

고속충격하의 노치형상에 따른 동적거동연구

장영환*, 박성도, 윤희석(전남대 기계공학과)

A study of dynamic behavior with effect of notch shape on high impact

Y. H. Jang (Mech. Eng. Dept. CNU), S. D. Park, H. S. Yoon (Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

This study is about the dynamic behavior of steel(SM45C). Dynamic tests were performed using SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) which is designed and modified to be used in both tensile and compressive modes. Quasi-static compression tests were also carried out for the comparison to the dynamic results. Not only the dynamic mechanical properties but also the effect of the notch of the specimen on stress-strain curve were investigated. The dynamic test results reveal that strain and stress are sensitively affected by the notch. The depth and the number of notch increase the stress and decrease the strain.

Key Words : Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)(홉킨슨 압력봉), Dynamic Stress-Strain Curve(동적 응력-변형률 곡선), The effect of the notch(노치효과)

1. 서론

충격하중을 받는 재료의 거동에 관한 연구는 공학의 넓은 분야에 깊은 관계를 갖고 있다. 기계의 성능이 향상됨에 따라서 기계의 작동속도가 높아지게 되었고 따라서 각 부재는 충격하중을 견디면서 그 기능을 수행하도록 설계되는 것이 필수 조건이 되어 왔다. 뿐만 아니라 교통기관에서는 충돌에 관한 안전성의 확보가 중요한 과제로 대두되고 있으며, 에너지 관련기기, 항공기 등의 안전설계에는 내충격성이 중요한 문제로 되고 있다. 그러나 충격하중을 받을 때 재료의 거동은 정적인 경우에 비해 현저히 높은 거동을 하고 있으며, 아직 정량적으로 충분히 규명하지 못하고 있는 부분이 많다. 일반적인 실험 방법으로는 10²/sec 이상의 고변형률 속도를 얻는 것이 어렵기 때문에 이러한 고변형률을 얻기 위해 여러가지 시험방법이 고안되어 왔는데, 비교적 널리 이용되는 방법이 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)시험방법이다. SHPB는 1914년 Hopkinson[1]에 의해 처음으로 소개되었고 그 이후 Kolsky와 Davies[2]가 압력봉에서의 변위를 측정하기 위한 콘덴서를 설계함으로써 시험기술에 있어서 많은 발전을 이루었으며, 1941년에 들어와서 Kolsky에 의해 처음으로 2개의 압력봉 사이에 시편을 설치하는 SHPB가 소개되었다. 본 연구에서는 이러한 SHPB를 이용하여 일반 구조용 및 자

동차부품용으로 널리 쓰이는 SM45C의 고속충격하에서의 응력-변형률 곡선을 구하였다.

따라서 본 논문에서는 기존의 SHPB 시험 방법 [3]에서 다루지 않은 이용한 정적-동적 응력과 다양한 형태의 U노치에 대하여 정적 비교하며, 충격 부하를 받는 부재의 거동은 정하중과는 달리 응력 파로써 재료부재내에 압축과 인장의 진동을 반복하면서 전달되는 이론에 기초하여 충격파의 반사효과로 인한 응력감쇠효과를 알아보았다.

2. 연구이론

2.1 1 차원 파동 방정식

Fig.1은 봉의 길이방향을 축으로 하고, 여기에 수직인 단면 내에는 균일 분포하는 축응력만이 작용하는 경우에, P와 Q구간의 운동방정식[4]은 다음과 같다. A는 단면적, ρ₀는 밀도, ρ₀A dx는 PQ의 질량, u는 x방향 변위이다.

$$\rho_0 A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = A \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \tag{1}$$

따라서 x방향의 변형률과 응력은

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

이므로 식(1)은 다음과 같이 정리되며, 이것을 1 차원 파동방정식(wave equation)이라 한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad c_0^2 = \frac{E}{\rho_0} \quad (3)$$

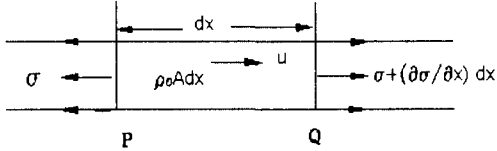


Fig. 1 Equation of motion of stress wave

2.2 변형영역(Deformed Zone)

Fig.2은 SHPB를 이용한 충격 압축 실험에서 시간에 따른 응력파의 전달 양상을 나타낸다. 충격 압축 모드에서 시편의 응력과 변형률은 다음 식에 의해서 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = E_T \left(\frac{A_b}{A_s} \right) = f_\sigma (\Delta v) \sigma \left(\frac{A_b}{A_s} \right) \quad (4)$$

$$f_\sigma = \frac{E v_0}{2 C_0 (\Delta v)_1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = \frac{-2 C_0}{L_0} \int \varepsilon_R dt = f_\varepsilon (\Delta v) \varepsilon \quad (6)$$

$$f_\varepsilon = \frac{2 L_p v_0}{C_0 L_0 (\Delta v)_2} \quad (7)$$

여기서 E는 봉의 탄성계수, ε_t 는 시편 통과 응력파, A_b/A_s 는 봉과 시편의 면적비, f_σ 는 응력 측정상수, C_0 는 봉에서의 응력파의 전파속도, ε_R 는 반사 응력파, f_ε 은 변형률 측정상수, ε_t 는 초기 압축 응력파, $(\Delta v)_1$ 는 초기 응력파의 전압, $(\Delta v)_2$ 과 $(\Delta v)_\varepsilon$ 은 Incident bar에서의 변형률을 시간에 따라 적분한 값을 나타내고 있다.

