

다회가공 평면연삭작업에서 표면조도의 실험적 예측

최후곤*, 김재윤**, 여명구***

Experimental Surface Roughness Estimation in Multi-Pass Horizontal Grinding Operations

Hoo-Gon Choi*, Jae Yoon Kim**, and Myung Koo Yeo***

ABSTRACT

Surface roughness is one of the most important characteristics in machining processes. This study presents probabilistic models to estimate surface roughness experimentally in multi-pass horizontal surface grinding operations from three independent distributions such as the initial surface roughness distributions of workpiece, the distributions of the wheel radius, and the distributions of distances between major active grains. To specify the model characteristics from surface roughness measurements, either the probability satisfying a given surface roughness or the range of surface roughness satisfying a given probability have been estimated while grinding conditions are fixed. Finally, the relationship between grinding conditions satisfying surface roughness range under a given probability can be established.

Key Words : Surface roughness(표면조도), Grinding operations(연삭작업)

1. 서론

표면조도는 가공된 제품의 품질, 가공기계의 정확도 또는 정밀도, 기술수준 등의 평가를 위한 주요기준이 되며, 하나의 공정에서 얻어진 표면조도는 후속공정과 제품의 조립 등에서 생산비와 생산시간 결정에 큰 영향을 미친다. 연삭작업은 제품표면의 품질을 향상시키기 위한 마감작업(finishing) 중 하나로 작업종류, 방법 등의 결정을 위한 이론적 토대가 부족하여 경험적 기술에 의존하고 있으며 상당한 시간과 비용을 유발시키고 있다. 연삭작업에서 표면조도는 주축의 회전속도, 연

삭숫돌 및 작업물의 이송량(feed), 작업물의 재질, 연삭숫돌 드레싱, 진동, 연삭숫돌의 특성인 지름과 주연삭입자(active grain)간의 거리, 주연삭입자의 크기 등의 요소들이 상호 복합적으로 작용하여 결정된다. 기계산업에 있어서 「연삭작업」은 「조립」과 마찬가지로 생략되는 것이 가장 바람직하지만 생략될 수 없는 중요한 공정으로 평가되고 있으며, 연삭작업의 효율문제는 생산성 향상을 위한 중요한 문제로 대두된다.

연삭작업의 효율성을 증대시키기 위한 노력으로 다양한 형태의 수학적 접근이 시도되었는데^[1-9], 대부분 기하학적 분석 또는 실험에 의한

* 성균관대학교 시스템경영공학부
** 한국기업전산원 프로세스공학연구소
*** 성균관대학교 대학원 산업공학과

수리적 표면조도 결정모델의 증명 및 보정에 관한 연구이다. Malkin^[9]은 이상적 표면조도 결정식을 개발하여 효율적으로 표면조도를 예측할 수 있게 하였다. 그러나 Malkin^[9]의 식은 이상적인 것으로서 상당한 불확실성을 갖는데, 연삭숫돌 제조과정에서 발생하는 불균일성 - 숫돌입자의 크기, 입자간의 거리, 결합(bonding)정도 등 - 을 고려하지 못하였기 때문이다. 본 연구는 Malkin^[9]의 이상적 표면조도식에 숫돌입자의 크기와 입자간의 거리의 불균일성을 추가하여 표면조도를 보다 신뢰성 높게 예측하고자 한다.

연삭작업의 표면조도에 관한 연구는 칩 두께를 통한 표면조도 예측, 연삭력과 표면조도의 관계분석, 연삭숫돌 드레싱의 표면조도에 대한 영향, 연삭숫돌 입자의 분포특성에 관한 연구로 분류된다. Kannappan과 Malkin^[2]은 숫돌입자(grain)의 크기와 연삭작업시의 제 요소 - 힘, 에너지, 마찰, 공구마모 등등 - 와의 관계에 관한 실험연구에서 표면조도를 근사적으로 예측할 수 있는 척도로 최대 칩 두께를 제시하였고, Lindsay^[10]는 원통형 플런지 연삭(cylindrical plunge grinding)에 있어서 칩 두께와 연삭입자-작업물 접촉길이(grain-workpiece contact length)의 관계에 관한 연구를 통해 절삭물과 표면의 관계를 분석하였으며, 근사적으로 표면조도를 예측할 수 있는 척도로 칩 두께를 제시하였다. Brach et al.^[11]은 절삭력을 요소 힘으로 분석하여 그들 중 작업물의 접선방향의 힘(tangential force)이 표면에 가장 큰 영향을 끼친다고 가정하고 작업물의 접선방향의 힘을 동력계를 통해 측정하여 힘의 변화에 따른 표면조도의 변화를 분석하였다.

