

## SHPB를 이용한 구조용 AL합금재의 동적거동 특성 시험에 관한 연구

허 신\* · 김동성\* · 구정서\* · 강흥식\*\* · 홍성인\*\*\* · 정동택\*\*\*\*

### Dynamic Behavior Characteristic Test of Structural Aluminium Alloy Materials using SHPB

S. Hur, D.S. Kim, J.S. Koo, H.S. Kang, S.I. Hong and D.T. Chung

**Key Words:** Strain Rate(변형률속도), Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB), Dynamic Behavior(동적 거동), Strain Hardening(변형률 경화)

#### Abstract

It is important to know the mechanical properties of the materials under dynamic load. The mechanical properties of most materials are influenced to some extent by strain rate. One of the reliable test device for determining the mechanical properties of materials at high strain rate is Split Hopkinson Pressure bar. In this paper, we conducted the mechanical properties test for the aluminium alloy 6063 and 6061 using the SHPB device.

#### 1. 서론

동적으로 하중을 받는 구조물을 보다 정확하게 해석하고 설계하기 위해서는 변형률속도(strain rate)에 영향을 받는 재료의 기계적 특성을 반드시 알 필요가 있다. 대부분 재료의 기계적 성질이 어느 정도 변형률속도의 영향을 받고 있다는 것은 잘 알려져 있다. 이와 같은 변형률속도의 의존성은 금속, 세라믹, 유리 및 고분자를 포함한 거의 모든 재료에서 관찰된다. 특히 금속에서 변형률속도 효과의 크기는 1950년대 이후 많은 연구자의 연구주제이었다.

과거 50년 동안, 고속시험의 기술적 진보로 재료의 동적 거동 특성에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 시험 기술의 발전은 소위 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 또는 Kolsky bar의 개발로 이루어 졌다. Kolsky bar는  $10^2 \text{ s}^{-1}$ 에서  $10^3 \text{ s}^{-1}$ 까지의 변형률속도에서 단축 압축 상태에 있는 금속의 동적 소성응답을 연구하기 위해서 사용되었다. 그후에는 인장 및 비틀림의 소성 유동 뿐만 아니라 동적 파괴를 연구하는데 까지 이르렀다. 최근에 Kolsky bar는 더 높은 변형률속도( $> 10^4 \text{ s}^{-1}$ )에서 시험할 수 있도록 개선되었고 세라믹과 같은 취성 재료와 고분자와 같은 연성재료를 포함하는 다양한 재료를 시험할 수 있게 되었다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구에서는 새로 제작된 SHPB 시험장치의 이론적 배경과 관련 계측장치를 소개하고 알루미늄 합금 6063 및 6061 계열의 시편에 대해서 변형률속도  $10^2/\text{sec} \sim 10^3/\text{sec}$  범위에서 동

\* 한국기계연구원 신교통기술연구부  
 \*\* 충남대학교 기계공학과 대학원  
 \*\*\* 충남대학교 기계공학과  
 \*\*\*\* 한국기술교육대학교 기계금형공학과

적 재료 특성시험을 수행하고 시험 결과를 검토한다.

## 2. 충격시험의 이론

SHPB시험 이론<sup>(3)</sup>은 입력봉(incident bar)에서 측정된 초기 탄성 입력파와 반사파 그리고 출력봉(transmit bar)에서 측정된 투과파의 크기에 의하여 시편의 응력 및 변형률에 대한 정보를 얻을 수 있도록 확립되었다.

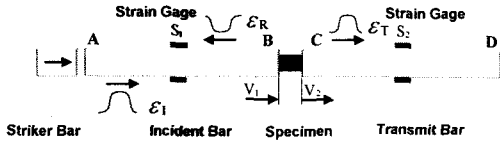


Fig. 1 A propagation process of elastic stress wave for the SHPB test

Fig. 1에서 충격봉(striker bar)이 입력봉 A를 주어진 속도로 충격을 가하면 이 충격에 의해 입력봉 내에 변형률  $\epsilon_I(t)$ 를 갖는 입사파가 발생한다. 이 입사파가 입력봉의 다른 끝인 B에 도달하게 되면 임피던스의 차이에 의하여 입사파의 일부는 변형률  $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 반사파로 반사되고 나머지는 변형률  $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 투과파가 발생한다. 스트레인게이지  $S_1$ 과  $S_2$ 에 의하여 입사파, 반사파, 투과파의 시간에 대한 변화를 측정할 수 있다.

