

차체용 부재의 동적 인장 특성 및 충돌 특성 평가를 위한 시험장비 개발

허 훈[#] · 김석봉¹

Testing Equipments for the Evaluation of Dynamic Tensile characteristics and the Crashworthiness of Auto-body Members

H. Huh, S. B. Kim

Abstract

This paper deals with introduction of testing equipments for the evaluation of dynamic tensile characteristics of auto-body steel sheets and the crashworthiness of auto-body members. The servo-hydraulic high speed material testing machine was developed for tensile tests at the intermediate strain rate to obtain the tensile material properties at the strain rate under 500/sec. The split Hopkinson bar apparatus using the elastic wave was developed for dynamic material characteristics at the high strain rate ranged from 1,000 to 10,000/sec. The servo-hydraulic high speed crash testing machine is the equipment for the evaluation of the collapse load and crashworthiness of auto-body members. High speed carrying truck crashes to specimen with the maximum velocity of 17 m/sec.

Key Words: Dynamic Tensile Characteristics, Strain Rate, Auto-body Members, High Speed Material Testing Machine, Hopkinson Bar, High Speed Crash Testing Machine

1. 서 론

최근 운송수단의 고속화는 차량의 충돌 시 구조적인 안전성을 요구하게 되었으며, 특히 자동차의 경우 배기가스 규제에 대응 및 연비향상을 목적으로 하는 차량 경량화가 필수적으로 대두되고 있다. 차량의 경량화는 구조 및 진동 특성뿐만 아니라 충돌안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 자동차 충돌 시 재료가 빠르게 변형하는데 일반적으로 재료는 변형률 속도(strain rate)가 증가함에 따라 유동응력이 증가하여 강도가 커진다. 특히 철은 변형률 속도에 따라서 강도의 변화가 다른 재료에 비하여 더 크기 때문에 차체용 강판의 정확한 동적 물성의 확보는 필수적이며 차체 충돌 시 동적 특성을 고려한 충돌해석을 바탕으로 안정적인 경량 차체설계가 이루어져야 한다.

차체용 박판 금속 및 충격 흡수부재의 동적 거동은 정적 거동과 큰 차이를 보이므로 차량의 정확한 충돌 해석을 위해서 차체 구조용 박판의 동적 물성을 확보하는 것이 중요하다. 차체용 에너지 흡수 부재의 충돌특성 및 붕괴형상은 동적 물성을 적용한 충돌해석으로 예측되며 부재의 실제 충돌시험과의 비교를 통하여 부재의 충돌성능이 정확하게 평가될 수 있다.

본 논문에서는 실제 차량 충돌 시 발생하는 수~수백/sec의 중변형률 속도에서의 동적 물성시험 방법을 확립하기 위하여 제작된 고속 재료시험기를 소개하며 수천/sec 이상의 고변형률 속도에서의 재료의 물성특성을 평가하기 위한 압축 및 인장형 홉킨슨바(Hopkinson Bar) 시험기를 소개한다. 또한 충돌 시 차체용 에너지 흡수 부재의 충돌 거동을 파악하기 위한 고속 충돌시험기를 소개한다.

1. KAIST 기계항공시스템학부

교신저자: KAIST 기계항공시스템학부, hhuh@kaist.ac.kr

2. 고속 재료시험기(High Speed Material Testing Machine)

