중변형률 속도에서의 강판의 파단 연신율 연구

임지호*[1], 김석봉[1], 김진성[1], 허 훈[1], 권순용[2], 윤치상[2], 박성호[3]

한국과학기술원 기계공학과[1] · 현대자동차 금속재료팀[2] · POSCO 자동차강재연구센타[3]

Study on the Fracture Elongation of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate

Jiho Lim*[1], Seokbong Kim[1], Jinsung Kim[1], Hoon Huh[1], Sunyong Kwon[2], Chisang Yoon[2], Sungho Park[3]

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

[2] *Hyundai MotorCompany, 772-1, Changdum-dong, Whasung-si, Kyunggi-do, 445-706, Korea*

[3] *Automotive Steels Research Center, PSOCO, 699, Gumho-dong, Gwangyang-si, Jeonnam, 545-090, Korea*

Abstract : While the formability is important and indispensable for success in very complicated sheet metal forming, it seems that few studies has been carried out about the formability of sheet metal at the high strain rate. The present experimental results report that the elongation is dependent on the crosshead speed in tensile tests. In this paper, the tensile elongation has been obtained from various steel sheets for an auto-body at the intermediate strain rate. The strain rate in the experiment is ranged from 0.003/sec to 200/sec. The experimental result demonstrates that the tensile elongation does not decrease as the strain rate increases. This tendency has varieties depending on the microstructure and forming history of sheet metal. Some high strength steels have the tendency that the tensile elongation increases as the strain rate increases, while o thers not. This phenomenon is very important not only in sheet metal forming but also in the crashworthiness evaluation to predict the fracture and tearing of sheet metal members.

Key words : Elongation(연신율), Formability(성형성), Intermediate strain rate(중변형률 속도), Strain rate hardening(변형률 속도 경화), Dynamic material test(동적 물성실험)

1. 서 론

박판구조물이 중요 구조물의 80% 이상을 차지하고 있는 자동차에서 박판 성형은 가장 중요한 제조공정 중의 하나이며, 박판 성형기술이 발달함에 따라서 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 일반적으로 박판 성형공정은 빠른 속도로 이루어지므로 박판이 실제 변형하는 변형률 속도(strain rate)에서의 성형성에 관한 연구는 박판 가공의 성공을 결정짓는 중요한 요소이다. 그러나, 변형률 속도가 1~1000 /s인 중변형률 속도(intermediate strain rate)에서의 동적 물성실험은 최근에야 신뢰성 있는 연구가 이루어지고 있기 때문에 박판의 고속 변형 시의 성형성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

재료의 응력과 변형률 관계를 얻는 방법은 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]. 중변형률 속도에서의 동적 물성실험은 하중낙하시험법 (drop weight test), 캠플라스토미터 (cam plastometer) 등의 기계식 방법과 유압장치를 이용한 방법으로 연구되어 왔으며, 최근에는 주로 유압장치를 이용한 연구

* aker@kaist.ac.kr

가 활발히 이루어지고 있지만 아직까지 시험방법이나 시험규격이 명확하게 정립되지 않고 있다[2-4].

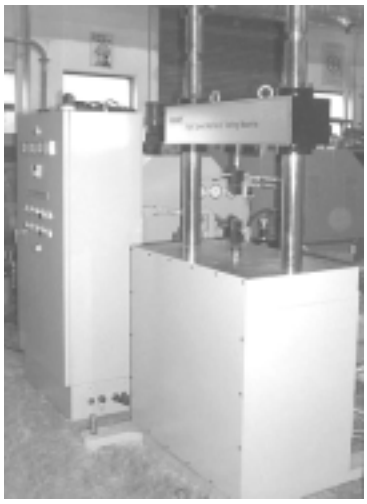
본 논문에서는 여러 종류의 차체용 강판에 대하여 중변형률 속도에서의 파단 연신율에 대한 연구를 수행하였다. 유한요소해석을 사용하여 고속 인장시편의 형상을 결정하고, 자체 제작한 유압식 고속 인장 재료시험기(high speed material testing machine)를 사용하여 17 종의 차체용 강판에 대한 고속 인장실험을 수행하였다. 동적 물성실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도, 항복 응력의 민감도, 연신율의 변화를 고찰하였다.

