

취성파괴수준과 파괴개시시점에 관한 진삼축 모형실험연구

천대성^{1)*}, 박 찬²⁾, 박철환³⁾, 전석원⁴⁾

True Triaxial Physical Model Experiments on Brittle Failure Grade and Failure Initiation Stress

Dae-Sung Cheon, Chan Park, Chulwhan Park and Seokwon Jeon

Abstract At low in-situ stress, the continuity and distribution of natural fractures in rock mass predominantly control the failure processes. However at high in-situ stress, the failure process are affected and eventually dominated by stress-induced fractures preferentially growing parallel to the excavation boundary. This fracturing is often observed in brittle type of failure such as slabbing or spalling. Recent studies on the stress- or excavation-induced damage of rock revealed its importance especially in a highly stressed regime. In order to evaluate the brittle failure around a deep underground opening, physical model experiments were carried out. For the experiments a new true triaxial testing system was made. According to visual observation and acoustic emission detection, brittle failure grades were classified under three categories. The test results indicate that where higher horizontal stress, acting perpendicular (S_{H2}) and parallel (S_{H1}) to the axis of the tunnel respectively, were applied, the failure grade at a constant vertical stress level (S_V) was lowered. The failure initiation stress was also increased with the increasing S_{H1} and S_{H2} . From the multi-variable regression on failure initiation stress and true triaxial stress conditions, $f(S_V, S_{H1}, S_{H2})$ was proposed.

Key words Brittle failure, Failure grade, Failure initiation stress, Deep underground opening, True triaxial stress conditions

초 록 상대적으로 저심도에 건설되는 암반구조물의 경우 단층이나 절리 등 암반 내 존재하는 불연속면이 굴착 후 생성된 경계면과의 교차에 의해 구조적인 형태의 파괴가 지배적으로 발생하나, 고심도에 건설되는 경우 높은 현지응력과 굴착에 따른 유도응력으로 인해 공동 경계면에서 스펙링이나 슬래빙과 같은 취성파괴가 발생할 수 있다. 취성파괴는 암반구조물의 안정성을 약화시키는 주된 원인으로, 고심도 영역에서 암반구조물의 안정성을 확보하기 위하여 응력조건에 따라 발생하는 취성파괴의 개시시점, 파괴수준 및 파괴범위 등과 같은 파괴특성이 규명되어야 한다. 본 연구에서는 고심도의 암반구조물에서 발생할 수 있는 취성파괴의 파괴수준 및 개시시점과 재하응력사이의 관계를 정량적으로 평가하고자 진삼축 응력조건을 구현할 수 있는 모형실험장치를 설계, 제작하여 여러 응력조건에서 모형실험을 수행하였다. 공동주변에서 발생한 파괴수준을 육안관찰과 미소파괴음 발생양상에 의해 3단계로 구분하고, 진삼축 응력조건에 따라 제시하였다. 그 결과 파괴수준은 공동단면에 작용하는 재하응력(S_V, S_{H2}) 뿐 아니라 공동 축에 평행한 재하응력 S_{H1} 에 영향을 받으며, S_{H1} 과 S_{H2} 의 크기가 증가할수록 동일한 S_V 에서 파괴수준은 감소하였다. 파괴개시시점 역시 S_{H1} 과 S_{H2} 의 증가에 따라 파괴개시를 위한 응력수준은 증가하였으며, 다중회귀분석을 통해 파괴개시시점과 진삼축 응력조건의 관계식을 도출하였다.

핵심어 취성파괴, 파괴수준, 파괴개시시점, 고심도 암반구조물, 진삼축 응력조건

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원
²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원
³⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원
⁴⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수
* 교신저자 : cds@kigam.re.kr
접수일 : 2007년 4월 9일
심사 완료일 : 2007년 4월 18일

1. 서 론

암반구조물의 파괴는 초기응력의 크기, 무결암의 강도 그리고 단층이나 절리와 같이 암반 내에 존재하는 불연속면의 상태에 의해 좌우된다. 상대적으로 저심도에 건설되는 암반구조물의 경우 단층이나 절리 등 암반

내 존재하는 불연속면이 굴착 후 공동 경계면과의 교차에 의해 불록을 형성하여 자중에 의해 떨어지거나 미끄러지는 구조적인 형태의 파괴(structurally controlled failure)가 주로 발생한다. 그러나 고심도에 건설되는 암반구조물의 경우 높은 현지응력(in-situ)과 공동 굴착에 따른 유도응력(induced stress)으로 인하여 공동 경계면에서 스폐링(spalling)이나 슬래빙(slabbing)과 같은 취성파괴(brittle failure)가 발생할 수 있다.

암반구조물에서 발생하는 취성파괴는 암반이 충분한 강도와 지지력을 가지고 있음에도 불구하고 절대적인 현지응력의 크기가 크거나, 암반구조물의 형상과 현지응력의 방향에 의해 암반의 강도를 초과하는 응력집중이 발생하는 경우 나타날 수 있다. 특히 취성파괴현상은 현지암반의 응력조건과 암반강도에 의해 절대적으로 영향을 받는다(천대성 등, 2006).

최근 응력에 의해 야기된 손상영역을 평가하기 위한 시험터널이 운영되었던 캐나다 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)의 URL(Underground Research Laboratory)에서의 현장 측정결과, 소규모 시험터널의 천단부와 바닥부에서 약 0.5 m의 취성파괴영역이 발생한 것으로 보고되었다(Read and Martin, 1996; Martin et al., 1997). 국내에서도 캐나다 경우와 같이 취성파괴의 발생사례는 주로 고심도에서 보고되었으며, 점차 고심도에 건설되는 산악터널이 증가함에 따라 발생사례가 증가하고 있다. 더욱이 최근 국내의 저심도에서도 취성파괴에 의한 스폐링 현상이 보고되어(최영태 등, 2006), 취성파괴에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 취성파괴의 발생은 암반구조물의 안정성을 저해시키기 때문에 구조물의 설계단계에서부터 응력조건에 따른 취성파괴의 발생여부 및 파괴범위 등을 파악하는 것이 매우 중요하다.

