

동적 간접인장하중에서 암석의 파괴과정에 관한 연구

조상호(전북대학교)

나카무라 유이치(일본 야즈시로 공업고등전문학교)

양형식(전남대학교)

가네코 카츠히코 (일본 북해도대학)

1. 서론

최근 광물자원의 가격상승과 고갈의 문제로 유용광물회수를 위한 광물처리시스템의 고효율화가 이슈가 되고 있다. 특히 충격, 고전압방전, 미소폭약, 전자 빔 등을 이용한 암석광물의 분쇄방법 들이 개발되고 있다. 특히 제트밀과 같은 고속 파쇄기의 경우에는 고속 운동하는 입자를 충돌시켜 분쇄시키는데, 여기서 충돌된 입자는 내부에 발생된 응력파의 영향과 고속으로 발생하는 변형에 의하여 파쇄가 발생하게 된다. 이러한 파괴현상은 동적 응력장에서 고속으로 발생하는 변형에 따른 복잡한 압축·인장의 복합파괴가 발생하게 된다¹⁾. 앞에서 소개한 동적인 파괴현상에 미치는 영향인자들을 규명하는 것은 암석발파, 광물처리, 내진설계, 내충격 설계 등에 중요하지만, 이러한 동적 파괴현상은 극히 고속이고 복잡한 현상으로 실험에서 얻어지는 정보가 한정되어있어 최근까지 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 예를 들면, 암석의 동적강도는 변형률 속도 또는 응력속도에 의존하여 변형률 속도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 보이며, 일반적으로 동적강도는 정적강도의 2배 이상으로 알려져 있다²⁻³⁾. 특히 동적 인장강도의 변형률 속도 의존성 및 영향인자에 관한 연구는 미흡한 수준이다. 본 연구에서는 시험편 내에 압축과 인장이 동시에 발생하는 인장시험법인 압열인장시험을 적용하였다. 시험편에 고속인 압축하중을 가하기 위하여 소형 고속 재하장치⁴⁾를 개조, 적용하였다. 암석의 동적 변형 및 파괴특성을 파악하기 위하여 고속디지털 비디오카메라, 충격 로드 셀을 이용하여 파괴과정을 관찰, 분석하였다. 적용한 실험법의 유효성을 판단하기 위하여 동적 파괴과정 해석법¹⁾을 적용하여 암석시료의 파괴과정을 모사하였다.

2. 암석의 동적 압열인장시험(간접인장시험)

압열인장시험용 암석시료에 하중을 가하기 위하여 나카무라(2000)가 고안한 뇌관 구동 고속 재하장치⁴⁾를 개조하여 적용하였다.(그림 1). 이 장치는 수중 뇌관의 기폭으로 발생된 수중 충격압이 암석시료의 상부에 위치한 피스톤을 가압하여 작동하게 된다. 동적 압열인장 시험에서 발생하는 암석시료의 파괴거동을 관찰하기 위해서 고속비디오카메라(13500

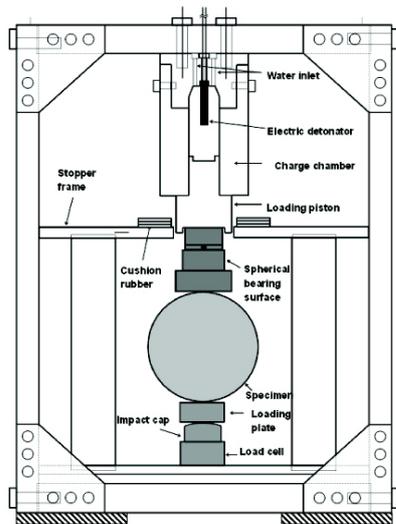


그림 1. 전기뇌관 구동 고속재하장치

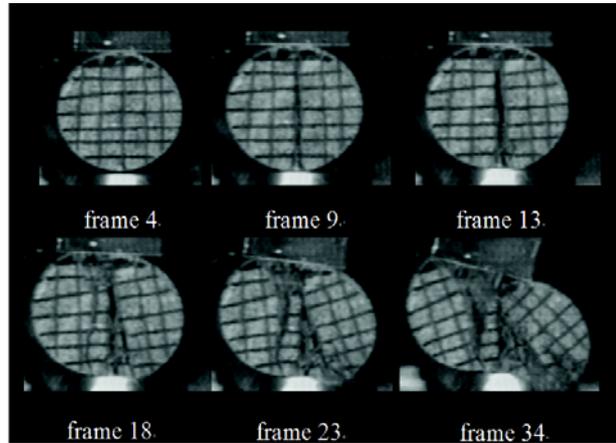


그림 2. 사암의 동적 간접인장 실험의 고속촬영결과 (프레임 간격은 74s)

