

## Alloy718 의 비틀림변형과 동적재결정

박노광<sup>#</sup> · 김정한<sup>1</sup> · 김남용<sup>1</sup> · 이동근<sup>1</sup> · 염종택<sup>1</sup>

### Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization of Torsion-Tested Alloy 718

N. K. Park, C. H. Kim, N. Y. Kim, D. G. Lee, J. T. Yeom

(Received October 12, 2006)

#### Abstract

Torsion testing was employed to investigate the deformation and recrystallization behavior of coarse-grained Alloy 718, and the results are compared with the compression testing results. Mechanical testing was conducted on bulk Alloy718 samples within the temperature ranges, 1000°C~1100°C. The strain gradient formed in the torsion specimens resulted in a recrystallization behavior which varied along the radial direction from the center to the surface. The flow curves based on effective stress and effective strain as obtained by Fields and Backofen's isotropic deformation theory and the dynamic recrystallization within the compression tested samples and torsion tested samples are different. The different deformation and recrystallization behavior can be rationalized by the fact that the deformation in the coarse-grained torsion specimens is not uniform and thus the strain gradient within the specimens cannot be analytically predicted by FE simulation. Thus, the extent of recrystallization cannot be properly predicted by the established recrystallization equations based on compression tests.

**Key Words** : Alloy718, Dynamic Recrystallization, Torsion Test, Strain Gradient

#### 1. 서 론

비틀림 시험에서는 인장시험에서 소성변형도중 게이지부위에서 흔히 일어나는 단면감소에 따른 확산네킹 혹은 국부네킹이 일어나지 않으며, 또한 압축시험시 나타나는 현상으로 금형과 접촉하고 있는 시험편 표면에서의 마찰 및 냉각에 기인한 소성변형 dead zone이 형성되지 않기 때문에 인장 시험 혹은 압축시험에 비하여 상대적으로 대변형률에서의 소성변형거동을 이해하기 위한 연구에 유리하다. 그러나 비틀림 시험에서는 중심으로부터 원주부위로 반경방향으로 진행함에 따라, 이론상 변형률은 0에서부터 점차 증가되어 시험편 표면에서 최대 변형률이 얻어지게 된다. 결국, 시험

편 단면에서 중앙과 표면부에서 형성된 소성변형조직은 차이가 있게 되고, 원주방향으로 소성변형응력이 변하게 되어, 비틀림 시험에서 구한 평균적인 응력-변형률 곡선에 있어서도 인장시험에서 얻은 응력-변형률 곡선과 비교하여 차이가 있게 된다. 또한 응력-변형률 곡선과 동일 변형률에서 얻을 수 있는 재결정조직은 변형모드에 따라 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 비틀림시험을 압축시험과 함께 수행하여 비교함으로써 대변형 연구에서의 비틀림시험의 한계를 알아보려고 하였다.

Fields와 Backofen에 의하면 등방성 소재의 균일 소성변형을 가정하면, 비틀림 시험으로부터 구한 응력-변형률 곡선은 아래 식(1)과 같이 구할 수 있다[1~2].

1. 한국기계연구원 소재성형센터 정밀소성팀  
# 교신저자 : 한국기계연구원, E-mail: pnk@kmail.kimm.re.kr

$$\tau = \frac{M}{2\pi\gamma^3}(3+m+n) \quad (1)$$

여기에서, n과 m은 각각 가공경화지수와 변형속도민감도지수를 M은 모멘트(힘),  $\gamma$ 는 전단변형량,  $\tau$ 는 전단응력을 의미하며 통상적으로 각각 0과 0.3의 값으로 고정해 사용하고 있다[3]. 실험적으로 m의 값은 실험결과와 식(2)를 이용해 curve fitting방법으로 구할 수 있다[4].

$$m = \left[ \frac{\partial \ln \tau}{\partial \ln \dot{\gamma}} \right]_{\theta} = \left[ \frac{\partial \ln M}{\partial \ln \theta} \right]_{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

여기서  $\theta$ 는 비틀림각도,  $\dot{\theta}$ 는 비틀림각속도,  $\dot{\gamma}$ 는 전단변형속도를 의미한다.

