

코너부의 펜슬가공시 볼엔드밀의 공구변형 특성

왕덕현*, 윤경석**

Characteristics of Tool Deflection of Ball-end Mill Cutter in Pencil Cutting of the Corner

Duck-Hyun Wang* and Kyung-Suk Yun**

ABSTRACT

Ball-end milling process is widely used in the die and mold manufacturing because of suitable one for the machining of free-form surface. During the process, the pencil cutting operation can be adopted before finish cut to eliminate overload in uncut area caused by large diameter of ball-end mill. The ball-end mill cutter for the pencil cutting is easily deflected by cutting force due to the long and thin shape, and the tool deflection in pencil cutting is one of the main reason of the machining errors on a free-form surface. The purpose of this study is to find the characteristics of deflected cutter trajectory by constructing measurement system with eddy-current sensor. It was found that the severe reduction of corner radius produced the overcut during the plane cutting. Up cutting method induced the overcut both plane and slope cutting, but down cutting one induced the undercut. From the experiments, down cutting with upward cutting path can generate the small undercut surface.

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

1. 서론

금형제작에서 3차원 자유곡면을 만들기 위하여 볼엔드밀 공구에 의한 가공이 널리 사용되고 있다. 볼엔드밀 작업은 공구의 끝단이 원형이라는 특이한 형상으로 인해서 절삭기구해석이 복잡하고 따라서 절삭력해석이 어렵기 때문에 절삭조건이 경험적으로 부여되는 것이 대부분이며 적절한 가공이 이루어지지 않고 있다.^[1] 또한 볼 형상의 특성상 공구

의 중심날에서의 절삭성은 거의 없고, 최외각날에서 큰 절삭력을 발휘하게 되는데, 이런 절삭력의 불규칙한 형태는 공구의 변형을 일으키고 공구수명을 단축시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 볼엔드밀링의 절삭력 예측에 관한 연구^[2~5]와 적절한 절삭조건을 찾기 위한 연구^[6]가 진행되었다. 또한 공구 변형을 고려한 절삭력 모델을 바탕으로 가공 오차를 줄이기 위한 이송속도 결정에 관한 연구도 진행되었다.^[7]

* 경남대학교 기계공학부

** 경남대학교 대학원 기계공학과

금형제작에서 높은 생산성으로 저가격화와 고효율화를 이루기 위해서는 가공시간의 단축이나 고정밀 가공을 실현하는 것이 중요한 과제로 부각된다. 일반적으로 황삭에서 사용하는 직경이 큰 볼엔드밀은 공작물체거량은 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. 최근에는 정삭에서도 가공속도를 증가시키기 위해 큰 직경의 공구를 사용하는 경향에 있으므로, 이때 남게 되는 미가공 부위는 다시 잔삭가공이나 펜슬가공으로 제거해주는 후가공 과정을 거치게 된다.

펜슬가공(Pencil cutting)은 최근에 CAM프로그램에 의해 NC코드 생성이 자동화되고 간편화되면서 사용되기 시작한 가공과정으로, 미가공 부분만을 정삭가공 이전에 먼저 윤곽가공 하여 인접면의 진입과 빠짐 영역을 제거함으로써 정삭에서 절삭조건인 까다로운 설정 없이 절삭부하를 줄이면서 정확하게 가공할 수 있도록 해주는 역할을 한다.^[8] 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 볼엔드밀의 펜슬가공중에 발생하는 공구변형을 관찰하기 위해 실험적인 방법으로 실제 가공 중에 비접촉식으로 고정도의 측정이 가능한 와전류센서(Eddy-current sensor)를 공구에 부착, 온라인으로 변형량을 측정하는 방법을 사용하여 가공조건에 따른 공구의 변형을 측정하고 측정된 데이터에서 가공래직의 분석으로 공구변형 특성을 파악하였다.

2. 공구변형모델에 대한 적용

볼엔드밀의 공구변형 모델을 정의할 때 공구는

절삭날에 존재하는 flute에 의해 매우 복잡한 형상을 띄게 되므로 변형모델을 단순한 봉의 형태로 근사하여 나타낼 수 있다. 공구홀더는 강체로서 변형이 일어나지 않는다고 가정하고 커터를 공구홀더에 고정된 외팔보(Cantilever beam)로 간주하여 모델을 정의할 수 있다.