암반구조물에서 발생하는 취성파괴를 규명하고 평가하기 위한 방법으로 실규모의 현장실험과 실내 모형실험, 수치실험 등의 방법이 적용될 수 있다. 그러나 실규모 현장실험의 경우 대상지역의 선정 뿐 아니라 실험수행을 위한 많은 시간과 비용으로 인해 현실적으로 적용하는 데 많은 어려움이 따른다. 이에 반해 실내에서 수행되는 모형실험이나 수치실험은 수행이 비교적 용이하며, 여러 조건을 변화시키면서 발생하는 현상을 규명할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 진삼축 응력조건하에서 고심도 암반구조물에서 발생할 수 있는 취성파괴의 특성을 알아보기 위하여 진삼축 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 진삼축 응력상태(true triaxial stress condition)를 구현할 수 있는 진삼축 모형실험장치를 설계, 제작하였

다. 제작된 실험장치를 이용하여 중앙에 직경 60 mm의 원형공동을 갖는 290 mm×290mm×290 mm 크기의 시멘트 모르타르에 대해 진삼축 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 통하여 취성파괴수준과 취성파괴개시시점과 같은 파괴특성을 육안관찰과 미소파괴음(AE) 측정장치를 이용하여 분석하였다.

2. 시료, 실험장치 및 실험방법

2.1 시료의 물리적, 역학적 특성

본 연구에서는 암석을 모사할 수 있는 시멘트 모르타르를 이용하여 모형실험을 수행하였다. 일반적으로 모형실험을 수행하는 데 있어, 실제 현지 암반의 특성을 반영하기 위해 차원해석에서 구해진 축소율에 따라 변형계수 또는 강도를 고려하여 재료를 선정한다(Hobbs, 1966). 이 경우 차원해석에 의해 계산된 물성을 갖는 재료는 낮은 강도와 함께 연성의 성질을 보이는 것이 일반적이다.

그러나 응력조건에 따른 취성파괴특성을 파악하는 것이 실험의 주된 목적인 경우 실제 암반의 파괴양상과 유사한 실험결과를 발생시킬 수 있는 재료의 선정이 요구된다. 이에 본 연구에서는 실제 암석보다 낮은 일축 압축강도를 가지나 암석에 가까운 취성(brittleness)을 갖는 시멘트 모르타르를 실험재료로 선정하였다. 일반적으로 널리 사용되는 취성지수(brittleness index)인 일축압축강도 대 인장강도의 비를 이용하는 경우, 암석은 10~30 사이에 속하며, 일축압축강도 대 인장강도의 비가 10 이상인 재료를 취성재료라 일컫는다. 본 연구에서 사용된 시멘트 모르타르의 취성지수는 약 13으로서 암석보다는 취성지수가 낮으나 취성재료의 범위에 포함되기 때문에 응력에 의해 야기되는 파괴특성을 규명하는 데 적합한 재료라 할 수 있다(천대성 외, 2006).

제작된 시료는 균질성을 위해 골재를 사용하지 않고 고강도의 초조강 시멘트와 주문진 표준사, 그리고 물을 이용하여 제작하였다. 배합은 시멘트 : 표준사 : 물의 무게비가 각각 3:6:2의 비율로 이루어졌으며, 상온에서 28일 이상의 양생기간을 갖는 시멘트 모르타르를 실험재료로 사용하였다. 5개 이상의 시료에 대해 수행된 실험으로부터 얻어진 시료의 물리적, 역학적 특성은 표 1과 같다.

모형실험을 수행하는 데 있어 대상 실험체의 크기가 클수록 외부 조건에 따라 발생하는 물리적 변화량의 측정과 계측이 용이하며, 경제조건으로 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다. 또한 크기효과에 따른 현장결과와의 차이점을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 크기가 증가할수록 대상 실험체를 제작하고 실험하는 데 많

은 어려움이 존재하며, 적용되는 하중의 증가로 대용량의 하중기가 필요하게 된다. 이에 본 실험에서는 실험 장비의 용량 등의 제반조건을 종합적으로 고려하여 290 mm×290 mm×290 mm 규격을 갖는 모형실험체를 제작하였다(그림 1). 터널을 모사한 내부의 원형공동은 직경 60 mm, 길이 150 mm의 크기를 가지며, 중앙부에 위치한다.

2.2 실험장치

2.2.1 진삼축 압축챔버

진삼축 응력조건에서 모형실험체의 파괴특성을 규명하기 위해 새롭게 진삼축 압축챔버를 제작하였다. 진삼축 압축챔버는 최대 290 mm×290 mm×290 mm의 모형실험체에 대해 실험이 가능하며, 높이 620 mm×너비 500 mm×폭 700 mm의 직육면체로 제작되었다(그림 2와 그림 3). 진삼축 응력조건은 Mogi(1971)가 사

용했던 방식을 채택하여 두 방향의 응력은 실린더에 의해 재하되며, 나머지 한 방향은 챔버 내의 유체를 이용하여 모형실험체에 직접 재하된다.

