

암석시편 파괴에 따른 acoustic emission 특성인자 분석

이종원¹ · 오태민^{2*} · 김현우³ · 김민준⁴ · 송기일⁵

¹비회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 연구원

²정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 조교수

³정회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 선임연구원

⁴비회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 선임연구원

⁵정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 부교수

Analysis of acoustic emission parameters according to failure of rock specimens

Jong-Won Lee¹ · Tae-Min Oh^{2*} · Hyunwoo Kim³ · Min-Jun Kim⁴ · Ki-Il Song⁵

¹Researcher, Multi Disaster Countermeasure Organization (MDCO), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (PNU)

³Senior Researcher, Multi Disaster Countermeasure Organization (MDCO), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

⁴Senior Researcher, Multi Disaster Countermeasure Organization (MDCO), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

⁵Associate Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

*Corresponding Author : Tae-Min Oh, geotaemin@pusan.ac.kr

Abstract

A monitoring method based on acoustic emission (AE) sensor has been widely used to evaluate the damage of structures in underground rock. The acoustic emission signal generated from cracking in material is analyzed as various acoustic emission parameters in time and frequency domain. To investigate from initial crack generation to final failure of rock material, it is important to understand the characteristics of acoustic emission parameters according to the stress ratio and rock strength. In this study, uniaxial compression tests were performed using very strong and weak rock specimen in order to investigate the acoustic emission parameters when the failure of specimen occurred. In the results of experimental tests, the event, root-mean-square (RMS) voltage, amplitude, and absolute energy of very strong rock specimen were larger than those of the weak rock specimen with an increase of stress ratio. In addition, the acoustic emission parameters related in frequency were more affected by specification (e.g., operation and resonant frequency) of sensors than the stress ratio or rock strength. It is expected that this study may be meaningful for evaluating the damage of underground rock when the health monitoring based on the acoustic emission technique will be performed.

Keywords: Acoustic emission (AE), Parameter, Uniaxial compressive strength, Failure monitoring

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(5)657-673(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.5.657>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 24, 2019

Revised August 20, 2019

Accepted August 29, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

최근 음향방출(Acoustic Emission, AE) 센서를 이용하여 지하 암반 내 구조물의 손상을 평가하는 기법이 활발하게 사용되고 있다. 암반 손상 시 발생하는 미소파괴음은 시간 및 주파수 영역에서 다양한 음향방출 특성인자로 분석된다. 암반 내 초기 균열 발생부터 최종 파괴까지의 특징을 파악하기 위해서는 외부응력 수준과 암반 강도에 따른 음향방출 특성인자 발생 양상을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 경암과 연암 강도를 가진 화강암 시편을 이용하여 일축 압축시험을 수행하여, 암석 시편 파괴 시 발생하는 음향방출 특성인자를 분석하였다. 실험결과, 응력 비율이 증가할수록 이벤트 횟수, 실효값, 최대 진폭, 절대 에너지가 경암 시편에서 연암 시편 보다 높은 경향을 보였다. 또한, 주파수 관련 특성인자는 응력 비율 증가나 시편의 물성특성에 대해 민감도가 낮은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 암석 시편 파괴에 따른 음향방출 특성인자 분석 결과, 실효값(RMS)이 가장 민감한 인자로 평가되었다. 본 연구의 결과는 음향방출 기반 모니터링 수행 시 암반 손상 정도 평가를 위하여 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 음향방출, 특성인자, 일축 압축강도, 파괴 모니터링

1. 서 론

지하 암반에는 터널이나 지중 에너지 저장시설(underground rock storage cavern)과 같은 구조물이 구축되어 있다. 이러한 지하 구조물에서 지진이나 주변 지반 굴착과 같은 외력에 의하여 손상이 발생한다면 지상 구조물의 붕괴와 같은 심각한 사회적인 피해가 발생할 수 있다. 따라서 암반 내 구조물을 안전하게 사용하기 위해서는 운영과 함께 구조물의 안정성 모니터링을 함께 실시하는 것이 필수적이다(Butt et al., 2000; Wang et al., 2018).

음향방출(acoustic emission, AE) 모니터링 기법을 통하여 재료 내부의 손상위치 및 균열상태를 평가할 수 있다(Wang, 2014; Zhang et al., 2015). 외력에 의하여 응력(stress) 에너지가 암반 내부에 누적되면서 입자의 파괴 및 미세 절리 간에 마찰이 발생한다. 이후 응력이 암반의 최대 강도에 도달하면 누적된 에너지가 방출되면서 최종 파괴에 이른다(Fig. 1). 이때 발생하는 음향방출 신호는 약 10 kHz에서 1 MHz의 높은 주파수 대역의 탄성과 형태로 생성된다(Park et al., 2013). 이러한 고주파의 음향방출 신호 기반 모니터링 기법은 미세한 균열의 발생부터 최종 파괴까지의 손상 이력을 효율적으로 평가할 수 있는 장점이 있다(Helmstetter and Garamobois, 2010; Cheon et al., 2014).

재료 내부의 손상으로 인하여 생성되는 음향방출 신호는 측정 센서를 통하여 파형(waveform) 신호로 수집된다. 음향방출 신호는 카운트, 에너지, 오름시간, 지속시간, 최대 진폭, 실효값(root-mean square voltage, RMS), 절대 에너지 등의 다양한 특성인자로 분석될 수 있다(Feng et al., 2019). 또한, 주파수 변환을 통하여 초기 주파수, 최대 주파수, 평균 주파수 등과 같은 주파수 기반 특성인자로 분석이 가능하다(Li et al., 2017). 이러한 특성인자는 암석 재료의 손상 정도(e.g., stress, damage level)나 재료의 특성(e.g., strength)에 따라 달라질 수 있다. 따라서 암반 내 구조물의 안정성 평가를 위해서는 암석 재료의 손상 정도와 재료의 특성에 따른 음향방출 특성인자 발생 양상을 사전에 평가하는 것이 중요하다.

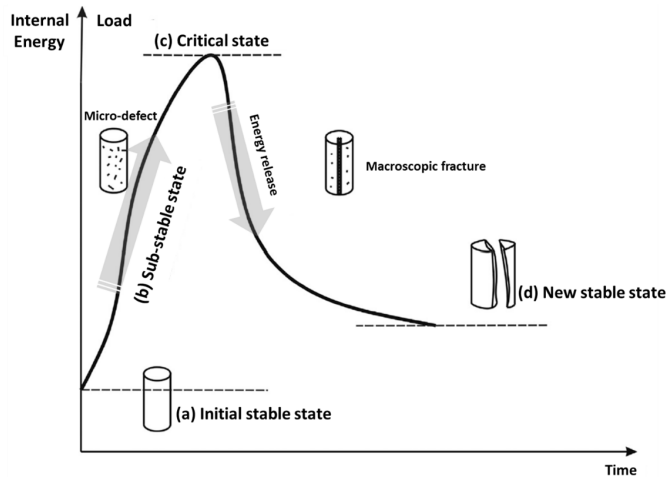


Fig. 1. Deformation characteristics for rock sample by loading (after Zhang et al., 2015)

암석 재료의 파괴에 따른 음향방출 특성인자는 암석의 손상 정도를 나타내는 외부 응력 수준에 영향을 받는다. Zhao et al. (2013)은 일축 압축시험을 통하여 응력에 따른 암석 시편 내 균열 생성 및 발달을 음향방출 신호의 측정을 통하여 평가하였다. 응력 증가에 따라 시편에서 발생하는 음향방출 이벤트 횟수는 증가하였으며, 시편 내 부분적인 변형이나 최종 파괴에 도달하는 경우 이벤트 횟수가 급격히 증가하는 결과를 보였다. Chmel and Shcherbakov (2013)은 최대 진폭을 이용하여 재료의 손상 정도를 평가하였다. Archer et al. (2016)은 암석 시편 내 일축 압축하중 증가에 따라 발생하는 음향방출 특성인자 중 실효값 발생 양상을 분석하였다. 실효값과 최대 진폭은 음향방출 신호의 크기와 관련이 있는 특성인자로서 하중 증가에 따른 음향방출 이벤트 횟수가 급격히 증가할 때 실효값과 최대 진폭 또한 크게 증가하는 결과를 보였다.

