

## 절삭조건을 고려한 공작물의 표면조도 해석

김 성 겐\* · 김 석 현\*\*

### (Analysis on the Surface Roughness in Workpiece Considering Cutting Conditions)

Seong-Geol Kim \* · Seock-Hyun Kim \*\*

---

#### ABSTRACT

To satisfy the requirement for the precision and productivity of machine tools, we need the technique to predict the surface roughness of workpiece under various cutting conditions. The surface roughness is mainly influenced by the ideal roughness i. e., the roughness by feeding quantity and geometry of the tool. In this paper, the surface roughness is divided into three zones and the mathematical models of the three zones are obtained, in consideration of the feeding conditions and tool geometry. Using the mathematical models, we developed a program to calculate the maximum feeding quantity satisfying the required surface roughness of the workpiece. The program is used to calculate the maximum feed for two kinds of the bites used under the real cutting condition.

---

#### 1. 서 론

현재 세계 각국은 날로 심화되는 국제 경쟁에서 기술적 우위를 확보하기 위하여 기술 혁신에 총력을 기울이고 있다. 이와 관련하여 최근 10여년간 고도로 정보화되고 자동화된 시스템 산업에 많은 기술적 진보가 이루어졌고, 특히, CAD/CAPP/CAM/CAT 등

컴퓨터를 이용한 설계와 가공 및 생산시스템의 활용 기술수준이 국가의 기계공업 수준을 가늠하는 중요한 척도가 되고 있다[1]. 최근에는 특수합금, 복합재, 세라믹 등 신소재의 활용이 다양화되면서, 새로운 가공 기술과 초정밀 가공에 대한 연구가 크게 주목을 받고 있고, 이와 관련하여 다양한 절삭조건에 따른 정밀 및 초정밀 공작기계의 채터방지 기술, 공구마모, 표면조도의 측정 등 모니터링 기술이 중요한 연구과제로 대두되고 있다 [2, 3, 4].

---

\* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 특별연구원

\*\* 강원대학교 정밀기계공학과 부교수

본 논문에서는 첫째, 일반적으로 알려진 공작물의 표면조도 표시방법에 대하여 정리 기술하고, 둘째, 절삭조건과 공구가 주어질 때, 기하학적 가공면의 거칠기에 대한 수학적 모델을 제시하며, 셋째, 제시된 모델을 통하여 공작물의 표면거칠기와 절삭조건과의 상관관계를 도출하고, 넷째, 절삭조건과 공구가 결정되었을 때, 공작물의 표면조도를 계산하고 도시하는 전용프로그램을 개발하였다.

## 2. 절삭 가공면의 거칠기와 성질

### 2.1 표면거칠기의 표시방법

일반적으로 공작물의 표면조도는 측정범위의 크기에 따라, 극히 좁은 범위에서의 요철을 나타내는 가공면 거칠기(surface roughness), 중간 범위에서의 요철을 나타내는 웨이비니스(waviness), 넓은 범위에서의 요철을 나타내는 평면도(flatness) 등 3가지로 대별할 수 있다. 공작물이 작을 때에는 웨이비니스나 평면도는 문제가 되지 않으며, 가공면 거칠기가 공작물의 성능을 지배하게 된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 공구와 공작물의 상호운동으로부터 기하학적으로 정해지는 거칠기가 존재한다.

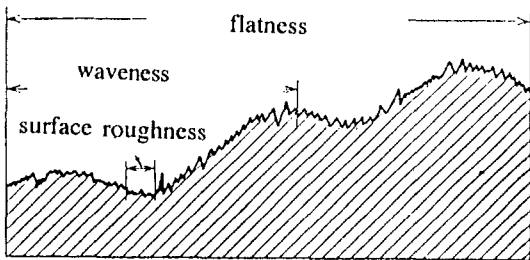


Fig. 1. Surface roughness

표면거칠기가 발생하는 요인에 따라 실제 가공면의 거칠기는 다음과 같이 5가지로 구분된다. 첫째, 공구형상과 이송 운동기구로부터 기하학적으로 정해지는 거칠기(이상거

