

반도체 레이저 비임을 이용한 금속표면의 거칠기 측정에 관한 연구
A Study on the Metallic Surface Roughness
Measurement by Laser Diode Beam

김희남* 김양술** 박희재*** 황재연***
Hee-Nam Kim Yang-Sull Kim Hee-Jae Park Jae-Yean Hwang

ABSTRACT

A new technique for the measurement of surface roughness based on the intensity fluctuations of laser light backscattered from a moving surface has been introduced.

The developed method will be quite useful for evaluating the surface quality under machining with more detailed information by detecting the surface roughness along both directions simultaneously.

* 정회원 : 명지대학교
* * 홍익대학교
* * * 명지대학교대학원

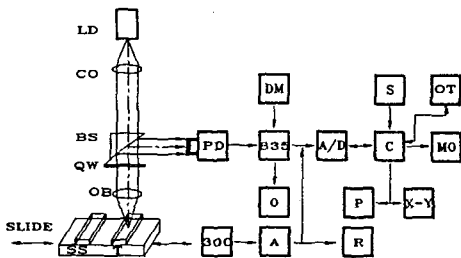
1. 서 론

초정밀 가공 분야에서 생산성을 높이기 위하여 가공면의 거칠기를 가공중 계측 하면서 그에 따라 가공 조건을 변화시키는 인프로세스 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 이들의 가공면 형상을 평가하는 방법으로 종래의 촉침식 방법은 가공물의 표면에 영향을 줌으로 표면거칠기를 비접촉식으로 연속 계측하는 방법이 요구된다. 이러한 목적으로 사용되는 주된 계측방법은 레이저 광선을 이용한 비접촉식 계측이 일반적이다. 이러한 방법에 의한 표면거칠기의 측정은 비파괴적인 방법으로 접촉기구로써 측정할 수 없는 초정밀 가공표면의 측정에 가장 효율적인 방법이라고 할 수 있다.

이런 연구는 W.B. Ribbens Robert A. Sprague 및 J.M. Elson 등 여러사람⁽¹⁻²²⁾에 의해 연구되어 왔으나 아직도 표면거칠기 측정에 대한 충분한 정량적인 검토가 이루어 졌다고 볼 수 없다.

따라서 본 연구는 초소형 초경량화가 가능한 반도체 레이저를 사용하여 연삭 가공된 시편의 이송 속도와 입사광속의 지름을 변화 시킬 때 이들의 표면거칠기 측정에 미치는 영향을 검토하여 인프로세스 측정에 적용 가능 범위를 밝히는데 목적을 두었다.



- LD : Laser diod (GaAlAs)
- CO : Collimotor lens
- BS : Beam splitter
- QW : Quarter - wave plate
- OB : Objective lens
- PD : Photodetector
- 835 : 835 optical power meter
- DM : Digital multimeter
- O : Ocilloscope
- 300 : Surfcom 300B
- A : Amplifier
- R : Recorder
- A/D : A/D converter
- C : 80386 30 MHz computer
- S : Software (SCOPE, DADISP)
- MO : Monitor
- P : Printer
- X-Y : X-Y plotter
- SS : Standard specimen
- T : Test specimen
- OPD : Optical magnetic disk drive

Fig. 1 Measurement system of surface roughness

2. 실험방법 및 장치

2.1 측정계 구성

본실험에 사용한 미소 연삭가공된 제품의 표면 거칠기 측정에 대한 실험장치의 개요도를 Fig. 1에 도시 했으며 Photo. 1은 그 사진이다.

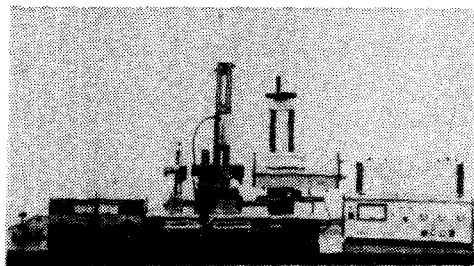


Photo. 1 Layout of experiment system

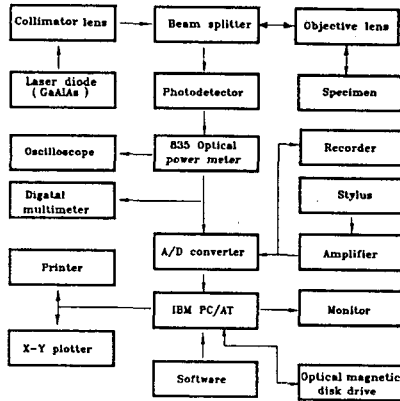


Fig. 2 Block diagram of measuring system

또 Fig. 2은 반도체 레이저와 보조장치로 구성된 본 실험장치에 대한 측정시스템을 블록선도로 표시한 것이다.

