

Ti-6Al-4V 고강도 볼트의 성형성에 미치는 표면산화효과

김정한[#] · 이채훈¹ · 홍재근¹ · 김재호² · 염종택¹

Effect of Thermal Oxidation Coating on the Hot Forging Process of High Strength Ti-6Al-4V Bolt

Jeoung Han Kim, Chae Hoon Lee, Jae Keun Hong, Jae Ho Kim, Jong Taek Yeom

(Received January 9, 2009)

Abstract

Since fastener bolt for airplane require high specific strength and corrosion resistance, Ti-6Al-4V alloy is widely used. However, the Ti-6Al-4V bolt is generally manufactured by cutting and rolling because of their poor workability. The aim of present work is to develop hot forming technology for high strength Ti-6Al-4V. Various heat-treatments were applied to specimen in order to increase hot-workability and prevent galling with die. Multiple forging were simulated with FE code to determine optimum process parameters including specimen temperature, strain rate, local strain, and thermal shrinkage. Forged samples were heat-treated again to increase their mechanical properties.

Key Words : Ti-6Al-4V, Fastener, Bolt, Hot Forging, Oxidation

1. 서 론

항공기용 볼트 부품은 제품의 특성향상과 안정성 확보를 위해 주의 깊고 정밀한 제조 공정이 요구된다[1]. 타이타늄합금 소재 볼트는 최근의 고유가 시대와 맞물려 특유의 비강도성과 내식성으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 현재까지의 대부분의 타이타늄 볼트는 성형성이 우수한 순 타이타늄이나, 베타계 합금으로 주로 냉간에서 성형이 이루어지고 있다. 반면, 용체화 및 시효처리로 1100MPa 수준의 인장강도가 얻어지는 Ti-6Al-4V 합금의 경우는 열악한 성형성으로 인해 대량생산이 이루어지지 못하고 있다[2]. 일반적으로 Ti-6Al-4V 합금 볼트는 열간단조, 나사가공, 절삭가공 등의 공정을 따라 제조된다. 여기서, 열간가공 부분은 가장 어려운 공정으로서 정밀한 형상제어, 균일한 조직, 건전한 표면상태 등이 이루어져야 한다. 건전한 성형성을 확보하기 위

해서는 소재의 온도, 변형량, 소요시간 등이 최종형상 및 미세조직에 미치는 영향이 고려되어야 한다. 한편, 타이타늄 합금은 특유의 고반응성으로 인하여 금형소재들과의 소착(Galling)이 잘 발생한다는 문제점이 보고되고 있다[3]. 소착현상이 발생할 경우 공구와 소재와의 높은 마찰로 인해 표면결함이 발생하기 쉽고 원하는 형상으로의 성형이 어렵게 된다. 따라서, 수천 회 이상의 연속적인 볼트 생산을 보장하기 위해서는 소착성 해소를 위한 표면처리 연구가 반드시 수행되어야 한다. 본 연구는 상기한 타이타늄 합금 열간단조 기술 확립 및 표면결함 문제를 해결하기 위해 수행되었고 이를 위해 여러 표면처리의 영향을 분석해 보았다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 열간 압연

1. 한국기계연구원, 재료기술연구소/ 특수합금연구그룹
2. 신진블랙, 냉간사업부
교신저자: 재료기술연구소, E-mail: kjh1754@kims.re.kr

Table 1 Chemical composition of as-received material (in wt. %)

Al	V	Fe	N	O	Ti
5.8	4.18	0.05	0.02	0.10	Bal.



Fig. 1 Microstructure of Ti-6Al-4V alloy solution heat treated and quenched

된 봉상의 형태의 소재로서 8 μm 수준의 α 상 결정립도를 가지고 있었다(Fig. 1). 초기소재의 인장강도와 연신율은 각각 963MPa 와 22% 수준이었다. 화학적 조성은 다음 Table 1 과 같다.

실험에 사용된 소재의 고온성형성을 평가하기 위해 고온압축시험을 수행하였으며, 고온성형 조건(시험온도, 변형속도, 변형후 고온유지시간 등)에 따른 표면상태의 변화를 관찰하였다. 고온압축시험을 통해 얻어진 압축유동곡선 결과를 바탕으로 유한요소해석을 수행하였으며 (DEFORM-2D) 이를 통해 성형조건 확립 및 금형 설계를 수행하였다.

