고속 재료시험기를 사용한 차체용 강판의 동적 물성실험

Dynamic Material Tests of Steel Sheets for an Auto-body Using the High Speed Material Testing Machine

임 지 호*, 허 훈*
Jiho Lim*, Hoon Huh*

ABSTRACT

The dynamic behavior of sheet metals must be examined to ensure the impact characteristics of auto-body by a finite element method. Since the strain-rate in the crash analysis of auto-body is under 500 /s, an appropriate experimental method to acquire the material properties at the corresponding strain-rate has to be developed. In this study, a high speed material testing machine was manufactured for tension tests of sheet metal under 500/s. Dimensions of a specimen for sheet metal need to be determined for tension test of sheet metal at intermediate strain rate because there is not a standard tension specimen for the dynamic test. Numerical simulations are carried out to determine dimensions and the shape of the specimen. Tensile tests of steel sheets in auto-body are performed at several kinds of strain rates. Fast Fourier transform smoothing method is used to fit the oscillation of load caused by the ringing phenomenon of a jig.

주요기술용어 : High speed material testing machine(고속 재료시험기), Strain rate hardening(변형률 속도 경화), intermediate strain rate (중변형률 속도), Dynamic material property(동적물성치), Crashworthiness(충돌안전성)

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 연비향상은 엔진출력의 향상과 차체 형상 변경에 따른 공기저항의 감소 및 소재개발에 따른 차량 경량화에 의하여 가능하다. 최근의 자동차기술은 차량의 경량화를 위하여 고장력 강판 등의 소재 개발과 하이드로포밍과 Tailor 용접 강판 등의 신 성형기법 등을 이용한 부재성형 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 자동차 업계의 경우 경량화에 상반되게 차량의 안전도에 관한 법규가 강화되고 있으며, 충돌 법규보다 더 강화된 상품성 관련시험을 실시하여 차량의 충돌성능을 비교, 발표하고 있다.

차량의 경량화는 충돌 안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 하기 때문에 차체 충돌 시 차

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

체의 고속 변형에 의한 재료의 동적 특성을 고려한 충돌해석을 바탕으로 안정적인 경량 차체 설계가 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 다양한 방법으로 응력과 변형률 관계를 얻을 수 있다. 변형률 속도가 1000/s 이상일 때는 홉킨슨바 시험기로 응력과 변형률의 관계를 구한다. 차량 충돌에서 발생하는 변형률 속도 구간인 수십에서 수백/s 범위는 기계식이나 유압식으로 시편을 고속으로 변형시키는 방법을 사용하지만 아직까지 시험방법이나 시험규격이 명확하게 정립되지 않은 실정이다.

본 논문에서는 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 차체용 강판의 고속 인장실험을 수행하여 변형률 속도에 의한 동적 물성변화를 고찰한다. 중변형률 속도에서의 시편에 대한 규격이 없기 때문에 유한요소법을 사용하여 시편의 형상을 결정하고 이를 실험에 사용한다.

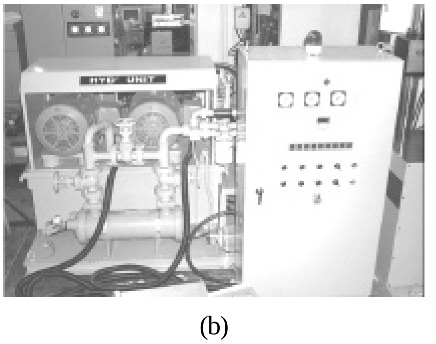
2. 중변형률 속도의 고속 인장시험 방법

2.1 고속 재료시험기

본 연구에서 1000 /s 이하의 중변형률 속도 (intermediate strain rate) 범위에서 박판의 동적 물성실험을 하기 위하여 고속 재료시험기를 제작하였다. Fig. 1 은 자체 제작한 고속 재료시험기의 사진이다. 시험기의 크기는 1000mm×600mm×2300 mm 이고, 크로스헤드의 높이를 220 mm 씩 3 단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최고 속도는 5000 mm/s 이고 최대 하중은 30kN, 최대 변위는 100mm 이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300kg/cm^2 이고, 최고 유량은 200 l/min 이다. 작동유체를 압축시키기 위하여 45kW 용량의 유압모터를 2 개 사용하였다. 입력신호에 따른 작동유체의 반응속도를 빠르게 하기 위하여 5l 의 어큐뮬레이터(accumulator)를 설치하였다. 파형발생기(Function generator)에서 원하는 입력신호를 서보제어기(servo controller)에 보내고, 서보제어기는 변위계에서 측정된 변위와 입력신호를 비교하여 유압밸브에 feedback 을 보내게 된다.

