

볼엔드밀 공구에 의한 사각형상 가공시 공구 휨에 따른 절삭력 특성

김인수*, 김상현*, 이동섭*, 왕덕현**,#

*경남대학교 대학원 융합기계공학과, **경남대학교 기계공학부

Cutting Force Characteristics and Tool Deflection When Machining Rectangular Shapes with a Ball End Mill

In Soo Kim*, Sang Hyun Kim*, Dong Sup Lee*, Duck Hyun Wang**,#

*Graduate School, Kyungnam Univ., **School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received 10 April 2019; received in revised form 22 April 2019; accepted 15 May 2019)

ABSTRACT

Ball end mills used for high-speed and high-precision machining require longer machining time than flat end mills or face cutters, since the tool diameter is limited and the rigidity is reduced by the characteristics of the tool's cutting edge: at the top end of the tool, the cutting speed approaches zero and hardly removes any material. Because there is little material removal at the top end of the ball end mill, the outer cutting edge performs the majority of the work; this irregular cutting force deforms the tool and shortens its life. In this study, we attached an eddy-current sensor to a tool to measure the deformation from the cutting force and we used a tool dynamometer to measure the cutting force. We found that the change in cutting force is dependent on the change in feed rate during square-shaped processing and, as the feed rate is accelerated, the cutting force also increases. Higher cutting forces increase tool deformation.

Key Words : Ball Endmill Cutter(볼엔드밀 공구), Tool Dynamometer(공구동력계), Eddy-current Sensor System(와전류센서 시스템), High Speed Machining(고속가공), Cutting Force(절삭력)

1. 서 론

선반, 밀링 등 다양한 공작기계의 발전은 컴퓨터의 발전과 더불어 최근에는 공장자동화, 특히 스마트 팩토리 사업에서는 필수적인 장비로 발전하고 있다.

첨단화된 기계 장비를 이용하여 제품을 자동생산함에 있어 관련된 필요 기술들, 특히 공구소재기술, 공구활용기술들도 발전해야 한다. 현재는 다양한 용

도와 여러 분야에 필요한 부품을 생산하기 위해 효율적인 연구개발이 이루어져 공작기계들이 산업현장에서 활발히 사용되고 있다. 산업현장에서는 효율적인 투자를 통한 생산성 향상과 품질 향상을 위하여 고속화, 고정밀화가 요구되는 가공시스템으로 변화되고 있다. 각종 기계 구성부품의 가공정밀도의 개선, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 경쟁력을 강화시키고 있다. 특히 최근 기계 가공에서 요구되는 납기단축과 제조경비절감에 따른 생산성 향상이 이루어지고 있다¹⁾.

금형가공에 주로 사용되는 볼엔드밀 가공은 평엔드

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-505-999-2160

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

밀가공이나 페이스커터 가공과 비교하여 가공시간이 매우 길고, 사용되는 커터의 직경이 극히 제한되며, 공구의 절삭부가 입체적인 반구 형태라는 형상 특성으로 인하여 강성이 저하하며, 공구 정점부에서는 절삭속도가 0이 되어 이론적으로 절삭이 이루어지지 않는다. 그리고 공작물의 곡면경사와 공구 날의 위치에 따라 절삭속도가 변하기 때문에 가공조건 선정이 상당히 어렵다. 볼 형상의 특성상 공구의 중심 날에서의 절삭은 거의 없고, 최외각날에서 큰 절삭을 발휘하게 되는데, 이러한 절삭력의 불규칙한 형태는 공구의 변형을 일으키고 공구의 수명을 단축시킨다^[2].

본 연구에서는 볼엔드밀 가공 중 발생하는 공구의 변형과 이에 따른 절삭력변화를 연구하기 위하여 실험적인 방법을 통하여 실제 가공 중 비접촉식으로 고정도의 측정이 가능한 와전류센서(eddy-current sensor)를 공구에 부착하여 온라인으로 변형량을 측정하는 방법과 동시에 공구동력계를 사용해서 절삭력을 측정하는 방법을 사용하였다. 가공조건에 따른 공구의 변형을 측정하고 측정된 데이터를 바탕으로 가공방향에 따른 절삭력의 변화와 공구변형 특성을 파악하여 절삭조건에 따른 생산성 향상을 도모하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 공구변형 모델

