

엔드밀 마멸에 따른 절삭력과 표면조도의 특성

The Characteristics of Cutting Force and Surface Roughness in case of Endmill Wear

허현*(부산대원), 이기용(부산대원), 강명창(부산대 기계기술 연구소),
김정석(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터), 황경현(한국기계연구원)

Abstract

End Milling is available for machining the variable shape of products and has been widely applied in many industries. To manufacture precise products, a surface roughness has to be noticeable as a important parameter. In end milling, the research for tool wear has been insufficient because the tool shape and the cutting geometry are complicated. In this paper, the pattern of endmill wear is investigated and the machinability is evaluated. As finding out the characteristics of cutting force and surface roughness, the effect of endmill wear on machinability is investigated.

Key words : Endmill Wear(엔드밀 마멸), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면조도), Machinability(가공성)

1. 서론

엔드밀 가공은 슬롯, 포켓, 표면가공 등 다양한 형상의 가공에 유용하므로 많은 산업에 널리 응용되고 있으며, 정밀한 제품을 제작하기 위해서는 가공후 표면조도가 양호해야 하므로 표면조도는 정밀도를 좌우하는 중요한 파라미터라 할 수 있다.

표면조도에 영향을 미치는 인자는 절삭조건(절삭속도, 이송량, 절삭깊이), 공작기계의 동특성 및 안정성, 공구마멸, 공구형상 등이 있다. 이중 절삭속도와 이송량이 표면조도에 미치는 영향은 가공 기하학적으로 규명되었으며,^(1,2) 절삭깊이도 chatter(Chatter)를 발생시키는 측면에서 여러 연구가 진행되나 있지만,^(3,4,5) 공구마멸에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이는 엔드밀 형상 및 가공형태가 기하학적으로 복잡하므로 마멸의 패턴과 진전을 파악하기가 어렵기 때문으로 사료된다.

엔드밀의 공구마멸은 선삭에서와 같이 플랭크 마멸(Flank Wear), 크레이터 마멸(Crater Wear), 선단 마멸이 존재하는데, 가공 측면의 표면조도에 영향을 주는 것은 플랭크 마멸이며 선단마멸은 가공 밀면에 영향을 미친다.⁽⁶⁾ 일반적으로 엔드밀 가공의 경우 측면이 중요시 되므로,⁽⁷⁾ 플랭크 마멸의 패턴 및 진전과 측면의 표면조도와의 관계를 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 엔드밀 마멸의 패턴을 확인하고 마멸의 진전에 따른 가공성을 평가하고자 한다. 절삭가공의 중요한 파라미터 중 하나인 절삭력과 정밀도를 나타내는 표면조도의 특성을 파악함으로써 엔드밀 마멸이 가공에 미치는 영향을 조사하여 엔드밀 가공 연구의 지침으로 삼고자 한다.

2. 실험장치 구성 및 실험방법

일반적으로 상향밀링(Up-milling)보다 하향밀링(Down-milling)으로 절삭시 표면조도가 양호하게 나타나므로 본 연구에서는 다운밀링으로 실험을 행하였다.

2.1. 실험장치의 구성

본 실험을 위한 장치도를 Fig. 1에 나타내었다.

밀링머신의 베드에 공구동력계(Tool Dynamometer)를 장착하고 공작물을 공구동력계에 고정시켜 평엔드밀(Flat Endmill)로 가공하였으며 공구동력계에서 획득한 절삭력 신호는 A/D 변환기와 PC를 사용하여 신호처리 하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서 사용한 실험조건 및 실험장비의 재원은 Table 1과 같다.

