

플라스틱 SHPB 기법을 사용한 고무의 고변형률 하중 하에서의 동적변형 거동

이역섭[#], 김경준^{*}

Dynamic Deformation Behavior of Rubber Under High Strain-Rate Compressive Loading by Using Plastic SHPB Technique

Ouk Sub Lee[#], Kyoung Joon Kim^{*}

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 $10^3/s \sim 10^4/s$. In this paper, dynamic deformation behaviors of rubber materials widely used for the isolation of vibration from structure under varying dynamic loading are determined by using plastic SHPB technique. A transition point to scope with the dynamic deformation behavior of rubber-like material is defined in this paper and used to characterize the specifics of the dynamic deformation of rubber materials.

Key Words : high strain rate(고변형률 속도), plastic SHPB(플라스틱 Split Hopkinson Pressure Bar), stress-strain curve(응력-변형률 선도), stress-log strain rate curve(응력-로그 변형률 속도), stress wave(응력파)

기호설명

•
 $\dot{\epsilon}$ = strain rate
 $\epsilon_{specimen}$ = specimen strain

$\sigma_{specimen}$ = specimen stress

L = specimen length

E = Young's modulus

R = radius of the bar

A = cross-sectional area of the bar

A_s = cross-sectional area of the specimen

C_0 = stress wave velocity

C = stress wave velocity of pressure bar

ϵ_I = incident strain

ϵ_R = reflected strain

ϵ_T = transmitted strain

접수일: 2003년 2월 28일; 게재승인일: 2003년 8월 14일
교신처: 인하대학교 기계공학과
Email: fecos@inha.ac.kr, Tel: (032)860-7315
* 인하대 대학원 기계공학과

1. 서론

충돌 혹은 충격에 관한 문제는 외국의 경우 산업의 발달과 함께 이미 오래 전부터 커다란 관심의 대상이 되어 왔다. 고변형률 속도 하에서의 압축과 인장 시험은 저변형률 속도일 때의 시험과는 구분되어야 한다. 고변형률 하중 하에서의 시험에서 관성의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 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 불안정한 변형은 관성에 의한 것이므로 관성의 영향을 최소화하는 조건에서 실험을 수행하여야 한다. 일반적으로 고무재료는 다량의 에너지 흡수 율로 인해 지진과 같은 진동과 파손증가 방지를 위해 널리 사용되었다. 그러나 고무재료는 하중과 변형을 비선형적인 관계로 나타낸다. 또한 커다란 변형 영역은 hyper-elastic 특성을 나타낸다. 그래서 고무재료의 효과적인 정적/동적 특성의 설계를 위해선 좀더 세부적이고 구체적인 이해가 필요하다.

본 논문에서는 내진재료의 동적변형거동을 실험적으로 규명하여 내진 구조물에 필요한 설계에 관한 정보제공과 플라스틱 바를 사용한 SHPB 기법으로 내진재료의 일종인 고무의 고변형률 하중 하에서의 기계적 특성을 규명하였다. 변형률 속도가 $10^3/s$ 이상의 상태에서 충격에 대한 압축 하중 하에서의 동적 재료의 특성을 얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적으로 SHPB 장치는 $10^3 \sim 10^4$ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

2. 이론

2.1 기본 가정에 관한 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 균

일하다는 사실이 발견되었다⁴. 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 일정한 변형

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

2.3 SHPB 기법의 응력과 변형률 속도 측정

전통적인 SHPB 기법에서, 시편은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된다. Fig. 1은 SHPB에서 발생한 압축 탄성파의 전파 거동을 나타내었다. 충격봉(striker)이 입력봉에 충돌하게 되면, 응력파(stress wave)가 발생하고 시편까지 출력봉을 통해서 전파하게 된다. 입력된 응력파의 일부는 재료의 임피던스(impedance) 차에 의해 봉과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시편으로 투과된다. 이러한 투과파는 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 이때 시편내의 응력, 변형률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다⁵.

