

製品 表面品質의 確率的 豫測

- The Probabilistic Forecasting of Product's Surface Quality -

여명구*

Yeo, Myung-Koo

양정희**

Yang, Jeong-Hoe

Abstract

As a general index in surface quality of machined products, surface roughness is to measure worker's skill level, a ground product quality and machining accuracy, etc. The surface roughness is defined by a function of rotational speed and radius of a grinding wheel, distances of active grains composed of the wheel, and feed of a grinder's worktable.

To predict surface roughness in horizontal surface grinding operations, probability distributions were used. Probability distribution functions(p.d.f.) of surface roughness were found as results when the size of active grains(=the radius of a grinding wheel) is given as uniform, exponential distribution, and the distance between active grains follows the distributions of uniform, exponential.

For each pdf case, probabilistic features of surface roughness were also analyzed and presented. This study is a substantial step for determining mathematically the surface roughness instead of using empirical approaches. More works should be presented to develop a general model by which an accurate roughness value can be obtained in horizontal surface grinding operations.

1. 서론

현대 산업사회에서 생산되어지는 수 많은 제품들 중 여러 가지 기계가공을 통하여 얻어지는 제품들과 또한 이러한 제품들 중 완성품의 부품으로 쓰여지는 제품들에 있어서 제품의 표면품질(surface quality)은 여러 가지 제품특성중에서 가장 중요한 특성의 하나로 대두되며, 이러한 이유로 제품가공을 위한 일련의 기계가공공정(machining operation)의 마지막에 표면품질을 높이기 위한 연삭작업(grinding operation)이 따르게 된다. 연삭작업은 양질의 표면을 얻고자 할 때, 또는 양질의 표면을 필요로 하는 피가공물의 여타 절삭가공(cutting operation) 후의 다듬질에 쓰인다.

제품의 표면품질은 일반적으로 표면조도(surface roughness)라는 척도에 의해 표현되며, 기계

* 성균관대학교 산업공학과 박사과정

** 인덕전문대학 공업경영과

가공에 있어서 가공 표면조도는 가공된 물품의 질 또는 수준을 나타내는 대표적인 척도이며, 가공기계의 정밀도, 작업수준 등을 나타내는 지표이기도 하다. 그리고 연속가공공정에 있어서 한 공정에서의 표면조도는 이어지는 다음 공정과 물품의 조립 등에 큰 영향을 주게되며, 특히 연삭작업(grinding operation)에서 표면조도는 피가공물의 가장 중요한 특성으로 대두된다.

연삭작업에 있어서 표면조도는 공구의 회전속도, 공구의 이송량, 공구의 지름, 주연삭입자(active grain)간의 거리, 주연삭입자의 크기로 결정되며 이들 주요 요소들이 상호 복합적으로 작용한다.최근에 들어 경험에 의한 표면조도의 예측 및 결정의 불안정성과 부정확성 및 모호함을 극복하고 신뢰성 있는 표면조도의 예측 및 결정을 위하여 경험에 의존한 방법이 아닌 다른 방법, 즉 수학적인 모델의 개발이 요구되고 있으며, 이에 따른 정확한 표면조도의 예측 및 결정이 필요하다[11][12].

따라서, 본 연구는 연삭작업을 통해 제품의 표면품질을 향상시키는 경우에 있어서 표면조도를 예측 및 결정할 때, 변동을 고려할 수 없는 기하학적 기본 모형의 부정확함을 극복하는데 있어 기존의 경험적 방법이 아닌 확률적 접근을 시도함으로써 연삭작업시 표면조도에 영향을 주는 변동을 고려하고, 나아가 표면조도에 큰 영향을 주는 불규칙적인 요소(진동, 열, 마찰 등)와 연삭작업을 원활히 하게 해주는 변동요소(절삭유, 휠 드레싱등)를 고려할 수 있게 하고자 한다.