위의 시험 원리를 이용하여 다음과 같이 시간에 대한 시편의 응력-변형률, 변형률속도(strain rate) 관계식을 얻을 수 있다. 식(1)에서 시편내에 가해진 응력  $\sigma_s(t)$ 는 투과파  $\epsilon_T(t)$ 의 크기에 비례한다.

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

여기서, E는 충격봉의 탄성계수, A는 충격봉의 단면적,  $A_s$ 는 시편의 단면적이다.

식(2)에서 시편이 균일하게 변형할 경우, 시편내의 변형률속도  $\dot{\epsilon}_s$ 는 반사파  $\epsilon_R(t)$ 의 크기에 비례한다.

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

여기서  $C_0$ 는 봉의 파동전파속도, L은 시편의 길이이다.

식 (2)를 적분하면 시편내의 변형률  $\epsilon_s(t)$ 를 구할 수 있는 식 (3)이 된다.

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

즉 반사파  $\epsilon_R(t)$ 와 투과파  $\epsilon_T(t)$ 를 스트레인게이지로 측정하여 시편의 응력-변형률 및 변형률속도를 얻을 수 있다.

## 3. SHPB 시험장치의 SETUP

Fig. 2는 SHPB시험 시스템의 구성을 보이고 있다. 하중장치(air gun)는 충전된 공기를 quick acting valve를 사용하여 충격봉이 발사되도록 하는 역할을 한다. 충격봉은 마라징강(VASCOMAX C-350)을 사용하였으며 입력봉에 적합한 충격 에너지와 지속시간을 갖는 압축파를 전달하기 위하여 직경 19mm, 길이 200.0mm의 충격봉을 사용하였다. 또한 입력봉과 출력봉도 충격봉과 동일한 재료의 마라징강을 사용하였다.

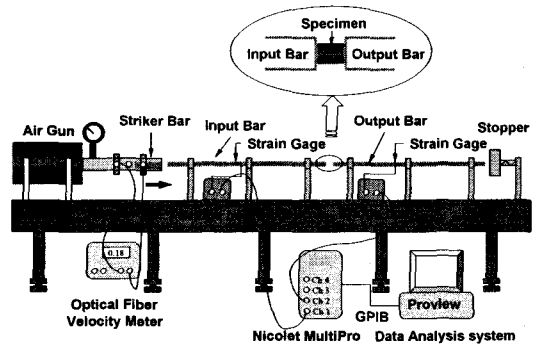


Fig. 2 A schematic diagram of SHPB system

Fig. 3은 입력봉 및 출력봉의 제원으로서 봉의 직경은 19.0 mm, 길이는 각각 1,570mm로 제작되었다. 이 봉들은 베드위에 놓여있는 8개의 부상 및 가이드에 의하여 일직선으로 정밀하게 정렬되었다. 시편이 삽입되는 입력봉과 출력봉의

양끝은 평면 접촉이 매우 중요하므로 정밀 연삭 되었다. Table 1은 입력봉과 출력봉의 기계적 특성을 나타내고 있다.



Fig. 3 Dimensions of the incident bar and transmitted bar

Table 1 Mechanical characteristics of the bars

Materials	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
VASCOM AX C-350	8,000	186.0	2,438	8.0

시편에 가해지는 입사파의 크기를 파악하기 위한 충격봉의 속도 측정은 할로겐 램프를 광원으로 하고 광섬유를 사용하는 광학식 속도 측정장치를 사용하였다.

길이방향 응력파의 시간에 따른 변화를 측정하기 위해서 Measurements group사의 ED-DY-031CF-350 스트레인게이지를 사용하였다. 부착 위치는 Fig. 3에서와 같이 입력봉 및 출력봉의 중간지점, 즉 시편에서 785mm 떨어진 지점에 부착하였다. Table 2는 스트레인게이지의 제원을 나타내고 있다.

Table 2 Dimensions of strain gauge

Manufacture Co.	Measurements group
Gage length(mm)	0.79
Gage factor	3.25±3.0%
Resistance(Ω)	350±0.8%

게이지내의 미세한 저항값의 변화는 Fig. 4의 half bridge 회로에 의하여 전압 변화로 나타나게 되며, 이 회로는 입력봉 및 출력봉의 굽힘 영향을 받지 않게 된다. 또한 half bridge 회로에 공급되는 전원은 독립적인 DC Power supply를 사용하여 외부의 노이즈 영향을 받지 않도록 하였다.

