

# Ti-6Al-4V 합금의 열간 전단 스피닝

이항수<sup>#</sup> · 송영범<sup>1</sup> · 홍성석<sup>1</sup>

## Shear Spinning of Ti-6Al-4V Alloy at Hot Working Temperature

H. S. Lee, Y. B. Song, S. S. Hong

(Received July 11, 2011 / Revised September 14, 2011 / Accepted September 15, 2011)

### Abstract

A method for estimating the shear spinnability is suggested, and it was applied to sheets of Ti-6Al-4V alloy for estimation of shear spinnability at hot working temperature. The effective working temperature was 850°C or above. The hot spinning operation was carried out in two steps of shear spinning. The reduction of thickness at the first step was 50% and 45% at the second, and the overall reduction of thickness was 72.4%. The cone spinning process could produce a uniform wall thickness with only a few percent tolerance, proving itself appropriate for making cones of Ti-6Al-4V alloy with uniform wall thickness.

**Key Words** : Titanium Alloy, Shear Spinning, Uniform Wall Thickness, Hot Working, Conical Shells

### 1. 서 론

본 논문에서는 대표적 난성형재인 티타늄 합금에 대하여 두께가 균일한 원추형 제품의 스피닝 성형성 평가를 연구목적으로 한다.

판재의 성형에는 일반적으로 디프드로잉이 많이 적용되나, 균일한 두께 분포를 갖는 원추형 용기를 제작하는 데에는 전단 스피닝을 적용하는 것이 효과적이다. 디프드로잉을 적용하여 원추형 용기를 제작하기 위해서는 여러 번의 공정이 필요하며, 두께의 불균일성이 수반되어 두께가 일정한 원추형 용기의 제작에는 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 전단 스피닝을 적용하여 균일 두께의 원추(cone) 형상의 제품을 얻고자 한다.

스피닝(spinning)은 맨드렐(mandrel)에 소재관을 고정시킨 후 회전시키는 가운데 성형롤러나 주걱으로 소재를 밀어 붙여 맨드렐과 같은 형상의 제품으로 성형하는 가공법으로, 점진적 회전가공(incremental rotary forming)에 속하는 기술이다. 스

피닝 공정은 가정용품, 전기용품, 기계부품, 군수 산업용 부품, 원자력산업, 우주항공산업 분야 등 모든 산업분야 전반에 걸쳐 유용하게 적용되고 있으며 근래에는 자동차부품 등 기계부품으로의 적용이 늘어나고 있다. 이 공정은 다품종 중소량 생산에 뛰어난 경제성을 갖고 있기 때문에 소비자의 다양한 욕구에 적극 대처할 수 있을 뿐 아니라 원추형 용기 등 특별한 형상의 경우에는 스피닝 공정에 의해서만 상용화가 가능하여 박관성형의 대표적 공정의 하나로 그 중요성이 인식되고 있다.

티타늄 합금은 「경량·고강도」의 뛰어난 특성을 가진 재료로서 용도가 항공·우주분야 등을 중심으로 이루어져 있었으며, 근래에는 강도, 연신율, 충격에너지, 피로강도 및 부식저항성 등이 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 항공우주분야 이외의 수요확대가 현저하다. 그러나 높은 항복강도와 낮은 연신율, 스프링백(spring back) 현상으로 냉간가공에 많은 어려움이 있다. 그러므로 난

1. 국방과학연구소  
# 교신저자: 한라대학교 기계자동차공학부, hslee@halla.ac.kr

가공재인 티타늄 합금 판재를 성형에는 열간가공이 필요한 경우가 많다. 이에 따라 고온에서의 성형성에 대한 조사도 필요하다.

