

산란광속(光束) 측정에 의한 연삭가공 표면 거칠기 측정방법

홍 성 욱,* 김 현 수**

A Method for Measurement of Roughness of Ground Surfaces by Using Fluxes of Scattered Lights

Seong-Wook Hong* and Hyun-Soo Kim**

ABSTRACT

This paper presents a simple method for measurement of roughness of ground surfaces. The present method utilizes fluxes of scattered lights condensed through lenses aligned along the specular direction. A theoretical analysis is performed for the purpose of investigating the possibility of the method as well as determining the experimental condition. Experiments are also performed to show the effectiveness and robustness of the proposed method. The theoretical and experimental results show that the proposed method is simple enough to implement and has a potential to identify a wide range of roughness of ground surfaces.

Key words : surface roughness(표면 거칠기), ground surface(연삭표면), Gaussian surface(정규분포 표면), light scattering(광산란), flux of scattered light(산란광속), light flux ratio(광속비), light intensity(광강도), on-the-machine measurement(기상계측), specularly reflected light(정반사광), diffusely reflected light(난반사광)

1. 서 론

연삭공정은 대체로 마무리 작업에서 실행되므로 연삭 공정에서의 정밀도는 해당 제품의 질을 결정하는 중요한 요인이 된다. 표면 거칠기는 연삭공정에서의 정밀도를 나타내는 중요 요소로서 연삭표면에 대해 표면 거칠기를 측정하는 것이 일반화되어 있다. 연삭표면에 대한 표면 거칠기 평가는 보편적으로 연삭공정 종료후 시행

하여 합/부 판정만을 하고 연삭작업의 특성상 원래 상태로 다시 장착하는 것이 어려우므로 부적합품을 폐기하여 왔다. 따라서 연삭가공물을 연삭기에서 이탈시키지 않고 연삭표면 거칠기를 측정할 수 있는 기상(on-the-machine)계측의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔으며 많은 연구가 계속되어 왔다.^(1,2) 그 중에서도 측정장치 구성의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법인 기상 계측에 가장 적합한 방법으로 평가되고 있다.⁽¹⁻³⁾

* 금오공과대학교 정밀기계공학과(종신회원)

** 금오공과대학교 정밀기계공학과 대학원

표면 거칠기 측정에 있어서의 광산란 현상 응용은 Beckmann⁽⁴⁾이 표면의 특정부분에 입사되는 광이 표면 거칠기의 영향으로 산란될 때의 산란광강도(scattered light intensity)를 수식화한 후 본격화 되었다. 광산란을 응용한 표면 거칠기 측정방법은 정반사광을 이용하는 방법, 난반사광을 이용하는 방법, T.I.S 방법, 산란각 분포를 이용하는 방법 등으로 분류되는 방법들이 많이 개발되었다.⁽⁵⁾ 정반사광을 이용하는 방법은 정반사광(specularly reflected light)의 강도를 측정하여 표면 거칠기를 구하는 방법으로 표면 거칠기를 결정하기 위해 Beckmann의 정규분포 표면(Gaussian surfaces)에 대한 이론을 적용한다.^(6,6) 이 방법은 정규분포 표면과 유사한 연삭표면에서, 특히 비교적 고운 표면의 경우에 유용하나 실험적으로는 보다 거친 표면과 비정규분포 표면 등에서도 유용함이 밝혀진 바 있다.⁽⁶⁾ 한편 난반사광(diffusely reflected light)을 이용하는 방법은 난반사광과 표면 거칠기와의 관계를 얻는 방법⁽⁷⁾으로, 실제로는 연삭표면에서 정반사광과 특정각도의 난반사광의 광강도비 또는 두개의 각도에서 측정된 난반사광의 광강도비를 측정매개변수로 사용한다. 난반사광을 이용하는 방법으로는 백색광원과 광섬유다발(optic fiber bundle)을 사용하여 입사와 집광을 하는 방법⁽⁸⁾이나 난반사광의 강도비와 Beckmann의 이론식과의 관련을 통해 거칠기를 산출하는 방법^(9,10) 등이 적용되었으며 일반적으로 거친 표면의 거칠기 측정에 적합한 것으로 평가되고 있다.

