지반구조물 안전감시용 미소파괴음 계측시스템 개발

천대성¹ · 정용복^{1*} · 박의섭¹

¹정회원, 한국지질자원연구원

Development of acoustic emission monitoring system for the safety of geotechnical structures

D.S. Cheon¹, Y.B. Jung^{1*}, E.S. Park¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT: The monitoring method of geotechnical structures using acoustic emission(AE) and microseismicity(MS) is to detect the microscopic deformation and fracture behavior in the inner structures by measuring induced acoustics and vibrations. It can identify a pre-indication of failure by taking advantage of the characteristics that the amount and occurrence rates of AE and MS increase rapidly prior to large scale destruction of the target structures. The monitoring system consisting of high-quality sensors, high-speed data acquisition device and the operation program is required for the practical application of this method. Recently, the AE and MS monitoring systems have been localized. In particular, the developed operation software which can analyze and interpret the measured signals was demonstrated through a number of applications to domestic fields. This report introduces the configuration and features of developed monitoring system, then the challenges and future direction of AE monitoring in geotechnical structures are discussed.

Keywords: Acoustic emission, Microseismic, Monitoring, Operation software, Early warning

초 록: 미소파괴음과 미소진동을 이용한 지반구조물 계측은 구조물 내부의 미시적 변형이나 파괴거동을 음향과 진동으로 계측하는 방법으로, 계측대상의 대규모 파괴에 앞서 이들의 발생량과 발생빈도가 급격히 증가하는 특성을 활용하여 파괴의 사전징후를 파악할 수 있다. 이 방법의 실제 적용을 위해서는 고사양의 센서, 고속의 신호획득장치 그리고 운영프로그램으로 구성된 계측시스템이 요구된다. 근래 국내기술에 의한 현장계측용 미소파괴음과 미소진동 계측시스템이 개발되었다. 특히 계측된 신호를 분석하고 해석할 수 있는 다양한 기능의 운영프로그램을 개발하고 선진외국 제품과의 상호비교를 통해 효용성을 평가하였다. 본 보고에서는 개발된 미소파괴음 계측시스템의 구성과 특징 등에 대해 소개하고, 향후 해결과제와 나아갈 방향에 대하여 논의하였다.

주요어: 미소파괴음, 미소진동, 계측, 운영프로그램, 조기경보

1. 서 론

요즘 산사태나 지반침하와 같은 지반관련 사고로 이에 대한 국민적 관심이 증대되고 있다. 지반구조물의 파괴는 대부분 인간에게 경제적, 사회적인 피해뿐 아니라 신체적, 정신적인 피해를 유발한다. 특히 대형

구조물인 터널, 지하공간구조물, 사면 등은 다른 재난에 비해 그 피해가 더 큰 경우가 대부분이다. 따라서 파괴가 발생하기 전에 이상징후를 감지할 수 있다면 이러한 피해를 경감시킬 수 있다. 이상징후의 감지는 계측을 통한 안전감시를 수행함으로써 실현될 수 있으며, 구조물의 안전감시는 감시대상의 목적과 특성 그리고 시기 등에 따라 달라져야 한다.

안전감시를 위해 사용되는 기술을 흔히 계측이라 표현할 수 있으며, 계측은 인간의 능력과 계측기기의 성능을 조합해서 공학적인 정보를 정확하게 수집하여

*Corresponding author: Y.B. Jung

E-mail: ybjung@kigam.re.kr

Received August 29, 2014; Revised September 16, 2014;

Accepted September 18, 2014

분석하는 행위로 정의할 수 있다(KSMI, 2006). 토목 건설분야에 현재 널리 이용되는 계측방법은 변위, 지하수위, 응력 등을 이용한 방법이다. 그러나 이러한 종래의 계측방법은 파괴의 사전징후를 감지하기에 다소 부족한 부분이 있어 미소파괴음(Acoustic Emission, AE)이나 미소진동(MicroSeismicity 또는 MicroSeismic event, MS)을 이용한 계측이 선진외국을 중심으로 활용되고 있으며, 근래들어 국내에서도 활용하기 시작하였다(Hong et al., 2006; Cheon et al., 2008; Cheon et al., 2011). 미소진동은 미소지진음으로 표현되기도 하지만, 지진과 구별하기 위해서 진동이라는 용어를 사용하는 것이 보다 합리적으로 인식되고 있다(Song et al., 2012). 또한 미소진동은 인위적인 행위에 의해 유발되었다는 한정적 의미로 유발진동(induced-seismicity)으로 표현될 수 있다.