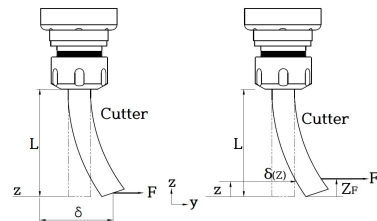
볼엔드밀 가공의 공구변형 모델을 정의할 때 공구는 절삭날에 존재하는 홈(flute)에 의해 매우 복잡한 형상을 띄게 되므로 변형모델을 단순한 봉의 형태로 나타낼 수 있다. 공구홀더는 강체로서 변형이 일어나지 않는다고 가정하고 공구날은 공구홀더에 고정된 외팔보(Cantilever beam)로 간주하여 모델을 정의할 수 있다.

Kline^[3]은 공구변형모델로 Fig. 1(a)에 나타난 것처럼 공구 끝단에 작용하는 경우와 Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 공구의 끝단에서 z만큼 떨어진 점에 작용하는 경우로, Fig. 1(b)의 경우 수평방향 변형량을 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\delta(z) = \frac{F_y}{2ER^4} [(z_F - z)^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - z_F)] \quad (1)$$

식(1)에서 z_F 는 끝단에서 절삭력의 작용하는 위치까지의 거리이고, R은 공구반경, E는 공구의 탄성계수, L은 유효공구길이, F_y 는 공구의 변형을 일으키는 절삭력의 수평성분으로 공구축과 수직인 방향의 절삭력이다. 유효공구길이 L은 스펀들과 공작기계에서 발생하는 변형량을 고려하기 위하여 도입되었는데 정삭의 경우나 공구의 직경이 상대적으로 작을 경우에는 절삭력에 의한 스펀들과 공작기계의 변형이 비교적 크지 않아 스펀들에서 발생하는 변형의 영향을 무시할 수 있으므로 본 연구에서도 Kline이 제시한 것처럼 공구의 유효한 길이를 공구홀더로 고정된 실제 공구 길이로 적용하여 공구자체의 변형량만으로 실험값을 고려하였다^[3].

Feng^[4-5]은 Fig. 2와 같이 볼엔드밀의 공구변형모델을 가정하여 볼엔드밀의 절삭계(Cutting system) 변형을 완전 단일체로 생각하여 그 변형을 고려한 공구 변형량을 식(2)와 나타내었다.



(a) at the edge (b) distance from the edge

Fig. 1 Simple tool deflection models for different point acting cutting force suggested by Kline

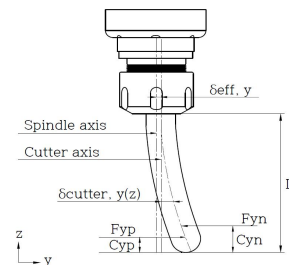


Fig. 2 A deflected ball endmill cutting model suggested by Feng

$$\delta_y(z) = \delta_{cutter, y}(z) + \delta_{eff, y} \quad (2)$$

여기서, $\delta_{cutter,y}(z)$ 는 z 에서의 y 방향 공구변형을 나타내고 식(1)과 동일하며, $\delta_{eff,y}(z)$ 는 완전 단일체의 y 방향 변형량을 나타낸다. 콜렛, 스피indle베어링, 공작기계구조의 완전단일체인 경우 $\delta_{eff,y}$ 는 완전 단일체의 유효강성으로 식(3)에 의해서 결정된다.

$K_{eff,y}$ 값은 커터에 하중을 가하여 변형량을 측정하여 얻을 수 있는 값이다.

$$\delta_{eff,y} = (F_{yp} + F_{ym}) / K_{eff} \quad (3)$$

2.2 절삭력 모델

볼엔드밀 가공은 공구날 끝의 반구형 부분에서 공구날 형상 특성상 절삭날을 따라 연속적으로 변하는 절삭특성을 가지고 있으므로, 날의 형상이 계속적으로 변하는 절삭기구를 해석적인 식으로 표현하기가 어렵다. 기존의 해석적 모델(analytical model)들은 모든 3차원 절삭은 2차원 경사절삭의 합으로 표현할 수 있다는 가정에서 출발하였으므로 전단각과 마찰각 등 입력데이터의 정확성이 필요하고, 절삭력 예측에 필요한 입력데이터를 구하기 위해서는 실험을 거쳐야하는 단점을 가지고 있다. 따라서 절삭날을 따라서 변화하는 절삭력과 미변형 칩 형상과의 관계를 실험적 모델 파라미터의 함수로 표현하는 실험적인 방법을 이용하여 볼엔드밀의 절삭기구를 표현하는 것이 유리하다.

