https://doi.org/10.7735/ksmte.2017.26.1.13

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online) / ISSN 2508-5093(Print)

Trochoidal 방식을 이용한 황삭가공의 최적조건

봉하윤[a], 김문기[b*]

Optimal Cutting Condition of Rough Cutting Using Trochoidal Motion

Ha Yoon Bong[a], Moon Ki Kim[b*]

[a] Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education, 1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31253, Korea
[b] School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31253, Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 25 September 2016
Revised 28 November 2016
Accepted 30 November 2016

Keywords:
Rough cutting
Trochoidal motion
Optimal tool path
Optimal cutting speed

ABSTRACT

In modern industry, the machining process is very important for manufacturing various products. More than 80% of machining processes apply rough cutting. The target of this study is to establish the optimal condition of rough cutting using trochoidal motion for improving productivity. For research, the range of cutting conditions is defined by trochoidal motion. The cutting time and tolerance are measured and evaluated according to the cutting conditions of machining. Experimental data are utilized for comparing trochoidal motion and contouring. It is found that the cutting time of trochoidal motion is two times less than that of contouring with optimal cutting conditions. To conclude, trochoidal motion for rough cutting under appropriate cutting conditions improves productivity and shortens processing time significantly.

1. 서 론

현재의 제품 생산의 추세는 다품종 소량생산시스템을 기반으로 고객의 요구를 파악하고 다양한 제품을 출시하는 것이며 단기간에 다양한 제품 생산을 위한 생산성을 향상시키기 위해 지속적인 기술개발이 이루어지고 있다. 최근에는 3D 프린팅 등 다양한 생산방식이 제시되고 있지만, 알루미늄, 티타늄 등의 경금속재료 부품들은 대부분은 절삭가공을 통해 완제품을 생산하는 방식을 취하고 있다. 절삭가공은 전통적인 기계가공 방법으로서, 대부분의 기계업체에서 사용하는 가공방법 중 70~80% 이상의 비중을 차지하고 있으므로 생산성 향상의 측면에서 절삭가공의 최적화는 매우 중요한 요소이다.

절삭가공 중 80%이상이 황삭가공을 적용하고 있는데, 많은 수의 절삭가공의 형상이 2.5D의 형태이고, 더 복잡한 형상이더라도 2.5D의 황삭가공 후 3D 또는 다축(multi-axis) 정삭을 하기 때문이다. 그러므로 생산성 향상의 측면에서는 황삭가공이 기계가공에서는 근본적으로 중요한 요소이다[1].

현장에서는 생산성을 높이기 위해 많은 연구와 노력이 이루어지고 있으며 황삭가공의 특성상 다양한 요인들이 복합적으로 작용하지만 대부분 2가지 절삭조건에 대하여 많은 연구가 진행되었다.

현장에서 황삭가공의 최적화를 수행하는 이유는 가공시간 단축 및 공구수명 향상을 통한 생산성 향상에 목적을 두고 있다. 가공최적화를 위한 절삭 조건으로는 공구경로의 최적화와 이송속도 제어를 통한 절삭력의 최적화로 나눌 수 있다.

Tsai[2,3] 등은 물리량 기반의 절삭력을 일정하게 유지하기 위한

* Corresponding author. Tel.: +82-41-560-1312
Fax: +82-41-560-1360
E-mail address: mkkim@koreatech.ac.kr (Moon Ki Kim).

최적의 가공조건을 향상시키는 연구를 하였고, Lee[4] 등은 제품에 허용하는 가공오차를 고려하여 가공속도를 최적화하는 방법을 연구하였다. Kang[5,6] 등은 황삭가공 시간 단축을 위해 절삭력을 상향 제한하고 일정한 부하가 유지되도록 절삭조건을 제어하여 시뮬레이션으로 시간 단축을 검증하였다. Lee[7] 등은 가공경로는 수정하지 않고 주축 회전수 및 이송속도의 최적화를 통한 절삭력 해석에 관한 연구를 하였다. Kim[8,9] 등은 황삭가공의 공구경로를 최적화할 수 있는 기하학적 알고리즘을 개발하고 공구의 파손 및 가공안정성을 위한 연구를 진행하였다.

