중변형률 속도에서의 차체용 강판의 동적 인장실험

임지호†·허훈*·권순용**·윤치상** 박성호***

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

Ji-Ho Lim†·Hoon Huh*·Soon-Yong Kwon**·Chi-Sang Yoon**·Sung-Ho Park***

Key Words : Strain Rate Hardening(변형률 속도 경화), Intermediate Strain Rate(중변형률 속도), Dynamic Material Property(동적물성치), High Speed Material Testing Machine(고속재료 시험기), Fracture Elongation (파단 연신율)

Abstract

The dynamic behavior of sheet metals must be examined to ensure the impact characteristics of auto-body by a finite element method. An appropriate experimental method has to be developed to acquire the material properties at the intermediate strain rate which is under 500/s in the crash analysis of auto-body. In this paper, tensile tests of various different steel sheets for an auto-body were performed to obtain the dynamic material properties with respect to the strain rate which is ranged from 0.003/sec to 200/sec. A high speed material testing machine was made for tension tests at the intermediate strain rate and the dimensions of specimens that can provide the reasonable results were determined by the finite element analysis. Stress-strain curves were obtained for each steel sheet from the dynamic tensile test and used to deduce the relationship of the yield stress and the elongation to the strain rate. These results are significant not only in the crashworthiness evaluation under car crash but also in the high speed metal forming.

1. 서 론

최근 에너지 절감 필요성의 대두와 운송수단의 고속화로 인하여 차체의 경량화, 안전화가 차량설계, 생산분야의 목표가 되고 있다. 운송수단의 고속화는 차량이나 열차의 충돌 시 구조적인 안전성을 요구하게 되었으며, 특히 자동차의 경우 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 동적 특성을 고려한 충돌해석을 바탕으로 안정적인 경량 차체설계가 이루어져야 한다. 이를 위하여 자동차 차체용 강판의 정확한 동적 물성치 확보가 필수적이다.

재료의 응력과 변형률 관계를 얻기 위한 실험은 변형률 속도에 따라 여러 가지 방법이 있다. 변형률 속도 수/s 이하는 일반적인 재료시험기나 피로시험기를 사용하고 있다. 그러나 변형률 속도가 수/s 이상으로 증가하면 기존의 방법으로 정확한 동적 물성치를 얻을 수 없다. 변형률 속도가 1000/s 이상인 경우는 일차원 탄성파 이론을 이용한 홉킨슨 바 시험기로 응력과 변형률의 관계를 얻을 수 있다[1]. 차량 충돌에서 발생하는 변형률 속도 구간인 수십에서 수백/s 범위에서는 하중낙하시험법 (drop weight test), 캠플라스토미터 (cam plastometer) 등의 기계식 방법과 공압이나 유압처럼 유체를 사용하는 방법 등이 많이 연구되었으나 아직까지 시험방법이나 시험규격이 명확하게 정립

† 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
E-mail : aker@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3262 FAX : (042)869-3095
* 한국과학기술원 기계공학과
** 현대자동차
*** POSCO

되지 않은 실정이다[2,3]. 최근에는 주로 유압장치를 이용하여 많은 연구들이 수행되고 있고[4], 특히 Inston 사에서 중변형률 속도에서의 박판의 동적 물성치를 얻을수 있는 시험기를 시판중이다[5]. 그러나 아직까지 중변형률 속도에서의 동적 물성치에 대한 연구가 많이 발표되지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 17 종의 차체용 강판의 고속 인장실험을 수행하여 변형률 속도에 따른 동적 물성치 데이터베이스를 구축하였다. 중변형률 속도에서의 시편에 대한 규격이 없기 때문에 유한요소법을 사용하여 시편의 형상을 결정하여 이를 실험에 사용하였다. 동적 물성실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도, 항복 응력의 민감도, 연신율의 변화를 고찰하였다.