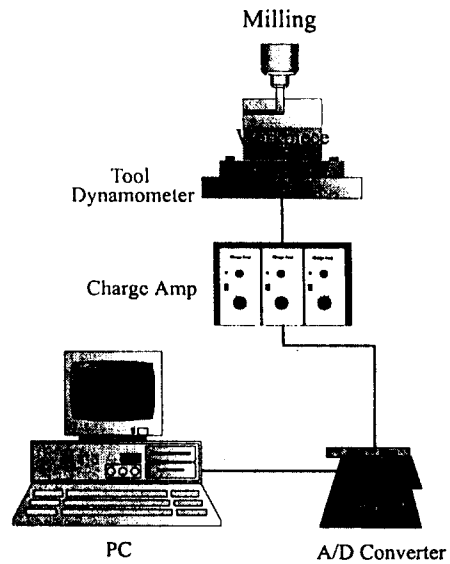


Fig. 1 The Schematic Diagram of Experimental Setup

Table 1 The Specification of Experimental Apparatus and Cutting Condition

Tool	HSS 2 Fluted Flat Endmill Diameter : 10mm Helix Angle : 30°
Workpiece	SKD11
Machine Tool	Vertical Milling Machine (FVH800 Kasuga Co.,)
Spindle Speed(rpm)	205, 299, 384
Table Speed(mm/min)	15, 25
Axial Depth of Cut(mm)	1.4
Radial Depth of Cut(mm)	6
Overhang(mm)	37
Cutting Flued	No Cooling
Tool Dynamometer	KISTLER 9257B
Charge Amp.	KISTLER 5007

하향밀링시 공구 파손 측면에서 반경방향 절삭깊이(Radial Depth of Cut)는 공구의 반경보다 크게 하는 것이 합당하며⁽⁶⁾, 축방향 절삭깊이(Axial Depth of Cut) 및 절삭속도가 크면 chatter를 야기시키므로 예비실험을 통해 적절한 절삭조건을 선정하였다.

공구마멸의 패턴 및 진전을 파악하기 위해 일정한 가공시간 간격으로 공구상태를 현미경을 통해 관찰하였는데, 절삭조건마다 마멸의 진전 속도가 틀리므로 적절한 시간 간격을 설정하여 절삭력 및 마멸량을 측정하였다.

본 연구에서는 가공측면에 관심을 두므로 절삭력은 축방향(Z 방향)에 수직인 평면의 두방향(X, Y방향)을 측정하였으며, X 방향이 테이블 이동방향이 되도록 셋팅하였다. Fig. 2에 주축 속도 200rpm, 테이블 속도 15mm/min, 마멸량 0에서 측정한 X, Y방향의 절삭력을 나타내었다. 절삭력의 피크값이 다른 것은 공구의 런아웃(Runout), 채터, 칩의 영향으로 각 피크값의 평균을 취하여 절삭력으로 나타내었다.

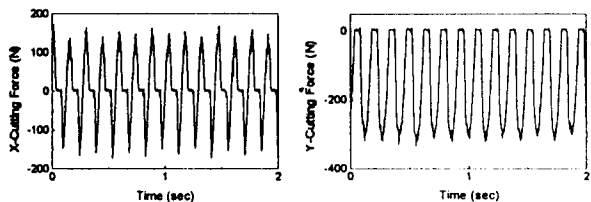


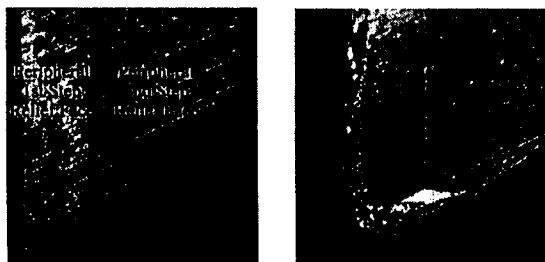
Fig. 2 Measured Cutting Force

가공 후 공작물의 표면조도는 공구진행방향(테이블 이동방향)으로 중심선 평균조도 Ra를 측정하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공구의 마멸패턴

새공구와 마멸된 공구를 Photo. 1에 나타내었다.



(a) New Tool

(b) Worn Tool

Photo. 1 New Tool and Worn Tool

Photo. 1의 마멸된 공구는 주축속도 384rpm, 테이블 속도 15mm/min으로 10분 가공한 상태이다. 마멸된 부분이 측면에서 밀면으로 넓게 퍼져 있고, 밀면에서 외주1여유면(Peripheral 1st Step Relief Face)을 따라 발생한 마멸이 측면에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 또한 칩의 영향으로 용착마멸(Adhesive Wear)뿐만 아니라 연마마멸(Abrasive Wear)이 발생하여 공구가 손상된 것을 관찰할 수 있다.

