

Tunnelling Technology

미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술



천대성
한국지질자원연구원
선임연구원

1. 서론

대규모 지반구조물을 굴착하는 경우 구조물의 안정성을 감시하면서 시공을 진행하는 것이 중요하다. 지반구조물의 안정성 감시에는 보통 변위계를 중심으로 한 계측이 행하여져 왔지만, 이와 같은 변위 계측은 사전적인 파괴 예측과 함께 부분적으로 발생하는 지반파괴를 예측하기 어렵다. 또한 구조물의 안정성에 중대한 영향을 주는 지반거동에 관해서도 변위의 측정을 중심으로 한 종래의 측정만으로 충분하다고 말할 수 없다.

미소파괴음(Acoustic Emission, AE)과 미소지진음(Microseismic event, MS event)은 응력의 재분배에 의해 균열이 생성될 때 나오는 순간적인 에너지 방출에 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 있다(Ishida, 1999). 미소파괴음은 금속분야에서 처음 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.

미소파괴음을 이용한 지반구조물 안정성 감시는 주로 광산의 록버스트(rock burst)의 예지나 예측을 목적으로 활발하게 수행되고 있으며, 단층면 해석이나 모멘트텐서 해석을 통해 파괴메커니즘의 규명에도 활용되었다. 그러나 이러한 적용은 지하 1,000m를 넘는 심부나 이에 상응하는 높은 지압 조건을 가지는 광산을 주된 대상으로 하고 있다. 이에 반하여 지표에 가까운 토목분야의 구조물에서 단층면 해석 등을 수행한 미소파괴음의 측정 사례는 드물게 보고되고 있다. 이는 천부에 위치한 지반구조물은 지표에 가까워 지압이 작고, 또 굴착되는 지반구조물의



규모가 광산과 비교해서 작기 때문이다. 또한 신중한 시공과 충분한 보강이 수행되어 록버스트와 같은 현저한 암반파괴가 발생하는 경우는 드물고, 3차원적인 발생위치의 결정이나 단층면 해석을 적용할 수 있는 큰 규모의 미소파괴음의 발생이 적기 때문이다. 그러나 비교적 좁은 영역에서 미소한 파괴를 대상으로 한 고감도의 미소파괴음 측정을 수행할 경우 지표에 가까운 지반구조물에 있어서도 미소파괴음 측정은 가능하다. 또한 웨이브가이드를 이용한 미소파괴음을 이용하거나 상대적으로 저주파대역을 측정하는 경우 그 활용성은 더욱 증가할 것이다. 최근 일본과 유럽에서 지하양수발전소, 터널, 사면 등에 적용한 사례(Ishida, 1999; Shiotani, 2006; Hirata 등, 2007; Dixon과 Spriggs, 2007; Sefanute 등, 2009)는 이러한 예를 잘 보여준다.

본 보고에서는 미소파괴음을 이용한 계측기술과 이 기술이 지반구조물의 안정성 감시를 위해 활용된 국내외 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 미소파괴음 계측기술

2.1 비파괴시험으로서 미소파괴음 시험

비파괴시험(Nondestructive testing, NDT)은 소재나 제품 등 시험대상을 파괴하거나 변화시키지 않고, 이들의 상태나 내부 구조를 평가하기 위하여 실시하는 시험을 말한다. 비파괴시험에는 미소파괴음 시험(acoustic emission testing, AET or AT)외에 육안시험(VT), 초음파탐상시험(UT), 방사능투과시험(RT), 침투탐상시험(PT) 등이 있다. 이 시험을 실시하는 목적은 크게 재료의 특성화, 균열 검출, 공정 모니터링으로 나눌 수 있으며 궁극적으로 제품 등이 사용 중에 파손되어 인명피해를 발생시키거나 환경 오염을 일으키는 중대한 사고를 사전에 예방하는 데 있다(음향방출시험II, 2010). 미소파괴음 시험은 다른 비파괴 시험과 달리 반향신호 등을 이용하여 균열을 검출하는 것이 아닌 재료내부에서의 발생신호를 이용하는 것이 큰 특징이다. 미소파괴음 시험과 다른 비파괴시험과의 차이를 표 1에 제시하였다.

표 1. AET시험과 다른 비파괴시험과의 차이점

AET	Most Other NDT Methods
Detects growth/movement of flaw	Detect presence of flaw
Relates to stress field at flaw	Relates to size and shape of flaw
Intimate relationship to material failure	Indirect relationship to material failure
Best suited for global monitoring	Best suited for local scanning
Each loading is unique	Inspections are easier to repeat
Less intrusive, easier access	More intrusive, harder access
Applicability, technique depend on material	Applicability, technique depend on material
Less dependent on local geometry	More dependent on local geometry
Principle Limitations: (1) Unstressed flaws will not emit; (2) Dependence on stress History; (3) Wave attenuation; (4) Noise	Principle Limitations: (1) Close access required; (2) Dependence on surface condition, geometry; (3) Some methods are limited to surface-breaking flaws.

2.2 미소파괴음의 역사

소리를 이용하여 예측하거나 경고를 알려주는 기술은 아주 오래전부터 사용되어 왔다. 그림 1은 선사시대에 생활했던 선조들이 소리를 이용하여 다리의 안정성여부를 확인하거나 개들을 이용해 외부 침입을 파악하는 데 사용한 예를 보여준다. 또한 균열과 관련된 소리에 관한 자료를 아래와 같이 성경 구절에서도 찾아 볼 수 있다.

“The sound of a cry from Babylon and the sound of great fracture comes from the land of the Chaldeans.”

Jeremiah 51:54

지반공학분야에서는 광산의 록버스트를 대상으로 하거나 지진모델을 대상으로 하여 일찍부터 미소파괴음의 이

용이 시도되었다고 할 수 있다. 그러나 금속 분야에서는 acoustic emission이라는 용어가 생기 전에 ‘tin cry’라는 소리가 알려져 있었고, 이것이 미소파괴음에 대응하

