

경사면 가공에서 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계에 관한 연구 (A Study on the Relationship of Surface Shape and Tool Runout in the Ball-End Milling)

박희범*, 최광호(부산대 대학원), 이득우, 김정석(부산대 기계공학부)
H. B. Park*, K. H. Choi(Graduate School, Pusan National Univ.)
D. W. Lee, J. S. Kim(Pusan National Univ.)

Abstract

Due to the development of CNC machining centers and the complexity of machined part geometry, the ball-end milling became the most widely used the cutting process. Generally, the tool runout defined as the eccentricity of a rotating tool set in the holder involved the spindle runout and the problem of tool runout generated to remove the workpiece is a main factor affecting the machining accuracy. In this paper, the relationship of tool runout(zero-to-peak, P-K) and surface shape on the change of cutting conditions is studied and it is proposed the probability of prediction of surface shape from the in-process tool runout measurements with high response displacement sensor in the ball-end milling.

Key Words : Ball-End Milling(볼엔드밀링), Tool Runout(공구 런아웃)(Zero-to-Peak), Surface Shape(표면 형상), Spindle revolution(주축 회전수), Inclined Angle(경사각)

1. 서론

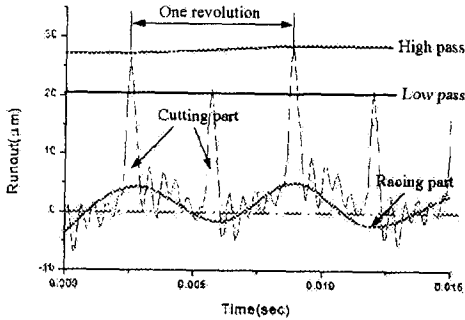
CNC 공작기계의 발달과 복잡한 형상을 제품에 대한 요구의 증가에 의해 볼엔드밀 가공은 3D의 복잡한 형상이 필요한 항공 산업과 자동차 산업, 금형 산업에 가장 많이 적용되는 가공 방법이다. 볼엔드밀이나 엔드밀 가공은 단축 가공으로 상당량의 진동이 발생하게 된다. 이러한 성분은 직접적으로 표면 형상에 영향을 발생시키게 되는데,⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 따라서, 경사면 가공 중 공구의

런아웃이 표면 형상에 어떤 영향을 주는가에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 가공 조건의 변화에 따른 경사면 가공에서 발생하는 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계를 파악하여 최적의 절삭 조건과 표면 형상의 예측 가능성을 제시하고자 한다.^{(3),(6)}

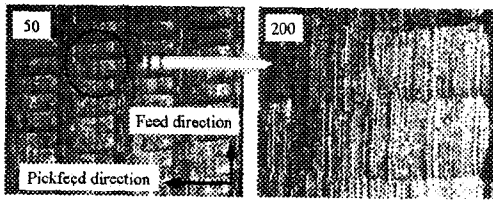
2. 공구의 런아웃의 분석 및 표면 형상의 변화

기계 가공 중 진동은 항상 발생하며 특히 엔드밀 혹은 볼엔드밀 가공과 같은 단축 절삭에서는 그 성분이 상당량 발생한다. 주로 그 성분은 설치오차에 의한 것과 공구와 공구 홀더사이의 이물질이나 설계 상 오차와 가공 중 칩의 제거를 하기 위해 발생하는 절삭저항 등이다. 이 중에서 가장 큰 성분은 가공 중 칩 제거에 의한 절삭저항에 의해 발생하는 성분이다. Fig. 1(a)은 가공 후 획득한 공구의 런아웃을 보여주고 있으며, 공구의 런아웃은 공회전 성분과 절삭 성분 그리고 가공 후 진동 성분들의 결합으로 구성되어 있으며 이러한 성분들이 가공 중 계속하여 발생하며 진폭이 큰 부분과 작은 부분이 반복적으로 발생함을 알 수 있다. Fig. 1(b)은 한 예로 공구의 런아웃이 발생하였을 때 가공 후 공구 현미경을 이용하여 표면 형상을 보여주고 있다. 표면 형상은 공구가 1 회전하였을 때 가공되어진 표면 형상으로 일정한 날 당 이송량을 주었을 때 공구의 런아웃에 의해 날 당 이송폭이 변화하였음을 보여준다. 따라서, 공구의 런아웃을 가공 조건의 변화를 통해 그 변화와 표면 형상과의 관계를 밝히는 것이 필요하다. 여기서, 한 회전 당 발생하는 공

구의 런아웃의 가공 성분 중 진폭이 큰 것을 High pass로 진폭이 작은 것을 Low pass로 정의한다.