2. 선행 관련연구의 고찰

2.1 칩두께를 통한 표면조도 예측

Kannappan과 Malkin[6]은 연삭입자(grain)의 크기와 연삭작업시의 제 요소 - 힘(force), 에너지(specific cutting energy), 마찰(friction), 공구마모(tool wear) 등등 - 와의 관계에 관한 실험연구에서 표면조도를 근사적으로 예측할 수 있는 척도로 최대 칩 두께(t_{max})를 제시하였으며, 다음과 같이 표현하였다.

$$t_{max} = \left[\frac{4v}{VCr} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/2} \right]^{1/2}$$

v =작업대의 이동속도(작업물의 이송속도)

V =연삭 휠의 회전속도

d =작업물의 1패스(pass)당 인피드

D =연삭 휠의 지름

r =칩의 너비와 두께의 비율

C =단위면적당 연삭입자의 수

Lindsay[8]는 원통형 연삭(cylindrical plunge grinding)에 있어서 칩 두께(chip thickness)와 연삭입자-작업물 접촉길이(grain-work contact length)의 관계에 관한 연구를 통해 절삭률(metal removal rate)과 표면의 관계를 분석하였으며, 근사적으로 표면조도를 예측할 수 있는 척도로 칩 두께(t)를 다음과 같이 제시하였다.

$$t = \frac{2 \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{1/4} \left(\frac{Z_w}{V_s} \right)^{1/4}}{(Cr)^{1/2} D_e^{1/4}}$$

- V_w =작업물의 회전속도
- V_s =연삭 휠의 회전속도
- Z_w =연삭 휠 1회전당 절삭률
- D_e =연삭 휠의 지름
- C =단위면적당 연삭입자의 수
- r =칩의 너비와 두께의 비율

2.2 연삭력과 표면조도

Brach et al.[4]은 절삭력을 요소 힘으로 분석하여 그 요소 힘 중 작업물에 평행인 방향의 힘 (tangential force)이 표면에 가장 영향을 끼친다고 가정하고 작업물에 평행인 방향의 힘을 검력기(dynamometer)를 통해 측정하여 그 힘의 변화에 따른 절삭면의 변화를 분석하였다. 그리고 작업물에 평행인 방향의 평균 힘(mean tangential force, F_T)을 다음과 같이 정의 하였다.

$$F_T = \frac{uvbd}{V}$$

- V =연삭 휠의 회전속도
- u =연삭 에너지(specific grinding energy)
- v =작업대의 이동속도
- b =절삭너비(width of cut)
- d =연삭깊이(depth of cut)

2.3 원통형 연삭(cylindrical plunge grinding)에서의 표면조도

원통형 연삭에서의 표면조도에 관한 연구로는 진술한 Lindsay[8]의 연구가 있으며, Murray 와 Malkin[9]은 원통형 연삭에 있어서의 연삭력(grinding force)과 표면조도의 관계에 휠 드레싱(wheel dressing)의 영향을 검토한 실험연구를 하였다. 휠 드레싱은 연삭작업시 생성된 칩(chip)이 연삭 휠의 연삭입자 사이에 붙어서 연삭이 제대로 이루어지지 않는것을 막기 위하여 다이아몬드가 붙어있는 공구(dresser)를 이용하여 연삭 휠에 붙어있는 칩을 제거해 주는 것을 말한다. 드레싱 공구에는 1점형(single-point dresser)와 회전형(rotary dresser)이 있다.

Xiao et al.[13]은 원통형 연삭에서 연삭작업의 단계를 황삭(roughing), 정삭(finishing), 마무리(spark-out)로 나누고 각 단계에 따른 작업 제약조건을 만족하는 연삭주기시간 최소화를 연구하였다. Chiu와 Malkin[5]은 원통형 연삭작업에 있어서 Xiao et al.[13]의 연구와 같이 작업을 단계적으로 나누고, 역학적 요소들을 고려하여 각 단계에서의 연삭력, 절삭률, 최종단계의 표면조도 등을 컴퓨터 모의 실험하고 다음과 같이 경험적인 요소가 포함된 표면조도의 모의실험식을 제시하였다.

