

티타늄 합금재의 튜브 스피닝 공정해석

홍대훈* · 황두순* · 이병섭* · 홍성인**

A Study on the Process of Tube Spinning for the Titanium Alloy

D. H. Hong*, D. S. Hwang*, B. S. Lee*, S. I. Hong**

ABSTRACT

Studies for tube spin forming have been implemented restrictively compared to spinning process, because of the complex of deformation mechanism. Especially there were not many studies by using FEM(Finite Element Method) for overcoming restriction of upper bound method. In this paper, the tube spinning process is analyzed to produce cylindrical body made by titanium alloy. In analysis, processing parameters was obtained by using upper bound method to consider material properties of titanium alloy and finite element analysis was implemented to investigate the flatness and the elongation of the titanium alloy workpiece by using ABAQUS code.

The independent variables are ; material properties of workpiece, angles of roller, reduction of diameter. Three variables, two angles of roller and reduction of diameter are optimized by using the upper bound method. In this method, we can estimate the workable power, working force and reduction of diameter, and also the flatness and the elongation of workpiece by the finite elements analysis using ABAQUS/standard. The results indicates that these variables play a critical factors of spinning process for the titanium alloy and the optimum values of these variables.

초 록

튜브 스피닝 성형에 대한 연구는 전통적 스피닝 공정에 비해 본질적으로 변형의 메카니즘이 보다 복잡한데 기인하여 이론 및 해석 연구가 국한적으로 이루어져 왔다. 특히, 상계법을 이용한 해석의 제한성을 극복하기 위한 유한요소법을 이용한 연구는 아직 소수에 그치고 있는 실정이다. 본 연구에서는 티타늄 합금을 재료로 사용한 용기의 튜브 스피닝 공정을 상계법과 유한요소법을 이용하여 조사하였다. 해석에 있어 티타늄합금의 성형특성을 고려하여 상계법을 통해 공정변수가 설정되었으며, 유한요소해석 code인 ABAQUS를 사용하여 티타늄 합금재의 신장량과 편평도를 얻었다. 해석에 사용된 독립변수들은 로울러의 전·후방각도와 가공깊이, Feed rate이며 이 변수들은 유한요소법과 상계해법을 통하여 최적화된다. 이 해석법에서 우리는 스피닝 가공의 가공동력과 힘 그리고 지름의 감소율을 얻을 수 있고, 또한 유한요소해석에 의해서 가공재의 편평도와 신장량도 구할 수 있다. 그 결과로부터 정해진 변수들이 티타늄 합금의 스피닝 공정에 있어서 중요한 요소임을 알 수 있으며, 그 변수들의 최적값을 얻을 수 있다.

* 충남대학교 기계공학과 대학원 (Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

** 충남대학교 기계공학과 (Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

1. 서론

튜브 스피닝(tube spinning)은 회전 축대칭 튜브제품을 제조하기 위해 널리 사용되는 스피닝 단조공정(spining forging group)의 한 분야로서 압출(extrusion)과 압연(rolling)공정의 복합공정으로 로울러에 국부적으로 연속적인 변형을 주어 벽두께를 크게 감소시키고 길이를 증가시켜서 기계적 성질과 치수 정밀도가 우수하고 두께가 얇은 튜브형 제품을 제작하는 점진적 소성가공방법이다.

최근 튜브 스피닝은 가공기술과 가공기계의 진보에 따라 일반의 기계 공업, 자동차 산업, 화학 공업, 우주항공 산업, 미사일 산업등의 각종 기계부품 및 소성가공에 널리 이용되고 있으며, 또한 다품종 소량제품의 합리화, 재료의 절약, 기계적 성질의 향상 및 생산비 절감의 관점에서 이의 평가가 현저히 높아지고 있다.

튜브 스피닝에 대한 연구는 전통적 스피닝공정에 비해 본질적으로 변형의 메카니즘이 보다 복잡한데 기인하여 이론 및 해석 연구가 국한적으로 이루어져 왔다.

