

# 워엄 스크루 가공을 위한 플래네터리 밀링의 공구 간섭 시뮬레이션

## The Cutting Tool-workpiece Interference Simulation for Worm Screw Machining by Planetary Milling

이민환<sup>1</sup>, 김선호<sup>2,✉</sup>, 안중환<sup>3</sup>

Min Hwan Lee<sup>1</sup>, Sun-Ho Kim<sup>2,✉</sup> and Jung Hwan Ahn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 주식회사 만도 중앙연구소 (Mando Co. Ltd.)

<sup>2</sup> 동의대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Dong-Eui Univ.)

<sup>3</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: sunhokim@deu.ac.kr, Tel: 051-890-2259

Manuscript received: 2009.5.29 / Accepted: 2009.9.18

*A worm screw is widely used in a geared motor unit for motion conversion from rotation to linear. For mass production of a high quality worm, the current rolling process is substituted with the milling process. Since the milling process enables the integration of all operations of worm manufacturing on a CNC(Computer Numerical Control) lathe, productivity can be remarkably improved. In this study, the tooling system for planetary milling on a CNC lathe to improve machinability is developed. However, the cutting tool-workpiece interference is important factors to be considered for producing high quality worms. For adaptability of various worms machining, the tool-workpiece interference simulation system based on a tool-tip trajectory model is developed. The developed simulation system is verified through several kinds of worms and experimental results.*

Key Words: Cutting Tool-workpiece Interference Simulation (공구간섭 시뮬레이션), Geared Motor (기어드 모터), Worm Screw (워엄 스크루), Planetary Milling (플래네터리 밀링)

### 1. 서론

자동차의 품질 고급화에 따라 전동식 조향 장치(Electric power steering), 전동식 윈도우(Electric power window), 전동식 좌석 조절 장치(Electric seat adjusting), 전동식 페달 조절 장치(Electric pedal adjusting), 전동식 선루프(Electric sunroof adjusting), 전동식 반사경 조절 장치(Electric mirror adjusting), 전동식 변속장치(Electric shifting), 안티록 브레이크 장치(Anti-lock Brake System) 등과 같은 자동차 부품에 기어드 모터(Geared motor) 채용이 증가하고

있다.

기어드 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는데 사용되는 워엄 스크루(Worm screw)는 단면 가공, 나사가공, 드릴링, 홈 가공, 브로칭 등 여러 공정을 거쳐 완성되는 다공정 제품이다. 이러한 작업은 각 공정이 독립된 기계에서 이루어지고 있기 때문에 생산성이 낮고 공정간 이동에 따른 정밀도 저하가 문제가 되고 있다.

전통적으로 워엄 스크루의 나사가공은 전조가공이 일반적이다. 그러나 전조 다이슬을 이용하는 전조가공은 가공시간이 짧고 저비용 방법이지만,

전조 후변형과 다이스의 마모에 의한 형상정도 저하 등으로 인해 제품정밀도가 낮은 단점을 가진다.<sup>1</sup>

다공정으로 가공이 이루어지는 생산공정을 통합하고 가공 정밀도를 높이기 위한 방법으로 CNC (Computer Numerical Control) 선반을 이용한 가공방법이 있다. 그러나 전통적인 툴링(Tooling)을 적용한 CNC 선반 가공법으로는 깊은 홈을 가진 다양한 형상의 워엄 스크루를 효과적으로 가공하는데 많은 어려움이 있다.

이러한 어려움을 해결하기 위해 본 연구에서는 CNC 선반에 적용이 가능한 플레네터리 밀링(Planetary milling)용 툴링 시스템을 개발했다. 그리고 개발한 툴링 시스템의 가공성(Machinability)을 높이고 다양한 워엄 스크루에의 적용성(Adaptability)을 향상시키기 위해 나사가공 모델을 바탕으로 한 공구간섭 시뮬레이터를 개발하고자 했다. 아울러 본 논문에서는 개발된 시뮬레이터를 다양한 스크루에 적용시키므로써 유용한 결과를 얻을 수 있음을 보여 준다.

