

인장형 홉킨슨 바의 오차 분석 및 자동차용 냉연강판의 고속인장 특성 연구

강 우종, 허 훈(한국과학기술원), 한 수식(포항종합제철 기술연구소)

Error Eestimation of Tension Split Hokinson Bar and High Strain Rate Tensile Tests of Sheet Metals for an Auto-body

Woo-Jong Kang, Hoon Huh(KAIST) and Soo-Sik Han(Posco Technical Research Lab.)

Abstract

The dynamic behavior of vehicle body materials is dependent on material strain rates. In high speed tensile test of sheet metals, a new tension split Hopkinson bar specially designed for sheet metals is used. The tension split Hopkinson bar has some sources of errors such as grips and the plate type specimen. In this paper, these errors estimated and minimized. The results from both quasi-static and dynamic tests show that the strain rate hardening effect for sheet metals can not be described by the original Johnson-Cook constitutive relation. This relation has been modified to include a higher-order term for the hardening effect.

Key Words : Hopkinson bar, High strain rate(고 변형률 속도), Tension test(인장시험)

1. 서 론

일반적으로 금속재료의 동적 거동은 정적 또는 준 정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다. 이러한 동적 하중 상태에서의 재료 거동은 최근 산업기술의 발전에 따른 운송수단의 고속화와 더불어 많은 관심사가 되고 있다. 특히 자동차, 항공기 등은 승객 및 화물의 안전성이 매우 중요한 문제이므로 충돌시의 에너지 흡수성 또는 변형정도가 정확히 파악되어야 한다. 재료의 거동 양상은 변형률 속도에 따라서 달라지므로 원하는 변형률 속도에 맞는 적합한 시험 방법을 결정해야 하며, 이에 따라 관성효과, 온도효과, 탄소성파, 충격파 등의 영향을 적절히 고

려하여야 한다. 동적 실험방법 중 탄성파 및 소성파의 전파 양상을 분석하여 재료의 동적 거동을 분석하는 방법이 1940년대 말 Kolsky^[1]에 의하여 제안된 이후로 이 분야의 활발한 연구가 진행되어 왔다. 이장치는 홉킨슨 바^[2]로 잘 알려져 있으며, 보통 변형률 속도 1,000-10,000/sec의 범위에서 재료의 충격특성을 분석하기 위하여 이용되어 왔으며, 재료의 응력-변형률 선도를 직접 얻을 수 있으므로 구성방정식을 구하는데 적합하여 많은 연구자들에게 이용되어왔다. 이 방법은 처음에는 주로 압축 시험에 사용되었으며 Harding^[3]에 의하여 인장 시험방법이 개발된 후 비틀림 시험에도 응용되었다.

홉킨슨 바 인장 시험은 압축 시험법의 뒤를 이어 개발되었으나, 압축 시험에 비하여 많

은 연구가 진행된 편은 아니다. Lindholm과 Yeakley^[4], Nicholas^[5]에 의하여 인장형 흡킨슨 바 시험에서의 오차 요인이 분석되었으며 이러한 오차를 보정하기 위한 방법이 제시되기도 하였다. Ogawa는 인장-압축형 흡킨슨 바를 제작하여, Baushinger 효과를 연구하였다^[6]. Staab와 Gilat^[7]은 알루미늄 6061-T651 재료에 대한 고 변형률 속도 인장 시험에 있어서, 봉형 시편의 기하학적 형상에 관한 연구를 수행하였다. 동적 인장 시험을 수행할 경우 변형 초기에 시편 내부의 응력 및 변형률 상태가 균일하지 않으며, 이것은 시편의 관성 효과에 의한 것으로 알려져 있다. 이러한 불 균일한 응력 상태는 응력파가 시편을 수 차례 왕복 할 경우 균일하게 되지만, 그 전에 재료 내부의 불 균일성으로 인하여 네킹이 빨리 진행할 수도 있다. Kang등^[8]은 인장형 흡킨슨 바를 이용하여 박판금속의 시험을 수행하였으며, 유한요소 해석을 통하여 그림, 엔빌 및 시편형상의 영향을 검증하였다. Zhao 와 Gary^[9]에 의하여 압축형 흡킨슨 바를 이용한 박판 금속의 고속 시험이 수행되었으며, 이때에는 박판 금속을 접착하여 압축시편을 만들었기 때문에 순수한 박판 시편의 압축 거동이라고 보기 힘들다.

