

차체용 강판의 온도에 따른 변형률 속도 민감도 연구

이희종¹, 송정한¹, 조상순¹, 김석봉¹, 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, S. B. Kim, H. Huh

Abstract

This paper is concerned with the thermo-mechanical behavior and 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, and the variation of environmental temperatures 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. The experimental results show that the strain rate sensitivity increases at low temperature and it decreases at high temperature. It means that as the strain rate getting increasing, the variation of flow stress is more sensitive on the temperature. The results also indicates that the material properties of SPRC35R is more depend on the changes of strain rates and temperature than those of SPRC45E.

Key Words : strain rate sensitivity(변형률 속도 민감도), dynamic strain aging(동적 변형 시효), temperature sensitivity(온도 민감도), intermediate strain rate(중변형률 속도)

1. 서 론

최근 에너지 절감 필요성과 운송 수단의 고속화로 인해 차체의 경량화, 안전화가 차량설계, 생산 분야의 중요한 목표가 되고 있다. 소재 측면에서 차량의 경량화를 위하여 고장력 강판 등의 신소재 개발과 하이드로포밍과 재단용접강판(TWB)등의 신성형기법을 이용한 부재성형 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 차량의 경량화는 충돌안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 자동차 충돌 시 재료가 빠르게 변형하는데 일반적으로 재료는 변형률 속도(strain rate)가 증가함에 따라 유동응력이 증가하며, 온도(temperature)가 증가함에 따라 유동응력이 감소한

다. 특히 차체용 강판은 변형률 속도에 따라서 강도의 변화가 다른 재료에 비하여 크고 온도 범위에 따라 변형률 속도에 대한 민감도가 다르기 때문에 상온 뿐만 아니라 자동차의 다양한 작동 온도에서 충돌 안전성을 확보하기 위해서는 작동 온도 범위에서 차체용 강판의 정확한 동적 물성치 확보는 필수적이다.

철강의 온도와 변형률 속도에 따른 물성 변화의 연구는 주로 고변형률 속도에서 비틀림 홉킨슨 바(Torsional Hopkinson bar) 시험기를 이용하여 연구되었다. Campbell 과 Ferguson[1]은 연강에 대해 195K~713K 의 온도 범위에서 0.001/sec 부터 1000/sec 까지의 시험을 수행하여 고온보다는 저온에서, 변형률 속도가 변할 때 유동응력의 변화폭

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 포스코 기술연구소

한국과학기술원 기계공학과, E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

이 큰 것을 확인하였고, Klepaczko 와 Duffy[2]는 AISI1020 열연강에 대해 83K~494K 범위에서 0.0005/sec 에서 1000/sec 으로 jump test 를 수행하여 극 저온에서는 변형률 속도 변화 영향(strain rate history effect)에 의하여 일정 변형률 속도일 때 보다 더 높은 유동응력을 보이지만 150K 이상에서는 변형률 속도 변화 영향이 재료의 물성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 증명하였다. 최근에는 Nemat-Nasser[3,4]등이 선박용 강재, 스테인레스 강, 탄탈륨 재료에 대해 압축형 홈킨슨 바 시험기를 이용하여 77K~1000K 의 넓은 온도범위에서 고변형률 속도 시험을 수행하여 각 재료에 대한 동적 물성 거동과 고변형률 속도에서 열연화 현상 등에 관한 연구를 하였으며 기존의 구성 방정식을 검증하고 전이이론에 기초한 구성방정식을 제안하였다.

그러나 이러한 연구 결과들은 주로 1000/sec 이상의 고변형률 속도에서 결과로 차량의 충돌 변형률 속도에서의 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 차체 충돌에서의 변형률 속도 범위인 200/sec 이하의 중변형률 속도범위에서 차체용 강판인 SPRC35R, SPRC45E 에 대하여 동적 물성시험을 수행하여 온도에 따른 변형률 속도 민감도를 조사하였다. 온도 범위는 자동차의 작동 온도 범위를 고려하여 -40℃~200℃에서 범위로 결정하였으며, 이러한 온도영역에 대하여 변형률 속도에 따른 차체용 강판의 거동에 미치는 영향을 고찰하고 물성 데이터베이스를 구축하였다.