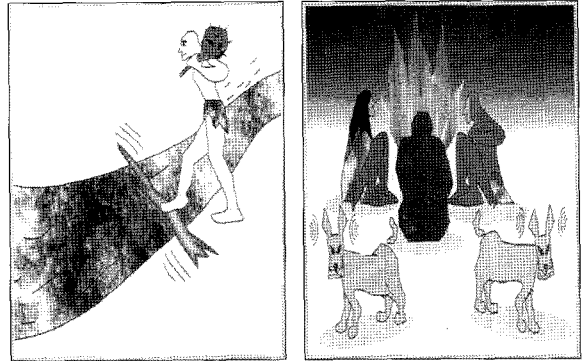


그림 1. 선사시대의 소리를 이용한 예측과 경고

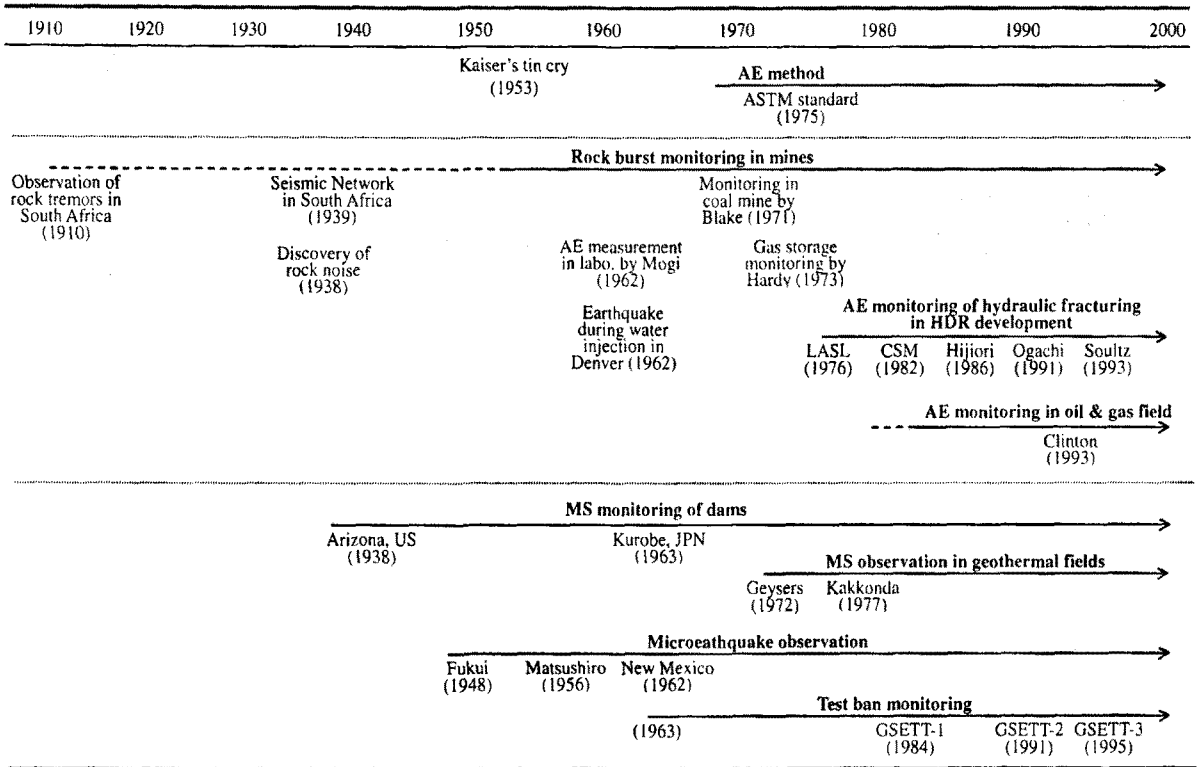


그림 2. 미소파괴음 기술의 역사

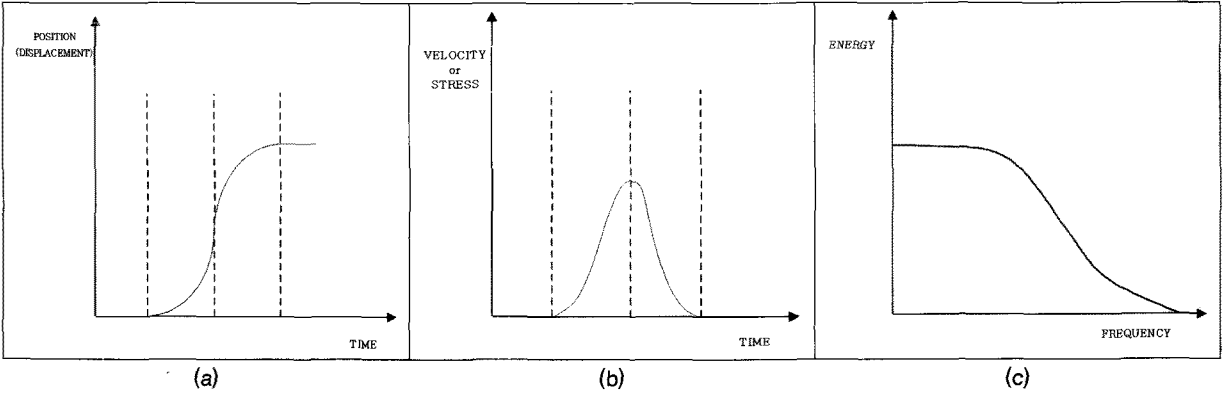


그림 3. 미소파괴음 음원의 특징

는 현상으로 이해되고 있다. Schofield에 의해 'acoustic emission'이라고 명명한 것이 처음으로 '미소파괴음' 용어가 시작된 것으로 알려져 있다. 이후 미소파괴음에 관한 연구는 1950년대에 독일의 Kaiser가 금속파괴 시 귀에 들리지 않는 높은 주파수의 소리를 검출한 것으로부터 시작되었다는 것이 정설이다. 광산에서는 1930년대부터 미광무국(USBM)의 Obert와 Duvall이 사용한 것으로 알려져 있다. 그림 2는 미소파괴음 기술에 관한 시대별 발전단계를 보여준다.

2.3 기본 특성

전술한 바와 같이 미소파괴음 신호는 재료의 손상과 관련된 갑작스런 변형에너지 방출 시에 발생하는 탄성파이다. 대부분 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).

신호의 발생은 재료내부에서는 시간에 따른 변위나 위치의 변화로 나타나며(그림 3(a)), 이것이 응력파로서 전

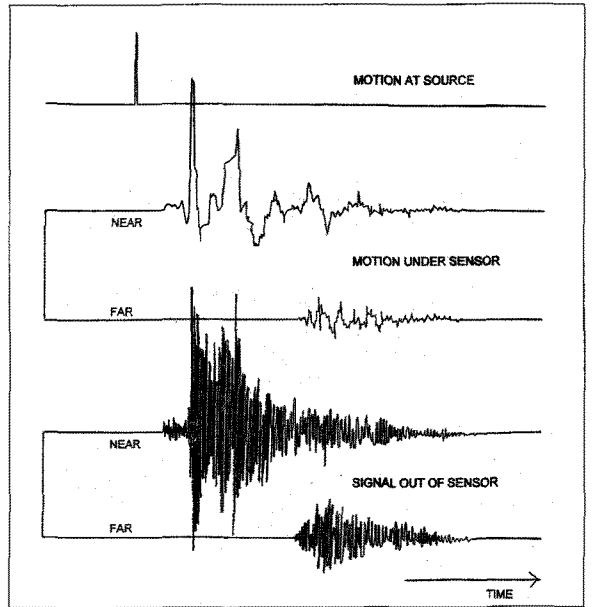


그림 4. 미소파괴음 신호 형성

달되는 것이다(그림 3(b)). 전달되는 탄성파는 낮은 주파수에서 상대적으로 높은 에너지를 갖는다(그림 3(c)). 재료내부에서 신호를 발생시키는 음원은 짧은 펄스형태이지만 재료 내부에서의 전달경로, 센서의 주파수 대역, 방향성 등에 의해 신호는 복잡한 형태를 갖는다(그림 4).

