

필렛 엔드밀을 이용한 자유곡면 황삭가공 시간단축 Machining Time Reduction in Rough Machining of Sculptured Surface using Filleted End Mill

신 동혁(서울대 원), 김 종일(서울대 원), 김 병희(강원대 정밀기계공학과), 주 종남(서울대 기계설계학과)
D.H.Shin(Graduate School, Seoul Nat'l. Univ.), J.I.Kim(Graduate School, Seoul Nat'l. Univ.),
B.H.Kim(Kangwon Univ.), C.N.Chu(Seoul Nat'l. Univ.)

ABSTRACT

The cusp height in ball end milling, flat end milling and filleted end milling according to various surface inclination angle was calculated. The calculation result shows that, for each kind of tools, there exists certain range of inclination angle in which cusp height characteristics favorable. From machining time calculation, filleted end mill found to be superior to flat end mill in rough machining of sculptured surface.

Key Words : sculptured surface, machining time, cusp height, inclination angle

1. 서론

자유 곡면을 3축 가공기로 가공할 때, 황삭 가공은 주로 평엔드밀이나 큰 직경의 볼엔드밀로 등고면 가공을 하고, 정삭은 작은 직경의 볼엔드밀로 가공을 한다.

황삭 가공을 효율적으로 수행하여 가공의 시간을 줄이는 연구는 여러 연구자들에 의해서 수행되어 왔다. 그러나 기존의 연구들은 한 등고면 내에서의 공구 경로의 생성 방식을 분류하고, 최적의 경로를 결정하거나[2], 공구의 가공 성능을 정하는 데이터베이스(축방향 가공깊이, 피이드량)를 이용한, 공구의 교환을 고려한 황삭 가공 경로 생성하는 것에 대한 연구[1]들로 실제의 중요 결정 사항인 등고면의 간격은 사용 공구의 제한 조건으로 받아들이거나 임의로 결정하는 방식을 취하여 왔다. 그러나 등고면 사이의 간격을 결정하여 가공되는 등고면의 개수를 최소화하는 것이 가공 시간 단축에 상당한 영향을 준다.

여기서는 공구의 종류와 경사도에 따른 커스프 높이를 고찰하여 각 공구에 따른 유리한 경사 영역을 결정하고 가공물의 주 경사도를 계산하여, 공구별로 자유 곡면 가공 경로를 계산하여 비교하였다.

2. 경사도에 따른 각 공구별 커스프 높이

평엔드밀과 볼엔드밀은 경사도에 따라서 공구경로

간의 간격이 달라진다. <그림 1>의 (a)에서와 같이 평면을 가공할 때는 평엔드밀이 형상면에서 완전하게 부합되지만 볼엔드밀은 커스프가 생기게 된다.

그러나 회전식 절삭공구를 사용한 자유곡면 가공에서는 커스프를 피할 수 없고, <그림 1>의 (b)와 같이 45°의 경사면에 대해서는 평엔드밀에 비해서 볼엔드밀이 커스프 높이가 유리하며 그 차이가 가장 크다.

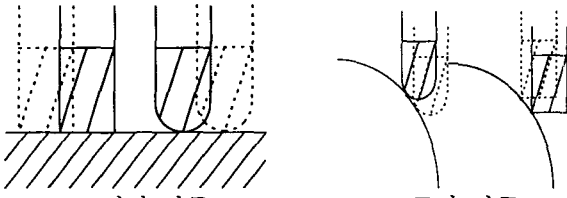
이러한 극단적인 두 경우를 비교해 보면 0°와 45° 사이에 평엔드밀과 볼엔드밀의 커스프 높이가 같아지는 경사각이 존재하게 됨을 알 수 있다.

볼엔드밀의 커스프의 높이와 평엔드밀의 커스프의 높이를 비교하기 위해서는 조건을 일치시켜야 한다. 볼엔드밀로 구면을 가공할 때 커스프의 높이를 제한조건으로 주면 구면상의 호의 길이(공구 경로 간격, <그림>2의 2Δθ에 해당)가 결정된다. 경로간격을 나타내는 Δθ는 다음과 같은 식을 통하여 구할 수 있다.

