

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XII

턴밀에서 트로코이드 치형 가공특성 평가에 관한 연구

Study on the Evaluation of Machining Characteristics of Trochoidal Profile by Turn-Mill

이춘만^{1,✉}, 안종욱¹
Choon-Man Lee^{1,✉} and Jong Wook Ahn¹

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-6322

Manuscript received: 2016.1.5. / Revised: 2016.1.25. / Accepted: 2015.1.26.

Various processes have been developed to improve the performance of the lubrication oil pump in a recent automobile industry. In particular, trochoidal profile has been widely used for the lubrication oil pump because it is easy to flow control and a lot of oil feed rate is obtained. Accuracy of the trochoidal profile as a core component of the lubricating oil pump affects the driving performance. So, it is necessary to develop efficient processing of the trochoidal profile. In this study, a machining process for the trochoidal profile is developed by turn-mill. Cutting force, surface roughness and tool wear were evaluated in accordance with machining conditions.

KEYWORDS: Trochoidal profile (트로코이드 치형), Turn-Mill (턴밀), Lubrication oil pump (윤활유 펌프), Machining characteristics (가공 특성)

1. 서론

최근 자동차산업 분야에서는 친환경성, 생산성 향상, 주행성능 개선 등의 목표로 다양한 기술개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다.¹ 특히, 차량 주행 성능에 직접적인 영향을 미치는 변속기의 역할이 높아지고 있다.

변속기는 엔진의 속도를 변화시키는 장치이다. 변속기의 기능 및 수명 향상을 위해 내부마찰을 막는 윤활 공급 장치는 필수적이다. 자동차 출력 동력의 약 30%가 윤활 공급 장치에 사용되기 때문에 변속기의 성능 개선을 위해 윤활 공급 장치의 성능향상 또한 필수적이다.

윤활유 공급 장치로써 트로코이드 치형(Trochoidal profile)을 적용한 트로코이드 로터 펌프가 많이 적용되고 있다.

트로코이드 로터 펌프는 구조가 간단하고 같은 크기의 윤활유 공급 장치에 비해 1회전당 송출 유량이 많고, 정량적인 유량제어가 용이하여 자동차 변속기 분야에 많이 쓰여지고 있다.²⁻⁸ 트로코이드 로터 펌프의 핵심부품인 트로코이드 치형의 정밀도는 변속기의 성능을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 경량화 요구에 따라 더욱 가볍고 강도가 높은 소재를 적용한 트로코이드 치형을 가공하기 위해 다양한 연구 및 공정개발이 진행되고 있다.

국내에서는 Jeong 등이 트로코이드 치형을 적용

한 윤활유공급장치의 최적 설계 방법을 제시하고 유동해석을 수행하였으며,⁹ Cho 등은 트로코이드 치형의 단조해석을 통해 공정 최적조건 및 치형에 대한 하중을 연구하였다.¹⁰ 국외에서는 Yasuyoshi 등이 트로코이드 치형을 적용한 윤활펌프 개발에 관해 연구를 수행하였으며,¹¹ Gamez-Montero 등은 트로코이드 치형을 적용한 윤활유 펌프에서 기어 최적 접촉에 관한 연구를 수행하였다.¹²

본 연구에서는 윤활유 공급장치의 핵심부품인 트로코이드 치형을 가공하기 위해서 턴-밀(Turn-mill) 공정을 개발하였다. 또한, 선정된 가공조건을 바탕으로 실험을 수행하여 가공특성을 분석하였다.

