

엔드밀 가공시 주축 오리엔테이션 기능을 통한 공구마멸측정 보정 장치의 개발

강익수*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 김전하(부산대 대학원 정밀기계공학과),
강명창(부산대 기계공학부), 김정석(부산대 기계공학부), 김기태(화천기공㈜)

Development of Calibration Instrument for Tool Wear Measurement using Spindle Orientation Function in End Milling

I. S. Kang(Graduate School, PNU), J. H. Kim(Graduate School, PNU), M. C. Kang(School of Mech. Eng., PNU),
J. S. Kim(School of Mech. Eng., PNU), K. T. Kim(Hwacheon Machinery Co.)

ABSTRACT

The most important thing in measuring the tool wear is to set up the measurement base. The end mill that is being used for machining is difficult to set up the base and to measure the tool wear because of geometric properties of that such as a helix and relief angle. In this study, a new instrument using spindle orientation function in end milling is developed to measure tool wear and evaluated by measuring system on the machine. Finally, this new method makes possible the wear measurement of same position and reduces measuring time compared with measuring methods such as the microscope and CCD.

Key Words : End Mill(엔드밀), Spindle Orientation(주축 오리엔테이션), Tool Wear(공구마멸), Calibration(보정), BT Type Tool Holder(BT 형 공구홀더), Slenderness Ratio(세장비)

1. 서 론

최근 고속가공의 도입으로 고속·고정도 가공을 위하여 엔드밀의 사용이 증대되고 있지만, 엔드밀의 기하학적인 특성으로 인해 마멸측정이 어려운 실정이다. 기상계측 마멸측정시스템의 구축으로 공작기계 테이블상에서 바로 주축을 이동시켜 마멸을 측정하게 되면, 공구탈착, 광조도(Illuminance), 조명각도 등의 오차를 최소화하고, 반복정밀도를 높일 수 있다. 이렇게 오차를 최소화해도 여전히 문제가 남아있다. 여유면마멸(Flank wear) 측정시 경계선을 정하는 방법 외에는 기준을 정하기가 어렵고, 이 경계선은 헬릭스각(Helix angle)으로 인해 3 차원 공간상에 존재하므로 곡선의 형태로 인해 배율을 높이면 측정 가능한 가시영역이 좁아지게 된다. 그리고 가공후 엔드밀 화상을 실시간으로 획득하면서 화면상에 정해둔 기준선과 여유면들의 경계선을 일치시키기 위해 수동으로 조작해야 하기 때문에

공구마멸 자동 측정은 불가능하다.⁽¹⁻²⁾

공구마멸 측정에 대한 대부분의 연구가 센서 신호를 통한 실시간 감시와 머신비전(Machine vision) 시스템을 이용한 이미지 처리에 머물러 있고, 직접적인 측정에 대한 연구는 미진한 상태이다.⁽³⁻⁴⁾ 절삭력, 가속도, 음향방출, 소음신호를 처리하는 간접적인 측정법이 연구되고 있지만, 이는 다양한 가공조건과 공구형상으로 인해 많은 실험이 필요하므로 단순한 공정이나 실험실차원에서만 적용되고, 정확한 측정이나 감시가 어려운 실정이다.⁽⁵⁻⁸⁾

따라서 본 연구에서는 가공후 주축을 공구마멸 측정위치로 움직이게 하는 서브프로그램을 작동시켜 이동한 후 주축을 고정시켰을 때 공구가 항상 측정하고자 하는 위치에 정지하도록 하고, 이를 위해 공구를 공구홀더에 장착시 원주방향 각도조절에 의해 공구의 측정위치를 고정시킬 수 있으며, 엔드밀의 정확한 세장비를 직접 측정할 수 있는 장치를 개발하여 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 주축 오리엔테이션 원리

정확한 마멸경향의 측정을 위해서는 항상 동일한 위치의 이미지가 획득되어야 하지만, 수동 조작 과정을 거치게 되면 측정시간이 상당히 지연되고, 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 먼저 가공 전 공구를 측정하고자 하는 위치에 맞춰 공구홀더에 장착할 수 있는 장치가 필요하다. 주축 정위치 정지 기능을 이용하면 항상 동일한 위치의 이미지 획득이 가능하게 된다. 주축 오리엔테이션은 주축회전의 $\pm 180^\circ$ 범위 내에서 그리드시프트(Grid shift)로 위치를 옮길 수 있다. FANUC 시스템에서 주축 오리엔테이션의 지령 시퀀스(Sequence)는 PMC(Programmable motion controller)와 CNC 사이의 통신에 의해 주축 정위치가 이루어진다. 원리는 센서에서 1 회전 신호와 위치검출 펄스신호를 피드백해서 CNC 상에 기억되어 있는 주축위치에서 정지하도록 한다.

