

볼엔드밀에 의한 펜슬가공시 공구변형 특성

Characteristics of Tool Deflection when Pencil Cutting with Ball-End Mill

윤경석(경남대 대학원), 왕덕현, 김원일, 이운경(경남대 기계공학부), 이상훈(한화기계연구소)
K. S. Yun(Graduate School, Kyungnam Univ.), D. H. Wang, W. I. Kim, Y. K. Lee(Kyungnam Univ.)
S. H. Lee(Hanwha Machine R&D Center)

ABSTRACT

Pencil cutting can eliminate overload in uncut area caused by large diameter ball-end mill before finish cutting. As ball-end mill for pencil cutting is long and thin type, it is easily deflected by cutting force. The tool deflection when pencil cutting with thin and long ball-end mill is one of the main reason of the machining errors on a free-form surface. The purpose of the research is to find the characteristics of deflected cutter trajectory by eddy-current sensor.

Key Words: Ball-end mill(볼엔드밀), Tool deflection(공구변형), Pencil cutting(펜슬가공), Machining error(가공오차), Eddy-current sensor(와전류센서)

1. 서론

3차원 자유곡면이 요구되는 금형 가공에는 볼엔드밀의 사용이 필수적으로 요구되며 다양한 가공과정을 필요로 한다. 일반적으로 생산성을 높이기 위해 황삭에서는 중절삭으로 가공시간을 줄이며, 정삭에서 정확한 치수와 표면거칠기를 얻도록 한다. 중절삭에 사용하는 볼엔드밀은 절삭력에 견딜 수 있는 충분한 강성을 가지면서 공작물제거량을 증가시키기 위해 직경이 큰 볼엔드밀을 사용한다. 큰 직경의 볼엔드밀에 의한 가공에서 날부의 곡률이 크기 때문에 공작물의 곡면 곡률 반경이 공구반경보다 작을 경우 가공되지 않고 가공이 덜된 부분으로 남게 된다. 특히 곡면과 곡면이 만나는 접합부에서 이러한 현상이 뚜렷하게 나타난다. 이러한 부분은 정삭가공에서 작은 직경의 볼엔드밀로 제거하지만, 이 부분에 설정하는 정삭절삭조건은 가공되는 부분의 절삭력이 절삭깊이의 변화에 의해 급격하게 변화하는 이유로 매우 까다롭게 된다. 펜슬가공(Pencil cutting)은 이러한 부분만을 정삭가공 이전에 실행하는 윤곽가공으로 정삭에서 필요로 하는 까다로운 절삭조건을 설정 없이 정확하게 가공할 수 있는 가공방식이다.^[1]

펜슬가공에 사용되는 볼엔드밀은 깊은 곳을 가공해야 하므로 엔드밀이 가늘고 긴 형태를 갖고 있어

야 하는데, 이런 형태의 볼엔드밀은 강성의 부족으로 절삭력에 의해 공구가 변형되어 가공오차를 일으킬 수 있다. 이러한 현상은 곡면과 곡면이 이어지는 코너부에서 더욱 심하게 나타나는데, 곡면의 변화에 의한 절삭력의 변동이 급격히 일어나게 된다.

본 연구에서는 금형의 펜슬가공중에 나타나는 코너부에서의 볼엔드밀 변형특성에 대해 가공 후에 3차원측정기를 이용해서 추정해내는 간접적인 방법이 아닌 실제 가공 중에 볼엔드밀에 부착한 와전류센서(Eddy-current sensor)로부터 변형량을 취득, 분석하여 다양한 가공경로에서의 볼엔드밀 변형특성과 가공계획에 대하여 파악하고자한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 머시닝센터에서 실행하였다. Fig. 1에 나타낸 것처럼, 가공중 공구변형을 측정하기 위한 와전류센서는 볼엔드밀(6 ϕ , Cobalt 8% HSS)의 생크(Shank)와 0.3~0.5mm의 간격으로 설치하였고, 채터 신호를 측정하기 위하여 가속도계(Accelerometer)를 부착하였다. 와전류센서와 가속도계에서 나온 신호는 2개 채널로 동시에 NI-DAQ board로 A/D 변환하여

PC로 저장하였다.

