

이축압축시험에 의한 암석모사 시료의 원형공동주변 취성파괴 특성

Characteristics of Brittle Failure of Rock-like Material around a Circular Opening under Biaxial Loading Condition

성백옥, 전석원 (서울대학교 지구환경시스템공학부)
배성호 ((주)지오제니 컨설턴트)

1. 서론

공동이나 터널이 깊은 심도에 굴착되는 경우 과도한 지압이 지하 구조물에 작용하게 되며 암반의 강도가 클 때, 대규모의 암반이 돌발적으로 붕괴하는 rockburst 현상이나 표면으로부터 암반의 파편이 떨어져 나오는 spalling 현상이 관찰된다. 이렇게 암반이 파괴될 때 미소파괴음이 발생하며, 발생하는 미소파괴음을 효과적으로 이용하는 방법이 연구되고 있다. 미소파괴음 (acoustic emission 또는 microseismicity)이란 물체가 파괴되거나 변형될 때 발생하는 미소음이라 간단히 정의할 수 있으며, 지하 암반 구조물의 파괴나 변형을 사전에 예측하거나 파괴 메카니즘을 연구하기 위해서 미소파괴음이 효과적으로 이용될 수 있다.

암석이나 암반의 미소파괴음에 대한 연구는 1940년대 초기 광산에서 rockburst를 예측하기 위하여 수행된 이래 많은 연구가 있었으며, 특히 Meglis 등 (1995)은 원형 공을 중앙에 천공한 Lac du Bonnet 화강암 블록을 이용한 단축 및 이축압축 시험을 수행할 때 발생하는 미소파괴음을 측정하여 음원의 발생 메카니즘을 규명하고자 하였고, Fakhimi 등 (2002)은 취성 암반 내에 굴착된 공동 주위의 파괴를 모사하기 위한 이축압축 시험을 수행하여 사암 시료의 미소파괴음을 측정하여 파괴시의 파단면의 발생 특성을 연구하였다.

취성 암반 내 지하 공동의 안정성은 초기 응력의 크기와 암반의 물성에 의해 결정이 되며 초기 응력이 증가할수록 파괴의 과정은 공동의 경계부분에서 암석 파편이 판상으로 떨어져 나오는 슬래빙 (slabbing)이나 조각이 부스러져 나오는 스폐링 (spalling) 현상이 발생하게 된다. 이러한 파괴는 취성 파괴로 분류된다.

취성 암반에서 터널 주위의 파괴는 스폐링의 형태로 발생하는 경향이 있으며, Ortlepp 등 (1972)은 남아프리카 금광의 취성 암반으로부터 경험을 축적한 결과, 터널의 안정성은 단축 압축강도 (σ_c)에 대한 최대 초기응력(σ_1)의 비에 의해 평가될 수 있다고 하였다. 그는 스폐링이 발생하는 최소 비율을 $\sigma_1/\sigma_c > 0.2$ 라 하였고, Hoek-Brown (1980)은 Fig. 1.1과 같은 안정성 분류를 제시하였다. 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

$\sigma_1/\sigma_c \leq 0.1$: 무지보 상태로 안정, 손상 없음

$\sigma_1/\sigma_c = 0.2$: 최소의 스폐링 파괴 발생할 수 있으며, 가벼운 지보 필요

$\sigma_1/\sigma_c = 0.3$: 심한 스폐링 파괴 발생, 중간정도의 지보 필요

$\sigma_1/\sigma_c = 0.4$: 공동을 지지하기 위해서 많은 지보 필요

$\sigma_1/\sigma_c = 0.5$: 공동의 안정이 어렵고, 매우 많은 지보 필요

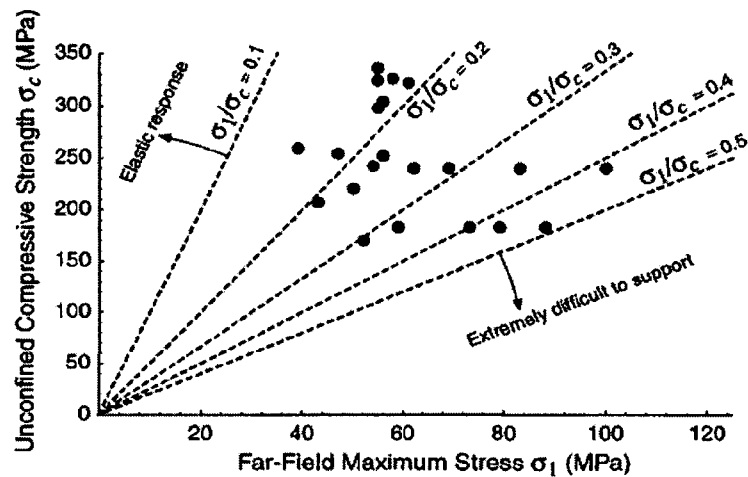


Fig. 1.1 Empirical stability classification developed for square tunnels in South Africa at $K=0.5$ (from Hoek and Brown, 1980)

본 연구에서는 암석에 비해 상대적으로 낮은 강도를 가지는 시멘트 모르타르를 이용하여 시험 수행 시 파괴의 전파특성을 관찰하기 위하여 미소파괴음을 측정하였고, 또한 변형률의 변화를 측정하여 미소파괴음 파라미터들과 비교하였다. 이로부터 파괴의 개시점을 찾아내고, 스폐링이 발생하는 응력 수준을 결정하고자 하였다.

2. 시험편, 시험장치 및 시험 방법

2.1 시료의 특성

본 연구에서는 시멘트 모르타르를 이용하여 시험편을 제작하였다. 시료는 가로×세로×높이가 각각 $170 \times 170 \times 170$ mm가 되도록 제작하였으며, 정육면체 모양의 블록 시료에 원형 실린더 모양의 공동을 구현하기 위하여 미리 제작된 알루미늄 형틀을 이용하여 시료를 양생하였으며, 시료의 모양은 Fig. 2.1과 같다.

모르타르는 쌍용양회에서 제작된 쌍용 초조강 시멘트와 시험용 모래 그리고 물을 배합하여 제작하였으며, 기본 물성 시험을 수행하였다. 모르타르의 배합비는 Table 2.1에 제시된 바와 같으며, 얻어진 기본 물성 값들은 Table 2.2와 같다. 삼축 압축 시험을 실시하여 점착력과 내부마찰각을 구하였으며, 이에 대한 결과는 Table 2.3과 같다.

