

< 논문 >

## 차체용 강판의 온도에 따른 동적 구성방정식에 관한 연구 (I)

- 온도에 따른 동적 물성 특성 -

이희종\* · 송정한\* · 허 훈† · 박성호\*\*  
(2006년 7월 19일 접수, 2006년 12월 21일 심사완료)

### Dynamic Constitutive Equations of Auto-Body Steel Sheets with the Variation of Temperature (I)

- Dynamic Material Characteristics with the Variation of Temperature -

Hee-Jong Lee, Jung-Han Song, Hoon Huh and Sung-Ho Park

**Key Words :** Intermediate Strain Rate(중변형률속도), Strain Rate Sensitivity(변형률속도 민감도), Temperature Sensitivity(온도 민감도), Dynamic Strain Aging(동적변형률시효), Fracture Elongation(파단연신율)

#### Abstract

This paper is concerned with the thermo-mechanical behavior of steel sheet for an auto-body including temperature dependent strain rate sensitivity. In order to identify the temperature-dependent strain rate sensitivity of SPRC35R, SPRC45E and TRIP60, uniaxial tensile tests are performed with the variation of the strain rates from 0.001/sec to 200/sec and the variation of environmental temperatures from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $200^{\circ}\text{C}$ . The thermo-mechanical response at the quasi-static state is obtained from the static tensile test and that at the intermediate strain rate is obtained from the high speed tensile test. Experimental results show that the variation of the flow stress and fracture elongation becomes sensitive to the temperature as the strain rate increases. It is observed that the dynamic strain aging occurs with TRIP60 at the temperature above  $150^{\circ}\text{C}$ . Results also indicate that the flow stress and fracture elongation of SPRC35R are more dependent on the changes of strain rates and temperature than those of SPRC45E and TRIP60.

#### 1. 서론

최근 에너지 절감의 필요성과 운송 수단의 고속화로 인하여 차체의 경량화와 안전화가 차량의 설계 및 생산 분야의 중요한 목표가 되고 있다. 소재적 측면에서 차량의 경량화를 위하여 고장력 강판 등의 신소재개발과 하이드로포밍, 재단용접강판(TWB) 등의 신성형기법을 이용한 부재의 성형

기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 차량의 경량화는 충돌안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 자동차 충돌 시 재료는 약 200/sec의 변형률속도(strain rate) 범위에서 고속변형이 발생하는데 일반적으로 재료는 변형률속도가 증가하면 유동응력이 증가하며, 변형 온도가 증가하면 유동응력이 감소하는 경향성을 보인다.<sup>(1)</sup> 특히, 차체용 강판은 변형률속도에 따라서 강도의 변화가 다른 재료에 비하여 크고 온도조건에 따라 변형률속도에 대한 민감도가 다르기 때문에 상온뿐만 아니라 규정된 작동온도에서의 충돌 안전성을 확보하기 위하여는 자동차의 작동온도 범위 내에서의 차체용 강판의 정확한 동적 물성치 확보가 필수적이다.

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 포스코 자동차강재연구센터

† 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3222 FAX : (042)869-3210

강재의 온도와 변형률속도에 따른 물성 변화의 연구는 주로 고변형률속도에서 비틀림 홉킨슨 바(torsional Hopkinson bar) 시험기를 이용하여 연구되었다. Campbell과 Ferguson<sup>(2)</sup>은 연강(mild steel)에 대하여 195K~713K의 온도범위에서 0.001/sec부터 1000/sec까지의 재료시험을 수행하여 고온보다는 저온에서, 변형률속도 변화에 따른 유동응력의 변화폭이 크다는 사실을 확인하였고, Klepaczko와 Duffy<sup>(3)</sup>는 AISI1020 열연강에 대하여 83K~494K 범위에서 변형률속도를 0.0005/sec에서 1000/sec으로 달리하여 극저온에서는 변형률속도 이력(strain rate history effect)에 의하여 일정 변형률속도일 때 보다 더 높은 유동응력을 보이지만 150K 이상에서는 변형률속도 이력이 재료의 물성에 큰 영향을 미치지 않다고 보고하였다. 최근에는 Nemat-Nasser<sup>(4,5)</sup> 등이 선박용 강재, 스테인리스강, 탄탈륨 재료 등에 대하여 압축형 홉킨슨바시험기를 이용하여 77K~1000K의 넓은 온도범위에서 고변형률속도 시험을 수행하여 각 재료에 대하여 동적 변형률시효(dynamic strain aging)현상을 포함한 동적 물성거동과 고변형률속도에서 열적연화(thermal softening) 현상 등을 고찰하였고 전이이론에 기초한 구성방정식을 제안하였다.

