

밀링작업에서 보조장치를 이용한 자유곡면의 표면거칠기 향상에 관한 연구

A study on the improvement of sculptured surface topography in milling operation by using tertiary motion attachment

*홍민성, **윤병운

*아주대학교 기계 및 산업공학부 조교수

**아주대학교 기계공학과 대학원

ABSTRACT

The applicability of a new method, termed the whirling motion concept, for the improvement of the surface finish in milling three-dimensional sculptured surfaces has been investigated. A method for implementing this concept on conventional NC machines that utilize a suitably configured attachment has been proposed. The tool path equation for the ball-end milling process, based on the Surface-Shaping System, has been obtained. Both results of the computer simulation and the experiment verified the proposed approach.

1. 서론

3차원 자유곡면의 모델링은 Coons[1]와 Bezier[2]의 이론을 바탕으로 비행기, 자동차 그리고 금형 등의 자유곡면의 가공에 이용된다. 일반적으로 자유곡면의 가공에 많이 사용되는 엔드밀은 가공시 공작물 표면에 공구자국이나 파상돌기(scallop)를 생성한다. 이것들은 공구의 형태와 가공경로에 의해 나타나는데, 특히 파상돌기는 가공경로간의 간격을 좁힘으로써 줄일 수 있다. 그러나, 이러한 방법은 가공경로가 길어지므로 많은 가공시간을 필요로 한다. 따라서, 고 정밀도를 요구하는 3차원 자유곡면의 밀링가공은 다른 공정에 비해 전체적인 생산성이 떨어진다.

밀링가공에서 표면 거칠기의 향상을 위한 많은 연구가 시도되었다. 그 중에서 절삭 날의 오차(cutter runout)와 회전축(spindle)의 회전속도변화가 있을 때, 엔드밀(end mill)을 이용한 3차원 밀링가공면을 예측할 수 있는 모델이 개발되었다[3]. 또한 평면밀링가공에 보조절삭운동(whirling motion)을 도입한 연구가 수행돼

있고[4], 실제 평면밀링가공을 통해 표면 거칠기의 향상을 보였다[5]. 그리고 절삭가공시 발생하는 여러 가지 오차들을 포함한 범용 표면가공시스템이 개발되었다[6].

Fig.1에서 보는 바와 같이 이러한 보조절삭운동은 주축에 가변편심(adjustable eccentricity)과 보조회전(whirling spindle)을 주어 기존 주축의 직선운동을 나선운동(trochoidal motion)으로 변환시켰다. 이러한 나선운동은 가공 경로들 사이의 비절삭 부분도 가공할 수 있는 장점을 갖고 있다.

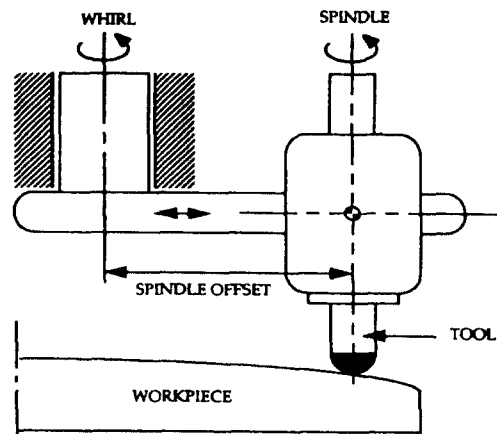


Fig. 1 Schematics of the Whirling Motion Concept

본 논문은 3차원 자유곡면의 가공을 위한 보조절삭운동의 기본원리를 분석하고, 기존의 3축 NC머신에 보조기구를 부착하여 보조절삭운동을 산업현장에 응용할 수 있도록 하는데 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

2.1. 3차원 자유곡면의 기하학적 모델

3차원 자유곡면식은 매개변수(parameters)를 사용하므로써 접선, 법선, 곡률 등을 간단히 구할 수 있다. 일반적인 3차원 곡면의 모델링은 3차 매개변수(cubic parameters)를 이용하고, 자유곡면의 기본요소로는 패치(patch)를 사용한다. 패치는 연속적인 2개의 매개변수(u,w)에 의한 점들 $\{X=X(u,w), Y=Y(u,w), Z=Z(u,w)\}$ 의 집합체이다. 여기서, 매개변수 u와 w는 0과 1사이의 값을 가지며, 양 3차(bi-cubic)패치의 대수적 표현은 다음과 같다.

