

# 통계적방법을 이용한 연삭표면의 3차원모델링

김동길\*, 김영태\*, 이상조\*\*

## 3D Modeling of Ground Surface with Statistical Method

Dong Kil Kim\*, Yong Tae Kim\* and Sang Jo Lee\*\*

### ABSTRACT

This paper simulated surface grinding process with statistically simulated grinding wheel topography, considering ridge formation phenomenon when grain scratch workpiece.

Wheel grain is modeled as hybrid sphere and cone. Grinding wheel characteristic was evaluated with stylus by expanding the scanning region of the profilometer from a straight line to a plane. Each grain's diameter and semi-angle are assumed as normal distribution, each grain's protrusion height from wheel plane is assumed gamma distribution. So grinding wheel is simulated with grain's position randomly distributed without overlapping.

Ground surface is 3-dimensionally simulated considering ridge formation of workpiece by each grain's cutting, and then surface profile and surface roughness parameters are compared with real ground workpiece.

**Key Words** : Surface grinding (평면연삭), Simulation (시뮬레이션), Surface roughness (표면거칠기), Ridge formation (살돋음), Statistical method (통계적방법)

### 1. 서론

연삭가공은 형상 및 크기가 일정하지 않은 슛돌입자를 결합체로 고정시켜 공작물을 가공하는데 슛돌입자의 입체적 불규칙성과 슛돌입자와 결합체의 복잡한 관계 때문에 슛돌의 정확한 성능을 파악하기 힘들다. 대부분의 연삭과정은 숙련된 기술자의 경험에 의존하여 가공정도를 예측하여 왔다. 따라서 고정밀 고능률 연삭을 위해서는 이러한 연삭 가공 메커니즘의 복잡한 상호 관계를 명확하게 해석하고, 각각의 가공변수들을 수학적으로 모델링 하여 개별 연삭 슛돌입자와 공작물의 상호관계를 시뮬레이션하여 가공정도를 예측하는 것이 필요

하다.

1960년대부터 연삭메커니즘을 해석하기 위해 연삭스들의 특성을 통계적 방법으로 처리하는 연구가 이루어져왔고, 최근에는 디지털 컴퓨터의 발달로 인해 개별 연삭입자에 대하여 수학적으로 모델링하여 공작물과의 상호관계를 해석하려는 연구가 이루어지고 있다<sup>(1)</sup>.

Kassen(1969)은 슛돌의 표면을 축침으로 프로파일을 구한 다음 연삭입자의 순번을 정하여 공작물위로 지나가면서 간섭을 일으키는 부분을 제거하여 이를 2차원적으로 시뮬레이션 하였다. S. S. Law와 S. M. Wu<sup>(2)</sup>는 테이블 이송속도, 연삭깊이, 입자의 선단각을 체계적으로 변화시키면서 연삭입

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 연세대학교 기전공학부

자의 분포를 나타내는 Z분포를 제안하여 연삭과정을 시뮬레이션 하였다. X. Chen과 W. B. Rowe<sup>(3)</sup>은 연삭입자를 드레싱 방법에 따라 수학적으로 모델링하여, 연삭입자가 공작물표면을 가공하고 지나갈 때 살돌음 현상에 의한 공작물의 형상을 포물선이라고 가정하여 표면거칠기와 연삭저항을 시뮬레이션하였다.

본 연구에서는 연삭숫돌 개별입자에 대하여 직경, 원추반각등을 통계적으로 모델링하였고, 연삭숫돌표면은 랜덤함수를 사용하여 연삭입자가 불규칙하게 배열되도록 하였다. 연삭입자에 의한 살돌음 현상을 고려하여 시뮬레이션된 연삭숫돌에 의해 가공변수에 따른 공작물의 표면을 3차원적으로 시뮬레이션하여 연삭가공표면을 예측하였다.

2. 이론

2.1 연삭숫돌

연삭입자는 일정한 형태와 모습을 가지지 않고 예리한 연삭날을 가지는 다면체 구조를 띄고 있다. 연삭입자가 연삭가공에 참여하는 부분은 수십 $\mu\text{m}$ 이 내이기 때문에, Fig. 1과 같이 선단부분은 원추반각  $\gamma$ 를 가지는 원추와 직경  $d_g$ 를 가지는 구의 복합형태로 모델링 하였다.