연삭숫돌 드레싱의 표면조도에 대한 영향에 관한 연구로서 Murray와 Malkin^[6]은 원통형 연삭에 있어서의 연삭력과 표면조도의 관계에 드레싱의 영향을 검토하였다. Xiao et al.^[7]은 원통형 연삭에서 연삭작업의 단계를 황삭, 정삭, 스파크아웃(spark-out)으로 나누고 각 단계에서 표면조도 등의 작업 제약조건을 만족하는 연삭주기시간 최소화에 관해 연구하였고, Chiu와 Malkin^[11]은 원통형 연삭작업에 있어서 Xiao et al.^[7]의 연구와 같이 작업을 단계적으로 나누고, 역학적 요소들을 고려하여 각 단계에서의 연삭력, 연삭효율, 최종단계의 표면조도 등을 컴퓨터 모의 실험하고 경험적인 요소가 포함된 표면조도의 모의실험식을 제시

하였다.

연삭숫돌의 연삭입자 분포특성에 관한 연구로서 Law와 Wu^[12]는 실험을 통해 연삭작업을 모형화 하였으며, 연삭숫돌의 특성을 분포로 정의하고, 표면조도와 연삭작업의 제 요소들과의 관계에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 주연삭입자간의 거리의 분포를 지수분포로 제시하였다. Malkin^[9]은 작업물의 가공표면의 불규칙성의 원인으로 연삭숫돌의 분포특성을 고려하였는데, 입자추출 기법의 발달로 같은 크기의 연삭입자 추출이 가능해짐에 따라 주연삭입자간의 거리와 주연삭입자의 크기가 일양분포(uniform distribution)를 따른다고 제시하였다. 여명구^[13]는 Malkin^[9]의 이상적 표면조도식을 이용하여 작업물의 초기 표면조도를 0(기준선)이라고 가정하고 1회 연삭가공후 표면조도의 확률분포를 도출하였다.

본 연구에서는 평면연삭작업의 표면조도 예측에 있어서 기하학적 기본 모형의 불확실성을 극복하고자 작업물의 초기표면(연삭작업전 표면)이 특정 분포를 따르는 경우 주연삭입자간의 거리와 주연삭입자의 크기가 특정 확률분포를 따른다고 가정하고 다회가공시 표면조도의 확률분포를 도출해 주어진 가공조건에서 원하는 표면조도를 얻을 확률을 제시하며, 반대로 주어진 작업조건에서 특정 확률을 만족하는 표면조도의 범위를 결정한다. 또한 특정 확률에서 원하는 표면조도의 범위를 만족하는 연삭조건들 사이의 관계를 찾아내며, 가공횟수의 예측을 통해 경제적인 연삭작업을 수행할 수 있도록 한다. 이는 평면연삭작업에서 표면조도에 영향을 미치는 불확실한 변동요소가 확률로 표현됨을 의미한다. 아울러 본 연구의 결과와 실제 평면연삭작업을 통해 얻은 표면조도 데이터의 적합성 검정을 통해 확률분포의 신뢰성을 검증한다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 연구방법 및 이상적 표면조도

본 연구에서는 작업물의 초기 표면조도, 즉 연삭작업을 시작하기 직전의 표면조도가 작은 범위를 갖는 특정한 분포를 따를 때, Fig. 1과 같은 Malkin^[9]의 이상적 표면조도 모형을 바탕으로 도출된 여명구^[13]의 작업물의 초기 표면조도가 0일 때의 1회 가공시의 표면조도 분포를 이용하여(부

록참조), 연삭숫돌의 주연삭입자간의 거리가 일양 분포를 따르고 연삭숫돌의 반지름의 분포가 일양 분포를 따르는 경우와 연삭숫돌의 주연삭입자간의 거리가 지수분포를 따르고 연삭숫돌의 반지름의 분포가 일양분포를 따르는 경우에 대해 다회가공 후 표면조도의 확률분포를 도출해 내고 실제 연삭 실험을 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 도출된 확률분포를 검증한다.

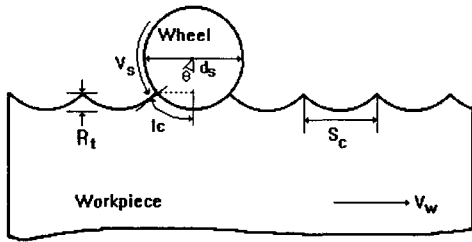


Fig. 1 Ideal surface roughness^[9]

본 연구의 가정은 다음과 같다.

- ① 주연삭입자간의 거리, 연삭숫돌의 반지름이 갖는 확률적 특성은 변하지 않는다.
- ② 연삭작업을 원활히 해 주는 부수적 요소(절삭유, 드레싱 등)는 없다.
- ③ 연삭작업시의 불규칙한 변동요소(진동, 열, 마찰 등)는 없다.

