

볼 엔드밀에 의한 반구 가공시 이송속도 변화에 따른 가공정밀도

임채열*, 우정운, 김중업(경남대 대학원), 왕덕현, 김원일(경남대 기계자동화공학부)

Machining Precision according to the Change of Feedrate when Ball Endmilling of Semisphere Shape

C. Y. Lim*, J. Y. Woo, J. U. Kim(Graduate Schoo.), D. H. Wang, W. I. Kim(Kyungnam Univ.)

ABSTRACT

Experimental study was conducted for finding the characteristics of machining precision according to the change of feedrate when ball endmilling of semisphere shape. The values of tool deflection and cutting force were measured simultaneously by the systems of eddy-current sensor and dynamometer. The machining precision was analyzed by roundness values, which were deeply relating with tool deflection and forces. The roundness was decreased in down-milling than in up-milling for each feedrate. As the cutting edge is moved to radius direction on the tool path, the tool deflection and the cutting force were seemed to be decreased. As the tool path was moved downward, the values of roundness, cutting force and tool deflection were obtained better ones. When compared the values of roundness, cutting force and tool deflection for different feedrate, the best machining accuracy was obtained at feed rate of 90mm/min in down-milling.

Key Words : Roundness(진원도), Eddy-current sensor(와전류센서), Tool deflection(공구변형), Dynamometer(공구동력계), Feedrate(이송속도)

1. 서론

CNC 공작기계 및 자동 CAM프로그래밍 소프트웨어의 개발과 발달로, 금형 및 항공기 부품산업 등에서는 3차원 자유곡면 가공이 많이 사용되고 있다. 이런 자유곡면 가공에 주로 사용되는 공구는 볼 엔드밀공구로 가공정밀성 및 가공능률을 높이기 위하여 공구재료와 절삭날의 형태가 다양한 여러 종류의 볼 엔드밀이 개발, 제작되어 사용되고 있다. 볼 엔드밀을 이용하여 금형 등의 3차원 곡면 형상을 가공함에 있어서 가공물의 정밀도에 영향을 미치는 요소 중에는 절삭력에 의한 공구의 휨이 큰 부분을 차지한다. 그러나, 가공물 형상의 복잡성에서 기인되는 정확한 절삭 조건 예측이 곤란하며 또한 볼 엔드밀 가공 공정 해석의 부정확성 때문에 절삭력을 고려하여 절삭 조건을 부여하지 못하고 대부분 경험에 의존하는 수가 많으며 실제적으로는 모든 가공 공정에서 가공 조건은 상당히 보수적으로 주어지고 있다. 이로 인하여 생산성이 저하됨은

물론 때로는 잘못 부여된 절삭 조건으로 인하여 제품의 정밀도를 저하시키는 경우도 있다.

볼 엔드밀에 대한 연구로서는 Hosoi 등[1]이 평면 경사면 절삭날을 갖는 공구와 나선형 절삭날 공구의 상향밀링과 하향밀링에서 나타나는 절삭력을 측정하여, 하향밀링이 상향밀링보다 절삭력 변화의 폭이 작으며, 특히 나선형 절삭날 공구가 하향밀링에서 절삭력이 비교적 작게 발생한다고 보고하고 있다. 미소절삭날 개념을 통한 절삭력 모델링은 Devor 등[2]이 엔드밀에 적용하고 있는데 절삭전 칩의 단면과 실험계수를 이용하여 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 구하여 전체 절삭력을 산출하는 방법을 제시하였다. 가공조건의 최적화에 관한 연구로서는 절삭력 예측 모델을 바탕으로 절삭속도와 가공경로의 최적화에 의해 가공속도와 가공된 공작물의 오차를 줄이는 것을 목적으로 하고 있다. 최근에는 고속가공용 머시닝 센터의 개발로 주축과 이송속도의 고속화로 가공시간의 단축과 고정밀 가

공을 위한 새로운 방법에 관한 연구가 시행되고 있다[3-4].

