

## 평면 연삭에서의 연삭 슷돌 마모 추정 및 실험적 검증

주광훈\*, 이응숙\*\*\*, 김현수\*, 홍성욱\*\*, 박천홍\*\*\*

### Estimation and Experimental Verification of Grinding Wheel Wear in Surface Grinding Process

K.H. Ju\*, E.S. Lee\*\*\*, H.S. Kim\*, S.W. Hong\*\* and C.H. Park\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper deals with the theoretical estimation and its experimental verification of grinding wheel wear in surface grinding process. A theoretical formulation is provided to predict the grinding wheel wear in surface grinding. To validate the theoretical prediction, the grinding wheel wear is measured by using a laser scanning micrometer. The associated surface roughness and grinding force are also investigated both theoretically and experimentally. Through a series of simulations and experiments, it is shown that the predictions are in good agreement with the experimental results.

**Key Words :** Surface grinding(평면 연삭), Grinding wheel wear(연삭 슷돌 마모), Surface roughness(표면 거칠기), Grinding force(연삭력)

#### 1. 서론

연삭 가공은 형상 및 치수 정밀도가 높고 고온 표면을 제공하므로 대부분의 절삭 공정에서 마무리 공정을 이루고 있다. 연삭은 슷돌 표면에 돌기된 입자와 공작물의 상호작용에 의해 절삭이 이루어지므로 슷돌 표면 상태와 연삭 조건은 제품의 질을 결정하는 중요한 요소가 된다. 연삭 슷돌을 공구로 하는 연삭 가공은 다른 절삭 공정에 비해 공구의 마모 진행정도가 빠르게 나타나는데 연삭 가공 중에 발생하는 슷돌의 마모는 기계적으로 인가된 절 보기 절입량(Depth of Cut)보다 실제 절입량을 작게 하여 가공오차의 원인이 되고 있다. 최근 이와 같은 측면을 고려하여 연삭 가공 중에 슷돌의 마모를 측정함으로써 연삭 정밀도를 향상시키려는 연구가

진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 한편, 연삭 가공에 있어서 절인 (Cutting Edge)의 마모(Wear), 결손(Fracture), 탈락(Fall), 신출(New Exposure) 등과 같은 연삭 입자에 대한 동적 거동을 표현하기 위해 특징적인 파라미터들을 규정할 수 있다면 연삭 결과의 예측을 통해서 슷돌 표면의 거동 및 진단 시스템을 구축할 수 있게 된다.

본 연구에서는 원통 연삭에 대해서 적합성이 입증된 연삭 공정에 대한 관련식<sup>[2-10]</sup>들을 평면 연삭의 경우로 확대하여 슷돌 마모량을 평가하기 위한 추정식을 도입하였다. 또한, 제안된 추정식을 이용하여 윈도우즈 환경에서 연삭 공정 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 추정식에 대한 실험적 검증을 위해 평면 플런지 연삭 공정에 적용하여 추정 값과 실험 결과를 비교 분석하여 제안된 식이 실제 연삭

☞ 2000년 12월 6일 접수  
\* 금오공과대학교 대학원  
\*\* 금오공과대학교 기계공학부  
\*\*\* 한국기계연구원

가공 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

## 2. 연삭 공정의 모델링

### 2.1 연삭 입자 평균 직경 및 결합도 수치화

연삭 슷들의 특성은 입자와 결합도에 영향을 받는다. 입자의 크기는 입도로 표시하고 있으며, 입도는 가로, 세로가 1인치인 그물 망의 눈 수로 정의되어있다(KS L60001). 입자의 평균 직경  $D_g$ 를 입도  $G_s$ 와의 관계에서 다음과 같이 얻을 수 있다<sup>[2,7]</sup>.

$$D_g = 48600 \times G_s^{-1.29} \langle \#150 \sim \#30 \rangle \quad (1)$$

스들의 결합도는 연삭 입자의 경도 및 인성 그리고 결합제의 지지력에 직접적으로 영향을 받는다. 결합도의 표시는 슷들 측면에 수직하게 뾰족한 원통 형상의 비트를 두고 축 방향으로의 일정한 하중 상태에서  $120^\circ$  회전시켜 생성된 비트의 홈 깊이를 측정하여 연한 결합도 A로부터 단단한 결합도 Z까지 표시한다(KS L6501). 본 연구에서는 결합도  $G_b$ 를 수치적으로 표현하기 위해 결합도 기호 A=1, B=2, C=3, ... 와 같이 자연수로 대치하였다.