2. 중변형률 속도에서의 동적 물성실험

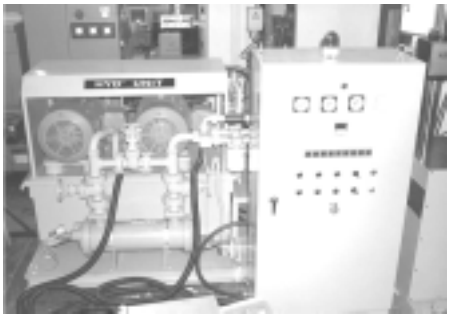
2. 고속 인장 재료시험기

본 논문에서는 수백 /sec이하의 중변형률 속도 범위에서 박판의 동적 물성실험을 하기 위하여 자체 제작한 Fig. 1의 고속 인장 재료시험기를 사용하였다. 실린더의 최고 속도는 4000 mm/sec이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 100 mm이다. 고속 인장실험 동안 시편의 한쪽 끝단이 일정한 속도로 움직여야 하지만 유압밸브의 반응속도가 아무리 빠르더라도 실린더를 순간적으로 원하는 속도까지 증가시킬 수 없다. 본 논문에서는 시편에 힘이 가해지는 동안 실린더가 일정한 속도를 유지할 수 있도록 특수한 형태의 지그를 사용하였다 .

변형률 속도가 수 /s 이상으로 시편이 빠르게 변형하면 지그와 시편에 하중이 균일하지 않고 부재가 진동하는 하중 떨림 현상 (load ringing phenomenon)이 발생하여 로드셀에서 측정하는 시편에 작용하는 하중을 왜곡하게 된다. 이러한 하중 떨림 현상은 실제 시편에 작용하는 정확한 하중을 측정하지 못하게 하여 실험결과를 왜곡하고 잘못된 결과를 도출하게 한다. 하중 떨림 현상은 시편을 고정시키는 지그의 고유 진동수가 클수록 감소하는 경향을 보이기 때문에 지그의 질량을 감소시키고 인장방향의 탄성계수를 증가시켜야 한다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 시편을 고정시키는 그립부를 간단하게 설계하고 로드셀과 함께 직접 크로스헤드(crosshead)에 고정시킴으로써 하중 떨림 현상을 획기적으로 개선하였다. 본 논문에 사용한 지그의 고유진동수는 13000 Hz이다.



(a)



(b)

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

Fig. 2 Upper gripping jig.

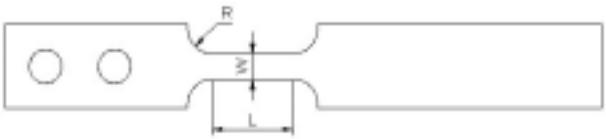


Fig. 3 Schematic diagram of a specimen.

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

2. 2 동적 인장시편

고속 인장시험에 대한 시편 규격이 아직 정해지지 않았기 때문에 합리적인 실험 오차를 가지는 시편의 규격에 대한 연구가 필요하다. 시편은 표점부에서 변형의 대부분이 발생해야 하며 곡률반경에 의한 응력집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장시편의 형상인자는 Fig. 3과 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 고속 인장실험에서 합리적인 오차를 가지는 시편을 결정해야 하기 때문에 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 시편의 변형 해석으로 시편의 치수를 결정하였다. 시편의 폭과 필렛부의 반경을 각각 6 mm로 고정시키고 표점길이를 10 mm에서 35 mm까지 변화시키며 오차를 계산하였다. 본 논문에서는 Fig. 4의 최대 변형률 속도를 높이기 위하여 15 mm와 20 mm의 표점거리를 갖는 시편을 사용하였다.