황삭가공의 경우 일반적으로 윤곽절삭(contouring) 방식을 통해 가공조건을 최적화하기 위한 연구가 이루어졌다. 그러나 가공경로 및 절삭력을 동시에 최적화하는 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

공구경로 및 이송속도의 제어를 동시에 최적화할 수 있는 트로코이달(trochoidal) 방식의 가공데이터 생성 방법을 사용하면 윤곽절삭 방식에 비해 절삭력의 유지가 쉽고 공절삭(aircut)을 최소화함으로써 공구경로를 최적화할 수 있다. 또한 기계의 주축동력(kW), 소재의 물성치, 공구 등의 데이터를 반영하여 8단계의 가공조건들을 제시해 주기 때문에 트로코이달 방식으로 생성한 NC데이터를 연구에 사용하려고 한다.

본 연구에서는 알루미늄 소재를 사용하는 황삭가공에서 트로코이달 방식으로 생성한 가공조건을 실험으로 검증하여 공구가 마모되지 않는 범위에서의 최적의 황삭가공 조건을 연구하고자 한다.

2. 이론 배경

2.1 트로코이달 가공방식

트로코이드(trochoid)는 일직선상에 있는 하나의 원이 미끄러지지 않고 구를 때 이 원에 고정된 한 점이 그리는 궤적을 의미하며 Fig. 1과 같이 그 궤적을 중심으로 한 공구의 이송을 트로코이달 가공방법이라고 한다.

2.2 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식의 차이

이송 f(mm/rev)는 1회전 동안 공작물을 가로지르는 절삭공구의 이동거리를 의미한다. 여기서 v_f(mm/min)는 이송속도, n_t(rpm)은 절삭공구의 회전속도이다.

$$f = \frac{v_f}{n_t} \tag{1}$$

절삭력 f_z(mm)는 한 개의 절삭날이 1회전동안 이동하는 양을 의미한다. 여기서 N은 공구날 수이다.

$$f_z = \frac{f}{N} \tag{2}$$

황삭가공은 2.5D 가공이므로 2D 평면으로 나타내면 절삭력과 칩두께는 동일하게 된다. 여기서 a_c(mm)는 칩두께이다.

$$a_{c\max} = \frac{v_f}{N n_t} \tag{3}$$

Fig. 2와 같이 윤곽절삭 가공에서는 공작물과 공구가 접촉하는 면적이 달라지므로 공구직경 및 가공물림양을 고려해야한다.

윤곽절삭 가공에서는 이송 f가 일정하게 유지되므로 가공물림에 따라 칩두께가 변하게 된다. 여기서 D(mm)는 공구 직경, a_e(mm)는 가공물림이다.

$$f_z = a_c \sqrt{\frac{D}{a_e}} \tag{4}$$

트로코이달 가공에서는 공구 부하를 일정하게 유지하기 위해 칩두께를 일정하게 유지하도록 이송 f 및 가공물림 a_e를 제어하여 황삭가공 조건을 최적화 할 수 있도록 한다.

$$a_c = f_z \sqrt{\frac{a_e}{D}} \tag{5}$$

2.3 트로코이달 방식의 가공 특징

트로코이달 방식은 공구의 부하를 일정하게 유지시킬 수 있도록 가공데이터를 생성해준다. 일반적으로 황삭가공 데이터를 만들기 위해서는 숙련자의 경험을 토대로 가공에서 필요한 데이터(절입깊이, 절삭속도, 이송속도 등)를 결정하는 것이 중요하였지만 트로코이달 방식의 황삭가공에서는 공작기계의 가공능력에 따라 가공데이터를 생성해주며, 가공 소재별 적정 가공 데이터 값이 데이터베이스화 되어있어 사용자는 공작기계의 가공조건(1~8단계)를 선택

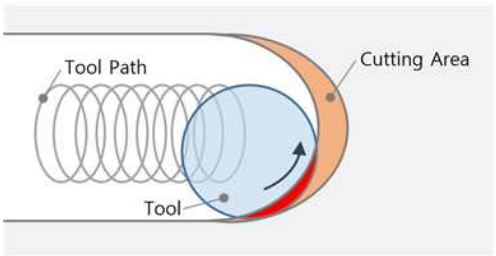

Fig. 1 Trochoidal tool path

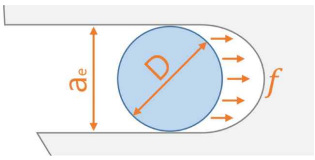

Fig. 2 Contouring operation tool path

하고 이송(feed)과 주축회전수(RPM)가 최적화된 가장 효율적인 황삭가공 데이터를 생성할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 실험 개요

본 연구에서는 알루미늄 소재의 황삭가공시 최적 조건을 찾기 위해 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식의 비교 실험을 하였다.