칠기:  $H_1 = H_m$ ), 둘째, 구성인선의 생성 탈락에 의해 발생하는 거칠기( $H_2$ ), 셋째, 절삭기구 자체가 가지는 불안정 요소인 가공 변형, 열변형 등에 의해 발생하는 거칠기( $H_3$ ), 넷째, 공구 날-공작물의 상대위치가 변동(진동, 채터)함으로 발생하는 거칠기( $H_4$ ), 다섯째, 공구 날의 파손 또는 마모로 발생하는 거칠기( $H_5$ )이다. 한편, 가공면의 표면 거칠기를 표시하는 방법으로 최대높이( $R_{max}$ ), 10점 평균거칠기( $H_z$ ), 중심선 평균거칠기( $R_a$ ) 등 3가지를 사용한다. 측정점(stylus)과 광학적 방법등을 이용한 표면거칠기 검사기를 사용하여 공구의 이송방향으로 가공면을 측정하면 Fig. 2와 같은 표면거칠기 곡선이 측정된다. Fig. 2에서 일점쇄선으로 표시된 평탄한 가공면에 대하여 이 면에서 3점 이상으로 접하는 평면을 기준으로 이 면으로부터 상대적으로 가장 깊은 골(점선으로 표시된 부분)까지의 거리( $H_{max}$ )를 포함하여 표시하는 것이 10점 평균거칠기이다. 기준면의 넓이 내에서 1회 이상은 거의 나타나지 않는 매우 큰 산이나 골은 제외하고 표시한다. 최대높이는 큰산과 골을 모두 포함시켜 표시하며, 평균중심선으로부터의 평균편차(average deviation)를 표시하는 값이 중심선 평균거칠기( $H_{CLA}$ )이다.

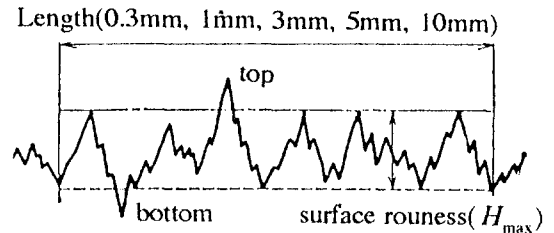


Fig. 2.  $H_{max}$

### 2.2 기하학적 가공면 거칠기

(1) 바이트 절삭시의 가공면 거칠기  
 절삭조건과 바이트의 종류가 결정되면 이상거칠기와 중심선 평균거칠기를 계산할 수

있다. 우선, 공구의 선단반경(R)이 0인 뾰족날 바이트의 경우(Fig. 3) 식(1)로 이상거칠기를 계산할 수 있고, 식(2)로 중심선 평균거칠기를 구할 수 있다.

$$H_{th} = \frac{f}{\cot K_1 + \cot K_2} \quad (1)$$

$$H_{CLA} = \frac{f}{4(\cot K_1 + \cot K_2)} \quad (2)$$

여기서,

- $H_{th}$  기하학적으로 계산되는 이론적 가공면거칠기
- F 이송량
- d 절삭깊이
- $K_1$  엔터링 각(entering angle)
- $K_2$  작용 앞날각
- R 공구의 선단반경

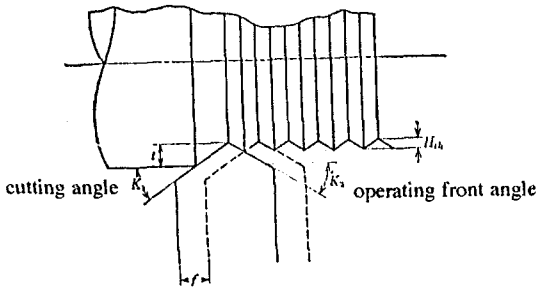


Fig. 3.  $H_{th}$  for a bite with sharp edge

또한, 공구의 선단반경이 둥근날 바이트인 경우(Fig. 4), 이송량을 식(3)으로 가정하면 이상거칠기는 식(4)로 계산되고, 중심선 평균거칠기는 Brewer의 식(5)를 이용하여 구한다(2).

