

Ti-6Al-4V 합금 3D 날개형상의 항온단조 공정설계

염종택[#]· 박노광¹· 이유환²· 신태진³· 홍성석⁴· 심인옥⁴· 황상무³· 이종수²

Process Design of Isothermal Forging for Three-Dimensional 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, C. S. Lee

(Received December, 8, 2004)

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 main design priorities were to minimize forging loads and to distribute strain uniformly in a given forging condition. The FE simulation results for the final process design were compared with the isothermal forging tests. The instability of deformation was evaluated using a processing map based on the dynamic materials model(DMM), including flow stability criteria. Finally, a modified process design for producing a uniform Ti-6Al-4V wing product without forming defects was suggested.

Key Words : Process Design, Isothermal Forging, Ti-6Al-4V Alloy, Wing Shape, 3D FE Simulation, Processing Map

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[1~2]. 티타늄합금의 일반 단조조건은 변태온도, 합금조성, 최종제품의 형상 및 요구특성 등에 따라 결정되며, 주로 850°C - 1050°C의 온도범위와 변형속도 $10^0 - 10^3 \text{s}^{-1}$ 사이에서 수행되는 것이 일반적이다. 그러나, 티타늄합금은 고온에서의 높은 유동응력과 함께 극

히 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 전단 밴드, 내부 및 표면균열 등의 성형결함을 일으키는 것으로 알려져 있다[3]. 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

1. 한국기계연구원, 공정연구부
2. 포항공과대학교, 신소재공학과
3. 포항공과대학교, 기계공학과
4. 국방과학연구소, 기술연구본부
교신저자: 한국기계연구원, 공정연구부
E-mail: yjt96@kmail.kimm.re.kr

소재에서 주요관심사로 대두되어 왔다. 이러한 정밀단조의 주요 특징으로는 금형냉각, 단열가열 효과가 없기 때문에 단조조건이 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 Shaping 을 통한 공정최소화에 의해 재료비 및 후 가공비를 절감할 수 있는 기술개발이 절실히 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 3D 날개형상에 대하여 단일공정에 의한 Near Net Shaping 항온단조공정설계가 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 Ti-6Al-4V 합금의 항온단조공정에 활용하고자 하는 3D 형상은 중량의 감소와 응력등을 감안하여 설계된 실제 날개 flame 의 중요부분을 현재 본 연구에 활용하고자 하는 800 톤 유압프레스의 제한된 용량과 단조시 금속유동을 고려하여 축소한 형상으로 Fig. 1 에 나타내었다.

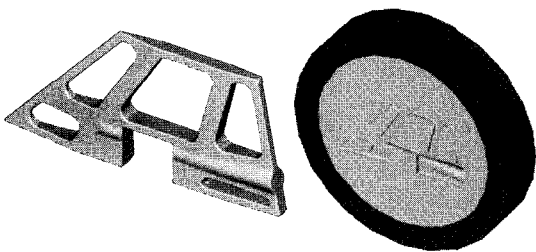


Fig. 1 3D solid and die models for Ti-6Al-4V wing-shape

이러한 Ti-6Al-4V 3D 날개형상에 대한 기본도면을 기초로 하여 초기금형형상을 모델링하였고, FE 항온단조공정해석은 상용 소성가공 전용 프로그램인 DEFORM-3D 를 이용하여 수행하였다. 이때 초기빌렛 형상 및 크기, 금형 및 공정설계는 단조작업의 용이성, 단조하중, 변형의 균일성 등을 기

초로 이루어 졌다. 또한 FE 항온단조 공정해석은 강소성(rigid-plastic)으로 가정하여 해석하였고, 항온단조임을 감안하여 금형 및 빌렛 모두 970°C 로 설정하였으나 변형시 발생하는 변형열은 해석에 반영하였다. 또한 항온단조속도는 5mm/s 로 가정하였고, 해석에 사용된 마찰계수와 계면열전달계수는 실제 실험으로부터 얻어진 0.3 과 3kW/m² °C 를 적용하였다[4].

