

축소 모형시험과 개별 요소 해석에 의한 원형 공동 주변의 점진적 취성파괴 특성에 관한 연구

배성호^{1)*}, 전석원²⁾, 박의섭³⁾

Characteristics of the Progressive Brittle Failure around Circular Opening by Scaled Model Test and Discrete Element Analysis

Seong-Ho Bae, Seok-Won Jeon and Eui-Seob Park

Abstract Progressive and localized brittle failures around an excavated opening by the overstressed condition can act as a serious obstacle to ensure the stability and the economical efficiency of construction work. In this paper, the characteristics of the brittle failure around a circular opening with stress level was studied by the biaxial compressive test using scaled specimen and by the numerical simulation with PFC^{2D}, one of the discrete element codes. The occurring pattern and shape of the brittle failure around a circular opening monitored during the biaxial loading were well coincided with those of the stress induced failures around the excavated openings observed in the brittle rock masses. The crack development stages with stress level were evaluated by the detailed analysis on the acoustic emission event properties. The microcrack development process around a circular opening was successfully visualized by the particle flow analysis. It indicated that the scaled test had a good feasibility in understanding the mechanism of the brittle failure around an opening with a high reliability.

KeyWords Brittle failure, Scaled model test, Acoustic emission(AE), Crack development stage, Notch shaped failure region

초 록 암반 내 형성된 과도한 초기응력장은 굴착 공동 주변에 점진적이고 국부적인 취성파괴를 유발시킴으로서 시공의 안정성과 경제성을 확보하는데 장애 요인으로 작용할 수 있다. 이 논문에서는 응력 수준 증가에 따른 공동 주변의 취성파괴 거동 특성을 파악하기 위해 축소된 원형 터널 공시체를 이용한 이축압축시험과 입자 결합 모델을 이용하여 개별요소법의 일종인 PFC^{2D} 해석에 의한 연구를 수행하였다. 실내 이축압축시험을 통해 취성파괴의 발생 영역과 형태 면에서 실제 암반 공동 주변에서 발생된 파괴 특성과 유사한 파괴 거동을 모사할 수 있었다. 응력 강도비 증가에 따라 진행된 균열 발전단계를 미소파괴음 특성 변수들에 대한 상세 분석을 통해 평가하였다. PFC^{2D} 해석을 통해 공동 주변에서의 미세 균열 발생과 전파 과정을 성공적으로 가시화하였으며 이를 통해 이축 압축시험 결과의 신뢰성과 시험방법의 적정성을 확인할 수 있었다.

핵심어 취성파괴, 축소 모형시험, 미소파괴음, 균열 발전단계, 노치형 파괴 영역

1. 서 론

굴착된 지하 공동 주변 암반 내 발생하는 취성파괴 현상은 현지 암반 초기응력 조건, 강도 조건 그리고 굴착단면의 형태에 영향을 받으며 특히 응력조건과 암반 강도 조건에 절대적으로 영향을 받게 된다. 동일한 단

면조건에서 변형이나 취성파괴 특성은 초기응력 값 자체의 절대적인 크기보다는 일축압축강도(σ_c)에 초기응력 최대 성분(σ_1)의 비인 응력 강도비(σ_1/σ_c , ratio of the maximum far field stress to UCS)에 직접적으로 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Ortlepp et al., 1972; Hoek and Brown, 1980; Martin et al., 1999). 국내에서도 현장 실측결과 여러 지역의 100 m 이상 심도 영역에서 축압계수가 감소되는 것이 아니라 3.0 이상의 높은 값을 가지는 것으로 보고되고 있다(배성호 외, 2002; 최성용 외, 1999). 암석의 강도 특성도 지역 및 심도에 따라 큰 편차를 나타내고 있

¹⁾ 정회원, (주)지오제니 컨설턴트 상무이사
²⁾ 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수
³⁾ 정회원, 한국지질자원연구원 선임연구원
* 교신저자 : shbae007@geogeny.biz
접수일 : 2005년 7월 8일
심사 완료일 : 2005년 8월 8일

기 때문에 일정 심도 이상의 지하공간에 과잉 수평응력과 암반 강도가 낮은 지반 조건이 형성된 경우 구조물 안정성에 매우 불리한 조건으로 작용할 수 있다. 암반 구조물의 안정성과 시공의 경제성 확보에 있어 초기응력에 대한 제반 정보가 큰 영향을 미침에도 불구하고 지금까지 이에 대한 중요성이 간과되어 왔고 실제 설계나 안정성 검토 단계에서 충분히 고려되지 않은 것이 사실이다(배성호, 2005).

국내에서도 일부 토목현장의 경우 조사 단계에서 초기응력 측정이 수행되지 않았거나 조사된 자료가 설계 과정에 반영되지 않아 실제 굴착 작업 중 과도한 수평응력으로 인해 굴착 공동 주변 암반에 취성파괴가 유발되어 시공 과정에 큰 문제를 발생시킨 것으로 알려져 있다(Fig. 1). 우리나라의 지리적 특성은 전반적으로 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 산악 지형의 고도가 증가하는 양상을 나타낸다. 이러한 지형적 조건하에서 지금까지 남북 방향을 축으로 하는 국토 개발이 완료되어 가고 점차 동서 방향을 축으로 개발이 전환되어감에 따라 철도, 고속도로, 국도와 같은 사회 인프라 시설의 구축과 관련된 산악 지역 내 대심도 영역에서의 대규모 지하공간 건설이 크게 증가할 것으로 예상된다. 이는 과지압 상태(overstressed condition)로 취성파괴의 가능성이 큰 지반 조건에서 시공 작업이 수행되어야 함을 의미한다. 따라서 향후 공동 주변에서 발생하는 잠재적 파괴 특성에 대한 연구가 활발하게 이루어질 것으로 판단된다.

공동 주변의 파괴 거동 연구에는 수치해석적 방법과 모형시험에 의한 방법이 보편적으로 적용되고 있다. 수치해석의 경우 모델 구성이나 해석이 용이한 장점이 있으나 입력변수 선정이나 실제 암반 재료의 표현이 매우 어려운 한계가 있기 때문에 모형시험에 의한 분석이 실제 거동에 가까운 결과를 얻을 수 있는 방법이라고 볼 수 있다. 모형시험은 실제 규모의 실험을 실시하는 방

법과 축소율을 적용한 재료를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. Meglis et al.(1995)은 원형 터널단면을 가지는 대규모 암석 공시체를 이용하여 일축압축, 이축압축 조건과 공동의 굴착에 따른 주변의 점진적 손상 발전의 평가를 시도하였다. 그러나 부적절한 공시체 형상과 가압판과 공시체 면과의 불일치 등으로 인해 비정상적인 파괴 거동이 유도된 문제점을 가진다. Fakhimi et al.(2002)은 원형 단면의 터널을 가지는 암석 공시체에 대한 이축압축시험과 개별요소법에 의한 수치해석을 통해 공동 주변에서의 미세 균열 발전 양상과 파괴면에서의 입자 거동을 분석하였다. 실험 결과 최소 주응력 방향의 공벽에 노치형 파괴면은 형성되었으나 공벽과 가압부의 근접(공시체 폭 : 40 mm, 공동 직경 : 14 mm)으로 공동 주변에서 개시된 취성파괴가 충분히 진전되지 못하고 공시체 내부에 발생한 균열과 손상이 전체 파괴 거동을 지배한 결과를 유도하였다. 이러한 불완전한 파괴 거동과 센서 배열 및 공동 크기의 영향으로 공동 주변의 균열 발전 양상에 대한 정보를 가진 미소파괴 특성 자료는 획득하지 못하였다.