음향방출 특성인자의 발생 양상은 재료의 특성인 암석 시편의 강도에 따라 다르게 나타난다. Khazaei et al. (2015)은 일축 압축시험을 통하여 암석 시편의 강도에 따른 음향방출 특성인자를 평가하였다. 암석 시편의 강도가 클수록 발생하는 음향방출 신호의 에너지가 증가하였으며 해당 편차 또한 증가하는 결과를 보였다. Kim et al. (2015)은 음향방출 신호의 누적 주파수-크기 관계(i.e., b value)를 이용하여 암석 시편의 강도에 따른 특성을 평가하였다. 암석 시편의 강도가 큰 시편일수록 b value가 모든 정규화된 축응력 비율(normalized axial stress, σ/σ_{peak}) 구간에서 큰 결과를 보였다.

상기 기존 연구들은 임의의 특성인자만을 이용하여 암석의 파괴특성을 분석하였다. 그러나 실제 현장 암반에서 음향방출 신호를 이용하여 구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 적합한 음향방출 특성인자의 선정이 선행되어야 한다. 또한, 암반의 음향방출 모니터링 기법의 신뢰성 향상을 위하여 다양한 음향방출 특성인자를 암반의 강도와 응력 수준에 따라 복합적으로 고려할 필요성이 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 암석 시편의 강도에 따른 적합한 음향방출 특성인자를 분석하기 위하여 극단적인 두 그룹의 화강암 시편, 경암(very strong rock)과 연암(weak rock) 시편을 준비하였다. 또한, 일축 압축시험을 실시

하여 암석 시편 내 손상 발생에 따른 음향방출 신호를 획득하여 분석하였다. 획득한 음향방출 신호는 다양한 특성 인자(이벤트, 실효값, 최대진폭, 절대 에너지, 초기 주파수, 최대 주파수)로 변환되어 고려하였다. 또한 하중 강도에 따른 특성인자 별 반응 특성을 복합적으로 분석하여 최적 특성 인자를 도출하였다. 본 연구에서 검증된 음향방출 특성인자는 암반 내 구조물의 안정성 평가를 위한 기초 연구 결과로 향후 현장 모니터링에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 암석시편 준비 및 파괴 실험방법

2.1 암석시편 준비

본 연구에서는 암석 시편의 파괴에 따른 음향방출 신호 수집을 위하여 총 4개의 화강암 시편을 준비하였다. 화강암 시편은 ISRM에서 제시한 화강암의 일축 압축강도에 따른 분류에 의하여 연암(weak rock)과 경암(very strong rock)에 해당한다(Brown, 1981) (Fig. 2). 자세한 암석물성은 Table 1에 정리하였다. 시편은 50 mm의 직경, 100 mm의 높이를 가진 원기둥 형태로 준비하였으며, 편하중 작용을 방지하기 위하여 시편의 표면을 연마하였다.

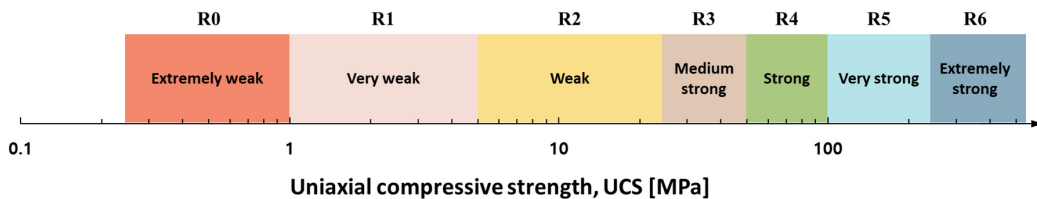


Fig. 2. ISRM classification of rocks according to level of uniaxial compressive strength

Table 1. Properties of rock specimen

Specimen	Density (g/cm ³)	P-wave velocity (m/s)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (-)	UCS (MPa)
S1	2.92	5833.3	53.34	0.2287	142.4
S2	2.92	5241.4	48.59	0.2068	143.9
W1	2.73	2680.7	3.02	0.2612	22.1
W2	2.62	2416.7	3.49	0.3402	21.6

2.2 실험 장비 및 방법

암석 시편의 파괴에 따른 음향방출 신호 측정 실험 구성은 일축 압축시험 장비와 음향방출 신호 측정 시스템으로 구성하였다(Fig. 3). 암석의 파괴는 일축 압축시험을 통하여 수행하였으며, 재하 속도는 한국암반공학회에서 제안한 표준시험법을 참고하여 하중을 가한 후 2~15분 내에 암석 시편이 파괴되도록 0.1 mm/min으로 설정하였다.

또한, 시편 표면의 축(axial) 방향 및 수평(lateral) 방향으로 변형률 게이지를 각각 부착하여 시편의 변형량을 측정하였다.

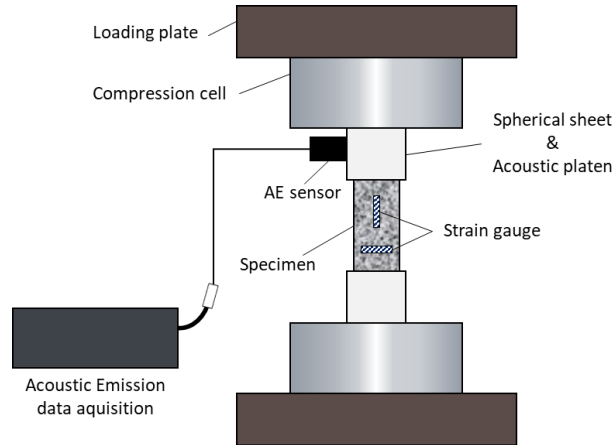


Fig. 3. Acoustic emission measurement setup with uniaxial compressive test

Table 2. Specifications of AE monitoring system

Property	Specification
Analog AE inputs	8 channels / board
Input Impedance	10 Ω
Resolution	16 bit
Frequency response	1 kHz to 1 MHz
A/D conversion rate	16 bit, 10 MSPS / channel
Digital processing	18 bit 256 tap digital FIR filter
Waveform storage	15,000 samples / channel
Analog filter	1 kHz, 5 kHz, 20 kHz, 100 kHz (high pass) 100 kHz, 400 kHz, 1 MHz (low pass)

음향방출 신호는 PAC에서 개발한 Micro-II Express-Express 8 시스템과 R.45IC 센서를 이용하여 수집하였다. 본 연구에 사용된 AE 시스템의 성능은 Table 2와 같다. 사용한 측정 시스템의 최대 측정 가능한 신호의 진폭 크기는 100 dB이다. 또한 고주파 노이즈를 제거하기 위해, 아날로그 필터(analog filter)를 사용하여 400 kHz low pass filter를 설정하였다. 신호 수집율(sampling rate)은 10 MPS (mega per second)로 설정하였다. 음향방출 신호 수집에 이용한 센서는 공진 주파수가 16.6 kHz, 운영 주파수는 1~30 kHz에 해당한다. 또한, 센서 자체에 내장되어 있는 증폭기(pre-amplifier)에서 획득 신호를 40 dB 증폭하여 신호를 획득하였다. 임계값(threshold)은 예비 실험을 통하여 신호대잡음비(signal-noise ratio)가 최대가 되는 40 dB로 설정하였으며, 기존 보고된 연구(Archer et

al., 2016)를 참고하여 센서는 시편 상부의 음향 플레이트(acoustic platen)에 설치하고, 고진공 그리스를 커플링 재료로 사용하여 음향방출 신호를 안정적으로 획득할 수 있도록 하였다.

