

플라스틱 SHPB 를 사용한 고무의 고변형률 하중하에서의 동적변형 거동.

이억섭*(인하대 기계공학부), 김경준(인하대 인하대원 기계공학과)

Dynamic deformation behavior of rubber under high strain rate compressive loading

O. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.), K. J. Kim(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. 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), dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 선도), stress wave(응력파), high strain rate(고변형률 속도), dynamic yield stress(동적 항복 응력)

1. 서론

고변형률 속도하에서의 압축실험은 저변형률 속도일 때의 시험과는 구분되어야 한다. 고변형률 하중하에서의 시험에서 관성의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적인 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 나타낸다⁽¹⁾. 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 특징지어지는 극한 작업 환경에 사용되고, 특히 단조와 압연과 같은 공정들은 고변형률 하중하에서 작업이 이루어진다. 이러한 극한 하중 상태에서 사용되는 구조물의 설계를 위해서는 고변형률 하중하에서 금속에 대한 기계적 변형 거동을 알아야 한다. 그러나 고변형률 하중하에서의 기계적인 특성을 얻기는 쉽지 않다.

변형률 속도가 10³/s 이상의 상태에서 충격에 대한 압축과 인장 하중하에서 동적 재료의 특성을

얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적으로, SHPB 장치는 10³-10⁴ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

2. 이론

2.1 기본 가정 및 이론

SHPB 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽²⁾와 Chree⁽³⁾ 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 축방향으로의 응력파 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 일정한 시편의 변형

탄성파가 붕을 통해서 전파를 하지만, 마찰이나 소성 변형에 대한 영향 때문에 시편의 변형을 해석하기는 어려움이 있다. 따라서 마찰의 영향은 접성이 있는 윤활제를 사용하여 줄였다. 더욱이 시편의 변형은 일정하지만, 고변형률 속도에서는 갑작스런 입자들의 가속화 때문에 길이 방향이나 반경 방향의 관성이 발생하게 된다.

2.3 SHPB 에 대한 응력과 변형률 속도 측정

전통적인 SHPB 기법에서, 시편은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된다. Fig. 1에서 SHPB에서 발생한 압축 탄성파의 전파 거동을 나타내었다. 충격봉(striker)이 입력봉에 충돌하게 되면, 응력과(stress wave)가 발생하고 시편까지 출력봉을 통해서 전파하게 된다. 입력된 응력의 일부는 물질의 임피던스(impedance) 차에 의해 붕과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시편으로 투과된다. 이러한 투과파는 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 이때 시편내의 응력, 변형을 그리고 변형률 속도는 각 붕에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다⁽⁵⁾.

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

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

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

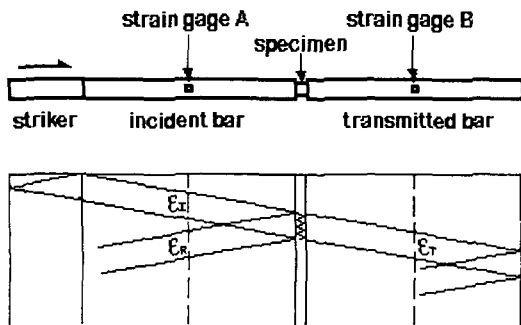


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive test.

3. 실험

3.1 하중장치와 충격봉

실험에서 사용된 입력봉, 출력봉과 충격봉의 재질은 모두 PEEK-1000 으로써 항복 강도는 110MPa 이고, 밀도는 1.32g/Cm³ 이며, 탄성계수는 4.4GPa 이다. 그림 2 는 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

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

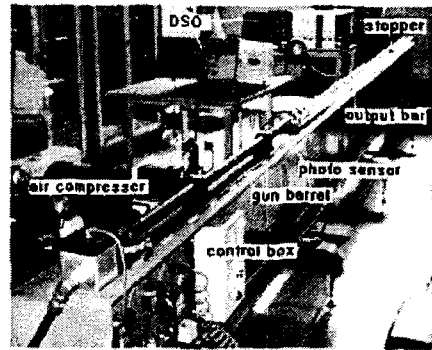


Fig. 2 SHPB experimental setup.

3.2 입력봉과 출력봉

압력봉의 직경이 작을수록 좀 더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 붕의 길이는 붕에서의 응력과 길이(stress wavelength)의 최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 붕의 길이(L)에 대한 직경(D)의 비율을 100으로 하였다. 이들 두 붕의 재질은 충격봉과 같은 재질인 PEEK-1000 으로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm 로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면에는 시편과의 완전한 접촉하도록 정밀 연삭하였다^{(6),(7),(8)}.

