

SHPB 기법에서 Pulse shaper 가 내유 고무(NBR)의 동적 변형 거동에 미치는 영향

김성현*(인하대원), 이억섭(인하대 기계공학과), 이종원(인하대원)

Effect of pulse shaper in SHPB technique on dynamic deformation behavior of an NBR rubber

S. H. Kim(Mech. Eng. Dept. InHa U.), O. S. Lee(Mechanical Eng. Dept., InHa U.)
and J. W. Lee(Mech. Eng. Dept. InHa U.)

ABSTRACT

This paper presents a Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique to obtain compressive stress-strain data for rubber materials. An experimental technique that modifies the conventional Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) has been developed for measuring the compressive stress-strain responses of materials with low mechanical impedance and low compressive strengths such as rubber. This paper introduces an all-polymeric pressure bar which achieves a closer impedance match between the pressure bar and the specimen materials. In addition, we use a pulse shaper to lengthen the rising time of the incident wave to ensure stress equilibrium and homogeneous deformation of a rubber materials. It is found that the modified technique can determine the dynamic deformation behavior of an NBR rubber more accurately.

Key Words : SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), 동적 변형(Dynamic Deformation), 고 변형률 속도(High Strain - Rate), 내유 고무(NBR), 펄스 조절기(Pulse Shaper)

1. 서론

고무와 같은 강도가 낮고, 임피던스(impedance)가 낮은 기계 재료는 자동차와 항공기 등의 수송용 자동 기구의 충격 흡수용으로 널리 사용되고 있다. 실제 구조물에서 고무 재료를 사용하기 위해서는 제품의 설계단계에서 고무 재료의 물성치에 대한 정확한 정보가 확보되어야 한다. 특히, 고 변형률 속도(High strain rate)로 정의 되는 충격하중과 충돌하중 상태에서 구조물의 건전성을 유지하는 설계를 구현하기 위하여서는 고무재료의 동적 응답과 에너지 소산 거동에 대한 정보가 필요하다.

고 변형률속도 하에서 재료의 거동은 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)라는 실험 기법을 이용하여 규명할 수 있다. SHPB 기법은 $10^2 \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도에서 금속, 콘크리트 그리고 세라믹과 같은 기계 재료의 동적 거동 특성을 규명하기 위해,

1949년 Kolsky¹에 의해 개발되었다.

기존의 SHPB 기법은 고강도의 압력봉을 사용하여 금속과 같은 재료의 동적 거동에 대한 관찰을 용이하게 하였다. 그러나 기존 SHPB 기법으로 플라스틱이나 고무재료와 같은 연성재료의 시편을 실험하게 되면 시편과 봉의 높은 임피던스 차와 시편에서의 낮은 응력파의 전파속도로 인하여 시편에서의 동적 거동에 대한 응답률을 낮게 된다.² 그러므로 기존의 SHPB 기법을 연성 재료에 적용하기 위해서는 새로운 기법을 개발할 필요가 요구된다.

본 연구에서는 고무재료와 같은 연성재료의 SHPPB 실험을 위하여 중합체(Polymer)의 압력봉을 사용하여 기존 실험을 수정하였다. SHPB 실험에서 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻기 위해서는 시편이 동적 응력 평형 상태 하에서 일정하게 변형되어야 한다. 또한, 중합체의 봉과 고무시편은 변형률 속도에 민감하므로 일정한 변형률 속도로 변형되도록

특 해야 한다. 즉, 실험을 수행하는 동안 확연한 변형을 속도의 변화가 없어야 한다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위해 Pulse shaper 를 부착하여 시편 내에서 응력의 동적 평형상태와 일정한 변형을 속도를 얻을 수 있다.³

본 논문에서는 수정된 SHPB 기법을 이용하여 내유성, 마모성과 열노화성, 내약품성이 우수한 내유고무(NBR)의 동적 변형 거동 특성에 대해 연구를 수행하였다.

