

알루미늄 원통컵 스피닝 작업을 위한 롤러이송경로 설계

김종호* · 박규호*

(1998년 7월 16일 접수)

Design of roller path for spinning of cylindrical cups of aluminum sheet metal

J.H. Kim and K.H. Park

Abstract

Spinning is a chipless forming method for producing axially symmetric parts by using axial-radial motions of a spinning roller. This process has still some advantages in such a view point that a variety of complex shapes which can not be formed in a press can be easily spun at a low cost, although it is one of the oldest forming methods for spinning mainly cookware parts for a long time. This study is to investigate the optimum roller path in order to obtain the maximum spinnability in producing cylindrical cups of Aluminum(A1050-H16) sheet metal. Working conditions applicable to any size of blank were predetermined through preliminary spinning tests. 9 types of roller path were proposed and experiments were carried out. The modified involute curve was shown to give the maximum drawing ratio and more uniform quality of spun cups, as compared with other results of this study. In addition, thickness distribution and dimensional accuracy of spun cups were examined and discussed.

Key Words : Spinning(스피닝), Involute Curve(인벌류트곡선), Roller Path(롤러이송경로), Modified Involute Curve(변형인벌류트곡선), Thickness Distribution(두께분포)

1. 서론

스피닝 성형은 그림1과 같이 원판 또는 파이프 형태의 소재를 고정시킨 후 맨드릴을 회전시키면서 롤러를 사용해 소재를 맨드릴의 형상으로 밀어붙이면서 점진적으로 성형하는 공정이다.

이 성형법은 다품종 소량생산의 고정밀도 제품을 만드는데 이용되어온 방법으로 롤러와 판재가 접촉하는 부위에서 변형이 국부적으로 일어나므로 성형에 큰 힘이 소

되지 않아 다른 성형법에 비해 소형의 장치와 공구로 가공이 가능한 이점이 있다.

초기의 스피닝은 가늘고 긴 주걱 모양의 도구를 사용하여, 또는 소재-공구사이의 마찰을 줄이기 위하여 주걱 끝을 롤러로 대체하여 성형하였는데, 이는 수 작업에 따른 작업자의 기술과 경험에 크게 의존하여 균일한 제품 생산과 일정한 작업 조건 유지가 어려웠다. 그러나 최근엔 롤러와 유압구동장치를 적용하면서 발전을 거듭하여, 서보 유압 장치와 다축 슬라이드(multi-slide)를 이용한 NC

* 서울산업대학교 금형설계학과

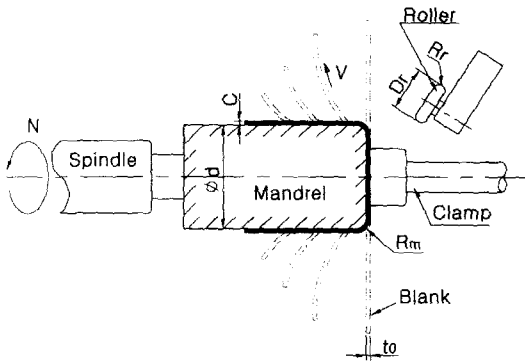


Fig. 1 Spinning process of sheet metal

스피닝 기계가 개발되고, 이들 기계에 의해 복잡한 다공정의 제품을 1대의 기계에서 완성할 수 있는 전용 장비를 개발하고 있는 추세이다. 또한 적용 범위도 가정용 전기, 조명기구, 주방용기 이외에 자동차, 항공기, 산업기기 등 소형에서 대형의 정밀 제품까지 점점 다양화되어가고 있다.⁽¹⁾

스피닝에 관한 작업 종류, 가공특성, 가공실례 등이 종합적으로⁽²⁾ 기술된 이후 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되고 있다. Hayama⁽³⁻⁵⁾는 이 분야에 대한 집중적인 실험과 연구를 수행하여 스피닝 작업에서의 작업변수(이송피치, 이송속도, 롤러 치수, 가공 시작점 위치)들의 영향 조사와 롤러 공구의 이송 경로 효과를 분석하였으며, 스피닝 작업에 적당한 인벌류트(involute) 곡선이 최적의 이송 경로라고 제안하였다. 또한 이 곡선을 사용하여 NC 스피닝 기계에서 롤러 경로(roller path) 설계를 프로그램화하여 적용한바 있다.

