

고변형률에서 황동 사출금형의 동적 거동 특성

김선용 · 백승엽

유한대학 금형설계과

(2007. 11. 30. 접수 / 2008. 2. 28. 채택)

Dynamic Behavior Characteristics of Brass Mold at High Strain Rates

Kim, seon yong · Seung-Yub Baek

Department of tool and mold design, Yuhan college

(Received November 30, 2007 / Accepted February 28, 2008)

Abstract : Mechanical properties of the materials used for mold and industrial machinery under high strain rate loading conditions such as high impact loading are required to provide appropriate safety assessment to varying dynamically loaded mechanical structures. The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique with a special experimental apparatus can be used to obtain the material behavior under high strain rate loading conditions. In this paper, the dynamic deformation behavior of a brass under high strain rate compressive loading conditions has been determined using the SHPB technique.

1. 서론

고변형률 속도 하에서의 압축과 인장 시험은 저변형률 속도일 때의 시험과는 구분되어야 한다. 고변형률 하중 하에서의 시험은 관성의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 동적인 실험에서 관성은 다음의 3가지 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 사출금형의 많은 경우는 높은 응력이나 순간에 작용하는 하중에 의해 특정 지어지는 극한 작업 환경에 사용되고, 특히 대형 사출물과 단조와 압연과 같은 공정들은 고변형률 하중 하에서 작업이 이루어진다. 이러한 극한 하중 상태에서 사용되는 금형 설계를 위해서는 고변형률 하중 하에서 금속에 대한 기계적 변형 거동을 알아야 한다. 그러나 고변형률 하중 하에서의 기계적인 특성을 얻기는 쉽지 않다. 변형률 속도가

$10^3/s$ 이상의 상태에서 충격에 대한 압축과 인장 하중 하에서 동적 재료의 특성을 얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적으로 SHPB 장치는 $10^3 \sim 10^4/s$ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 SHPB 실험 기법을 이용하여 황동(Brass)의 고변형률 압축 하중에서의 동적 변형 거동을 실험적으로 규명하고, 황동(Brass)에 대한 압축 항복 강도와 변형률 속도와의 관계를 고변형률 변형특성에 대하여 면밀한 고찰을 수행하였다.

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 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.

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.

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 출력봉을 통해 다음과 같이 얻어진다⁽⁵⁾.

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

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

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

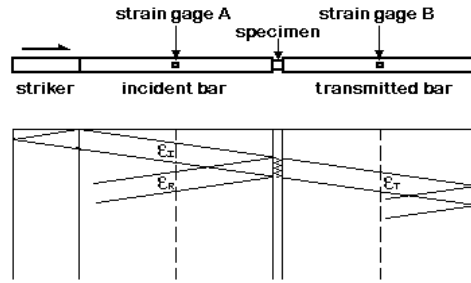


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive SHPB test.

3. 실험

3.1 하중제어장치와 충격봉

실험에서 사용된 입력봉, 출력봉과 충격봉의 재질은 모두 STB2(크롬도금 베어링 강)로서 항복 강도는 490MPa이고, 탄성계수는 225GPa이다. Fig. 2는 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

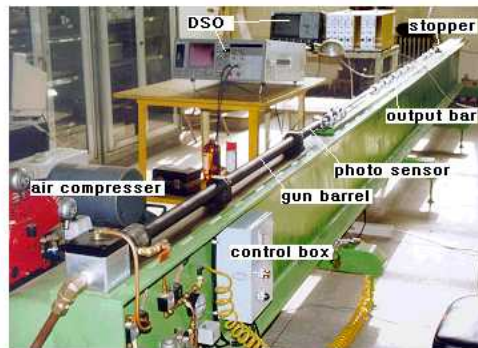


Fig. 2 General view of SHPB experimental apparatus.

충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Photo 1에서 보듯이 긴 배럴(gun barrel)을 설치하였으며 압력을 발생시키는 장치와 입력봉에 정확한 충격을 주도록 정밀하게 셋팅을 하였다.

