

티타늄 합금판재(Ti-6Al-4V)의 고온 소성변형특성(1)

박진기¹, 김정환², 박노광², 김영석[#]

Plastic deformation characteristic of titanium alloy sheet (Ti-6Al-4V) at elevated temperature

J. G. Park, J. H. Kim, N. K. Park, Y. S. Kim

Abstract

Titanium alloy sheets have excellent specific strength and corrosion resistance as well as good performance at high temperature. Recently, titanium alloys are widely employed not only aerospace parts but also bio prosthesis and motorcycle. However, due to the low formability and large spring back at room temperature, titanium alloy sheets were usually formed by slow forming or hot forming with heating die and specimen. In the sheet metal forming area, FE simulation technique to optimize forming process is widely used. To achieve high accuracy FE simulation results, Identification of material properties and deformation characteristic such as yield function are very important. In this study, uniaxial tensile and biaxial tensile test of Ti-6Al-4V alloy sheet with thickness of 1.0mm were performed at elevated temperature of 873K. Biaxial tensile tests with cruciform specimen were performed until the specimen was breakdown to characterize the yield locus of Ti-6Al-4V alloy sheet. The experimental results for yield locus are compared with the theoretical predictions based on Von Mises, Hill, Logan-Hosford, and Balat's model. Among these Logan-Hosford's yield criterion well predicts the experimental results.

Key Words : Titanium alloy sheet, Yield locus, Biaxial tensile test, Elevated temperature

1. 서 론

티타늄 합금 판재는 알루미늄 이나 철강재료와 비교하여 무게 대비 우수한 강도와 내식성, 고온 강도 특성으로 인해 비록 철강재료 대비 가격이 고가이지만(30~120US\$/kg) 항공기 부품, 인공 보철물, 모터사이클의 배기 시스템, 헬리콥터의 모터헤드 등 티타늄 재료의 특성을 잘 살릴 수 있는 부품에 사용이 확대되고 있다. 티타늄 재료는 상용의 순수 티타늄 β 상 티타늄과 α - β 상으로 분류되는데, 대표적인 α - β 상 티타늄 합금으로는 Ti-6Al-4V이 있다. 우주항공부품에 고강도 경량 소재로 널리 사용되는 Ti-6Al-4V 합금 판재는 상온에서 고강도 ($\sigma_y = 1000\text{MPa}$) 이면서 파단 연신율(EI=12%)과 탄성계수(E=120GPa)가 작아 상온

성형성이 낮다. 또한, 티타늄 합금 판재는 육방조밀구조(Hexagonal Close Packed Structure, HCP)로 슬립계가 매우 적을 뿐 아니라 슬립계와 슬립기구가 명확히 규명되어있지 않아 판재 프레스 가공에 많은 한계를 갖고 있다.

최근 티타늄 합금판재의 고온 변형특성과 성형 한계에 관한 연구가 많이 이루어 지고 있으나, 대부분의 연구가 $0.5T_m$ 이상인 1023K ~ 1173K에서 $10^{-4}/s \sim 5 \times 10^{-3}/s$ 의 정도의 매우 작은 변형률 속도로 대변형을 얻는 초소성 가공(Superplastic forming)에 관한 것들이다[1~2]. Roland[3] 등은 β 티타늄의 상온 킵 드로잉 연구를 수행하였지만 α - β 티타늄에 관한 연구는 많지 않다. 또한, Vanderhastan[4] 등은 α - β 티타늄의 온도별 단축인장 실험을 수행하여 기초적 물성을 평가하였다.

1. 경북대학교 대학원
2. 한국기계연구원부설 재료연구소
교신저자: 경북대학교 기계공학과,
E-mail: caekim@knu.ac.kr

그러나 α - β 티타늄의 소성변형특성을 나타내는 항복거동에 대해서 연구는 많지 않다.

