

Ti-6Al-4V 판재의 온간 딥드로잉 성형성에 미치는 공정변수의 영향

신기승^{1,2} · 박진기³ · 김정환[#] · 김영석³ · 박용호² · 박노광¹

Effect of Processing Conditions on the Deep Drawability of Ti-6Al-4V Sheet at Warm Temperatures

G. S. Shin, J. G. Park, J. H. Kim, Y. S. Kim, Y. H. Park, N. K. Park

(Received February 6, 2014 / Revised July 1, 2014 / Accepted July 31, 2014)

Abstract

In the current study, fundamental deep drawing characteristics of Ti-6Al-4V alloy sheets were investigated to establish the effect of processing conditions on large size square deep drawn cups. To accomplish this study, FE-simulations (Abaqus) were performed to determine optimum blank size, friction coefficient, the gap between punch and die, etc. The simulated processing parameters were verified experimentally. Based on the FE-simulation results, deep drawing was performed with various blank holding loads and sample sizes. In order to improve the formability of Ti-6Al-4V sheet, various lubricant methods were evaluated. Tensile tests and thickness measurements were conducted on the formed sheets. Processing parameters including blank holding force, lubricants, and optimum blank size, were selected to achieve improved drawing quality. With the optimum processing condition, a 200mm×200mm cup was deep drawn successfully.

Key Words : Titanium, Ti-6Al-4V Sheet, Deep Drawing, FEM-simulation, Abaqus Code, Lubricant

1. 서 론

최근 세계적으로 항공기부품에 타이타늄 합금의 사용 비율이 점점 증가하는 추세이다. 최신 민항기(Boeing 787)에서 15wt.% 이상, 군용기(F22)에서 40wt.% 이상 타이타늄 부품이 다량 사용되고 있다[1, 2]. 국내에서도 항공 우주부품에 타이타늄 합금을 적용하고 있으나, 타이타늄 판재(Ti-6Al-4V)의 경우 항공기용 브라켓(bracket) 및 덕트(duct)등의 부품을 제조하기 위한 핵심 타이타늄 판재 성형 기술이 부족하여, 해외로부터의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 기존의 판재 성형법으로 하이드로포밍, 러버포밍 등이 있으나, 주로 알루미늄과 철강 소재에 많이 적용되었던 기술로서 타이타늄 합금에는 적용이 어

려웠다. 그 이유로는 낮은 성형성으로 인해 충분한 변형량을 얻기 어렵고, 집합조직과 스프링 백의 영향을 많이 받아 형상 제어 해석이 난해하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 800℃~950℃에서 초소성 성형을[1,3,4] 하는데 실제 현장에 적용할 경우 작업성이 떨어지고 성형비용이 높다는 단점이 제기되고 있다. 최근 높아지는 고강도 타이타늄 판재부품의 수요에 대비하기 위해서 성형온도가 낮고 생산성을 높일 수 있는 유압프레스를 이용한 드로잉 공정기술개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구는 Ti-6Al-4V판재를 이용하여 550℃에서 온간 딥드로잉 성형의 가능성을 확인하고자 하였으며, 공정 조건의 영향을 도출 하기 위해 유한요소해석(FEM)을 통해서 블랭크 크기, BHF(Blank Holding Force), 하부 금형과

1. 재료연구소, 타이타늄연구실

2. 부산대학교, 재료공학과

3. 경북대학교, 기계공학부

Corresponding Author: Hanbat National University, E-mail: jh.kim@hanbat.ac.kr

편치 사이의 간격 등을 예측하였다. 유한요소해석 예측결과를 토대로 온간 성형 후 사각 컵에 대한 유한요소해석 예측결과 비교 및 산세처리, 두께측정, 인장실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V 소재는 Grade 5급으로서 ASTM B265 규격을 만족하는 재질로서 합금조성은 Table 1과 같다. 실제 산소함량을 정밀 분석한 결과 0.19%로 양호한 범위 안에 있는 것을 확인했다.

본 소재는 압연 소둔처리 되었으며, 압연판재의 미세조직을 분석해보았다. Fig. 1은 압연방향에 대해 ND, TD, RD 방향 별로 조직을 관찰한 결과이다. 방향별로 결정립도와 형상에서 큰 차이는 보이지 않았으며, 평균 결정립도는 5~10 μ m 수준이었다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Elements	Composition (wt.%)
Al	5.5 – 6.75
C	< 0.10
Fe	< 0.40
V	3.4 – 4.5
O	< 0.20
N	< 0.05
H	< 0.01
Ti	Bal

