

철강재료 변형률속도 경화의 미시적 관찰

윤종현¹ · 허 훈[#] · 박찬경² · 강주석² · 서주형² · 허무영³ · 강형구³

Microscopic Investigation of the Strain Rate Hardening for Polycrystalline Metals

J. H. Yoon, H. Huh, C. G. Park, J. S. Kang, J. H. Suh, M. Y. Huh, H. G. Kang

(Received November 14, 2007)

Abstract

Polycrystalline materials such as steels(BCC) and aluminum alloys(FCC) show the strain hardening and the strain rate hardening during the plastic deformation. The strain hardening is induced by deformation resistance of dislocation glide on some crystallographic systems and increase of the dislocation density on grain boundaries or inner grain. However, the phenomenon of the strain rate hardening is not demonstrated distinctly in the range of 10^{-2} to 10^2 /sec strain rate. In this paper, tensile tests for various strain rates are performed in the range of 10^{-2} to 10^2 /sec then, specimens are extracted on the same strain position to investigate the microscopic behavior of deformed materials. The extracted specimens are investigated by using the electron backscattered diffraction(EBSD) and transmission electron microscopy(TEM) results which show the effect of texture orientation, grain size and dislocation behavior on the strain rate hardening.

Key Words : Plastic Dformation, Strain Rte Hrdening, Dislocation Dnsity, Tensile Tst, Electron Bckscattered Dffraction(EBSD), Transmission Eectron Meroscopy(TEM), Dislocation Bavior

1. 서 론

일반적으로 철강재료는 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하여 정적변형 시 발생하는 유동응력과 다른 경향을 보이게 된다. 차체용 강관을 비롯하여 중고속변형을 겪게 되는 철강재료의 경우, 변형률속도에 따라 변형거동이 달라질 뿐 아니라 강도의 변화가 크기 때문에 정확한 충돌해석과 거동을 예측하기 위해서는 재료의 동적 물성을 확보하고 변형률속도 경화(strain rate hardening)의 미시적 원리를 정확히 이해하는 것이 필요하다.

동적물성과 관련된 연구로는 다양한 온도조건

하에서 실험을 통하여 소재의 동적 응력-변형률 선도를 얻고 이를 해석에 적용하기 위한 거시적인 구성방정식을 구성하는 분야[1]와 변형률속도 경화의 원인을 미시적으로 관찰하고 전위(dislocation)와 슬립기구(slip system)를 이용하여 미시적 구성방정식을 구성하는 분야[2] 등으로 나눌 수 있다. TEM(Transmission Electron Microscopy)을 이용한 금속재료의 미시적 관찰에 관한 연구로는 Uenishi[3] 등이 정적과 10^3 /sec의 고속 변형률속도에서 전위밀도와 변형률속도 변화, 계재물의 효과를 관찰하였으며 Chao[4] 등은 변형률속도에 따른 아결정립(subgrain)의 크기와 유동응력의 변화를 관찰하였다.

1. 한국과학기술원 기계항공시스템학부
2. 포항공과대학교 신소재공학과
3. 고려대학교 신소재공학부
교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

본 논문에서는 정적 변형률속도($10^{-3}/\text{sec}$)부터 자동차 충돌 시 국부적으로 발생하는 변형률속도인 $10^2/\text{sec}$ 까지의 영역에 대하여 인장실험을 수행한다.

또한 각 변형률속도 실험마다 일정한 변형률을 부과하여 동일조건 하에서 변형률속도의 효과만을 관찰하도록 한다. 동적 인장실험을 수행한 뒤 변형된 시편에서 미세 조직 관찰을 위한 시료를 추출하며 EBSD(Electron BackScattered Diffraction)와 TEM을 이용하여 변형률속도 경화의 원인을 미시적으로 분석한다.

