

Split Hopkinson Pressure Bar를 이용한 동적손상시편의 제작

조슬기 · 조상호* · 안중량 · 김승곤¹⁾ · 천대성²⁾ · 양형식³⁾ · 신중호⁴⁾ · 가네꼬 카즈히코⁵⁾

1. 서론

고심도 지하공간에서는 주로 발파에 의한 굴착이 이루어지는데, 핵폐기물 처분장과 같이 차폐(sealing)성 이 요구되는 경우에는 주변암반의 손상을 최소화 할 수 있는 기계굴착공법이 고려되고 있으나, 최근에는 굴착효율 및 경제성을 고려하여 정밀 발파 굴착공법이 제안되고 있는 실정이다. 발파 굴착공법의 경우 폭약의 폭발에 의한 충격에너지를 이용하여 암반의 파쇄를 유도하므로, 주변암반에 손상이 발생하게 된다. 그러나 충격에너지에 의한 손상 발생 메커니즘 및 평가방법에 관한 연구는 미비한 실정이다. 새로운 암반의 파쇄제어 기술과 암반손상평가법의 개발을 위해서는 암석의 동적 파괴과정이나 동적 파괴 현상에 미치는 다양한 요인에 관한 연구가 중요하다.

본 연구에서는 암질재료의 동적손상과정 및 파괴메커니즘에 관하여 기초적인 정보를 얻기 위하여, 정밀 제작된 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)^{1,4)} 시스템을 이용한 동적 파괴 시험을 수행하였다. 암반의 단계적인 손상에 대한 평가를 하기 위하여 암질 재료에 충격속도를 단계적으로 증가시키며 충격파를 입사시켰다. 시료내에 동적응력상태와 일정 변형률속도를 유지시키기 위하여 충격파형 제어기법을 적용하였다. 실험시료의 손상도를 평가하기 위하여 파괴 전과 후의 탄성파속도 검증을 수행하였다.

2. 동적하중실험

2.1 실험 장치 및 실험 조건

암석의 동적 충격 하중에 따른 실험시료의 손상 정도를 파악하기 위해서 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시스템을 이용하여 실험시료에 충격하중을 가하였다. 본 연구에서는 실험시료가 파괴하기 전에 시료 내 동적응력평형상태와 일정변형률속도를 확보하기 위하여 충격바와 입사바 사이에 파형 형성 제어용 금속디스크를 부착하여 실험을 수행하였다.(그림 1) 본 시스템은 충격파를 전달해주는 충격바와, 파형의 형상을 제어해주는 pulse shaper, 입사바, 전달바로 구성되어있다.

시편은 입사바와 전달바 사이에 위치하며 충격바는 가스 압을 이용하여 추진되어진다. 앞서 말한 pulse shaper는 입사파의 형상을 제어해 주는 것으로 가스 압과 충격 바의 길이 그리고 pulse shaper의 크기와 종류에 따라 좌우된다. 입사바의 길이는 2600mm, 전달바의 길

1) 전북대학교 * corresponding author:chosh@chonbuk.ac.kr

2) KIGAM

3) 전남대학교

4) KIGAM

5) 북해도 대학

이는 1600mm이며 충격바의 직경은 27mm이며 입사바와 전달바의 직경은 1.5inch이다. 암질 재료 실험시료로서 그라우팅용 시멘트 모르타르를 이용하여 시료를 제작하였다. (그림 2) 실험시료는 직경 31mm, 길이 30mm으로 제작되었다. 시료는 입사바와 전달바의 사이에 놓여 지는데, 시료의 가압면을 정밀하게 가공할 필요가 있어 시편의 편평도 오차가 10 μ m 이내로 연마하였다. 시편의 물성 및 실험 조건은 다음 표1에서 볼 수 있다. 표에서 나타난 탄성과 속도는 파괴 이전의 탄성과 속도이며 시료에 대한 동적 손상정도를 달리 하기 위해서 가스압은 각각 8, 11, 15, 20 psi를 주었다. 충격응력은 가스압에 따른 바의 충격 응력 정도이다.

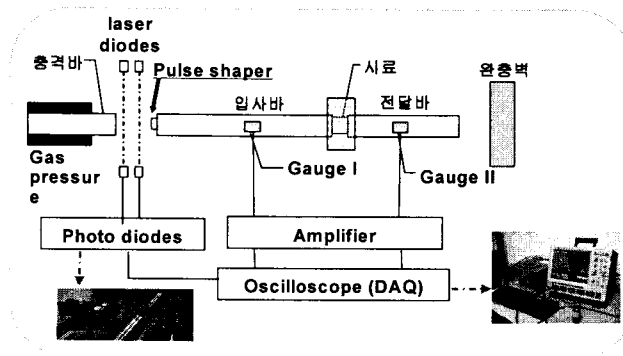


그림 1. 파형 형상 제어를 부착한 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시스템

표 1. 실험 조건

시편번호	길이 (mm)	직경 (mm)	충격응력 (MPa)
C1	30	31	460
C2	30	31	553
C3	30	31	652
C4	30	30	839

3. 실험결과

입사바와 전달바에서 측정된 변형률데이터를 이용하여 시료내 작용한 응력과 변형률을 계산하였다. 표 2에서는 시료 내에 작용한 응력의 최대값을 보여주고 있다. 이 값은 단계적 손상시료를 제작하기 위하여 낮은 충격속도부터 입력하였으므로, 일반적으로 보여주는 시료의 강도값과는 다르다. A4 시료의 경우 작용응력이 낮게 평가되었는데, 이것은 높은 충격에 의하여 시료 내 많은 손상이 발생하여 충격파가 전달바로 전파되지 못하였기 때문이다. 이러한 원인으로 시료 내 동적응력의 불평형상태가 발생하였기 때문으로 추정된다.

