

# 전단 스피닝에 의한 원추형상의 성형에 관한 변형 메커니즘

김재훈<sup>1</sup> · 김 철<sup>#</sup>

## New Deformation Mechanism in the Forming of Cones by Shear Spinning

J. H. Kim, Chul Kim

(Received December, 7, 2004)

### Abstract

The shear spinning process, where the plastic deformation zone is localized in a very small portion of the workpiece, shows a promise for increasingly broader application to the production of axially symmetric parts. In this paper, the three components of the working force are calculated by a newly proposed deformation model in which the spinning process is understood as shearing deformation after uniaxial yielding by bending, and shear stress,  $\tau_{rz}$  becomes  $k$ , yield limit in pure shear, in the deformation zone. The tangential force are first calculated and the feed force and the normal force are obtained by the assumption of uniform distribution of roller pressure on the contact surface. The optimum contact area is obtained by minimizing the bending energy required to get the assumed deformation of the blank. The calculated forces are compared with experimental results. A comparison shows that theoretical prediction is reasonably in good agreement with experimental results.

**Key Words** : Bending Energy, Optimum Contact Area, Shear Spinning, Tangential Force

### 1. 서 론

전단 스피닝(shear spinning)공정은 소재의 반경 방향의 직경을 변화시키지 않고 두께를 사인법칙에 의해 변화시킨다. 이러한 전단 스피닝 작업을 위한 장비 및 공정 변수들을 선택하는데 블랭크(blank)의 필요한 에너지를 예측하는 것이 매우 중요하다. 또한, 이 에너지는 롤러(roller)와 소재에 작용하는 힘에 영향을 미치는 지배적인 요소이다. 이에, 이론과 실험으로 전단스피닝 공정에 관한 많은 연구가 수행되었다. Colding[1]은 압연과 압출 공정의 조합으로 원추(cone) 스피닝 공정을 고려했다. 반면에, Kalpakcioglu[2]는 단순 전단 공정으로 가정하여 성형에 필요한 힘을 해석하였다.

Avitzur 등[3], Kobayashi[4], Hayama[5]는 복잡한 변형 효과를 고려하여 원추 스피닝의 해를 구했으나 접선력을 예측하는 방정식이 복잡하고 해를 얻기 위해서는 많은 계산시간을 요했다. Hayama와 Amano[6,7]는 이론 및 실험을 통하여 전단 스피닝 시에 블랭크와 롤러사이의 접촉 형태를 연구했다. 또한 Hayama[8]는 블랭크와 롤러 사이의 접촉 면적을 이용하여 가공력의 세 성분을 정확하게 평가했다. Kegg[9]는 전단 스피닝의 가공성(spinability)을 결정하기 위한 실험방법을 제안했으며, Sortais[10]은 일반 스피닝 공정에서 원추의 벽 두께를 연구하여 변형에너지법에 의한 이론적인 접선력을 유도했다. 그러나, 이전 연구는 공정변수의 제한된 범위에서만 실험된 결과와 일치하였

1. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계기술 연구소

고 다른 작업 조건에서는 좋은 결과를 얻지 못했다.

본 논문에서는 새로운 변형 모델을 가정하여 변형시 반경방향의 위치를 그대로 유지시키고 변형에너지  $\dot{W}_r$  에 대한 잔여일(redundant work)을 최소화하여 접선력(tangential force)  $F_t$  을 유도했다. 또한, 참고문헌[9]의 실험결과로부터 얻은 접촉면적의 형태를 이용하여 접촉계수  $m$  을 구하고 접선력과 이를 이용하여 이송력(feed force)  $F_f$  와 수직력 힘(normal force)  $F_n$  을 구한 후 실험결과와 비교하였다.

## 2. 원추 형상의 전단 스피닝 메카니즘

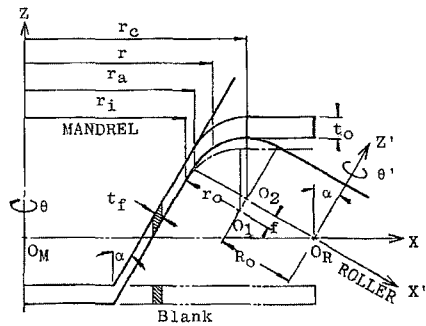
### 2.1 변형 메카니즘

Fig. 1-(a)에 콘 형상의 전단스피닝에 관한 변형 메카니즘을 모식화하여 나타내었다. 블랭크의 디스크 직경은  $D_b$ , 두께는  $t_0$  이다. 디스크의 맨드릴은 원추 모양이고, 스피닝 머신(spining machine)의 헤드에 장착되어 회전되며 돌리는 맨드릴의 측면에 평행한 베드의 트랙(track)을 따라서 블랭크를 성형시킨다. 전단스피닝 공정에서는 변형하는 동안 블랭크의 반경방향이 일정하고 변형 영역(deformation zone)을 제외하고 블랭크 전체에서 각속도가 일정하다. 따라서, 초기 디스크의 두께  $t_0$ , 최종 원추 형상에서 두께  $t_f$ , 반각을  $\alpha$ 라고 할 때, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

