

<論 文>

광산란을 이용한 연삭표면의 비접촉식 광학적 조도측정기술

임 등 열* · 김 승 우*

(1988년 7월 12일 접수)

A Noncontact Optical Roughness Measurement Technique of Ground Surfaces by Light Scattering

Dong-Yeol Yim and Seung Woo Kim

Key Words : Beckmann's Light Scattering Theory(백맨의 광산란이론), Normal Surface(정규 분포 표면), Mean Intensity Ratio(평균 광강도비), Traverse Roughness(횡방향조도), Scattering Pattern Recognition(산란패턴 인식), Gaussian Curve Fitting(가우스 곡선맞춤), Standard Deviation of Dispersion of Gaussian Curve(가우스 커브의 분산의 표준편차)

Abstract

Described is a method for development of an optical roughness measurement sensor for in-situ quality assurance in the precision grinding. Main approach is made based upon the Brckmann's light scattering theory, in which general solutions of the optical scattering behaviour are given under many simplifying assumptions on the model of the surfaces illuminated. For the ground surface, the assumptions are verified through computer simulation and experimental work in order to examine the validity of Beckmann's theory on predicting the optical responses according to the roughness variation. As a result, an optical monitoring strategy is derived which can evaluate the roughness value of the ground surface by statistically detecting the pattern of intensity distribution of the scattered light. Finally, the strategy is proven by comparing with the results using the stylus method.

기 호 설 명

I_0 : 가우스커브의 최고 광강도비	Ra : 중심선 평균거칠기
I_d : V_d/V_{ds}	Rq : RMS 표면거칠기
I_s : V_s/V_{ss}	V_d : 난반사방향의 수광소자출력전압
I_{ds} : I_d/I_s	V_s : 정반사방향의 수광소자출력전압
L : 표면의 조사길이 (illuminated length)	V_{ds} : 표준시편인 경우의 V_d
T : 상관거리 (correlation distance)	V_{ss} : 표준시편인 경우의 V_s
Te : 등가상관거리	ϕ : 반사광의 수광각도
$Tave$: Te 의 평균값	λ : 입사광속의 파장
	θ_1 : 입사각도
	θ_2 : 반사각도
	ρ : 무차원화된 반사광의 전기장의 크기

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

- $\langle \rho_{spe} \rangle$: 정반사 평균진폭비
 $\langle |\rho|^2 \rangle$, $\langle \rho \rho^* \rangle$: 평균 반사광 강도비
 $\langle \rho \rho^*_{spe} \rangle$: 정반사 평균 광강도비
 σ_s : 가우스커브의 분산의 표준편차
 σ_z : 조도요소 높이분포의 표준편차

1. 서 론

연삭공정에 있어서 고도의 생산성 및 품질향상을 달성하기 위해서는 가공물 표면조도(surface roughness)의 인프로세스 측정(in-process measurement)을 통한 가공중의 공정제어가 필수적으로 요구된다. 현재 널리 사용되고 있는 촉침식기법(stylus technique)은 접촉식이기 때문에 인프로세스 측정에 이용하기가 매우 어려워서 새로운 비접촉식 표면조도 측정기술의 개발이 시급히 요구되고 있다.

이러한 요구에 부응하기 위하여 10여년 전부터 공학표면(engineering surfaces)의 비접촉식 조도 측정 기술의 개발을 위한 많은 연구가 진행되어 왔는바, 광학, 공압(pneumatics), 전기캐패시턴스(electrical capacitance) 등의 원리를 이용하는 방법들이 시도되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾.

여러방법들 중에서 광학적 방법은 근래에 급속히 이루어진 광전자학과 컴퓨터의 발달에 힘입어 많은 진전을 이룩하였다. 기계가공 표면의 조도측정에 응용되는 대표적인 광학원리는 크게 나누어 광산란(light scattering)과 광간섭(light interference)으로 분류된다. 광간섭을 이용하는 방법은 표면형상(surface profile)의 재현이 가능하고 0.1nm 이하의 측정 분해능을 가질수 있으므로 급속 거울면과 같이 아주 고운 표면의 조도측정에 유용하다. 이제 까지 광간섭원리를 이용하는 조도측정 기술에 연구가 집중되어 왔으며 그 결과 측정장치가 성공적으로 상품화되고 있으나⁽⁵⁾, 이 방법의 단점은 매우 고가이고 복잡한 영상처리가 요구되어 많은 시간이 소요되며 포스트프로세스(post-process) 용으로 개발된 것이라는 점이다. 한편 광산란을 이용하는 방법은 표면형상의 재현이 곤란하고 측정 정밀도가 광간섭 방법 보다 낮기는 하지만 짧은 시간내에 표면의 통계학적 처리를 통한 조도변수 표현이 가능하다. 따라서 이 방법은 정밀연삭 표면과 같은 표면의 인프로세스 조도측정에 유용한 경제적인 측정 장치의 제작을 가능하게 한다. 이제까지 주로 연구

되어온 광산란 방법에는 TIS(total integrated scattering)방법, Fourier 방법, Beckmann 방법, 형상각도(profile angle) 방법 등이 있으며⁽⁶⁻¹⁰⁾, 비교적 단순한 방법인 산란광의 정반사에 대한 난반사의 비율을 이용하는 방법도 사용가능한 것으로 알려지고 있다.

