

자유형 단조 공정에 의한 Ti-6Al-4V 빌렛 제조기술

김국주^{1#} · 최승식 · 황창률 · 김종식 · 염종택² · 이종수³

Manufacturing Process of the Ti-6Al-4V Billet by the Open-die Forging

K. J. Kim, S. S. Choi, C. Y. Hwang, J. S. Kim, J. T. Yeom, J. S. Lee

Abstract

Manufacturing process of Ti-6Al-4V alloy billet was investigated with FEM simulation and experimental analysis. Before the breakdown process of Ti-6Al-4V alloy ingot, FEM simulation for the breakdown processes of Ti-6Al-4V alloy ingot was used to calculate the forging load and state variables such as strain, strain rate and temperature. In order to breakdown the ingot structure and make an equiaxed structure billet, two different processes were employed for a VAR/VAR processed Ti-6Al-4V alloy ingot. Firstly, the ingot was cogged in single-phase β field at the temperature of 1,100°C. In the process, the coarse and inhomogeneous structure developed by the double melting process was broken down. The second breakdown was performed by upsetting and cogging processes in $\alpha+\beta$ phase field to obtain the microstructure of fine equiaxed α structure in the matrix of transformed β . Finally, the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy billet made in this work were compared with those of other billet and ring product.

Key Words : Ti-6Al-4V, Breakdown, Equiaxed, β -transus, conventional forging, beta forging

1. 서 론

Ti-6Al-4V 합금의 단조는 상 변태온도(β -transus temperature)를 기준으로 그 이하에서 단조 되는 conventional forging ($\alpha+\beta$ 상 영역)과 그 이상에서 beta forging (β 상 영역)으로 구별된다.

Ti-6Al-4V 합금 잉곳(ingot)의 breakdown 공정은 β 상 영역에서 변형 저항이 작고, 연성도 충분하므로 큰 변형을 주는 가공이 용이하기 때문에 beta forging 이 널리 행해지고 있다. 그러나 대부분의 Ti 합금의 마무리 가공 온도가 그 재료 특성을 결정하기 때문에 $\alpha+\beta$ 상 영역에서 가공되는 경우가 많다.

일반적으로 breakdown 공정은 단순히 주조 조직을 파쇄하여 미세한 조직을 얻는 목적과, 2 차 가공을 위한 preform 을 형성하기 위한 목적으로 수

행된다. 그러나 Ti-6Al-4V 합금의 경우, breakdown 공정에서 원하는 미세조직을 얻지 못할 경우 최종제품의 생산과정에 조직을 제어하기는 매우 어렵고, 이 공정에서 형성된 미세조직이 최종제품에 매우 중요한 영향을 미치므로, 2 차 가공의 조건과 형상을 고려하여 적절한 빌렛(billet)의 형상 및 미세조직을 얻는 것이 핵심기술이라고 할 수 있다.

Ti 합금의 경우 2 차 가공에 직접 투입되는 소재의 형태는 빌렛으로 대부분 수입에 의존하고 있다. 따라서, 원소재의 높은 가격 때문에 최종제품의 단가를 높이는 결과를 초래한다.

본 연구에서는 가격이 상대적으로 낮은 잉곳 상태에서 breakdown 공정을 통한 빌렛 형상 및 미세조직을 최적의 상태로 제어하는 기술을 개발하고, 외산 빌렛 및 외산재(링 제품)와 미세조직 및 기계적 특성을 비교하였다.

1. (주) 태웅

2. 한국기계연구원 소재성형센터

3. 포항공과대학 신소재공학과

교신저자: (주) 태웅, E-mail:kookjoo.kim@taewoong.com

2. 실험방법

2.1 원소재 분석

본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 상용 조성 (commercial grade)이며, 국내 업체로부터 구입한 $\Phi 250\text{mm}$ 인 봉 형태의 소재로서, 화학조성은 Ti-6.704Al-4.401V-0.081O-0.201Fe-0.026C-0.016N-0.0018H 로 ASTM B381 에 제시된 합금조성 기준을 충족하고 있음을 알 수 있다.

2.2 Breakdown(1 차) 공정

Ti-6Al-4V 잉곳을 먼저 1,500ton 유압프레스를 이용하여 자유형 단조에 의한 breakdown 공정을 수행하였으며, 그림 1 에 breakdown 공정 과정에 대한 설명을 나타내었다.

