

# SPRC440 강판재의 미세조직 구성이 동적 인장 특성에 미치는 영향

이성희<sup>1</sup>· 임영목<sup>#</sup>· 이정환<sup>2</sup>· 김인배<sup>1</sup>· 김양도<sup>1</sup>

## Effect of Microstructure on Dynamic Tensile Characteristics of SPRC440 Sheet

S. H. Lee, Y. M. Rhyim, J. H. Lee, I. B. Kim, Y. D. Kim

(Received April 14, 2011 / Revised May 27, 2011 / Accepted May 27, 2011)

### Abstract

The behavior of metallic materials at high strain rates shows different characteristics from those in quasi-static deformation. Therefore, the strain rate should be considered when simulating crash events. The objective of this paper is to evaluate the dynamic tensile characteristics of SPRC440 as a function of the volume fraction of phases. As-received SPRC440 is composed of ferrite and pearlite phases. However, ferrite and martensite phases were observed after heat treatment at 730°C and 780°C for 5 minutes, as expected by calculations based on the curves from dilatometry tests. High cross-head speed tensile tests were performed to acquire strain-stress curves at various strain rates ranging from 0.001 to 300 s<sup>-1</sup>, which are typical in real vehicle crashes. It was observed that the flow stress increases with the strain rate and this trend was more pronounced in the as-received specimens consisting of ferrite and pearlite phases. It is speculated that the dislocation density in each phase has an influence on the strain rate sensitivity.

**Keywords** : Dynamic Tensile Test, Strain Rate Sensitivity, Flow Stress, Dislocation Density, Microstructure

### 1. 서 론

최근 에너지·환경문제가 사회적인 주요 관심사로 떠오르면서 수송기기의 연비향상을 위한 경량화에 대한 관심이 높아지고 있다. 수송기기의 경량화는 충돌에 대한 안전성이 검증된 상태에서 이뤄져야 하는데, 일반적으로 금속재료는 정적인 조건과 동적인 조건에서 변형거동이 다르며, 또한 그 정도가 재료마다 다르기 때문에 안전성을 담보하는 설계를 위해서는 설계 해석에 사용될 동적 물성치를 실험을 통해서 정확히 구할 필요가 있다.

현재 사용되고 있는 고속 인장 시험기는 크게

두 가지로, Kolsky의 1차원 탄성과 이론에 근거하여 수천/s 이상의 고변형률 속도에서의 변형거동을 실험하는 홉킨슨 바 시험기[1-4]와 약 1/s~수백/s 변형률 속도에서의 시험이 가능하도록 기존의 유압식 인장 시험기를 개량[5-7]한 것이 대표적이다.

금속학적 관점에서 인장물성에 미치는 미세조직에 대한 연구는 대부분 준 정적 변형률 속도에서 이루어져 왔으며, 고속에서의 동적 인장 실험에 대한 결과는 상대적으로 그 정보가 미미한 편이다. 또한 미세조직 구성이 동적 인장 결과에 미치는 영향에 대한 연구도 조성이 다른 이종소재를 이용한 경우가 대부분이며, 이 경우 각 상의 비율 외에

1. 부산대학교 재료공학과  
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소  
# 교신저자 : 재료평가연구그룹, E-mail: rhyim@kims.re.kr

소재 별 화학조성 및 제조공정 이력에 따른 영향이 충분히 배제되었다고 보기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 자동차용 외판재로 사용되고 있는 강판재 중에서 SPRC440 소재를 선택하여 동일한 화학적 조성을 가지면서 열처리를 하여 상의 종류 및 비율을 변화시킨 소재로 만들었다. 열처리를 통해 강화상인 펄라이트로와 마르텐사이트의 존재 여부 및 그 비율이 고속 변형 거동에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 SPRC440의 조성은 Table 1과 같다.

**Table 1 Chemical composition of SPRC440 (wt%)**

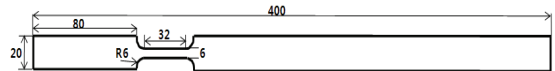
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.079	0.13	1.28	0.010	0.002	bal.