Malkin^[9]의 불확실성 또는 연삭숫돌의 불균일성이 배제된 이상적 표면조도 식은 다음과 같다.

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

여기서 R_t = 최대표면조도

V_s = 주축의 회전속도

V_w = 작업물의 이송속도

d_s = 연삭숫돌의 지름

l_c = 주연삭입자에 의해 연삭되어 생겨나는 호의 길이의 1/2

S_c = 주연삭입자에 의해 연삭되어 생겨나는 호의 현 길이

X = 주연삭입자 사이의 거리

$$Y = d_s/2$$

$$Z = X^2/Y$$

2.2 다회가공시 표면조도의 수리적 모형

가공물의 초기 표면조도 T 가 g 와 h 사이의 값을 갖는 일양분포를 따를 때 1회 가공 후 표면조도는 초기 표면조도 T 에서 주연삭입자간의 거리가 a 와 b 사이의 값을 갖고 연삭 휠의 반지름이 c 와 d 사이의 값을 가지며 초기 표면조도가 0일 때의 1회 가공시의 표면조도(R_t)를 뺀 값과 같다고 가정하였다. n 회 가공 후 표면조도 $R_t^{[n]}$ 는 다음과 같이 유도된다. 즉, 다회 가공이 일어난 후의 표면조도는 직전 단계에서 가공이 일어난 후의 작업물의 표면조도에서 표면조도가 0일 때의 1회 가공시의 표면조도를 뺀 값으로 정의된다.

$$f_T(t) = \frac{1}{h-g} I_{(g,h)}(t), \quad R_t^{[n]} : n\text{회 가공 후 표면조도} \quad (2)$$

$$T - R_t = R_t^{[1]} \quad \dots \quad 1\text{회 가공 후 표면조도}$$

$$R_t^{[1]} - R_t = R_t^{[2]} \quad \dots \quad 2\text{회 가공 후 표면조도}$$

$$R_t^{[2]} - R_t = R_t^{[3]} \quad \dots \quad 3\text{회 가공 후 표면조도}$$

.

.

.

$$R_t^{[n-1]} - R_t = R_t^{[n]} \quad \dots \quad n\text{회 가공 후 표면조도}$$

$$T - 2R_t = R_t^{[2]} \quad (\because T - R_t = R_t^{[1]})$$

$$T - 3R_t = R_t^{[3]}$$

.

.

.

$$\therefore T - nR_t = R_t^{[n]}$$

$$T - nR_t = T - \beta Z = U \quad (3)$$

$$(\because \beta = \frac{n V_w^2}{8 V_s^2}, \quad U = R_t^{[n]})$$

따라서 n 회 가공 후 표면조도의 분포는 $f_U(u)$ 로 나타낸다.

2.3 실험환경 및 방법

2.3.1 실험환경

산업용 전동 공구를 생산하는 국내 K사에서 평면연삭기를 이용하여 수평축 왕복테이블 방식으로, 세 종류의 연삭숫돌에 대해 작업물의 이송속도를 세 경우로 변화시켜 가며 Table 1과 같이 총 9가지의 실험을 수행하였다.

이 실험의 목적은 식(3)으로 표현되는 이론적 표면조도의 분포와 식(3)을 고려하지 않고 연삭작업을 수행했을 때 얻어진 실제 표면조도의 분포가 유사한지 또는 차이가 나는지를 확인하는 것이다. 만약 두 가지 방식으로 얻은 표면조도의 분포가 유사성을 갖는다면 식(3)의 이론적 표면조도 분포는 신뢰성을 가질 수 있으며 Malkin^[9] 등이 활용한 이상적 표면조도식의 불확실성을 다소 배제한 실용적 표면조도 예측식이 될 것이다.

Table 1 Experimental environment

Type of workpiece : S-45C, 35 × 35 × 100 (mm)
 Rotational speed of grinding wheel(rpm) : 1700

	Type of grinding wheel	Feed(m/min)
Experiment 1	WA46-H2 305×38×127(mm)	40.34
Experiment 2	WA46-H2 305×38×127(mm)	51.06
Experiment 3	WA46-H2 305×38×127(mm)	58.54
Experiment 4	WA60-K0 305×38×127(mm)	40.34
Experiment 5	WA60-K0 305×38×127(mm)	51.06
Experiment 6	WA60-K0 305×38×127(mm)	58.54
Experiment 7	WA46-K2 305×38×127(mm)	40.34
Experiment 8	WA46-K2 305×38×127(mm)	51.06
Experiment 9	WA46-K2 305×38×127(mm)	58.54

2.3.2 실험방법

각 단위실험환경에서 가공회수에 대한 표면조도의 측정을 위해 16개의 작업물을 2열로 배치하고 연삭숫돌이 작업물을 1회 가공할 때마다 2개씩 조도를 측정한다. 그리고 단위실험환경의 기준 표면조도 설정을 위해 실험 전에 2개의 작업물의 조도를 미리 측정한다.