T.I.S (total integrated scatter) 방법은 Bennett 등⁽¹¹⁾에 의해 제안된 것으로 표면의 형태를 정규분포(Gaussian distribution)로 가정하여 총산란광에 대한 총난반사 광강도비로부터 거칠기 변수를 산출하는 방법이며 측정장비의 설치 정밀도가 매우 중요하여 기상 계측에는 부적합하다. 산란각 분포(scattering angle distribution)를 이용하는 방법은 산란광강도의 각분포를 이용하는 방법으로서 산란광강도 각분포 자체와 분포의 편차등을 측정매개변수로 하여 거칠기를 산출하는 방법이다.^(6,12,13) 실험적으로 비교적 넓은 영역의 표면 거칠기를 측정할 수 있는 것으로 밝혀진 바 있으나⁽¹³⁾ 표면에 파상도가 있으면 광강도 각분포에 편차를 보이므로 광강도 각분포 자체를 활용하는 것은 다소 제한이 있다고 알려지고 있다.⁽¹⁴⁾

이상의 측정방식들은 산란광의 강도를 측정하는 방법이 대부분으로 대체로 표면상태에 따른 편차가 크고 측

정가능 영역이 한정되거나 광학계가 복잡해질 가능성이 높다. 이같은 문제점을 개선하기 위해 광속(light flux) 측정에 의한 간편한 표면 거칠기 측정방법이 저자들에게 의해 실험적으로 제안된 바 있다.⁽¹⁵⁾ 광속을 측정하는 방식은 정반사광을 이용한 방법과 난반사광을 이용한 방법의 중간적인 특성을 가지며 측정원리상 기계적 오차 등에 의한 변화가 적어 기상 계측에 유용함이 실험적으로 밝혀졌다. 그러나 측정장치 설계를 위한 이론적인 검토는 이루어지지 않았으며 표면반사율에 의존하므로 모든 공정에 대해 보정을 해야하는 문제점이 있었다.

본 연구에서는 기존의 광속비(light flux ratio) 측정방식의 문제점을 개선할 수 있는 새로운 방식의 광속비 측정방안을 제시하였고 광속(light flux) 측정에 대한 이론식을 도입하여 장치의 설계방안을 구체화하였다. 광속비 측정을 위해 정반사 방향에 두개의 서로 다른 구경의 집광렌즈를 두어 산란광을 집광할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 새로운 광속비는 이와 같이 서로 다르게 얻어진 두 산란광속을 나눈 것으로 정의하여 측정시 표면의 상태나 외부 변동요인에 따른 오차에 대응할 수 있도록 하였다. 한편 연삭표면의 단면곡선이 정규분포한다는 가정과 표면이 작은 거울면(mirror facet)같이 구성된다는 가정⁽⁴⁾하에 산란광의 광속량을 확률적으로 계산하는 이론식을 도입하였다. 그리고 이론식에 근거하여 표면 거칠기와 수광렌즈 등에 따른 광속량의 변화를 고찰하여 기존방식과 새로운 방식의 장단점을 논의하였으며 대상 시편에 대해 적절한 실험장치를 설계하였다. 이론적인 검토와 실험을 통해, 광속비 측정방식은 구현하기 쉽고 정규분포 표면에 대해 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 실험을 위해 구성된 측정장치를 이용하여 0.2 μm R_a 에서 2.3 μm R_a 까지의 비교적 넓은 범위의 시험 연삭시편에 대해 표면 거칠기를 효과적으로 측정할 수 있었다.

2. 연삭표면에서의 산란광속(Scattered Light Flux)

2.1 산란광속에 의한 표면 거칠기 측정의 개념

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 산란광속 측정의 개념을 설명하고 있다. 표면에 입사된 레이저광은 표면의 형상에 의해 산란하게 되는데 표면이 고울수록 정반사 방향(specular direction)으로 집중되고 거칠수록 난반사 방향(diffuse direction)으로 분산된다. 이때 그