2. 변형률속도 인장실험

관찰에 사용된 소재는 변형률속도 민감도 (strain rate sensitivity)가 큰 SPCC(0.63t)이며 정적 변형률속도인 $10^{-3}/\text{sec}$ 부터 중고속 변형률속도인 $10^2/\text{sec}$ 영역에서 실험을 수행하였다. 중고속 인장실험은 Fig. 1 과 같이 본 연구실에서 개발한 중고속 인장실험기를 사용하였으며 인장시편 규격은 Fig. 2 와 같다. Fig. 3 은 변형률속도에 따른 인장실험 결과를 나타내며 항복 전, 후에 각 변형률속도에 따른 유동응력 차이가 가장 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3 의 인장실험 결과를 바탕으로 모든 시편에 20%의 변형률을 부과하여 다양한 변형률속도의 동적 인장실험을 수행하였다. 중고속 인장실험 중에 시편에 일정한 변형률을 부과하기 위하여 Fig. 4 와 같은 인장시편과 지그(jig)[5]를 중고속 인장실험기에 장착하여 실험을 수행하였다. 지그의 작동원리는 다음과 같다. 부과하고자 하는 변형률의 양 만큼 d_{gap} 을 조절하여 시편을 장착한다(Fig. 5(a)). 인장실험 시 시편 하단부가 닿게되면 표점부(gage section)에서 d_{gap} 만큼의 변형이 발생한다. 이 때, 시편에 물려놓은 스톱퍼(stopper)가 지그 하단부에 걸려(Fig. 5(b)) 표점부는 더 이상 변형하지 못하고 시편 하단부의 홈에서 파단이 유도된다(Fig. 5(c)).

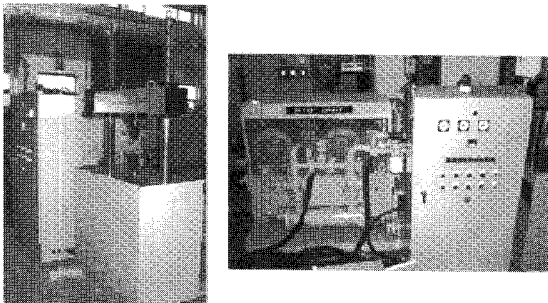


Fig. 1 High speed material testing machine

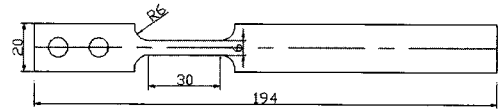


Fig. 2 Dimension of specimen for dynamic tensile tests

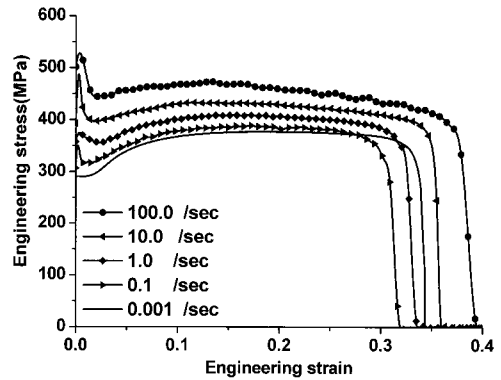


Fig. 3 Stress-strain curves for various strain rates with SPCC

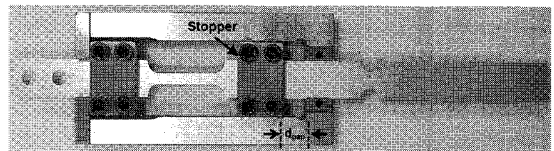
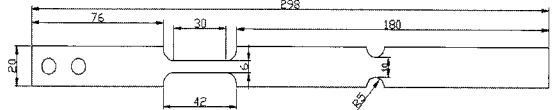
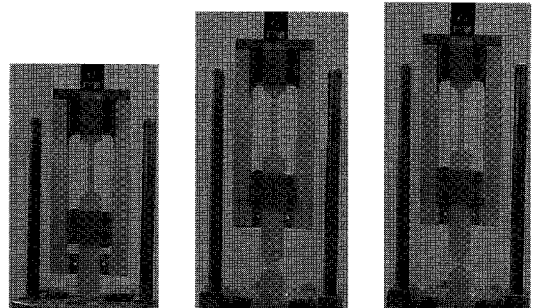


