

스플릿 홉킨슨 바(SHPB)시험에서의 암석 파괴 메카니즘

조상호¹⁾ · K. Kaneko²⁾ · 양형식³⁾

1. 서 론

암석이나 콘크리트와 같은 취성 물질의 동적강도나 균열은 보통 변형률 의존성을 보인다. Kosky[1]에 의해 개발된 스플릿 홉킨슨 바(SHPB) 시험은 재료의 동적 강도나 10^3 /s에 달하는 변형률 속도 하의 응답을 조사하는 데 널리 적용되고 있다. 1차원 응력과 이론에 근거하여 동적 변형률과 변형률 속도를 계산할 수 있다[2]. 이상적인 동적 시험에 대하여, 샘플은 동적 응력 평형상태여야 하고 최종 파괴에 도달하기 전에는 일정한 변형률로 변형되어야 한다.

이 연구는 파형 형성 장치를 이용하여 동적 응력파의 평형상태를 유지하고 일정한 변형률 속도로 하중이 가해지도록 하였다. 또한 동 압축하의 파괴 메카니즘에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

그림 1에 파형 성형 장치를 부착한 SHPB 시험법을 제안하고 그 흐름도를 보였다. SHPB 시험은 충격(타격) 바와 파형 성형장치, 입사 바, 그리고 전달 바로 구성되어 있다. 암석 시편은 입사 바와 전달 바 사이에 위치한다. 충격 바를 작동시키는 데는 가스 충을 이용한다. 입사 파의 모양은 가스 충의 압력과 충격 바의 길이 그리고 파형 성형장치의 규격에 따라 좌우된다. 입사 파 ϵ_i 과 반사 파 ϵ_R , 그리고 투과 파 ϵ_T 를 계측하기 위해 입사 바와 전달 바에 변형률 게이지를 부착하였다. 응력 $\sigma(t)$, 변형률 속도 $\dot{\epsilon}(t)$ 와 변형률 $\epsilon(t)$ 는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t)$$

1) 토론토대학교
2) 북해도대학
3) 전남대학교

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L} \varepsilon_R(t)$$

여기서 A는 시편의 단면적, L은 시편의 길이, A₀는 바의 단면적, E₀는 바의 영률, c₀는 1차원 응력파의 속도이다. 이 식들은 시편이 균질하게 변형되고 시편 내에서는 동적 응력이 평형상태인 것으로 간주한다. 직경 19 mm, 충격 바와 입사 바의 길이는 1800 mm이고 전달 바의 길이는 1600 mm였으며 모든 바의 직경은 19 mm였다. 충격 속도는 6~11 m/s로 하였으며 이 때 얻어진 변형률 속도는 100~640 /s 였다.

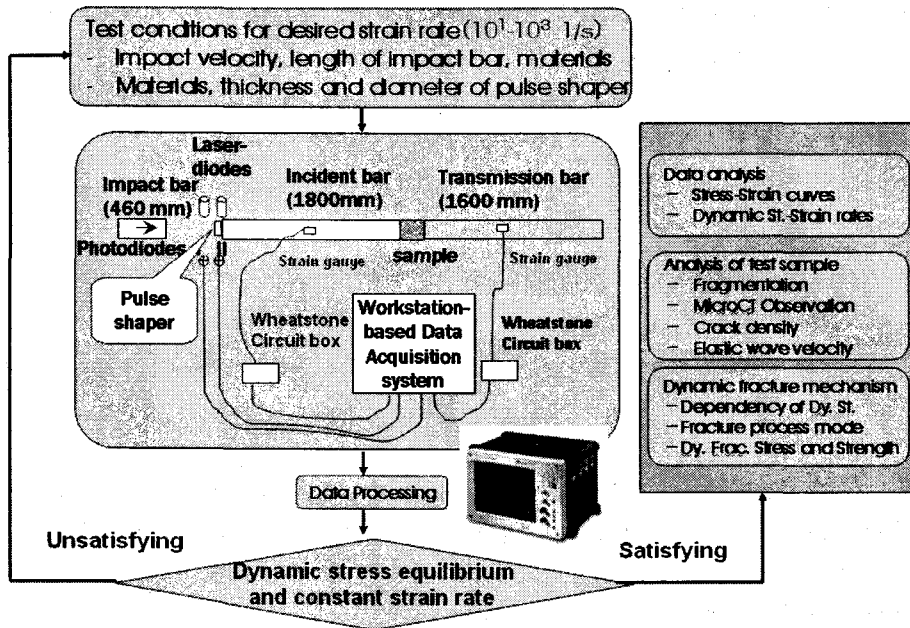


그림 1. 파형 성형 장치를 부착한 스플릿 홉킨슨 바(PSC SHPB) 시험법

2.2 변형 이력의 계측 및 분석

입사 바와 전달 바의 중심에 부착한 변형률 게이지는 변형률 이력을 모니터 하는데 사용된다. 실험에는 직경 9 mm, 길이 19 mm의 화강암 시편이 사용되었다.

