

원통연삭가공시 레이저 빔을 이용한  
금속 표면거칠기의 인프로세스 측정에 관한 연구

A Study on the In-process Measurement of Metallic Surface Roughness  
in Cylindrical Grinding by Laser Beam

김 회 남\*·윤 여 권\*\*·이 주 상\*\*·김 대 옥\*\*  
H. N. Kim·Y. K. Yun·J. S. Lee·D. W. Kim

ABSTRACT

This paper deal with the design of noncontact in-process measurement system which measures the surface roughness during cylindrical grinding. The measuring system is extremely simple and the apparatus proposed is composed of a laser unit, photodetector and optical system. The experimental performance of the apparatus is satisfactory and good results are expected in the actual use. During operation, the surface of a workpiece is continuously scanned by a laser beam. The experimental results show that the presence of chattering, loading and glazing can be detected sensitively along both circumferential and feed directions and the surface roughness value is obtained from the reading along the feed direction.

1. 서 론

오늘날 현대 산업의 고도화에 따른 생산 가공 기술의 급속한 발달로 초정밀 가공된 고품질의 제품들이 생산되고 있으며, 이에따라 제품을 손상없이 신속하게 평가하기 위하여 종래의 접촉식 표면거칠기 측정방법에서 벗어나 광학을 이용한 비접촉식 표면거칠기 측정방법의 기술 확립이 재촉되어

지고 있다.

비접촉식 측정방법은 무엇보다도 측정 흔적을 남기지 않는 장점이 있으며 측정식으로는 이를 수 없는 in-process 측정을 가능하게 해준다. 이러한 목적으로 널리 사용되는 것으로 레이저광선을 이용한 비접촉식 측정 방법이 주 연구대상이 되고 있다.

이러한 연구는 1960년 마이먼(T. H. Maiman)에 의해 루비레이저가 발견된 후 레이저의 급속한 발

\* 명지대학교 기계공학과

\*\* 명지대학교 대학원 기계공학과

달과 더불어 활발히 진행되어 W. R. Ribbens, M. Shiraish, C. S. Lee 등 여러사람<sup>1~21)</sup>에 의해 연구되어 왔으나 표면거칠기 측정에 대한 충분한 정량적 검토가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 가공품 표면의 정도를 향상시킬 수 있는 가공법중 하나인 원통연삭기에서 원통연삭가공시 He-Ne 레이저 빔을 이용한 표면거칠기의 in-process 측정에 있어서 측정 범위와 가능성을 밝히는데 목적을 두었다.

## 2. 실험방법 및 장치

### 2.1 측정계구성

측정계는 기본적으로 He-Ne gas laser와 렌즈 광학계, 광검출기, 컴퓨터와 A/D 변환기로 구성되어 있다. 레이저 발진기와 광검출기는 원통연삭기 앞면 몸체에 알루미늄 프레임과 기둥에 의해 견고하게 고정되어 있다.

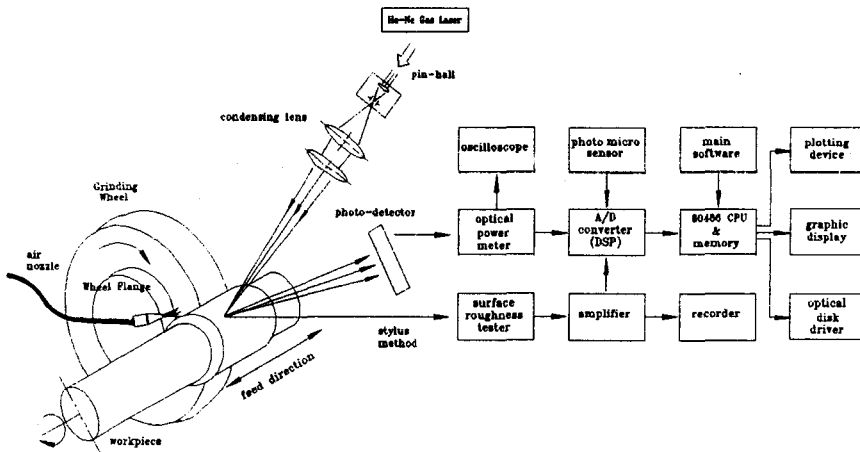


Fig. 1 Schematic diagram of the in-process measurement system

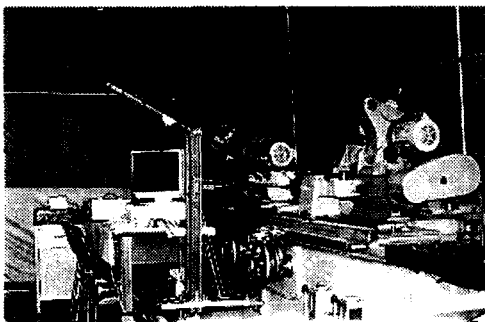


Fig. 2 Layout of the experimental system(Photos.)

또한 가공중에 발생하는 칩(chip)과 먼지는 측정에 영향을 미치는 요소로서 이를 제거하기 위해 공기 압축기(air compressor) 및 노즐(nozzle)을 사용하였다.

