

<논 문>

## 표면조도 모델을 이용한 정면밀링에서의 최적 이송속도 선정

백대균\* · 고태조\*\* · 김희술\*\*

(1996년 1월 10일 접수)

### Determination of the Optimum Feed Rate by a Surface Roughness Model in a Face Milling Operation

Dae-Kyun Baek, Tae-Jo Ko and Hee-Sool Kim

**Key Words :** Optimum Feed Rate(최적 이송속도), Surface Roughness Model(표면조도 모델), Insert(인서트), Axial Run-Out(축방향 런아웃), Radial Run-Out(반경방향 런아웃)

#### Abstract

Determination of an optimal feed rate is valuable in the sense of the precision and efficient machining. In this regard, a new surface roughness model for the face milling operation that considered the radial and axial runouts of the inserts in the cutter body was developed. The validity of the model was proved through the cutting experiments, and the model is able to predict the real machined surface roughness exactly with the information of the insert runouts and the cutting conditions. From the estimated surface roughness value, the maximum feed rate that obtains a maximum material removal rate under the given surface roughness constraint can be selected by using a bisection method. Therefore, this method for optimizing the feed rate can be well applied to the using selection of the cutting condition during the NC data generation in CAM.

#### 1. 서 론

생산현장에서 무인화 및 자동화로 인하여 기계의 가격이 고가화됨에 따라 기계의 효율적 운용이 점점 더 중요하게 되었다. 특히 절삭가공에서는 절삭 효율을 높임과 동시에 제품의 정밀도도 향상되기를 원하는 배타적 요구가 높아지고 있다. 이러한 관점에서 최적 절삭조건 선정에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 대부분의 연구내용은 제품생산의 경제성을 높임과 동시에 정밀도를 향상시키려는 관점에서 목적함수를 결정하고 있다.

지금까지의 주된 연구를 살펴보면 Wu와 Ermer<sup>(1)</sup>가 선삭에서 미분방정식을 계산하여 두 개의 변수

에 대한 절삭조건 최적화를 연구하였고, Ermer<sup>(2)</sup>는 한 개 혹은 두 개의 부등제한조건을 고려하는 최적조건 선정에서 geometric programming을 사용하여 프로그램의 유연성을 보였다. Iwata 등<sup>(3)</sup>은 최대절삭력과 허용동력 그리고 안정영역의 제한조건을 확률적 계수로 치환하여 최적절삭조건을 찾았다. 또한 Friedman과 Tipnis<sup>(4)</sup>는 비용, 생산율 그리고 이윤율의 판정문제에 대하여 절삭률-공구수명(cutting rate-tool life)의 특성함수를 이용했을 때, 경제적 절삭조건은 R-T 곡선상에 위치한다고 주장하였다. 그러나 이제까지의 연구는 비교적 해석이 용이한 선삭에 관한 연구가 대부분이었고, 제한조건으로 사용된 표면조도는 실제 표면조도와 상당한 차이를 보여 정면밀링작업에 적용하는데 문제점이 많다.

일반적으로 절삭가공에서는 절삭속도를 빠르게

\*영남대학교 금형기술연구센터

\*\*회원, 영남대학교 기계공학과

하고 이송속도를 천천히 함으로써 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 또한 마지막 마무리가공에서 깨끗한 표면을 얻기위해 일반적으로 이송속도를 늦추어서 표면조도를 좋게하고 있다. 그러나 밀링가공에서 표면조도는 인서트 런아웃에 의하여 좌우되므로 최적의 이송속도를 찾아서 알맞은 표면조도를 얻고 절삭효율을 높이는 힘들다.

