중변형률 속도에서의 플라스틱의 고속 인장실험

임지호*1) · 김석봉1) · 김진성1) · 허 훈1) · 이강욱2)
한국과학기술원 기계공학과1) · 현대모비스 응용기술연구부 2)

High Speed Tensile Tests of Plastics at the Intermediate Strain Rate

Jiho Lim*1) · Seokbong Kim1) · Jinsung Kim1) · Hoon Huh1) · **Kangwook Lee2)**

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

*2) *Hyundai MOBIS company, Mabook-ri, Guseong-eup, Yongin-si, Gyunggi-do, Korea, 449-910*

Abstract : In the past, the static load–displacement curve was sufficient to predict the deformation of plastics. As plastics have increasingly been used in more applications such as automotive pasts, the dynamic material properties considering the strain rate and temperature become important. In plastics, the stress is typically very sensitive to the strain rate, but results for dynamic material properties at the intermediate strain rate ranged from 1 /sec to 500 /sec do not have been published sufficiently. This paper introduces a newly developed high speed material testing apparatus for tensile tests at the strain rate up to 500 /sec and dynamic material properties of plastics from experiments. Stress–strain curves were acquired for the polycarbonate and the polypropylene from the dynamic tensile test and utilized to obtain the relationship of the stress and the fracture elongation to the strain rate.

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

1. 서 론

승객의 안전을 위하여 전개되는 에어백은 플라스틱 구조물에 담겨져 있는데, 차량 충돌 시 에어백의 전면 판넬이 대쉬보드에서 떨어지면서 에어백이 전개한다. 실제 에어백의 전개 시에 에어백이 빠른 속도로 전개하기 때문에 전면 판넬이 큰 충격을 받으면서 전면 판넬 주위의 플라스틱이 깨지는 현상이 발생한다. 이와 같은 플라스틱 파손 현상은 에어백의 정상적인 작동을 방해하거나 파단면이 승객에 상해를 줄 수 있기 때문에 충돌과 같은 빠른 거동을 하는 경우의 플라스틱 소재에 대한 기계적 물성치를 차량설계에 반영하여야 한다.

자동차 플라스틱 소재의 정적 물성치는 일반적으로 정규시편을 이용하여 규격화된 시험에서 도출된 결과가 정리되어 있다. 반면에 변형률 속도(strain rate)에 영향을 받는 동적 물성치는 시험방법과 조건이 까다롭고 시험 오차도 심하게 나타나므로 신뢰성 있는 결과도출이 쉽지 않다. 그러나 충돌처럼 급격한 동하중이 작용하는 경우에는 신뢰성있는 거동 예측을 위하여 재료의 동적물성치를 반드시 고려해야 한다.

재료의 응력과 변형률 관계를 얻기 위한 실험은 변형률 속도에 따라 여러 가지 방법이 있다. 변형률 속도가 1000 /sec 이상의 고변형률 속도(high strain rate) 구간은 관성과 응력파 영향의 증가로 재료가 불균일하게 변형하는데, 주로 홉킨슨 바(Hopkinson bar) 시험기를 이용한 물성실험이 수행되어 왔다. 홉킨슨 바 시험기는 고변형률 속도에서의 재료의 거동을 연구하는데 가장 많이 쓰이는 실험 장치로 대략 1000-10000/sec

* aker@kaist.ac.kr

변형률 속도에서의 재료의 동적물성을 얻을 수 있다. 이러한 홉킨슨 바 시험기는 Kolsky[1]의 일차원 탄성파 이론에 따라서 입력봉에서 측정한 탄성 입력파와 반사파 및 출력봉에서 측정한 투과파의 크기에 의하여 시편의 응력 및 변형률을 얻을 수 있도록 고안된 장치로 압축, 인장, 비틀림, 굽힘 등의 방법으로 많은 연구자들에 의해서 연구되었다[2].

차량 충돌에서 발생하는 변형률 속도 구간인 수백/sec까지의 중변형률 속도(intermediate strain rate)에서는 하중낙하시험법(drop weight test)과 캠플라스토미터(cam plastometer) 등의 기계식 방법과 공압이나 유압처럼 유체를 사용하는 방법 등이 많이 연구되었으나 아직까지 시험방법이나 시험규격이 명확하게 정립되지 않은 실정이다[5-6]. 최근에는 주로 유압장치를 이용하여 많은 연구들이 수행되고 있고[7-8], Instron과 MTS등의 시험기 제조사에서는 중변형률 속도에서의 박판의 동적 물성치를 얻을 수 있는 시험기를 개발하여 시판한다[9]. 그러나 아직까지 중변형률 속도에서의 동적물성치에 대한 깊이 있는 연구는 많이 발표되지 않고 있는 실정이다.

