

볼 엔드밀 가공시 공구변형에 관한 연구

두 승*, 서한원(전북대 대학원), 유기현(전북대 강사), 서남섭(전북대)

A Study on Deflection of Tool in Ball-End Milling

S. Doo*, H. W. Seo(Graduate School, CNU), K. H. Yoo, N. S. Seo(ChonBuk Nat'l Univ.)

ABSTRACT

This paper presents a prediction of tool deflection and resulting machining error for sculptured surface productions in the ball-end milling process. Due to the different materials and the dimensions of the tool holder and cutter, a cantilever beam model with three uniform sections is proposed for the tool deflection model. The ability of this model has been verified by a machining experiment. In this study, cutting force and machining error are investigated.

This paper provides the prediction of machining error for sculptured surface to improve machining quality for industrial application.

Key Words :Ball-end mill(볼엔드밀), Tool deflection(공구변형), Cutting force(절삭력), Machining error(가공오차)
Upward cutting(상방향절삭), Downward cutting(하방향절삭)

1. 서론

최근 자동차, 기계, 우주항공산업의 급속한 발전과 더불어 대외 경쟁력 확보 및 품질향상과 생산성 증대를 실현하기 위하여 자유곡면을 포함하는 정밀 금형 가공 기술의 개발이 절실하게 요구되고 있다.

특히, 가공정밀도 및 생산성에 큰 영향을 미치며 주로 정삭가공용으로 많이 이용되는 볼엔드밀(ball end mill)에 관심이 집중되고 있다. 그러나 많은 연구⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾가 진행되고 있는 평엔드밀(flat end mill)에 비하여 볼엔드밀은 공구끝단 부분이 반구형이고 대부분의 절삭이 이 부분에서 이루어지므로 절삭기구가 매우 복잡하여 절삭력 해석이 쉽지 않아 활발한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 또 볼엔드밀을 이용한 금형가공시 발생하는 가공오차의 원인으로는 공구변형, 공구마모, 열변형 등이 있는데 이중 공구변형이 가장 큰 영향을 미치는 인자이다 Devor⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 등은 평엔드밀(flat-end mill)을 강성체인 외팔보로 가정하여 공구변형량을 예측할 수 있도록 모델링하였고 Lim⁽⁶⁾ 등이 볼엔드밀 가공시 공구변형을

고려한 절삭력 예측 프로그램에 대하여 논하였다.

본 논문은 볼엔드밀 가공시 발생하는 공구 변형량을 예측하기 위해 볼엔드밀을 강성체인 3단 외팔보로 가정하여 모델링한 후 변위센서(gap sensor)로 측정된 공구변형값과 시뮬레이션 값을 비교하여 검증하였다. 또 검증된 본 모델을 이용하여 자유곡면 가공시 발생하는 가공오차(공구변형량)를 예측하였으며 자유곡면의 형상에 따라 다르게 나타나는 가공오차의 원인을 비교 분석하였다.

2. 공구변형 모델

2.1 모델링

절삭가공시 발생하는 공구변형(tool deflection)량은 공구 홀더와 공구를 강성체인 외팔보로 가정하여 다음과 같이 모델링하였다.

그림 1(A)는 공구홀더와 공구를 나타낸 것이며 그

림1(B)는 그림1(A)를 간략화 한 것이다.