튜브 스피닝과 관련된 해석적 연구는 Kobayashi 와 Thomsen [1]에 의해 'spining forging' 이라는 이름으로 초등해법과 슬립선장 방법을 사용하여 수행되었으며, M.Hayama[2]는 초등해석을 수행하여 실험값과 비교하였다. 이후로 S.Kalpackcioglu[3], C.H.Well[4], T.Ram Mohan과 R.M. Mishra[5] 등에 의하여 상계해법이나 에너지법에 의한 단순화 해석을 통하여 광범위하게 조사되었다. 그리고, 많은 연구들([6]-[10])이 진행되어 튜브 스피닝에 관한 변수들의 규명과 가공력과 에너지소비를 계산할 수 있게 되었고, 공정상 지배적인 변수상호간의 관계를 보다 조직적으로 해결하려는 필요성이 대두됨에 따라 튜브 스피닝 공정에서 불안정 소성유동 해석에 대한 연구가 Gur와 Tiroch[11]에 의해 상계해법을 이용하여 수행되었다. Feng 과 Pan[12] 은 평면변형, 완전 강소성 가정으로 단위 및 몇 개의 삼각형 속도장을 써서 상계해법으로 유동성형력

을 계산하였으며, 최근에는 R.P.Singhal 등[13]이 긴 튜브의 튜브 스피닝에 요구되는 동력계산을 수행한 바 있다.

국내에는 장[14]에 의해 상계해법의 개선을 통해 유동성형공정(flow forming process)의 근사해석이 연구된 바 있다. 그러나, 기존의 상계법 등에 의한 해석방법은 예비성형체의 전체적인 변형, 금속 유동 형태 등을 예상하거나 최적의 공정 조건을 결정하는데 있어서는 유용하게 사용될 수 있으나 상세한 금속유동에 대한 다양한 공정변수들의 영향을 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 필요성이 대두되었고 유한요소법을 이용한 접근방법이 시도되었다. 유한요소법을 이용한 연구는 아직 소수인데, 김 등[15]이 상계해법과 유한요소법을 이용하여 튜브 스피닝 공정을 연구한 바 있으며, 이 등[16]에 의해 wedge indentation 방법을 사용하여 내경축소공정이 연구된 바 있다.

티타늄합금은 연성이 우수하여 상온에서도 성형이 가능하고 무게에 비해 강도가 우수할 뿐만 아니라 내식성, 내열성이 좋기 때문에 항공기, 로켓 분야와 같은 첨단 산업에서 주로 사용되고 있는 재료이다. 그러나, 티타늄 합금이 상온에서 저온취성이며 절삭 등의 가공시 내마모성이 뒤떨어져 흔적을 남기기 쉽고 좋은 강도 때문에 절삭공구의 수명을 단축시키는 결과를 초래하기 때문에 절삭 등의 가공보다 좋은 성형성을 고려한 가공법이 사용되고 있다. 용기 가공의 경우 이러한 티타늄합금의 성질을 고려하여 튜브 스피닝 공정을 통해 가공하는 것이 바람직하다.

튜브 스피닝 공정을 이용하여 티타늄합금을 가공하는 경우 재료의 성질을 고려한 설계변수들의 채택과 그것에 대한 영향 평가가 중요하다. 따라서 본 논문에서는 용기의 튜브 스피닝 공정을 상계해법을 이용하여 근사해석 하였으며, 이를 기반으로 공정변수를 설정하였다. 상계해법을 통하여 설계된 조건을 기반으로 wedge indentation방법으로 전방 튜브 스피닝 공정을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{r_1} &= \frac{\sin \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} v_o \\ \Delta V_{r_2} &= \left\{ \frac{\cos(\theta - \alpha) \sin \Phi}{\sin(\alpha + \Phi)} \frac{T_o}{T_f} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos(\beta_1 + \theta) \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \right\} v_o \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta V_{r_3} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\Phi + \alpha)} v_f$$