미세조직 구성을 변화시키는데 있어 필요한 기초자료를 얻기 위하여 dilatometer를 이용하여 온도에 따른 길이변화를 측정하여 주요 변태점과 온도에 따른 상분율을 도출하였다. 측정장비로는 Theta Industries, INC 사의 DilatronicIII를 사용하였으며, 폭이 3mm, 길이가 20mm 인 판상시편을 사용하였다. 승온 속도는 초당 5°C였으며 1100°C에서 10분간 유지 하였다. dilatometer 실험 결과로부터 얻은 팽창 곡선을 이용하여 상변태 개시온도부터 종료온도까지 오스테나이트와 페라이트의 상분율을 계산한 후, 이를 바탕으로 6개의 열처리 구간을 설정하였다. 열처리는 Thermvac Engineering 사의 고온 염욕로를 사용하였으며 각각의 온도에서 5분간 유지 후 수냉하였다.

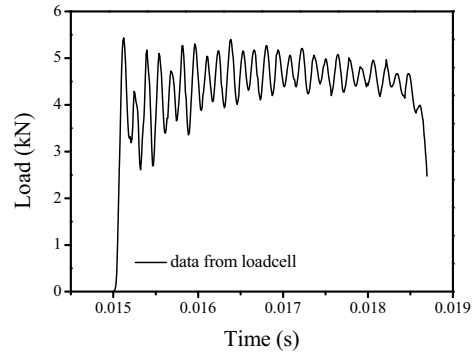
열처리 전과 후의 미세조직 상 분율[8]과 결정립 크기[9]를 측정하기 위하여 시편을 경면 연마한 후 4% Nital 용액으로 수초간 에칭하여 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다.

변형거동을 살펴보기 위하여 준 정적 변형을 속도인 0.001/s 조건에서는 일반 인장 시험기를 사용하였고 1/s, 10/s, 100/s, 200/s, 300/s의 변형률 속도에서는 고속 인장 시험기를 사용하였다.

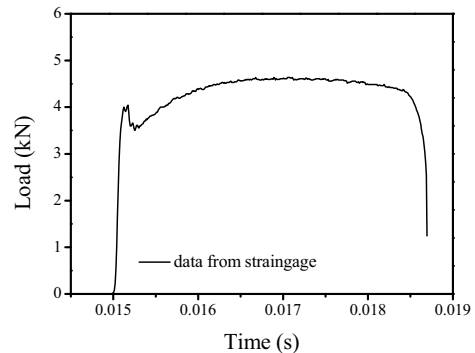
본 연구에서 사용한 고속 인장 시험 장비는 Instron 사의 VHS-65/80-25 모델로 시험 가능한 영



**Fig. 1 Dimension of specimen for high strain rate tensile test**



(a)



(b)

**Fig. 2 Time-load curves at strain rate of 94/s : (a) data obtained by loadcell and (b) data obtained by strain gage**

역은 0.1m/s~25m/s 이다. 고속 인장 시험 시 액츄에이터가 목표한 속도에 도달한 후 시편에 하중을 부과하기 위해 패스트-조 그림을 사용하였다. 이 그림은 시험 전 상태에서는 하부 그림이 시편을 구속하지 않은 상태이나, 시험 시작 후 액츄에이터가 가속된 상태에서 밖-아웃 웬지가 제거되는 순간 미리 걸어두었던 잔류 응력으로 인해 그림이 시편을 구속하게 된다. 액츄에이터가 지시한 속도에 도달한 후 시편을 구속하기 때문에 그 속도에 도달하기 위한 가속구간이 필요하므로 시편은 Fig. 1과 같이 한 쪽 부분을 길게 설계하였다.

고속 인장 시험은 정지 상태에서 매우 빠른 속도로 시편을 인장시키기 때문에 시편에 작용하는

순간가속도가 높아지면서 발생한 힘의 불균형으로 인해 시편과 지그가 진동을 한다[10]. 이러한 하중 떨림은 정확한 유동곡선을 얻는데 장애가 되므로 이를 최소화하기 위하여 시편의 상부 그립부에 하중측정을 위한 변형게이지(strain gage)를 추가로 부착하여 시험을 실시하였다.

Fig. 2는 94/s에서의 고속 인장 실험 결과로 시간당 받는 데이터포인트의 개수는 똑같음에도 불구하고 Fig. 2(a)와 같이 압전로드셀에서 얻은 하중데이터는 하중 떨림 현상이 심하게 나타났으나, Fig. 2(b)와 같이 변형게이지로부터 얻은 변형 신호를 하중으로 환산한 결과에서는 그 현상이 완화된 것을 볼 수 있다.

