

타이타늄합금 형상 링 압연공정 연구

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

A Study on Profile Ring Rolling Process of Titanium Alloy

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

(Received May 10, 2007)

Abstract

The profile ring rolling process of Ti-6Al-4V alloy was investigated by finite element(FE) simulation and experimental analysis. The process design of the profile ring rolling includes geometry design and optimization of process variables. The geometry design such as initial billet and blank sizes, and final rolled ring shape was carried out with the calculation method based on the uniform deformation concept between the wall thickness and ring height. FEM simulation was used to calculate the state variables such as strain, strain rate and temperature and to predict the formation of forming defects during ring rolling process. Finally, the mechanical properties of profiled Ti-6Al-4V alloy ring product were analyzed with the evolution of microstructures during the ring rolling process.

Key Words : Profile Ring Rolling, Ti-6Al-4V Alloy, Finite Element Analysis, Process Design, Forming Defects

1. 서론

링압연공정(Ring Rolling)은 블랭크(Blank)라고 불리는 두꺼운 링의 직경을 늘리면서 단면적을 감소시키는 공정으로 균질한 원주방향의 입자유동을 갖는 이음매 없는 링 형상 구조의 점진적 특수 성형법이다[1]. 이러한 공정의 활용은 발전설비, 화학 플랜트, 가스터빈 및 제트엔진용 링부품 등 다양한 분야의 링부품 제조에 사용되고 있다[2].

과거 항공기용 팬케이스, 압축기 케이스 등의 복잡한 형상을 가지는 링 부품들은 선형 링의 형태로 링압연공정으로 제조한 후 기계가공에 의해 원하는 형상으로 가공하는 공정에 따라 제조하였으나, 원소재 투입중량 증가, 가공시간 및 공구소모량 상승 등의 문제를 초래하고 있으며, 특히 타이타늄합금[3]의 경우 원소재 단가가 철계 합금에 비해 상당히 높고 난삭재로 분류되어 있어, 정형

(Near-Net Shaping) 성형기술인 형상 링 압연공정기술(Profile Ring Rolling)의 개발이 절실히 요구되고 있다[4].

링 압연기술 선진국 및 외국업체들은 대부분 CAD/CAM기술 및 유한요소해석(FEM)기술을 금형 및 공정설계에 직접적으로 활용하고 있으며, 공정 제어 및 최종제품의 조직과 특성을 예측하는데 까지 확대 적용하고 있다. 그러나, 선진업체에서도 형상 링 압연공정의 경우 블랭크 및 최종 공정설계에서 FEM해석기술을 일부 활용하여 제한된 부품에 적용하고 있는 것으로 판단되며, 삼차원 FEM해석의 신뢰성을 향상시키기 위한 노력이 꾸준히 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 타이타늄합금 형상 링부품에 대하여 결합억제 및 여러 허용치 등을 고려한 계산방법에 의해 초기 빌렛크기, 블랭크 설계 등이 수행되었고, 결정된 형상 설계결과를 바탕으로 FEM해석을 수행하여

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 포항공과대학교 신소재공학과

3. ㈜ 태웅

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

형상 링 압연공정시 급형으로의 미충진 문제, 링 밀(Ring Mill)설비 용량 초과여부 및 하중변화 분석, 부위별 변형량 및 온도분포 등이 예측되었다. 또한, 이러한 예측결과를 바탕으로 최적 형상 링 압연공정 방안을 도출하였다. 최종적으로, 설계된 공정조건에 따라 제조된 타이타늄 형상 링압연품에 대한 기계적 특성 및 미세조직 분석 등을 통해 성형품의 건전성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 원소재 및 β 변태점 분석

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V합금 빌렛의 화학 성분은 Table 1에 나타내었고, 부위별 미세조직은 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy used in this work (wt. %)

C	Fe	Al	V	N
0.023	0.2	6.03	4.07	0.005
O	H	Ti		
0.22	0.001	Bal.		