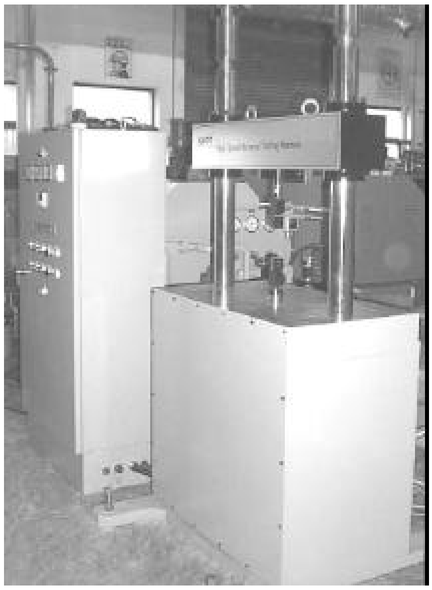
2. 중변형률 속도에서의 인장실험

2.1 고속 인장 재료시험기

본 논문에서는 수백 /sec 이하의 중변형률 속도(intermediate strain rate) 범위에서 박판의 동적 물성실험을 하기 위하여 고속 재료시험기를 제작하였다. Fig. 1 은 중변형률 속도에서의 동적 물성실험을 위하여 자체 제작한 고속 인장 재료시험기(high speed material testing machine)의 사진이다. 시험기의 가로는 1000mm, 세로는 600mm, 높이가 2300mm 의 크기이고, 크로스헤드의 높이를 220 mm 씩 3 단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최고 속도는 4000 mm/sec 이고 최대 하중은 30kN, 최대 변위는 100mm 이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300kg/cm^2 이고, 최고 유량은 240 l/min 이다. 작동유체를 압축시키기 위하여 45kW 용량의 유압모터를 2 개 사용하였고, 입력신호에 따른 작동유체의 반응속도를 빠르게 하기 위하여 5l 용량의 어큐뮬레이터(accumulator)를 설치하였다. 서보밸브는 Moog 사의 D662 밸브를 사용하였다. 시편의 변형시간이 짧기 때문에 고속 응답특성이 좋은 Kistler 사의 9051B, 압전형 로드셀을 사용하여 응력을 측정하였다. 시편의 변위는 Sentech 사의 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 사용하으며, 실험에 사용된 LVDT 의 최대변위는 100 mm 이고 고유진동수는 15 kHz 이다.

고속 인장실험 동안 시편의 한쪽 끝단이 균일한 속도로 움직여야 하지만 유압밸브의 반응속도가 아무리 빠르더라도 실린더를 순간적으로 빠른 속도로 움직이게 할 수 없다. 본 연구에서는 시편에 힘이 가해지는 동안 실린더가 일정한 속도를 유지할 수 있도록 특수한 형태의 지그를 사용하였다.

빠른 속도로 시편에 인장을 가하면 시편과 지그에 균일한 하중이 작용하지 않는다. 특히 수십 /s 이상의 변형률 속도에서는 이러한 현상이 특히 심화되어 시편과 로드셀 사이의 지그의 떨림으로 로드셀에서 측정하는 하중이 진동하는 현상이 발생한다. 이러한 하중 떨림(load ringing) 현상은 실제 시편에 작용하는 정확한 하중을 측정하지 못하게 하여 실험결과를 왜곡하고 잘못된 결과를 얻게 한다. 본 논문에서는 진동특성이 좋은 Fig. 2 와 같은 그립을 설계하여 하중 떨림 현상을 획기적으로 개선하였다.



(a)

(b)

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

Fig. 2 Upper gripping jig

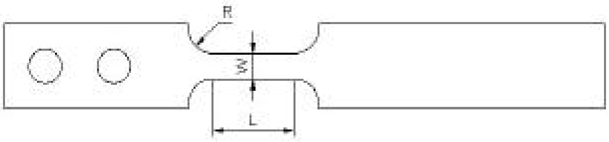


Fig. 3 Schematic diagram of a specimen.

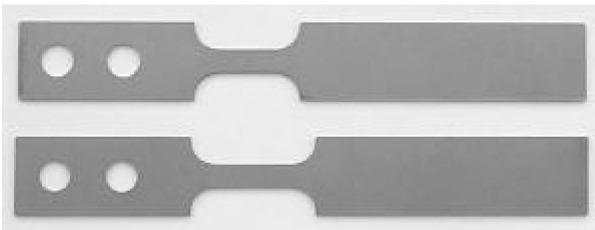


Fig. 4 Tensile specimens with the length of the gauge section of 15 mm and 20 mm.

2.2 고속 인장시편의 결정

물성 실험시 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 인장실험은 인장속도가 빠르기 때문에 스트레인게이지나 신장계를 사용하는데 어려움이 있다. 고속 카메라, 레이져 장비 등을 이용하여 균일하게 변형하는 표점부의 변위를 직접 측정할 수 있겠지만 본 연구에서는 실린더의 변위를 측정하여 간접적으로 표점부의 변위를 환산하는 방법을 채택하였다.

