

암반 비탈면에서 AE 기법을 이용한 위험도 평가 연구

A Study on the Risk Evaluation using Acoustic Emission in Rock Slope

변요셉¹⁾ · 김석천²⁾ · 성주현¹⁾ · 천병식³⁾ · 정혁상[†]

Yoseph Byun · Sukchun Kim · Joohyun Seong · Byungsik Chun · Hyuksang Jung

Received: January 13th, 2014; Revised: April 8th, 2014; Accepted: October 8th, 2014

ABSTRACT : A slope may fail after construction owing to external factors such as localized rainfall, earthquake, and weathering. Therefore, the grasp of failure probability for slope failures is necessary to maintain their stability. In particular, it is very difficult to detect the symptoms of rock slope failure in advance by using traditional methods, such as displacement due to the brittleness of rocks. However, Acoustic Emission (AE) techniques can predict slope failures earlier than the traditional methods. This study grasped failure probability of slope by applying AE techniques to a rock slope with a history of collapse. When applying AE techniques to a slope that has a high probability of failure, the grasp of failure probability of the specific location became possible.

Keywords : AE techniques, Rainfall, Rock slopes, Failure probability

요지 : 사면은 건설된 후에도 집중강우나 지진, 풍화 등 외부요인으로 인해 파괴가 발생할 수 있기 때문에, 사면의 안정적 유지관리를 위해서는 사면 붕괴의 가능성을 파악하는 것이 필요하다. 특히 암반사면은 암석의 취성적인 특성으로 인해 변위 계측 등과 같은 일반적인 방법으로는 파괴발생이전에 사전징후를 감지하기 매우 어렵다. 그러나 AE 기법을 사면에 적용한다면 변위가 발생하기 전에 파괴 시 발생된 AE 신호를 분석함으로써 일반적인 계측 방법보다 초기에 상태파악이 가능할 것이다. 본 논문에서는 한국의 암반사면 중 붕괴 이력을 가지고 있는 사면에 AE 기법을 적용하여 사면붕괴 가능성을 파악하였다. 그 결과 붕괴위험이 있는 사면에 AE 기법을 적용하면 사면의 위치별 붕괴 가능성을 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : AE 기법, 강우, 암반사면, 붕괴 가능성

1. 서론

우리나라는 지질학적으로 전체면적의 70 % 이상이 산악 지대로 형성되어 있다. 따라서 도심지 구조물을 제외하고 거의 모든 토목 구조물은 산악지대와 연관을 가지고 있다. 특히 도로나 철도의 선형이 직선화되면서 사면이 많이 조성되는데 이때 발생하는 사면은 대규모화되고 급경사를 이루게 되어 붕괴의 가능성이 높다. 사면의 불안정 요인으로는 크게 내적요인과 외적요인으로 구분한다. 내적요인으로는 진행성 파괴, 풍화작용, 물의 침투에 의한 용해작용이 있으며 외적요인으로는 지형의 기하학적인 변화, 토피 하중의 제거, 하중의 증가, 충격과 진동, 인접한 호수 또는 저수지의 수위강하, 강우 등이 있다(Terzaghi, 1950; Brunsten, 1979). 사면붕괴로 인한 피해를 줄이기 위해서는 효율적인 유지관리가 필요하다. 사면의 유지관리를 위한 기존의 사면 계측 기술은 지표면 변위에 국한된 계측을 실시하고 있어 사면

내 결함이 상당히 진행된 후에 붕괴위험을 예측할 수 있는 한계성을 가지고 있다. 그러므로 한계성 극복을 위해서는 사면 내부에서 진행되는 변위나 신호를 평가할 수 있는 계측 기술이 요구되고 있고, 그중 하나가 AE(Acoustic Emission, 음향방출)를 이용한 계측 기술이다. AE란 균열의 발생, 성장 그리고 재배열 과정에서 방출되는 탄성파를 말하는데, 탄성파는 사면붕괴가 일어날 때 필연적으로 발생된다(Hardy, 1977). 따라서 AE를 이용하여 사면 계측을 실시한다면 비탈면 내부에 균열 발생부터 사면붕괴까지 과정을 감시할 수 있을 것이며 그 과정을 계속해서 감시하면 궁극적으로는 파괴 발생원의 위치와 장래의 파괴시점을 파악할 수 있는 공학적 근거자료를 확보할 수 있어 대상 사면의 장기 안정성 평가에 매우 유용한 기법으로 활용될 수 있다.

한편 국외에서 수행된 AE 기법에 관한 연구를 살펴보면, Koerner(1978)는 성토비탈면의 법면을 단계적으로 굴착하고 비탈면의 불안정화에 동반하는 미소파괴음의 검출도 시

1) Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation

2) U-Kyung Engineering & Construction

3) Construction Industry Research Institute Association, Inc.

† Department of Railroad Civil Engineering, Dongyang University (Corresponding Author : yoricom@empas.com)

도하였고, Nakajima et al.(1988)은 음향방출기법에 의해 산사태조사용으로 개발한 미소파괴음 계측로트드(파이프 내에 미소파괴음 발생재로 수지와 광섬유를 충전한 것)를 미야기현 오토미자가 산사태감시에 적용하였다. 또한 Shiotani et al.(2001)는 음향센서를 암반 비탈면에 설치하기 위해 WEAD 라는 웨이브가이드를 개발하였고, Dixon & Spriggs(2007)은 토사비탈면을 모니터링하기 위해 강관과 모래로 형성된 웨이브 가이드를 제안하였다. 국내에서 수행된 AE 기법에 관한 연구는 주로 실내 압축시험을 수행하면서 응력변화에 따른 미소파괴음 변화 양상이나 음원 분석 등에 대해 한정적으로 이루어졌으며, 최근 모형실험을 수행하면서 파괴위치 및 파괴메커니즘을 위한 연구로의 확장이 이루어지고 있다. 그러나 음향방출 기법을 사면 현장에 적용한 사례는 Cheon et al.(2011) 외에는 부족한 실정이다.

