

# 전체면 접촉 절삭공구를 이용한 장구형 웜나사 치형가공 연구

강신준<sup>1</sup> · 김용환<sup>#</sup>

## Double Enveloping Worm Thread Tooth Machining Study using Full Face Contact Cutting Tool

S. J. Kang, Y. H. Kim

(Received January 31, 2020 / Revised April 28, 2020 / Accepted April 29, 2020)

### Abstract

In this paper, we propose the generation of a double enveloping worm thread profile with a non-developable ruled surface. Thread surface machining cuts all the way from the tip to the tooth root at one time, like full-face contact machining, rather than cutting several times like point machining. This cutting can reduce the cutting duration and achieve the smooth surface that does not require a grinding process for the threaded surface. The mathematical model of the cutting process was developed from theoretical equations, and the tooth surface was generated using two parameters and modeled in the CATIA using the generated Excel data. Additionally, the machining process of the worm was simulated in a numerical control simulation system. To verify the validity of the proposed method, the deviation between the modeling and the workpiece was measured using a 3D measuring machine.

**Key Words:** Double Enveloping Worm, Non-developable Ruled Surface, Full-face Contact Machining, Point Machining

### 1. 서 론

웜기어 드라이브는 웜과 기어가 맞물려서 직각 방향의 서로 교차하지 않는 두 축 사이에 동력을 전달하는 기어 동력 전달 장치의 기계요소로서 웜 구동 장치는 레오나르도 다빈치 이래로 활발하게 연구된 주제였다. 웜기어 드라이브는 다음과 같은 경우에 다양하게 활용되고 있다. 1) 상대적으로 좁은 공간에서 큰 감속비 및 큰 동력을 사용해야 하는 경우, 2) 소음이 문제가 되는 경우, 3) 충격 부하 흡수가 필요한 경우 및 유지보수가 필요 없거나 최소한으로 필요한 경우 이외에도 저렴하고, 가볍고, 소음이 적은 플라스틱의 특성 때문에 자동차,

가정/의료 기기, 식품 가공산업에서 금속(웜)-플라스틱(기어) 또는 플라스틱(웜)-플라스틱(기어)

조합의 수요가 높아지고 있다. 웜 소재에는 탄소 나노튜브, 폴리아세탈 합성 복합체가 적용되고 있다[1]. 자동차용 전동식 조향 장치(EPS)에는 P-EPS, C-EPS 및 R-EPS가 사용되고 있는데 웜기어 드라이브는 C-EPS의 전동식 조향 장치가 사용되고 있다 [2]. 전통적인 원통형(cylindrical) 웜기어 드라이브와 비교할 때, 장구형(doubling enveloping, globoid or hourglass) 웜기어 드라이브는 더 많은 접촉 면적을 제공한다. 따라서 장구형은 웜과 기어에 가해지는 충격 하중의 흡수성을 증가시킬 수 있다. 장구형 웜은 1765년 영국 시계 제조업자인 Henry Hindley가 개발했다[3,4]. Hindley 웜은 사다리꼴 형태의 직선날(straight cutting edge)을 가진 전삭 공구로 선반에서 웜 나사면을 가공하고, 기어는

1. 영신금속공업(주) 기술연구소, 이사

# Corresponding Author: Chungnam National University of Mechanical Engineering, E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr, ORCID ID : 0000-0002-4895-3674

Hindley 워와 동일한 워형 호브(hob) 커터에 의해 기어 치면을 가공하였다.

이후 Samuel I Cone은 1924년에 Hindley 워 드라이브를 성공적으로 제조하여 1932년에 첫 번째 특허를 받았다[4]. 1925년 Cone은 Hinley 워 드라이브를 생산하기 위해 Cone company를 설립하였다.