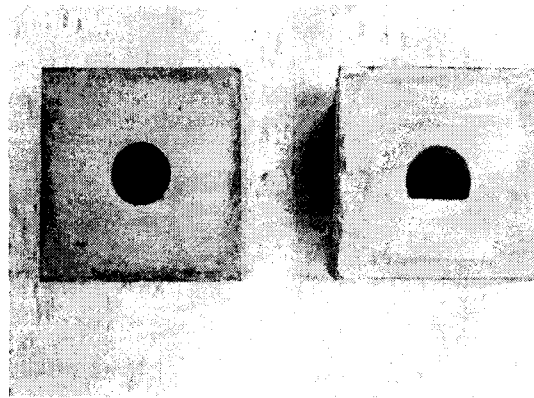


Fig. 2.1 View of block specimen for biaxial test

Table 2.1 Mixing ratio of mortar by weight

Specimen	Sand	Cement	Water	Curing time after casting (day)
Mortar	55	28	17	> 10

Table 2.2 Mechanical properties of mortar

Sample	Diameter (mm)	Length (mm)	Wave velocity (m/sec)		Specific Gravity	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
			P wave	S wave					
S21-1	50.0	100.8	3150	1530	2.17	30.8	2.8	12.4	0.16
S21-2	50.0	100.3	3130	1570	2.08	31.1	2.7	14.9	0.19
S21-3	50.0	100.7	3050	1480	2.09	31.9	2.3	12.1	0.10
S21-4	50.0	100.4	3240	1480	2.09	29.9	2.6	20.3	0.21
S21-5	50.0	98.3	3170	1730	2.02	28.8	2.6	22.4	0.17
S21-6	50.0	99.1	3300	1680	2.07	36.0	2.1	14.0	0.17
S21-7	50.0	100.4	3240	1760	2.01	32.0	2.5	27.1	0.21
S21-8	50.0	99.5	3020	1690	2.03	28.1	2.5	15.5	0.16
S21-9	50.0	102.2	3100	1760	2.01	27.4	2.0	15.9	0.18
S21-10	50.0	100.9	2970	1770	2.03	26.8	2.6	10.7	0.18
Mean Value	50.0	100.3	3140	1650	2.06	30.2	2.4	16.5	0.17

Table 2.3 Triaxial test result of mortar specimen

Confining pressure (MPa)	Maximum Stress (MPa)	Internal Friction Angle (°)	Cohesion (MPa)
0	35.2	35	9
5	57.1		
10	79.2		
15	89.8		

10일이 지난 이후의 기본 물성값을 보면 P파 속도 3140 m/s, S파 속도 1650 m/s, 비중 2.06, 단축 압축 강도 30.2 MPa, 인장 강도 2.4 MPa, 탄성계수 16.5 GPa, 포아송비 0.17로 나타났다. 또한 삼축 압축 시험 결과 내부마찰각 35°, 점착강도 9 MPa의 값을 얻었다.

2.2 이축 압축 시험 장치 및 변형률과 미소파괴음 측정을 위한 장치

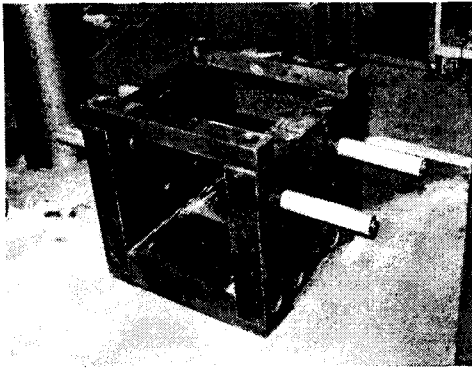
2.2.1 이축압축 시험 장치

이축압축 시험은 미국 Interlaken사에서 제작된 최대 200톤 하중용량의 Interlaken 2000 시스템에서 수행하였다. 이 시험기는 변위 및 하중제어가 가능한 서보제어 시스템 (servo-controlled system)을 갖추고 있으며 본 연구에서의 시험은 하중제어 조건 하에서 수행되었다. 시험 중의 시간 및 하중 데이터는 Interlaken의 주 제어장치에 실시간으로 0.5초 간격으로 저장되도록 하였다.

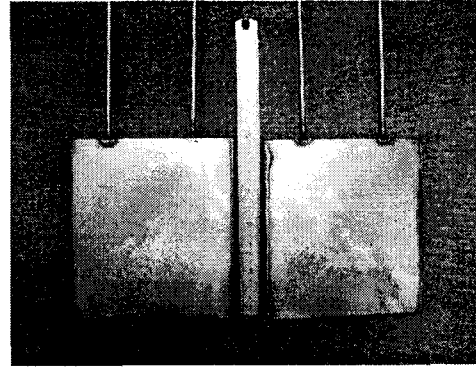
본 연구에서는 이축압축 시험을 실시하기 위해 가압을 위한 새로운 이축압축 프레임을 고안하여 제작하였으며 Fig. 2.2(a)에 보는 바와 같다. 강철 재질로 시료가 받는 하중을 감안하여 충분히 견딜 수 있을 만큼의 두께를 고려하여 열처리 하였으며, 플랫폼을 이용해 가압을 할 때 프레임의 변형을 막기 위해 상단부에 두개의 사각형 모양의 강철 막대를 부착시키는 구조로 하였다. 플랫폼은 Fig. 2.2(b)에 보는 바와 같으며 재질은 스테인리스를 이용하였고, 가압을 위해 직경 6 mm의 스테인리스 튜브를 2개 사용하였다. 튜브의 끝에는 Swagelok사에서 제작한 볼밸브 (ball valve, SS-43S6MM)를 하나씩 장착하고, 플랫폼에 공급되는 유압은 경도정밀에서 제작된 30 MPa 용량의 서보 제어가 가능한 유압펌프를 이용하여 가하였다.

2.2.2 변형률 측정 장치

DA100 시스템은 일본 Yokogawa사에서 제작한 것으로 크게 자료를 획득하는 Indicator DS600과 이 자료를 증폭시키는 역할을 하는 Amplifier DA100으로 나누어져 있다. 자료를 처리하는 소프트웨어는 DARWIN DAQ32 Plus로 구성되었다. DS600에서 모듈은 모두 6개이다. 총 30개의 채널을 사용하고 있으며, 확장이 가능하다.