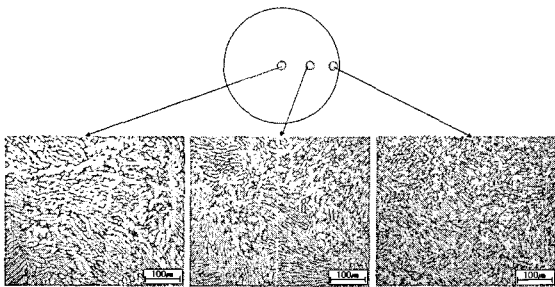


Fig. 1 Microstructures of Ti-6Al-4V alloy

부위별 빌렛의 조직사진에서 알 수 있는 바 같이, 정 중앙부에 일부 α상이 구상화되지 않은 부위가 관찰되고는 있으나, 전체적으로 등축정 또는 연신된 α상과 변태 β상으로 구성된 전형적인 α-β 조직을 구성하고 있음을 관찰 할 수 있다.

한편, 본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V합금의 β 변태점을 측정하기 위하여 900~1015°C 영역에서 1 시간 동안 등온 유지한 후 급냉하고, 조직을 관찰하는 방법의 열처리 시험을 수행하였다. 그 결과, 본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V합금의 β 변태온도는 약 990°C임을 알 수 있었다.

2.2 형상 링압연공정

Fig. 2는 실제 링제품을 기초로 여러 허용치 및 설계변수를 적용하여 얻어진 성형 형상을 나타낸 것으로, 외경은 약 1,300mm 정도이다.

Ti-6Al-4V합금의 형상 링압연공정은 Fig. 3에 나타낸 절차에 따라 수행되었다. 본 연구에서는 형상 링압연품을 제조하기 위한 방법으로, 블랭크 제작공정을 거친 후 링압연공정 또는 링단조공정을 통해 적정 크기의 선형 링을 제조하고, 이러한 선형 링으로부터 최종단계에서 형상을 가지는 급형 (Mandrel, Main Roll 등)을 활용하여 형상을 구현하는 방법을 이용하고자 하였다.

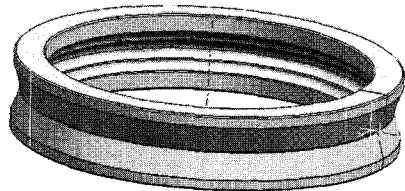


Fig. 2 Schematic drawing of profiled Ti-6Al-4V ring

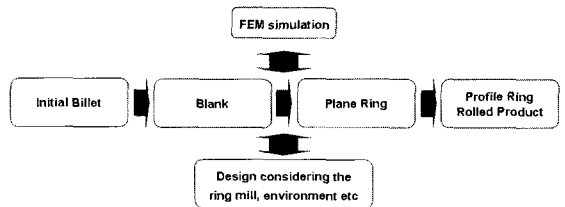


Fig. 3 Strategy of profile ring rolling process

형상 링압연 공정시 회전롤(Main Roll), 맨드릴 (Mandrel), 축롤(Axial Roll) (이들을 총칭하여 급형으로 명명함.) 등의 가열온도는 약 150°C로 측정되었으며, 회전롤(Main Roll)의 회전속도는 26rpm로 수행하였다.

2.3 FEM해석 및 특성평가

형상 링압연공정에 따른 부위별 변형량, 변형 속도, 온도 등의 변화를 알아보기 위하여 유한요소해석(FEM)이 수행되었다. 형상 링압연공정의 FEM해석은 상용코드인 SHAPE-RR 프로그램을 사용하였으며, 마찰계수와 계면 열전달계수는 각각

0.5와 20kW/m²°C를 적용하였다[5]. 또한 FEM해석에 사용된 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma = K_0(a_0 + a_1\varepsilon)^n(b_0 + b_1\dot{\varepsilon})^m \quad (1)$$

