

## 스플릿 홉킨슨 압력봉 실험장비를 이용한 암석의 동적 압열인장강도 평가에 관한 연구

양정훈<sup>1)</sup>, 안중량<sup>1)</sup>, 김승곤<sup>1)</sup>, 송영수<sup>1)</sup>, 성낙훈<sup>2)</sup>, 이연규<sup>3)</sup>, 조상호<sup>1)\*</sup>

### Estimation of Dynamic Brazilian Tensile Strengths of Rocks Using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) System

Jung-Hun Yang, Jung-Lyang Ahn, Seung-Kon Kim, Young-Su Song,  
Nak-Hoon Sung, Youn-Kyou Lee, Sang-Ho Cho

**Abstract** In this study, we estimated the dynamic tensile strength and strain rate from Brazilian tensile test using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system. A pulse shaping technique, which controls the shape of the impact-induced incident waves, was used for achieving the dynamic stress equilibrium and constant strain rate before fracture of rock samples. Three kinds of rock type, Inada granite, Kimachi sandstone and Tage tuff were prepared as 50 mm in diameter and 26 mm in thickness. The high-speed videography system was used to observe the fracture processes of the rock samples. As the results of the tests, the ratio of dynamic tensile strength and static tensile strength was 11.9 for Inada granite, 8.5 for Kimachi sandstone and 9.2 for Tage tuff.

**Key words** Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB), Dynamic tensile strengths, Strain rate

**초 록** 본 연구에서는 스플릿 홉킨슨 압력봉 실험장비를 적용한 압열인장 실험을 수행하여, 암석의 동적인장강도 및 변형률 속도를 평가하였다. 시료가 파괴되기 전에 시료 내 동적 응력평형상태를 확보하기 위하여 펄스웨이핑 기법으로 입사파의 증가시간을 제어하였다. 압열인장 실험시료는 Inada 화강암, Kimachi 사암, Tage 응회암을 정밀하게 가공하여 제작되었다. 결과로서, Inada 화강암의 동적인장강도는 정적인장강도의 11.9배 이었으며, Kimachi 사암과 Tage 응회암은 각각 8.5배, 9.2배로 평가되었다. 고속카메라를 이용하여 시료 내 축 하중 방향으로 발생하는 인장균열의 발생양상을 관찰하였다.

**핵심어** 스플릿 홉킨슨 압력봉, 동적압열인장강도, 응력속도, 변형률속도

## 1. 서 론

암석의 동적인장강도는 발파, 지진, 암반돌출에 의한 지진동과 같은 동적하중에 대한 암반 구조물의 안정성 평가에 중요한 요소가 된다. 충격하중에 대한 암석 및 암반의 파괴현상은 동적 응력장에서 고속으로 발생하는 변형에 따른 복잡한 압축·인장의 복합파괴 양상을

보인다. 또한 암석의 동적강도는 변형률속도 또는 응력속도와 비례하여 증가하는 경향을 보이며, 일반적으로 동적강도는 정적강도의 2배 이상으로 알려져 있다. 이러한 동적강도는 폭약의 충격력 또는 고속 유압제어장치를 이용한 동적재하장치 및 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)등을 이용하여 평가된다(Zhao and Li, 2000, Jason 외, 2002, Cho 외, 2007, 조상호 외, 2009). 본 연구에서는 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB)실험법에 압열인장시험을 적용하여 암석에 대한 동적 간접인장강도 평가를 수행하였다. 사용된 암석시료는 일본의 대표적 암석인 Inada 화강암, Kimachi 사암, Tage 응회암 등으로써 시험 조건에 맞게 시편을 정밀하게 제작하였다. 시험편 내 응력평형이전에 시편의 파괴를 방지하기 위하여 펄스웨이핑법을 적용하여 입사파의 증가시간을

<sup>1)</sup> 전북대학교 자원·에너지 공학과

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

<sup>3)</sup> 군산대학교 해양건설공학과

\* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2011년 2월 10일

심사 완료일 : 2011년 4월 20일

게재 확정일 : 2011년 4월 20일

제어하였으며, 동적 변형을 측정법으로 계측된 응력-시간 데이터로부터 동적 인장강도 및 변형률 속도를 평가하였다. 또한 동적 압열인장하중에 의한 암석시료의 파괴특성을 파악하기 위하여 고속디지털 카메라를 이용하여 파괴과정을 관찰하였다.

