

ORIGINAL ARTICLE

이축압축실험을 통한 지하공동 손상시 음향방출 및 미소변형 특성 연구

김민준¹, 최준형², 나태유³, 박 찬⁴, 채병곤⁴, 박의섭^{5*}

¹한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 선임연구원, ²한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 선임기술원,
³한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 박사후연수자, ⁴한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 책임연구원,
⁵한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 센터장

A Study on Acoustic Emission and Micro Deformation Characteristics During Biaxial Compression Experiments of Underground Opening Damage

Min-Jun Kim¹, Junhyung Choi², Taeyoo Na³, Chan Park⁴, Byung-Gon Chae⁴, and Eui-Seob Park^{5*}

¹Senior Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
²Senior Engineer, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
³Postdoctoral Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
⁴Principal Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
⁵Head, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author: espark@kigam.re.kr

Received: April 18, 2024
Revised: April 22, 2024
Accepted: April 23, 2024

ABSTRACT

This study investigates acoustic emission (AE) and micro-deformation characteristics of circular openings through biaxial compression experiments. The experimental results showed a significant increase in the frequency, count, energy, and amplitude of AE signals immediately before damage occurred in the circular opening. The differences in frequency and count between before and after damage initiation were significantly pronounced, indicating suitable factors for identifying damage occurrence in circular openings. The results for digital image correlation (DIC) technique revealed that micro-deformation was concentrated around the openings, as evidenced by the spatial distribution of strain. In addition, spalling was observed at the end of the experiments. The AE and micro-deformation characteristics presented in this study are expected to serve as fundamental data for evaluating the stability of underground openings and boreholes for deep subsurface projects.

Keywords: Underground opening, Biaxial compression experiment, Acoustic emission, Digital image correlation

초록

본 연구에서는 심부 지하공간의 안정성을 평가하고자 심부 응력조건을 반영한 암석블록의 이축압축실험을 통하여 지하공동에서 손상 발생시 발생하는 음향방출 및 미소변형의 특성을 분석하였다. 음향방출 특성 분석 결과 지하공동에서 손상 발생 직전에 음향방출 신호의 주파수, 카운트, 에너지, 진폭 특성이 급격히 증가하였다. 특히 주파수와 카운트는 손상 전후에서 특성 차이가 크게 나타나 원형 공동의 손상 특성 분석에 적합한 음향방출 인자인 것으로 나타났다. 이미지상관기법 적용결과 실험 중 공동 주변에 변형이 집중되었음을 변형률의 공간적 분포를 통해 알 수 있었으며, 실험 종료 지점에서는 스펙링 현상이



발생하였음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 원형 공동 손상시 음향방출 및 미소변형 특성은 심지층 활용을 위한 지하공동 안정성 평가의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어: 지하공동, 이축압축실험, 음향방출, 이미지상관기법

1. 서론

심지층 개발 및 안정적인 활용을 위해서는 심부에 건설하는 지하공동의 안정성 평가 및 역학적 특성 파악이 매우 중요하다. 특히, 심지층 암반에 작용하는 높은 응력 조건에서는 지하공동 주변으로 응력 및 변형이 집중되어 암반의 손상, 균열 발달 및 전파가 발생하여 지하 공간의 안정성과 지하 시설물의 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 이에 대한 정량적인 평가가 필수적이다. 예를 들면 지하 500미터 이하에 건설되는 고준위 방사성폐기물의 심층처분시설에서는 높은 현지응력이 작용하는 조건에서 지하공동을 굴착함으로써 공동 주변 암반의 역학적 거동에 대한 분석 및 검토가 사전적으로 요구된다. 현지응력 조건하 지하공동의 안정성 평가 및 역학적 특성 평가는 이론 및 해석적인 방법으로 접근이 가능하며 이에 대한 사전 연구들이 진행되어왔다(Fakhimi et al., 2002, Park et al., 2006, Kang and Song, 2019, Hong et al., 2021). 이에 비해 심지층 환경의 높은 현지 응력 조건에서 지하공동의 역학적 특성 분석에 관한 실험적 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 심부 암반에서 굴착하는 지하공동 주변에 발생하는 균열 및 균열 전파와 같은 복잡한 역학적 현상을 규명하기 위해서는 이론 및 해석적 방법 뿐만 아니라 실험적 접근방법이 반드시 필요하다. 또한, 지하공동의 역학적 특성 분석에 대한 실험적 연구에는 심부 공동 주변의 역학적 특성을 집중적으로 분석하기 위한 추가적인 모니터링 방안이 요구된다.

음향방출과 이미지 상관기법은 재료 및 파괴역학 분야에서 모니터링 기법으로 널리 사용되고 있으며 암반공학 분야에서도 그 활용성이 증대하고 있다(Miao et al., 2021, Chu et al., 2023). 음향방출은 외부 충격이 가해질 때 재료 내부에서 생성되는 탄성파로써, 암석역학 실험에서 히트(hit) 수, 진폭(amplitude), 에너지, 카운트(count)와 같은 음향방출 인자 특성을 이용하여 육안으로는 관측하기 힘든 암반의 미세균열 특성 분석에 효율적으로 사용된다. 또한 다수의 음향방출 센서를 사용하면 여러 위치에서의 음향방출 신호 특성을 이용하여 암반 내 균열이 발생하는 위치나 균열의 전파 여부를 추정할 수 있다. 특히, 음향방출은 재료에 파괴가 발생하기 전에 손상을 감지할 수 있는 수동적 특성을 지니고 있어 암반 손상 모니터링 및 취성 파괴 메커니즘 분석에 중요한 역할을 한다(Moradian et al. 2016, Lee et al., 2019). 이에 반해 이미지상관기법은 실험 대상이 되는 물체의 표면 이미지를 확보함으로써 디지털 이미지 처리와 상호 연관성 분석을 통해 실험 대상의 형태 변화를 추적할 수 있는 기법으로, 이를 암반공학 실험에 적용하면 암반 시험편의 표면에서 발생하는 주변형률, 전단 변형률, 변형 벡터와 같은 정보를 계산하여 암반 변형 및 손상에 대한 정량화된 결과 획득이 가능한 장점이 있다.

이러한 특징을 가진 음향방출과 이미지상관기법을 암반공학 실험에 동시에 적용할 경우 더욱 효과적인 역학적 특성 분석이 가능하다(Miao et al., 2020). 특히 하중과 변위 데이터만으로는 공동 모사 암석 시험편에서 응력집중 영역의 역학적 특성 분석이 제한적이지만, 두 모니터링 기법이 적용되면 공동 주변에서 발생하는 실험적 현상 관측이 가능하다. 그럼에도 불구하고 암석의 음향방출 및 이미지상관기법 적용에 대한 연구는 주로 일축압축시험(Cao et al., 2019, Xin et al., 2022), 간접인장시험(Stirling et al., 2013, Aliabadian et al., 2019), 파괴인성 시험(Kim et al., 2020) 및 노치 시험편을 이용한 압축시험(Gong et al., 2017, Lin and Labuz, 2013) 등의 표준 암석역학 시험을 대상으로 수행되어 왔다. 하지만 공동을 포함한 암석 시험편에서는 하중을 가할 시 공동

주변으로 응력이 집중되고 손상 영역이 형성되기 때문에 표준 암석역학 시험에서 발생하는 음향방출 및 미소변형 특성과는 차이가 있으므로, 이에 관한 차이점을 구분할 수 있는 실험과 모니터링 기법이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 높은 응력조건에서 지하공동 주변 응력집중 영역의 역학적 특성 분석을 위한 모니터링 방안을 적용하고 결과를 제시하기 위하여 공동 모사 암석 블록 시험편에 음향방출(acoustic emission)과 이미지 상관기법(digital image correlation)을 사용한 이축압축실험을 수행하였다. 이를 위하여 원형 공동 손상을 유발할 수 있는 조건을 구성하기 위한 이축압축실험장치를 구성하였으며, 암석 블록에 원형 공동을 만들어 시험편을 제작하였다. 강도가 다른 두 종류의 사암에 일정한 횡방향 하중 조건을 가한 뒤 축방향 가압을 통해 시험편에 손상을 발생시키는 이축압축실험을 수행하였으며, 실험 동안 음향방출과 이미지상관기법 모니터링 시스템을 적용하였다. 측정된 자료를 바탕으로 지하공동에서 손상 발생에 따른 음향방출 인자와 미소변형의 특성을 도출하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 하중시스템

본 연구에서는 Kocurek사에서 판매하는 Berea 및 Idaho 사암의 암석 블록 시험편을 이용하였다. 사암은 결정질암과 달리 낮은 하중에서 입자의 변형을 관찰이 용이하기 때문에 사암 시험편을 이용하여 실험을 수행하였다. 특히 Berea 사암과 Idaho 사암 시험편은 일축압축강도가 낮아서 후술할 하중시스템의 하중용량에 적합하며, 암석의 포아송비(Poisson's ratio)가 달라 암석의 탄성 특성에 따라 달라지는 암반 시험편 표면의 거동 관찰이 용이할 것으로 판단되었다.

