

TECHNICAL NOTES

# 음향미소진동기반 모니터링 시스템을 이용한 지반구조물(유류 지하저장시설) 진단평가 가이드라인

천대성\*, 정용복

한국지질자원연구원 전략기술연구본부

## Guideline for the Diagnose of Geotechnical Structure (Underground Oil Storage Cavern) using a Microseismic Monitoring System

Dae-Sung Cheon\* and Yong-Bok Jung

KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

\*Corresponding author: [cds@kigam.re.kr](mailto:cds@kigam.re.kr)

Received: July 6, 2018

Revised: July 20, 2018

Accepted: July 24, 2018

### ABSTRACT

Monitoring is the act of collecting and analyzing accurate engineering information using various methods and instruments. The purposes of the monitoring are design verification, construction management, quality control, safety management, and diagnose of structure etc.. The diagnose evaluation of the geotechnical structures corresponds to the confirmation of the structural performance. It is aimed to judge the soundness of geotechnical structures considering the degree of damage due to the environmental change and elapsed time. Recently, microseismicity, which is widely known in Korea, can be used for safety management and diagnoses of structure as it detects the micro-damage without disturbance of the structure. This report provides guideline on the procedure for assessing an underground oil storage cavern using microseismic monitoring techniques. Guidelines cover the selection of monitoring systems, sensor array, sensor installation and operation of systems, and interpretation.

**Keywords:** Microseismic, Monitoring, Underground oil storage cavern, Diagnose

### 초록

모니터링은 여러 방법과 장치를 이용하여 공학적 정보를 정확하게 수집하여 분석하는 행위를 말한다. 모니터링의 목적은 설계확인, 시공관리, 품질관리, 안전관리, 구조물 성능 확인 등이 있으며, 지반구조물 진단평가는 구조물의 성능 확인에 해당하는 것으로 구조물이 사용 개시 후 환경 변화나 경년에 의해 누적된 피로 손상도를 고려하여 구조물의 건전도 판단을 목적으로 한다. 근래 국내에서 많이 알려진 음향미소진동은 구조물의 교란이 없는 상태에서 미세 수준의 손상을 감지하여 안전관리 및 구조물의 성능 확인에 활용될 수 있다. 본 보고는 음향미소진동 모니터링 기법을 이용하여 유류지하저장시설을 진단평가하는 절차에 대한 가이드라인을 소개한다. 가이드라인에는 모니터링 시스템 선정, 센서 배열과 설치 및 시스템 운영, 해석 등을 다루고 있다.

**핵심어:** 음향미소진동, 모니터링, 유류지하저장시설, 진단평가



## 1. 적용범위

광본 가이드라인에서는 음향미소진동기반의 모니터링 시스템을 이용하여 지반구조물(유류 지하저장시설)의 구조적 안정성을 진단평가하기 위한 지침을 제안한다.

## 2. 참고규격

ISO 12716:2001 Non-destructive testing — acoustic emission inspection – Vocabulary

ASTM E750 Standard Practice for Characterizing acoustic emission Instrumentation

ASTM E1316 Terminology for Nondestructive Examinations

NDIS 2421:2000 Recommended practice for in situ monitoring of concrete structure by acoustic emission

KS B 0550-1996 비파괴시험 용어

KS B ISO12713 비파괴검사-미소진동시험-탐측자의 일차교정

ISRM Suggested Method for In Situ Microseismic Monitoring of the Fracturing Process in Rock Masses

ISRM Suggested Method for Laboratory Acoustic Emission Monitoring

## 3. 용어의 정의

본 가이드라인에서 사용하는 주요 용어는 다음과 같다. 나머지 용어는 ASTM E1316, ISO 12716:2001에 기재된 것을 사용한다.