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

$$\varepsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon_R dt \quad (2)$$

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

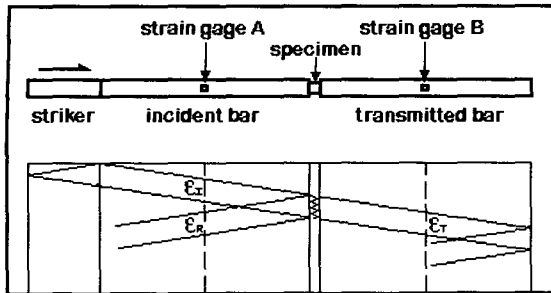


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive test.

3. 실험

3.1 하중제어장치와 충격봉

실험에서 사용된 입력봉, 출력봉과 충격봉의 재질은 모두 PEEK(poly-ether-ether-ketone)-1000 로서 항복 강도는 110MPa 이고, 탄성계수는 4.4GPa 이며 밀도는 1.32g/cm³ 이다. PEEK-1000 은 폴리에테르에테르케톤수지를 압출성형한 소재로서 내약품성, 내마찰마모성, 기계가공성 등에서 균형이 잡힌 열가소성 슈퍼엔지니어링 플라스틱이다. Fig. 2 는 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

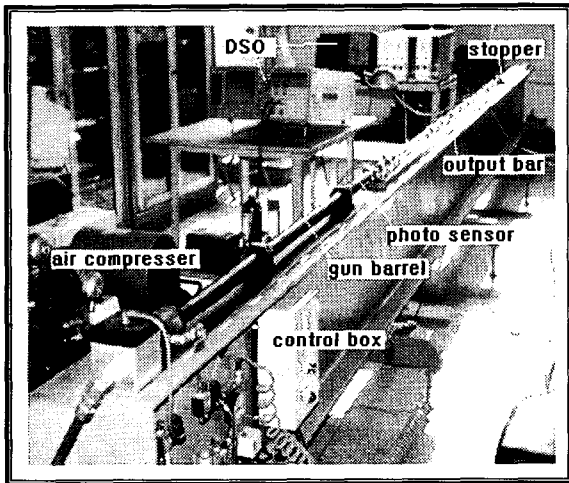


Fig. 2 General view of SHPB experimental apparatus.

충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm 이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Fig. 2 에서 보듯이 건 배럴(gun barrel)을 설치하였으며 압력을 발생시키는 장치와 입력봉에 정확한 충격을 주도

록 정밀 하게 셋팅을 하였다.

3.2 입력봉과 출력봉

입력봉의 직경이 작을수록 좀더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 봉의 길이는 봉에서의 응력파의 길이 (stress wavelength)의 최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L) 대 직경(D)의 비(L/D)는 100 으로 하였다⁶. 이들 두 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질인 PEEK-1000 으로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 지름은 16mm 로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면을 시편과 완전히 접촉하도록 정밀 연삭하였다^{6,7,8}.

3.3 직진도 유지장치

실험 장치에서 중요한 문제점은 봉에서의 응력파가 일차원으로 전파하기 위해 봉의 직진도의 유지이다. 따라서 I-beam 을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다⁹.

3.4 속도와 응력파 측정 장치

속도를 측정하기 위해, 건 배럴(gun barrel)의 끝단에 50mm 의 간격으로 3 개의 광 센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광 센서의 빛을 차단시킬 때, Oscilloscope 와 Nicolet 410 에 전기적인 신호가 전달되게 하였다. 입력봉과 출력봉의 중간에 부착된 스트레인 게이지로부터 응력파의 신호를 검출하였다.

3.5 압축 시편(specimen)

Table 1 과 Table 2 는 본 연구에서 사용한 고무의 성분표 와 기계적인 특성을 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of rubber materials.

	Rubber		
	1	2	3
Hardness (Hs)	50	70	86
Tensile strength (Mpa)	20	22.5	18
Elongation (%)	446	240	120

Table 2 Specification for rubber materials.

