

## 스플릿 홉킨스 압력봉(SHPB)를 이용한 화강암의 동적 파괴인성 측정에 관한 연구

강명수, 조상호 (전북대학교)  
이상은, 장윤호 (강원대학교)  
양정훈 (지질자원연구원)

### 1. 서 론

일반적인 암석의 파괴인성은 정적하중 하에서 평가되는 재료물성으로 균열 개시와 전파에 관한 물질 고유의 상수로 알려져 있다. 정적 파괴인성은  $10^4 \text{MPa m}^{1/2} \text{s}^{-1}$  이하의 하중속도에서 평가되는 반면에 동적 파괴인성은  $10^4 \text{MPa m}^{1/2} \text{s}^{-1}$  이상의 하중속도에서 평가되고 있으며, 발파, 지진, 충돌 등과 같은 동적 하중에 대한 구조물의 안정성 평가 및 설계에서 재료특성으로 적용될 수 있다.

동적 파괴인성을 구하기 위하여 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)시험 장치를 이용하여 SCB(Semi Circular Bend)시료의 3점 동적재하시험이 수행되었으며 정적 파괴인성과 비교되었다(Tang과 Xu, 1990). 또한 대리석에 대한 동적 파괴인성의 하중속도 의존성을 평가하기 위하여 SHPB를 이용한 SR(Short Rod)시료의 동적재하시험이 수행되었다(Zhang 외, 1999). 최근에는 동적 파괴인성 측정에서 임계 파괴시간을 평가하기 위해 레이저 및 광학장비를 이용한 비접촉식 간극 측정법이 적용된 바가 있다(Chen 외, 2009).

본 연구에서는 미세균열 이방성에 따른 동적 파괴인성을 평가하기 위하여 포천 화강암을 대상으로 Rift, Hardway, Grain면에 따라 코어시료를 획득하였으며, 시료의 한쪽단면에 역 V자형의 썬기를 새겨 넣어 SR시료를 제작하였다. SR시료를 대상으로 동적 파괴인성을 평가하기 위하여 스플릿 홉킨스 압력봉(SHPB)과 레이저 간극측정 시스템을 도입하였다.

### 2. 실험 개요

#### 2.1 SHPB 시스템 개요

SHPB는 고속으로 발생되는 암석 및 재료의 변형 및 특성을 파악하기 위하여 사용되며, 본 연구에서는 SR시료에 동적인 하중을 가하기 위하여 적용되었다. 그림 1은 SHPB시스템의 개요도를 보여주고 있다. 본 시스템은 충격봉과 충격봉 추진 장치, 펄스웨이퍼, 입사봉, 전달봉로 구성된 하중 제어부와 동적변형률, 비산속도, 동적변위를 측정하는 고속데이터 획득 시스템으로 나누어진다. 충격봉은 압축공기를 이용하여 추진되어 입사봉에 충돌하면서 응력을 전달한다. 이때 충격봉이 펄스웨이퍼에 충격하중을 주게 되면, 펄스웨이퍼는 소성 변형을 하게 되고, 파형의 진폭이 급격하게 올라가는 시간이 늘어나기 때문에 입사파의 동적 응력이 평형상태가 된다. 입사봉의 길이

는 2600mm, 전달봉의 길이는 1600mm, 모든 봉의 직경은  $\phi 37\text{mm}$ 로 동일하게 하였다. 펄스웨이퍼는 직경  $\phi 10\text{mm}$ , 두께 0.58mm의 구리디스크를 사용하여 입사파형을 제어하였다. 입사파형은 펄스웨이퍼의 재질 및 형상, 충격봉 길이와 충전 가스 압에 따라서 변화된다.