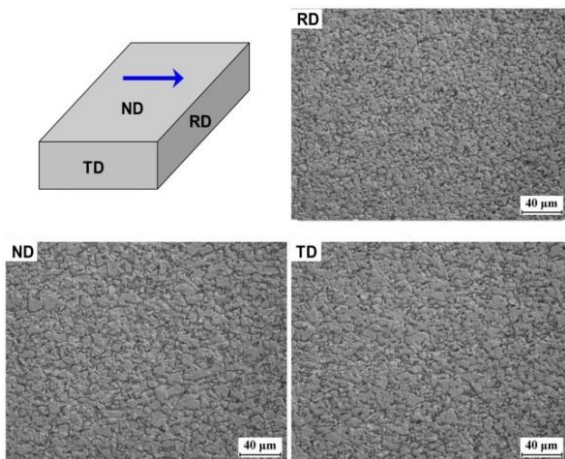


Fig. 1 Directional microstructure of Ti-6Al-4V sheet

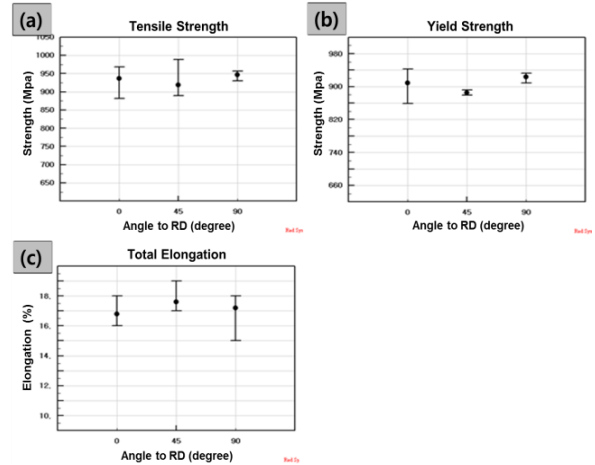


Fig. 2 Tensile strength and elongation of Ti-6Al-4V sheet according to loading axis: (a) tensile strength, (b) yield strength, and (c) total elongation

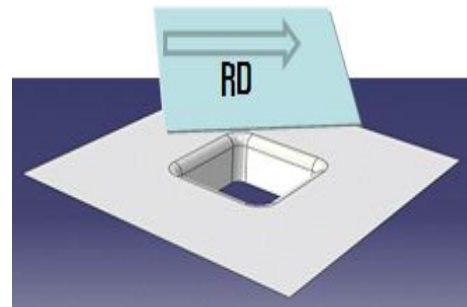


Fig. 3 Ti-6Al-4V sheet positioning. RD is aligned to corner direction of drawing die

온간 딥드로잉 실험에 앞서 유한요소해석을 통하여 원소재의 성형성을 향상시키기 위한 최적의 공정조건을 예측하였고 이때 ABAQUS-3D 코드를 사용하였다. 해석을 위해서 Barlat(1989) 항복조건식을 사용하였으며 이 식의 계수들은 별도로 시행된 2축인장 실험 데이터를 통해 도출하였다. 딥드로잉은 100ton 급 프레스를 이용하여 온간 성형을 시행하였는데, 온도 및 프레스 작동은 컴퓨터를 연결하여 온도 편차 $\pm 10^{\circ}\text{C}$, 스트로크 편차 $\pm 0.2\text{mm}$ 수준으로 정밀히 제어를 하였다. 온간 딥드로잉 실험 시 Ti-6Al-4V 시편에 물과 희석된 MoS_2 를 Graphite코팅 전에 도포하였다.

블랭크 크기를 300×300mm, 330×330mm, 350×350mm, 400×400mm로 나누어 실험을 시행하였으며, BHF를 알아보기 위해서 29kN ~ 39kN 조건으로 실험하였다.

MoS_2 코팅과 Graphite코팅을 한 Ti-6Al-4V시편을 하부 금형 위에 놓은 후 상부금형을 하부금형과 밀

작시커 550℃로 설정하였으며, 이후 펀치 속도 0.5mm/sec로 저속 드로잉을 실시하였다. 온간 성형된 사각형 컵에 생성되어 있는 스케일을 제거하기 위해 산세 처리를 시행하였다. 이후 두께 측정을 수행하였는데 이때, 성형 시 윤활제 MoS₂를 사용한 것과 MoS₂를 사용하지 않은 것 두 가지를 비교해 보았다.

Ti-6Al-4V의 성형특성을 조사하기 위해 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험은 ASTM-E8의 규격에 준하여 수행되었으며 INSTRON 4206 모델을 사용하였다. 인장 시험 시편들은 연신방향이 압연방향에 대해 0, 45, 90°의 각도를 가지도록 가공되었다. 시험조건은 상온에서 10⁻³/s⁻¹의 속도로 선정되었다. 실험은 동일 조건에서 5번 시행을 하여 평균값을 구하여 Fig. 2와 같이 도시하였다. 방향별 강도와 연신율의 관계를 살펴보면 45° 조건의 경우가 강도는 가장 낮으면서 성형성은 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 타이타늄 합금의 경우 저면(basal plane)이 ND방향에서 TD방향으로 양방향 분리되어 기울어져 있는 형태로 배향되어 있기 때문이다. 이 경우 45° 방향으로 인장하였을 때 분해전단응력이 가장 높게 된다. 본 연구에서는 가장 많은 변형이 걸리는 금형의 코너부에서 45° 방향 인장변형이 걸리도록 Ti-6Al-4V판재를 Fig. 3과 같이 배치하고 실험과 해석을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 유한요소해석을 이용한 성형성 예측

실제 드로잉 실험에 앞서 최적화된 성형을 위해 마찰계수, 블랭크 홀딩력, 펀치와 다이간의 간격을 공정변수로 두고 Ti-6Al-4V 판재의 사각컵 성형에 미치는 영향을 알아보기 위해 유한요소해석을 수행하였다. Table 2는 200×200mm 사각형 컵의 유한요소 해석 변수 조건으로 펀치, 블랭크, 상부금형, 하부금형의 치수 정보를 나타낸 표이다.

