

SHPB 기법을 사용한 고무와 합성수지의 고변형률 속도 하중 하에서의 동적 변형 거동

이역섭*, 이종원#, 김경준**

Dynamic Deformation Behavior of Rubber and Ethylene Copolymer Under High Strain Rate Compressive Loading

Ouk. Sub. Lee*, Jong. Won. Lee#, Kyoung. Jun. Kim**

ABSTRACT

It is well known that a specific experimental method, the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) technique is a best experimental technique to determine the dynamic material properties under the impact compressive loading conditions with strain-rate of the order of $10^3/s \sim 10^4/s$. This type of experimental procedure has been widely used with proper modification on the test setups to determine the varying dynamic response of materials for the dynamic boundary conditions such as tensile and fracture as well. In this paper, dynamic compressive deformation behaviors of a rubber and an Ethylene Copolymer materials widely used for the isolation of vibration from varying structures under dynamic loading are estimated using a Split Hopkinson Pressure Bar technique.

Key Words : Dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 선도), Ethylene Copolymer(에틸렌 합성수지), high strain rate(고변형률 속도), Rubber(고무), SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), stress wave(응력파)

기호설명

- $\dot{\epsilon}$ 변형률 속도(strain rate)
- $\epsilon_{specimen}$ 시편 변형률(specimen strain)
- $\sigma_{specimen}$ 시편 응력(specimen stress)
- L 시편 길이(specimen length)
- E 영 계수(Young's modulus)
- R 압축봉의 직경(radius of the bar)
- A 압축봉의 단면적(cross-sectional area of the bar)
- A_s 시편의 단면적(cross-sectional area of the specimen)
- C_0 응력파속도(stress wave velocity)
- C 바의 응력파속도(stress wave velocity of pressure bar)
- ϵ_I 입사 변형률(incident strain)
- ϵ_R 반사 변형률(reflected strain)

접수일: 2003년 12월 6일; 게재승인일: 2004년 3월 12일

* 인하대학교 기계공학부

교신저자: 인하대학교 기계공학과

E-mail winsors98@hotmail.com Tel. (032) 860-7315

** 인하대 대학원 기계공학과

ϵ_T 투과 변형률(transmitted strain)

1. 서론

충격하중을 받는 재료의 거동에 관한 연구는 공학의 넓은 분야에 깊은 관계를 가지고 있다. 특히 동적하중을 받는 경계조건 하에서 사용되는 구조물을 정밀하게 설계 제작하는 필요성이 고조됨에 따라 여러 재료들의 고변형률 속도로 변형될 경우에 대한 역학적인 성질이 중요한 과제로 떠오르고 있다. 구조물의 건전성과 신뢰성을 향상시키기 위해서는 구조물이 실제적으로 받는 여러 조건의 하중하에서 실험적으로 정밀하게 획득된 정확하고, 완벽한 재료 물성치가 필요하다. 그러나 구조물의 설계나 제작에 사용되고 있는 대부분의 재료 물성치는 변형률 속도가 매우 낮은 조건하에서 얻어진 것을 수정하여 사용하는 것이 대부분이다. 우리는 이것을 공학적인 처리로 간과하여 왔으며 모두 크게 관심을 가지지 않고 이런 것을 관례로 인정하여 오고 있다. 그러나 정적하중 하에서 변형하는 재료의 변형거동은 고변형률 속도의 하중하에서의 변형 거동과는 판이하게 다른 경우가 많다. 특히 고무 재료나 합성수지의 경우에는 정적인 하중하의 변형 거동도 부분적으로만 연구되어 있을 뿐이며, 동적인 하중 하에서의 변형 거동은 체계적인 연구 결과가 보고되어 있지 않다. 따라서 하중시간이 수 마이크로 초에서 수백 마이크로 초사이인 경우에는 정적 압축 하중 하에서의 변형거동은 동적인 것과는 완전히 다를 수도 있을 것이다.