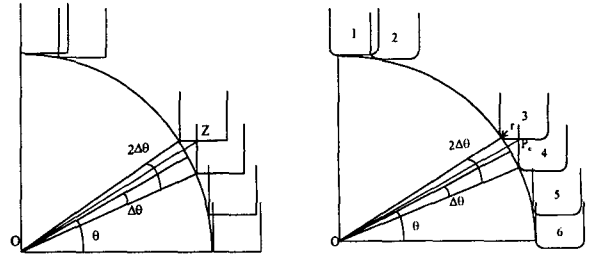
$$\Delta\theta = \cos^{-1} \frac{(1 + \frac{R}{\rho})^2 + (1 + \frac{h_c}{\rho})^2 - \rho^2}{2(1 + \frac{R}{\rho})(1 + \frac{h_c}{\rho})}$$

h_c = cusp height (1)

$$0 \leq \Delta\theta \leq \sin^{-1} \frac{R/\rho}{1 + R/\rho}$$



(a) 평면 가공 (b) 곡면 가공
 <그림 1> 공구에 따른 커스프 높이 비교



(a) 평엔드밀 (b) 필렛엔드밀
 <그림 3> 경사도에 따른 커스프 높이

원호각 $\Delta\theta$ 을 갖는 접촉점에 대해서 커스프 높이는 다음과 계산한다.

$$h_c = \|Z - O\| - \rho$$

$$Z = (\rho \cos(\theta - \Delta\theta), \rho \sin(\theta + \Delta\theta)) \quad (4)$$

평엔드밀과 볼엔드밀의 커스프 높이가 같아지는 경사각은 다음식으로부터 구한다.

$$\sin 2\theta = \frac{(\frac{h_c}{\rho})^2 + 2(\frac{h_c}{\rho})}{\sin 2\Delta\theta} \quad (5)$$

필렛 엔드밀의 경우는 더욱 복잡하다. 커스프가 생성되는 것을 네 가지로 구분할 수 있으며 각각의 경우 커스프 높이를 따로 구해야 한다.

<그림 3>의 (b)는 공구 4의 측면과 3의 밀면에 의해서 생성되는 경우로 커스프 높이는 다음과 같다.

$$h_c = \|P_c - O\| - \rho$$

$$P_c = ((\rho + r) \cos(\theta - \Delta\theta) - r, (\rho + r) \sin(\theta + \Delta\theta) - r) \quad (6)$$

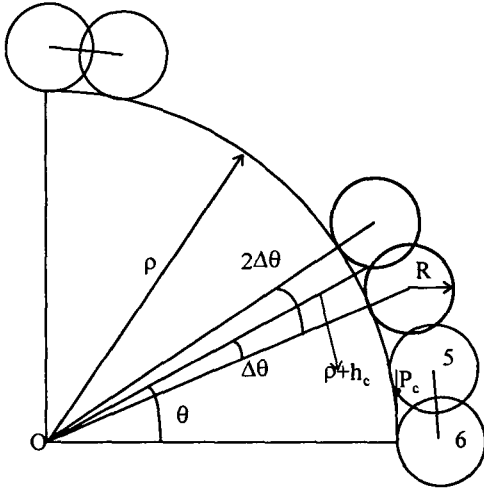
<그림 3>의 (b)에서 공구 5의 원의 부분과 6의 측면에 의해서 커스프가 생성되는 경우 높이는 다음과 같다.

$$h_c = \|P_c - O\| - \rho$$

$$P_c = ((\rho + r) \cos(\theta + \Delta\theta) - r \cos \phi, (\rho + r) \sin(\theta + \Delta\theta) - r \sin \phi)$$

$$\cos \phi = 1 - 2(1 + \frac{\rho}{r}) \sin \theta \sin \Delta\theta \quad (7)$$

$$\Delta\theta \leq \sin^{-1} \left(\frac{r/\rho}{2(1 + r/\rho)} \cdot \frac{1}{\sin \Delta\theta} \right)$$



