

금속재료 변형률속도 경화의 미시적 관찰

윤종현¹, 허 훈^{1#}, 허무영², 강형구², 박찬경³, 서주형³, 강주석³

Microscopic Investigation of the Strain Rate Hardening for Metals

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

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 this paper, tensile tests for various strain rates are performed in the range of 10^{-2} to 10^2s^{-1} then, specimens are extracted on the same strain position to investigate the microscopic behavior of deformed materials. The extracted specimen is investigated by using the electron backscattered diffraction(EBSD) and transmission electron microscopy(TEM) results which contain grain size, grain shape, aspect ratio and dislocation substructure.

Key Words : Plastic deformation, Strain rate hardening, Dislocation density, Tensile test, Electron backscattered diffraction(EBSD), Transmission electron microscopy(TEM)

1. 서론

일반적으로 금속재료는 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하여 정적변형 시 발생하는 유동응력과 다른 경향을 보이게 된다. 정적물성과 동적물성은 각 재료의 고유특성으로서 재료의 강도와 종류에 따라서 차이를 보이게 된다. 차체용 강판의 경우 변형률속도에 따라서 강도의 변화가 크기 때문에 정확한 충돌해석과 거동을 예측하기 위해서는 변형률속도 경화(strain rate hardening)를 이해하고 재료의 동적물성을 확보하는 것이 필수적이다.

동적물성과 관련된 연구로는 다양한 온도조건 하에서 실험을 통하여 소재의 동적 응력-변형률 선도를 얻고 이를 해석에 적용하기 위한 거시적

인 구성방정식을 구성하는 분야와 변형률속도 경화의 원인을 미시적으로 관찰하고 전위와 슬립기구를 이용하여 미시적 구성방정식을 구성하는 분야[1-2] 등으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 정적 변형률속도($10^{-3}/\text{sec}$)부터 자동차 충돌 시 국부적으로 최대 발생하는 변형률속도인 $10^2/\text{sec}$ 까지의 영역에 대하여 인장실험을 수행한다. 또한 각 변형률속도 실험마다 일정한 변형률을 부과하여 동일조건 하에서 변형률속도의 효과만을 관찰하도록 한다. 인장실험을 수행한 뒤 변형된 시편에서 미세 조직 관찰을 위한 시편을 추출하게 되며 EBSD(Electron BackScattered Diffraction)와 TEM(Transmission Electron Microscopy)을 이용하여 변형률속도 경화의 원인을 미시적으로 분석한다.

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

2. 변형률속도 인장실험

관찰에 사용된 소재는 변형률속도 민감도(strain rate sensitivity)가 큰 SPCC(0.63t)를 사용하였으며 정적 변형률속도인 10^{-3} 부터 $10^2/\text{sec}$ 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.

