

# 기하학적 특징선을 이용한 밀링 가공면의 표면 조도 예측

정태성\*(한국과학기술원 대학원 기계공학과), 양민양(한국과학기술원 기계공학과)

## Prediction of the Machined Surface Roughness using Geometrical Characteristic Lines

T. S. Jung(Mechanical Eng. Dept. KAIST), M. Y. Yang(Mechanical Eng. Dept. KAIST)

### ABSTRACT

This paper presents the procedures for the evaluation of the maximum surface roughness and the shapes of the cut remainder employing the ridge method. The shapes and the heights of the cut remainder are estimated by overlapping adjacent ridges in consideration of the various machining parameters: the feedrate, the path interval. The maximum surface roughness in plane cutting modes are derived as a function of the maximum effective cutter radius,  $R_{eff,max}$ , and the path interval ratio,  $\tau_{fp}$ . The predicted results are compared with the values estimated by the conventional roughness model.

**Key Words** : Ridge method (능선 궤적법), Maximum surface roughness (최대 표면 거칠기), Surface texture(텍스처)

### 1. 서론

부적절한 가공 조건은 가공 시간을 증가시키고 가공 품질을 악화시키기 때문에 표면 품질을 만족시키는 효율적인 가공 조건을 선정하기 위하여 가공면 형상(texture, topology)과 표면조도 예측의 중요성도 커지게 되었다.<sup>1</sup> 전통적으로 볼엔드 밀 가공면의 기하학적 표면 거칠기는 커스프(cusp) 높이로 근사 되었으나<sup>2</sup> 최근 고이송 고효율 가공 조건이 일반적으로 쓰이면서 시뮬레이션을 통해 정밀한 표면조도를 예측하고 가공 조건을 최적화하고자 하는 연구가 있었다.<sup>3</sup>

Jung<sup>4</sup>은 시뮬레이션을 이용한 표면조도 예측의 단점을 보완하기 위하여 볼엔드밀 가공면의 특징선을 오른쪽 능선과 왼쪽 능선으로 정의하고 각각의 궤적 및 유효 인선 반경은 다음 식으로 유도하였다.

$$\psi_L = \begin{bmatrix} x_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \tan \phi_L \\ R - \sqrt{R^2 - R_{eff,L}^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $R_{eff,L} = f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \sec \phi_L$

$$\psi_R = \begin{bmatrix} x_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \tan \phi_R \\ R - \sqrt{R^2 - R_{eff,R}^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $R_{eff,R} = f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \sec \phi_R$

본 논문에서는 능선 궤적법을 이용하여 볼엔드 밀 가공에서 경로 간격과 이송 속도가 가공면의 형상 변화에 미치는 영향에 대해 고찰하고, 최대 표면 거칠기를 해석적으로 구하였다. 또한, 해석된 표면 조도를 기존의 표면 거칠기 예측 모델에 의해 계산된 것과 비교하였다.

본 연구에서 최대 표면 거칠기는 인접 경로의 능선을 중첩함으로써 예측되었으며, 경로 간격과 날당 이송의 비를 나타내는 경로 간격비  $\tau_{fp}$ 에 따라 달라지는 최대 유효 인선 반경  $R_{eff,max}$ 의 함수로 유도되었다.

### 2. 가공 표면의 예측

밀링 가공면 최종 형상은 하나의 가공 경로에서 생긴 가공 형상의 중첩이다. 따라서, 최대 잔여 절삭 단면에서의 특징선들을 경로 간격에 따라 중첩함으로써 최종 가공면의 표면조도를 예측할 수

있다.

실제 밀링 가공에서 가공 경로 사이에는 인선의 회전 위상차가 존재하며, 이로 인해 인접 경로의 최대 잔여 절삭 단면은 서로 일치하지 않는다. 위상차로 인해 가공면의 최대 표면 거칠기는 감소하는 것으로 알려져 있으며, 가공면의 표면 텍스처를 제어하기 위해 이를 이용한 연구가 있으나 일반적인 NC 가공에서 이를 제어하는 것은 매우 어렵다.<sup>5</sup> 또한, 기존의 표면 거칠기 예측 모델에서도 경로 사이의 위상차는 무시되었다. 따라서, 본 연구에서는 경로 사이에 위상차가 없는 것으로 가정하고 최대 표면 거칠기와 잔여 절삭 단면의 형상을 예측하였다.