2. 트로코이드 곡선

2.1 트로코이드 곡선의 정의

트로코이드 곡선은 직선을 따라 회전하는 원의 접촉점의 자취로 그려지는 곡선이다. 트로코이드 곡선은 원운동에 따라 여러 가지 곡선 형태로 나눌 수 있다. 원이 직선이 아닌 더 큰 원의 내부를 따라 회전하여 그리는 곡선을 하이포 트로코이드(Hypo trochoid) 곡선이라 하며, 원이 다른 원의 외부에 따라 회전하여 그리는 곡선을 에피 트로코이드(Epi trochoid) 곡선이라 한다.¹³

2.2 극좌표 방식에 의한 평면곡선 정의

트로코이드 곡선을 나타내기 위해 극좌표계(PCS: Polar Coordinate System)에서 θ 를 매개변수로 하는 식 (1) 방정식을 사용하였다. 원점으로부터의 거리를 r , x 축과의 이루는 각을 θ 로 나타내었다.¹⁴

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta \quad (1)$$

극좌표계에서 곡선을 정의할 때 $r=f(\theta)$ 로 사용되며 식(2)와 (3) 같은 함수형태로 쓰인다.

$$r = a + b\theta \quad (2)$$

$$r = a + b \cos(n\theta) \quad (3)$$

식(3)은 다양한 형상의 트로코이드 곡선을 설계하는데 쉽게 사용될 수 있다. Fig. 1은 극좌표계에서 트로코이드 곡선을 삼각함수로 나타낸 그림이다. 여기서, a, b 그리고 n 설정값에 따라 여러 가지 트로코이드 곡선을 생성할 수 있다. 특히, n 은 트로코이드 곡선의 잎(leaf)의 개수를 나타낸다. Fig.

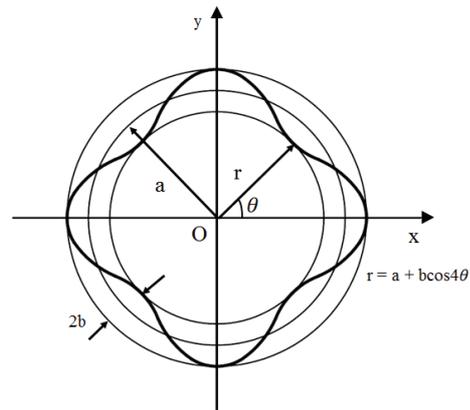
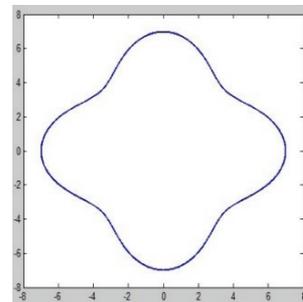
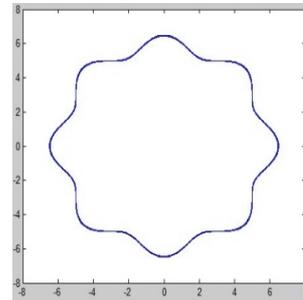


Fig. 1 Trochoidal curve by trigonometric function in polar coordinate system



(a) 4 leaf trochoidal profile



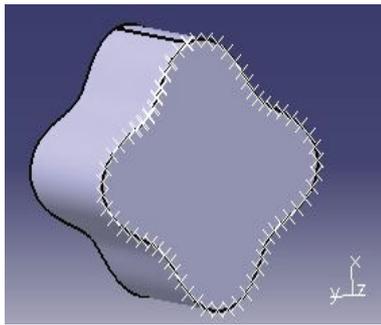
(b) 8 leaf trochoidal profile

Fig. 2 Various shapes of the trochoidal curves

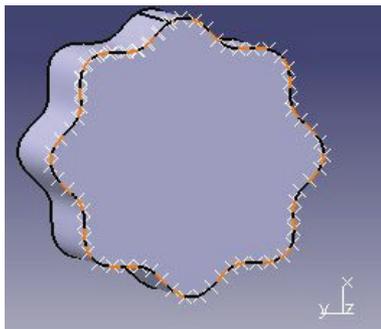
2는 MATLAB을 통해 본 연구에서 선정된 트로코이드 곡선을 나타내었다. 4잎 형상일 경우, $n=4, a=6$ 그리고 $b=1$ 로 선정하였으며, 8잎 형상의 경우, $n=8, a=6$ 그리고 $b=0.5$ 로 선정하였다.