기계가공 표면에서의 광산란은 매우 복잡한 형태로 발생되며 단순화된 가정하에서만 이론적 해의 적용이 가능하다. Beckmann은 표면에서 반사된 빛의 전자기적 성질을 이용하는 산란이론을 제시하였는데⁽¹¹⁾, 이 이론은 넓은 조도범위에서의 산란 반사를 묘사할 수 있으며 주기적 표면과 랜덤표면에 모두 적용 가능하다. 그의 이론을 기계가공 표면의 조도측정에 이용하고자 하는 연구가 여러 연구가들에 의해 시도되어 왔으며 연삭표면의 경우에도 긍정적인 연구결과가 보고되고 있으나⁽¹²⁻¹⁹⁾, 측정시스템의 객관성 있는 설계지침은 아직까지 제시되지 못하고 있는 실정이다. 많은 경우에 있어서 정반사와 난반사가 독립적으로 다루어져 왔으며 그 결과 연삭표면에 대한 광산란의 해석에 큰 오차가 내재되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 적용제어 연삭가공 공정에 사용가능한 인프로세스 표면조도 측정기술 개발을 목표로 하여 광학을 이용한 비접촉식 조도측정 기술의 개발을 시도하였으며 포스트 프로세스에도 사용가능 하도록 하였다. 측정기술의 개발은 정반사광과 난반사광의 단순비교 방법(정반사광에 대한 난반사광의 비율을 이용하는 방법)과 산란광의 패턴인식(pattern recognition)을 이용하는 방법의 두 가지로 진행되었는데, 후자의 방법에 중점이 두어졌으며 Beckmann의 산란이론(scattering theory)이 측정시스템 제작의 관점에서 분석되고 응용되었다.

2. 정반사광과 난반사광의 단순비교 방법

2.1 측정원리 및 측정시스템의 설계

이 방법은 빛의 반사를 직접적으로 이용한 간단한 광학식 방법으로 표면이 고울수록 빛나게 보이는 기초적인 광반사현상에 착안한 것이다. 이 방법에서는 정반사광에 대한 난반사광의 비율을 표면조도 측정의 측정변수로 사용하여 표면에 따른 측정변수의 변화를 관찰하여 표면조도를 산출한다.

광속이 연삭표면에서 반사될때 반사광들은 Fig.

1에 도시된 바와 같이 정반사와 난반사의 두 성분으로 나뉘며 반사형태는 조도요소의 경사도 분포에 지배적인 영향을 받는다. 평균경사도의 증가에 따라 난반사는 증가하나 정반사는 감소하고, 중심선 평균거칠기 Ra 값의 증가에 따라 정반사는 감소하는 반면 난반사는 증가한다.

상기의 광반응특성을 이용하여 Ra 값을 산출하기 위하여 Fig. 2에 도시된 바와 같은 측정시스템이 광원(light source), 측정 단자(measuring probes), 광전회로(opto-electronic circuit) 및 컴퓨터 인터페이스(interface) 회로의 3 부분을 중심으로 하여 구성되었다.

Fig. 2에서 광원으로는 50W의 텅스텐-할로겐(Tungsten-Halogen) 백색광이 사용되었고 광선들은 광섬유다발(optic fiber cable)을 통해 2개의 측정 단자중 수직단자(vertical probe)에 전달된다. 측정단자는 수직단자와 45°로 경사진 경사단자(inclined probe)로 구성된다. 수직단자는 측정표면에 광속을 입사시키고 정반사광을 수집하며 경사

단자는 45°로 난반사되는 광선들을 수집하는 기능을 한다. 측정 단자들의 내부에는 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 끝이 잘 연마된 광섬유들이 끼워져 있으며 광속의 입사와 반사광속의 수집은 이 광섬유들에 의해 이루어진다. 수직단자 내의 광섬유들은 반으로 나뉘어져 있는데 한쪽은 광원과 연결되어 있어서 표면에 광속을 입사시키고 다른 한쪽은 정반사광을 수집한다. 경사단자 내의 광섬유들은 반사광의 수집만을 행한다. 수집된 반사광들은 광섬유다발을 통해 측정단자들과 연결되어 있는 광전회로의 수광소자(photodetector)에 전달된다. 수광소자는 정반사와 난반사 용으로 각각 1개씩 2개가 사용되었으며 광전회로를 통해 입사광량에 비례하는 전기적 신호(전압)를 발생시키도록 설계되어 있다. 이 아날로그 신호는 A/D 컨버터와 컴퓨터 인터페이스 회로를 통해 디지털신호로 변환되어 마이크로 컴퓨터에 입력된후 일련의 보정과정(calibration procedures)을 거쳐 Ra 조도값으로 환산된다. 사용된 광섬유는 외경이 125 μm 이고 코어(core)직경이 50 μm 인 다중 모우드 표준 광섬유이었으며 광섬유다발의 직경은 약 3mm정도이었다. 정반사용 광전회로에서 생성되는 전압은 Vs 이며 난반사용 광전회로에서 생성되는 전압은 Vd 이다.

Fig. 2에 도시된 측정시스템은 광섬유를 사용하기 때문에 광속이 약 65°의 각도로 퍼져서 입사하게 되고, 측정단자에 수집되는 반사광량은 측정단자와 측정표면 사이의 거리에 따라 매우 민감하게 변화한다. 따라서 측정단자와 표면사이의 거리를 항상 일정하게 유지시킬 것이 요구되었으며 3mm 거리에서 최대 응답이 얻어졌다. 반사각도가 45°일때 표면조도에 따른 반사광량의 변화를 가장 잘 구분할 수 있었기 때문에 경사단자의 각도를 45°로 설계하였다.