2.2 공구마멸 보정 장치 원리

BT 형의 툴홀더는 이면구속이므로 먼저 주축 오리엔테이션을 실행하여 툴홀더와 주축의 일치하는 하나의 홈과 키에 마크를 해두면 공구장착시 이 마크를 고려하여 장착하여 주축 오리엔테이션시 반복적으로 동일한 위치의 마멸측정이 가능하게 할 수 있다. 따라서, 평 엔드밀의 경우 직경과 헬릭스각을 알고, 측정하고자 하는 축방향 높이를 정하면 툴홀더에 공구를 장착할 때 축방향 높이에 일치하는 각도로 회전시켜 장착할 수가 있게 된다. 먼저 평 엔드밀의 기하학적인 구조로부터 축방향 높이와 공구 회전각의 관계를 원주방향으로 펼친 그림인 Fig. 1로부터 계산할 수 있다.

헬릭스각 α 와 측정하고자 하는 공구의 축방향 높이 L_a 로부터 원주방향 길이 L_c 는 식 (1)과 같다.

$$L_c = L_a \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

펼친그림의 원주방향 길이의 최대값은 공구직경이므로 전체 원주길이에 대한 식 (1)에서 얻어진 원주방향 길이의 비가 공구장착시 회전 시켜야 하는 각도가 된다. A-A 단면에서 B 점이 B'로 이동하는 각도 β 의 라디안값을 구하는 식은 식 (2)와 같다.

$$\beta = \frac{L_c}{\pi D} \cdot 2\pi = \frac{L_a \cdot \tan \alpha}{\pi D} \cdot 2\pi = \frac{2L_a \cdot \tan \alpha}{D} \quad (2)$$

평 엔드밀의 경우 여유각은 공구의 특성에 따라

보통 $10 \sim 15^\circ$ 사이에 존재한다. 따라서, Fig. 2 에서 처럼 초기 공구날의 수직상태에서 C 와 같은 상태로 측정되면 여유면의 초점이 맞지 않게 되므로 C' 상태처럼 날 E 가 E' 의 상태로 여유각 γ 만큼 공구를 적게 회전시켜 여유면 전체의 이미지가 다 획득 되도록 해야 한다.

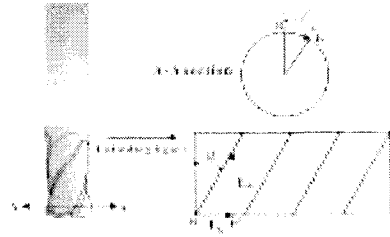


Fig. 1 Geometry and shape of flat end mill

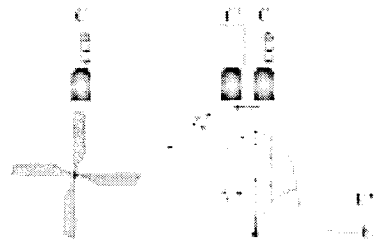


Fig. 2 Relation of relief angle and lens focus

Fig. 3 의 A 점을 기준으로 공구를 시계방향으로 회전시키려 할 때 측정하고자 하는 높이가 90° 회전시의 축방향 높이를 초과하면 CCD 로 측정이 어렵기 때문에 측정하고자 하는 최대높이 L_m 의 한계를 정해서 90° 회전시 보다 축방향으로 초과하는 높이에 대한 각을 반시계방향으로 움뻐시켜 기준을 새롭게 정해야 한다.

공구를 90° 회전시킬 때 축방향 높이는 식 (1)로부터 식 (3)과 같이 구해진다.

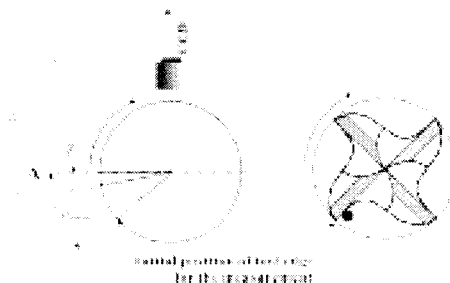


Fig. 3 Decision of offset angle for the measuring height

$$L_{90} = \frac{\pi D}{4 \cdot \tan \alpha} \quad (3)$$

최대높이에서 공구를 90° 회전시켰을 때의 높이의 제한 값을 식 (2)에 대입하고, 여기에 여유각을 더하면 식 (4)와 같이 읍셋시켜야 하는 각도가 계산된다.

$$\beta_{offset} = \frac{2 \cdot \tan \alpha}{D} \left(L_m - \frac{\pi D}{4 \cdot \tan \alpha} \right) + \gamma$$

$$= \frac{2 \cdot L_m \tan \alpha}{D} - \frac{\pi}{2} + \gamma \quad (4)$$

식 (4)와 같이 읍셋시킨 각도에서의 위치가 기준이 되며 최종적으로 이 기준에서부터 회전시켜야 하는 공구의 회전각은 식 (5)와 같이 구해진다.