스피닝에 대한 기초연구는 일찍부터 수행되었으며 근래에는 제품개발 사례가 많이 발표되었다. Kobayashi 등[1]은 전단 스피닝(shear spinning)에 대하여 기초적인 해석이론을 제시하였으며, Kegg[2]는 타원형 맨드렐을 사용하여 전단 스피닝성을 측정하는 방법을 제시하였다. Kalpakcioglu[3]는 재료의 연성과 전단 스피닝성의 상관관계에 대하여 조사하였으며 실용적인 두께감소율 한계가 50%라고 보고하였다. Hayama 등[4, 5]은 스피닝 공정 중에 발생하는 가공력의 해석과 여러 가지 가공조건에 대한 역학적 변수의 영향을 조사하였다. 근래에는 제품화 과정에서의 개발사례에 대한 연구가 발표되었다[6]. 본 저자도 전단변형과 교축변형이 혼합된 복합스피닝 공정에 관한 이론연구를 진행하였으며, 기계부품의 개발을 목적으로 실험용 CNC 스피닝머시인을 개발한 바 있다[7]. 또한, 실험연구를 통해 강판재의 교축스피닝에 대한 성형성을 조사한 바 있다[8].

본 연구의 구체적 목표는 고온에서의 전단 스피닝성을 측정할 수 있는 간이 성형성 평가시스템을 제안하고, 티타늄 6-4합금에 대하여 전단 스피닝성을 조사한 뒤, 이 결과를 바탕으로 비교적 작은 원추각을 가지면서 두께가 균일한 원추형 용기를 제작하는 것이다. 즉, 실용적인 전단 스피닝에서 얻을 수 있는 두께감소율 50%를[3] 안정적으로 확보할 수 있는 성형온도를 찾고, 이 온도에서 원추형 용기를 제작하는 것이다.

## 2. 실험장치 및 소재

### 2.1 스피닝 머시인

본 연구에서 사용한 실험장치는 실험용으로 제작된 CNC형 스피닝머시인[7]으로, 기계부품의 주요사양은 다음과 같다.

Max. workpiece length : 600mm  
 Workpiece diameter : 50-480mm  
 Longitudinal travel of saddle : 300mm  
 Transverse travel of saddle : 300mm  
 Longitudinal thrust of saddle : 160kN  
 Transverse thrust of saddle : 160kN  
 Speed of saddle, variable : 0-1.5m/min  
 Rotating speed of main spindle : 583rpm

X-Y 테이블(saddle)은 유압 서보제어 방식으로 이송되며, CNC 보간기능에 있어서는 보통의 공작기계에 사용되는 직선보간, 원호보간 이외에 인볼류트(involute) 곡선을 창성하도록 하여 스피닝의 특성을 가진 제어가 가능하도록 하였다.

Fig. 1은 제작된 기계의 전경을 보여주고 있으며, Fig. 2는 공구(roller)가 장착된 X-Y 테이블을 보여주고 있다.



Fig. 1 Spinning machine

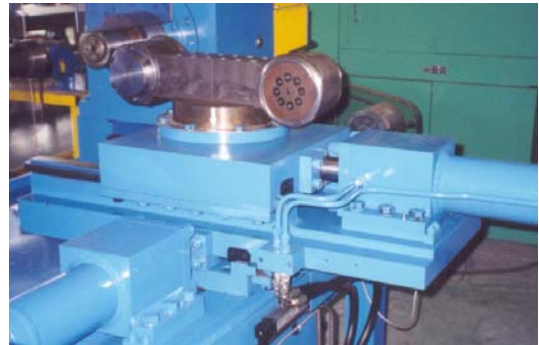


Fig. 2 Saddle

### 2.2 실험 소재

실험에 사용된 소재는 두께가 5.5mm인 티타늄 6-4합금(Ti-6Al-4V)이다. 이 재료의 기본적인 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 판재 제조시의 압연방향에 대하여 0°, 90°로 채취된 재료를 ASTM의 소형 판재시험편 규격으로 가공하여 인장시험에 사용하였다. L과 T는 각각 압연방향(rolling direction)과 그것의 직각방향(transverse direction)을 나타내며, 각각 3개씩을 시험하여 평균값을 제시하였다. 시험기는 Instron 4505이며,  $1 \times 10^{-4}$ /sec의 변형률이 발생하도록 시험속도(testing speed)를 설정하였다.

