

## 소형 앵글 스피들 공구의 절삭성능에 관한 연구

김진수<sup>\*,\*\*,#</sup>, 김용조<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> 한국폴리텍대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계과, <sup>\*\*</sup> 경남대학교 기계공학부

### Cutting Performance of a Developed Small-angle Spindle Tool

Jin Su Kim<sup>\*,\*\*,#</sup>, Yohng Jo Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Computer Aided Mechanics Department, Changwon Campus Korea Polytechnic

<sup>\*\*</sup>School of Mechanical Engineering, Kyungnam University

(Received 2 March 2016; accepted 27 March 2016)

#### ABSTRACT

The cutting performance of a developed small-angle spindle tool was investigated with Al6061 using a TiAlN coated high-speed steel end mill. Up-cut and down-cut processes in a milling machine were carried out at the range of 1000-4000 rpm for spindle speed and 50-300 mm/min for feed rate. As a result, the highest cutting force in the Fx direction was obtained from the up-cut process when the spindle speed was 1000 rpm and the feed rate was 100 mm/min. In the Fy direction, the highest cutting force appeared in the up-cut process at a feed rate of 250 mm/min at the same spindle speed. Conversely, the lowest cutting force came out in the up-cut process at a spindle speed of 4000 rpm and a feed rate of 50 mm/min. As for surface finish, the finest surface roughness was obtained as Ra 0.7642  $\mu$ m at a spindle speed of 4000 rpm and a feed rate of 50 mm/min. Consequently, given the cutting performance of the developed small-angle spindle tool, we conclude that its use in industrial practice is feasible.

**Key Words** : Angle Spindle(앵글 스피들), Cutting Performance(절삭성능), Surface Roughness(표면거칠기), Cutting Force(절삭력), Al6061(알루미늄 합금)

### 1. 서 론

절삭가공에서 가공정밀도에 직접적 영향을 미치는 주요 인자로서는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등이 있다. 일반적으로 이송속도를 증가시키면 형상오차가 커지게 되고, 주축의 회전수를 증가시키면 진동이 커지게 되어 공구수명이 짧아지는 결과를 초래하며, 또한 절삭온도 상승에 의해

정밀도가 저하된다<sup>[1-3]</sup>. 공작기계의 성능개선과 절삭공구의 제작은 상호 밀접한 관계를 가지고 있으며 이들 모두가 중요한 역할을 함으로써 완전한 고품질 제품이 가능해진다. 하지만 하나의 제품을 각 공정에 따른 여러 대의 공작기계를 사용함으로써 사이클 시간이 길어지고 제품의 이동에 따라 공작물을 고정하는 치구가 필요하게 된다. 또한 공작물의 이동에 따른 형상공차 및 고품위 제품의 생산에 어려움이 발생되어 조작자의 기능에 따른 불량률이 증가하면서 안정화된 기계라인을 구축하는 것도 쉽지 않다. 따라서 생산성을 높이기 위해 하나의 공작기계로 복잡한 형상의 복합가공을 가

# Corresponding Author : prokjs@kopo.ac.kr

Tel: +82-55-260-1134, Fax: +82-55-260-1175

능하게 하는 앵글 스피들이 널리 사용되고 있다. 그러나 특히 협소한 공간에서는 기존의 앵글 스피들로서는 상당한 가공의 제한을 받고 있다<sup>[4-6]</sup>.

최근 항공기 및 자동차의 많은 부품들이 형상의 복잡성에도 불구하고 강도 향상을 위해 일체형으로 제작되고 있다. 따라서 4축 또는 5축 공작기계가 많이 사용되고 있으나, 특히 앵글 스피들 공구를 사용하여 3축 공작기계에서도 가공이 가능하게 되었다. 그러나 형상이 복잡하고 협소한 공간에서는 기존의 앵글 스피들 공구는 그 크기로 인하여 작업이 거의 불가능하다. 예를 들면, 승용차용 캘리퍼(Caliper)의 경우 기존 분리형으로 되어 있던 것이 일체형 구조로 바뀌면서 실린더의 내부가공이 기존의 앵글 스피들로서는 가공이 곤란하였다. 따라서 기존 앵글 스피들의 소형화가 필요하게 되었고, 본 저자의 선행 연구에서 소형 앵글 스피들을 개발한 바가 있다.

