

## 펜슬가공시 공구변형을 고려한 볼엔드밀의 가공 궤적 Tool Trajectory of Ball-End Mill in Consideration of Deflection when Pencil Cutting

윤경석(경남대 대학원), 왕덕현(경남대 기계공학부)

K. S. Yun(Graduate School, Kyungnam Univ.), D. H. Wang(Kyungnam Univ.)

### Abstract

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

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

### 1. 서론

볼엔드밀은 자유곡면가공에 사용되는 공구로 금형가공에는 필수적이다. 볼엔드밀링 작업은 공구의 끝단이 원형이라는 특이한 형상으로 인해서 절삭기구해석이 복잡하고 절삭력해석이 어렵기 때문에 절삭조건이 경험적으로 부여되는 것이 대부분이라 적절한 가공이 이루어지지 않고 있다.<sup>[1]</sup>

또한 볼 형상의 특성상 공구의 중심날에서의 절삭성은 제로에 가깝고, 최외각날에서 큰 절삭력을 발휘하게 되는데, 이런 절삭력의 불규칙한 형태는 공구의 변형을 일으키고 수명을 짧게 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 볼엔드밀링의 절삭력 예측에 관한 연구<sup>[2]</sup>와 적절한 절삭조건을 찾기 위한 연구가 진행되었다. 또한 공구 변형을 고려한 절삭력 모델을 바탕으로 가공오차를 줄이기 위한 이송속도 결정에 관한 연구도 진행되었다.<sup>[3]</sup> 일반적으로 황삭에서 사용하는 직경이 큰 볼엔드밀은 공작물 제거량은 크지만 공구곡률이 크기 때문에 공작물의 곡면 곡률반경이 공구반경보다 작을 경우 가공이 덜된 미절삭부분으로 남게된다. 특히 곡면과 곡면이 만나는 접합부에서 이러한 현상이 뚜렷하게 나타난다. 정삭에서 작은 직경의 볼엔드밀로 정확한 치수와 표면거칠기를 얻는 가공과정을 거치게 되지만, 이러한 부분을 가공할 때 설정하는 절삭속도는 절삭 부하의 변화가 다른 부분에 비해 심하고, 절삭시간이 길어져 생산성이 저하되는 것을 고려할 때 매우 까다롭게 된다. 펜슬가공(Pencil cutting)은 이러한 부분만을 정삭가공 이전에 윤곽가공을 해 줌으로써 정삭에서 필요로 하는 까다로운 절삭조건의 설정 없이 미절삭부위를 정확하게 가공할 수 있는 가공방식이다.<sup>[4]</sup> 펜슬가공에 사용되는 볼엔드밀은 공구곡률반경이 작고 깊은 곳을 가공해야 하므로 엔드밀이 가늘고 긴 형태를 갖고 있어야 하는데, 이런 형태의 볼엔드밀은 강성의 부족으로 절삭력에 의해 공구가 변형되어 가공오차를 일으킬 수 있다.

본 연구에서는 펜슬가공에서 절삭력에 의한

공구변형으로 발생하는 가공경로의 오차를 가공 중에 볼엔드밀에 부착한 와전류센서로부터 변형량을 취득하여 가공궤적을 나타내려고 한다. 특히 절삭력을 많이 받는 코너에서의 공구변형값과 절삭력과의 관계를 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험은 머시닝센터에서 실행하였다. Fig. 1은 펜슬가공시 절삭력에 의한 공구변형을 측정하기 위하여 볼엔드밀( $\phi 6$ , M42 HSS)의 생크(Shank)에 와전류센서를 1mm의 간격으로 설치한 것이다. 와전류센서에서 취득된 신호는 NI-DAQ board로 A/D 변환하여 PC로 저장한 후 데이터 분석을 용이하게 하기 위해 가상계측 프로그램인 LabVIEW에서 저장된 신호를 Median 필터로 처리하였다.