입력봉의 직경이 작을수록 좀더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 봉의 길이는 봉에서의

응력파의 길이 (stress wavelength)의 최소 두 배가 되도록 하였다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L) 대 직경(D)의 비(L/D)는 100으로 하였다⁽⁴⁾. 이들 두 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질인 STB2로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면을 시편과 완전히 접촉하도록 정밀 연삭하였다.⁽⁶⁻⁸⁾

실험 장치에서 중요한 문제점은 봉에서의 응력파가 일차원으로 전파되기 위한 봉의 직진도의 유지이다. 따라서 I beam을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다.⁽⁹⁾

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

3.2 압축 시편(specimen)

Table 1은 황동의 기계적인 특성을 나타내었고, Table 2는 본 연구에서 사용한 황동의 화학 성분을 나타내었다.

시편의 형상은 충격의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 본 연구에서 사용된 시편의 두께는 5mm이고 직경은 10mm로 하였다. 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 오실로스코프에 검출된 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)와 같아야 한다. Fig. 4의 결과는 이러한 이론적인 요구를 만족하고 있음을 알 수 있다. 식(1), (2)와 (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의

Table 1 Static mechanical Properties of specimen.

Mechanical Properties	Brass
Hardness (Brinell)	145.1
Tensile Yield Strength	445MPa
Modulus of Elasticity	97GPa
Shear Modulus	37GPa
Density	8.49g/cc

Table 2 Chemical composition for brass materials.

Chemical composition wt.%	Brass
Cu	57.560
Pb	3.800
Fe	0.260
Sn	0.350
Zn	Rem.

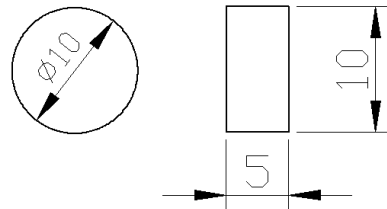


Fig. 3 Geometry of compressive specimen.

관계를 얻을 수 있다. Fig. 5는 황동의 동적 응력 변형률의 관계를 나타내었으며, Fig. 5에서 타원으로 표시된 부분에서 항복점을 지나 가공경화가 발생하는 영역의 거동을 면밀하게 분석 비교해 보았다.

Figs. 6,7,8은 황동의 뚜렷한 동적 압축 항복 응력이 그래프상에서 결정되지 않으므로 0.2%오프셋(offset)라인으로 동적 압축 항복 응력을 결정하였고, 변형률속도가 1805/s,

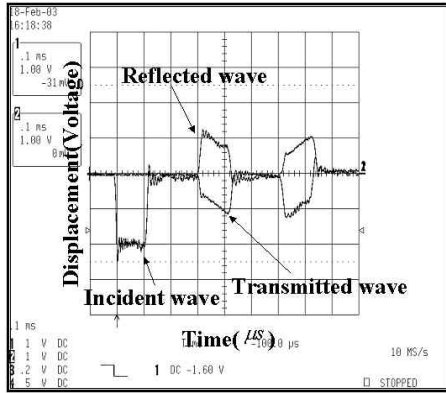


Fig. 4 Strain signal recorded at Oscilloscope under compressive loading for Brass.

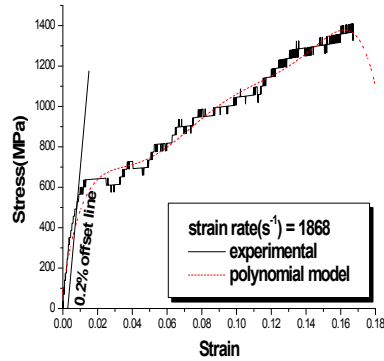


Fig. 7 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress strain curve for Brass at strain rate of 1868.

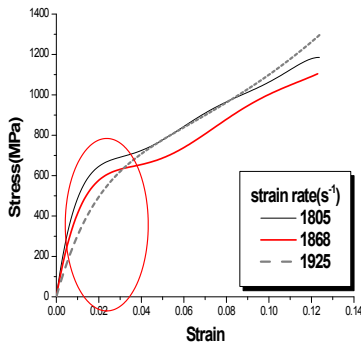


Fig. 5 Compressive stress strain curve fitting for Brass.