## 2. 동적재하 압열인장실험

### 2.1 실험 장치 및 실험 조건

고속으로 발생하는 암석 및 재료의 변형 및 특성을 파악하기 위하여 SHPB시스템이 적용되고 있으며 본 연구에서는 암석의 압열인장시험에 적용하였다. 그림 1은 SHPB시스템의 개요도를 보여준다. 본 시스템은 충격파를 전달해주는 충격바와 충격바 추진장치, 파형의 형상을 제어해주는 펄스웨이퍼, 입사바, 전달바로 구성된다. 시편은 입사바와 전달바 사이에 위치하며, 충격바는 압축공기를 이용하여 추진되어 입사바에 충돌하면서 응력을 전달한다. 이때 충격바가 펄스웨이퍼에 충격하중을 주게 되면, 펄스웨이퍼는 소성 변형을 하게 되고, 파형의 진폭이 급격하게 올라가는 시간이 늘어나기 때문에 입사파의 동적 응력이 평형상태가 된다(Frew 외, 2002). 실험에 사용된 입사바의 길이는 2600 mm, 전달바의 길이는 1600 mm, 충격바의 직경은  $\phi 27$  mm, 입사바와 전달바의 직경은  $\phi 37$  mm이다. 본 연구에서는 실험시료가 파괴되기 전에 시험편 내 준정적 응력상태가 유지되도록 펄스웨이퍼링 기법을 적용하여 입사파의 증가시간을 제어하였다. 200 mm의 충격바를 7 m/sec

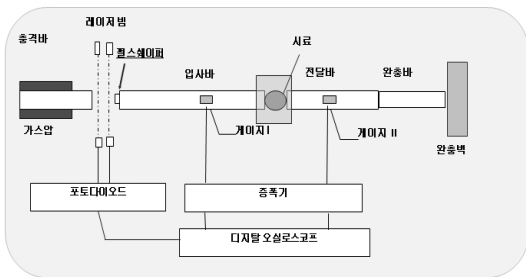


그림 1. 충격 파형 형상 제어 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시스템 개요도

표 1. 암석 시료의 물성

암석시료	탄성파속도(km/s)	밀도( $g/cm^3$ )	정적 인장강도(MPa)	탄성계수(GPa)
Inada 화강암	3.95	2.58	7.30	56.80
Kimachi 사암	2.71	2.00	4.82	6.50
Tage 응회암	2.38	1.76	2.29	4.50

로 추진시키기 위하여 가스챔버에 8 psi의 압축공기를 충전하였다. 펄스웨이퍼는 직경  $\phi 10$  mm, 두께 0.58 mm의 구리디스크를 사용하여 입사파형을 제어하였다. 입사파형은 펄스웨이퍼의 재질 및 형상, 충격바의 길이와 충전 가스압에 따라 크기와 종류가 좌우된다. 또한 시료 내 파괴양상을 관찰하기 위하여 고속디지털 카메라 (1200 frame/sec)를 이용하여 충격전후의 시료를 촬영하였다.

### 2.2 암석시료 제작

시료는 Inada 화강암, Kimachi 사암과 Tage 응회암으로써 압열인장용 시험편을 각각 제작하였다. 화강암 시료는 직경  $\phi 50$  mm, 길이 25 mm, 사암시료는 직경  $\phi 50$  mm, 길이 26 mm, 응회암 시료는 직경  $\phi 50$  mm, 길이 24 mm로 제작되었다. 시편의 물성은 표 1과 같다. Cho 외(2007)에 의하면 압열인장 시험편의  $\phi 50$  mm인 경우에 입사파형의 증가시간(가압 후 최대진폭에 도달하는데 소요되는 시간)은 50  $\mu s$  이상이어야 암석 시험편이 파괴되기 전에 응력평형상태에 가까이 도달한다고 보고한 바가 있다. 본 연구에서 발생된 입사파형의 증가시간은 100  $\mu s$ 로 시료 내 응력평형조건을 만족시킨 것으로 판단된다.