현재까지는 Ti-6Al-4V합금 판재를 이용한 제품의 제조는 주로 초소성 가공에 의지하고 있지만 향후 대량 생산에 적합한 프레스 가공기술이 적용될 것으로 예상된다. Ti-6Al-4V합금 판재의 프레스 가공기술 확립을 위해서는 먼저 Ti-6Al-4V합금 판재에 대한 소성변형거동(기계적 특성, 항복곡면형상, 집합조직, 스프링백 등)과 및 프레스 가공성(press formability)의 평가가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 판재를 대상으로 873K~1073K 근방에서 프레스 가공기술 확립을 위한 데이터 베이스 구축을 목적으로 경북대에서 보유하고 있는 2축 인장 시험기를 이용하여 고온에서의 단축인장과 2축 인장 실험을 수행하였으며, 등가 소성일(equivalent plastic work)의 원리를 적용하여 Ti-6Al-4V 티타늄 합금 판재의 온간 항복곡면을 도출하였다. 본 연구에서는 재료 수급의 어려움으로 우선 873K에 대해서만 실험을 수행하였다.

2. 실험방법 및 결과

2.1 단축 인장실험

JIS13B 시편으로 773K~973K 에서 $10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 단축 인장 실험한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 온도가 상승할수록 항복강도는 점차 하강하며 균일연신 구간도 감소 함을 알 수 있다.

실험적 항복곡면 작성의 기준 데이터로 활용되는 단축 인장 실험을 위해 873K에서 단축 인장 실험을 하여 소성 변형률이 3%일 때 이방성 계수를 측정하였다. 또한 압연방향과 그에 수직인 방향으로 인장실험을 하여 n 승 경화 강소성 재료 모델인 Swift 커브피팅(curve fitting)을 하여 얻어지는 재료상수들을 Table 1에 나타내었다. 또한 각 방향별 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2.2 축 인장실험

실험에 사용한 2축 인장시편을 Fig. 3에 나타내었다. 시편의 날개부에 길이 60mm 폭 0.2mm 이하의 슬릿이 있는데 이는 변형률을 측정하는 가운데 부분에 균일한 응력장을 형성하는데 기여한다.

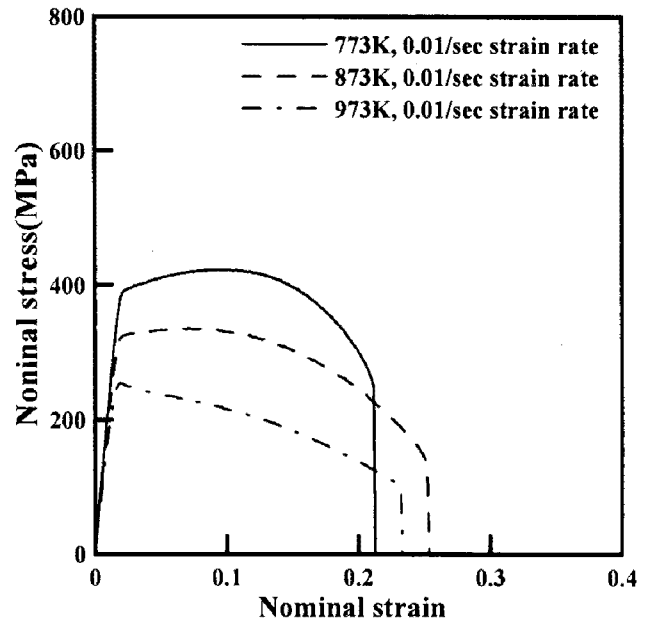


Fig. 1 Uniaxial tensile test results for various temperatures at $10^{-2}/\text{sec}$ strain rate