본 연구에서는 최종 개발 공구의 신뢰성을 확보하기 위한 가공 성능의 실험적 조사를 수행하고자 하였다. 3축 머시닝센터에 장착된 앵글스핀들의 끝단에 TiAlN 코팅 엔드밀 공구를 장착하여 항공기와 자동차 부품에 많이 사용되어지고 있는 알루미늄 합금(Al6061)을 사용하여 건식가공으로 측면 절삭 된 가공에서 상향절삭과 하향절삭에서 절삭저항의 3분력과 진동에 의한 변위량에 따른 표면거칠기에 어떠한 영향을 미치는지 가공특성에 대하여 최적 절삭조건을 찾고자 하였다.

## 2. 장치 제작과 실험

### 2.1 머시닝센터용 앵글 스피들 장치

기존의 앵글 스피들은 회전방향을 상부에서 전환하는 형식으로 되어 있으며, 동력전달 계통이 복잡하여 스피들 헤드의 떨림이나 윤활 및 열 발생에 따른 냉각의 문제로 인해 3000rpm 이상의 고속 가공에서는 적용이 어려웠다.

따라서 본 저자는 선행 연구에서 머시닝센터용 소형 앵글 스피들을 개발하였으며, 특징적인 것은 다음과 같다. (1) 3축 머시닝센터에 장착하여 수직 회전을 수평방향으로 상부에서 전환하여 절삭방향

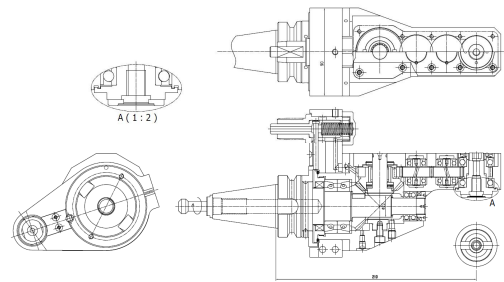


Fig. 1 CAD drawings of the developed small angle spindle tool

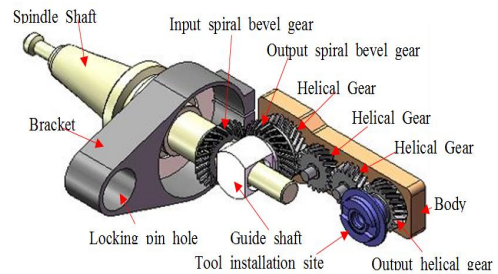
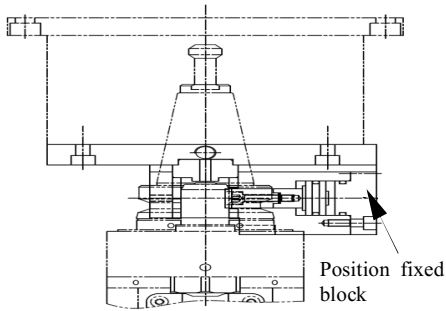


Fig. 2 Schematic illustration of the developed small angle spindle tool

을 직각방향으로 전환 가능, (2) 좌우 측면가공과 협소한 공간에서 절삭가공 가능, (3) 앵글 스피들에서 발생하는 떨림을 억제하는 진동방지 장치, Fig. 1은 개발한 소형 앵글 스피들의 설계도면이고, Fig. 2는 장치의 내부 구성도이다. 특히 브라켓(Bracket)은 로킹핀 홀을 통해 핀이 머시닝센터의 주축과 고정되어 진동을 방지하는 장치가 부착되는 부분이다.