2. 이론

2.1 탄성과 전파이론

SHPB 실험 기법은 충격봉(Striker Bar)과 두 개의 압력봉(Pressure Bar)으로 이루어져 있으며, 압력봉은 입력봉(Incident Bar)과 출력봉(Transmitted Bar)으로 이루어져 있다. 충격봉이 입력봉에 충격 하중을 주게 되면 충격면에 응력파(stress wave)가 발생되어 충격봉과 입력봉으로 각각 전파되게 된다. SHPB 기법에서는 압력봉의 기하학적인 형상에 의하여 응력파는 봉내를 1 차원적으로 전파되게 된다.⁴ 입력봉내를 전파하는 응력파는 입력봉과 시편의 계면에서 임피던스 차에 의해 반사되거나 투과된다. 입력봉과 시편의 계면에서 반사된 파(Reflected wave)는 위상이 바뀌어 입력봉으로 다시 전파되고 투과된 파(Transmitted wave)는 출력봉으로 전파된다. 입력봉과 출력봉에는 응력파의 신호를 검출하는 스트레인 게이지(Strain gage)가 각각 부착되어 있다. 압력봉내를 1 차원적으로 전파하는 응력파를 검출하고, 검출된 응력파 신호로부터 시편에서의 응력파 변형을 그리고 변형률 속도를 측정할 수 있다.⁵

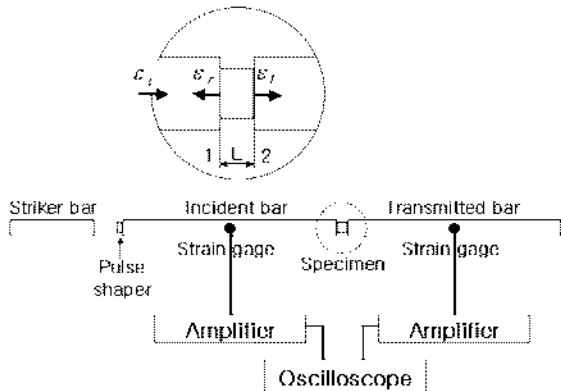


Fig. 1 Schematic of the modified SHPB with all-polymeric bars for testing soft materials specimens

시편이 1 차원적으로 변형한다면 다음과 같은 관계로 시편에서의 변형률 속도를 구할 수 있다.

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{v_1 - v_2}{L} \quad (1)$$

위 식에서 v_1 과 v_2 는 시편과 압력봉 계면에서의 입자속도(Particle velocities) 이며, C_0 는 압력봉내의 응력파 전파속도이다. L 은 시편의 길이를 나타내고 있다. 변형률, 응력파 전파속도 그리고 입자속도와 의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{C_0}{L}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (2)$$

입력봉과 시편의 계면에 작용하는 힘 F_1 과 시편과 출력봉의 계면에 작용하는 힘 F_2 는 압력봉의 탄성계수 E 와 압력봉의 단면적 A 로 다음과 같이 알 수 있다.

$$\begin{aligned} F_1 &= EA(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \\ F_2 &= EA\varepsilon_t \end{aligned} \quad (3)$$

시편의 양면에 작용하는 응력 σ_1 과 σ_2 는 위식을 시편의 단면적 A_s 로 나누어 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E \frac{A}{A_s}(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \\ \sigma_2 &= E \frac{A}{A_s}\varepsilon_t \end{aligned} \quad (4)$$

시편에 작용하는 평균응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{Aver} = E \frac{A}{A_s}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (5)$$

시편의 양단에 작용하는 힘 F_1 과 F_2 가 같다면 식 (3)에 의해 $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ 의 관계가 된다. 즉 시편의 동적 응력상태가 평형이 되므로 다음과 같은 식으로부터 시편에서의 응력파 변형을 그리고 변형률 속도를 알 수 있다.

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \varepsilon_t \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_i dt \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \varepsilon_r(t) \quad (8)$$

식 (6), (7), (8)의 관계는 식(3)에서 $F_1 = F_2$ 가 되어 동적 응력 상태가 평형이 되는 경우 유효하게 쓰인다. 즉 시편의 양단에 작용하는 힘은 식(3)을 상호 비교하여 시편에서의 동적 응력 상태를 알 수 있다.

압력봉의 기하학적인 형상은 응력파가 압력봉내를 일차원적으로 전파하기 위한 직경 대 길이의 비와 시편에서 변형률 속도가 최대가 되기 위한 직경

을 고려하여야 한다. 그리고 응력파의 파장에 의해 시편에서의 전체 변형량이 결정되므로 봉의 길이는 최소한 응력파의 2 배의 길이가 되어야 한다. 압력봉의 항복강도가 압력봉의 탄성영역 내에서 변형하는 시편의 최대 응력값을 결정하게 되므로 고강도의 재질을 사용하여야 한다. 고무시편의 실험을 위해 본 논문에서는 항복강도가 110Mpa 이고 탄성계수가 4.4Gpa 인 PEEK-1000(Poly-Ether-Ether-Ketone-1000)을 사용하였다. 압력봉의 기하학적인 형상은 직경과 길이를 각각 16mm, 1600mm 로 하였다.

