

〈기술논문〉

# 새로운 Tension Split Hopkinson Bar를 이용한 박판의 고속 인장시험

강우중\* · 조상순\* · 허 훈\*\* · 정동택\*\*\*

(1997년 6월 2일 접수)

## High Strain Rate Tensile Test of Sheet Metals with a New Tension Split Hopkinson Bar

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

**Key Words :** Hopkinson Bar(홉킨슨바), High Strain Rate(고변형률속도), Tension Test(인장 시험), Finite Element Method(유한요소법)

### Abstract

A split Hopkinson bar could be used for obtaining the high strain rate material properties of sheet metals for an autobody. In high speed tensile tests of sheet metals, a new design of a tension split Hopkinson bar apparatus is needed. The design of grips and an anvil needs much effort for good experimental results. The effects of the grip size, pin hole and the anvil length are numerically analyzed with ABAQUS/Explicit for the new apparatus of split Hopkinson bars. From the experiments with the new apparatus, the material properties of SPCEEN in the high strain rate state have been acquired and compared with quasi-static experimental results. The material properties of SPCEEN as well as other sheet metals in an autobody are indispensable for the analysis of crashworthiness. Nevertheless the experiment of sheet metal in the high strain rate state has not been done or reported.

### 1. 서 론

동적 또는 충격하중을 받는 재료의 기계적 특성을 알기 위하여 변형률속도의 영향에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 1940년대 말 Kolsky<sup>(1)</sup>에 의하여 고속 물성측정을 위한 장치가 제안되었으며, 이것은 Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB)<sup>(2)</sup>로 잘 알려져 있다. 이후로 고변형률속도에서의 기계적 물성측정에 많은 발전이 이루어졌

다. 이 장치는 입력봉, 출력봉, 충격봉 등으로 구성되어 있으며, 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉을 입력봉에 충돌시키면 이때 발생한 압력파가 입력봉으로 전달되고 이어서 시편을 거쳐 출력봉으로 전달된다. 이 봉들은 탄성 한계 내에 있지만 두봉 사이에 위치한 시편은 임피던스의 차에 의하여 소성변형을 하게 된다. 두 개의 긴 봉 중간에 부착된 스트레인 게이지의 신호와 봉내의 1차원 탄성과 전달식으로부터 시편과 접촉하는 두봉의 끝에 미치는 시간에 따른 하중과 변위를 결정 할 수 있다. 이 장치는 변형률속도 1,000/sec ~ 10,000/sec 대의 광범위한 변형률속도 범위에서 재료의 충격특성을 분석하기 위하여 많은 연구자들

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\*회원, 국방과학연구소

에 의하여 이용되어 왔다. Lindholm과 Yeakley<sup>(3)</sup>는 SHB를 이용하여 인장 또는 압축 변형률시험을 하기 위한 방법에 관하여 언급하였다. Dharan과 Hauser<sup>(4)</sup>는 고순도 알루미늄에 대한 고변형률속도 시험을 수행하였으며, 시편 크기의 영향에 대해서도 언급을 하였다. Ogawa<sup>(5)</sup>는 일차원 탄성과 이론에 근거하여 새로운 충격 인장-압축시험장치를 소개하였으며, Baushinger 효과에 대한 연구를 수행하였다. Staab와 Gilet<sup>(6)</sup>은 TSHB(Tension Split Hopkinson Bar)를 이용한 알루미늄 6061-T651 재료에 대한 고변형률 시험에 있어서, 봉형 시편의 기하학적 형상에 관한 연구를 수행하였으며, 시편의 직경에 대한 길이의 비(L/D)가 1.60 이상인 경우 고속 인장시험시 재료의 인장강도가 시편의 형상에 영향을 받지 않음을 보였다. 또한 MARC를 이용한 SHB의 3차원 유한요소해석을 수행하여 일차원 이론에 의하여 얻어진 시편의 동적인 구성방정식이 적합한 것을 검증하였다. Follansbee와 Frantz<sup>(7)</sup>는 SHPB에서의 탄성과의 감쇄가 응력-변형률관계에 미치는 영향을 연구하였으며, 수학적으로 감쇄된 응력파를 보정하였다. Parry 등<sup>(8)</sup>은 SHPB를 이용한 시험에서 시간에 따른 변형률이 일정하도록 하기 위하여 홉킨슨바 시험기를 수정하였다. Nicholas 등<sup>(9)</sup>은 인장시험용 홉킨슨바를 이용하여 알루미늄, 철 등의 물성시험을 수행하였고, 시험장치의 오차를 보정하였다. 그 외에도 알루미늄 합금, 구리합금, 복합재료 등의 다양한 재료에 대한 고변형률 시험이 수행되었다.<sup>(10~14)</sup>

TSHB(Tension Split Hopkinson Bar)는 시편을 입력봉 및 출력봉에 결합하는 방법과 인장력을 가하는 방법에 따라 여러 가지 형태가 사용되고 있으나, 압축이나 전단시험장치에 비하여 그 발전이 더디게 이루어져 왔다. 그 이유는 첫째로 응력-변형률관계의 초기단계의 정확성에 많은 영향을 주게 되는 짧은 상승시간(rise time)을 갖는 인장응력파를 얻기가 어려우며, 시편을 입력봉과 출력봉에 연결시키는 어려움, 그리고 최적의 시편형상에 대한 불확실성 등으로 인하여 장치의 설계, 제작 및 실험상의 오차를 판정하는 등에 어려움이 있다는 것이다. 따라서 장치의 제작에 있어서 시편과 입, 출력봉과의 단면적 차이에 의한 임피던스차이 및 시편과 봉의 접촉부에서 발생하는 응력파의 왜곡(distortion) 등에 많은 주의를 기울여야 한다. 또한 Kolsky의 이론에 의하여 시편의 응력-변형률 관계

