

# 평면연삭 가공시 레이저 빔을 이용한 $Al_2O_3$ 계 연삭숫돌의 드레싱시기에 관한 연구

김 희 남, 김 대 욱\*

## A Study on the Dressing Time of $Al_2O_3$ Grinding Wheel in Surface Grinding by Laser Beam

Kim, Hee-Nam · Kim, Dae-Wook

Keywords : Dressing time, Surface grinding, Wear and Roding, Grind wheel

### ABSTRACT

This paper describes investigation of the dressing time by laser in the surface grinding operation. Always, dressing work is done before grinding operation. And then, generates wear and roading on the wheel by contact between the grinding wheel and the workpiece. Together, it makes bad not only grinding performance but also ground surfaces. On these states dressing work is needed.

On this paper contour of the wheel by He-Ne laser is measured. It has also been found that the wheel deflection reduces the actual depth of cut and the roughness of the ground surface.

### 1. 서 론

오랜 전통을 통하여 연삭작업은 기계부품의 다듬질이나 절삭공구의 날끝연마등 정밀가공분야에서 중요한 역할을 수행해왔다. 또한 산업의 발달과 함께 점차 정밀도에 대한 문제가 중요하게 대두됨으로서 연삭작업의 역할은 더 큰 비중을 차지하게 되었다.

한편 laser를 이용한 연구는 1969년에 Ribens<sup>(1)</sup>가 laser빔의 간섭을 이용해 금속표면의 거칠기를 측정하였으며 1975년 Stover<sup>(2)</sup>는 Kirchhoff회절적분과 Beckman산란이론을 바탕으로 표면형상의 특성에 관한 논문을 발표했다. 1981년에는 M.Shiraish<sup>(3)(4)</sup>가 선삭가공에서 laser를 이용한 가공물의 표면거칠기측정을 시도하였고, 1987년 C.S.Lee<sup>(5)</sup>에 의해 연삭가공시 가공물의 표면거칠기의 in-process측정에 대한 연구가 발표되었다.

본 논문은 기존의 laser빔을 이용한 가공물에 대한 표면거칠기의 in-process측정을 토대로 연삭숫돌작업면의 변화를 검출하여 dressing시기를 찾는 방법을 시도하였다.

최근에는 많은 신소재 즉, 난삭재의 등장으로 연삭에 대한 연구가 더욱 활발해지고 고정밀을 요구하는 분야에서도 새로운 방법들의 연구개발이 활발히 진행될것이다. 숫돌입자절삭날은 고온, 고열, 경화, 소성변형, 화학반응등으로 마모가 발생되고, 시편과의 반복적 충돌과 열충격으로 탈락이 발생된다. 이로써 시편의 표면거칠기는 나빠지게 되고, dressing시기를 찾는다면 원하는 정도의 표면거칠기를 얻을 수 있을것이다.

### 2. 관련이론

먼저, sampling frequency를 선택하는데 있어서 표본화정리(sampling theorem)에 의해 결정해 주어야 한다. 연속신호  $x(t)$ 를 대역폭이 BHz인 이상적인 저역통과 여파기(low-pass filter)에 통과시킴으로써 그 시퀀스  $x(mt)$ 에서 복원될 수 있음은 명백하다. 이것은 이상적인 저역 통과여파기가 이상적인 진폭과 위상을 갖기 때문인데 BHz 이상의 모든 주파수들이 완

\* 명지대학교 기계공학과

\*\* 명지대학교 기계공학과 대학원

전혀 제거되지만  $|f| \leq B$  범위에 있는 성분들은 아무런 감쇠없이 통과된다. 또한,  $|f| \leq B$  범위안에 있는 모든 주파수들은 위상함수가  $f$ 의 선형 함수이기 때문에 정확히 같은 지연이 일어난다. 즉,

$$T_d(f) = -\frac{d}{df}(\text{위상함수}) = c, |f| \leq B \quad (1)$$

이다. 여기서  $T_d(f)$ 는 시간지연 함수이다. 다음에 그림에서 연속신호인  $x(t)$ 의 정확한 복원이 이루어지려면 중심선에 인접한 성분들간에 어떤 겹침도 없어야 한다는 것을 알 수 있다. 예를들면 중심에서의 주파수 성분  $x(f)$ 와  $x(f-f_s)$  또는  $x(f+f_s)$ 간에 어떤 겹침도 없어야만 한다. 그러므로 다음조건이 만족되어야만 한다.

$$f_s - B \geq B \quad (2)$$

또는

$$f_s \geq 2B \quad (3)$$

여기서  $f_s$ 는 초당 hertz나 표본수이다. 즉, 표본화 주파수는 연속신호  $x(t)$ 의 내역폭  $B$ 의 최소한 두배 이상이어야만 한다. 그리고 주파수  $f_s/2$ 는 Nyquist 주파수로 정의되며  $f^N$ 으로 규정한다.

