

# 볼엔드밀을 이용한 원호곡면의 가공시 CUSP 의 크기

윤희중\* · 박상량\* · 최종순\* · 박동삼\*\*

## Cusp Height in Circular Surface Machining Using Ball End Mill

Hee Jung Yoon, Sang Lyang Park, Jong Soon Choi and Dong Sam Park

**Key Words :** Ball End mill (볼 엔드밀), Cusp (컹습), Step over (스텝오버), Step down (스텝다운)

### 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. But, cusp is inevitable by-product in sculptured surface machining, and it is very difficult to calculate the cusp height correctly. In this study, an analytical cusp height model is proposed considering the radius of the ball end mill, radius of machined workpiece and the inclined angle of convex or concave circular surface. Experiments were performed to check the validity of this proposed model and experimental results showed that the proposed cusp model were very effective.

### 1. 서론

최근 몇 년 동안 개인용컴퓨터의 급속한 발달로 기존의 CAD/CAM 운영체계가 Workstation 급에서 PC 급 컴퓨터로 하향 조정 됨에 따라 자유곡면의 형상 가공용 Software 의 보급이 크게 확대 되었다. 이와 더불어 기존의 Copy milling 방식에 의존하던 곡면가공의 형태가 CAD/CAM 을 이용한 NC 가공으로 변화되면서 그 활용분야가 급속히 증가하고 있다.

한편, CAD/CAM 을 이용한 자유곡면의 형상 가공은 가공 특성상 형상 정밀도에 많은 영향을 미치며 그 대표적인 요인으로는 공구의 변형, 콜렛의 파악력 부족, Chatter 의 발생, 가공방향에 따른 절삭력의 변화 등이 있다. 또한, 곡면가공시 공구간의 경로간격이 좁아지면 형상정밀도는 좋아지는 반면에 좁은 공구경로 간격으로 인하여

가공시간은 증가한다. 특히, 3 축 CNC 머시닝 센터에서는 공구간의 경로간격과 공구의 크기 및 공작물의 곡률 반경에 따라 생성되는 Cusp 이 필연적으로 발생하여 미절삭 부분이 나타나게 되는데, 공구간의 경로간격이 넓어지면 Cusp 의 높이도 증가하여 형상정밀도가 나빠진다. 이는 곧 후가공 공정이 증가한다는 것을 의미하며 Cusp 의 제거는 자동화를 위한 많은 연구와 노력에도 불구하고 거의 수작업에 의존하고 있어 생산성을 떨어뜨리는 큰 요인이 되고 있다. 이러한 Cusp 의 크기를 이론적으로 규명하고 최적의 가공경로를 얻기위한 연구들이 꾸준히 진행되어 왔는데[1-4], 최근 Tsao[5]는 Convex 와 Concave 구면가공시 Cusp 의 크기에 대한 모델과 최적의 절삭조건에 대하여 제안하였으나 공작물구면과 공구의 접촉각으로서 Cusp 의 크기를 계산하고자 하였기에 실용적인 면에서 부적절성을 보였으며, 계산과정 또한 측면 절삭날의 가공참여 여부는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 이러한 가공특성을 고려하여 볼 엔드밀을 사용한 원형곡면 가공시 Cusp 높이를 구하는 모델식을 제안하였으며 그 유효성을

\* 인천대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인천대학교 기계공학과

컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.  
 한편, 검증실험을 통한 공작물의 형상 모델링은 상용 CAD/CAM 시스템인 DeL CAM사의 DUCT5를 이용하였으며 볼엔드밀의 가공경로 NC code는 동회사의 PowerMILL을 이용하여 구하였다.

## 2. Cusp 높이 모델식

### 2.1 Cusp 과 공구경로

볼 엔드밀 가공 시 공구경로간의 거리에 따라 Fig. 1 과 같이 미절삭 부분이 남게 되는데 이를 Cusp 혹은 Scallop 이라고 하며 원하는 외형 치수로부터 Cusp 끝단까지의 거리를 Cusp 높이로 정의한다. Cusp를 제거하기 위해서는 많은 시간이 소요되므로 이를 최소화 하지 않으면 안된다.

또한, Fig. 1 에서 곡면 가공시 X 축 방향 혹은 Y 축 방향으로의 공구경로사이의 거리를 Step over, Z 축 방향으로 증감하는 것을 Step down 이라 정의하며 Cusp 의 크기에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 임의의 곡면가공시 Step over 와 Step down 은 동시에 존재하며 곡면의 형상, 공구의 종류에 따라 일정한 상관관계를 가진다.