컴퓨터와 A/D 변환기는 측정계에서 보내지는 거칠기 신호를 입수, 저장하고 적절한 과정을 거쳐 필요로하는 데이터를 처리하기위해 필요하다.

Fig. 1에 측정계의 전체적인 개요도를 도시하였고, Fig. 2는 측정계의 사진이다.

### 2.2 실험방법

He-Ne gas 레이저 발진기로부터 발생된 광속은 광학렌즈를 통과하면서 0.1mm의 직경으로 피측정물 표면에 입사되며, 전형적인 광학적 배치로써 15°의 반사각으로 반사된다.

He-Ne gas 레이저 발진기와 광검출기(photodetector)는 원통연삭기 앞면 몸체에 견고하게 고정되어 있고 가공도중 공작물은 연삭기 테이블위의 주축대와 심압대 센터(center)에 지지된 채로 측정

계에서 발진된 0.1mm 직경의 광속에 공작물의 피 측정면이 주사되면서 테이블의 이송속도와 같은 속도로 이송되는데, 이때 공작물 표면에서 15°의 각도로 반사되는 반사광량의 종속적인 변화가 광 검출기에 의해 수감되어 진다.

광검출기에 수감되어 보내지는 출력신호, 즉 전압의 변화량은 16bit A/D 변환기를 통해 컴퓨터 시스템에 전달되어 진다. 컴퓨터를 통해 이러한 모든 데이터를 입수하여 필요한 처리 과정을 거친 후 결과를 CRT, 레코더 및 플로터와 같은 주변 기기로 다양하게 출력한다.

Fig. 3은 광검출기(photodetector) 및 측정식측정기(SURFTEST-III)로부터 보내지는 측정신호가 컴퓨터에 입수되기까지의 과정을 나타낸 것이다.

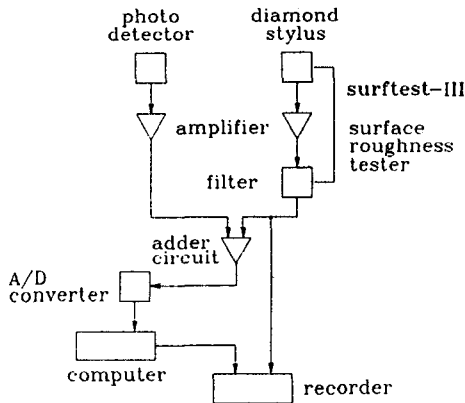


Fig. 3 Data aquisition system

### 2.3 실험장치 및 시편

#### 1) 실험장치

본 실험에서 사용된 기계 및 기기들은 다음과 같다.

(1) Cylindrical grinding machine : Model gloss-N-1200-H (Kondo Machine Works Co., Ltd)

(2) Light source : He-Ne gas laser generator (Huges 3027 H-P), power 7.0mW, wavelength 6328Å

(3) Optical power meter : Laser pico-watt optical power meter(M835-SL-04), power range 2 nW to >2W, resolution 0.005%

(4) Detector : silicon photo-detector(818-SL : photovoltaic type), wavelength range 400~1100nm, active area 1cm<sup>2</sup>

(5) A/D converter : 16bits 2 channels, conversion speed 20Hz~50kHz max on each channel, DSP-16 Plus(Ariel)

(6) Surface roughness tester : Model-SURF-TEST-III(MITUTOYO MFG. Co., Ltd.)

(7) Computer : IBM compatable, 32 bit CPU-Intel 80486/66VC-DX2

(8) Photo micro sensor : 고풍출력 타입, 전원 전압 DC 5~15V, 제어출력 80mA

(9) Oscilloscope : Model. V-212, 20MHz Digital oscilloscope(Hitachi Denshi, Ltd.)

(10) Optical magnetic disk drive : 600Mb~4.8Gb

측정식 표면거칠기 측정기인 SURFTEST-III은 본 실험에서 제안된 in-process 측정을 통해 얻어진 측정결과와 신뢰성을 검토하기 위한 비교 기준으로 사용되었다.

본 실험에서는 전기적 형태로 바뀌어진 신호를 A/D 변환기를 통해 컴퓨터와 인터페이스를 이루어 CRT 화면상에서 거칠기를 직접 판정할 수 있도록 하였다.

#### 2) 시편

본 실험에서 시편의 재료는 기계구조용 탄소강(SM45C)을 사용하였으며, 이 시편의 재질에 대한 기계적 성질과 화학적 성분을 Table 1에 나타내었고, 시편의 형상과 치수는 Fig. 4이고 Fig. 5는 실험에 사용된 시편의 사진이다.