그러나 이러한 연구 결과들은 주로 1000/sec이상의 고변형률속도에서의 결과로써 차량의 충돌 변형구간인 중변형률속도에서의 온도 및 변형률속도에 따른 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 자동차 충돌 변형에서의 변형률속도 범위인 200/sec 이하의 중변형률속도 범위에서 대표적인 차체용 구조강판인 SPRC35R, SPRC45E, TRIP60에 관하여 동적 물성시험을 수행하였다. 온도 범위는 자동차의 작동온도 범위를 고려하여 -40℃~200℃의 범위로 결정하였으며, 이러한 온도영역에 대하여 변형률속도에 따른 차체용 강판의 유동응력 및 파단연신율의 변화를 고찰하고 강판의 변형률속도 민감도와 온도 민감도를 조사하였다.

## 2. 시험 방법

### 2.1 동적 인장시험

일반적으로 정적시험의 경우 국제규격에서 실험 방법뿐만 아니라 물성시험에 사용되는 시편의 종류, 형상, 조건 등에 관해 규정하고 있지만, 중변형률속도에서의 물성시험의 경우는 아직 명확한 연구결과가 마련되어 있지 않기 때문에 시험방법과 시편에 대한 규정이 명시되어 있지 않다.<sup>(6)</sup>

따라서 중변형률속도범위에서 인장시험을 수행하기 위하여 본 논문에서는 유한요소해석에 의하여 최적형

상이 결정된 Fig. 1 과 같은 치수를 가지는 시편을 사용하였다.<sup>(7-9)</sup> 시편의 그림부의 길이가 다른 것은 이동부의 지그가 일정한 속도에 이른 후에 시편을 잡기 위하여 이동부의 길이를 증가시킨 것이고, 고정부의 두 개의 구멍은 로드셀 쪽에 있는 지그에 볼트로 체결하기 위하여 가공하였다. 시험에 사용된 시편은 모두 압연 방향으로 가공 되었으며 준정적변형률속도의 인장시험에서도 동일한 시편을 사용하였다.

### 2.2 고속인장 재료시험기

중변형률속도 범위에서 동적 물성을 얻기 위하여 지금까지 공압, 유압 및 기계적인 방법이 이용되어왔으나 본 논문에서는 고압의 유압 실린더를 사용하여 시편을 인장하는 방식을 채택하였다. 유압식 시험장치는 공압과 기계식 방법에 비하여 큰 힘을 얻을 수 있고 속도 조절이 용이한 장점이 있는 반면에 고압, 고유량의 유체를 짧은 시간 동안에 제어해야 하는 기술적인 어려움 때문에 최근에서야 활발하게 연구되고 있으며 제작 단가가 비싼 단점이 있다. 본 논문에서는 수백/sec 이하의 중변형률속도 범위에서 박판의 동적 물성시험을 수행하기 위하여 유압식 고속인장 재료 시험기(high speed material testing machine)를 사용하였으며<sup>(7)</sup> 다양한 온도에서 동적 시험을 수행하기 위하여 챔버를 장착하였다. Fig. 2(a)는 챔버 장착 전 고속인장 재료시험기의 모습이며, Fig. 2(b)는 챔버 장착 후

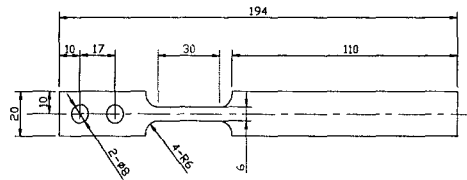
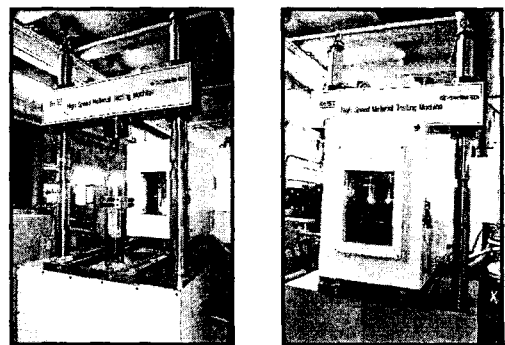


Fig. 1 Schematic description of a tensile specimen



(a) w/o chamber

(b) w/ chamber

Fig. 2 High speed material testing machine with an environmental chamber

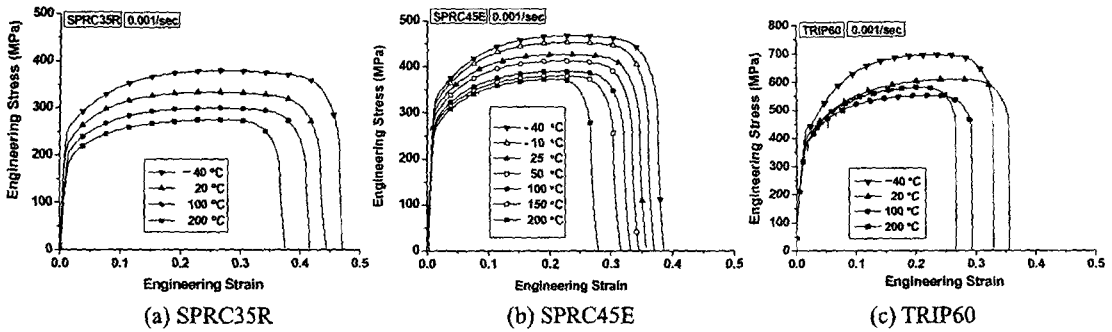


Fig. 3 Engineering stress-strain curve at quasi-static with the variation of the temperature

시험기의 모습이다. 실험에 사용한 챔버장치의 온도 제어범위는  $-50^{\circ}\text{C}$ ~ $350^{\circ}\text{C}$ 이며,  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 신뢰성을 갖는다. 시편이 부착되는 주위에 온도를 감지할 수 있는 열전대를 장착하여 챔버 내부의 온도를 측정하며 전기 및 액체질소를 이용하여 온도를 제어한다.