frames/s)을 사용하였다. 그림 2는 뇌관의 기폭 후 사암 시험편이 파괴되는 과정을 보여주고 있다. frame 9에서 축 방향으로 발생한 균열은 상하부 가압판과 연결되고 있을 수 있다. 그림 3은 시료의 하부에 설치한 충격 로드 셀을 이용하여 계측한 하중이력곡선을 보여주고 있다. 그림 내에 표시한 화살표는 그림 2의 frame 9의 화상에 해당되는데, 이것은 시료가 최대하중을 받는 시점에서 균열의 개구량은 고속카메라의 분해능 이하 임을 보여주고 있다. 본 연구에서는 하중이력곡선에 나타내는 최대 하중값을 이용하여 압열인장강도를 평가하여 표 1에 나타내었다. 여기서 동적압열강도는 정적압열인장강도의 평균치 보다 2.9-3.3배 높게 평가되었다.

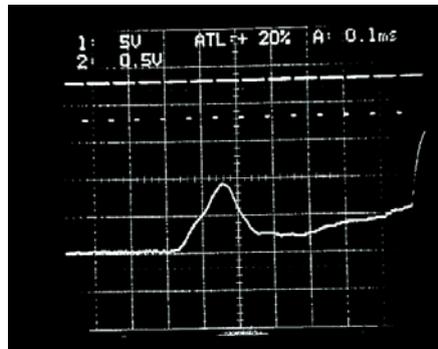


그림 3 사암시료의 하중이력곡선(시간 축: 100 μs/div)

표 1. 기마치 사암의 동적 압열인장시험 결과

No. of Sample	SS1	SS2
Rise time up to the peak force (μs)	126	150
Peak force (kN)	17.89	15.79
Static tensile strength, S_s (MPa)*		2.79
Dynamic tensile strength, S_d (MPa)	9.11	8.04
Load-plate moving speed (m/s)**	4.19	4.41

3. 시험시료의 마이크로 포커스 X선 CT 관찰

동적 압열인장시험 전후로 암석시료의 내부를 비파괴 관찰하기 위하여 고분해능 X선 단층촬영시스템(TOSCANER 30900 μ hd, 북해도대학)을 이용하였다5). 그림 4(a)은 동적 압열인장시험 후에 분산된 암석시료의 파편을 회수하고 재결합시켜 관찰한 결과로서, 150장의 스캔단면도를 3차원으로 재구성한 시료를 보여주고 있다. 그림 내 화살표는 가압방향을 보여주고 있으며, 가압판 접촉부근은 썩기형태로 파분쇄되었고, 중앙부의 인장균열과 연결되어 있다. 그림 4(b)는 z축의 15mm 높이에 해당되는 xy단면도를 보여주고 있다. 단면도를 살펴보면 시료 내 주요인장균열과 연결된 분기균열들이 보이고 있는데 이것은 동적 압열인장시험에서 발생하는 암석시료의 인장균열은 미소균열의 발생, 연결 및 성장에 의해서 발생된 것으로 유추할 수 있다.