- 1) 음향미소진동: 재료의 변형 또는 파괴 시 변형에너지가 개방되어 발생한 탄성파, 음향방출음(Acoustic Emission, AE)과 미소진동(Microseismicity)을 포괄하는 의미
- 2) 음향방출음: 재료의 변형 또는 파괴 시 변형에너지가 개방되어 발생한 탄성파 중 10 kHz 이상의 주파수를 갖는 탄성파. 지반 구조물 분야에서는 미소파괴음으로도 사용
- 3) 미소진동: 재료의 변형 또는 파괴 시 변형에너지가 개방되어 발생한 탄성파 중 수 십 Hz에서 10 kHz 사이의 주파수를 갖는 탄성파. 미소지진음으로도 사용
- 4) 채널: 음향미소진동신호가 통과하여 처리되는 일련의 전기적 경로
- 5) 위치표정: 음향미소진동신호를 이용하여 음향미소진동의 발생 위치를 판정하는 방법
- 6) 배열: 음향미소진동의 위치표정을 실시하기 위해 센서 여러 개로 구성된 조
- 7) 교정 신호: 음향미소진동센서의 적정 설치 여부나 센서의 초기 반응 확인을 목적으로 사용되는 음향미소진동파 모방한 탄성파 발생원
- 9) 이벤트 수: 음향미소진동신호를 검출하는 계측채널에서 계수된 음향미소진동 신호 수
- 10) 지하구조물(유류지하저장시설): 원유의 지하저장을 위해 자연적 또는 인공적으로 암반에 굴착된 무복공의 지하 공동 (unlined underground cavern)에 지하수압을 이용하여 원유를 저장하는 시설. 국내는 폭 18 m, 높이 30 m의 표준 단면 활용

## 4. 사전지식

음향미소진동 모니터링 시스템의 선정, 장착, 점검, 성능시험 및 초기조작의 경우 다음 항목에 대해 충분한 지식과 기술을 가지고 있어야 한다. 또한, 지반구조물 중 하나인 유류지하저장시설에 대한 기본 지식을 가지고 있어야 한다.

- (1) 음향미소진동에 관한 기초이론
- (2) 음향미소진동기반 모니터링 시스템
- (3) 음향미소진동기반 모니터링 시스템과 시험대상 구조물 사용 상 요구사항 및 제한
- (4) 음향미소진동기반 모니터링 시스템의 조작 및 데이터 해석
- (5) 지반구조물 안전계측에 관한 기본 지식
- (6) 유류지하저장시설의 저장원리, 배치, 운영에 관한 지식
- (7) 암석역학적 기본 지식

## 5. 음향미소진동기반 모니터링 시스템

### 5.1 시스템의 구성

음향미소진동기반 모니터링 시스템은 Fig. 1과 같은 구성과 기능을 가진 것을 표준으로 한다.

