

Planetary Milling 과 Side Milling 에 의한 Worm 가공 특성 비교

이민환#, 권태웅*, 강동배*, 김화영**, 안중환***

Machinability Comparison of Planetary Milling and Side Milling for Worm Machining

Min Hwan Lee#, Tae Woong Kwon*, Dong Bae Kang*, Hwa Young Kim** and Jung Hwan Ahn***

ABSTRACT

According to global trend of the expanding need of high-quality automobiles, the usage of small precise worm consisting of gearing part for motors to actuate convenience modules has increased rapidly. Precision of those worms has very sensitive characteristic to motor performance and noise. Forming process has been generally used to manufacture worms because of its mass productivity. However, it has problems such as deformation due to residual stress and wear of dies. Planetary milling and side milling are among alternatives using cutting tools. To overcome those problems the two machining methods have some contrast features in the sense of tool numbers and cutting mechanism. In this paper, machinability of both methods was compared in terms of cutting force, precision and cycle time.

Key Words: Worm (웜), Planetary Milling (플래네터리 밀링), Side Milling (사이드 밀링), Auto-CNC Lathe (CNC 자동선반), Cutting Force (절삭력), Motor Current (모터 전류)

1. 서론

세계적인 자동차의 고급화 추세에 따라 각종 편의장치 및 안전장치 구동을 위한 기어 장착 모터의 수요가 급증하고 있다.¹ 자동차용 기어 장착 모터는 저가격, 소형화, 저소음, 고감속비 등이 요구되는데 이를 충족시키기 위한 감속기로 웜(Worm)과 웜휠(Worm wheel) 구조가 널리 사용되고 있다.

웜은 일종의 나사모양의 기어로서 웜휠과 수직

하게 물려 회전하기 때문에 작은 공간 내에 1 단 감속으로도 고감속비를 구현할 수 있고, 다른 기어구조에 비해 상대적으로 작은 소음을 가지는 장점이 있지만 웜과 웜휠의 가공 정도에 그 성능이 크게 좌우된다. Fig. 1 은 자동차용 DC 모터 중 웜과 웜휠 구조를 이용한 한 예로서 EAP (Electric Adjusting Pedal) 구동용 모터의 구조를 간략히 나타낸 그림이다. 회전자(Armature)의 회전 토크는 웜을 통해 웜휠과 너트(Nut)에 전달되고 최종적으로 리이드스크류(Leadscrew)의 직선운동으로 전환

접수일: 2006 년 7 월 10 일; 게재승인일: 2006 년 8 월 25 일

교신저자, 대우정밀 기술연구소

E-mail : mhwlee@dpi.daewoo.co.kr, Tel.(051) 509-2091

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 부산대학교 기계공학부

되어 페달의 높낮이를 조정할 수 있는 구조를 설명하고 있다.

현재 국내 업계에서는 자동차용 소형 워름은 주로 전조(Thread forming)로 가공되고 있다. 전조가공은 전조다이스를 이용하여 소재를 소성가공하는 가공법으로서 가공시간이 짧고 가공비가 저렴하지만, 잔류응력에 의한 후변형과 다이스의 마모를 초래하므로 절삭가공에 비하여 형상 정밀도가 떨어지는 단점이 있다.¹

전조가공에 비해 플레네터리 밀링(Planetary milling)과 사이드 밀링(Side milling)은 공구 홀더의 내륜 및 외륜에 바이트를 다수 장착한 밀링형태의 공구를 사용하여 나사를 고속 절삭하는 방법으로 워름의 형상 정밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 자동 CNC 선반으로 워름 제작에 필요한 모든 공정을 집적시킬 수 있기 때문에 가공 효율성이 크게 높아진다.

유럽 및 북미지역의 선진 업체들은 주로 플레네터리 밀링을 이용한 전용기로 고정밀 워름을 생산하고 있다. 특히 자동차용 기어 장착 모터가 고속화 될수록 고정밀 워름의 성능은 진가를 발휘하고 있다. 비록 전조가공이 대량생산에 적합한 방법이라 해도 정밀도 향상이라는 부분에 대해서는 소성가공에서 오는 제약을 피할 수 없고 공정 집적화를 통한 생산성 개선에도 한계가 있기 때문에 향후 국내 업체들의 부품 경쟁력 확보를 위해 새로운 가공법으로의 전환이 필요한 시점이다.