1930년대 이래 많은 러시아, 미국 및 중국 과학자들이 Hindley 워기어 드라이브의 기술 원리 및 공정 장비 연구에 전념해 왔다. 결과적으로 워와 기어의 나사면과 치면에 작용하는 하중이 동시에 맞물려 균일하게 분포되도록 하기 위해서 워의 입구와 출구 부분을 제거하였다[4]. Litvin은 1950년대부터 ZA 기어 드라이브에 대한 물림(meshing)과 접촉에 대하여 이론적 연구를 하였다. 워 나사면은 워의 축방향 단면에 장착된 직선날 공구에 의해 점 가공(Point milling)에 의해 가공되고 직선날은 워 축에 대하여 나선운동을 한다[5,6]. Ishida는 이론, 수치 계산, 장구형 워기어의 제조 및 실험 결과 등을 이용하여 장구형 워와 새로운 연삭 휠에 대한 접촉면 또는 접촉선의 특성을 연구하였다. 이때 장구형 워 나사면은 밀링 커터에 의해 점 가공으로 작업한 후 연삭 휠로 연삭을 실시하였다[7]. Tsay는 Hindley 워 드라이브와 유사한 이중(dual) 장구형 워 드라이브와 ZN형 장구형 워 드라이브를 제안하였다[8]. Zhong은 5축 가공기에서 테이퍼 엔드밀 공구를 이용하여 워 나사면을 한 번에 절삭하는 전개 가능한 선직면(developable ruled surface)인 장구형 워의 절삭 방법을 제안하였다[9]. Dong은 NC 기계에서 플랫폼 엔드밀 공구를 이용하여 워 나사면을 점 가공으로 여러 번 절삭하는 전개 가능한 선직면인 연삭공정이 필요한 장구형 워의 절삭 방법을 제안하였다[10]. Kim은 엔드밀 공구 형상에 따른 치형 정밀도 분석을 실시하였다[11]. Sobolak은 장구형 워의 나사면에 대한 수치 계산식과 CAD 시스템을 이용하여 장구형 워의 나사면을 모델링하였다[12].

본 논문에서는 사다리꼴 형상의 장구형 워 나사면을 3D 모델링하였다. 워 나사면은 Fig. 1(a)과 같이 선반작업에서의 인서트 팁(점) 또는 밀링작업에서의 코너R(점)을 이용한 가공처럼 여러 번 절삭가공하는 것이 아니다. 즉, Fig. 1(b)과 같이 전체면(또는 테이퍼)이 접촉하는 절삭가공을 이용하였다. 이러한 이뿌리(root)부터 이끝(tip)까지 전체면 가공은 전개 불가능 선직면(non-developable ruled

surface)인 워 나사면을 생성할 수 있다. 따라서 가공한 나사면은 연삭공정이 필요없는 매끈한 표면과 절삭 시간을 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 또한 플라스틱용 워를 생산하기 위한 사출성형 금형의 가공 정밀도 향상에 기여할 수 있다.

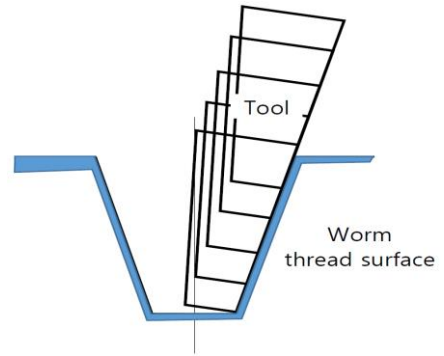


Fig. 1(a) Schematic diagram for point milling

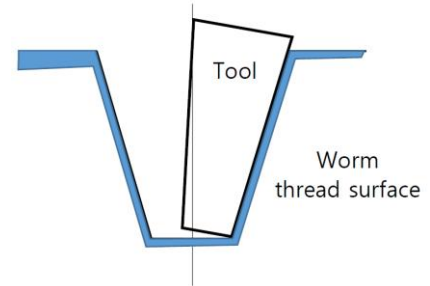


Fig. 1(b) Schematic diagram for full face milling

## 2. 수학적 모델

### 2.1 좌표계

고정된 상태에서 회전하는 워에 대하여 공구가 가공하기 위해 이동하면서 회전할 때, 워와 공구의 회전축과 회전방향 및 회전각도가 상이하기 때문에, 가공 접촉이 이루어지는 직선에서의 속도가 서로 상이하다. 따라서 접촉을 규명하기 위해서는 워와 공구를 기준으로 상대좌표계 간의 관계가 먼저 규명되어야 한다.