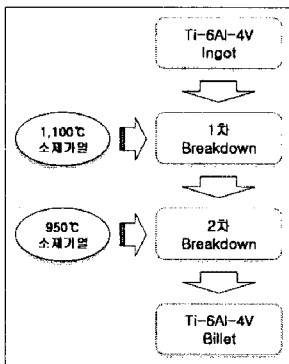


Fig. 1 breakdown process of Ti-6Al-4V ingot

Ti-6Al-4V 합금 잉곳으로부터 빌렛을 제조하기 위한 공정으로, 2 단계의 breakdown 공정을 수행하였다. 1 차 breakdown 공정은 주조 조직을 파쇄하기 위한 것으로, β 단상구역($\sim 1000^\circ\text{C}$ 이상)에서의 업셋팅(upsetting) 및 코깅(cogging)공정을 통해 수행하였고, 2 차 breakdown 공정($\sim 1000^\circ\text{C}$ 이하)은 1 차 breakdown 공정에서 얻어진 widmanstätten 조직을 등축정 조직으로 변환하기 위한 것으로, $\alpha+\beta$ 영역에서 코깅 공정을 통해 수행하였다.

2.3 Ti-6Al-4V(1 차) 조직분석

첫번째 breakdown 공정 후 Ti-6Al-4V 합금의 매크로 및 미세조직을 분석하여 breakdown 공정 정도를 판단하려고 하였다. 그림 2 는 Ti-6Al-4V 합금의 매크로 및 미세조직을 관찰한 결과이다. 매크로 조직은 표면부에 주상정(columnar)조직이 관찰되며, 결정립 크기가 큰 조직임을 관찰할 수 있다. 미세조직을 분석 한 결과, 중간재의 대부분 영역이 "widmanstätten 조직과 grain boundary α "가 함께 존재하는 전형적인 Ti-6Al-4V 합금의 β 성형 조직이었고, 특히 문제가 되는 부분은 prior β 조직

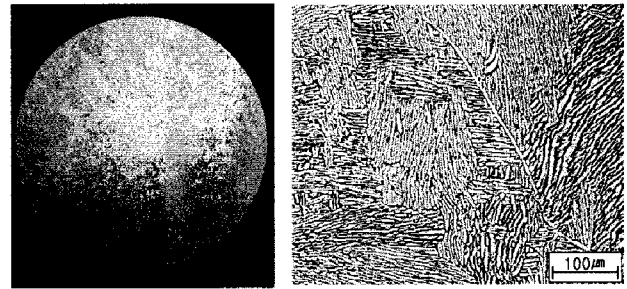


Fig. 2 Macro and micro structure of Ti-6Al-4V billet after breakdown(1st)

안에 colony 크기가 상당히 크며, 이것은 β 변태점 ($\sim 1,000^\circ\text{C}$) 이상의 온도에서 충분한 단조 성형이 이루어지지 않은 것으로 판단되었다. 그러나, 한 차례 breakdown 공정을 거친 소재이기 때문에 잉곳 조직과 달리 일부 prior β 결정립이 미세화 되었으므로 등축정(equiaxed) α 상을 가지기 위한 공정으로, 다시 $\alpha+\beta$ 상 영역에서 breakdown(2 차)공정을 수행하기로 하였다.

2.4 Breakdown(2 차) 공정

2 차 breakdown 공정에 앞서, FE 해석에서 얻어진 성형하중, 온도, 변형량 분포에 대한 해석결과를 그림 3 에 나타내었다.

