

## 볼엔드밀 가공시 공구경로가 Cusp 의 크기에 미치는 영향

윤희중\*, 박상량, 박경호 (인천대학교 대학원 기계공학과),  
박동삼(인천대학교 기계공학과)

### The Effect of Tool Path on the Cusp Height in Ball End Milling of Cylindrical Surface

H. J. Yoon\*, S. L. Park, K. H. Park (Dept. of Mech. Eng., Univ. of Incheon)  
D. S. Park(Dept. of Mech. Eng., Univ. of Incheon)

#### ABSTRACT

Sculptured surface machining plays a vital role in the process of bring new products to the market place. A great variety of products rely on this technology for the production of the dies and moulds used in manufacturing. And, the use of CNC machines and CAD/CAM system has become a vital parts of product development process. The propose of this study is to investigate the effect of cutting parameters on the machinability such as surface roughness and cusp generated in the machining of sculptured surface on a three-axis CNC machining center using the CAD/CAM system. Experimental result showed that: In step down cutting, as the inclined angle of surface became smaller, the cusp height appeared higher. On the other hand, in step over cutting, as the inclined angle of surface became larger, the cusp height appeared higher. In the point of precision machining, step over cutting was more effective. For the minimization of cusp height, step down cutting was effective in larger inclined surface, but step over cutting in smaller inclined surface.

**Key Words** : Ball end mill (볼엔드밀), Cusp height(커슌 크기), Tool path (가공경로), CAD/CAM

#### 1. 서론

최근 제품의 심미적 특성이 수요자의 구매여부를 결정하는 주요한 변수로 대두됨에 따라 이와 같은 제품생산을 위한 CAD/CAM의 도입 및 활용이 금형업체를 중심으로 크게 확대 되고 있다.

CAD/CAM을 이용한 자유곡면 가공은 가공 특성상 형상정밀도에 많은 악영향을 미치는데 대표적인 요인으로는 공구의 변형, 콜렛척의 파악력 부족, Ch 채터의 발생, 가공방향에 따른 절삭력의 변화 등이 있다.

특히, 3 축 머시닝센터에서는 공구간의 경로간격과 공구의 크기 및 공작물의 곡률반경에 따라 가공시 Cusp이 필연적으로 발생하여 미절삭 부분이 존재하게 된다. 곡면 가공시 공구간의 경로간격이 좁아지면 형상정밀도는 높아지는 반면에 좁은 공구경

로 간격으로 인하여 가공시간은 증가한다. 또한, 공구간의 경로간격이 넓어지면 Cusp의 높이도 증가하여 형상정밀도가 악화되는 경향이 있다. 이는 곧 후가공 공정이 증가한다는 것을 의미하며 결국 총비용은 감소하지 않는다.

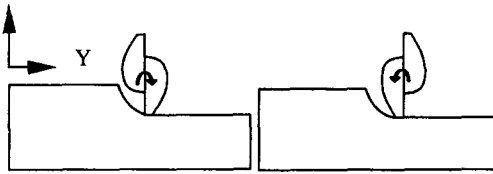
따라서, 본 연구에서는 실린더 형상의 곡면가공을 통하여 칠판, 공구의 진행방향 및 절삭방향에 따른 절삭특성에 의한 가공물의 형상정밀도를 규명하고자 하였으며 둘째, Constant step down, Constant step over 및 Constant cusp 가공을 통하여 경사각의 증감에 따른 Cusp 크기의 변화에 대하여 고찰하고자 하였다.

공작물의 형상 모델링은 상용 CAD/CAM 시스템인 DelCAM사의 DUCT5 를 이용하였으며 볼엔드밀의 가공경로 NC code는 동 회사의 PowerMILL을 이용하여 구하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 절삭방향

밀링가공시 절삭방향은 Fig. 1과 같이 상향절삭(Up cutting)과 하향절삭(Down cutting)으로 분류된다. 상향절삭은 공구의 회전방향과 진행방향이 반대인 경우로 절삭력의 방향이 공작물방향과 공구진행방향의 벡터합으로 표현된다. 즉 공구가 시계방향으로 회전할 때 공구의 진행방향의 좌측에 공작물이 위치하며 공구가 받는 절삭력은 X축 방향의 힘과 -Y 방향 힘의 벡터 합으로 표현된다.



(a) Up cutting (b) Down cutting  
Fig. 1 Up cutting and down cutting

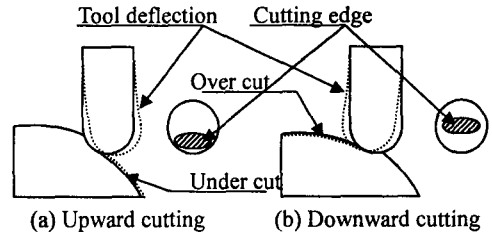
하향절삭(down cutting)은 상향절삭과 반대의 경우로 공구의 날이 공작물의 상단에서 공작물에 수직인 방향으로 접근하여 평행한 방향으로 나간다.