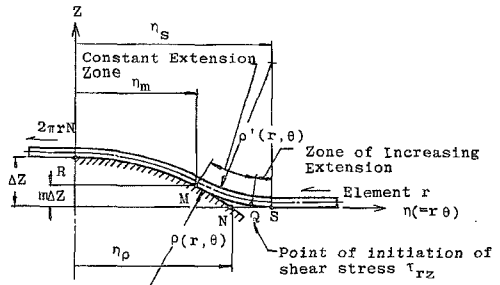
$$t_f = t_0 \sin \alpha \quad (1)$$

맨드릴이  $360^\circ$  회전하는 동안에 돌리는 같은 위치에 있으며, 회전 후 돌리는 Fig. 1-(a)에서 보여준 것처럼  $x$  방향으로  $f \sin \alpha$ ,  $z$  방향으로  $f \cos \alpha$ 로 이송한다. 블랭크의 반경 요소에 대한  $z$ - $\eta$ 평면에서의 변형모양은 Fig. 1-(b)의 영역 SQMR 로 가정되었고, 여기서  $z$  와  $\eta$ 는 블랭크의 높이와 길이를 나타낸다. Fig. 1-(b) 및 Fig. 2-(a)에서  $\eta_m$ 는 롤러가 블랭크에 접촉하기 시작하는 선을 나타내며,  $\eta_p$ 는 기하적인 계산으로부터 구한다. Fig. 2-(a)의 영역 BQFH 는 굽힘(bending)이 시작되는 선이며 실제 접촉면적은 BIC 로 둘러싸인 영역이다. Fig. 2-(b)에서는 경계가  $r_b$  에서  $r_c$  까지인 반경방향의 변형 영역을 보여준다. Fig. 1-(b)에서 요소  $r$  를 고려할 때, 요소의 변형이 곡률  $\rho$  을 따라 S 점에서 시작되고 S 점을 통과한 후, 곡률의 반경은 점차적

으로 감소하여, Q 점에서 요소의 1/2 은 굽힘에 의한 단축 인장 혹은 압축에 의해 항복 되어진다. Q 점을 통과한 후, M 점까지 요소  $r$  은 원주방향의 인장(extension)은 일정하다고 가정하였으며, 반면에 전단 변형률  $\gamma_{rz}$  은 곡선 QM 을 따라서 0 에서  $(\theta_0 - \theta_m) / \theta_0$  ( $\cot \phi_2 - \cot \phi_1$ ) 까지 단조 증가한다고 가정했다. 여기서,  $\theta_0$  와  $\theta_m$  은 식(12)에 나타내었다  $((\partial \gamma_r / \partial r) dr)$  만큼의 차이는 곡선 QM 을 따라 요소의 곡률반경을 감소시켜 M 점에 도달시킨다.



(a) R-Z plane



(b) Z- $\eta$  plane

Fig. 1 Schematic description of the deformation in shear spinning of cones

M 점을 통과한 후, 요소의 인장 부호는 바뀌고 곡선은 일정한 것으로 가정했다. 반면에 전단 변형률  $\gamma_{rz}$  은 곡선 MR 을 따라서  $(\theta_0 - \theta_m) / \theta_0$  ( $\cot \phi_2 - \cot \phi_1$ )에서  $(\cot \phi_2 - \cot \phi_1)$ 까지 롤러에서 단조 증가한다.

R 점에 도달한 후, 요소의 원주방향 팽창이 제거되어 지고 Fig. 2-(a)와 같이 영역 BFCB 에서는 소성변형이 일어나고, 영역 FHLCF 에서는 탄성 굽힘이 일어난다.

접촉길이  $\eta_m$  를 얻기 위하여 식 (2)를 가정하였다.