Use	Ingredients	Rubber(Phr*)		
		1	2	3
Rubber	SMR CV60	100	100	100
Carbon	FEF	22	55	88
	SRF	15	15	15
	Zinc oxide	5	5	5
	Stearic acid	1	1	1
Antioxidants	BLE	2	2	2
	Sunnoc	2	2	2
	3P	2	2	2
	7P	2	2	2
Accelerants	NOBS	1.2	1.2	1.2
	DM	0.6	0.6	0.6
Vulcanizing agent	S	2	2	2

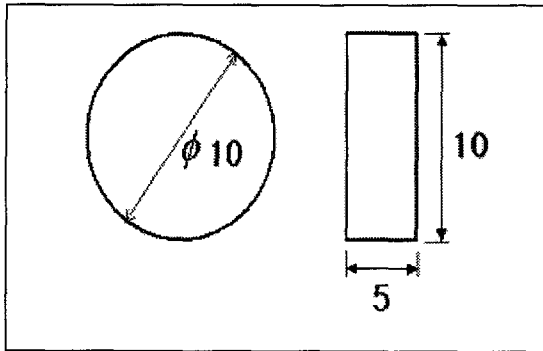


Fig. 3 Geometry of compressive specimen.

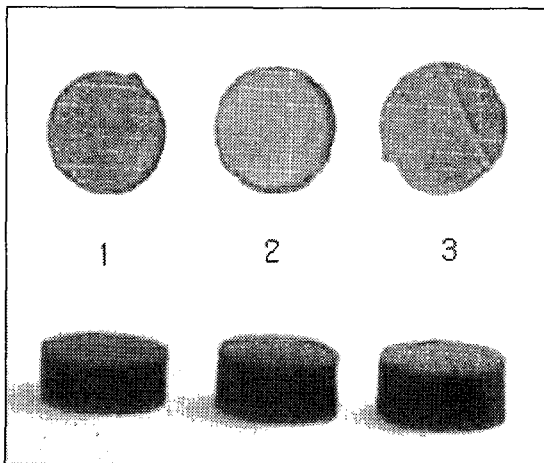


Fig. 4 Geometry of rubber specimens.

시편의 형상은 중력의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 두께는 rubber1 은 3.8mm rubber2 와 rubber3 은 4.6mm 이고 직경은 10mm 로 하였다. 그 형상과 실험 전 시편의 실제형상은 Fig. 3 와 Fig. 4 에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 오실로스코프(oscilloscope)에 검출된 결과는 Fig. 5 에 나타나 있다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)와 같아야 한다. Fig. 5 의 결과는 이러한 이론적인 요구를 만족하고 있음을 알 수 있다. 식(1), (2), (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의 관계를 얻을 수 있었다.

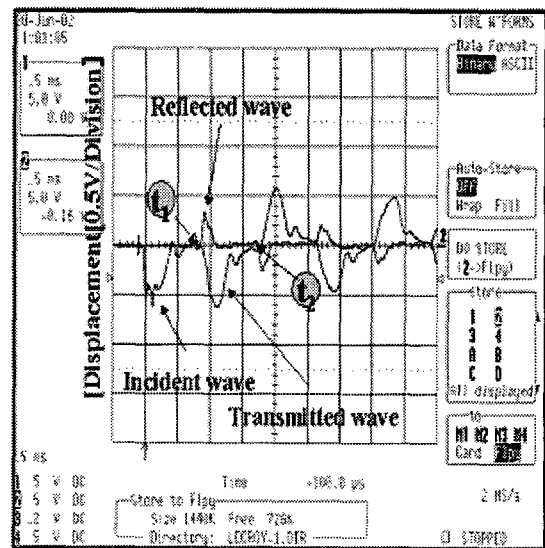


Fig. 5 Strain signal recorded at oscilloscope

고무의 동적 및 정적인 하중 하에서의 응력-변형률 그래프를 비교한 그래프를 Fig. 6 에 나타내었다. 전환점과 피크점에 결정은 Fig. 7 에서 보듯이 두개의 fitting-line 을 사용하여 결정하였다. 첫번째 fitting-line 과 두번째 fitting-line 의 교차점에서 수직한 방향에 위치한 점을 전환점(transition point, T)이라 하였고, 응력-변형률 그래프에서 가

장 큰 응력에 위치한 점을 피크점(peak point, P)이라 정하였다.

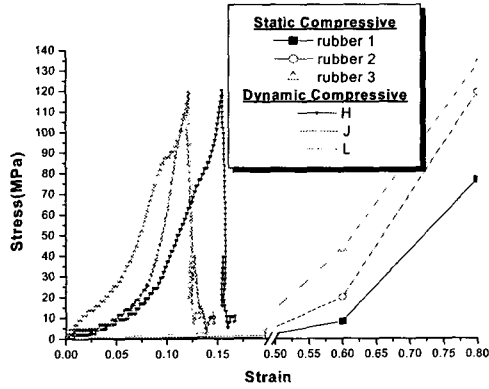


Fig. 6 Dynamic and static compressive stress-strain curves.