**2. 플레네터리 밀링**

플레네터리 밀링은 주로 전용기에 많이 적용되고 있는 고속 나사 절삭법으로서, 공구 홀더의 크기가 크지만 높은 절삭 토크를 낼 수 있어 중절삭이 가능하고 강성이 뛰어나 가공 안정성이 높다.<sup>1</sup> Fig. 1 은 플레네터리 밀링에 의해 가공된 워엄 스크루를 보여 준다.

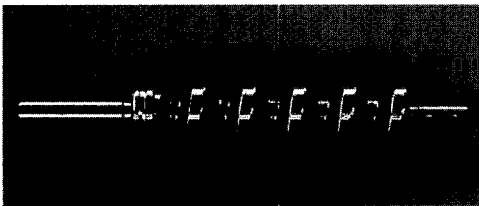


Fig. 1 Worm screw by planetary milling

절삭 메커니즘은 밀링 머신의 하향 절삭과 유사하다. 공작물 중심축으로부터 편심 되어 있는 공구 홀더의 내륜에 다수의 절삭 바이트가 설치된다. 저속 회전하는 공작물에 대해 공구 홀더가 고속회전하면서 공구가 공작물을 감싸 안은 형태로 가공이 이루어진다.

이러한 분야에 대한 연구동향을 살펴보면, 주

로 학술적 측면에서 나사 및 나선 홈 가공을 위한 연삭공구 또는 공구설계 대한 기하학적 해석에 대한 연구가 있어 왔다.<sup>2-6</sup> 회전공구에 의한 공구간섭 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이며, 특수 공구를 이용한 나사 가공법에 대한 연구사례는 최근 부분적으로 발표되고 있다. Ahn 은 사이드 밀링을 이용한 나사절삭에 대한 실험적 연구를 수행했고,<sup>7</sup> Lee 는 기어드 모터의 소음특성에 대한 연구를 수행했다.<sup>8</sup> Mohan 과 Shunmungam 은 플레네터리 밀링에 대해 변환행렬을 이용하여 가공 프로세스의 기하학적 형상을 시뮬레이션하고 워엄 스크루 형태에 따른 공구의 최적형상을 설계 하였다.<sup>9</sup>

Fig. 2 는 플레네터리 밀링의 가공원리를 나타내는 그림이다. 다수의 바이트를 고정된 공구 홀더는 선반의 주축에 고정된 공작물에 대해 편심되어 있으며, 저속으로 회전하는 공작물과 같은 방향 또는 반대 방향으로 공작물의 바깥 쪽을 고속으로 회전한다.

공구 홀더의 고속회전과 더불어 왕복대는 워엄 스크루의 피치만큼 이송하면서 가공을 하게 된다. 바이트와 공구 홀더의 회전비는 공작물의 재질에 따라 다양하게 설정이 된다.

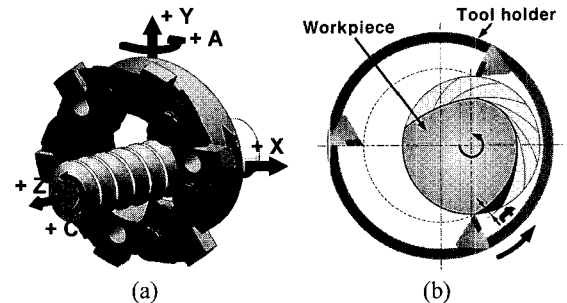


Fig. 2 (a) Three dimensional view of planetary milling, (b) Chip generation mechanism of planetary milling

**3. 좌표계 변환을 통한 기하 모델링**

Fig 3 은 플레네터리 밀링에서의 공구 좌표계 ( $X_T, Y_T, Z_T$ )와 공작물 좌표계( $X_W, Y_W, Z_W$ )에 대한 정의를 나타낸다. 공구 좌표계의 원점은 공작물 좌표계의 원점으로부터 Z 축으로  $m$  만큼 떨어져 있고 워엄 스크루의 나선각은  $\beta$  만큼 틀어져 있다.