2.3 형상 모델링 및 NC 코드 생성

본 연구에서는 선정된 4잎과 8잎 형상에 대해 CAD/CAM 프로그래밍 CATIA로 모델링을 수행하



(a) 4 leaf trochoidal profile



(b) 8 leaf trochoidal profile

Fig. 3 Shape modeling with CAD/CAM program

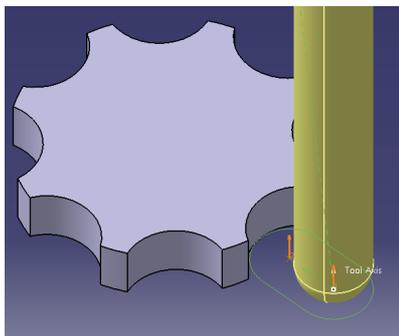


Fig. 4 Simulation of the machining process with CAD/CAM program

였다. Fig. 3은 선정된 형상들의 모델링을 나타낸다. 또한, Fig. 4와 같이 4잎과 8잎 형상의 모의 가공을 통해 공구간섭을 확인하였으며, 절삭조건을 고려하여 NC-code를 생성하였다.

3. 트로코이드 치형 가공

3.1 실험장치 구성

4잎과 8잎의 트로코이드 치형을 가공하기 위해

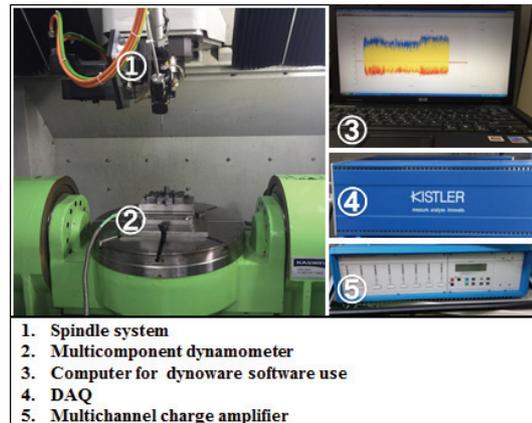


Fig. 5 Experimental set up for processing of the trochoidal profiles

Table 1 Machining conditions

Material	AISI 1045 steel
Rotational speed (rpm)	2/5
Spindle speed (rpm)	5,000/7,500/10,000
Depth of cut (mm)	0.4
Tool diameter (mm)	6 (flat end-mill)
Processing shape	4/8 leaf

서 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 5축 킬팅 테이블 머시닝센터는 현대 WIA의 HI-V560 장비를 사용하였다. 가공조건에 따라 절삭력을 측정하기 위해 Kistler사의 9527B A dynamometer를 테이블에 부착하였다. 또한 절삭력을 실시간으로 모니터링하기 위해 공구동력계에서 들어온 외부 신호를 증폭기(Multichannel charge amplifier)를 통해 증폭시킨 다음 데이터 수집장치(Data Acquisition)에서 디지털 신호로 변환하여 연결된 컴퓨터에서 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하였다.

3.2 가공조건

Table 1에는 트로코이드 치형을 가공하기 위한 가공조건을 나타내었다. 사용된 소재는 AISI 1045이며, 각 형상에 대해 절입깊이는 0.4 mm로 고정하였다. 스핀들 회전속도를 5,000 rpm, 7,500 rpm 그리고 10,000 rpm 까지 증가시켰으며 테이블 회전속도를 2 rpm과 5 rpm으로 각각 증가시켜 가공특성을 분석하였다. 4잎과 8잎의 치형을 가공하기 위해 WIDIN사의 ZE324 040S 초경공구를 사용하였다.

