

평엔드밀 포켓가공시 절삭력과 공구변형에 관한 연구

최성윤*, 권대규*, 박인수*, 왕덕현#,**

*경남대학교 대학원, **경남대학교 기계공학부

A Study on the Cutting Forces and Tool Deformation when Flat-ended Pocket Machining

Sung-Yun Choi*, Dae-Gyu Kwon*, In-Su Park* and Duck-Hyun Wang#,**

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

(Received 27 December 2017; received in revised form 26 February 2017; accepted 2 March 2017)

ABSTRACT

Recently, the operation of precision pocket machining has been studied for the high speed and accuracy in industry to increase production and quality. Moreover, the demand for products with complex 3D free-curved surface shapes has increasing rapidly in the development of computer systems, CNC machining, and CAM software in various manufacturing fields, especially in automotive engineering. The type of aluminum (Al6061) that is widely used in aerospace fields was used in this study, and end-mill down cutting was conducted in fillet cutting at a corner with end-mill tools for various process conditions. The experimental results may demonstrate that the end mill cutter with four blades is more advantageous than that of the two blades on shape forming in the same condition precise machining conditions. It was also found that cutting forces and tool deformation increased as the cutting speed increased. When the tool was located at 45° (four locations), the corner was found to conduct the maximum cutting force rather than the start point of the workpiece. The experimental research is expected to increase efficiency when the economical precision machining methods are required for various cutting conditions in industry.

Key Words : Pocket Cutting(홈가공), Tool Dynamometer(공구동력계), Eddy Current Sensor System(와전류센서장치)

1. 서 론

최근 산업현장에서는 생산성 향상과 품질 향상을 위하여 고속화, 고정도화가 요구되는 정밀가공(Precision machining)이 이루어지고 있으며, 컴퓨터의 급격한 발전과 CNC 공작기계와 CAM 소프트웨어의 급속한 개발로 자동차 부품, 항공기 부품, 금형 등 복잡한 삼차원 자유 곡면 형상을 갖는 제품의 수요가 급증

하고 있다. Trust 등^[1-2]은 상향 엔드밀 공정에서의 공구 형상 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형 칩단면적으로 나타내는 절삭력 예측모델을 제시하고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다. Wang은 펜슬가공시 볼엔드밀의 공구변형을 와전류센서로 측정하였고^[3], 절삭력과 음향 방출신호를 동시에 사용해서 공구파손을 검출하는 연구를 수행하였다.^[4] 가공시 코너 반경^[5]과 공구날끝 반경의 영향^[6]에 관한 연구도 진행되었다.

본 연구에서는 항공부품에서 많이 사용하는 재료인 AL6061 알루미늄을 피삭재로 사용하여 평엔드밀 공구로 포켓 사각 형상을 상향·하향 절삭 등 여러 가지

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

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

가공조건에 따라 수행 하였으며 직교 배열표를 분산분석(ANOVA)을 통하여 가공조건변화에 따른 절삭력 특성과 공구변위에 영향을 미치는 요인들을 실제 절삭력 측정실험을 통하여 확인하였다.^[7] 본 연구의 결과는 평 엔드밀 포켓가공에서의 최적 가공방법과 가공조건을 제시하여 경제적인 가공방법 설정에 유용하게 사용될 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 평 엔드밀 가공 중에 발생하는 공구의 변형량 측정과 공구동력계로 부터 절삭력을 검출하기 위해 동일중공업의 TNV-40A 수직형 머시닝센터의 주축 절삭유 고정부에 마그네틱 베이스(Magnetic base)를 이용한 치구로 고정하고 X, Y 축의 변위를 동시에 측정하기 위하여 와전류센서 고정 장치를 설치하고 공구끝단으로부터 40mm 되는 부분에 와전류 센서 간의 신호간섭을 최소화하기 위하여 측정치구(Measuring fixtures)를 엔드밀 샹크(Shank)부에 부착하고 와전류센서 사이는 1.0mm 간격을 두고 와전류센서를 설치하여 포켓가공 실험을 하였다. Fig. 1은 실험장치이고 Fig. 2(a)와 2(b)는 마그네틱 베이스(Magnetic base)를 포함한 측정치구(Measuring fixtures)의 사진과