이는 시편의 그립부에 변형게이지를 부착한 경우, 하중을 시편에서 직접 측정하기 때문에 시편의 진동으로 인한 하중 떨림 외에 지그 몸체, 시편과 지그의 계면 및 지그와 로드셀의 계면 등에서 유발되는 떨림 현상이 배제되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서는 하중 떨림 현상이 최소화 된 인장 결과를 얻기 위하여 변형게이지를 부착하여 실험을 실시하였다.

### 3. 실험 결과

SPRC440을 1100℃까지 가열하는 동안 시편의 길이 변화를 온도의 함수로 Fig. 3에 나타냈다. BCC 구조에서 FCC구조로 조밀화됨에 따라 변위가 감소하기 시작하는 725℃에서 오스테나이트 상으로의 변화가 개시되는 것을 알 수 있고, 862℃에서 변위가 다시 증가하는 것으로 보아 상변태가 완료되었음을 유추할 수 있다.

이와 같은 팽창곡선으로부터 온도에 따른 상 분율을 예측하기 위하여 상변태 개시온도부터 종료 온도까지 T.A.Kop[11] 가 제안한 식(1)을 이용하여 페라이트와 오스테나이트의 상대적인 분율을 계산하여 Fig. 4에 나타냈다.

$$V_f = \frac{\Delta L - \Delta L_e^\gamma}{\Delta L_e^\alpha - \Delta L_e^\gamma} \quad (1)$$

Fig. 5는 dilatometer 실험 결과로부터 계산한 마르텐사이트의 부피 분율과 염욕로에서 열처리를 한 후 미세조직관찰을 통해 실제 측정된 마르텐사이트의 부피분율을 비교한 그래프이다. A1 변태점 이상의 온도에서 급냉하였을 때 얻어지는 마르텐

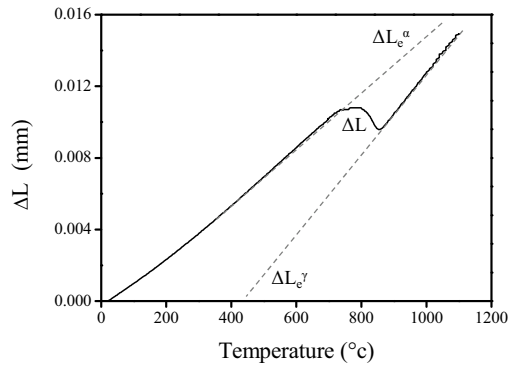


Fig. 3 Dilatation curve of SPRC440

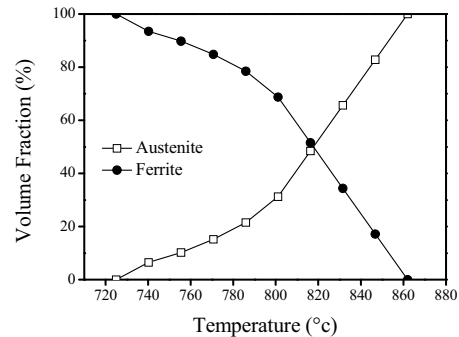


Fig. 4 Calculated volume fraction of austenite and ferrite

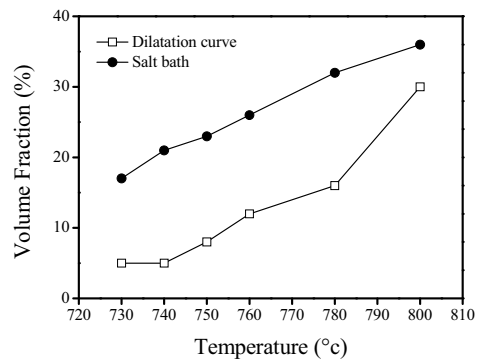
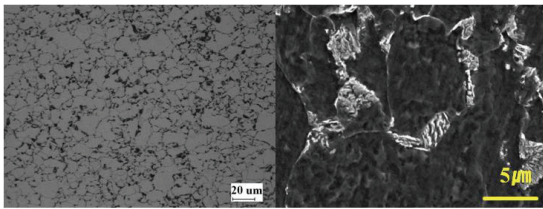
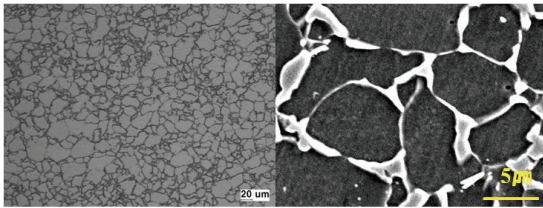


