

워엄 스크루 가공용 사이드 밀링의 공구 간섭 시뮬레이션

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

이민환¹, 김선호^{2,✉}, 안중환³Min Hwan Lee¹, Sun-Ho Kim^{2,✉} and Jung Hwan Ahn³¹ 주식회사 만도 중앙연구소 (Mando Co. Ltd.)² 동의대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Dong-Eui Univ.)³ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

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

Manuscript received: 2010.1.25 / Revised: 2010.8.15 / Accepted: 2010.9.28

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 side 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), Side Milling (사이드 밀링)

1. 서론

자동차의 품질 고급화에 따라 다양한 전동 액츄에이터가 개발되고 있으며, 회전용 액츄에이터로는 기어드 모터(Geared motor)의 적용이 증가하고 있다.¹

기어드 모터에서 회전운동을 직선운동으로 변환하는데 사용되는 워엄 스크루(Worm screw)는 단면가공, 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 다이스를 이용하는 전조가공은 가공시간이 짧고 저비용 방법이지만, 후변형과 다이스의 마모에 의한 형상정도 저하 등으로 인해 제품정밀도가 낮은 단점을 가진다.²

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. 최근에는 CNC 선반에 적용이 가능한 플레네터리 밀링(Planetary milling)용 툴링 시스템을 개발하고 공구의 간섭을 시뮬레이션한 연구도 보고 되었다.¹ 그러나 이 가공방법은 홀더 반경에 비해 많은 절삭공구를 장착할 수 없는 단점을 가진다. 따라서 가공속도를 높이는데 한계를 가진다.

본 연구에서는 플레네터리 밀링이 갖는 단점을 극복하기 위해 CNC 선반에 적용이 가능한 사이드 밀링(Side 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. 사이드 밀링

사이드 밀링은 CNC 자동선반의 터릿부분에 공구 홀더를 장착하여 가공하는 방식으로 절삭 방식은 밀링가공의 상향 절삭과 유사하다. 저속 회전하는 공작물에 대해 외륜에 여러 개의 절삭날을 가진 공구 홀더가 공작물과 반대방향으로 고속으로 회전하면서 공작물의 바깥방향에서 절삭이 이루어진다. 이러한 구조는 상대적으로 작은 홀더 반경에 많은 절삭 공구를 장착할 수 있기 때문에 절삭부하를 다수의 절삭날에 분담시킬 수 있다. 따라서 절삭날 하나의 날 당 절삭량이 작아지게 되어 툴의 회전속도도 높일 수 있다. 또한 홀더 반경이 작고 공구와 공작물의 접촉 길이가 짧아지므로 플레네터리 밀링보다 간섭문제를 상대적으로 작게 받는다. 그러나 플레네터리 밀링보다 커스프의 높이가 크고 칩의 길이가 짧기 때문에 같은 공구 선속도와 이송속도에서는 표면거칠기가 나빠지게 된다.²

Fig. 1은 사이드 밀링에 의해 가공된 워엄 스크루를 보여 준다.

이러한 분야에 대한 연구동향을 살펴보면 주로 학술적 측면에서 나사 및 나선 홈 가공을 위한 연삭공구 또는 공구설계 대한 기하학적 해석에 대한 연구가 있어 왔다. 회전공구에 의한 공구간섭 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이며, 특수 공구를 이용한 나사 가공법에 대해서는 연구사례는 최근



Fig. 1 Worm screw for automobile manufactured by side milling

부분적으로 발표되고 있다. Ahn³은 사이드 밀링을 이용한 나사절삭에 대한 실험적 연구를 수행했고, Lee⁴는 기어드 모터의 소음특성에 대한 연구를 수행했다. Mohan과 Shunmungam은 플레네터리 밀링에 대해 변환행렬을 이용하여 가공 프로세스의 기하학적 형상을 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과의 사례연구를 통하여 워엄 나사 형태에 따른 공구의 최적형상을 설계하였다.⁵