엔드밀의 절삭날을 여러 개의 아주 작은 절삭날로 나눌 때 각각의 미소 절삭날의 절삭기구는 Fig. 3에 나타나 있듯이 2차원 절삭 과정으로 나타낼 수 있다.

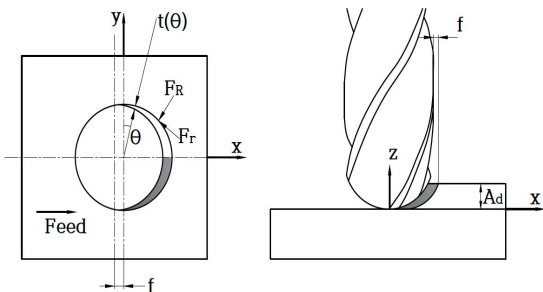


Fig. 3 Cut geometry and coordinate system for ball-end mill

따라서, 미소 절삭날에 작용하는 미소 절삭력을 구한 후 이들을 적분하면 공구회전각에 따른 순간 절삭력의 계산이 가능하다⁵⁾.

볼엔드밀의 기본적인 절삭 기하학은 평엔드밀인 경우와 유사하나 볼 부위에서의 공구반경의 변화에 따른 날 부위의 위치에 따라 서로 다른 절삭속도로 인하여 위치에 따라서 다른 절삭기하를 가지게 되는데, 이를 나타내기 위한 모델파라미터로서 $K_T(z)$ 와 $K_R(z)$ 를 들 수 있다⁶⁾.

비 절삭저항 계수인 $K_T(z)$ 와 $K_R(z)$ 는 한 절삭 조건에 대해서 상수의 값을 가지는 것이 아니라 절삭날의 위치에 따른 함수로 간주하여서 각 절삭깊이에 있어서의 값을 나타내게 된다. 절삭깊이의 변화와 이송속도의 변화를 주어 얻은 데이터를 바탕으로 $K_T(z)$ 와 $K_R(z)$ 를 구한다면 절삭력의 예측이 가능하다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구는 수직형 머시닝센터(Doosan, Mynx 6500/50)에서 가공실험을 통하여 그 결과를 얻었으며, Fig. 4와 같이 머시닝센터 공구쪽에 x 축과 y 축에 0.5 mm 떨어져서 비접촉으로 공구변형을 측정할 수 있도록 와전류센서를 위치하였으며, 테이블에는 3축 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계(Kistler, KEYENCE EX-502)장치를 위치하였다. 3축의 절삭력과 2축의 공구변형 데이터를 실시간으로 측정하기 위하여 National Instruments 사의 DAQ시스템을 연결하여 실시간으로 PC에 저장하였다.

본 연구에 사용된 피삭재는 생산현장에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 기계구조용 탄소강재인 SM45C로 크기는 40×40×35 mm인 육면체이며, 가공 방향은 Fig. 5와 같다. 중심에서 대각선으로 이동하기 시작할 때 절삭력과 공구변형량을 동시에 측정하였으며, 특히 ①번 방향에서, ②번, ③번 그리고 ④번 방향일 때 일정한 절삭력과 공구변형량을 측정할 수 있었다.

본 실험적 연구를 위해 절삭조건중 주축의 회전수와 절삭깊이를 고정시키고 이송속도 변화에 따른 특

성연구를 파악하기 위하여 Table 1과 같은 조건에서 수행하였다.

피삭재에 직선과 코너부, 절삭깊이에 대한 절삭력 신호처리는 실험과 동시에 공구동력계와 공구 변형량은 와전류센서로부터의 미소전압 변동량을 전압증폭기를 통하여 증폭되고 NI-DAQ board에서 A/D변환되어 컴퓨터에 내장되어 있는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 1초당 1000개의 DATA를 획득하는 방법으로 컴퓨터에 저장하여 분석하였다.

