

공학석사 학위논문

증기터빈 티타늄 블레이드의 단조공정
개발에 관한 연구

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

지도교수 조 종 래

2005년 8월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

김 윤 환

本 論 文 을 김윤환의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 공학박사 왕 지 석 ㉠

위 원 공학박사 이 성 열 ㉠

위 원 공학박사 조 종 래 ㉠

2005년 7월

한국해양대학교 대학원

기계공학과 김 윤 환

목 차

ABSTRACT	i
기호설명	iii
List of Tables	iv
List of Figures	v
1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	1
1.3 연구 목적	2
2. 이론적 배경	4
2.1 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 소재특성	4
2.1.1 물리적 성질	5
2.1.2 기계적 성질	6
2.2 강소성 유한요소법	7

3. 티타늄 블레이드의 단조공정	11
3.1 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 단조특성	11
3.2 블레이드의 단조공정	13
4. 시뮬레이션	16
4.1 시뮬레이션의 개요	16
4.2 2차원 시뮬레이션	16
4.2.1 해석조건	16
4.2.2 시뮬레이션 및 해석결과	22
4.3 3차원 시뮬레이션	34
4.3.1 3차원 시뮬레이션의 개요	34
4.3.2 직접 단조법	40
4.3.3 2단계 단조법	45
4.3.4 직접 단조법과 평면 단조법의 비교	55
4.4 시뮬레이션 결과 및 고찰	60
5. 결론	61
6. 참고문헌	62

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

Yun-hwan Kim

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

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.

기 호 설 명

- σ'_{ij} : 편차 응력 텐서(deviatoric stress tensor)
- $\bar{\sigma}$: 유효응력(effective stress)
- $\bar{\epsilon}$: 유효변형률(effective strain)
- $\dot{\bar{\epsilon}}$: 유효 변형률 속도(effective strain rate)
- $\dot{\epsilon}_{ij}$: 변형률 속도 텐서(strain rate tensor)
- \mathbf{n}_j : 단위 법선벡터
- T_i : 표면력
- S_f, S_v : 표면력 및 속도가 규정된 면
- m^* : 마찰 상수
- k : 유동응력에 상응하는 전단응력($\bar{\sigma}/\sqrt{3}$, MPa)
- \vec{t} : 소재와 금형의 접촉부에서 접선 방향 벡터
- v_s : 소재와 금형의 상대 속도(mm/sec)
- v_D : 금형의 속도(mm/sec)
- $\delta\pi$: 범함수의 변분
- K_P : 벌칙함수(penalty function)

List of Tables

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V

Table 2 Comparison of properties of titanium and stainless steel

Table 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V

Table 4 Distances from root portion and area of each section

Table 5 Simulation parameters

Table 6 Preform radii at sections

Table 7 Simulation parameters of direct forging process

List of Figures

- Fig. 1 Phase diagram that predicts results of forging or heat treatment practice
- Fig. 2 Shape of forged blade
- Fig. 3 Moment and thrust loading on dies during forging
- Fig. 4 Two types blades having same cross section with different torsion
- Fig. 5 Shape of Ti-6Al-4V forged blade by flattening forging process
- Fig. 6 Shapes of each section
- Fig. 7 Flow stress with temperatures
- Fig. 8 Thermal properties of Ti-6Al-4V
- Fig. 9 Mesh shapes for FEM analysis
- Fig. 10 Temperature distributions for forging process of case 1(section A)
- Fig. 11 Temperature distributions for forging process of case 1(section B)
- Fig. 12 Temperature distributions for forging process of case 1(section C)
- Fig. 13 Temperature distributions for forging process of case 1(section D)
- Fig. 14 Temperature distributions for forging process of case 1(section E)
- Fig. 15 Temperature distributions for forging process of case 2(section A)
- Fig. 16 Temperature distributions for forging process of case 2(section B)
- Fig. 17 Temperature distributions for forging process of case 2(section C)
- Fig. 18 Temperature distributions for forging process of case 2(section D)
- Fig. 19 Temperature distributions for forging process of case 2(section E)

Fig. 20 Temperature distributions for forging process of case 3(section A)

Fig. 21 Temperature distributions for forging process of case 3(section B)

Fig. 22 Temperature distributions for forging process of case 3(section C)

Fig. 23 Temperature distributions for forging process of case 3(section D)

Fig. 24 Temperature distributions for forging process of case 3(section E)

Fig. 25 Temperature distributions for forging process of case 4(section A)

Fig. 26 Temperature distributions for forging process of case 4(section B)

Fig. 27 Temperature distributions for forging process of case 4(section C)

Fig. 28 Temperature distributions for forging process of case 4(section D)

Fig. 29 Temperature distributions for forging process of case 4(section E)

Fig. 30 Maximum and minimum temperature in the workpiece

Fig. 31 The shape of the top and bottom die for flattening forging process

Fig. 32 The shape of the top and bottom die for finishing forging process

Fig. 33 The shape of the top and bottom die for direct forging process

Fig. 34 Preform shape for two steps forging process

Fig. 35 Preform dimension for two steps forging process (unit : mm)

Fig. 36 Preform shape for direct forging process

Fig. 37 Preform dimension for direct forging process (unit : mm)

Fig. 38 Mesh shape for FEM analysis

Fig. 39 Initial position of work piece and die for direct forging process

Fig. 40 Deformation for direct forging process

- Fig. 41 Temperature distributions of direct forging process
- Fig. 42 Predicted forging load of direct forging process
- Fig. 43 Predicted thrust load of direct forging process
- Fig. 44 Mesh shape for FEM analysis
- Fig. 45 Initial position of work piece and die for flattening forging process
- Fig. 46 Deformation for flattening forging process
- Fig. 47 Temperature distributions of flattening forging process
- Fig. 48 Predicted forging load of flattening forging process
- Fig. 49 Predicted thrust load of flattening forging process
- Fig. 50 Mesh shape for FEM analysis of finishing forging process
- Fig. 51 Initial position of work piece and die for finishing forging process
- Fig. 52 Deformation for finishing forging process
- Fig. 53 Temperature distributions of finishing forging process
- Fig. 54 Predicted forging load of finishing forging process
- Fig. 55 Predicted thrust load of finishing forging process
- Fig. 56 Comparison of forging and thrust load for each forging process
- Fig. 57 Effective strain distributions of direct forging process(section C)
- Fig. 58 Effective strain distributions of flattening forging process(section C)
- Fig. 59 Temperature distributions of direct forging process(section C)
- Fig. 60 Temperature distributions of flattening forging process(section C)

1. 서론

1.1 연구 배경

터빈 블레이드는 열효율 증대를 위하여 요구되는 발전소의 가혹한 운전 조건에 적합하고, 수명이 긴 고품질의 재질이 요구되고 있다. 이에 따라 수입 단가의 상승과 납기 지연이 야기되므로 이러한 문제점을 해소하기 위하여 국산화가 절실하다. 이를 위하여 경량이고 고강도인 티타늄 합금(titanium alloy)을 이용한 블레이드의 단조 공정 개발이 필요하다.

국내에서는 보통 각재(bar stock)를 밀링기계에서 가공하여 블레이드를 제작하고 있으나 이러한 방법은 설비투자와 절삭시간 등이 많이 소요되므로 단조 공정으로의 공법전환이 이루어지고 있다. 따라서 블레이드의 생산을 위한 단조 공정 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 단조(finish forging)작업에서는 높은 변형응력 때문에 성형을 하기 위해 큰 힘이 필요하다. 따라서 치수 정밀도를 높이고, 보다 적은 성형하중으로 블레이드를 제작할 수 있는 단조 공정개발이 필요하다.

1.2 연구 동향

외국의 선진 발전 설비 전문 업체에서는 1950년대부터 발전소의 열효율 향상을 위하여 저압 터빈의 마지막 단과 그 앞 단에 대하여 소재를 12%Cr 강에서 경량이고 부식 저항성이 우수한 티타늄 합금으로 변경시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 현재는 널리 실용화되고 있는 추세이다. 그리고 최

근에는 컴퓨터와 수치기법의 급속한 발전에 힘입어 컴퓨터를 이용한 공정설계 및 금형설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Aksenov[3]는 slip-line법으로 터빈 블레이드의 성형공정을 해석하였으며, Akgerman[4]등은 경험적 지식, 문헌 등의 재고찰로 수립된 설계규칙과 초등 해석법(slap method)을 이용하여 터빈 블레이드와 컴프레서 블레이드의 자동 설계와 제작을 위한 CAD/CAM 시스템인 “BLDFORG”를 개발하였다.

Kobayashi[5]등은 다단계 금속 성형 공정 설계의 가장 중요한 사항중의 하나인 예비 성형체(preform) 설계를 위하여 유한요소법에 역추적기법(backward tracing scheme)을 도입, 셸 노우징(shell nosing) 공정을 설계하였다. 이후 평면 변형 압연[6], 링 압연[8], 및 헤딩(heading) 공정[9]등의 예비 성형체 설계에 역추적기법이 포함된 유한요소법 이용되었다. 특히 Kang[10]등은 플래쉬가 없는 블레이드의 밀폐형 단조공정 설계를 위하여 역추적기법을 사용하여 소재의 초기 단조위치 및 형상을 결정하였다.

Choi[11, 12]는 블레이드 단조공정 설계에 필요한 블레이드 단조도면 작성, 단조 금형 설계, 예비형상치수 결정, 예비형상의 위치 선정, 축력을 최소화하는 금형각 선정, 하중 예측 등을 할 수 있는 것을 목표로 통합된 시스템을 개발하였다.

이는 컴퓨터 시뮬레이션을 토대로 한 동시공학적 설계로 기존의 경험과 기하학적 접근을 토대로 한 설계에서 올 수 있는 시행착오를 최대한 줄이며, 설계비용과 시행착오에 따른 비용손실을 최소화하고, 또한 정량적 설계기법의 데이터 베이스로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

1.3 연구 목적

현재 국내에서 사용되고 있는 증기터빈 블레이드는 12%Cr 스테인레스강(STS 430 등) 재질로 제작되고 있는데 티타늄 블레이드로의 교체가 필요한 이유는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 발전소의 열효율을 향상시키고,

발전 용량을 극대화시키기 위한 목적으로 이러한 터빈에는 기존의 블레이드보다 길이가 긴 것이 필요하다. 이러한 조건에 12%Cr 스테인레스강을 사용하는 경우 블레이드의 중량 증가에 따른 원심력의 증가로 블레이드에 과도한 응력이 걸리는 문제가 발생되므로 소재의 질량이 기존의 12%Cr 스테인레스강의 60% 수준인 티타늄 합금 소재를 채택함으로써 길이는 길지만 원심력은 기존 소재와 유사한 상태로 유지할 수 있는 방법이다. 둘째는 발전소 저압 터빈의 과증기에서 습증기로 변하는 경계에서 응축된 수분에 의한 부식을 방지하기 위한 목적으로 채택되는데 이러한 블레이드의 부식 피로는 발전소 강제 정지의 큰 원인이 되고 있다. 이러한 경우 부식 피로에 대한 저항성이 우수한 티타늄 블레이드를 채택함으로써 발전소의 안정적인 운전에 큰 기여를 하게 된다.

최근에는 티타늄 합금이나 초합금(superalloy)을 재료로 많은 구조 부품 등을 등온 혹은 열간 상태로 단조함에 있어서 컴퓨터를 이용한 단조공정의 합리적인 설계에 많은 노력을 기울이고 있다. 예를 들면 블레이드의 열간 및 등온 단조 중에 생기는 결함, 즉 일정 방향으로 재료가 겹쳐 생기는 랩(lap), 재료표면이나 내부에 발생하는 전단띠(shear band), 금형에 다 차지 않는 미성형(underfill) 등을 단조해석 컴퓨터 프로그램의 해석결과에 의하여 방지할 수 있고, 더 나아가 정형단조(net shape)와 근사정형단조(near net shape)를 실현함으로써 생산비의 절감과 품질의 우수함을 이루어 가고 있다.

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

2. 이론적 배경

2.1 티타늄 합금(Ti-6Al-V)의 소재 특성

티타늄은 제련이 어렵고 용점이 높으며, 제작 단가가 비싸기 때문에 생산성 및 활용도는 강이나 알루미늄 합금에 비하여 낮은 편이다. 그러나 티타늄 합금은 비중이 약 4.5로 강의 60%정도로 가벼우며 비강도, 내열성 및 내식성이 우수하여 우주 항공용, 의료용 생체재료 등 여러 분야에서 응용되고 있다.

특히, 실용 합금으로 널리 알려져 있는 Ti-6Al-4V 합금은 대표적인 $\alpha + \beta$ 상 티타늄 합금으로서, 합금을 구성하는 합금원소와 더불어 미세조직의 형상 및 분포에 의하여 기계적 특성이 변하는 것으로 알려져 있다.

티타늄 합금은 그 조성원소의 무게비에 따라 오늘날 약 30종류가 사용되고 있으며, 상온에서의 안정성에 따라 미세구조가 크게 3가지, 즉 α , β , $\alpha + \beta$ 구조로 구분된다. α 조직은 용접성이 우수하나 경화성이 낮고 강도는 중간정도이며 고온강도 및 크립성이 좋다. β 조직은 열처리에 의한 경화성이 좋으며 강도와 상온 가공성 및 크립성이 좋다. $\alpha + \beta$ 조직은 용접성이 좋고 열처리에 의한 경화성이 비교적 좋다. 강도와 가공성은 좋으나 크립성은 낮다.

Table 1은 Ti-6Al-4V의 화학성분 조성이다.

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V

Compositions, wt.%					
Al	V	Fe	O	N	Ti
6.362	4.235	0.169	0.186	0.008	89

2.1.1 물리적 성질

티타늄 합금의 개략적인 물리적 성질은 다음과 같다

- (1) 가볍다(강의 약 60%).
- (2) 용융점이 높다(약 1668℃).
- (3) 열팽창 계수가 작다(스테인레스강의 약 50%).
- (4) 열전도율이 작다(스테인레스강의 약 50%).
- (5) 전기저항이 크다.
- (6) 탄성계수가 작다(강의 약 50%).

Table 2 는 티타늄과 스테인레스강의 물리적 성질을 비교한 것이다.

Table 2 Comparison of properties of titanium and stainless steel [13]

	Titanium	Ti-6Al-4V	Stainless steel
Specific gravity	4.51	4.43	7.9
Melting point (°C)	1668	1540~1650	1400~1427
Young's modulus (GPa)	105.91	113.76	199.07
Specific electric resistance ($\mu\Omega$ -cm)	55	171	72
Thermal conductivity (W/m/K)	171.6	7	13
Coefficient of thermal expansion (1/°C)	8.4×10^{-6}	8.8×10^{-6}	16.5×10^{-6}
Specific heat (J/kg/k)	519.16	565.22	498.22

2.1.2 기계적 성질

티타늄의 비중은 스테인레스 강의 약 60%인데 구조재료로써 사용하는 경우 이들 금속 재료의 절반의 중량이 된다. 또한 강도에 있어서 공업용 순 티타늄은 스테인레스 강에 상당하고 티타늄 합금에서는 특수강 이상의 강도를 가지고 있다. 이 때문에 비강도가 높고 특히 티타늄 합금의 비강도는 약 500℃까지 실용 금속 중에서 가장 높은 값을 보인다.

티타늄 합금은 내력/인장강도의 비가 0.9~0.95로 높은 값을 가지고 있다. 재료 선정의 기준으로 인장강도의 크기보다도 내력을 고려하는 것이 많기 때문에 이 점에서도 티타늄은 유리한 재료이다.

피로강도에 있어서도 뛰어나다. 피로비(피로강도/인장강도)는 강의 경우에는 0.2~0.3인데 비하여 티타늄 합금은 0.5~0.6 정도의 값을 보인다. 노치 결함에 있어서도 민감하지 않다고 알려져 있다.

공업용 순 티타늄은 상온보다도 오히려 저온에서 인성을 가지고 있다. 또한 티타늄 합금도 강에서 나타나는 것과 같은 저온에 있어서 급격한 취화현상을 보이지 않는 뛰어난 충격성질을 가지고 있다.

Table 3에 Ti-6Al-4V의 일반적 물성치를 표시하였다.

Table 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V [2]

Young's modulus	110
Shear modulus(GPa)	42
Ultimate strength(MPa)	960
Yield strength(MPa)	900
Elongation(%)	17

2.2 강소성 유한요소법

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(finite element)로 나누어서 각 절점의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분원리(variational principle), 가중잔류법(method of weighted residual), 에너지 균형법(energy balance approach)등을 이용하여 세우고 이것을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다.

유한요소법을 이용한 금속성형 방법에는 탄소성 해석(elastic-plastic analysis), 강소성 해석(rigid-plastic analysis), 유효 변형률 속도를 고려하여 열간 가공 해석에 이용할 수 있는 점소성 해석(viscoplastic analysis)등이 있는데 탄소성 해법은 비교적 정확한 응력과 변형양상을 얻을 수 있지만 매 변형단계마다 요소가 항복상태에 도달하였는지 검사해야 하며 비정상상태의 문제 해석시 변형증분량을 한꺼번에 많이 늘릴 수 없는 단점이 있다. 그래서 탄성 변형량이 소성 변형량보다 무시 할 만큼의 단조나 압출과 같은 소성문제에는 강소성 해법이 쓰인다. 이 방법은 벌크 성형 해석에 있어서 뛰어난 해석 정확도와 계산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다.

소재가 열간 변형을 거치는 동안 온도, 변형률, 변형률 속도, 유지 시간 등의 공정 변수들이 미세조직의 변화에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고 최적의 공정 변수값을 찾기 위해서는 수치 해석적인 방법이 가장 효율적이며 기계적 변수들과 미세조직과의 상관관계를 파악하기 위해 강소성 유한요소법의 이용이 요구된다.

강소성 유한 요소의 수식화에서는 다음과 같은 가정을 따른다.

- (1) 재료는 강소성체이고, 탄성 변형은 무시한다.
- (2) 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 무시하며, 가공 후에도 등방성(isotropic)을 유지한다.

- (3) 재료는 변형동안 체적 일정조건을 따른다.
- (4) 재료는 von Mises 항복조건을 따른다.
- (5) 다이는 강체이며, 변형하지 않는다.

체적이 V 인 연속에는 접촉력 T_i 가 정의된 표면 S_f 와 속도 v 가 정의된 표면 S_v 로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 이 물체가 준정적상태에서 미소변형(infinitesimal deformation)을 일으키고 관성의 효과와 체적력을 무시하면 실제 응력과 속도장은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

(i) 평형 방정식(equilibrium equation)

$$\sigma_{ij,i} = 0 \tag{2.1}$$

(ii) 적합 방정식(compatibility equation)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \tag{2.2}$$

$$\text{비압축성 조건 : } \epsilon_{i,i} = \dot{\epsilon}_v = 0 \tag{2.3}$$

(iii) 구성 방정식(constitutive equation)

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \tag{2.4}$$

여기서

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \tag{2.5}$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \tag{2.6}$$

σ_{ij}' 은 편차 응력이며, $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 은 유효 응력과 유효 변형률 속도이다.

(iv) 경계조건(boundary condition)

$$\sigma_{ij}n_j = T_i \quad \text{on } S_f \quad (2.7)$$

$$v_i = U_i \quad \text{on } S_v \quad (2.8)$$

여기서 n_j 는 표면에서의 단위 법선벡터이다.