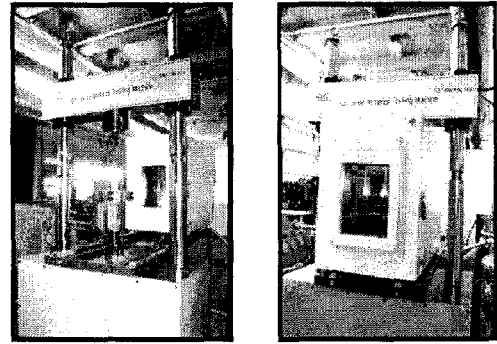
2.1 고속 재료시험기

수백/sec 이하의 중변형률 속도 범위에서 박판의 동적 물성시험을 수행하기 위하여 유압식 고속 재료시험기를 제작하였다. Fig. 1는 자체 제작한 고속 재료시험기의 사진이다. 시험기의 하중프레임은 가로 1000mm, 세로 600mm, 높이 2300mm의 크기이고, 크로스헤드의 높이를 220mm 씩 3단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최고 속도는 7800 mm/sec이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 300 mm이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300 kg/cm² 이고 작동 유체를 압축시키기 위하여 45 kW 용량의 유압모터를 2개 사용하며 Moog사의 D792 서보밸브로 유량을 제어한다. 동적 물성시험은 수 msec 이내에서 끝나기 때문에 동적 특성이 좋은 로드셀을 사용하여야 한다. 이를 위하여 고속응답 특성이 좋은 Kistler사의 9051A 압전형 로드셀이 사용되었다. 변위는 Sentech사의 LDT를 사용하여 측정된다. 다양한 온도 범위에서 동적시험을 수행하기 위하여 챔버가 장착되었으며 온도 제어 범위는 -50℃~350℃ 이다.

동적 물성시험 시 시편을 순간적으로 인장시키므로 시편이 변형하는데 작용하는 하중 외에 힘의 불균형으로 인한 시편과 지그의 진동까지 로드셀에서 측정되며 이를 하중 진동 현상이라 한다. 이는 시편에 작용하는 정확한 하중을 측정하지 못하게 하여 로드셀에서 측정되는 하중값을 왜곡시켜 정확도를 떨어뜨린다. 지그의 고유진동수를 증가시키면 하중 진동을 개선할 수 있으며 이를 위하여 지그의 질량을 줄이고 강성을 증가시켜야 한다. 로드셀과 지그 사이에 위치하는 부분을 최소화하고 하중을 지지하지 않는 부분을 제거하여 질량을 줄였으며 단면을 증가하고 길이를 감소하여 지그의 강성을 증가시켰다. 제작된 상부지그 및 강판의 하중선도는 Fig. 2와 같으며 13,000Hz의 높은 고유진동수로 하중진동이 크게 저감되었음을 알 수 있다.

2.2 동적 인장시편 결정

중변형률 속도범위에서 인장시험을 수행하기 위해서는 시험장치에 적합한 시편의 결정이 필요하게 되며 이를 위하여 여러 형상인자를 고려하여 유한요소해석에 의해 결정된 시편을 사용하였



(a) w/o chamber (b) w/ chamber

Fig. 1 High speed material testing machine with an environmental chamber

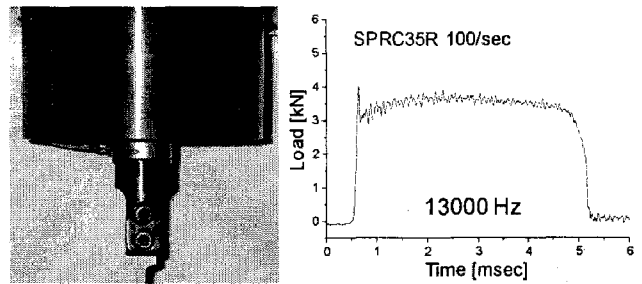


Fig. 2 Upper gripping jig of HSMTM and load curves from tensile tests of SPRC35R



Fig. 3 Specimen for the intermediate tensile test

다[1]. 시편은 변형의 대부분이 표점부에서 이루어져야 하며 곡률반경에 의한 응력집중 없이 변형률이 균일하여야 한다. 박판 인장시편의 형상인자는 편평부의 길이, 폭, 필렛부의 반경이다. 편평부 길이가 증가할수록 측정변위의 오차가 감소하며 시편의 변형률의 분포가 균일하게 발생하나 관성에 의하여 시편이 균일하게 변형하지 않고 구동부 쪽에 변형이 집중할 수 있다. 시편의 폭이 작으면 시험 오차가 발생할 가능성이 커지며 곡률반경이 작아지면 표점부에 비하여 필렛부의 변형이 상대적으로 감소하지만 필렛부에서 응력이 집중되는 단점이 있다. 이상과 같은 형상인자를 고려하여 유한요소해석 및 인장시험으로 결정된 박판형 인장 시편은 편평부길이 30 mm, 폭 및 필렛부의 반경은 6 mm 인 Fig. 3과 같다. 지그가 일정한 속도에 이른 후에 시편을 고정하므로 시편의 그립부 길이가 일정거리만큼 증가하였으며 상부지그 고정 방식에 의하여 시편에 두 개의 구멍이 필요하다.