Table 1 Working condition of surface roughness (SM 45C)

Surface roughness (Rmax)	Tracing speed (mm/sec)	Beam spot diameter (mm)	Laser spot (mm)
5.8	Optical stylus	0.1	0.5
6.5			
6.7			
6.9			
7.0			
7.4			
7.5			
7.7			
8.5			
10.8			
11.4	3.0	4.0	

측정계의 교류전원은 115V-60Hz이며 레이저 다이오드에는 직류 4.5V가 주어졌다.

레이저 다이오드에서 방출된 광속은 검사면에서 반사

된 다음 광분리기를 거쳐 광검출센서로 들어가는데 여기서 시편의 표면거칠기의 변화에 따른 반사에너지가 검출되고 이것이 다시 전압으로 변환되어 전압차의 지시가 표면거칠기 정도를 지시하도록 시스템을 구성하고 있다.

2.2 실험방법

Laser diode에서 방출되는 광속은 광분리기를 거쳐 광센서로 입사된다. 이것은 전류증폭을 한후 전압으로 변환시킨후 12bit A/D변환기를 통해 디지털 형태로 변환한후 마이크로 컴퓨터의 메모리에 저장된다. 이때 시편 이송과 거칠기 신호의 입력과정은 컴퓨터의 프로그램 제어에 의하여 시작되고 또한 컴퓨터에 의해 데이터가 처리되도록 하였다. 메모리에 저장된 측정자료들은 표면평가를 위해 제어되는 IBM PC/AT 386에 의해 적절히 처리된후 그래픽 디스플레이를 통해 표시된다. 또 산출된 거칠기 변수들과 단면곡선 그래프를 마이크로 컴퓨터의 주변기기인 프린터를 통해 기록한다.

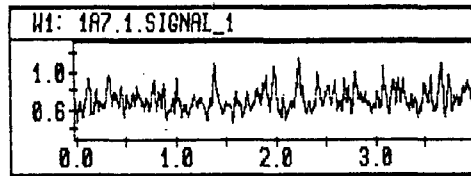


Fig. 3 Time domain surface roughness signal

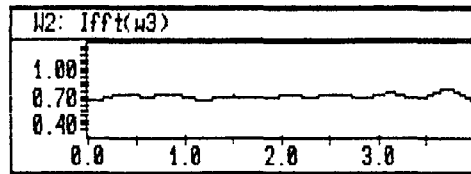


Fig. 4 Time domain waveness signal

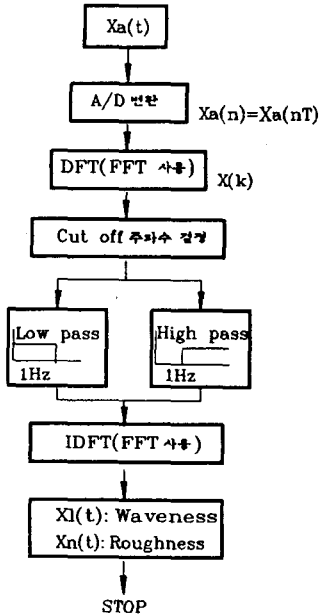


Fig. 5 Flowchart of signal processing

2.3 표면 거칠기 신호의 분석

측정계로부터 받아들여진 표면 거칠기 신호는 Fig. 3과 같다. 거칠기 신호는 Fig. 4와 같은 Waviness 신호와 중첩되어 있으므로 이들 신호를 분리할 필요가 있다. 분리에 사용될 필터를 설계하기 위해서는 Fig. 5와 같은 과정으로 거칠기 신호를 주파수 영역에서 분석, 검토할 필요가 있다.

먼저, 거칠기 신호를 연속 시간영역의 값인 $X_a(t)$ 로 두자.

$X_a(t)$ 의 주파수 영역으로의 변환은 Fourier변환을 사용하여 변환한다. 즉

FT
 $X_a(t) \rightarrow X_a(f) \dots \dots \dots (1)$
 이를 Fourier적분식으로 표현하면 다음과 같다.

$X_a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X_a(t) \exp(-j\omega t) dt \dots \dots (2-a)$

$\omega = 2\pi \cdot f \dots \dots \dots (2-b)$

거칠기 신호 $X(t)$ 가 T주기로 A/D변환이 된 신호로

바뀌면 이산형 신호 영역 신호가 되므로 $X_a(nT)$ 이다. 편의상 $X_a(nT)=X_a(n)$ 로 했을때 이 신호의 이산 Fourier변환과 그 역변환 즉, DFT(Discrete Fourier Transformation)와 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transformation)는 다음과 같다.