### 2.3 실험결과

그림 2는 Inada 화강암 시료의 응력파-시간이력 곡선으로 입사바에서 계측된 입사파  $\sigma_I$ 와 인장파  $\sigma_R$ 를 보이고 있으며 전달바에서 계측된 전달파  $\sigma_T$ 를 나타내고 있다. 이때 충격바와 입사바의 충격속도는 7.12 m/sec 였다. 일반적인 SHPB실험의 입사파형은 사각형에 가까운 반면에 계측된 입사파형은 삼각형에 가까운 형상으로 펄스웨이퍼에 의한 파형제어 효과에 의한 것이다. 시료를 통과하여 전달바로 전달된 전달파는 입사파와 비교하여 작은 진폭을 보이는데 이것은 입사응력파의 일부가 입사바의 끝단에서 반사되거나 시료의 파괴 시에 흡수된 것으로 판단된다.

그림 3은 Kimachi 사암 시료의 응력파-시간이력 곡선으로 입사파의 형상은 화강암시료와 유사하지만 반사파의 응력값은 화강암보다 크게 나타났다. 이것은 화

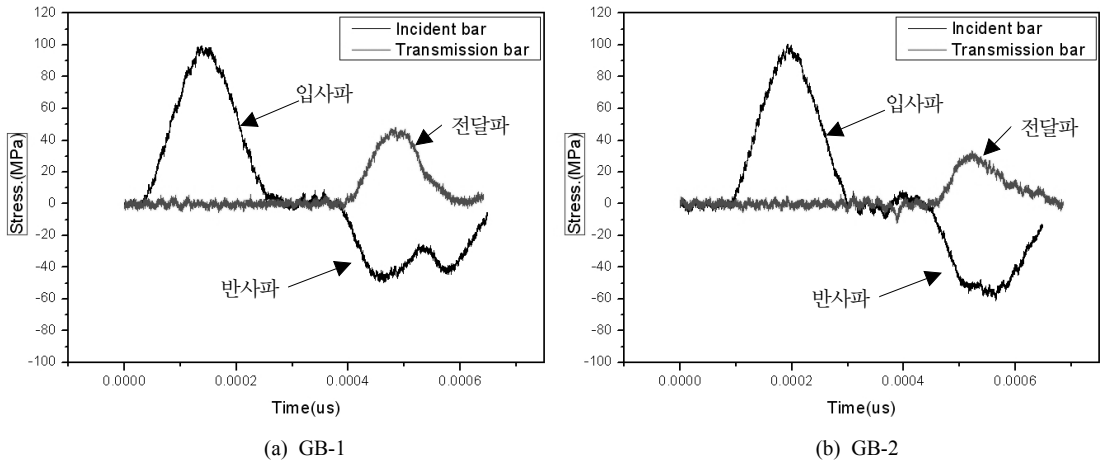


그림 2. Inada 화강암 시료의 응력파-시간이력 곡선

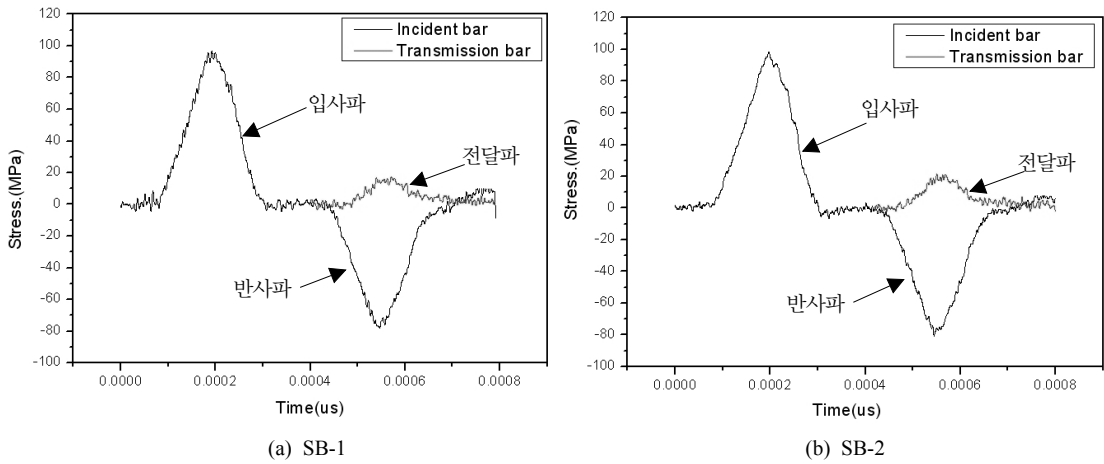


그림 3. Kimachi 사암 시료의 응력파-시간이력 곡선

강암에 비하여 탄성계수가 낮은 사암에서 가압면이 되는 입사파 끝단의 변위가 증가했음을 의미한다. 전달파의 경우에는 화강암 시료에 비하여 비교적 낮은 응력값을 보이는데 이것은 시료에 작용한 최대 하중값이 감소한 것을 의미한다.