Kline^[9]은 공구변형모델로 공구의 끝단에서 z만큼 떨어진 점에 작용하는 수평방향 변형량을 다음과 같이 근사하여 나타내었다.

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

여기서 z_f 는 절삭력의 중심위치이고, R은 공구반경, E는 공구의 탄성계수, L은 유효공구길이, F_y 는 공구의 변형을 일으키는 절삭력의 수평성분으로 공구축과 수직한 방향의 절삭력이다. 유효공구길이 L은 spindle과 공작기계에서 발생하는 변형량을 고려하기 위하여 도입되었는데 정삭의 경우나 공구의 직경이 상대적으로 작을 경우에는 절삭력에 의한 spindle과 공작기계의 변형이 비교적 크지 않아 spindle에서 발생하는 변형의 영향을 무시할 수 있으므로^[10] 본 실험에서는 공구의 유효한 길이를 공구홀더로 고정된 실제 공구 길이로 적용하여 공구자체의 변형량만으로 실험값을 고려하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험은 머시닝센터에서 펜슬가공시 절삭력에 의한 공구변형을 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 것처럼 고속도강(M42종)으로 만들어진 직경 6mm의 볼엔드밀의 생크(Shank)에 와전류센서를 1mm의 간격으로 설치하여 진행하였다. 공구변형에 따른 와전류센서에서 취득된 변형량 신호는 NI-DAQ board(National Instruments사, U.S.A.)로 A/D 변환하여 계측프로그램인 LabVIEW (National Instruments사, U.S.A.)로 PC에 저장한 후 데이터 분석을 용이하게 하기 위해 저장된 신호를 최빈도필터(Median filter)로 변환 후 처리하였다.

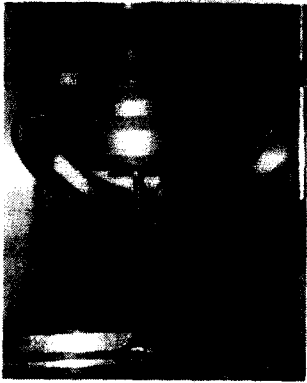


Fig. 1 Experimental setup with eddy current sensor

공구홀더로부터 볼랜드밀의 설치거리인 유효공구길이는 펜슬가공시 깊은 곳을 가공하기 위해 50mm로 길게 설치하여 실험하였는데, 이로 인하여 강성이 부족하여 변형되기 쉬워진다. 와전류센서는 공구날부 바로 위 생크에 공구홀더로부터 30mm 떨어진 곳에 X와 Y방향으로 설치하여 각각의 방향에서 변형량 데이터를 취득하였다. 이는 최대절삭력을 받는 절삭날부에 가장 근접한 데이터를 얻기 위한 것으로 실제 가공이 일어나는 절삭날부의 변형상태는 외팔보 식을 이용하여 변형량을 얻을 수 있다. 볼랜드밀의 강성(Stiffness)은 굽힘시험에서 269.167 kg/mm를 나타내었으며, 와전류센서는 전압을 변형량으로 환산하기 위하여 볼랜드밀의 생크부에서 보정(Calibration)한 결과 선형적인 값으로 2.4V/mm를 나타내었다.

3.2 실험방법 및 조건

본 실험에 사용한 피삭재는 냉간금형용 합금강(STD-11, H_{Rc}15)으로 크롬(Cr)성분이 많은 난삭재이다. 본 실험을 수행하기 위하여 피삭재 시편을 평면형태($\theta=0^\circ$)와 경사진 형태($\theta=15^\circ$)로 각각 바이스에 고정하였다. 실험방법으로는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 피삭재를 θ° 경사진 상태로 하고 가공경로를 측면윤곽가공에서 코너부를 지나 하방향(Downward)경사면으로 A가공경로와 상방향(Upward)경사면에서 코너부를 지나 측면윤곽가공으로 진입하는 B가공경로로 진행하였으며, 각각의 가공코드를 CAM프로그램으로 생성하였다. 경사면 가공에서는 절삭조건과 가공경로를 변화시키면서