Fig. 4는 Ti-6Al-4V 판재의 500℃와 600℃에서의 성형한계도 (FLD: Forming Limit Diagram) [5, 6] 를 도시한 그래프이다. 시편의 폭을 달리하여 다양한 변형률 모드를 유도하려 하였다. 그러나, 대부분 시편에서 파단부 근방의 변형률이 평면변형 모드로 나타났다. 이는 고온상태에서 타이타늄 합금 판재와 펀치 사이의 심한 마찰로 인해 2축 인장에서의 변형 모드를 실현하기 어려웠기 때문이었다[2].

Table 2 Drawing molding analysis applied to the variable conditions

Division	Content
Materials	Ti-6Al-4V
Sample size	330mm x 330mm
Punch size	196mm x 196mm
Punch corner radius	5mm
Punch speed	0.5mm/s
Blank holding force	29kN, 34kN, 39kN
Coefficient of friction	0.1, 0.3, 0.5
Intervals of punch and bottom die	2mm, 3mm, 4mm, 5mm
Temperature	500℃, 600℃
Depth	55mm

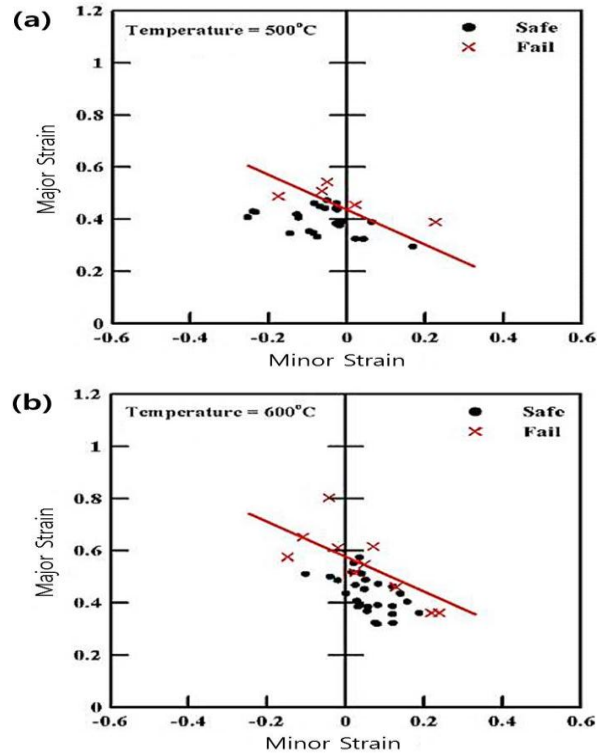


Fig. 4 FLDs at Ti-6Al-4V alloy sheet at (a) 500℃ (b) 600℃[2]

Fig. 5와 6은 앞선 성형한계도를 바탕으로 전산모사한 결과이다. Fig. 5에 블랭크 홀딩력의 변화와 펀치 및 하부금형과의 간격변화에 따른 성형해석 결과를 나타내었다. BHF는 29kN에서 39kN까지 변화 시키고

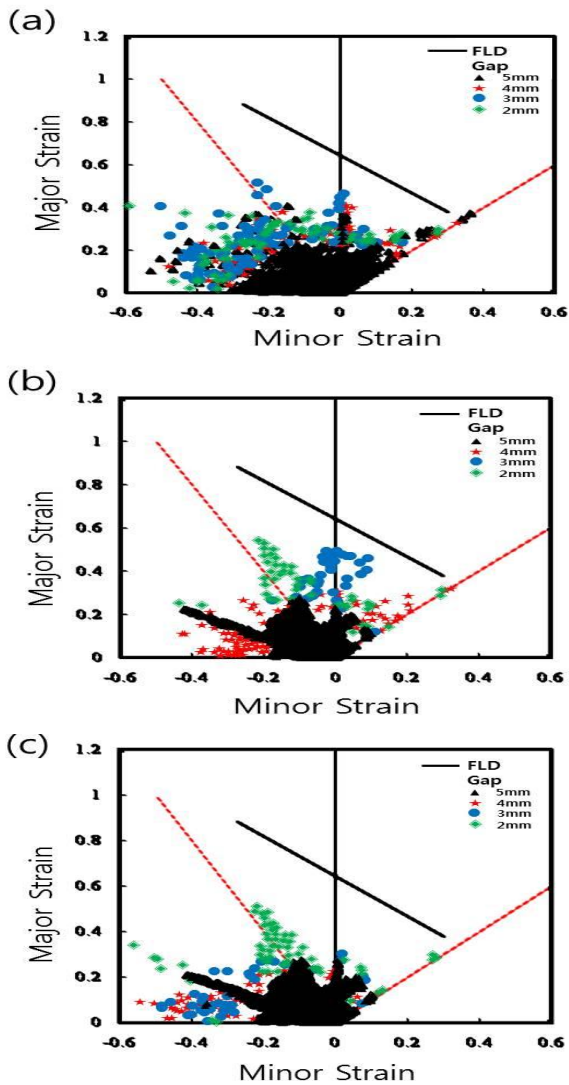


Fig. 5 Forming limit diagram analysis using FEM with different gap sizes and BHF of (a) 29kN (b) 34kN and (c) 39kN. Friction coefficient is fixed as 0.3