Johnson은 실제의 표면력에 의한 일률은 접선 방향의 속도 불연속에 의한 에너지 소비율보다 작거나 같다고 주장하였는데, 만약 변형이 완전 강소성재료의 평면변형이라면, 상계해법을 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$W \leq J^* \quad (5)$$

여기서, J^* 는 운동학적 가용속도장으로부터 계산된 일률의 상계값이다. 즉, 상계값은 속도불연속면에 소모되는 에너지와 로울러와 소재간의 마찰에 의한 에너지의 소비율로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J^* &= k[\Delta V_{r_1} A(\Gamma_1) + \Delta V_{r_2} A(\Gamma_2) + \\ &\quad \Delta V_{r_3} A(\Gamma_3) + mv_2 A(\Gamma_4)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, k 는 재료의 전단항복응력이고, m 은 로울러와 재료사이의 마찰계수이다.

기하학적인 조건에 의하여 각 Φ 는 식(9)에 의하여 구할수 있으며, Build-up을 고려했을 때 실제적인 두께감소율은 두 개의 삼각형 속도장에 대하여 식(7)과 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \frac{h}{T_o + h} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{T_o + h - T_f}{T_o + h} \quad (8)$$

$$\tan \Phi = \frac{(1 - R_2) \tan \alpha \tan \theta}{R_2 \tan \theta - \tan \alpha} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tan \beta_2 &= \\ &\frac{\tan \alpha \tan \beta_1 \tan \Phi}{\tan \Phi (R_2 \tan \beta_1 + R_1 \tan \alpha) - (1 - R_2) \tan \alpha \tan \beta_1} \\ &\times \frac{T_o}{T_o + h} \end{aligned} \quad (10)$$

이상에서와 같이 삼각형 속도장에 대한 앞의 이론식들을 종합하여 보면, 구하여지는 상계값은 Build-up h , 삼각형 속도장의 각 θ 와 β_1 의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(h, \beta_1, \theta) = J^* \quad (11)$$

이와같이 본 논문에서 가정한 복합적인 삼각형 속도장에 대한 상계값 즉, J^* 의 최소 상계값을 얻기 위하여는 방정식 $F(h, \beta_1, \theta)$ 의 변수에 대한 최소값으로 얻을 수 있다.

여기서 Build-up (h)는 θ , β_1 에 의존적인 값이기 때문에 디타늄합금의 재료특성을 고려한 유한요소법과 상계법에서 얻은 값을 서로 피드백함으로써 수렴되는 최적의 값을 통하여 얻을 수 있다. 따라서 최소상계값은 θ , β_1 에 대한 최적화로 결정될 수 있다.

2.3 가공력과 동력의 결정

Kobayashi, Thomsen[1]에 의하면 각방향의 가공력은 원주방향의 가공력 F_t 를 알게되면 축방향의 힘 F_a , 반경방향의 힘 F_r 을 비례적으로 구할 수 있다. 이러한 가공력은 로울러와 재료사이의 접촉면에 압력 p 가 일정하게 분포되어 있다는 가정하에서 계산될 수 있다.

즉, 가공력을 결정하기 위해서는 재료와 로울러사이의 접촉면적을 계산하는 것이 중요하다. 이와 같이 3방향의 투영된 접촉면적을 구하기 위하여 기하학적인 방법과 수치적인 방법을 이용한다. 따라서 3방향의 힘의 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_t &= T_o \cdot f \cdot k \cdot K \\
 F_a &= T_o \cdot k \cdot \sqrt{D_r \cdot f \cdot \tan \alpha} \cdot K \\
 F_r &= T_o \cdot k \cdot \sqrt{D_r \cdot f / \tan \alpha} \cdot K \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서 k : maximum shear stress

K : coefficient of force component

α : attack angle of roller

D_r : diameter of roller

여기서, F_t , F_a , F_r 은 원주, 축방향, 반경 방향의 힘의 성분을 나타내며, Coefficient of force component K 는 다음과 같이 나타낸다.

