

고변형률 속도 압축 하중 하에서의 고무와 황동의 동적 거동 특성

이역섭(인하대 기계공학부),
김경준(인하대 인하대원 기계공학과), 이종원* (인하대 인하대원 기계공학과)

Dynamic deformation behavior of rubber and brass under high strain rate compressive loading

O. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)
K. J. Kim(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.), J. W. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)

ABSTRACT

A specific experimental method, the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) technique has been widely used to determine the dynamic material properties under the impact compressive loading conditions with strain-rate of the order of 103/s~104/s. This type of test procedure has been used to examine the dynamic response of materials in various modes of testing. In this paper, dynamic deformation behaviors of rubber materials widely used for the isolation of vibration from varying structures under dynamic loading are determined using a Split Hopkinson Pressure Bar technique.

Key Words : SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), stress-strain curve(응력-변형률 선도), stress wave(응력파), high strain-rate(고변형률 속도), Free-cutting brass(폐삭황동)

1. 서론

동적인 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 나타낸다¹. 첫 번째로 관성은 어떠한 조건에서는 무시할 수 있는 반경 성분을 가지게 된다. 두 번째로는 실험의 초기에서 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미치게 된다. 최근 기계 구조물들의 많은 경우는 높은 응력이나 순간에 작용하는 하중에 의해 특정 지어지는 극한 작업 환경에 사용되고, 특히 단조와 압연과 같은 공정들은 고변형률 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 극한 하중 상태에서 사용되는 구조물의 설계를 위해서는 고변형률 하중 하에서 금속이나 비금속에 대한 기계적 변형 거동을 알아야 한다.

변형률 속도가 $10^3/s$ 이상의 상태에서 충격에 대한 압축과 인장 하중 하에서 동적 재료의 특성을 얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적

으로 SHPB 장치는 $10^3 \sim 10^4$ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 내진재료 및 자동차용 방진재료로 사용되는 고무와 기계 장치 등의 나사, 볼트, 와셔 같은 기계부품인 폐삭 황동의 동적 변형거동을 실험적으로 규명하여 필요한 설계에 관한 정보 제공과 플라스틱과 크롬 도금 베어링 강를 사용한 SHPB 기법으로 기계적 특성을 규명하고, 재료의 고변형률 변형특성에 대하여 면밀한 고찰을 수행하였다.

2. 이론

2.1 기본가정 및 이론

SHPB 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer² 와 Chree³ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB 기법에 응용되었고, 응력파가 파장 λ 인 순수 코사인파 (cosine

wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R:봉의 반경)일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다.⁴ 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 성질은 축 방향으로의 응력과 전파속도는 그 파장(wavelength)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 악영향을 끼치게 되므로 유의해야 한다.

2.2 시편의 균일 단면 변형

압력봉 내에서의 탄성과 전파이론이 수학적으로 예견될 수 있음에 반해 시편의 변형은 소성과 전파와 마찰에 의한 영향을 고려해야 하기 때문에 해석에 어려움이 따른다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제를 사용하여 줄였으며, SHPB 기법을 이용한 고변형률 속도에서는 갑작스러운 입자들의 가속화 때문에 길이 방향이나 반경 방향의 관성이 발생하게 된다.

2.3 SHPB 에 대한 응력과 변형률 속도 측정

SHPB 기법에서의 시편은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된다. Fig. 1 은 SHPB 에서 발생한 압축 탄성파의 전파 거동을 나타내었다. 충격봉(striker)이 입력봉에 충돌하게 되면, 응력파(stress wave)가 발생하고 시편까지 입력봉을 통해서 전파하게 된다. 입력된 응력파의 일부는 물질의 임피던스(impedance) 차에 의해 봉과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시편으로 투과된다. 이러한 투과된 응력파는 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 이때 시편내의 응력, 변형률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다.⁵

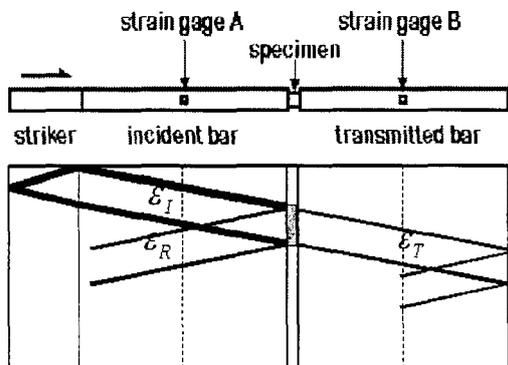


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive test

식 (1), (2), (3)은 시편의 응력과 변형률, 변형률

속도를 측정하는데 사용된 식이다.