**Table 1 Results of tensile test for Ti-6Al-4V**

| Direction | UTS(MPa) | YS(MPa) | El(%) |
|-----------|----------|---------|-------|
| L         | 974.6    | 863.1   | 16.98 |
| T         | 994.8    | 925.2   | 18.02 |

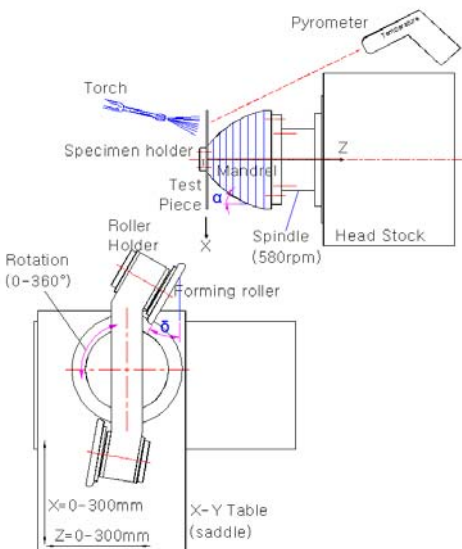
위의 표에서 알 수 있듯이 티타늄 6-4합금은 높은 항복강도와 낮은 연성으로 상온가공이 어려우며 열간가공이 필요한 소재이다. 일반적으로 티타늄합금의 열간가공은 취성을 피하기 위하여  $\beta$ -변태점( $\beta_t$ ) 이하의 온도에서 작업한다. 티타늄 6-4합금의  $\beta$ -변태점은 995℃로서 최저 열간가공 온도는 이보다 약 250℃가 낮은 750℃부터 가능하다. 750℃에서의 변형저항은 약 350MPa 정도이며  $\beta$ -변태점에서는 약 6MPa 정도이다. 그 사이에서는 온도에 따라 반비례하는 경향을 보인다[9].

### 3. 전단 스피닝성 평가시험

#### 3.1 실험방법 및 조건

본 논문에서 제안된 성형성 평가시스템에 대한 내용이다. 종래의 평가방법에서는 점진적으로 원추각이 변하는 타원형 맨드렐[2]을 이용하였으나, 공구궤적의 설정이 어려운 점을 고려하여, 다단 원추형 맨드렐을 이용하는 방법을 제안한다.

시험기구의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 스피닝성 평가용 맨드렐을 주축에 고정하고 원형의 판재를 다단 원추형 맨드렐에



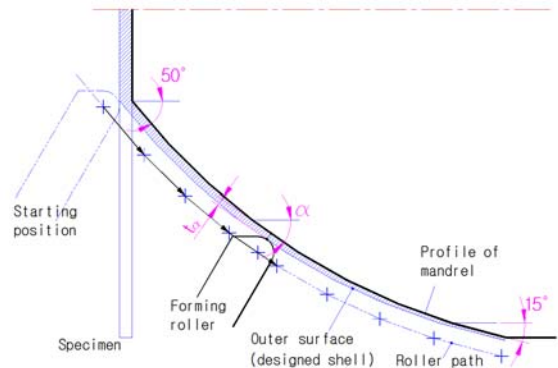
**Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup**

고정하여 주축과 함께 회전시키는 가운데 성형롤러를 이송시켜 제품을 성형한다.

평가용 맨드렐은 단계적으로 원추각( $2\alpha$ )이 변하는 형상, 즉 다단 원추형 맨드렐(multi-conical angled mandrel)이며, 여기서 반원추각  $\alpha$ 의 범위는 입구부의 50°에서 시작하여 15°까지 5°씩 변화시켰다. 전단 스피닝에서 성형 후 두께는 다음 식과 같은 사인법칙에 지배를 받는다[1].

$$t_\alpha = t_0 \times \sin \alpha \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 맨드렐의 반원추각(semi-conical angle)을 나타내며,  $t_0$ 는 성형 이전의 소재두께를,  $t_\alpha$ 는 성형 후 제품두께를 나타낸다. 전단스피닝에서는 여러 번의 스피닝을 반복해도 초기의 반경이 항상 일정하게 유지된다. 그러므로 체적 일정의 법칙에 의해 성형 후의 두께는 반원추각에 따라 위의 식 (1)과 같이 된다. 이 식을 기준으로 성형품의 두께가 만들어지도록 맨드렐과 성형롤러와의 간극(gap)을 설계하였다. Fig. 4는 사용된 맨드렐과 공구궤적을 보여준다.



