

대형 Ti-6Al-4V 합금의 Ring-Rolling 공정설계

염종택^{1,2#}, 정은정¹, 김정한¹, 이동근¹, 박노광¹, 최승식³, 이종수²

Ring-Rolling Design of a Large-Scale Ti-6Al-4V alloy

J. T. Yeom, E. J. Jung, J. H. Kim, D. G. Lee, N. K. Park, S. S. Choi, C. S. Lee

Abstract

The ring rolling design for a large-scale Ti-6Al-4V alloy ring was performed with a calculation method and FEM simulation. The ring rolling design includes geometry design and optimization of process variables. The calculation method was to determine geometry design such as initial billet and blank size, and final rolled ring shape. A commercial FEM code, SHAPE was used to simulate the effect of process variables in ring rolling on the distribution of the internal state variables such as strain, strain rate and temperature. In order to predict the forming defects during ring rolling, the process-map approach based on Ziegler's instability criterion was used with FEM simulation. Finally, an optimum process design to obtain sound Ti-6Al-4V rings without forming defects was suggested through combined approach of Ziegler's instability map and FEM simulation results.

Key Words : Ring Rolling Process, Large-Scale Ti-6Al-4V Ring, FEM Simulation, Forming Defects

1. 서론

링압연공정(ring rolling)은 이음매 없는 링 모양의 제품을 연속적으로 가공하여 원하는 치수의 제품을 제조하는 공정으로, 발전설비, 화학플랜트, 가스터빈 및 제트엔진용 링부품 등 다양한 분야의 링부품 제조에 사용되고 있다. 이러한 링압연공정은 타 링부품제조공정인 링 단조(ring forging)공정에 비해 작업 속도가 빠르며, 온도유지가 가능하며, 수율향상 등을 꾀할 수 있고, 특히 grain flow line 이 원주방향으로 끊기지 않고 연속적으로 형성되기 때문에 우수한 특성을 발현할 수 있는 장점을 가진다. 과거 링압연공정은 최종 압연 링부품의 형상과 관련된 설계에 국한되었으나, FEM 시뮬레이션과 같은 컴퓨터 전산모사기술의 발달과 함께 공정중 fishtailing, folder 등의 성형결함의

생성과 미세조직의 변화를 고려함으로써 제품의 품질을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 항공기 엔진용 타이타늄합금의 링부품 제조의 경우 통상적으로 링압연공정을 활용하는 것으로 알려져 있다. [1] 그러나, 타이타늄합금의 ring rolling 공정시 최종제품 표면부의 불량률 초래하는 fishtailing, folder 등의 성형결함을 최소화하기 위한 노력이 요구된다. 지금까지 알려진 고온성형성을 평가하기 위한 접근방법들은 동적재료모델(Dynamic Materials Model)에 기초한 방법론들, 원자론적 모델, 연성파괴개념에 기초한 접근방법들, 유동불안정 및 인장 불안정(네킹) 인자를 기초로 한 방법 등 다양한 방법들이 연구되어 왔으며, Murty 와 공동연구자들 [2]은 여러 유동 안정 및 불안정성 인자들에 대한 고찰을 통해 Ziegler 에 의해 제안된 소성 불안정인자가 가장 신뢰할

1. 한국기계연구원, 재료기술연구소

2. 포항공과대학교, 신소재공학과

3. (주) 태웅

교신저자: 한국기계연구원, E-mail: yjt96@kmail.kimm.re.kr

수 있는 결과를 나타내었음을 증명하였다. 그러나, 이러한 소성 불안정 및 안정기준들을 실제 소성 가공공정에 적용하기 위해서는 다양한 공정조건에 대한 신뢰성 입증의 실행되어야 한다.

본 연구에서는 대형 Ti-6Al-4V 합금 링부품의 링 압연공정에 대하여 결함억제 및 여러 허용치 등을 고려한 preform, 블랭크(blank) 및 최종 링제품의 형상설계방법을 제시하였다. 또한 이러한 형상설계가 실제 링압연공정시 결함이나, 기타 조직적 문제의 발생 가능성여부 등을 알아보기 위해 3D FEM 해석을 수행하여 성형하중, 온도 및 변형률 분포 등을 조사하였고, 에너지분산효율 및 유동불안정성을 기초한 모델을 활용하여 제시된 변형공정지도상에서 결함발생여부를 예측 평가함으로써 최적의 성형조건에 대해 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V 합금 빌렛은 VAR/VAR double 용해된 잉고트로 부터 2 차 코킹 공정에 의해서 제조되었다. Fig. 1 은 Ti-6Al-4V 합금 빌렛의 미세조직을 나타낸 것으로, 등축정 α 상, 연신된 α 상과 변태 β 상으로 구성된 α - β 조직임을 관찰할 수 있다.

