

Side Milling Cutter 를 이용한 Worm Screw 가공시 절삭 모델링을 통한 Cusp 예측

김창현*(부산대학교 지능기계공학과), 권태웅(부산대학교 지능기계공학과)
강동배(부산대학교 지능기계공학과) 이민환(대우정밀), 안중환(부산대학교 기계공학부)

A study on the forecast of Cusp by Cutting Modeling in Worm Screw Process by Side Milling Cutter

C.H.Kim*(Mech. Eng. Dept. PNU), T.W.Gwon(Mech. Eng. Dept. PNU),
D.B.Kang(Mech. Eng. Dept. PNU), M.H.Lee(Daewoo Precision, Ind.), J.H.Ahn(Mech. Eng. Dept. PNU)

ABSTRACT

Cutting force and face roughness have the largest influence on precision of a structure or processing efficiency in cutting processing. Thus cutting force model and face roughness model are necessary for this interpretation. In this paper, tool path model and face roughness model which consider the blade number of a tool and a revolution speed of tool and workpiece in the worm processing using side milling cutter are presented. This model was used to forecast the cusp. Experimental results show that the predicted cusp coincides with experimental one.

Key Words : Worm screw(웜 스크류), Side milling cutter(사이드 밀링 커터), Cusp(커슘), Modeling(모델링)

1. 서론

자동차용 기어드 모터는 좁은 공간에서 큰 토크 전달을 필요로 하기 때문에 비교적 소형이며 모터의 회전운동을 전달하기 위한 동력 전달 기구로 Worm gear 를 사용한다. 기어드 모터의 경우, 모터축과 Worm shaft 가 직렬된 상태에서 모터의 회전운동이 Worm shaft 와 Worm wheel 을 거쳐 구동계로 전달된다. 이 때 Worm shaft 가 가진 Cusp 은 모터의 고속 회전시 소음, 진동을 유발하게 된다. 소음, 진동이 발생하게 되면 모터가 내장된 해당 모듈의 수명 단축 및 고장을 초래하며, 따라서 모터가 내장된 부품 모듈의 수명 및 신뢰성 향상을 위해서는 Worm shaft 의 가공성능 개선을 통한 품질 향상이 필수적이다.

기존의 Worm 가공 방법인 전조가공과 비교하여 절삭에 의한 Worm 가공의 경우 가공 시간이 다소 많이 걸리나 소성변형에 따른 후변형, 전조다이 마모에 따른 치수정도 저하 등의 문제가 없으므로 보

다 고정도의 Worm shaft 가공이 가능하다. 그러나 고품위 표면조도를 얻기 위한 최적의 가공조건 선정이 어렵다. Side milling 가공에서 표면조도는 날 당 이송과 함께 가공물의 이송속도에 의하여 크게 좌우 되기 때문에 최적의 조건을 찾아서 알맞은 표면조도를 얻고 절삭효율을 높이는 어렵다. 절삭에 의한 Worm 가공 공정에서 가공물의 정밀도나 가공능률에 가장 큰 영향을 미치는 것이 절삭력과 표면거칠기로서 이의 해석을 위해서 절삭력 모델과 표면거칠기 모델이 필요하다.

본 논문에서는 Side milling cutter 를 이용한 Worm 가공에서 공구와 가공물의 회전속도, 공구의 날 개수를 고려한 공구 궤적과 표면거칠기 모델을 세우고, 이 모델을 이용하여 Worm screw 의 Cusp 을 예측하였다. 제안된 표면거칠기 모델의 검증을 위하여 자동선반에서 Side milling cutter 을 이용한 Worm 가공 실험을 수행하였으며, 여러 가공조건에 따른 Cusp 의 크기, 형상을 모델에서 예측한 크기, 형상과 비교 분석하였다.

2. Worm 가공 모델링

자동선반에서 Side milling cutter 를 이용한 Worm 가공시 가공물의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것이 표면거칠기이며, 이의 해석을 위하여 우선 평판에서의 공구 궤적과 표면 거칠기를 모델링하였다. 평판에서 만들어진 절삭 모델을 원통에 적용하여 원통에서의 절삭 모델을 완성하였으며, 이를 이용하여 Cusp 을 예측하였다.