실린더가 빠르게 움직이기 때문에 고속 응답특성이 좋은 Kistler 의 9341B 의 압전형 로드셀을 사용하였다. 로드셀의 최대하중은 7000 lb 이고 고유진동수는 40 kHz 이다. 시편의 변위를 측정하기 위하여 Sentech 사의 LDT(linear displacement transducer)를 사용하였다. 이 장치는 고리 모양의 자석이 유도막대를 따라 이동할 때 생기는 자기장의 변화에 따른 전압변화를 측정함으로써 자석과 연결된 물체의 변위를 알 수 있도록 하는 장치이다. 실험에 사용된 LDT 의 최대변위는 100 mm 이고 고유진동수는 15 kHz 이다.

(a)



(b)

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

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. Fig. 2 는 상부지그와 로드셀의 사진이다.

Fig. 3 은 1 m/s 와 4 m/s 의 경우에 대하여 입력신호에 대한 실린더의 변위를 나타낸 그래프이다. 입력속도와 거의 같은 속도로 실린더가 이동함을 알 수 있다. 입력신호에 비해서 20ms 정도 실린더가 느리가 작동하는데, 이는 서보밸브의 응답속도 때문에 발생하는 현상이다.

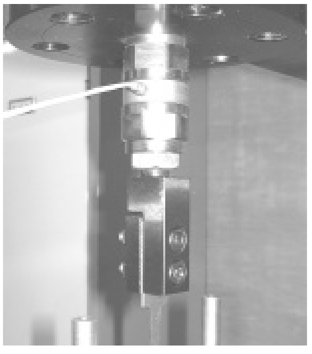
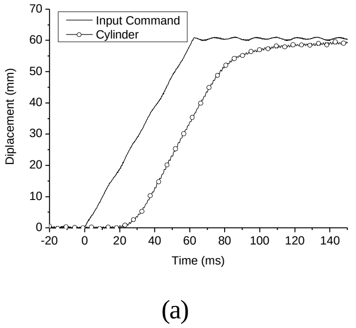
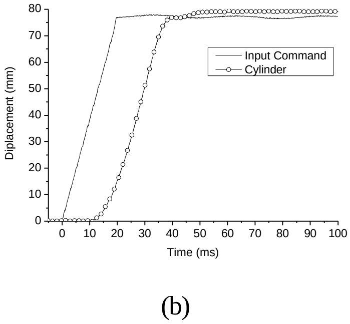


Fig. 2 Load cell and an upper jig



(a)



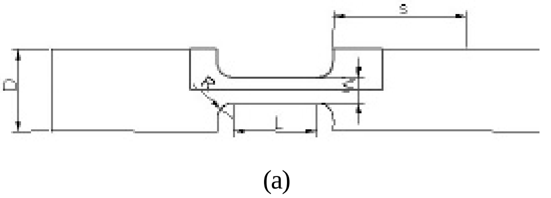
(b)

Fig. 3 Load-displacement curve: (a) 1 m/s; (b) 4 m/s

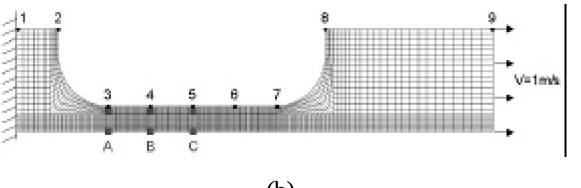
2.2 고속 인장시편의 결정

고속 인장시험은 시편 규격이 아직 정해지지 않았기 때문에 시편의 규격에 대한 연구가 필요하다. 시편은 표점부에서 변형의 대부분이 발생해야 하며 곡률반경에 의한 응력집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장시편의 형상인자는 Fig. 4 와 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.