본 논문에서는 사이드 밀링과 플레네터리 밀링에 의한 워름 절삭 가공의 특성을 비교하고자 한다.

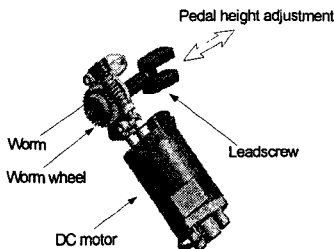
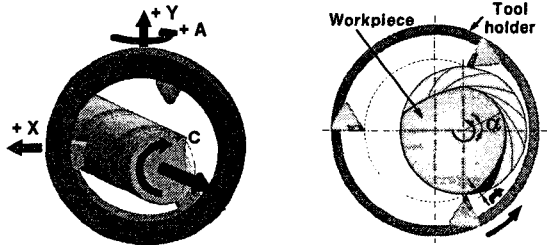


Fig. 1 Structure of a worm geared DC motor for pedal adjustment

2. Planetary milling 과 Side milling 에 의한 Worm 가공 메커니즘

2.1 Planetary milling

Fig. 2 는 플레네터리 밀링의 가공 원리를 나타내는 개략도이다. 플레네터리 밀링을 이용한 방법은 공작물 중심축으로부터 편심되어 있는 공구홀더의 내륜에 공구가 배치되어, 저속회전하는 공작물에 대해 공구홀더가 고속회전 할 때 공구가 공작물을 감싸안은 방향으로 가공이 이루어진다. 특징은 Cusp 의 높이가 작고 칩(Chip)의 길이가 길어지기 때문에 표면정도 향상과 절삭력 감소의 효과가 있다.² 그러나 상대적으로 공구홀더의 크기가 커지고 내륜에 장착되는 공구 개수가 제한될 수밖에 없기 때문에 공구 날당 절삭량이 많아지고, 따라서 공구회전 속도를 높이 올리기 어렵다. 그리고, 상대적으로 큰 홀더 및 절삭반경으로 인해 모듈이 작은 나사 및 나선각(helix angle)이 큰 나사가공시에는 간섭에 의한 제약이 큰 편이다.



(a) Three dimensional view (b) Chip generation mechanism

Fig. 2 Mechanism of planetary milling

2.2 Side milling

Fig. 3 은 사이드 밀링의 가공 원리를 나타내는 개략도이다. 사이드 밀링은 저속 회전하는 공작물에 대해 외륜에 여러 날을 가진 공구홀더가 고속으로 회전할 때 바깥방향으로 절삭이 이루어진다. 상대적으로 작은 홀더반경에 많은 바이트를 장착할 수 있기 때문에 절삭부하를 더 많은 바이트에 분담시킬 수 있다. 따라서, 공구수명에 유리하고 회전속도도 높일 수 있는 장점이 있다. 또한, 홀더 크기가 작고 공구와 공작물의 접촉 길이가 짧아지므로 플레네터리 밀링보다 간섭 문제를 상대적으로 작게 받는다. 그러나, 전자의 방법보다 Cusp 의 높이가 크고 칩의 길이가 짧기 때문에 같은 절삭

조건에서는 표면거칠기가 나빠지게 된다.² 따라서 사이드 밀링에서는 공구 회전수 및 공구수를 늘릴 필요가 있다.

Fig. 4 는 본 연구에서 사용된 플래네터리 밀링 커터와 사이드 밀링 커터의 사진이다.

