

회절광을 이용한 기상계측용 표면거칠기의 측정시스템

김성훈*, 이기용(부산대 대학원), 강명창, 김정석(부산대 ERC/NSDM), 김남경(진주산업대)

Measuring System of Surface Roughness for On-The-Machine using Diffraction Light

Sung-Hoon Kim*, Ki-Yong Lee(Graduate School, Pusan National Univ.),
Myeong-Chang Kang, Jeong-Suk Kim (ERC/NSDM, Pusan Univ.), Nam-Kyung Kim(Jinju Univ.)

ABSTRACT

This paper deals with the establishment of the method of non-contact surface roughness measurement by developed system. One of the most important factor of determinating quality of a produced manufacture is surface roughness. The tendency of manufacturing method is changing from small amount manufactures / high-volume production to large amount manufactures / low volume production, and the study of reducing time for surface roughness measurement has been actively investigated. The non-contact surface roughness method by using laser which is different from contact method has been only used to the polished surface, so new surface roughness measurement method was adopted by virtue of Fraunhofer diffraction in the periodic surface for on-the-machine. In this paper, we establish the method of non-contact surface roughness measurement which can reduce measuring time in the periodic surface.

Key Words : surface roughness(표면거칠기), on-the-machine(기상), machining surface(절삭면), Fraunhofer diffraction(프라운호프 회절), tenacity performance(강인성 평가)

1. 서론

정밀부품들의 표면정밀도 향상을 위해 표면거칠기의 측정이 많이 사용되고 있다. 특히 근래에는 가공자동화와 생산성향상을 위해 기상(on the machine)측정과 가공중(ir process)측정의 필요성이 계속 제기되어오고 있는 실정이다. 기상측정은 그 원리와 구조, 설계에 있어서 많은 제약을 받지만 생산성 향상에 큰 장점을 가진다. (1~3) 표면 거칠기의 측정은 보편적으로 촉침식을 이용하고 있으며 아직까지 촉침식이 표준적인 방법으로 인정되고 있다. 이 방법은 정확한 측정을 가능하게 하고 측정표면의 단면곡선을 재현할 수 있다는 장점이 있지만 촉침이 측정표면을 횡단하므로 연속적이고 빠른 측정을 요하는 경우에는 부적당하다. 또한 측정 가공물의 재질이 연할 경우 촉침의 자국이 생겨 정밀 가공물 표면에 흠집을 남길 수 있다. 따라서 측정센서의 개발시 측정시스템이 주변여건

에 대하여 강건하게 설계되어야 하며 센서로서의 유연성이 있어 장착조건 등에 무관하게 응용될 수 있어야 한다. 또한 측정과정이 가공시간을 지연시키는 것은 바람직하지 않으므로 측정시간이 많이 소요되는 방법 역시 적용이 곤란하다. 이와 같은 문제들을 극복할 수 있는 가장 근접된 해결방법으로 비접촉식 방법이 연구되고 있는데 주로 광학식을 이용하고, 비매개변수법과 매개변수법으로 나눌 수 있다. (4~5)

본 논문에서는 규칙적인 파형을 갖는 면에 프라운호프(Fraunhofer)회절과 푸리에(Fourier)변환을 이용하여 이론식을 도입하고, 그 이론식에 근거하여 프라운호프 회절상의 각 차수에 대한 강도들과의 관계를 표면 거칠기의 범위에 따라 보정하여 비교적 넓은 범위의 표면거칠기 범위에 적용하였다. 그리고, 기존의 촉침식 방법으로 측정된 표면거칠기와 새로운 방법을 이용하여 획득한 표면거칠기를 비교하고 검토하여 기상계측용 표면거칠기 측정시스템을 구성하고자 하였다.

2. 측정원리와 실험식

Fig. 1은 반사면의 프라운호프 회절상을 구하기 위한 광학적 푸리에 변환측정계이다.