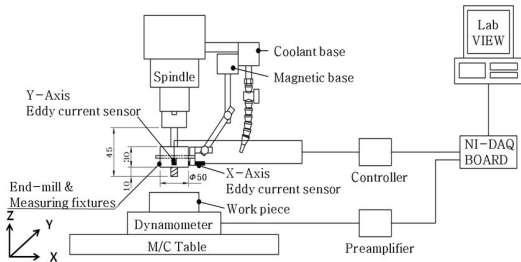
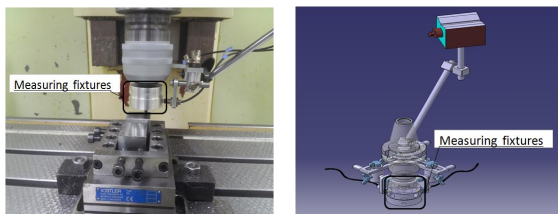


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup



(a) Photograph of measuring fixtures (b) 3D CAD modeling of measuring fixtures

Fig. 2 Experimental measuring fixture system

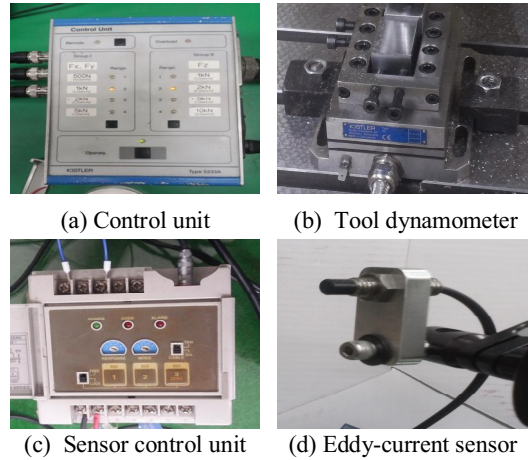


Fig. 3 Tool dynamometer and eddy-current system

Table 1 Experimental conditions for machining tests

Item	Value
Spindle revolution (rpm)	1500
Feed rate (mm/min)	80
Depth of cut (mm)	2
End-mill diameter(mm)	6
End-mill Number of the tool edge (ea)	2, 4
Cutting direction	Up milling, Down milling
Air ejection	On , Off

3D CAD 모델링이다.

절삭공구는 공구마멸에 인한 가공오차(Machining error)를 최소화하기 위하여 고속가공 및 형상가공에 적합한 고 내마멸성을 가진, 고속도강(HSS, SKH 59)에 코발트 8%가 함유된 TiCN(Titanium carbon nitride) 코팅 공구로, 직경 5mm와 직경 6mm공구를 사용하였다.

데이터 수집은 공구동력계와 와전류센서 측정시스템 신호들이 전압증폭기를 거쳐 DAQ board (National Instrument, USA)에서 A/D변환을 하여 LabVIEW 프로그램으로 공구 동력계의 X, Y, Z의 3축의 절삭력 변화와 와전류센서 측정시스템에서 공구의 X, Y의 변위를 각각 1초당 4000개의 데이터를 획득하는 방법으로 실시간으로 측정 저장하였다.