2.1 평판에서의 절삭 모델

평판에서의 절삭 모델을 세우기 위해 가공물에 커터의 각 날이 들어가면서 절삭하는 두께는 일정하고 가정한다.

2.1.1 공구 궤적 모델

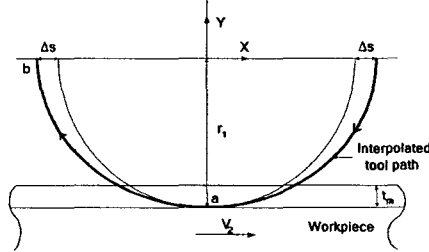


Fig. 1 Interpolated tool path at the plate

Fig. 1 은 평판 가공에서의 공구 궤적을 나타낸 것이다. 가공물이 고정되어 있을 경우, 평판에 전사되는 공구궤적은 공구의 회전이 그대로 반영되어 원으로 나타나게 되나, 가공물이 일정속도 V_2 로 이송을 하게 되므로 전사되는 공구 궤적은 Fig. 1 에서의 짙은 색으로 표시된 궤적으로 나타난다. Fig. 1 에서

$$T_1 = \frac{60}{N_1} \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{T_1}{4} = \frac{15}{N_1} \quad (2)$$

$$\Delta s = V_2 \cdot \Delta t = 15 \frac{V_2}{N_1} \quad (3)$$

여기서, Δt : a 에서 b 까지 걸리는 시간, 초

T_1 : 공구가 1 회전 하는데 걸리는 시간

N_1 : 공구의 회전 속도(RPM)

Δs : Δt 동안 가공물이 움직인 거리

t_m : 가공 깊이 이다.

Workpiece 기준에서 바라본 공구의 궤적은 다음과 같은 타원 식으로 가정하여 근사하였다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

여기서, $a = r_1 + \Delta s = r_1 + 15 \frac{V_2}{N_2}$, $b = r_1$ 이다.

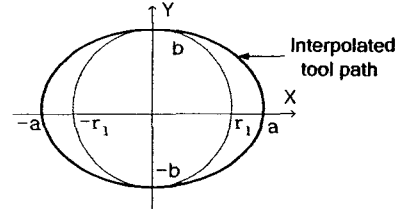


Fig. 2 Interpolated tool path

2.1.2 표면 거칠기 모델

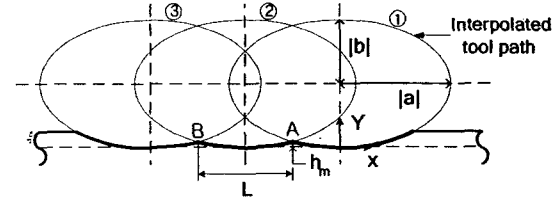


Fig. 3 Cusp at the plate

Side milling cutter 를 이용한 평판 가공시 각 공구 날에 의해 가공물에 전사되는 각각의 날 궤적은 타원 형상으로 나타낼 수 있다. Fig. 3 에 식 (4)에서 가정한 공구 궤적 식을 이용하여 ①, ②의 타원을 나타내었다. 각각의 궤적식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y-b)^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{(x+L)^2}{a^2} + \frac{(y-b)^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

여기서, $a = r_1 + \Delta s$, $b = r_1$ 이다. L 은 커슥의 길이로 n 번째 공구날과 n+1 번째 공구날이 회전하는 동안 이송한 가공물의 길이이다. L 은 다음 식으로 표현된다.

$$L = \Delta t_z \cdot V_2 \quad (7)$$

$$\Delta t_z = \frac{T_1}{Z} = \frac{60}{N_1 \cdot Z} \quad (8)$$

여기서, Δt_z 는 공구의 각날이 지나는 시간이고 Z 는 공구의 날 수이다. 따라서 평판에서 커슥의 길이는 식 (9)와 같다.

$$L = \frac{60}{N_1 Z} \cdot V_2 \quad (9)$$

식 (5)와 (6)을 연립하여 ①, ② 타원의 교점 A 를 구하면

$$x = -\frac{L}{2}, y = b \pm b\sqrt{1 - \frac{L^2}{4a^2}} \quad \text{이다.}$$

평판에서의 커슘의 높이는

$$h_m = y = \left| b - b\sqrt{1 - \frac{L^2}{4a^2}} \right| \quad \text{이다.}$$

2.2 원통에서의 절삭 모델

Worm 가공의 경우 가공물이 원형이므로 2.1 절에서 구한 평판 모델을 이용하여 원통에서의 절삭 모델을 구할 수 있다. 평판 모델의 평판 가공물을 원형으로 가정하고 이때 공구 궤적을 동일한 타원으로 가정한다. 가공물의 이송 속도는 회전 각속도로 변환이 된다.

