

## 능선 궤적법을 이용한 볼엔드밀 가공면 해석

정태성\*, 남성호\*\*, 박진호\*\*\*, 양민양#

### Analysis of Machined Surfaces by Ball-end Milling using the Ridge Method

Tae Sung Jung\*, Sung Ho Nam\*\*, Jin Ho Park\*\*\* and Min Yang Yang#

#### ABSTRACT

Ball-end milling is one of the most common manufacturing processes for the parts with sculptured surface. However, the conventional roughness model is not suitable for the evaluation of surface texture and roughness under highly efficient machining conditions. Therefore, a different approach is needed for the accurate evaluation of machined surface. In this study, a new method, named 'Ridge method', is proposed for the effective prediction of the geometrical roughness and the surface topology in ball-end milling. Theoretical analysis of a machined surface texture was performed considering the actual trochoidal trajectories of cutting edge. The characteristic lines of cut remainder are defined as three-types of 'Ridges' and their mathematical equations are derived from the surface generation mechanism of ball-end milling process. The predicted results are compared with the results of conventional method. The agreement between the results predicted by the proposed method and the values calculated by the simulation method shows that the analytic equations presented in this paper are useful for evaluating a geometrical surface roughness of ball-end milling process.

**Key Words** : Ridge method (능선 궤적법), Surface roughness (표면조도), Surface texture (가공면 형상), Cut remainder (잔여 절삭), Ball-end mill (볼엔드밀), Finish Cut (정삭)

#### 기호설명

$O - XYZ$  = coordinates on the machined surface

$H_{max}$  = maximum surface roughness

$R$  = tool radius

$r$  = radius of cutting edge

$f_t$  = feed per tooth

$f_p$  = path interval

$\psi$  = profile of characteristic line of cut remainder

(ridge)

$R_{eff}$  = effective cutter radius

$\tau_{Reff}$  = effective cutter radius ratio ( $R_{eff} / f_t$ )

$C_n$  = profile of the  $n^{th}$  cutting edge,  $n = 1, 2$

$\Phi_n$  = trajectory of the  $n^{th}$  cutting edge,  $n = 1, 2$

$\theta$  = rotation angle of the cutter(CW)

$\Pi$  = maximum cut remainder section

$\Gamma$  = cutting-edge plane

접수일: 2003년 5월 21일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

\* 주식회사 재영솔루션 프라스틱응용기술연구소

\*\* 한국과학기술원 기계기술연구소

\*\*\* 주식회사 에자일텍

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

Email: myyang@kaist.ac.kr, Tel: (042) 869-3264

$C, S, R, L, V =$  subscripts denote the values corresponding to the conventional roughness model, the scallop height, the right-half ridge, the left-half ridge, the critical-velocity ridge, respectively

### 1. 서론

볼엔드밀을 이용한 가공은 가장 널리 쓰이는 3 차원 정형 가공 공정으로서 보다 정밀한 가공 오차 예측을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 밀링 가공의 오차는 절삭력에 의한 공구의 휨, 공구 마모, 칩(chip) 배출, 채터(chatter), 러빙(rubbing), 열적 변형 등 많은 요인으로 인해 발생된다.<sup>1-4</sup> 그러나, 경로 간격, 이송 속도 등의 가공 조건 선정은 일반적으로 공구와 공작물을 강체계(rigid system)로 가정한 이론적 표면 거칠기를 기준으로 이루어지므로 효율적인 가공 조건 선정을 위한 그에 대한 정밀한 해석이 중요하다.

전통적으로 볼엔드밀 가공면의 기하학적 표면 거칠기는 커스프(cusp)로 근사 되었나,<sup>5,6</sup> 근래에 고이송 고효율 가공이 일반화되면서 커스프 높이 뿐만 아니라 커터마크(cutter mark) 높이가 가공면의 표면 품위에 많은 영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다. Miyazawa<sup>7</sup> 는 볼엔드밀을 이용한 곡면 가공에서의 커터마크를 고려한 기하학적 표면 거칠기 식을 유도하였고, Naito<sup>8</sup> 는 고효율 가공 조건에서 볼엔드밀 가공 특성에 대하여 연구하였다. 또, Kim<sup>9,10</sup> 는 일반화된 공구 모델을 제시하고 공구 편심(run out)이 표면 거칠기에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 커스프와 커터마크의 중첩 이론을 이용하여 밀링 가공면의 기하학적 형상을 예측하였다. 최근, Koreta<sup>11</sup> 등은 고이송 가공에서의 정밀한 표면조도 예측을 위하여 트로코이드(trochoid) 공구 인선 궤적을 고려하였으며, Z-map 을 이용한 가공 시뮬레이션을 통해 가공면 형상(topology)을 예측하고, 이를 바탕으로 표면 품위를 개선할 수 있는 가공 조건을 도출하였다.

