

차체용 고장력 강판의 동적 인장 특성 평가

김 석 봉^{*1)} · 허 훈¹⁾ · 신 철 수²⁾ · 김 효 균²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 현대하이스코 기술연구소²⁾

Dynamic Tensile Characteristics of the High Strength Steel Sheet for an Auto-body

Seokbong Kim^{*1)} · Hoon Huh¹⁾ · Chirlsoo Shin²⁾ · Hyokun Kim²⁾

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

²⁾HYSKO Technical Research Laboratories, 30-9 Sunwol-ri, Haeryong-myeon, Suncheon-si, Jeonnam 540-856, Korea

(Received 28 June 2006 / Accepted 16 August 2006)

Abstract : An important challenging issue in the automotive industry is the light-weight, safe design and enhancement of crash response of an auto-body structures. These objectives lead to increasing adoption of high strength steel sheet for inner and outer auto-body members. This paper evaluates the dynamic tensile characteristics of high strength steel sheets, HS45R, TRIP60, DP60 and DP100, along the rolling direction and transverse direction. Static tensile tests were carried out at the strain rate of 0.003/sec using the static tensile machine (Instron 5583). Dynamic tensile tests were carried out at the range of strain rate from 0.1/sec to 200/sec using a high speed material testing machine developed. The tensile tests acquire stress-strain relation and strain rate sensitivity of each material. The experimental results show two important aspects for high strength steels: the flow stress increases as strain rate increases; the strain hardening decreases as the tensile stress increases. The experiments also produce interesting results that the elongation does not decrease even when the strain rate increases.

Key words : High strength steel(고장력강), High speed material testing machine(고속 재료 시험기), Strain rate(변형률속도), Dynamic tensile test(동적 인장 시험)

1. 서 론

자동차 산업에서 자동차의 연비를 향상시키고, 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 차체 구조의 경량화가 중요하며 이를 실현시키기 위하여 다양한 성형 공정과 재료가 개발되고 있다. 그 중 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나는 고장력 강판을 차체에 사용하는 것으로 주로 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 강과 DP(Dual Phase) 강이 사용된다. 두 강

판은 가벼우면서도 강도와 성형성이 우수한 재료로 알려져 있다. TRIP 강은 변형이 일어나는 동안 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변화하므로 연신율과 강도가 증가하는 특징을 가지고 있다. DP 강은 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 저탄소강으로 동일한 강도의 다른 탄소강(HSLA)에 비하여 성형성과 연신율이 우수한 특징을 가진다.¹⁾

고속재료는 변형률속도에 의하여 동적 특성이 정적 특성에 비하여 큰 차이를 보이기 때문에 차량의 정확한 충돌 해석을 위하여 자동차 구조용

*Corresponding author, E-mail: ksb79@kaist.ac.kr

강판의 동적 인장특성을 확보하는 것이 중요하다.^{2,3)} 그러나 실제 차체 충돌 시 발생하게 되는 1/sec에서 500/sec에 이르는 중변형률속도에서는 현재 적절한 시험방법이 규격화 되어있지 않은 상태이다.

본 논문에서는 차체용 고장력 강판의 동적 인장 특성을 파악하기 위하여 HS45R, TRIP60, DP60, DP100을 선택하여 0.003에서 200/sec의 변형률속도에서 인장시험을 수행하였다. 시험은 유한요소 해석에 의하여 결정된 시편을 사용하여 고속 재료 시험기를 사용하여 수행되었다. 각 재료의 변형률 속도에 대한 응력-변형률 곡선을 통하여 변형률 속도에 따른 항복응력과 연신율의 변화를 관찰하였다.