유한요소 해석을 위하여 Fig. 4 와 같이 시편의 표점부와 필렛부 및 그립부에 대하여 1/2 대칭으로 모델링 하였으며, 그립부에 1 m/s 의 속도 경계조건을 부가하였다. 각 시편의 표점길이에 따른 영향을 알아보기 위하여 폭은 6mm 필렛의 반경은 6mm, 그립이 시편에 물리기 전까지의 이동거리은 20mm, 그립부의 폭은 20mm 를 기준모델로 하였다.



(a)



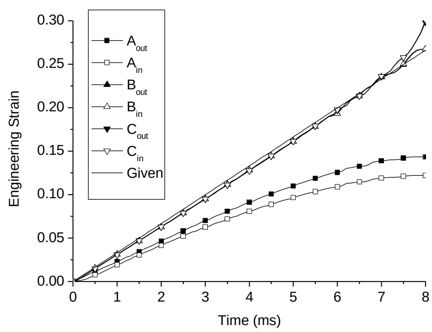
(b)

Fig. 4 Schematic description of a specimen for finite element analysis: (a) modeling part; (b) FE model and boundary condition for analysis

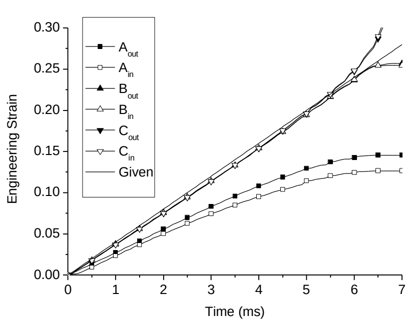
물성 실험시 시편의 변형률을 측정하는 가장 이상적인 방법은 측정하고자 하는 부분의 변위를 직접 측정하는 것이다. 정적 실험 시 스트레인게이지나 extensometer 를 사용하여 균일한 변형을 하는 표점부의 변위를 직접 측정하지만 고속 인장실험은 인장속도가 빠르기 때문에 스트레인게이지나 extensometer 를 사용하는데 어려움이 있다. 고속카메라, 레이져 장비 등을 이용하여 균일하게 변형하는 표점부의 변위를 직접 측정할 수 있겠지만 본 연구에서는 실린더의 변위를 측정하여 간접적으로 표점부의 변위를 환산하는 방법을 채택하였다.

Fig. 5 는 기준 모델에서 표점부의 길이에 따른 요소들의 시간에 대한 변형률 그래프이다. Fig. 4(b)에서 정의된 것과 같이 A 는 필렛부의 요소, C 는 표점부 중앙의 요소, B 는 A 와 C 중간의

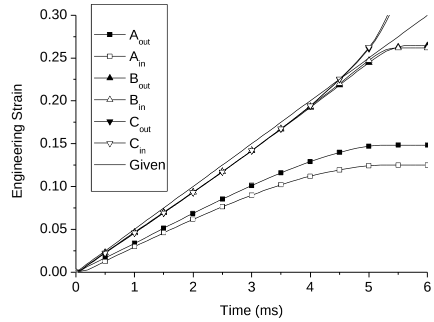
Fig. 5 Contour of the effective plastic strain of a specimen with the gauge length of 30 mm at strain of 0.2



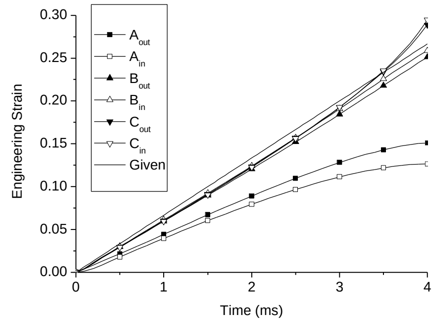
(a)



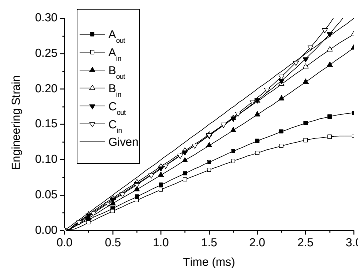
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6 Effective plastic strain curve of specimens with W 6mm with variation of length, L: (a) L 30mm; (b) L 25mm; (c) L 20mm; (d) L 15mm; (e) L 10mm