2.2.1 공구 궤적 모델

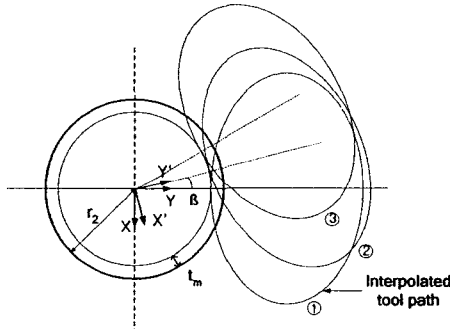


Fig. 4 Interpolated tool path at the cylinder

Fig. 4 는 가공물을 원형으로 가정한 공구의 궤적이다. Fig. 4 에서

$$\Delta t_z = \frac{T_1}{Z} = \frac{60}{N_1 \cdot Z} \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{60}{N_2} \quad (11)$$

n 번째 공구날과 n+1 번째 공구날이 회전하는 동안 회전한 공작물의 각도는 일정하며 이때의 공작물의 회전 각도를 구하기 위해 식 (10)과 식 (11)을 이용하였다.

$$\frac{T_2}{\Delta t_z} = Z \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{N_2}{ZN_1} \cdot 2\pi \quad (13)$$

여기서, N_2 : workpiece 의 회전속도(RPM)

T_2 : workpiece 가 1 회전하는데 걸리는 시간

β : n 번째 날이 이뿌리면에 닿을 때부터 n+1 번째 공구 날이 이뿌리면에 닿을 때까지 공작물이 회전한 각이다.

2.2.2 표면 거칠기 모델

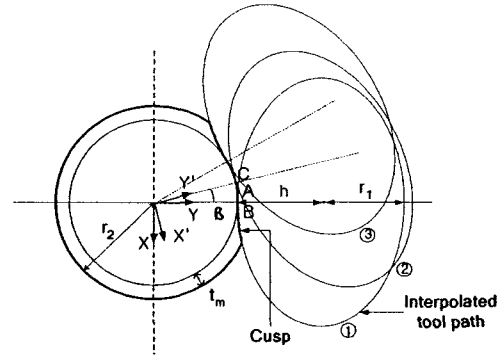


Fig. 5 Cusp at the cylinder

Fig. 5 에서

$$h = r_1 + r_2 - t_m \quad (14)$$

평판에서 세운 식 (4)에서 식(6)을 이용하여 원통에 적용할 경우 ①, ②의 타원 식은 다음과 같다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y-h)^2}{b^2} = 1 \quad (15)$$

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{(y'-h)^2}{b^2} = 1 \quad (16)$$

여기서, $x' = x \cos \beta - y \sin \beta$, $y' = x \sin \beta + y \cos \beta$ 이다. 두 타원의 교점 A 가 (x_1, y_1) 이면 공구 궤적과 가공물의 이뿌리면이 만나는 원 ④의 방정식은 식 (17)과 같다. 따라서 커슘의 높이는 식 (18)과 같다.

$$x^2 + y^2 = (r_2 - t_m)^2 \quad (17)$$

$$h_m = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} - (r_2 - t_m) \quad (18)$$

또한 타원 ①과 타원 ②가 가공물의 이뿌리면과 만나는 교점은 각각 B, C 이다. 이 때 두 점 B, C 사이의 직선 거리는 원통에서의 커슘 길이이다.

따라서 커슘의 길이는 다음과 같다.

$$L = \sqrt{2(r_2 - t_m)^2 (1 - \cos \beta)} \quad (19)$$

3. 실험 결과

3.1 평판에서의 실험 결과

평판에서의 절삭 모델을 검증하기 위하여 Fig. 6 와 같은 장치를 구성하여 실험하였다.