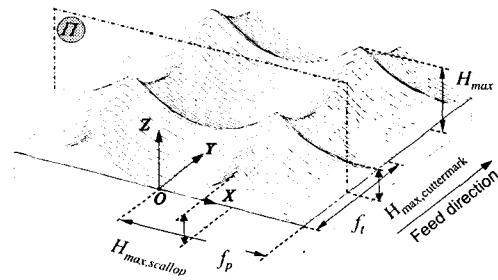
Z-map 을 이용한 시뮬레이션은 최종 가공면의 형상을 정밀하게 예측할 수 있으며, 고효율 가공 조건에서도 이론적 표면 거칠기를 계산할 수 있다. 그러나, 많은 계산 량의 한계로 인하여 공구의 크기, 경로 간격, 이송 속도, 공구의 기울임 등 다양

한 가공 조건에서 가공면의 형상과 표면 조도를 예측하고자 할 때 효율적이지 못하다. 그러므로, 시뮬레이션을 대체할 수 있는 수학적 해석법이 요구된다.

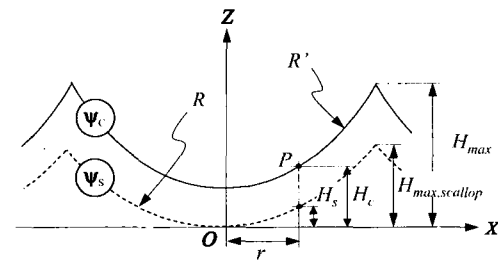
본 연구에서는 볼엔드밀 가공면을 쉽고, 정밀하게 예측할 수 있는 새로운 방법으로 능선 궤적법(Ridge method)를 제시하였다. 특히, 잔여 절삭(cut remainder)을 대표하는 특징선(characteristic line) 들을 능선(ridge)으로 정의하였고, 볼엔드밀 가공의 표면 생성 원리 원리로부터 이들의 지배 방정식을 해석적으로 유도하였으며, 능선의 개념을 이용하여 예측된 결과를 기존의 표면 거칠기 모델과 비교하였다.

### 2. 볼엔드밀 가공면의 예측

#### 2.1 구면 근사 모델



(a) Surface texture predicted by conventional roughness model



(b) Characteristic line of cut remainder (Ridge)

Fig. 1 Analysis of machined surface by Spherical-tool approximation model

구면 근사 모델은 공구의 회전 속도가 이송

속도에 비하여 매우 빠르면 인선의 궤적면(envelop of cutting edge)을 반구로 가정할 수 있다는 것에 착안한 것으로 볼랜드밀 가공면의 표면 거칠기를 예측하는 일반적인 방법이다. 이 모델에서는 가공면의 잔여 절삭을 Fig. 1(a)에서와 같이 날당 이송과 경로 간격만큼 떨어진 반구형 가공면이 중첩(superposition)된 것으로 예측하였다.

또한, 평면 가공에서 최대 표면 거칠기  $H_{\max}$ 는 경로 간격에 따라 발생되는 잔여 절삭 높이인 커스프와 공구 이송에 의해 생기는 커터마크 높이의 합으로 계산되었다.

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H_{\max, \text{scallop}} + H_{\max, \text{cuttermark}} \\ &= \frac{f_p^2}{8R} + \frac{f_t^2}{8R} \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 1(b)는 구면 근사 모델에서 잔여 절삭의 고점(peak)을 나타내는 특징선을 보여 주며, 전통적인 표면 거칠기 모델에서 능선은 최대 잔여 절삭 단면(maximum cut remainder section)  $\Pi$ 에 존재하는 반경이  $R'$ 인 원의 일부로 가정되었다. 평면  $\Pi$ 는 공통평면(common plane;  $XZ$ )에 평행하고 이송 방향  $Y$ 에 대하여 수직이다.

$$R' = \sqrt{R^2 - \left(\frac{f_t}{2}\right)^2} \quad (2)$$

따라서, 기존의 표면 거칠기 모델에서 능선은 이송평면(osculating plane;  $YZ$ )에 대하여 대칭이며, 능선 위의 점  $P$ 에서의 높이  $H_C$ 는 다음의 식으로 계산된다.

$$H_C = R - \sqrt{R'^2 - r^2} = R - \sqrt{R^2 - R_{\text{eff},C}^2} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터  $P$  점에서의 유효 인선 반경 (effective cutter radius)  $R_{\text{eff},C}$ 은 식 (4)와 같이 계산되며,

$$R_{\text{eff},C} = \frac{f_t}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2r}{f_t}\right)^2} \quad (4)$$

유효 인선 반경비(effective cutter radius ratio)  $\tau_{\text{Reff}}$ 는 다음과 같다.

$$\tau_{\text{Reff},C} = \frac{R_{\text{eff},C}}{f_t} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + (2\tau_r)^2} \quad (5)$$

따라서, 구면 근사 모델에서 능선의 궤적  $\psi_C$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\psi_C = \begin{bmatrix} x_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm r \\ H_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } H_C = R - \sqrt{R^2 - R_{\text{eff},C}^2}$$

또한, 반경이  $r$ 인 인선에 의해 생기는 커스프 높이  $H_S$ 는 식 (7)과 같으므로,  $\tau_{\text{Reff},S}$ 와  $\tau_r$ 의 관계는 다음 식 (8)으로 표현된다.