3. 연구결과 및 분석

3.1 표면조도의 이론적 확률분포

식(3)에 보인 이론적 확률 분포의 형태는 Fig. 2와 같으며 CASE I과 CASE II는 각각 주연삭입자간의 거리가 a와 b사이의 값을 갖는 확률변수이고 연삭숫돌의 반지름이 c와 d사이의 값을 갖는

확률변수 일 때, 표면조도의 분포 도출 시 고려해야 할 확률변수 대소관계의 두 가지 경우인 $\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c}$ 인 경우와 $\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d}$ 인 경우를 의미한다. CASE I과 CASE II의 두 개의 그래프는 각각 연삭숫돌의 주연삭입자간의 거리와 연삭숫돌의 반지름의 분포가 일양분포를 따르는 경우(CASE I-1, CASE II-1)와 연삭숫돌의 주연삭입자간의 거리지수분포를 따르고 연삭숫돌의 반지름의 분포가 일양분포를 따르는 경우(CASE I-2, CASE II-2)의 표면조도의 확률분포의 형태를 나타낸다.

Fig. 2에서 $f_U(g - \frac{\beta a^2}{d})$ 와 $f_U(h - \frac{\beta b^2}{c})$ 는 이론적 표면조도 확률분포의 최대 확률밀도 값을 나타내며, 확률밀도함수의 형태로 보아 CASE I-1, CASE I-2, CASE II-1, CASE II-2의 네 가지 경우 모두 $g - \frac{\beta a^2}{d}$ 와 $h - \frac{\beta b^2}{c}$ 사이 또는 부근의 표면조도 값을 얻을 가능성이 가장 높음을 알 수 있다.

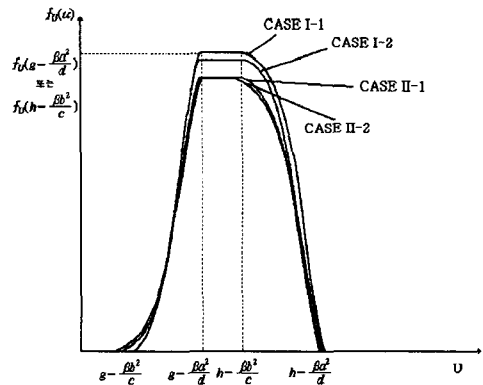


Fig. 2 Theoretical probability density functions

3.2 실험결과

가공회수에 따라 구별되는 2개의 작업물의 정해진 측정 위치에서 각 작업물당 30개씩 조도값을 측정하여 단위실험환경당 420(3×30×7)개의 데이터를 측정하였다. 표면조도 측정은 측정식 표면조도 측정기를 이용하였으며 측정방법은 Table 2와 같은 환경에서 결(layer)에 평행한 방향으로 측정하였으며, 연삭숫돌의 특성이 WA60-K0인 실험환경의 경우 측정결과는 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

Table 2 Measuring environment

Measuring device (probe type)	SE-2300(Kosaka Lab. Ltd., Japan)
Sampling length	4.0mm
Evaluation length	0.8mm
Probe velocity	1mm/s
Measuring parameter	R _a (maximum surface roughness)

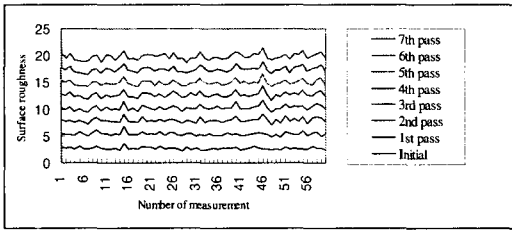


Fig. 3 Experimental results using a WA60-K0 wheel at 40.34m/min feed

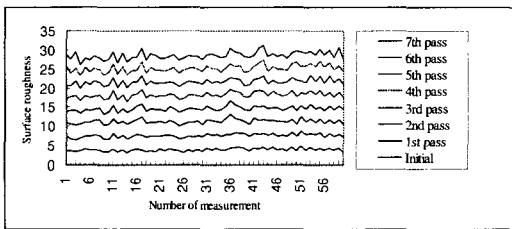


Fig. 4 Experimental results using a WA60-K0 wheel at 51.06m/min feed

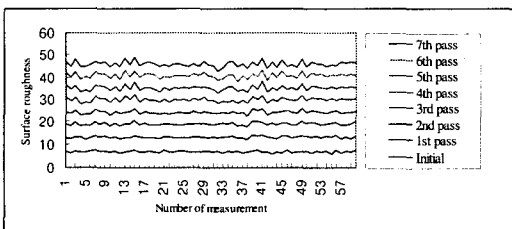


Fig. 5 Experimental results using a WA60-K0 wheel at 58.54m/min feed

Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에서 작업물의 이송속도가 빠를수록 표면조도의 변화 폭이 크다. 따라서 정밀한 가공을 위하여 이송속도를 낮추는 것이 바람직하다. 또한 2~4가공 이후의 각 측정 위치별 표면조도의 변화가 일정한 것으로 보아 2~4회 가공 후 표면구조가 거의 결정됨을 알 수 있다.