금형과 소재간의 마찰을 고려하기 위하여 다음 식을 적용하였다.

$$f = -\frac{2}{\pi}m^*k\left[\tan^{-1}\frac{|v_s|}{u_0}\right]\vec{t} \quad (2.9)$$

여기서 m^* 은 마찰 상수, k 는 전단응력, u_0 는 $|v_s|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이고, v_s 는 금형에 대한 소재의 상대 속도이며, \vec{t} 는 v_s 방향의 단위벡터이며 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{t} = \frac{1}{v_s} [u\vec{i} + (v - v_d)\vec{j}] \quad (2.10)$$

여기서 v_d 는 금형의 속도이며 v_s 는 속도의 크기로서 다음과 같다.

$$v_s = \sqrt{u^2 + (v - v_d)^2} \quad (2.11)$$

적합 방정식 (2.2)와 경계조건 (2.9)에 의해 함수는 가상일의 원리를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV - \int_{S_f} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (2.12)$$

비압축성 조건으로 문제를 해결하기 위해 벌칙함수를 도입한 범함수(π)의 변분은 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + K_p \int_V \epsilon_V \delta\epsilon_V dV - \int_{S_f} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (2.13)$$

벌칙 상수는 $K_p = \frac{\sigma_m}{\epsilon_v}$ 로 표현되며 매우 큰 수이다.

체적 V 에서 식 (2.13)을 각각의 요소에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

여기서 m 은 요소를 나타낸다.

$$\delta\pi^{(m)} = \int_{V^{(m)}} \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + K_p \int_{V^{(m)}} \epsilon_V \delta\dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_f^{(m)}} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (2.14)$$

식 (2.14)를 절점 속도 v_α 에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\pi = \partial \frac{\pi}{\partial v_\alpha} \delta v_\alpha = 0 \quad (2.15)$$

3. 티타늄 블레이드의 단조공정

3.1 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 단조특성

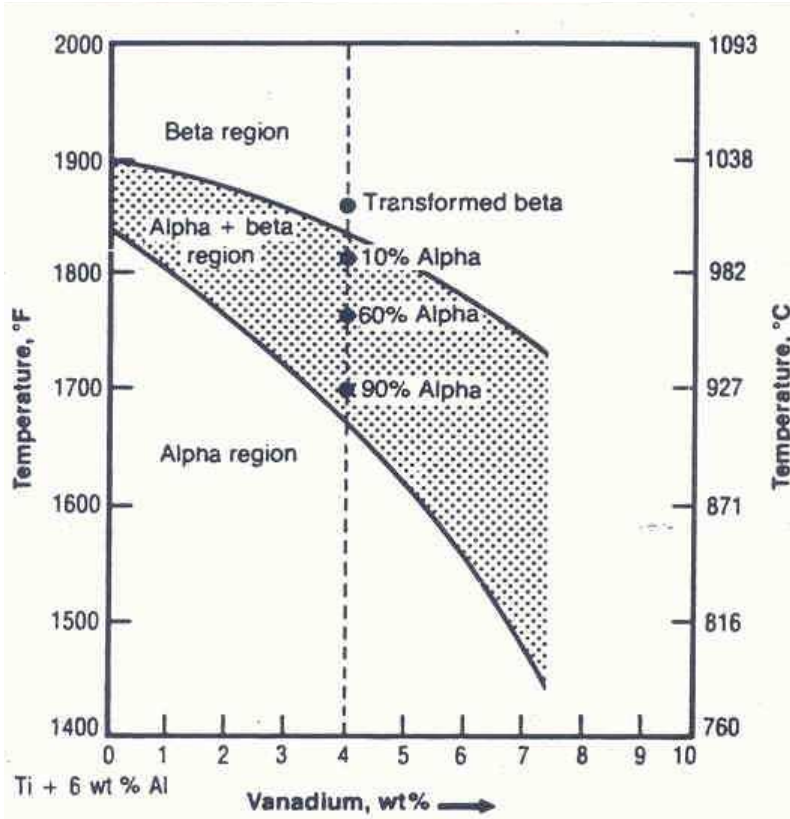


Fig. 1 Phase diagram that predicts results of forging or heat treatment practice [14]

Ti-6Al-4V의 단조특성은 제조 공정에 크게 지배를 받는다. Fig. 1은 바나듐 (Vanadium)의 함량에 따른 Ti-6Al의 평형 상태도이다. 소재 특성은 열간 단조가 β 범위에서 행하여 졌는가, 혹은 그 이하의 온도인 $\alpha + \beta$ 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 β 영역에서 행하여 질 때는 침상구조(acicular structure)가 얻어지는 경향이 있다.

티타늄 합금의 단조시에는 온도와 변형이력에 따른 미세조직의 크기와 형상에 따라 기계적 성질이 변하고, 단조시에도 수차례 예비성형(prefforming)과 블록킹(blocking) 공정이 필요하므로 단조비용의 상승 원인이 된다. 티타늄 합금으로 우수한 소성변형을 얻기 위해 고온에서 열간단조나 등은 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 β 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. 따라서 2차원 시뮬레이션의 단조 온도를 880°C와 900°C로 설정하여 그 결과를 비교하였다.

3.2 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. 2 는 단조된 블레이드의 형상이다. 그림과 같이 길이 1016mm의 블레이드는 길이 방향으로 비틀려 있기 때문에 단조시 정밀단조에 어려움이 있다. Fig. 3에 길이방향으로 비틀린 블레이드를 단조할 때 다이에 미치는 축력(F_x , F_y)와 모멘트(M_x , M_y , M_z) 하중을 보여주고 있다. 모멘트 M_x , M_y 는 각각 축력 F_x , F_y 에 의해 생기고, 모멘트 M_z 는 축력 F_x 와 F_y 에 의해 주어진다. 소재를 변형시키기 위해서 해머의 최대 에너지를 사용하기 위해서는 가능한 한 축력과 모멘트를 허용하지 않는 것이 중요하다. 블레이드는 얇고 긴 형상이기 때문에, 모멘트 M_x , M_y 는 모멘트 M_z 에 비하여 무시될 수 있고, 결국 가능한 한 작은 모멘트 M_z 를 가지는 단조 방법을 찾아야 한다.

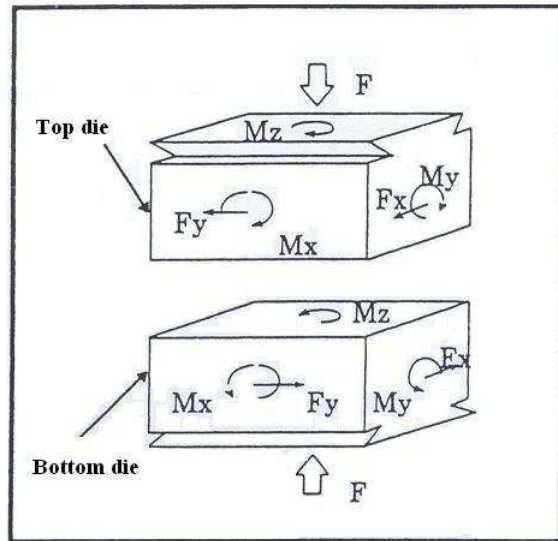


Fig. 3 Moment and thrust loading on dies during forging

그래서 본 연구에서는 블레이드를 첫 번째 단계로 비틀림 없이 중간 단계의 형상을 만들고, 두 번째 단계로 비틀린 형상의 최종 단계로 성형하는 과정을 수행하였다. 이후에는 전자를 평면단조(flattening forging), 후자를 마무리 단조(finishing forging)이라 한다.

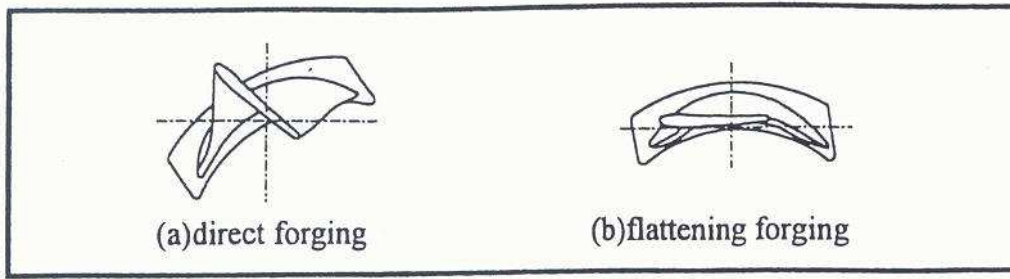


Fig. 4 Two types blades having same cross section with different torsion

Fig. 4는 해석에 사용된 다른 비틀림 각을 가진 두 종류의 블레이드 형상을 보여주고 있다. (a)는 마무리 단조시의 금형만을 사용하여 직접 단조한 블레이드의 형상이고, (b)는 2단계 단조의 첫 번째 평면 단조법으로 성형한 비틀림 없는 블레이드의 형상이다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션의 개요

2D 및 3D 시뮬레이션은 DEFORM 2D/3D를 사용하였으며, DEFORM 2D/3D는 미국 SFTC(Scientific Forming Technologies Corporation)에서 1991년에 만든 소성가공, 성형공정의 시뮬레이션 전용 FEM 소프트웨어로써, Design Environment for FORMing에서 이름을 붙인 상업용 프로그램이다.

시뮬레이션에 필요한 각 물성치와 경계조건들은 프로그램에 내장된 데이터베이스와 각종 참고문헌들을 활용하였다.

시뮬레이션은 2D 해석과 3D 해석으로 나누어 실행하였으며, 2D 해석에서 각종 공정 변수들을 결정하고, 3D 해석에서는 그 공정 변수들과 티타늄 블레이드의 성형성에 대하여 검증하였다.

4.2 2차원 시뮬레이션

4.2.1 해석조건

Fig. 5는 티타늄 블레이드의 2단계 단조법 중 첫 번째 평면단조로 성형했을 때의 블레이드 형상이다. 우선 블레이드의 날개부분을 다섯 개의 단면으로 나누어 각각 해석하였다. 루트(root)부로부터 거리 0mm, 203.2mm, 508mm, 812.8mm, 1016mm의 단면을 선택하였으며, Table 4에 루트부에서 각 단면의 거리와 그 면적을 타나내었다. 이 면적을 토대로 예비 성형체의 직경을 결정하고, 금형의 압하 속도, 금형과 소재의 온도를 바꿔주면서 해석을 수행하였다. 금형의 압하 속도는 100mm/s, 50mm/s, 10mm/s, 소재의 온도는 900°C와 880°C, 금형의 온도는 400°C를 사용하였으며, Table 5에 조건별로 정리하였다.

Fig. 6은 각 단면의 형상을 나타내고 있고, Fig. 7과 Fig. 8은 해석에 사용된

Ti-6Al-4V의 유동 응력과 열 물성치를 보여주고 있다. Fig. 7의 값은 DEFROM 2D/3D에 내장된 값을 도시화 한 것이다.

Table 4 Distances from root portion and area of each section

	section A	section B	section C	section D	section E
Distance(mm)	0	203.2	508	812.8	1016
Area(mm ²)	10347	7045	4279	2981	2880

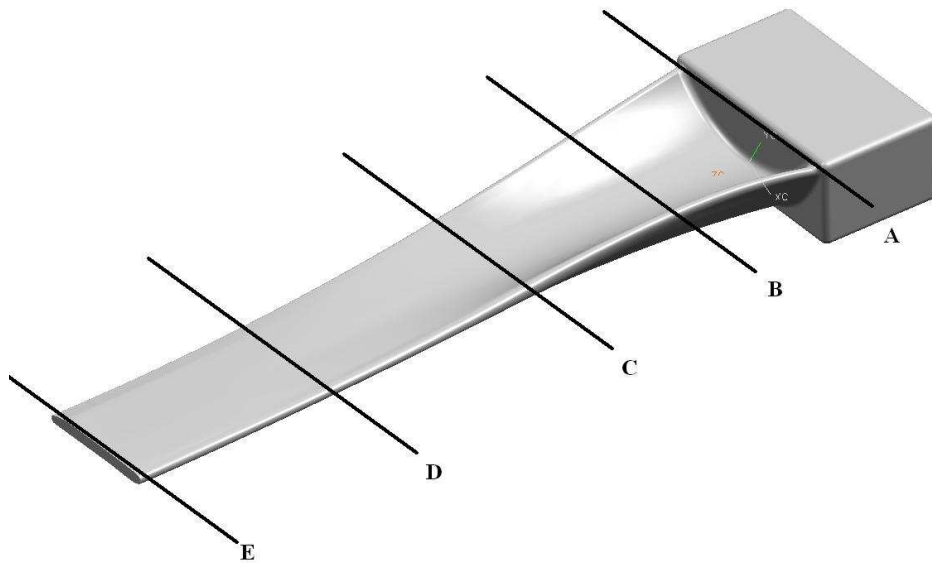


Fig. 5 Shape of Ti-6Al-4V forged blade by flattening forging process

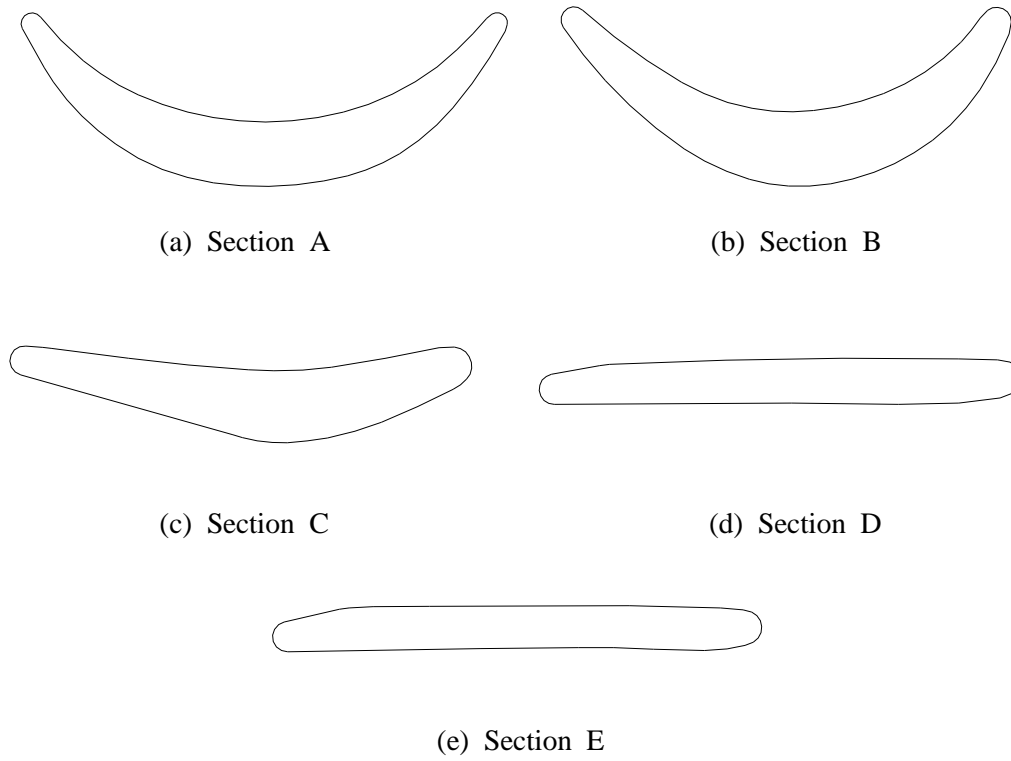
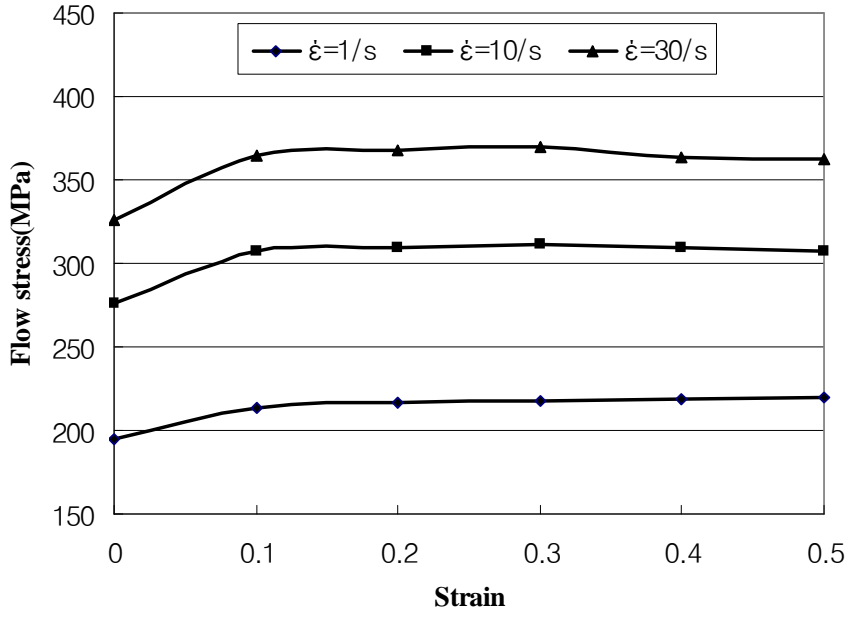


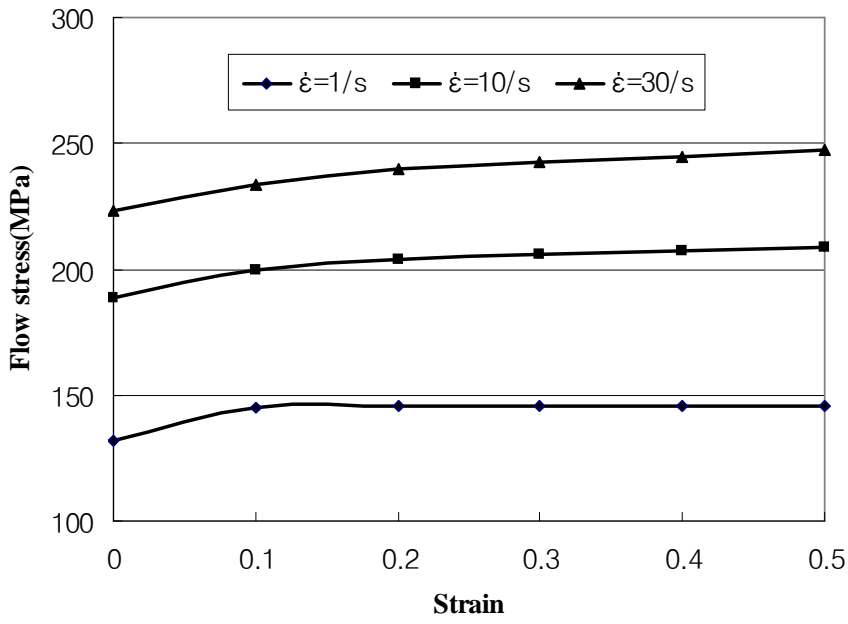
Fig. 6 Shapes of each section

Table 5 Simulation parameters

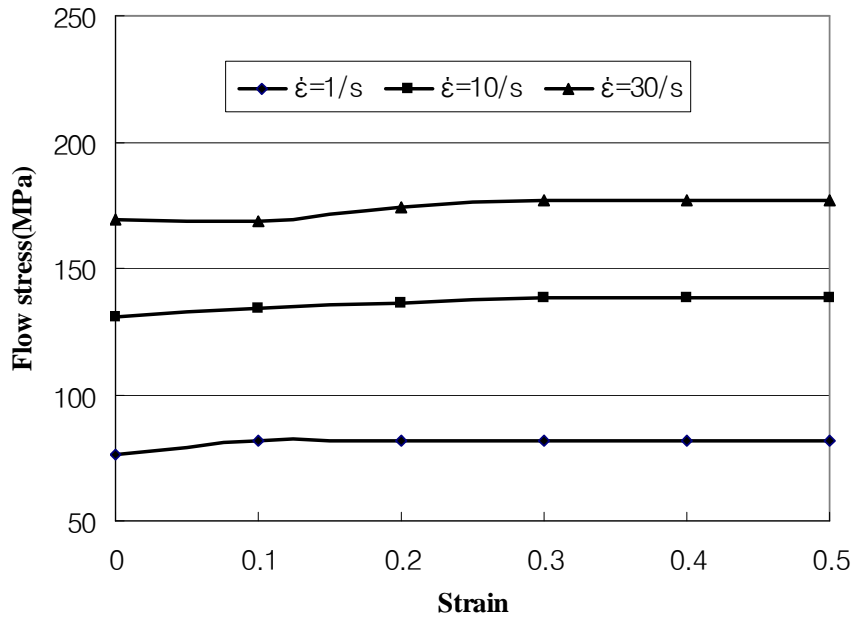
	case 1	case 2	case 3	case 4
Pressing velocity (mm/s)	100	10	100	10
Workpiece temperature (°C)	900	900	880	880
Die temperature (°C)	400	400	400	400
Convection coefficient (W/mm ² /°C)	0.01	0.01	0.01	0.01