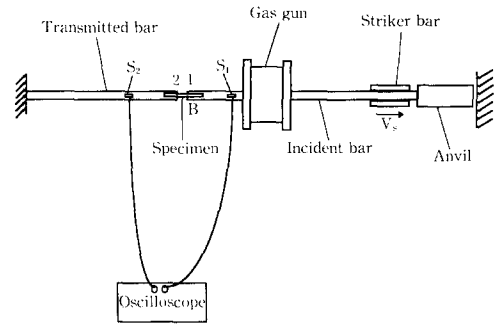


Fig. 1 The schematic diagram of tension split Hopkinson bar

를 얻기 위하여 시편의 변형이 균일하여야 하므로 시편과 입, 출력봉과의 임피던스 차이에 직접적인 영향을 주게 되는 시편의 단면적과, 그립(grip)의 효과를 무시할 만한 시편의 길이에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 인장 시험용 Split Hopkinson Bar를 제작하여 금속재료의 동적 물성치를 얻어내고자 하며, Fig.1와 같은 형태로 박판형태의 인장시편을 사용할 수 있도록 하였다. 또한 시편의 단면적 변화에 대한 반사파 및 투과파의 변화를 유한요소 해석을 통하여 정량적으로 알아보았으며, 그림의 효과에 대해서는 정성적인 영향을 알아보았다. 유한요소해석과 실험을 통하여 제작된 TSHB를 검증하였고, 자동차 구조용 재료로 많이 쓰이고 있는 SPEN에 대한 정적 및 동적 물성시험을 수행하였다.

## 2. TSHB의 기본이론

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.1에서와 같은 인장시험장치에서는 충격봉이 입력봉에 주어진 속도로 충격을 가하게 되면, 충격에 의해 입력봉 내에 변형률  $\epsilon_I(t)$ 를 갖는 인장파가 발생한다. 이 인장파가 입력봉의 다른 끝인 B에 도달하게 되면 임피던스의 차이에 의하여 인장파의 일부는 변형률  $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 압축파로 반사되고 나머지는 변형률  $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 인장파로 투과된다. 이러한 입력파, 반사파, 투과파의 시간에 대한 변화는 스트레인 게이지  $S_1$ 과  $S_2$ 에 의하여 측정된다.

시편이 균일하게 변형할 때 시편내의 변형률속도는 반사파의 크기에 비례하며, 시편내에 가해진 응력의 크기는 투과파의 크기에 비례한다. 시편내의 변형률은 다음과 같이 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (1)$$

여기서,  $V_1(t)$ 와  $V_2(t)$ 는 각각 Fig. 1에서 점 1 및 2의 속도이고,  $L$ 은 시편의 길이이며 인장의 경우 (+)부호가 되도록 하였다. 봉에서 응력 및 변형률 분포가 일차원이라 가정할 때, 탄성파의 전파이론에 의한 특성선(characteristic line)에서는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$C_0\epsilon(t) \pm V(t) = const \quad (2)$$

여기서,  $C_0$ 는 봉내의 탄성파의 전파속도이며,  $\epsilon$ ,  $V$ 는 각각 봉의 변형률 및 속도를 나타낸다. 위의 관계식을 이용하면 다음과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$V_1(t) = C_0\{\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t)\} \quad (3)$$

$$V_2(t) = C_0\epsilon_T(t) \quad (4)$$

식 (1) 및 식 (3), 식 (4)를 이용하면  $\dot{\epsilon}(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{L}\{\epsilon_I(t) - \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)\} \quad (5)$$

또한 시편의 양끝에 걸리는 힘은 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1(t) = EA_0\{\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t)\} \quad (6)$$

$$P_2(t) = EA_0\{\epsilon_T(t)\} \quad (7)$$

여기서,  $E$ 는 봉의 탄성계수이며  $A_0$ 는 입력봉 및 출력봉의 단면적이다. 시편내부의 평균응력은 식 (6)과 식 (7)에 의하여 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A} \quad (8)$$

여기서,  $A$ 는 시편의 단면적이다. 시편 양단에 걸리는 힘이 같다고 가정하면 식 (6) 및 식 (7)에 의하여 아래와 같이 입사파, 반사파 및 투과파 사이의 관계식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_I + \epsilon_R = \epsilon_T \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 시편의 응력 및 변형률을 구하면 아래와 같다.

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (11)$$

식 (11)을 적분하게 되면 시편에서의 변형률인 식 (12)를 얻을 수 있게 된다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (12)$$

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

다음으로 일차원 탄성파 전달이론을 이용하면 충격봉, 입력봉, 앤빌(anvil)에서 응력들을 계산할 수 있게 된다. 충격단에서의 평형조건은 다음의 식 (13)이 만족되어야 한다.

$$A_a\sigma_a + A_b\sigma_b = A_s\sigma_s \quad (13)$$

여기서, 첨자  $s$ ,  $b$  및  $a$ 는 각각 충격봉, 입력봉, 앤빌을 나타낸다. 충격단에서의 충격봉과 앤빌의 연속적인 접촉조건을 만족시키기 위하여 식 (14)가 성립된다.

$$V_s - \frac{\sigma_s}{\rho_s C_s} = \frac{\sigma_a}{\rho_a C_a} = -\frac{\sigma_b}{\rho_b C_b} \quad (14)$$

여기서,  $\rho$ 는 재료의 밀도를 나타내며,  $C$ 는 탄성파의 전파속도이다. 봉과 앤빌 및 충격봉의 재질이 같다면 다음의 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_a = \rho_b = \rho_s = \rho \\ C_a = C_b = C_s = C \quad (15)$$