2. 고장력 강판의 고속 인장 시험

2.1 유압식 고속 재료 시험기

본 연구에서는 수백/sec 이하의 중변형률속도 범위에서 고장력 강판의 동적 물성 특성을 평가하기 위하여 고속 재료 시험기를 사용하였으며 시험기는 Fig. 1과 같다. 인장 시험기 하중 프레임의 크기는 가로 1000, 세로 600, 높이 2300 mm이며 크로스헤드의 높이를 220 mm 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, 최고 유량은 240 l/min이며 작동유체를 압축시키기 위하여 2개의 45 kW 용량의 유압모터를 사용하였다. 중변형률속도에서의 물성 실험은 수 msec 이내에서 끝나기 때문에 동적 특성이 좋은 로드셀을 사용하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 고속응답특성이 좋은 Kistler사의 9051A 압전형 로드셀이 사용되었다.

2.2 동적 인장 시편의 결정

정적 시험의 경우 ASTM, KS, JIS 등에서 실험 방법뿐만 아니라 실험에 사용되는 시편의 종류, 형상, 조건 등에 관하여 규정하고 있지만 고속 인장 시험의 경우에는 시편에 대한 이러한 규정이 명시되어 있지 않다. 따라서 중변형률속도 범위에서 인장 시험을 수행하기 위하여 실험 장치에 적합한 시편을

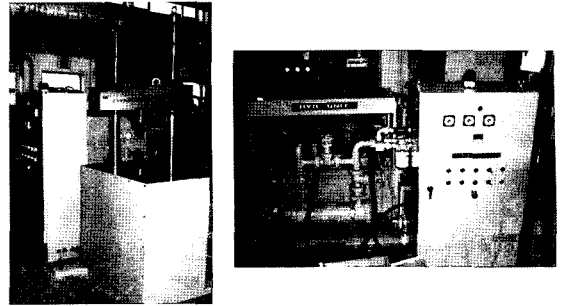


Fig. 1 High speed material testing machine

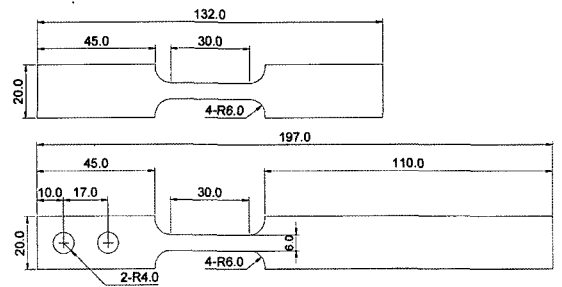


Fig. 2 Schematic description of (a) static and (b) dynamic tensile specimen for the intermediate strain rate tests

결정할 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 여러 형상 인자를 고려하여 유한요소해석에 의하여 결정된 시편이 사용되었다.⁴⁾

시편의 변형은 대부분 표점부에서 이루어져야 하며 곡률 반경에 의한 응력 집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장 시편의 형상 인자를 크게 표점부의 길이와 폭 그리고 필렛부의 반경으로 나눌 때 일반적으로 표점부의 길이와 폭의 크기가 증가할수록 측정변위의 오차가 감소하며 시편의 변형률 분포가 균일하게 발생한다. 하지만 관성에 의하여 시편이 균일하게 변형하지 않고 구동부 쪽에 변형이 집중할 수 있다. 필렛부의 반경의 경우 그 길이가 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하지만 응력집중이 발생하는 문제가 있다. 이상과 같은 형상인자의 영향을 고려하여 유한요소해석에 의해 최적화된 동적 인장 시편이 결정되었으며 형상은 Fig. 2와 같다. 두 시편은 표점부 길이, 폭, 필렛의 반경의 크기가 각각 30 mm, 6 mm, 6 mm로 동일하나 전체 길이는 차이를 보인다. 정적 시험과 동적 인장 시험에서의 그림 방식의 차이 때문에 동적 인장 시 65 mm 더 긴 그림부를 가진다.