Table 1 Scaling factor with respect to the variation of length.

Model		Reference Strain	Strain at center	Scaling Factor
L (mm)	10	0.1	0.0876	0.876
	15	0.1	0.0908	0.908
	20	0.1	0.0928	0.928
	25	0.1	0.0942	0.942
	30	0.1	0.095	0.95

고속 인장시험에 대한 시편 규격이 아직 정해지지 않았기 때문에 합리적인 실험 오차를 가지는 시편의 규격에 대한 연구가 필요하다. 시편은 표점부에서 변형의 대부분이 발생해야 하며 곡률반 경에 의한 응력집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장시편의 형상인자는 Fig. 3 과 같이 표점부의 폭과 길이, 필렛(fillet)부의 반경이다. 표점길이가 증가할수록 측정변위의 오차가 감소하며 시편의 변형률의 분포가 균일하게 발생한다. 하지만 표점길이(L)이 증가할수록 변형률 속도가 감소하며 관성에 의하여 시편이 균일하게 변형하지 않고 구동부 쪽에 변형이 집중할 수 있다. 표점부의 폭(W)가 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하고 변형률의 분포가 균일해지나 실험상의 오차가 증가한다. 곡률반경(R)이 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하지만 응력집중이 발생하는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 고속 인장실험에서 합리적인 오차를 가지는 시편을 결정하기 위하여 유한요소법을 이용한 시편의 변형해석을 통하여 실험에 사용할 시편의 치수를 결정하였다. 시편의 양끝단에서 측정한 기준 변형률이 0.1 이라고 했을 때 시편 중앙부분의 변형률을 유한요소 해석으로 측정하고 이의 비율을 비례상수로 결정하였다. Table 1 은 0.1 의 기준변형률에 대하여 L 의 변화에 따른 비례 상수표이다. 비례상수는 대략 0.9~0.95 이고, L 이 증가할수록 비례상수가 1 에 근접한 값을 가진다. 이와 같은 실험결과로부터 표점거리 15 mm 에서 30 mm 까지 변형률 속도에 따라서 시편을 사용할 수 있고, 표점거리에 해당하는 비례상수를 데이터 처리에 사용하면 된다. 본 논문에서는 Fig. 4 의 15mm 와 20mm 의 표점거리를 갖는 시편을 사용하였다.

Table 2 Experimental conditions.

Machine	Strain Rate [/s]	Length of gauge section [mm]	Quantity
Static UTM	0.003	20	3
High Speed Material Testing Machines	0.1	20	3
	0.5	20	3
	1	20	3
	2	20	3
	5	20	3
	10	20	3
	20	20	3
	50	20	3
	100	20	3
	200	15	3

3. 차체용 강판의 동적 물성실험

3.1 3. 차체용 강판의 고속 인장실험

자체에 사용되는 17 종의 강판에 대하여 중변형률 속도에서의 동적 물성실험을 수행하였다. 본 논문에서는 편의상 SPCC, SGACD, SPRC35R, SPRC40R 의 결과만 설명한다. Table 2 에 나타낸 바와 같이 0.003 /s 의 변형률 속도에서는 정적 재료시험기를 사용하였고 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 /s 일때의 인장실험을 수행하였다. 각 변형률 속도마다 3 회 반복하였고 200 /s 을 제외한 모든 변형률 속도에서 표점거리 20 mm 의 시편을 사용하였다.

수십 /s 이상의 변형률 속도의 경우에 시편과 지그에 균일한 하중이 작용하지 않기 때문에 지그가 진동하여 로드셀에서 측정하는 하중이 진동하는 하중 떨림 현상이 발생한다. 본 연구에서 하중 떨림 현상을 획기적으로 개선한 지그를 사용하였음에도 불구하고 100 /s 이상에서 여전히 하중이 진동하는 결과를 보인다.

실제 시편에 작용하는 하중이 진동하는 것이 아니기 때문에, 유연화 과정을 통한 응력–변형률 선도를 구해야 한다. 본 논문에서는 설정한 주파수보다 높은 퓨리에 성분을 제거하는 FFT (Fast Fourier Transform) 필터를 이용한 유연화 방법을 사용하였다. Fig. 5 에 이러한 방법으로 유연화 과정을 거친 SPRC35R 의 하중 선도를 표시하였다.