3.3 이론적 확률분포의 입력모수 결정 절차

본 연구에서는 주연삭입자의 크기와 거리 그리고 작업물의 초기 표면조도가 특정분포를 따른다고 가정하기 때문에 각 분포에 대한 모수의 추정이 매우 중요하다. 작업물의 초기표면조도에 관련된 모수로서 g 와 h 는 각 실험환경에서 이송속도가 가장 빠른 단위실험환경에서 기준표면조도 작업물(연삭작업이 이루어지지 않은 작업물)의 표면조도 측정값 중에서 최대값, 최소값으로 결정하고 주연삭입자의 크기에 따른 모수 c 와 d 는 Malkin^[9]이 제시한 입자크기(d_g)를 추정하는 식(4)에 연삭숫돌의 입도번호를 대입하여 입자크기를 구한 후 원하는 오차 한계내의 적절한 전후 값과 연삭숫돌의 반지름을 더한 값으로 결정한다.

$$d_g(\text{mm}) = 68M^{-1.4} \quad (4)$$

여기서 d_g =입자의 크기
 M =입도번호

식(4)에서 c , d 와 d_g 는 $0 < c < d_g < d$ 의 관계를 갖는다.

주연삭입자간의 거리의 모수인 a 와 b 는 Malkin^[9]의 연삭숫돌의 연삭입자 밀도(V_g)를 추정하는 식(5)를 통해 구한 연삭숫돌의 연삭입자 밀도를 이용하여 구한 연삭숫돌면의 한 결(layer)의 연삭입자의 수 $\frac{\pi d_s V_s}{d_g}$ 로 연삭숫돌면의 길이 πd_s 를 나눈 연삭입자간의 평균거리를 식(6)과 같이 추정한 후 c 와 d 를 정하는 경우와 같이 원하는 오차 한계내의 적절한 전후 값으로 결정한다.

$$V_g(\%) = 2(32 - S) \quad (5)$$

여기서 V_g =연삭숫돌의 연삭입자 밀도
 S =조직번호

$$\frac{\pi d_s}{\pi d_s V_s} = \frac{d_g}{V_g} \quad (6)$$

식(6)에서 a , b 와 V_g , d_g 는 $0 < a < \frac{d_g}{V_g} < b$ 의 관계를 갖는다. 하나의 예로서 숫돌 WA60-K0, 이송량 58.54m/min인 실험의 경우, 식(4), (5), (6)을 이용한 모수 결정절차는 다음과 같다.

- ① 기준표면조도의 측정값 중 최소값은 5.8 μm , 최대값은 7.49 μm 이므로 g , h 값은 각

- 각 $5.8\mu\text{m}$, $7.49\mu\text{m}$ 이다.
- ② 연삭숫돌의 입도번호가 60이므로 식(4)에 따라 연삭입자의 크기는 $2203.342\mu\text{m}$ 이며, 이 값과 연삭숫돌의 반지름 값을 더한 값을 기준으로 사용자 오차한계 내의 전후 값으로 결정된다.
 - ③ 연삭숫돌의 조직번호가 0이므로 식(5)와 식(6)에 따라 연삭입자간의 거리는 $3485\mu\text{m}$ 이며 사용자의 오차한계 내의 전후 값으로 결정된다.

얻어진 모수는 Table 3과 같다.

Table 3 Input parameters using a WA60-K0 wheel at 58.54m/min feed

Rotational speed(V_s)	1700m/min
Feed(V_w)	58.54m/min
Distance between active grains(a, b)	3450 μm , 3750 μm
Radius of grinding wheel(c, d)	154600 μm , 154800 μm
Initial surface roughness(g, h)	5.8 μm , 7.49 μm

3.4 이론적 표면조도와 실험결과와의 비교

3.4.1 표면조도 예측 프로그램

개발된 표면조도 예측 프로그램은 입자간의 거리와 크기가 모두 일양분포를 따를 경우의 모듈과 일양분포, 지수분포를 따르는 경우의 모듈로 구성되어 있으며 이론적 확률분포의 그래프, 특정 표면조도를 얻을 확률과 실험결과와의 적합성 여부를 검정할 수 있다. 예를 들어 숫돌 WA60-K0, 이송량 58.54m/min인 실험의 경우 다음의 절차에 따라 이론적 확률분포의 형태와 임의의 표면조도를 얻을 확률을 계산한다.