지금까지 국내에서 수행된 모형시험의 경우 대부분 차원 해석(dimension analysis)을 하여 실제 조건과 실내 시험 조건과의 축소율을 산정하고 이를 바탕으로 변형계수, 강도, 포아송비 등 변형 거동과 관련된 변수들의 축소된 값을 가지는 인공 재료(석고, 모래 혼합물)로 모델을 구성하는 방법으로 시험을 수행하여 왔다. 그러나 실제 축소율을 가지는 인공 재료(synthetic material)의 구성은 현실적으로 불가능하며 대부분의 축소 모형 시험을 통한 연구가 공동 주변의 변형 거동 분석에 목적을 두었기 때문에 관련된 변수들 중 변형계수의 축소율을 기준으로 재료를 선정하는 방식을 적용하였다. 그러나 이러한 축소율을 적용한 인공 공시체는 재료 자체가 취성 재료의 성질을 상실하게 된다. 따라서 응력에 의한 공동 주변의 국부적 파괴 특성을 조사하는 데는 부적

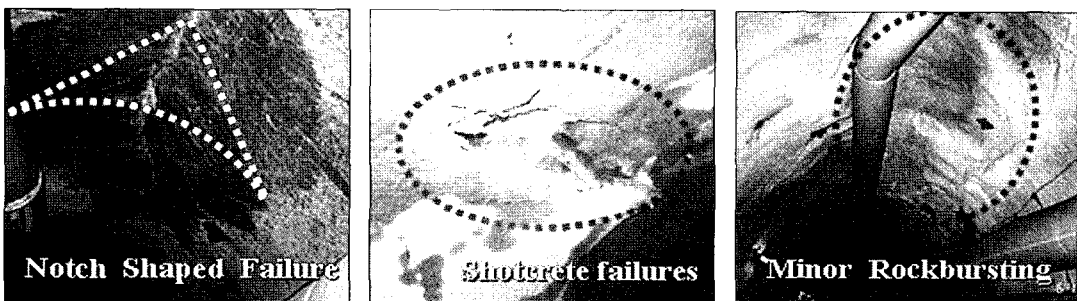


Fig. 1. Stress induced failures around excavated openings in Korea

합하기 때문에 본 연구에서는 암석에 가까운 높은 취성도를 가지는 고강도 콘크리트로 제작한 터널 축소모형 공시체를 사용하여 실내 실험과 분석을 수행하였다.

2. 시험 장치 및 시험 방법

2.1 모형 공시체의 제작 및 역학적 특성

파괴 특성 특히 응력 강도비에 따른 단계적 취성파괴 거동의 모사와 분석이 주 목적인 경우 실제 암반의 파괴 양상과 유사한 타당성 있는 시험 결과를 획득하기 위해서는 실제 암반과 유사한 파괴 관련 물성을 가지는 재료로 공시체를 구성하는 것이 필수적이다. 본 연구에

서는 실제 암석보다는 낮은 일축압축강도를 가지면서 암석에 가까운 1/10~1/13 범위의 높은 취성도를 가지는 고강도 콘크리트를 사용하여 내부에 공동 형상을 가지는 정육면체 공시체를 제작하였다. 공시체는 클수록 외부 조건에 따라 발생하는 물리적 변화량의 측정과 모니터링이 용이하나 제작상의 어려움과 적용되는 하중 조건이 크게 증가하기 때문에 제반 조건을 종합적으로 고려하여 170 x 170 x 170 mm 규격으로 제작하였다. 공시체 내부의 균질도가 낮은 경우 비정상적인 파괴 거동을 나타낼 가능성이 커지므로 재료 균질성 확보를 위해 공시체 제작시 골재는 사용하지 않았고 고강도 시멘트와 모래만을 사용하였다. 단면 크기는 경계부와 거리, 모니터링 센서의 크기와 부착성 등을 고려하여 19.63 cm²의 단면적으로 설계하였다. Fig. 2는 이축압축시험용으로 제작된 원형터널 공시체의 규격과 완성된 후의 모습을 보여준다. 재료의 역학적 물성들을 파악하기 위해 ISRM 기준에 따라 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비 탄성과 속도시험 등을 각 공시체별로 5회 이상 실시하여 평균값을 대표적으로 적용하였는데 본 시험에 사용한 공시체의 일축압축강도(σ_c^*)는 약 31~38 MPa 범위이다.

2.2 이축 압축 시험장치 및 시험방법

시험용 공시체는 프레임 내부에 위치하며 플랫폼(flat jack)은 최소 주응력 가압용으로 사용된다. 또한 압축기로부터 가해지는 하중은 최대 주응력을 모사하며 공시체 상부에 위치하는 강철 플레이트를 통해 전달되도록 설계하였다. 메인 프레임은 공시체의 크기를 고려하여 가로, 세로가 각각 300 mm, 290 mm로 하였으며 작업의 용이성과 안전성을 위해 좌, 우측부와 하부 판이 분리되는 형태로 제작하였다. 좌, 우측 판과 하부 판은 직경 16 mm인 16개의 개별 볼트에 의해 고정되며 공시체의 측 방향(side direction) 변형에 의한 좌, 우 판의 이완 현상을 최소화시키기 위해 가로, 세로 40 mm, 30 mm 규격의 수평 바를 전방부와 후방부에 각각 설치하였다. 높은 하중조건에서 프레임의 강성이 낮은 경우 정확한 하중 전달이 어렵기 때문에 가압 시 높은 강성을 가질 수 있도록 좌, 우측 판은 50 mm, 하부 판은 70 mm 두께의 강철 재질을 사용하였다. 유압에 의해 팽창되는 플랫폼은 구조상 선단 모서리부는 팽창 시 완전한 평면 형상을 이루지 못하기 때문에 공시체와 같은 크기인 경우 선단부에서는 불완전한 하중 전달이 발생된다. 이러한 점을 고려하여 본 시험에서는 가로, 세로 각각 190 mm, 190 mm 규격으로 제작하여 불완전한 하중 전달을 최소로 하도록 설계하였으며 25 MPa

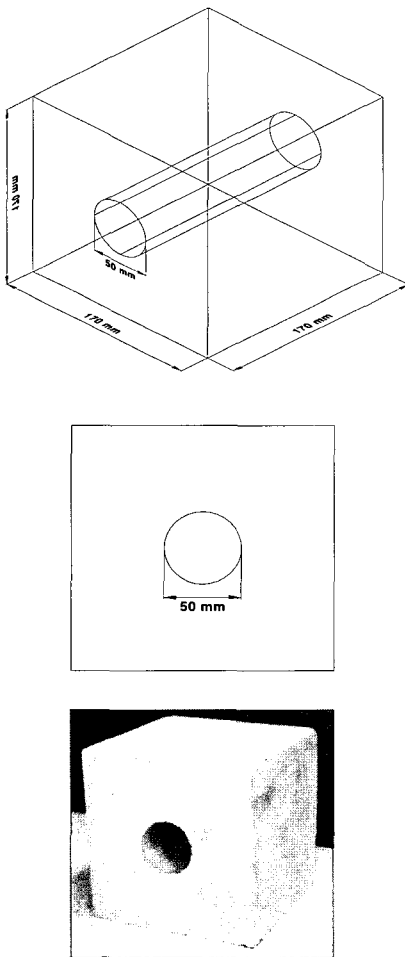


Fig. 2. Isometric and front view of specimen and photo of specimen with opening

이상의 내압에 견딜 수 있도록 제작하였다. Fig. 3은 메인 프레임의 모식도와 제작 완료된 후의 모습을 각각 보여준다.

시험용 압축장치로는 미국 Interlaken사에서 제작된 200톤 하중 용량을 가진 Interlaken 2000 시스템을 사용하였고 가압방법은 로드 셀을 사용하여 500 kgf/min의 일정한 비율로 하중을 전달하였다. 최소 주응력은 1% 이내의 오차 내에서 정밀한 압력 유지가 가능한 서보 유압펌프로부터 플랫 잭에 유압을 전달하고 유지하는 방법으로 모사하였다. 가압에 따라 발생하는 물리량의 변화는 변형률과 미소파괴음(AE) 측정을 통해 모니터링 하였다. 주 모니터링 대상인 AE 특성 변수들에 대한 측정, 변환 및 저장은 미국 Physical Acoustic Corporation(PAC)사의 MISTRAS 2001 시스템을, 압전 센서로는 센서의 반응 주파수 대역이 100~1,000 kHz인 (주) 하기닉스의 모델 AE-SC를 이용하였다. 총 7개의 센서를 사용하였으며 위치는 탄성파의 일종인 AE 신호의 전달 특성을 고려하지 공시체 전, 후면부와 터널 내부 측벽에 분산하여 부착하였다. 정확한 AE 측정을 위해서는 AE 신호의 검출 한계, PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time), HLT(Hit Locking Time) 등 측정 매개변수들을 최적으로 설정해야 한다. 시험에 사용한 공시체 크기와 센서 배열 및 간격 그리고 측정하고자 하는 음원 특성을 고려하여 검출 한계는 38~45 dB 범위 값을 적용하였고 나머지 매개 변수들은 각각 50, 100, 50 μ sec 값을 사용하였다. 신호 샘플링 간격의 경우 측정 시스템은 최대 8 MHz의 샘플링 주파수를 가지나 샘플링 간격이 너무 짧은 경우 기록되는 파일의 용량이 급격히 증가하게 된다. 본 시험

