

〈論 文〉

노우즈반경에 따른 엔드밀의 가공특성 및 절삭시간의 비교

김병희* · 최영석** · 주종남***

(1994년 12월 27일 접수)

Comparison of Precision Machinabilities and Cutting Time in Inclined Milling Process

B. H. Kim, Y. S. Choi and C. N. Chu

Key Words : Inclined Milling Process(경사밀링가공), Superposition Method(중첩이론), Surface Roughness(표면거칠기), Tool Wear(공구마모), Cutting Force(절삭력)

Abstract

Surface generation model of three types of endmills is introduced to analyse the cutting mechanism of an endmill more accurately. Superposition method is introduced to define the effective cusp including the effects of cutter mark. Through the comparison of three endmills, it is shown that the ball-nose endmill is superior to the ball endmill and the flat endmill for inclined milling process in 3- or 5-axis machining modes. By using the objective function minimizing the machining time, appropriate nose radius is selected for various cutter radiuses and cutter inclination angles.

1. 서 론

최근 인적자원의 부족 및 고임금화에 따른 가공비용의 증가와 납기단축의 필요성, 고정밀화 및 소비자의 다양한 욕구 등에 대처하기 위해서 효율적이며, 정밀한 자유곡면 가공의 필요성이 점점 증대되고 있다. 기존의 볼 엔드밀에 의한 자유곡면의 가공의 경우, 절삭날이 주축회전수에 따른 최대 절삭속도를 가지지 못하기 때문에 생산성이 저하되고, 가공시간이 증가할 뿐 아니라, 절삭날의 정점부 근방에서 절삭속도가 극히 작게 되어 공작물을 문지르는(rubbing) 현상을 일으키므로 절삭력이 증가하고, 공구마모가 심해지는 단점이 있다. 따라서 볼 엔드밀에 의한 미소밀링^(1~3)으로는 높은 생산성

과 표면정밀도를 얻는 것이 불가능한 것으로 알려져 왔다.^(4,5) 이러한 문제를 극복하기 위하여 도입된 평 엔드밀(flat endmill)이나 정면밀링커터(face mill) 등에 의한 5축 공작기계상에서의 경사밀링가공(inclined milling process)의 경우 공작물이 항상 공구의 주변날에서 공구의 최대 절삭속도로 가공되며, 공구정점부에서의 문지름현상도 피할 수 있는 장점이 있어 곡률이 작은 자유곡면을 가진 금형 및 기계부품의 가공에 있어서는 생산성과 표면거칠기가 모두 향상되는 것으로 보고되고 있다.^(4,5) 그러나, 기존의 경사밀링의 경우, 평 엔드밀이나 정면 밀링공구를 사용함에 따라 발생하는 금형표면의 과대한 공구마크(cutter mark)를 피하기 위해 이송을 극소화할 수밖에 없으므로 작업시간이 크게 늘어나는 단점이 있을 뿐 아니라, 고가의 5축 공작기계를 구입하여야 하고, 공작기계의 강성부족으로 인한 기계오차가 큰 단점이 있다.⁽⁷⁾

따라서 본 논문에서는 여러 종류의 엔드밀들—

*정회원, 강원대학교 정밀기계공학과

**정회원, 서울대학교 대학원

***정회원, 서울대학교 기계설계학과

볼 엔드밀(ball endmill), 볼 노우즈 엔드밀(ball-nose endmill), 평 엔드밀 등—의 절삭기구에 대한 통합모델링과 중첩법⁽⁶⁾을 기초로 한 표면거칠기 해석 및 밀링가공실험을 통해 각 엔드밀의 절삭성능 비교평가를 수행하여 볼 노우즈 엔드밀이 5축 및 3축 공작기계상에서의 정밀경사밀링가공에 가장 적합한 공구임을 입증하였다. 또한, 최적화작업을 통해 고정밀, 고능률가공을 위한 공구설계 데이터와 절삭조건을 산출하였다.

2. 엔드밀의 종류에 따른 표면거칠기 특성해석

2.1 엔드밀의 종류

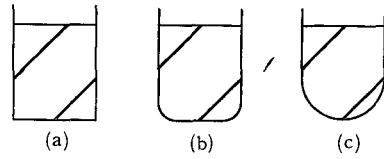
현재 주로 사용되고 있는 엔드밀은 Fig. 1에서와 같이 노우즈반경과 공구반경의 상관관계에 따라 평 엔드밀, 볼 노우즈 엔드밀, 볼 엔드밀 등 크게 세 가지로 분류할 수가 있다

한편, 평 엔드밀과 볼 엔드밀의 경우는 극단적인 장단점을 공유하게 되므로 그 사용에 한계가 있게 된다. 따라서 적절한 크기의 노우즈반경을 갖는 볼 노우즈 엔드밀을 사용함으로써 다른 두 엔드밀의 장점을 어느 정도 공유하는 것이 정밀한 경사밀링가공시에는 유리하게 된다.

