한국공작기계기술학회 '97년도 추계학술대회 논문집 pp 254~259

레이저 빔을 이용한 표면거칠기 및 파상도의 in-process 검출

김희남 (명지대), 허 웅 (명지대), 윤여권* (명지대 대학원)

In-process Detection of Surface Roughness and Waviness Using Laser Beam

H. N. Kim (Myongji univ.), W. Huh (Myongji univ.), Y. K. Youn* (Myongji univ.)

ABSTRACT

The measurement of surface roughness and waviness by means of noncontact method is an important area to be developed for GAC(Geometrical Adaptive Control) system. This paper deal with the design of noncontact in-process measurement system which measures the surface roughness and waviness during cylindrical grinding.

This measuring system is simple and the apparatus proposed is composed of a laser unit, photodetector and optical system. During operation, the surface of a workpiece is continuously scanned by a laser beam. This method makes it possible to detect the surface roughness and waviness along the feed direction by control the spot diameter of laser beam.

The experimental results show that the presence of chattering, loading and glazing can be detected sensitively along the feed directions.

Key Words : Roughness (거칠기), Waviness (파상도), Measurement (측정)

1. 서 론

현대산업이 고도화됨에 따라 기계가공품에 대해 높은 정밀도와 표면의 품위가 요구되어지는 실정에 따라 CNC공작기계의 발달과 아울러 각종초정밀 가공법이 개발되고 있다. 기계가공품 표면의 정도를 평가함에 있어서 표면거칠기 및 파상도는 매우 중요한 부분이다. 표면거칠기와 파상도는 제품의 정밀도와 조립성을 결정하는 중요한 인자이다. 초정밀기계부품을 절삭 또는 연삭가공하여 부품을 조립할 때, 부품조립의 수월성과 정밀도는 치수공차의 정확도는 물론이지만 형상공차의 정확도 또한 중요한 요소이다.

형상공차의 정밀도는 주로 공작기계의 정적,동적강성과 절삭공구 및 절삭조건에 의해 결정되는 표면거칠기 및 파상도에 영향을 받게된다.

특히, 표면거칠기는 주로 절삭공구 및 절삭조건에 의해 많은 영향을 받게되나 파상도는 주로 공작기계 및 공구의 동적강성, 주축계의 회전에의한 진동, 베드등 구동면의 진직정밀도등에 의해 영향을 받는 경향이 크다.

초정밀 가공된 부품의 표면구성요소중 거칠기가 양호하게 가공되더라도 파상도의 크기가 크다면 형상정밀도를 크게 떨어뜨리는 요소가 될수 있다.

표면거칠기를 측정함에 있어 종래의 촉침식측정법은 제품표면에 측정흔을 남기며 인프로세스측정에 적용이 불가능하여 고정도,고능률적인 인프로세스 측정법의 개발을 통하여 표면정도와 생산성을향상시킬수 있도록 해야한다.

이러한 인프로세스 측정에 레이저를 이용하기위한 연구는 1969년 Ribbens[1]가 레이저 빛의 간섭현상을 이용하여 금속의표면거칠기를 측정한 이후 M.Shiraish, C.S.Lee 등 여러사람[1)~19)]에의해 연구되어 왔으나 표면거칠기측정에 대한 정량적인 검토가 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 He-Ne레이저를 이용하여 원통연삭가공시 제품의 표면거칠기 및 파상도를 인프로세스 검출함에 있어 측정범위와 가능성을 밝히고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 측정계는 He-Ne gas laser와 렌즈광학계, 광검출기, A/D변환기, 컴퓨터, 촉침식 표면거칠기 측정기로 구성되어있다. 촉침식 표면거칠기 측정기는 본 실험에서 제안된 인프로세스 측정결과의 신뢰성을 검토하기위한 비교기준으로 사용되었다.

Fig.1은 측정계의 전체적인 개요도이다.

He-Ne gas laser 에서 발생된 광이 광학렌즈를 통과하면서 0.1 mm의 직경으로 피측정물 표면에 입사되고, 전형적인 광학적 배치로서 15° 의 반사각으로 반사된다.