Table 1은 한국지질자원연구원에서 제공하는 국가표준기본법 제 14조의 규정에 의거하여 국가측정표준과 소급성이 유지된 측정방법으로 획득한 사암시험편의 기본 물성 시험 결과이며, Kocurek사에서 제공하는 일축압축강도(UCS) 결과(Berea sandstone : 34-54 MPa, Idaho sandstone : 20-27 MPa)와 유사하게 측정되었다.

Table 1. Mechanical properties of sandstones

	Specific Gravity	Absorption Ratio	Wave Velocity		UCS	Poisson's Ratio	Porosity	Elastic Modulus
			S-wave	P-wave				
	[-]	[%]	[ms]		[MPa]	[-]	[%]	[GPa]
Berea sandstone	2.20	6.04	1,610	2,770	41	0.49	18 - 21	9.7
Idaho sandstone	1.99	12.26	1,440	2,890	20	0.09	29 - 30	7.34

사암 암석블록에 이축압축상태 및 원형 공동의 손상을 구현하기 위하여 50 mm × 50 mm × 50 mm 정육면체 시험편의 정중앙 위치에 5 mm 직경의 원형 모양으로 천공하여 시험편을 제작하였다. 횡방향으로 시험편에 하중을 가압하기 위하여 압력로딩프레임을 제작하였으며, 2 ton급 로드셀(MNC-2)과 10 ton급 유압식 실린더(RMS100)를 이용하여 횡방향 단축면에 시험편 기준으로 최대 8 MPa까지 단축 하중을 가할 수 있도록 구성하였다. 또한 시험편과 가압판 사이에 구면좌를 설치하여 시험편의 직각도에 따라

하중을 균일하게 가할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 경계효과를 최소화 하기 위하여 하중시스템을 적용할 수 있는 최대 길이로 암석 블록의 크기를 설정하였으나 이에 대한 정확한 영향은 고려되지 않았다.

축방향으로 시험편에 하중을 가하기 위해 160 ton급 유압식 서보제어 장치(MTS. 815 model)를 사용하였으며, 시험편에 0.008 mm/s의 재하속도로 하중을 가할 수 있도록 실험을 설계하였다. 횡방향 가압방법과 유사하게 가압면을 일정하게 유지할 수 있도록 구면좌를 설치하였다.

2.2 모니터링 시스템

2.2.1 음향방출특성

실험 중 음향방출 데이터를 수집하기 위하여 컨트롤러, 데이터수집장치, 음향방출 센서, 소프트웨어(AEwin for Express-8 E5.91)로 구성되어 있는 음향방출 모니터링 시스템을 설치 및 운영하였다. 본 실험에서는 암석블록 시험편의 크기를 고려하여 직경이 8 mm인 Nano 30 음향방출 센서를 사용하였다. 음향방출 센서는 2/4/6 증폭기를 추가 연결하여 40 dB 만큼 증폭된 값을 실험에서 측정하였다. 진공 그리스를 사용하여 음향방출 센서를 암석 시험편에 부착하였으며, 이미지상관기법의 적용을 위하여 음향방출 센서는 시험편의 후면에 설치하였다. 음향방출 신호 측정을 위한 샘플링 속도는 1 MHz로 설정하였으며, 실험 중 일상소음, 기계 및 전자기 잡음으로부터의 간섭을 최소화하기 위하여 45 dB의 진폭 임계값을 설정하였다. 이는 실험에 앞서 단순 기계의 가동으로 측정된 신호들을 측정함으로써 설정하였다. 그 외 음향방출 신호 측정 관련 시간적인 변수들은 AEwin(2014)에서 제공하는 사용자 매뉴얼 값을 적용하였다.

2.2.2 이미지상관기법

이미지상관기법은 암반 표면의 입자 이동을 별도의 접촉 센서 없이 광학 측정 장치를 이용하여 관심영역에 대해 2차원 또는 3차원적으로 상대적 변위를 해석하는 방법으로 암석의 파괴 및 변형 관찰에 용이하다(Wu et al., 2021). 이미지상관기법 분석을 위해서는 2대의 카메라를 이용하여 다각적으로 시험편 표면의 입자의 이동을 관측하여 시험편 표면의 변형률을 계산하기 때문에 시험편과 카메라 간 거리와 각도가 결과 해석에 영향을 미친다.

본 연구에서는 이축압축상태에서 원형 공동에 손상이 발생할 때의 공동 주변 미소 변위 특성을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 이미지상관기법 시스템을 설치하였다. 이미지상관기법 시스템은 Dantec Dynamics에서 제공하는 패키지를 사용하였으며, 패키지는 카메라, 렌즈, 거치대, 조명, 데이터수집장치, 해석용 소프트웨어로 구성되어있다. 실험간 이미지 획득을 위하여 12 mm 초점거리의 Schneider Kreuznach 렌즈와 1600 × 1200 px 해상도의 CCD 이미지 센서를 탑재한 Q-400 카메라를 사용하였다. 이미지상관기법 적용을 위한 최적의 각도는 20-30°이며(Dantec Dynamics GmbH, 2016), 본 연구에서는 시험편과 카메라 사이의 거리를 800 mm, 시험편의 중심으로부터 각 카메라 사이의 거리를 230 mm로 조정하여 각도를 약 27°로 유지하였다. 실험간 이미지 데이터는 2.5 Hz의 샘플링 속도로 취득하였다.

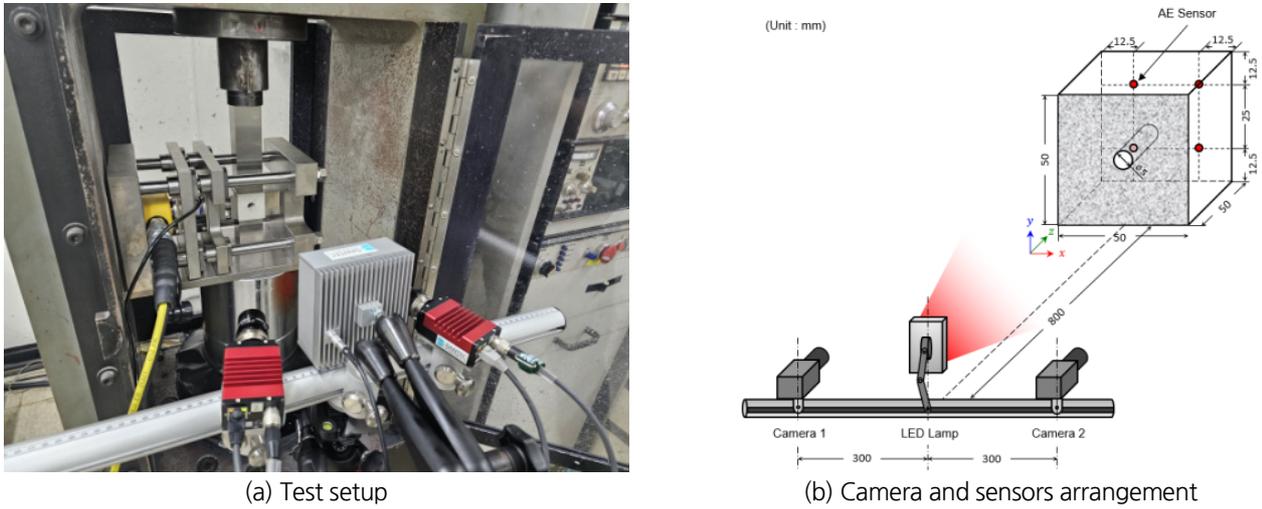


Fig. 1. Test setup for biaxial compression experiments using AE and DIC

2.3 실험절차

이축압축실험을 위하여 제작된 압력로딩프레임을 이용하여 먼저 횡방향 고정 하중을 가압하였다. 가압 뒤 축방향으로 0.008 mm/s의 일정 재하 속도로 축방향 하중을 증가시켜 원형 공동에서 발생하는 암반 시험편의 거동을 관찰하였다. 이 때, 하중시스템 및 음향방출과 이미지상관기법 모니터링 시스템의 시간을 일치시키기 위하여 표준 시간을 이용하여 동시에 자료 취득을 시작하였다. 본 연구에서는 역학적 특성이 서로 다른 Berea, Idaho 사암과 횡방향 하중의 영향을 살펴보기 위하여 Table 2와 같이 총 4가지 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

Table 2. Experimental cases for biaxial experiments

Rock type	Specimen	Horizontal stress [MPa]
Berea sandstone	BR0508	3.0
	BR0516	6.0
Idaho sandstone	ID0508	3.0
	ID0516	6.0

실험간 변위 제어를 통해 축방향으로 가압하면서 하중을 실시간으로 측정하였고, 하중이 급격하게 감소하는 시점에서 실험을 종료시켰다. 이는 본 연구의 목적에 따라 시험편에 완전한 파괴를 가하는 것이 아니라 원형 공동 주변에 일부 손상이 발생하는 시점의 음향방출 및 미소변위 특성을 획득하기 위함이었다.

