

## 티타늄 합금판재(Ti-6Al-4V)의 고온 성형성 평가

배문기<sup>1</sup> · 박진기<sup>1</sup> · 김정한<sup>2</sup> · 박노광<sup>2</sup> · 김영석<sup>#</sup>

### Evaluation of press formability for Ti-6Al-4V sheet at elevated temperature

M. K. Bae, 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 prothesis and motorcycle. But the database is insufficient of the titanium alloy for press forming process. In this study, the effect of temperature on the forming limit diagram was investigated for Ti-6Al-4V titanium alloy sheet through the Hecker's punch stretching test at elevated temperature. Experimental results obtained in this study can provide a database for development of press forming process at elevated temperature of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet. From the experimental studies it can be concluded that the formability of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet is governed by the ductile failure for the testing temperature below and vice versa neck-induced failure above the recrystallization temperature  $0.5T_m$ . The formability of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet at 750°C increases about 7 times compared with that at room temperature.

**Key Words :** Forming Limit Curve, Forming Limit Diagram, Titanium Alloys, Formability, Elevated Temperature, Ductile Failure, Ductile Fracture Limit Diagram

#### 1. 서 론

근래 티타늄 합금 판재는 우주항공, 일반산업, 해양분야 및 상업분야 등, 주로 무게에 비해 높은 강도가 요구되거나 내식성, 고온에서의 높은 강도가 요구되는 부품에 자주 사용되고 있다. 일반적인 철강 재료에 비해 가격이 아주 비싼 편(30~120US\$/kg)이고, 북미의 경우 티타늄 수요의 약 70%가 우주항공 관련 분야만 주로 수요가 집중되어 있지만, 점차 항공, 스포츠, 의료, 해양산업 등으로 그 수요처가 늘어나고 있다. 티타늄 합금 재료인 Ti-6Al-4V은 티타늄 합금 중 가장 대표적인 합금 중 하나로서, 상온에서 비중( $\gamma = 4.42$ )에 비해 상당한 고강도를 가지고 있고, 적은 파단연신률( $El=0.12$ )과 탄성계수( $E=120\text{GPa}$ )를 가지고

있어서 항공우주부품과 같은 고강도 경량소재가 필요한 곳에 널리 사용되고 있다. 하지만 티타늄 합금 판재는 육방조밀구조(Hexagonal Close Packed Structure, HCP)로 슬립계가 매우 적을 뿐 아니라 슬립계와 슬립기구가 명확히 규명되어있지 않다. 최근 티타늄 판재의 고온 변형특성과 성형한계에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으나, 대부분의 연구가 성형온도가  $0.5T_m$  이상인 750°C~900°C에서 변형률 속도를  $10^{-4}/\text{s} \sim 5 \times 10^{-3}/\text{s}$  정도로 매우 작게하여 결정립 슬립(grain boundary sliding)을 도모하여 큰 변형을 얻는 초소성 가공(superplastic forming)에 관한 것들이다.[1~3] 향후 대량생산에 적합한 프레스 가공기술이 티타늄 합금판재에도 적용이 확대될 것으로 예상되는 가운데 결정립 슬립이 시작되는 온도로 알려진 725°C 근방의 고

1. 경북대학교 기계공학부

2. 한국 재료 연구소 특수 합금 연구부

# 교신저자: 경북대학교 기계공학부, caekim@knu.ac.kr

온에서 프레스 가공성(press formability)의 확보 및 응용연구가 티타늄 판재의 가공에서 에너지 절약 차원에서 중요한 과제로 떠오르고 있다.

판재의 프레스 가공공정에서 재료의 성형성의 척도로 사용되고 있는 성형한계도(FLD : Forming Limit Diagram)는 주 변형률 좌표축 상에 다양한 변형모드에 있는 판재의 변형률을 표시하고 온전한 변형과 넥 또는 파단 변형의 경계로 나타내진다.[4~6] 최근 Al, Mg, 초고강도 강판 등 다양한 재료들에 대한 성형한계도를 도출하기 위해 많은 실험적, 이론적 연구가 수행되고 있지만[7~8] 아직 까지 Ti-6Al-4V합금 판재의 고온 성형성에 대한 연구는 그리 많지 않다.