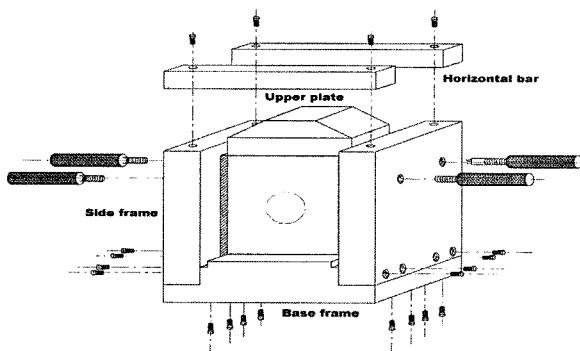
에서는 샘플링 간격 오류로 발생하는 알리아싱(temporal aliasing)에 의한 신호 왜곡(distortion) 현상을 방지하고 적정 파형을 얻을 수 있는 최대 샘플링 간격인 4 MHz 값을 사용하여 기록되는 자료의 크기를 최소화 하였다. 트리거 방식은 동기 트리거(synchronized triggering) 방식을 적용하여 임의의 센서가 신호에 반응하면 나머지 6개도 동시에 측정이 시작되도록 하였다. Fig. 4는 전체 시험 시스템의 모식도, 공시체에 부착된 압전 센서, 최소 수평응력에 해당하는 하중을 모사하기 위해 플랫잭에 유체를 주입시키는 작용을 하는 서보 유압펌프의 모습을 보여준다.

2.3 미소파괴음 분석

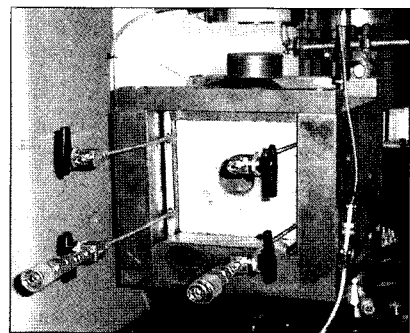
2.3.1 기본 개념 및 매개변수 선정

일반적으로 재료는 최종 파괴강도 수준에서는 가칭 영역의 주파수를 가지는 AE를 발생시키지만 재료의 종류나 발생하는 현상의 규모에 따라 신호의 강도와 주파수 범위에 매우 광범위하며 대부분 가칭 영역을 벗어나는 성분들이 대부분이다. AE 신호는 크게 돌발형 신호(burst AE signal) 연속형 신호(continuous AE signal)로 나눌 수 있다(Pollock, 1975). 연속형 신호는 대부분의 미소파괴음 관련 연구에서는 보통 잡음신호로 취급되므로, 신호 취득시 돌발형 신호 취득 및 분석을 주목적으로 한다.

외부 응력에 따른 균열 성장단계와 같은 파괴 특성 해석에 적용될 수 있는 AE 특성 변수(AE event properties)로는 AE 계수(AE count or AE ring down count), 에너지(AE energy), 최대 진폭(peak amplitude),



(a) Perspective view of main frame and other units



(b) photo of main frame and flat jack unit

Fig. 3. Schematic diagram and photo of main frame unit

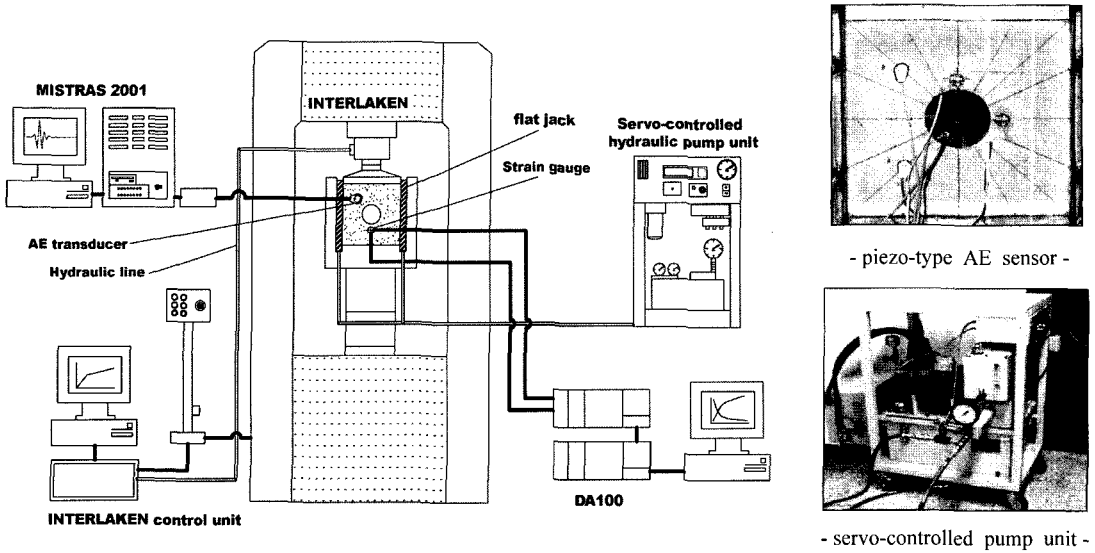


Fig. 4. Schematic diagram and parts of testing and monitoring system

지속시간(duration time), 오름시간(rise time) 등이 일반적으로 많이 사용된다. Fig. 5는 대표적인 돌발형 AE 신호의 파형과 이에 대한 AE 특성 변수들을 도식적으로 나타낸다.

AE 시험에서는 장비 자체에서 발생하는 백색 잡음(white noise)을 최소화시키기 위해 신호 획득이 개시되는 임계 기준을 설정하는데 이를 일반적으로 검출 한계(threshold)라고 한다. 신호가 AE 측정기기의 검출한계를 초과하게 되면 측정 기기에서는 자료획득이 시작되는데, 이와 같이 검출한계를 초과하는 AE 신호 성분을 타격음(hit)이라 한다. AE 신호에서 분석할 수 있는 관련 특성 변수들은 다음과 같다.

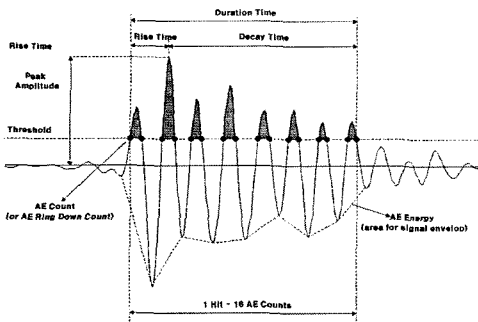


Fig. 5. Graphical definition of AE properties for burst AE signal

AE 계수는 AE 신호가 검출 한계를 넘어선 횟수로 단순히 계수라고도 한다. 일반적으로 큰 타격음들은 작은 타격음들에 비해 검출한계를 넘어서는 횟수가 많으므로, 이러한 AE 계수는 측정된 신호의 강도(intensity)에 대한 평가기준이 된다. AE 에너지는 신호 지속기간 동안의 탄성과 파형 포락선에서 음의 영역(면적)에 해당하는 측정값으로, 지속시간과 진폭에 민감하고, 검출 한계 설정값이나 구동 주파수에는 덜 의존적이기 때문에 AE 계수보다 더 많이 사용된다. 최대 진폭은 AE 신호의 양의 최대값을 말하며, 이는 보통 미세 탄성파를 생성시키는 재료의 음원 강도와 관련된다. 측정은 보통 log 단위(decibels, dB)로 기록되어 큰 신호와 작은 신호 모두 정확한 측정을 할 수 있게 한다. 측정되는 진폭에 영향을 주는 수많은 인자들로 인해 진폭 분석은 동일한 증폭 수준과 동일 형태의 센서를 사용하여 이루어져야 한다. 시험 중에 측정되는 상대 진폭분포는 재료 인자들과는 무관하기 때문에 여러 하중 단계의 AE 신호의 상대적 특성을 규명하는데 유용하다. AE 지속시간은 오름시간과 감쇠시간(decay time)으로 구성되며 AE 신호가 제일 처음 검출 한계를 지나 마지막으로 검출 한계를 지날 때까지의 시간으로, 잡음 필터링 등에 유용하게 쓰인다. 오름시간은 신호가 검출 한계를 초과한 후 최대 진폭 값에 도달하는데 걸리는 시간으로, 음원과 센서 사이의 전파과정에 의해 제어되기 때문에 AE 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하기 위한 목적으로 많이 사용된다.