동적인 하중이 작용하는 인장 혹은 압축 변형 거동 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 미치는 것으로 정리할 수 있다.¹ 첫 번째로 관성은 어떠한 실험 조건 즉, 시편의 모양에 따라서는 무시할 수 있는 반경 성분을 가지게 된다. 두 번째로는 실험의 초기에서 나타나는 재료의 동적변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 이것은 시험편의 기하학적 형상을 조정하면 최소화시킬 수 있다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 고무재료와 합성수지는 금속재료에 비해서 비에너지 흡수율이 크다. 따라서 이들 재료는 지진하중과 같은 고에너지 하중이 짧은 시간에 발생하는 경우에 대응하여, 구조물에 발생

하는 진동 감소와 동적 파손방지를 위한 재료로 널리 사용되고 있다.

고무재료와 합성수지의 정적하중에 대한 하중과 변형의 관계에 해당하는 일반적인 변형 거동은 비선형적으로 나타난다. 또한 대변형 영역에서는 hyper-elastic 특성을 나타낸다. 그러므로 고무재료 혹은 합성수지를 사용하는 구조물이 동적하중을 받는 경우에 대비하여 효과적인 동적 특성을 고려한 설계를 수행하기 위해서는 좀더 세부적이고 구체적인 동적 변형거동에 대한 데이터의 창출과 이것에 대한 해석 및 이해가 필요한 실정이다.

변형률 속도가 $10^3 - 10^4/s$ 정도인 충격 압축 혹은 충격 인장 하중 하에서 동적 재료의 특성을 얻기 위해서 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다.

본 연구에서는 SHPB 실험 기법을 이용하여 내진재료 및 방진재료로 사용되는 고무와 우수한 충격강도와 인열강도를 가지고 있어 파이프나 대형 용기에 사용되는 합성수지(PH143/PH162/PB160 / PM340)의 고변형률 속도 압축 하중에서의 변형 거동을 실험적으로 규명하였다. 또한 이들 재료의 고변형률 속도 압축하중하에서 기계적 특성에 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, 응력파의 파장이 λ 인 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R 은 봉의 반경)일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다.⁴ SHPB 실험 장치로 실험을 수행할 때 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 특성중의 하나는 축 방향으로의 응력파 전파속도가 그 파장(wavelength)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 악영향을 끼치게 되므로 될 수 있는 대로 파장이 균일한 응력파를 발생시키는 실험 환경을 조성하도록 유의해야 한다.

2.2 시편의 균일 단면 변형

압력봉 내에서의 탄성과 전파이론이 수학적 으로 예견될 수 있음에 반해 시편의 변형에 대한 해석에는 소성과 전파와 마찰에 의한 영향을 고려 해야 하기 때문에 정확한 해석을 수행하는데 어려 움이 따른다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제를 사용하여 최소화하여야 한다. SHPB 기 법을 이용한 고변형률 속도 하중을 받는 재료내부 에서는 갑작스러운 입자들의 가속화 때문에 길이 방 향이나 반경 방향의 관성이 발생하게 되는데 이 것의 영향은 시편의 기하학적인 형상을 조정하여 최소화할 수 있다.

2.3 SHPB 기법에서 응력과 변형률 속도 측정

SHPB 기법에서 재료시편은 입력봉(incident bar)와 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된 다. Fig. 1은 SHPB 실험에서 발생한 압축 탄성과가 입력봉과 출력봉을 통하여 전파하는 거동을 나 타낸 것이다. 충격봉(striker)이 입력봉에 충돌하게 되면, 압축 응력파(stress wave)가 발생되고 이 응 력파는 시편이 위치하고 있는 곳까지 입력봉을 통 해서 전파하게 된다. 시편의 위치까지 전파된 응 력파의 일부분은 입력봉과 시편의 임피던스 (impedance) 차이에 의해서 일부분은 입력봉과 시 편이 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시 편으로 투과된다. 여기서 투과된 응력파는 출력봉 과의 계면을 통과하여 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 시편내에서 발생하는 동적 응력, 동적 변형 률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레 인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 산정된다.⁵⁾

stress wave propagation for the compressive SHPB test

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

$$\varepsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (2)$$

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

식 (1), (2), (3)은 시편의 응력과 변형률, 변형률 속도를 산정하는데 사용된 식이다.

