

티타늄 합금의 후방압출 공정 설계

Process Design of Titanium Alloy Backward Extrusion

홍성석 김진영 김홍규 박태원 백두현 심인옥 김성식
Hong, Sung Suk Kim, Jin Young Kim, Hong Kyu Park, Tae Won, Baik, Doo Hyun Shim, In Ok Kim, Seong Shik

ABSTRACT

The backward extrusion process of titanium alloy with large length to diameter ratio was simulated for different punch and die shape. The process variables such as initial billet shape, interface friction, contacting time and punch velocity were investigated and compared with experimental results. To make more effectively titanium alloy cup shape forging products with vertical wall, a modified die design which can reduce forging load, prevent sticking with punch and minimize material loss was suggested.

주요기술어 : Backward Extrusion(후방압출), Titanium Alloy(티타늄 합금), Die Design(금형설계)

1. 서 론

티타늄합금은 비강도 및 내식성이 매우 우수한 재료로 항공우주 분야뿐 아니라 화학공업분야 및 발전용 부품, 의료기기, 인체 생체이식재료로도 많이 사용되며 근래에는 스포츠기구에 이르기까지 사용분야가 확대되고 있다. 재료 및 부품의 형태로서 단조품/가공품 및 주조품 모두 가능하나 단조/가공 재료가 주조재에 비하여 구조재로 널리 이용되고 있다. 일반적으로 단조품의 균일한 조직을 얻기위하여는 항온성형공정이 널리 이용되고 있으나, 고온에서 견딜수 있는 금형 재질이 고가인데다 항온 유지를 위한 가열시스템

등의 관련 설비에 많은 투자비가 요구되므로 최근에는 비등온 단조공정이 경제적인 측면에서 많이 고려되고 있다. 또한 소재 가격이 타 철강 재료에 비하여 고가이므로 소재 투입량을 줄이고 후속 가공비를 절감하기 위하여는 가능한 최종 부품형상에 근접하는 정밀한 성형을 하는 것이 필요하며 따라서 형상에 따른 금형설계 및 공정설계가 매우 중요하다.

티타늄합금의 비등온 단조공정에 영향을 주는 공정 변수로는 유동응력의 비등온 변형특성, 성형온도 및 속도, 예비성형체 형상, 경계면 윤활 특성 및 열전달 특성, 금형냉각 영향 등을 들 수 있다. 재료의 유동응력은 일반적으로 항온조건 하에서 압축시험을 통하여 구하게 되는데 이 값을 비등온 성형공정에 이용하기 위하여는 Shen 등^[1]이 제시한 온도 이력에 따른 유동

* 국방과학연구소

응력 값의 보정이나, 변형열에 의한 영향을 고려하는 것이 필요하다^[2]. Im 등^[3]은 금형과 소재의 접촉시간 및 성형속도와 같은 공정변수의 영향을 단순 형상의 비등온 성형공정에 대하여 고찰하였으며, Lee 등^[4,5]은 실린더 형상의 엷셋팅 공정에 대하여 유동응력 특성과 금형 냉각 영향을 고찰하였으며 그 중에서 접촉시간이 미세조직 분포 및 변형 형상을 제어하는데 주요한 변수로 작용함을 보여주었다. 소재와 금형사이의 열전달 계수는 윤활조건, 온도, 재료의 항복응력 및 접촉압력의 함수로 압력이 증가할수록 그 값은 증대하게 된다. 이러한 특성들은 링 압축시험을 통하여 구하게 되는데 참고문헌^[1,6]에 잘 나타나 있다. 최근에는 2차원 형상뿐 아니라 3차원 형상에 대한 해석도 널리 이용되고 있는데 Dean 등^[7]은 Ti-6Al-4V 블레이드 성형에서 경계면 마찰, 금형온도 변화 및 경계면 열전달 계수를 실험적으로 측정하여 그 값을 이용하여 유한요소 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

지금까지 수행되어 온 티타늄합금의 단조공정에 대한 공정변수들의 영향은 대체로 실린더 엷셋팅 형상과 같은 단순 형상에 대하여 주로 연구되어 왔으며, 산업체에서 수행되고 있는 실제 단조공정에 대한 금형형상 및 온도, 빌레트형상 등의 영향에 대한 고찰은 미흡한 실정이다. 그 이유는 현장에서의 비등온 성형공정에 대한 공정변수들의 값들을 정확히 파악하는 것이 매우 힘들기 때문이다. 본 논문에서는 길이/직경비가 큰(약 2.3) 컵 형상의 티타늄합금 후방압출 공정에 대하여 산업체에서 수행하고 있는 금형형상에 따른 공정설계를 수행하여 실제 단조작업과의 비교를 통한 단조특성을 검토하였다. 실제 단조공정이 수행된 모델에 대하여 빌레트 형상, 금형 접촉시간, 경계면 마찰 및 성형속도 등의 단조공정 변수에 따른 영향을

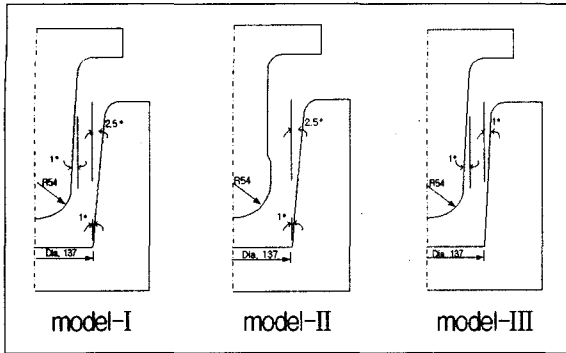
고찰하였다. 또한 길이/직경 비가 큰 티타늄합금의 후방 압출 공정설계시 빠짐기울기(drafting angle)를 최소화하여 경제적인 부품 성형이 가능한 금형설계 방안을 제시하였다.

2. 후방압출 공정설계

2.1 금형 설계

일반적으로 길이/직경 비가 큰 컵 형상의 성형은 후방압출 단조공정에 이어 아이어닝(ironing) 공정으로 측면벽 길이를 늘리는 방법과 후방압출 공정만으로 부품을 제조하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 전자의 방법은 주로 철강 재료의 단조공정에 널리 이용되며, 아이어닝 공정으로 측면벽 길이 늘림과 아울러 벽 두께를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 티타늄합금의 경우 재료의 온도 민감성 등으로 인하여 일반적으로 후자의 방법으로 성형을 하게된다. 본 논문에서는 후자의 방법에 대하여 금형설계를 수행하였다.