본 연구는 현재 금형의 재료로 많이 사용되고 있는 크롬(Cr)이 많이 함유된 난삭재인 STD-11의 냉간:금형용 합금강을 피삭재로 사용하여 볼 엔드밀로 반구 가공시 이송속도와 가공방향을 변화시켰을 경우 이송속도 변화에 따른 절삭력, 공구변형 및 진원도 등을 측정하여 가공특성을 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험적 연구로 가공특성을 평가하기 위한 머시닝센터의 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 공구 변형을 측정하기 위해 직경 10mm 볼 엔드밀의 샹크(shank)에 와전류 센서를 X, Y축에 부착하였고, X, Y 및 Z축에서 발생하는 절삭력은 공구 동력계를 이용하여 측정하였다. 와전류 센서는 Keyence사(Japan) 제품으로 센서헤드는 EX-008, 컨트롤러는 EX-502를 사용하였다. 센서헤드를 공구에 접촉시킨 값을 컨트롤러의 1번에 입력하고 공구와 센서헤드의 간격을 2mm로 했을 때의 값을 2번에 입력하였으며 간격이 1mm위치에서의 값을 3번에 입력하여 보정작업을 행하였다. 통상적으로 컨트롤러의 1번은 0V에 가까운 값이 나오고, 2번은 대략 5V의 값이 나오며 3번은 약 2.5V의 값이 나온다. 측정은 센서헤드를 1mm근처에 위치시켜 컨트롤러의 3번에 입력하면 NI사(미국)의 LabVIEW 화면상에 0V값으로 셋팅이 된다. 이것으로 가공시 공구가 센서의 헤드로부터 멀어지거나 가까워지는 변화값을 읽어 공구변형을 측정한다.

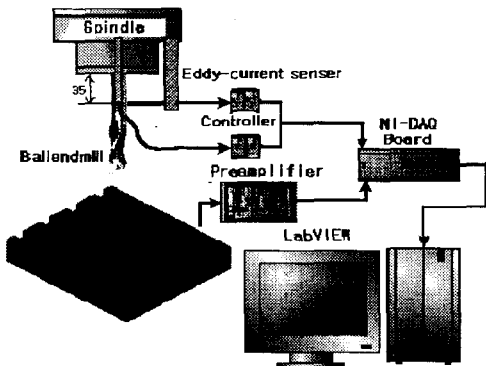
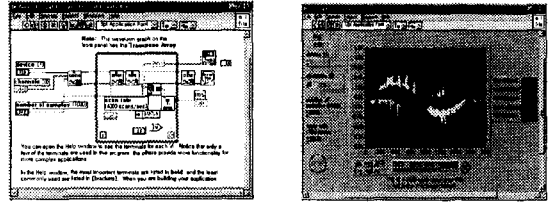


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

와전류 센서로부터 얻어진 공구 변형값과 공구동력계에서 얻어진 절삭력 신호는 NI-DAQ board로 A/D 변환하여 계측 프로그램인 LabVIEW로 PC에 저장하였다. 가공 후 가공경로에 따른 공구변형과 절

삭력 특성을 비교하기 위한 가공정밀도 측정은 RA-116D의 진원도 측정장치를 사용하였다. Fig. 2는 실험데이터를 저장한 LabVIEW 프로그램의 Front panel과 Block diagram을 나타낸 것이다.



(a) Front panel (b) Block diagram

Fig. 2 Synchronized measurements of tool deflection and cutting force with LabVIEW

본 실험에 사용한 피삭재는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 냉간 금형용 합금강(STD-11)으로 크롬(Cr) 성분이 많이 함유된 난삭재이다. 실험은 먼저 직경 20mm 초경 TiAlN 코팅 평 엔드밀로 황삭가공을 한 후 20mm 초경 TiAlN 코팅 볼 엔드밀로 정삭 가공을 하여 제작하고 10mm 초경 TiAlN 코팅 볼 엔드밀로 실험을 수행하였다. 피삭재의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of STD-11 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
1.6	0.4	0.6	0.3	0.03	0.5	13	1.2	0.5	0.25

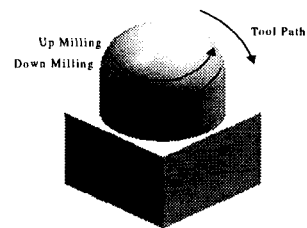


Fig. 3 Workpiece configuration

절삭시 공구에 발생하는 열과 칩 배출을 용이하게 함으로써 칩이 절삭력에 영향을 끼치지 않게 하기 위해 절삭유를 충분히 주었으며, 절삭조건은 주축속도 1000rpm, 이송속도를 60mm/min, 90mm/min 및 120mm/min로 정하였다. 경로 간격은 3mm로 하였고 가공깊이는 1mm로 하였다. 가공은 상향가공과 하향가공 양방향으로 하였고, 실험조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental condition

Spindle revolution(rpm)	1000
Feedrate(mm/min)	60, 90, 120
Path interval(mm)	3
Cutting depth(mm)	1
Cutting direction	Up, Down Milling

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이송속도에 따른 가공정밀도

Fig. 4는 이송속도 60mm/min에서의 상향절삭과 하향절삭의 진원도 값을 각 경로에 대해 나타낸 것이다. 경로 1과 2에서는 상향절삭과 하향절삭의 차이가 크며, 경로 3부터는 근사적인 값을 보이고 있다. 경로가 진행함에 따라 진원도가 좋아지는 경향을 보이고 있고, 하향절삭이 상향절삭보다 진원도가 더 양호한 결과를 보인다. Fig. 5는 이송속도 60mm/min에서의 상향과 하향절삭의 진원도 프로파일을 500배로 확대하여 나타낸 것이다.

