

차체용 강판의 온도에 따른 변형률속도 민감도 연구

이희종¹· 송정한¹· 조상순¹· 허 훈[#]· 박성호²

A Study on the Strain-Rate Sensitivity According to the Temperature for Steel Sheets of an Auto-Body

H. J. Lee, J. H. Song, S. S. Cho, H. Huh, S. H. Park

(Received October 6, 2005)

Abstract

This paper is concerned with the thermo-mechanical behavior including temperature dependent strain-rate sensitivity of steel sheet for an auto-body. In order to identify the temperature dependent strain-rate sensitivity of SPRC35R and SPRC45E, uniaxial tension tests are performed with the variation of the strain-rates from 0.001 /sec to 200 /sec at environmental temperatures varied from -40 °C to 200 °C. The thermo-mechanical response at the quasi-static state is obtained with the static tensile test and at the intermediate strain-rate is from the high speed tensile test. Experimental results show that the strain-rate sensitivity increases at low temperature. It represents that as the strain-rate increases, the variation of flow stress becomes sensitive on the temperature. The results indicate that the flow stress of SPRC35R is more dependent on the changes of strain-rate and temperature than those of SPRC45E.

Key Words : Strain-Rate Sensitivity, Dynamic Strain Aging, Temperature Sensitivity, Intermediate Strain-Rate

1. 서 론

최근 에너지 절감 필요성과 운송 수단의 고속화로 인하여 차체의 경량화, 안전화가 차량설계, 생산 분야의 중요한 목표가 되고 있다. 소재 측면에서 차량의 경량화를 위하여 고장력 강판 등의 신소재 개발과 하이드로포밍, 재단용접강판(TWB) 등의 신성형기법을 이용한 부재성형 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 차량의 경량화는 충돌안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 자동차 충돌 시 재료는 약 200/sec 의 변형률속도(strain-rate) 범위에서 고속변形이 발생하는데 일반적으로 재료는 변형률속도가 증가하면 유동응력이 증가하며, 변형 온도가 증가하면 유동응

력이 감소하는 경향성을 보인다. 특히 차체용 강판은 변형률속도에 따라서 강도의 변화가 다른 재료에 비하여 크고 온도 범위에 따라 변형률속도에 대한 민감도가 다르기 때문에 상온 뿐만 아니라 자동차의 다양한 작동 온도에서 충돌 안전성을 확보하기 위하여 작동 온도 범위에서 차체용 강판의 정확한 동적 물성치 확보가 필수적이다.

장제의 온도와 변형률속도에 따른 물성 변화의 연구는 주로 고변형률속도에서 비틀림 흡킨슨바(Torsional Hopkinson bar) 시험기를 이용하여 연구되었다. Campbell 과 Ferguson[1]은 연강에 대하여 195K~713 K의 온도 범위에서 0.001/sec에서 1000 /sec 까지의 시험을 수행하여 고온보다는 저온에서 변형률속도가 변할 때 유동응력의 변화폭이 크다

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: hhhuh@kaist.ac.kr

는 사실을 확인하였고, Klepaczko 와 Duffy[2]는 AISI1020 열연강에 대하여 83K~494K 범위에서 변형률속도를 0.0005/sec에서 1000/sec으로 달리하여 극저온에서는 변형률속도 이력(strain-rate history effect)에 의하여 일정 변형률속도일때 보다 더 높은 유동응력을 보이지만 150K 이상에서는 변형률속도 이력이 재료의 물성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 보였다. 최근에는 Nemat-Nasser[3~4]등이 선박용 강재, 스테인레스 강, 탄탈륨 재료에 대하여 압축형 흡킨슨바시험기를 이용하여 77K~1000K의 넓은 온도범위에서 고변형률속도 시험을 수행하여 각 재료에 대한 동적 물성 거동과 고변형률속도에서 재료의 열적연화(thermal softening)현상 등을 고찰하고 기존의 구성 방정식을 검증하고 전이이론에 기초한 구성방정식을 제안하였다.