8단계의 이송과 주축회전수가 조합된 구간을 선정하고 가공깊이에 대한 조건들의 조합으로 다양한 경우에 대해 가공시간, 공구마모 여부, 표면 거칠기를 비교 및 분석하였다.

3.2 실험 장치

본 실험에 사용된 수직형 3축 머시닝센터는 Fig. 3과 같이 국내 D사에서 제작한 장비로 Table 1과 같이 최대주축회전속도가 12,000 rpm이고, 주축 동력이 25 kW이다.

절삭 실험에 사용된 공구는 Fig. 4와 같이 국내 Y사에서 제작한 Ø10 mm HSS 2날 평엔드밀(10×10×26×80 mm)로 황삭가공시 칩 배출을 용이하게 하기 위해 2날 엔드밀을 사용하였다.

시험편은 알루미늄 소재를 사용하였으며 25 BHN의 값을 가지는 70×70×40 mm의 규격을 사용하였다.

절삭시 시험편의 고정을 위해 같이 유압바이스와 가이드블럭을 사용하여 견고하게 고정하였다. 절삭시 발생하는 공구의 떨림 등을 일정하게 유지하기 위해 공구의 장착 높이를 40 mm로 고정하였다.

3.3 실험 조건 및 방법

가공조건은 Table 2와 같이 트로코이달 가공방식에서 기계와 소재 등의 조건을 고려하여 산출된 8단계의 이송과 주축 회전수 값을 윤곽절삭 방식과 트로코이달 방식에 동일하게 사용하였다.

Fig. 5는 가공형상으로 외측 윤곽 형상과 내부로 진입하는 열린 포켓 형상이 포함된 복합형상이다. Fig. 6은 가공경로에 대한 그림으로 가공조건을 입력하여 각각 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식에 대한 NC데이터를 작성하였다.

NC데이터는 총 54개의 데이터를 생성하였으며 3 mm 절입깊이를 가지고 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식을 비교한 16개의 데이터와 6~15 mm 절입깊이에 대한 32개의 비교데이터와 최종 검증을 위한 다양한 절입깊이의 조합에 대한 6개의 데이터를 실험하였다.

트로코이달 및 윤곽절삭의 가공방식에 따른 표면 거칠기의 차이점을 비교하기 위하여 Fig. 7과 같이 외측구간과 내측구간을 선정하여

Table 1 Specifications of vertical machining center

Items	Specifications
Machine	DNM 500
Max. spindle speed (RPM)	12,000
Max. spindle motor power (kW)	25
Travel (X / Y / Z) (mm)	1020 / 540 / 510
NC System	Fanuc i series

Fig. 3 Machining center with FANUC controller

Fig. 4 Ø10 mm HSS flat-endmill 2-flute

Table 2 Cutting condition table

Cutting Condition	FEED (mm/min)	SPINDLE (rpm)	XY pitch (mm)
1	1,222	3,659	0.67
2	1,959	6,653	1.31
3	2,029	7,204	2.13
4	1,970	6,930	3.09
5	1,896	6,340	4.13
6	2,321	7,002	4.13
7	2,746	7,545	4.13
8	3,170	8,000	4.13

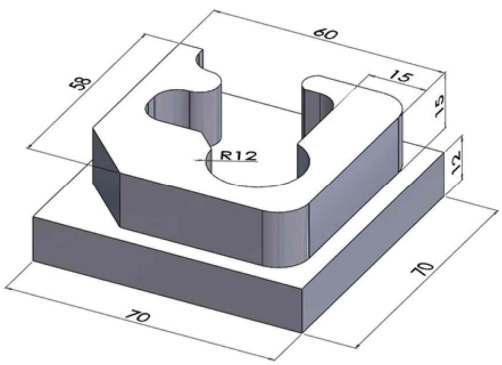

Fig. 5 3D CAD model for machining

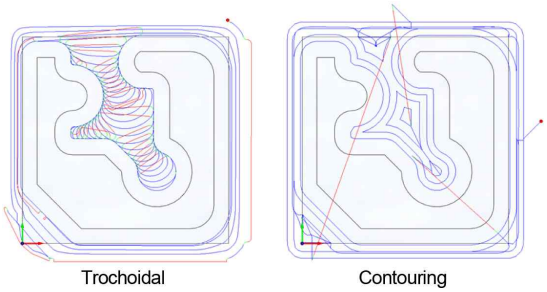

Fig. 6 Generated tool path by CAM

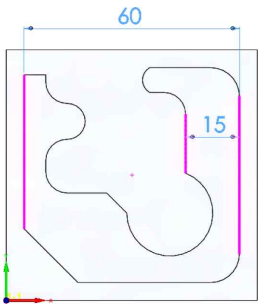

Fig. 7 Measured points (60 mm, 15 mm)

측정하였다. 외측 60 mm 부분은 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였고 내측 15 mm 부분은 마이크로미터를 사용하여 측정하였다.