$$K = f' / [T_o \cdot f \cdot k \cdot \pi \cdot \{D_m + (2 + R)T_o\}] \quad (13)$$

또한, 가공력 F_t 로부터 가공동력 \dot{W} 를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{W} = F_t \pi (D_m + (2 - R)T_o) \quad (14)$$

여기서 F_t : tangential force component

D_m : diameter of mandrel

T_o : initial thickness of workpiece

R : reduction ratio

3. 유한요소해석

3.1 모델링

스피닝공정의 정확한 해석을 위해서는 회전과 축방향이송을 모두 고려하여야 하므로 3차원해석이 필요하나 과도한 작업시간을 줄이기 위하여 2차원 축대칭으로 형상을 가정하였다. 또한 Feed rate의 영향을 파악하기 위하여 압입방식(Indentation)을 사용하여 스피닝공정을 해석하였다.[Fig. 3] 가공재는 탄소성재료로 가정하였으며 요소는 상용코드인 ABAQUS에서 축대칭 요소인 CAX4를 사용하였으며 로울러는 강체(Rigid Body)로 취급하였다.

3.1 해석 방법

스피닝 유한요소해석에 있어서 압출방식

(Extrusion)을 사용할 경우에는 Feed rate의 영향을 고려할 수 없기 때문에 본 연구에서는 압입(Indentation)방식을 채택함으로써 이러한 단점을 보완하였다.

Indentation방식은 Fig. 2에서와 같이 실제 스피닝공정에서 roller가 재료를 한번 회전할 때 축방향으로 진행하는 거리를 고려하여 STEP2의 Feed rate를 정할 수 있으며 STEP3는 가공깊이에 의하여 결정이 된다.

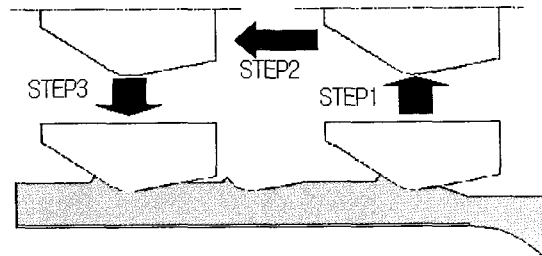


Fig. 2. Roller path in indentation analysis

3.3 해석 조건

제품의 재료는 티타늄합금(Titanium15)을 사용하였으며 그 물성치는 Table 1과 같으며 Fig. 3은 인장시험을 통하여 얻은 응력-변형률 선도이다.

Table 1 Material Properties of Ti15

Density	4.76 [g/cc]
Yield stress	749.69 [MPa]
Ultimate stress	762.41 [MPa]
Fracture stress	802.01 [MPa]
Young's Modulus	87394.766 [MPa]
Possion's ratio	0.31

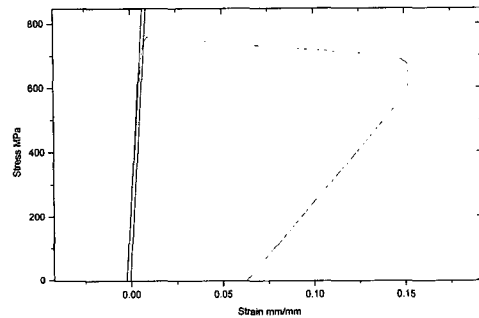


Fig. 3. Stress-Strain curve

해석에 사용된 티타늄합금인 Ti-15는 연성이 우수하여 상온성형이 가능하다는 장점이 있으나 Fig. 3과 같이 실제로 소성가공이 이루어지는 영역, 즉 소성영역이 매우 작음으로 인하여 스피닝가공과 같은 국부변형인 경우에는 가공깊이 나 feed rate, 로울러의 전·후방각이 중요한 의미를 가지게 된다.