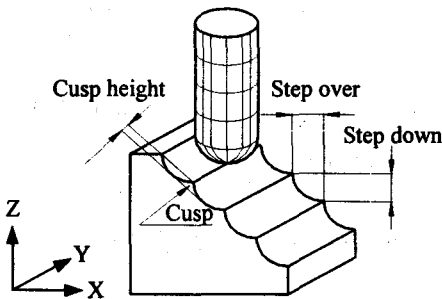
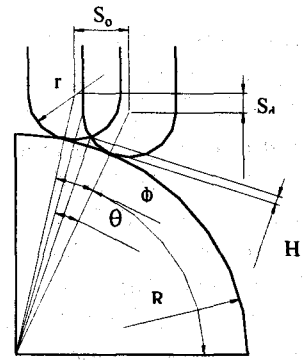


Fig. 1 Cusp height in ball end mill cutting

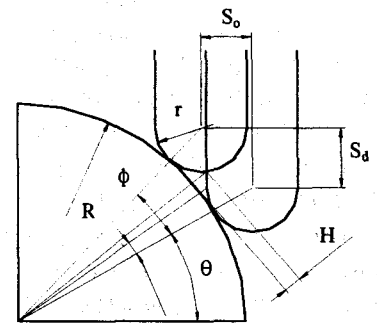
### 2.2 Cusp 높이에 관한 모델식 제안

곡면가공시 Cusp 의 높이는 Fig. 2, Fig. 3 과 같이 공작물과 공구형상의 기하학적 관계로부터 구할 수 있다. 기호의 정의는 다음과 같다.

- R : 공작물 반경
- r : 공구 반경
- $S_d$  : Step down
- $S_o$  : Step over
- H : Cusp height
- $\theta$  : XY 평면과 공구구면 중심이 이루는 각
- $\phi$  : 인접공구경로의 두 공구중심이 이루는 각
- $\alpha$  : 공구구면과 축면절삭날의 경계점이 공구의 구면중심과 이루는 각

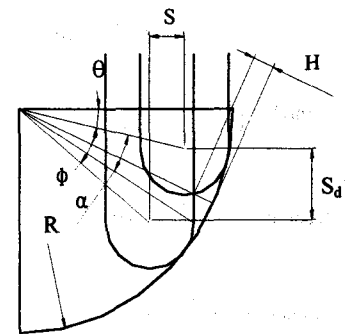


(a) Side cutting

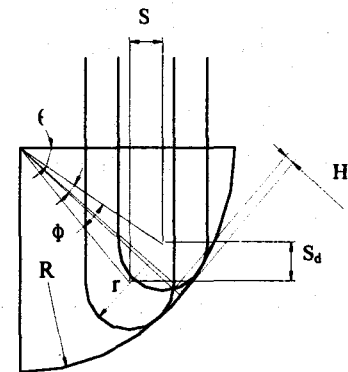


(b) End cutting

Fig. 2 Cusp height on convex surface



(a) Side cutting



(b) End cutting

Fig. 3 Cusp height on concave surface

그림에서 보듯이 곡면 가공시 곡면을 Fig. 2와 같은 Convex 영역과 Fig. 3과 같은 Concave 영역으로 나눌 수 있으며 각각 영역에 대하여 Constant step down 또는 Constant step over로 공구 경로를 생성할 때 XY 평면과 공구중심이 이루는 각  $\theta$ 의 크기에 따라 블랜드밀 절삭날의 절삭참여 형태가 달라진다. 즉, Fig. 2(a)와 Fig. 3(b)와 같이 각  $\theta$ 가 커질수록 Cusp는 오직 블랜드밀의 구면 절삭날에 의하여 형성되나 Fig. 2(b)와 Fig. 3(a)와 같이  $\theta$ 가 작을 때는 Cusp가 구면 절삭날뿐만 아니라 측면절삭날에 의해서도 형성된다.

지금까지 알려진 Cusp 높이에 대한 모델식은 측면날의 절삭참여 경우를 전혀 고려하지 않았는데  $\alpha$ 와  $\phi/2$ 의 상관관계에 따라 측면날이 절삭을 수행할 수 있으므로 모델식의 수정이 요구되고 있다. 본 연구에서는 이를 고려하여 새로운 모델식을 제안하고자 한다.