2.3 시험 방법

차체용 강판의 온도에 따른 동적 물성치를 얻기 위하여 일정 온도에서 변형률속도에 따라서 준정적 및 중변형률속도로 인장시험을 수행하였다. 준정적 인장 시험은 0.001/sec의 변형률속도로 일반적인 만능재료시험기(Instron 4206)에 챔버를 장착하여 사용하였다. 0.1/sec에서 200/sec 사이의 중변형률속도 구간에 해당하는 0.1, 1, 10, 100, 200/sec의 변형률속도에서 시험을 수행하였다. 그리고 실험 온도범위는 자동차의 작동 온도범위와 챔버의 온도제어범위, 로드셀의 가용범위를 고려하여  $-40^{\circ}\text{C}$ ~ $200^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 먼저 차체용 강판에 대하여 중변형률속도에서 온도 효과가 동적 물성에 미치는 영향 유무에 대한 선행 연구로써 항복응력이 약 200MPa인 SPRC35R에 대하여  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 시험을 수행하였다. 그리고 강도에 따른 영향을 조사하기 위하여 45kg급과 60kg급 강판인 SPRC45E와 TRIP60에 대하여 추가적으로 시험을 수행하였다. SPRC45E 차체용 강판에 대해서는  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 준정적 및 중변형률속도 인장 시험을 수행하였으며, TRIP60에 대해서는  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 시험을 수행하였다. 시험 조건에 따라서 2~3 회 이상 반복하여 시험을 수행하였으며, 각각의 온도에서 시편의 온도 분포를 일정하게 하고 시편과 그림 사이에 열전달이 발생하지 않도록 하기 위하여 원하는 온도에 도달한 후 약 20~25 분 동안 유지한 후 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 강판의 화학적조성비를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Chemical composition of specimens

| Material             | Chemical composition (wt %) |        |       |       |       |       |
|----------------------|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                      | C                           | Si     | Mn    | P     | S     | Al    |
| SPRC35R<br>(t=1.4mm) | 0.04                        | 0.03   | 0.50  | 0.035 | 0.025 | 0.045 |
| SPRC45E<br>(t=1.2mm) | 0.0016                      | 0.0084 | 1.573 | 0.113 | 0.006 | 0.045 |
| TRIP60<br>(t=1.4mm)  | 0.0996                      | 1.165  | 1.373 | 0.022 | 0.003 | 0.039 |

3. 시험 결과

3.1 온도변화에 따른 정적 시험 결과

차체용 구조강판인 SPRC35R, SPRC45E, TRIP60에 대하여 시험 온도에서 준정적 인장시험 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 온도가 증가할수록 항복응력과 최대 인장강도, 연신율이 감소하는 현상을 확인할 수 있으며 항복응력의 변화량보다 최대 인장강도 변화량이 더 큰 것을 알 수 있다. TRIP60의 경우는 다른 강종과 비교하여  $200^{\circ}\text{C}$ 의 응력곡선에서 톱니형상의 유동(serrated flow)이 나타나고  $100^{\circ}\text{C}$ 의 유동응력보다 더 커지는 응력의 역전현상이 나타난다. 이러한 현상은 강재의 고유한 특성으로 동적변형률시효(dynamic strain aging) 현상과 관련이 있다. TRIP60의 경우에는 재료 내부의 탄소(C) 또는 질소(N) 원자뿐만 아니라 실리콘(Si)이나 망간(Mn)의 불순 원자들이 전위를 고착시킴으로써  $200^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 이러한 현상이 나타나는 것으로 판단되며 이에 대하여 4장에서 자세히 고찰하였다.