Fig. 4 Jig system to impose the designated strain



(a) (b) (c)

Fig. 5 Procedure of jig operation

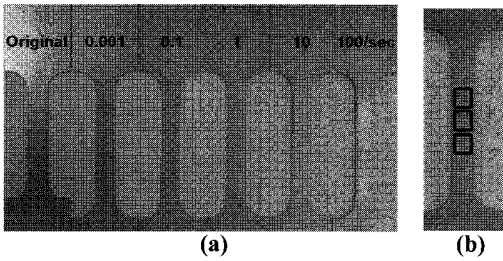


Fig. 6 Deformed specimens at 20% strain

Table 1 Characteristics of grain distribution for various strain rates specimens

Strain Rate (/sec)	Avg. Grain Size(μm)	Avg. Misorientation($^\circ$)	Avg. Aspect Ratio	$f(g)_{\text{max}}$
Initial	11.0	38	0.53	7.0
0.001	12.0	16	0.49	7.7
0.1	12.4	16	0.48	11.1
1	11.8	16	0.47	7.5
10	10.9	15	0.49	9.9
100	12.2	15	0.47	9.3

3. EBSD 실험결과

일정한 변형량을 부과한 시편의 변형 후 형상은 Fig. 6(a)와 같으며 표점부 중심으로부터 5mm 크기 단위의 시료를 추출하여(Fig. 6(b)) EBSD를 찍고 변형 후 미세조직 변화를 관찰하였다. 각 변형률속도 시료에 대하여 가로, 세로 총 200 μm 의 영역을 측정하였다. Fig. 7은 10⁻³/sec부터 10²/sec의 변형률속도로 20% 변형한 시료의 미세조직과 방위분포를 나타내고 있다. Table 1에서 정리한 바와 같이 평균 결정립 크기는 변형률속도에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보이며 평균 misorientation과 세장비는 감소하는 경향을 보인다. 평균 결정립 크기가 증가하는 이유는 인장 변형이 진행됨에 따라 결정립들 사이의 각도가 저각각(low-angle misorientation)으로 바뀌면서 평균 결정립 크기를 계산할 때 주변 결정립들이 같은 결정립으로 포함되기 때문으로 판단된다. 또한 세장비의 경우 전체 결정립들이 모두 길어지는 효과를 보이지만 변형률속도에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 관찰된다. 변형률속도에 따른 결정립 크기와 모양변화(aspect ratio)의 특징적인 경향성을 관찰할 수 없으므로 보다 정량적인 ODF(Orientation Distribution Function) 분석을 수행하였다. Fig. 8의 ODF 분석에서 10⁻¹/sec의 변형률