$$\text{회전형 드레싱의 경우, } R_a = R_1 \delta_r^{1/3} \left(\frac{V_w a}{V_s} \right)^m \left(1 + e^{-\frac{0.77t_w}{r}} \right) (1.02d_g + 0.76)$$

$$\text{1점 드레싱의 경우, } R_a = R_2 s_d^{1/2} a_d^{1/4} \left(\frac{V_w a}{V_s} \right)^m \left(1 + e^{-\frac{0.77t_w}{r}} \right) (1.02d_g + 0.76)$$

R_a =표면조도
 V_w =작업물의 회전속도
 V_s =연삭 휠의 회전속도
 δ_r =드레싱 각
 τ =모의실험의 시스템시간
 a_d =드레싱 깊이(dressing depth)
 s_d =드레싱 리드(dressing lead)
 t_{sp} =마무리 연삭시간(spark-out time)
 a =연삭깊이(depth of cut)
 d_s =연삭입자의 크기
 R_1, R_2, m =경험상수

2.4 연삭 휠의 연삭입자 분포특성

Law와 Wu[7]는 실험을 통해 연삭작업을 모형화 하였으며, 연삭 휠(grinding wheel)의 특성을 분포로 정의하고, 표면조도와 연삭작업의 제 요소들과의 관계에 대해 연구하였다. 이 연구에서 Law와 Wu는 주연삭입자간의 거리는 지수분포를 따르고 있으며, 연삭 휠의 반지름과 주연삭입자의 크기의 합의 분포는 Z-분포(Z-distribution)를 따르고 있다고 제시하였다. 제시한 Z-분포는 다음과 같다.

$$f(z) = \frac{k+1}{\delta_e^{k+1}(2^{k+1}-1)} (\delta_e + z)^k$$

여기서, $0 \leq z \leq \delta_e$

δ_e =연삭 후의 작업물 프로파일(profile)에서 얻는 실험치

k =작업대의 이동속도와 절삭두께의 함수

Malkin[1]은 작업물의 가공표면의 불규칙성의 원인으로 연삭 휠의 분포특성을 들며, 입자추출 기법의 발달로 같은 크기의 연삭입자 추출이 정확해짐에 따라 주연삭입자간의 거리와 주연삭입자의 크기가 일양분포를 따른다고 제시하였다.

3. 표면조도의 확률적 예측

3.1 가정 및 기호

본 논문에서는 Malkin[1]의 이상적 표면조도의 식을 증명하고, Malkin[1]이 제시한 연삭 휠의 주연삭입자간 거리의 분포 - 일양분포(uniform distribution) - 와 주연삭입자간 크기의 분포(범위를 갖는 연삭 휠의 반지름의 분포) - 일양분포(uniform distribution) - 와 Law와 Wu[7]의 연구에서 제시한 연삭 휠의 주연삭입자간 거리의 분포 - 지수분포(exponential distribution) - 를 Malkin[1]의 이상적 표면조도의 식에 대입하여, 위에서 제시한 각각의 분포를 따른다고 가정한 경우, 즉 주연삭입자간 거리-주연삭입자의 크기가 ① 일양분포-일양분포, ② 지수분포-일양분포를 따르는 경우 몫의 분포(distribution of quotient)식[3]을 이용하여 표면조도의 새로운 분포를 도출해 낸다.

본 연구의 가정은 다음과 같다.

- ① 1회 가공(single pass)만 고려한다.
- ② 연삭작업 전의 작업물의 초기 표면조도는 0이다.
- ③ 연삭 휠을 연삭입자 1개의 두께 만큼씩 층(layer)으로 나누었을때, 각 층의 연삭입자의 분포특성은 같다.
- ④ 연삭작업을 원활히 해 주는 부수적 요소(절삭유, 드레싱등)는 없다.
- ⑤ 연삭 작업시의 불규칙한 변동요소(진동, 열, 마찰 등)는 없다.