3.2 온도변화에 따른 동적 시험 결과

SPRC35R, SPRC45E, TRIP60에 대하여 주변 온도를 변화하여 중변형률속도 영역에서 고속 인장시험

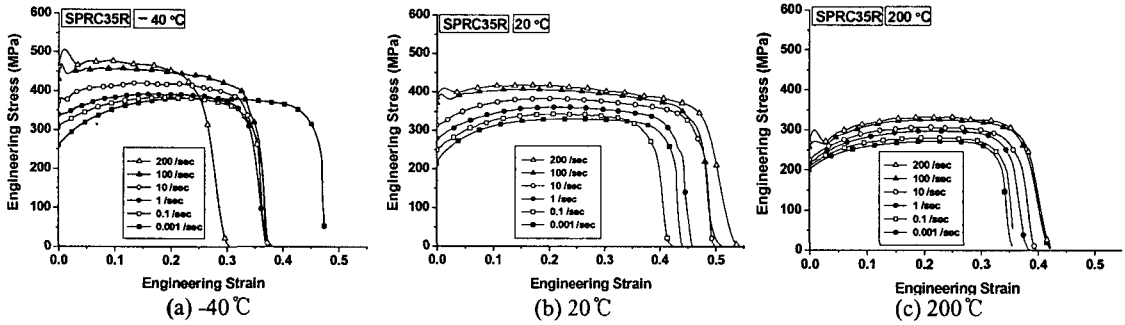


Fig. 4 Engineering stress-strain curves of SPRC35R with the variation of strain rate and temperature

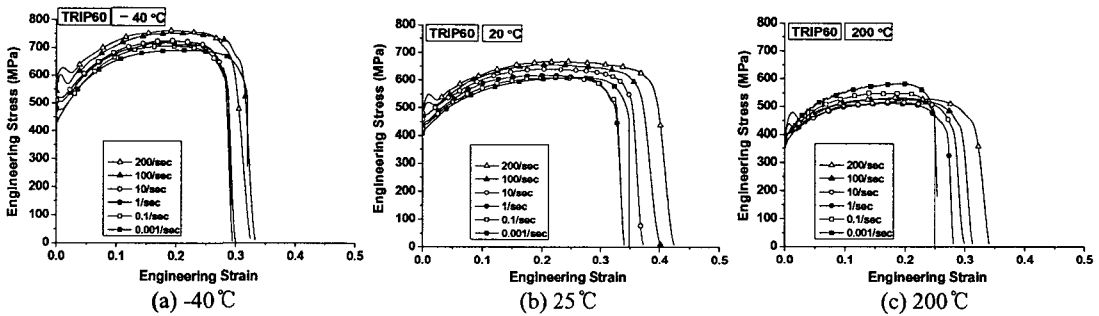


Fig. 5 Engineering stress-strain curves of TRIP60 with the variation of strain rate and temperature

험을 수행하였다. Fig. 4 와 Fig. 5 에 SPRC35R 과 TRIP60 의 온도 및 변형률속도에 따른 공칭응력-공칭변형률 선도를 도시하였다. 동적 인장시험의 특성상 100/sec 이상의 변형률속도에서 하중떨림(load ringing)현상이 관찰되었다.<sup>(9)</sup> 실험 온도 범위에서 변형률 속도가 증가할수록 응력이 증가하는 변형률속도경화(strain rate hardening) 현상을 관찰할 수 있으며, 온도에 따른 이러한 변형률속도경화는 상온을 기준으로 저온에서는 변형률속도의 변화에 따른 유동응력의 변화량이 큰 반면 고온에서는 변화량이 감소하는 것을 공칭응력-공칭변형률 선도를 통하여 정성적으로 확인할 수 있다. 한편, 상온에서 변형률 속도가 증가할수록 공칭응력-공칭변형률 선도의 기울기가 감소한다. 이는 응력의 변형률속도 민감도가 변형률이 증가할수록 감소하는 것을 의미하며 이러한 현상은 저온에서 특히 심화되어 최대 인장응력이 발생하는 변형률이 변형률속도가 증가할수록 감소한다. 특히 Fig. 4(a)에 도시되어 있는 SPRC35R 의 -40°C에서 공칭응력-공칭변형률 선도를 살펴보면 100/sec 이상의 변형률속도에서 항복점과 최대 인장응력 발생점이 거의 일치하며 항복이 일어난 후에 변형률이 증가할수록 응력이 감소하는 양상을 보인다.

TRIP60 의 경우, 각각의 온도에서 변형률속도가 증가할수록 유동응력이 증가하는 경향은 존재하지만 SPRC35R 과 SPRC45E 에 비하여 변형률속도의 증가에 따른 유동응력의 변화량이 상대적으로 적게 나타난다. 또한 TRIP60 은 상온보다 저온에서 가공경화 속도가 크게 증가하는 특징을 보이며, 200°C의 고온에서 준정적변형률속도의 유동응력이 중변형률속도에서의 유동응력 보다 증가하여 변형률속도 민감도가 음의 값을 가지는 현상을 보인다. 이는 TRIP60 이 200°C의 고온에서 동적변형률시효 영역에 속하게 되어 준정적변형률속도에서의 유동응력은 일시적으로 증가한 것으로 판단되며 이에 대하여 4 장에 자세히 고찰하였다.

