

선삭가공시 레이저 빔을 이용한 금속의 표면 거칠기 측정에 관한 연구(Ⅱ)

A Study on the Metallic Surface Roughness Measurement in Turning by Laser Beam(Ⅱ)

김희남* · 황재연** · 이주상*** · 하상용***

H. N. Kim · J. Y. Hwang · J. S. Lee · S. Y. Ha

ABSTRACT

A laser-based in-process measurement system for the evaluation of surface roughness in turning is reported. The proposed measuring system makes it possible to detect the surface roughness not only circumferential path but also along the feed direction even during machining. Also, it permits the real-time measurement of surface roughness in dynamic condition.

1. 서 론

생산기술이 발달함에 따라 기계 가공품에 대한 고정밀도가 요구되고 있고, 이에 부응하여 NC 및 CNC 공작기계 등에 의한 가공의 자동화가 이루어지고 있다.

정밀제품의 품질보증을 위한 평가에 있어서 표면 거칠기는 매우 중요한 요소이다. 전통적인 표면 거칠기 측정법은 가공이 완료된 후에 측정이 이루어지기 때문에 경제적인 측면에 있어서도 불합리한 점이 내재되어 있다.

이러한 문제점들을 해소하기 위해 인프로세스 측정기술이 M. Shiraish^{1,2)}, Robert A. Sprague³⁾ 등 여러사람^{4)~21)}에 의해 연구되어져 왔으나 아직도 충분한 검토가 이루어졌다고는 볼 수 없다. 표면 거칠기에 대한 인프로세스 측정은 거칠기 값을 포함한 연속적인 기록이 필수적인데 측정식과 같은 기계적인 접촉이 요구되는 방법을 적용한다면 높은 접촉압력에 의하여 가공표면에 측정 흔적을 남기고 결국 칩의 파괴를 초래할 것이다. 따라서 비접촉적인 방법들이 개발되었고, 이러한 방법들은 공기식이나 전기적, 혹은 광학적 기법을 요한다.

인프로세스 측정기술은 가공중에 연속적으로 기

* 명지대학교 기계공학과

** 대우국민차 생산기술부

*** 명지대학교 대학원 기계공학과

록되는 측정신호를 CNC 공작 기계의 제어 시스템에 전달하여 가공에 직접 이용되도록 하는 적응 제어 가공기법에 핵심이 되는 기술이다.

이러한 기술을 개발하기 위한 기초적인 단계로서, 본 논문에서는 레이저 빔을 이용한 광학적 기법을 도입하여 선삭 가공시 인프로세스 측정의 가능성을 검토하고, 적용이 가능한 측정범위를 설정하는데 목적을 두었다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험방법

2.1.1 측정계 구성

본 실험에서 사용된 측정 시스템의 전체적인 개

요도를 Fig. 1에 도시하였으며, Fig. 2는 그 사진이다.

측정계는 기본적으로 He-Ne gas laser, 렌즈 광학계, 광검출기로 이루어져 있다. 레이저와 광검출기는 선반의 공구 테이블 반대편에 완전히 고정되어 있고, 측정에 악영향을 주는 연기와 칩으로부터 보호되어 있다. 레이저의 광속은 렌즈를 통과하면서 직경 0.1mm의 크기로 가공물 표면에 입사되고, 전형적인 광학적 배치로써 20°의 반사각을 갖는다. 측정장치는 선반의 이송속도와 같은 속도로 검사 표면의 형상을 따라 주사하게 되고 광검출기에 의해 표면 상태에 종속적으로 변화하는 반사광량을 검출하여 증폭한 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터 시스템으로 전달된다.

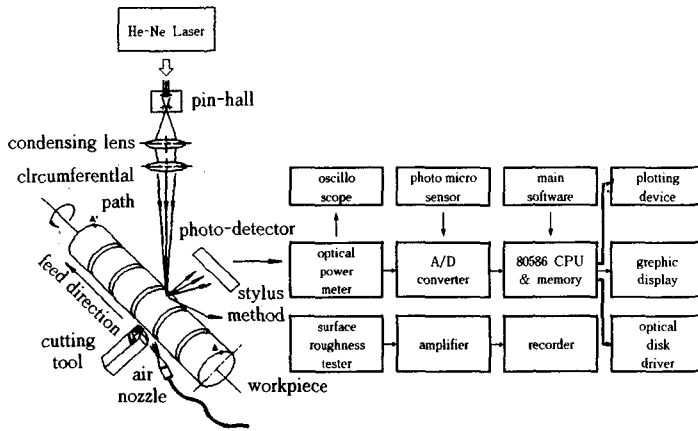


Fig. 1 Schematic diagram of the in-process measurement system.