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of test specimen

#### a) Mechanical properties

Material	Yielding strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HRB)
SM45C	42	56	21	91

#### b) Chemical composition (%)

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

Table 2에 시편의 건식 연삭가공조건을 나타냈으며, 시편을 Table 2에서 주어진 연삭조건에 의

Table 2 Machining condition

Wheel speed (m/min)	Work piece speed (m/min)	Table speed (m/min)	Dressing speed (mm/rev)	Depth of cut ( $\mu\text{m}$ )	Beam spot diameter (mm)	Wheel
1908	2	0.24	0.16	15	0.1	WA46K7V
	7	0.54	0.36			
	11	0.90	0.60			
	16					

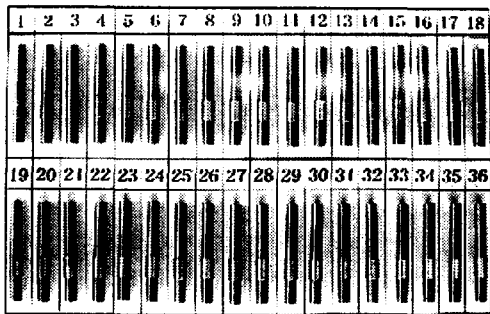


Fig. 4 Configuration of the test specimens(Phota.)

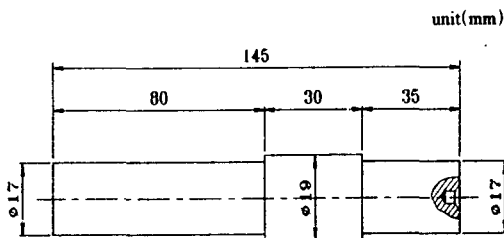


Fig. 5 Dimension of the test specimen(mm)

해 가공하기 전에 모든 시편의 초기 표면은 균일한 상태이어야 한다.

따라서, 모든 시편의 초기 표면을 균일하게 가공하기 위해 CNC선반에서 1차형상가공을 한 후 절삭속도 1915m/min, 시편 이송속도 0.3m/min, 절입깊이 10 $\mu\text{m}$ 의 연삭조건으로 spark-out 될때까지 건식 연삭가공하여 시편을 제작하였다.

제작된 시편이 각기 다른 임의의 표면거칠기로 가공될 수 있도록 하기 위해 Table 2와 같이 건식 연삭으로 연삭조건을 각각 다르게 변화시켜 가면서 가공되도록 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기 값을 측정하기 위해 연삭숫돌을 0.16mm/rev의 이송속도로 드레싱한 후 공작물 테이블 이송속도를 각각 0.24m/min, 0.54m/min, 0.90m/min로 하고 절삭속도를 1910m/min, 1915m/min, 1919m/min, 1924m/min로 각각 변화시켜 가면서 가공하였으며, 또한 다시 연삭숫돌을 0.54mm/rev, 0.90mm/rev의 이송속도로 각각 드레싱하여 위와같은 가공조건으로 가공하였다.

이때 고정된 조건으로 드레싱 절입깊이는 10 $\mu\text{m}$ , 가공 절입깊이는 15 $\mu\text{m}$ 로 하였으며 숫돌은 WA46K7V를 사용하였다. 여기서, 연삭숫돌의 주속도(周速度)는 1908m/min이므로, 공작물의 주속도(周速度)는 각각 2m/min, 7m/min, 11m/min, 16m/min가 된다.

Fig. 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14는 각 조건에서 연삭속도의 변화에 따른 가공면의 표면거칠기 값의 변화를 in-process 측정계를 이용하여 측정 한 후, 동일한 가공면에 대해 가공완료 후 측정식 측정기로 측정하여 산출된 표면거칠기 값을 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 6~14에서 볼 수 있는 바와 같이 공작물의

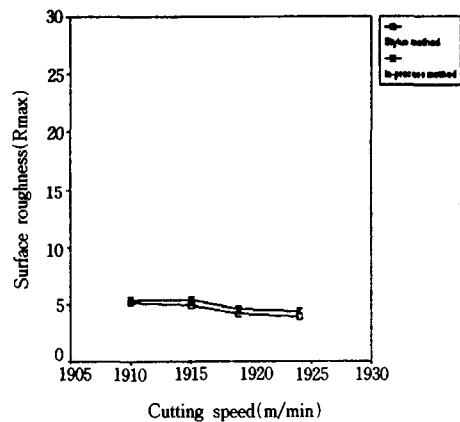


Fig. 6 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.24m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

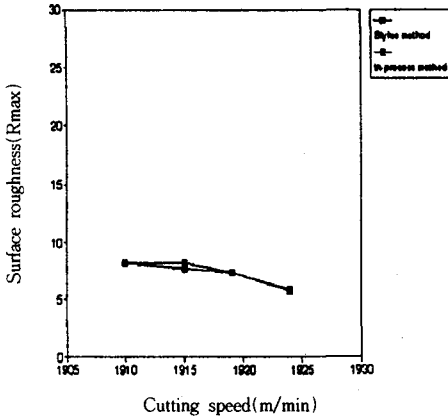


Fig. 7 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.54m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

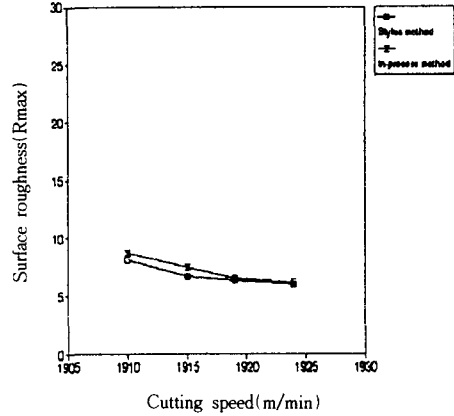


Fig. 9 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.24m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

