

증기터빈 티타늄 블레이드의 단조공정 개발에 관한 연구

김윤환¹, 조종래², 정호승¹, 박희천³, 이낙규⁴

A Study on the Development of Forging Process for Steam Turbine Titanium Blade

Y. H. Kim, J. R. Cho, H. S. Jeong, H. C. Park, N. K. Lee

Abstract

When Ti-6Al-4V is used in long steam turbine blades, the main issues are how to improve the fatigue strength as a problem of internal quality and how to forge the thinnest possible blades as problem of dimensional precision. To assure an excellent fatigue strength, it is important to make the two phase fine and equiaxial structure by providing enough plastic deformation in the two phase(α phase/ β phase) temperature region. Accordingly, it needs to predict that forging temperature, preform design and forging velocity in forging process. To achieve this end, the two steps forging process was suggested to forge the thin and twisted blades with a precision hammer considering die forces and metal flow. Two steps forging process consists of the flattening forging process and finishing forging process. Process in forging of a 1016mm long steam turbine blade is designed by the finite element method. This study attempts to derive systematic design procedures for process design in the forging. Forging parameters was analyzed in two-dimensional plane-strain simulation and two steps forging process carried out in three-dimensional simulation. Consequently, optimal forging process parameters of long steam turbine blades in Ti-6Al-4V with a high dimensional precision are selected in the hammer die forging.

Key Words : Ti-6Al-4V, Titanium, Blade, Turbine

1. 서 론

터빈 블레이드는 열효율 증대를 위하여 요구되는 발전소의 가혹한 운전 조건에 적합하고, 수명이 긴 고품질의 재질이 요구되고 있다. 이에 따라 국산화가 절실히 요구되며 경량이고 고강도인 티타늄 합금(titanium alloy)을 이용한 블레이드의 형단조 공정 개발이 필요하다.

국내에서는 보통 각재(bar stock)를 밀링기계에서 가공하여 블레이드를 제작하고 있으나 이러한 방

법은 설비투자과 절삭시간 등이 많이 소요되므로 단조공정으로의 공법전환이 이루어지고 있다. 따라서 블레이드의 생산을 위한 단조공정 설계의 개발은 아주 시급한 문제이다[1, 2].

티타늄 블레이드의 단조에 있어서 미세조직의 변화는 블레이드의 기계적 성질에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 단조공정 중 단조온도, 성형시간 등의 공정변수를 찾는 것이 중요하다. 또한 단조시 블레이드는 날개부분의 형상이 꼬여 있기 때문에 치수 정밀도를 높이기 어렵고, 특히 마무리

1. 한국해양대학교 대학원 기계공학과
2. 한국해양대학교 기계정보공학부
3. ㈜ 케이에스피
4. 한국생산기술연구원

단조작업에서는 높은 변형응력 때문에 성형을 하기 위해 큰 힘이 필요하다. 따라서 치수 정밀도를 높이고, 보다 적은 성형하중으로 블레이드를 제작할 수 있는 단조 공정개발이 필요하다.

본 연구에서는 티타늄 터빈 블레이드의 단조공정에 대해 유한요소법을 이용하여 단조공정 중 발생할 수 있는 결함과 성공적인 단조품을 얻기 위해 공정해석 중 주요 공정변수가 미치는 영향을 관찰하고, 열간 및 등온 단조 해석결과를 상호 비교 검토하였다.

2. 티타늄 블레이드의 단조공정

2.1 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 단조특성

Ti-6Al-4V의 단조특성은 제조 공정에 크게 지배를 받는다. Fig. 1은 바나듐(Vanadium)의 함량에 따른 Ti-6Al의 평형 상태도이다. 소재 특성은 열간 단조가 범위에서 행하여 졌는가, 혹은 그 이하의 온도인 범위에서 행하여 졌는가에 따라서 크게 좌우된다. 단조를 2상 영역($\alpha+\beta$ Zone)에서 행하여 질 때는 등축구조(equiaxed structure)가 얻어지는 반면에 그 이상의 온도인 영역에서 행하여 질 때는 침상구조(acicular structure)가 얻어지는 경향이 있다.