$$f = 2R \sin K_2 \quad (3)$$

$$H_{th} = \frac{R}{2} \sin^2 \delta = \frac{f^2}{8R} \quad (\sin \delta = \frac{f}{2R}) \quad (4)$$

$$H_{CLA} = \frac{f^2}{18\sqrt{3}R} \quad (5)$$

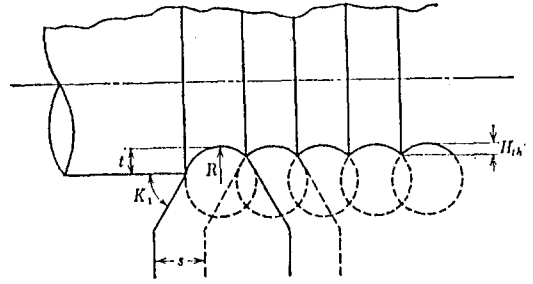


Fig. 4.  $H_{th}$  for a bite with round edge

(2) 밀링커터에 의한 가공면의 거칠기  
밀링커터에 의한 가공면의 거칠기는 평커터의 경우, 식(6)으로 계산된다. 식(6)에서 +는 하향 절삭이며, -는 상향절삭을 의미한다.

$$H_{th} = \frac{f_z}{8(r/f_z \pm z/\phi)} \quad (6)$$

여기서,

- $f_z$  평커터 날 1개당의 이송량
- r 커터의 반경
- z 커터의 치수

(3) 드릴에 의한 구멍면의 거칠기  
드릴에 의한 구멍면의 이상거칠기는 식(7)과 같이 드릴 날 1개당 이송량( $f_z$ ), 선단날과 구멍면과 이루는 각( $\theta$ ), 백테이퍼 각( $r$ )의 함수로 표시된다.

$$H_{th} = \frac{f_z \tan \theta \tan r}{\tan \theta + \tan r} \quad (7)$$

### 3. 절삭 조건과 표면 거칠기

바이트로 선삭을 할 때 생성되는 이상거칠기는 식(1)과 식(4)로 표시되므로, 표면조도를 향상시키기 위해서는 이송량과 앞날각을 감소시키거나, 공구의 선단반경과 옆날

각을 증가시켜야 한다. 그러나 이송량을 감소시키면 절삭시간이 증대되고, 앞날각을 증시키면 chatter진동이 발생되어 칩 형성이 원활하지 못하게 된다. 그러므로 가공면거칠기와 절삭시간, 만족스러운 칩 형성들간의 최적치를 결정하여야 한다. 현실적으로 이송량을 작게하고, 고속절삭을 수행함으로써 표면거칠기의 감소효과를 증대시킬 수 있다. 최근에는 미세이송에 의한 다듬질 절삭이 널리 활용되고 있다.

본 논문에서는 공구가 주어졌을 때, 사용자가 원하는 공작물의 표면조도를 얻기 위하여 최대 이송율을 결정하는 수학적 모델을 제시한다. 본 연구에서는, 최대 이송율을 계산하기 위해서 3가지의 가정을 전제로 한다. 첫째, 구성인선이 존재하지 않으며, 둘째, 공작물의 표면조도는 이송율과 공구의 기하학적 조건에 의해서만 결정된다. 셋째, 절삭깊이는 공작물의 표면조도에 크게 영향을 미치지 못한다. 공작물의 표면조도는 사용자가 원하는 표면거칠기( $\delta$ )와 사용되는 공구의 기하학 특성과 이송량에 따라 영역 1, 영역 2, 영역 3으로 Fig. 5과 같이 구별할 수 있다.

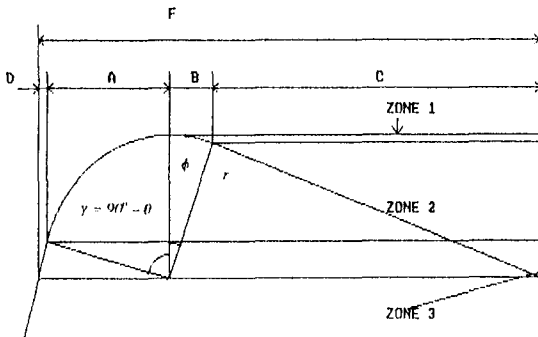


Fig. 5. Zones of surface roughness in single point turning or face milling

(1) 영역 1 ( $\alpha < \phi$ )

영역 1은 Fig. 6에서 도시된 것과 같이 노

우스 반경만이 표면조도와 관련된다. 여기서 사용되는 기호를 정리하면 다음과 같다.