그러나 이러한 연구 결과들은 주로 1000/sec 이상의 고변형률속도에서의 결과로써 차량의 충돌변형구간인 중변형률속도에서의 온도 및 변형률속도에 따른 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 자동차 충돌 변형에서의 변형률속도 범위인 200/sec 이하의 중변형률속도범위에서 차체용 강판에 사용되는 SPRC35R, SPRC45E에 대하여 동적 물성시험을 수행하였다. 온도 범위는 자동차의 작동온도 범위를 고려하여 -40°C~200°C의 범위로 결정하였으며, 이러한 온도영역에 대하여 변형률속도에 따른 차체용 강판의 유동응력 및 파단연신율의 변화를 고찰하고 변형률속도 민감도와 온도민감도를 조사하였다.

2. 중변형률속도에서 온도에 따른 물성 시험

200/sec 이하의 중변형률속도 범위에서 박판의 동적 물성시험을 수행하기 위하여 본 논문에서는 유압식 고속 인장 재료 시험기(high speed material testing machine)를 사용하였다[5~6]. 유압식 시험장치는 공압과 기계식 방법에 비하여 큰 힘을 얻을 수 있고 속도 조절이 용이한 장점이 있는 반면에 고압, 고유량의 유체를 끊은 시간 동안에 제어해야 하는 기술적인 어려움과 비싼 제작 단가 때문에 최근 십여 전부터 활발하게 연구되고 있다[7]. 고속 인장 재료시험기를 사용하여 온도에 따른 동적 인장시험을 수행하기 위하여 챔버를 제작하여 장착하였다. 챔버의 온도 제어범위는 -50°C~350°C이며, 정확성은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이다. 시편이 부착되는 주위에 열전대를 장착하였으며 전기, 액체 질소

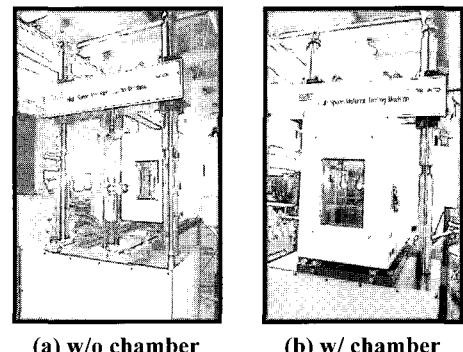


Fig. 1 High speed material testing machine with an environmental chamber



Fig. 2 Schematic description of a tensile specimen

를 이용하여 온도를 제어 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1 의 (a)는 챔버 장착전 고속 인장 재료 시험기의 모습이며 (b)는 챔버 장착후 시험기의 모습이다. 또한 중변형률속도범위의 인장시험에서 표점부의 균일한 변형을 유도하기 위하여 이동부의 지그가 일정한 속도에 이른 후에 시편에 인장력을 부기하도록 하였다. Fig. 2 에 본 논문에서 사용한 시편을 도시하였다[6].

재료의 온도에 따른 동적 물성치를 얻기 위하여 일정 온도에서 변형률속도에 따라서 준정적 시험, 중변형률속도 시험으로 인장시험을 수행하였다. 준정적 시험은 0.001/sec 의 변형률속도에 대하여 만능 재료시험기(UTM)인 Instron 4206 에 챔버를 장착하여 사용하였다. 0.1/sec 에서 200/sec 사이의 중변형률속도 구간에 대해서는 0.1, 1, 10, 100, 200/sec 의 변형률속도에서 고속 인장재료시험기를 사용하였다. 시험 온도 범위는 자동차의 작동 온도 범위와 챔버의 온도 제어 범위 그리고 로드셀의 가용 범위를 고려해 -40°C~200 °C로 설정하였다. 시험 조건에 따라서 2~3 회 이상 반복하여 시험하였으며, 각각의 온도에서 시편의 온도 분포를 일정하게 하고 시편과 그립사이에 열전달이 발생하지 않도록 하기 위하여 원하는 온도에 도달한 후 20~25 분 동안 유지한 후 시험을 수행하였다.