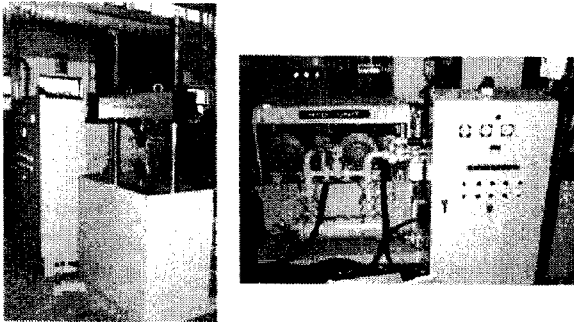


Fig. 1 High speed material testing machine

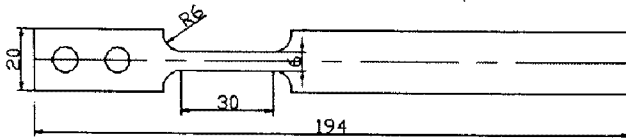


Fig. 2 Dimension of specimen for dynamic tensile tests

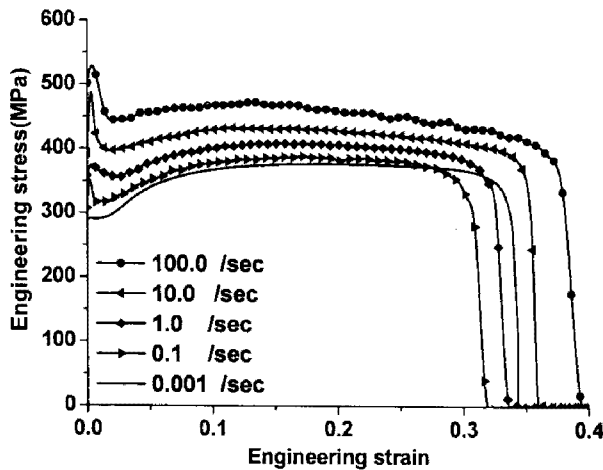


Fig. 3 Stress-strain curve for various strain rates with SPCC

Fig. 3 의 인장실험 결과를 바탕으로 모든 시편에 20%의 변형률을 부과하여 다양한 변형률속도 인장실험을 수행하였다. 중고속 인장실험 중에 시편에 일정한 변형률을 부과하기 위하여 Fig. 4 와 같은 지그[3]를 중고속 인장실험기에 장착하여 실험을 수행하였다. 지그의 작동원리는 다음과 같다. 부과하고자 하는 양 만큼의 d_{gap} 을 조절하여 시편을 장착한다.(Fig. 5(a)) 인장실험 시 시편 하단부가 당겨지면 표점부(gage section)에서 d_{gap} 의 변형이 일어난다. 이 때, 시편에 물려놓은 stopper 가 지그 하단부에 걸려(Fig. 5(b)) 표점부는 더이상 변형하지 못하고 시편 하단부의 홈에서 파단이 유도된다.(Fig. 5(c))

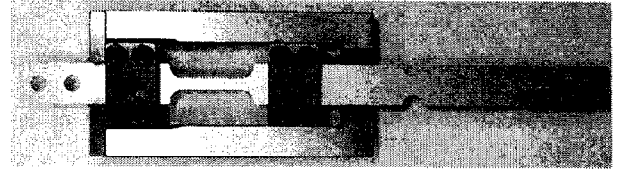
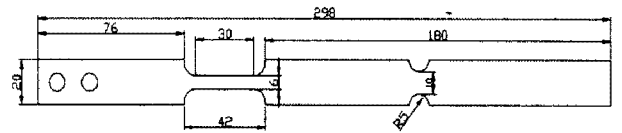


Fig. 4 Jig system to impose the designated strain

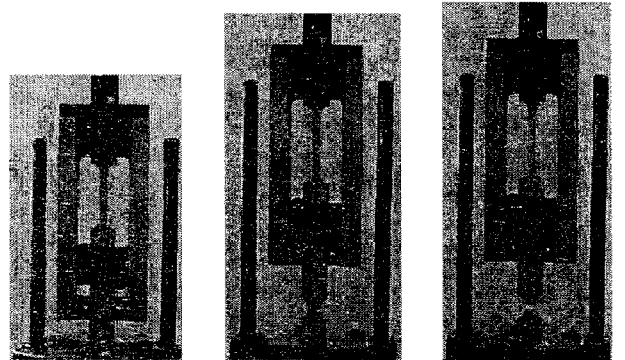


Fig. 5 Procedure of jig operation

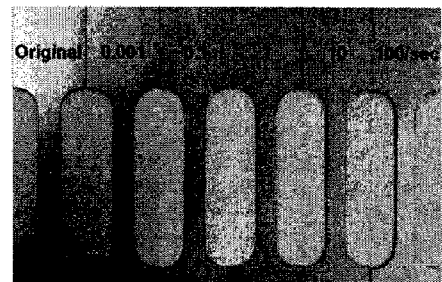


Fig. 6 Deformed specimens

3. EBSD 실험결과

일정한 변형량을 부과한 시편의 표점부 중심부로부터 5mm 크기 단위의 시편을 추출하여 EBSD를 찍고 변형 후 미세조직 변화를 관찰하였다. 각 변형률속도 시편에 대하여 가로, 세로 200 μm 의 크기로 측정하였으며 초기재료의 변형 전 평균 그레인 크기는 11 μm 이다. Fig. 7은 10⁻³부터 10²/sec의 변형률속도로 20% 변형한 시편의 미세조직을 나타내고 있다. Table 1.에서 정리한 바와 같이 변형률속도에 따른 그레인 크기와 모양변화의 특징적인 경향성을 관찰할 수 없으므로 보다 정량적인 ODF 분석을 수행하였다. 10/sec 이상의 고변형률속도와 비교하여 10⁻¹/sec 이하의 저변형률속도에서 변형한 시편의 텍스처(texture) 변화가 75% 이상 크게 발달한 것을 관찰할 수 있다. 이는 고변형률속도 하에서 변형할 경우 높은 초기 변형경화(strain hardening)에 의하여 텍스처가 초기 변형부터 구속되어 변형이 진행되어도 텍스처의 변화량이 크지않기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 Fig. 9의 PF(pole figure) 분석 결과에서도 나타난다. 10⁻³/sec 변형률속도와 10⁻¹/sec 시편의 PF 그림에서는 텍스처가 특정 방위로 집중되어 분포되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 EBSD의 실험결과를 종합하여 볼 때, 변형률속도에 따른 텍스처의 회전과 변형량이 많지않고 텍스처의 변화가 변형률속도 경화에 미치는 영향이 작은 것으로 판단되어 근본적인 원인을 찾고 분석을 수행하기가 불가능한 것으로 판단된다.