3.3 직진도 유지 장치

실험 장치에서 중요한 문제점은 붕에서의 응력파가 일차원으로 전파하기 위해 붕의 직진도의 유지이다. 따라서 I-beam 을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 속도와 응력과 측정 장치

속도를 측정하기 위해, gun barrel 의 끝단에 50mm 의 간격으로 3 개의 광센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광센서의 빛을 차단시킬 때, oscilloscope 와 Nicolet 410 에 전기적인 신호가 전달되게 된다. 봉의 중간에 부착된 스트레인 게이지로부터 응력파의 신호를 검출하게 된다.

3.5 시편(specimen)

시편의 형상은 중력의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 두께는 R1 이 3.8mm 이고 R2 와 R3 는 4.6mm 이다. 직경은 10mm 로 하였다. 그 형상은 그림 3 에 나타내었다.

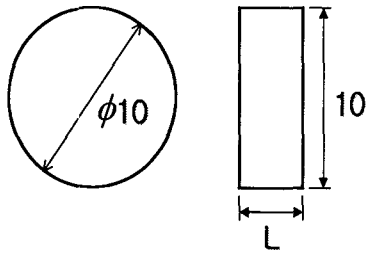


Fig. 3 Geometry of compressive Rubber specimen.

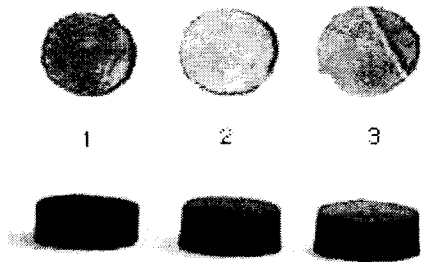


Fig. 4 Geometry of rubber specimens before compressive test (Rubbers 1, 2 and 3 from left)

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 oscilloscope 에 검출된 결과는 그림 4 에 나타나있다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)와 같아야 한다. 하지만 점차 감쇠됨을 볼 수 있다.

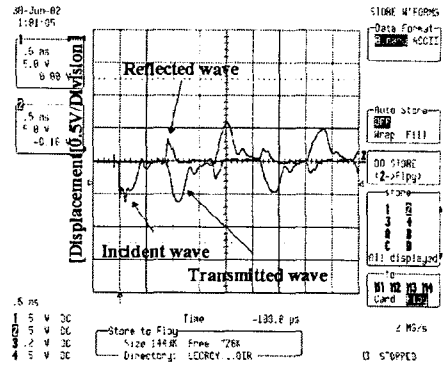


Fig. 5 Strain signal recorded at oscilloscope.

Fig 6 에서는 정적 및 동적인 하중 하에서의 전형적인 응력-변형률 그래프를 비교 하였다.

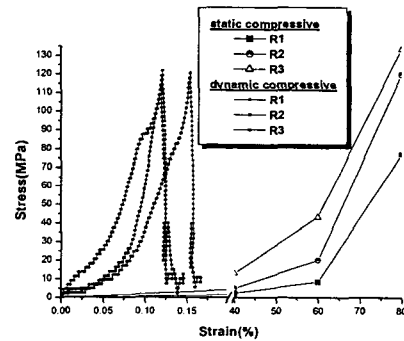


Fig. 6 Dynamic and static compressive stress-strain curve.

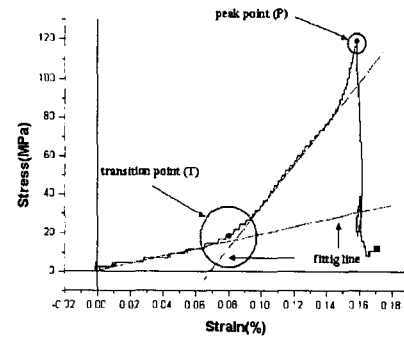


Fig. 7 Determination of peak point and transition point.

전환점과 피크점에 결정은 그림 6 에서 보듯이 두개의 fittig line 을 사용하여 결정하였다. 이 두 점의 명칭을 전환점(transition point, T), 피크점(peak point, P)이라 정하였다.

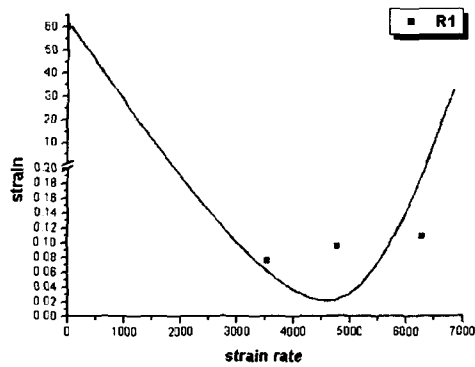


Fig. 8(a) Typical relationship between strain rate and strain at the transition point.