이에 본 연구에서는 티타늄 합금판재의 프레스 가공기술 확립을 위한 기초연구로 Hecker의 둠 장출 실험[9]을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금판재의 고온에서의 성형특성과 성형한계도를 평가하였으며 이를 향후 Ti-6Al-4V합금 판재의 고온 프레스 가공을 위한 공정설계 및 금형설계의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 고온 성형한계도 시험

### 2.1 둠 장출 시험

Ti-6Al-4V합금 판재의 고온 성형성에 평가를 위해 설계, 제작된 10ton용량의 고온 판재성형 시험기의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 열원으로 히트 카트리지(평균 1kw/EA, 총 14개)를 시편의 온도 구배를 최소화하기 위해 상부다이, 하부다이 및 펀치에도 설치하여 쉽게 고온에 도달하도록 설계하였다. 금형의 주요 치수는 NUMISHEET'96에 제시된 값을 이용하였다. 상부다이와 하부다이는 거치대에 고정되어 있으며, 하부에 체결된 실린더에 연결된 직경 101.6mm의 구형 장출 펀치가 판재를 성형하면서 실험이 진행된다. 실험에 관한 모든 제어는 Labview에 의해 행해지고 변위계와 로드 셀을 장착하여 시간증분에 따라 변하는 펀치의 변위와 하중을 기록, 저장하도록 프로그래밍 하였다. 금형의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 PID 제어기를 이용하였으며, 시편의 온도 구배를 최소화 하기 위하여 장출 실험 직전, 펀치와 시편을 접촉시켜 시편의 온도가 정상상태에 도달하도록 한 후 실험을 진행하였다.

실험에 사용한 소재는 두께 1mm의 Ti-6Al-4V합금 판재로서, 시편의 형상은 길이가 200mm(압연 방향), 폭이 25~200mm인 직사각형 시편이다. 시편의 격자는 화학적 용해액과 전기적인 방법을 병행하여 부식시켜 인쇄하는 것이 통상적인 방법이나, 이때 부식된 격자가 고온에서는 사라져 측정이 불가능하게 되므로 예전시 잉크와 실크스크린 기법을 이용한 전사법으로 2mm×2mm의 크기를 가지는 정사각형 격자를 인쇄하였다.

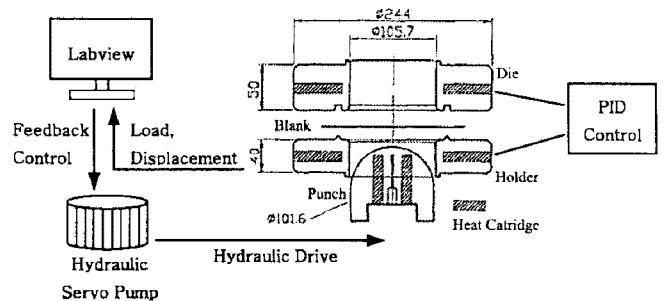


Fig. 1 Formability testing machine at elevated temperature

실험은 시편의 표면 온도를 각각 500°C, 600°C, 700°C으로 설정한 후, 펀치의 상승속도를 10mm/s로 하여 실시하였으며, 실험도중 시편의 온도변화는  $\pm 10^\circ\text{C}$  이내이었다.

### 2.2 시험 결과

Fig.2는 FLD 측정을 위해 장출실험에서 시편의 일부에 파단이 발생한 직후의 시편의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)~(c)는 각각 500°C, 600°C 및 700°C 인 경우에 대한 결과이다. 그림으로부터 시편의 온도가 재결정 온도인 700°C 이하에서는 모든 변형모드 하에서 시편의 파단이 연성파괴 형태를 갖고 있음을 알 수 있다. 한편 시편의 온도가 재결정 온도부근인 700°C에서는 단축인장 변형모드에 가까울수록 넥에 의한 파단이 일어나는 것으로 판단된다.