진삼축 압축챔버는 전면부, 중앙부, 후면부로 구성된다. 각 부분의 결합은 50개의 볼트에 의해 이루어지며, 연결부분에 o-ring을 삽입하여 누유를 방지하였다. 전면부에는 중간크기의 응력을 재하하기 위한 실린더와 가압판이 설치되었으며, 실험 후 챔버 내부의 실리콘유를 배출하기 위한 배수시설이 되어 있다. 가압판은 상부가 압판과 중첩이 되지 않도록 모형실험체의 크기보다 10 mm 작은 크기로 제작하였다. 실린더는 무게와 부피를 줄이기 위하여 단동식으로 제작되었으며, 직경은 340 mm이며 최대이동거리는 30 mm이다. 실린더가 장착된 전면부는 두께 50 mm의 강철로 제작되었다.

중앙부는 사각관의 형태로 두께 30 mm의 강철로 제작되었다. 상부는 피스톤을 위한 200 mm 직경의 홀이 존재하며, 2개의 o-ring이 설치되어 있다. 또한 챔버 내

표 1. 시멘트 모르타르의 물리적, 역학적 특성

Properties	Cement mortar
Bulk specific gravity	2.02
Absorption ratio (%)	0.32
P-wave velocity (m/sec)	3,590
S-wave velocity (m/sec)	1,840
Uniaxial compressive strength (MPa)	38
Brazilian tensile strength (MPa)	3
Young's modulus (GPa)	11.5
Poisson's ratio	0.21
Cohesion (MPa)	9
Friction angle (°)	40

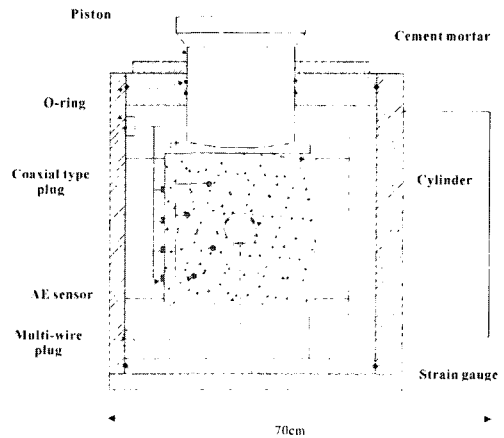


그림 2. 진삼축 압축챔버의 내부모식도

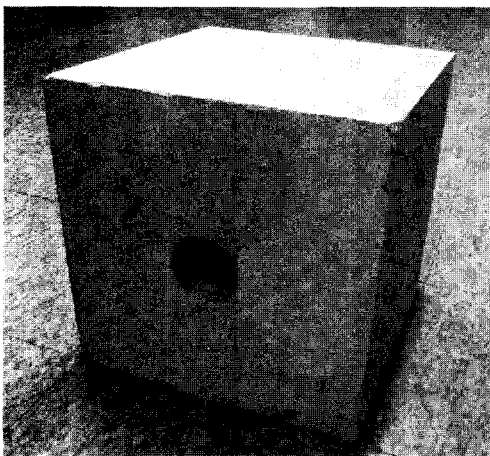


그림 1. 모형실험체

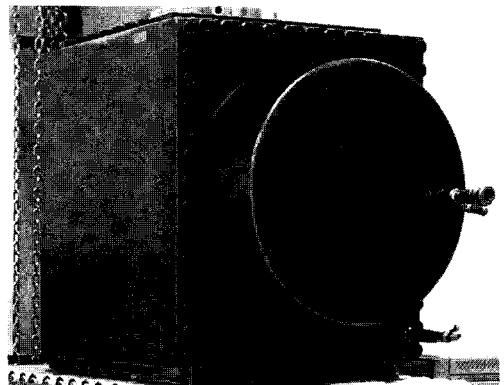


그림 3. 진삼축 압축챔버의 모습

에 유체를 주입할 때 발생하는 기포를 제거하기 위한 배출구가 존재한다. 하부에는 모형실험체를 중앙에 위치시키기 위한 가압판이 본체에 고정되어 있다. 가압판은 높이 100 mm×너비 280 mm×폭 280 mm의 직육면체로 제작되었다.

후면부에는 모형실험을 수행하는 동안 발생하는 공동의 변형과 미소파괴음(AE)을 측정하기 위해 변형률계 이저용 다선식 플러그(multi-wire type plug)와 동축식 플러그(coaxial type plug)가 존재한다. 미소파괴음을 측정할 때 발생하는 잡음을 최소화하기 위하여 동축케이블과 BNC 단자가 일체형이 되도록 설계하였다. 진삼축 압축챔버는 8개의 미소파괴음 센서와 9개의 변형률계이저를 사용할 수 있다.

2.2.2 재하장치 및 자료획득장치

본 실험에 사용된 재하장치는 미국 Interlaken사에서 제작된 것으로 시스템은 시험 프레임, DDC-4000 컨트롤러, UTP-4 프로그램, 유압펌프, 삼축센, 구속압 및 간극수압용 증폭기(intensifier)와 액세스리 부품으로 구성되어 있다.

시험 프레임은 500 ton의 압축용량을 가지고 있으며, 낮은 하중 용량의 측정을 위하여 50 ton의 압축용량을 가진 로드셀의 부착이 가능하도록 제작되어 있다. 이 시험기는 암석역학 시험용으로 제작되어 매우 높은 강성을 가진다. 구동장치는 프레임의 뒷부분에 부착된 서보밸브를 통해 전기적으로 조절된다.

DDC-4000 컨트롤러는 모든 신호를 생성하고 제어와 측정을 수행하는 디지털 신호처리기로서, 컨트롤러와 사용자와의 상호작용은 메인 컴퓨터에 장착된 인터페이스 소프트웨어 UTP-4 프로그램으로 연결되어 일련의 시험을 수행한다.