금형설계에서 고려되는 요소중의 하나는 단조시 소재유동을 원활하게 하고, 단조후 단조품 추출을 용이하게 하는 내·외면 측면부의 빠짐기울기를 선정하는 것이다. 일반적으로 외측 빠짐기울기는 내측보다 더 작게 설정하는 것이 일반적이며, 빠짐기울기를 설정하는 가장 중요한 요소는 부품의 높이 혹은 깊이이다. 또한 빠짐기울기는 성형하기 어려운 재료나 변형속도가 느린 경우 성형 시 계속되는 냉각과 수축(shrinkage)으로 인하여 더 큰 빠짐기울기가 요구된다. 티타늄과 니켈기합금의 단조인 경우 일반적으로 7° 혹은 그 이상의 빠짐기울기가 요구된다^[8]. 그러나 이러한 값은 부품 형상에 따라 다르게 적용될 수 있



[그림 1] 펀치 및 하부 금형 형상

[표 1] 펀치 및 하부 금형 빠짐기울기

	펀치 빠짐기울기	하부 금형 빠짐기울기
model I	1°	1°
model II	1°	1° + 2.5°
model III	0°	1° + 2.5°

으며 본 논문에서처럼 길이/직경비가 큰 컵 형상의 부품인 경우 빠짐기울기가 크면 클수록 소재 소모량 및 단조후 가공량이 증대되어 경제적이지 못하게 된다. 따라서 가능한 빠짐기울기를 최소로하여 성공적인 부품을 제조하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 그림 1에서처럼 일반적으로 고려될 수 있는 금형설계의 3가지 모델에 대하여 해석을 수행하여 실제 단조공정과 비교 검토한 후 새로운 형태의 티타늄합금 후방압출 단조용 금형설계를 제시하고자 한다. 표 1은 각 모델에 대한 펀치 및 다이 형상을 보여주고 있다.

2.2 공정설계

티타늄합금의 단조공정 설계에서 우선 고려되어야 할 요소는 소재가열 온도 설정 및 가열방식이다. 티타늄합금은 가열시 표면에 산화스케일이 발생하며 철강

재료와는 달리 스케일이 표면에 부착된 상태로 단조공정이 수행되므로 최종 제품에 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 산화 방지를 위하여 몰유리 등으로 코팅을 하여 소재를 가열하게 된다. 본 논문에서는 Deltaglaze #151 코팅제를 사용하였으며 이러한 코팅제는 산화 방지뿐 아니라 단조시 금형과 소재 사이의 윤활 작용도 하게되므로 티타늄합금 단조공정에 널리 이용되고 있다. 소재 가열온도는 일반적으로 β -변태 온도(β -transus temperature) 이하에서 이루어지며, 본 단조공정에서는 970°C로 설정하였다.

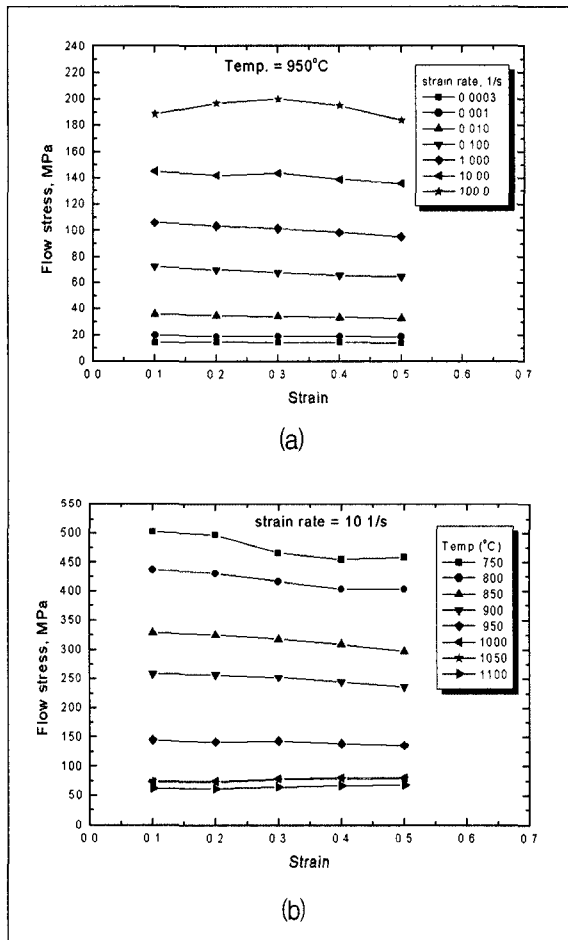
또한 펀치 및 다이 온도를 통상의 일반단조 공법보다는 가능한 높게 설정하기 위하여 다이에는 전기 저항식 히터봉을 삽입하여 금형 온도를 500°C까지 예열이 가능하도록 하였다.

2.3 공정 해석

해석에 이용된 티타늄합금의 유동응력 특성은 참고 문헌^[9]를 참조하였다. 티타늄합금의 유동응력 특성은 일반 철강재료와는 달리 그림 2에 보여주는 것처럼 온도 및 변형률속도에 매우 민감하며 온도가 100°C 하강하게 됨에 따라 유동응력 값은 상당한 차이가 나타나므로 성형 시 온도제어가 중요한 변수가 됨을 알 수 있다. 해석에 이용된 열적 특성은 참고문헌^[5]을 참조하였으며, 표 2 및 표 3에 각각 나타내었다.

금형 및 소재의 경계면 열전달 계수는 이전의 연구 결과^[1,6]에서 알 수 있듯이 경계면에 작용하는 압력에 의존하게 되며, 소재운반 및 정지 상태 공정과 같이 압력이 가해지지 않은 경우 $0.8\text{KWm}^{-2}\text{K}^{-1}$, 실제 펀치가 작용하는 단조공정인 압력이 가해지는 경우 $20\text{KWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 를 사용하였다. 또한 경계면 마찰상수는 Deltaglaze #151 몰유리로 코팅을 한 경우 약 0.2의 값을 사용하였다^[10].

공정 해석은 DEFORM^[11] 프로그램을 이용한 비등온 성형공정으로 수행하였으며, 공정변수와 관련된 값들은 표 4에 보여주고 있다.