발생된 미소파괴음 신호는 크기와 속도로 특징지을 수

미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

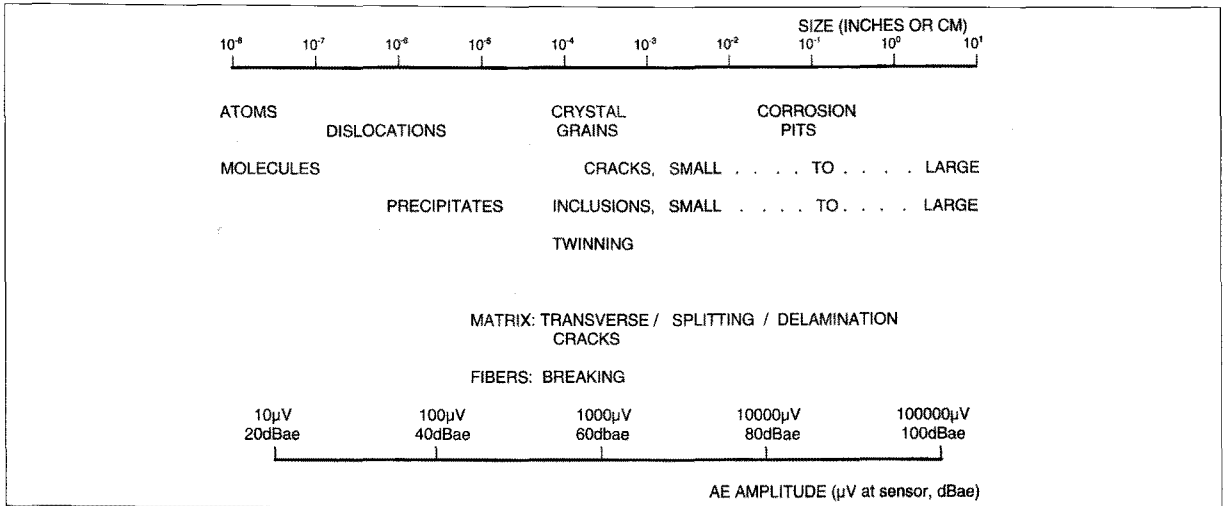


그림 5. 미소파괴음 음원의 크기

있다. 크기는 얼마나 큰 재료와 연관되어있는 지 여부를, 속도는 얼마만큼 운동이 빨리 발생하는 지를 알려준다. 그림 5는 음원발생과 관련된 재료의 크기와 그 에 상응하는 미소파괴음 신호의 진폭을 보여준다. 또한 미소파괴음 신호는 돌발형과 연속형으로 구분된다. 돌발형은 균열이나 마찰 등에 의해 이산적으로 짧은 시간내에 강한 펄스형태로 발생하는 파형으로 신호검출 방식(Hit based processing)으로 계측한다. 연속형 미소파괴음의 경우 누수나 재료의 항복, 그리고 백색잡음 등에 의해 발생하는 파형으로 시간진행방식(Time-driven processing)으로 계측한다.

미소파괴음 계측장치는 기본적으로 AE 센서와 센서로부터 출력된 신호를 증폭하는 프리앰프, 필터링과 신호처리 등을 수행하는 DAQ장치(시그널 컨디셔너), DAQ와 컴퓨터간 인터페이스, 컴퓨터, 그리고 해석소프트웨어 등으로 구성된다. 최근 미소파괴음 계측장치의 발달로 인해 취득된 신호의 파형뿐만 아니라 얻어진 파형을 각종 미소파괴음 변수들로 변환하여 보다 효과적으로 계측하거나 분석할 수 있다.

주요 미소파괴음 변수로는 AE 횟수(AE count), 진폭

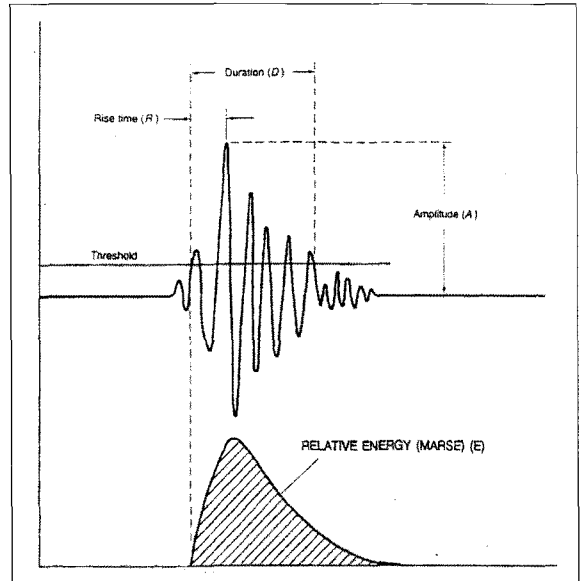
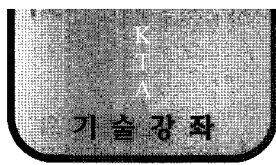


그림 6. 미소파괴음 파형과 변수

(amplitude), 지속시간(duration), 으뜸시간(rise time), 에너지(AE energy) 등이 일반적으로 사용되며 각각의 변수에 대한 정의는 다음과 같다(그림 6). 목적에 따라 이들 변수이외에도 b-값, Average frequency 등을 추가적으



미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

로 사용하거나, 기존 변수를 조합하여 사용한다.

- (1) AE 횟수(AE count): 미소파괴음 신호가 검출한계 (threshold)를 넘어서는 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): 미소파괴음 신호에서의 최대 진폭을 말하며, 이는 보통 미소파괴음을 생성하는 재료의 음원 강도와 관련된다. 측정은 보통 로그 단위 (decibels, dB)로 기록한다.
- (3) 지속시간(duration): 미소파괴음 신호가 맨 처음 검출한계를 지나 마지막으로 검출한계를 지날 때까지의 시간으로, 잡음 필터링 등에 유용하게 쓰인다.
- (4) 오름시간(rise time): 미소파괴음 신호가 검출한계를 초과한 후 최대 진폭 값에 도달하는데 걸리는 시간으로, 음원과 센서 사이의 파 전파과정에 의해 제어되기 때문에 미소파괴음 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하는 목적으로 많이 사용한다.
- (5) 상대에너지(AE relative energy): 지속시간 동안의 미소파괴음 파형 포락선 밑의 면적에 해당하는 측정

값으로, 지속시간과 진폭에 민감하고 검출한계 설정 값이나 주파수에는 덜 의존적이기 때문에 미소파괴음 횟수보다 더 많이 사용된다.

2.4 지반공학분야에서의 미소파괴음

지반공학분야에서는 acoustic emission을 한글로 표기할 때 주로 ‘미소파괴음’으로 표현하나, 이외 금속, 기계 분야 등에서는 ‘음향방출음’으로 표기한다. 음향방출음이란 용어는 금속분야에서 사용되기 시작하여, 지반공학분야에서도 금속의 파괴와 마찬가지로 미세하고 높은 주파수의 탄성파동을 의미한다. 현장에서 측정된 규모가 큰 미소파괴음은 지진에 가까운 현상으로 볼 수 있어 유발지진(Induced seismicity) 또는 미소지진(microseismicity)이라 일컬어 지는 경우가 많다(Ishida, 1999). 앞서 전술한 바와 같이, 같은 현상에 대해서 관련 기술자나 연구자의 전문분야에 따라 명칭이 달라지는 경우가 있다. 그림 7은 지반공학분야에서 널리 통용되고 있는 미소파괴음의 주파수 범위에 따른 분류표이다. 본 보고에서 사용된 미소파괴음은 단순히 acoustic emission만을 의미하기보다는 microseismicity를 포함한 포괄적인 용어이다.