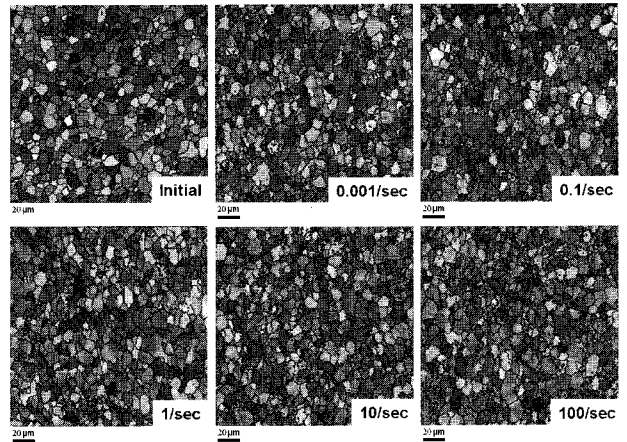


Fig. 7 EBSD result for various strain rates specimens

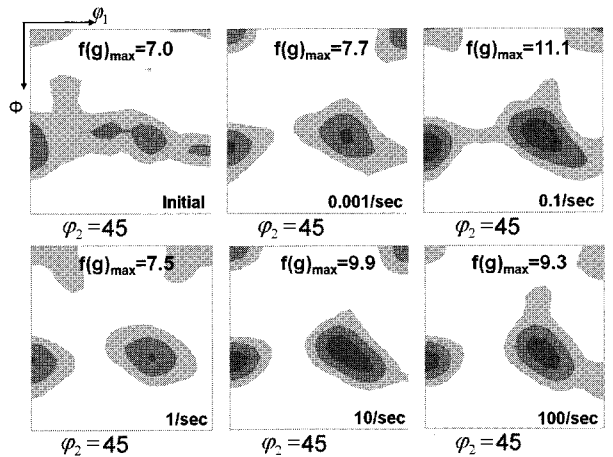


Fig. 8 Texture evolution after tensile tests for various strain rate specimens

속도 시료에서 방위변화가 가장 크게 발생하였지만 변형률속도에 따른 특징적인 경향을 발견할 수 없었다. 이와 같은 경향은 PF(Pole Figure) 분석 결과에서도 비슷하게 나타난다. EBSD의 실험결과를 종합하여 볼 때, 변형률속도에 따른 텍스처의 회전과 변형률이 많지 않고 텍스처의 변화가 변형률속도 경화에 미치는 영향이 적은 것으로 판단되어 변형률속도 경화의 근본적인 원인을 찾고 분석을 수행하기가 어려울 것으로 판단하였다.

4. TEM 실험결과

변형률속도 경화의 보다 근본적인 원인을 분석하기 위하여 다양한 변형률속도에 대하여 TEM을

이용하여 변형 전, 후의 전위거동을 관찰하였다. TEM 을 이용한 전위 관찰은 각 변형률속도 별로 1%의 저변형률을 부과한 상태에서 비교하였다 (Fig. 9). 높은 변형률 상태의 철강시편은 전위밀도가 급격히 높아져 명확한 전위관찰이 어렵고 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 저변형률 영역에서 변형률속도에 대한 유동응력의 차이가 가장 크므로 TEM 관찰을 위한 인장실험은 1% 저변형률 영역에서 수행하였다. 그러나 1%의 저변형률을 부과할 경우 실제로 TEM 관찰에 사용될 인장시편의 표점부가 균일하게 변형하는지를 알 수 없으므로 Fig. 10 과 같이 표점부를 세분화하여 표점부 폭의 변화를 측정하였다. 모든 변형률속도에 대하여 1% 변형이 표점부에서 균일하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 11). 따라서 EBSD 실험과 동일한 방법으로 표점부 영역에서 3 개의 시료를 추출하여 TEM 관찰을 수행하였다.

Fig. 12 은 인장실험을 수행하기 전의 초기 시료의 전위분포를 나타낸다. 전체적으로 전위의

발달이 적은 것을 확인할 수 있지만 입계면(grain boundary)과 삼중점(triple junction) 부근에서 소수의 전위가 관찰되었다. 변형이 가해지지 않은 초기 시료가 소수의 전위를 포함하고 있는 것은 특정한 결정 구조를 가지는 소재의 경우 공공이나 전위 등의 결함을 가지고 있는 것이 결함이 없는 구조보다 열역학적으로 안정하기 때문인 것으로 판단된다.