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

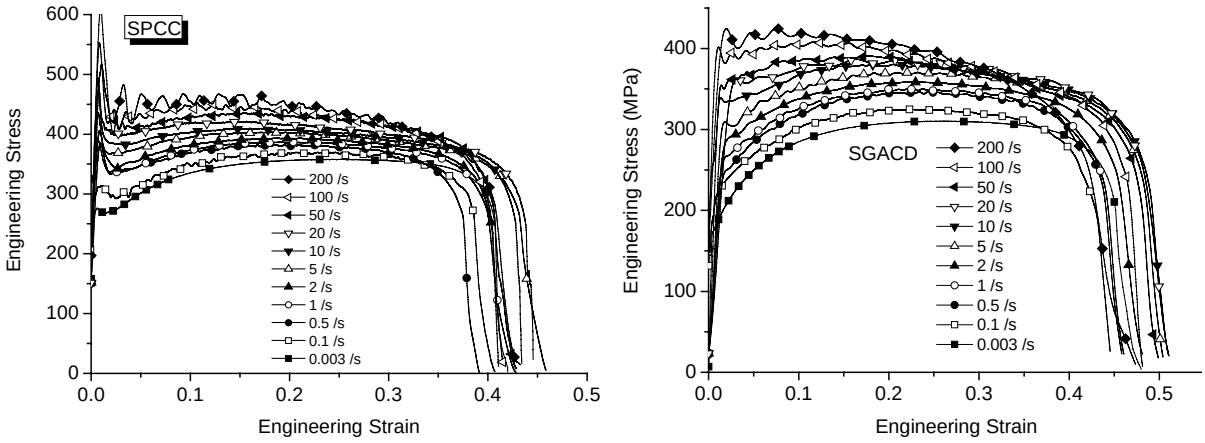
Machine	Strain Rate [/s]	Length of gauge section [mm]	Quantity
Static UTM	0.003	20	3
High Speed Material Testing Machines	0.1	20	3
	0.5	20	3
	1	20	3
	2	20	3
	5	20	3
	10	20	3
	20	20	3
	50	20	3
	100	20	3
	200	15	3

3. 강판의 동적 인장실험

3.1 강판의 중변형률 속도에서의 물성 실험

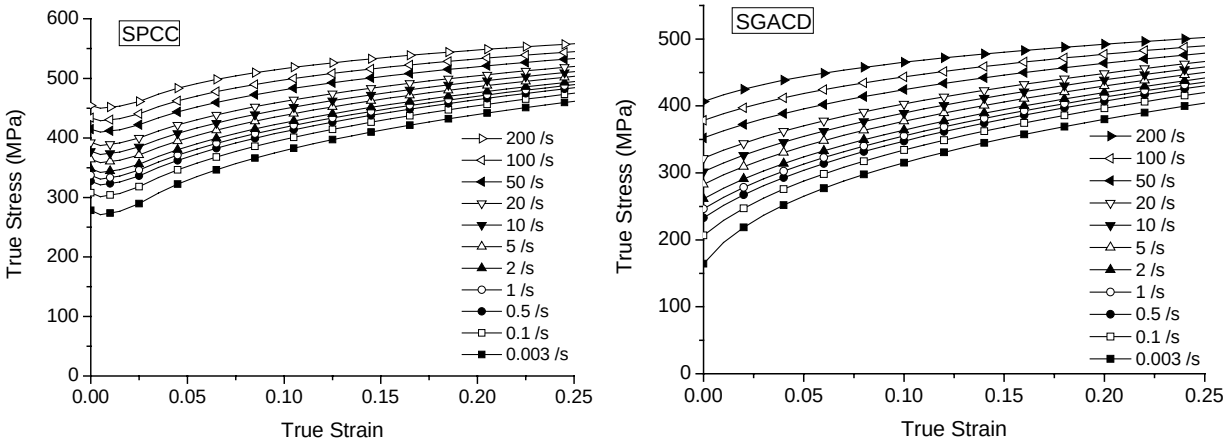
자체에 사용되는 17종의 강판에 대하여 중변형률 속도에서의 동적 물성실험을 수행하였다. 본 논문에서는 편의상 SPCC, SGACD, SPRC35R, SPRC40R의 결과만 설명한다. Table 2에 나타낸 바와 같이0.003 /s의 변형률 속도에서는 정적 재료시험기를 사용하였고 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 /s에서의 인장실험을 수행하였다. 각 변형률 속도마다 3회 반복하였고 200 /s을 제외한 모든 변형률 속도에서 표점거리 20 mm의 시편을 사용하였다. 본 논문에서 하중 떨림 현상을 획기적으로 개선한 지그를 사용하였음에도 불구하고 100 /s 이상에서 여전히 하중이 진동하는 결과를 보인다. 실제 시편에 작용하는 하중이 진동하는 것이 아니기 때문에 FFT (Fast Fourier Transform) 필터를 이용한 유연화 방법을 사용하였다.