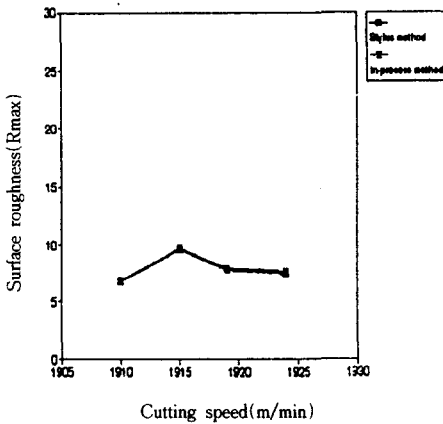


Fig. 8 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.90m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

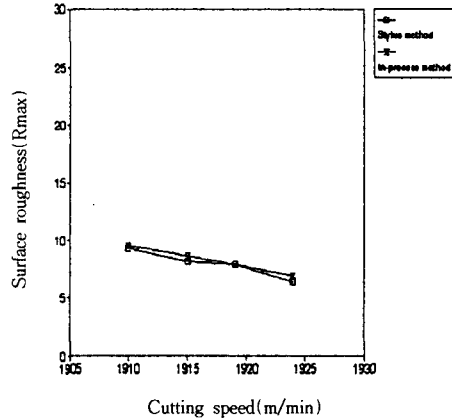


Fig. 10 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.54m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

주속도(周速度)가 증가할수록 표면의 거칠기 정도(精度)가 점차 향상되는 것을 두가지 측정계에서 측정된 거칠기값을 통하여 알 수 있다. 그러나 Fig. 13, 14에서와 같이 연삭숫돌 드레싱을 0.60mm/rev의 이송속도로 하고 절삭하였을 경우 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기는 10 Rmax 이상으로 매우 거칠게 가공되며, 이 경우에는 in-process 계측된 거칠기값이 측정식에서 계측된 거칠기값 보다 오히려 작게 나타난다. 이는 거친 연삭표면에서는 입사광선이 가공물 표면에서 반사될

때 매우 심하게 산란되어 반사광량이 제대로 검출되지 못하기 때문이라고 생각된다.

따라서 연삭표면의 거칠기 값이 10 Rmax 이하의 경우에는 두 측정계에서 측정된 거칠기값이 선형적으로 일치에 가까워지나, Fig. 13, 14에서와 같이 약 10 Rmax 이상의 거친 연삭표면에 대해서는 두 측정계에서 측정값의 차이가 많아진다.

연삭가공은 대부분 10 Rmax 이하의 정밀 연삭 표면을 얻기위한 가공법 이므로 제안된 in-process 측정계의 측정범위내에 있다고 볼 수 있다.

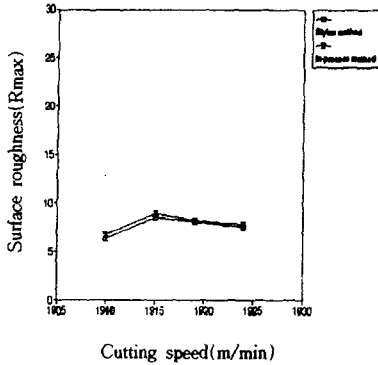


Fig. 11 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.90m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

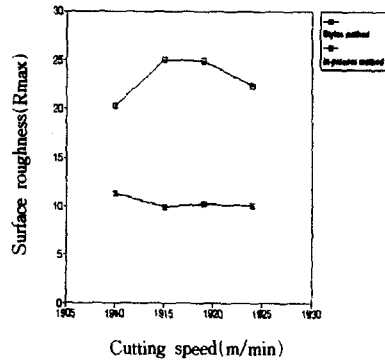


Fig. 14 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.90m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

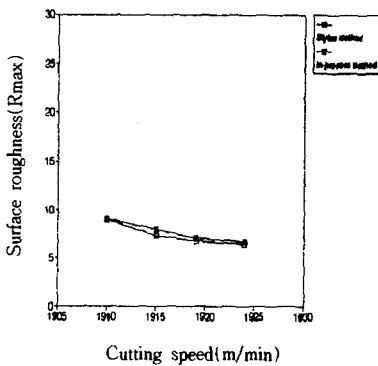


Fig. 12 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.24m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

### 3.2 이송속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

본 실험에서는 이송 속도의 변화에 따른 거칠기의 변화가 in-process 측정에 미치는 영향에 대해 고찰하기 위해 이송속도를 0.24m/min, 0.54m/min, 0.90m/min로 변화시켜 가면서 각각의 연삭조건으로 가공되는 공작물의 표면거칠기를 측정하였다.

Fig. 15~Fig. 26은 각각의 조건에서 테이블의 이송속도의 변화에 따른 표면거칠기를 in-process 계측된 거칠기값과 가공완료 후 측정식 측정기로 계측한 거칠기값의 변화를 나타낸것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이송속도가 증가함에 따라 가공물의 표면은 다소 거칠게 가공됨을 알 수 있다.