[그림 2] 유동응력 선도 : (a) 950°C에서 변형률속도에 따른 선도, (b) 변형률속도 10 1/s에서 온도에 따른 선도

[표 2] Ti-6Al-4V합금의 열전도도 계수

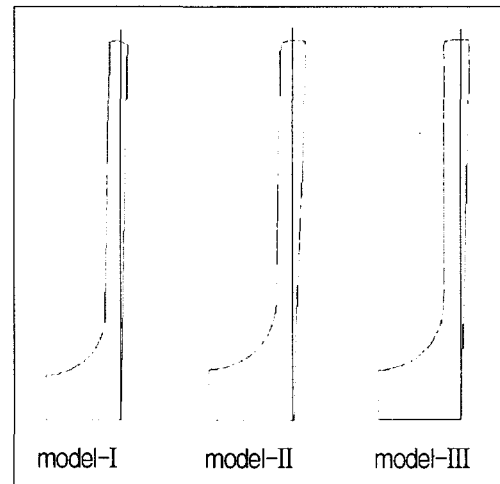
Temperature (°C)	93	205	315	425	540	650	950	1100
K (Ns ⁻¹ °C)	7.3	9.1	10.6	12.6	14.6	17.5	23.5	24.5

[표 3] Ti-6Al-4V합금의 비열

Temperature (°C)	100	200	400	600	800	1000	1100
C (KJg ⁻¹ °C)	550	590	620	730	910	950	1000

[표 4] 해석에 사용된 공정 변수

Punch velocity	150 mm/s
Punch/Die temperature	300°C/500°C
Billet Temperature	970°C
Friction factor	0.2



[그림 3] 펀치 및 금형 형상에 따른 변형 형상

그림 3은 각 모델에 대한 최종 변형 형상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 펀치 및 다이의 빠짐 기울기가 작을수록 보다 수직벽에 가까운 형상을 얻을 수 있으며, 그림 4에서 처럼 model-I, model-III, model-II 순으로 외부 반경의 벌어짐 정도가 증대되는 것을 알 수 있다. 또한 부품길이도 최대로 성형할 수 있어 소재 소모량 및 단조 후 기계가공 등에서 큰

이점을 얻을 수 있다. 그러나 model-I처럼 빠짐기울기를 너무 작게하는 경우 실제 단조공정에서는 소재가 편치면에 고착되어 성형 후 탈형에 어려움이 발생하였으며, 따라서 model-II나 model-III으로의 검토가 이루어졌다. 그림 5는 이송거리에 대한 하중선도로 model-I의 경우는 성형 중 벽면이 모두 접촉하게되어 성형이 진행됨에 따라 선형적으로 하중이 증가하는 양상을 나타내고 있으며 그 값은 1,030톤으로 최대하중을 나타내고 있다. model-II의 경우는 성형이 진행됨에 따라 다이 빠짐기울기가 2.5°로 증가하였으므로 상대적으로 낮은 621톤의 하중치를 나타내고 있으나, model-III의 경우는 편치 및 다이 하단부에서만 접촉

이 연속적으로 일어나게 되므로 성형초기에 하중이 증가하다가 어느 정도 변형이 진행된 후에는 하중 변화가 없이 거의 일정한 값을 나타내고 있으며 그 값은 331톤으로 세 모델중에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 본 연구에서는 단조품이 편치에 고착되는 문제와 성형 하중을 고려하여 model-III을 실제 단조공정에 적용하였으며, 단조작업은 600톤 유압프레스에서 수행되었다.

3. 실제 단조공정 해석 및 실험

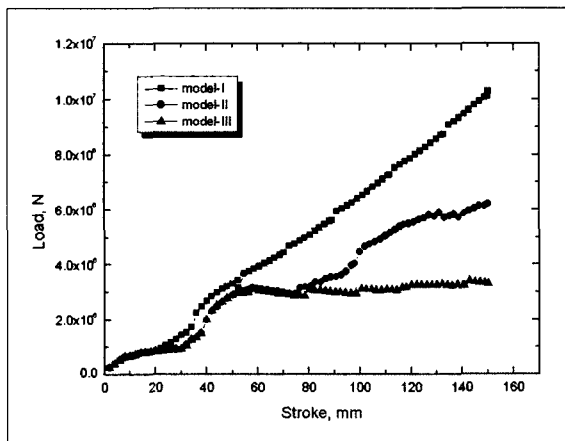
3.1 초기 빌레트 형상 영향

Model-III에 대하여 초기 빌레트 형상의 영향을 고찰하였다. 그림 6은 초기 빌레트 형상으로 실린더 형상과 측면 경사 빌레트 형상을 보여주고 있으며 두 빌레트의 체적은 동일하게 하였다. 실린더 빌레트인 경우에는 소재가 금형에 장착 시 빌레트가 금형 하부에 접촉하게 되는 형태이며, 측면 경사 빌레트인 경우에는 하부금형 중간에 소재가 위치하도록 되어있다.

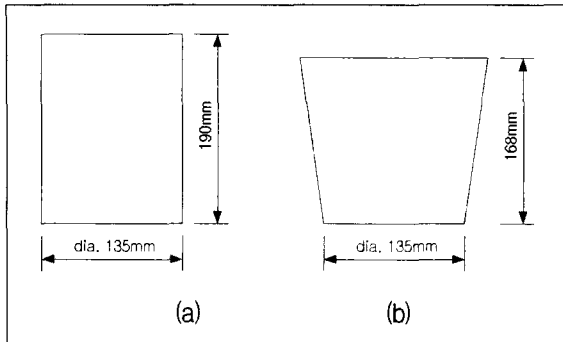
그림 7은 변형 형상을 나타낸 것으로 실린더 빌레트인 경우 단조품 끝단부 형상이 균일하게 성형되는 반면에 측면 경사 빌레트인 경우에는 외측면이 금형에 접촉하게 되어 소재 온도가 떨어지게 되므로 외측면 유동이 내측면 보다 느리게 일어나 끝단부 형상이 불균일한 것을 알 수 있다. 즉 빌레트가 초기에 금형에 접촉되는 위치에 따라 최종 성형품 형상에 영향을 주게되는 것을 알 수 있다. 그림 8은 온도 분포를 나타낸 것으로 실린더 빌레트인 경우 금형하부 즉 금형보다 상대적으로 온도가 낮은 이젝터 부분(300℃)에 소재가 접촉하게 되어 측면 경사 빌레트인 경우보다 온도 편차가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

	Ro	R1	R2	H
model-I	68.5	58.36	74.43	344.38
model-II	68.5	58.44	77.45	301.59
model-III	68.5	53.87	74.88	309.43