Fig. 5는 SPCC와 SGACD의 변형률 속도에 따른 공칭 응력–변형률(engineering stress–strain) 선도이다. 100 /s과 200 /s에서 하중을 유연화시켰음에도 여전히 응력이 진동함을 응력이 진동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 실험에서 얻은 변형률과 응력으로부터 후처리 과정을 거친 후 얻은 변형률 속도에 따른 진응력–변형률(true stress–strain) 선도이다. 변형률 속도가 증가할수록 감



(a) (b)

Fig. 5 Engineering stress-strain curves at various strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD.



(a) (b)

Fig. 6 Fitted true stress-strain curves: (a) SPCC; (b) SGACD.

소하는 것을 의미한다. SGACD처럼 강도가 약한 재료가 강도가 높은 재료보다 이러한 현상이 더 크게 나타난다.

Fig. 7은 변형률 속도 증가에 따는 항복응력의 변화를 나타낸 그래프이다. SGACD와 같이 낮은 강도의 재료는 항복응력이 정적실험에 비하여 두 배 이상 증가하지만 SPRC40R과 같은 재료는 약 1.5배정도 증가한다. 일반적으로 낮은 강도의 재료가 변형률 속도에 더 민감한 결과를 보인다. 그러나 Fig. 6의 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.

3.2 변형률 속도에 따른 파단 연신율 변화

Fig. 8은 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. 변형률 속도가 0.1~0.5 /s까지는 파단 연신율은 감소하다가 변형률 속도가 10~20 /s 일 때까지 오히려 증가하며 정점을 이룬 후에 다시 감소하는 S자 형태를 나타낸다. 이것은 Fig. 9(a)의 시편의 파단 형상에서 확인할 수 있다.