- $\phi$  앞날각
- $\theta$  옆날각
- $r$   $\theta$ 에 대한 보상각 ( $90^\circ - \theta$ )
- $\sigma$  노우스 반경의 중심에서 골까지의 각 ( $\alpha = \sigma$ )
- $\delta$  봉우리와 골 사이의 높이
- $r$  공구의 노우스 반경
- $F$  이송률 (in/rev, in/tooth)

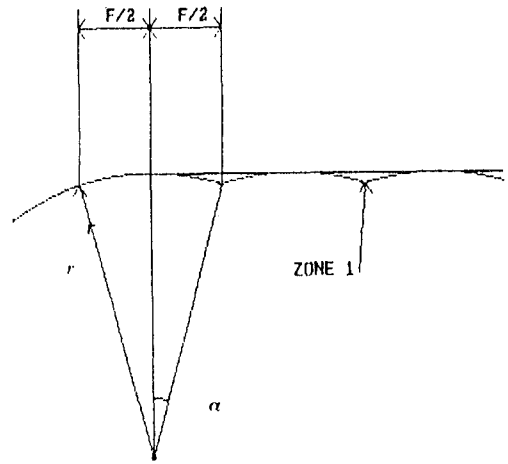


Fig. 6. Surface roughness in zone 1 of single turning or face milling

기하학적 조건으로부터, 이송량( $F$ )과 노우스 반경( $r$ )과의 관계는 식 (8)로, 봉우리와 골사이의 높이( $\delta$ )와 노우스 반경과의 관계는 식 (9)으로 표시할 수 있다.

$$r \sin \alpha = F/2 \quad (8)$$

$$\delta = (1 - \cos \alpha) \quad (9)$$

여기서는  $\alpha$ 와  $\phi$ 가 미세하다고 가정한 근사해석과 완전해석을 구분하여 수행한다.

첫째,  $\alpha$ 를 미소각으로 가정한 근사해석은 다음과 같다.

식 (8) 과 식 (9) 로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5F/r \\ \alpha^2 &= 2\delta/r \\ F^2 &= 8r\delta \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 산술적 평균거칠기 ( $R_{AA}$ ) 를 도입하고, 일반적으로 알려진 봉우리와 골사이의 높이 ( $\delta$ ) 와의 관계식을 적용하면 식 (11) 이 되고, 식 (10) 으로부터 식 (12) 를 구할 수 있다.

$$\delta = 4R_{AA} \quad (11)$$

$$R_{AA} = \frac{\alpha^2 r}{8} (\alpha^2 = 2\delta/r\delta = 4R_{AA}) \quad (12)$$

$\alpha$  는 영역 1에서 앞날각 ( $\phi$ ) 보다 작거나 같기 때문에 최대 이송량에 대한 식은 식 (13) 으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \phi \\ R_{AA} &\leq \frac{\phi^2 r}{8} \end{aligned} \quad (13)$$

둘째, 영역1에 대한 완전해석은 다음과 같다. 식 (8) 과 (9) 을 변형하면 식 (14) 으로 표현할 수 있다.

$$\frac{F^2}{4r^2} + \left(1 - \frac{\delta}{r}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

식 (14) 로부터, 이송률을 산술적 평균거칠기와 공구의 노우스반경의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{32R_{AA}r(1-2R_{AA}/r)} \quad 10 \\ R_{AA} &= \frac{r}{4}(1-\cos\alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15) 에서  $\alpha \leq \phi$  이므로, 영역 1의 완전

해석에 의한 산술적 평균거칠기의 조건은 식 (16) 으로 결정된다.

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \phi \\ R_{AA} &\leq \frac{r}{4}(1-\cos\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

(2) 영역 2 ( $\phi < \alpha \leq r$ )

Fig. 7은 영역 2에 대하여 도시하고 있다. 공구에 의하여 생성된 릿지(봉우리와 골)는 앞날각 ( $\phi$ ) 과 노우스반경 ( $r$ ) 의 함수로 표현되며, 영역 1의 해석과 동일하게 2가지 해석방법으로 수행하였다.