- ① Table 4의 가공모수를 Fig. 6과 같이 입력한다.

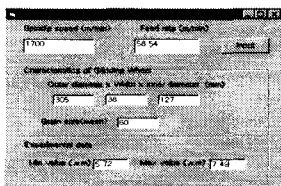


Fig. 6 Window for inputting grinding parameters

- ② 입력된 가공모수를 계산하여 추정 모수를 결정하며, 확률을 계산하고자 하는 표면조도의 구간을 Fig. 7과 같이 입력한다.

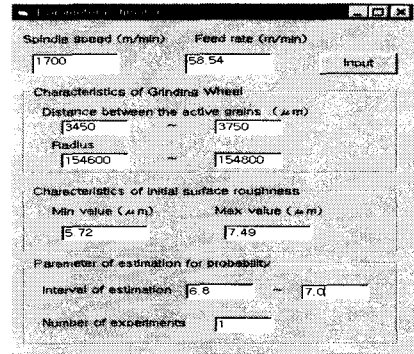


Fig. 7 Window for determining the estimator and specifying surface roughness range

- ③ 식(3) 및 Fig. 2에서 보인 바와 같이 추정 모수를 바탕으로 이론적 확률분포가 Fig. 8과 같이 나타나며, 입력된 표면조도 구간에서 표면조도가 존재할 확률이 Fig. 9와 같이 나타난다.

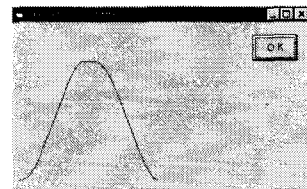


Fig. 8 Screen for viewing the resulting probability density function

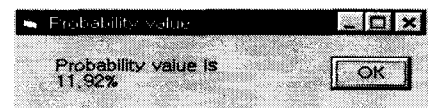


Fig. 9 Screen for viewing the resulting probability

3.4.2 이론적 결과와 실험결과와의 비교

이론적 확률분포와 실험결과 간의 유의 수준 5%의 적합성 검정(Chi-square goodness-of-fit test)을 실시하면, 검정결과가 Fig. 10과 같이 나타난다.

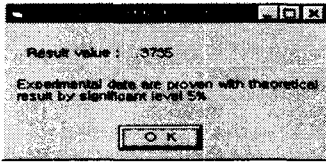


Fig. 10 Result of Chi-square goodness-of-fit test

Fig. 11은 슷돌 WA60-K0, 이송량 58.54m/min 인 실험의 경우 1회가공후 표면조도 실험값을 모 의실험 도구인 Arena 3.0에 입력하여 실험값의 확 률분포를 그래프로 나타낸 것으로 Fig. 8과 유사 한 형태를 나타내고 있으므로 실험치들이 이론적 확률분포함수와 유사함을 알 수 있다. 즉 다회가 공 평면연삭작업에서 표면조도를 정의하는 확률분 포 $f_U(u)$ 는 그 타당성이 입증된다.

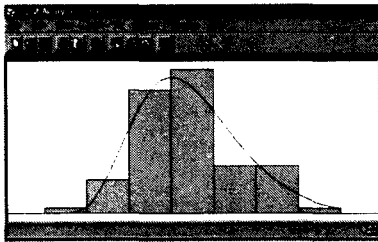


Fig. 11 Probability density function of the experimental results using Arena

4. 결론 및 추후과제

본 연구에서 도출해낸 다회가공후 표면조도의 이론적 확률분포는 이론적 배경을 배제한 다음 실제 연삭작업을 수행한 후 얻어진 표면조도의 확률 분포와 유사함을 알 수 있다. 따라서 주연삭입자 간의 거리(X), 연삭숫돌의 반지름(Y), 초기표면조 도(T)의 분포함수와 연삭휠의 회전속도(V_s), 작업 대의 이동속도(V_w)가 주어지는 경우

- ① n회 가공후 표면조도의 범위가 주어질 때, 그 범위를 만족할 확률
 - 주연삭입자간의 거리 $\{X|0 < a < X < b\}$ 와 연삭 숫돌의 반지름 $\{Y|0 < c < Y < d\}$ 와 초기표면 조도, $\{T|0 < g < T < h\}$ 가 각각 특정 분포를 따를 때, n회 가공후 표면조도의 범위가 $p_2 \leq U \leq q_2$ 으로 주어지는 경우 $f_U(u)$ 를

이용해 범위를 만족하는 확률을 계산할 수 있다.

