

중변형률 속도에서의 차체용 강판의 고속 인장실험

임지호¹⁾ · 김석봉¹⁾ · 김진성¹⁾ · 허 훈^{*1)} · 임종대²⁾ · 박성호³⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 현대자동차²⁾ · POSCO³⁾

High Speed Tensile Tests of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate

Jiho Lim¹⁾ · Seokbong Kim¹⁾ · Jinsung Kim¹⁾ · Hoon Huh^{*1)} · Jongdae Lim²⁾ · Sungho Park³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Changdum-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾POSCO, 699 Gunho-dong, Gwangyang-si, Jeonnam 545-090, Korea

(Received 30 September 2004 / Accepted 17 November 2004)

Abstract : This paper introduces a newly developed high speed material testing apparatus for tensile tests at the strain rate up to 500 /sec. The tensile properties of sheet metals are indispensable for the accurate crashworthiness analysis of auto-bodies since the local strain rate reaches to 500 /sec in the car crash. An appropriate experimental method has to be developed to acquire the tensile properties at the intermediate strain rate ranged from 0.003/sec to 200/sec . Tensile tests of various different steel sheets for an auto-body were performed to obtain the dynamic properties with respect to the strain rate. The dimensions of specimens that can provide the reasonable results were determined by the finite element analysis. A special jig fixture of a load cell is designed to reduce the load ringing phenomenon induced by unstable stress propagation at the high strain rate. Stress-strain curves were acquired for each steel sheet from the dynamic tensile test and utilized to obtain the relationship of the stress to the strain rate.

Key words : High speed material testing machine(고속 재료시험기), Intermediate strain rate(중변형률 속도), strain rate hardening(변형률 속도 경화), Dynamic material property(동적물성치), Load ringing phenomenon(하중 떨림 현상)

1. 서론

최근의 자동차 개발 동향은 소비자의 요구에 호응하여 차체 안전도와 충돌 특성에 중점을 두고 있다. 또한, 자동차 배기가스 규제의 대응 및 연비향상을 목적으로 하는 차량 경량화가 필수적으로 대두되고 있다. 차량의 경량화는 충돌 안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 하기 때문에 차체 충돌 시 차체의 고속 변형에 의한 재료의 특성을 고려한 충돌

해석을 바탕으로 이루어져야 한다.¹⁾ 이를 위하여 자동차 차체용 강판의 정확한 동적 물성치 확보는 필수적이다.

재료의 응력과 변형률 관계를 얻기 위한 실험은 변형률 속도(strain rate)에 따라 여러 가지 방법이 있다. 변형률 속도가 수백 /sec 이상의 고변형률 속도(high strain rate) 구간은 관성과 응력과 영향의 증가로 재료가 불균일하게 변형하는데, 주로 홉킨슨 바(Hopkinson bar) 시험기를 이용한 물성실험이 수행되어 왔다. 홉킨슨 바 시험기는 고변형률 속도에서

^{*}To whom correspondence should be addressed.
hhuh@kaist.ac.kr

의 재료의 거동을 연구하는데 가장 많이 쓰이는 실험 장치로 대략 1000-10000 /sec 변형률 속도에서의 재료의 동적물성을 얻을 수 있다. 이러한 홉킨슨 박시험기는 Kolsky²⁾의 일차원 탄성과 이론에 따라서 입력봉에서 측정된 탄성 입력파와 반사파 및 출력봉에서 측정된 투과파의 크기에 의하여 시편의 응력 및 변형률을 얻을 수 있도록 고안된 장치로 압축, 인장, 비틀림, 굽힘 등의 방법으로 많은 연구자들에게 의해서 연구되었다.³⁻⁶⁾