3. 실험

3.1 하중장치 및 충격봉(Strike-Bar)

$10^3 \sim 10^4$ /s 의 변형률 속도를 발생시키기 위해 서 충격하중을 발생시켜야 한다. 본 연구에서는 충격봉(striker-bar), 입력봉(incident-bar)과 출력봉 (transmitted-bar)의 재질이 모두 강화 플라스틱 (PEEK-1000)을 사용한 경우와 모두 고탄소 크롬 도금 베어링 강(SCB2)을 사용한 두 경우의 결과 를 비교하였다. 강화 프라스틱 재료와 고탄소 크 롬 도금 베어링 강 재료의 항복 강도는 각각 110MPa, 452MPa 이고, 탄성계수는 각각 4.4GPa, 225GPa 이다. Fig. 2는 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타낸 것이다.

본 연구에서 사용된 충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm 이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Fig. 2 에서 보듯이 gun barrel 을 설치하여 고압을 받는 충격봉을 빠른 속도로 직진으로 유도 하도록 하였으며, 입력봉에 균일하고 정확한 충격 하중이 작용되도록 직진도 유도 장치를 설치하였 다.

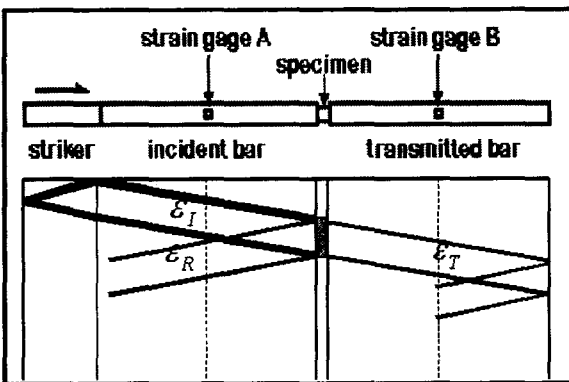


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic

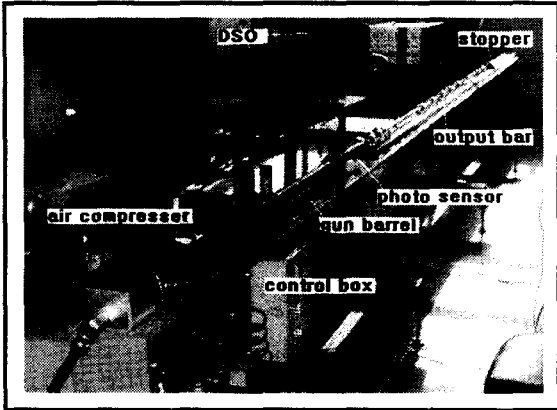


Fig. 2 General view of SHPB experimental apparatus

3.2 입력봉과 출력봉

변형률 속도를 결정하는 봉의 직경이 작을수록 좀 더 높은 변형률 속도로 시편을 변형시킬 수 있다. 또한 봉 내부에서 발생하는 응력파는 1 차원에 가까울수록 오차가 적다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 봉의 길이는 봉에서의 응력파-길이(stress wave-length)의 최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 재료가 25% 이상으로 변형될 것을 감안하여 봉의 길이(L)에 대한 직경(D)의 비율을 100 으로 하였다. 이들 입력봉과 출력봉의 재질은 임피던스를 동일하게 유지시키기 위하여 충격봉과 같은 재질로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm 로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝 단의 면에는 시편과의 완전한 평면접촉이 되도록 정밀 연삭하였다^{6,7,8}.