2.3 음향방출 특성인자

음향방출음은 재료의 내부 혹은 표면에서 손상이 발생할 때 생성되는 탄성파 신호이다. 이러한 음향방출 데이터는 음향방출 측정 센서의 압전 소자(piezoelectric element)에서 전기적인(electrical) 신호의 형태로 변환되어 획득된다(Grosse and Ohtsu, 2008). 측정된 신호는 방출된 음원의 특성에 따라 파형이 달라지며 사용자가 설정한 임계값에 의하여 오름시간, 지속시간, 최대진폭, 카운트, 에너지, 실효값과 같은 다양한 특성인자로 분석된다(Fig. 4). 또한, 획득한 음향방출 신호는 주파수 변환에 의해 초기 주파수, 최대 주파수, 평균 주파수와 같은 주파수 영역 특성인자로 평가될 수 있다.

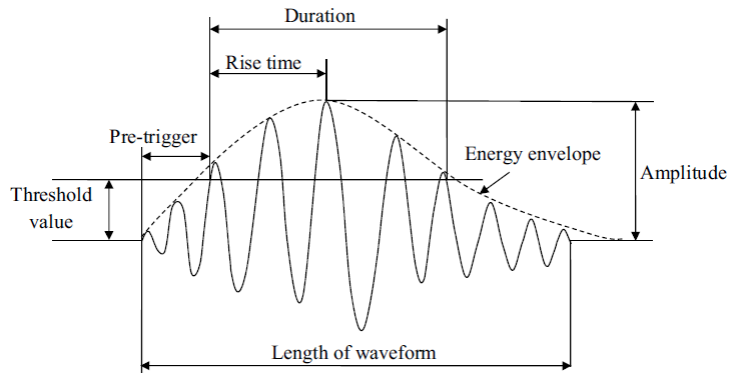
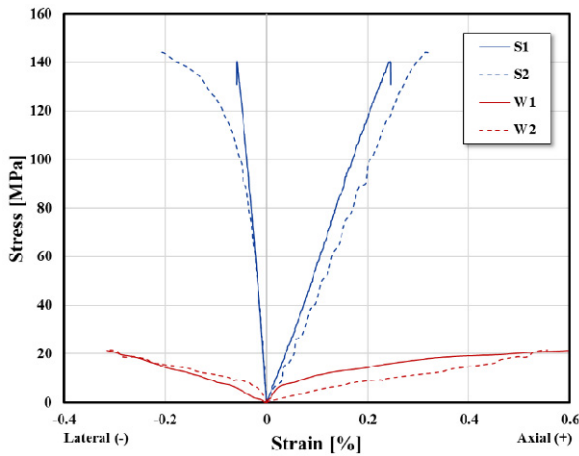


Fig. 4. An example of acoustic emission parameters based on waveform (Feng et al., 2019)

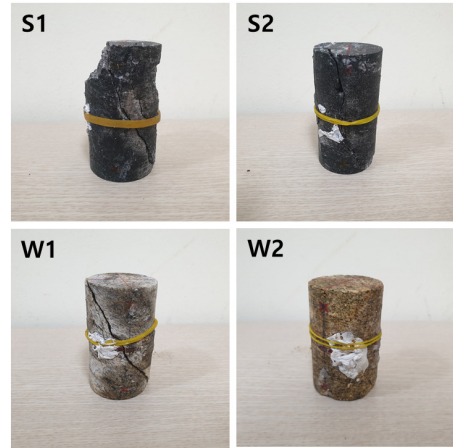
암석 시편 파괴 실험 이후 암석 강도에 따른 음향방출 신호 특성인자는 각 시편의 최대 응력에 해당하는 응력 비율(stress ratio, $\sigma / \sigma_{\max} \times 100, \%$)로 분석하였다. 본 연구에서는 음향방출 신호 특성인자를 이벤트(event), 실효값(RMS), 최대 진폭(amplitude), 절대 에너지(absolute energy), 주파수(frequency)로 선정하여 경암 및 연암의 파괴 시 특성을 분석하였다.

3. 일축 압축하중 조건에서의 음향방출음 측정 결과

일축 압축시험을 통하여 획득한 시편의 응력-변형률 그래프는 Fig. 5와 같다. 일축 압축하중 실험 결과, 경암 시편은 142.4 MPa (S1), 143.9 MPa (S2)의 일축 압축강도 결과를 보였으며 이와 반대로 연암시편은 22.1 MPa (W1), 21.6 MPa (W2)에 해당한다. 이러한 암석 시편의 강도 특성에 따른 음향방출음 측정 결과를 각 시편의 응력 비율을 이용하여 분석하였다.



(a) Stress-strain curve



(b) Rock specimens at ultimate failure

Fig. 5. Specimens under uniaxial loading conditions

3.1 이벤트(event)

음향방출 이벤트는 암석 시편이 하중에 의하여 변형이 발생되면서 생성되는 신호의 개수에 해당한다. 이벤트는 암석 시편 재료의 특성으로 대표되는 일축 압축강도(uniaxial compressive strength, UCS)와 하중 수준에 따라 달라진다(Jin et al., 2017). 또한, 암석 시편 내 심각한 파괴가 발생하는 경우, 다량의 음향방출 이벤트가 발생한다(Chmel and Shcherbakov, 2013). 따라서 이벤트 발생 양상을 하중 증가에 따라 누적하여 그래프의 증감 경향성 특성을 분석한다면 시편 내부의 변형 발생 및 파괴 특성을 평가하는데 효과적이다.

Fig. 6은 응력 비율(stress ratio) 증가에 따른 경암(S1, S2) 및 연암(W1, W2) 시편에서 발생한 누적 이벤트를 측정된 결과이다. 응력 비율은 각 시편의 최대 일축 압축강도 대비 해당하는 응력이며, 이때 발생하는 이벤트 횟수를 0%부터 누적하여 암석 시편 강도에 따른 결과를 비교 분석하였다. 누적 이벤트 수는 응력 비율이 100%에 도달할수록 증가하는 결과를 보였다(Fig. 6). 그러나 경암(S1, S2)과 연암(W1, W2)시편에서 누적 이벤트의 증가 경향성은 차이를 보였다. 경암 시편의 경우, 약 10%의 응력 비율까지는 낮은 수준의 이벤트 수가 관찰되었다. 10% 이후 응력이 증가함에 따라 다량의 이벤트가 관찰 되었으며, 약 40%의 응력 비율 이후에는 뚜렷한 이벤트가 관찰 되지 않았다. 반면에 연암 시편의 경우 약 20~30%의 응력 비율까지는 이벤트가 거의 발생되지 않다가, 약 30% 이후 파괴 시(100%)까지 급격한 이벤트 수의 증가가 관찰 되었다.

암석 시편의 강도에 따른 음향방출 신호 발생 결과는 경암이 연암에 비하여 누적 이벤트 수가 더 높은 결과를 보였다. 측정된 누적 이벤트 수는 최대 일축 압축강도(응력 비율 = 100%)에서 경암은 약 25,000~35,000 (Fig. 6(a) and 6(b)), 연암은 약 3,500~13,000 (Fig. 6(c) and 6(d))회 발생하는 것으로 측정되었다. 본 연구에서 사용된 시편에서는 경암이 연암에 비하여 누적 이벤트 값이 약 3.6배 높은 것으로 분석되었다.