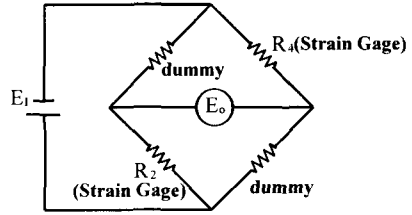


Fig. 4 Circuit of half bridge

Bridge 회로의 출력 전압신호는 샘플링 속도가 10 Mhz이고 수직 분해능이 12 bit인 고속 데이터 수집기(Nicolet MultiPro 150)에 의하여 트리거되고, 트리거된 신호는 GPIB를 거쳐 데이터 처리 소프트웨어인 Proview 화면에 즉시 나타난다. 스트레인게이지에서 고속데이터 수집기까지의 거리가 길고 또한 미소전압을 측정을 해야 하므로 주변의 전자기파에 의한 노이즈를 제거하기 위해서 차폐선(shield wire)이 사용되었고 모든 관련장치에 접지를 형성하였다. 또한 스트레인 신호를 측정하기 위해서 고주파 성분 제거를 위한 필터 및 증폭기를 사용하지 않았다.

식 (4)는 half bridge 회로를 통해 발생된 미소 출력전압  $E_0$ 와 시편의 변형률  $\epsilon_s$ 사이의 변환식이다.<sup>(4)</sup>

$$E_0 = \frac{1}{2} F \cdot E_I \cdot \epsilon_s \quad (4)$$

여기서, F는 gage factor,  $E_I$ 는 bridge box의 입력전압이다.

#### 4. 충격시험 결과

시험 시편으로 사용한 60계열 알루미늄 합금 재료는 부식 저항 및 용접성이 우수하고 고강도를 가진다. 특히 Al6063은 압출성이 좋기 때문에 구조용 재료로 많이 사용되고 Al6061은 용접 구조물에 많이 사용된다. 유럽 및 일본에서는 신형 자기부상열차(Maglev)의 구조체에 사용하기도 한다.<sup>(5)</sup> Al6063 및 Al6061재료의 시편의 제원은 Table 3에 제시되었다. 시편 형상은 원통형으로서 길이와 직경의 비가 1±0.05정도가 되도록 하였고 끝 단면이 서로 평행하게 되도록 하였다.

록 가공하였다.

Table 3 Dimensions of test specimen

Materials	Diameter(mm)	Length(mm)
Al6061	10.0	10.0
Al6063		

#### 4.1 충격파의 측정 데이터

Fig. 5는 게이지에서 측정된 충격파 신호를 나타내고 있다. 여기서 입사파  $\epsilon_I$ 는 입력봉을 통해 들어온 최초 응력과 이며, 반사파  $\epsilon_R$ 는 시편에서 반사된 파이고 투과파  $\epsilon_T$ 는 시편을 통과한 후 출력봉으로 전달된 파이다.

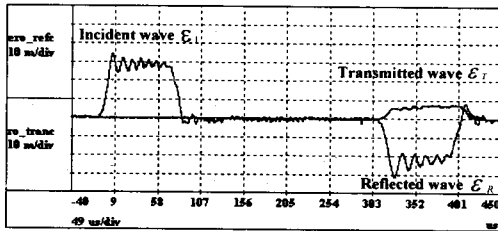


Fig. 5 A view of elastic stress wave

입사파 및 반사파는 충격에너지에 의해서 입력봉이 변형시, 반경방향 관성으로 인해 분산(dispersion) 효과가 발생하고 있다. 압축파의 지속시간  $\Delta t(=2 \cdot L/C_0)$ 는 약  $83 \mu\text{sec}$ 이다. 여기서,  $C_0$ 는 봉내의 압축파 전달 속도이고  $L$ 은 충격봉의 길이이다.

#### 4.2 응력 및 변형률 곡선

측정된 데이터들은 데이터처리 소프트웨어(Proview)<sup>(6)</sup>에서 개발된 프로그램으로 각 실험에 따른 응력-변형률 곡선을 얻었다.

먼저 준정적 인장시험을 위하여 ASTM 표준 시험 기준<sup>(7)</sup>에 따라서 제작된 표점거리 25.0 mm의 Al6063 및 Al6061 재료의 봉형 인장시편을 5개 제작하고, Instron 만능시험기를 이용하여 인장시험을 수행하였다. 준정적 인장시험의 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-4} / \text{sec}$ 에서 Al6063의

항복강도는 228.0 MPa, 인장강도는 278.0 MPa를 얻었고, Al6061의 항복강도는 290.0 MPa, 인장강도는 355.0 MPa를 얻었다. 인장시험의 결과는 진변형률-진응력으로 변환된 값이다.