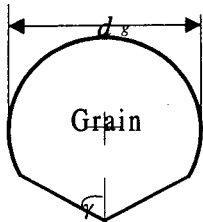


Fig. 1 Modelling of grain

연삭숫돌입자 직경은 숫돌입도 S에 관한 식으로 평균적인 값을 사용하고 있다<sup>(4)</sup>.

$$\bar{d}_g = 45 S^{-1.28} \quad (1)$$

각각의 연삭숫돌 입도에 대해서 숫돌입자의 크기는 일정한 범위 내에서 일정한 통계적 분포를 가지므로, Fig. 2와 같이 정규분포를 이루고 있다고 가정 할 수 있다<sup>(5)</sup>. KS L 6001에 의하면 연삭숫돌

각각의 입도는 5단계의 표준체를 통과해야 하는데, 1단계 표준체는 연삭입자가 모두 통과해야 하며 5단계 표준체는 최대 3%까지 통과해도 무방한 표준체를 규정하고 있는데, 간단히 1단계 표준체의 직경과 5단계 표준체의 직경을 95%의 신뢰도를 가지는 정규분포의  $\bar{d}_g - 2\sigma_{d_g}$ 와  $\bar{d}_g + 2\sigma_{d_g}$ 로 가정할 수 있다. 확률밀도 분포함수는 식(2)과 같이 표현가능하다.

$$f(d_g) = \frac{1}{\sigma_{d_g} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_g - \bar{d}_g}{\sigma_{d_g}}\right)^2\right], \quad (2)$$

$$(2\sigma_{d_g} - \bar{d}_g \leq d_g \leq 2\sigma_{d_g} + \bar{d}_g)$$

Table 1은 #30~#80의 연삭숫돌에 대하여 위 식(1)과 (2)를 사용하여 평균과 표준편차를 나타내었다.

단위 면적당 연삭입자의 개수를  $n_g$ 라고 하면 연삭숫돌의 입도와, 조직률로부터 다음과 같이 구하여 질 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$n_g = \frac{6}{\pi} \frac{V_g}{d_g^2} \quad (3)$$

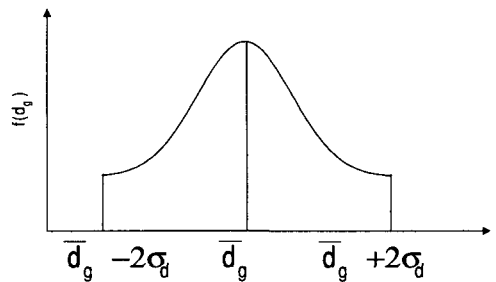


Fig. 2 Probability density function of grain diameters

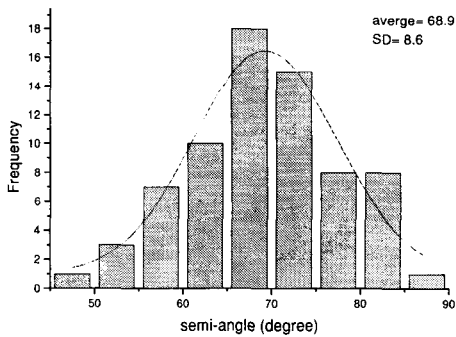
Table 1 Mean and standard deviation of wheel grain

S(#)	$\bar{d}_g(\mu\text{m})$	$\sigma_{d_g}(\mu\text{m})$
30	579	52
46	335	49
60	238	35
80	165	23

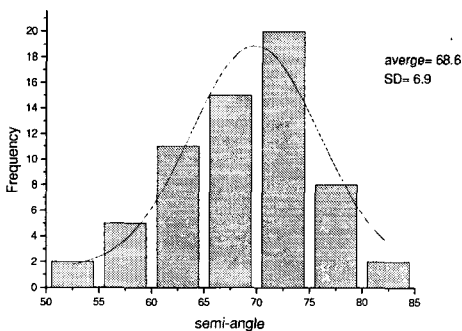
### 2.2 연삭숫돌의 topography

표면조도측정기와 X-Y 테이블을 이용하여 연삭숫돌의 형상을 3차원적으로 측정할 수 있다<sup>6)</sup>. 연삭입자와 기공 사이에 연삭 칩이 존재하면, 측정으로는 연삭숫돌과 연삭칩을 구별하지 못하기 때문에, 드레싱을 수회 반복하여 연삭 칩을 전부 제거한 후 SV-600(Mitutoyo) 표면조도측정기를 사용하여 연삭숫돌표면을 측정을 하였다.

연삭입자의 원추반각을 측정하기 위해 위의 측정된 데이터를 3차원적으로 조합하여 연삭입자가 돌출되어 피크를 이루는 부분에서 연삭입자의 돌출높이와 폭을 측정하여 연삭입자의 원추반각을 구하였다. Fig. 3-(a)은 WA46k7v를 숫돌회전가로방향으로 원추반각을 측정된 도수분포를 나타내고, Fig. 3-(b)는 숫돌회전방향으로 측정된 도수분포인데 연삭입자의 원추반각은 숫돌회전방향과 숫돌회전가로방향의 분포는 같은 형태를 가진다고 할 수 있다.