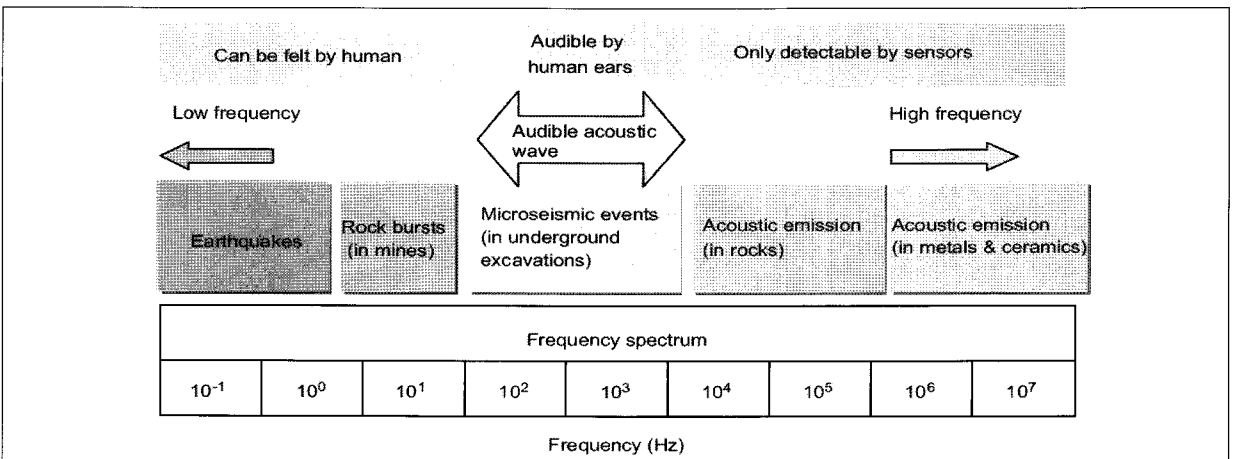


그림 7. 주파수영역과 미소파괴음 기술의 적용범위(Cai 등, 2007)

3. 국외 기술개발현황 및 적용사례

3.1 국외 기술개발현황

미소파괴음에 관한 연구는 지하광산의 안정성을 연구하기 위해 지질재료를 대상으로 연구가 시작되었다. 1930년대 후반에서 1940년대 초반까지 미광무국의 Obert와 Duvall이 현장뿐 아니라 실내에서도 시료나 구조물이 하중을 크게 받음에 따라 미소파괴음의 발생속도가 크게 증가함을 보였다. 반면 구조물의 파괴 후에 안정화에 이르면 발생속도는 감소함을 보였다. 이로부터 미소파괴음 발생속도는 구조물의 불안정성을 지시하는 인자로 판명되었고, 이러한 초기 연구를 바탕으로 미국과 캐나다 정부에서 깊은 심도에 있거나 고압의 응력이 작용하는 광산의 록버스트에 관해 연구를 지원하여, 순수한 연구를 넘어 지하구조물의 안전과 기반제어를 위한 기본 계측 수단으로 활용되어 왔다. 미소파괴음 측정기술의 발전으로 인해 균열개시와 성장에 대한 정보로서 미소파괴음이 많이 활용되고 있다(Eberhardt, 1998; Eberhardt 등, 1999; Falls & Young, 1998). 그리고 암석의 파괴메커니즘을 규명하기 위하여 초점 메커니즘(focal mechanisms)방법과 음원의 방사패턴을 이용하는 모멘트텐서해석(Moment tensor analysis) 방법이 지속적으로 수행되고 있다(Shah & Labuz, 1995; Carvalho, 1999; Manthei 등, 2001)

미소파괴음을 이용한 계측기술은 미국, 캐나다, 일본, 유럽 등 선진국에서 이미 지하연구실험실(underground research laboratory, URL)이나 지하양수발전소, 터널, 사면 등에 적용되고 있다(Ishida, 1999; Young, 1999; Shiotani, 2006; Hirata 등, 2007). 선진외국의 경우 AE 센서를 비롯한 시스템과 이를 활용한 상용프로그램을 직접 제작하여, 현장에 활용하고 있다. 대표적인 미소파괴음 관련업체는 미국의 PAC, 캐나다 ESG, 독일의 Vallen, 일본 Fuji ceramics 등이 있으며, 캐나다 ESG는 영국의 ASC와 함께 컨설팅 업무를 병행하고 있다.

3.2 국외 적용사례

3.2.1 지하연구실험실 적용사례

그림 8은 캐나다 AECL(Atomic Energy of Canada Limited's)의 지하연구실험실내의 TSX(Tunnel Sealing Experiment) 터널에 미소파괴음을 적용한 사례이다(Young 등, 1999). 지하연구실험실은 초기에 균열이 발생하지 않은 비교적 균질한 Lac du Bonnet 화강암 암반 내에 위치하고 있으며, 이 중 TSX 터널은 주응력 방향과 나란하며 4.4m × 3.5m의 타원형으로 굴착되었다. 탄성 해석에 의한 최대 주응력은 105MPa이었으며 바닥과 천단부에서 발생하였다. 주파수 범위가 50Hz - 250kHz인 가속도계

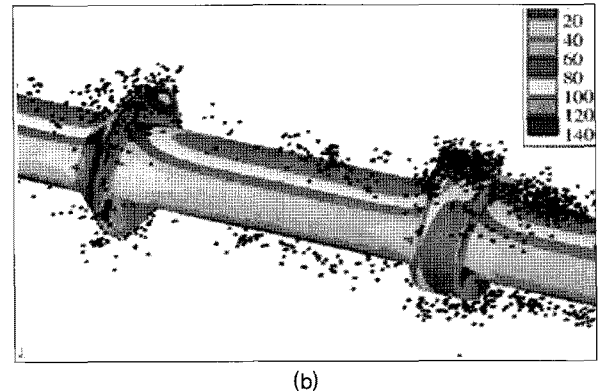
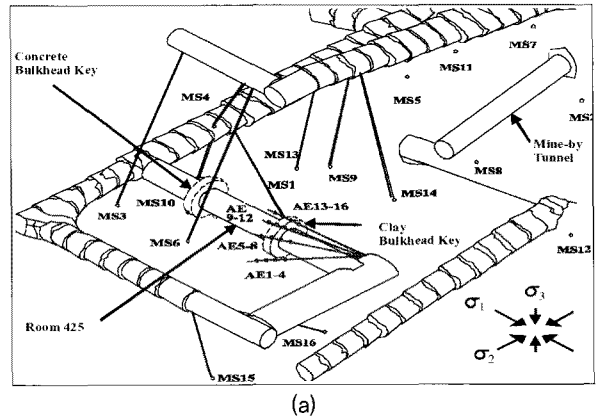
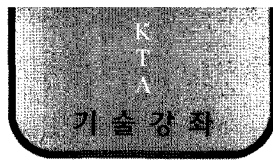
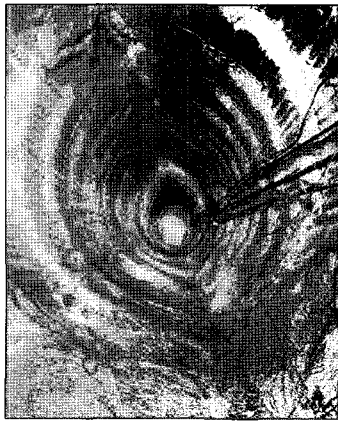


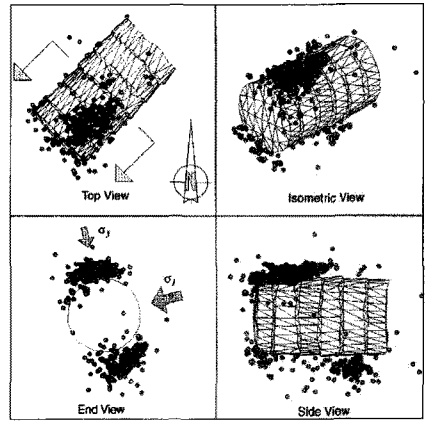
그림 8. TSX 터널 형상과 센서 배치도(a)와 응력분포와 발생 미소파괴음위치(b) (After Young 등, 1999).