Kawai⁽⁶⁾는 스피닝 가공의 재현성과 다품종 소량생산방식에서의 빠른 적용을 위해 데이터 베이스(data base)의 구축을 시도하여 검색 단계까지 완성하였으며, 최근엔 튜브재를 이용하여 압나사(internal thread) 성형 특성을⁽⁷⁾ 조사하였다. Saito⁽⁸⁾는 이러한 스피닝 공정을 직경 1 mm 이하의 스테인리스 제품에 마이크로 스피닝(micro-spinning) 기술을 응용하여 스피닝 기술의 적용 범위를 점차 확대 개발해 나가고 있다. Kim 과 Hong⁽⁹⁾은 튜브 스피닝에 있어서 롤러대신에 다이를 사용하는 경우에 대해 상해해법과 상용 소프트웨어를 이용하여 해석 결과와 실험 결과를 비교 검토하였다.

본 연구에서는 판재를 소재로 사용하는 원통컵 스피닝에 있어서 롤러의 이송경로에 대한 최적 경로를 실험적으

로 조사해보고자 한다. 직선, 직선과 직선(오목형, 볼록형), 인벌류트 곡선, 수정된 인벌류트 곡선 등 여러 형상의 경로에 대해 성형성을 조사하고, 이들 성형품의 품질도 함께 비교 검토한다. 이를 위해 작업에 영향을 미치는 이송피치, 이송속도, 롤러 등의 작업 조건은 예비 실험을 통해 공통의 성형가능 영역을 찾은 다음, 이들 조건을 일정하게 한 상태에서 시편의 직경을 변화시켜 가면서 최대 드로잉비를 주는 이송 경로를 실험 연구한다.

2. 롤러이송경로의 수학적 표현

Fig. 1에서와 같이 원형 소재로부터 원통컵을 멀티경로(multi-path)로 성형할 때 롤러의 이송 경로 선택에 따라 파단이나 주름 불량이 발생하기 때문에 경로를 최적으로 설계하는 것은 대단히 중요하다. 이송 경로가 직선이나 원호로 구성된 것은 간단히 표현할 수 있지만 곡선의 경우엔 쉽지 않다. 지금까지 스피닝 가공에 많이 적용되고 있는 인벌류트 곡선 구성에 대해 Hayama⁽⁴⁾가 제안한 근사 수식은 다음과 같다.

