

## 대형 압축기 휠의 열간단조 공정설계

임정숙\*·염종택\*·김현규\*\*·박노광\*

# Hot Forging Design for a Large Scale Compressor Wheel

J.S. Lim, J.T. Yeom, and N.K. Park

### Abstract

Hot-forging process and die design was made for a large-scale compressor wheel of Ti-6Al-4V alloy with 2-D FE analysis. The design integrated the geometry-controlled approach and dynamic materials modelling(DMM). In order to obtain the processing contour map of Ti-6Al-4V alloy based on DMM, compression tests were carried out in the temperature range of 915°C to 1015°C and the strain range of  $10^{-3}s^{-1}$  to  $10s^{-1}$ . In the die design of the compressor wheel using the rigid-plastic FE analysis, forging dimensional accuracy, the capacity of the forging machine and defect-free forging were considered as main design factors. The microstructure of hot forged wheel using the designed die showed a typical alpha-beta structure without forging-defects.

**Key Words** : Ti-6Al-4V, Compressor Wheel, Dynamic Materials Modelling(DMM), Forging-Defects

### 1. 서 론

티타늄합금은 고온강도가 우수하고 비강도가 크기 때문에 가스터빈 압축기, 팬디스크 또는 팬 블레이드 등 수명이 제한된 고에너지 부품에 많이 사용되어 왔으며, 티타늄 합금 중 가장 널리 알려지고 보편적으로 사용되고 있는 합금으로 대표적인  $\alpha\beta$ 형 티타늄 합금인 Ti-6Al-4V 합금을 들 수 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 선박용 파급기 압축기 휠은 1차 성능 해석 및 공력 해석 결과 압축기의 온도는 240°C 전후로 예상되었으며 이를 바탕으로 Ti-6Al-4V 소재를 압축기휠용 후보소재로 선정하여 이에 대한 연구를 수행하였다. 티타늄 합금

의 기계적 특성에 주된 영향을 미치는 인자는 미세조직 형상이므로써 일반적으로 등축정조직, 층상조직 및 이들이 공존하는 혼합조직 등 크게 세 가지로 구분된다. 등축정조직은 강도, 연성, 피로균열생성에 대한 저항성 등이 우수한 반면, 층상조직은 크리프저항성, 피로균열전파에 대한 저항성 등이 우수한 것으로 알려져 있다. 한편 혼합조직의 경우 이들 각 미세조직 형상들이 지닌 장점을 골고루 지님으로써 전반적으로 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 이러한 미세조직적 변화에 따라 기계적 특성이 현저하게 변화되기 때문에 적절한 가공열처리 조건의 선정이 최종적인 부품의 기계적 특성을 결정한다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 열간 단조 중 Ti-6Al-4V의 재료

\* 한국기계연구원 공정연구부

\*\* (주)STX 기술연구소

거동을 이해하고 안정영역에서의 소재의 변형을 제어함과 동시에, 다이 충전을 고려하여 압축기 휠 단조 금형을 설계하였으며, 실제 단조 작업을 통하여 이를 검증하였다.

## 2. Ti-6Al-4V 합금의 고온 성형성 평가

Ti-6Al-4V 합금의 고온 성형성을 파악하고 이에 따른 미세조직 형태의 변화를 조사하기 위하여 열간가공성 시험장치(ThermacMaster-Z)를 이용하여 고온 압축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 압축시편의 형상은 지름 8mm, 길이 12mm인 원통형 시편이고,  $10^{-2}$  torr 이상의 진공분위기 하에서  $\text{Si}_3\text{N}_4$  블록사이에 시편을 위치시킨 후 일정 변형을 속도로 시험을 수행하였다. 시험온도는  $915\sim 1015^\circ\text{C}$  사이에서, 변형속도는  $10^{-3}\sim 10/\text{sec}$  범위에서 진변형량 0.6까지 압축하였다. 이 때  $\text{Si}_3\text{N}_4$  블록과 시편사이에 열전달 및 마모를 최소화하기 위해 운모판을 삽입하였다. 시험온도에 도달하기 위한 가열속도는  $5^\circ\text{C}/\text{sec}$ 이고, 시험온도에 도달한 후 시편 전체의 온도를 균일하게 하기 위해 5분간 유지한 후 압축하였고, 압축 직후의 미세조직을 관찰하기 위해 질소급냉하였다.

압축시험의 유동응력곡선 분석결과를 토대로 이 합금의 가장 적합한 공정 조건은  $930\sim 950^\circ\text{C}$ , 변형률  $10^{-3}/\text{sec}$  임을 알 수 있었으며, 이 때의 응력-변형률 곡선을 그림 1에 나타내었다. 그러나, 본 연구에서는 해머단조기를 이용하여 단조하여야 하기 때문에 최대한 이에 합당한 조건을 공정설계에 반영하고자 하였다.