시간축상에서 받은 신호의 상관도를 계산하기 위하여 autocorrelation을 만족하여야 한다. autocorrelation은 다음과 같이 정의 된다.

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T x(t)x(t+\tau) dt \quad (4)$$

그러나 대부분의 FFT분석기는 이 계산을 주파수 영역에서 행한다. 이때의 식은

$$R_{xx}(\tau) = F^{-1} [ S_x(f) S_x^*(f) ] \quad (5)$$

여기서  $F^{-1}$ 은 역Fourier변환이며  $S_x$ 는  $X(t)$ 의 Fourier변환이다

다음에는 시간상에서 받은 신호에 혼입되어 있는 waveness성분을 제거하기위해 시간영역에서 얻은 신호를 주파수영역에서 분석할 필요가 있다. 시간영역의 값을  $x(t)$ 라 놓고 주파수영역을  $s(f)$ 라 할때

$$\begin{matrix} \text{FT} \\ x(t) \longrightarrow s(f) \end{matrix} \quad (6)$$

위식을 Fourier변환하면

$$\begin{aligned} s(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j2\pi ft} dt \\ x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(f) e^{j2\pi ft} dt \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $x(t)$ =신호  $x$ 의 시간영역에서의 함수  
 $s(f)$ =신호  $x$ 의 주파수영역에서의 함수  
 $j = \sqrt{-1}$

신호  $x(t)$ 가 최소한의 조건만 만족시킨다면

Fourier변환은 신호가 주기적이든 비주기적이든 간에 모두 유용하며 실세계에서 다루는 신호는 이조건을 모두 만족한다고 보아야할 것이다.

그다음에는 PSD(power spectral density)처리에서 차단주파(cutoff frequency)를 결정하여준다.

### 3. 실험방법 및 장치

#### 3-1. 실험방법

본 실험에서 사용된 평면연삭기는 Fig.1과 같고, table 이송은 10mm/min으로 하고 각 절입조건의 변화에 따른 연삭숫돌의 표면변화를 관찰한다. 또한 연삭 숫돌은 용융알루미나 ( $Al_2O_3$ )계의 A, WA, SA와 입도가 60, 150의 2개씩 6종을 선정하였으며 그 제원은 Table1과 같다.

여기서 각 상질과 크기가 다른 숫돌의 표면변화를 관찰하고 시편의 표면거칠기에 미치는 영향을 비교하여 SKD-11의 최적의 절삭성능을 갖는 숫돌을 찾는다. Data측정은 spark out된 후에 측정하였다. 먼저, 연삭작업을 통한 숫돌표면의 신호에서 잡음(noise)을 제거하기위해 전체 신호에 대해 FFT과정으로 noise성분이 최소화 될때까지 실험하였다.

Table 1 Dimension of grinding wheel

Abrasive grain	Grain size	Grade	Structure	Bond
A	60	K	/	V
	150			
WA	60	K	/	V
	150			
SA	60	K	/	V
	150			

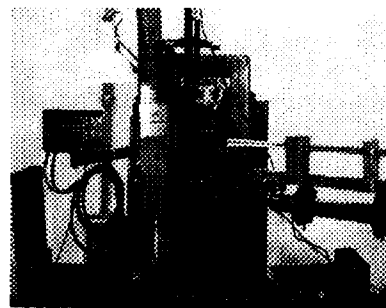


Fig. 1 Layout of experiment system

Fig.1에서 보듯이 두개의 laser를 이용해 하나의 빔은 숫돌에 조사하고, 다른 하나의 빔은 flange cover에 조사해 반사되어지는 빔을 통해 숫돌 한점에 대한 변화를 관찰한다. 여기서 광원(light source)은 He-Ne gas laser를 이용하였고, detector는 silicon photo-detector를 사용하였다.