금형과 펀치간의 간격은 2mm에서 5mm까지 변화시키면서 변형율을 계산해보았다. 마찰계수를 0.3으로 고정한 본 성형조건에서는 대부분의 조건에서 변형율점이 FLD 아래에 위치하여 사각컵 성형이 가능한 것으로 나타났다. 금형과 펀치간의 간격 영향은 크지 않은 것으로 보이나, 간격이 4mm 이상인 경우 주름의 발생이 보여졌고, BHF의 경우도 34kN이하로 줄어들면서 주름이 발생하여 성형성에 좋지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6에서는 마찰계수 변화와 간격 변화에 따른 성형성을 확인하여 보았다. 통상적으로 냉간 성형에서

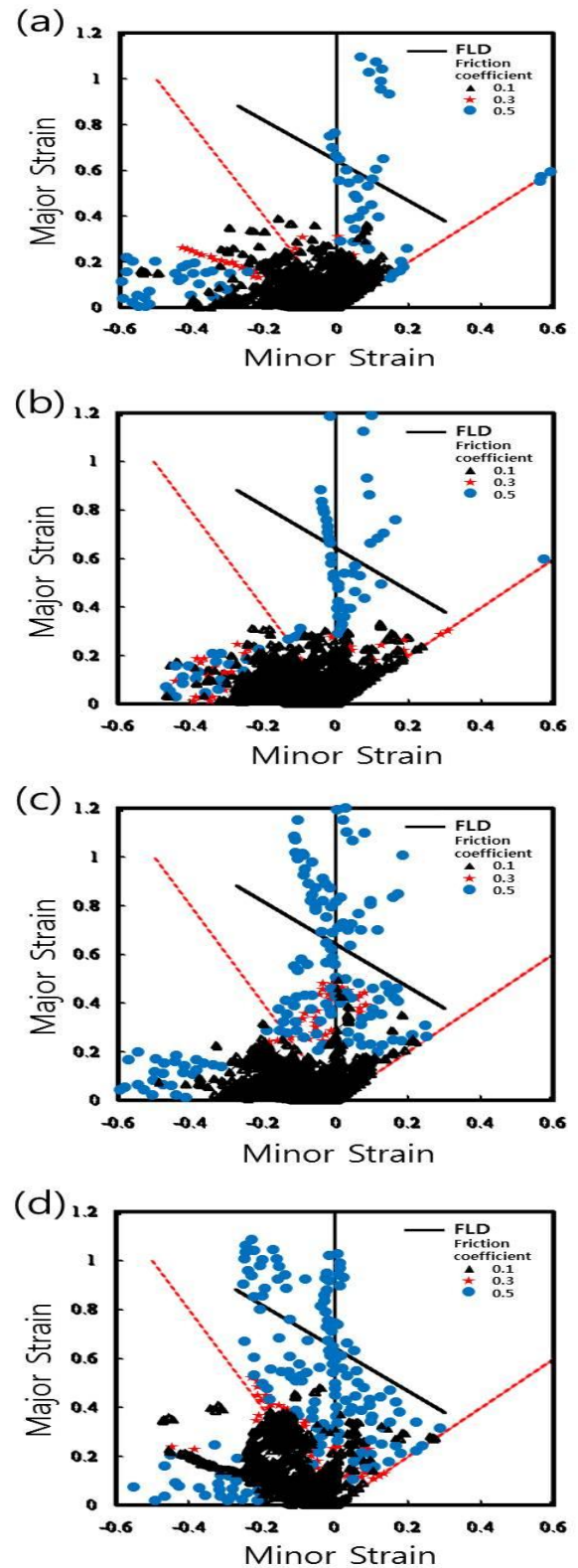


Fig. 6 Forming diagrams with different friction coefficients and gap sizes of (a) 5mm, (b) 4mm, (c) 3mm, and (d) 2mm, BHF is fixed as 39kN

마찰계수는 0.1이 주로 사용되며 열간에서는 0.3이 사용된다. 그러나, 실제 성형에서는 마찰계수를 측정하는 것 자체가 쉽지 않은 작업이다. 본 연구에서는 윤활의 영향을 평가하기 위해 마찰계수 조건을 0.1, 0.3, 0.5로 달리하여 해석해 보았다. 성형해석 결과, 간격이 커질수록 주름이 발생하는 현상은 앞서 Fig. 3에서 확인한 것과 동일하였다. 그리고 마찰계수가 0.1에서 0.3, 0.5로 증가함에 따라 마찰 저항에 의해 재료의 연신이 증가하며 성형한계에 가까워지고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 마찰계수 0.5 이상에서는 전 영역에 걸쳐 파단이 예측되었다. 따라서, 소재와 금형간의 윤활을 원활하게 하여 성형이 이루어지는 전 영역에서 마찰계수를 0.3이하로 관리하여야 파단 없이 성형이 가능할 것으로 예측된다. 마찰을 줄이기 위한 윤활 효과는 3.3절에 토의 하였다.