500 ton에 해당하는 고용량의 하중을 측정하기 위하여 Interlaken시험기에서 제공하는 delta-P type의 압력계를 이용하였다. 자료획득을 위하여 시스템 작동용 컴퓨터와는 별도로 자료획득용 컴퓨터를 사용하였다. 하중신호는 DDC-4000 컨트롤러 뒷면에 부착되어 있는 외부 출력단자로부터 입력시켰다.

2.2.3 미소파괴음(AE) 측정장치

미국 Physical Acoustic Corporation(PAC)사의 PCI/Disp 시스템을 이용하여 모형실험동안 발생하는 미소파괴음을 측정하였다. 시스템은 크게 미소파괴음 신호를 입력받는 센서, 획득된 신호를 증폭하는 전치증폭장치(pre-amplifier), 그리고 각종 신호를 처리하는 처리장치로 구성되어 있다.

사용된 미소파괴음 센서는 (주)하기소닉에서 제작한 AE-SC 모델로 지름과 두께는 각각 3.6 mm, 2.4 mm이며 센서의 공진주파수는 150 kHz, 주파수대역은 100 kHz~1,000 kHz이다. 센서의 접착을 용이하게 하고 센서의 감도를 적정하게 유지하기 위해 고진공접착제(高眞空接着劑, electron wax)를 커플런트(couplant)로 사용하였다. 센서에서 감지된 미소파괴음 신호는 전치증폭장치 PAC model 1220A에 의해 40 dB만큼 증폭되었다. 미소파괴음 신호의 측정 및 처리는 PAC사에서 제공하는 AEwin 프로그램을 이용하였다. AEwin 프로그램은 미소파괴음의 신호 및 파형을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 실험을 통해 얻은 미소파괴음 자료를 저장하여 분석 및 재생시킬 수 있는 윈도우용 구동프로그램이다.

2.3 실험방법

진삼축 모형실험은 Interlaken 시험기에 의해 수행되었다. 모형실험에서 공동 축에 수직인 연직재하응력, S_v 의 제어는 Interlaken의 시험 프레임을 이용하여 하중제어방식으로 수행되었다. 공동 축에 평행한 수평재하응력, S_{H1} 은 유압으로 재하되며 역시 Interlaken사에서 제공되는 구속압 장치(confining pressure actuator)를 이용하여 압력제어방식으로 수행되었다. 공동 축에 수직인 수평재하응력 S_{H2} 는 SBEL사의 유압장치를 이용하여 구현되었다. 미소파괴음의 계측은 미국 PAC사의 PCI/Disp 시스템을 통해 수행되었으며, 발생된 미소파괴음 파라미터의 계측과 음원추적이 수행되었다.

그림 4는 진삼축 압축챔버에서 모형실험체가 받는 응력방향과 센서의 위치를 나타낸 모식도이다. 그림에서와 같이 S_v 와 S_{H2} 는 공동 축에 수직하게, S_{H1} 은 공동 축에 평행하게 재하되며, 모형실험에서 응력의 크기는 항상 $S_v > S_{H2} > S_{H1}$ 의 관계를 유지하였다. 그림 5는 진삼축 모형실험장치의 전체 모습을 나타낸다.

3. 실험결과

3.1 파괴수준

모형실험동안 발생된 미소파괴음의 타격음 누적곡선과 음원발생량, 그리고 모형실험 후 수행된 육안관찰을 통해 응력조건에 따른 공벽의 파괴수준(failure grade)과 파괴개시시점(failure initiation stress)을 알아보았다. 파괴수준은 공벽에서 발생하는 파괴의 정도를 의미하며, 파괴개시시점은 공벽에서 취성파괴가 관찰되기 시작하는 응력수준을 의미한다.

그림 6은 모형실험 후 공벽에서 발생한 스프링의 모습을 보여준다. 스프링은 최대접선응력이 가장 큰 최대

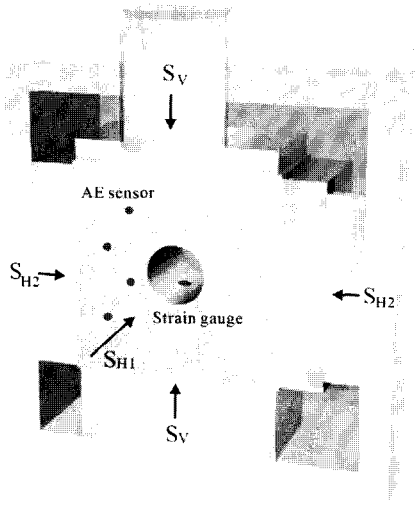


그림 4. 진삼축 압축챔버와 모형실험체의 모식도



그림 6. 모형실험후 공벽에서 관찰된 취성파괴현상

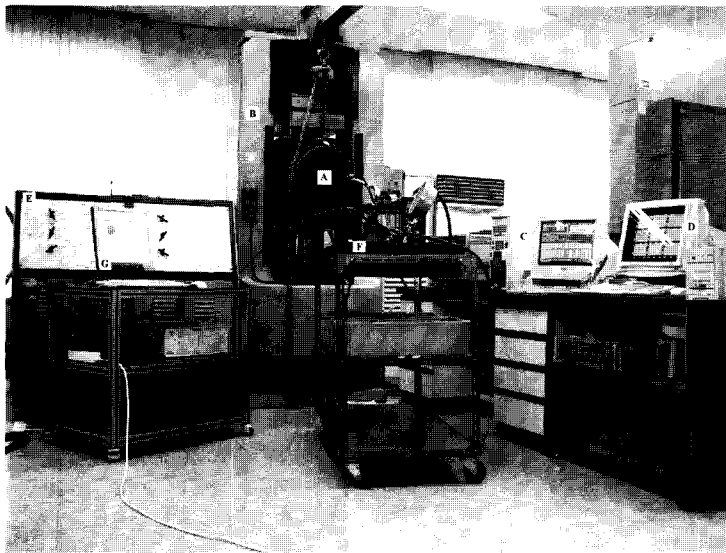


그림 5. 진삼축 모형실험의 전체모습

A: 진삼축 압축챔버, B: Interlaken 시험기, C: Interlaken 컨트롤러, D: 자료획득장치, E, F: 구속압 재하장치, G: AE 측정장치