본 논문에서는 차체 구조물의 정확한 충돌 해석을 위한 물성치의 획득을 위하여 박판시편을 고속 인장시험하기에 적합하도록 인장형 흡킨슨 바 시험기를 제작하고 자동차용 냉영강판의 고속 인장 시험을 수행하였다. 박판 시편에서의 응력파의 전파 상태는 일차원으로부터 벗어나게 되므로 어느 정도의 오차를 포함하게 된다. 따라서 시편의 형상으로 인한 오차의 정도가 허용 가능한지의 여부를 알아보았으며 이러한 오차를 최소화하기 위한 박판 형태의 시편 형상을 구하였다. 그림의 사용 또한 일 차원 응력파의 진행을 방해하는 요인이기 때문에 그림의 사용으로 인한 오차를 계산하였다.

2. 인장형 흡킨슨 바의 오차분석 및 시편형상 결정

Fig. 1은 본 연구에서 제작된 인장형 흡킨슨바를 나타낸다. 볼트형 그림을 채택하였으며, 엔빌의 설계는 단순화하여 봉의 끝단에 부착하였다. Kolsky의 탄성과 이론에 의하면 입력봉에서 측정된 초기 탄성 입력파와 반사파 그리고 출력봉에서 측정된 투과파의 크기에 의하여 다음 식들과 같이 시편의 응력 및 변형률을 얻을 수 있다.

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

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

인장형 흡킨슨 바는 몇 가지 요인에 의하여 실험상의 오차가 수반되게 된다^[10]. 첫 번째 요인은 그림의 사용으로 인한 응력파의 산란이며, 둘째로는 Fig. 2와 같은 박판 형태의 인장 시편의 사용으로 인한 일 차원 이론의 위배이다. 이와 같이 인장형 흡킨슨 바를 이용한 실험시에 존재하는 여러 가지 오차의 정량적인 크기를 알아보려고 한다.

먼저 그림의 사용으로 발생하는 오차를 알아보기 위하여, 시편을 장착하지 않고 그림만을 장착한 상태에서 실험을 수행하여 입력파와 반사파를 측정하였다. Fig. 3의 실선은 초기 입력파를 나타내며, 점선은 측정된 입력파가 시편의 끝단에 도달하였을 때까지 발생한 감쇄효과를 고려한 계산된 파형을 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 두 파형의 차이는 크게 발생하지 않았다. Fig. 4의

실선은 그림이 장착된 상태에서 측정된 반사파이며, Fig. 4의 점선은 그림이 없이 반사되었을 때의 계산된 응력파를 나타낸다. 식 (4)의하여 에너지를 계산할 경우, 그림의 사용으로 인하여 약 9%의 에너지 손실이 그림에서 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. 그림에서 발생하는 에너지의 손실은 결국 시편의 변형에너지의 손실을 야기 시키므로 식 (3)에 의하여 계산된 시편의 변형률에는 약 9% 정도의 오차가 발생할 것으로 생각된다. 그러나 두 파형의 최대 크기를 비교하였을 경우 계산된 실험상의 오차는 0.36%로 거의 무시할 만 하였으므로 최대 변형률 속도 및 최대 응력의 크기는 큰 오차 없이 계산될 것으로 생각된다. 이와 같이 볼트 형태의 그림을 사용할 경우 변형률 속도에 따른 유동 응력의 증가를 관찰하는 데에는 큰 오차가 없는 것으로 나타났다.