Fig. 4 는 워엄 스크루의 가공에서 공구와 공작물간의 상호작용을 기하학적으로 나타낸 것이다. 공구 좌표계의 원점이 공작물 좌표계의 원점으로

부터 공구 좌표계 Y 축 방향으로  $l$  만큼 떨어져 있고, 절삭날 상의 한 점  $P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 은 Z 축으로  $\theta$ 만큼 회전했을 때를 위치를 표시한다. 또한 가공이 진행됨에 따라 공구는 워엄 스크루의 나선각을 따라 공작물 주위를 회전하게 되는데 회전한 각도를 공작물 좌표계의  $\alpha$ 로 표시하였다. 그림에서 윗부분의 음영은 공구와 공작물 사이의 간섭부분을 나타내고, 이 부분은 공작물이 가공 시 절삭되는 부분을 의미한다.

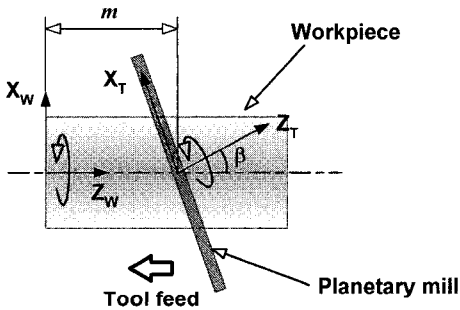


Fig. 3 Coordinate system of the cutter and workpiece

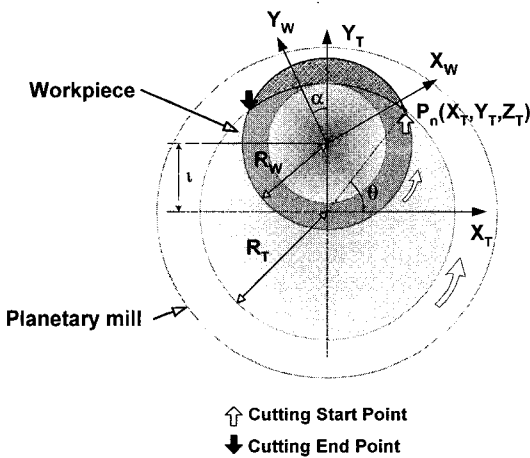


Fig. 4 Cutting tool-workpiece interaction

플래네터리 밀링에서의 좌표계에 대한 정의 및 공구 좌표계와 공작물 좌표계 사이의 회전변환 및 직선이송은 Denavit-Hartenberg 변환(D-H 변환)을 위한 조건을 만족시키고 있다.<sup>10</sup> 즉 공구 좌표계의 Y 축이 공작물 좌표계의 Z 축과 교차하고, 두 축이 서로 수직을 이루고 있다. 따라서 X 축에 대한 회전 및 평행이동 변환을 Y 축에 해당하는 변환 행렬로 변경함으로써 D-H 변환을 통하여 공구 좌표

계 상의 위치를 공작물 좌표계에서 표현이 가능하게 된다. 이것은 절삭 날의 위치를 단일 좌표계상에서 표현할 수 있기 때문에 이론적인 나선각 및 나선면에 대한 간섭여부를 계산을 위한 중요한 이론적 근거가 된다.

식 (1)은 공구 좌표계상의 한 점  $P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 이 공작물 좌표계상의 한 점  $P_n(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 으로의 변환을 나타내는 식이다. 식 (2)에서 변환 행렬 [H]는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 평행이동 변환행렬 [M]은 공작물의 회전속도에 따른 공구의 이송량  $m$  에 대한 평행이동변환 행렬  $[M_{zw,m}]$ 과 공작물 중심축에 대한 공구 중심축의 거리  $l$  에 대한 평행이동 변환행렬  $[M_{zt,l}]$ 를 곱한 행렬이다. 그리고  $[R_{zw,\alpha}]$ 은 공작물의 회전  $\alpha$ 에 대한 회전변환 행렬이고,  $[R_{zt,\beta}]$ 는 공구 좌표축이 워엄 스크루의 나선각 만큼 비틀어진 양  $\beta$ 에 대한 회전변환 행렬이다. 식 (4)는 공작물 좌표계와 공구 좌표계의 평행이동을 함께 나타내는 평행이동 행렬 [M]을 나타내고, 식 (5)는 워엄 스크루의 나선각에 따른 공구 좌표계의 회전 즉 공구 비틀림을 나타내는 회전변환 행렬을 나타낸다.