Fig. 3(a)와 3(b)는 각각 공구동력계의 Control unit과

Table 2 Orthogonal array of 3 factors and 2 levels [L8 (2³) type]

No.	Experimental procedure	column index			Experimental condition
		A	B	C	
1	1	0	0	0	$A_0 B_0 C_0$
2	2	0	0	1	$A_0 B_0 C_1$
3	3	0	1	0	$A_0 B_1 C_0$
4	4	0	1	1	$A_0 B_1 C_1$
5	5	1	0	0	$A_1 B_0 C_0$
6	6	1	0	1	$A_1 B_0 C_1$
7	7	1	1	0	$A_1 B_1 C_0$
8	8	1	1	1	$A_1 B_1 C_1$

Table 3 The experimental conditions of pocket machining

NO.	Factor & level conditions					
	Spindle revolution (rpm)	Feed rate (mm/rmin)	Depth of cut (mm)	End-mill diameter (mm)	Number of tool edge (each)	Air ejection
1	1500	80	2	6	2	On
2	1500	80	2	6	2	Off
3	1500	80	2	6	4	On
4	1500	80	2	6	4	Off
5	1500	80	2	6	2	On
6	1500	80	2	6	2	Off
7	1500	80	2	6	4	On
8	1500	80	2	6	4	Off

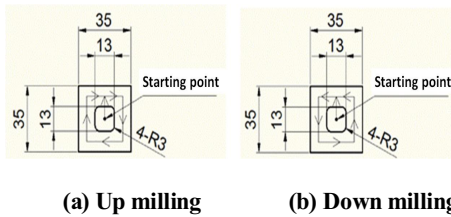
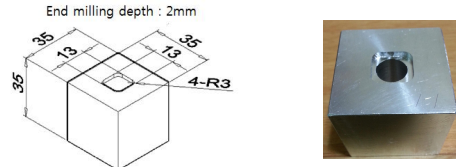


Fig. 4 Tool path for pocket machining

공구동력계이고 3(c)와 3(d)는 각각 와전류센서 측정시스템의 Control unit와 와전류센서이다.

Table 1과 같은 가공조건을 설정하여 포켓 형상가공에 대하여 인자가 3개이고 수준이 2개로, 8회의 실험으로 요인들을 검출하기 위해 Table 2와 같은 실험배치로 L8 (2³)형 직교배열표를 사용하여 Table 3의 실험조건에 따라 포켓가공을 수행하였다. CAM 프로그램 생성이 가능한 CATIA를 사용하여 모델링하고 Fig.



(a) CAD modeling (b) Machined specimen

Fig. 5 CAD modeling and photo. of machined specimen
4에 나타난 것과 같이 포켓 사각형상의 중심에서 가공을 수행하는 수치제어(NC) 코드를 생성하였다.

Table 3의 실험조건에 따라 8회의 실험을 할 수 있도록 알루미늄(Al6061)시편 크기를 35x35x35로 준비하여 포켓 가공실험을 실시하였으며, Fig. 5(a)는 CATIA로 작성한 형상이고 5(b)는 실제 가공된 피삭재이다.

3. 실험결과 및 고찰

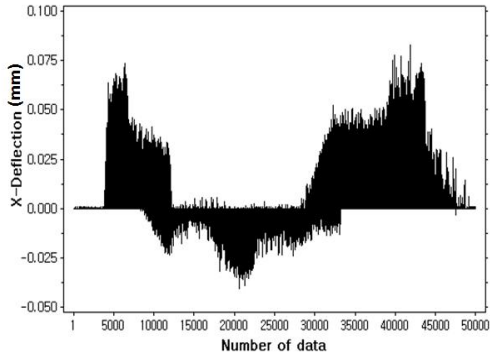
Table 2와 Table 3의 직교배열표 실험순서에 따라 평엔드밀 포켓 가공실험을 실시하면서 공구동력계와 와전류센서로 각각 x, y, z축의 절삭력과 x, y축의 공구변형량을 측정된 결과들을 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6 (a)는 x축방향으로 측정된 공구변형량이고, 6(b)는 y축 방향의 공구변형량을 나타낸 결과이다. Fig. 7의 (a), (b)와 (c)는 각각 x축, y축과 z축 방향에서 측정된 공구동력계로 측정된 절삭분력이다.