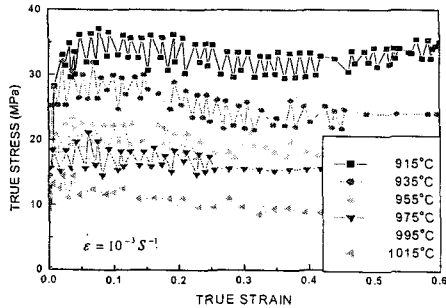


Fig. 1 Stress-strain curves of Ti-6Al-4V alloy of the strainrate  $10^{-3}/\text{sec}$

## 3. 정밀단조공정 설계 및 조직제어

### 3.1 압축기 휠의 단조공정 설계

최종 압축기 휠 가공품의 예상 도면과 원심 압축기에 대한 공력설계로부터 얻은 주요 치수를 바탕으로 단조품

의 기본단조형상을 도출하고, 열간 단조공정에 관한 유한요소해석을 통해 정밀단조 공정설계를 수행하였다. 또한 Thermo-mechanical processing에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 변화 및 이에 따른 기계적 특성 변화에 관한 연구 경험을 바탕으로 Ti-6Al-4V 합금 열간 단조 공정 조건을 설정하고자 하였다. 표 1은 공력설계로부터 얻어진 압축기 휠의 주요 치수를 나타낸 것이고, 그림 2는 예상되는 압축기휠의 최종 가공형상 및 1차적으로 얻은 기본단조형상을 나타낸것이다. 공력설계로부터 얻은 압축기휠의 주요 치수를 바탕으로 그림 2(b) 형상과 같은 단조품 형상을 1차적으로 도출하였다. 단조품 형상 도출은 고온 가열 및 열간 단조 중 발생할 수 있는 합금 표면의 산화, die chilling에 의한 표면 dead zone 발생 등을 고려하여 수행하였으며 이를 바탕으로 열간 단조공정에 관한 유한요소해석을 통해 단조품 형상의 정밀 설계 및 금형 설계를 수행하였다. 이때 그림 2(b)에 보여준 단조품의 주요 치수를 그림 3(a)에 나타내었으며 그림 3(b)에는 초기 빌렛 형상을 나타내었다.

Table 1 Dimension of forged part for compressor wheel

| 최대날개의외경(mm) | 윗날개의외경(mm) | 길이(mm) |
|-------------|------------|--------|
| φ455        | φ238.2     | φ149.7 |

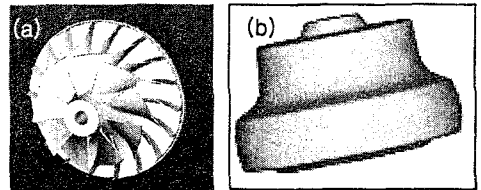


Fig. 2 (a) the last processed shape and (b) forged part of compressor wheel

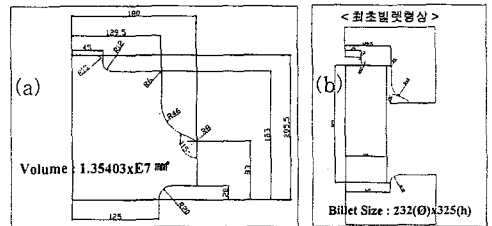


Fig. 3 Initial billet shape and dimension

정밀단조 공정해석은 상용 단조해석 프로그램인 DEFORM 코드를 활용하였으며 단조품이 축대칭 형상이기 때문에 대칭면에 대한 2차원 해석만 수행하였다. FE 단조해석은 비등온, 강소성 조건으로 해석을 수행하였고,

금형(H11)의 초기 온도는 300℃로 가정하였다. 해석에 필요한 주요 물리적 특성 등은 문헌에 수록된 내용[1]을 활용하였으며, 실험적인 측정이 힘든 계면마찰계수와 계면열전달계수는 단조해석에서 통상적으로 사용되는 0.3 및 20 N·sec·mm·℃를 각각 사용하였다. 성형할 단조장비는 해머 단조기로서, 해석과정에서의 ram speed는 해머단조기의 통상적인 ram speed인 1200mm/sec로 가정하여 해석하였다.

Ti-6Al-4V 합금의 미세조직은 등축정조직, 층상조직, 혼합조직 등 크게 세 가지로 구분되며, 본 연구에서는 thermo-mechanical process를 통해 강도측면에서 유리한 등축정 또는 혼합조직의 Ti-6Al-4V 압축기휠 제조를 목표로 하였다. 등축정 또는 혼합조직의 합금 부품을 제조하기 위해서는 Ti-6Al-4V 합금의 β transus 온도(통상적으로 약 990℃) 이하에서 단조를 수행해야 하기 때문에 본 연구에서의 초기 빌렛 가열온도는 970℃로 하였으며 단조 중 발생할 수 있는 빌렛의 온도 상승 효과를 함께 해석하였다.