$$H_S = R - \sqrt{R^2 - r^2} = R - \sqrt{R^2 - R_{\text{eff},S}^2} \quad (7)$$

$$\tau_{\text{Reff},S} = \frac{R_{\text{eff},S}}{f_t} = \tau_r \quad (8)$$

## 2.2 원판 근사 모델

구면 근사 모델은 볼랜드밀 가공면의 기하학적 표면 거칠기를 예측하기 위하여 전통적으로 사용되어 온 방법으로 최대 표면 거칠기를 매우 간단하게 계산할 수 있으며, 가공 속도가 경로 간격에 비하여 상대적으로 작은 가공 조건에서 그 예측 값은 실제 가공 결과를 잘 반영하였다. 그러나, 최근 공작기계와 공구, 가공 기술의 발전에 힘입어 날당 이송 속도를 경로 간격까지 높이는 고효율 가공이 점차 보편화 되었으며, 이러한 고효율 가공에서의 표면 거칠기는 기존의 표면 거칠기 모델로 예측할 수 없다.<sup>8,11</sup>

원판 근사 모델은 볼랜드밀 가공 공정을 더욱 정밀하게 해석하기 위하여 인선의 형상을 고려한 모델로서 정밀한 절삭력 예측을 위해 많이 사용되었다. 일반적으로 볼랜드밀은 반구면 위에 꼬임각(helix angle)을 가진 인선이 붙어 있는 형상을 지닌다. 그러나, 정삭에서는 절입 두께가 매우 작고 2 날을 가진 공구를 사용하는 것이 보편적이므로, 볼랜드밀 인선의 윤곽선은 Fig. 2(a)에서와 같이 원판 평면  $\Gamma$ 의 경계선으로 근사할 수 있다. 본 연구에서  $\Gamma$ 를 인선 평면(cutting-edge plane)이라 한다.

이 모델에서는 기존의 표면 거칠기 모델과 다

르게 공구 인선의 회전 운동과 공구 중심점의 병진 이동이 동시에 고려되며, 인선의 반경이  $r$  인 점  $P$ 의 3 차원 공간상의 궤적은 다음 식으로 표현된다.

$$\Phi_n = \begin{bmatrix} r \cos(\theta - (n-1)\pi) \\ -r \sin(\theta - (n-1)\pi) \\ R - \sqrt{R^2 - r^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \left(\frac{\theta}{\pi}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad n = 1, 2 \quad (9)$$

Fig. 2(b)는 식(3)으로 표현된 인선의 궤적을 그린 것으로 보는 바와 같이 공구 인선의 궤적은 트로코이드가 된다. 또한, 가공면의 잔여 절삭은 공

구 인선의 반경  $r$  과 이송 속도의 관계로부터 결정되며, 인선 궤적이 겹치지 않는 곳은 소재가 제거되지 못하고 잔여 절삭으로 남는다. 따라서, 공구 정점 부근에 공구 인선 반경이 상대적으로 작을수록 잔여 절삭량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 구면 근사 모델과 달리 공구 이송 방향의 왼쪽 보다 오른쪽에 많은 잔여 절삭량이 남는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 원판 근사 모델을 이용하여 공구 반경 5mm, 날당 이송 0.5mm/tooth, 경로 간격 0.5mm 인 조건에서 가공면을 예측한 그림이고, Fig. 3(b)는 동일한 조건에서 실제 가공된 표면의 사진이다.

