

Tension Split Hopkinson bar를 이용한 자동차 성형용 금속 박판의 Johnson-Cook 구성방정식 결정

*강 우중, 조 상순, 허 훈
한국과학기술원 기계공학과

정 동택
한국기술교육대학교

Johnson-Cook constitutive relation of sheet metals for an auto-body with a tension split Hopkinson bar apparatus

Woo-Jong Kang, Sang-Soon Cho and Hoon Huh
Department of Mechanical Engineering, KAIST

Dong-Taek Jung
Korea Institute of Technology and Education

Abstract

The Johnson-Cook constitutive relation has been used in dynamic plasticities. The constants of the Johnson-Cook relation of sheet metals for an autobody is not known yet. In this paper, the material properties of SPEN, SPCC and SPRC in the high strain rate states have been acquired. A new tension split Hopkinson bar was used in high speed tensile tests of sheet metals. The experimental results acquired from the apparatus are used to determine the constants of Johnson-Cook constitutive relation of sheet metals. This results can be used to analysis of crashworthiness.

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

1. 서론

1940년대 말 Kolsky⁽¹⁾에 의하여 고속물성 측정을 위한 장치가 제안된 후, 이것은 Split-Hopkinson pressure bar(SHPB)⁽²⁾로 잘 알려져 있다. 이 장치는 변형률속도가 대략 1,000/sec-10,000/sec인 변형 범위에서의 재료의 변형 이력에 따른 응력-변형률 관계를 직접 얻어 낼 수 있기 때문에 많은 연구자들에 의하여 이용되어 왔다. Nicholas⁽³⁾는 수정된 Split Hopkinson Bar 장치를 이용하여 알루미늄과, steel에 대한 시험을 수행하였으며, Lindholm과 Yeakley⁽⁴⁾는 SHPB를 이용하여 인장 또는 압축변형률 시험을 하기 위한 방법에 관하여 언급하였다. Johnson 과 Cook⁽⁵⁾은 이러한 흡진 스파 시험기를 이용하여 4340강, ARMCO iron, 니켈 200 등의 재료에 대한 시험을 수행하였으며, 구성방정식을 제안하고 상수들을 구하였다. Steinberg⁽⁶⁾은 전단 강성과 항복 응력을 상당 소성 변형률, 압력, 온도 등의 함수로 구성하여 고변형률 속도에서 유용한 구성방정식을 제안하였다. Zerilli와 Armstrong⁽⁷⁾은 Johnson-Cook 구성방정식을 보완하여 재료의 결정 격자구조에 따른 구성방정식을 제안하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 박판의 인장 시험에 적합하도록 제작된 tension split Hopkinson bar(TSHB)를 이용하여 자동차 차체 성형용 강판의 인장 시험을 수행한 후 각각의 재료의 동적 거동을 Johnson-Cook 구성방정식을 이용하여 나타내고자 한다.

2. TSHB를 이용한 자동차용 강판의 고속인장 시험

Tension split Hopkinson bar는 입력봉, 출력봉, 충격봉 등으로 구성되어 있으며 장치의 개략도 및 사용된 인장시편은 Fig. 1과 같다. 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉을 입력봉에 충돌시키면 이 때 발생한 인장파가 입력봉으로 전달되고, 일부는 시편을 거쳐 출력봉으로 전달되며 나머지는 다시 입력봉으로 반사되게 된다. Kolsky의 탄성과 이론에 의하면, 다음의 식 (1)에 나타난 바와 같이 시편의 변형률은 입력봉에서 측정된 반사파로 표현되며, 시편의 응력은 식 (2)와 같이 출력봉에서 측정된 투과파를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon(t) = - \int_0^t \frac{2C_0}{L} \epsilon_R(z) dz \quad (1)$$

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

여기서 L은 시편의 길이이며 C₀는 봉내의 탄성파의 전파속도이다. E는 봉의 탄성계수를 나타내고 A₀와 A는 각각 봉 및 시편의 단면적을 나타낸다.