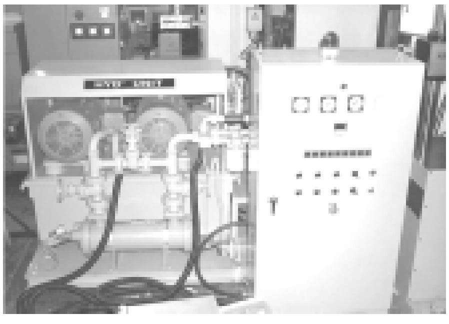
본 논문에서는 자동차 에어백 구조물에 사용되는 폴리카보네이트(polycarbonate)와 폴리프로필렌(polypropylene)의 변형률 속도에 동적 물성실험 결과를 소개한다. 플라스틱의 고속 인장실험을 수행하여 위하여 진동특성이 우수한 로드셀의 지그를 설계하여 고속 인장 시 발생하는 하중 떨림 현상(load ringing phenomenon)을 개선하였다. 동적물성실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도, 변형률 속도에 대한 항복응력의 변화와 파단 연신율을 고찰하였다.

2. 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 1000mm, 세로 600 mm, 높이 2300 mm의 크기이고, 크로스헤드(crosshead)의 높이를 220 mm 씩 3단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최대 속도는 4000 mm/sec이고 최대 하중은 30kN, 최대 변위는 100 mm이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300 kg/cm^{2}이고, 최고 유량은 240 liter/min이다. 작동유체를 압축시키기 위하여 45 kW 용량의 유압모터 2개를 사용하였고, 입력신호에 따른 작동유체의 반응속도를 빠르게 하기 위하여 5 liter 용량의 저장소(accumulator)를 설치하였다.

짧은 시험 시간 동안에 실린더가 순간적으로 빠르게 움직여야 하기 때문에 시험기의 반응속도가 26msec인 Moog사의 D662 서보 밸브 2개를 병렬로 연결하여 사용하였다. 하중 측정은 Kistler사의 압전형 로드셀을 사용하였고, 변위는 LVDT (linear variable differential transformer)를 이용하여 측정하였다.

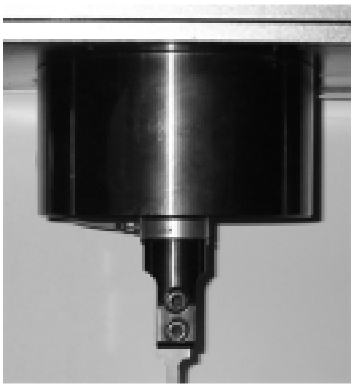
(a)



(b)

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

(a)

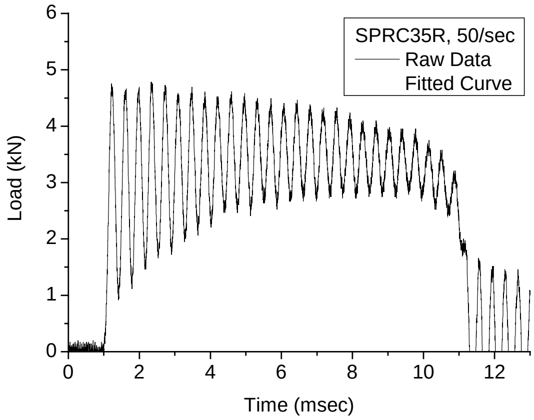


(b)

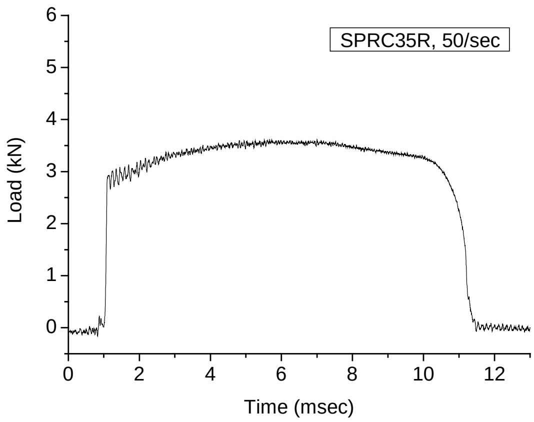
Fig. 2 Upper gripping jigs: (a) old design; (b) new design.