$$U = EAC_o \int_0^T \epsilon dt \quad (4)$$

다음으로 3차원 형상을 갖는 인장시편의 사용으로 인하여 발생할 수 있는 오차에 대하여 알아보고 오차를 최소화하는 인장시편의 형상을 결정하고자 한다. 고속 인장 시험시에 시편은 관성 효과를 갖게 되며 응력파가 시편의 횡 방향으로 진행함에 따라 응력파의 감쇄 효과가 발생하게 된다. 따라서 식 (5)와 같이 입력파와 반사파의 합은 근사적으로 일치하게 된다.

$$\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) \approx \epsilon_T(t) \quad (5)$$

따라서 식 (7)과 같이 실험상의 오차를 정의하였으며 실험을 통하여 측정된 응력파의 오차를 계산하였다.

$$error(\%) = \frac{\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)}{\epsilon_I(t)} \times 100 \quad (6)$$

실험 결과 각각의 시편의 길이 및 폭에 대한 실험상의 오차는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 나타났다. 시편의 길이가 길수록 관성효과가 증가하기 때문에, 계산된 오차는 크게 나타났다. 시편의 폭이 6mm인 경우에 가장 적은 오차가 계산되었다. 시편의 폭이 증가할수록 시편의 형상이 일 차원 형상으로부터 많이 벗어나게 되므로 오차가 증가하는 경향을 보였으며, 폭이 2mm, 4mm인 경우 시편의 형상은 일 차원 형상에 가까워져서 오차가 더 작을 것으로 기대되었지만 시편의 폭이 너무 작을 경우 시편의 임피던스가 크게 작아지기 때문에 사용된 입력봉과의 임피던스 차이가 크게 되므로 많은 오차가 수반되었다. 그러나 시편이 어느 이상의 강도를 확보 할 경우에는 이러한 편차는 크게 줄어들게 되므로 6mm이하의 폭을 갖는 시편도 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 자동차용 냉연강판의 고속 인장시험 및 구성방정식 결정

시험은 자동차용 냉연강판을 이용하였으며, 준 정적인 인장시험을 수행하기 위하여 Instron과 변형률 속도 1/sec을 얻기 위해 피로 시험장치인 Dynamic UTM을 이용하였다. Fig. 7은 시험된 시료 중에서 B26979의 준 정적 및 고속 인장시험 결과를 나타낸다. 고 변형률 속도 구간에서는 준 정적인 경우에 비하여 유동 응력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며 변형률 경화가 준 정적인 경우에 비하여 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 고속변형으로 인하여 발생된 열에 의한 연화현상 때문이다. Fig. 8은 B26979의 변형률 속도에 대한 초기 항복 응력의 변화를 나타낸다. 기존의 Johnson-Cook 구성방정식은 식(7)과 같이 변형률 속도 경화효과를 일차

식으로 근사하지만, 자동차용 냉연강판의 경우에는 항상 잘 일치하지는 않으므로 식 (8)에서와 같이 수정된 형태의 구성방정식을 사용하여 나타내었다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \log \dot{\epsilon})(1 - T^{*m}) \quad (7)$$

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C_1 \log \dot{\epsilon} + C_2 (\log \dot{\epsilon})^2] \times [1 - T^{*m}] \quad (8)$$

여기서

$$T^* = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \text{ 이다.}$$

구하여진 구성방정식의 상수들은 Table 1에 나타내었다. Fig. 9는 구성방정식에 의하여 구하여진 응력-변형률 선도를 나타낸다. 대부분의 경우에 있어서 Fig. 8에서와 같이 이차 근사의 경우 일차 근사에 비해 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었으나, Fig. 10의 경우처럼 잘 일치하지 않는 경우도 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 박판 시편을 고속 인장시험하기 위하여 인장형 홉킨슨 바를 제작하였다. 인장형 홉킨슨 바의 경우 발생할 수 있는 그립 및 시편의 형상으로 인한 오차를 계산하기 위한 방법을 제시하였으며, 그에 따른 실험 오차와 시편의 형상을 결정하였다. 제작된 인장형 홉킨슨 바를 이용하여 자동차용 냉연강판의 저속 및 고속 인장 시험을 수행하고, 재료의 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 얻었다. 이를 바탕으로 자동차용 냉연강판의 동적 거동을 나타내기 위하여