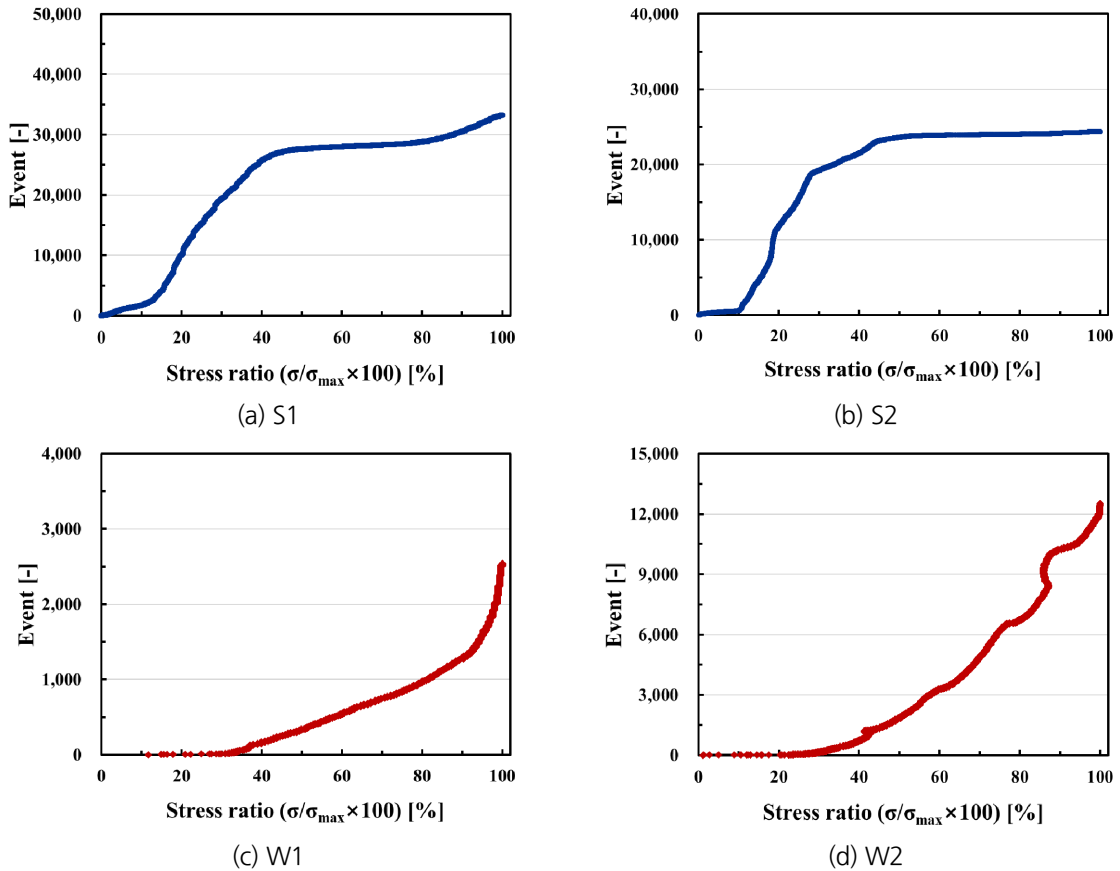


Fig. 6. Cumulative event with stress ratio

3.2 실효값(RMS)

실효값(root-mean-square voltage, RMS)은 발생한 음향방출 이벤트 파형의 평균 진폭(전압) 값에 해당한다. 음향방출 센서의 압전 소자에서 발생하는 전압 값은 암석 시편 손상 발생 시 측정되는 물리적인 변형 크기에 따라 달라진다. 따라서 실효값은 하중에 의한 시편 내의 파괴 특성을 분석하는데 유용한 특성인자로 활용되고 있다 (Dixon et al., 2018).

실효값은 응력 비율이 증가할 때(0% → 100%) 연암은 다소 증가하여 약 100%의 응력 비율에서 가장 큰 결과를 보였다. 경암의 경우 약 70% 응력 비율 부근에서 가장 높은 값을 가지는 것으로 확인되었다(Fig. 7). 평가된 최대 실효값은 연암보다 경암에서 약 1.3배 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 경암과 연암에서 확연한 차이를 보이는 것으로 판단된다. 경암의 경우 측정된 최대 실효값은 약 0.08 V (Fig. 7(a) and 7(b)), 연암에서는 약 0.06 V (Fig. 7(c) and 7(d))이다.

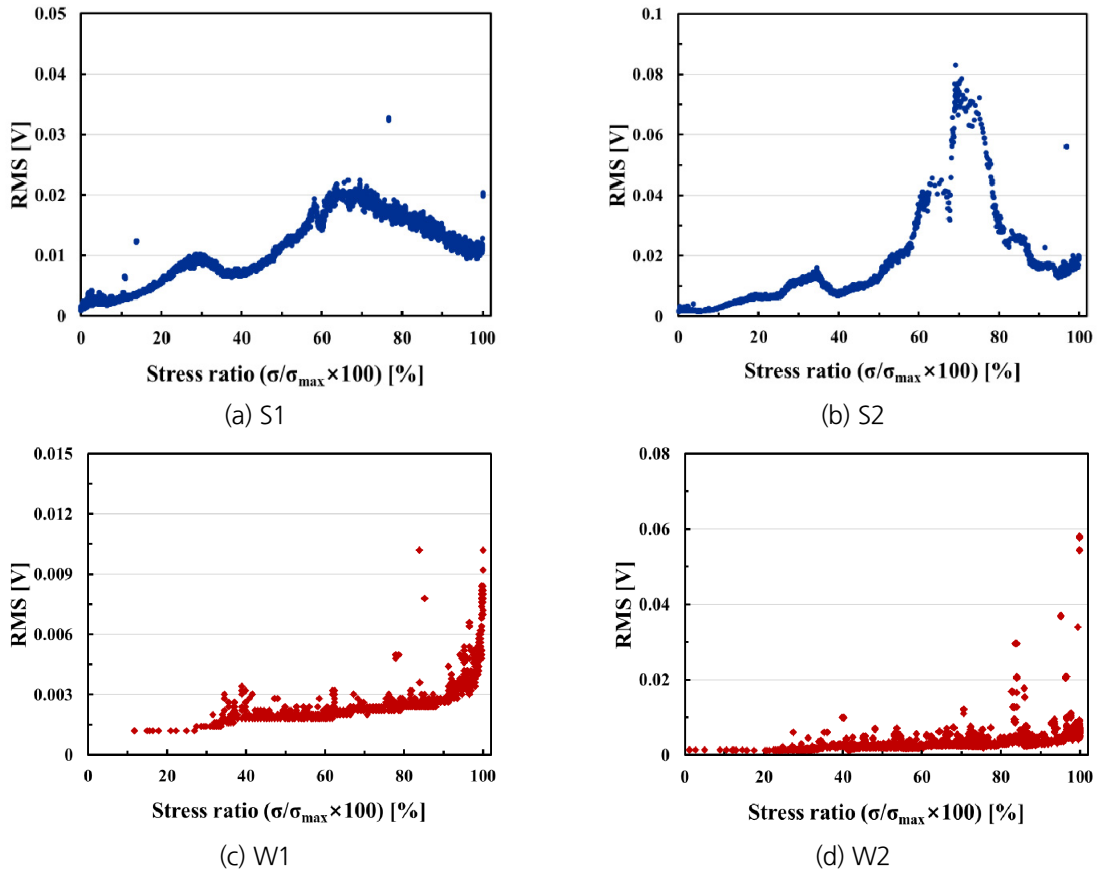


Fig. 7. Root-mean-square (RMS) voltage with stress ratio

이러한 원인으로는 하중 작용에 의하여 시편 내 큰 규모의 균열이 생성되고 연결되는 과정 때문에 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 일축 압축시험 과정에서 시편의 최종 파괴 과정은 기존에 존재하던 균열의 폐쇄(crack closure), 새로운 미세 균열 생성(micro-crack growth), 큰 규모의 균열의 생성 및 확장(macro-crack growth and coalescence), 최종 파괴(failure)으로 구분되는 특징이 있다. 이러한 과정에서 큰 규모의 균열이 생성 되는 경우 다수의 음향방출 이벤트가 발생하며, 이후 균열이 확장되고 연결될 때에는 음향방출 이벤트 수는 감소하지만 큰 규모의 에너지를 갖는 이벤트가 발생하는 특징이 있다(Moradian et al., 2016). 따라서 본 연구의 경암 시편에서는 응력 비율이 약 40% 부근에서 큰 규모의 균열이 생성되고 약 70%에서는 큰 규모의 균열이 확장 및 연결되는 것으로 분석된다. 이와 반대로 연암 시편에서는 이미 공극이 많이 존재하기 때문에 한번에 (경암처럼) 대규모의 파괴 보다는, 작은 규모의 파괴 및 균열 연결이 지속적으로 발생하여 응력 비율이 100%에 도달할수록 실효값이 점점 증가하는 것으로 분석된다.