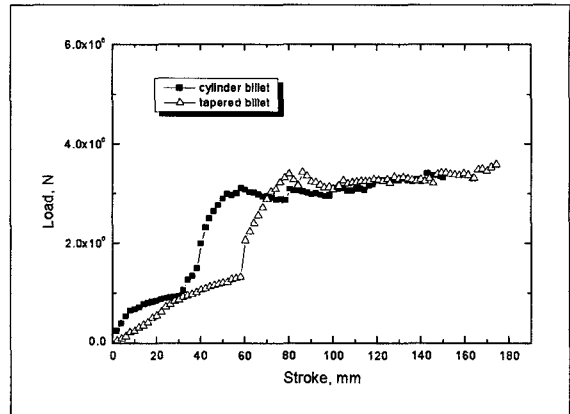
[그림 4] 변형 형상에 대한 대표적인 치수



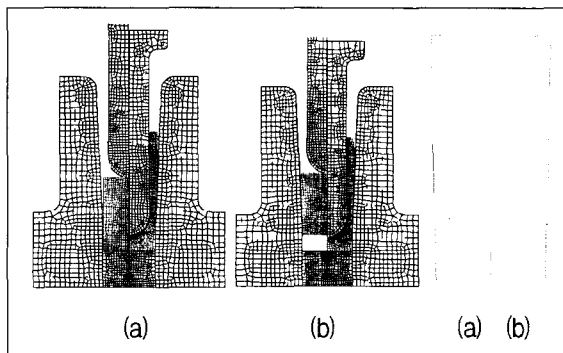
[그림 5] 금형 설계에 따른 하중 선도



[그림 6] 빌레트 형상 : (a) 실린더 (b) 측면 경사



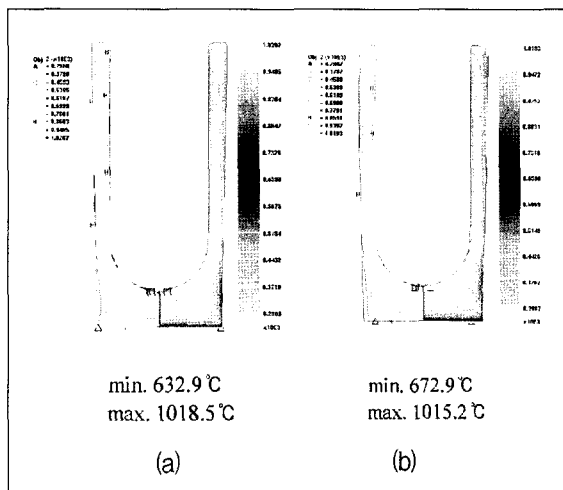
[그림 9] 빌레트 형상에 따른 하중 선도



[그림 7] 변형 형상 : (a) 실린더 빌레트
(b) 경사 빌레트

그림 9는 두 가지 빌레트 형상에 대한 하중선도를 비교한 것으로 최대 하중에서의 크기는 두 가지 경우 유사하게 나타나고 있으며, 성형시간은 측면경사 빌레트인 경우가 더 많이 소요되고 있다. 실제 성형공정에서는 측면 경사 빌레트를 이용하여 단조가 수행되었으며 그림 10은 실제 단조품 형상과 해석 결과를 비교하여 나타내었으며, 실제 단조품 끝단부 형상이 해석 결과와 유사함을 알 수 있다.

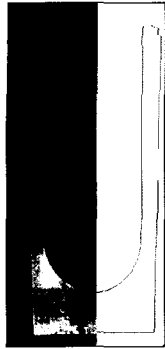
이상의 결과를 보면 본 해석 조건하에서는 단조품 끝단부 형상을 보다 균일하게 성형하기 위하여는 실린더 빌레트가 유리하며, 온도 편차를 최소화하기 위하여는 측면경사 빌레트를 이용하는 것이 유리함을 알 수 있다.



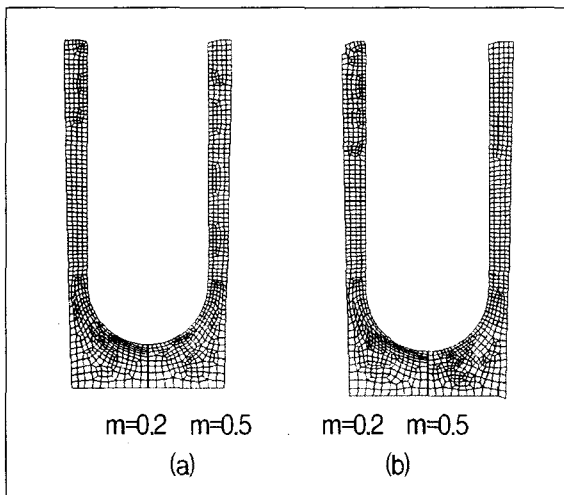
[그림 8] 온도 분포 : (a) 실린더 빌레트,
(b) 경사 빌레트

3.2 경계면 마찰 영향

앞절의 초기 빌레트 형상에 따른 단조공정에 대하여 경계면 마찰 영향을 고찰하였다. 그림 11은 경계면 마찰상수, m 이 0.2와 0.5인 경우의 각 빌레트 형상에 따른 변형 형상을 보여주고 있다. 실린더 빌레트인 경우 경계면 마찰에 따른 최종 단조품 형상의 변화는 나타나지 않았으며, 반면에 측면 경사 빌레트인 경우

