

〈論 文〉

## 연속 전해드레싱의 연삭조건변화에 의한 경면생성 및 시뮬레이션에 관한 연구

김정두\* · 이연종\*\*

(1993년 3월 6일 접수)

### A Study on the Generation of Mirror-like Surface and Simulation in Grinding Condition by Inprocess Electrolytic Dressing

Jeong-Du Kim and Youn-Jong Lee

**Key Words :** Elid Analysis(전해드레싱 해석), Density Distribution of Abrasive(연삭입자 밀도 분포), Ploughing(쟁기작용), Brittle Fracture(취성파괴), Ridge Formation(살돋음)

#### Abstract

Recently, a study on the mirror-like surface grinding of brittle materials is active and as branch of these study, new dressing method for superabrasive wheel, electrolytic inprocess dressing(Elid) was developed. Using Elid, the mirror-like surface of brittle material can be generated without polishing or lapping process. In the future, Elid grinding will take important place in industry. But so far the analysis on Elid grinding was not quantitative but qualitative. In this study, The purpose is the quantitative analysis on Elid grinding by computer simulation. For computer simulation, the mean and the variance of the abrasive distribution were measured by tracing of the grinding wheel with stylus in transverse direction in the case of respective dressing current condition. This measurement result in a density distribution of abrasive by mathematical formulation using statistical method. The prediction of the surface roughness in Elid grinding was based on this density distribution.

#### 기 호 설 명

<p><math>A_s</math> : 슛돌 표면적</p> <p><math>A_r</math> : 살돋음 면적</p> <p><math>Ad</math> : 연삭가공 흡의 면적</p> <p><math>D</math> : 연삭입자의 크기</p> <p><math>D_p</math> : 연삭입자가 공작물 속으로 침투한 깊이 에 대한 폭의 비</p> <p><math>H</math> : 재료의 경도</p> <p><math>I_p</math> : 피크전류</p> <p><math>k</math> : 전기화학 당량</p>	<p><math>\theta</math> : 연삭입자 끝의 각도</p> <p><math>\rho</math> : 전해액 비중</p> <p><math>t</math> : 통전시간</p> <p><math>T</math> : 연삭가공 시간</p> <p><math>f(z)</math> : 연삭입자 높이의 분포</p> <p><math>s^2</math> : 연삭입자 높이 분포의 편차</p> <p><math>\mu</math> : 연삭입자 높이 분포의 평균값</p> <p><math>X</math> : 입자의 슛돌폭 방향으로의 좌표값</p> <p><math>Z</math> : 입자의 슛돌표면으로부터의 좌표값</p> <p><math>X'</math> : X방향의 공작물 표면 좌표값</p> <p><math>Z'</math> : Z방향의 공작물 표면 좌표값</p> <p><math>Xr, Zr</math> : 살돋음 좌표값</p>
---	---

\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

\*\*한국과학기술원 정밀공학과 대학원

$\alpha$  : 살돋음 비

### 1. 서 론

최근 반도체 및 광학산업 등의 발전과 함께 웨라이트, 실리콘, 세라믹 등 경취재료의 경면연삭에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경취재료의 경면연삭은 가공면 거칠기가 200 nm이하의 범위에서 실현되므로 적용가능한 슛들의 입도는 #1000이상의 초미립자 슛들이어야 가능하다.<sup>(1)</sup> 그러나 #1000이상의 초미립자 다이아몬드 슛들을 사용하여 연삭할 경우 눈매움(loading) 또는 입자마멸(glazing)에 대비한 드레싱에 상당한 어려움이 있다.<sup>(2)</sup> 근래 이러한 문제해결에 대한 한 방법으로 슛들입도에 대한 적용성을 고려한 약전도성 연삭액에 의한 미약한 전기분해에 기반을 둔 드레싱법이 알려져 있다.<sup>(3)</sup> 전해드레싱 연삭은 관련 시스템 공급장치만 갖고 일반 연삭기에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 웨라이트에 대하여 래핑이나 폴리싱공정 없이 표면거칠기 Ra=7.4 nm정도의 경면을 얻을 수 있음을 실험을 통하여 확인하였음은 물론, 향후 전해드레싱을 이용하면 경취재료의 경면연삭 분야에서 고부가가치의 제품창출은 물론, 원가절감의 차원으로 산업현장에서 중요한 위치를 차지할 것이다. 그러나 전해드레싱 연삭이 갖는 여러 장점으로 인하여 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔지만 실험을 통하여 이를 분석하는 데에는 다이아몬드 슛들이 고가일 뿐만 아니라, 가공조건에 따른 여러 제약조건으로 인하여 정량적으로 해석하기가 어려워 대부분 정성적인 해석으로 분석되고 있다. 따라서 본 연구에서는 전해드레싱에서 드레싱전류 변화가 연삭 슛들입자 분포에 미치는 영향을 조사하고 이를 바탕으로 컴퓨터를 이용하여 전해드레싱시 공작물의 표면거칠기를 예측함으로써 전해드레싱을 정량적으로 해석하고자 한다.