그림 2는 재래식 SHPB 시험에서 얻어진 이력 곡선을 나타낸다. 입사 바에서 구한 변형률 곡선은 분산효과와 함께 고주파의 진동을 보여주므로 파형 성형 기술이 필요함을 알 수 있다[3].

그림 3은 충격 파의 속도가 6~11 m/s일 때 파형 성형 장치를 적용한 경우의 변형률 곡선이다. 충격 파의 속도가 줄어드는 데 따라 변형률 최고치도 감소함을 볼 수 있다. 그림에 화강암 시편에서 구한 결과들을 요약하였다.

시편 내의 동적 응력 평형을 확인하기 위하여 충격 바와 시편 사이 경계면의 응력과 시편과 전달 바 사이 경계면의 응력을 비교하였다. 그림 4는 충격 바와 TC4 시편의 경계면과, 시편과 전달 바의 경계면의 응력을 각각 보인 것이다. 두 경계 응력은 대단히 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 이는 시편 내의 동적 응력이 평형을 이루고 있음을 나타낸다.

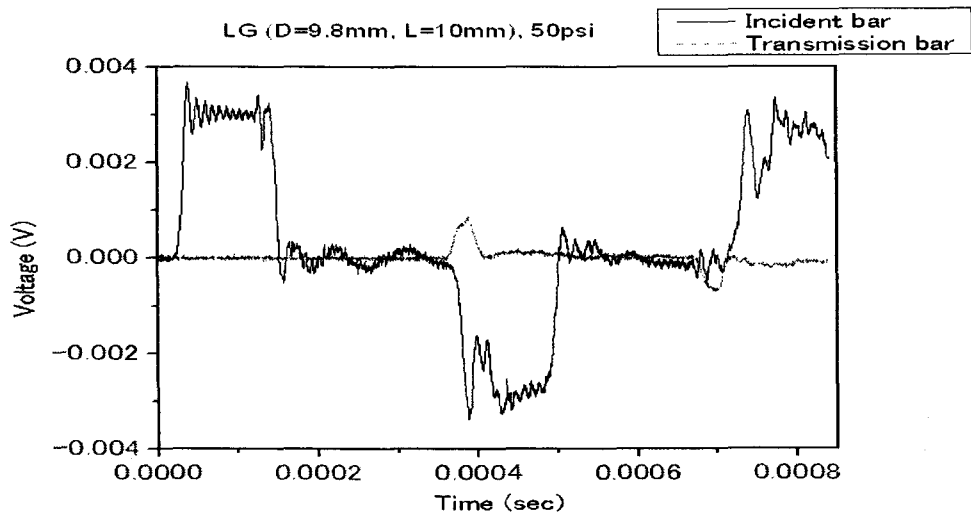


그림 2. 변형률 이력 곡선 (시편직경=9mm, 파형 성형 미적용)

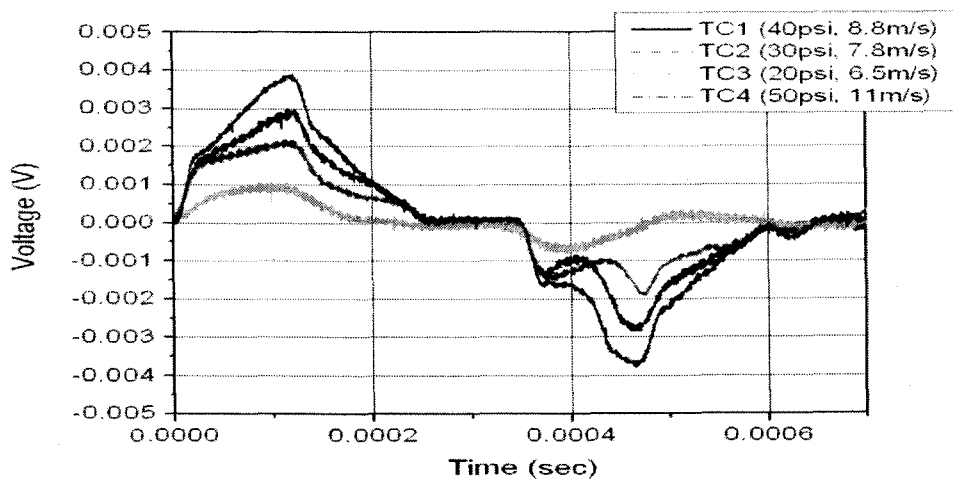


그림 3. 변형률 이력 곡선 (시편직경=9mm, 구리 파형 성형 장치 적용)

