

SHPB인장 시험에서 알루미늄 합금의 진응력-진변형률 관계

양 현 모* · 민 옥 기**

(1999년 10월 6일 접수)

The True Stress-Strain Relation of Aluminum Alloys in the SHPB Tension Test

Yang Hyunmo and Min Oakkey

Key Words: SHPB(홉킨슨압력봉), Tensile Split Hopkinson(인장홉킨슨), High Strain Rate(고변형률속도)

Abstract

The split Hopkinson pressure bar(SHPB) test has been used to find the mechanical property of materials at high strain rate. A tensile split Hopkinson pressure bar test system is developed and the threaded tensile specimen and the split collar are placed between elastic bars. When the compressive elastic wave generated by a striker is transferred from the transmit bar to the incident bar, some elastic wave is reflected at the threaded parts of the specimen and the transmit bar. This reflected wave can interfere with the transmitted wave. A proper length of elastic bars and the location of strain gage in these elastic bars are determined to avoid this interference. In order to avoid the interference of elastic wave reflected at the threaded parts of specimen and elastic bar, the length of transmit bar must be longer than that of incident bar. Strain gage in transmit bar must be located as close as possible from the interface of a transmit bar and specimen. In the developed tensile SHPB test system, Al2011-T3 and Al7075-T6 are tested to get the true stress-strain relation in the range of strain rate at 10^3 /sec

1. 서론

구조용 재료들은 많은 경우에 동하중이나 충격 하중을 받는다. 대부분의 재료들이 변형률 속도에 따라서 기계적 특성이 어느 정도 변화한다고 알려져 있다. 그러므로, 동하중을 받는 환경에서 사용되는 구조물을 정확하게 설계하기 위해서는 변형률 속도를 고려한 재료의 기계적 특성을 파악해야 한다.

변형률 속도가 금속 재료의 기계적 특성에 어

떤 영향을 주는지에 대해서 많은 연구가 있었으나, 고변형률 속도를 얻을 수 있는 신뢰성 있는 실험장치 구현에 어려움이 있었다. 1940년대 말 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)또는 Kolsky Bar라고 알려진 시편의 압축 시험방법이 Kolsky⁽¹⁾에 의해 제안되어 이 분야에 큰 진전을 가져오게 되었다.

SHPB를 이용해서 다양한 재료에 대한 압축 시험이 이루어 졌으며, 기존의 압축 시험장치를 변형한 SHPB 인장 시험장치도 제안되었다. SHPB 인장 시험장치는 Harding, Wood and Campbell^(2,3) 등에 의해서 처음으로 제안된 뒤 크게 세 가지 형태로 발전되었다. 첫 번째는 Fig. 1(a)에 나타낸 것처럼 탄성봉에 시편을 나사로 체결한 뒤 입력봉에 hollow tube나 collar를 입력봉에 충돌시켜서

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : minokey@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2817 FAX : (02)362-2736

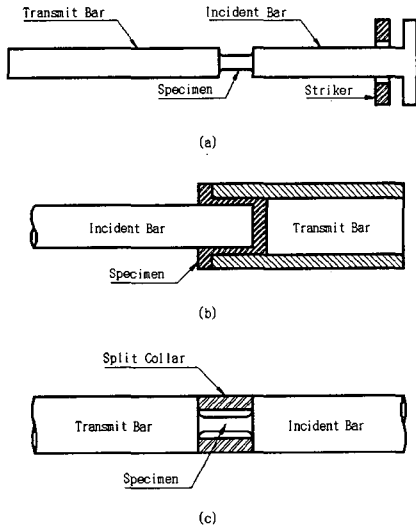


Fig. 1 Various schemes for the tensile SHPB test system

직접 인장탄성파를 통과시키는 방법이다.^(2,3) 두 번째는 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같다. “top-hat”이라는 모자 모양을 한 시편을 입력봉과 출력봉 사이에 끼우고 입력봉에 압축탄성파를 통과시키는 방법이다.^(2,4) 세 번째는 Fig. 1(c)에 나타난 것과 같다. 탄성봉 사이에 시편을 나사로 체결하고, 압축파가 입력봉의 자유단에서 인장파로 반사되는 것을 이용한다. 압축탄성파가 통과할 때 시편이 압축을 받지 않도록 split collar를 설치한다.^(2,5)