**Fig. 4 Mandrel and tool path for spinnability tests**

시험과정은 맨드렐의 회전속도를 일정하게 유지시킨 가운데 설계된 공구궤대로 롤러를 이송시켜 성형을 완료하는 것이다. 다른 공정조건은 다음과 같다.

Specimen size : Dia. 285mm, Thickness 5.5mm

Roller : Dia. 200mm, Radius of corner 7mm

Tilting angle( $\delta$ ) : 30°

Working temperature : 760℃, 850℃, 950℃

RPM of main spindle : 580rpm

Feed-rate of roller : 2.9mm/sec(0.3mm/rev)

Lubrication : B-N(boron nitride) powder

시험온도 설정에는 일반적인 열간가공의 추천 온도[9,10]와 Vanderhasten 등이 제안한 티타늄 6-4 합금의 성형온도맵[11]을 활용하여 정하였다. 보통 티타늄합금의 열간가공은 취성을 피하기 위하여  $\beta$ -변태점 이하의 온도에서 작업한다. 티타늄 6-4 합금의  $\beta$ -변태점은 995℃이며, 열간가공의 최저 온도는 이보다 약 250℃가 낮은 750℃부터 가능하다. 그러나 실제 실용적인 열간가공 온도에 대해서는 850℃-950℃를 추천하고 있는 경우와[9] 900℃-980℃를 추천하는 경우[10]가 있다. 한편, Vanderhasten 등은[11] 티타늄 6-4합금의 변형영역(domain)은 변형속도와 성형온도를 조합한 4개로 구분하였는데, 이 중 열간성형 영역에 대한 온도 범위로 750℃ 이상을 제시하고 있다. 이상의 문헌을 바탕으로 본 연구에서는 750℃-980℃ 범위에서 760℃, 850℃, 950℃를 성형성 평가의 시험온도로 설정하였다.

시험하는 과정에서 성형되는 소재를 상기 온도상태로 유지시키기 위해서는 소재를 가열시킬 수 있는 열원이 필요한데, 본 연구에서는 산소-프로판 가스화 토오치(torch)를 이용하였다. 이는 산업 현장에서 사용하는 방법으로, 고온에서 스피닝 작업을 하는 경우 여러 개의 토오치로 직접 가열하는 사례가 많다. 실험 도중에 시편의 온도를 측정하는 데에는 파이로미터(pyrometer)를 사용하였다. 토오치로 가열하는 면의 반대편에서 방사되는 복사과장을 파이로미터로 측정할 수 있도록 하였다. 이 과정에서 측정된 온도는 어느 정도의 오차를 가질 수 있음을 밝혀둔다.

### 3.2 전단 스피닝성 시험 결과

성형성 평가시험 결과로 얻어진 것은 성형상태, 시험편의 두께분포 및 직경분포 등이다.

Fig. 5는 성형된 시편의 단면 사진이며, Fig. 6은 그 과정에서 발생한 균열 결함을 보여주고 있다. Fig. 6에서 보여지는 결함은 시편의 외주부에 발생한 균열로, 760℃에서 성형한 시편에서 발견된 것이며, 850℃ 및 950℃에서 성형한 시편에서는 발견되지 않았다. 따라서 760℃ 또는 그 이하의 온도에서는 티타늄 6-4합금을 성형하기 어려울 것으로 판단되며, 일반적인 열간가공 온도로 추천되는 850℃-950℃ 범위가 실용적인 성형온도라고 판단된다.