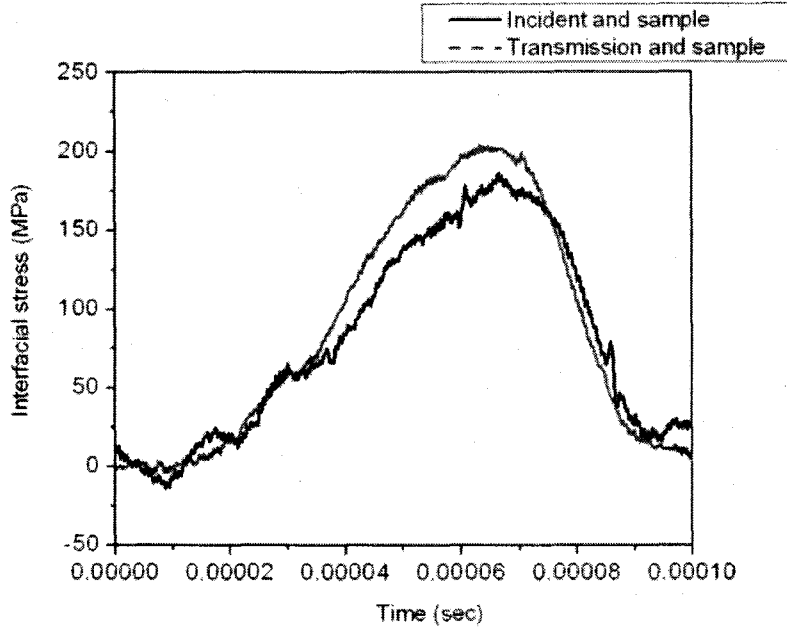


그림 4. 경계의 응력과 곡선 (구리 파형 성형 장치 적용)

3. X선 CT를 이용한 시편의 관찰과 검토

그림 5는 화강암 시편 TC4의 내부 파괴 상태를 나타낸다. 초기 가압단계에서는 원주형 시편의 가장자리 근처에서 축방향에 일치하는 스폴이 발생한다(그림 5(a)). 이 스폴은 점차 시편의 양쪽 면을 밀면으로 하는 원추형의 파쇄면을 형성하며 시편의 바깥쪽 표면에는 손가락 모양의 파편이 형성된다(그림 5(c)와 5(e)) 중간 하중 단계에서는 원추와 손가락 모양의 파편들 경계를 따라 빠른 속도로 전단 거동이 일어난다. 이 결과로 시편의 중심부에는 과 파쇄 영역이 형성된다(그림 5(e)). 최종적으로 파쇄 과정은 동적 응력-변형률도 곡선의 변형연화 거동으로 귀착된다.

4. 결론

본 연구에서는 파형 성형 장치를 부착한 SHPB 시험을 통하여 화강암 시편 내에 동적 응력 평형을 이루었다. X선 CT를 이용하여 시험편 내부의 파괴상태를 관찰하였으며, 동적 압축 하 화강암 시편의 파괴 기구를 고찰하였다.

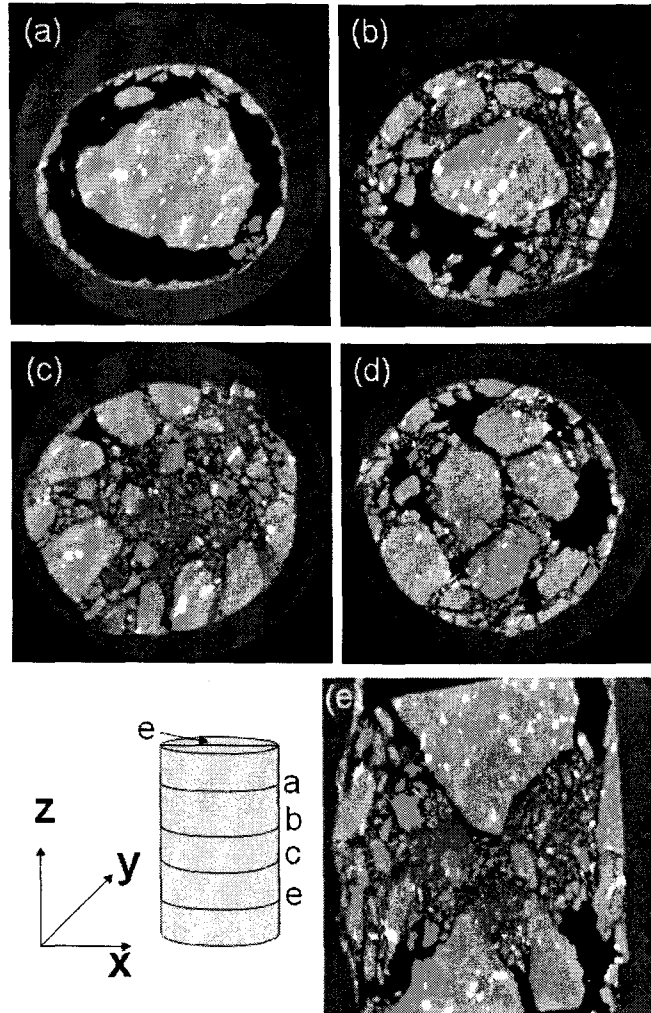


그림 5. 화강암 시편(TC4)의 3차원 구조 이미지

참고문헌

1. Kolsky, H., 1949, An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rate of loading., Proc. Roy. Soc. Lon. B. 62, pp. 676-700.
2. Gray, G.T., 1999, Classic split-Hopkinson pressure bar technique, LAUR-99-2347. Los Alamos National Laboratory.
3. Nemat-Nasser, S., J.B. Isaacs and J.E. Strttett, 1991, Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments, Pro. Roy. Soc. Lon. A 435 pp. 371-391.