식 (13), 식 (14) 및 식 (15)으로부터 충격봉, 입력봉, 앤빌에서의 응력들을 각각 다음의 식 (16), 식 (17) 및 식 (18)과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{A_s + A_b}{A_s + A_a + A_b} \rho C V_s \quad (16)$$

$$\sigma_a = \frac{-A_s}{A_s + A_a + A_b} \rho C V_s \quad (17)$$

$$\sigma_b = \frac{A_s}{A_s + A_a + A_b} \rho C V_s \quad (18)$$

특히 본 논문에서 제작된 홉킨슨바의 경우  $A_s = A_b = \frac{1}{2}A_a$ 이므로 식 (16), 식 (17) 및 식 (18)은 각각 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\sigma_s = \frac{3}{4} \rho C V_s \quad (19)$$

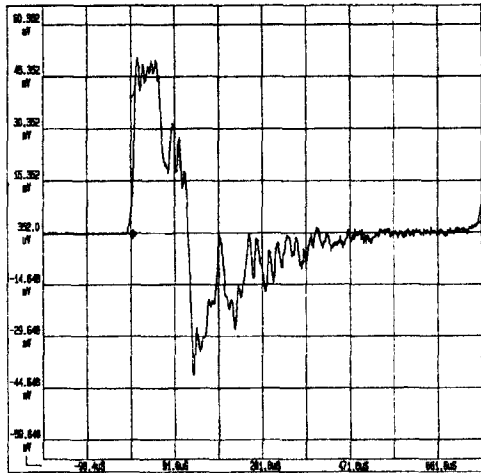


Fig. 2 The shape of input wave acquired from an oscilloscope when the area between striker bar and anvil is different

$$\sigma_a = -\frac{1}{4} \rho C V_s \quad (20)$$

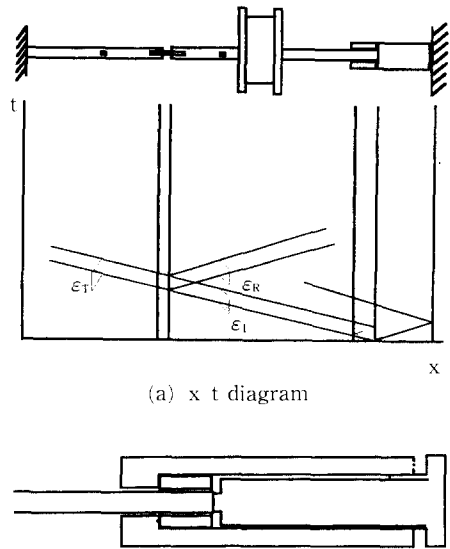
$$\sigma_b = \frac{1}{4} \rho C V_s \quad (21)$$

### 3. TSHB의 제작 및 실험

#### 3.1 시험장치의 제작

인장시험용 Hopkinson Bar는 압축 또는 전단 시험용 Hopkinson Bar에 비하여 적절한 인장시험의 결정에 대한 어려움 또는 시편과 입력봉 및 출력봉의 연결에 관한 문제점 등으로 인하여 발전이 느리게 진행되었지만, 여러 가지 형태의 장치가 제작되었으며 알루미늄, OFHC 등의 재료에 대한 시험도 수행되었다. 본 연구에서는 자동차 구조용 금속박판의 고속 인장시험을 수행하기 위하여 박판 형태의 인장 시험편을 장착할 수 있도록 그림을 설계하였다.

Hopkinson Bar의 제작에 있어서 Bar는 응력파의 전달과정중 탄성한계내에 있어야 하기 때문에 4340강이나 마라징(Maraging)강이 사용되며, 일차원 응력과 전단이론을 만족시키기 위하여 봉의 길이는 직경의 20배 이상이 되어야 한다.<sup>(2)</sup> 또한 스트레인게이지로 입사파, 반사파, 투과파를 측정할 때 응력파들 사이에 간섭이 없도록 하기 위하여 더욱 긴 봉이 필요하게 되며 봉과 시험편의 접촉 및 정렬이 대단히 중요하게 된다. 충격봉의 설계에서



(a) x t diagram  
(b) Schematic diagram of an anvil  
Fig. 3 The x-t diagram of TSHB when a long anvil is used

는 충격봉의 단면적이 입력봉의 단면적보다 크게될 경우 Fig. 2와 같은 계단모양의 입력파가 발생하게 되므로 입력봉의 단면적과 충격봉의 단면적이 같도록 설계하여야 한다. 충격봉의 단면적과 입력봉의 단면적이 같을 경우 발생한 입력파는 Fig. 8과 같이 나타난다.

충격봉의 길이는 식 (22)에 의하여 입력파의 지속시간에 영향을 주게 되므로 적절한 길이의 충격봉을 선정하는 것도 중요하다.

$$\Delta t = 2 \frac{L}{C_0} \quad (22)$$

제작된 장치는 압축공기를 이용하여 충격봉을 발사하도록 하였으며, 장치의 제작에 있어서 특히 많은 주의를 요하는 부분은 Fig. 1에 표시된 엔빌 부분과 그림부분이다. 우선 엔빌의 설계에 있어서는 Fig. 3(a)의 x-t 선도에서 보는 바와 같이 엔빌 끝단에서 반사되어 돌아오는 응력파가 입력봉으로 먼저 전달되는 응력파와 간섭을 일으키지 않도록 충분히 길게 설계하였다. 그러나 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 실제 엔빌은 여러 가지 부재의 조립으로 이루어져 있기 때문에 엔빌내에는 많은 접촉부가 존재하게 되고, 노이즈가 발생하므로 짧은 상승시간을 갖는 사각파를 얻기가 어려웠다. 이러한 노이즈

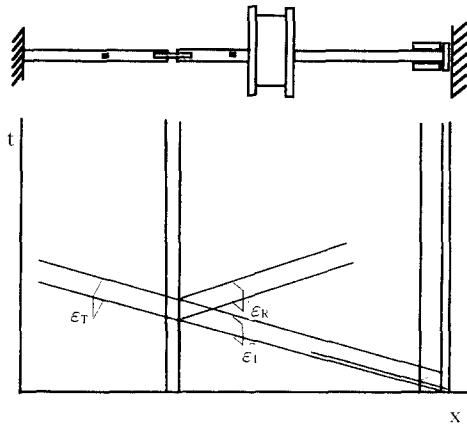
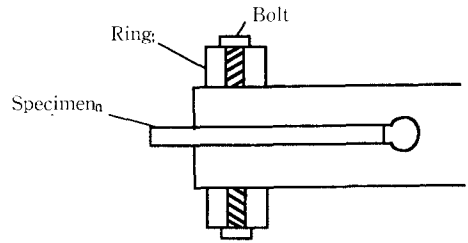