그림1에서 하중 P는 공구 끝점에 작용하며 공구 끝점과 공구 끝점에서 x만큼 떨어진 곳에서의 공구 변형량을 면적-모멘트법을 적용시켜 구하면

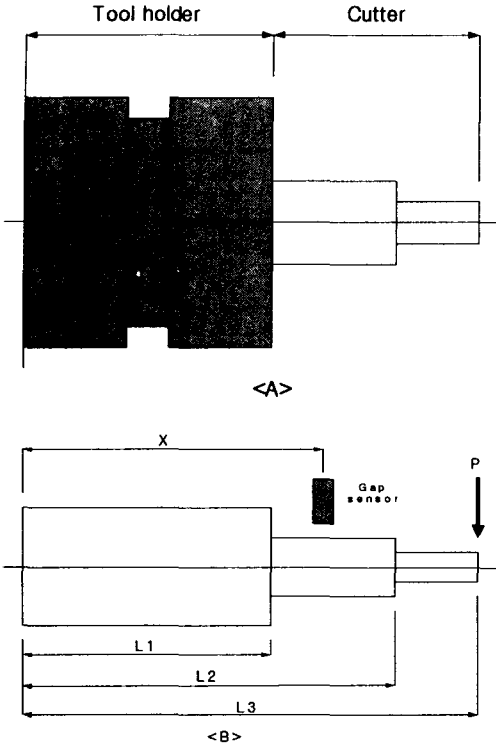


Fig.1 Tool deflection model

변위센서 위치에서의 변형량은

$$y(x) = P \left[\frac{1}{E_1 I_1} \left(LL_1 - \frac{1}{2} L_1^2 \right) \left(\frac{LX - \frac{1}{3} X^2}{2L - X} \right) + \frac{1}{E_2 I_2} \left(-\frac{1}{2} X^2 + LX - LL_1 + \frac{1}{2} L_1^2 \right) \cdot \left(\frac{LX - \frac{1}{3} X^2}{2L - X} \right) \right] \quad (1)$$

이며 공구끝점에서의 변형량은

$$y(x) = P \left[\frac{1}{3E_1 I_1} (2L^2 L_1 - LL_1^2) + \frac{1}{3E_2 I_2} (L_1 L_2 L - L_2^2 L - 2L^2 L_1 + 2L^2 L_2) + \frac{(L - L_2)^2 L}{3E_3 I_3} \right] \quad (2)$$

가 된다.

2.2 적용 실험 및 분석

볼엔드밀 가공시 발생하는 공구변형량을 실제로 변위센서(gap sensor)로 측정하여 시뮬레이션 값과

실제측정값을 비교하기 위하여 공구는 HSS 볼엔드밀(2날 $\phi 6\text{mm}$)을 사용하였으며 화천(주) 머시닝센터로 가공하였다. Table1은 실험 시 사용한 절삭조건 및 공구변형량의 측정위치를 나타낸 것이다.

Table 1. Experimental cutting condition

Measuring position(X)	72	Feed (mm/tooth)	0.0125
	82		
Radial depth of cut (mm)	2	Tool	HSS 볼엔드밀
Axial depth of cut (mm)	1.5	Cutting speed (m/min)	30

Fig.2, Fig.3은 변위센서의 측정위치(X 거리)가 각각 72mm, 82mm일 때 공구 변형량을 측정된 값과 이론적으로 계산한 값을 그려놓은 것이다. 밀링 가공시 절삭력은 밀링 커터의 단속 절삭으로 절삭력 값의 변화가 뚜렷하며 절삭이 이루어지지 않는 구간은 절삭력이 0에 가까워 공구의 변형량을 이론식에 대입하여 구하면 변형량이 0이된다. 그러나 실제적으로는 절삭이 이루어지지 않는 시간이 매우 짧아 공구의 변형은 계속적으로 지속되어 이론치와 다를 수밖에 없다. 따라서 실험시 발생한 절삭력 증가공이 이루어진 부분만을 받아 측정값과 이론값을 비교하였다. 실험전 변위센서의 오차를 확인하기 위하여 동일한 실험조건하에서 공회전으로 공구의 런아웃(run-out)량을 측정한 결과 거의 0에 가깝다는 사실을 확인했다

실험결과를 보면 2가지 모두 이론값과 실험값이 비슷한 경향을 보여 자유곡면 절삭시 절삭력만으로도 공구변형량을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

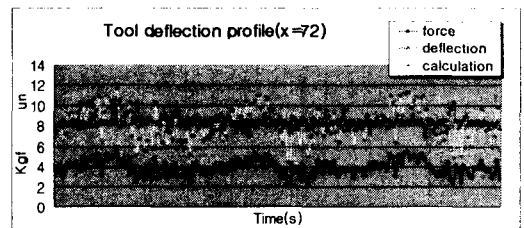


Fig.2 Experimental deflections with simulated results.(X=72mm)

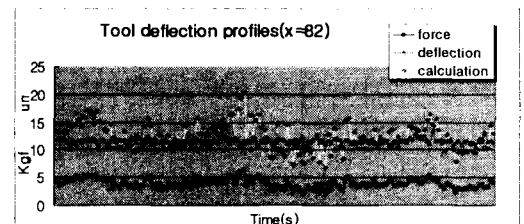


Fig.3 Experimental deflections with simulated results.(X=82mm)

3. 실험 및 결과 분석

일반적으로 볼엔드밀로 곡면 절삭시 항상 일정한 방향으로만 가공이 이루어지는 것이 아니라 상방향 절삭(upward cutting)과 하방향절삭(downward cutting)이 교차적으로 이루어지는 경우가 많다. 더욱이 제품의 정밀도는 공구변형에 의한 영향이 가장 크므로 가공시 곡면의 형상에 따라 변화하는 절삭력을 앞에서 언급한 공구변형 모델링을 적용하여 가공오차를 측정하였다.