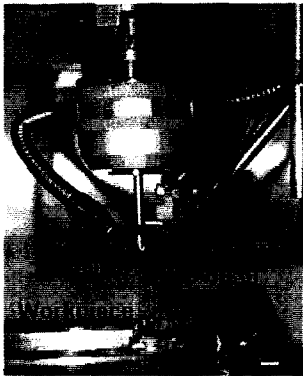


Fig. 1 Experimental setup

볼엔드밀의 전체 길이는 90mm이며 최대 날부 길이는 18mm이다. 공구홀더로부터 볼엔드밀 설치거리인 유효공구길이는 50mm로 고정시켜 실험하였다. 이는 펜슬가공시 깊은 곳을 가공하기 위해 공구를 길게 설치한 것으로 일반적으로 공구홀더로부터 나와 있는 유효공구길이가 길수록 강성이 부족하여 변형되기 쉬워진다. 와전류센서는 공구날부 바로 위 생크에 공구홀더로부터 30mm 떨어진 곳에 X와 Y방향으로 설치하여 각각의 방향에서 데이터를 취득하였다. 이는 최대 절삭력을 받는 절삭날부에 가장 근접한 데이터를 얻기 위한 것으로 변형 데이터 취득이 용이하였

다. Table 1은 볼엔드밀의 굽힘응력시험 결과로 볼엔드밀의 강성(Stiffness)은 269.167 kg/mm을 나타내고 있다. 와전류센서는 먼저 볼엔드밀의 생크부에서 보정하여 선형적인 값으로 2.4V/mm를 보였다.

Table 1 Bending test result for ball-end mill

Load at Yield (kgf)	Stress at Yield (kgf/mm <sup>2</sup> )	Displacement at Yield (mm)	Modulus (GPa)
613.700	434.104	2.280	154.678

### 2.2 실험방법 및 조건

본 실험에 사용한 피삭재는 냉간 금형용 합금강인 STD-11로 Cr성분이 많은 난삭재이다. 실험은 시편을 평면가공형태( $0^\circ$ )와 경사진 형태( $\theta^\circ$ )로 바이스에 고정시켜 실험하였다.  $0^\circ$ 인 평면가공에서는 절삭방향을 하향절삭으로 하고 코너반경  $r$ 을 변화시키며 궤적을 측정하였다. Fig. 2에서는  $\theta^\circ$  경사진 가공형태를 나타낸 것으로 가공경로를 측면윤곽가공에서 하방향(Downward) 경사면으로 코너가 연결되는 A가공경로와 상방향(Upward)경사면에서 코너를 지나 측면윤곽가공으로 진입하는 B가공경로로 정하고, 각각의 가공코드를 CAM프로그램으로 생성하였다. 경사면가공에서는 절삭조건과 가공경로를 변화시키면서 실험을 하였다. 와전류센서의 설치위치는 측면에서의 변형량 파악을 위해 X와 Y방향으로 설치하였다.

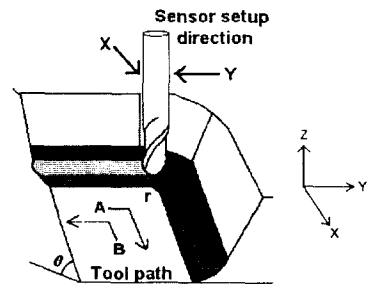


Fig. 2 Tool trajectory and sensor setup direction.

실험은 먼저 시편을 직경 20mm 초경 볼엔

드밀로 깊이 10mm로 황삭가공한 후, Fig. 3과 같이 곡면과 곡면이 만나는 각을  $60^\circ$ 로 하여 직경 6mm HSS 2날 볼엔드밀로 평면가공에서는 코너반경을 2.5, 5 및 10mm로 하고 경사면가공에서는 반경 5mm로 펜슬가공을 하였다. 펜슬가공시 평면과 경사면에서의 절삭깊이는 법선 방향으로 0.9mm를 유지할 수 있게 하였다. 실험에 사용된 절삭조건은 주축속도 700rpm, 이송속도 28mm/min을 기본적인 가공속도로 하고 각각의 코너부에서 주축속도와 이송속도로 변화시키면서 실험을 진행하였다.

