

# 박판의 고변형률에서의 기계적특성을 얻기위한 Tension Split Hopkinson bar의 제작 및 실험

정동택\*, 허훈\*\*, 강우종\*\*, 조상순\*\*

\*\*한국과학기술원 기계공학과

\*국방과학연구소

## High strain rate tensile test of sheet metals with a new tension split Hopkinson bar

Dong-Taek Jung\*, Hoon Huh\*\*, Woo-Jong Kang\*\*, Sang-Soon Cho\*\*

\*\*Department of Mechanical Engineering, KAIST

\*Agency for defense development

### Abstract

A split Hopkinson bar has been used for obtaining material properties in high strain rate state. In this paper, the apparatus was modified to obtain the high strain rate properties of sheet metal for an autobody. From the experiments with the new apparatus, the material properties of SPEN in the high strain rate state have been acquired and compared with quasi-static experimental results.

Key words : Hopkinson bar, High strain rate (고변형률), Tension test(인장시험)

### 1. 서론

동적 또는 충격하중을 받는 재료의 기계적 특성을 알기 위하여 1940년대 말 Kolsky<sup>[1]</sup>에 의하여 고속물성 측정을 위한 장치가 제안되었으며, 이것은 Split-Hopkinson pressure bar(SHPB)로 잘 알려져 있다. 인장시험을 위한 장치는 압축시험과 기본원리는 유사하나 입력파를 가하는 방법에서 차이가 있다. Lindholm<sup>[2]</sup>, Staab<sup>[3]</sup>, Nicholas<sup>[4]</sup>등에 의하여 고속인장 실험이 수행되었으며, 이 장치는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 입력봉, 출력봉, 충격봉 등으로 구성되어 있으며 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉을 입력봉에 충돌시키면 이 때 발생한 응력파가 입력봉으로 전달되고 이어서 시편을 거쳐 출력봉으로 전달된다. 이 때 봉내의 응력파의 전파거동을 일차원으로 간주하면 시편의 응력 및 변형률은 봉 중간에 부착된 스트레인게이지의 신호로부터 구할 수 있게 된다.

본 논문에서는 인장 시험용 Split Hopkinson Bar를 제작하여 금속재료의 동적 물성치를 얻어내고자 하며, 특히 박판 형태의 인장시편을 시험하기에 적합하도록 제작하여 자동차 차체용으로 많이 쓰이는 SPEN에 대한 고속인장 시험을 수행하였고 그 결과를 준 정적인 실험 결과와 비교하여 보았다.

### 2. TSHB(Tension Split Hopkinson Bar)의 이론

Kolsky의 일차원 탄성과 이론에 의하면 입력봉에서 측정된 초기 탄성 입력파와 반사파 그리고 출력봉에서 측정된 투과파의 크기에 의하여 시편의 응력 및 변형률을 얻을 수 있다.

Fig. 1과 같이 충격봉이 입력봉을 주어진 속도로 충격을 가하게 되면, 충격에 의해 입력봉 내에 변형률  $\epsilon_1(t)$ 를 갖는 인장파가 발생한다. 이 인장파가 입력봉의 다른 끝에 도달하게 되면 임피던스의 차이에 의하여 인장파의 일부는 변형률  $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 압축파로 반사되고 나머지는 변형률  $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 인장파로 투과된다. 이 때 스트레인게이지 S1과 S2를 이용하여 입력파, 반사파, 투과파의 시간에 대한 변화를 측정할 수 있다.

시편이 균일하게 변형할 때 시편내의 변형률 속도는 반사파의 크기에 비례하며, 시편내에 가해진 응력의 크기는 투과파의 크기에 비례한다. 시편내의 변형률 속도와 응력은 다음과 같이 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (1)$$

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (2)$$

식(1)을 적분하게 되면 시편에서의 변형률인 식(3)을 얻을 수 있게 된다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (3)$$

이와 같이 시편의 응력-변형률 곡선을 입력봉의  $\epsilon_R(t)$ 와 출력봉의  $\epsilon_T(t)$ 를 측정하여 얻을 수 있다.

### 3. TSHB의 제작 및 실험

#### 3.1 실험장치의 제작

인장 시험용 Hopkinson Bar는 다른 압축 또는 전단 시험용 Hopkinson Bar에 비하여 인장시편의 형상 결정에 대한 어려움 또는 시편과 입출력봉의 연결에 관한 문제점 등으로 인하여 발전이 느리게 진행되었지만, 여러 가지 형태의 장치가 제작되었으며 여러 가지 재료에 대한 실험도 수행되었다. 그러나 대부분의 TSHB가 봉형 시편을 이용한 실험에 적합하도록 제작되었으며, 따라서 본 논문에서는 박판형태의 인장시편을 이용하여 실험을 수행하기에 적합한 형태의 새로운 TSHB를 설계 및 제작하였다.