이에 본 논문에서는 암반사면의 붕괴 예측을 위해 장기간의 계측을 통한 음향방출기법의 적용성에 관해 연구하였다. 이를 위해 웨이브가이드를 제작하여 손상레벨 기준을 결정하였으며 붕괴 이력이 있는 절토 사면에 웨이브가이드를 적용하여 계측을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 미소파괴음의 개요

미소파괴음(AE, Acoustic Emission)은 고체재료가 외력을 받아 변형이나 파괴 등의 국소적인 미시변화(변형)를 일으킬 경우나 물체내부에 균열이 발생 또는 성장할 경우, 분자의 재배열 과정에서 재료 내부에 저장된 변형에너지(파면형성에너지, 열에너지, 격자에너지)의 급격한 방출에 의한 탄성파를 말한다(Hardy, 1977). 따라서 미소파괴음은 소성 변형, 균열의 발생과 성장, 마찰기구, 개재물의 파괴 및 상 변화 등에 관한 중요한 정보를 담고 있다.

재료가 외력을 받아 재료 내부에 균열이 발생될 때 발생하는 미소파괴음은 재료 내부에서 탄성파의 형태로 전파되고, 재료의 표면에 부착된 압전소자 형태의 음향센서에 도달하여 전기적 신호로 변환된다. 도달한 전기적 신호는 증폭기에서 증폭, 정형화하여 장시간에 걸쳐 계수하면 그 재료의 소성변형 또는 결함의 유무를 추정할 수 있게 된다. 이때 센서를 하나만 부착해도 되는 경우는 물체 내에 심각한 변형을 일으키는 결함의 위치를 알고 있고, 그 위치에 대한 결함의 거동에 대하여 알고 싶을 때이다. 센서를 3개 이상 부착하게 되면 지진의 진원(진앙)지 추정과 마찬가지로 각 검출 지점에 도달하는 미소파괴음의 시간차에 의해 미소파괴음

의 발생지점을 추정하는 것도 가능하다.

2.2 미소파괴음 파라미터

미소파괴음은 카운트, 이벤트, 진폭, 상승시간, 지속시간, 에너지 등의 파라미터를 이용하여 해석한다. 1개의 미소파괴음은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 카운트, 이벤트, 진폭, 상승시간, 지속시간, 에너지 등의 파라미터로 특징지어진다. 또한 미소파괴음 발생원의 크기를 평가하기 위해 미소파괴음 이벤트수와 진폭의 관계는 통계적으로 표현된다(Tomoda & Ohtsu, 2008).

히트는 미소파괴음의 파형 하나를 말하며, 이벤트는 균열과 관련된 정보를 가지고 있는 파형의 기본 단위로서 미소파괴음 원위치 표정에 사용된다. 카운트는 균열의 발생을 반영하는 파라미터이고, 설정된 기준치(threshold)를 초과하는 횟수로서 미소파괴음의 발생 횟수를 조사할 때 사용된다. 최대진폭은 신호의 최대치로서 파괴의 크기를 나타내고, 지속시간은 하나의 이벤트가 지속되는 시간으로 미소파괴음이 처음 기준치를 넘은 후 다시 기준치 이하로 떨어질 때까지의 시간이다. 상승시간은 미소파괴음이 기준치를 넘는 순간부터 최대진폭(dB)까지 도달되는데 요구되는 시간이며, 에너지는 하나의 이벤트 지속시간 동안의 포락선 면적으로 최대진폭의 제곱을 구해 계산한다.

AE 기법 분야에서는 미소파괴음 측정 시 구해지는 진폭빈도 분포로부터 b치를 산출할 수 있다. 지진학에서 유래된 b치는 진폭과 누적빈도와의 관계를 이용하여 구조물의 손상도를 평가하는 기법으로 멱함수 형태로 나타낸다(Gutenberg & Richter, 1954). 손상초기에는 미약한 진폭 수준의 신호가 발생함에 따라 b치의 기울기는 완만하기 때문에 상대적으로 큰 결과가 제시된다. 그러나 손상이 진행될수록 신호의 발생빈도와 크기가 증가함에 따라 결과는 감소한다. b치는 무차원이며 재료적 특성에 따라 다양한 결과를 나타내지만,

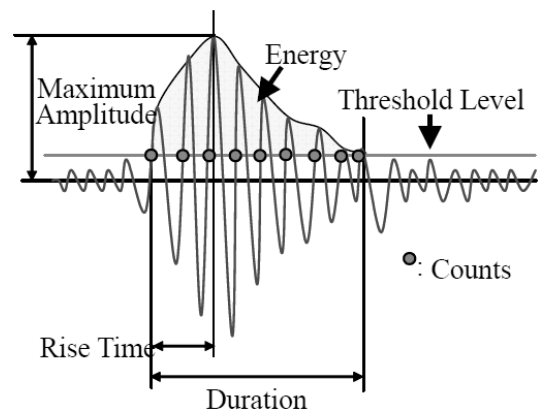


Fig. 1. AE signal parameters (Tomoda & Ohtsu, 2008)

암석의 경우 손상 초기에서는 미세균열의 발달로 1.5~2.5 정도의 결과를 나타내지만 파괴 시에는 1 미만의 결과가 제시되는 것으로 보고된다(Cox & Meredith, 1993). b치는 주파수 분석과 달리 기계적 민감도와 무관하기 때문에 구조물의 손상도 분석에 널리 이용된다(Heo, 2001). 또한 기울기를 토대로 대상 구조물의 재료적 특성을 평가할 수 있다.