### 2.2 드레싱 후 초기 절인의 특성

드레싱 후 가공에 참여하는 슷들 표면의 초기 절인수는 입자 평균 직경의 음의 지수함수로 표시되고, 슷들 입자의 초기 마모면 길이는 평균직경의 양의 지수함수로 나타난다. 여기에 드레싱 조건 및 결합도에 의한 보정계수를 곱하여 최종적으로 초기 절인수  $C_0$ (개/m)와 초기 마모면의 길이  $W_0$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다<sup>[2,4,7]</sup>.

$$\begin{aligned} C_0 &= (15922 D_g^{-0.5}) G_r^{0.33} E_d E_g \\ W_0 &= (0.00389 D_g^{0.44}) E_d E_g \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $G_r$ 은 지립률(0~1)을 나타내며,  $E_d$ 는 드레싱의 효과로서 드레싱 깊이, 이송속도, 드레서 형태, 드레서 날 끝의 예리함 정도에 따라 0.5~1.5의 값을 갖는다<sup>[2,7]</sup>.

$$E_d = \alpha \cdot \frac{V_d}{N_{ss}} \cdot \delta_d \cdot r_{d,f} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 실험상수,  $V_d$ 는 드레싱 속도,  $N_{ss}$ 는 슷들 회전수,  $\delta_d$ 는 드레싱 절입량,  $r_{d,f}$ 는 드레서 형상 계수를 의미한다.  $E_g$ 는 결합도가 미치는 영향을 나타낸 것이다<sup>[2,7]</sup>.

$$E_g = e^{-1.5(O_g - 0.77)} \quad (4)$$

여기서, 비트 홈 깊이를 나타내는  $O_g$ 는

$$O_g = a_1 \cdot D_g^{a_2} \cdot e^{(-0.116 \cdot G_b)} \quad (5)$$

로 정하였으며<sup>[2,7]</sup>,  $a_1, a_2$ 는 실험상수를,  $G_b$ 는 결합도를,  $D_g$ 는 입자의 평균 직경을 의미한다.

### 2.3 연삭 슷들 표면에서의 입자거동

연삭이 진행되면서 슷들 표면에서는 입자의 마모 및 탈락과 자생작용에 의한 새로운 입자의 출현 등 계속적인 변화가 일어난다. 일정한 연삭 조건에서 연삭 입자가 생성되어  $n$ 회 연삭까지 남아 있을 확률  $S(n)$ 은 다음과 같다<sup>[2,4,7]</sup>.

$$S(n) = \exp(-n/N) \quad (6)$$

여기서,  $n$ 은 슷들과 공작물의 간섭횟수로서 슷들 회전수와 가공 시간의 곱으로 표현된다.  $N$ 은 연삭 입자의 생성으로부터 탈락까지의 평균 절인 수 명으로서 칩의 단면적이 클수록, 공작물의 경도가 높을수록, 그리고 절인 강도가 작을수록 감소한다. 절인의 마모와 탈락으로 절인 선단이 슷들의 표면으로부터 후퇴하면 슷들 내층에 있던 절인이 새로이 연삭에 참여하게 되는데 이 비율을 절인의 신출율  $E(n)$ 으로 하고 1회 연삭에서의 신출율을 0~1의 값으로 한다. 신출율은 칩의 단면적이 크고 공작물의 경도가 높고 절인 강도가 낮은 경우 절인이 탈락하기 쉬우므로 증가한다. 따라서, 슷들 입자의 잔존율과 신출율을 이용하여 임의의 연삭 시점에서의 가공에 참여하는 전체 절인수를 산출할 수 있다.  $k-1$ 회에서 탈락되지 않고  $k$ 회까지 남아있는 잔존 절인수  $C_s$ 는<sup>[2,4,7]</sup>

$$C_s = C_i(k-1)S(k), \quad k \geq 1 \quad (7)$$

와 같이  $k-1$  회에서의 절인수  $C_i(k-1)$ 에 잔존율  $S(k)$ (0~1사이)를 곱하여 얻는다. 또한, 신출 절인수  $C_n$ 은<sup>[2,4,7]</sup>

$$C_n = C_i(k) E(k) \quad (8)$$

와 같이  $k$  회에서의 절인수  $C_i(k)$ 에 신출율  $E(k)$ 를 곱하여 얻을 수 있다. 그러므로  $k$  시점에서의 숫돌 표면상의 전체 절인수  $C_i(k)$ 는 잔존 절인수와 신출 절인수를 합한 형태로 다음과 같이 표현이 가능하며,  $C_i(0)$ 에는 초기 절인수  $C_0$ 가 이용된다<sup>[2,7]</sup>.