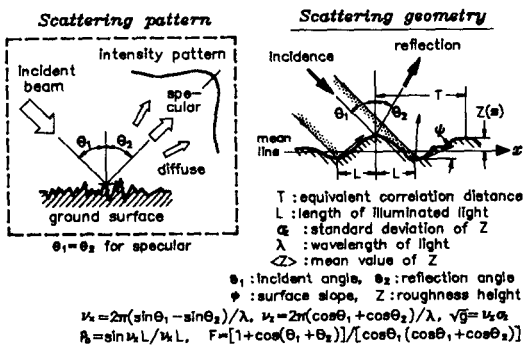


Fig. 1 Scattering of light from a ground surface

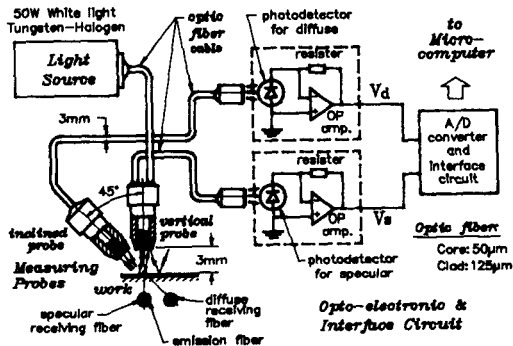


Fig. 2 Schematic diagram of roughness measuring system using fibre optic probes

2.2 실험결과 및 토론

Fig. 3은 Fig. 2의 설계에 근거하여 실제 제작된 실험장치를 이용하여 행해진 실험결과를 보여준다. 실험은 0.1~1.6 μm Ra 범위의 시편 14개에 대해 행해졌으며 정반사 전압 및 난반사 전압은 무차원화된 값 Is 및 Id 로 표현되었다. 무차원화된 전압 Is 및 Id 는 측정된 Vs 및 Vd 를 Vss 및 Vds 로 나누어서 얻게되며 측정변수 Ids 의 값은 $Ids = Id/Is$ 에 의해 산출된다. 여기서 Vss 및 Vds 는 각각 표

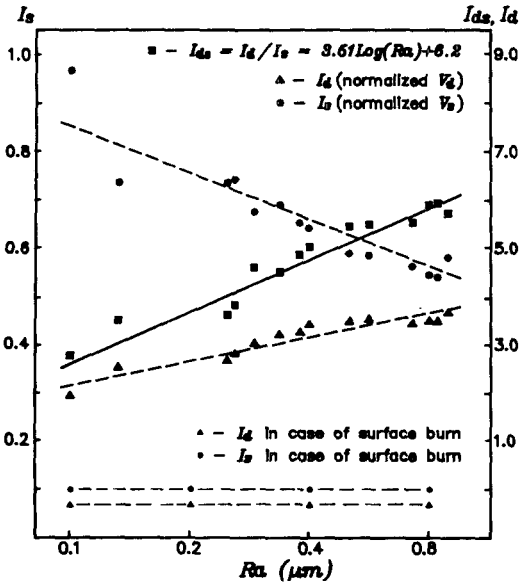


Fig 3 Normalized outputs from fibre optic probes

면조도가 $0.03\mu\text{m}$ Ra 인 기준시편을 사용하여 얻은 V_s 및 V_d 이다. 그림에서 윗부분은 정상적으로 가공된 표면에 대한 I_s , I_d 및 I_{ds} 이고 아랫부분은 표면연소(surface burn)가 발생한 표면에 대한 I_s 및 I_d 이다. 그림의 윗부분에서 경사진 두개의 점선은 각각 I_s 및 I_d 를 나타내고 실선은 측정변수 I_{ds} 를 나타낸다. I_{ds} 는 실험결과를 최소제곱 오차 방법을 사용하여 곡선맞춤 시킨결과 다음과 같은 실험식으로 Ra 와 연결될수 있었다.

$$I_{ds} = 3.51 \log(Ra) + 6.18 \quad (1)$$

표면연소가 발생한 경우에 I_s 및 I_d 의 측정치가 그림의 아랫부분과 같이 낮은 이유는 표면에 형성된 산화층에서 입사광속의 대부분이 흡수되어 반사광량이 매우 적어지기 때문이다.

본 장에서 설명된 측정시스템은 복잡한 측정이론의 도입없이 간단하게 측정시스템을 구성할 수 있었으며, 표면연소가 발생한 경우에는 I_s 및 I_d 가 표면조도에 관계없이 정상상태의 표면과 뚜렷이 구분될 정도로 낮은 값을 나타내기 때문에 표면연소의 감지에 매우 유용함을 알 수 있었다. 반면, 측정단자와 표면사이의 거리를 일정하게 유지시킬 필요가 있었으며, 가공물의 치수가 변화하는 인프로세스 측정에 응용되기 위해서는 측정단자 이송장치가 추가로 요구되었다. 또한 보정과정에서 곡선맞춤의 오차가 컸기 때문에 Ra 에 따른 측정신뢰도와

분해능이 좋지 않았으며 계산에 많은 시간이 소요되었다.

따라서 이 측정시스템은 합격/불합격 판정용 계이저로 제한된 범위내에서의 응용은 가능할 것으로 여측되었으나, 본 연구에서 필요로 하는 성능에는 적합한 것으로 판단되었으며 좀더 진보된 방법인 벡만의 광산란 이론을 이용하는 방법이 연구되었다.