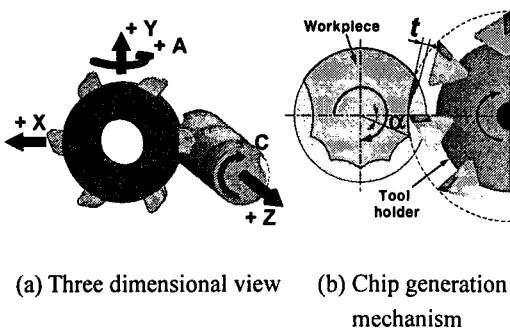
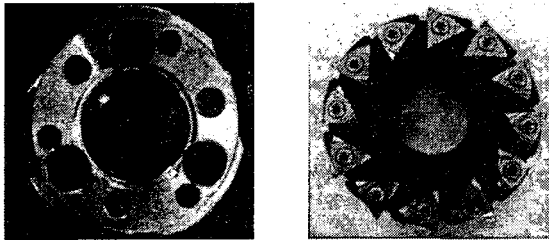


Fig. 3 Mechanism of side milling



(a) Planetary milling cutter (b) Side milling cutter

Fig. 4 Cutter for planetary milling and side milling

3. 전류이용 절삭력 측정

절삭력은 가공물의 질, 공작기계의 제어 성능, 공구파손 등 가공성능을 나타내는 가장 중요한 지표로 볼 수 있다. 대표적 연구로, Stein 등은 교류 서보 모터로부터 절삭력 유도과정을 고찰하고 절삭력을 추정하였고,^{3,4} Liu 등은 3 상의 유도모터 전류로서 드릴 공정 중 공구 파손을 검출하였다.⁵

3.1 실험장치

본 연구에서는 실제 워밍 가공용 선반에 공구동력계의 장착이 불가능하여 절삭력 대체신호로서 모터의 전류신호를 채용하였다. 모터의 전류신호는 서보드라이버의 전류신호를 통하여 검출하였다.

Table 1 Experimental condition for plane machining

Feed rate (mm/min)	Cutting depth (mm)	Side milling cutter speed (RPM)
254	2.25	780,1000,1300,1500
380		

Table 2 Cutter parameter for plane machining

Diameter (mm)	Side angle of bite (mm)	No. of bite	Nose radius (mm)
80	20°	12	0.4

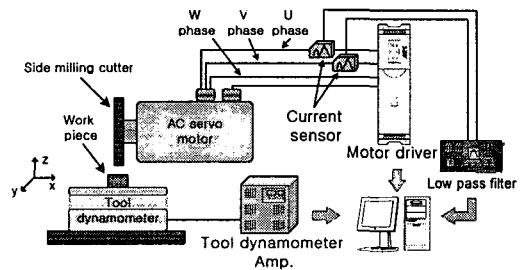


Fig. 5 Schematic diagram of plane machining

전류신호의 신뢰성을 평가하기 위하여 사이드 밀링으로 평판 가공 실험을 하였다. 평판가공실험 장치도를 Fig. 5 에 나타낸다. 실험은 모터 회전수와 공작물 이송속도를 바꾸면서 전류값과 절삭력을 측정하였다. 실험에 사용된 모터는 Mitsubishi 사의 RFS-153 이며, 서보 드라이버는 Mitsubishi 사의 MR-J2S-A 이다. 공작물의 밑부분에 Kistler 사의 9272A 공구동력계를 장착하여 절삭력을 측정하여 서보 드라이버의 전류신호와 비교하였다. 가공조건은 Table 1 에 나타내었다. 실험에 사용된 공작물은 패삭강인 SUM24L 이며, 워밍 가공을 위해 특수 제작된 초경 바이트를 사이드 밀링 커터에 장착하여 사용하였다. Table 2 는 사이드 밀링 커터의 공구형상에 대한 인자들을 나타낸 것이다. 직경은 바이트 끝의 직경을 나타내고 Side angle 은 바이트 절삭날의 측면각 즉 나사면의 압력각(Pressure angle)을 나타낸다. 그리고 장착된 바이트 수와 바이트 끝의 노우즈 반경을 같이 표시하였다.

3.2 전류와 절삭력의 신호특성

Fig. 6 은 공구 동력계에서 검출한 배분력(Z 축)

과 이송분력(Y 축)의 RMS 합력과 서보 드라이버의 전류값을 이용하여 절삭력으로 환산한 그래프를 나타낸다.

전류신호는 변화 형태가 공구 동력계 신호와 비슷하지만 진폭이 작고 약 0.013 초 정도 시간지연을 보인다. 이러한 진폭 감소와 시간 지연은 주축에 걸린 절삭력 변화를 검출해서 전류를 보상하는 서보 드라이버의 내부적 특성에 의한 것으로 평균값(RMS)과 변화 주기가 유사하므로 절삭력 크기를 추정하는 데는 문제가 없다.