실험을 진행하였다. 와전류센서의 설치위치는 측벽에서의 변형량 파악을 위해 X와 Y방향으로 설치하였다. Fig. 3은 Fig. 2에 나타낸 경로중 A가공경로를 따라 가공할 때 와전류센서로 X방향에서 측정된 결과로 측벽가공부와 코너가공부를 지나고 하방향 경사면가공을 포함하는 가공부의 공구변형상태를 나타낸 것이다.

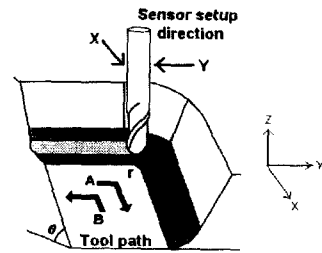


Fig. 2 Tool trajectory and sensor setup direction

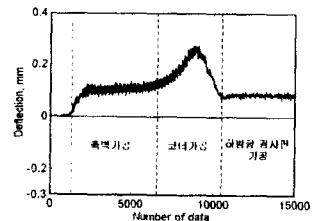


Fig. 3 Tool deflection measured by X direction according to path A

피삭재 시편이 평면형태($\theta=0^\circ$)인 경우 절삭방향을 하향절삭으로 하고 코너부반경(r)을 변화시키며 공구변형을 측정하였다. 실험은 먼저 시편을 직경 20mm 초경 볼랜드밀로 깊이 10mm로 황삭가공한 후, Fig. 4와 같이 곡면과 곡면이 만나는 각을 60° 로 하여 직경 6mm HSS 2날 볼랜드밀로 가공을 수행하였다. 펜슬가공시 평면과 경사면에서의 절삭깊이는 법선 방향으로 0.9mm를 유지할 수 있게 하였다. 실험에 사용된 절삭조건은 주축속도 700rpm, 이송속도 28mm/min로 정하고 실험을 진행하였다. 본 실험에 사용된 실험조건들은 다음의 Table 1에 나타내었다. 평면가공에서는 코너반경을 3mm, 5mm 및 10mm로 하고 경사면가공에서는 반경 5mm로 펜슬가공을 하였다.

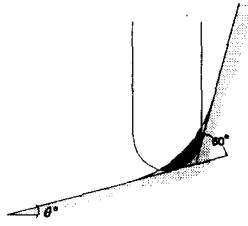


Fig. 4 Cross-section of pencil cutting

Table 1 Experimental conditions

θ	Cutting method	Rough cutter diameter	Pencil cutting corner radius	Spindle speed	Feed
0°	Down {Path A & B }	20 [mm]	3, 5, 10 [mm]	700 [rpm]	28 [mm/min]
15°	Up/Down (Path A & B)	20 [mm]	5 [mm]		

4. 실험결과 및 고찰

4.1 코너반경에 따른 공구변형 특성

Fig. 5는 평면가공($\theta=0^\circ$)에서 코너반경을 변화시키면서 가공중의 공구변형량을 X와 Y방향에서 측정된 것이다. 절삭력은 이송방향과 측벽에서 받게 되는데, 전체적으로 X, Y 각각의 방향에서 측정된 공구변형량은 이송방향에 대한 변형량은 미미하고 측벽으로부터의 변형이 크게 나타났다. 코너부는 황삭에서 반경 10mm 볼엔드밀로 가공된 상태이므로 펜슬가공에서 가공반경이 줄어들게 되면 절삭부하를 많이 받게 된다. Fig. 5(a)와 (b)에서는 코너반경을 10mm로 가공할 때를 나타낸 것으로 코너부에서 공구변형량은 큰 변화 없이 나타나고 있지만, Fig. 5(c)와 (d)에서 반경 5mm로 가공할 때는 절삭력에 의해 코너부에서 공구가 변형됨을 나타내었다. Fig. 5(e)와 (f)에서는 반경 3mm로 가공할 때 과도한 절삭력으로 변형이 심하게 일어남을 궤적으로 보여주고 있는데, Y방향에서 측정된 변형량은 측벽으로 파고드는 과절삭형태를 보여주고 있다. 이 현상은 절삭깊이의 증가에 의해 변형이 최대한 발

생된 상태에서 이송방향이 X에서 Y방향으로 급격히 바뀌에 따라 공구가 변형될 때 가지고 있던 반력에 의해 측벽을 파고들면서 과절삭 오차를 일으킨 것으로 생각된다.

