[논문] 한국소성가공학회지, 제 28 권 제 4 호, 2019
Transactions of Materials Processing, Vol.28, No.4, 2019
https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.4.183

장구형 웜 나사의 절삭 엔드밀 공구 형상에 따른 치형 정밀도 분석

강신준[1] · 김용환[#]

Analysis of Tooth Profile Accuracy of Enveloping Worm Thread Depending on End Mill Tool Shape

S. J. Kang, Y. H. Kim

(Received January 24, 2019 / Revised May 31, 2019 / Accepted June 11, 2019)

Abstract

Cylindrical worm reducers are generally used in various fields and forms throughout the industry, and demand is increasing due to their role as an integral part of the industry. Market trends require high-load, high-precision components, and small-sized reducers with large loads. When using a cylindrical worm reducer, a reducer designed with a reduced center distance while maintaining the same output torque results in gear wear. To overcome this difficulty, an enveloping worm gear reducer is introduced and studied. In this paper, three types of end mill tools are used to evaluate the tooth profile accuracy for each tool shape during machining of the tooth profile for a non-developed surface worm thread. The effect of the endmill shape on the accuracy of the tooth profile was analyzed by performing 3D modeling of the surrounding worm tooth profile based on the Hindley method. In this study, we analyzed tooth profile accuracy, tooth surface roughness, and tooth surface machining time, etc. Through the study, efficient machining conditions for the enveloping worm gears and the influence of parameters on the process were presented.

Key Words : Enveloping Worm, Cylindrical Worm, Ruled Surface (Non-Developed Surface), End Mill, Tooth Profile, Spindle Speed, Feed, Cutting Depth

1. 서 론

기계공업을 고도화, 다기능화, 정밀화하는데 있어서 중요한 기계요소의 하나인 기어는 효율적인 동력전달 부품의 기계요소로서 거의 모든 기계에 사용되고 그 수요가 매우 다양하고 응용 범위가 높다. 그 중에서도 웜기어는 한 번의 감속으로 높은 감속비를 얻을 수 있고 큰 동력을 전달할 수 있으며, 소음이 적기 때문에 여러 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 따라서 웜기어에 대한 수요는 더 한층 늘어날 것으로 전망되고 있다[1, 2].

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

웜기어의 종류에는 원통형 웜과 장구형 웜으로 분류되는데, 원통형 웜기어는 구동 웜과 종동 기어가 접촉하는 것으로 기어 치의 1~2개 정도만이 웜과 맞물리지만 장구형 웜기어는 기어비에 따라 일반적으로 3개 이상 맞물린다. 웜과 맞물리는 기어 치가 증가하고 각 기어 치의 맞물림 면적이 증가하면서 동력 전달 토크 용량을 크게 증가시키고 충격부하 저항을 증가 시킨다. 또한 원통형 웜기어는 각각의 기어 치형이 맞물림 하면서 회전하면 웜 나사의 미끄럼 방향과 거의 일치하는 접촉선은 1개이지만 장구형 웜기어는 웜 나사의 미끄럼 운동에 대략적으로 직각을 이루는 2개이상의 접촉선으로 구성되어 있다[3, 4].

장구형 웜은 접촉선이 2개이면서 웜과 기어가 3개 이상 맞물리는 치형으로 웜의 치면 형상이 복잡하고 치형 정밀도가 중요하다. 따라서 절삭방법과 절삭공구 종류에 따라 치형의 형상정밀도, 표면조도 등에 미치는 영향에 대한 조사 분석이 요구된다.

웜 치면의 표면 거칠기는 중심선 평균 거칠기(Ra) 기준으로 0.4 ㎛ 또는 최대 높이 거칠기(Rmax) 기준으로 1.6 ㎛ 이하로 관리해야 하는 것이 표준화 되어 있다[5]. 또한 필요에 따라 연삭 또는 폴리싱 등의 후가공 공정이 필요할 수 있다.

원통형 웜의 가공 방식은 나사 전조가공에 의한 성형가공 방식이 있지만 보편화, 표준화되어 생산성이 우수한 밀링 커터 방식을 선호한다. 장구형 웜은 복잡한 치형 형상을 가지고 있기 때문에 밀링 커터 방식이 활용되지 못하고 있으며, 엔드밀 공구를 이용하여 웜 치형을 가공하고 있는 실정이다[6].