$$\Theta = 1.455r^{0.5138} \tag{1}$$

$$\Phi = 0.97r^{0.5138} \tag{2}$$

$$\Psi = \tan^{-1}(x/y) \tag{3}$$

$$\Delta\Phi = \Phi - \Psi \tag{4}$$

$$\theta = \Theta - \Delta\Phi \tag{5}$$

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \tag{6}$$

인벌류트 곡선은 Fig. 2에서 보는바와 같이 반경 R 인 임의의 점 A에서 원을 중심으로 회전하면서 원호상의 점

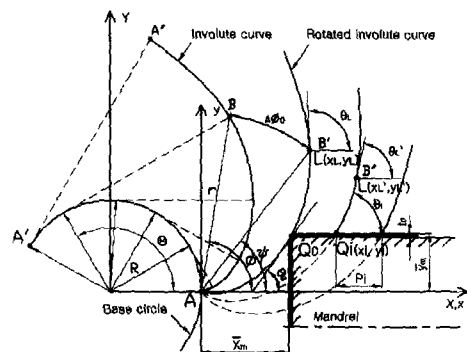


Fig. 2 Design of roller path by involute curve

에서 접선을 그었을 때 원호 길이와 접선 길이가 같도록 되는 점을 연결하여 구성된 곡선(AA'')이다. 기초원의 회전각(θ)에 대한 인벌류트 곡선상의 점 B 까지의 거리를 r 이라 하고 이 곡선이 $\Delta\Phi_0$ 만큼 회전하여 맨드릴 상의 소재와 접촉할 때, 접점(Q_0)에서의 기울기를 θ_0 , 그리고 이 곡선상의 임의점 B'에서의 기울기를 θ 라하고, 직선 AB'의 경사각을 Ψ 로 할 때 위 식을 사용할 수 있다. 위 식에서 \cdot (도트)는 기초원 반경 R로 나누어 무차원화시킨 것을 표시한다. 초기 경로에서의 롤러 위치(x_L, y_L)는 기하학적 요구조건을 만족시키면서 식(1)에서 식(6)까지를 연립하여 풀면 식(7)과 식(8)로 주어지고, 마찬가지로 방법으로 후기 경로에서의 위치(x'_L, y'_L)는 맨드릴 치수를 고려하여 식(9)와 식(10)으로 주어진다.

$$\Psi_0 = 0.97(\dot{r}_L^{0.5138} - \dot{r}_0^{0.5138}) + \tan^{-1}(y_0 + x_0) \quad (7)$$

$$\dot{x}_L = \dot{r}_L \cos \Psi_0, \quad \dot{y}_L = \dot{r}_L \sin \Psi_0 \quad (8)$$

$$\Psi_i = 0.97(\dot{r}_L^{0.5138} - \dot{r}_i^{0.5138}) + \tan^{-1}(y_m + x_i) \quad (9)$$

$$\dot{x}'_L = \dot{r}_L \cos \Psi_i, \quad \dot{y}'_L = \dot{r}_L \sin \Psi_i \quad (10)$$

여기서 \dot{r}_0 는 초기 롤러이송경로와 맨드릴과의 접촉점 (Q_0)까지의 무차원화된 반경을, 그리고 \dot{r}_L 는 후기 롤러이송경로와 맨드릴 표면과의 접촉점(Q_i)까지의 무차원화된 반경을 나타낸다. Ψ_0 와 Ψ_i 는 초기, 후기 롤러이송경로상의 임의의 점(B' 또는 B'')과 기초원상의 점 A와의 경사각을 표시한다.

본 연구에서는 위에서 기술한 인벌류트 곡선외에 더 좋은 성형성을 나타내 줄 수 있는 곡선 형태를 찾기 위해 인벌류트 곡선 상의 좌표(x'_L, y'_L)에 상수 a, b를 곱한 변형된 곡선(ax'_L, by'_L)을 생성하여 비교 검토하였다. 변형된 곡선은 Fig. 3에서 보는바와 같이 인벌류트 곡선 상의 4개점을 선택하고 이들 점을 지나는 Auto CAD상에서의 스플라인 곡선(spline curve)을 구성하여 이를 롤러 이송 경로로 사용하였다. 이 곡선을 구성할 때 기초원 회전각의 설정 크기에 따라서 일부 곡선 형태가 변화될 수 있는데, 여기서는 회전각 180°를 기준으로 하였으며 상수 a, b 변화에 따른 Fig. 3(b)의 곡선 형태를 볼 때, a 값 변화는 곡선 형태를 x축방향으로 너무 급격하게 변화시키는 반면, b 값 변화는 유사한 곡선 형태로 변화되고 있어 상수 b만을 변화시키고 상수 a는 1.0으로 고정하여 다른 이송 경로와 스피닝 성형성을 조사하였다.