본 실험에서는 가공조건 8단계에 따른 절삭 깊이 및 가공방식을 변화시켜가면서 다양한 실험조건을 생성하였으며 가공에 사용한 이송, 주축 회전수와 피치는 각 가공조건 단계의 값을 사용하여 고정하였다.

우선, 알루미늄 황삭가공에서 일반적으로 절입하는 깊이인 3 mm를 고정하고 가공조건 1~8단계를 윤곽절삭 방식과 트로코이달 방식으로 각각 8번의 가공을 진행하였다.

두 번째로 진행한 가공실험은 가공조건 3단계를 고정하고 절입깊이를 3~15 mm까지 3 mm씩 증가시켜가면서 윤곽절삭 방식과 트로코이달 방식으로 가공을 진행하였다. 이후, 가공조건의 단계를 4~6단계로 높여가며 동일한 가공을 진행하였다.

측정데이터는 가공시간, 공구상태와 표면 거칠기 항목을 측정하였으며, 가공 시간은 원점복귀 및 공구 보정 후 접근하는 시간을 제외한 가공시간을 측정하였다.

공구 상태는 가공 후 소재의 절삭 여부를 우선 확인하여 소재의 절삭이 온전하지 않은 경우에는 공구 날의 상태를 육안으로 확인하여 공구 날의 마모 여부를 확인하였다. 또한, 가공 중 매우 큰 절삭소음 및 진동이 발생하여 중단한 경우에도 공구 날의 마모 여부를 확인하였다.

표면 거칠기 측정을 위한 두 지점을 각각 버니어캘리퍼스와 마이크로미터로 측정한 결과 값을 얻었다. 윤곽절삭 및 트로코이달의 가공방식에 따른 가공시 표면 거칠기의 차이점을 비교하기 위하여

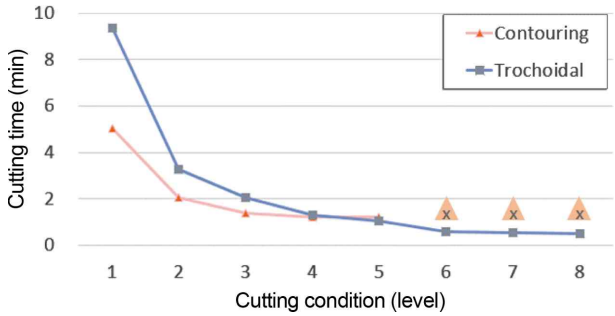

Fig. 8 Cutting time (depth 3 mm)

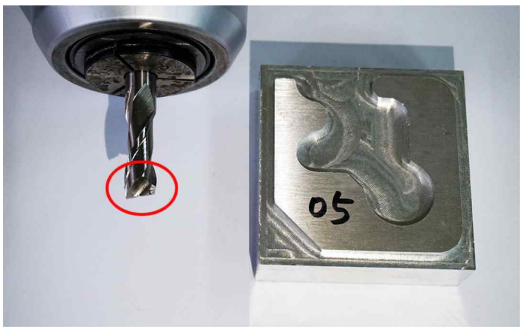

Fig. 9 Tool broken (contouring-level 5, depth 3 mm)

외측 60 mm 부분은 정삭 여유량 0.5 mm 포함하여 61 mm의 기준값을 가지며 내측 15 mm 부분도 정삭 여유량 0.5 mm을 포함하여 16 mm의 기준값을 가진다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 가공방식에 따른 비교

절입깊이 3 mm를 고정하고 가공조건의 모든 단계를 수행한 결과 Fig. 8과 같이 나타났으며 가공조건 1~3단계 까지는 윤곽절삭 가공의 시간이 빠른 것을 알 수 있었다. 가공조건 4단계에서는 윤곽절삭과 트로코이달의 가공시간이 근접한 것을 알 수 있다.