3.3 최대 진폭(amplitude)

최대 진폭(amplitude)은 획득한 음향방출 이벤트의 파형에서 가장 큰 진폭(dB) 값을 의미한다. 본 연구에서는 주변의 노이즈 신호를 제거하기 위해, 임계값을 40 dB로 설정하여 음향방출 신호를 획득하였다. 또한, 사용한 측정 시스템은 최대 100 dB까지 신호의 획득이 가능하기 때문에 이에 따라 측정 가능 진폭의 범위는 40~100 dB 이다.

일축 압축시험에서 최대 진폭은 응력 비율 증가에 따라 연암 시료에서는 약간 증가하는 경향을 보였다. 최대 일축 압축강도(응력 비율= 100%)에 도달할수록 최대 진폭은 60~80 dB까지 증가하였다(Fig. 8). 경암 시편의 경우, 약 70% 응력 비율일 때 최대 진폭이 급격히 증가하였으며, 응력 비율이 100% 일 때 80 dB 이상의 진폭 값이 관찰되었다.

그러나 최대 전압 값은 암석 시편의 파괴 특성을 평가할 수 있는 음향방출 특성인자로서 활용하기에는 한계가 있을 것으로 분석된다. 최대 진폭은 암석 시편 강도에 따라 큰 변화를 보이지 않는 것으로 파악되었다. 또한, 최대 진폭 값의 범위는 설정한 임계값(40 dB)부터 측정 시스템의 획득 가능한 최대 진폭(100 dB)에 따라 제한되기 때문에 다른 음향방출 특성인자에 비하여 상대적으로 평가할 수 있는 값의 범위가 좁다.

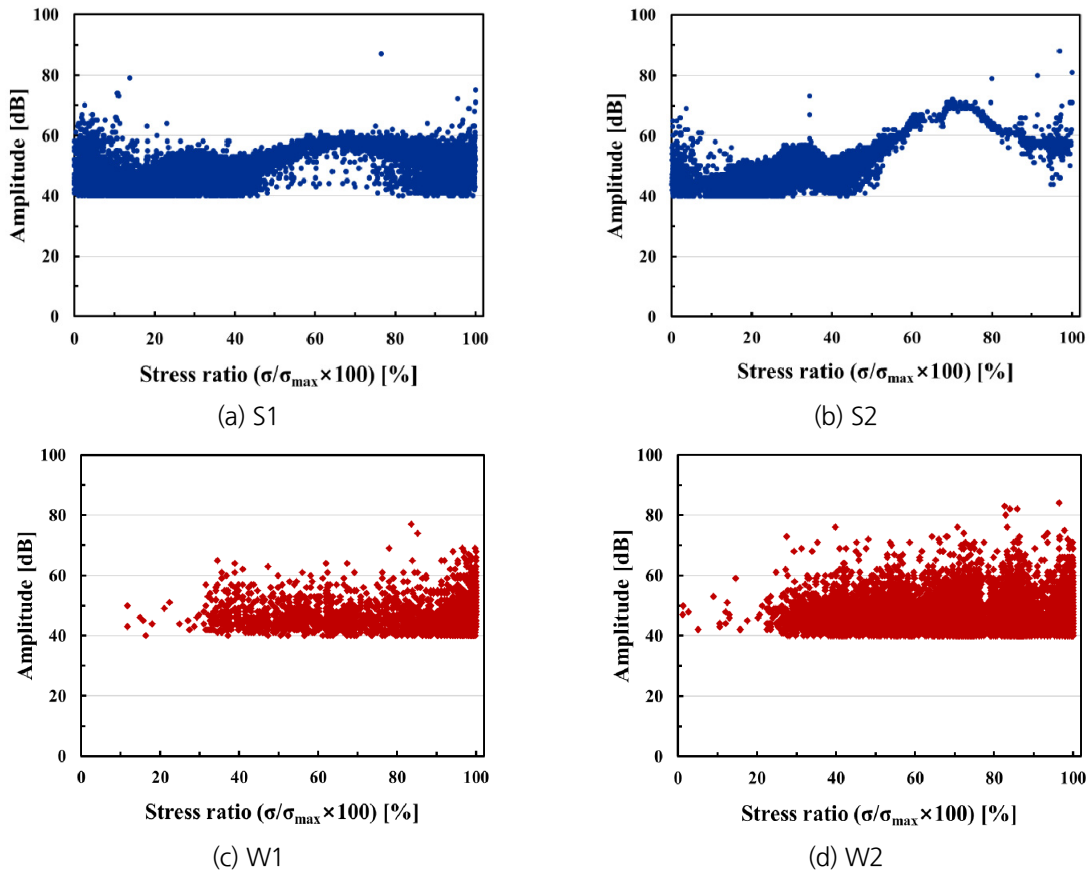


Fig. 8. Amplitude with stress ratio

3.4 절대 에너지(absolute energy)

절대 에너지(absolute energy)는 음향방출 이벤트의 절대적인 크기에 해당하는 에너지 값으로써, 카운트 에너지와는 다른 개념으로 사용된다. 카운트 에너지는 음향 신호의 파형에서 임계값을 상회하는 부분의 넓이에 해당한다. 절대 에너지는 획득 신호의 크기를 Jule [J] 단위로 나타내는 음향방출 에너지 인자에 해당한다. Fig. 9는 일축 압축시험에서 획득한 경암과 연암의 절대 에너지 결과를 보여준다.

경암의 경우, 70% 응력 비율에서 높은 수준의 에너지가 발생됨을 확인 할 수 있다. 반면에 연암의 경우 응력이 증가함에 따라 산발적으로 높은 수준의 에너지가 관찰 되었다. 연암의 경우 최대 절대 에너지 양은 약 $0.5 \sim 2.0 \times 10^{-12}$ J 이다. 전체적인 최대 에너지 양은 연암에 비해 경암이 큰 결과를 보였지만, 비슷한 경암 시편내에서도 파괴 시(e.g., 70% 응력 비율) 발생하는 에너지의 양은 대략 10배 이상 차이를 보인다(Fig. 9(a) and 9(b)). S1 시료의 경우 최대 절대 에너지 양은 약 4.8×10^{-12} J 인 반면에, S2 시료의 경우 약 65.0×10^{-12} J 로 나타났다. 이와 같은 결과는 비슷한 강도의 암석 시편이라도, 암석 내부의 입자의 구조적 결합 및 미세 절리의 분포에 따라 에너지 양의 차이가 많이 발생할 수 있음을 보여준다.