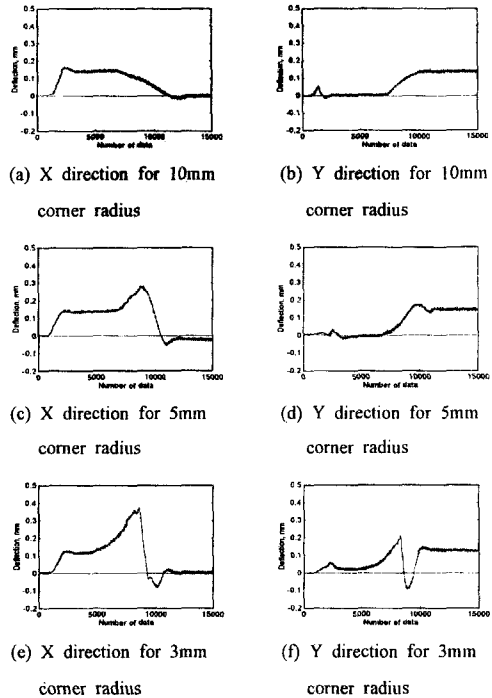


Fig. 5 Tool deflection for down cutting

4.2 상향절삭에서의 공구변형

피삭재가 경사면($\theta=15^\circ$)을 이루고 있고 공구가 피삭재에 상향절삭으로 실험한 결과는 다음과 같다. 상향절삭은 공구의 절입량이 초기에 미소한 상태에서 깊이가 점점 커짐에 따라 절삭력은 끝부분에서 가장 크게 된다. 이에 따라 공구의 변형은 절입되는 방향으로 발생하게 된다. Fig. 6은 측면윤곽가공에서 코너를 돌아 하방향 경사면으로, 이송방향이 Y축에서 X축으로 진입하는 A가공경로를 따라 X방향과 Y방향에서 측정된 공구변형 상태를 나타내고 있다. 코너부를 코너반경 5mm로 가공하는 상태인데, 황삭에서 반경 10mm로 가공된 상태이므로 코너부에서 공구는 절입량의 증가에 의해 많은 절삭력을 받게 된다. 먼저 측면윤곽가공에서 X방향에서 측정된 값을 보면, 측면방향으로의 변형은 거의 나타나지 않았지만 Y방향에서 측정된

이송방향에 대해서는 이송방향의 절삭력에 의해 반대로 변형된 상태를 나타내고 있다. X방향에서 측정된 결과는 코너부에서 공구가 이상적인 가공경로를 벗어나 측벽으로 절입하는 과절삭(Overcut)오차를 보여주고 있다. 이것은 코너를 가공하면서 이송방향이 하방향으로 바뀔 때 코너에서의 절입량 증가에 의해 이송방향과 반대로 공구가 심하게 변형되어 주축에 설치된 센서와의 간격이 순간적으로 좁혀져 이러한 상태를 보인 것으로 여겨진다. Y방향에서도 절입량의 증가에 따라 공구는 이상적인 경로에 완전히 진입하지 못하고 미절삭 형태의 오차를 보여주고 있다. 하방향 경사면 가공에서는 측면과의 변형은 보이지 않지만 이송방향에 대한 변형이 발생하여 결과적으로 표면법선 방향으로의 과절삭 상태를 나타내는 것으로 생각된다.