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

R_a = 이상적 표면조도

V_s = 주축(또는 연삭 휠)의 회전속도

V_w = 작업대의 이동속도(작업물의 이송속도)

d_s = 연삭 휠의 지름

S_c = 이송량

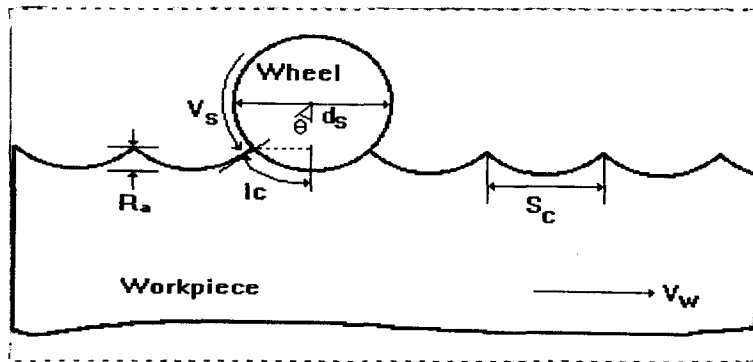
X = 주연삭입자 사이의 거리

$Y = d_s/2$

$Z = X^2/Y$

l_c = 연삭휠과 작업물이 접촉하여 나타나는 호(arc)의 크기의 반

3.2 표면조도의 기본모형



[그림 1] 표면조도의 기본모형

[그림 1]에서

$$l_c = \pi d_s \frac{\theta}{2\pi} = \frac{d_s}{2} \theta \quad (\text{rad}) \quad (3.2.1)$$

$$\cos \theta = \frac{\frac{d_s}{2} - R_a}{\frac{d_s}{2}} = 1 - \frac{2R_a}{d_s} \quad (3.2.2)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2R_a}{d_s}\right) \quad (3.2.3)$$

$2R_a \ll d_s$ 이므로(즉, θ 가 매우 작으므로), 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (3.2.4)$$

식(3.2.1)에서,

$$l_c^2 = \frac{d_s^2 \theta^2}{4} \quad (3.2.5)$$

식(3.2.4)에서,

$$\theta^2 = 2(1 - \cos \theta) \quad (3.2.6)$$

식(3.2.6)을 식(3.2.5)에 대입하면,

$$l_c^2 = \frac{2 d_s^2 (1 - \cos \theta)}{4} = \frac{d_s^2 (1 - \cos \theta)}{2} \quad (3.2.7)$$

식(3.2.2)를 식(3.2.7)에 대입하면,

$$l_c = (R_a d_s)^{1/2}$$

연삭작업은 아주 미세한 절삭이므로

$$S_c \approx 2l_c = 2 (R_a d_s)^{1/2}$$

$$S_c^2 = 4R_a d_s$$

$$R_a = \frac{S_c^2}{4d_s}$$

$$S_c = \frac{V_w}{V_s} X \quad \text{이므로}$$

따라서 이상적 표면조도의 식은 다음 같다.

$$R_a = \frac{1}{4} \left[\frac{V_w X}{\sqrt{2} V_s Y^{1/2}} \right]^2 = \frac{V_w^2}{8 V_s^2} Z \quad (3.2.8)$$

4. 표면조도의 확률분포 도출

주연삭입자간의 거리, X 와 연삭 휠의 반지름, Y 가 각각 0보다 큰 $[a, b]$ 와 $[c, d]$ 의 범위를 갖고 특정한 분포를 따르며, 서로 독립일때, 표면조도의 확률밀도함수 p.d.f. ($f_2(z)$)를 주연삭입자간 거리가 일양분포이고, 연삭 휠의 반지름이 일양분포일 경우(모형 I)와 주연삭입자간 거리가 지수분포이고, 연삭 휠의 반지름이 일양분포일 경우(모형 II), 각 모형은 b 와 c 의 대소관계에 따라 $\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c}$ 인 case와 $\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d}$ 인 case로 나뉘어 지며, 각각에 대한 확률밀도함수를 구해보면 다음과 같다.