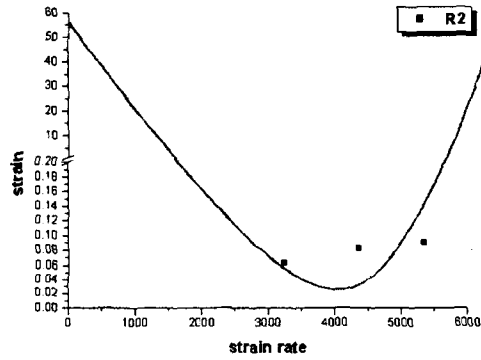


Fig. 8(b) Typical relationship between strain rate and strain at the transition point.

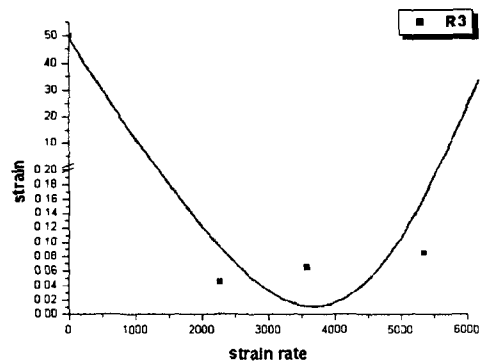


Fig. 8(c) Typical relationship between strain rate and strain at the transition point.

그림 8의 (a), (b), (c)들은 R1, R2, R3에 전환점의 변형률과 변형률 속도 증가와의 그래프를 추상적으로 나타내고 있다. 변형률은 속도가 증가 함으로써 어느 속도에 다다르면 그 변형률이 감소하다가 다시 증가하는 것을 알 수 있다.

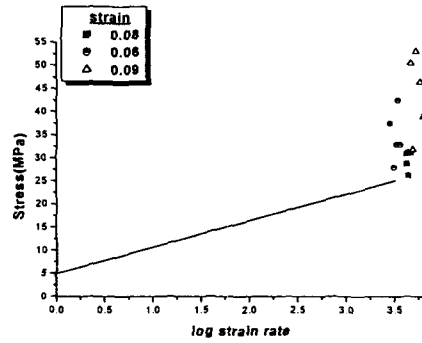


Fig. 9 Transition point stress vs. strain rate for Rubber.

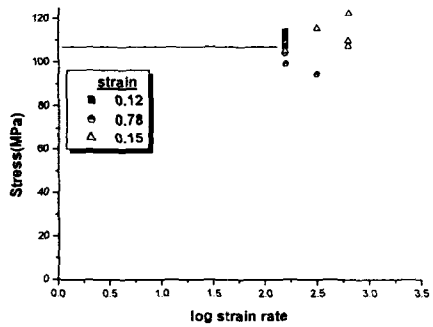


Fig. 10 Peak point stress vs. strain rate for Rubber 3.

그림 10는 고무의 기계적 성질을 전환점의 응력과 변형률 속도의 비선형적인 관계를 R3의 응력, 변형률 속도의 그래프로 나타내고 있다.

그림 8의 (a), (b), (c)와 그림 9는 전환점과 피크점의 응력-변형률 속도의 그래프로 나타내고 있다. 또한 선형과 비선형의 관계를 나타내고 있다.

4. 결론

플라스틱 SHPB를 사용한 고무의 고변형률 하중 하에서의 재료의 동적 변형 거동의 특성은 다음과 같다.

변형률 속도는 동적변형거동에 매우 큰 영향을 준다.

전환점에서의 변형률과 변형률 속도의 관계는 비선형적으로 2 차원 곡선과 유사하게 변화된다는 사실을 규명하였다.

전환점의 응력과 변형률 속도는 비선형적인 관계를 나타낸다.

피크점의 응력과 변형률 속도는 일정함을 나타내고 있으나, 더 정밀한 실험으로 이 사실을 규명할 것이다.

후기

연구에 도움을 주신 한국학술진흥재단에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 이억섭, 김연수, 백준호, "SHPB 테크닉을 이용한 Al5052-H32 의 동적 인장 거동 규명", 한국정밀 공학회 추계학술대회, pp.790~794, 20
2. Chree, C., "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates", 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 Cylinder", J. Reine "Angewandte Math", Vol81, pp.324, 1876
4. Davies, R. M., "An critical study of the Hopkinson Pressure Bar", 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
10. Blow, C. M and Hepburn C, Rubber Technology and Manufacture, Published for the Plastics and Rubber Institute by Butterworth Scientific, pp.80-85, 1982
11. Bragow, A. M. and Lomunow,, "Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Lolsky Method", Int. J. Impact Energy, Vol. 16, pp.321~330, 1994
12. Don E. Bray and Roderic K. Stanley, "Evaluation Nondestructive, A Tool in Design, Manufacturing, and Service", CRC press, pp.59
13. Follansbee, P. S., "The Hopkinson Bar, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing", American Society for Metals, Vol. 8, pp.198~203, 1985
14. Hopkinson, B., "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, 1941