포켓 사각형상 가공에서 절삭조건 변화에 따른 공구동력계에서 측정된 X, Y, Z축의 측정결과에서 최대값의 평균값으로 Minitab 통계분석 프로그램을 이용하여 유의성 검정을 통해 어떤 인자가 가공에 영향을 미치는지 확인하였다. Table 4는 공구동력계에서 측정된 최대값의 평균을 도표로 나타낸 것이고 Fig. 8은 가공절삭력 합력의 최대값의 평균의 그래프이다.

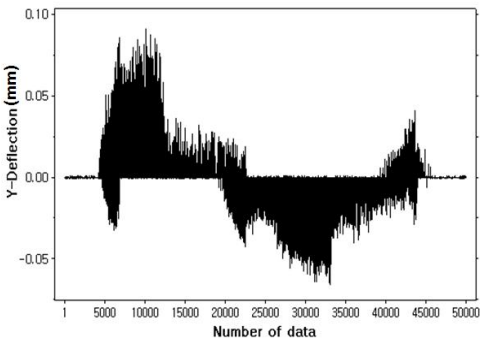
가공 동력 그래프에서 가공조건에 따라 X축 가공동력의 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 가공조건에 따라 X축 가공 시 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. Minitab을 이용해 분산분석을 통하여 검증 하였으며 Table 5의 분산분석의 결과에서 순차제곱합(Seq. SS)은 하나씩 순서적으로 요인을 추가하면서 그 변동을 고려한 제곱합이며, 수정제곱합(Adj. SS)은 다른 모든 요인들이 모두 이미 모형에 들어있다는 가정하에 마지막으로 새로 추가되는 요인의 변동을 제어 나온 제곱합

을 내타낸다. 분산분석표에서 P값이 0.05보다 작으면 영향을 주는 것으로 볼 수 있으며, 인자 B(Number of the tool edge)는 P값이 0.1로 결과에 상당한 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

분산 분석의 주효과 플롯은 Fig 9와 같이 나타났으며, 변형률에 영향을 미치는 인자는 주 효과도에서 그래프의 기울기가 크며, 영향을 미치지 않는 인자는 그래프의 기울기가 완만해 진다. 인자 B(Number of the tool edge)는 와전류센서에 의한 공구 변형의 주효과 그래프에서 공구의 변형을 낮출 수 있는 방법은 기울기가 큰 인자 B에 대한 수준이 낮은 1의 수준이다.

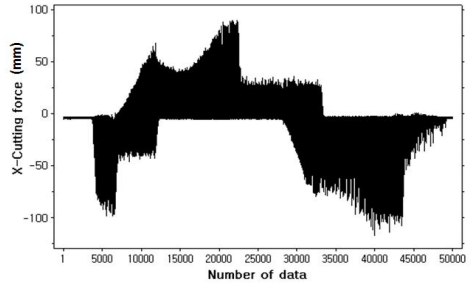


(a) Tool deflection of x-axis

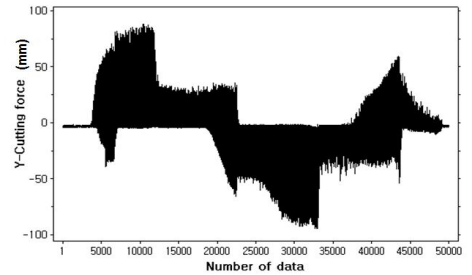


(b) Tool deflection of y-axis

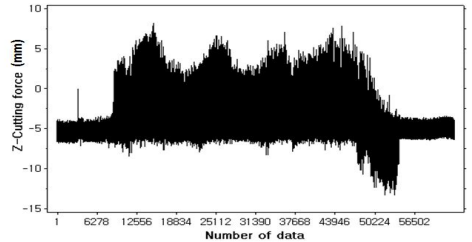
Fig. 6 Tool deflections measured by eddy current sensor system



(a) Cutting force of x-axis



(b) Cutting force of y-axis



(c) Cutting force of z-axis

Fig. 7 Cutting forces measured by tool dynamometer

Table 4 Maximum value average table of the tool dynamometer

No.	Cutting force of X-axis	Cutting force of Y-axis	Cutting force of Z-axis	Average cutting force
1	69	59	59	62
2	67	65	61	64
3	96	75	84	85
4	92	79	62	77
5	63	62	40	55
6	73	58	37	56
7	89	76	54	73
8	93	75	60	76