타이타늄합금과 금형 소재와의 소착을 막기 위해 표면산화처리를 수행하였다. 최적의 산화막 형성조건 도출을 위해 927°C~750°C 에서 열간도출을 수행하였다. 열처리 전 소재는 아세톤과 에탄올을 이용하여 초음파세척을 수행하였다. 표면산화처리 후 소재는 600°C 로 가열 후 볼트 성형 단조기로 이송되었다. 볼트성형은 열손실을 최대한 줄이기 위해 총 4 단으로 수행되었으며 초당 200mm/sec 의 펀치속도로 성형하였다. 표면 산화층의 생성속도를 알아보기 위해 SEATRAM 장비를 활용해 산화시험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온성형성 평가 및 유한요소해석

Ti-6Al-4V 의 고온압축시험을 수행하였으며, 고온성형 조건(시험온도, 변형속도, 변형후 고온유지시간 등)에 따른 표면균열 생성여부를 관찰하였다. Fig. 2 는 성형온도와 변형속도가 압축 후 시편의 형상에 미치는 영향을 보여주고 있다. 낮은 온도와 빠른 변형속도로 변형이 이루어질수록 취성과파괴 또는 표면균열생성 경향이 높았다. 600°C, 1/sec 의 성형조건이 온도와 속도 효율성 측면에서 가장 적합한 것으로 선정되었다.

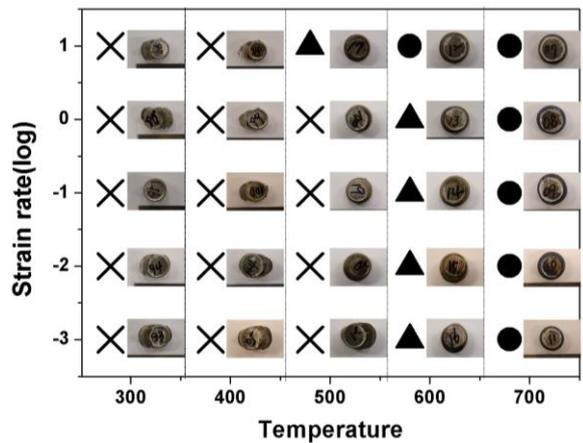
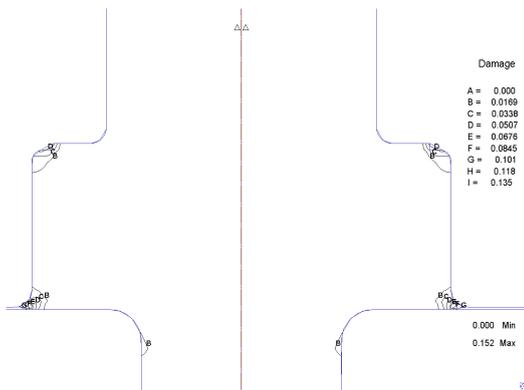


Fig. 2 Processing map constructed on the basis of the shape of compressed specimen. Symbol ‘X’ denotes surface cracking, ‘▲’ unstable deformation, and ‘●’ sound deformation, respectively

선정된 성형조건을 이용해 유한요소해석을 수행하였다. 이 때 적용된 재료물성치와 성형조건은 다음 Table 2 와 같다. 성형은 1 단에서 투입된 소재의 초기형상을 잡아주고 2 단에서 나사부를 성형하며 3, 4 단에서는 헤드부 업셋을 수행하는 방식으로 이루어졌다. Fig. 3 은 헤드부 성형 중 위치별 Cockcroft-Latham 연성파괴지수를 계산한 결과이며 최고 0.152 의 값이 볼트 헤드부의 최외각부에서 얻어졌다. 이 값은 Semiatin 등[4]에 의해 계산된 결과와 비교하면 비교적 낮은 수치로서 성형중 균열발생이 일어 나지 않는 것으로 판단되었다.