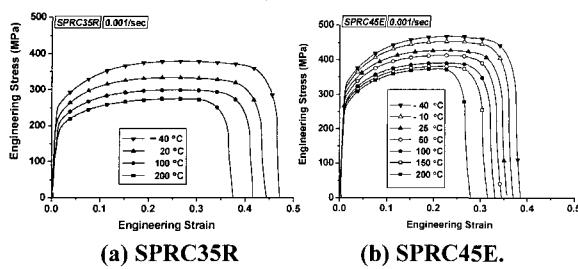


Fig. 3 Engineering stress-strain curve at quasi-static with the variation of the temperature

3. 온도에 따른 물성 시험 결과 및 고찰

3.1 온도 변화에 따른 정적 물성 특성

차체용 냉연강판인 SPRC35R, SPRC45E에 대하여 실현 온도에서 준정적 시험 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 온도가 증가할수록 항복응력과 최대인장응력이 감소하는 현상을 확인할 수 있으며 항복응력 변화량 보다 최대인장응력 변화량이 더 큰 것을 알 수 있다. 한편 온도가 증가할수록 연신율은 감소하는 경향을 보이는데 이러한 현상은 철강재의 고유한 특성인 동적변형률시효(dynamic strain aging) 현상과 관련되어 나타난다고 보고되어 있다[8].

3.2 온도 변화에 따른 동적 물성 특성

온도 및 변형률속도에 따른 유동응력 및 파단연신율의 변화를 조사하기 위하여 고속 인장시험을 수행하였다. 각 주변온도에서 변형률속도 변화에 따른 공칭응력-공칭변형률 선도를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. 전체 온도 범위에서 변형률속도가 증가할수록 응력이 증가하는 변형률속도 경화(strain-rate hardening)현상을 확인할 수 있다. 또한 동적 인장실험의 특성상 100/sec 이상의 변형률속도에서 하중멸림(load ringing)현상이 관찰되었다[9]. 그리고 상온을 기준으로 저온에서는 변형률속도 변화에 따른 응력의 변화량이 크고 고온에서는 변화량이 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 상온에서 변형률속도가 증가할수록 응력-변형률 선도의 기울기가 감소하는 경향을 보인다. 이는 응력의 변형률속도 민감도가 변형률이 증가할수록 감소하는 것을 의미한다. 이러한 현상은 저온에서 특히 심화되어 최대 인장응력이 나타나는 변형률이 변형률속도가 증가할수록 감소하여 100/sec 이상에서는 항복점과 최대 인장응력 발생점이 거의 일치하며 항복이 일어난 후 변형률이 증가 할수록 응력이 감소하는 양상을 보인다. 그러나 온도가 증가할수록 변형률속도 변화에 따른 응력의 변화량이 작아져 변형률속도가 증가할수록 응력-변형률 선도의 기울기가 감소하는 현상도 없어지게 된다.

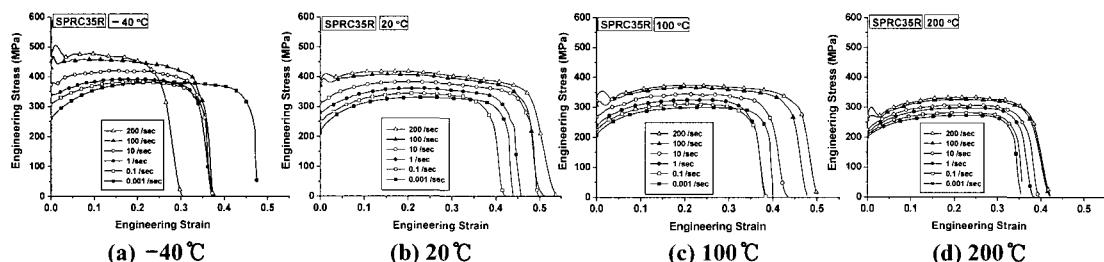


Fig. 4 Engineering stress-strain curves of SPRC35R with the variation of the strain rate and the temperature