<그림 2> 경사도에 따른 볼엔드밀의 커스프 높이

구면 가공에서 볼엔드밀은 경사도가 높아지면 <그림 2>의 원 5,6에서와 같이 원과 원이 만나는 것이 아닌 공구의 측면과 원이 만나게 된다. 이경우의 커스프 높이는 점 P_c 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$h_c = \|P_c - O\| - \rho$$

$$P_c = ((\rho + R) \cos(\theta + \Delta\theta) - R \cos \phi, (\rho + R) \sin(\theta + \Delta\theta) - R \sin \phi) \quad (2)$$

$$\cos \phi = 1 - 2(1 + \frac{\rho}{R}) \sin \theta \sin \Delta\theta$$

$\| \cdot \|$ = norm of vector

불부분과 공구의 측면이 만나는 영역에 대한 제한 조건은 다음과 같다.

$$\theta \leq \cos^{-1} \left(\frac{(1 + \frac{R}{\rho})^2 - (\frac{R}{\rho})^2 - (1 + \frac{h_c}{\rho})^2}{2(1 + \frac{h_c}{\rho}) \frac{R}{\rho}} \right) \quad (3)$$

<그림 3>의 (a)에서 평엔드밀에서 볼엔드밀과 같은

<그림 3>의 (b)에서 공구 5의 원의 부분과 6의 측면에 의해서 커스프가 생성되는 경우 높이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 h_c &= \|P_c - O\| - \rho \\
 P_c &= ((\rho + r)\cos(\theta - \Delta\theta) - r\cos\phi, \\
 &(\rho + r)\sin(\theta - \Delta\theta) - r\sin\phi) \\
 \sin\phi &= 1 - 2\left(1 + \frac{\rho}{r}\right)\cos\theta\sin\Delta\theta \\
 \Delta\theta &\geq \cos\left(\frac{r/\rho}{2(1 + r/\rho)} \cdot \frac{1}{\sin\Delta\theta}\right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

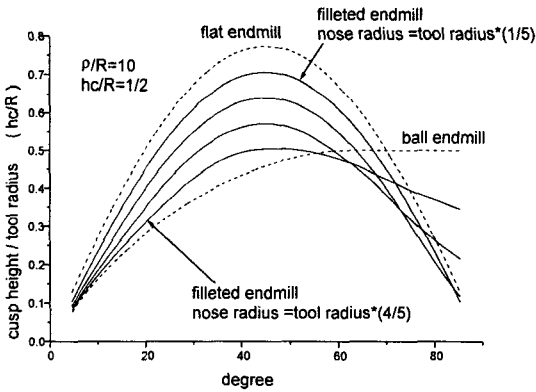
또 하나의 경우는 커스프의 높이가 필렛 부분의 노즈 반경에 비해서 작은 경우이며, 원호부분과 원호부분이 만나서 커스프를 생성하는 경우이다.

$$\begin{aligned}
 h_c &= (\rho + r)\cos\Delta\theta - \sqrt{r^2 - (\rho + r)^2\sin^2\Delta\theta} - \rho \\
 &= (h_c)_{ball}
 \end{aligned} \tag{9}$$

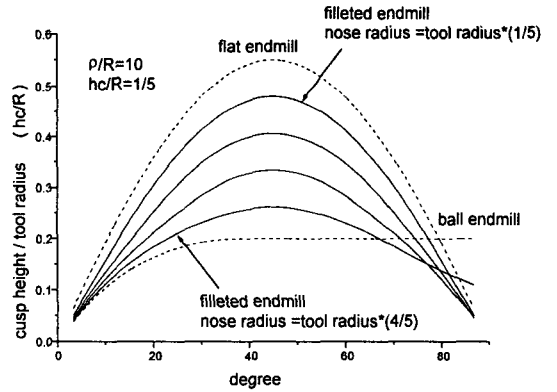
이상의 커스프 높이에 대한 식들을 종합하여 각도에 대해서 표시하면 <그림 4>와 같다. 경사도는 <그림 4>에서 가로축의 degree에 대해 (90°-degree)가 된다. 곡률 반경은 커스프 높이에 큰 영향을 주지 못하며, 하나의 공구에 대해서 커스프의 높이가 다른 공구에 비해서 더 낮아지는 경사도 영역이 있다. 그러므로 가공물의 주 경사도에 따라 3축 등고선 가공에서 더 적합한 공구가 있음을 알 수 있다.