공구마모의 경우 Fig. 9와 같이 윤곽절삭 가공은 5단계에서는 공구 손상의 조짐이 나타나고 6단계에 공구가 손상되었으며 트로코이달 가공은 8단계까지 정상적으로 가공이 된 것으로 보아 가공시 부하를 일정하게 유지하는 것으로 판단된다.

트로코이달 가공에서는 Fig. 10과 같이 가공조건이 높아질수록 절삭량이 증가하게 되는데 이송속도가 높아짐에 따라 XY방향의 표면 거칠기의 문제가 발생한다.

표면 거칠기 측정은 Fig. 7에서 표기한 두 지점을 측정하였으며 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식 모두 측정한 결과는 Fig. 11로 나타났으며 내측 측정값의 경우 표면 거칠기가 크게 차이가 나타났다.

윤곽절삭 방식의 경우 가공조건 3단계에서 16.06 mm로 최소값을 나타냈으며 트로코이달 방식의 경우 가공조건 3단계에서 16.24

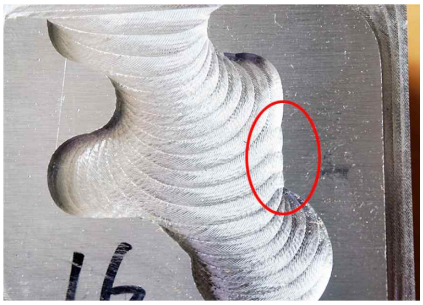

Fig. 10 Tolerance problem (trochoidal-level 8)

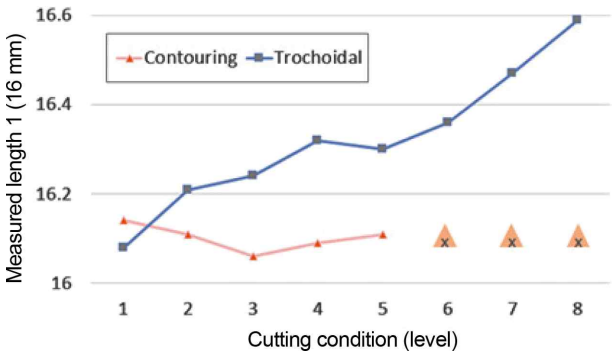

Fig. 11 Measured inside tolerance (depth 3 mm)

mm의 값을 나타낸 이후 가공조건 4단계이상에서 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 정삭에서 가공할 수 있는 측벽의 두께는 평균적으로 0.10D이며, Ø10 공구의 경우 1.0 mm 이내로 허용될 수 있기 때문에 측정된 표면 거칠기 값은 모두 허용범위에 들어오는 것을 알 수 있다.

외측 61 mm의 측정값은 모두 61.1~61.2 mm 사이의 값을 나타냈는데 두 방식에서 값의 차이가 없었다. 이는 가공 경로에서 외측의 경우 일정한 방향으로 직선가공을 하기 때문에 동일한 결과가 나타난 것으로 보인다.

가공조건 5단계부터는 트로코이달 방식의 가공시간이 빨라지나 시간 단축이 5초 미만으로 나타났으며 내측의 표면 거칠기도 커지는 것으로 보아 기계의 부하만 증가한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식을 비교할 구간으로 가공조건 3, 4단계를 정하고 3~15 mm의 가공깊이의 변화를 주어 가공실험을 진행하였다.

4.2 절입깊이의 변화에 따른 비교

4.2.1 3단계에서의 비교

가공조건 3단계에서는 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식을 비교하였으며 Fig. 12와 같이 가공깊이 6 mm 이상의 가공은 트로코이달 방식에서 가공시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 트로코이달 방식에서는 6 mm 이상의 가공에서 3 mm씩 절입하는 방식이 아니고 전체 깊이를 한 번에 가공하는 방식이므로 최대 절입깊이까지는

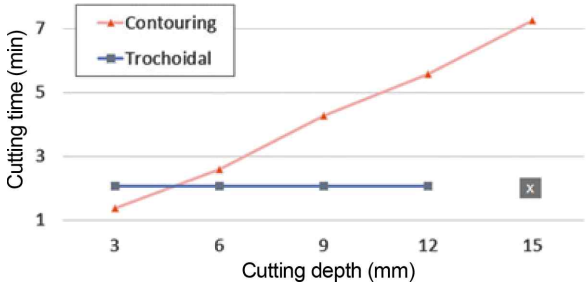

Fig. 12 Cutting time on the various depth (level 3)