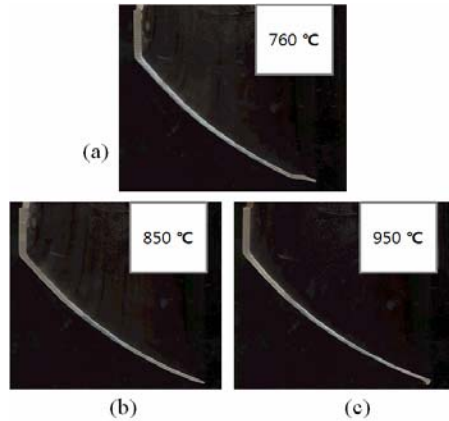


Fig. 5 Section views of shells from spinnability tests



Fig. 6 Surface cracks of shell spun at 760℃

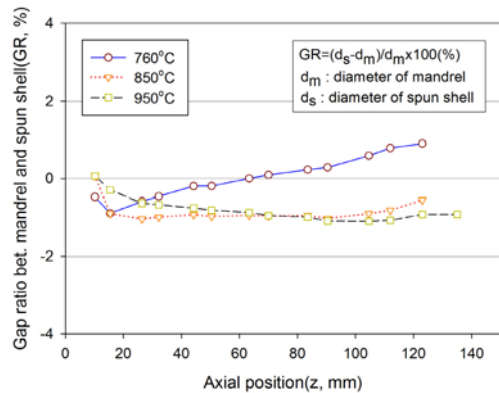


Fig. 7 Gap ratios between mandrel and spun shells

Fig. 7은 스피닝된 시험편의 안쪽 직경과 맨드릴 직경의 차를 맨드릴의 비로 나타낸 간극비의 분포를 보여준다. 모든 시험편에서 간극비는 1% 범위 내에 있어서 맨드릴 형상과 비교적 일치하는 결과를 얻었다고 판단된다. 다만, 비록 크지는 않으나, 760℃에서 성형된 시편의 외부로 가면서 점차 맨드릴보다 크게 측정되었으며, 850℃ 및 950℃에

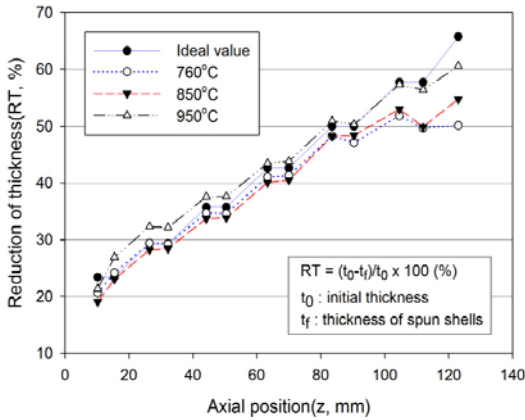


Fig. 8 Thickness distribution of shells spun at various temperature

서의 시편은 맨드렐보다 오히려 작게 성형되었다. 전자의 시편은 성형 도중에 발생한 스프링백의 영향을 많이 받았다고 생각되며, 후자의 경우는 성형 후 냉각되는 동안에 열수축이 발생하여 직경이 줄어들었기 때문이라고 사료된다.

Fig. 8은 맨드렐의 위치별 원추각에 따른 이상적인 두께, 즉 사인법칙( $t_{\alpha} = t_0 \times \sin \alpha$ )에 따른 두께와 성형품으로부터 측정된 두께를 비교한 것이다.

이 그림을 통해 시험온도로 설정한 모든 온도에서 50% 이상의 두께감소율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 760°C에서는 성형 도중 생긴 잔류응력 등으로 인해 균열이 발생하기 쉬워서 실용적인 온도라고 말하기는 곤란하다. 850°C에서는 두께감소율 55%까지 성형이 가능함을 확인하였으며, 950°C에서는 60%의 두께감소율까지 성형이 가능하였다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 안정적인 스피닝 공정이 실현되기 위해서는 850°C 이상의 온도에서 작업하는 것이 필요하다고 판단된다. 다만, 고온에서의 공기노출에 따른 산화 등에 대한 고려가 필요하다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 4. 원추형 셸의 전단 스피닝

##### 4.1 원추형 용기의 스피닝 공정설계

본 연구에서 성형하고자 형상은 반원추각이 16°인 균일 두께의 원추형 용기이다. 16°의 원추형 전단 스피닝에서 얻어지는 이상적인 두께감소율은 72.4%에 해당한다. 이는 실용적인 전단 스피닝의