밀링가공시 나타날 수 있는 양방향 절삭은 상향절삭과 하향절삭의 특성이 번갈아 나타나며 절삭력의 방향이 공구에 교번하중으로 작용하여 공구의 변형방향이 달라져 공작물의 표면 형상정밀도에 악영향을 끼친다. 반면에 급속이송길이가 짧아져 가공시간을 단축시키는 장점이 있다. 즉 공구의 강성이 아주 강한 경우나 황삭가공 시와 같이 정밀도나 사상여유가 충분할 때 가공한다.

### 2.2 공구경로 방향

볼엔드밀을 이용한 경사면 가공시 가공방향은 상방향 절삭(Upward cutting)과 하방향 절삭(Downward cutting)으로 분류된다. 상방향 절삭은 볼엔드밀로 곡면 가공시 곡면의 아래부분에서 위 방향으로 이동하면서 가공하는 것으로 실제 절삭이 일어나는 부분은 볼 엔드밀의 중심에서 벗어난 공구의 가장자리 부분에서 절삭이 일어난다. 반면에 하방향 절삭일 경우 공구의 중심부에서 절삭이 이루어지게 되어 실제 절삭이 일어나는 것이 아니라 문드러짐 현상이 뚜렷하여 공구의 마모가 과도하게 된다.

또한, 공구의 변형으로 인하여 상방향 절삭에서는 미절삭으로 남지만 하방향 절삭에서는 과절삭이 일어난다. 이러한 현상은 Fig. 2로부터 설명될 수 있다.



(a) Upward cutting (b) Downward cutting  
Fig. 2 Upward cutting and downward cutting

### 2.3 Cusp

볼엔드밀을 이용한 가공 시 공구경로간의 거리에 따라 Fig. 3과 같이 미절삭 부분이 남는데 이를 Cusp 이라 하며 일반적으로 곡면가공시 가장 문제시 되고 있다. 이를 자동적으로 제거하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있지만 아직 수작업에 의존하고 있다.

또한, Fig. 3에서 곡면 가공시 X축 방향 혹은 Y축 방향으로 공구경로 사이의 거리를 Step over 라 하며 Z축 방향으로 증감하는 것을 Step down이라 정의한다. 일반적으로 임의의 곡면가공시 Step over와 Step down은 동시에 존재하며 곡면의 형상, 공구의 종류에 따라 일정한 상관관계를 가진다.

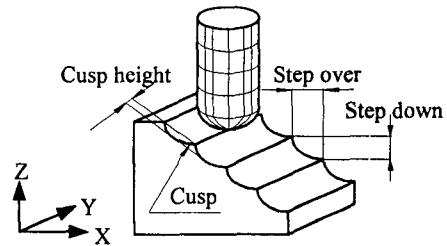


Fig. 3 Cusp height in ball end mill cutting

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치의 구성

공작기계는 ㈜화천에서 제작한 Series-2 모델의 3축 CNC 머시닝센터를 사용하였다. 가공시편의 형상모델링은 DelCAM사의 상용 CAD/CAM 시스템인 DUCT5를 이용하였으며 PowerMILL을 이용하여 공구경로 NC Data를 생성시켰다. 실험장치의 모습과 시편의 형상은 Fig. 4, Fig. 5와 같다.



Fig. 4 Experimental set-up

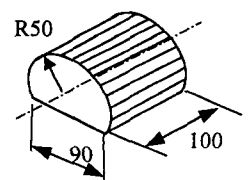


Fig. 5 Workpiece shape

실린더 형상의 가공시 Cusp 및 형상정밀도를 측정하기 위하여 KL133A 레이저 센서를 CNC 선반의 터렛(turret)에 장착하고 시편은 척에 고정된 후 주축을 일정속도로 회전시키면서 센서와 시편 사이의 변위를 측정 하였으며, 편심에 대한 영향을 최소화 하기 위하여 센터작업을 수행하였다. 이때 센서에서 발생한 신호는 A/D 변환기를 사용하여 컴퓨터에 저장하였으며 측정 장치의 구성은 Fig. 6 과 같다