3. 음향방출 특성 실험결과 및 분석

음향방출의 특성을 나타낼 수 있는 인자는 총 12개가 있으나 본 연구에서는 신호의 주파수, 세기, 에너지를 대표할 수 있는 인자

들을 선별하여 결과 분석에 사용하였다 (Grosse and Ohtsu, 2008, Hardy, 1981). 분석에 사용된 음향방출의 인자는 주파수, 카운트, 에너지, 진폭이며, Fig. 2는 전압신호로부터 해당 인자들이 나타내는 값을 보여주고 있다. 이들 인자는 음향방출 신호의 특성을 나타내는 핵심인자로서 신호의 세기 및 발생 횟수를 지시하는 인자이며, 미세균열, 손상 또는 외부적인 사건이 발생했을 때 변화가 발생하는 인자들이다(Oh et al., 2020). 실험조건별로 실험간 취득한 각각의 음향방출 인자를 시간-하중 그래프와 일치시켜 결과 분석하였다.

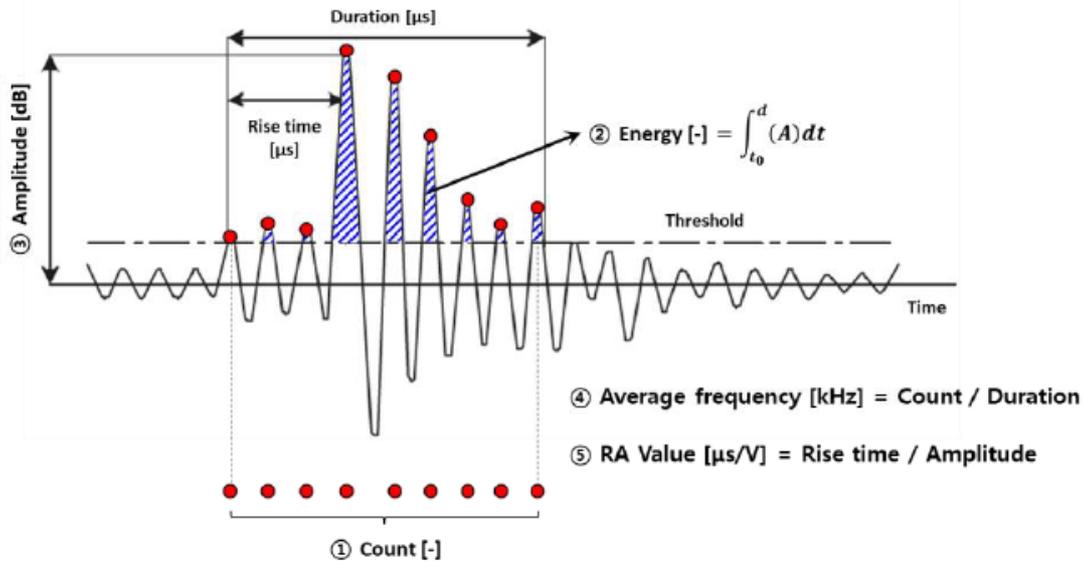


Fig. 2. Indications of AE parameters from voltage signal (Lee et al., 2020)

3.1 실험결과

Figs. 3-6은 이축압축실험에 따른 하중 및 음향방출 인자 특성 결과를 나타낸다. 실험결과 하중이 증가함에 따라 4가지 음향방출 인자 값들은 모두 증가하는 경향을 보였다. 이는 공통적으로 높은 하중에 의해 암석 시험편에서 큰 음향에너지가 방출됨을 나타내며, 임계치를 초과하는 빈도수가 높은 음향방출 신호가 발생함을 의미한다. 또한 특정 하중 수준까지는 하중에 의해 음향방출 값이 완만하게 증가하거나 거의 비슷한 값을 나타내다가 시험편에 손상이 발생하기 직전에 각 인자들 값이 급격히 증가하는 현상을 보였다. 이는 단순한 외력에 의한 시험편 내부에서 미세한 변형에 의해 발생하는 음향방출 신호와 시험편에 균열발생 및 파괴로 인한 손상 시 발생하는 음향방출 신호의 특성이 달라짐을 의미한다. 이에 따라 본 연구에서는 음향방출 인자 값이 급격히 증가하기 시작한 시점을 손상발생 시점으로 정의하였다. 모든 실험케이스에서 하중이 급격하게 감소하는 시점과 음향방출 특성이 급격히 증가하기 시작한 시점이 일치하였다. 따라서 손상 시점에서부터 실험이 종료된 구간까지를 손상에 의해 발생한 음향방출 신호가 주를 이루고 있는 손상 구간이라고 볼 수 있다. 각 음향방출 인자별 결과 분석에서 회색 점선으로 표시된 지점이 손상 시점이며, 하중이 0이 되는 지점까지가 손상 구간이다(Figs. 3-6). 다른 시험편과 달리 ID0516에서는 실험 시작 이후 34.4초까지 응력이 0.3 MPa 이하를 보였으며, 이는 해당 시험시 시험편이 가압판에 완전히 밀착되기까지 시간이 소요된 것으로 판단된다.