Johnson-Cook 구성방정식 및 이의 수정된 형태의 구성방정식에 대한 상수를 결정하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구비(과제번호 98-0200-01-01-5) 및 포항종합제철의 연구비에 의한 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Kolsky, H., *Stress Wave in Solids*, Dover, New York, pp. 41-65 (1949)
- [2] Follansbee, P. S., "The Hopkinson Bar," in *Metal Handbook 9th Edition*, Vol. 8, Mechanical Testing, American Society for Metals, pp. 198-203 (1978)
- [3] Harding, J., Wood, E. O. and Campbell, J. D., "Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain," *Journal of Mechanical Engineering and Science*, Vol. 2, pp. 88-96 (1960)
- [4] Lindholm, U. S., and Yeakley, L. M., "High Strain-rate Testing : Tension and Compression," *Experimental Mechanics*, Vol. 8, pp. 1-9 (1968)
- [5] Nicholas, T., "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain," *Experimental Mechanics*, May, pp. 177-185 (1981)
- [6] Ogawa, K., "Impact-tension Compression Test by using a Split-Hopkinson Bar," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, pp. 81-85 (1984)
- [7] Staab, G. H. and Gilat, A., "A Direct-tension Split Hopkinson Bar for

High Strain-rate Testing," *Experimental Mechanics*, Vol. 31, pp. 232-235 (1988)

- [8] Kang, W. J., Cho. S. S., Huh H. and Chung, D. T., "High Strain Rate Tensile Test of Sheet Metals with a New Tension Split Hopkinson bar," *대한기계학회논문집 A*, Vol. 21, No. 12, pp. 2209-2219 (1997)
- [9] Zhao, H. and Gary, G., The testing and behavior modeling of sheet metals at strain rates from 10^{-4} to 10^4 s $^{-1}$, *Materials Science and Engineering*, A207, pp. 4650 (1996)
- [10] Li, M., Wang, R. and Han, M. B., A kolsky Bar: Tension, Tension-tension, *Experimental Mechanics*, March, pp. 7-14 (1993)

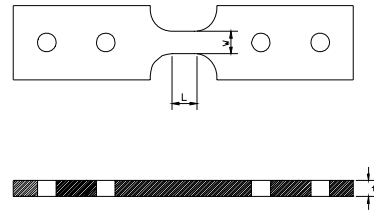


Fig. 2. Schematic description of a specimen.

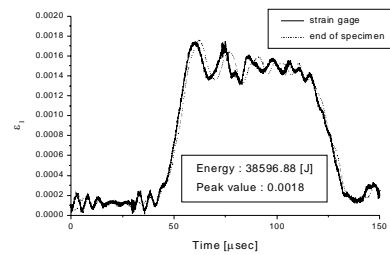


Fig. 3. Energy associated with an incident strain wave.



(a)

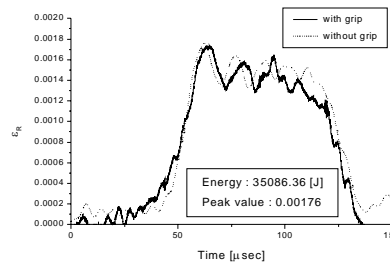
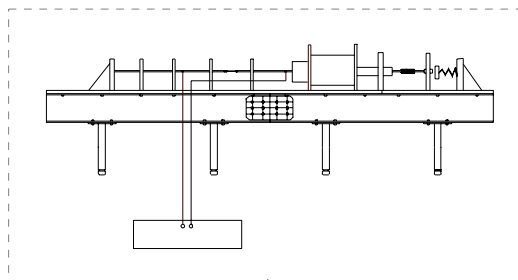


Fig. 4. Energy associated with a reflected strain wave.



(b)

Fig. 1. Schematic description of the tension split Hopkinson bar apparatus.

(a) Tension Split Hopkinson bar; (b) schematic description.