$$\Pr(p_2 \leq U \leq q_2) = \int_{p_2}^{q_2} f_U(u) du$$

- ② 원하는 확률이 주어진 경우 이를 만족하는 표면조도의 범위
 - 원하는 확률값이 주어진 경우 여러 표면 조도의 범위들을 구할 수 있으며, 표면조 도의 범위 중 가장 작은 범위가 보다 정밀한 표면조도의 범위라 할 수 있고 범위 선택시 가공정밀도나 비용 등을 고려하는 것이 바람직하다.
- ③ 원하는 표면조도의 범위와 확률이 주어진 경우, 공정모수들간의 관계 및 가공횟수
 - 연삭작업에서 표면조도는 식(1)에서 주어 진 바와 같이, 입자간의 거리와 연삭휠의 반지름이 주어진 경우 V_s (연삭숫돌의 회 전속도)와 V_w (작업대의 이송속도)에 의 해 결정된다. 그러므로 원하는 표면조도 의 범위와 원하는 표면조도의 범위를 만 족 할 확률이 주어지면, V_s 와 V_w 의 관 계를 추정할 수 있다.

를 알 수 있으며, 실제 연삭작업에서 표면조도 예 측 및 원하는 표면조도를 위한 공정모수 결정시에 위에서 도출된 결과들을 활용할 수 있을 것이다.

본 연구의 추후과제로는 연삭작업에 있어서 표면조도에 큰 영향을 주는 불규칙한 변동요소(진 동, 열등)의 분포 특성을 고려한 표면조도의 확률 분포 도출, 연삭작업을 원활히 해 주는 부수적 요 소(절삭유, 드레싱등)를 고려한 표면조도의 확률분 포 도출 등이 될 것이다.

참고문헌

1. Chiu, N. and Malkin, S., "Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 383-387, 1993.
2. Kannappan, S. and Malkin, S., "Effects of Grain Size and Operating Parameters on the Mechanics of Grinding," Journal of Engineering for Industry, pp. 833-842, 1972.

3. Kohli, S., Guo, C. and Malkin, S., "Energy Partition to the Workpiece for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels," Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 160-168, 1995.
4. Lee, J. and Malkin, S., "Experimental Investigation of the Bore Honing Process," Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 406-414, 1993.
5. Malkin, S. and Koren, Y., "Optimal Infeed Control for Accelerated Spark-Out in Plunge Grinding," Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 70-74, 1984.
6. Murray, T. and Malkin, S., "Effects of Rotary Dressing on Grinding Wheel Performance," Journal of Engineering for Industry, Vol. 100, pp. 297-302, 1978.
7. Xiao, G., Malkin, S. and Danai, K., "Intelligent Control of Cylindrical Plunge Grinding," Proceedings of the 1992 American Control Conference, Chicago, pp. 391-398, 1992.
8. Xiao, G., Malkin, S. and Danai, K., "Autonomous System for Multistage Cylindrical Grinding," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 667-672, 1993.
9. Malkin, S., Grinding Technology-Theory and Applications of Machining with Abrasives, Chap. 1, 2, 3 and 7, Ellis Horwood Ltd., 1989.
10. Lindsay, R. P., "On the Surface Finish-Metal Removal Relationship in Precision Grinding," Journal of Engineering for Industry, pp. 815-820, 1973.
11. Brach, K., Pai, D. M., Ratterman, E. and Shaw, M. C., "Grinding Forces and Energy," Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp. 25-31, 1988.
12. Law, S. S., Wu, S. M. and Joglekar, A. M., "On Building Models for the Grinding Process," Journal of Engineering for Industry, pp. 983-991, 1973.
13. 여명구, "평균연삭작업에 있어서 표면조도 결정 을 위한 확률적 접근," 석사학위논문, 성균

관대학교, 1992.

부록

- 작업물의 초기 표면조도가 0일때(평균길이 내의 모든 지점이 기준선상에 있는 경우)의 1회 가공 시의 표면조도 분포

1) 주연삭입자간 거리 X가 일양분포를 따르고, 연삭숫돌의 반지름Y가 일양분포를 따르는 경우의 표면조도의 분포

주연삭입자간 거리 X와 연삭숫돌의 반지름 Y의 분포함수가 각각

$$f_X(x) = \frac{1}{b-a} I_{(a,b)}(x),$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{d-c} I_{(c,d)}(y), \quad \alpha = \frac{V_w^2}{8V_s^2} \text{ 일때 표면}$$

조도의 확률밀도함수 $f_{R_s}(r)$ 은 다음과 같다. 단, $f_{R_s}(r)$ 은 확률밀도함수가 되기 위한 조건을 만족한다.