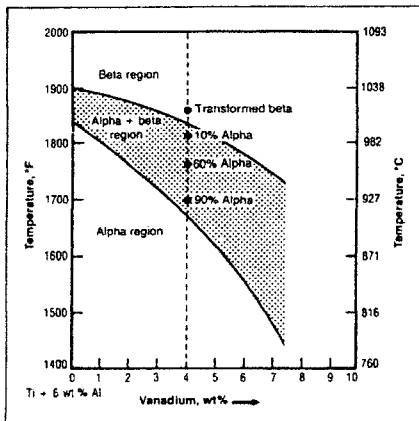


Fig. 1 Phase diagram that predicts results of forging or heat treatment practice

티타늄 합금의 단조시에는 온도와 변형이력에 따른 미세조직의 크기와 형상에 따라 기계적 성질이 변하고, 단조시에도 수차례 예비성형(preforming)과 블록킹(blocking) 공정이 필요하므로 단조비용의 상승 원인이 된다. 티타늄 합금으로

우수한 소성변형을 얻기 위해 고온에서 열간단조나 등온 단조를 행한다. 단조공정설계는 예비 성형체의 설계(preform design)와 가공조건 설계로 구분되는데 예비 성형체 설계는 최종품을 만들기까지의 중간성형단계와 각 단계에서의 재료의 형상과 치수를 결정하는 것을 뜻하며, 가공조건설계는 각 단계에서의 다이의 속도, 다이와 재료의 초기 온도분포, 윤활조건 등을 결정하는 것을 뜻한다.

Ti-6Al-4V의 변태 온도는 약 995°C이다. 따라서 단조시 플래쉬 부위를 제외한 블레이드의 표면이나 내부온도가 이 온도를 넘지 않도록 해야 한다. Ti-6Al-4V의 통상적인 단조 온도는 870~980°C이다.

2.2 블레이드의 단조공정

본 연구는 티타늄 블레이드를 어떻게 하여 우수한 피로 강도를 얻고, 해머에서 정밀단조를 할 것인가가 주된 논점이다.



Fig. 2 Shape of forged blade

Fig. 2는 단조된 블레이드의 형상이다. 그림과 같이 길이 1016mm의 블레이드는 길이 방향으로 비틀려 있기 때문에 단조시 정밀단조에 어려움이 있다. 그래서 본 연구에서는 블레이드를 첫 번째 단계로 비틀림 없이 중간 단계의 형상을 만들고, 두 번째 단계로 비틀린 형상의 최종 단계로 성형하는 2단계 단조공정의 과정을 수행하였다. 이후에는 전자를 평면단조(flattening forging), 후자를 마무리 단조(finishing forging)이라 한다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석조건

Fig. 3은 해석에 사용된 다른 비틀림 각을 가진 두 종류의 블레이드 형상을 보여주고 있다. (a)는 마무리 단조시의 금형만을 사용하여 직접 단조한

블레이드의 형상이고, (b)는 2 단계 단조의 첫 번째 평면 단조법으로 성형한 비틀림 없는 블레이드의 형상이다.

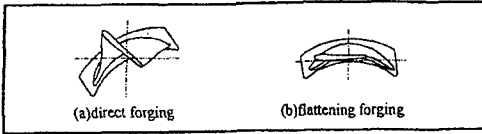


Fig. 3 Two types blades having same cross section with different torsion

해석은 2 단계 단조공정의 실용성을 검증하기 위하여 직접 단조공정과의 비교 해석을 실시하였다. 해석조건은 동일하게 적용하였으며 Table 1 에 그 해석조건을 표시하였다.

Table 7 Simulation parameters of forging process

Material	Pressing velocity (mm/s)	Workpiece temp. (°C)	Die temp. (°C)
Ti-6Al-4V	100	900	400

3.2 직접 단조공정

Fig. 4 는 단조 전 예비 성형체가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 5 는 공정 완료 후 소재의 형태와 온도분포를 보여주고 있다. 성형 하중은 약 276MN, 금형에 작용되는 측력은 약 50MN 의 하중이 금형에 작용하고 있다. 실제 공정에서 금형에 이렇게 큰 측력이 작용한다면 블레이드의 성형성이나 금형의 수명에 큰 타격이 될 수밖에 없을 것이다. 그리고 Fig. 5 의 온도분포를 보면 Ti-6Al-4V 의 변태점인 995°C를 넘어선 부위를 확인할 수 있다.

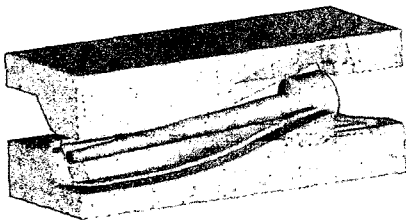


Fig. 4 Initial position of workpiece and die for direct forging process

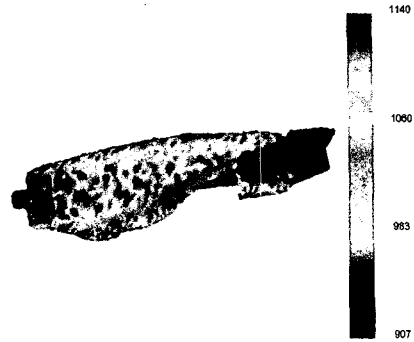


Fig. 5 Temperature distributions of direct forging process

3.3 2 단계 단조공정

2 단계 단조공정은 꼬이지 않은 형상의 블레이드를 성형하는 평면 단조 공정과, 평면 단조 공정에서 나온 블레이드의 플래시 부를 제거한 후 다시 900°C로 가열 후 꼬인 형상의 블레이드를 성형하는 마무리 단조 공정으로 나뉜다.