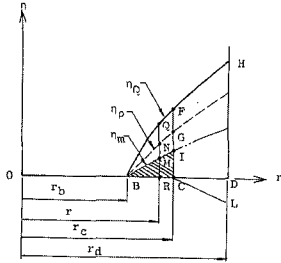
$$\bar{\rho}(r) = \frac{\eta_m^2}{2(1-m)\Delta z} = \frac{\eta_p^2}{2\Delta z} \quad (2)$$

$$\bar{\rho}'(r) = \frac{m}{1-m} \bar{\rho}(r) \quad (3)$$

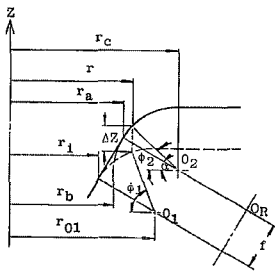
이상적인 기하학적 접촉길이  $\eta_p$  은 식 (4)와 같다.

$$\eta_p = r\theta_0 \quad (4)$$

여기서,  $\bar{\rho}(r)$ 과  $\bar{\rho}'(r)$ 은  $\rho(r, \theta)$ 와  $\rho'(r, \theta)$ 의 평균 반경이고,  $\theta_0$ 는 이상적인 기하학적 접촉각도이며 식(5)로 구할 수 있다.



(a) Deformation region in  $\eta$ - $r$  plane



(b) Shear deformation

Fig. 2 Model of deformation

$$\eta_m = \sqrt{1-m} \cdot \eta_p \quad (5)$$

요소  $r$ 의  $Q$  점에서 곡률반경은  $\rho_{EP}$ 에 의해 주어진다.

$$\rho'_{Q} = \rho_{EP} = \frac{Et_0}{4\sqrt{3}k} \quad (6)$$

$$M'_{Q} = M_{EP} = \frac{11r_0^2 k}{16\sqrt{3}} \quad (7)$$

이러한 변형 메커니즘에 의하여 Fig. 1과 Fig. 2로부터 식 (8)에서 식 (15)까지를 구하였다.

$$r_c = r_a + r_0 \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$r_i = r_a - f \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

$$r_b = r_a - 0.5 \cdot f \cdot \sin \alpha + (r_0 - \sqrt{r_0^2 - \frac{f^2}{4}}) \cos \alpha \quad (10)$$

$$r_{01} = r_c - f \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

$$\theta_m = \eta_m / r, \theta_Q = \eta_Q / r \quad (12)$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{r} \left( r_c - \frac{-D + \sqrt{D^2 - CF}}{C} \right) \right\} \quad (13)$$

여기서,

$$A = 2(r_c + R_0 \cos \alpha)$$

$$B = r^2 + (z - z_{02})^2 + 2(z - z_{02})R_0 \sin \alpha - r_c^2 - r_0^2$$

$$C = A^2 + 4R_0^2 \cdot \sin^2 \alpha$$

$$D = AB - 2R_0^2 (z - z_{02}) \sin 2\alpha$$

$$F = B^2 - 4R_0^2 \{ r_0^2 - (z - z_{02})^2 \cos^2 \alpha \}$$

$$z - z_{02} = \sqrt{r_0^2 - (r_{01} - r)^2} - f \cos \alpha$$

$$\text{for } r_b \leq r \leq r_{01}$$

$$= r_0 - f \cos \alpha \quad \text{for } r_{01} \leq r \leq r_c$$

$$\Delta z = f \cos \alpha + (r_c - r) \tan \phi_2 - (r_{01} - r) \tan \phi_1$$

$$\text{for } r_b \leq r \leq r_{01}$$

$$= f \cos \alpha + (r_c - r) \tan \phi_2 - r_0$$

$$\text{for } r_{01} \leq r \leq r_c \quad (14)$$

$$\cot \phi_1 = \frac{r_{01} - r}{\sqrt{r_0^2 - (r_{01} - r)^2}} \quad \text{for } r_b \leq r \leq r_{01}$$

$$= 0 \quad \text{for } r_{01} \leq r \leq r_c \quad (15-a)$$

$$\cot \phi_2 = \frac{r_c - r}{\sqrt{r_0^2 - (r_c - r)^2}} \quad \text{for } r_b \leq r \leq r_c \quad (15-b)$$

## 2.2 성형 에너지

Fig. 2-(a)의 BFCB 영역에서 전단 변형률 속도  $\dot{\gamma}_r$ 에 의해 발생하는 순간 변형 에너지  $dW_r$ 은 식 (16)로 표현된다.

$$d\dot{W}_r = \int_{\theta} k\dot{\gamma}_r t_o drrd\theta = 2\pi Nkt_o(\cot\phi_2 - \cot\phi_1)dr \quad (16)$$

곡선 BQF 와 곡선 BMI 상에서 굽힘 모멘트  $M_{EP}$  에 의해 발생하는 굽힘 에너지  $d\dot{W}_B$  는 식 (17)로 표현된다.

$$d\dot{W}_B = 2 \frac{M_{EP}}{\rho_{EP}} 2\pi Ndr = 2\pi N \left( \frac{22t_o k^2}{4E} \right) dr \quad (17)$$

외부에서 작용하는 일은 식 (18)과 같다.

$$d\dot{W}_E = 2\pi N dF_i \quad (18)$$

여기서,  $dF_i$  은  $\eta_m dr$  을 따라 롤러에서의 순간 접선력이다.

