

고속 볼엔드밀가공에서 회전오차의 측정을 통한 표면거칠기 예측에 관한 연구

- 회전오차가 표면거칠기에 미치는 영향 분석 -

Prediction of Surface Roughness through Measuring Runout
in High-speed Ball-End Milling

김병국(부산대 정밀기계공학과 대학원), 이기용 (부산대 정밀기계공학과 대학원),
이득우(부산대 기계공학부), 김정석(부산대 정밀기계공학과)

ABSTRACT

In this study the runout of spindle is selected as a parameter through which we could measure the machinability of machine and the quality of products. We experimented the effects of runout on surface roughness in high-speed ball-end milling by cutting HP4M workpiece in various cutting condition. It was found that runout makes a directive effects on surface roughness and the frequency type of runout is more or less similar with that of surface roughness. So the prediction of surface roughness could be possible through measuring the spindle runout.

Key Words : Runout(회전오차), Surface Roughness(표면 거칠기), Ball-End Milling(볼엔드밀 가공)

1. 서론

공작기계를 이용하는 기계가공에 있어서 제품의 품질을 좌우하는 요인중의 하나로 공작기계의 성능이 큰 비중을 차지하고 있다. 그래서 제품의 품질 향상을 위해 공작기계의 성능향상을 위한 연구가 계속되고 있다. 특히 제품의 고정도, 고능률 가공을 위하여 공작기계의 고속화가 진행됨에 따라 주축회전수와 이송속도 등의 고속화가 제품의 품질에 미치는 영향에 대한 연구가 요구되고 있다.

지금까지는 절삭메커니즘의 해석을 위해 공구동력계를 이용한 절삭력모델의 개발이 주로 이루어져 왔으나,^{1,2)} 고속절삭의 영역에서는 주축의 회전수가 10,000 ~ 40,000rpm의 범위에서 절삭이 이루어지기 때문에, 기존의 공구동력계는 응답속도가 절삭속도에 비해 느려 날당의 절삭저항변동을 측정하기가 불가능하다.³⁾ 또한 절삭력 측정의 경우 공구동력계에 공작물을 설치하여 수행함에 따른 설치상의 제약이

있다. 그래서 공작기계의 가공성의 파악과 제품의 품질정도의 예측이 가능하고 고속가공의 환경에 적합한 측정기술의 개발이 필요한 실정이다.

이를 위해 본 연구에서는 주축의 회전오차를 공작기계의 가공성과 제품의 품질을 측정, 예측할 수 있는 측정인자로 설정하고, 이것이 표면거칠기에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다.

주축의 회전오차는 공작기계의 가공정도를 판단할 수 있는 중요한 특성으로 주축과 공구의 설치오차, 편심질량 뿐만 아니라 가공시 공구의 휨정도, 제품의 재질등 공작기계가 가질 수 있는 가공성과 절삭조건에 의한 가공특성이 종합적으로 나타나는 인자라 할 수 있다.⁴⁾

본 실험에서는 고속머시닝센터와 볼엔드밀을 이용하여 다양한 가공조건에서 회전오차의 파형 분석을 통하여 주축의 회전오차가 표면거칠기에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 고속머시닝센터에서 볼엔드밀을 이용하여 절삭실험을 하였다. Photo. 1에 이 실험을 위한 장치도를 나타내었다.

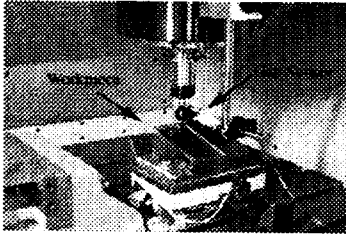


Photo. 1 Experimental set-up

본 실험에서 이용한 밀링 머시닝센터는 주축의 회전수를 최고 20,000rpm까지 낼 수 있는 고속용 장비이다. Photo. 1.에서 나타낸 것과 같이 주축의 회전 오차를 측정하기 위하여 변위측정기를 공구에 1mm의 간격을 두고 설치하였으며, 절삭력을 측정하기 위해 공구동력계 위에 피삭제를 설치하였다. 변위측정기와 공구동력계에서 나온 신호를 A/D Converter를 이용하여 4개의 채널로 획득하였다. 시편은 HP4M (HRC28)을 사용하였으며, 평면과 경사면(15°) 두 종류를 절삭하였다.