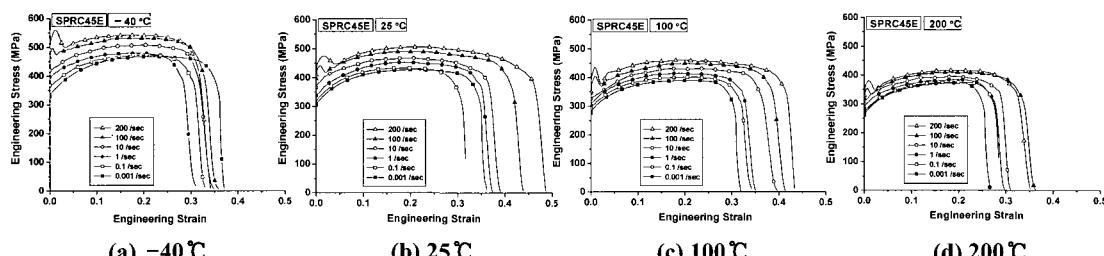


Fig. 5 Engineering stress-strain curves of SPRC45E with the variation of the strain rate and the temperature

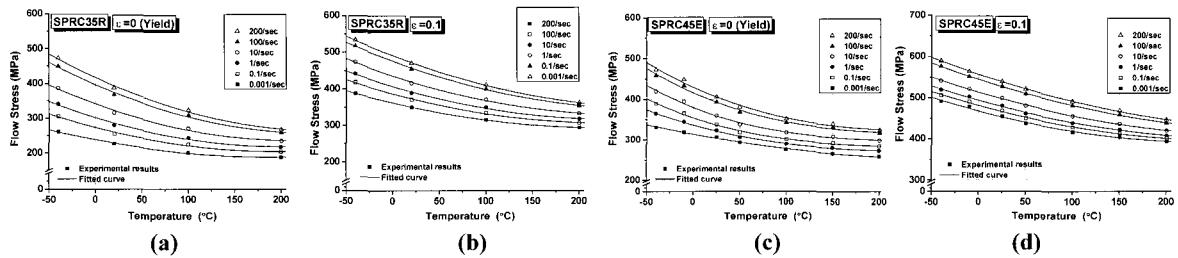


Fig. 6 Flow stress as a function of temperature for indicated strain and strain-rate: (a) SPRC35R at yield; (b) SPRC35R at $\varepsilon_p=0.1$; (c) SPRC45E at yield; (d) SPRC45E at $\varepsilon_p=0.1$

변형률속도와 온도가 재료의 유동응력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공칭응력-공칭변형률 선도를 진응력-진변형률 선도로 변환한 후 특정 변형률에서 온도에 따른 유동응력의 변화를 조사하였다. Fig. 6 의 (a)와 (b)에 SPRC35R 의 온도에 대한 유동응력 변화를 변형률속도별로 도시하였으며, (c)와 (d)에 SPRC45E 의 온도에 대한 유동응력 변화량을 변형률속도별로 도시하였다.

먼저 각 온도에서 변형률속도가 유동응력에 미치는 영향을 살펴보면 저온에서는 변형률속도가 증가할수록 유동응력이 증가하는 양이 큰 반면 고온에서는 증가량이 감소하는 것을 통하여 온도가 증가할수록 변형률속도 민감도가 감소한다는 사실을 정성적으로 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 6 의 (a)와 (c)에 도시한 각 변형률속도에서 온도가 항복응력에 미치는 영향을 살펴 보면 준정적 변형률속도일때는 온도 증가에 따른 항복응력의 감소 기울기가 완만한데 비하여 변형률속도가 증가할수록 온도 변화에 따른 항복응력 감소 기울기가 증가하는 것을 통하여 일정 온도 구간에서 온도 변화가 항복응력 감소에 미치는 영향이 변형률속도가 증가할수록 더 크다고 판단할 수 있다. 그러나 Fig. 6 의 (b)와 (d)에 도시한 바와 같이 소성변형률이 10% 발생한 경우 유동응력 감소 기울기가 비슷해지며 온도가 유동응력에 미치는 영향은 변형률속도에 따라 큰 차이가 나지 않는 것을 정성적으로 확인할 수 있다.