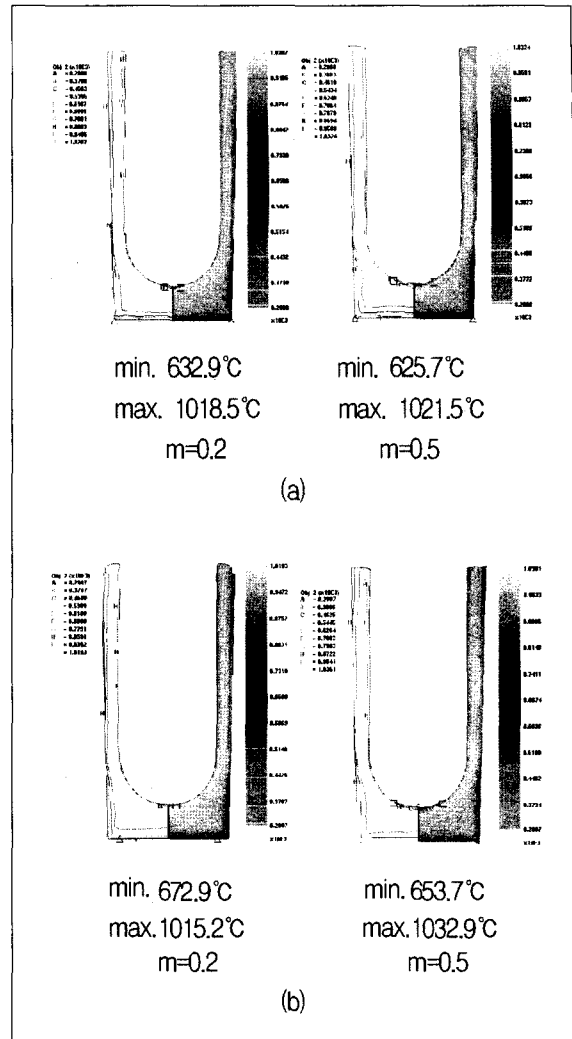


[그림 10] 변형 형상의 해석 및 실험 결과 비교



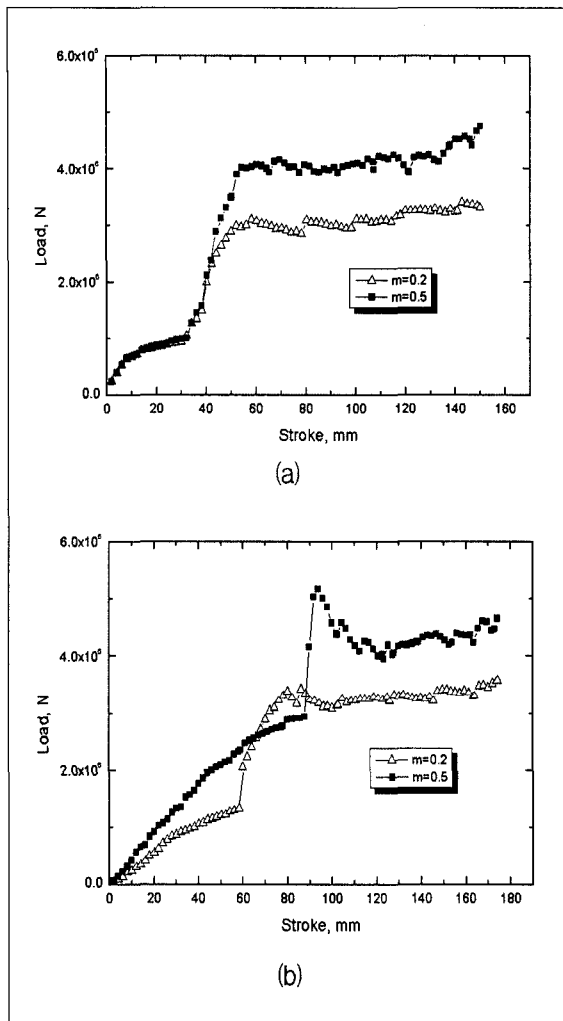
[그림 11] 경계면 마찰에 따른 변형 형상 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트

마찰 상수가 0.2인 경우에는 끝단부 형상이 불균일 한 반면에 마찰상수가 큰 경우에 오히려 끝단부 형상이 보다 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 마찰 상수가 작은 경우에는 내면의 유동이 외 면보다 다소 빠르게 진행되는 반면, 마찰 상수가 큰 경우에는 내외면 유동이 다소 균일하게 나타나는 것 을 알 수 있다. 그림 12는 마찰 상수에 따른 온도 분 포를 나타낸 것으로 두가지 빌레트 모두 마찰 상수가 작은 경우 온도의 최대 및 최소 편차가 작은 반면에



[그림 12] 경계면 마찰에 따른 온도 분포 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트

마찰 상수가 큰 경우 온도 편차도 크게 나타나는 것 을 알 수 있다. 또한 경사 빌레트인 경우 마찰 상수에 따라 온도의 최대 및 최소 위치가 다르게 분포됨을 알 수 있으며, 전반적으로 최종 부품의 온도 분포를 균일하게 하기 위하여는 경계면 마찰을 작게하는 것 이 유리함을 알 수 있다. 그림 13은 하중 선도를 나 타낸 것으로 실린더 빌레트인 경우 초기에 하중이 약



[그림 13] 경계면 마찰에 따른 하중선도 :
 (a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트

간 증가하다가 소재가 금형에 완전히 접촉한후 급격한 증가를 보이며 그후에는 하중의 변동이 없이 성형이 이루어지는 양상을 나타내고 있다. 경사 빌레트인 경우 하중이 성형 초기에 증가하다가 성형 중간 단계에서 하중이 급격히 증가하고 그후에 하중의 변동이 작은 선도를 나타내고 있으며, 마찰 상수가 클수록 하중의 급격한 증가가 다소 늦게 나타나며, 하중 값은 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

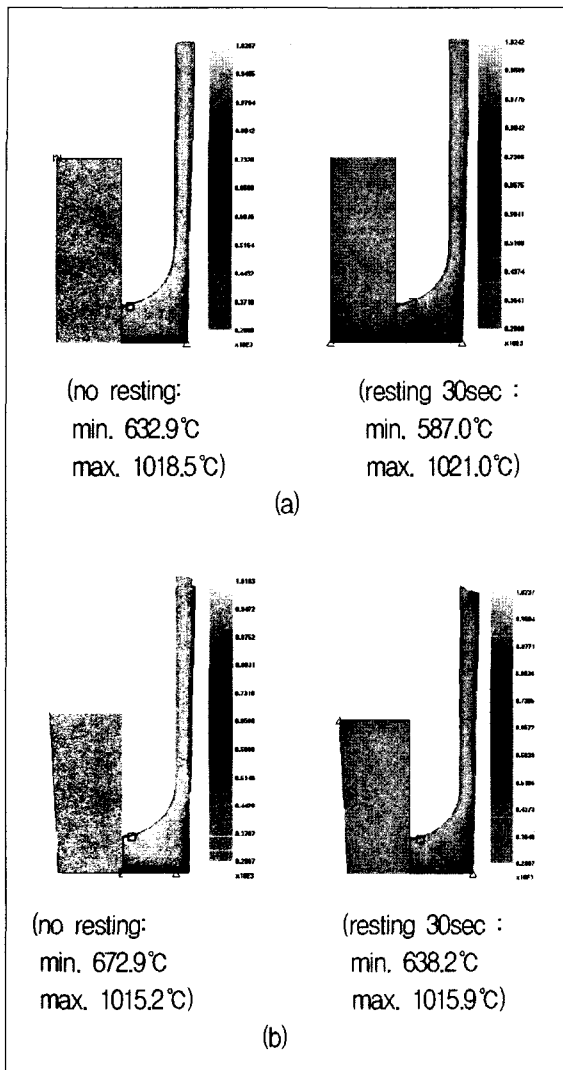
3.3 접촉시간 영향

일반적으로 단조공정은 소재를 로에서 금형으로 이동하는 시간, 소재가 금형에 장입되어 변형이 일어나기 전의 정지(resting)시간 및 소재가 요구 형상으로 변형되는 시간 등을 포함하게 된다. 본 논문에서는 소재가 금형에 장입되어 변형되기 전의 정지 상태에서 금형과 접촉되는 시간의 영향에 대하여 고찰하였다. 정지되어 있는 경우에 경계면 열전달 계수는 $0.8\text{KWm}^{-2}\text{K}^{-1}$, 압력이 가해지는 성형동안에는 $20\text{KWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 를 각각 사용하였다.