3. 정규분포 표면(Normal Surface)에 대한 Beckmann의 산란이론

Beckmann의 산란이론(scattering theory)⁽¹¹⁾은 광산란을 유발하는 조도요소들(roughness elements)의 곡률반경이 입사광속의 파장보다 매우 크다는 기본가정하에, 전자기파 반사에 관한 Kirchhoff의 해에 근거하여 표면의 일차원 및 이차원적인 취급을 통해 전개되었다. 일차원적인 취급의 경우 동일재료로 구성된 표면에서의 산란반사에 관한 일반해는 무차원화된 반사광의 전기장의 크기 ρ 로 다음과 같이 근사되어진다.

$$\rho = \frac{F}{2L} \int_{-L}^L \exp[\nu_x x - \nu_z(x)] dx \quad (2)$$

이 식에서 ρ 는 측정표면에서의 반사광의 전기장의 크기를 완전표면(perfectly smooth surface)에서의 정반사광의 전기장의 크기로 나누어서 얻게되며 다른 변수들은 Fig. 1에 표시되어 있다. Fig. 1에는 본장의 이론을 위한 산란기하(scattering geometry) 및 기호가 도시되어 있다.

벡만은 식 (2)를 이용하여 조도요소의 높이분포의 평균값 $\langle Z \rangle$ 가 0이고 분산의 표준편차가 σ_z 인 정규분포 표면에 대한 반사해도 제시하였는데, 정규분포 랜던표면에 응용될때는 일반적으로 다음의 두가지 방향으로 전개된다. 하나는 표면조도에 따른 정반사광의 변화를 관찰하는 것이고 다른 하나는 정반사 및 난반사를 모두 포함한 전체 산란현상을 관찰하는 것이다. 전자의 경우에는 조도요소들의 높이 분포에 의한 반사광의 경로차만이 고려되며 후자의 경우에는 조도요소들의 간격분포(spacing distribution)가 높이분포와 함께 고려된다.

정반사광의 표현식은 정반사 평균반사 진폭비(mean specular amplitude ratio) 즉 ρ 의 정반사 방향 평균값 $\langle \rho_{spe} \rangle$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$\langle \rho_{spe} \rangle = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\sigma_z \cos \theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3)$$

광량의 측정을 위해서는 광강도의 산출이 요구된다. 이를위해 식(3)을 제공하여 정반사 평균광강도비(mean specular intensity ratio)를 구하면 $\langle \rho_{spe} \rangle^2$ 가 되어 $\langle |\rho_{spe}|^2 \rangle$ 와는 ρ_{spe} 의 분산항(variance term)만큼 차이가 나지만, 정반사가 지배적으로 발생하는 고운표면의 경우에는 큰 오차 없이 적용 가능하다. 식(3)에서 σ_z 는 표면의 RMS 조도값 Rq 와 직접적으로 관련 되어진다.

난반사가 무시할 수 없게 발생하는 거친표면의 경우에는 식(3)은 더이상 유용하지 못하며 난반사의 영향을 고려한 전체 산란현상이 고찰되어야 한다. 이 경우에 유효한 관계식은 조도요소들의 간격 분포에 기인한 상관효과(correlation effect)를 고려한 반사각도에 따른 산란광의 강도비 $|\rho|^2$ 에 의해 구해질 수 있다. ρ 가 반사광들의 위상지연(phase shift)에 기인하는 복소수양이기 때문에 $|\rho|^2$ 는 ρ 의 공액복소수 ρ^* 를 사용하여 $\rho\rho^*$ 로 표현될 수 있으며, 평균강도비 $\langle \rho\rho^* \rangle$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\langle \rho\rho^* \rangle = \left[\rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! \sqrt{m}} \exp \left(-\frac{\nu_x^2 T^2}{4m} \right) \right] \times \exp(-g) \quad (4)$$

이식에서 T 는 조도요소들 사이의 상관거리(correlation distance)로써 조도요소들 사이의 자동상관계수(autocorrelation coefficient)가 $\exp(-1)$ 이 되는 거리이나, 실제표면에 응용될때는 인접한 조도요소들의 정점사이의 거리인 등가상관거리(equivalent correlation distance) Te 로 간주될 수 있다. 식(4)의 변수중 설명되지 않은 다른 변수들은 Fig. 1에 표시되어 있다.

식(4)에서 첫째항 $\rho_0^2 \exp(-g)$ 는 정반사성분을 나타내는 것으로 식(3)의 $\langle \rho_{spe} \rangle$ 의 제공과 같으며 나머지 항은 ρ 의 분산항으로 표면이 거칠수록 그 영향이 증대된다. 식(4)에서 조도요소들의 경사도분포는 평균값이 0이고 $2\sigma_z/T$ 의 표준편차를 갖는 가우스형태로 간주되었다.

4. 연삭표면의 일차원적 조도측정을 위한 Beckmann 이론 적용의 타당성 검토

제 3장에서 전개된 이론을 연삭표면의 측정에 응

용하기 위해서는 적용 타당성 여부가 검토되어야 한다. 적용 타당성 검토는 연삭표면의 가우스형태 취급의 타당성, 일차원 산란이론 적용의 타당성, 이론에 내포된 기본가정과 변수사이의 부등관계의 유효성의 3가지로 구분된다. 이제까지의 연구보고(12)와 경험에 의하면 연삭표면은 매우 근사한 가우스분포 형태를 갖는 것으로 알려지고 있다.