(a) Traverse direction



(b) Plunge direction

Fig. 3 Distribution of grain angle, WA46k 7V, D=205mm, 3460rpm, fd=0.2mm/rev

### 2.3 연삭입자의 높이 및 분포

3차원적으로 측정된 연삭숫돌표면에서 연삭입자의 돌출높이는 연삭숫돌의 최외각의 기준선으로부터 깊이를 계산하여 돌출높이를 역으로 계산할 수 있다. 연삭입자의 돌출높이는 최외각의 기준선으로 빈도수가 많고, 연삭숫돌 중심으로 향할수록 빈도수가 적어지는 감마분포를 이루고 있다. 감마분포의 기본식은 다음과 같다<sup>7)</sup>.

$$f(z, \sigma, \lambda) = \frac{1}{\sigma \Gamma(\lambda)} \left(\frac{z}{\sigma}\right)^{\lambda-1} \exp\left(-\frac{z}{\sigma}\right)$$

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} z^{\lambda-1} \exp(-z) dz$$

(4)

여기서, z는 변수, λ는 shape 파라미터, σ는 scale 파라미터이다.

Fig. 4는 연삭입자의 최외각 기준선으로부터 연삭숫돌의 중심방향으로의 분포를 나타내었고, 이로부터 λ = 0.384, σ = 32.56을 구하였다.

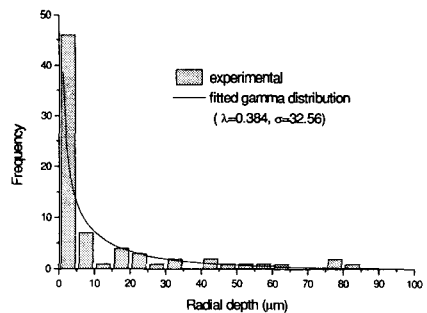


Fig. 4 Gamma distribution of grain height

연삭숫돌은 연삭입자, 기공, 결합제등과 혼합되어 3차원적으로 불규칙하게 분포하고 있다. 연삭입자의 중심이 결합제 표면보다 높게 있으면 드레싱이나, 연삭가공중에 탈락될 가능성이 크고, 연삭입자의 중심이 결합제 표면보다 너무 낮게 위치하면 연삭입자는 연삭에 참여하지 않는다. 연삭입자의 중심이 연삭 숫돌표면에 위치한다고 가정하면 2차원적인 좌표를 얻을 수 있다.

폭이 w인 원통형 연삭숫돌에서 숫돌표면을 평면직교 좌표계로 표시하기 위해 평면으로 펼쳤고, 이때 일정하게 분포한 랜덤함수에서 발생한 값  $R^U$

을 연삭입자의 중심의 좌표값이라 하였다. 연삭입자  $i$ 가 Fig. 5와 같이 존재한다고 하면, 임의의 연삭입자  $G^i, G^j$  에 대하여 다음과 같은 식이 만족한다<sup>[8]</sup>.

$$\sqrt{(I_i - I_j) + (J_i - J_j)} \geq \frac{(d_{g,i} + d_{g,j})}{2} \quad (5)$$

여기서,  $j=1$  to  $i-1$  이다.

$$I_i = R^U, I_j = R^U, J_i = R^U, J_j = R^U \quad (6)$$

여기서,  $I_i, I_j$  는  $G^i, G^j$  의 중심 I 좌표,  
 $J_i, J_j$  는  $G^i, G^j$  의 중심 J좌표,  
 $d_{g,i}, d_{g,j}$  는  $G^i, G^j$  의 직경,  
 $R^U$ 는 uniformly distributed random number 이다.

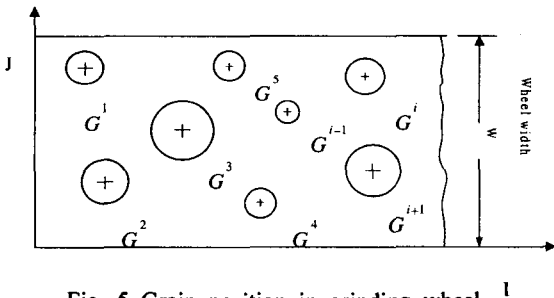


Fig. 5 Grain position in grinding wheel

### 2.4 연삭입자의 운동학

Fig. 6와 같이 연삭입자가  $N$  rpm으로 회전하면서 이송속도  $V_w$ 인 풀린지 연삭을 할 때 연삭입자  $G^i$ 의 시간에 따른 좌표계를 나타내기 위해 Fig. 7와 같이 연삭입자의 Z-Z 단면을 생각한다.