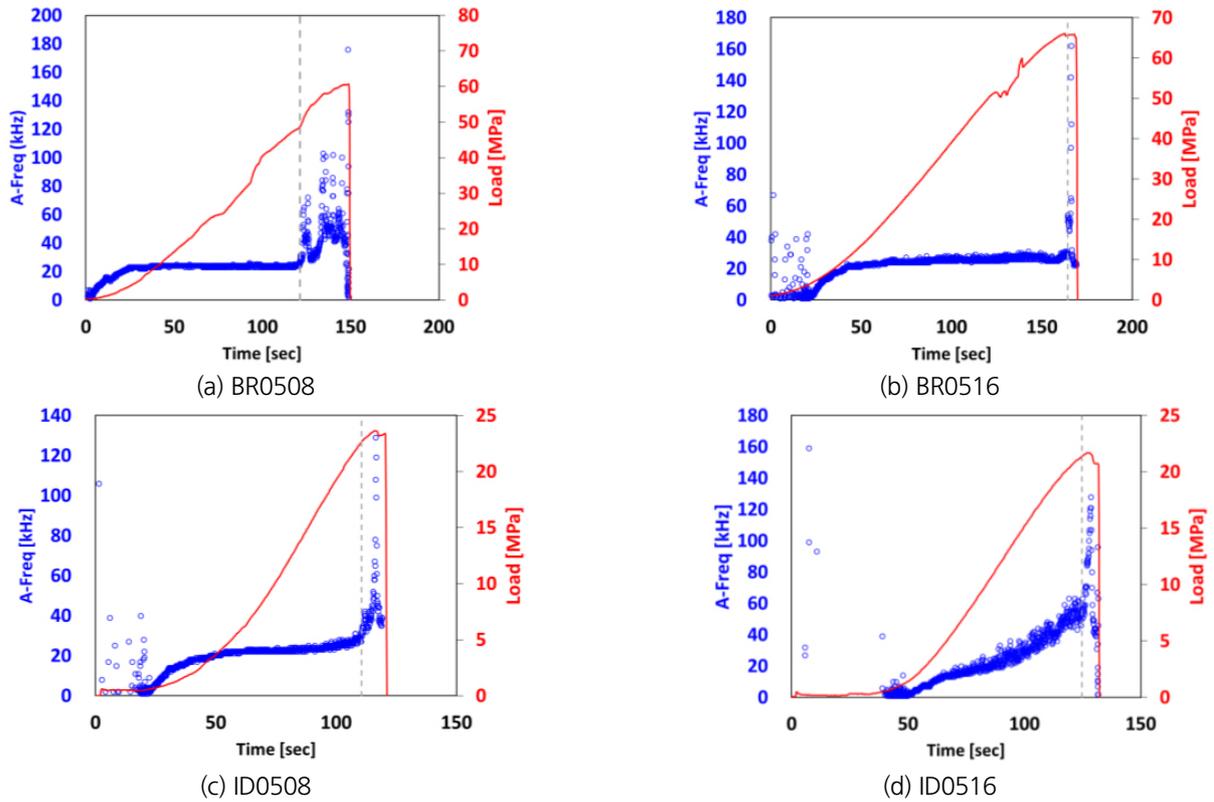


Fig. 3. A-Freq variations for all test specimens under axial loading

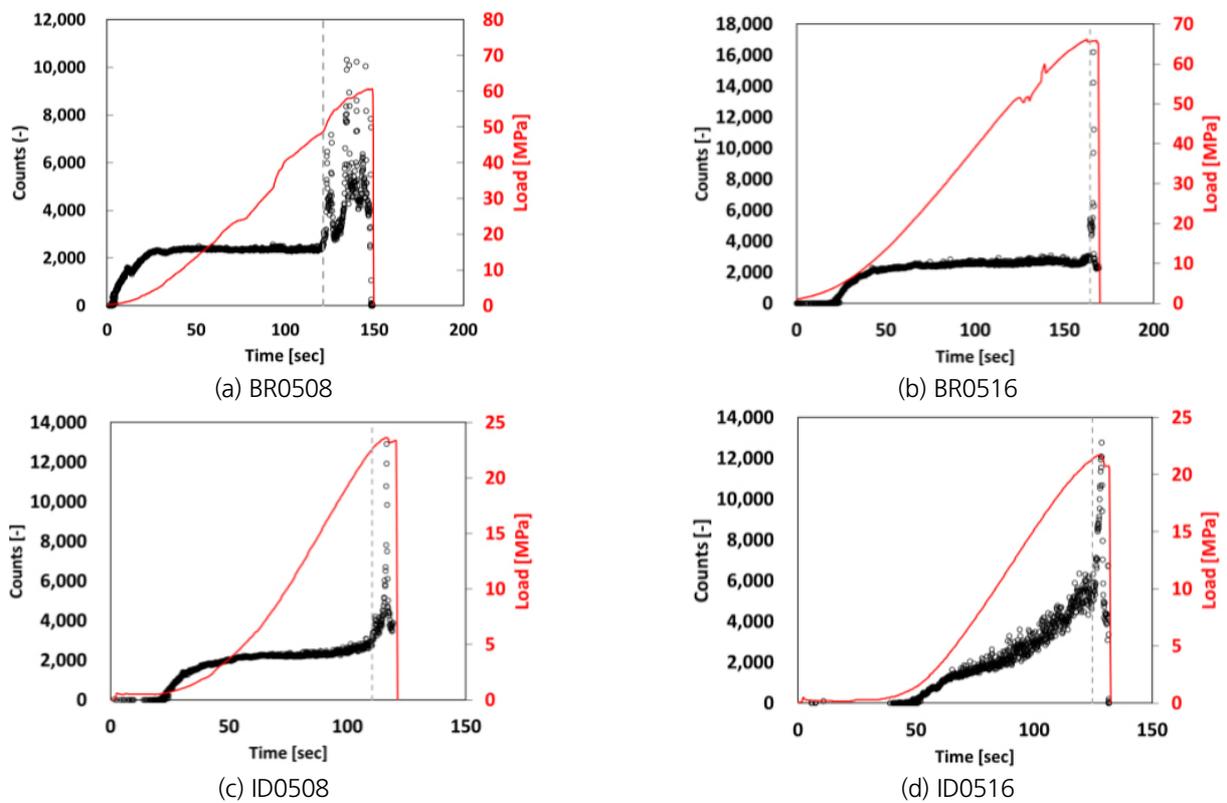


Fig. 4. Count variations for all test specimens under axial loading

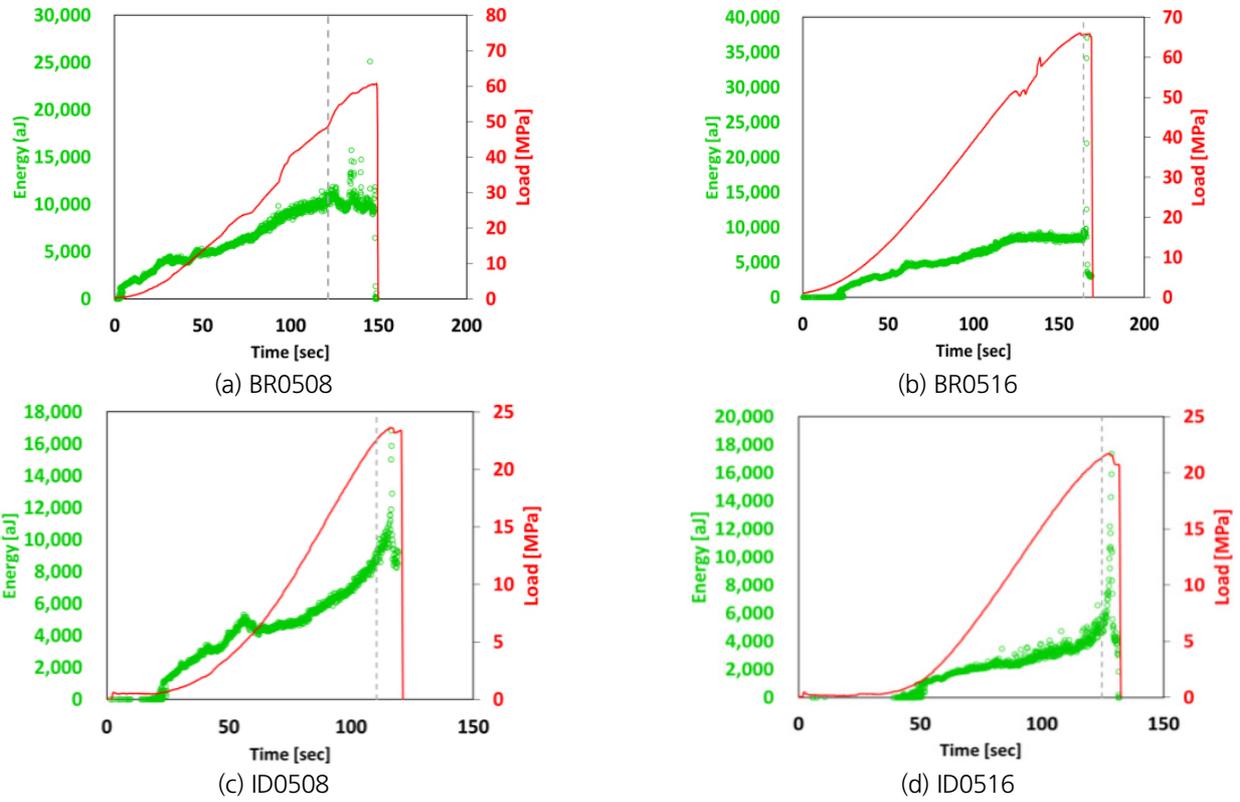


Fig. 5. Energy variations for all test specimens under axial loading

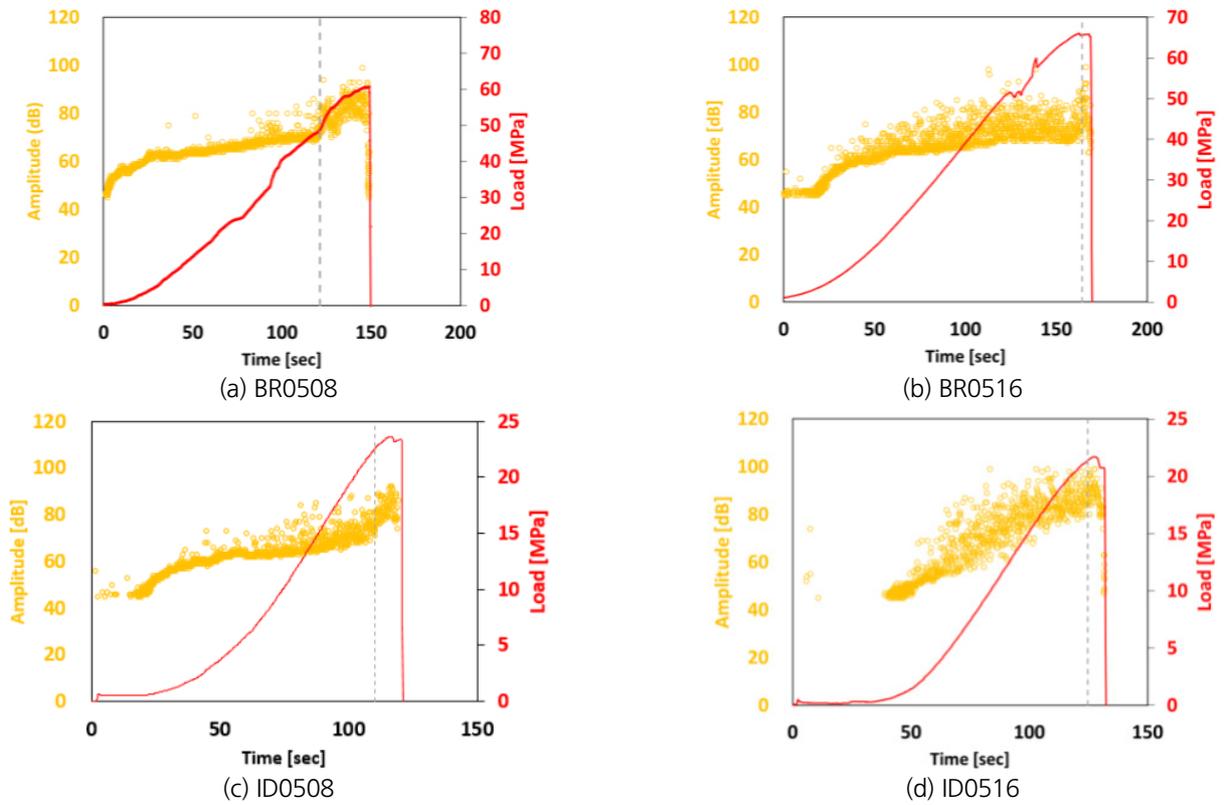


Fig. 6. Amplitude variations for all test specimens under axial loading

3.2 음향방출 인자 특성 분석

3.2.1 주파수(Frequency) 특성

주파수는 암석 시편의 파괴를 평가하기 위하여 활용되는 특성 인자이며, 암석의 강도, 종류, 하중, 파괴 모드, 음향방출 센서의 성능 등에 따라 달라진다(Gong et al., 2017, Li et al., 2017, Lee et al., 2019). 또한 음향방출 주파수 특성은 음향방출 모니터링 시스템에서 적절한 주파수 대역을 지니고 있는 음향방출 센서 선택에 대한 결정적인 근거를 제시해 주기 때문에 이를 사전에 파악하는 것은 매우 중요하다. Fig. 3(b), (c), (d) 실험의 초반에 측정된 높은 주파수 대역의 신호들은 잡음 제거 처리과정으로 모두 처리되지 못한 잡음이 수신된 것으로 판단된다. 전체 실험간 주파수 대역은 1-176 kHz의 영역을 보였다.

Fig. 7은 각 시험편별로 전체구간, 손상발생 전/후의 구간으로 나누어 각 구간에서의 주파수 평균 값을 도식하였다. 손상발생 전 구간 대비 손상발생 이후 구간에서의 평균 주파수는 BR0508에서 2.09배, BR0516에서 2.07배로 증가하였으며, ID0508에서 4.89배, ID0516에서 3.36배로 증가하였다. 일반적으로 재료에서 균열이 발생할 때의 음향방출 신호는 재료의 내부적 변형에 의해 발생한 신호들에 비해 주파수 대역이 높은 특성을 보인다(Oh et al., 2020). 그에 따라 전체 실험조건에서 손상발생 전의 주파수 대역에 비해 손상발생 이후의 주파수 대역이 높게 나타났으며, 이는 손상 구간에서 균열에 의한 음향방출신호가 주를 이루어 고주파수의 신호가 다수 포착되었기 때문이다. 두 종류의 사암 및 횡방향 하중에 대해 공통적으로 실험구간 전체의 평균 주파수는 20 kHz 내외의 비슷한 평균값을 보였다. 손상 발생 이후 구간에서의 평균 주파수는 Idaho 사암이 Berea 사암보다 1.49배 높게 나타났으며, Idaho 사암에서 손상 발생시 고주파수 음향방출 신호가 다량 발생한 것으로 판단된다. 반면에 측정된 음향방출 신호의 주파수 특성에서 횡방향 하중에 대해서는 큰 변화가 나타나지 않았다.

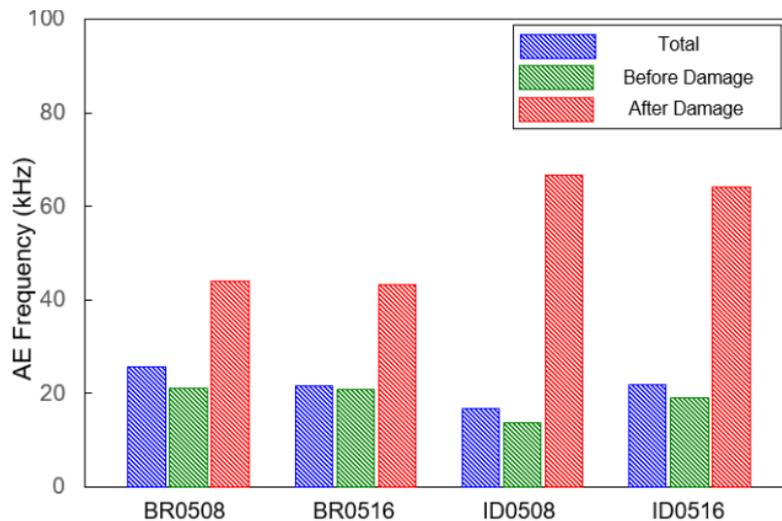