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{2 \cdot L_m \tan \alpha}{D} - \frac{\pi}{2} + \gamma - \frac{2 \cdot L_o \tan \alpha}{D}$$

$$= \frac{2 \cdot \tan \alpha}{D} (L_m - L_o) + \gamma \quad (5)$$

이런 원리를 이용하여 측정하고자 하는 높이에 일치하도록 공구를 회전시켜 장착시킬 수 있는 장치를 제작하였고, 지금까지 대략적으로 측정하던 공구의 뚫출길이를 직접 측정할 수 있게 하여 보다 정확한 세장비(L:D)를 구할 수 있게 하였다.

3. 공구마멸 보정 장치 개발

공구마멸 측정위치로 공구를 회전하여 고정하고, 세장비를 측정할 수 있도록 개발된 장치와 전체 4 방향에서 관찰되는 모습을 ① ~ ④부위로 확대하여 Fig. 4에 나타내었다.

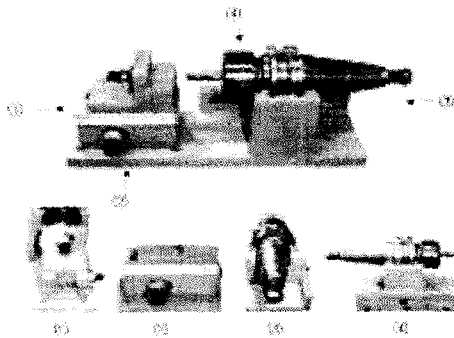


Fig. 4 Figures of instrument according to view position

①부위는 이송대이며 공구를 회전시킬수 있는 축과 다이얼이 장착되어 있고, 설치된 다이얼은 1회전에 50 등분되어 있으므로 한눈금당 7.2°의 분

해능을 가진다. ②부위는 공구뚫출길이를 측정할 수 있으며, 공구는 같이 이송되지 않고 수동으로 공구 밑날부가 이송대 벽면에 접하도록 되어있다. ④부위로 툴홀더를 정확하게 잡아주는 지그로 툴홀더의 홈에 별마크가 된 부분이 위로 오게 하고 반대편이 지그의 키와 접하도록 하였으며, 툴홀더가 회전과 이동을 하지 못하도록 지그는 정밀하게 제작되었다

4. 결과 및 고찰

4.1 평가 실험장치 및 방법

개발된 장치의 평가를 위하여 사용된 머시닝센터는 Makino V-55이며, 마멸이미지는 200 배 렌즈를 장착한 CCD 를 테이블에 고정한 기상계측용 마멸 측정시스템을 사용하여 획득하였다. 평가에 사용된 평 엔드밀은 축방향으로 10mm 가공을 수행한 공구이며, 코너부마멸이 0.3 mm 에 달한 마멸공구이다. 평가에 사용된 장치 및 사양들을 Table 1에 나타내었다.

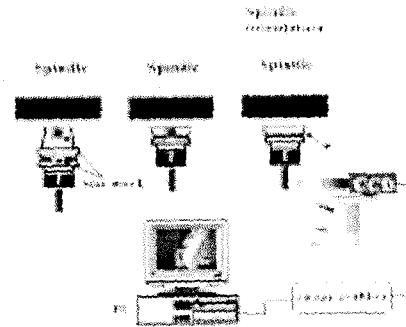


Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Instrument and specification

Instrument	Specification
Machining center	Makino V-55, Max 20,000 rpm
CCD	PULNIX Lens(x200)
Tool	4 flute flat end mill(TiAlN coated) Diameter : 10 mm Length : 70 mm(Sank : 45 mm) Helix angle : 30° 1st relief angle : 14° Condition : Worn tool
Tool holder	BT type

최대 측정높이를 15mm 로 하고, 3 개의 측정하고자 하는 높이를 정하여 식 (5)에 대입하여 공구 회전각을 구하고, 개발된 장치로 공구를 회전하여

툴홀더에 고정시켜, Fig. 5 와 같이 주축에 장착한 후 주축오리엔테이션을 실행하였다. 이 상태에서 주축을 렌즈쪽으로 이동시켜 측정높이 위치를 맞추고, PC 화면상에 헬릭스각 30° 로 붙여둔 기준선과 공구의 1·2 차 여유면의 경계선을 일치시킨 후 위치의 좌표를 영점으로 지정하였다.