Fig. 2는 중심거리 C만큼 떨어진 상태에서 서로 회전하지 않는 초기 상태의 워 블랭크(blank)의 고정 좌표계  $S_{W0}(O_{W0}; X_{W0}, Y_{W0}, Z_{W0})$ 와 공구 프레임(frame)의 고정 좌표계  $S_{T0}(O_{T0}; X_{T0}, Y_{T0}, Z_{T0})$  사이의 관계를 보여주고 있다. 여기서 두 개의 좌표  $Z_{W0}$

와  $Z_{T0}$ 는 워름 블랭크와 공구대(tool post)의 축선을 따라 위치하고, 이들은 축각(shaft angle)이  $90^\circ$  인 직각이다. 두 축 사이의 가장 짧은 거리는  $O_{W0}$ 에서  $O_{T0}$ 까지의 거리이며  $|O_{W0}O_{T0}| = C$ 이다. 여기서  $C$ 는 워름의 유효 반지름(pitch circle radius)과 공구의 유효 반지름의 합이다. 즉, 중심거리이다. 또한 워름 블랭크와 공구 프레임에 고정되어 있는 상태에서 가공하면서 서로 회전하는 2개의 이동 좌표계  $S_{W1}(O_{W1}; X_{W1}, Y_{W1}, Z_{W1})$ 과  $S_{T1}(O_{T1}; X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1})$ 이 있다. 장구형 워름이 오른쪽에서 왼쪽으로 절삭되는 동안, 공구는  $Z_{T0}$ 를 중심으로 반시계 방향으로 회전하고, 워름 블랭크는  $Z_{W0}$ 를 중심으로 반시계 방향으로 회전한다. 이들의 운동학적 관계는  $m_{TW} = \omega_T / \omega_W = \varphi_T / \varphi_W = z_W / z_T$ 로 공식화할 수 있다. 여기서  $m_{TW}$ 는 기어비(gear ratio)이고,  $\omega_W$ 와  $\omega_T$ 는 워름과 공구의 각속도(angular velocity),  $\varphi_W$ 와  $\varphi_T$ 는 워름과 공구의 회전각도(rotation angle),  $z_W$ 는 워름의 줄수(number of worm thread)이고  $z_T$ 는 기어의 잇수(number of gear teeth)이다.

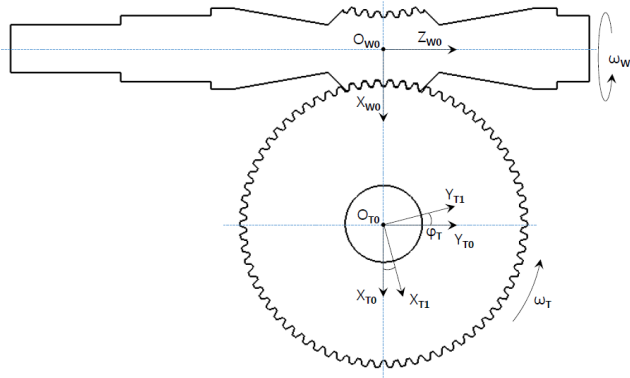


Fig. 2 Position relation among coordinate systems

### 2.2 공구의 수학적 모델

Fig. 3은 전체면 직선날을 가진 공구의 축방향 단면이다. 장구형 워름은 동일한 치형을 가진 공구에 의해서 가공된다.

여기서,  $d_w$ 는 워름의 피치원 지름,  $d_g$ 는 기어의 피치원 지름,  $\theta$ 는 공구의 테이퍼 각도(Taper angle),  $h_{amW}$ 는 워름의 어텐덤(Addendum),  $h_{fmW}$ 는 워름의 디텐덤(Dedendum), 그리고  $s_{mxW}$ 는 축방향 워름나사(worm thread)의 두께이다. 점 E는  $d_w/2$ 와  $d_g/2$ 가 만나는 지점으로 중심거리로 두 축 사이의 가장 짧은 거리이다.