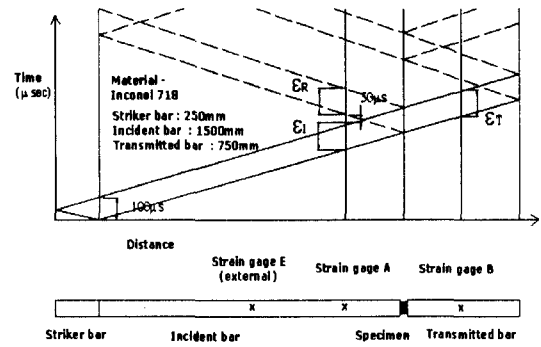


Fig.2 Lagrangian diagram in compression mode

Fig.3은 일반적인 압축파의 형태를 보이고 있다. Incident Bar은 압축 인장을 반복하고 Transmitted Bar를 통과한 압축파형을 보이고 있다.

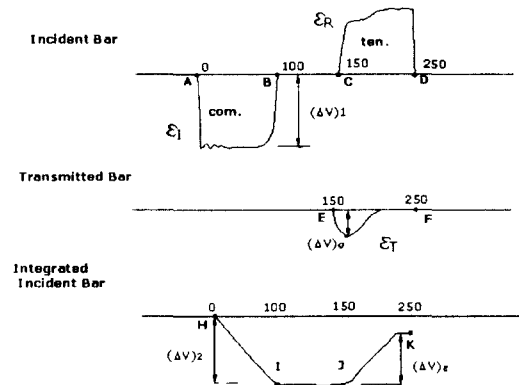


Fig.3. Typical wave shape

3. 실험 및 해석

3.1 실험 장치

SHPB 실험장치는 Fig.4 에서와 같이 Incident Bar와 Transmitted Bar 사이에 시편을 갖는 두개의 탄성 압축봉과 충격을 가하는 Striker bar로 이루어 졌다. 봉의 재료는 Inconel718을 사용하여 온도의 영향을 최소화하였다. Striker Bar는 질소가스의 압력에 의해 발사되며 봉의 속도측정은 두개의 광센서를 이용하였다.

응력파를 검출하기 위한 스트레인 게이지는 굽힘의 영향을 줄이기 위해 반경 방향에 대해 180°대칭이 되도록 하고, 2축용을 선정, 완전 브릿지방식으로 연결하였다.

스트레인 게이지는 시편으로부터 Incident Bar 와 Transmitted Bar 양쪽으로 같은 거리에 위치시키고 별도의 External 용 스트레인게이지를 설치하여 초기 발생 응력파를 놓치지 않도록 하였다. 응력파를 증폭하기 위한 Dynamic Amplifier 가 있고, 증폭된 신호를 모니터링하기 위해 A-D Board 가 내장된 컴퓨터를 사용하였다

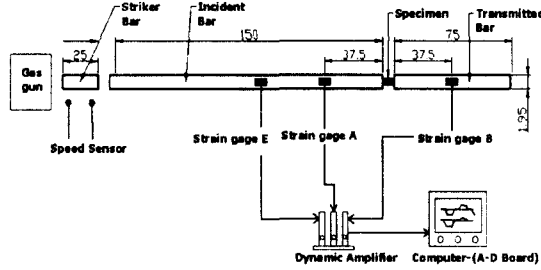


Fig.4 Schematic diagram of SHPB

3.2 실험 방법

시편은 Fig.5와 같이 제작되었고 기계적 성질이 우수하고 열처리에 의해 성질을 개선시킨 구조용 탄소강 SM45C를 이용하여 노치의 개수와 깊이에 따른 7가지 형태의 시편을 제작하였다. 또한 응력 집중을 감소시키기 위하여 노치의 끝단은 필렛처리를 하였으며 U노치를 이용하였다. Table1은 SM45C의 화학적 구성이다.

시편의 동적거동을 살펴보기 위해 Striker bar의 속도는 일정하게 8.333m/s로 하여 실험을 하였다. 또한 표면의 마찰을 줄이기 위해 MoS₂ 윤활제를 이용하여 윤활효과 뿐만 아니라 자체의 점성만으로 시편이 고정되도록 하였다. 또한 SATEC 시험기를 이용하여 압축률 0.01mm/s로 정적압축실험을 하였다.