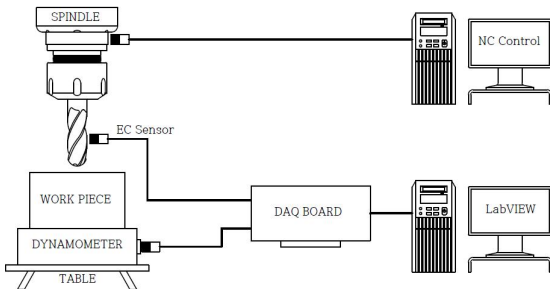


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

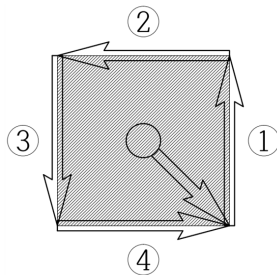


Fig. 5 Cutting direction for rectangular shape

Table 1 Experimental conditions for machining

Item	Value
Spindle revolution(rpm)	2000
Feed rate(mm/min)	100, 150, 200
Depth of cut(mm)	0.5
Too diameter(mm)	6(ball-endmill)
Number of tool edge	2
Cutting direction	upward

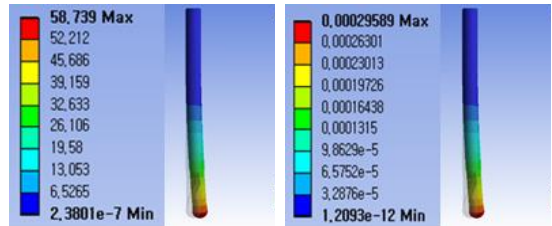
4. 실험결과 및 고찰

실험에 앞서 이론적으로 절삭력을 측정하기 위하여 Table 2와 같이 공구의 조건을 설정하여 유한요소해석을 실시하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 유한요소해석을 실시하여 나타난 결과이다. Table 3은 유한요소해석을 통한 절삭력을 나타낸 것이고, Table 4는 응력과 변형률, 변형값을 나타낸 것이다.

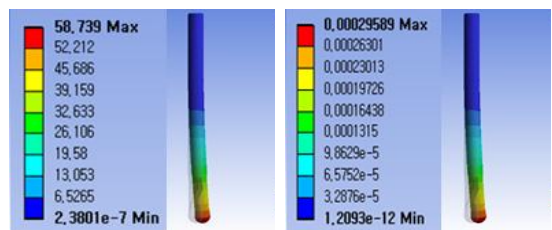
Table 2 Material properties of cutting tool

Tool material	SKH59
Tool length	62 mm
Tool diameter	6 mm
Elastic modulus	217 GPa
Poisson's ratio	0.29
Mass density	8140 kg/m ³
Thermal conductivity	24.5 k
Specific heat	418 cp
Shear strength	737 MPa
Tensile strength	1097 MPa
Bending strength	1938 MPa



(a) Stress analysis (b) Elastic strain analysis

Fig. 6 FEM results for 100 mm/min of feedrate



(a) Stress analysis (b) Elastic strain analysis

Fig. 7 FEM results for 200 mm/min of feedrate

Table 3 FEM results of cutting forces for different feedrate

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
F100	59.9252	134.7321	-33.2731
F200	55.6653	186.7337	-57.5925

Table 4 FEM results of stress, strain and deformation for different feedrate

	Stress (MPa)	Strain	Deformation (mm)
F100	45.987	0.0002294	0.085301
F200	58.739	0.00029589	0.11258

유한요소해석을 통한 이론적인 절삭력은 Table 3에서 보는 바와 같이 이송속도가 빠를 때 Fx값은 줄어 들고, Fy값은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 공구는 이송속도가 빨라지면 변형이 커지는 것을 Table 4를 통해서 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 5에 제시한 절삭방향에 따라 이송속도가 100 mm/min로 절삭가공하는 경우 측정된 절삭력 F(x)와 F(y)를 나타내는 그림으로, ①구역을 지날 때 F(x)의 값이 음의 방향으로 가장 크게 나타나고, ②구역을 지날 때부터 방향이 바뀌었다가 ③구역에서 양의 방향으로 크게 나타나고 있으며, ④구역에서 다시 감소하는 것을 알 수 있다. Fy의 값은 ①구역에서 ②구역으로 가면서 값이 증가하고, ③구역에서부터 방향이 바뀌면서 감소하다가 ④구역에서 음의 방향으로 큰 값을 나타내었다.