### 2. 모델링 해석

본 연구에서는 전해드레싱에서 이온화된 양과 연삭 슛들이 마멸되는 양 사이의 차이가 생성된 연삭입자의 높이 분포에 미치는 영향과 살돋음현상을 고려하여 연속 전해드레싱을 사용하였을 때의 가공물의 표면조도를 예측하고자 하였다. 연삭입자의

형상은 방추형 모델을 이용하였으며 원추각은 임의의 범위내 값을 랜덤하게 취하도록 하였다. 연삭입자의 높이 분포는 드레싱 정도, 입자의 크기, 슛들마멸정도에 따라서 변하는 식(1)과 같은 감마분포를 갖는다.<sup>(4)</sup> 여기에서 Z가 0보다 클 경우에는 식(1)과 같고, Z가 0 또는 음수일 경우에는 f(z)가 0이다.

$$f(z) = \alpha \lambda / \tau (\lambda) z \lambda^{-1} e^{-\alpha z} \tag{1}$$

여기에서,

$$\tau(\lambda) = \int_0^\infty f(z) \lambda^{-1} e^{-z} dz \tag{2}$$

$$\alpha = \mu / s^2 \tag{3}$$

$$\lambda = \mu^2 / s^2 \tag{4}$$

여기에서  $\mu$ 와  $s^2$ 은 연삭입자 높이분포의 평균값과 편차이다. 각각의 드레싱전류 조건에서 이러한 평균값과 편차는 표면거칠기 측정기에 의하여 슛들표면의 표면거칠기를 측정하여 구했다. 이렇게 얻은 평균값, 편차와 컴퓨터에서 발생하는 난수는 균일분포를 가지므로 이것을 통계적 방법으로 처리해서 식(1)을 만족하는 감마분포를 얻어낸다.<sup>(5)</sup> 즉 연삭입자의 위치와 형상은 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$C_i = (x, z, \theta) \tag{5}$$

- $C_i$  : i번째 연삭입자의 좌표 및 형상
- $x$  : 슛들쪽 방향으로의 위치에 관한 변수
- $z$  : 연삭입자 높이에 관한 변수
- $\theta$  : 원추각

절삭이 일어나는 시점과 살돋음(ridge formation) 비( $\alpha$ )는 연삭입자가 공작물속으로 침투한 깊이에 대한 폭의 비( $D_p$ )와 공작물의 경도( $H$ )에 의해 결정되며<sup>(6,6)</sup> 살돋음은 좌우대칭이라고 보았다.

$$\alpha = A_r / A_a \tag{6}$$

여기에서  $A_r$ 은 살돋음 면적,  $A_a$ 는 연삭가공 홈(groove)의 면적이다. 이온화에 의하여 용출되는 양은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = k \cdot I_a \cdot t \tag{7}$$

여기에서  $k$ 는 전기화학 당량,  $I_d[A]$ 는 드레싱전류,  $t[\mu\text{sec}]$ 는 통전시간이다.

### 3. 알고리즘

Fig. 1은 시뮬레이션의 흐름도(flow chart)를 나

타낸 것으로서 기본적인 알고리즘은 살돈음을 고려 하였을 때 연삭입자의 2차원 형상을 공작물에 압입 시켜 가공된 2차원 형상을 얻어내는 것이다. 시뮬레이션의 입력값은 드레싱전류, 공작물의 경도, 가공시간, 연삭입자의 크기이다. 슛돌이 이온화되는 양과 마멸되는 양의 차이를 계산하고 그 때의 연삭입자 높이에 대한 평균값, 편차를 조사하였다. 이 평균값과 편차로부터 연삭입자의 높이분포가 식(1)에 의하여 구하여지면 이 분포를 기초로 하여 공작물의 가공된 2차원 형상의 좌표를 구하였다. 하나의 연삭입자가 공작물에 압입된 깊이와 폭을 계산

하여 이 두 값의 비( $D_p$ )가 임계값을 넘으면 절삭이 일어나 칩이 생긴다고 보았으며 그 때의 제거되는 재료의 양은 재료의 경도와  $D_p$ 에 의해 결정하였다.  $D_p$ 값이 임계치보다 작다면 절삭은 이루어지지 않고 쟁기작용(ploughing)만 일어난다고 보았고  $D_p$ 값을 연삭입자마다 계산한 후 임계  $D_p$ 값과 비교하여 살돈음(ridge)형성의 유무를 판단하고 살돈음되는 양을 계산하였다. 살돈음이 일어났을 때에는 새로운 공작물 표면형상을 계산하게 된다. 이 과정을 연삭가공시간동안 반복하여 최종표면형상과 표면조도값  $R_a$ 를 계산하였다.

