국부적인 파괴에 의해서 발생한 미소파괴음인지를 구별할 수 있는 기본정보를 획득할 수 있었다.

참고문헌

1. 배성호, 전석원, 박의섭(2007), “모형시험과 개별요소법을 이용한 단면 형상에 따른 공동 주변 취성파괴에 관한 연구”, 터널과지하공간, Vol. 17, pp.389-410.
2. 성백욱(2004), “이축압축 시험에 의한 원형공동주변 암석의 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 파괴원 위치 결정과 미소파괴 메커니즘 관한 연구”, 공학박사학위논문, 강원대학교
6. 장수호(2002), “응력수준에 따른 암석의 손상특성과 심부터널 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 안전감시시스템 개발 연구”, p152.
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. 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.
14. 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.
15. 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.

16. 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.
17. Ishida, T. (1999), *An Introduction to Acoustic Emission of rock*, Kinmirraisha Nagoya, p213.
18. Mansurov, V.A.(1994), "Acoustic emission from failing rock behavior", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 27, pp. 173-182.
19. Martin, C.D., Read, R.S. and Martino, J.B.(1997), "Observation of brittle failure around a circular test tunnel", *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, Vol. 34, pp. 1065-1073.
20. Obert, L. and Duvall, W. (1945), "Microseismic method of prediction rock failure in under ground mining, Part II . Laboratory experiments", U.S. Bur. of Min., Rep. Invest. 3803. p14.
21. 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