Table 1 Experimental equipments

Maching Center	Spindle speed : 20,000rpm Feed Speed : 50m/min Location Resolution : 2 μ m
Dynamometer	Range : -2.5 ~ 2.5 (kN) Rigidity : 240 N/ μ m
Gap Sensor	Resolution : 0.5 μ m Range : 0 ~ 2.0mm
Surface Roughness Measurement System	Range : 0 ~ 120 mm Vertical Resolution : 0.5nm Horizontal Resolution : 0.1 μ m
Tool	Ball Endmill (ϕ 10)
Workpiece	HP4M (HRC28)

가공후에 시편의 표면거칠기를 측정하기 위하여 점

측식 표면거칠기 측정기를 사용하여 R_a , R_{max} , 등을 측정하였다. Table 1.에 실험장비를 나타내었다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 5종류의 가공방식으로 절삭실험을 하였다. 크게 평면과 경사면의 시편을 절삭하였는데, 경사면은 가로하방향(horizontal downward), 가로상방향(horizontal upward), 세로하방향(vertical downward), 세로상방향(vertical upward) 4종류의 가공방식으로 절삭실험을 하였다. 그리고 모두 하향 절삭을 채택하였다.

평면보다 경사면의 가공방식을 다양하게 한 것은 일반적인 금형 제품의 가공에서 단순한 평면보다는 경사면이나 곡면이 많기 때문에 경사면에서의 가공 특성을 파악하기 위해서이다. Fig. 1.에서 경사면의 가공방향을 나타내었다.

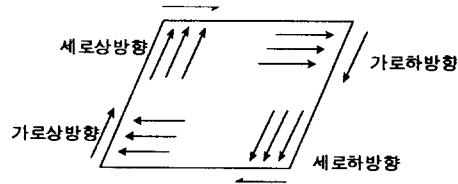


Fig. 1 Cutting direction in an inclined plane

주축의 회전수는 각 가공방식에 있어서 8,000 10,000 12,000 15,000 18,000rpm 5종류의 회전수로 가공하였다. 그리고 이송속도도 각 회전수에 맞추어 2,400 3,000 3,600 4,500 5,400mm/min으로 하였다. 이것은 회전당 이송량을 0.3mm로 일정하게 하기 위함이다. Table 2.에 가공조건을 나타내었다.

Table 2 Experimental condition

Cutting Direction	Flat, Incline(Vertical, Horizontal)
Spindle Speed (rpm)	8,000 10,000 12,000 15,000 18,000
Feed Speed (mm/min)	2,400 3,000 3,600 4,500 5,400
Feed per Revolution (mm)	0.3
Pick Feed (mm)	0.3
Axial Depth of Cut (mm)	0.8

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도에 따른 회전오차의 특성

절삭속도 증가에 따른 회전오차의 특징을 알아보기 위해 평면가공에서 주축의 회전오차 파형을 절삭속도에 따라 Fig. 2에 나타내었다.

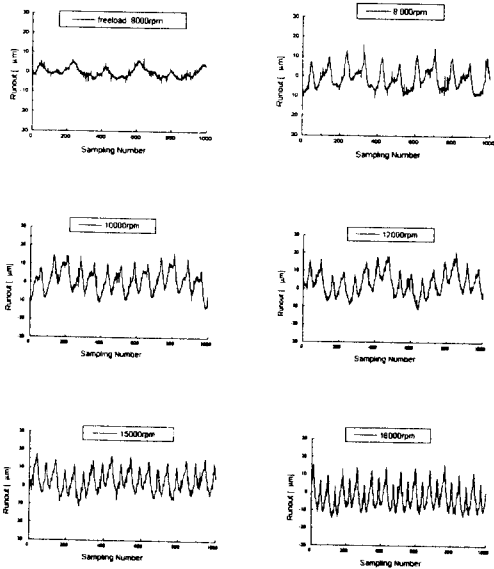


Fig. 2 Runout for cutting speed

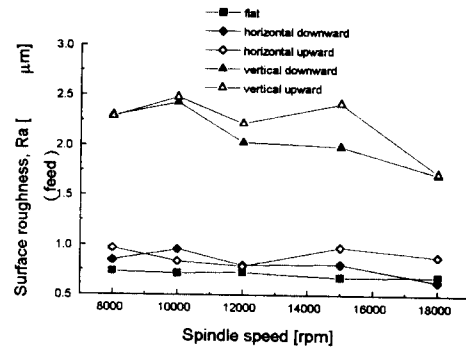
절삭을 수행하지 않은(무부하) 상태의 회전오차(8,000rpm)의 파형과 각 회전속도에 따른 회전오차의 파형을 비교하기 위하여 샘플링수를 1000개로 하여 도시하였다. 데이터 획득에 있어서 샘플링 주파수를 25kHz로 하고 한번 신호 획득시 5,000개의 데이터를 받았다. 그러므로 한번 신호를 획득하는데 걸리는 시간은 0.2초이다.