Z-Z 단면에서 연삭입자  $G^j$ 의 좌표계는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$M^{G^i} = - |g^{G^i}(L^{G^i} - e^{G^i})| + f^{G^i} \quad (7)$$

여기서,  $e, f$  는 연삭입자  $G^i$ 의 중심점이고  $g$ 는 원추반경  $\gamma$ 와 연삭입자  $G^i$ 는 다음과 같이

표현할 수 있다.

$$g = \cot(\gamma) \quad (8)$$

연삭입자  $G^i$ 의 시간에 관한 좌표계는 다음과 같다.

$$X^{G^i} = x_0^{G^i} + V_w t + (R + M^{G^i}) \cos(\theta_0^{G^i} + \phi t) \quad (9)$$

$$Z^{G^i} = (R + M^{G^i}) \sin(\theta_0^{G^i} + \phi t) \quad (10)$$

$$Y^{G^i} = L^{G^i} \quad (11)$$

$$\phi = N/60 \text{ rad/sec}, \quad (12)$$

여기서,  $x_0^{G^i}, \theta_0^{G^i}$ 는  $G^i$ 의 초기값이다.

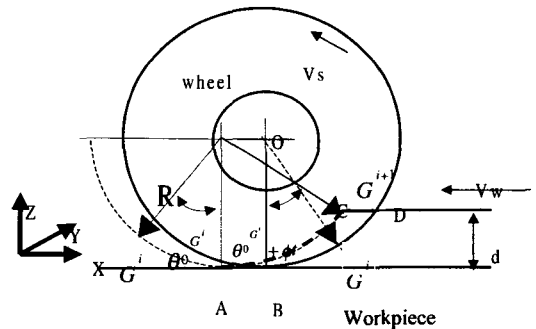


Fig. 6 Kinematics of grinding wheel

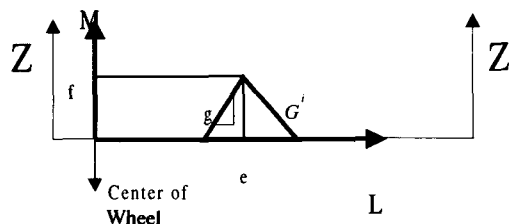


Fig. 7 Modeling of grain in grind wheel

### 2.5 살돋음의 모델링

연삭입자  $G^i$ 가 불규칙한 형상의 공작물을 제거하고 지나갈 때, 제거되는 공작물은 연삭입자  $G^i$ 의 중심에 대하여 비대칭적 형상을 가지게 된다. 연삭입자  $G^i$ 에 의한 살돋음 현상을 수학적으로 모델링 하기 위해, 연삭입자  $G^i$ 의 좌우로 살돋음 되는 면적은 연삭입자  $G^i$  중심선을 기준으로 하여 연삭되어지는 면적에 비례하고, 살돋음 형태를 포물선이라고 가정한다면 Fig. 8에서와 같이 나타낼 수 있다.

연삭입자  $G^i$ 의 우측에 발생하는 살돋음을 생각할 때, 살돋음 되는 포물선의 면적은 연삭제거 되는 면적의 살돋음 비  $\epsilon$  에 비례하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon \frac{b_0' h_0'}{2} = \frac{4}{3} b_1 h_1 \quad (13)$$

연삭입자  $G^i$ 의 좌측의 삼각형과, 살돋음 포물선의 꼭지점과 공작물의 초기표면이 이루는 밀변에 의해 생기는 삼각형을 닮음 꼴이라고 한다면,

$$\frac{h_0}{b_0'} = \frac{h_1}{b_1'} \quad (14)$$

식(13)과 식(14)에 의해 살돋음 되는 포물선의 밀변과 높이는 다음과 같다.

$$b_1 = b_0' \sqrt{\frac{3}{8}} \epsilon \quad (15)$$

$$h_1 = h_0' \sqrt{\frac{3}{8}} \epsilon \quad (16)$$

그러므로 포물선의 중심에서의 좌표계  $Z'(Y')$  는 연삭입자  $G^i$ 에 의한 연삭깊이  $h_0'$ , 연삭폭  $b_0'$ , 살돋음 비  $\epsilon$  로 나타낼 수 있다.

$$Z' = h_0' \sqrt{\frac{3}{8}} \epsilon \left( 1 - \frac{8}{3b_0'^2 \epsilon} Y'^2 \right) \quad (17)$$

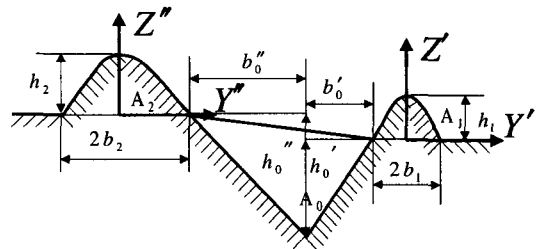


Fig. 8 Modeling of ridge formation

### 3.시뮬레이션 방법

#### 3.1 연삭숫돌표면의 시뮬레이션

연삭숫돌표면을 생성하기 위한 플로우 차트는 Fig. 9에 나타내었으며 다음과 같은 순서로 시뮬레이션한다. 초기조건으로 연삭숫돌입자의 개수  $N_g$  를 구한 후, 각각의 연삭입자에 대한 직경과 원추 반각을  $R^N$  (Normally distributed random number)을 이용하여 구하고,  $R^G$  (Gamma distributed random number)를 이용하여 돌출 높이를 구한다.  $i$ 번째 연삭 숫돌  $G^i$ 의 중심의 좌표  $I_i, J_i$ 를  $R^U$ 를 이용하여 임의의 시뮬레이션 영역에 위치시킨다. 식(5)을 만족하는지를 판단하여 만족하지 않으면 위의 과정을 반복한다