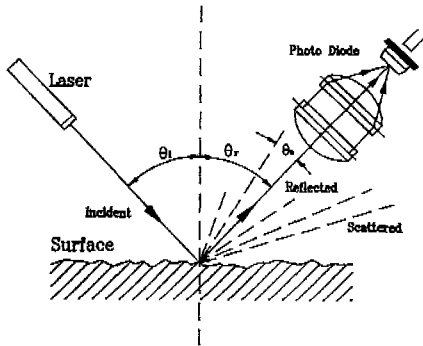


Fig. 1 The conceptual diagram for measurement of flux of scattered light

림에서와 같이 정반사 방향에 집광렌즈를 두면 렌즈의 유효 수광각내의 각도로 반사하는 광은 렌즈를 통해 집중되므로 정반사광과 난반사광 일부를 포함하는 광속이 얻어지게 된다. 이와 같이 광속을 측정하게 되면 정반사광과 난반사광을 동시에 받아들일게 되므로 정반사광을 측정하는 방식과 난반사광을 측정하는 방식을 결합한 특성을 보이게 된다. 또한 렌즈에 포착되는 반사광을 적분하는 효과가 있으므로 장치나 표면에서의 미소한 변화 등, 기계적 오차에 둔감한 특성을 보인다. 실제 측정을 위해서는 신뢰도를 높이기 위하여 구경을 달리하는 두개의 집광렌즈에서 집중한 광속들 간의 비를 측정변수로 하였다.

2.2 정규분포 표면에서의 산란광속

연삭표면의 기하학적 단면곡선이 정규분포를 한다고 가정하면 그 미분도 정규분포한다.⁽¹⁶⁾ 따라서 단면곡선에 대한 미분의 확률밀도 함수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(h_s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{h_s}{\sigma_s}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기서 h_s 는 단면곡선의 미분, σ_s 는 단면곡선 미분의 표준편차를 의미한다. 한편 표면에 단파장의 광이 일정한 각도로 입사된다고 하면 산란각은 표면의 경사각에 의존하게 된다. 표면의 경사각과 단면곡선의 미분은 다음과 같은 관계를 갖는다. 즉

$$\theta_s = \tan^{-1} h_s \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_s < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

여기서 θ_s 는 표면 경사각이다. 따라서 표면 경사각의

확률밀도 함수는 다음과 같이 얻어진다.

$$f(\theta_s) = \frac{1}{\sigma_s \cos^2 \theta_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\tan \theta_s}{\sigma_s}\right)^2\right) \quad \text{if } -\frac{\pi}{2} \leq \theta_s < \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

0

otherwise

Fig. 2는 식 (3)의 표면 경사각의 확률밀도 함수와 정규분포 함수를 비교해서 보여주고 있으며 산란광이 집속 렌즈에 포착되는 표면 경사각 영역을 표시하고 있다. 표면 경사각의 확률밀도 함수는 정규분포 함수에 비해 중앙에 더 집중되는 경향을 볼 수 있으며 본 연구에서와 같이 비교적 넓은 각도의 표면 경사각을 고려해야 하는 경우 표면 경사각을 정규분포 함수로 두는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다. 표면 경사각 측정영역은 반사각이 표면 경사각의 2배가 되므로 유효 수광각의 1/2이 된다. 입사광이 평행광으로서 수광렌즈 축점위치의 표면을 중심으로 작은 반경내에 입사된다고 하면 반사광이 수광렌즈를 통해 포착될 확률은 다음과 같다.

$$\Phi = 2 \int_0^{\theta_0} f(\theta_s) d\theta_s \quad (4)$$

여기서 Φ 는 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률을, θ_0 는 유효 수광각을 의미한다. 식 (4)에 의하면 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률은 단면미분의 표준편차와 관련을 갖는다. 수광부에서 실제 측정되는 반사광속은 입사광속량에 의존하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_r = C \psi_i \Phi \quad (5)$$

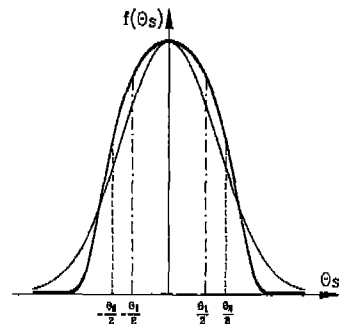


Fig. 2 The Gaussian probability density function, the probability density function of surface slope, and effective angles of detection