Fig. 2는 사이드 밀링의 가공원리를 나타내는 개략도이다.⁶

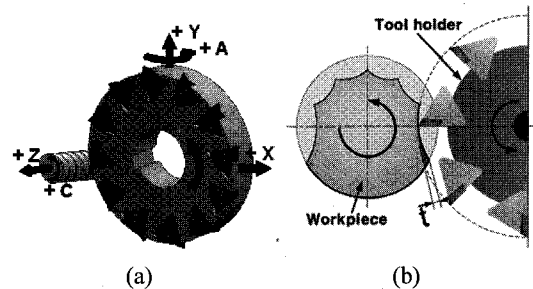


Fig. 2 Mechanism of side milling. (a) Three dimensional view, (b) Chip generation mechanism

다수의 절삭날이 공구 홀더에 방사형으로 배치되고 선반의 주축에 고정되어 저속 회전하는 공작물에 대해 공작물과 같은 방향 또는, 반대 방향으로 공작물의 바깥쪽을 고속으로 회전한다. 사이드 밀링 커터의 경우, 홀더의 외경 부분에 공구가 장착되기 때문에 같은 직경에서 비교했을 때, 더 많은 절삭날을 장착할 수 있는 장점이 있다. 또한 작은 사이즈이면서 공구의 선속도를 높일 수 있어 고속 가공이 가능하다. 가공특성에 있어서는 공구 회전 속도 영역이 넓기 때문에 다양한 절삭조건을 선정할 수 있다. 절삭 조건으로서 업 컷, 다운 컷의 문제는 밀링 머신의 경우와 동일하고 나선각에 따라 밀링 커터를 기울이는 것은 밀링 머신의 비틀림 홈 깎기와 같다.⁷

Fig. 3 은 본 연구에 사용된 사이드 밀링 커터이다.

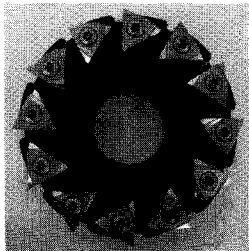


Fig. 3 Side milling cutter

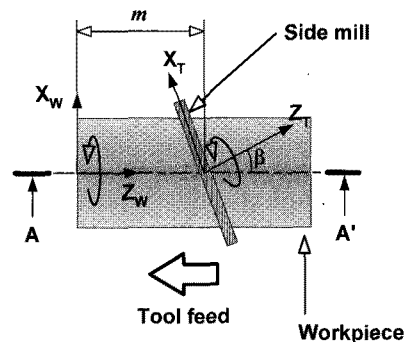


Fig. 4 Coordinate system of the side milling cutter and workpiece

3. 좌표계 변환을 통한 기하 모델링

Fig. 4 는 사이드 밀링에서 공구 좌표계(X_T, Y_T, Z_T)와 공작물 좌표계(X_W, Y_W, Z_W)에 대한 정의를 나타낸다. 그림은 공작물 좌표계의 원점으로부터 공구 좌표계의 원점이 공작물 좌표계 Z 축으로 m 의 거리만큼 떨어져 있고 공구 좌표계가 공작물 좌표계 Z 축 상의 공구 좌표계 Y 축을 기준으로 위엄 스크루의 나선각 β 만큼 회전한 상태를 나타낸다. 이때 거리 m 은 위엄 스크루의 나선각을 따라 공구가 회전할 때 회전 운동과 동기 되어 직선 이송되는 공구의 이동을 의미한다.⁶

Fig. 5 는 위엄 스크루의 가공에서 공구와 공작물간의 상호작용을 기하학적으로 나타낸 것이다. 그림은 공구 좌표계의 원점이 공작물 좌표계의 원점으로부터 공구 좌표계 Y 축 방향으로 거리 만큼 떨어져 있고 절삭 날의 한 점 $P_n(X_T, Y_T, Z_T, l)^T$ 은 공구 좌표계의 Z 축으로 θ 만큼 회전했을 때를 표시한다. 또한 가공이 진행됨에 따라 공구는 위엄 스크루의 나선각을 따라 공작물 주위를 회전하게 되는데 회전한 각도를 공작물 좌표계의 α 로 표시하였다. 그림 상에서 공구와 공작물 사이의 간섭부분을 음영으로 표시하였고 이 부분은 공작물이 가공 시 절삭되는 부분을 의미한다.