Fig. 4 The x-t diagram of TSHB when a short anvil is used

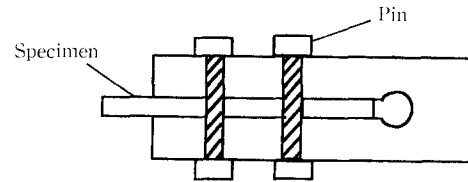
즈를 없애기 위하여 엔빌을 일체형으로 가공하게 되면 제작 및 실험상의 어려움이 발생하게 되므로 Fig. 5와 같이 설계를 단순화하여 봉의 끝단에 나사를 내어 짧은 엔빌을 부착시키는 방법을 이용하였다. 짧은 엔빌을 사용할 경우 Fig. 4의 x-t 선도에서 보는 바와 같이 엔빌의 양끝단에서 발생한 응력파가 간섭을 일으키게 되나 엔빌의 길이가 충분히 짧으므로 그 효과는 수  $\mu$ s 정도에서만 발생하게 되고, 따라서 충분히 긴 충격봉을 사용할 경우 그 효과는 무시할 수 있다고 생각된다. 이전의 설계에서 발생했던 여러 가지 노이즈를 없앨 수 있기 때문에 실제 장치의 제작시 채택하여 사용하였다.

다음으로 그림의 설계에 있어서 시편을 Fig. 4(a)와 같은 형태의 그림으로 고정시켰으나 다음 절에 보여지게 될 유한요소해석 결과에 의하면 그림의 질량이 크게될 경우 반사파와 투과파의 모양이 크게 왜곡되기 때문에 가능한 한 질량은 줄였다. 따라서 Fig. 5(b)와 같은 형태로 시편을 입, 출력봉에 고정시키는 방법을 이용하였다. 즉, 큰 충격력에서도 시편의 미끄러짐을 방지하기 위하여 시편과 봉에 구멍을 뚫어서, 봉과 같은 마라징(Maraging) 강으로 제작된 핀(pin)과 너트(nut)를 이용하여 고정하였다. 이 때 봉의 표면으로 나오게 되는 핀의 머리는 가능한 작게 하여 반사파 및 투과파가 영향을 적게 받도록 하였다.

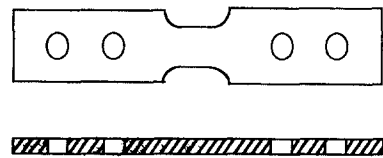
이와 같은 TSHB를 이용하여 입출력 봉에 부착된 스트레인 게이지의 신호를 오실로스코프를 이용하여 측정하였고, 충격봉의 속도는 광섬유(optical fiber) 센서를 이용하여 측정하였다. 측정된 스트레



(a) Lagrge ring type



(b) Pin type



(c) Specimen for a tension test

Fig. 5 The schematic diagram of grips and a specimen

인게이지 신호중 반사파는 식 (12)에 의하여 시편의 변형률로 변환되어지며, 투과파는 식 (10)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 SPEN의 재료로 만들어진 시편을 사용하였다. 강판의 명칭은 JIS의 규격을 따라 명명하였다. S는 Steel을, P는 Plate를, 세번째의 C는 Cold rolled를, 네번째의 E는 강판의 등급을 나타내며 N은 시효보증을 뜻한다.

사용한 시편의 준 정적 특성을 알아보기 위하여 인장시험을 수행하였다. 0.001/sec의 변형률속도를 얻기 위하여 Instron을 이용하였으며, 변형률 속도 1/sec을 얻기 위한 시험에는 피로시험장치인 Dynamic UTM을 이용하였다. Fig. 6은 SPEN의 준 정적인 경우에 대한 응력·변형률선도이다.

변형률속도가 1/sec로 증가하였을 때 재료의 유

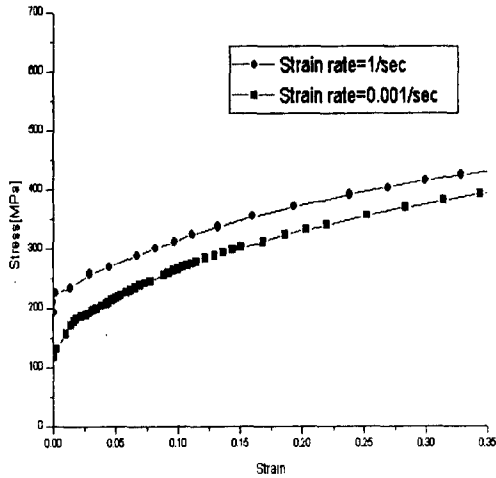


Fig. 6 The Stress strain curves of SPcEN from a quasi static tension test

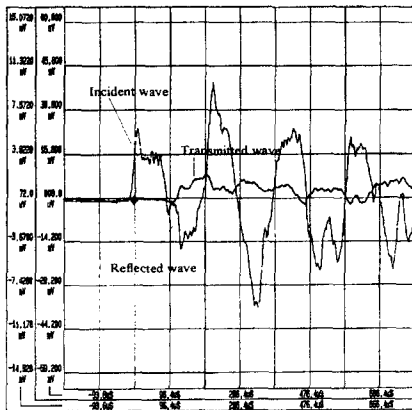


Fig. 7 The shape of waves acquired from an oscilloscope when a large anvil is used

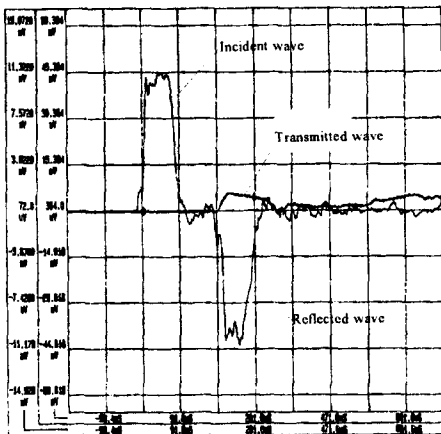


Fig. 8 The shape of waves acquired from an oscilloscope when a short anvil is used

동응력 (flow stress)이 증가하는 것을 볼 수 있다. 준정적인 시험에서 얻어진 물성치는 ABAQUS/Explicit을 이용한 TSHB의 탄소성 유한요소해석에서 시험의 물성치로 이용되었다.