그러나 AE 기법 분야에서는 지진에 비해 매우 짧은 시간이기 때문에 미소파괴음 계측에 b치를 적용하기 위해서 개량b치가 제안되었다. b치를 음향방출기법에 적용시키기 위해서 제안된 개량b치는 파괴의 시작 시간을 추정 가능하게 하는 파라미터로서 진폭분포의 기울기로 정의된다. Shiotani & Ohtsu(1999)는 평균 진폭 μ , 표준편차 σ 등을 적용하였다. 개량b치는 Eq. (1)과 같고, 진폭분포의 평균치와 표준편차에 의해 계산되어진다. 이때 진폭의 범위는 $(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma$ 에 의해 결정된다.

$$b = \frac{\log_{10}N(w_1) - \log_{10}N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (1)$$

- 여기서 $N(w_1)$: $\mu - \alpha_1\sigma$ 를 넘는 진폭의 누적 수
- $N(w_2)$: $\mu + \alpha_1\sigma$ 를 넘는 진폭의 누적 수
- μ : 평균 진폭
- α_1, α_2 : 경험적 상수
- σ : 진폭의 표준편차

Shiotani et al.(2001)은 장기간 AE 계측 시에 연속적으로 측정된 많은 양의 미소파괴음 분석을 위해서 데이터의 모수(母數)를 결정하여 이동평균을 이용해서 해석을 수행하였는데, 데이터 모수는 지진학에서 검증된 50개로 하여 평가를 수행하였다.

그레이드는 미소파괴음의 초기 경사도를 나타내는 파라미터로서 미소파괴음의 진폭과 상승시간을 이용해서 얻을 수 있다. 한편 그레이드는 콘크리트 재료에 적용되는 복합 파라미터로서 인장파괴에서 전단파괴까지 이르는 과정의 정보를 제공하는 취성재료의 안정성 평가에 효과적인 파라미터이다.

2.3 웨이브가이드

사면 분야에서의 음향방출기법 적용은 콘크리트 및 암석의 분야와 다르게 웨이브가이드를 통한 기술이 개발되어 왔다. 지반 내부에서 발생한 미소파괴음을 검출하는 것은 사면붕괴 진행의 추정과 안정성 평가에 있어서 매우 중요하므로 미소파괴음 계측에 필요한 조건은 암반에 잠재된 균열의

영향을 받지 않고 미소파괴음을 검출할 수 있어야 하고, 검출된 미소파괴음의 특성에서는 암반 내부의 파괴를 합리적으로 평가할 수 있어야 한다. 또한 지반 내부의 국소적인 파괴에서 지반 전체의 파괴에 이르기까지 연속적으로 미소파괴음을 검출 및 평가를 할 수 있어야 한다. 미소파괴음은 고주파로서 매질에서 전파될 때 감쇠가 발생하며, 이러한 감쇠 정도는 통과하는 매질에 영향을 받는다. 특히 암반은 절리와 같은 불연속면의 존재로 인하여 그 감쇠가 크게 발생할 수 있다. 일반적인 웨이브가이드는 미소파괴음을 유도하는 도파봉을 말하지만, 사면에서의 웨이브가이드는 지반 내부에서 발생한 미소파괴음을 감쇠 없이 측정하기 위한 것을 말한다. 웨이브가이드를 통한 계측은 관찰 대상의 파괴에서 발생하는 미소파괴음을 직접 측정하는 것이 아니고, 웨이브가이드의 변위에 의해 발생하는 신호를 간접 측정하는 방식이다. 웨이브가이드를 통해 AE 계측을 실시할 경우에는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

3. 웨이브가이드를 통한 손상레벨 결정 실험

3.1 AE 계측 시스템

시험에 사용된 고주파 음향센서는 직경이 33 mm, 높이가 42 mm인 미국 PAC에서 제작한 방수전용 센서로 Operating Frequency Ranges는 35~100 kHz이다. 시험 시 얻어지는 신호들은 미국 PAC(Physical Acoustic Corporation)사에서 제작한 samos-8시스템을 이용하여 측정하였다. Samos-8은 AE win 프로그램을 통한 미소파괴음 신호 및 파형의 측정뿐만 아니라 실험을 통해 얻은 미소파괴음 자료의 저장 및 분석, 재생이 수행되는 다채널 컴퓨터 시스템으로 센서와 전치증폭기, 케이블, PC본체 등으로 구성되어 있다. 미소파괴음 신호가 음향센서에 의해 감지되어 전기신호로 변환되고, 전치증폭기를 통해 증폭된 후 측정되어 컴퓨터에 저장된다.