2. 중변형률 속도에서 온도에 따른 물성 시험

수백/sec 이하의 중변형률 속도 범위에서 박판의 동적 물성시험을 수행하기 위하여 본 논문에서는 유압식 고속 인장 재료 시험기(high speed material testing machine)를 사용하였다[5-7]. 고속 인장 재료시험기를 사용하여 여러 온도에서 동적 시험을 수행하기 위해 챔버를 제작하여 장착하였다. 챔버의 온도 제어범위는 -50℃~350℃이며, 정확성은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이다. Fig. 1 의 (a)는 챔버 장착전 고속 인장 재료 시험기의 모습이며 (b)는 챔버 장착후 시험기의 모습이다. 또한 중변형률 속도범위의 인장실험에서 표점부의 균일한 변형을 유도할 수 있도록 하기 위하여 이동부의 지그가 일정한 속도에 이른 후에 시편을 잡기 위하여 설계된 시편을 사용하였다[6]. Fig. 2 에 본 논문에서 사용한 시편을 도시하였다.



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

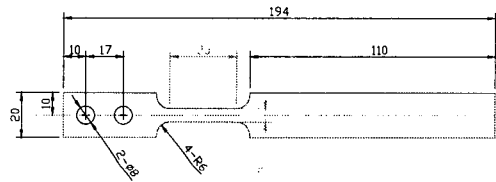


Fig. 2 Schematic description of a tensile specimen

재료의 온도에 따른 동적 물성치를 얻기 위하여 일정 온도에서 변형률 속도에 따라서 준정적 시험, 중변형률 속도 시험으로 인장시험을 수행하였다. 준정적 시험은 0.001/sec 의 변형률 속도에 대하여 원하는 온도에서 시험을 수행하기 위해 일반적인 정적 재료시험기(Instron 4206)에 챔버를 장착하여 사용하였다. 0.1/sec 에서 200/sec 사이의 중변형률 속도 구간에 대해서는 0.1, 1, 10, 100, 200/sec 의 변형률 속도에서 고속 인장 재료 시험기를 사용하였다. 시험 온도 범위는 자동차의 작동 온도 범위와 챔버의 온도 제어 범위, 로드셀의 가용 범위를 고려해 -40℃~200℃ 로 설정하였다. 시험 조건에 따라서 2~3 회 이상 반복하여 시험하였으며, 각각의 온도에서 시편의 온도 분포를 일정하게 하고 시편과 그림사이에 열 전달이 발생하지 않도록 하기 위하여 원하는 온도 도달 한 후 20~25 분 동안 유지한 후 시험을 수행하였다.

3. 온도에 따른 물성 시험 결과 및 고찰

3.1 온도 변화에 따른 정적 물성 특성

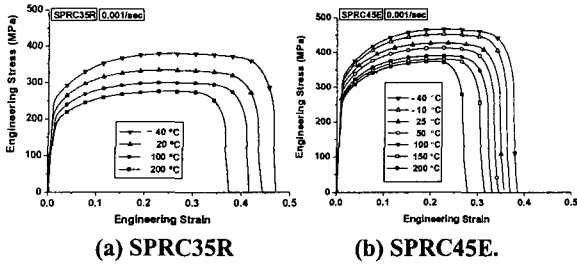


Fig. 3 Engineering stress-strain curve at quasi-static with the variation of the temperature

각 재료에 대하여 실험 온도에서 준 정적 실험 결과는 Fig. 3 에 도시하였다. 온도가 증가할수록 항복 응력과 최대 인장 강도가 감소하는 현상을 확인할 수 있으며 항복 응력 변화량 보다 최대 인장 강도 변화량이 더 큰 것을 알 수 있다. 한편 온도가 증가할수록 연신율은 감소하는 경향을 보이는데 이러한 현상은 steel 의 고유한 특성으로 동적 변형률 시효 현상과 관련이 있다 연신율은 온도가 증가함에 따라 감소하다가 인장강도가 피크를 이루는 시점인 동적 변형률 시효 영역에서 최저값을 가진 후 온도가 증가할수록 증가하게 된다. 이러한 동적 변형률 시효 영역은 변형률 속도가 증가할수록 고온으로 이동하는 특징을 가

지고 있다[8].