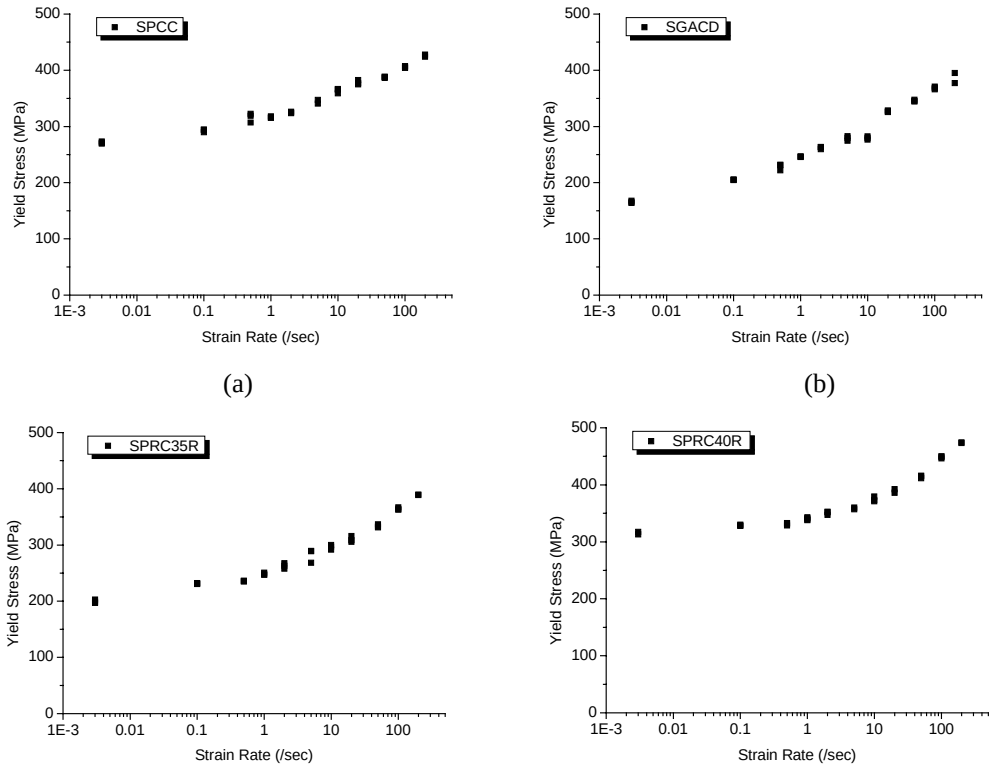


Fig. 7 Yield stress according to strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD; (c) SPRC35R; (d) SPRC40R.

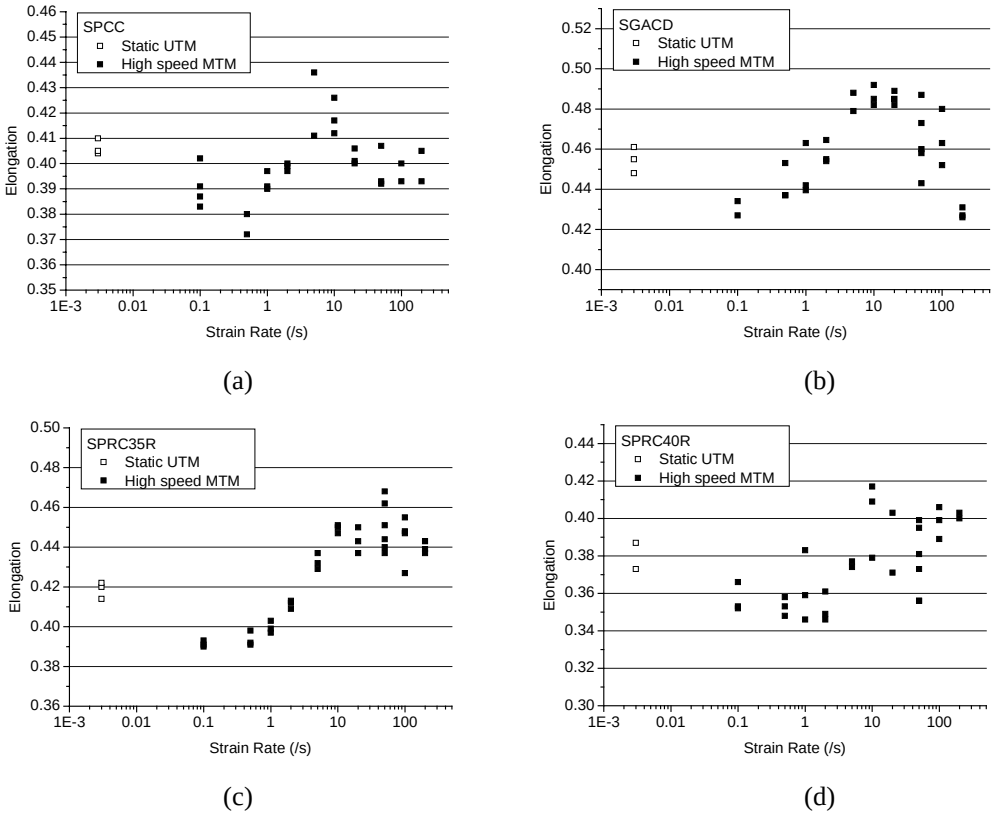
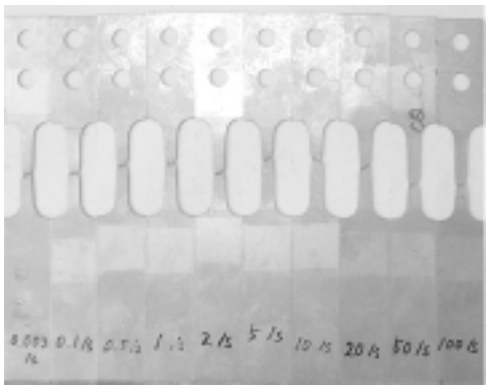
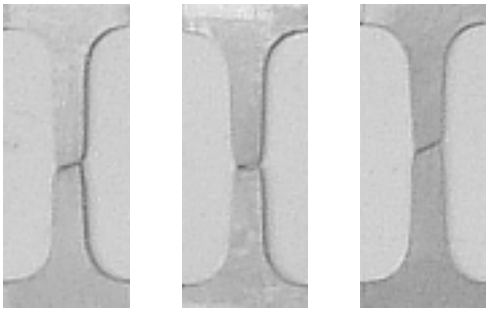