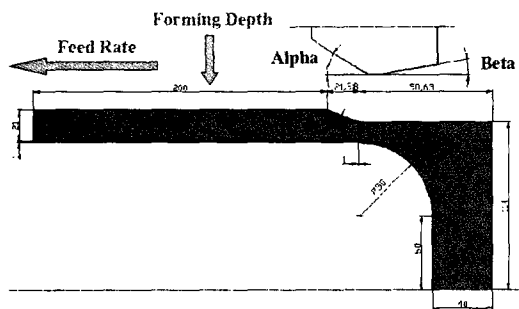


Fig. 4 Schematic drawing of preform body

해석에서 사용된 모델은 Fig. 4와 같은 단면 형상을 가지고 있으며 예비성형체는 두께 14mm, 길이 200mm, 내부직경은 100mm이다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 티타늄합금의 스피닝공정에서 소요되는 가공력과 동력을 고려하여 로울러의 전방각과 후방각을 상계해법을 사용하여 얻었으며 ABAQUS를 사용하여 절삭깊이, 최종길이 그리고 Feed rate에 따른 편평도를 해석하였다.

4.1 상계해법 해석결과

Fig. 5는 티타늄합금에 대하여 로울러의 전방각도와 재료의 두께(t), 맨드릴의 반지름(rm)의 변화에 따라서 기계에 요구되는 가동동력의 크기와 경향을 보여준다. 가공동력은 식(13)과 같이 로울러의 접선력에 의하여 결정이 된다. 가공깊이는 10%이며 다양한 형상치수에 적용하기 위하여 (a), (b), (c)와 같이 t와 rm의 비율에 따

른 변화와 (d), (e)와 같이 t와 rm의 비율은 일정하고 크기가 변화한 경우로 나타내었다.

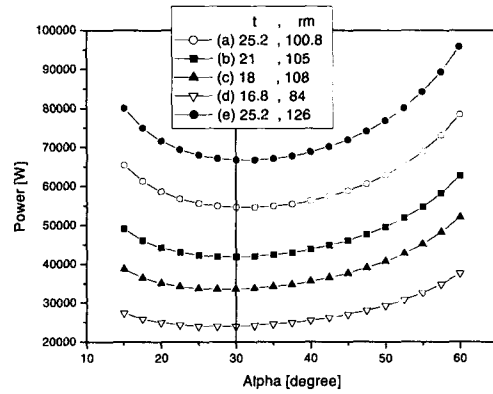


Fig. 5 Comparison of power according to Alpha

변수의 크기변화에 대하여 경향은 일정하며 전체적으로 t와 rm이 클수록 동력이 많이 요구됨을 알 수 있으며, rm에 비해 t의 변화에 보다 의존적임을 알 수 있다. 전방각도가 15° 부터 30° 까지는 동력의 크기가 감소하다가 그 이후로 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 동력은 접선력의 크기에 좌우되며 최대전단응력의 크기에 따라 결정된다. Fig. 5로부터 전방각이 약 30° 근방에서 가장 적은 동력으로 가공할 수 있음을 알 수 있다.

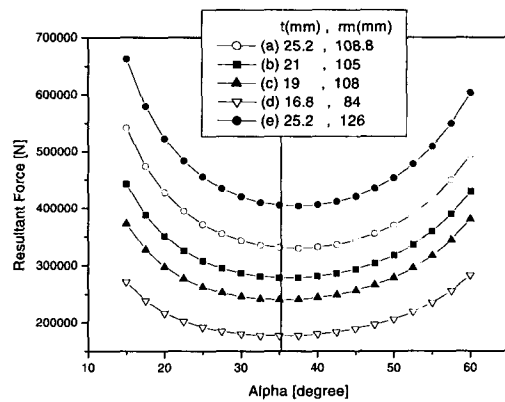


Fig. 6 Resultant Force according to Alpha

Fig. 6은 가공깊이가 10%인 경우 로울러의 전방각도에 따른 세힘, 즉, 축력, 반경방향힘, 접선력의 합력의 그래프이다.