이송방향에 따른 인프로세스 표면 거칠기 측정은 적은 표본수로도 거칠기 판정이 가능하다는 강점으로 인해 많은 연구가 이루어지고 있으나 아직까지는 기술적 난점으로 인해 좀처럼 제시되고 있지 않다.

본 실험에서는 광전센서(photo micro sensor)를 이용하여 이송방향의 거칠기 측정을 시도하였다. 이러한 측정은 가공된 표면의 거칠기가 거의 균일하다는 가정하에서 실험이 이루어졌다.

Fig. 3에서와 같이 광전센서는 검출점으로부터 매회전마다 1회의 펄스를 일으키며, 검출된 펄스

신호는 원주경호를 따라 측정되는 연속신호와 함께 CRT 화면상에 나타난다.

컴퓨터는 이러한 모든 데이터를 입수하는데 사용되며 필요한 처리 과정을 통해 CRT, 레코더 및 플로터와 같은 주변 기기로서 다양한 결과를 출력한다.

2.1.2 표면거칠기 신호의 분석 및 처리

연속적으로 입수되는 일련의 신호들은 주변에 산재한 교란요소에 의해 원하지 않는 진동 잡음과 가공물 표면형상에 따른 waveness 성분을 포함하고 있다. 이러한 요소들은 거칠기 값에 대해 오차를

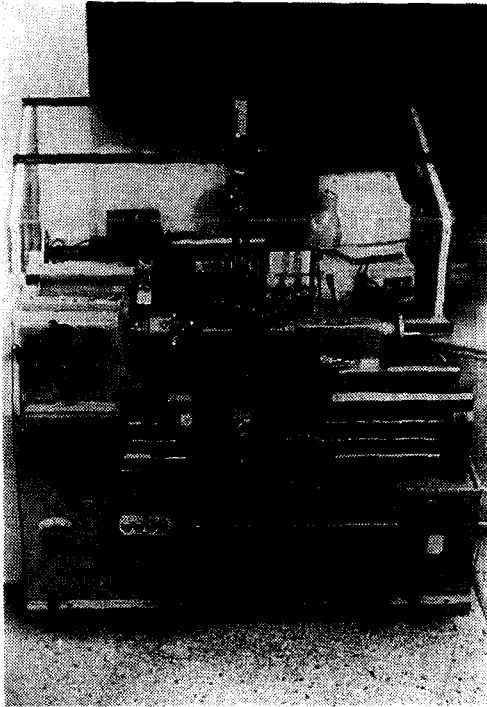


Fig. 2 Layout of the experimental system(Photo.)

발생시키는 요인으로써 제거되어야 한다.

이러한 원치 않는 잡음(noise)들은 디지털 필터를 사용하여 감소시킬 수 있다.

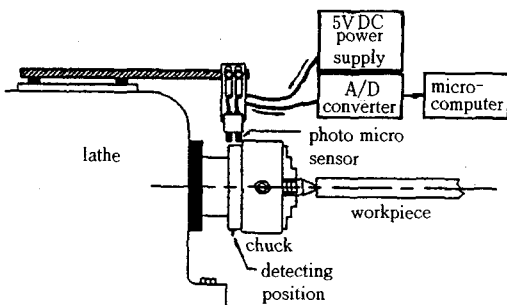


Fig. 3 System for the surface roughness measurement along the feed direction

디지털 필터는 PSD(power spectral density) 처리에 의해 결정된 cut-off 주파수를 이산 푸리에 변환(DFT)과 그의 역변환(IDFT)에 적용시켜 잡음

에 대한 여과를 수행한다¹⁵⁾.

상수값을 갖는 함수 $f(t)$ 의 Fourier 변환은 다음과 같다.