그림 4는 Tage 응회암 시료의 응력파-시간이력 곡선으로 반사파는 입사파에 가까운 응력값을 보이며 전달파는 현저하게 작은 응력값을 보이고 있다. 이것은 화강암에 비하여 변형량이 크며 동적하중에 대한 저항력이 낮아 발생한 것으로 판단된다.

시료 내 발생한 인장응력  $f_{td}$ 는 다음 식 (1)로부터 평가되며, 동적 인장 강도는 인장응력  $f_{td}$ 의 최대 값으로 결정된다(Joseph 외, 1993).

$$f_{td} = \frac{2P_T}{\pi LD} \tag{1}$$

여기서  $P_T = \pi R^2 \sigma_T$ 가 되며,  $L$ 은 시료의 길이(mm)이고,  $D$ 는 시료의 직경(mm),  $R$ 은 SHPB의 반지름을 의미한다. 추가적으로, 응력속도  $\dot{\sigma}$ 와 시료의 변형률 속도  $\dot{\epsilon}$ 은 다음 (2)와 (3)식으로 계산된다.

$$\dot{\sigma} = \frac{f_{td}}{\tau} \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \tag{3}$$

$\tau$ 는 전달파의 도달 시점으로부터 피크 값까지의 경과 시간이며,  $E$ 는 시료의 탄성계수이다.

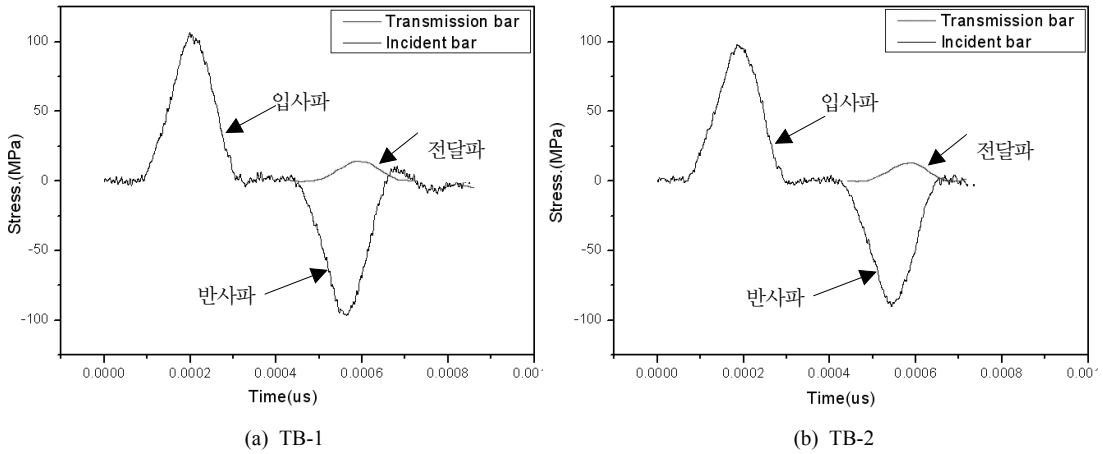


그림 4. Tage 응회암 시료의 응력파-시간이력 곡선

표 2. 실험 조건 및 결과

암석시료		직경 (mm)	길이 (mm)	충격속도 (m/sec)	동적 인장강도 (MPa)	응력속도, $\dot{\sigma}$ (GPa/s)	변형률속도, $\dot{\epsilon}$ (1/s)
Inada 화강암	GB-1	50	25.8	7.12	102.48	1163.14	20.47
	GB-2	50	25.5	6.92	72.07	1108.25	19.51
Kimachi 사암	SB-1	50	26.4	6.63	35.96	366.13	56.33
	SB-2	50	27.1	6.79	43.09	454.55	69.93
Tage 응회암	TB-1	50	25.2	7.02	21.07	201.24	44.72
	TB-2	50	24.3	6.86	21.04	212.55	47.23