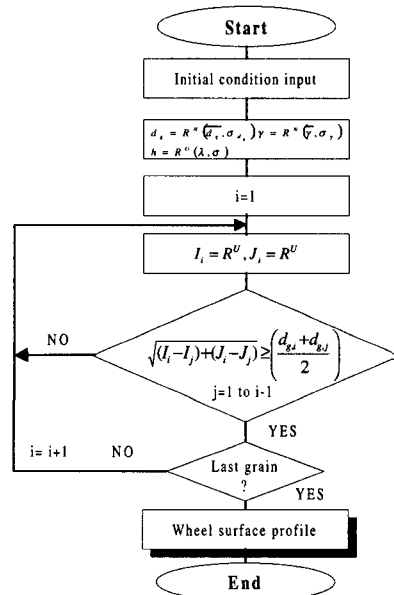


Fig. 9 Flow chart of grinding wheel simulation

### 3.2 연삭가공면의 시뮬레이션

연삭입자가 공작물위로 고속으로 지나갈 때 여러 가지 상호작용이 발생하는 데 본 연구에서는 다음과 같이 가정하였다.

- ① 연삭입자에는 한 개의 연삭날만이 생성된다.
- ② 연삭입자가 공작물을 연삭할 때 연삭입자의 마모, 탈락, 파쇄 작용은 발생하지 않는다.
- ③ 연삭입자가 공작물위로 지나간 부분의 공작물은 제거되고, 연삭입자주위로 살돈음되는 양은 제거되어지는 공작물의 면적에 비례한다.
- ④ 연삭기의 축강성으로 인한 진동과 연삭입자와 공작물의 탄성변형은 발생하지 않는다.

연삭과정을 시뮬레이션을 하기 위한 조건은 Table 2와 같고 플로우 차트는 Fig. 10과 같다.

초기 입력조건으로 연삭숫돌표면을 형성한후 랜덤하게 분포되어있는 연삭입자를 공작물과 접촉하는 가까운 부분부터 정렬한다.  $i$ 번째 연삭입자  $G^i$ 에 대하여  $\Delta t$ 을 증가시키면서  $X^{G^i}, Z^{G^i}$ 를 구한다.  $G^i$ 의 연삭유무를 판단하여 연삭을 할 때, 연삭깊이와 단면적을 계산하여 식(17)에 의해 살돈음량을 공작물에 첨가하게 된다.

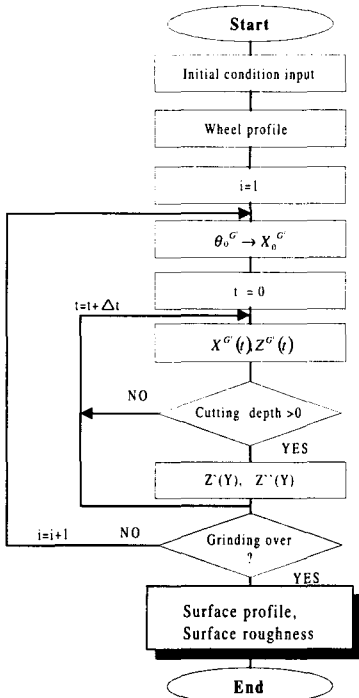


Fig. 10 Flow chart of grinding process

Table 2 Simulation condition

wheel	WA46k7v ψ 205
wheel speed	3460rpm, 37.1m/s
workpiece	$\epsilon = 0.2$
grinding type	surface plunge grinding
table speed	20m/min
grinding depth	5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 15 $\mu$ m
$n_g$	4.59no/mm <sup>2</sup>
resolution	$\Delta t$ : $5.4 \times 10^{-8}$ sec, X: 2 $\mu$ m, Y: 1 $\mu$ m

### 4. 실험

#### 4.1 실험장치

본 실험에서는 살돈음 현상을 고려하여 3차원적으로 시뮬레이션된 가공면과 실제 가공된면의 표면 거칠기를 비교분석하기 위해, Fig. 11와 같이 평면연삭기를 이용하여 시편을 가공하였다.