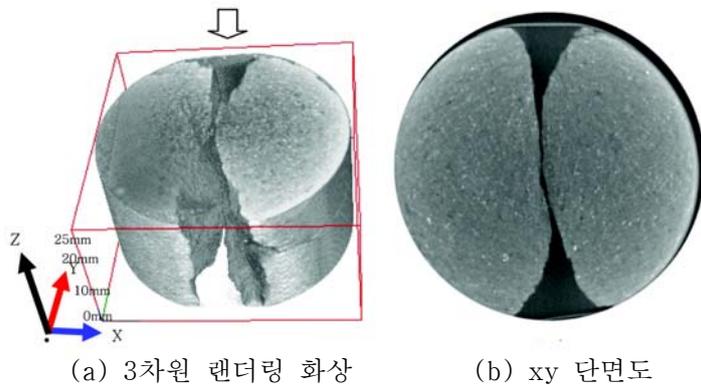


그림 4 사암 시료의 마이크로 포커스 X선 단층촬영 화상

4. 동적 압열인장시험에서 암석시료의 동적 파괴과정

동적 압열인장시험에서 암석의 파괴과정을 수치적으로 모사하기 위해서는 시험편의 기하형상 및 가압면의 동적 강제변위를 고려할 필요가 있는데, 본 연구에서는 동적 파괴과정 해석법1)에 변위가속도 경계조건을 새롭게 도입하여 실측된 하중제어곡선에 맞추어 해석모델의 상단경계의 변위를 발생시켰다(그림 5참조). 해석모델에 적용한 물성 값은 표2와 같으며, 실험에서의 시험편의 설치방법을 고려하여 가압면을 제외한 모든 경계는 자유면으로 가정하였다. 그림 6은 해석모델의 상단부 변위경계에 적용된 변위이력곡선이다. 반면에 해석모델 하단부의 변위는 고정시켜 시험조건과 맞추었다.

표 2 해석모델의 물성치

Parameter	Value
P-wave velocity (m/s)	3700
Density (kg/m^3)	2170
Elastic modulus (GPa)	25.7
Poisson's ratio	0.25
Mean compressive strength (MPa)	50.0
Mean tensile strength (MPa)	5.0
Coefficient of uniformity	5
Fracture energy (Pa·m)	300
Applied displacement velocity v_d (m/s)	3,5 and 7