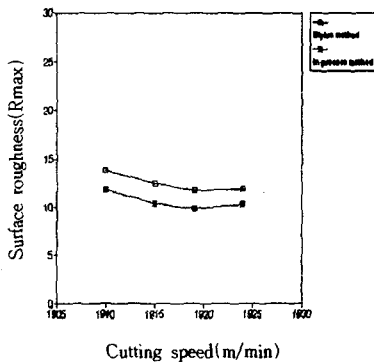


Fig. 13 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.54m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

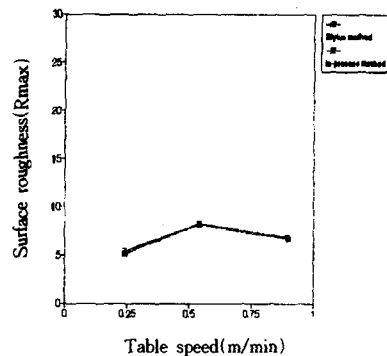


Fig. 15 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1910m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

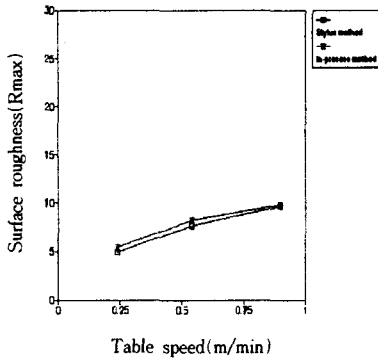


Fig. 16 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1915m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

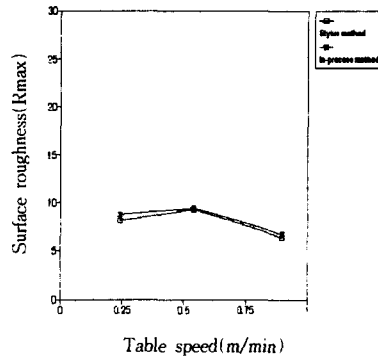


Fig. 19 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1910m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

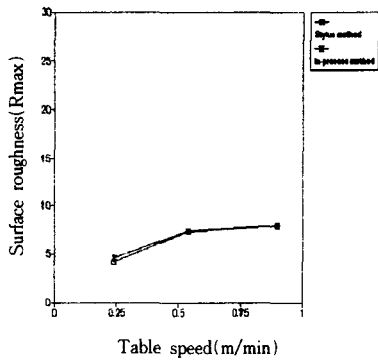


Fig. 17 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1919m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

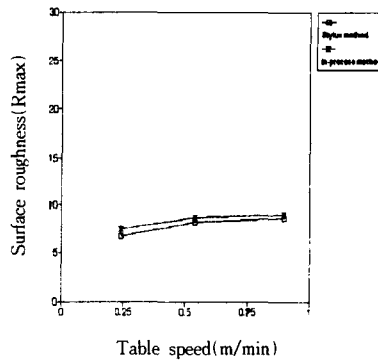


Fig. 20 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1915m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

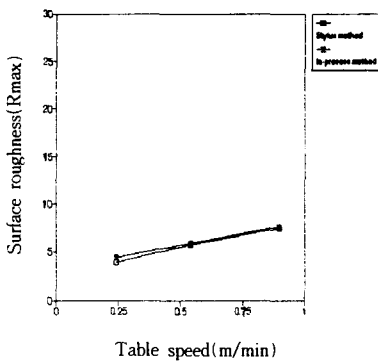


Fig. 18 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1924m/min), dressing speed(0.16mm/rev)

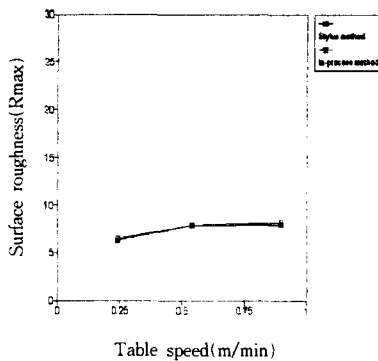


Fig. 21 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1919m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

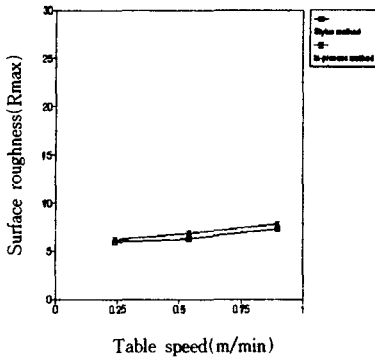


Fig. 22 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1924m/min), dressing speed(0.36mm/rev)

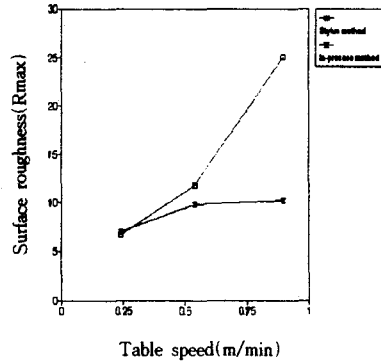


Fig. 25 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1919m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

