

PMMA의 동적 인장 거동

이억섭*, 김면수**, 황시원***

Dynamic tensile behavior of PMMA

Ouk Sub Lee, Myun Soo Kim, Si Won Hwang

Key words : Split Hopkinson Pressure Bar technique(SHPB 기법), high strain rate(고 변형률 속도), stress wave(응력파), dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 곡선), tensile loading(인장 하중), deformation behavior(변형거동), dynamic maximum stress-log strain rate curve(동적 최대응력-대수 변형률 속도 곡선)

ABSTRACT

The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique, a special experimental apparatus, has been used to obtain the material behavior under high strain rate loading condition. In this paper, dynamic deformation behaviors of the PMMA under high strain rate tensile loading are determined using SHPB technique.

기호설명

		C_0	응력파 속도(wave velocity)
		ϵ_I	입사변형률(incident strain)
$\epsilon_{specimen}$	시편 변형률(specimen strain)	ϵ_R	반사변형률(reflected strain)
$\sigma_{specimen}$	시편 응력(specimen stress)	ϵ_T	투과변형률(transmitted strain)
$\dot{\epsilon}$	변형률 속도(strain rate)	R	압축봉의 직경(radius of the bar)
L	시편 길이(specimen length)		
E	영 계수(Young's modulus)		
A	압축봉의 단면적(cross-sectional area of the bar)		
A_S	시편의 단면적(cross-sectional area of the specimen)		

1. 서론

고 변형률 속도 하에서의 인장 실험은 저 변형률 속도 하에서의 그것과는 분명하게 구분되어져야 한다. 고 변형률 속도 하에서는 관성에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적 실험에서

* 인하대학교 기계공학과 교수

** 인하대학교 기계공학과 석사과정

*** 동양대학교 기계공학과 교수

관성은 다음의 3가지 영향을 나타낸다⁽¹⁾. 첫 번째로 관성은 어떠한 조건하에서는 무시할 수 있는 반경 방향의 성분을 나타나게 한다. 두 번째로 실험 초기에 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미친다.

최근 기계 구조물들은 높은 응력과 순간에 작용하는 하중에 의해 특징지어지는 극한 작업 환경에서 사용되고, 단조와 압연과 같은 가공 공정들은 고 변형을 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 구조물이나 작업환경에 대한 최적의 설계를 하기 위해서는 고 변형을 하중 조건하에서의 물리적-기계적 재료 특성에 대한 광범위한 정보가 요구된다. 이러한 문제에 대한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고, 동적 실험에 대한 실험적 data의 부족과 신 소재의 계속적인 개발에 의해 아직도 많은 연구가 필요하다.

변형을 속도가 $10^2 \sim 10^3/s$ 이상의 고 변형을 속도 하에서의 기계적 거동을 측정하기 위해 최근에 가장 널리 쓰이고 있는 방법은 split Hopkinson pressure bar technique이다. 이 방법은 1949년 Kolsky에 의해 현재 사용되고 있는 장비가 개발되어 지금까지 많은 발전을 거듭하였다. 본 연구에 사용된 SHPB technique은 Nicholas scheme⁽²⁾을 따른 방법이다.

본 연구에서는 자동차 산업, 광학기기, 의료기기, Light Cover, 전자제품, 사무용품, 가정생활용품, 건축용 등 매우 광범위하게 사용되는 PMMA (Polymethylmethacrylate)에 대해 고 변형을 인장 하중 하에서의 거동을 규명하였다.

2. 이론

2.1 기본 가정 및 이론

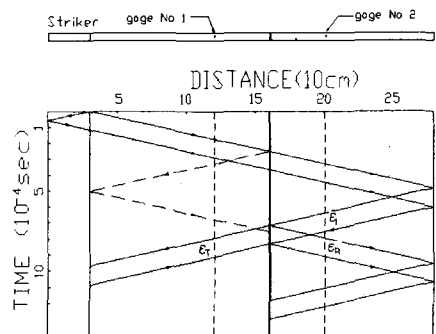
봉끼리의 완전 접촉조건, 길이방향과 반경방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽³⁾와 Chree⁽⁴⁾ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB technique에 응용되었고, 응력과 파장 λ 인 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R:봉의 반경)일 때 응력파에 의한 축 변위

와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다. 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-변형을 거동에 악영향을 끼치게 되므로 유의해야 한다.