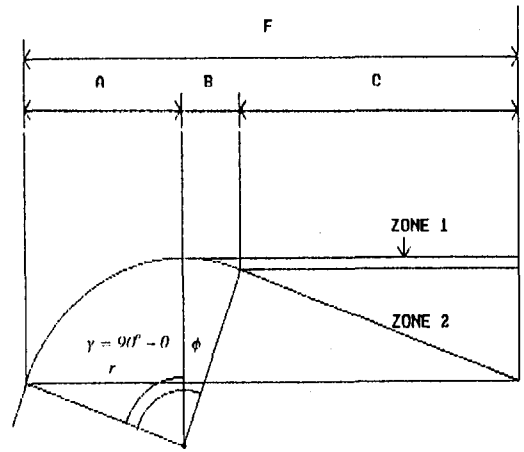


Fig. 7. Surface roughness in zone 2 of single turning or face milling

첫째,  $\alpha$  를 미소각으로 가정하면 식 (10) 을 사용할 수 있으며, Fig. 7에서 도시된 A, B, C는 기하학적 고찰을 통하여 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{2\delta r} \\ B &= r\sin\phi = r\phi \\ C &= [\delta - 4(1-\cos\phi)]\cot\phi = \frac{\delta}{\phi} - \frac{r\phi}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

이송률 ( $F$ ) 은 Fig. 7로부터 다음과 같이 표현된다.

$$F = A + B + C$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{2\delta r} + r\phi + \frac{\delta}{\phi} - \frac{r\phi}{2} \\
 &= \sqrt{8R_{AA}r} + \frac{r\phi}{2} + \frac{4R_{AA}}{\phi} \quad (\delta = 4R_{AA})
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

식(18)은 영역 2에서 표면조도가 결정되었을 때, 최대 이송량을 계산하는 식이다. 영역 2가 존재하기 위한 구속조건  $\phi < \alpha \leq r$  으로부터 산술적 평균거칠기의 조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{r\phi^2}{2} < R_{AA} \leq \frac{r}{4}(1-\sin\theta)
 \tag{19}$$

둘째, 영역2의 완전해석은 다음과 같다. Fig. 7에서 제시된 A, B, C는 식(20)으로 표현되며, 영역 2에서의 최대 이송량은 식(21)로 구해진다.

$$\begin{aligned}
 A &= r\sin\alpha = r\sin[\cos^{-1}(1-\delta/r)] \\
 B &= r\sin\phi \\
 C &= [\delta - r(1-\cos\phi)]\cot\phi
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 F &= A + B + C \\
 &= r\sin[\cos^{-1}(1-4R_{AA}/r)] + r\sin\phi \\
 &\quad + [4R_{AA} - r(1-\cos\phi)]\cot\phi \\
 &\quad (\delta = 4R_{AA})
 \end{aligned}$$

최종적으로 완전 해석에 의한 영역 2의 산술적 평균거칠기는  $\phi < \alpha \leq r$ 로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 \phi < \alpha \leq r \\
 \frac{r}{4}(1-\cos\phi) < R_{AA} \leq \frac{r}{4}(1-\sin\theta)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

(3) 영역 3( $\phi > r$ )

영역 3은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 영역

2와 유사하나, 길이 D가 첨가된다. 영역 3의 표면거칠기 식이 영역 2의 식보다 널리 사용되므로, 공작물의 표면거칠기가 작으면 영역 1의 식을 사용하고, 표면거칠기가 크면 영역 3의 식을 사용하여 최대 이송량을 계산한다.

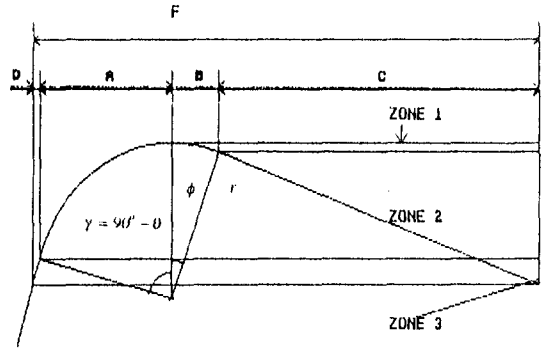


Fig. 8. Surface roughness in zone 3 of single turning or face milling

첫째, 근사해석에서  $\alpha$ 는 미소각으로 가정할 수 있으나 옆날각의 보상각( $r$ )은 미소각으로 가정할 수 없다. 최대 이송량( $F$ )은 Fig. 8로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 F &= A + B + C + D \\
 &= \delta(1/\phi + \cot r) \\
 &\quad + r(\sin r + \phi/2 - \cot r + \cos r \cot r) \\
 &= 4R_{AA}(1/\phi + \tan\phi) \\
 &\quad + r(\cos\theta + \phi/2 - \tan\phi + \sin\theta\tan\theta) \\
 &\quad (\delta = 4R_{AA}, \theta + r = 90^\circ)
 \end{aligned}$$