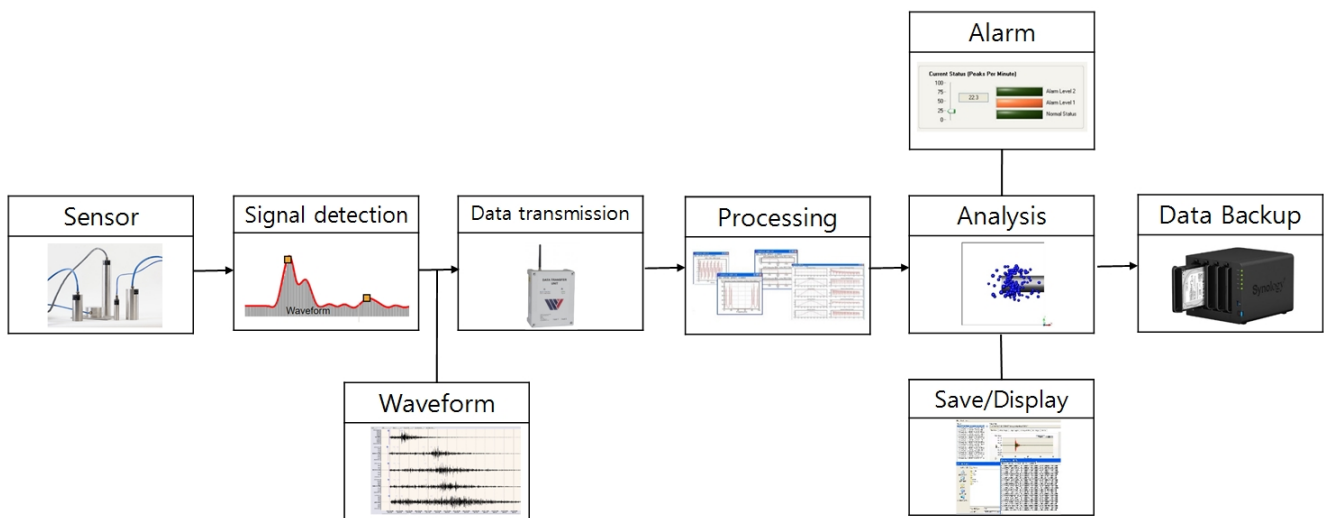


Fig. 1. The components and functions of microseismic monitoring system

## 5.2 센서

음향미소진동센서는 지오폰과 가속도계로 나뉘지며, 일(축)방향과 삼축방향 센서로 구분된다. 음향미소진동센서는 모니터링 대상 지반구조물의 운영 중에 음향미소진동신호를 검출할 수 있는 충분한 감도를 가진 것이어야 한다. 지오폰의 경우는 80 V/m/s 이상의 감도를 가져야 하며, 가속도계의 경우 1 V/g 이상의 감도를 가져야 한다. 음향미소진동센서는 일정 기간 동안 온도, 습도, 기계적 진동 등에 대하여 충분한 내구성을 확보한 것이어야 한다.

## 5.3 신호검출

신호검출에 사용되는 장치는 전치증폭기(preamplifier), 아날로그-디지털 변환기(A/D 변환기), 임베디드(내장) 자료획득 컴퓨터(Embedded Data Acquisition Computer, DAC)의 세 부분으로 구성된다. 신호검출에 있어서 주의할 사항은 주파수 앨리어싱(aliasing) 현상을 피하기 위해, 샘플링 속도는 암반 손상 또는 파괴 이벤트의 주요 주파수 범위에서 최대 5-10 배가 되어야 한다.

음향미소진동신호를 증폭시킬 때는 주파수대역도 선정해야 한다.

- (1) 증폭기: 음향미소진동센서와 가능한 한 가까운 위치에 전치증폭기를 설치하는 것이 바람직하다. 증폭기는 내부에서 발생하는 고유의 전기적 잡음이 적은 것을 사용한다. 전치증폭기는 설치 환경(온도, 습도, 기계적 진동 등)을 고려하여 보호를 위한 적절한 방책도 세워야 한다.
- (2) 주파수대역: 음향미소진동센서 및 증폭기를 조합했을 때의 주파수대역은 성능 평가 용도에 따라 선정한다. 암반의 경우 음향 방출센서는 10 kHz ~ 1 MHz 범위에서 선정하며, 미소진동센서는 10 Hz ~ 10 kHz에서 선정한다.

## 5.4 파형기록

음향미소진동기반 모니터링 시스템은 음향미소진동신호 파형을 기록하는 기능을 가진 것이 좋다. 음향미소진동신호 파형을 기록하는 경우 기록 가능한 용량, 기록 재생계의 주파수대역, 동적범위, 신호 대 잡음비 등의 특성이 기록하려는 음향미소진동신호 파형에 맞게 충분한 범위로 설정한다.

## 5.5 신호전송

신호전송장치는 계속된 음향미소진동 자료의 처리 및 보존을 위해 서버 컴퓨터에 음향미소진동 신호를 전송하며, 각 신호검출장치에 대한 시간 동기화를 제공한다. 각 신호검출장치의 시간 동기화는 3차원 위치표정을 위해 중요한 기술이다. 사용하는 음향미소진동센서의 주파수대역과 기록시간 등에 따라 정밀도가 달라질 수 있다. 신호전송장치는 1) 센서에서 신호검출장치까지, 2) 신호검출장치에서 서버까지, 3) 서버에서 자료처리 및 자료해석 부분까지로 구분할 수 있다.

## 5.6 신호처리

신호처리는 음향미소진동신호와 기타 외부 신호를 포함한다. 각 용어는 ASTM E1316, ISO 12716:2001을 표준으로 한다.

음향미소진동 변수(또는 파라미터): 음향미소진동기반 모니터링 시스템은 다음 음향미소진동 파라미터의 일부 또는 전부를 계

측하는 기능을 가지는 것이어야 한다. 처음에는 가능한 한 많은 음향미소진동 변수를 계측하여 음향미소진동 파라미터 및 해석 방법의 효율성을 다각적으로 검토하는 것이 좋다.