#### 4. 시험 결과 고찰

##### 4.1 유동응력의 변형률속도 및 온도 민감도

일반적으로 강재는 변형률속도가 증가하면 재료의 유동응력이 증가하고 변형온도가 증가하면 유동응력이 감소하는 특징을 보인다. 하지만 유동응력이 증가 또는 감소되는 변화량은 재료와 변형률속도 및 주변온도에 따라 각각 달라지게 된다. 변형률속도와 온도가 재료의 유동응력에 미치는

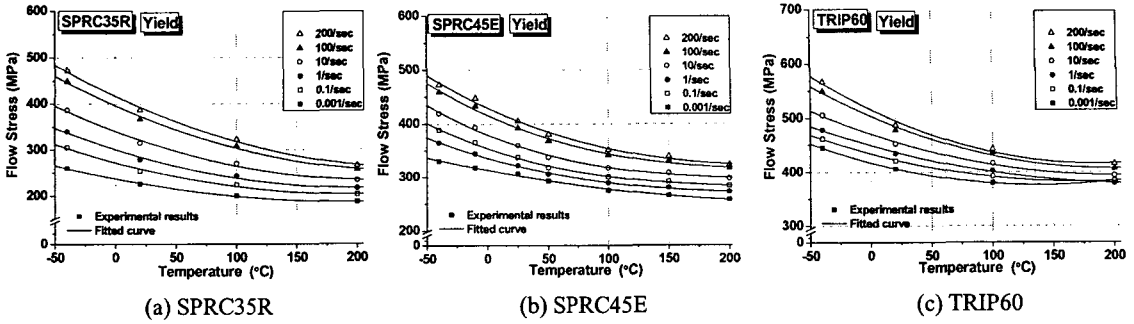


Fig. 6 Variation of yield stress with respect to temperatures at corresponding strain rates

영향을 살펴보기 위하여 본 논문에서는 실험을 통하여 확보한 공칭응력-공칭변형률 선도를 진응력-진변형률 선도로 변환한 후 특정 변형률에서 온도에 따른 유동응력의 변화를 조사하였다. Fig. 6에 세 종류의 구조용 강판에 대하여 항복응력의 변화를 변형률속도에 따른 온도의 함수로써 비교하여 도시하였다.

먼저 특정 온도에서 변형률속도가 유동응력에 미치는 영향을 살펴보면 저온에서는 변형률속도가 증가할수록 항복응력의 증가량이 큰 반면 고온에서는 감소하는 경향을 통하여 온도가 증가할수록 변형률속도민감도가 감소한다는 사실을 정성적으로 확인할 수 있다. 그리고 특정 변형률속도에서 온도가 항복응력에 미치는 영향을 살펴보면 준정적변형률속도에서는 온도 증가에 따른 항복응력의 감소기울기가 완만한데 비하여 변형률속도가 증가할수록 항복응력 감소기울기가 증가하는 시험결과를 통하여 변형온도 변화가 항복응력 감소에 미치는 영향은 변형률속도가 증가할수록 더 크다고 판단할 수 있다.

이러한 항복응력에 미치는 변형률속도 및 온도의 영향을 정량적으로 파악하기 위해 식 (1)의 변형률속도 민감도(strain rate sensitivity), 식 (2)의 온도 민감도(temperature sensitivity)를 정의고 이를 계산하여 Table 2와 Table 3에 도시하였다.

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

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

Table 2에 소성변형률이 0인 항복지점에서 변형률속도가 0.001/sec에서 200/sec으로 증가할 경우 각 시험 온도에서 유동응력 변화량( $\Delta\sigma$ )과 변형률속도 민감도계수(m)를 정리하였다. 민감도계수를 비교

Table 2 Strain rate sensitivity at the corresponding temperature

| Material |                      | -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 |
| TRIP60   | $\Delta\sigma$ (MPa) | 123   | 82    | 63    | 31    |
|          | m                    | 0.020 | 0.016 | 0.013 | 0.007 |

Table 3 Temperature sensitivity at the corresponding strain rate

| Material |                      | 0.001/sec | 0.1/sec | 1/sec | 10/sec | 100/sec | 200/sec |
|----------|----------------------|-----------|---------|-------|--------|---------|---------|
| SPRC35R  | $\Delta\sigma$ (MPa) | -74       | -103    | -124  | -154   | -192    | -206    |
|          | s                    | -0.31     | -0.43   | -0.52 | -0.64  | -0.80   | -0.86   |
| SPRC45E  | $\Delta\sigma$ (MPa) | -72       | -92     | -105  | -122   | -143    | -150    |
|          | s                    | -0.30     | -0.38   | -0.44 | -0.51  | -0.60   | -0.62   |
| TRIP60   | $\Delta\sigma$ (MPa) | -61       | -78     | -100  | -113   | -144    | -153    |
|          | s                    | -0.26     | -0.33   | -0.42 | -0.47  | -0.60   | -0.64   |

한 결과 온도가 증가할수록 변형률속도 민감도가 감소하며, 상대적으로 강도가 낮은 SPRC35R이 변형률속도 민감도가 가장 크고 재료의 강도가 증가할수록 민감도가 줄어드는 것을 정량적으로 확인할 수 있다. 또한 Table 3에 온도가 -40°C에서 200°C로 증가할 경우에 각 시험 변형률속도에서 항복응력의 변화량( $\Delta\sigma$ )과 온도 민감도계수(s)를 정리하였다. 온도 민감도계수가 음의 값을 가지는 것은 온도가 증가할수록 유동응력이 감소하는 것을 의미하며, 변형률속도가 증가할수록 온도 민감