2.3.2 균열 발전단계 평가 기준

Eberhardt et al.(1998, 1999)과 장수호(2002)는 균열 개시를 포함한 균열 발전단계에 대한 보다 합리적이고 객관적인 기준 설정을 위해 응력 변형률 자료에 접이동 회귀분석(moving point regression) 기법과 일축 및 삼축시험에서의 미소파괴음 분석을 종합적으로 응용한 방법을 통해 균열 닫힘응력(σ_{cc}), 균열 개시응력(σ_{ci}), 2차 균열 개시응력(σ_{ci2}), 균열 결합응력(σ_{cs} , crack coalescence stress)과 균열 손상응력(σ_{cd} , crack damage stress) 수준에 대한 기준을 제시하고자 하였다(Fig. 6). 이 기준들을 간략히 요약하면 다음과 같다.

① 균열 폐쇄(crack closure)

임계 기준은 축방향 강성곡선(axial stiffness curve)이 비선형 거동에서 탄성 거동으로 변이되는 지점임. 하중 증가시 횡방향 강성이 닫히거나 이미 닫힌 균열들의 전단이나 미끄러짐에 의해 급속히 감소하는 시작함.

② 균열 개시(crack initiation)

하중 증가에 따라 재하 초기에 나타나는 배경 수준(background level) 이상으로 AE 특성 변수들이 상승하는 구간으로 AE 계수와 AE 에너지가 처음으로 급속히 상승하기 시작함.

③ 이차 균열(secondary cracking)

이차 균열에 관련된 임계 수준은 균열 개시 이후 하중 증가에 따라 미소 파괴음이 급속히 증가하는 점으로 규정함. 체적 변형률 곡선에서 현저한 변화가 관찰되는 점으로도 정의됨.

④ 균열 결합(crack coalescence)

균열 결합은 축방향 강성 곡선이 선형 거동에서 벗어나기 시작하는 구간으로 정의됨. 체적 강성 곡선상에서 값들의 불규칙한 변화를 통해서 확인되며 AE 발생률이나 특성의 변화도 종종 이 구간과 일치함. AE 사상 누적곡선에서 2차 균열 발생 후 선형적 증가를 나타내는 지점.

⑤ 균열 손상(crack damage)

균열 손상기준은 체적 변형률 곡선에서 양의 값에서 음의 값으로 전이되어 역전되는 점으로 정의됨. AE 사상의 누적곡선에서 2차 선형 증가에서 벗어나 급격한 증가가 개시되는 지점.

4. 원형 공동 주변에서의 파괴 특성

4.1 응력 강도비에 따른 점진적 취성파괴

현장에서 과도한 응력집중에 의해 공동 주변에 발생되는 취성파괴의, 실내 모형시험을 통한, 모사 가능성을 파악하기 본 시험에 앞서 예비시험을 시행하였다. 예비시험과 분석은 서로 다른 강도와 최소 주응력을 가지는

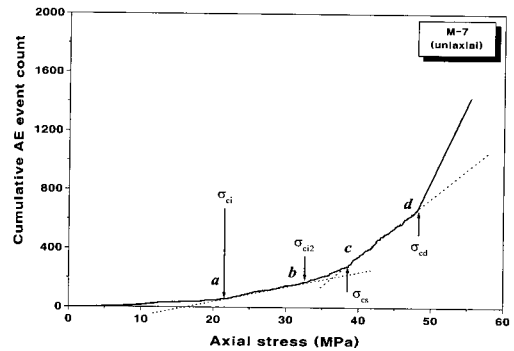


Fig. 6. Determination of damage threshold stage in uniaxial compressive failure process(after Chang, 2002)

조건에서의 파괴 양상들을 분석하여 취성파괴 여부와 동일한 응력 강도비에서의 유발되는 파괴 현상의 재현성과 반복성의 확인에 목적을 두었다. 취성파괴 발생 유무는 실제 지반조건에서 발생하는 노치형 파괴면(notch shaped failure region)의 형성 여부와 Hajiabdolmajid(2001)이 제시한 취성파괴 판단 기준을 적용하였다. 예비시험 결과 동일한 응력 강도비(σ_1/σ_c^*) 조건에서 서로 다른 강도를 가지는 3개의 모형 공시체 모두 최소 주응력 방향의 공벽에 거의 유사한 형태 즉 미세 균열이 발생된 후 이러한 균열들의 연결, 확대에 의해 소규모 스폐링 형태의 국부적 취성파괴가 발생되었다(Fig. 7).

Fig 8은 본 시험에서 얻어진 결과들 중 일부로 응력 강도비 증가에 따른 공벽부에서 관찰된 점진적 취성파괴 양상을 보여준다. 일축압축강도가 약 31 MPa인 모형 공시체를 이용하였으며 심도 200 m의 수직응력에 해당하는 5.50 MPa를 최소 주응력으로 적용한 조건에서 최대 주응력을 그 이상으로 가압하면서 나타나는 공동 주변 파괴 특성을 모니터링하였다. 분석결과 공동 주변에서의 국부적인 파괴와 뚜렷한 미세 균열의 발생이 관찰되었다. 고해상도 카메라에 의한 공벽 모니터링 결과 응력 강도비가 약 0.50~0.60 정도에서 최소 주응력 방향에 해당하는 측벽부에 육안으로 관찰 가능한 미세 균열(visible microcrack)이 형성되었다(Fig. 8.(b)). 0.65의 응력 강도비에서 미세 균열들의 부분적 연결 현상이 관찰되었고 하중이 증가됨에 균열면들의 교차에 의한 박탈면들이 형성되어 일부는 분리되어 떨어져 나오는 소규모 스폐링 현상이 국부적으로 발생하였다 Fig.8.(c)). 0.75~0.80 이상의 응력 강도비에서는 전 구간에 걸쳐 균열들이 연결되어 큰 파괴면들이 형성되는 대규모의 스폐링이 발생되었다 Fig.8.(d)). 일축압축강

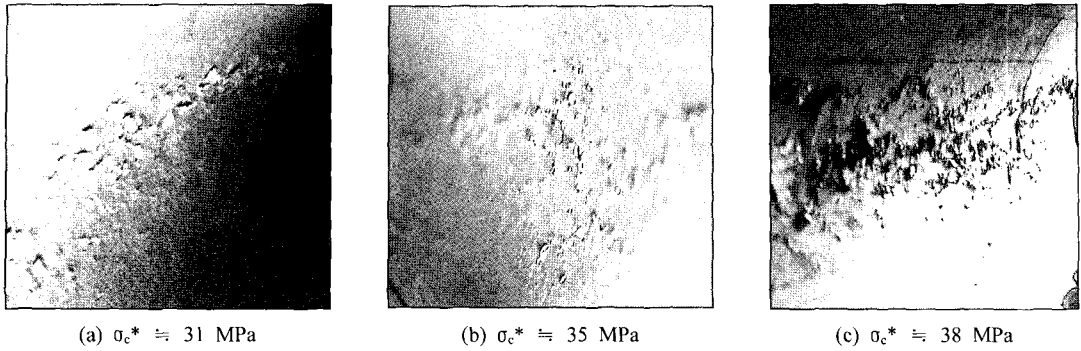


Fig. 7. Close up view of the stress induce spalling around the circular openings at the similar σ_1/σ_c^* level for three test specimens($\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.65$)