Fig. 5 Changes of the martensite volume fraction depending on the quenching temperature

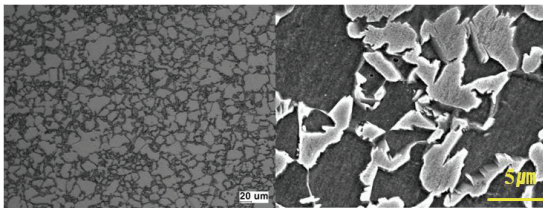
사이트의 부피 분율은 오스테나이트화 온도에서 형성된 오스테나이트의 부피 분율과 비례한다고 알려져 있으나, Fig. 5에 나타난 바와 같이 실측한 마르텐사이트 분율과 식 (1)을 이용하여 계산한 분율은 약 10% 정도의 차이가 있었다. 이것은 계산된 분율은 이론적으로 예측한 것으로 실측과 차이가 있을 수 있으며, 또한 염욕로는 다른 가열로에



As- received, Ferrite+12%Pearlite OM and SEM



730°C W.Q, Ferrite+17%Martensite OM and SEM



780°C W.Q, Ferrite+31%Martensite OM and SEM

**Fig. 6 Micrographs of SPRC440**

비해 상대적으로 균일한 온도 분포를 유지할 수 있지만 완벽하게 온도를 제어할 수 있는 것은 아니므로 두 개의 결과에 차이가 나는 것으로 여겨진다.

SPRC440은 12%의 펄라이트 분율을 가지므로 동일한 분율의 마르텐사이트를 만들기 위해서는 760°C에서 열처리를 실시하면 될 것으로 예상하였으나 실제 760°C에서 열처리 후 측정된 마르텐사이트상의 분율은 27%로 나타났으며 730°C에서 열처리한 경우 약 17%의 마르텐사이트가 존재하는 것으로 나타났다. 마르텐사이트의 분율이 동적 인장 특성에 미치는 영향을 알아보려고 17% 보다 더 높은 분율의 마르텐사이트를 얻기 위하여 780°C에

서 열처리하여 약 31%의 마르텐사이트가 존재하는 시편도 제조하였다.

Fig. 6은 SPRC440의 열처리 전과 후의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 입수상태의 SPRC440은 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있으며, 열처리 후에는 예상한 바와 같이 페라이트와 마르텐사이트를 얻을 수 있었다.

Table 2는 결정립 크기를 측정한 결과로 페라이트 결정립 크기는 열처리 전과 후의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

미세조직의 구성을 달리한 각 시편의 준 정적 변형률 속도 인장 실험 결과를 Table 3에 나타냈다. 페라이트와 펄라이트로 구성된 시편보다 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 시편의 최대 인장 강도 값이 더 높은 것을 알 수 있으며, 이는 마르텐사이트의 미세한 쌍정구조와 높은 전위 밀도가 전위의 이동을 효과적으로 방해함으로써 강도를 높이기 때문이다[12].

Fig. 7은 다양한 변형률 속도에서의 진 변형률-응력 선도를 나타낸 것으로, 가공경화에 의하여 응력이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 미세조직의 구성에 상관없이 변형률 속도가 증가할수록 유동응력이 증가 하는 것을 알 수 있다. 변형률 속도가 빨라지면 활성화되는 전위원의 수가 증가하여 전위 밀도가 높아지므로[13,14] 전위의 움직임이 방해받기 때문에 유동응력이 높아진다.