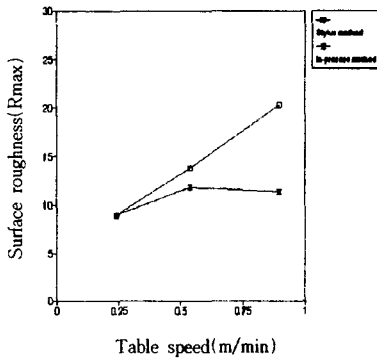


Fig. 23 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1910m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

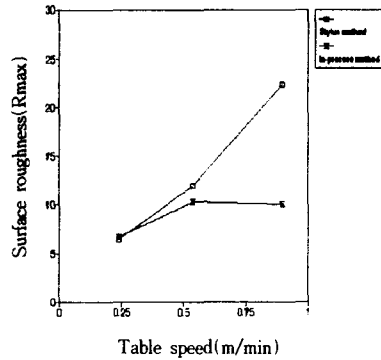


Fig. 26 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1924m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

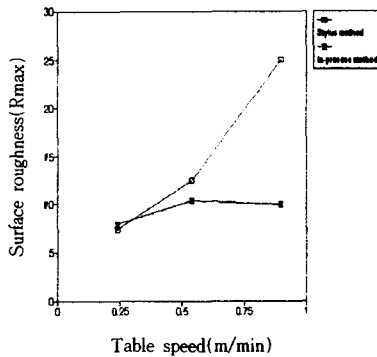


Fig. 24 Surface roughness vs. table speed at cutting speed(1915m/min), dressing speed(0.60mm/rev)

그러나 Fig. 15에서와 같이 공작물의 주속도(周速度)가 2m/min로 느린상태에서 테이블을 0.90m/min로 급속 이송시켜 연삭하였을 경우에는 비정상 연삭상태의 가공물 표면거칠기 형상을 나타내고 있으며, Fig. 19, 20, 21, 22에서 슷돌을 드레싱한 이송속도 보다 공작물 이송속도를 빠르게 하여 가공했을 경우에는 오히려 표면거칠기값이 낮아지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 비정상 연삭상태로서 측정된 거칠기값은 낮아지나 실제 가공물의 표면은 긴 나선형태를 나타내어 표면의 품질을 떨어뜨리게된다.

또한 Fig. 15~22에서 볼 수 있듯이 슷돌의 드레싱 이송속도를 0.36mm/rev 이하로 했을때 이송속도의 변화에 따른 거칠기는 약 10 Rmax 이하로 가



공되며 이때 제안된 인프로세스 측정계와 측정식 측정계에서 측정된 값이 선형적으로 거의 일치됨을 알 수 있다.

Fig. 23~26에서와 같이 슷돌을 0.60mm/rev로 드레싱하고 공작물 이송속도를 0.54m/min, 0.90m/min의 조건으로 가공하면 거칠기가 약 10 Rmax 이상으로 되어 두 측정계의 측정값의 변화가 심함을 알 수 있다.

### 3.3 드레싱 속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

Fig. 27~Fig. 38은 드레싱 속도의 변화에 따른 거칠기 변화가 in-process 측정에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위하여 연삭스틀을 0.16mm/rev, 0.36mm/rev, 0.60mm/rev의 이송속도로 드레싱한 후 각기 다른 연삭 조건으로 가공하여 두 측정방법에 의해 측정된 표면거칠기값의 변화를 그림으로 나타낸 것이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슷돌의 드레싱 이송속도가 증가될수록 가공물 표면은 거칠게 가공됨을 알 수 있다.

Fig. 31~Fig. 38에서와 같이 슷돌을 0.60mm/rev의 이송속도로 드레싱한 후 공작물을 0.90m/min로 이송시켜 가공하였을때, 연삭표면은 10 Rmax 이상으로 매우 거칠게 가공되며 두 측정계에서 측정된 표면거칠기값의 차이가 심함을 볼 수 있다.

본 실험에서 0.36mm/rev 이상의 드레싱 속도는 표면의 거칠기를 급격히 거칠게 하므로 정밀한 연

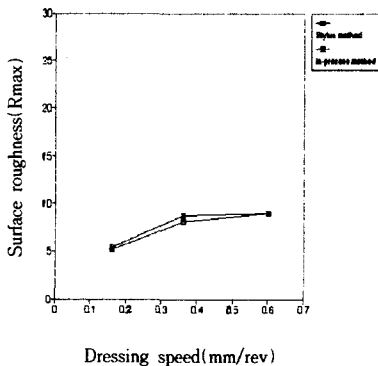


Fig. 27 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1910m/min), table speed(0.24mm/rev)

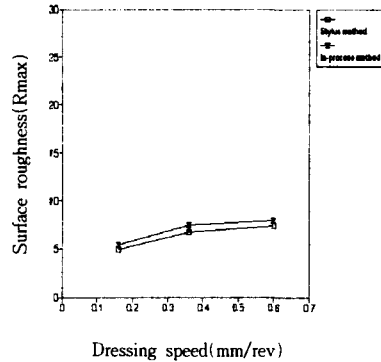


Fig. 28 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1915m/min), table speed(0.24mm/rev)