미소파괴음과 미소진동은 응력의 재분배에 의해 균열이 생성될 때 나오는 순간적인 에너지 방출과 동반되는 탄성파로서, 주파수 범위, 관심대상 등에 따라 구분될 수 있다(Cai et al., 2007). 두 용어를 분리하는 기준으로 일반적으로 10 kHz가 주로 사용되며, 미소파괴음은 10 kHz 이상의 고주파를 일컫는다. 그러나 본 보고에서 미소파괴음은 미소진동을 포함하는 포괄적인 의미로 사용하였다. 이들은 대규모 파괴에 앞서 발생량과 발생빈도가 급격히 증가하는 경향을 보여 파괴의 사전징후를 포착하는 데 이용될 수 있다. 또한 설치된 센서 지점 이외에도 주변의 일정범위를 계측가능하기 때문에 다른 방법에 비해 광범위한 계측영역을 갖는다. 계측범위는 사용되는 센서의 주파수, 센서 사양, 센서 배치, 대상지역의 지반특성 등에 따라 달라진다. 계측된 하나의 파형으로부터 횡수, 진폭, 지속시간 등 여러 파라미터를 추출할 수 있어 하나의 신호로부터 다양한 정보의 획득이 가능하다. 아울러 발생 지점과 발생 균열 메커니즘의 규명도 가능하다.

미소파괴음을 이용한 기술은 1930년대 전후 광산에 이용된 이후 최근에는 셰일가스개발, 심부지열개

발, 이산화탄소 지중저장 등에도 널리 활용되고 있다. 이 기술을 구현하기 위해서는 종래 계측장비에 비해 고속의 신호획득장치와 운영프로그램, 고사양의 센서 등으로 구성된 계측시스템이 요구된다. 선진외국의 경우 이미 관련 산업과 목적에 맞춰 계측시스템을 개발하여 사용하고 있다. 이에 반해 국내에서는 뒤늦게 한국지질자원연구원에서 미소파괴음 계측시스템을 개발해오고 있다. 본 보고에서는 개발이력, 특징, 향후 과제 등을 중심으로 국내기술로 개발된 미소파괴음 계측시스템을 소개하고자 한다.

2. 미소파괴음 계측시스템의 국외개발현황

2.1 계측시스템의 구성

미소파괴음 계측시스템은 계측의 목적, 계측 대상의 특성, 사용 조건 등에 따라 달라지나, 일반적으로 센서, 프리앰프, 신호획득장치, 운영프로그램으로 구성된다(Fig. 1). 계측시스템의 각 장치는 다음과 같은 기능과 특징을 갖는다.

AE 센서는 주로 압전물질로 만들어지며 실내용으로 사용되는 경우는 프리앰프가 내장되지 않는 경우가 대부분이지만 현장용의 경우 일반적으로 프리앰프가 내장되어 있다. 암석이나 콘크리트의 경우 10 kHz에서 100 kHz를 통과대역으로 사용하는 반면 금속은 이보다 더 고주파까지 통과대역을 사용한다. 현장에서는 감쇠를 고려하여 15 kHz나 60 kHz가 사용되는 경우가 많다. MS 센서의 경우 일방향 가속도계나 지오폰, 하이드로폰을 사용하며 계측범위에 따라 대역폭을 달리 사용한다.

센서에서 측정된 신호는 프리앰프에 의해 증폭되어 신호획득장치로 전송된다. 신호획득장치는 주파수 필터와 메인앰프 등을 통해 필터링 작업이 가능하며, A/D 컨버터나 DSP (Digital signal processor)를 통해 계측된 신호를 처리하여 운영프로그램으로 전달한다.

Fig. 2는 미국 PAC사의 신호획득장치인 PCI-DSP4의 내부 모식도를 보여준다. 신호획득장치는 제조사에 따라 다르나 PAC사 제품의 경우 파형모듈이 옵션으로 존재하는 경우가 있으며, 파형모듈이 없는 경우는 측정된 신호파형을 볼 수 없고 다만 발생된 미소파괴음의 횟수, 파라미터 값 등만을 측정할 수 있다. 운영프

로그램은 신호획득장치에서 전달받은 신호를 실시간으로 가시화시켜주며, 시간별 발생횟수, 발생위치 등의 정보를 제공한다. 미소파괴음 계측시스템은 신호 취득속도가 높고 자료량이 많을 수 있기 때문에 충분한 하드디스크와 빠른 CPU를 사용하는 것이 좋다 (JANDT, 2008).

Fig. 1. Examples of AE and MS monitoring system (www.pacndt.com, www.esgsolutions.com)

Fig. 2. Example of DAQ board for AE signal detection

2.2 국외 개발현황

전술한 바와 같이 선진외국의 경우는 목적에 맞게 계측시스템을 개발, 생산하고 있다. AE 계측시스템의 경우 미국의 PAC사, 독일의 Vallen사 등이, MS 계측시스템의 경우 캐나다의 ESG, 영국의 ASC 등이 널리 알려져 있다. 본 보고에서는 지반분야에서 국내에 비교적 잘 알려진 PAC사와 ESG사의 시스템에 대하여 소개한다. 두 회사의 공통된 특징으로 자체적으로 센서와 계측장치, 그리고 운영프로그램을 개발, 생산하고 있다는 점이다.