2.2 중첩이론에 의한 이론적인 표면거칠기 해석

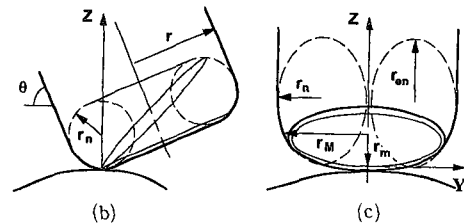
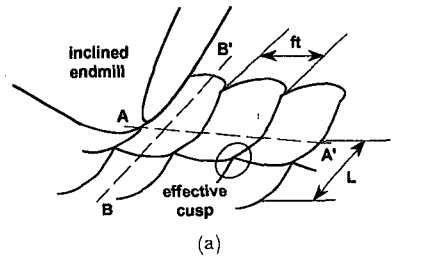
경사밀링가공시의 이론적인 표면거칠기값을 구하기 위해서는 노우즈반경을 고려한 통합된 경사밀링가공모델을 설정할 필요가 있다. Fig. 2는 경사밀링가공시의 절삭가공면(Fig. 2(a)) 및 이송방향에 수평으로 나타나는 단면(Fig. 2(b))과 이송방향에 수직인 단면(Fig. 2(c))을 나타내고 있다. 실제로 절삭가공면을 관찰해 보면, Fig. 2(a)와 같이 구름평면(osculating plane)인 단면 A-A'상에서 단속적인 날당이송에 따른 절삭날의 가공면 제거혼적에 의해 발생하는 공구마크와 공통평면(common plane)인 단면 B-B'상에서 경로간 간격에 따른 인접한 두 공구의 가공면의 제거혼적으로 발생하는 커스프(cusp)가 중첩되는 지역(빚금친 부분)이 나타나게 되는데, 일반적으로 금형 등의 표면거칠기는 가공면 상의 texture중에서 가장 높이가 높은 부분인 최대 거칠기(R_{max})로 나타내게 되므로, 유효 커스프(effective cusp)로 불리는 중첩된 피크부의 해석이 중요하게 된다

기존의 표면거칠기 해석에 관한 논문들은 대부분



(a) Flat endmill
(b) Ball-nose endmill
(c) Ball endmill

Fig. 1 Specification of endmills by the size of the nose radius



(a) 3-D view of the machined surface
(b) Osculating plane(A-A' section)
(c) Common plane(B-B' section)

Fig. 2 Geometries of inclined milling process

B-B'단면상에서의 커스프를 가공면의 최대거칠기라고 주장하는 오류를 범하고 있는데, 중첩법에 의해 A-A'단면상의 공구마크와 B-B'단면상의 커스프를 중첩시킬 경우 정확한 표면거칠기 해석의 수행이 가능하게 된다. Fig. 2(b)와 (c)로부터 절삭조건 및 절삭기구에 따라 유효커스프를 이루는 케릭은 투사의 원리에 의해 세타원이 복합된 형상으로 근사할 수 있는데, 그림으로부터 타원 E_b 의 유효장반경 r_M 과 유효단반경 r_m 을 공구의 노우즈반경 r_n 과 공구기울기각 θ 의 함수로 표시하면

$$r_M = r + r_n(\cos\theta - 1) \text{ at } 0 \leq r_n < r$$

$$r_M = 0 \text{ at } r_n = r$$

$$r_m = r_M \cos\theta$$

이 되고, 노우즈부가 투사된 타원의 장반경 r_{en} 은

$$r_{en} = (r - r_n) \cos \theta + r_n \quad (3)$$

이 된다.

한편, 경로간 간격의 크기 및 공구의 형상에 따라 표면거칠기를 결정하는 유효커스프의 형태는 두 가지로 분류할 수가 있다. 즉, 경사밀링가공시 노우즈반경이 공구반경에 비하여 상대적으로 작거나 경로간 간격 L 이 매우 작아 아래와 같은 조건을 만족할 경우

$$\begin{aligned} L &\leq 2\{r + r_n(\cos \theta - 1)\} \text{ or} \\ r_n &\leq (r - 0.5L)/(1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

공구마크의 높이를 H_e 라고 할 때, 유효커스프의 높이는

$$H_e = r_m - \frac{r_m - H}{r_M} \sqrt{r_M^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (5)$$

로 얻을 수 있고, 반대로 가공기하가 아래와 같은 조건을 만족할 경우에는

$$\begin{aligned} L &> 2\{r + r_n(\cos \theta - 1)\} \text{ or} \\ r_n &> (r - 0.5L)/(1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