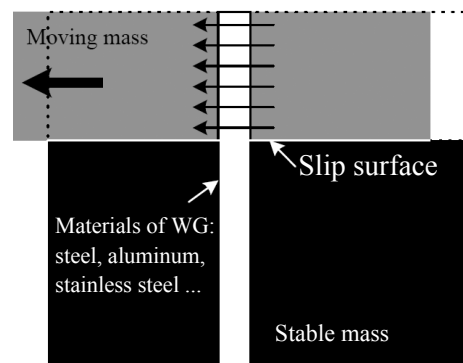


Fig. 2. Waveguide type (Shiotani et al., 2001)

이때 증폭기의 내부에서 노이즈의 발생이 없는 것이 가장 바람직하지만 실체는 전자회로 자체에서 혼잡음 등의 노이즈가 발생한다. 또한 증폭기의 주파수 대역이 넓을수록 노이즈가 크게 되면 계측상 잘못된 결과를 도출할 수 있는 가능성이 많다. 따라서 본 연구에서는 전원 라인에 의한 노이즈를 차단해 주기 위해 일반적인 변압기와 다른 노이즈 컷트랜스가 미소파괴음 시스템에 설치하여 실험을 실시하였고, AE 신호를 검출하기 위해서 설치하는 기준(threshold) 전압을 노이즈레벨 이상의 값을 설정하여 실험하였다.

3.2 웨이브가이드 제작 및 시험 방법

사면 파괴의 진행상태를 판단하기 위한 손상레벨 결정 시험을 실시하였다. 먼저 웨이브가이드를 제작하였고, 휨과 전단에 대한 파괴를 인위적으로 발생시켜 이때 발생하는 미소파괴음 파라미터(카운트, 에너지, 개량b치, 그레이드)를 분석하여 결정하였다. 웨이브가이드는 현장암반의 강도의 시멘트 페이스트(W/C=50%)로 제작하였고, 철근을 배근하였다. 웨이브가이드에는 음향센서를 부착하였고, 압축시험기를 이용하여 하중을 재하하면서 파괴과정에서 발생하는 파괴음을 수집하여 파괴음 파라미터별로 분류하여 파괴단

계별 특성치를 얻었다. 휨시험에서는 12개의 음향센서를 사용하였고, 전단시험에서는 8개의 센서를 사용하였다.

3.3 시험 결과 및 분석

사면 파괴의 진행상태를 판단하기 위해 휨시험과 전단시험을 실시한 결과는 Fig. 3~6에서 보여준다. 파괴가 일어나기 시작하면서 AE가 발생하였는데, 휨시험 결과에서 이때 카운트는 35, 에너지는 50으로 나타났다. 따라서 이 값들은 휨파괴의 초기단계로 판단할 수 있고, 카운트가 35에서 65 사이일 경우와 에너지가 50~150일 경우에는 휨파괴에서 전단파괴로 바뀌는 구간으로 판단할 수 있었다. 한편 전단 시험 결과에서 카운트 65에서 100 사이일 경우와 에너지가 150~500일 경우에는 전단파괴가 진행되고 있는 상황으로 판단할 수 있었으며, 카운트 100 이상일 경우와 에너지 500 이상일 경우에는 전단에 의해 파괴가 상당히 진행된 상황으로 판단할 수 있었다. 또한 그레이드는 1.0을 경계로 손상레벨 II와 손상레벨 III, IV로 분류할 수 있었고, 개량b치는 0.05를 경계로 하여 손상레벨 II와 손상레벨 III, IV로 분류할 수 있었다. 즉 개량b치가 0.05 이상인 경우와 그레이드가 1.0 이하일 경우의 파괴양상은 미시적 파괴로 판단하며, 개