(a)



(b)

Fig. 2.2 Biaxial loading apparatus: (a) biaxial frame and (b) flat jack

2.2.3 미소파괴음 측정 장치

본 연구에서는 이축 압축 시험 시 발생하는 미소파괴음을 측정하고 음원 추적을 실시하기 위하여 미국 Physical Acoustic Corporation (PAC)사에서 제작한 MISTRAS 2001 시스템을 이용하였다. MISTRAS 2001 시스템은 파형과 신호 측정, 결과 분석 및 디스플레이 등을 수행하는 완전 디지털 방식의 다채널 컴퓨터 구동 시스템이다. MISTRAS 시스템을 구성하는 주요 부분은 IBM 호환 PC, AEDSP-32/16 카드, MISTRAS 소프트웨어, 센서, 전치증폭기, 케이블 등이다.

미소파괴음 변수를 측정하고 3차원 음원 추적을 실시하기 위해서는 채널설정, 신호처리 설정, 미소파괴음 변수 설정, 3차원 음원추적 설정 등을 해야 한다.

채널 설정에서는 채널의 수 설정, 검출한계 (AE threshold), PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time), HLT (Hit Locking Time)의 설정을 해야 한다. 채널 수는 7개로 하였고, 검출한계는 잡음의 수준을 고려하여 40 dB로 설정을 하였으며, PDT는 이전 최대값보다 큰 최대값이 나타날 때까지 대기하는 시간으로 50 μsec , HDT는 검출한계를 넘는 피크값이 탐지된 이후 다음 피크값이 나타날 때까지 대기하는 시간으로 100 μsec , HLT는 하나의 미소파괴음을 측정 후 측정을 잠시 중단하는 시간으로 500 μsec 로 설정하였다.

신호처리 설정에서는 신호취득 속도, 필터 상하한 설정, 트리거 이전 기록시간 (pre-trigger time) 설정, 파형의 길이 설정 등을 해야 한다. 신호취득 속도는 AEDSP-32/16 카드가 한 개의 파형을 매 초마다 기록하는 속도로서 본 연구에서는 4 MHz로 설정하여 0.25 μsec 마다 한 개의 파형이 기록되도록 하였다. 필터는 100 kHz ~ 1200 kHz 의 주파수 대역을 갖도록 하였다. 트리거 이전 기록시간은 일정한 기준치 (threshold)를 초과하기 전에 얼마나 오랫동안 기록해야 하는지를 설정 하는 것으로 65 μsec 로 설정하였다. 파형의 길이는 1 k에서 15 k까지 허용가능한데 1 k로 설정하여 256 μsec 가 되도록 하였다.

미소파괴음 변수는 측정을 원하고자 하는 것을 선택할 수 있으며, 본 연구에서는 파형이 기록된 시간, 진폭, 에너지, 미소파괴음 개수, 오름시간, 지속시간 등을 측정하도록 하였다.

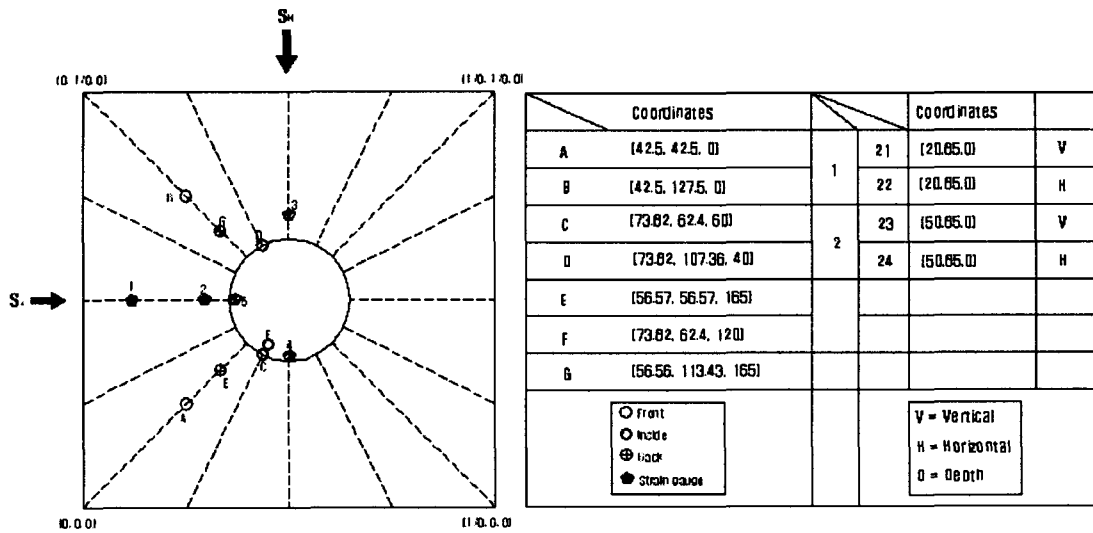


Fig. 2.3 Position of AE transducers and strain gauges

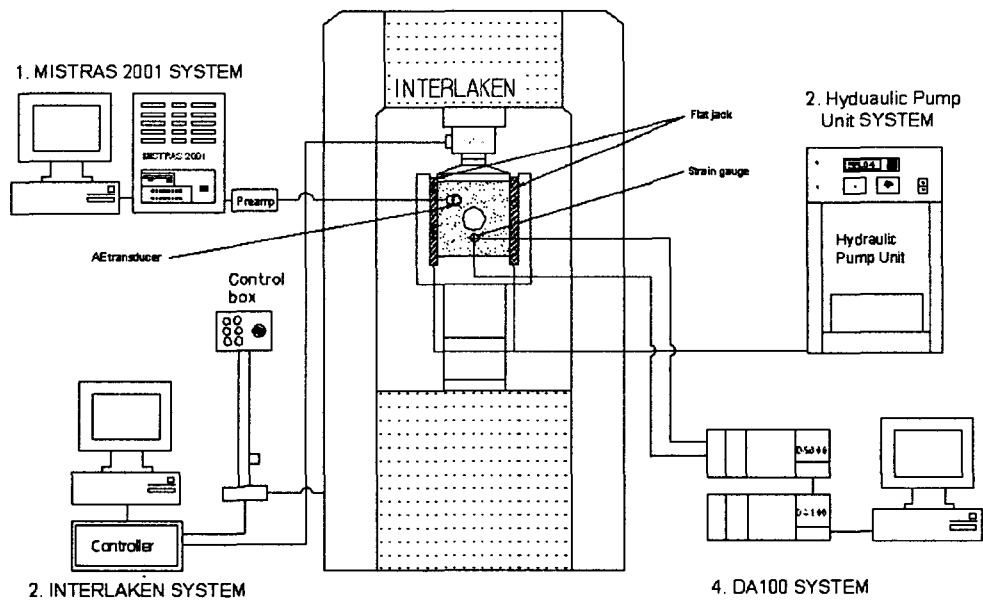


Fig. 2.4 Schematic diagram of biaxial compression testing system and measuring system