Table 1 Characteristics of grain distribution for various strain rates specimens

/sec	Avg. Grain Size (μm)	Avg. Misorientation ($^{\circ}$)	Avg. Aspect Ratio	f(g) max.
Initial	11.0	38	0.53	7.0
0.001	11.3	16	0.49	10.3
0.1	12.0	14	0.47	11.8
1	11.0	16	0.48	7.7
10	11.6	15	0.49	6.7
100	12.0	15	0.47	6.7

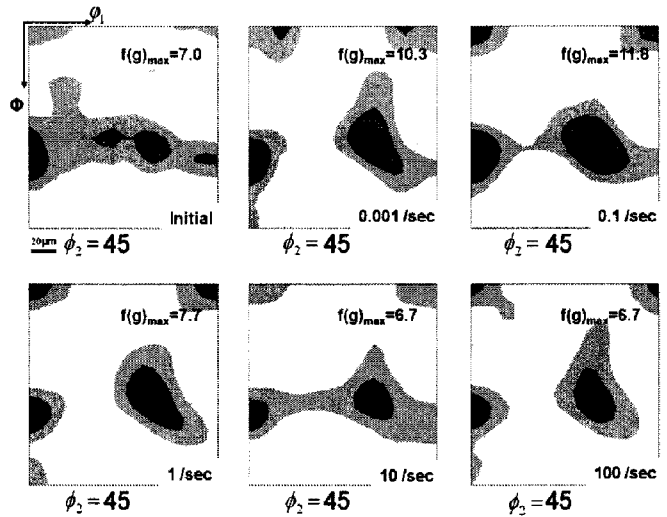


Fig. 8 Orientation distribution function for various strain rates specimens

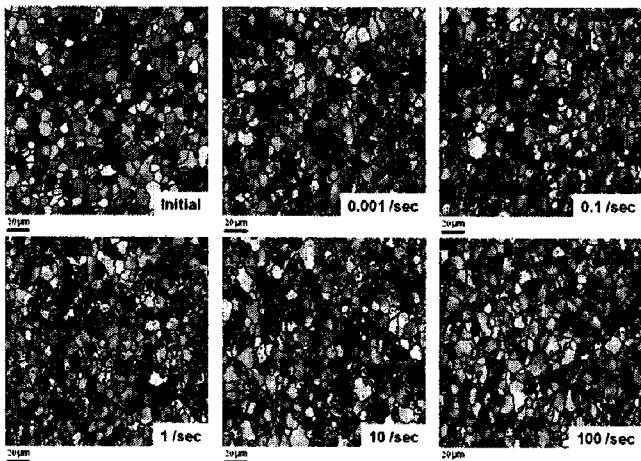


Fig. 7 EBSD result for various strain rates specimens

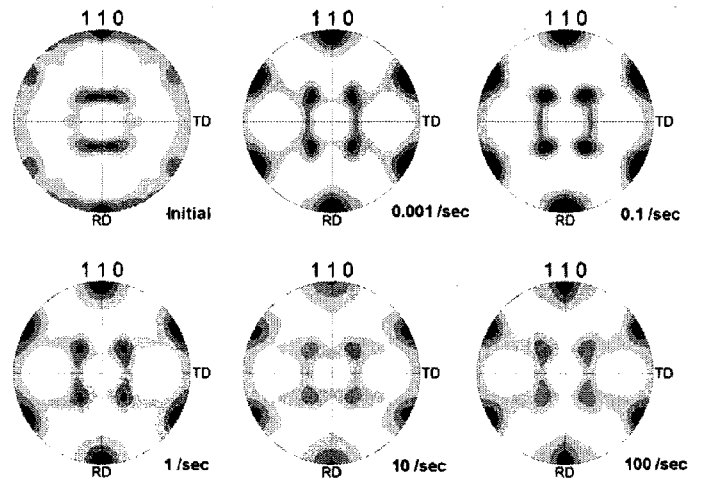


Fig. 9 Pole figure distribution for various strain rates specimens

4. TEM 실험결과

변형률속도 경화의 근본적인 원인을 분석하기 위하여 각 변형률속도에 대하여 20% 변형된 시편의 표점부에서 시편을 채취하여 TEM 분석을 수행하였다. Fig. 10 은 초기 소재의 변형 전 미세조직을 나타내며 가로, 세로 1 μ m 의 크기로 촬영하였다. 입계(grain boundary)와 삼중점(triple junction)을 관찰할 수 있으며 변형 전 초기 시편에서는 전위의 발달을 크게 관찰할 수 없다. Fig. 11, 12 는 각 변형률속도에 대한 변형률 20%의 전위분포를 나타낸다. 전위밀도가 급격하게 높아진 것을 확인할 수 있지만 과도하게 발달된 전위에 의하여 변형률속도에 대한 효과를 분석하기가 어렵다. 따라서 변형률속도 경화의 양이 크게 발생하고 전위의 발달이 크지 않은 항복점 직후의 시점에서 미세조직 관찰이 이루어져야 할 것으로 판단되며 이를 위한 저변형률을 부과하는 인장실험을 수행하고자 한다.