3.3 직진도 유지 장치

SHPB 실험 장치에서 가장 중요한 요소중의 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 거의 완벽하게 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전파되어야 한다는 점이다. 따라서 I-beam 을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하여 완벽한 직진도가 유지되도록 하였다.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

충격봉의 충격속도를 측정하기 위해, gun barrel 의 끝단에 50mm 의 간격으로 3 개의 광센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광센서의 빛을 차단시킬 때, 오실로스코프(oscilloscope : Lecroy-

9354A)에 전기적인 신호가 전달되게 하였다. 응력파는 봉에 부착된 스트레인게이지(strain-gage)로부터 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 휘트스톤-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 영향과 관성의 영향을 최소화하기 위한 기하학적인 형상으로 입력봉과 출력봉 사이에 접촉 고정시켜야 한다. 본 연구에서 사용된 시편의 두께(L)는 4.8mm-5.2mm 이고, 직경은 10mm 로 하였다. 그 형상은 Fig. 3 에 나타내었다.

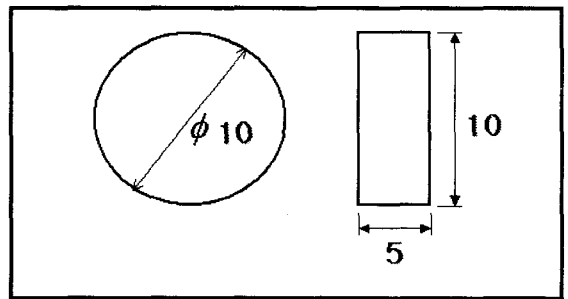


Fig. 3 Geometry of compressive specimen

Table 1 과 Table 2 는 본 연구에서 사용한 Ethylene Copolymer 와 Rubber 의 기계적인 특성과 화학 성분을 나타내었다.

Table 1 Mechanical Properties of Rubber

	Rubber		
	1	2	3
경도 (Hs)	50	70	86
인장 강도(Mpa)	20	22.5	18
Elongation (%)	446	240	120

Table 2 Mechanical Properties of Rubber

Mechanical Properties	PB160	PH143	PH162	PM360
항복점 인장강도 (MPa)	25.5	17.6	26.4	24.5
파단점 인장강도 (MPa)	29.4 3	34.4	34.3	27.4
파단점 신율(%)	600	800	800	500
굴곡점 탄성율 (kg/cm ²)	1.2E 4	8E3	1.3E4	1.3E4
충격강도(IZOD) (kg.cm/cm)	30	20	20	20

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 oscilloscope 에 검출된 결과는 Fig. 4 과 Fig. 5 에 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)의 합과 같아야 한다. Fig. 4 과 Fig. 5 의 결과는 이러한 이론적인 요구를 만족하고 있음을 알 수 있다.

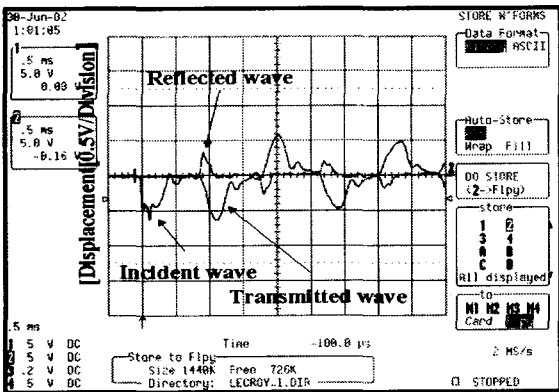


Fig. 4 Strain signal of Rubber recorded at oscilloscope

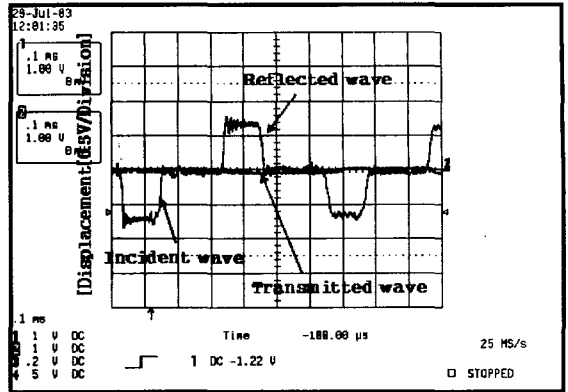


Fig. 5 Strain signal of Ethylene Copolymer recorded at oscilloscope

Fig. 6 에서는 Rubber 의 정적 및 동적인 하중 하에서의 전형적인 응력-변형률 그래프를 비교하였다.