평가방법은 임의의 지점으로 주축을 이동시켜 놓고 주축 오리엔테이션 기능이 포함된 마멸측정을 위한 서브프로그램을 구동시켜 지정된 공구마멸 좌표계로 이동하여 마멸이미지를 획득하였고, 1 차 여유면의 선명한 이미지 획득여부를 판단하고, 실제 제작된 장치로부터 발생한 오차성분을 정량적으로 파악하여 이론적으로 계산된 공구 회전각을 수정하였다. 수정된 회전각의 적용으로 각 측정높이에서의 선명한 이미지 획득정도를 파악하고, 임의의 위치에서 반복 실험으로 동일한 이미지의 획득 가능성을 평가하였고, 기존의 마멸 측정법들과의 측정시간을 측정하여 본 장치에 의한 측정법의 효율성을 확인하였다.

4.2 평가 결과 및 고찰

Fig. 6 은 엔드밀의 여유면마멸 이미지를 보여주고 있다. 마멸부위는 은백색, 1 차 여유면은 회색, 2 차 여유면은 검은색으로 나타날 때를 최적의 조명상태로 정하고, 1 차 여유면은 렌즈와 수직인 평면을 이루도록 하여 왜곡된 이미지가 생기지 않도록 하였다.

평가에 사용된 공구의 경우 측정하고자 하는 최대높이 한계가 15mm 이므로 식 (1)로부터 구해진 초기 윗셋각 23.2° 를 장치에 설정하였다. 실제 측정높이는 엔드밀의 끝날이 PC 화면 중앙에 있을 때를 영으로 하여 측정하였다. 측정할 높이 4, 8, 12mm 를 식 (5)에 대입하여 구해진 회전각만큼 장치에서 엔드밀을 회전시킨 후 주축에 장착하고, 주축고정을 실행하여 마멸을 측정한 결과, Fig. 6(a)와 같이 광조도가 어둡고, 여유면상에서 초점이 균일하지 않음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 6(b)처럼 엔드밀을 역회전시켜 선명한 광조도와 여유면의 균일한 초점이 잡히도록 보정하였다.

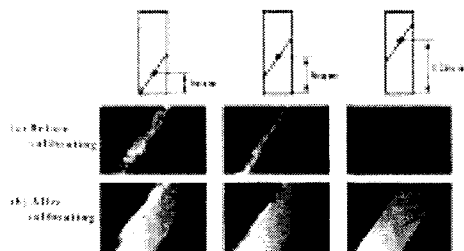


Fig. 6 Calibration of wear image by reverse rotation

이러한 원인은 장치 및 엔드밀 형상에 의한 오차로 역회전각도만큼 보상이 이루어져야 한다. 주축 회전각도의 측정이 곤란하므로 Fig. 7 과 같이 주축을 회전시키고, 이동시킨 Y 축 보상거리 D_{cal} 를 측정하여 보상할 회전각도 θ_{cal} 를 식 (6)으로부터 구하였다.

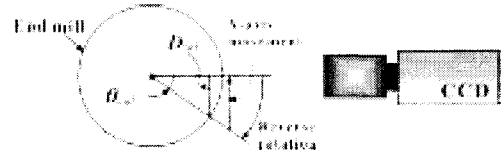


Fig. 7 Calibration principle of initial offset angle

$$\theta_{cal} = \sin^{-1}\left(\frac{2 \cdot D_{cal}}{D}\right) \quad (6)$$

이상의 실험으로 얻어진 보정거리와 각도에 대한 결과값들을 Table 2 에 나타내었으며, 초기 윗셋각은 보정각도가 더해져서 최종적으로 식 (7)와 같이 수정된다.

Table 2 Calibrating distance and angle according to measuring height

Measuring Height L_a (mm)	Rotating Angle β (°)	Calibrating distance D_{cal} (mm)	Calibrating angle θ_{cal} (°)
4	80.2	1.17	13.5
8	47.1	1.2	13.9
12	14	1.19	13.8

$$\beta_{offset} = \frac{2 \cdot L_m \tan \alpha}{D} - \frac{\pi}{2} + \gamma + \theta_{cal} \quad (7)$$

본 장치로부터의 보정거리는 거의 일정하게 1.2mm 이므로 보정 회전각을 13.9° 로 정하였다. 따라서 최종적인 윗셋각은 37.1° 가 된다. 장치 및 엔드밀의 기하학적인 형상에 기인한 윗셋각은 엔드밀의 형상에 따라 앞선 실험방법에 의해 사전에 정해져야 한다.