본 실험은 CNC머시닝센터로 가공하였으며 사용된 공구 및 공작물은 HSS 볼엔드밀(2날 $\phi 6\text{mm}$)과 STD11이다. 절삭조건은 Table2.과 같으며 Fig.4는 측정장치의 개략도이다.

Table 2. Experimental cutting condition

No	Cutting speed (m/min)	RD(Radial depth of cut) (mm)	AD(Axial depth of cut) (mm)	Feed (mm/tooth)
1	30	0.5	1.0	0.0125
2	50	1.0	1.5	

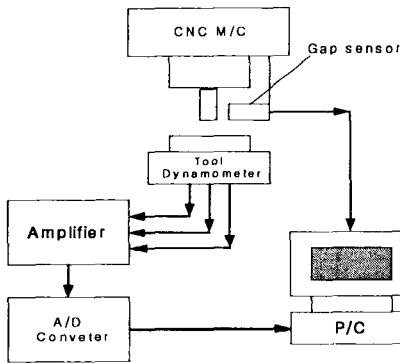


Fig. 4 Experimental set-up

가공실험은 Fig.5와 같은 형상으로 진행하였다.

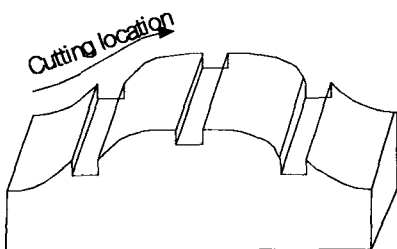


Fig. 5 Designed surface

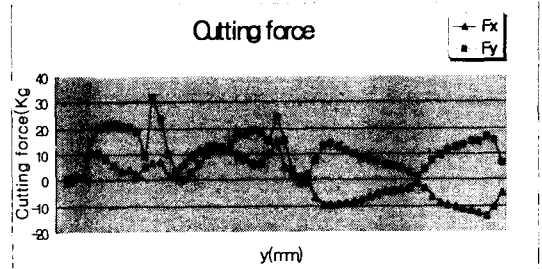


Fig. 6 Measured cutting force ($v=50\text{m/min}$, $RD=1.0\text{mm}$, $AD=1.5\text{mm}$, $\text{feed}=0.0125\text{mm/tooth}$)

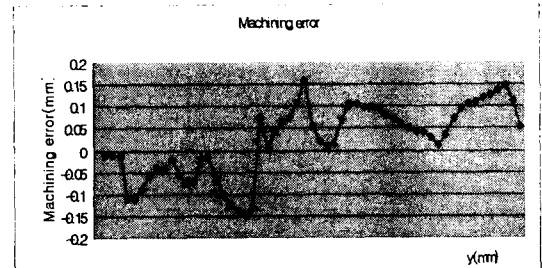


Fig. 7 Simulated machining error ($v=50\text{m/min}$, $RD=1.0\text{mm}$, $AD=1.5\text{mm}$, $\text{feed}=0.0125\text{mm/tooth}$)

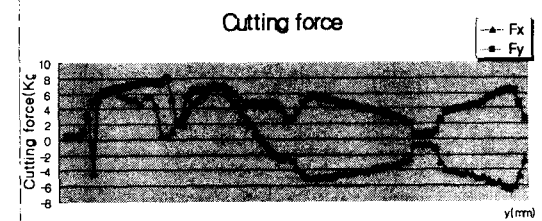


Fig. 8 Measured cutting force ($v=30\text{m/min}$, $RD=0.5\text{mm}$, $AD=1.0\text{mm}$, $\text{feed}=0.0125\text{mm/tooth}$)

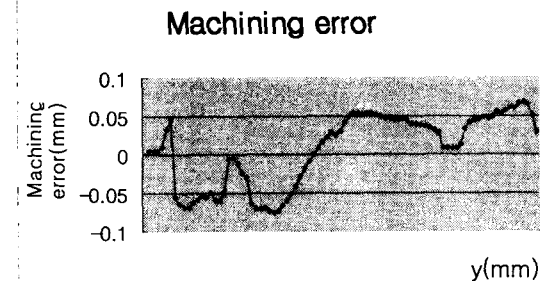


Fig. 9 Simulated machining error ($v=30\text{m/min}$, $RD=0.5\text{mm}$, $AD=1.0\text{mm}$, $\text{feed}=0.0125\text{mm/tooth}$)