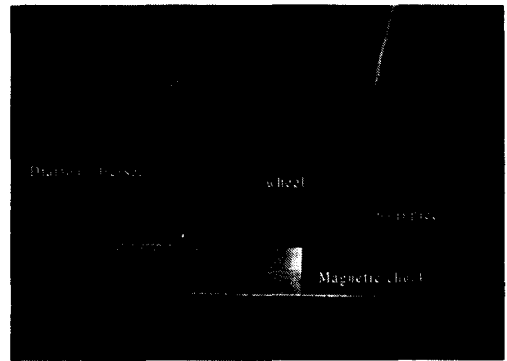


Fig. 11 Experimental set-up for surface grinding

화천기공(주)의 평면연삭기를 사용하였고 숫돌은 탄소공구강과 금형공구강에 사용되는 WA46K7V를 사용하였다. 가공한 공작물의 3차원적인 형상을 측정하기 위해 INTEK 광 간섭식 표면조도 측정기를 사용하였고, 가공된 단면의 표면 거칠기를 측정하기 위해 Mitutoyo SV-600 축침식 표면조도 측정기를 이용하였다. 기본적인 장치 및 기계사양은 Table 3와 같다.

Table 3 Specification of equipments

장치명	제작사	주요 사양
연삭기	화천기공	HGS 52A(1.5kW)
연삭숫돌	금강연마	WA46k 7V 205× 20× 50.8 3460rpm
연삭유	삼육특수유	수용성2중1호
촉침식조도 측정기	Mitutoyo	SV-600 tip radius 5 $\mu$ m
3차원 조도 측정기	INTEK	Accura I (W.S.I.)
공작물		SKD11(HRC60) 38× 38× 80

#### 4.2 단립 스크래치

WA46 연삭입자의 평균직경이 0.335mm이므로 드레싱에 의한 파쇄와 탈락을 고려하여 단석 다이 가몬드 드레서를 사용하여 연삭입자 한 개만 돌출되어 공작물을 스크래치하고 지나가도록, 폭 0.5mm, 높이 0.1mm만 돌출되도록 드레싱 하였다. SKD11를 이송속도 20m/min으로 하고, 연삭입자가 스크래치한 후 테이블의 플러지운동으로 스크래치 한곳을 중복하여 지나가지 않도록 하기 위해 1m/min속도로 트래버스 이송을 하였을 때 살돈음형상은 Fig.12과 같으며 이때 살돈음율  $\epsilon = 0.2$ 이다.

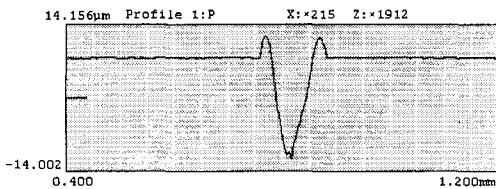


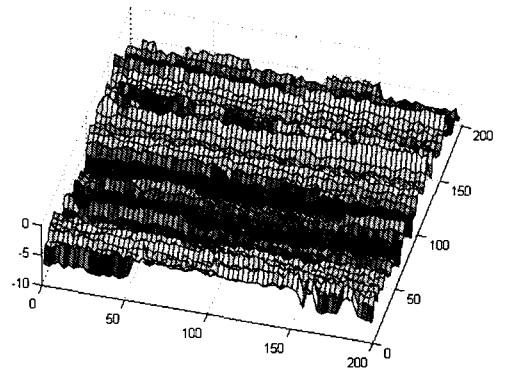
Fig. 12 Ridge formation shape SKD11 (HRC61)

### 5. 결과 및 고찰

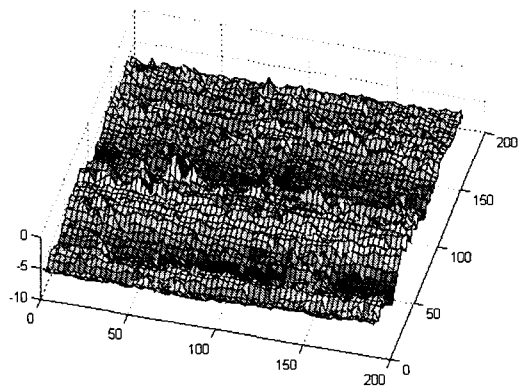
#### 5.1 연삭표면

Fig.13-(a)은 시뮬레이션된 연삭숫돌을 사용하여 절입깊이 10 $\mu$ m로 시뮬레이션하였을때 연삭표면이며, Fig.13-(b)은 SKD11을 실제로 가공한 표면을 ACCURA I 광학식 3차원 표면조도 측정기로 2.95 $\mu$ m 단위로 샘플링한 것이다. 시뮬레이션과 실험의