$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp(-j2\pi \cdot kn/N), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \dots \dots \dots (3-a)$

$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi \cdot kn/N), n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \dots \dots \dots (3-b)$

이때 A/D 변환 주기 T와 데이터 수는 시간 변수 t와 다음과 같은 관계를 가진다.

$t = nT = n/F_s \dots \dots \dots (4)$

여기서, F_s 는 A/D 변환시의 샘플링이 주파수이다.

2.4 실험장치 및 시편

본 실험에서 사용된 측정기기는 다음과 같다.

- (1) 광원 : Laser diode(GaAlAs), 파장(λ) 760nm,
- (2) 광검출기 : Photovoltaic type 광검출기, 증폭기 내장형, 명칭 Laser Pico-Watt Digital Meter M835-SL-04.
- (3) 표면 거칠기 측정기 : Tokyo Semitsu Co. LTD 모델 Surfcom 300B.
- (4) A/D변환기 및 Digital I/O : 12bit, 16채널, 최대 변환속도 30 KHz, 16 채널 Digital I/O, 입력 $\pm 1V \sim \pm 10V$, 모델 PCL812.
- (5) 컴퓨터 : IBM PC/AT 386
- (6) 광자기디스크 : 600Mb~4.8Gb
- (7) DC Power supply

본 실험에 사용된 재료는 구조용탄소강(SM45C)이며 이들의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties and chemical composition of specimen (SM45C)

a) Mechanical properties

Material	Yielding strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (H _{RB})
SM45C	42	56	21	91

b) Chemical composition (% wt)

Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
SM45C	0.45	0.25	0.78	0.03	0.035	Balance

1) 형상과 치수

시편은 연삭가공하여 최대 거칠기높이가 5.8Rmax ~ 11.4Rmax이 되도록 하였으며 이들 시편의 형상과 치수는 Fig. 6이고, Photo. 2에는 실제 실험에 사용된 시편들이다.

2) 표면의 거칠기 측정

실험에 사용될 시편의 표면거칠기 측정을 위하여 측정기는 Surfcom 300B(Tokyo Semitsu Co. LTD)를 사용하였으며 Cut off R 0.8mm, Traversing length 2.5, Range 2K로 하였으며 또한 매 연삭후 표면거칠기 값을 측정하였다.

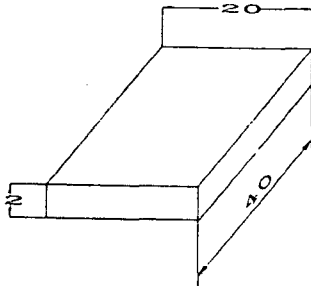


Fig. 6 Dimension of test specimen

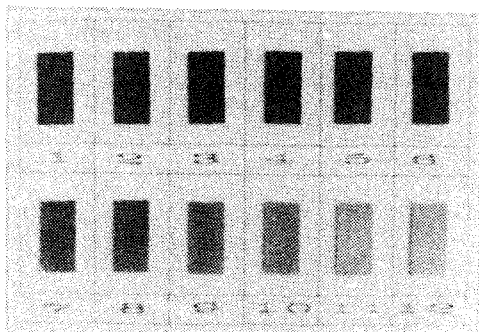


Photo. 2 Configuration of test specimens

3.1 시편의 이송속도가 표면거칠기 측정에 미치는 영향

시편의 이송속도 변화에 따르는 표면거칠기의 변화를 알아보기 위하여 시편의 이송속도를 0.03, 0.06, 0.12, 0.3, 0.6, 1.5, 3.0mm/sec로 변화시켜 주었으며 이들의 결과를 Fig. 7~Fig. 13에 나타내었다.

이때 입사광속의 지름은 0.1, 0.5, 1, 2, 4mm로 하였으며 임의의 표면거칠기는 5.8, 6.5, 6.7, 6.9, 7.0, 7.5, 7.7, 8.5, 10.8, 11.4Rmax로 되도록 하였다.

Fig. 7에서 보듯이 시편의 이송속도가 3mm/sec인 경우 입사광속 지름을 0.1이나 0.5mm로 주었을 때에 표면거칠기가 5.8Rmax~7.7Rmax에서 급격한 전압의 변화가 나타나고 그 이상의 표면거칠기에서는 완만한 기울기의 전압차를 볼 수 있었다. 이는 금속의 표면거칠기가 거칠수록 레이저 비임의 산란이 많이 일어나기 때문에 분해능이 떨어진다고 생각된다.