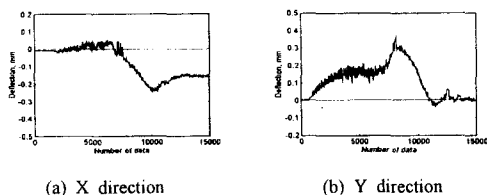


Fig. 6 Tool deflection for up-cutting according to downward path A

Fig. 7은 경사면($\theta=15^\circ$)가공시 상방향 경사면에서 평면으로 연결되는 B가공경로를 지날 때 X방향과 Y방향에서 측정된 공구변형 상태이다. 이송방향은 X축으로 진행되다가 코너를 돌아 Y축으로 이송방향이 변경되는 경우이다. 상방향 경사면 가공에서 공구의 변형 상태는 X방향에서 보면 변형값은 (+)값인데, 이는 이송방향과 반대로 변형되고 있는 상태이다. Y방향에서 측정된 상태를 보면 변형값은 (-)값으로 측면을 파고드는 과절삭 형태의 변형 상태를 보여주고 있다. 코너에서는 절입량의 증가에 따라 변형이 크게 나타나고 있다. Y방향에서는 (-)값이 크게 나타나는데, 이는 이송방향이 바뀔 때 측벽에 의해 측면윤곽가공으로 진입할 때, 이송에 의해 축은 가공경로를 따라가지만 공구는 절입량이 많은 상태이므로 절삭력에 의해 정해진 가공경로에 완전히 진입하지 못한 상태로 변형이 크게 발생하였고, 축을 따라 이송되는 주축에 고정된 센서와의 간격이 순간적으로 좁혀져 이러한 값을 보인 것이

라 생각된다. 측면윤곽가공에서는 X방향에서 측정된 코너의 변형은 거의 보이지 않지만, Y방향에서는 이송방향과 반대로 변형된 상태로 가공이 진행되는 것을 나타내고 있다. X방향에서 측정된 미절삭은 상방향 가공일 때 코너부에서 이송방향에 대한 절삭영역의 증가에 의해 공구가 이송방향과 반대로 과도한 절삭력으로 변형되어 미절삭 상태로 진행된 것이고, Y방향의 과절삭은 상향절삭일 때 안으로 파고드는 작용에 의한 것으로 생각된다.

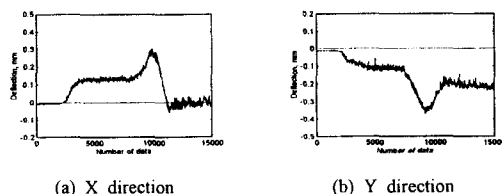


Fig. 7 Tool deflection for up-cutting according to upward path B

Fig. 8은 상향절삭으로 가공경로 A와 B를 따라 각각 하방향 경사면과 상방향 경사면을 가공할 때의 공구변형상태를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 하방향 경사면 가공에서는 과절삭 상태를 보이고 상방향 경사면 가공에서는 미절삭 상태를 보인다. 하방향 경사면 절삭에서의 과절삭은 불엔드밀이 이송방향의 절삭력에 의하여 공구가 이송방향과 반대로 변형되어 이러한 현상을 발생한 것으로 생각된다.

상방향 경사면 가공에서 가공오차가 미절삭 형태로 나타난 것은 절삭력 작용점이 공구 외각날로 옮겨지면서 이송방향의 절삭력에 의해 공구가 이송방향과 반대로 변형되어 이러한 오차를 일으킨 것으로 여겨진다. 불엔드밀 밀날의 정점부에서의 절삭성이 나쁜 것을 고려할 때 상방향 절삭이 보다 바람직한 것으로 나타내어지는데,^[11] 절삭성뿐만 아니라 가공오차를 고려할 때도 과절삭을 일으키는 하방향 경로보다는 미절삭형태인 상방향 절삭형태가 바람직하게 보인다.