대략 1 /sec에서 수백 /sec까지의 중변형률 속도(intermediate strain rate)는 차량 충돌에서 발생하는 변형률 속도 구간으로서 하중낙하시험법(drop weight test)과 캠 플라스토미터(cam plastometer) 등의 기계식 방법과 공압이나 유압처럼 유체를 사용하는 방법 등이 많이 연구되었으나⁷⁻⁸⁾ 아직까지 시험방법이나 시험규격이 명확하게 정립되지 않은 실정이다.^{9,10)} 최근에는 주로 유압장치를 이용하여 많은 연구들이 수행되고 있고,^{11,12)} Instron과 MTS 등의 시험기 제조사에서는 중변형률 속도에서의 박판의 동적 물성치를 얻을 수 있는 시험기를 개발하여 시판한다.¹³⁾ 그러나 아직까지 중변형률 속도에서의 동적 물성치에 대한 깊이 있는 연구는 많이 발표되지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 자체 개발한 고속 인장 재료시험기(high speed material testing machine)의 개발 과정과 실험 결과를 소개한다. 차체용 강관의 고속 인장 실험을 수행하여 변형률 속도에 따른 동적 물성치 데이터베이스 구축 과정을 설명한다. 진동특성이 우수한 로드셀 지그를 설계하여 고속 인장 시 발생하는 하중 떨림 현상(load ringing phenomenon)을 개선하였고, 중변형률 속도에서 박판의 동적 물성 실험에 적합한 시편의 형상을 결정하였다. 동적 물성 실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도, 항복응력 및 유동응력의 민감도의 변화를 고찰하였다.

2. 중변형률 속도의 인장시험

2.1 고속 인장 재료시험기

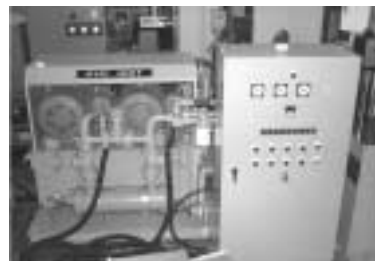
본 논문에서는 수백 /sec이하의 중변형률 속도 범위에서 박판의 동적 물성실험을 하기 위하여 고속

인장 재료시험기의 제작과정을 설명한다. Fig. 1은 중변형률 속도에서의 동적 물성실험을 위하여 자체 제작한 고속 인장 재료시험기의 사진이다. 시험기의 제원은 가로 1000 mm, 세로 600 mm, 높이 2300 mm의 크기이고, 크로스헤드(crosshead)의 높이를 220 mm 씩 3단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최대 속도는 4 m/sec이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 100 mm이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300 kg/cm²이고, 최고 유량은 240 liter/min이다. 작동유체를 압축시키기 위하여 45 kW 용량의 유압모터 2개를 사용하였고, 입력신호에 따른 작동유체의 반응속도를 빠르게 하기 위하여 5 liter 용량의 작동유체의 저장소(accumulator)를 설치하였다.

짧은 시험 시간 동안에 실린더가 순간적으로 빠르게 움직여야 하기 때문에 시험기의 반응속도가 26 msec인 Moog사의 D662 서보 밸브 2개를 병렬로



(a)



(b)

Fig. 1 High speed tension testing machine: (a) frame of machine; (b) hydraulic unit

연결하여 사용하였다. 하중 측정은 Kistler사의 압전형 로드셀을 사용하였고, 변위는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하였다.

시편이 일정한 변형률 속도로 변형하기 위하여 시편에 인장을 가하는 시험기의 실린더가 인장시험 동안 일정한 속도로 움직여야 한다. 실린더가 정지 상태에서 움직이면 일정한 변형률 속도 조건을 부과할 수 없기 때문에 시편에 힘이 가해지는 동안 실린더가 일정한 속도를 유지할 수 있는 특수한 형태의 지그를 사용하였다.

인장속도가 빨라질수록 시편과 지그에 균일한 하중이 작용하지 않는다. 특히 수십 /sec 이상의 변형률 속도에서는 이러한 현상이 특히 심화되어 시편과 로드셀 사이의 지그의 떨림으로 로드셀에서 측정하는 하중이 진동하는 현상이 발생한다. 이러한 하중 떨림 현상(load ringing phenomenon)은 시편에 작용하는 정확한 하중을 측정하지 못하게 하여 실험결과를 왜곡하고 잘못된 결과를 얻게 한다.

하중 떨림 현상은 시편의 변형부위에서 하중 측정 위치가 멀어질수록 심하여 탄성변형을 하는 시편의 그립부에 스트레인게이지를 붙여서 하중을 측정하는 방법이 시도되고 있지만, 이와 같은 방법은 하중측정의 정확도 향상에 비하여 시간이 많이 걸리고 번거로운 단점이 있다.

본 논문에서는 시편을 고정하는 그립부의 진동특성을 향상시키는 방법을 채택하였다. 진동특성은 시편과 로드셀 사이에 위치하는 그립부의 강성에 비례하고 질량에 반비례하는데, 일반적으로 고유진동수가 높을수록 하중 떨림 현상이 개선된다.