엄밀한 의미에서 연삭표면의 표면조직(surface texture)은 2차원적이지만, 횡방향(traverse direction) 조도가 연삭방향 조도보다 훨씬 크기 때문에 일차원적으로 취급될 수 있으며, L 이 Te 에 비해 충분히 크면 Beckmann의 일차원적 이론이 횡방향의 조도 측정에 적절히 적용될 수 있다.

이론에 내포된 가정의 유효성과 변수 사이에 요구되는 부등관계($L \gg T \gg \lambda$)는 실제의 연삭표면에 대해 광파장 λ , 조사길이 L , 등가상관거리 Te , 조도요소들의 곡률반경 사이의 관계를 검토하므로써 확인될 수 있다. 기본 가정인 광파장에 대한 조도요소들의 곡률반경의 크기비율은 광파장에 대한 등가곡률반경 Te/Rq 의 비율을 계산하므로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 실제의 연삭표면에 대한 등가상관거리 Te 가 조사되었으, 그 결과가 조도의 RMS(Rq) 값에 대한 Te 의 평균값 $Tave$ 의 변화형태로 Fig. 4에 도시되었다. Te 의 측정은 측정식 조도측정기 Talysurf 6를 사용하여 조도범위 0.1-1.6 μm Rq 에 대해 행해졌으며 컷오프길이(cut-off length)는 0.8mm로 하였다. 여기서 등가상관거리 Te 로는 인접한 조도요소의 정점사이의 간격이 취해졌다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 $Tave$ 값은 조도변수 Rq 의 증가에 따라 증가하

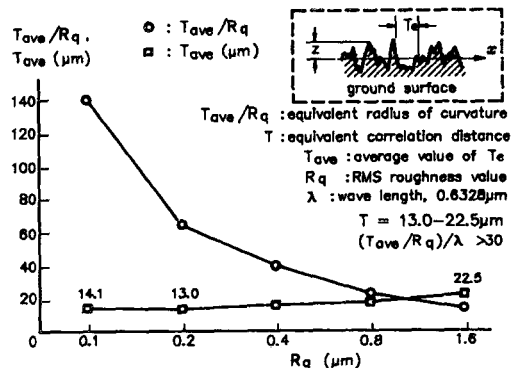


Fig. 4 Equivalent average one-dimensional correlation distances of ground surfaces in traverse direction

나 전구간에 걸쳐 13.0-22.5 μm 범위내에 존재하였고, $(Tave/Rq)/\lambda$ 의 값도 30 이상이어서 가정의 유효성이 확인될 수 있었으며 Beckmann의 일차원 이론의 적용이 타당함을 알 수 있었다.

5. 산란광의 패턴인식(Pattern Recognition)을 이용한 측정기법

백맨의 산란이론을 이용하는 방법은 크게 나누어서 정반사방향의 광강도만을 고려하는 방법과 반사각도에 따른 광강도의 분포상태를 관찰하는 방법의 두가지로 대별될 수 있다.

이중에서 정반사방향의 광강도만을 고려하는 방법은 비교적 단순한 방법으로 1 개의 수광소자를 사용하게 되며, 식(3)과 식(4)에 근거하여 표면조도에 따른 정반사방향의 광강도를 측정하는 방법이다. 이방법은 정반사가 지배적으로 발생되는 고운

표면에서는 근사적인 조도측정에 이용될수도 있을 것이나 거친표면인 경우에는 응용에 무리가 있게된다. 그 주된 이유는 거친표면에서의 난반사가 산란현상의 해석에 무시될수 없는 영향을 주는데 정반사 성분만이 취급되기 때문이다. 실제의 연삭표면에 대한 Tenner 등의 연구결과와⁽¹²⁾ 본 연구에 의하면, 광반응은 식(3)과 정확하게 일치되지 않았으며 특히 0.4 μm Rq 이상의 거친표면에 대해서는 오차가 큰 것으로 나타났다. Fig. 5는 입사각 θ_1 에 따른 식(4)의 $\langle \rho\rho^*_{spe} \rangle$ 와 식(3)의 $\langle \rho_{spe} \rangle^2$ 이 0.05-1.6 μm Rq의 조도범위에 대하여 변화하는 양상을 보여준다. 그림에서 알수있는 바와 같이 $\langle \rho\rho^*_{spe} \rangle$ 가 $\langle \rho_{spe} \rangle^2$ 보다 약간 크지만 그차이는 많지 않으며, 조도변화에 따른 광강도의 변화가 광속의 입사각에 대해 매우 민감하였다. 또, 조도변화에 따른 강도변화의 둔감성 때문에 0.2 μm Rq 이상의 조도범위에서는 실제적으로 광강도의 구분이 거의 곤란해지며 입사각이 작을수록 그정도가 심해진다. 입사각이 85° 이상에서는 비교적 구분이 잘되나 이 경우에는 수평입사각 근처이기 때문에 실제로 측정장치를 제작하기가 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 정반사 방향을 중심으로한 일정한 수광각도(collection angle) ψ 내의 산란광의 강도패턴을 인식하여 표면조도와 연결시키는 패턴인식기법(pattern recognition technique)의 개발을 시도하였다. 패턴인식기법의 개발을 위해 식(4)를 컴퓨터 시뮬레이션시킨 결과, 0.1~1.6 μm Rq의 조도범위에 대해 Fig. 6이 보여 주는 바와 같이 이 기법이 매우 유용할 것으로 예견되었다. Fig. 6에는 입사각이 0°이고 수광각도 ϕ 가 10°일때 0.05-1.6 μm Rq 범위에서의 $\langle \rho\rho^* \rangle$ 의 분포패턴이 0.1 μm Rq 표면의 $\langle \rho\rho^* \rangle$ 로 나누어져서 도시되어 있다. 그림으로 부터 실제의 연삭표면에서 자주 요구되는 표면조도값인 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 μm Rq에 대응되는 산란패턴이 비교적 뚜렷하게 인식될 수 있음을 알 수 있었다.