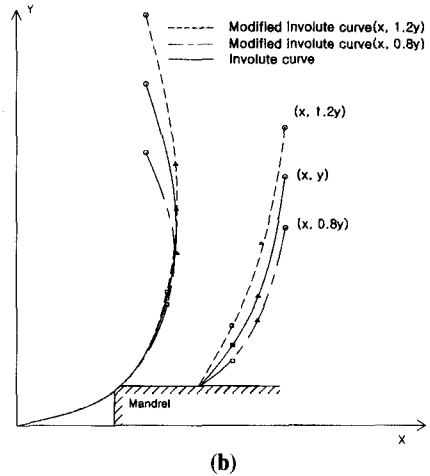
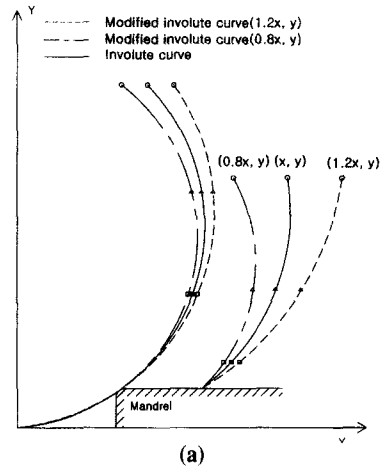


Fig. 3 Design of modified involute curve for roller path

3. 실험

3.1 실험장치

실험에 사용한 CNC 스피닝 머신이 Fig. 4에 나타나 있다. 이 기계는 4축 모터 제어 드라이브(AT 6450-4 axis controller drive)와 3개의 서보 모터(servo motor)로 구성되어 X축과 Y축은 롤러의 위치를 제어하고, Z축은 롤러가 장착된 터릿(turret) 공구대의 회전을 제어한다. 모터 제어 드라이브는 PC(personal computer) 컴퓨터 내에 설치되어 모든 제어를 컴퓨터에서 컨트롤할 수 있으며, 모터 토크(torque)는 36kg·m이고, 주축 회전속도는 140~900rpm의 범위에서 조절가능하며, 터릿 공구대는

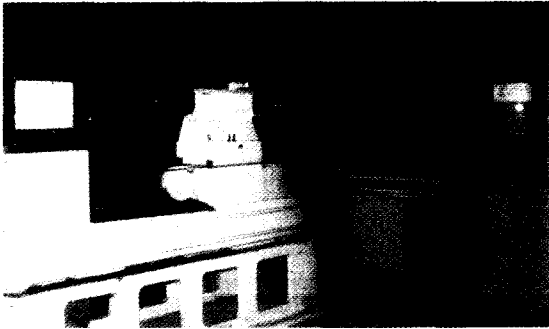


Fig. 4 CNC Spinning machine

4개의 공구를 장착하여 스피닝 작업을 순차적으로 4공정 작업할 수 있도록 되어 있다.

롤러이송경로의 설계는 Auto CAD 환경에서의 Auto Lisp으로 프로그래밍하여 화면에 출력한 다음 이를 dxf 파일로 변환한다. CompuCam 소프트웨어에서 dxf 파일을 입력받아 롤러이송경로, 롤러이송속도 등을 지정하고 NC코드로 변환하여 prg 파일로 저장한다. prg 파일을 CompuMotor 소프트웨어에서 입력받아 원점 세팅 및 시작점을 지정한 후, 프로그램을 실행시키면 설계된 이송경로에 따라 스피닝 작업을 할 수 있다.

3.2 실험방법

스피닝 성형에 영향을 주는 인자는 이송속도, 주축 회전수, 이송피치, 롤러의 초기 경사각, 재질, 롤러 반경 등 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 기존의 결과⁹⁾를 기초로 Table 1의 실험조건을 고정시킨 상태에서 9종류의 롤러이송경로를 변화시키면서 알루미늄 소재의 성형성을 조사

Table 1 Experimental condition for spinning

맨드릴 직경(d)	∅60
맨드릴코너 반경(Rm)	4
롤러직경(Dr)	∅94
롤러곡률반경(Rr)	4
롤러설치 각도	5°
이송 피치(pi)	2
롤러의 접선 속도(V)	3.36~7.84 mm/sec
주축 회전수(N)	294~898 rpm
기초원 반경	50
클리어런스(C)	1