개발된 앵글 스피들의 조립 정밀도는 측정을 위하여 인디게이트를 이용하여 진직도 0.002mm, 평행도 0.005mm, 평면도 0.01mm 이내로 측정되었고, 머시닝센터의 스피들에서 앵글스핀들의 위치핀(Positioning pin) 고정거리와 조립 전체 백래시를 앵글스핀들의 끝단에 인디게이트를 부착하여 0.02mm~0.05mm 이내에 맞추고 가공방향에 맞게 브라켓을 직각과 수평을 확인하여 고정하였다. 또한, 공구센터 측정 및 조정 작업에서는 진직도 0.002mm 이내, 진원도 0.01mm 이내, 주축 선단부



**Fig. 3 Location and structure of the positioning lock equipment**

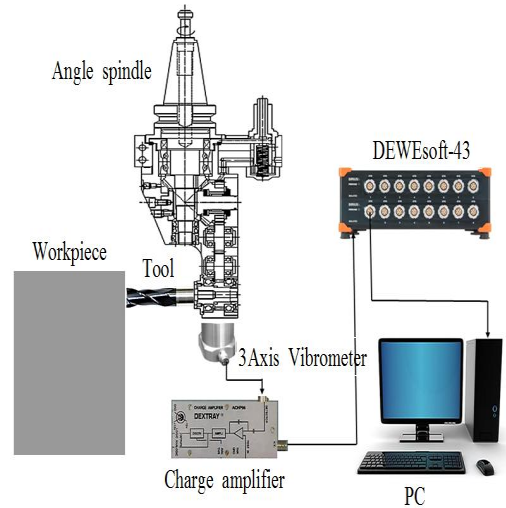
회전시 주축의 흔들림 공차 0.008mm 이내로 측정되었다.

## 2.2 앵글 스피들 진동방지를 위한 위치핀 고정 블록

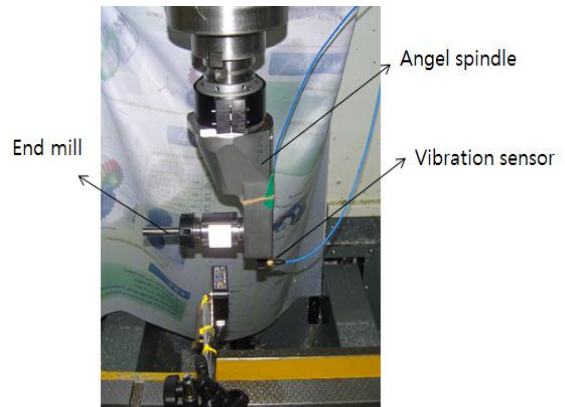
진동방지 장치는 공작기계의 스피들 하우징에 고정되어 있어 실린더에 유압이 가해지면 고정블록은 피스톤에 의해 전진하면서 오일 미스트 노즐을 강하게 압박하여 앵글 헤드에서 발생하는 진동이나 떨림 등을 억제하는 역할을 한다. 진동방지 블록 장치의 위치와 구조는 Fig. 3에 나타내었다.

## 2.3 절삭 가공 실험 방법 및 조건

본 실험에 사용된 CNC공작기계는 머시닝센터(TNV-40, S&T중공업)이며, 절삭저항과 같은 각종 데이터의 측정을 위한 실험 장치의 구성은 Fig. 4와 같이 하였다. 즉 절삭저항은 압전소자형 공구동력계(Kistler, 9257BA)를 이용하여 3분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )으로 측정하고, 절삭력 신호는 다채널 증폭기 DAQ Borad(AT-MIO-16E-1)를 거쳐 내장된 A/D 변환기에서 각 채널의 신호를 이산 신호로 바꾸어 터미널을 통해 LabVIEW 프로그램으로 컴퓨터에 저장하도록 하였다. 변위량 측정을 위하여 앵글 스피들의 하단에 압전형가속도센서를 부착하고 3축 진동에 따른 변위량을 측정하였다. 절삭유는 사용하지 않고 건식 절삭을 수행하여 절삭력과 변위량을 측정하였다. Fig. 5는 앵글 스피들의 변위량 측정을 위한 압전형 가속도 센서의 부착 위치



**Fig. 4 Schematic illustration for data acquisition in the cutting process**



**Fig. 5 Proximity sensor for measuring of vibration**

를 나타내었고 Table 1은 압전형 가속도 센서의 제원을 나타 내었다.