제작된 TSHB를 이용하여 실제 시험을 수행한 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. Fig. 7은 설계변경 전에 얻어진 파형이며, Fig. 8은 엔빌 및 그림부분에 대한 설계변경을 시행한 후에 얻어진 파형을 나타낸다. 설계변경 후에 입사파의 모양은 보다 사각파에 가까워졌으며, 시험의 응력변화를 나타내는 투과파의 모양을 비교해 보면 설계변경 후에 그림에서 미끄러짐이 발생하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 8에서 얻어진 반사파 및 투과파를 이용하여 시험의 응력-변형률선도를 그려보면 Fig. 9와 같게 된다. 시험에서는 충격봉의 충격속도가 23 m/sec이었으며 평균 변형률속도는 약 3500/sec이다. Fig. 10은 준정적인 경우 및 고속 인장시험 결과를 같이 나타낸 그림이다. 준정적인 경우와 비교하였을 때 유동응력이 약 2배 증가한 것을 볼 수 있으며, 또한 변형률 경화는 고속인 경우 더 작은 것을 볼 수 있다.

#### 4. 유한요소해석

TSHB(Tension Split Hopkinson Bar)는 일차원 탄성과 전달이론을 만족시키고 또한 응력파의 중첩

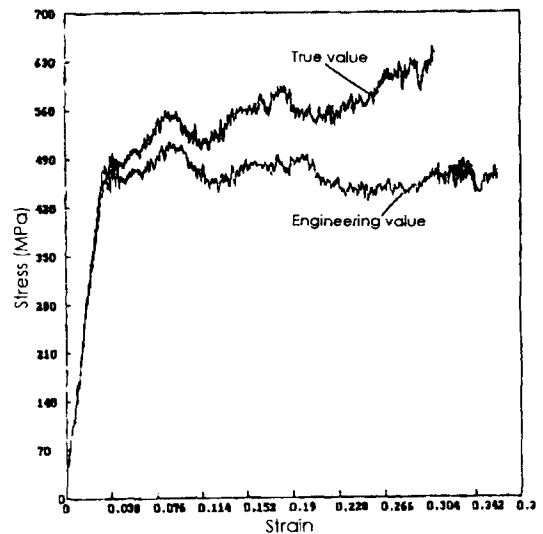


Fig. 9 The stress-strain curves of SPcEN at high strain rate.(average strain rate=4000/sec)

을 막기 위하여 반경 대 길이의 비가 상당히 크게 설계되어 있다. 따라서 엑스플리시트 코드를 이용하여 유한요소 해석을 수행할 경우 사용되는 요소의 모양 및 크기에 따라 해의 정확도가 영향을 받기 때문에 요소의 경사율(aspect ratio)이 제한을 받게 된다. 따라서 Fig.1과 같이 가늘고 긴 봉형태의 시험장치를 전체적으로 해석하기 위해서는 많은 수의 요소가 필요하게 되므로 시스템의 용량 및 계산 시간이 상당히 길어지게 되며 또한 비효율적이다. 따라서 시험장치를 충격봉이 엔빌에 충돌하는 부분과 시편부분으로 나누어서, 각각의 부분에 대한 독립적인 해석을 수행하고자 한다. 이를 위해서는 먼저 시편에 전달되는 인장 응력의 크기를 계산한 후 시편부분의 해석을 위한 입력 데이터로 이용해야 한다.

유한요소해석을 위하여 Fig.1과 같은 시험장치를 각각 Fig.11 및 Fig.12와 같이 두 부분으로 유한요소 모델화하였다.

응력파가 실험장치의 양끝단에서 반사되어 돌아오는 것을 고려하지 않기 위하여 Fig.11과 Fig.12에 나타난 바와 같이 무한요소(infinite element)를 이용하여 파의 반사를 막았다. 즉, 무한요소가 사용된 부분은 실제로 봉이 무한히 길것과 같은 효과를 나타내게 되므로 응력파의 반사를 없앨 수 있게 된다. 충격봉과 엔빌이 접촉하는 부분은 축대칭 문제로 근사화하여 해석할 수 있으며, 시편이 봉에 붙어 있는 부분에서는 시편의 형상이 박판형상이기

때문에 3차원으로 해석을 수행하여야 한다. 또한 시편과 봉이 붙어있는 부분에서는 시편의 비끄러짐이 없다고 가정을 하여 해석을 하였다. 충격봉이 엔빌에 충돌하는 속도는 25 m/sec으로 하였고, 200 mm의 길이를 가지는 충격봉에 대한 해석을 수행하였으며, 응력파의 지속시간은 식 (22)에 의하여 계산하면 약 80  $\mu$ s이다.