3차원 음원추적을 위한 설정에서는 미소파괴음 전파속도, 센서의 부착치, 잠금시간 (lookout time) 및 전파시간 차이 선택 등을 입력해야 한다. 미소파괴음 전파속도는 재료 내에서 타성파의 전파속도로서 탄성파 속도 측정기를 이용하여 구한 P파 속도를 입력하였다. 3차원 음원 추적에서 이벤트 (event)란 하나의 음원 현상을 통해 얻은 AE 타격음의 그룹으로, 물리적 의미에서는 하나의 음원현상이다. 잠금 시간은 소프트웨어가 이벤트 처리를 다시 시작하기 전의 최소 시간으로 이 시간은 적어도 AE 이벤트가 가장 가까운 센서에서 가장 먼 센서까지의 파가 전파되는 시간으로 해야 한다. 때때로 이벤트는 반향음을 발생시키기 때문에 한 음원으로부터 여러 이벤트를 피하기 위하여 잠금시간을 설정하는 것이다. 본 연구에서는 $60\mu\text{sec}$ 로 설정하였다.

Fig. 2.3은 본 실험에 적용한 AE 센서 및 변형률 게이지의 위치를 나타낸 것이며, Fig. 2.4는 본 실험장비의 개요도를 나타낸 것이다.

3. 이축 압축 하에서의 시험편의 파괴거동

3.1 시험편의 취성 거동 특성

본 연구에서는 이축 압축 시험 시 미소파괴음 및 변형률 계측자료와 육안 관찰을 종합하여 각 응력 수준에 따른 취성 거동 특성을 알아보았다. 대표적인 거동을 보이는 시료 B-3과 B-4에 대한 특성을 고찰해 보기로 한다. 본 시험에서의 취성 파괴의 진행 과정은 크게 네 단계로 나눌 수가 있다. 균열 발생 이전단계, 균열 시작 단계, 균열이 서로 연결되는 단계, 거대균열이 발생하고 극심한 스폴링이 일어나는 단계로 나눌 수가 있다. Fig. 3.1은 B-4 시료의 시험 시 관찰된 파괴의 과정을 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비율에 따라서 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 시료의 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비가 약 0.4 이전에서는 미세 균열이 발생하지 않았으며, 약 0.55 ~ 0.65 정도에서는 발생된 미세 균열이 육안으로 뚜렷이 관찰된다. 또한 0.7 ~ 0.75 정도에서는 발생된 미세 균열들이 서로 연결되면서 파편이 떨어져 나오기 시작한다. 이 응력 수준을 넘어서 0.8 ~ 0.85 이상이 되면 심한 스폴링 현상이 발생하게 된다.

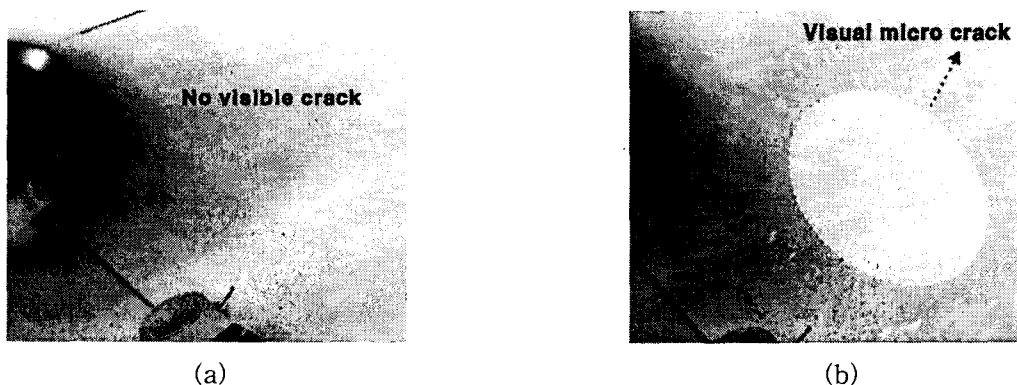
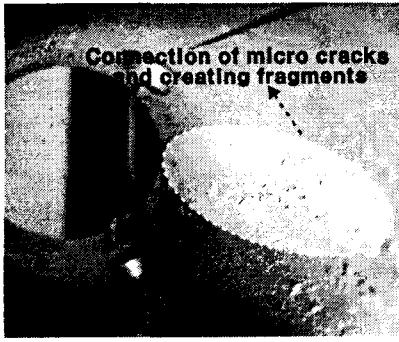
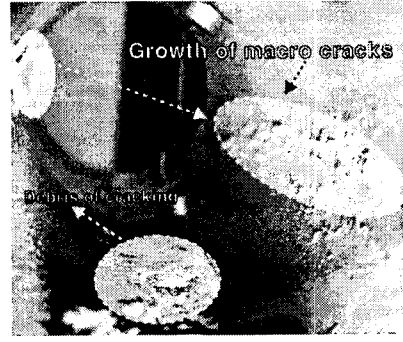


Fig. 3.1 View of progressive failure of specimen B-4: (a) $\sigma_1/\sigma_c < 0.4$ and (b) $\sigma_1/\sigma_c \approx 0.50 \sim 0.55$



(c)

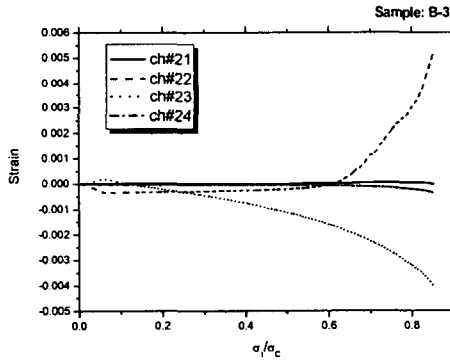


(d)

