

열간 후방압출된 Ti-6Al-4V 튜브의 성형결함 해석

염종택*·심인규*·나영상*·박노광*·홍성석**·심인옥**

Assesment of Forming Defects in Hot Backward Extruded Ti-6Al-4V Tube

J.T. Yeom*, I.K. Shim*, Y.S. Na*, N.K. Park*, S.S. Hong** and I.O. Shim**

Abstract

The metal forming behavior and defect formation in Ti-6Al-4V tube during hot backward extrusion were investigated. To predict the forming-defects such as shear band, inner cracks or surface cracks, dynamic material model(DMM) including Ziegler's instability criterion and modified Cockcroft-Latham fracture criterion(C-L model) were used. These models were coupled to the internal variables generated from FE analysis. The chilling effect and friction indicated a great influence on the deformation mode of the tube and the formation of surface cracks. The simulation results for the backward extrusion were compared with the experimental observations.

Key Words : Ti-6Al-4V Alloy, Forming Defects, Dynamic Material Model, Instability Criterion

1. 서 론

최근 단조, 압연, 압출 등의 소성가공시 발생하는 성형 결함(전단밴드, 기공, 내부 또는 표면균열 등)과 결정립 크기, 조직변화 등의 재질예측을 통해 최적공정을 얻기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.⁽¹⁾ 특히 $\alpha+\beta$ 형 티타늄 합금과 같이 가공열처리공정에 따라 조직의 변화가 다양하게 나타나는 경우 재료의 가공성 및 공정변수에 따른 조직변화를 예측하는 일은 상당히 중요한 일이다. 티타늄합금 중 가장 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V(Ti-64) 합금은 높은 비강도와 우수한 파괴인성 및 부식저항성 등과 같은 특성을 가지고 있는 전형적인 $\alpha+\beta$ 형 티타늄 합금으로 300°C까지의 비교적 고온에서 견딜수 있기 때

문에 항공기용 엔진 및 기체구조 재료로 많이 사용되고 있다. 그러나, 일반적인 금속부품에 비해 티타늄합금으로 제조된 부품의 경우 고가이며, 고온에서의 높은 유동응력과 높은 온도의존성으로 인하여 가공성이 떨어지기 때문에 산업용 부품에 적용하기 위한 많은 제약을 가진다. 티타늄합금의 산업용부품으로는 튜브형상이 주를 이루며, 일반적으로 이러한 부품에 대해 압출공정이 이용된다. 압출공정에 의해 티타늄합금의 튜브형상을 성형할 경우 표면 균열을 피하기 어려운 것으로 알려져 있으며, 이러한 결함을 최소화하기 위해서는 많은 실험과 시행착오를 요구한다.⁽²⁾ 최근 FE해석기술의 발달과 함께 최소한의 비용으로 공정최적화를 얻기 위한 노력이 이루어지고 있으나, 성형결함을 예측함으로써 형상 뿐만 아니라

* 한국기계연구원, 공정연구부
** 국방과학연구소, 기술연구본부

제품의 품질을 향상시키고자 하는 연구는 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 후방압출된 Ti-64합금 튜브형상에 대한 성형결함을 예측하기 위한 모델들을 검토하고, FE해석과 연계하여 후방압출된 Ti-64 튜브에서 발생하는 성형결함을 예측함으로써 신뢰할 수 있는 성형결함 예측방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 열간 후방압출

Ti-64 후방압출에 사용된 소재는 704°C에서 2시간 가열한 후 공냉된 어닐링 조직으로 등축 α상과 변태된 β상(transformed β)으로 구성되어 있으며, 평균 등축 α상 입자크기는 15.4μm, 변태된 β상 입자크기는 7.7μm이었다. Ti-64합금의 후방압출을 통한 튜브형상의 성형은 150톤 유압프레스가 이용되었으며, 후방압출의 금형 및 punch 형상은 그림 1에 도식적으로 나타내었다.