유동응력에 미치는 변형률속도 및 온도의 영향을 정량적으로 파악하기 위해 특정온도에서 식(1)의 변형률속도 민감도(strain-rate sensitivity)와 특정 변형률속도에서 식(2)의 온도 민감도(temperature sensitivity)를 정의하여 비교하였다.

$$m = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \dot{\epsilon})} \approx \frac{\Delta(\ln \sigma)}{\Delta(\ln \dot{\epsilon})} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Table 1 The variation of flow stress and coefficient of strain-rate sensitivity

Material \ Temperature	-40°C	20°C	100°C	200°C	
SPRC35R	$\Delta\sigma$ (MPa)	212	161	123	80
	m	0.049	0.044	0.039	0.029
SPRC45E	$\Delta\sigma$ (MPa)	142	99	75	64
	m	0.029	0.023	0.020	0.018

Table 2 The variation of flow stress and coefficient of temperature sensitivity

Material \ Strain rate	0.001 /sec	0.1 /sec	1 /sec	10 /sec	100 /sec	200 /sec
SPRC35R	$\Delta\sigma$ (MPa)	-74	-103	-124	-154	-192
	s	-0.31	-0.43	-0.52	-0.64	-0.80
SPRC45E	$\Delta\sigma$ (MPa)	-72	-92	-105	-122	-143
	s	-0.30	-0.38	-0.44	-0.51	-0.60

$$s = \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \approx \left[\frac{\Delta\sigma}{\Delta T} \right] \quad [\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2)$$

Table 1에 소성변형률이 0인 항복지점에서 변형률속도가 0.001/sec에서 200/sec으로 증가할 경우 각 시험 온도에서 유동응력 변화량($\Delta\sigma$)과 변형률속도 민감도(m)을 정리하였다. 변형률속도 민감도 계수를 비교함으로써 온도가 증가할수록 변형률속도 민감도가 감소하는 것을 정량적으로 확인할 수 있으며, 상대적으로 강도가 약한 SPRC35R 이 SPRC45E 보다 온도 변화에 따라 민감도계수가 감소하는 경향이 크게 나타난다. 또한 Table 2에 소성변형률이 0인 항복지점에서 온도가 -40°C에서 200°C로 증가할 경우 각 시험 변형률속도에서 유