PAC (Physical Acoustics Corporation)사는 1968년 창립된 이후 장비와 운영프로그램을 개발하고 기계, 항공, 플랜트 등 많은 분야의 현장에 AE 계측을 적용하고 있다. 이 회사는 MISTRAS 그룹의 일원으로 비파괴검사시험에 관한 업무도 수행하고 있다. 또한 AE와 관련한 자체 교육프로그램을 운영하고 있으며, 근래에는 REACT 부서를 만들어 학교와 산업체와의 공동연구를 담당하고 있다. 제품생산 분야는 크게 센서, 앰프, 신호획득장치, 운영프로그램 등이 있으며, 적용산업에 따라 다양한 응용제품과 보조장치 등을 생산하고 있다. PAC사는 세계 최고 수준의 아주 다양한 AE 센서를 생산하고 있으며, 생산되는 AE 센서의

종류는 일반용도용, 프리앰프내장형, 광대역, 차동형, 소형, 저주파수용, 고온용, 방수용 등이 있다(Fig. 3(a)). 앰프의 경우 프리앰프, 포스트앰프, 안전용 프리앰프, 전하형 프리앰프 등이 있다(Fig. 3(b)). 자료획득 장치의 경우 18 bit나 16 bit의 2 채널, 4채널, 8채널 등의 보드와 이동형 소형보드, 그리고 DSP를 탑재한 보드 등을 생산하고 있으며, 이들을 결합하여 56채널, 80 채널 등으로 확장할 수 있다(Fig. 3(c)). 운영프로그램에서도 다양한 제품군을 생산하고 있으며, AEwinTM, AEwinPostTM, NOESIS, PAC AE viewer, Moment Tensor 등이 이에 해당한다. AEwinTM은 대표적인 운영프로그램으로 실시간으로 AE 신호를 획득하고, 필터링, AE 신호특징 추출, 정보, 다중음원기능, 2D와 3D 가시화, 클러스터링, FFT 처리 등을 수행할 수 있다(Fig. 4(a)). AEwinPostTM는 AEwin의 후처리 프로그램으로서, AE 신호특징 추출, 상세 필터링, 자료 통합 등의 기능이 있으며 자료획득장치가 없는 컴퓨터에서 활용될 수 있도록 개발되었다. NOESIS는 보다 향상된 후처리프로그램으로서 AE 신호의 고급 필터링, 데이터 통계, 클러스터, 패턴인식과 인공지능망을 이용한 신호처리 등이 가능하다(Fig. 4(b)).

ESG사는 캐나다 토론토대학교의 Paul Young 교수의 제자들을 중심으로 1993년 만들어진 회사로서,

Fig. 3. Products of PAC company (www.pacndt.com)

PAC사와 유사하게 센서, 자료획득장치, 운영프로그램 등을 자체 제작, 생산하고 있다. 다른 점으로는 사업대상이 미소진동이라는 점과 기술서비스에 대한 영역에도 많은 부분을 할애하고 있다는 점이다. 생산되는 센서는 4.5 Hz와 15 Hz의 일방향과 삼방향 지오폰, 고정밀의 일방향과 삼방향 가속도계, 그리고 지오폰과 가속도계를 활용한 다운홀 배열센서 등이다(Fig 5(a)). 자료획득장치로는 24 bit와 32 bit의 반영구적인 3종류의 DAQ 보드를 제작하고 있으며, Paladin Viper 제품은 현재 전 세계적으로 수백개소 이상의 광산과

석유가스전에서 활용되고 있다(Fig. 5(b)). 특히 Paladin IV는 최신의 자료획득장치로서 이더넷을 통한 동기화, 플러그앤플레이 기능 등의 향상된 성능을 가지고 있다. 운영프로그램으로는 1994년부터 개발해온 HSS (Hyperion Seismic Software)이 있으며, 자료획득모듈인 HNAS, 파형가시화모듈인 WaveVis™, 3차원 가시화 및 해석 프로그램인 SeisVis™, 파괴모드 해석용 SMTI™, 스펙트럼 분석용 등의 프로그램이 있다. Fig. 5(c)는 HSS를 이용하여 광산에서 측정한 미소진동의 위치와 크기를 보여주는 화면이다.