$$\begin{aligned} C_i(k) &= C_s + C_n \\ &= C_i(k-1) S(k) + C_i(k) E(k) \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_i(k) = C_i(k-1) \frac{S(k)}{1-E(k)} \quad (10)$$

#### 2.4 연삭 숫돌 반경 감소량

연삭 가공 중에 연삭 숫돌의 반경은 입자의 마모 및 결손, 탈락에 의해 감소하게 된다<sup>[6]</sup>. 그러므로 입자의 마모속도 및 결손속도를 이용하여 반경 감소량을 얻을 수 있는데 마모속도  $D_w$ (mm/회)는 칩 체적에 의해 다음과 같이 크게 두 가지의 실험식으로 분류된다<sup>[2,7]</sup>.

$$\begin{aligned} D_w(k) &= 8550 U_s^{2.2} H_w Z^{1.2}, \quad U_s < 0.004 \\ &= 0.205 U_s^{0.531} H_w Z^{1.2}, \quad U_s \geq 0.004 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $U_s$ 는 제거된 칩에 체적으로

$$U_s = \left(\frac{v}{V}\right) \cdot \frac{A}{C_i^2} \quad (12)$$

와 같은 계산식을 사용하였으며<sup>[6,7]</sup>,  $v$ 는 공작물 속도를,  $V$ 는 숫돌의 속도를,  $A$ 는 절입량을,  $C_i$ 는 단위 길이당 절인수를 나타낸다.  $H_w$ 는 마모 속도 함수로서 공작물의 정도에 대한 지수함수 형태의 관계식으로 나타나며,  $Z$ 는 절인 강도비(Ratio of Cutting Edge Strength)로서 결합도와 드

레싱 효과의 상관 관계식으로 표현된다.

또한, 결손 속도  $D_f$ (mm/회)는 칩 체적에 의해 다음과 같이 크게 두 가지 실험식으로 분류할 수 있는데 여기서,  $H_f$ 는 결손 속도 함수로서 공작물 정도에 대한 지수함수 형태의 관계식이다<sup>[2,7]</sup>.

$$\begin{aligned} D_f(k) &= 0.753 U_s^{1.5} H_f Z^{-1.0}, \quad U_s < 0.01 \\ &= 0.017 U_s^1 H_f Z^{-0.8}, \quad U_s \geq 0.01 \end{aligned} \quad (13)$$

절인의 마모 속도를 이용하여 숫돌의 반경 감소량을 다음과 같이 얻을 수 있다<sup>[2,7]</sup>.

$$W_w(k) = C_w [D_w(k) \cdot n]^{0.25} \quad (14)$$

여기서,  $C_w$ 은  $n$ 에 따라서 구분되어 얻어지는 실험적인 상수이다. 또한, 절인의 결손 속도를 이용하여 절인 결손에 의한 숫돌의 반경 감소량은<sup>[2,7]</sup>

$$W_f(k) = C_f [(D_f(k) \cdot n)^{0.284}] \quad (15)$$

와 같으며,  $C_f$ 는  $n$ 에 따라 구분되어 얻어지는 실험적 상수이다. 입자의 탈락에 의한 숫돌의 반경 감소량은<sup>[2,7]</sup>

$$W_{fall}(k) = 0.005 \frac{D_g}{1000} R_{fall} \quad (16)$$

로 표현되며, 탈락률을 나타내는  $R_{fall} = 1 - S(k)$ 이다. 그러므로 연삭 숫돌의 전체 반경 감소량은

$$W_t = W_w + W_f + W_{fall} \quad (17)$$

와 같이 마모, 결손, 탈락에 의한 숫돌의 반경 감소량을 합하여 얻어진다<sup>[2,7]</sup>.