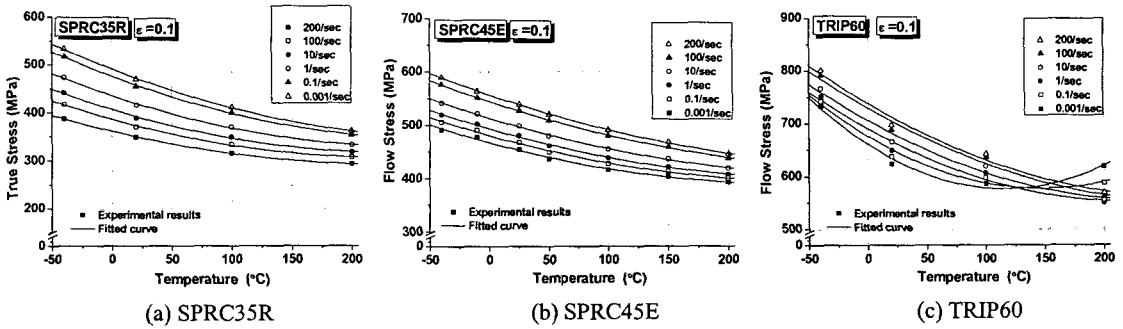


Fig. 7 Variation of flow stress at the plastic strain of 0.1 with respect to temperatures at corresponding strain rates

도계수의 절대값이 커지는 결과를 통하여 변형률 속도가 증가할수록 온도 민감도가 증가한다는 사실을 정량적으로 확인할 수 있다. 그리고 SPRC35R 과 SPRC45E, TRIP60 의 온도 민감도계수를 통하여 상대적으로 강도가 약한 SPRC35R 이 변형률속도 뿐만 아니라 온도 변화에도 민감한 사실을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7 에 도시한 바와 같이 소성변형이 10% 진행된 상태에서 각 재료의 유동응력 감소 경향을 살펴보면 각 변형률속도에서 온도증가에 따른 유동응력 감소 기울기가 비슷하고 온도가 유동응력에 미치는 영향이 변형률속도에 따라 큰 차이가 나타나지 않는다. 한편 Fig. 7(c)에 도시한 TRIP60 에 대하여 각 변형률속도에서 온도 증가에 따라 유동응력이 감소하는 경향을 살펴보면 0.001/sec 과 0.1/sec 의 변형률속도의 경우에 100°C와 200°C의 온도범위에서 온도가 증가할수록 유동응력이 증가하는 현상이 발생하며 200°C의 고온에서 준정적변형률속도의 유동응력이 중변형률속도에서의 유동응력보다 증가하여 변형률속도 민감도가 음의 값을 가지는 현상을 보인다. 이는 TRIP60 의 경우에 약 200°C의 고온에서 동적변형률시효 영역에 속하게 되어 준정적변형률속도에서의 유동응력은 일시적으로 증가하지만 변형률속도가 증가할수록 동적변형률시효 영역이 고온으로 이동하는 특성으로 고온에서 변형률속도 민감도가 음의 값을 가지는 것으로 판단된다.

4.2 동적변형률시효 현상

앞서 TRIP60에서 관찰된 동적변형률시효 현상에 관하여 보다 자세하게 고찰하기 위하여 200°C 전·후의 온도범위인 150°C와 250°C에서 추가적인 시험을 수행하였다. Fig. 8에 0.001/sec의 변형률속도에서 각 온도에 따른 인장시험결과를 변형률 0.15, 인장력 300~600 MPa의 범위에서 확대하여 도시하였다. 150°C이상의 온도에서 톱니유동이 나

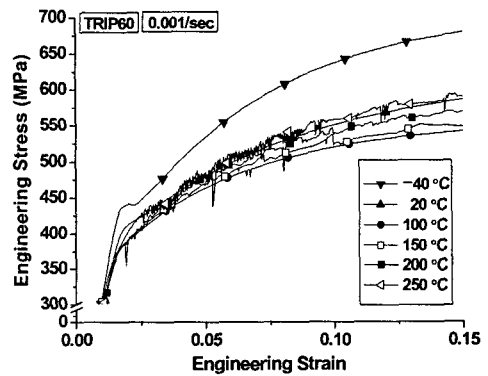


Fig. 8 Engineering stress-strain curves of TRIP60 at the strain rate of 0.001/sec

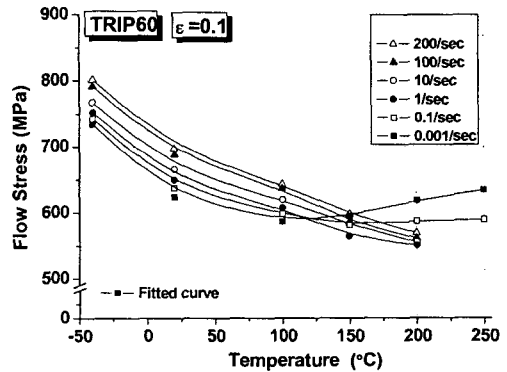


Fig. 9 Effect of strain rates and temperature on flow stress at a plastic strain of 10%