여기서 ψ , ϕ 는 각각 반사광속과 입사광속을 나타내며 C 는 측정장치나 조건 등에 따라 결정되는 계수로서 1보다 작은 값을 갖는다. 결국 반사광속은 입사광속에 반사광속이 수광렌즈에서 포착될 확률의 곱으로 나타나게 되며 단면곡선 미분의 표준편차와 직접 관련을 갖게 된다. 일반적으로 단면곡선 미분의 표준편차는 단면곡선의 자기상관 함수 (autocorrelation function)가 주어진다면 다음과 같은 관계를 갖는다. ⁽¹⁶⁾

$$\sigma_s^2 = -B''(0) \quad (6)$$

여기서 $B(\tau)$ 는 단면곡선의 자기상관 함수이다. 자기상관 함수는 현재 위치와 지연거리 τ 에서의 함수값간의 유사성 정도를 나타내게 되는데 정규분포 표면에서는 표준편차 (R_q) 및 상관거리 (correlation distance)의 함수로 표현된다. 단면곡선의 자기상관 함수는 표면의 수평방향 특성 (또는 표면 불규칙 돌기들의 밀도)에 관련이 되는 상관거리에도 의존하게 되어 연삭공정에 따라 달라질 수 있으므로 표면 거칠기와 단면곡선 미분 표준편차의 일반적인 관계를 규정하기 어렵다. 여기서는 단면곡선 미분의 표준편차가 표면 거칠기와 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 가정한다.

$$\sigma_s = a + b \log R_q \quad (7)$$

여기서 a , b 는 재질 및 공정에 따른 상수이다. 식 (7)은 표면경사각이 표면 거칠기와 무관한 계수와 표면 거칠기의 대수값에 대한 비례값으로 구성되는 것으로 가정한 것이며 연삭표면에서 측정된 결과에 비교적 잘 부합되는 것으로 알려져 있다. ⁽⁸⁾

2.3 산란광속의 계산

식 (7)에서 a , b 가 주어지면 식 (3)을 통해 표면 경사각의 확률밀도 함수가 얻어지며 이를 식 (4)에 대입하면 해당렌즈를 통해 산란광이 포착될 확률을 얻게 되어 결국 식 (5)에서 수광렌즈를 통해 집속되는 광속량을 계산할 수 있다. Fig. 3은 참고문헌⁽⁸⁾에서 사용한 표준 연삭시편 (RUBERT 제품)에 대해 유효 수광각을 변화시키면서 계산한 광속과 표면 거칠기의 관계를 보여주고 있다. 유효 수광각이 작을수록 고운 표면에서 매우 민감하지만 거친 표면에서는 광속이 매우 작아짐을 확인할 수 있다. 따라서 유효 수광각이 작으면 정반사광을 측정하는 방법과 유사한 특성을 나타내게 되며 고운 표

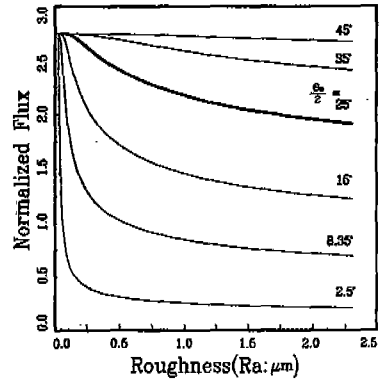
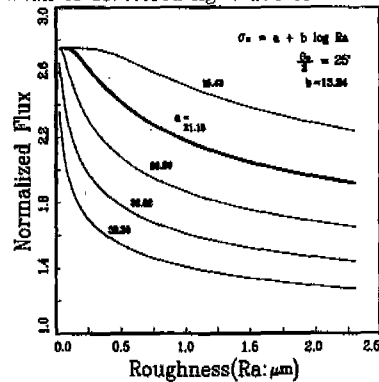


Fig. 3 Flux of scattered light due to effective angle of detection (simulation with data in the reference [8])

면의 거칠기 측정에 유리함을 알 수 있다. 또한 유효 수광각이 커지면 광속이 넓은 영역에 걸쳐 비교적 완만하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 비교적 넓은 영역의 표면 거칠기 측정이 가능해질 것으로 기대할 수 있다. 그러나 유효 수광각이 너무 커지면 산란광을 대부분 받아들이게 되기 때문에 측정값이 총산란광 (T. I. S) 광속에 가까워지며 표면 거칠기에 따른 변화가 너무 적어져서 바람직하지 않다. 측정하고자 하는 대상 시편들의 표면 거칠기 범위가 설정되어 있다면 Fig. 3과 같이 유효 수광각에 대한 광속변화를 구한 후 측정 감도와 선형성 등을 고려하여 수광렌즈의 구경을 결정하여야 한다.