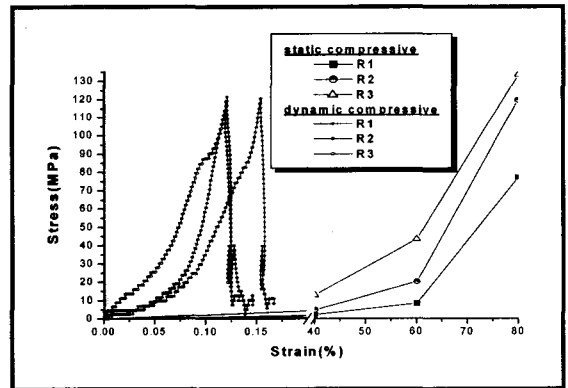


Fig. 6 Dynamic and static compressive stress-strain curve

고무 재료의 동적 변형에서 나타나는 특이한 사항들을 정량적으로 표시하기 위하여 전환점과 피크점을 Fig. 7 에서 나타낸 것과 같이 두개의 fitting-line 을 사용하여 다음과 같이 정의하였다. 본 연구에서는 첫번째 fitting-line 과 두번째 fitting-line 의 교차점에서 수직한 방향에 위치한 점을 전환점(transition point, T)이라 정의하였고, 응력-변형률 그래프에서 가장 큰 응력에 위치한 점을 피크점(Peak point, P)이라 정의하였다.

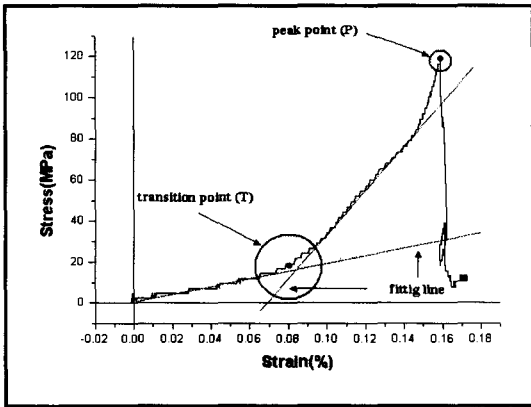


Fig. 7 Determination of peak point and transition point

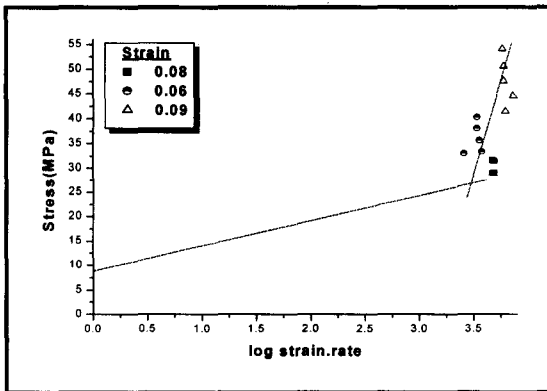


Fig. 8 Transition point stress vs. strain rate for Rubber 1

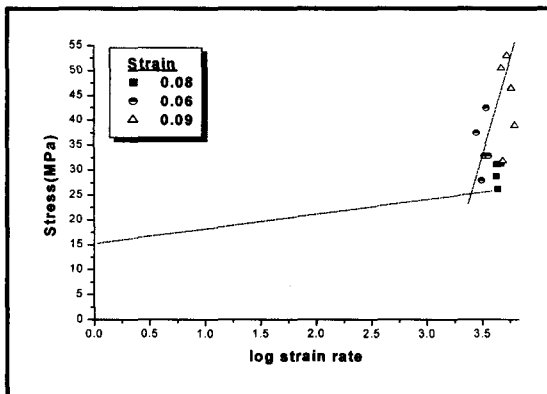


Fig. 9 Transition point stress vs. strain rate for Rubber 2

Figs. 8, 9 은 고무시편(rubber 1, 2)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 이중선형인 관계를 보이고 있다.