일반적으로 Fig. 2(a)와 같이 사용자가 사용하기 편리한 지그를 사용하는데, 이를 Fig. 2(b)와 같이 개선하였다. L자형의 그립부에 시편을 볼트로 고정하고 하중을 지지하지 않는 불필요한 부분을 제거하였으며, 지그의 강성을 증가시키기 위하여 판상 압전형 로드셀을 지그와 직접 체결하고 지그의 길이를 최대한 감소시켰다. Fig. 3은 차체용 강판인 SPRC35R을 50 /sec 변형률 속도에 대하여 두 종류의 지그로 인장시험을 한 결과이다. 이전 지그는 고유진동수가 2500 Hz로 하중 떨림 현상이 크게 발생하였으나, 개선된 지그는 고유진동수가 13000 Hz로

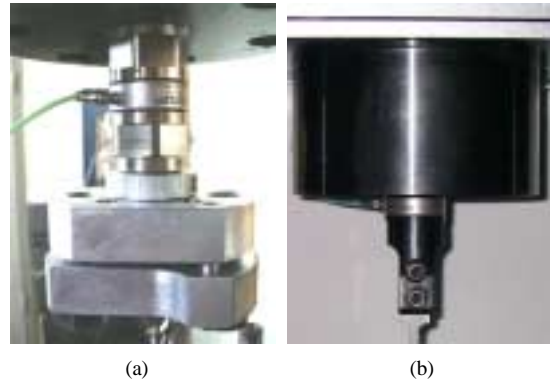


Fig. 2 Upper gripping jigs: (a) old design; (b) new design

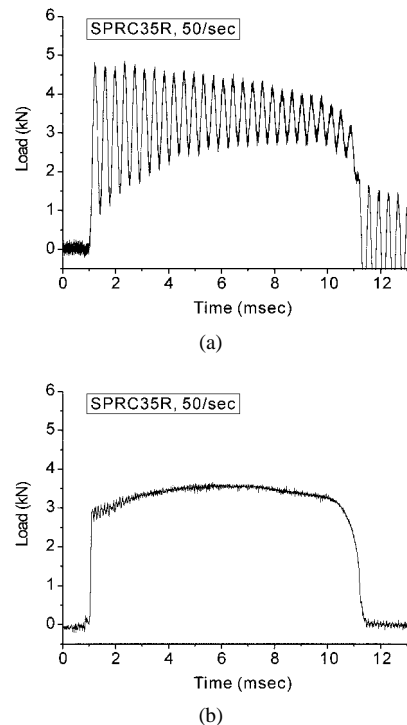


Fig. 3 Load curves of SPRC35R at 50/sec: (a)old design; (b) new design

크게 높아지고 하중 떨림 현상도 획기적으로 개선되었다.

2.2 고속 인장시편의 결정

재료 실험 시 시편의 변형률을 측정하는 가장 이상적인 방법은 측정하고자 하는 부분의 변위를 직접 측정하는 것이다. 정적 실험 시 스트레인게이지나 신장계(extensometer)를 사용하여 균일한 변형을

하는 표점부의 변위를 직접 측정하지만 고속 인장 실험은 인장속도가 빠르기 때문에 스트레인게이지나 신장계를 사용하는데 어려움이 있다. 고속카메라, 레이저 장비 등을 이용하여 균일하게 변형하는 표점부의 변위를 직접 측정할 수 있겠지만 본 논문에서는 실린더의 변위를 측정하여 간접적으로 표점부의 변위를 환산하는 방법을 채택하였다.¹⁴⁾ 고속 인장시험에 대한 시편 규격은 표준화되어 있지 않기 때문에 합리적인 실험 오차를 가지는 시편의 규격에 대한 연구가 필요하다. 시편은 표점부에서 변형의 대부분이 발생해야 하며 곡률 반경에 의한 응력집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장 시편의 형상인자는 Fig. 4에 표시한 것과 같이 표점부의 폭과 길이, 필렛(fillet)부의 반경 등이다. 일반적으로는 표점길이가 증가할수록 측정변위의 오차가 감소하며 시편의 변형률의 분포가 균일하게 발생한다. 그러나 표점길이(L)이 증가하지만 변형률 속도가 감소하며 관성에 의하여 시편이 균일하게 변형하지 않고 구동부 쪽에 변형이 집중할 수 있다. 표점부의 폭(W)이 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하고 변형률의 분포가 균일해지나 실험상의 오차가 증가한다. 곡률반경(R)이 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하지만 응력집중이 발생하는 단점이 있다. 본 논문에서는 Fig. 5의 사진과 같이 시편의 폭이 6mm 이고 표점거리가 각각 15 mm 와 30 mm 인 시편을 사용하였다.