또한, 정삭의 경우 일방향 가공이 보편적이므로 본 논문에서는 일방향 가공에서의 표면조도 예측에 관하여 다룬다.

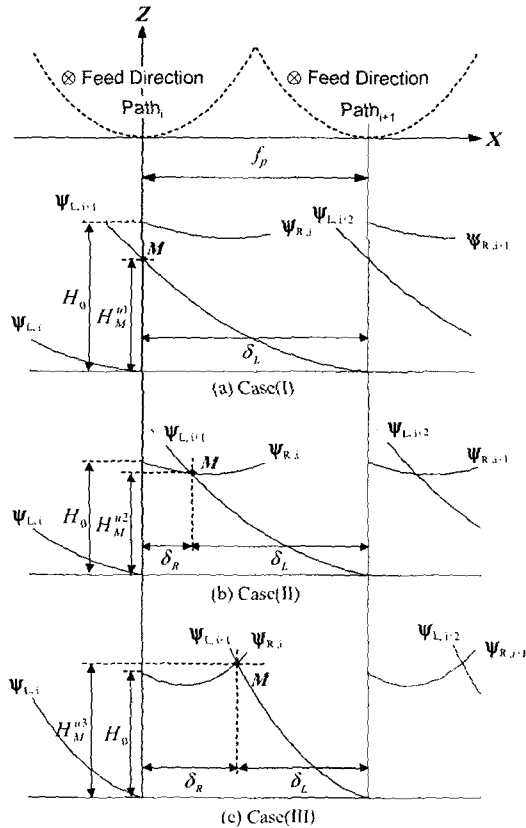


Fig.1 Expected shapes of cut remainder

일방향 가공에서는 경로 사이의 가공 방향이 변하지 않으므로 잔여 절삭 단면의 오른쪽 능선  $\psi_R$ 과 왼쪽 능선  $\psi_L$ 이 경로 간격  $f_p$  마다 주기적으로 나타난다. 따라서,  $i$  번째 가공 경로의 잔여 절삭은  $i$  번째 가공 경로의 오른쪽 능선  $\psi_{R,i}$ 와  $i+1$  번째 경로의 왼쪽 능선  $\psi_{L,i+1}$ 에 의해 결정된다.

일방향 가공에서 최대 표면 거칠기를 계산하는 기하학적 조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 경로 간격비 따라 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 본 연구에서는 경로 간격비  $\tau_p$ 를 경로 간격과 날당 이송의 비,  $f_p/f_i$ 로 정의 하였다.

Case (I):  $f_p \leq \tau_{pc}^u f_i$

Fig. 2(a)는 공구의 이송 속도가 경로 간격에 비하여 상대적으로 클 경우에 예측되는 최대 잔여 절삭 단면에서의 잔여 절삭 형상을 보여 준다. 이때, 인접한 오른쪽 능선  $\psi_{R,i}$ 과 왼쪽 능선  $\psi_{L,i+1}$ 은 서로 만나지 않으며, 최대 표면 거칠기  $H_{max}$ 는 수학적으로 인접 경로의 왼쪽 능선과 공구 축에 평행한 직선의 교점이다.

따라서, Fig. 1(a)에서 길이  $\delta_L$ 과 경로 간격  $f_p$ 은 다음과 같은 관계를 가지며,

$$f_p = \delta_L = f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \tan \phi_L \quad (3)$$

이를 수치 해석적으로 풀어  $\phi_L$ 을 구하면 Case(I) 최대 유효 인선 반경  $R_{eff,max}^u$ 과 최대 표면 거칠기  $H_{max}^u$ 를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$H_{max}^u \approx H_M^u = R - \sqrt{R^2 - (R_{eff,max}^u)^2} \quad (4)$$

$$R_{eff,max}^u = R_{eff,M}^u = R_{eff,L} = f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \sec \phi_L \quad (5)$$

또한, 식 (4)와 식 (5)는 교점의 높이  $H_M^u$ 가 중심점의 잔여 절삭 높이  $H_0$ 보다 작은 경우에 유효하므로 일방향 가공에서 Case(I)의 기하학적 가정은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_M^u \leq H_0 = R - \sqrt{R^2 - f_i^2} \quad (6)$$

따라서, 식 (5)와 식 (6)으로부터 일방향 가공의 Case(I) 유효한 입계 경로 간격  $f_{pc}^{u1}$  은 다음과 같이 구해 진다.