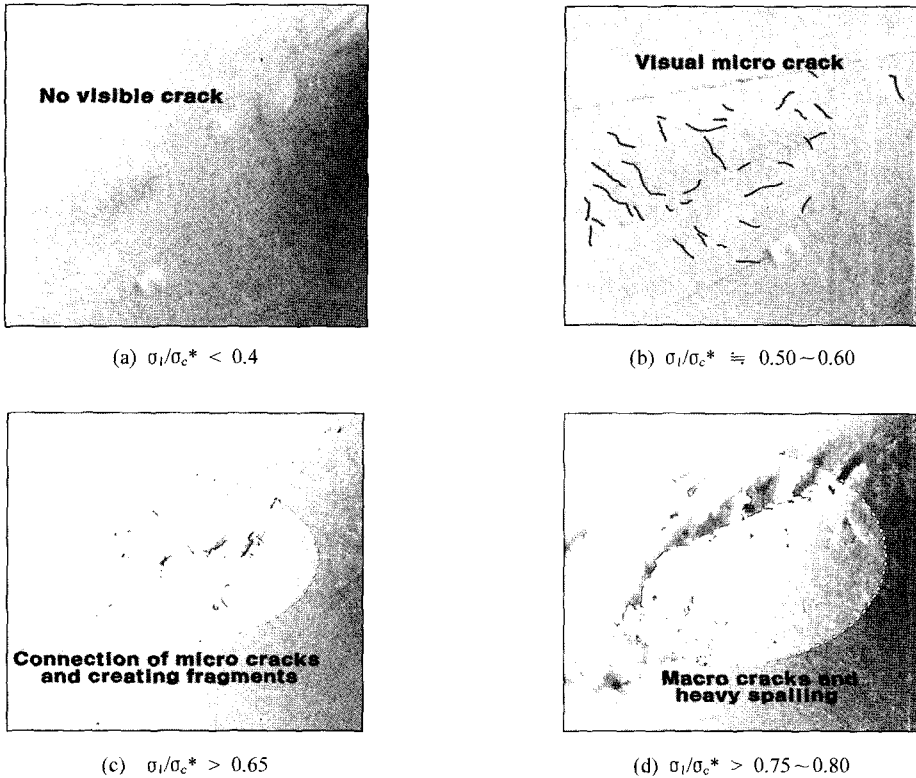


Fig. 8. Progressive brittle failure around a circular opening with $\sigma_1/\sigma_c^*(\sigma_c^* \approx 31 \text{ MPa}, \sigma_3 = 5.50 \text{ MPa})$

도가 다른 모형 공시체에 대한 시험에서도 동일한 응력 강도비 수준에서 모두 유사한 취성파괴 현상들이 관찰되었다.

Fig. 9는 이축압축시험이 종료된 후의 터널단면 주변의 파괴 위치 및 형상 자료들중의 일부를 나타낸다. 도시된 파괴 영역은 시료 내부의 공동 축방향으로 형성된

파괴면들 중 가장 큰 파괴면이 발생된 위치의 단면을 기준으로 산정하였다. 최소 주응력 방향의 양측벽부에 대칭적인 노치 파괴면들이 형성되었으나 파괴 면적에서는 다소 비대칭적인 특성을 나타내는데 이는 시료 자체의 부분적인 불균질성과 가압과정에서 발생하는 기계적 오차에 의한 것으로 판단된다. 모형시험에서 구현

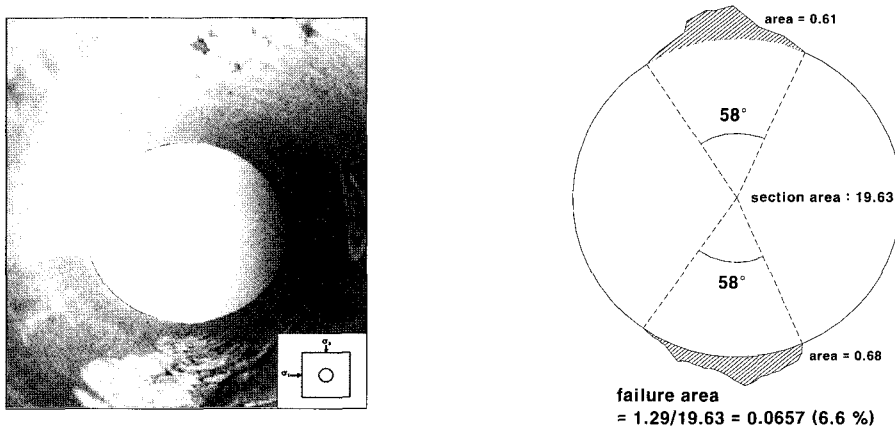


Fig. 9. Occurring location and shape of stress induced brittle failure around a circular opening formed by biaxial compressive test(area unit : cm²)

된 파괴 현상들은, 실제 암반을 대상으로 한 여러 현장의 시공 및 굴착과정에서 발생된 파괴에 대한 모니터링 및 분석결과를 바탕으로 Martin et al.(1999)에 의해 보고 된 결과와 비교해 볼 때, 파괴 발생 위치나 파괴 영역 형상이 매우 유사한 양상을 나타내었다.

이축 방향으로만 하중이 전달되기 때문에 하중 조건과 하중 경로가 실제 지하 암반 조건과 완전히 일치하지는 않으나 공동 주변에 유도된 파괴면 형태와 가압중 발생된 제반 현상들을 근거로 분석해 볼 때 응력 강도비에 따라 공시체 내부 공동 주변에서 응력 집중에 의한 취성파괴 현상이 뚜렷하게 나타나는 것으로 판단되었다. 이러한 결과로부터 대심도 영역이 아니라도 암반의 강도가 낮고 일정 수준 이상의 초기응력이 작용하는 조건에서는 응력에 의해 취성파괴가 유발될 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 사실을 통해 실제 공동 주변 파괴특성을 분석하는데 있어 터널 공시체를 통해 모형시험의 가능성과 공학적 적용성을 검증할 수 있었다.

4.2 미소파괴음 분석에 의한 균열 발전단계 평가

이축압축시험에서 응력 강도비 증가에 따라 유도되는 균열 발전단계는 앞에서 언급한 Eberhardt et al.(1998, 1999)과 Chang et al.(2001)가 제시한 기준에 근거하여 평가하였는데 이들 5개 균열 발전단계(crack development stage) 중 균열 개시 수준은 미소파괴음 측정자료로부터 추정이 용이하지 않아 분석에서 제외하였다. 평가는 미소파괴음 측정에서 얻어진 AE 계수, AE 에너

지, AE hit 및 AE 지속기간 등 관련 개별 특성 변수들과 변수들의 누적곡선(accumulative curve)에 대한 분석 그리고 시험 중 수행된 공벽 주변 매질에서의 파괴 모니터링 결과를 상호 보완적으로 비교 검토하는 방법으로 수행하였다. Fig. 10은 분석 결과들의 일부를 나타내는데 일축압축강도가 33 MPa인 모형 공시체에 대한 이축압축시험에서 측정된 AE hit와 AE 계수의 빈도곡선을 보여준다. 응력 강도비가 약 0.45 부근에서 측정값들의 응력 개시에 해당하는 1차적인 급속한 변화점이 나타났고 0.55 부근에서 2차 균열 개시에 해당하는 2차적인 변화점이 발생되었다. 균열 손상점은 응력 강도비가 약 0.80 수준으로 변화점을 용이하게 추정할 수 있으나 2차 균열 발생단계와 균열 손상단계사이에 해당하는 응력 강도비 구간 중 2개의 지점에서 급속한 변화점들이 존재하기 때문에 어느 값이 응력 결합단계에 해당하는지는 명확하지 않다. Fig. 11은 응력 강도비에 따른 AE hit의 누적곡선들의 변화 특성에 따라 균열 발전 단계를 추정된 결과를 나타낸다. Fig. 10에 비해 변화 특성이 좀 더 명확하게 나타남을 알 수 있다. AE hit 누적곡선과 AE 계수 누적곡선을 통해 2차 균열 개시응력을 제외한 나머지 균열 발전단계들을 추정할 수 있었는데 Fig. 10에서 변화 특성이 불분명했던 균열 결합 응력이 Fig. 11에서는 응력 강도비가 명확하게 0.65 내외 구간의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 AE 변수들은 상호 보완적인 정보들을 가지고 있기 때문에 균열 발전 단계에 대한 상세한 평가는 개별 항목보다는 모든 변수들에 종합적인 분석을 통해서 가능함을 알 수 있었다.