그림 14(a), (b)는 실린더 및 측면 경사 빌레트인 경우의 정지시간이 없는 경우와 30초인 경우에 대한 온도분포를 나타낸 것이다. 실린더 빌레트인 경우 소재가 초기에 금형 하부와 접촉하게 되고, 측면 경사 빌레트인 경우 측면 상부 모서리 부분이 접촉하게 되므로 상대적으로 하부 금형 온도보다 낮은 이젝터(ejector) 부분에 접촉하게 되는 실린더 빌레트인 경우가 성형 후 최저 온도가 더 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 정지시간이 없는 경우와 비교하여 성형 후 최대 온도는 거의 비슷한 양상을 보이거나 최저 온도는 더 낮은 값을 나타내고 있어 정지시간이 길어짐에 따라 최종 부품의 온도 편차가 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

그림 15(a), (b)는 두 가지 빌레트 형상에 대한 최종 형상을 보여주는 것으로 실린더 빌레트인 경우에는 정지 시간의 크기에 관계없이 최종 형상의 변화가 나타나지 않았으나 측면 경사 빌레트인 경우 정지시간이 30초인 경우에는 편차와 접촉되는 내면부의 유동이 외면부보다 다소 빠르게 진행됨을 알 수 있으며, 정지 시간이 없는 경우와 같이 모서리 부분이 단지는 현상은 발생되지 않았다.

그림 16은 정지시간 크기에 따른 두 가지 빌레트

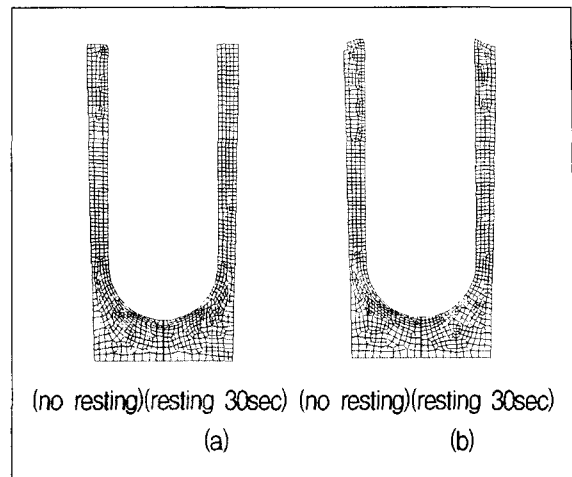


[그림 14] 정지 시간에 따른 온도 분포 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트

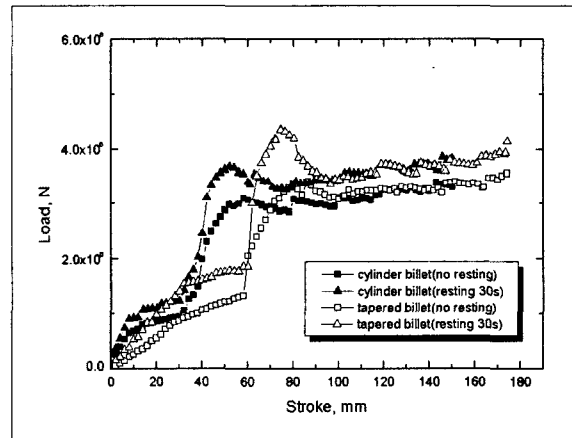
의 하중 분포를 나타낸 것으로 정지 시간이 있는 경우가 초기 온도 하강에 따른 영향으로 다소 큰 하중 값을 나타내고 있으며, 그 경향은 빌레트 형상에 관계없이 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.4 펀치 속도 영향