4.1 모형 I

1) case 1 $(\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c})$

$$f_z(z) = \frac{\sqrt{\frac{d^3}{z} - \frac{a^3}{z^2}}}{3(b-a)(d-c)} I_{(\frac{a^2}{d}, \frac{b^2}{d})}(z) + \frac{a^2 + ab + b^2}{3(d-c)z^2} I_{(\frac{b^2}{d}, \frac{a^2}{c})}(z) + \frac{\frac{b^3}{z^2} - \sqrt{\frac{c^3}{z}}}{3(b-a)(d-c)} I_{(\frac{a^2}{c}, \frac{b^2}{c})}(z)$$

2) case 2 $(\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d})$

$$f_z(z) = \frac{\sqrt{\frac{d^3}{z} - \frac{a^3}{z^2}}}{3(b-a)(d-c)} I_{(\frac{a^2}{d}, \frac{a^2}{c})}(z) + \frac{\sqrt{\frac{d^3}{z} - \sqrt{\frac{c^3}{z}}}}{3(d-c)z^2} I_{(\frac{a^2}{c}, \frac{b^2}{d})}(z) + \frac{\frac{b^3}{z^2} - \sqrt{\frac{c^3}{z}}}{3(b-a)(d-c)} I_{(\frac{b^2}{d}, \frac{b^2}{c})}(z)$$

4.2 모형 II

1) case 1 $(\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c})$ $f_z(z) = \{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{d} \sqrt{z}} - \frac{a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$

$$+ \frac{\lambda^2 d^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{d} \sqrt{z}} - \frac{a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$$

$$+ \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{d} \sqrt{z}} - \frac{a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} \} I_{(\frac{a^2}{d}, \frac{b^2}{d})}(z)$$

$$+ \{ \frac{b^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$$

$$+ \frac{b^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$$

$$+ \frac{b^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} \} I_{(\frac{b^2}{d}, \frac{a^2}{c})}(z)$$

$$+ \{ \frac{b^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{c} \sqrt{z}}$$

$$+ \frac{b^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda^2 c^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{c} \sqrt{z}}$$

$$+ \frac{b^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{c} \sqrt{z}} \} I_{(\frac{a^2}{c}, \frac{b^2}{c})}(z)$$

2) case 2 $(\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d})$

$$f_z(z) = \{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{d} \sqrt{z}} - \frac{a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$$

$$+ \frac{\lambda^2 d^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{d} \sqrt{z}} - \frac{a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{a} z} - \frac{a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} \} I_{(\frac{a^2}{d}, \frac{a^2}{c})}(z) \\
 & + \{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{a} z} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \\
 & + \frac{\lambda^2 d^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{a} z} - \frac{\lambda^2 c^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \\
 & + \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{a} z} - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \} I_{(\frac{a^2}{c}, \frac{b^2}{d})}(z) \\
 & + \{ \frac{b^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{\sqrt{z}} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \\
 & + \frac{b^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda^2 c^2}{12(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \\
 & + \frac{b^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \frac{1}{z^2} - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)} \sqrt{z} e^{-\lambda \sqrt{c} z} \} I_{(\frac{b^2}{d}, \frac{b^2}{c})}(z)
 \end{aligned}$$

5. 확률적 표면조도 분석

위의 연구결과를 통해 주연삭입자간의 거리와 연삭 휠의 반지름이 분포로 주어지는 경우,

① 원하는 표면조도의 범위가 $a \leq R_o \leq b$ 일때, 표면조도의 범위를 만족할 확률,

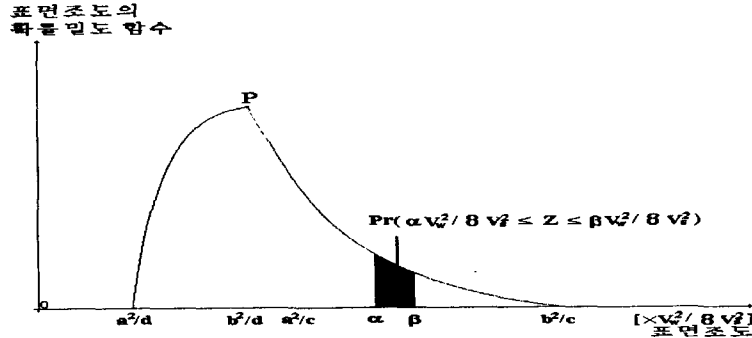
$$\Pr(a \leq R_o \leq b) = \Pr\left(\frac{16 V_w^2 \alpha}{V_s^2} \leq Z \leq \frac{16 V_w^2 \beta}{V_s^2}\right)$$