노우즈반경이 상대적으로 크므로 공구마크에 의한 영향은 무시할 수가 있다. 결국, 유효커스프의 높이는

$$H_e = r_{en} - \frac{r_{en}}{r_n} \sqrt{r_n^2 - \left(\frac{L}{2} - r + r_n\right)^2} \quad (7)$$

가 된다

2.3 표면거칠기의 비교

노우즈반경이 미소한 평 엔드밀에 의한 경사밀링 가공의 경우 공구하면 채적의 단반경이 줄어 유효 공구반경이 증가함으로써 기존의 커스프를 줄일 수 있는 장점이 있으나, 과도한 공구마크로 인해 표면

거칠기가 상대적으로 증가하는 현상이 발생하게 된다. 또한 볼 엔드밀의 경우 이송방향의 공구마크는 무시할 수 있을 정도로 작은 반면 커스프의 크기가 평 엔드밀에 비하여 상대적으로 커 표면거칠기가 증가하는 평 엔드밀과는 상반되는 현상이 발생한다.⁽⁶⁾

Fig. 3은 날당이송이 0.02 mm/tooth, 경로간 간격이 0.7 mm, 절삭깊이 0.5 mm, 공구반경 8 mm 인 절삭조건으로 공구기울기각이 80°인 세 종류의 엔드밀에 의한 정밀가공시 생성된 공구마크의 측정값을 비교하고 있다. 표면거칠기의 측정은 Rank-Taylor Hobson 측정식 표면거칠기 측정기에 의하여 측정하였다. 평 엔드밀에 의한 측정결과는 이론치와 큰 차이가 없으며, 공작물의 가공면 상에 발생한 가공 texture도 이송방향으로 평행한 정상적인 형태를 이루고 있었으나, 볼 엔드밀의 경우에는 측정결과가 계산된 결과보다 수십배 크게 나타났을 뿐 아니라, 동일 이송조건에서의 볼 노우즈 엔드밀의 측정결과보다도 최대 표면거칠기값(R_{max})이 약간 크게 나타나고 있다. 또한 가공 texture도 불규칙하게 발생했을 뿐 아니라 가공면의 여러곳에 미세한 돌출부나 함몰부가 발생하여 표면거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다. 그 이유는 볼 엔드밀에 의한 미소밀링시 공구정점부 근방에서 문지름현상이 발생하므로 정상상태인 칩형성기구가 이루어지지 못하고 소성변형에 의해 버(burr)가 형성되거나, 유효여유각이 평 엔드밀에 비하여 상대적으로 작아 칩포켓이 좁아지므로 칩에 의한 재절삭현상이 발생하는 것으로 생각된다. 한편 노우즈 반경 3 mm의 볼 노우즈 엔드밀이 평 엔드밀이나 볼 엔드밀에 비하여 좋은 표면상태를 보이는 것은 볼 노우즈 엔드밀의 경우 노우즈반경이 큰 기하학적인 이득을 통해 동일한 절삭조건하에서는 평 엔

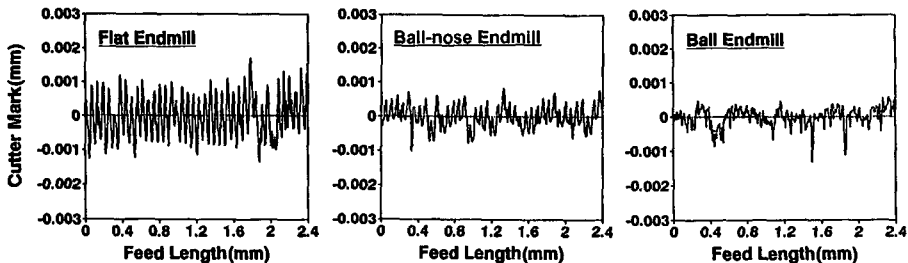


Fig. 3 Comparison of cutter marks among three kinds of endmills-ball endmill ; ball-nose endmill ; and flat endmill

드밀보다 이론적으로 작은 공구마크를 형성할뿐 아니라 절삭성이 불 엔드밀에 비하여 우수하므로 문지름의 발생이 적고 충분한 칩포켓이 확보되기 때문이다.