(a) Example screen of AEwin™

(b) Example screen of NOESIS

Fig. 4. Operation software developed by PAC (www.pacndt.com)

(a) Sensors

(b) DAQ - 32 bit Paladin IV

(c) Example screen of HSS

Fig. 5. Products and operation software of ESG (www.esgsolutions.com)

3. 미소파괴음 시스템 개발

3.1 개발이력

국내 지반분야에서 AE에 관련된 연구는 1980년대 전후부터 보고되었으나, 대부분 실내실험에 국한되어 수행되었다(Park, 1981; Ko, 1983). 이들 연구는 구조물의 계측에 관한 실용적 목적보다는 작은 크기의 시료를 활용한 순수 연구용이었다. 이후 2006년에 한국지질자원연구원에서 현장계측목적의 AE와 MS

계측시스템 시작품을 개발하였다. 초기 제작된 시스템은 두 종류로써 AE와 MS 계측에 모두 적용이 가능한 PXI 형식(측정 및 자동화시스템을 위한 견고한 PC 기반의 플랫폼)의 시스템과 MS 계측에만 가능한 시스템으로 구성되었다(Table 1). 이 시스템은 AE 계측용에는 미국 PAC사 제품의 압전센서를, MS 계측용에는 캐나다 ESG사의 일방향 가속도센서를 사용할 수 있도록 제작되었다. 신호획득장치는 NI사 제품을 이용하였으며, 운영프로그램은 Labview 프로그램을 이용하여 제작되었다. 초기 개발된 운영프로그램은

Table 1. DAQ configuration of prototype AE and MS monitoring system (KIGAM, 2006)

	DAQ of prototype AE and MS monitoring system	DAQ of prototype MS monitoring system
Configuration	<ul style="list-style-type: none"> • Max. sampling rate: 1 MHz • PXI type • 16Bit resolution • up to 12 channels • PXI-6120(NI corp.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Max. sampling rate: 51.2 kHz • USB type • 24 Bit resolution • up to 12 channels • cDAQ-9172(NI corp.)
Note	High performance and high cost	Relative low cost, only use for MS events

하나의 모듈로 구성되었으며, 설정된 검출한계 이상의 신호가 감지되는 경우 자료를 저장하고 신호의 발생위치를 추적할 수 있도록 구성되었다.

AE와 MS 계측시스템을 국내에 적용할 때의 어려움 중 하나는 기술에 대한 인식 부족과 함께 다른 계측방법에 비해 AE와 MS 계측장비가 고가라는 점이다. 이는 AE와 MS 신호가 고주파의 탄성파이기 때문에 고속의 신호취득이 가능한 신호획득장치가 필요하며, 일반적으로 고속 신호획득장치는 고가이기 때문이다. 또한 고속신호를 처리하는 운영프로그램 비용 또한 기존의 계측운영 프로그램에 비해 비싸다. 이러한 문제점에도 불구하고 AE와 MS 계측방법이 주는 여러 장점으로 인해 선진외국에서는 널리 사용되고 있다(Cheon et al., 2008). 따라서 시작품 형태의 계측시스템은 비용절감을 고려하여 실험장치에 범용

으로 사용되는 여러 신호획득장치를 검토하여 선정하였다. 범용의 신호획득장치가 가지는 한계점을 극복하고 국내 현장여건을 고려하여 운영프로그램을 자체 제작하게 되었다. 최초 제작된 운영프로그램은 CPU와 메모리를 고려하여 AE 계측용 운영프로그램(AE scope)과 MS 계측용 운영프로그램(MS scope)로 구분하였다.

개발된 시스템에 대한 성능평가는 실내실험과 현장실험을 통해 이루어졌으며, 본 보고에는 MS 계측에 대해 캐나다 ESG사의 제품과 기술이 적용된 여수유류비축기지의 계측신호와 비교, 검토한 내용을 제시하고 있다. 여수유류비축기지에 사용된 장치는 일방향 가속도계인 A1030 센서와 6채널 24비트인 Paladin 신호획득장치, HSS 운영프로그램을 사용하였다. 본 연구원에서는 가행광산에 구축한 지하연구실험실

(a) Seismic wave pattern by blasting using ESG monitoring system

(b) Seismic wave pattern by estimated brittle failure using ESG monitoring system

(c) Seismic wave pattern by blasting using self-developed monitoring system

(d) Seismic wave pattern by hammering using self-developed monitoring system

Fig. 6. Comparison of seismic wave patterns between ESG and KIGAM self-developed monitoring system

(Underground research laboratory)에 일방향 가속도 계인 A1030센서와 cDAQ-9172로 구성된 신호획득장치, MS scope 운영프로그램을 사용하였다. 여수유류 비축기지의 경우 발파, 천공, 스케일링 등 다양한 작업이 수행되었고 취성파괴로 추정되는 파형에 대한 계측도 이루어졌다. 지하연구실험실에서는 파형의 비교를 위해 발파와 취성파괴와 파형이 비슷할 것으로 추정되는 해머타격이 수행되었다. Fig. 6은 두 시스템에서 계측된 신호를 비교한 것이다. 발파작업에 의한 파형은 뚜렷한 주기적인 특성이나 경향을 보이지 않고, 일정시간동안 지속적인 파형을 보인다. 신호의 최대진폭은 신호발생 위치와 센서사이의 거리 등 여

러 인자에 의해 달라지지만 대략 수 V로 계측되어 두 시스템의 계측결과가 유사성을 보임을 알 수 있다. 취성파괴로 추정되는 측정파형은 발생규모에 따라 최대진폭이 차이가 발생하지만 계측 초기의 짧은 시간에 에너지가 집중된 후 소멸되는 패턴이 해머타격과 유사하다. Fig. 6의 진폭은 사용된 센서가 30 V/g이기 때문에 진폭이 1 m/s²인 경우 약 3 V에 해당한다.