2.3 동적 인장 시험

고장력 강판, HS45R, TRIP60, DP60, DP100을 압연방향(rolling direction)과 압연직각방향(transverse direction)으로 0.003, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200/sec의 변형률속도에서 인장 시험을 수행하였다. 0.003/sec의 준정적의 경우 정적 인장 시험기, Instron 5583을 사용하였으며 0.1~200/sec의 중변형률속도는 고속 재료 시험기를 사용하였다. 일반적으로 동적 물성치는 변형률속도의 자연대수 함수에 비례하여 변한다.⁵⁾ 따라서 변형률속도 조건을 자연대수 함수에서 비슷한 간격을 가지도록 1, 2, 5의 비율로 증가시키며 시험을 수행하였다.

3. 고장력 강판의 고속 인장 시험

3.1 응력-변형률 선도

고장력 강판에 대하여 압연방향(RD)과 압연직각방향(TD)에 대하여 정적 인장 시험을 수행하였으며 재료의 물성은 Table 1과 같다. DP60와 DP100은 항복응력과 최대인장강도(UTS)가 압연직각방향으로 실험한 경우가 더 크게 측정되었다. 일반적으로 강판의 압연 시 조직(texture)이 방향성을 가지게 되며 압연방향으로 방향성을 가지게 될 경우 압연직각방향에 비하여 항복강도 및 최대인장강도가 작게 측정된다. HS45R과 TRIP60의 경우 항복응력은 압연방향으로 실험한 결과와 압연직각방향의 결과가 동일하며 최대인장강도의 경우 압연직각방향에서 크게 측정되었으나 차이가 크지 않다. 이를 통하여 시험이 수행된 HS45R과 TRIP60은 조직의 방향성이 유동응력에 크게 영향을 주지 않는 것으로 보인다. TRIP60과 DP60은 압연방향에 대하여 비슷한 강도를 가지나 연신율은 각각 35.6%, 28.6%를 보이며 큰 차이를 나타낸다. 항복응력과 최대인장강도의 비를 살펴보면 DP60이 더 작으며 성형성이 우수한 결과를 보인다. 각 재료에 대한 연신율을 비교하면 압연방향으로 시험한 경우가 압연직각방향으로 시험한 경우보다 큰 연신율을 가지는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 0.003/sec에서 200/sec의 변형률속도에서 인장 시험을 통하여 얻어진 공칭응력-변형률 선도이다. 변형률속도에 따른 유동응력 분포를 살펴보

Table 1 Material properties from the static test

Material	Tensile Direction	Thickness [mm]	Yield Stress [MPa]	UTS [MPa]	Elongation [%]
HS45R	TD	1.23	311	447	32.7
	RD		311	450	33.6
TRIP60	TD	1.46	410	602	35.1
	RD		410	607	35.6
DP60	TD	1.43	393	623	26.3
	RD		380	618	28.6
DP100	TD	1.47	653	1027	13.5
	RD		644	994	14.7

*TD(transverse direction), RD(rolling direction)

면 HS45R의 유동응력은 TRIP60, DP60, DP100에 비하여 변형률속도에 민감하여 응력의 변화가 큰 것을 알 수 있으며 DP100의 유동응력은 변형률속도에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 변형률속도가 커지면 활성화 되는 전위(dislocation)의 근원점 수가 증가하게 되므로 강도가 증가하게 된다. 하지만 이러한 영향이 강도가 높은 재료의 경우 본래의 높은 강도에 비해 상대적으로 작아 변형률속도에 둔감한 것으로 판단되며 이는 고속변형에서의 전위구조의 변화와도 관계가 있다.⁶⁾ HS45R은 고강도 강판에 속하지만 TRIP60, DP60, DP100에 비하여 상대적으로 강도가 약하여 유동응력이 변형률속도에 상대적으로 더 민감하다. 결국 TRIP강 및 DP강은 변형률속도에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있으며 이를 통하여 차량의 충돌 시 변형률속도경화의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 강판의 응력-변형률 선도의 기울기는 변형률속도가 증가할수록 점점 더 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 변형률속도가 증가할수록 강판의 변형률속도 민감도가 감소함을 의미하며 HS45R과 같이 상대적으로 낮은 강도를 가지는 강판에서 두드러진다.