일반적으로 연삭기의 기본구조 주파수는 300~

450Hz 정도의 주파수이기 때문에 식(3)과 같이 Nyquist이론에 의해 측정하고자하는 기본주파수의 최소 2배 이상의 sampling rate를 선택했다. 표면거칠기 신호처리에 있어서 sampling rate가 가장 중요한데, 신호를 적당한 sampling rate로 받아서 Fourier변환을 하여본 결과 실험신반에 걸친 차단주파수는 1kHz미만이었다. sampling frequency는 선속도 계산에 의해 50KHz로 결정하였다. Aliasing을 피하는 반면에 기억장소의 효과적인 사용을 고려하여 sampling rate를 결정하였다. A/D converter는 DSP-16 plus를 사용하였고, 신호와 잡음의 분리를 위해 matlab으로 low-pass filtering을 해주었는데 cut-off frequency는 10Hz성분으로 설정했다. cut-off frequency는 PSD(power spectral density)에 의해서 결정되었다.

또한, 시편의 표면거칠기를 측정하기 위하여 surfstest402를 이용하여 각 조건에 따른 시편의 표면거칠기와 신호값을 비교하였다.

마지막으로 연삭숫돌작업면의 형상변화를 CCD camera를 이용한 Image processing에 의해 비교하였다. 그리고 Fig.2은 측정계의 block diagram상태를 나타내고 있다.

### 3-2. 시편 및 가공조건

본 실험에서 사용된 재료는 SKD-11재를 선정하였으며 이재료의 화학적 조성 성분비와 기계적 성질은 Table 2와 Table 3과 같다.

Table 2 Chemical compositions of specimen

Material	Chemical composition (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Mo
SKD-11	1.40~1.60	0.40	0.60	0.03	0.03	0.80~1.20

Table 3 Mechanical properties

Material	Mechanical property	
	Hardness(HRC)	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )
SKD 11	61	82

두께 10mm인 SKD-11재를 25×100mm(폭×길이)의 치수로 절단하였고, 경도값은 Hrc61이상이므로 열처리한 후 연삭기에서 각 변의 평행도와 직각도를 측정하면서 시험편을 제작 하였다. Fig.3은 실험에 사용한 시편을 나타낸 것이다

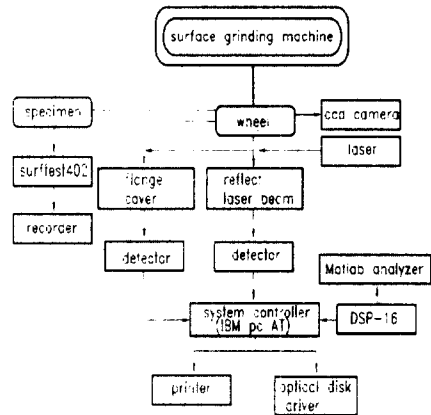


Fig. 2 Block diagram of measuring system

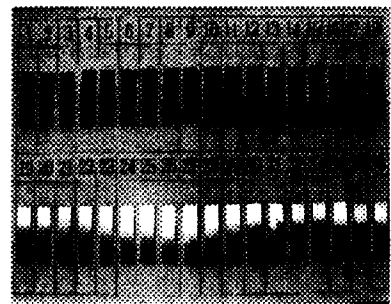


Fig. 3 Configuration of specimens

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4-1. 절입깊이의 변화가 숫돌입자에 미치는 영향

절입깊이가 연삭작업중 숫돌입자의 변화에 따라 연삭숫돌작업면에 어떤 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 Table 4에서 보듯이 이송속도를 10mm/min으로 고정하고 절입깊이를 0.01mm씩 증가하여 최고 1.0mm까지 연삭가공하였다. 절입조건으로 0.05mm증가후 한번씩 검출하여 data를 비교하였다. 연삭숫돌의 조건은 A60, WA60, SA60, A150, WA150, SA150의 숫돌을 spark out될때까지 가공하였고, 숫돌작업면변화의 검출도 spark out될때 실시하였다. Fig. 4는 연삭가공시 연삭숫돌입자에 따른 두종의 입도와 숫돌의 절입깊이 증가시 laser빔을 이용한 검출량에 대해 전압값의 비교를 나타낸 것이다. 먼저 A 숫돌을 보면 입도에 대해서 전압값이 조금씩 증가되는 경향을 볼 수 있다. A60의 전압값은 0.7mm에서 전압값이 증가되어 일정하게 되어 dressing을 필요로 하는 것을 볼 수 있었다. 절입깊이가 0.7mm에서의 전압값은 1.47V이다. 또한 입도150은 절입깊이가 0.4mm에서 dressing을 다시 요구한다. 이것은 입자가 작아지고, 눈매꿈현상에 의해 표면이