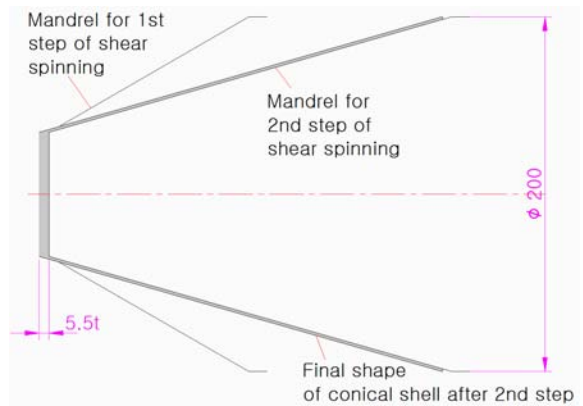


Fig. 9 Conical shell and corresponding shapes of mandrels

한계가 50%라는 점[3]을 고려할 때 매우 높은 성형률에 해당한다고 판단되어 2단계로 공정을 분할하여 성형을 시도하였다.

1단계 성형에서는 사인법칙에 의해 50%의 두께 감소율에 해당하는 30°의 반원추각을 갖는 맨드렐을 사용하였으며, 2단계 스피닝에서는 1단계에서 성형된 시편을 16°의 반원추각을 갖는 맨드렐을 이용하여 성형하였다. 최종 성형품과 단계별 맨드렐 형상을 Fig. 9에 나타내었다.

앞에서 850°C 이상에서 스피닝 공정을 적용해야 50%의 두께 감소율을 확보할 수 있다는 것을 확인하였으나, 안정적인 스피닝공정[9][10]을 위해 920°C의 온도에서 성형을 시도하였다.

시험방법은 스피닝성 평가시험과 다르지 않으나, 고정된 원추각이므로 직선형 궤적을 적용하되, 사인법칙에 따른 간극을 고려하였다. 또한 롤러의 설치각(tilting angle)은 단계별로 사용된 맨드렐의 반원추각과 같도록 설치하였다. 대부분의 가공조건은 성형성 평가시험에서와 같다. 성형성 평가시험에서와 다른 성형조건을 다음에 나타내었다.

Specimen size : Dia. 200mm, Thickness 5.5mm

Tilting angle( $\delta$ ) : 30°(1st step), 16°(2nd step)

Working temperature : 920°C

Fig. 10에 실험장면의 사진을 나타내었다. 롤러가 가압하고 있는 방향에 토오치를 설치하여 가열하였으며, 시편의 온도는 반대측에서 파이로미터를 이용하여 측정하였다.