(a) Analysis of tool runout



(b) Surface shape

Fig. 1 Tool runout and surface shape

3. 실험 장치 및 방법

본 실험은 MAKINO-V55의 고속 머시닝 공작기계를 사용하여 각도 바이스를 이용하여 가공물을 고정하고, 고응답성 변위 센서를 공구에 근접시켜 공구의 끝단에서 Z축으로 40mm 되는 위치에 X축과 Y축에 각각 설치하여(Fig. 2) 신호를 획득한 후 가공 조건을 변화시켜 공구의 런아웃

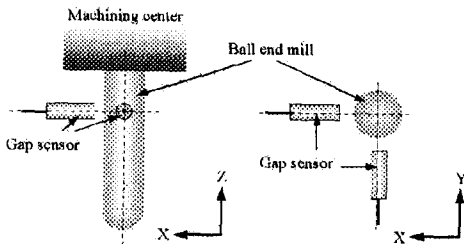


Fig. 2 Experimental set-up

과 가공 후 공구 현미경을 이용하여 날 당 이송폭을 측정하여 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계를 연구하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 실험 조건을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental conditions

Workpiece	STD11(HRC18)
Tool	Ball End mill (R5, TiAlN coated, 2 flutes)
Tool overhang	60mm
Spindle revolution	6000rpm, 8000rpm, 10,000rpm, 12000rpm, 14,000rpm
Inclined angle	15°, 30°, 45°
Depth of cut	0.3mm
Feedrate per tooth	0.3mm
Pickfeed	1mm
Environment	Dry
Tool path	Horizontal upward downing

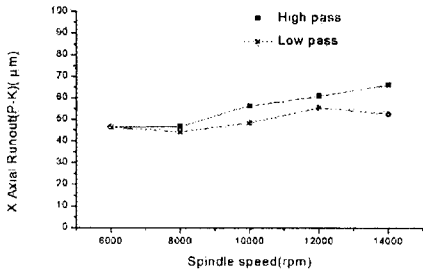
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 15도 경사면 가공에서 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계

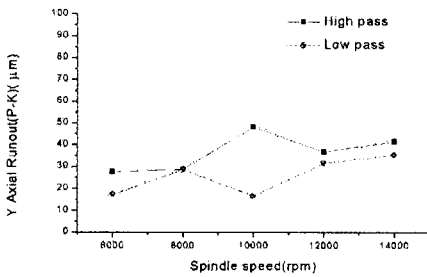
공작기계의 회전 특성의 평가를 통해 공회전에서 각 회전수에 따라 공구의 런아웃이 다르다는 것은 알 수 있었다. 본 연구에서는 공회전에서 획득한 신호 중 X축과 Y축의 공구 런아웃의 크기가 거의 비슷한 6,000rpm, 10,000rpm, 12,000rpm과 X축과 Y축의 런아웃이 거의 같은 8,000rpm, 14,000rpm을 가공 조건으로 선정하였으며, 이 네 가지의 공구 경로를 통해 수평 하방향 하향절삭이 가장 적합한 공구 경로이지만 여기에서는 공구의 진동 성분을 통해 런아웃과 표면 형상과의 관계를 파악하기 위해 수평 가공 중 진동이 심한 상방향을 선택하여 실험을 하였다.