본 연구에서는 세 번째 방법을 도입하였으며, 원하는 투과파가 얻어질 수 있도록 적절한 탄성봉의 길이를 정하기 위해 입력봉과 출력봉의 길이를 달리하여 파를 측정해 본다. 이를 토대로 SHPB 인장 시험장치를 구성하였으며, 변형률 속도가 알루미늄 시편의 진응력-진변형률 사이의 관계에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험

2.1 탄성파의 전파

SHPB(Split Hopkinsin Pressure Bar)인장 시험 장치의 개략도와 탄성파의 전파를 나타내는 특성선(characteristic line)의 X-t선도를 Fig. 2에 나타내었

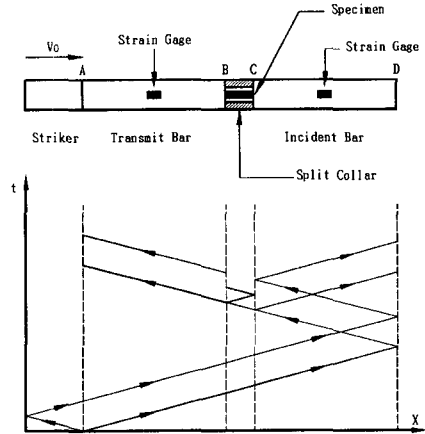


Fig. 2 Schematic of SHPB and characteristic diagram

다. 이 시험장치는 충격봉(striker)과 두 개의 탄성봉(elastic bar), 그리고 스플릿 칼라(split collar)로 구성된다. 두 개의 탄성봉은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmit bar)이며, 통상적인 SHPB 압축 시험장치와는 충격봉을 기준으로 그 위치가 반대이다. 이는 자유단에서 반사된 탄성파가 입력봉의 역할을 하기 때문이다.

V_0 의 속도를 가진 충격봉이 출력봉의 단면 A와 충돌하면(Fig. 2 참조) 출력봉을 통해서 압축탄성파가 전파되며, 이 탄성파의 길이는 충격봉의 두 배에 해당한다. 출력봉을 거친 탄성파는 스플릿 칼라를 통해서 입력봉으로 전파된다. 시편은 입력봉과 출력봉 사이에 설치되며, 탄성봉과 나사로 체결된다. 시편은 스플릿 칼라로 싸여 있는데, 스플릿 칼라의 역할은 압축탄성파가 출력봉에서 입력봉으로 전파될 때, 시편에 소성 변형이 발생하는 것을 방지하는 것이다. 스플릿 칼라를 통해서 입력봉으로 전파된 탄성파는 입력봉의 단면 D에서 반사되어 인장탄성파로 바뀌게 된다.⁽⁷⁾ 입력봉을 거쳐서 시편에 도달한 인장탄성파는 일부가 시편을 통해서 출력봉으로 투과되고, 나머지는 임피던스 차에 의해서 입력봉으로 반사된다. 입력봉과 출력봉에 설치한 스트레인 게이지에 의해서 입사파, 반사파 및 투과파를 측정한다. 이와 같이 측정된 투과파(ϵ_T)와 반사파(ϵ_R)를 이용해

서 시편의 진응력(σ), 진변형률(ϵ), 및 변형률 속도($\dot{\epsilon}$)를 나타내면 식 (1)-(3)과 같은 관계를 가진다. (6,8)

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \epsilon_{T(t)} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_R \quad (2)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (3)$$

E_0 : 탄성봉의 Young's modulus

A_0 : 탄성봉의 단면적

A : 시편의 단면적

L : 시편의 길이

C_0 : 탄성봉에서 탄성파의 속도

2.2 실험장치의 구성

SHPB이론을 적용한 실험장치는 다음의 몇 가지 조건을 만족시켜야 한다. (5,7)

- 1) 탄성봉, 충격봉, 및 스플릿 칼라의 응력이 탄성 한계를 넘지 말아야 한다.
- 2) 탄성봉 내에서의 응력파의 거동은 1차원에 가까워야 한다.
- 3) 시편은 균일한 변형을 하여야 한다.
- 4) 시편은 탄성봉에 단단히 체결되어야 하며, 나사부에서 소성 변형이 일어나지 않아야 한다.