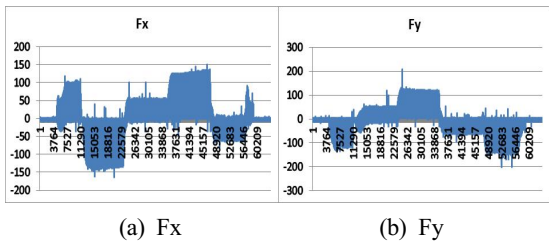


Fig. 8 Cutting force characteristics for 100 mm/min feedrate according to the cutting direction as shown

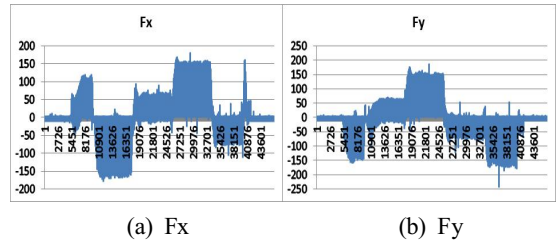


Fig. 9 Cutting force characteristics for 150 mm/min feedrate according to the cutting direction as shown

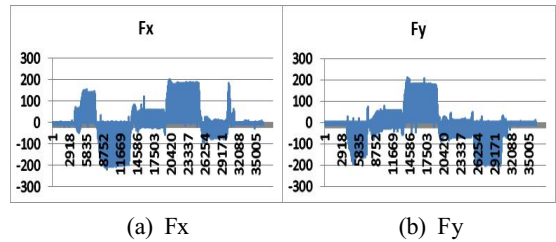


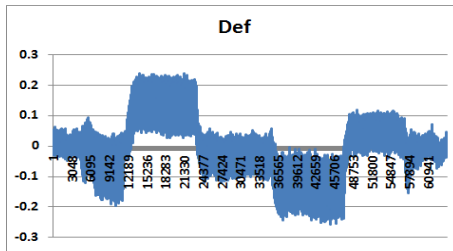
Fig. 10 Cutting force characteristics for 200 mm/min feedrate according to the cutting direction as shown

Fig. 9는 이송속도가 150 mm/min인 경우이고, Fig. 10은 이송속도가 200 mm/min인 경우로 절삭력 Fx와 Fy는 Fig. 8에서 보이는 것과 같은 양의 방향, 음의 방향 모두 같은 경향을 나타내고 있으며, Fx와 Fy의 값이 각 구역에서 그 크기가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

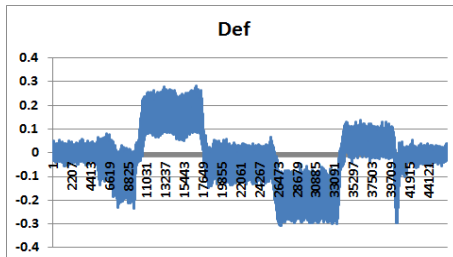
①번 구간을 가공할 때 F(x)의 값은 이송속도에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며 절삭력이 음의 방향으로 큰 값을 나타내며, ②번 구간에서 음의 방향에서 양의 방향으로 바뀌면서 ①번구역보다 상대적으로 낮은 절삭력을 나타내고 있다. ③번 구간에서 양의 방향으로 큰 절삭력이 작용하다가 ④번 구간에서 다시 음의 방향의 절삭력이 나타나고 있었다. F(y)의 값은 ①번 구간에서 양의 방향의 작은 절삭력이 나타나고 있으며, ②번 구간에서 양의 방향 큰 절삭력이 나타나며 ③번 구간에서 방향이 음의 방향으로 바뀌어 ④번 구간에서 음의 방향이 큰 절삭력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공구가 가공을 시작할 때 절삭력이 증가하는 경향이

나타나고 있으며, F(z)의 값은 모든 구간에서 음의 방향으로 절삭력이 나타나고 있었다.

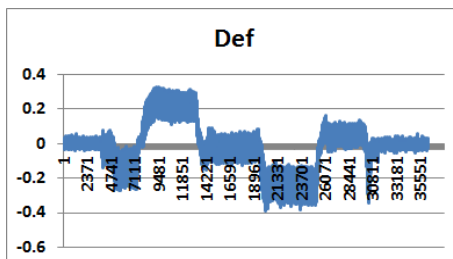
Fig. 11(a), 11(b) 그리고 11(c)는 Fig. 5에 나타난 절삭방향을 따라 가공하는 경우 각각 이송속도가 100 mm/min, 150 mm/min 그리고 200 mm/min으로 절삭가공하면서 와전류센서장치로 얻은 x 방향 공구의 변형량이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 공구의 x방향의 변형량은 x방향의 절삭력과 밀접한 관계가 있으며, 절삭력의 변화에 따라 유사한 공구변형이 발생하고 있었다.