Table 2 Process condition and physical properties of the Ti-6Al-4V bolt forging process

Physical properties of materials		
	Ti-6Al-4V (Workpiece)	H-13 (Die material)
Density (kg/m ³)	4300	7760
Coefficient of thermal expansion (°C ⁻¹)	8.8×10 ⁻⁶	11.5×10 ⁻⁶
Heat capacity (N/mm ² °C)	18.0	28.6
Heat transfer coefficient between workpiece and die/punch (N/°C s mm)	11	11
Emissivity	0.1	0.1
Process condition		
Punch speed	200mm/sec	
Workpiece temperature (°C)	600	
Die/Punch temperature (°C)	200	
Lubricant	Oil base graphite	

**Fig. 3 Forged shape and distribution of Cockcroft-Latham damage value after 4th forging**

3.2. 볼트성형성에 미치는 표면산화막 영향
소재와 금형사이의 소착을 방지하기 위해 윤활 및 표면처리 효과를 조사해보았다. 3 가지 윤활제 (OilDag, MoO₂, Boron-Nitride)등이 시도되었고 OilDag

이 가장 뛰어난 특성을 보여주었다. 윤활제는 표면특성을 향상시키고 소착성을 감소시키는 효과가 있었으나 단독적인 사용으로는 충분한 효과를 보이지 못했다. 이를 해결하기 위해서 추가적인 표면코팅방안이 고려되었다. Hutchings 등[5]은 CVD, PVD, Diamond-like carbon coating, 이온스퍼터링, 산화막처리 등이 소착성에 미치는 영향을 분석하였으며 그 중 Diamond-like carbon coating 과 산화막처리가 가장 효과가 좋은 것으로 보고하였다. 그 중 가장 용이하며 경제성이 높은 것으로 산화막처리로서 본 연구에서도 이 방법을 사용하기로 하였다.

표면산화막의 영향을 알아보기 위해 투입할 소재에 각기 다른 온도에서 열처리를 수행해 보았다. Fig. 4는 927°C, 850°C, 750°C 의 각기 다른 온도에서 표면산화막을 생성한 후 성형한 모습이다. Fig. 4(a)는 아무런 표면 처리를 수행하지 않은 시편으로서 표면에 상당한 수준의 소착이 발생하였다(화살표 부분). 뿐만 아니라 표면에 부분적으로 균열이 발생한 것을 확인하였다. Fig. 4(b)는 927°C 산화피막 시편으로서 표면에 황색의 매우 두터운 산화막이 형성된 것을 확인 할 수 있었다. 소착은 발생하지 않았지만 2 단계의 공정에서 성형이 멈추는 현상이 발생하였다. 이는 초기 등방정 조직이 2 중조직(Bi-modal)으로 바뀌면서 소재강도가 급격히 증가했기 때문이었다. 뿐만 아니라 두터운 취성의 산화막으로부터 균열이 생성되어 내부로 전파되는 문제가 발견되었다(Fig. 5). 한편, 850 °C 에서 생성된 소재의 경우 비교적 건전한 성형성이 확보되었으며 소착성도 상당량 개선되었다. 그러나 소재내부의 응력집중 부위에 전단밴드등이 형성된 것이 나타났으며(Fig. 6) 이는 향후 피로수명 및 강도에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

Fig. 4(d)는 750°C 에서 표면처리된 소재로서 가장 매끄러운 표면상태를 보여주고 있다. 변형 후 취성의 산화막은 대부분 마모되어 사라졌으며 부위별로 잔존하는 막의 두께는 5μm 이내였다.

소성변형 불균형에 의한 전단밴드의 형성량도 상당부분 개선되었으며 성형 후 미세조직은 미세한 등방정 조직을 유지하고 있었다. TG 시험결과 성형전 표면에 생성된 산화층의 양은 0.2mg/cm² 이하로 나타났으며 이 수준 이상의 두터운 산화막이 형성될 경우 표면균열 및 전단밴드등이 형성되는 것으로 나타났다.