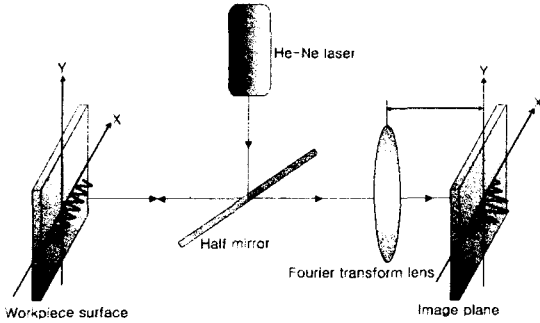


Fig. 1 Optical measuring system

어떤 반사면에 평면파를 입사시킨 때의 결상면에 관한 진폭분포 $\rho(\eta, \xi)$ 는, 반사면의 복소진폭의 푸리에 변환으로서, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\rho(\eta, \xi) = \int \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda f} (\eta x + \xi y)\right\} dx dy \quad (1)$$

여기서, λ 는 입사광의 파장, f 는 렌즈의 접점거리이다. $u = \eta/\lambda f$ (공간주파수)로 두면,

$$\rho(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{i \frac{4\pi}{\lambda} f(x)\right\} \exp\{-i 2\pi u x\} dx \quad (2)$$

로 되고, 프라운호프 회절상의 강도분포 $I(u)$ 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$I(u) = |\rho(u)|^2 \quad (3)$$

전형적인 절삭면은 Fig. 2에서 표시한 것과 같다.

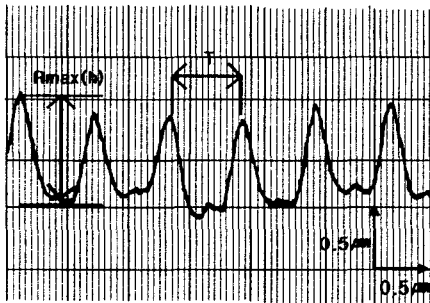


Fig. 2 Wave form of typical machining surface

높이 h , 주기 T 이고, N 개로 되는 삼각파주기 계수로서 표현될 수 있기 때문에, 광학적 푸리에 변환 $\rho(u)$ 는 식(2)로부터,

$$\rho(u) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \int_{nT-\frac{T}{2}}^{nT} \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} h \left(\frac{2}{T}x - 2n + 1\right)\right) \times e^{-i 2\pi u x} dx \right.$$

$$\left. + \int_{nT}^{nT+\frac{T}{2}} \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} h \left(-\frac{2}{T}x + 2n + 1\right)\right) \times e^{-i 2\pi u x} dx \right\} \quad (4)$$

로 된다. 광의 파장이나 거칠기가 상당히 작은 경우, $x = 2\pi h/\lambda < 1$ 로 간주할 수 있기 때문에, $\gamma = x^2/6$ 으로 되고, 결국 조도 h 는 다음과 같이 표현된다.

$$h \approx R_{\max} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{3}{2}} \gamma \quad (5)$$

프라운호프 회절상의 각 차수광강도에서 얻을 수 있는 강도비 γ 와 광파장 λ 에 의해 정량적으로 구할 수 있다. 일반적으로 3차광강도까지를 고려하게 되면 다음과 같은 식이 된다.

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_0 + I_1 + I_2 + I_3}} \quad (6)$$

측정된 시편의 각 차수의 광강도 I 값을 식(6)에 대입하여 획득된 R_{\max} 값이 측정식으로 획득된 R_{\max} 값과 편차가 생김을 확인하였다. 따라서, R_{\max} 와 강도비 γ 와의 관계를 실험적으로 보정할 필요가 있다. R_{\max} 에 관한 보정을 위해 식(5)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$R_{\max}^2 = \alpha \gamma \quad (7)$$

여기서 α 는 보정계수이다.

Table 1에 보이는 실험 결과에 의하면 α 와 γ 는 지수적인 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Measured value of roughness parameters

R_{\max}	I				γ	α
	I_0	I_1	I_2	I_3		
0.71	245	165	149	128	0.643	0.5
0.89	245	178	161	132	0.658	0.79
1.15	245	189	178	153	0.68	1.32
1.59	245	191	177	179	0.69	2.53
2.01	245	203	192	190	0.705	4.04
2.52	245	218	207	187	0.713	6.35

최소자승법에 의해,

$$\alpha = C\gamma^\beta \quad (8)$$

C 와 β 를 구하면,

$$C = 5925.9, \quad \beta = 20.3 \quad (9)$$

이 된다.