• CASE I-1 ($\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c}$)

$$f_{R_s}(r) = \frac{\sqrt{\frac{ad^3}{r} - a^2 \frac{a^3}{r^2}}}{3\alpha(b-a)(d-c)} I_{(\frac{aa^2}{d}, \frac{ab^2}{c})}(r)$$

$$+ \frac{\alpha(a^2 + ab + b^2)}{3(d-c)r^2} I_{(\frac{ab^2}{d}, \frac{aa^2}{c})}(r)$$

$$+ \frac{a^2 \frac{b^3}{r^2} - \sqrt{\frac{ac^3}{r}}}{3\alpha(b-a)(d-c)} I_{(\frac{aa^2}{c}, \frac{ab^2}{c})}(r)$$

• CASE II-1 ($\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d}$)

$$f_{R_s}(r) = \frac{\sqrt{\frac{ad^3}{r} - a^2 \frac{a^3}{r^2}}}{3\alpha(b-a)(d-c)} I_{(\frac{aa^2}{d}, \frac{aa^2}{c})}(r)$$

$$+ \frac{\sqrt{\frac{ad^3}{r} - \sqrt{\frac{ac^3}{r}}}}{3\alpha(b-a)(d-c)} I_{(\frac{aa^2}{c}, \frac{ab^2}{d})}(r)$$

$$+ \frac{\alpha^2 b^3}{r^2} - \frac{\sqrt{ac^3}}{r} I_{(\frac{ab^2}{d}, \frac{ab^2}{c})}(r)$$

2) 주연삭입자간 거리 X가 지수분포를 따르고, 연삭숫돌의 반지름 Y가 일양분포를 따르는 경우의 표면조도의 분포

주연삭입자간 거리 X와 연삭숫돌의 반지름 Y의 분포함수가 각각 $f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x}$,

$$f_Y(y) = \frac{1}{d-c} I_{(c, d)}(y),$$

$K_1 = (e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})(d-c)$, $\alpha = \frac{V_w}{8V_s^2}$ 일 때 표면조도의 확률밀도함수 $f_R(r)$ 는 다음과 같다. 단, $f_R(r)$ 은 확률밀도함수가 되기 위한 조건을 만족한다.

• CASE I-2 ($\frac{b^2}{d} < \frac{a^2}{c}$)

$$\begin{aligned} f_R(r) = & \left\{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{r}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \right. \\ & - \frac{\alpha a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3K_1} \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda^2 d^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & - \frac{\alpha a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12K_1} \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & \left. - \frac{\alpha a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \right\} I_{(\frac{aa^2}{d}, \frac{aa^2}{c})}(r) \\ & + \left\{ \frac{ab^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\alpha a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3K_1} \frac{1}{r^2} \right. \\ & + \frac{ab^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\alpha a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12K_1} \frac{1}{r^2} \\ & + \frac{ab^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \\ & \left. - \frac{\alpha a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \right\} I_{(\frac{ab^2}{d}, \frac{aa^2}{c})}(r) \\ & + \left\{ \frac{ab^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{r}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{ab^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\lambda^2 c^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & + \frac{ab^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \\ & \left. - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right\} I_{(\frac{aa^2}{c}, \frac{ab^2}{c})}(r) \end{aligned}$$

• CASE II-2 ($\frac{a^2}{c} < \frac{b^2}{d}$)

$$\begin{aligned} f_R(r) = & \left\{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{r}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \right. \\ & - \frac{\alpha a^3 \lambda e^{-\lambda a}}{3K_1} \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda^2 d^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & - \frac{\alpha a^4 \lambda^2 e^{-\lambda a}}{12K_1} \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & \left. - \frac{\alpha a^5 \lambda^3 e^{-\lambda a}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \right\} I_{(\frac{aa^2}{d}, \frac{aa^2}{c})}(r) \\ & + \left\{ \frac{\lambda d \sqrt{d}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{z}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{z}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right. \\ & + \frac{\lambda^2 d^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} - \frac{\lambda^2 c^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & + \frac{\lambda^3 d^2 \sqrt{d}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{d}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & \left. - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right\} I_{(\frac{aa^2}{c}, \frac{ab^2}{d})}(r) \\ & + \left\{ \frac{ab^3 \lambda e^{-\lambda b}}{3K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\lambda c \sqrt{c}}{3\alpha K_1} \sqrt{\frac{\alpha}{r}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right. \\ & + \frac{ab^4 \lambda^2 e^{-\lambda b}}{12K_1} \frac{1}{r^2} - \frac{\lambda^2 c^2}{12\alpha K_1} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \\ & + \frac{ab^5 \lambda^3 e^{-\lambda b}}{60K_1} \frac{1}{r^2} \\ & \left. - \frac{\lambda^3 c^2 \sqrt{c}}{60\alpha K_1} \sqrt{\frac{r}{\alpha}} e^{-\lambda \sqrt{\frac{c}{\alpha}} \sqrt{r}} \right\} I_{(\frac{ab^2}{d}, \frac{ab^2}{c})}(r) \end{aligned}$$