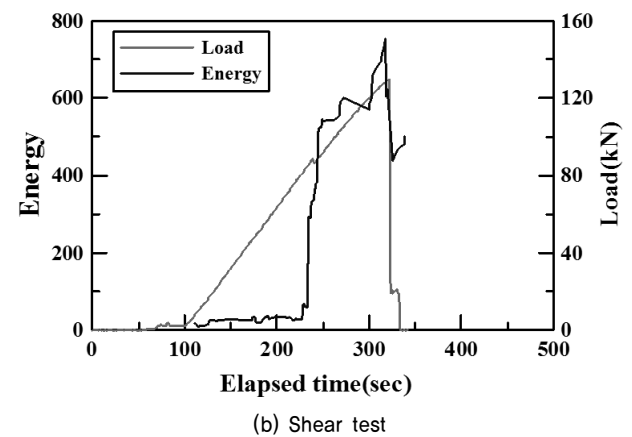
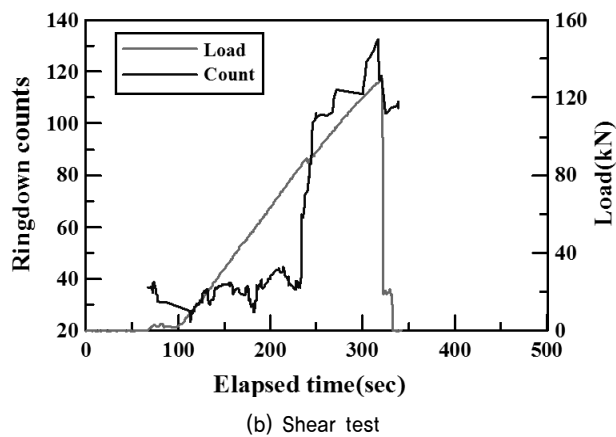
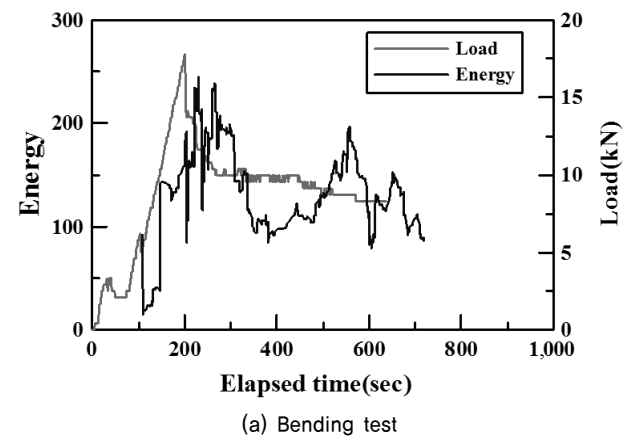
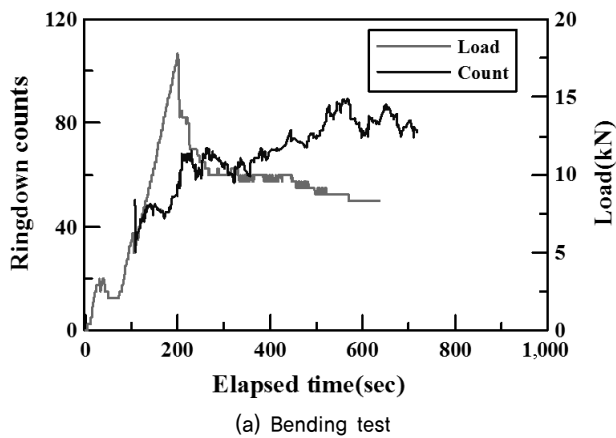
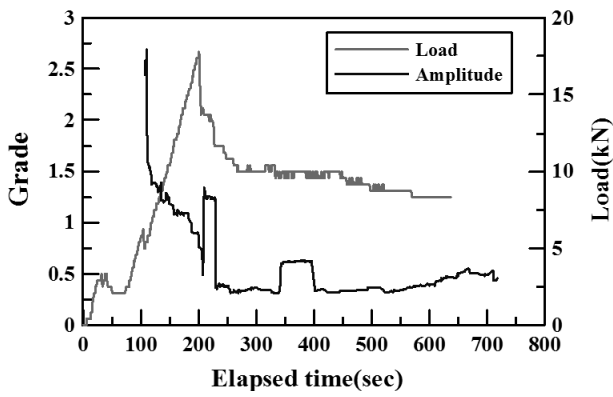
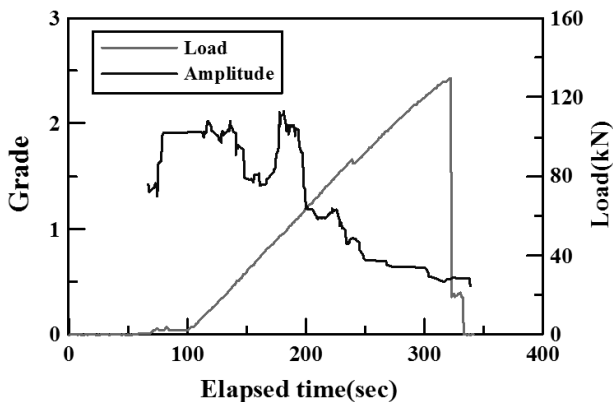


Fig. 3. Load and ringdown count

Fig. 4. Load and energy

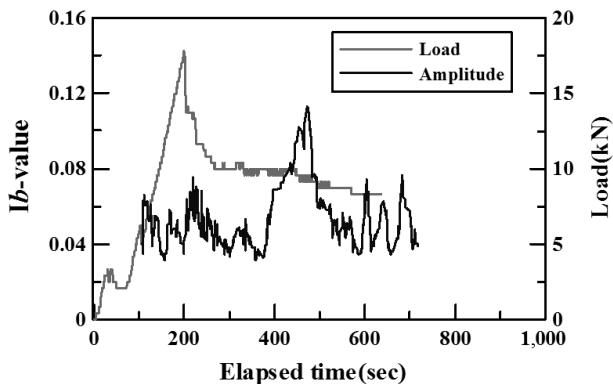


(a) Bending test

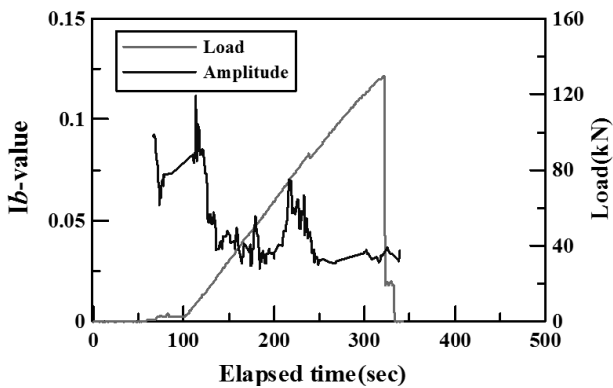


(b) Shear test

Fig. 5. Load and grade



(a) Bending test



(b) Shear test

Fig. 6. Ib-value

량 b 치가 0.05 이하인 경우와 그레이드가 1.0 이상일 경우의 파괴양상은 거시적 파괴로 판단할 수 있다. 분석결과를 토대로 파괴의 진전 상태 및 수준을 고려하기 위해 손상레벨을 결정하였다. 손상레벨 기준의 주요 항목은 카운트, 에너지, 그레이드, 개량 b 치로 결정하였고, Table 1은 결정된 손상레벨을 보여준다.