타지기 시작하며, 온도가 증가할수록 다양한 유형의 톱니유동(serrated flow)이 관찰되고 유동응력이 증가한다. 특히 250°C에서 톱니유동이 가장 뚜렷하게 나타나며 상온의 유동응력과 거의 동일한 유동응력 크기를 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 톱니유동 현상은 응력-변형률 곡선상에서 관찰되는 응력의 반복적인 떨림 현상 또는 불연속적

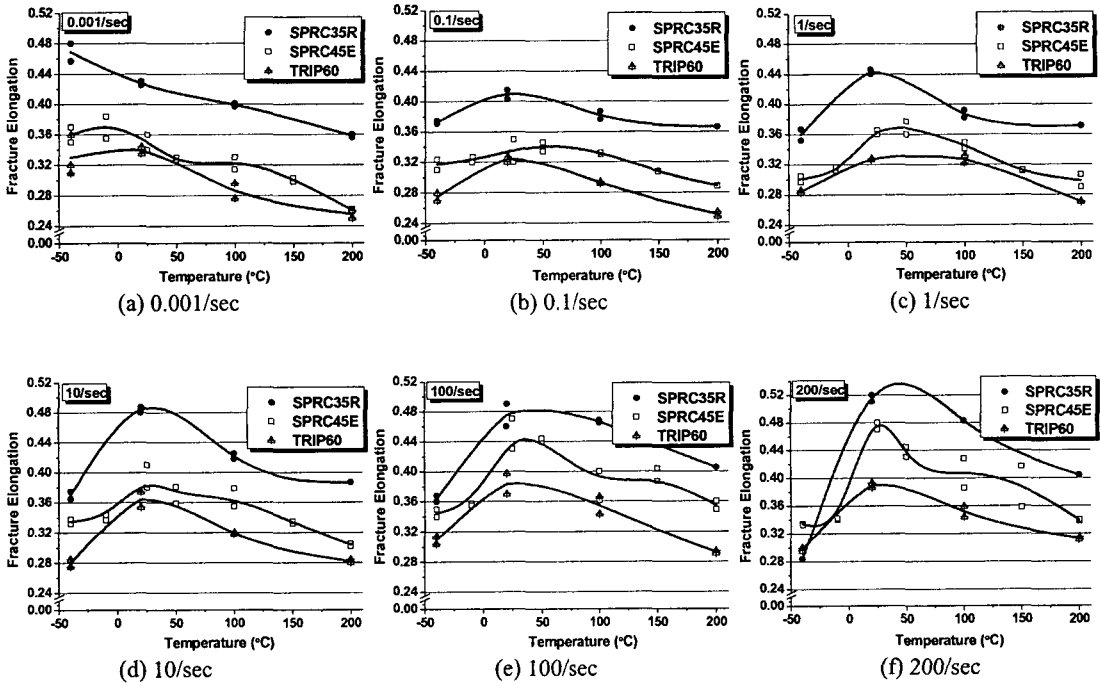


Fig. 10 Fracture elongation of SPRC35R, SPRC45E and TRIP60 with the variation of temperature

인 변화를 의미하며 침입형 원소인 용질원자 (solute)가 전위와 분위기를 형성하여 전위를 고착시키는 동적변형시효(dynamic strain aging) 때문인 것으로 보고되어있다.<sup>(10)</sup>

이러한 실험적 관찰을 통하여 TRIP60의 경우 0.001/sec의 변형률속도에서 약 150°C~250°C의 온도범위는 동적변형률시효 영역에 속하게 되며 재료거동이 불안정하게 된다는 사실을 유추할 수 있다. 뿐만 아니라 동적변형률시효 현상이 발생하면 항복강도보다는 인장 강도가 증가된다고 보고되어 있다. 이에 대한 고찰을 위하여 Fig. 9에 소성변형률이 10% 진행된 상태에서 온도에 따른 유동응력 변화를 변형률속도별로 도시하였다. 250°C의 온도 범위에서 0.1/sec 변형률속도까지는 동적변형률시효 현상에 의해 온도증가에 따라 유동응력이 증가하는 현상이 발생하지만 1/sec 이상의 변형률속도에서는 온도증가에 따라 유동응력이 계속해서 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 동적변형률시효 영역이 변형률속도가 증가할수록 고온으로 이동하는 특성으로 저변형률속도에서는 이동전위의 속도가 느려져 전위가 용질원자 분위기에 쉽게 고착되지만, 변형률속도가 증가할수록 용질원자가 전위에 고착하기 위해서는 더 높은 온도