Convex 영역에서는  $\alpha$ 가  $\phi/2$ 보다 작을 경우, Concave 영역에서는  $\alpha$ 가  $\phi/2$ 보다 클 경우 공구 측면날이 절삭을 수행하므로 이를 고려하여 Cusp 높이에 관한 모델식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

### 2.2.1 Convex 영역에서의 Cusp 높이

$$\frac{S_o}{S_d} = \tan\left(\theta + \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

$$\phi = \arccos\left(\cos\theta - \frac{S_o}{R+r}\right) - \theta$$

$$\text{or } \arcsin\left(\sin\theta + \frac{S_d}{R+r}\right) - \theta \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan\left[\frac{(R+r)\sin\theta}{(R+r)\cos(\theta+\phi) + (S_o-r)}\right] - \theta \quad (3)$$

따라서, 블랜드밀의 구면 절삭날이 절삭에 참여하는  $\alpha \geq \frac{\phi}{2}$ 인 경우 Cusp 높이는 다음 식으로 표현된다.

$$H = -R + (R+r)\cos\frac{\phi}{2} - \sqrt{r^2 - ((R+r)\sin\frac{\phi}{2})^2} \quad (4)$$

또한, 측면절삭날에 의해서도 Cusp이 형성되는  $\alpha \leq \frac{\phi}{2}$ 인 경우 Cusp 높이는 다음과 같이 유도된다.

$$H = \sqrt{[(R+r)\cos(\theta+\phi) + (S_o-r)]^2 + [(R+r)\sin(\theta+\phi) - \sqrt{r^2 - (S_o-r)^2}]^2} - R \quad (5)$$

### 2.2.2 Concave 영역에서의 Cusp 높이

$$\frac{S_o}{S_d} = \tan\left(\theta + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6)$$

$$\phi = \arccos\left(\cos\theta - \frac{S_o}{R-r}\right) - \theta$$

$$\text{or } \arcsin\left(\sin\theta + \frac{S_d}{R-r}\right) - \theta \quad (7)$$

$$\alpha = \arctan\left[\frac{(R-r)\sin(\theta+\phi)}{(R-r)\cos(\theta+\phi) + r}\right] - \theta \quad (8)$$

따라서,  $\alpha \leq \frac{\phi}{2}$ 일 때 Cusp 높이는 다음과 같다.

$$H = R - (R-r)\cos\frac{\phi}{2} - \sqrt{r^2 - ((R-r)\sin\frac{\phi}{2})^2} \quad (9)$$

또한,  $\alpha \geq \frac{\phi}{2}$ 일 경우 Cusp 높이는 다음 식으로 유도된다.

$$H = -\sqrt{((R-r)\sin\theta + \sqrt{2rS_o - S_o^2} + ((R-r)\cos(\theta+\phi) + r))^2 + R} \quad (10)$$

### 2.3 제안된 Cusp 모델식의 적용범위

제안된 Cusp 식들의 적용범위는 Step down 혹은 Step over 량과  $\theta$  및  $\alpha$ 에 의하여 결정되는데 다음에서 한 예를 보이고자 한다. Fig. 4는 공작물의 Convex 영역에서 Step down 가공시 공구직경 10mm, 곡률 반경이 50mm일 때 새로운 이론식의 적용 범위를 나타내고 있다. A는  $\phi/2$ 가  $\alpha$ 보다 클 때, B는  $\alpha$ 가 작을 때이며 C는 step over 량이 공구직경보다 큰 경우로 이때는 공구의 직경이 더 큰 공구를 사용하여야 한다는 것을 의미한다. 여기서 기존의 방식으로 계산 하였을 때 Step down 량이 공구의 반경보다 큰 경우에 계산이 불가 하였음을 알 수 있다. 따라서, A 영역에서는 식 (4), B 영역에서는 식 (5)를 이용하여 계산하여야 한다.

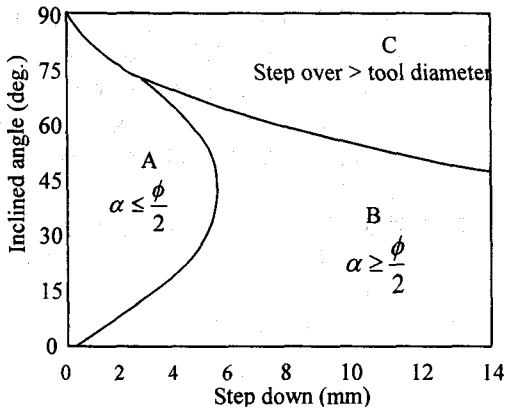


Fig. 4 Domain of application for proposed cusp height equation in step down cutting of convex surface (tool diameter  $d=10\text{mm}$ , Radius of curvature  $R=50\text{mm}$ )

Fig. 5 는 Step over 가공시 새로운 이론식의 적용 범위를 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 A 영역에서는 식 (4), B 영역에서는 식 (5) 를 이용하여 계산 하여야 한다.