본 연구에서 사용한 SHPB인장 시험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

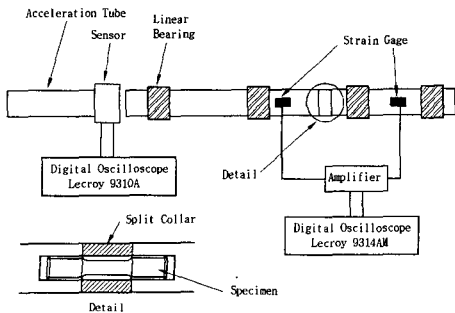


Fig. 3 Schematic of SHPB test system

SHPB 실험은 탄성봉의 탄성과 해석에 의해서 시편의 진응력-진변형률의 관계를 구하는 것이므로, 입력봉, 출력봉 및 스플릿 칼라는 항상 탄성 한계 내에 있어야 한다. 이런 이유로 고강도 강이 사용되지만, 시편의 항복 강도가 낮거나 높은 변형률 속도를 얻지 않아도 된다면, 소성 변형이 일어나지 않는 범위에서는 일반적인 구조용 강재를 사용해도 실험이 가능하다. 본 논문에서는 저강도 소재의 알루미늄 합금 시편을 사용하였고, 1000/sec내외의 변형률 속도에서 실험을 목적으로 하므로 항복 강도등을 고려하여 탄소 공구강인 STC4를 사용하였다.

인장 실험은 충격봉으로부터 출력봉에 가해진 탄성파가 입력봉으로 전파되어야 하는데, 이 역할을 하는 것이 스플릿 칼라이다. 출력봉으로부터 입력봉으로 압축 탄성파가 전파될 때, 스플릿 칼라를 통해서 모든 탄성파가 전파되는 것이 이상적이거나, 실제로는 시편을 통해서도 파의 전파가 이루어지고, 이 때 시편 역시 변형을 일으킨다. 시편의 변형 상태가 탄성 한계 내에서 이루어진다면, 탄성파가 지나간 후에 다시 원 상태로 회복될 것이므로, 스플릿 칼라는 압축탄성파가 시편을 지날 때, 시편에 소성 변형이 일어나지 않도록 해야 한다. 이런 이유로 스플릿 칼라의 단

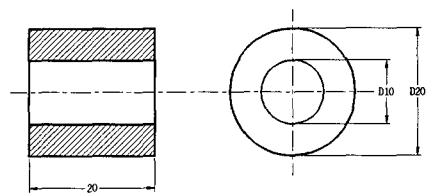


Fig. 4 Split collar (unit: mm)

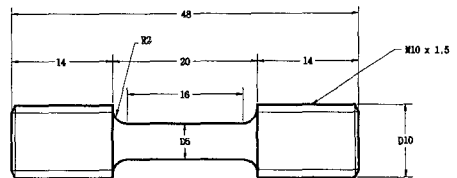


Fig. 5 Dimension of the aluminum specimen (unit: mm)

Table 1 Material property of the specimen

Mechanical property	Tensile strength	Yield strength	Percent elongation
Al2011-T3	360Mpa	300Mpa	14%
Al7075-T6	550Mpa	480Mpa	11%