한편, Fig. 4는 절삭깊이 0.5 mm, 경로간 간격 1 mm, 주축회전수 2000 rpm, 공구기울기각이 80°인 절삭조건하에서 이송속도의 변화에 따른 이송방향의 공구마크의 크기를 비교한 결과이다. 이론적인 공구마크의 크기는 불 엔드밀이 가장 작고, 불 노우즈 엔드밀, 평 엔드밀의 순서로 증가하는 것으로 나타나고 있으나, 실험결과와는 약 1400 mm/min 이하의 낮은 이송속도에서는 불 엔드밀의 문지름 현상으로 인해 불 노우즈 엔드밀이 가장 좋은 표면 거칠기를 나타내고 있음을 알 수 있다. 평 엔드밀의 경우에는 뛰어난 절삭성으로 인해 측정결과가 가장 이론적인 값에 접근하고 있다.

Fig. 5는 공구반경 5 mm인 평 엔드밀, 불 엔드밀, 불 노우즈 엔드밀(노우즈반경 : 2.2 mm)로 경사밀링가공할 때 경로간 간격의 변화에 따른 유효

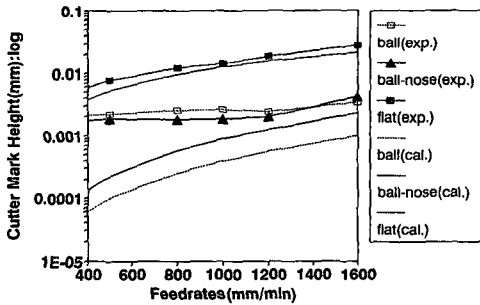


Fig. 4 Variation of cutter mark height against feedrate

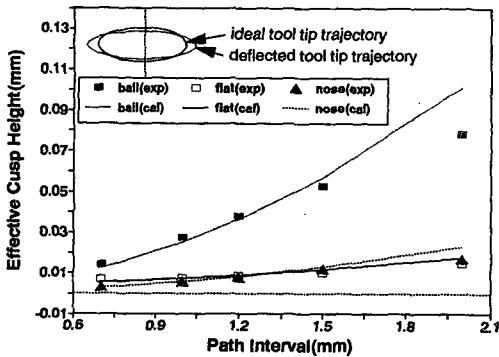


Fig. 5 Comparison between the calculated and the measured values of the effective cusp height against path intervals

커스프의 크기변화를 시뮬레이션결과와 실제실험결과를 비교한 것이다. (날당이송 : 0.0625 mm, 공구 기울기각 82°) 경로간 간격이 1.3 mm 이하인 정밀 가공시에는 불 노우즈 엔드밀이 가장 좋은 표면 거칠기를 나타내고 있으며, 1.3 mm 이상에서는 평 엔드밀이 가장 우수한 것으로 나타나고 있다. 이는 경로간 간격 1.3 mm 이하일 경우에는 공구마크의 영향이 커스프의 영향보다 크기 때문이며, 1.3 mm 이하에서는 그 반대의 현상이 발생하기 때문이다. 한편, 경로간 간격이 작을 경우에는 문지름현상 등으로 인해 실험값이 이론값보다 큰 값을 가지게 되나, 경로간 간격이 증가함에 따라 절삭력이 증가하므로 공구변형에 의해 실험값이 이론치 보다 작아지는 현상이 발생하게 된다. 따라서 보다 정밀한 해석을 위해서는 절삭력에 의한 절삭날의 궤적변화를 고려할 필요가 있다.

결국, 경로간 간격이 좁고, 이송속도가 작은 정밀밀링일 수록 극단적인 경우인 평 엔드밀(노우즈 반경=0)이나 불 엔드밀(노우즈반경=공구반경)에 접근할 경우에 각각 공구마크의 영향이 급속히 증가하거나, 유효커스프가 노우즈부에 의해 형성되고, 문지름현상이 발생하여 표면거칠기가 저하되게 된다. 따라서 절삭조건 및 접촉기하에 따라 적절한 노우즈반경을 갖는 불 노우즈 엔드밀을 사용할 경우 표면거칠기를 향상시키는 효과를 얻을 수 있다.

3. 공구수명 및 간섭특성의 비교

Fig. 6은 평 엔드밀(공구반경 : 10 mm ; 노우즈반경 : 0.05 mm ; 날 수 : 4) 및 불 노우즈 엔드밀(노

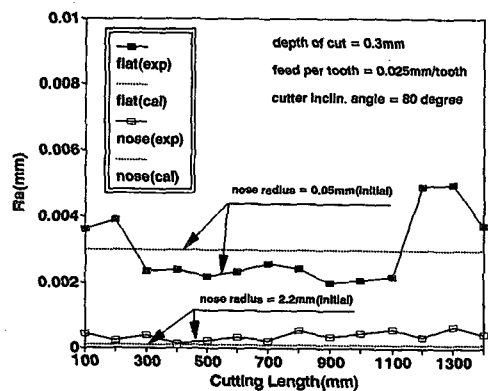


Fig. 6 Variation of surface roughness against the cutting time

우즈반경 : 3 mm)에 의한 경사밀링가공시 가공길이의 증가에 따른 표면거칠기의 변화의 실험결과를 보여주고 있다. (주축회전수 : 2000 rpm ; 절삭깊이 : 0.5 mm ; 공구기울기각 80°)