Fig. 13 Deferences between contouring and trochoidal

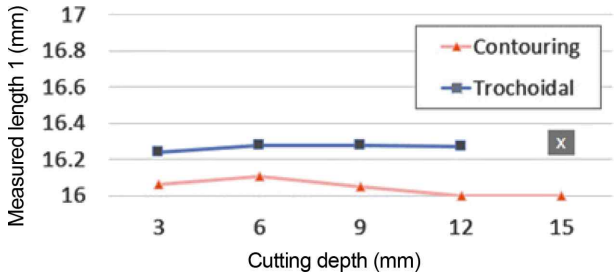

Fig. 14 Measured inside tolerance (level 3)

가공 시간 2'06"로 일정한 것을 확인하였다.

트로코이달 방식은 소재, 공구, 기계의 조건을 계산하여 최적의 조건을 찾아주는 방식이나 현장에서 사용하는 공구 및 소재의 사용이 제한적이므로 항상 최고능률에서 사용할 수 없다. 실제 실험에서도 가공조건 3단계임에도 15 mm의 절입깊이에서 공구가 파손된 것을 확인 할 수 있다.

가공 후 형상을 비교하면 트로코이달 방식과 윤곽절삭 방식의 공구경로에 따른 표면 거칠기의 차이를 보이고 있다. Fig. 13과 같이 육안으로는 많이 차이가 나는 것으로 보이지만, Fig. 14와 같이 실제 측정을 해보니 0.2 mm 이내의 차이만 보이기 때문에 두 방식의 표면 거칠기 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

4.2.2 4단계에서의 비교

Fig. 15와 같이 가공조건 4단계에서도 가공조건 3단계와 유사한 결과를 나타냈다. 트로코이달 방식의 가공시간은 1'32"로 동일하고 6 mm 이상의 가공에서 윤곽절삭 방식의 가공보다 시간이 줄어

드는 것으로 나타났다. 그러나 트로코이달 방식을 사용한 가공조건 4단계에서 Fig. 16과 같이 12 mm의 절입시 공구의 마모가 커짐에 따라 절삭이 되지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 17은 표면 거칠기를 측정한 그림으로서 0.2 mm 이내의 차이만 보이기 때문에 두 방식의 표면 거칠기 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

가공조건 3단계에서 9 mm 깊이로 가공 시 윤곽절삭 방식은 4'28"이고 트로코이달 방식은 2'06"로 가공시간이 절반이하로 측정되었으며 가공조건 4단계에서 윤곽절삭 방식은 3'59"이고 트로코이달 방식은 1'32"로 가공시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 가공깊이 12 mm에서는 그 편차가 더 커지는 것으로 나타났으나 가공조건 4단계에서의 공구마모 현상 등이 발생하므로 트로코이달 방식에서는 9 mm의 절삭깊이가 적절한 것으로 판단하였다.

4.2.3 최적조건의 선정

9 mm의 절입깊이가 적절하다고 판단하고 최적의 가공조건을 찾기 위해 가공조건별 가공시간과 표면 거칠기에 대한 분석을 하였다.

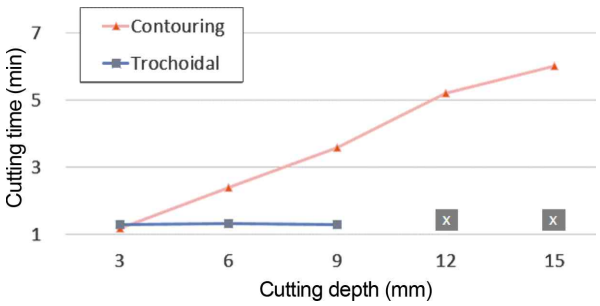

Fig. 15 Cutting time on the various depth (level 4)

Fig. 16 Failed machining (trochoidal-level 4, depth 12 mm)

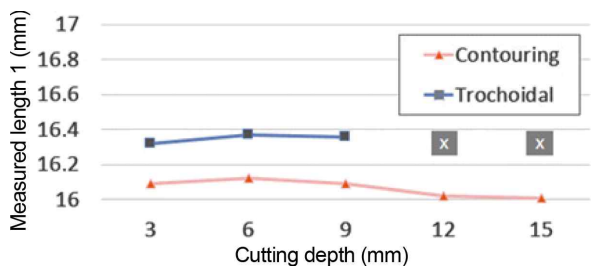

Fig. 17 Measured inside tolerance (level 4)

Fig. 18과 같이 절입깊이 9 mm일 때 가공 조건 6단계에서는 공구파손이 일어났으며 가공 시간으로는 3단계가 2'06", 4단계가 1'32", 5단계가 1'05"로 가공 단계별로 약 30초의 시간이 단축되었다.