성능평가와 더불어 개발된 시스템을 광산, 지하연구실험실, 터널, 사면 등에 적용을 통해 성능개선 작업을 수행하였다. 성능개선작업 결과로부터 AE와 MS 계측시스템의 신호획득장치를 같이 사용하지 않고 각각의 특성에 맞게 사용하는 것이 경제적인 측면이

Fig. 7. Development history of AE and MS monitoring hardware system

Fig. 8. Development history of the AE and MS monitoring software system

나 현장적용성 등에서 효율적이어서 Fig. 7과 같이 AE 계측용과 MS 계측용으로 분리하였다. 또한 사용되는 센서와 신호획득장치의 호환문제로 인하여 MS의 경우 추가적인 장치가 필요하였으며, 현장 작업의 편리성을 위해 산업용 컴퓨터를 이용하여 일체화시키고, 소형화 시켰다. AE 계측용 역시 센서연결부위의 배치와 전기회로 등을 검토하여 저전력의 소형장치로 변환하였다.

운영프로그램의 경우에 있어서는 AE와 MS 모두 같은 탄성파이기 때문에 AE scope와 MS scope로 나누어져 있던 운영프로그램을 AEMS solution이라는 명칭으로 통합하였다. 다만 통합에 따른 각각의 헤더파일의 구분과 신호처리 속도, 프로그램 안정성, 메모리 할당 등을 고려하여 Fig. 8과 같이 7개의 모듈로 구성하였다. Observer 모듈에서 신호의 고속획득에 중점을 두었으며, 1D/2D/3D analyzer 모듈의 경우 후처리 기능을 주로 수행하도록 하였다. 현재는 시스

템의 안정적 활용과 보다 소형화를 위하여 cRIO방식의 하드웨어와 이에 연동할 수 있는 운영프로그램을 개발 중에 있다. cRIO는 compactRIO를 줄여서 일컫는 용어로서 재구성이 가능한 임베디드 컨트롤 및 수집 시스템을 말한다.

3.2 하드웨어 구성

현재 현장에서 활용되고 있는 미소파괴음 계측시스템의 하드웨어 구성은 Fig. 9와 같으며, 사양은 Table 2에 제시되었다. 센서는 계측대상의 규모, 목적 등에 따라 AE 센서 또는 MS용 일방향/삼방향 가속도계를 사용하며, 신호획득장치를 포함한 계측시스템은 사용되는 센서에 따라 AE 계측용과 MS 계측용으로 구분된다. 계측시스템의 비용 중 많은 부분을 차지하는 신호획득장치는 4채널이 사용되기 때문에 채널 수에 따라 최소 4 채널에서 12 채널까지 확장이 가능하다.

Fig. 9. Configuration of Self-developed AE and MS system

Table 2. Specification of AE and MS monitoring system

Type	Sensor	Signal conditioner	DAQ board
Acoustic Emission(AE) monitoring system	Piezoelectric sensor 15 kHz or 60 kHz (PAC corp.)	Sensor w/ preamp. DAQ board(IEPE) provided	NI PCI-4462 204.8kHz sampling rate 24bit, up to 12 channel
MicroSeismic (MS) monitoring system	Directional (Uniaxial or Triaxial) accelerometer 50 Hz - 5kHz (ESG corp.)	Self-developed conditioner 4ch or 12ch per each 28 V power supply	NI-9233 51.2 kHz sampling rate 24bit, 12 channel

최근 개발 중인 시스템은 동기화기능을 강화하여 24 채널, 36채널 등의 확장이 가능하도록 구현하고 있다. AE 계측용의 경우 초기 시작품과 달리 PCI-4462 신호 획득장치를 사용하며, MS 계측용의 경우 신호획득장치로 NI-9233이 사용된다. NI-9233을 사용하기 위하여 USB 형태의 cDAQ NI-9172가 추가적으로 사용되며, NI-9172는 4슬롯 16채널까지 확장이 가능하다.