본 연구에서는 상기 식(1)과 식(2)를 이용하여 유동응력 곡선을 구하였다. 또한 유한요소해석을 이용하여 압축시험과 비틀림 시험시의 조직변화와 변형량을 예측하고자 하였다. 사용된 소재로는 대결정립을 갖는 Alloy 718을 이용하여 비틀림 변형거동을 이해하고자 하였으며, 소성변형되는 과정에서 나타나는 조직변화를 이해하기 위하여 다양한 온도 및 변형률 속도에서 구한 시험편에 대한 조직검사를 실시하여 빌렛내에서 발전하는 결정립 조직을 관찰하였다.

Alloy 718에서 결정립 크기는 합금의 고온기계적 성질을 결정하는 주요인자이기 때문에 이들 결정립 크기를 설계자의 요구특성에 맞추어 조절할 필요가 있다. 일반적으로 크리프 강도를 높이고 균열성장속도를 낮추기 위해서는 결정립 크기를 조대화 시켜야 하며, 저주기 피로강도와 인장항복강도를 증대시키기 위해서는 미세화된 결정립이 상대적으로 유리하다. 본 연구는 Alloy 718 소재에서 대변형시 나타나는 재결정거동을 이해하기 위하여 수행되었으며, 변형초기에서의 동적재결정 거동을 이해하기 위하여 결정립크기를 크게하여 고온변형시험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 비틀림 시험과 압축 시험

본 연구에서 사용된 Alloy 718 소재는 Ni-Fe-Cr계 합금으로 그 화학조성은 Table 1과 같다. 우선 VIM(진공유도용해)후 VAR(진공아크용해)된 잉고

트를 유압프레스를 이용하여 코강함으로써 주조 조직을 파쇄하며 균일한 조직의 빌렛을 얻었다. 당초 columnar grain이 형성된 잉고트 부위로부터 발전된 부위의 빌렛에서 시험편을 샘플링한 후 고온에서 균질화 열처리를 수행하였고, 이들 빌렛에서 압축 시험편 및 비틀림 시험편을 채취하였다. 이들 압축시험 및 비틀림 시험에 사용된 시험편의 형상 및 크기는 각기 Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)와 같은데, 각기 직경 8mm, 길이 12mm의 원통형 블록과 단면길이 8mm, 게이지길이 20mm의 비틀림 시험편을 이용하였다.

Table 1 Chemical composition of Alloy 718

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	V
0.046	0.1	0.060	0.006	0.002	19.2	2.8	17.7	0.075
W	Cu	Al	Co	Nb+Ta	Ti	Zr	B	Ni
0.06	0.03	0.62	0.22	5.6	1.1	0.05	0.04	Bal.

시험조건은 1000~1100℃ 구역에서 시험편이 균일온도에 도달한 후 변형률 속도를 0.01과 0.1/sec 조건으로 압축시험 및 비틀림 시험하였고, 그 결과는 자동기록장치에 의해서 응력-변형률 곡선으로 변환하였다. 시험에 사용된 Alloy 718의 초기조직은 20 $\mu$ m수준의 미세한 결정립을 가지고 있어 고온변형중 발생하는 미세 재결정립과의 기존의 결정립의 구분이 어려운 문제점이 있었다. 동적재결정된 결정립의 분율 및 크기를 정확히 측정하기 위해, 초기조직을 1200℃에서 2h동안 열처리를 하여 결정립 크기를 250 $\mu$ m로 조대하게 성장시켰다. Fig. 2는 열처리후의 Alloy 718 미세조직을 보여 주고 있다.

### 2.2 재결정 조직관찰

실험중 발생하는 동적재결정 양상을 조사하기 위하여, 비틀림 시험 종료후 즉시 시험편을 수냉 시킴으로써 시험편내 조직변화를 방지하며 가공조직을 유지할 수 있도록 하였다. 시험편 채취는 압축 시험편 중앙부를 압축응력방향에 평행하게 절단하여 중앙부위에서 일어나는 동적재결정 거동을 조사하였고, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 비틀림 시험편에 대해서는 중앙부위와 표면부위에서의 조직변화를 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 결정립 크기는 image analyzer를 이용하여 linear intercept method로 구하였다.