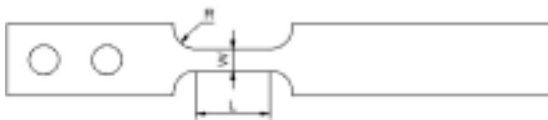


Fig. 4 Schematic diagram of a specimen

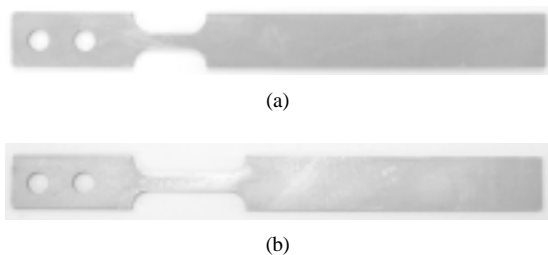


Fig. 5 Tensile specimens: (a) length of the gauge section of 15 mm; (b) length of the gauge section of 30 mm

3. 차체용 강판의 동적 인장실험

자동차 차체용 냉연강판인 Table 1의 EZNCD, SPCC, SPRC390E-BH, TRIP60 에 관한 준정적 및 중 변형률 속도에서의 물성실험을 수행하고 응력-변형률 선도, 변형률 속도 민감도 등의 고속물성 데이터베이스를 확보하였다. 제조사에 따라서 강판의 물성치가 다르기 때문에 각 제조사에서 사용하는 강판 명칭을 사용하였다. EZNCD는 디프드로잉용 냉간압연 아연도금 강판이고, SPCC는 일반적인 냉간압연강판이다. TRIP60은 최대응력이 600 MPa급인 TRIP강이다. Table 2에 표시된 바와 같이 변형률 속도 0.003, 0.1/sec에서는 정적 재료시험기를 사용하였고, 변형률 속도가 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200/sec에서는 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 인장실험을 수행하였다. 시험기의 인장속도가 최대 4 m/sec 이기 때문에 표점거리 15 mm의 시편에 대하여 200 /sec까지 실험을 수행하였다. 동적 물성치는 변형률 속도의 자연대수 함수에 비례하여 변하므로 변형률 속도 조건이 자연대수 함수에 대략 비슷한

Table 1 Material properties acquired from quasi-static tensile tests

Material	Thickness (mm)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
EZNCD	2.0	149.1	307.9
SPCC	0.8	270.6	356.5
SPRC390E-BH	0.65	268.0	399.5
TRIP60	1.2	423.8	645.6

Table 2 Experimental condition

Testing machine	Strain rate [/sec]	Length of gauge section [mm]	Width [mm]
Static material testing machine	0.003	30	6
	0.1	30	6
High speed material testing machine	0.5	30	6
	1	30	6
	2	30	6
	5	30	6
	10	30	6
	20	30	6
	50	30	6
	100	30	6
	200	15	6

간격을 가지도록 1, 2, 5의 비율로 증가시켰다. 실험은 각 변형률 속도마다 3회 반복하였고 200/sec을 제외한 모든 변형률 속도에서 표점거리 30 mm의 시편을 사용하였다.