TRIP 강은 인장하중 시 저온으로 갈수록 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변화하면서 가공경화율(work hardening rate)이 커지는 경향이 두드러지며 상온 및 고온에서는 이러한 TRIP 특성이 크게 나타나지 않는다.⁷⁾ 본 연구에서는 상온에서 시험을 수행하여 변형률속도에 따른 TRIP 특성을 고찰하였으나 가공경화율의 변화는 나타나지 않았다. 유동응력은 인장속도의 증가와 함께 증가하는 경향을

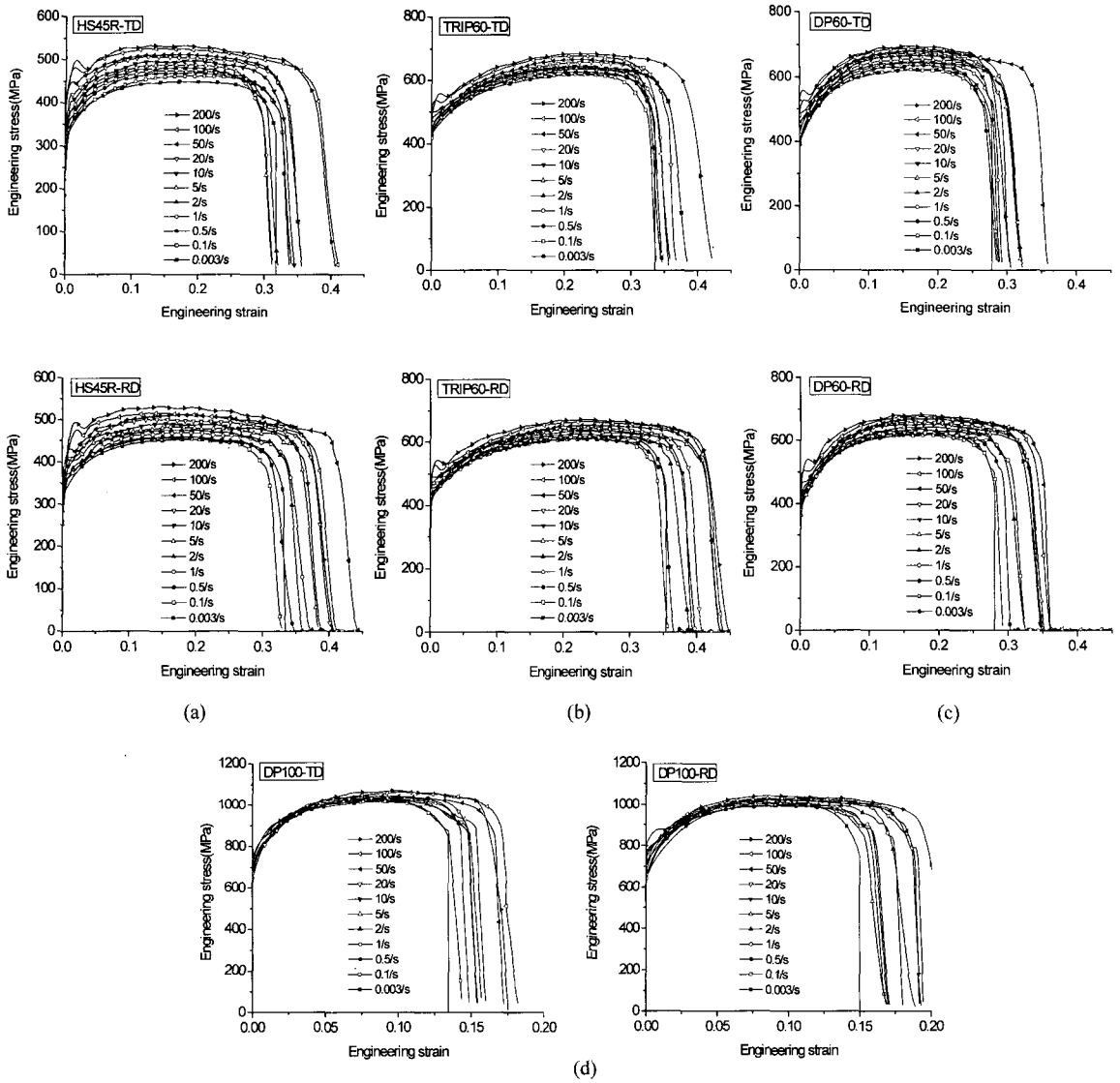


Fig. 3 · Stress-strain curves of high strength steel with the variation of the strain rate: (a) HS45R; (b) TRIP60; (c) DP60; (d) DP100