(a) 850°C

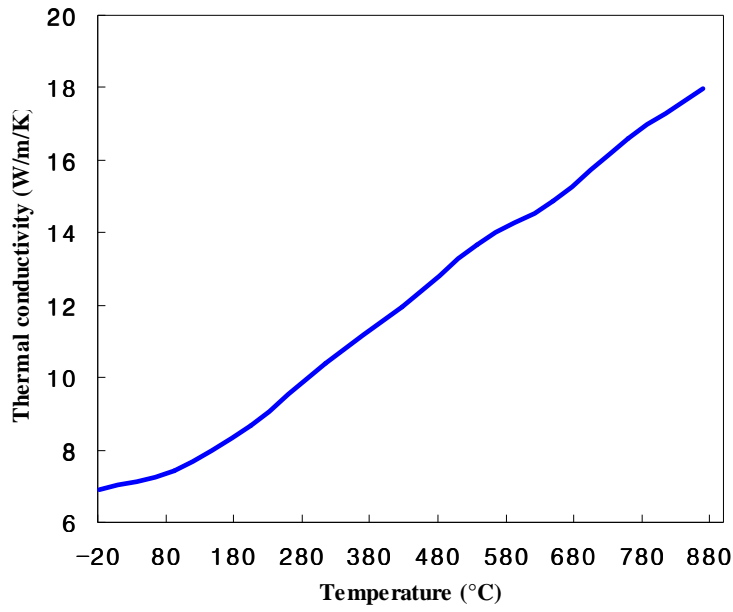


(b) 900°C

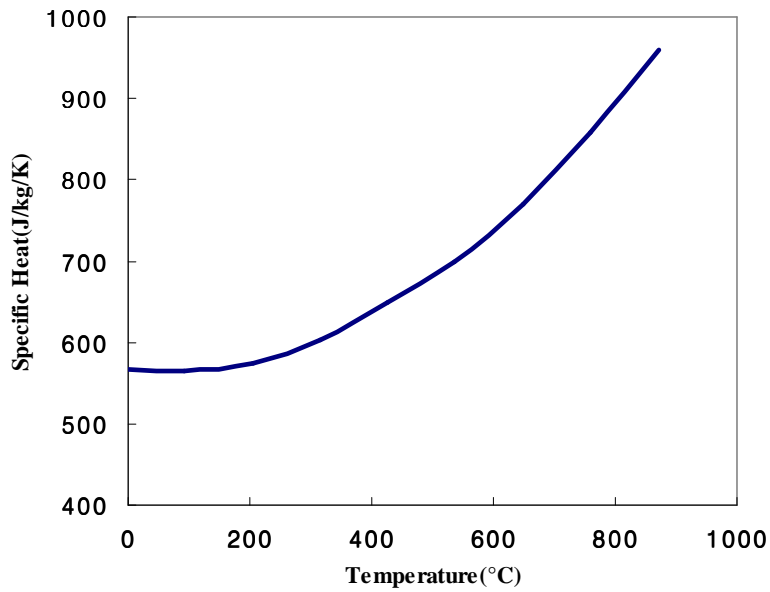


(c) 950°C

Fig. 7 Flow stress with temperatures



(a) Thermal conductivity



(b) Specific heat

Fig. 8 Thermal properties of Ti-6Al-4V [2]

4.2.2 시뮬레이션 및 해석결과

Fig. 9는 DEFORM 2D에서 각 단면의 금형과 소재의 요소(mesh) 형상이며, 각 단면 예비 성형체의 반경을 Table 6에 표시하였다.

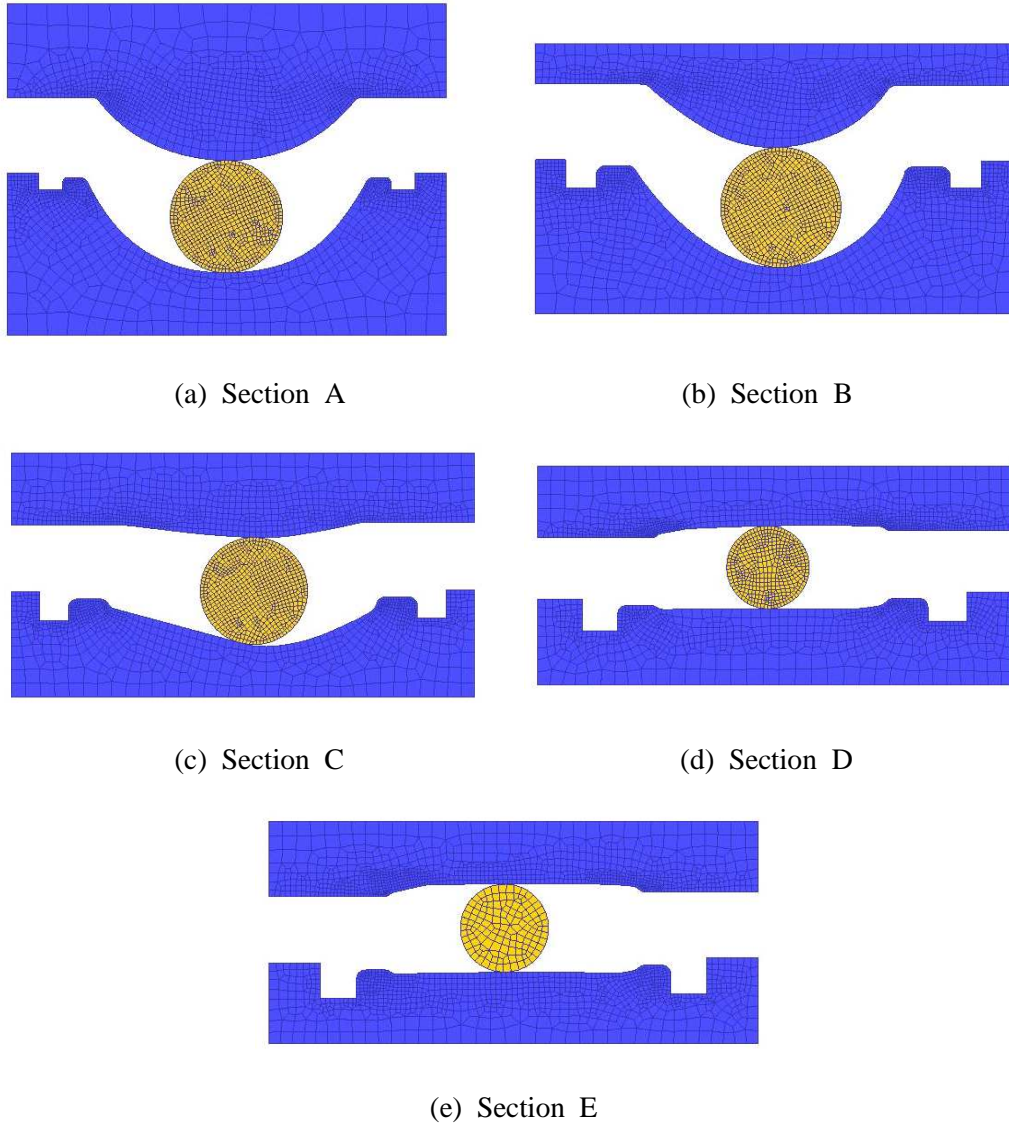


Fig. 9 Mesh shapes for FEM analysis

Table 6 Radii of preform at sections

Section	A	B	C	D	E
Radius (mm)	59	49	28	33	32

길이방향으로의 변형은 없다고 가정하여 평면변형 문제로 해석하였으며, 금형과 소재의 온도변화를 예측하기 위하여 열전달 해석을 수행하였다.

(1) Case 1

Fig. 10~14는 Table 5에 표시된 Case 1의 조건으로 해석된 결과로 금형과 소재의 온도 분포이고 80% 공정과 100%공정의 결과이다. 전 단면에서 930~970℃의 온도분포를 보이고 있다.

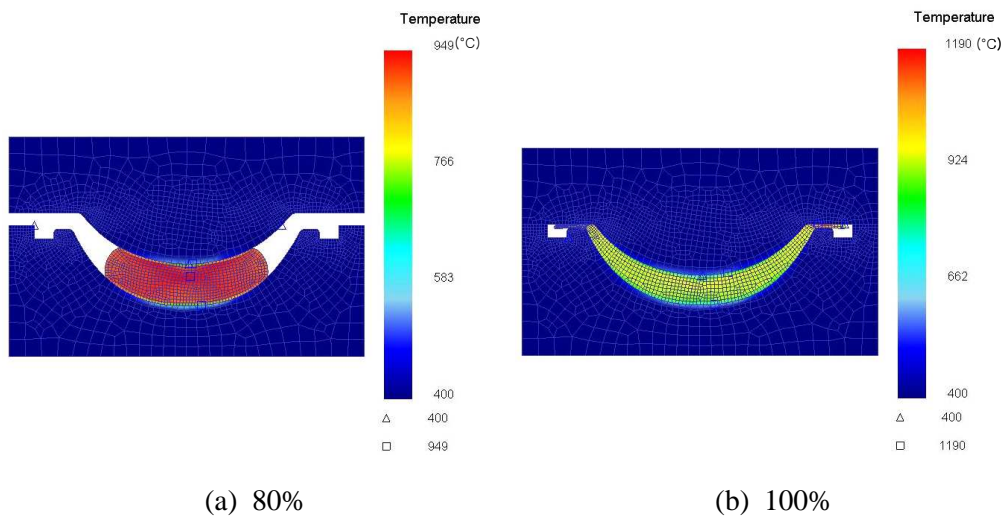
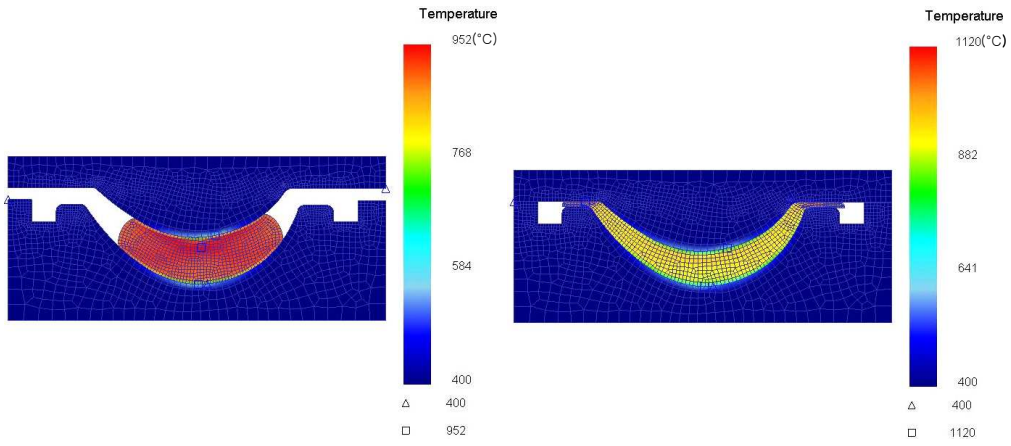


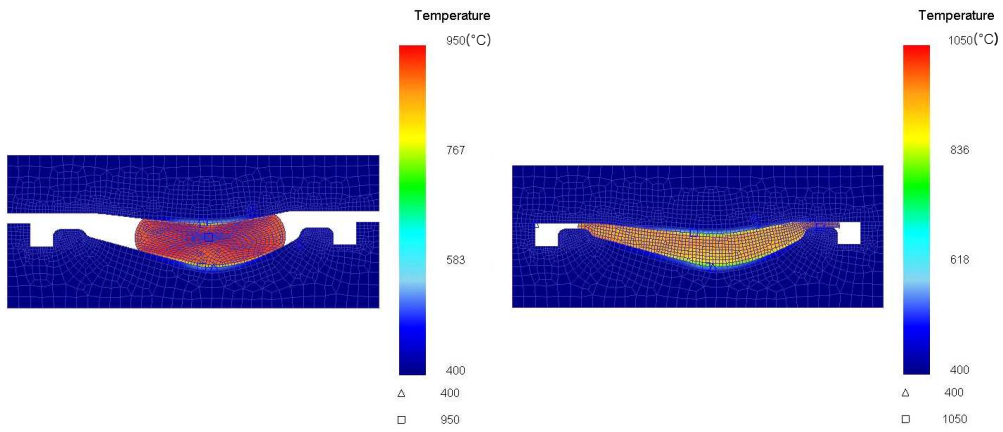
Fig. 10 Temperature distributions for forging process of case 1(section A)



(a) 80%

(b) 100%

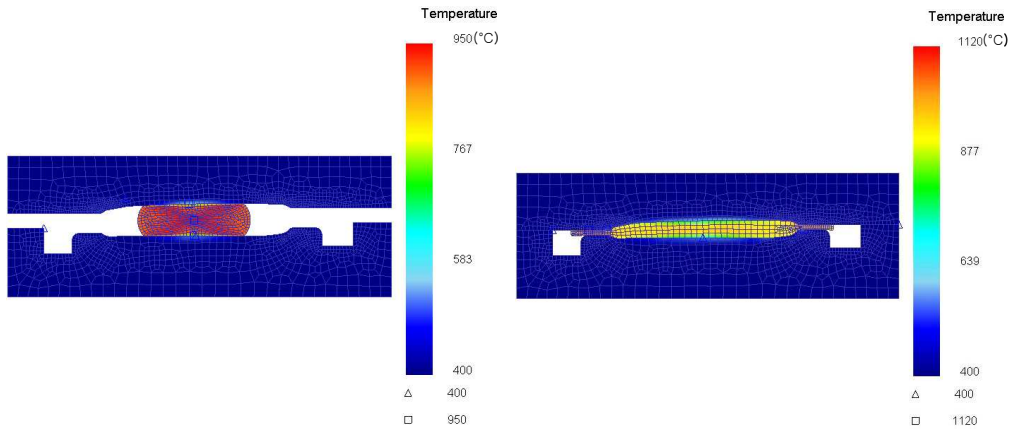
Fig. 11 Temperature distributions for forging process of case 1(section B)



(a) 80%

(b) 100%

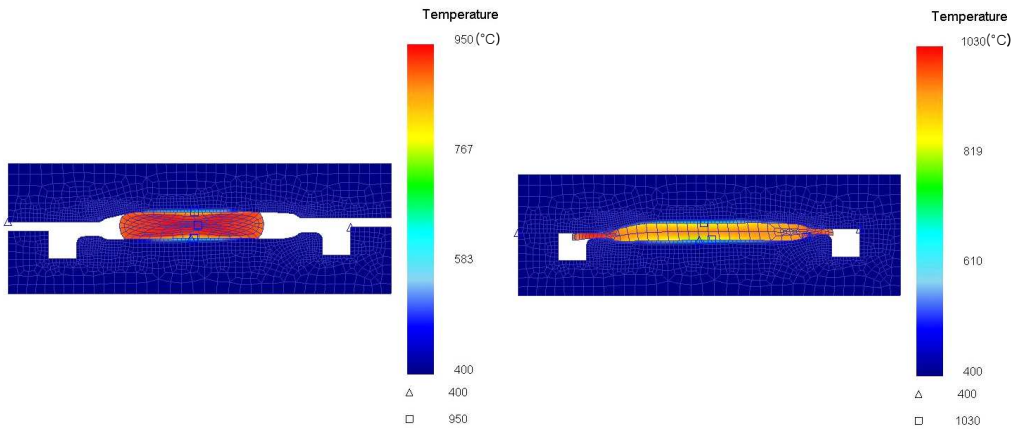
Fig. 12 Temperature distributions for forging process of case 1(section C)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 13 Temperature distributions for forging process of case 1(section D)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 14 Temperature distributions for forging process of case 1(section E)

(2) Case 2

Fig. 15~19는 Table 5에 표시된 Case 2의 조건으로 해석된 결과로 금형과 소재의 온도 분포이고, 80% 공정과 100%공정의 결과이다. 전 단면에서 740~940℃의 온도분포를 보이고 있다.