따라서 본 연구에서는 정면밀링가공에서 인서트 런아웃과 함께 커터의 반복회전에서 각 회전이 가공면에 미치는 영향을 고려한 표면조도 모델을 이용하여 최적 이송속도를 찾고자 한다. 또한 인서트 런아웃이 공작물의 이송속도가 변화함에 따라 공작물의 치수정밀도에 미치는 영향을 파악하여 가공품의 정밀도를 높이는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 이송방향 표면조도 모델

밀링작업에서 표면조도의 수학적 모델은 초기에는 인서트 런아웃을 고려하지 않고 표면조도 모델이 개발되었고, 그 후에 인서트 런아웃과 공구의 처짐을 고려한 표면조도 모델이 개발되었다.<sup>(15-10)</sup>

밀링작업에 있어서는 커터제작시의 가공오차와 인서트 규격의 오차로 인하여 축방향 인서트 런아웃(axial runout)과 반경방향 인서트 런아웃(radial runout)이 존재하게 되고, 축방향 인서트 런아웃은 절삭깊이를 변화시키고 반경방향의 인서트 런아웃은 날당이송을 변화시켜 표면조도를 변화시킨다.

정면밀링은 앞날과 후속하는 날의 상대적인 인서트 런아웃이 일정하지 않으므로, 절삭후 표면형상의 형성에 관여하는 날은 이송에 따라 다르게 나타난다. 표면형상을 시뮬레이션하기 위해  $i$ 번째 인서트에 런아웃이 존재하는 경우의 기하학적 관계는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.  $X$ 축은 이송의 진행방향을 나타내고  $Z$ 축은 공작물의 가공면에서 법선, 즉 주축방향을 나타낸다. 이 그림은 런아웃이 없을 때 절삭된 면을 기준면으로 하여 첫번째 인서트의 곡률반경의 중심을 지나는  $Z$ 축과 기준면이 만나는 점을 원점으로 하고, 이 점을 지나는  $X$ 축을 기준으로 도시하였다. 본 해석에서는 인서트 런아웃을 측정하여 평균값보다 큰 것은 양의 값으로 하고 평균값보다 작은 것은 음의 값으로 한다. 그림에서 보는 바와 같이  $i$ 번째 인서트의 반경방향 런아웃이  $\epsilon_r(i)$ , 축방향 런아웃이  $\epsilon_a(i)$ 일 때 인서트 곡선의 반경 중심은  $O$ 에서  $O'$ 로 이동하게 된

다. 여기서,  $z'$ 는  $i$ 번째 인서트가 런아웃이 없을 때 인서트의 곡률반경의 중심을 지나는 축을 나타낸다.  $i$ 번째 인서트의 궤적은  $A, P, Q, B$ 로 이루어지고,  $i+1$ 번째 날은 날당이송거리인  $f_i$ 만큼 이동한 위치에서 인서트 런아웃에 따라 궤적을 그리게 된다.

가공후의 표면형상은 다음과 같이 모델링할 수 있다. 먼저 표면형상의  $x$ 좌표는 커터날의 수를  $z_c$ , 커터의 순번을  $i$ , 데이터수를  $n$ 으로 나타낼 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta x = \frac{z_c \cdot f_i}{n}$$

$$x(i, j) = \Delta x \cdot j, \quad i = 1 \cdots z_c, \quad j = 1 \cdots n \quad (1)$$

여기서,  $x(i, j)$ 는  $i$ 번째 인서트의 절인선상에서 원점으로부터  $x$ 방향으로  $j$ 번째의 위치를 나타낸다. 또한  $\Delta x$ 는 생성하려는 데이터수  $n$ 에 따라 정해지는 이송방향의 증분치를 나타내는데 결국  $\Delta x$ 는 이송방향의 이론적인 표면조도 궤적의 resolution을 나타낸다.

인서트 곡률반경이  $r$ 이고, 커터의 리드각이  $\gamma_L$  일 때  $i$ 번째 인서트의 절인선과 인서트의 곡률이 만나는 교점을  $P$ 라고 할 때  $x$ 방향의 위치  $x(i, p)$ 와  $Z$ 방향의 위치  $z(i, p)$ 는 다음과 같다.

$$x(i, p) = -r \cos \gamma_L - \epsilon_r(i)$$

$$= \Delta x \cdot p$$

$$z(i, p) = r(1 - \sin \gamma_L) - \epsilon_a(i) \quad (2)$$

따라서 교점  $P$ 의  $x$ 좌표값  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = \frac{-r \cos \gamma_L - \epsilon_r(i)}{\Delta x} \quad (3)$$