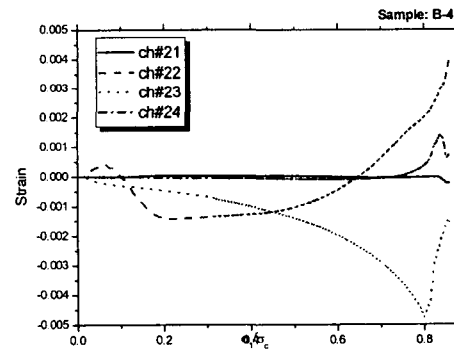
Fig. 3.1 Continued: (c) $\sigma_1/\sigma_c > 0.65$ and (d) $\sigma_1/\sigma_c > 0.80$

3.3 시험편의 변형률 특성

본 연구에서는 Fig. 2.3과 같이 1번 위치 (85 mm, 50 mm, 0 mm)와 2번 위치 (50 mm, 85 mm, 0 mm)에 두개의 십자형 변형률 게이지를 부착하여 각 위치에서의 원형 공동의 중심에 대한 반경방향과 접선방향의 변형률을 측정하였다. 1번 위치에서 반경방향에 대한 변형률은 ch#21, 접선방향에 대한 변형률은 ch#22, 2번 위치에서 접선방향에 대한 변형률은 ch#23, 반경방향에 대한 변형률은 ch#24번으로 채널을 설정하였다. 이축압축시험 동안 얻어진 다섯 개의 시료에 대한 변형률 곡선은 Fig. 3.2와 같다. 이때 음의 방향은 압축을, 양의 방향은 인장을 의미한다.



(a)



(b)

Fig. 3.2 Relationship between strain and normalized maximum principle stress of the biaxial specimen (a) B-3 and (b) B-4

시료의 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비가 B-3에서는 약 0.6, B-4에서는 약 0.5를 나타냈다. ch#23은 시험이 시작되면서 대체적으로 압축 변형을 일으키게 되며 그 기울기는 완만하다. 그러나 일정 수준이 지나면 그래프의 변화가 음의 방향으로 가파르게 된다. 이는 하중에 의해 이부분에 상당한 압축력이 작용함을 의미한다. B-3에서는 약 0.5, B-4에서

는 약 0.43의 값을 나타내었다. 응력 수준이 더 증가하게 되면 기울기가 반전되는 부분이 있는데, 최대 접선응력이 작용하는 부분으로 스폐링 현상에 일어날 때 이 부분에 작용하는 압축력이 이완되기 때문이다. B-3의 경우는 관찰되지 않았으며, B-4의 경우에는 약 0.8의 값을 나타내었다. ch#24는 ch#1과 비슷하게 시험이 종료될 때까지 큰 변화를 보이지 않았으나 스폐링이 발생하는 응력 수준에서 약간의 변화를 보였다.

3.4 시험편의 미소파괴음 특성

본 연구에서는 이축 압축 시험 동안 나타나는 시료의 파괴 특성을 규명하기 위하여 미소파괴음을 측정하였으며, 미소파괴음 계수 (count)를 이용하여 시료의 파괴 과정을 알아보았다. Fig. 3.3은 각 시료의 단축 압축 강도에 대한 최대주응력의 비율에 따른 미소파괴음 계수의 변화를 나타낸 것이다. 각 시료 모두 처음 가압할 때 약간의 미소파괴음이 발생하였으며, 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비율이 B-3은 약 0.42, B-4는 약 0.44, 부근에서 미소파괴음의 발생이 서서히 증가함을 볼 수 있다. 이때를 미세 시료의 공벽에 미세 균열이 발생하는 응력 수준으로 보았다. 미세 균열이 서로 연결되어 극심한 스폐링이 격렬히 일어나기 시작하는 단계는 B-3은 0.72, B-4는 0.82정도로 보았다.

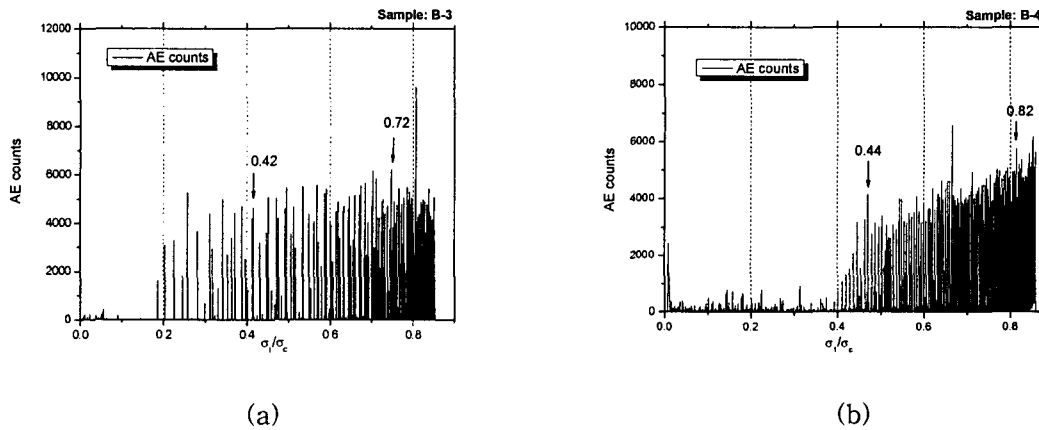
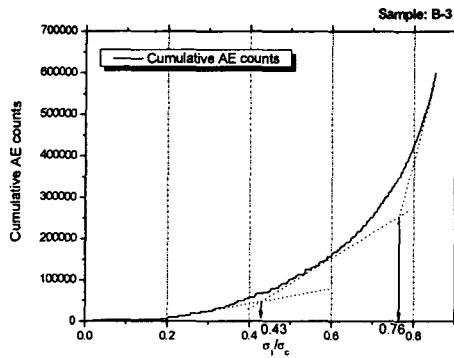


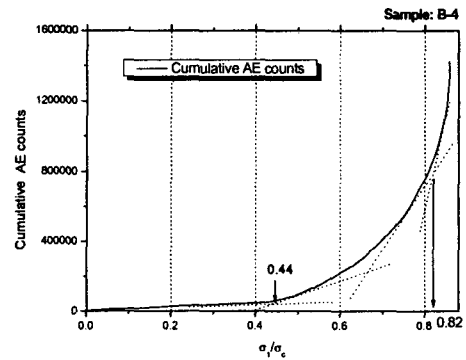
Fig. 3.3 AE counts for specimen (a) B-3 and (b) B-4

Fig. 3.4는 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비의 증가에 따른 미소파괴음 계수 (Cumulative AE counts)의 변화를 나타낸 것이다. 균열의 개시 시점 및 극심한 스폐링이 발생하는 수준을 보면 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비가 각각 B-3은 0.43과 0.76에서 B-4는 0.44와 0.82에서 균열의 시작과 극심한 스폐링이 나타났다.