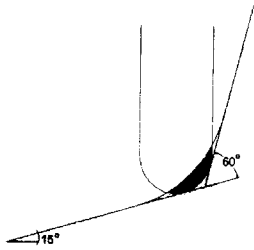


Fig. 3 Cross-section of pencil cutting

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 코너반경에 따른 공구변형 궤적

Fig. 4는  $0^\circ$  평면가공에서 코너반경을 변화시키면서 가공중의 공구변형량을 X와 Y방향에서 측정된 것이다. 절삭력은 이송방향과 측벽에서 받게 되는데 전체적으로 각각의 방향에서 측정된 공구궤적은 이송방향에 대한 변형량은 미미하고 측벽으로부터의 변형이 크게 나타났다. 코너부는 황삭에서 반경 10mm 볼엔드밀로 가공된 상태이므로 펜슬가공에서 가공반경이 줄어들게 되면 절삭부하를 많이 받게 된다. Fig. 4(a)에서의 반경 10mm가공에서는 코너부에서 공구변형량은 큰 변화 없이 나타나고 있지만, Fig. 4(b)에서 반경 5mm로 가공할 때는 절삭력에 의해 코너부에서 공구가 변형됨을 나타내었다. Fig. 4(c)에서는 반경 2.5mm로 가공할 때 과도한 절삭력으로 변형이 심하게 일어남을 궤적으로 보여주고 있는데, Y방향에서 측정된 변형량은 측벽으로 과도한 절삭형태를 보여주고 있다. 이 현상은 이송방향의 변화에 따른 급격한 절삭력 변화에 대해 공

구의 강성이 부족하여 비정상적인 공구변형 형태를 나타낸 것으로 사료된다.

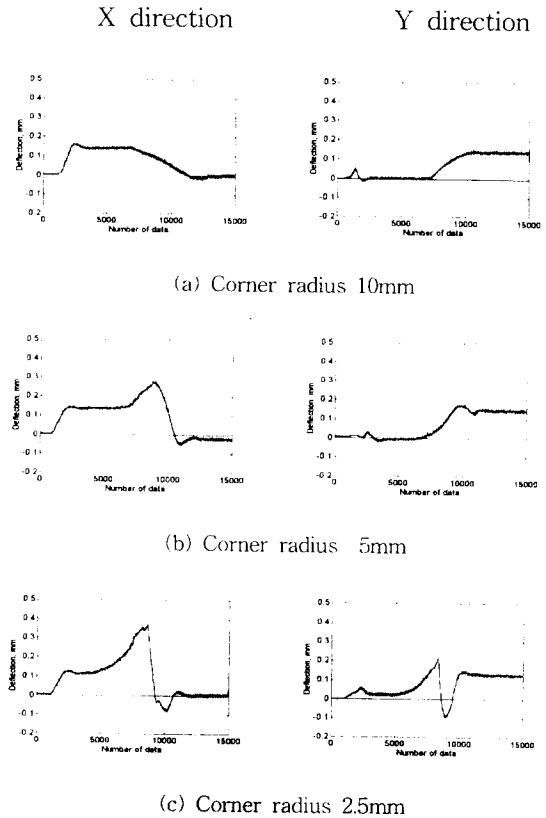


Fig. 4 Tool deflection for down cutting according to plane path

#### 3.2 가공경로에 따른 공구변형 궤적

경사면 가공에서의 가공경로에 따른 공구변형형태를 측정하기 위해 가공경로에 따른 공구변형궤적을 분석하였다. Fig. 5는 측벽윤곽가공에서 하방향가공으로 가공경로가 연결되는 A가공경로를 하향절삭으로 가공시 X와 Y방향에서 측정된 공구변형값을 나타낸 것이다. 기본가공조건인 700rpm, 28mm/min으로 코너부를 코너반경 5mm로 가공하였다. Fig. 5(a)는 이송속도의 변화 없이 가공할 때를 나타낸 것으로 코너부에서 공구변형상태가 크게 나타나고 있다. Fig. 5(b)는 이송속도를 20mm/min으로 낮춘 것으로 변형량이 줄어들었음을 보인다. 코너부 가공 전후의 변형상태를 보면 측벽 윤곽 가공일 때 볼엔드밀은 측벽과 반대로 미소 변형된 상태로 가공되고 있으

며, 코너부 가공상태에서 심한 공구변형 상태를 보이고 있다. 이송방향이 하방향 절삭으로 바뀌어 가공될 때 공구변형은 Z방향에서 받는 절삭력에 의해 이상적인 가공경로로 완전히 절입되지 못하고 -Z방향으로 변형된 상태로 가공되고 있다.

