한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집 pp.114~117

Ti-6Al-4V 소형 날개형상의 항온단조 공정 및 금형설계

염종택*,**·박노광*·이유환**·신태진***·홍성석****·심인옥****·황상무***·이종수**

Process and die designs for isothermal forging of the small-scale Ti-6Al-4V wing shape

J.T. Yeom, N.K. Park, Y.H. Lee, T.J. Shin, S.S. Hong, I.O. Shim, S.M. Hwang and C.S. Lee

Abstract

The isothermal forging design of a Ti-6Al-4V wing shape was performed by 3D FE simulation. The design focuses on near-net shape forming by the single stage. The process variables such as the die design, pre-form shape and size, ram speed and forging temperature were investigated. The minimization of forging load and uniform strain distribution in a given forging condition were considered as main design factors. The FE simulation results for the final process design were compared with the isothermal forging tests. Finally, the modified process design for producing the uniform Ti-6Al-4V wing product without forming defects was suggested.

Key Words : Process design, Isothermal forging, Ti-6Al-4V alloy, Small-scale wing shape, 3D FE simulation

1. 서 론

일반적으로 단조성 평가는 균열생성에 대한 저항성, 유동응력, 변형속도 민감도 등에 의해 결정되는 데, 티타늄합금의 단조성은 알루미늄합금, 철 합금 등에 비해 현저히 낮고, 니켈, 코발트 합금과 유사한 것으로 알려져 있다.[1] 티타늄합금의 일반 단조조건은 변태온도, 합금조성, 최종제품의 형상 및 요구특성 등에 따라 결정되며, 주로 850°C – 1050°C 의 온도범위와 변형속도 $10^0 - 10^3 s^{-1}$ 사이에서 수행되는 것이 일반적이다. 그러나, 티타늄합금은 고온에서의 높은 유동응력과 함께 극히 제한된 공정구간(process window) 등으로 인하여 일반 열간단조로 복잡한 형상의 부품을 성형할 경우 형상 및 조직제어에 어려움이 많고, 특히 금형과 소재사이의 마찰과 die chilling 효과에 의한 소재표면과 중심의 온도 불균일에 기인하여 전단밴드, 내부 및 표면균열 등의 성형결함을 일으키는 것으로 알려져 있다.[2] 또한, 단조설비의 용량이 상대적으로 커야 하며 다단계 공정이 필요하기 때문에 제품 생산단가는 상대적으로 높아지게 된다. 따라서, 금형온도를 단조재 온도 부근까지 가열하는 열간 다이단조(Hot die forging) 및 항온단조(isothermal forging) 등의 정밀단조기술이 난성형 소재에서 주요관심사로 대두되어 왔다. 이러한 정밀단조의 주요 특징으로는 금형냉각, 단열가열 효과가 없기 때문에 단조조건의 재현성이 높아 조직 및 기계적 성질에 대한 관리가 용이하며, 단조하중이 일반단조에 비해 적게 요구되는 장점을 가진다. 그러나, 항온단조공정은 고온에서 견딜 수 있는 고가의 금형재질과 함께 항온 유지를 위한 가열시스템 등의 관련설비에 많은 투자비가 요구되고 있어 Near Net Shaping 또는 Net Shaping을 통한 공정최소화에 의해 재료비 및 후 가공비

* 한국기계연구원, 공정연구부
** 포항공과대학교, 신소재공학과
*** 포항공과대학교, 기계공학과
**** 국방과학연구소, 기술연구본부

를 절감할 수 있는 기술개발이 절실히 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 3D 날개 형상에 대하여 단일공정에 의한 Near Net Shaping 항온 단조공정설계가 FEM 해석에 의해 수행되었고, 단조하중을 최소화하고 균일한 변형을 얻기 위한 금형 및 초기 빌렛(billet) 형상, 항온단조 공정조건 등을 제시하고자 하였다.

2. 항온단조 금형 및 초기빌렛 설계

2.1 3D 날개형상의 기본형상 및 해석조건

본 연구에서 항온단조공정에 활용된 3D 형상은 중량의 감소와 응력 등을 감안하여 설계된 실제 날개 flame 의 중요부분을 현재 본 연구에 활용하고자 하는 800 톤 유압프레스의 제한된 용량과 단조시 금속유동을 고려하여 축소한 형상으로 그림 1 에 나타내었다.