### 4. 해석결과 및 고찰

#### 4.1 다이아몬드 초미립자 크기에 의한 영향

Fig. 2는 드레싱전류  $I_p=20A$ , 재료경도  $H=10$

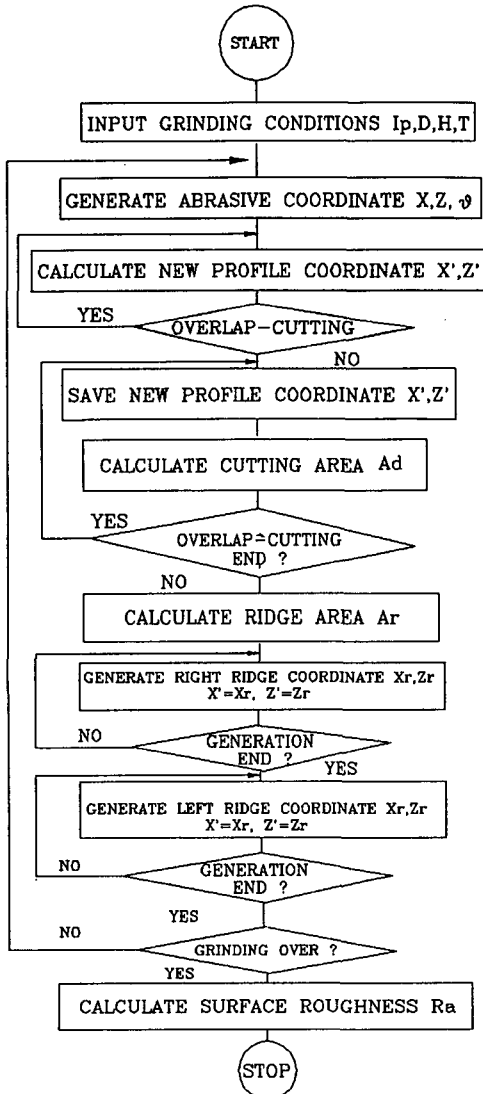


Fig. 1 Flowchart of grinding simulation

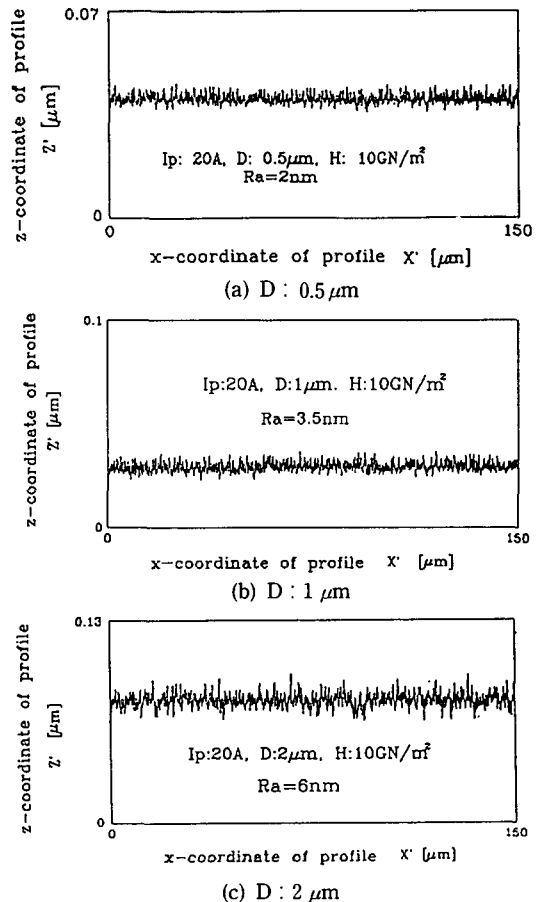


Fig. 2 Influence of grain size on surface roughness in case of  $I_p : 20 A$ ,  $H : 10 \text{ GN/m}^2$

GN/m<sup>2</sup>의 경우에 연삭입자 크기가 표면거칠기에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이며 Fig. 3은 입자크기의 변화에 따른 실험과 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 연삭입자의 크기를 0.5, 1, 2,