$$p(u, w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} u^i w^j \quad (1)$$

여기서 a_{ij} 벡터는 자유곡면의 곡면계수(surface coefficient)이고, 식(1)에 u,w의 특정값을 넣으면 패치 위의 한 점을 나타낼 수 있다[7]. 또한, 자유곡면은 다음의 Bezier 곡면으로 쉽게 표현할 수 있다.

$$p(u, w) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n p(i, j) B_{i,m}(u) B_{j,n}(w) \quad (2)$$

여기서 $p(i, j)$ 는 $(m+1) \times (n+1)$ 배열의 특정다각형의 꼭지점이다. 그리고, $B_{i,m}(u)$ 와 $B_{j,n}(w)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$B_{i,m}(u) = \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i}$$

$$B_{j,n}(w) = \frac{n!}{j!(n-j)!} w^j (1-w)^{n-j} \quad (3)$$

보조절삭운동의 개념을 이해하기 위하여 가공 면과 절삭 날과의 상관관계가 필요하다. 3차원 곡면가공에서 가공 면의 미절삭(undercut)과 과대절삭(overcut)을 방지하기 위해서 엔드밀의 주축은 가공 면에 항상 수직인 방향으로 유지되어야 한다. 즉, 양 3차 패치 위의 점 $p(u,w)$ 에서의 단위 법선 벡터 $n(u,w)$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다[7].

$$n(u, w) = \frac{\mathbf{p}^u \times \mathbf{p}^w}{|\mathbf{p}^u \times \mathbf{p}^w|} \quad (4)$$

여기서, 접선벡터 $\mathbf{p}^u = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial u}$ 이고, $\mathbf{p}^w = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial w}$ 이다.

2.2. 표면가공시스템(Surface-Shaping System)

절삭 날과 공작물의 관계는 가공 면의 정확한 표면 거칠기를 예측하기 위해 필요하다. 이를 위해 제안된 새로운 가공시스템으로써 표면가공시스템이 소개되었다[8]. Fig.2는 표면가공시스템의 모델링을 위한 좌표 계들을 나타내고 있다.

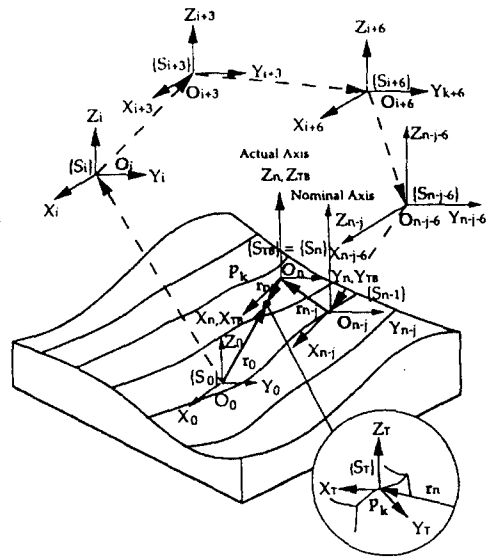


Fig. 2 Coordinate Systems and General Cutting Path of the Surface-Shaping System

절삭 날 상의 한 점(surface-shaping point)은 공구기본좌표계 $\{S_n\}$ 에서 식(5)의 벡터 r_n 으로 표현되는데 이것은 절삭 날의 기하학적 형상(tool geometry)을 나타낸다.