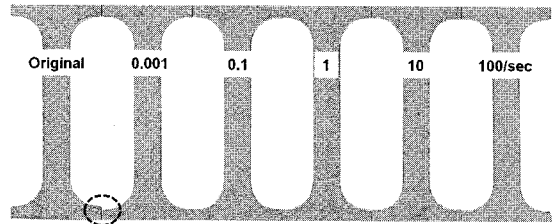


Fig. 9 Deformed specimens at 1% strain

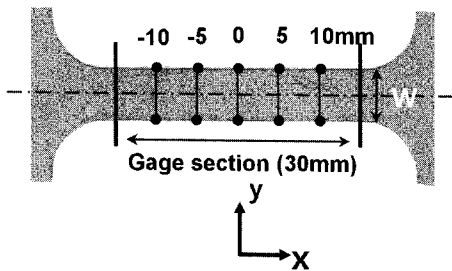


Fig.10 Measuring points on the gauge section

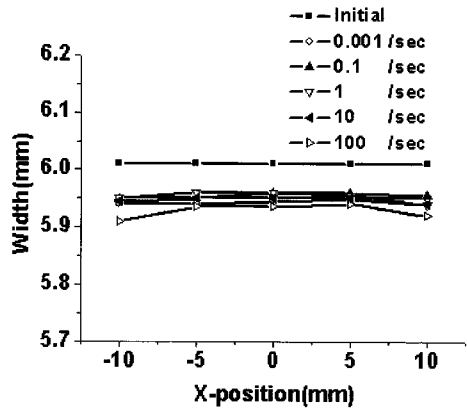


Fig.11 Distribution of width on the gauge section

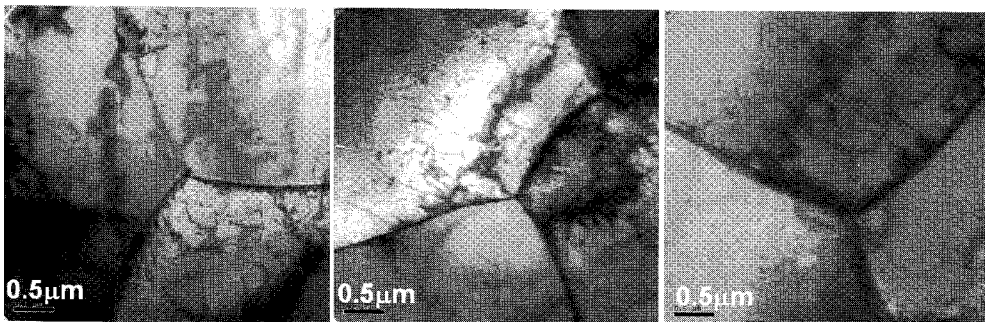


Fig.12 Dislocation structure of the initial specimen

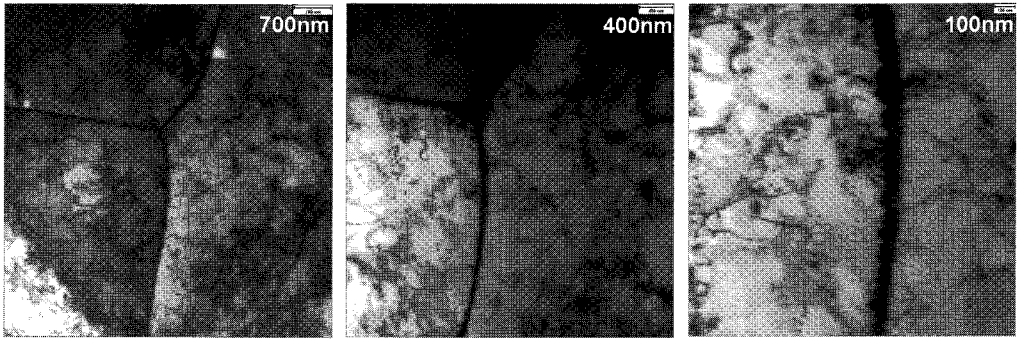


Fig.13 Dislocation structure at the 10^{-3} /sec strain rate

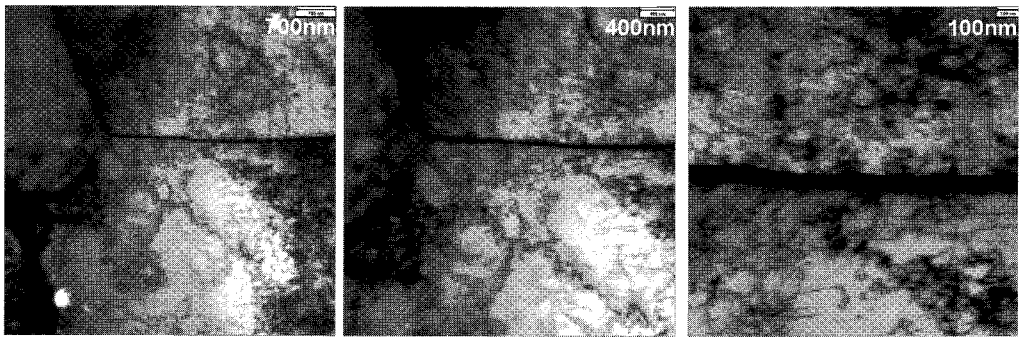


Fig.14 Dislocation structure at the 10^0 /sec strain rate

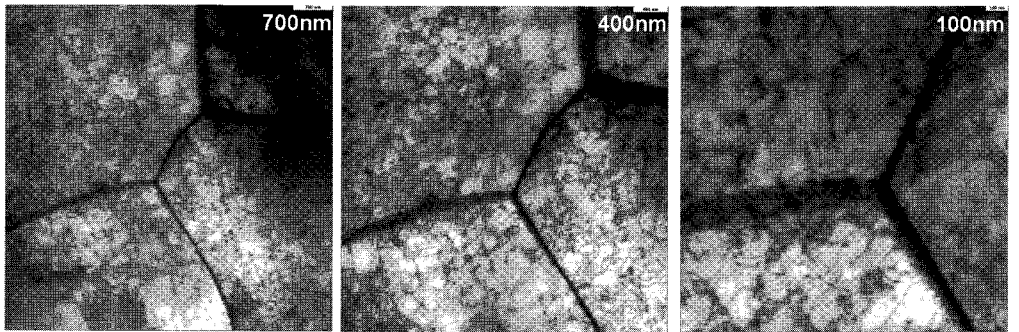


Fig.15 Dislocation structure at the 10^1 /sec strain rate

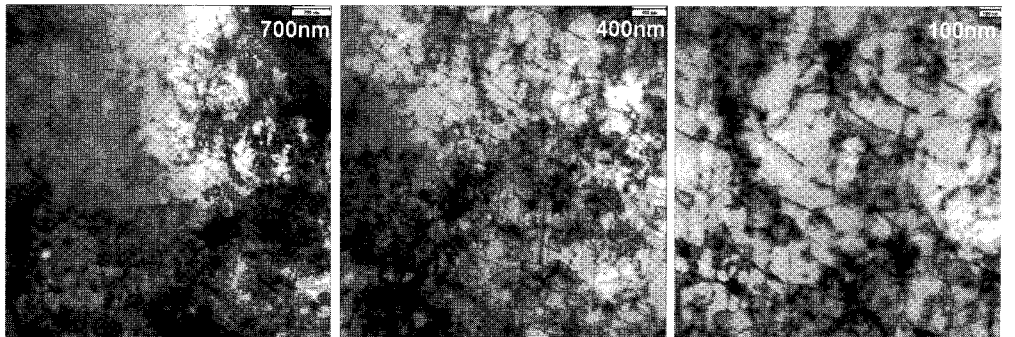


Fig.16 Dislocation structure at the 10^2 /sec strain rate

각 변형률속도별로 전위의 발달을 비교하기 위하여 모든 시료에 대하여 (001) 정대축(zone axis)으로 TEM 관찰을 수행하였다. Fig. 13에서 Fig. 16은 각 변형률속도에 따른 입계면과 삼중점의 전위분포를 나타낸다. 정적 변형률속도 시료(Fig. 13)에서 전위는 산발적으로 분포하고 있으며 타원형 형태의 루프(elliptical loop) 또는 반루프 형태(half-loop)의 전위가 다수 관찰된다[6, 7]. 또한 변형률속도 $10^1/\text{sec}$ 이상의 시료와 비교할 때, 전위들 사이의 뒤엉킴(tangle)이 적은 것을 확인할 수 있다. 