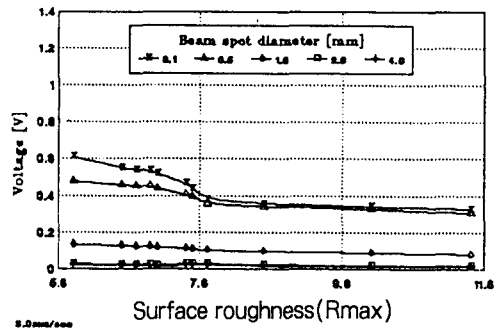


Fig. 7 Digital voltage vs. surface roughness (Tracing speed : 3mm/sec)

3. 실험결과 및 고찰

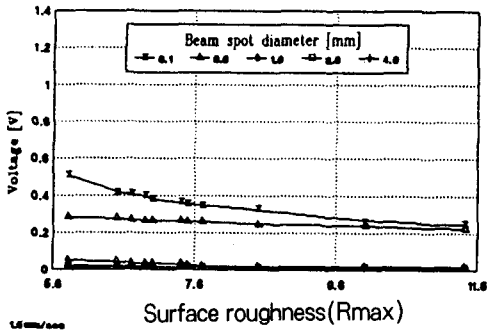


Fig. 8 Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 1.5mm/sec)

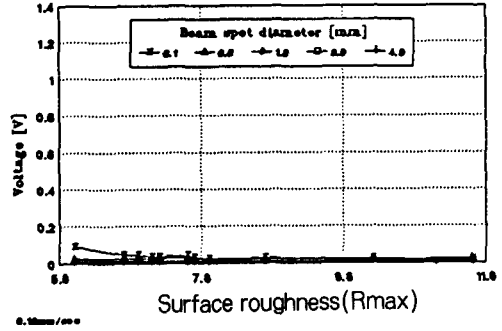


Fig. 11 Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 0.12mm/sec)

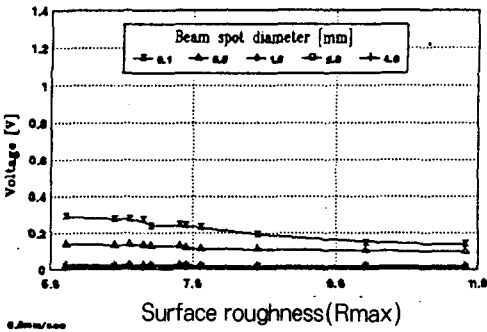


Fig. 9. Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 0.6mm/sec)

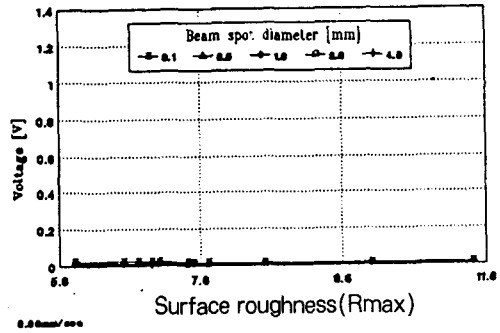


Fig. 12 Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 0.06mm/sec)

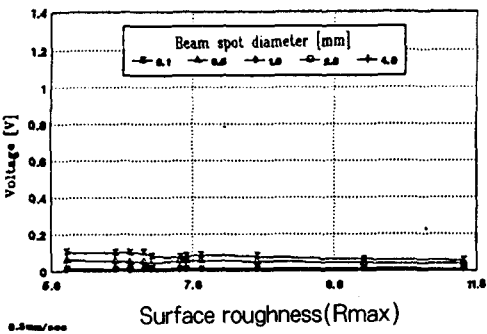


Fig. 10 Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 0.3mm/sec)

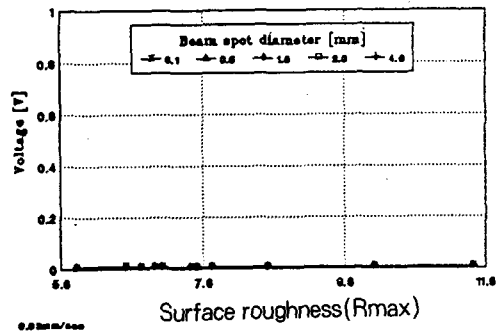


Fig. 13 Digital voltage vs. surface roughness
(Tracing speed : 0.03mm/sec)

입사광속이 1.0mm일때는 표면거칠기의 전구간에서 거의 직선적인 전압의 변화를 보이며 전압차는 작음을 알 수 있었다. 따라서 그 이상의 입사광속을 주었을 경우에도 전압의 기울기는 점차 일정하게 유지된다.

고로 표면거칠기 측정시 이송속도는 3mm/sec일 때 입사광속의 지름 0.1mm~0.5mm일때가 가장 이상적으로 표면거칠기를 측정할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 이송속도가 1.5mm/sec일때 입사광속의 지름이 0.1mm까지 분해능이 좋고 0.5mm에서는 직선적인 전압이 보이나 전압차는 크지 않음을 알 수 있었다. 1mm에서는 5.8Rmax~7.5Rmax까지 약간의 전압변화가 있었으나 7.7Rmax~11.4Rmax에서는 전압의 차가 없이 일정함을 보이고 있다.