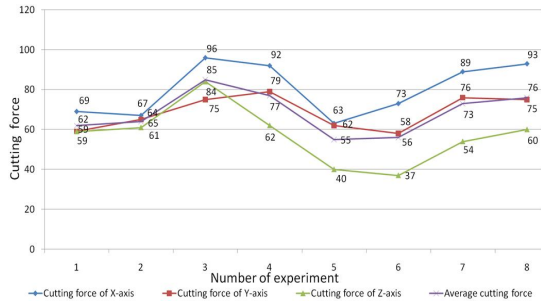


Fig. 8 Maximum value average graph of tool dynamometer

Table 5 The maximum value of the average variance of the tool dynamometer

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A (Cutting direction)	1	26.0	24.50	24.50	7.71	0.048
B (Number of the tool edge)	1	684.50	684.50	684.50	181.06	0.107
C (Air ejection)	1	98.00	98.00	98.00	25.9	0.197
Error	4	15.00	15.00	3.75		
Whole	7	822.00				

S = 1.93649
 R-Squared(square)= 98.18%
 R-Squared(Correcton) = 96.81%

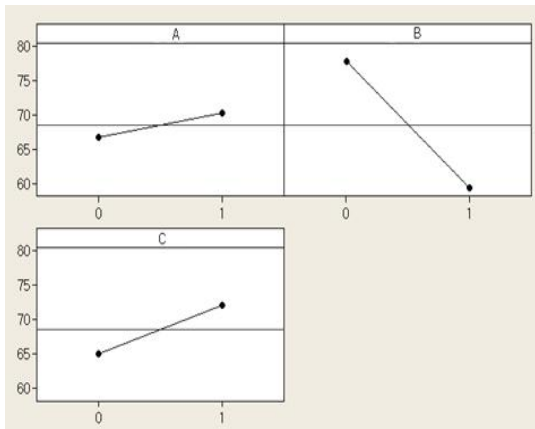


Fig. 9 Main effects plot (mean data)

Table 6 Maximum value average table of the tool deflection

No.	Tool deflection of X-axis	Tool deflection of Y-axis	Average tool deflection
1	0.286	0.06	0.173
2	0.282	0.051	0.166
3	0.324	0.04	0.182
4	0.365	0.037	0.201
5	0.303	0.028	0.165
6	0.191	0.032	0.111
7	0.392	0.041	0.216
8	0.393	0.044	0.218

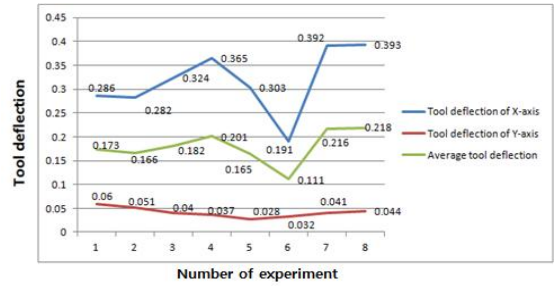


Fig. 10 Maximum value average graph of tool deflection

Table 7 The maximum value of the average variance of the tool deflection

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A (Cutting direction)	1	0.00076	0.00001	0.00001	1.20	0.334
B (Number of the tool edge)	1	0.00510	0.00510	0.00510	8.07	0.047
C (Air ejection)	1	0.00020	0.00020	0.00020	0.03	0.874
Error	4	0.00308	0.00308	0.00077		
Whole	7	0.00840				