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{specimen} = \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{-2C}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

3. 실험

3.1 하중장치 및 충격봉(Striker-Bar)

$10^3 \sim 10^4 /s$ 의 변형률 속도를 발생시키기 위해서는 충격하중을 준다. 본 연구에 사용된 충격봉(striker-bar), 입력봉(incident-bar)과 출력봉(transmitted-bar)의 재질은 모두 강화 플라스틱(PEEK-1000)이고, 다른 하나의 재질은 모두 고탄소 크롬 도금 베어링 강(SCB2)으로써 각각의 항복 강도는 110MPa, 452MPa 이고, 탄성계수는 4.4GPa, 225GPa 이다. Fig. 2 는 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

여기에 사용된 충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm 이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Fig. 2 에서 보듯이 gun barrel 을 설치하여 압력을 발생시키는 장치와 입력봉에 정확한 충격을 주기 위한 직진도 유도 장치를 설치하였다.

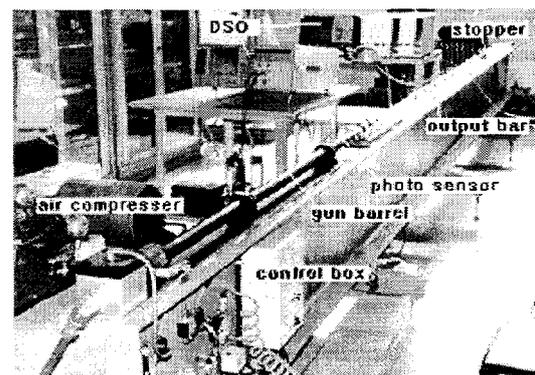


Fig. 2 General view of SHPB apparatus

3.2 입력봉과 출력봉

변형률 속도를 결정하는 봉의 직경이 작을수록 좀 더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 또한 봉 내부에서 응력파는 1 차원이어야 한다. 봉의 길이는 봉에서의 응력파-길이(stress wave-length)의

최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L)에 대한 직경(D)의 비율을 100으로 하였다. 이들 입력봉과 출력봉의 재질은 임피던스의 영향으로 충격봉과 같은 재질로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면에는 시편과의 완전하게 접촉하도록 정밀 연삭하였다^{6,7,8}.

3.3 직진도 유지 장치

실험 장치에서 중요한 요소중의 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전파되어야 한다는 점이다. 따라서 I-beam을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다⁹.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

속도를 측정하기 위해, gun barrel의 끝단에 50mm의 간격으로 3개의 광센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광센서의 빛을 차단시킬 때, 오실로스코프(oscilloscope: Nicolet 410)에 전기적인 신호가 전달되게 하였다. 응력파는 봉에 부착된 스트레인게이지(strain-gage)로부터 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 휘스톤-브리지(Wheatstone-bridge)회로에 의해 전압변화로 나타나게 된다. 이러한 전압의 미세한 변화는 회로가 부착된 증폭기(amplifier)를 거쳐 오실로스코프(oscilloscope: Lecroy 9354A)에 기록되게 하였다.

3.5 시편(specimen)

시편의 형상은 중력의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 두께(L)는 4.8mm~5.2mm이다.

4. 결과 및 고찰

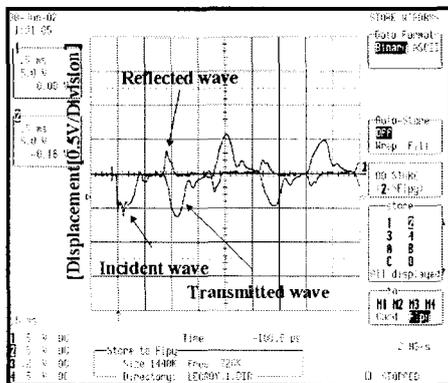


Fig. 3 Strain signal of rubber recorded at oscilloscope

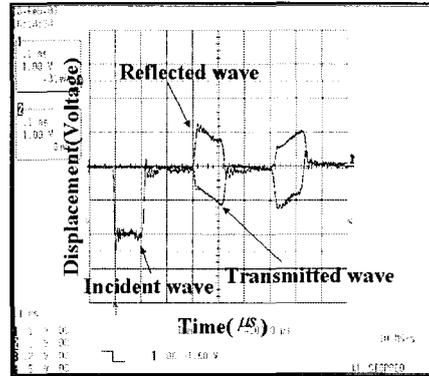


Fig. 4 Strain signal of brass recorded at oscilloscope

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 오실로스코프(oscilloscope)에 검출된 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)가 같아야 한다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과는 이러한 이론적인 요구를 만족하고 있음을 알 수 있다.

전환점과 피크점의 결정은 Fig. 5에서 보듯이 두개의 fitting-line을 사용하여 결정하였다. 첫번째 fitting-line과 두번째 fitting-line의 교차점에서 수직 방향에 위치한 점을 전환점(transition point, T)이라 하였고, 응력-변형률 그래프에서 가장 큰 응력에 위치한 점을 피크점(peak point, P)이라 정하였다.

