

비틀흠킨슨봉을 이용한 알루미늄합금의 고속 전단변형 실험

전병선*, 유용한, 정동택
국방과학연구소

High strain rate test of aluminum alloy with torsional Hopkinson bar

Byoung-Seon Jeon*, Yo-Han Yoo, Dong-Teak Chung
Agency for Defense Development

Abstract

The split Hopkinson bar technique is the most widely used method to study material behavior at high strain rate deformation. In the present paper, a torsional Hopkinson bar for testing thin-walled tube specimens at high strain rate is described. From the experiment of aluminum 6061, dynamic stress-strain relationship can be obtained and dynamic result is compared with static one.

Key words : torsional Hopkinson bar, high strain rate testing, thin-walled tube specimen

1. 서론

동적 하중을 받는 재료의 기계적 거동을 알아내기 위한 방법으로, Kolsky[1]에 의해 제안된 흠킨슨봉(split Hopkinson pressure bar)을 이용한 실험이 연구되어왔다. 이는 시편의 응력-변형률을 직접 구하는 것이 아니라 Fig. 1에 나와있는 것처럼 입력봉과 출력봉의 신호를 조합하여 시편의 동적 거동을 해석하는 방법이다. 그동안 많은 사람들에 의해 재료의 고속거동을 알아내기 위한 방법으로 흠킨슨봉에 대한 연구가 이루어져왔다. 그러나 인장과 압축실험에 있어서, 시편의 넥킹(necking)이나 배부름(barreling)현상 등으로 인해 데이터해석에 곤란을 겪어왔다. 이외에도 시편의 체결이나 표면마찰 등으로 인한 문제점이 대두되고 있다. 이러한 난제들을 해결하는 방법으로 제안된 것이 비틀흠킨슨봉(torsional Hopkinson bar) 방법으로서 얇은 튜브형태의 시편(thin-walled tube specimen)을 이용하여 정수압성분을 완전히 제거하고 순수 전단응력만에 대한 실험을 수행하는 것이다.

본 논문에서는 비틀용 흠킨슨봉 실험장치를 제작하고 알루미늄합금(Al. 6061)시편

에 대해 고속전단변형실험을 실시하여 고속변형시 재료물성의 변화를 알아보고자 한다.

2. 이론적 배경

파동전파(wave propagation)이론을 사용하면 본 실험에 적용되는 x-t선도(x-t diagram)를 얻을 수 있다. 이를 Fig. 2에 표시하였으며 기존의 인장 및 압축실험장치의 경우와 거의 유사한 것을 알 수 있다. 즉 림(clamping)부분에서 잡고있는 상태에서 끝단을 비틀면 일정량의 비틀에너지가 저장된다. 그리고 림부분에서 순간적으로 해제(release)해주면 저장된 비틀에너지가 입력봉에 가해지면서 변형률 $\gamma_I(t)$ 를 갖는 입력파가 발생된다. 이후 입력파가 시편이 연결된 봉의 끝부분에 도달되면 봉과 시편의 임피던스의 차이에 의해 입력파의 일부는 변형률 $\gamma_R(t)$ 를 갖는 반사파로, 나머지는 변형률 $\gamma_T(t)$ 를 갖는 투과파로 분리된다. 이때 봉에 부착된 스트레인 게이지를 거쳐 각각의 변형률을 실시간으로 측정하게 된다.

기존의 홉킨슨봉이론과 게이지를 통해 얻은 데이터를 이용하면 시편의 변형률속도 $\dot{\gamma}_s(t)$ 와 응력 $\tau_s(t)$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다[2].

$$\dot{\gamma}_s(t) = \frac{2C_0D_s}{L_sD} \gamma_R(t) \quad (1)$$

$$\tau_s(t) = \frac{GD^3}{8D_s^3t_s} \gamma_T(t) \quad (2)$$

여기서 C_0 , G , D , D_s , L_s , t_s 는 각각 봉의 전단파(shear wave) 전파속도, 봉의 전단계수, 봉의 직경, 시편의 직경, 시편의 길이 그리고 시편의 두께이다. 식(1)을 적분하면 시편내의 변형률을 구하게 된다. 즉 입력봉과 출력봉의 변형률을 측정하면 시편의 응력-변형률 곡선을 구할 수 있게 된다.

3. 비틀 홉킨슨봉의 제작 및 실험

입력봉과 출력봉의 제작에는 알루미늄 2024-T4가 쓰였다. 이는 초기에 예비토크(pre-torque)를 가하기 쉽도록 하기 위함이다. 유압피스톤을 이용하여 초기 비틀을 주도록 하였고 비틀려진 봉을 순간적으로 해제할 수 있도록 하기 위해 마찰식 림장치가 고안되었다. 이는 Fig. 3에 나와있는 것처럼 유압을 이용하여 그립(grip)으로 봉을 접촉하여 붙잡게 되고 이 상태에서 초기비틀이 가해지게 된다. 다시 림장치에 유압을 가하여 어느 이상이 되면 피벗(pivot)의 알루미늄 핀이 부러지면서 순간적으로 토크를 전달하게 된다. 시편은 알루미늄 6061을 사용하여 제작되었다. 시편의 형상은 Fig. 4와 같이 튜브형태로 외경은 입출력봉의 크기와 같고 입출력봉사이에 접착제를 이용하여 연결이 된다. 기존의 스트레인 측정앰플을 쓸 경우 필터링효과 등에 의해 고주파 성분이 제거될 수 있으므로 본 실험에서는 스트레인게이지의 신호를 그대로 디지털 오실로스코프(Nicolet 410, 10Mega-sample/sec with 12bit resolution)로 받아 사용하였다[3].