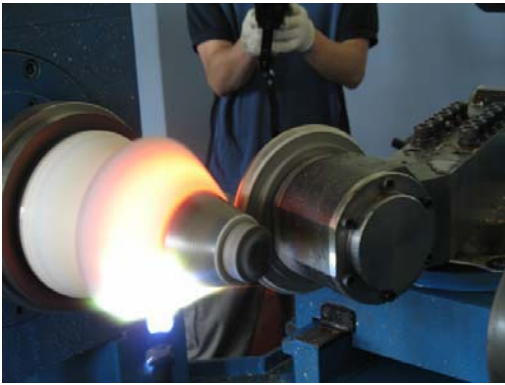


Fig.10 Experimental view for hot spinning

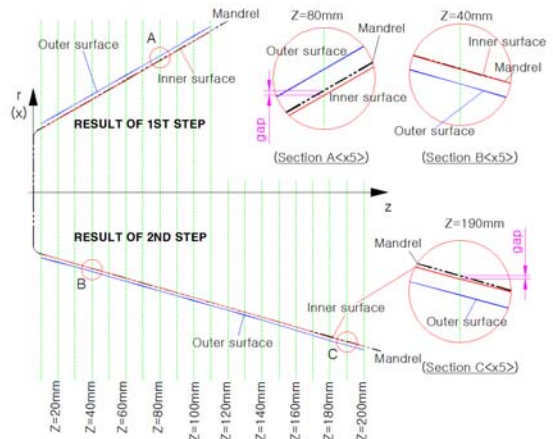


Fig.12 Section views of mandrel and spun shells

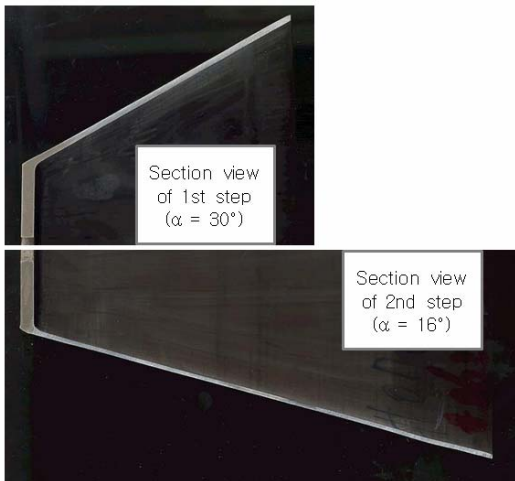


Fig.11 Section views of conical shells spun at 1st and 2nd steps

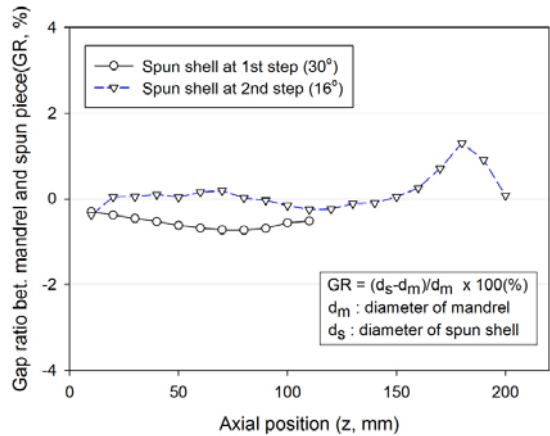


Fig.13 Gap ratios of shells from cone spinning

#### 4.2 실험결과 및 분석

1단계 스피닝에서는 원형의 판재형 소재를 사용하여 반원추각이 30°인 맨드릴에 밀어붙이는 전단 스피닝을 적용하였다. 이때의 이상적인 두께감소율은 50%이다. 2단계 스피닝은 1단계 스피닝의 성형품을 소재로 사용하여 추가적으로 두께를 감소시키는 과정이다. 반원추각이 16°인 맨드릴에 밀어붙여 스피닝하였다. 2단계 스피닝에서 목표하는 두께감소율은 45%이다.

Fig. 11은 1차 및 2차 스피닝 결과 얻어진 시편의 단면을 보여주고 있다. 위 부분에서 보이는 것이 1단계 스피닝의 성형품이며, 아랫 부분에 위치한 시편이 2단계 스피닝의 성형품이다. 단면의 상태가 모두 양호함을 알 수 있다.

Fig. 12는 3차원 측정기로부터 측정된 데이터를 맨드릴과 비교하여 보여주는 그림이며, Fig. 13은 맨드릴 직경과 성형품의 안쪽 직경과의 차이를 맨드릴 직경에 대한 비로 나타낸 간극비의 분포도이다. 이 그림에서 간극비는 대부분의 범위에서 1% 이하임을 알 수 있다. 따라서 형상의 정밀성 측면에서 매우 좋은 결과를 얻었다고 생각된다.

Fig. 14는 시편의 두께감소율 분포를 사인법칙에 따른 이상적인 경우와 비교하여 보여주고 있다. 1차 및 2차 스피닝의 모든 경우에서 용기 벽의 시작부분과 끝부분을 제외한 대부분의 영역에서 비교적 균일한 두께분포를 보여주고 있으며, 이상적인 경우와 수 %의 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 완벽한 두께 균일성을 확보하지는 못했지만 비교적 균일한 벽두께를 얻을 수 있었다.