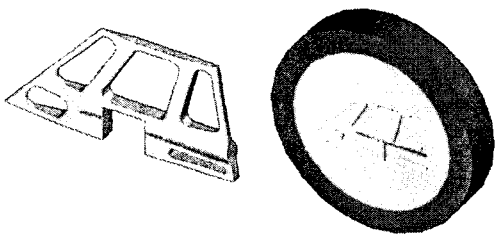

Fig. 1 3D solid and die models for Ti64 wing-shape

이러한 Ti64 3D 날개형상에 대한 기본도면을 기초로 하여 초기금형형상을 모델링하였고, FE 항온단조공정해석은 상용 DEFORM-3D 를 이용하여 수행하였다. 이때 초기빌렛 형상 및 크기, 금형 및 공정설계는 단조작업의 용이성, 단조하중, 변형의 균일성 등을 기초로 이루어 졌다. FE 항온단조 공정해석은 강소성(rigid-plastic)으로 가정하여 해석하였고, 항온단조임을 감안하여 금형 및 빌렛 모두 970°C 로 설정하였으나 변형시 발생되는 변형열은 해석에 반영되었다. 또한 항온단조속도는 5mm/s 로 가정하였고, 해석에 사용된 마찰계수와 계면열전달계수는 실제 실험으로부터 얻어진 0.3 과 3kW/m^2°C 를 적용하였다.

2.2 금형 및 초기빌렛 형상설계

초기금형형상을 토대로 그림 2 와 같은 3 가지 형태의 초기 빌렛형상에 따라 FE 해석을 수행하였다. 그 결과 직사각형 형태(그림 2(c))는 최대하중이 ~3000 톤 이상으로 나타났으며, 특히 위쪽 중심의 flame 부위에 변형이 집중(최대 유효 변형률 약 4.0)되어 그 부위에 균열 및 성형결함 등이 발생될 수 있는 것으로 해석되었다. 그림 2(a)의 형태는 과도한 하중증가(최대하중 약 920 톤)와 변형집중현상 등은 개선되었으나(최대 유효 변형률 ~1.2), 그림 2(b)형태(최대하중 약 970 톤)와 비교시 최대하중의 차이가 거의 나타나지 않았으며, 이는 초기 빌렛의 가공을 최소화할 수 있는 그림 2(b)의 형태가 유리함을 의미한다.

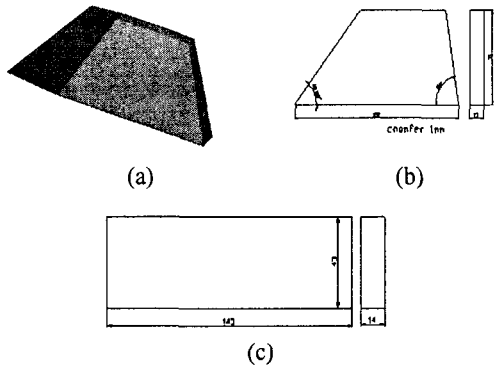

Fig. 2 Some initial billet types for Ti64 wing-shape

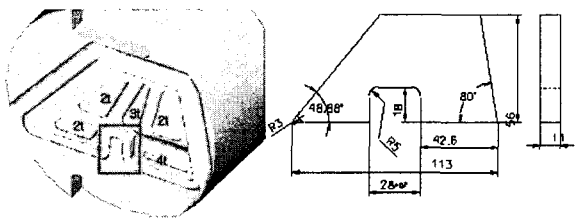

Fig. 3 Modified die and initial billet designs

한편, 급격한 하중증가는 과도한 flash 의 양이 원인이 된 것으로 이에 따라 변형집중이 일어난 것으로 판단된다. 따라서 성형하중 및 변형집중을 최소화하기 위해서는 플래시의 양을 줄여 하중을 낮추고, 응력집중에 의한 과도한 변형을 개선하기 위한 금형 및 초기빌렛 설계가 요구된다. 그림 3 은 여러 차례에 걸쳐 수정된 초기빌렛과 금형의 Solid 모델을 나타낸 것으로, 금형형상에서 오른쪽에 나타낸 숫자는 각 flash 의 두께를 의미하며, 주로 금형의 수정은 flash 의 두께와 폭의 최적화에 중점을 두고 수정하였다. 또한 사각테두리로 표시된 flash 부위는 시편을 정확한 위치에 안착시키기 위해서 고안된 설계이다.