2mm, 4mm에서는 서로가 일치됨을 볼 수 있으므로 이송속도가 1.5mm/sec일때는 0.1mm로 사용이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9 이송속도가 0.6mm/sec일때는 표면거칠기 측정에 사용될 수 있는 입사광속의 지름은 0.1mm, 0.5mm 가능하며, Fig.10에서는 이송속도가 0.3mm/sec일때 표면거칠기 측정에 사용될 수 있는 입사광속의 지름은 0.1mm가 가능하며, Fig.11에서는 이송속도가 0.12mm/sec일때 사용될 수 있는 입사광속의 지름은 0.1mm일때 5.6Rmax~7.8Rmax 영역에서 가능하며, Fig. 12, 13의 이송속도가 0.06mm/sec와 0.03mm/sec에서는 입사광속의 지름에 상관없이 표면거칠기 측정이 곤란함을 알 수 있다.

Fig. 14는 입사광속의 지름을 0.1mm로 하였을 때 이송속도에 대한 표면거칠기 5.6Rmax의 그림으로써 W₁의 이송속도는 0.03mm/sec, W₂는 0.06mm/sec, W₃는 0.12mm/sec, W₄는 0.3mm/sec, W₅는 0.6mm/sec, W₆는 1.5mm/sec, W₇은 3.0mm/sec로 이송했을 때의 그림이다.

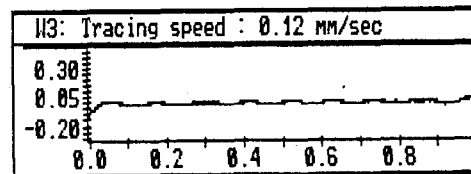
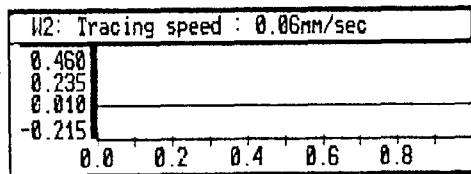
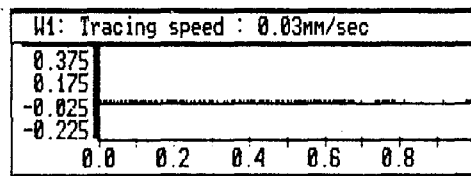
Optical scanning method에서는 beam spot size가 작을수록 좋아지지만 동일한 평가길이에 대해 sampling step의 수가 많아짐으로 오차의 누적이 커지게 된다. 그러므로 너무 작은 입사광속의 지름은 인프로세스 계측에 나쁜 영향을 줄 수도 있다.

본 실험의 결과로 볼때 입사광속 지름이 4.0~0.1mm로 갈수록 전압의 차이가 점점 높게 나타나며 표면거칠기에 대한 민감성을 보여주고 있다.

입사광속지름 1.0mm에서는 이송속도 3.0mm/sec 이상이 되어야 표면거칠기 측정에 적용이 가능하고 입사광속지름 0.5mm, 0.1mm에서는 이송속도 0.6mm/sec이상이면 역시 표면 거칠기 측정에 적용이 가능함을 알 수 있다.

광속의 지름 1.0mm에서는 이송속도 3.0mm/sec가 선형적인 변화를 보이고 있으며 0.5, 0.1mm에서는 이송속도 1.5mm/sec가 선형적임을 알 수 있다.

그러므로 입사광속 지름이 2.0~4.0mm와 이송속도 0.03~0.3mm/sec구간은 표면거칠기에 따른 전압의 변화가 안정된 선형성을 보이지 않았고 불안정한 함으로 표면거칠기 측정에 곤란함을 알 수 있고 입사광속의 지름이 작아질수록 표면거칠기에 대한 예민한 반응을 보이고 있으므로 입사광속지름은 1.0mm이하에서만 표면거칠기 측정에 적용이 가능하고 이송속도는 0.6mm/sec이상이어야 표면거칠기 측정에 적용이 가능하며 결과적으로 입사광속지름 0.5mm와 이송속도 1.5mm/sec가 가장 안정된 적용범위를 알 수 있었다.