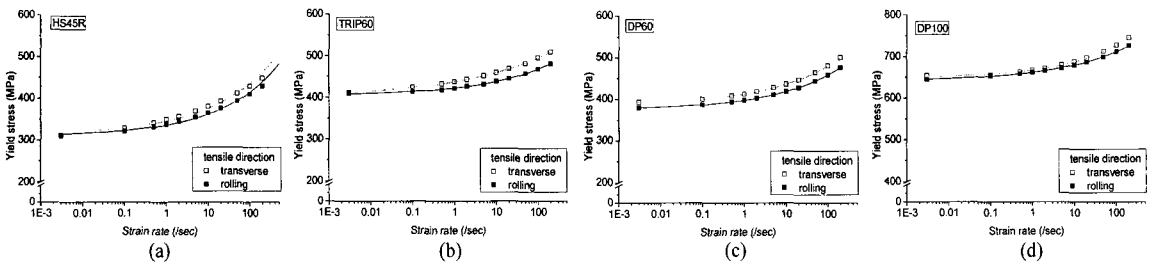


Fig. 4 Yield stress along the tested direction with the variation of the strain rate: (a) HS45R; (b) TRIP60; (c) DP60; (d) DP100

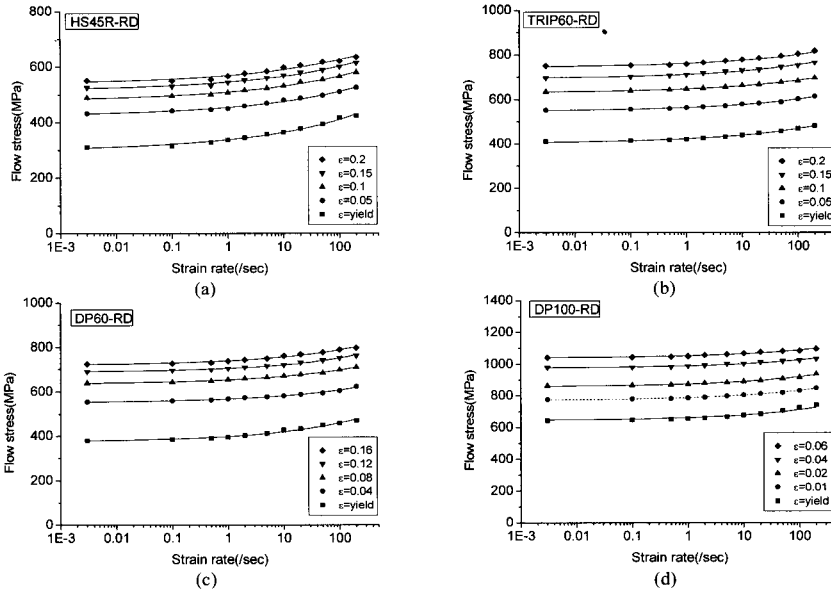


Fig. 5 Strain rate sensitivity of high strength steel with the variation of strain:
(a) HS45R; (b) TRIP60; (c) DP60; (d) DP100

보이나 소성구간의 기울기는 변형률속도에 따라서 변하지 않음을 알 수 있다.