② 원하는 확률이 정해져 있을때 이를 만족할 수 있는 표면조도의 범위

③ 표면조도의 범위와 확률이 주어진 경우, 공정모수들간의 관계와 공정모수를 알 수 있다.

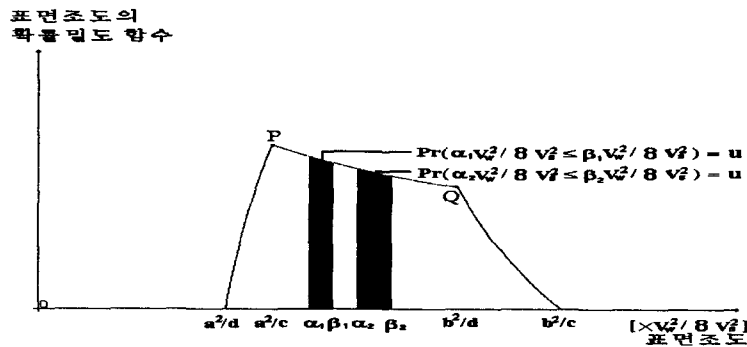
주연삭입자간의 거리, $X(0 < a < X < b)$ 와 연삭 휠의 반지름, $Y(0 < c < Y < d)$ 이 각각 특정한 분포를 따르며, 서로 독립일때, 표면조도 분포의 형태는 주연삭입자간의 거리와 연삭 휠의 반지름의 분포와 주연삭입자간의 거리와 연삭 휠의 반지름의 범위의 관계에 따라 각각 [그림 2], [그림 3], [그림 4], [그림 5]과 같으며, V_s (연삭 휠의 속도)와 V_w (작업대의 이동속도)가 주어졌을 때 얻을 수 있는 표면조도의 범위와 표면조도의 변화에 따른 확률변화의 추이를 알 수 있다.

5.1 모형 I의 표면조도 분포형태



[그림 2] 모형 I의 표면조도 분포의 형태(case 1)

주연삭입자간의 거리, X 의 범위가 $0 < a < X < b$ 이고, 연삭 휠의 반지름, Y 의 범위가 $0 < c < Y < d$ 일때, 원하는 표면조도의 범위가 $\alpha \leq R_a \leq \beta$ 일때, [그림 2]와 같이 주어진 작업조건 하에서 원하는 표면조도를 만족할 수 있는 확률을 제시할 수 있다. 표면조도의 분포형태를 보면, 주어진 X 의 범위와 Y 의 범위에 의해 나타나는 표면조도의 범위에서만 확률밀도함수가 정의되며, 점 P 를 중심으로 표면조도가 낮아지는 방향으로서는 확률밀도가 비교적 급격하게 변화하고, 표면조도가 높아지는 방향으로서는 확률밀도가 비교적 완만하게 변화하며, 확률을 구하고자 하는 표면조도의 범위가 일정하다면 b^2/d 부근의 표면조도의 범위를 얻을 확률이 가장 높음을 알 수 있다.

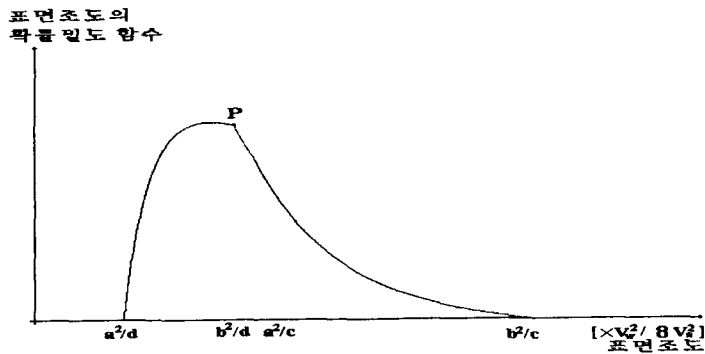


[그림 3] 모형 I의 표면조도 분포의 형태(case 2)