여기서, K₀는 강도계수, n은 가공경화지수, m은 변형속도 민감도계수, a₀, a₁, b₀, b₁ 등은 재료상수이다. 이러한 재료상수들은 온도에 의존하며, 고온 압축시험결과에서 얻어진 유동응력을 토대로 도출된 온도에 따른 재료상수들은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material Constants of the constitutive equation

Temp. (°C)	K ₀	a ₀	a ₁	n	b ₀	b ₁	m
850	179	0.044	1	0	0	1	0.18
900	122	0.048	1	0	0	1	0.21
950	73	0	1	0	0	1	0.235
1000	51	0	1	0	0	1	0.213

한편, 공정 설계 방안에 따라 Ti-6Al-4V합금 형상 링 시제품이 제작되었고, Ti-6Al-4V합금 링제품의 부위별 미세조직 관찰과 함께 인장 및 충격특성 등을 수행하여 본 제품의 건전성을 조사하였다. 또한, 미세조직의 변화와 특성간의 관계를 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 형상 설계

본 연구에서 목표로 하는 대상제품은 항공기엔진용 형상 링부품으로 제품은 개략적으로 1,340mm OD×1,127mm ID×264mm H의 치수를 가진다. 이러한 형상 링 압연품을 제작하기 위해서 Fishtail, fold 등의 성형결함을 최소화하기 위한 조건으로 링의 두께와 높이 사이의 관계를 정의하는 다음과 같은 관계식이 활용되었다[6].

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

여기서, h는 링의 높이, b는 링의 두께이며, 아래첨자 1과 2는 각각 블랭크와 최종 링의 치수를 의미한다. 한편, 식 (2)는 블랭크와 최종 링제품간

의 부피가 같다는 가정과 함께 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

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

여기서, 아래첨자 o와 i는 각각 외경과 내경을 의미한다. 결국, 이러한 계산방법과 현장조건 등을 고려하여 형상 링압연공정에 활용될 블랭크 및 선형 링압연품의 크기를 결정하였다. 즉, 블랭크의 치수는 670mm OD×185mm ID×300mm H이며, 선형 링압연품의 크기는 970mm OD×700mm ID×270mm H로 결정되었다.

3.2 FEM해석 및 공정최적화 설계

기존의 연구[7]에서 Ti-6Al-4V합금의 선형 링압연공정시 최적 성형조건에 도출이 수행된 바 있으며, 본 연구에서는 이와 동일한 성형조건에서 우선적으로 형상 링 압연공정에 대해 FEM해석을 수행하였다. 즉, 성형온도는 950°C, 주 구동롤(Main Roll)의 회전속도는 평균 26rpm, 압축롤(Mandrel)의 평균 압축속도는 0.5mm/s로 형상 링압연공정을 수행하였다.

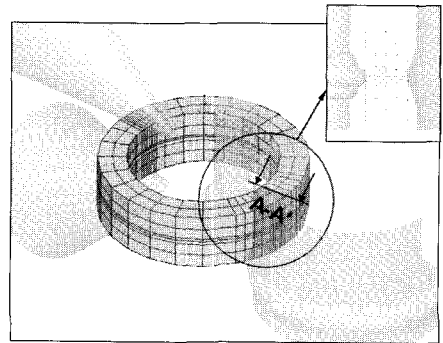


Fig. 4 Initial FEM mesh for profile ring rolling simulation of Ti-6Al-4V alloy

한편, FEM해석에 사용된 블랭크, 선형 링 등은 앞서 언급된 계산방법과 현장조건 등을 감안하여 설계된 형상에 따라 모델링되었고, Fig. 4에 형상 링압연공정에 대한 FEM해석 모델링을 나타내었다. FEM해석에 사용된 mesh는 Brick형태가 적용되었고, 금형과 소재가 접촉되는 부위에 대하여 fine mesh가 적용되었다.