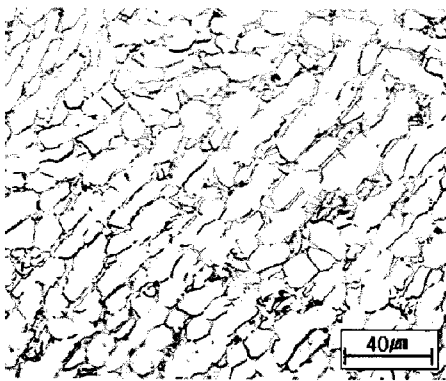


Fig. 1 Microstructure of Ti-6Al-4V alloy

Ti-6Al-4V 합금의 성형조건을 결정하기 위해서는 이 합금의 β 변태점을 얻어나는 것은 상당히 중요한 일이며, 본 연구에서는 900~ 1015°C 영역에서 1 시간동안 열처리한 후 급냉하는 방법으로 β 변태점을 측정하였다. 이러한 실험을 통해 약 990°C 가 이 합금의 β 변태점임을 알 수 있었다. FEM 해석을 통해 얻어진 최적화 공정조건을 검증하기 위한 링 압연공정은 최대직경 2,500mm, 높이

600mm 를 제조할 수 있는 100 톤 용량의 링압연기를 통하여 수행하였고, main roll 과 mandrel 등의 금형온도는 약 150°C, main roll 의 회전속도는 26rpm 에서 최적화된 공정조건에 따라 수행하였다.

3. 초기형상 및 블랭크 설계

본 연구에서 링압연품, 초기 빌렛, 블랭크(blank) 등의 형상은 Shivpuri [3]등에 의해서 제안된 계산방법을 기초로 수행되었다. 먼저, 링압연 성형품의 표면부의 허용치는 다음과 같은 세가지 인자를 기준으로 결정하게 된다.

$$TOL = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

여기서, F_1 은 피할수 없는 표면결함($\approx 2.54\text{mm}$), F_2 는 링직경의 팽창($\approx 0.1\text{mm}$), F_3 는 링 높이 또는 두께의 팽창율($\approx 0.254\text{mm}$) 등과 관련된 허용치를 의미한다. 결국, 링압연 성형품은 최종제품의 치수에 이러한 허용치를 고려하여 얻어질수 있으며, 921mm(OD) \times 815mm(ID) \times 115mm(H)의 최종 링압연품을 결정하였다. 링압연공정시 fishtailing, folder 등의 표면결함이 자주 발생되는데 이러한 결함을 최소화하기 위한 조건으로 링의 두께와 높이 사이의 관계를 정의하는 다음과 같은 관계식이 활용된다.

$$h_1^2 - b_1^2 = h_2^2 - b_2^2 \quad (2)$$

여기서, h 는 링의 높이, b 는 링의 두께이며, 아래첨자 1 과 2 는 각각 블랭크와 최종 링의 치수를 의미한다. 통상적으로, 링압연공정에서 피어싱(piercing)을 위한 펀치가 구비되어 있기 때문에 블랭크의 내경(d_{ii})은 결정된다. 따라서, 블랭크의 크기는 높이(h_2)와 외경(d_{1o})의 계산을 통하여 결정할 수 있으며, 식 (2)에 부피분율이 일정하다는 가정과 함께 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d_{2o} + d_{2i}}{2d_{2i} + b_1} = \frac{b_1}{b_2} \sqrt{1 - \left(\frac{b_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{b_1}{h_2}\right)^2} \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 o 와 i 는 각각 외경과 내경을 의미한다. 결국, 이러한 계산방법에 의해 초기 블랭크 크기가 440mm(OD) \times 220mm(ID) \times 130mm(H)로 결정되었다.