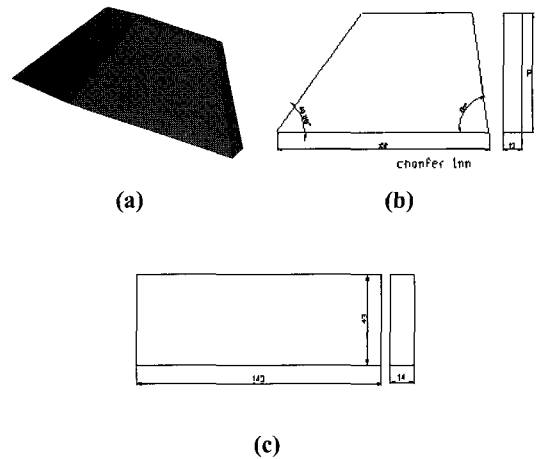


Fig. 2 Some initial billet types for Ti-6Al-4V wing-shape

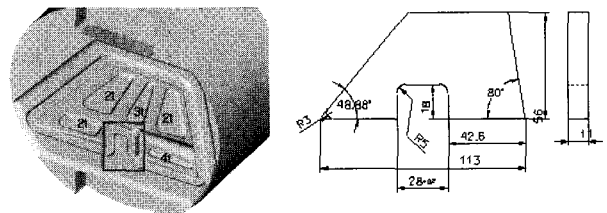


Fig. 3 Modified die and preform designs

2.2 금형 및 초기빌렛 형상설계

초기금형형상을 토대로 Fig. 2 와 같은 3 가지 형태의 초기 빌렛형상에 따라 FE 해석을 수행하였다. 그 결과 직사각형 형태(Fig. 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 발생할 수 있는 것으로 해석되었다. Fig. 2(a)의 형태는 과도한 하중증가(최대하중 약 920 톤)와 변형 집중현상 등은 개선되었으나(최대 유효 변형률 ~1.2), Fig. 2(b)형태(최대하중 약 970 톤)와 비교시 최대하

중의 차이가 거의 나타나지 않았으며, 이는 초기 빌렛의 가공을 최소화할 수 있는 Fig. 2(b)의 형태가 유리함을 의미한다.

한편, 급격한 하중증가는 과도한 플래시(flash)의 양이 원인이 되어 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. Fig. 3은 여러 차례에 걸쳐 수정된 초기빌렛과 금형의 Solid 모델을 나타낸 것으로, 금형형상에서 오른쪽에 나타난 숫자는 각 플래시의 두께를 의미하며, 주로 금형의 수정은 플래시의 두께와 폭의 최적화에 중점을 두고 수정하였다. 또한 사각테두리로 표시된 부위는 시편을 정확한 위치에 안착시키기 위해서 고안된 설계이다.

3. 시험단조 및 항온단조설계 개선

금형과 소재의 온도를 동일하게 유지하는 항온 단조에 앞서 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 열간단조시 미충진 및 성형결함 문제 등을 검토하기 위해서 열간단조에 의한 시험단조를 수행하였다. 금형과 초기빌렛은 Fig. 3에 제시된 설계를 기초로 제작하였고, 초기빌렛은 가열시 산화방지를 위해 glass 코팅을 실시하였으며, Alloy718로 제작된 상하부 금형에는 이형재 역할로 Boron Nitride(BN)를 도포하였다. 열간 시험단조는 5mm/s이하의 속도로 금형온도는 700°C, 빌렛온도는 970°C로 설정하여 시험하였다. 또한 단계별 성형거동을 이해하기 위해 성형하중을 200톤과 400톤이 걸리는 시점에서 시험을 중단하고 그때의 시험편형상을 관찰하였다. Fig. 4는 400톤까지의 단조하중으로 열간 시험단조한 후 시험편의 외관을 관찰한 결과이다.

