

# Ti-6Al-4V 합금의 초소성 벌지성형에 미치는 배압력의 영향

\*송유준, 이종수  
포항공과대학교 항공재료연구소

## A Study on the Effect of Back Pressure on the Superplastic Bulge Forming of Ti-6Al-4V Alloy

\*You-Joon Song, Chong-Soo Lee  
Center for Advanced Aerospace Materials  
Pohang University of Science & Technology, Pohang 790-784

### Abstract

A modified Mukerjee's model considering the microstructural evolution was developed to study the superplastic bulge forming process of Ti-6Al-4V alloy. Through the microstructural observation after deformation, it was found that the grain growth rate of uniaxially tested specimens was different from that of biaxially deformed specimens. From this result, bulge forming experiments with and without back pressure were performed to examine the grain growth behavior and to compare the results of biaxial test with those of triaxial test. Good agreement between the prediction by a modified Mukerjee's model and the experimental measurements was obtained for bulge profile and thickness distribution.

Key Words : Superplasticity, Superplastic Forming, Hydrostatic Pressure, Ti-6Al-4V alloy.

### 1. 서론

초소성 현상은 매우 좁은 영역의 온도와 변형율속도 범위 내에서 나타나며, 초소성 재료는 변형율속도에 매우 민감하므로 초소성 성형 공정에서는 최적 온도, 변형율속도를 유지하는 것이 무엇보다도 중요하게 된다. 그런데, 지금까지의 대부분의 연구

는 초소성 성형 동안 일어나는 미세조직의 변화를 고려하지 않았을 뿐만 아니라 공정 설계의 기초 자료인 인장 특성에 일축 인장 시험으로부터 얻어진 값을 그대로 적용하여 왔다.

따라서, 본 연구에서는 초소성 성형 공정의 기본 모델인 벌지 성형의 해석을 위해 기존의 Mukherjee의 해석해 모델<sup>1)</sup>을 수정, 결정립성장<sup>2)</sup>을 포함하는 새로운 해석해를 유도하여 성형 시험을 수행하였고 알루미늄 합금 등에 사용되는 배압력을 Ti-6Al-4V 합금의 성형 공정에 적용한 성형 시험도 실시하였다. 성형 도중 및 성형 후의 미세조직을 관찰하여 초소성 성형 동안 일어나는 미세조직의 변화를 고려한 공정 해석을 검증하고자 하였으며 이를 위해 본 연구의 해석적 방법에서 예측된 두께 분포, 성형된 높이, 형상 등을 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 TIMET 에서 구입한 5mm 두께의 판재이며 원래 상태의 조직은 조대한 Widmanstatten 조직이었다. 가공열처리 공정은 1050℃에서 30분간 용체화 처리, 800℃에서 30분간 소둔 처리 및 열간압연을 거쳐 900℃에서 1시간 동안 재결정처리가 이루어졌다.

초소성 성형시의 특성평가방법으로는 부풀림 벌지성형을 수행하였다. 모든 성형은 Ti-6Al-4V 합금에 가장 적합한 조건으로 판단된 900℃,  $5 \times 10^{-4}$ 의 조건에서 수행하였으며, 배압력이 가해지지 않는 이축 성형실험과 1MPa의 배압력을 가한 삼축(이축 인장과 일축 압축응력상태의 조합) 성형을 수행하였다. 또한 결정립성장을 관찰하기 위해 SEM으로 변형량에 따른 미세조직의 변화도 관찰하였다.

## 3. 이론

본 해석해에서 이축성형과 배압력이 가해진 벌지성형에 대한 구성 방정식을 아래 표에 요약하였다.<sup>3)</sup>

	No Back Pressure	Applied Back Pressure
구성방정식	$\bar{\sigma} = K \left( \frac{\bar{D}_s}{D_0} \right)^{mp} \exp(amp\bar{\epsilon}) \bar{\epsilon}^m$	
Principal Stress	$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_2 &= \frac{\rho}{2s} \delta \\ \sigma_3 &= 0 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_2 &= \frac{\rho}{2s} \delta - P_b \\ \sigma_3 &= -(P_b + \frac{\delta}{2}) \end{aligned}$
von Mises Effective Stress	$\bar{\sigma} = \frac{\rho\delta}{2s} = \sigma_1$	$\bar{\sigma} = \frac{\delta}{2} \left( \frac{\rho}{s} + 1 \right) \approx \frac{\rho\delta}{2s} = \sigma_1 + P_b$

#### 4. 실험 결과 및 고찰

일축인장시험 자료의 이축성형시험에의 적용성을 검증하기 위해 일축인장시험에서의 결정립 성장속도를 최적압력사이클에 적용하여 성형한 후 미세조직을 관찰한 결과, 결정립 성장속도가 일축인장과 이축성형에서 차이가 남을 알 수 있었다<sup>4)</sup>. 본 연구에서 일축인장시험 자료로 부터 계산된 최적 압력 사이클에 1MPa의 일정 배압력을 적용, 실험하여 그 때의 결정립 성장속도를 측정된 결과 약간 다른 결정립 성장속도가 나타남을 알 수 있었다. 이 결과로부터 새로운 압력 사이클을 계산하여 성형을 수행하였다. 이축과 배압력이 가해진 상태의 압력사이클을 비교하여 그림 1에 나타내었다.