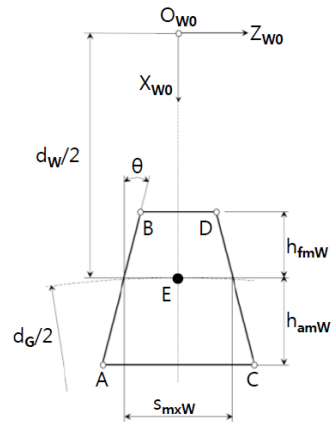


Fig. 3 Fragment of the thread profile of tool in central plane

좌표점  $A(X_{W0A}, Z_{W0A})$ 는 다음과 같은 값을 가진다.

$$\begin{aligned} X_{W0A} &= \frac{d_w}{2} + h_{amW} \\ Z_{W0A} &= -\left(\frac{s_{mxW}}{2} + h_{amW} \cdot \tan \theta\right) \end{aligned} \quad (1)$$

또한 좌표점  $B(X_{W0B}, Z_{W0B})$ 는 다음과 같은 값을 가진다.

$$\begin{aligned} X_{W0B} &= \frac{d_w}{2} - h_{fmW} \\ Z_{W0B} &= -\left(\frac{s_{mxW}}{2} + h_{fmW} \cdot \tan \theta\right) \end{aligned} \quad (2)$$

선분인 두 점 AB를 이은 직선의 방향 벡터는  $[X_{W0B} - X_{W0A}, Z_{W0B} - Z_{W0A}]$ 이다. 선분 AB에 대한 매개변수 방정식은 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} X_{W0}(u) &= X_{W0A} + (X_{W0B} - X_{W0A}) \cdot u \\ Z_{W0}(u) &= Z_{W0A} + (Z_{W0B} - Z_{W0A}) \cdot u \end{aligned} \quad (3)$$

동일하게 오른쪽 선분 CD에 대한 매개변수 방정식은 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} X_{W0}(u) &= X_{W0C} + (X_{W0D} - X_{W0C}) \cdot u \\ Z_{W0}(u) &= Z_{W0C} + (Z_{W0D} - Z_{W0C}) \cdot u \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $u$ 는 매개변수( $0 \leq u \leq 1$ ).

### 2.3 공구와 워름의 수학적 모델

공구가 워름 블랭크를 가공하기 위하여 자체 축을 중심으로 반시계 방향으로  $\theta_T$ 만큼 회전할 때,  $S_{T0}$ 에서 직선날의 궤적면 방정식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 즉,  $S_{T1}$ 에서  $S_{T0}$ 로 좌표 변환을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 X(\varphi_W) &= X_{W0} \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \sin(\varphi_W) - C \cdot \sin(\varphi_W) + \\
 &C \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \sin(\varphi_W) + Y_{W0} \cdot \cos(\varphi_W) - \\
 &Z_{W0} \cdot \sin(\varphi_W) \cdot \sin(\varphi_T) \\
 Y(\varphi_W) &= X_{W0} \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_T) - C \cdot \cos(\varphi_W) + \\
 &C \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_W) - Y_{W0} \cdot \sin(\varphi_W) - \\
 &Z_{W0} \cdot \sin(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_W) \\
 Z(\varphi_W) &= C \cdot \sin(\varphi_T) + X_{W0} \cdot \sin(\varphi_T) + Z_{W0} \cdot \\
 &\cos(\varphi_T) \tag{5}
 \end{aligned}$$

### 2.4 장구형 워의 수학적 모델

S<sub>T0</sub>에서 S<sub>W0</sub>로 좌표 변환을 통하여 워나사 면 S<sub>W0</sub>는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X(\varphi_W, u) &= X_{W0}(u) \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \sin(\varphi_W) - C \cdot \\
 &\sin(\varphi_W) + C \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \sin(\varphi_W) + \\
 &Y_{W0}(u) \cdot \cos(\varphi_W) - Z_{W0}(u) \cdot \sin(\varphi_W) \cdot \\
 &\sin(\varphi_T) \\
 Y(\varphi_W, u) &= X_{W0}(u) \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_T) - C \cdot \\
 &\cos(\varphi_W) + C \cdot \cos(\varphi_T) \cdot \cos(\varphi_W) - \\
 &Y_{W0}(u) \cdot \sin(\varphi_W) - Z_{W0}(u) \cdot \sin(\varphi_T) \cdot \\
 &\cos(\varphi_W) \\
 Z(\varphi_W, u) &= C \cdot \sin(\varphi_T) + X_{W0}(u) \cdot \sin(\varphi_T) + Z_{W0}(u) \cdot \\
 &\cos(\varphi_T) \tag{6}
 \end{aligned}$$

## 3. 장구형 워 모델링

### 3.1 워나사 매개변수

Table 1은 장구형 워의 블랭크를 설계할 때 주요 설계 매개변수 목록으로 λ는 워의 중간 평면 (최소 직경의 단면)에서의 워의 리이드 각도이며, 워 축을 따라 변화한다. 그리고 E<sub>n</sub>은 워와 기어가 서로 맞물리는 물림잇수 이다.