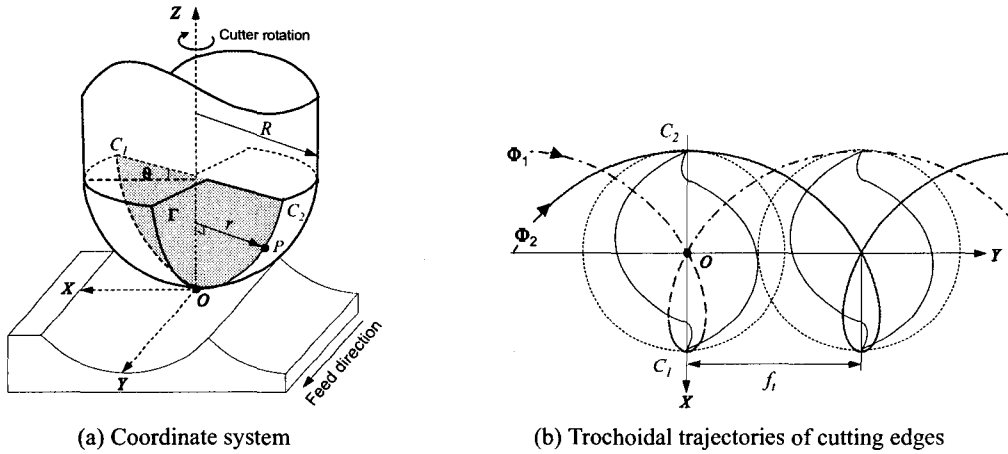


Fig. 2 Analysis of ball-end milling process of Disk-tool approximation model

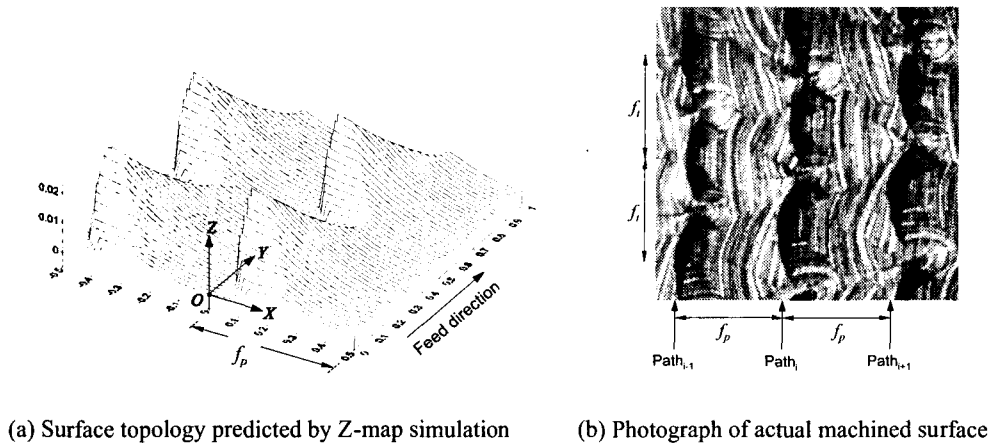


Fig. 3 Analysis of machined surface by Disk-tool approximation model

Fig. 1(a)와 비교하면 기존의 예측과 확연히 다른 것을 알 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 얻은 최대 표면 거칠기는 약  $25\mu\text{m}$  로 식 (1)에 의하여 계산된 최대 표면 거칠기  $12.5\mu\text{m}$  와 2 배의 차이를 보였다. 또한, Fig. 3(b)의 실 가공면에서 측정된 최대 표면 거칠기는  $23.5\mu\text{m}$  로 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

### 3. 능선의 수학적 해석

#### 3.1 볼랜드밀 가공의 표면 창성 원리

원판 근사 모델을 이용하면 기존의 표면 거칠기 모델에 비하여 가공면의 형상(texture)을 보다 정밀하게 예측할 수 있으나, 최대 표면 거칠기 등을 알기 위해서는 가공 조건에 따라 시뮬레이션을 수행하여야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 볼랜드밀 가공 오차를 보다 쉽고 정밀하게 예측하기 위하여 원판 근사법을 기초로 잔여 절삭을 예측할 수 있는 기하학적 특징선을 해석적으로 구하고 이를 이용하여 볼랜드밀 가공에서의 표면 조도를 예측하였다.

밀링 가공면의 최종 형상은 각 단위 가공 경

로에서 생긴 가공면의 중첩으로 이루어진다. 따라서, 볼랜드밀 가공 표면의 최종 잔여 절삭량을 예측하기 위해서는 하나의 가공 경로에서 생성되는 가공면의 창성 원리를 이해할 필요가 있다.

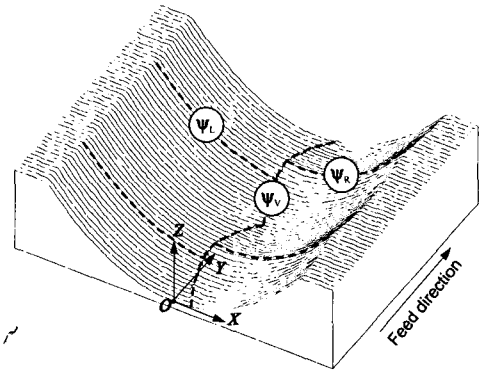


Fig. 4 Surface topography and ridges generated by single cutting path

Table 1 Sequence of surface generation

Rotation angle ( $\theta$ )	Tool center position	$C_1$	$C_2$
$[-\pi/2 \sim 0]$	$[E_{-1} \sim E_0]$	Generate machined surface $RS_1$	
$[0 \sim \pi/2]$	$[E_0 \sim E_1]$	Generate ridge $\psi_{V,1L}$	Generate machined surface $LS_1$
$[\pi/2 \sim \pi]$	$[E_1 \sim E_2]$	Generate machined surface $LS_2$ Generate ridge $\psi_{L,1}$	Generate machined surface $RS_3$ Generate ridge $\psi_{V,1U}$
$[\pi \sim 3\pi/2]$	$[E_2 \sim E_3]$	Generate machined surface $LS_3$	Generate machined surface $RS_2$ Generate ridge $\psi_{V,2L}, \psi_{R,1}$
$[3\pi/2 \sim 2\pi]$	$[E_3 \sim E_4]$	Generate ridge $\psi_{V,2U}$	Generate machined surface $LS_4$ Generate ridge $\psi_{L,2}$
$[2\pi \sim 5\pi/2]$	$[E_4 \sim E_5]$	Generate machined surface $RS_4$ Generate ridge $\psi_{R,2}$	