#### 2.5 연삭력(Grinding Force) 추정

연삭 가공에서는 절인이 공작물에 접촉하여 슬라이딩(Sliding)하다 절삭(Cutting) 영역에서 연삭작업을 수행한다. 연삭력은 슬라이딩과 절삭영역에서 모두 발생하며 전체 연삭력은 슬라이딩에 의한 연삭력과 절삭에 의한 연삭력을 합한 형태로 표현이 가능하다<sup>[6]</sup>. 연삭 가공 중에 숫돌 절인에 작용하는 접선 연삭 저항  $F_t$ 와 법선 연삭 저항  $F_n$ 은 다음

과 같이 표현 할 수 있다.

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} \quad (18)$$

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl}$$

여기서,  $F_{n,c}$ 는 절삭 영역에서의 법선력(Normal Force)를,  $F_{n,sl}$ 은 미끄러짐 영역에서의 법선력  $F_{t,c}$ 는 절삭영역에서의 접선력(Tangential Force), 그리고  $F_{t,sl}$ 은 미끄러짐 영역에서의 접선력을 나타내며, 절삭에 관계된 파라미터들을 적용하면 다음과 같이 표현된다<sup>[2,7]</sup>.

$$F_n = \lambda \sigma A_m + \tau A_a \quad (19)$$

$$F_t = \sigma A_m + \mu \tau A_a$$

여기서  $A_m$ 은 칩의 횡단면적,  $\tau$ 는 압축 항복 응력,  $A_a$ 는 공작물과 스톨 입자 마모 면과의 실제 접촉 면적을 의미한다.  $\lambda$ 는 연삭 입자의 예리함 정도를 나타내는 것으로서 절인 전체의 평균 마모면의 길이인  $W(k)$ 를 전체 절인수로 나누어서 절인에 대한 평균적인 형상계수  $\lambda$ 를 정하였다<sup>[2,7]</sup>.

$$\lambda = 3.52 \left( \frac{W(k)}{C_i(k)} \right)^{0.2} \quad (20)$$

$\sigma$ 는 공작물의 바 연삭 저항으로서 공작물 경도  $H$ 가 크거나 칩 단면적  $A_m$ 이 적을수록 커지는데

$$\sigma = 297 A_m^{-0.21} \left( \frac{H}{454} \right)^{0.15} \quad (21)$$

와 같은 실험식을 사용하였다<sup>[5,7]</sup>.  $\mu$ 는 절인과 공작물과의 마찰계수를 나타내는 실험식으로서

$$\mu = 0.205 G_s^{-0.25} + 0.12 \left( \frac{H}{454} \right)^{-0.5} C_t^{-0.584} \quad (22)$$

와 같이 스톨 입도  $G_s$ 와 연삭 액의 종류에 영향을 받는다. 연삭 액의 종류  $C_t$ 는 Dry=1, Water=3, Solution=5, Soluble=5, Emulsion=7, Oil=1로 구분하여 수치화 하였다<sup>[2,7]</sup>. 또한 연삭 동력  $P$ 는 다음

과 같이 나타난다.

$$P = 0.0098 F_t V C_i(k) \quad (23)$$

즉, 단위 연삭 폭 당의 접선 연삭 저항  $F_t$ 에 연삭 속도  $V$ 를 곱한 형태로 나타난다<sup>[2,7]</sup>.

## 2.6 표면 거칠기 추정

연삭 가공면의 거칠기는 스톨의 절입량에 영향을 받을 뿐만 아니라 스톨 표면에 영향을 미치는 드레싱 조건 및 연삭 중의 스톨면의 변화에도 영향을 받는다. 표면 거칠기에 직접 영향을 미치는 절인 밀도, 선단각, 스톨과 공작물의 지름 및 주속도 등에 대한 연구결과<sup>[4,5,6]</sup>에 기초하여 가공 면의 거칠기 추정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$R_z(k) = 2000(C_i(k)/1000)^{-0.8} (1.5\Delta)^{0.4} \cdot [W(k)/C_i(k)]^{0.8} \{ (v/V)[1/D + 1/d]^{0.5} \}^{0.8} + R_{min} \quad (24)$$

$$(\text{단, } \Delta > 0, R_{min} = 1.7\Delta^{0.13})$$

표면 거칠기는 절인수가 많을수록, 평균 마모면의 길이가 클수록, 공작물의 속도가 작을수록, 스톨의 속도가 클수록, 스톨의 지름이 클수록, 그리고 스톨 절입량  $\Delta$ 가 작을수록 작아지는 것으로 정하였으며, 절입량이 있을 때 경험적으로 가장 작은 값을 이용하여 표면 거칠기 최소 값을 계산하여 표시하였다<sup>[2,7]</sup>.