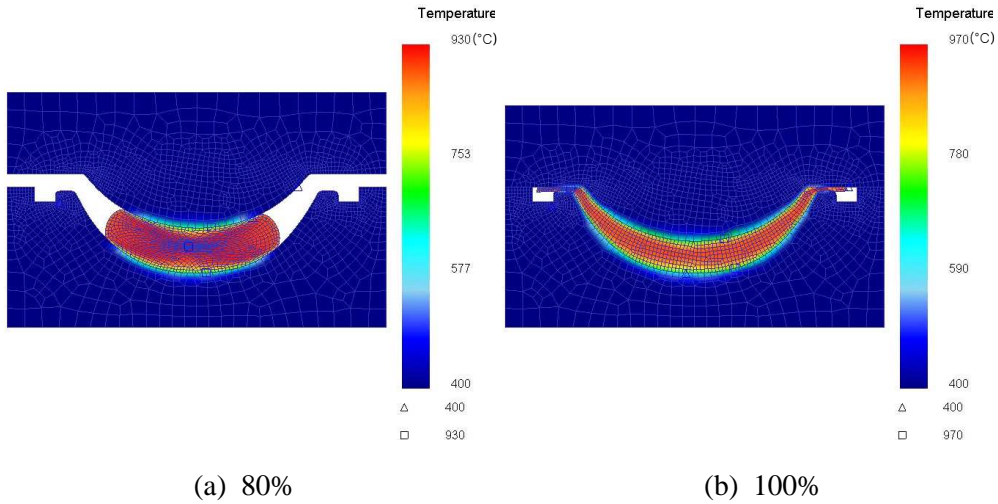


Fig. 15 Temperature distributions for forging process of case 2(section A)

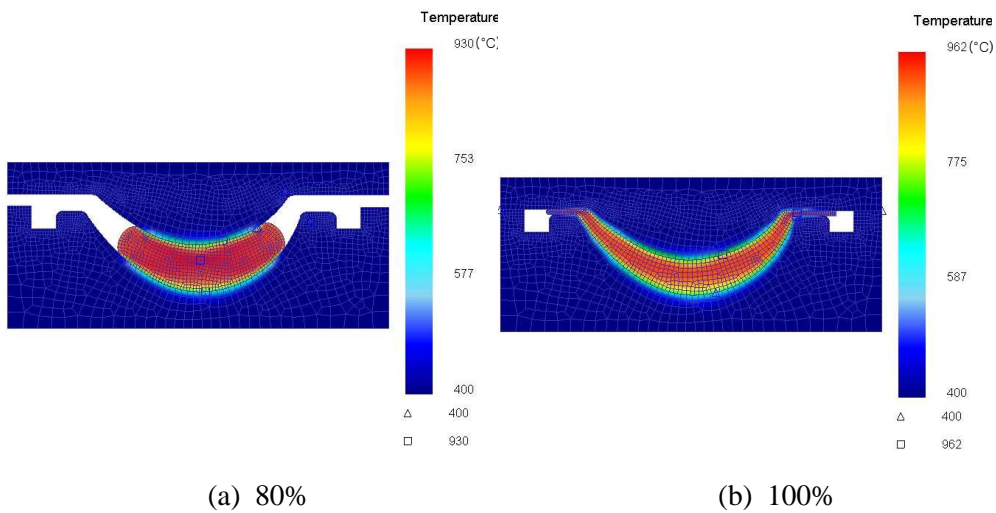
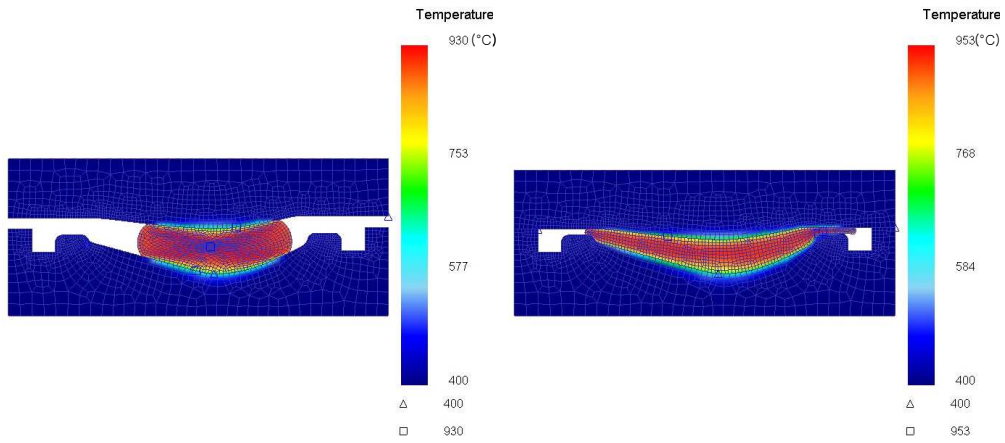


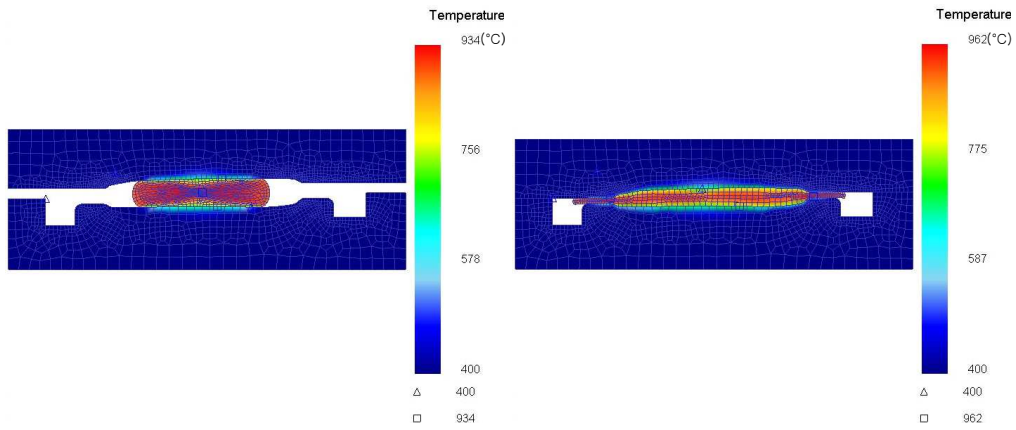
Fig. 16 Temperature distributions for forging process of case 2(section B)



(a) 80%

(b) 100%

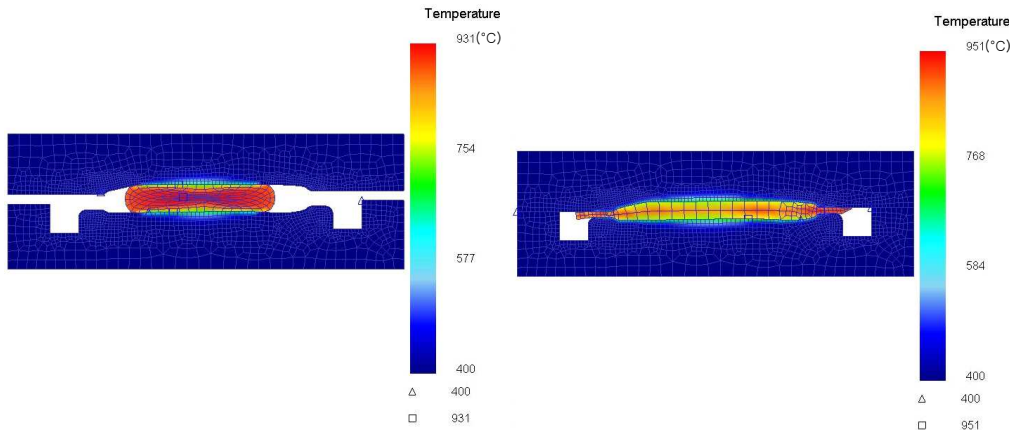
Fig. 17 Temperature distributions for forging process of case 2(section C)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 18 Temperature distributions for forging process of case 2(section D)



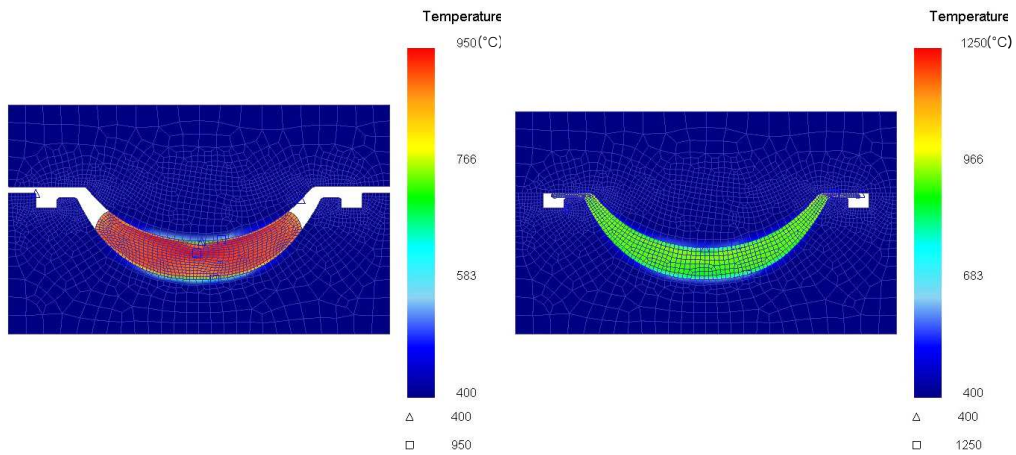
(a) 80%

(b) 100%

Fig. 19 Temperature distributions for forging process of case 2(section E)

(3) Case 3

Fig. 20~24는 Table 5에 표시된 Case 3의 조건으로 해석된 결과로 금형과 소재의 온도 분포이고, 80% 공정과 100%공정의 결과이다. 전 단면에서 880~960°C의 온도분포를 보이고 있다.



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 20 Temperature distributions for forging process of case 3(section A)

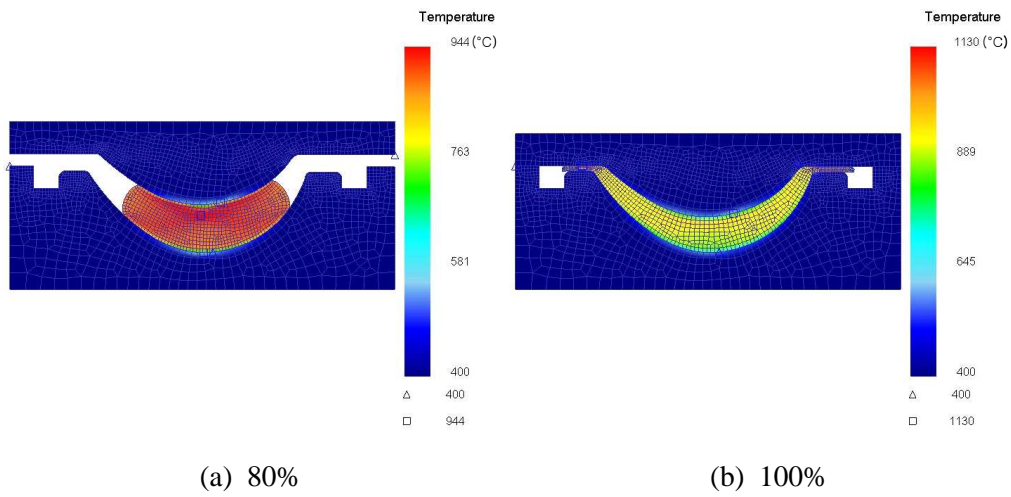


Fig. 21 Temperature distributions for forging process of case 3(section B)

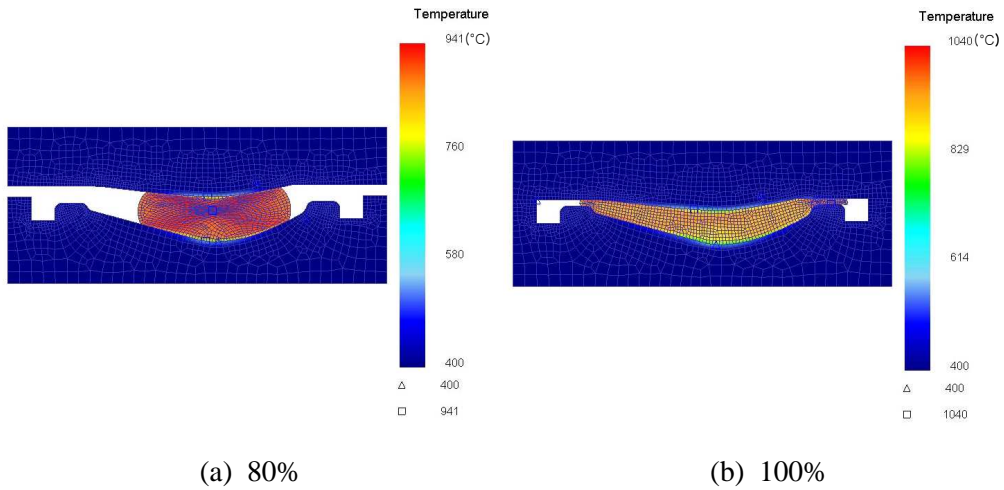
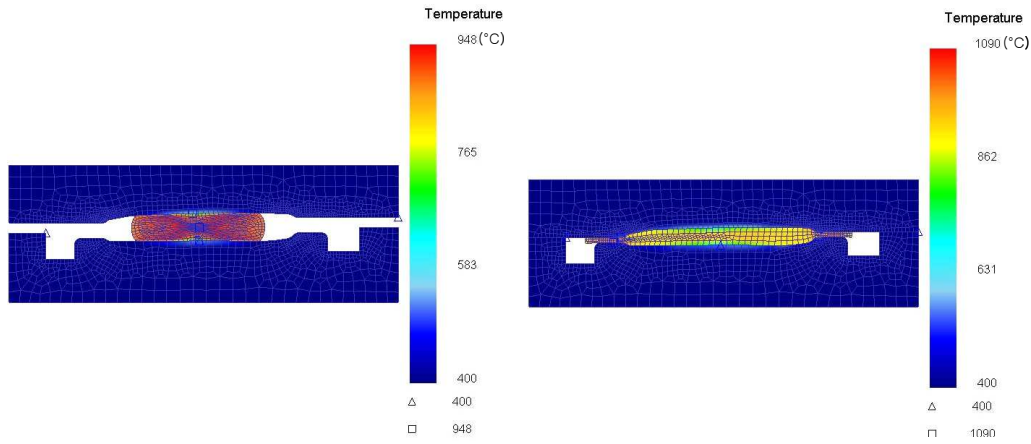


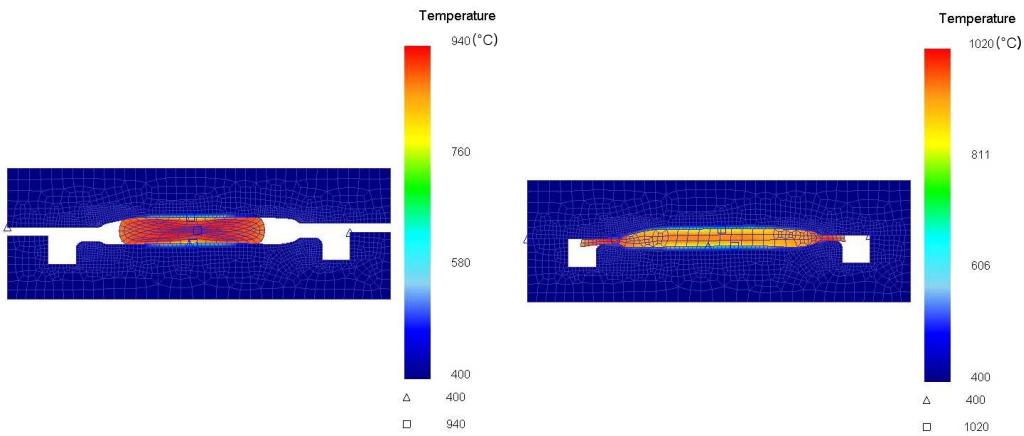
Fig. 22 Temperature distributions for forging process of case 3(section C)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 23 Temperature distributions for forging process of case 3(section D)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 24 Temperature distributions for forging process of case 3(section E)

(4) Case 4

Fig. 25~29는 Table 5에 표시된 Case 4의 조건으로 해석된 결과로 금형과 소재의 온도 분포이고, 80% 공정과 100%공정의 결과이다. 전 단면에서 710~930°C의 온도분포를 보이고 있다.

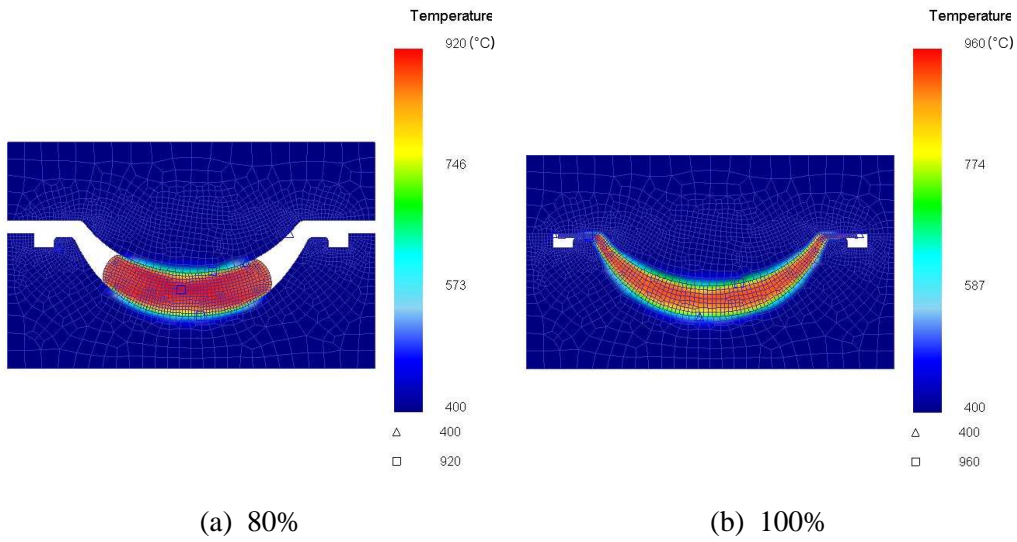


Fig. 25 Temperature distributions for forging process of case 4(section A)

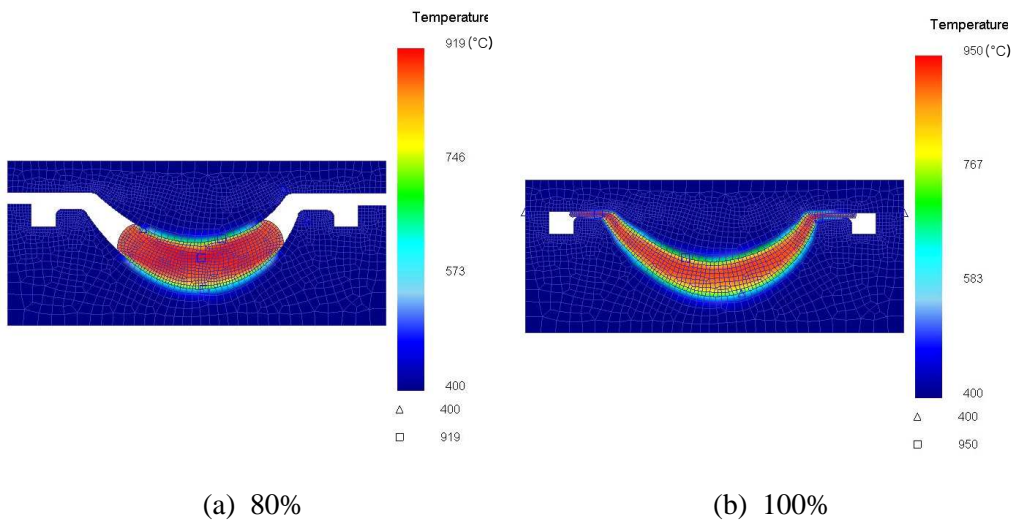
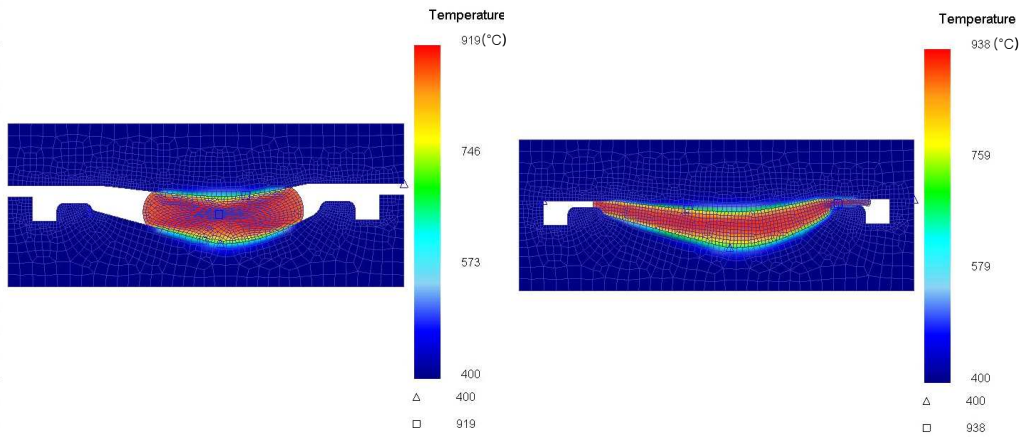