Fig. 3은 α 와 γ 의 관계를 나타낸 그래프이며, γ 가 0.71이내의 범위에서는 아주 양호한 결과를 얻을 수 있다.

식(9)의 값을 식(7)에 대입하고 정리하면 R_{\max} 는 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = 76.98\gamma^{10.65} \quad (10)$$

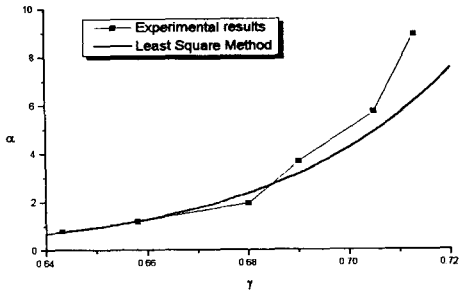


Fig. 3 Curve fitting by least square method

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

주체 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같이 컴퓨터, 화상입력장치(image grabber), 반도체 레이저 발광장치, 측정부, CCD 등으로 구성하였다. CCD카메라에 읽힌 화상은 화상입력장치를 통하여 컴퓨터에서 읽어들이어 데이터처리를 행한다. 화상의 각 화소는 화상입력장치에서 8비트로 변환되어 0에서 255사이의 그레이 레벨(gray level)로 입력리게 된다. 측정장치에서 각 렌즈간의 거리와 레이저와 반사경(half mirror)과의 거리가 측정장치 설계의 중요한 설계 파라미터중의 하나이다. 경량화를 위하여 공구홀더에 물릴 수 있도록 알루미늄으로 제작된 연결장치를 고안하였다.

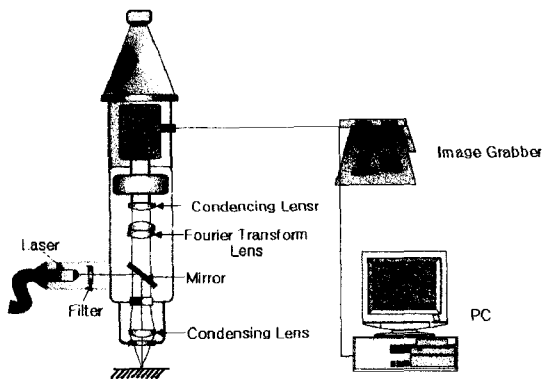


Fig. 4 Experimental setup system

Fig. 5는 실제 공작기계상에서 표면거칠기를 측정하는 장치 장치의 사진이다. 사용된 공작기는 CNC 고속머시닝 센터(MAKINO V55)이다. 레이저 발생기로 파장 $\lambda = 0.635 \mu\text{m}$, 출력 5mW의 레이저 다이오드를 사용하였다. 레이저 다이오드는 레이저 발진을 개시하는 임계전류나 광출력의 편차가 있기 때문에 레이저 다이오드 광출력을 일정하게 제어하는 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 CCD 카메라의 사양은 모델명 BW-2301ED이고 픽셀은 512(L) × 418(H)

이다.