각 강판의 압연방향과 압연직각방향에 따른 시험 결과를 비교하면 최대인장강도의 차이는 크지 않으나 항복응력은 차이를 보인다. 강판의 변형률속도에 따른 항복응력의 크기는 Fig. 4와 같으며 대체로 압연방향보다 압연직각방향으로 시험한 경우에 항복응력이 더 크게 나타난다. 0.003/sec의 준정적 변형률속도에서는 압연 및 압연직각방향에서의 항복응력이 큰 차이를 보이지 않으나 변형률속도가 커질수록 그 차이가 커지는 것을 살펴볼 수 있다. 200/sec의 변형률속도에서 HS45R, TRIP60, DP60, DP100의 항복응력의 차이는 각각 18.7, 27.9, 24.5, 19.1 MPa를 나타낸다.

Fig. 5는 압연방향으로 시험이 수행된 강판의 변형률속도 민감도 곡선이다. 등간격의 5개의 변형률 값에서 얻은 유동응력의 값을 변형률속도에 대하여 나타낸 선도이다. HS45R의 변형률속도 민감도 곡선의 기울기는 항복점에서의 변형률(0.0)에서 최대 인장강도 부근에서의 변형률(0.2)로 증가함에 따라 점점 더 감소하며 상대적으로 고강도인 TRIP60, DP60, DP100은 변형률속도 민감도 곡선의 기울기 변화가 적다. 특히 DP100의 경우 변형률이 0.06로

증가해도 변형률속도 민감도 곡선의 기울기가 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이를 통하여 강판의 변형률속도 민감도 정도는 강판의 강도에 영향을 받는다고 판단할 수 있으며 강도가 낮은 강판이 변형률속도에 더 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

3.2 파단 연신율

다양한 변형률속도에 대한 공칭응력-변형률 선도에서 파단 연신율을 살펴보면 정적 시험 결과와 유사하게 압연방향의 경우가 압연직각방향의 경우보다 크게 측정되었음을 확인할 수 있다. Fig. 6은 동적 인장 시험에서 변형률속도에 따른 파단 연신율 분포를 나타낸다. 일반적으로 변형률속도가 증가하면 강판의 강도는 변형률속도 경화에 의하여 증가하며 파단 연신율은 감소할 것으로 예상된다. 그러나 HS45R, TRIP60, DP60의 파단연신율은 0.003/sec에서 0.1/sec까지 감소하다 100/sec까지 증가하며 DP100은 변형률속도가 증가할수록 연신율이 증가하는 경향을 보인다. 정적 인장 시험에서 네킹(necking) 현상이 일어날 때 변형은 게이지 영역에서 국부적으로 집중되지만 높은 변형률속도에서의 인장 시험에서는 국부적으로 변형률속도 경화가 네킹의 진행을 지연시키고 연신율은 네킹부에 넓은 밴