주축 오리엔테이션 기능을 사용하여 실험한 결과 각각의 측정높이에서 선명한 이미지의 획득이 가능함을 Fig. 8 에 나타내었다. 각각의 측정시 측정하고자 했던 높이 외의 다른 높이의 이미지들은 초점이 맞지 않고, 여유면을 나타내지 못하며 조명상태가 좋지 않음을 알 수 있었다.

Table 3 은 ① 공구현미경시스템, ② CCD 시스템, ③ 기상계측용 CCD 시스템, ④ 주축 오리엔테이션

을 이용한 새로운 방법의 4 가지 경우에 대해 평정한 결과를 보여주고 있다. 이는 임의의 위치에서 주축을 분리하거나 이동시키는 시점을 시작으로 하여 공구마멸 측정과 이미지 획득 후 원위치 상태로 복귀하는 시점까지의 5 회 평균시간이다. 기상계측 마멸측정과 주축 오리엔테이션을 통합한 새로운 방법이 공구현미경 측정법에 비해 5 배정도 측정시간이 단축됨을 알 수 있다.

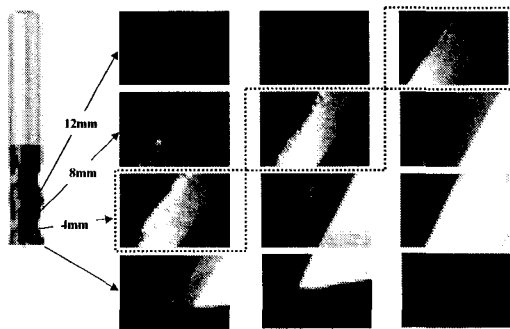


Fig. 8 Differences of flank wear images according to measuring height

Table 3 Comparison of measuring time for various methods of tool wear measurement

Method	Measuring time
1. Microscope	2min 12sec
2. CCD system	1min 40sec
3. CCD system on the machine	47sec
4. Spindle orientation	28sec

5. 결론

본 연구는 보다 정확하고 신속한 엔드밀의 마멸 측정을 위하여 수행되었으며, 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 주축 오리엔테이션 기능의 원리를 파악하였고, 측정하고자 하는 고정된 엔드밀의 공구마멸 측정높이 만큼의 회전각도를 계산하는 방정식을 기하학적 형상 치수들로부터 유도하였다.

2) 이론적으로 계산된 회전각도로 엔드밀을 회전시켜 고정시킬 수 있으며, 동시에 세장비의 측정이 가능한 공구마멸 보정 장치를 개발하였다.

3) 장치의 성능평가를 통해 이론적인 각도 외에 장치에서 기인하는 오차 각도를 파악하였고, 이를 보정하여 초기 윗셋각을 수정하였다.

4) 각각 다른 마멸정도를 가지는 측정높이에 대

한 성능평가를 통해 선명한 마멸이미지의 획득이 가능하였고, 반복실험을 통해서도 동일한 이미지의 획득이 가능하였다.

5) 기존의 직접적인 공구마멸 측정법들에 비해 월등히 뛰어난 작업효율을 나타내었으며, 특히 공구현미경 측정법에 비해서는 측정시간을 5 배정도 단축할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003 년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공㈜ 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Iwade, H., and Fujii, Y., "Study on Cutting Mechanism of Different Helix Angles End Mills," JSPE, Vol. 10, pp. 1889-1893, 1990.
- Ko, S. L., Lee, S. K., and Bae, S. M., "Study on the Design of End Mill Geometry," KSPE, Vol. 18, No. 8, pp. 24-31, 2001.
- Martin, K. F., "A Review by Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine Tools," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, No. 4, pp. 527-551, 1994.
- Pfeifer, T., and Wieggers, L., "Reliable Tool Wear Monitoring by Optimized Image and Illumination Control in Machine Vision," Measurement, Vol. 28, No. 3, pp. 209-218, 2000.
- Roget, J., "Use of Acoustic Emission for In-process Monitoring of Tool during Turning and Milling," Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society for NDI, pp. 94-101, 1986.
- 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 하건호, "고속 엔드밀 가공시 동적모델에 의한 표면형상 예측," 대한기계학회지, 제 24 권, 제 7 호, pp. 1681-1688, 2000.
- Wilcox, S. J., Reuben, R. L., and Souquet, P., "The use of Cutting Force and Acoustic Emission Signals for the Monitoring of Tool Insert Geometry during Rough Face Milling," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 37, No. 4, pp. 481-494, 1997.