Table 1 Scaling Factor with respect to the variation of length

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

요소이다. 아래첨자 out 은 시편의 가장자리 요소를 나타내고, in 은 중심의 요소를 표시한다. A 지점의 응력-변형률 선도는 기준 변형률에 비하여 L 에 관계없이 상당히 작고 비선형의 결과를 보인다. 이는 A_{out} 의 필렛부에서 변형이 집중되어 생기기 때문이다. L 의 값이 작아질수록 기준 변형률에 대한 오차가 증가하는데 이는 표점부 사이의 변형에 대한 필렛부의 변형의 상대 비율이 증가하기 때문이다. L 이 10mm 인 경우를 제외하고 15~30 mm 인 경우에 B_{in}, B_{out}, C_{in}, C_{out} 의 변형률이 거의 같은 결과를 보이므로 그 사이에서는 균일한 변형률과 하중이 작용함을 알 수 있다.

변형률의 기울기가 거의 선형이므로 실린더의 이동거리를 측정한 기준 변위에 대하여 실제 시편의 변형률에 대한 선형 비례상수를 구할 수 있다. 시편의 양 끝단에서 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 30mm 에서 15mm 까지 변형률 속도에 따라서 시편을 사용할 수 있고, 표점거리에 해당하는 비례상수를 데이터 처리에 사용하면 된다. 본 논문에서는 30mm 의 표점거리를 갖는 시편을 사용하였다.

3. 차체용 강판의 고속 인장실험

자동차에 사용되는 강판인 SPCEN, SPRC35R, SPRC40R, SPFC590 의 변형률 속도에 의한 동적 물성 실험을 수행하였다. 0.003 /s 의 변형률 속도에서는 정적 재료시험기를 사용하였다. 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 /s 일때의 인장실험을 수행하였다. 1500/s 과 2500/s 에 대해서는 인장형 홉킨슨바 시험기를 사용하였다.

변형률 속도가 대략 50/s 의 경우에는 로드셀과 시편 사이의 지그가 급격한 변형으로 인하여 진동하게 된다. 따라서 로드셀에서 시편에 작용하는 하중 외에 지그의 진동에 의한 하중의 변화도 같이 측정한다. 이런 현상을 하중의 진동(ringing)현상이라고 부른다. 진동 현상은 시편과 로드셀 사이에 있는 지그의 고유진동수와 관계있고, 그 정도는 시험기마다 다르다. Fig. 7 은 SPRC35R 의 50/s 에서의 하중 선도이다. 하중의 진동수는 대략 4800 Hz 정도이다.

시편이 변형하면서 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 Transforms) 필터를 이용한 유연화 방법을 사용하였다. Fig. 7 에 이러한 방법으로 유연화 과정을 거친 SPRC35R 의 응력-변형률 선도를 표시하였다.

Fig. 8 은 SPRC35R 의 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도이다. 변형률 속도가 증가할수록 강도가 증가하고 연신율이 증가하고 있다. 100/s 이상은 하중의 진동이 너무 크기 때문에 FFT