유한요소해석 결과를 토대로 예측하면 Ti-6Al-4V합금 판재의 온간 딥드로잉성은 크게 열악하지 않은 것으로 판단된다.

다만, 마찰계수가 0.5일 경우는 모든 금형과 펀치의 간격 조건에서 성형한계도를 지났다. BHF 증가시 간격이 줄어들수록 성형한계도에 멀어지며, 홀딩력이 작은 구간에서는 주름이 발생할 것으로 예측되었다. 따라서 주름이 발생하지 않으며 사각컵이 완벽하게 성형되는 조건은 BHF 39kN, 시편의 크기 330×330mm, 마찰계수 0.1, 펀치와 하부금형의 간격은 2mm가 가장 적합한 조건인 것으로 판단되어 실제 실험에 적용하였다.

3.2 블랭크 크기 및 BHF 설계

Fig. 7는 블랭크 크기별 시험결과를 나타내었는데, 300×300mm 경우 블랭크 크기가 작아 성형시 BHF가 받을 면적이 작아 다른 부분은 유입되고, 귀부분만 남게 되었다.

330×330mm은 300×300mm처럼 귀부분만 남지 않고, BHF가 받은 면적까지 성형 후에도 존재하였다. 블랭크 크기 330×330mm까지는 온전한 형상이 얻어졌으나, 350×350mm부터는 파단(화살표)이 발생하였다.

400×400mm는 다른 시편에 비해 BHF의 영향을 받은 면적이 넓어 성형 깊이도 낮았으며, 화살표의 귀 부분부터 모서리까지 파단이 발생하였다.

350×350mm 경우 BHF를 24kN으로 낮추었음에 불구하고, 파단이 발생해 블랭크 크기가 성형에 매우 민감함을 알 수 있었다. 따라서 사각형 컵 성형에서

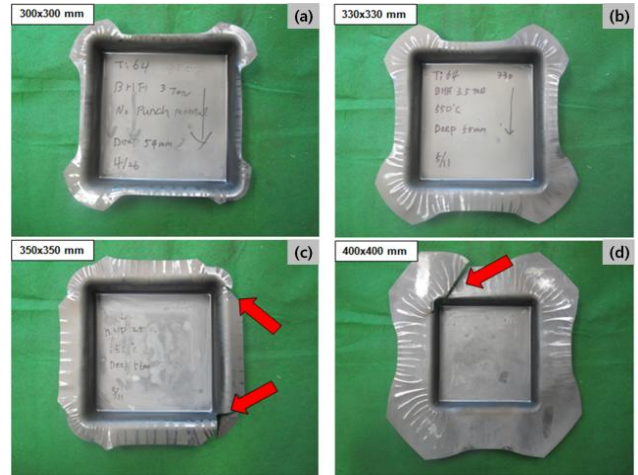


Fig. 7 Effect of blank size on the deep drawing. Blank sizes were (a) 300mm×300mm, (b) 330mm×330mm, (c) 350mm×350mm, and (d) 400mm×400mm, respectively

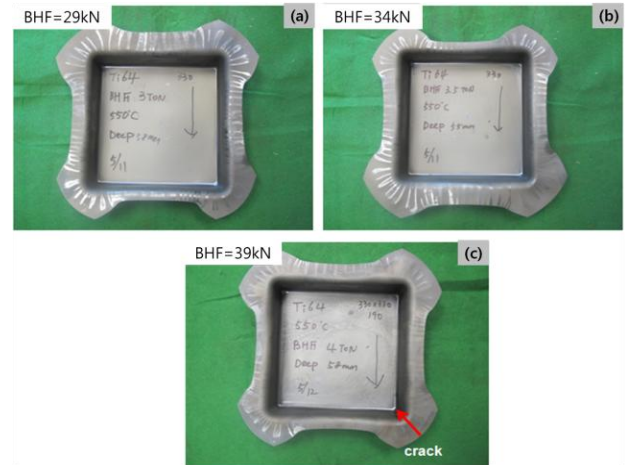


Fig. 8 Effect of blank holding force on the deep drawing (a) BHF 29kN, (b) BHF 34kN, and (c) BHF 39kN

최적의 블랭크 크기는 330×330mm인것을 확인하였다.

BHF 조건을 29kN, 34kN, 39kN으로 실험하였다. Fig. 8을 보면 34kN까지는 성형성이 우수하고 주름의 생성도 적었다. 39kN는 유한요소해석 결과 최적의 조건이었음에도 불구하고, 실제 실험 시 바닥의 4군데 모서리 중 한 군데에서 작은 균열이 발생하였다. 비록, 39kN의 경우 성형 깊이는 비교적 깊었으나, 안전율을 고려하면 유한요소해석 결과와 상이하게 34kN에서의 성형이 가장 적당한 것으로 확인되었다.