$$P_n(X_w, Y_w, Z_w)^T = [H] \cdot P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T \quad (1)$$

$$[H] = [R_{zw,\alpha}] [M_{zw,m}] [M_{zt,l}] [R_{zt,\beta}] = [R_{zw,\alpha}] [M] [R_{zt,\beta}] \quad (2)$$

$$[R_{zw,\alpha}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[M] = [M_{zw,m}] [M_{zt,l}]$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 1 & m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[R_{zt,\beta}] = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (6)은 D-H 변환에 의한 공구 좌표계를 공작물 좌표계로 변환하는 변환 행렬이다. 공구의  $n$  번째 절삭날 상의 한 점  $P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 은 변환 행렬  $[H]$ 에 의해 공작물 좌표계로 표현되어지고,  $P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 은 공구 좌표계에서 공구 좌표축  $Z$  축을 따라 회전하므로 식 (7)과 같이 표현되어질 수 있다. 이때  $R_T$ 는 공구 홀더의 절삭날 끝점 반경이다.

$$[H] = \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & -s\alpha & c\alpha \cdot s\beta & -l \cdot s\alpha \\ s\alpha \cdot c\beta & c\alpha & s\alpha \cdot s\beta & l \cdot c\alpha \\ -s\beta & 0 & c\beta & m \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T = \begin{bmatrix} R_T \cdot \cos\theta \\ R_T \cdot \sin\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이러한 방법으로 절삭날의 모든 궤적이 공구와 공작물의 회전속도와 이송량에 대해 공작물 좌표계에 생성되어진다. 식 (8)은 공구 좌표  $P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 이 공작물 좌표계의 공구 궤적  $P_n(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 으로 변환된 결과를 나타낸다.

$$P_n(X_w, Y_w, Z_w)^T = [H] \cdot P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$$

$$= \begin{bmatrix} X_T \cdot c\alpha \cdot c\beta - Y_T \cdot s\alpha + Z_T \cdot c\alpha \cdot s\beta - l \cdot s\alpha \\ X_T \cdot s\alpha \cdot c\beta + Y_T \cdot c\alpha + Z_T \cdot s\alpha \cdot s\beta + l \cdot c\alpha \\ -X_T \cdot s\beta + Z_T \cdot c\beta - m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

플래네터리 밀링에서  $l$ 은 공작물의 반경  $R_w$ , 공구반경  $R_T$ , 나사산의 높이  $H_t$ 라고 했을 때 식 (9)와 같이 표시된다.

$$l = -R_T + R_w - H_t \quad (9)$$

Fig. 5와 Fig. 6은 식 (8)을 이용하여 계산된 공구 궤적을 나타낸다. Fig. 5는 공작물 좌표계 XY 평면상의 공구 궤적을 나타낸 것으로 공구-공작물

상호작용 모델의 특성을 잘 만족시키고 있다. Fig. 6 역시 공작물 좌표계 YZ 평면상의 공구 궤적을 표시하는 그림으로 공구의 나선각 및 궤적이 공작물 나선을 잘 추종함을 알 수 있다.

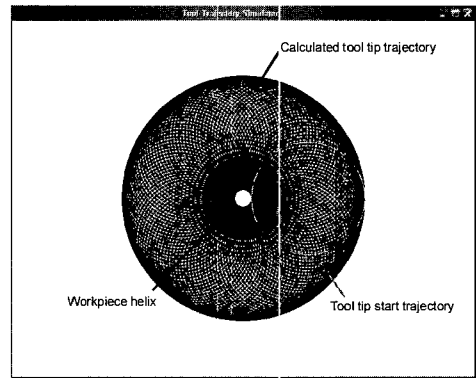


Fig. 5 Front view of tool tip trajectory in mathematical model

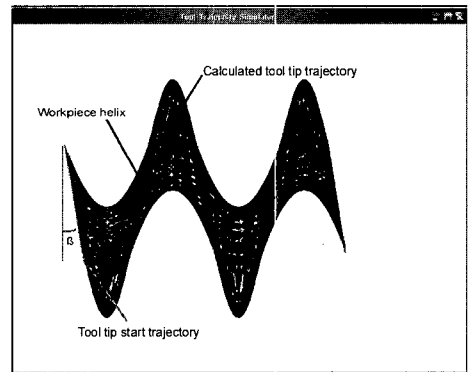


Fig. 6 Side view of tool tip trajectory in mathematical model

Table 1은 밀링의 공구궤적 연산을 위하여 사용된 조건들을 나타낸다.