사진에서 관찰되는 바와 같이 여러 군데에서 미충진된 부위가 발생하고 있으며, 국부적인 과도한 소성변형의 흔적이 발견된다. 또한 균열 및 lap 등의 성형결함으로 발견할 수 있는 부위들이 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위한 수정된 Ti-6Al-4V 3D날개형상과 preform형상은 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 미충진과 과도한 소성변형 문제를 해결하기 위해서 각 모서리 및 각진 부위에 대한 R3이상의 rounding을 부가하여 금형을 수정하였고, 부족한 소재를 채우기 위해 preform형상의 단면적을 최대한으로 넓게

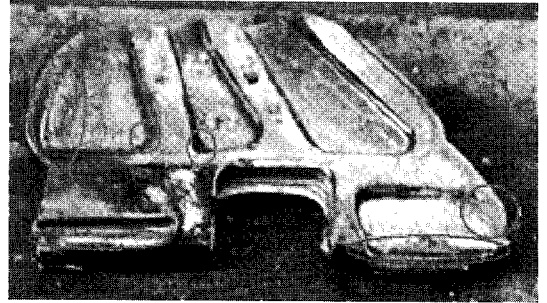
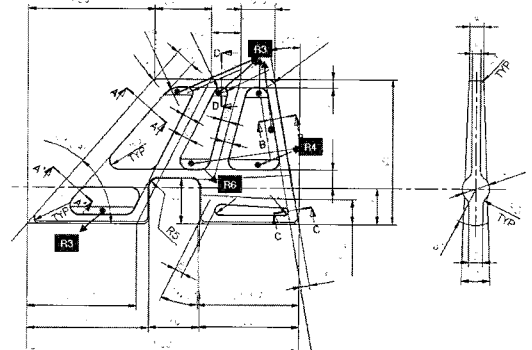
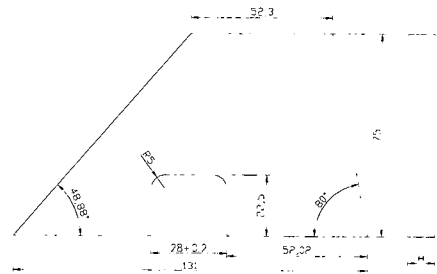


Fig. 4 Forged product processed by the preliminary hot-forging



(a) Modified 3D Ti-6Al-4V wing-shape



(b) Modified perform shape

Fig. 5 Final design for isothermal forging

변경하여 성형하중을 최대한 감소시키고 변형량 분포가 균일하게 되도록 수정하였다.

4. 항온단조공정해석 및 조직분석

4.1 항온단조 FE 해석

실제 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조에 앞서

FE 성형해석을 통해 성형성 및 성형하중 등을 검토하였고, 항온단조조건은 Table 1 에 요약하였다. Table 에서 알 수 있는 바와 같이 항온단조온도는 850°C 를 선정하였으며, 이것은 기 보고된 논문[5] 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
8.0mm	850°C	1.5-3mm	2mm/sec

항온단조는 850°C 의 온도에서 단조하중의 최소화를 감안하여 유압프레스의 제어가능 최소속도인 2mm/s 의 램속도로 가정하여 해석되었고, 마찰계수와 계면열전달계수는 금형 및 공정설계시 사용된 0.3 과 3kW/m²°C 이 각각 적용되었다.

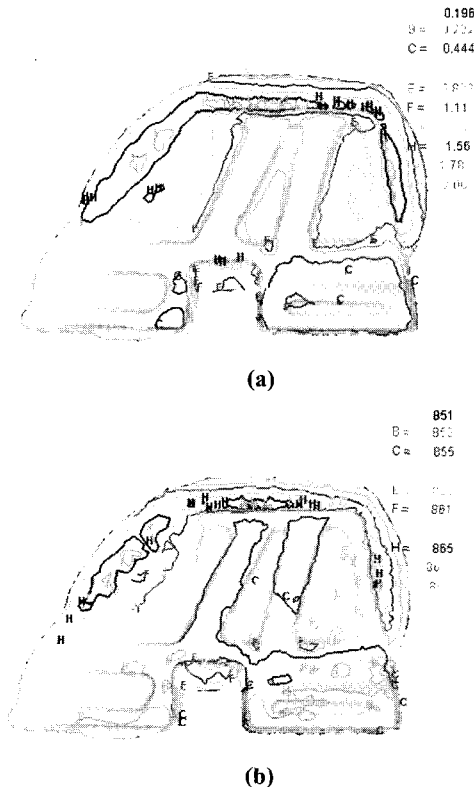


Fig. 6 Strain(a) and temperature(b) distributions of isothermal forging simulation