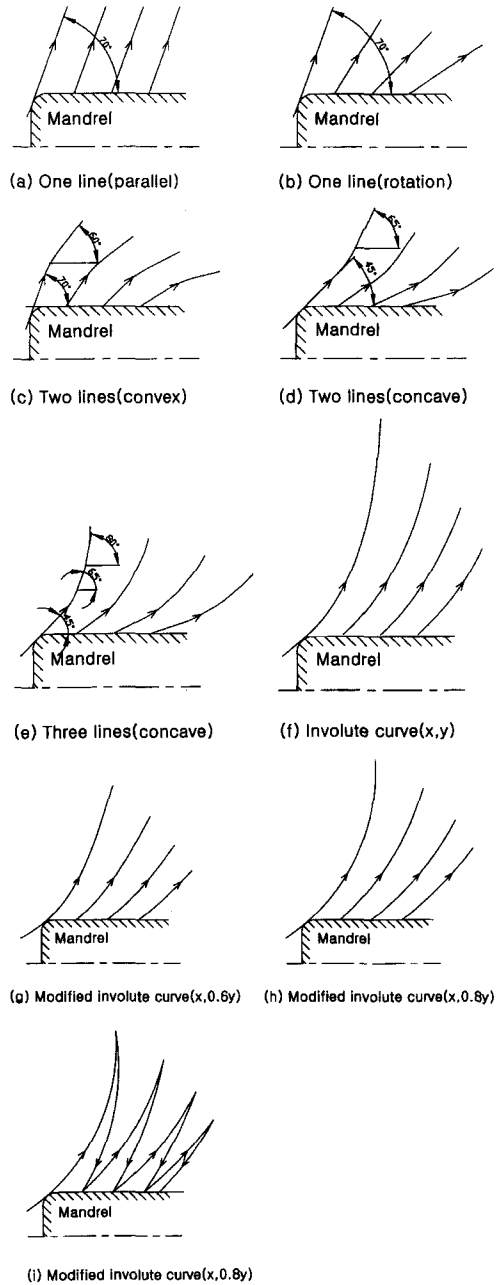


Fig. 5 Design of roller path(a)-(i)

하였다. 즉, 이송 피치 2 mm, 주축의 회전수는 445 rpm, 롤러의 접선 속도는 4 mm/sec로 일정하게 한 상태에서 소재를 직경 80 mm로부터 직경 155 mm까지 5 mm 간격으로 증가시키면서 실험하였으며, 실험에 사용

Table 2 Mechanical properties of test material

재 질	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield stress (kgf/mm ²)	Hardness (Hv)	Elongation (%)
A1050-H16	7.97	3.61	41.73	45.84

한 소재는 순수 알루미늄(A1050-H16)으로서 이의 기계적 성질이 Table 2에 주어져 있다.

본 실험에 사용된 롤러이송경로가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림의 경로(a)는 경사각이 70°인 직선을 맨드릴 상에서 이송 피치 만큼씩 평행 이동시킨 것이며, 경로(b)는 경사각이 70°인 직선을 매 피치마다 2°씩 회전 이동시킨 것으로 소재의 외측부를 점차적으로 넓혀가면서 소재의 유입을 유도한 것이다. 경로(c)는 경로(b)를 기초로 70°, 60°의 2개 직선을 블록형으로 조합한 것이고, 경로(d)는 45°, 65°의 2개 직선을 오목형으로 조합한 것이고, 경로(e)는 45°, 65°, 80°의 3개 직선을 오목형으로 조합하고 경로(b), (c), (d)처럼 회전시킨 것으로 직선들 사이는 라운딩하였다.