이때 피측정물 표면에서 15° 의 각도로 반사되는 반사광량의 종속적인 변화가 광검출기에 의해 입수되어지며, 광검출기에 수감되어지는 전압의변화량은 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터로 전달되어진다.

컴퓨터를 통해 이러한 데이터를 입수한후 필요한 신호처리과정을 거쳐 결과를 CRT, 레코더등으로 출력해볼 수 있다.

Fig.2에 광검출기 및 촉침식 측정기로부터 보내지는 측정신호가 컴퓨터에 전달되는 과정을 나타내었다.

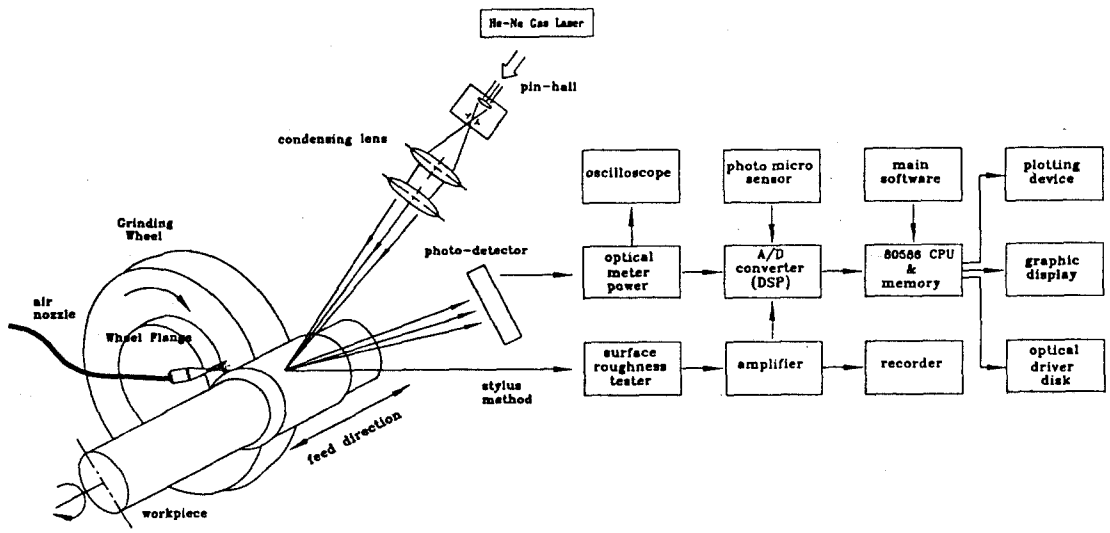


Fig.1 Schematic diagram of the in-process measurement system

2-2. 실험방법

레이저 빔을 이용하여 in-process 상태에서 공작물의 표면상태를 측정한 후 공작물을 탈착하여 촉침식 표면거칠기 측정기로 거칠기를 측정할 수 있도록 SM45C를 재료로 하여 Table.1과 같은 조건으로 시편을 연삭가공하였다.

Table.1 Machining condition

Wheel speed (m/min)	Work piece speed (m/min)	Table speed (m/min)	Dress-ing speed (mm/rev)	Depth of cut (μm)	Beam spot diameter (mm)	Wheel
1908	2 7 11 16	0.24 0.54 0.90	0.16	15	0.1	WA46 K7V

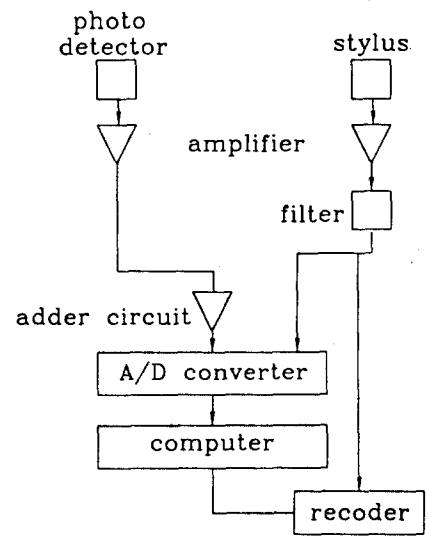


Fig.2 Data aquisition system

3. 교란요소 및 신호처리

3-1. 교란요소

표면 거칠기 신호에는 짧은 파장 성분의 거칠기(roughness) 곡선에 이것을 제외한 긴 파장 성분의 파상도(waviness) 곡선이 혼입 되어있다.