소비된 에너지와 외부에서 한 일을 같게하면 식 (19)로 표현된다.

$$d\dot{W}_E = d\dot{W}_r + d\dot{W}_B \quad (19)$$

식 (19)에 식 (16), (17), (18)을 대입하면, 순간 접선력은 식 (20)과 같다.

$$F_i = \int_{r_b}^{r_c} \left\{ kt_o(\cot\phi_2 - \cot\phi_1) + \frac{22k^2 t_o}{4E} \right\} dr =$$

$$kt_o \left( \sqrt{r_o^2 - (r_b - r_{o1})^2} - \sqrt{r_o^2 - (r_c - r_{o1})^2} + \frac{22k^2 t_o}{4E} (r_c - r_b) \right) \quad (20)$$

여기서,

$$r_c - r_b = \frac{f}{2} \sin \alpha + \sqrt{r_o^2 - \frac{f^2}{4}} \cos \alpha$$

$$r_b - r_{o1} = \frac{f}{2} \sin \alpha - \sqrt{r_o^2 - \frac{f^2}{4}} \cos \alpha$$

완전 탄소성체에서  $k$  는  $\sigma_y / \sqrt{3}$  이며  $\sigma_y$  가 단순 인장에서의 항복 한도이면, 가공경화 재료에 대하여  $k$  는  $\bar{\sigma} / \sqrt{3}$  이다. 여기서,  $\bar{\sigma}$  는 단순 인장에서의 순간 유동응력이다.

본 논문에서는 식(19)을 계산하기 위하여  $k$  를  $\bar{\sigma}_m / \sqrt{3}$  라고 가정한다. 여기서,  $\bar{\sigma}_m$  은 평균 유효 변형률  $\bar{\epsilon}_m$  에 대한 유효 응력이고, 평균 유효 변형률  $\bar{\epsilon}_m$  은 식 (21)과 같다.

$$\bar{\epsilon}_m = \frac{1}{r_c - r_b} \int_{r_b}^{r_c} \frac{\cot\phi_2}{\sqrt{3}} dr = \frac{r_o - \sqrt{r_o^2 - (r_c - r_b)^2}}{\sqrt{3}(r_c - r_b)} \quad (21)$$

평균 유효 응력  $\bar{\sigma}_m$  은 변형영역에 있는  $\bar{\sigma}$  의 평균값이고 S. Kobayashi et. al[4]에서 주어진 것과는 다르다. 따라서, 평균유효응력은 식 (22)과 같다.

$$\bar{\sigma}_m = \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} / \int d\bar{\epsilon} \quad (22)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}} = 2\pi N(\cot\phi_2 - \cot\phi_1 + \frac{22k}{4E}) / \eta_o \sqrt{3} \quad (23)$$

식(2)와 (3)에 의해  $\eta_o$  은 식 (24)로 주어진다.

$$\eta_o = \eta_p / \sqrt{1 - m(r)} \quad (24)$$

### 2.3 변형 힘의 요소

전단 스피닝 공정을 결정하는데 Fig. 3 의 반경 방향의 힘  $F_r$  과 축방향의 힘  $F_z$  도 매우 중요하다. 롤러와 블랭크 사이의 접촉 표면에 작용하는 법선 응력  $P$  가 동일한 크기로 분포되었다고 가정하면 반경방향의 힘과 축방향의 힘은 접선력의 함수로써 구할 수 있다.

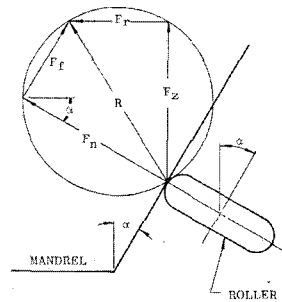


Fig. 3 Force system

$$F_r = \frac{F_t}{A_r} A_r = PA_r \quad \text{and} \quad F_z = \frac{F_t}{A_z} A_z = PA_z \quad (25)$$

식(25)에서 접촉 표면에서 마찰의 영향은 무시하며,  $A_r, A_z, A_z$  는 접선방향, 반경방향, 축방향으로 접촉 표면이 투영된 면적이다.