좌표계에 대한 정의 및 공구와 공작물 사이의 회전변환 및 직선이송은 Denavit-Hartenberg 변환(D-H 변환)을 위한 조건을 만족시키고 있다.⁸ 즉 공구 좌표계의 Y 축이 공작물 좌표계의 Z 축과 교차하고 두 축이 서로 수직을 이루고 있다. 따라서 기본식의 X 축에 대한 회전 및 평행이동 변환을 Y 축에 해당하는 변환 행렬로 변경하면 D-H 변환을 통하여 공구 좌표계 상의 궤적을 공작물 좌표계에서 표현이 가능하게 된다. 이것은 절삭 날의 궤적

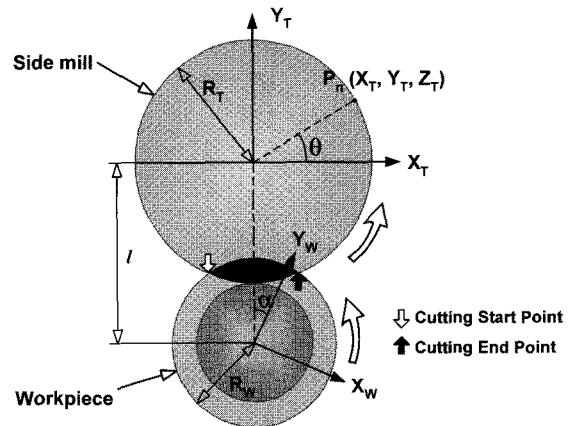


Fig. 5 Tool-workpiece interaction in a side milling

을 단일 좌표계 상에서 표현할 수 있기 때문에 이론적인 나선각 및 나선면에 대한 간섭여부를 계산을 위한 중요한 이론적 근거가 된다. 절삭날의 모든 궤적이 공구와 공작물의 회전속도와 이송량에 대해 공작물 좌표계에 생성되어진다. 식 (1)은 공구 좌표 $P_n(X_T, Y_T, Z_T, l)^T$ 이 공작물 좌표계의 공구 궤적 $P_n(X_W, Y_W, Z_W, l)^T$ 으로 변환된 결과를 나타낸다.¹

$$P_n(X_W, Y_W, Z_W)^T = [H] \cdot P_n(X_T, Y_T, Z_T)^T$$

$$= \begin{bmatrix} X_T \cdot ca \cdot cb - Y_T \cdot sa + Z_T \cdot ca \cdot sb - l \cdot sa \\ X_T \cdot sa \cdot cb + Y_T \cdot ca + Z_T \cdot sa \cdot sb + l \cdot ca \\ - X_T \cdot sb + Z_T \cdot cb - m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[H] = [R_{z_w, a}] [M_{z_w, m}] [M_{z_t, l}] [R_{z_t, \beta}] = [R_{z_w, a}] [M] [R_{z_t, \beta}] \quad (2)$$

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

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

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

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

식 (1)에서 c 와 s 는 각각 cos 와 sin 을 의미한다. 사이드 밀링에서 l 은 공작물의 반경 R_w, 공구 반경 R_T, 나사산의 높이 H_t 라고 했을 때 식 (6)과 같이 표시된다.

$$l = R_T + R_w - H_t \quad (6)$$

Fig. 6 과 Fig. 7 은 식 (1)을 이용하여 계산된 사이드 밀링의 공구 궤적을 나타낸다. Fig. 6 은 공작물 좌표계의 XY 평면에서 그려진 공구궤적을 나타낸다. 붉은색 선으로 표시된 선은 공작물 외경에 생성될 워엄 스크루의 나선(Helix)을 표시하고 하늘색 원은 공구의 한 끝점이 처음으로 그리는 원의 궤적을 나타낸다. 그리고 나머지 파란색 선들은 공구가 그리는 궤적들을 나타낸다. 그림에서 공작물 외경의 나선과 공구의 첫 궤적을 통해 계산된 궤적이 Fig. 5 에 설명된 사이드 밀링의 공구-공작물 상호작용 모델을 잘 만족시키고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7 은 공작물 좌표계의 YZ 평면에서의 공구 궤적을 그린 그림이다. 공구의 첫 궤적이 나선각 만큼 기울어져 있고 이후 그려진 궤적도 공작물 외경의 나선을 잘 추종해가고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 은 밀링의 공구궤적 연산을 위해 사용된 조건들이다.