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{j\omega t} dt$$

이산 푸리에 변환을 $\bar{F}(j\omega)$ 라고 하면, 이는 $F(j\omega)$ 에 영차수 근사화(zero order approximation)로써 정의될 수 있다. 즉,

$$\bar{F}(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) e^{j\omega nT}$$

여기서 T 는 샘플링 간격이며 또한 시간(t)영역에서 적분 간격을 의미한다.

이산 푸리에 변환의 실제적인 계산은 유한의 합을 수반해야 하므로 연속함수 $f(t)$ 는 N 개로 표본화되고, 이들 표본은 $t=0$ 에서 시작된다고 가정하면 상기식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{F}(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT) e^{j\omega nT}$$

$f(t)$ 의 표본함수를 $\bar{f}(t)$, $f_n = f(nT)$ 로 놓고,

$$\bar{f}(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n \delta(t-nT)$$

로 정의될 때, $f(t)$ 에 존재하는 불필요한 주파수 성분은 필터를 통과하면서 제거된다. $f(t)$ 를 재구성하기 위해 일반적으로 Whittaker 함수를 적용하며, 임펄스 응답을 $h(t)$ 라 할때 이는 다음과 같이 정의된다.

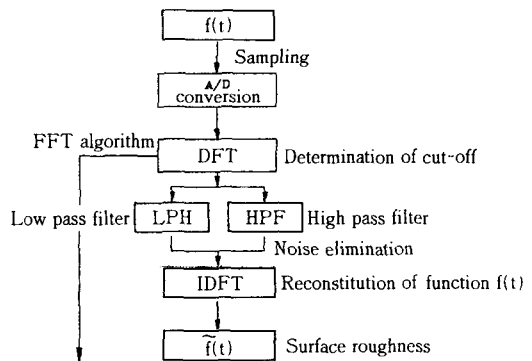


Fig. 4 Flow chart of signal processing

$$\bar{F}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \sum_{n=0}^{N-1} f_n \delta(t-\tau-nT) d\tau$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} f_n h(t-nT)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} f_n \frac{\sin[\pi/T] (t-nT)}{(\pi/T) (t-nT)}$$

이러한 모든 과정은 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 처리되었다. Fig. 4는 입수된 신호의 처리과정을 간단히 설명한다.

2.2 실험장치

2.2.1 실험기기

본 실험에서 사용된 기기들은 다음과 같다.

- 1) Light source : He-Ne gas laser generator (Hughes 3027 H-P), power 7.0mW, Wavelength 6328 Å
- 2) Optical power meter : Laser pico-watt optical power meter(M835-SL-04), power range 2nW to > 2W, resolution 0.005%
- 3) Detector : Silicon photo-detector(818-SL :

photovoltaic type), wave-length range 400~1100nm, active area 1cm²

- 4) A/D converter : 12bit 16channel (HAD574Z), 0.015% of reading ±1 bit accuracy, conversion speed 30KHz max.
- 5) Surface roughness tester : Model SURFCOM 300B(Tokyo Semitsu CO.LTD)
- 6) Computer : IBM compatible, CPU-Intel 80386 math-coprocessor
- 7) Photo micro sensor : 고휘력 타입, 전원전압 DC 5~15V, 제어출력 80mA
- 8) DC power supply : Model ED-3301 ED-603, tripple output, 160 watts, linear/series
- 9) Oscilloscope : Model 2090 Digital ocilloscope (Nicolet Instrument Co.)
- 10) Optical magnetic disk drive : 600Mb~4.8Gb
 촉침식 표면 거칠기 측정기인 SURFCOM 300B는 본 실험에서 제안된 방법을 통해 얻어진 측정결

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of the test specimen

a) Mechanical properties

Material	Yielding strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation	Hardness	Modulus of elasticity
SS 41	29.1	46.7	31.8	125	21.5×10 ³

b) Chemical composition(% wt)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS 41	0.171	0.33	0.39	0.016	0.021

Table 2 Machining condition

Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Beamspot diameter (mm)	Cutting tool			
5	for each cutting speed and depth of cut	0.1	0.1	PCBNR 2020K12			
14							
24							
42							
70							
121							
5	for each cutting speed and depth of cut				0.1	0.1	PCBNR 2020K12
14							
24							
42							
70							
121							

과의 신뢰성을 검토하기 위한 비교기준으로 사용되었다.