접촉표면에서 투영된 면적의 비를 계산한 후,

식(20)에서 구한 접선력을 이용하여 식(25)에 적용하면 반경방향의 힘과 축방향의 힘을 구할 수 있다.

접선방향, 반경방향, 축방향으로 접촉 표면이 투영된 면적은 식 (26)에서 식(28)과 같다.

$$A_t = \int_{r_b}^{r_c} \Delta z (1-m) dr \quad (26)$$

$$A_r = \int_{r_b}^{r_c} \sqrt{(1-m)} \eta_\rho \cot \phi_2 dr \quad (27)$$

$$A_z = \int_{r_b}^{r_c} \sqrt{(1-m)} \eta_\rho dr \quad (28)$$

여기서,  $A_t, A_r, A_z$  를 구하기 위해서는 접촉계수  $m$  의 값이 필요한데 이를 위해서는 전단 스피닝 시에 블랭크와 롤러 사이 접촉 형태를 근원적으로 실험에 의해 조사해야 한다.

따라서, 본 논문에서 접촉계수는 반경방향에 의한 함수로 제안했다.

$$m(r) = m_c \frac{r - r_b}{r_c - r_b} \quad (29)$$

여기서,  $m_c$  는 이론적으로 구한 힘이 실험 결과에 근접하도록 결정 되어져야 하는데 본 연구자는 변형 모델의 굽힘에 소요되는 에너지를 최소로 하는 최적의  $m_c$  을 결정하고자 하였다. Fig. 1 와 Fig. 2 와 같이 곡선  $\eta_m$  은 롤러가 블랭크에 접촉하기 시작하는 것을 보여주고,  $\eta_\rho$  은 기하적인 관계에서 얻을 수 있다.

블랭크의 반경요소에 대한  $\eta-z$  평면에서의 변형 형태는 Fig. 1 에서 곡선 SQMR 으로 가정하면, 굽힘이 시작되는 선은 Fig. 2 에서 곡선 BQF ( $\eta_Q$  선)으로 그려질 수 있고, 식 (2), (24), (3)에 의해 식 (30)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\eta_m}{\rho} = \frac{\eta_Q - \eta_m}{\rho'} \quad (30)$$

영역 BIC은 1의 위치에 따라 변하기 때문에 최적의 접촉 형태는 변형 모델에서 계산되어진 전 굽힘 에너지를 최소화 시킴으로써 얻을 수 있었고 음영부분의 굽힘에너지 영역 BIC은 식(31)에

의해 계산되어진다.

$$\iint_F M_p \frac{1}{\rho} dr d\eta = \int_r M_p \frac{1}{\rho} \eta_m dr \quad (31)$$

영역 BFG에 있는 굽힘에너지는 식 (32)과 같다.

$$\iint_F M_p \frac{1}{\rho'} dr d\eta = \int_r M_p \frac{1}{\rho'} (\eta_Q - \eta_m) dr \quad (32)$$

여기서  $M_p$  는 블랭크의 단위 폭 당 전소성적 굽힘 모멘트를 의미하며, ( $t_o^2 \bar{\sigma}_m / 4$ )이다.

전굽힘 에너지는 식(31)을 (32)에 추가하여 식 (30)에 대입하면 식 (33)으로 표현할 수 있다.

$$W_B = \int_r 2M_p \frac{\eta_m}{\rho} dr = 2M_p \int_r \frac{2\Delta z}{\eta_\rho} \sqrt{1-m(r)} dr \quad (33)$$

식(29)을 식(33)에 대입하며 식(34)과 같다.

$$W_B = 2M_p \int_r \frac{2\Delta z}{\eta_\rho} \sqrt{1 - m_c \left( \frac{r - r_b}{r_c - r_b} \right)} dr \quad (34)$$

전 굽힘에너지는  $m_c = 1$  일 때 최소값을 가지며 이런 과정을 거쳐 계산된 반경방향의 힘과 축방향의 힘은 식 (35)에 의해 이송력  $F_f$  과 수직력  $F_n$  으로 분배된다.

$$\begin{aligned} F_f &= -F_r \sin \alpha + F_z \cos \alpha \\ F_n &= F_r \cos \alpha + F_z \sin \alpha \end{aligned} \quad (35)$$

### 3. 결과 및 토론

Fig. 4의 계산 과정을 통하여 접선력, 이송력, 수직력을 구한 후 Table 1의 6개 주요 공정변수가 각 힘에 미치는 영향을 실험 결과와 비교하였다.