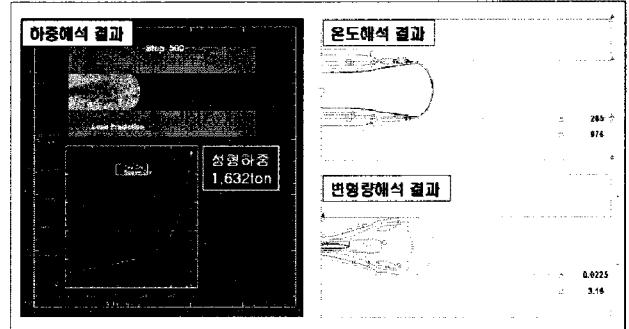


Fig. 3 Breakdown(2nd) process FEM Result of Ti-6Al-4V Alloy

실제 공정에 앞서 FEM 해석을 수행한 결과, 성형하중은 최대 1,632ton 으로, 이는 당사((주) 태웅)에서 보유하고 있는 2,000ton 유압프레스에서 가능할 것으로는 판단되었다. 온도해석 결과에서 변형열에 의한 중심부의 온도변화가 최종 단계의 경우 $950\sim 976^\circ\text{C}$ 로 약 26°C 정도 상승한 것으로 해석되었는데, 이는 Ti-6Al-4V 합금의 β 변태점이 996°C 임을 감안하면, 이러한 공정조건에서는 β 변태점 이상으로 상승하여 부분적인 변태 조직이 관찰되지 않을 것으로 예상된다. 변형량의 분포는 중심부에서 최대 3.15 의 유효 변형량을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과를 통해 중심부의 경우 upsetting 공정만으로도 lath 형의 α 상이 구상화 될 수 있을

것으로 예상된다. (* lath α 상 완전 구상화되기 위한 최소 조건 : 변형량 2.5) 또 표면부와 중심부 모두 균일하게 구상화를 이루어 균일한 등축정 α 상을 형성시키기 위해서는 upsetting 과 side-pressing 을 병행하여 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 실제 breakdown 공정 시 소재 handling 의 용이성을 감안하여 upsetting 공정을 약 50% 정도만 압축하였고, side-pressing 시 최소 50%정도로 연속적으로 회전하면서 압축이 이루어지도록 설계하였다.

1 차적으로 breakdown 공정을 거치 소재 일부분을 $\Phi 260\text{mm} \times \text{L}580\text{mm}$ 로 절단하여, 과열방지를 위해 2 단계로 가열하였다. 가열온도 650°C 에서 10 시간 유지 후 다시 950°C 로 가열하고 950°C 에서 8 시간 동안 유지 후 앞절에서 설명한 것처럼, $\alpha+\beta$ 상 영역에서 2 차 breakdown 공정만 수행하기로 하였다. 그림 4 는 실제 Ti-6Al-4V 합금의 두번째 breakdown 공정을 나타낸 것이다.

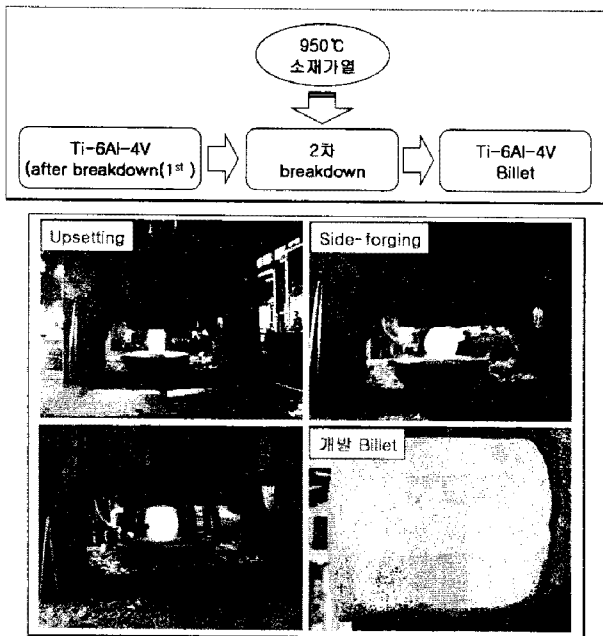


Fig. 4 Breakdown(2nd) process of Ti-6Al-4V Alloy

이렇게 제조된 Ti-6Al-4V 빌렛을 외산 빌렛과 미세조직을 비교하여 보았고, 이 빌렛으로 업셋팅(upsetting)과 피어싱(piercing)을 통해 링 압연 공정(ring rolling)을 거쳐 실제 $\Phi 900\text{mm}$ 급 Ti-6Al-4V 링 제품을 제작하여, 외산제 링 제품(carlton forge works)과 외산(TIMET Co.) 빌렛으로 제작한 링 제품과 미세조직 및 기계적특성을 상호 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 개발 Ti-6Al-4V 빌렛 미세조직관찰

2 차에 걸친 breakdown 공정을 통해 제조된 개발 Ti-6Al-4V 합금 빌렛의 미세조직을 원주방향과 축방향에서 관찰하였다. 또 개발 빌렛의 미세조직을 평가하기 위하여 외산 빌렛과 상호비교 하였다.