이 힘이 과다하게 작용할 경우에는 가공기계에 무리한 부하가 작용하여 작업효율이나 제품의 질을 떨어뜨릴 우려가 있다. Fig. 6에서 나타나듯이 티타늄합금의 경우 여러 형상치수에 대하여 전방각이 약 35° 근방에서 가장 적은 가공력이 작용하는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5와 Fig. 6을 통하여 가공동력과 로울러에 가해지는 합력이 가공에 미치는 영향을 고려함으로써 티타늄용기의 형상에 적절한 로울러의 전방각을 얻을 수 있다.

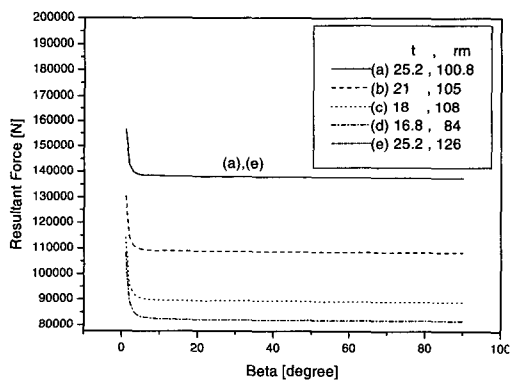


Fig. 7 Resultant Force according to Beta

Fig. 7은 로울러의 후방각에 따른 세 작용력의 합력을 나타낸다. 여기서 가공깊이는 10%이며 전방각도는 32.5°이다. 재료두께가 25.2mm인 (a)와 (e)가 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있는데 이는 후방각의 크기가 재료두께(t)에만 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 후방각이 0° 도부근 즉, 후방경사면이 거의 재료에 닿아있는 경우에는 그 접촉력으로 인하여 큰 힘이 작용하나, 10° 이하까지 계속 힘이 감소하여 그 이후는 거의 일정한 경향을 보인다. 이것은 가공깊이로 인하여 로울러의 후방면이 특정 후방각도까지는 재료와 접촉하고 있다는 것을 나타낸다. 그림을 통하여 최적의 로울러 후방각도는 10° 이하라고 할 수 있다. 이 후방

각은 티타늄합금이 탄성회복시 거동에 중요한 요인이 되며, 또한 로울러의 Feed rate에 따라서 한번의 회전동안에 가공되지 않은 부분이 다음 회전에서 로울러의 후방과 접촉하기 때문에 가공성에도 큰 영향을 미친다.

4.2 유한요소 해석 결과

상계해법을 통해서 스프닝공정에서의 Feed rate 영향을 해석할 수 없다. 따라서 티타늄합금 용기에 대하여 최적으로 설계된 로울러의 형상을 사용하여, Feed rate가 티타늄용기의 스피닝 가공에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한요소법을 사용하였다.

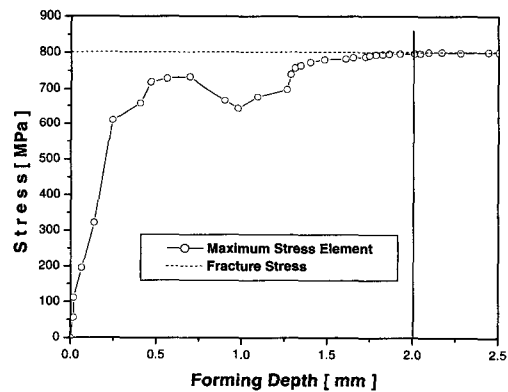


Fig. 8 Forming depth of Titanium alloy

Fig. 8은 로울러의 가공깊이에 따른 상당응력의 크기를 나타낸다. 가공깊이는 재료의 물성에 의하여 주로 영향을 받으며 깊이가 작을수록 발생하는 응력의 크기는 작으나 공정상 과도한 가공시간이 소요된다. 따라서 Fig. 8과 같이 티타늄합금에서는 과단이 일어나지 않는 범위에서 최대깊이인 약 2mm의 가공깊이가 최적의 값이라고 할 수 있다. 여기서 응력은 가공영역에서의 최대응력을 나타낸다.