Figs. 10, 11 은 고무시편(rubber 1, 2)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.

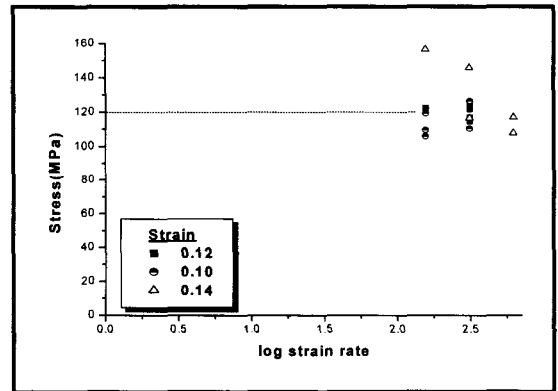


Fig. 10 Peak point stress VS strain rate for rubber 1

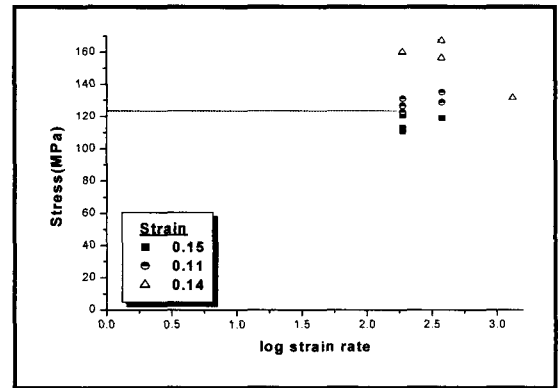


Fig. 11 Peak point stress VS strain rate for rubber 2

Figs. 12, 13 은 고무시편의 전환점의 변형률-변형률 속도 그래프를 나타낸다. 고무시편의 전환점의 변형률은 변형률 속도와 함께 다양한 선형적인 모습을 보였다.

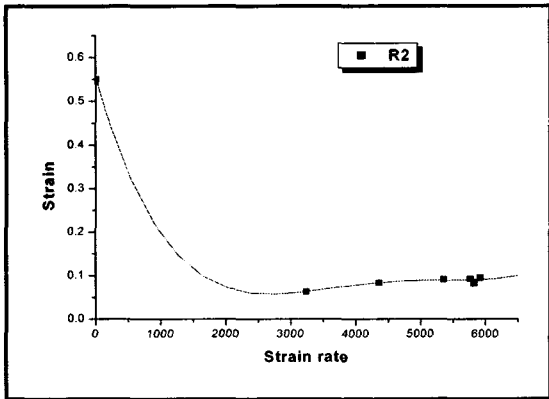


Fig. 12 Typical relationship between strain rate and strain at the transition point Rubber 1

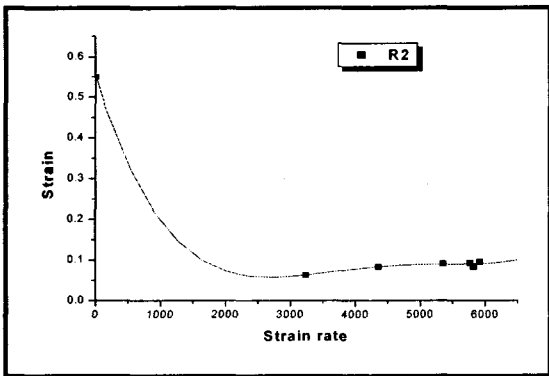


Fig. 13 Typical relationship between strain rate and strain at the transition point Rubber 2

식(1), (2)와 (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의 관계를 얻을 수 있다. Fig. 14 은 Ethylene Copolymer 의 동적 응력-변형률의 관계를 나타내었으며, Fig. 13 에서 타원으로 표시된 부분에서 항복점을 지나 가공경화가 발생하는 영역의 거동을 면밀하게 분석 비교해 보았다¹⁰