촉침식 측정기의 원리는 다이아몬드 촉침이 가공물 표면위를 일직선상을 따라 이동하는 동안 표면의 요철에 의해 발생하는 미세한 상하 운동을 전기적으로 증폭시켜 보상과정을 거친 후 표면 거칠기 값으로 변환시키게 되어 있다. 본 실험에서는 전기적 형태로 바뀌어진 신호를 컴퓨터와 인터페이스를 이루는 A/D 변환기를 통해 CRT 화면상에서 직접 거칠기를 판정할 수 있도록 하였다.

2.2.2 시편

본 실험에서 사용된 재료는 연강(SS 41)이며, 이에 대한 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1과 같다.

거칠기가 서로 다른 표면을 얻기 위해 Fig. 5에서와 같이 하나의 시편에 대해 6개의 구간으로 나누어 각각 다른 조건으로 가공하였다. 시편의 가공 조건을 Table 2에 나타내었고, Fig. 6은 실제 실험에 사용되었던 시편의 사진이다.

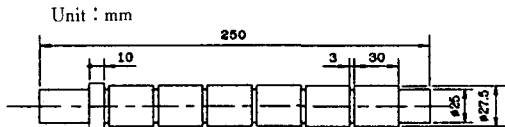


Fig. 5 Dimension of the test specimen

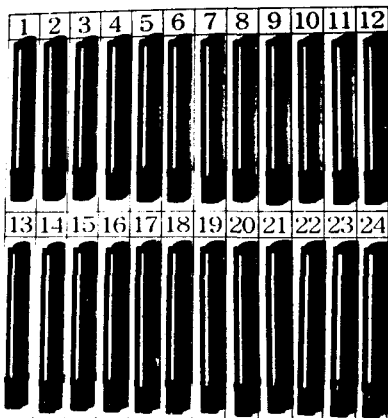


Fig. 6 Configuration of the test specimens(Photo.)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도의 변화가 표면 거칠기 측정에 미치는 영향

절삭속도가 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다는 사실은 이미 잘 알려져 있으나 제안된 인프로세스 측정계가 이러한 거칠기 변화를 검출할 수 있음을 밝혀 신뢰성을 검토하고자 한다.

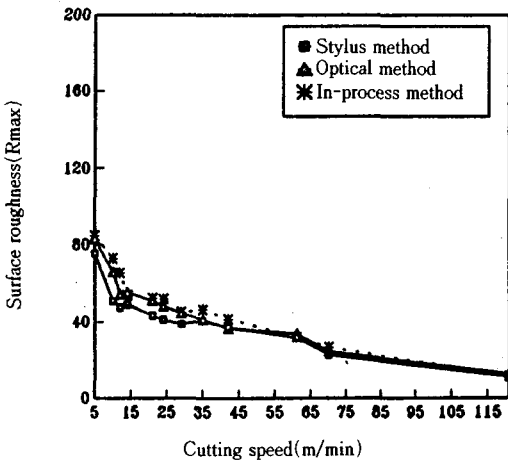
절삭속도의 증가에 따른 표면 거칠기 값의 변화를 알아보기 위해 절삭속도를 5, 14, 24, 42, 70, 121m/min로 변화시켜 주었으며, 각각의 절삭속도에 대해 0.24~0.52mm/rev의 이송속도로 가공하여 다양한 조건하에서 비교가 이루어졌다.

고정된 조건으로서 절입량을 0.1mm로 하였고, 전 공정에서 PCBNR 2020-K12 절삭공구가 사용되었다.

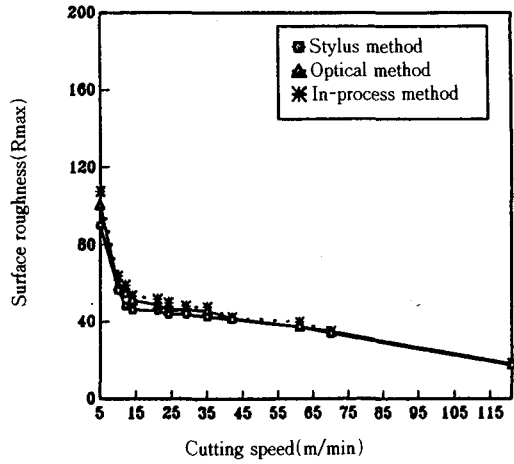
Fig. 7 (a), (b), (c)는 절삭속도의 변화에 따른 가공면의 거칠기 값에 대한 함수관계를 나타낸다. 동일한 가공면에 대해 촉침법과 가공 완료 후 비회전 상태에서 이루어진 광학식 측정 및 인프로세스 측정으로부터 각각 산출된 거칠기 값을 함께 나타내었다.