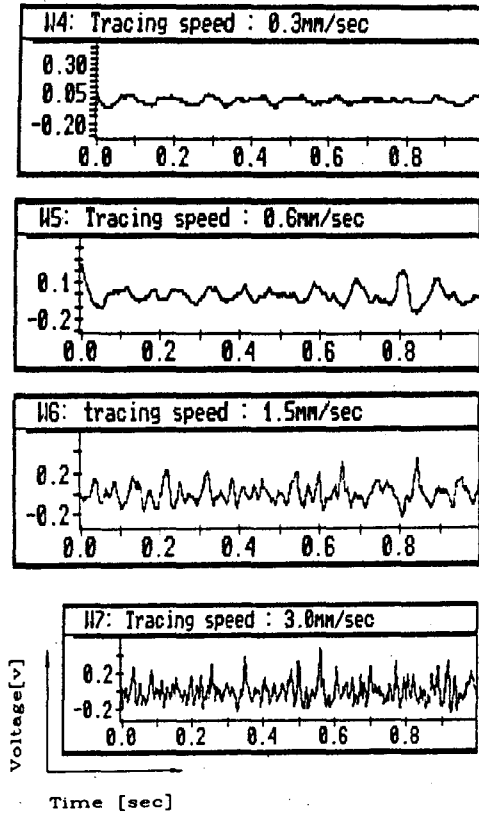


Fig. 14 Surface roughness for tracing speed

3.2 입사광속의 지름이 표면거칠기 측정에 미치는 영향

입사광속의 지름 변화에 따른 표면거칠기 측정의 변화를 알아보기 위하여 입사광속의 지름을 0.1, 0.5, 1, 2, 4mm로 변화시켜 주었으며 이들의 결과를 Fig. 15~Fig. 20에 나타내었다.

이때 시편의 이송속도는 0.03, 0.06, 0.12, 0.3, 0.6, 1.5, 3.0mm/sec의 7가지로 하였다.

Fig. 15는 입사광속의 지름이 0.1mm일때 이송속도 3mm/sec~0.6mm/sec일때는 표면거칠기 5.8Rmax~7.7Rmax에서는 분해능이 좋으므로 급격한 전압의 변화가 나타나나 표면거칠기 8.5Rmax~11.4Rmax에서는 작은 기울기를 갖는것을 볼 수 있었다.

이는 금속의 표면 거칠기가 거칠수록 산란의 현상으로 분해능이 좋지 않음을 볼 수 있다. 이송 속도가 0.3mm/sec일때는 표면 거칠기가 5.8Rmax~11.4Rmax에서는 거의 직선적인 변화가 보이며, 이송속도가 0.12mm/sec일때는 표면거칠기가 5.8Rmax~7.7Rmax까지는 전압의 변화가 약간 있으나 8.5Rmax~11.4Rmax에서는 표면거칠기에 따라 전압의 기울기가 없음을 알 수 있다. 이송속도가 0.03mm/sec와 0.06mm/sec에서는 거칠기의 변화에 관계없이 전압이 거의 변화없이 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 16은 시편의 이송속도를 3.0mm/sec로 하였을때 입사광속의 지름에 대한 표면 거칠기 5.8Rmax의 그림으로서 W(1)은 입사광속의 지름이 0.1mm일때 W(2)는 0.5mm일때, W(3)은 1.0mm, W(4)는 2.0mm이며 W(5)는 4.0mm일때의 그림이다.

Fig. 17에서는 입사광속의 지름이 0.5mm일때 표면거칠기 측정에 사용될 수 있는 이송속도는 3, 1.5, 0.6mm/sec이며, Fig. 18에서는 입사광속의 지름이 1.0mm일때 사용할수 있는 이송속도는 3mm/sec이며, Fig. 19~Fig. 20에서의 입사광속의 지름이 2.0mm~4.0mm일때는 이송속도의 변화에 관계없이 거의 전압의 변화가 없으며 서로 일치함을 알 수 있다.

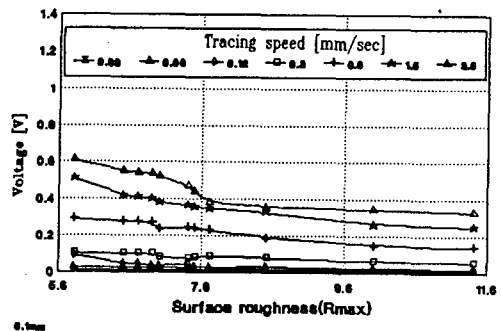


Fig. 15 Digital voltage vs. surface roughness (Beam spot diameter : 0.1mm)