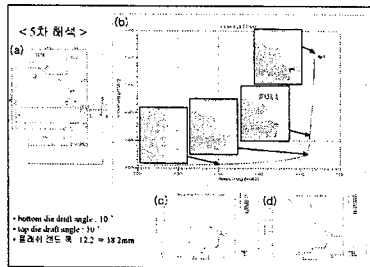


Fig. 4 The fifth simulation and the result

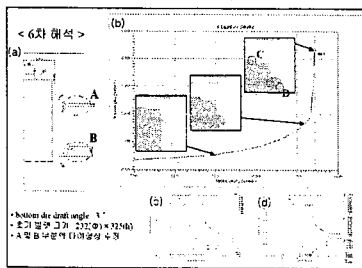


Fig. 5 The sixth simulation and the result

단조품의 cavity 발생을 없애고 단조품이 금형에 적절히 채워지는 조건에서 단조하중을 감소시키기 위해 금형의 draft angle, 플래시 치수, 금형 곡면의 곡률 반경 등을 변화시키면서 정밀 금형설계를 수행하였고, 총 여섯 차례에 걸쳐 이루어졌다. 그림 5는 5차 해석 결과를 나타낸 것으로, 단조품 내 변형을 분포의 균일도가 증가하고 온도상승이 억제되는 것을 확인할 수 있었으며, 그림

6은 6차 해석 결과로서, cavity를 어느정도 감수하면서 단조품의 부위별 변형률 및 온도상승 등을 고려할 때 대체적으로 만족스러운 해석결과를 얻을 수 있었다.

### 3.2 FE 단조해석을 통한 형상 및 조직 제어

압축실험 데이터를 Prasad[2]의 동적재료모델에 기초하여 분석함으로써 그림 6과 같은 변형공정지도(deformation processing map)를 작성하였으며 자세한 내용은 이전에 보고한 논문[4]에서 얻을 수 있다. 변형공정지도에서 제시하는 안정 영역에 해당하는 온도 및 변형률, 변형률 속도로부터 공정설계 창(process design window)을 설정할 수 있으며, 유한요소해석을 통해 얻어진 단조품의 부위별 온도 및 변형률 속도 값으로부터 불안정한 금속 유동을 보이는 부분을 예측할 수 있다. 그림 6에 나타난 공정지도에서 불안정한 영역은 shadow표시된 영역으로 변형속도가 빠른 조건에서 얻어졌으며, 이러한 불안정구간은 전단밴드, 균열 등과 같은 성형결함이 발생할 수 있는 가능성을 가진다.

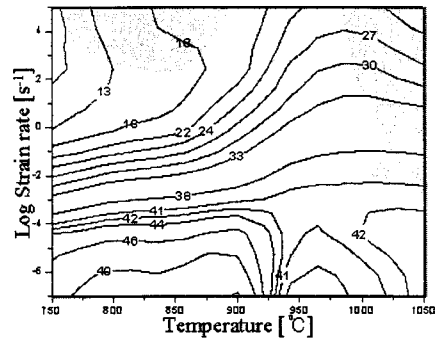


Fig. 6 Deformation processing map for Ti-6Al-4V alloy

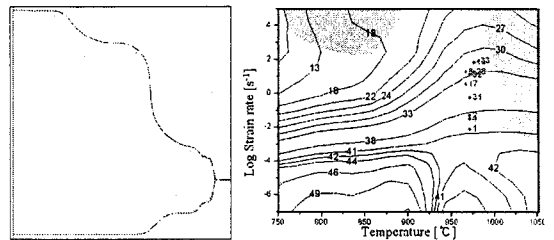


Fig. 7 Simulation to estimate instability of Ti-6Al-4V

앞서 수행된 공정해석을 바탕으로 그림 7과 같은 최종 단조형상을 결정하고 이의 성형성 여부를 해석한 결과 모든 영역이 소성불안정 구간에 포함되지 않았으며, 금형의 충전률이 우수한 단조 형상과 금형 설계인 것으로 평가되었다.