회전오차의 파형에서 각각의 피크는 절삭인선이 절삭이 이루어질 때의 회전오차의 양이다. 무부하 절삭시 회전오차의 양을 제외한 나머지가 실제 가공시 발생하는 공구의 휨에 의한 회전오차라 할 수 있다. 그리고 한 주기안에서의 회전오차량의 편차는 날당 절삭량의 차이로 볼 수 있고 이것이 표면거칠기에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

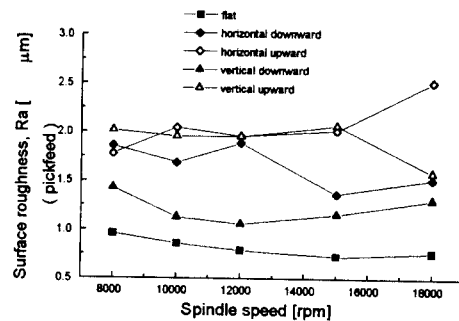
3.2 표면거칠기 분석

Fig. 3은 각 절삭방식에 의해 절삭한 시편의 표면을

이송방향과 피크피드 방향으로 표면거칠기, R_a (평균 거칠기)를 측정하여 주축회전수의 증가에 따라 나타낸 것이다. 각 가공방식과 절삭속도의 변화에 따라 표면거칠기의 특성을 알 수 있다.



(a) Surface roughness for feed



(b) Surface roughness for pickfeed

Fig. 3 Surface roughness for cutting condition

먼저 이송방향의 표면거칠기에서 세로방향 절삭의 표면거칠기를 제외하고 나머지는 비슷한 값을 나타내었다. 세로방향 절삭의 표면거칠기가 나쁜 것은 가공 특성상 이송방향이 경사진면과 일치하여 X, Y축방향의 흔들림과 함께 Z축방향의 이송의 영향이 표면 직접적으로 영향을 미쳐 표면거칠기가 큰 것으로 생각된다.

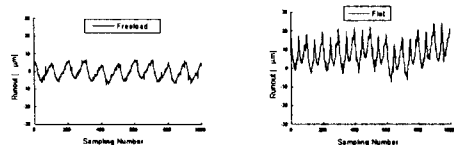
한 절삭조건에서의 절삭속도에 따른 표면거칠기의 변화는 이론적으로는 날당 이송량이 같기 때문에 변화가 없어야 하나 속도의 증가에 따른 다른 절삭인자들의 변화로 약간의 차이가 생긴다. Fig. 3 (a)에서 아래부분의 3가지 절삭방식의 표면거칠기는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 일반적인 가공기는 속도가 증가할수록 표면거칠기가 진동이나 회전오차의

영향으로 나빠지는 것이 보통이나 본 실험에서 이용한 고속가공기는 고속에서 안정된 가공성을 보이는 것으로 추측된다.

Fig. 3 (b), 피크피드 방향의 표면거칠기에서 가로 방향 절삭이 이송방향의 표면거칠기와 달리 평면절삭의 표면거칠기에 비해 크게 나빠진 것을 볼 수 있다. 이것은 경사진 방향과 피크피드의 방향이 일치하여 절삭시 높이차에 의한 표면거칠기의 증가로 생각된다. 그러나 세로방향 절삭은 피크피드방향의 경우도 다른 가공방식에 비해 표면거칠기 값이 큰 것으로 보아 가공방식에 문제가 있는 것으로 보인다.

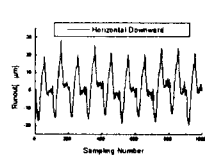
3.3 회전오차의 파형분석과 표면거칠기 예측

Fig. 4는 주축의 회전수를 15,000rpm으로 하여 6가지 방법으로 절삭한 주축의 회전오차를 차례대로 나타내었다. 모두 1,000개의 데이터를 도시한 것으로 이 데이터를 받은 절삭길이는 3mm이다.

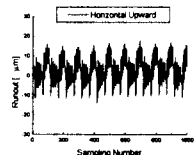


(a) Freeload

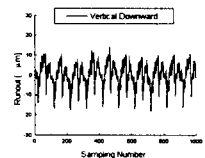
(b) Flat



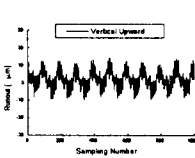
(c) Horizontal Downward



(d) Horizontal upward



(e) Vertical downward



(f) Vertical upward

Fig. 4 Runout in spindle speed 15,000rpm

파형 (a)는 무부하상태의 회전오차를 도시한 것이다. 절삭을 하지 않은 상태이지만 진폭을 가진 파형이 나타난 것은 주축의 회전오차의 원인인 공구의 설치오차나 주축의 편심 그리고 공작기계의 강성문

제로 생김, 가공과는 무관한 회전오차라 볼 수 있다. 가공하기전 무부하 상태의 회전오차를 측정하여 파형을 분석해 보면 공작기계 자체의 이상상태를 감지할 수 있다. 나머지 파형은 평면가공과 경사면가공에서의 주축의 회전오차를 나타낸 것이다.