3. 시험단조 및 항온단조설계 개선

금형과 소재의 온도를 동일하게 유지하는 항온단조에 앞서 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 열간단조시 미충진 및 성형결함 문제 등을 검토하기 위해서 열간단조에 의한 시험단조를 수행하였다. 금형과 초기빌렛은 그림 3 에 제시된 설계를 기초로 제작하였고, 초기빌렛은 가열시 산화방지를 위해 glass 코팅을 실시하였으며, Alloy718 로 제작된 상하부 금형에는 이형재 역할로 Boron Nitride(BN)를 도포하였다. 열간 시험단조는 5mm/s 이하의 속도로 금형온도는 700°C, 빌렛온도는 970°C 로 설정하여 시험하였다. 또한 단계별 성형거동을 이해하기 위해 성형하중을 200 톤과 400 톤이 걸리는 시점에서 시험을 중단하고 그때의 시험편형상을 관찰하였다. 그림 4 는 400 톤까지의 단조하중으로 열간 시험단조한 후 시험편의 외관을 관찰한 결과이다.

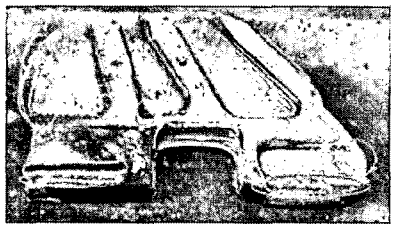

Fig. 4 Forged product processed by the preliminary hot-forging

사진에서 관찰되는 바와 같이 여러 군데에서 미충진된 부위가 발생하고 있으며, 국부적인 과도한 소성변형의 흔적이 발견된다. 또한 균열 및 lap 등의 성형결함으로 발전할 수 있는 부위들이 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서, 미충진, 과도한 소성변형 문제를 해결하기 위해서 각 모서리 및 각진 부위에 대한 R3 이상의 rounding 을 부가하여 금형을 수정하였다. 또한 부족한 소재를 채우기 위해 초기 빌렛의 단면적을 최대한으로 넓게 변경하여 성형하중을 최대한 감소시키고 변형량분포가 균일하게 되도록 수정하였다. 그러나, 수정된 금형 및 초기빌렛을 통해 열간단조를 수행할 경우 여전히 미충진부위와 과도한 변형의 흔적을 발견할 수 있었으며, 특히 성형하중의 부족으로 인해 원하는 형상을 구현하기가 어려운 것을 확인 할 수 있었다.

4. 항온단조 공정해석 및 실험

4.1 항온단조 공정해석

실제 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조에 앞서 FE 성형해석을 통해 성형성 및 성형하중 등을 검토하였고, 항온단조조건은 표 1 에 요약하였다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 항온단조온도는 850°C 를 선정하였으며, 이것은 기 보고된 논문[3]에서 제시된 Ti-6Al-4V 합금의 최적 성형온도조건을 기준으로 한 것이다.

Table 1 Conditions of isothermal forging simulation

Moving distance	Temp.	Flash thickness	Ram speed
11.2mm	850°C	1.5-3mm	1-2mm/sec

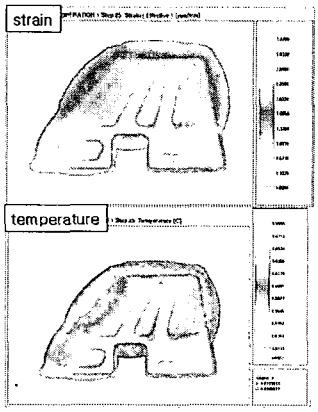

Fig. 5 Strain and temperature distributions of isothermal forging FE simulation

그림 5 는 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조해석으로부터 얻어진 변형량 및 온도분포와 하중곡선을 나타낸 것이다. 변형량 분포에서 알 수 있는 바와 같이 균일변형에 의해 성형이 진행되는 것을 확인할 수 있으며, 온도 또한 일부 flash 생성부위를 제외하고 균일한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 해석상에 나타난 성형 최대하중이 700 톤 정도로 나타나 800 톤 유압프레스에서 성형이 가능한 것으로 해석되었다.