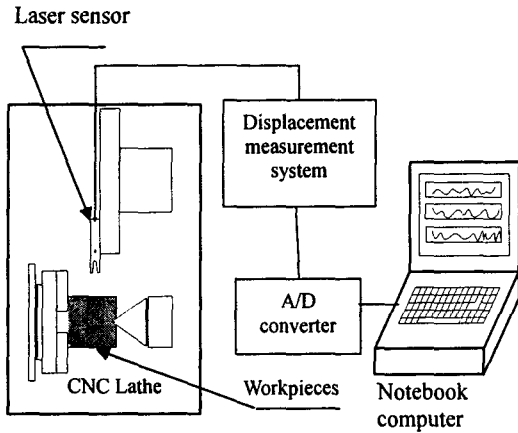


Fig. 6 Accuracy measurement system set-up

### 3.2 실험방법

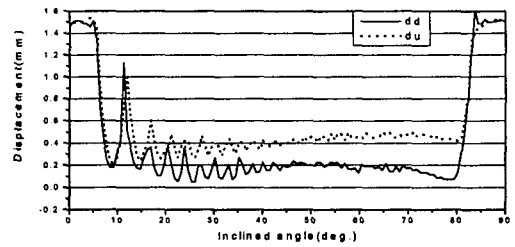
실린더 형상에 대한 가공 실험조건은 Table 1 에 나타내었으며 경사면 가공에 비하여 다양한 각도의 절삭 특성을 비교 할 수 있도록 선반을 통하여 기본형상을 가공하였으며, 선반 절삭면을 기준으로 형상의 정밀도를 측정하였다. 사용된 공구는  $\phi 10$  볼 엔드밀을 사용하였으며 크게 Constant step over, Constant step down, Constant cusp 에 대하여 상방향 절삭과 하방향 절삭, 상향 절삭과 하향 절삭을 각각 수행하였다. Cusp 의 높이는 Step over 와 Step down 은 평균 0.23mm 로 하여 공구경로를 생성하였다.

Table 1 Experimental conditions for cylinder cutting

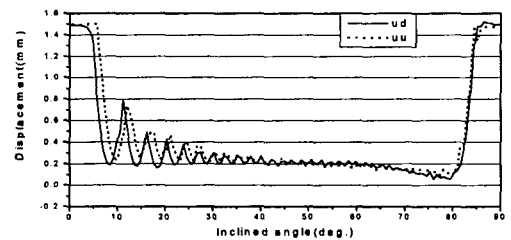
Constant step over		Constant step down		Constant cusp	
Up cutting	Down cutting	Up cutting	Down cutting	Up cutting	Down cutting
1.5mm	1.5mm	1.5mm	1.5mm	0.73mm	0.73mm
Tool diameter		Feed rate		Spindle speed	
$\phi 10$ mm		160 mm/min		1120rpm	

## 4. 실험결과 및 분석

Fig.7, Fig. 8 및 Fig. 9 에 가공형상의 정밀도 및 Cusp 의 크기를 나타내었다. 이들 그림에서 변위 센서로부터 변위가 0 을 기준으로 하여 멀어질 경우에는 그래프가 전체적으로 이동되는데 이는 형상 정밀도를 의미하며, 그래프의 인근 파고 높이 차가 Cusp 의 높이를 나타낸다.



(a) Downward cutting



(b) Upward cutting

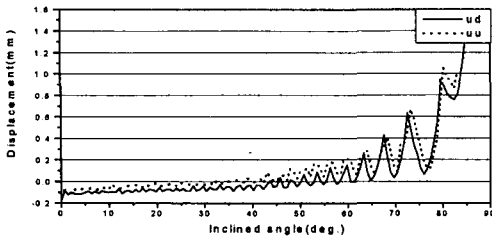
Fig. 7 Shape accuracy and cusp height in the constant step down cutting

Fig.7에서 전체적인 형상 정밀도는 Upward cutting 방식이 유리하며 특히, Downward up cutting 시 형상 정밀도가 약 0.4mm로서 가장 나쁘게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 Cusp 높이를 보면 경사각도가 증가할수록 인근 파고의 최저치와 최고치의 차이가 감소하고 있으며 경사각이 커질수록 Cusp 높이가 크게 감소하고 있다.

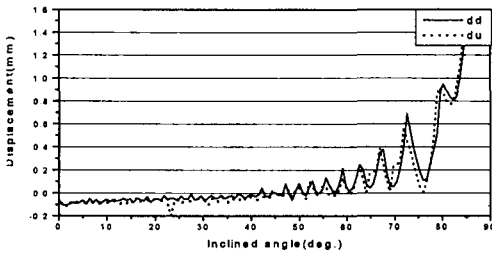
한편, Fig. 7 (a)를 보면 50°와 70° 부근에서 불룩한 형상이, 20°와 30° 부근에서는 오목한 형상이 관찰되는데 이는 Downward 절삭시 공구의 변형방향에 변화가 있는 것으로 판단된다. 즉, 20°와 30° 부근에서는 공구의 변형방향이 공작물 쪽을 향하게 되고 50°와 70° 부근에서는 공구의 슬립에 의한 영향으로 공작물의 반대방향으로 변형이 이루어진 것으로 판단된다.