가 필요하기 때문이다.<sup>(12-15)</sup>

#### 4.3 파단연신을 특성

차체용 냉연강판 SPRC35R, SPRC45E, TRIP60의 온도와 변형률속도에 따른 파단연신율 특성을 살펴보기 위하여 준정적 및 고속 인장시험을 통하여 확보한 파단연신율을 변형률속도 및 온도에 따라 Fig. 10에 도시하였다. 먼저 상온에서 변형률속도에 따른 파단연신율의 변화를 살펴보면 0.1/sec의 변형률속도까지는 파단연신율이 감소하다가 변형률속도가 증가할수록 오히려 파단연신율이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 단순 인장 시에 네킹(necking)이 발생하면 네킹부에서 집중적인 변형이 발생하는데, 고속 인장시험 시에는 네킹이 발생하는 부분에서의 국부적인 높은 변형률속도 경화가 네킹의 진행을 억제하여 주위로 전파시키기 때문에 오히려 파단연신율이 증가하는 것으로 판단된다.<sup>(9)</sup> 그리고 특정 변형률속도에서 온도에 따른 파단연신율의 경향성을 검토하기 위하여 파단연신율의 실험값을 실선으로 근사하여 비교하였다. 준정적변형률속도에서는 온도가 증가할수록 파단연신율이 감소하는 경향이 나타나며 0.1/sec 이상의 변형률속도에서는 상온의 파단연신율이 가장 크고 온도가 증가 또는 감소 할수록 파단연

신율이 감소하는 경향이 나타난다. 온도가 증가함에 따라 연신율이 감소하는 경향은 탄소강의 동적변형 시효에 의한 청열취성(blue brittleness) 특성과 관계가 있다.<sup>(8)</sup> 일반적인 탄소강에서는 연신율이 온도증가에 따라 일단 감소했다가 200℃~300℃에서 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. 즉, 부재가 빠르게 변형할 때 특정 변형률속도 구간에서는 변형률속도경화에 의하여 파단연신율이 증가하므로 적절한 온도 및 변형속도를 유지시킨다면 충돌안전성이나 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

SPRC35R, SPRC45E, TRIP60 차체용 강판에 대하여 -40℃~200℃의 온도 범위에서 0.001/sec~200/sec의 변형률속도로 동적 물성시험을 수행하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 각각의 온도, 변형률속도에서 응력-변형률 선도, 변형률속도민감도 등의 데이터 베이스를 구축하였다.

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

(3) 강도가 낮은 SPRC35 이 SPRC45E, TRIP60 보다 변형률속도 증가에 따른 응력의 증가량이 클 뿐만 아니라 온도 증가에 따른 응력의 감소량이 크다.

(4) TRIP60의 경우 약 150℃ 이상의 고온에서 동적변형률시효 현상에 의한 톱니유동, 음의 변형률속도 민감도 현상이 발생한다.

(5) 변형률속도가 증가할수록 국부적인 높은 변형률속도 경화에 의한 네킹의 전파 때문에 파단연신율이 증가하는 경향을 나타낸다.

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

### 참고문헌

- (1) Meyers, M. A., 1994, *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Campbell, J. D. and Ferguson, W. G., 1970, "Temperature and Strain Rate Dependence of The Shear Strength of Mild Steel," *Phil. Mag.* Vol. 21, No. 169, pp. 63~82.
- (3) Klepaczko, J. and Duffy, J., 1982, "Strain Rate History Effects in Body-Centered-Cubic Metals," *ASTM STP765*, pp.251~268.
- (4) Nemat-Nasser, S. and Guo, W. C., 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.
- (5) Nemat-Nasser, S. and Guo, W. C., 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.
- (6) ASM Handbook Committee, 1985, *Metals Handbook 9<sup>th</sup> Ed. - Mechanical Testing*, ASM. Metals Park, Ohio.
- (7) Lim, J. H., Kim, S. B., Kim, J. S., Huh, H., Lim, J. D. and Park, S. H., 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.
- (8) Lee, H. S. and Oh, Y. K., 2001, "The Tensile Characteristics of Steel Sheets at Various Temperature Conditions," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 2, pp. 101~110.
- (9) Huh, H., Lim, J. H., Kim, S. B., Han, S. S. and Park, S. H., 2004, "Formability of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate," *Key Engineering Materials*, Vols. 274-276, pp. 403~408.
- (10) Robinson, J. M. and Shaw, M. P., 1994, "Microstructural and Mechanical Influences on Dynamic Strain Aging Phenomena," *Int. Mater. Rev.*, Vol. 39, pp. 113~122.
- (11) Huh, H., Lim, J. H., Song, J. H., Lee, K. S., Lee, Y. W and Han, S. S., 2003, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60 TRIP Steel for Side Member," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 4, No.3, pp.149~156.
- (12) Zukas J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- (13) Jones, N., 1989, *Structural Impact*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (14) Hoge, K. G. and Mukherjee, A. K., 1977, "Temperature and Strain Rate Dependence of the Flow Stress of Tantalum," *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, No. 8, pp. 1666~1672.
- (15) Liang, R. and Khan, A. S., 1999, "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.