Fig. 3.5는 $K(\sigma_1/\sigma_c)$ 에 따른 미소파괴음 계수의 변화를 나타낸 것이다. 균열이 시작되는 K값과 극심한 스폐링이 일어나는 단계는 각각 B-3은 K값이 2.5와 5.2, B-4는 K값이 2.6과 4.1이었다.

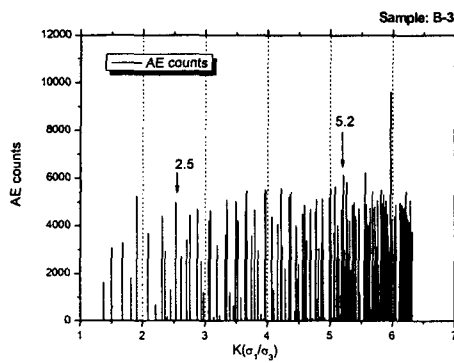


(a)

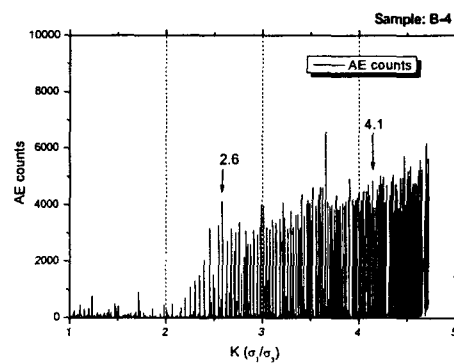


(b)

Fig. 3.4 Cumulative AE counts in specimen (a) B-3 and (b) B-4



(a)



(b)

Fig. 3.5 AE counts in the function of $K(\sigma_1/\sigma_c)$ for specimen (a) B-3 and (b) B-4

본 실험 결과 이축 압축 시험 시 미소파괴음 변수를 이용한 해석에서 미세 균열이 발생하기 시작하는 응력 수준과 극심한 스프링이 시작되는 응력 수준을 결정하였다. 그 결과는 Table 3.1과 같다. 단축 압축 강도에 대한 최대주응력의 비 (σ_1/σ_c)가 대략 0.44 정도에서 미세 균열이 발생하기 시작함을 알 수 있으며, 극심한 스프링이 일어나는 수준은 대략 0.78 정도의 수준인 것으로 나타났다. 또한 최소주응력에 대한 최대주응력의 비 $K(\sigma_1/\sigma_c)$ 에 대해서 알아본 결과 K 값이 약 2.55 정도에서 미세 균열의 발생이 시작되어 약 4.65 정도에서 극심한 스프링이 발생이 시작됨을 알 수 있었다.

Table. 3.1 Micro crack initiation and spalling failure initiation level of biaxial specimen

Sample	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	P-wave Velocity (m/sec)	AE Parameters	Micro Crack Initiation Level		Spalling Failure Initiation Level	
				σ_1/σ_c	$K(\sigma_1/\sigma_3)$	σ_1/σ_c	$K(\sigma_1/\sigma_3)$
B-3	34.1	3560	Counts	0.42	2.50	0.72	5.20
			Cumulative AE counts	0.48		0.76	
			Duration	0.42		0.76	
B-4	30.2	3220	Counts	0.44	2.60	0.82	4.10
			Cumulative AE counts	0.43		0.82	
			Duration	0.45		0.8	
Mean Value	32.2	3390		0.44	2.55	0.78	4.65

3.5 음원 추적에 의한 균열의 분포 특성

본 연구에서는 이축압축 시험동안 미소파괴음을 측정하였고, 측정된 미소파괴음 신호로부터 음원 추적을 수행하였다. 음원추적의 각 단계는 실내 시험을 통한 재료의 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력이 비가 0.4 ~ 0.8이후 시험이 종료될 때까지 수행하였으며 이축압축 실험동안 총 910개의 음원을 추적하였다.

$\sigma_1/\sigma_c=0.4$ ($\sigma_1=12$ MPa)일 때까지의 음원추적 결과 초기 하중 단계에서 내부 균열이 닫히면서 발생한 음원으로 추정된다. 하중단계 $\sigma_1/\sigma_c=0.4$ 이전 시험 시작시의 음원을 제외하면 음원은 극소수로 발생한다. 그러나 $\sigma_1/\sigma_c=0.4$ 이후로 음원의 수가 증가하기 시작하여 $\sigma_1/\sigma_c=0.6$ ($\sigma_1=18$ MPa)이 지나면 점점 증가하였으며 $\sigma_1/\sigma_c=0.7 \sim 0.8$ ($\sigma_1=21$ MPa ~ 24 MPa) 이후로 갑작스런 증가를 보였다. $\sigma_1/\sigma_c=0.8$ 이후로 대부분의 음원이 나타나게 되며 Fig. 3.6에 음원의 진폭의 크기에 따른 최종적인 위치를 도시하였다.