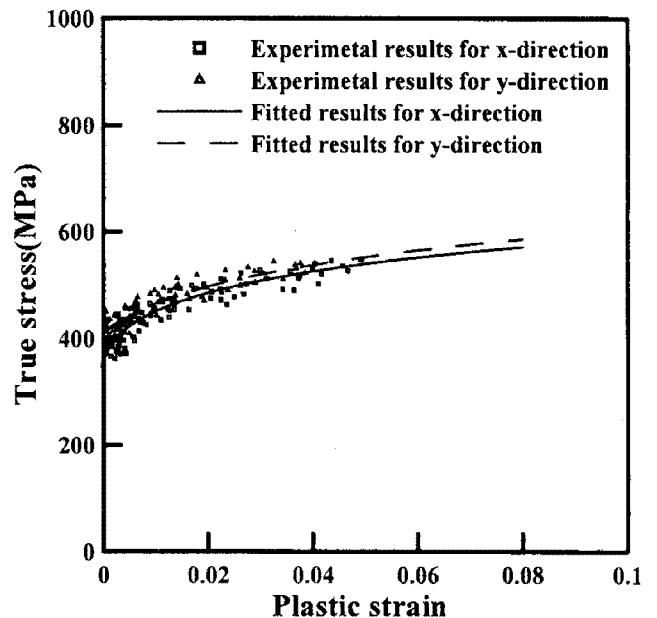


Fig. 2 Uniaxial tensile test results for each direction

Fig. 4에 나타낸 2축 인장시험기를 이용하여 X축과 Y축의 응력비를 1:2, 1:1, 2:1로 달리하여 실험을 하였다. 2축 인장시험기는 각 방향별로 4개의 유압 실린더로 응력을 제어하게 되며, 팬토그래프형의 링크 메커니즘(Pantograph-type link mechanism)을 이용하여 서로 마주보는 유압실린더

의 응력을 동일하게 제어할 수 있도록 되어있다.

Table 1 Mechanical properties of the material

Tensile direction	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	c^*	n^*	α^*	r^{**}
0° (x-direction)	33.3	394	782	0.12	0.002	1.5
90° (y-direction)	47.6	423	823	0.13	0.006	2.2

* Approximated using $\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n$ for $\epsilon^p = 0.002 \sim 0.05$

** Measured at uniaxial plastic strain $\epsilon^p = 0.03$

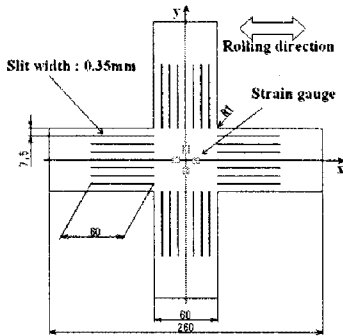


Fig. 3 Specimen for biaxial tensile test

변형률은 상온에서는 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 스트레인 게이지(Strain gage)를 통해 측정하나, 고온이 되면 스트레인 게이지를 사용할 수 없게 되어 본 연구에서는 Fig. 4 에 나타난 것과 같이 시편 상단부에 CCD 카메라를 장착하고 시편에는 그리드(Grid)를 식각하여 그리드의 변형을 CCD 카메라로 실시간으로 측정하여 변형률을 측정하였다. 일반적인 화학 에칭을 이용하면 승온 후에는 그리드가 사라져 측정이 불가능하다. 그래서 본 연구에서는 에폭시(Epoxy) 수지를 전사하여 측정을 시도 하였다. 하지만 이 방법도 그리드가 사라지는 않지만, 고온에서 시편의 온도가 상승하면 그리드 선을 CCD 카메라로 구별하기가 어려워진다. 그래서 본 연구에서는 여러 가지 그리드 마킹 전사액을 테스트 하여 최종적으로 페인트 마커를 사용하였다. 고온 카트리지 히터가 삽입된 가로, 세로 100mm 두께 40mm 의 동판이 십자시편 중앙부의 위, 아랫부분에 부착되어 온도를 상승시키며 최대 1023K 까지 승온이 가능하다. Fig. 4 의 Side view 에서 Upper die 와 Lower die 의 상하부에는 단열처리를 하여 전도 열전달을 방지하였다. 대류

열전달은 정상상태에 달하면 전도 열전달에 비해 크지 않고 균일하기 때문에 고려하지 않았다. 2축 인장 실험을 통해 획득한 응력비에 따른 응력-변형률 선도를 Fig. 5 에 나타내었다. 각 실험들은 실험결과를 나타내며, n 승 경화모델을 이용하여 커브피팅하여 나타내었다.