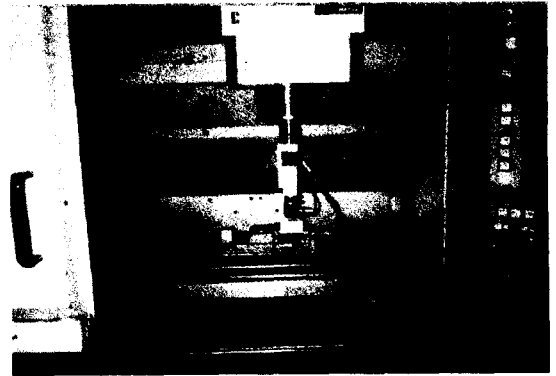


Fig. 5 System attached to machining center

3.2 실험 방법

비교용 표준시편을 직접 제작하여 그 시편을 접촉식 표면조도 측정기 SV-400(Stylus)으로 측정하였다. 시편의 개수는 20개이고 $R_{\text{max}}(\mu\text{m})$ 로 0.71 μm 에서 2.52 μm 까지이다. 절삭면에 대한 실험시 측정된 화상 즉, 회절상의 각 차수의 광강도를 매개변수로 삼아 측정하였다. 먼저, 측정 화상에서 $\|d_{\text{rel}}\| = \max \|d_{\text{rel}}\|$ 를 구하고, 스페이셜 모우먼트와 센트럴 모우먼트를 구한 뒤 무게 중심을 찾은 후, $\|d_{\text{rel}}\|$ 의 4/5에 해당하는 값을 문턱값(threshold)으로 정한다. 회절광 분포 방향으로 광 강도를 스캔하고, 스캔한 데이터를 분석하여 $I_0, I_1, I_2, \dots, I_n$ 을 구한다. $I_0, I_1, I_2, \dots, I_n$ 을 구하는 방법은 각 차수의 회절광이 분포하는 주축의 중심으로부터 직선을 그어 그 직선에 포함되는 각 화소의 강도의 합을 화소의 개수로 나누어 평균값을 취하였다. 이론식에 이러한 값들을 넣어 그 결과를 확인한 후 이론식을 보정하였고, 실제 다양한 표면 거칠기 영역의 절삭면에 이 시스템을 적용하고 접촉식 표면조도 측정기로 측정 한 값을 기준으로 하여 비교하고 조사하였다.

4. 실험 결과 및 강인성 평가

4.1 실험 결과

측정대상인 절삭면을 먼저 접촉식 표면조도 측정기로 측정한 후 R_{max} 을 기준으로 삼고, 이 장치로 CCD 카메라에 획득되는 화상을 Fig. 6에 나타내었다. $R_{\text{max}}(\mu\text{m})$ 로 0.7103 μm 에서 2.5148 μm 까지이다. 절삭면에 대한 실험시 측정된 화상 즉, 프라운호프 회절상의 각 차수의 광강도(0차부터 3차까지)를 매개변수로 삼아 측정하였다. 대칭형으로 나오는 화상에서, 한쪽 방향으로 확실하지는 않지만 회절상의 패턴이 형성되어 있음을 확인할 수 있고, 표면거칠기가 나빠질수록 회절광의 패턴이 점점 사라짐을 확인할 수 있다. 따라서 어느정도 표면거칠기 이상의 값에서는 회절상을 획득하기가 쉽지 않을 것이고 바로 그

값이 이 장치의 한계라 할 수 있을 것이다.

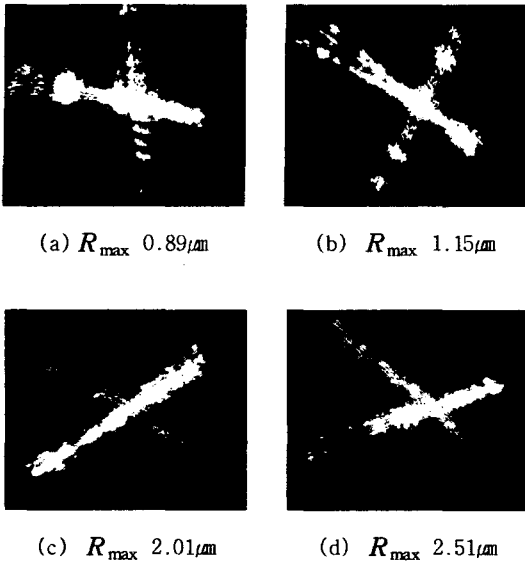


Fig. 6 CCD image of machining surface

각 차수의 강도를 얻기 위한 과정이 Fig. 7에 나타나 있다.