먼저 시편으로 입력되는 인장응력의 크기를 계산하기 위하여 충격봉과 엔빌부분을 축대칭으로 모델화하여 해석하였다. Fig.13은 이와 같은 조건에서

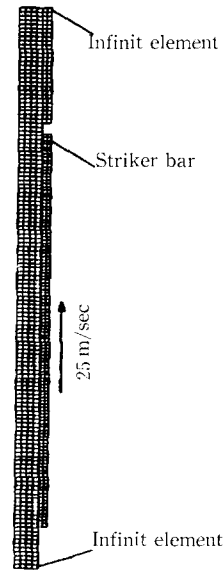


Fig. 11 Finite element mesh of a striker bar and an anvil for axisymmetric analysis

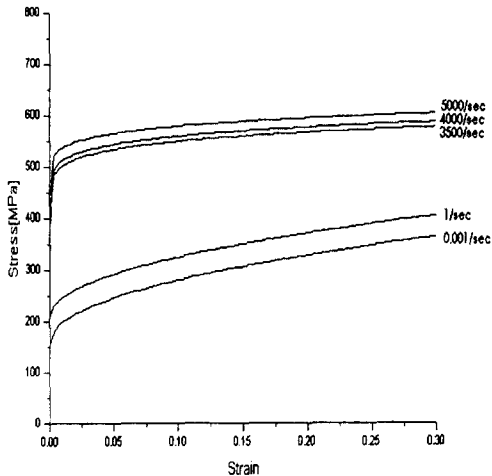


Fig. 10 The stress-strain curves of SPCCN at various strain rates

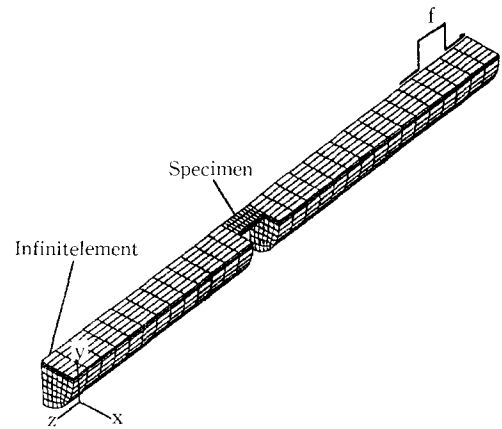


Fig. 12 Finite element mesh of a specimen and bars for 3D analysis

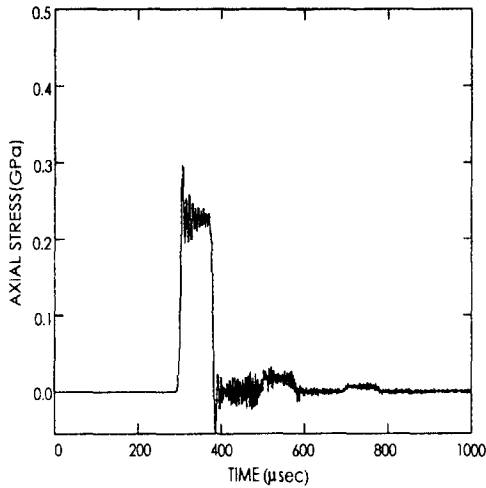


Fig. 13 The input stress wave when the anvil is infinitely long

Fig. 11의 중앙부분에 전달되는 인장응력을 시간에 대하여 그려본 것이다. 응력파의 모양이 사각파에 가까운 것을 볼 수 있으며, 계산되어진 응력파의 크기는 약 0.25 GPa이며, 이것은 식 (21)에 의해서도 알 수 있다. 응력파의 지속 시간은 약 80  $\mu$ s 가 되는 것으로 나타났다. 본 해석에서는 80  $\mu$ s 이후에 응력파가 0이 되지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 실제 충격봉과 엔빌의 충격은 일치율이 아니기 때문에 전단응력파의 영향에 의한 것으로 생각된다. 즉, 충격전단에서 발생한 전단파가 종방향 응력파보다 느리게 진행하여 나타난 결과이다. 이것은 실제 실험에 의해서도 관찰되어지는 결과이다. 이상의 해석은 엔빌 끝단에서 응력파의 반사가 일어나지 않도록 무한요소를 이용하여 해석을 한 경우이다. 그러나 실제 제작되어진 장치에서는 파의 반사가 일어나게 되므로 Fig. 11에서 엔빌부분에 사용할 무한요소를 없애게 되면 Fig. 14의 결과처럼 파의 중첩이 이루어져서 약 2배정도 입력파의 크기가 커진 것을 관찰할 수 있었다. 즉 충격봉을 똑같은 속도로 발사하여도 응력파의 중첩이 이루어지게 되면 2배가 큰 입력파를 얻게 된다.

앞의 해석에서 계산된 응력파를 Fig. 13에서와 같이 근사화하여 시편에 전달되는 입력펄스로 이용하였다. 즉 Fig. 13에서 얻어진 입력파의 모양을 진폭과 파장이 같은 사각파로 근사화 하고, 시편으로 전달되는 응력파의 감쇄(attenuation)는 무시하였다. 이와 같이하여 근사화된 입력펄스가 유한요소모델에 작용하였을 경우에 시편 및 그 주변의 입

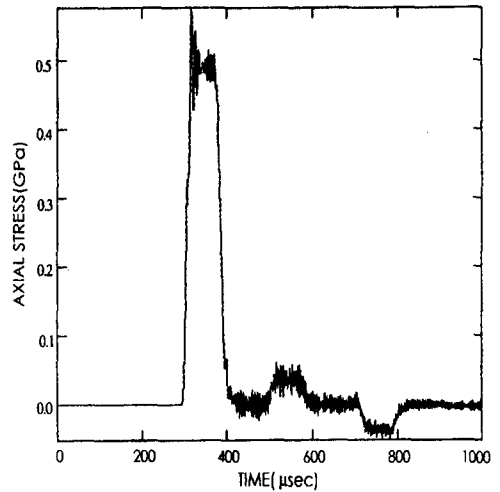


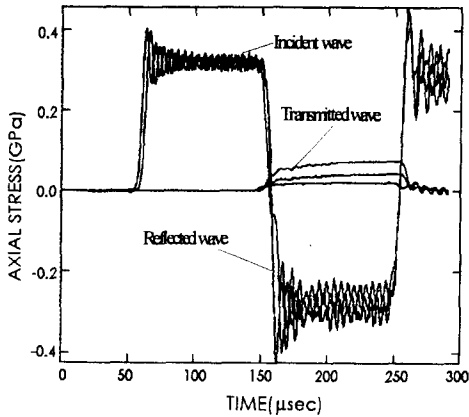
Fig. 14 The input stress wave when the anvil is short