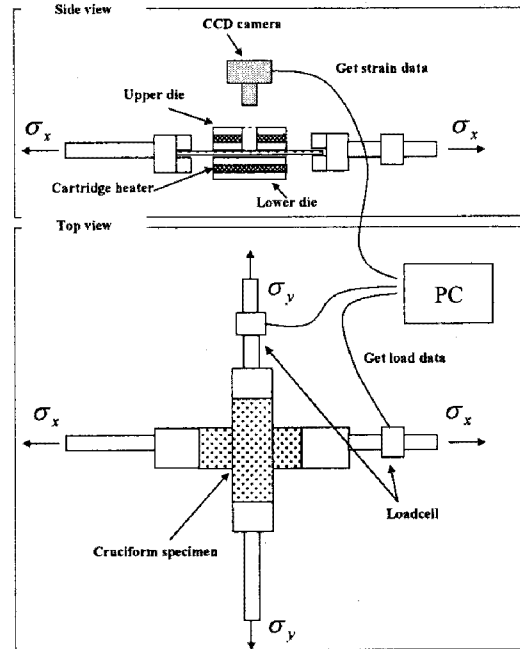
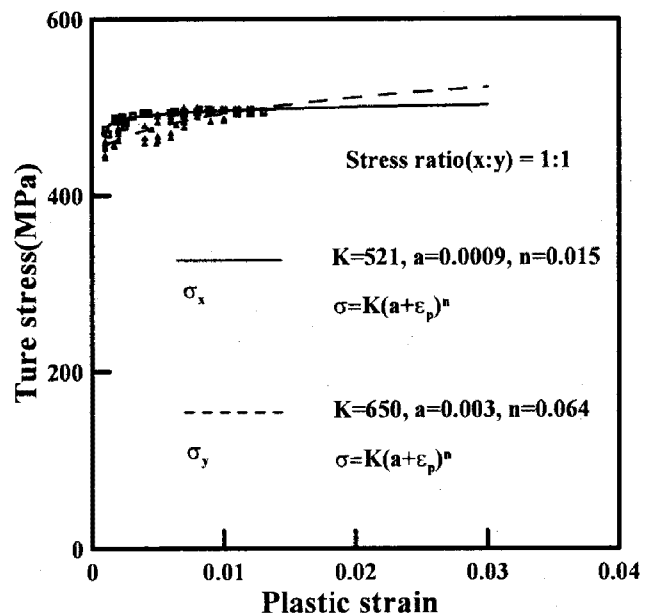
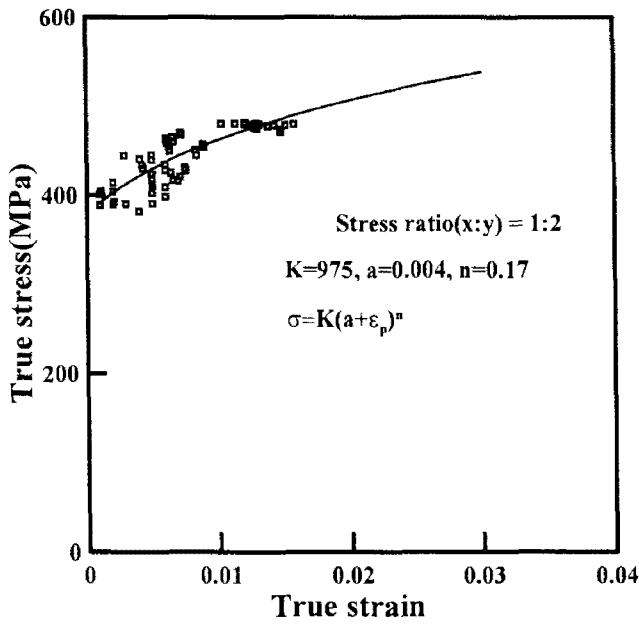


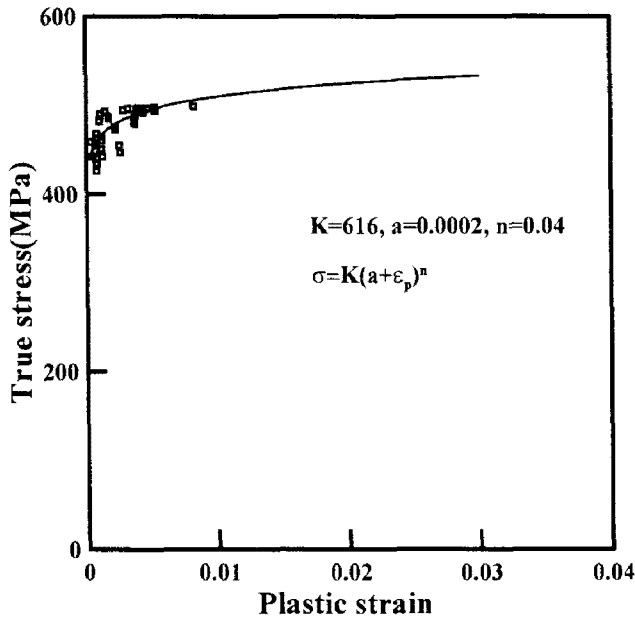
Fig. 4 Experimental apparatus for biaxial tensile test