## 3. 추정식의 타당성 평가 실험

### 3.1 실험 장치 셋업

연삭 스톨 마모 추정에 대한 검증 실험을 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 적용된 연삭기는 범용 평면 연삭기로서 연삭 테이블 위에 공작물과 레이저 스캐닝 마이크로미터(Laser Scanning Micrometer : LSM)<sup>[11]</sup>을 병렬로 설치하여 LSM의 탈착 없이 가공 후에 연삭 스톨을 LSM으로 이동하여 스톨의 마모량을 측정 할 수 있도록 구성하였다. 공작물 아래에는 공구 동력계(Tool Dynamometer)를 두어 가공 중에 연삭력을 측정할 수 있도록 하였으며, 휴대용 측정식 표면 거칠기 센서를 이용하여

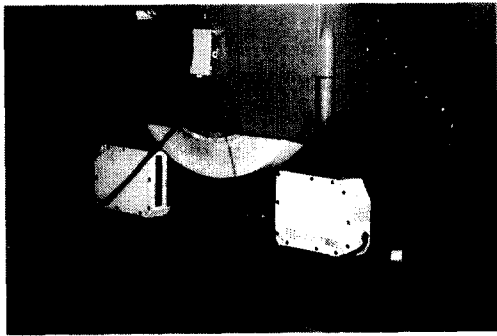


Fig. 1 Experimental setup for measuring grinding wheel wear

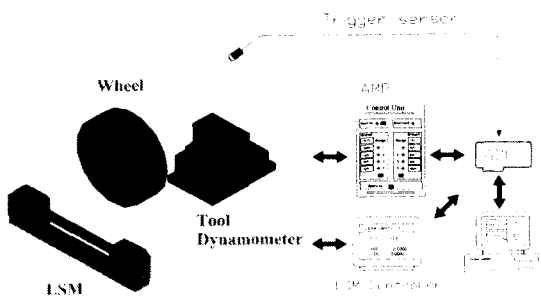


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

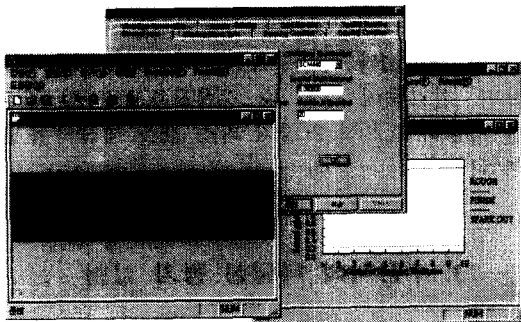


Fig. 3 Typical screens of the simulation program

Table 1 Experimental conditions<sup>[1]</sup>

Property/Condition	Data
Grinding wheel	WA90JmV
Width of wheel	38mm
Cutting speed	$\phi$ 240mm $\times$ 1700rpm
Table feeding speed	0.154m/s
Grinding method	Up-Grinding
Depth of cut	10 $\mu$ m
Workpiece	SCM4

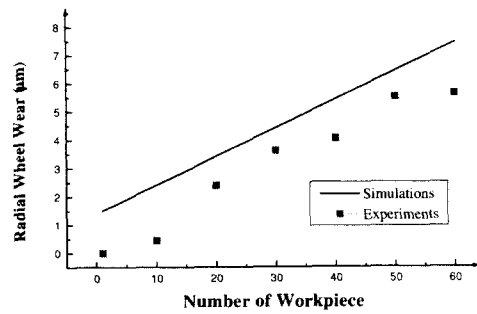


Fig. 4 Comparison of prediction and experimental result<sup>[1]</sup> for grinding wheel wear

가공물의 탈착 없이 기계 위에서 가공면의 표면 거칠기를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 스톨 앞면 커버에는 비접촉 트리거 센서를 장착하여 스톨의 특정 점에 동조되어 측정이 이루어지도록 하였다. Fig. 2는 실험 장치의 개략도를 보인 것이다.