Fig. 9는 티타늄용기표면에서 로울러의 Feed rate에 따른 굴곡의 최고와 최저높이의 차인 편평도(mm)를 나타낸 것이다. 티타늄합금의 경우 Feed rate가 작을수록 높이의 차가 작아지는 것을

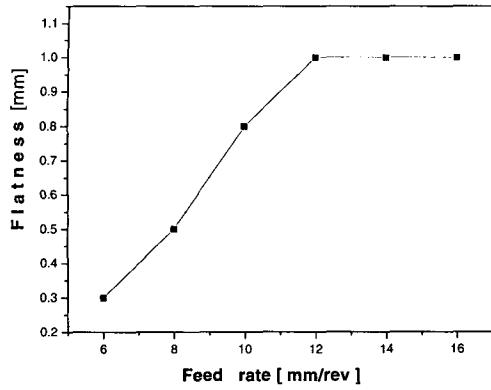


Fig. 9 Flatness according to Feed rate

알 수 있다. Feed rate와 편평도는 비례적인 관계를 가지다가 약 12 mm/rev정도부터는 거의 일정해지는 것을 알 수 있다.

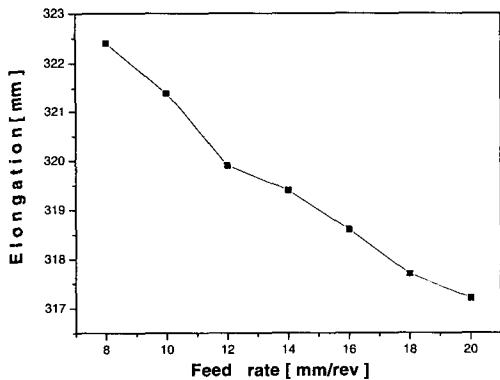


Fig. 10 Elongation according to Feed rate

Fig. 10은 Feed rate에 따른 티타늄용기 끝단의 길이 신장량을 나타낸 그래프이다. 여기서 티타늄합금의 경우 Feed rate에 따른 길이 신장량이 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그것은 같은 가공깊이를 가지고 가공할지라도 Feed rate가 작을수록 끝의 높이 차가 줄어들고 그 만큼의 양이 길이 신장에 영향을 미친다는 것을 의미한다.



Fig. 11 Deformed body

Fig. 11은 Feed rate가 비교적 큰 값인 12mm/rev로 하였을 때 가공된 티타늄합금의 형상을 나타낸다. Fig. 9에서의 결과로부터 알 수 있듯이 Feed rate가 큰 경우, 표면에 굴곡이 심하게 나타나 있는 것을 확연히 구분할 수 있으며 이런 현상이 경우에 따라서는 재료의 열발산에 도움을 주는 등 유용한 효과를 나타내기도 한다. 따라서 얻고자 하는 편평도와 가공속도를 적절히 고려하여 최적의 Feed rate를 결정할 수 있다.

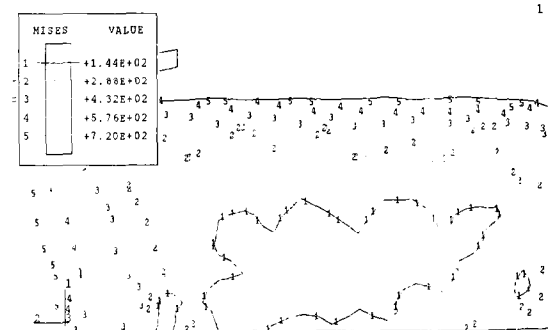


Fig. 12 Contour of Effective stress in Titanium alloy after Spinning

Fig. 12는 Feed rate가 2mm/rev로 작은 값을 가질 때 가공된 재료의 응력분포를 나타낸다. 외형적으로 표면은 거의 편평하나 응력분포는 로울러가 가공한 경로를 따라 일정한 간격으로 집중되어 있음을 알 수 있다. 이것은 실제 스피닝가공의 응력집중현상을 잘 보여주고 있으며 압입방식(Indentation)의 스피닝공정 해석법이 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