4.2 3D 날개형상의 항온단조 및 조직분석

FE 항온단조해석을 토대로 실제 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조를 수행하였으며, 금형에 이형재인 BN 을 도포하고, glass 코팅된 소재를 안착

한 후 진공분위기에서 850℃ 로 가열하여 성형을 수행하였다. 그림 6 은 항온단조에 의해서 얻어진 Ti-6Al-4V 3D 날개형상에 대한 성형품사진을 나타낸 것이다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 성형품의 표면상태가 상당히 양호하며, 미충진부위 및 과도 변형집중이 없이 성형된 것을 관찰할 수 있다.

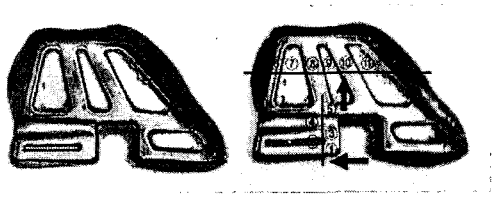

Fig. 6 Forged product processed by the isothermal forging

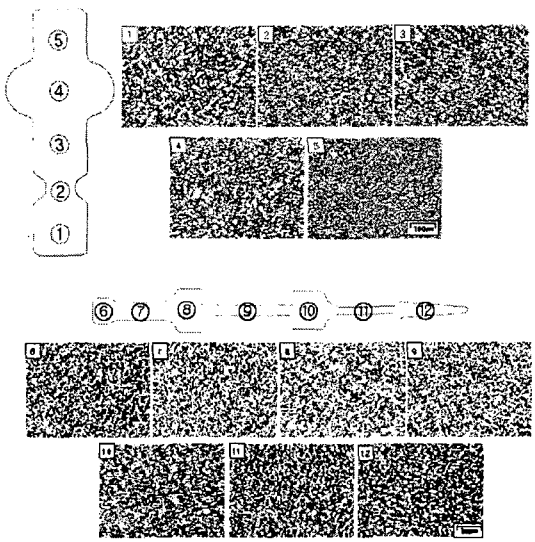

Fig. 7 Microstructures observed from different positions in isothermal forged Ti64 product

그림 7 은 그림 6 에 나타낸 성형품의 절단위치의 방향별로 절단한 후 부위별 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 각 부위별 미세조직의 변화 없이 균일한 조직을 나타내고 있으며, 초정 α상과 함께 변태된 β상으로 구성된 전형적인 (α+β) structure 를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 7 에 제시된 항온단조품의 절단면 부위에 대한 FE 해석결과를 좀더 자세히 살펴 본 결과, 온도분포는 850~860℃ 정도로 변형열에 의한 최대 온도상승이 약 10℃ 정도로 균일하며, 유효변형량에 있어서는 0.3 ~1.5 정도로 부위별로 다소 차이를 보이고는 있으나, 대부분 flash 생성 부위인 끝단에 변형이 집중되어 있고 중심부위의 변형률은 0.5 이하로 균일한 것으로 해석되었다. 이러한 해석결과는 미세조직관찰 결과에서 보여진 전체적으로 균일한 (α+β) structure 의 결과를 잘 반영하는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 소형 날개형상에 대한 항온단조 금형 및 공정설계가 3D FE 해석과 함께 수행되었고, 단조하중의 최소화와 균일 변형량분포를 얻기 위한 여러 금형설계, 초기빌렛형상 및 크기, 단조조건 등의 영향을 조사하였다. 공정설계 변수 중 금형의 flash 두께 및 폭과 함께 초기 빌렛형상과 크기는 하중의 증가와 균일 변형량분포를 얻기 위해서 상당히 중요한 변수임을 알 수 있었고, 주어진 단조설비 및 환경에서 이들 변수를 최적화한 공정설계와 항온성형품의 외관검사 및 부위별 미세조직 관찰결과와의 비교를 통해 소형 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온성형이 성공적으로 이루어 졌음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원과 2003 년도 국가지정연구실사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 아울러 항온단조 시뮬레이션 및 조직관찰에 도움을 준 임정숙, 심인규 연구원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) 박노광, 1992, "Ti 합금 정밀성형", 기계와 재료, 제 4 권, 제 2 호, pp. 103-114

(2) G.K. Turnbull, 1982, Titanium and Titanium alloy-Source Book, ASM, pp. 265-

(3) 염종택, 심인규, 박노광, 홍성석, 심인옥, 2003, "동적재료모델을 활용한 열간 후방압출된 Ti64 튜브의 성형결함 해석," 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 6 호, pp.566-571