S = 0.0277916
 R-Squared(square)=63.26%
 R-Squared(Correcton) = 35.70%

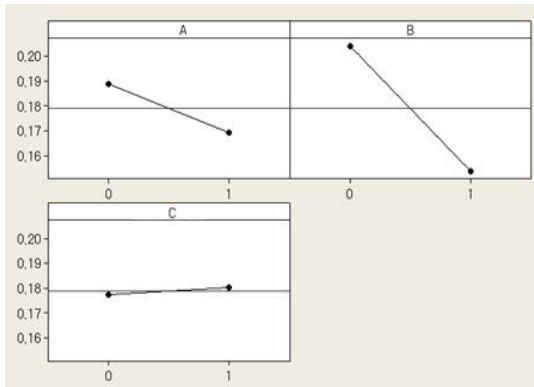


Fig. 11 Main effects plot (mean data)

와전류센서에 의해 측정된 공구 변형에 대한 X, Y축의 측정결과에서 최대값의 평균을 가지고 어떤 인자가 가공에 영향을 미치는지 확인하였다. Table 6은 와전류센서에서 측정한 최대값의 평균을 도표로 나타낸 것이고 Fig. 10은 그래프이다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 가공 동력 그래프에서 가공조건에 따라 X축의 공구변위 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 가공조건에 따라 X축 가공시 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, Table 7은 Minitab을 이용한 분산분석의 결과이다.

분산분석에서 $P < 0.05$ 가 되면 유의하다는 것을 알 수 있으며 분산분석결과에서 $P < 0.047$ 로 와전류센서 측정의 공구변형 최대값 평균은 분산분석결과에서 공구날수 인자가 유의하게 나왔으며, 분산분석의 주효과 플롯은 Fig. 11과 같이 나타났다.

분산분석결과에서 공구동력계와 와전류센서에 의해 측정된 값에 대한 최대값 평균의 분석에서는 가공방향, 공구날수가 유효한 인자임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 (AL6061) 소재를 머시닝센터에서 포켓 사각형상의 평 엔드밀 가공시 영향을 미치는 요인으로서 가공방향, 공구날수, 에어분출과 같이 3가지를 선정하고 직교배열표를 이용하여 절삭력과 공구변형에 따른 형상 부위의 정밀도에 미치는 요인들의 영향을 통계적방법으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 통계적 분석방법인 분산분석의 유의수준 10%하에서 측정된 절삭동력 최대값의 평균에 대한 분산분석 결과 가공방향이 영향을 주는 것으로 나타났다.
2. 통계적 분석방법인 분산분석의 유의수준 10%하에서 측정된 공구변형 최대값의 평균에 대한 분산분석 결과 공구날수가 영향을 주는 것으로 나타났다.
3. 공구날수에 선정에 따라서 공구의 변형이 발생하였으며, 공구가 시편의 도입부 보다 코너부 진입 시 가장 큰 절삭력을 받으며 공구의 변화가 급격히 일어남을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol 63, pp. 677-700, 1941.
2. J. Tlust and P. Macneil, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", Annals of the CIRP, Vol. 24, pp. 21-25, 1975.
3. D. H. Wang and K. S. Yun, "Characteristics of Tool Deflection of Ball-end Mill Cutter in Pencil Cutting of the Corner", J. of the KSPE, Vol. 16, No. 2, pp. 123-129, 1999.
4. D. H. Wang, W. I. Kim and J. S. Lim, "The mechanism and detection of tool fracture using sensor fusion in cutting force and AE signals for small diameter ball-end milling", J. of KSMPE, Vol. 3, No. 3, pp.24-31, 2004.
5. Lee, J. Y., Kim, C. H., and Sea, C. W., "Plating hardness and its effect to the form accuracy in shaping of corner cube on cu-plated steel plate using a single diamond tool", Journal of KSMPE, Vol. 13, No. 5, pp.64-69, 2014.
6. Noh, Y. H., "A study on surface roughness of aluminum 7075 to nose radius and cooling method in CNC lathe machining", Journal of KSMPE, Vol. 14, No. 4, pp.85-91, 2015.
7. Chen, T. C. and Hong, H., "Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method," Journal of Materials Processing Technology, No. 123, pp. 1-4, 2002.