각각의 경우에 있어서 연삭입자가 지나간 그루브의 홈이 표면의 프로파일을 결정함을 관찰할 수 있다. 시뮬레이션 된 공작물의 표면에 불규칙적인 측수가 발생하는데, 이는 연삭입자가 불규칙적인 다면체 구조를 가지며 연삭입자에는 한 개 이상의 연삭날이 존재하여 살돈음이 연삭입자 주위뿐만 아니라 연삭날 사이에서도 발생하기 때문이다



(a) Simulated surface profile



(b) Experimental surface profile

Fig. 13 3D ground surface profile, depth 10 $\mu$ m

Fig. 14는 절입깊이 10 $\mu$ m일 때 트래버스 방향으로 시뮬레이션된 공작물을 1 $\mu$ m씩 샘플링한 단면과, 실제 공작물을 SV-600 촉침식 표면조도측정기를 사용하여 1 $\mu$ m씩 샘플링하여 1mm구간을 나타낸 것이다. 시뮬레이션된 단면은 프로파일의 피치와 밸리가 일정한 범위 내에서 고르게 분포하는데 비하여, 실제 공작물의 단면은 절입깊이가 증가함에 따

라 피크와 밸리의 차이가 큰 부분이 존재하는데 이는 단석 다이아몬드 드레서를 이용하였기 때문에 드레싱피드가 나사산의 피치를 형성하여 연삭숫돌 최외각 연삭입자의 높낮이에 의한 영향이라고 할 수 있다.

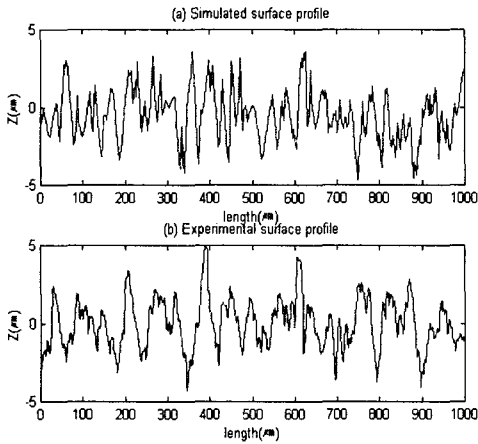


Fig. 14 Cross section of surface profile traverse direction, depth 10µm

Fig. 15는 절입깊이가 10µm일 때 연삭숫돌의 플런지 방향으로의 프로파일을 나타내고 있는데, 연삭입자들간의 간격과 연삭입자들의 돌출높이, 운동학적 관계에 의해 가공표면이 형성됨을 알 수 있다. 선행하는 연삭입자가 공작물을 연삭하고 지나가면 연삭입자의 궤적이 가공면의 프로파일을 생성하게 되고, 후행하는 연삭입자의 연삭깊이가 공작물 표면보다 높게 되면 공작물을 연삭하지않게 된다.

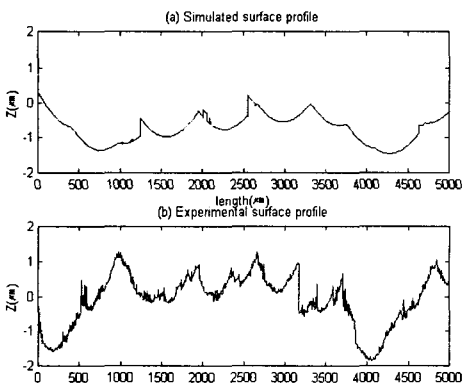


Fig. 15 Cross section of surface profile plunge direction, depth 10µm

그러나 후행하는 연삭입자의 연삭깊이가 공작물 표면 보다 깊게 되면 후행하는 연삭입자의 궤적이 가공면의 프로파일을 바꾸게 된다. 또한 후행하는 연삭입자들간의 간격에 의해 연삭단면적이 바뀌게 되는데 연삭깊이가 깊고 연삭입자간의 간격이 길면 연삭단면적이 증가하게 된다. 살들음에 의해 주위의 가공면의 프로파일이 변화게 된다.

Table 4는 시뮬레이션한 가공면과 실제 가공면의 각종 표면거칠기 파라미터를 나타내고 있다.

$R_a$ 와  $R_{max}$ 는 일반적으로 가장 많이 사용하는 표면거칠기 파라미터로써 가공표면의 피크와 밸리의 높낮이 정도를 나타내는데 절입깊이가 증가할수록 가공면의 표면거칠기는 거칠어짐을 알 수 있다. 절입깊이가 5µm일때 시뮬레이션한 가공면의  $R_a=1.01µm$ 이고, 실제가공면의  $R_a=0.48µm$ 로써 2배정도 차이 나이지만  $R_{max}$ 가 6.02µm, 4.33µm이므로 시뮬레이션된 연삭표면과 실제가공면의  $R_a$ 와  $R_{max}$ 는 거의 일치함을 알 수 있다.