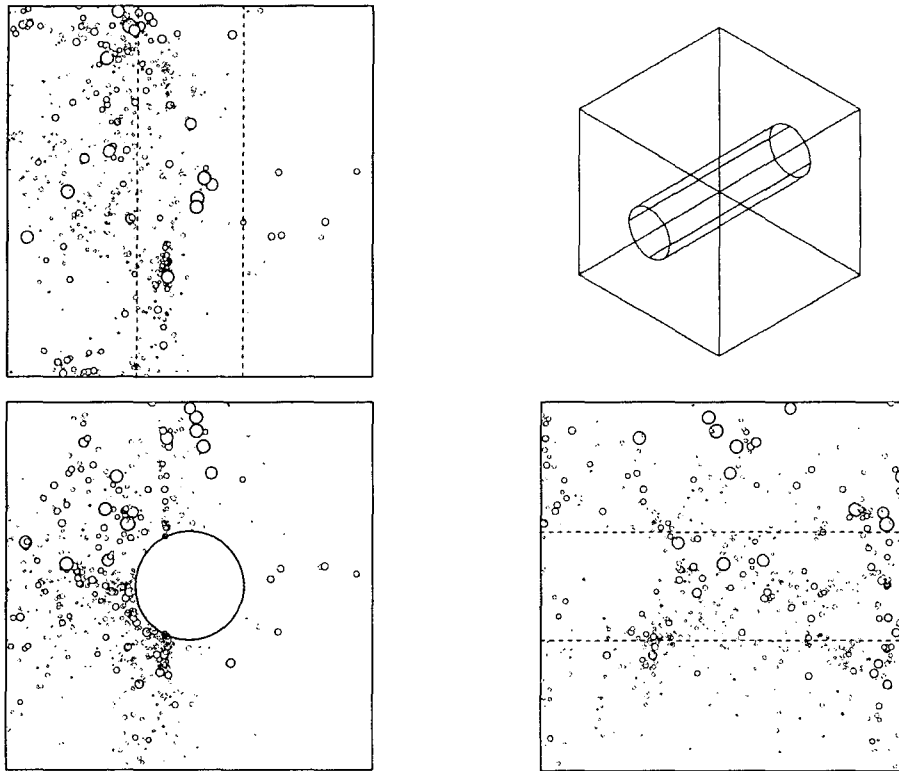


Fig. 3.6 Plot of AE source by the magnitude of amplitude in the specimen under biaxial compression after $\sigma_1/\sigma_c=0.8$ and $\sigma_3=5.4$ MPa

3.6 수치해석을 통한 이축압축 시험의 검증

본 연구에서는 이축압축시험을 통한 재료의 취성 파괴 거동을 모사하기 위하여 유한차분법 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 해석에는 Mohr-Coulomb 식을 적용하였으며, 수치해석 결과 나온 변위값으로부터 변형률을 계산하여 실제 실험과 비교 검토하였다. 메쉬 (mesh)는 가로세로 각각 86개의 그리드로 나누었으며, 실제 시료와 같은 크기인 17 cm × 17 cm로 모델링하였다. 중앙부에 직경 5 cm의 원형 실린더를 2차원으로 모사하였고, 메쉬 (mesh)의 크기는 가운데로 갈수록 조밀하게 선정하여 공의 경계부근에서 좀 더 자세한 관찰을 하고자 하였다. 본 연구의 수치해석 모델은 Fig. 3.7과 같으며, 입력 변수는 Table 3.2와 같다.

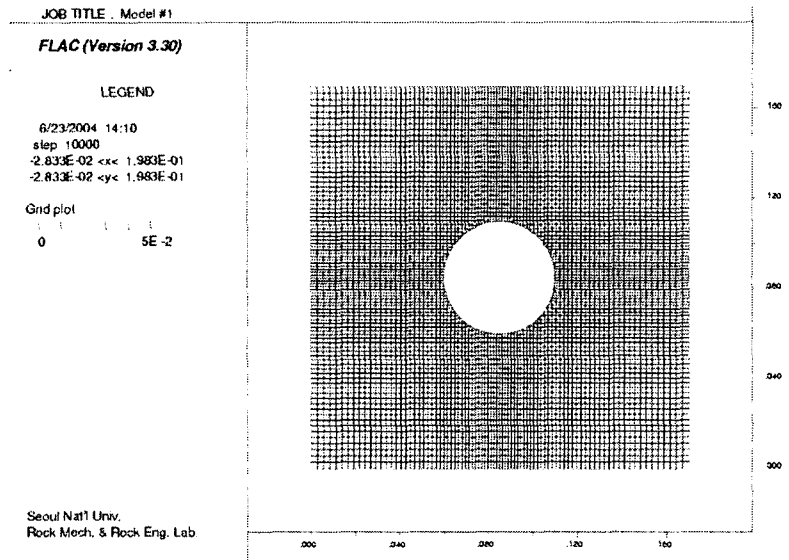


Fig. 3.7 Finite difference meshes for numerical analysis

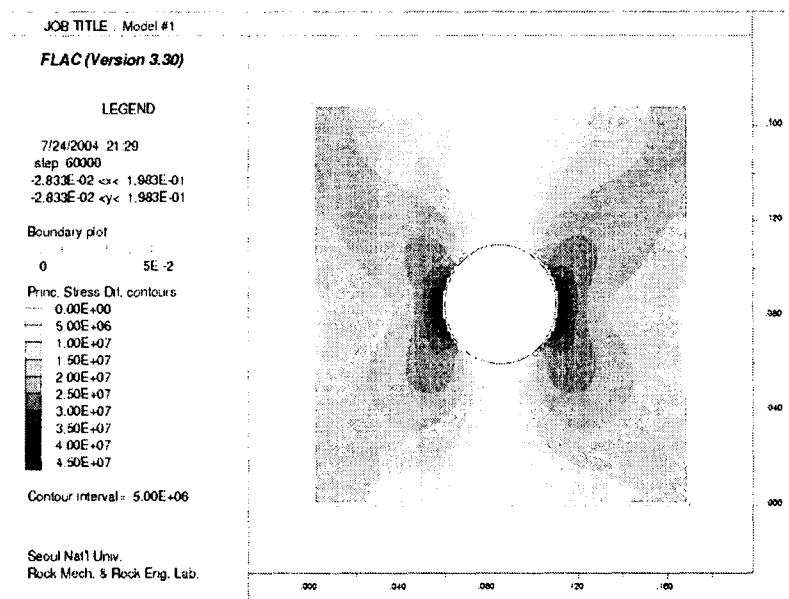


Fig. 3.8 Contour plots of differential principal stress around a circular tunnel at $\sigma_1/\sigma_c=0.7$

Table 3.2 Input parameter for numerical analysis

Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio (ν)	Density (kg/m^3)	Cohesion (MPa)	Friction Angle ($^\circ$)	Tensile Strength (MPa)
16.5	0.17	2.06	9	35	2.4

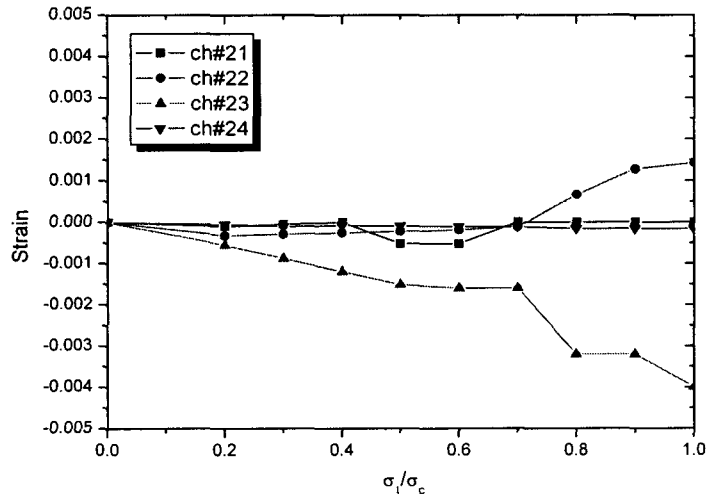


Fig. 3.9 Relationship between strain and normalized maximum principle stress from the numerical analysis (ch#21 ~ ch#24)