Fig. 3은 15도 경사면에서 회전수에 따른 한 회전 당 High pass와 Low pass의 공구 런아웃을 10회전 동안 측정된 후 각각 평균을 내어 구한 데이터를 그림으로 나타낸 것으로 각각의 회전

수에 따라 High pass와 Low pass의 값이 다르며 회전수가 증가할수록 x축과 y축 공구의 런아웃은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 고속으로 갈수록 원심력이 증가하게 되고 그에 의해 공구의 런아웃이 증가되었다고 생각되어진다. 특히, 10,000rpm에서 y축 공구 런아웃의 high pass와 low pass의 차이가 다른 회전수에 비하여 가장 큼을 알 수 있으며, 8,000rpm에서 가장 그 차이가 작음을 알 수 있다.



(a) X axial tool runout(p-k)



(b) Y axial tool runout(p-k)

Fig. 3 Tool runout at 15°

Fig. 4는 15도 경사면에서 각 회전수에 대한 날 당 이송폭의 변화를 보여주고 있으며, 8,000rpm에서 변화가 가장 작고, 10,000rpm에서 가장 큼을 알 수 있는데, 실제 공구현미경으로 측정된 결과 8,000rpm에서는 0.34mm, 0.26mm, 10,000rpm에서 0.367mm, 0.233mm으로 그 차이가 상당히 발생함을 알 수 있다. 10,000rpm의 공구 런아웃 파형을 분석한 결과 앞서 언급한 것과 같이 절삭이 공회전 성분 중 최대가 되는 부분에

가공이 되어 발생하였음을 알 수 있었다.

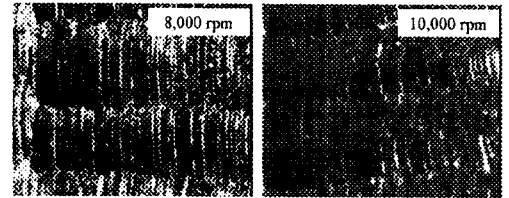
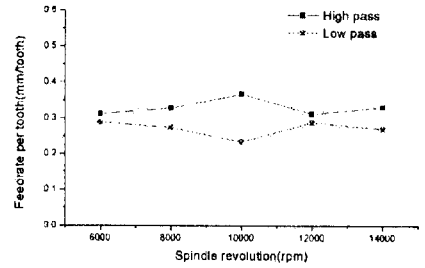


Fig. 4 Variation of feedrate per tooth at 15

Fig. 5는 표면 형상 측정 장치를 이용하여 표면 거칠기를 각 회전수마다 측정된 것으로 표면 거칠기가 8,000rpm과 10,000rpm에서 각각 Ra 0.7745μm, 1.5278μm, Rmax 5.2628μm, 10.7833μm으로, 상당량의 차이가 발생함을 알 수 있다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5를 비교하며 상당히 비슷한 경향을 볼 수 있음을 알 수 있다.

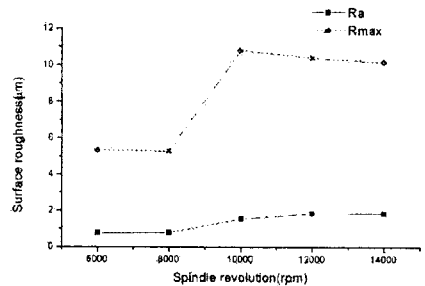
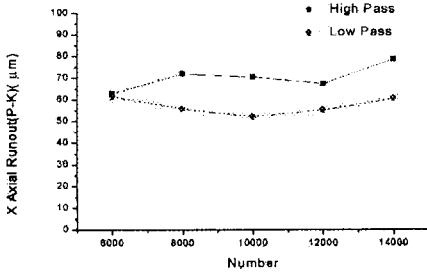


Fig. 5 Surface roughness at 15°

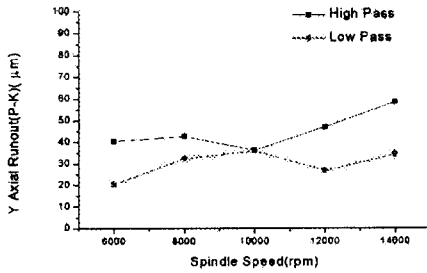
4.2 30도 경사면 가공에서 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계

Fig. 6은 30도 경사면에서 각각의 회전수에 따른 한 회전 당 High pass와 Low pass를 그림으로 나타낸 것으로 여기서는 10,000rpm에서 y축 공구

런아웃의 high pass와 low pass의 차이가 다른 회전수에 비하여 가장 작음을 알 수 있으며, 14,000rpm에서 가장 그 차이가 크음을 알 수 있다. 즉, 고속 영역으로 갈수록 공구의 런아웃은 증가하고, 신호를 분석하며 공회전 성분 중 어느 부분에서 가공이 시작하였는지에 따라서, 그 진폭의 변화가 발생한다는 것을 알 수 있다.