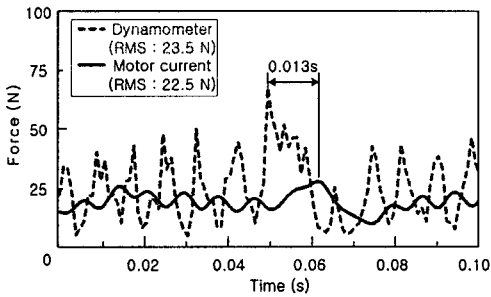


Fig. 6 Comparison of cutting forces between tool dynamometer and motor current in plane machining

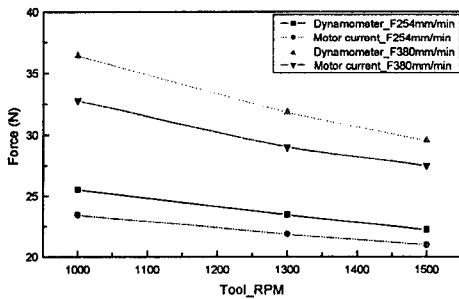


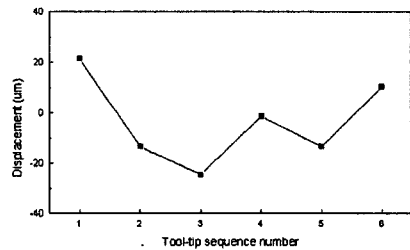
Fig. 7 Comparison of average cutting forces between tool dynamometer and motor current in plane machining

Fig. 7 은 이송 속도를 바꾸었을 때 회전수 별로 절삭력과 전류를 각각 측정한 데이터를 평균적으로 나타낸 것이다. 데이터의 절대값에 있어서는 전류값이 절삭력의 약 0.9 배의 크기를 보이고 절삭력의 감소 형태도 거의 유사하게 전류값이 절삭력을 추종함을 알 수 있다.

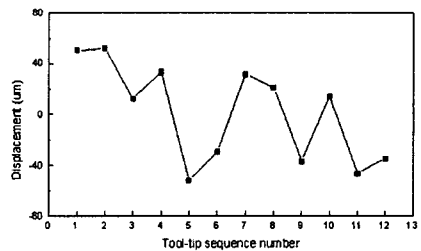
4. WORM 가공 실험

4.1 공구 Run-out 측정

웜 가공 실험에 앞서 가공에 사용될 커터의 런아웃을 측정하였다. 커터에 장착된 바이트 수는 플레네터리 밀링 커터는 6 개, 사이드 밀링 커터는 12 개이다. Fig. 8 은 런아웃 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과로부터 플레네터리 밀링 커터는 약 50 μ m, 사이드 밀링 커터는 약 110 μ m로서 사이드 밀링 커터가 두 배 이상 런아웃(Run-out)이 큰 것으로 측정되었다. 이것은 사이드 밀링 커터의 경우 공구수가 많고 커터의 직경이 크기 때문에 바이트의 장착 조건이 같다고 하면 사이드 밀링 커터가 불리할 수 밖에 없다. 따라서, 향후 런아웃을 줄이기 위한 커터 기구에 대한 연구가 필요하다.



(a) Planetary milling cutter



(b) Side milling cutter

Fig. 8 Tool tip run-out of planetary milling cutter and side milling cutter

4.2 모터 전류 측정과 토크 변환

플레네터리 밀링과 사이드 밀링의 실험은 CNC 자동선반에서 행하였다. 실험에 사용된 CNC 자동선반은 플레네터리 밀링은 한화 SL-20H Plus 이고 사이드 밀링은 한화 STL-32H 이다. 웜 가공

실험은 공구의 회전속도와 이송속도(Feed rate)를 바꾸며 실험 하였고 가공조건과 커터 형상의 인자들은 Table 3 과 Table 4 에 각각 나타내었다. 가공조건은 장비와 공구가 감당할 수 있는 범위 내에서 이전의 실험 결과들을 바탕으로 의미 있는 것으로 판단되는 조건들을 선정하였다. 커터 형상은 양산용 부품 가공을 목적으로 제작된 바이트와 홀더에 장착했을 때의 인자 값들을 나타낸다.