이송속도를 변화시키면서 세 성분의 힘을 조사하여 Fig. 5 에 나타내었는데, 이송속도를 증가시킬수록 세 성분의 힘은 증가되었다. 이는 이송속도가 증가하면 급격한 접선력의 증가를 가져오기 때문이다.

이송속도가 작은 경우가 이송속도가 클 경우보다 접선력이 실험결과와 더욱 잘 일치한다. 전단

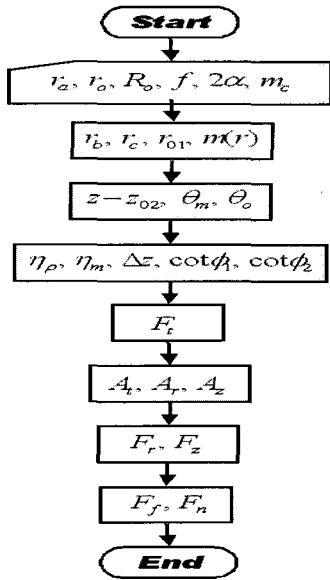
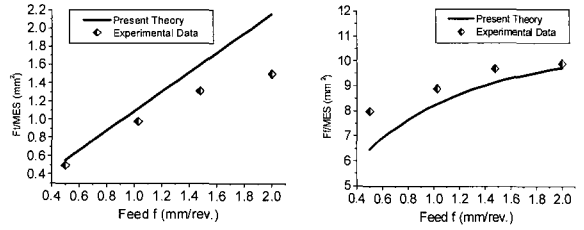


Fig. 4 The flow chart for calculating forces

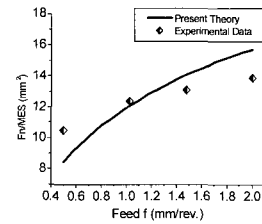
Table 1 Working conditions in shear spinning of cones

Condition	(a) Fig. 5	(b) Fig. 7	(c) Fig. 8	(d) Fig. 9	(e) Fig. 10	(f) Fig. 11
Half Cone Angle $\alpha$ (deg.)-ALPA	22.5°	22.5°	22.5°	22.5°	15.0-30.0°	30.0°
Diameter of Roller $D_R$ (mm)	74	30-120	74	74	74	74
Round-off Radius $r_o$	4.0	4.0	2.0-12.0	4.0	4.0	4.0
Feed $f$ (mm/rev.)	0.5-2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1-1.1
Thickness $t_c$ (mm)	2.0	2.0	2.0	1-3.0	2.0	1.5
Measuring Radius $r_s$ (mm)	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	34.0
Mean Flow Stress $\bar{\sigma}_m$ (kg/mm <sup>2</sup> )	13.50	13.50	13.50	14.7-12.7	13.50	11.40
Young's Modulus $E$ (kg/mm <sup>2</sup> )	7200	7200	7200	7200	7200	7200
Revolution per Minutes $N$ (rpm)	440	440	440	440	440	540



(a) Tangential force

(b) Feed force



(c) Normal force

Fig. 5 Relation between forces and feed of roller f working condition: Table 1-(a)

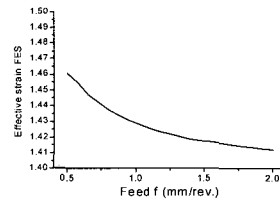


Fig. 6 Relation between finite effective strain and feed of roller f working condition: Table 1-(a)

스피닝 공정에서 이송속도가 증가하면 실제 스피닝 공정은 불안정하고 접선력이 낮아지는 언더스피닝(Underspining) 경향을 보여준다.

Fig. 6에 나타난 것과 같이 이송속도가 증가할수록 유효변형률은 감소되어지고, 이송속도가 2mm/rev 보다 더 큰 경우에는 유효 변형률의 값은  $(\cot\alpha)/\sqrt{3}$  과 거의 일치한다. 이것은 큰 이송속도와 가공경화 재료에서는 본 연구에서 계산한 가공력이  $\bar{\sigma}_m$  때문에 단순 전단 이론을 적용하여 구한 가공력보다 더 낮은 가공력을 얻을 수 있다.