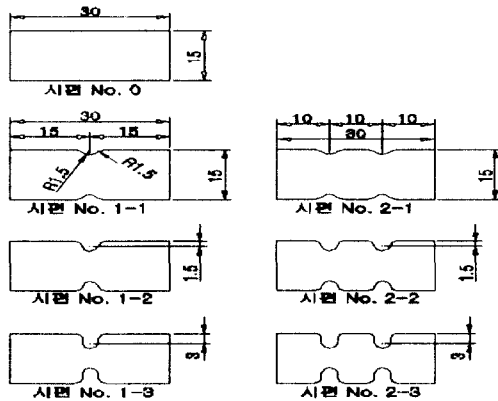


Fig.5 Shape of specimen

Table1 Chemical composition of material(wt.%)

구분	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.45	0.25	0.60	0.03	0.03

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 정적실험결과

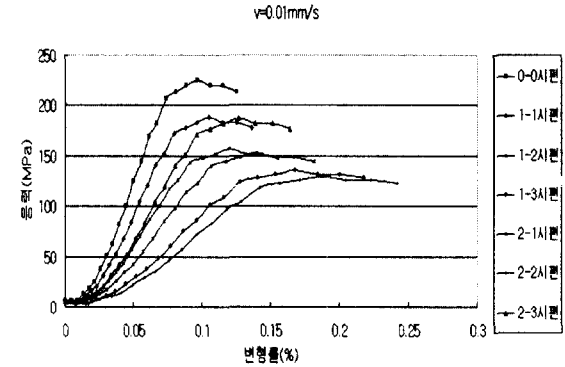


Fig.6 Static strain-stress curve

Fig.6 는 정적압축실험의 결과를 보여준다. 노치의 깊이가 커질수록 응력이 감소하며 변형률이 증가한다. 또한 같은 노치의 깊이가 같은 경우에는 Fig.5의 시편 1-1,1-2,1-3에 비하여 2-1,2-2,2-3의 경우 응력이 더 감소하고 변형률이 증가한다.

3.3.2 동적실험결과

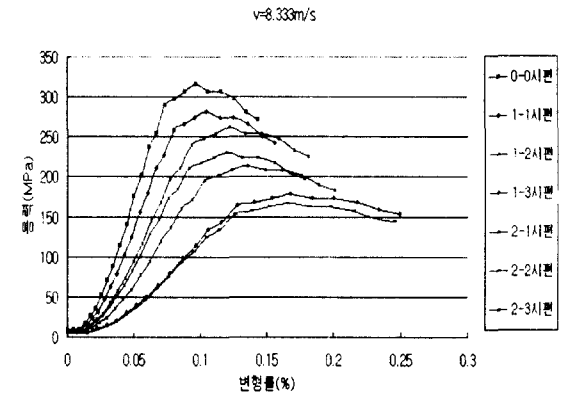


Fig.7 Dynamic strain-stress curve

Fig.7 는 동적압축실험의 결과를 보여준다. 일반적인 경향은 정적실험결과와 같으나 응력은 정적에 비해 증가하며 변형률은 정적에 비교하여 감소한다.

3.3.3 정적-동적실험 비교

Table2는 정적, 동적실험의 최대응력값이다. 동적 하중은 정적하중과 달리 응력파로서 전파된다. 노치로 인한 응력파의 반사로 인하여 동적응력 역시 감소함을 알 수 있다.

Table2. Maximun stress

Specimen number	Static(MPa)	Dynamic(MPa)
시편 No.0-0	225	315
시편 No.1-1	188	281
시편 No.1-2	156	230
시편 No.1-3	135	178
시편 No.2-1	187	262
시편 No.2-2	152	213
시편 No.2-3	129	166

Table3 은 탄성계수값이다. 노치의 깊이와 개수에 따라 탄성계수가 감소한다.

Table3. Elastic modulus

Specimen number	Static(GPa)	Dynamic(GPa)
시편 No.0-0	349	446
시편 No.1-1	269	367
시편 No.1-2	195	262
시편 No.1-3	120	145
시편 No.2-1	222	293
시편 No.2-2	163	216
시편 No.2-3	103	138

4. 결론

본 연구에서는 다양한 형태의 노치를 주어 정적 실험과 동적실험의 응력, 변형률을 비교하였다. 정적에 비하여 동적인 경우 응력은 증가하며 변형률은 감소하였다. 그리고 노치 깊이가 깊을수록 각각의 경우에 10~20%의 응력감소가 있었으며 노치 깊이가 같은 경우 노치가 하나인 시편 1 번계열에 비해 노치가 두개인 2 번계열의 경우가 5~10%의 감소가 있음을 알 수 있다. 노치의 영향으로 동적인 경우는 응력의 민감도가 크며 정적인 경우는 변형률의 민감도가 크다.

참고문헌

1. B. Hopkinson, A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets ,Phil. Trans. A, Vol 213,, p.437,1914
2. R.M. Davies, A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar, Phil. Trans. A, Vol 240, p.375, 1948
3. Essam El-Magd, Michael Brodmann "Influence of precipitates on ductile fracture of aluminium alloy AA7075 at high strain rates.
4. 양동륜 외, 충격공학, 1992, 원창출판사, pp. 6-14