티타늄합금의 단조공정에서 변형속도의 영향을 확

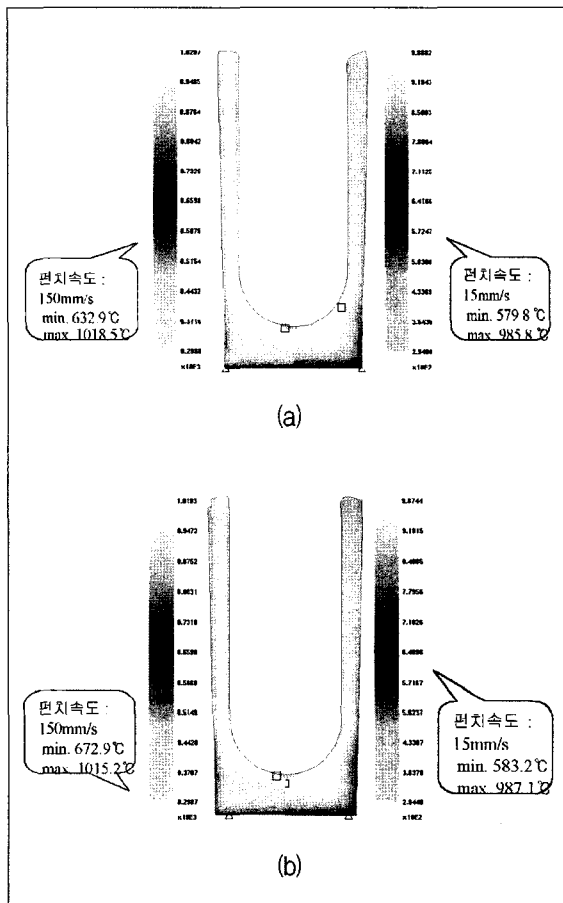


[그림 15] 정지 시간에 따른 변형 형상 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트



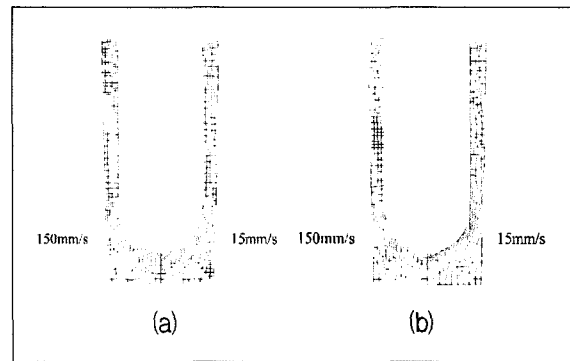
[그림 16] 정지 시간에 따른 하중선도

인하기 위하여 펀치속도를 두 가지로 변경하여 해석을 수행하였다. 비교적 성형속도가 큰 경우에 대하여 150mm/sec, 느린 성형속도에 대하여는 약 1/10인 15mm/sec로 하여 계산하였다. 그림 17은 두 가지 빌레트 형상에 대한 펀치속도에 따른 온도 분포를 보여주고 있다. 빌레트 형상에 관계없이 성형속도가 빠른 경우가 금형과의 접촉시간 단축 및 변형열 발생 등으로 성형속도가 느린 경우에 비하여 최종 부품의 최소

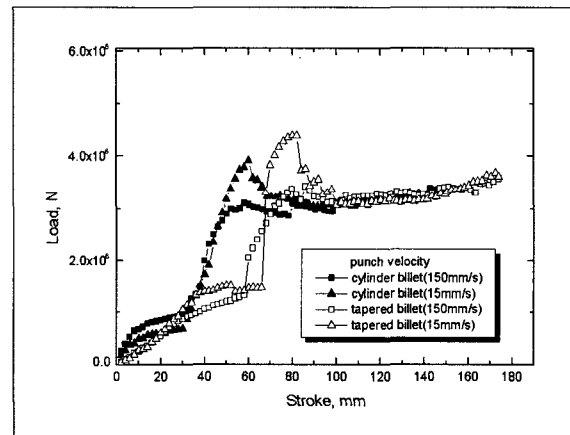


[그림 17] 펀치 속도에 따른 온도 분포 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트

최대 온도 값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 최대 및 최소 온도 편차도 성형속도가 빠른 경우에 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 성형속도가 빠른 경우에는 변형열에 의한 영향으로 부품에 국부적으로 온도가 높은 부분이 존재하게 되는데 실린더 빌레트인 경우 1018.5°C, 경사 빌레트인 경우 1015.2°C로 나타났다. 티타늄합금의 β 변태 온도(β -transus temperature)가 일반적으로 $995 \pm 15^\circ\text{C}$ 이므로 이 온도구간을 초과하게 되면 내부 미세조직은 $\alpha + \beta$ 에서 β 로의 변화를 가져오게 되며 최종 부품의



[그림 18] 펀치 속도에 따른 변형 형상 :
(a) 실린더 빌레트 (b) 경사 빌레트



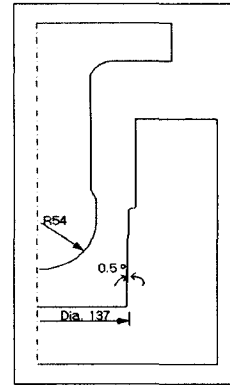
[그림 19] 펀치 속도에 따른 하중선도

기계적 성질에도 영향을 주게 되므로 성형속도의 선정은 신중하게 이루어져야 할 것으로 사료된다.

그림 18은 성형 속도에 따른 최종 변형형상을 보여주는 것으로 실린더 빌레트인 경우 펀치 온도가 하부 급형보다 상대적으로 낮게되어 있으므로 펀치와 접촉 시간이 큰 성형속도가 느린 경우에 외면의 유동이 내면보다 다소 빠르게 진행됨을 보여주고 있으나 그 차이는 크지 않으며, 경사 빌레트인 경우에는 성형속도가 느린 경우가 펀치와의 접촉시간 증대로 내부 유동이 상대적으로 감소되어 성형속도가 빠른 경우에 나

타나는 끝단부 단 지는 현상은 오히려 방지할 수 있음을 알 수 있다.

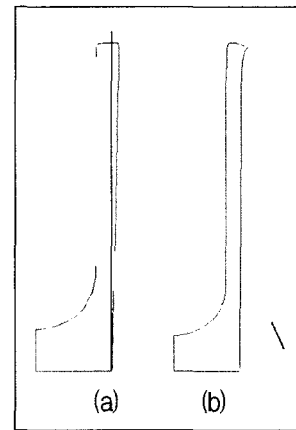
그림 19는 하중 선도를 보여주는 것으로 성형속도가 느린 경우에는 일반적으로 성형 하중이 작게 나타나나, 티타늄합금의 경우 온도 감소에 따른 유동응력 편차가 크기 때문에 온도 감소가 크게 일어나는 느린 성형속도에서 오히려 최대 하중은 다소 증가될 수 있음을 알 수 있다.



[그림 20] 수정 설계된 펀치 및 금형 형상

4. 수정 금형설계

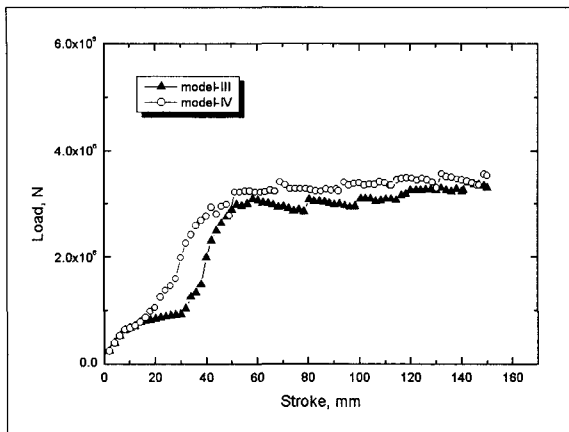
본 연구에서 시도되고 있는 컵형상의 티타늄 후방 압출 공정을 성공적으로 수행하기 위하여는 앞 절에서 논의된 바와 같이 초기 빌레트 형상, 소재 및 금형 간의 경계면 마찰, 빌레트의 금형과의 접촉시간 및 펀치속도 영향등의 다양한 공정 변수들의 영향들이 면밀히 검토되어야 한다. 그러나 이러한 공정 변수들의 영향에 앞서 본 제품과 같은 후방압출 부품 성형에서는 가능한 성형 하중의 감소, 티타늄합금의 낮은 열전도도 특성으로 인한 소재와 펀치 사이의 고착문제 및 빠짐기울기 최소화에 따른 소재 손실 감소 등에 영향을 주는 금형설계가 중요한 부분을 차지하게 된다. 본 논문에서는 이러한 영향을 고려하여 앞절에서 제시한 금형 형상을 그림 20과 같이 수정 설계안을 제시하고자 한다. 성형 초기에 소재는 하부 금형에 모두 접촉하게 되나 성형이 진행됨에 따라 내면 형상을 결정하는 펀치부는 펀치 헤드 부분만 접촉하도록 하며, 하부 금형에 접촉된 소재는 후방 압출 형상이 완성된 후에는 금형에 접촉하지 않도록 하므로써 접촉면적 최소화로 성형하중을 감소시킬 수 있으며, 하부 금형의 빠짐 기울기를 최소화하므로써 소재 손실을 최소화 할