1) 신호 파형의 크기와 관련된 변수

진폭, 링다운 카운트, 음향미소진동에너지,

2) 신호 파형 형상 관련된 변수

지속시간(duration), 상승시간(rise time), 평균주파수

3) 위치표정 변수

지진 포텐시(seismic potency), 방출에너지, 지진 모멘트, 겉보기 체적, 에너지 지수

### 5.7 자료기록

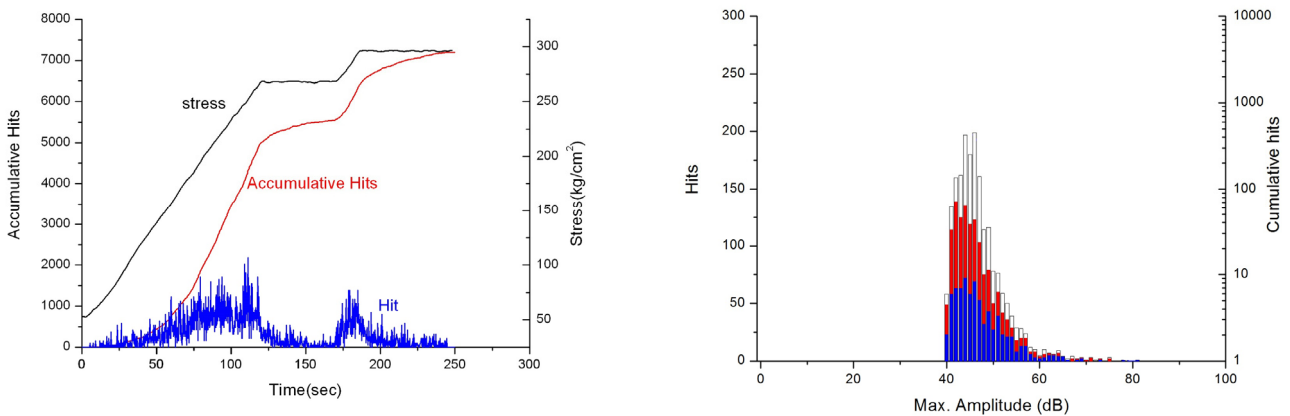
음향미소진동기반 모니터링 시스템은 신호처리부에서 출력되는 음향미소진동 변수를 기록하기 위해 용량이 충분한 불휘발성 기록장치가 탑재된 것이어야 한다. 기록장치는 자료해석장치 또는 다른 서버 상에서 기록정보를 재생할 수 있는 수단을 갖춘 것이어야 한다.

### 5.8 자료해석

음향미소진동기반 모니터링 시스템은 다음의 자료해석기능의 일부 또는 전부를 갖춘 것이어야 한다. 또한 해석된 자료를 시간 순으로 기록하는 것은 모니터링 대상 구조물의 건전성을 평가하는 데 있어 중요한 요소이다

- (1) 경향 해석기능: 선택된 음향미소진동 변수의 변화 경향을 해석하는 기능
- (2) 분포 해석기능: 음향미소진동 변수가 계측대상 안에 들어가는 음향미소진동 이벤트를 해석하는 기능
- (3) 음향미소진동 표정 해석기능: 주로 여러 개의 음향미소진동센서에 도달하는 음향미소진동파의 도달시간 차이 정보에 따라 음향미소진동원의 위치를 추정하는 기능

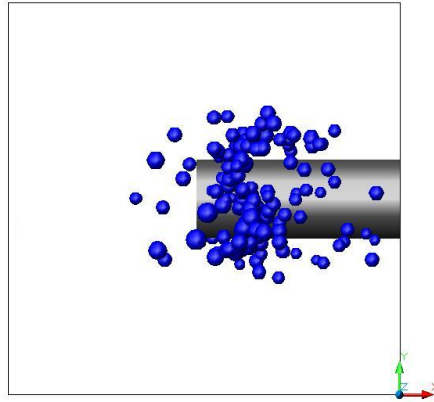
Fig. 2는 경향, 분포, 음향미소진동 표정 해석기능의 한 사례를 제시한 것이다.