파형 (b)을 보면, 평면가공으로 하나의 주기안에서 날당 회전오차의 편차가 1~2 μ m이내이다. 한 주기안의 회전오차 편차량이 적다는 것은 절삭시 일정한 절삭량으로 가공이 되고 있다는 것이다.

Table 3은 5가지 절삭방식에서의 표면거칠기, R_a 를 이송방향과 피크피드방향으로 나타낸 것이다.

Table 3 Surface roughness for cutting condition in spindle speed 15,000rpm

Cutting Condition	Surface Roughness	Feed (μ m)	Pickfeed (μ m)
Flat (b)		0.68	0.73
Horizontal Downward (c)		0.81	1.37
Horizontal Upward (d)		0.98	2.02
Vertical Downward (e)		1.99	1.16
Vertical Upward (f)		2.12	2.07

경사면 절삭의 회전오차 파형을 보면 먼저 파형 (c)에서 한 주기 안의 날당 회전오차의 편차가 최고 20 μ m 정도로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 절삭이 한 날에 의해서만 이루어져 그에 따른 표면거칠기가 규칙적인 이론적인 거칠기에 비해 나빠질 것이고 실제 실험에서도 이송방향으로 0.2~0.5 μ m, 피크피드방향으로 1 μ m 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 다른 경사면 절삭보다 좋은 표면거칠기를 보이는 것은 하방향의 절삭이 발생하는 부위가 하방향에서는 경사면의 바깥쪽에서 일어남으로 칩 배출이 용이하고 채터가 발생하지 않았기 때문이라 생각된다. 회전오차의 파형이 이것을 보여준다.

파형 (d)에서는 한 주기 안에서의 파형에 고주파성분의 파형이 들어 있다. 이것은 절삭시 가공조건이 불안정하여 채터가 발생한 것이다. 이것은 상방향 절삭의 단점이라고 볼 수 있다. 표면거칠기는 Table 5에서 볼 수 있듯이 이송방향과 피크피드방향에서 모두 앞의 2가지 방식보다는 값이 큰것으로 보아 채터의 영향이 있다고 판단된다. 그리고 상방향 절삭에서는 절삭이 발생하는 부분이 경사면쪽에서 일어나 칩배출이 어렵고 경사면과 부딪치면서 반대방향

으로 힘을 받아 채터가 심하여 고주파 성분이 많은 것으로 판단된다.

파형 (e), (f)의 세로방향의 회전오차의 파형에서도 고주파성분이 들어 있고, 한 주기의 파형에서의 날당 회전오차량의 편차가 평면절삭에 비하여 커 표면거칠기가 이송방향이나 피크피드방향에서 R_a 가 1~1.5 μm 정도 크게 나타났다. 그리고 가공방식에 있어서도 이송방향이 경사진 방향으로 이루어지면 X, Y 축방향의 흔들림과 함께 Z축방향의 이송의 영향이 표면 직접적으로 영향을 미쳐 표면거칠기의 값이 급격히 커진다.

본 실험에서 수행한 고속 볼엔드밀 가공에서 주축의 회전오차 파형의 분석이 표면거칠기를 예측할 수 있는 실용성 있는 방법임을 알 수 있다. 먼저 한 주기안의 날당 회전오차량의 편차를 조사하고 전체 파형의 피크점을 이은 파형의 진폭을 조사해 보면 표면거칠기의 정도를 간접적으로 파악할 수 있다.

4. 결 론

고속 볼엔드밀가공에서의 주축의 회전오차 측정을 통한 표면거칠기 예측에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면거칠기의 예측에 있어서 회전오차 파형의 날당 편차량, 피크값을 이은 파형의 진폭, 그리고 주파수 분석을 통한 고주파 성분의 분석으로 표면거칠기의 정도를 파악할 수 있다.
2. 주축의 회전오차는 공작기계의 가공성을 판단할 수 있는 유용한 기준이 될 수 있으며 회전오차의 변동이 제품의 표면거칠기에 직접적인 영향을 미치므로 회전오차의 측정을 통하여 공작기계의 성능과 함께 제품의 품질을 예측, 감시할 수 있다.
3. 경사면의 가공시 절삭방식에 따라 절삭성이 달라 상방향절삭보다는 하방향절삭이 칩 배출이나 채터 방지의 효과로 더 유용한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. MinYang Yang and HeeDuck Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31. No. 1., pp.45-54, 1991
2. HsiYung feng and ChiaHsiang Meng, " The Prediction of Cutting Forces in the Bal-End

Milling Process - I. Model Formulation and Model Building Procedure", Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 34. No. 5. pp.697-710, 1994

3. 安岡 成泰, "高硬度材の高速切削加工に関する研究", 千葉大學大学院 工学研究科 機械工学専攻 機械システム工学講座, 1996
4. W.A. Kline and R.E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces In End Milling", Int. J. Mach. Tools Des. Res. Vol. 23. No. 2/3, pp.123-140, 1983