그림 5 에서 매크로 조직의 관찰 결과는 중심부의 경우 표면부에 비해 다소 큰 결정립 분포를 나타내었고, 이는 2 차 breakdown 공정 시 변형열로 인한 온도상승에 기인된 것으로 판단된다.

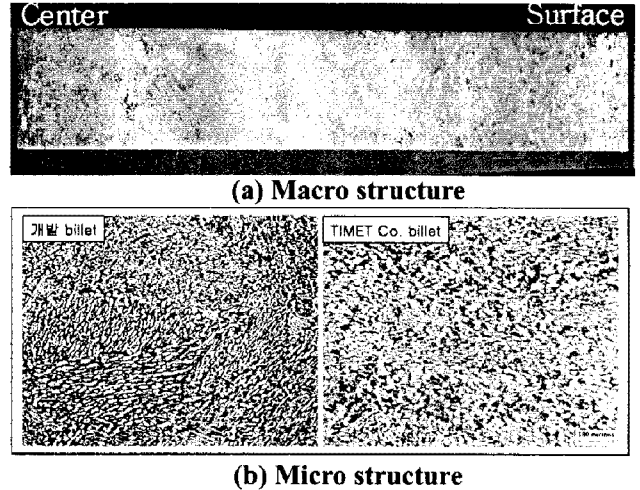


Fig. 5 Macro and Micro structure of Ti-6Al-4V billet after 2nd breakdown process

Ti-6Al-4V 합금 개발 빌렛의 미세조직을 관찰한 결과(그림 5), lath 형 α 상이 종횡비가 2:1 정도인 등축정에 가까운 조직으로 변화되었음을 알 수 있었고, 외산 빌렛의 미세조직과 매우 비슷함을 관찰할 수 있었다. 다만, 중심부의 일부가 lath 형 α 상이 되었는데 이는 2 차 breakdown 공정의 변형량이 다소 충분하지 못한 것을 나타내는 증거이다. 그러나, 향후 링 제품을 제조하는 $\alpha+\beta$ 형 링 압연 공정에서 lath 형 α 상은 충분히 파쇄 될 것으로 예상되었다.

3.2 개발 빌렛 링과 외산 제품의 미세조직 및 기계적 특성 상호비교

개발 Ti-6Al-4V 빌렛의 실질적인 미세조직 및 기계적 특성평가를 위해서 2 차 가공인 링 압연공정을 통해서 $\Phi 900\text{mm}$ 급 링 제품을 제작하여, 외산 링 제품과 외산 빌렛으로 링 제품을 제작한 후 상호 비교하여 보았다

그림 6 은 외산 빌렛에서 링 압연 공정을 통해 얻어진 제품, 외산 링 제품 및 개발 빌렛으로 제작한 링 시제품의 미세조직을 관찰한 결과이다.

As rolled 상태의 조직은 각 링 제품 모두 종횡비가 2:1 이하인 등축정 조직에서 약간 벗어난 연신된 lath 형 α 상에 가까운 조직을 나타내고 있다.

조직적인 변화 중 등축정 α 상이 아닌 약간 연신된 형태의 α 상으로 변화된 것에 차이점이 있다.

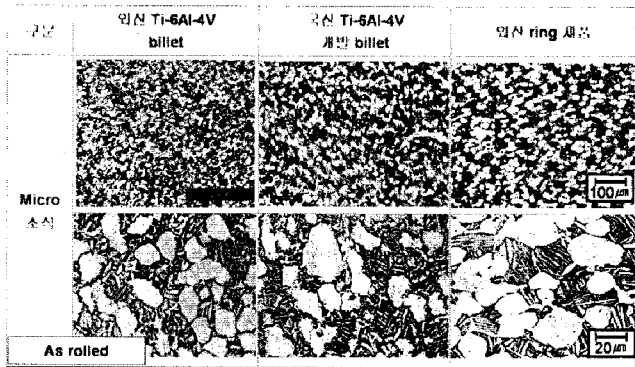


Fig. 6 Comparison analysis micro structure of actual Ti-6Al-4V ring mutual product as rolled

이러한 연신된 α 상의 존재는 등축정 α 상에 비해 파괴인성이나 충격특성 등에서 유리할 것으로 판단된다. 이는 breakdown 공정을 통해서 미세한 등축정 α 상을 얻을 수 있었기 때문으로 판단된다.