마멸의 형태는 Fig. 3와 같이 측면과 밀면으로 구분하여 나타낼 수 있다.

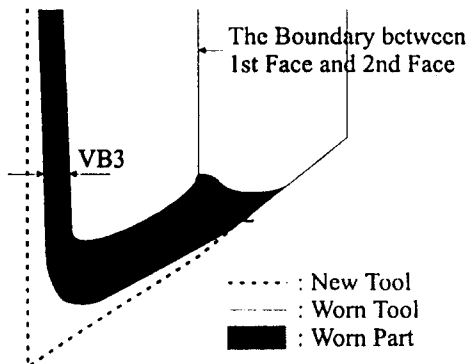


Fig. 3 The Shape of Wear

Fig. 3에서 공구는 가공시간에 따라 빗금친 부분과 같이 마멸이 발생할 뿐만 아니라 날카로운 날끝이 둔화되는 등 형상이 변화한다. Fig. 3에 마멸량을 나타내는 인자로 공구날 끝단에서의 마멸량 VB1, 외주1여유면과 외주2여유면의 경계 지점에서의 마멸량 VB2, 측면의 마멸량 VB3을 정의하였다. 실험

결과 VB3은 VB1과 VB2에 비해 작고 칩의 불규칙적인 용착으로 인해 그 정확한 크기를 측정하기 어려우므로 절삭력 및 표면조도에 지배적인 영향을 미치는 인자로 VB1과 VB2를 선정하였다.

Table 2에 각 절삭조건에 따른 VB1~VB3의 값을 나타내었다.

Table 2 The Value of VB1, VB2, VB3

Spindle Speed (rpm)	Table Speed (mm/min)	Cutting Time (min)	VB1 (mm)	VB2 (mm)	VB3 (mm)
384	15	9	0.224	0.085	0.075
299	15	50	0.28	0.23	0.05
205	15	70	0.212	0.166	0.1
299	25	27	0.367	0.152	0.1

3.2 가공시간에 따른 마멸, 절삭력, 표면조도의 특성

Fig. 4에 가공시간에 따른 마멸, 절삭력, 표면조도를 나타내었다. V는 주축속도, f는 테이블 속도를 나타낸다.

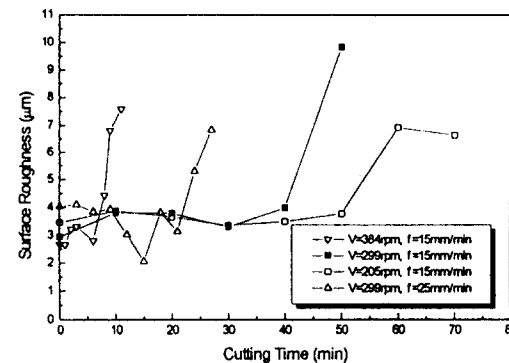
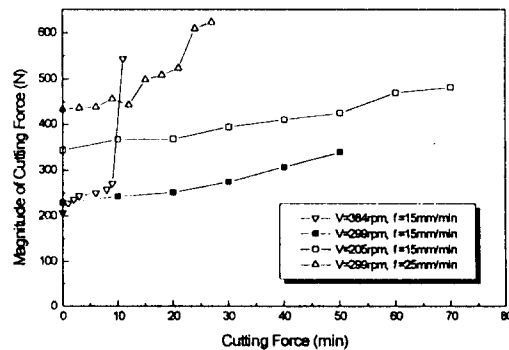
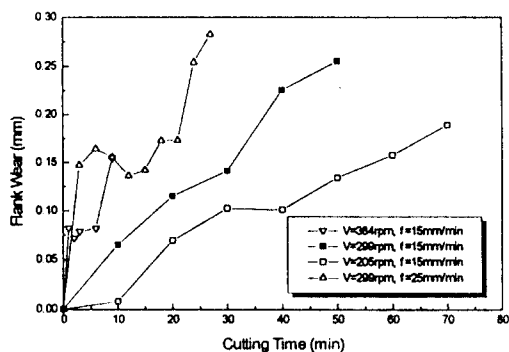