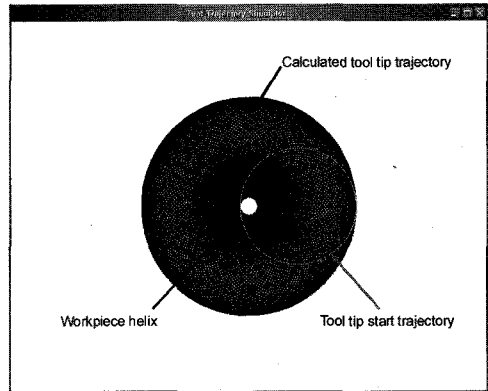


Fig. 6 Front view of tool tip trajectory in mathematical model of side milling

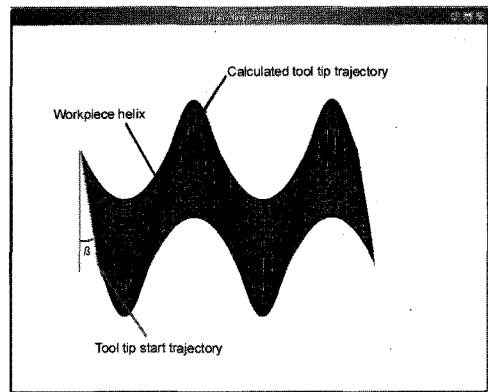


Fig. 7 Side view of tool tip trajectory in mathematical model of side milling

Table 1 Conditions of tool trajectory calculation using mathematical model

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 (mm)		
l	23	20+6.3-3.3 = 23

4. 공구간섭 시뮬레이션

식 (1)을 이용하여 공구궤적과 이론적 나선면의 위치를 서로 비교하면 공구간섭을 시뮬레이션할 수 있다. Fig. 8 은 공구의 간섭을 설명하는 그림

이다. Fig. 8(a)는 간섭이 없을 때의 공구궤적과 이론적 나사면과의 관계를 나타내고, Fig. 8(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.⁹

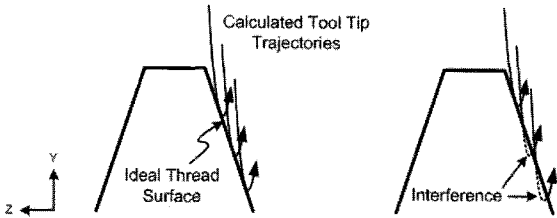


Fig. 8 (a) Thread cutting without interference, (b) Thread cutting with interference

Fig. 9 는 사이드 밀링의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 사공구 직경 80 mm, 모듈 1.5, 나선각 8.98°, 치직각 압력각 20° 으로 가공 실험에 사용될 공구 직경과 워엄의 사양을 적용하였다.

Fig. 9(a)는 시뮬레이션에 의한 공구 간섭의 크기를 표시한 결과로서 공구 1 회전 시 절삭날 하나의 간섭을 나타낸다. 따라서 연속적으로 가공이 이루어지면 절삭날 하나의 간섭량에 해당하는 간섭크기가 가공 나사면의 전면에서 발생하게 된다.

Fig. 9(b)는 시뮬레이션의 결과 간섭의 영향에 의해 워엄 스크루 가공시 생성될 나사면의 형상을 나사의 축방향 단면에서 나타낸 그림이다. 사이드 밀링은 이뿌리 근방에서 높이 약 0.3mm 간섭이 발생하고 깊이는 최대 25 μm로서 이끝원 쪽으로 갈수록 감소한다.

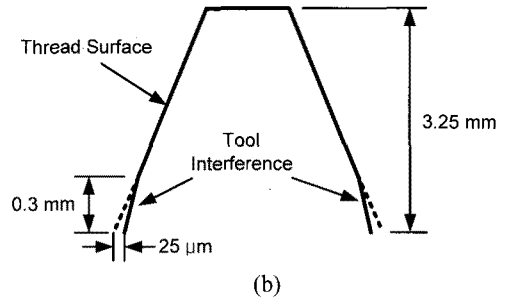


Fig. 9 Tool interference simulation of the side milling. (a) Tool tip interference on thread surface, (b) Interference of generated thread surface in axial section