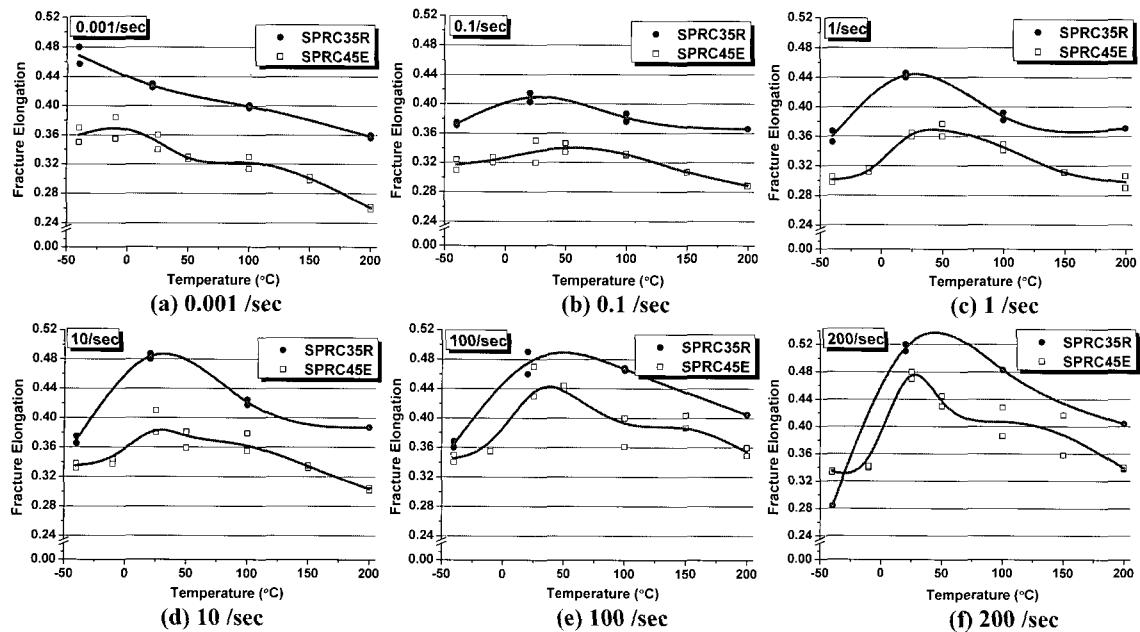


Fig. 7 Fracture elongation of SPRC35R and SPRC45E with the variation of temperature

동응력 변화량($\Delta\sigma$)과 온도 민감도 계수(s)를 정리하였다. 온도 민감도 계수가 음의 값을 가지는 것은 온도가 증가할수록 유동응력이 감소하는 것을 의미하며 변형률속도가 증가할수록 온도 민감도 계수의 절대값이 커지는 것으로 인하여 변형률속도가 증가할수록 온도 민감도가 증가하는 사실을 정량적으로 확인할 수 있다. 그리고 SPRC35R 과 SPRC45E 의 온도에 대한 영향을 비교하면 상대적으로 강도가 약한 SPRC35R 이 변형률속도와 온도의 변화에 더 민감한 것을 확인할 수 있다.

3.3 온도 변화에 따른 파단연신을 특성

차체용 냉연강판 SPRC35R, SPRC45E 의 준정적 및 고속 인장시험을 통해 온도와 변형률속도에 따른 파단연신율 특성을 살펴보기 위하여 각각의 변형률속도 및 온도에 따른 파단연신율의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 먼저 상온에서 변형률속도에 따른 파단연신율의 변화를 살펴보면 변형률속도 0.1/sec 까지는 파단연신율이 감소하다가 변형률속도가 증가할수록 오히려 파단연신율이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 단순 인장 시 재료의 균일한 변형이 발생하다가 불안전성(instability)에 의해 네킹(necking)이 발생하여 네킹부에서 변형이 집중되는데, 고속 인장시험 시에는 네킹이 발생하는 부분에서의 국부적인 높은 변형률속도

경화가 네킹의 진행을 억제하여 주위로 전파시키기 때문에 오히려 파단연신율이 증가하는 것으로 판단된다[9]. 그리고 특정 변형률속도에서 온도에 따른 파단연신율의 경향성을 검토하기 위하여 파단연신율의 실험값을 실선으로 근사하여 비교하였다. 준정적 변형률속도에서는 온도가 증가할수록 연신율이 감소하는 경향이 나타나며 0.1/sec 이상의 변형률속도에서는 상온의 파단연신율이 가장 크고 온도가 증가, 감소할수록 파단연신율이 감소하는 경향이 나타난다. 온도가 증가함에 따라 전반적으로 연신율이 감소하는 경향은 탄소강의 동적변형시효에 의한 청열취성(blue brittleness) 현상과 관계가 있다[10]. 일반적인 탄소강에서는 연신율이 온도증가에 따라 일단 감소했다가 200°C ~300°C에서 최저를 이룬 후 다시 증가한다. 또한 저온에서는 변형률속도 증가에 따른 네킹 전파보다 재료 강성의 증가에 의한 취성화 영향이 크기 때문에 연신율이 감소하게 된다. 변형률속도가 증가할수록 이러한 경향이 크게 나타나는 것을 통해 변형률속도가 증가할수록 연신율에 미치는 온도의 영향이 증가한다고 판단할 수 있다. 이상의 결과는 자동차의 다양한 작동온도에서 차량 충돌시 차체부재의 파단예측이나 고속 성형에서 부재의 온도 상승에 의한 성형성 같은 문제에서 큰 의미가 있다. 부재가 빠르게 변형할 때 일