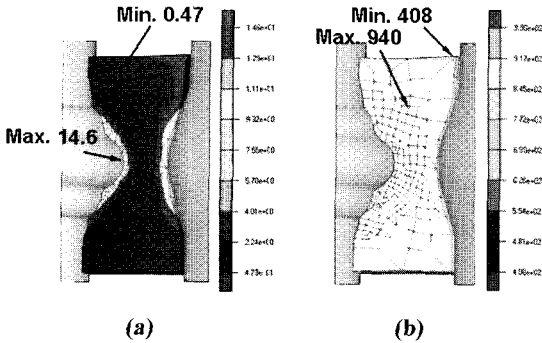


Fig. 5 Strain(a) and temperature(b) contours at A-A' cross-section for profile ring rolling simulation

Fig. 5는 형상 링압연공정의 FEM해석결과로서, Fig. 4에서 나타낸 A-A' cross-section에서의 변형량과 온도분포를 나타낸 것이다. 유효 변형량 분포의 경우 형상이 주어지는 부분에 변형이 집중되었고, 특히 압축롤(Mandrel) 형상 쪽에서 14.6의 최대변형량이 나타남을 알 수 있다. 한편, 온도 분포의 경우 표면부에 비해 중심부의 온도가 높음을 관찰할 수 있으며, 변형열에 의한 온도상승보다는 표면으로의 열손실이 훨씬 커서 중심부에서 약 -10°C 로 온도하강이 일어났다. 또한 표면부에서 가장 온도가 많이 하강된 부위는 위쪽 모서리 부위로 약 408°C 로 해석되었음을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 형상 링 압연공정이 진행됨에 따른 하중 및 형상의 변화를 나타내는 FEM해석 결과이다. 형상 링압연공정이 진행됨에 따라 압축롤(Mandrel)의 형상으로 충진되고 있음을 알 수 있으며, 최종단계에서 약간 미충진 부위가 발생됨을 알 수 있다. 이것은 Stroke가 충분하지 않음을 의미하는 것으로 fishtail, fold 등의 성형결함이 발생하지 않는 범위에서 더 충분한 stroke를 가하여 주는 것이 요구된다. 한편, 성형시간에 따른 하중변화에서, 압축 롤(Mandrel)의 최대하중은 약 40초 부근에서 80톤 정도로 나타났으며, 축롤(Axial Roll)에서도 같은 경향을 보이며, 최대하중은 약 40톤 정도로 나타났다. 이러한 해석결과는 링 압연에 적용하고자 하는 Ring Mill장비의 최대하중이 100톤임을 감안하면 다소 성형하기 어려운 하중이 압축 롤(Mandrel)에 적용되는 것을 의미한다. 또한 시간에 따른 하중의 변화를 살펴보면 초기 형상을 구현하는 시점에서 최대하중을 보이고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 약간의 초기

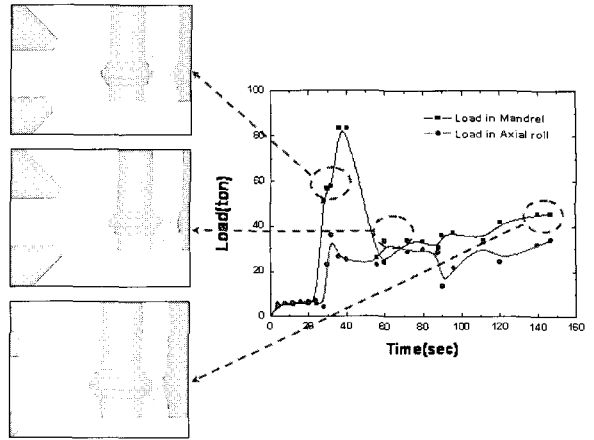


Fig. 6 Load-time curve and deformation results for profile ring rolling simulation

안내힘이 형성되도록 약 30초부근까지 성형을 시도한 후 1차 재가열을 통해 형상 링압연공정을 마무리하는 것이 추천되는 바이다.