4. 현장 적용성 평가

암반사면 중 붕괴 이력을 가지고 있는 사면에 AE 기법을 적용하였다. 먼저 넓은 범위에서의 경향을 확인하는 것을 목적으로 하여 AE 히트와 AE 이벤트를 분석하였고, 이후에 파괴의 세부적인 경향을 파악하기 위해 AE 파라미터들(카운트, 에너지, 그레이드, 개량 b 치)을 분석하였다. 여기서 AE 히트는 하나의 센서에서 측정된 AE 신호로서 AE의 발생빈도를 알 수 있는 파라미터이고, AE 이벤트는 설정된 기준치(threshold)를 초과하였을 때의 값으로서 AE 원위치 표정에 사용되었다.

4.1 사면현황

대상사면은 강원도 강릉시에 위치하는 절토 사면으로 붕괴 이력을 가지고 있고, 붕괴 이후 보강을 부분적으로 하여 진행성 붕괴가 일어나는 사면이다. 사면은 연장 약 400 m, 전체높이 75 m로서 토층심도율이 0.4 이하로 암반사면으로 분류된다. 경사는 토사구간이 1:1.5, 리핑암 및 발파암 구간이 1:1.0으로서 사면 절취 전에는 탄층이나 점토층이 존재하고 풍화 및 파쇄가 심하게 진행되어 있는 상태였다. 따라서 FRP를 이용하여 보강을 실시하였고, 상부는 경사 1:1.5로 경사완화를 실시하였다. 보강 및 경사완화를 실시한 이후에도 사면의 일부 구간에서는 사면 표면의 배부름에 의한 부등침

Table 1. Criteria for damage levels

Count (count)	AE Parameter			Failure Level	Assumed Failure Stage
	Energy (count)	Grade	Ib-value		
0 ~ 35	0 ~ 50	-	-	I	Early Flexural Failure
35 ~ 65	50 ~ 150	1.0 <	0.05 <	II	Flexural failure - Early Shear Failure
65 ~ 100	150 ~ 500	1.0 >	0.05 >	III	Early Shear Failure - Mid to Late Shear Failure
100 <	500 <			IV	Completion of Shear Failure

하가 발생한 것을 확인할 수 있었으며, 이로 인해 부등침하가 발생하여 소단의 3 m 폭 콘크리트 측구와 사면 하부가 상당히 큰 차이로 벌어져 있는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 웨이브가이드 설치 현황

계측을 위한 계측 공은 2공으로서 각각 사면의 20 m 소단과 40 m 소단에 위치해 있다. 20 m 소단의 계측공 연장은 10 m이고, 40 m 소단의 계측공 연장은 12 m이다. Borehole No.1과 Borehole No.2의 웨이브가이드는 사면표면에서 발생하는 노이즈를 차단하기 위해 사면의 표면으로부터 2 m 심도까지 모래로 채우고, 웨이브가이드의 AE 센서(60 kHz)는 2 m 간격으로 총 4채널로 설치하였다. 시험에 사용된 AE 센서는 직경이 33 mm, 높이가 42 mm인 미국 PAC에서 제작한 방수전용 센서로 Operating Frequency Ranges는 35~100 kHz이다. 시험 시 얻어지는 신호들은 미국 PAC(Physical Acoustic Corporation)사에서 제작한 samos-8시스템을 이용하여 측정하였다. Samos-8은 AE win 프로그램을 통한 AE 신호 및 파형의 측정뿐만 아니라 실험을 통해 얻은 AE 자료의 저장 및 분석, 재생이 수행되는 다채널 컴퓨터 시스템으로 센서와 전치증폭기, 케이블, PC본체 등으로 구성되어 있다. AE 신호가 AE 센서에 의해 감지되어 전기신호로 변환되고, 전치증폭기를 통해 증폭된 후 측정되어 컴퓨터에 저장된다. 특히 전원 라인에 의한 노이즈를 차단해 주기 위해 일반적인 변압기와 다른 노이즈 컷 트랜스가 AE 시스템에 설치되어 있다. Fig. 7은 사면에 설치된 웨이브가이드 위치를 보여주고 있다.

4.3 계측 결과 및 분석

Borehole No.1에서 AE 히트는 6월에서 9월 사이에 급격하게 증가하는 것으로 나타났는데, 6월과 9월 사이의 AE 히트는 약 190,000회가 증가하였다. 따라서 이 기간 동안에