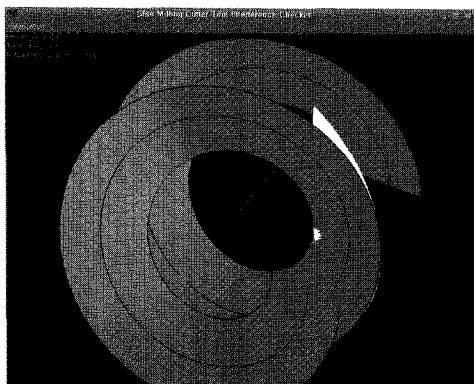
이러한 결과를 바탕으로 사이드 밀링의 기하학적 공구간섭을 수학적 모델을 이용하여 시뮬레이션 한다. Table 2 는 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

Table 2 Simulation conditions for tool interference

Worm Module	1.0	1.5	2.0	2.5
Thread Height(mm)	2.25	3.35	4.5	5.62
Outside Circle Diameter (mm)	18	18	18	18
Pitch Circle Diameter (mm)	16	15	14	13
Root Circle Diameter (mm)	13.5	11.3	9.0	6.75
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			

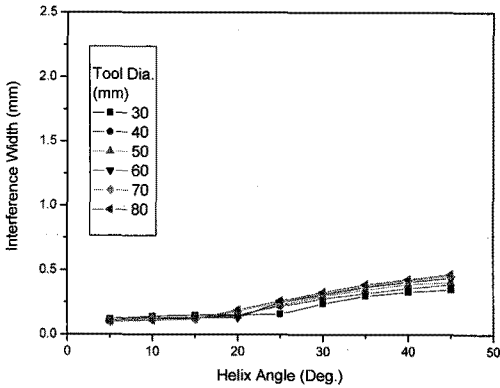
Fig. 10 은 모듈 1.0 의 워엄에 대한 사이드 밀링의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 10(a)는 사이드 밀링의 간섭량을 보여주는 결과로 대체로 나선각이 증가할수록 간섭량도 따라 증가하는 추세를 보이거나 0.5mm 를 넘지 않고, 공구 직경의 영향도 크지 않다. 공구직경에 대한 간섭의 영향은 공구직경이 커질수록 간섭량이 증가한다. 이 역시 기하학적 특성으로 사이드 밀링에서는 공구 궤적이 나사면과 접촉하는 길이가 공구 직경이 클수록 커지기 때문에 간섭도 그만큼 증가한다. 그러나 플레네터리의 경우처럼 접촉 길이가 급격히 커지는 않기 때문에 그만큼의 간섭량의 증가도 없다.

Fig. 10(b)는 사이드 밀링의 나사면에 대한 간섭량의 비율을 영역으로 정리한 그래프이다. 이 그래프를 이용하여 공구직경과 나선각에 따른 간섭 정도를 판단할 수 있다. 즉 간섭을 최소화할 수

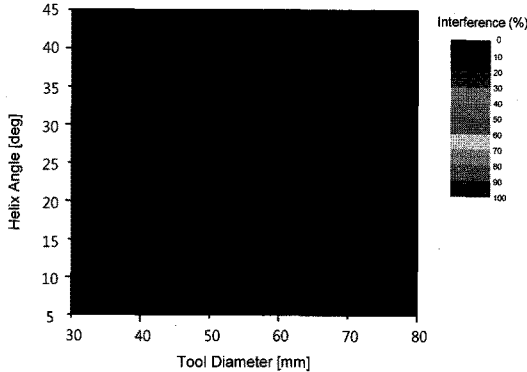


(a)

있는 공구직경과 나선각의 한계영역을 정의할 수 있다. 간섭 영향을 받지 않는 사용가능 영역을 공구간섭 10% 미만으로 설정할 경우 공구 직경 증가에 따른 나선각의 범위는 줄어들고 간섭비율 10% 미만 영역은 대략 30° 이내이다.



(a) Interference width



(b) Interference range

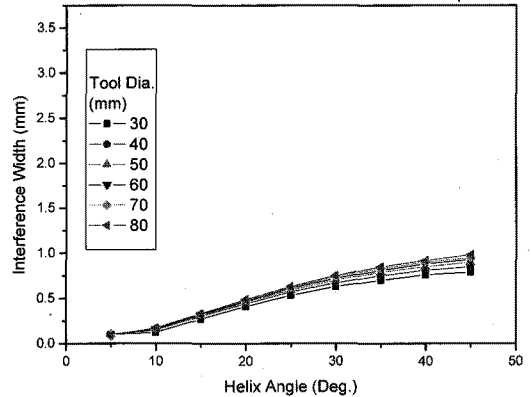
Fig. 10 The tool interference simulation of side milling (Module 1.0)

Fig. 11은 모듈 1.5에서의 사이드 밀링 시뮬레이션 결과이다. 역시 모듈 1.0의 사이드 밀링의 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 갖는다. 간섭비율이 모듈 1.0에 비하여 약간 증가하였고, 10%미만 간섭영역이 나선각 약 18° 이하로 모듈 1.0보다 줄었다.