본 실험에서 입력봉과 출력봉에 붙은 스트레인게이지를 통해 얻은 펄스를 Fig. 5에 표시하였다. 이때 예비토크를 주기 위해 가해진 비틀량은 7° 이다. 이때 최고 변형률

속도는 560 strain/sec가 된다. 이때 얻어진 데이터를 이용하여 응력-변형률선도를 구할 수 있었다. Fig. 6에 응력-변형률선도를 표시하였다. 정적상태에서 알루미늄 6061의 초기항복응력은 144MPa정도[4]로 알려져있으나 본 실험의 결과 고속변형에서는 166MPa로 증가됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 고속변형하에서의 비틀림시험을 위한 홉킨슨봉을 설계 및 제작하였으며 알루미늄 6061 시편을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험결과 560 strain/sec의 변형속도에서 얻어진 초기항복응력값은 정적상태의 값보다 15%정도 증가하는 것으로 나타났다. 향후 각종 재료에 대한 인장, 압축 및 비틀림홉킨슨봉시험을 통하여 데이터를 수집, 비교 분석한다면 고속변형시 재료의 거동을 해석하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] H. Kolsky, "Stress Wave in Solids," Dover, New York, pp. 41-65, 1949
- [2] T. Weerasooriya, "The MTL Torsional Split-Hopkinson Bar," AD-A223 278, May, 1990
- [3] 정동택, "SHPB를 이용한 응력-변형률 측정," 대한기계학회 '94년도 춘계학술대회는 문집 (I), pp. 33-41
- [4] C. R. Barrett, W. D. Nix and A. S. Tetelman, "The Principles of Engineering Materials," Prentice Hall, New Jersey, 1973

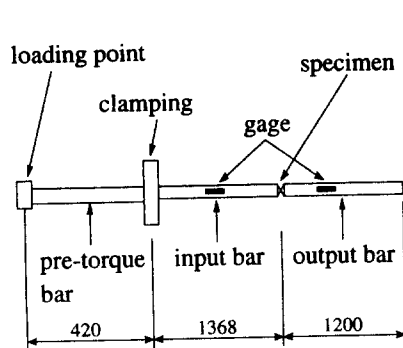


Fig. 1 Schematic diagram of torsional Hopkinson bar (unit:mm)

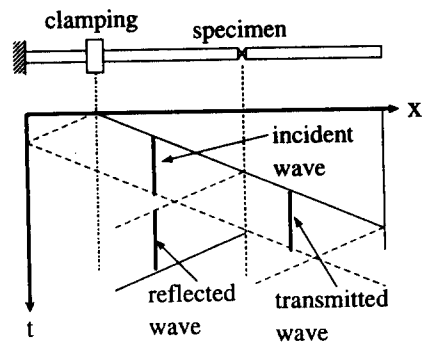


Fig. 2 X-t diagram for torsional Hopkinson bar

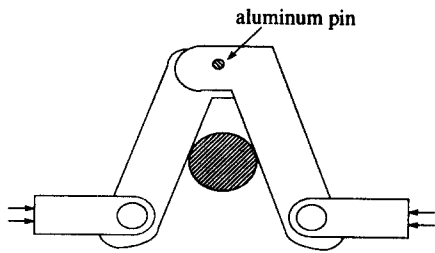


Fig. 3 Clamping mechanism in torsional Hopkinson bar

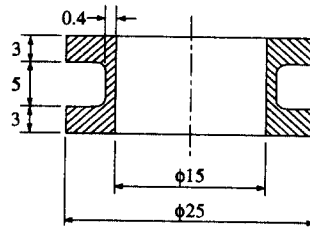


Fig. 4 Specimen configuration used in torsional Hopkinson bar test (unit:mm)

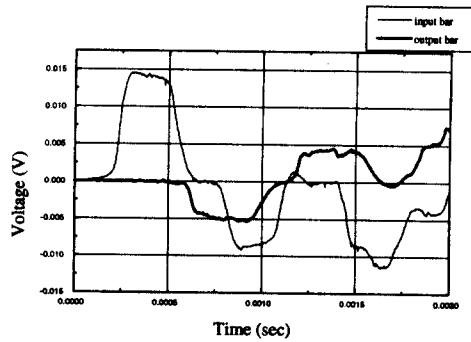


Fig. 5 Waves obtained from input and output bar

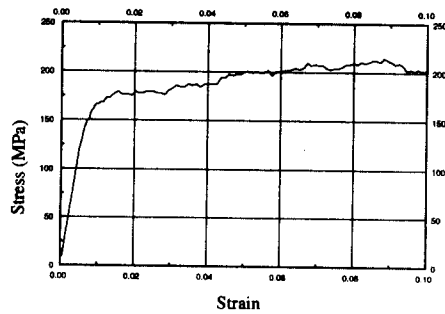


Fig. 6 Stress-strain curve for Al. 6061