거칠기 곡선과 파상도 곡선은 여파 과정을 통해 분리되는데, 과거에는 아날로그 회로에 의존했던 이러한 처리도 반도체 기술의 발달과 함께 A/D 변환 회로의 고체 소자화, 고속 Fourier 연산 장치의 보급과 고성능 마이크로 프로세서의 개발로 인해 훨씬 신속하고 정확하게 신호 처리를 할 수 있게 되었다.

이러한 파상도곡선의 혼입 원인은 정확히 규명되지는 않았으나, 가공시 피삭재와 공구사이의 마찰로인한 진동에 의해 발생되는 경우와 공작기계의 동적강성과 제작정밀도에서 발생되는 진직도, 직각도, 진원도 등 형상 오차에 기인되는 경우를 원인으로 들 수 있으며, 또한 연삭숫돌자체의 형상오차에 따른 원인에도 영향을 받게된다.

그외에도 가공물자체의 진직도, 진원도 등 가공된 형상정밀도의 오차에 의한 파상도곡선의 변동이 혼입되기도하는데 이 경우는 전술한 파상도곡선의 파장보다 길게 나타나는 것이 일반적이다.

따라서 순수한 거칠기 값을 얻기 위해서는 거칠기 곡선을 제외한 파장에 대해서는 디지탈 필터(digital filter)를 사용하여 여파를 가해줄 필요성이 있다.

제안된 인프로세스 측정시스템의 장점 중 한가지는 피측정물에 대한 접근에 있어서 가공 표면의 거칠기 신호가 표면으로부터 광검출기까지 빛에 의해 전달되므로 기계적인 장치가 필요하지 않다는 점이다. 이러한 조건을 충족시키면서 원활한 계측을 수행하려면 높은 반사 강도가 요구되므로 레이저와 같이 고휘도성 광원이 필요하다.

He-Ne 레이저의 휘도(brightness)는 발산각이 1 mrad, 빔의 직경이 1 mm, 출력이 1 mV 일때, 1mV 출력은 0.16 lumens에 상당하며 1 mrad은 약 10^{-6} sterad 이므로 2×10^{7} lumens/cm^2-sterad 가 된다.

레이저 빔은 파장 6328 Å의 단색광을 방출하는 7mW 출력의 고휘도성을 가지고 있으므로 약간의 연기나 주변광에 견딜 수 있다.

본 실험에서 가공된 표면의 거칠기 신호에서 cut-off 시키는 파상도(waviness)곡선 성분의 주파수는 공작물의 이송속도의 변화에 따라 1.6 Hz~6 Hz 사이에 분포한다.

따라서 위에서 열거한 잡음들은 대역 필터나 고역및 저역 필터를 사용하여 제거함으로써 순수한 거칠기 값을 산출할 수 있다.

본 실험에서 사용한 소프트웨어에서는 이러한 여파 과정을 실행시킬 수 있는 다양한 필터를 제공해 준다.

3-2. 신호 처리

측정된 거칠기 신호에 혼입되어 있는 잡음(noise)들은 디지탈 필터(digital filter)를 이용한 여파과정을 통하여 감소시킬 수 있다.

이와같이 거칠기(roughness) 신호에 혼입되어 있는 파상도(waviness)성분을 분리하기 위해 시간영역에서 입수된 거칠기 신호를 주파수 영역에서 분석할 필요가 있다.

디지탈 필터는 PSD(power spectral density)처리에서 결정된 차단 주파수(cut-off frequency)를 이산 Fourier 변환(DFT)과 그의 역변환(IDFT)에 적용시켜 잡음에 대한 여파를 수행한다.