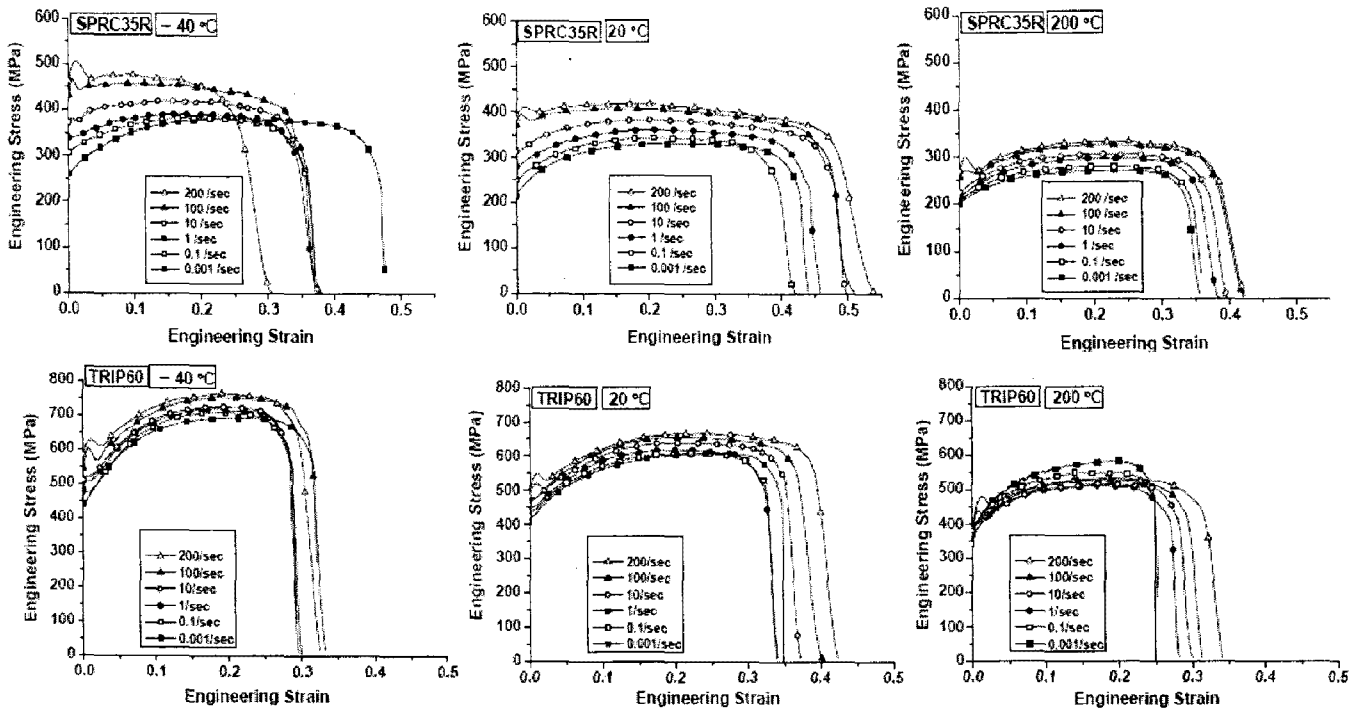


Fig. 4 Engineering stress-strain curves of SPRC35R and TRIP60 with the variation of strain rate and temperature

2.3 재료의 동적 인장특성 평가

고속 재료시험기를 이용한 동적 인장시험으로부터 응력-변형률 선도, 변형률 변화에 따른 변형률 속도 민감도, 물성 구성방정식의 계수, 파단 연신율 등의 데이터베이스를 구축할 수 있다. Fig. 4는 다양한 온도 및 변형률 속도에 대한 차체용 강관의 공칭응력-변형률 선도이다. 온도가 증가할수록 유동응력이 감소하며 각 온도에서 변형률 속도가 증가할수록 유동응력이 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 상대적으로 고강도인 TRIP60의 유동응력이 SPRC35R에 비하여 변형률 속도에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3. 홉킨슨 바(Hopkinson Bar) 시험기