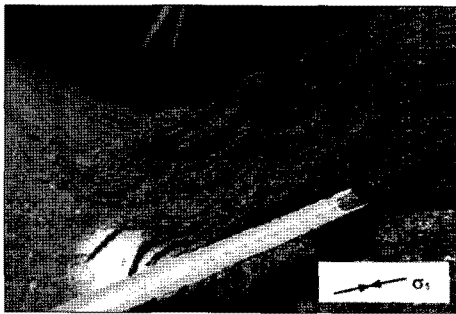
미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술



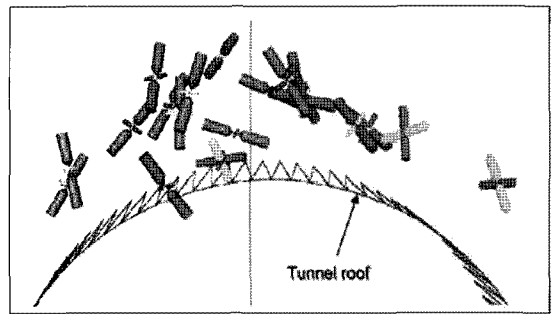
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9. 캐나다 URL 시험터널 적용사례 ((a) 발생된 취성파괴 모습, (b) 계측된 미소파괴음, (c) 취성파괴 상세 모습, (d) 미소파괴음으로부터 계산된 파괴메카니즘) (after Martin, 1997)

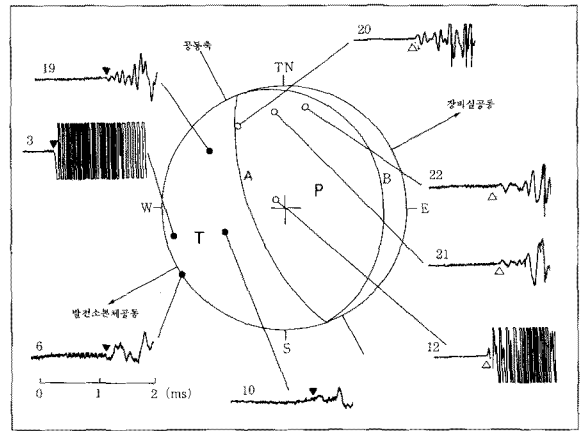
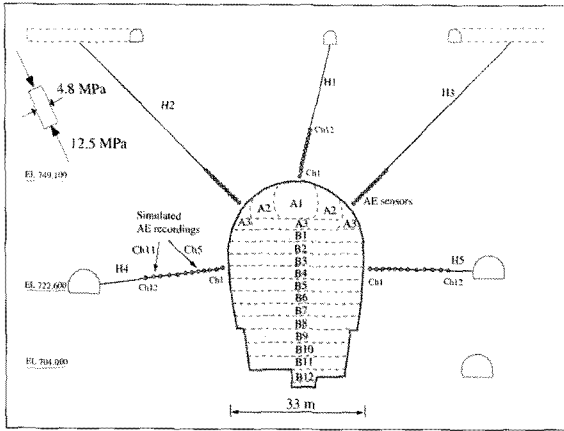
와 AE센서를 혼용하여 총 24개의 센서가 감시용 시추공에 설치되었다. 그림 8(b)는 응력분포와 발생한 미소파괴음을 제시한 그림으로서 응력집중이 높은 곳에서 미소파괴음이 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 위와 동일한 지하연구실시험실의 다른 시험터널에서 발생한 V형태의 취성파괴 모습과 계측된 미소파괴음을 보여준다. 시험터널에서 관찰된 취성파괴는 기존의 수치해석방법으로 예측할 수 없었으나, 발생한 미소파괴음으로부터 형상과 파괴메카니즘을 규명할 수 있었다 (Martin, 1997).

3.2.2 지하양수발전소 적용사례

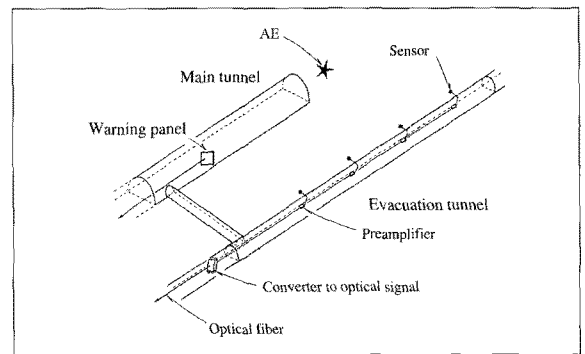
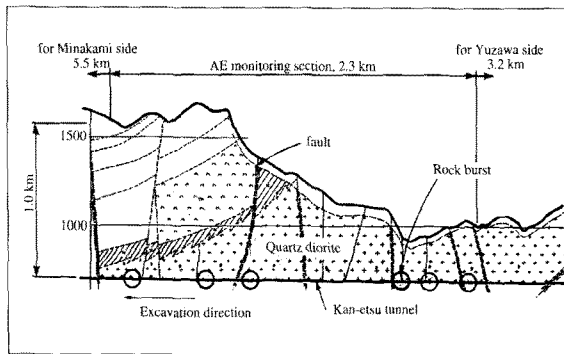
다른 적용사례로서 일본의 Ishida(1999)가 지하 280m에 위치한 지하양수발전소 공동의 측벽부에서 공동 굴착과 함께 발생하는 미소파괴음을 측정하여 분석한 사례가 있다(그림 10). 이 경우 규모가 큰 미소파괴음의 발생은 많지 않았지만, 비교적 좁은 영역에서 미세한 파괴를 대상으로 한 고감도 미소파괴음 측정을 통해서, 진원을 3차원적으로 결정하였고 동시에 단층면 해석을 수행하여 발생 메커니즘을 연구하였다. 그 결과 미소파괴음 발생 원인이 된 파괴면의 주향경사나 그 파괴를 발생시킨 주응력의 방향은 암반내의 주 절리면의 주향·경사, 초기지압의

미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

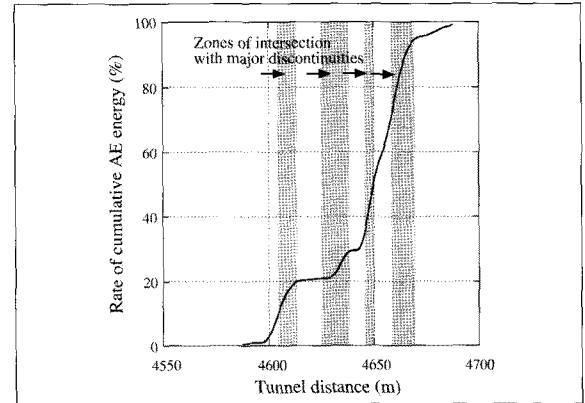
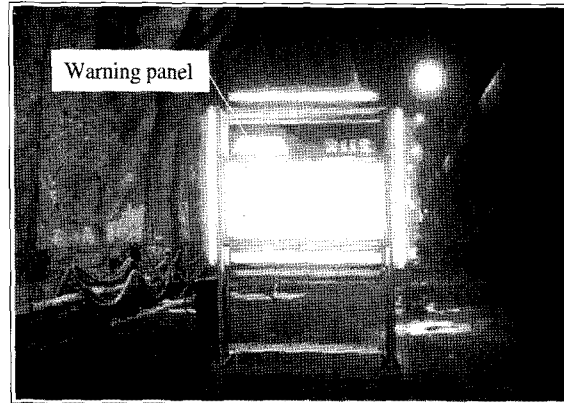


(a) (b)

그림 10. 일본의 지하발전소공동에 대한 AE 모니터링 사례(After Ishida,1999).