그러나 표면 거칠기를 비교해 보면 가공조건 4단계부터 급격한 표면 거칠기의 증가로 인하여 Fig. 19와 같이 가공조건 3에서는 16.28 mm, 가공조건 4에서는 16.36 mm로 약 0.08 mm정도 증가하였다.

이송의 증가는 공구의 마모면에서의 상대적 미끄럼 속도에 영향이 없는 반면에 절삭속도는 미끄럼 속도를 비례적으로 증가시킨다. 공구마모는 온도와 상대적 미끄럼 속도의 함수이므로 절삭속도의 증가는 이송의 증가에 비해 공구의 수명을 더 많이 단축시키는 것을 알 수 있고 '황삭시 생산율을 올리는 것이 필요하다면, 절삭속도를 높이는 것보다 이송을 높이는 것이 항상 바람직하다'라는 것을 의미한다. 황삭시 최적의 절삭조건 선정의 기본적인 원리는 항상 이송을 가능한 최대로 설정하는 것이므로[10] Table 3과 같이 이송이 빠르고 절입량이 최소인 가공조건 3단계와 절입깊이 9 mm가 황삭가공에서 최적 조건임을 알 수 있다.

4.2.4 검증

가공조건 3단계 및 가공깊이 9 mm를 기준으로 11~13 mm 가

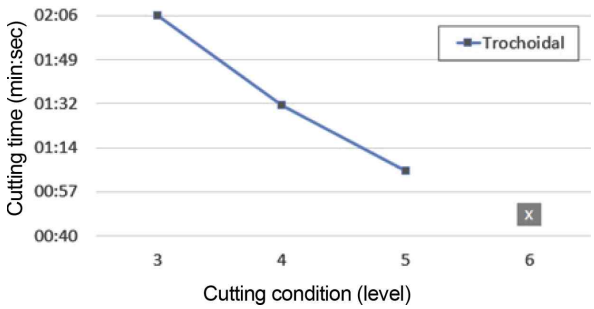

Fig. 18 Cutting time on the 9 mm depth

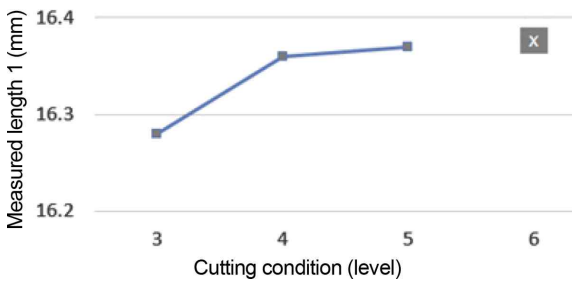

Fig. 19 Comparing inside tolerance (level 3~5)

Table 3 Comparing cutting condition

Cutting condition	Feed (mm/min)	Spindle (rpm)	XY pitch (mm)
3	2,029	7,204	2.13
4	1,970	6,930	3.09
5	1,896	6,340	4.13

Table 4 Verifying various depth

Cutting condition	Cutting depth (mm)	Total cutting depth (mm)	Cutting time (min'sec")	Measured length 1 (mm)	Measured length 2 (mm)
3	9, 2	11	4'16"	16.18	61.05
	6, 5	11	4'16"	16.18	61.05
	9, 3	12	4'16"	16.18	61.05
	6, 6	12	4'16"	16.18	61.05
	9, 4	13	4'16"	16.18	61.05
	7, 6	13	4'16"	16.18	61.05

공시 가공의 효율을 확인하기 위해 절입깊이를 다양하게 변화시켜 가면서 추가 실험을 진행하였다. 실험결과는 Table 4와 같이 가공시간 및 표면 거칠기가 일정하게 측정되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 소재의 황삭가공에 대한 최적 조건을 찾기 위해 8단계의 이송과 주축 회전수가 조합된 구간을 선정하고 절입깊이의 변화를 달리하여 윤곽절삭 방식과 트로코이달 방식의 가공실험을 하였고, 각각의 가공시간, 공구 상태, 표면 거칠기를 비교 및 분석한 결과는 다음과 같다.