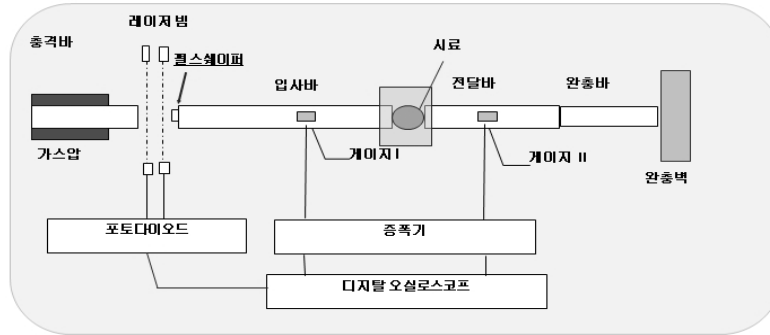


그림 1. 충격 파형 형상 제어 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시스템 개요도

## 2.2 SR시편 제작

그림 2는 미세균열 방향성에 따른 코어 획득 위치와 SR시료의 형상을 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 암석은 경기도 포천지역에서 생산되고 있는 포천화강암으로, 균열 우세면이 존재하는 3방향 중에서 가장 많은 미세균열이 존재하는 면을 Rift면(XY면), 다음으로 미세균열이 많이 존재하는 면을 Grain면(ZY면), 미세균열이 가장 적게 존재하는 면을 Hardway면(XZ면)으로 구분하였다. 포천 화강암의 미세균열 이방성이 동적 파괴인성에 미치는 영향을 평가하기 위해 X, Y, Z축 방향으로 코어시료를 제작하였다.

Rift축(Z축)을 따라서 제작된 코어시료의 한쪽 단면에 에 Hardway면(XZ면)과, Grain면(ZY면)의 방향으로 V자 형태의 썸을 새겨 넣어 각각  $K_{yx}$ ,  $K_{xy}$ 시료를 제작하였고, Grain축(X축)을 따라서 제작된 코어시료에 Hardway면(XZ면)과, Rift면(XY면)의 방향으로 V자 형태의 썸을 새겨 넣어 각각  $K_{zy}$ ,  $K_{yz}$ 시료를 제작하였다. 또한 Hardway축(Y축)을 따라서 제작된 코어시료에 Rift면(XY면)과, Grain면(ZY면)의 방향으로 V자 형태의 썸을 새겨 넣어 각각  $K_{zx}$ ,  $K_{xz}$ 시료를 제작하였다.

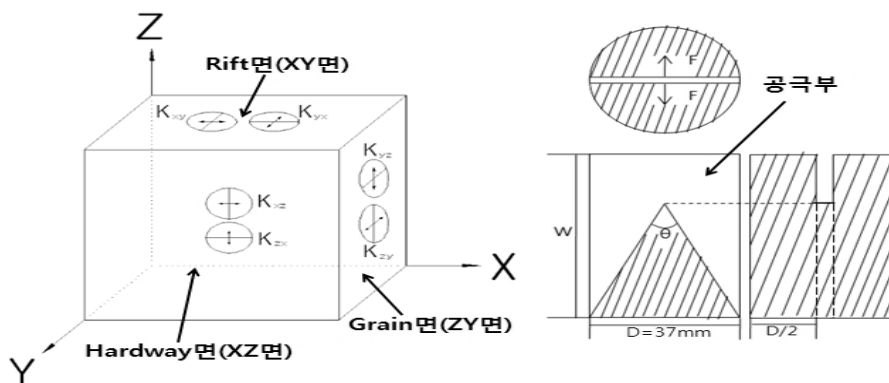


그림 2. 미세균열 방향성에 따른 균열 형상

(1)Rift면( $K_{zx}$ 및  $K_{yz}$ 시료) (2)Grain면( $K_{xy}$ 및  $K_{xz}$ 시료) (3)Hardway면( $K_{yx}$ 및  $K_{zy}$ 시료)

## 2.3 레이저 비접촉식 간극측정 시스템

본 시스템에 사용된 레이저 광원은 ThoLabs사의 675nm의 파장대를 갖는 LPS-675-FC를 사용하였고, 레이저 출력 제어장치는 EK1101 driver를 사용하였다. 분산된 레이저를 직사광으로 바꾸기 위하여 Ring-Activated Threaded Iris Diaphragm이 사용되었으며, 시료 내 개구변위부분을 통과하는 레이저 광은 집광렌즈인 N-BK7 Plano-Convex Lenses에 의하여 집중되어 고속 포토다이오드 (High-Speed Photo-detectors)에 입사된다. 짧은 시간동안 고속으로 변화되는 개구변위는 개구변위부를 통과하는 레이저 광량의 변화에 따라 증감되는 고속 포토다이오드의 출력 값으로부터 유추된다.

## 2.4 동적 파괴인성 평가

파괴인성을 측정하기 위한 표준시험방법은 금속재료를 대상으로 발전되어 온 것이며, 구조해석에서의 안전 설계 개념에 맞추어 제시되어 있다. 암석에 대해서는 1988년 국제암반공학회(ISRM)에 의해 파괴인성 측정을 위한 표준시험방법이 제시된 바 있으며, 본 연구에서는 SR시험편을 사용하여 최대하중과 변위로부터 동적 파괴인성을 계산하였다.