$$R_{eff,Mc}^{u1} = f_i = f_i \left( \frac{\phi_{Lc}}{\pi} \right) \sec \phi_{Lc} \quad (7)$$

$$f_{pc}^{u1} = \delta_{Lc} = f_i \left( \frac{\phi_{Lc}}{\pi} \right) \tan \phi_{Lc} = \tau_{ipc,L} f_i = \tau_{ipc}^{u1} f_i$$

식 (7)을 풀면 일방향 가공의 Case(I)을 만족하는 입계 경로 간격비  $\tau_{ipc}^{u1}$  는 약 0.9262 임을 알 수 있다. 따라서, Fig. 2(a)는 경로 간격이  $f_p$  가  $0.9262 f_i$  보다 작은 경우에 해당된다.

$$\text{Case (II)} : \tau_{ipc}^{u1} f_i \leq f_p \leq \tau_{ipc}^{u2} f_i$$

일방향 가공에서 최대 표면 거칠기가 결정되는 두 번째 기하학적 조건은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 인접한 두 능선의 교점에서 만들어 지는 잔여 절삭 높이  $H_M^{u2}$  가 중심점의 잔여 절삭 높이  $H_0$  보다 낮은 경우이다. 따라서, 최대 표면 거칠기  $H_{max}^{u2}$  는 중심점의 잔여 절삭 높이  $H_0$  와 같으며 최대 유효 인선 반경  $R_{eff,max}^{u2}$  는 다음의 식으로 표현된다.

$$H_{max}^{u2} = H_0 = R - \sqrt{R^2 - f_i^2} \quad (8)$$

$$R_{eff,max}^{u2} = f_i \quad (9)$$

한편, 오른쪽 능선과 왼쪽 능선이 만나는 점 M에서 다음 식이 만족되므로,

$$f_p = \delta_R + \delta_L \quad (10)$$

$$R_{eff,M}^{u2} = R_{eff,R} = R_{eff,L}$$

$H_M^{u2} \leq H_0$  인 기하학적 가정으로부터, 두 번째 경우의 입계 경로 간격을 구할 수 있다.

$$R_{eff,Mc}^{u2} = f_i = f_i \left( 1 - \frac{\phi_{Rc}}{\pi} \right) \sec \phi_{Rc} = f_i \left( \frac{\phi_{Lc}}{\pi} \right) \sec \phi_{Lc} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_{pc}^{u2} &= \delta_{Rc} + \delta_{Lc} \\ &= f_i \left( 1 - \frac{\phi_{Rc}}{\pi} \right) \tan \phi_{Rc} + f_i \left( \frac{\phi_{Lc}}{\pi} \right) \tan \phi_{Lc} \quad (12) \\ &= \tau_{ipc,R} f_i + \tau_{ipc,L} f_i \\ &= \tau_{ipc}^{u2} f_i \end{aligned}$$

식 (11)과 식 (12)를 풀면  $\tau_{ipc,R}$  는 약 0.6133 이며,  $\tau_{ipc,L}$  는 앞 절에서 계산되었다. 따라서, 일방향 가공의 Case(II) 입계 경로 간격비는  $\tau_{ipc}^{u2}$  는 1.5395 이며, Fig. 2(b)는  $0.9262 f_i \leq f_p \leq 1.5395 f_i$  인 가공 조건 하에서 유효하다.

$$\text{Case (III)} : \tau_{ipc}^{u2} f_i \leq f_p$$

일방향 가공에서 생각할 수 있는 마지막 기하학적 조건은 Fig. 1(c)와 같으며, 경로 간격이 날당 이송에 비하여 상대적으로 큰 경우에 해당된다. 이때, 최대 잔여 절삭 높이는 인접한 두 능선이 만나는 점에서 계산되어 지며, 교점에서 다음 식을 만족한다.

$$f_p = \delta_R + \delta_L \quad (13)$$

$$R_{eff,M}^{u3} = R_{eff,R} = R_{eff,L} \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)는 각각 다음과 같이 쓸 수 있으므로,

$$f_p = f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \tan \phi_R + f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \tan \phi_L \quad (15)$$

$$f_i \left( 1 - \frac{\phi_R}{\pi} \right) \sec \phi_R = f_i \left( \frac{\phi_L}{\pi} \right) \sec \phi_L \quad (16)$$

이를 수치 해석적으로 풀어, Case(III)의 최대 유효 인선 반경  $R_{eff,max}^{u3}$  과 최대 표면 거칠기  $H_{max}^{u3}$  를 구할 수 있다.