Figs. 4, 5는 유효 수광각을 25°로 두고 식 (7)의 a , b

Fig. 4 Flux of scattered light due to a in eq. (7)



(simulation with data in the reference [8])

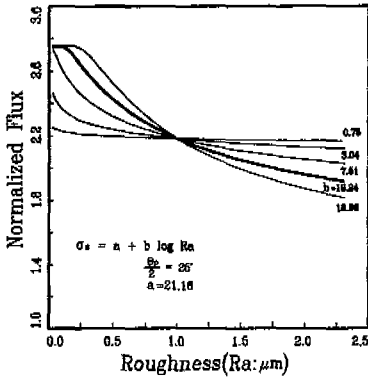


Fig. 5 Flux of scattered light due to b in eq. (7) (simulation with data in the reference [8])

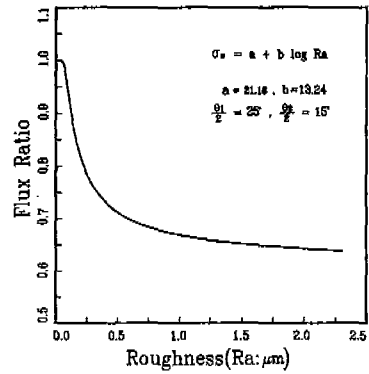


Fig. 6 Flux ratio FR_2 with respect to surface roughness (simulation with data in the reference [8])

값을 변화시킨 경우의 표면 거칠기와 광속과의 관계를 보여주고 있다. a 값이 변화하면 고운 표면에서의 곡선 특성에 변화가 생기며 곡선 전체의 수직방향 이동이 발생하나 경향은 크게 바뀌지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 b 값의 변화는 곡선의 변화율에 직접적인 영향을 주고 있는 것으로 나타나고 있다.

2.4 측정매개변수의 설정

실제 표면 거칠기 측정을 위해서는 광속을 직접 사용하는 것보다는 광원의 변동 등 외적인 변동 요인의 효과를 줄이기 위해 광속비를 측정매개변수로 택하는 것이 유리하다. 만일 입사광속을 측정하여 반사광속과의 비를 구한다면 참고문헌⁽⁸⁾에서와 같이 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$FR_1 = \frac{\Psi_r}{\Psi_i} = C\Phi \quad (8)$$

따라서 식(8)로 결정되는 광속비는 입사광속에 무관하게 된다. 식(8)에 의하면 측정되는 광속비가 표면반사율이나 측정상태 등에 관계되는 C 값의 영향을 받게 되어 광속비와 표면 거칠기 관계를 표면의 반사율 등에 따라 보정해야 하므로 범용 측정장치로 사용하는 데는 다소의 문제가 있다. 그러나 이같은 특성은 동일 공정에 투입한다면 문제되지 않으며 특히 C 값이 표면 반사율에 크게 의존하므로 연삭표면의 주요결함인 표면연소 등에는 오히려 효과적일 수 있다. FR_1 을 이용하면 Fig. 3과 동일한 양상의 결과를 얻을 수 있다.

한편 정반사 방향에 놓인 두개의 서로 다른 구경을

갖는 렌즈를 통해 집속된 광속을 각각 ψ_{r1} , ψ_{r2} 라고 하면 광속비를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$FR_2 = \frac{\Psi_{r1}}{\Psi_{r2}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (9)$$

여기서 Φ_1 , Φ_2 는 각각의 렌즈에 의해 반사광이 포착될 확률을 의미한다. 이 경우에는 표면 반사를 등에 의존하는 계수 C 가 제거되어 표면 거칠기 측정에 보다 효과적일 수 있다. 그러나 이 경우에도 측정매개변수가 표면 거칠기에 간접적으로 대응되므로 보정이 필요하다. 예컨대 식(7)에서 상수 a , b 의 값을 결정하기 위해 최소 2개의 측정값이 필요하다. Fig. 6은 유효 수광각을 25° , 15° 로 둔 경우의 집속된 산란광속의 비와 표면 거칠기의 관계를 예시하고 있다.