둘째, 영역 3을 완전해석하면, 최대 이송량은 식(24)로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 F &= A + B + C + D \\
 &= 4R_{AA}(\cot\phi + \tan\theta) + r(\cos\theta + \sin\phi) \\
 &\quad + r[(1-\sin\theta)\tan\theta + (1-\cos\phi)\cot\phi]
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

#### 4. 전용 프로그램의 개발 및 응용 사례

진술한 수학적 모델을 효과적으로 활용하

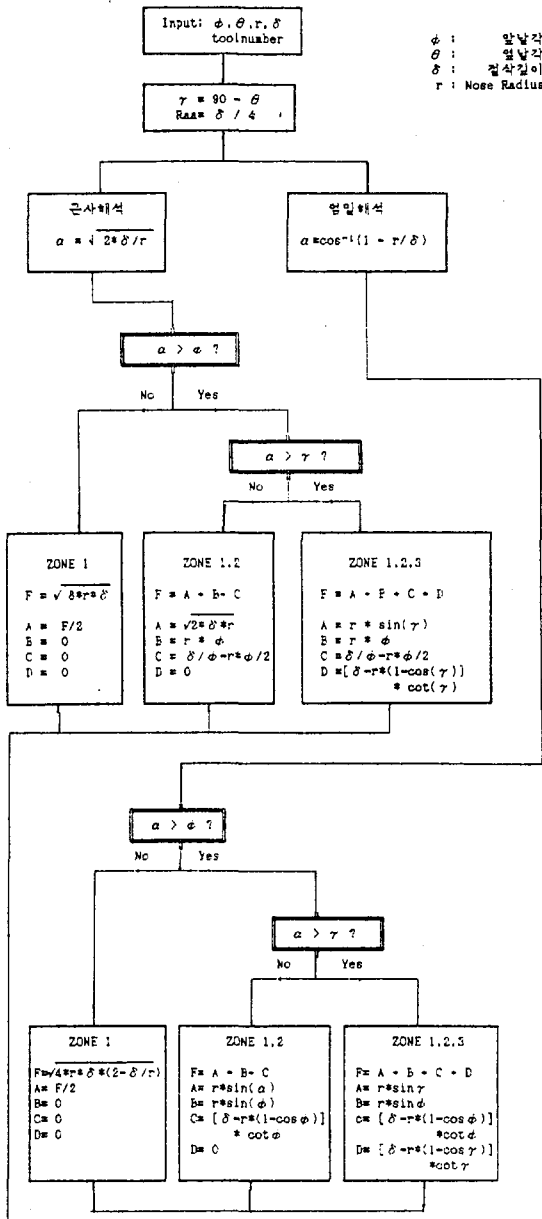
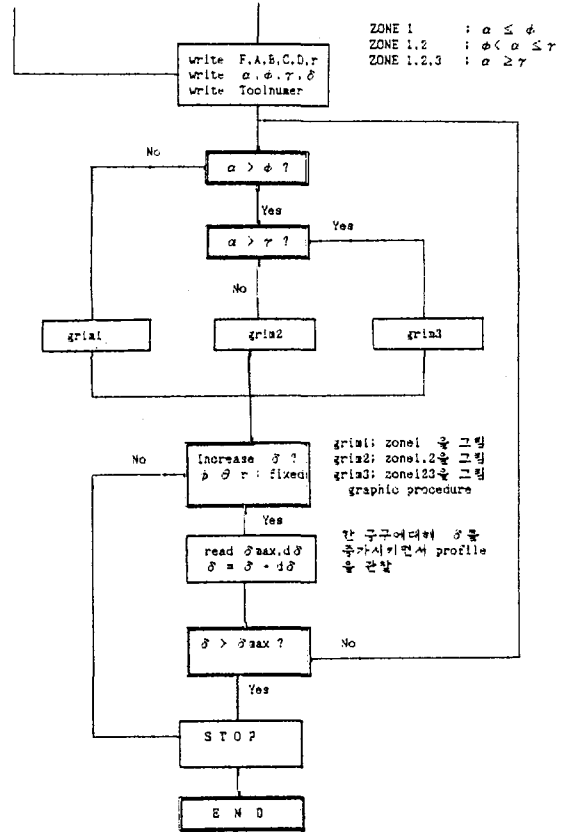