홉킨슨 바 시험기는 고변형률 속도에서 거동

을 연구하는데 가장 많이 쓰이는 실험장치로 대략 1,000~10,000/sec 변형률 속도에서 재료의 동적 물성을 얻을 수 있다. 홉킨슨 바 시험기는 Kolsky[2]의 일차원 탄성파이론에 따라서 입력봉에서 측정된 탄성 입력파와 반사파 및 출력봉에서 측정된 투과파의 크기에 의하여 고변형률 속도에서 비교적 정확한 응력 및 변형률을 얻을 수 있도록 고안된 장치이다. 크게 입력봉, 출력봉, 충격봉으로 구성되며 충격봉이 입력봉에 충격을 가하는 방향에 따라서 압축형과 인장형으로 구분된다. 충격봉, 입력봉, 출력봉의 단면적은 모두 같으며 입력봉과 출력봉의 직경은 20 mm이다. Fig. 5(a)와 같이 입력봉에서 측정된 탄성 입력파와 반사파 그리고 출력봉에서 측정된 투과파로 응력 및 변형률을 얻을 수 있다. Fig. 5(b), (c)는 압축형과 인장형 홉킨슨 바 시험기이며 압축형 시험기

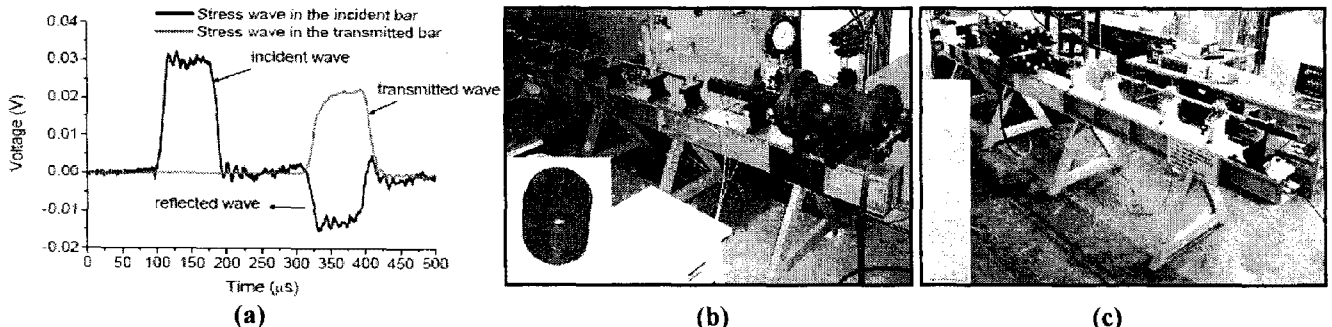


Fig. 5 (a) Stress waves in the incident and transmitted bar from strain rate of 1000/sec; (b) split Hopkinson pressure bar; (c) tension split Hopkinson bar

는 원통형 시편을 시험할 수 있고, 인장형 시험기는 판상형 시편의 물성시험을 수행할 수 있다.

4. 고속 충돌시험기(High Speed Crash Testing Machine)

4.1 고속 충돌시험기

고속 충돌시험기는 에너지 흡수부재의 변형모드 및 에너지흡수능을 평가하기 위한 시험기로 Fig. 6과 같이 전장 10,000 mm, 전폭 1,700 mm의 크기를 가진다. Moog사의 D665 서보밸브와 2쌍의 201 및 401 용량의 축압기(accumulator)를 이용하여 1000 mm 길이의 피스톤을 발사함으로써 대차가 고속 전진하게 된다. 250kg의 대차가 최대 17m/sec의 속도로 발사되어 충돌에너지를 부재에 부과할 수 있으며 시험기 후방의 댐퍼에서 부재의 최종 붕괴 후의 잉여 에너지를 흡수한다. 시편이 장착되는 지그에는 Kistler사의 압전형 로드셀인 9071A가 4개가 장착되어 최대 600 kN의 하중을 측정할 수 있다. 로드셀은 볼트를 이용하여 초기에 약 600kN 이상으로 압축되어 있으므로 부재와 대차의 충돌 시 압축하중이 아닌 인장하중이 로드셀에 가해진다. 따라서 고속충돌로 인한 로드셀의 파손이 발생하지 않으며 각 로드셀 측정값의 평균값을 사용하여 충돌하중을 측정한다. 변위와 속도는 3000 mm 길이의 변위계를 이용하여 대차의 움직임을 감지하여 측정한다.