4, 8 μm로 변화시켜가면서 시뮬레이션하면 표면거칠기 Ra는 2, 3.5, 6, 14, 20 nm로 증가하였다. Fig. 4는 I<sub>p</sub>=10A, H=10 GN/m<sup>2</sup>의 경우 연삭입자 크기가 표면거칠기에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결

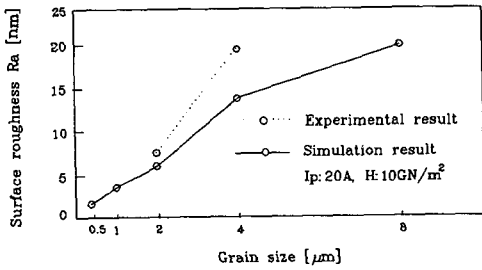


Fig. 3 Result of influence of grain size on surface roughness

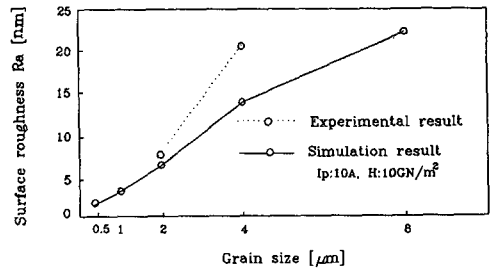
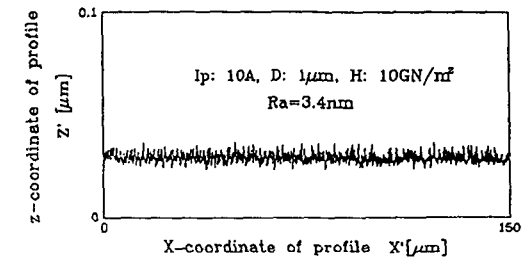
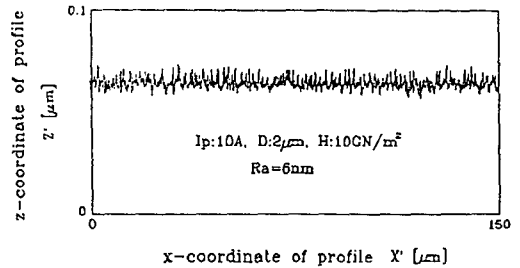


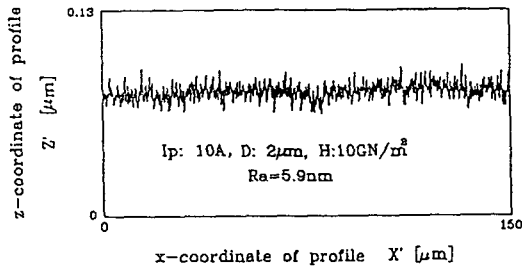
Fig. 5 Result of influence of grain size on surface roughness



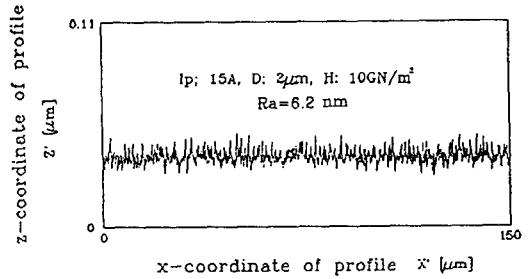
(a) D : 1 μm



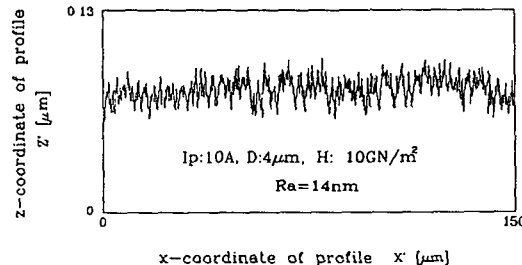
(a) I<sub>p</sub> : 10 A



(b) D : 2 μm



(b) I<sub>p</sub> : 15 A



(c) I<sub>p</sub> : 20 A

Fig. 4 Influence of grain size on surface roughness in case of I<sub>p</sub> : 10A, H : 10 GN/m<sup>2</sup>

Fig. 6 Influence of pick current on surface roughness in case of D : 2 μm, H : 10 GN/m<sup>2</sup>

과이고 Fig. 5는 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한 것이다.  $I_p=20A$ ,  $H=10\text{GN/m}^2$ 의 경우(Fig. 3)와 거의 같은 결과를 얻었다. 그 원인은  $I_p=10, 20A$ 일 경우 모두 충분한 이온용출로 인하여 전해