산란광의 강도패턴을 표면조도와 적절히 연결시키기 위해서는 강도패턴을 대표할 변수들의 산출이 요구된다. Fig. 6은 산란패턴의 대칭성이 유지될 때 정반사방향의 최고 광강도와 분산의 형태로 대표변수를 잘 특성지을 수 있음을 알게 한다. 본 연구에서는 최소제곱 오차방법을 이용하여 Fig. 7과 같이 강도패턴을 최적의 가우스형태로 곡선맞춤시켰으며 다음과 같은 식을 얻었다.

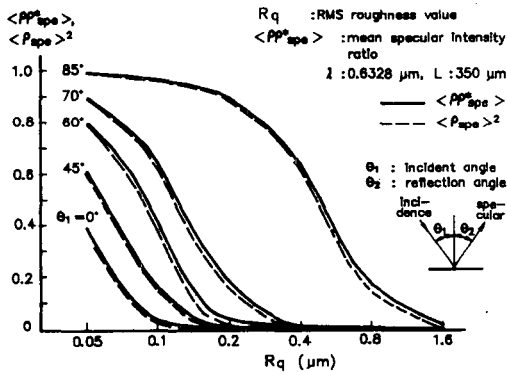


Fig. 5 Comparison of mean specular intensity ratio and square of mean amplitude ratio for Gaussian surfaces

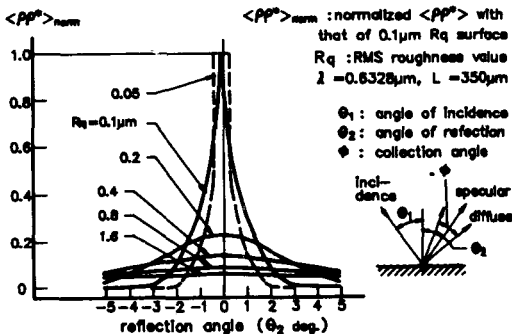


Fig. 6 Normalized distribution pattern of mean intensity ratio with zero incident angle and 10° collection angle

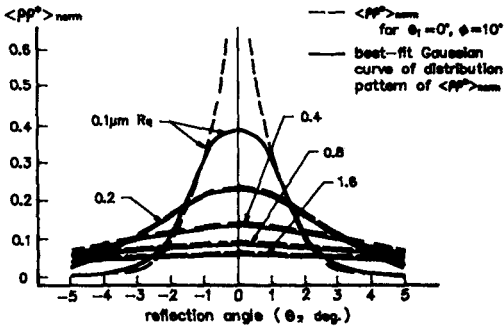


Fig. 7 Best-fit Gaussian curves for scattered pattern

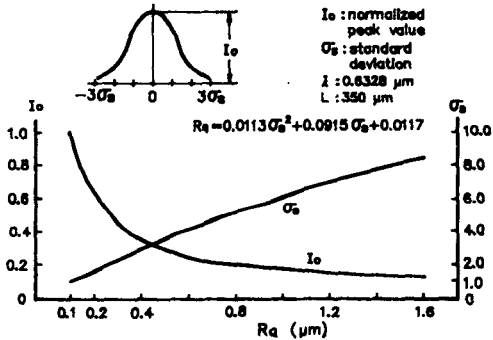


Fig. 8 Variations of two normalized parameters for characterising scattered pattern

$$\langle \rho \rho \rangle^* = I_0 \exp \left[-\frac{(\theta_1 - \theta_2)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (5)$$

여기서 I_0 는 가우스커브의 최고 광강도를 나타내며 σ_s 는 가우스커브의 분산의 표준편차를 나타낸다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 정반사방향에 대한 산란패턴의 대칭성은 입사각의 증가에 따라 나빠지는 것으로 나타났으며 적절한 입사각은 $0 \sim 15^\circ$ 이었고, 가우스 커브피팅의 오차는 수광각도에 따라 달라지는데 최적의 수광각은 정반사방향을 중심으로 하여 5° 이었다. 이 경우 피팅의 오차는 $0.2 \mu\text{m } Rq$ 이상에서는 매우 낮았다.

식 (5)를 이용한 곡선맞춤으로부터 얻어진 변수 I_0 와 σ_s 가 표면조도의 변화에 따라 변화하는 양상은 Fig. 8에 도시된 바와 같으며, 조도의 증가에 따라 거의 직선적으로 변화하는 변수 σ_s 가 적절한 측정변수가 될수 있음을 알수 있었다. σ_s 와 Rq 사이의 관계는 일련의 보정과정을 거쳐 다음과 같은 2차방정식 형태로 표현될 수 있었다.

$$Rq = 0.0113\sigma_s^2 + 0.0915\sigma_s + 0.0117 \quad (6)$$

6. 측정시스템의 설계 및 실험결과

전장에서 제안된 패턴인식기법을 이용하여 연삭표면의 조도를 측정하기 위한 측정시스템은 Fig. 9에 도시된 바와같이 HeNe 레이저발생기(laser generator), 영상감지부(image sensing unit), 디지털 데이터처리부(digital data processor) 등의 3가지 부분으로 구성된다.