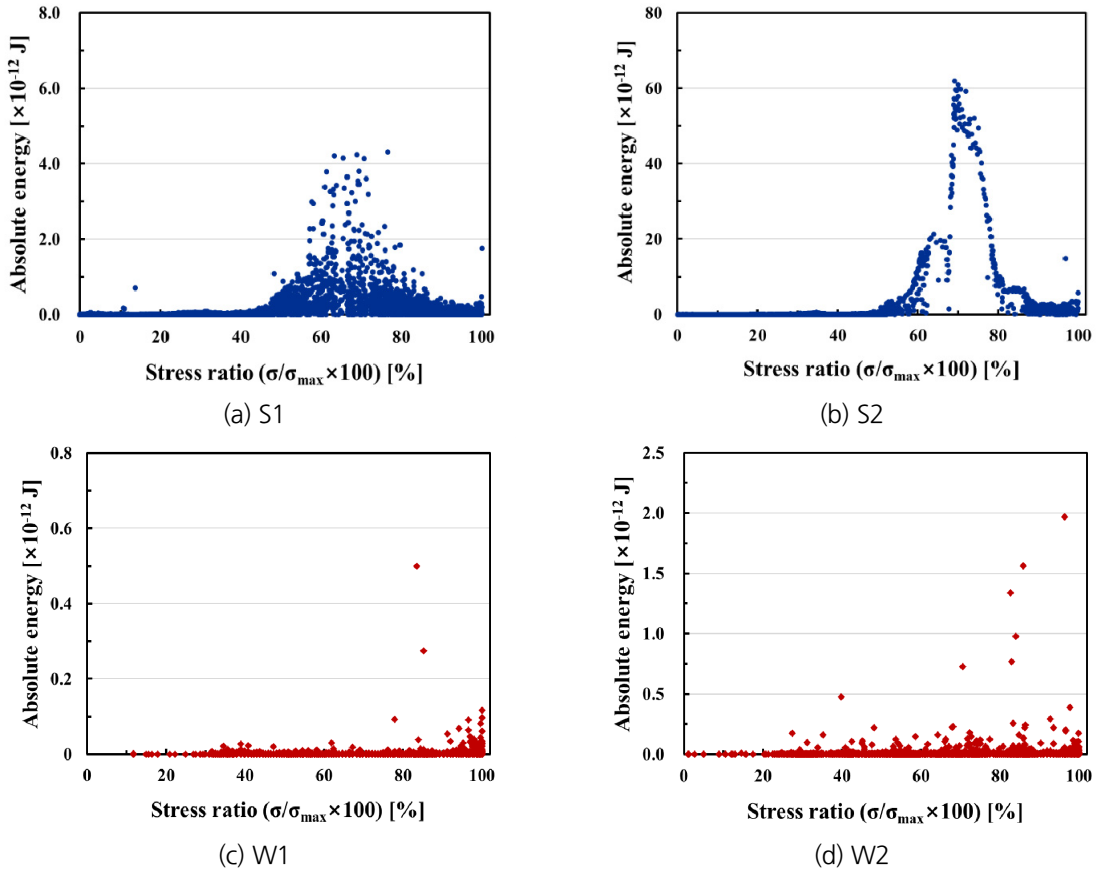


Fig. 9. Absolute energy with stress ratio

3.5 주파수(frequency)

주파수는 암석 시편의 파괴를 평가하기 위하여 널리 활용되고 있는 특성 인자에 해당하며 시편의 강도, 종류, 응력 비율, 파괴 모드, 사용한 센서의 성능 등에 따라 달라진다(Gong et al., 2017; Li et al., 2017). 주파수 특성 인자는 주로 초기 주파수(initial frequency)와 최대 주파수(peak frequency)로 분석될 수 있다. 초기 주파수는 음향방출 이벤트 파형에서 최대 진폭에 도달하는 시간(오름시간, rise time)과 도달 시간 동안 임계값을 상회하는 카운트 수(count to peak)의 비율에 해당한다. 최대 주파수는 획득한 파형의 주파수 변환 후 가장 높은 주파수 값에 해당한다.

Fig. 10은 일축 압축시험에서 측정된 경암 및 연암 시편의 초기 주파수 결과를 보여준다. 경암의 경우, 응력 비율 증가에 따라 초기 주파수는, 낮은 응력 비율에서 상대적으로 다양한 주파수 대역(1~130 kHz)을 보이고, 암석의 큰 파괴가 발생한 70% 응력 비율 부근에서는 약 18 ± 1 kHz의 일정한 초기 주파수 값을 보였다(Fig. 10(a) and 10(b)). 연암의 경우 약 20% 응력 비율 이상에서 파괴시 까지 다양한 초기 주파수 대역(1~160 kHz)이 관찰 되었다(Fig. 10(c) and 10(d)).

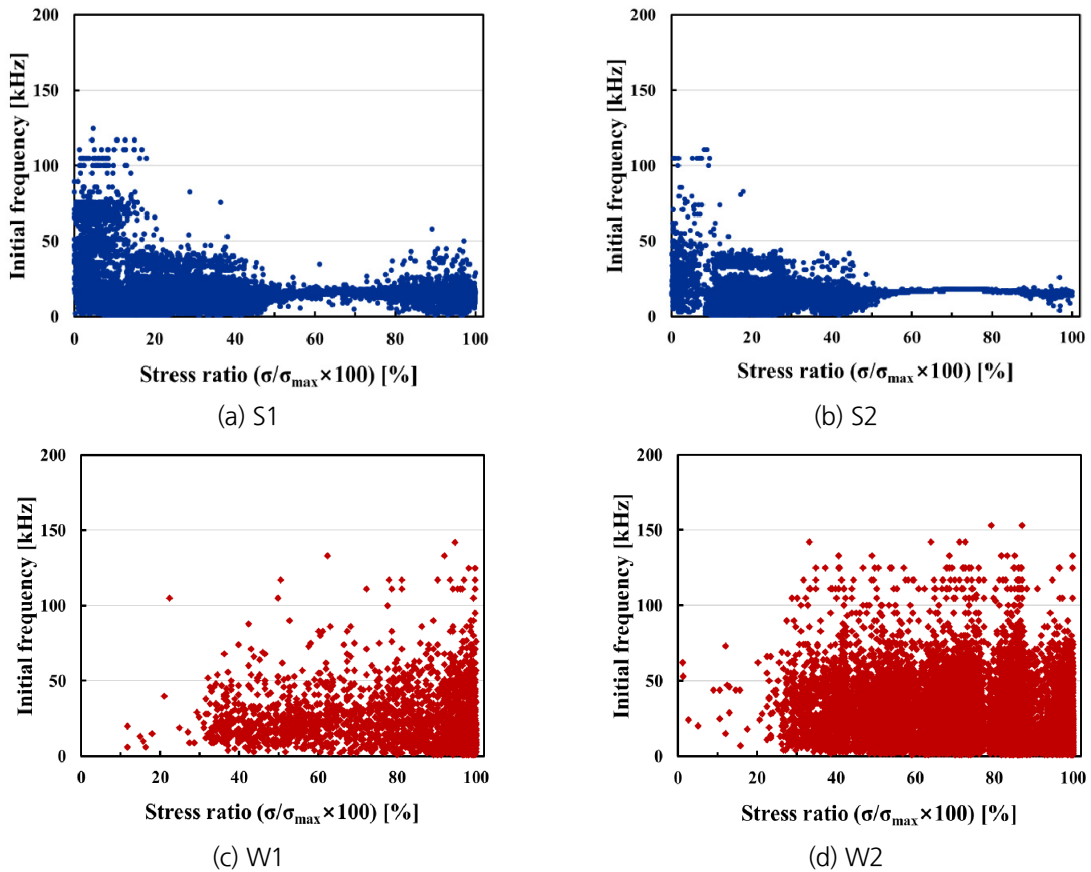


Fig. 10. Initial frequency with stress ratio

경암 시편에서, 최대 주파수는 초기 20% 이하의 응력 비율에서는 다소 다양한 주파수들이 관찰 되었다. 해당 최대 주파수 결과는 같은 시편에서 초기 주파수 값들보다는 다소 낮은 수준(75 kHz 이하)의 주파수 대역이 관찰 되었다. 응력 비율 증가에 따라 약 20 kHz의 주파수 신호가 지배적인 결과를 보였다(Fig. 11(a) and 11(b)). 이와 반대로 연암 시편에서는 응력 증가 비율과 상관없이 3 ± 1 kHz 및 17 ± 2 kHz, 43 ± 2 kHz, 56 ± 1 kHz의 다양한 주파수 값이 지배적인 것으로 관찰 되었다(Fig. 11(c) and 11(d)).