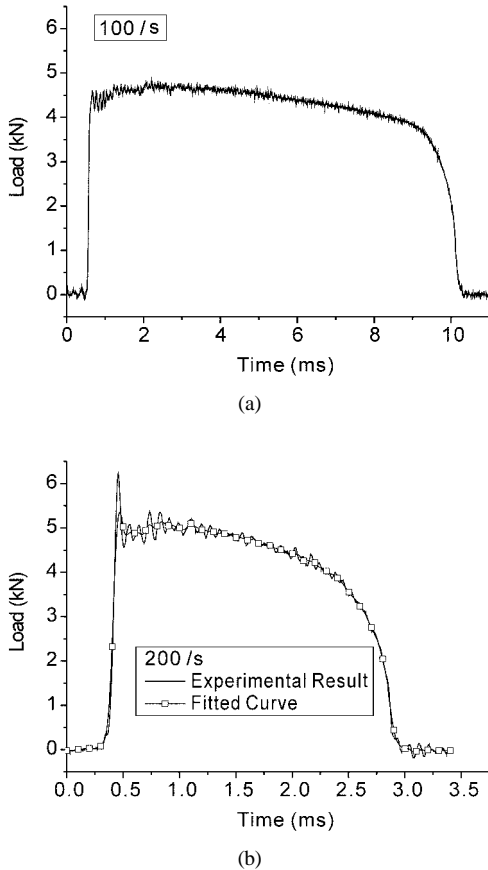


Fig. 6 Load curves of EZNCD with respect to strain rate: (a) 100/sec; (b) 200/sec

Fig. 6은 변형률 속도에 따른 EZNCD의 하중 선도이다. 100/sec의 변형률 속도에서는 하중 떨림 현상이 거의 발생하지 않고 정확한 하중 선도를 얻을 수 있지만, 100/sec 이상에서는 여전히 하중이 진동한다. 특히 시편에 순간적인 하중이 가해지는 초기에 하중 떨림이 심한 결과를 보인다. 100/sec 이상에서는 시편과 로드셀 사이의 진동만이 아니라 시편 자체의 진동에 의한 응력과의 영향이 증가하기 때문에 하중 떨림 현상을 실험적으로 그림부를 개선하는 방법만으로 해결하는 것은 거의 불가능하다. 본

논문에서는 실험에서 얻은 진동하는 하중 신호에서 매끄러운 하중 선도를 얻기 위하여 설정한 주파수보다 높은 주파수의 푸리에 성분을 제거하는 FFT(Fast Fourier Transform) 필터를 이용한 유연화 방법을 사용하였다. Fig. 6(b)의 사각형 기호는 유연화 과정을 거친 하중 선도이다.

Fig. 7은 EZNCD, SPCC, SPRC390E-BH, TRIP60의 11개의 변형률 속도에 대한 공칭 응력-변형률 선도이다. 100/sec과 200/sec에서 하중을 유연화시켜도 여전히 응력이 진동하는 것을 볼 수 있다. 변형률 속도가 증가할수록 응력-변형률 선도의 기울기가 감소하는데 이것은 응력의 변형률 속도 민감도가 변형률이 증가할수록 감소하는 것을 의미한다. EZNCD와 같은 강도가 약한 재료가 TRIP60과 같이 강도가 높은 재료보다 이러한 현상이 더 크게 나타난다.

Fig. 7(a)의 EZNCD의 공칭 응력-변형률 선도에서 최대응력의 발생 변형률이 변형률 속도가 증가할수록 점차 작아지는데, 특히 100/sec 이상에서는 항복점과 최대응력 발생점이 거의 일치하여 응력이 변형률이 증가할수록 감소하는 양상을 보인다. 공칭응력 선도의 기울기는 음수이지만 이를 Fig. 8의 진응력 선도로 변환하면 여전히 가공경화에 의하여 응력이 증가함을 알 수 있다.

일반적으로 중변형률 속도에서의 재료의 거동은 흡킨슨바 시험으로부터 얻은 고변형률 속도에서의 동적 물성치와 정적 재료시험기로부터 얻은 정적 물성치의 항복응력으로 변형률 속도 민감도를 구한 후 정적 응력-변형률 선도에 곱하는 방법으로 내삽하여 사용하였다. 이러한 방법을 사용하면 중변형률 속도에서의 응력-변형률 선도의 기울기는 변형률 속도 증가에 따라서 증가하도록 표현되지만 실험은 반대의 결과를 보여준다. Fig. 9(a)는 기존에 사용되어온 정적 응력-변형률 선도에 항복응력의 변형률 속도에 대한 민감도를 곱하는 방법으로 얻은 그래프이고, Fig. 9(b)는 동적 물성실험에서 얻은 결과이다. 두 그래프 모두 각 변형률 속도에 대한 항복응력 값은 같지만 Fig. 9(a)는 응력 선도의 기울기의 감소를 표현하지 못하기 때문에 변형률이 증가할수록 점점 오차가 커짐을 알 수 있다.