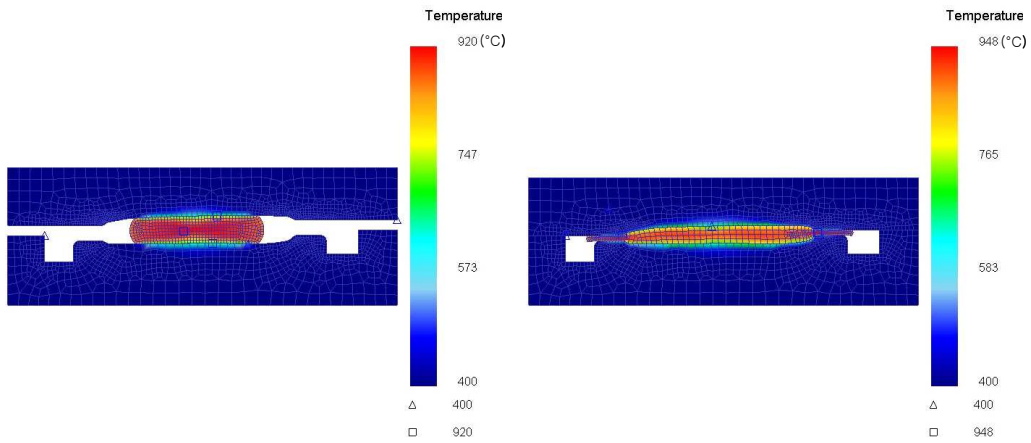
Fig. 26 Temperature distributions for forging process of case 4(section B)



(a) 80%

(b) 100%

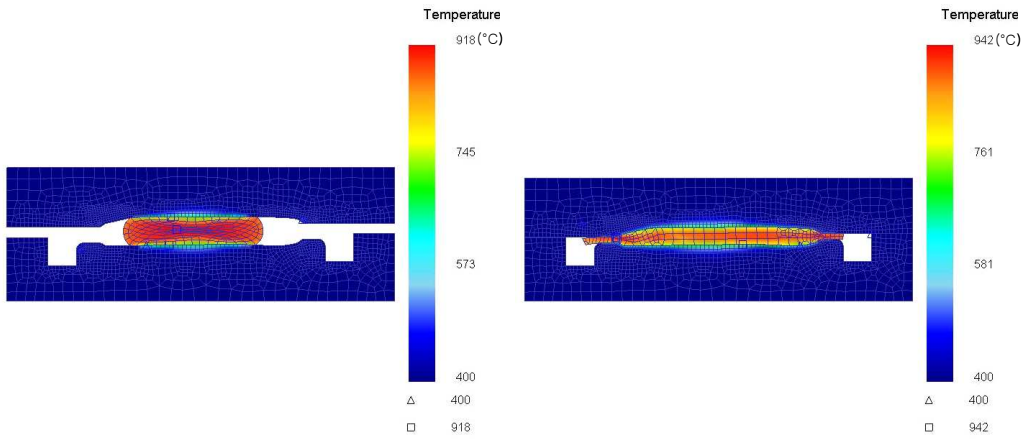
Fig. 27 Temperature distributions for forging process of case 4(section C)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 28 Temperature distributions for forging process of case 4(section D)



(a) 80%

(b) 100%

Fig. 29 Temperature distributions for forging process of case 4(section E)

2D 해석에서는 Ti-6Al-4V의 단조온도 범위인 870~980°C 내에서 성형할 수 있는 공정변수를 찾아야 한다. 다음 Fig. 30은 각 Case 별로 100% 성형시 소재 내부의 최고 온도와 최저 온도의 평균치를 도시화 하였다. 금형과 맞닿는 부분은 최저 온도 산출에서 제외하였다.

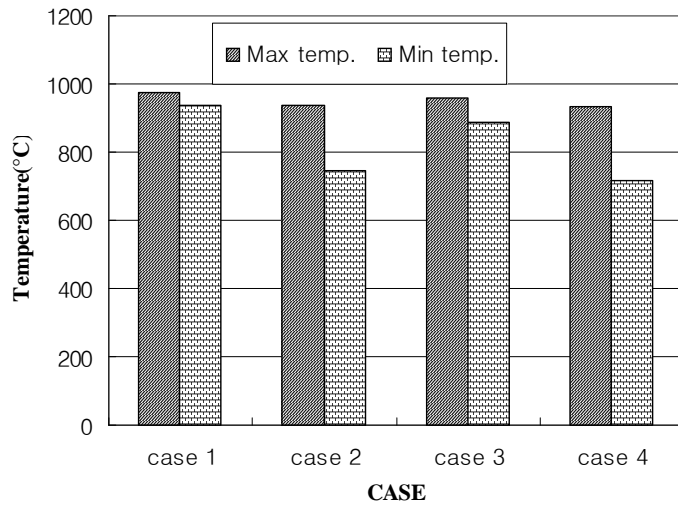


Fig. 30 Maximum and minimum temperature in the workpiece

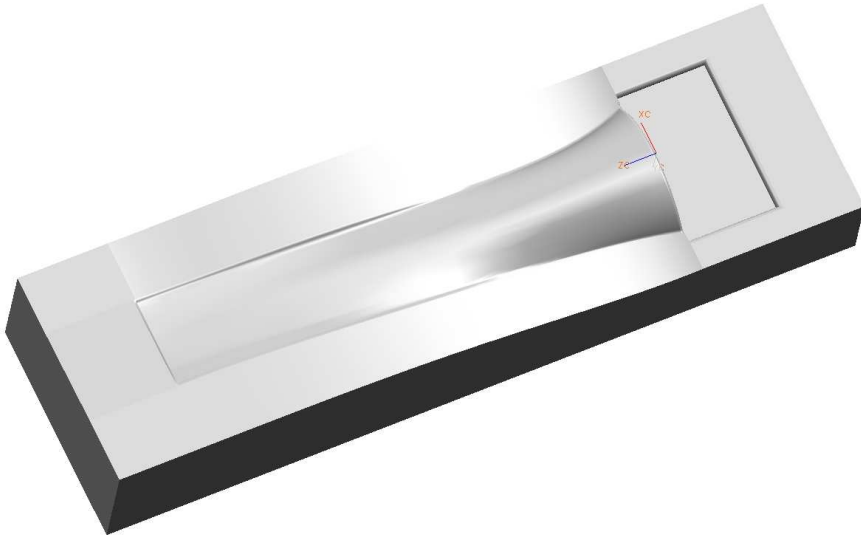
그림과 같이 모든 경우에 대해서 최대 평균온도는 단조 온도 범위를 초과하지 않고 있으나 최저 평균온도는 Case 2, 4에서 범위 내 최저 온도인 870℃를 훨씬 밑돌고 있다. 이는 소재의 온도를 880℃로 할 경우 성형 공정시 원하는 미세조직, 즉 $\alpha + \beta$ 상의 조직을 만들 수 없다. 따라서 소재의 온도는 900℃가 적당하다 할 수 있다. 그리고 금형의 압하 속도는 실제 공정에서 해머를 사용하므로 100mm/s의 속도가 가장 적당하다. 따라서 2차원 시뮬레이션의 결과 첫 번째 Case의 공정변수를 3차원 시뮬레이션에 적용하였다.

4.3 3차원 시뮬레이션

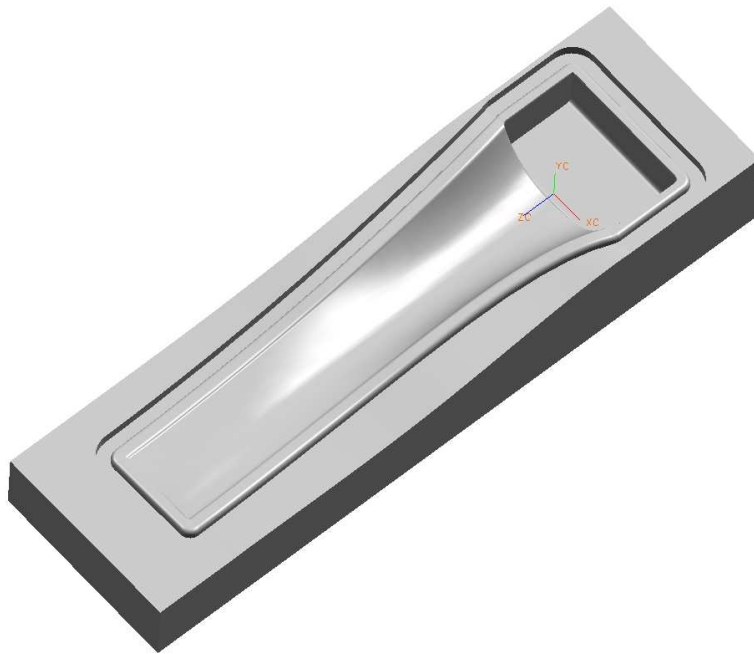
4.3.1 3차원 시뮬레이션의 개요

3D 해석에서는 2D 해석에서 얻은 공정 변수를 가지고 티타늄 블레이드의 성형성을 평가하고자 하였다. 그리고 2단계 단조법의 실용성을 검증하기 위하여 직접 단조법과의 비교 해석을 실시하였다. 또한 3D 해석은 열전달 해석을 병행하여 2D 해석의 결과와 비교 검증하였다.

Fig. 31은 2단계 단조법의 첫 번째 단계인 평면 단조 공정의 상부 금형과 하부 금형의 3D 모델링 형상이며, Fig. 32는 그 두 번째 단계인 마무리 단조 공정에 쓰이는 상부 금형과 하부 금형의 형상이다. Fig. 33은 직접 단조 공정에 쓰이는 상, 하부 금형의 형상이다.

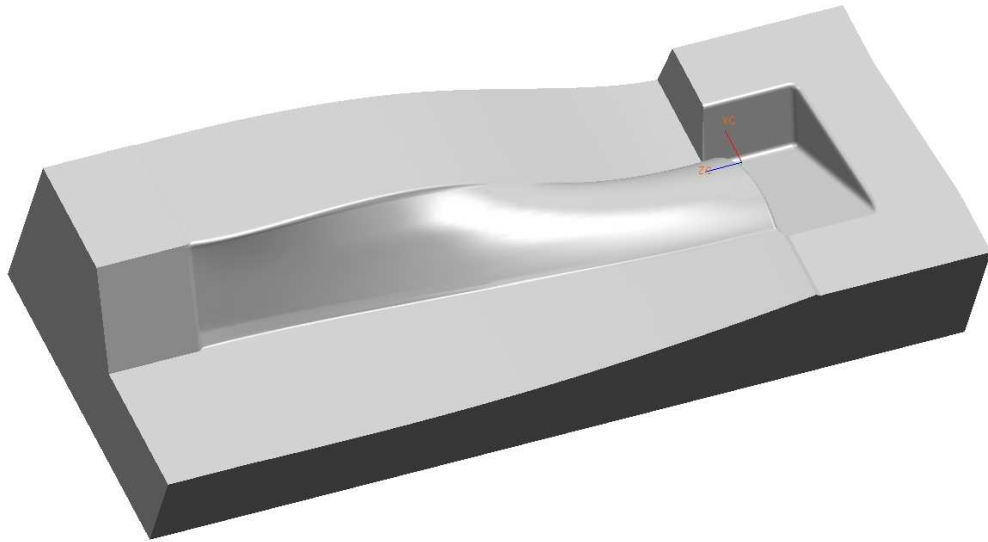


(a) Top die

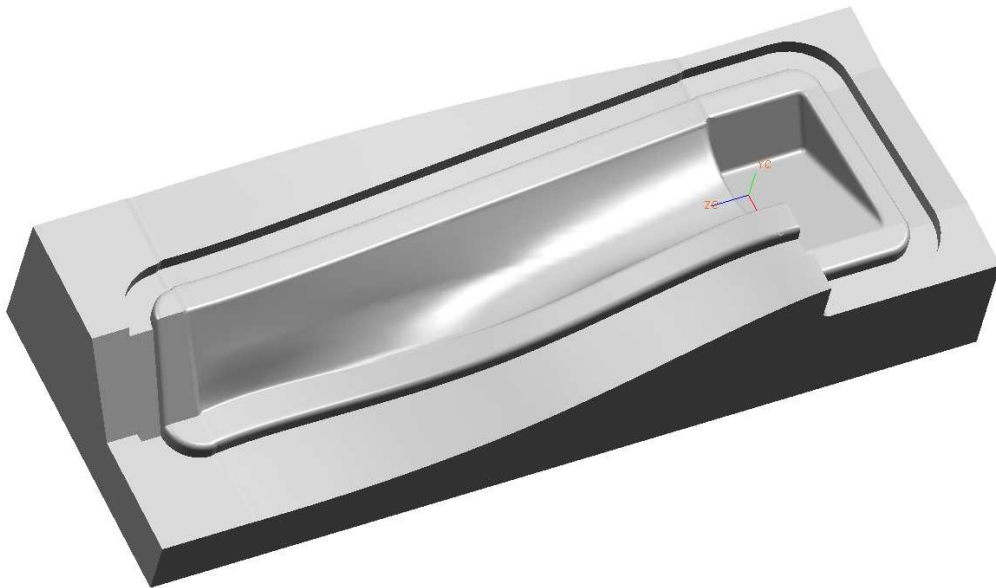


(b) Bottom die

Fig. 31 The shape of the top and bottom die for flattening forging process

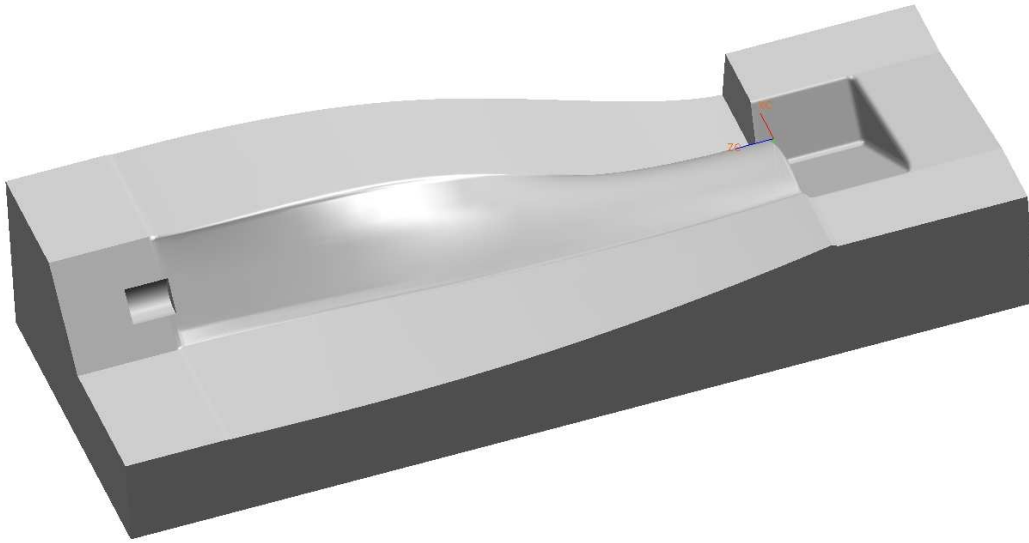


(a) Top die



(b) Bottom die

Fig. 32 The shape of the top and bottom die for finishing forging process



(a) Top die



(b) Bottom die

Fig. 33 The shape of the top and bottom die for direct forging process

Fig. 34는 블레이드 3차원 단조 시뮬레이션에서 2단계 단조법에 사용된 예비 성형체의 형상이다. 2차원 해석에서의 예비 성형체의 반경을 기본으로 하고, 길이방향의 거동을 감안하여 예비 성형체의 치수를 결정하였다. Fig. 35는 예비 성형체의 치수를 표시하고 있다.

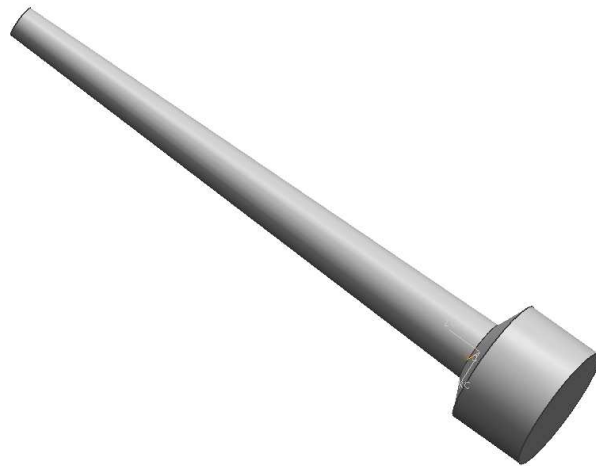


Fig. 34 Preform shape for two steps forging process

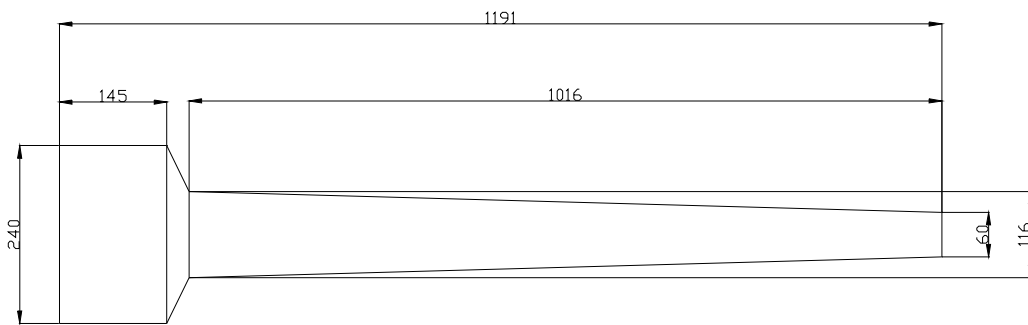


Fig. 35 Preform dimension for two steps forging process (unit : mm)

Fig. 36은 직접 단조법에 사용된 예비 성형체의 형상이다. Fig. 34의 형상과 유사하지만 Fig. 33의 금형에서 소재가 자리를 잡기 위한 홈에 위치할 수 있도록 길이만 40mm 증가 시켰다. Fig. 37은 예비 성형체의 치수를 표시하고 있다.