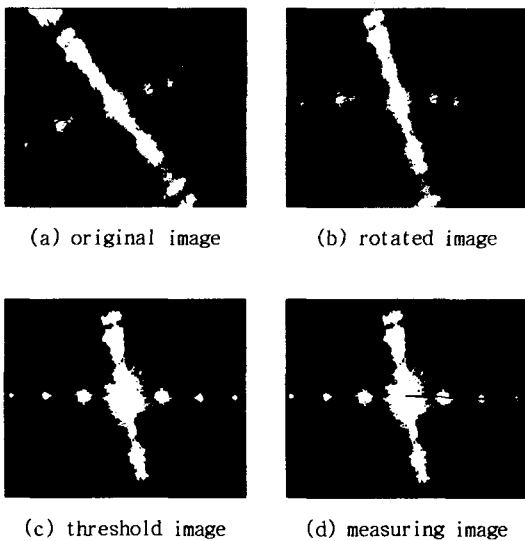


Fig. 7 Process of measuring intensity

앞에서 언급된 바와 같이 프라운호프 회절원리를 이용한 이론식에 적용하니 그 결과가 어떠한 규칙성을 가지고 있다는 것을 확인하였다. 따라서, 최소자승법에 의하여 보정된 실험식을 적용하였다.

Table 2 Comparison of reference R_{max} & acquired R_{max}

reference R_{max} (μm)	acquired R_{max} (μm)	Error (%)
0.61	0.66	6.4
0.81	0.76	5.2
1.13	1.17	4.2
1.48	1.57	6.3
1.99	2.13	7.1
2.54	2.29	9.8
3.10	3.65	17.7

Table 2는 임의의 시편에 대하여 이 장치로 획득된 각 차수의 광강도 I 를 매개변수로 잡고 실험을 통해 보정된 식과 접촉식 표면조도 측정기로 측정된 값을 비교하여 오차를 나타낸 것으로 R_{max} 값은 3회 반복 측정된 값을 평균한 값이고, R_{max} 가 약 $2.5\mu\text{m}$ 이상일 때 이 식을 신뢰할 수 없게 된다는 사실을 확인할 수 있다.

4.2 강인성 평가

외부 변동 요인에 의한 강인성 평가실험을 하였다. 실제 기상측정을 위해서는 여러 작업환경에 강인해야 한다. 따라서, 외부광원의 영향, 절삭유 영향, 높이변동의 영향 등에 대한 평가를 해서 이 장치의 강인성을 확인하였다.

4.2.1 높이변동에 따른 영향

높이 변동에 대한 영향을 고려하기 위하여 R_{max} 가 $1.9984\mu\text{m}$ 인 시편에 대하여 높이를 0.5cm 씩 윗방향으로 2.5cm 까지 인위적으로 이동시키면서 거칠기 변화를 측정하였다. Fig. 8은 높이변화에 따른 거칠기 측정이다. 각 차수의 광강도는 변화가 무시할 수 있을 정도이므로 높이 변동에는 강인함을 알 수 있다.

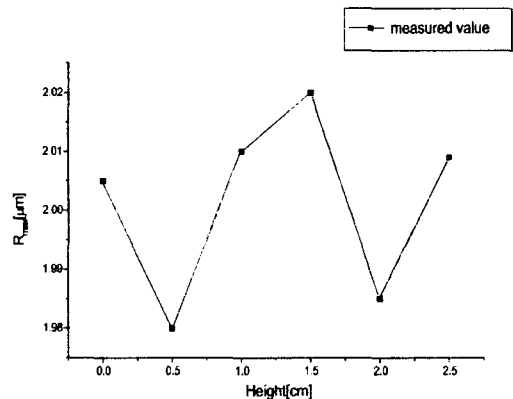


Fig. 8 Variation of R_{max} according to height change of this system

4.2.2 절삭유 사용유무에 따른 영향

이 장치는 기상측정이 목적으로 가공 후 즉시 이 장치를 장착하고 표면거칠기를 측정해야 하므로 절삭유의 유무에 따른 영향을 고려해야 한다. 절삭유 유무에 따른 거칠기 측정치의 상대오차는 Fig. 9와 같다. 그림에서 가공 후에 절삭유가 있는 경우 측정치의 오차가 커짐을 알 수 있다. 따라서 본 장치를 실제로 적용함에 있어서 측정전 절삭유를 어느정도 제거해야 정밀한 결과를 얻을 수 있을 것 같다.