Table 3 Experimental conditions for worm machining

Feed rate (mm/min)	Cutting depth (mm)	Tool speed (RPM)	
		Planetary milling	Side milling
200	3.5	750,1000,1250,	1000,1500,2000,
400			
600			
800			

Table 4 Cutter parameter for worm machining

	Diameter (mm)	Side angle of bite (deg.)	No. of bite	Nose radius (mm)
Planetary milling	15	20°	6	0.4
Side milling	80	20°	12	0.4

모터 전류는 각각의 실험에 사용된 장비의 서보 모터 드라이버의 종류가 서로 달라 전류 프루브(Current Probe)를 이용하여 직접 측정하였다. 사용된 전류 프루브는 Tektronix A622 이다.

측정된 모터 전류는 식(1)에서 등가적류전류(I_e)와 토크상수(K_t)에 의해 토크로 환산될 수 있다.^{6,7}

$$T_m(t) = K_t \cdot I_e(t) \quad (1)$$

등가의 적류 전류로서 3 상 모터 전류의 실효값 (root mean square)을 사용하였다.

$$I_e(t) = I_{rms}(t) = \sqrt{\frac{I_u^2(t) + I_v^2(t) + I_w^2(t)}{3}} \quad (2)$$

모터의 토크상수(K_t)는 사용한 모터의 사양서에서 제공하는 토크상수 값을 사용하였다. 플래네터리 밀링 가공에 사용된 모터의 토크상수는 0.39

Nm/A 이고, 사이드 밀링 가공에 사용된 모터의 토크상수는 0.57 Nm/A 이다.

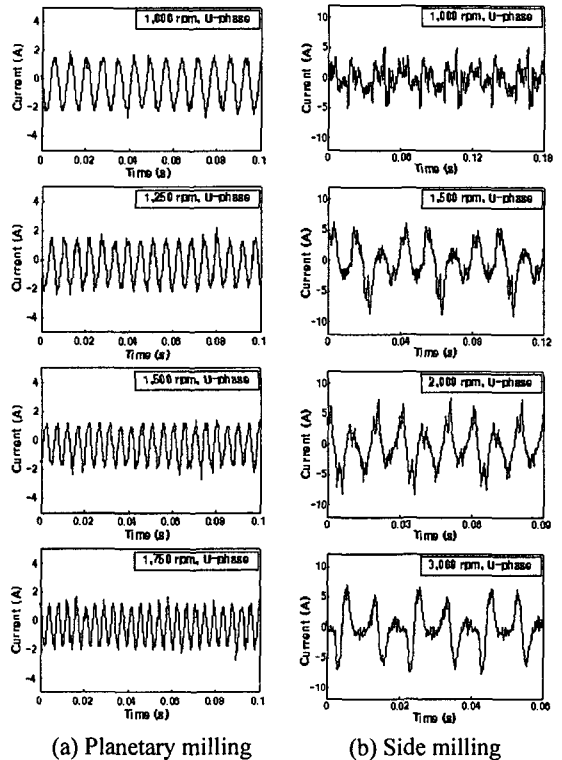


Fig. 9 Current signal of planetary milling and side milling at feed rate 600 mm/min

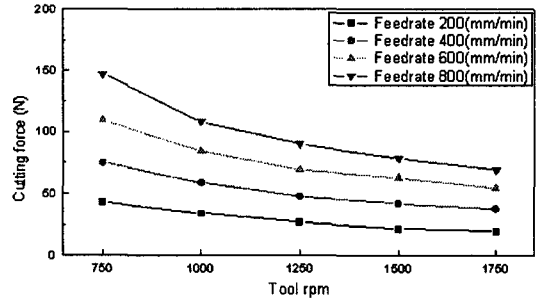
Fig. 9는 이송속도 600 mm/min에서의 플래네터리 밀링과 사이드 밀링의 전류신호를 나타낸다. 플래네터리 밀링에서는 회전속도 변화에 따른 모터 전류 변화의 크기가 그렇게 크지 않고 모터 1회전당 3개의 파형을 갖는 정현파의 주기만 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 런아웃에 의한 전류 변화도 거의 나타나지 않았다. 이것은 부족한 절삭력을 보완하기 위해 2.7:1의 감속이 일어나는 플래네터리 밀링의 구조에 의해 모터에 인가되는 부하의 변화폭이 크지 않기 때문이다. 그와는 달리 사이드 밀링의 경우 툴 홀더의 부하가 그대로 모터에 전달되기 때문에 측정된 전류의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 툴 홀더의 런아웃의 영향이 모터의 전류신호에 그대로 반영되고 있다. 즉, 1000~2000 RPM까지의 그래프에