현장에 전원이 공급되지 않는 경우를 대비하여 배터리와 같은 전력공급장치를 부가적으로 사용한다. 현장에서 계측된 자료는 무선통신이 가능한 경우에는 무선통신 방식으로, 그렇지 않은 경우에는 유선방식을 사용한다. 사면과 같이 지상에 설치된 경우에는 무선통신을 쉽게 이용할 수 있으나, 터널과 같은 경우에는 무선통신이 용이하지 않을 수 있다. 터널의 경우 유선방식인 광케이블이나 전력선통신 등을 설치하는 것이 안정적인 신호를 받을 수 있는 장점이 있다. 그러나 광케이블의 경우 설치 작업을 위해서 차량 등과 같은 현장지원이 필요하며, 케이블 설치길이가 수 km 이상인 경우에는 비용적인 측면을 고려하여야 한다. 전력선통신은 전력을 공급하는 전력선을 매개로 신호를 수십 내지 수백 kHz 이상의 고주파 신호에 실어 통신하는 방법이다. 이 방법의 장점은 기존에 설치된 전력선을 이용하여 별도의 케이블설치 작업을 수행하지 않아도 된다는 점이다. 다만 전력선 중간의 변압기가 있는 경우 변압기 양단에 추가적인 모듈의 설치작업이 필요하며, 신호의 왜곡현상이 발생할 수 있는 것 등이 단점이다. 지하공간에 사용되는 무선통

신은 지하공간의 구조가 복잡하지 않은 경우에 사용 가능 하다. 곡률이 크지 않은 선형의 장대터널 같은 경우 무선브릿지를 이용하여 수 km에 대해 통신이 가능하다.

3.3 운영프로그램

미소파괴음 계측시스템의 중요 부분 중 하나로 운영프로그램을 꼽을 수 있는 데, 이는 측정된 자료를 현장상황이나 목적 등에 따라 적절하게 재현해줄 뿐 아니라 사용의 편리성, 자료해석의 정확도 향상 등에 기여하기 때문이다. 운영프로그램은 앞서 전술한 바와 같이 AE 계측용과 MS 계측용으로 구분되어 사용되던 프로그램을 하나의 운영프로그램인 AEMS solution으로 통합하였다. 개발된 운영프로그램은 7개의 모듈로 구성되어 있으며, 4개의 모듈은 원격지의 현장계측용, 3개의 모듈은 사무실의 서버용으로 사용된다. 각 모듈의 담당기능은 Table 3과 같다.

AEMS solution은 다양한 기능을 제공하고 있으며, 대표적인 기능을 열거하면 다음과 같다.

- 실시간 계측과 원격계측
- 검출한계설정 등 각종 환경설정
- 고속 자료획득과 저장
- 자료 필터링과 FFT 분석
- 시간별 자료처리와 후처리
- 위험수준 알람기능과 e-mail 발송기능
- 데이터 리뷰

Table 3. Features of modules in AEMS solution software

System	Module	Main Feature
Field system (Local Data acquisition equipment)	Observer	Signal measurement and storage
	Data viewer	Check and view of measured data
	Data sender	Data transmission through FTP
	Data receiver	Data receiving through FTP
Office system (Server and Analysis equipment)	1D analyzer	Data analysis in an 1D condition
	2D analyzer	Data analysis in a 2D condition
	3D analyser	Data analysis in a 3D condition

- 다양한 방식의 초동시간설정
- 차원(1D, 2D, 3D)에 따른 음원발생위치 추적
- AE 파라미터 분석 및 내보내기
- 다양한 방법의 음원분석
- 파괴 메커니즘 분석

AEMS solution은 7개 전체 모듈을 관리하며, Fig. 10과 같은 환경설정을 위한 화면이 제시된다. 환경설정화면은 5개 탭으로 구성되어 있으며, Measurement 탭에서는 계측시스템 선정, 신호 저장시간선정, 검출한계 등 기본변수를 설정하며, Channels 탭에서는 사용채널 수와 신호획득장치 등을 설정한다. Alarm & Excu 탭은 위험수준 기준과 이메일 전송 등과 관련되어 있으며, Algorithm 1과 Algorithm 2는 초동발체방법, 음원해석방법, 감쇠특성 등과 관련되어 있다. 환경설정 내용은 측정신호 저장파일의 헤더부분에 기록되어 개개의 모듈에서 공통적으로 사용될 수 있도록 연결자 역할을 한다.

Observer 모듈은 센서로부터 신호를 수집, 저장하는 역할을 수행하며, Fig. 10의 Tools 메뉴에서 Observer

Fig. 10. Setup window of AEMS solution

를 실행하거나, 환경설정화면 하단의 체크박스를 이용하여 자동으로 실행시킬 수 있다. Observer 모듈은 전체적인 신호의 크기를 보여주는 Level Trend 탭, 현재의 신호를 보여주는 Time Signal 탭, 저장된 신호를 보여주는 Triggered Signal 탭, 계측된 신호의 시간에 따른 변화를 보여주는 Hit Rate 탭, 그리고 환경설정 내용과 프로그램 정보를 제공하는 Setup 탭과 About 탭이 있다(Fig. 11(a), (b)). Triggered Signal 탭의 신호 자료는 검출한계(trigger level)를 넘는 신호가 센서에 도달하는 경우에 계측된 자료이다.