Fig. 9는 펀치의 곡률반경(R)에 의한 성형성을 알아본 결과이다. R이 5인 Fig. 9(a)는 바닥면의 4군데

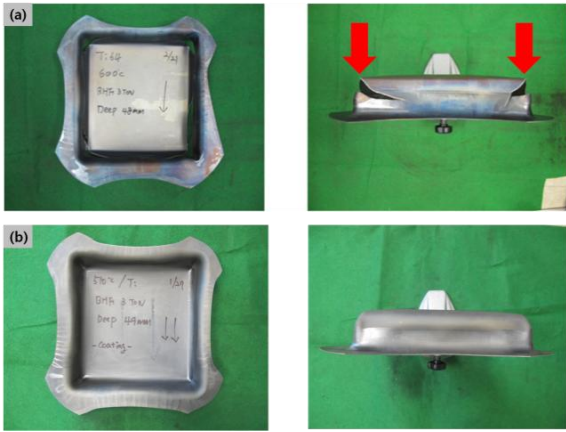


Fig. 9 Result of forming according to the radius of curvature R (a) R=5 (b) R=10

모서리 모두 큰 파단(화살표)이 발생하였다. 이는 각 코너부에서 발생하는 변형량이 한계 소성변형량을 넘어섰기 때문이며, R이 10인 Fig. 9(b)는 R이 5인 편치보다 변형량이 적어 모서리 부분이 파단 없이 완만하게 성형되었다.

3.3 성형성에 미치는 윤활효과

MoS₂은 다른 고체윤활제와 비교해 마찰계수가 낮기 때문에 Ti합금의 열간성형에서 뛰어난 효과가 있어 본 연구에 적용하였다. Fig. 10은 MoS₂코팅을 사용한 후 Graphite코팅을 하고 성형한 결과와 기존 Graphite코팅만 했을 때의 표면 상태를 비교한 사진이다. 두 경우 모두 성형 조건은 550℃에서 0.5mm/sec 편치 속도로 실험하였다. MoS₂코팅과 Graphite코팅을 사용한 경우가 보다 부드러운 표면상태를 보이고 있는 반면 Graphite코팅만 사용한 성형품의 경우는 표면에 심한 스크래치가 발생했음을 확인하였다. MoS₂코팅과 Graphite코팅을 동시에 하였을 경우에는 MoS₂코팅의 우수한 열특성과 마찰계수가 적기 때문에 성형시 시편과 마찰이 적어 Graphite코팅만 시행한 시편보다 성형깊이가 더 깊어 성형성이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

3.4 온간 성형 후 제품 두께

최종 온간 성형 후 제품의 부위별 두께를 측정하였다. 200mm×200mm 사각형 컵을 Fig. 11(a)와 같이 가로방향(①-③)과 대각선방향(②-④)으로 절단하여 정중앙을 중심으로 두께분포를 조사해 보았다[7].

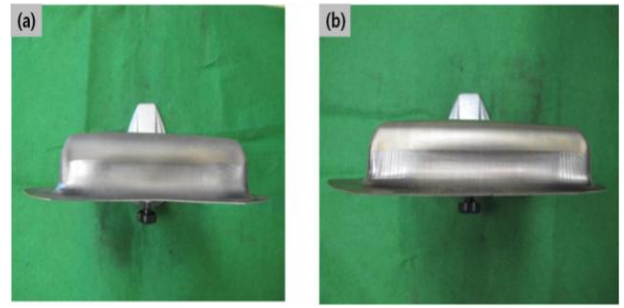


Fig.10 Effect of coating method on the formability (a) MoS₂ coated sample, (b) Graphite coated sample

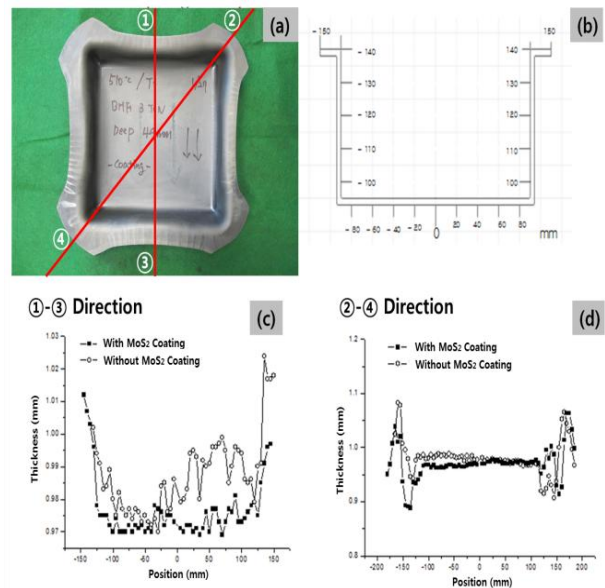


Fig.11 Thickness Variation of square cup according to the distance from center, (a) direction of thickness measurement, (b) cross-section diagram of square cup, (c) thickness along ①-③ direction (d) thickness along ②-④ direction

전반적으로 바닥 부위는 두께 0.97mm 정도로 초기 소재두께와 거의 유사해서 성형의 영향을 가장 덜 받은 부분으로 평가될 수 있었다. 반면 컵의 벽면은 두께가 두꺼워지는 경향이 발생하는데 이는 성형시 소재가 좁은 공간으로 유입되면서 압축이 발생하기 때문이었다. 사각형의 바닥 코너부는 가장 두께가 얇은 곳으로서 가장 극심한 변형량과 인장력이 발생하는 부위이다.