(a) Examples of the parameters trend of MS data

(b) Examples of the amplitude distribution of MS data

Fig. 2. Example of analysis of MS data



(c) Examples of source location of MS events

**Fig. 2.** Example of analysis of MS data (Continued)

## 5.9 알람 기능

음향미소진동기반 모니터링 시스템은 사전에 사용자가 지정한 경계값(히트 수, 누적빈도 등)을 초과할 경우 사용자에게 실시간으로 해당 사항을 통보할 수 있어야 한다.

## 5.10 해석자료 표시

음향미소진동기반 모니터링 시스템은 해석 결과를 표시하는 수단을 갖춘 것이어야 한다. 또한 표시를 갱신하는 주기도 지정할 수 있어야 한다.

## 5.11 해석자료 저장

해석이 끝난 자료의 디지털기록과 중요한 인쇄출력을 저장할 수 있는 것이 좋다. 저장기간은 데이터베이스 정보의 필요성을 고려하여 결정한다.

# 6. 모니터링 시스템 선정, 설치 및 운영 절차

## 6.1 시스템 선정

모니터링 대상에 적합한 시스템과 주변장치를 준비한다.

- (1) 음향미소진동기반 시스템
- (2) 천공 장비 또는 천공 장치
- (3) 그라우팅 재료
- (4) 전원

(5) 현장 설치용 보조 도구

### 6.2 센서 배열 설계

센서의 배열 설계에는 두 가지 방법이 있다. 하나는 최적화와 같은 반경험적(semi-empirical) 방법이며, 다른 하나는 유전자 알고리즘(GA) 등과 같은 지능형 최적화 알고리즘을 통해 센서 배열을 설계하는 것이다. 지반구조물의 모니터링에 있어 센서 배열은 일반적으로 다음과 같다.

- (1) 센서 배열은 가능한 한 위치표정의 정확성을 확보하기 위해 계측 대상을 감싸야 한다.
- (2) 센서 간격은 센서 성능과 계측감도에 따라 달라진다. 계측영역 내 각각의 센서 위치는 요구되는 이벤트 위치의 정확도를 만족시킬 수 있도록 설치되어야 한다.
- (3) 중요한 영역과 예측 가능한 불안정한 곳에는 센서 수를 늘리고 센서 간격을 줄여 센서의 밀도를 높여야 한다.
- (4) 자료전송장치는 센서의 배열에 따라 달라지며 지속적이고 정확한 계측자료를 확보하기 위해 센서의 배열을 설계할 때 편의성과 보안을 고려해야 한다. 또한 현장조사를 통해 센서 배열이 적합한 지 확인하여야 한다.
- (5) 전체 계측과정에서 불리한 지질 조건과 불안정한 영역에서는 센서를 추가적으로 설치해야 한다.
- (6) 음향미소진동 신호가 아닌 소음(예 : 발파, 전기잡음, 시추 및 건설 차량 등)의 영향을 최대한 줄여야 한다
- (7) 전체적인 센서 배열에는 적합한 '자체 허용 오차'가 있어야 한다. 특정 지역의 센서가 작동하지 않으면 다른 지역의 센서가 해당 지역을 계측할 수 있어야 한다.

유류 지하저장시설과 같은 지반구조물에서는 굴착 전에 대부분의 센서를 기존에 존재하는 공동이나 터널을 이용하여 설치한 후, 굴착이 진행됨에 따라 추가 센서를 설치한다. Fig. 3은 유류 지하저장시설에 대한 센서 배열의 한 예를 제시한 것이다.