Table 2은 실험에 적용된 가공 조건이며, 소재는 자동차부품과 항공기부품에서 많이 사용하는 알루미늄합금(Al6061)이며, 70mmX40mmX40mm이다. 앵글 스피들 공구에 고속도강 엔드밀  $\varnothing 10\text{mm}$  2날 TiAlN 코팅공구를 장착하여 건식 절삭(dry cutting)으로써 Table 1과 같은 조건으로 상향절삭과 하향절삭 실험을 하였다. 주축회전수와 이송속도의 선정은 가공 모의 실험 결과 500rpm에서 이송속도 150mm/min일 때와



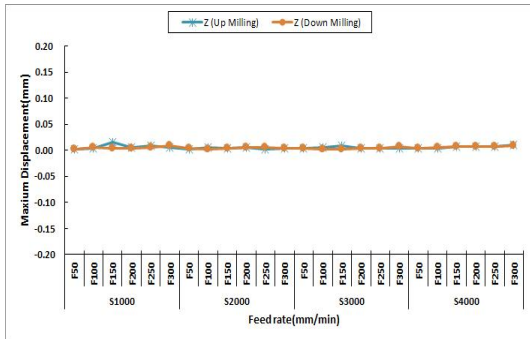


Fig. 8 Max. z-axis displacement measured in up-cut milling and down-cut milling of Al6061

절삭 가공에서 가장 높은 값을 가지고 보였다. z 축 방향에서는 S1000 및 F150일 때 상향절삭 가공 중에 가장 높은 값을 보였고, S2000와 F50에서 상향절삭 가공이 가장 낮은 값으로 나타났다.

가장 낮은 최대 변위량은 x축 0.000335mm, y축 0.001407mm, z축 0.001615mm로 상향절삭 가공 중에 나타났으며, 가장 높은 최대 변위량은 x축 0.084720mm, y축 0.033402mm, z축 0.015876mm이었으며, 주축 회전수가 높을 때 안정적인 변위량이 나타났음을 알 수 있었다.

### 3.2 절삭력 측정

절입깊이를 1.5mm로 하고 절삭력 측정을 하여 3분력( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )의 값으로 Fig. 9, 10 및 11에 나타내었다. x축 방향에서는 안정적인 값으로 나타났고, y축 및 z축 방향에서는 비교적 높게 나타났다. 이것은 앵글 스펀들의 측면 가공에 의한 머시닝센터 동작기계가 y축과 z축의 원형 가공에 따른 부하량이 각각의 축에서 가공되기 때문인 것으로 보였다. 모든 축의 회전수에서 이송속도 F50일 경우에는 절삭력의 3분력 모두가 낮게 나타났다. Fig. 9에서 x축의 3분력이 비슷하게 나타났으며, 가장 높은 부위는 S1000에서 F100일 때 상향절삭 가공 중에 나타났고, 가장 낮은 부위는 하향절삭에 의해 S4000 및 F50일 때 나타났다. 그러나 전체적으로 3분력이 비슷하면서 낮은 값을 보였다.

Fig. 10와 같이  $F_y$ 는 S1000 및 F250에서 상향절삭 가공 중에 가장 높았으며 거의 200N이었다. 가장 낮은 값은 S4000 및 F50일 때 상향절삭 가공

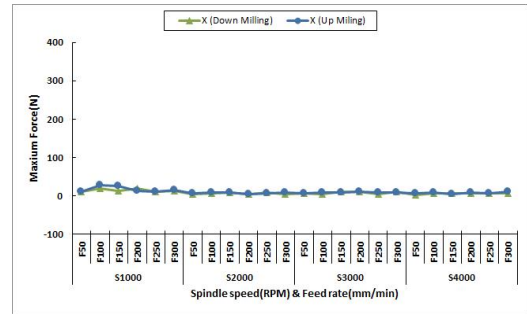


Fig. 9 Max. cutting force of  $F_x$  in up-cut milling and down-cut milling of Al6061