롤러 직경을 변화시키면서 세 성분의 힘을 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 롤러 직경이 큰 경우는 실험결과와 잘 일치하고 롤러 직경이 작은 경

전단 스피닝에 의한 원추 형상의 성형에 관한 변형 메커니즘

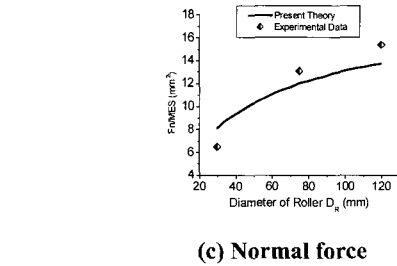
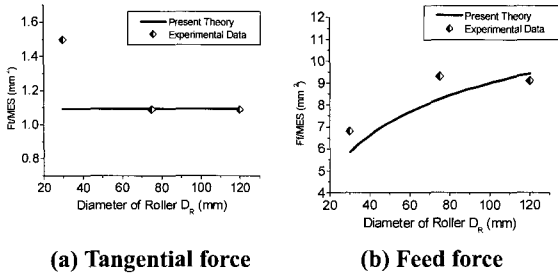


Fig. 7 Relation between forces and diameter of roller  $D_R$  working condition: Table 1-(b)

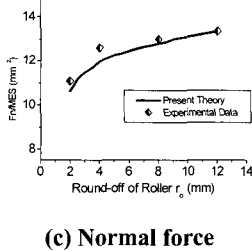
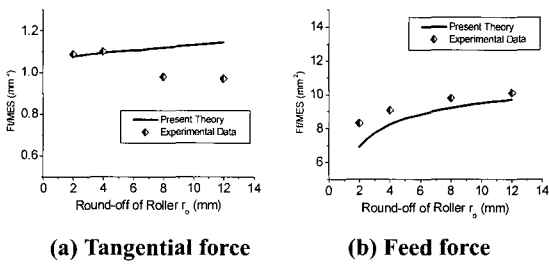


Fig. 8 Relation between forces and radius of round-off of Roller  $r_o$  working condition: Table 1-(c)

우에는 다소 차이가 있지만, 롤러 직경이 작은 경우는 현장에서 실제로 사용될 수 없다.

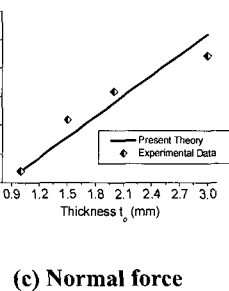
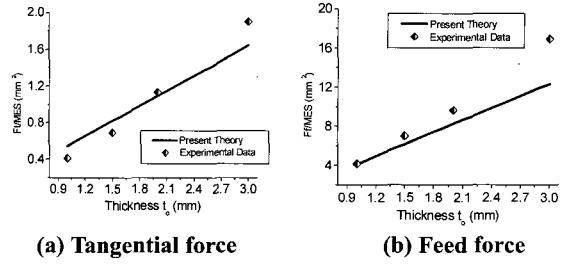


Fig. 9 Relation between forces and thickness of blank  $t_o$  working condition: Table 1-(d)

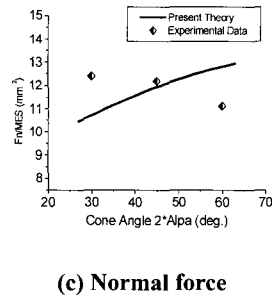
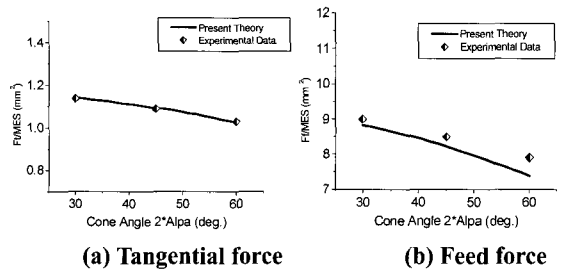


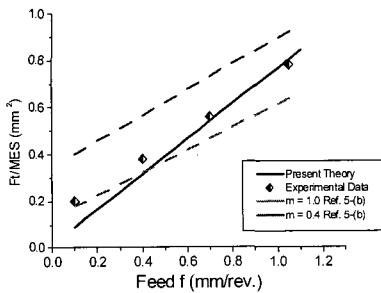
Fig.10 Relation between forces and cone angle of mandrel  $2\alpha$  working condition: Table 1-(e)

롤러 곡률반경의 영향을 조사하기 위해 롤러 곡률반경을 변화시키면서 세 성분의 힘을 조사하여 Fig. 8에 나타내었다. 곡률반경이 크면 클수록 가공력은 조금씩 변화하므로 가공력은 롤러의 곡

를반경에 의해 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

블랭크 두께를 변화시키면서 세 성분의 힘을 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. 블랭크의 두께가 작을수록 세 성분의 힘은 증가하지만, 유효 변형률의 값은 일정하다.