Table 1 Conditions of tool trajectory calculation

Items	Data	Remark
Helix angle(deg.)	8.98°	
Lead (mm)	47.708	
Tool radius (mm)	20	
Helix radius (mm)	6.3	
Thread height (mm)	3.3	
Offset length $l_p$ (mm)	17	$-20+6.3-3.3 = -17$

### 4. 공구간섭 시뮬레이션

식 (8)을 이용하여 공구궤적과 이론적 나사면의 위치를 서로 비교하면 공구간섭을 시뮬레이션할 수 있다. Fig. 7은 공구의 간섭을 설명하는 그림이다. 그림 (a)는 간섭이 없을 때의 공구궤적과 이론적 나사면과의 관계를 나타내고, 그림 (b)는 간섭 발생 시의 관계를 나타낸다. 공구궤적과 나사면 사이의 간섭은 계산된 공구 궤적이 이론적 나사의 축 방향 단면상에서의 나사면의 경계를 침범할 경우로 정의할 수 있다.<sup>11</sup>

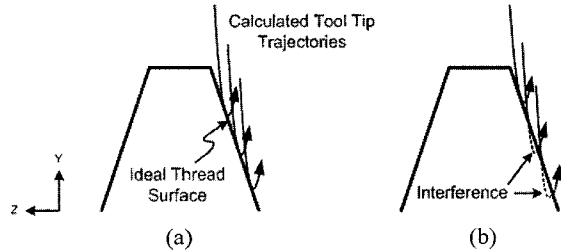


Fig. 7 (a) Thread cutting without interference, (b) Thread cutting with interference

Fig. 8은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 공구직경 20mm, 모듈 1.5, 나선각 8.98°, 치직각 압력각 20°로 설정했다. 그림 (a)는 시뮬레이션에 의한 공구간섭의 크기를 표시한 결과로서 공구 1회전 시 절삭날 하나의 간섭을 나타낸다. 따라서 연속적으로 가공이 이루어지면 절삭날 하나의 간섭량에 해당하는 간섭크기가 가공 나사면의 전면에서 발생하게 된다. 그림 (b)는 시뮬레이션의 결과로서 간섭의 영향에 의해 워엄 스크루 가공시 생성될 나사면의 형상을 나사의 축 방향 단면에서 나타낸 그림이다. 이뿌리에서 높이가 약 0.65mm의 간섭이 발생하고 간섭 깊이는 최대 62 μm이다. 이때 간섭의 크기는 이끝원으로 갈수록 감소한다. 이끝원 쪽에서도 이뿌리 방향으로 0.25mm의 간섭이 발생하고 간섭 깊이는 최대 23 μm이다. 외경에서의 간섭은 이뿌리에서와는 반대로 이뿌리 방향으로 갈수록 간섭 깊이가 감소한다.

이러한 결과를 바탕으로 플레네터리 밀링의 기하학적 공구간섭을 수학적 모델을 이용하여 시뮬레이션 했다. Table 2는 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