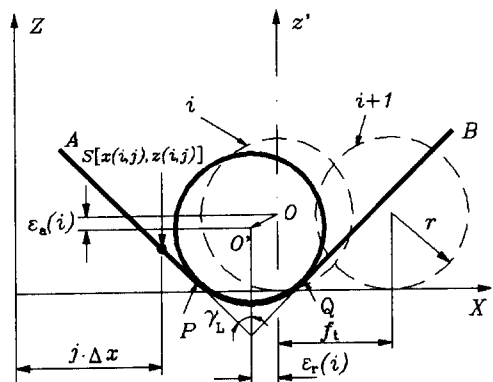


Fig. 1 Theoretical surface profile with run-out

교점  $Q$ 의  $x$ 방향의 위치  $x(i, q)$ 와  $z$ 방향의 위치  $z(i, q)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(i, q) &= r \sin \gamma_L - \varepsilon_r(i) \\ &= \Delta x \cdot q \\ z(i, q) &= r(1 - \cos \gamma_L) - \varepsilon_a(i) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 교점  $Q$ 의  $x$ 좌표값  $q$ 는 다음과 같다.

$$q = \frac{r \sin \gamma_L - \varepsilon_r(i)}{\Delta x} \quad (5)$$

Fig. 1에서 보는 바와 같이  $A$ 와  $P$  사이의 임의점  $S$ 에서  $Z$ 방향의 위치  $z(i, j)$ 는 식 (2)를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} z(i, j) &= a_1 \cdot x(i, j) + b_1, \quad 1 \leq j < p \\ \text{여기서, } a_1 &= -\cot(\gamma_L) \\ b_1 &= z(i, p) - a_1 \cdot x(i, p) \end{aligned} \quad (6)$$

$P$ 와  $Q$  사이의 궤적은 반경이  $r$ 인 원의 방정식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} z(i, j) &= -\sqrt{r^2 - [x(i, j) + \varepsilon_r(i)]^2} - \varepsilon_a(i) + r, \\ p \leq j < q \end{aligned} \quad (7)$$

$Q$ 와  $B$  사이에서는 식 (2)를 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(i, j) &= a_2 \cdot x(i, j) + b_2, \quad q \leq j < n \\ \text{여기서, } a_2 &= \tan(\gamma_L) \\ b_2 &= z(i, q) - a_2 \cdot x(i, q) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (6)~(8)을 이용하여 각 날의 궤적을 계산할 수 있고, 이 궤적으로부터 피드방향의 표면형상을 시뮬레이션할 수 있다. 본 연구에서는 6개의 날을 사용하였으므로 커터가 1회전할 동안에는 6개의 궤적을 얻을 수 있고 2회전 3회전으로 확장하여 날의 궤적을 계속하여 얻을 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 시편은 기계구조용 압연강재(SS41)로 선택하였으며, 밀링머신과 커터, 인서트 및 실험장치의 제원은 Table 1과 같다. 정반위에 인서트 런아웃을 측정할 수 있는 지그를 설치하고 그위에 공구를 고정하여 dial indicator로 축방향과 반경방향의 인서트 런아웃을 측정하였다. 시편의 조도측정은 측정식 조도계를 사용하였는데 변위량에 비례하는 전압은 증폭기에서 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 마이크로 컴퓨터에 저장하였다. 표면조도계의 작동조건은 tracing속도 3.0 mm/sec, cut off값은 0.8 mm로 선정하였다.