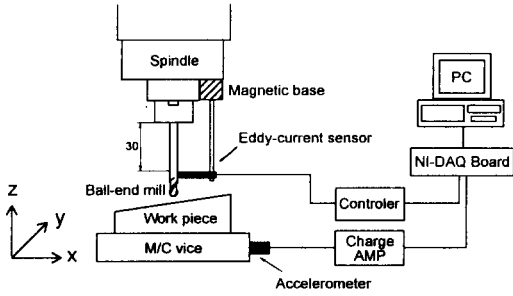


Fig. 1 Experimental setup

공구는 공구홀더로부터 나와 있는 유효공구길이 가 길수록 강성이 부족하여 변형되기 쉽다. 본 실험에서는 유효공구길이를 50mm로 고정시켜 실험하였다. 와전류센서는 공구 변형폭이 커서 변형 데이터 취득이 용이한 공구날부 바로 위 생크에 공구홀더로부터 30mm 떨어진 곳에 X방향과 Y방향으로 설치하여 각 방향에서의 데이터를 취득하였다. 와전류센서는 먼저 볼엔드밀의 생크부에서 보정(Calibration)을 하였는데, 선형적인 값으로 1.5V/mm를 보였다.

2.2 실험방법 및 조건

본 실험에 사용한 피삭재는 냉간 금형용 합금강인 SKD-11로 15°경사진 형태로 바이스에 고정시켜 절삭조건과 가공경로를 변화시키면서 실험을 하였다. Fig. 2에 나타난 것처럼 가공경로를 측면윤곽가공에서 하방향(Downward)경사면으로 코너가 연결되는 A가공경로와 상방향(Upward)경사면에서 코너를 지나 측면윤곽가공으로 진입하는 B가공경로로 정하고, 절삭방식에 따른 공구변형의 특성을 파악하기 위해 각각의 가공경로에 대해 상향절삭과 하향절삭으로 구분된 가공실험을 진행하였다.

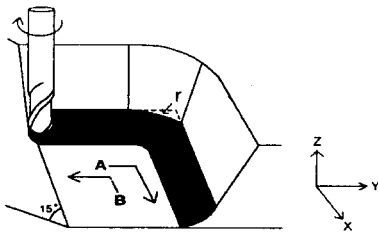


Fig. 2 Cutting direction

실험은 먼저 시편을 직경 20mm 초경 볼엔드밀로 깊이가 10mm로 황삭가공한 후, 곡면과 곡면이 만나는

각을 60°로 하여 직경 6mm HSS 2날 볼엔드밀로 코너각을 반경 5mm로 펜슬가공을 하였다. 펜슬가공시 평면과 경사면에서의 절삭깊이는 법선 방향으로 0.9mm를 유지할 수 있게 하였는데, 코너부에서는 황삭에서 먼저 공구곡률에 의해 코너각이 반경 10mm로 가공된 부분이므로 반경 5mm로 가공할 때 절입깊이는 더욱 커지게 되어 많은 절삭력을 받게 된다.

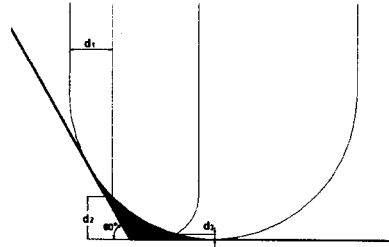


Fig. 3 Cross-section of pencil cutting in plane by 6φ ball-end mill

실험에 사용된 절삭조건은 주축속도 700rpm, 이송속도 28mm/min을 기본적인 가공속도로 하고 각각의 코너부에서 임의의 주축속도와 이송속도로 변화시키며 가공하였으며, 저장된 데이터는 필터링하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상향절삭시 공구변형 특성

절삭형태를 상향절삭으로 하고 Fig. 2에 나타난 A와 B 가공경로에 따른 펜슬가공시 공구변형 실험을 하였다. Fig. 4는 평면에서 하방향(Downward)경사면으로 코너가 연결되는 A가공경로에 따라 700rpm, 28mm/min으로 가공하다가 코너에서 주축속도와 이송속도를 변화시켰을 때, 코너에서의 공구변형을 X방향에서 측정된 것이다. 코너부 가공 전후의 변형 상태를 보면 I은 측면 윤곽 가공일 때 볼엔드밀은 측면과 반대로 미소 변형된 상태로 가공되고 있으며, II는 코너부 가공상태인데 심한 공구변형 상태를 보이고 있다. III은 이송방향이 하방향 절삭으로 바뀌어 가공되는 상태로, 이때 공구변형은 Z방향에서 받는 절삭력에 의해 Z방향으로 완전히 절입되지 못하고 -Z방향으로 변형된 상태로 가공되고 있다. (a)는 절삭속도 변화 없이 코너를 가공한 상태로 공구변형상태가 크게 나타나고 있다. (b)는 코너부에서 이송속도를 20mm/min으로 낮춘 상태로 공구변형이 줄었음을 보인다. (c)와 (d)는 각각 주축속

도와 이송속도를 변화시킨 것이다.