[그림 21] 금형 형상에 따른 변형 형상 :
(a) model-III (b) 수정 금형

수 있으며, 성형 후 온도 하강이 상대적으로 큰 압출 부품 상부가 펀치에 직접적으로 접촉되지 않게 하므로써 일반적으로 발생될 수 있는 펀치와 부품 사이의 고착 문제를 해결하고자 하였다.

그림 21은 모델 III의 실린더 빌레트인 경우와 최종 형상에 대한 부품 단조형상을 보여주고 있다. 그림에서 처럼 수정 설계된 금형인 경우 보다 수직에 가까운 부품 형상을 성형할 수 있으며 부품높이도 모델 III의 309.43mm 보다 357.98mm로 성형할 수 있음을 알 수 있다. 그림 22는 model III의 실린더 빌레트인 경



[그림 22] 금형 형상에 따른 하중 선도

우와 하중선도를 비교한 것으로 두 모델 사이의 성형 하중은 유사한 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 수직벽을 갖는 후방 압출 부품인 경우 부품형상, 성형하중 및 성공적인 부품 성형을 위하여는 본 논문에서 제시되는 수정 형상의 금형을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 산업 현장에서 컵 형상의 후방 압출 공정에서 일반적으로 고려될 수 있는 여러 가지 금형 설계 모델에 대한 해석을 수행하여 각 공정 변수들의 영향을 분석하고 실제 단조공정과 비교 검토를 수행하였으며, 수직벽을 갖는 컵형상의 티타늄합금 후방압출 공정에 대하여 보다 개선된 금형 설계를 제시하므로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 티타늄합금의 컵형상 후방압출 공정에서는 가능한 소재가 펀치와 금형에 접촉되는 면적을 최소로 하는 것이 바람직하며 금형 설계 방법에 따라 성형 하중을 크게 감소시킬 수 있다.

- 2) 초기 빌레트의 형상 및 금형에 처음 접촉되는 위치에 따라 최종 성형품의 끝단부 형상이 다르게 나타남을 알 수 있으며 이러한 현상은 실제 단조품 형상과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 경계면 마찰계수를 가능한 작게 할수록 최종 성형품의 최대, 최소 온도 편차를 줄일 수 있으며, 성형하중 감소에도 기여함을 알 수 있다.
- 4) 금형과의 접촉시간 또한 최종 부품의 온도 편차에 크게 기여하고 있음을 알 수 있으며 가능한 소재를 로에서 취출하여 성형 시작 전까지의 시간을 최소화하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.
- 5) 성형 속도를 빠르게 할수록 최종 부품의 온도 편차를 감소시킬 수 있으나 국부적인 온도 상승이 미세조직 및 기계적 특성에 나쁜 영향을 신중히 고려해야 할 공정 변수중 하나이다.
- 6) 수직벽을 갖는 티타늄합금 컵형상 후방압출 부품을 보다 효과적으로 성형하기 위하여 성형하중 감소, 소재와 펀치 사이의 고착문제 및 소재 손실 최소화가 가능한 수정된 금형 형상을 제시하였으며, 본 수정금형 이용시 최대 높이의 부품 성형이 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] G.S. Shen, S.L. Semiatin, E. Kropp and T. Altan, "A Technique to Compensate for Temperature History Effects in the Simulation of Non-Isothermal Forging processes", Journal of Materials Processing

- Technology, Vol.33, 1992, pp.125~139.
- [2] H.L. Gegel, J.C. Malas, S.M. Doraivelu and V.A. Shende, "Modeling Techniques Used in Forging Process Design", Metals Handbook: Forming and Forging, Vol.14, American Society for Metals, 1988, pp.415~438.
- [3] Y.T. Im and G.S. Shen, "A Study of Influence of Press-Speed, Contact Time, and Heat Transfer in Non-Isothermal Upset Forging of Ti and Al Alloy Rings", Proc. 16th NAMRC, 1988, pp.91~98.
- [4] Rong Shean Lee and Huan Chang Lin, "Effects of Die Chilling and Flow Stress Characteristics on the Deformation of Non-Isothermal Forging of Ti-6Al-4V Alloy", Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol.4, 1996, pp.205~219.
- [5] Rong Shean Lee and Huan Chang Lin, "Process Design Based on the Deformation Mechanism for the Non-isothermal Forging of Ti-6Al-4V Alloy", Journal of Materials Processing Technology, vol. 79, 1998, pp.224~235.
- [6] S.L. Semiatin, E.W. Collings, V.E. Wood and T. Altan, "Determination of the Interface Heat Transfer Coefficient for Non-Isothermal Bulk-Forming Processes", Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol.109, 1987, pp.49~57.
- [7] T.A. Dean and J.W. Brooks, "An Exercise in the Investigation of Boundary Conditions and Evaluation of Numerical Simulation Applied to the Net-shape Forging of Ti-6Al-4V Aerofoil Blades", Proc. of the International Conference on Forging and Related Technology, Birmingham, UK, 1998, pp.73~82.
- [8] Tomas G. Byrer, S.L. Semiatin and Donald C. Vollmer, "Forging Handbook", Forging Industry Association and ASM, 1985, pp.70.
- [9] T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier and Y.V.R.K. Prasad, "Hot Working of Commercial Ti-6Al-4V with an Equiaxed α - β Microstructure: Materials Modeling Considerations", Materials Science and Engineering, vol. A284, 2000, pp.184~194.
- [10] S.L. Semiatin, R.L. Goetz, E.B. Shell, V. Seetharaman, and A.K. Ghosh, "Cavitation and Failure during Hot Forging of Ti-6Al-4V", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.30A, 1999, pp.1411~1424.
- [11] DEFORMTM Users Manual, Version7.0, Scientific Forging Technologies Corporation, Columbus, OH, 2000.