고속 인장실험 동안 시편의 한쪽 끝단이 균일한 속도로 움직여야 하는데 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 /sec 이상의 변형률 속도에서는 이러한 현상이 특히 심화되어 시편과 로드셀 사이의 지그의 떨림으로 로드셀에서 측정하는 하중이 진동하는 현상이 발생한다. 이러한 하중 떨림 현상은 실제 시편에 작용하는 정확한 하중을 측정하지 못하게 하여 실험결과를 왜곡하고 잘못된 결과를 얻게 한다.

하중 떨림 현상은 시편의 변형부위에서 하중측정 위치가 멀어질수록 심하여 탄성변형을 하는 시편의 그립부에 스트레인게이지를 붙여서 하중을 측정하는 방법이 시도되고 있지만, 이와 같은



(a)



(b)

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

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 형태의 지그를 사용하는데, 이를 Fig. 2(b)와 같은 형태로 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

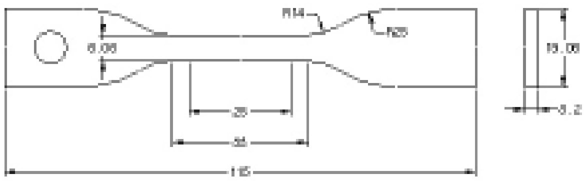


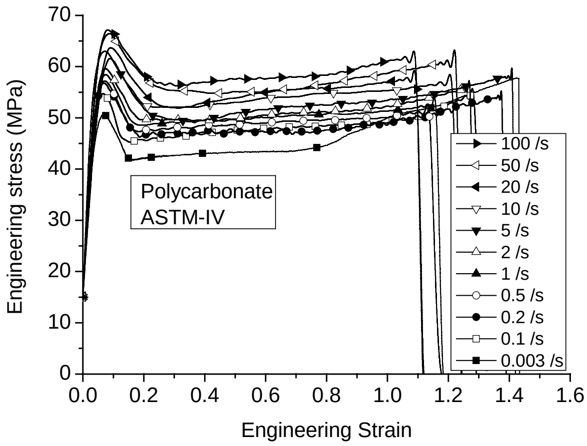
Fig. 4 A tensile specimen of ASTM IV type.

50/sec 변형률 속도에 대하여 두 종류의 지그로 인장실험을 한 결과이다. 이전 지그는 고유진동수가 2500 Hz로 하중떨림 현상이 심하게 발생하였으나, 개선된 지그는 고유진동수가 13000 Hz로 크게 높아지고 하중 떨림 현상도 획기적으로 개선되었다.

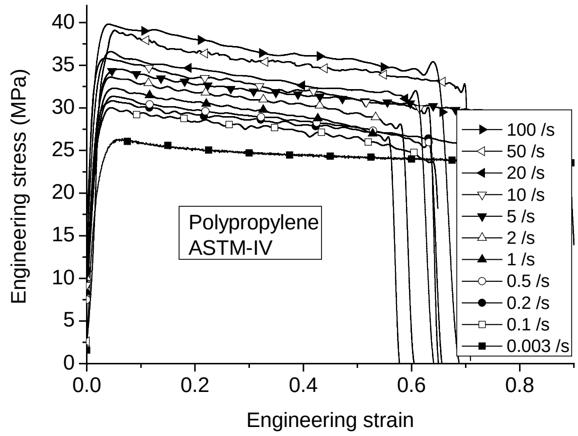
3. 플라스틱의 동적 인장 실험

자동차 에어백 구조물에 쓰이는 폴리카보네이트와 폴리프로필렌에 관하여 준정적 및 중변형률 속도에서의 물성실험을 수행하고, 응력-변형률 선도, 변형률 속도 민감도, 파단 연신율 등을 확보하였다. 0.003, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 /sec의 전체 11개의 변형률 속도에 대하여 실험을 수행하였고, 정적 재료시험기를 사용한 0.003 /sec의 경우를 제외한 나머지는 본 연구실에서 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하였다. 동적 물성치는 변형률 속도의 자연대수 함수에 비례하여 변하므로 변형률 속도 조건이 자연대수 함수에 대략 비슷한 간격을 가지도록 1, 2, 5의 비율로 증가시켰고, 재료 실험은 각 변형률 속도마다 3회 반복하였다. 실험에 사용한 시편은 ASTM IV형으로 시편의 한쪽 그립부에 구멍을 뚫어 시편을 고정시켰다.