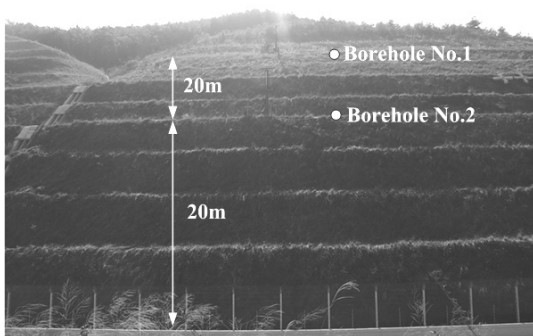


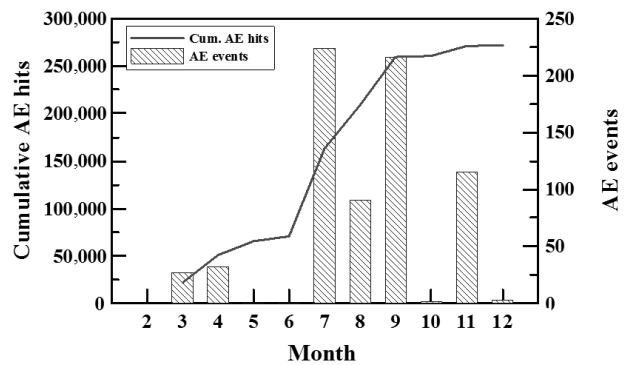
Fig. 7. Location of the waveguide

AE 활동이 활발한 것으로 판단된다. Borehole No.2에서 AE 히트는 6월에서 7월 사이에 급격히 증가하였고, 8월에서 9월에 다시 증가하는 것으로 나타났다. 특히 6월에서 7월 사이에는 AE 히트수가 360,000회가 증가하여 AE 활동이 매우 활발한 것으로 나타났는데, 이것은 사면 내부 움직임에 의해서 발생한 것으로 판단된다. AE 이벤트수는 7월과 9월에 최대 발생하였다. Borehole No.1에서 7월에는 약 220회가 발생하였고, 9월에는 Borehole No.2에서 약 2,100회 발생하였다. 한편 AE 히트와 AE 이벤트는 Borehole No.1에 비해 Borehole No.2에서 많이 발생하였으며, 이것은 Borehole No.2에서 AE 활동이 더 활발한 것을 나타낸다. Fig. 8은 2007년에 얻어진 누적 AE 히트와 AE 이벤트를 보여준다.

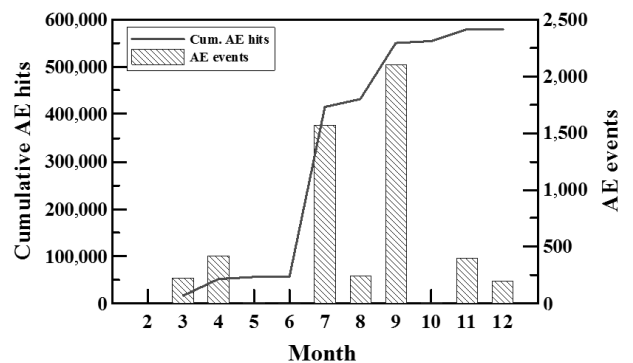
일별 AE 히트는 2007년 7월에 Ch-4에서 최대 31,000회가 발생하였고, Ch-8에서 약 100,000회가 발생하였다. 지표면 근처에 설치된 Ch-4와 Ch-8에서 AE 히트가 최대 발생한 것으로 보아 지표면 근처의 변형을 반영한 것이라고 판단된다. Fig. 9는 일별 AE 히트를 보여주고 있다.

비탈면의 유지 및 관리에 있어서 비탈면 파괴진행 과정과 손상 정도를 파악하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 파괴과정과 손상 정도에 대한 파악은 비탈면 파괴를 예측하는데 있어서 유용한 정보를 제공할 수 있기 때문이다.

파괴의 진행 상황을 알기 위해 실내시험에서 결정된 손



(a) Borehole No.1



(b) Borehole No.2

Fig. 8. Cumulative AE hits and AE events

상레벨을 적용하여 AE 파라미터의 파괴 평가를 실시하였다. 파괴평가 분석을 위해 대표적으로 이벤트의 수가 가장 많이 발생한 Ch-5에 대해 분석하였다. Fig. 10은 Ch-5의 카

운트, 에너지, 개량치 그리고 그레이드의 결과를 보여준다. 에너지는 9/19에 급격하게 발생하였고, 카운트도 9/19에 급격하게 발생하였다. 이는 에너지 방출의 영향으로 카운트가 증가한 것으로 판단된다. 한편 개량치와 그레이드의 분석 결과는, 9/17에 공통으로 파괴의 시작을 나타내는 값이 발생하였다. 그 원인은 9월 전체 강우량의 43 %가 9/14~19에 집중되면서, 비탈면 내부에 인장 균열이 성장하여 슬라이딩이 발생했기 때문으로 판단된다.

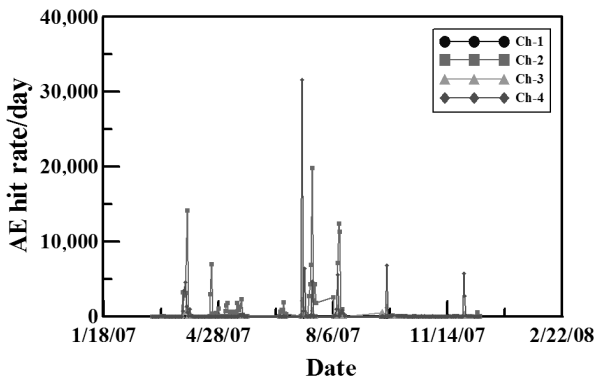
5. 결 론

본 연구에서는 AE 기법을 사면에 활용하기 위해 웨이브가이드를 제작하여 실내시험을 통해 손상레벨을 결정하였고, 붕괴 이력을 가지고 있는 사면을 선택하여 사면의 상태를 검토하였다. 본 논문에서 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