4.2 부재의 충돌특성 평가

고속 충돌시험기를 이용하여 차체용 부재의 충돌 특성을 평가하였다. Fig. 7, 8은 차량의 저속 충돌 시에 범퍼와 함께 대부분의 에너지를 흡수하는 크래쉬 박스의 최종 붕괴형상 및 측정된 하중-변위 선도를 보여준다. 250 kg의 대차를 8 m/sec의 속도로 충돌시켜 얻은 시험결과는 유한요소해석을 이용한 결과와 유사한 최종 붕괴형상 및 하중 선도를 보인다. Fig. 9는 열차용 에너지 흡수부재인 인장볼트의 충돌 및 파단시험 결과이다. 예비인장력을 부과한 후 대차를 9.5 m/sec의 속도로 충돌시켜 파단하중을 측정하였다.

5. 결론

본 논문에서는 차체용 박판의 동적 물성시험 방법을 확립하기 위하여 제작된 고속 재료시험기

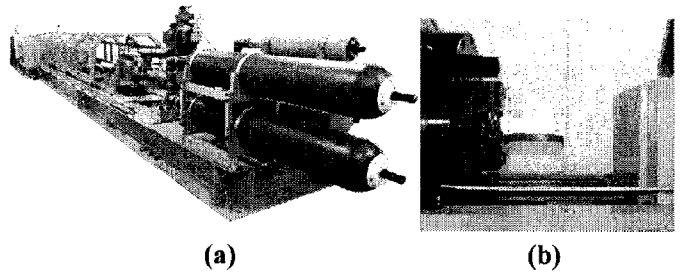


Fig. 6 High speed crash testing machine: (a) frame of the machine; (b) jig set and carrying truck

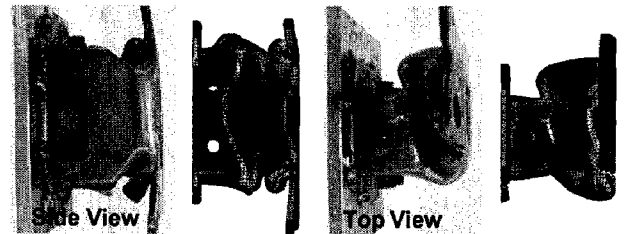


Fig. 7 Deformed shape of crash box in crash test

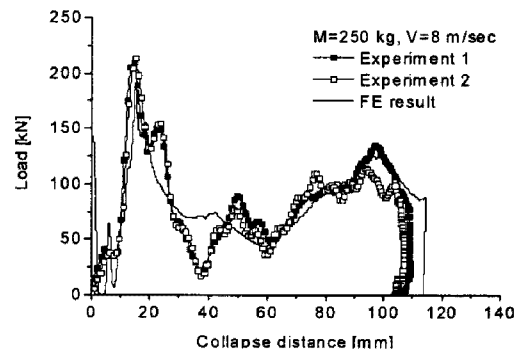


Fig. 8 Load-displacement curves of crash box

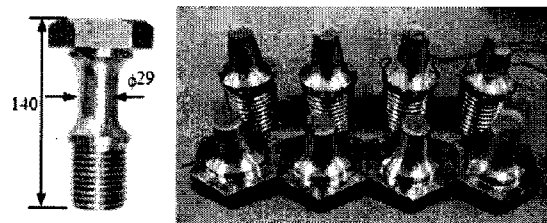


Fig. 9 Failure of tensioning bolt in crash test

와 흡킨슨 바 시험기를 소개하였다. 또한 고속 충돌 시 에너지 흡수 부재의 충돌성능을 파악하기 위한 고속 충돌시험기를 소개하였다.

참고 문헌

- [1] H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song and J. H. Lim, 2007, Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body, Int. J. Mech. Sci., Accepted.
- [2] H. Kolsky, 1963, Stress waves in solids, Dover, New York, pp. 41-65.