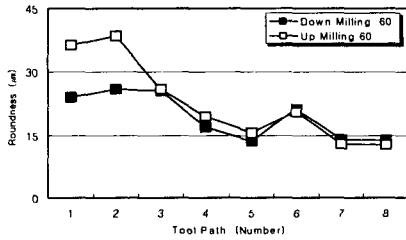


Fig. 4 Roundness characteristics for different tool path at feedrate of 60mm/min

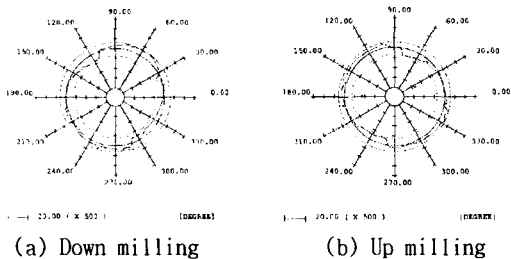


Fig. 5 Typical profiles of roundness measurement at feedrate of 60mm/min

Fig. 6는 이송속도 90mm/min에서의 상향절삭과 하향절삭의 진원도 값을 나타낸 것이다. 경로 2와 6에서 진원도 값의 차이가 다른 경로에 비해 약간 크게 나타났으며 전체적으로 경로가 진행하면서 진원도 값이 향상되고, 상향절삭이 하향절삭보다 진

원도가 나빴다. Fig. 7은 이송속도 90mm/min에서의 상향과 하향절삭의 진원도 프로파일을 500배로 확대하여 나타낸 것이다.

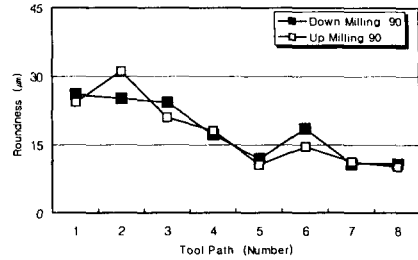


Fig. 6 Roundness characteristics for different tool path at feedrate of 90mm/min

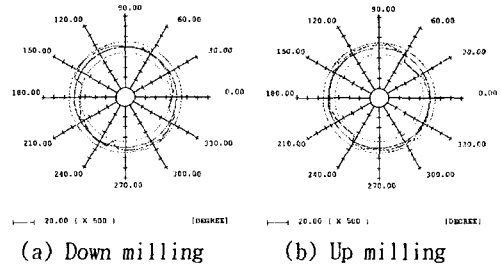


Fig. 7 Typical profiles of roundness measurement at feedrate of 90mm/min

Fig. 8은 이송속도 120mm/min에서의 상향절삭과 하향절삭의 진원도 값을 나타낸 것이다. 경로 1과 2에서는 상향절삭과 하향절삭의 차이가 크게 나타났으며, 경로 3부터는 점차 진원도가 좋아지다가 경로 6에서는 약간 나빠지는 것을 보였다. 상향절삭 보다는 하향절삭에서 진원도 값이 더 좋음을 보였다. Fig. 9은 이송속도 120mm/min에서의 상향과 하향절삭의 진원도 프로파일을 500배로 확대하여 나타낸 것이다.

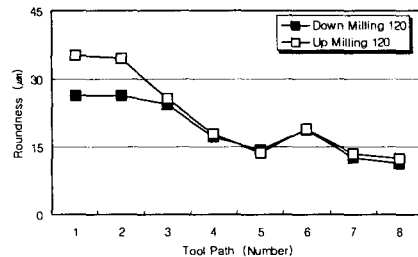


Fig. 8 Roundness characteristics for different tool path at feedrate of 120mm/min

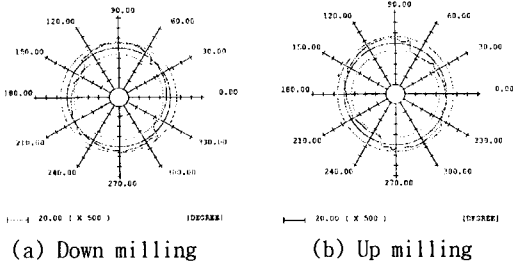


Fig. 9 Typical profiles of roundness measurement at feedrate of 120mm/min

Fig. 4, Fig. 6 및 Fig. 8에서 나타난 것처럼, 경로가 진행함에 따라 진원도가 좋아지는 경향을 나타내고 있으며, 하향절삭으로 이송속도 90mm/min 에서 가장 좋은 진원도 값을 얻었다.