(a) Deformation of x direction for 100 mm/min feedrate



(b) Deformation of x direction for 150 mm/min feedrate



(c) Deformation of x direction for 200 mm/min feedrate

Fig. 11 Tool deformation according to the different feed rate

Table 5 Average values of measured cutting forces and deformation of x-dir

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	Deformation (mm)
F100	-53.8986	16.78778	-53.012	0.137833
F150	-64.5705	17.90811	-62.1349	0.166773
F200	16.1226	82.47427	-79.3784	-0.032620

Table 6 Variance values of high and low for measured cutting forces

Value	Variance	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
F100	High	55.0647	37.1982	65.4772
	Low	84.3100	31.9634	126.8612
	Sum	139.3747	69.1616	192.3384
F150	High	67.7553	47.8945	67.8600
	Low	93.7643	36.9064	153.3259
	Sum	161.5196	84.801	221.1859
F200	High	45.4067	126.5750	85.4980
	Low	38.5401	80.2855	194.2372
	Sum	83.9468	206.8605	279.7352

실험장치를 통하여 가공 중 실시간으로 측정된 절삭력과 변형값중 Fig. 5의 ①영역에서 각 방향의 평균 절삭력값들과 x 방향의 평균 변형량 값을 Table 5에 나타내었다. Table 6은 Fig. 5의 ①영역에서 각 방향의 절삭력 값들의 상위 변동값과 하위 변동값을 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 불엔드밀을 이용하여 사각형상을 가공할 때 발생하는 불 엔드밀의 형상변형과 절삭력의 관계를 파악하기 위해 와전류센서를 주축에 부착하여 센서 입력부가 불엔드밀에서 1 mm의 여유를 둔 위치에서 와전류의 변형을 실시간으로 측정하여 공구의 변형을 분석하고, 동시에 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정된 값으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

사각형상 가공 시 이송속도의 변화에 따라 절삭력의 변화가 나타나고 있으며, 각 절삭구간에서 이송속도가 빨라지면, 절삭력이 감소하는 구간에서는 값

이 더욱 감소하고, 절삭력이 높은 구간에서는 더 증가하는 것을 알 수 있었다.

절삭력이 증가하면 절삭저항을 많이 받아 공구의 변형도 커지고 절삭력이 감소하면 절삭저항이 줄어들어 공구의 변형도 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 공구의 변형과 절삭력의 관계는 이송속도, 절삭깊이 등에 따라 달라지고 이송속도가 빨라지면 절삭력이 커지고 그에 따라 공구의 변형도 커지는 것을 알 수 있었다.

또한, 공구의 변형이 특정한 절삭조건에서 줄어드는 현상이 발생하는 경우도 있어, 보다 다양한 절삭조건을 부여한 실험을 통하여 공구의 변형과 절삭력의 관계를 설명하는 연구가 필요하다.

International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 7, pp. 697-710, 1994.

6. Kim, G. M., Cho, P. J., Kim, B. H., Chu, C. N., "Cutting Force Prediction in the Ball-End Milling Process of Various Cutting Area Using Z-map," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 57-65, 1997.

REFERENCES

1. Lee, C. M., Ryu, S. P., Ko, T. J., Jung, J. Y., Chung, W. J., "A study on the Analysis and Evaluation of Cutting forces for High Speed Machining by a Ball-end mill," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 167-174, 2005.
2. Doo, S., Hong, J. W. and Suh, N. S., "A study on the Cutting Force and Machining Error on the Inclined Plane in Ball-end Milling," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 112-119, 2001.
3. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts," International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 22, pp. 7-22, 1982.
4. Feng, H. Y., Menq, C. H., Menq, "A Flexible ball end milling system model for cutting force and machining error prediction," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 461-469, 1996.
5. Feng, H. Y., Menq, C. H., "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process-I. Model formulation and model building procedure,"