동적 파괴인성의 계산에 필요한 최대 하중 값은 전달봉의 변형을 게이지로 부터 얻어진 전달파  $\epsilon_t$ 를 다음 공식에 대입함으로 계산되었다.

$$P_c = E \cdot A \cdot \epsilon_t \cdot T_c$$

$T_c$ 는 레이저 변위측정 시스템을 통해 얻어진 파괴 임계시간이며  $E$ 와  $A$ 는 각각 탄성계수와 단면적을 나타낸다. 또한 동적 파괴인성  $K_{Ic}$ 는 다음 공식을 통해 계산되었다.

$$K_{Ic} = 24 C_k F_c / D^{1/2} (MPa \cdot m^{1/2})$$

$$F_c = P_c / 1.1489$$

$$C_k = 1 - 0.6 \Delta w / D + 1.4 \Delta a_0 / D - 0.01 \Delta \theta$$

$$\Delta w = \text{시료길이} - 1.45D$$

$$\Delta a_0 = V\text{형 노치 위치} - 0.48D$$

$$\Delta \theta = V\text{형 노치 각도} - 54.6^\circ$$

여기서  $F_c$ 는 임계 인장하중으로 일축하중  $P_c$ 로부터 얻어진 보정 상수값 1.1489를 적용하여 구해졌으며,  $C_k$ 는 보정계수로서 보통 1로 계산되어진다.

## 3. 실험 결과

표 1은 화강암의 미세균열 이방성에 따른 평균 동적 파괴인성을 평가한 것이다. 충격봉의 속도는 6.40m/s~7.16m/s범위로 제어되었다. 레이저 간극측정 시스템으로부터 측정된  $T_c$ 의 값 또한  $0.92 \times 10^{-5} \sim 1.58 \times 10^{-5} \mu s$ 의 근소한 차이를 보이고 있다.

미세균열이 가장 많이 존재하는 Rift면 방향의 시료(Kzx, Kyz)의 동적 파괴인성 평균값은  $38.68\text{MPa m}^{1/2}$ 로 평가되었고, 다음으로 미세균열이 많이 Grain면 방향의 시료(Kxy, Kxz)와 미세균열이 가장 적은 Hardway면 방향의 시료(Kyx, Kzy)의 동적 파괴인성 평균값은 각각  $41.18\text{MPa m}^{1/2}$ 과  $46.71\text{MPa m}^{1/2}$ 로 평가되었다. 동적 파괴인성의 평균값은 Hardway면 > Grain면 > Rift면의 높은 순서로 나타내어 미세균열 이방성은 다소 동적 파괴인성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에 사용된 시료의 수가 적으며, 이에 따라 향후 추가적인 실험이 필요하다고 판단된다.

표 1. 실험조건 및 결과

시료 No.	충격봉 속도 (m/s)	Tc(s)	Pc(MN)	Fc(MN)	Kic (MPa m <sup>1/2</sup> )	하중속도 (MPa m <sup>1/2</sup> s <sup>-1</sup> )
Kxz	6.40	1.08×10 <sup>-5</sup>	0.0153	0.0133	57.62	5.39×10 <sup>6</sup>
Kyx	6.96	1.58×10 <sup>-5</sup>	0.0141	0.0122	54.52	3.44×10 <sup>6</sup>
Kzy	6.48	1.56×10 <sup>-5</sup>	0.0102	0.0089	38.94	2.54×10 <sup>6</sup>
Kzx	6.69	1.19×10 <sup>-5</sup>	0.0097	0.0084	37.45	3.21×10 <sup>6</sup>
Kxy	6.59	1.50×10 <sup>-5</sup>	0.0064	0.0055	24.74	1.30×10 <sup>6</sup>
Kyz	7.16	0.92×10 <sup>-5</sup>	0.0104	0.0090	39.81	4.48×10 <sup>6</sup>

#### 4. 결론

본 연구에서는 미세균열 이방성에 따른 동적 파괴인성을 측정하기 위해 SHPB를 이용한 SR(Short Rod)시료의 동적재하시험이 수행되었다. 동적 파괴인성  $K_{ic}$ 의 평균값은 Hardway면 > Grain면 > Rift면으로 나타내어 다소 미세균열 이방성이 동적 파괴인성에 영향을 미치고 있음을 볼 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Tang C.A, Xu.X, 1990, A new method for measuring dynamic fracture toughness of rock, Eng Fract Mech, 35(4/5).
2. Zhang.Z.X, Kou.S.Q, Yu.J, Yu.U, Jiang.L.G, Lindqvist.P.A, 1999, Effects of loading rate on rock fracture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp.597-611.
3. Chen.R, Xia.K, Dai.F, Lu.F, Luo.S.N, 2009, Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, pp.1268-1276.