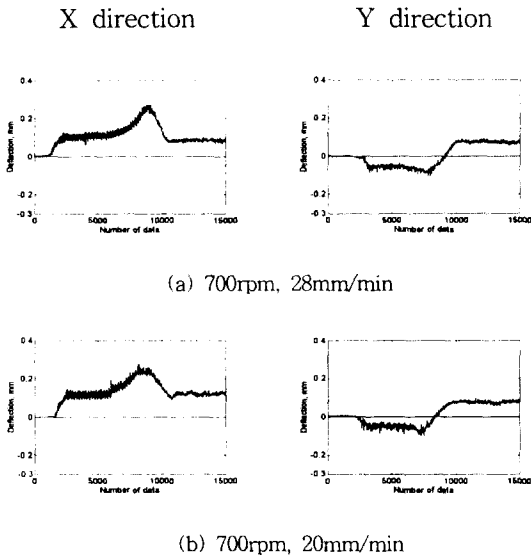


Fig. 5 Tool deflection for down cutting according to downward path

일반적으로 주축속도는 공구의 수명에 영향을 주고 이송속도는 가공속도와 표면거칠기에 영향을 주는 인자인데<sup>[5]</sup>, Fig. 5에서 나타난 것처럼 코너부에서 이송속도를 줄임으로써 공구변형이 줄어들었음을 나타내었다. 공구변형은 이송속도에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 하향 절삭에서의 X방향과 Y방향에서 측정된 변형상태를 분석하면 코너부에서의 공구의 변형 방향은 측벽과 반대방향으로 변형되어 공작물의 가공오차형태는 미절삭 형태를 나타내었다. 이는 하향 절삭에서는 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.

Fig. 6은 절삭형태에 따른 공구변형량을 비교하기 위해 A가공경로에서 절삭형태만 상향절삭으로 하고 같은 조건으로 실험한 것이다. A가

공경로에서 상향절삭시 코너부의 X방향은 공구가 이상적인 가공경로를 벗어나 측벽으로 절입하는 과절삭(overcut)오차를 일으켰다. 이것은 코너를 가공하면서 이송이 하방향으로 바뀔 때 생성되는 하방향 절삭력에 의해 공구가 변형되어 가공경로를 벗어나게 된 것이다.

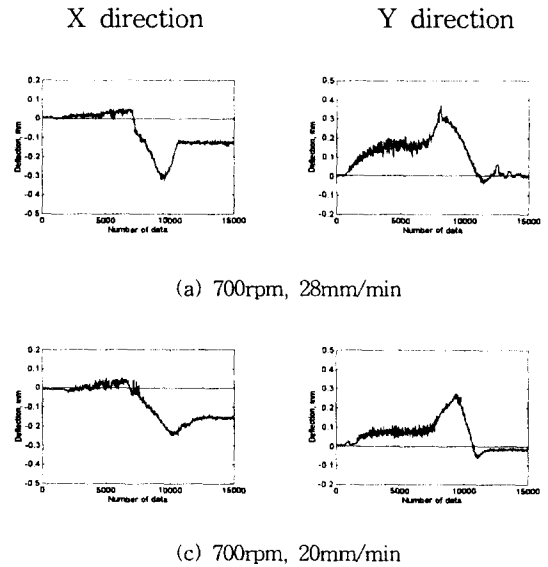
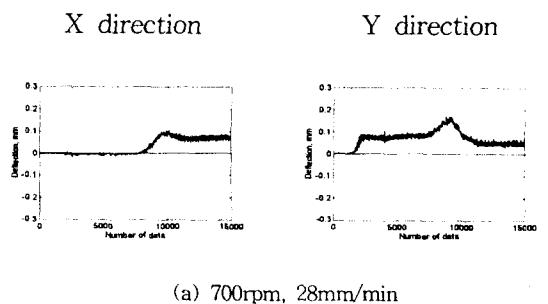


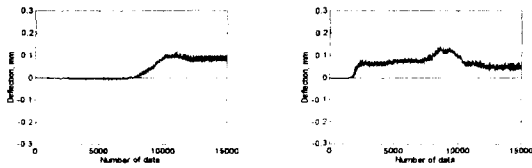
Fig. 6 Tool deflection for up cutting according to downward path

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.

Fig. 7은 상방향경사면 가공에서 측면윤곽가공으로 이송이 연결되는 B가공경로에서 하향절삭일 때 X와 Y방향에서 측정된 공구변형상태를 나타낸 것이다. 상방향이송일 때 공구변형량이 작았고 코너부도 변형이 거의 나타나지 않았지



(a) 700rpm, 28mm/min



(b) 700rpm, 20mm/min

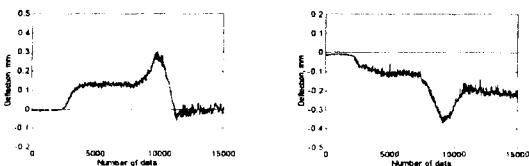
Fig. 7 Tool deflection for down cutting according to upward path

만, 측면윤곽가공으로 진입하면서 공구가 측면과 반대로 변형됨을 보였다. Fig. 5의 A가공경로와 비교했을 때 공구변형량이나 진동에 의한 영향이 작게 나타났다. 상방향경사면으로 가공할 때 공구변형은 거의 일어나지 않았고 코너부에서의 변형도 심하지 않았다.