### 4. 표면조도 시뮬레이션 및 실험결과

표면조도 모델의 타당성을 알아보기 위하여 표면형상을 시뮬레이션하고 절삭실험을 수행하여 측정식조도계로 표면조도를 측정하여 검증하였다. 인서

Table 1 Specification of experimental set-up

Milling machine	WMV-1100(1100×280) mm
Cutter	Korea tungsten M 115 SP 04 R/L-10
	Lead angle : 45°
	Diameter : 100 mm
Insert	SPGN 120304, 120308 P20
	Nose radius : 0.4 mm
Workpiece	130×77×45 mm
A/D converter	Conversion rate : 30 KHz
	Resolution : 12 bit
	Input range : ±10 V
Dial indicator	Mitutoyo 513
Surface roughness tester	Mitutoyo type EMD-R75C

**Table 2** Measured axial and radial run-out

(mm)

	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$
Axial run-out	-0.002	0.005	-0.005	0.002	-0.001	0.000
Radial run-out	-0.043	0.035	-0.015	0.015	0.005	0.005

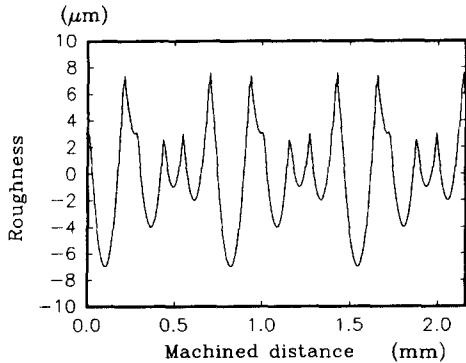
트 반경이 0.4 mm, 커터의 리드각이 45°이고 6개의 날을 가진 밀링커터에 다이얼 인디케이터(dial indicator)로 인서트 런아웃을 측정된 값이 Table 2와 같다. 주축의 회전속도 370 rpm, 이송속도 267 mm/min에서 Table 2의 인서트 런아웃으로 식 (6)~(8)을 이용하여 표면형상을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 2이다. Fig. 2는 커터가 3회전 하는 동안에 가공된 가공면의 형상을 나타내었는데 인서트 런아웃에 따라 표면형상이 불규칙함을 알 수 있다.

Fig. 3은 위의 절삭조건에서 절삭깊이를 1 mm로 하여 시편을 절삭하여 표면조도계로 표면조도를 측정된 결과이다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교하여 보면

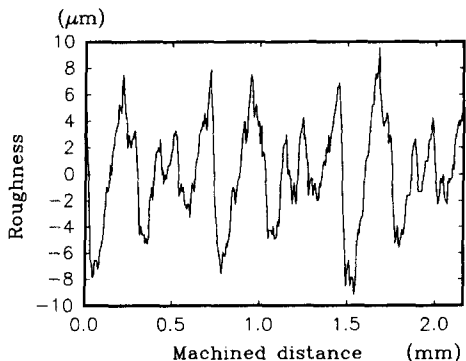
표면조도 모델로부터 시뮬레이션한 결과와 실험에서 측정된 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 이송속도의 변화에 따른 표면조도의 변화를 알아보기 위해 절삭속도는 370 rpm으로 고정시켜 두고 이송속도만을 변화시키면서 표면조도를 시뮬레이션하였다. 먼저 이송속도 127 mm/min에 대하여 첫번째 날과 네번째 날의 인서트 런아웃이 심한 경우 2회전할 동안 각 날의 궤적을 구하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 첫번째 날과 세번째 날은 절삭을 행하고도 가공후의 표면형상에 관여하지 않음을 알 수 있다. 그리고 커터가 1회전하여 형성된 가공면의 형상은 계속해서 반복하여 생성되지 않고, 그 다음의 커터의 회전에 의해 가공면의 형상이 변화됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 4와 동일한 조건에서 이송속도만 61 mm/min으로 변화시켜 커터가 4회전할 동안의 표면의 형상을 도시한 Fig. 5의 결과에서 더욱 분명히 나타난다.