(a) (b)



(c) (d)

그림 11. 터널 적용사례 (a) 단면도 및 록버스트발생위치 (b) 센서 배열모식도 (c) 록버스트 경고패널 (d) 미소파괴음 발생 양상 (after Hirata 등, 2007)

측정결과, 미소파괴음 발생 시의 공동 형상, 암반변위계의 측정결과 등과 합리적으로 대응하는 것으로 보고하였다(그림 10(b)). 이것은 미소파괴음 계측이 지하발전소와 같은 비교적 지표에 가까운 토목분야의 공동에도 기본적으로 적용 가능하고, 안정성 평가에 유용하다는 것을 의미하는 것이다.

3.2.3 터널 적용사례

Shimizu 철도터널, Shin-shimizu 터널 등을 굴착하면서 록버스트 발생을 경험한 일본에서는 Tanigawa-dake 산을 관통하는 Kan-etus 터널을 굴착하면서 미소파괴음 계측작업을 수행하였다. 과업지역은 200MPa의 일축압축강도를 갖는 석영질 섬록암지역이었다(그림 11(a)). 록버스트가 발생한 지점은 토파고 230m - 1000m이었으며, 미소파괴음이 발생한 지역은 대부분 불연속면과 관련이 있었다. 계측된 미소파괴음은 작업장의 안전유지뿐 아니라 지보형태를 결정하는 데 사용되었다. 본 사례는 미소파괴음 계측에 토대를 둔 리스크 운영시스템을 통해 굴착과정 동안 성공적으로 작업이 이루어진 사례라 할 수 있다.

3.2.4 사면적용사례

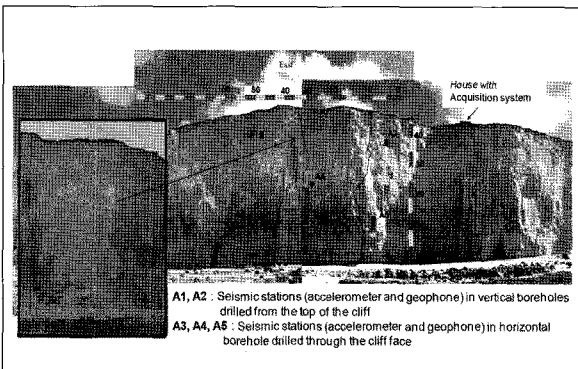
미소파괴음을 사면에 적용하는 경우 상대적으로 저주

파수인 지오폰이나 미소지진음 범위에 해당하는 가속도계를 사용하거나, 웨이브가이드를 이용한 방법이 이용된다. 지오폰이나 미소지진음의 경우 광범위한 범위를 계측할 수 있으나 어느 정도파괴가 진행한 후 계측하는 특징이 있으며, AE센서와 웨이브가이드를 이용한 경우 보다 미세한 파괴의 측정이 가능하여 사전 파괴징후를 알 수 있다. 그림 12(a)는 40Hz - 1.5kHz의 주파수대역을 갖는 지오폰과 2Hz - 10kHz를 갖는 가속도계를 이용하여 높이 70m사면을 계측한 사례이다(Senfaute 등, 2009). 누적된 미소파괴음 발생량에서 알 수 있듯이 파괴가 발생하기 전 누적량이 급격히 증가함을 알 수 있다.

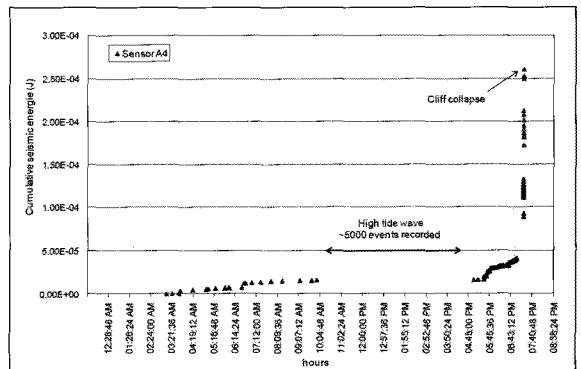
4. 국내 기술개발현황 및 적용사례

4.1 국내 기술개발현황

국내에서 수행된 미소파괴음에 관한 연구는 주로 실내 압축시험(이규상, 1996; 이상은, 1999; 심현진과 이정인, 2000; 허종석, 2001; 장수호, 2002)을 수행하면서 응력 변화에 따른 미소파괴음 변화 양상이나 음원 분석 등에 대해 한정적으로 이루어졌다. 최근 모형실험(성백옥, 2004;

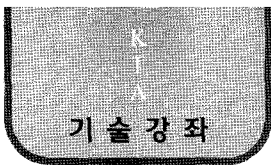


(a)



(b)

그림 12. 미소파괴음을 이용한 사면 계측



미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

배성호 등, 2007; 천대성 등, 2007) 등을 수행하면서 상대적으로 큰 규모의 재료에 대해 파괴위치 및 파괴 메커니즘을 위한 연구로의 확장이 이루어졌다. 그러나 국외에 비해 미소파괴음 기법을 현장에 적용한 사례가 상당히 미흡한 실정이다. 보고된 미소파괴음 적용사례는 캐나다 ESG의 기술을 이용한 유류비축기지 현장과 순수 국내기술에 의한 사면현장 등 소수에 불과하다.

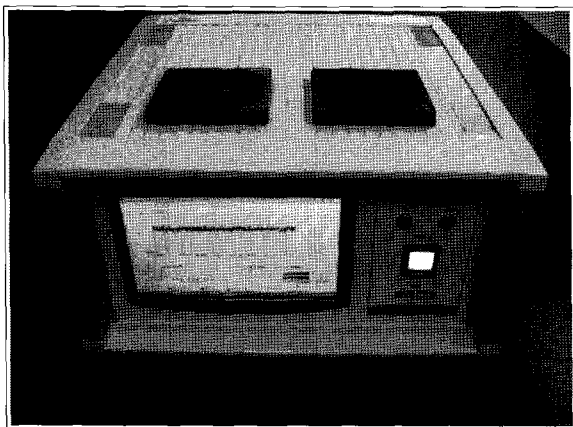
한편, 한국지질자원연구원(2006)에서는 국내의 독자적인 기술을 이용하여 미소파괴음 계측시스템과 운영프로그램을 개발하였으며(그림 13), 지하연구실험실(URL)과 유류비축기지, 사면 등의 지반구조물에 대한 현장적용연

구를 수행하고 있다.