Table 1 Parameter of the enveloping worm blank

Items	Parameters	Values
Number of thread of the worm	Z <sub>w</sub>	1
Lead angle of the worm	λ	4.14°
Normal pressure angle	α <sub>n</sub>	20°
Engaging number	E <sub>n</sub>	5
Pitch circle radius of the worm	r <sub>1</sub>	15.7
Gear ratio	m <sub>TW</sub>	60:1
Cross angle of the worm gear set	γ	90°

Center distance	C	120mm
Base circle diameter	Db	71.8mm

Table 2는 전체면 접촉 공법에 의한 워의 치면 설계할 때 주요 공구 매개변수 목록으로 L<sub>1</sub>은 공구 밑바닥부터 공구척에 물리는 길이, L<sub>2</sub>는 공구 밑바닥부터 유효한 공구의 절삭날의 길이, D<sub>1</sub>은 공구 코너 반지름이 시작되는 부분까지의 바닥 지름, 코너 반지름이 없는 경우는 공구 바닥 지름과 동일, R<sub>c</sub>는 공구 바닥 코너 반지름, θ는 공구 테이퍼 각도 이다.

Table 2 Parameter of the tool

Items	Parameters	Values
Hanged length	L <sub>1</sub>	70mm
Cut length	L <sub>2</sub>	5.6mm
Cut bottom diameter	D <sub>1</sub>	0.58mm
Edge radius	R <sub>c</sub>	0.1mm
One side taper angle	θ	20°

### 3.2 워나사 컴퓨터 그래픽

장구형 워에 대한 수학적 모델을 적용하여 파라미터 입력 방식의 프로그램을 실행하여 블랭크 및 치형을 Fig. 4와 Fig. 5에서 가시화 하였다.

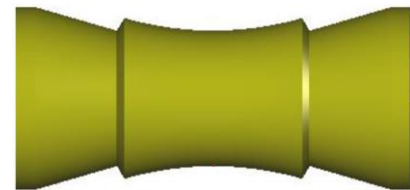


Fig. 4 3D visualization of worm blank

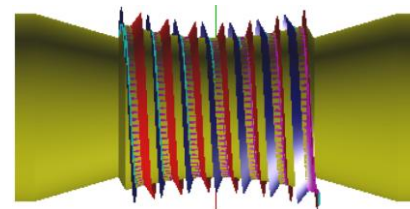


Fig. 5 3D visualization of worm thread

파라미터 입력 방식의 프로그램을 실행하여 엑셀 데이터를 생성한 후 CATIA에서 전체면 접촉 공법에 의한 사다리꼴 형태의 워나사 치형을 작도하였다. 즉, Fig. 6에서 2개의 straight line을 연결한 후 2개의

guide curve를 따라 sweep를 실행하면 직선 사다리꼴 형태의 웜나사 치형이 Fig. 7과 같이 생성된다.

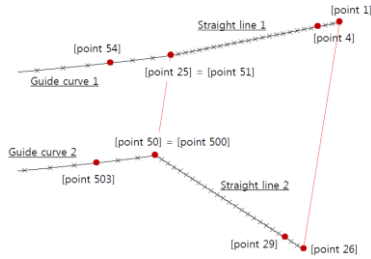


Fig. 6 modelling principle of worm thread

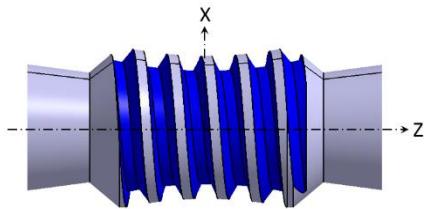


Fig. 7 3D modelling of worm thread

#### 4. 장구형 치형 가공

전체면 접촉 방식의 장구형 웜 치형을 가공하기 위하여 Fig. 8과 같이 동시 5축 턴-밀 장비를 이용하였고 웜의 블랭크는 연속 이동하는 Z축과 일치하는 C축에 설치하여 가공하였다. 정삭 공정에서 B축에 장착되어 있는 공구 스핀들의 회전수는 11,000rpm으로 고정하였다.