변형률속도가 증가함에 따라 전위밀도가 급격하게 증가하는 것을 관찰할 수 있으며 $10^1/\text{sec}$ 이상의 변형률속도 시료에서 전위들이 결정립 내에 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. $10^2/\text{sec}$ 변형률속도 시료에서는 저변형률속도 시료와 비교할 때, 길이가 상대적으로 짧은 전위들이 서로 무수히 뒤엉켜 분포하고 있으며 특징적으로 교차(crisscross)전위[8]들이 분포하는 것을 관찰할 수 있다. 교차전위는 90° 에 가까운 각도를 이루며 결정립 내에 분포하고 있으며 전위들과 뒤엉켜 전위절점(dislocation node)을 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 전위절점(dislocation node)을 중심으로 전위세포(cell structure)를 이루기 위하여 전위발달이 진행되고 있는 것을 관찰할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 변형률속도 경화의 미시적인 원인을 분석하기 위하여 다양한 변형률속도에 대하여 동적인장실험을 수행하였다. 텍스처의 효과와 방위변화가 변형률속도 경화에 미치는 효과를 관찰하기 위하여 EBSD 실험을 수행하였으나 변형률속도에 따른 지배적인 경향이 없음을 확인하였다. 또한 변형률속도에 따른 전위발생과 전위형상을 관찰하기 위하여 TEM 실험을 수행하였다. 변형률속도가 증가함에 따라 전위밀도가 급격히 증가하였으며 전위가 균일하게 결정립 면에 분포하고 있음을 관찰하였다. $10^1/\text{sec}$ 이상의 변형률속도에서 변형된 시료에서는 전위의 뒤엉킴과 교차전위 및 전위절점 등이 관찰되며 전위세포를 형성하는 과

정에 있음을 확인할 수 있다. 변형률속도가 증가함에 따라 균일하게 분포된 전위가 급격하게 증가할 뿐 아니라 전위의 뒤엉킴과 전위세포 형성 등이 가공경화율의 급격한 상승을 유도한 것이라 판단되며 이러한 효과에 의하여 변형률속도경화가 발생하는 것으로 판단된다. 전위발달 과정과 버거스벡터의 방향에 따른 효과는 추가적인 TEM 실험을 통하여 검증하고자 한다.

참고 문헌

- [1] W. J. Kang, H. Huh, 2000, Crash Analysis of Auto-Body Structures Considering the Strain-Rate Hardening Effect, *Int. J. Automotive Technology*, Vol.1, No.1, pp. 35~41.