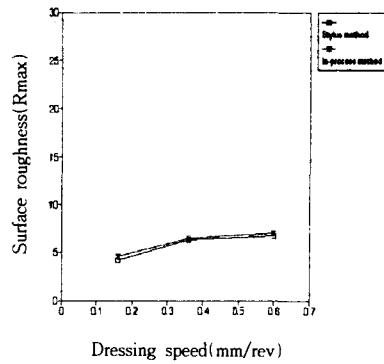


Fig. 29 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1919m/min), table speed(0.24mm/rev)

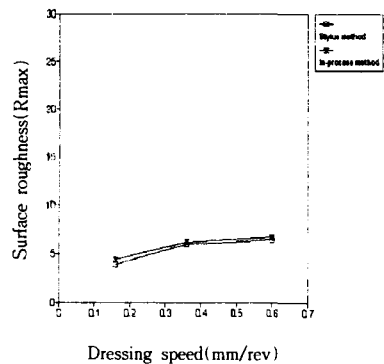


Fig. 30 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1924m/min), table speed(0.24mm/rev)

삭가공 표면을 얻기 위해서는 무엇보다도 드레싱 속

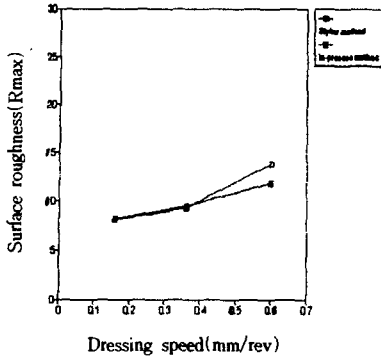


Fig. 31 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1910m/min), table speed(0.54mm/rev)

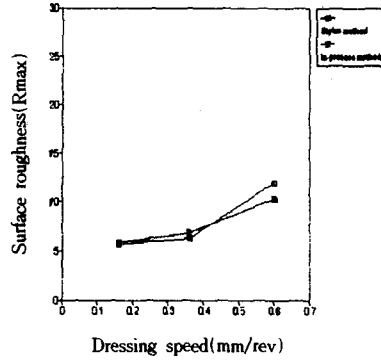


Fig. 34 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1924m/min), table speed(0.54mm/rev)

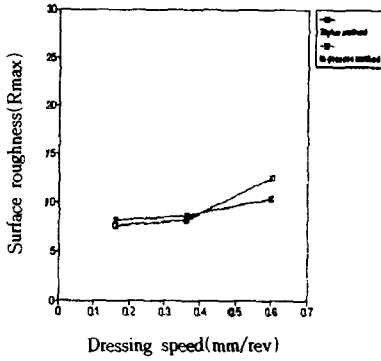


Fig. 32 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1915m/min), table speed(0.54mm/rev)

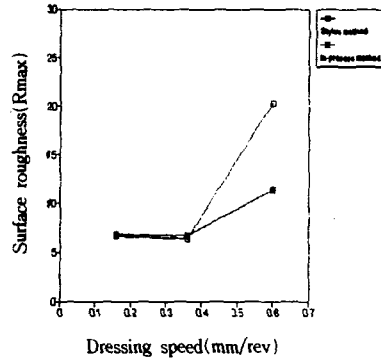


Fig. 35 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1910m/min), table speed(0.90mm/rev)

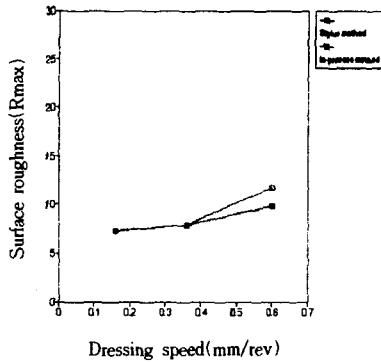


Fig. 33 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1919m/min), table speed(0.54mm/rev)

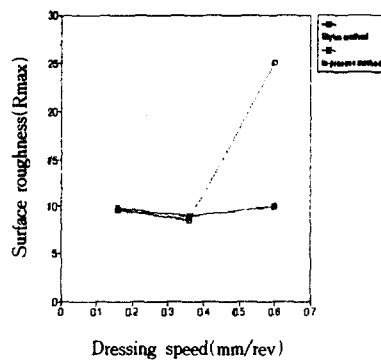


Fig. 36 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1915m/min), table speed(0.90mm/rev)

도를 0.36mm/rev 이하로 하는 것이 중요하며, 또한 숫돌의 드레싱 속도 보다 공작물 이송속도를 느

리게하여 가공하는 것이 바람직한 연삭 조건으로 고찰되어 진다.