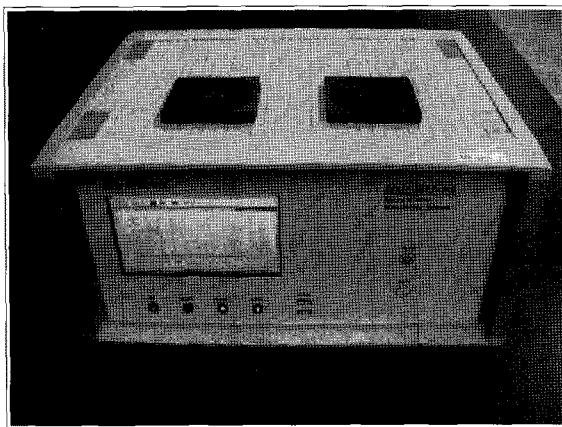
4.2 국내 적용사례

4.2.1 유류비축기지 적용사례

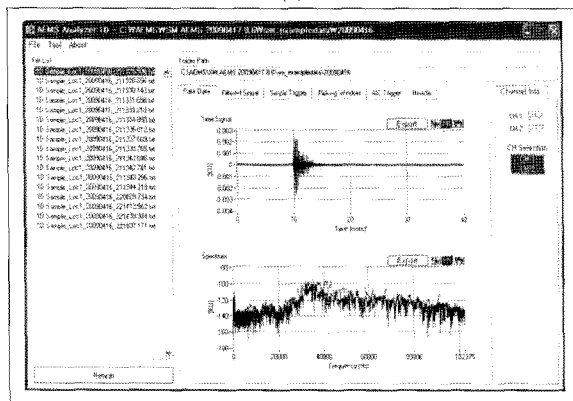
국내에서도 지반구조물의 유지관리 및 방재에 대한 관심이 증가함에 따라 외국기술을 이용하여 지반침하나 국부파괴에 대한 계측시스템을 이용한 사례가 보고되었다(Hong 등, 2006). 여수의 지하유류비축기지는 스펀링의 발생여부를 감시하기 위해 캐나다 ESG의 미소파괴음 계측시스템이 도입되어 적용된 한 사례이다. 적용현장은 심



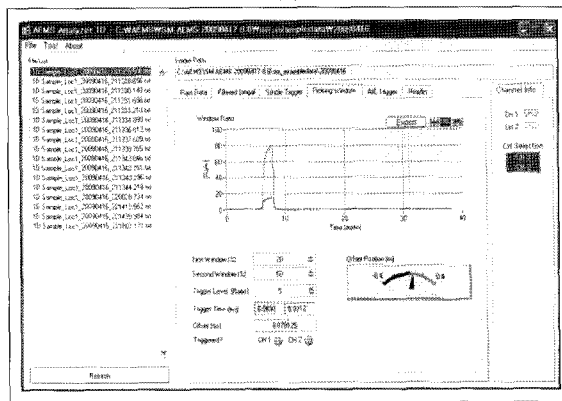
(a)



(b)

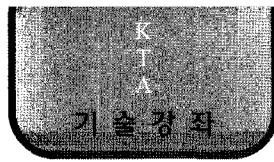


(c)

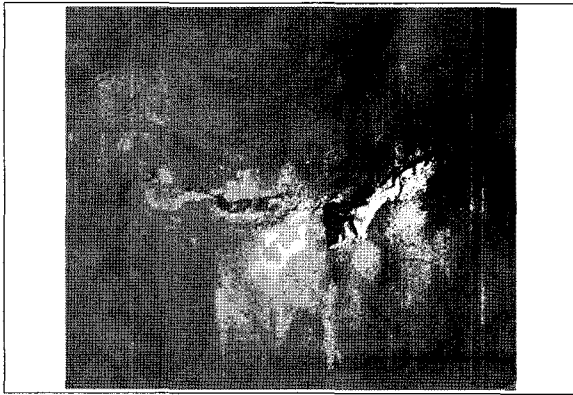


(d)

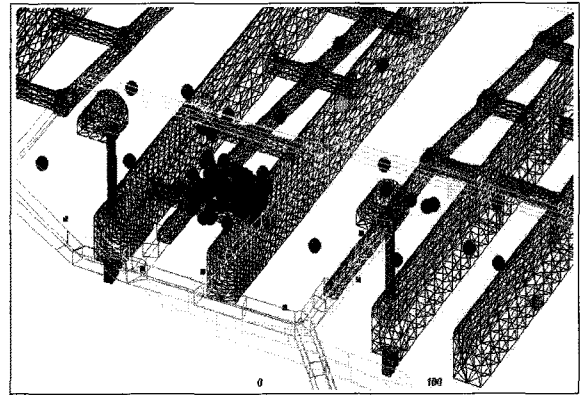
그림 13. 국내기술로 개발된 미소파괴음 시스템 (a) AE 계측용 시스템 (b) MS 계측용 시스템 (c) (d) 운영프로그램 화면



미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

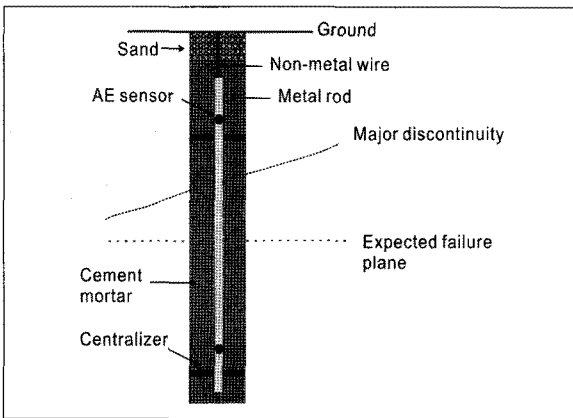


(a)

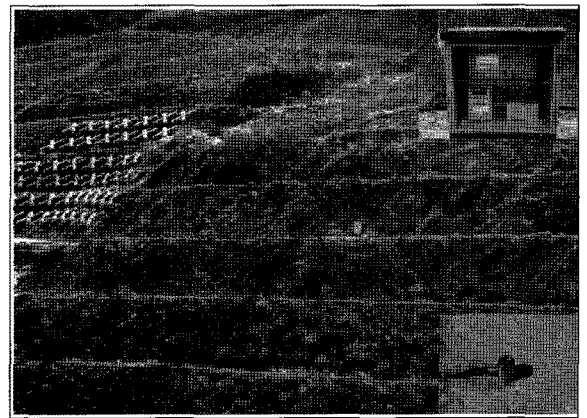


(b)

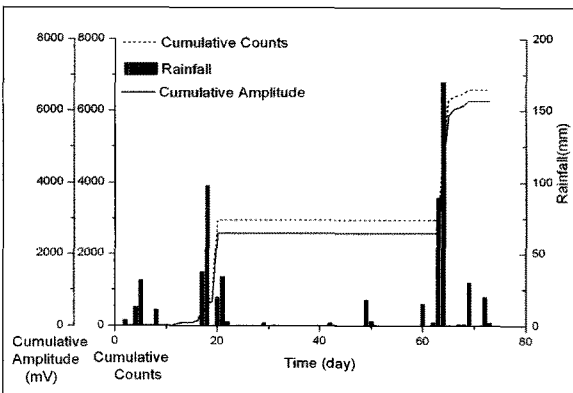
그림 14. 여수의 지하유류비축기지에서 측정된 MS 이벤트(after Hong 등, 2006)