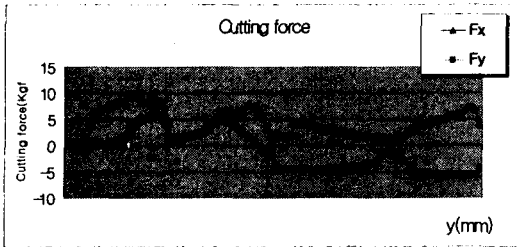


Fig.10 Measured cutting force ($v=30\text{m/min}$,
RD=0.5mm, AD=1.5mm, feed=0.0125mm/tooth)

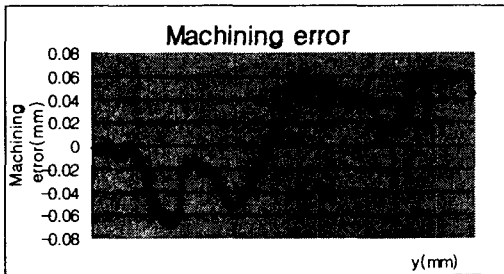


Fig.11 Simulated machining error ($v=30\text{m/min}$,
RD=0.5mm, AD=1.5mm, feed=0.0125mm/tooth)

실험결과를 고찰하면 Table 2. No.1의 절삭조건보다 No.2의 절삭조건으로 가공시 절삭력의 크기 및 가공오차가 크게 나타나고 있으며 전체적인 형태는 같은 경향을 보이고 있다. 가공오차를 보면 상방향 가공시는 경사면을 덜 깎는 미절삭 형태를 보이고 하방향가공시는 경사면을 더 깎는 과절삭이 일어나고 있음을 보여준다. 절삭력 및 가공오차의 그래프를 보면 중간에 0에 가까워지는 값이 나타나는데 이는 시편 그림에서 처럼 공면 중간에 홈을 만들어 놓았기 때문이다. 미절삭 및 과절삭의 이유는 상방향 가공시 공구변형이 공작물의 바깥쪽으로 발생하여 변형량 만큼 가공이 덜 일어나고 반대로 하방향절삭시는 공구변형이 공작물의 안쪽으로 발생하여 변형량 만큼 더 가공되기 때문이다.

가공오차를 보면 상방향 가공이 하방향가공 보다 좀더 큰 오차를 보이고 있는데 그 이유는 동일한 공구접촉점에서 상방향가공시는 접촉영역이 공구축과 수직된 평면상에서 볼 때 상반부에 집중되어 있기 절삭력 중심이 공구접촉점 보다 축방향으로 윗쪽에 있기 때문이다. 또한 상방향가공시 위에서 살펴본 것처럼 공구의 절삭부위가 공구 바닥면의 바깥쪽에 분포하고 있는 것에 반하여 하향절삭시는 공구 안쪽(중심부)에 절삭부위가 분포되어 가공면의 조도 및 절삭성의 측면에서 볼 때 상향식 절삭이 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

볼엔드밀을 사용하여 곡면가공 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공구변형량을 예측할 수 있도록 공구홀더 및 공구를 3단보로 가정하여 모델링 한 결과 시뮬레이션값과 실험치가 비교적 일치함을 알 수 있다

2) 가공오차를 예측한 결과 상방향절삭이 하방향절삭 보다 가공오차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3) 곡면가공시 상방향절삭시는 미절삭이 하방향절삭시는 과절삭이 발생하므로 이를 고려하여 가공계획을 수립해야 한다..

참고문헌

1. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process" Transactions of the ASME, Vol.63,pp.667-700, 1941
2. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process part II-Down Milling" Transactions of the ASME, Vol.67,pp.233-251, 1941
3. W. A. Kline, R. E. Devor, I. A. Shareef, "The Prediction of Surface of Accuracy in End Milling" ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.104, pp.272-278, 1982
4. R. E. Devor, W. A. Kline and W. J. Zdeblick, A Mechanistic Model for the Force System in End Milling with Application to Machining Airframe Structures, Proc. 8th NAMRC, 297-303, 1980
5. 이상규, 고성립, "엔드밀의 정적 강성에 관한 연구," 한국정밀공학회지 '96년도 추계학술대회 논문집, pp. 9-14, 1996.
6. E. M. Lim and C. H. Menq "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process. Part 2. Surface Generation Model and Experimental Verification, Int. J. Tools Manufact. Vol. 35. pp. 1171-1185, 1995.