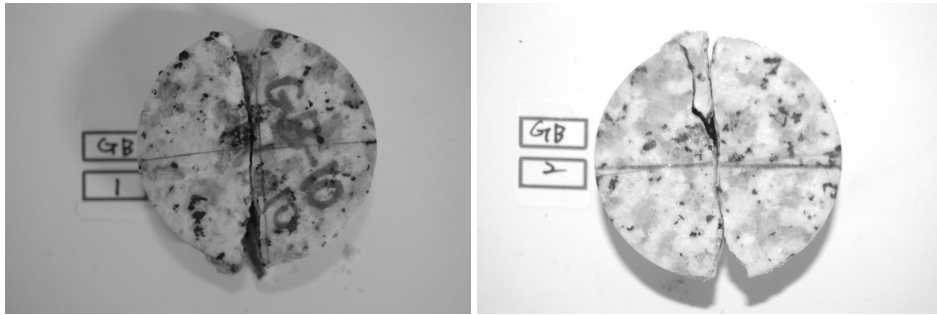
표 2는 각 시료에 대한 실험조건 및 동적 인장강도 ( $f_{td}$ ), 응력속도( $\dot{\sigma}$ ), 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ )를 보여주고 있다. 모든 시료에 대하여 충격속도를 일정하게 유지하기 위하여 공기압 디지털게이지의 표시 값을 8 psi으로 일정하게 적용하였으나 여러 가지 환경변수에 의하여 충격속도는 6.5~7.1 m/sec 이내로 하였다. 화강암의 경우 평균 동적인장강도는 87.25 MPa으로 정적인장강도의 약 11.9배로 평가되었으며, 사암과 응회암의 평균 동적인장강도는 40.02 MPa와 21.05 MPa로 정적인장강도의 약 8.5배와 9.2배를 보였다. 변형률속도는 화강암의 경우 평균 19.99  $s^{-1}$  이었으며 사암과 응회암은 각각 63.13  $s^{-1}$ , 34.79  $s^{-1}$ 로서 사암, 응회암, 화강암의 순서를 보였다. 화강암의 경우, 결정질광물로 이루어져 퇴적암인 사암이나 응회암에 비하여 강도가 높고 단위시간당 변형량이 적게 발생한 것으로 사료된다.

그림 5는 실험 후 파괴된 시료로서 하중 축을 따라서 발생된 인장균열들을 보이고 있다. 사암시료의 경우 다른 암석에 비하여 많은 인장균열을 보이고 있다. 가압

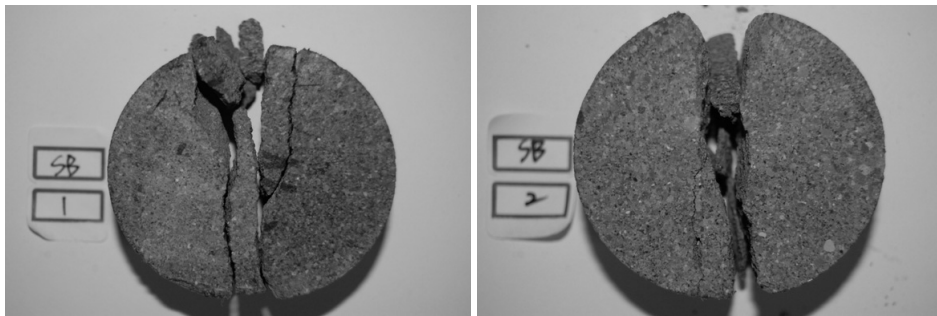
부는 높은 압력에 의하여 소편으로 분쇄되었으며 회수가 불가하였다.