거칠기 신호를 연속시간 영역의 값인 $X_a(t)$라고 놓고, $X_a(t)$의 주파수 영역 변환은 Fourier 변환을 이용하여 변환한다.

$$X_a(t) \xrightarrow{\text{FFT}} X_a(f) \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

윗 식을 Fourier 적분식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

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

$$\omega = 2\pi f \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-b})$$

거칠기 신호 $X_a(t)$ 가 T 의 주기로 A/D 변환이 된 신호로 바뀌면 이산형 영역 신호가 되므로 $X_a(nT)$ 가 된다.

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.

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

$$k = 0, 1, 2, \cdots\cdots, N-1 \quad \cdots\cdots (3\text{-a})$$

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

n = 0, 1, 2,……,N-1 · · · · · · (3-b)

이때, T는 A/D 변환주기로서 시간(t)영역에서 적분간격을 의미하며 시간변수 t 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$t = n \cdot T = n / Fs \quad \cdots\cdots\cdots \quad (4)$$

여기서, n 는 Data point 의 수이며 Fs는 A/D 변환시 샘플링 주파수 이다.

본 실험에서는 테이블 이송속도가 4 mm/sec 이고, A/D변환 샘플링 주파수를 2 KHz로 하였을때 A/D변환주기 T 는 0.5 ms가 된다.

그리고 측정길이를 8 mm 로 하였으므로 데이터 윈도우는 4,000 데이터 포인트(data point)가 된다. 따라서 이송거리 분해능은 2 μm/point 가 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 거칠기 곡선과 파상도 곡선

신호처리과정을 거쳐 검출하는 인프로세스 측정은 연삭가공시 가공물의 표면상태를 내부공정상태에서 판독하여 숫돌의 떨림자국, 눈메꿈, 글레이징 등과 부적합한 연삭조건에의한 표면상태의 악화를 감지하여 실시간에 이상상태를 제어해줌으로서 항상 최상 품위의 제품을 생산해낼 수 있다.