주연삭입자간의 거리, X 의 범위가 $0 < a < X < b$ 이고, 연삭 휠의 반지름, Y 의 범위가 $0 < c < Y < d$ 일때, 주어진 작업조건 하에서 원하는 표면조도를 만족할 수 있는 확률(u)이 주어졌을 때, [그림 3]과 같이 원하는 확률을 만족할 수 있는 여러가지 표면조도의 범위들을 제시할 수 있으며, 제시된 표면조도의 범위들 중 가장 작은 표면조도의 범위가 주어진 조건하에서 확률(u)을 만족할 수 있는 가장 정밀한 표면조도의 범위라고 할 수 있다. 예를 들어 같은 확률을 갖는 표면조도의 범위를 예측할때 표면조도(R_a)의 범위가 $1\mu m \leq R_a \leq 5\mu m$ 와 $7\mu m \leq R_a \leq 8\mu m$ 인 경우, 범위가 작은 $7\mu m \leq R_a \leq 8\mu m$ 인 경우가 보다 명확한 예측이라고 할 수 있다. 이 분포의 형태를 보면, 주어진 X 의 범위와 Y 의 범위에 의해 나타나는 표면조도의 범위에서만 확률밀도함수가 정의되며, 점 P 와 점 Q 사이에서 확률밀도가 완만히 변화함을 알 수 있다. 또한 원하는 표면조도의 범위와 원하는 확률이 주어진 경우, 공정모수들 간의 관계를 알 수 있으며, 원하는 표면조도의 범위와 원하는 확률을 만족할 수 있도록 공정모수의 변화를 제의 할 수 있다.

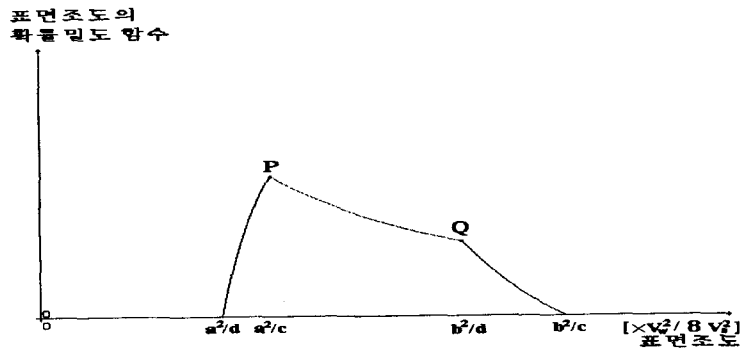
5.2 모형 II의 표면조도 분포형태

주연삭입자간의 거리가 지수분포를 따르고 연삭 휠의 반지름이 일양분포를 따르는 경우의 표면조도 분포의 형태는 [그림 4], [그림 5]과 같다.



[그림 4] 모형 II의 표면조도 분포의 형태(case 1)

표면조도의 분포형태를 보면 [그림 2]와 거의 유사한 형태로서 주어진 X의 범위와 Y의 범위에 의해 나타나는 표면조도의 범위에서만 확률밀도함수가 정의되며, 점 P를 중심으로 표면조도가 낮아지는 방향으로 확률밀도가 비교적 급격하게 변화하며, 표면조도가 높아지는 방향으로 확률밀도가 비교적 완만하게 변화함을 알 수 있다.



[그림 5] 모형 II의 표면조도 분포의 형태(case 2)

이 분포의 형태를 보면, [그림 3]과 유사한 형태로서 주어진 X의 범위와 Y의 범위에 의해 나타나는 표면조도의 범위에서만 확률밀도함수가 정의되며, 점 P와 점 Q 사이에서 확률밀도가 점 P 앞과 점 Q 뒤에 비해 완만히 변화함을 알 수 있다.