드레싱 상태가 동일하여 입자분포의 평균값과 편차가 같기 때문이다. Fig. 3, 4에서 연삭입자가  $2\mu\text{m}$  (#8000)의 경우에는 시뮬레이션값이 실험값과 잘 일치하지만 연삭입자가  $4\mu\text{m}$  (#4000)의 경우에는

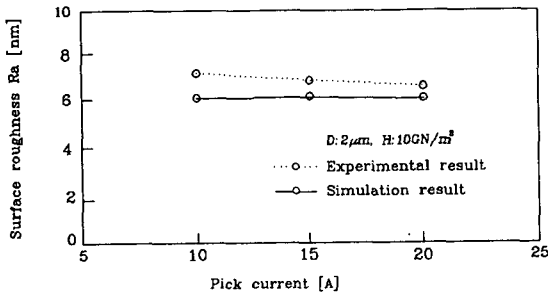


Fig. 7 Result of influence of pick current on surface roughness

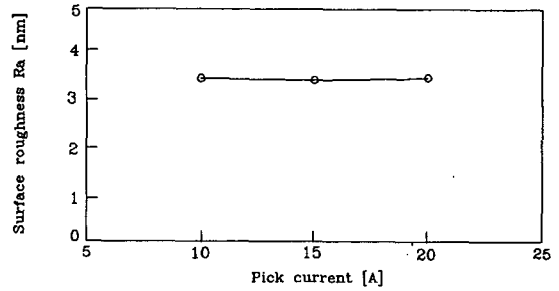
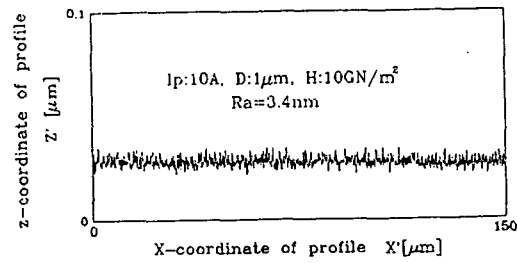
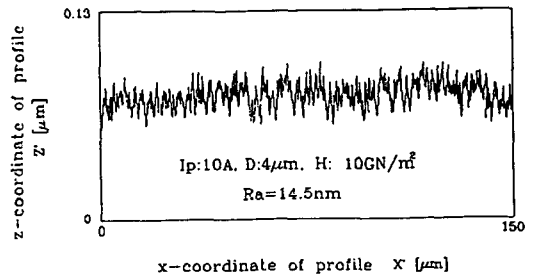


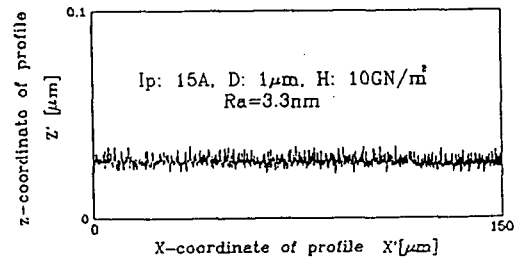
Fig. 9 Result of influence of pick current on surface roughness ( $D: 1\mu\text{m}, H: 10\text{GN/m}^2$ )



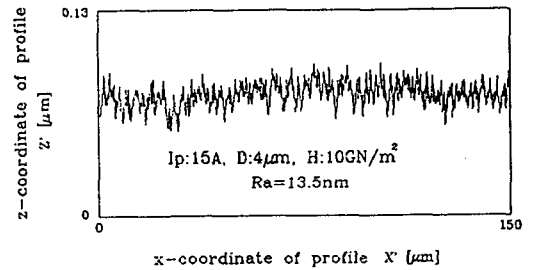
(a)  $I_p: 10\text{ A}$



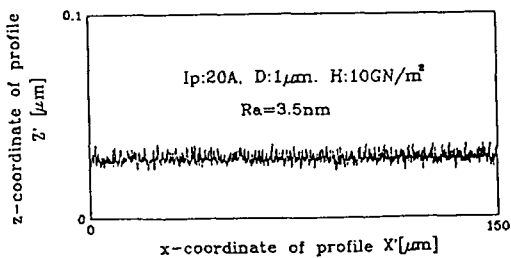
(a)  $I_p: 10\text{ A}$



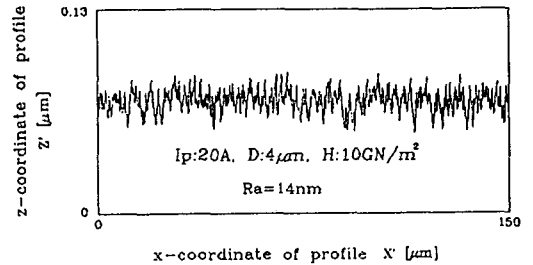
(b)  $I_p: 15\text{ A}$



(b)  $I_p: 15\text{ A}$



(c)  $I_p: 20\text{ A}$



(c)  $I_p: 20\text{ A}$

Fig. 8 Influence of pick current on surface roughness in case of  $D: 1\mu\text{m}, H: 10\text{GN/m}^2$