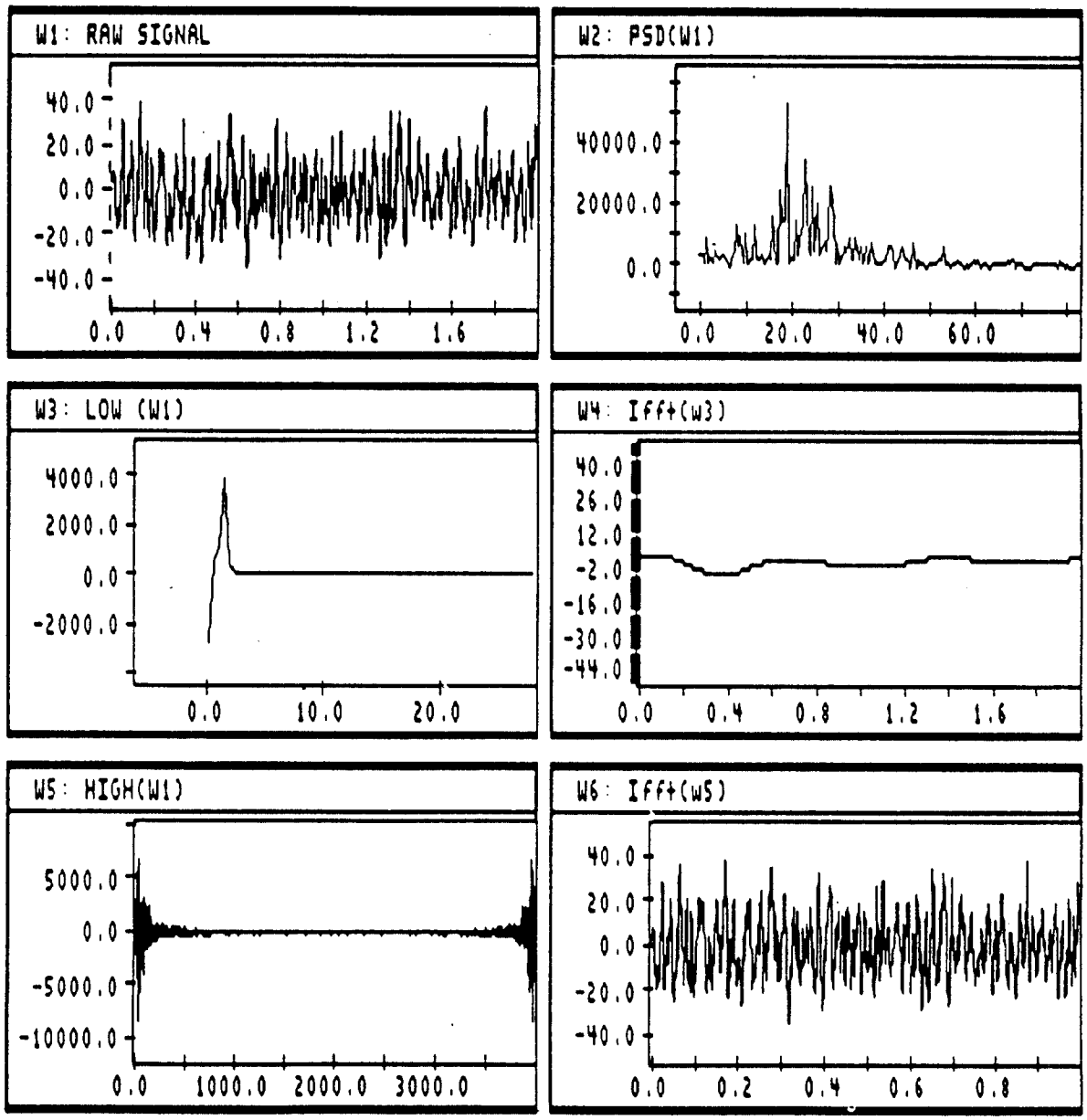


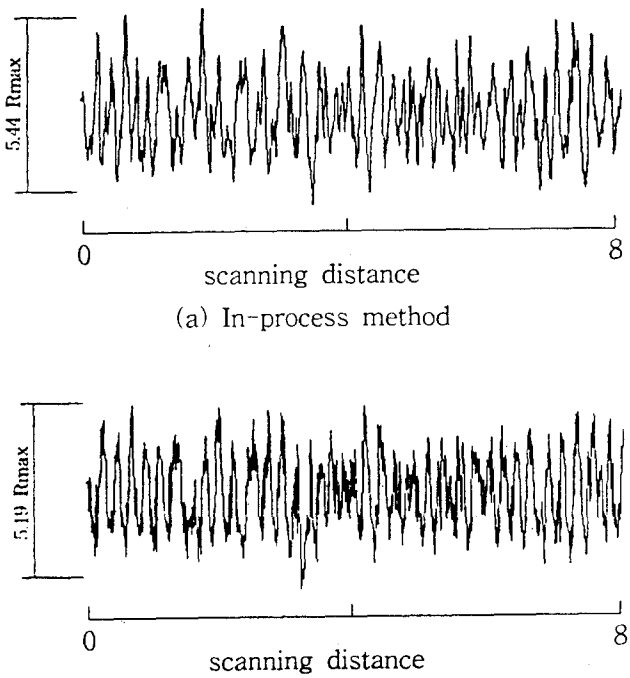
Fig.3 Surface roughness signal processing

Fig.3은 인프로세스 계측되어 입수된 거칠기(roughness)신호에 포함되어있는 파상도(waviness) 곡선을 제거하여 순수한 거칠기 곡선을 얻는 신호처리과정을 보여준다.