정 변형률속도 구간에서는 변형률속도 경화에 의하여 파단연신율이 증가하므로 적절한 온도, 변형 속도를 유지시킨다면 충돌안전성이나 성형성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 차체용 강판에 대하여 온도 및 변형률속도에 따른 유동응력 및 파단연신율의 변화를 조사하기 위하여 고속 인장시험을 수행하였다. 대표적인 자동차 구조용 강판인 SPRC35R, SPRC45E에 대하여 -40°C~200°C의 온도 범위에서 0.001/sec~200/sec의 변형률속도로 동적 물성시험을 수행하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 각각의 온도, 변형률속도에서 응력-변형률선도, 변형률속도 민감도 등의 데이터베이스를 구축하였다.

(2) 각 강판에 대하여 온도가 증가할수록 변형률속도 민감도가 감소하고 변형률속도가 증가할수록 온도 민감도가 증가한다.

(3) 강도가 낮은 SPRC35 이 SPRC45E 보다 변형률속도 증가에 따른 응력의 증가량이 클 뿐만 아니라 온도 증가에 따른 응력 감소량이 크다.

(4) 변형률속도가 증가할수록 국부적인 높은 변형률속도 경화에 의한 네킹의 전파때문에 파단연신율이 증가하는 경향을 나타낸다.

(5) 온도가 증가할수록 청열취성 특성에 의해 연신율이 감소하는 경향이 나타난다. 하지만 변형률속도가 증가하면 저온에서 재료 강성의 증가에 의한 취성화 영향으로 상온의 파단연신율이 가장 크고, 저온, 고온이 될수록 파단연신율이 감소하는 경향을 나타낸다.

참 고 문 헌

[1] J. D. Campbell, W. G. Ferguson, 1970, Temperature

and Strain Rate Dependence of The Shear Strength of Mild Steel, Phil. Mag. Vol. 21, No. 169, pp. 63~82.

[2] J. Klepaczko, J. Duffy, 1982, Strain Rate History Effects in Body-Centered- Cubic Metals, ASTM STP765, pp. 251~268.

[3] S. Nemat-Nasser, W. C. Guo, 2001, Thermo mechanical Response of AL-6XN Stainless Steel over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 35, pp. 1823~1846.

[4] S. Nemat-Nasser, W. C. Guo, 2003, Thermo mechanical Response of DH-36 Structural Steel over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures, Mech. Mater., Vol. 35, pp. 1023~1047.

[5] J. H. Lim, S. B. Kim, J. S. Kim, H. Huh, J. D. Lim, S. H. Park, 2005, High Speed Tensile Test of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate. Transaction of KSAE, Vol. 13, No. 2, pp. 127~134.

[6] 임지호, 허훈, 권순용, 윤치상, 박성호, 2004, 중변형률속도에서의 차체용 강판의 동적 인장 실험, 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 1669~1974.

[7] K. Mahadevan, R. McCoy, B. Schell, J. Fekete, 1998, Strain-Rate Characterization of Automotive Steel and the Effect of Strain-Rate in Component Crash Analysis, SAE 982392.

[8] J. M. Robinson, M. P. Shaw, 1994, Microstructural and Mechanical Influences on Dynamic Strain Aging Phenomena, Int. Mater. Rev., Vol. 39, pp. 113~122.

[9] H. Huh, J. H. Lim, S. B. Kim, S. S. Han, S. H. Park, 2004, Formability of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate, Key Engineering Materials, Vols. 274-276, pp. 403~408.

[10] 이항수, 오영근, 2001, 박강판의 온도변화에 따른 인장특성, 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 2 호, pp. 101~110.