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Stress-strain curve at stress ratio of 1:1 (a), 1:2(b), and 2:1

2.3 항복곡면의 작성

항복곡면 작성을 위해 소성일의 원리[5]를 적용하였다. 먼저 단축 응력-변형률 선도로부터 소성일을 계산하여 각 등가 소성 변형률에 따른 소성일을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Plastic works and stresses for each plastic strains

ϵ^p_0	0.005	0.01
W	2.03	4.26
σ_{ϵ^p}	431	459

Table 3에서는 다양한 응력비의 2축 인장 하에서 소성일을 계산하고, 이 값이 Table 2의 단축 인장 하에서의 소성일과 같게 될 때의 각 방향별 응력값을 나타내었다.

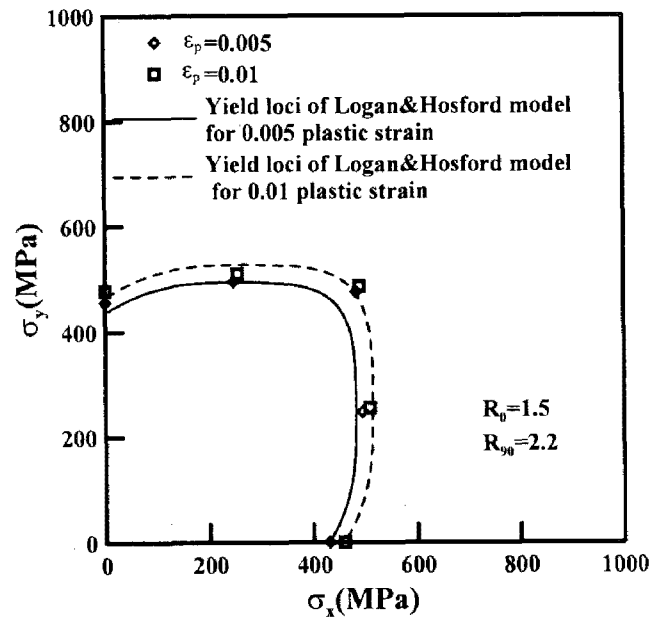


Fig. 6 Experimental data points for contours of plastic work at 873K.

Table 3 Equivalent stresses for each equivalent plastic strains. (unit : MPa)

Stress ratio \ ϵ^p_0	0.005		0.01	
	x	y	x	y
1:0	431	0	459	0
2:1	495	247	509	254
1:1	483	475	489	486
1:2	247	495	254	509
0:1	0	455	0	478

Table 3을 이용하여 Fig. 6에 항복곡면을 나타내

었다. 또한, 실험에서 구한 항복곡면을 임의의 소성 변형률에서의 X 방향의 항복응력 σ_{ϵ^p} 로 무차원화 시켜 von Mises, Hill, Logan-Hosford 그리고 Barlat의 항복조건식과 비교하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 873K에서는 Logan-Hosford[6]의 소성항복 함수가 Ti-6Al-4V의 소성변형 거동을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

티타늄과 같은 HCP 구조를 갖는 마그네슘에 대하여 실험적으로 구한 상온 항복 곡면의 경우를 보면 y 축의 항복응력이 x 축보다 다소 높은 비대칭적인 형태를 나타내는데[7] 본 연구에서도 비슷한 경향을 보이며 Fig. 6에서 보듯이 y 방향으로 약 30MPa 상승한 형태의 항복곡면이 얻어졌다.

본 연구에서는 응력비가 '0'보다 큰 2 축 인장 모드에서 항복곡면을 구하였지만 보다 정확한 항복곡면을 파악하기 위해서는 2 축 압축 및 전단 모드에서 항복곡면을 도출해야 한다. 이를 위해서 면내 압축 및 전단실험을 필요하다. HCP 결정구조를 갖는 마그네슘 합금의 경우, 압축상태에서 소성변형 항복응력이 인장상태의 경우보다 작다는 것이 알려져 있어[8] 동일한 HCP 결정구조를 갖는 티타늄 합금도 유사한 경향을 보일 것을 판단된다.