Fig. 7 (a), (b), (c)에서 보는 바와같이 절삭속도가 70~121m/min로 증가함에 따라 표면 가공도는 점차적으로 향상되어짐을 알 수 있으며, 세가지 측정방법 모두 거의 일치되는 경향을 보이고 있다. 그러나 절삭속도가 5~24m/min 구간에서는 촉침식과 광학식으로 측정된 거칠기 값이 비슷한 경향성을 갖고는 있으나 잘 일치하지는 않는다. 이는 아주 거친 표면에서는 입사 광선의 산란이 심하게 일어나기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인해서 촉침법에 의한 거칠기 값에 비해 광학식 측정으로 얻어진 거칠기 값이 상대적으로 높게 분포한다. 특히 저속절삭에 있어서는 가공표면에 이물질이 들러붙는 경우가 생기는데 인프로세스 측정은 이러한 이물질의 영향을 받게 되며, 따라서 일직선상의 경로를 따라 거칠기 값을 측정하는 다른 두가지 방법보다 약간 더 높은 거칠기 값을 산출한다.

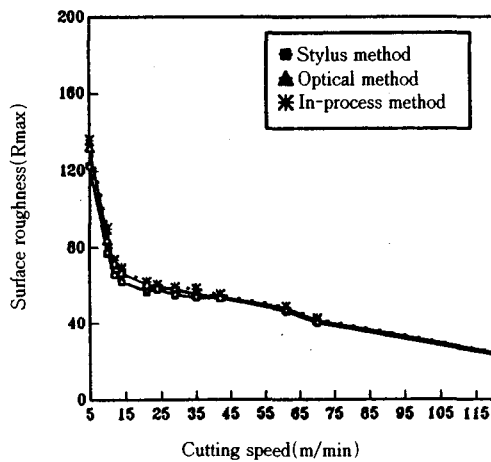
실험 결과에 따르면 절삭속도가 70~121m/min 구간에서 0.48~0.52mm/rev의 이송속도로 가공될 때 인프로세스 측정이 가능함을 알 수 있으나 그 이하의 절삭속도에서는 좋은 가공면을 얻지 못함으로



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Surface roughness vs. cutting speed at feed rate (0.24m/min, 0.41m/min, 0.52m/min)

정확한 인프로세스 측정을 기대하기가 어렵다.

Fig. 8 (a), (b), (c), (d), (e), (f)는 이송속도의 증가에 따른 표면 거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이송속도의 증가는 표면 가공 상태를 소폭이나마 거칠게 한다.

이송속도가 0.24, 0.30, 0.36, 0.41, 0.48, 0.52mm/rev의 6가지로 주어졌으며, 5, 14, 24m/min의 저속절삭에서는 촉침식과 광학식으로 얻어진 거칠기 값이 잘 일치되지 않음을 알 수 있다. 그러나 42, 70, 121m/min 구간의 절삭속도에서는 이송속

도가 증가함에 따라 거칠기 값이 선형적인 증가 곡선을 나타낸다.

이송속도에 따른 거칠기 변화가 소폭적인 증가를 보이고 있고, 고속의 절삭가공을 할수록 이송속도 증가에 따라 일치된 경향성을 나타낸다.

실험 결과로 볼때, 표면 거칠기에 절대적인 영향을 미치는 인자는 절삭속도라는 사실이 제안된 인프로세스 측정 시스템을 통해서 충분히 검토될 수 있었다.