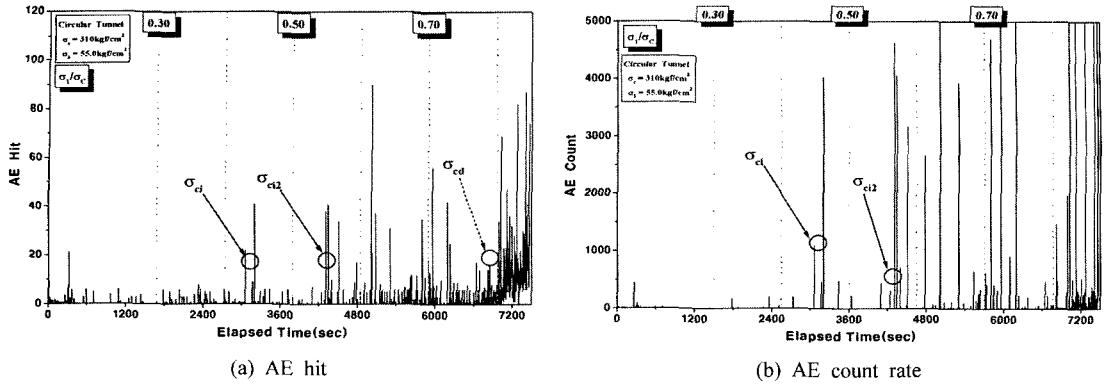


Fig. 10. Plot of AE event properties with σ_1/σ_c^* for circular tunnel specimen($\sigma_c^* \approx 33$ MPa, $\sigma_3 = 5.5$ MPa)

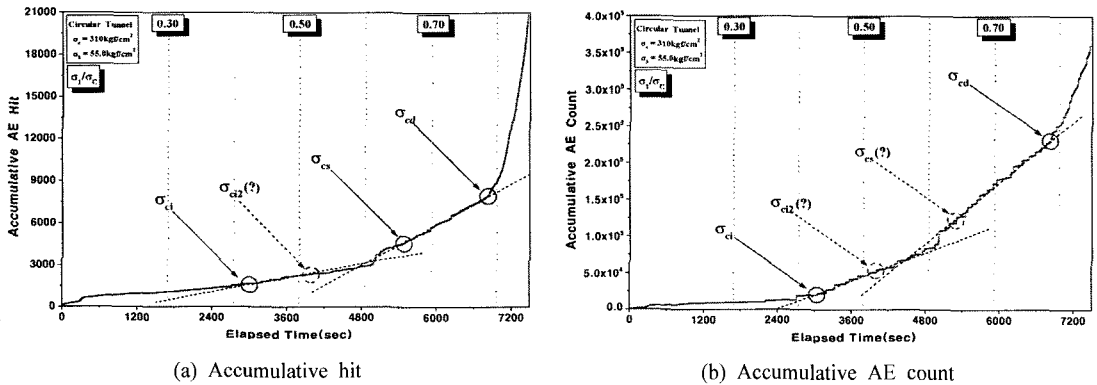


Fig. 11. Crack development stage by accumulative AE hit and AE count with σ_1/σ_c^* for circular tunnel specimen($\sigma_c^* \approx 33$ MPa, $\sigma_3 = 5.5$ MPa)

원형 터널단면 모형에 대한 이축압축시험 결과 응력 강도비가 약 0.40~0.45 수준에서 균열 개시가 발생되었으며 0.50~0.60 범위에서 이차 균열이 유도되는 것으로 분석되었다. 그리고 균열 결합과 균열 손상 현상은 응력 강도비가 각각 0.65~0.70과 0.75~0.80 이상에서 발생하는 것으로 나타났다. 공벽 주변 매질에서의 파괴 모니터링 자료와 비교 결과 균열 개시는 시각적으로 확인되지 않았다. 2차 균열은 공벽에 미세한 균열이 발생하는 수준에 해당하며 균열 결합은 공벽에서 미세 균열의 연결, 확장에 재료의 소규모 분리, 박탈이 일어나는 즉 소규모 스펙링이 발생하는 수준에 해당하는 것으로 분석되었다. 그리고 균열 손상은 대규모 균열과 심한 스펙링 현상이 발생하는 응력 강도비 수준에서 진행되는 것으로 나타났다. 축소 모델에 대한 이축압축시험 과정에서 분석된 공동 주변 취성파괴 특성들을 종합적으로 분석하면 단계별 파괴 특성이 나타난 응력 강도비 수준이 현장 자료로부터 제시된 기준에 비해 상대적

으로 높은 값을 가지는 것으로 평가되었다. 이는 근본적으로 현장 조건과 실내 시험조건과의 차이에 의한 것으로 판단된다. 실제 암반조건인 경우 앞에서 언급한 바와 같이 굴착 전 안정상태에서 굴착에 의해 불균형 상태가 발생되고 이로 인한 응력 경로의 변화와 굴착에 따른 암반 재료의 손상, 암반 거동의 시간 의존성 등의 영향으로 불연속면이 분포하지 않거나 빈도가 매우 낮은 과상의 지반조건이라도 암반의 일축압축강도는 실내 일축압축강도의 40%~50% 이하로 감소된다고 알려져 있다(Martin, 1994, 1995; Myrvang 1991). 이에 비해 본 시험에서는 공동이 있는 상태의 상대적으로 매우 작은 규모의 균질한 공시체를 사용하였고 현장 조건에 비해 매우 빠른 하중속도를 적용하여 실제 현지 암반 조건에서 발생할 수 있는 강도 저하의 요인들을 대부분 배제하였거나 최소화시켰기 때문에 상대적으로 높은 응력 강도비 값들이 얻어진 것으로 분석되었다.

5. 입자 결합모델에 의한 개별 요소 해석

5.1 모델 구성 및 미세 입력변수 산정

모형시험 결과의 신뢰성을 확인하고 시험방법의 적합성을 검증하기 위해, 수치해석을 통한, 응력 강도비 증가에 따른 공동 주변의 파괴 양상 및 특성을 분석하였다. 해석 방법으로 특정 구성방정식 및 파괴기준을 적용하는 기존의 연속체 및 불연속체 해석 프로그램과 달리, 해석재료의 변형 및 파괴거동이 변화하는 미세구조의 함수로 표현되는 PFC^{2D}(Particle Flow Code two dimension)를 적용하였다.

콘크리트 공시체에 대한 실내시험 결과(최대 압축강도, 영률)와 입자결합모델의 역학적 거동이 가장 유사하도록 예비 해석을 통해 입자결합모델의 최적 입력물성값을 산정하였다. 콘크리트 공시체의 역학적 물성은 실내시험을 통해 얻은 자료를 이용하였다. 실제 실내시험 공시체의 크기를 갖는 이차원의 입자결합모델을 구성한 다음 일축압축시험을 모사하였다. 입자 크기는 최소 반경을 0.375 mm로 하였으며 Fig. 12에 도시한 단계에 따라 구성하였다.

모델 구성시 접촉강성도 모델로는 선형모델을 적용하였고 결합모델로는 평행 결합모델(parallel bonding model)을 적용하였다. 선형모델과 평행 결합모델에서 입자의 거동을 나타내는 입력 물성으로는 입자의 법선강성 및 전단강성, 결합의 법선 및 전단강성, 인장 및 전단결합력 그리고 입자의 마찰계수 등이 있다. 이 중 입자와 결합의 강성도와 결합력을 반복적으로 변화시켜 최적 물성값들을 산정하였다. Fig. 13은 예비 해석단계에서 원주형 공시체의 일축압축강도 모사를 위해 구성된 PFC^{2D} 모델의 해석 전, 후 형상을 보여준다.

Fig. 14는 예비 해석에서 얻어진 응력 변형을 곡선과 실제 일축압축시험에서 측정된 응력 변형을 곡선을 비교 도시한 것이다. 예비 해석 결과와 실내 일축압축시험에서 측정된 값이 거의 유사한 변화 특성을 나타냄을 알 수 있다. Table 1은 예비 해석에서 산정된 입자와 평행 입자모델의 최종 미세 물성값들을 나타낸다. Fig. 15는 본 해석에 사용된 터널모양 단면을 포함하는 2차원 PFC^{2D} 모델을 나타내는데 입자의 최소 직경은 예비시험과 같이 0.375 mm, 최대 비율은 1.66의 값을 적용하여 약 35,000개의 입자들로 구성하였다. 최소 주응력으로는 심도 200 m의 수직응력에 해당하는 5.50 MPa를 일정하게 유지시켰으며 최대 주응력은 최종 파괴가 발생하는 수준까지 증가시키는 방법으로 수행하였다.