### 3. 동적 압열인장시료 파괴과정에 관한 고찰

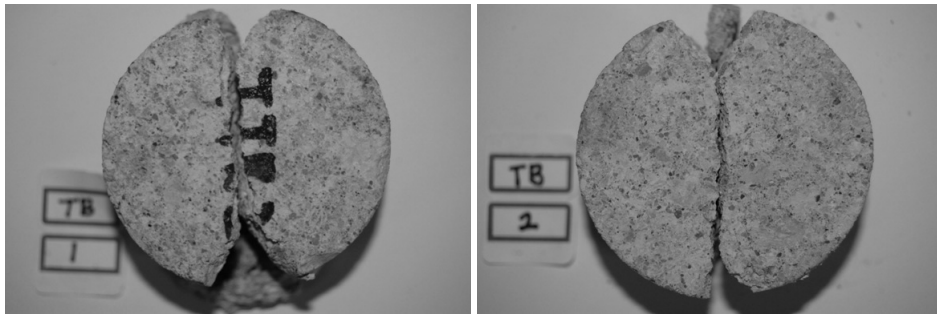
일반적인 정적 압열인장시험에서 시료 내 응력상태는 하중을 가하는 축방향으로 항상 압축응력이 작용하며 축방향에 수직한 방향으로 항상 인장응력이 작용하게 된다. 암석의 경우 압축강도가 인장강도의 3배 이상으로 압축파괴보다 인장파괴에 의하여 시료가 파괴된다 (Cho 외, 2007). SHPB를 적용한 동적 압열인장시험에서 정적 압열인장시험에서와 같은 응력상태를 확보하기 위해서는 입사파와 전달파에서 가해지는 하중이 일정한 시간동안 유지되어야 한다. 실험에서 사용된 응회암 시료의 직경이 50 mm이고 탄성파속도가 2.38 km/s 일 때 시료 내 응력파의 전달시간은 21  $\mu s$ 가 된다. 이때 시료 내 전체가 일정한 축하중을 받기 위해서는 2회 이상 응력파의 왕복이 필요하므로 입사파의 증가시간은



(a) Inada 화강암



(b) Kimachi 사암



(c) Tage 응회암

그림 5. 동적압열인장 파괴시료

84  $\mu$ s 이상이 되어야 한다. 그림 2-4를 보면 입사바의 증가시간은 100  $\mu$ s이상이므로 시료 내에 일정한 시간동안 가압을 유지하고 있으므로 정적 압열인장시험과 유사한 파괴양상을 유추할 수 있다. 본 실험에서는 동적 압열시험 중 시료 표면의 균열 발생 양상을 관찰하기 위하여 고속카메라를 이용하였다.

그림 6은 화강암 시료에 대한 고속카메라 촬영 화상을 보여 주고 있다. 여기서, 각 화상은 830  $\mu$ s의 시차간격으로 그림 6(a)는 입사바의 움직임이 확인된 시점의 화상을 보여주고 있다. 그림 6(b)는 시료 중앙부에 축방

향 균열발생 흔적이 보이며 그림 6(c)-(f)는 입사바와 전달바를 연결하는 다수의 균열을 보여주고 있다. 특히 입사바와 전달바 근접 부위는 미세하게 분쇄되고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 사암 시료에 대한 균열 발생 양상을 보여 주고 있다. 그림 7(a)는 시료 내 동적 하중이 작용하기 직전의 화상을 보여주고 있다. 그림 7(b)는 미세한 변위를 보이나 특별한 균열발생의 흔적은 보이지 않으며 그림 7(c)는 시료 중앙부에서의 균열 발생과 함께 입사바와 전달바의 가압부 부분에서의 미세균열이 관찰되었다. 그림 7(d)

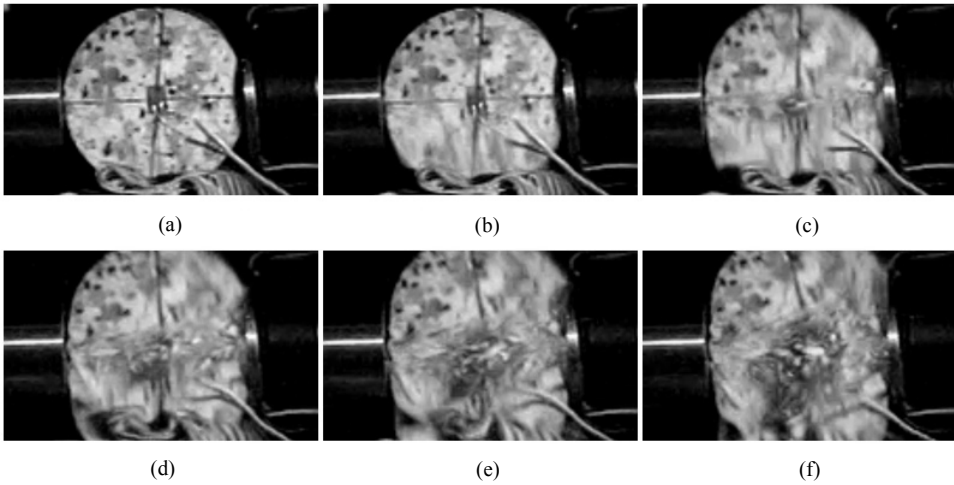


그림 6. 화강암 시료 디지털 고속 카메라 화상(1200 frame/sec)