- [2] A. Ma, F. Roters, D. Raabe, 2007, A dislocation density based constitutive law for BCC materials in crystal plasticity FEM, *Comp. Mat. Sci.*, 39, pp. 91~95.
- [3] A. Uenishi, C. Teodosiu, E. V. Nesterova, 2005, Microstructural evolution at high strain rates in solution-hardened interstitial free steels, *Materials Science and Engineering A400-401*, pp. 499~503.
- [4] YI-YIN CHAO, S. K. VARMA, 1991, Effect of strain rate on dislocation cell size and Hall-Petch-type relationship at various strain levels during a uniaxial tensile test in electrical conductor aluminum, *J. Mat. Sci. Lett.* 10, pp. 630~632.
- [5] I. Choi, S. Lee, D. K. Matlock, J. G. Speer, 2006, Strain Control during High Speed Tensile Testing, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 5, 20, pp. 1~4.
- [6] E. Hornbogen, 1962, Shock-induced dislocations, *Acta Metallurgica*, Vol. 10, pp. 978~980.
- [7] S. T. Mandziej, 1993, The Role of Mobile Dislocations in the Nucleation of Brittle Fracture, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 24A, pp. 545~552.
- [8] S. T. Mandziej, 1993, Low-energy dislocations and ductility of ferritic steels, *Materials Science and Engineering*, A164, pp. 275~280.