Fig. 9. Algorithm of the program for calculating the surface roughness



기 위해서는 가공조건에 따라 표면조도를 예측하고, 요구되는 표면조도를 충족시키는 가공조건을 계산하는 전용 프로그램이 필요하다. 공작물의 표면조도를 가공조건에 따라 수식적으로 표현하기 위해서는 공작물에 요구되는 표면거칠기 값을 결정한 후, 공구의 노우스반경, 앞날각 및 옆날각을 등을 고려하여 해당되는 조건식에 대입하여 최대 이송량을 계산하여야 한다. Fig. 9는 진술한 이론모델에 근거하여 작성된 공작물의 표면거칠기 프로그램의 흐름도를 보인다.

개발된 프로그램을 이용하여, 실제 사용되고 있는 2가지 종류의 바이트를 대상으로, 영역별로 산술적 평균거칠기가 주어졌을 때, 최대 이송량을 계산하였다. Table 1은

사용된 2가지 바이트의 사양을 나타내고 있으며, 각 영역별로 최대 이송량을 계산한 결과를 Table 2와 Fig. 10 ~ Fig. 14에 도시하였다.

Table. 1. Specification of the used bites

type of bite	Bite 1	Bite 2
$\phi$ (°)	15	45
$\theta$ (°)	14	45
$r$ (mm)	2.4	2.4

Table. 2. Calculation result of the maximum feed ( $\mu\text{m}$ )

type of bite		Bite 1	Bite 2
Zone 1	$\delta$	80.0	90.0
	$f$	1,229.0	1302.0
	$R_{AA}$	20.0	22.0
Zone 2	$\delta$	1,400.0	—
	$f$	7,723.0	—
	$R_{AA}$	350.0	—
Zone 3	$\delta$	2,200.0	1,890.0
	$f$	10,958.0	5,768.0
	$R_{AA}$	550.0	470.0