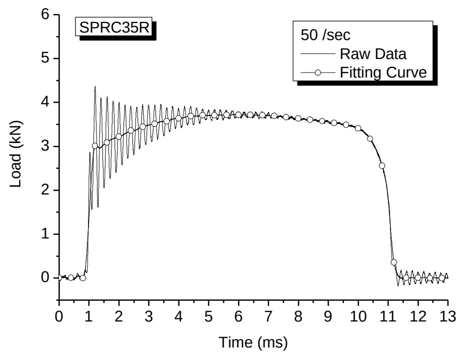


Fig. 7 Stress–strain curve and curve fitting

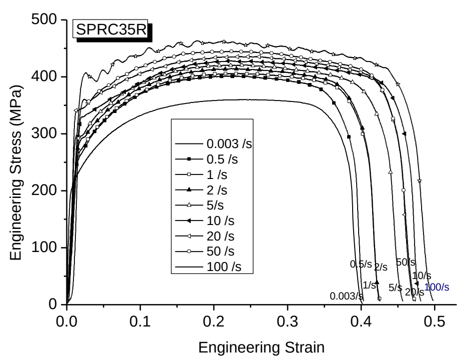
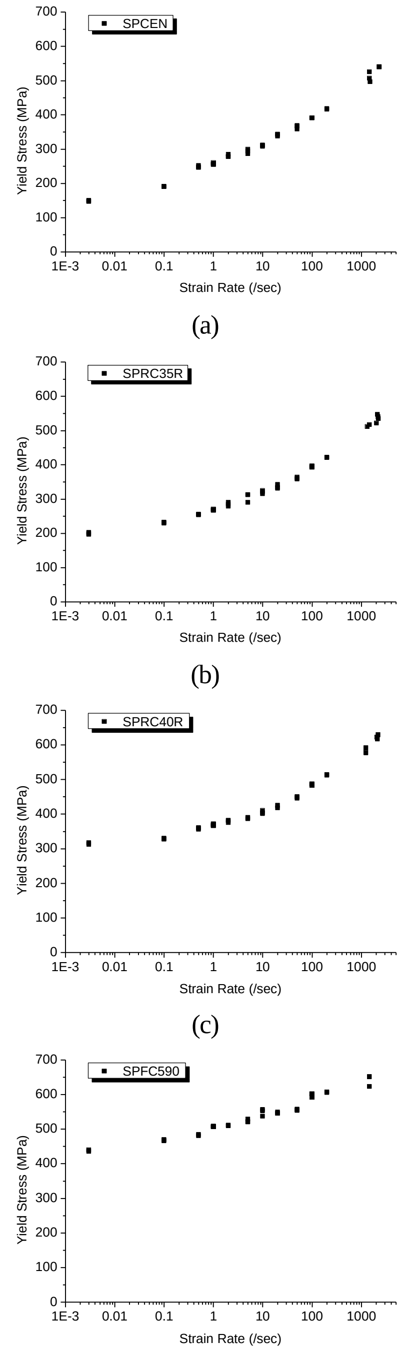


Fig. 8 Stress–strain curves for strain rate

유연화 방법으로 완전히 매끄러운 응력선도를 구할 수가 없기 때문에 유연화된 하중선도가 진동한다. 이와 같은 하중 진동현상을 제거하기 위하여 지그의 고유진동수를 증가시키거나 시편에 스트레인게이지를 붙여서 하중을 측정하는 방법으로 연구가 진행되고 있다. Fig. 9 는 변형률 속도의 로그 비율에 대한 항복응력의 그래프이다. 모든 재료 모두 변형률 속도가 증가할수록 항복응력이 증가하는 경향을 보이고, 강도가 약한 재료일수록 변형률 속도에 대한 민감도가 큰 것을 알 수 있다.



(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 9 Yield stress for strain rate: (a) SPCEN; (b) SPRC35R; (c) SPRC40R; (d) SPFC590

4. 결론

충돌시 차체의 변형률 속도인 수백 /s 이하 구간에서의 동적 물성 데이터를 확보하기 위하여 고속 재료시험기를 제작하였다. 고속 인장실험의 시편 규격이 없기 때문에 유한요소해석을 사용하여 시편의 형상인자를 파악하고 표점부의 길이가 30mm, 필렛부의 곡률 반경과 표점부의 폭이 6mm 인 시편을 표준시편으로 결정하였다.

정적 재료시험기, 고속 재료시험기, 홉킨슨 바 시험기를 이용하여 0.003, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 1500, 2500/s 의 11 가지 변형률 속도에 대하여 네가지 차체용 강판에 대한 인장실험을 수행하였다. 50/s 이상에서 응력 진동현상이 발생하여 이를 FFT 필터를 이용한 유연화 방법을 사용하여 응력–변형률 선도를 얻었다.

본 논문은 고속 재료시험기를 사용함으로써 실제 차체 충돌 시의 변형률 속도 전체에 대한 동적 물성 데이터를 확보한 것에 의의가 있다.

참 고 문 헌

1) Huh, H., Kang, W. J. and Han, S. S. “A Tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metals,” Experimental Mechanics, Vol. 42, No. 1, pp. 8-17, 2002.

2) H. Huh, J. H. Lim, J. H. Song, K. S. Lee, Y. W. Lee and S. S. Han, “Crashworthness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60Trip Steel for Side Members,” International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 149-156 2003.

3) K. Miura, S. Takagi, O. Furukimi, T. Obara and S. Tanimura, “ Dynamic Deformation Behavior of Steel Sheet for Automobile,” SAE Paper No.960019, 1996.