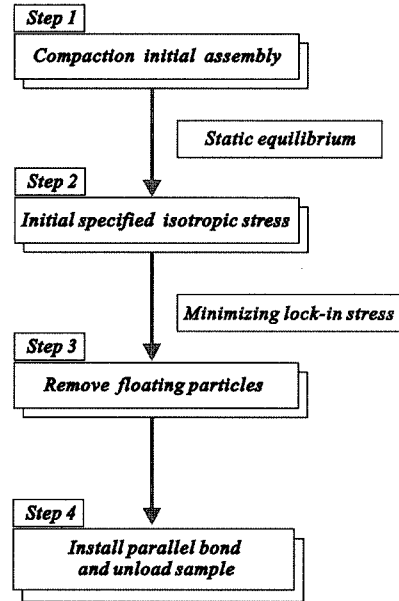


Fig. 12. General procedure of material genesis for PFC analysis

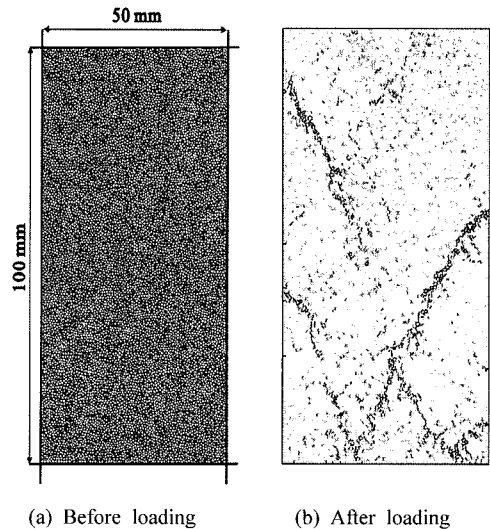


Fig. 13. View of bonded particle model before and after simulation of uniaxial loading with PFC^{2D}

5.2 수치해석 결과 분석

Fig. 16은 원형 터널단면 모델에서 재하 초기단계와 마지막 단계에서 얻어진 주요 해석 결과들 나타낸다. 구성 입자들간에 작용되는 접촉력(contact chain force)

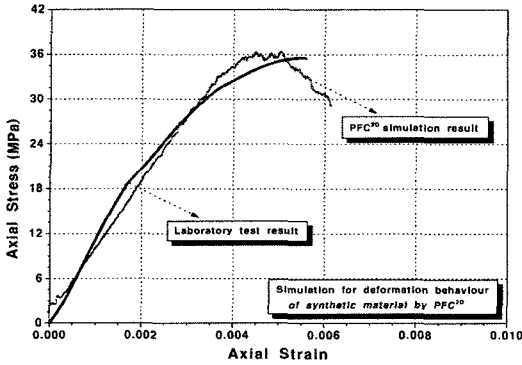


Fig. 14. Simulation result of deformation behaviour of synthetic material by PFC^{2D} and its comparison with laboratory test result

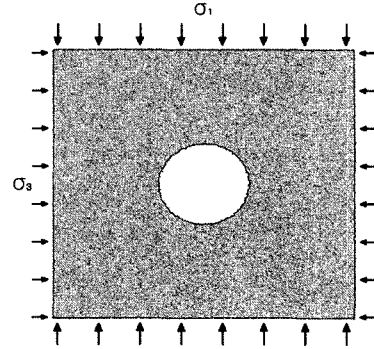


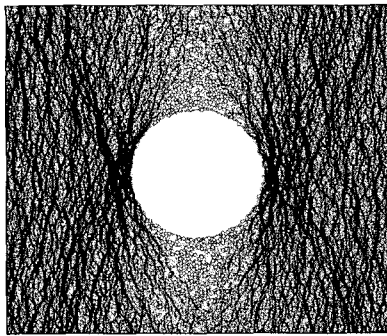
Fig. 15. PFC^{2D} model for simulation of biaxial loading

의 경우 재하 초기단계에서 최대 주응력 방향의 성분들은 변위 발생과 함께 이완된 반면 최소 주응력 방향에 해당하는 양 측벽부 및 인근 내부 영역에는 큰 압축력이 작용되는 것으로 나타났다. 재하 마지막 단계에서는 응력 집중에 의해 발생된 파괴의 영향으로 공동 주변에서는 입자들의 파괴와 함께 압축력이 크게 이완된 반면 그 내부 영역에 가장 큰 압축력이 작용하는 양상을 나타내었다. 발생된 미세 균열의 분포는 좌, 우 측벽부를 포함한 인근 영역에서 가장 높은 빈도를 보이며 다음으로 45° 각도의 주 파괴면을 따라 높은 발생 빈도를 나타내었다. Fig. 17은 응력 강도비 증가에 따른 공동 주변부에서의 균열 발생 및 발전 과정을 보여준다. 응력

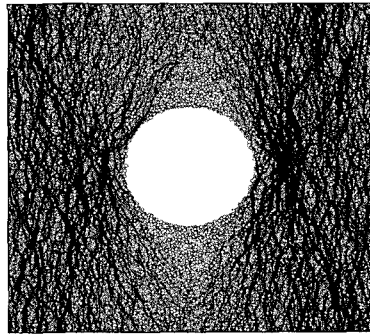
강도비가 0.40 이하인 경우 공벽 인접부와 내부 영역에서 균열들이 불규칙하게 발생되었다. 응력 강도비가 증가됨에 따라 공동 중심부에서 최소 주응력 방향으로 약 50°~60° 각도의 범위에 해당하는 상, 하 공벽부 영역에서 균열이 발생되어 내부로 확장되는 양상을 나타내었다. 내부로 확대 성장된 미세 균열들은 연결, 결합되어 완전한 대칭은 아니지만 최소 주응력 방향으로 노치형의 파괴면을 형성하였다. 이 후 노치형의 파괴면을 형성한 균열들은 40°~45° 각도로 성장, 확대되고 내부의 국부적 균열들과 결합되어 모델 전체의 최종 파괴를 유발하였다. Fig. 18은 실내 모형시험에서 발생된 공동 주변의 최종 파괴양상과 PFC^{2D} 해석에서 결합력이 상실된 파괴된 입자들을 제거한 후의 단면 파괴 영역을 비교하였다. 원형 터널단면 공시체 경우 최소 주응력

Table 1. Micro-properties that define parallel-bond material

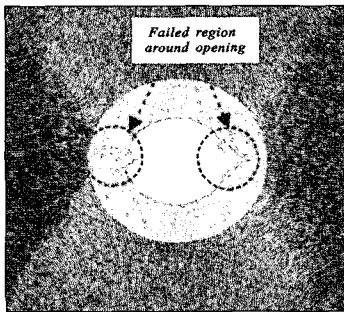
Parameter	Description	Value
ρ	ball density [kg/m ³]	2060
E_c	ball-ball contact modulus [Pa]	5x10 ¹⁰
k_n/k_s	ball stiffness ratio []	1.0
$\bar{\lambda}$	parallel-bond radius multiplier []	1.0
\bar{E}_c	parallel-bond modulus [Pa]	62.5x10 ⁷
$\overline{k_n/k_s}$	parallel-bond stiffness ratio []	1.0
μ	ball friction coefficient []	0.50
$\bar{\sigma}_c$ (mean)	parallel-bond normal strength, mean [Pa]	3x10 ⁷
$\bar{\sigma}_c$ (std.dev.)	parallel-bond normal strength, std. dev. [Pa]	7.5x10 ⁶
$\bar{\tau}_c$ (mean)	parallel-bond shear strength, mean [Pa]	1.5x10 ⁷
$\bar{\tau}_c$ (std. dev.)	parallel-bond shear strength, std. dev. [Pa]	3.75x10 ⁶



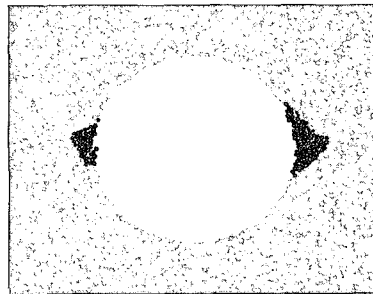
(a) Contact chain force($\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.45$)



(b) Contact chain force($\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.80$)

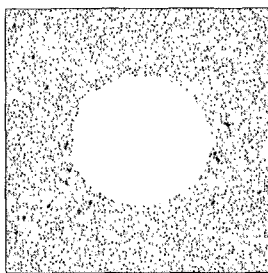


(c) Displacement field distributions at the final loading stage

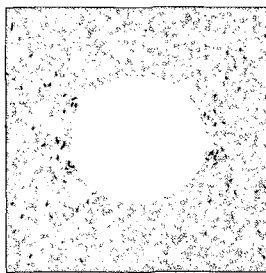


(d) Close up view of failure region

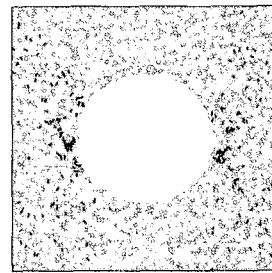
Fig. 16. PFC^{2D} analysis results for circular opening model



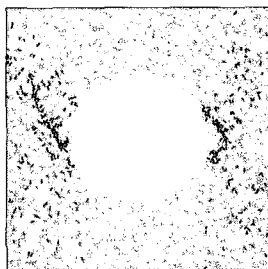
(a) $\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.45$