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{B}_T \mathbf{e}^4 = \prod_{i=1}^m \mathbf{A}_{i-1,i}^j \mathbf{e}^4 \quad (5)$$

여기서 \mathbf{B}_T 는 m개로 이루어진 i-1좌표계와 i좌표계간의 조화변환행렬(homogeneous transformation matrix) $\mathbf{A}_{i-1,i}^j$ 의 곱이고, \mathbf{e}^4 는 공구좌표계의 원점을 나타낸다. 변환행렬 \mathbf{A}^j 는 $j=1, 2, 3$ 일 때 각각 X, Y, Z방향으로의 이

동행렬(translational matrix)이고, $j = 4, 5, 6$ 일 때 각각 X, Y, Z축을 중심으로 한 회전행렬(rotational matrix)을 나타낸다. 절삭 날 위의 한 점은 공작물좌표계 $\{S_0\}$ 와 공구기본좌표계 $\{S_n\}$ 에서 각각 r_0 와 r_n 벡터로 표현되는데, 이들은 식(6)과 같은 관계를 가지며 공구와 공작물 사이의 기구학적 특성(kinematic characteristics)을 나타낸다.

$$r_0 = B_{0,n} r_n = \prod_{k=1}^n @ A_{k-1,k}^{j_k} r_n \quad (6)$$

여기서 위 첨자 @는 변환행렬 A^j 의 특성을 나타내며, 각각 주 운동(nominal motion), 오차에 의한 운동(error motion), 보조운동(higher order motion)을 나타낸다. 식(5)를 식(6)에 대입하므로써 총체적 표면가공시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$r_0 = B_{0,n} B_T e^4 \quad (7)$$

2.3. 보조절삭운동을 이용한 3차원 곡면가공

표면가공시스템에 의해 보조절삭운동을 이용한 볼엔드 밀링 작업을 기구학적 요소(r_0)와 기하학적 요소(r_7)로 표현하면 식(8)과 식(9)로 나타내어진다. 식(8)에서 r_0 는 공작물 좌표계 $\{S_0\}$ 에서 본 절삭 날 위의 점 p_k 의 좌표를 나타내며, r_7 은 공구좌표계 $\{S_7\}$ 에서 점 p_k 의 좌표를 나타낸다. 보조절삭운동인 나선운동은 회전각 θ_w 와 편심 e 에 의해 만들어진다. Fig.3은 볼엔드밀의 기구학적 형상을 나타내며, 본 연구에서는 절삭 날(flute)의 둥근 끝 부분만 모델링을 하였다

$$\begin{aligned} r_0 &= B_{0,7} r_7 \\ &= {}^N A^1(x) {}^N A^2(y) {}^N A^3(z) {}^N A^5(\theta_y) \\ &\quad {}^H A^6(\theta_w) {}^H A^5(e) {}^N A^6(-\theta(t)) r_7 \end{aligned} \quad (8)$$

$$r_7 = {}^N A^6(\phi_i) {}^N A^1(R_i) {}^N A^5(\psi_i) e^4 \quad (9)$$

여기서

$$x = x_0 + f_x \cdot t$$

$$y = y_0 + f_y \cdot t$$

$$z = z_0 + f_z \cdot t$$

θ_y : 공구축의 기울기

$\theta(t)$: 엔드밀의 회전각 ($\omega_s \cdot t$)

θ_w : 나선운동의 회전각 ($\omega_w \cdot t$)