2.2 SHPB 실험방법에 의한 응력-변형을 결정

입력봉(incident bar), 출력봉(transmitted bar), 충격봉(striker bar)등으로 구성되어 있는 SHPB에서는, 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 위치시킨다. 충격봉이 V의 속도로 입력봉에 충돌하게 되면 봉의 밀도가 ρ_0 일 때 입력봉에는 $\rho_0 CV/2$ 의 크기를 갖는 응력파가 발생하게 되고 이 응력파는 시편을 거쳐 출력봉으로 전파된다. 이때 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스의 차이에 의하여 탄성 및 소성 변형을 하게 된다.

입력봉 및 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어지는 신호와 봉 내의 1차원 탄성과 전파 이론으로부터 시간에 따른 하중과 변형을 결정할 수 있다. Fig. 1에 인장 SHPB실험에서 입력봉 및 출력봉에서의 탄성과 전파 형상을 나타내었다.



ϵ_I : incident strain, ϵ_R : reflected strain,
 ϵ_T : transmitted strain

Fig. 1 A schematic diagram of elastic stress waves for the SHPB test (the subscript I, R, and T refer to the incident, reflected and transmitted pulses, respectively).

충격봉의 충격에 의해 입력봉에 발생된 압축 응력파는 본질적으로는 분산되지 않고 시편과 split ring(Fig. 3 참조)의 복합 단면(composite section)을 통과한다. 이 때 split ring과 입력봉 및 출력봉 사이의 완벽한 접촉 정도, split ring의 단면적에 대한 specimen의 단면적의 비가 클수록 시편을 통해 탄성 범위를 넘어서는 어떠한 압축파도 전달되지 않는다는 조건이 확실해진다¹⁶⁾. 결론적으로 모든 압축파가 시편이 존재하지 않는 경우와 마찬가지로 split ring을 통해 전달된다.

Fig. 1에 나타난 것처럼 입력봉에 발생된 압축 응력파는 출력봉의 자유단에 도달 할 때까지 계속 전파된다. 출력봉의 자유단에 도달한 압축 응력파는 다시 출력봉으로 인장파(ϵ_T)의 형태로 반사되어 gage No. 2에 기록된다. 시편에 도달한 인장파의 일부는 입력봉으로 ϵ_T 의 형태로 전달되고, 나머지는 다시 출력봉으로 ϵ_R 의 형태로 반사된다. 시편에서의 인장 응력을 계산하는데 사용되는 인장파(ϵ_T)가 입력봉으로 전달 될 때 입력봉과 split ring사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파(spurious wave)가 ϵ_T 와 간섭이 발생되지 않도록 strain gage를 위치시켜야한다. Fig. 1에 점선으로 표시된 부분이 입력봉과 split ring 사이의 계면에서 반사되는 의사 인장파(spurious wave)이다. 의사 인장파(spurious wave)의 amplitude는 Fig. 3에서 보이듯이 매우 작으므로 시편에 큰 영향을 미치지 않는다.

split ring과 입력봉 및 출력봉의 정교한 연결은 압축파가 어떠한 형태의 분산없이 봉으로 전파되기 위한 매우 중요한 조건이다. 그리고 인장파가 시편에 도달했을 때 빠르고 완만한 하중을 얻기 위해서는 나사 가공된 시편이 봉에 정교하게 연결되어야 한다¹⁷⁾. 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 얻어진다.

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

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

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

여기서 E, A와 C_0 는 각각 봉의 탄성계수, 봉의 단면적 및 봉에서의 종탄성과 속도를 나타내고, L과 A_s 는 각각 시편의 gage length와 단면적을 나타낸다.