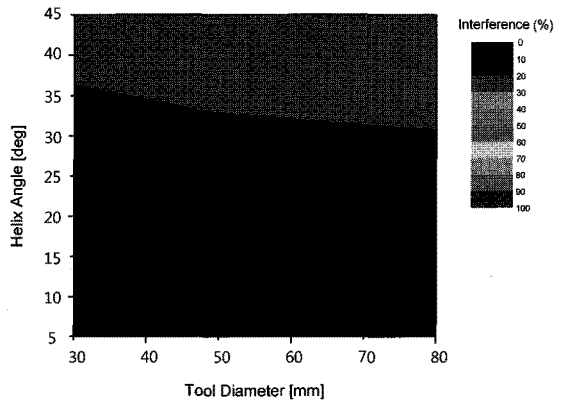
Fig. 12와 Fig. 13은 각각 모듈 2.0과 모듈 2.5에서의 공구간섭 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전체적인 경향은 모듈 1.0과 1.5와 유사하다. 모듈 2.0에서의 10%미만 간섭영역은 사이드 밀링의 경우 약 13° 이하이고, 모듈 2.5에서는 각각 약 10° 이하이다.

이러한 결과로부터 모듈이 커질수록 간섭량도

증가하고 나선면에 대한 간섭비율도 커지는 경향을 보인다. 그리고 가공이 가능한 나선각 범위는 감소한다. 공구 직경에 대해서는 공구직경이 클수록

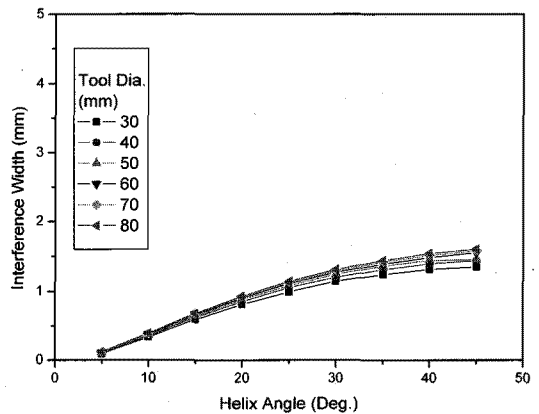


(a) Interference width

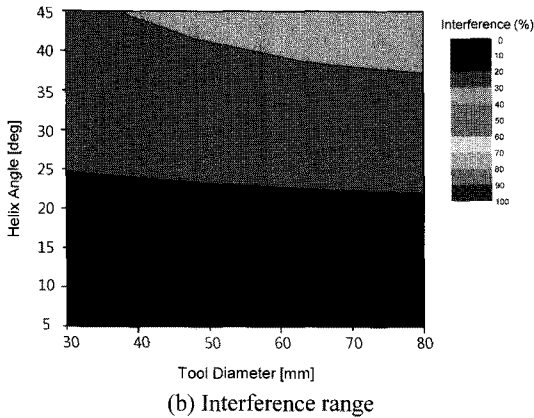


(b) Interference range

Fig. 11 The tool interference simulation of side milling (Module 1.5)