Table 1 The dimension of effective region in specimens used for numerical calculation (thickness : 1.5 mm)

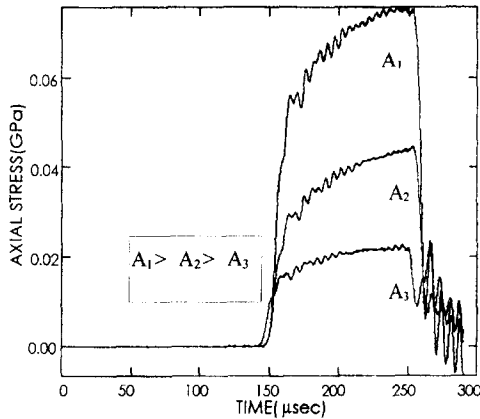
Width (mm)	Length (mm)
10	7
7.5	7
4.0	7

력봉 및 출력봉에 생기는 응력파를 계산하였다. 고 변형률 속도에 대한 시험을 수행하고자 할 경우, 시편의 응력상태가 균일(homogenous)하면 입력봉 및 출력봉에 장착된 스트레인게이지로 측정된 변형률에 의해서 시편의 응력 변형률관계가 구해지기 때문에, 균일한 응력상태를 얻을 수 있는 시편의 형상이 중요하게 된다. 즉 짧은 시간에 시편 내부에 균일한 응력상태가 되기 위하여 가능한 한 시편의 길이는 짧아야 하고, 시편과 입, 출력봉과의 임피던스 차이를 줄이기 위해서는 시편의 단면적은 가능한 한 넓어야 하겠지만, 실제 시편을 고정하고 있는 그림의 영향을 생각하면 보다 긴 시편을 사용하는 것이 좋기 때문에 최적의 시편의 길이 및 넓이에 대한 검토가 필요하게 된다. 그러나 유한요소 해석만으로 끝단효과(end effect)를 충분히 고려할 수 없기 때문에 시편의 형상을 완전히 결정하는 것은 무리가 따른다. 따라서 우선 시편의 폭의 변화에 따르는 반사파 및 투과파의 변화를 정량적으로 알아보고, 핀 구멍의 효과 및 그림질량의 영향 등





(a) The shape and amplitude of longitudinal stress waves



(b) Magnification of transmitted waves.

Fig. 15 The effect of the specimen width

을 해석을 통하여 알아보았다.

시험은 두께 1.5 mm의 SPCEN을 이용하였다. 해석에서는 준정적시험에서 구하여진 물성치를 이용하였고, 변형률속도에 따른 영향은 고려하지 않고 탄소성으로 해석을 수행하였다. 또한 시험과 봉 사이의 미끄러짐효과도 무시하였다. 입력봉에서 시험편으로의 임피던스차에 의해 반사되어 돌아오는 응력파가 입사파와 간섭을 일으키지 않게 하기 위하여 입력봉 및 출력봉의 길이를 500 mm로 하였다.

시험편의 폭의 변화에 따라 파의 반사 및 투과의 정도를 관찰하기 하기 위하여 Table 1과 같이 여러 가지 폭을 갖는 시험편에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 15(a)는 각 경우에 대한 해석결과를 나타내는 그림이다. 시험편의 폭이 넓어질수록 임피던스가

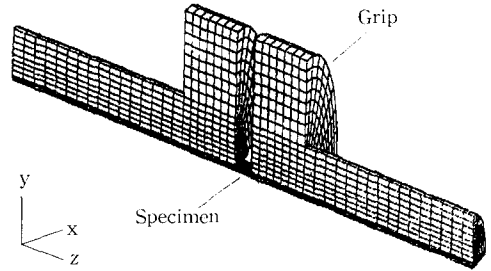


Fig. 16 Finite element mesh of bars and a specimen with grips

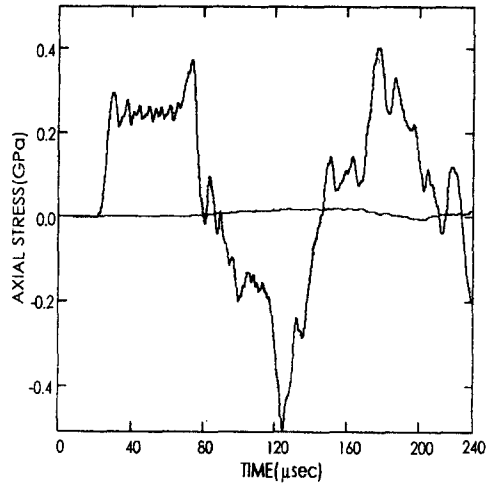


Fig. 17 The wave distortion when large grips are used

작아지기 때문에 투과파의 크기는 커지게 되며 반사파의 크기는 작아지게 된다. 식 (9)에 의하여 투과파와 반사파의 합은 입사파와 같게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 15(b)는 투과파만을 확대해서 나타낸 그림이다.

시험편을 붙고 있는 그림의 영향을 해석하기 위하여 Fig. 16과 같이 입, 출력봉 및 시험편과 그림을 유한요소 모델화하여 해석하였다. 시험편이 봉에 물려 있는 부분에 질량이 추가된 경우 Fig. 17과 같이 반사파의 모양과 투과파의 모양이 크게 왜곡되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 시험편의 양 끝단과 시험편의 임피던스 차이가 너무 크기 때문에 응력파의 반사와 중첩이 복합적으로 생겨서 일어난 것이다. 따라서 실제 시험장치를 제작할 경우 시험편을 붙기위한 그림의 질량은 가능한 한 줄이는 것이 바람직하다.