최근 우수한 절삭가공기계의 보급과 치형 모델링 기술의 발전으로 복잡한 형상의 절삭가공이 가능하고, 적절한 회전수와 이송속도는 공구수명, 가공면의 정도, 가공능률의 향상뿐만 아니라 우수한 가공성능을 발휘할 수 있다.

장구형 웜은 2개의 접촉선과 웜과 기어가 3개 이상 맞물리는 매우 복잡한 웜 치 형상으로 치 간격을 정밀하게 가공해야 한다. 이에 5축 턴-밀을 이용한 다축 가공에서는 절삭공구의 형상에 따라 공작물의 윤곽가공에 많은 영향을 미치기 때문에 엔드밀의 형상에 따른 가공정밀도에 미치는 영향을 조사/분석에 대한 연구가 요구된다[7].

따라서 본 논문에서는 복잡한 형상인 Hindley 방식의 장구형 웜 치형 설계와 설계된 치형의 모델링을 구현하고, 밀링 커터를 대신한 엔드밀 공구를 사용하여 절삭공구의 형상에 따른 웜 치형의 가공정밀도에 대한 영향을 조사 분석하였다.

2. 장구형 웜 모델링

2.1 장구형 웜 치형 생성

Hindley 방식의 장구형 웜 서피스(치면) Σ_1은 직선 절삭날을 가진 절삭 공구에 의해서 생성된다(Fig. 1) [8, 9]. 공구 각속도 $\Omega^{(b)} = d\Psi_b/dt$로 축 O_b을 중심으로 회전 운동을 하고, 장구형 웜 각속도 $\Omega^{(1)} = d\Psi_1/dt$로 축을 중심으로 회전하며, Ψ_b 및 Ψ_1는 생성 과정에서 공구 및 장구형 웜의 회전 각도이다(Fig. 2). 공구의 회전축과 장구형 웜 사이의 최단 거리는 E_c이다. 웜 치면 생성 과정에서 공구 절삭날의 직선들은 반지름 R_0의 원에 대한 접선 방향을 유지한다. Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 회전 방향은 오른쪽 장구형 웜 치면 생성의 경우에 해당한다[9].

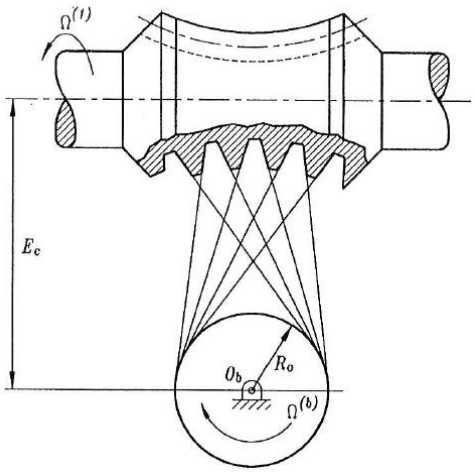

Fig. 1 Worm generation

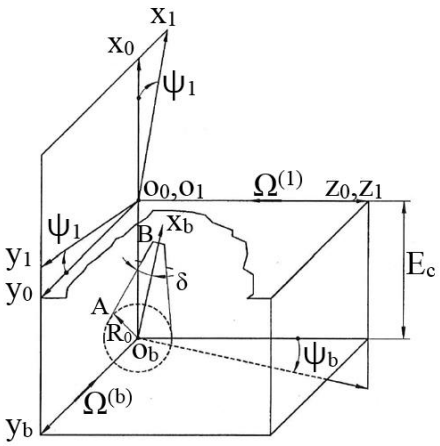

Fig. 2 Coordinate systems applied for worm generation

2.2 웜 치면 방정식

웜 치면을 유도하기 위해 3가지 좌표계를 설정한다. $S_1(x_1,y_1,z_1)$은 강체로 웜에, 그리고 $S_b(x_b,y_b,z_b)$는 강체로 공구에 연결되어 있다. 또한 고정 좌표계 $S_0(x_0,y_0,z_0)$는 강체로 웜 감속기(하우징)에 연결되어 있다. 웜 치면을 생성하는 절삭날의 직선 AB는 식 (1) 과 같이 공구의 S_b 좌표계로 표현된다(Fig. 3)[9].