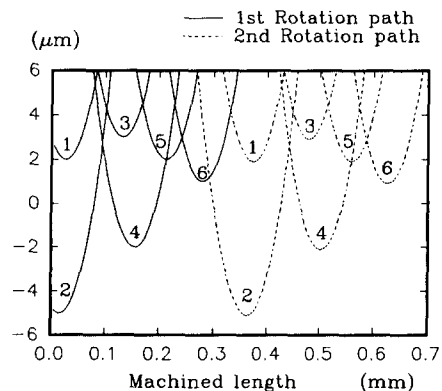
이송속도가 느려짐에 따라 가공면의 형상에 직접 관여하는 날의 수는 적어지고 커터의 그 다음 회전이 앞의 회전에 의해 생성된 가공면에 중첩하게 된다. 따라서 이송속도가 더욱 느려지게 되면 가공면을 형성하는 날의 수는 더 작아지고 어떤날은 절삭



**Fig. 2** The simulated surface profile (speed : 370 rpm, feed : 267 mm/min)



**Fig. 3** The measured surface profile (speed : 370 rpm, feed : 267 mm/min)



**Fig. 4** The simulated surface orbits (speed : 370 rpm, feed : 127 mm/min)

을 행하지도 않게 된다. 또한 2, 3회 뒤의 커터의 회전이 현재의 회전에서 형성된 가공면에 영향을 미치게 된다. 따라서 커터가 4회전하는 동안에 각

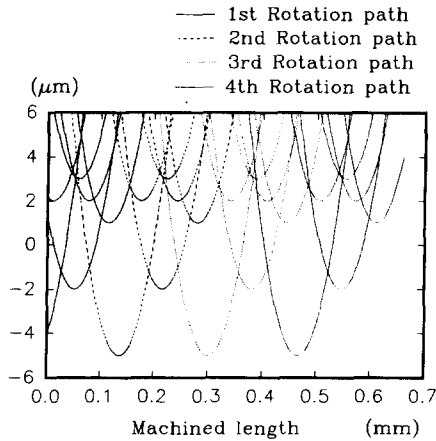


Fig. 5 The simulated surface orbits (speed : 370 rpm, feed : 61 mm/min)

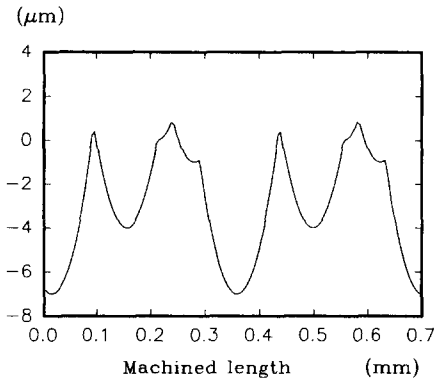


Fig. 6 The simulated surface profile (speed : 370 rpm, feed : 127 mm/min)

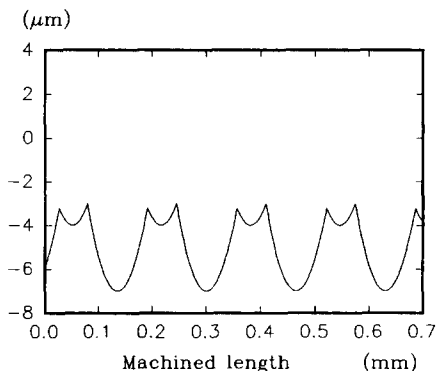


Fig. 7 The simulated surface profile (speed : 370 rpm, feed : 61 mm/min)

날의 궤적을 먼저 시뮬레이션하고, 커터가 1회전할 동안의 구간에서 최소값을 구하여 표면형상을 구할 수 있다. 즉, Fig. 6은 커터가 1회전할 동안의 거리에서 Fig. 4에 대하여 최소값을 구하여 표면형상을 시뮬레이션하고 커터가 2회전할 거리에 대하여 반복해서 나타낸 표면형상이다. 마찬가지로 Fig. 7은 커터가 1회전할 동안의 거리에서 Fig. 5에서 최소값을 구하여 표면형상을 시뮬레이션하고 커터가 4회전할 거리에 대하여 반복해서 나타낸 표면형상이다. Fig. 6과 7에서 보는 것과 같이 현재의 커터 회전에 의해 형성된 표면형상 모델은 그 다음 회전들이 미치는 영향을 고려하여 구했음을 알 수 있다.