Fig. 9는 모듈 1.0의 워엄 스크루에 대하여 공구직경과 나선각의 변화에 따른 공구간섭 시뮬레

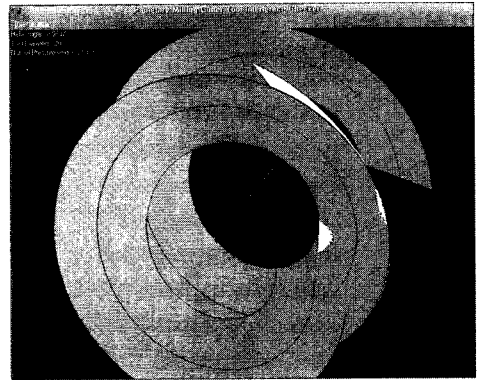


Fig. 8(a) Tool tip interference on thread surface

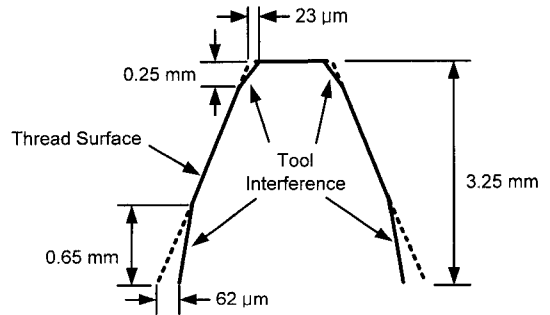


Fig. 8(b) Interference of generated thread surface in axial section

Table 2 Simulation conditions for a tool interference

Worm Module	1.0	1.5
Thread Height(mm)	2.25	3.35
Outside Circle Diameter(mm)	18	18
Pitch Circle Diameter(mm)	16	15
Root Circle Diameter (mm)	13.5	11.3
Pressure Angle(deg.)	20	
Helix Angle(deg.)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	
Tool Diameter(mm)	30, 40, 50, 60, 70, 80	

이션 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 (a)의 간섭량은 나선각이 증가함에 따라 간섭량도 증가하고 있음을 보여주고 있다. 공구직경이 작을수록 간섭량이 증가하고 직경에 따른 간섭량의 변동 폭도 크다. 특히 공구직경이 30mm 일 때는 나선각 35° 이상, 공구직경 40mm 일 때는 45° 이상에서 각각 나사면 전면에서 간섭이 일어나는 것을 알 수 있다. 기하학적 특성상 공구의 궤적이 나사면을 감싸 안은 방향으로 접촉하기 때문에 공구직경이 작아질수록 공구궤적의 곡률도 작아져 나사면과의

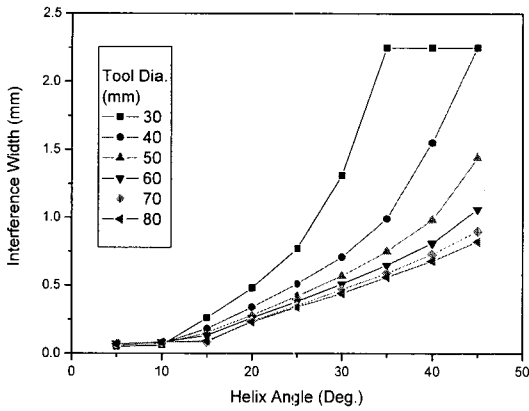


Fig. 9(a) Interference width for module 1.0

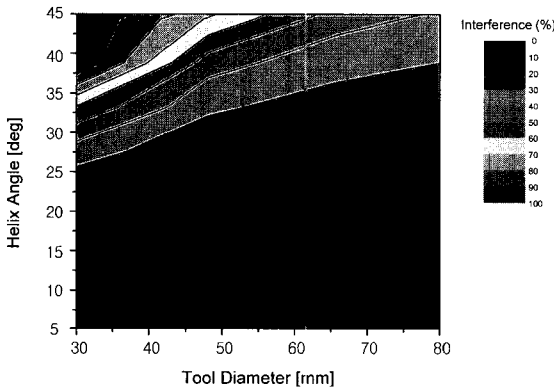


Fig. 9(b) Interference range for module 1.0

접촉 길이가 증가한다. 따라서 그만큼 간섭량이 급격히 증가한다. 이것은 공구간섭을 최소화하기 위해서는 공구직경을 크게 할 필요가 있다는 것을 의미한다. 그림 (b)의 간섭량 비율 그래프에서 공구직경 30mm~40mm 부근의 나선각 40° 근방에서는 나사면 전면에 간섭이 발생하고, 공구직경이 작을수록 그리고 나선각이 클수록 간섭량도 증가함을 보여준다. 그리고 공구직경 증가에 따라 나선각의 범위도 증가하는 경향을 보인다. 모듈 1.0의 경우 10% 미만 간섭 영역은 나선각 15° 이내로 나타났다.