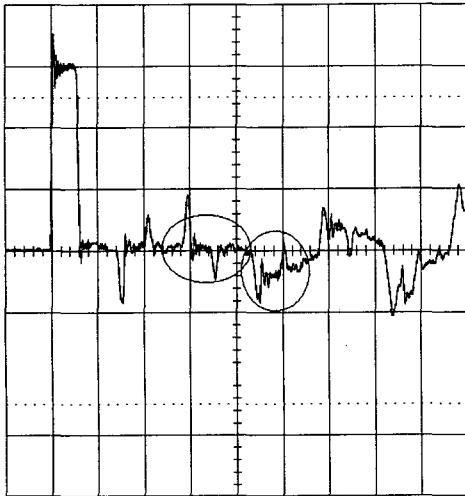


Fig. 6 Strain wave in transmit bar
(transmit bar length : 1500mm
incident bar length : 1500mm)

면적이 시편에 비해서 충분히 커야 한다. 본 연구에서는 탄성봉과 스플릿 칼라의 단면적 비가 4 : 3이 되도록 하였으며, 사용된 스플릿 칼라는 길이 20mm, 외경 20mm, 내경 10mm이다. 인장 실험에 사용된 시편은 알루미늄 Al2011-T3과 Al7075-T6이다. 시편의 치수를 Fig. 5에 나타내었다.

2.3 탄성봉의 길이

SHPB 압축 시험의 경우 일반적으로 입력봉과 출력봉의 길이가 같고, 스트레인 게이지는 봉의 중간 지점에 위치시킨다. 그러나 인장 시험의 경우에 압축 시험과 같이 봉의 길이가 같고, 스트레인 게이지의 위치도 같으면, 원하는 신호를 포착할 수 없다. 입력봉과 출력봉의 길이가 1500mm로 동일한 경우에 오실로스코프에서 얻은 출력봉의 스트레인 게이지 신호를 Fig. 6에

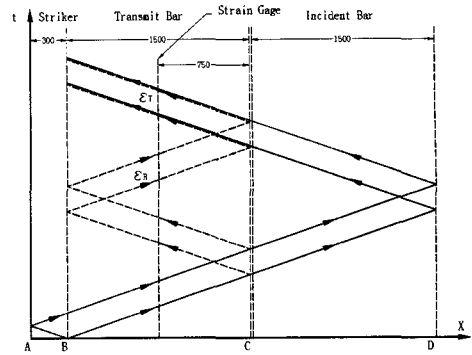


Fig. 7 X-t diagram
(transmit bar length : 1500mm
incident bar length : 1500mm)

나타내었다.

오른쪽 타원 안에 있는 부분이 출력봉에서의 투과파이다. 투과파의 시작 부분이 심하게 솟아 있는 것을 볼 수 있고, 얼마 후 다시 신호가 움푹 패인 모습을 한 것을 볼 수 있다. 이는 왼쪽 타원 안에 있는 신호가 출력봉의 자유단에서 반사되어 투과파의 신호와 겹쳐서 나타나기 때문이다. 왼쪽 타원안에 있는 신호는 초기에 충격봉으로부터 입사된 압축탄성파의 일부가 스플릿 칼라와의 접촉면이나 봉의 나사부에서 반사되었기 때문에 나타난 것으로 생각된다. 탄성봉의 길이가 동일한 경우의 X-t 선도를 Fig. 7에 나타내었다. ϵ_R 은 출력봉과 스플릿 칼라의 경계면에서 반사된 탄성파이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 탄성파가 시편에서 출력봉으로 들어가는 시간대와 반사파가 출력봉과 시편의 경계면에서 반사되는 시간대가 거의 일치한다. 그러므로, 스트레인 게이지의 위치에 상관없이 투과파와 출력봉에서의 반사파가 동시에 겹쳐서 나타날 것이다.

투과파와 출력봉에서의 반사파가 겹쳐서 나타나지 않도록 하기 위해서는 두 신호간에 시간의 차이를 만들어야 하는데, 그러기 위해서는 일단 입력봉과 출력봉의 길이가 달라야 한다. 그리고 출력봉에서의 스트레인 게이지의 위치를 변화시킴으로써 두 파가 서로 겹치는 것을 막을 수 있다. 출력봉의 길이를 입력봉보다 길게 해야 유리한데, 이는 출력봉의 길이가 짧을 경우, 반사파가 출력봉을 왕복하는 시간이 짧아져서 투과파에 간

섭을 일으킬 확률이 높기 때문이다.