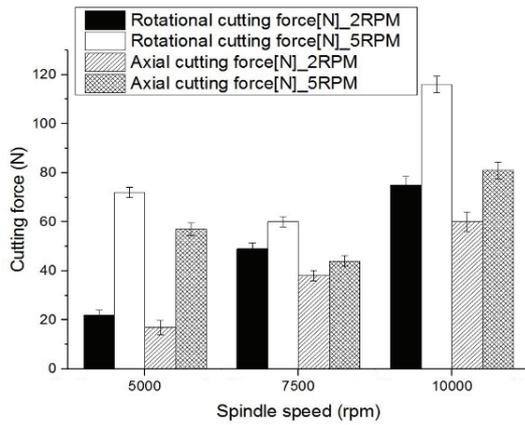


Fig. 6 Cutting force of the 4 leaf shape according to machining conditions

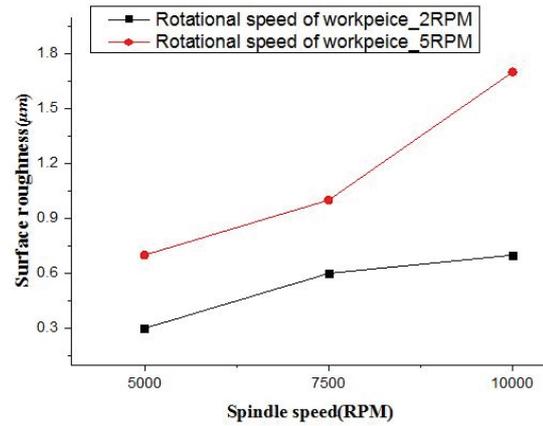


Fig. 8 Surface roughness of the 4 leaf shape according to machining conditions

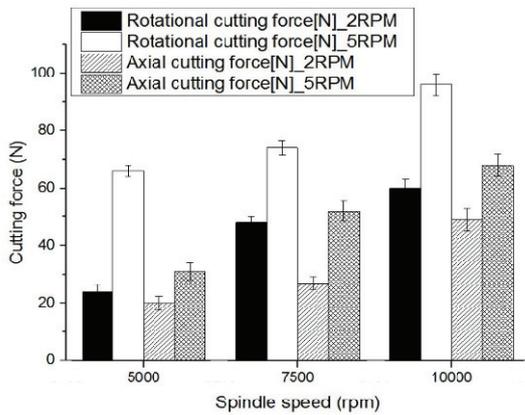


Fig. 7 Cutting force of the 8 leaf shape according to machining conditions

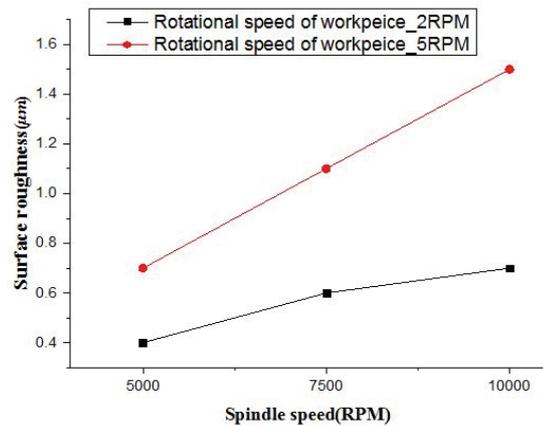


Fig. 9 Surface roughness of the 8 leaf shape according to machining conditions

4. 결과 분석

4.1 절삭력 분석

4잎과 8잎의 트로코이드 치형 가공시 절삭력을 분석하기 위해 선정된 가공조건에 따라 실험을 수행하였다. 정확한 절삭력 분석을 위하여 각각의 실험마다 공구와 소재를 교체하였다. 또한 측정된 절삭력 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 3회 반복실험을 수행하여 평균값을 산출하였다.

Figs. 6과 7은 4잎과 8잎의 트로코이드 치형의 절삭력 측정결과를 나타낸다. 스피들 회전속도와 테이블 회전속도를 증가시켰을 때 4잎과 8잎 형상 모두 절삭력이 증가되었다. 특히, 4잎 형상의 경우 스피들 회전속도 5,000 rpm 일 때, 테이블

회전속도 증가에 따라 최대 절삭력이 3배 이상 증가되었다. 이는 8잎 형상보다 4잎 형상 가공시 절입량이 많아 공구에 절삭저항이 더욱 집중되었기 때문이다.