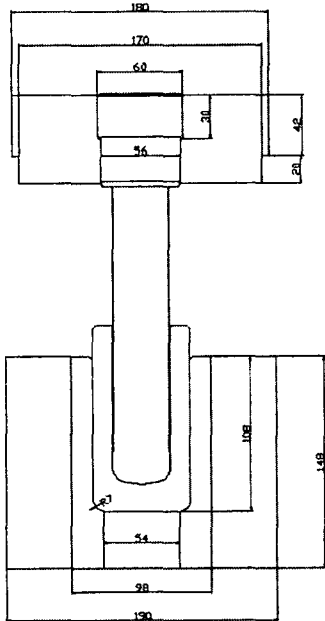


Fig. 1 Schematic illustration of fixture used to backward extrusion for Ti-6Al-4V

소재 가열시 산화방지를 위하여 Deltaglaze #151 코팅제를 사용하였으며, 소재가열온도는 β-변태점(~1000°C)의 20~30°C정도 낮은 970°C로 설정하였다. punch와 하부금형의 가열은 350°C로 밴드히터를 이용하여 가열되었고, 가열후 oil-base 흑연윤활제로 도포되었다. 후방압출시 압출속도는 30mm/s로 약 75%까지 성형되었다.

2.2 후방압출에 대한 FE해석

후방압출공정에 대한 변형률, 변형속도, 온도분포와 같은 내부변수들을 얻기 위해서 상용 FE코드인 DEFORM-2D가 이용되었다. 이때 해석에 필요한 열전달 및 유동 응력 데이터는 이전에 보고된 논문⁽³⁾을 활용하였다. 또한 금형과 소재사이의 계면열전달계수는 하중에 따라 달라 나타나며, 비등온 열전달 측정실험에서 직접적으로 측정된 값을 이용하였다. 즉, 하중이 가해지지 않은 경우 0.07kW/m²°C가 성형이 이루어져 하중이 가해지는 경우 5kW/m²°C를 사용하였다. 또한 경계면 마찰계수는 0.3으로 입력하여 해석되었다. 이러한 FE해석을 통해 얻어진 변형률, 변형속도, 온도분포는 성형결함예측모델과 연계되어 Ti-64합금의 후방압출시 발생하는 성형결함을 예측하는데 활용하였다.

3. 성형결함예측 모델

3.1 Instability criterion을 포함한 동적재료모델

동적재료모델은 재료의 조성적 거동, 열간 성형성 및 미세조직적 변화사이의 관계를 연계시킨 것으로, 열간가공시 복잡한 재료들의 가공성, 파괴 및 유동 거동을 거시적으로 표현하기 위한 방법으로 개발되었다. Prasad⁽⁴⁾ 등은 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지 분산특성은 고온에서 재료를 변형시킬 때 재료의 소성변형에 의해서 소모되는 에너지와 미세조직적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지에 기인한다고 하였으며, 결국 이러한 미세조직적 변화는 온도와 변형속도의 함수로 얻어지는 변형속도민감도를 통해서 예측함이 가능함을 입증한바 있다. 가공성 또는 가공 효율을 극대화하기 위해서는 가공중 외부에서 유입된 power가 열적 방출보다는 변형되는 재료의 미세조직적 변화에 소모되는 것이 유리하게 되며, 이를 정량적으로 표현하기 위해서 식(1)에 나타난 에너지 분산 효율(η)을 제시하였다.

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \quad (1)$$

여기서, 에너지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미세조직적 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다. 한편, Ziegler⁽⁵⁾는 고온 변형동안 소성 유동 불안정성을 평가하기 위한 continuum criterion으로 다음과 같은 소성 불안정인자(ξ)를 제안하였다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (2)$$

여기서 ξ 이 음의 값을 나타내는 경우 유동불안정구간으로 정의된다. 이러한 모델들을 실제 후방압출공정시 Ti-64 튜브에서 발생하는 성형결함을 예측하는데 이용하기 위해서는 변형속도, 온도 등의 성형변수에 따른 공정지도(processing map)가 요구되며, 본 연구에서는 고온압축시험결과에서 얻어진 유동응력곡선과 조직관찰결과를 토대로 공정지도를 작성하여 성형결함예측에 활용하였다.