볼 노우즈 엔드밀의 경우 전체적인 공구마크의 크기가 이론치보다는 약간 큰 값을 나타내고 있으나 노우즈부의 강성이 뛰어나 가공길이의 증가에 따른 표면거칠기의 변화는 무시할 수 있을 정도로 미소하다. 그러나 평 엔드밀의 경우, 가공초기에는 노우즈부의 초기마모로 인해 측정된 표면거칠기가 도리어 이론치보다 작은 결과를 보이고 있으나, 가공길이가 계속 증가함에 따라 칩핑(chipping)과 결손(breakage)현상이 발생하게 되고, 결과적으로 런아웃(runout)의 증가와 절삭성 저하로 인한 거스르미의 발생으로 인해 표면거칠기가 급속히 악화되게 된다. 한편, 가공길이가 어느정도 증가하게 되면 표면거칠기가 약간 향상되는 현상이 발생하는데, 이는 4개의 날이 모두 균일한 형태로 결손됨으로써 런아웃이 영향이 줄기 때문이며, 이는 결국 형상정밀도의 악화를 가져오게 된다. 따라서 평 엔드밀로 STD11과 같은 난삭재료를 경사밀링가공을 할 경우에는 공구수명이 극단적으로 짧게 되고, 가공정밀도에 연속성이 저하되게 된다. 따라서 경사밀링가공에 의한 고경도 재료의 정밀 혹은 고정밀가공시에는 내마모성이 뛰어나고 경사밀링가공 효과를 충분히 얻을 수 있는 볼 노우즈 엔드밀을 사용하는 것이 볼 엔드밀이나 평 엔드밀에 비하여 정밀도 및 공구수명의 관점에서 이점이 있다.

한편 평 엔드밀에 의한 경사밀링가공의 가장 큰 단점 중의 하나는 간섭의 발생이 심하므로 가공할

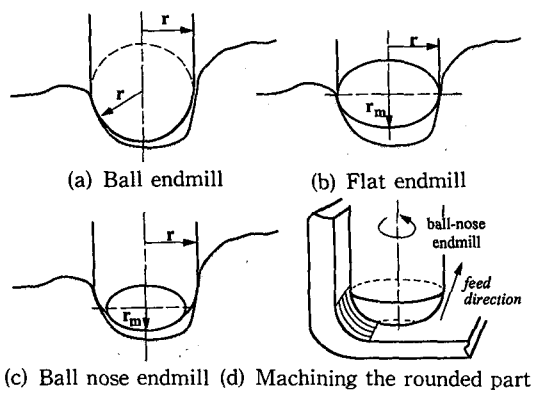


Fig. 7 Characteristics of gouging according to the kind of endmill

수 있는 곡면에 한계가 있는 것이다. 볼 엔드밀의 경우, 절삭성이나 가공비용면에서는 평 엔드밀에 비하여 매우 떨어지지만, 자유곡면의 가공에 가장 적합한 형상을 가지고 있어 가공가능한 곡면의 범위가 넓으므로 실제로 정삭가공시에는 평 엔드밀에 비하여 널리 사용되어 왔다. 한편, 볼 노우즈 엔드밀은 볼 엔드밀과 같이 노우즈부에 의한 구특성을 가지고 있어 평 엔드밀에 비하여 가공범위가 넓으며 특히, 볼 엔드밀의 취약가공 영역인 자유곡면의 라운딩(rounding)부의 가공에 우수한 기능을 나타내고 있다. Fig. 7은 세가지 공구의 경사밀링가공시의 간섭특성 및 볼 노우즈 엔드밀에 의한 곡면의 라운딩부가공 예를 보여주고 있다. 결국 볼 노우즈 엔드밀은 5축 경사밀링이나 3축 동작기계상에서의 치구에 의한 경사밀링가공을 통해 충분한 구특성을 발휘하고, 작은 라운딩부의 가공시에는 볼 엔드밀보다 효과적으로 적용할 수가 있어 경사밀링가공에 가장 유연한 공구라 말할 수가 있다.