Fig. 8은 동일한 변형량일 때 각각의 변형률 속도에서의 유동응력을 도시한 것으로, 그래프의 기울기가 커진다는 것은 변형률 속도가 증가할수록 동일 변형량에서의 유동응력이 증가하는 비율이 커지는 것이므로 변형률 속도에 대한 민감도가 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

Table 4는 연신율이 10%일 때 변형률 속도가 트상의 강화효과로 인해 유동응력은 증가하였으나 17% 마르텐사이트로 구성된 시편과 비교하여 0.001/s 와 300/s 의 유동응력과 그 증가량을 나타

**Table 2 Variation of volume fraction and grain size depending on heat treatment**

	Ferrite		Pearlite		Martensite	
	Volume Fraction (%)	Grain Size (μm)	Volume Fraction (%)	Grain Size (μm)	Volume Fraction (%)	Grain Size (μm)
As-received	89	10.3	11	1.4	-	-
730 °C W.Q	83	12.4	-	-	17	2.2
780 °C W.Q	69	12.2	-	-	31	2.3

**Table 3** Material properties acquired from quasi-static tensile tests

	UTS (MPa)	Elongation
12% Pearlite	474	0.35
17% Martensite	610	0.26
31% Martensite	736	0.17

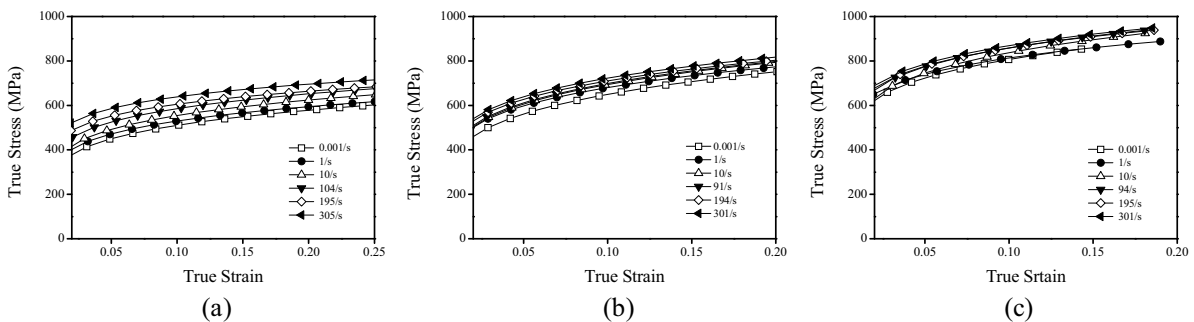
낸 것으로 페라이트와 펄라이트로 구성된 시편은 변형률 속도가 증가함에 따라 응력의 변화량은 크고, 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 시편의 응력 변화량이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

유동응력이 증가하였다는 것은 전위의 움직임이 방해 되었다는 것을 의미하는데, 일반적으로 고속 변형에서 유동응력이 증가하는 원인은 전술한 바와 같이 변형률 속도가 증가함에 따라 활성화 되는 전위원의 수가 증가하여 전위 밀도가 높아지기 때문으로 알려져 있다[15]. 따라서 상분율에 따른 유동응력 변화량의 차이는 변형을 하기 전인 초기에 갖고 있는 전위 밀도의 차이에서 기인 된 것으로 사료된다.