초기응력과 평행한 공벽에서 발생하며, Carter(1992), Ewy and Cook(1990), Martin(1993), 배성호(2005) 등이 보고한 바와 같이 공벽에서 조각조각 부서지는 파괴 형태를 보였다. 이들은 스포링의 발생시점 및 규모는 현지 압반강도와 주변 응력장의 관계에 의해 결정된다고 보고하였다.

본 연구에서 분류된 파괴수준은 배성호(2005)의 육안 관찰결과에서 제시된 기준을 참조하여 3단계로 분류

하여, 육안으로 균열이 관찰되지 않는 단계를 a단계(no failure grade)로, 육안으로 균열이 관찰되며 파편과 같은 조각이 발생하기 시작하는 단계를 b단계(visible macro crack)로, 뚜렷하게 스포링 현상이 관찰되는 단계를 c단계(heavy spalling grade)로 구분하였다(그림 7과 표 2).

S_{H2} 의 크기가 증가할수록 공벽에서 스포링 발생을 위해 요구되는 S_v 의 크기가 증가하였다. 이는 공벽의 접선 방향에 집중되는 접선응력을 유도하는 식, $\sigma_\theta = 3S_v - S_{H2}$

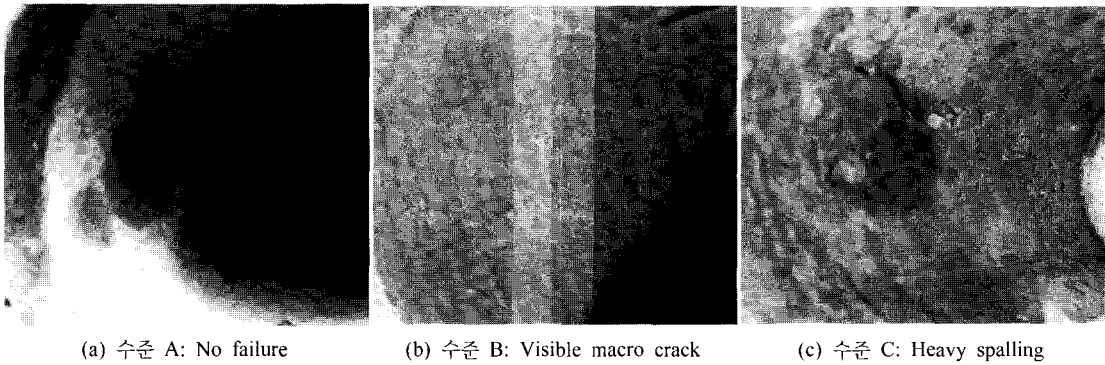


그림 7. 3단계로 분류된 파괴수준

표 2. 응력조건에 따른 파괴수준

No. of test	S_{H1} (MPa)	S_{H2} (MPa)	S_V (MPa)	Failure grade
1	0	4.63	20.2	a
2	0	4.63	25.0	b
3	0	4.63	29.7	b
4	0	6.95	29.7	b
5	0	6.95	35.7	c
6	0	9.26	35.7	c
7	1.5	3.47	29.7	c
8	1.5	4.63	35.7	c
9	1.5	4.63	27.3	b
10	1.5	4.63	44.0	model failure*
11	1.5	6.95	27.3	a
12	1.5	6.95	41.6	model failure
13	1.5	9.26	27.3	a
14	1.5	9.26	35.7	b
15	2.5	4.63	27.3	a
16	2.5	4.63	35.7	c
17	2.5	6.95	34.5	c
18	2.5	9.26	29.7	b
19	2.5	9.26	35.7	c
20	2.5	9.26	30.0	a
21	2.5	9.26	38.3	c

*: 모형실험체 전체의 파괴를 의미

에 의해서 그 영향정도를 알 수 있다. 또한 S_{H2} 와 마찬가지로, S_{H1} 의 크기가 증가함에 따라 공벽에서 파괴발생을 위해 요구되는 S_V 의 크기 역시 증가함을 보였다.

그림 8은 구분된 파괴수준을 3차원에 도시한 것이다. 그림과 같이 S_{H2} 의 크기가 증가할수록, 그리고 S_{H1} 의 크기가 증가할수록 동일한 S_V 에서 파괴수준은 감소하며, 파괴를 발생시키는 데 필요한 응력수준이 증가함을 알 수 있다.

3.2 파괴개시시점

응력조건에 따라 공벽에서 파괴가 발생하기 시작하는

시점에 대하여 알아보았다. 모형실험에서 파괴개시시점은 보수적인 관점에서 육안관찰에서 파괴가 발생하지 않았을 때의 응력수준과 파괴수준 b단계의 모형실험에서 발생한 미소파괴음 타격음 누적곡선으로부터 결정되었다. 미소파괴음에 의한 파괴개시시점은 Lee and Haimson (1993)에 의해 수행되었던 방법을 이용하여 미소파괴음 타격음 누적곡선과 타격음의 발생량 그래프에서 타격음의 양이 증가하기 시작하는 지점을 선정하였다.

S_{H1} 을 고려하지 않고, 공동단면에 작용하는 S_V 와 S_{H2} 에 대하여 육안관찰과 미소파괴음 계측에 의해 결정된 파괴개시시점을 응력조건에 대하여 도시하였다(그림 9).