4. 절삭력의 비교

날당이송이나 절삭깊이가 미소한 정밀가공시에는

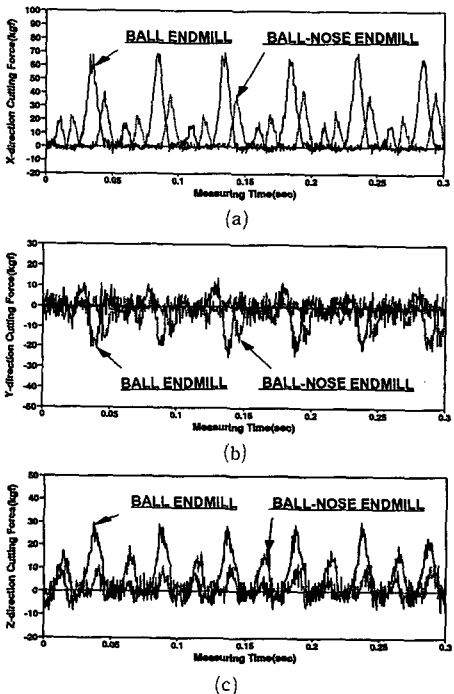


Fig. 8 Comparison of cutting forces with respect to the size of nose radius

동일한 날 절삭조건하에서도 절삭성능에 따라 절삭력(cutting force)의 차이가 발생하게 된다. Fig. 8은 80°의 공구기울기각, 0.03 mm/tooth의 날당이송, 0.5 mm의 절삭깊이로 경사밀링가공시의 볼 노우즈 엔드밀과 볼 엔드밀의 절삭력을 비교한 실험 결과이다. 절삭력은 Kistler 9257B 공구동력계로 측정하였다. 볼 엔드밀의 경우 절삭속도의 저하에 따른 비절삭저항의 증가 및 칩 배출의 어려움으로 인해 볼 노우즈 엔드밀에 비하여 상대적으로 큰 절삭력을 나타내고 있다. 결국 볼 노우즈 엔드밀이 동일한 절삭조건하에서 작은 절삭력을 유지할 수 있으므로 공구변형에 의한 형상정밀도 저하가 작을 뿐 아니라 공구의 기계적인 마모도 상대적으로 작게 된다.

5. 절삭시간을 최소로 하는 노우즈반경의 선정

5.1 가공시간의 산출

자유곡면을 가공할 때에 전체작업시 순수한 절삭 가공시간에 영향을 미치는 변수는 5축이나 3축 경사밀링가공경로에 의해 생성된 경로의 총길이와 이송속도의 함수로 나타내진다. 즉, 총절삭시간은 다음과 같이 얻어진다.

$$\text{Total cutting time} = \sum_i^{N_p} \left(\frac{(PL)_c}{FR_i} + \frac{(PL)_q}{FR_q} \right) (\text{min}) \quad (8)$$

단, 이 때 N_p 는 경로수, $(PL)_c$ 는 순수절삭길이, $(PL)_q$ 는 급속이송길이, FR_i 는 각 경로별 이송속도이고, FR_q 는 기계의 오버라이드(override)에 따른 급속이송속도이다. 급속이송에 따른 시간의 변화는 절삭가공에 따라 소모되는 절삭시간에 비하여 매우 작다고 가정하면 실제 절삭시간은 주로 총가공경로와 경로별 이송속도에 의존하는 함수가 된다.

5.2 노우즈반경 선정함수의 구성

한편, 총가공경로는 공구반경 및 노우즈반경으로 이루어진 유효커스프의 함수로 원통면을 일정한 표면거칠기로 가공하기 위한 노우즈반경선정함수는 공구반경을 r , 노우즈반경을 r_n , 경로간 간격을 L , 날당이송을 ft , 공작물의 구름평면상에서의 곡률반경이 ρ , 유효커스프를 H_e 고 할 때 식(5)로부터

$$(r_e)_{var} = \frac{(r_e)_{var} - H((r_e)_{var}, (ft)_{var}, (\rho)_{const})}{(r)_{const}} \times \sqrt{(r)_{const}^2 - \left(\frac{(L)_{var}}{2}\right)^2} = H_e \quad (9)$$

로 얻을 수 있다. 수식 중에 var 첨자를 가진 것들은 변수이고 $const$ 첨자를 가진 것은 상수이다.

5.3 절삭조건에 따른 노우즈반경의 선정

Fig. 9는 공구기울기각 및 초기에 설정된 유효커스프의 높이가 각각 80°와 10 mm이고 표면거칠기를 안정화하는 최소, 최대 날당이송이 각각 0.03 mm/tooth, 0.15 mm/tooth, 최소 절삭속도가 65 m/min이고, 경로간 간격의 제한영역을 0.5 mm에서 1.5 mm로 할 때 공구반경이 각각 5 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm인 엔드밀의 가공시간을 최소로 하는 노우즈반경 값의 변화를 주축회전수의 변화에 따라 보여주고 있다.