$$x_b = u*\cos(\delta)+R_0*\sin(\delta),\ y_b = 0,\ z_b = u*\sin(\delta)-R_0*\cos(\delta) \quad (1)$$

여기서 치높이를 결정하는 매개 변수 u와 절삭날의 각도 δ은 직선 공구날의 현재 위치를 결정한다[9].

$$\delta = \arcsin(R_0/R)-s_p/(2*R) \quad (2)$$

여기서 u 범위는 웜의 골경에서 외경까지이고, R은 공구 절삭날의 두께가 주어지는 기준원의 반경이다.

웜 치면은 직선 계열로 생성되며 평면상에 전개 불가능 선직면(non-developed ruled surface)이다. 식 (1)을 사용하여 웜 치면 방정식을 유도하고 S_b에서 S_1으로의 좌표 변환을 도출하면 식 (3)을 얻는다[9].

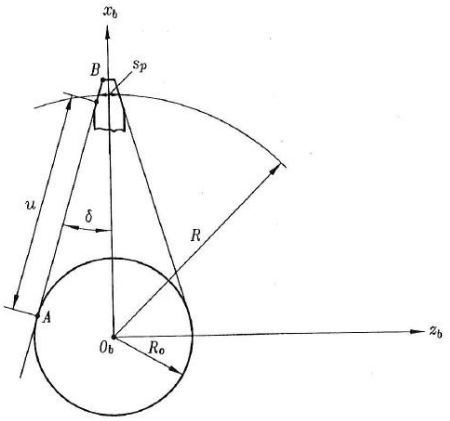

Fig. 3 Blade representation

$$x_1 = \cos(\Psi_1)*[u*\cos(\delta+\Psi_b)+R_0*\sin(\delta+\Psi_b)-E_c]$$
$$y_1 = \sin(\Psi_1)*[u*\cos(\delta+\Psi_b)+R_0*\sin(\delta+\Psi_b)-E_c] \quad (3)$$
$$z_1 = u*\sin(\delta+\Psi_b)-R_0*\cos(\delta+\Psi_b)-E_c]$$

여기서 $\Psi_b = \Psi_1*m_{b1} = \Psi_1*\Omega^{(b)}/\Omega^{(1)}$ 이다.

Σ_1에서의 장구형 웜 치면을 표현하기 위해서는 2개의 매개 변수 u, Ψ_1이 존재하며 이 2개의 변수와 식(3)을 이용하면 Σ_1에서의 접촉점을 계산할 수 있고, 일련의 접촉점들을 연결하면 장구형 웜의 다중 치면을 생성할 수 있다[9].

2.3 장구형 웜 치형 모델링

Table 1은 장구형 웜의 주요 설계 매개 변수 목록이다. λ는 웜의 중간 평면 (최소 직경의 단면)에서의 웜의 리이드 각도이며, 웜 축을 따라 변화한다. 장구형 웜 곡면 지점의 좌표는 수학적 모델을 적용하여 CATIA를 활용한 장구형 웜의 3차원 치형을 Fig. 4와 같이 그려진다.

Table 1 Major parameter of the enveloping worm

Items	Parameters	Values
Number of thread of the worm	N_w	1
Lead angle of the worm	λ	4.14°
Pitch circle radius of the worm	r_1	22.5
Gear ratio	m_G	60:1
Cross angle of the worm gear set	γ	90°
Center distance	E_c	120 mm
Base circle diameter	D_b	71.8mm