Hopkinson Bar의 제작에 있어서 Bar는 응력파의 전달과정중 탄성한계내에 있어야 하므로 4340강이나 마라징(Maraging)강이 사용되며, 일차원 응력파 전달 이론을 만족시키기 위하여 봉의 길이는 최소한  $L/D$ 가 20이상이어야 하며, 스트레인게이지로 입사파, 반사파, 투과파를 측정할 때 응력파들 사이에 간섭이 없도록 하기 위하여 더욱 긴 봉이 필요하게 된다. 또한 봉과 시편의 접촉 및 정렬이 대단히 중요하게 된다. 충격봉의 길이는 식(4)에 의하여 입력파의 지속시간에 영향을 주게 되므로 적절한 길이의 충격봉을 선정하는 것도 중요하다.

$$\Delta t = 2 \frac{L}{C_0} \quad (4)$$

본 시험 장치는 압축공기를 이용하여 충격봉을 발사하도록 설계하였으며, 특히 장치의 제작에 있어서 어려움이 있었던 부분은 Fig. 1에 표시된 앤빌(Anvil) 부분과 그립(grip)부분이었다. 앤빌의 설계에 있어서 충격봉과 앤빌의 충돌로 인하여 발생하는 많은 노이즈를 제거 하기 위하여 설계를 단순화 하였다. Fig. 2의 x-t 선도에서 보는 바와 같이 앤빌의 양끝단에서 발생한 응력파가 간섭을 일으키게 되나 앤빌의 길이가 충

분히 짧으므로 그 효과는 수  $\mu\text{s}$  정도에서만 발생하게 되고, 따라서 충분히 긴 충격봉을 사용할 경우 그 효과는 무시할만하다고 생각된다.

다음으로 시편의 장착부분의 설계에 있어서 가능한 한 그립의 질량을 작게 하고 큰 충격력 하에서도 시편에서 미끄러짐이 발생하지 않도록 하기 위하여 Fig. 3과 같은 볼트 체결 방식의 그립(grip)을 채택하였다. 이 때 봉과 같은 재료인 마라징(Maraging)강으로 제작된 편을 이용하여 고정하였다.

이와 같은 TSHB를 이용하여 입출력 봉에 부착된 스트레인게이지의 신호를 오실로스코프를 이용하여 측정하였고, 충격봉의 속도는 광섬유(Optical fiber)센서를 이용하여 측정하였다. 측정된 스트레인 게이지 신호중 반사파는 식(3)에 의하여 시편의 변형률로 변환되어지며, 투과파는 식(2)에 의하여 시편의 응력으로 변환되어지므로 시편의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있게 된다.

### 3.2 자동차용 강판의 저속 및 고속 인장시험

실험에는 자동차 차체 성형용으로 많이 사용되는 SPCEN의 재료로 만들어진 시편을 사용하였다. 강판의 명칭은 JIS의 규격을 따라 명명하였다. S는 Steel을, P는 Plate를, 세 번째의 C는 Cold rolled를, 네 번째의 C와 E는 강판의 등급을 나타내며 N은 시효 보증을 뜻한다.

사용한 시편의 저속도 특성을 알아보기 위하여 준 정적인 인장시험을 수행하였다. 대략  $0.001\text{sec}^{-1}$ 의 변형률 속도대를 얻기 위하여 Instron을 이용하였으며, 변형률 속도  $1\text{sec}^{-1}$ 을 얻기 위한 시험에는 피로 시험장치인 Dynamic UTM을 이용하였다. Fig. 5는 SPCEN의 준 정적인 경우에 대한 응력-변형률 선도이다. 제작된 TSHB를 이용하여 실제 실험을 수행하면 Fig. 4와 같은 입사파, 반사파 및 투과파가 오실로스코프로부터 측정되게 되며 얻어진 데이터와 식(1), 식(2), 식(3)으로부터 시편의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다. Fig. 6은 변형률속도변화에 따른 SPCEN의 응력-변형률 선도이다. 고변형률하에서는 변형률증가에 따른 유동응력증가가 크지 않았지만, 준 정적인 경우에 비하여 유동응력이 약 40%정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 고속 인장시험을 위한 TSHB를 설계 및 제작하였으며, 특히 박판 형태의 시편을 이용하여 실험하기에 적합하도록 그립을 채택하였다. 적절한 시편을 선택하여 장치의 설계, 제작 및 검증 단계로서, 자동차 차체용 강판으로 많이 쓰이고 있는 SPCEN의 고속 인장 시험을 수행하여 변형률속도에 따른 기계적 물성치를 구하였으며, 준정적인 시험에서 얻은 결과와 비교하여 보았다.