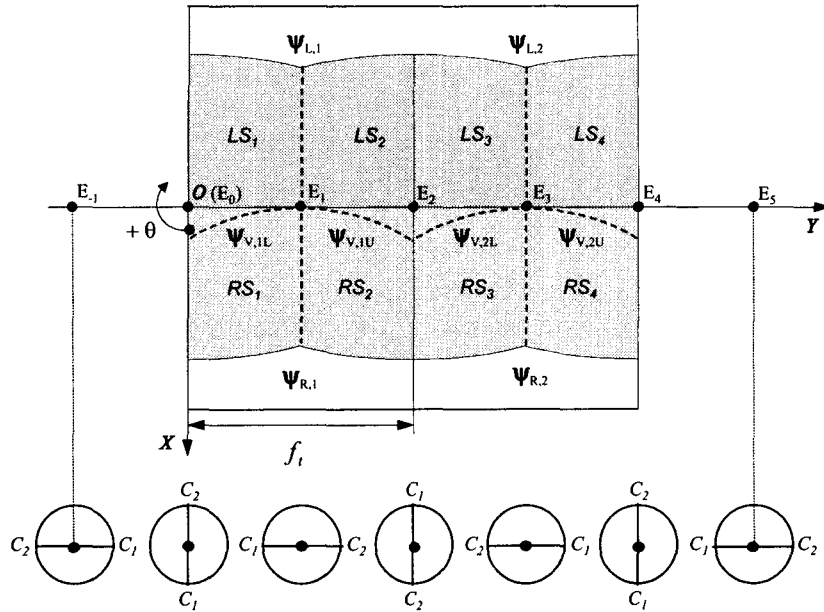


Fig. 5 Surface generation mechanism of ball-end milling process (top view)

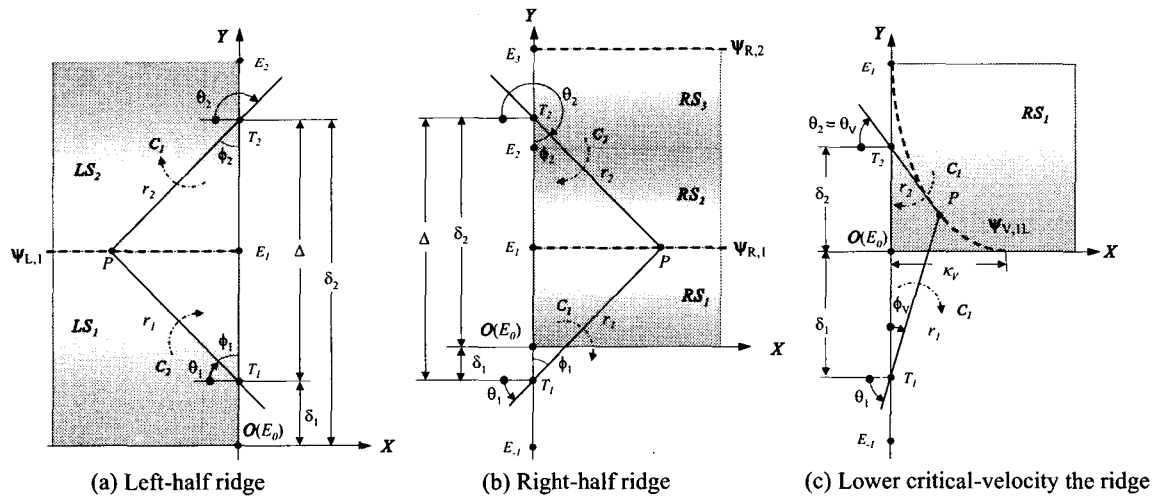


Fig. 6 Characteristic lines of cut remainder

Fig. 4 는 가공 시뮬레이션을 통해 예측된 단일 가공 경로에서의 가공면 형상과 세 가지 특징선을 보여 준다. 앞서 기술한 바와 같이 기존의 표면 거칠기 예측 모델에서 특징선은 최대 잔여 절삭 단면  $\Pi$  에 존재하는 원호로 가정되었으나, 원판 근사 모델에서는 최대 잔여 절삭 단면에 존재하는

두 능선과 이송 방향을 따라 나타나는 하나의 능선을 볼 수 있으며, 본 연구에서는 이들의 위치와 생성 원리로부터 각각을 ‘왼쪽 능선( $\psi_L$ )’, ‘오른쪽 능선( $\psi_R$ )’, ‘임계 속도 능선( $\psi_V$ )’ 라 정의하였다.

Fig. 5 과 Table 1 은 공구의 중심의 이동 위치와 인선의 회전에 따라 가공면이 생성되는 순서를

정리한 것이다.

### 3.2 능선 궤적의 유도

#### 3.2.1 왼쪽 능선 ( $\psi_L$ )

Fig. 5에서 첫 번째 왼쪽 능선  $\psi_{L,1}$ 은 공구 중심이  $E_0$ 에서  $E_1$ 까지 이동하면서 인선  $C_2$ 이 회전하며 가공한 면  $LS_1$ 과 공구 중심이  $E_1$ 에서부터  $E_2$ 까지 이동하면서 인선  $C_1$ 에 의하여 생성된 면  $LS_2$ 의 교선이다. (Table 1)

따라서, 첫 번째 왼쪽 능선의 창성 원리는 Fig. 6(a)와 같이 도식화 할 수 있으며, 능선 위의 임의의 점  $P(x_p, y_p, z_p)$ 에서 다음의 식이 만족된다.

$$\begin{aligned} x_p &= r_1 \sin \phi_1 = r_2 \sin \phi_2 \\ z_p &= R - \sqrt{R^2 - r_1^2} = R - \sqrt{R^2 - r_2^2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 점  $P$ 에 작용하는 인선  $C_2$ 와  $C_1$ 의 인선 반경이다.