Fig. 6 은 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조해석으로부터 얻어진 변형량 및 온도분포를 나타낸 것이다. 변형량 분포에서 알 수 있는 바와 같이 일부 플래시 생성부위에 변형이 집중되며, 대부분 균일변형에 의해 성형이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 온도 또한 일부 플래시 생성부위를 제외하고 균일한 분포를 나타내고 있다. Fig. 7 은 항온단조공정시 stroke 에 따른 하중의 변화를 나타낸 것으로, 성형 최대하중이 658 톤 정도로 나타나 800 톤 유압프레스에서 성형이 가능한 것으로 해석되었다.

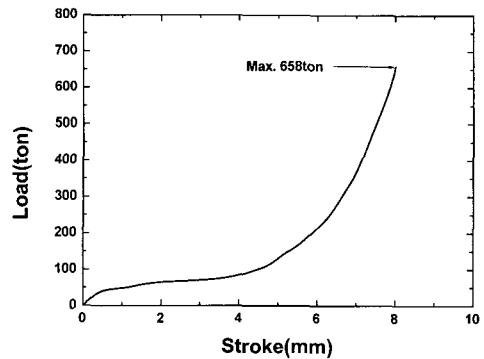


Fig. 7 Stroke vs. load curve

4.2 성형결함에측 및 평가

Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 최종설계가 성형결함이 발생되지 않는 성형안정영역에 포함되어 있는지의 여부를 판단하기 위해서 동적재료모델에 기초한 Ti-6Al-4V 합금의 변형공정지도(Processing Map)[6~7]를 이용하였다.

동적재료모델[8]은 재료의 조성적 거동, 열간 성형성 및 미세조직적 변화사이의 관계를 연계시킨 것으로 열간가공시 복잡한 재료들의 가공성, 파괴 및 유동 거동을 거시적으로 표현하기 위한 방법으로 개발되었다. 이 모델에 따르면, 가공성 또는 가공효율을 극대화하기 위해서는 가공중 외부에서 유입된 힘(power)이 열적 방출보다는 변형되는 재료의 미세조직적 변화에 소모되는 것이 유리하게 되며, 이를 정량적으로 표현하기 위해서 에너지 분산 효율(η)을 제시하였다.

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \tag{1}$$

여기서, 변형속도 민감도계수 m 은 다음과 같이 표현된다.

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right)_T = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_T \quad (2)$$

결국, 에너지 분산효율값(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미세조직변화가 가장 활발함을 의미하게 된다. 한편, 금속 유동의 안정성을 파악하기 위해 Ziegler[9] 등이 제안한 소성불안정기준을 사용하기도 하지만, 본 연구에서는 온도의존성을 고려할 수 있는 Malas 와 Seetharaman[10] 등에 의해 제안된 다음과 같은 4 가지 기준을 이용하고자 하였다.

$$0 < m \leq 1 \quad (3)$$

$$m' \left(= \frac{\partial m}{\partial (\ln \dot{\epsilon})} \right) < 0 \quad (4)$$

$$s \left(= \frac{1}{T} \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right) \geq 1 \quad (5)$$

$$s' \left(= \frac{\partial s}{\partial (\ln \dot{\epsilon})} \right) < 0 \quad (6)$$

여기서, s 는 온도민감도계수를 의미한다.