가공하는 웜의 재질은 합금강이고, 조질 열처리한 심부 경도는 HRC 34 이다. 또한 가공하는 공작물(작업좌표계)의 원점을 설정하기 위하여 800rpm으로 회전하는 슈퍼 센터를 사용하여 공작물의 원점을 셋팅하였다.

웜의 치면 가공은 1회에 오른쪽 치면과 왼쪽 치면을 동시에 가공되는 것이 아니고, 먼저 오른쪽 치면을 다음과 같은 순서로 가공을 진행한다. 구축인 B축 각도는 90°의 수직이 아닌 좌우로 기울어진각도의 스왑(swarf)이고, 이송량이 2,000mm/min, 절입량이 0.00mm의 일정한 값으로 고정된 상태에서 유연하고 연속적인 치면을 가공하기 위하여 C축이 미세하게 회전을 진행하면 B축에 장착된 엔드밀 공구가 Z축의 입구측에서 출구측으로 1회 가공을 진행하면 오른쪽 치면이 완성된다. 그리고 왼쪽 치면은 오른쪽 치면의 가공과 동일한 순서로 진행하면 Fig. 7과 같

은 모델의 가공품이 만들어진다.



Fig. 8 Simultaneous 5-axis Turn-Mill machine

Table 3은 엔드밀로 전체면 접촉 방식의 웜 치면을 모델링한 치형을 정삭 작업하는 파라메타와 값들을 표시하였다. 절삭조건에 해당되는 이송(Feed), 날수(Number of flute)의 파라메타 값들은 시행착오를 통하여 얻어진 값들이고, 톨패스 값들은 CAM에서의 불연속적인 톨패스 또는 단방향 톨패스에 대하여 매크로 편집을 통하여 커스터마이징한 값들이다. Fig. 9는 가공에 사용된 엔드밀 형상을 보여주고 있다.

Table 3 Milling condition of the end mill

Items	Parameters	Values
Feed	F	2,000(mm/min.)
Depth of cut	H	0.00mm
Cutting direction	DC	Down-cut
Taper end mill diameter	FD	Ø3.0mm
Number of flute	FN	2개
No. of toolpath(RH)_FD	TPN1	5,024



Fig. 9 End mill shape (a) Taper (b) Corner R

#### 5. 실험 결과 및 고찰

3D 모델링과 가공품에 대한 유효성을 검증하기 위하여 3차원 형상 측정 장비(CMM)를 활용하여 Fig. 7 모델링에 대하여 전체면 접촉(테이퍼)과 코너 레디우스 엔드밀로 가공한 가공품을 상대 비교를 위해



측정포인트를 지정하여 워나사 치형의 형상 정밀도를 측정하였다.

여기서 장구형 워나사 가공품의 측정 지점은 Fig. 10과 같이 워나사의 앞면인 ZY(+) 방향에서 12개 지점과 뒷면의 ZY(-) 방향에서 12개 지점을 지정하였다. 엔드밀 공구에 따른 치형 정밀도의 범위는 3D 모델링의  $X_{li}, Y_{li}, Z_{li}$  좌표를 기준점으로 하고, 3차원 측 정기로 모델링과 동일한 지점을 측정한  $X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i}$ 의 좌표와의 편차( $\mu\text{m}$ )를 측정하였다.

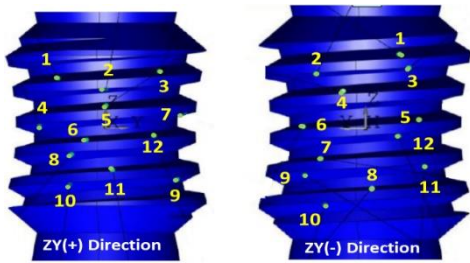


Fig. 10 Tooth flank measuring point

Fig. 11과 Fig. 12에서 각각 장구형 워 치형에 대하여 테이퍼, 코너 레디우스 형상의 엔드밀 공구로 가공된 워나사의 앞면과 뒷면의 총24개 지점에 대한 가공 정밀도 편차를 그래프로 나타내었다.