절입깊이가 6 mm 이하인 경우에는 윤곽절삭 방식과 트로코이달 방식의 가공시간 및 표면 거칠기의 차이가 크게 발생하지 않는다.

절입깊이를 3 mm로 제한한 경우, 윤곽절삭 방식의 가공조건 5단계 이상에서는 공구의 부하가 커져 공구마모가 크게 발생하였으나 트로코이달 방식에서는 공구마모가 적게 발생 것으로 보아 절삭력이 일정하게 유지되는 것으로 보인다.

가공조건 3단계에서 절입깊이가 9 mm 이상의 경우에는 윤곽절삭 방식 4분 28초와 트로코이달 방식 2분 06초로 가공시간이 2배 이상 차이를 보였다. 윤곽절삭 방식은 3 mm씩 절입을 하기 때문에 절입깊이인 3 mm의 배수로 일정하게 시간이 증가하는 경향을 보이지만 트로코이달 방식은 9 mm 이상을 한 번에 절입 할 수 있기 때문에 실험에서 절입한 15 mm까지의 가공시간이 동일하게 측정되었다.

트로코이달 방식에서도 절입깊이 12 mm 이상에서 가공조건에 따라 공구의 마모가 발생하였기 때문에 트로코이달 방식이 사용가능한 구간이 고려되어야 하며, 공구의 마모가 일어나지 않으며 안정적으로 황삭가공이 지속가능하고, 윤곽절삭 가공에 비해 가공 효율이 높은 트로코이달 가공조건 3단계(이송: 2,029 mm/min, 주축 회전수: 7,204 rpm, 피치: 2.13 mm)일 때 최대 절입량 9 mm가 가장 적합하다는 것을 얻을 수 있었다.

황삭가공에 트로코이달 방식을 적용하여 가공경로 및 절삭력의 효율적인 제어를 통해 윤곽절삭 보다 높은 가공효율을 얻을 수 있었으며, 트로코이달 방식이 효율적인 최적조건을 파악하는 방법을 제시함으로써 다양한 소재 및 공구에 적용한다면 공구 부하를 최소화하고 가공시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 황삭가공의 제시 및 문제 해결에 도움이 되리라 기대한다.

References

[1] Choi, J. G., Kim, H. S., Kim, S. C., 2004, A Study on the Optimum Finish Allowance for Machining Accuracy Improvement in the End Milling Processes, Journal of the KSMTE, 13:3 8-15.

[2] Tsai, M. D., Takata, S., Inui, M., Kimura, F., Sata, T., 1991, Operation Planning Based on Cutting Process Models, Annals of the CIRP, 40:1 95-98.

[3] Tlusty, J., Smith, S., Zamudio, C., 1991, New NC Routines for Quality in Milling, Annals of the CIRP, 39:1 517-521.

[4] Lee, H. S., Lee, C.S ., Kim, J. M., Heo, E. Y., 2013, A Study of Feedrate Optimization for Tolerance Error of NC Machining, Journal of the KSMTE, 22:5 852-858.

[5] Kang, I. S., Lee, S. Y., Choi, H. J., Park, C. W., 2016, Machining Optimization Simulation Based on Cutting Force and Its Experimental Validation, Journal of the KSPE Spring Conference, 16-16.

[6] Kang, J. H., Seo, S. H., Lee, J. J., 1995, Rough Cut Tool Path Planning in Fewer-axis CNC Machining, Journal of the KSPE Autumn Conference, 193-198.

[7] Lee, S. Y., Lee, W. H., Kim, S.Y., Kim, S. K., Jeon, E. C., 2010, A Study on the Optimization of Machining Condition Considered Cutting Forces, Journal of the KSME Spring Conference, 216-220.

[8] Kim, K. M., Lee, H. K., Yang, K. E., 1995, An Algorithm of Efficient Rough Cutting Path for Pocket, Journal of the KSPE Spring Conference, 143-148.

[9] Kim, H. C., 2008, An Optimized Direction Parallel Tool Path Generation for Rough Machining, Transactions of the KSME- A, 32:9 761-769.

[10] Boothroyd G., Knight, W.A., 1989, Fundamentals of Machining and Machine Tools, DongMyeong Sa, Korea.

[11] LMT TOOLS, n.d., viewed 13 September 2016, The Shortest Path is ... A Curve, <http://www.lmt-tools.com/the-shortest-path-is-a-curve>.