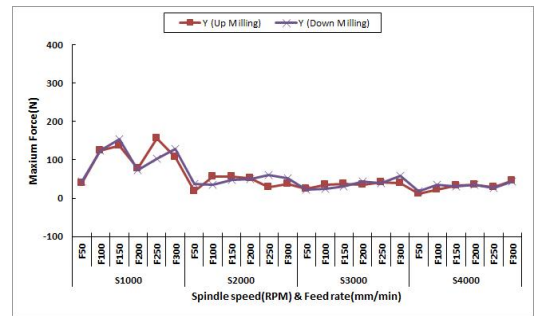


Fig. 10 Max. cutting force of  $F_y$  in up-cut milling and down-cut milling of Al6061

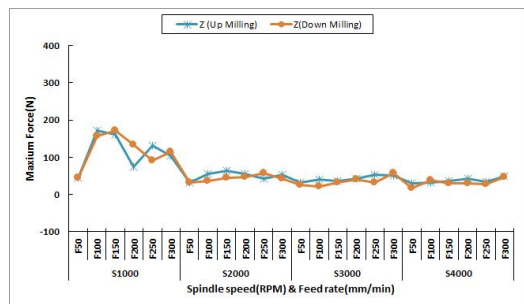


Fig. 11 Max. cutting force of  $F_z$  in up-cut milling and down-cut milling of Al6061



에서 나타났다.

z축 방향에서는 Fig. 11에서와 같이 하향절삭에서 S4000 및 F50일 때 절삭력은 가장 낮은 값이었고, 상향절삭의 경우에는 S1000과 F100에서 가장 높은 값을 보였고 거의 200N에 가까웠다.

결론적으로 주축회전수 S4000, 이송속도 F50일 때 x축은 하향 절삭가공 시 가장 낮은 값을 보였고, Fy는 상향절삭에서 가장 낮은 값을 가졌다. 또한 Fz는 하향절삭가공 중에 가장 좋은 것으로 나타났다.

### 3.3 표면거칠기의 측정

표면 거칠기 분석 프로그램인 Surfcoeder-F3500D를 이용하여 표면거칠기의 측정은 Fig. 12와 같이 시험편의 측정 방향 8곳을 측정하여 평균값을 사용하였으며, 가공 방향과 직각 방향인 면을 측정하였다.

일반적으로 이송속도에 따른 표면거칠기는 상향절삭과 하향절삭 가공시 회전수가 높을수록 이송속도가 낮을수록 표면거칠기가 좋게 나타났음을 알 수 있었다. Fig. 13에는 하향절삭 가공시의 표면거칠기 Ra 값을 나타내었고, 가장 양호한 경우는 Ra 0.7641 $\mu\text{m}$ 이었으며 S4000 및 F50의 조건에서 나타났다. 반면에 가장 불량한 것은 3.8917 $\mu\text{m}$ 이며 S1000에서 F250과 F300에서 나타났다.

Fig. 14에는 상향절삭 가공시의 Ra 값을 나타내었고, S4000 및 F50에서 Ra 0.954 $\mu\text{m}$ 로서 가장 양호했다. 그러나 S1000과 F250에서는 Ra 3.984571 $\mu\text{m}$ 이었으며 가장 나쁘게 나타났다.