Pulse shaper 는 Fig. 1 에서처럼 입력봉의 충격면에 압력봉과 다른 재질을 부착한 것이다. 충격봉에 의해 충격하중을 받게 되면 Pulse shaper 가 소성 변형하게 되고, 응력파는 입력봉을 향하여 전파되게 된다. 본 연구에서 Pulse shaper 는 26.4 MPa 의 항복점 인장 강도를 갖는 Ethylene Copolymer PH162 를 사용하여 시편의 파손을 방지하고, 시편내의 동적 응력상태가 평형에 이르도록 하였다.⁶

3. 실험 결과 및 고찰

충격면에서 생성된 응력파가 입력봉에 전파되고 시편에서 입력봉과의 임피던스 차에 의해 입력봉으로 반사되거나 출력봉으로 투과된 파는 Fig. 2 와 같이 각각의 압력봉에 부착된 스트레인 게이지를 통하여 오실로스코프(Oscilloscope)에 기록된다.

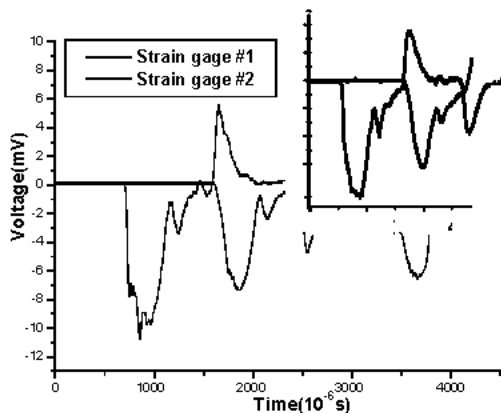


Fig. 2 Strain-time signals for a SHPB experimental with NBR-rubber specimen

Fig.2 는 내유고무 시편으로 중합체 압력봉의 SHPB 실험을 수행하여 얻은 파형의 모습이다. Pulse shaper 를 부착하였을 때의 파형과 비교하기 위하여 그림의 우측 상단에 Pulse shaper 를 부착하여 수행한 SHPB 실험으로 얻어진 파형을 첨부하였다. 두 개의 파형을 서로 비교하여 보면, 파형의 모습이

완전히 다른 양상을 보이고 있다. Table 1 에 Pulse shaper 를 부착하였을 때와 부착하지 않았을 때의 입력파에 대한 정보를 비교하였다.

	No-Pulse shaper	Pulse shaper
Rising time	43 μ s	146 μ s
During time	455 μ s	461 μ s

Table 1 Comparison of measured incident wave data with Pulse shaper and without Pulse shaper

입력파가 최초 측정되는 시간과 끝나는 시간으로부터 입력파가 지속되는 시간을 기록하였으며 파가 급격히 신장되는 부분의 시간을 Rising time 으로 나타내었다. Rising time 은 입력파가 동적 평형 상태에 도달할 때 까지 걸리는 시간이며 중합체 압력봉의 경우 낮은 응력파 전파속도와 임피던스 때문에 동적 평형 상태에 도달하는 시간을 길게 하여야 한다.

Pulse shaper 를 부착하였을 때에는 충격봉이 입력봉에 직접적으로 하중을 가하지 않고 Pulse shaper 를 통해서 하중을 전달하게 된다. Pulse shaper 의 기하학적인 특성과 물리적인 특성에 따라 입력파의 형태가 바뀌게 된다. Fig. 2 와 같이 Pulse shaper 를 부착하여 안정된 형태의 파형을 얻기 위해서는 Pulse shaper 의 기하학적인 형상에 대한 적당한 설계가 필요하다.

Pulse shaper 를 부착하여 Rising time 이 길어진 파는 시편에서 동적 응력의 평형 상태에 도달할 수 있는 충분한 시간을 주게 된다. Rising time 이 길어진 파가 동적 응력의 평형 상태에 미치는 영향은 식(3)을 서로 비교하여 알 수 있다.

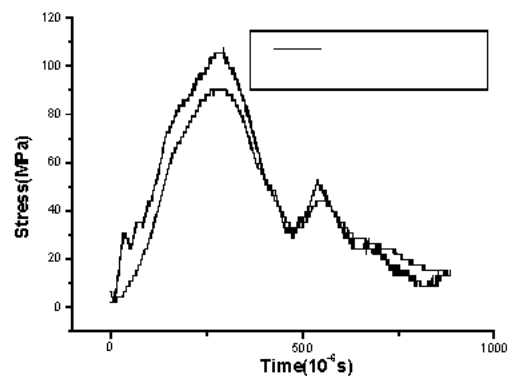


Fig. 3 Comparison of front-end stress and back-end stress

Fig. 3 은 입력봉과 시편의 계면(Front-end)와 시편과 출력봉의 계면(Back-end)에 작용하는 응력을

비교한 그림이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 두 면에 작용하는 응력이 시간에 따라 전체적으로 같은 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

Pulse shaper 를 부착하여 입력파의 Rising time 을 길어지게 하므로써 시편의 양단에 작용하는 응력이 동일해진다. 일련의 과정들을 통하여 Fig. 4 와 같은 시편에서 일정한 변형률 속도의 변형이 이루어졌음을 알 수 있다.