이를 뒷받침하기 위하여 각 온도별 파단면을 SEM 관찰한 결과를 Fig.3에 나타내었다(왼쪽부터 2축 인장, 평면변형 인장, 단축인장 시편). Fig.3에서와 같이 시편온도가 500°C, 600°C에서는 모든 변형모드에서 연성파괴의 대표적인 형태인 담풀

(Dimple) 형상이 나타났다. 하지만 700°C에서는 이러한 딥플 형상이 단축인장 모드로 갈수록 현저히 줄어 들고 있는데, 이를 미루어 보아 500°C, 600°C에서는 연성파괴에 의한 파단이, 재결정 온도 부근인 700°C에서는 국부 넥에 의한 파단이 나타나고 있음을 알 수 있다.

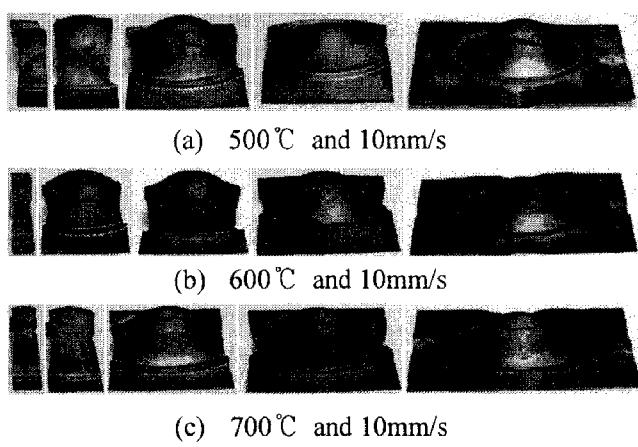
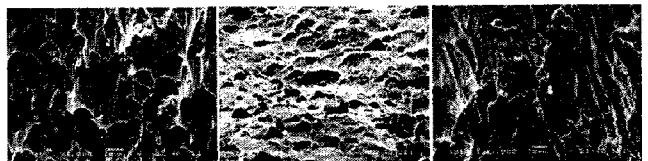
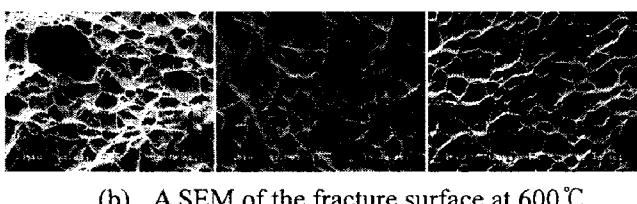
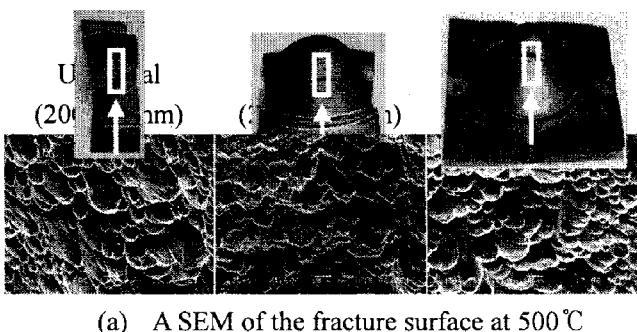


Fig. 2 FLD tested specimens



(c) A SEM of the fracture surface at 700°C

Fig. 3 SEM images of the fractured surfaces for different temperature and different deformation modes.

변형모드별 성형한계 측정을 위해 강원대학교 김형종 교수 연구실에서 개발된 ASIAS<sup>R</sup> (Automated Surface Information Analysis System)[7]가 사용되었다. Fig. 4는 ASIAS를 이용하여 시편 온도가 600°C 인 경우에 폭이 50mm인 시편의 파단 근처에서 변형률을 측정한 예를 나타낸 것이다. 고온에서도 사각격자가 손상되지 않아 파단부 위 근처에서 격자의 변형을 측정할 수 있었다.