4.2 표면거칠기 분석

선정된 트로코이드 치형의 표면거칠기를 측정하기 위해 중심선으로부터 평균이탈선간의 거리를 산술 평균으로 구하는 중심선평균조도(CLA) Ra 값을 측정하였다. Figs. 8과 9는 가공조건에 따른 4잎과 8잎 형상의 표면거칠기를 각각 나타낸다. 절삭력 증가 데이터와 비례하여 4잎과 8잎 형상 모두 스피들 회전속도와 테이블 회전속도를 증가할수록

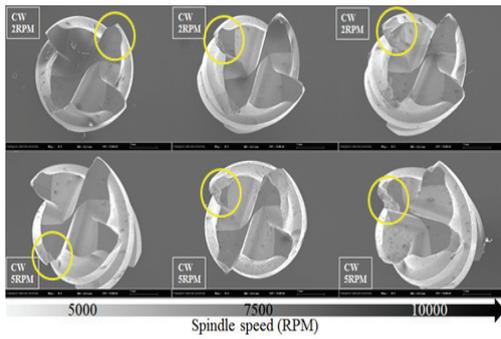


Fig. 10 Tool wear of the 4 leaf shape

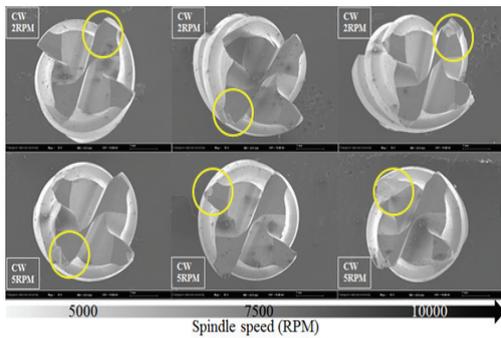


Fig. 11 Tool wear of the 8 leaf shape

표면거칠기도 증가하였다. 스피들 회전속도 10,000 rpm, 테이블 회전속도 5 rpm일 때, 4잎 형상의 경우 1.7 μm, 8잎 형상의 경우 1.5 μm로 각각 측정되었다.

4.3 공구마모 분석

가공조건에 따라 공구의 마모를 분석하기 위해 고분자, 금속 및 세라믹 시료의 표면 분석시 사용되는 Zeiss사의 Merlin compact 모델인 저전압주사전자현미경(Low voltage scanning electron microscope)을 사용하였다. 저전압주사전자현미경은 점자빔을 접속시켜 시료 표면의 관찰영역을 주사하고 이 때 시료 표면에서 발생하는 여러 전자형태를 감지해 시료의 표면 형태 및 조성에 대한 각각의 영상을 얻어 출력할 수 있다.

Figs. 10과 11은 트로코이드 형상 가공시 가공조건에 따른 공구마모를 나타낸다. 절삭력 측정결과와 비례하여 두 형상 모두 스피들 회전속도와 테이블 회전속도가 증가할수록 공구마모가 크게 증가하였다. 특히, 4잎 형상 가공시 8잎 형상에 비해 절입량 및 가공면적이 넓기 때문에 모든 가공조건에서 공구마모가 증가하였다.

5. 결론

4잎과 8잎 형상의 트로코이드 곡선을 정의하고 가공특성을 분석하기 위해 턴-밀 공정에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다양한 형상의 병을 설계하는데 사용되는 $r = a + b\cos(n\theta)$ 식을 통해 턴-밀에 적용한 트로코이드 곡선을 정의하였으며 NC-Code 생성을 위해 CAD/ CAM 프로그램을 통해 공구 간섭 및 충돌을 검증하였다.

(2) 선정된 트로코이드 치형을 가공하기 위해 장비를 구축하였으며 공구와 소재에 특성에 따라 실험조건을 선정하였다.