Fig.3에서 W1과 같은 표면 거칠기신호를 式(3)에 따라 FFT(Fast Fourier Transform) 하여 $X_a(f)$를 표현하면 W2와 같이 나타나게 되며, W2의 주파수 영역의 신호에서 2Hz 를 차단 주파수로 하여 저역 선형 필터링과 고역 선형 필터링을 한 후 式(3-b)와 같이 역변환(IFFT)을 각각 실행하면 W4와 같은 파상도(waviness)신호와 W6과 같은 순수한 거칠기(roughness)신호를 분리하여 검출할수 있다.

4-2. 인프로세스 측정의 정도(精度)

Fig.4 는 연삭숫돌을 깊이10 μm, 이송속도 0.16 mm/rev로 드레싱한 후 절삭속도 1910 m/min, 이송속도 0.24 m/min, 절입깊이 15 μm 의 연삭조건으로 가공된 시편을 인프로세스 측정한 거칠기 형상과의 촉침식 측정기로 측정한 거칠기 형상을 나타낸 것이다. 인프로세스 측정계에서 측정된 거칠기 형상이 촉침식 측정기에서 측정된 거칠기보다 예리하고 민감한 파형을 나타내어 촉침식 측정기에서의 값보다 약간 크게 나타나지만 그 차이는 매우 작음을 알수 있다.



(a) In-process method

(b) Stylus method

Fig.4 Comparison roughness profile recordings

Table.1 과 같은 조건으로 가공하여 레이저 빔을 이용한 측정계로 내부공정상태에서 표면상태를 검출한 후 촉침식 표면 거칠기 측정기로 측정한 결과를 Fig.5, 6, 7에 나타내었다.

연삭숫돌의 절삭속도는 1908 m/min 이며 공작물의 주(周)속도는 각각 2 m/min, 7 m/min, 11 m/min, 16 m/min이다. 일반적으로 공작물의 주속도가 감소하면 연삭숫돌은 보다 경(硬)하게 작용하고, 공작물의 주속도가 증가하면 보다 연(軟)하게 작용하므로 가능한 공작물의 주속도를 빠르게 하는 것이 생산성 증가와 숫돌의 수명을 길게할 수 있을 것이다.