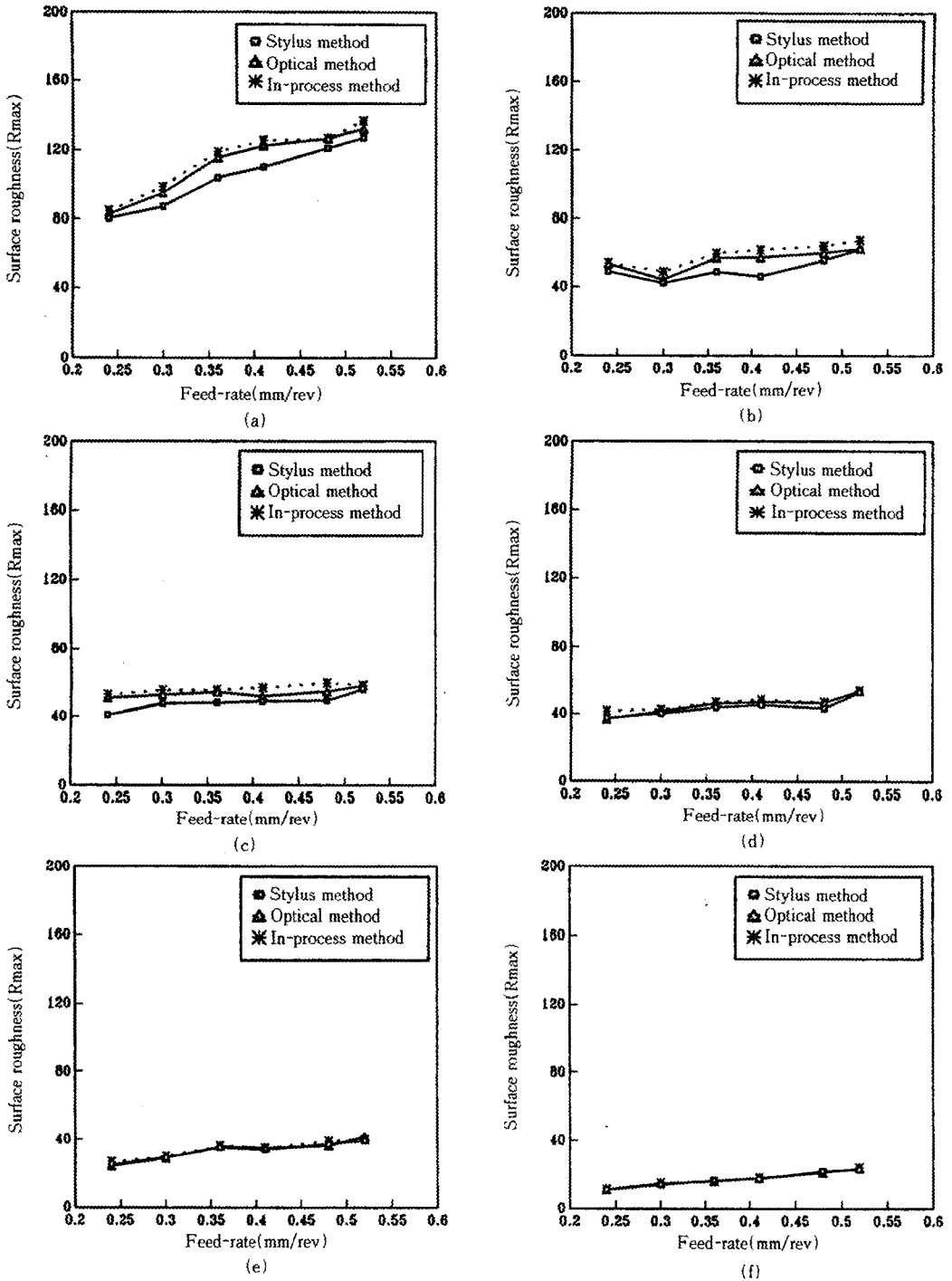


Fig. 8 Surface roughness vs. feed rate at cutting speed

3.3 이송방향에 따른 표면거칠기 측정

이송방향에 대한 거칠기 판정은 실시간(real time)의 정보 전달이 요구되는 적응 제어 시스템에 유용할 것으로 기대된다. 본 실험에서는 이를 위해 광전센서를 이용하는 간단한 방법이 시도되었고, 그 결과는 만족할만 하다고 생각된다.

절삭속도 121m/min에서 0.41mm/rev의 이송속도로 가공되는 표면에 대해서 Fig. 9(a)는 원주경로에 따른 거칠기의 연속기록을 나타내고, (b)는 펄스 열(pulse train), 그리고 (c)는 펄스 열에 상응하는 불연속적인 표면 거칠기를 나타낸다.