4.3 하향절삭에서의 공구변형

공구변형량을 비교하기 위해 경사면($\theta=15^\circ$)가공시 상향절삭과 같은 조건과 가공경로에서 절삭형태만 하향 절삭으로 변경하여 실험하였다. 하향절삭

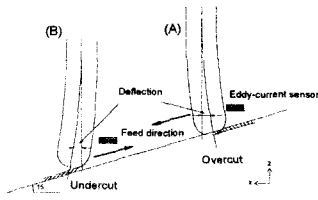


Fig. 8 Tool deflection for up-cutting according to upward/downward cutting path

에서는 초기절삭량이 과다하기 때문에 공구의 변형 형태는 공구가 밀어 올려지는 방향으로 변형이 발생하게 되고 이에 따라 공구변형 형태는 미절삭 형태를 나타내게 된다. Fig. 9는 측면윤곽가공에서 하방향가공으로 가공경로가 연결되는 A가공경로를 하향절삭으로 가공시 X와 Y방향에서 측정된 공구 변형값을 나타낸 것이다. 코너 가공 전후의 변형 상태를 보면 측벽 윤곽 가공일 때, X방향의 측정값은 볼엔드밀은 측벽과 반대로 미소 변형된 미절삭 형태로 가공되고 있는 것을 보이며, Y방향인 이송방향은 공구가 이송되는 방향으로 변형된 것을 나타내고 있다. 이는 상향절삭에서 나타난 이송방향의 반대방향으로 발생한 공구변형과 다르게 이송 방향쪽으로 변형이 발생한 것인데, 이러한 현상은 볼엔드밀이 일반 펜드밀과는 달리 공구밀날이 볼형상으로 밀날에서도 절삭이 이루어지고 있기 때문이며 공구 밀날이 공작물에 절입될 때 하향절삭의 특징인 밀어 올려지는 방향으로 변형이 발생하여 공구는 이송방향쪽으로 밀어 올려진 변형형태로 가공이 진행되는 것으로 여겨진다. 코너 가공에서는 미절삭형태의 공구변형 상태를 보이고 있다. 이송 방향이 하방향 경로로 바뀌어 가공될 때도 공구변형은 상향절삭과는 반대로 이송방향에 대해 변형된 상태로 가공이 진행되고 있다.

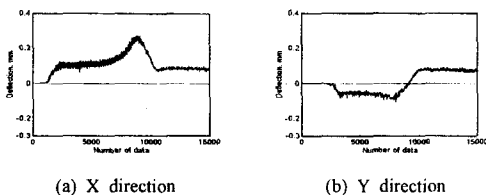


Fig. 9 Tool deflection for down-cutting according to downward path A

Fig. 10은 상방향 경사면 가공에서 측면윤곽가공으로 이송이 연결되는 가공경로 B에서 하향절삭일 때 X방향과 Y방향에서 측정된 공구변형상태를 나타낸 것이다. 상방향 경사면 가공에서는 X방향에서 측정된 값을 보면 이송방향의 공구변형은 거의 일어나지 않았지만, 측면에서는 미절삭형태를 나타내었다. 코너부분도 변형이 거의 나타나지 않았지만, 측면윤곽가공으로 진입하면서 공구는 A가공경로와 마찬가지로 이송되는 방향으로 변형이 발생하였고, 측면 반대로 변형되어 미절삭형태를 나타내었다. B가공경로 가공에서는 Fig. 9의 A가공경로와 비교했을 때 공구변형량이나 진동에 의한 영향이 작게 나타났다. 상방향 경사면으로 가공할 때 공구변형은 거의 일어나지 않았고 코너에서도 변형이 심하지 않는 안정적인 절삭형태를 나타냈다.