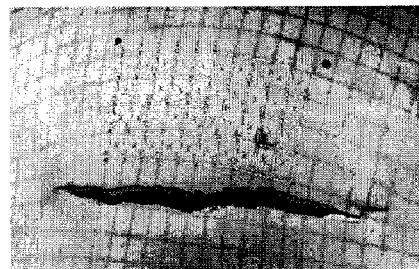
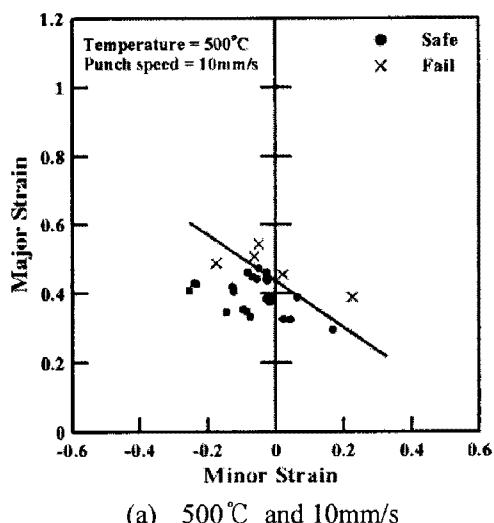


Fig. 4 Strain measurement using AISAS [7] for the fractured specimen of L200×W50 at 500°C.



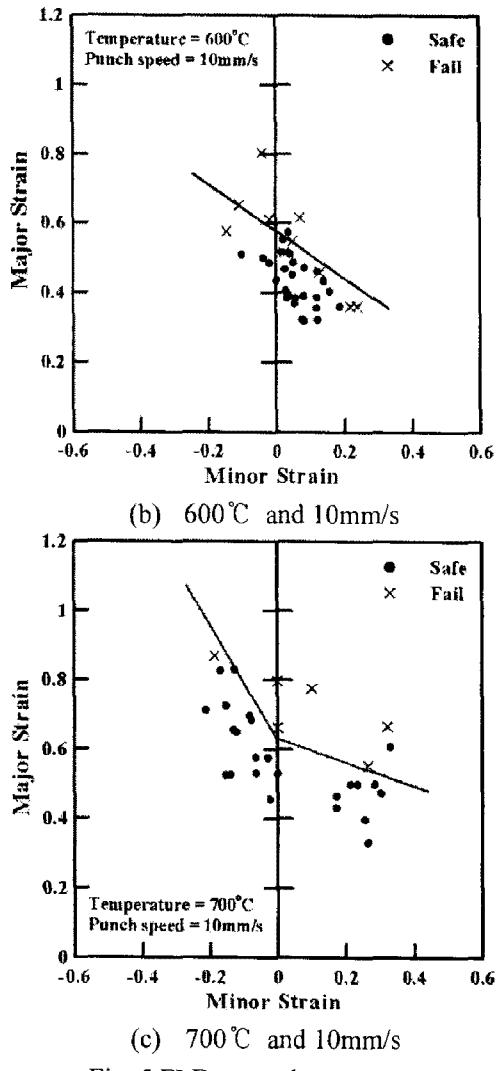


Fig. 5 FLDs at each temperature

Fig. 5 (a)~(c)는 차례대로 Ti-6Al-4V합금의 온도별 성형한계도를 나타낸 것이다. 500°C, 600°C의 경우, 실험시편의 폭을 달리하여 다양한 변형모드를 유도하려 하였으나, 대부분 시편에서 파단부 근방의 변형률이 평면변형 모드로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 고온상태에서 티타늄 판재와 편치 사이의 심한 마찰존재로 인해 특히 등 2축 인장에서의 변형모드를 실현하기 어려웠기 때문으로 판단된다. 반면 700°C의 경우에는 강판의 둠 장출 실험에서와 비슷한 형태의 넥 발생에 의한 성형한계선의 경향을 나타내고 있다. Ti-6Al-4V합금 판재의 연신률이 상온에서 약 10% 내외임을 감안할 때 Fig. 6에서와 같이 500°C에서는 약 5배, 600°C에서는 약 6배, 700°C에서는 약 7배 정도 성형성이 증가함을 알 수 있었다.