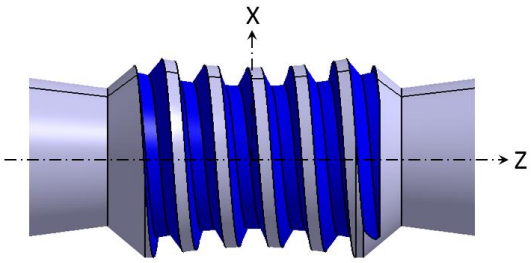

Fig. 4 3D modeling of enveloping worm

3. 장구형 치형 가공

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

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

공구축인 B축 각도가 90°, 이송량이 2,000 mm/min, 절입량이 0.07 mm의 일정한 값으로 고정된 상태에서 유연하고 연속적인 치면을 가공하기 위하여 C축이 미세하게 회전을 진행하면 B축에 장착된 엔드밀 공구가 Z축의 입구측에서 출구측으로 가공을 진행한다. 이러한 과정을 동일한 절입량으로 골밑까지 수 회 진행하면 오른쪽 치면이 완성된다. 그리고 왼쪽 치면은 오른쪽 치면의 가공과 동일한 순서로 진

행하면 Fig. 4와 같은 모델의 가공품이 만들어진다.

Table 2는 엔드밀로 Hindley 방식의 웜 치면을 모델링한 치형을 정삭 작업하는 파라메타와 값들을 표시하였다. 절삭조건에 해당되는 이송(Feed), 절입량(Cut of depth)의 파라메타 값들은 시행착오를 통하여 얻어진 값들이고, 툴패스 값들은 CAM에서의 불연속적인 툴패스 또는 단방향 툴패스에 대하여 매크로 편집을 통하여 커스터마이징한 값들이다. Fig. 6은 가공에 사용된 3종류의 엔드밀 형상을 보여주고 있다.

Fig. 5 Simultaneous 5-axis Turn-Mill machine

Table 2 Milling condition of the end mill

Items	Parameters	Values
Feed	F	2,000 mm/min
Depth of cut	H	0.07 mm
Cutting direction	DC	Down-cut
Flat end mill diameter	FD	Ø 3.0 mm
Corner rad. end mill dia.	CD	Ø 3.0 mm* R0.3
Ball end mill diameter	BD	R1.5 mm
Number of flute	FN	2개
No. of toolpath(RH)_FD	TPN1	77,701
No. of toolpath(RH)_CD	TPN2	82,671
No. of toolpath(RH)_BD	TPN3	75,468

Fig. 6 End mill shape (a) Flat, (b) Corner R, and (c) Ball

3.1 평 엔드밀 가공

공구 끝 형상은 Fig. 6의 (a)와 같은 평면 모양으로 드릴의 원추형 선단부가 없는 형상과 같다. 그리고 하단 절삭날(flute)의 모서리 반지름 R이 0이다. 원추형 선단부를 사용하는 드릴과 달리 측면과 하단 절삭날을 사용하여 회전 및 전진하면서 수평 방향으로 절삭하는 공구이다.

평평한 면과 거친 면의 절삭에 적합하지만 완만한 곡면이나 유연한 곡면을 가공할 수 없다. 1회 많은 양을 절삭할 수 있는 장점으로 황삭가공에 적합하다. 그러나 절삭 흔적이 계단처럼 되기 때문에 가공품 공차를 일정하게 유지할 수 없는 단점이 있다.

따라서 평면을 가공하는 경우에는 경로간 간격(step over)이 공구 지름의 절반 이하인 경우에는 미절삭이 존재하지 않지만, 경사면을 가공하는 경우에는 Fig. 7의 ①부분과 같은 미절삭이 존재한다.

Fig. 7의 공구 위치점(CL-Point)은 공구 접촉점(CC-Point)에서 수평방향으로 동일 직선상에 위치한다.

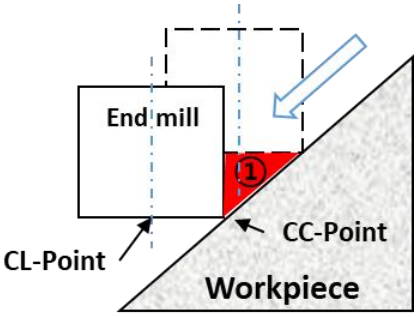

Fig. 7 Flat end mill process

3.2 코너 레디우스 엔드밀 가공

공구 끝 형상은 Fig. 6의 (b)와 같은 평면이면서 모서리는 둥근 모양이다. 그리고 하단 절삭날(flute)의 모서리 반지름 R은 공구 반지름보다 작다. 즉 측면과 하단의 절삭날, 그리고 모서리 반지름 R의 절삭날을 사용하여 절삭하는 공구이다.