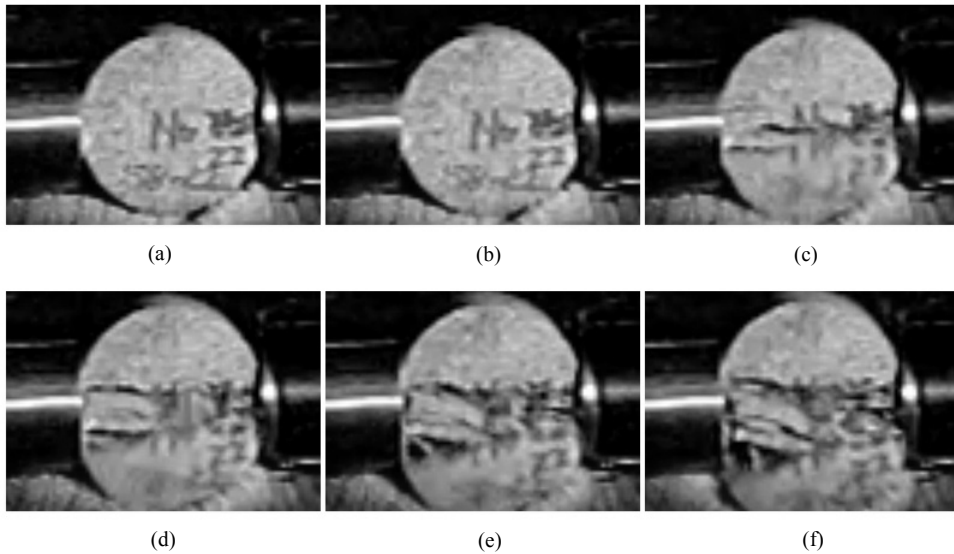


그림 7. 사암 시료 디지털 고속 카메라 화상(1200 frame/sec)

에서는 가압부 부분에서의 미세균열과 시료 중앙부에서의 초기 균열이 점차 연결되어가고, 최종적으로 균열들이 각각 축 하중 방향으로 연결됨과 동시에 가압부에서의 파괴가 발생하는 것이 관찰되었다(그림 7(e)-(f)).

그림 8은 응회암 시료에 대한 디지털 고속카메라 화상으로써 인장 균열의 발생양상이 뚜렷하게 관찰되었다. 그림 8(b)는 시료의 중앙부에 축방향으로 발생하는 균열을 보이며, 이후 중앙부의 축방향 균열이 전달바의 가압부 부분으로 전달되는 것을 보여주고 있다(그림 8(c)).

그림 8(d)는 전달바의 가압부에서의 균열이 보이며 그림 8(e)-(f)에서는 축 하중 방향으로 균열이 전파되어 최종적으로는 양 가압부를 연결하는 파단면이 발생되었다.

디지털 고속카메라 화상으로부터, SHPB를 적용한 압열인장실험에서 시료 내 축 하중방향 인장균열과 가압면 부근의 분쇄는 거의 동시에 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이것은 시료내 응력상태는 정적 압열인장시험과 유사한 준정적 인장응력의 평형상태가 확보되었음을 암시한다.

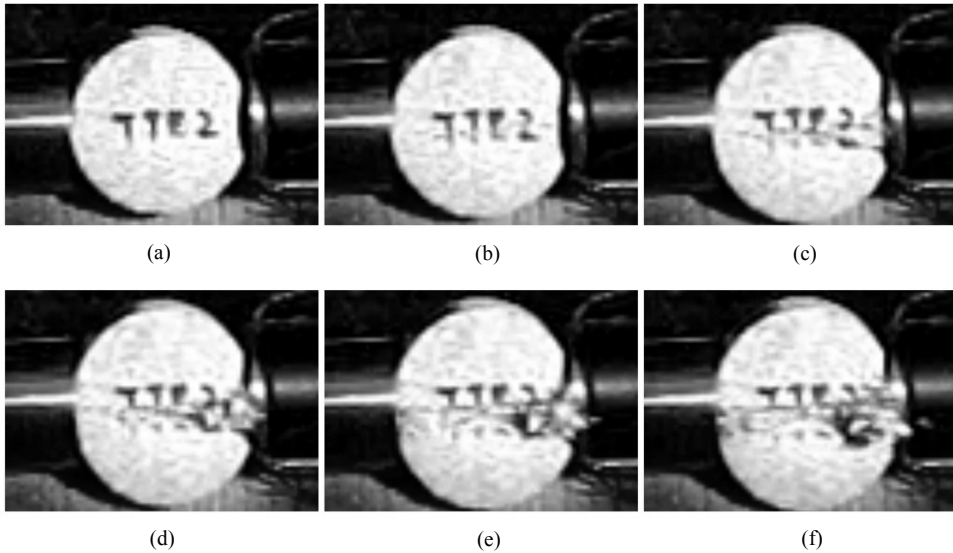


그림 8. 응회암 시료 디지털 고속 카메라 화상(1200 frame/sec)