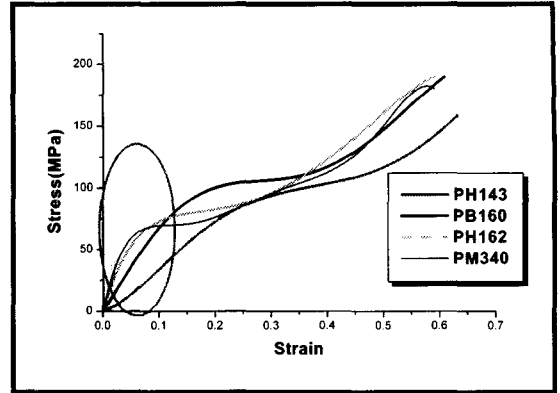


Fig. 14 Compressive stress-strain curve for Ethylene Copolymer

이러한 초기에 발생하는 관계를 Figs. 15, 16, 17, 18 에서 나타낸 Ethylene Copolymer 에 대해 고 변형률 응력-변형률 선도로 나타내었다. 다음 Figs. 15, 16, 17, 18 은 Ethylene copolymer 시편의 응력-변형률 그래프를 나타낸다. 여기서 보면 항복 응력 값은 거의 비슷한 양상을 가지나 피크점에서의 응력과 변형률은 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 변형률 속도의 차이 때문이라는 것을 알 수 있다.