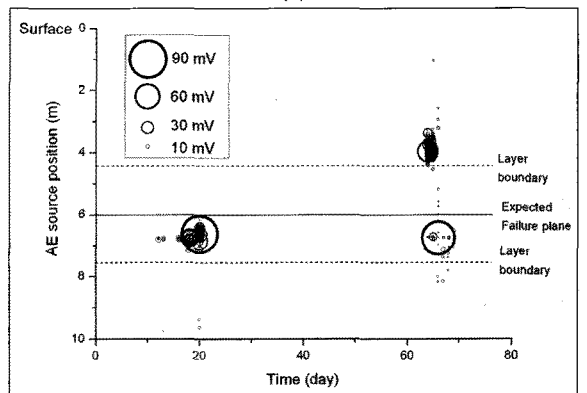
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 15. 웨이브가이드를 이용한 사면적용사례

도 150 m에 위치한 일축압축강도가 200 MPa을 넘는 안산암질 응회암지역이었으나 과지압으로 인해 파평현상과 함께 슛크리트 균열이 발생하였다(그림 14(a)). 시공 중 안전유지를 위해 주파수대역이 50Hz - 5kHz인 12개의 가속도계를 설치하여 미소파괴음 발생양상을 계측하였다(그림 12(b)). 계측된 미소파괴음의 발생지역, 파형, 발생 수준을 토대로 경고기준과 그에 따른 대처방안을 토대로 안전시공을 수행하였다.

4.2.2 사면 적용사례

사면과 같은 지반구조물은 일반적으로 대규모일 뿐만 아니라 불연속면을 포함하기 때문에 내부에서 발생된 고주파의 미소파괴음은 심한 감쇠로 인해 계측센서에 도달하지 못하거나 미세한 크기로 도달하여 이를 활용하는 데 있어 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 웨이브가이드와 웨이브생성재를 이용한 사면계측장치와 방법이 개발되었다(천대성 등, 2008). 제안된 계측방법은 사면을 구성하는 지반구성물질이나 조건에 크게 영향을 받지 아니하고, 지반구성물질에 관계없이 유사한 미소파괴음을 발생시킬 수 있다. 또한 미소파괴음의 발생원에서 센서까지 감쇠영향을 최소화하여 도달하게 할 수 있다. 개발된 웨이브가이드를 파괴에상면을 관통하도록 현장사면에 설치하고, 설치한 웨이브가이드와 동일한 재료에 대해 실내시험을 수행함으로써 사면의 손상정도를 평가할 수 있다.

그림 15(a)는 제안된 기술의 모식도를 나타내는 것으로서, 사면에서 변형이 발생함에 따라 모래를 포함한 시멘트 모르타르로 만들어진 웨이브생성재에 하중이 전달된다. 이 때 웨이브생성재에서 미소파괴음이 발생되고, 내부의 금속봉을 통해 센서로 신호가 전달된다. 계측된 신호의 발생속도, 발생량, 발생위치 등이 계산되고, 실내시험으로부터 구한 관리기준과의 비교분석을 통해 손상정도를 파악하게 된다. 그림 15(b)는 고속도로 주변사면에 설치된 계측시스템의 모습을, 그림 15(c)와 (d)는 경우에

따라 발생한 미소파괴음의 발생량과 발생위치를 보여준다. 미소파괴음 분석결과로부터 현재까지 사면은 안정한 상태를 유지하는 것으로 나타났다.

5. 맺음말

미소파괴음을 이용한 계측기술은 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 적합한 기술로서, 많은 구조물의 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴검사 기술로서 이용되어 왔다. 지반구조물의 적용에 있어, 미소파괴음을 이용한 계측은 기존의 변위계나 응력계를 중심으로 한 계측에서 감지할 수 없었던 부분적인 암반파괴와 갑작스러운 파괴현상을 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 아직까지 국내 지반공학분야에서 미소파괴음 기술은 주로 실내시험에 한정적으로 이루어져 왔으며, 이로 인해 현장계측기술로서 인지도가 낮고 있지 않다. 다만 최근 들어 지반구조물의 대형화, 심부화와 함께 이들 구조물에 대한 안전감시와 유지관리의 중요성이 증가함에 따라 계측에 대한 관심도 증가하고 있다. 이러한 이유로 전술한 비와 같이 유류비측기지 등에 미소파괴음을 이용한 계측기술이 적용되고 있으나 장비 및 인력 모두 외국기술에 의존하고 있다. 그러나 외국기술의 이용은 비용 측면 뿐 아니라 기술의 지속성, 신속성 등에 바람직하지 않고, 지반구조물을 포함한 국가기간시설물의 안정적 유지관리를 위해서는 미소파괴음과 관련된 계측기술의 자립화가 필요할 것으로 사료된다.

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



미소파괴음을 이용한 지반구조물 계측기술

3. 심현진, 이정인, 2000, 암석 및 콘크리트의 압축변형거동과 미소파괴음 측정에 관한 연구, 터널과지하공간, Vol. 10, pp.59-69.
4. 음향방출시험II, 2010, 구미서관, 296p.
5. 이규상, 1996, 암석의 이방성 속도를 고려한 미소파괴음 발생의 3차원 음원추적, 석사학위논문, 서울대학교
6. 이상은, 1999, Acoustic emission에 의한 암석의 파괴원 위치 결정과 미소파괴 메커니즘 관한 연구, 공학박사학위논문, 강원대학교
7. 장수호, 2002, 응력수준에 따른 암석의 손상특성과 심부터널 주변 암반 손상영역의 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교
8. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원, 2007, 취성파괴수준과 파괴개시시점에 관한 진삼축 모형실험연구, 터널과지하공간, Vol. 17, pp.128-138.
9. 천대성, 정용복, 박의섭, 박찬, 장현익, 2008, 미소파괴음을 이용한 지반구조물 원격계측기술, 한국지반공학회 추계학술회의, p.632.
10. 허종석, 2001, 삼축 압축하에서 암석의 미소파괴음 측정과 변형파괴 특성, 공학박사학위논문, 서울대학교.
11. 한국지질자원연구원, 2006, 지하구조물의 통합 안전감시시스템 개발 연구, p152.
12. 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.
13. Dixon, N. and Spriggs, M., 2007, Quantification of slope displacement rates using acoustic emission monitoring, Can. Geotech. J. Vol 44, pp966-976.
14. Eberhardt, E., 1998, Brittle rock fractures and progressive damage in uniaxial compression, Ph.D dissertation, University of Saskatchewan.
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. 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.
18. Ishida, T., 1999, An Introduction to Acoustic Emission of rock, Kinmiraiasha Nagoya, p213.
19. Leighton, F., Blake, W., 1970, Rock noise source location technique, USBM RI 7432.
20. Senfaute, G., Duperret, A., and Lawrence, J.A., 2009, Micro-seismic precursory cracks prior to rock-fall on coastal chalk cliffs: a case study at Mensil-Val, Normandie, NW France, Nat. Hazz. Earth Sys. Sci., Vol 9, pp.1625-1641.