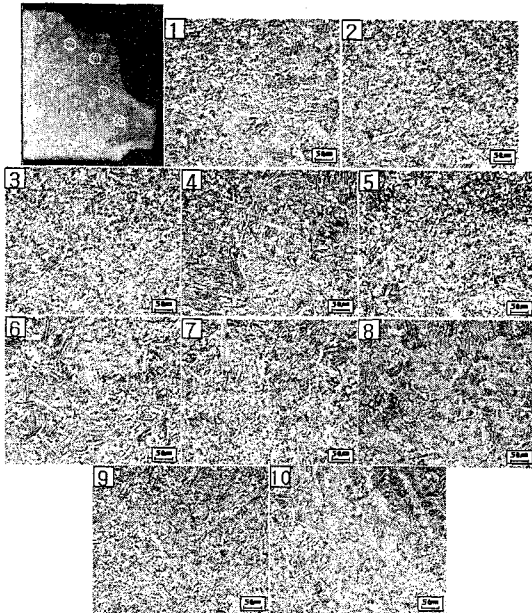
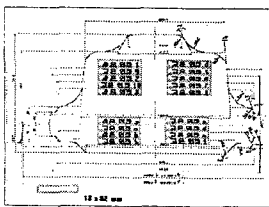


Fig. 8 Macro- and micro-structures of the forged part

### 3.3 제품의 성형성 검증 및 인장 시험

최종단조형상을 바탕으로 실제 단조작업이 수행되었고, 제작된 제품의 macro 및 micro structure를 살펴보았으며, 인장시험을 통해 그 특성을 검사하였다. 그림 8은 성형된 제품의 macro- 및 micro-structure를 나타낸 것이다. 전체적으로 metal flow는 접혀짐이 없이 금형라인을 따라 연속적으로 형성된 것을 확인할 수 있고, 미세조직은 전체적으로 성형결합이 없는 전형적인  $(\alpha+\beta)$  혼합조직을 나타내었다. 그림 9는 인장시험편 제조를 위한 cut-up diagram 및 결과데이터를 나타내고 있다. 전체적으로 metal flow가 잘 이루어진 상부에서 채취된 시험편의 강도가 다소 높은 것으로 나타났으나 그 정도가 미비하며 전반적으로 비슷한 강도를 나타내고 있다.



| No. | Temp.(°C) | YI(MPa) | UTI(MPa) | EL(%) | RA(%) |
|-----|-----------|---------|----------|-------|-------|
| 1   | RT        | 978.1   | 906.5    | 17.4  | 19.7  |
| 3   | RT        | 955.8   | 899.1    | 20.1  | 20.8  |
| A   | RT        | 956.6   | 935.6    | 22.0  | 25.7  |
| B   | RT        | 956.4   | 924.1    | 28.7  | 31.8  |
| 5   | 100       | 923.6   | 754.6    | 20.6  | 44.3  |
| 8   | 100       | 950.8   | 733.6    | 22.5  | 48.9  |
| F   | 100       | 956.6   | 728.9    | 21.5  | 53.3  |
| D   | 100       | 958.1   | 728.9    | 24.2  | 55.8  |
| 4   | 100       | 923.7   | 600.6    | 20.0  | 49.0  |
| 7   | 100       | 910.3   | 651.3    | 12.3  | 40.8  |
| C   | 100       | 917.7   | 644.6    | 23.6  | 56.5  |
| E   | 100       | 895.3   | 645.9    | 21.7  | 54.2  |

Fig. 9 Cut-up diagram of the forged part and tensile test results

## 4. 결론

(1) Ti-6Al-4V 합금에 대하여 열간단조 공정에 관한 FE해석을 통해 정밀단조 공정설계 및 금형설계를 수행하였으며 최적의 단조 공정 및 금형 도면을 도출하였다.

(2) Ti-6Al-4V의 재료거동을 이해하고 DMM을 이용하여 안전영역에서의 소재의 변형을 제어하였고, 금형의 충진을 고려하여 금속 유동 측면과 단조품 재질 측면에서 최적화된 단조 형상의 금형을 설계할 수 있었다.

(3) 실제 단조 후 단조품의 macro-와 micro-structure를 관찰한 결과 동적재료모델에서 예측된 바와 같이 변형 결합이 발견되지 않았으며 전체적으로  $(\alpha+\beta)$  혼합조직을 보였다.

## 후기

본 사업은 경남신지식 기계설비사업의 일환으로 추진되었으며, 제품 성형에 수고해 주신 한일단조 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) Harold J. Hucek, 1985, "Aerospace Structural Metals Handbook", Publication No.4, Columbus, Ohio 43201
- (2) S.V.S Narayana Murty, 2000, "Instability criteria for hot deformation of materials", Int. Materials Reviews, Vol. 45, p.15~26.
- (3) Y.V.R.K. Prasad, 1997, "A compendium of processing maps", ASM, p. 456~458.
- (4) 임정숙, 나영상, 염종택, 박노광, 2003, "열간 단조 중 Ti-6Al-4V 재료거공과 다이 충진을 고려한 금형설계", 대한금속재료학회, 춘계학술대회, p.39.
- (5) 염종택, 김두현, 나영상, 박노광, 2001, "Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명", 한국소성가공학회, 제 10권 제 4호, p.347~354.