결국, 소형 앵글 스피들을 사용하여 상향절삭과 하향절삭을 하였을 경우 주축회전수 S4000과 이

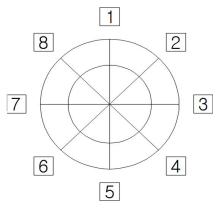


Fig. 12 Measuring direction for surface roughness of the machined surface

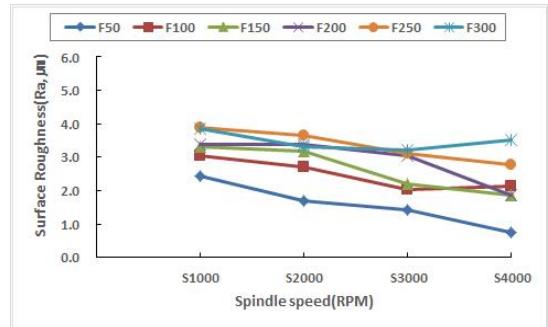


Fig. 13 Surface roughness Ra by down-cut milling of Al6061

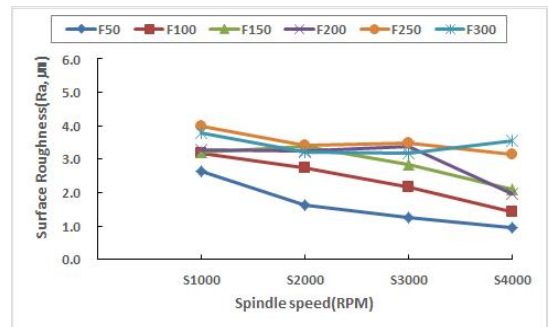


Fig. 14 Surface roughness Ra by up-cut milling of Al6061

송속도 F50에서 일반적으로 양호한 값을 보였으나, 특히 하향절삭 가공에서 가장 우수한 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 소형 앵글 스피들 공구의 절삭 성능을 조사하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 3축 머시닝 센터에서 알루미늄합금(Al6061)을 절삭소재로 하고 TiAlN코팅 고속도강 엔드밀을 사용하여 상향절삭과 하향절삭에 의해 앵글 스피들에 미치는 영향을 조사하였다. 가공방향에 따른 절삭조건을 제시하고, 측면 절삭 원형 가공 중에 절삭조건 변화에 따른 각축의 절삭저항, 진동에 의한 최대 변위와 표면거칠기 값 등을 조사하여 형상 가공이나 미소구간의 가공을 수행할 수 있는

소형 앵글 스피들의 가공특성을 확보하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각각의 절삭축에서 절삭저항 3분력의 크기는 비교적 비슷하게 나타났다. 가장 높은 절삭력은 y축에서 S1000과 F250, 상향절삭에서 200N 정도의 크기로 나타났고, 또한 z축에서 S1000과 F150에서 비슷한 크기로 나타났다
- 2) 진동에 의한 앵글 스피들의 최대 변위량은 전체적으로 안정적인 값을 보였다. 가장 낮은 변위량은 x축 0.000335mm, y축 0.001407mm, z축 0.001615mm 이었으며 상향절삭가공 중에 나타났다. 반면 가장 높은 변위량은 x축 0.084720mm y축 0.033402mm, z축 0.015876mm 이었으며 회전수가 높을 때 나타났다. Al6061 합금 절삭가공시 앵글 스피들은 상당히 안정적인 변위량이 발생하였다.
- 3) 표면거칠기 경우에는 S4000, F50, 하향절삭에서 Ra 0.7641 $\mu$ m까지 얻을 수 있었고 가장 우수하였다. 일반적으로 하향절삭 시에 주축회전수가 높고 이송속도가 낮을수록 우수한 표면거칠기를 얻을 수가 있었다.
4. Kim, G. H., Yang, S. C. and Park, Y. C., "A Study on the Characteristics on Ultra Precision Machining of Al6061-T651", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4 No. 1, pp.43-48, 2005.
5. Kim, K. R., Ko, H. J., Cho, Y. T. and Jung, Y. G., "Development of Angle Spindle for Shape Machining of Hydrostatic Bearing", Proceeding of the Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Spring Conference, pp. 71, 2013.
6. Park, H. K., Lee, S. M., Lee, C. S., Chae, S. S., Lee, W. S., Choi, Y. S., Jo, H. T., Baek, Y. J. and Lee, J. C., "A Study on the Characteristics of High-Speed Small-Diameter Wipe Milling for Al 6061", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 24-28, 2012.

## REFERENCES

1. Yan, D., El-wardany, T. I. and Elbestawi, M. A., "A Multi-sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398, 1995.
2. Lee, J. K., Lyu, J. H., Kim, M. K. and Kook, J. H., "A Study on the Evaluation of End Mills for High Speed Machining", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 833-837, 2000.
3. Bae, H. J. and Park, H. S., "Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling" Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 52-59, 2004.