4. 구성방정식 및 성형결함에측 모델링

열간성형시 변형열은 유동응력의 연화(flow softening)에 직접적으로 영향을 미치게 되며, FEM 해석에 고온 압축시험에 의해서 얻어진 유동응력 데이터를 적용하기 위해서는 반드시 변형열을 보정하여야 한다. 온도 증분의 계산은 식(4)에 표현된 관계식을 이용할 수 있고, 유동응력의 보정은 선형보간법을 활용한 식(5)에 표현된 수식에 따라 얻어질 수 있다.

$$\Delta T = \frac{0.9 \int \rho \sigma d\varepsilon}{\rho C} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_1 + [T_1 - (T_1 + \Delta T_1)] \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{T_1 + \Delta T_1 - (T_2 + \Delta T_2)} \right\} \quad (5)$$

여기서, ε_p 는 소성변형량, ρ 는 밀도, C 는 비열이며, ΔT 는 온도증분을 의미한다. 유동응력은 변형량, 변형속도, 온도 등의 내부상태변수에 의존하며, 이러한 유동응력을 표현하기 위해서 다음과 같은 구성방정식을 활용하였다.

$$\sigma = K_0 (a_0 + a_1 \varepsilon)^n (b_0 + b_1 \dot{\varepsilon})^m \quad (6)$$

여기서, K_0 는 강도계수, n 은 가공경화지수, m 은 변형속도 민감도계수, a_0, a_1, b_0, b_1 등은 재료상수이다.

한편, fishtailing 과 같은 표면결함 이외에 Ti-6Al-4V 합금의 열간성형공정에서 자주 발생하는 전단밴드, 내·외부 균열에 대한 예측을 위해서, 여러 소성안정 및 불안정기준 중 내열소재에 대하여 신뢰성이 입증된 Ziegler [4]의 소성불안정기준을 적용하고자 하였다.

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (7)$$

여기서 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 이 음의 값을 나타내는 경우 유동 불안정 구간으로 정의된다. 결국, 이러한 소성불안정 인자와 FEM 해석을 통해 링압연공정의 최적 공정변수가 최종적으로 결정되었다.

5. FEM 해석 및 공정최적화 설계

5.1 링압연공정의 FEM 해석

본 연구에서 링압연공정의 FEM 해석은 상용코드인 SHAPE-RR 에 의해 수행되었다. 이때 마찰계수와 계면열전달계수는 각각 0.5 와 $20 \text{ kW/}^\circ\text{K m}^2$ 을 이용하였고, 금형온도는 150°C , main roll 의 회전속도는 26rpm 으로 가정하였다. 공정설계 조건으로는 소재의 온도, mandrel 의 압축속도 등을 들 수 있으며, 링압연공정 설비의 성능을 감안하여 소재 온도구간은 $900 \sim 970^\circ\text{C}$, mandrel 의 압축속도는 0.5, 1mm/s 로 변화시켜 FEM 해석이 수행되었고, 형상 측면에서의 균일성 여부를 조사함으로써 일차적인 공정조건을 도출하였다.

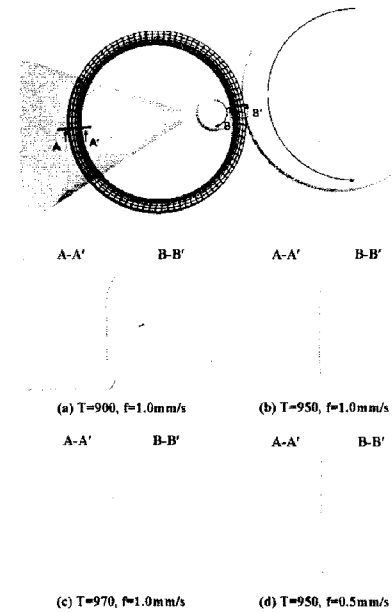


Fig. 2 Ring deformation under simulation conditions for ring rolling; T= temperature, f= feed rate of the mandrel.

Fig. 2 는 링압연공정의 여러 공정조건에 따라 FEM 해석한 링의 형상변화를 나타낸 것이다. 온도가 900°C 에서 970°C 로 상승함에 따라 링의 형상이 균일하게 됨을 알 수 있으며, 같은 소재가 열온도 950°C 에서 mandrel 의 압축속도가 느린 0.5mm/s 조건에서 보다 균일한 형상을 나타냄을 알 수 있다. 한편, FEM 해석을 통해 얻어진 부위별 온도와 변형량분포에서 온도는 중심부가 표면부에 비해 온도가 높게 나타났으며, 변형량은 반대로 표면이 더 높은 분포를 나타내었다. 링압연 공정별 온도분포에서 소재가열온도가 970°C 이고,

mandrel 의 압축속도가 1mm/s 인 경우 변형열로 인해 국부적으로 중심부 온도가 β 변태온도 이상으로 상승한 것으로 해석되었고, 이것은 이러한 조건으로 링압연을 수행하는 경우 조직적인 불균일을 나타낼 수 있음을 의미한다.