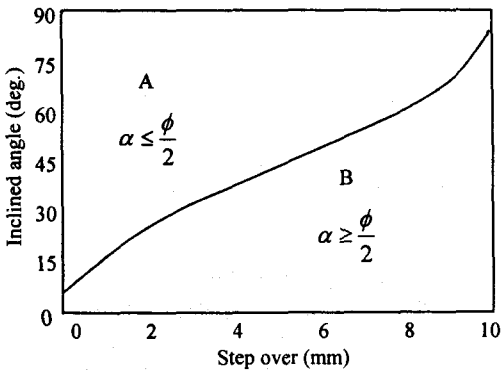


Fig. 5 Domain of application for proposed cusp height equation in step over cutting convex surface. (tool diameter  $d=10\text{mm}$ , Radius of curvature  $R=50\text{mm}$ )

한편, 제안된 모델식은  $\theta$  가 거의  $90^\circ$  부근영역 혹은  $R$  이 무한대인 평면의 가공시에도 적용되며 식(1) 혹은 식(6)으로부터  $S_o$  혹은  $S_d$  만 주어진 원호곡면 혹은 평면 가공시의 Cusp 높이  $H$  를 순차적으로 구할 수 있게 된다.

### 3. 실험장치의구성

곡면가공실험을 위하여 공작기계는 ㈜화천에서 제작한 Serious-2 모델인 3 축 CNC 머시닝센터를 사용하였다. 형상 모델링은 DeICAM사의 상용 CAD/CAM 소프트웨어인 DUCT5 를 이용하였으며

PowerMILL을 이용하여 실험을 위한 공구경로 NC Data를 생성시켰다. 실험장치와 공작물의 설치 모습을 Fig. 6 에 나타내었다.

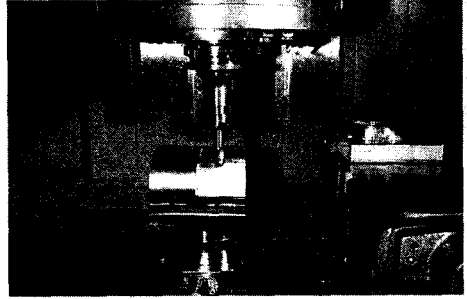


Fig. 6 Experimental set-up

표면거칠기의 측정은 레이저 변위계(KL342A, Anritsu, 일본)를 사용 하였으며 고정구를 제작하여 머시닝센터의 주축에 고정하였다. 또한, 시편의 가공면을 변위센서에 수직이 되도록 머시닝센터의 테이블에 고정 한 후 일정 속도로 테이블을 이송하면서 변위센서를 통하여 Cusp 높이를 측정하였으며, 그 출력 Analog 신호를 PCMCIA (DAQ1200, NI, 미국) A/D 변환기로 A/D 변환하였다. 이때 Data 의 Sampling frequency 는 1 kHz로 하였다. 측정장치의 구성개요는 Fig. 7 과 같다.

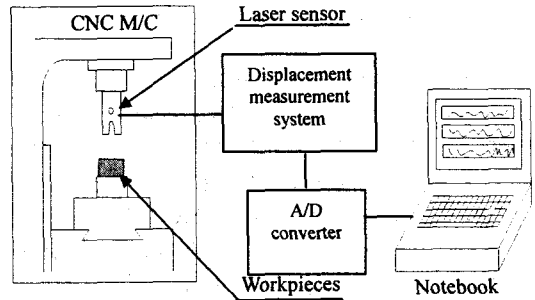


Fig. 7 Cusp height measurement system set-up

### 4. Cusp 모델식의 검증실험 결과

본 연구에서 제안된 Cusp 모델식의 검증을 위하여 공작물 반경  $R$  이 무한대인 경우 즉 경사 평면에 대한 가공실험을 수행 하였으며, 이로부터 기존의 Cusp 높이 계산방식과 본 연구에서 제안된 Cusp 식 및 실험결과를 상호 비교하고자 하였다.