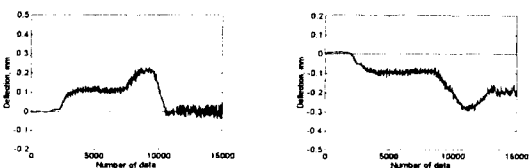
Fig. 8은 절삭형태를 상향절삭으로 하고 B가공경로를 상방향(Upward)경사면에서 평면으로 연결되는 가공경로를 지날 때의 X방향과 Y방향에서 측정된 공구변형상태이다.

X direction

Y direction



(a) 700rpm, 28mm/min



(b) 700rpm, 20mm/min

Fig. 8 Tool deflection for up cutting according to upward path

X방향에서 측정된 코너부의 변형상태는 미절삭을 나타냈고, Y방향에서는 과절삭을 나타내었다. X방향에서 측정된 미절삭은 상방향가공일 때 이송방향의 절삭력 작용점이 상승함에 따라

공구가 이송방향과 반대로 변형되어 미절삭 상태로 진행한 것이고, Y방향의 과절삭은 상향절삭일 때 안으로 파고드는 작용에 의한 것으로 여겨진다. 이렇게 진행된 가공은 코너부에서 황삭가공 후 남은 미가공부위에 의해 절입량이 늘어나면서 공구에 과도한 절삭력이 작용하여 공구변형이 심해졌고 이송방향이 측면윤곽가공으로 변하여 절삭력의 증가로 변형량이 증가하면서 측벽을 파고든 것으로 보인다.

가공경로에 따라 상향과 하향절삭을 분석해보면, 상향절삭일 때 X와 Y방향에서 측정된 코너부의 공구변형은 측벽을 파고드는 과절삭 형태를 보였고 변형량도 과도하였으며, A와 B가공경로에 상관없이 비슷한 공구변형상태를 나타내었다. 하향절삭에서는 전체적으로 공구의 변형 방향은 측벽 바깥쪽으로 진행되어 미절삭형태를 나타냈고, 변형량도 작았으며 이송속도에 의한 변형량의 차이도 크지 않았다. 코너부가 많은 펜슬가공에서는 기울기각이 작을 때 가공안정성이나 공구변형면에서는 하향밀링이 더 좋은 값을 나타내었다. 가공경로에 의한 공구변형상태를 보면 상방향 경사면 가공에서 측면윤곽가공으로 진행하는 B가공경로의 코너부에서 가장 안정된 형태를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 펜슬가공에서 공구의 변형을 고려한 가공계획을 분석하였는데, 공구에 직접 부착한 와전류센서로부터 얻은 데이터로 공구변형 상태를 파악할 수 있었고, 펜슬가공에서 코너부의 곡률에 따른 분석으로 이를 나타내었다. 펜슬가공시 코너부에서 공구의 변형은 상향가공에서 절삭력에 의한 과절삭으로 측벽을 파고드는 형태를 보였고 하향절삭일 때는 미절삭형태로 나타났지만, 하향절삭이 가장 양호한 가공형태를 나타내었고, 일정한 이송속도에서 코너가공시 이송속도를 줄임으로써 가공에러를 줄일 수 있음을 보였다. 실험과 같은 조건의 코너를 가공할 때는 하향절삭으로 상방향 경사면가공에서 측면윤곽가공으로 진입하는 것이 가공의 안정성이 양호하고, 공구변형에 의한 가공오차가 적은 것으로 나

타났다.

### 참고문헌

1. 김찬봉, 양민양, “볼엔드 밀링의 절삭조건 검증시스템”, 한국정밀공학회지, 제12권, 제2호, pp.123~134, 1995.
2. H. Y. Feng, C. H. Menq, “A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction”, Trans ASME J. Manufact. Science and Engineering, Vol.118, pp.461~469, 1996
3. 양민양, 심충건, “볼 엔드밀에 의한 정밀가공에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제11권 제2호, pp. 50~64, 1994.
4. 이희관, 김준형, 조시완, 양균의, “자유곡면으로 이루어진 3차원 곡면의 고속 가공 시스템 개발”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 782~787, 1997.
5. G. Boothroyd, “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”, McGraw-Hill, pp. 65~70, 1981.