Φ 900mm 급 Ti-6Al-4V 링 부품의 신뢰성 평가 기준은 다음 표 1 과 같다.

Table 1 Minimum mechanical properties of Ti-6Al-4V ring(* Spec. : AMS-T-81915)

Tensile strength (MPa)	Yield strength (0.2%, MPa)	Elongation (%)	Impact test (J)
≥ 862	≥ 793	≥ 8	20

외산 빌렛으로부터 제조된 링 및 외산재 링을 인장 및 충격 시험을 수행하였고, 각 링 제품별 특성 평가를 비교하였고, 기계적 특성 결과를 그림 7 에 정리하였다. 그 결과 링 부품의 신뢰성 기준을 다 만족하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 최종 제품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 breakdown 공정에 의한 Ti-6Al-4V 빌렛의 제조 기술이 매우 중요하다고 할 수 있다.

다만, 본 연구에서 제조된 국산 및 외산 원소재로부터 제조된 링 제품은 충격치의 요구규격 (~20J)을 초과 달성한 것으로 평가되었으나, 오히려 외산 ring 제품의 충격치가 요구 규격에 못 미치는 것을 알 수 있다. 그러나, Ti 합금의 적용분야는 강도뿐만 아니라 인성, 피로 등도 함께 요구하고 있는 경우가 많으며, 아울러 고온 특성 즉, 크리프 특성 또한 요구되는 경우가 상당히 많다. 따라서, 이들 특성들을 모두 만족할 수 있는 우수한 품질의 타이타늄 링 제품을 생산하는 것이 중요하며, 이러한 특성을 함께 고려한 연구가 진행될 것이다.

4. 결론

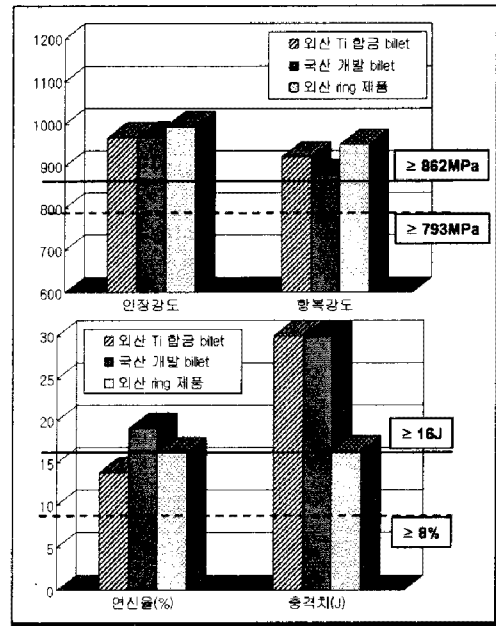


Fig. 7 Comparison analysis mechanical properties of actual Ti-6Al-4V ring mutual product as rolled

본 연구에서는 자유형 단조에 의한 breakdown 공정 통해 Ti-6Al-4 합금의 빌렛을 개발하였고, 그 특성을 선진국의 빌렛 및 최종제품과 비교하였다.

(1) Ti-6Al-4V 잉곳의 1차 breakdown 공정은 주조 조직을 파쇄하기 위한 것으로, β 단상구역 (~1,000°C 이상)에서의 수행하였고, 2차 breakdown 공정(~1,000°C 이하)은 1차 breakdown 공정에서 얻어진 widmanstätten 조직을 등축정 조직으로 변환하기 위한 것으로, $\alpha+\beta$ 영역에서 수행하였고, 최적의 빌렛제조 기술을 확보하였다.

(2) 1, 2차 breakdown 공정을 통해서 중형비가 2:1 이하인 등축정 조직의 빌렛을 얻을 수 있었고, 이 빌렛으로 Φ 900mm 급 링 제품을 제조하여 외산 제품과 비교한 결과 대등한 특성을 얻을 수 있었고, 신뢰성 평가 기준을 만족하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 부품·소재기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] G.K. Turnbull, Titanium and Titanium alloys -Source Book, ASM, (1982) p265-
- [2] Matthew J. Donachie, Jr, "Titanium and titanium alloys", American Society for Metals, 1982.