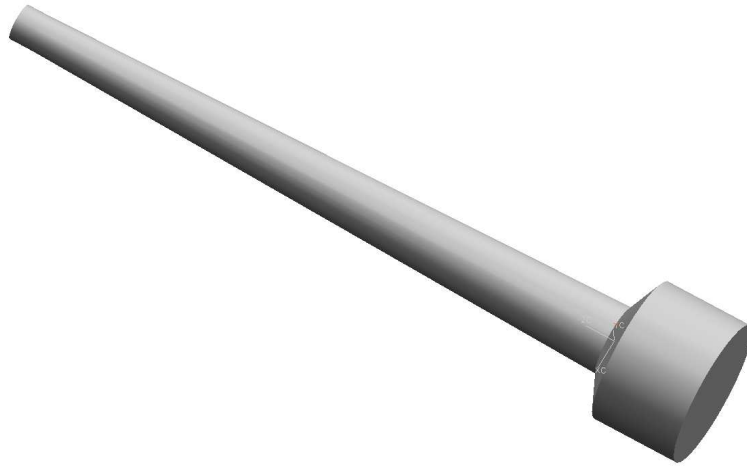


Fig. 36 Preform shape for direct forging process

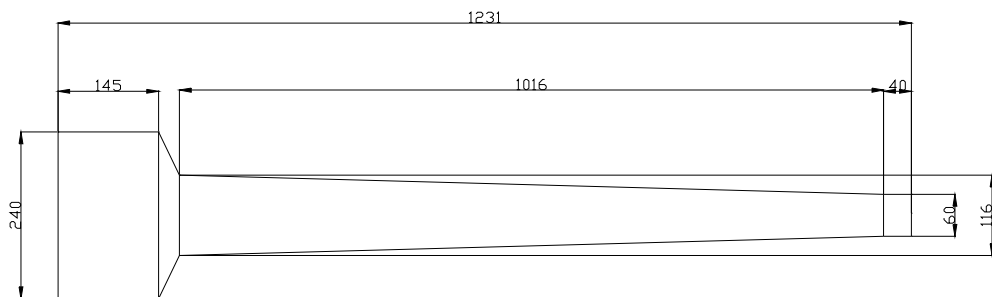


Fig. 37 Preform dimension for direct forging process (unit : mm)

4.3.2 직접 단조법

2단계 단조법의 효율성과 성형성을 검증하기 위하여 직접 단조법의 시뮬레이션을 실시하였다. Table 7에 그 해석조건을 표시하였고, Fig. 36의 예비 성형체를 사용하였다. Fig. 38은 예비 성형체의 요소 형상으로 요소는 36,146개, 절점은 8,602개 이다.

Table 7 Simulation parameters of direct forging process

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

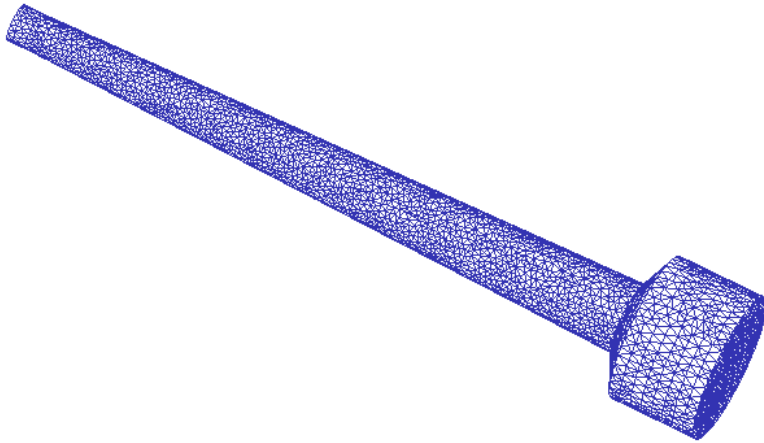


Fig. 38 Mesh shape for FEM analysis

Fig. 39는 단조 전 예비 성형체가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 40은 공정 80%와 100% 완료된 성형 과정을 보여주고 있다. 금형은 Fig. 33의 금형을 사용하였다.

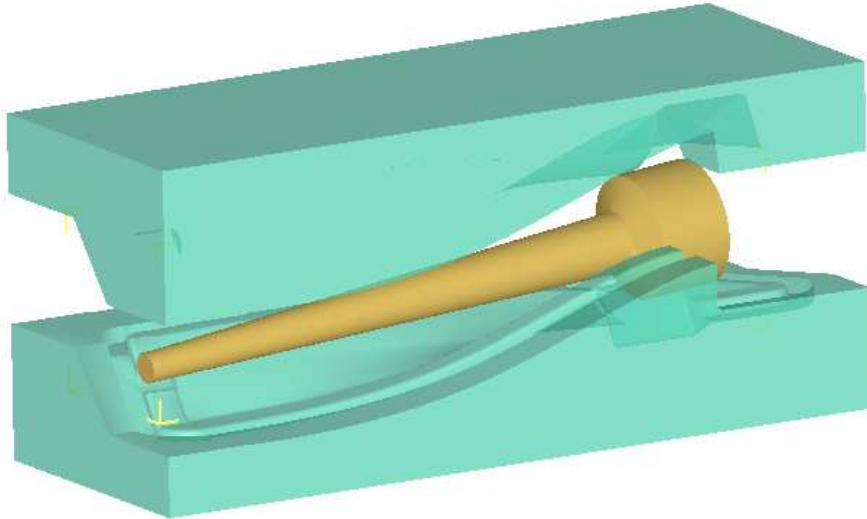
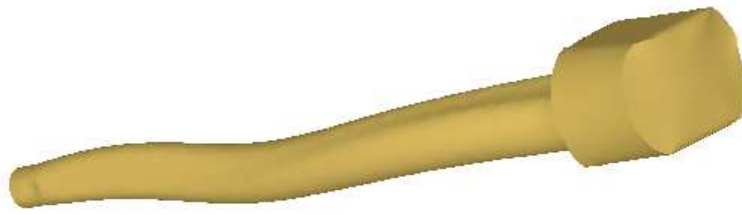


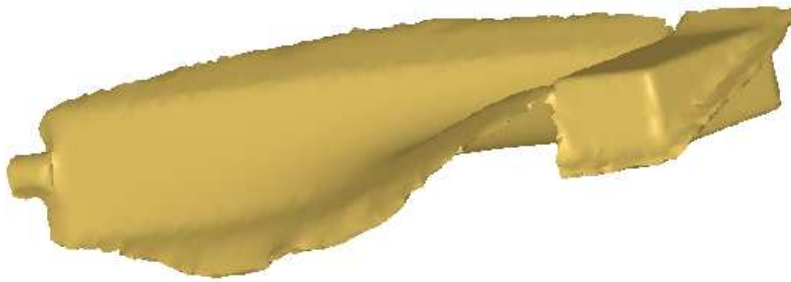
Fig. 39 Initial position of workpiece and die for direct forging process

Fig. 40을 보면 소재의 변형 형상이나 플래쉬의 형상은 대체로 양호한 결과로 해석되었다.

Fig. 41은 직접 단조법에서 예측된 온도분포를 보여주고 있고, Fig. 42와 Fig. 43은 예측된 성형하중과 금형에 작용하는 축력을 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 성형 하중은 약 276MN, 금형에 작용되는 축력은 약 50MN의 하중이 금형에 작용하고 있다. 실제 공정에서 금형에 이렇게 큰 축력이 작용한다면 블레이드의 성형성이나 금형의 수명에 큰 타격이 될 수밖에 없을 것이다. 그리고 Fig. 41의 온도분포를 보면 Ti-6Al-4V의 β 변태점인 995°C를 넘어선 부위를 확인할 수 있다.

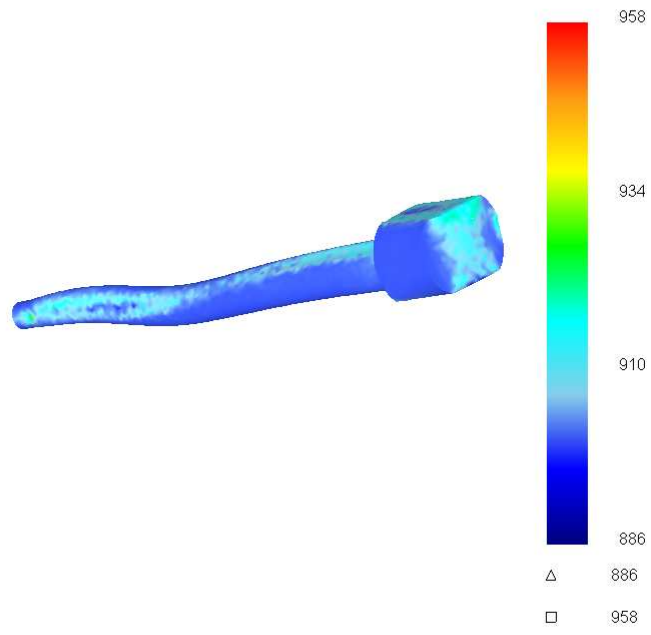


(a) 80%

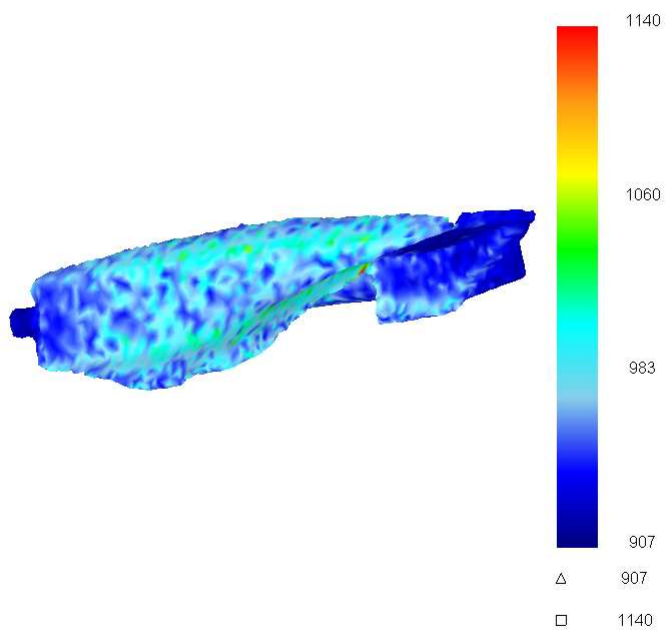


(b) 100%

Fig. 40 Deformation for direct forging process



(a) 80%



(b) 100%

Fig. 41 Temperature distributions of direct forging process

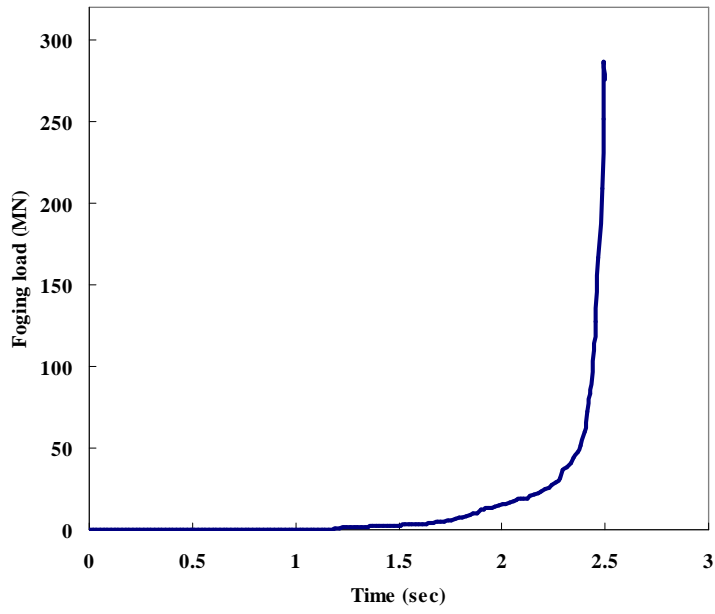


Fig. 42 Predicted forging load of direct forging process

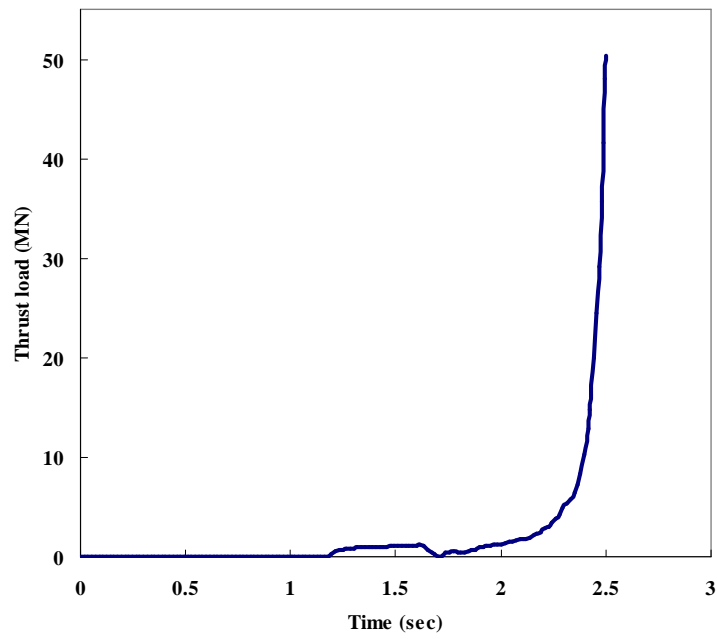


Fig. 43 Predicted thrust load of direct forging process

4.3.3 2단계 단조법

2단계 단조법은 직접 단조법에서 사용한 예비 성형체를 2D 해석에서 나온 결과와 같이 900℃로 가열한 후 Fig. 31의 금형으로 끼이지 않은 형상의 블레이드를 성형하는 평면 단조 공정과, 평면 단조 공정에서 나온 블레이드의 플래쉬 부를 제거한 후 다시 900℃로 가열 후 Fig. 32의 금형으로 끼인 형상의 블레이드를 성형하는 마무리 단조 공정으로 나뉜다.

2단계 단조법은 Table 7의 해석 조건과 동일하게 사용한다.

(1) 평면 단조 공정

평면 단조의 예비 성형체는 직접 단조법에서 사용한 것을 그대로 사용하고, 상하부 금형은 Fig. 31의 끼이지 않은 형상의 금형을 사용한다. Fig. 44는 예비 성형체의 요소 형상으로 요소는 39,011개, 절점은 9,317개 이다.

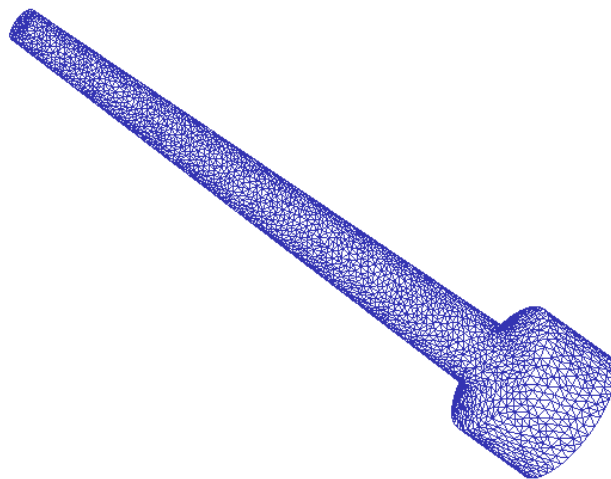


Fig. 44 Mesh shape for FEM analysis

Fig. 45는 단조 전 예비 성형체가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 46은 공정

80%와 100% 완료된 성형 과정을 보여주고 있다. Fig. 47은 공정 80%와 100%상태에서의 온도분포를 보여주고 있다. Ti-6Al-4V의 단조온도 범위인 870~980℃ 내에서 성형이 이루어지고 있으며, 2D 시뮬레이션의 결과와 유사한 분포를 보이고 있다.

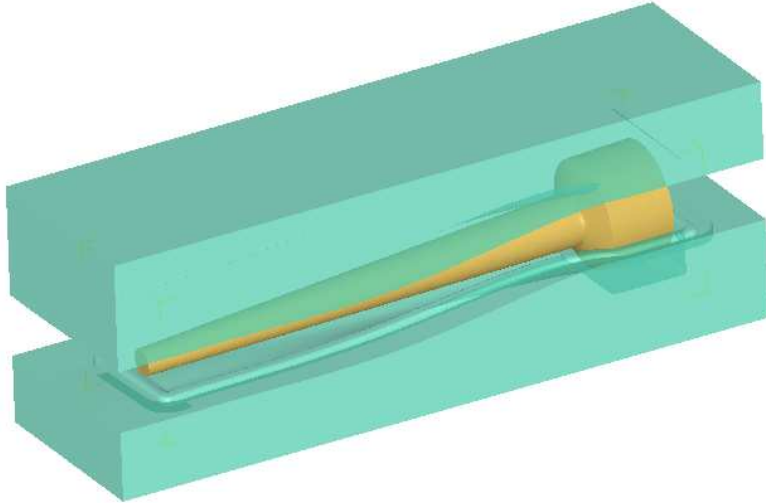
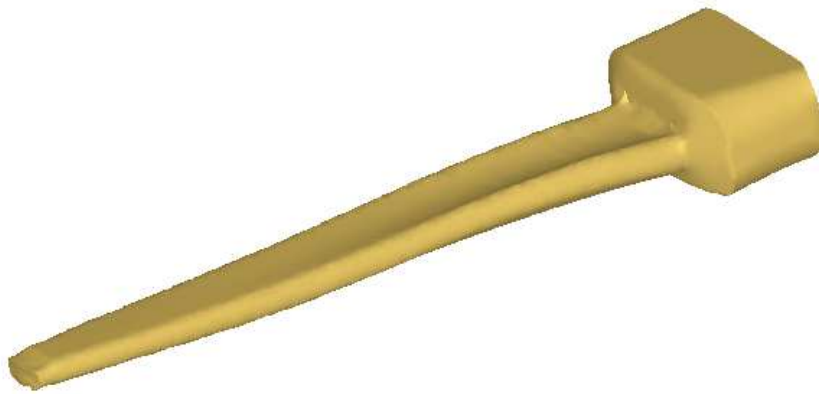


Fig. 45 Initial position of workpiece and die for flattening forging process

Fig. 46을 보면 성형된 블레이드의 형상이나 플래쉬의 형상을 봤을 때 미충전이 없이 양호한 결과를 보여주고 있다. 하부 금형도 꼬이지 않은 형상으로 예비 성형체의 초기 위치 선정에도 전혀 무리가 없다.

Fig. 48과 49는 평면 단조 공정에서 예측된 성형 하중과 축력을 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 성형 하중은 약 349MN, 축력은 최대 약 2.5MN의 하중이 금형에 작용하고 있다. 성형 하중은 직접 단조법으로 성형하였을 때와 유사한 값을 보이나, 축력의 경우는 직접 단조법의 수치와 많은 차이를 보여주고 있다.