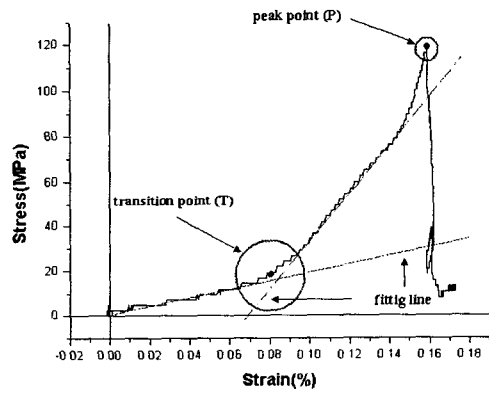


Fig. 7 Determination of peak point and transition point.

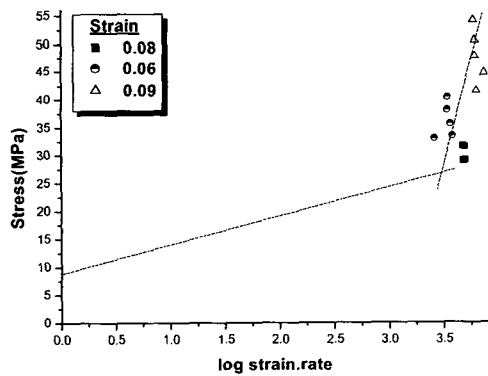


Fig. 8 Transition point stress VS strain rate for rubber 1.

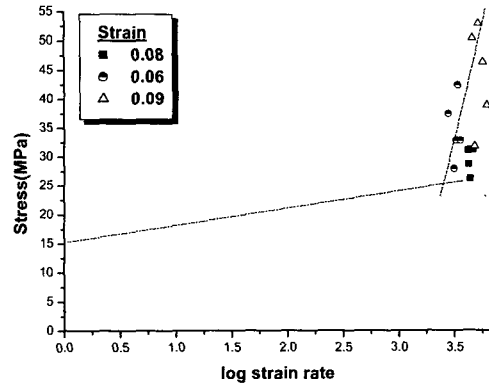


Fig. 9 Transition point stress VS strain rate for rubber 2.

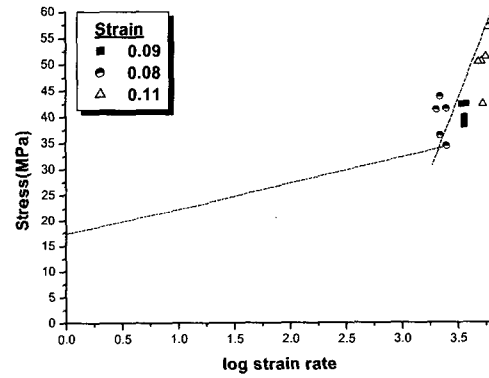


Fig. 10 Transition point stress VS strain rate for rubber 3.

Figs. 8, 9, 10 은 고무시편(rubber 1, 2, 3)의 전환점에서의 응력-대수 변형률속도 관계 그래프를 나타낸다. 또한 정적인 하중을 주었을 때의 전환점에서의 압축강도와 동적인 하중을 주었을 때의 전환점에서의 압축강도를 비교한 그래프이다. 여기서 전환점의 응력-대수 변형률속도 그래프는 거의 이중선형인 관계를 보이고 있다.

Figs. 11, 12, 13 은 고무시편(rubber 1, 2, 3)의 피크점에서의 응력-대수 변형률속도 관계 그래프를 나타낸다. 또한 정적인 하중을 주었을 때의 피크점에서의 압축강도와 동적인 하중을 주었을 때의 피크점에서의 압축강도를 비교한 그래프이다. 여기서 피크점의 응력-대수 변형률속도 그래프는 선형적인 관계를 보이고 있다.