시편의 손상 정도를 알아보기 위하여 파괴전 탄성과와 파괴 후 탄성을 속도를 측정하여 각각 파형의 속도의 차이를 구하였다. 그림 3에는 C1 시료의 실험 전과 후에 측정된 탄

성과 파형을 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 탄성과 도 이러한 파형의 차이를 이용하여 탄성과의 감쇠비를 구했으며 식은 다음과 같다.

$$\text{탄성과속도감쇠비} = \frac{(\text{파괴이전탄성과속도} - \text{파괴이후탄성과속도})}{\text{파괴이전탄성과속도}}$$

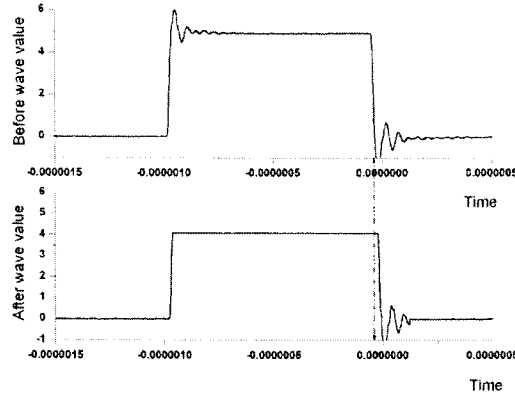


그림 2. 파괴 전 후의 탄성과 속도 파형

또한 파괴이전에 측정된 각각의 시료 길이와 파괴 후 시료 길이를 측정하여 변화량을 구했으며, 이것으로 파괴 후의 손상 정도를 알아보았다. 다음 결과는 표 2에서 보는 것과 같다.

표 2. 실험결과

시편번호	시료 내 최대작용응력 (MPa)	겉보기변형률 ($\Delta l / l$)
C1	125	0.001
C2	125	0.004
C3	125	0.01
C4	45	0.015

그림 3에서 보여주는 탄성과속도 감쇠비와 겉보기 변형률을 살펴보면 높은 충격속도 일수록 임계변형률이 증가하고, 이에 따라 많은 크랙이 발생하고 P파와 S파 속도의 감쇠율은 작아지고 있음을 알 수 있다.

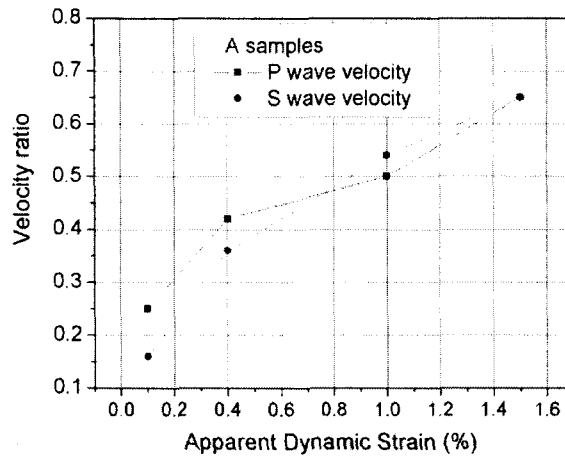


그림 3. 탄성파속도와 겉보기 변형률

4. 결론

정밀 제작된 홉킨스바를 이용하여 충격속도 9.9~18.0 m/s의 조건으로 단계별 동적손상 시편을 제작할 수 있었다. 충격시험 전후에 P파와 S파 속도를 측정하였으며, 마이크로 CT를 이용하여 시편 내 동적균열을 비파괴 검사하였다. 본 연구로부터의 결과를 정리하면 다음과 같다. 탄성계수의 하중속도 의존성은 보이지 않았으며, 높은 충격속도 일수록 높은 임계변형률을 보이고 P파와 S파 속도의 감쇠비가 증가한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Kolsky H, "An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rate of loading."Proc. Roy. Soc. Lon. B. 62, 676-700, 1949
2. Gray G.T, "Classic split-Hopkinson pressure bar technique,"LAUR-99-2347. Los Alamos National Laboratory, 1999
3. Nemat-Nasser S, Isaacs JB, Strittett JE, "Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments" Pro. Roy.Soc.Lon. A 435 371-391, 1991
4. Cho SH, Mohanty B, Rajeev R, Xia K, Kaneko K, 2007, Fragmentation mechanism of rock in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test, 21stCanadian Congress of Applied Mechanics, Ryerson University, Toronto, Canada, June 3-7, pp. 607-608