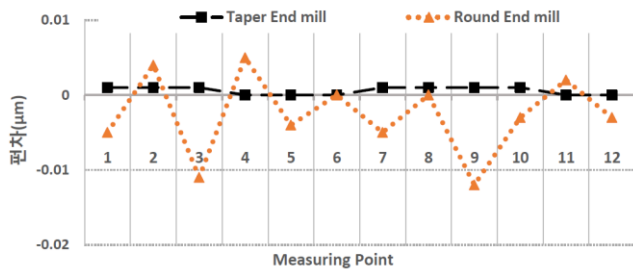


Fig. 11 Tooth flank precision in ZY(+) direction

Fig. 11의 앞면의 경우 테이퍼 엔드밀의 최대 편차는 #1, 2, 3, 7~10 지점이고, 최소 편차는 #4~6, #11~12 지점으로 최대 편차는 + 편차의 미절삭이 발생하였다. 코너 레디우스 엔드밀의 최대 편차는 #3 지점으로 - 편차로 인한 과절삭과 최소 편차는 #6, 8 지점에서 0으로 편차는 발생하지 않아 코너 레디우스 엔드밀의 경우 과절삭만 발생하였다

Fig. 12의 뒷면의 경우 테이퍼 엔드밀의 최대 편차는 #2~3, 5~7, 9~10, 12 지점이고, 최소 편차는 #1, 4, 8,

11 지점으로 최대 편차는 + 편차의 미절삭이 발생하였다. 코너 레디우스 엔드밀의 최대 편차는 #1, 4 지점으로 과절삭과 최소 편차는 #9지점에서 미절삭이 발생하였다.

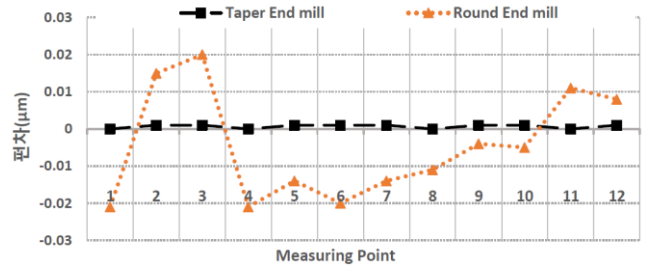


Fig. 12 Tooth flank precision in ZY(-) direction

Fig. 11과 12에서 테이퍼 엔드밀은 앞면과 뒤면 모두 과절삭이 나타나지 않은 이유는 장구형 워 치형의 나선형 곡면을 1회 가공하기 때문이고, 코너 레디우스 엔드밀은 과절삭과 미절삭이 동시에 나타나는 이유는 나선형 곡면을 여러 번 가공하기 위해 공구 접촉점을 연결하는 가공 경로를 따라 가공이 진행될 때 발생한 것으로 보여진다. 이것은 절삭공구 경로에서 곡선가공의 경우 공구 접촉점과 공구 접촉점을 연결하는 경로를 공구가 직선으로 이동함에 따라 발생하는 오차로 인한 것으로 보이며, 또한 경로간 간격 0.07mm가 주어지기 때문에 미절삭의 편차가 존재하는 것을 나타내고 있다.

Table 4에서 공구형상별 측정된 결과의 평균치로서 테이퍼 엔드밀의 경우는 모델링 형상과 가공품과의 치수 편차가 ‘0’을 나타내고 있지만, 코너 레디우스 엔드밀의 경우는 치수 편차가 ‘-’을 나타내고 있다. 이것은 테이퍼(전체면 접촉) 엔드밀로 1회 가공하는 것이 정밀하게 가공된 것을 보여주고 있다.