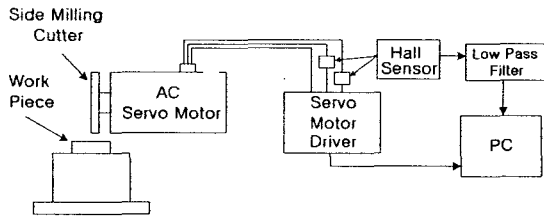


Fig. 6 The experimental setup

Table 1 은 평판에서의 실험 조건을 나타내며, Table 2 는 각각의 결과를 나타낸다. 실제 가공 결과와 모델링된 값과 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 1 Experimental Condition

Side Milling Cutter	Diameter	75mm
	Material	Carbide
Workpiece	SUS 316L	
Machine Tool	AC Servo Motor	
Spindle Rotation Speed(RPM)	1000, 1300, 1500	
Workpiece Feed Speed (mm/min)	348	

Table 2 Comparison of Cusp at the plate

	Experiment	Modeling
1000 RPM	2.011mm	2.152mm
1300 RPM	1.381mm	1.478mm
1500 RPM	1.112mm	1.201mm

3.2 원통에서의 실험 결과

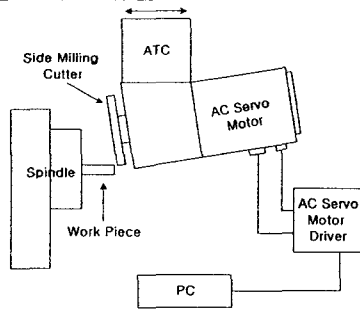


Fig.7 The experimental setup

원통 모델에 대한 모델링된 이론을 검증하기 위하여 Fig. 7 과 같은 장치를 구성하여 실험하였다. 본 연구에서 사용한 실험 조건은 Table 3 과 같다.

Table 3 Experimental Condition

Side Milling Cutter	Diameter	75mm
	Material	Carbide
Workpiece	SUS 316L	
Machine Tool	AC Servo Motor	
Spindle Rotation Speed(RPM)	1000, 2000, 3000	
Workpiece Rotation Speed (RPM)	34	

Table 4 Comparison of Cusp at the cylinder

	Experiment	Modeling
1000 RPM	1.088mm	1.103mm
2000 RPM	0.605mm	0.613mm
3000 RPM	0.341mm	0.3457mm

Table 4 은 실험으로부터 측정된 커스의 크기와 모델링으로 구한 커스의 크기를 비교해 놓은 것이다. Table 4 에서 알 수 있듯이 실험값과 모델링된 값은 거의 일치하고 있다.

하지만 가공시 주축의 rpm 변화와 주축의 흔들림, 공구의 런아웃 영향, 공구 궤적의 보간 때문에 실제 가공된 가공물의 크기가 일정하지 않게 나타났다. 특히 공구의 런아웃은 거의 모든 선반 기계에서 존재하므로 가공시 반드시 고려해야 할 중요한 부분이다.

3. 결론

본 연구를 통해 사이드 밀링 커터를 이용한 worm 가공에서 공구 궤적 모델과 표면 거칠기 모델을 제안하고 실제 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공구 궤적 모델을 기초로 하여 가공물의 표면 거칠기 모델을 제안하였다.
- 2) 모델을 통해 예측된 커스는 실험으로부터 측정된 커스와 거의 일치하였다.
- 3) 공구의 회전 속도가 증가함에 따라 커스의 크기가 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

향후, 가공시 발생하는 주축의 rpm 변화와 주축의 흔들림, 공구의 런아웃, 공구 궤적 보간 등의 영향을 고려한 보다 정확한 절삭 모델의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 산업기술재단 지역혁신인력양성사업의 연구과제의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이종암 외, “랙형 다이를 이용한 고품질 Worm Shaft 개발”, 부산시 자동차분야 고부가가치품목 기술개발사업 보고서, 2003
2. Akiyo Horiuchi, Minoru Maki, Milling Glass Worm gearing with Worm Teeth Generated by High-Speed Screw Cutting Method? JSME International Journal. Series C, Vol. 44, No.2, pp.500-505, 2001.
3. 허성우, Side milling cutter 에 의한 Worm screw 가공에 관한 연구? 공학석사 학위 논문, 2004.