서는 Fig. 8의 런아웃 측정 데이터상에 나타난 3개의 큰 피크치에 해당하는 3개의 전류 피크치가 주기적으로 나타나고 있다. 3000 RPM에서는 공구회전 속도가 빨라짐으로써 상대적으로 작은 런아웃 피크 중 하나가 인접한 큰 피크가 가공될 때 가공이 이루어지지 않기 때문에 2개의 전류 피크만 주기적으로 반복되고 있다.

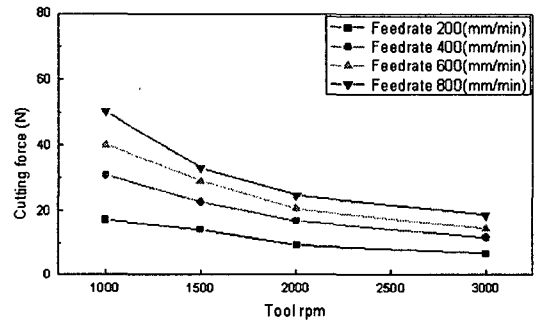
모터 전류신호를 감속비와 식(1)에 의해 바이트에 걸리는 힘으로 환산하여 회전속도에 따라 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 실험 결과에서 두 가지 가공법 모두 회전속도가 증가함에 따라 절삭력이 감소하고 있음을 볼 수 있다.

플래네터리 밀링은 회전수에 따른 절삭력의 변화가 급격하게 나타난다. 이것은 실험에 사용된 자동선반에서 플래네터리 밀링이 모터로 직접 구동되는 것이 아니라 기어에 의해 2.7 대 1로 감속이 되어서 구동되기 때문에 공구의 회전수 변화는 적지만 실제 구동되는 모터의 회전수는 2.7 배나 크게 변하게 되고 절삭력의 변화 또한 크게 나타나기 때문이다. 플래네터리 밀링에서 감속이 이루어지는 이유는 홀더의 크기 제한에 따른 바이트 수의 제한 때문이다. 플래네터리 밀링 공구는 상대적으로 홀더자체가 크기 때문에 자동선반에 장착되기 위해서는 그 크기가 제한 될 수 밖에 없고 적은 수의 바이트를 가지고 주어진 가공이 이루어지면 날당 절삭력이 커지고 그에 따라 마모량이 커질 수 밖에 없으므로 그 만큼의 구동토크 증가 및 공구 회전속도의 저하가 필요하기 때문이다.

사이드 밀링은 감속 없이 모터의 회전속도 및 토크가 그대로 공구회전으로 전달되기 때문에 공구의 회전속도를 다양하게 가져갈 수 있다. 따라서, 공구의 선속도를 증가시켜 절삭력을 떨어뜨릴 수 있는 장점이 있다. 그러나 바이트가 견딜 수 있는 한계 선속도를 넘어서면 공구마모가 급격히 진행될 수 있으므로 공구의 회전속도에 대한 충분한 검토가 필요하다. Fig. 10의 그래프에서는 플래네터리 밀링에서보다 절삭력이 작게 걸리고 공구회전 속도에 따른 절삭력의 감소폭도 작은 것을 확인할 수 있다. 같은 공구 회전수에서의 절삭력을 비교해 보면 플래네터리 밀링이 사이드 밀링에 비해 약 2배의 절삭력이 공구에 작용하는 것을 알 수 있다. 따라서 공구의 선속도 허용 범위 내에서의 공구마모는 사이드 밀링이 더 우수한 가공법이라 할 수 있다.