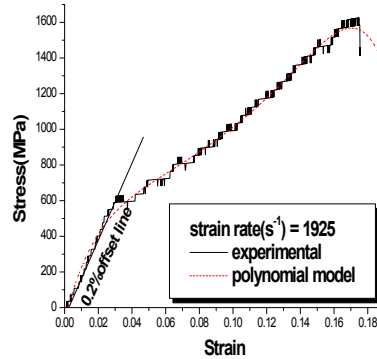


Fig. 8 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress strain curve for Brass at strain rate of 1925.

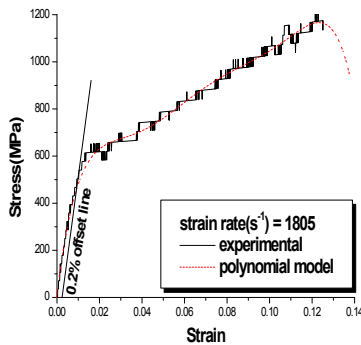


Fig. 6 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress strain curve for Brass at strain rate of 1805.

1868/s, 1925/s로 증가함에 따라서 항복응력이 540Mpa, 560Mpa, 580Mpa 로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 9는 각 실험조건에서 결정된 대수 변형률속도의 관계를 나타낸 것으로 황동의 동적 압축 항복응력과 변형률속도의 관계는 대수 좌표계에서 이중 선형의 특성이 나타남을 알 수 있다. 이 결과를 보면 압축 항복응력과 대수 변형률속도는 이중선형적인 관계를 나타내며 이것은 플라스틱, 고무에 대한 결과와 유사한 것으로 규명되었다.

5. 결론

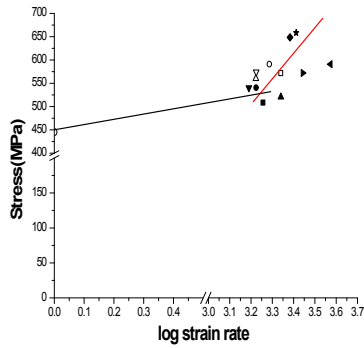


Fig. 9 Dynamic compressive yield stress vs. log strain rate curve for Brass.

압축 하중하에서 Brass에 대한 동적 변형 거동을 SHPB 기법을 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 황동의 동적 압축 항복응력은 변형률 속도에 비례한다.
2. 황동에 대한 동적 압축 항복응력과 변형률 속도의 관계는 대수 좌표계에서 이중 선형의 재료 특성이 나타남을 알 수 있다.

참고문헌

1. 이억섭, 김면수, 백준호, 2001, SHPB 테크닉을 이용한 AI5052 H32의 동적 인장 거동 규명, 한국정밀공학회 추계학술대회, pp.790~794.
2. Pochhammer, L., 1876, On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder, J. Reine Angewandte Math, vol. 81, p.324.
3. Chree, C., 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.
4. Davies, R.M., 1948, An critical study of the Hopkinson Pressure Bar, Phil. Tran. A, Vol. 240, p.375.
5. Follansbee, P.S., 1985, <The Hopkinson

Bar>, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing, American Society for Metals, Vol. 8, pp.198~203.

6. Lee, O.S., You, S.S., Chung, J.H. and Kang, H.S., 1988, Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment, KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp.1143~1149.
7. Lee, O.S., Lee, J.Y., Kim, G.H. and Hwang, H.S., 2000, High Strain rate Deformation of Composite Materials Using a Split Hopkinson Bar Technique, Key Engineering Materials”, Vol. 183~187, Part 1, pp.307~312.
8. Lee, O.S. and Kim, G.H., 2000, 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.
9. 이억섭, 김면수, 황시원, 조규상, 2003, 고변형률 압축/인장 하중에 대한 알루미늄 합금의 동적 변형 거동, 한국정밀공학회, 20권, 1호, pp.196~204.