Fig. 6을 살펴보면 6날 중에서 4날이 가공면의 형상에 관여하고 두날은 절삭을 행하고도 가공면의 형상에 전혀 관여하지 않는다. 또한 이송속도가 늦어지게 되면 가공면에 관여하는 날의 수는 Fig. 7과 같이 더욱 적어져서 두 날만이 가공면의 형성에 참여하게 된다. 최고거칠기를 계산하여 보면, Fig. 6의 경우는 약  $8 \mu\text{m}$ 이고 Fig. 7의 최고거칠기는 약  $4 \mu\text{m}$ 이다. 동일한 절삭조건에서 동일한 인서트 런아웃을 가진 커터로 절삭을 행할때 이송속도가 작게 되면 Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 것처럼 거칠기 중심선은 아래로 내려오게 되고 공작물의 치수를 결정하는 치수선도 내려오게 된다. Fig. 7은 Fig. 6보다 거칠기가  $4 \mu\text{m}$  좋아지게 되는데 이것은  $4 \mu\text{m}$  만큼 더 공작물의 윗 부분이 절삭된다는 것을 알 수 있다.

## 5. 최적 이송속도 선정

마지막 마무리 가공에서는 표면의 품질을 높이기 위하여 일반적으로 이송속도를 늦추어서 표면조도를 좋게 한다. 그러나 위에서 살펴본 것처럼 표면조도는 인서트 런아웃에 의하여 크게 좌우되므로 최적의 이송속도를 찾아서 알맞은 표면조도를 얻으면서 절삭효율을 높이는 것이 쉽지는 않다. 따라서 본 연구에서 제안되는 표면조도 모델을 다음과 같이 이용하게 되면 최적의 이송속도를 찾아서 목적에 합당한 표면조도를 얻으면서 동시에 절삭효율도 높일 수 있다.

4장의 절삭조건에서 인서트 런아웃이 없는 경우와 오차가 발생하는 경우에 대하여 날당이송을 변화시키면서 표면조도 모델을 이용하여 최고거칠기

를 구하여 Fig. 8에 각각 나타내었다.

그림에서 보는 것처럼 인서트 런아웃에 따라 표면조도값은 많은 차이를 보이게 되는데 최대거칠기는 모든 경우에 날당 이송속도가 작을 수록 표면조도는 좋아지게 된다. 따라서 수치해석 알고리즘인 Bisection method<sup>(11)</sup>에 표면조도 모델을 적용시키

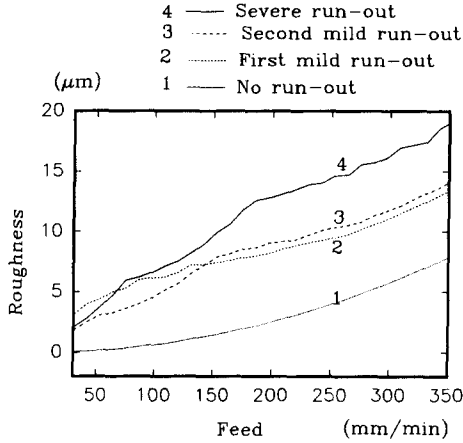


Fig. 8 Maximum surface roughness by run-out effect

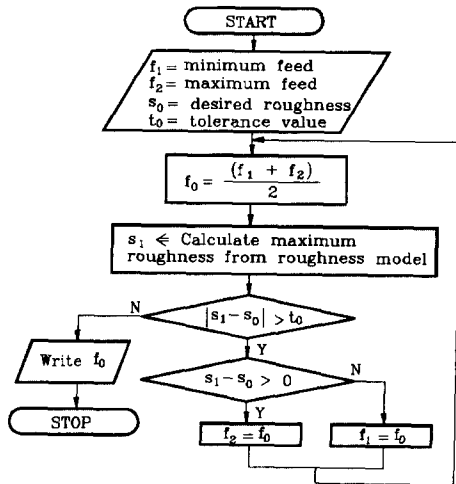


Fig. 9 Flow chart for determination of optimum feed rate

면 목적의 최대 거칠기를 얻을 수 있는 최적의 이송속도를 Fig. 9와 같이 찾을 수 있다.