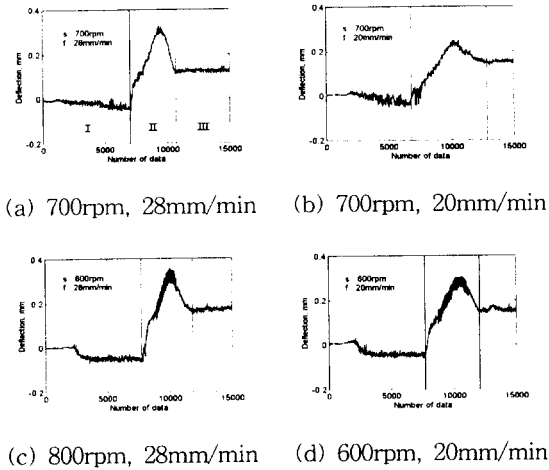


Fig. 4 Tool deflection for up cutting according to downward path

일반적으로 주축속도는 공구의 수명에 영향을 주고 이송속도는 가공속도와 표면거칠기에 영향을 주는 인자인데^[2], Fig. 4에서 나타난 것처럼 코너부에서 이송속도를 줄임으로써 공구변형이 줄어들음을 보였는데, 이것은 공구 변형이 주축속도보다는 이송속도에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 B가공경로로 상방향(Upward)경사면에서 평면으로 연결되는 가공경로를 지날 때의 X방향에서 측정된 공구변형상태이며, 이송속도의 변화에 의해 공구변형량도 줄어든 것을 나타내고 있다.

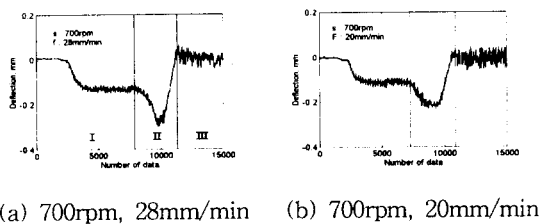


Fig. 5 Tool deflection for up cutting according to upward path

Table 2는 상향절삭시 A와 B가공경로와 조건에 따른 X와 Y방향에서 측정된 코너부의 공구변형량을 나타낸 것으로, 가공경로에 상관없이 비슷한 공구변형을 나타내었다. 가공경로 A에서는 상향으로 절삭시 코너부의 X, Y방향에서 공구가 이상적인 가공경로를 벗어나 측벽으로 절입하는 과절삭(Overcut)으로

차를 일으켰는데, 윤곽가공시에 생성되는 측면절삭력과 코너를 가공할 때 생성되는 하방향 절삭력에 의한 것으로 추측된다. 상향절삭일 때는 초기 공구의 절입량이 작은 상태에서 점점 커짐에 의해 절삭력이 끝부분에서 커지게 되는데, 코너부에서 절입량의 증가에 의한 공구강성의 부족으로 측벽방향으로 변형되어 측벽을 파고 든 것으로 보인다.

Table 2 Tool deflection at the corner for up cutting

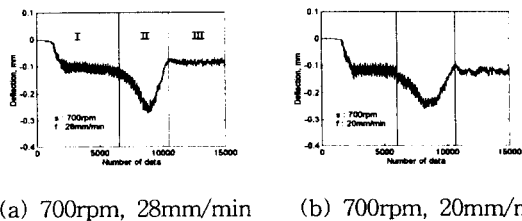
Tool path	Spindle speed(rpm)	Feed rate (mm/min)	Tool Deflection(mm)	
			X direction	Y direction
A	700	28	(-) 0.326	(-) 0.373
	700	20	(-) 0.253	(-) 0.273
B	700	28	(+) 0.306	(-) 0.373
	700	20	(+) 0.233	(-) 0.300

(-) : Overcut, (+) : Undercut

가공경로 B의 X방향에서 측정된 코너부는 미절삭(Undercut)을 나타냈고 Y방향에서는 과절삭을 나타내었다. X방향에서 측정된 미절삭은 상방향가공에 의한 Z방향의 미절삭이 코너부에서 X방향 미절삭으로 나타난 것으로 볼 수 있다. 이것은 공구가 상방향으로 절삭시에는 이송방향과 반대로 변형되어 Z방향으로 미절삭된 상태로 진행하다가 코너부에서 황삭가공 후 남은 미가공부위에 의해 절입량이 늘어나면서 공구에 과도한 절삭력이 작용하여 공구변형이 심해졌고, X축의 이상적인 가공경로에 접근하지 못한 상태에서 이송방향이 측면윤곽가공으로 변하여 절삭력의 증가로 공구강성이 떨어짐에 따라 과도하게 변형된 것으로 보인다.