식 (10)으로부터  $r_1$ 과  $r_2$ ,  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 의 관계는 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{eff,L} &= r_1 = r_2 \\ \phi_L &= \phi_1 = \phi_2 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, Fig. 6(a)에서 삼각형  $PT_1T_2$ 는 이등변 삼각형이 됨을 알 수 있고, 변  $\overline{T_1T_2}$ 의 길이  $\Delta$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta &= \delta_2 - \delta_1 = f_i \left( \frac{\theta_2}{\pi} \right) - f_i \left( \frac{\theta_1}{\pi} \right) = f_i \left( \frac{\phi_1 + \phi_2}{\pi} \right) \\ &= 2f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

또한, 왼쪽 능선의 유효 인선 반경  $R_{eff,L}$ 은 날당 이송  $f_i$ 와 공구 회전각을 나타내는 매개 변수  $\phi_L$ 의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{eff,L} &= \frac{\Delta}{2} \sec \phi_L = f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \sec \phi_L \\ 0 &\leq R_{eff,L} \leq R, \quad 0 \leq \phi_L \end{aligned} \quad (13)$$

이상에서, 왼쪽 가공면의 잔여 절삭 높이를 나타내는 왼쪽 능선  $\psi_L$ 은 다음 식으로 유도된다.

$$\psi_L = \begin{bmatrix} x_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \tan \phi_L \\ H_L \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,  $H_L = R - \sqrt{R^2 - R_{eff,L}^2}$

#### 3.2.2 오른쪽 능선 ( $\psi_R$ )

특징선  $\psi_{R,1}$ 은 가공면  $RS_1$ 과 가공면  $RS_2$ 의 교선이며, 각각의 생성 원리는 Table 1에 정리되어 있다. 따라서, 오른쪽 능선의 궤적식  $\psi_R$ 은 Fig. 6(b)와 같은 표면 창성 원리로부터 유도할 수 있다.

앞서의 경우와 마찬가지로 능선 위의 임의의 점  $P$ 에서 다음의 식이 만족되며,

$$\begin{aligned} R_{eff,R} &= r_1 = r_2 \\ \phi_R &= \phi_1 = \phi_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$\Delta$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta &= \delta_2 + \delta_1 = f_i \left( \frac{\theta_2}{\pi} \right) + f_i \left( \frac{\theta_1}{\pi} \right) = f_i \left( \frac{2\pi - (\phi_1 + \phi_2)}{\pi} \right) \\ &= 2f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)으로부터 오른쪽 능선의 유효 인선 반경  $R_{eff,R}$ 은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{eff,R} &= \frac{\Delta}{2} \sec \phi_R = f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \sec \phi_R \\ 0 &\leq R_{eff,R} \leq R, \quad 0 \leq \phi_R \end{aligned} \quad (17)$$

따라서, 오른쪽 능선의 궤적  $\psi_R$ 은 다음과 같다.

$$\psi_R = \begin{bmatrix} x_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \tan \phi_R \\ H_R \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,  $H_R = R - \sqrt{R^2 - R_{eff,R}^2}$

### 3.2.3 임계 속도 능선 ( $\psi_V$ )

임계 속도 능선은 공구의 이송 속도가 인선의 회전에 의한 속도보다 상대적으로 빠른 곳에 형성되며, 첫 번째 아래쪽 임계 속도 능선  $\psi_{V,L1}$  은 공구의 중심이  $E_{-1}$  에서부터  $E_0$  까지 이동하는 동안 가공된 면  $RS_1$  과 공구가  $E_0$  에서부터  $E_1$  까지 이동하면서 회전한 인선 평면  $\Gamma$  의 교선이다.

Fig. 6(c)는  $\psi_{V,L1}$  의 생성 원리를 나타내며, 능선의 한 점  $P(x_p, y_p, z_p)$  에서 식 (19)가 만족된다.

$$\begin{aligned} x_p &= r_1 \sin \phi_V = r_2 \cos \theta_V & (19) \\ y_p &= r_1 \cos \phi_V - f_t \left( \frac{1}{2} - \frac{\phi_V}{\pi} \right) = -r_2 \sin \theta_V + f_t \left( \frac{\theta_V}{\pi} \right) \end{aligned}$$

또한, 점  $P$  에서 인선 평면  $\Gamma$  와 능선이 접하므로,  $r_2$  과  $\theta_V$  의 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial y_p / \partial \theta_V}{\partial x_p / \partial \theta_V} = \frac{-r_2 \cos \theta_V + \frac{f_t}{\pi}}{-r_2 \sin \theta_V} = -\tan \theta_V \quad (20)$$

식 (20)을 정리하면  $r_2$  를 얻을 수 있다.