반사파의 간섭을 피하기 위해서 입력봉과 출력봉의 길이를 각각 1200mm, 2000mm로 바꾸고 입력봉의 스트레인 게이지는 중간에, 출력봉의 스트레인 게이지는 시편 쪽에서 약 300mm 정도 떨어진 곳에 부착한다. 출력봉에서의 스트레인 게이지 신호와 X-t선도를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타낸다. 투과파가 상당부분 진행하고 난 뒤에 반사파가 나타남을 알 수 있다. 반사파가 나타나기 전에 진행한 투과파는 약 800mm정도인데 충격봉에 의한 입사파와 입력봉에서의 반사파

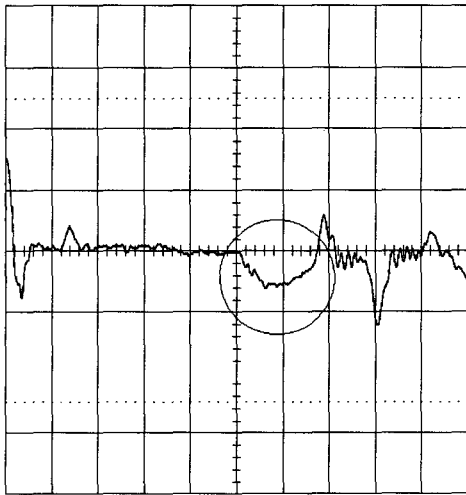


Fig. 8 Strain wave in transmit bar
(transmit bar length : 2000mm
incident bar length : 1200mm)

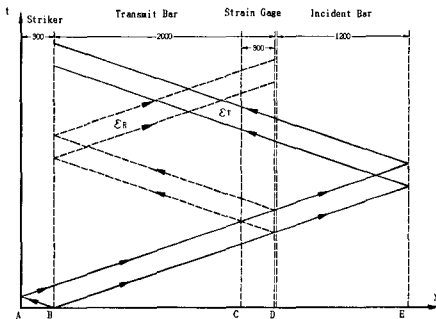


Fig. 9 X-t diagram
(transmit bar length : 2000mm
incident bar length : 1200mm)

가 약 600mm정도의 길이를 갖는 점을 고려하면, 충분한 길이의 투과파이다. 또한, 투과파에 생겼던 진동도 상당부분 감소했음을 알 수 있다. 출력봉의 길이를 입력봉보다 길게 함으로써, 시편의 체결부에서 반사된 탄성파가 출력봉의 자유단에서 반사되어 다시 스트레인 게이지로 돌아오는 시간이 길어지고, 상대적으로 투과파는 시편을 거쳐서 곧 스트레인 게이지에 닿으므로 반사파와 간섭을 일으키기 전에 신호를 포착할 수 있다. 그리고 반사파의 진동의 영향이 없어질 만큼 충분한 시간이 흐른 뒤에 투과파가 지나가므로 투과파의 앞부분에 생기는 진동도 대폭 감소하였다. X-t선도에서 투과파가 스트레인 게이지를 지나가고 난 후에 반사파가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

변형률 속도가 알루미늄 시편의 진응력-진변형률 관계에 미치는 영향을 분석하기 위해서 충격봉의 속도를 변화화면서 실험을 수행하였다.

충격봉의 속도를 달리하여 Al2011-T3 시편에서 획득한 진응력-진변형률 관계를 Fig. 10에 나타내었고, Al7075-T6 시편에서 획득한 진응력-진변형률 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 정적인 실험 수치와 비교해서 두 재료 모두 변형률 속도가 증가함에 따라서 경화되는 현상을 볼 수 있다. Al2011-T3의 경우에는 소성 영역에서 평균적으로 10% 정도의 경화현상을 보이며 Al7075-T6의 경우에는 약 5% 정도의 경화현상을 나타낸다.