Fig. 7. Average frequency of specimens according to damage conditions

3.2.2 카운트(Count) 특성

음향방출의 카운트 수는 음향방출 신호 중 임계 전압 이상의 진동 횟수로 정의되며, 발생하는 신호의 주파수와도 관련이 있는 인자이다. 모든 실험조건에서 하중의 증가에 따라 카운트 수가 증가하는 경향을 보였으며, 손상이 발생하기 직전 카운트 값이 급격히 증가하는 현상을 보였다. Berea 사암에서는 손상발생 전 대비 손상발생 이후 구간에서의 평균 카운트 수가 횡방향 하중이 3.0 MPa

일 때는 1.93배, 6.0 MPa일 때는 2.16배로 증가하였으며, Idaho 사암에서는 각각 4.03배, 3.87배로 증가하였다(Fig. 8). 손상 발생 시 암석 시험편 내에서 강한 음향방출 신호가 발생하여 전압의 임계치를 초과하는 빈도수가 증가하기 때문이다. 또한 Idaho 사암에서 손상 발생시 카운트의 증가 정도가 Berea 사암에 비해 더 크게 발생하는 경향을 보였다. 이는 주파수의 결과와 유사하게 Idaho 사암에서 손상에 따른 음향방출 신호의 변화 특성이 Berea 사암보다 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 카운트 특성에 대한 횡방향 하중의 영향 또한 미미하거나 특정 경향을 나타내지 않은 것으로 나타났다.

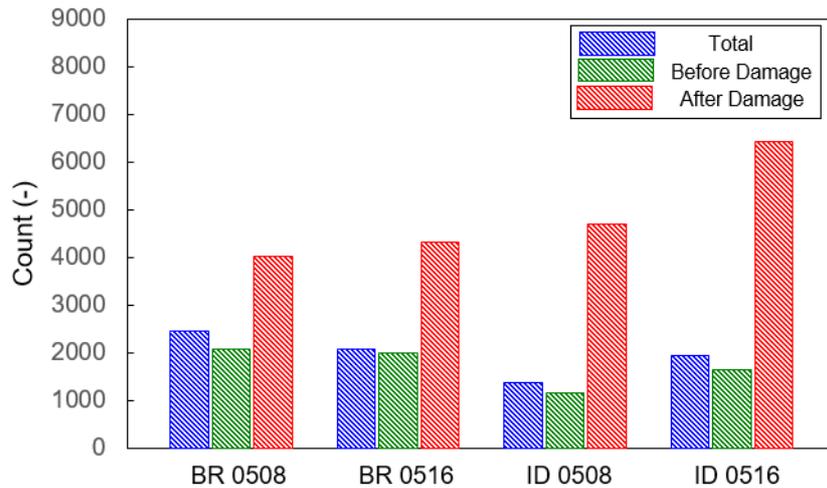


Fig. 8. Count of specimens according to damage conditions

3.2.3 에너지(Energy) 특성

음향방출 에너지는 계측된 음향방출 신호의 진폭을 제공하여 지속시간에 걸쳐 적분한 값으로 정의되며, 획득 신호의 크기를 Jule [J] 단위로 나타내는 음향방출 인자에 해당한다. 에너지 인자 값이 Fig. 5와 같이 손상발생 시점에서 급격히 증가하였고, 증가 정도는 손상발생 전 대비 손상 구간에서의 평균 에너지 값이 BR0508에서 1.62배, BR0516에서 1.51배로 증가하였으며, ID0508에서 1.94배, ID0516에서 2.51배 증가한 것으로 나타났다(Fig. 9). 뿐만 아니라 손상 이전 구간에서도 하중의 증가에 따라 음향방출 에

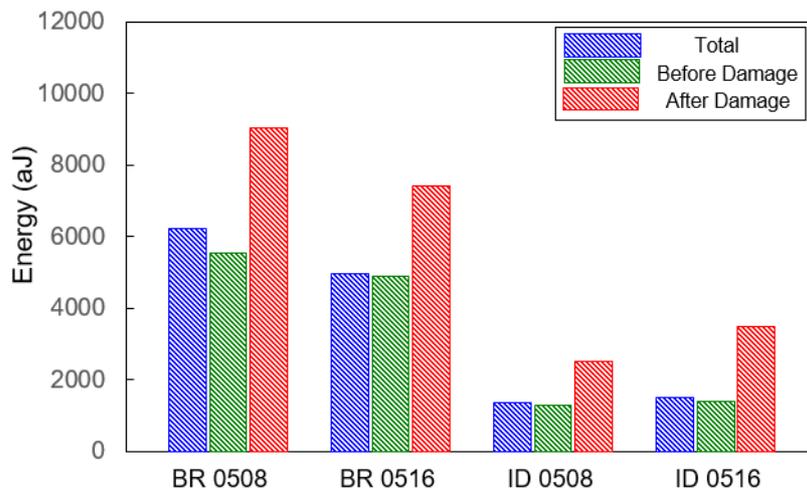


Fig. 9. Energy of specimens according to damage conditions

너지가 증가하는 현상이 확인되었다. 횡방향 하중 크기에 대한 에너지 크기의 차이가 일부 있었으나 뚜렷한 경향을 나타내지는 않았다. 반면에 시험편의 압중에 따른 에너지 크기의 차이로 Berea 사암이 Idaho 사암에 비하여 평균적으로 3.87배만큼 값이 크게 나타났다. 이는 두 압중의 일축압축강도 또는 공극률과 같은 기본 물성의 차이로부터 기인한 것으로 보이며, 본 실험의 결과로는 이에 대한 정확한 규명은 어려웠다. 주파수와 카운트에서는 압중에 따른 영향이 크지 않았기에 에너지 인자는 공동의 손상여부뿐만 아니라 암석의 기본 특성에 대한 정보 취득시 유리한 인자인 것으로 판단된다.