(a) X axial tool runout(p-k)



(b) Y axial tool runout(p-k)

Fig. 6 Tool runout at 30°

Fig. 7은 30도 경사면에서 각 회전수에 대한 날 당 이송폭의 변화를 보여주고 있는데, 10,000rpm에서 0.36mm, 0.24mm, 14,000rpm에서 0.446mm, 0.154mm으로 그 차이가 상당히 많이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 8은 표면 형상 측정 장치를 이용하여 표면 거칠기를 각 회전수마다 측정된 것으로 표면 거칠기가 10,000rpm과 14,000rpm에서 각각 Ra 0.8388μm, 1.9683μm, Rmax 4.1428μm, 9.1909μm으로, 상당량의 차이가 발생함을 알 수 있다.

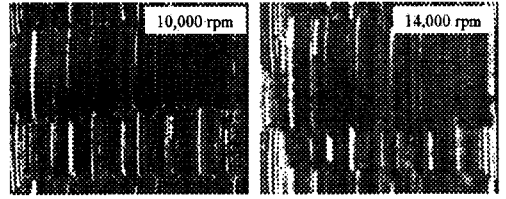
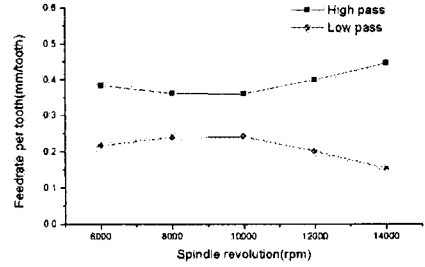


Fig. 7 Feedrate per tooth at 30°

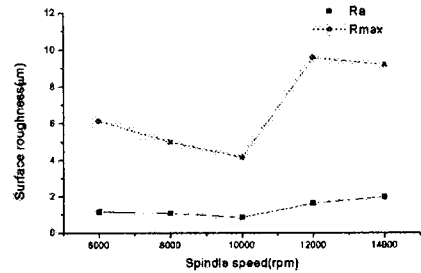


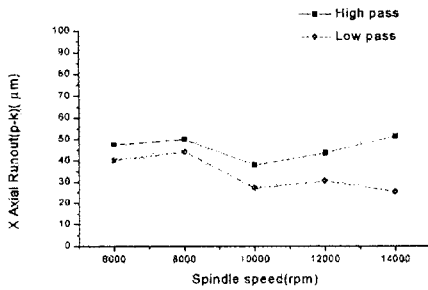
Fig. 8 Surface roughness at 30°

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9의 결과 상당히 비슷한 경향을 볼 수 있음을 알 수 있다.

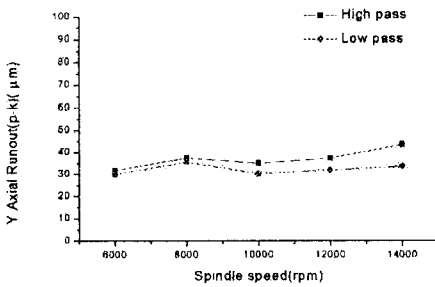
4.3 45도 경사면 가공에서 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계

Fig. 9는 45도 경사면에서 각각의 회전수에 따른 한 회전 당 High pass와 Low pass를 나타낸 것으로 회전수가 증가할수록 x축과 y축 공구의 런아웃은 다른 경사면 가공에 비해 거의 선형적으로 일정하고 고속으로 갈수록 High pass와 Low pass의 차이가 약간 증가함을 알 수 있다. 특히, 10,000rpm에서 y축 공구의 런아웃의 high pass와 low pass의 차이가 다른 회전수에 비하여 가장 작게 발생하며 14,000rpm에서 가장 그 차이가 가

장 크게 발생함을 알 수 있다.