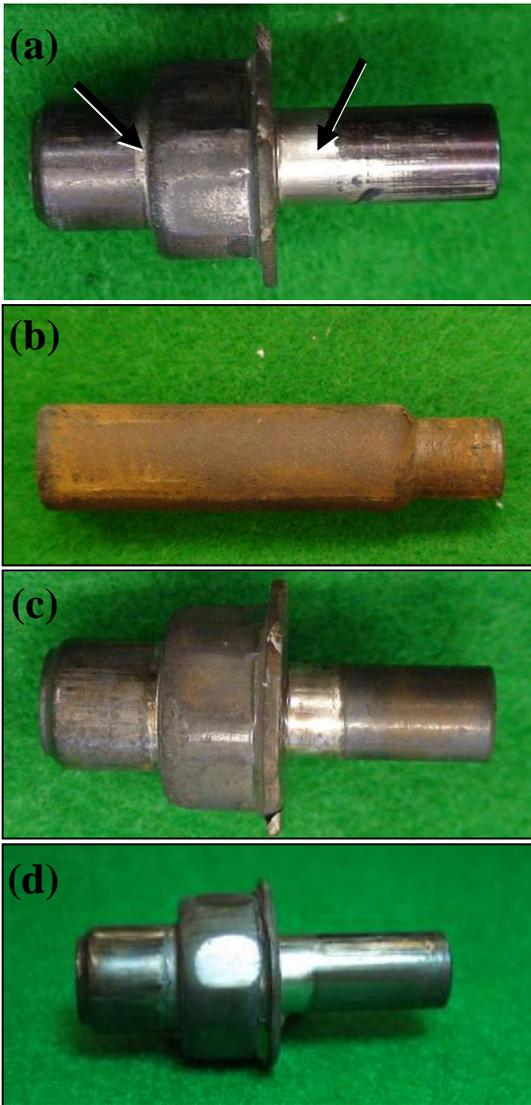


Fig. 4 Photographs of forged Ti-6Al-4V bolt samples (a) without thermal oxidation treatment and thermally oxidized at (b) 927°C, (c) 850°C, and (d) 750 °C before forging

4. 결 론

Ti-6Al-4V 합금을 이용한 고강도 볼트성형을 연구하였다. 이를 위해 고온성형성 평가 및 유한요소해석을 수행하였으며 600°C, 1/sec 의 조건이 온도와 공정속도 측면에서 가장 적합한 것으로 나타났다. 소재와 금형간의 소착을 방지하기 위해



Fig. 5 Micrographs of the specimen thermally oxidized at 927°C. Surface cracks are initiated at thick α -case region(gray colored area)

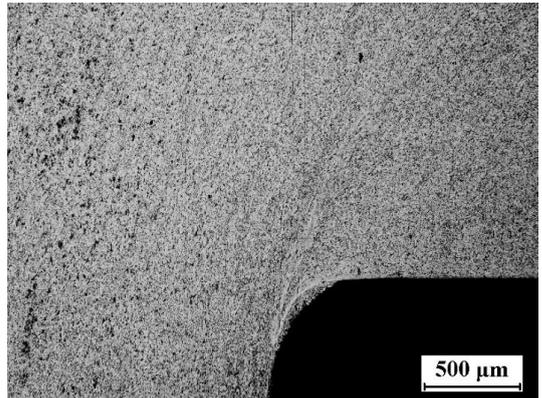


Fig. 6 Microstructure of forged Ti-6Al-4V bolt with thermal oxidation treatment at 850°C

윤활제와 표면산화막 형성을 도입하였고 OilDag 과 750°C 표면산화막이 성형성과 표면 및 내부결함 제어 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중소기업지원 과제로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Donarchie Jr., 2000, Titanium-A Technical Guide 2nd edition, ASM International, pp. 5~11.
- [2] N. S. Reddy , Y. H. Lee , J. H. Kim , C. S. Lee,

- 2008, High temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy with an equiaxed microstructure: a neural networks analysis. *Met. Mater. Int.*, Vol. 14, pp. 213~222.
- [3] N. Matsukura, 2007, Development of cold forging technology for beta-titanium, in M. Niinomi, S.Akitama, M. Hagiwara, M. Ikeda, and K. Maruyama(eds). *Ti-2007 science and technology*, Kyoto, pp. 1395~198.
- [4] S. L. Semiatin, R. L. Goetz, E. B. Shell, V. Seetharaman, A. K. Ghosh, 1999, Cavitation and failure during hot forging of Ti-6Al-4V, *Metall. Mater. Trans., A* Vol. 30, pp. 1411~1424.
- [5] U. Wiklund, I. M. Hutchings, 2001, Investigation of surface treatments for galling protection of titanium alloys, *Wear*, Vol. 251, pp. 1034~1041.