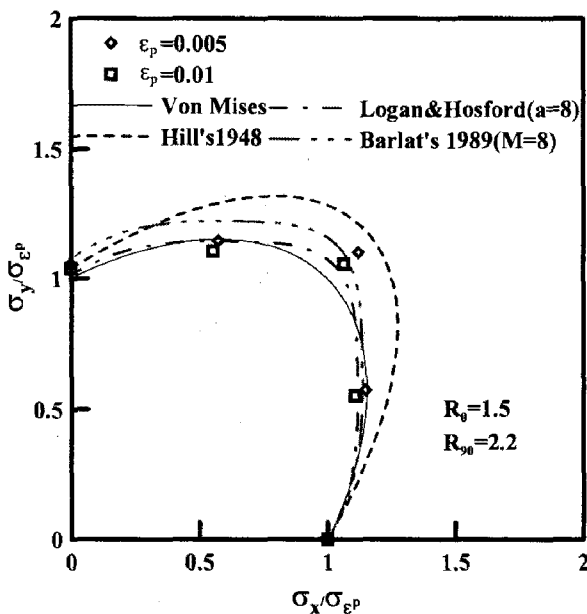


Fig. 7 Comparison of experimental data for each plastic work with theoretical yield locus at 873K.

4. 결론

본 연구에서는 티타늄 합금 Ti-6Al-4V 압연 판재에 대해 873K에서 단축과 2 축 인장 실험을 행하여 항복곡면을 도출하였다. 이 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 873K에서 단축인장 시험결과를 Swift n 승경화식으로 커브피팅하여 압연 방향에 대하여 $\sigma = 782(0.002 + \epsilon^p)^{0.12}$ 를 얻었다.
- (2) 873K에서 단축인장 시험결과를 Swift n 승경화식으로 커브피팅하여 압연의 수직방향에 대하여 $\sigma = 823(0.006 + \epsilon^p)^{0.13}$ 를 얻었다.
- (3) Logan-Hosford의 항복조건식이 873K에서 Ti-6Al-4V 합금 판재의 소성변형 거동과 잘 부합한다.

향후 Ti-6Al-4V 합금판재에 대해서 온도별, 속도별로 변형률의 전 구간에 걸쳐 항복곡면을 측정하는 연구를 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 2008년 지식경제부 항공우주부품기술개발사업(Ti 합금판재의 성형성 평가 및 최적 성형기술 개발)과 경북대학교 BK21 사업의 지원에 의해 수행되었다. 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. A. Krohn, S. B. Leen, T. H. Hyde, 2007, A superplastic forming limit diagram concept for Ti-6Al-4V, Proc. ITMechE., Vol. 221, pp. 251~264.
- [2] S. B. Leen, M. A. Krohn, T. H. Hyde, 2008, Failure prediction for Titanium alloys using a superplastic forming limit diagram approach, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. Vol. 39, pp. 327~331.
- [3] R. Lang, K. Hofmann, H. Gese, 2001, Cold forming of beta titanium sheet, Proc. RTO Meeting 69 on "Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms", Norway, Vol. 7, pp.1~7
- [4] M. Vanderhastan, L. Rabet, B. Verlinden, 2008, Ti-6Al-4V: Deformation map and modelisation of tensile behaviour, Materials and Design, Vol. 29, pp. 1090~1098.

- [5] Y. S. Kim, 2003, Theory of Engineering Plasticity, Sigma Press
- [6] R. W. Logan, and W. F. Hosford, 1980, Upper-bound anisotropic yield locus calculations assuming $\langle 111 \rangle$ pencil glide, Int. J. Mech. Sci., Vol. 22-7, pp. 419~430
- [7] J. G. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You, 2005, Plastic deformation characteristic of AZ31 magnesium alloy sheet, Trans. Mat. Process., Vol. 14, pp. 520~526
- [8] M. G. Lee, S. J. Kim, R. H. Wagoner, K. Chung, H. Y. Kim, 2008, Constitutive modeling for anisotropic /asymmetric hardening behavior of magnesium alloy sheet: Application to sheet springback, Int. J. Plasticity, 25, pp. 70~104