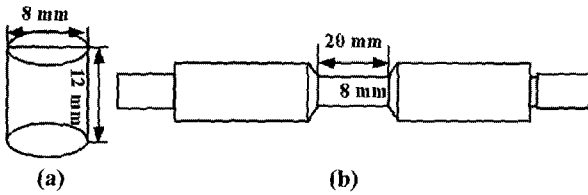


Fig. 1 Configuration of specimens for compression tests and torsion tests: (a) compression tests, (b) torsion tests

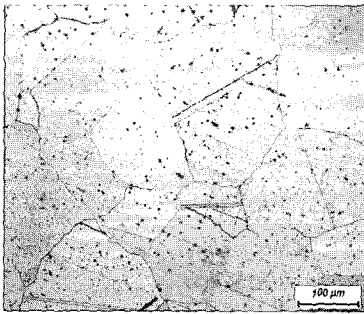


Fig. 2 Optical micrograph of Alloy718, water-cooled after 2hours heat-treatment at 1200 °C

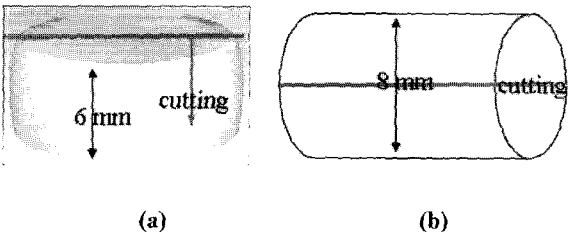


Fig. 3 Machining region of (a) compression, (b) torsion

### 2.3 FE 전산모사

시험중 일어나는 소성변형 해석을 위하여 Deform 2D를 이용하여 전산모사를 수행하였다. 전체적으로 시험편의 변형이 다결정체의 균일변형된다는 가정하에 축대칭 모드로 수행하였으며, 압축시험에 대한 재결정거동을 바탕으로 비틀림 시험시 부위별로 나타나는 재결정 거동을 해석하고자 하였다.

Alloy 718의 소성변형시 일어나는 동적재결정 거동을 분석하기 위하여 동적재결정, 준동적재결정, 결정립 성장 등에 대한 기존의 압축시험을 바탕으로 한 연구결과를 이용하여 비틀림 시험시 일어나는 조직변화를 조사하였다. 이들 결과는 2.2절에서 관찰한 바 실제 시험편에 대하여 관찰

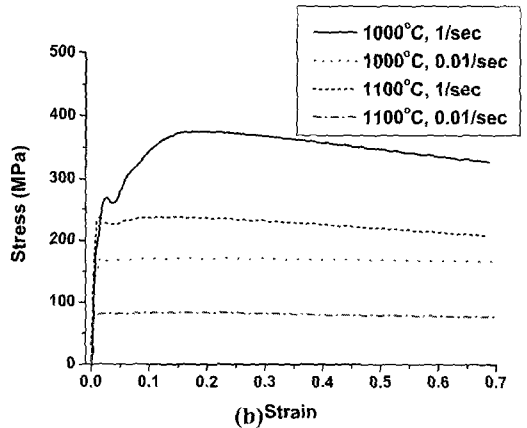
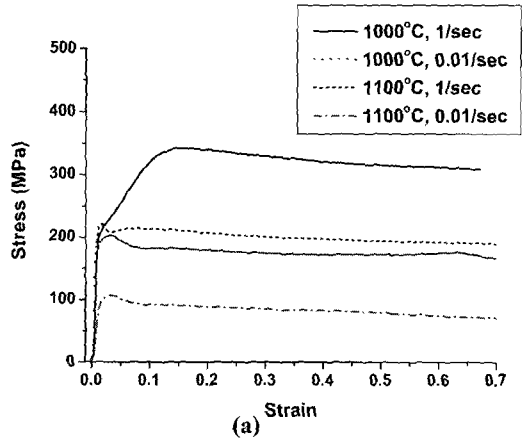


Fig. 4 Flow curves as obtained by; (a) compression testing and (b) torsion testing

한 미세조직과 비교 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

앞서 서론에서 유동응력을 구하는 식(1)은 시험편이 중앙으로부터 외부에 까지 균일하게 변형된다는 가정하에 구한 평균응력이다. 식(1)로부터 von Mises 유효응력을 구할 수 있으며, 단일 압축 시험으로부터 구한 값과 비교할 수 있다. 본 실험에서 구한 비틀림 시험으로부터 구한 응력-변형률 곡선을 압축시험에서 구한 곡선과 비교하였다.