Table 4 Working condition

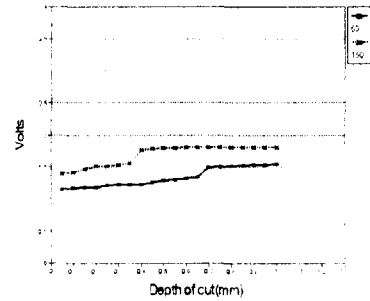
Abrasive grain	Grain size	Depth of cut (mm)	Speed of table (mm/min)
A WA SA	60	0.05	10
		0.10	
		0.15	
		0.20	
		0.25	
		0.30	
		0.35	
		0.40	
		0.45	
	150	0.50	
		0.55	
		0.60	
		0.65	
		0.70	
		0.75	
		0.80	
		0.85	
		0.90	
0.95			
1.0			

매끈해졌기 때문으로 생각된다. WA의 입도60은 절입깊이 1.0mm에서 전압변화가 큰것을 볼 수 있고, 입도150은 절입깊이 0.7mm에서 전압값의 변화가 크게 나타나므로 이점에서 dressing을 다시 해주어야 한다. 그리고 두개의 data에서 초기값에서 약 1.5voltage의 변화인 3V와 3.5V에서 dressing을 요구한다. SA의 입도60은 절입깊이 1.2mm에서, 입도150은 절입깊이 1.0mm에서 dressing을 요구한다. WA와 마찬가지로 전압값의 변화가 초기값에서 약 1.5V차이가 나면 dressing을 요구한다. 전반적으로 입도가 작은것일수록 숫돌의 변화가 초기에 발견되는것을 볼 수 있었다.

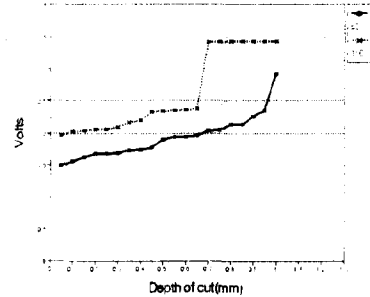
4-2. 절입깊이의 변화가 숫돌입도에 미치는 영향

절입깊이에 따른 숫돌입도별 숫돌작업면의 변화를 알아보기위해 이송속도를 10mm/min으로 고정하고 절입깊이를 0.01mm간격으로 0.01mm부터 1.0mm까지 가공을 하는데 0.05mm간격으로 data를 검출하였다. 실험에 사용된 입도별 종류는 A의 60,150, WA의 60, 150, SA의 60, 150 이다.

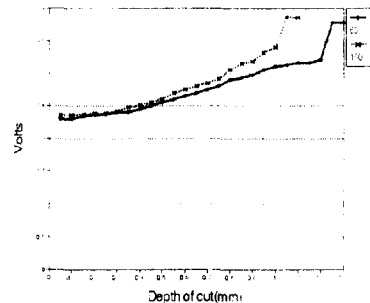
먼저 Fig. 5에서 60계열의 입도를 관찰해보면 전압의 크기는 SA>WA>A순으로 나타난다, 이것은 입자의 특성에 따라 나타나는 현상이라 생각된다. 같은 입도라고 해도 숫돌 특성에 따라서 가공되는 정도의 변화가 SA, WA와 A로 A가 가장 전압이작게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 전압이 크게 변화되는 점을 비교해보면 A는 0.7mm, WA는 1.0mm, SA는 1.2mm로 SA숫돌이 가장 오랜시간동안 가공할 수 있다. 그리고 입도150에서는 A는 0.4mm, WA는 0.7mm, SA는 1.0mm에서 dressing을 요구하는 전압값을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Depth of cut vs. volts(abrasive grain) (a)A (b)WA (c)SA