Fig. 4 Flank Wear, Cutting Force and Surface Roughness with Cutting Time

Fig. 4에서 마멸의 경우 마멸량을 $(VB1+VB2)/2$ 로 정의하여 도시화 하였다. 표면조도가 가시적으로 악화될 때까지 가공하였기 때문에 절삭조건별로 가공시간이 다르고 주축속도와 테이블 이송속도가 클수록 마멸의 진전속도는 빠르게 나타났다. 가공시간의 경과에 따라 전체적으로 마멸량이 증가하지만 드물게 가공시간이 더 길어도 마멸량이 작은 경우가 있는데 이는 엔드밀 공구의 형상이 변화하기 때문에 마멸량의 증가가 형상변화보다 더 작게 되면 마멸량은 감소하기 때문이다. $V=384\text{rpm}$, $f=15\text{mm/min}$ 의 절삭조건에서 11분경에 공구의 파손이 일어났는데 이때 절삭력과 표면조도도 매우 큰 것을 알 수 있다. 절삭력의 경우는 X, Y방향의 절삭력을 취하여 도시화 하였는데 가공시간에 따라 증가하는 경향을 보인다. 중심선 평균 표면조도 Ra 는 해석적으로 다음과 같은 값을 가진다.⁽⁶⁾

$$Ra \approx \frac{f_z^2}{R18\sqrt{3}} \quad (1)$$

여기서 f_z : 날당이송량(mm)

R : 공구반경

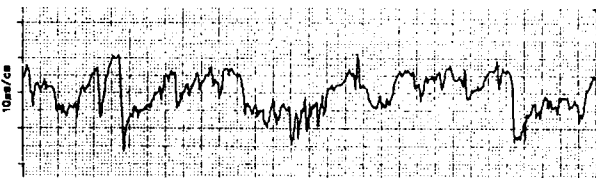
각 절삭조건에 따른 해석적 Ra 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 The Value of Ra with Cutting Condition

Spindle Speed (rpm)	Table Speed (mm/min)	Feed per Tooth (mm)	Ra (μm)
384	15	0.02	0.003
299	15	0.025	0.004
205	15	0.037	0.009
299	25	0.042	0.011

Table 3의 해석적 Ra 값과 Fig. 4의 실제 Ra 값을 비교해 보면 그 차이가 약 400 ~ 800배에 이르는 것을 알 수 있다. 또한 해석적으로는 날당이송량이 커짐에 따라 Ra 도 커지지만 Fig. 4에서는 그런 경향을 찾기 어렵다. 이는 해석적으로 나타나는 가공과정의 기하학적 형상이 표면조도에 미치는 영향보다 공작기계의 동특성, 칩의 공작물 표면의 용착, 채터 등에 의한 영향이 훨씬 크다는 것을 의미한다.

Fig. 4에서 가공시간에 따른 표면조도를 살펴보면 어느 시간까지는 일정한 값을 보이다가 갑자기 악화되는 경향을 보이는데 이때 가공표면은 가시적으로 확인될 수 있을 정도로 나빠진다. Fig. 5에 $V=205\text{rpm}$, $f=15\text{mm/min}$ 의 절삭조건에서 초기상태와 50분 가공했을 경우의 표면형상을 나타내었다.



(a) Cutting Time = Start



(b) Cutting Time : 50 min

Fig. 5 Measured Surface(Measured Length : 8mm)

Fig. 5에서 초기상태의 표면형상에 비해 50분 가공했을 경우의 표면형상은 파형(Wave)진 형태를 확연히 보이고 있다. 이런 표면형상은 다른 절삭조건에서도 어느 가공시간이 되면 발생하였는데 이때의 절삭력이 본실험에서 사용한 공작기계의 각 절삭조건에 따른 한계절삭력으로 추정된다.

3.3 마멸에 따른 절삭력, 표면조도의 특성

Fig. 6에 마멸에 따른 절삭력과 표면조도를 나타내었다.