Fig. 10 Influence of pick current on surface roughness in case of  $D: 4\mu\text{m}, H: 10\text{GN/m}^2$

실험값과 시뮬레이션값에 다소 차이가 있다. 그 원인은 연삭입자가  $4\mu\text{m}$ 의 경우 실제 실험에서는 취성파괴가 많이 일어났으나 시뮬레이션에서는 이를 고려하지 못한 것에 대한 오차값이라고 사료된다.

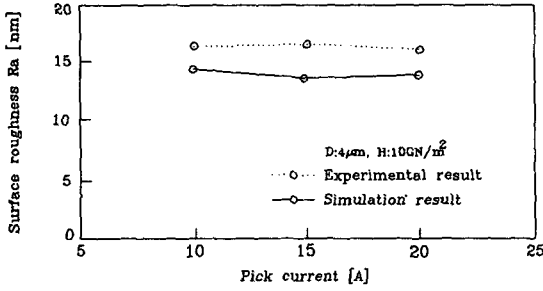


Fig. 11 Result of influence of pick current on surface roughness

#### 4.2 피크전류( $I_p$ )의 영향

Fig. 6은 연삭입자 크기  $D=2\mu\text{m}$ , 재료경도  $H=10\text{GN/m}^2$ 의 경우 피크전류( $I_p$ )가 표면거칠기에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과이며 Fig. 7은 시

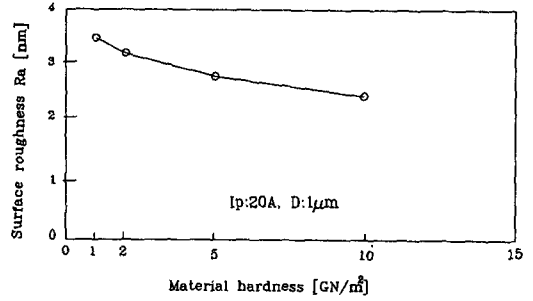
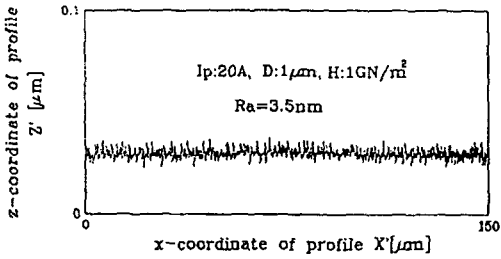
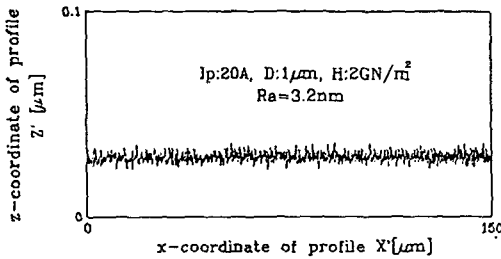


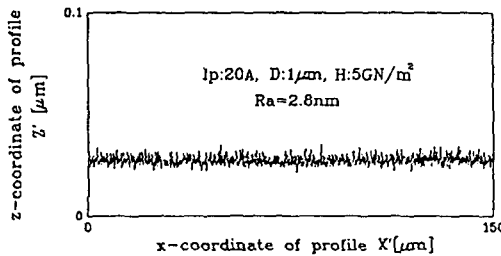
Fig. 13 Result of influence of material hardness on surface roughness ( $I_p : 20\text{ A}$ ,  $D : 1\mu\text{m}$ )