TSHB를 이용하여 실제 실험을 시행하면 입력파 및 반사파는 스트레인게이지 S₁, S₂와 오실로스코프를 이용하여 Fig. 2와 같이 측정된다. 이러한 응력파들을 식 (1) 및 식 (2)을 이용하여 시편내의 응력-변형률 선도로 변환하게 된다. 시편의 변형률 속도는 충격봉의 발사 속도를 조정하여 변화시킬 수 있으며, 평균 변형률 속도가 대략 2500/sec에서 5000/sec인 정도의 범위에서 시험을 수행하였다. 시험에는 자동차 차체 성형용으로 많이 사용되는 SPCE, SPCC, SPRC의 재료를 사용하였다. 이러한 강판의 명칭은 JIS의 규격을 따라 명명한 것으로서, S는 Steel을, P는 Plate를, 세 번째의 C는 Cold rolled를, 네 번째의 C와 E는 강판의 등급을 나타내며 N은 시효보증을 뜻한다. 사용한 시편의 저속도 변형률 특성을 알아보기 위하여 준 정적인 인장시험을 수행하였다. 이와 같이 하여 준정적인 인장시험결과와 고속인장 시험 결과를 도시하면 사용한 시편의 재료에 대하여 각각 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5와 같이 나타난다. 고변형률 속도인 경우 소성변형으로 인하여 시편 내부에 많은 열이 발생하게 되므로 저속도 경우와 달리 가공경화가 덜 발생한 것을 볼 수 있다. 그러나 유동응력은 준 정적인 경우에 비하여 대략 두배정도 증가한 것을 알 수 있다.

3. Johnson-Cook 구성방정식의 결정

금속재료의 동적 거동을 나타내는 Johnson-Cook 구성방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \epsilon)(1 - T^*{}^m) \quad (3)$$

여기서

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

구성방정식의 첫 번째 괄호는 재료의 변형률 경화효과를 나타내며, 두 번째 괄호는 변형률 속도 경화를 나타낸다. 마지막으로 세 번째 괄호는 열적연화현상(Thermal softening effect)을 나타낸다. 위의 구성방정식의 첫 번째 괄호 안의 상수인 A, B, n 은 각각 변형률 속도가 1/sec인 경우의 응력-변형률 선도를 Ludwick의 식으로 나타내었을 경우에 해당하는 상수들이다. 두 번째 괄호의 C를 구하기 위하여 각각 Fig. 6 과 같이 초기 항복응력의 변화를 변형률 속도에 따라 Log 선도에 나타낸 그림을 이용한다. 이 때 C는 세 번째 괄호의 열적 연화 현상을 배제하고 등은 변형과정일 때 얻어지게 되므로 초기 항복이 발생할 때 구하였다. 마지막으로 세 번째 괄호 안의 상수 m을 구하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 변형률 속도가 4000/sec인 경우 시편의 단열변형에 따른 온도상승을 ABAQUS/Explicit을 이용하여 계산하였다. 변형 시간이 약 50 μ s인 경우 변형률 속도가 4000/sec이므로 그 때의 변형률은 약 0.2이다. m을 구하기 위하여 변형률이 0.2일 때의 온도상승 20°C를 이용하였다. 각각의 재료에 대하여 결정된 A, B, n, C 및 m은 Table. 1과 같다. 결정된 Johnson-Cook 구성방정식을 이용하여 얻은 단열 응력-변형률 선도는 각각의 재료에 대하여 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같다.

4. 결론

본 논문에서는 고속 인장시험을 위한 TSHB를 이용하여 자동차 성형용으로 많이 쓰이고 있는 SPCEN, SPCC, SPRC의 금속박판을 인장 시험하였고 재료의 동적 거동을 표현하기 위하여 많이 쓰이고 있는 Johnson-Cook 구성 방정식의 5개의 상수들을 구하였다. 또한 Johnson-Cook 구성 방정식을 이용하여 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 나타내어 보았다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구비(과제번호 95-0200-11-02-3)에 의하여 연구되었으며 국방과학연구소 관계자 여러분께 감사드리며 아울러 한국기술교육대학교의 정동택 박사님께 도 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Kolsky, 1949, *Stress wave in solids*, Dover, New York, pp. 41-65.
2. P. S. Follansbee, "The Hopkinson Bar," in *Metal Handbook* 9th Edition, Vol. 8, Mechanical Testing, American Society for Metals, pp. 198-203.
3. T. Nicholas, 1981, "Tensile testing of materials at high rates of strain," *Exp. Mech* May, pp. 177-185.
4. U. S. Lindholm and L. M. Yeakley, 1968, "High strain-rate testing: tension and compression," *Exp. Mech* vol. 8, pp. 1-9.
5. G. R. Johnson, W. H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," in Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, pp.541-547, 1983.
6. D. J. Steinberg, S. G. Cochran, and M. W. Guinan, "A constitutive model for metals applicable at high-strain rate," *J. Appl. Phys.* 51(3), pp.1498-1504, 1980.
7. F. J. Zerilli and R. W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculation," *J. Appl. Phys.* 61(5), pp.1816-1825, 1987.

Table 1. The constants of Johnson-Cook constitutive relation for sheet metals.