5. 향후과제

전위의 발달을 효과적으로 비교하기 위하여 1~2% 내외의 변형률을 부과하는 동적 인장실험을 수행하여 다양한 변형률속도의 시편에서 전위발달을 관찰하고자 한다.

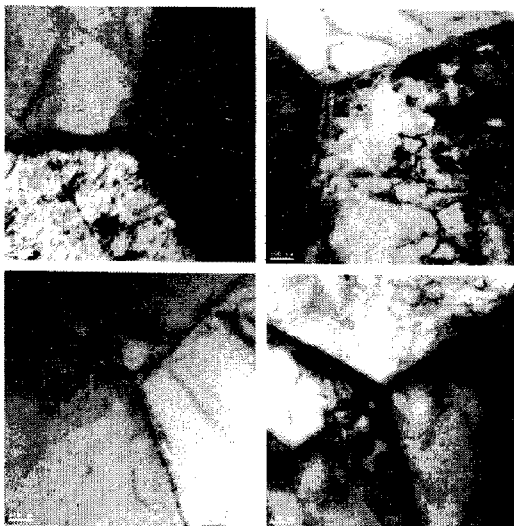


Fig. 10 Dislocation structures in SPCC steel for initial material

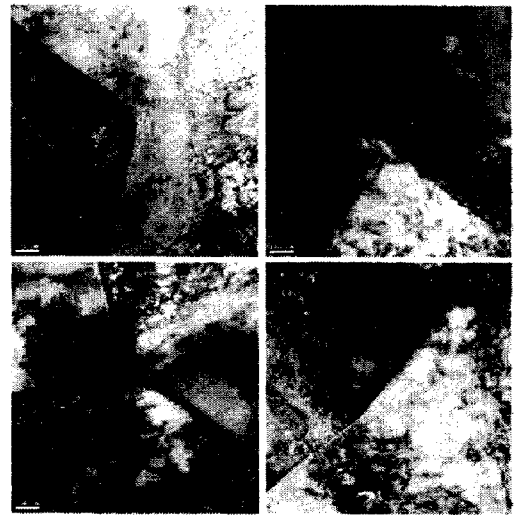


Fig. 11 Dislocation structures in SPCC steel for 20% strain at 1/sec

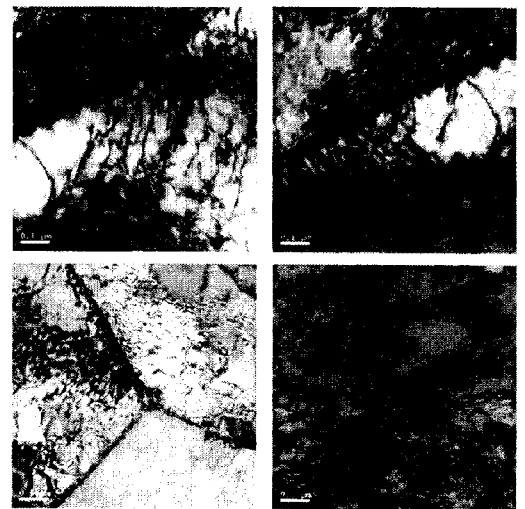


Fig. 12 Dislocation structures in SPCC steel for 20% strain at 100/sec

참고 문헌

- [1] A. Ma, F. Roters, D. Raabe, "A dislocation density based constitutive law for BCC materials in crystal plasticity FEM", *Comp. Mat. Sci.*, 39, 91-95, 2007.
- [2] J. Cheng, S. Nemat-Nasser, W. Guo, "A unified constitutive model for strain-rate and temperature dependent behavior of molybdenum", *Mechanics of materials*, 33, 603-616, 2001.
- [3] I. Choi, S. Lee, D. K. Matlock, J. G. Speer, "Strain Control during High Speed Tensile Testing ", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 5, 2006.