Fig. 5는 폴리카보네이트와 폴리프로필렌의 변형률 속도에 대한 공칭 응력–변형률 선도이다. 폴리카보네이트는 처음 항복이 발생한 후 급격하게 응력이 감소하다가 대략 변형률이 0.2인 부근에서 다시 점차적으로 증가한다. 폴리프로필렌은 항복후 응력이 계속 감소하면 변형률 속도가 증가할수록 강도가 증가하는 결과를 보인다. 두 재료 모두 변형률 속도의 증가에 따라서 강도가 증가하며, 응력–변형률 선도의 기울기의 큰 변화를 보이지 않는다. 정적 응력선도에 변형률 속도 민감도를 곱하여 변형률 속도가 증가할수록 기울기



(a)



(b)

Fig. 5 Engineering stress–strain curves: (a) polycarbonate; (b) polypropylene.

가 계속 증가하는 기존의 동적 구성방정식으로 실험결과를 잘 표현하지 못할 것이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 최대응력의 변형률 속도에 따른 변화 그래프이다. 변형률 속도에 대한 최대응력의 변화량은 비슷하지만, 폴리프로필렌에 비하여 폴리카보네이트가 강도가 두 배 정도 된다는 것을 감안하면 폴리프로필렌이 변형률 속도에 대하여 상대적으로 더 민감하다고 할 수 있다. Table 1은 최대응력에 대한 식(1)의 Cowper–Symonds 구성방정식의 계수이다. C값이 정적에 비하여 강도가

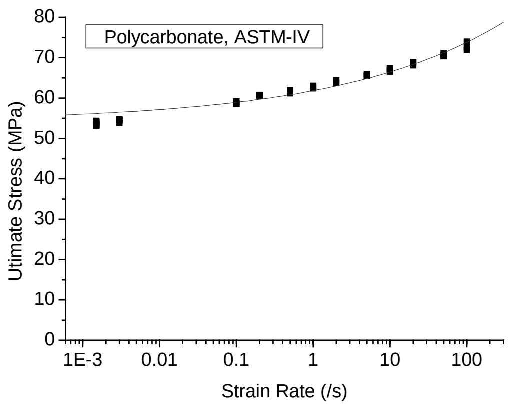
$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}} \qquad (1)$$

Tabel 1 coefficients of Cowper–Symonds model

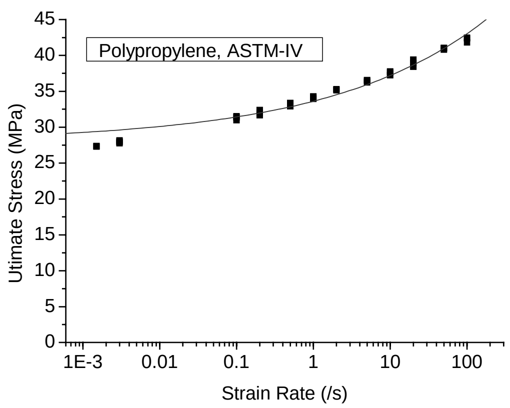
Material	C (/sec)	p
Polycarbonate	2208.78	12.2
Polypropylene	48.03	9.88

두 배로 증가하는 변형률 속도를 의미하는데, 폴리프로필렌의 값이 48.03으로 상대적으로 낮은 값을 가진다.

Fig. 7은 변형률 속도의 변화에 따른 파단 연신율 그래프이다. 폴리카보네이트는 변형률 속도의 변화에 파단 연신율 1.1~1.5 정도로 약간 감소하지만 큰 변화가 보이지 않았다. Fig. 7(a)의 빈사각형은 시편의 자체결함으로 인하여 다른 시편과 다르게 빨리 파단된 결과이다. 이는 Fig. 8(a)의 시편의 파단 형상에서도 관찰할 수 있다.

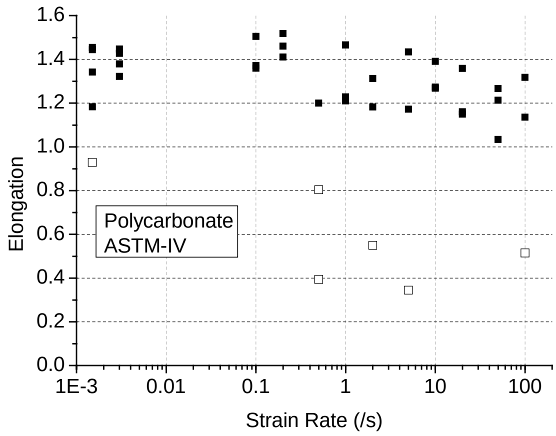


(a)