한편, 연삭 공정 모델링에 대한 시뮬레이션 프로그램을 Fig. 3에 보인 것처럼 윈도우즈 환경에서 개발하였다. 연삭 가공에 대한 전반적인 조건들을 입력 한 후 스톨 마모나 표면 거칠기, 연삭력 등과 같은 연삭 파라미터들을 그래픽으로 확인 할 수 있으며 파일 저장 기능을 갖고 있다.

### 3.2 연삭 스톨 마모에 대한 실험적 검증

제안된 추정식을 검증하기 위해 Table 1과 같은 연삭 조건에서 개발된 연삭 공정 모델링 시뮬레이션 프로그램 결과와 실험치를 비교 분석하였다.

Fig. 4는 드레싱 후 연삭 횟수의 증가에 따른 스톨 마모의 변화를 보인 것으로서 스톨 마모 추정을 위한 시뮬레이션 결과가 실험 결과에 잘 부합됨을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 조건에서 부가적으로 측정된 공작물의 표면 거칠기 변화를 보인 것이다. 연삭 진행 정도에 따라 측정된 표면 거칠기가 기울기를 갖고 증가하고있는 것을 볼 수 있다. 플런지 연삭(Plunge Grinding)의 경우 연삭 가공이 진행되면 일반적으로 표면 거칠기가 증가 되는 것이 실험적으로 검증된 바 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 모델링에 의한 추정 결과에서는 비교적 일정하게 유지되어 나타나고 있는데 이는 표면 거칠기에 관여하는 스톨 마모나 연삭력 변화 등에 대한 효과가 정확하게 고려되지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 계산에 의한 표면 거칠기 값이 평균적인 의미에서 활용성이 있을 것으로 사료된다.

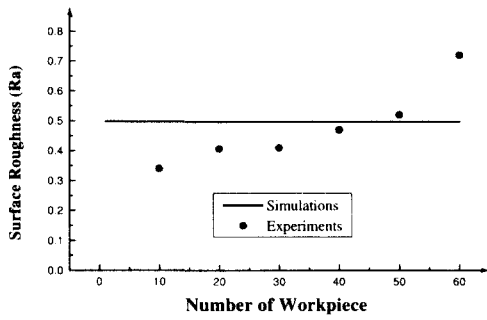


Fig. 5 Comparison of prediction and experimental result<sup>[1]</sup> for the surface roughness

Table 2 Experimental conditions

Property/Condition	Data
Grinding wheel	WA4517V
Width of Grinding	29mm
Cutting speed	$\phi$ 287mm × 1700rpm
Table feeding speed	0.72m/s
Grinding method	Up-Grinding
Depth of Cut	10 $\mu$ m
Workpiece	SM20C



Fig. 6 Comparison of prediction and experimental result for grinding wheel wear

또한, 슷돌 마모 추정식의 다양한 검증을 위해 연삭 조건을 바꾸어서 실험하였다. Table 2와 같이 연삭 슷돌을 기존 보다 연한 것으로 하고 재질이 다른 공작물을 선택하였다. Fig. 6은 연삭이 진행되면서 연삭 슷돌 마모에 대한 추정식의 시뮬레이션 결과 및 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 추정식의 결과의 오차 정도가 유의수준을 크게 벗어나지 않는 범위에서 실험의 경향을 따르고 있다.