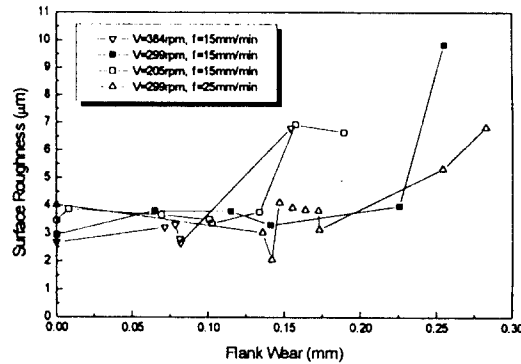
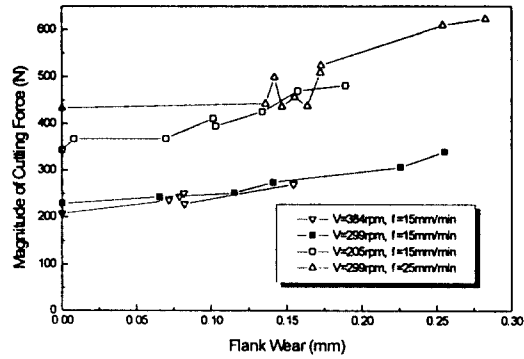


Fig. 6 Cutting Force and Surface Roughness with Flank Wear

가공시간에 따라 마멸량이 작아지는 경우가 존재하므로 마멸량에 따라 절삭력과 표면조도를 소트(Sort)하여 Fig. 6을 나타내었다. 절삭력은 마멸량에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이지만 표면조도는 마멸과의 상관관계를 찾기 어렵다.

선삭의 경우 마멸량이 기하학적으로 표면조도에 영향을 미치는 것과 같이⁽⁶⁾ 엔드밀 가공시도 공구의 마멸이 표면조도에 영향을 미칠것으로 추정된다. 그러나 실험 결과 실제 표면조도가 해석적인 표면조도와 큰 차이가 있으므로 공구 마멸이 기하학적으로 표면조도에 영향을 미친다 하더라도 그 영향을 실험적으로 증명하는 것은 어렵다.

마멸량이 기하학적으로 표면조도에 미치는 영향을 알 수 없지만 마멸량에 따른 절삭력 증가에 의해 어느 한계 순간부터 파형진 표면이 형성되므로 마멸은 표면조도에 영향을 미치는 중요한 인자라고 할 수 있다.

5 결론

1. 엔드밀의 플랭크 마멸은 측면마멸과 밀면마멸이 같이 발생하며 측면보다 밀면의 마멸이 더 크므로 마멸량의 기준으로 밀면 마멸을 선정하였다.
2. 엔드밀 가공시 연마마멸에 의해 공구의 외관이 변화하게 되고 이는 마멸량에 영향을 미친다.
3. 플랭크 마멸의 진전에 따라 절삭력은 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.
4. 플랭크 마멸의 진전에 따른 표면조도 특성은 일정한 경향을 보이지 않지만 각 절삭조건마다 표면조도가 갑자기 악화되는 한계마멸량이 존재한다.

참고문헌

1. M. E. Martellotti, An Analysis of the Milling Process, Transactions of ASME, Vol. 63, pp.677-700, 1941

2. M. E. Martellotti, An Analysis of the Milling Process - Down Milling, Transactions of ASME, Vol. 67, pp.233-251, 1945
3. F. Ismail, A. Bastami, Improving Stability of Slender End Mills against Chatter, Transactions of ASME, Vol. 108, pp.264-268, 1986
4. An-Chen Lee, Analysis of Chatter Vibration in the End Milling Process, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, pp.471-479, 1991
5. 星鐵太郎, 機械加工びびり現象-解析と対策, 工業調査會, 1977
6. 李奉珍, 尾崎省太郎, Machining Data Handbook, 韓國科學技術院 精密機械技術센터, 1981
7. D. Montgomery, Y. Altintas, Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling, Transactions of ASME, Vol. 113, pp.160-168, 1991
8. Warren R. Devries, Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag New York, 1991