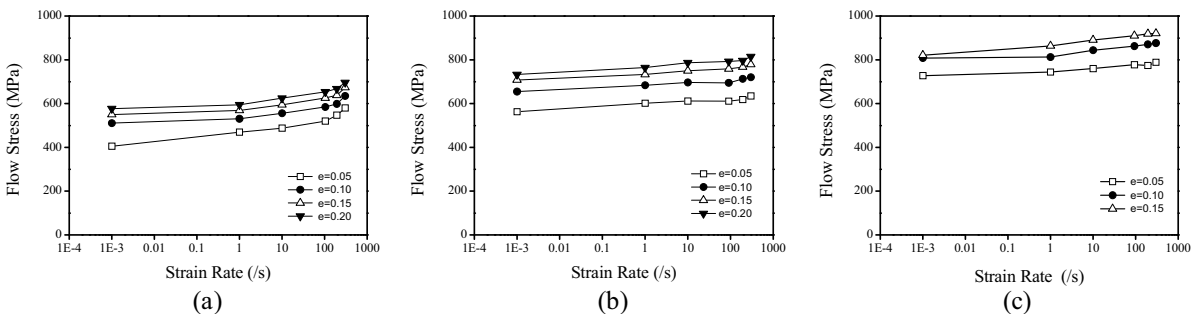
금속은 이전의 이력에 따라서 매우 다른 전위 밀

도를 가지는데, 완전히 어닐링된 금속은  $10^4/\text{mm}^2 \sim 10^6/\text{mm}^2$  정도의 전위 밀도를 갖고 있는 반면 심하게 냉간 가공된 금속은  $10^9/\text{mm}^2 \sim 10^{10}/\text{mm}^2$  정도의 전위 밀도를 가지며 마르텐사이트 조직은 심하게 변형된 금속에서와 비슷한 높은 전위 밀도를 가지는 것으로 알려져 있다[12,16]. 또한 펄라이트는 초기에 약  $10^8/\text{mm}^2$  정도의 전위밀도를 가지며[17] 10% 균일변형이 일어났을 때 펄라이트의 전위밀도가 마르텐사이트의 초기 전위밀도와 비슷한 것으로 보고된 바 있다[17,18].

따라서 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 시편은 마르텐사이트가 초기부터 높은 전위 밀도를 가지기 때문에 변형률 속도가 증가하여도 전위밀도 증가량이 상대적으로 작으므로 속도 민감도가 낮은 반면, 페라이트와 펄라이트로 구성된 시편은 초기에 상대적으로 낮은 전위밀도를 갖기 때문에 변형률 속도가 증가함에 따라 전위 밀도의 증가량이 커지므로 속도 민감도가 높은 것으로 판단된다. 31%의 마르텐사이트로 구성된 시편은 마르텐사이트 보편 변형률 속도 민감도는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 17%정도의 마르텐사이트에서 이미 충분히 복잡하고 견고한 전위 구조를 형



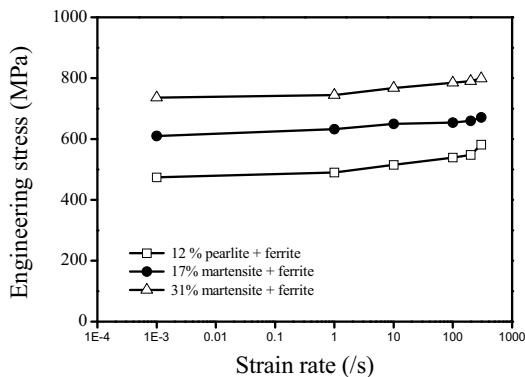
**Fig. 7** True strain-stress curves at various strain rate : (a) Ferrite+12% Pearlite, (b) Ferrite+17% Martensite and (c) Ferrite+31% Martensite



**Fig. 8** Strain rate sensitivity at various strain rate : (a) Ferrite+12% Pearlite, (b) Ferrite+17% Martensite and (c) Ferrite+31% Martensite

**Table 4 The increase ratio of tensile strength at 0.001/s and 300/s at strain of 10%**

	0.001/s flow stress	300/s flow stress	increase rate
12% Pearlite	511 MPa	635 MPa	24%
17% Martensite	655 MPa	721 MPa	10%
31% Martensite	808 MPa	877 MPa	9%

**Fig. 9 Variation of UTS depending on the strain rate and heat treatment**

성함으로써 변형률 속도 증가에 따른 활성화된 전위원의 증가 영향이 미미했기 때문에 판단된다. 이러한 결과는 Yoon 등이 연구한 변형률 속도에 따른 SPCC 강과 TRIP 강의 변형률 속도 경화에 대한 연구 결과[19]와도 일치한다.

Fig. 9는 각 변형률 속도에서의 최대 인장 강도 값을 도시한 것이다. 페라이트와 펄라이트로 구성된 시편은 변형률 속도가 301/s에서 최대 인장 강도 값이 581MPa이며, 마르텐사이트가 17% 포함된 시편은 변형률 속도가 0.001/s 일 때 최대 인장 강도 값이 610MPa이다. 또한 17%의 마르텐사이트가 포함된 시편의 301/s의 변형률 속도에서의 최대 인장 강도 값은 671MPa이며 31% 마르텐사이트가 포함된 시편의 0.001/s의 최대 인장 강도 값은 736MPa이다. 본 연구에서 시험한 범위 내에서는 변형률 속도가 빨라지면서 전위 밀도 증가로 인한 강화 효과보다 마르텐사이트 상에 의한 강화 효과가 더 큰 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자동차용 강판에 대하여 동일한