Fig. 10은 모듈 1.5의 워엄 스크루에 대한 시뮬레이션 결과이다. 전체적인 경향은 모듈 1.0의 결과와 유사하나 전체적인 간섭의 크기는 모듈이 증가함에 따라 함께 증가하였다. 나사면 전면의 간섭영역은 공구직경 30mm~40mm에서 나선각 40° 근방이고, 10% 미만 간섭영역은 나선각 약 12° 이하이다. Fig. 11은 모듈 2.0의 워엄 스크루에 대한 시뮬레이션 결과이다. 모듈 1.0, 및 1.5와 유사한

특성을 보인다.

이러한 결과로부터 워엄 스크루의 모듈이 커질수록 간섭량은 증가하나 나사면에 대한 간섭비율은 작아지는 경향을 나타내고 가공이 가능한 나선각의 범위도 감소하고 있음을 알 수 있다.

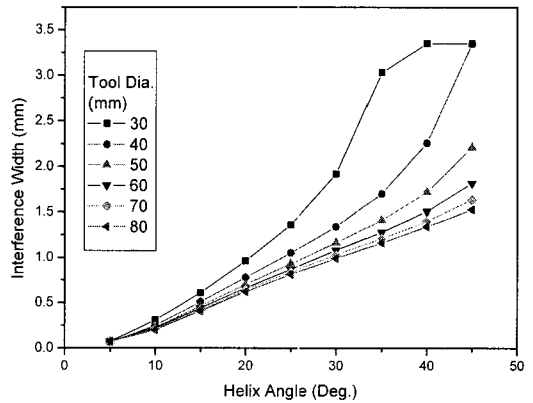


Fig. 10(a) Interference width for module 1.5

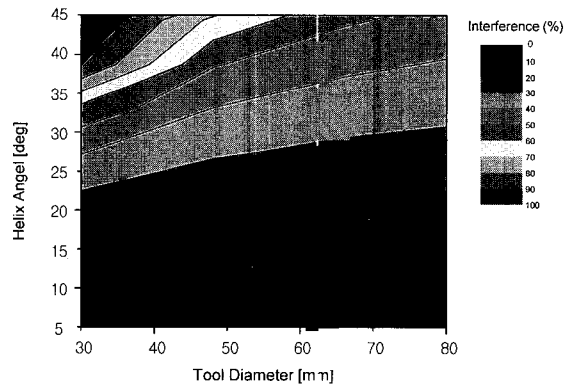


Fig. 10(b) Interference range for module 1.5

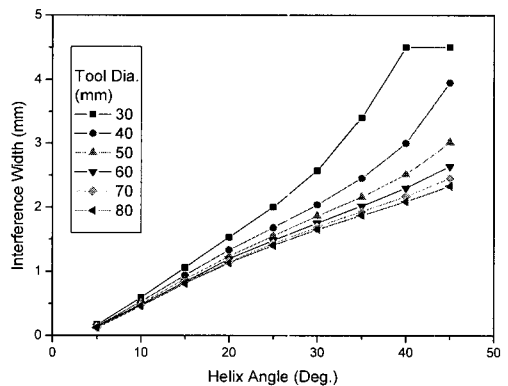


Fig. 11(a) Interference width for module 2.0

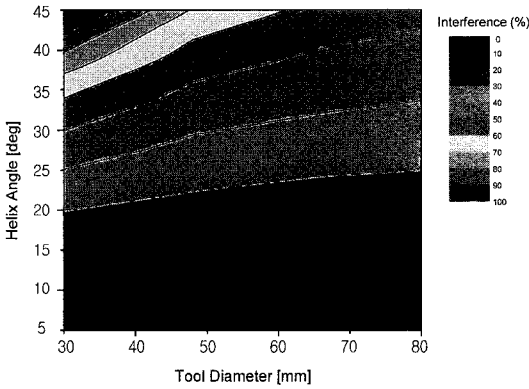


Fig. 11(b) Interference range for module 2.0

5. 시뮬레이션 결과와 실험결과의 비교

Fig. 12 는 개발한 틀링 시스템을 이용하여 모듈 1.5, 나선각 8.98°, 압력각 20° 인 워엄을 가공하고 스크루의 프로파일을 측정한 치형오차를 나타낸다. 간섭이 없는 경우의 치형오차는 일정한 기울기를 가지면서 선형적인 분포를 보이지만, 간섭이 있는 경우에는 간섭부분에서 간섭량 만큼 선형 분포를 벗어난다. 이뿌리와 이끝에서 간섭이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것은 시뮬레이션 결과와 일치함을 보여 주고 있다.