Table 4 Average deviation of measuring point

	ZY(+)	ZY(-)
Taper End mill	0.000	0.000
Corner Radius End mill	-0.003	-0.005

Table 5에서는 장구형 워나사 제품의 표면 거칠기를 측정한 결과를 보여주고 있다. CAM에서 치면을 완전하게 가공하기 위한 가공 횟수를 검토하면, 테이퍼 엔드밀은 1회, 코너 레디우스 엔드밀은 74회가 확인됨에 따라 가공 횟수가 적은 테이퍼 엔드밀의

표면조도가 가장 우수한 것으로 나타내었다. 또한 가공 횟수가 작음에 따라 가공 소요시간은 짧게 나타내고 있다.

**Table 5 Surface roughness and Machining time**

	Roughness, Rmax( $\mu\text{m}$ )	Time(min.)
Taper	1.017	1.5
Corner Radius	1.131	74

## 6. 결 론

본 연구에서는 전체면 접촉(테이퍼) 방식의 장구형 워름 나사 가공을 위해 2종류의 엔드밀 형상에 따른 치형 정밀도, 치형 조도 및 가공시간에 대한 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체면 접촉 방식의 공구를 이용하여 사다리꼴형상의 장구형 워름 치면을 효율적으로 가공할 수 있었다.

(2) 테이퍼 엔드밀은 장구형 워름 나사 가공에 우수한 정밀도와 낮은 치수 편차를 나타냈다.

(3) 테이퍼 엔드밀은 치면 조도가 우수하고 가공시간이 짧았다.

(4) 테이퍼 및 코너 레디우스 엔드밀은 장구형 워름의 표면 거칠기  $R_{\text{max}} = 1.6\mu\text{m}$  이하 값을 얻을 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 정부(산업통상자원부·중소벤처기업부) World Class 300 R&D 프로젝트 기술개발지원사업 지원을 받아 수행된 연구임(S2428843).

## REFERENCES

[1] Joe J. Liou & Stefan Rakuff, Feb. 2018, The Development of Worm Drives, Power Transmission Engineering, pp. 38~43.

- [2] S.H. Kim, 2018, Worm Gear Efficiency Model Considering Misalignment in Electric Power Steering Systems, Mech. Sci., No. 9, pp. 201~210.
- [3] Buckingham, E., 1988, Analytical Mechanics of Gears, 3rd ed., Dover Publications. INC, New York, pp. 276~300.
- [4] Crosher, W.P., 2002, Design and Application of the Worm Gear, 1st ed., ASME Press, New York, pp. 47~61.
- [5] Litvin, F.L., C.-L. Hsiao, 1993, Computerized Simulation of Meshing and Contact of Enveloping Gear Tooth Surfaces, Comput. Methods Appl. Mech. Engr., Vol. 102, pp. 337~366.
- [6] Litvin, F.L., 2004, Gear Geometry and Applied Theory, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 614~626.
- [7] K. Ishida, H. Ueda, S. Ohashi, Y. Fukui, 1978, Theoretical and Experimental Investigation of a New Plane Toothed Wheel and Its Enveloping Hourglass Worm, J.Mech.Des., Vol. 100, pp. 460~469
- [8] K.Y. Chen, C.B. Tsay, 2009, Mathematical Model and Worm Wheel Tooth Working Surfaces of the ZN-type Hourglass Worm Gear Set, Mech. Mach. Theory, Vol. 44, no. 9, pp. 1701~1712.
- [9] L. Zhong, Q. Bi, Y. Wang, H. Ding, 2011, Five-axis Flank Milling Method of Plane Double Enveloping Hourglass Worm, Advanced Mater. Research, Vol. 314-316, pp. 1523~1532
- [10] L. Dong, J. Wang, P. Liu, W. Wei, H. Li, 2012, An NC Rough Turning Method of an Enveloping Toroidal Worm, Prod. Eng. Res. Devel., Vol. 6, pp. 129~135.
- [11] Y. H. Kim, S. J. Kang, 2019, Analysis of Tooth Profile Accuracy of Enveloping Worm Thread Depending on End Mill Tool Shape, Trans. Mater. Process., Vol. 28, No. 4, pp. 183~189.
- [12] M. Sobolak, P. Polowniak, 2015, Mathematical Model of Globoid Worm for use of Generating CAD Model, DOI:10.17814/mechanic.2015.2.53