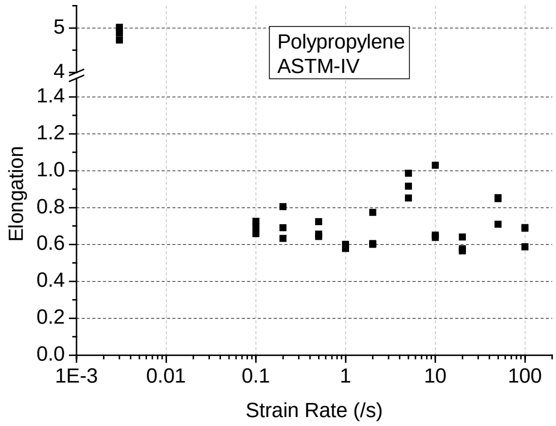


(b)

Fig. 6 Ultimate stress with the variation of the strain rate: (a) polycarbonate; (b) poly-propylene.

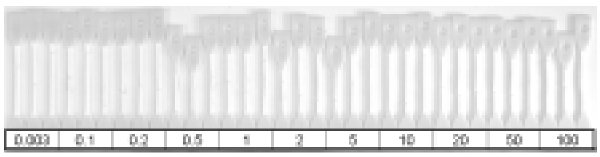


(a)

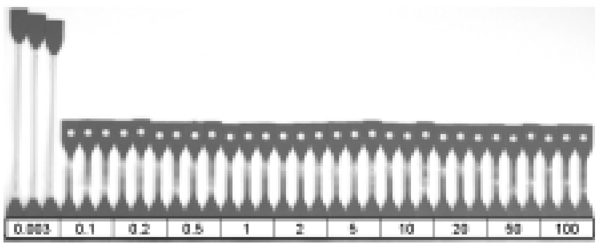


(b)

Fig. 7 Fracture Elongation: (a) polycarbonate; (b) poly-propylene.



(a)



(b)

Fig. 8 Fracture shapes: (a) polycarbonate; (b) poly-propylene.

폴리프로필렌은 준정적인 0.003 /sec과 0.1 /sec이상의 변형률 속도의 파단 연신율의 변화가 크게 나타난다. 준정적 실험의 경우 5 정도의 파단 연신율을 가지지만 동적 실험의 경우 0.6~1 정도로 상대적으로 낮은 파단 연신율의 결과를 보였다. 이는 Fig. 8(b)의 결과에서 확연히 확인할 수 있다. 폴리프로필렌은 인장이 가해질 경우 구부러져 있던 폴리머의 사슬이 펴지는 과정을 거치는데, 시편을 빨리 잡아당길 경우에는 관성 때문에 사슬이 충분히 펴지기 전에 끊어지게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 자체 제작한 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 폴리카보네이트와 폴리프로필렌의 고속 인장실험을 수행하여 변형률 속도에 따른 동적 물성치을 얻었다. 편평부가 33 mm인 ASTM IV 형 시편을 사용하여, 정적시험기와 자체 제작한 고속 인장 재료시험기를 이용하여 0.003, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 /sec의 11가지 변형률 속도에서의 인장실험을 수행하였다.

변형률 속도가 증가할수록 강도가 증가하고, 응력–변형률 선도의 기울기는 큰 변화를 보이지 않았다. 강도 변화의 절대량은 비슷하지만, 정적강도를 감안하면 폴리프로필렌이 폴리카보네이트에 비하여 변형률 속도에 대한 민감도가 상대적으로 더 크다. 폴리카보네이트는 변형률 속도의 변화에 대하여 파단 연신율의 변화가 미미했지만, 폴리프로필렌은 관성의 효과로 인하여 동적 실험의 파단 연신율이 크게 감소하였다.

References

1) H. Kolsky, Stress Waves in Solids, Dover, New York, pp. 41-98, 1963.

2) 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.

3) M. A. Meyers, Dynamic Behavior of materials, John Wiley & Sons, New York, 1994.

4) "Mechanical Testing," ASM Handbook, ASM Intl., Metals Park, Ohio, Vol. 8, 1985.

5) G.B. Dudder, "Drop Tower Compression Test," Metals Handbook, 9th Ed., American Society for Metals, pp. 196-199, 1985.

6) D.R. Ambur, C.B. Prasad and W.A. Waters Jr. "A Dropped-weight Apparatus for Low-speed Impact Tesing of Composite Structures," Experimental Mechanics, Vol. 3, pp.77-82, 1995.

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

8) Jiho Lim, Seokbong Kim, Jinsung Kim, Hoon Huh, Sunyong Kwon, Chisang Yoon and Sungho Park, "Study on the Fracture Elongation of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate," proc. KSAE Spring Conference, pp.1669-1974, 2004.

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