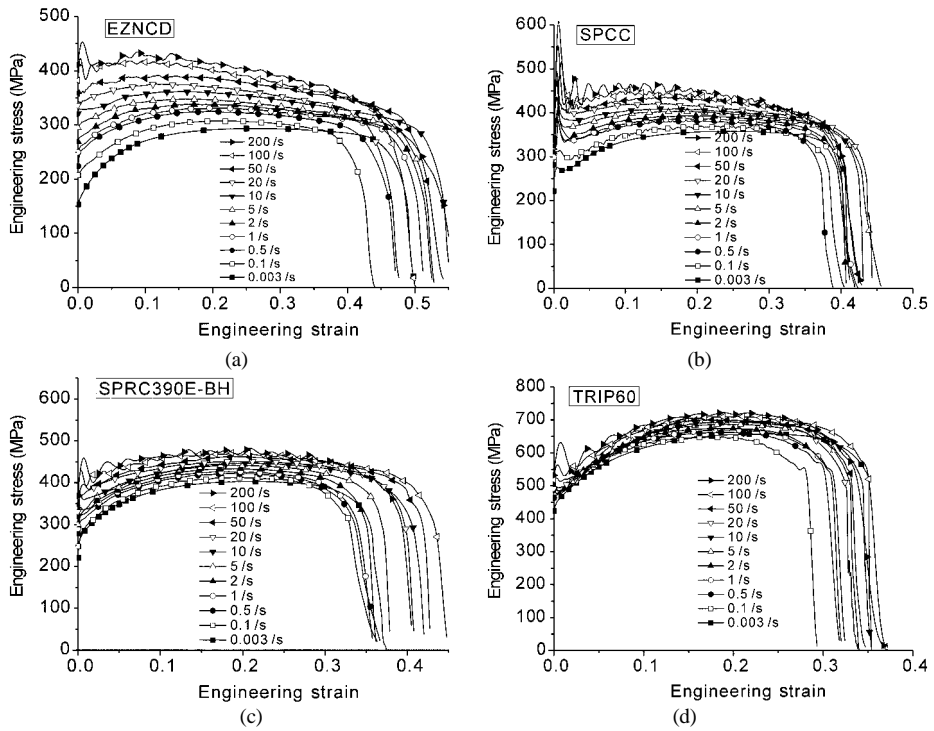


Fig. 7 Engineering stress—strain curves of cold-rolled steel sheets with the variation of the strain rate: (a) EZNC; (b) SPCC; (c) SPRC390E-BH; (d) TRIP60

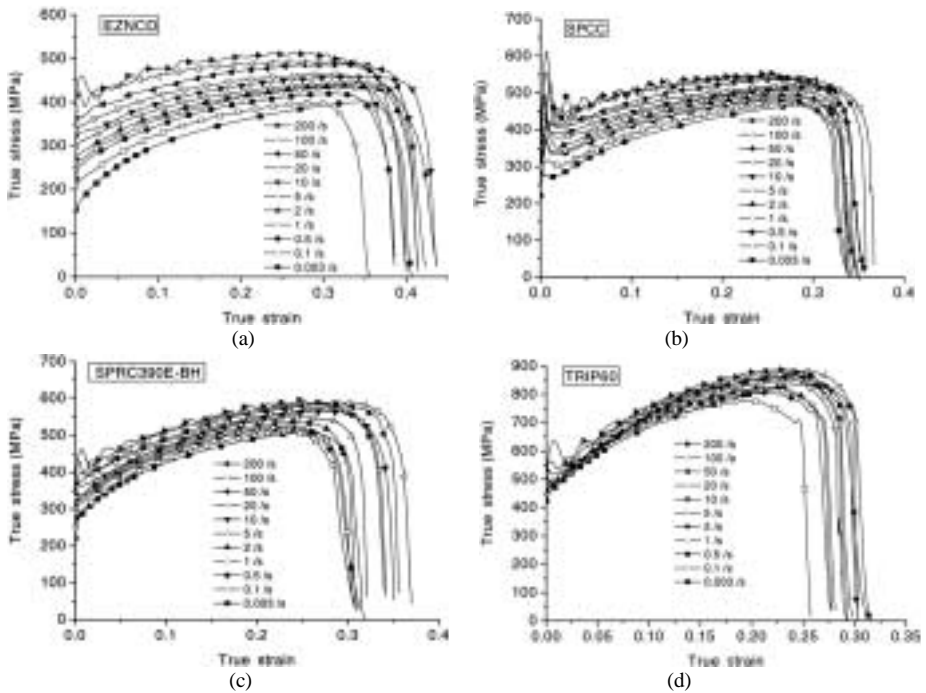


Fig. 8 True stress—strain curves of cold-rolled steel sheets with the variation of the strain rate: (a) EZNC; (b) SPCC; (c) SPRC390E-BH; (d) TRIP60