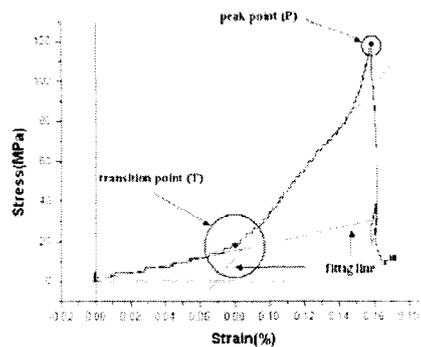


Fig. 5 Determination of peak point and transition point

식(1), (2)와 (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의 관계를 얻을 수 있다. Fig. 6은 황동의 동적 응력-변형률의 관계를 나타내었으며, Fig. 6에서 타원으로 표시된 부분에서 항복점을 지나 가공경화가 발생하는 영역의 거동을 면밀하게 분석 비교해 보았다.

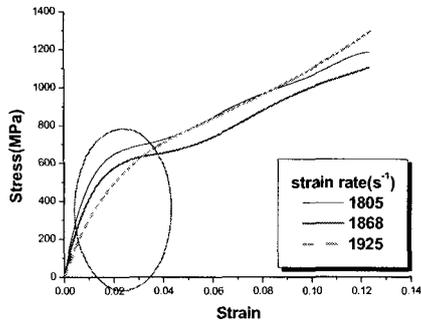


Fig. 6 Compressive stress-strain curve fitting for brass

Fig. 7는 고무와 황동의 항복점에서의 응력-대수 변형률속도 관계 그래프를 나타낸다. 또한 정적인 하중을 주었을 때의 항복점-압축강도와 동적인 하중을 주었을 때의 항복점-압축강도를 비교한 그래프이다. 여기서 고무와 황동의 항복점의 응력-대수 변형률속도 그래프는 선형적인 관계를 보이고 있다. 이렇게 결정된 항복응력과 각 실험조건에서 결정된 대수 변형률 속도(log strain rate)의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 항복응력과 대수 변형률 속도는 이중선형적인 관계를 나타내며 이것은 알루미늄, 플라스틱에 대한 결과와 유사하다는 것이 규명되었다.

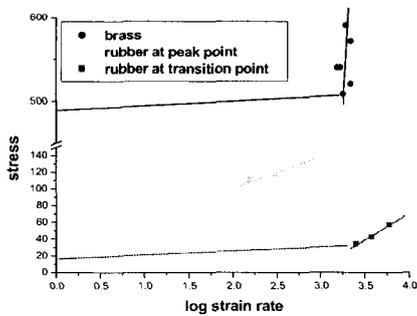


Fig. 7 Dynamic compressive stress vs log strain rate curve for brass and rubber

4. 결론

동적인 압축 하중 하에서 고무와 황동에 대한 동적 변형 거동을 SHPB 기법을 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 고무 시편의 동적 변형 거동에서 변형률 속도의 효과는 매우 크다는 것을 보였다. 동적인 전환점들의 응력들은 변형률 속도의 증가와 동적인 변형률 변화의 작은 영역에서 큰 증가를 보였다.
2. 전환점의 응력-대수 변형률 속도는 이중 선형의

관계를 나타내고 피크점의 응력-대수 변형률 속도는 선형적인 관계를 보였다.

3. 레삭황동의 압축 항복 강도와 변형률의 관계는 이중 선형의 재료 특성이 나타남을 알 수 있었다.

후기

연구에 도움을 주신 한국학술진흥재단에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 이억섭, 김면수, 황시원, 조규상, "고변형률 압축/인장 하중에 대한 알루미늄 합금의 동적 변형 거동", 한국정밀공학회지, Vol. 20, No. 1, pp.196~204, 2003.
2. Chree, C., "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinat", Their Solutions and Applications, Cambridge Phil. Soc. Trans. Vol 14, pp. 250, 1889.
3. Pochhammer, L., "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylind", J. Reine "Angewandte Math", Vol81, pp.324, 1876.
4. Davies, R. M., "An critical study of the Hopkinson Pressure B", Phil. Tran. A, Vol. 240, P.375, 1948.
5. Follansbee, P.S., "<The Hopkinson Bar>, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing", American Society for Metals, Vol. 8, pp.198~203, 198.
6. Lee, O. S., Lee, S. S., Chung, J. H. and Kang, H. S., "Dynamic Deformation Under Bar Experiment", KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp.1143~1149, 1988.
7. Lee, O. S., Lee, J. Y., Kim, G. H. and Hwang, H. S., "High Strain-rate Deformation of Composite Materials Using a Split Hopkinson Bar Technique, Key Engineering Materials', Vol. 183~187, Part 1, pp.307~312, 2000.
8. Lee, O. S. and Kim, G. H., "Thickness Effects on Mechanical Behavior of a Composite Material(1001P) and Polycarbonate in Split Hopkinson Pressure Bar Techniq", Journal of Materials Science Letters, Vol.19, pp.1805~1808, 2000.
9. Lee, O. S. and Kim. G. H., "Determination of Deformation Behavior of the Al6061-T6 under High Strain Rate Tensile Loading Using SHPB Technique", Transaction of KSME (A), Vol.24, No.12, pp.3033~3039, 2000.