Fig. 6 은 SPCC 와 SGACD 의 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도이다. 100 /s 과 200 /s 에서 하중을 유연화시켰음에도 여전히 응력이 진동하는 것을 응력이 진동하는 것을 볼 수 있다. 변형률 속도가 증가할수록 응력–변형률 선도의 기울기가 감소하는데 이것은 응력의 변형률 속도 민감도가 변형률이 증가할수록 감소하는 것을 의미한다. SGACD 처럼 강도가 약한 재료가 강도가 높은 재료보다 이러한 현상이 더 크게 나타난다.

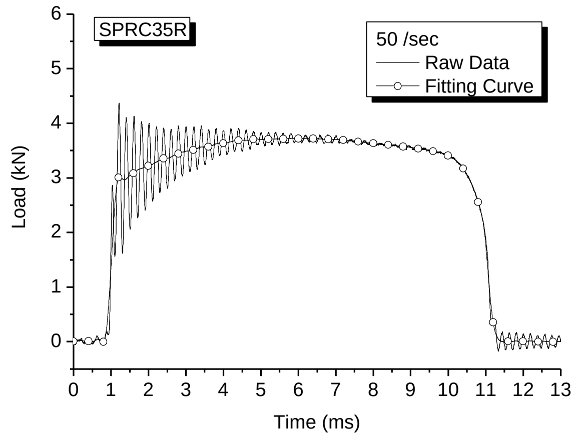
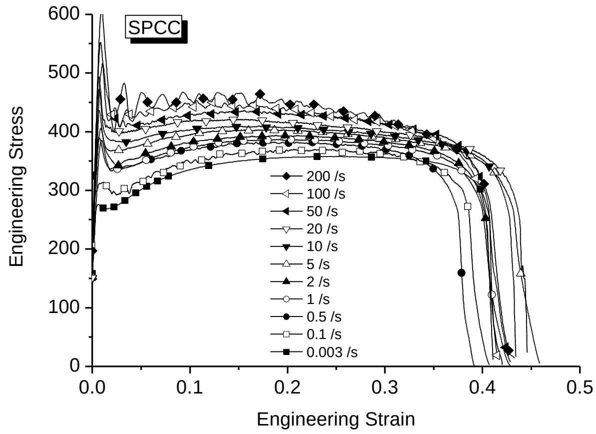
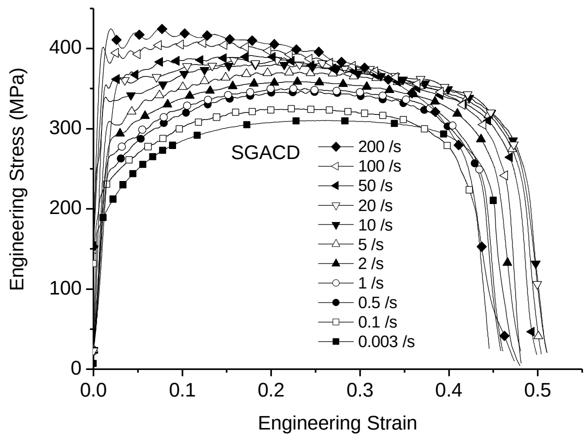


Fig. 5 Stress–strain curve and curve fitting



(a)



(b)

Fig. 6 Stress–strain curves at various strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD.