주축회전수가 증가함에 따라 절삭시간을 최소로 하는 노우즈반경은 엔드밀의 반경에 따라 각각 1.3

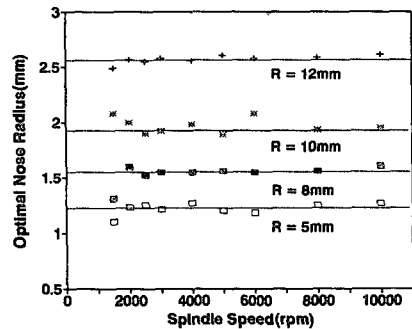


Fig. 9 Variation of optimal nose radius against the spindle speed and the tool radius

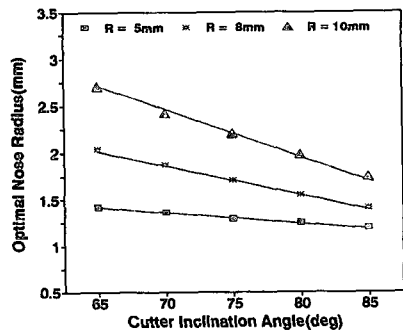


Fig. 10 Variation of optimal nose radius against the cutter inclination angle

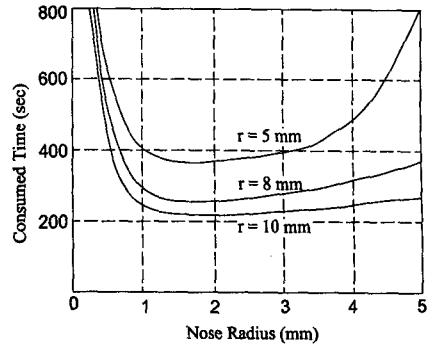
mm, 1.6 mm, 1.9 mm, 2.6 mm로 수렴함을 알 수 있다. 결국, 시뮬레이션 결과로부터 주축회전수가 안정된 절삭속도인 2500 rpm 이상일 경우에는 주축회전수의 변화가 최적 노우즈반경의 결정에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수가 있다. 이는 유효커스프의 크기를 일정한 값으로 지정하고 가공시간을 목적함수로 지정하였을 경우, 엔드밀의 노우즈반경이 최적값 이상에서는 주축회전수가 증가함으로써 감소되는 공구마크의 절대량이 노우즈반경이 변화하므로써 발생하는 표면거칠기의 절대량에 비하여 매우 적기 때문에 주축회전수의 증가로 얻어지는 가공시간의 감소가 미소하기 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 제한조건 하에서 주축회전수 2500 rpm로 100 mm×100 mm인 평면을 유효커스프의 높이가 10 mm 이하가 되도록 경사밀링 가공할 때 공구기울기각의 변화에 따른 노우즈반경의 변화를 나타내고 있다.

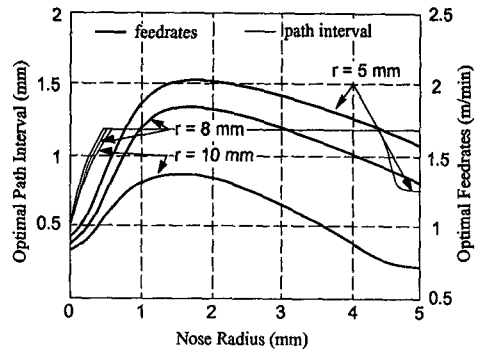
그림으로부터 공구기울기각이 증가함에 따라 노우즈반경의 값이 감소하고 있음을 알 수가 있다. 이는 공구기울기각이 45°에 접근할수록 공구마크의 크기는 커지게 되고, 따라서 상대적으로 큰 노우즈반경을 가진 공구를 사용해야 공구마크의 영향이 줄어 전체적인 유효커스프의 크기가 감소되기 때문이다. 또한 공구반경의 변화에 따라 선정된 노우즈반경도 변화하게 되는데, 이는 노우즈반경이 감소함에 따라 상대적으로 증가되는 유효단반경의 영향으로 인한 유효커스프의 증가량이 공구반경이 작을수록 커지기 때문이다. 결국 가공시간을 최소로 하는 노우즈반경은 공구반경과 공구기울기각의 변화에 따라 선형적으로 변화하므로 가공상황이 변화함에 따라 그 최적의 값이 특정한 영역 내에 여러값이 존재하게 되나 어느 정도 노우즈반경이 최적값 근처로 접근하면 노우즈반경의 변화에 따른 절삭시간의 차이가 미소하므로 최적값의 영역 중에서 공구반경에 따라 가능한 작은 값을 선택하는 것이 절삭속도면에서 유리하다고 볼 수 있다.