레이저 발생기에서는 파장이 $0.6328 \mu\text{m}$ 이며 직경이 약 0.7mm 인 평행 단색광축이 발생되어 15° 의 입사각으로 측정표면에 입사된다. 영상감지부는 일련의 집광렌즈와 CCD 영상센서(charge coupled device image sensor) 및 광전회로로 구성되는데, 측정표면에서 반사된 빛을 렌즈를 통하여 모은후 영상센서에 영상을 형성시키는 역할을 한다. 본연구에서 사용된 영상센서는 수광된 빛의 강도에 비례하는 전기적 신호를 생성하는 수광소가 4096개가 $7 \mu\text{m}$ 의 간격으로 일차원적으로 배열된 것으로 그의 광전회로를 통하여 구동된다. 영상센서는 산란광의 공간상분포가 센서상의 수광소자 배열상에 적절히 사상될 수 있도록 하기위해, 렌즈시스템의 영상점에서 약간 벗어난 곳에 위치되도록 설계되었다. 렌즈시스템의 구경각(aperture angle)은 5° 로 설계되었다.

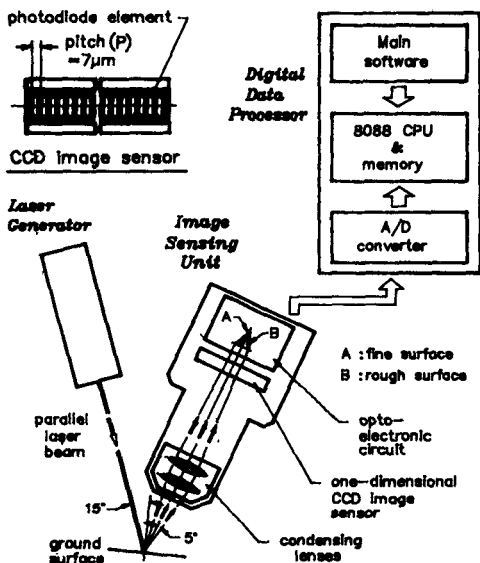


Fig. 9 Roughness measurement system using HeNe laser and CCD image sensor

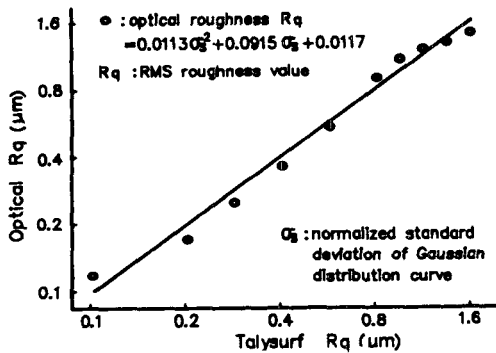


Fig. 10 Verification of optical results by using Talysurf 6

디지털 데이터처리부는 A/D 컨버터, INTEL 8088 마이크로프로세서, 소프트웨어 프로그램 등으로 구성되어 측정자료를 처리한다. 영상센터에서 발생된 아날로그 신호는 A/D 컨버터를 통하여 디지털형태로 변환된후, 8088 마이크로프로세서와 프로그램에 의해 처리되어 공학조도변수 Rq 를 산출하게 된다. 영상센서로부터 전달되는 전기적 신호는 광전회로에서 발생한 다양한 성분의 고주파 노이즈를 포함하고 있기때문에, 노이즈의 제거를 위하여 디지털 여과기를 사용한후 식(5)에 따라 가우스 곡선맞춤 시키고 식(6)을 이용하여 Rq 값을 산출하도록 하였다.

본 연구에서 개발된 패턴인식 기법을 이용한 광학식 측정시스템의 유용성이 Fig. 10에 도시된 바와 같이, 일련의 연삭시편들에 대해 표면조도의 Rq 값을 측정한후 측정식 조도측정기 Talysurf 6을 사용하여 얻은 측정치와 비교하는 형식으로 입증되었는데, 그 결과는 그림에서 알수있는 바와 같이 서로 잘 일치하였다.

7. 결 론

조도범위 0.1-1.6 μ m Rq 인 연삭표면의 표면조도를 인프로세스로 측정하기 위해 광학적 비접촉식 측정 기술의 개발이 연구되었으며 그의 이론적 기초가 정립되었다.

측정기술의 개발은 2 가지 방향으로 진행되었다. 하나의 방법은 백색광원과 광섬유및 수광소자를 이용하여 정반사광과 45° 방향의 난반사광을 수집한 후 광강도를 서로 비교하는 비교적 간단한 형태의 방법이었다. 다른 또하나의 방법은 광산란현상을

이용하는 방법으로 Beckmann의 광산란이론(light scattering theory)이 측정시스템의 설계 및 제작의 관점에서 분석되었고, HeNe 레이저 및 CCD 영상 센서(image sensor)를 이용한 실험장치가 제작되었으며 기초실험이 행해졌다. 또한, 연삭표면에 대한 Beckmann이론의 적용 타당성 여부를 검증하기 위한 고찰 및 실험이 행해졌으며 그 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

정반사광과 난반사광의 단순비교 방법은 특별한 이론적 기초가 요구되지 않았고 염가로 측정장치를 제작할 수 있었으며 표면연소(surface burn)의 감지에는 매우 유용하였다. 그러나 분해능과 신뢰도가 매우 낮은 것으로 밝혀졌고 측정단자들을 항상 측정 표면과 일정한 거리를 유지하도록 해야할 필요성이 요구되었으며 인프로세스 측정을 위해서는 측정단자 이송장치가 추가로 요구되었다.