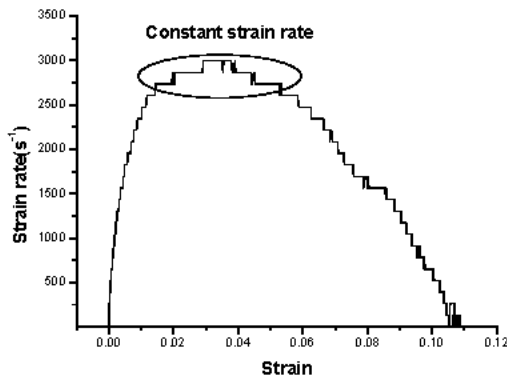


Fig. 4 Dynamic strain rate - strain curve of PH 162 Pulse shaped SHPB experiments

Fig. 5 에 Pulse shpaer 를 부착한 증합체 압력봉의 SHPB 기법을 이용하여 내유고무(NBR)의 실험을 수행하여 얻은 응력-변형률 선도를 나타내었다.

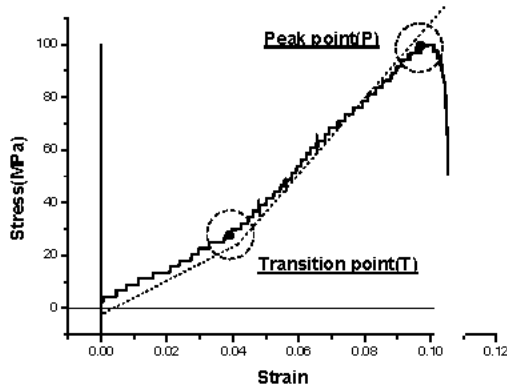


Fig. 5 Compressive stress-strain curve for NBR rubber

4. 결론

재료의 동적 하중 하에서 고변형률 속도로 변형하는 거동의 특성을 관찰하기 위한 실험적인 접근 방법의 하나인 SHPB 기법을 이용하여 고무와 같은 낮은 밀도와 낮은 임피던스 재료를 실험하기 위해 증합체 압력봉을 사용하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 증합체 압력봉을 사용하였을 때 기존의

SHPB 기법에 비하여 응력파의 측정이 용이해졌다. 그러나 증합체 압력봉에서 응력파의 거동 특성상 시편에서 동적 응력 비평형 상태가 되어 실험에서 오차의 원인이 되었다.

- 2) 동적 응력 비평형 상태의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 입력봉의 전면에 Pulse shaper 를 부착하여 실험 기법을 개선하였다. 소성변형 된 Pulse shaper 를 통해 응력파가 입력봉에 전파되도록 하여, 기존의 SHPB 기법과 다르게 응력파의 전파 양상이 입력파의 Rising time 을 길게 하여 시편에서의 동적 응력 상태를 평형으로 만들게 하였다.
- 3) 시편에서 동적 응력의 평형 상태는 시편의 변형이 일정한 변형률 속도가 이루어지게 한다. 즉 SHPB 실험에서 일련의 가정에 합당한 실험의 조건을 제공하여 보다 정확한 동적 하중 하에서의 고 변형률 속도로 변형하는 재료의 거동 특성을 관찰할 수 있는 실험 과정을 개발하였다.

후 기

본 연구는 한국 학술진흥 재단의 지원(KRF-2003-041-D00002)을 받아 수행 된 것 입니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kolsky, H., "Stress In Solids", pp.87~91, 1963
2. Gray, G. t., "Split Hopkinson Pressure Bar Testing of Soft Materials," ASM Handbook, Vol. 18, pp. 489~496, 2000
3. Frew, D. F., "Pulse shaping Techniques for Testin Brittle Material with a Split Hopkinson Pressure Bar," EXPERIMENTAL MECHANICS, Vol. 42, PP.92~106.
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.
6. B. Song., W. Chen., "Dynamic Stress Equilibration in Split Hopkinson Pressure Bar Tests on Soft Materials," EXPERIMENTAL MECHANICS, Vol. 44, pp. 300~312.