3.2 연성파괴개념에 의한 파괴이론

고온에서 소성가공중에 소재의 파괴는 주로 기공(cavity)의 형성에 기인한 연성파괴에 의해 발생되며, 이러한 기공의 형성은 소재와 금형사이의 마찰, 열전달과 함께 소재와 다이의 형상에 의존한다. 이러한 연성파괴의 개념을 이용하여 Cockcroft와 Latham은 소성변형에너지 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 소성변형에너지 개념을 도입한 연성파괴조건을 제시하였고, Oh⁽⁶⁾ 등은 기공성장개념에 의하여 기공크기가 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 이론에 근거하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\bar{\sigma}}{\sigma^*} d\bar{\epsilon} = C_{crit} \quad (3)$$

여기서, σ^* 는 최대 주응력, $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 은 각각 유효응력과 변형률을 의미한다. 결국 소재의 연성파괴는 C_{crit} 값을 초과할 경우에 발생된다. 최근에 Venkatesh와 Fox⁽⁷⁾는 Ti-64 합금에 대하여 수정 Cockcroft-Latham기준을 이용하여 각 변형속도 및 온도별 임계손상지도(critical damage map)를 제시하였으며, 본 연구에서는 이러한 임계손상지도에서 본 후방압출 성형조건에 해당하는 임계손상값 0.754를 적용하여 상용 DEFORM 코드와 연계하였고, 후방압출된 Ti-64 튜브에 대한 손상해석에 활용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Ti-64 튜브의 조직관찰 및 FE해석

그림 2는 후방압출된 Ti-64 튜브의 마크로조직사진을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 튜브의 하부다

이와 접촉된 표면부에 표면균열이 발생되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 표면균열은 계면의 마찰과 열전달에 기인한 것으로 판단된다. 그림 3은 Ti-64 튜브의 내부에서 관찰되는 조직과 표면균열을 나타낸 표면부위의 미세조직이다. 내부의 미세조직은 후방압출된 970℃로 소재를 가열함에 따라 등축정 α 조직이 다소 작아졌으며, 변태된 β 상의 비율이 증가된 조직을 보이고 있다. 한편, 표면균열이 발생된 부위의 경우 균열주위에 기공(cavity)들이 형성되어 있음을 알 수 있으며, 이는 열간후방압출시 발생하는 표면균열이 연성파괴개념에 기인한 것임을 간접적으로 입증하는 증거이다.

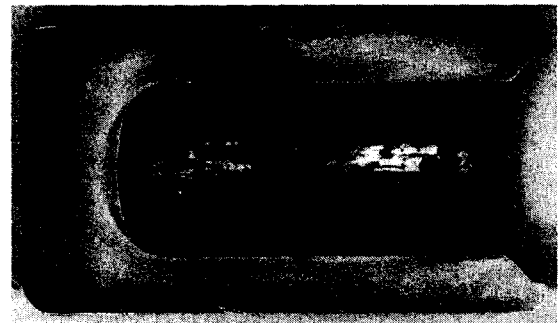


Fig. 2 Macrograph of backward extruded Ti-64

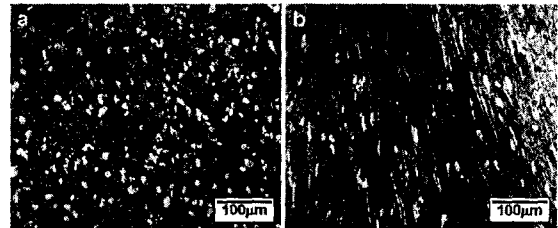


Fig. 3 Microstructures of backward extruded Ti-64 tube observed at (a) inside and (b) surface

후방압출에 대한 FE해석결과에서 튜브의 안쪽 부위가 변형률이 높음을 알 수 있었으며, 최대 유효변형량은 안쪽 punch와 인접한 모서리부위로 약 4.3정도로 나타났다. 또한 온도분포의 해석결과와 punch의 바둑부위와 하부다 이와 접촉되어 있는 표면부에서 최대 약 200℃정도의 온도하강이 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 성형결함예측 및 검증

본 연구에서 후방압출된 Ti-64 튜브의 성형결함을 예측하기 위해서 Ziegler의 소성 불안정인자와 수정 Cockcroft-Latham 연성파괴모델이 이용되었고, 실제 Ti-64 튜브에서 관찰된 표면균열의 도식적 그림과 함께

이들 모델의 해석결과를 그림 4에 나타내었다.