경로(f)는 인벌류트 곡선식을 프로그래밍하여 상수 a, b를 각각 (1, 1)로하여 곡선을 생성하여 이를 사용한 것이고, 경로(g)와 경로(h)는 본 연구에서 제안한 방식에 따른 것으로 상수 a, b를 각각 (1, 0.6), (1, 0.8)의 값을 주어 변형된 인벌류트 곡선을 생성하여 이를 롤러이송경로로 적용한 것이다. 경로(a)로부터 경로(h)까지는 롤러가 일방향(one way)으로 내측에서 외측으로만 향하여 실험한 것이고, 경로(i)는 경로(h)와 동일한 형태의 곡선이지만 이것은 롤러가 양방향(two ways)으로 왕복 운동을 하면서 스피닝 작업을 하도록 한 것이다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 작업 조건의 변화 효과보다는 롤러이송 경로변화에 대한 효과를 먼저 고찰하는 것으로 롤러 경로의 종류를 9가지 제안하여 이들에 대한 최대 드로잉비, 즉 맨드릴 직경에 대한 소재 직경의 비를 나타내는 것으로 스피닝 성형성을 조사하였다. 실험은 작업조건(이송속도, 주축 회전수, 이송피치 등)이 고정된 상태에서 시편 치수를 변화시키면서 성형중에 주름이나 파단이 발생하지 않으면서 최대로 성형시킬수 있는 시편 직경을 구하는 것인데 이에 대한 실험 결과가 Fig. 6에 주어져 있다. 그림을 보면 단순 직선(경로(a))보다는 회전시킨 직선 형상(경로

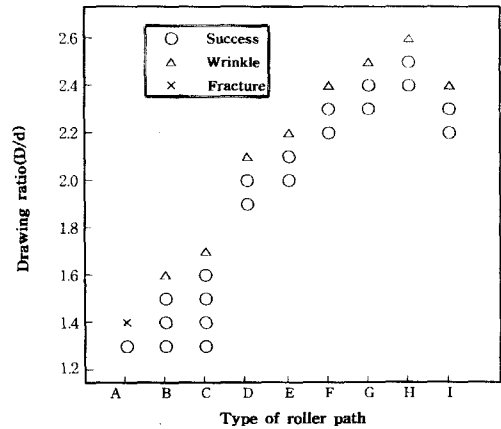


Fig. 6 Comparison of drawing ratio for 9 types of roller path

(b))이 좋고, 또한 두 직선을 사용하더라도 블록형(경로(c))보다는 오목형(경로(d))이 뛰어난 점을 고려해 볼 때 롤러이송경로는 일반적으로 회전시키는 오목형 곡선이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 직선 개수도 늘어날수록 성형성이 향상되고 있으며(경로(e)), 이들을 연속함수의 형태로 나타낸 인벌류트 곡선(경로(f))은 더 높은 값을 보여 주고 있다. 그리고 이를 일부 수정한 변형 인벌류트 곡선(경로(h))은 기존의 인벌류트 곡선보다 더 큰 값을 나타내고 있어, 본 연구에서 제안한 경로 설계 방법이 성형성 향상을 위한 방법중의 하나인 것으로 판단된다. 유압 프레스에 의한 순수 알루미늄 박판의 디프 드로잉에서 일반적으로 얻을수 있는 드로잉비⁽¹⁰⁾가 1.6-2.0인 것에 비해 스피닝에서는 드로잉비 2.5까지 얻을수 있어 알루미늄 소재의 스피닝 작업 유용성도 큰 것으로 나타났다. 지금까지의 경로는 외측 방향으로만 롤러를 움직이면서 스피닝한 결과이고, 경로(i)는 경로(h)와 똑같은 곡선 형태이지만 그림5(i)에서와 같이 일방향이 아닌 왕복 방향으로 롤러를 이송시키면서 실험한 곡선이다. 성형성은 롤러의 복귀 운동시 소재의 압축력 작용으로 공정 후반기에 주름이 발생해 다소 떨어지지만, 생산성과 품질 향상을 위한 보다 실질적인 작업 공정이다.