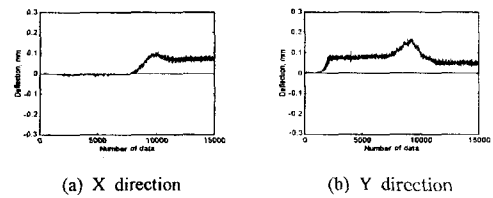


Fig. 10 Tool deflection for down-cutting according to upward path B

Fig. 11은 하향절삭에서 각 가공경로의 경우 상방향과 하방향 경사면에서의 공구변형상태를 나타내었다. 하향가공일 때는 전체적으로 진동의 영향이 작고, 공구의 변형량도 적었으며 이송속도에 의한 변형량의 차이도 크지 않았다. 공구의 변형 방향도 측벽의 바깥쪽으로 진행되어 미절삭형태를 나타냈다. 최병규^[11] 등은 볼엔드밀에 작용하는 절삭력은 상향절삭에서 훨씬 크게 나타나고 있고, 이에 따라 절삭력에 의한 공구의 변형을 예상하여 가공경로 선정 시에 하향절삭을 추천하고 있는데, 펜슬가공후 정삭과정에 들어가기 때문에 과절삭을 일으키는 상향절삭보다는 오차를 보정할 수 있는 미절삭형태의 가공이 안전할 것이고, 이러한 점들에 하향가공이 훨씬 유리할 것으로 생각된다.

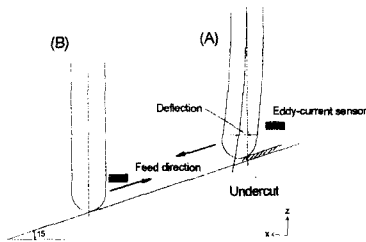


Fig. 11 Tool deflection for down-cutting according to upward/downward cutting path

5. 결론

본 연구에서는 볼엔드밀 가공중 펜슬가공시 발생하는 공구변형 특성을 관찰하기 위하여 와전류센서를 주축에 부착하여 센서 입력부가 회전공구에서 1mm 떨어진 위치에서 변형을 실시간 측정하여, 가공제적을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

펜슬가공시 코너반경을 변화시키는 경우, 급속한 코너반경의 변화는 코너부에서 과절삭현상을 초래한다. 공구변형은 평면가공과 동일하게 경사면 가공에서도 상향절삭에서는 절삭력에 의한 과절삭으로 측벽을 파고드는 형태를 보였고 하향절삭에서는 미절삭 형태를 나타내었다. 이와 같은 현상은 볼엔드밀은 평엔드밀과는 다르게 볼형상의 밀날에 의해 측면날과 동일하게 밀날에서도 절삭작용이 발생하여 하향과 상향절삭의 특징인 공구변형 상태를 나타낸 것으로 보인다. 경사면 가공에서는 상방향으로 가공할 때 공구변형이 가장 작았으며, 하향절삭일 때 가공의 안정성이나 공구변형에 의한 가공오차가 적은 것으로 나타났다. 본 실험과 같은 조건의 가공에서는 하향절삭으로 상방향 가공경로를 설정하는 것이 가공의 안정성이 양호하고, 공구변형에 의한 가공오차를 작게할 수 있었다.

참고문헌

1. 김찬봉, 양민양, "볼엔드 밀링의 절삭조건 검증시스템," 한국정밀공학회지, 제12권, 제2호, pp. 123~134, 1995.
2. H. Y. Feng and C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting

- Force and Machining Error Prediction," Trans. of ASME, J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, No. 4, pp. 461~469, 1996.
3. M. Y. Yang and H. D. Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tools & Manufact., Vol. 31, No. 1, pp. 45~54, 1991.
4. C. G. Sim and M. Y. Yang, "The Prediction of the Cutting Force in Ball-End Milling with a Flexible Cutter," Int. J. Mach. Tools & Manufact., Vol. 33, No. 2, pp. 267~284, 1993.
5. G. Yucesan and Y. Altintas, "Prediction of Ball End Milling Forces," Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 118, No. 1, pp. 95~103, 1996.
6. S. H. Park, Y. T. Jun, C. W. Lee and M. Y. Yang, "Determining the Cutting Conditions for Sculptured Surface Machining," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 61, pp. 61~70, 1993.
7. 양민양, 심충건, "볼 엔드밀에 의한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제11권 제2호, pp. 50~64, 1994.
8. 이희관, 김준형, 조시완, 양균의, "자유곡면으로 이루어진 3차원 곡면의 고속 가공 시스템 개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 782~787, 1997.
9. W. A. Kline and R. E. DeVor, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22, 1982.
10. 이상규, 고성립, "엔드밀 가공시 공구변형을 고려한 표면형성 해석," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 119~124, 1996.
11. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 회중당, pp. 355~358, 1996.