티타늄 합금의 스피닝 공정을 해석하는데 있어서 상계해법을 사용하여 최적의 로울러 전방각과 후방각을 정하였으며 유한요소법을 사용하여 티타늄 합금 가공시 Feed rate의 영향을 파악하였다.

- (1) 티타늄용기의 길이신장을 위한 스피닝공정에서 로울러의 전방각은 약 32.5°에서 가공이 적합함을 보였다.
- (2) 티타늄합금에 대한 가공력을 바탕으로 얻어진 가장 적절한 로울러의 후방각은 약 10°이 하임을 알 수 있다.
- (3) 스피닝공정시 Feed rate에 따른 티타늄용기의 편평도와 길이신장의 경향을 파악하였으며 이를 바탕으로 사용용도에 따른 적절한 Feed rate를 결정할 수 있다.
- (4) 티타늄합금의 스피닝공정에 있어서 적절한 해석법을 개발하였다.

참 고 문 헌

1. S. Kobayashi and E. G. Thomsen, 'Theory of spin forging', CIRP Annalen, 10 : No.2, pp.114-123, 1961.
2. M. Hayama, 'Theoretical study of tube spinning', Bulletin of the Faculty of Engr., Yokohama Nat. Univ., vol.15, pp.38-48, March 1966.
3. S. Kalpakcioglu, 'On the mechanics of shear spinning', Trans. ASME., Ser. B, J. Engng, for Ind., p.485, 1961.
4. C.H.Wells, 'The control of buildup and diametral growth in shear forming', Journal of Eng. Ind., pp.63-70, Feb 1968.
5. T.Ram Mohan and R.M.Mishra, 'Studies on power spinning of tubes', Int. J. product. Res, vol.10, No.4, pp.351-364, 1972
6. C.L.Packham, 'Metal spinning and shear and flow forming parts', Sheet Metal Industries, pp.586-599, June 1977.
7. C.Mallanna, H.N.Nagarajan and M.E. Visuegwarran, 'Process parameters in flow forming (drawing type tube spinning) and how they affect the end product', 1st Int. Conf. Rotary Metal-Working Process, Nov 1979.
8. D.H.Pollitt, 'The practical and potential of flow forming processes', 1st Int. Conf. Rotary Metal-Working Process, Nov 1979.
9. S.Kalpakjian and S.Rajagopal, 'Spinning of tube's a review', J.Applied Metal Working, Vol.2, No.3, pp.211-223, July 1982.
10. D.H.Pollitt, 'Flow forming for cost effectial innovation', Sheet Metal Industries, Sept. 1990.
11. M.Gur and J.Tiroch, 'Plastic instability under compressive loading during shear spinning process', Journal of Eng. for Ind., Vol.104, pp.17-22, Feb. 1982.
12. B.S.Feng and J.Z.Pan, 'The analysis of force components for shear spinning process of cylindrical parts', 1985.
13. R.P.Singhal, P.K.Sayena and R.Prakash, 'Estimation of power in the shear spinning of long tubes in hard to work materials', Journal of Mat. Processing Tech. 23, pp.29-40, 1990.
14. 장세용, 1994, "유동성형공정 근사해석에 관한 연구", 충남대학교 석사학위 논문
15. 김진형, 홍성인, 이정환, 이영선, '상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝공정 해석에 관한 연구', 한국소성가공학회지, 제6권 제6호, pp.517-526, 1997.
16. S.I.Hong, S.H.Rhee and S.J.Yun, 'A study on the neck-in process by flow-forming', Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.895-898, 1998.