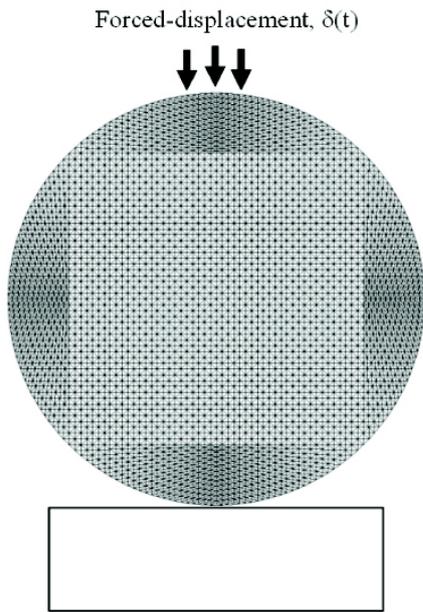


그림 5 해석모델의 경계조건 및 유한요소 해석망

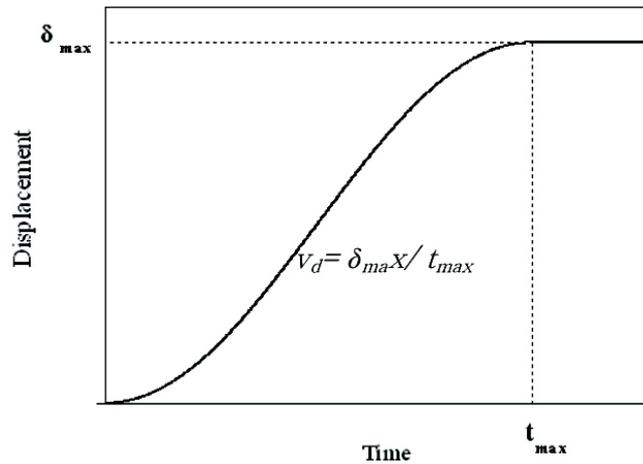


그림 6. 해석모델 상단경계에 적용한 변위이력곡선

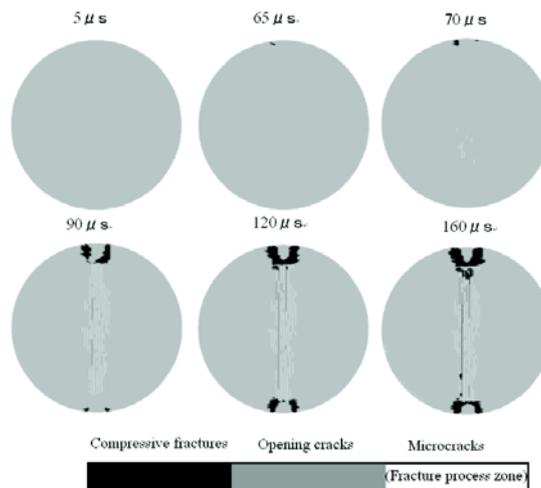


그림 7. 압축파괴와 인장균열의 전과양상

그림 7에 동적 압열인장시험의 해석결과로서 압축파괴와 인장균열의 발생, 진전과정을 보여주고 있다. 각각의 시료모델 상단의 수치는 강제변위를 작용시킨 시점부터 경과된 경과시간을 나타내며, 시료 내 흑색은 압축파괴, 회색 선은 개구 균열, 백색선은 파괴프로세스 영역에 해당되는 미세균열을 표시하고 있다. 압축파괴는 강제변위를 시킨 후 65 μ s에서 상단 경계에 나타나기 시작하여 5 μ s 후에 약간 증가하는 양상을 보이고 있다. 이때 해석모델의 중앙부에 다수의 짧은 미세인장균열(백색선)이 보이기 시작하여 경과시간과 함께 상하부로 연결, 성장하는 파괴과정을 보이고 있다. 최종적으로 경과시간 160 μ s에서는 개구 균열(회색 선)과 상하단의 압축파괴영역이 연결되어 파괴과정이 종료되었다. 앞에서 설명한 해설결과로부터 동적 압열인장시험에서 발생하는 암석시료의 파괴과정을 해석할 수 있다. 추가로,

동적응력장 해석결과로부터 동적 압열인장 하중하에서 시료의 수직선상 중앙부 응력상태는 정적실험과 비슷한 응력상태를 보여주었으나, 가압면 주위에 해당되는 시료의 상하부 응력 상태는 안정되는데 까지 30 μ s 이상 소요되는 것으로 나타났다. 해석결과를 종합해 볼 때 본 연구에서 적용한 동적 압열인장시험법은 암석재료의 동적인장강도를 평가하는데 유효한 방법으로 판단된다.

5. 결론

충격력을 이용한 암석광물의 파분쇄와 관련된 파괴과정을 분석, 해명하기 위하여 인장시험법 중의 하나인 압열인장시험을 적용하였다. 시험편에 고속인 압축하중을 가하기 위하여 소형 고속재하장치(4)를 개조, 적용하였다. 암석의 동적변형 및 파괴특성을 파악하기 위하여 고속디지털 비디오카메라, 충격 로드셀을 이용하여 파괴과정을 관찰, 분석하였다. 실험결과로서 기마치 사암의 동적 압열인장강도는 정적 압열인장강도 평균치의 2.9-3.3배였다. 시험 시료의 마이크로 포커스 X선 CT 관찰 결과, 동적 압열인장시험에 의한 암석시료의 인장균열은 미소균열의 발생, 연결 및 성장에 의해서 발생된 것으로 판단된다. 끝으로 동적 파괴과정 해석 결과, 동적 압열인장시험의 암석시료 파괴과정은 압축파괴, 미시인장균열의 발생 및 연결, 성장, 압축영역과의 연결, 시료의 붕괴로 설명하고 있다.

참고문헌

1. Cho, S.H., Y. Ogata and K. Kaneko, 2003, Strain rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40: 763-777
2. Grady, D.E. and M.E. Kipp, 1980, Continuum modeling of explosive fracture in oil shale, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 17:147-157
3. Gomez J.T, A. Shukul and A. Sharma, 2001, Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 36: 37-49 (Otani, J. and Obara, Y.(eds), A. A. Balkema, Tokyo, Japan pp.3-12, 2004)
4. Yuichi N., K. Yasunori, M. Yasuki and Y. Kiritani, 2000, A new high-speed loading apparatus driven by explosive for dynamic fracture experiments of rock-like materials, *Kayaku* 61.6: 273-280
5. Cho, S.H., S. Kubota, Y. Ogata, M. Yokota and K. Kaneko, 2005, Microscopic visualization of a granite rock to dynamic tensile loading by using a micro X-ray CT system, *Sci. Tech. Energetic Materials* 66: 334-339