3. 실험방법

3.1 하중 장치 및 충격봉

$10^2 \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도를 발생시키기 위한 충격하중을 주는 장치는 공기압을 이용하여 충격봉을 발사할 수 있도록 설계, 제작되었으며 충격봉, 입력봉 및 출력봉이 탄성한계를 벗어나지 않도록 충격속도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 각 봉의 소재로 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있으며 강도가 높은 고 탄소 베어링강을 사용하였다. 충격봉의 길이는 300mm로 제작하였고, 표면에는 충격봉이 발사 될 때 gun barrel과의 마찰을 줄이기 위하여 Teflon ring을 장치하였다. 직경은 입력봉과 같은 16mm이다. Photo 1, 2에서 SHPB 실험장치의 전체적인 모양과 충격봉을 각각 나타내었다.

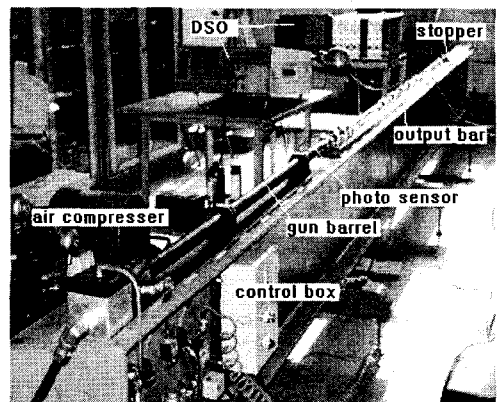


Photo 1 General view of SHPB experimental apparatus.

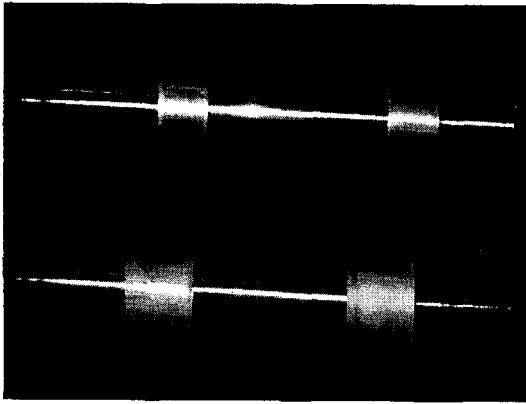


Photo 2 Various types of striker bar.

3.2 입력봉 및 출력봉

변형률 속도를 결정하는 봉의 직경이 작을 수록 고 변형률 속도를 얻을 수 있다. 그리고 봉 내부에서 응력파는 1차원 적으로 전파되어야 한다. 또한 시편의 변형률의 크기는 응력파의 파장과 관계가 있으므로 봉의 길이는 최소한 봉에서의 응력파 파장의 2배 이상이어야 한다. 이러한 조건과 25%이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L)에 대한 직경(D) 비율을 100으로 하였다⁽⁵⁾. 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질이며 직경 역시 충격봉과 같은 16mm로 하였다. 봉의 끝은 정밀 연마하여 표면의 정밀도를 유지하였으며 각 봉의 양끝은 서로 완전한 평면 접촉을 하도록 정밀 연삭하였다.

본 연구에서 사용된 충격봉 및 압력봉의 재질은 고탄소 크롬 베어링 강으로 항복강도는 452MPa이고, 탄성계수는 225GPa이다. 충격봉과 압력봉에 시편이 장착된 형상은 Fig. 2에 나타나 있다.

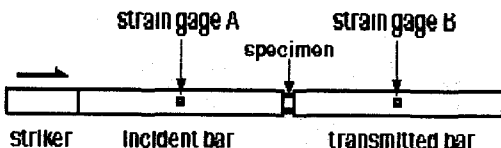


Fig. 2 Schematics of specimen and pressure bars

3.3 직진도 유지 장치

실험 장치에서 중요한 요소 중 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전달되도록 하는 것이다. 직진도가 유지되지 못하면 시편을 각 압력봉에 장치할 때 매우 곤란할 뿐만 아니라 시편에 비틀림 또는 전단하중을 가하는 나쁜 영향이 발생한다.

직진도를 유지하기 위해서 I 빔을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.