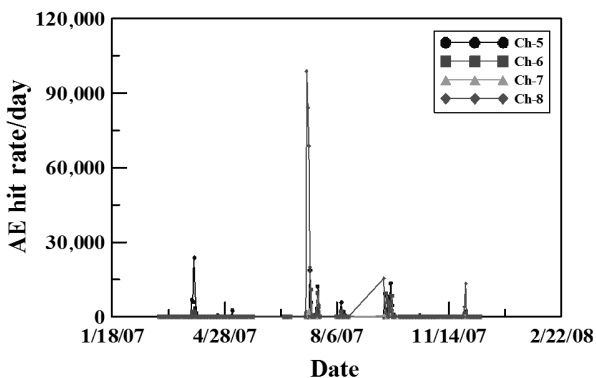
- (1) 웨이브가이드를 제작하여 힘 및 진단시험을 통해 파괴 시 발생하는 AE 파라미터와 파괴거동과의 관계로부터 손상레벨을 결정할 수 있었다.
- (2) 붕괴 이력이 있는 대상사면을 선정하여 웨이브가이드를 통한 계측을 수행하였고, 실내시험에서 결정된 손상레벨 기준으로 사면의 상태를 확인할 수 있었다. 그 결과 사면 내부에서 진단파괴가 발생하기 시작한 것으로 나타났다.
- (3) 현장시험을 통해 제시된 손상레벨 항목들 중, 미소파괴 음의 복합 파라미터인 그레이드와 개량치를 적용한 결과, 두 개의 복합 파라미터는 인장파괴에서 진단파괴까지 이르는 과정의 정보를 제공하는 취성재료의 안정성 평가에 효과적인 변수로서 암반의 안정성 평가에도 유효하게 나타났다.
- (4) 연구 대상 비탈면은 「시설물의 안전관리에 의한 특별법」에 의해 2중 시설물로 구분되며, 2중 시설물의 경우에는 정기적인 점검을 실시하므로 현재까지 붕괴가 발생하지 않았지만, 지속적인 계측을 통해 사면의 거동을 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다.

References

1. Brunsten, D. (1979), Mass movements. In: Embleton, C. E. and Thornes, J. B. (eds.), Progress in Geomorphology. Arnold, pp. 130~186.
2. Cheon, D. S., Jung, Y. B., Park, E. S., Song, W. K. and Jang, H. I. (2011), Evaluation of damage level for rock slopes using

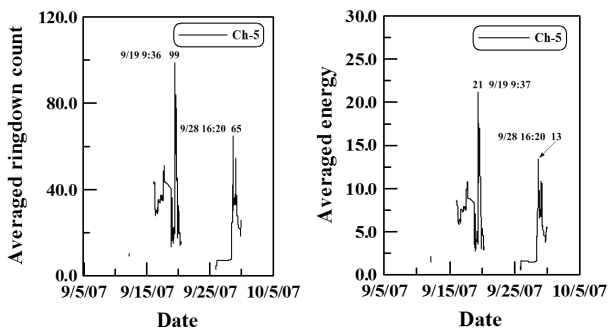


(a) Borehole No.1



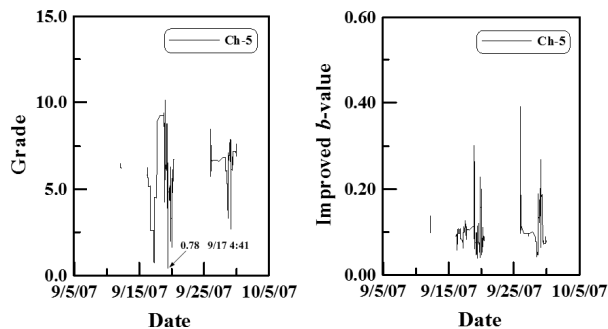
(b) Borehole No.2

Fig. 9. AE hit rate



(a) Count

(b) Energy



(c) Grade

(d) lb-value

Fig. 10. Measured data in site

- acoustic emission technique with waveguides. *Engineering Geology*, Vol. 121, No. 1, pp. 75~88.
3. Cox, S. J. D. and Meredith, P. G. (1993), Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emission, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 1, pp. 11~21.
 4. Dixon, N. and Spriggs, M. (2007), Quantification of slope displacement rates using acoustic emission monitoring. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, pp. 966~976.
 5. Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1954), *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton, Princeton University Press, New Jersey. p. 310.
 6. Hardy, H. R. (1977), Emergence of acoustic emission/microseismic activity as a tool in geomechanics. *Proceedings of 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic structures and Materials*, Pennsylvania State University, Treant. Tech Publication, pp. 13~31.
 7. Heo, J. S. (2001), Measurement of acoustic emission and the characteristics of deformation and fracturing of rock under triaxial compression, Seoul National University Ph.D Thesis, pp. 10~56.
 8. Koerner, R. M. (1978), Acoustic emission monitoring of soil stability. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceeding of the ASCE*, 104, pp. 571~582.
 9. Nakajima, I., Sato, J., Taira, N. and Kubota, N. (1988), The observation of landslide by the acoustic emission monitoring rod. In: Yamaguchi, K., Kimpara, I., and Higo, Y. (eds.), *Program in Acoustic Emission IV*. Japanese Society for Nondestructive Inspection, pp. 273~281.
 10. Shiotani, T. and Ohtsu, M. (1999), Prediction of slope failure based on AE activity, *ASTM., STP 1353*, pp. 156~172.
 11. Shiotani, T., Ohtsu, M. and Ikeda, K. (2001), Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation. *Construction Building Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 235~246.
 12. Terzaghi, K. (1950), *Mechanism of landslides*. Geological Society of America, Berkeley volumes, pp. 83~123.
 13. Tomoda, Y. and Ohtsu, M. (2008), Corrosion process of steel bar in reinforced concrete by acoustic emission, *Proceedings of The 19th International Acoustic Emission Symposium, Prog in acoustic emission XIV: The Japanese Society for Non-destructive Inspection*, pp. 341~346.