3.2 온도 변화에 따른 동적 물성 특성

차체용 내연강판 SPRC35R, SPRC45E 의 온도에 따른 준정적 및 고속 인장시험을 수행하여 Fig. 4, Fig. 5 의 공칭응력-공칭변형률 선도를 구하였다. 전체 온도 범위에서 변형률 속도가 증가할수록 응력이 증가하는 현상을 확인할 수 있는데 상온을 기준으로 저온의 경우에는 변형률 속도의 변화에 따른 응력의 변화량이 커지며 고온의 경우에는 변화량이 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 상온에서 변형률 속도가 증가할수록 응력-변형률 선도의 기울기가 감소하는데 이것은 응력의 변형률 속도 민감도가 변형률이 증가할수록 감소하는 것을 의미한다. 이러한 현상은 저온에서 특히 심화되어 최대 인장 응력의 발생 변형률이 변형률 속도가 증가할수록 감소하여 100/sec 이상에서는 항복점과 최대 인장응력 발생점이 거의 일치하여 항복이 일어난 후에 변형률이 증가할수록 응력이 감소하는 양상을 보인다. 온도가 증가할수록 변형률 속도의 변화에 따른 응력의 변화량이 줄어들며 변형률 증가에 따른 변형률 속도 민감도 감소 현상도 줄어들는다. Fig. 6 과 같이 일정 변형률에서 온도에 따른 유동응력의 감소경향을 변형률 속도 별로 도시함으로써 각각의 온도에 대한 유동응력

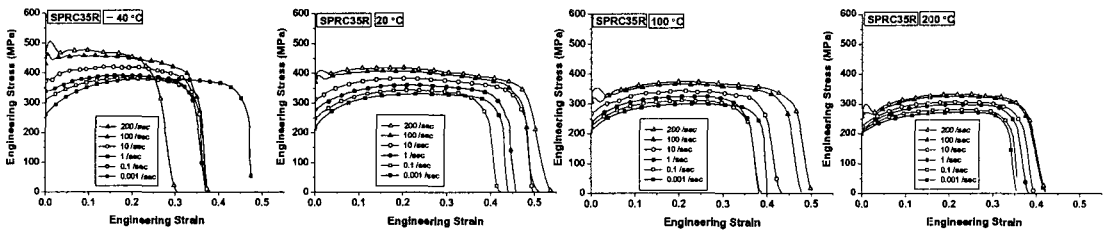


Fig. 4 Engineering stress-strain curves of SPRC35R with the variation of the strain rate and the temperature.

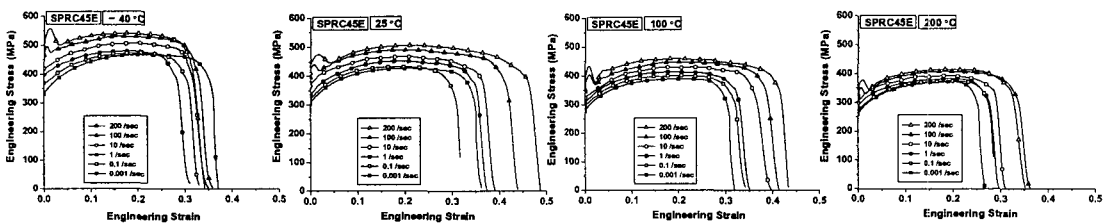


Fig. 5 Engineering stress-strain curves of SPRC45E with the variation of the strain rate and the temperature.