3.2.4 진폭(Amplitude) 특성

진폭은 음향방출 신호의 시작으로부터 종료 사이에 계측된 최대 전압을 뜻하며, 신호의 세기를 직접적으로 나타내는 인자이다. 음향방출 시스템에서는 최대 진폭 100 dB까지 신호 획득이 가능하며, 앞서 진폭 임계값을 45 dB로 설정하였기 때문에 본 실험에서 측정 가능한 진폭의 범위는 45-100 dB이다. 손상발생 전 구간 대비 손상발생 이후 구간에서의 평균 진폭은 BR0508에서 1.22배, BR0516에서 1.21배로 증가하였으며, ID0508에서 1.23배, ID0516에서 1.32배로 증가하였다(Fig. 10). 진폭 또한 하중의 증가에 따라 증가하였으며, 손상이 발생할 때 급격히 상승하는 경향을 보였으나 앞서 기술된 다른 음향방출 인자들과 대비하여 시험편의 손상에 따라 증가한 정도가 크지 않았다. 이는 측정 가능한 진폭의 최대 값이 100 dB 이기 때문에 다른 음향방출 특성인자에 비하여 상대적으로 평가할 수 있는 범위가 좁기 때문이다. 손상 신호를 판별하기 위해서는 최대 전압값의 세기 자체만 활용하기 보다는 빈도수를 나타내는 주파수나 신호의 적분 값을 나타내는 에너지 등의 인자가 함께 분석에 사용되는 것이 더욱 효율적인 것으로 판단된다.

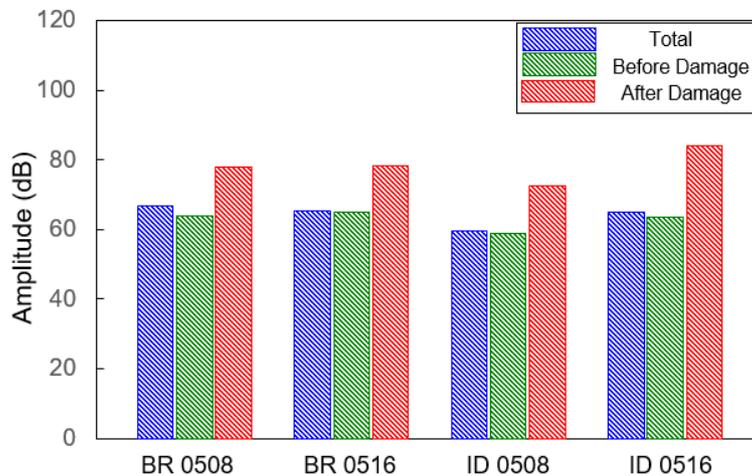


Fig. 10. Amplitude of specimens according to damage conditions

3.3 손상판별에 적합한 음향방출 인자에 대한 고찰

암석 시험편의 손상에 따라 음향방출 값이 급격히 증가하는 경향은 주파수에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 카운트, 에너지, 진폭 순으로 나타났다. 특히 진폭은 신호의 세기를 확인할 수 있는 중요한 인자임에도 불구하고 손상에 대한 민감도가 다소 낮아 시험편의 손상 여부 판단에 사용하기에는 다른 인자들과 비교하여 효율적이지 않은 것으로 판단되며, 진폭 인자를 손상판별에 사용하기 위해서는 정량적인 기준 도입이 필요하다. 따라서 음향방출 특성을 이용하여 지하공동의 손상 여부 또는 안정성 평가를 위해서는 주파수 또는 카운트 값을 검토하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단된다. 또한 주파수는 Fig. 2와 같이 카운트를 음향방출 지

속시간으로 나눈 값이기에 주파수와 카운트 모두 실험조건별 유사한 변화양상을 나타내었다. 다만 두 인자의 관계에 신호의 지속시간이라는 변수가 추가되기에 두 인자가 정확하게 비례하지는 않았다. 에너지 특성의 경우 손상발생 전 구간에서 하중 증가에 따라 에너지 증가가 많이 발생하였기 때문에 손상시점에서 급격하게 증가하는 정도는 주파수나 카운트보다 낮았다. 이를 통해 손상 시점을 판단하는 인자로는 카운트가 에너지보다 더 적절함을 알 수 있다. 반면 에너지 인자는 손상발생 전 구간에서 하중 작용에 대한 민감도가 높기 때문에 외부 요인 발생 여부에 대한 정보를 추정할 때 유용한 인자인 것으로 판단된다. 다만, 본 실험을 통해 도출된 음향방출 인자 특성은 균질한 사암에 대한 것으로 유가스전 또는 이산화탄소 지중저장 등 퇴적암 계열 기반 심지층 활용 프로젝트에 접목하기 보다 적절할 것으로 판단되며, 이를 일반적인 암석 거동으로 논지를 확장하기 위해서는 국내 암석이나 결정질암에 대한 추가 실험의 수행이 필요하다.

4. 이미지상관기법 결과분석

본 연구에서는 이미지상관기법의 적용 및 분석을 통하여 이축압축시험간 시험편 표면에서의 미소변형을 측정하였다. 이미지상관기법을 적용하는 시험편 표면에는 명암차가 뚜렷한 흑백의 임의의 패턴이 있어야 하며, 시험편이 변형을 일으킬 때 이 패턴들이 움직이는 것을 사진이미지를 통해 추적할 수 있어야 한다. 사암은 입자 배열과 공극 구조가 임의의 패턴으로 작용하여 이미지상관기법 적용이 가능하다. 이미지상관기법의 결과 해석시 획득한 이미지의 화질이 낮거나 실험간 패턴의 상대적인 움직임이 제대로 나타나지 않는 경우 해석 값이 부정확한 한계가 있다. Idaho 사암의 경우 상대적으로 높은 공극률 값으로 시험편 표면 이미지 자료에서 공극이 차지하는 공간이 입자들의 미소변위 수준 대비 크기 때문에 입자 패턴의 상대적인 움직임 결과 해석에서 부정확한 현상을 보였다. 따라서 이미지상관기법 결과분석은 Berea 사암에 대해서 수행하였으며, 분석에는 Dantec Dynamic사에서 제공하는 ISTRa 4D 소프트웨어를 이용하였다(Dantec Dynamics GmbH, 2016).

Fig. 11은 시험편의 표면에서 발생한 변형 벡터를 보여준다. 벡터의 화살표 방향은 이축압축시험에 의한 축하중 방향으로 압축 변형이, 횡하중 방향으로 인장변형이 발생하였음을 보여준다. 또한 공동 주변에서는 원의 접선방향으로 벡터 방향이 형성되었으며, 이는 공동을 포함한 시험편의 이축압축조건하 발생하는 응력 방향과 일치하였다.