3. 공작물의 경사각 계산 및 등고면 간격 계산

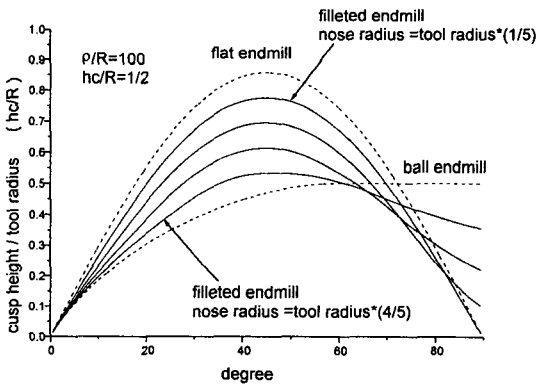
공작물 황삭 가공에서 평엔드밀을 사용하는 경우에 공구 경로가 지나게 되는 등고면의 높이의 간격



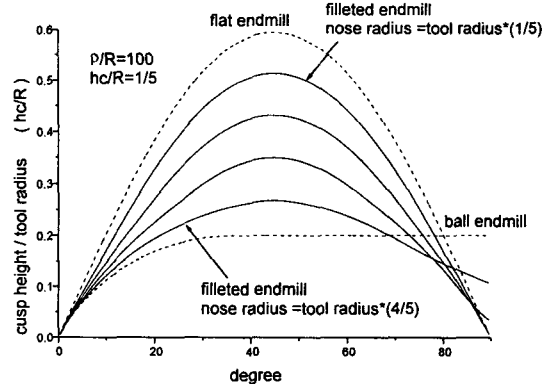
(a) 곡률: 공구 반경: 커스프 높이=20:2:1



(c) 곡률: 공구 반경: 커스프 높이=50:5:1



(b) 곡률: 공구 반경: 커스프 높이=200:2:1



(d) 곡률: 공구 반경: 커스프 높이=500:5:1

<그림 4> 일정한 경로 간격에 대한

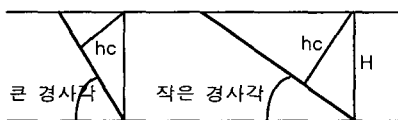
공구별 커스프 높이

을 일정하게 하는 것이 일반적인 방법이였으나, 표면 거칠기의 개념에 의해서 커스프의 높이를 일정하게 하는 것을 고려하게 되면 등고면의 높이의 간격이 달라지게 된다. 곡면의 경사도에 따라서 등고면의 높이를 다르게 하여야만 커스프의 높이를 제한할 수 있다. 하나의 등고면 내에서는 스파이럴 방식에 의해서 가공을 하거나, 지그재그 방식에 의해서 가공을 하는데, 두 경우에서 모두 최종적으로 등고면과 공작물과의 교선을 따라서 한 번은 가공을 하여야 하므로 커스프의 높이는 전적으로 공작물의 곡률과 경사도에 의존하지만 등고면내에서 경사도는 위치에 따라서 각기 틀리므로 등고면의 사이에 형성되는 커스프의 높이는 달라진다. 즉 한 등고면 내에서는 <그림 5>와 같이 등고면 사이에 형성된 커스프는 경사도가 낮을 수록 커지게 되므로 제한된 커스프의 높이에 대해서 최소의 경사도에 의해서 등고면 간격이 결정되게 된다. 일단 공작물의 모든 높이에 대해서 하나의 등고선을 따라서 경사도를 모두 계산하여 그 중에서 가장 작은 경사도를 구한다. 구해진, 각 높이에서의 경사도에 대해 제한된 커스프 높이를 갖는 등고면 간격을 평엔드밀과 필렛엔드밀에 대해서 구한다. 이 등고면 간격 데이터 베이스로부터 최소 높이의 등고면부터 차례로, 커스프 제한 높이에 맞는 등고면 간격을 반복법에 의하여 구하고, 구해진 등고면 높이에서의 공구 경로를 계산한다.