4-3. 이송횟수와 시간변화에 따른 숫돌 입자,입도별 드레싱시기와의 관계

시간변화에 따른 숫돌입자 및 입도별 숫돌작업면의 변화를 알아보기위해 이송속도를 10 mm/min으로 고정하고 절입깊이를 0.01mm씩증가하여 0.01mm부터 1.0mm까지 가공하였고, 측정은 20분마다 한번씩하였다. 20분동안의 조건은 절입이 0.05mm까지 증가하고, 300strok정도의 가공이 이루어 진다. 실험에 사용된 입자 및 입도별 종류는 A의 60,150 WA의 60, 150 SA의 60, 150 이다. Fig.6에서 보듯이 모두 표면거칠기가 0.5Ra값을 나타내면 dressing을 필요로 한다. 먼저 A60은 처음에는 좋지않은 표면거칠기를 나타내지만 점차 좋아져 120분(2000strok)부터 점차 거친연삭이 이루어지고 260분(3900strok) 후에는 거친 Ra값을 나타낸

Table 5 Working condition

Abrasive grain	Grain size	Time (min)	Speed of table (mm/min)
A	60	20	10
		40	
		60	
		80	
		100	
WA	60	120	
		140	
		160	
		180	
		200	
SA	60	220	
		240	
		260	
		280	
		300	
	150	320	
		340	
		360	
		380	
		400	

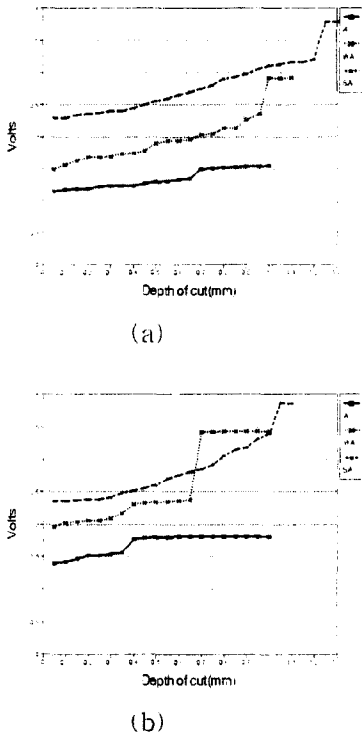


Fig. 5 Depth of cut vs. volts(Grain size)  
(a)60 (b)150

다. WA는 400분(6000strok), SA는 460분(6900strok)에는 dressing을 요구하게 된다. 따라서 시편이나 연삭조건에 따라 올바른 숫돌을 선택하는것이 필요하겠다. 예를들면 장시간 연삭이나 단단한 재질에는 SA를 사용하는것이 바람직 하겠다. 입도150은 입도60에 비해 점차 dressing시기가 빨라지는 것을 볼 수 있다. A는 200분, WA는 260분, SA는 380분으로 입도 150에서도 SA 숫돌이 가장 오랜시간연삭할 수 있다.

#### 4-4. 숫돌면의 조직상태 변화

각 숫돌의 절입깊이의 변화에 따른 연삭숫돌 작업면의 변화를 CCD camera로 촬영하여 비교하였다. 가공하기 전에 한점을 선택하여 가공전의 숫돌작업면의 상태를 관찰하고 가공하면서 생기는 숫돌면 한 점의 변화를 관찰하였다. 그리고 시편의 표면거칠기의 변화와 비교하여 드레싱시기를 찾으려고 시도하였다. Fig.7에서 부터 Fig.12까지를 보면 각 숫돌의 조건에서 생기는 변화를 관찰하였다. CCD촬영은 절입을 0.01mm씩 0.01mm부터 1.0mm까지 증가시키고 가공하는 중에 가공전의 상태와 절입 후의 숫돌작업면의 상태를 관찰 하였고 그이후의 숫돌에 따라 절입깊이 1.0mm와 1.2mm까지 관찰하였다. 먼저 A60연삭숫돌에서는 절입깊이 0.7mm에서 눈메꿈현상을 통한 dressing시기를 찾았고 WA60에서는 절입깊이 0.8mm에서 숫돌입사의 탈락현상을 관찰 할 수 있었다. 그리고

SA60에서는 마모현상에 의한 숫돌수명 예측이 이루어졌다. 그러나 전체적으로 눈메꿈현상을 동반하는것이 관찰되었다. 가장 많이 다시 dressing작업을 요구하는 가장 큰 요인은 눈메꿈현상을 들수 있겠다.