상단은 고정시키고, 양옆 (최소주응력)과 하단부 (최대주응력)에서 하중을 가하였다. 최대 주응력은 재료의 강도를 30 MPa로 보았을 때 그 강도에 대한 비율을 0.4에서부터 1.0까지 단계적으로 증가시켰다. 양 옆의 플랫폼으로 가하는 부분은 5.4 MPa로 유지하고, σ_1/σ_c 의 변화에 따른 응력의 변화를 살펴보았다. Fig. 3.8은 수치해석을 통해 모사해본 이축압축 시험 중 최대주응력과 최소주응력의 차이의 분포를 나타내고 있는데, 최대 접선응력이 작용하는 공동의 측벽부에 최대주응력과 최소주응력의 차이가 가장 크게 나타나고 있으며, 실제 스폐링이 발생하는 부분과 일치한다. 스폐링에 의한 공동 벽면의 파괴는 전단 응력에 의한 파괴이기 때문에 Fig. 3.8에 보인 결과는 실험의 결과와 일치하는 것으로 관찰되었다.

수치해석을 통해 얻은 변위값을 이용하여 계산한 변형률 값과 실제 실험으로부터 구한 변형률을 비교하여 보았다. Fig. 3.9는 수치해석 모델을 이용하여 구한 각 채널별 응력에 따른 변형률의 값을 나타낸 것이다. 수치해석에 의한 값을 도시해본 결과 실제 실험에서 얻은 값 (Fig. 3.2 참조)과 비슷한 양상으로 진행됨을 볼 수가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 암석의 강도에 대한 주응력 비에 따른 암석의 취성 파괴 특성 및 파괴 진행 양상을 규명하기 위하여, 시멘트 모르타르를 이용하여 만든 모형 블록에 원형 형상의 공동을 만들어 이축 압축 시험을 수행하였다. 최소주응력은 플랫폼을 이용하여 일정한 압력을 항상 유지할 수 있도록 하였으며, 최대주응력은 하중기를 사용하여 일정한 속도로 증가시켜 응력 수준을 변화시킬 수 있도록 하였다. 파괴 진행 양상을 알아보기 위하여 이축 압축 시험 동안 발생하는 미소파괴음 음원추적을 실시하였고, 공동 주위에 변형률 게이지를 부착하여 파괴의 개시 수준을 알아보았다. 본 연구에서 수행된 연구 내용 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 지하 공동의 응력 수준에 따른 취성 파괴 특성을 알아보기 위하여 이축 압축 시험을 수행하였으며, 이때 최소주응력은 플랫폼을 이용하여 일정수준을 유지하도록 하고, 최대주응력은 하중기를 이용하여 일정 가압 속도로 증가시켰다. 이축 압축 시험 중 미소파괴음 및 변형률을 측정하였으며, 측정결과 재료의 단축 압축 강도에 대한 최대 주응력의 비가 약 0.44 정도일 때 공의 내부 벽에 미세균열의 발생이 시작됨을 관찰되었다. $\sigma_1/\sigma_c=0.8 \sim 0.85$ 이후 미소파괴음 신호의 발생빈도는 급격하게 증가하게 되고, 변형률도 급작스런 변화를 보이게 된다. 또한 공동의 벽면에서 암석 파편들이 공 내부로 격렬히 떨어져 나오는 극심한 스폐링이 관찰되었다. 최소 주응력에 대한 최대 주응력의 비인 K값의 변화에 따른 미소파괴음 파라미터들을 비교해 본 결과 이 값이 약 2.55일 때 미세균열의 발생이 시작되며, 약 4.65이후 극심한 스폐링이 발생함을 알 수 있었다.
2. 시험동안 음원 추적을 실시한 결과 최소 주응력이 작용하는 공동의 벽면 주변에서 다수의 음원이 발생하였다. 또한 변형률 및 미소파괴음 자료를 해석한 결과 일정 응력 수준에서 음원도 똑같이 증가하는 모습을 보였다. 즉, 약 $\sigma_1/\sigma_c=0.4$ 부근에서 음원이 증가하기 시작하고, $\sigma_1/\sigma_c=0.8$ 이후 갑작스런 음원의 증가를 보였다.
3. 유한차분법 수치해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하여 실험실에서 구한 기본물성을 입력값으로 하여 실제 실험 조건과 유사한 조건을 입력 변수로 하여 수치해석을 실시하였다. 그 결과 실제 음원이 발생하는 부분과 수치해석 시 소성영역이 일어나는 부분이 대략적으로 비슷하였고, 소성 영역이 발생하기 시작하는 응력 수준이 변형률 및 미소파괴음을 측정하여 얻은 파괴의 개시 수준과 일치함을 알 수 있었다. 또한 실제 시험 시의 변형률의 변화와 수치해석을 통해 얻은 변형률의 변화는 거의 일치 하였다. 본 실험에서 음원 추적 결과와 수치해석 시 소성영역이 국부적으로 다르게 보였는데, 이는 중앙에 있는 실린더 모양의 원형 공동의 영향으로 음원으로부터 발생된 파가 각각의 센서에 직접적으로 전달되지 못하고 굴절하여 전달되는 반사파의 영향에 의한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 성백옥, 2004, 이축 압축 조건에서의 암석모사시료의 취성 거동 특성, 터널과 지하공간 투고 중
- 2) Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T., Labuz, J.F., 2002, Simulation of Failure around Circular Opening in Rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 39, 507-515
- 3) Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 217-218
- 4) Meglis, I.L., Chow, T.M., Young, R.P., 1995, Progressive Microcrack Development in Tests on Lac du Bonnet Granite - I. Acoustic Emission Source Location and Velocity Measurements, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 32, 741-750
- 5) Ortlepp, W.D., O'Ferral, R.C., Wilson, J.W., 1972, Support Methods in Tunnels, Association of Mine Managers of South Africa, Papers and Discussion, 167-195