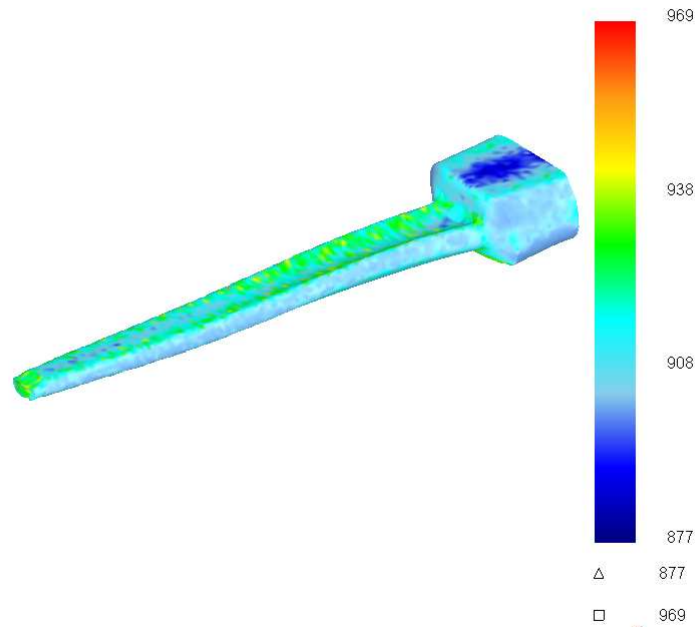


(a) 80%

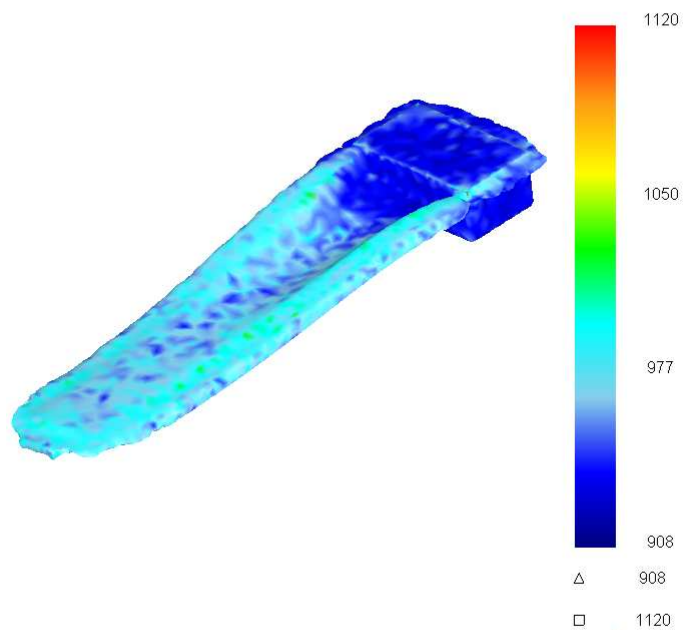


(b) 100%

Fig. 46 Deformation for flattening forging process



(a) 80%



(b) 100%

Fig. 47 Temperature distributions of flattening forging process

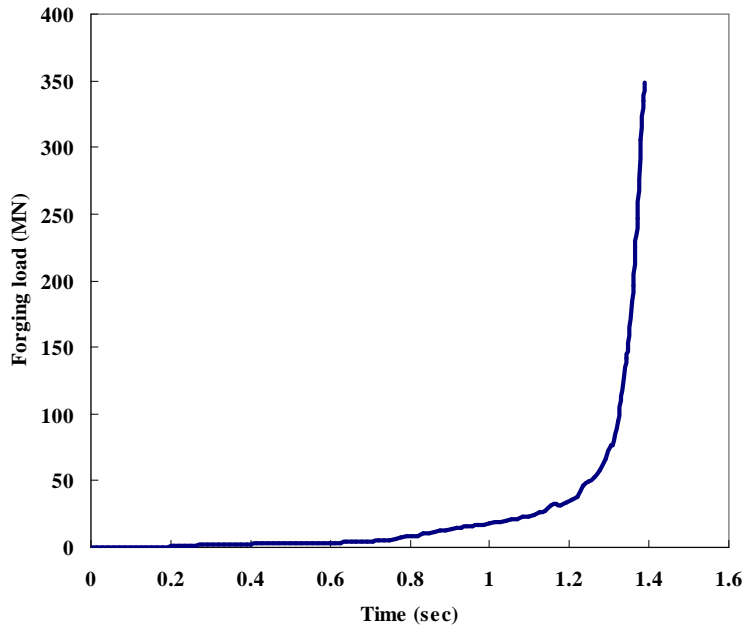


Fig. 48 Predicted forging load of flattening forging process

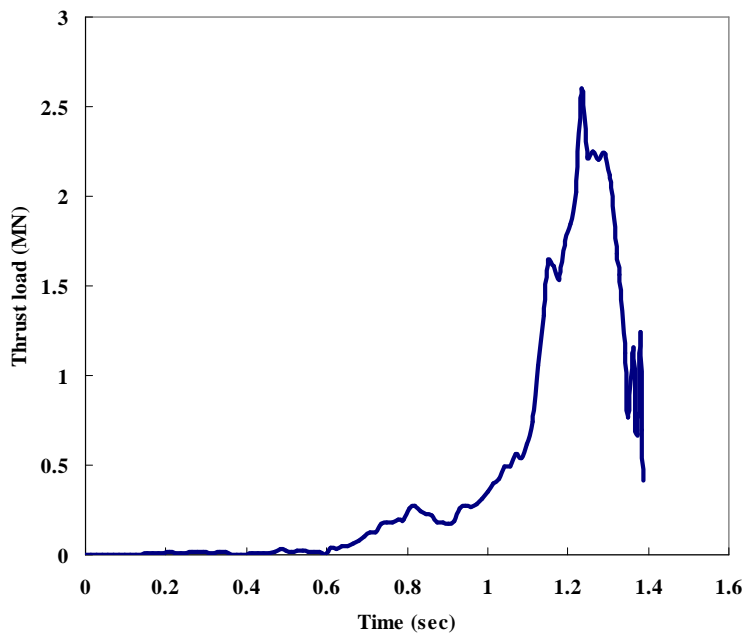


Fig. 49 Predicted thrust load of flattening forging process

(2) 마무리 단조 공정

마무리 단조 공정은 평면 단조 공정에서 성형한 꼬이지 않은 블레이드를 Fig. 32의 금형으로 꼬인 형상의 블레이드로 성형하는 공정이다. Fig. 50은 평면 단조 공정에서 얻은 블레이드로 플래쉬를 제거한 소재의 요소 형상으로 요소는 40,374개, 절점은 9,739개 이다. Fig. 51은 단조 전 소재가 금형에 놓인 모습이고, Fig. 51은 공정 80%와 100% 완료된 성형 과정을 나타내고 있다. Fig. 53은 그 성형 과정에서의 온도분포이다.

그림에서 보는 것과 같이 전 공정에 양호한 성형 결과를 보여주고 있고, 온도분포 또한 단조온도 범위인 870~980℃ 내에서 성형이 이루어짐을 알 수 있다. Fig. 54와 55는 마무리 단조 공정에서 예측된 성형 하중과 축력을 보여주고 있다. 성형하중은 약 100MN이 작용하고 있고, 축력은 약 10MN의 하중이 금형에 작용하고 있다. 이전 공정에 비해 적은 성형 하중이 필요로 하고, 금형이 미치는 축력도 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

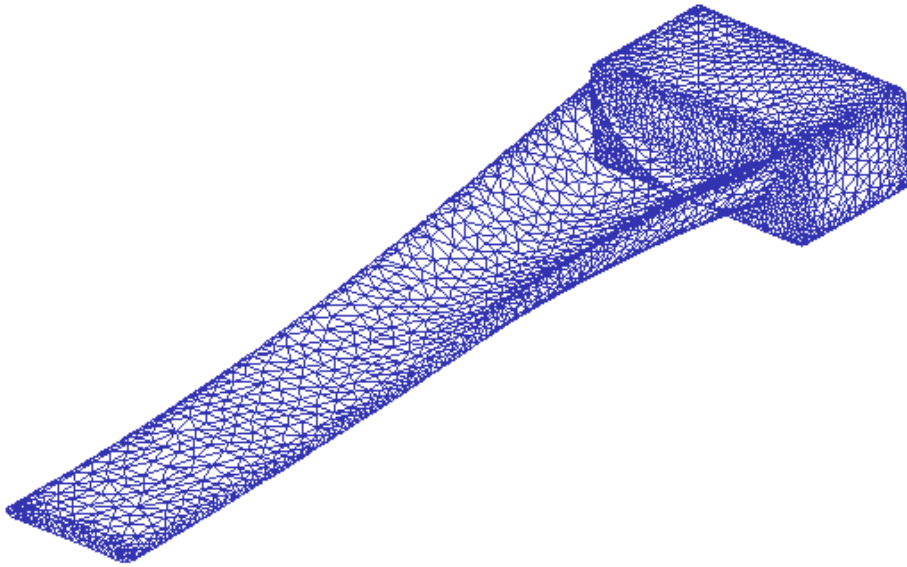


Fig. 50 Mesh shape for FEM analysis of finishing forging process

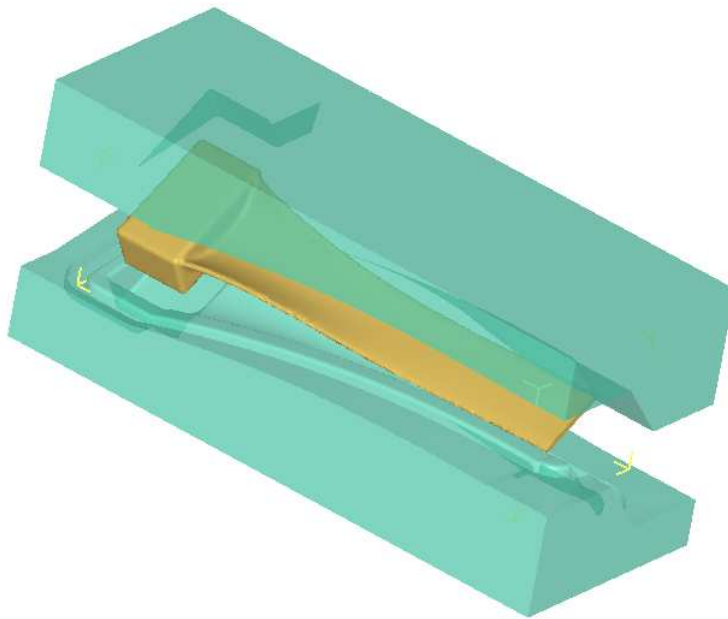
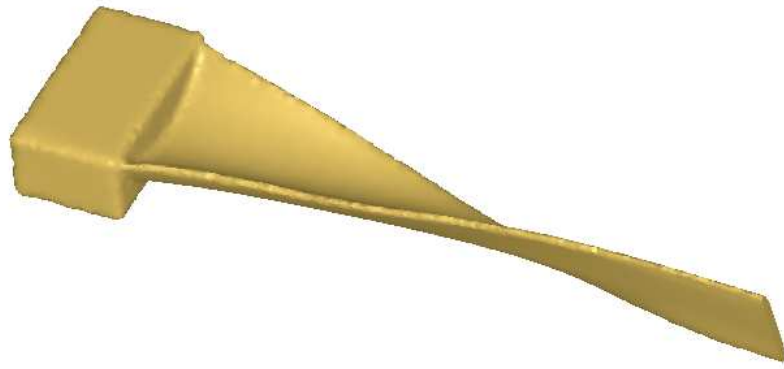


Fig. 51 Initial position of workpiece and die for finishing forging process

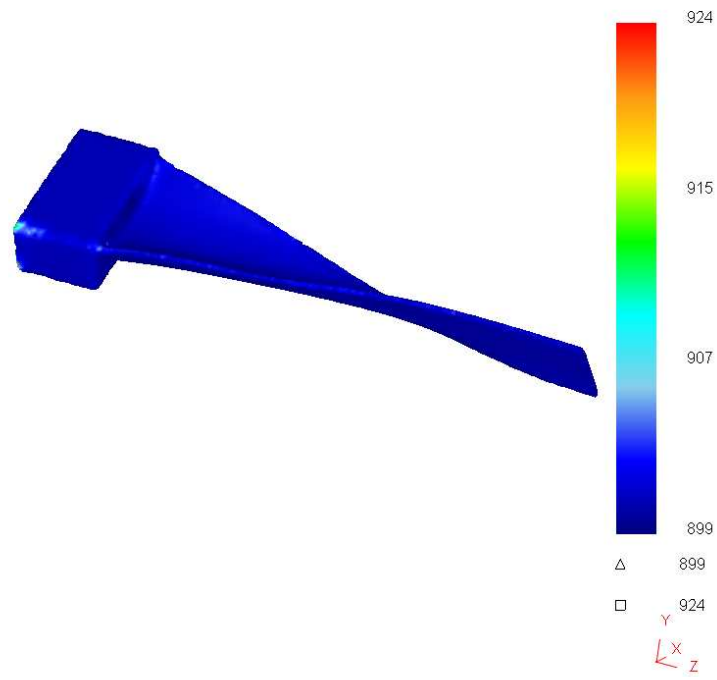


(a) 80%

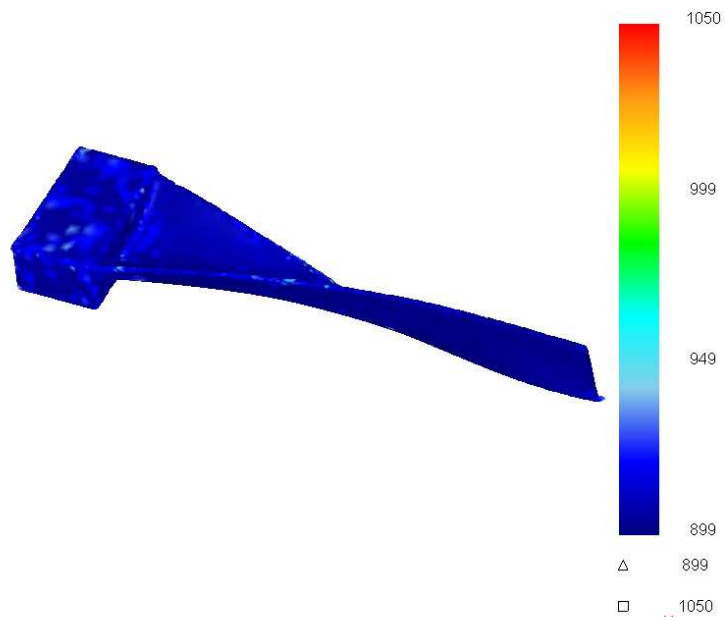


(b) 100%

Fig. 52 Deformation for finishing forging process



(a) 80%



(b) 100%

Fig. 53 Temperature distributions of finishing forging process

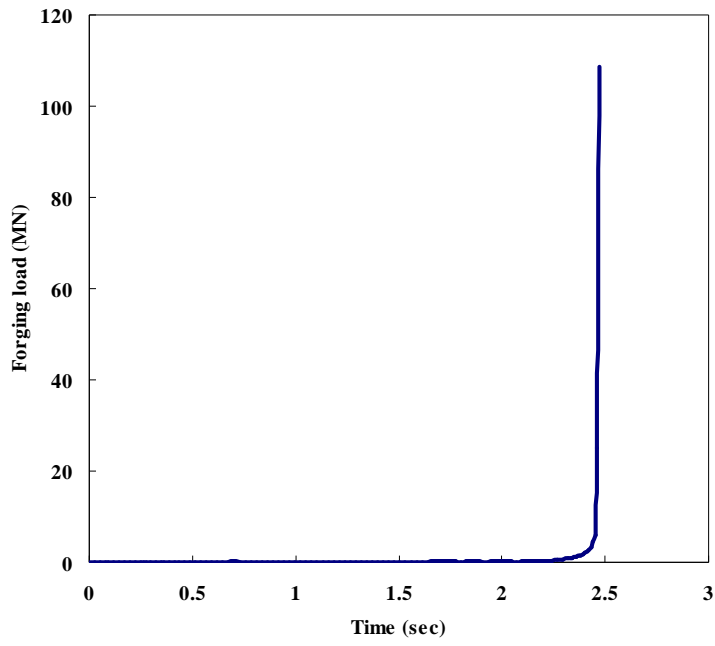


Fig. 54 Predicted forging load of finishing forging process

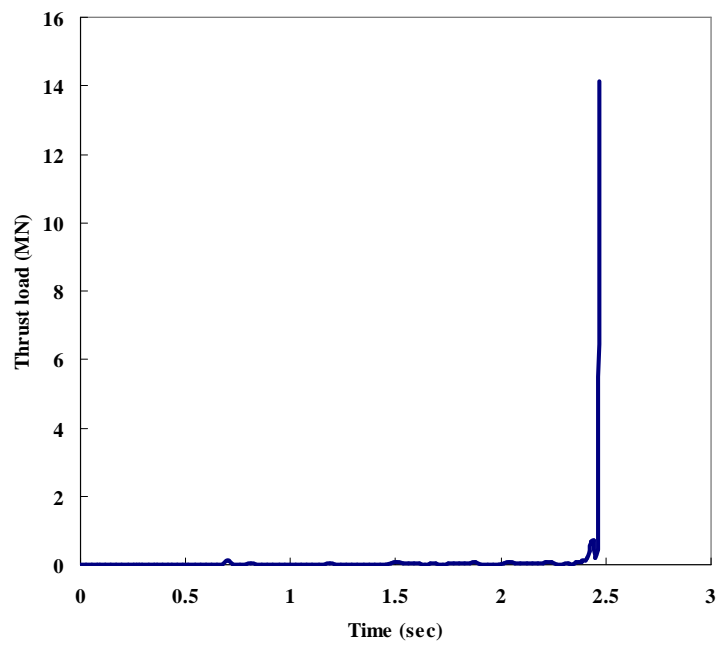


Fig. 55 Predicted thrust load of finishing forging process

4.3.4 직접 단조법과 평면 단조법의 비교

Fig. 56은 직접 단조법을 이용한 블레이드의 단조공정과 2단계 단조법의 평면 단조공정, 마무리 단조공정의 성형 하중과 다이에 작용하는 축력을 나타내고 있다. 직접 단조공정과 평면 단조공정 중에 다이에 작용하는 축력의 차이가 확실히 나타남을 알 수 있다.

Fig. 57은 직접 단조공정 중 블레이드의 루트부에서 거리 508mm 위치의 단면(section C)에서의 유효 변형률의 분포이고, Fig. 58은 평면 단조공정 중의 같은 위치에서의 유효 변형률 분포이다. 직접 단조법의 경우 비틀려 있는 형상 때문에 변형률의 분포가 평면 단조공정의 경우와는 다른 경향을 보여주고 있다. Fig. 59는 직접 단조공정 중 블레이드의 루트부에서 거리 508mm 위치의 다면에서의 온도분포이고, Fig. 60은 평면 단조공정 중의 같은 위치에서의 온도분포이다. 직접 단조공정에서 공정 100% 완료시 Ti-6Al-4V의 β 변태온도인 995℃를 넘어선 부위를 확인할 수 있다. 평면 단조공정에서는 단조온도 범위인 870~980℃에서 성형이 이루어짐을 확인할 수 있다.