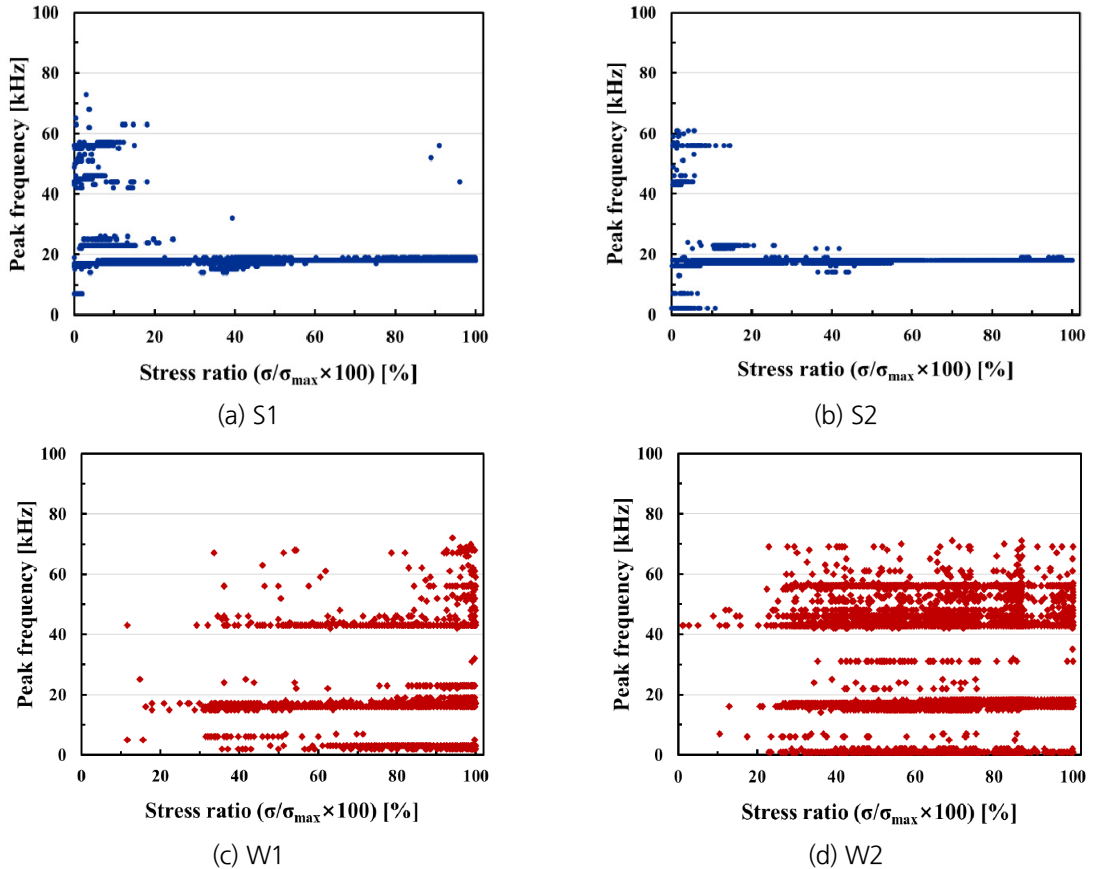


Fig. 11. Peak frequency with stress ratio

이러한 원인으로는 사용한 센서의 공진 주파수의 영향으로 판단된다. 초기 주파수는 음향방출 신호의 최대 진폭까지의 특징을 나타내므로 실제 시편 파괴 시 발생하는 음향방출 신호의 특징을 나타낸다. 반면에, 최대 주파수는 음향방출 신호의 전체적인 특징을 나타낸다. 음향방출 신호의 후반부(최대 진폭 이후)는 고주파 신호의 감쇠가 다량 발생하기 때문에 최대 주파수는 시편 파괴의 특징을 나타내기 보다는 센서의 공진 주파수 대역으로 수렴하게 된다(Rodríguez and Celestino, 2019). 이에 따라 측정된 최대 주파수가 센서의 공진 주파수(16.6 kHz)에 주로 수렴하는 결과를 보이는 것으로 판단되며, 이러한 특징은 경암 시편에서 보다 명확한 것으로 파악되었다.

위의 결과에서, 주파수를 암석 시편의 파괴를 평가할 수 있는 특성인자로 사용하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 주파수는 응력 비율의 증가나 암석 시편의 일축 압축강도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 주파수는 사용한 센서의 공진 및 운영 주파수에 보다 민감한 특성인자에 해당한다(Ishida et al., 2017). 따라서 하중에 의한 암석 시편의 손상을 평가하기 위해서는 주파수를 단일 평가 지표로 활용하기 보다는 다양한 음향방출 특성인자를 복합적으로 적용해야 할 것이다.

4. 암석 시편 강도에 따른 음향방출 신호 특성에 관한 논의

일축 압축시험에서 암석 시편의 파괴 과정은 초기 시편 내 존재하던 균열이 닫힌 후 미세 균열 생성 및 큰 규모의 균열로의 확장, 최종 파괴 순서로 발생된다. 이때 시편 내에서는 주로 고주파의 음향방출 신호가 발생되며, 음향방출 측정 센서를 이용하여 신호를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 발생한 음향방출 신호의 횟수에 해당하는 이벤트와 실효값, 최대 전압, 절대 에너지, 초기 주파수, 최대 주파수를 음향방출 특성인자로 선정하였으며, 서로 다른 강도의 암석 시편을 이용하여 일축 압축 파괴에 따른 음향방출 특성인자 발생 양상을 분석하였다. 또한, 실험을 통해 분석한 바와 같이 실효값, 최대 전압, 절대 에너지는 유사하게 발생한 신호의 크기를 나타내는 특징이 있다. 그 중 실효값과 이벤트 수를 음향방출 신호 크기를 나타내는 대표적인 특성인자로 선정하여 분석하였다. 주파수는 센서 성능에 크게 영향을 받는 특성인자에 해당하기 때문에 파괴 특성을 평가하기에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 연암과 경암의 음향방출 신호 특성을 누적 이벤트 수와 누적 실효값을 이용하여 파괴가 발생할 때까지 누적된 음향방출 신호 특성을 분석 하였다.

시편의 최종 파괴가 발생하는 동안 누적 이벤트 수와 누적 실효값은 경암 시편이 연암 시편에 비하여 큰 결과를 보였다. 또한, 경암이 연암에 비하여 누적 이벤트 수는 약 3.8배, 누적 실효값은 약 6.5배 높은 것으로 분석되어 실효값이 이벤트에 비하여 암석 시편 강도에 따른 음향방출 신호 특성 분석에 적합한 특성인자로 평가되었다(Fig. 12). 그러나 단일 음향방출 특성인자를 적용한 파괴 특성 분석은 한계가 있을 것으로 판단된다. 시편 내 미세 균열의

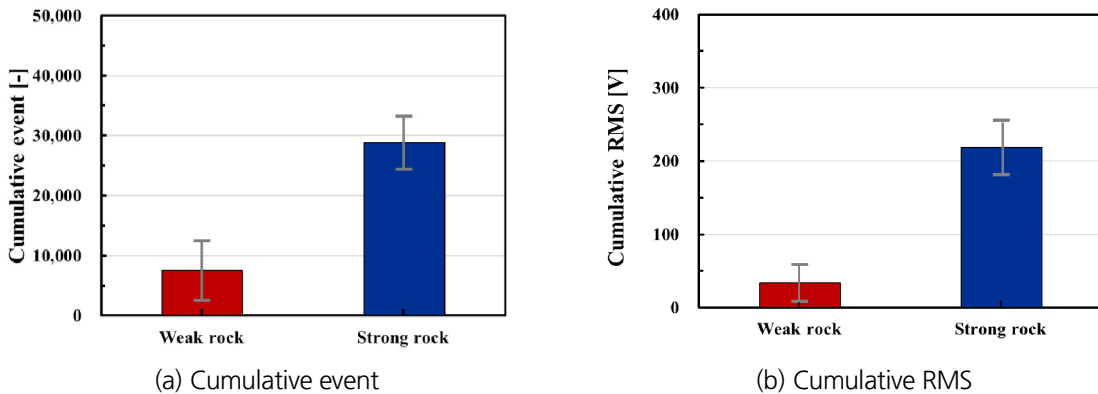


Fig. 12. Cumulative event and RMS for weak and strong specimens at ultimate failure