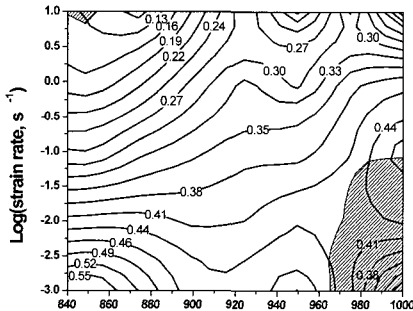


Fig. 8 Deformation process map obtained on Ti-6Al-4V alloy at a true strain of 0.9

이러한 4가지 소성안정기준들은 Liapunov function 을 기초함과 동시에 열역학 제 2법칙에 근거한 엔트로피의 개념에서 얻어진 것이다. 즉, 소성변형과 같은 비가역 공정에서는 공정중의 엔트로피

발생속도가 계속 증가해야 한다는 열역학적 이론로부터 얻어진 것으로, 특히 온도민감도계수(s)의 경우 안정변형 영역에서 유동응력의 온도 의존성이 충분히 커야 한다는 사실을 의미한다. 그러나, 만일 유동응력의 온도의존성이 너무 작을 경우 재료 내부에 국부적인 유동(flow localization)이 발생하게 된다. Fig. 8은 Ti-6Al-4V합금의 기 측정된 유동응력곡선[5]을 이용하여 진변형률이 0.9인 조건에서 변형속도와 온도에 따른 에너지 분산효율(η)과 4가지 성형안정기준을 적용한 변형공정지도(deformation processing map)를 나타낸 것이다. 변형공정지도에서 가장 높은 에너지분산효율값(~ 0.55)은 온도 850°C, 변형속도 $10^{-3} s^{-1}$ 에서 관찰되며, 이 구간이 열간성형에 최적조건임을 의미한다. 한편, 변형공정지도상에서 빗금친 부분은 소성불안정구간을 의미하며 비교적 온도가 낮은 850°C이하의 온도구간에서 변형속도가 빠른 $10^1 s^{-1}$ 조건과 함께 온도가 높고(970°C이상) 변형속도가 느린 조건($10^{-1} \sim 10^{-3} s^{-1}$ 구간)에서 관찰된다. 결국 이러한 영역에서의 소성변형의 경우 전단변형밴드, 균열생성 등과 같은 변형결함 및 국부유동에 의한 균열 등이 나타날 수 있음을 암시한다.

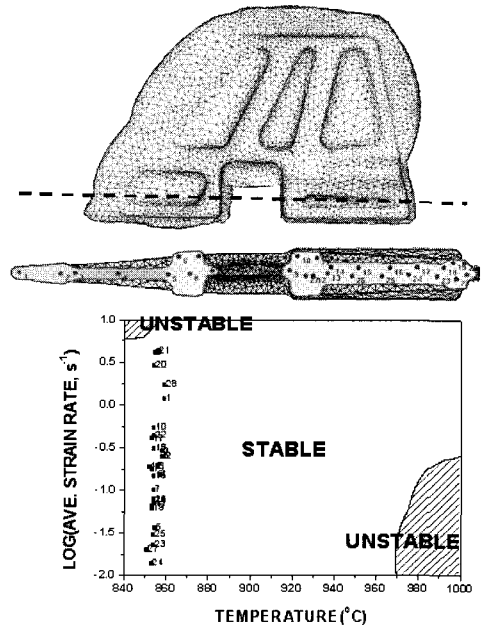


Fig. 9 Deformation processing map at a true strain of 0.9 to determine the deformation stabilities of different positions of Ti-6Al-4V 3D wing-shape

Fig. 9는 DEFORM-3D를 이용한 Ti-6Al-4V 소형 날개형상의 단조해석에서 얻어진 부품의 부위별 해석결과(평균변형속도, 온도)와 진변형률 0.9에서의 공정설계 창을 함께 나타낸 것이다. 대부분의 부위가 성형안정구간에 존재하고 있음을 관찰할 수 있으며, 이것은 진변형률 0.9이하의 조건에서 안정적으로 항온성형이 가능함을 의미한다.