3.4 충격봉 속도 및 응력파 측정 장치

충격봉의 속도를 측정하기 위해 충격봉이 지나가는 경로에 50mm 간격으로 3개의 광 센서를 설치하였다. 충격봉에 의해 광 센서의 빛이 차단되는 순간이 전기적 신호에 의해 오실로스코프(oscilloscope ; Nicolet 410)에 감지되도록 하였다.

응력파($\epsilon_I, \epsilon_T, \epsilon_R$)를 검출하기 위해 입력봉과 출력봉에 스트레인 게이지들을 부착하였다. 스트레인 게이지를 각 봉에 부착할 때에는 각각의 유효신호가 간섭되지 않도록 시편과의 접촉면으로부터 입력봉과 출력봉 각각 800mm 되는 거리에 부착시켰다.

봉의 길이방향의 응력파의 시간에 따른 변화는 스트레인 게이지에 미세한 저항으로 작용하며 이러한 미세한 변화는 증폭기(amplifier)를 거쳐서 오실로스코프(digital storage oscilloscope ; Lecroy 9354A)에 기록되게 된다.

3.5 시편 및 split ring

본 연구에 사용된 시편의 재료는 PMMA이다. 시편의 전체 길이는 34mm이며, 지름은 4mm이고, 양끝 12mm의 길이에는 나사 가공을 하여 시편을 봉에 고정시킬 수 있게 하였다.

split ring의 단면적에 대한 압력봉의 단면적의 비는 3:4이다. 그리고 split ring의 단면적에 대한 시편의 단면적의 비는 12:1이다. 이러한 형상

은 초기 압축파가 시편에 어떠한 소성변형을 가하지 않고 온전히 출력봉으로 전달될 수 있는 조건이다¹⁵⁾.

입력봉에 발생한 초기 압축파가 출력봉에 완벽하게 전달될 수 있도록 입력봉과 출력봉 사이에 장치하는 split ring은 외경 16mm, 두께 10mm로 하였으며, 내경은 시편이 split ring과 마찰을 일으키지 않고 움직일 수 있는 최소의 크기로 하였다. split ring은 각 봉과 같은 재질을 사용하였고 입력봉, split ring, 출력봉의 일직선 정렬을 위해 collar를 사용하였다. Fig. 3에 시편의 형상 및 collar를 사용해 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 장치된 형상을 나타내었다.

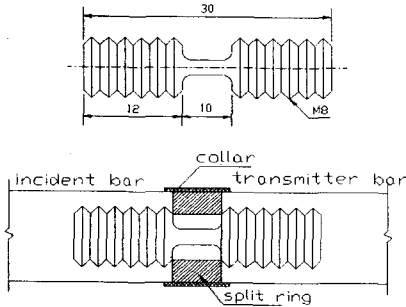


Fig. 3 Specimen geometry and setting between incident and transmitter bar.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4에 SHPB시험에서 입력봉과 출력봉에 부착한 스트레인 게이지로부터 얻어진 응력파의 전형적인 형태를 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출되는 입력파, 반사파의 크기(amplitude) 및 형상이 똑같아야 하나 실제 검출된 신호를 보면 점차 감쇠됨을 알 수 있다. 이러한 문제점은 더 정확한 data를 얻기 위해 보정되어야 한다.

위에서 얻어진 결과를 식 (1), (2), (3)을 사용하여, Fig. 5와 Fig. 6에서 PMMA의 동적 인장 하중하에서의 응력-변형률 선도와 응력-대수 변형률 속도를 나타내었다.

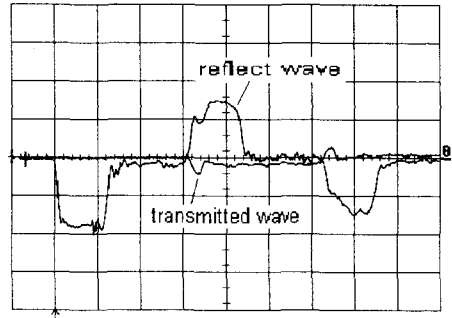


Fig. 4 General view of the signal obtained by the strain gage A and B.