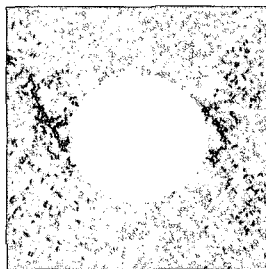
(b) $\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.60$



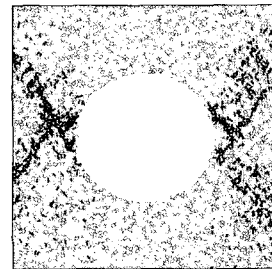
(c) $\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.68$



(d) $\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.72$



(e) $\sigma_1/\sigma_c^* \approx 0.76$



(f) $\sigma_1/\sigma_c^* > 0.80$

Fig. 17. Simulation of crack growth around a circular opening with σ_1/σ_c^* (close up view)

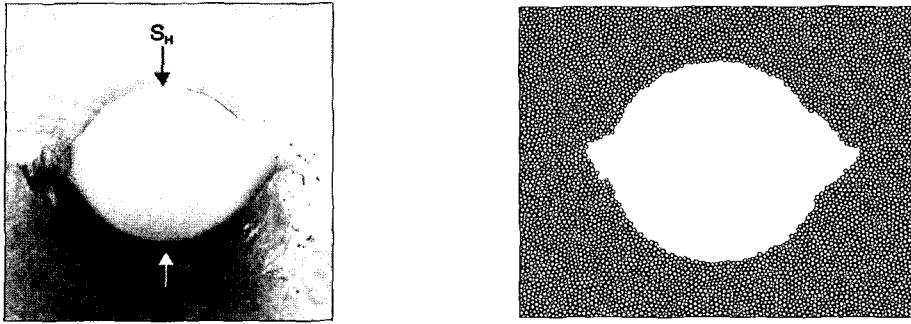


Fig. 18. Comparison of failure region around an opening simulated by PFC^{2D} with by biaxial compressive test

방향의 좌, 우 측벽부에서 60° 이내의 각도로 노치 형태의 취성 파괴면이 형성되었는데 PFC^{2D} 해석 결과 얻어진 파괴 형상과 거의 동일한 양상을 나타내었다. 결과적으로 수치해석을 통해 원형 공동 주변에서의 미세 균열 발생과 전파 과정을 성공적으로 가시화하였고 이를 통해 이축압축시험 결과의 타당성과 신뢰성을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

원형 터널 공시체를 이용한 이축압축시험과 입자 결합모형을 이용한 개별 요소 해석을 통해 수행된 응력 강도비에 따른 공동 주변의 취성파괴 거동 특성에 대한 연구를 통해 얻어진 주요 내용들은 다음과 같다.

- 1) 이축압축시험 결과 최소 주응력 방향의 공벽에서 발생된 미세 균열이 응력 강도비 증가에 따라 연결, 확장되어 소규모의 스폐링 발생된 후 점차 공벽 내부로 진행되어 노치형 파괴면이 형성되었다. 원형 터널단면의 경우 국부적 취성파괴가 발생하는 영역은 최소 주응력 방향의 공벽부에서 60° 이내의 각도에서 발생하는 것으로 분석되었다.
- 2) 하중 조건과 하중 경로가 실제 지하 암반 조건과 완전히 일치하지는 않았으나 공동 주변에 유도된 파괴면의 형태와 발생 영역 그리고 가압 중 발생된 제반 현상들은 실제 현장 조건에서 발생된 취성파괴 거동과 유사한 양상을 나타내었다.
- 3) 미소파괴음 특성자료에 대한 상세 분석을 통해 응력 강도비 증가에 따라 점진적으로 진행되는 균열 발전단계에 대한 정량적 평가가 가능하였다. 균열 발전단계에 대한 평가 결과 단계별 파괴 특성 분석에서 얻어진 응력 강도비 수준이 현장 자료로부터

터 제시된 기준에 비해 상대적으로 높은 값을 가지는 것으로 조사되었다. 이는 근본적으로 현장 조건과 실내 시험조건과의 차이에 의한 것으로 판단된다. 실제 암반조건인 경우 응력 경로의 변화와 굴착에 따른 암반 재료의 손상, 암반 거동의 시간 의존성 등의 영향으로 불연속면이 분포하지 않거나 빈도가 매우 낮은 과상의 지반조건이라도 암반의 압축강도는 실내 일축압축강도의 40%~50% 이하로 감소된다고 알려져 있다. 이에 비해 본 시험에서는 공동이 있는 상태의 상대적으로 매우 작은 규모의 균질한 공시체를 사용하였고 현장 조건에 비해 매우 빠른 하중속도를 적용하여 실제 현지 암반 조건에서 발생할 수 있는 강도 저하의 요인들을 대부분 배제하였거나 최소화시켰기 때문인 것으로 판단된다.

- 4) 입자 결합모형에 의한 개별 요소 해석을 통해 이축 압축시험 결과와 거의 동일한 파괴 거동의 모사가 가능하였다. 응력 강도비 증가에 따른 개별 구성 입자들의 미세 파괴 현상의 추적을 통해 원형 공동 주변에서의 미세 균열 발생과 균열의 발전, 전파 과정을 성공적으로 가시화하였고 이를 통해 이축압축시험 결과의 신뢰성과 시험방법의 적정성을 확인할 수 있었다.
- 5) 향후 시험장치의 규모와 가압 용량이 증대되고 수치해석 시 구성 입자 크기의 제약조건이 많이 완화된다면 실내시험과 수치해석을 통해 공동 주변의 점진적 취성파괴 거동에 대한 보다 상세하고 정밀한 공학적 분석이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배성호, 전석원, 최용근, 김학수, 2002, 수압파쇄시험에

- 의한 산악지역에서의 현지 암반 초기응력 측정 및 분포 특성 연구, 한국터널공학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 57~70.
2. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 3. 장수호, 2002 응력수준에 따른 암석의 손상 특성과 심부 터널 주변 암반 손상영역의 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 4. 최성용, 신희순, 박찬, 신중호, 배정식, 이형원, 박종인, 전한석, 1999, 유류비축기지 설계를 위한 대심도 경사공에서의 수압파쇄 초기응력 해석, 한국지반공학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 185~205.
 5. Chang, S.H., Seto, M. and Lee, C.I., 2001, Damage and fracture characteristics of Kimachi sandstone in uniaxial compression, Geosystem Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 18~26.
 6. Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. and Read, R.S., 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, Can. Geotech. J., Vol. 35, pp. 222~233.
 7. Eberhardt, E., Stimpson, B. and Stead, D., 1999, Qualifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression, Int. J. Rock Mecha. Min. Sci. Vol. 36, No. 3, pp. 361~380.
 8. 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 & Mining Sciences, Vol. 39, pp. 507~515.
 9. Hajiabdomajid, V., 2001, Mobilization of strength in brittle failure of rock, Doctorial Thesis, Queen's university, Canada.
 10. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), Underground Excavation in Rock, The institute of Mining & Metallurgy, London, pp. 183~220.
 11. Martin, C.D., 1994, The strength of Massive Lac du Granite around Underground Openings, Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Canada.
 12. Martin, C.D., 1995, Brittle rock strength and failure: Laboratory and in situ, Proceedings of the 8th ISRM Congress on Rock Mechanics, pp. 1033~1040.
 13. Martin, C.D., Kaiser, P. K. and McCreath, D. R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, pp. 136~151.
 14. Meglis, I.L., Chow, T.M. and Young, R.P., 1995, Progressive microcrack development in test on Lac du Bonnet granite - I. Acoustic emission source location and velocity measurements, Int. J. Rock. Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, No. 8, pp. 741~750.
 15. Myrjang, A.M., 1991, Estimation of in situ compressive strength of rocks from in situ stress measurements in highly stressed rock structures, Proceedings of the 7th ISRM Congress on Rock Mechanics, pp. 573~575.
 16. Ortlepp, W.D., O'Ferral, R.C., and Wilson, J.W., 1972, Support methods in tunnels, Association of Mine Manager of South Africa: Paper & Discussion, pp. 167~195.
 17. Pollock, A.A., 1975, Metals and Rocks : AE Physics and Technology in common and in contrast, Proceeding of 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania University, Trans Tech Publication, pp. 383~404.

배 성 호



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스
템공학부 공학박사
Tel: 02-3472-2261
E-mail: shbae007@geogeny.biz
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 상무이사

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@snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
부교수

박 의 섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 선임연구원