4.3 3D 날개형상의 항온단조 및 조직분석

FE 항온단조해석을 토대로 실제 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 항온단조를 수행하였으며, 상하부 금형에는 이형재 역할을 하는 Boron Nitride 를 도포하였고, glass 코팅된 소재를 안착한 후 진공분위기에서 850°C 로 가열하여 성형을 수행하였다. Fig. 10 은 항온단조에 의해서 얻어진 Ti-6Al-4V 3D 날개형상에 대한 성형품 외관사진을 나타낸 것으로, 성형품의 표면상태가 상당히 양호하며, 미충진 및 과도 변형집중부위가 없이 성형된 건전한 상태의 성형품임을 관찰할 수 있다.

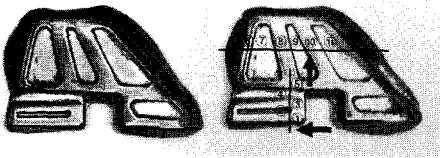


Fig.10 Forged product processed by the isothermal forging

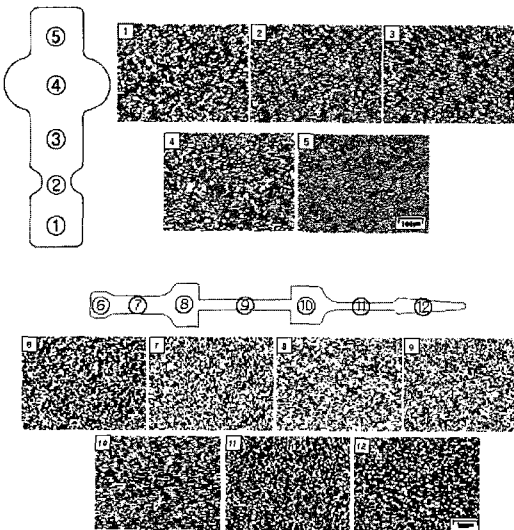


Fig.11 Microstructures observed from different positions in isothermal forged product

Fig. 11 은 Fig. 10 에서 나타낸 성형품의 절단위치에 따라 절단한 후 각 부위별 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 각 부위별 미세조직은 등축정 α 상의 크기와 분율 등이 균일하게 분포된 조직을 나타내고 있으며, 등축정 α 상과 함께 transformed β 상으로 구성된 전형적인 ($\alpha+\beta$) 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다.

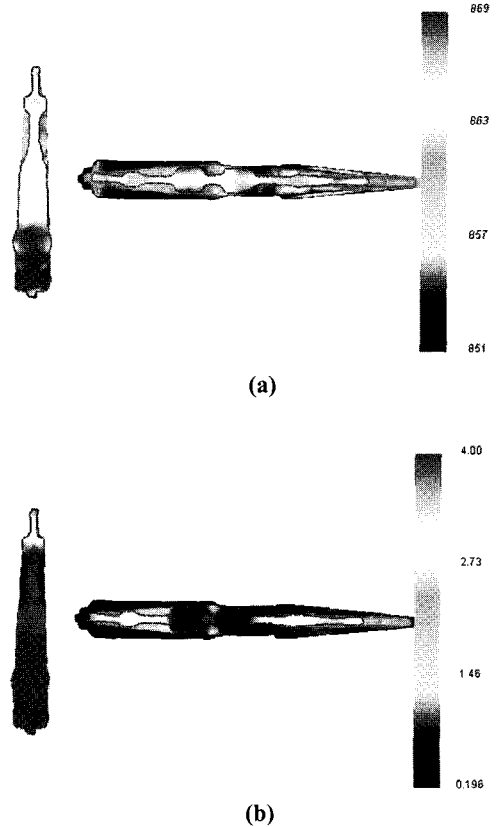


Fig.12 Temperature(a) and effective strain(b) distributions of Ti-6Al-4V 3D wing-shape

Fig. 12는 Fig. 11에 제시된 항온단조품의 미세조직 관찰부위와 동일한 위치의 온도와 변형량분포의 FE해석결과를 나타낸 것이다. 온도분포는 850~860°C정도로 변형열에 의한 최대온도상승이 약 10°C정도로 균일하며, 유효변형량에 있어서는 0.2~1.5정도로 부위별로 다소 차이를 보이고는 있으나, 대부분 플래시 생성 부위인 끝단에 변형이 집중되어 있고 중심부위의 변형량은 0.5이하로 균일한 것으로 해석되었다. 이러한 해석결과는 미세