원추각도를 변화시키면서 세 성분의 힘을 조사하여 Fig. 10에 나타내었는데 원추각도가 클수록 접선력은 감소한다. 접선력과 이송력은 실험결과와 잘 일치하지만 수직력은 원추각도가 증가할수록 이론적인 값은 증가하지만 실험결과는 반대로 감소된다. 이러한 현상에 대해 원추각도를 60°, 75°, 90°, 105°에 대하여 수행한 결과는 이론적인 값과 실험치가 잘 맞는 경향을 보이므로 이론의 타당성에는 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.



**Fig.11 Relation between forces and feed of roller f in accordance with m working condition: Table 1-(f)**

Fig. 11에 M. Hayama(5-b)의 값과 실험결과를 비교하여 나타냈었다. M. Hayama는 접촉계수m의 값을 실험결과를 통하여 상수로 결정하였지만 본 연구에서는 접촉계수는 식(29)와 같이m의 값을 r의 함수로 정의하였다.

전단 스피닝 공정에서 접선력, 이송력, 수직력은 스피닝 작업을 수행하는데 필요한 힘을 알아야 하는 설계자와 생산자에게는 매우 중요한데 본 연구에서 제안된 결과가 실험과 잘 일치하므로 매우 고무적이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 전단 스피닝에 의한 원추 형상의 성형에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론에 도달했다.

(1) 새로운 변형 모델에 근거하여 유도된 이론적인 접선력은 실험결과와 잘 일치하였다.

(2) 접선력과 이론적인 접촉면적에 의해 계산된 수직 및 이송력은 실험결과에 상당히 접근함을 알 수 있고, 접선력, 이송력, 수직력의 비는 각각 세 방향으로의 투영된 면적의 비와 거의 같음을 알 수 있었다.

(3) 식 (29)로 제안된 접촉 계수, m(r)로부터 실험과 잘 일치하는 이론적인 결과값들을 얻을 수 있었다.

(4) 평균 유효 변형률  $\bar{\epsilon}_m$ 에 대한 평균 유효 응력  $\bar{\sigma}_m$ 은 가공력의 이론적인 값들을 실험결과에 더 근접시켰다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. N. Colding, 1959, Shear spinning, ASME No. 59-prod-2, May.
- [2] S. Kalpackcioglu, 1961, On the mechanics of shear spinning, Journal of engineering for industry, TRANS. ASME, Series B, vol. 83, pp. 125~130.
- [3] B. Avitzur, C. T. Yang, 1960, Analysis of power spinning of cones, Journal of engineering for industry, TRANS. ASME, Series B, Vol. 82, pp. 231~245.
- [4] S. Kobayashi, I. K. Hall, E. G. Thomsen, 1961, A theory of shear spinning of cones, Journal of engineering for industry, TRANS. ASME, Series B. Vol. 83, pp. 485~495.
- [5] M. Hayama, T. Murota, H. Kudo, 1964, Study of Shear Spinning, 1st Report, TRANS. JSME, Vol. 30, No. 220.
- [6] M. Hayama, T. Murota, H. Kudo, 1964, Study of Shear Spinning, 2nd Report, TRANS. JSME, Vol. 30, No. 220.
- [7] M. Hayama, T. Murota, H. Kudo, 1965, Study of Shear Spinning, 3rd Report, TRANS. JSME, Vol. 31, No. 228.
- [8] M. Hayama, T. Amano, 1975, Analysis of Contact Form of Roller on Sheet Blank in Shear Spinning of Cones, Journal of JSTP. Vol. 16, No.174.
- [9] M. Hayama, T. Amano, 1975, Experiments on the Mechanism of Shear Spinning of Cones, Journal of JSTP. Vol. 16, No. 172.



- [10] M. Hayama, 1975, Analysis of Working Forces in Shear Spinning of Cones, Journal of JSTP. Vol. 16, No. 175.
- [11] R. L. Kegg, 1961, A New Test Method for Determination of Spinnability of Metals, Journal of Engineering for Industry, TRANS.ASME, Series B, pp. 119~124.
- [12] H. C. Sortais, S. Kobayashi, E. G. Thomsen, 1963, Mechanics of Conventional Spinning, Journal of Engineering for Industry, TRANS. ASME, Series B, Vol. 85, pp. 44~48.
- [13] 김종호, 박규호, 나경환, 김승수, 1999, 알루미늄 원통컵의 스피닝 성형성에 영향미치는 작업조건 연구, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 5 호, pp. 465~470.
- [14] 이항수, 2003, 원통형 컵에 대한 강판의 Conventional 스피닝의 실험 연구, 한국소성가공학회 2003년 춘계학술대회논문집, pp. 274 ~277.