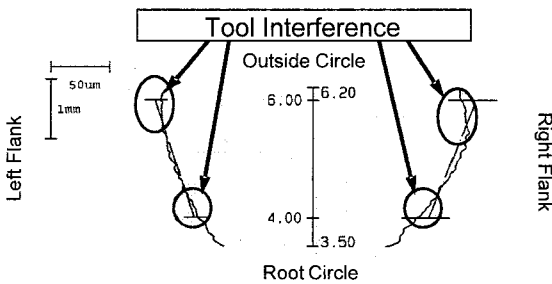


Fig. 12 Profile for machined worm

6. 결론

본 연구에서는 워엄 스크루의 가공 효율성을 높이기 위해 CNC 선반에 적용이 가능한 플래네티리 밀링용 틀링 시스템을 개발했다. 개발된 시스템의 가공성과 다양한 제품에의 적용성을 높이기 위한 목적으로 공구간섭 시뮬레이션 개발을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 공구직경이 작을수록 간섭량이 증가하고, 직경에 따른 간섭량의 변동폭도 커진다. 이것은

공구간섭을 최소화하기 위해서는 공구직경을 크게 할 필요가 있다는 것을 의미한다.

(2) 워엄 스크루의 모듈이 커질수록 간섭량은 증가하나 나선면에 대한 간섭비율은 작아지는 경향을 나타내고, 가공이 가능한 나선각의 범위도 감소하고 있음을 알 수 있다.

(3) 시뮬레이션 결과로부터 정해진 공구직경과 나선각에서 공구간섭량을 최소화할 수 있는 영역을 찾을 수가 있었다.

이러한 연구결과는 플래네티리 밀링을 이용한 워엄 스크루 가공기술의 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Wehmann, R., "The Whirling Process for Improved Worm Gears," Gear Solutions Magazine, No. 10, pp. 48-53, 2003.
2. Li, X. P. and Li, H. Z., "Theoretical modelling of cutting forces in helical end milling with cutter runout," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 9, pp. 1399-1414, 2004.
3. Altintas, Y. and Engin, S., "Generalized Modeling of Mechanics and Dynamics of Milling Cutters," Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 25-30, 2001.
4. Ehmann, K. F., "Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 153-156, 1990.
5. Kaldor, S., Rafael, A. M. and Messinger, D., "On the CAD of Profile for Cutters and Helical Flutes," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 53-56, 1988.
6. Bär, G., "CAD of Worms and Their Machining Tools," Computer & Graphics, Vol. 14, No. 3-4, pp. 405-411, 1990.
7. Ahn, J. H., Kang, D. B., Lee, M. H., Kim, H. Y., Kim, S. H. and Cho, K. K., "Investigation of Cutting Characteristics in Side-milling A Multi-thread Worm Shaft on Automatic Lathe," Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, pp. 63-66, 2006.
8. Lee, M. H., Kang, D. B., Kim, H. Y. and Ahn, J. H., "Classification of Geared Motor Noise Using a Cepstrum and Comb Lifter Analysis," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 8, No. 3, pp. 45-49, 2007.
9. Mohan, L. V. and Shunmungam, M. S., "Simulation

- of whirling process and tool profiling for machining of worms,” *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 185, No. 1-3, pp. 191-197, 2007.
10. Spong, M. W. and Vidyasagar, M., “Robot Dynamics and Control,” John Wiley & Sons, Inc., pp. 62-83, 1989.
  11. Wright, R. S. and Sweet, M., “Open GL Superbible,” Waite Group Press, pp. 259-407, 1997.