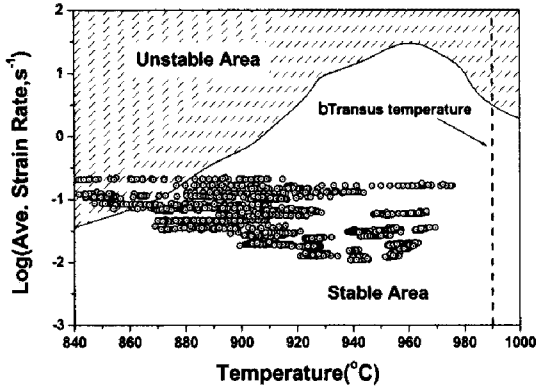


Fig. 3 Flow instability map at a true strain =1.0 to determine the deformation stability of all note points of the ring simulated at T=950°C and f=1.0mm/s

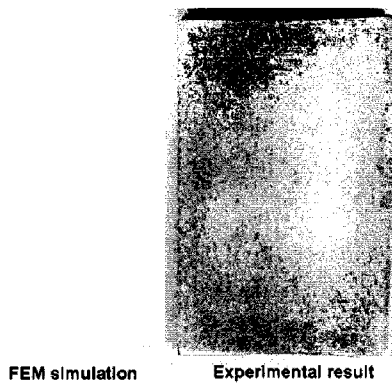


Fig. 4 The comparison of simulated and actual ring rolled shapes at T=950°C and f=0.5mm/s

Fig. 3 은 Ti-6Al-4V 합금의 소성불안정 공정지도와 함께 형상 측면에서 가장 균일한 조건인 소재가열온도 950°C 와 mandrel 의 압축속도가 0.5mm/s 조건에서 FEM 해석된 링압연품의 모든 노트점에서 얻어진 온도와 평균변형속도결과를 mapping 한 결과이다. 대부분이 안정조건에 위치하고 있으나, 일부 낮은 온도영역이 소성 불안정영역에 포함되어 있음을 관찰 할 수 있다. 이러한 불안정영역을 확인한 결과 모두 mandrel 또는 main roll 과 바로 접촉되어 있는 부분으로 확인되었으나, 이러한 부위는 앞서 언급된 피할수 없는 표면결함 허용치

(F₁)에 포함되는 영역으로 실제 공정에서 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. Fig. 4 는 최적 조건으로 선정된 950°C 와 mandrel 의 압축속도가 0.5mm/s 조건에서 링압연공정을 수행한 실제 링제품의 절단면과 FEM 해석결과를 비교한 것이다.

최적조건에서 성형된 링압연품의 경우 성형결합이 없는 건전한 제품임을 관찰할 수 있으며, FEM 해석결과는 실제 링압연품의 형상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 계산방법과 FEM 해석을 통해 외경 900mm 급 Ti-6Al-4V 합금 링의 공정설계를 수행하였다. 설계의 착안점으로 균일한 형상, 국부적 β 변태온도이상으로의 온도상승으로 인한 불균일 조직분포 억제, 전단밴드, 내외부 균열 등의 성형결합 억제 측면에 초점을 맞추어 공정설계가 이루어진 결과 소재가열온도 950°C 와 mandrel 의 압축속도 0.5mm/s 를 주어진 공정설계를 통한 최적 공정조건으로 제시하였다. 또한, 이러한 최적 조건에서 실제 링압연을 수행한 결과 성형결합이 없는 건전한 Ti-6Al-4V 합금 링제품이 얻어졌음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 부품소재기술개발 사업과 2003 년 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 대한 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Kluge, Y. H. Lee, H. Wiegels, R. Kopp, 1994, Control of strain and temperature distribution in the ring rolling process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp 137~141.
- [2] S. V. S. N. Murty, B. N. Rao, and B. P. Kashyap, 2000, Instability criteria for hot deformation of materials, Int. Mater. Rev., Vol. 45, pp. 15~26.
- [3] R. Shivpuri, E. Eruc, 1993, Planning and simulation of the ring rolling process for improved productivity, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, pp. 153~173.
- [4] 염종택, 김두현, 나영상, 박노광, 2001, Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명, 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 4 호, pp. 347~354