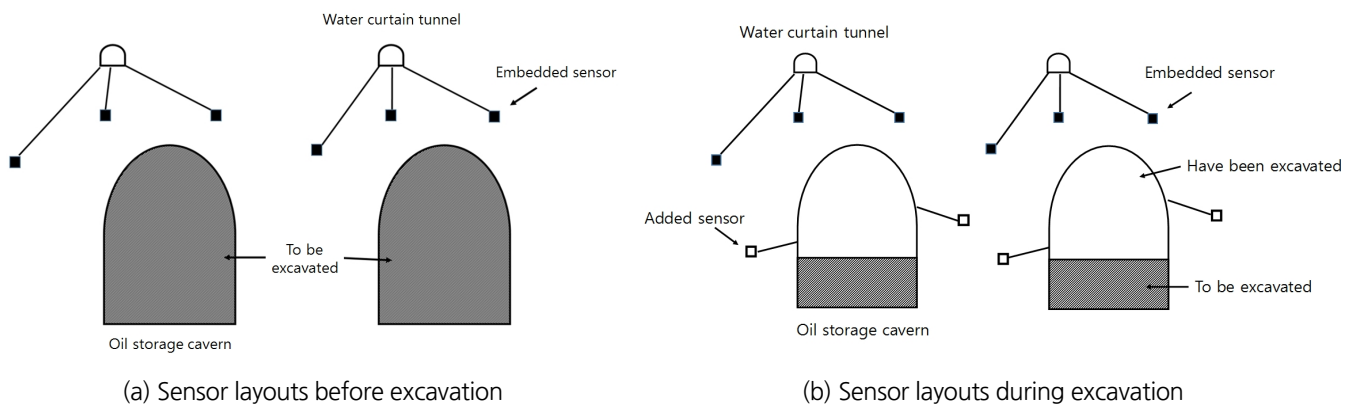


Fig. 3. Example of sensor layouts for oil storage cavern

### 6.3 센서 설치

신뢰할 수 있는 모니터링 결과를 위해 센서 설치하는 매우 중요하다. 센서의 설치하는 일반적으로 다음의 과정을 따른다.

- (1) 천공: 센서는 일반적으로 암반을 천공한 후 시추공에 센서를 삽입하고, 시멘트나 기타 재료 등을 이용하여 그라우팅하여 사용

한다. 이 때, 시추공 직경이 너무 작으면 센서를 설치할 수 없게 되기 때문에, 시추공 직경은 일반적으로 설치 편의를 위해 센서 직경의 약 1.3-1.5 배가 활용된다. 시추공의 길이는 적절한 자료수집과 획득된 자료의 품질을 보장하기 위해 굴착손상영역(EDZ, Excavation Damage Zone) 밖의 지역까지 연장하여 천공한다.

- (2) 시추공 청소: 천공한 구멍 내 자갈, 물 및 기타 잔여물을 청소해야 하며, 이때 송풍장치가 수평 및 하향의 시추공의 바닥에서 잔여물을 제거하는 데 필요하다.
- (3) 센서 배치: 수평 및 하향경사 시추공의 경우, 설치 빔이 시추공 바닥에 센서를 배치하는 데 사용된다. 이 후 설치 빔을 회수하고 주입 및 배기 파이프를 시추공에 배치한다. 상향 시추공의 경우, 센서와 배기 파이프를 함께 시추공에 삽입해야 한다.
- (4) 그라우팅: 시추공 내의 센서와 암석사이를 결합하기 위하여 그라우팅을 시행한다. 그라우팅은 밀봉 재료가 거의 경화 될 때까지 일정하고 느린 속도로 작동 될 수 있도록 해야 하며, 이때 사용되는 그라우팅 재료는 암석과 유사한 음향 임피던스(즉, 밀도와 전파속도)를 가져야 한다.

## 6.4 보정 신호

센서 설치 후 보정을 위한 타격 등이 수행되며, 이후 몇몇 계측에 필요한 변수를 설정한 후 계측이 수행된다. 계측이후 자료의 처리와 분석 등은 다양한 방법이 제시되어 있으며, 일반적으로 계측된 음향미소진동 신호의 변수분석과 위치표정, 음원의 크기 등이 인위적인 활동과 결합하여 주요 분석대상이 된다.

## 6.5 잡음 분리

음향미소진동 모니터링의 경우 잡음 분리가 매우 중요하며 일반적인 잡음의 분리 순서는 다음과 같다.