Data viewer는 현장에서 Observer 모듈을 실행하지 않고 계측자료와 AE 파라미터 등을 볼 수 있도록 개발된 모듈이며, 계측자료는 확장자가 CSV인 파일로 내보내기가 가능하다.

(a) Trend of signal screen

(b) Triggered signal screen

Fig. 11. Example screens in Observer module

Fig. 12. Function of data sender and data receiver modules

Data sender 모듈은 Observer 모듈이 수집, 저장한 데이터파일을 FTP 통신을 이용하여 원격지에 있는 서버 컴퓨터로 전송하는 기능을 수행하며, Data receiver 모듈

은 Data sender 모듈에서 전송한 파일을 서버로 수신하는 역할을 한다. AEMS solution은 여러 지역의 로컬 계측시스템으로부터 하나의 서버로 자료의 전송이 가능하도록 설계되었다(Fig. 12).

Analyzer 모듈은 현장에서 계측된 자료에 대한 보다 상세한 분석을 위한 모듈로서, 적용 대상의 특성과 분석능력향상, 음원발생위치 해석의 정확도 향상을 위해 1차원(1D), 2차원(2D), 3차원(3D) analyzer로 구분되어 있다. 계측신호의 구분은 환경설정의 Source ID method에서 결정된 정보를 통해 이루어진다. 1차원 해석의 경우 복잡하지 않은 터널, 단층대나 불연속면을 통과하여 설치된 록볼트 등을 이용한 경우, 또는 웨이브가이드를 이용한 사면계측 등에 활용된다. 2차원 해석은 특정 터널의 단면 등과 같이 평면을 계측대

(a) Raw data screen

(b) Manual picking screen

(c) AIC picking screen

(d) Multiple source analysis

Fig. 13. Various picking methods in Analyzer module and multiple analysis function

상으로 한 경우에 활용된다. 3차원 해석은 3차원적인
센서 배열을 통해 보다 정밀한 계측과 음원위치결정,
파괴메커니즘 분석 등을 수행할 때 활용된다.

Analyzer 모듈은 Raw data 탭, Filtered Signal 탭, Simple 탭, Manual 탭, Picking window 탭, AIC 탭, Header 탭으로 구성되어 있다(Fig. 13(a), (b), (c)). Raw data 탭은 일정 검출한계에 의해 저장된 자료를 보여주며, Filtered Signal 탭은 사용자가 일정 주파수 밴드를 이용하여 필터링한 자료를 보여준다. Simple 탭은 초동발체에 있어 일정 검출한계를 넘는 지점을 선택하는 방식이며, Manual 탭은 사용자가 파형을 검토하면서 초동발체시간을 선택하는 방식이다. Picking window와 AIC 탭은 크기가 다른 두 개의 윈도우를 이동시키면서 두 값의 일정비율이 넘는 지점을 초동 발체시간으로 산정하는 방식이며, AIC 알고리즘을 이용하여 초동발체를 하는 탭이다. AIC 알고리즘에 의한 초동을 발체하는 방법은 Maeda (1985)가 제시한 방법에 기초하였다. 이들을 통해 1차원, 2차원, 3차원 음원이 각각 계산되며, Tool 메뉴의 Multiple analysis를 수행하는 경우, 모든 방식으로 계산된 음원이 제시

된다.

음원발생위치 추적에 사용되는 방식은 도달시간 차를 이용하는 방식인 TDOA (Time Difference of Arrival) 방식이 주로 활용되고 있으며, Analyzer 모듈 역시 기본적으로 TDOA 방식을 제공한다. 이 방식을 사용할 때는 항상 분석되는 차원에 하나 이상의 추가 센서에서 신호가 측정되어야 하며, 이렇게 각각의 센서에서 측정된 신호의 도달시간 차를 사용하여 계산한다. 그러나 이 방식은 간혹 음원결정을 하지 못하고 발산하는 경우가 있어, 유전알고리즘의 하나인 RCGA (Real Coded Genetic Algorithm)을 이용하여 음원발생위치 결정의 신뢰성을 향상시켰다. Fig. 14는 본 프로그램에 사용되는 RCGA의 프로세스를 보여준다. 3차원에서 결정된 음원으로부터 균열모드를 결정할 수 있으며, 3D Analyzer 모듈에서 6개 이상의 센서에 감지된 신호에 한해서 이 기능이 구현되도록 하였다. 균열모드의 결정은 Polarity와 SiGMA 방식이 사용되었다. Fig. 15는 임의로 생성한 음원에 대한 균열모드 분석화면을 제시한 것이다.