4. 결론

본 연구에서는 암석 시료의 동적압열인장강도를 파악하기 위하여 디스크형상의 Inada 화강암, Kimaci 사암, Tage 응회암 시료를 제작하여 충격파형 형상제어 SHPB 재하실험을 수행하였다. 동적 변형률 측정법으로 계측된 응력-시간 데이터로부터 동적 인장강도 및 변형률 속도를 평가하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 동적압열인장강도는 화강암의 경우 평균 87.25 MPa으로 정적인장강도의 약 11.9배로 평가되었으며, 사암은 평균 40.02 MPa로서 정적인장강도의 약 8.5배, 응회암은 21.05 MPa로 정적인장강도의 9.2배를 보였다.
2. 변형률속도는 화강암의 경우 평균 19.99 s<sup>-1</sup>이었으며 사암과 응회암은 각각 63.13 s<sup>-1</sup>, 34.79 s<sup>-1</sup>로서 사암, 응회암, 화강암의 순서로 높은 값을 보였다.
3. 디지털 고속카메라 화상으로부터, 시료 내 축 하중방향 인장균열과 가압면 부근의 분쇄가 거의 동시에 발생하고 있음이 관찰되었다. 이것은 본 연구에서 적용한 SHPB 압열인장실험법이 동하중재하 실험법을 적용하지만 인장파괴시 정적 압열인장시험과 유사한 준정적 인장응력의 평형상태를 확보하고 있음을 시사하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No.2009-0075527).

참고문헌

1. 조상호, 조슬기, 김승곤, 박 찬, 金子勝比古, 2009, 단계적 충격하중에 의한 암석의 동적손상메커니즘에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 19.6, 545-557.
2. Joseph W.T., Allen R.C. and Steven T.K., 1993, Experimental and Numerical Analysis of High Strain Rate Splitting Tensile Tests, ACI Materials Journal, 90.2.
3. Zhao J. and Li H.B., 2000, Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 861-866.
4. Jason T.G., Arun S. and Atul S., 2002, Photoelastic Evaluation of Stress Fields and Fracture During Dynamic Splitting Experiments, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, ETATS-UNIS, 30.3, 186-196.
5. Cho S.H., Nakamura Y., Ogata Y., Mohanty B., Kitayama H. and Kaneko K., 2007, Fracture processes of rocks in dynamic tensile-splitting test, the 1st Canada and U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada.
6. Cho S.H., Mohanty B., Rajeev R., Xia K., and Kaneko K., 2007, Fragmentation mechanism of rock in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test, 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, Ryerson University, Toronto, Canada, 607-608.
7. Frew D.J., Forrestal M. J. and Chen W., 2002, Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar, Experimental Mechanics, 42.1, 93-106.



### 양정훈

2009년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사  
2011년 전북대학교 공과대학 자원공학과 석사

Tel: 063-270-4636  
E-mail: poizxclkj@chonbuk.ac.kr  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사졸업



### 김승곤

1977년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1980년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
전남대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 063-270-2364  
E-mail: skkim@chonbuk.ac.kr  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수



### 성낙훈

1984년 서울산업대학교 전자공학과 공학사  
1987년 연세대학교 전자공학과 공학석사  
2010년 전북대학교 자원에너지공학과 공학박사

Tel: 042-868-3181  
E-mail: nhsung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구실 책임기술원



### 조상호

1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사  
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과 석사  
2003년 북해도대학교 대학원 공학연구과 박사

Tel: 063-270-4636  
E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수



### 안중량

2010년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사

Tel: 063-270-4636  
E-mail: yangtte@chonbuk.ac.kr  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정



### 승영수

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
1980년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 063-270-2365  
E-mail: geosys@chonbuk.ac.kr  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수



### 이연규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864  
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr  
현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수