조사결과 0.1-1.6 μ m Rq 조도범위의 연삭표면들은 조도요소들 사이에 13-22.5 μ m 범위의 등가상관 거리(equivalent correlation distance)를 갖는 것으로 밝혀졌으며 일차원 광산란이론이 유용하게 도입될 수 있었다.

Beckmann 이론의 사용에 있어서 정반사방향만의 광반응은 산란현상을 정확히 예측하지 못하는 것으로 밝혀졌으며, 정반사를 중심으로한 일정한 반사각도내의 산란광의 광강도 분포패턴을 인식하는 방법인 패턴인식기법(pattern recognition technique)이 새롭게 제시되었는데 조도측정에 유용하게 이용될 수 있음이 밝혀졌다. 이 기법을 위한 소프트웨어가 준비되었으며 이 방법에서 광강도 분포의 분산의 표준편차가 매우 신뢰할만한 측정변수로 밝혀졌고 이를 이용하여 공학적 조도변수 Rq 를 잘 표현할 수 있었다.

이 패턴인식 기법을 이용하는 측정시스템에서는 HeNe 레이저및 일차원 영상센서를 사용하므로써 안정된 평행광속을 쉽게 얻을수 있었으며, 측정점이 이동하여도 측정장치의 이동없이 영상을 추적할 수 있어서 인프로세스 측정에 용이하게 응용이 가능할 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

- (1) Thomas, T.R., 1979, "Surface Roughness Measurement : Alternatives to the Stylus", 19th Proc. of the Machine Tool Design & Research, pp. 383~389.

- (2) L. H. Tanner, 1979, "A Comparison between Talysurf 10 and Optical Measurements of Roughness and Surface Slope", *Wear*, 57, pp. 81~91.
- (3) P.M. Lonardo, 1978, "Testing a New Optical Sensor for In-Process Detection of Surface Roughness", *Annals of the CIRP*, Vol. 27/1, pp. 531~534.
- (4) I. Inasaki, 1983, "Development of In-Process Sensor for Surface Roughness Measurement", 23th Proceedings of the Machine Tool Design & Research, pp. 109~113.
- (5) T.V. Vorburger, 1987, "Measurements of Roughness of very Smooth Surfaces" *Annals of the CIRP*, Vol. 36/2, pp. 503~509.
- (6) R. Brodmann, G. Thurn, 1984, "An Optical Instrument for Measuring the Surface Roughness in Production Control", *Annals of the CIRP*, Vol. 33/1, pp. 403~406.
- (7) E.L. Church, 1979, "The Measurement of Surface Texture and Topography by Differential Light Scattering", *Wear*, 57, pp. 93~105.
- (8) B. Brodmann, G. Thurn, 1986, "Roughness Measurement of Ground, Turned and Shot-Peened Surfaces by ther Light Scattering Method", *Wear*, 109, pp. 1~13.
- (9) M. Fairlie and R.S. Timist, 1986, "Light Scattering from Medium-Gloss Aluminum Surfaces", *Wear*, 109, pp. 29~42.
- (10) D.G. Jansson, J. M. Rourke, A.C. Bell, 1984, "High-Speed Surface Roughness Measurement", *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 106, Feb., pp. 34~39.
- (11) P. Beckmann and A. Spizichino, 1963. "The Scattering of Electromagnetic Weves from Rough Surfaces", Pergamon Press, Oxford.
- (12) L. H. Tanner and M. Fahoum, 1976, "A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surfaces, Using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light", *Wear*, 36, pp. 299~316.
- (13) L. H. Tanner, 1976, "The Use of Laser Light in the Study of Metal Surfaces", *Optics and Laser Technology*, June, pp. 113~116.
- (14) C.S. Lee, S.W. Kim, D. Y. Yim, 1987, "An In-process Measurement Technique Using Laser for Non-contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surfaces", *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 425~428.
- (15) F. Sweeney and T.A. Spedding, 1986, "A Simulation Technique to Investigate Rough Surface Scatter", *Wear*, 109, pp. K43~56.
- (16) K. Yanagi, T. Taeda and T. Tsukada, 1986, "A Practical Method of Optical Measurement for the Minute Surface Boughness of Cylindrical Machined Parts", *Wear*, 109, pp. 57~67.
- (17) M. Shiraishi, 1987, "A Consideration of Surface Roughness Measurement by Optical Method", *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 109, May, pp. 100~105.
- (18) 임동열, 김승우, 1987, "연삭 가공면의 표면조도와 형상정밀도의 비접촉식 인프로세스 측정 기술", 한국정밀공학회지, 제4권, 제2호, pp. 36~46.
- (19) 임동열, 1987, "연삭 가공면의 표면조도와 형상정밀도의 비접촉식 인프로세스 측정기술 개발", 한국과학기술원 생산공학과 석사학위 논문.