3.2 하향절삭시 공구변형 특성

공구변형량을 비교하기 위해 같은 조건과 가공경로에서 절삭형태만 하향 절삭으로 변경하여 실험하였다. Fig. 6은 A가공경로를 따라 X방향에서 측정된

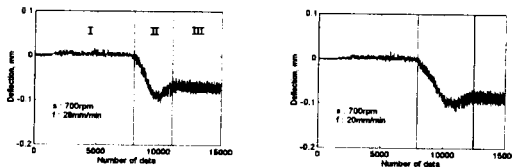


(a) 700rpm, 28mm/min (b) 700rpm, 20mm/min

Fig. 6 Tool deflection for down cutting according to downward path

공구변형값을 나타낸 것이다. 상향절삭과 비교하여 코너부에서 미절삭형태를 보여주고 있다.

Fig. 7은 가공경로 B에서 하향절삭일 때 X축에서 측정된 공구변형상태를 나타낸 것이다. I의 상방향 이송에서는 공구변형량이 작았고 II코너부도 변형이 거의 나타나지 않았지만, III의 측면 윤곽가공으로 진입하면서 공구가 측면과 반대로 변형됨을 보였다. 상향가공에서의 변형상태와 비교하면 변형은 거의 일어나지 않았고 안정적인 절삭형태를 나타냈다.



(a) 700rpm, 28mm/min (b) 700rpm, 20mm/min

Fig. 7 Tool deflection for down cutting according to upward path

Table 3에서 하향절삭에서의 각 가공경로에 따른 X방향과 Y방향에서 측정된 변형상태를 나타내었다. 상향절삭과 비교했을 때 코너부에서의 공구의 변형 방향은 측벽과 반대방향으로 변형되어 공작물의 가공오차형태는 미절삭을 나타내었다.

하향절삭에서는 공작물의 초기 절입폭이 크므로 절삭력에 의해 공구가 밀어 올려지는 방향으로 변형이 일어나 미절삭오차를 일으킬 수 있는데, 측벽을 파고들 때 공구가 측벽의 반대방향으로 변형됐다는 것을 예상할 수 있다.

Table 3 Tool deflection at the corner for down cutting

Tool path	Spindle speed(rpm)	Feed rate (mm/min)	Tool Deflection(mm)	
			X direction	Y direction
A	700	28	(+) 0.275	(+) 0.091
	700	20	(+) 0.253	(+) 0.078
B	700	28	(+) 0.097	(-) 0.166
	700	20	(+) 0.107	(-) 0.133

(-) : Overcut, (+) : Undercut

하향가공일 때는 전체적으로 진동의 영향이 덜하고, 공구의 변형량도 적었으며 이송속도에 의한 변형량의 차이도 크지 않았다. 공구의 변형 방향도 측벽 바깥쪽으로 진행되어 미절삭형태를 나타냈다. 주종남^[3]등의 연구에 의하면 기울기 각이 큰 측벽가공

시 가공면에 수직한 방향으로의 최대절삭력은 하향 밀링에서는 증가하고 상향밀링에서는 감소하여 상향 밀링이 유리한 것으로 나타냈는데, 코너부가 많은 펜슬가공에서는 기울기각이 작을 때 가공안정성이나 공구변형면에서는 하향밀링이 더 좋은 값을 나타내었다. 펜슬가공후에 정삭과정에 들어가기 때문에 과절삭보다는 오차를 보정할 수 있는 미절삭형태로 가공되어야 한다. 이런 면에선 하향가공이 훨씬 유리할 것으로 생각된다.

4. 결론

펜슬가공에서 공구의 변형특성에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 펜슬가공시에 코너부에서 공구의 변형은 상향가공에서 절삭력에 의한 과절삭으로 측벽을 파고드는 형태를 보였고 하향절삭일때는 미절삭형태로 나타났는데 이는 공구가 가늘고 긴 형상으로 강성의 부족에 의한 것이라 여겨진다.
- 피드속도는 가공시간과 공구변형에 큰 영향을 미치는데, 일정한 절삭속도에서 코너부에서 피드속도를 줄임으로써 가공시간이 길어지는 것을 최소화하면서 가공에러를 줄일 수 있음을 보였다.
- 펜슬가공시 작은 기울기에서는 하향절삭이 가공의 안정성이나 공구변형에 의한 가공오차가 적은 것으로 나타났는데, 코너부가 많은 펜슬가공경로 설정시에 하향절삭으로 하는 것이 바람직하게 보인다.

5. 참고문헌

1. 이회관, 김준형, 조시완, 양균의, "자유곡면으로 이루어진 3차원 곡면의 고속 가공 시스템 개발", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 782-787, 1997.
2. G. Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", McGraw-Hill, pp. 65-70, 1981.
3. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z map을 이용한 임의의 절삭영역에서 블랜드밀의 절삭력에 측", 한국정밀공학회지, 제14권, 제3호, pp. 57-65, 1997.