공구 형상은 평 엔드밀과 볼 엔드밀의 두 가지 기능을 모두 갖춘 공구이나 유연하게 곡면을 재현하는 것은 하단 절삭날의 모서리 반지름 R로 인하여 절삭이 불가능한 경우가 있다. 1회 절삭 량은 평 엔드밀처럼 크며, 절삭 저항은 모서리 반지름 R의 절삭날에 의해서 평 엔드밀보다 작다. 정삭가공 전에 황삭과 중삭 절삭가공에 적합하다.

따라서 평면을 가공하는 경우 경로간 간격이 공

구지름과 같아도 미절삭 부분이 존재하며, 경사면인 경우에는 모서리 반지름 R과 R 사이에 Fig. 8의 ② 부분과 같은 미절삭이 존재한다.

Fig. 8과 같이 공구 위치점은 공구 접촉점의 모서리 R에 의해 경로 위치는 동일하지 않다.

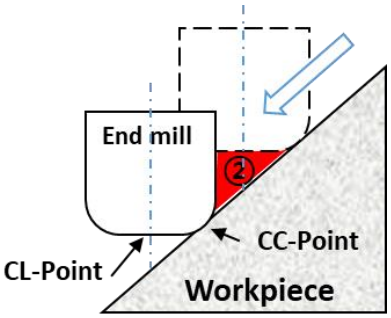

Fig. 8 Corner R end mill process

3.2 볼 엔드밀 가공

공구 끝 형상은 Fig. 6의 (c)와 같은 둥근 모양이다. 하단 절삭날(flute)의 모서리 반지름 R은 공구 반지름과 같다. 즉 둥근 모양의 절삭날을 사용하여 절삭하는 공구이다.

둥근 절삭날의 모든 점들이 마치 곡면 상에서 볼을 굴리는 것처럼 접촉하기 때문에 곡면을 부드럽게 재현 할 수 있다. 따라서 정삭 절삭공정에 적합하다. 1회 절삭 양은 크지 않지만 절삭날의 저항은 작기 때문에 절삭가공이 어려운 단단한 소재의 절삭과 정밀제품의 중간 가공공정에 적합하다.

따라서 평면과 경사면을 가공하는 경우에는 경로간 간격에서 R과 R 사이에 Fig. 9의 ③부분과 같은 미절삭이 존재한다. Fig. 9와 같이 공구 위치점은 공구 접촉점의 반지름 R에 의해서 경로 위치는 동일하지 않고 아래에 위치한다.

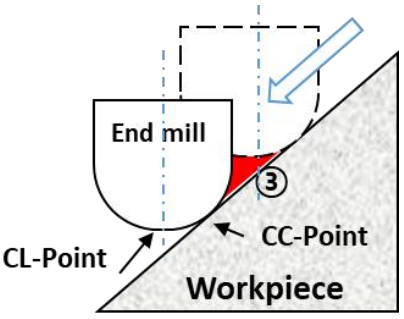

Fig. 9 Ball end mill process

4. 실험 결과 및 고찰

3D 모델링과 가공품에 대한 유효성을 검증하기 위하여 3차원 형상 측정 장비(CMM)를 활용하여 가공품을 측정하였다. 일반적으로 기어의 치형을 측정하는 경우에는 기어 측정용 전용 소프트웨어를 사용하여 피치, 유효지름, 바깥지름, 기어 높이 등을 측정하지만, 장구형 웜은 기어의 치형이 표준화되어 있지 않기 때문에 전용 소프트웨어를 사용할 수 없다. 따라서 Fig 10과 같이 3D 모델링과 가공품의 상대 비교를 위해 측정포인트를 지정하여 웜나사 치형의 형상 정밀도를 측정하였다.