성형품의 두께 측정에서 성형품의 바닥면은 일정한 치수분포를 보였다. 성형품 성형시 윤활제 MoS₂를 사용한 경우 전반적으로 보다 균일한 두께 분포

를 보였고 MoS₂를 사용하지 않은 경우는 두께의 분포가 불균일 하였다. 이는 균일한 윤활이 Ti-6Al-4V 판재의 딥드로잉 성형성뿐만 아니라 두께 균일성 향상에도 매우 중요함을 보여준다.

3.5 산세처리에 의한 표면 스케일

타이타늄 합금은 고유의 반응성이 강하고 특히 산소친화력이 높아 고온에 노출시 표면 산화층이 집중적으로 발생된다. 이러한 산화층은 취성이 강한 특징을 가지고 있어 산화층의 제거가 반드시 필요하다.

이를 위해 온간 성형 후 Ti-6Al-4V 성형 컵의 산화층을 화학적 부식 방법으로 제거해 보았다. 산세 처리는 H₂O 82%, HNO₃ 15%, HF 3% 용액에서 5분~10분까지 교반을 하면서 진행되었다. Fig. 12(a)는 산세 처리 전의 조직사진으로 두께 16 μ m 스케일이 있었으나, 산세처리 후 Fig. 12(b)와 같이 깨끗하게 변한다. Fig. 12(c)와 Fig. 12(d)은 사각형 컵의 산세처리 전 후 사진이며, 산세처리 후 표면 스케일 뿐만 아니라 미세한 스크래치도 산세작업을 통해 제거됨을 볼 수 있었다.

3.6 성형품의 인장특성

산세 후 성형품의 기계적 특성을 평가해 보았다. 인장시편 채취 부위는 Fig. 13과 같이 사각형 컵의 바닥에서 압연방향(A1, A2)과 압연방향의 수직방향(B1, B2), 압연방향의 대각선방향(C1, C2), 사각형 컵의 정면에서 오른쪽부터 시계방향(D, E, F, G)으로 채취하였다[8]. Table 3은 최종제품에 대한 인장특성을 나타낸 것으로, 인장강도와 항복강도의 경우 각각 950MPa, 935MPa 이상으로 원소재 대비 높은 강도였으며, 대각선방향의 경우는 Ti-6Al-4V합금의 이방성 영향으로 다른 부위의 시편보다 인장강도가 낮았다. 반면, 옆면의 경우 부위에 따라 720MPa로 낮은 강도를 보이는 부분이 있었다. 연신율의 경우도 바닥부 채취 시편은 상대적으로 높은 연성을 보인 반면 성형품의 옆 벽면인 인장시편 채취 부위 벽면 F, G에서는 7.0~8.6%의 낮은 연성이 관찰되었다.

전반적으로 옆면의 인장 특성 낮은 이유는 성형도중 하부 금형과의 마찰이 격심해서 표면상태가 좋지 못하였고, 시편 채취 부위가 Spring-back으로 굴곡의 영향 때문으로 판단된다.

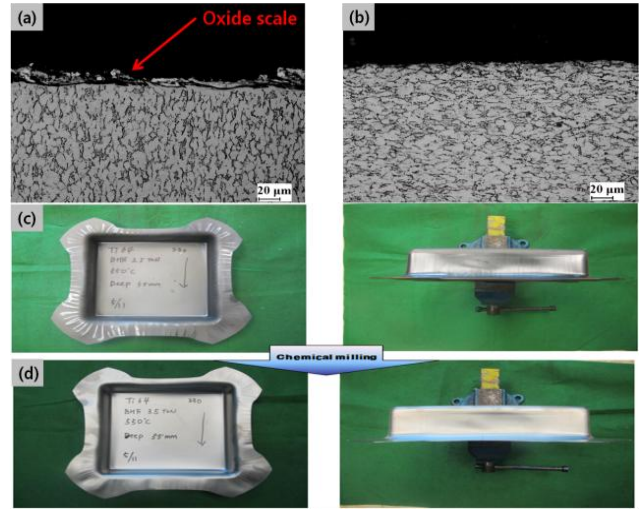


Fig.12 Microstructural images of samples (a) before and (b) after pickling treatment, Macro surface conditions (c) before and (d) after pickling treatment

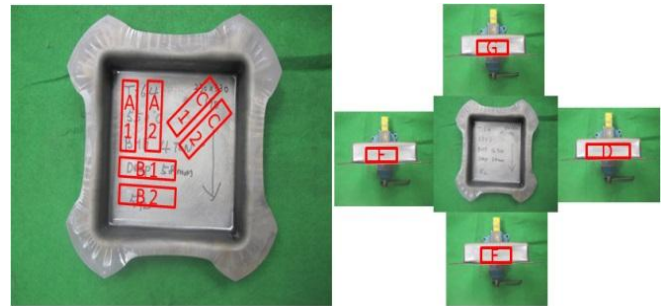


Fig.13 Tensile specimen machining direction and position in front the square cup

Table 3 Tensile test result of deep drawing cup

Sample No.	UTS (MPa)	YS(MPa)	U.EI (%)
A1	1066	976	15.3
A2	1047	957	16.7
B1	1063	999	14.4
B2	1097	1012	15.2
C1	967	938	15.5
C2	981	948	40.3
D	1083	721	21.2
E	1066	927	15.1
F	1040	785	7.0
G	1071	935	8.7

4. 고 찰

Ti-6Al-4V은 대표적인 난성형성 합금으로 550°C의 비교적 낮은 온도에서 성형은 어려운 것으로 알려져 있다. Ti-6Al-4V 판재의 온간 성형은 기존에 보고되지 않았던 기술로 본 연구에서 최초로 시도되었다. 온간 성형에서는 결합 없이 건전한 성형품을 얻을 수 있어야 하는데 이를 위해 다양한 성형조건들이 성형성에 미치는 영향을 분석하였다.