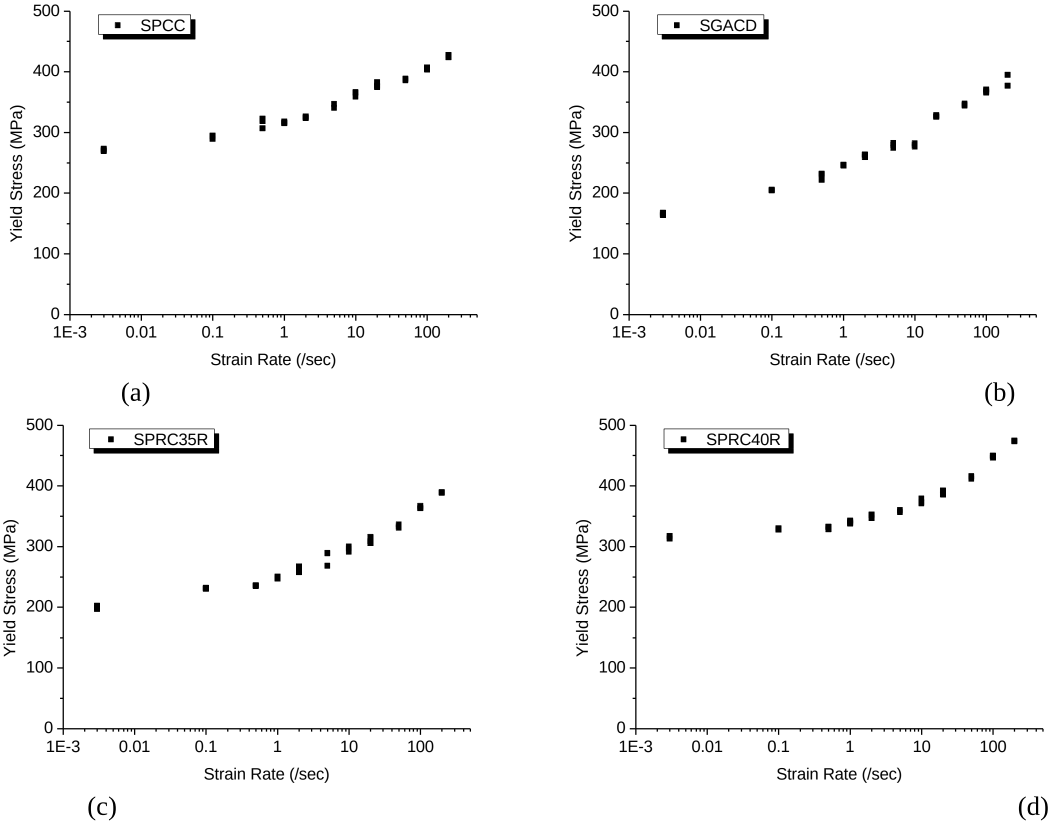


Fig. 7 Yield stress according to strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD; (c) SPRC35R; (d) SPRC40R.

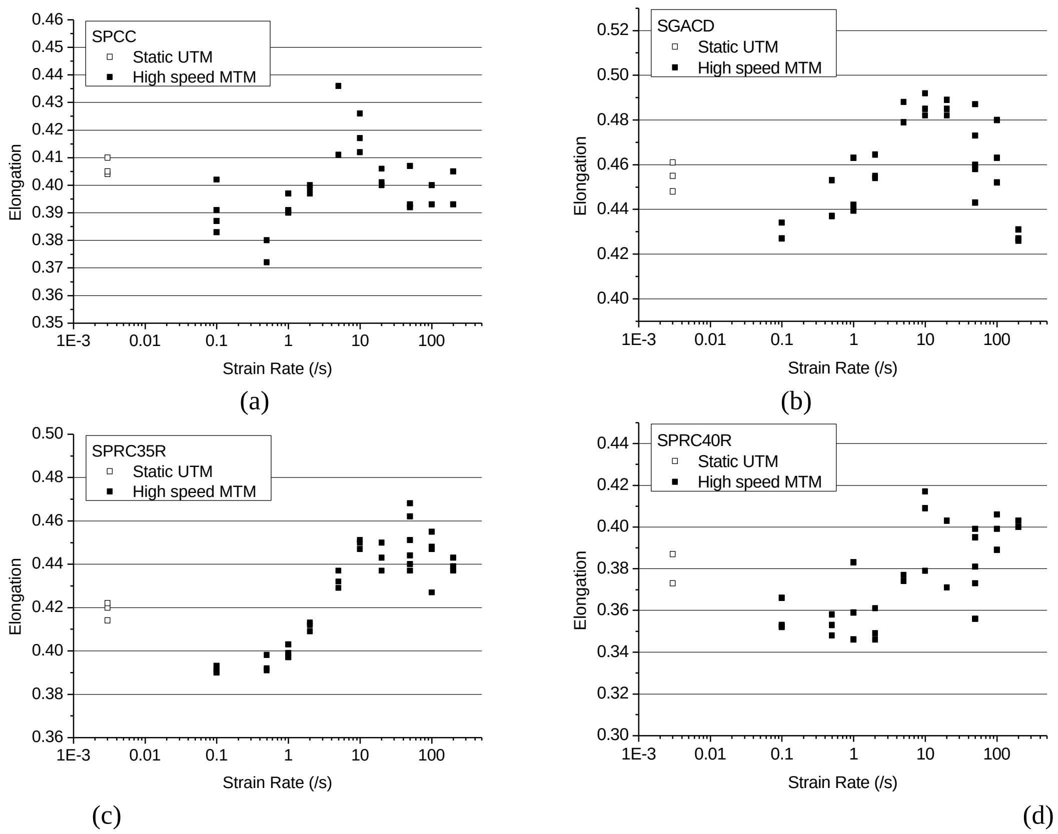


Fig. 8 Fracture elongation according to strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD; (c) SPRC35R; (d) SPRC40R.