5.3 표면조도와 공정모수의 관계

연삭작업에서 표면조도의 결정은 식(3.2.8)에서 주어진 바와 같이, V_s (연삭 휠의 회전속도)와 V_w (작업대의 이동속도)에 의해 결정된다. 그러므로 원하는 표면조도의 범위와 원하는 표면조도의 범위를 만족 할 확률이 주어지면, V_s 와 V_w 의 관계를 제시할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 제품의 표면품질을 향상시키기 위한 연삭작업에서 표면조도를 예측 및 결정할 때, 변동을 고려할 수 없는 기하학적 기본 모형의 부정확함을 극복하는데 있어 기존의 경험적 방법이 아닌 확률적 접근을 시도함으로써 연삭작업시 표면조도에 영향을 주는 변동(본 연구에서는 연삭 휠의 특성)을 고려하였다.

연삭 휠에서 주연삭입자간의 거리와 주연삭입자의 크기의 분포특성을 이용하여 새로운 표면 조도의 분포들을 제시하였다. 따라서 이 분포들을 통해 표면조도에 영향을 주는 공정모수, 즉 주연삭입자간의 거리의 분포와 주연삭입자의 크기(연삭 휠의 반지름)의 분포, 그리고 연삭 휠의 회전속도, 작업물의 이송속도를 알면, 원하는 표면조도를 만족할 확률을 제시해 줄 수 있으며, 또한 원하는 확률로 만족할 수 있는 표면조도의 범위를 구할 수 있다. 그리고 원하는 표면 조도의 범위를 원하는 확률로 만족하기 위한 공정모수들 사이의 관계를 제시하고 있다.

추후과제로는 연삭작업에 있어서 표면조도에 큰 영향을 주는 불규칙한 변동요소(진동, 열 등)의 분포 특성을 고려한 표면조도의 확률분포의 도출, 연삭작업을 원활히 해 주는 부수적 요소(절삭유, 드레싱등)을 고려한 표면조도의 확률분포의 도출, 연삭작업 전의 작업물의 초기 표면조도를 고려한 표면조도의 확률분포 도출 등이다.

7. 참고 문헌

1. Boothroyd, G., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Scripta Book Company, 1975
2. Malkin, S., *GRINDING TECHNOLOGY-Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Ellis Horwood Ltd., 1989
3. Mood, A.M., Graybill, F.A., and Boes, D.C., *Introduction to the Theory of Statistics*, 3rd ed., McGRAW-HILL, 1974
4. Brach, K., Pai, D.M., Ratterman, E., and Shaw, M.C., "Grinding Forces and Energy", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, 25-31, 1988
5. Chiu, N., and Malkin, S., "Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, 383-387, 1993
6. Kannappan, S., and Malkin, S., "Effects of Grain Size and Operating Parameters on the Mechanics of Grinding", *Journal of Engineering for Industry*, 833-842, 1972
7. Law, S.S., Wu, S.M., and Joglekar, A.M., "On Building Models for the Grinding Process", *Journal of Engineering for Industry*, 983-991, 1973
8. Lindsay, R.P., "On the Surface Finish-Metal Removal Relationship in Precision Grinding", *Journal of Engineering for Industry*, 815-820, 1973
9. Murray, T., and Malkin, S., "Effects of Rotary Dressing on Grinding Wheel Performance", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 100, 297-302, 1978
10. Peters, J., Inasaki, I., Paul, T., and Tonshoff, H.K., "Modeling and Simulation of Grinding Processes", *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 2, 677-688, 1992
11. Requicha, A. A., "Mathematical Definition of Tolerance Specifications", *Manufacturing Review*, Vol. 6, No. 4, 269-274, 1993
12. Voelcker, H., "A Current Perspective on Tolerancing and Metrology", *Manufacturing Review*, Vol. 6, No.4, 258-268, 1993
13. Xiao, G., Malkin, S., and Danai, K., "Intelligent Control of Cylindrical Plunge Grinding", *Proc. of 1992 American Control Conference*, 391-398, 1992