- (1) 잡음 특성 파악: 잡음의 주파수대역, 진폭 등의 특성이 음향미소진동신호의 주파수대역, 진폭 등의 특성과 유사한 경우, 또는 잡음의 특성이 명확하지 않는 경우에 먼저 잡음의 특성을 파악하기 위한 시험 모니터링을 일정 기간 동안 실시하고 그 결과를 기술자가 해석하여 음향미소진동신호와 잡음을 분리할 방법을 검토한다.
- (2) 파형 분류: 잡음 분리를 위해서 시험 모니터링에서 획득한 파형을 분류한다.
- (3) 주파수대역: 환경 또는 사용 조건에 따라 사용할 필터의 주파수대역을 선택하는 것이 좋다. 음향미소진동신호와 잡음을 분리하는 방법에는 경계치(threshold) 전압을 사용하는 방법, 주파수필터를 사용하는 방법 등 음향미소진동 모니터링 시스템에 의해 자동적으로 실시되는 것과 음향미소진동 변수의 변화 경향, 분포 및 상관해석, 음향미소진동 위치표정해석 등의 결과를 바탕으로 기술자의 판단에 따라 실시하는 것이 있으며 잡음 특성에 따라 적절한 방법을 선정한다.

Fig. 4는 음향미소진동 모니터링에서 전기적 원인으로 인한 잡음 파형의 한 예를 제시한 것이다.

## 6.6 음향미소진동 모니터링

모니터링은 목적에 따라 연속모니터링, 일정 기간 모니터링, 또는 긴급 시의 임시 모니터링으로 구분하며 유의미한 음향미소진동신호가 발생하는 징후를 놓치지 않도록 음향미소진동 변수의 경향, 분포, 상관, 음향미소진동 위치표정 등의 정보를 연속적 또는 정기적으로 관측한다.



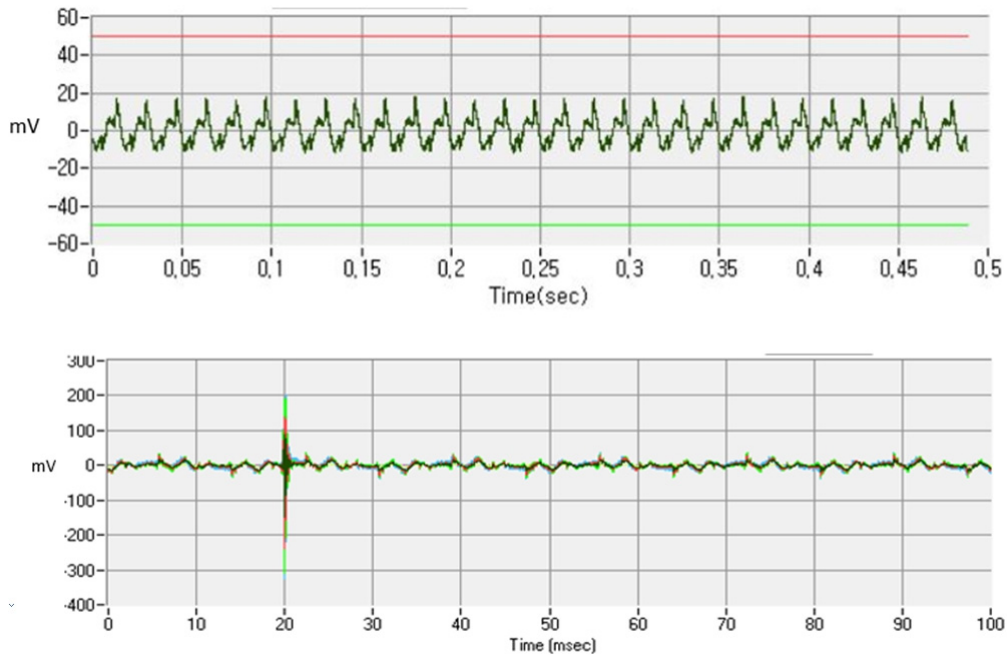


Fig. 4. Example of electrical noises

### 6.6.1 모니터링의 목적

음향미소진동기반 모니터링 중에 신호가 수신될 경우, 먼저 그 신호가 유의미한 음향미소진동 신호인지 판단할 필요가 있다. 유의미한 음향미소진동 발생이 확인된 경우에는 계측된 음향미소진동 변수의 외부 작업환경에 대한 변화 경향, 분포, 상관, 음향미소진동 위치표정의 크기와 분포 등을 종합적으로 평가하여 안정성을 평가한다.