Fig. 8 Fracture elongation according to strain rate: (a) SPCC; (b) SGACD; (c) SPRC35R; (d) SPRC40R.



(a)



(b) (c) (d)

Fig. 9 Specimens of SPCC after fracture at: (a) all strain rates; (b) 0.003/s; (c) 0.5/s; (d) 20 /s.

Fig. 9(b), (c), (d)는 각각 0.003 /s, 0.5 /s, 20 /s일 때의 시편의 파단부 사진이다. 연신율이 가장 작은 0.5 /s에서의 시편은 넥킹부의 폭이 다른 조건의 시편 파단면에 비하여 상대적으로 좁은데, 0.003 /s과 20 /s에서의 시편은 넥킹부의 폭이 완만히 변하며 넓게 분포하고 있다. 이는 단순 인장 시에 넥킹(necking)이 발생하면 넥킹부에서 집중적인 변형이 발생하는데, 고속 인장 실험 시에는 넥킹이 발생하는 부분에서의 국부적인 높은 변형률 속도 경화가 넥킹의 진행을 억제하여 주위로 전파시키기 때문에 오히려 연신율이 증가하는 것으로 생각된다. 변형률 속도가 20 /s 이상으로 증가하면 변형률 속도 경화에 의한 넥킹부의 전파보다 재료의 강성이 증가에 따른 연신율 감소 효과가 크기 때문에 다시 연신율이 감소하는 것으로 생각된다.

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 변형 속도를 유지시킨다면 충돌안전성이나 성형성이 향상된다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 중변형률 속도에서의 차체용 강판에 대한 인장 실험시의 연신율에 대한 연구를 수행하였다. 유한요소해석을 사용하여 고속 인장시편의 형상을 결정하고, 자체 제작한 유압식 고속 인장 재료시험기를 사용하여 17 종의 차체용 강판에 대한 고속 인장실험을 수행하였다. 동적 물성실험으로부터 변형률 속도에 따른 응력–변형률 선도, 항복 응력의 민감도, 연신율의 변화를 고찰하였다.

변형률 속도가 증가할수록 연신율이 감소할 것이라는 일반적인 예상과 달리 연신율은 대략 0.5 /s까지 감소하다가 약 10~20 /s까지 다시 증가한 후 다시 감소하는 S자 형태를 나타낸다.

후 기

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

References

1) 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, No. 1, pp. 8-17, 2002.

2) J.H. Lim and H. Huh, "Dynamic Material Tests of Steel Sheets for an Auto-body Using the High Speed Material Testing Machine," proc. KSAE, Fall Conference, Vol.2, pp. 1525-1530, 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.

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