$$r_2 = \frac{f_t}{\pi} \cos \theta_V \quad (21)$$

따라서, 식 (19)와 식 (21)을 연립하면 임계 속도 능선의 유효 인선 반경  $R_{eff,V}$  는 다음 식 (22)로 계산된다. 또한,  $\theta_V$  와  $\phi_V$  의 관계는 식 (23)으로 정리되므로, 이를 수치 해석적으로 풀면  $R_{eff,V}$  의 값을 구할 수 있다.

$$R_{eff,V} = r_1 = \frac{f_t \cos^2 \theta_V}{\pi \sin \phi_V} \quad (22)$$

$$\phi_V - \theta_V + \cos^2 \theta_V \cot \phi_V + \sin \theta_V \cos \theta_V = \frac{\pi}{2} \quad (23)$$

$$0 \leq \phi_V, \theta_V \leq \pi/2$$

또한, 식 (22)로부터 임계 속도 능선은 공구 인선의 반경이  $f_t/\pi$  보다 작은 공구 정점 부근의 인선들에 의해 만들어 지는 것을 알 수 있다. 따라서, Fig. 6(c)에서 임계 속도 능선의 폭  $\kappa_V$  는  $f_t/\pi$  이다.

이상에서, 아래쪽 임계 속도 능선 식  $\psi_{V,L}$  은 다음 식 (24)와 같이 쓸 수 있으며, 위쪽 임계 속도 능선  $\psi_{V,U}$  는  $\psi_{V,L}$  와 기하학적 대칭을 이루므로 식 (25)로 표현된다.

$$\psi_{V,L} = \begin{bmatrix} x_{V,L} \\ y_{V,L} \\ z_{V,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_t}{\pi} \cos^2 \theta_V \\ \frac{f_t}{\pi} (\theta_V - \sin \theta_V \cos \theta_V) \\ H_V \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\text{여기서, } H_V = R - \sqrt{R^2 - R_{eff,V}^2}$$

$$\psi_{V,U} = \begin{bmatrix} x_{V,U} \\ y_{V,U} \\ z_{V,U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_t}{\pi} \cos^2 \theta_V \\ f_t - \frac{f_t}{\pi} (\theta_V - \sin \theta_V \cos \theta_V) \\ H_V \end{bmatrix} \quad (25)$$

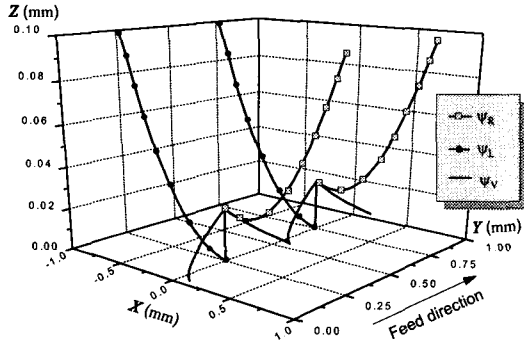
## 4. 예측 결과 및 고찰

Fig. 7(a)는 공구 반경이 5mm 이고, 날당 이송 0.5mm/tooth 인 경우에 예측된 잔여 절삭의 능선을 보여 주고 있으며, Fig. 7(b)는 최대 잔여 절삭 단면  $\Pi$  에서 예측된 단면 형상과 Z-map 시뮬레이션 및 기존의 예측법으로 계산된 단면 모양을 비교한 것이다. 보는 바와 같이, 기술된 해석법으로 예측한 왼쪽 능선과 오른쪽 능선은 시뮬레이션으로 계산한 궤적과 매우 잘 일치한다. 따라서, 본 연구에서의 해석이 불연드밀 가공면을 잘 추정한다고 할 수 있다.

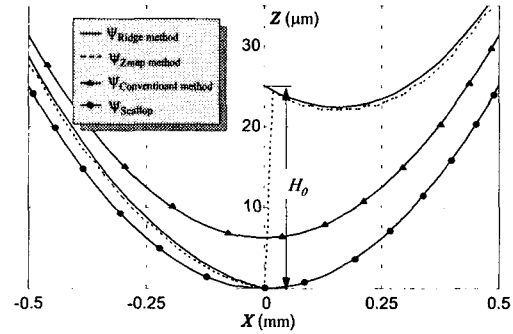
또한, 능선 궤적법으로 구한 두 능선  $\psi_L, \psi_R$  는 기존의 거칠기 예측 모델과 다르게 공구 중심 축에서 서로 만나지 않으며, 공구 중심 부근의 잔여 절삭 높이  $H_0$  는 식 (18)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$H_0 = R - \sqrt{R^2 - f_t^2} \quad (26)$$





(a) Predicted trajectories of ridges



(b) Expected profiles of cut remainder  
(in maximum cut remainder section)

Fig. 7 Analysis of cut remainder by Ridge method ( $R=5\text{mm}$ ,  $f_t=0.5\text{mm}$ )