비틀림 시험 및 압축시험에 의해서 구한 응력-변형률 곡선은 각기 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)와 같다. 0.01/sec의 변형속도에서 시험을 수행한 경우 변형량 0.2수준에서 압축시험으로부터 얻은 유동응력은 비틀림 시험으로부터 얻은 경우보다 4%(1000°C),

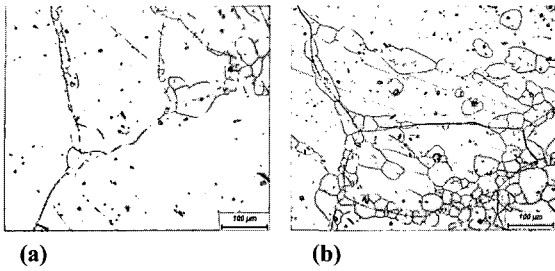


Fig. 5 Recrystallization behavior within the torsion tested specimen: (a) Center region, (b) Surface region.

7%(1100°C)정도 높았다. 반면, 1/sec의 비교적 빠른 변형속도에서 얻은 경우는 비틀림 유동응력이 압축유동응력보다 10%(1000°C), 12%(1100°C)정도 높았다. 이에 대한 원인은 식(1)에서  $m$ 값을 0.3으로 고정하고 계산하였기 때문이다. 일반적으로  $m$ 값은 일반적으로 낮은 변형속도에서는 변형속도민감도 지수가 높고 높은 변형속도에서는 변형속도민감도 지수가 낮으므로 식(1)에서도  $m$ 의 값이 변형속도에 따라 변화해야 한다. 식의 보정을 위해서 0.01/sec 조건에서는  $m$ 값에 0.3보다 높은 값을 1/sec 조건에서는 그보다 낮은 값을 적용해야 할 것으로 보인다. 비틀림 유동응력과 압축유동응력을 동일하게 맞추기 위해 식(2)를 이용해 실험데이터로 계산하여 각 변형속도 별로 최적의  $m$ 값을 구한 결과 각각 0.33(0.01/sec), 0.15(1/sec)와 같다.

본 연구에서 사용된 소재의 결정립 크기는 250 $\mu$ m로 매우 크기 때문에 개별적으로 결정립내에서 작동되는 슬립시스템 수는 상대적으로 적고 소성 변형 양상이 균일하지 않게 된다. 본 실험에서 비틀림 시험 후 재결정되는 양상을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다.

비틀림 시험과 압축 시험후 동적재결정된 결정립 크기와 부피 분율을 비교한 결과는 Fig. 6과 같다. 변형률 속도 1/sec에서 비틀림 시험에서의 결정립 크기와 부피 분율은 26.3 $\mu$ m, 10.4%이고 압축 시험에서의 결정립 크기와 부피 분율은 8.9 $\mu$ m, 20.4% 이었다. 비틀림 시험에 비하여 압축 시험의 부피 분율이 상대적으로 더 높고 결정립 크기가 미세하였다.

비틀림 변형과 압축 변형시 일어나는 재결정 거동을 이해하기 위하여, Deform-2D를 이용하여 FE 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 압축 시험과 비틀림 시험에서 얻을 수 있는 최대 변형률은 각기 1.33, 0.7로 압축 시험에서 변형률이