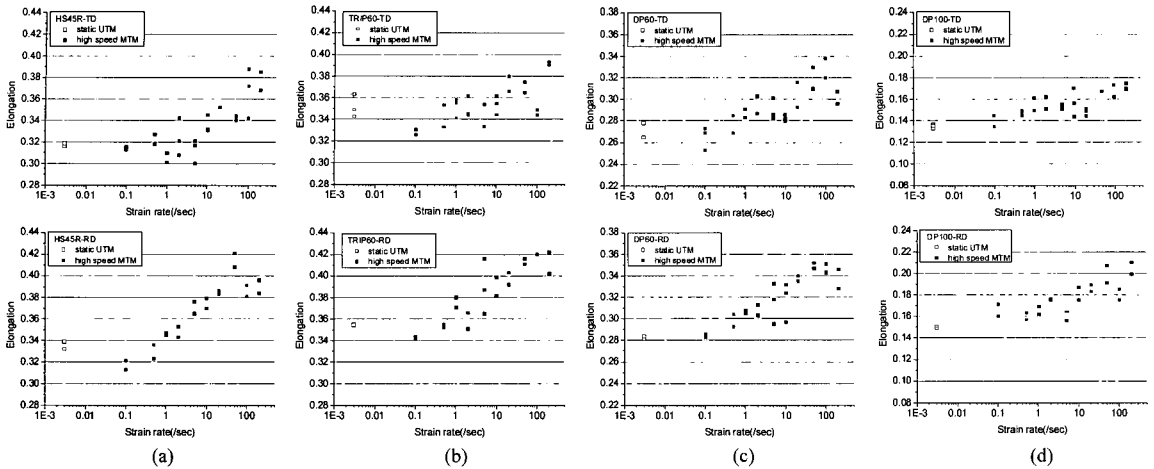


Fig. 6 Fracture strain of high strength steel with the variation of the strain rate: (a) HS45R; (b) TRIP60; (c) DP60; (d) DP100

드를 형성하며 근처로 전파한다. 이러한 현상 때문에 변형률속도가 증가할수록 오히려 파단 연신율은 증가하게 된다. 이 실험 결과는 차체 부재의 파단 관점에서 매우 중요하며 박판의 성형성을 향상시키기 위한 차체부재의 박판 성형 공정에 적용 가능하다. 파단 연신율은 적절한 변형률속도 영역에서 변형률속도경화에 의하여 증가하므로 적절한 속도를 수반한 성형 공정을 통하여 정적으로 수행한 공정에 비하여 우수한 성형성을 기대할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고장력 강판, HS45R, TRIP60, DP60, DP100에 대하여 다양한 변형률속도에서 동적 인장 특성을 평가하였다.

- 1) 인장 시험을 통하여 변형률속도의 증가에 따른 변형률경화의 감소와 유동응력의 증가에 대한 정량적인 결과를 얻었다.
- 2) TRIP60, DP60, DP100은 HS45R에 비하여 비교적 작은 변형률속도 민감도를 가진다.
- 3) 항복응력은 변형률속도가 증가함에 따라 압연 직각방향에 대한 시험이 압연방향으로의 시험 결과 보다 더 큰 값을 가진다.
- 4) HS45R, TRIP60, DP60의 연신율은 0.003/sec에서 0.1/sec까지 감소하다가 100/sec 까지 다시 증가하는 경향을 보이며 DP100의 파단 연신율은 변형률속도의 증가에 따라 점진적으로 증가한다.

References

- 1) A. Yoshitake, K. Sato and Y. Hosoya, "A Study on Improving Crashworthiness of Automotive Parts by using High Strength Steel Sheets," SAE 980382, 1998.
- 2) S. Tanimura and J. Duffy, "Strain Rate Effects and Temperature History Effects for Three Different Tempers of 4340 Var Steel," Int. J. Plasticity, Vol.2, pp.21-35, 1986.
- 3) H. Huh, J. H. Lim, S. B. Kim, S. S. Han and S. H. Park, "Formability of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate," Key Eng. Materials, Vols.274-276, pp.403-408, 2004.
- 4) J. H. Lim, S. B. Kim, J. S. Kim, H. Huh, J. D. Lim and S. H. Park, "High Speed Tensile Test of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.127-134, 2005.
- 5) R. Liang and A. S. Khan, "A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Models for BCC and FCC Metals over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures," Int. J. Plasticity, Vol.15, pp.963-980, 1999.
- 6) K. Miura, S. Takagi, T. Hira, O. Furukimi and S. Tanimura, "High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts," SAE 980952, 1998.
- 7) Y. Tomita and T. Iwamoto, "Constitutive Modeling of TRIP steel and Its Application to the Improvement of Mechanical Properties," Int. J. Mech. Sci., Vol.37, No.12, pp.1295- 1305, 1995.