### 참고문헌

- (1) H. Kolsky, "Stress wave in solids," Dover, New York, pp. 41-65, 1949.
- (2) U. S. Lindholm and L. M. Yeakley, "High strain-rate testing: tension and compression," Exp. Mech. vol. 8, pp. 1-9, 1968.
- (3) G. H. Staab and A. Gilet, "A direct-tension split Hopkinson bar for high strain-rate testing," Exp. Mech. Vol. 31, pp. 232-235, 1988.
- (4) T. Nicholas, "Tensile testing of materials at high rates of strain," Exp. Mech. May, pp. 177-185, 1981.

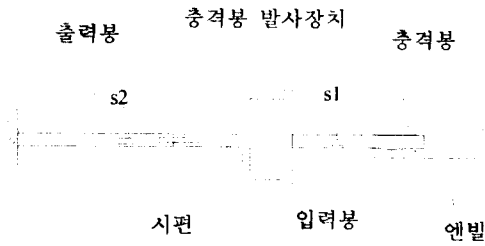


Fig.1 Schematic diagram of Tension Split Hopkinson bar.

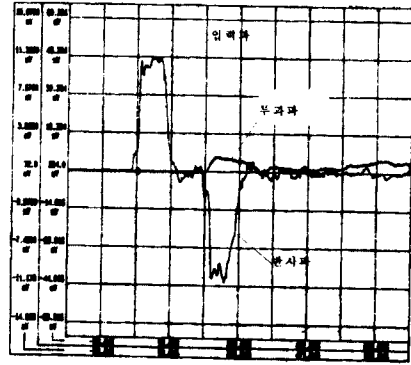


Fig. 4 The shape of waves acquired from an oscilloscope.

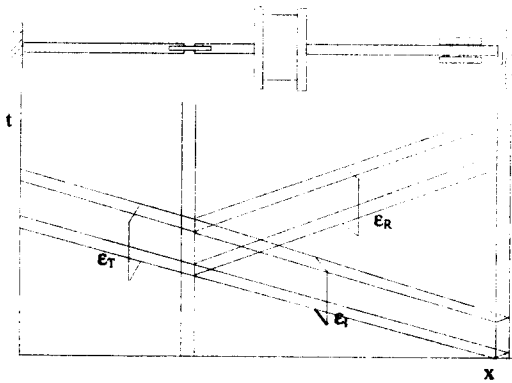


Fig. 2 The x-t diagram of Tension Split Hopkinson bar.

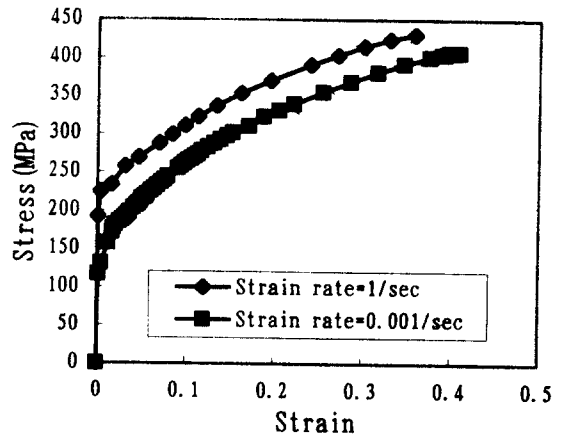


Fig. 5 The stress-strain curve of SPCCEN from a quasi-static tension test.

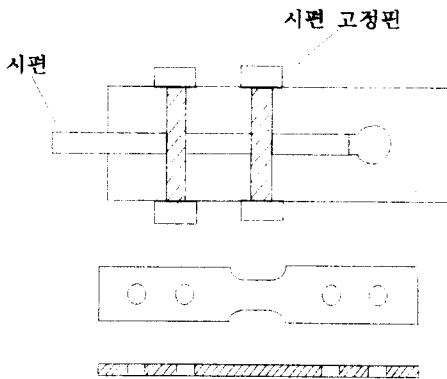


Fig. 3 The schematic diagram of grip and specimen.

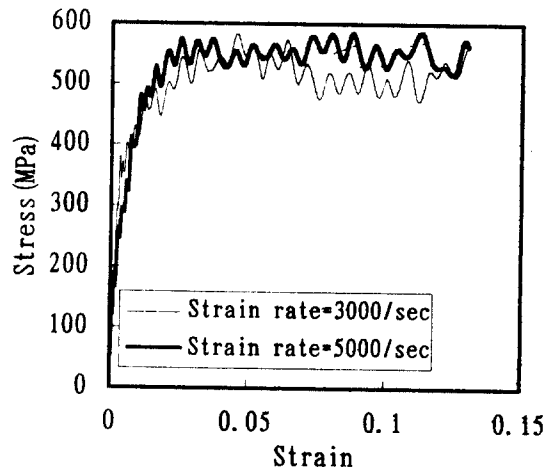


Fig.6 The stress-strain curve of SPCCEN at the high strain rate.