3.3 형상 링압연공정 및 특성평가

실제 형상 링압연공정은 앞서 제시된 성형온도, 평균 압축속도에 따라 수행하였으며, 설계된 선형링 형상으로부터 한번의 공정으로 형상 링압연을 수행하는 것으로 계획되었다. 그러나, 한번의 공정으로 형상 링압연을 수행하는 도중 하중이 거의 최대에 도달하였고, 최종단계에서 미충진 부분이 발생하여 재가열후 최종 링압연이 수행되었다. 이러한 결과는 해석결과와 잘 일치하는 결과이다.

Fig. 7은 형상 링압연된 Ti-6Al-4V합금 링성형품을 나타낸 것으로, 표면부에 미세 균열이 일부 관찰되기는 하나, 전체적으로 건전한 링 성형품임을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 형상 링압연된 Ti-6Al-4V 링제품의 주요부위에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 미세조

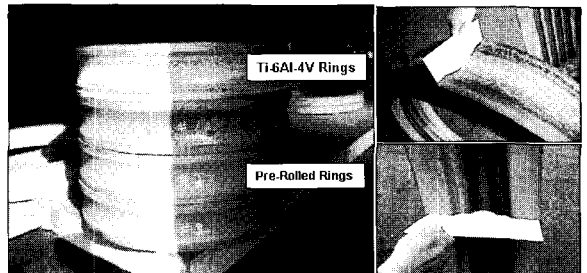


Fig. 7 Profile ring rolled Ti-6Al-4V alloy rings

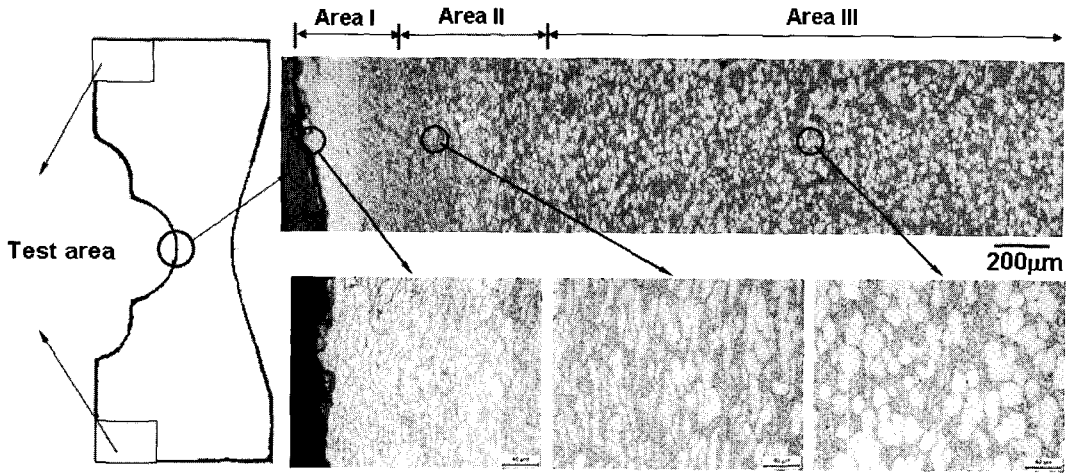


Fig. 8 Microstructures of profiled Ti-6Al-4V ring at deformed areas

직은 크게 3가지 부분으로 나누어짐을 알 수 있다. 즉, 최외각 표면부(Area I)는 소재의 가열시 및 링압연공정시 α 안정화 원소인 산소의 표면부 침투로 인해 α 상 층이 두껍게 형성된 α -case 층(약 350 μ m)을 나타내고 있으며, 표면부와 중심부 사이의 영역(Area II)은 α 상이 연신된 형태를 보이고 있으며(약 500 μ m), 중심부(Area III)는 대부분 등축정 α 상과 변태된 β 상으로 구성된 혼합조직이 형성되어 있음을 알 수 있다. 결국, 링 제품의 경우 표면부와 중심부 사이의 연신된 α 상을 구성하고 있는 영역으로 인해 내·외압에 대한 저항성이 높은 특성을 보일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 성형결함을 최소화하기 위한 계산방법을 활용한 형상설계와 FEM해석을 통한 Ti-6Al-4V합금 형상 링압연 공정설계를 수행하였고, 이러한 형상 및 공정설계를 기초로 실제 형상 링 압연공정을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계산방법의 활용과 현장조건을 감안한 블랭크 및 선형 링 형상설계에서 블랭크의 치수는 670mm OD×185mm ID×300mm H 이며, 선형 링압연품의 크기는 970mm OD×700mm ID×270mm H로 결정되었다.