Fig. 7은 성형품의 두께 분포를 나타낸 것으로 롤러이송경로 4가지 종류에 대해서 비교, 검토하였다. 그림의 경로 (f), (h), (i)는 그림 3에 주어져 있는 곡선 형태이고, 경로(j)는 경로(i)와 같고 단지 롤러와 맨드릴 사이의 틈새(clearance)를 1.0 mm에서 0.8 mm로 바꾼 것이다. 일방향 경로의 경우엔 롤러가 재료를 외측으로만 밀면서

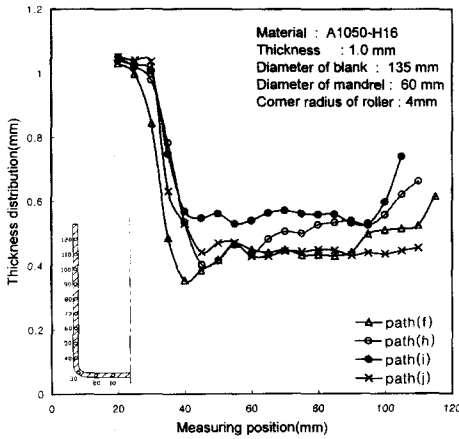


Fig. 7 Thickness distribution of spun cups at each different roller path

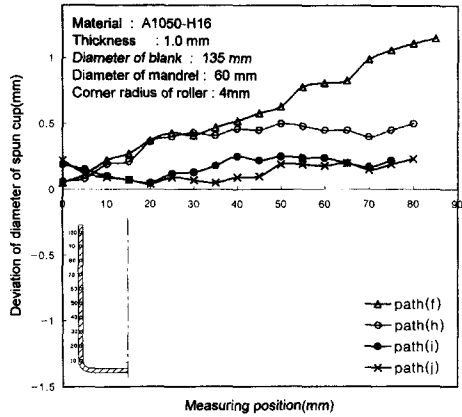


Fig. 9 Deviation of cup diameter spun at each different roller path

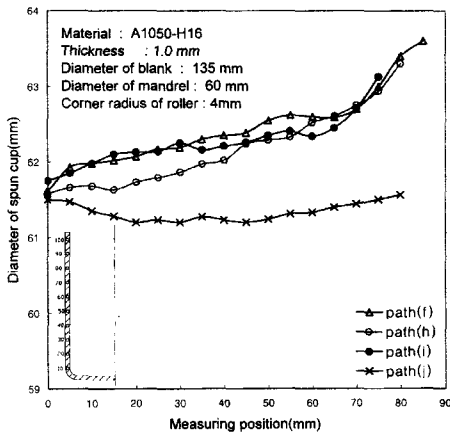


Fig. 8 Dimensional accuracy of spun cups at each different roller path

성형하기 때문에 맨드릴 코너부에서의 두께가 심하게 얇아지고 있으나, 왕복운동의 양방향 성형에서는 인장과 압축이 교대로 작용하기 때문에 측벽 두께가 보다 균일하게 나타나고 있다. 또한 틈새가 작을수록 측벽 두께는 더 얇아지고, 특히 제품의 끝단 부위에서 볼 수 있는 것처럼 측벽 두께를 일정하게 하기 위해서는 양방향 이송과 함께 틈새를 소재 두께보다 작게 설계해야 함을 알 수 있고, 순수 알루미늄 소재를 스피닝 작업하게 되면 측벽은 소재 두께의 40~50% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 직경 60 mm의 맨드릴을 사용하여 성형된 제품의 외경 치수를 측정한 것인데, Fig. 1에서와 같이 롤러 1개를 사용하여 성형할 경우엔 맨드릴의 치수보다 약

1.5~2.5 mm(맨드릴 치수기준 2.5~4.2%) 크게 나타나며 이러한 경향은 제품의 측벽 높이 증가에 따라 서서히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그런데 이와 같은 경향은 롤러 경로의 방향(일방향, 양방향)에는 거의 무관하고 틈새에 크게 좌우되는 것으로 보여지며 그림에서 알 수 있는 바와 같이 측벽의 균일한 직경을 얻기 위해선 소재 두께보다 작은 틈새의 선정이 중요하다.