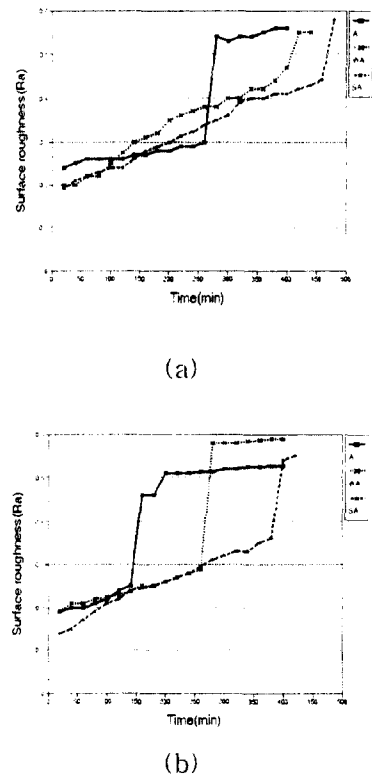
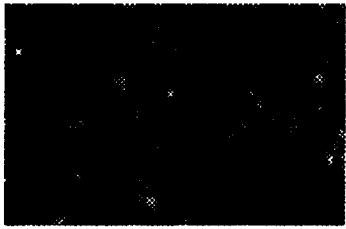


Fig. 6 Time vs. surface roughness  
(Grain size) (a)60 (b)150

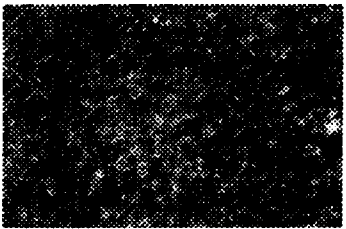


(a)



(b)

Fig. 7 Surface of the wheel (Grain A60)  
(a)Before (b)0.70mm

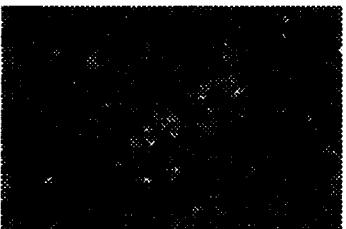


(a)

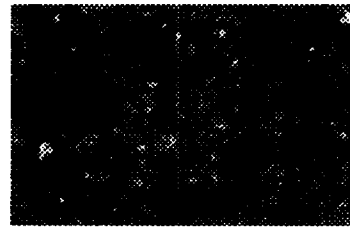


(b)

Fig. 8 Surface of the wheel (Grain A150)  
(a)Before (b)0.50mm

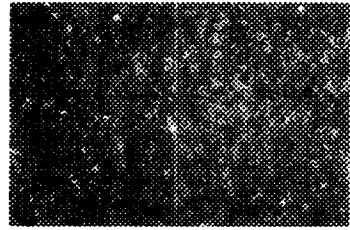


(a)

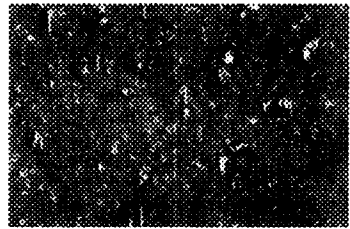


(b)

Fig. 9 Surface of the wheel (Grain WA60)  
(a)Before (b)1.0mm

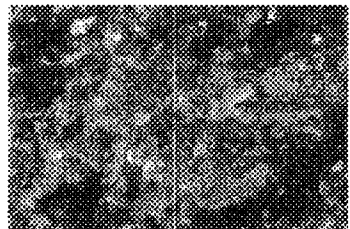


(a)

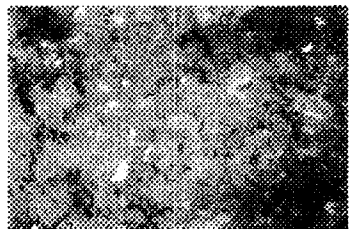


(b)

Fig. 10 Surface of the wheel (Grain WA150)  
(a)Before (b)0.70mm

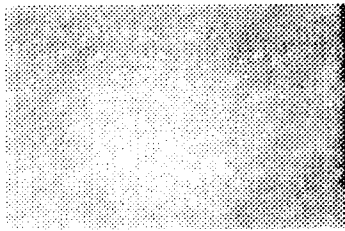


(a)

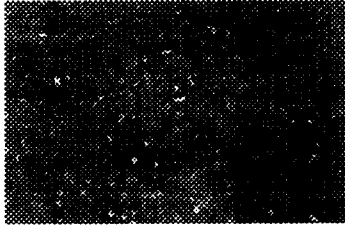


(b)