그림에서 핀의 영향을 해석하기 위하여 입, 출력

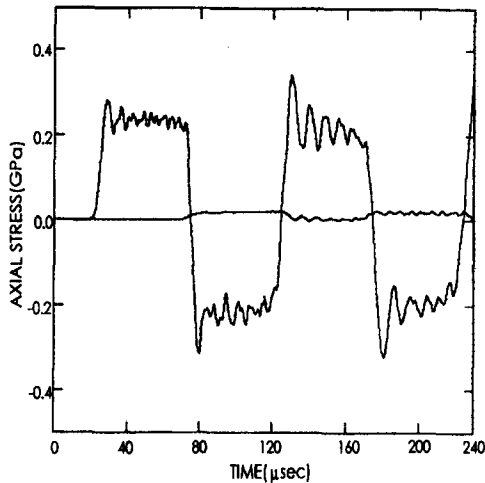


Fig. 18 The wave distortion when the pin hole effect is considered

봉에서 핀이 위치한 곳의 요소의 밀도와 탄성계수를 변화시켜 봉의 다른 부분에 비하여 임피던스가 차이가 나도록 하여 해석을 수행하였다. 핀 구멍이 있을 경우 Fig. 18에서 보는 바와 같이 반사파와 투과파의 크기나 모양은 Fig. 17과 같이 핀 구멍이 없는 경우에 비하여 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 따라서 시편을 물기 위하여 Fig. 5(b)와 같이 제작된 그림을 사용하여도 봉내의 핀구멍으로 인한 영향은 크지 않은 것으로 생각된다.

이상과 같이 TSHB의 유한요소해석을 통하여 장치의 설계시 고려되어야 할 여러 가지 변수들의 영향을 알아보았으며, 그 결과 그림의 질량은 가능한 한 작게 설계되어야 하며 충분한 충격력에서도 시편의 미끄러짐이 없도록 하여 Fig. 9와 같은 파형이 얻어지도록 해야 한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 고속 인장시험을 위한 TSHB를 설계 및 제작하였으며, 특히 박판형태의 시편을 이용하여 시험하기에 적합하도록 그림을 채택하였다. 시험장치의 제작과정중 충격단 부분과 시편을 봉에 고정시키는 방법에 관하여는 ABAQUS/Explicit 유한요소해석을 이용하여 여러 가지 설계변수들의 영향을 알아보았다. 해석결과 그림의 질량은 가능한 한 줄이는 것이 바람직했으며, 핀구멍의 영향으로 반사파 및 투과파가 영향을 받기는 하지만 그

영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 엔빌길이 등의 여러 가지 설계변수들에 대한 영향을 알아보았다. 사용된 시편의 형상은 최적의 형상이라고 할 수 없으므로 앞으로 실험과 해석을 통하여 최적의 시편 형상을 결정할 필요가 있다. 본 논문에서는 적절한 시편을 선택하여 장치의 설계, 제작 및 검증단계로서, 자동차 차체용 강판으로 많이 쓰이고 있는 SPEN의 고속 인장시험을 수행하여 기계적 물성치를 구하였으며, 준정적인 시험에서 얻은 결과와 비교하여 보았다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구비(과제번호 95-0200 11-02-3)에 의하여 연구한 결과 중 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kolsky, H., 1949, *Stress Wave in Solids*, Dover, New York, pp. 41~65.
- (2) Follansbee, P. S., "The Hopkinson Bar," in *Metal Handbook 9th Edition, Mechanical Testing*, American Society for Metals, Vol. 8, pp. 198~203.
- (3) Lindholm, U. S. and Yeakley, L. M., 1968, "High Strain-rate Testing: Tension and Compression," *Exp. Mech.*, Vol. 8, pp. 1~9.
- (4) Dharan, C. K. H. and Hauser, F. E., 1970, "Determination of Stress-strain Characteristics at Very High Strain Rates," *Exp. Mech.*, Vol. 10, pp. 370~376.
- (5) Ogawa, K., 1984, "Impact-tension Compression Test by Using a Split-Hopkinson Bar," *Exp. Mech.*, Vol. 24, pp. 81~85.
- (6) Staab, G. H. and Gilet, A., 1988, "A Direct-tension Split Hopkinson Bar for High Strain-rate Testing," *Exp. Mech.* Vol. 31, pp. 232~235.
- (7) Follansbee, P. S. and Frantz, C., 1983, "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 105, pp. 61~66.
- (8) Ellwood, S., Griffiths, L. J. and Parry, D. J., 1982, "Materials Testing at High Constant Strain," *J. Phys. E:Sci. Instrum.*, Vol. 15, pp.

- 280~282.
- (9) Nicholas, T., 1981, "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain," *Exp. Mech.* pp. 177~185.
- (10) Chung, D. T., 1994, "Split Hopkinson Pressure Bar Technique for Stress-strain Measurement," *Proc. KSME, Spring Conference*, pp. 33~41.
- (11) Albetini, C. and Montagani, M., 1974, "Testing Techniques Based on the Split Hopkinson Bar," in *Mechanical Properties at High Rates of Strain*, The Institute of Physics, London.
- (12) Sheu, S. L., 1992, "Determining the Dynamic Properties of Composite Materials at Higher Strain Rates Using the Split Hopkinson Pressure Bar," M. S. Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan.
- (13) Holt, D. L., Babcock, S. G., Green, S. J. and Maiden, C. J., 1967, "The Strain-rate Dependence of the Flow Stress in Some Aluminum Alloys," *Trans. ASM.*, Vol. 60, pp. 152~159.
- (14) Steidel, R. F. and Mackerov, C. E., 1960, "The Tensile Properties of Some Engineering Materials at Moderate Rates of Strain," *ASTM Bulletin*, Vol. 247, pp. 57~64.