Martin et al.(1994), Castro(1996), Diederichs(1999) 등에 따르면 취성파괴의 개시시점은 재하응력의 선형식으로 표현되며, 특히 Martin et al.(1997)은 파괴개시시점이 터널단면에 작용하는 축차응력에 의해 표현될 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 이들 연구결과를 바탕으로 파괴개시시점에 대한 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석결과 본 연구의 결과 역시 선형회귀가 가장 적합한 것으로 나타났다(그림 9). 이들의 선형회귀로부터 파괴개시시점에 대하여 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\frac{S_V}{\sigma_c} = 1.115 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.493 \quad (1)$$

그림 9와 식 (1)로부터 파괴개시시점은 공동단면에 작

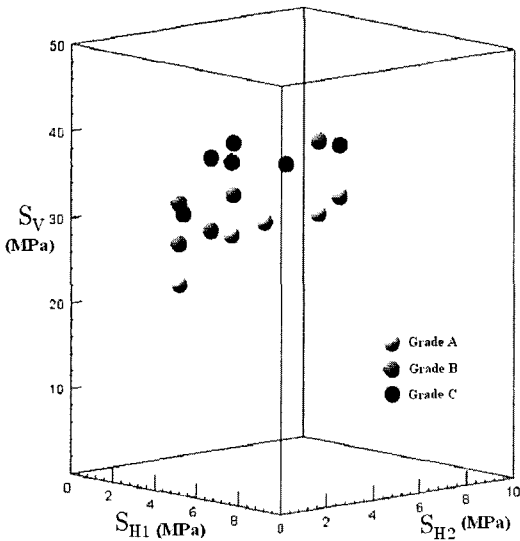


그림 8. 3차원으로 도시된 응력조건에 따른 파괴수준

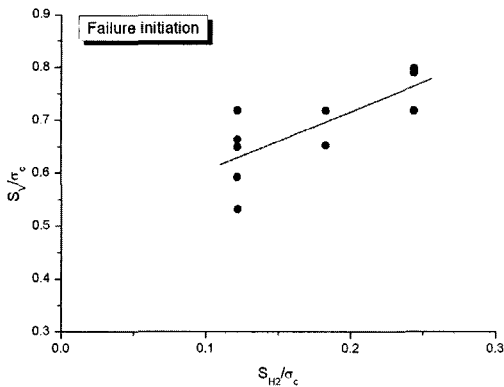


그림 9. 2차원 응력조건에서 취성파괴개시시점과 선형회귀

용하는 S_V 와 S_{H2} 의 크기에 영향을 받으며, 파괴개시를 위한 S_V 는 S_{H2} 의 크기가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

다음은 여러 연구자들(Herrick, 1990; Lee and Haimson, 1993; Song and Haimson, 1993)에 의해 실내 모형실험으로부터 결정된 응력조건에 따른 파괴개시시점을 일축압축강도로 정규화하여 이를 선형회귀한 것이다.

$$\frac{S_V}{\sigma_c} = 0.525 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.955 \quad (\text{Herrick, 1990}) \quad (2)$$

$$\frac{S_V}{\sigma_c} = 1.074 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.990 \quad (\text{Song and Haimson, 1993}) \quad (3)$$

$$\frac{S_V}{\sigma_c} = 0.6 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.796 \quad (\text{Lee and Haimson, 1993}) \quad (4)$$

Herrick(1990)은 일축압축강도가 28 MPa인 Indiana 석회암에 대하여 보어홀에 대한 실내 모형실험을 수행하였다. Song and Haimson(1993)은 일축압축강도가 21 MPa인 Cordova Cream 석회암에 대하여 수행하였다. 또한 Lee and Haimson(1993)은 캐나다 AECL의 Lac du Bonnet 화강암에 대하여 수행한 결과로서 일축압축강도는 167 MPa이었으며, 모형실험체에 대해 직경 20 mm의 드릴로 천공하면서 계측된 미소파괴음과 육안관찰로부터 도출된 것이다. 식 (1)과의 비교를 통해 본 연구에서 제안된 식이 기존 연구결과의 내용과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다(그림 10). 그림 11은 일축압축강도에 의해 정규화된 응력조건이 본 연구와 유사한 Lee and Haimson(1993)의 결과와 본 연구의 결과를 함께 도시한 것으로 취성파괴개시를 위한 회귀식이

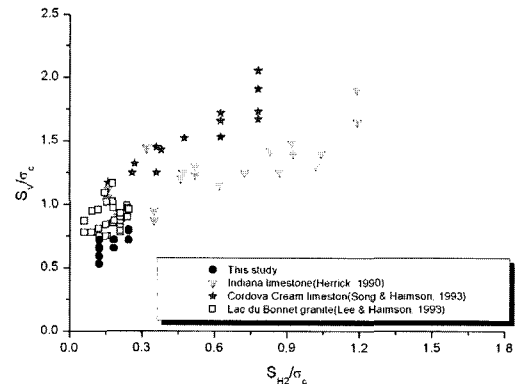


그림 10. 2차원 응력조건에서 여러 연구자들의 취성파괴개시시점

거의 유사함을 알 수 있다.