Fig. 11 Surface of the wheel (Grain SA60)  
(a)Before (b)1.2m



(a)



(b)

Fig. 12 Surface of the wheel (Grain SA150)  
(a)Before (b)1.0mm

## 5. 결 론

Laser의 특징인 높은 단색성과 지향성을 이용해 숫돌면의 입자, 입도, 절입깊이의 변화에 따른 반사형태를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연삭숫돌의 입자에 따라 dressing시기가 변하는데 A재질이 가장 빨리 dressing시기가 오고 그 다음은 WA, SA순으로 SA가 가장 오래 가공이 이루어진다. 또한 WA와 SA는 전압의 증가값에서 약 1.5V증가하면 dressing시기가이다.
2. 입도에 따른 변화는 입도150이 입도60에 비해 dressing시기가 더 빠르고 A, WA, SA순으로 A가 가장 빠른 dressing시기를 요구한다.
4. 표면거칠기가 0.5Ra값 이상에서는 원하는 정밀도를 얻지못하게 되고, 따라서 0.5Ra값 이상이되는 절입량이 A60에서는 절입깊이 0.7mm이고, WA60과 SA60에서는 1.0mm와 1.2mm입을 일 수 있다. 그리고 A150, WA150, SA150은 절입깊이 0.4mm, 0.7mm, 1.0mm이상에서 재료의 표면거칠기 값 0.5Ra를 나타낸다.
5. SKD-11재료의 가공시간과 이송횟수에 따른 변화는 입도60의 A는 260분과 이송횟수 3900번에서 dressing을 요구하고, WA는 400분, 이송횟수 6000번, SA는 460분, 이송횟수 6900번에서 dressing을 요구하고, 150계열의 A는 200분, 이송횟수 3000번이고, WA는 약 280분, 이송횟수 4200번, SA는 약 400분, 이송횟수 6000번에서 다시 dressing을 요구한다.

## REFERENCES

1. William B.Ribbens, Interferometric surface roughness measurement, AP, Vol.8, No.11, Nov, 1969.
2. John C.Stover, Roughness characterization of smooth machined surfaces by light scattering, APPLIED OPTICS, Vol.14, No.8, August 1975.
3. M.Shiraishi, A consideration of surface roughness measurement by optical method, Transaction of the ASME, Vol.109, May 1987.
4. M.Shiraishi, In-process measurement of surface roughness in turning by laser beams, Engineering for industry, Vol.103, May 1981.
5. C.S.Lee, S.W.Kim, An in-process measurement technique using laser for non-contact monitoring of surface roughness and form accuracy of ground surfaces, CIRP, Vol.36 1, 1987.
6. K.V.Kumar, M.Cozmanca, Y.Tanaka, and M.C.Shaw, A New Method of Studying the Performance of Grinding Wheels, ASME, Vol.102, FEB 1980.
7. S.B.Rao and S.M.Wu, Compensatory control of roundness error in cylindrical chuck grinding, Engineering for industry, Vol.104, February 1982.
8. K.V.Kumar and M.C.Shaw, The Role of Wheel-Work Deflection in Grinding Operations, ASME, Vol.103, FEB 1981.
9. F.Engineer, C.Guo, and S.Malkin, Experimental Measurement of Fluid Flow Through the Grinding Zone, ASME, Vol.114, FEB 1992.
10. C.Guo and S.Malkin, Analysis of Fluid Flow through the Grinding Zone, ASME, Vol.114, NOV 1992.
11. T.Ueda, A.Hosokawa, and A.Yamamoto, Measurement of Grinding Temperature Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber, ASME, Vol.108, NOV 1986.
12. T.Ueda, A.Hosokawa, and A.Yamamoto, Studies on Temperature of Abrasive Grains in Grinding-Application of Infrared Radiation Pyrometer, ASME, Vol.107, MAY 1985.
13. N.Ramesh Babu, V.Radhakrishman, and Y.V.G.S.Murti, Investigations on Laser Dressing of Grinding Wheel-Part I: Preliminary study, ASME, Vol.111, AUG 1989.
14. N.Ramesh Babu and V.Radhakrishman, Investigations on Laser Dressing of Grinding Wheel-PartII: Grinding Performance of Laser Dressed Aluminum Oxide Wheel, ASME, Vol.111, AUG 1989.