(a) X axial tool runout(p-k)



(b) Y axial tool runout(p-k)

Fig. 9 Tool runout at 45°

Fig. 10은 45도 경사면에서 각 회전수에 대한 날 당 이송폭의 변화를 보여주고 있다. 이송폭의 차이 가장 작은 10,000rpm에서는 0.329mm, 0.271mm, 가장 큰 14,000rpm에서 0.356mm, 0.244mm으로 그 차이가 다른 각도에 비해 약간의 변화가 발생함을 알 수 있다.

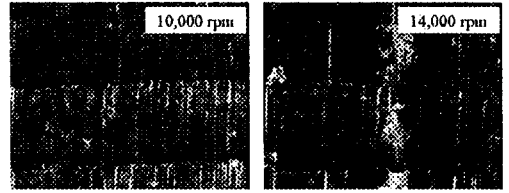
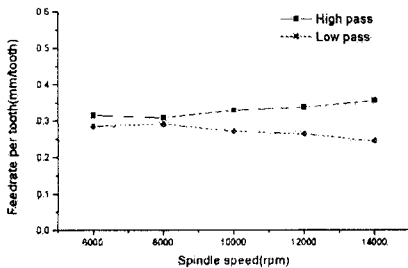


Fig. 10 Feedrate per tooth at 45°

Fig. 11은 표면 형상 측정 장치를 이용하여 표면 거칠기를 각 회전수마다 측정한 것으로 표면 거칠기가 10,000rpm과 14,000rpm에서 각각 Ra 0.9375μm, 0.6085μm, Rmax 5.8794μm, 3.4024μm으로, 거의 변화가 발생하지 않음을 알 수 있다. 실험 결과, 공구 런아웃과 날 당 이송량의 변화, 표면 거칠기를 비교하며, 상당히 비슷한 경향을 볼 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 공구의 런아웃을 변화가 바로 표면 형상 오차에 직접적인 영향을 준다는 것과 공구의 런아웃의 변화를 통해 가공 조건을 선정하고, 표면 형상의 예측이 가능함을 알 수 있었다.

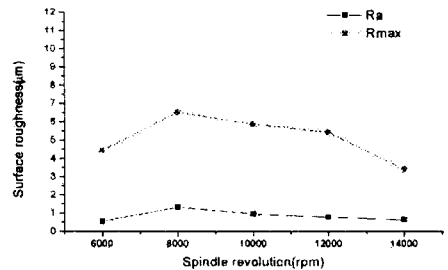


Fig. 11 Surface roughness at 45°

5. 결론

본 연구에서는 경사면 볼랜드밀 가공에서 수평 하방향 하향 밀링을 통해 공구의 런아웃과 표면 형상과의 관계를 얻었다. 그 결과,

1) 표면 형상에서 보면 경사각 중 45°로 가공하였을 때 다른 경사각에 비해 안정된 날 당 이송폭의 변화를 볼 수 있었다.

2) 절삭 속도 중 8,000rpm에서 가공하는 것이 가장 균일한 커스프를 가진 표면 형상을 얻을 수

있었다.

3) 경사면 가공에서 공구의 런아웃이 표면 형상과 표면 거칠기에 직접적인 영향을 준다는 것을 알 수 있으며 이것으로 통해 어떤 조건에서도 공구의 런아웃을 통해 표면 형상 예측이 가능하다는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. W.A. Kline and R.E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.23, No.2/3, pp.123-140, 1983
2. 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
3. Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process-II. Cut Geometry Analysis and Model Verification", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.34, No.5, pp.711-719, 1994
4. Ching-Chia Tai and Kuang-Hua Fuh, "A Predictive Force Model in Ball-End Milling including Eccentricity Effects", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.34, No.7, pp.959-979, 1994
5. Julius S. Bendat and Allen G. Piersol, "Random Data, Analysis and Measurement Procedures", 2nd Edition, pp.370-377, 1991, John Wiley & Sons.
6. M. A. Elbestawi, F. Ismail and K. M. Yuen, "Surface Topography Characterization in Finish Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34 No. 2, pp.245-255, 1994