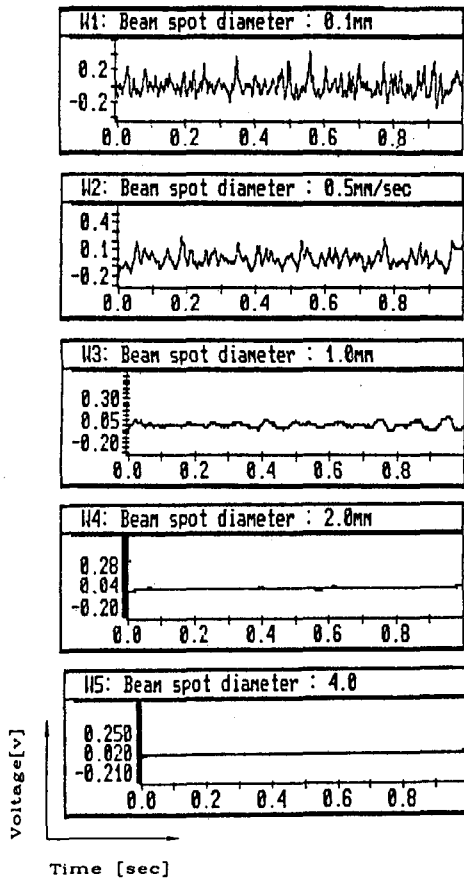


Fig. 16 Surface roughness for beam spot diameter

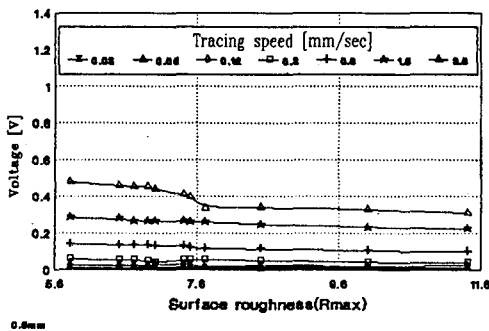


Fig. 17 Digital voltage vs. surface roughness (Beam spot diameter : 0.5mm)

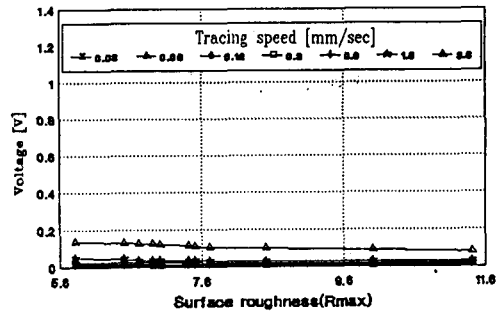


Fig. 18 Digital voltage vs. surface roughness (Beam spot diameter : 1.0mm)

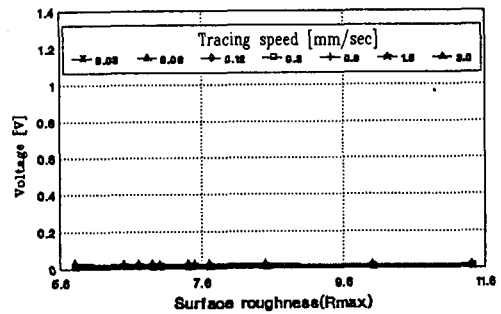


Fig. 19 Digital voltage vs. surface roughness (Beam spot diameter : 2.0mm)

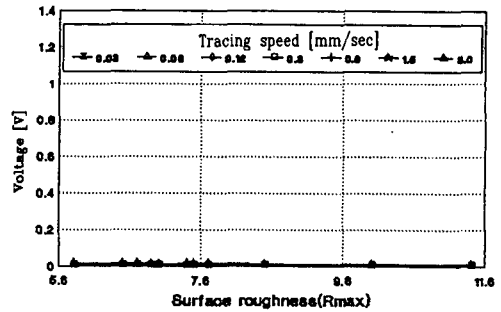


Fig. 20 Digital voltage vs. surface roughness (Beam spot diameter : 4.0mm)

Fig. 21은 표면거칠기 윤곽에 대한 그림이고, 다음 식에 의하여 그값을 구할 수 있다.

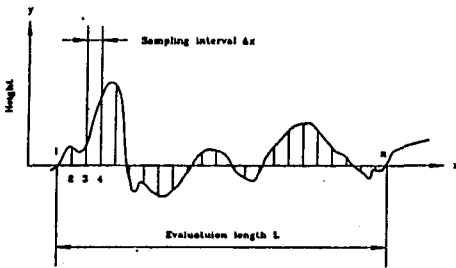


Fig. 21 Surface roughness profile

$$\Delta x = L/(n-1) \cong L/n$$

여기서 Δx 는 샘플링 간격, L은 표면거칠기 측정의 평가거리, n은 샘플의 갯수이며, Table 3은 윗식에서 구해진 이송속도에 따른 시편의 샘플링 간격 Δx 와 평가길이 L에 대한 표이다.

Table 3 Sampling interval Δx and evaluation length L of specimen(SM45C)

Tracing speed (mm/sec)	Evaluation length L (mm)	Sampling interval Δx (mm)
0.03	0.12288	0.00003
0.06	0.24567	0.00006
0.012	0.49152	0.00012
0.3	1.22880	0.00030
0.6	2.45670	0.00060
1.5	6.14400	0.00150
3.0	12.28800	0.00300

Δx 가 작을수록 sampling회수가 많아지기 때문에 측정에 소요되는 시간이 길어지게 되어 인프로세스 측정에는 문제가 될 수도 있다.