$$R_{eff,max}^{u3} = R_{eff,M}^{u3} \quad (17)$$

$$H_{max}^{u3} = H_M^{u3} = R - \sqrt{R^2 - (R_{eff,max}^{u3})^2}$$

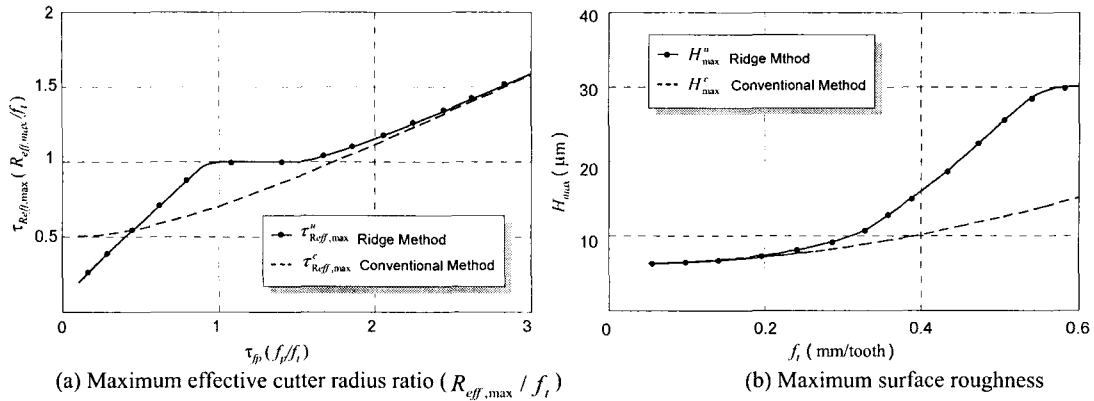


Fig. 2 Ridge method vs. Conventional method

### 3. 예측된 결과

Fig. 2(a)는 앞서 기술된 표면 거칠기 예측 식으로부터 볼랜드밀의 평면 가공에서 예측되는 최대 유효 인선 반경비  $\tau_{R_{eff,max}}$ 를 경로 간격비  $\tau_{fp}$ 에 따라 그린 것이며, Fig. 2(b)는 공구 반경이 5mm 이고 경로 간격이 0.5mm 인 경우에 공구의 이송 속도에 따라 예측되는 최대 표면 거칠기를 보여 준다.

예측된 최대 유효 인선 반경은 경로 간격비  $f_p / f_t$ 가 작을수록 기존의 예측식과 차이를 나타내었다. 따라서, 가공 속도가 빨라질 수록 기존의 예측식은 가공면의 표면 거칠기를 예측하기 어렵다.

### 4. 결론

본 논문에서는 능선 궤적법을 이용하여 평면 가공에서 가공면의 표면 거칠기를 예측함으로써 능선 궤적법이 기존의 방법보다 정밀하게 표면 조도를 예측할 수 있음을 보였다.

본 연구의 해석을 통해 볼랜드밀을 이용한 평면 가공에서 최대 표면 거칠기 예측식은 공구 반경, 날당 이송, 경로 간격비, 최대 유효 인선 반경  $R_{eff,max}$ 의 함수로 유도 되었으며, 예측된 최대 유효 인선 반경은 경로 간격비가 작을수록 기존의 예측식과 차이를 나타내었다. 따라서, 가공 조건 선정에서 경로 간격 및 이송 속도는 이를 고려하여 결정하여야 한다. 제안된 방법은 기존에 시뮬레이션에 의한 방법에 비하여 보다 쉽고 빠르게 임의의 가공 조건에서 표면 거칠기를 예측할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 이를 이용한 가공 경로 생성 및 가공

조건 선정 등 정밀 가공 기술의 향상이 기대 된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 주문적응형 쾌속제품개발 시스템 사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. 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.
2. Loney, G. C., and Ozsoy, T. M., "NC machining of free form surfaces," Computer Aided Design, 19(2), pp. 85-90, 1987.
3. 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.
4. 정태성, 최인휴, 양민양, "볼랜드밀 가공면의 기하학적 특징선 해석," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1148-1153, 2003.
5. Saito, A., Zhao, X., and Tsutsumi, M., "Control of surface texture of mold generated by ball-end milling," Journal of Japan Society for Precision and Engineering, Vol. 66, No. 3, pp. 419-423, 2000.