$R_{sk}$ 는 프로파일의 피크와 밸리가 중심선을 기준으로 상하로 편향된 정도를 나타내는데,  $R_{sk} < 0$ 이면 아래쪽으로 피크와 밸리가 편향되어 마멸저항이 크다는 것을 나타낸다. 절입깊이가 감소함에 따라 시뮬레이션과 가공면의  $R_{sk}$ 가 감소하여 연삭가공면의 마멸저항은 증가함을 나타내고 있다.

Table 4 Parameters of surface roughness

	depth 5(µm)		depth 10(µm)		depth 15(µm)	
	exp.	sim.	exp.	sim.	exp.	sim.
$R_a$	0.48	1.01	0.77	1.28	1.02	1.29
$R_{max}$	4.33	6.02	5.96	8.23	6.78	8.84
$R_q$	0.62	1.19	0.96	1.99	1.22	2.05
$R_{sk}$	-0.42	-0.34	-0.217	0.16	0.28	0.31
$R_{kr}$	3.47	3.02	2.95	2.59	2.41	2.79

$R_{kr}$ 은 프로파일이 중심선에 밀집된 정도를 나타내는데,  $R_{kr}$ 이 크면 프로파일이 중심선 근처에 밀집되어 있음을 나타낸다. 예를 들어 구형파일 경우  $R_{kr}=1$ 이고, 사인파일 경우  $R_{kr}=1.5$ 이고, 삼각



파일 경우  $R_{kr}=1.79$ 이다. 시뮬레이션과 연삭가공  
 턴의 경우  $R_{kr}$ 은 2.41~3.47의 높은 값을 나타내고  
 있다. 절입깊이가 증가할수록  $R_{kr}$ 은 감소한다.

## 6. 결론

본 연구에서는 드레싱된 연삭숫들의 형상을 측  
 정하여 각각의 연삭입자를 원추형으로 생긴 구로  
 모델링하여, 통계적으로 연삭숫들표면을 시뮬레이  
 션하였다. 연삭입자와 공작물간의 살돌음 현상을  
 고려하여 연삭가공표면을 3차원적으로 시뮬레이션  
 하였고, 이를 실제 가공면의 3차원적 형상과 연삭  
 숫들의 가로방향의 단면, 연삭숫들 회전방향의 단  
 면을 비교하였고, 각종 표면 거칠기 파라미터를 비  
 교하여 연삭가공면의 특성을 평가하였다.

첫째, 연삭숫들표면을 랜덤함수를 이용하여 연  
 삭과정을 시뮬레이션하였고, 실제 가공면과 비교하  
 였을 때, 연삭숫들의 가로 방향의 가공단면은 살돌  
 음 현상을 고려하여 시뮬레이션한 가공면과 같은  
 표면거칠기 특성을 나타내었고, 연삭숫들의 회전방  
 향의 단면은 연삭입자들의 운동학적 관계에 의한  
 내적이 가공단면을 결정함을 보였다.

둘째, 절입깊이가 감소할수록 연삭표면의 표면  
 거칠기는 개선되며, 마멸저항은 증가하고 프로파일은  
 중심선에 집중되어 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 류제구, 성형 연삭공학, 대광서림, 1991.
2. S. S. Law, S. M. Wu, "Simulation Study of the  
 Grinding Process," Journal of Engineering for  
 Industry, Transaction of the ASME, Vol. 95, pp.  
 983-991, 1973.
3. X. Chen, B. Rowe, "Analysis and simulation of the  
 grinding process," Part I, Part II, Int. J. Mach.  
 Tools Manufact., Vol. 36/8, pp. 871-896, 1996.
4. 손명환, 절삭 가공론, 문운당, 1992.
5. P. Koshy, V. K. Jain, G. K. Lal. "A Model for the  
 Topography of Diamond Grinding Wheels," Wear,  
 Vol. 169, pp. 237-242, 1993.
6. J. Tamaki, T. Kitagawa, " Evaluation of Surface  
 Topography of Metal bonded Diamond Wheel  
 Utilizing three-dimensional Profilometry," Int. J.

Mach. Tools Manufact., Vol. 35/10, pp.  
 1139-1351, 1995.

7. P. Koshy, V. K. Jain, G. K. Lal, "Stochastic  
 Simulation Approach to Modelling Diamond  
 Wheel Topography," Int. J. Mach. Tools Manufact  
 Vol. 37, pp. 751-761, 1997.
8. H. Alawi, M. A. Younis, "Probabilistic approach to  
 the conformity of wheel work in grinding process,"  
 INT. J. PRO. RES., Vol. 24/2, pp. 279-290, 1986.
9. H. K. Tonshoff, J. Peters, I. Inasaki, T. Paul,  
 "Modelling and Simulation of Grinding Process,"  
 Annals of CIRP, Vol. 41/2, pp. 677-688, 1992.