(a)  $H : 1\text{ GN/m}^2$

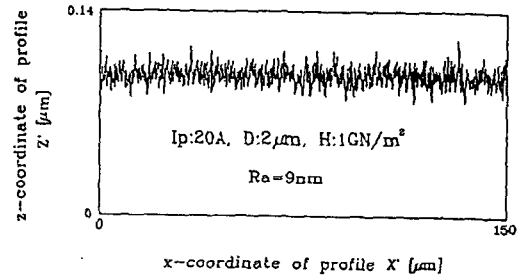


(b)  $H : 2\text{ GN/m}^2$

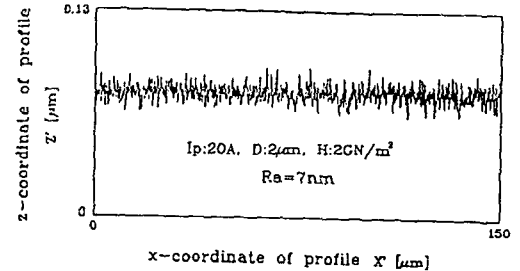


(c)  $H : 5\text{ GN/m}^2$

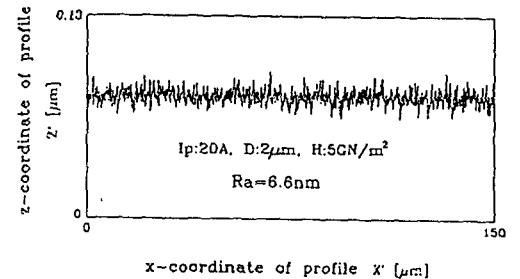
Fig. 12 Influence of material hardness on surface roughness in case of  $I_p : 20\text{ A}$ ,  $D : 1\mu\text{m}$



(a)  $H : 1\text{ GN/m}^2$



(b)  $H : 2\text{ GN/m}^2$



(c)  $H : 5\text{ GN/m}^2$

Fig. 14 Influence of material hardness on surface roughness in case of  $I_p : 20\text{ A}$ ,  $D : 2\mu\text{m}$

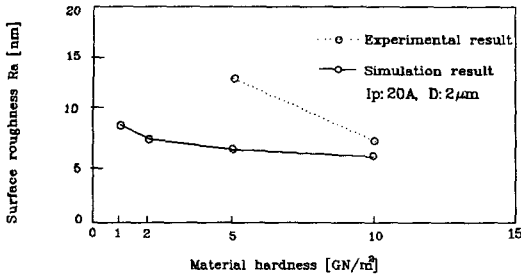
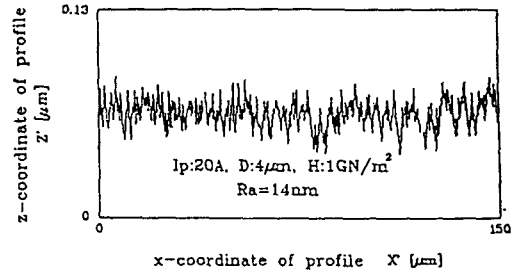


Fig. 15 Result of influence of material hardness on surface roughness

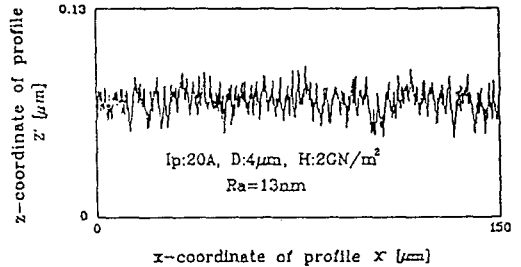
물레이션결과를 실험결과와 비교한 것이다.  $I_p=10, 15, 20A$ 의 경우 시물레이션값  $Ra$ 는  $6\sim 6.2nm$ 로 거의 변화가 없으며 실험결과와도 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8, 9는  $D=1\mu m, H=10GN/m^2$ 의 경우  $I_p$ 가 표면거칠기에 미치는 영향을 시물레이션한 것으로서  $I_p$ 를 10, 15, 20A로 변화시켰을 때 표면거칠기  $Ra$ 는  $3.3\sim 3.5nm$ 로 거의 변화가 없다. Fig. 10은  $D=4\mu m, H=10GN/m^2$ 의 경우  $I_p$ 가 표면거칠기에 미치는 영향을 시물레이션한 것이고 Fig. 11은 시물레이션값과 실험값을 비교한 것이다.  $I_p$ 를 10, 15, 20A로 증가시켰을 때의 표면거칠기  $Ra$ 는 14.5, 13.5, 14nm로 일정한 값을 나타내었고 실험값에 거의 접근하였다. 모든 경우에서  $I_p$ 가 변하더라도 표면거칠기의 변화가 없는데 그 원인은  $H=10GN/m^2$ (흑라이트)의 경우  $I_p$ 가 10, 15, 20A일때 전해드레싱이 충분하여 슛들의 드레싱 상태가 동일하여 연삭입자 분포의 평균값과 편차가 같기 때문이다.