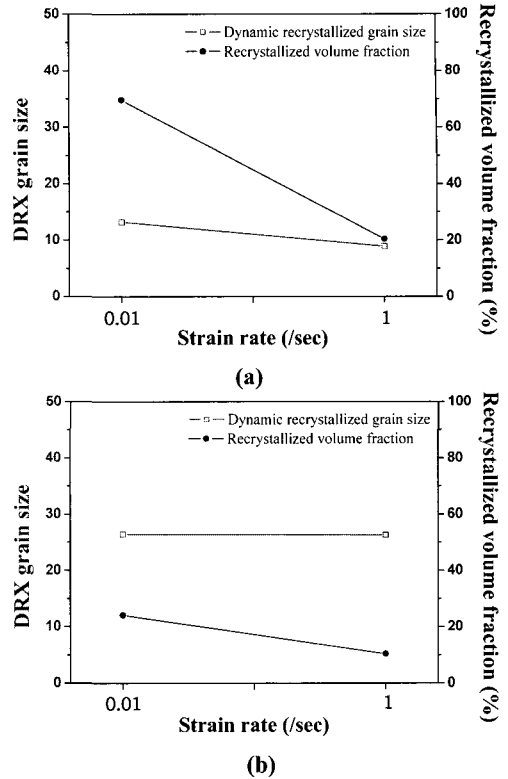
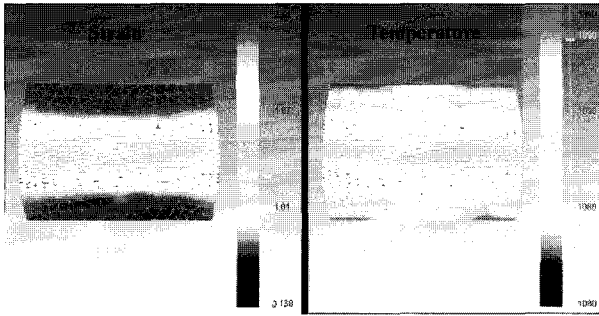


Fig. 6 Recrystallized grain size and volume fraction within (a) the torsion tested specimen, (b) the compression tested specimen

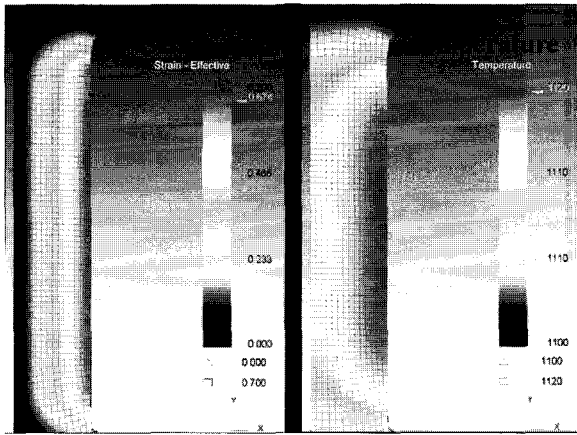
높으므로 재결정 분율이 상대적으로 높다고 판단된다. 또한 비틀림 시험에서 변형열이 1120°C로 압축 시험 보다 높아 결정립 성장이 촉진된 것으로 판단된다.

비틀림 시험시 소성 변형률을 FE 해석한 결과를 보면 이상적인 경우 변형률은 구배를 갖고 그 크기는 시험편 중심에서 외부로 갈수록 0에서 시작하여 점차 커지게 된다. ABAQUS를 이용하여 탄소성 해석을 한 결과에서도 유사한 결과를 얻을 수 있다[5].

동적재결정이 일어나는 조건에서 비틀림 시험 후 조직 관찰한 본 실험 결과를 보면 동적 재결정은 시험편의 외부뿐만 아니라 내부에서도 일부 발생한 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 앞서 유동응력 곡선에서 압축 시험편과 비틀림 시험편에서 나타나는 차이를 설명하고 있다. 즉, 비틀림 시험시 시험편 반경 방향으로 모든 시험편 위치에서 균일하게 변형률이 커지는 것이 아니라



(a) Hot compression tested at 1000°C, 1.0s<sup>-1</sup>



(b) Torsion tested at 1100°C, 1.0s<sup>-1</sup> up to a torsional angle of 348.5

Fig. 7 FE simulation results for the prediction of the strain and temperature: (a) under compression, (b) under torsion

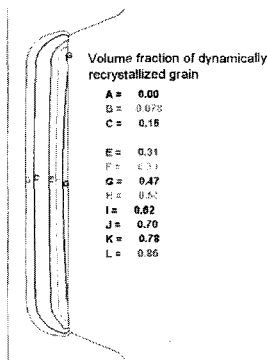


Fig. 8 Two-dimensional FE simulation for the prediction of dynamic recrystallization within torsion-tested specimen at 1100°C, 1.0s<sup>-1</sup> up to a torsional angle of 348.5. Materials DB is obtained from the metallographic tests on compression specimens