Fig. 14. RCGA process in Analyzer module

Fig. 15. Failure mode analysis

4. 맺음말

구조물의 안전관리에 대한 인식과 관심은 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 지반구조물의 재해는 그 규모와 피해가 크기 때문에 이에 대한 안전감시가 매우 중요하다. 이러한 지반구조물의 재해대응에 관한 방법 중 본 보고에서는 미소파괴음을 이용한 방법과 이에 관련된 계측시스템의 개발에 대해 서술하였다. 미소파괴음을 이용한 계측은 지반구조물 내부의 미시적 변형이나 파괴거동을 음향과 진동을 이용해 계측하는 방법으로 종래의 계측방법에 비해 파괴현상을 사전에 감지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 다소 고가의 계측시스템이 요구되는 기술적 측면과 계측의 중요성에 대한 사회적 공감대 등의 사회적 측면이 해결되어야 하는 과제로 여겨진다. 특히 계측시스템에 있어 다른 선진외국에 비해 늦게 개발, 적용되고 있으며, 아직 앞으로 해결해야 할 과제들이 남아있는 것은 사실이나 국내 독자 기술로 여러 구조물에 대한 현장적용이 이루어지고 있는 점은 주목할 만하다.

미소파괴음 계측기술은 센서, 자료획득장치, 운영프로그램으로 구성된 계측시스템과 이를 활용한 분석, 해석기술로 구분될 수 있다. 센서의 경우 아직

신뢰성이나 내구성이 충분히 검증되고 있지 않지만 국내 업체에서 개발이 이루어지고 있으며, 또한 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)를 이용한 개발을 통해 국내개발이 가능할 것으로 보인다. 자체개발된 운영프로그램은 현장중심형으로 개발되어 지반구조물에 적용하는 데 보다 실용성을 높였다. 해석과 분석 기술이 있어서 다양한 방법을 채택함으로써 보다 객관적인 분석이 가능하도록 하였다. 또한 운영프로그램은 현재도 지속적으로 향상되어 나가고 있어 미소파괴음 기술을 적용하는 데 있어 중요한 역할을 수행할 것으로 여겨진다. 또한 앞으로 재해대응 안전감시의 목적을 위해서는 다양한 지반구조물에 대한 계측과 운영경험 등을 통한 자료의 지속적인 축적과 이를 바탕으로 한 신뢰성이 향상된 관리기준 등이 마련되어야 할 것으로 보인다.

미소파괴음의 계측은 미소파괴음 자체의 이벤트가 발생하는 것을 예상할 수는 없으나 미소파괴음이 발생한 원인을 파악하고 관련된 위험성(hazard)를 파악할 수 있어 이와 관련된 위험도(risk)를 관리할 수 있다. 또한 위험성이 있는 미소파괴음이 발생할 것 같은 지반구조물의 위치를 규정할 수 있어 이러한 관점의 안전감시개념을 활용한다면 지반구조물의 재해대응에 보다 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘지하 암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발’과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Cai, M., Kaiser, P.K., Morioka, H., Minami, M., Maejima, T., Tasaka, Y., 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.
2. Cheon, D.S., Park, E.S., Jung, Y.B., Park, C., Synn, J.H. (2008), “Monitoring technique using acoustic emission and microseismic event”, *Tunnel & underground space*, Vol. 18, pp. 1-9.
3. Cheon, D.S., Jung, Y.B., Park, E.S., Song, W.K., Jang, H.J. (2011), “Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with waveguides”, Vol. 121, pp. 75-88.
4. ESG, www.esgsolutions.com
5. Hong, J.S., Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y., Choi, Y.T., Park, Y.J. (2006), “Microseismic event monitoring of highly stressed rock mass around underground oil storage caverns”, *Tunnelling & Underground Space Technology*, No. 214.
6. JANDT (2008), *Acoustic emission(translated edition)*, goomibook, p. 446.
7. KIGAM (2006), *A study on the safety monitoring techniques for underground space facilities*, OAA-2004004-2006(3), KIGAM, p. 406.
8. Ko, H.J. (1983), *A study on A.E. source location of cylindrical specimen and plate with a circular hole under uniaxial compressive stress*, Master thesis, Seoul National University, p. 48.
9. KSMI (2006), *Theory and practice of safety monitoring on underground structure*. goomibook, Seoul, p. 446.
10. Maeda, N. (1985), “A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data”, *Jishi* Vol. 38, pp. 365-379.
11. PAC, www.pacndt.com
12. Park, C.W. (1981), *A study on acoustic emission during laboratory shear test in rock*, Master thesis, Seoul National University, p. 87.
13. Song, Y.H., Park, M.H., Jeon, J.S., Lee, J.M, Cho, C.S., Lee, T.J. (2012), “Construction of a microseismicity observation network borehole accelerometers for monitoring geothermal reservoir”, *Korean society of mineral energy resources engineers*, Vol. 49, pp. 487-497.