4.3 피삭재 경도값에 의한 영향

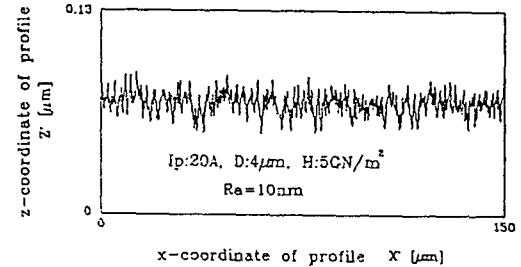
Fig. 12는  $I_p=20A, D=1\mu m$ 의 경우 재료의 경도( $H$ )가 표면거칠기에 미치는 영향을 시물레이션한 결과이고 Fig. 13은 재료의 경도변화에 따른 시물레이션 결과를 나타낸 것이다.  $H$ 를 1, 2, 5, 10  $GN/m^2$ 로 변화시켰을 때 표면거칠기  $Ra$ 는 3.5, 3.2, 2.8, 2.4 nm로 점차 감소하였다. Fig. 14는  $I_p=20A, D=2\mu m$ 의 경우 재료의 경도가 표면거칠기에 미치는 영향을 시물레이션한 것이고 Fig. 15는 실험값과 시물레이션값을 비교한 것이다. 10  $GN/m^2$ 의 경우에 시물레이션 결과는 실험결과와 잘 일치하나 재료 경도가 작을수록 시물레이션값과 실험값은 큰 차이를 보인다. 그 원인은 재료의 경도가 커



(a) H : 1 GN/m<sup>2</sup>



(b) H : 2 GN/m<sup>2</sup>



(c) H : 5 GN/m<sup>2</sup>

Fig. 16 Influence of material hardness on surface roughness in case of  $I_p : 20 A, D : 4 \mu m$

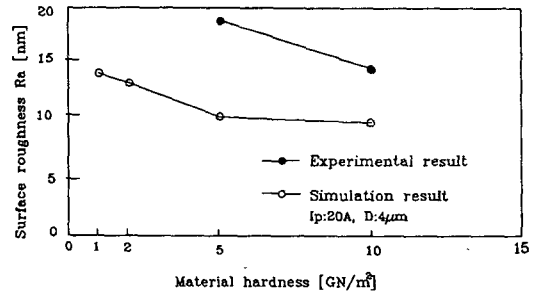


Fig. 17 Result of influence of material hardness on surface roughness

질수록 살돋음되는 양이 증가하기 때문이라 사료된다. Fig. 16은  $I_p=20A, D=4\mu m$ 의 경우 재료의 경도가 표면거칠기에 미치는 영향을 시물레이션한

Table 1 Grinding conditions

Experimental conditions	Grinding machine	Surface grinding machine(KGS-600H)
	Wheel	SD8000
	Weel for truing	GC60K7VG
	Power source	EPD-3A ( $I_p=5-20A$ , $\tau_{on}=5-200 \mu s$ )
	Electrode	Overlapped area : 1/3 of the wheel Material : copper
	Grinding fluid	Solution type 1, 2, 3
	Surface roughness tester	-Surftest-402 Mitutoyo -Non-contact surface roughness measurement system WYKO
Simulation conditions	Grain diameter	0.5, 1, 2, 4, 8 $\mu m$
	Dressing current	10, 15, 20 A
	Workpiece hardness Hv	1, 2, 5, 10 GN/m <sup>2</sup>

결과이고 Fig. 17은 실험값과 시뮬레이션값을 비교한 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전해드레싱시 슛돌의 상태변화를 축침식 표면거칠기 측정기로 연삭입자분포의 평균값과 편차를 측정하여 평가하였고 이를 바탕으로 전해드레싱시 표면거칠기 예측이 가능하였다.

(2) 시뮬레이션을 통하여 전해드레싱시 재료경도, 드레싱전류, 입자크기 변화에 따른 표면거칠기 변화를 예측할 수 있었다. 연삭입자가  $2 \mu m$ , 재료의 경도가  $10 \text{ GN/m}^2$ 일 경우 시뮬레이션값은 실험값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) N. N. 1991, "鏡面研削の最新技術動向, 理化學研究所, pp. 147~148.
- (2) Komanduri, R. and Reed, W. R. 1980, "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel," Annals of the CIRP, Vol. 29, pp. 239~243.
- (3) Ohmori, H. and Nakagawa, T. 1990, "Mirror Surface Grinding on Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing," Annals of the CIRP Vol. 39, pp. 329~332.
- (4) W. König, 1976, "Three Dimensional Measurement of the Grinding Wheel Surface-Evaluation and Cutting Behaviour," Annals of the CIRP, Vol. 25, pp. 197~202.
- (5) Press, W. H. 1988, "Numerical Recipes in C," CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, pp. 206~221.
- (6) Hokkirigawa, K. 1988, "The Effect of Hardness on the Transition of the Abrasive Wear Mechanism," Wear, Vol. 123, pp. 241~251.

(1) N. N. 1991, "鏡面研削の最新技術動向, 理化學