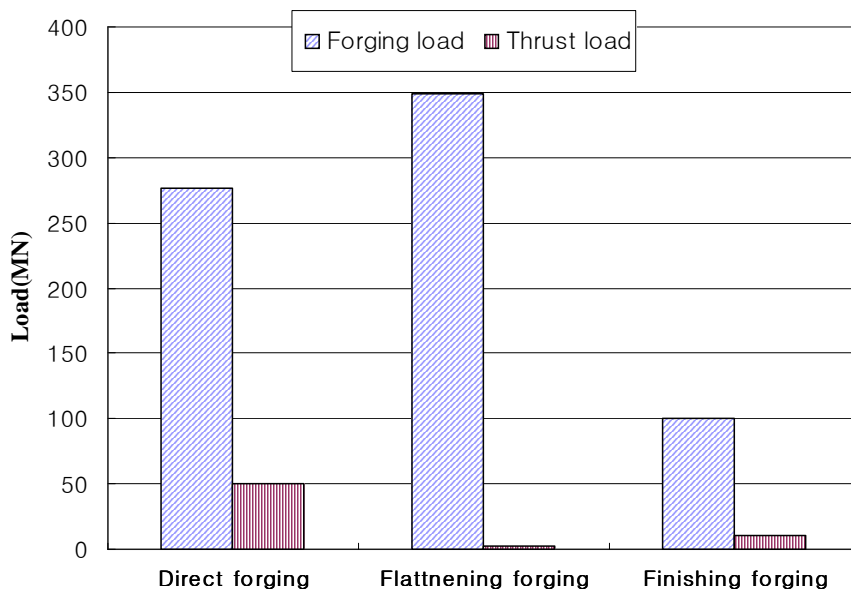
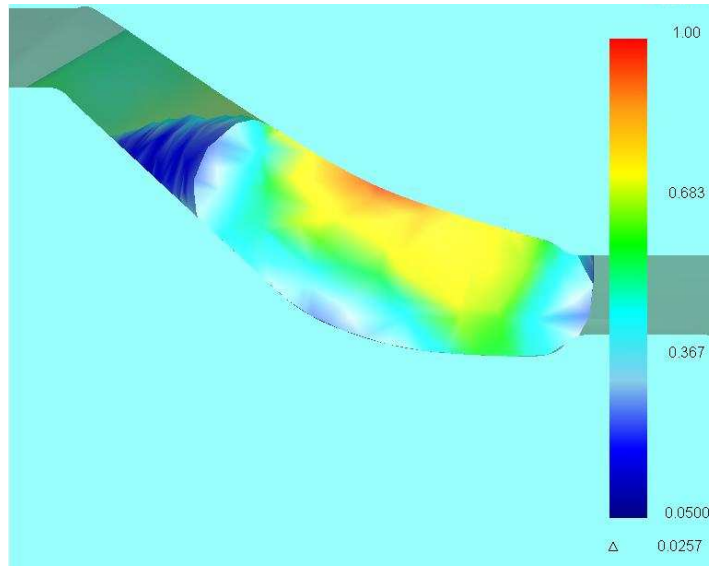
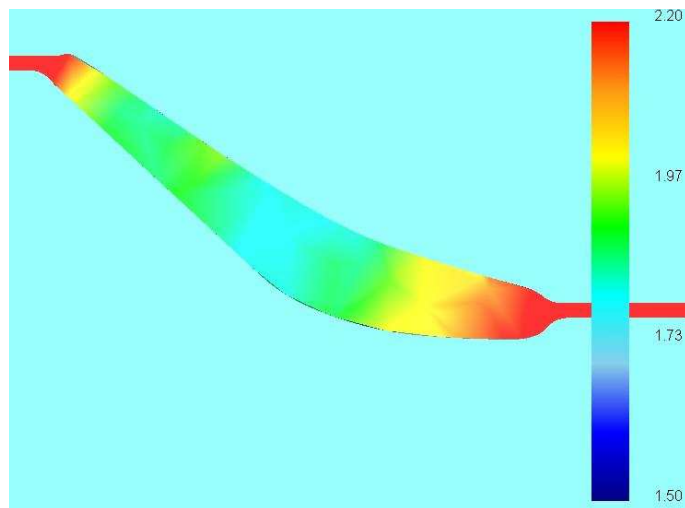


Fig. 56 Comparison of forging and thrust load for each forging process

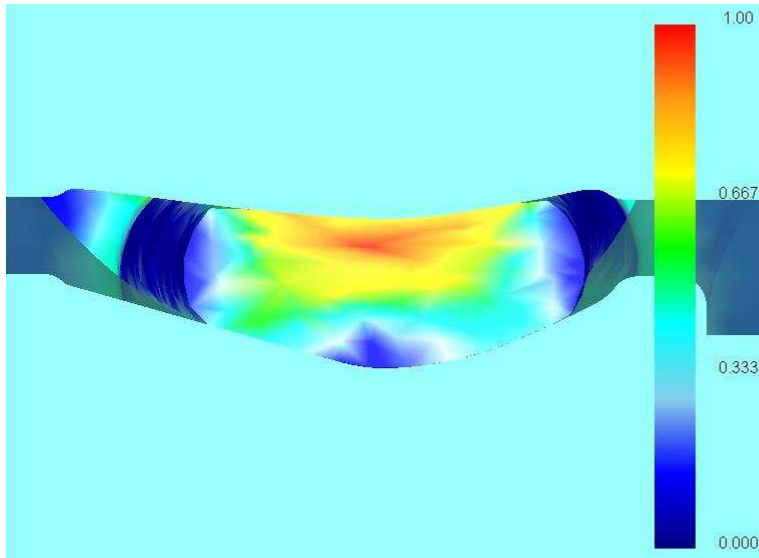


(a) 80%

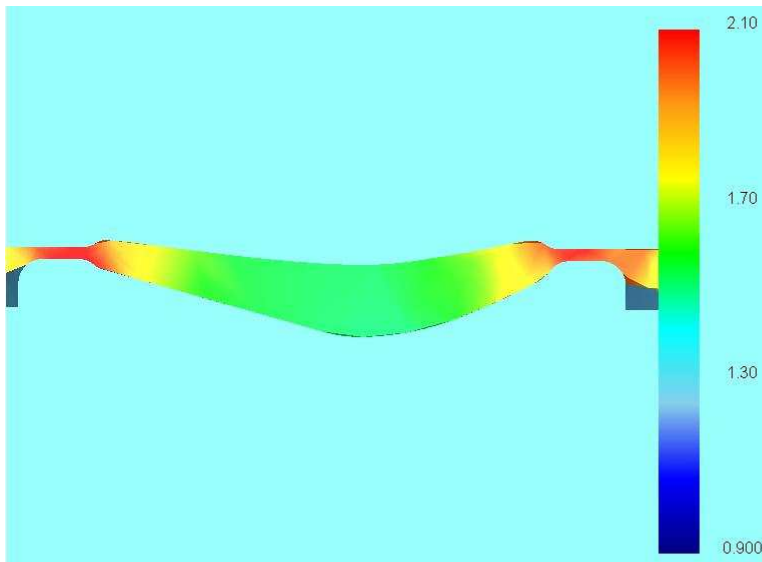


(b) 100%

Fig. 57 Effective strain distributions of direct forging process(section C)

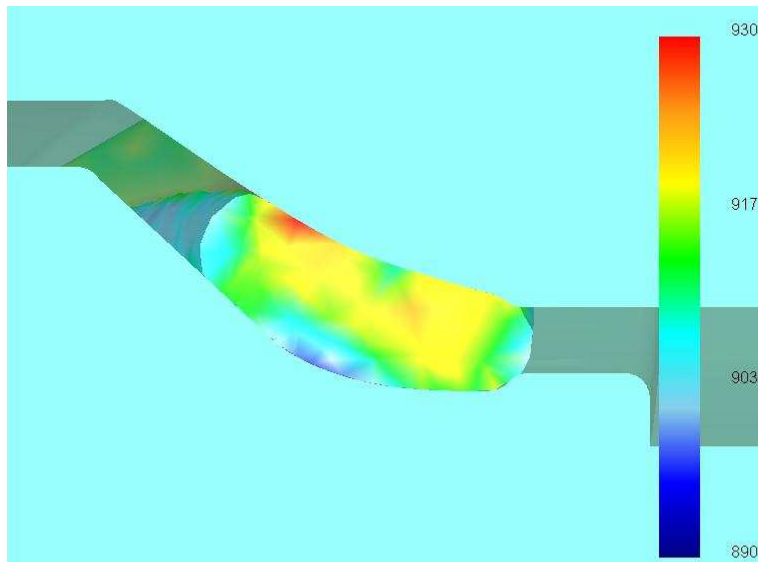


(a) 80%

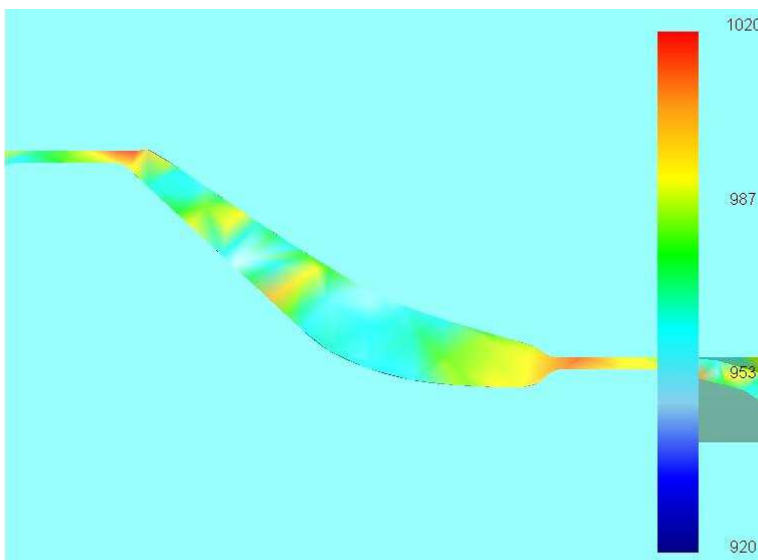


(b) 100%

Fig. 58 Effective strain distributions of flattening forging process(section C)

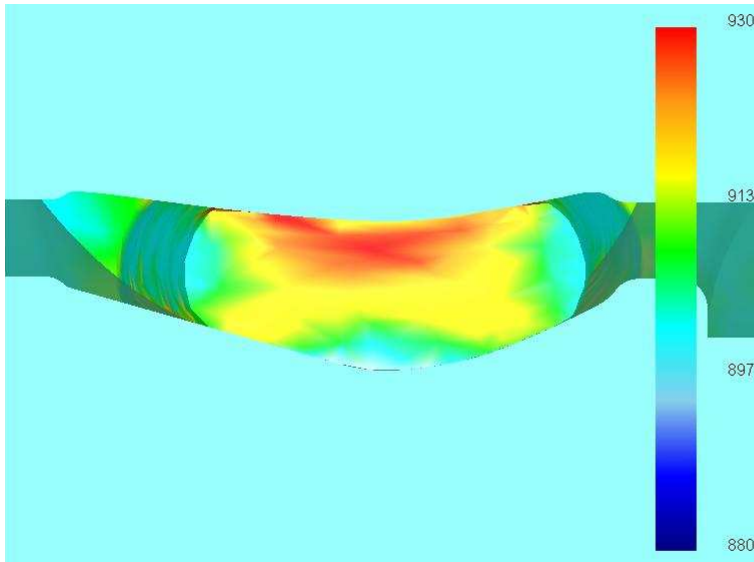


(a) 80%

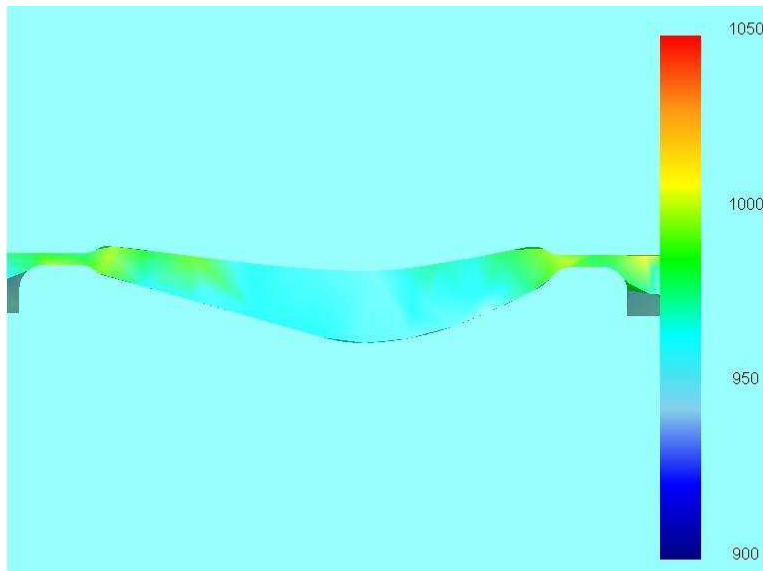


(b) 100%

Fig. 59 Temperature distributions of direct forging process(section C)



(a) 80%



(b) 100%

Fig. 60 Temperature distributions of flattening forging process(section C)

4.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

지금까지 2D 시뮬레이션에서는 소재와 금형의 온도, 금형의 압하 속도 등의 공정변수를 결정하기 위하여 6가지의 경우에 대하여 해석을 하였고, 3D 시뮬레이션에서는 2D 시뮬레이션에서 얻은 공정변수를 가지고 블레이드의 성형성에 대하여 고찰을 해보았다.

2D 시뮬레이션에서 Ti-6Al-4V의 단조온도 범위인 870~980℃에서 모든 성형이 이루어지고, 해머에서 단조할 경우를 고려할 때 Case 1 즉 금형의 압하 속도 100mm/s, 소재의 온도 900℃로 할 경우가 가장 적합한 공정이라고 결정하였다.

3D 시뮬레이션에서는 위 2D 시뮬레이션에서 구한 공정변수를 이용하여 2단계 단조법의 성형성을 직접 단조법과 비교 검증하였고, 2단계 단조법이 성형성이나 해머의 에너지 효율 측면에서 직접 단조법에 비하여 훨씬 유리함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 증기터빈 티타늄(Ti-6Al-4V) 블레이드 단조공정의 수치적 해석을 DEFORM 2D/3D를 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.

(3) 2차원 시뮬레이션에서 소재의 온도 900℃와 880℃, 금형의 압하속도 100mm/s와 10mm/s를 적용하여 모두 4가지의 경우에 대해서 해석한 결과 최적 단조공정은 첫 번째 경우인 금형의 압하속도 100mm/s, 소재의 온도 900℃로 결정할 수 있었다.

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

6. 참고문헌

- [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] L. B. Aksenov, N. R. Chitkara, and W. Johnson, "Pressure and Deformation in the Plane Strain Pressing of Circular Section Bar to Form Turbine Blade", Int. J. mech. Sci. Vol. 17, pp. 681~691, 1975
- [4] N. Akgerman, and T. Altan, "Application of CAD/CAM in Forging Turbine Blades", J. of Engineering for Power, Trans. ASME, pp. 290~296, 1976.
- [5] J. J. Park, N. Rebelo and S. Kobayashi, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method", Int. J. mach. Tool Des. and Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71~79, 1983.
- [6] S. M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Plane-Strain Rolling by the Finite Element Method", Int. J. mach. Tool Des. and Res., Vol. 24, No. 4, pp. 253~266, 1984.
- [7] S. M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. mach. Tool Des. and Res., Vol. 26, No. 3, pp. 232~243, 1986
- [8] B. S. Kang, and S. Kobayashi, "Preform Design in Ring Rolling Processes by the Three Dimensional Finite Element Method", Int. J. mach. Tool Des. and Res., Vol. 31, No. 1, pp. 139~151, 1991.
- [9] B. S. Kang, "Processed Sequence Design in a Heading Process", J. of

- Materials Processing Tech., 27, pp. 213~226, 1991.
- [10] B. S. Kang, N. S. Kim and S. Kobayashi, "Computer Aided Preform Design in forging of an Airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tools., Manufact., Vol. 30, No. 1, pp. 4~52, 1990.
- [11] 최병욱, "터빈블레이드 단조 금형설계의 자동화에 관한 연구", 한국해양대학교 석사학위논문, 1999.
- [12] 최병욱, 조종래, 왕지석, 김동권, 김동영, "터빈 블레이드의 형단조 금형설계의 자동화에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 569~575, 1999.
- [13] 이부윤, "Ti Bucket의 단조 및 열가공 공정개발 타당성 조사", 한국중공업주식회사 연구 최종 보고서, 1997.
- [14] Matthew J. Donachie, Jr., "Titanium : A technical guide Second edition", ASM International, 2000.
- [15] Gerd Lutjering, James C. Williams, "Titanium" Springer, 2003.
- [16] 권재도, 배용탁, 최성종, "티타늄(Ti-6Al-4V)의 조직변화에 따른 기계적 특성 평가", 대학기계학회논문집 A권, Vol. 26, No. 4, pp. 609~616, 2002.
- [17] 엄종택, 김두현, 나영상, 박노광, "Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명", 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 347~354, 2001.
- [18] 이유환, 신태진, 황상무, 박노광, 심인옥, 이종수, "Ti-6Al-4V 합금의 고온성형시 미세조직 예측에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 290~295, 2003.
- [19] 박종진, "티타늄디스크 근사정형 열간단조시 금형속도의 최적화", 대학기계학회논문집, Vol. 19, No. 4, pp. 896~907, 1994.
- [20] 조현중, 김낙수, 박종진, "강소성 유한요소법을 이용한 Ti 합금 터빈디스크의 단조공정 해석", 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 11, pp. 2954~2966, 1994.

- [21] N. Akgerman, "Design and manufacture of forging die : computer aided methods, SME Technical paper", MF pp. 72~531, 1972.
- [22] N. Akgerman, nad T. Altan, "Application of CAD/CAM in forging turbine and compressor blades, trans. of the ASME, J.of Engineering for power", Vol. 98, April 1976, pp. 290~296.
- [23] 이승평, "그림으로 설명하는 금속재료". 청호, 1998.
- [24] 김영석, "소성역학" 시그마프레스, 2003.

감사의 글

부족한 제게 학문적인 면과 일상생활에서의 정도를 가르쳐 주시고 인생의 길을 헤쳐 나갈 수 있도록 모든 면에서 모범을 보여주신 조종래 교수님께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립니다. 또한 바쁘신 와중에도 부족한 이 글을 심사하는데 수고를 아끼지 않으신 왕지석 교수님, 이성열 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

2년 남짓 제 대학원 생활의 모든 것이었던 전산고체역학실험실의 선배님 그리고 후배님들에게 감사의 마음 전합니다. 실험실의 만형으로서 많은 의견과 충고를 아끼지 않으시면서 대학원 생활에 많은 도움을 주신 호승이 형, 동생으로서 후배로서 언제나 힘이 되어주었던 민우, 석사 1년차로서 앞으로 실험실을 이끌어 나갈 기열이 그리고 항상 굷은 일 마다하지 않았던 막내 영환이에게 감사의 마음을 전합니다.

학부생활 4년, 그리고 그 이후에도 언제나 마음의 휴식처가 되어주었던 파도소리 선후배님들께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 특히 지금까지도 든든하게 내 곁에서 힘이 되어주는 동기 지용이와 인묵이에게 고맙다는 말 전합니다. 더불어 후배이지만 그 이상으로 제게 버팀목이 되어준 소명, 명희, 혜진이에게 고맙다는 말 전합니다.

항상 부족한 저이지만 마음의 기둥이자 안식처로서 힘들 때나 즐거울 때나 언제나 웃는 모습으로 나와 함께 해준 선영이에게 이 글을 빌어 고마움을 전하고 싶습니다.

사막이 아름다운 것은 그 속에 오아시스가 있기 때문이라고 합니다. 메마른 세상을 촉촉하고 아름답게 적셔 주는 것은 언제나 순수하고 위

대한 사랑의 힘이 아닐까 생각합니다. 아마도 모든 사랑 중에서 가장
고결하고 위대한 사랑은 자식을 향한 부모님의 한결같은 마음일 것입니
다.

늘 부족하고 못한 아들이지만 부모님께서 크신 사랑과 증만하신 신
뢰로써 이끌어 주셨습니다. 아직 갈고 닦아야 할 부분이 많은 저이지만
그래도 이렇게 구김 없이 성장하여 세상에 나아가 사람 노릇 할 수 있
도록 키워주신 은혜에 대해 이 짧은 글로는 도저히 풀어놓지 못할 무한
한 감사의 마음을 전해드리고 싶습니다. 나약하고 우둔한 제가 한 편의
논문을 쓰기까지 겪었던 많은 어려움과 실망들은 바로 부모님의 한결
같은 사랑이 있었기에 기꺼이 이겨낼 수 있었고, 이제 그렇게 우여곡절
끝에 만들어진 논문을 조심스레 세상에 내놓습니다.