그림에서 보는 것과 같이 주어진 이송속도에서 표면조도 모델로부터 구한 최고거칠기가 목표의 최고거칠기보다 작으면 이송속도가 큰 방향으로 탐색하고, 목표의 최고거칠기보다 크면 이송속도가 작은 방향으로 탐색한다. 이러한 방법으로 탐색하여 최고거칠기가 공차안에 들어가면 그 때의 이송속도를 출력한다.

본 연구에서는 최적 이송속도를 구하기 위하여 커터의 인서트 런아웃을 측정하여 50~500 mm/min의 이송속도 구간에서 Fig. 9와 같이 수치해석 알고리즘에 표면조도 모델을 적용하였다. 측정된 인서트 런아웃은 Table 3과 같다.

절삭속도 370 RPM에서 최고거칠기를 20 μm로 목표값을 정했을 때 공차(tolerance value) 0.001 μm에서 14번의 반복수행(iteration)으로 이송속도 376 mm/min을 구하였다. 수치해석을 통하여 얻은 최적의 이송속도는 376 mm/min이었으나, 본 실험에서 사용한 공작기계는 범용으로서 속도조절에 한

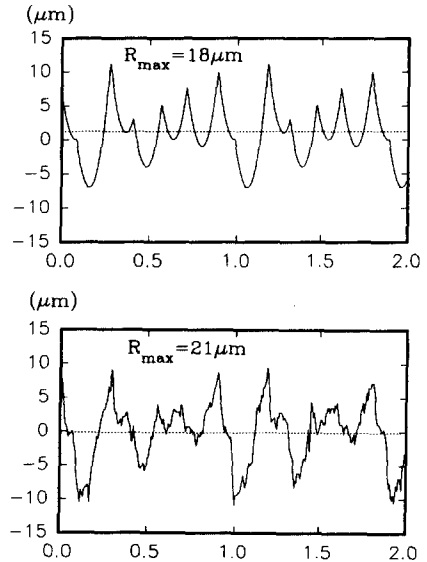


Fig. 10 The simulated and measured surface profile (speed : 370 rpm, feed : 342 mm/min)

Table 3 Measured axial and radial run-out

	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$
Axial run-out	-0.002	0.005	-0.003	0.002	-0.002	-0.001
Radial run-out	-0.032	0.036	-0.024	0.011	0.010	0.001

계가 있다. 따라서 가장 근접한 속도범위인 342 mm/min를 선정하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 모델의 타당성을 비교하여 보았다. Fig. 10(a)는 시뮬레이션 결과로서 최적이송속도가 6 mm/min 정도 늦추어졌기 때문에 처음에 선정한 20  $\mu\text{m}$ 보다 적은 18  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한 이송속도 342 mm/min에서 절삭가공을 하여 Fig. 10(b)에 나타내었는데 최고거칠기는 21  $\mu\text{m}$ 로 시뮬레이션 결과와는 3  $\mu\text{m}$ 의 차이가 났다.

또한, Fig. 10과 동일한 커터로 동일한 실험조건에서 목표 최고거칠기를 10  $\mu\text{m}$ 로 하였을 때 15번의 반복수행으로 최적 이송속도 164 (mm/min)를 구하였다. 본 연구에 사용된 밀링머신에 가장 가까운 이송속도인 187 (mm/min)에서 표면형상을 시뮬레이션하여 Fig. 11(a)에 나타내었고 실험을 수행하여 Fig. 11(b)에 나타내었다. 시뮬레이션의 최고거칠기는 11  $\mu\text{m}$ 이고 실험에서 구한 최고거칠기는 13  $\mu\text{m}$ 로 2  $\mu\text{m}$ 의 차이가 발생하였다. 이러한 차이의 주된 원인은 인서트 런아웃의 측정오차와 표면조도의 측정오차에 기인한다고 생각된다.