ω_s, ω_w : 주축과 나선운동의 각속도

e : 나선운동의 편심

R_i : 볼엔드밀의 반경

ψ_i : i 번째 절삭날위의 특정점이 Z축과 이루는 각

ϕ_i : i 번째 절삭 날이 X축과 이루는 각

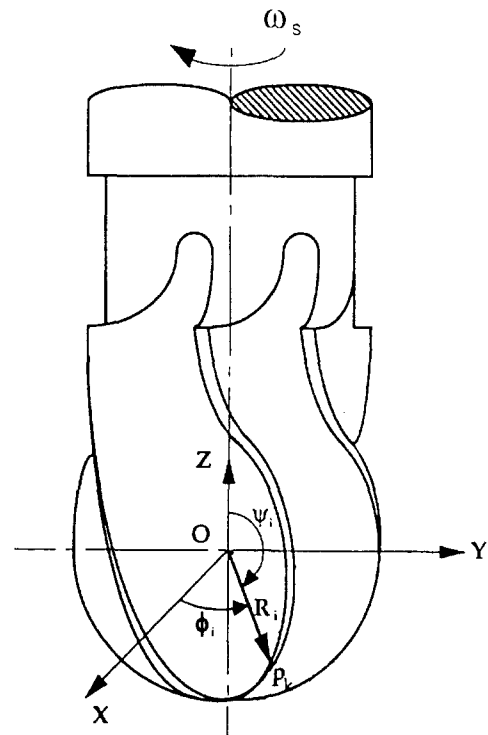


Fig. 3 Cutter Geometry of a Ball End Mill

식(8)과 식(9)로부터 최종적으로 보조절삭운동을 이용한 볼엔드밀의 절삭날 위의 점 p_k 의 공구경로식(tool path equation)을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + e \cdot \cos \theta_y \cos \theta_w + R_i \cos \theta_y \sin \eta \\ y + e \cdot \sin \theta_w + R_i \sin \eta \\ z - e \cdot \sin \theta_y \cos \theta_w - R_i \sin \theta_y \sin \eta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $\eta = \phi_i - \theta(t) + \theta_w$ 이다.

2.4. 컴퓨터 시뮬레이션

표면가공모델의 시뮬레이션 프로그램은 다음과 같은 과정으로 실행된다.

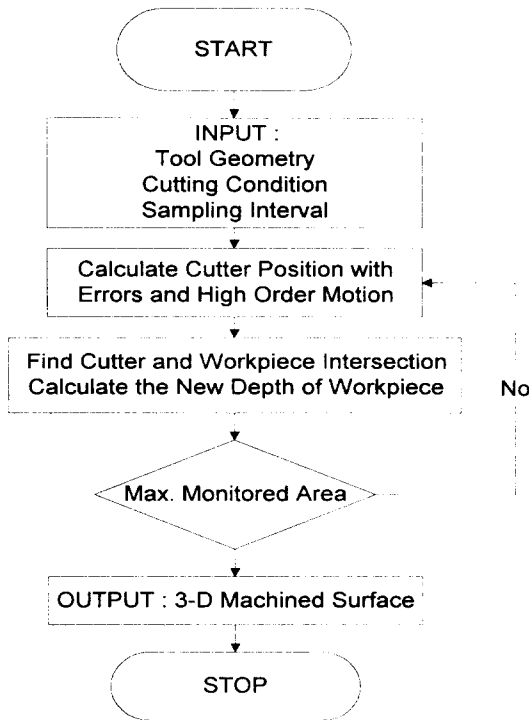


Fig. 4 Flowchart of the Surface-Shaping Model

Table 1은 볼엔드밀을 이용한 3차원 자유 곡면의 가공조건을 나타내며, 시뮬레이션의 결과는 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 보여진다. 그리고 Fig. 5는 기존의 볼엔드밀링 가공이고, Fig.6(a)는 보조절삭운동의 추가한 경우이다. 이때 보조회전속도는 32rpm, 보조편심은 2.54mm이다. Fig.6(b)는 Fig.6(a)의 가공 면의 일부를 확대해서 본 것이다.

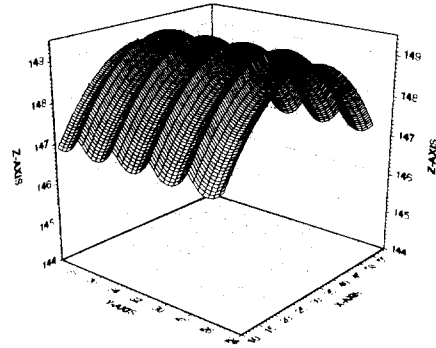
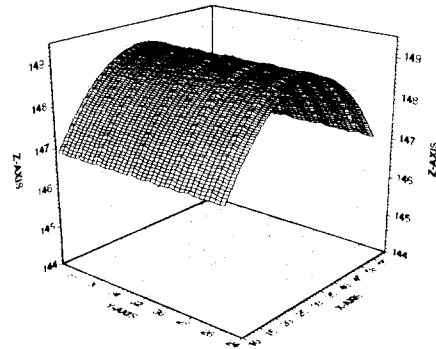
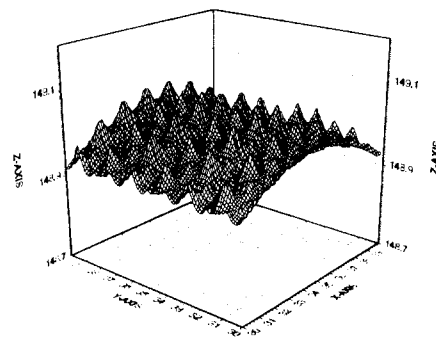