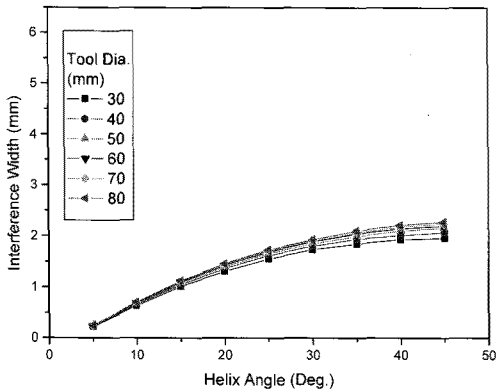


(a) Interference width

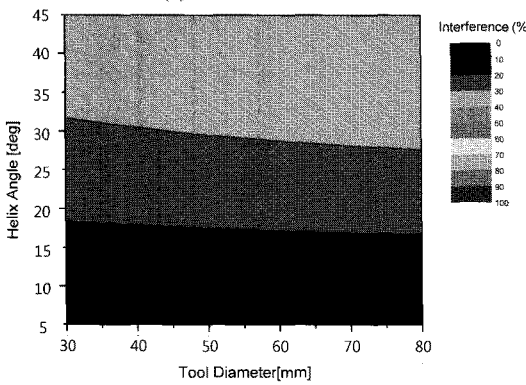


(b) Interference range

Fig. 12 The tool interference simulation of side milling (Module 2.0)



(a) Interference width



(b) Interference range

Fig. 13 The tool interference simulation of side milling (Module 2.5)

간섭량 및 나사면 간섭비율이 증가한다. 나선각의 경우는 나선각이 증가할수록 간섭량 및 나사면 간섭비율이 증가한다.

5. 시뮬레이션 결과와 실험결과의 비교

Fig. 14는 개발한 툴링 시스템을 이용하여 모듈 1.5, 나선각 8.98°, 압력각 20°인 워엄을 가공하고 기어측정기를 통해 측정된 치형오차를 나타낸다. 그래프에서 수직에 가까울수록 나사면이 이론적인 치형에 가깝다는 것을 의미한다. 간섭이 없는 경우의 치형오차는 일정한 기울기를 가지면서 선형적인 분포를 보이지만, 간섭이 있는 경우에는 간섭부분에서 간섭량 만큼 선형분포를 벗어난다. 이것은 시뮬레이션 결과와 일치함을 보여주고 있다.

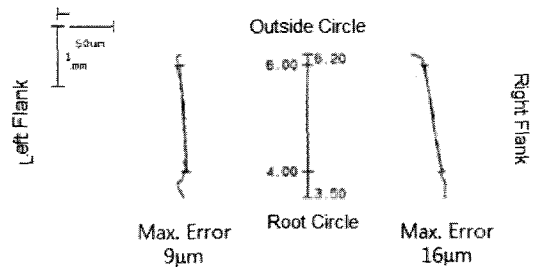


Fig. 14 Profile for machined worm

6. 결론

본 연구에서는 워엄 및 워엄 휠의 가공 효율성을 높이기 위해 CNC 선반에 적용이 가능한 사이드 밀링용 툴링 시스템을 개발하고, 개발된 시스템의 가공성과 다양한 제품에의 적용성을 높이기 위한 목적으로 한 공구간섭 시뮬레이션 개발을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 공구직경이 클수록 간섭량 및 나사면 간섭비율이 증가한다. 나선각의 경우는 나선각이 증가할수록 간섭량 및 나사면 간섭비율이 증가한다.
- (2) 모듈이 커질수록 간섭량도 증가하고 나사면에 대한 간섭비율도 커지는 경향을 보인다. 그리고 가공이 가능한 나선각 범위는 감소한다.
- (3) 시뮬레이션 결과로부터 정해진 공구직경과 나선각에서 공구간섭량을 최소화할 수 있는 영역을 찾을 수가 있었다.

참고문헌

1. Lee, M. H., Kim, S. H. and Ahn, J. H., "The Cutting

- Tool-workpiece Interference Simulation for Worm Screw Machining by Planetary Milling,” *Journal of KSPE*, Vol. 26, No. 12, pp. 47-54, 2009.
2. Wehmann, R., “The Whirling Process for Improved Worm Gears,” *Gear Solutions Magazine*, No. 10, pp. 48-53, 2003.
 3. 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.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Kim, S. H., “Investigation of Surface Roughness Characteristics according to Tool Runout Variations in Side Milling Cutter for Worm Screw,” *Journal of KSMPE*, Vol. 8, No. 4, pp. 76-82, 2009.
 7. 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.
 8. Spong, M. W. and Vidyasagar, M., “Robot Dynamics and Control,” *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 62-83, 1989.
 9. Wright, R. S. and Sweet, M., “Open GL Superbible,” *Waite Group Press*, pp. 259-407, 1997.