앞서 서술한 S_{H1} 과 S_{H2} 의 증가는 파괴개시시점을 증가시키며, 동일한 S_V 에서 파괴수준의 정도를 감소시킨다는 분석결과를 바탕으로 3차원 응력조건에 따라 발생된 파괴개시시점에 대해 다중회귀분석(multi-regression)을 수행하였다(그림 11). 그림 12의 격자망은 다중회귀분석에 의해 제시된 평면이며, 검은 점은 모형실험으로부터 구한 결과를 표현한 것이다. 파괴개시시점은 터널

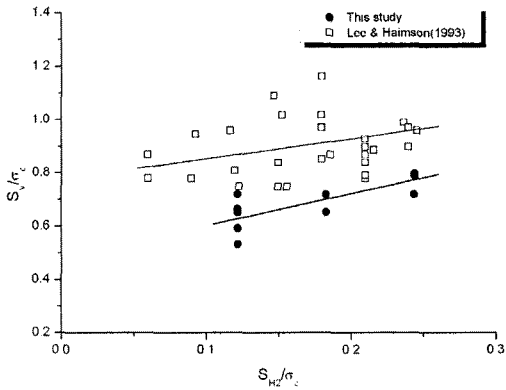


그림 11. 정규화된 응력조건이 유사한 기존연구와 본 연구의 취성파괴개시시점

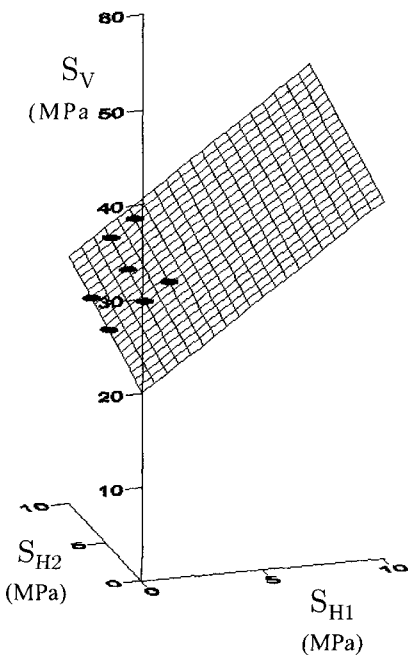


그림 12. 취성파괴개시를 위한 진삼축 응력조건

에 작용하는 모든 재하응력에 영향을 받으며, 재하응력의 크기가 증가할수록 파괴개시를 위해 요구되는 응력이 증가함을 알 수 있다.

식 (5)는 파괴개시시점과 재하응력 사이의 관계를 최소자승법에 의한 다중회귀분석을 통해 구한 평면방정식으로, 재하응력은 일축압축강도로 정규화하였다. 다중회귀분석에 의한 결과에서 S_{H1} 이 S_{H2} 에 비해 파괴개시시점에 영향을 많이 주는 것으로 나타났다. 따라서 취성파괴의 개시시점을 평가하고자 할 때, 2차원 응력조건이 아닌 3차원 응력조건을 구현한 상태에서 모형실험을 수행해야 정확한 파괴개시시점을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$f(S_V, S_{H1}, S_{H2}) = -\frac{S_V}{\sigma_c} + 1.777 \frac{S_{H1}}{\sigma_c} + 0.614 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.529 = 0 \quad (5)$$

파괴수준에 대한 분류에서 공벽에서의 심한 스펀링(heavy spalling) 현상이 관찰된 단계의 응력조건에 대하여 알아보았다. 그림 13과 그림 14는 육안관찰에 의해 c단계에 해당하는 응력수준과 이에 해당하는 모형실험체의 미소파괴음 타격음 누적곡선으로부터 결정된 응력에 대하여 도시한 것이다. 누적곡선에서 결정된 응력 이후 타격음의 발생량과 음원의 발생량이 급격히 증가하는 것으로부터 공벽주변에서 심한 스펀링 현상이 발생하는 시점이라 판단하였다.

그림 13과 그림 14에서 심한 스펀링이 발생하는 응력조건에 대한 선형회귀식(식 (6))과 평면방정식(식 (7))을 도출하였다. 파괴개시시점과 같이 심한 스펀링은 공동단면에 작용하는 재하응력과 선형관계를 보이며, 공동 축에 작용하는 재하응력에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 파괴개시시점과 비교하여 S_{H1} 의 계수가 매우 작은 값을 보였으며, 이는 심한 스펀링에 대한 S_{H1} 의 영향이 미미함을 의미한다. 이러한 현상은 파괴범위와 파괴심도에서 더욱 뚜렷하게 나타났다(Cheon et al., 2006). 이로부터 공동 축에 평행한 재하응력은 공벽에서의 파괴발생여부에는 많은 영향이 있으나, 파괴가 발생한 후에는 영향이 줄어들며, 파괴발생 후 취성파괴는 공동단면에 작용하는 재하응력의 크기에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

$$\frac{S_V}{\sigma_c} = 0.772 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.766 \quad (6)$$

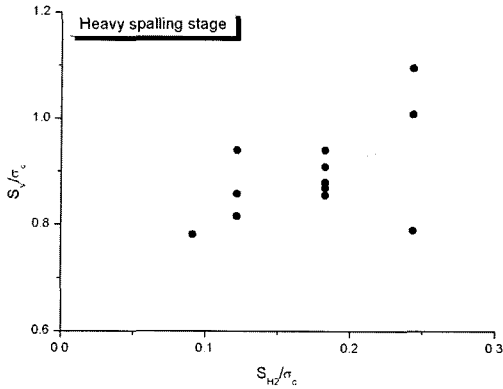


그림 13. 심한 스펠링단계에 관한 2차원 응력조건

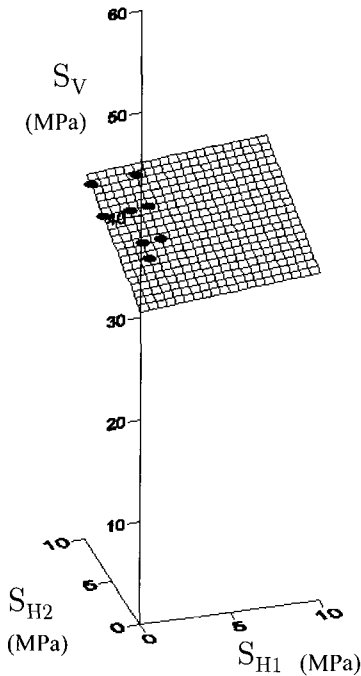


그림 14. 심한 스펠링단계에 관한 3차원 응력조건

$$f(S_V, S_{H1}, S_{H2}) = -\frac{S_V}{\sigma_c} + 0.143 \frac{S_{H1}}{\sigma_c} + 0.516 \frac{S_{H2}}{\sigma_c} + 0.804 = 0 \quad (7)$$