따라서 본 실험에서 최적 입사광속의 지름은 0.1mm일때가 가장 좋음을 알 수 있었다.

4. 결 론

연마된 금속의 표면거칠기 측정에 반도체 레이저의 적용을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 금속의 표면거칠기가 5.8Rmax~11.4Rmax범위에서는 이송속도가 1.5mm/sec 및 3mm/sec로 적용 되었을때 표면거칠기 측정에 가장 적합함을 알 수 있었다.
- 2) 금속의 표면거칠기가 5.8Rmax~11.4Rmax범위에서는 광축침이 0.1mm와 0.5mm때가 가장 좋음을 알 수 있었다.
- 3) 표면거칠기의 측정에 광학적인 방법을 도입하여 가공중 이송방향에 따라서 인프로세스 측정이 가능하리라 생각된다.

참고문헌

- 1) William B.Ribbens, Interferometric surface roughness measurement, Applied Opt., Vol. 8, No. 11, Nov. 1969
- 2) J.A. Aas, Reconstruction of surface profiles from their diffraction spectra, Applied Opt., Vol. 11, No.7, July. 1972
- 3) Rober A. Sprague, Surface roughness measurement using white light speckle, Applied Opt., Vol. 11 No. 12, Dec. 1972
- 4) E.L. Church and J.M Zavada, Residual surface roughness of diamond-turned optics, Applied Opt., Vol. 14, No.8, Aug. 1975
- 5) J.M Elson and J.M Bennett, Relation between the angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surface, J. Opt. Soc. Am., Vol. 69, No.1, Jan. 1979
- 6) M Shiraishi, In-process measurement of surface roughness in turning by laser beams, ASME, Vol. 103, pp. 203~209, May. 1981
- 7) D.G. Jansson, J.M.Rourke, and A.C. Bell, High-speed surface roughness measurement,

- ASME, Vol. 106, pp. 34~39, Feb. 1984
- 8) David Y.Lou, A.Martinez, and D.Stanton, Surface profile measurement with a dual-beam optical system, Applied Opt., Vol.23, No.5, Mar. 1984
 - 9) 谷村吉久, 豊田辛可, レーザ干渉計を應用した非接觸微細形狀測定裝置ね, 精密機械, 50卷, 10號, 10. 1984
 - 10) 官本三, 接觸式と非接觸式みによる表面形狀測定, 精密機械, 51卷, 4號, 4. 1985
 - 11) Thomas Young, Linear systems and digital signal processing, Prenticehall, Inc, 1985
 - 12) Ming Shong Lan, In-process detection of tool breakage in milling, ASME, Vol. 108, pp. 191~197, Aug. 1986
 - 13) C.S.Lee,D.Y.Yim, An In-process measurement technique using laser for noncontact monitoring of surface roughness and form accuracy of ground surface, Annals of the CIRP, Vol. 36, pp. 425~428, Jan. 1987
 - 14) M.Shiraishi, A consideration of surface roughness measurement by optical method, ASME, Vol. 109, pp. 100~105, May. 1987
 - 15) K.Kim, K.F.Eman, In-process control of cylindricity in boring operations, ASME, Vol. 109, pp. 291~296, Nov. 1987
 - 16) K.Kim, K.F.Eman, Analysis of alignment error in a laser-based in-process cylindricity measurement system, ASME, Vol. 109, pp. 321~329, Nov. 1987
 - 17) I. Yellowley, In-process detection of tool failure in milling using cutting force models, ASME, Vol. 111, pp. 149~157, May. 1989
 - 18) 清野慧, 黃佩森, 鈴木傳文, 粗と測定的光スキッド法(第1報), 精密工學會誌, 55, 08, pp. 1409~1414, 1989
 - 19) 김희남, 전영식, 구만서, Laser beam을 이용한 금속 표면의 거칠기 측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol. 5, No.2, Oct. 1990
 - 20) 김희남, 전영식, 구만서, Laser beam을 이용한 금속 표면의 거칠기 측정에 관한 연구(2), 명지대학교 산업기술연구소 논문집, 제 9집, Dec. 1990
 - 21) 김희남, 허웅, 구만서, 광학식 표면 거칠기 계의 디지털 신호처리, 한국산업안전학회지, Vol. 6, No.2, Jun. 1991
 - 22) 김희남, 남무호, 황재연, 박희재, 선삭가공시 Laser beam을 이용한 금속의 표면거칠기 측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol.6, No. 4, Dec. 1991