소성변형이 불균일하게 일어나며 변형률의 재분배가 일어나게 된다. 이에 따라 이상적으로는 재결정이 일어나지 않는 중심부에서도 재결정이 상당수준 일어난 것을 확인할 수 있다. Deform 2D를 이용하여 비틀림 변형 도중 나타나는 미세조직 변화를 예측한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

FE 소성해석에 의하면 비틀림 시험시 전체적으로 해석적 방법과 동일하게 균일하게 일정한 기울기를 갖는 변형률이 내부로부터 외부로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 외곽부의 소성변형률이 0.7인 경우 내부에서는 소성변형이 거의 없어 동적재결정을 야기할 수 있는 임계변형률에 도달되지 않았기 때문에 동적재결정이 발생하지 않고, 외부에서는 임계변형률을 넘었기 때문에 결정립계에서 동적재결정이 일어날 것이 예상된다. 그러나 실제로 전산모사의 결과는 Fig. 6의 비틀림 시험편에 대한 재결정시험결과와 일치하지 않는다.

즉, FE 해석상 변형률이 0.1 이하에 머무는 중앙부에 있어서도 동적재결정이 일어난 것을 확인할 수 있으며, 이들 결과는 변형률 재분배가 발생한 것을 확인시켜 준다. 이상의 결과는 Fields와 Backofen[1]이 제안한 등방성 소재의 균일소성변형을 가정한 소성변형식 (1)은 본 소재와 같이 결정립 크기가 큰 소재의 경우에 적용하기에 어렵다는 것을 확인시켜주며, 그 정도는 다양한 결정립 소재에 대한 체계적인 분석실험을 통해 확인될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과로부터 튜브형 시험편을 이용하여 비틀림 시험을 수행할 경우에 특히 표면적/체적의 비가 크기 때문에 소성변형 해석상 주의를 요한다.

#### 4. 결론

Alloy718을 비틀림 변형시험하여 구한 응력-변형률 곡선과 압축시험에서 구한 응력-변형률 곡선과 미세조직을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 비틀림 시험에서 구한 응력-변형률 곡선은 균일변형의 가정하에 구할 경우 압축시험에서 구한 결과와 차이가 나타났다. 비틀림 유동응력과 압축유동응력을 동일하게 맞추기 위해서는 각 변형속도 별로 최적의 변형속도 민감도지수를 구하여 적용해야 한다.

(2) 조대 결정립을 가지는 Alloy718을 이용하여 비틀림 시험을 수행한 결과, 실제 소성변형률이

## 참 고 문 헌

작은 중심부에서도 동적재결정이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 재료내부에서도 외부와 같이 다량의 전위생성 및 소멸과 같은 전위회복 및 동적재결정이 일어나는 것을 나타낸다.

(3) 비틀림 시험 보다 압축 시험에서 재결정 분율이 높고 결정립 크기는 미세하였다. 재결정 분율은 압축시험에서 1.33의 높은 변형률 때문으로 판단되고, 결정립 크기는 비틀림 시험에서 변형률이 압축 시험의 내부 변형률 보다 높기 때문에 결정립 성장이 일어난 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 민군겸용기술개발사업의 일환으로 추진되었으며, 관련연구 지원에 감사드린다.

- [1] D. F. Fields, W. A. Backofen, 1957, in Proceed. of the 60<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Society for Testing and Materials, Vol. 57, pp. 1259~1272.
- [2] S. C. Shrivastava, J. J. Jonas, G. J. Canova, 1982, Mech. Phys. Solids, Vol. 30 (1/2), pp. 75~90.
- [3] 한형기, 2001, 고온비틀림시험기 및 그 주변기기의 개발, 중소기업 이전기술개발사업 최종보고서.
- [4] S. L. Semiatin, J. J. Jonas, 2003, G. E. Dieter, H. A. Kuhn, S. L. Semiatin(Eds.), Handbook of workability and process design, ASM International, pp. 94~96.
- [5] H. S. Kim, 2001, Mater. Sci. Eng. A, Vol A299, pp. 305~308.