(2) 형상 링압연공정에 대한 FEM해석결과, 변형량 분포는 형상이 주어지는 부위에 일부 집중되었고, 온도분포는 변형열에 의한 온도상승보다는 급형과의 접촉으로 인한 온도손실 효과가 더욱 크게 나타나, 중심부의 온도가 초기 가열온도 950°C에 비해 10°C 정도 하강하는 것으로 예측되었다.

(3) 형상 링압연공정에서 얻어진 링제품의 미세조직관찰 결과, 변형되지 않은 영역(dead metal zone)이 거의 생성되지 않았으며, 표면부 α -case 형성층과 중심부의 등축정 α 상과 변태된 β 상으로 구성된 혼합조직 사이에 약 500 μ m정도의 연신된 α 상이 존재하는 층이 형성되었다.

(4) 설계된 형상 링압연공정조건에 따라 제조된 형상 링의 특성 평가결과, 모두 요구규격을 만족하는 건전한 링부품임을 확인하였다.

Table 3 Tensile and impact properties of profile ring rolled Ti-6Al-4V alloy

	YS(MPa)	UTS(MPa)	EL(%)	RA(%)	Impact Energy(J)
Spec.	793	862	8	16	20
Test(Ave.)	908	965	19	43	34

한편, 형상 Ti-6Al-4V 링 성형품에 대한 인장 및 충격시험결과는 AMS-T-81915 요구규격과 함께 Table 3에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 상온인장 및 충격치 모두 규격을 만족하고 있음을 알 수 있으며, 결국, 본 연구에서 개발된 형상 링압연품의 경우 치수 정밀도 측면에서 일부 개선할 점은 있으나, 조직 및 특성 측면에서 건전한 형상 링 Ti-6Al-4V합금 압연품인 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 부품소재기술개발 사업과 2003년 국가 지정연구실사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 대한 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Bolin, 2005, Ring Rolling, ASM Handbook, Vol. 14A Metalworking: Bulk Forming, ASM Int., Materials Park, OH 44073-0002, pp. 136~155.
- [2] E. Eruc, R. Shivpuri, 1992, A summary of ring rolling technology- I. Recent trends in machines, processes and production lines, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 32, No. 3, pp. 379~398.
- [3] J. S. Kim, Y. W. Chang, C. S. Lee, 1998, Mechanical and Microstructural Analysis on the Superplastic Deformation Behavior of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy, Metals and Materials, Vol. 4, No. 4, pp. 771~ 777.
- [4] E. Eruc, R. Shivpuri, 1992, A summary of ring rolling technology-II. Recent trends in process modeling, simulation, planning and control, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 32, No. 3, pp. 399~413.
- [5] 염종택, 정은정, 김정환, 이동근, 박노광, 최승식, 이종수, 2006, 대형 Ti-6Al-4V합금의 Ring-Rolling 공정설계, 한국소성가공학회 2006년도 춘계학술대회 논문집, pp. 373~376.
- [6] R. Shivpuri, E. Eruc, 1993, Planning and simulation of the ring rolling process for improved productivity, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No. 2, pp. 153~173.
- [7] J. T. Yeom, J. H. Kim, N. K. Park, S. S. Choi, C. S. Lee, 2007, Ring-rolling design for a large scale ring product of Ti-6Al-4V alloy, J. Mater. Process Technol., Vol. 187-188, pp. 747~751.