Fig. 5 Simulated Ball End Milled Surface (Conventional Motion)



(a)



(b)

Fig. 6 Simulated Ball Nose End Milled Surface with Whirling Motion

Table 1 Working Conditions

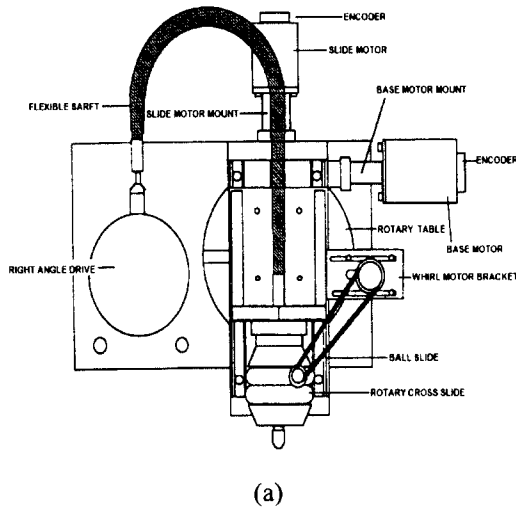
No. of Flutes	2	Cutting Speed	860rpm
Feedrate	47.625mm	Cutter Radius	3.175mm

3. 실험방법 및 고찰

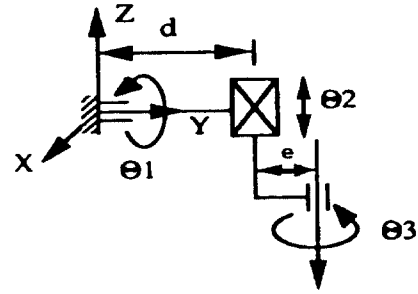
3.1. 실험방법

3차원 가공 면의 표면 거칠기 향상을 위해 기존의 밀링머신에 보조기구를 부착하여 나선 운동을 수행하였다. 실험장치는 Fig.7(a)에 보여지고, Fig.7(b)은 실험장치의 골격도 (skeleton diagram)이다. 보조기구는 Fig.7과 같이 2자유도계로 구성되어 있는데 상하로 200mm이동이 가능한 슬라이드(slide)와 ±20° 만큼 회전 가능한 회전판(rotary table)으로 구성되어 있다. Fig.7(b)에서 θ_1 은 회전판의 회전각이고, θ_2 는 슬라이드의 이동거리, θ_3 는 나선운동의 회전각, e 는 회전 편심, d 는 회전판과 슬라이드 사이의 간격이다. 이 보조장치를 3차원 자유곡면에 응용하기 위해서 포스트 프로세서(postprocessor)가 개발되었다. 이 포스트 프로세서는 다음의 기능을 갖고 있다.

- ① 3차원 자유곡면의 표현
- ② 공구경로의 표현
- ③ 좌표변환
- ④ 보조장치의 제어



(a)



(b)

Fig. 7 Experimental Setup

(a) Overall View

(b) Kinematics of the Attachment

자유곡면가공을 위해, 공구 축은 가공표면에 항상 수직해야 된다. 따라서 표면의 법선에 따른 공구축의 회전이 필요하다. 보조기구의 제어를 위해 3개의 변수를 설정하였다. THETA1(t)은 회전판의 기울어진 각을 나타내고, THETA2(t)는 슬라이드의 위치, 그리고 THETA3(t)는 밀링헤드의 나선운동 각을 나타낸다.