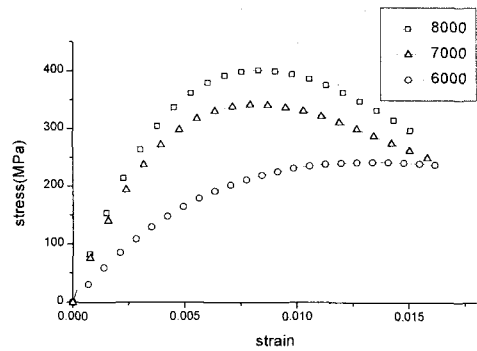


Fig. 5 Dynamic tensile stress-strain curve for PMMA.

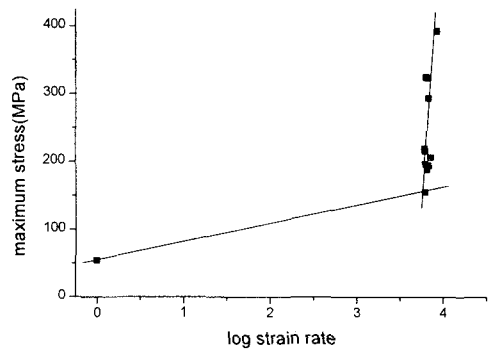


Fig. 6 Dynamic log strain rate versus maximum stresses for PMMA.

Fig. 5에서 PMMA의 동적 인장 하중하에서의 응력과 변형률 선도에서 변형률이 0.005에서 0.010 사이에서 최대 응력이 나타남을 알 수 있고, Fig. 6에서는 응력과 대수 변형률 속도의 관계가 쌍 1차형식으로 나타낼 수 있음을 규명하였다.

5. 결론

여러 산업 분야에서 많이 사용되고 있는 PMMA의 동적 인장변형을 SHPB 기술을 이용하여 규명하였으며, 실험적으로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) PMMA의 최대응력은 동적 인장 하중하에서 변형률 속도의 변화에 민감하게 변화하며 그 변화 양상은 쌍 1차형식으로 나타낼 수 있다.
- (2) PMMA의 동적 인장 하중하에서 고변형률속도 민감도 $((\sigma_{dyn} - \sigma_{stat}) / \sigma_{stat})$ 는 394%임을 밝혔다.

참고 문헌

- (1) G. Regazzoni, P. S. Follansbee, 1986, "Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test", *Journal of Applied Mechanics* Vol. 53 pp. 519~520.
- (2) American Society for Metals Hand Book, 8th edition, Vol. 1, pp. 947-948
- (3) L. Pochhammer, 1876, "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder", *J. Reine Angewandte Math.*, Vol 81, p. 324.
- (4) C. Chree, 1889, "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications", *Cambridge Phil. Soc. Trans.* Vol 14, p. 250.
- (5) C. H. Nguyen, H. J. Schindler, 1997, "On Spurious reflection Waves in Hopkinson Bar Tensile Tests Using a Collar", *Journal DE Physique IV*, pp. C3-85~C3-87.

- (6) T. Nicholas, 1981, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain", *Experimental Mechanics*, pp. 179~180.
- (7) A. M. Bragov and A. K. Lomunov, 1994, "Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method", *Int. J. Impact Energy*, Vol. 16, pp. 321~330.
- (8) Ouk Sub Lee, Seung Suk You, Ju Ho Chung and Hee Soo Kang, 1998, "Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkison Pressure Bar Experiment," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149.
- (9) O. S. Lee, G. H. Kim, S. W. Hwang, M. S. Han and J. S. Hwang, 2000, "High Strain-Rate Deformation Of Polymeric Materials Using Split Hopkinson Pressure Bar Technique", *Key Engineering Materials*, Vol. 183-187, Part 1, pp. 307~312
- (10) 이억섭, 김관희, 황시원, 2000, "SHPB 테크닉을 이용한 A16061-T6의 고속 인장 변형거동 규명", *재료 및 파괴부문 학술 대회*, Vol. 1, pp. 161~166.