조직관찰 결과에서 보여진 전체적으로 균일한 ($\alpha+\beta$) 조직의 결과를 잘 반영하는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 소형 날개형상에 대한 항온단조 금형 및 공정설계를 3D FE 해석과 변형공정지도를 통해 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Ti-6Al-4V 3D 소형 날개형상의 항온단조 공정 설계 변수중 금형의 플래시(flash)두께 및 폭과 함께 preform 설계는 하중의 감소와 균일 변형량분포를 얻기 위한 중요한 설계인자인 것을 확인하였다.

(2) 하중 최소화와 균일 변형량분포 측면에서 최적화된 Ti-6Al-4V 3D 소형 날개형상의 항온단조 금형 및 공정설계에 따라 FE 해석을 수행한 결과 거의 모든 부위에서 균일한 변형 및 온도분포의 FE 해석결과를 나타내었고, Ti-6Al-4V 합금의 진변형량 0.9 에서 얻어진 변형 공정 지도상에 각 부위별 해석결과를 나타낸 결과 모든 부위가 성형 안정구간에 포함되어 있었다.

(3) FE 해석결과와 실제 항온단조된 Ti-6Al-4V 성형품의 조직분석결과의 비교를 통해 표면상태의 균일성, 하중 최소화, 부위별 조직의 균일성, 성형결함 등을 검토한 결과, 성형결함이 없는 균일한 ($\alpha+\beta$) 조직임을 알 수 있었고, 결과적으로 항온단조에 의해 소형 Ti-6Al-4V 3D 날개형상의 구현이 성공적으로 이루어 졌음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원과 2003년도 국가지정연구실사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 박노광, 1992, Ti 합금 정밀성형, 기계와 재료, 제 4 권, 제 2 호, pp. 103~114.
- [2] Y. S. Na, J.T. Yeom, N. K. Park, J. Y. Lee, 2003, Prediction of microstructure evolution during high temperature blade forging of a Ni-Fe based superalloy, Alloy 718, Metals and Materials Int., Vol. 9(1), pp. 15~19.
- [3] G. K. Turnbull, 1982, Titanium and Titanium alloy-Source Book, ASM, p. 265.
- [4] 염종택, 임정숙, 박노광, 2003, Ti-6Al-4V 합금의 열간성형에 대한 계면열전달계수의 결정 및 분석, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 4 호, pp.370~375.
- [5] N. K. Park, J. T. Yeom, Y. S. Na, 2002, Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-6Al-4V using processing maps, J. Mater. Process Technol., Vol. 130-131, pp.540~545.
- [6] 염종택, 심인규, 박노광, 홍성석, 심인옥, 2003, 동적재료모델을 활용한 열간 후방압출된 Ti64 튜브의 성형결함 해석, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 6 호, pp. 566~571.
- [7] 염종택, 박노광, 이유환, 신태진, 황상무, 홍성석, 심인옥, 이종수, 2004, Ti-6Al-4V 합금의 열간 후방압출에 대한 성형 안정성평가모델의 고찰, 한국군사과학기술학회지, 제 7 권, 제 3 호 (통권 제 18 호), pp. 84~92.
- [8] Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark, D. R. Barker, 1984, Modelling of dynamic material behavior in hot deformation : Forging of Ti-6242, Metall. Trans., 15A, pp.1883~1892.
- [9] H. Ziegler, 1965, Some extremum principles in irreversible thermodynamics with application to continuum mechanics, in Prog. Solid Mech., I.N. Sneddon, and R. Hill(eds.), Vol. 4, Wiley, New York, p. 93.
- [10] J. C. Malas, V. Seetharaman, 1992, Using material behavior models to develop process control strategies, JOM, 44, pp. 8~13.