3.2 공구변형과 절삭력

Fig. 10과 Fig. 11은 이송속도 90m/min에서 측정된 공구변형과 절삭력 값들을 각각 나타낸 것이다. Fig. 10(a)와 10(b)는 각각 와전류 센서장치에서 얻은 대표적인 X축과 Y축에서의 공구변형값들이다. 그림에 나타난 것처럼 볼 엔드밀 공구가 반구형상을 가공하기 때문에 X축에서 Y축으로 원형으로 이동하면서 공구변형값이 사인파형으로 나타남을 보여주고 있다. Fig. 11(a), 11(b) 및 11(c)는 각각 X, Y 및 Z축에서 측정된 대표적인 절삭력값들이며, Z축의 절삭력은 동일한 Z값에서 원형으로 가공하므로 절삭력이 일정한 값으로 나타나고, X축과 Y축 절삭력들은 공구변형과 같은 이유로 사인파형으로 나타난다. 공구경로가 아래쪽으로 진행함에 따라 공구변형값과 절삭력은 감소되는 경향을 나타내고 있다.

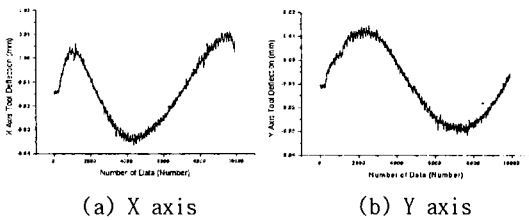


Fig. 10 Tool deflection measurement

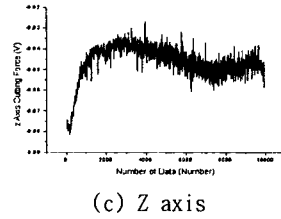
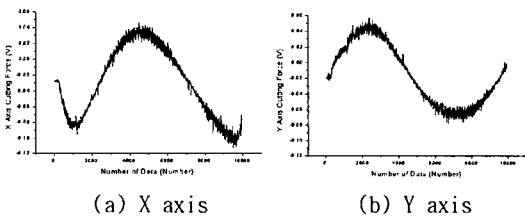


Fig. 11 Cutting force measurement

4. 결론

볼엔드밀에 의한 반구 가공시 이송속도 변화에 따른 가공정밀도 특성을 파악하기 위하여, 와전류 센서로 공구변형과 공구동력계로 절삭력을 실시간으로 측정하고 또한 진원도값들을 측정 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

진원도 특성은 측정조건외의 모든 이송속도에서 하향절삭이 상향절삭보다 양호하였으며, 공구경로가 아래쪽으로 내려갈수록 진원도의 값이 향상되는 경향을 나타내고 있다. 이는 공구 센터의 끝점부터 가공을 시작하여 공구경로에 따라 절삭날 끝이 반경 방향으로 진행함에 따라 절삭력 및 공구변형이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 이송속도 변화에 따라 가공형상의 진원도 값들과 절삭력 및 공구변형의 값들을 비교해 볼 때, 하향절삭으로 이송속도 90mm/min에서 가공정밀도의 측면에서 가장 양호한 결과를 보였다.

참고문헌

- [1] T. Hosoi and Hoshi, "Cutting actions of ball endmill with a spiral edge," Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 49-59, 1997.
- [2] C. K. Park and H. Y. Maeng, "A study on free surface cutting force system of conical cutting edge ball end mill," J. of the KSME, Vol. 9, No. 4, pp. 440-451, 1985.
- [3] H. Y. Feng, C. H. Menq, "A flexible ball end milling system model for cutting force and machining error prediction," Trans. of ASME J. of Manuf. Sci. and Engr., Vol. 118, pp. 461-469, 1996.
- [4] S. H. Park, Y. T. Jun, C. W. Lee and M. Y. Yang, "Determining the cutting conditions for sculptured surface machining," Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol. 61, pp. 61-70, 1993.