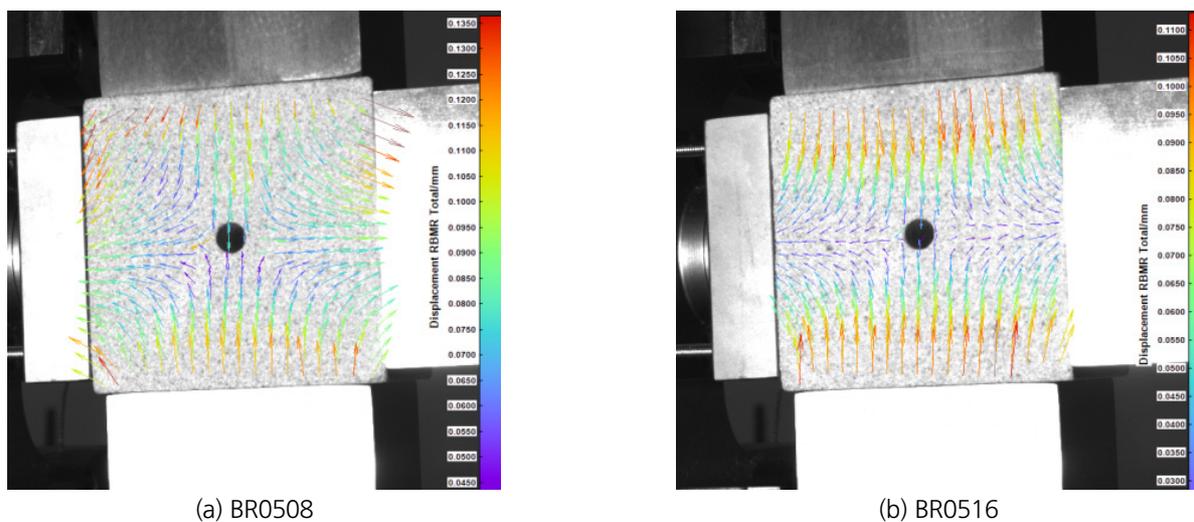


Fig. 11. Displacement vector field

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 손상 시점 및 실험 종료 시 미소 변형률 측정 결과를 나타낸다. Fig. 12는 실험조건별로 3장에서 손상발생 지점으로 제시된 시간에 대한 이미지상관기법 해석 결과를 나타낸다. 손상 시점에서의 해석 결과 시험편의 표면에 육안으로 식별되는 균열은 발생하지 않았으나 변형률 등고의 붉은 표시 부분과 같이 원형 공동 주변으로 미세변형이 집중되었음을 확인하였고, 이에 따른 해당영역에서 손상이 발생하였음을 나타낸다. 실험 종료 직후 변형률 등고 확인 결과 공동 주변에서 암석 표면이 탈락하는 스포링 현상이 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 13). 암석 시험편 표면이 탈락한 지점은 동일 사진 내의 특정 지점의 상대적 변위를 측정하는 이미지상관기법이 더 이상 적용되지 않기 때문에 결과해석영역에서 자동적으로 제외된다. 따라서 공동 주변 결과 해석 영역에서 제외된 부분은 암석이 탈락한 부분으로 스포링이 발생한 지점으로 볼 수 있다. 스포링이 발생한 시점의 응력은 BR0508에서 60.75 MPa, BR0516에서는 65.85 MPa으로 나타났다.

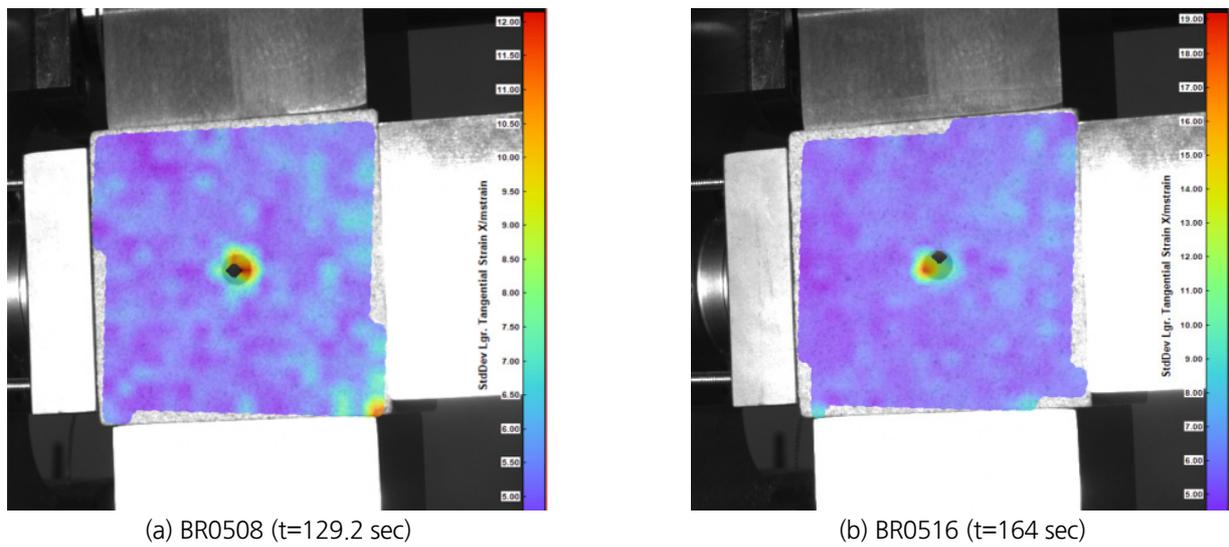


Fig. 12. Tangential strain contour at damage initiation

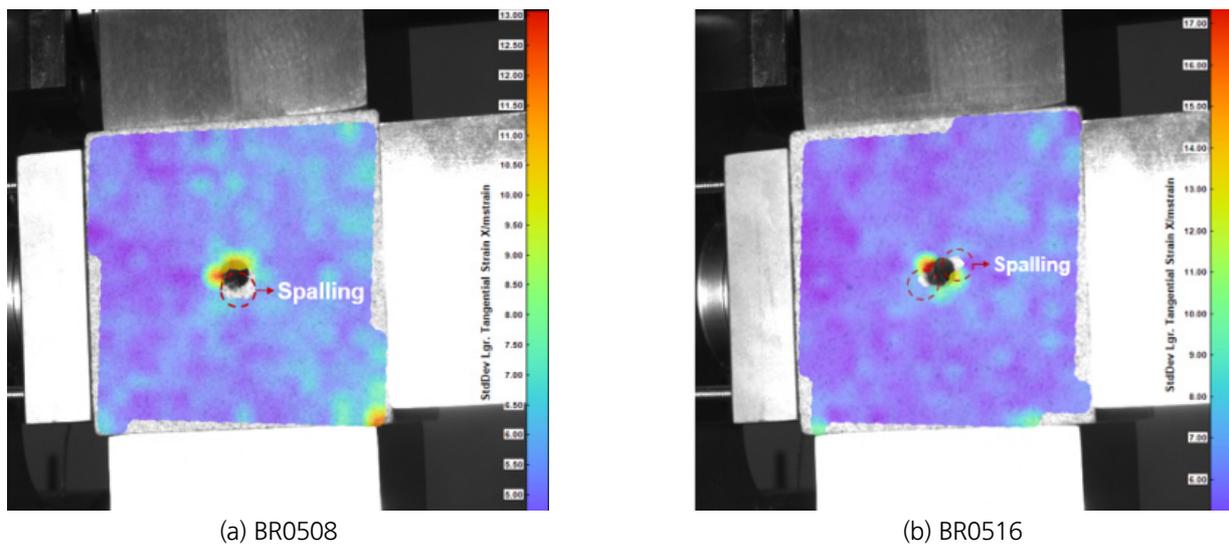


Fig. 13. Tangential strain contour at the end of the experiment

Fig. 14는 파괴 발생 후 시험편 표면의 확대된 이미지를 나타내고 있다. Fig. 13에서 제시된 시험편 표면에서 발생된 스폴링 발생 영역 뿐만 아니라 공의 내부에서도 스폴링 현상이 발생하였다. 다만 이미지상관기법으로는 공 내부 균열 형태 분석이 제한적이기에 보다 상세한 분석을 위해서는 CT 분석 등이 추가적으로 수행되어야한다.

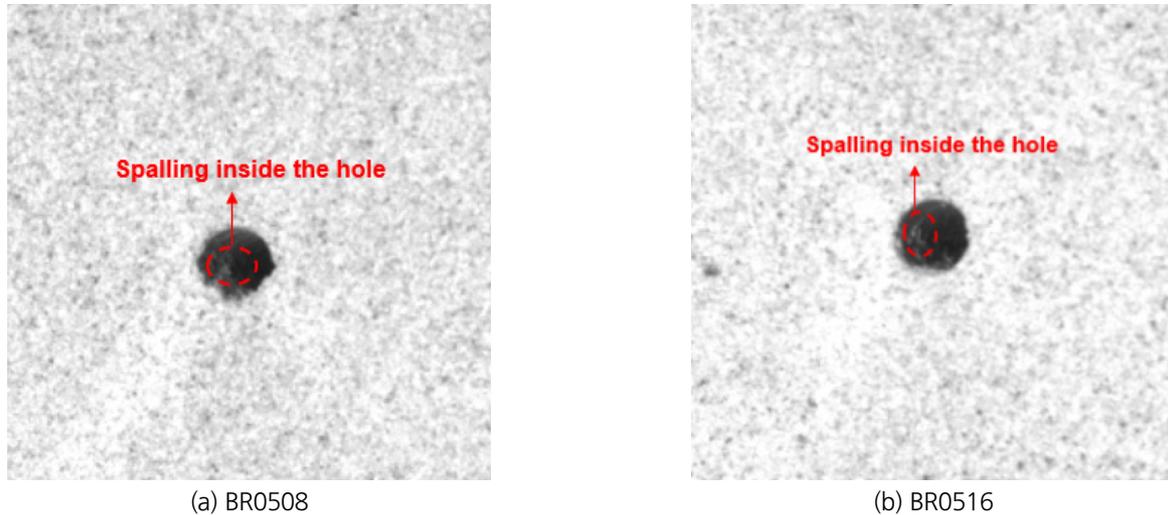


Fig. 14. Damage occurrence inside the hole

이미지상관기법 적용 분석 결과를 통하여 이축압축조건에 의한 공동 주변 손상 발생을 추가 확인하였다. 이는 또한 3장에서 제시한 음향방출인자 특성이 실제 공동 주변 손상 및 스폴링 발생에 따른 것임을 나타내며 두 가지 모니터링 기법 적용 결과가 유효함을 확인하였다.