부가적으로 수행한 연삭력 측정의 결과로서

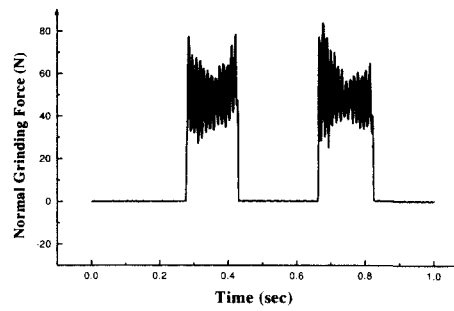


Fig. 7 Typical plot for normal grinding force in plunge grinding process

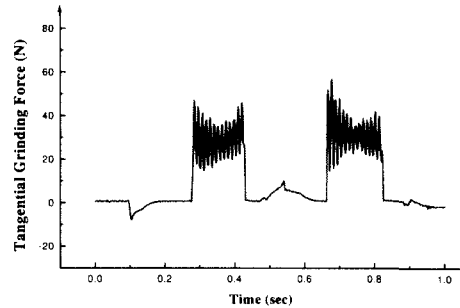


Fig. 8 Typical plot for tangential grinding force in plunge grinding process

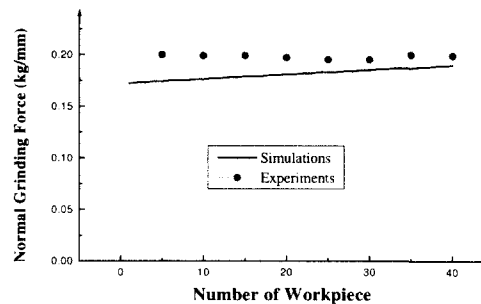


Fig. 9 Comparison of prediction and experimental result for the normal grinding force

Fig. 7은 Table 2의 연삭 조건에서 가공물에 가해지는 법선 방향의 연삭력을 보인 것이며 Fig. 8은 접선 방향의 연삭력을 보인 것인데 법선 방향 힘이 접선방향 힘보다 크게 나타나고 있다. Fig. 8에 보인 접선 저항력에 관한 그림을 보면 연삭이 이루어지지 않는 상태에서 신호가 나타나고 있는데 이는 유압 장치에 의해 구동되는 연삭 테이블이 왕복 할

때 급격한 방향 전환에 의해 발생하는 공작물의 관성에 의한 영향으로 사료된다. 본 연구에서는 법선 연삭력을 중심으로 실험치와 계산치를 비교하였다. Fig. 9는 연삭 진행에 따른 연삭력 추정식의 시뮬레이션 결과와 실험에서 얻어진 법선 연삭력을 비교한 것으로서 연삭력 추정이 실험 결과를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연삭 공정에 대한 주요 파라미터들을 수치화하고 추정식을 유도하였다. 또한, 제안된 추정식을 이용하여 윈도우즈 환경에서 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 실험적 검증을 위해 범용 평면 연삭에 적용하였다. 실험 결과, 스톨 마모 추정 시뮬레이션 결과가 실험 결과에 잘 부합됨을 확인하였다. 또한, 부가적으로 행해진 법선 연삭력 및 표면 거칠기에 대한 비교 평가에서도 법선 연삭력의 경우 제안된 추정식이 실험 결과를 잘 반영하였으며, 표면 거칠기의 경우 평균적인 의미에서 활용성을 기대할 수 있었다. 그러나 유도된 연삭 파라미터들이 원통 연삭을 기준으로 개발되었으므로 평면 연삭으로의 확장에 있어서 파라미터 변환 입력에 따른 개선의 여지가 있는 것으로 사료된다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품”사업 중 “연삭메카니즘의 핵심부품 설계 기술 개발”과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. 주광훈, 김현수, 홍성욱, 박천홍, “LSM을 이용한 연삭 스톨 마모 모니터링,” 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 12, pp. 82-87, 2000.
2. 이용숙, 원통 연삭 작업의 시뮬레이션에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원 기계공학과, 1997.
3. T. Suto, H. Inoue, T. Waida, H. Noguchi, K. Tamakohri, T. Sata, “A newly developed in-process sensor for detecting active grain wear in grinding operation,” Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 229-234, 1975.
4. T. Suto. and T. Sata, “Simulation of grinding process based on wheel surface characteristics,” Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 15, No. 1, pp. 27-33, 1981.
5. 小野浩二, 研削仕上, 眞書店, 東京, pp. 21-24, pp. 50-80, 1952.
6. S. Malkin, Grinding technology : Theory and Application of Machining with Abrasives, Chapter 3, 5, 7, 8, John Wiley & Sons, New York, 1988.
7. E. S. Lee, J. K. Lee and M. Y. Yang, “Simulation of cylindrical plunge grinding based on the behaviour of cutting edge wear,” Int. J. Prod. Res., Vol. 35, No. 10, pp. 2917-2937, 1997.
8. J. Verkerk, “The real contact length in cylindrical plunge grinding,” Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 259-264, 1975.
9. M. Maris, R. Snoeys, J. Pèters, “Analysis of plunge grinding operations,” Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 225-230, 1975.
10. L. Tigerström, “A model for determination of number of active grinding edges in various grinding process,” Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 271-275, 1975.