Fig. 8은 Constant step over 방식으로 가공한 실험 결과로 경사각이 감소 함에 따라 Cusp의 크기가 감소한다. 또한 Cusp 높이와 형상 정밀도는 공구 경로의 방향과 큰 상관관계가 없는 것을 보여 주고 있다. 단, 하방향 절삭에서 상향절삭시 미세하나마

형상정밀도가 나빠진다는 것을 알 수 있다.

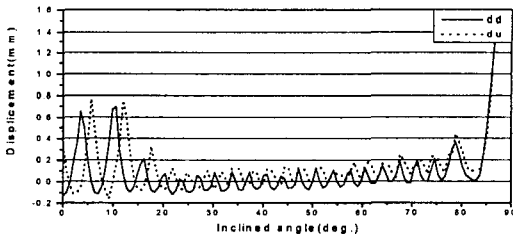


(a) Downward cutting

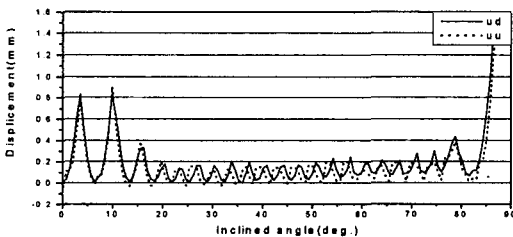


(b) Upward cutting

Fig. 8 Accuracy of shape and cusp height in the constant step over cutting



(a) Downward cutting



(b) Upward cutting

Fig. 9 Shape accuracy and cusp height in the constant cusp cutting

위의 두 실험결과로부터 Cusp 높이를 가능한 한 억제하기 위해서는 경사각이 작을 때에는 Step over 가공 방식을, 경사각이 커질 때는 Step down 방식이 유리하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Constant cusp 으로 가공한 것으로 Step down, Step over 의 평균 Cusp 높이를 계산하여 공구 경로를 생성 하였으며 Cusp 높이는 0.27mm 로 하였

다. 전반적으로 표면의 형태는 균일한 형상을 나타내고 있으나 절삭방향에 따른 표면 정밀도는 Constant step over 가공보다 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

볼랜드밀에 의한 실린더 형상의 가공시 공구 경로와 절삭방향 변화에 따른 Cusp의 크기 및 형상정밀도 측정결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Step down 방식의 가공시 경사각이 작을수록 Cusp 의 높이가 급격히 증가한다.
- (2) Step over 방식의 가공시 경사각이 커질수록 Cusp 의 높이가 급격히 증가한다.
- (3) 표면거칠기와 형상정밀도의 항상 측면에서는 Step over 방식이 유리하다.
- (4) Cusp 높이의 최소화와 균일화를 위해서는 경사각이 큰 부분의 가공은 Step down 가공방식이, 경사각이 작은 부분의 가공은 Step over 방식이 유리하다.

## 참고문헌

1. 성완, 최종호, 송오석, "자유곡면의 CNC 가공을 위한 가공경로의 생성," 한국정밀공학회지, 제 16 권 4 호, pp. 129-137, 1999.
2. 이상규, 고성립, "엔드밀 가공시 표면형상 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 16 권 4 호, pp. 229-236, 1999.
3. 김규만, 주종남, "볼랜드밀 경사면 가공에서 절삭력 맵을 이용한 평균절삭력 예측," 한국정밀공학회지, 제 15 권 12 호, pp. 212-219, 1998.
4. 이기용, 강명창, 김정석, "엔드밀 가공시 동적 절삭력 모델에 의한 절삭력 및 표면형상 예측," 한국정밀공학회지, 제 14 권 4 호, pp. 38-45, 1997.
5. Chung-Chen Tsao, Wen-Chou Chen, "Effect of cutting parameter on the scallop size during the milling process", J. of Materials Processing Tech. 72, pp. 208-213, 1997.
6. K. Suresh, D.C.H. Yang, "Constant scallop-height machining of free-form surface", Trans. ASME, J. Eng. Ind. Vol. 116, pp. 253-259, 1994.
7. Geoffrey Boothroyd Winston A. Knight, Fundamental of Machining and Machine Tools, Second Edition, pp. 90-94, 1989.
8. 金夏龍 譯, "엔드밀의 모든 것", 성안당, pp. 72-77, 1997.