이미지상관기법의 해석 연구 결과를 보다 신뢰성이 검증된 자료로 활용하기 위해서는 정확한 실험조건을 반영한 이론적 해 또는 수치해석의 결과와 비교 분석을 통한 상호검증이 이루어져야 할 것이다. 또한 이미지상관기법은 손상영역의 크기, 손상정도에 대한 분석에도 적용 가능하여 지하공동의 안정성 평가 및 역학적 특성 분석에 광범위하게 사용할 수 있다. 본 연구의 실험결과를 통해 지하공동 주변에서 발생한 미세변형, 응력 집중 현상과 스폴링 발생을 확인할 수 있었으며 시간별 전체 해석공간에서의 변형률을 제시하였고, 이는 특히 수치해석적 연구 결과를 검증할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다.

5. 결론

심지층의 높은 현지응력 조건에서 굴착하는 지하공동의 역학적 특성 평가는 심지층 개발과 활용에 있어 매우 중요함에도 불구하고 이론적, 해석적 접근법에 비해 실험적 연구 및 데이터의 확보가 부족한 실정이다. 특히 도심도 터널과 같은 원형 공동 주변으로 변형이 집중되거나 손상이 발생하는 현상을 사전에 모니터링 할 수 있는 시스템을 구성하고 정량적으로 평가할 수 있는 기반 및 분석 기법의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 원형의 지하공동을 모사한 두 종류의 사암 암석 블록에 대하여 음향방출 모니터링 시스템과 이미지상관기법을 적용한 이축압축실험을 통하여 공동 주변의 손상 시 발생하는 음향방출 신호와 미세변형의 특성을 분석하였다. 그 결과 공동 주변에

손상이 발생할 때 음향방출 특성인 주파수, 카운트, 에너지가 급격히 증가하고 진폭 또한 증가함을 확인할 수 있었으며 각각의 인자 특성을 실험 조건별 손상 전후에 따라 정량적으로 제시하였다. 각 사암의 역학적 특성에 따라 손상시 증가하는 음향방출 특성의 비율이 다르게 나타났으며, 횡하중의 크기에 대한 영향은 미미하였다. 이미지상관기법을 통한 미소변형 특성 분석 결과 최초 손상을 감지한 시점에서 공동 주변으로 변형률이 집중되는 현상을 보였다. 이를 통해 실험 조건이 합리적으로 구현되었음을 확인할 수 있었고 음향방출 특성이 공동 주변 손상으로부터 측정된 것임을 검증하였다. 또한 실험 종료 시점에서는 공동 주변에서 시험편의 표면이 탈락되면서 이미지상관기법이 적용되지 않는 영역이 발생하였으며, 이는 스폐링 현상으로 인한 것임을 확인하였다.

본 연구에서 제시된 음향방출 특성은 심부 지하공동 주변의 암반 모니터링 시스템 및 암반 손상도 평가 방법 개발을 위한 기초자료로 활용 가능하다. 또한 이미지상관기법을 통해 획득된 미소변위 특성은 시간 및 공간적 정보를 제공함으로써 수치해석 모델의 검증용 데이터 제공 및 손상영역 추정에 대한 방안을 제시한다.

본 연구에서는 이미지상관기법의 특성상 원형 공동 암석 모사 블록의 표면에 대한 미소변형 검증 결과만을 검증 자료로 제시하였다. 향후에는 CT 이미지를 이용하여 공동 내부에서의 스폐링 및 역학적 파괴 특성을 살펴보고 이를 이미지상관기법의 결과와 비교하여 표면 모니터링의 효용성에 대한 분석을 수행할 예정이고, 나아가 국내 암석 또는 결정질암에 대한 실험을 수행함으로써 시추공 안정성 평가에 대한 논지로 확장하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 ‘심부층 개발과 활용을 위한 지하심부 특성평가 기술개발(과제코드 GP2020-010)’ 및 2024년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단(RS-2021-KN066110)의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- AEwin, 2014, Software Users' Manual, MISTRAS Group Inc., Benicia, CA, USA.
- Aliabadian, Z., Zhao, G.F., and Russell, A.R., 2019, Failure, crack initiation and the tensile strength of transversely isotropic rock using the Brazilian test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122, 104073.
- Cao, A., Jing, G., Ding, Y.L., and Liu, S., 2019, Mining-induced static and dynamic loading rate effect on rock damage and acoustic emission characteristic under uniaxial compression, *Safety Science*, 116, 86-96.
- Chu, C., Wu, S., Zhang, C., and Zhang, Y., 2023, Microscopic damage evolution of anisotropic rocks under indirect tensile conditions: Insights from acoustic emission and digital image correlation techniques, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 30(9), 1680.
- Dantec Dynamics GmbH, 2016, ISTRA 4D Software Manual Q-400 System, Nova Instruments, Germany
- Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T., and Labuz, J.F., 2002, Simulation of failure around a circular opening in rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), 507-515.
- Gong, Y., Song, Z., He, M., Gong, W., and 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*, 91, 155-169.
- Grosse, C. and Ohtsu, M., 2008, *Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Hardy, H.R., 1981, Applications of acoustic emission techniques to rock and rock structures: A state-of-the-art review. *Acoustic emissions in geotechnical engineering practice*, American Society for Testing Materials, 4-92.
- Hong, S., Kwon, S., Min, K. B., and Ji, S.H., 2021, Effect of Excavation and Thermal Stress on Slip Zone and Aperture Change Around Disposal Hole and Tunnel in Fractured Rock, *Tunnel and Underground Space*, 31(2), 125-144.
- Kang, I.S. and Song, J.J., 2019, Fast Analysis of Rock Block Behavior on Underground Opening considering Geostatic Stress Conditions, *Tunnel and Underground Space*, 29(1), 64-74.
- Kim, J.S., Hong, C.H., and Kim, G.Y., 2020, Evaluation of Stress Thresholds in Crack Development and Corrected Fracture Toughness of KURT Granite under Dry and Saturated Conditions, *Tunnel and Underground Space*, 30(3), 256-269.
- Lee, J.W., Kim, H., and Oh, T.M., 2020, Acoustic Emission Characteristics during Uniaxial Compressive Loading for Concrete Specimens according to Sand Content Ratio, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9), 2808-2823.
- Lee, J.W., Oh, T.M., Kim, H., Kim, M.J., and Song, K.I., 2019, Analysis of acoustic emission parameters according to failure of rock specimens, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*. 30, 657-673.
- Li, L.R., Deng, J.H., Zheng, L., and Liu, J.F., 2017, Dominant frequency characteristics of acoustic emissions in white marble during direct tensile tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(5), 1337-1346.
- Lin, Q. and Labuz, J.F., 2013, Fracture of sandstone characterized by digital image correlation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 235-245.
- Miao, S., Pan, P.Z., Konicek, P., Yu, P., and Liu, K., 2021, Rock damage and fracturing induced by high static stress and slightly dynamic disturbance with acoustic emission and digital image correlation techniques, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), 1002-1019.
- Miao, S., Pan, P.Z., Zhao, X., Shao, C., and Yu, P., 2020, Experimental Study on Damage and Fracture Characteristics of Beishan Granite Subjected to High-temperature Treatment with DIC and AE Techniques, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 721-743.
- Moradian, Z., Einstein, H.H., and Ballivy, G., 2016, Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 785-800.
- Oh, T.M., Kim, M.K., Lee, J.W., Kim, H., and Kim, M.J., 2020, Experimental investigation on effective distances of acoustic emission in concrete structures, *Applied Sciences*, 10(17), 6051.
- Park, Y.J. and Kim, K.H., 2006, Analytical solution for a circular opening in an elastic – brittle – plastic rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4), 616-622.
- Stirling, R.A., Simpson, D.J., and Davie, C.T., 2013, The application of digital image correlation to Brazilian testing of sandstone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 1-11.
- Wu, H., Ma, D., Spearing, A.J.S., and Zhao, G. 2021, Fracture response and mechanisms of brittle rock with different numbers of openings under uniaxial loading, *Geomechanics and Engineering*, 25(6), 481-493.
- Xin, C., Yang, Y., Yang, M., Liang, P., Sun, Y., and Shen, H., 2022, Study on Strain Field Evolution of Uniaxial Compression Sandstone Based on Digital Image Correlation Technology, *Applied Sciences*, 12(23), 11939.