(a) Planetary milling



(b) Side milling

Fig. 10 Comparison of cutting force between planetary milling and side milling

5. 품질 및 가공시간 비교

5.1 나사등급

Fig. 11은 워의 형상 정밀도를 평가하기 위한 측정부위를 나타낸다.⁸⁻⁹ 치형오차(Profile error)는 기어 치(齒)의 기준 압력각(α)에 대한 나사면 기울기의 정밀도를 나타내는데, 워휠과의 맞물림 시험의 전달효율과 기어의 마모에 영향을 줄 수 있는 인자이다. 피치오차(Pitch error)는 나사산 각각의 피치들에 대한 산포를 나타내는 것으로 나사산들간의 간격이 얼마나 균일하게 가공되어 있는지 판단할 수 있다. 작을수록 기어 구동 시 기어 치들간의 충돌에 의한 소음이 작아진다. 누적리드오차(Cumulative lead error)는 나사면의 전 측정구간에 대해 누적 피치 혹은 리드의 이론값과의 차이인데, 이 값은 워의 전체적인 정밀도를 판단할 수 있는 인자이다. 이 값이 크면 워의 회전 주기

에 따라 웜헬과의 주기적인 충격과 흔들림이 크게 발생하게 되는데 기어의 효율뿐만 아니라 소음과 내구성에도 큰 영향을 줄 수 있다.

Table 5 는 나사 평가 척도를 이용해서 두가지 밀링 가공법과 전조 가공법으로 생산한 나사를 평가한 것이다. 전조가공, 플레네터리 밀링, 사이드 밀링의 가공 정밀도를 각각 비교해 보면 치형오차와 표면거칠기는 전조가공이 우수하고, 누적리드오차와 피치오차는 두 가지 밀링 가공법이 더 높은 정밀도를 나타내고 있다. 전조가공에서 치형오차와 나사면의 표면거칠기가 더 우수한 이유는 다이스를 이용한 소성가공의 특성으로 판단할 수 있다. 모터의 진동과 소음에는 전조가공에 의한 웜이 절삭가공에 의한 것보다 불리한데 이는 모터 소음 및 진동에 큰 영향을 주는 인자가 리드 및 피치오차에 대한 형상 정밀도이기 때문이다.¹ 치형(Profile)과 표면거칠기가 영향을 주는 부분은 큰 하중이 걸릴 때의 기어효율과 내구성으로 보다 큰 토크와 빠른 회전수를 가지는 모터는 영향을 받을 수 있다. 따라서, 두 밀링 가공법 모두 개선이 필요한 부분으로 이는 양산화를 통해 바이트 형상 및 절삭조건을 최적화하면 어느 정도 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

플레네터리 밀링과 사이드 밀링의 정밀도를 비교해보면 누적리드오차, 피치오차와 표면거칠기는 비슷하고, 치형오차는 사이드 밀링이 더 우수한 결과를 보인다. 치형오차가 플레네터리 밀링에서 더 크게 나타나는 이유는 플레네터리 밀링의 경우 공구와 공작물 사이의 공구 접점이 공작물 좌표의 원점과 동일한 축에 있지 않기 때문에 일어나는 형상오차에 의한 것이다. 즉 플레네터리 밀링은 형상오차를 줄이기 위해 공구형상에 대해 보정이 필요하지만 사이드 밀링의 경우는 공구축과 공작물 축을 일치시켜 가공하기 때문에 공구보정이 필요 없고 그에 따라 치형오차가 줄어드는 결과를 얻었다.

표면거칠기는 사이드 밀링의 공구 선속도가 크고 바이트 수가 많기 때문에 플레네터리 밀링보다는 좋아질 것으로 판단되지만, 공구의 런아웃의 영향을 많이 받기 때문에 실제 측정된 값은 그 차이가 크지 않다. 공구의 런아웃을 줄이면 두 방법 모두 표면거칠기를 향상시킬 수 있을 것으로 생각되고 특히 사이드 밀링이 플레네터리 밀링보다는 더 개선되는 폭이 클 것으로 사료된다.