각 응력상태에서의 결정립 성장속도 차이에 의해 유동응력의 차이가 생기며 따라서 최적 압력 사이클이 변화하게 된다. 결정립 성장에 의한 유동응력의 증가가 클수록 변형저항이 커지게 되는 데 이러한 결정립 성장속도의 차이는 각 응력상태에서의 변형 에너지 차이 때문으로 고려된다.

위 최적 압력사이클을 이용하여 성형실험을 수행한 후 본 해석해의 검증을 위해 해석해에서 유도된 effective strain, dome profile 등의 예측값을 측정값과 비교하였다. 성형 높이가 50mm로 예측된 30분 동안의 성형의 경우, 실제 성형된 높이는 49.4mm로 약 1.2%의 오차를 보이고 있으며, effective strain이나 bulge profile의 경우도 예측값과 실측값이 잘 일치함을 알 수 있었다.

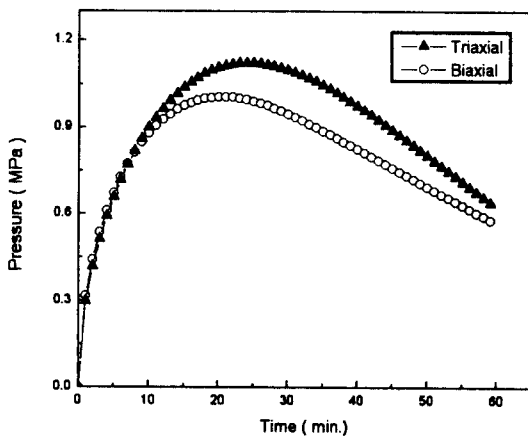


Fig. 1 Calculated pressure cycle curve.

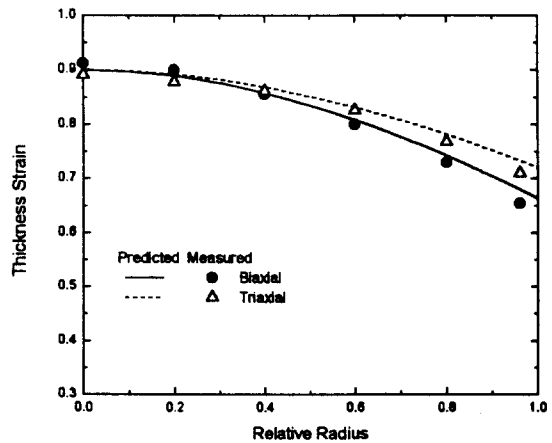


Fig. 2 Comparison of predicted thickness with experimental data.

그림 2는 배압력을 가하지 않은 경우와 배압력을 가한 경우 각각의 두께분포의 예측값과 측정값을 서로 비교하여 보여주고 있는데 배압력을 가한 경우가 그렇지 않은 경우보다 좀 더 균일한 두께분포를 나타내고 있으며 에지부근에서 예측값과 측정값에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 균일한 두께분포는 배압력이 가해지고 결정립 성장속도가 커짐에 따라 유동응력이 증가하게 되며 이로 부터 변형 저항이 증가하여 배압력이 가해지지 않는 이축성형의 경우보다 좀더 균일한 두께분포가 얻어진다고 설명할 수 있으며, 에지 부근에서의 두께분포 차이는 재료와 다이간의 클램핑한 부근에서 성형되는 재료 내부로 재료의 flow가 발생하기 때문으로 고려된다.

본 연구에서는 배압력에 의한 결정립 성장속도의 증가로 두께분포가 어느 정도 균일해졌으나, 결정립 성장에 의한 성형성 감소가 고려되어야 하며, 향후의 연구에서는 결정립 성장이 성형성에 미치는 효과가 좀 더 체계적으로 이루어져야겠다.

## 5. 결 론

1. 초소성 성형을 위한 Mukherjee의 해석해를 수정하여 최적 압력사이클, 두께분포, 벌지 형상, 높이 등을 예측할 수 있는 방정식을 유도하였고, 배압력을 가하는 성형을 위한 방정식도 유도되었다.

2. Ti-6Al-4V 합금의 일축 인장과 이축 성형시험 그리고 배압력이 가해진 성형시험을 동일한 변형률속도로 동일시간 동안 수행한 후 미세조직을 관찰한 결과 각 경우의 결정립 성장속도에 차이가 있음이 발견되었다.

3. 수정된 해석해를 Ti-6Al-4V 합금의 초소성 성형에 적용하여 본 결과 등이축성형이나 배압력이 적용된 성형 모두 벌지 형상이나 두께분포의 실측치가 예측치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 6. 참고 문헌

1. A.Dutta, A.K.Mukherjee : Mat. Sci. & Eng., A157(1992), 9
2. E.Sato, K.Kuribayashi : ISIJ Int., vol.33(1993), No.8, 825
3. C.C.Bampton, R.Raj : Acta Met., vol.30(1982), 2043
4. 이주훈 : 석사학위논문, 포항공과대학교, (1996)