표면가공시스템에 따라서 보조기구는 다음과 같이 제어된다.

$$THETA1(T) = \arctan(n_x/n_z) \times 360/2\pi$$

$$THETA2(T) = (B_z - C_z - L \times n_z)/n_z \quad (20)$$

$$THETA3(T) = 2\pi \times \omega_w \times t \times 60$$

여기서 n_x 와 n_z 는 각각 가공 면의 법선 벡터의 X, Z방향 성분이다. ω_w 는 밀링 헤드의 나선운동의 각속도이다. L은 공구의 길이이며, C_z 는 가공 면의 높이, B_z 는 이송테이블에서 회전판의 중심까지의 거리를 나타낸다.

보조절삭운동의 결과 뿐만 아니라 보조기구의 기능을 시험하기 위해 몇 가지의 표면을 가공하였으며, 가공과정 동안에 절삭진동을 줄이기 위해 가공왁스(machinable wax)를 공작물로 사용하였다. 실험은 Table 1과 같은 조건으로 수행되었으며, 보조절삭운동에 의한 3차원 자유곡면가공과 기존의 가공방법에 의한 실험 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 보여진 것과 같이 각각의 경우에서 공작물의 전체적인 표면 거칠기 차이를 알 수 있다.

SURFTEST(SV-624)에 의해 측정된 표면 거칠기 평균값(Ra)은 공구진행 방향에 수직인 방향에서 보조운동이 있는 경우 약 4배가 향상되었다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과는 약 3배정도 였다.

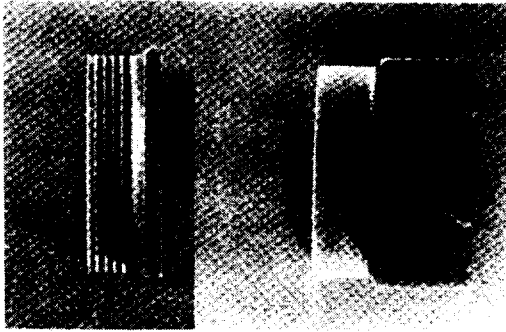


Fig. 8 3-D Surface Machined Without and With Whirling Motion

4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 표면가공시스템을 이용하여 3차원 자유곡면의 가공을 위한 볼엔드밀링의 공구경로식을 유도하였다.

2) 시뮬레이션 및 실험결과를 통하여, 기존의 밀링작업과 비교하여 볼 때 보조절삭운동을 적용함으로써 3차원 자유곡면의 표면 거칠기가 향상됨을 알 수 있었다.

3) 제안된 보조장치는 3축 NC머신과 포스트 프로세서의 개발을 통하여 현장에의 응용이 가능하다.

5. 참고문헌

- [1] S. D. Coons, "Surface for Computer Aided Design of Space Forms", Report MAC-TR-41 Project MAC, MIT, MA, 1967.
- [2] P. E. Bezier, Numerical Control-mathematics and Applications, John Willey and Sons, 1972.

- [3] T. S. Babin, J. W. Sutherland, S. G. Kappor, "On the Geometry of End Milled Surface", Proceedings of the Fourteenth NAMRC, pp.168-176, May 1986.

- [4] S-J. You, "Synthesis and Generation of Milled and Polished Surface Under Tertiary Cutter Motion", Ph.D.Thesis, Northwestern University, 1989.

- [5] M. Stanley, "The Improvement of Milled Surface Characteristics Using Tertiary Motion of the Milling Cutter", Master Thesis, Northwestern University, 1988.

- [6] M. S. Hong and K. F. Ehmann, "Generation of Engineered Surfaces by the Surface-Shaping System", Int. J. Machine Tools Manufacture, Vol. 35. No.9, pp. 1269-1290, 1995.

- [7] M. E. Mortenson, Geometric Modeling, John Wiley and Sons, 1985.

- [8] 홍 민성, "선삭에서의 가공 표면 제어", 한국공작기계기술학회지, 제4권 제3호, pp. 48-57, 1995.