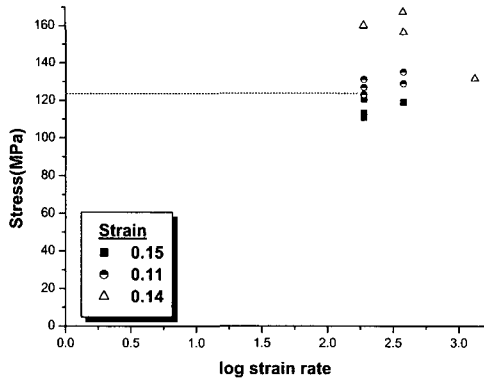


Fig. 11 Peak point stress VS strain rate for rubber 1.

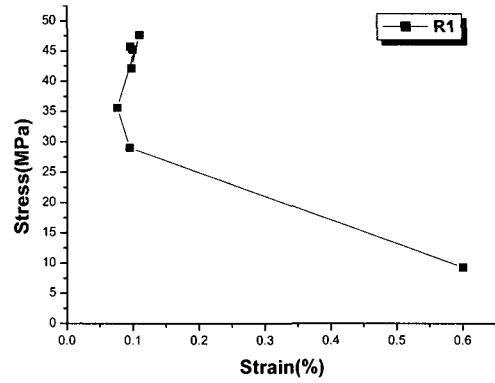


Fig. 14 Transition point stresses VS strains for rubber 1 at varying strain rates.

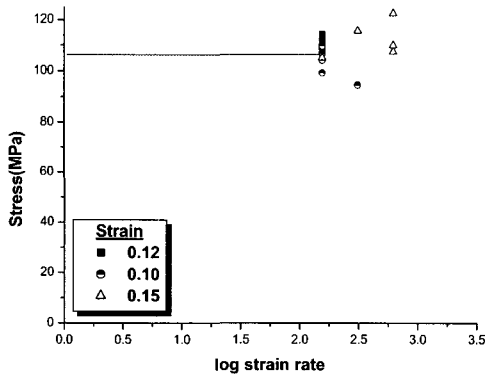


Fig. 12 Peak point stress VS strain rate for rubber 2.

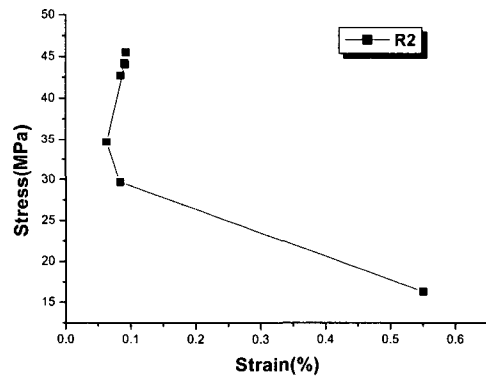


Fig. 15 Transition point stresses VS strains for rubber 2 at varying strain rates.

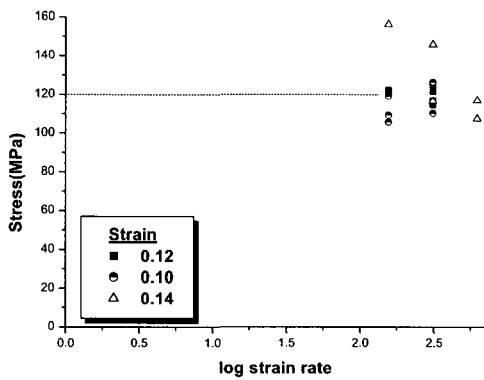


Fig. 13 Peak point stress VS strain rate for rubber 3.

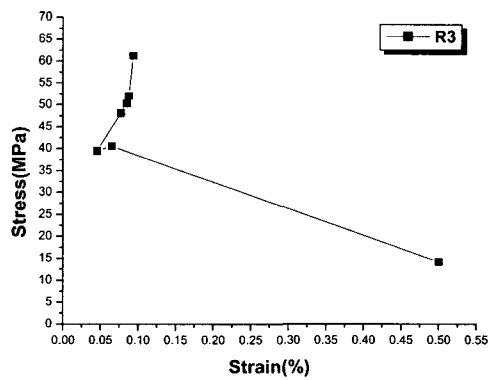


Fig. 16 Transition point stresses VS strains for rubber 3 at varying strain rates.