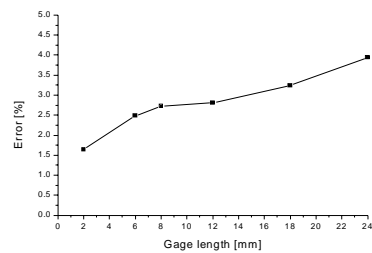


Fig. 5. The error with respect to the gage length.

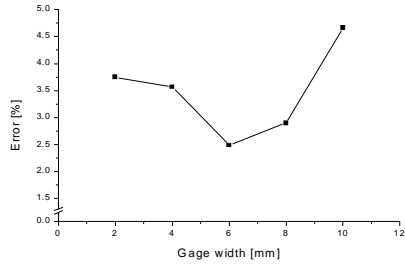


Fig. 6. The error with respect to the gage width.

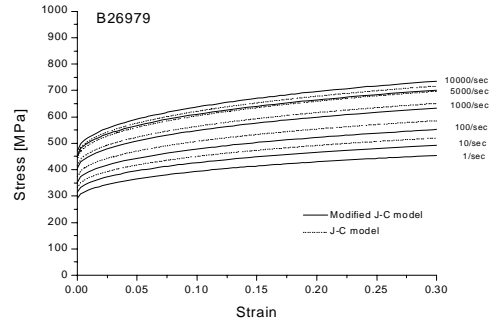


Fig. 9. Stress-strain curve estimation with constitutive equations.

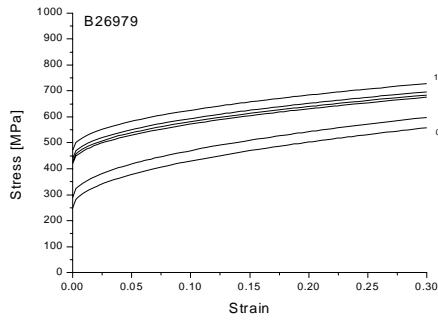


Fig. 7. Stress-strain curves from experiments.

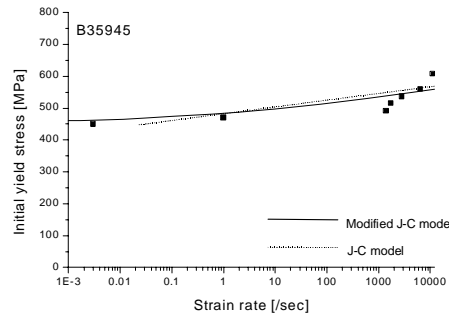


Fig. 10. Initial yield stress vs. strain rate.

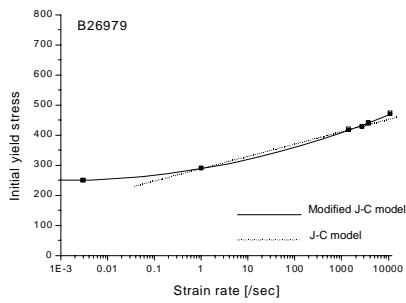


Fig. 8. Initial yield stress vs. strain rate.

Table 1. Constants in the original and modified Johnson-Cook constitutive relation for sheet metals.

	A (MPa)	B (MPa)	n	C	C ₁	C ₂	m
B96821 (CHSP35R)	284	456	0.48	0.132	0.053	0.021	0.428
60Tri p	432	800	0.59	0.075	0.030	0.012	0.547
B26979 (CHSP40E)	290	556	0.49	0.145	0.060	0.024	0.357
B42904 (CQ)	255	460	0.47	0.183	0.073	0.029	0.437
B43479 (DDQ)	220	450	0.49	0.246	0.098	0.039	0.367
B43786 (DQ)	219	416	0.48	0.223	0.088	0.035	0.323
B43787 (EDDQ)	220	414	0.49	0.250	0.100	0.040	0.327
B35945 (Tri p80)	470	940	0.43	0.050	0.020	0.007	0.574
CP800 (DQ)	811	634	0.40	0.011	0.005	0.002	1.04