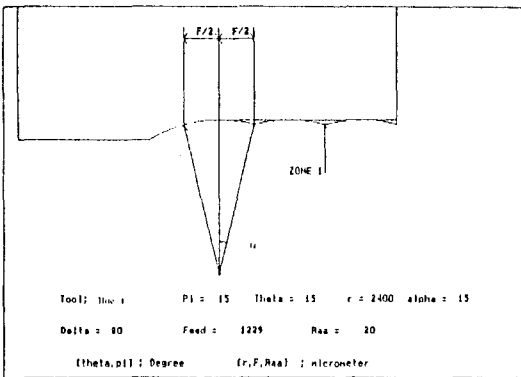


Fig. 10. Analysis result of zone 1 for bite 1

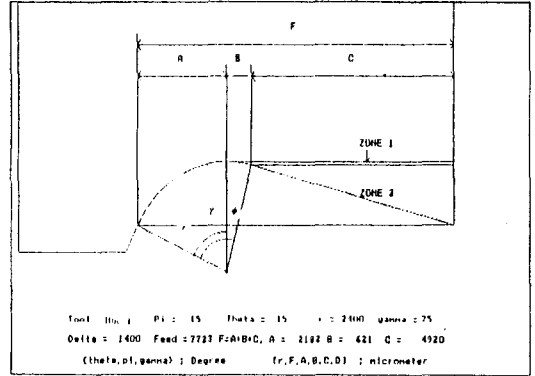


Fig. 11. Analysis result of zone 2 for bite 1

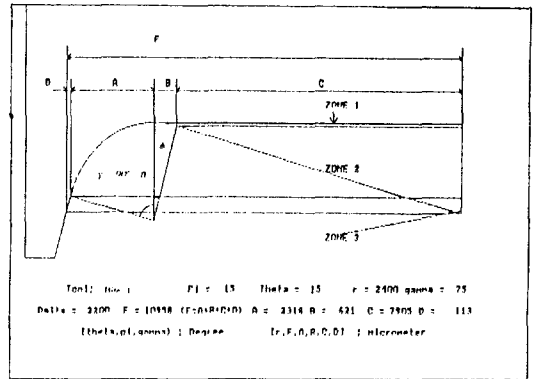


Fig. 12. Analysis result of zone 3 for bite 1

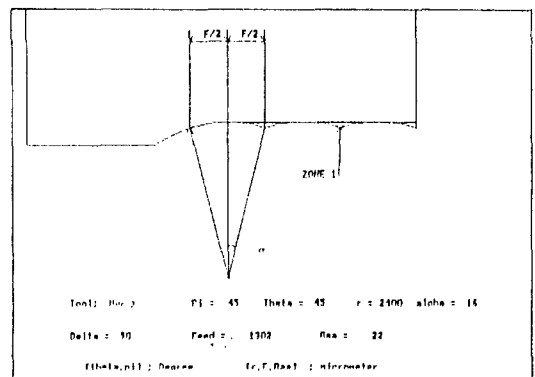


Fig. 13. Analysis result of zone 1 for bite 2



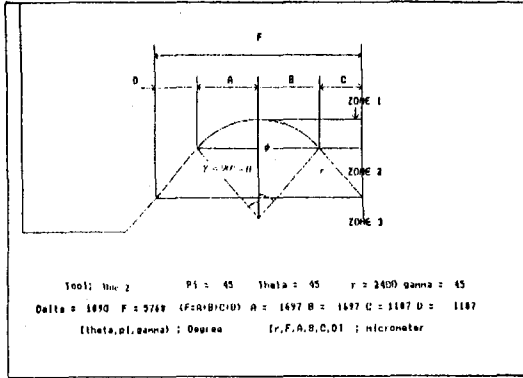


Fig. 14. Analysis result of zone 2 for bite 2

## 5. 결 론

공작기계의 정밀도 및 생산성, 신뢰성에 대한 요구조건을 충족시키기 위해서는 다양한 절삭조건 하에서 공작물의 표면거칠기를 예측하는 기술이 필요하다. 공작물의 표면거칠기는 이상거칠기 즉, 공구의 형상과 이송량에 의한 거칠기에 의해 주로 영향을 받고 있으며, 공작기계의 진동이나 채터현상, 공작기계의 열변형, 공구의 마모와 결손등에 영향을 받는다.

본 논문에서는, 공작물의 표면거칠기에 영향을 미치는 절삭조건들에 대하여 이론적으로 고찰하였다. 공작물의 표면조도를 표면거칠기와 공구의 기하학 특성 및 이송량에 따라 세영역으로 구분하여 각 영역 별로 주어진 절삭조건과 공구에 대한 기하학적 가공면 거칠기의 수학적 모델을 결정하였다. 이

로부터 공작물의 표면거칠기와 절삭조건과의 상관관계를 규명하였다. 절삭조건과 공구가 결정되었을 때, 공작물의 표면조도를 계산하고 도시하는 전용 프로그램을 개발하고, 실제 사용되는 2가지 종류의 바이트에 대하여 개발된 프로그램을 이용하여 절삭조건에 따른 최대 이송량을 결정하는 방법을 제시하였다.

## Reference

1. N. H. Cook, R. H. Johnson, "Computerized Manufacturing System Process Planning", Report No. 4, Material Processing Lab., M. I. T., 1980.
2. M. S. Shunmugam, V. Radhakrishnan, "Computation of the Three-Dimensional Envelope for Roughness Measurement", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 14, pp. 211-216, 1974
3. Allan, Roger, "Electronics to Boost Productivity", IEEE Spectrum, January, 1978
4. K. Saito, T. Miyoshi, "Measuring Method of the Specular Reflection of the Polished Free-Form Surface on the Machine", Proc. of the 4th Int. Con. on Production Eng., pp. 959-964, 1980.
5. 김동원, "기계 공작법", 동명사, 1984.