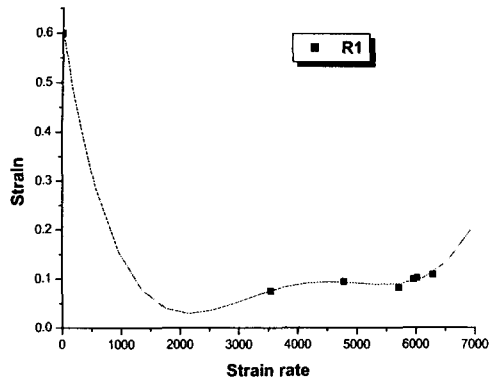


Fig. 17 Typical relationship between strain rates and strains at the transition points for rubber 1.

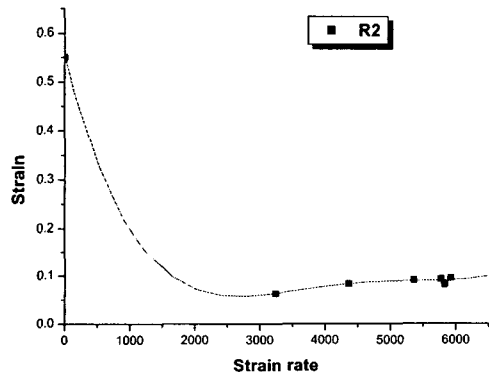


Fig. 18 Typical relationship between strain rates and strains at the transition points for rubber 2.

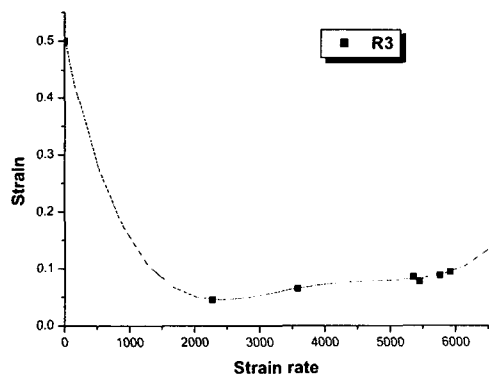


Fig. 19 Typical relationship between strain rates and strains at the transition points for rubber 3.

Figs. 14, 15, 16 은 고무시편의 전환점의 응력-변형률 그래프를 나타낸다. 여기서 흥미 있는 사실은 변형률 속도의 증가와 함께 변형률 변화가 되는 작은 영역에서는 응력이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 게다가 경화속도의 증가는 동적인 변형률 속도의 증가와 비슷한 양상을 보였다.

Figs. 17, 18, 19 는 고무시편의 전환점의 변형률- 변형률 속도 그래프를 나타낸다. 고무시편의 전환점의 변형률은 변형률 속도와 함께 다양한 선형적인 모습을 보였다.

5. 결론

동적인 압축 하중 하에서의 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.

후 기

본 연구는 한국 학술 진흥 재단의 지원 (E00061)을 받아 수행 된 것 입니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Lee, O. S., Kim, M. S. and Baek, J. H. "Dynamic Deformation Behavior of Aluminum-H32 under High Strain Rate Tensile Loading," Proc. Of kspe, pp. 790~794, 2001.
2. Pochhammer, L., "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," J. Reine Angewandte Math, vol. 81, p.324.
3. 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.
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, 1985.
 6. Lee, O. S., You, S. S., Chung, J. H. and Kang, H. S., "Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment," KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149, 1998.
 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 Technique," Journal of Materials Science Letters, Vol. 19, pp. 1805~1808, 2000.
 9. Lee, O. S., Kim, M. S., Hwang, S. W. and Cho, G. S. "Dynamic Deformation Behavior of Aluminum Alloys under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 196~204, 2003.
 10. Bragow, A. M. and Lomunow., "Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method," Int.J.Impact Energy, Vol. 16, pp. 321~330, 1994.
 11. 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.
 12. Zukas, J. A., "High Velocity Impact Dynamics," John Wiley & Sons, Inc, 1990.
 13. Blow, C. M and Hepburn, C. "Rubber Technology and Manufacture," Published for the Plastics and Rubber Institute by Butterworth Scientific, pp. 80-85, 1982.
 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, pp. 437, 1941.