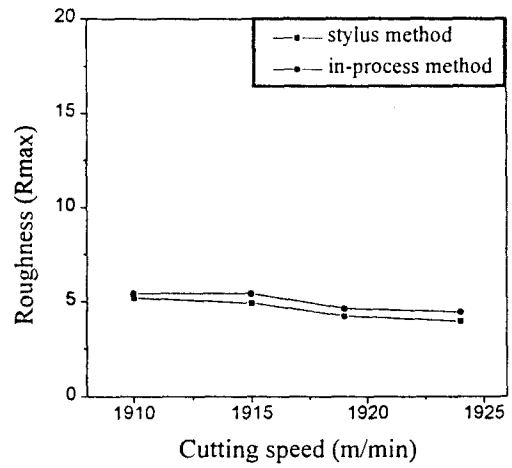


Fig.5 Surface roughness vs. Cutting speed at table speed 0.24 m/min

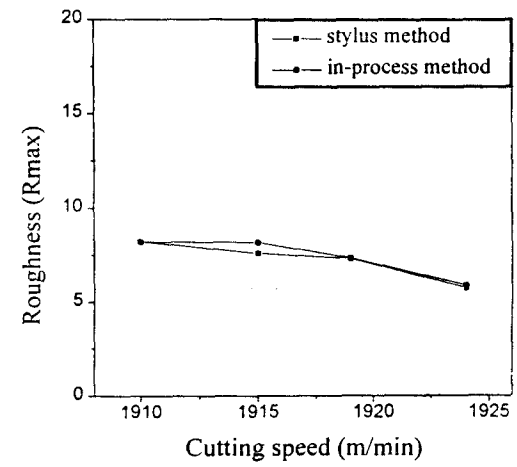


Fig.6 Surface roughness vs. Cutting speed at table speed 0.54 m/min

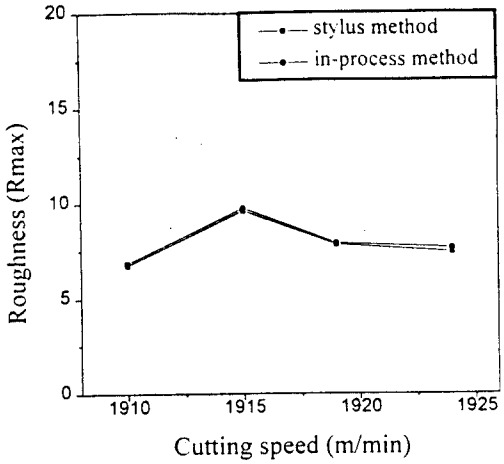


Fig.7 Surface roughness vs. Cutting speed at table speed 0.90 m/min

5. 결 론

본 연구에서 레이저 빔을 이용하여 표면거칠기를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

1. 연삭가공시 레이저 빔을 이용한 광학적인 방법으로 표면상태를 인프로세스 측정함으로서 내부공정상태에서 표면상태를 감시할수 있었다.

2. 레이저 빔의 직경이 0.1 mm에서 단면곡선에 혼입되어있는 거칠기곡선과 파상도 곡선을 얻을 수 있었다.

3. 공작물의 주속도가 증가함에따라 표면거칠기는 다소 양호해지며, 인프로세스 측정계를 이용하여 10 μm Rmax 이하의 표면에 대해 신뢰할만한 측정결과를 얻을수 있었다.

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1) William B.Ribbens; Interferometric surface roughness measurement, Applied Opt., Vol.8, No.11, Nov.1969

2) John C. Stover; Roughness chracterization of smooth machined surface by light scattering, Applied Opt.,Vol.14, No.8, Aug.1975

3) M. Shiraishi; In-process measurement of surface roughness in turning by Laser beams, ASME, Vol.103, pp.203~209, May.1981

4) M. Shiraishi; A consideration of surface roughness measurement by optical method, ASME, Vol.109, pp.100~105, May.1987

5) K.Kim, K.F. Eman; Analysis of alignment error in a Laser-based in-proces cylindricity measurement system, ASME, Vol.109, pp.321~329, Nov.1987

6) C.S.Lee, D.Y.Yim; An In-process Measurement Technique Using Laser for Non-Contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surface, Annals of the CIRP, Vol.36, pp.425~428, Jan,1987

7) 清野慧, 黃佩森, 鈴木博文; 粗さ測定の光スキット法(第1報), 精密工學會誌, 55卷, 8號,pp.1049~1414, 1989

8) 鈴木憲二; 研削砥石の トレッシンク の研究(第1報),日本精密機械論文集,30捲,3號,1964,pp.246-252

9) 中山一雄, M.C.Shaw; 研削仕上面の あらさ,日本機械學會論文集(第3部),37卷,293號, Jan,1970, pp.178-186

10) Rovert A.Sprague; Surface roughness measurement using white light speckle, Applied Opt., Vol.11 No.12, Dec.1972

11) 安井平何; 研削作業面性狀の 定量化に關する研究(第1報), 日本精密機械論文集,40卷, 8號, 8.1974, pp.639-644

12) Osuk Kwon,J.C.Wyant and C.R.Hayslett; Rough surface interferometry at 10.6 μm, Applid Opt.,Vol.19. No.11, 1980

13) Robert K. ERF; Laser application, Vol.4, Academic press, PP.2~69, 1980

14) 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

15) Thomas Young; Linear systems and digital signal processing,Prentice-hall, Inc, 1985

16) J.Wilsion, B.Hawakes; Laser principle and Application, Prentice-Hall, pp.131~142, 1987

17)임 동렬, 김 승우; LASER Autocollomation을 이용한 디지탈 조도 측정 (시스템의 입사 광속의 최적 스폿크기), 기계학회 춘계학술대회 초록집, pp.105~108, 1989

18) 김희남,전영식,구만서; Laser beam을 이용한 금속표면의 거칠기측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol.5, No.2, Oct.1990

19) 김희남,허웅,구만서; 광학식 표면 거칠기계의 디지탈 신호처리, 한국 산업안전학회지, Vol.6, No.2, Jun.1991