4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션은 <그림 6>의 밑면이 사각형 단면이고 단순 대칭형의 형상에 대해서 수행하였다. 비교를 위해서 <그림 6>의 (a)의 경사도가 큰 곡면과 (b)의 상대적으로 경사도가 작은 곡면에 대해서 두 번의 시뮬레이션을 수행하였다.

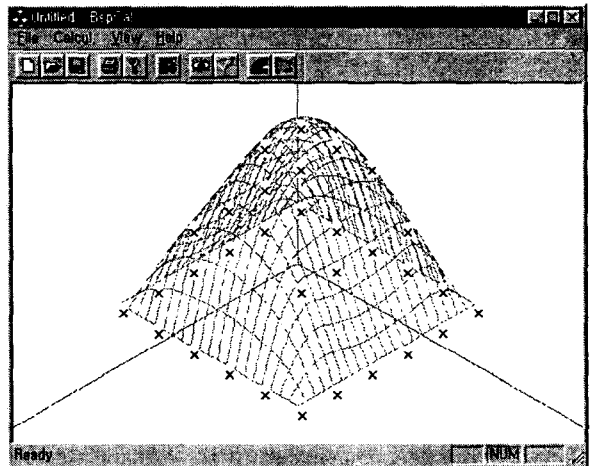
곡면의 밑면 단면은 50x50 이고 (a)의 단면은 높이가 43.9 이고, (b)의 단면은 높이가 32.4 이다. 계산에 사용된 공구는 직경이 10 인 평엔드밀과 직경이 10 이고 필렛 반경이 2 인 필렛엔드밀이고, 커스프의 최대 높이는 5 로 제한하였다.



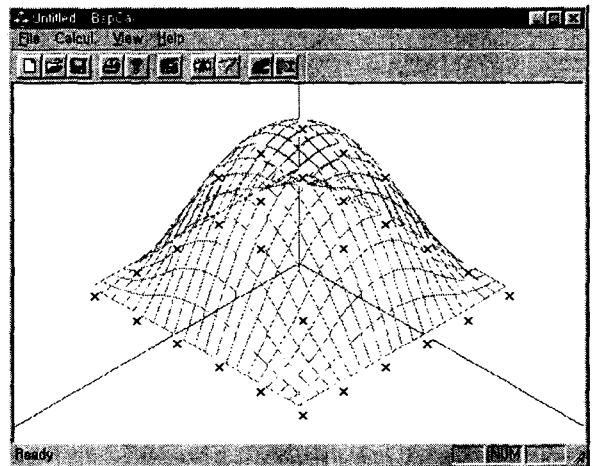
커스프 높이 : hc , 등고면 간격 : H
 <그림 5> 경사도에 따른 커스프의 높이

각각의 자유곡면에 대한 높이에 따른 경사도와 그 경사도에서 커스프의 높이를 만족하는 등고면 간격을 계산한 결과가 <그림 7>에 도시되었다. 모든 경사각에서 필렛엔드밀이 평엔드밀보다 등고면 간격이 크고, 경사각이 커질수록 등고면 간격의 차이가 커진다.

커스프의 높이를 만족하는 등고면의 높이와 그 높이에서의 공구 경로를 <표 1>에 표시하였다. 경사도가 상대적으로 작은 <그림 6>의 (b)의 자유곡면이 (a)의 자유곡면보다 경로 감소율이 작음을 알 수 있다. 이것은 평면에 가까운 형상일수록 평엔드밀이 유리하다는 공구별 커스프 높이 비교 결과와 일치한다.