Fig. 7 은 변형률 속도 증가에 따는 항복응력의 변화를 나타낸 그래프이다. SGACD 같이 낮은 강도의 재료는 항복응력이 정적실험에 비하여 두 배 이상 증가하지만 SPRC40R 과 같은 재료는 약 1.5 배정도 증가한다. 일반적으로 낮은 강도의 재료가 변형률 속도에 더 민감한 결과를 보인다. 그러나 Fig. 6 의 응력-변형률 선도 그래프에서 알 수 있듯이 낮은 강도의 재료는 변형률이 증가함에 따라서 변형률 속도에 대한 민감도가 크게 감소하고 그 경향이 재료마다 다르기 때문에 재료의 정확한 강도 예측을 위하여는 본 논문에서 수행한 것과 같이 각 재료마다 변형률 속도에 대한 동적 물성실험을 수행하여야 한다.

Fig. 8 은 변형률 속도에 따른 파단 연신율의 변화 그래프이다. 일반적으로 강도가 강한 재료가 연신율이 작기 때문에 변형률 속도 경화에 의하여 변형률 속도가 증가하면 파단 연신율이 감소할 것이라고 예측되어왔다. 그러나 실험결과는 이러한 이제까지의 예상과 반대되는 결과를 보인다. 파단 연신율은 변형률 속도가 0.1~0.5 /s 까지는 감소하다가 변형률 속도가 10~20 /s 일때까지 오히려 증가하며 정점을 이룬 후에 다시 감소하는 S 자 형태를 나타낸다. 단순 인장 시에 넥킹(necking)이 발생하면 그 부분에서 집중적인 변형이 발생하는데, 고속 인장 실험 시에 넥킹이 발생하는 부분에서의 국부적인 높은 변형률 속도 경화가 넥킹의 진행을 억제하여 주위로 전파시키기 때문에 오히려 연신율이 증가하게 된다.

이 결과는 차량 충돌과 같은 문제에서 차체부재의 파단예측이나 고속 성형에서의 부재의 성형성 같은 문제에서 큰 의미가 있다. 기존의 예측과 반대로 부재가 빠르게 변형하면 일정 변형률 속도 구간에서는 변형률 속도 경화에 의하여 파단 연신율이 오히려 증가하기 때문에 적절한 변형속도를 유지시킨다면 충돌안전성이나 성형성이 향상된다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 17 종의 차체용 강판의 고속 인장실험을 수행하여 변형률 속도에 따른 동적 물성치 데이터베이스를 구축하였다. 중변형률 속도에서의 시편에 대한 규격이 없기 때문에 유한요소법을 사용하여 표점부의 폭이 6 mm 이고 표점부의 길이가 각각 15 mm 와 20 mm 인 시편을 결정하고 이를 실험에 사용하였다. 정적시험기와 자체제작한 고속 인장 재료시험기를 이용하여 0.003, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 의 11 가지 변형률 속도에서의 차체용 강판에 대한 인장실험을 수행하고, 100/s 이상에서 발생하는 응력 진동현상을 FFT 필터를 이용하여 유연화 하였다.

동적 물성실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도, 항복 응력의 민감도, 파단 연신율에 대한 데이터베이스를 결과를 보였다.

후 기

본 논문은 현대자동차 주식회사의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) H. Huh, W. J. Kang, and S. S. Han, 2002, “A Tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metals,” *Experimental Mechanics*, Vol. 42, pp. 8-17.

(2) Meyers, M. A., 1994, Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, New York.

(3) Mechanical Testing, ASM Handbook, ASM Intl., Metals Park, Ohio, Vol. 8

(4) K. Miura, S. Takagi, T. Obara, and S. Tanimura, 1998, “High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts,” SAE, 980952.

(5) Instron Corporation, 2002, Operating Instructions of Instron FastTrack 8800 and Materials Test Control Systems.