이들 측벽의 위치에 따른 직경의 진원도 분포 측정이 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 8에서와 같이 측벽 높이에 따라 직경뿐만 아니라 진원도 불량도 더 커지는 것으로, 그리고 기존의 인벌류트곡선 보다는 변형된 인벌류트곡선이 더 균일 품질을 나타내고 있으며, 보다 나은 품질 개선을 위해서는 최적의 롤러이송경로에서 양방향으로 작업해야 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

순수 알루미늄 박판 소재의 스피닝 작업에 있어서 최대의 성형성을 나타낼 수 있는 롤러이송경로를 찾기 위해 9 종류의 경로를 제안하고, 이들에 대해 시편 크기를 변화시키면서 실험한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 롤러이송경로는 이송 피치에 따라 회전하는 형태의 직선보다는 곡선이, 그리고 블록형보다는 오목형 곡선이 불량없는 성형에 더 적합한 것으로 나타났으며, Hayama에 의해 제안된 인벌류트 곡선을 수정한 변형 인벌류트 곡선이 본 연구의 9종류의 경로들 중에서 가장 큰 드로잉비 2.5를 나타내었다.

(2) 변형 인벌류트 곡선은 품질 면에서도 우수한 것으로 나타났으며, 실제 제품을 스피닝할 때엔 일방향 경로보다는 양방향 경로가 제품의 두께 분포와 진원도 정밀도에서 보다 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 그리고 균일한 제품 품질을 위해선 틸새를 소재 두께보다 작게 취하는 것이 더 바람직하다.

(3) 프레스에서 디프 드로잉하기 어려운 알루미늄 소재를 최적의 롤러이송경로를 따라 스피닝 가공하면 더 큰 성형성을 얻을 수 있으며, 향후엔 제품의 생산성 향상을 위해 작업 조건들을 변화시키면서 최적의 성형조건을 재질별로 조사 연구할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 馬場 淳, 1988, "スピニングの高精度化の動向と展望", 塑性と加工 Vol.29, No.324, pp.13~20.
- (2) 日本塑性加工學會, 1984, "スピニング加工技術", 日刊工業新聞社.
- (3) 葉山益次郎, 工藤洋明, 篠倉恒, 1988, "絞りスピニング加工のパススケジュールの研究", 塑性と

加工, vol.30, no.324, pp.55~62.

- (4) M. Hayama, M. Nakamura, T. Watanabe and H. Hamano, 1986, "Roller Path Programming in Conventional Spinning by N.C. Spinning Machine", 塑性と加工, vol.27, no.308, pp.1053~1059.
- (5) 葉山益次郎, 工藤洋明, 村田崇彦, 1992, "絞りスピニングのローパスプログラミングの一般的形状への展開", 塑性と加工, 第33卷, 第376, pp.510~518.
- (6) K. Kawai, 1989, "A Fact Data Base on Spinning Technology", Proc. Int. Conf. on Rotary Forming, pp.59~62.
- (7) K. Kawai, H. Kudo and M. Endo, 1996, "Rotary Forming of Tapered Internal Threads", Advanced Technology of Plasticity, 5th ICTP, vol.2, pp.533~536.
- (8) M. Satio, 1996, "Micro-Spinning Technology for Tubular Products" Advanced Technology of Plasticity 5th ICTP, pp. 553~556.
- (9) 김승수, 나경환, 김종호, 1998, "스피닝 공정 개발", 생산기술연구 논문집, 제3권1호, pp.43~53.
- (10) 김세환, 신양화, 1993, "프레스 금형의 세부 설계법", 기전연구소.