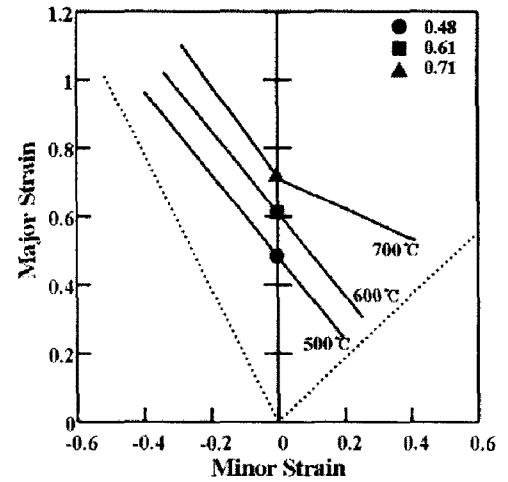
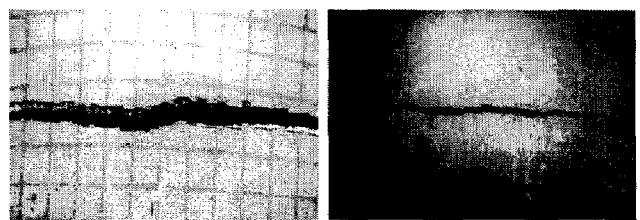


Fig. 6 Experimental results of FLD of the Ti-6Al-4V alloy sheets at elevated temperatures.

### 3. 결과 및 고찰

A. S. Korhonen 등[13]은 둠 장출 실험 후, 다중 국부 넥(multiple localized neck)이 재료의 표면에 나타나면 재료가 국부 넥이 아닌 연성파괴에 의한 파단임을 실험으로서 증명하였다.



(a) Ti-6Al-4V specimen (200X100mm) at 600 °C      (b) Ti-6Al-4V specimen (200X100mm) at 700 °C

Fig. 7 Multiple localized neck in case of plane strain mode in Ti-6Al-4V sheet at 600°C and 700°C

본 실험에서도 Fig. 7에서와 같이 600°C에서는 다중 국부 넥이 발견되어 연성파괴에 의해 재료가 파단되고 있음을 간접적으로 증명하고 있다. 따라서 Ti-6Al-4V 합금판재의 경우에 재결정온도보다 낮은 온도영역에서는 연성 파괴에 의한 파단과 안전영역을 경계로 하는 연성파괴선도 DFLD(Ductile Fracture Limit Diagram)를 적용하는 것이 합리적이라 판단된다.[10]

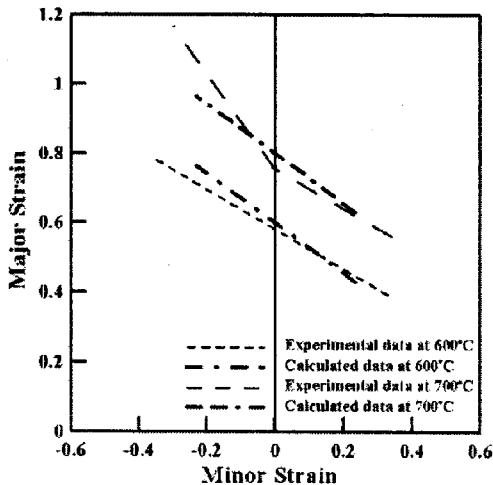


Fig. 8 Comparison experimental data to calculated data with Cockcroft & Latham model

Fig. 8에 Ti-6Al-4V 합금판재를 600°C에서의 실험결과와 대표적인 연성파괴식인 Cockcroft & Latham[12]의 식

$$C = \int_0^{\bar{\sigma}} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

$$= k(1+R)^{\frac{1}{n}} \frac{(\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^{n+1}}{n+1}$$

을 이용하여 예측한 DFLD를 나타내었다. 여기서  $\sigma_1$  = 주응력,  $\bar{\sigma}$  = 등가응력이며, Ti-6Al-4V재료의 이방성 항복곡면은 Logan 과 Hosford[14]의 항복 조건에 따르는 것으로 하여  $a=8$ 로 하였다.[15] 600°C와 700°C에서 단축인장 실험을 수행하여 구한 임계값 C는 각각 431Kgf/mm<sup>2</sup>, 527 Kgf/mm<sup>2</sup>이었다.