결 론

본 연구에서는 고심도에 건설되는 암반구조물에서 발생할 수 있는 취성파괴를 모형실험을 통하여 알아보았

다. 이를 위해 진삼축 응력조건을 구현할 수 있는 모형 실험장치를 제작, 활용하였으며 취성파괴의 특성 중 파괴수준과 파괴개시시점을 재하응력의 크기에 대해 정량적으로 표현하고자 하였다. 이상의 연구에서 얻어진 주요한 결과들은 다음과 같다.

- 1) 진삼축 모형실험을 수행하여 공벽에서 발생한 파괴수준을 육안관찰과 미소파괴음 발생양상으로부터 3단계로 구분하였다. 파괴수준과 응력조건에 따른 영향을 분석한 결과 S_{H1} 과 S_{H2} 가 증가함에 따라 동일한 응력조건에서 파괴수준은 감소하였다.
- 2) 파괴개시시점은 공동단면에 작용하는 재하응력과 선형적인 관계를 갖으며, 또한 공동 축에 작용하는 재하응력에도 영향을 받았다. 따라서 파괴수준과 파괴개시시점에 대한 연구는 3차원 응력조건에서 수행되어야 할 것이다.
- 3) 파괴개시시점과 응력조건에 대한 다중회귀분석을 통해 이들 사이의 정량적인 관계식, $f(S_V, S_{H1}, S_{H2})$ 을 도출하였으며, 최소 재하응력이 중간 재하응력에 비해 파괴개시시점에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.
- 4) 심한 스펠링이 발생조건과 공동단면에 작용하는 재하응력은 선형관계를 보이며, 공동 축에 작용하는 재하응력에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 파괴개시시점과 비교하여 심한 스펠링에 대한 공동 축의 작용응력은 미미한 것으로 나타났다.

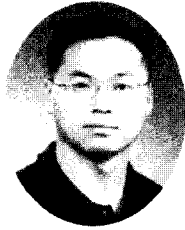
사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘고심도 지하연구실험실(URL)구축 및 실증실험연구’과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교.
2. 최영태, 이대혁, 이희석, 김진화, 이두화, 유광호, 박연준, 2006, 과지압으로 인한 암반의 점진적 취성파괴과정의 수치해석적 연구, Vol. 16, pp. 259~276.
3. 천대성, 박찬, 신중호, 전석원, 2006, 취성파괴에 관한 고찰, 터널과지하공간, Vol. 16, pp. 437-450.
4. Castro, L.A.M., 1996, Analysis of stress-induced damage initiation around deep openings excavated

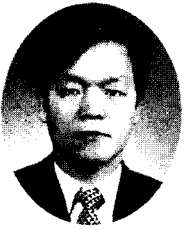
- in a moderately jointed brittle rock mass, Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Canada.
5. Carter, B.J., 1992, Size and stress gradient effects on fracture around cavities, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 25, pp.167-186.
 6. Cheon, D.S., Park, C., Park, C.W., Jeon, S., Park, Y.J. and Kim, J.W., 2006, Brittle failure rock-like material around an opening under polyaxial loading conditions, ARMA/USRMS 06-1063.
 7. Diederichs, M.S., 1999, Instability of hard rock masses: The role of tensile damage and relaxation, Ph.D. Dissertation, University of Waterloo, Canada.
 8. Ewy, R.T. and Cook, N.G.W., 1990, Deformation and fracture around cylindrical openings in rock: Parts I and II, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 27, pp. 387-427.
 9. Herrick, C.G., 1990, A laboratory study of the relation between borehole breakouts and in-situ stress in Indiana limestone, MS thesis, University of Wisconsin-Madison, USA.
 10. Hobbs, D.W., 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. Vol. 3, pp. 101 -127.
 11. Lee, M. and Haimson, B., 1993, Laboratory study of borehole breakouts in Lac du Bonnet granite: a case of extensile failure mechanism, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 30, pp. 1039-1045.
 12. Martin, C.D., 1993, The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings, Ph.D. Dissertation, University of Manitoba, Canada.
 13. Martin, C.D., Martino, J.B., Dzik, E.J., 1994, Comparison of borehole breakouts from laboratory and field test, *Proceedings of Eurock'94 A.A. Balkema, Rotterdam*, pp. 184-190.
 14. Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, pp. 1255-1269.
 15. Read, R.S. and Martin, C.D., 1996, Technical summary of AECL's mine-by experiment phase I: Excavation response, AECL Report AECL-11311, Atomic Energy of Canada Limited.
 16. Song, I. and Haimson, B., 1993, Laboratory study of borehole breakouts in Cordova Cream sandstone: a case of shear failure mechanism, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 30, pp. 1047-1056.

**천 대 성**

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사
Tel: 042-868-3248
E-mail: cds@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

**박 찬**

1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학석사
2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과
공학박사
Tel: 042-868-3245
E-mail: chan@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

**박 철 환**

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3244
E-mail: cwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 책임연구원

**전 석 원**

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템
공학부 부교수