중변형률 속도에서의 차체용 강판의 고속 인장실험

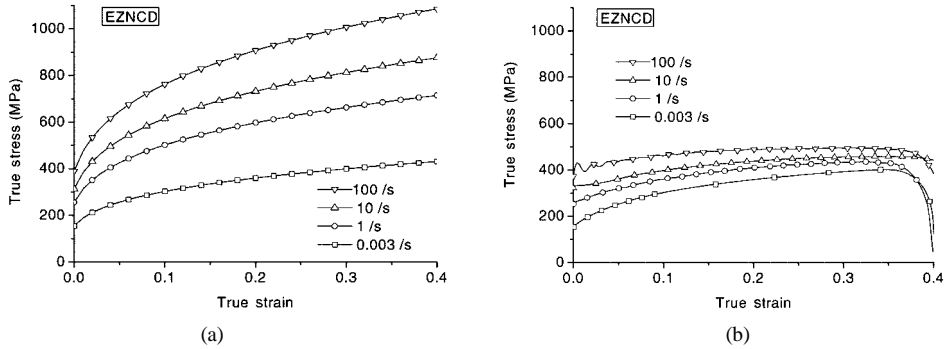


Fig. 9 Stress—strain curves of EZNCD: (a) Cowper-Symonds model fitted on the basis of the yield stress; (b) experimental results

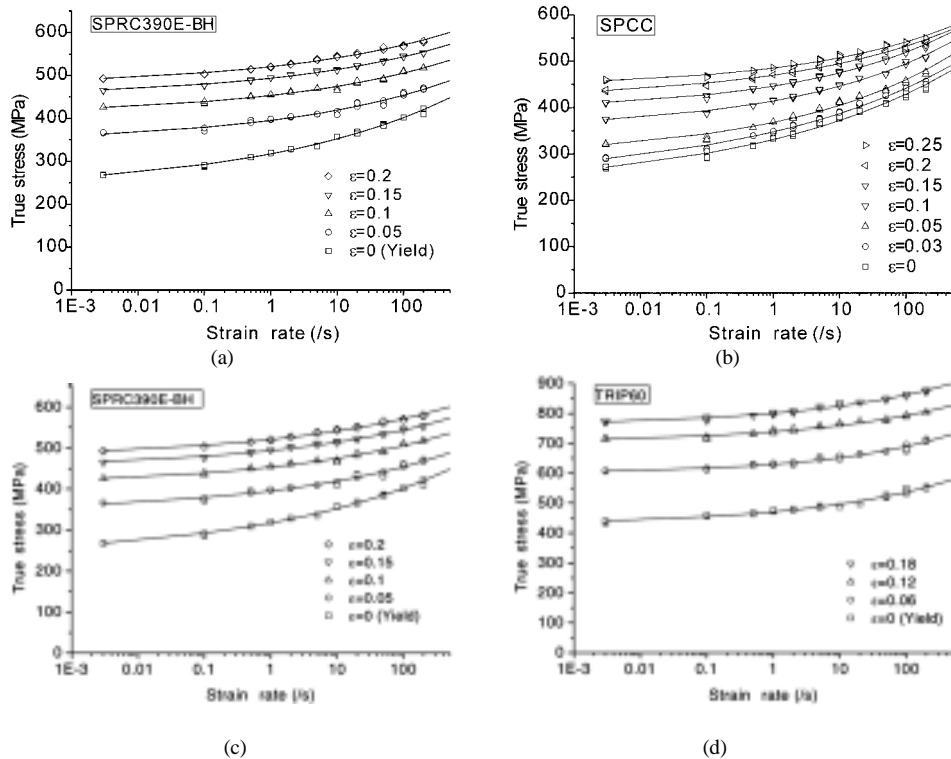


Fig. 10 Variation of the stress for the plastic strain: (a) EZNCD; (b) SPCC; (c) SPRC390E-BH; (d) TRIP60