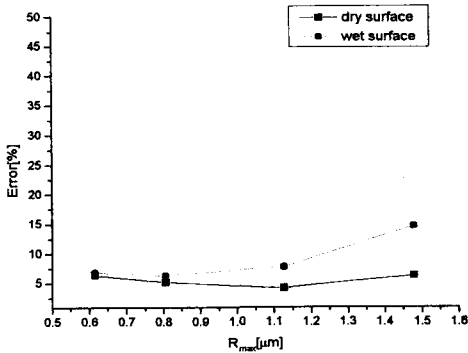


Fig. 9 Error tendency according to existence of cutting fluid

4.2.3 외부광원에 따른 영향

외부광원의 영향을 평가하기 위해 암실과 일반 실내에서 측정을 해 보았다. 시편은 R_{max} 1.1523μm를 사용하였고 입력된 화상의 주방향 광량분포는 Fig. 10과 같다. 그림으로부터 암실에서 측정한 광강도의 값이 일반 실내에서 측정한 값보다 약 5정도 높다. 장치 자체가 표면조도 측정을 시편에 거의 밀착한 상태로 하므로 외부광원에 대한 변동이 거의 없기 때문이다. 이는 실제 외부광원이 어느 정도 영향을 미칠 수 있으나 거의 무시할 수 있을 정도의 값이다.

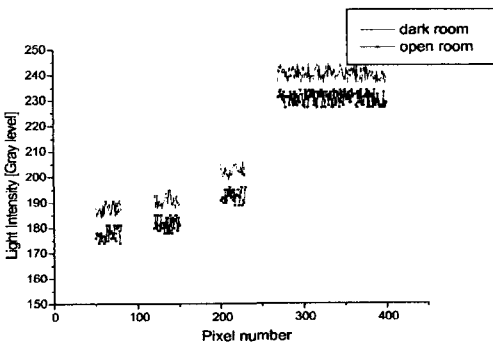


Fig. 10 Variation of light intensity distribution due to external light

5. 결론

본 논문에서는 프라운호프 회절원리에 기초한 표면 거칠기 장치를 개발하였고, 이상과 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 규칙적인 파형을 갖는 절삭면에 프라운호프 회절원리를 이용하여 비접촉식 표면 거칠기 측정 시스템을 제작하였다.
- (2) 실험을 통하여 얻은 데이터를 최소자승법을 이용하여 이론식을 보정한 실험식을 얻었다.
- (3) 본 장치에 의해서 보정된 실험식으로 측정한 거칠기 값과 촉침식 표면 거칠기 장치로 측정된 값과 비교한 결과, R_{max} 값이 약 2.5μm이하에서는 오차율이 10%이내로 나타나 비교적 좋은 결과를 얻었다.
- (4) 외부 환경 즉, 절삭유의 영향, 측정장치의 높이 변동의 영향, 외부광원 영향에 대한 개발된 장치의 강인성 평가 실험을 하였으며, 이들의 영향을 크게 받지 않음을 확인하였다.

본 연구는 여러 가지 가공기술의 발전과 더불어 요구되는 신속한 표면거칠기 측정기술 개발에 목적을 두었으며, 앞으로 더 넓은 범위, 또한 절삭면과 연삭면을 동시에 측정할 수 있는 시스템 개발하고자 한다.

참고 문헌

1. P. Beckmann and A. Spizzichino, The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, Pergamon press, Oxford, 1963.
2. Motoyoshi Hisaoka, "Development of Reflex Measurement on Surface Roughness by Scanning Vibration of Laser Beam", "Bull. of JSPE, Vol. 63, No. 3, pp. 410-414, 1997.
3. 塚田忠夫, 谷村吉久, "非接觸式による精密加工表面の性状評價", 日本精機學會, 1995.
4. 장경애, 빛의 과학, 도서출판 상학당, 1998.
5. D. Y. Yim and S.W.Kim, "Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces by Light Scattering", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No.2, pp.283-289, 1990