앞서 SEM사진과 다중 국부 넥을 근거로 판단한 것과 같이 600°C에서는 연성파괴에 의한 파단으로 성형한계를 예측하는 것이 합리적이라 판단된다. 하지만 시편의 온도가 700°C에 이르면 시편에서는 더 이상 다중 국부 넥을 찾아볼 수 없으며, 연성 파괴에 의한 파단보다는 국부 넥에 의한 파단이라고 판단된다. 이는 Fig. 3의 SEM 사진으로 분석한 결과와 일치한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 돔 장출 실험을 실행하여 Ti-6Al-4V합금 판재의 고온 성형성을 실험적으로 평가하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고온에서의 판재 성형성 평가를 위하여 히트 카트리지와 유압프레스를 장착한 고온 돔 장출 실험 장비를 개발하였다.
- (2) 고온에서의 Ti-6Al-4V합금판재의 성형성 평가를 시행한 결과, 500°C에서는 약 5배, 600°C에서는 약 6배, 700°C에서는 약 7배 정도 성형성이 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 고온에서의 Ti-6Al-4V합금판재의 파단 성향을 분석한 결과, 600°C까지는 연성파괴에 의한 파단이, 재결정 온도 부근인 700°C 이상에서는 국부 넥에 의한 파단이 지배적인 것을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 2008년 지식경제부 항공우주부품기술개발사업(Ti합금판재의 성형성 평가 및 최적 성형기술 개발)과 경북대학교 BK21사업의 지원에 의해 수행되었으며 관계자 제위께 감사드린다. 또한 성형한계 측정을 위한 ASIAS S/W를 제공하여 주신 강원대학교 김형종 교수께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] M.Vanderhasten, L. Rabet, and B.Verlinden, 2008, Ti-6Al-4V: deformation map and modelisation of tensile behavior, Materials and Design, Vol.29, pp.1090-1098.
- [2] A.S.Khan, R.Kazmi, and B.Farrokh, 2007, Multiaxial and non-proportional loading responses, anisotropy and modeling of Ti-6Al-4V titanium alloy over wide ranges of strain rates and temperatures, Int. J. plasticity, Vol.23, pp.931-950
- [3] S.B.Leen, M.A.Krohn, and T.H.Hyde, 2008, Failure prediction for titanium alloys using a superplastic forming limit diagram approach, 2008, Mat-wiss. U. werkstofftech, Vol.38, No.4-5, pp.327-331.
- [4] R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Oxford

- University Press, new York, 1983.
- [5] Y.S. Kim, Plasticity, 2003, Sigma Press.
- [6] Z. Marciniaik and K. Kuczynski, 1967, Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal, Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp. 609
- [7] H.Y. Kim, S.C. Choi, H.S. Lee, H.J. Kim, and K.T. Lee, 2007, Experiment for forming limit diagram and springback characteristics of AZ31B magnesium alloy sheet at elevated temperature, Trans. Mat. Processing, 16-5, pp. 364
- [8] H.S. Son, S.H. Jung, and Y.S. Kim, 2007, Prediction of forming limit for anisotropic sheet metals with considering the effect of strain-path changes, Proceeding 2007 Autumn Conf. Trans. Mat. Processing, pp. 109
- [9] S.S.Hecker, 1972, A simple forming limit curve technique and results on aluminum alloys, Proc. 7th Biennial Congress Int. Deep Drawing Research Group, Amsterdam, pp.5.1-5.8
- [10] L.Zhang, Y.-J.Yin, Y-Q.Chen, and M.-D. Xue, 2003, Damage and forming limit analysis in porous ductile metals at room or elevated temperature, Mater. Sci. Technol., Vol.19, pp.1355-1360.
- [11] J.R.Mayeur and D.L.McDowell, 2007, A three-dimensional crystal plasticity model for duplex Ti-6Al-4V, Int. J. Plasticity, Vol.23, pp.1457-1485
- [12] M. G. Cockcroft, and D. J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals. J. Inst. Met., 96, pp.33-39
- [13] A.S. Korhonen, T. Manninen, 2008, Forming and fracture limits of austenitic stainless steel sheets, Mater. Sci. Eng. A, 488, pp. 157-166
- [14] R. W. Logan, and W. F. Hosford, 1980, Upper-bound anisotropic yield locus calculations assuming<111> pencil glide, Int. J. Mech. Sci., Vol. 22-7, pp. 419~430
- [15] J.G. Park, J.H. Kim, N.K. Park, and Y.S. Kim, Plastic deformation characteristic of titanium alloy sheet(Ti-6Al-4V) at warm temperature, Proceeding 2009 Spring Conf. Trans. Mat. Processing, in print.