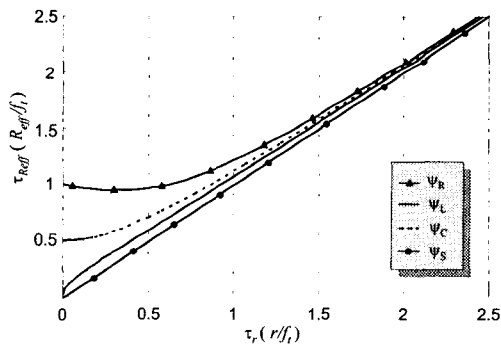


Fig. 8 Comparison of effective cutter radius ( $R_{eff}$ )

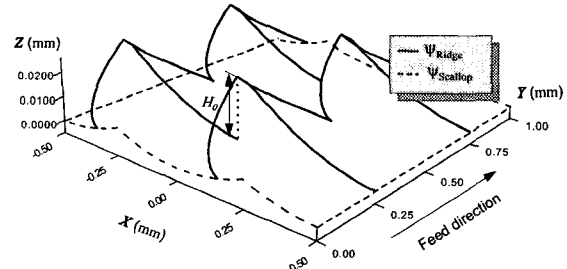


Fig. 9 Surface texture predicted by Ridge method

Fig. 8 는 단일 가공 경로에 의해 생성된 가공면에서 공구 중심으로부터의 거리  $r$  과 능선을 형성하는 유효 절삭 반경  $R_{eff}$  의 관계를 표시한 것이다. 그림에서  $\tau_r$  의 값이 증가할수록 기존의 거칠기 모델에서 계산한 잔여 절삭 높이가 능선법으로 예측한 값에 가까워 지는 것을 알 수 있다. 따라서, 공구 이송 속도가 경로 간격에 비해 상대적으로 작을 경우 가공면의 최대 표면 거칠기 및 형상(texture)는 구면 근사 모델로 예측할 수 있다. 그러나, 근래에 주로 사용되는 고이송 가공 조건에서는 기존의 구면 근사법으로 가공면을 예측하기 어렵다.

Fig. 9 는 예측된 능선을 이용하여 공구 반경 5mm, 날당 이송 0.5mm/tooth, 경로 간격 0.5mm 인 조건에서 가공의 형상을 예측한 것이다. 보는 바와 같이 날당 이송과 경로 간격이 동일한 조건에

서 최대 표면 거칠기는 공구 중심 부근의 잔여 절삭 높이  $H_0$  와 같으며, 주어진 가공 조건에서 식 (26)으로 계산된 최대 표면 거칠기는  $25\mu\text{m}$  로 앞서 Z-map 을 이용한 시뮬레이션에서 예측된 값과 동일하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 볼랜드밀 가공면을 해석하는 새로운 방법으로 ‘능선 궤적법’을 제시하였다.

이를 위해 원판 근사 모델을 기초로 한 볼랜드밀 가공의 표면 창성 원리로부터 가공면의 잔여 절삭을 대표하는 세 가지 ‘능선’을 정의하고, 각각의 궤적식을 해석적으로 유도하였다. 능선의 방정식은 날당 이송과 인선의 회전각 및 공구 반경의

함수로 유도되었으며, 시뮬레이션을 통해 계산된 잔여 절삭 단면 형상과 제시된 예측법으로 복원된 단면 모양의 비교를 통해 본 연구에서의 해석이 볼엔드밀 가공 공정을 잘 반영함을 알 수 있었다. 또한, 공구의 이송 속도 및 인선 반경에 따른 유효 인선 반경의 비교를 통해 제시한 방법이 기존의 구면 근사 모델에 비해 다양한 가공 조건에서 기하학적 잔여절삭을 정밀하게 예측할 수 있음을 보였다.

### 참고문헌

1. Smith, S. and Tlusty, J., "An overview of modeling and simulation of milling process," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, No. 2, pp.169-175, 1991.
2. Tlusty, J., "Analysis of state of research in cutting dynamics," Anals of CIRP, Vol. 27, No. 2, pp.583-589, 1978.
3. Yang, M. Y. and Park, H. D., "The prediction of cutting force in ball-end milling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 31, No. 1, pp.45-54, 1991.
4. Doo, S., Hong, J. W. and Suh, N. S., "A study on the cutting force and machining error on the inclined plane in ball-end milling," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 112-119, 2001.
5. Loney, G. C. and Ozsoy, T. M., "NC machining of free form surfaces," Computer Aided Design, 19(2), pp. 85-90, 1987.
6. Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Sculptured surface machining - Theory and applications," Kluwer Academic Publishers, 1998.
7. Miyazawa, S. and Takada, K., "Micro milling of three-dimensional surface," Journal of Japan Society for Precision and Engineering, Vol. 47, No. 2, pp. 94-99, 1981.
8. Naito, K., Ogo, K., et al., "Development of ball end milling for fine high-efficiency finishing," International Journal of Japan Society for Precision and Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 105-110, 1994.
9. Kim, B. H. and Chu, C. N., "Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 179-188, 1994.
10. Kim, B. H. and Chu, C. N., "Texture prediction of milled surface using texture superposition method," Computer-Aided Design, Vol. 31, No. 3, pp. 485-484, 1999.
11. Koreta, N., Egawa, T., et al., "Analysis of surface roughness generation by ball endmill machining," Journal of Japan Society for Precision and Engineering, Vol. 59, No. 9, pp. 129-134, 1993.