여기서 장구형 웜나사 가공품의 측정 지점은 Fig. 10과 같이 웜나사의 앞면인 ZY(+) 방향에서 12개 지점과 뒷면의 ZY(-) 방향에서 12개 지점을 지정하였다. 엔드밀 공구에 따른 치형 정밀도의 범위는 3D 모델링의 X_{1i},Y_{1i},Z_{1i} 좌표를 기준점으로 하고, 3차원 측 정기로 모델링과 동일한 지점을 측정한 X_{2i},Y_{2i},Z_{2i}의 좌표와의 편차(㎛)를 측정하였다.

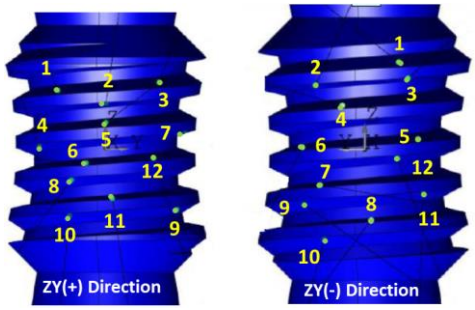

Fig. 10 Tooth flank measuring point

Fig. 11과 Fig. 12에서 각각 Hindley 방식의 장구형 웜 치형에 대하여 평, 코너 레디우스 및 볼 형상의 엔드밀 공구로 가공된 웜나사의 앞면과 뒷면의 총 24개 지점에 대한 가공 정밀도 편차를 그래프로 나타내었다.

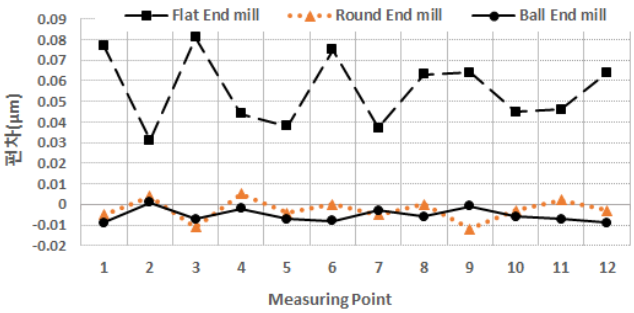

Fig. 11 Tooth flank precision in ZY(+) direction

Fig. 11의 앞면의 경우 평 엔드밀의 최대 편차는 #3 지점이고, 최소 편차는 #2 지점으로 모두 + 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. 볼 엔드밀의 최대 편차는 #1, 12 지점으로 – 편차로 인한 과절삭과 최소 편차는 #2 지점에서 미절삭과 #9 지점에서의 과절삭이 발생하여 볼 엔드밀의 경우 미절삭과 과절삭이 모두 발생하였다.

Fig. 12의 뒷면의 경우 평 엔드밀의 최대 편차는 #10 지점이고, 최소 편차는 #3 지점으로 모두 미절삭이 발생하였다. 코너 레디우스 엔드밀의 최대 편차는 #1, 4 지점으로 과절삭과 최소 편차는 #9지점에서 미절삭이 발생하였다. 볼 엔드밀의 최대 편차는 #6 지점에서 과절삭과 최소 편차는 #9 지점에서 미절삭이 발생하였다.

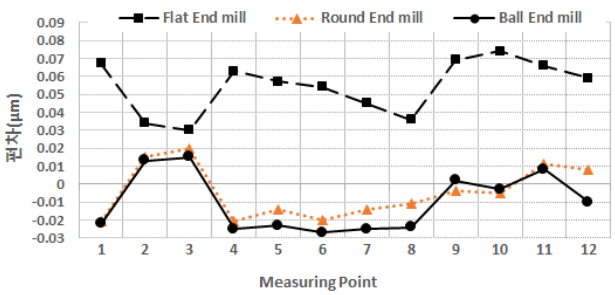

Fig. 12 Tooth flank precision in ZY(-) direction

Fig. 11과 12에서 평 엔드밀은 앞면과 뒤면 모두 미절삭을 나타내고, 코너 레디우스와 볼 엔드밀은 과절삭과 미절삭을 동시에 나타내고 있다. 이러한 가공 흔적의 차이는 장구형 웜 치형의 나선형 곡면을 가공하는 절삭공구가 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 발생되는 오차로 인한 것으로 보이며, 본 가공공차에서는 접촉점을 잇는 직선과 모델링 곡면과의 편차를 0.01 mm으로 설정하였다. 또한 경로간 간격 0.07 mm가 주어지기 때문에 미절삭의 편차가 존재하며, 평 엔드밀의 경우 미절삭 구간이 가장 높게 나타났다.