	A(MPa)	B(MPa)	n	C	m
SPCEN	208	350	0.48	0.135	0.314
SPCC	214	433	0.45	0.158	0.253
SPRC	221	483	0.43	0.127	0.262

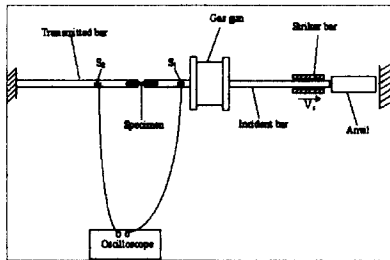


Fig. 1 The schematic diagram of tension split hopkinson bar.

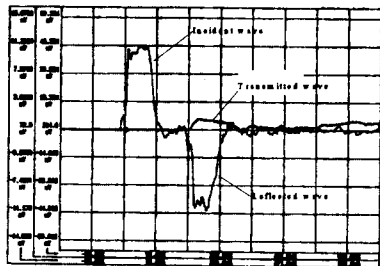


Fig. 2 The waves measured from an oscilloscope.

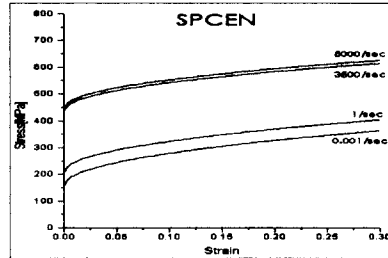


Fig. 3 The stress-strain curves of SPCEN at various strain rate.

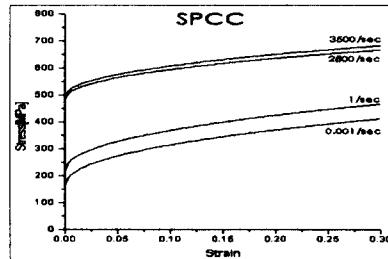


Fig. 4 The stress-strain curves of SPCC at various strain rate.

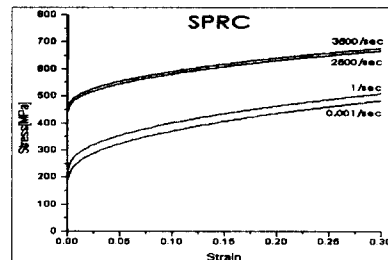


Fig. 5 The stress-strain curves of SPRC at various strain rate.

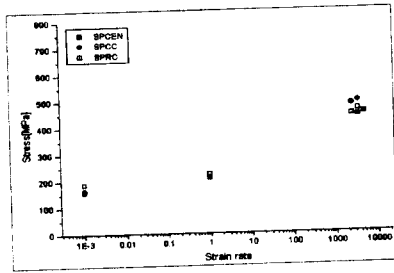


Fig. 6 The initial yield stress with respect to the strain rate.

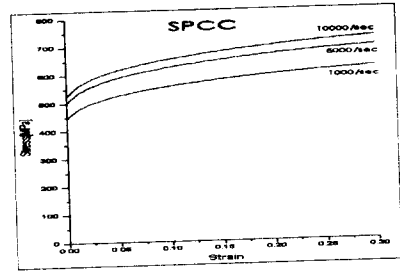


Fig. 9 The stress-strain curves from the Johnson-Cook constitutive relation.

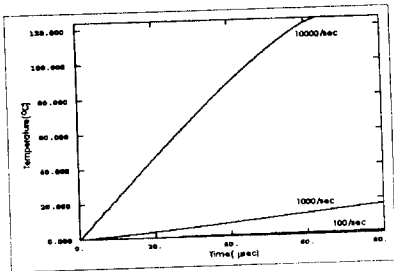


Fig. 7 The increase of a temperature in a specimen with respect to the strain rate.

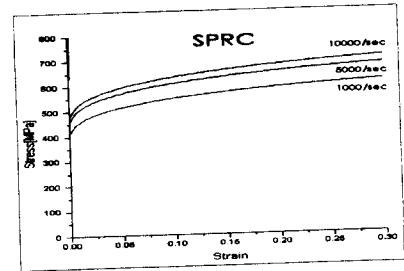


Fig. 10 The stress-strain curves from the Johnson-Cook constitutive relation.

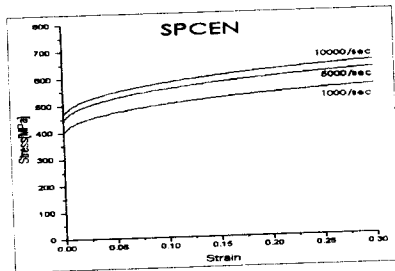


Fig. 8 The stress-strain curves from the Johnson-Cook constitutive relation.