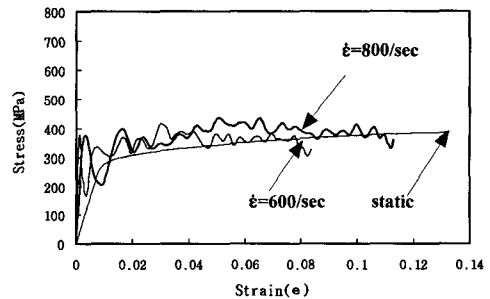


Fig. 10 Stress-strain relation of Al2011-T3

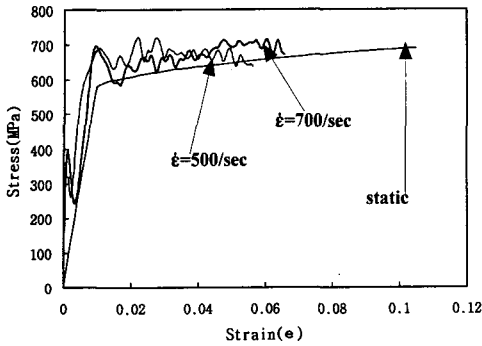


Fig. 11 Stress-strain relation of Al7075-T6

탄성봉에서 얻은 신호로 해석한 진응력-진변형을 관계는 그래프의 초기에는 관성 효과에 의해서 오버슈트(overshoot)를 보이고, 재료가 경화를 일으키는 부분에서는 지속적인 진동(oscillation)을 볼 수 있다. 이것은 탄성파가 진행하면서 탄성봉의 표면에서 반사되는 표면파로 인한 분산효과 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 시편과 탄성봉을 나사로 체결하는 방법을 사용하는데, 초기에 탄성봉을 진행하는 압축탄성과 중 일부가 시편의 체결부에서 반사된다. 탄성봉의 길이를 변화시키면서 몇 차례의 실험을 수행한 결과, 출력봉의 길이를 입력봉 보다 길게 하면 탄성파간의 간섭을 피할 수 있음을 알 수 있다.

변형률 속도가 알루미늄의 진응력-진변형을 관계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 알루미늄 봉으로 인장시편 (Al2011-T3, Al7075-T6)을 가공하여 $10^3/\text{sec}$ 범위의 변형률 속도에서 획득한 값을 정적 시험에서 획득한 값과 비교하였다. 정적 인 시험과 비교해서 두 가지 재료 모두 변형률 속도 증가에 따라 Al7075-T6의 경우에는 약 5%

정도, Al2011-T3의 경우에는 약 10% 정도 경화 현상을 보였다.

후 기

이 논문은 1998년도 한국과학재단 연구비 지원 (과제번호 981-1003-022-2)에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials Very High Rates of Loading," *Proc. Phys. Soc. (London)*, B63, 676~700.
- (2) Nicholas, T. and Bless, S.J. 1985, "Metals Handbook," *American Society of Metals*, Vol. 8.
- (3) Harding, J., Wood, E.D., Campbell, J.D., 1960, "Tensile Testing of Material at Impact Rate of Strain," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 2, pp. 88~96.
- (4) Lindholm, U.S. and Yeakley, L.M., 1968, "High Strain Rate Testing: Tension and Compression," *Experimental Mechanics*, Vol. 8.
- (5) Nicholas, T., 1981, "Tensile testing of Materials at High Rates of Strain," *Experimental Mechanics*.
- (6) Meyers, M.A., 1994, "Dynamic behavior of materials," Wiley-Interscience, John Wiley & sons, inc. New York.
- (7) Meyers, M.A., and Rivichandran, G., 1989, "Short Course in Dynamic Behavior of Materials," Center of Excellence for Advanced Materials University of California, San Diego, March 6~10.
- (8) 서송원, 민욱기, 이정민 " SHPB 시험용 알루미늄 압축시편의 치수 효과," 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회 논문집 A , 339~343