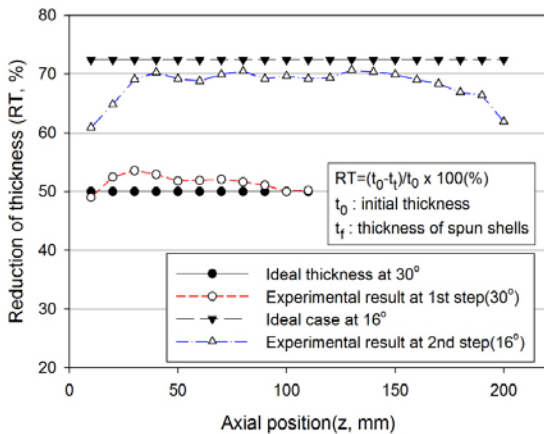


Fig.14 Distribution of thickness reduction

보통 두께의 편차가 수십% 정도 발생하는 디프드로잉과 비교했을 때, 균일 두께의 원추형 용기를 성형하는 데에는 전단 스피닝이 적절하다고 판단된다.

### 5. 결론

다단 원추각을 갖는 맨드렐을 이용하여 스피닝 성을 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 티타늄 6-4합금 판재를 소재로 하여 고온에서의 전단 스피닝성을 평가하였다. 고온에서의 전단 스피닝성 평가 결과, 760°C의 온도에서는 약 50%까지 두께를 감소시킬 수 있었으나, 성형 도중 발생한 잔류응력 등으로 인해 성형품에 균열이 발생하는 등 결함을 보여서 실용적인 성형영역이 아님을 확인하였으며, 850°C 및 950°C에서는 두께를 각각 55%와 60%까지 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

스피닝성 평가결과를 바탕으로 2단계의 전단 스피닝을 적용시켜 반원추각이 16°인 원추형용기를 열간에서 성형하였다. 열간가공 온도로 추천되는 범위에 속하는 920°C에서 성형한 결과, 외관뿐만 아니라 맨드렐과의 치수 차이가 1% 정도의 범위로 측정되어 형상품질이 우수함을 알 수 있었다. 두께의 분포도에서는 용기의 입구부와 출구부를 제외한 대부분의 영역에서 수 % 이내의 균일성이 확보되어 균일두께의 원추형 용기에 전단 스피닝이 적합함을 확인하였다.

이러한 결과들은 대형의 용기제품을 성형하는데 참고자료로 유용하게 쓰일 수 있을 것이라 사료되며, 향후 고온 가열에 따른 소재의 물성변화 등에 대한 연구가 추가되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] S. Kobayashi, I. K. Hall, E. G. Thomsen, 1961, A Theory of Shear Spinning of Cones, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, Vol. 83, pp. 485~495.
- [2] R. L. Kegg, 1961, A New Method for Determination of Spinnability of Metals, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, Vol. 83, pp. 119~124.
- [3] S. Kalpakcioglu, 1961, A study of shear-spinnability of metals, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, Vol. 83, pp. 478~483.
- [4] M. Hayama, 1975, Analysis of Working Forces in Shear Spinning of Cones, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 16, No. 175, pp. 627~635.
- [5] M. Hayama, T. Amano, 1975, Experiments on the Mechanism of Shear Spinning of Cones, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 16, pp. 371~378.
- [6] J. Faulhaber, 1987, CNC Controlled Spinning of Truck Wheel Disks, Industrial & Production Eng., Vol. 11, pp. 28~30.
- [7] H. S. Lee, 2002, Development of Spinning Machine for Manufacturing the Automobile Parts, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf. pp. 117~120.
- [8] H. S. Lee, 2005, Experimental Study on the Conventional Spinnability of Steel Sheets, Trans. Mater. Process, Vol. 14, pp. 764~771.
- [9] Y. T. Lee, J. H. Lee, 2002, Working Technology of Titanium, Cheong Moon Gak, pp. 127~129.
- [10] S. L. Semiatin et al., 1993, ASM Handbook (Forming and Forging), ASM International, Vol. 14, pp. 589~592.
- [11] M. Vanderhastan, L. Rabet, B. Verlinden, 2008, Ti-6Al-4V: Deformation map and modelisation of tensile behaviour, Mater. & Design, Vol. 29, pp. 1090~1098.