생성 시에는 다량의 음향방출 이벤트가 발생하지만 큰 규모의 균열로의 확장 시에는 오히려 음향방출 이벤트 수가 감소하고 실효값이 급격히 증가하는 특징을 보이기 때문이다(Moradian et al., 2016). 따라서 이벤트와 실효값을 연계하여 분석한다면 하중에 의한 암석 시편의 파괴를 분석하는데 유리할 것으로 판단된다. 또한, 향후 연구에서 손상에 따른 다양한 암반 강도 별 음향방출 특성인자 분석 연구를 실시한다면 현장에서 음향방출 신호 기반 모니터링 수행 시 기초데이터로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

최근 지진이나 굴착과 같은 외부적인 요인에 의한 암반 내 구조물의 손상을 평가하기 위하여 음향방출 센서를 이용한 모니터링 기법이 활용되고 있다. 음향방출 모니터링 기법을 사용하기 위해서는 측정된 음향방출 신호의 특성인자를 암반 강도 별로 정량화 및 특성화하여 손상 상태 평가 가이드라인으로 활용하는 것이 필수적이다. 만약 암반 강도 특성에 따른 음향방출 특성인자의 분석이 선행되지 않는다면 암반 손상의 특성을 평가할 수 없기 때문에 모니터링 기법의 신뢰성이 감소할 수 있다. 따라서 본 연구는 일축 압축시험을 실시하여 암석 시편의 강도에 따른 음향방출 특성인자의 특성을 사전에 파악함으로써 암반 구조물 손상 상태 평가를 위한 최적 음향방출 특성인자를 분석하는데 목적이 있다.

실험 결과, 일축 압축하중이 증가할 때, 암석 시편의 강도가 높을수록 누적 음향방출 이벤트 횟수가 증가하는 경향을 보였다. 이벤트 수는 일축 압축하중 작용에 따라 암석 시편 내 부분적인 파괴나 최대 하중에 가까워질수록 급격히 증가하는 것으로 파악되었으며, 경암 시편에서 연암 시편에 비하여 이벤트 횟수가 약 3배 높게 측정되었다. 또한, 음향방출 신호의 크기를 나타내는 실효값, 최대 진폭, 절대 에너지는 일축 압축하중 증가에 따라 강도가 높은 시험편군에서 높게 측정되는 결과를 보였다. 이러한 특성인자들은 이벤트와 마찬가지로 최대 하중에 가까워질수록, 시편 내 부분적인 파괴가 발생할수록 급격히 증가하는 경향을 보였다. 또한, 최대 진폭은 설정한 임계값과 측정 시스템의 성능에 따라 측정 범위가 제한되므로 본 연구에서 선정한 다른 특성인자들에 비하여 암석 시편의 파괴를 평가할 수 있는 민감도가 낮은 인자로 분석되었다. 마지막으로, 주파수 특성인자는 응력 비율이나 암석 재료의 특징 보다는 센서의 운영 주파수나 공진 주파수의 영향을 크게 받아 파괴 상태를 평가하는 지표로서 사용하기에는 무리가 있을 것으로 분석된다. 일축 압축하중 조건에서 분석된 음향방출 특성인자를 종합적으로 분석하면, 이벤트와 실효값을 함께 사용한다면 손상에 의한 암석 시편의 파괴 특성을 분석하는데 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 일축 압축하중 조건에서 음향방출 특성인자 평가를 위하여 한정된 강도의 화강암 시편만을 고려하였다. 따라서 음향방출 모니터링 기법을 활용하기 위한 암반 손상 평가 기준을 정립할 때, 다양한 암종 및 암석 강도별 손상 실험을 실시한다면 최적화된 손상 평가 가이드라인을 설계할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 통하여 파악된 암석 시편의 강도에 따른 음향방출 특성인자 분석 연구는 향후 현장에서 음향방출 기반 모니터링 수행 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Archer, J.W., Dobbs, M.R., Aydin, A., Reeves, H.J., Prance, R.J. (2016), "Measurement and correlation of acoustic emissions and pressure stimulated voltages in rock using an electric potential sensor", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 89, pp. 26-33.
2. Brown, E.T. (1981), *ISRM suggested methods. Rock characterization testing and monitoring*, Oxford: Pergamon Press.
3. Butt, S.D., Mukherjee, C., Lebars, G. (2000), "Evaluation of acoustic attenuation as an indicator of roof stability in advancing heading", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, No. 7, pp. 1123-1131.
4. Cheon, D.S., Jung, Y.B., Park, E.S. (2014), "Development of acoustic emission monitoring system for the safety of geotechnical structures", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 5, pp. 471-485.
5. Chmel, A., Shcherbakov, I. (2013), "A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 64, pp. 56-59.
6. Dixon, N., Smith, A., Flint, J.A., Khanna, R., Clark, B., Andjelkovic, M. (2018), "An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries", *Landslides*, Vol. 15, No. 8, pp. 1631-1644.
7. Feng, X.T., Young, R.P., Reyes-Montes, J.M., Aydan, Ö., Ishida, T., Liu, J.P., Liu, H.J. (2019), "ISRM suggested method for in situ acoustic emission monitoring of the fracturing process in rock masses", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52, No. 5, pp. 1395-1414.
8. Gong, Y., Song, Z., He, M., Gong, W., Ren, F. (2017), "Precursory waves and eigenfrequencies identified from acoustic emission data based on Singular Spectrum Analysis and laboratory rock-burst experiments", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 91, pp. 155-169.
9. Grosse, C.U., Ohtsu, M. (2008), *Acoustic emission testing*, Springer Science & Business Media, pp. 3-9.
10. Helmstetter, A., Garambois, S. (2010), "Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 115, No. F3, F03016.
11. Ishida, T., Labuz, J.F., Manthei, G., Meredith, P.G., Nasser, M.H.B., Shin, K., Yokoyama, T., Zang, A. (2017), "ISRM suggested method for laboratory acoustic emission monitoring", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, No. 30, pp. 665-674.
12. Jin, P., Wang, E., Song, D. (2017), "Study on correlation of acoustic emission and plastic strain based on coal-rock damage theory", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 627-637.

13. Khazaei, C., Hazzard, J., Chalaturnyk, R. (2015), "Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling", *Computers and Geotechnics*, Vol. 67, pp. 94-102.
14. Kim, J.S., Lee, K.S., Cho, W.J., Choi, H.J., Cho, G.C. (2015), "A comparative evaluation of stress-strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp. 495-508.
15. Li, L.R., Deng, J.H., Zheng, L., Liu, J.F. (2017), "Dominant frequency characteristics of acoustic emissions in white marble during direct tensile tests", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, No. 5, pp. 1337-1346.
16. Moradian, Z., Einstein, H.H., Ballivy, G. (2016), "Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 785-800.
17. Park, E.S., Shin, H.S., Cheon, D.S., Jung, Y.B. (2013), "Management and concept of the monitoring system considering the characteristics of subsea tunnels", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 5, pp. 523-536.
18. Rodríguez, P., Celestino, T.B. (2019), "Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 210, pp. 54-69.
19. Wang, C.L. (2014), "Identification of early-warning key point for rockmass instability using acoustic emission/microseismic activity monitoring", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 100, No. 71, pp. 171-175.
20. Wang, S.G., Liu, Y.R., Tao, Z.F., Zhang, Y., Zhong, D.N., Wu, Z.S., Lin, C., Yang, Q. (2018), "Geomechanical model test for failure and stability analysis of high arch dam based on acoustic emission technique", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 112, pp. 95-107.
21. Zhang, R., Dai, F., Gao, M.Z., Xu, N.W., Zhang, C.P. (2015), "Fractal analysis of acoustic emission during uniaxial and triaxial loading of rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 100, No. 79, pp. 241-249.
22. Zhao, X.G., Cai, M., Wang, J., Ma, L.K. (2013), "Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 64, pp. 258-269.