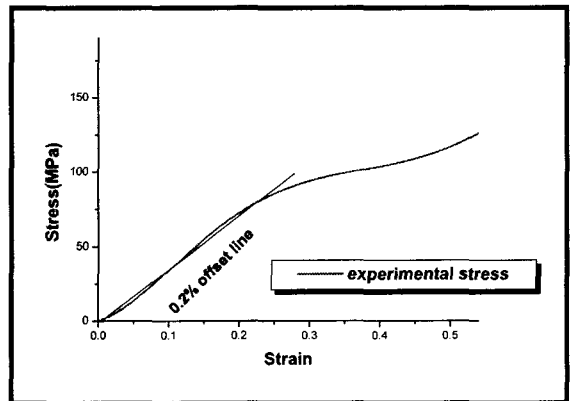


Fig. 15 Polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for PH143

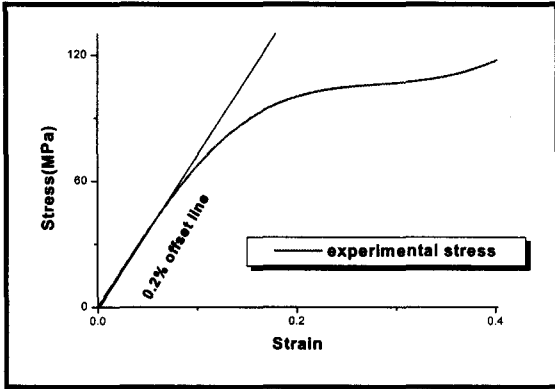


Fig. 16 Polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for PB160

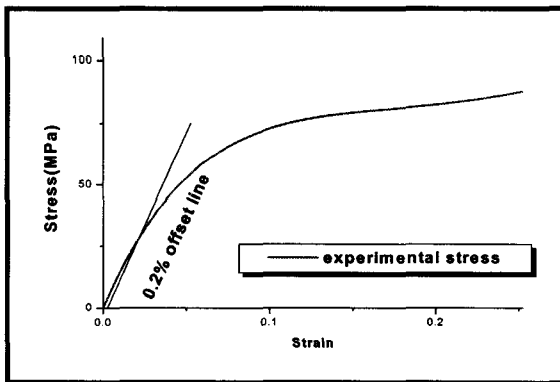


Fig. 17 Polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for PH162

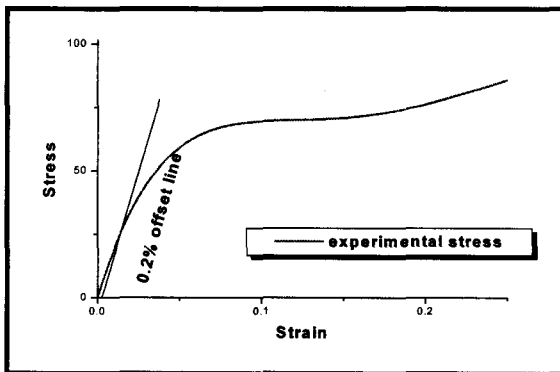


Fig. 18 Polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for PM340

Figs 15, 16, 17, 18 에서와 같이 Ethylene Copolymer 에서는 뚜렷한 항복응력이 그래프상에서 결정되지 않으므로 0.2%오프-셋(off-set)라인으로 항복응력을 결정하였다.

Fig. 19 은 PB160/ PH162/ PH143/ PM340 의 항복 점에서의 응력-대수 변형률 속도 관계 그래프를 나타낸 것이다. 여기서 정적인 하중을 주었을 때의 항복점-압축강도의 차이를 확연하게 비교할 수 있었다.

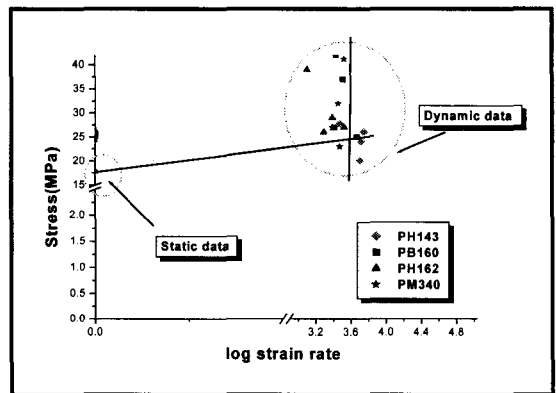


Fig. 19 Dynamic compressive yield vs. log strain rate curve for Ethylene Copolymer

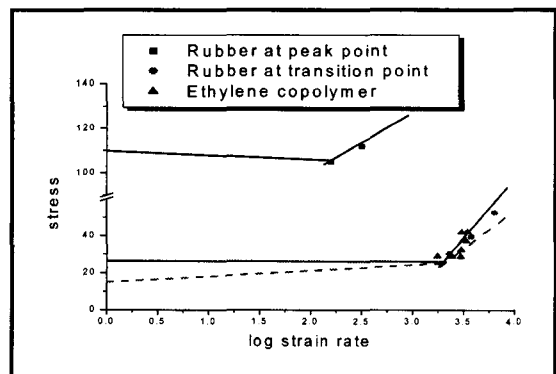


Fig. 20 Dynamic compressive stress vs log strain rate curve for Ethylene Copolymer and rubber

여기서 고무와 Ethylene Copolymer 의 항복점의 응력-대수 변형률 속도 그래프는 선형적인 관계를 보이고 있다. 이렇게 결정한 항복응력과 각 실험

조건에서 결정된 대수 변형률 속도(log strain rate)의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 항복응력과 대수 변형률 속도는 이중 선형적인 관계를 나타내며 이것은 알루미늄, 플라스틱에 대한 결과와 유사하다는 것이 본 연구에서 명확하게 규명되었다¹¹⁻¹³.

5. 결 론

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

1. 고무 시편의 동적 변형 거동에서 변형률 속도의 효과는 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 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. Ethylene Copolymer 의 동적 변형 거동 또한 고무 시편과 같이 변형률 속도의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었다.
4. Ethylene Copolymer 의 압축 항복 강도와 변형률 관계는 이중 선형의 재료 특성이 나타남을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. Lee, O.S., Kim, M.S. and Baek, J.H., "Determination of dynamic tensile behavior of Al5052-H32 using SHPB technique," Proceeding of the KSPE Autumn Annual Meeting, 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, p.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, K.S., "Dynamic Deformation Behavior of Aluminum Alloys under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading," KSPE, 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.