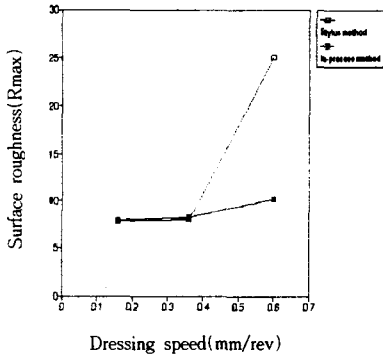


Fig. 37 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1919m/min), table speed(0.90mm/rev)

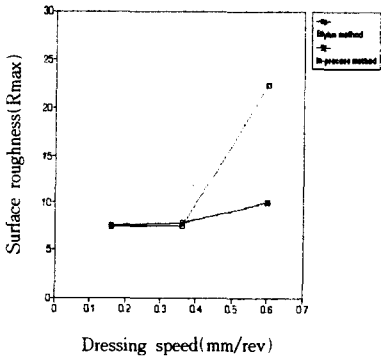


Fig. 38 Surface roughness vs. dressing speed at cutting speed(1924m/min), table speed(0.90mm/rev)

## 5. 결 론

이상과 같은 실험은 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연삭가공시 표면 거칠기를 인프로세스 측정함에 있어 레이저 빔을 이용한 광학적인 방법으로 가공중, 표면의 거칠기 값을 측정할 수 있었다.
- 2) 공작물 주속도(周速度)의 증가에 따라 표면 거칠기는 다소 양호해지며, 제안된 인프로세스 측정계를 이용하여 연삭가공 범위내에 있는 거칠기 10 Rmax 이하의 정밀한 표면에 대하여 신뢰할 만한 측정결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 공작물의 주속도(周速度)에 비해 이송속도가 지나치게 빠르면 비정상적인 연삭표면이 생성

되며, 슷들을 0.60mm/rev의 이송속도로 드레싱하여 가공하면 표면이 약 10 Rmax 이상으로 매우 거칠게 되어, 반사광량의 심한 산란으로 인하여 정확한 측정을 기대하기 어렵다.

- 4) 공작물 이송방향에 따른 표면 거칠기 측정은 표면의 거칠기를 in-process 상태에서 판독할 수 있으므로 CNC 공작기계의 적응제어 시스템에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.
- 5) 제안된 인프로세스 측정계를 이용하여 테이블 이송과 공작물 회전 에 따른 공작물 원주방향의 표면 거칠기도 측정할 수 있으며, 이 방법의 응용은 엔드밀(End Mill), 트위스트 드릴(Twist Drill)등과 같이 나선형태의 인선(刃先)을 가진 공구의 표면 거칠기 측정에 유효할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 1) William B. Ribbens, Interferometric surface roughness measurement, Applied Opt., Vol. 8, No. 11, pp.2778~2784, Nov. 1969.
- 2) John C. Stover, Roughness characterization of smooth machined surface by light scattering, Applied Opt., Vol. 14, No. 8, Aug. 1975.
- 3) M. Shiraishi, A consideration of surface roughness measurement by optical method, ASME, Vol. 109, pp.100~105, May. 1987.
- 4) 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卷, 8號, pp.1049~1414, 1989.
- 5) 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.
- 6) 鈴木憲二, 研削砥石のトレンシンクの研究(第1報), 日本精密機械論文集, 30卷, 3號, pp.246~252, 1964.
- 7) 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, pp.178~186, Jan. 1970.
- 8) Robert A. Sprague, Surface roughness measurement using white light speckle, Ap-

- plied Opt., Vol. 11 No. 12, pp.2811~2816, Dec. 1972.
- 9) 岩田耕一, 光學的等高線形成たよる形状の測定, 精密機械, 39卷, 5號, pp.483~489, 1973.
  - 10) 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, pp.639~644, 1974.
  - 11) Robert K. ERF, Laser application, Vol. 4, Academic press, pp.2~69, 1980.
  - 12) D.G. Jansson, J.M. Rourke, and A.C. Bell, High-speed surface roughness measurement, ASME, Vol. 106, pp.34~39, Feb. 1984.
  - 13) David Y. Lou, A. Martinez and D. Stanton, Surface profile measurement with a dual-beam optical system, Applied Opt., Vol. 23, No. 5, pp.746~751, Mar. 1984.
  - 14) 谷村吉久, 豊田辛可, レーザ干涉計を應用した非接觸微細形状測定裝置ね, 精密機械, 50卷, 10號, pp.1617~1621, 1984.
  - 15) 官本三, 接觸式と非接觸式みによる表面形状測定, 精密機械, 51卷, 4號, pp.674~680, 1985.
  - 16) Anthony E. Siegman, LASER, Oxford university press, pp.675~678, 1986.
  - 17) J. Wilsion, B. Hawakes, Laser principle and Application, Prentice-Hall, pp.131~142, 1987.
  - 18) 임동렬, 김승우, LASER Autocollomation을 이용한 디지털 조도 측정(시스템의 입사 광속의 최적 스폿크기), 기계학회 춘계학술대회 초록집, pp.105~108, 1989.
  - 19) 김희남, 전영식, 구만서, Laser beam을 이용한 금속표면의 거칠기측정에 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 표면거칠기 측정에 관한 연구, 한국산업안전학회지, Vol. 6, No. 4, pp.58~65, Dec. 1991.
-