(a) 높이가 43.9 인 자유 곡면



(b) 높이가 32.4 인 자유 곡면

<그림 6> 시뮬레이션에 사용된 자유 곡면

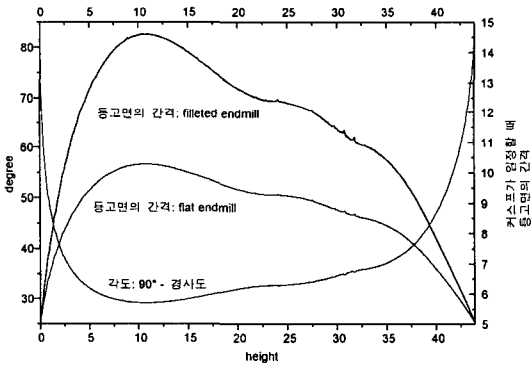
5. 결론

참고 문헌

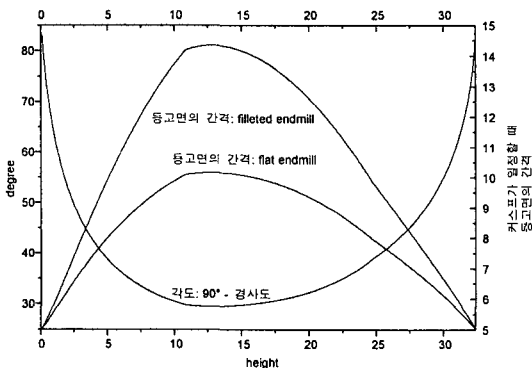
경사도에 따른 커스프의 높이를 분석한 결과, 공구 종류에 따라서 같은 커스프 높이를 갖는 경로간 간격이 더 넓어서 가공 시간에 유리한 공구가 경사도 영역에 따라서 존재한다.

가공 공정과 공구 종류에 따라서 공구 경로 계획과 경로 길이 계산방식이 달라지는데, 자유곡면의 황삭 가공에서는 등고면 3축 가공을 평엔드밀과 필렛엔드밀로 한다. 두 가지 자유 곡면 모델에 대해서 등고면에서의 경사도를 계산하고 제한된 커스프 높이에 맞추어 등고면의 높이를 선정하였다. 그 결과 평엔드밀과 필렛엔드밀의 경로가 생성되는 등고면의 갯수는 필렛엔드밀이 더 적어서 경로가 짧게 되어 가공 시간면에서 유리하다. 그리고 상대적으로 경사도가 작은 영역이 많은 자유곡면에서는 평엔드밀과 필렛엔드밀의 경로 차이가 상대적으로 작게 된다.

1. Y. S. Lee, B. K. Choi and T. C. Chang, "Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining," Int. J. Prod. Res., Vol. 30, NO. 6, pp. 1447-1470, 1992.
2. H. Li, Z. Dong and G. W. Vickers, "Optimal Tool Path Pattern Identification For Single Island, Sculptured Part Rough Machining Using Fuzzy Pattern Analysis," CAD, Vol. 26, NO. 11, pp. 787-795, 1994.
3. R. E. Barnhill and S. N. Kersey, "A Marching Method for Parametric Surface/Surface Intersection," CAGD, Vol. 7, pp. 257- 280, 1990.
4. 김병희, 1994, 볼 노우즈 엔드밀에 의한 자유곡면의 정밀가공특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 기계설계학과 박사 학위논문.
5. 이계정, 1992, 절삭성을 고려한 자유곡면 황삭 가공 경로의 생성 기법에 관한 연구, 서울대학교 대학원 기계설계학과 석사 학위논문.



(a) 높이 43.9 인 자유곡면



(b) 높이 32.4 인 자유곡면

<그림 7> 곡면의 경사도와 등고면 간격

<표 1> 두 곡면에 대한 등고면 높이 및 경로비

	등고면의 높이 (mm)		경로비 = $\frac{\text{경로차}}{\text{플랫밀의 경로길이}}$
	flat end mill	filleted end mill	
높이 43.9 인 자유곡면	6.3	6.4	0.238
	13.9	19.6	
	23.5	31.6	
	32.5	40.5	
	40.0	43.9	
높이 32.4 인 자유곡면	6.1	6.2	0.065
	15.3	18.2	
	26.2	28.0	
	32.4	32.4	