3.3.1 평면 단조공정

Fig. 6 은 단조 전 예비 성형체가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 7 은 공정 완료 후 소재의 형태와 온도분포를 보여주고 있다. 성형 하중은 약 349MN, 측력은 최대 약 2.5MN 의 하중이 금형에 작용하고 있다. 성형 하중은 직접 단조법으로 성형하였을 때와 유사한 값을 보이나, 측력의 경우는 직접 단조법의 수치와 많은 차이를 보여주고 있다.

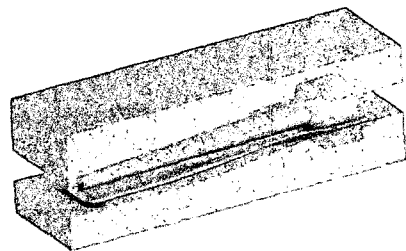


Fig. 6 Initial position of workpiece and die for flattening forging process

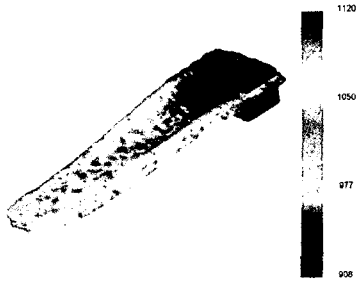


Fig. 7 Temperature distributions of flattening forging process

3.3.2 마무리 단조공정

Fig. 8 은 단조 전 예비 성형체가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 9 는 공정 완료 후 소재의 형태와 온도분포를 보여주고 있다. 전 공정에 양호한 성형 결과를 보여주고 있고, 온도분포 또한 단조온도 범위인 870~980℃ 내에서 성형이 이루어짐을 알 수 있다. 성형하중은 약 100MN 이 작용하고 있고, 축력은 약 10MN 의 하중이 금형에 작용하고 있다. 이전 공정에 비해 적은 성형 하중이 필요로 하고, 금형이 미치는 축력도 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

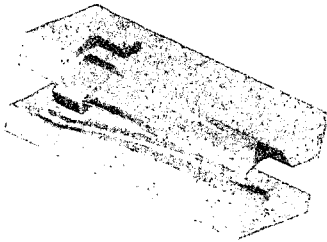


Fig. 8 Initial position of workpiece and die for finishing forging process



Fig. 9 Temperature distributions of finishing forging process

4. 결론

본 연구에서는 증기터빈 티타늄(Ti-6Al-4V) 블레이드 단조공정의 수치적 해석을 DEFORM 2D/3D 를 사용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소법을 통해 형단조를 통한 블레이드의 단조공정을 예측함으로써 절삭가공 등의 기존 제조방법보다 소재의 낭비를 막을 수 있고, 공정변수의 영향을 분석할 수 있었다.

(2) 유한요소법으로 형단조 시뮬레이션을 함에 있어서 공정변수의 여러 가지 조건을 바꾸어 가면서 그에 따른 현상을 예측할 수 있었다.

(2) 대형 터빈 블레이드를 형단조 함에 있어 단조 공정을 평면 단조공정과 마무리 단조공정의 2 단계로 나누어서 성형성을 좋게 하고 금형에 작용하는 축력을 최소화 하여 정밀한 블레이드 단조가 가능하게 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] K. Tani, T. Sato, S. Ishigai, H. Morikawa, O. Ishiyama, S. Araki, "Manufacturing of large turbine blades of Ti-6Al-4V alloy", The 13th International Forgemasters Meeting, 1997.
- [2] Welsch, Gerhard, "Materials properties handbook : titanium alloys", ASM International, 1994.
- [3] 최병욱, 조종래, 왕지석, 김동권, 김동영, "터빈 블레이드의 형단조 금형설계의 자동화에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 569 ~ 575, 1999.
- [4] 염종택, 김두현, 나영상, 박노광, "Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명", 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 347 ~ 354, 2001.
- [5] Matthew J. Donachie, Jr., "Titanium : A technical guide Second edition", ASM International, 2000.
- [6] 권재도, 배용탁, 최성중, "티타늄(Ti-6Al-4V)의 조직변화에 따른 기계적 특성 평가", 대학기 계학회논문집 A 권, Vol. 26, No. 4, pp. 609 ~ 616, 2002.