한편, Fig. 11은 공구반경 및 노우즈반경의 변화에 따른 순수절삭소요시간(Fig. 11(a))과 각각 노우즈반경에 따라 순수절삭소요시간을 최소로 하는 최적 절삭조건(Fig. 11(b))을 보여주고 있다.

공구반경이 8 mm인 엔드밀로 가공할 경우에는 Fig. 11(a)로부터 노우즈반경이 약 1.6 mm일 때 절삭소요시간이 최소가 되며, 그 때에 자동적으로 설정된 절삭조건은 Fig. 11(b)로부터 이송속도는 1.8



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Overall cutting time and (b) Related cutting conditions

m/min, 경로간 간격은 1.4 mm로 얻어진다. 따라서 본 논문에서 구성한 최적화 알고리즘을 이용하면 최적 노우즈반경 뿐만 아니라, 최적절삭조건 또한 자동적으로 선정할 수가 있다.

결국, 목적하는 자유곡면이 설정되면 간섭을 피할 수 있는 최대의 공구기울기각 및 공구반경을 사전에 결정한 후, 노우즈반경선정 알고리즘을 통하여 절삭시간을 최소로 하는 노우즈반경과 해당절삭조건을 자동적으로 선정할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 중첩법을 기초로 시뮬레이션 및 경사밀링가공 실험을 통한 평 엔드밀, 볼 노우즈 엔드밀 및 볼 엔드밀의 정밀절삭성능평가와 가공시간을 최소로 하는 노우즈반경의 선정에 관한 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 공구마크, 노우즈반경 등의 영향을 고려한 중첩법을 사용하여 경사밀링가공 시의 정량적인 표

면거칠기 값을 보다 정확하게 구하였다.

(2) 정밀절삭조건하에서는 볼 노우즈 엔드밀을 사용할 경우 볼 엔드밀과 평 엔드밀에 비하여 우월한 표면거칠기를 얻을 수가 있다.

(3) 경사밀링가공의 특성상 절삭점이 절삭날의 끝부분에 국부적으로 집중되고 단속절삭이 반복되어 노우즈반경이 너무 작을 경우 절삭저항 및 충격으로 인한 칩핑 및 결손의 발생이 심하므로 고강성의 재료를 가공할 경우에는 볼 노우즈 엔드밀을 사용하는 것이 공구수명 측면에서는 유리하다.

(4) 동일한 금속제거율하에서는 볼 노우즈 엔드밀이 볼 엔드밀보다 상대적으로 작은 절삭력을 가지게 되므로 절삭력에 의한 공구변형 및 공구의 기계적 마모가 적게 된다.

(5) 최적 노우즈반경은 높은 회전수에서는 주축 회전수의 증가와 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 특성이 있으며, 그 크기는 공구반경이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

후 기

본 연구는 “3차원 정밀가공 시스템에 관한 연구 (특정연구과제 92-47-00-01)”로서 수행된 결과의 일부이다.

참고문헌

(1) Miyazawa, S. and Takada, K., 1981, “Micro Milling of Three-Dimensional Surface,” *JSPE*, Vol. 47, No. 2, pp. 94~99.
 (2) Kishinami, T. and Suzuki, H., 1982, “On Relationship Between Cutting Ability and Cutting Edge Shape of Circular Cutting Edge Ball End

Mill,” *JSPE*, Vol. 48, No. 7, pp. 68~74.

(3) Takeuchi, Y. and Watanabe, T., 1993, “Generation of Sculptured Surfaces by Means of an Ultraprecision Milling Machine,” *Annals. of CIRP*, Vol. 42, pp. 611~614.
 (4) Vickers, G. W. Quan, K. W., 1989, “Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining,” *Trans. ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 111, No. 2, pp. 22~26.
 (5) Töshoff, H. K. and et al., 1989, “Die Manufacturing by 5-Axis and 3-Axis Milling,” *J. of Mechanical Working Technology*, Vol. 20, pp. 105~119.
 (6) Kim, B. H. and Chu, C. N., 1994, “Effect of Cutter Mark on Surface roughness and Scallop Height in Sculptured Surface Machining,” *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 179~188.
 (7) Ralph, W. L. and Martin Loftus, 1993, “The Application of an Inclined End Mill Machining Strategy on 3-Axis Machining Center,” *J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 2, pp. 115~133.
 (8) Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., 1993, “CL-DATA Optimization in 5-axis Surface Machining,” *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 22~26.
 (9) 맹희영, 1989, “자유곡면 모형의 볼 엔드밀링 해석과 NC 절삭에 관한 연구,” 박사학위논문, 서울대학교, 서울.
 (10) Cho, H. D., 1993, “Tool Path Machining of Precision Sculptured Surface in Five-Axis End Milling,” Ph. D. Thesis, KAIST.