Ti-64 튜브의 결함은 주로 하부다리와 접촉된 표면에서의 균열이며, 그림 4(b)에 나타난 Ziegler의 소성 불안정인자에 의해서 음의 값을 가지는 소성 불안정구간의 해석결과는 이러한 실제 표면균열부위 뿐만 아니라 안쪽 부위 또한 소성불안정구간인 것으로 해석되었고, 성형결함을 과대평가하는 것으로 나타났다. 반면에 수정 Cockcroft-Latham 연성파괴모델을 이용하여 소성손상을 해석한 결과(그림 4(c))에서는 손상의 양은 최대 0.13정도로 임계 손상치를 초과하지 않았으나, 손상이 크게 나타난 부위가 대부분 실제 조직관찰에서 표면균열을 나타낸 부위인 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 연성파괴개념의 수정 Cockcroft-Latham 모델은 균열발생의 절대적인 값을 제공할 수는 없으나, 균열발생의 가능성이 높은 부위를 예측하는 데는 상당한 신뢰도가 있는 것으로 판단된다.

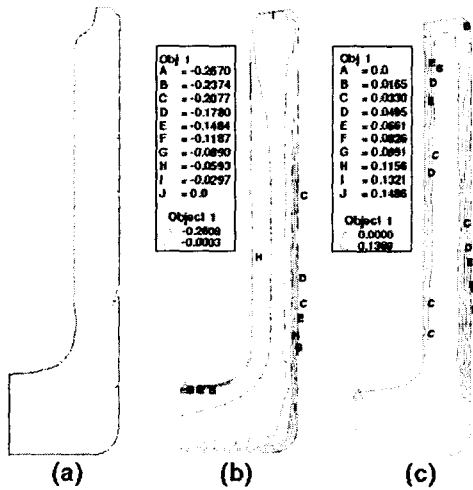


Fig. 4 The comparison of (a) experiment and predictions of the forming-defect for backward extruded Ti-64, (b) Ziegler's instability and (c) modified C-L model

5. 결론

본 연구에서는 Ti-64합금의 열간 후방압출시 발생하는 성형결함을 예측하기 위해서 Ziegler의 소성불안정인자와 수정 Cockcroft-Latham 연성파괴모델을 이용하였으며, 실제 후방압출된 Ti-64 튜브의 조직관찰결과와 비교·분석하였다. 실제 후방압출된 Ti-64 튜브의 경우 하부다리와 접촉되어 있는 표면부에 균열들이 발생되었으며, Ziegler의 소성불안정인자에 의한 해석은 이러한 성형결함을 과대평가하는 경향을 보였다. 반면, 수정 Cockcroft

-Latham 연성파괴모델의 해석결과는 최대 0.13정도의 다소 낮은 손상치를 나타냈으나, 실제 표면균열이 발생된 부위에 높은 손상분포를 나타내었으며, 결국 이러한 연성파괴모델은 향후 Ti-64의 열간성형시 발생될 수 있는 내부 및 표면균열을 예측하기 위한 유용한 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Semiatin S. L., Seetharaman V. Weiss I., 1998, "Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys, Mater. Sci. Eng. A243, p.1.
- (2) Udagawa T., Kropp E., and Altan T., 1992, "Investigation of metal flow and temperatures by FEM in the extrusion of Ti-64 tubes", J. Mater. Proc. Tech., Vol.33, p. 155.
- (3) Park N. K. Yeom J. T., Na Y. S., 2002, "Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-64 using processing maps", J. Mater. Proc. Tech., Vol.130-131, p. 540.
- (4) Prasad Y., Gegel H. L., 1984, "Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242, Metall. Trans., A15, p. 1883.
- (5) Ziegler, H., 1965, "Some extremum principles in irreversible thermodynamics with application to continuum mechanics", in Prog. Solid Mech., Sneddon, I. N., and Hill, R.(eds.), Vol. 4, Wiley, New York, p. 93.
- (6) Oh, S. I. Chen, C.C. and Kobayashi, S., 1979, "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing - Part I, II, J. Eng. for Industry, Vol. 101, p. 23.
- (7) Venkatesh, V. and Fox, S. P., 2001, "Development of damage maps for Ti-6Al-4V processing", in Microstructure modeling and prediction during thermomechanical processing, Srinivasan, R., Semiatin, S. L., Beaudoin, A., Fox, S., and Jin, Z., (eds.), TMS, p. 147.