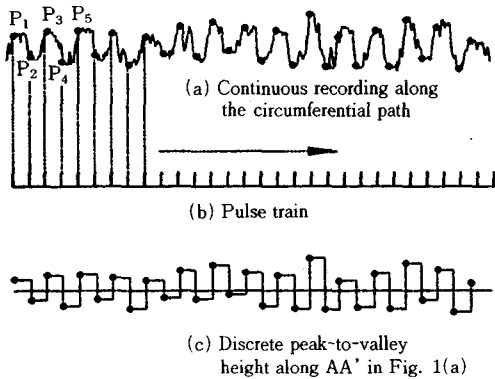


Fig. 9 Surface roughness measurement along the feed direction

그림으로부터 각 점 $P_i(i = 1, 2, 3 \dots)$ 에 대응하는 연속기록은 Fig. 1에서 직선 AA'에 대한 산과 골의 높이에 해당한다.

이것은 이송방향에 따른 측정만으로도 가공표면의 최대 거칠기 값이 산출될 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 표면 거칠기의 인프로세스 측정에 대한 광학적인 방법을 도입하여 가공중, 원주경로 뿐만 아니라 이송방향에 따른 표면 거칠기를 측정할 수 있다.
- 2) 저속절삭은 가공표면을 거칠게 만들고, 이러한 거친 표면은 입사광의 산란을 크게 함으로 정확

한 거칠기 측정이 곤란하다.

- 3) 절삭속도 70~121m/min 구간내에서 가공될 때 인프로세스 측정이 가능하며 신뢰할 만한 결과를 기대할 수 있다.
- 4) 이송방향에 따른 측정은 효율적으로 최대 거칠기를 판정할 수 있으므로 실시간 제어가 요구되는 가공 시스템에 잘 적용될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) M. Shiraishi, In-process measurement of surface roughness in turning by laser beams, ASME, Vol.103, pp.203~209, May.1981.
- 2) M. Shiraishi, A consideration of surface roughness measurement by optical method, ASME, Vol.109, pp.100~105, may.1987.
- 3) Robert A. Sprague, Surface roughness measurement using white light speckle, Applied Opt., Vol.11, No.12, Dec.1972.
- 4) William B. Ribbens, Interferometric surface roughness measurement, Applied Opt., Vol.8, No.11, Nov.1969.
- 5) K. Kim, K. F. Eman, In-process control of cylindricity in boring operations, ASME, Vol.109, pp.291~296, Nov.1987
- 6) 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.
- 7) 清野慧, 黄佩森, 鈴木博文, 粗さ測定的光スキット法(第1報), 精密工學會誌, 55, 08, pp.1049~1414, 1989.
- 8) J. A. Aas, Reconstruction of surface profiles from their diffraction spectra, Applied Opt., Vol.11, No.7, Jul.1972.
- 9) E. L. Church and J. M. Zavada, Residual surface roughness of diamond-turned optics, Applied Opt., Vol.14, No.8, Aug.1975.
- 10) 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.
- 11) D. G. Jansson, J. M. Rourke, and A. C. Bell, H-

- igh-speed surface roughness measurement, ASME, Vol.106, pp.34~39, Feb.1984.
- 12) 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.
 - 13) 容村吉久, 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巻, 10號, 10.1984.
 - 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巻, 4號, 4.1985.
 - 15) Thomas Young, Linear systems and digital signal processing, Prentice-hall, Inc, 1985.
 - 16) 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.
 - 17) 임동렬, 김승우, LASER Autocollimation을 이용한 디지털 조도 측정(시스템의 입사 광속 광속의 최적 스폿 크기), 기계학회 춘계학술대회 초록집, pp.105~108, 1989.
 - 18) I. Yellowley, In-process detection of toolfailure in milling using cutting force models, ASME, Vol.111, pp.149~157, May.1989.
 - 19) 김희남, 전영식, 구만서, Laser beam을 이용한 금속 표면의 거칠기 측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol.5, No.2, Oct.1990.
 - 20) 김희남, 허웅, 구만서, 광학식 표면 거칠기계의 디지털 신호처리, 한국산업안전학회지, Vol.6, No.2, Jun.1991.
 - 21) 김희남, 남무호, 황재연, 박희재, 선삭가공시 Laser beam을 이용한 금속의 표면 거칠기 측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol.6, No.4, Dec.1991.
-