유한요소해석 결과, 최적의 딥드로잉 조건은 BHF 39kN, 펀치와 금형의 간격 2mm이었다. 그러나 실제 수행한 결과의 최적 조건은 조건은 BHF 34kN, 펀치와 금형의 간격은 2mm로 예측되었다. 그 외 조건도 예측 결과와 유사 하였지만, BHF의 경우는 차이가 있었다. 이는 금형의 온도가 고온으로 가열되어 실제 실험에서는 시편을 펀치 중심부에 정확히 위치하기가 어려워 BHF가 시편에 균일하게 전가되지 못한 것이 한 원인으로 파악된다. 또한, 판재에 MoS₂ 코팅과 Graphite 코팅 공정시 수작업으로 인해 코팅층 두께가 시험 때마다 상이 하였을 것으로 고려된다. 코팅 층이 동일할 경우 좀더 시편과 펀치 및 금형 간의 마찰을 줄여 성형성의 향상이 있었을 것으로 추측된다.

본 연구에서는 500°C, 600°C에서 얻어진 FLD 곡선을 이용해서 550°C 딥드로잉 성형성을 예측하였다. 비록 소재와 금형 모두 동일한 온도로 유지하면서 성형을 수행하였으나, 200×200mm 수준의 비교적 대형크기 드로잉에서는 부위별로 온도 구배가 발생하였을 것으로 추측된다. 따라서, 유한요소해석과 실제 실험 사이에는 이에 따른 영향이 존재하였을 것으로 판단된다. 보다 정밀한 해석을 위해서는 금형 가열 및 부위별 냉각 거동을 고려한 해석기법에 대한 연구가 요구된다.

5. 결 론

Ti-6Al-4V판재에 대한 딥드로잉 최적조건을 확인하기 위하여 유한요소해석을 이용하여 블랭크 크기, BHF, 마찰계수, 펀치와 하부 금형의 간격 등의 영향을 조사하였다.

(1) 최적의 공정조건을 도출하기 위해서 유한요소해석을 활용해 여러 공정변수 영향을 예측하였으며 그 결과를 실제 실험결과와 비교하였다.

(2) BHF 조건과 블랭크 크기가 성형성에 매우 큰

영향을 미치는 것으로 나타났다. BHF 34kN까지는 파단이 생성 되지 않았지만 39kN 이상에서는 파단이 생성되었다. 블랭크 크기 330×330mm 이상에서는 귀부분에서 파단이 생성되었고, 400×400mm 경우는 다른 조건에 비해 성형 깊이가 낮았다.

(3) 표면 윤활여부에 따라 성형성과 성형 후 표면상태가 크게 변화하는 것을 확인하였으며 MoS₂ 코팅과 Graphite 코팅을 동시적용 시 가장 효과적이었다.

(4) 성형 후 표면 두께 균일성은 비교적 우수하였으나 시편 끝 단에서 유입되는 곳이 전반적으로 두꺼웠으며, 모서리부분이 가장 두께가 얇았다.

(5) 산세처리를 함으로써 심한 스크래치와 스케일이 제거되었다. 인장시험 결과 바닥부분 시편이 높은 연성을 보였다.

REFERENCES

- [1] R. R. Boyer, K. T. Slattery, D. J. Chellm, H. R. Phelps, 2007, Ti-2007 Science and Technology(M. Niinomi, et al.), Japan Institute of Metals, Sendai, Japan, pp. 1255~1262.
- [2] J. G. Park, N. K. Park, Y. S. Kim, 2010, Evaluation of Press Formability for Ti-6V-4Al Sheet at Elevated Temperature, Trans. Mater. Proc., Vol.19, No.4, pp. 230~235.
- [3] G. Lutjering, 1998, Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of (α + β) Titanium Alloys, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 243, No. 1, pp. 32~45.
- [4] M. J. Donachie, 1982, Titanium and Titanium Alloys-SourceBook, ASM International, Metal Park, OH, pp. 265~269.
- [5] R. Hill, 1983, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, New York.
- [6] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967, Limit Strains in the Process of Stretch-forming Sheet Metal, Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, No. 9, pp. 609~612.
- [7] T. Ohwue, T. Shindo, T. Hayashi, 2002, Square Shell Deep Drawability of Commercially Pure Titanium Sheet, Nippon Steel Technical Report, pp. 125~128.
- [8] ASTM Standard E8/E8M, 2013, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, DOI: 10.1520/E0008_E0008M-13A.