Fig. 10의 변형률 속도에 따른 유동응력의 변화를 변형률을 변화시키며 나타낸 변형률 속도 민감도 선도이다. 응력—변형률 선도에서 알 수 있듯이 변형률이 증가할수록 민감도 선도의 기울기가 감소하고, 낮은 강도의 재료일수록 그 정도 크게 나타난다. TRIP60과 같이 강도가 강한 재료의 경우 변형률 속도 민감도 선도는 변형률에 따라서 거의 영향이 없는 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 차체용 강판의 고속 인장실험을 수행하여 변형률 속도에 따른 동적 물성치 데이터베이스를 구축하였다.

진동특성이 우수한 로드셀의 지그를 설계하여 고속 인장 시 발생하는 하중 떨림 현상을 개선하였다.

중변형률 속도에서 박판의 동적 물성실험에 적합하도록 시편의 표점부의 폭이 6 mm 이고 표점부의 길이가 각각 15 mm 와 30 mm 인 시편을 결정하였다.

정적시험기와 자체 제작한 고속인장 재료시험기를 이용하여 EZNCD, SPCC, SPRC390E-BH, TRIP60 에 대하여 0.003, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200/sec 의 11 가지 변형률 속도에서의 인장실험을 수행하였다. 실험결과에서 변형률 속도가 증가할수록 재료의 응력이 증가하고, 낮은 강도의 재료일수록 응력의 증가량이 큰 것을 알 수 있다. 정적실험과 홉킨슨 바 실험에서 얻은 항복응력을 내삽하여 정적응력 선도에 곁하여 사용되어진 일반적인 물성 구성방정식의 결과와 다르게 중변형률 속도에서 변형률 속도가 증가할수록 응력-변형률 선도의 기울기가 감소하면서 최대응력의 발생 위치가 앞으로 이동하는 결과를 보였다.

References

- 1) H. Huh, J. H. Lim, J. H. Song, K. S. Lee, Y. W. Lee and S. S. Han, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60TRIP Steel for Side Members," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.4, No.3, pp.149-156, 2003.
- 2) H. Kolsky, *Stress Waves in Solids*, Dover, New York, pp.41-98, 1963.
- 3) U. S. Lindholm and L. M. Yeakley, "High Strain-rate Testing: Tension and Compression," *Experimental Mechanics*, Vol.8, pp.1-9, 1968.
- 4) J. Duffy, J. D. Campbell and R. H. Hawley, "On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effect in 1100-0 Aluminum," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, Vol.38, pp.83-91, 1971.
- 5) G. H. Staab and A. Gilat, "A Direct-tension Split Hopkinson Bar for High Strain-rate Testing," *Experimental Mechanics*, Vol.31, pp.232-235, 1988.
- 6) H. Huh, W. J. Kang and S. S. Han, "A Tension Split Hopkinson bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals," *Experimental Mechanics*, Vol.42, pp.8-17, 2002.
- 7) G. B. Dudder, "Drop Tower Compression Test," *Metals Handbook*, 9th Ed., American Society for Metals, pp.196-199, 1985.
- 8) D. R. Ambur, C.B. Prasad and W.A. Waters Jr. "A Dropped-weight Apparatus for Low-speed Impact Testing of Composite Structures," *Experimental Mechanics*, Vol.3, pp.77-82, 1995.
- 9) M. A. Meyers, *Dynamic Behavior of materials*, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- 10) "Mechanical Testing," *ASM Handbook*, ASM Intl., Metals Park, Ohio, Vol.8, 1985.
- 11) K. Miura, S. Takagi, T. Obara and S. Tanimura, "High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts," *SAE*, 980952, 1998.
- 12) J. H. Lim, S. B. Kim, J. S. Kim, H. Huh, S. Y. Kwon, C. S. Yoon and S. H. Park, "Study on the Fracture Elongation of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate," 2004 KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1669-1974, 2004.
- 13) Instron Corporation, "Operating Instructions of Instron Fast Track 8800 and Materials Test Control Systems," 2002.
- 14) J. H. Lim and H. Huh, "Dynamic Material Tests of Steel Sheets for an Auto-body Using the High Speed Material Testing Machine," 2003 KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1525-1530, 2003.