### 6.6.2 평가항목과 판정 방법

유류 지하저장시설과 같은 건설 후 접근이 불가능한 대형 구조물의 내부에서 발생하는 균열과 같은 결함의 진행상황을 파악하기 위해 다양한 음향미소진동 변수의 시간적·공간적 변화를 규명한다. 또한 외부 변수의 변화도를 함께 고려하여 아래와 같은 평가항목을 바탕으로 지반구조물의 성능을 판정한다.

- (1) 음향미소진동의 발생과 관련된 변수인 카운트 수, 히트 수, 이벤트 수 등의 급격한 증가
- (2) 기타 음향미소진동 변수의 변동
- (3) 외부 환경(수압 등)의 변동
- (4) 음향미소진동 발생 위치의 이동 및 집중

### 6.6.3 기준치 초과 시 보고

기준치 초과 시 발주처와 협의한 사항에 근거하여 보고 및 대응한다.

## 7. 기록데이터 보관

### 7.1 모니터링 계획서

모니터링 계획서를 기록하여 일정 기간 동안 보관한다.

### 7.2 보관기간

설치 전후의 음향미소진동기반 모니터링 시스템의 성능시험 결과와 해석, 처리 기록의 보관기간은 모니터링 대상 구조물의 소유자 또는 관리자가 결정한다.

## 8. 보고

### 8.1 보고서

모니터링 대상 구조물의 음향미소진동기반 모니터링 종료 시 음향미소진동기반 모니터링 결과 보고서를 작성한다. 보고서는 구조물의 소유자 또는 관리자가 쉽게 점검할 수 있도록 간결하게 요점을 적는다.

#### 8.1.1 보고서 수록 사항

- (1) 프로젝트 정보
- (2) 모니터링 시스템 정보(시스템, 센서, S/W 등)
- (3) 설치 정보(시추공 위치/심도, 센서위치, 그라우트재 성분 등)
- (4) 모니터링 관련 설정 정보(채널 수, 샘플링 속도, 전파 속도, 관리 기준 등)
- (5) 파형 특성(주파수 특성, 지속시간, 진폭 등)
- (6) 시계열 정보(히트/이벤트 수, 진폭 등)
- (7) 공간 정보(이벤트 발생 위치, 진폭 등)
- (8) 외부 환경정보(수압 등)
- (9) 성능 평가 결과

### 8.2 기타

정기 보고 또는 비정상적인 음향미소진동 신호징후가 발생한 경우의 보고 사항은 모니터링 대상 구조물의 소유자 또는 관리자가 정한다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통산자원부의 에너지국제공동연구사업인 ‘에너지 지하저장시설의 해외시장 진출을 위한 핵심기술 개발 및 Value Chain 통합기술관리 시스템 개발(20168510050070)의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- ASTM Standard E750, 2015, Standard Practice for Characterizing acoustic emission Instrumentation, ASTM International.
- ASTM Standard E1316, 2018, Terminology for Nondestructive Examinations, ASTM International.
- Ishida., T., Labuz, J.F., Manthei, G., Meredith, P.G., Nasser, M.H.B., Shin, K., Yokyama, T., Zang, A., 2017, ISRM Suggested Method for Laboratory Acoustic Emission Monitoring, *Rock Mech. Rock Eng.*, 50, 665-674.
- ISO 12716, 2001, Non-destructive testing – acoustic emission inspection – Vocabulary, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- NDIS 2421, 2000, Recommended practice for in situ monitoring of concrete structure by acoustic emission, Japanese Society for Nondestructive Inspection.
- KS B 0550, 1996, Glossary of terms in nondestructive testing, Korean Agency for Technology and Standards.
- KS B ISO12713, 2013, Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Primary calibration of transducers, Korean Agency for Technology and Standards.
- Xiao, Y.X, Feng, X.T., Hudson, J.A., Chen, B.R., Feng, G.L., Liu, J.P., 2016, ISRM Suggested Method for In Situ Microseismic Monitoring of the Fractureing Process in Rock Masses, *Rock Mech. Rock Eng.*, 49, 843-869.