Table 3에서 공구형상별 측정된 결과의 평균치로서 코너 레디우스 엔드밀의 경우가 제일 작은 평균편차를 나타내고 있다. 이것은 편차의 최대·최고가 작은 것으로 모델링형상과 가공품과의 치수가 정밀하게 가공된 것을 보여주고 있다.

Table 3 Average deviation of measuring point

	ZY(+)	ZY(-)
Flat End mill	0.055	0.055
Corner Radius End mill	-0.003	-0.005
Ball End mill	-0.005	-0.010

Table 4에서는 장구형 웜나사 제품의 표면 거칠기를 측정한 결과를 보여주고 있다. CAM에서 1회를 가공하는 공구 접촉점간 거리(Cutting moves linear length)를 측정하면, 평 엔드밀은 912.72 mm, 코너 레디우스 엔드밀은 905.91 mm, 볼 엔드밀은 878.66 mm의 직선길이로 측정됨에 따라 공구 접촉점간 거리가 작은 볼 엔드밀 경우 표면조도가 가장 우수한 것으로 나타내었다. 또한 접촉점의 길이가 작음에 따라 가공 소요시간은 길게 나타내고 있다.

Table 4 Surface roughness and Machining time

	Roughness, Rmax(㎛)	Time(min.)
Flat	4.217	71
Corner Radius	1.131	74
Ball	0.443	80

5. 결 론

본 연구에서는 Hindley 방식의 장구형 웜 나사 가공을 위해 3종류의 엔드밀 형상에 따른 치형 정밀도, 치형 조도 및 가공시간에 대한 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 장구형 웜 나사 가공에서 절삭공구에 따른 가공 정밀도는 코너 레디우스 엔드밀이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

(2) 웜나사 치형의 정밀도는 코너 레디우스 엔드밀을 사용할 경우 모델링치수와 장구형 웜나사 가공품과의 편차가 가장 작은 것을 확인하였다.

(3) 치면의 조도는 볼 엔드밀의 경우가 우수하고, 가공시간은 평 엔드밀을 사용할 경우가 가장 짧은 것으로 나타내었다.

(4) 코너 레디우스 엔드밀은 장구형 웜이 필요로 하는 표면 거칠기 Rmax 기준으로 1.6 ㎛ 이하의 가공 데이터를 나타내었다.

(5) 코너 레디우스 엔드밀의 1 cycle에 대한 툴 패스 가공 시간은 볼 엔드밀에 비해 약 8 % 정도 빠른 것을 확인할 수 있었다.

향후 코너 레디우스 엔드밀로 가공한 장구형 웜에 대한 치형의 접촉면과 피치오차 등을 평가하기 위해 장구형 웜 감속기에 대한 기어 피팅시험을 실시함으로써 산업현장의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

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, February 2018, The Development of Worm Drives, Power Transmission Engineering, pp. 38~43.

[2] M.Turci, June 2016, Worm Gear Efficiency Estimation and Optimization, Gear Technology, pp. 46~52.

[3] F.L.Litvin, C.-L. Hsiao, 1993, Computerized Simulation of Meshing and Contact of Enveloping Gear Tooth Surfaces, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 102, No. 3, pp. 337~366.

[4] W.P.Crosher, 2002, Design and Application of the Worm Gear, 1st ed., ASME Press, New York, pp. 47~61.

[5] ANSI/AGMA 6022-C93, 1993, Design Manual for Cylindrical Wormgearing, p.24.

[6] Yonghong Chen, Yan Chen, Wenjun Luo, Guanghui Zhang, 2015, Development and Classification of Worm Drive, The 14th IFToMM World Congress.

[7] Hankook Delcam Ltd, 2010, CAM using PowerMILL.

[8] Earle Buckingham, 1988, Analytical Mechanics of Gears, McGraw-Hill, New York, pp.276~300.

[9] F.L.Litvin, A.Fuentes, 2004, Gear Geometry and Applied Theory, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 614-621.