Fig. 6은 Al6063에 대해서 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 690, 1,070 / \text{sec}$ 에 대해서 각각의 진변형률-진응력을 나타낸 것이다. 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 690 / \text{sec}$ 일 경우, 진변형률  $\epsilon = 0.06$ 에서 진응력값은 준정적 시험값보다 6.0% 증가하였다. 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 1,070 / \text{sec}$ 일 경우, 진변형률  $\epsilon = 0.1$ 에서 진응력값은 준정적 시험값보다 8.0% 증가하였다.

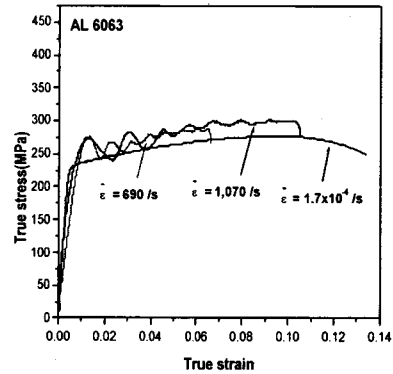


Fig. 6 True strain-true stress curves with strain rate variation(Al6063).

Fig. 7은 Al6061에 대해서 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 660, 1,040 / \text{sec}$ 에 대해서 각각의 진변형률-진응력을 나타낸 것이다. 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 660 / \text{sec}$ 일 경우, 진변형률  $\epsilon = 0.06$ 에서 진응력값은 준정적 시험값보다 3.6% 증가하였다. 변형률속도  $\dot{\epsilon} = 1,040 / \text{sec}$ 일 경우, 진변형률  $\epsilon = 0.1$ 에서 진응력값은 준정적 시험값보다 3.0% 증가하였다.

문헌<sup>(2,8)</sup>에 의하면, Al6061과 같은 고강도 알루미늄합금의 압축시험의 결과, 변형률속도  $10^{-4}$ 에서 1,000 /sec 범위에서 변형률경화 효과는 미미한 것으로 나타나 있다.

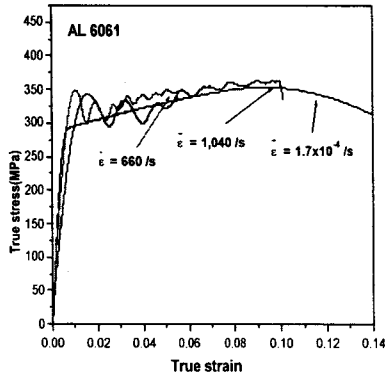


Fig. 7 True strain-true stress curves with strain rate variation(Al6061).

## 5. 결론

제작된 SHPB 시험장치를 이용하여 수행한 Al 6063 및 6061 재료의 기계적 특성시험 결과는 다음과 같다.

- 1) Al6063 계열의 경우, 변형률속도 690 및 1070 /sec에서 변형률속도의 증가에 따라 변형률경화 현상을 나타냈으며, 진응력값은 준정적 시험값보다 각각 6.0%, 8.0% 증가하였다.
- 2) Al6061 계열의 경우, 변형률속도 660 및 1040 /sec에서 변형률속도의 증가에 따라 변형률경화 현상을 나타냈으며, 진응력값은 준정적 시험값보다 각각 3.6%, 3.0% 증가하였다.

## 참고문헌

(1) Rodney J. Clifton, 2000, "Response of materials under dynamic loading: Report from United States National Committee on Theoretical and Applied Mechanics", Int. J. of Solids and Structures, vol. 37, pp.

105-113.

(2) T. Nicholas, 1980, "Dynamic Tensile Testing of Structural Materials using A Split Hopkinson Bar Apparatus", Technical Report AFWAL-TR-80-4053, Air Force Wright Aeronautical Laboratory.

(3) Marc Andre Meyers, 1994, "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley & Sons Inc.

(4) 1997, "Errors due to Wheatstone Bridge Nonlinearity", Measurement Group Tech note TN-507-1.

(5) 1998, "Aluminium Alloy Selection and Applications", The Aluminium Association, Inc..

(6) 1997, "Nicolet Analysis and Report Software-Quick Reference Guide and Tutorial", Nicolet Technologies.

(7) 2000, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM Designation: E 8M-00 METRIC.

(8) J. D. Campbell, 1973, "Dynamic Plasticity: Macroscopic and Microscopic Aspects", Materials Science and Engineering, 12, pp. 3-21.