Convex 곡면일 경우의 식(4)와 (5)에서 공작물 반경  $R$  이 무한대 이고  $\theta$  가  $15^\circ$  일 때  $75^\circ$  경사 평면을 직경  $\phi$  10mm의 볼엔드밀로 가공할 때 비교 결과는 Fig. 8과 같이 나타났으며 시험편의

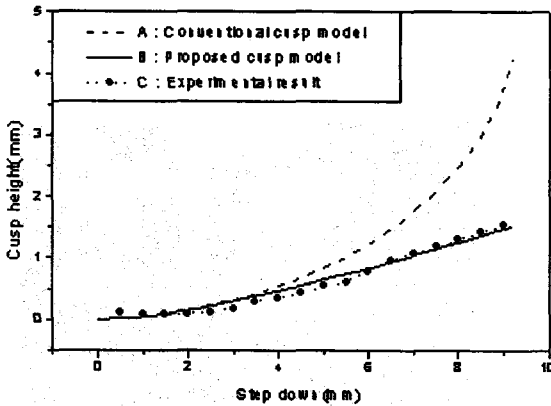


Fig. 8 Comparison of proposed cusp height model and experimental result in inclined plane

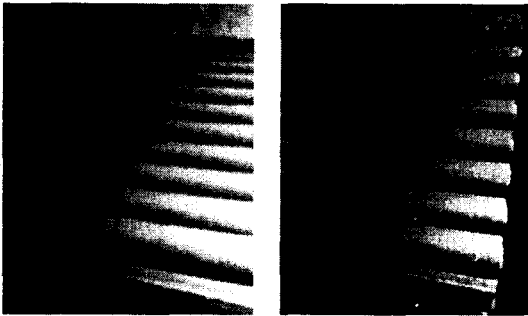


Fig. 9 Cusp generated in cutted surface

가공실험 후 Cusp이 형성된 표면상태를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 8 은 Step down 량의 증가에 따른 Cusp 높이를 구한 결과로 A는 기존의 계산방식 즉, 식 (4) 에 의하여 계산된 결과이며 B는 본 연구에서 제안된 식 (4), (5)를 모두 고려한 계산결과이다. 또한 C는 실제의 실험결과를 나타낸 것으로 Cusp 의 높이는 본 연구에서 제안된 식에 의한 계산값과 거의 일치하고 있음을 알 수 있어 제안된 식의 유용성을 확인할 수 있다. 특히, Step down 량이 약 3mm 보다 커질 경우 기존방식보다 제안된 식이 훨씬 타당하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

볼랜드밀에 의한 원호곡면 가공시 Cusp 높이에 대한 이론적 해석과 검증실험 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Cusp 크기를 이론적으로 계산하는 모델식을 세울 때 볼랜드밀의 측면 절삭날의 절삭

참여여부에 대한 고려조건을 제안하였다.

- (2) 새로이 추가된 식의 적용범위는 Convex 영역에서는 Step over 량이 공구반경보다 큰 경우, Concave 영역에서는 Step over 량과 공작물의 곡률반경의 비례선상 하단부에서 적용된다.
- (3) 제안된 식은 공작물의 원호반경 R 이 아주 크다고 가정할 경우 평면의 가공시에도 적용이 가능하다.
- (4) 기존의 Cusp 높이 계산방식과 제안된 식 및 실험결과를 상호 비교한 결과 제안된 식이 실험결과와 잘 일치하였다.
- (5) 특히, 경사평면의 가공시 Step down 량이 3mm 이상이 될 경우 제안식과 실험결과는 기존식에 비하여 월등한 일치성을 보여 주었다.
- (6) 원호곡면의 가공시에도 제안된 Cusp 높이 계산식이 시뮬레이션 결과 및 실험결과와 아주 유사한 경향을 보여 주었다.

## 참고문헌

1. 성완, 최종호, 송오석, "자유곡면의 CNC 가공을 위한 가공경로의 생성" 정밀공학회지, 제 16 권 4 호, pp. 129-137, 1999.
2. J.P. Singh, J.P. Yadav, Dasharath Ram and I.K. Kaul, "Automatic Generation of NC Part Programs from 3D Modeller", Proceedings of the 14th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, pp. 959-962, 1998.
3. Tera R. Reddy, Krishna K. Krishnan, Mark Kaiser, and Jose K. Daniel, "Geometric Reasoning Based Optimal Tool Path Planning for Machining of Free-form Surface", Proceedings of the 2nd Annula Internatinal Conference on Industrial Engineering Applications and Practic II - Vol. 2, pp. 891-896, 1997.
4. 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.
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. Geoffrey Boothroyd Winston A. Knight, "Fundamental of Machining and Machine Tools", Second Edition, pp.90-94, 1989.
7. 金夏龍 譯, "엔드밀의 모든 것", 성안당, pp.72-77, 1997.