위의 두 경우의 조건을 비교하여 보면, Fig. 10의 이송속도에서는 6날 모두가 표면형상에 관여하고 있으나 Fig. 11의 이송속도에서는 4날만이 표면형상에 관여하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 것과 같이 이송속도 342 (mm/min)에서는

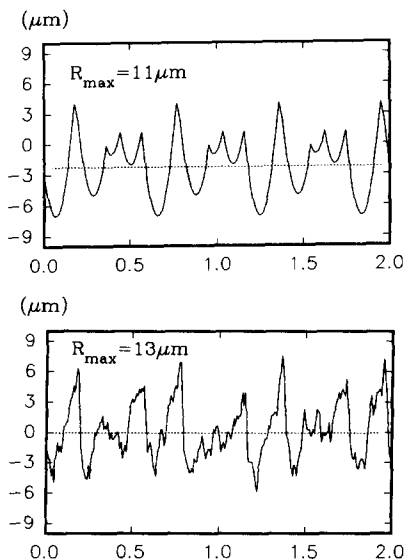


Fig. 11 The simulated and measured surface profile (speed : 370 rpm, feed : 187 mm/min)

거칠기 중심선이 0보다 위쪽에 나타나고, 이송속도 187 (mm/min)에서는 절삭면의 형상에 관여하는 날이 4날이므로 거칠기 중심선이 0보다 아래쪽에 나타났다. 실험에서 측정된 결과에서는 거칠기 중심선은 모두가 0 부근에 나타나고 있는데 표면조도계는 단지 가공면의 상대적인 높낮이만을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 표면조도 모델을 이용할 경우 거칠기 중심선과 치수선의 절대적인 위치를 알 수 있으므로 공작물의 기하학적 치수도 예측할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 개발한 표면조도 모델을 이용할 경우 표면조도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 목적의 표면조도를 구할 수 있는 최적의 절삭조건을 구하여 절삭능률의 향상을 기할 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

정면밀링작업에서 표면조도 모델을 이용하여 최적 이송속도를 찾고 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 밀링작업에서 표면조도는 인서트 런아웃에 따라 다양하게 변화하므로 본 연구에서는 절삭조건, 인서트 형상, 그리고 인서트 런아웃을 고려하여 표면조도 모델을 개발하였다.

(2) 표면조도 모델을 Bisection method에 적용하여 목적의 표면조도를 얻을 수 있는 최적의 이송속도를 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

(3) 표면조도계는 단지 가공면의 상대적인 높낮이만을 측정할 수 있으나, 표면조도 모델을 이용할 경우 거칠기 중심선과 치수선의 절대적인 위치를 알 수 있으므로 공작물의 기하학적 치수도 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 941-0000-064-2)의 일부로 수행되었습니다. 이에 감사사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Ermer, D. S. and Wu, S. M., 1967, "The Effect of Experimental Error on the Determination of

- the Optimum Metal Cutting Conditions," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 89, pp. 315~322.
- (2) Ermer, D. S., 1971, "Optimization of the Constrained Machining Economics Problem by Geometric Programming," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 93, pp. 1067~1072.
- (3) Iwata, K., Murotsu, Y., Iwatsubo, T. and Fujii, S., 1972, "A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 94, pp. 1099~1107.
- (4) Friedman, M. Y. and Tipnis, 1976, "Cutting Rate-Tool Life Characteristic Functions for Material Removal Processes," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 98, pp. 481~486.
- (5) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 104, Aug., pp. 272~278.
- (6) Sutherland, J. W. and Devor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 108, Nov., pp. 269~279.
- (7) You, S. J. and Eman, K. F., 1989, "Scallop Removal in Die Milling by Tertiary Cutter Motion," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 111, Aug., pp. 213~219.
- (8) Elbestawi, M. A., Ismail, F. and Yuen, K. M., 1994, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, Vol. 34, No. 2, pp. 245~255.
- (9) 김병희, 주종남, 1994, "자유곡면의 정밀가공을 위한 표면거칠기의 정량적해석에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 18, pp. 1483~1495.
- (10) 김병희, 주종남, 1995, "3축 머시닝센터와 치구를 이용한 금형의 정밀가공시의 특성해석," 한국정밀공학회지, 제12권, 제3호, pp. 119~129.
- (11) James, M. L., Smith, G. M. and Wolford, J. C., 1988, *Applied Numerical Methods for Digital Computation*, Harper & Row.