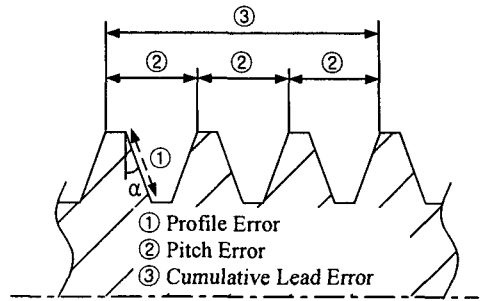


Fig. 11 Measurement position of worm thread

Table 5 Threading time and quality for the three methods

	Forming	Planetary milling	Side milling
Profile Error (μm)	13.1	22.1	15.7
Cumulative Lead Error (μm)	24.7	8.6	7.5
Pitch Error (μm)	13.6	4	3.2
Thread Surface ($R_{\text{max}}-\mu\text{m}$)	0.644	6.34	5.887
Threading Time (sec)	10	36	28
Tool Speed (RPM)	-	1900	1800

5.2 나사가공시간

전조가공이 대략 10 초 정도에 나사가공이 이루어지는 것에 비하면 플레네터리 밀링은 약 36 초, 사이드 밀링은 약 28 초로서 생산성이 떨어지지만 CNC 자동선반으로의 집적이 이루어지는 것을 감안하면 전체 공정에 대한 생산성은 전조에 비해 향상될 수 있다. 실제 공정을 비교한 결과 전조의 경우 완전한 제품의 웜 가공에 17 개 공정을 통해 약 150 초, CNC 자동선반을 이용한 단일 공정의 플레네터리 밀링은 약 100 초의 시간이 소요되었고 사이드 밀링 은 약 90 초 내외에서 가공이 완료되었다. 따라서, 자동차용 부품과 같이 대량생산과 소음 및 진동에 민감한 부품들은 공정 집적과 고정도 가공이 가능한 플레네터리 밀링이나 사이드 밀링이 더 적합하다고 할 수 있다.

특히, 사이드 밀링이 표면거칠기, 치형오차 및

가공시간에서 플레네터리 밀링보다 더 좋은 성능을 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 공구홀더의 크기가 작기 때문에 큰 각도의 나선각(Helix angle)을 갖는 웜이나 큰 직경의 나사가공에 유리하고 좁은 공간에 설치가 쉬워 자동화 및 공정을 집적하기가 쉬운 장점이 있다.

6. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 웜의 정밀도는 전조보다 밀링에 의한 것이 훨씬 우수하였다.
2. 플레네터리 밀링보다 사이드 밀링이 많은 공구 수와 공구의 빠른 회전속도로 인해 절삭력이 감소하였다.
3. 플레네터리 밀링과 사이드 밀링에 의한 웜의 정밀도는 비슷하나 가공시간은 사이드 밀링이 짧았다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Lee, M. H., Kang, D. B., Kim, H. Y. and Ahn, J. H., "Development of worm machining method to improve noise and vibration of automotive DC motor," Proc. of the KSPE Spring Annual Meetings, pp. 777-780, 2004.
2. Wehmann, R., "The Whirling Process for Improved Worm Gears," Gear Solutions Magazine, pp. 48-53, 2003.
3. Stein, J. L. and Wang, C. H., "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 112, pp. 239-248, 1990.
4. Stein, J. L. and Shin, K. C., "Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drives," ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 108, pp. 289-295, 1986.
5. Liu, H. S., Lee, B. Y. and Tang, Y. S., "Monitoring of Drill Fracture from the Current Measurement of a Three-Phase Induction Motor," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 36, No. 6, pp. 729-738, 1996.
6. Kim, G. D., Kwon, W. T. and Chu, C. N., "Indirect Cutting Force Measurement and Cutting Force Regulation Using Spindle Motor Current," Journal of the KSPE, Vol. 14, No. 10, pp. 15-27, 1997.
7. Altintas, Y., "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
8. Worm software operating manual, ver. 2.0, Klingelnberg, 2000.
9. Germany standard, "Concepts and parameters associated with cylindrical gears and cylindrical gear pairs with involute teeth," DIN3960, 1980.