(3) 스피들 회전속도와 테이블 회전속도를 증가시켰을 때 4잎과 8잎의 형상 모두 절삭력이 증가되었다. 특히, 4잎 형상의 경우 스피들 회전속도 5,000 rpm 일 때, 테이블 회전속도 증가에 따라 최대 절삭력이 3배 이상 증가되었다.

(4) 절삭력 측정데이터와 비례하여 표면거칠기 역시 스피들 회전속도와 테이블 회전속도를 증가시켰을 때 증가하였다. 특히, 스피들 회전속도 10,000 rpm, 테이블 회전속도 5 rpm일 때, 4잎 형상의 경우 1.7 μm, 8잎 형상의 경우 1.5 μm로 각각 측정되었다.

(5) 가공조건에 따른 공구마모 분석결과, 스피들 및 테이블 회전속도가 증가할수록 공구마모가 증가하였다. 4잎 가공시 8잎 형상에 비해 절입량과 가공면적이 넓어 공구마모가 크게 나타난 것으로 판단된다.

향후 본 연구 내용을 바탕으로 최적 가공조건을 구하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015-2016년도 창원대학교 자율연구 과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Park, J. S., "Development Trend of Increasing Number of Gears and Component Technologies in Automatic Transmission," Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 35, No. 8, pp. 33-37, 2013.

2. Lee, D. K., Lee, S. Y., Hong, Y. J., Koo, J. M., and Seok, C. S., "Development of Speed Limit Safety Wheel Used by Trochoid Gear," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 12, pp. 1340-1345, 2012.
3. Kim, M. S., Chung, W. J., Jeong, S. W., and Jeon, J. Y., "Methodology for Simulation of Trochoid Pump," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 465-471, 2013.
4. Kim, C. and Bae, J. H., "Design of Rotor Profile of Internal Gear Pump for Improving Fuel Efficiency," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 1, pp. 113-120, 2015.
5. Al-Hawaj, O. M., "Geometrical Analysis of a Quadrilateral Rotary Piston Engine," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 93, pp. 112-126, 2015.
6. Zhenxing, R., Chunyan, L., and Yulong, L., "Flow Characteristic and Trapping Characteristics of Cycloid Rotor Pump," *Open Mechanical Engineering Journal*, Vol. 9, pp. 449-454, 2015.
7. Liu, H., Lee, J. C., Yoon, A., and Kim, S. T., "Profile Design and Numerical Calculation of Instantaneous Flow Rate of a Gerotor Pump," *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 3, No. 1, pp. 92-97, 2015.
8. Biernacki, K., "Analysis of the Material and Design Modifications Influence on Strength of the Cycloidal Gear System," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 3, pp. 537-546, 2015.
9. Jeong, S. W., Chung W. J., Kim, M. S., and Jeon, J. Y., "Internal Flow Analysis Research Design and Methodology for Trochoid Pump," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp.87-93, 2014.
10. Cho, H. Y., Min, G. S., and Choi, J. U., "Analysis for Forging of Trochoidal Gears," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 13, No. 9, pp. 77-83, 1996.
11. Yasuyoshi, S., Kazuei, U., Mamoru, S., Mineo, O., and Takashi, K., "Development of Oil-Pump Rotors with a Trochoidal Tooth Shape," *SAE Technical Paper*, 1984.
12. Gamez-Montero, P., Castilla, R., Khamashta, M., and Codina, E., "Contact Problems of a Trochoidal-Gear Pump," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 12, pp. 1471-1480, 2006.
13. Kim, T. H. and Jang, G. W., "Teaching Calculus on Graphs of Various Equations in Engineering Mathematics Using Geogebra," *Proc. of the KSME Autumn Conference*, pp. 1744-1749, 2013.
14. Choi, B. G., You, W. S., Jeon, C. S., Pyeon, Y. S., et al., "CAD/CAM System and CNC Cutting," *Scitech Press*, 1996.