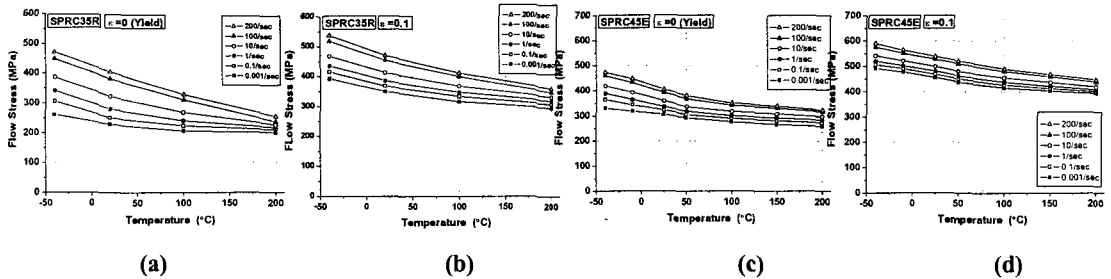


Fig. 6 Flow stress as a function of temperature for indicated strain and strain rate: (a) SPRC35R at $\epsilon = \text{Yield}$; (b) SPRC35R at $\epsilon = 0.1$; (c) SPRC45E at $\epsilon = \text{Yield}$; (d) SPRC45E at $\epsilon = 0.1$.

변화량을 비교하였다. Fig. 6의 (a), (b)에 SPRC35R에 대하여 온도에 따른 유동응력의 변화를 도시하였으며, (c)와 (d)에 SPRC45E의 변화량을 변형률 속도별로 도시하였다. Fig. 6의 결과를 통해 SPRC35R, SPRC45E 두가지 재료의 온도에 대한 영향을 비교하면 강도가 약한 재료인 SPRC35R이 온도의 변화에 보다 민감하다고 판단된다. 그리고 변형률 속도 별로 온도가 유동 응력에 미치는 영향을 살펴 보면 준정적 변형률 속도일 때는 온도 증가에 따른 유동 응력의 감소 기울기가 완만하고 변형률이 진행될수록 증가하는 경향을 보인다. 하지만 변형률 속도가 증가할수록 온도 변화에 따른 유동 응력 감소 기울기가 점점 급격해지는 현상을 확인할 수 있으며 이를 통해 일정 온도 구간에서 온도 변화가 유동 응력에 미치는 영향은 저변형률 속도일 때 보다는 고변형률 속도일 때가 더 크다고 할 수 있다.

4. 결론

SPRC35R, SPRC45E 강관에 대하여 $-40^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 $0.001/\text{sec} \sim 200/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 동적 물성 시험을 수행하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 각각의 온도, 변형률 속도에서 응력-변형률 선도, 변형률 속도 민감도 등의 데이터 베이스를 구축하였다.

(2) 상온의 변형률 속도 민감도를 기준으로 저온에서는 변형률 속도 민감도가 증가하며 고온에서는 변형률 속도 민감도가 감소한다.

(3) 변형률 속도가 증가할수록 온도 민감도가 증가한다.

참고 문헌

- [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 and J. Duffy, 1982, *Strain Rate History Effects in Body-Centered-Cubic Metals*, ASTM STP765, pp.251-268.
- [3] S. Nemat-Nasser and 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 and 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] 임지호, 허 훈, 2003, 고속 재료시험기를 사용한 차체용 강관의 동적 물성실험, 한국자동차 공학회 추계학술대회, pp. 1525~1530.
- [6] 임지호, 허 훈, 권순용, 윤치상, 박성호, 2004, 중변형률 속도에서의 차체용 강관의 동적 인장실험, 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 1669~1974.
- [7] J. M. Robinson and M. P. Shaw, 1994, Microstructural and Mechanical Influences on Dynamic Strain Aging Phenomena, *Int. Mater. Rev.*, Vol. 39, pp. 113-122