화학적 조성을 가지면서도 미세조직의 상과 그 분율이 다를 때, 변형률속도에 따른 동적 인장 특성을 살펴보고자 하였다. 열처리를 통해 페라이트와 펄라이트 및 페라이트와 마르텐사이트로 SPRC440 판재의 상 구성 및 분율을 변화시킨 후 0.001/s~300/s의 변형률속도에서 고속변형거동을 관찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구의 시험 범위에 있어서는 미세조직의 구성에 상관없이 변형률 속도가 증가할수록 전위 밀도가 증가하여 유동응력이 증가하였다.

(2) 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 시편에 비해 페라이트와 펄라이트로 구성된 시편의 속도 민감도가 컸으며, 이는 마르텐사이트가 본질적으로 높은 전위 밀도 및 쌍정 구조 등으로 인해 전위 움직임을 효과적으로 방해하기 때문에, 변형률 속도증가에 따라 활성화 되는 전위원 수의 증가 영향이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 변형률 속도 증가에 따른 전위밀도 증가로 인한 강화 효과보다 열처리를 통한 마르텐사이트 변태에 의한 강화 효과가 더 크게 나타났다.

(4) 마르텐사이트의 분율이 17%에서 31%로 증가하여도 변형률 속도 민감도는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

- [1] T. Nicholas, 1980, Tensile testing of materials at high rates of strain, *Exper. Mech.*, Vol 21, pp. 177~185.
- [2] M. Nabi Bassim, 1999, High strain rate effects on the strain of alloy steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.92-93, pp. 481~485.
- [3] R. Smerd, 2005, High Strain rate Tensile testing of Automotive Aluminum Alloy Sheet, *Int. J. Imp. Eng.*, Vol. 32, pp. 541~560.
- [4] S. Curtze, 2009, Deformation behavior of TRIP and DP steels in tension at different temperatures over a wide range of strain rates, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 507, pp. 124~131.
- [5] B. L. Boyce, 2009, The Dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.00002/s to 200/s, *Int. J. Imp. Eng*, Vol.36, pp. 263~271.
- [6] S. Oliver, 2007, Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing, *Mater. Charac.*,

- Vol. 58, pp. 390~400.
- [7] H. Huh, 2008, Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.50, pp. 918~931.
- [8] ASTM Standard E562-02. Standard test Method for Determining Volume Fraction by systematic manual point count. ASTM Int.
- [9] ASTM Standard E 112-96, Standard test Method for Determining Average grain size, ASTM Int.
- [10] G. Regazzoni, 1986, Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test, *J. App. Mech.*, Vol. 53, pp. 519~528.
- [11] T. A. KOP, 2001, Dilatometric analysis of phase transformations in hypo-eutectoid steels, *J. Mater. Sci.*, Vol. 36, pp. 519~526.
- [12] G. E. Dieter, 1986, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, Second edition.
- [13] A. Uenishi, 2005, Microstructure evolution at high strain rates in solution-hardened interstitial free steels, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 400-401, pp. 499~503.
- [14] F. A. Khalid, 1996, A TEM study of deformation substructure in high strain rate and explosively shock-loaded polycrystalline Iron, *JMEPEG*, Vol. 5, pp. 23~26.
- [15] S. B. Kim, 2007, Dynamic tensile characteristics of the high strength steel sheet for an auto-body, *KSAE*, Vol. 15, pp. 171~229.
- [16] S. Takebayashi, 2010, Comparison of the dislocation density in martensite steels evaluated by some X-ray diffraction methods, *ISIJ Int.*, Vol. 50, pp.875~882.
- [17] Y. F. Ivanov, 2009, Electron-beam modification of the pearlite steel, *The Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 34, pp. 219~229.
- [18] V. I. Izotov, 2007, Influence of the Pearlite Fineness on the Mechanical Properties, Deformation Behavior, and Fracture Characteristics of Carbon Steel, *The Phys. Met. Metall.*, Vol. 103, pp. 519~529.
- [19] J. H. Yoon, 2008, Ph. D, Microscopic investigation of the strain rate hardening for auto-body steel sheet, KAIST, Daejeon, pp. 35~40.