3. 측정장치 구성 및 표면 거칠기 측정

3.1 측정장치의 구성

광속비 측정에 의한 표면 거칠기 측정장치의 개념도를 Fig. 7에 나타내었다. 입사광원은 4 mW급 He-Ne 레이저로 파장은 632.8 nm이며 0.8 mm의 유효 빔직경을 갖고 있다. 레이저광을 입사부까지 전송하기 위해 광섬유(optic fiber)를 사용하여 측정부가 레이저 발생기와 무관하게 이동할 수 있게 구성하였다. 따라서 집광(condensing) 렌즈로 레이저 광을 광섬유의 한쪽 끝단에 집속시켜 원하는 위치까지 이동시킨 후 입사부에서는 다시 같은 렌즈를 사용, 평행광으로 환원(collimation)하여 표면에 입사시킨다. 입사광의 일부는 광

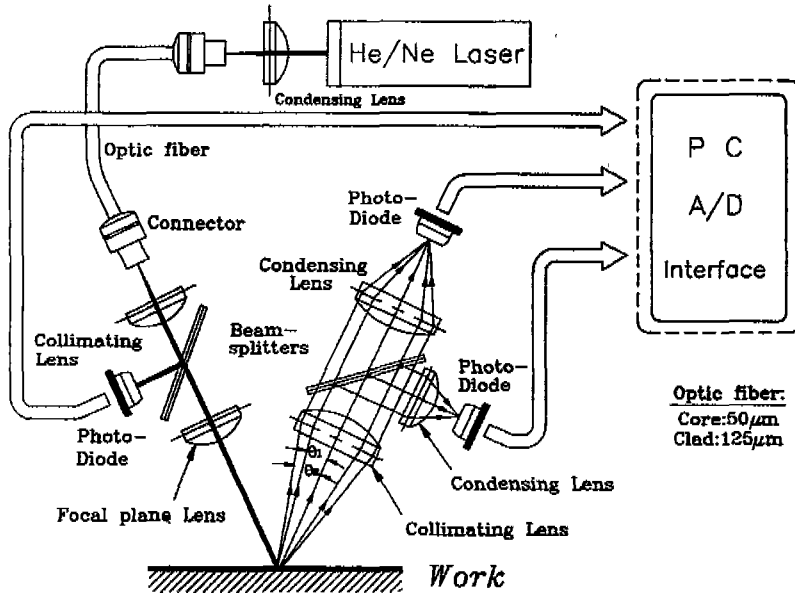


Fig. 7 Schematic diagram of the measurement system

분할기로 분할되어 입사광속(식(8)의 ψ) 측정에 사용된다. 입사광이 표면에서 산란되면 정반사 방향에 놓인 집광렌즈에 의해 렌즈구경에 포함되는 산란광이 평행광으로 되며, 광분할기에서 평행광의 일부가 분할되면 작은 구경의 집광렌즈로 집속되어 반사광속(식(8)의 ψ , 또는 식(9)의 ψ_{r1}) 측정에 사용된다. 그리고 광분할기에서 통과된 나머지 평행광을 약간 큰 집광렌즈로 집속하여 또 다른 반사광속(식(9)의 ψ_{r2})을 측정한다. 이렇게 측정된 광속들을 A/D한 후 스케일을 조정하여 식(8) 또는 (9)의 광속비를 얻는다.

3.2 측정조건의 설정

본 연구에서 사용한 연삭시편에 대해 표면 거칠기와 광속의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 앞절의 계산에서와 마찬가지로 유효 수광각이 작으면 측정 가능 영역이 높은 표면으로 제한되고 유효 수광각이 커질수록 광속량의 변화가 표면 거칠기에 대해 완만해지는 특성을 볼 수 있다. Fig. 8을 토대로 본 연구에서 고려한 연삭시편의 거칠기 범위인 $0.2 \mu m R_a - 2.3 \mu m R_a$ 에서 변별력이 좋도록 두개의 산란광속 집속렌즈의 유효 수광각을 각각 약 16.7° , 10° 로 선정하였다. Fig. 9는 실제 표면 거칠기 측정장치의 전체적인 구성을 보여주고 있으며 Fig. 10은 측정부만을 확대해 보여주고 있다.

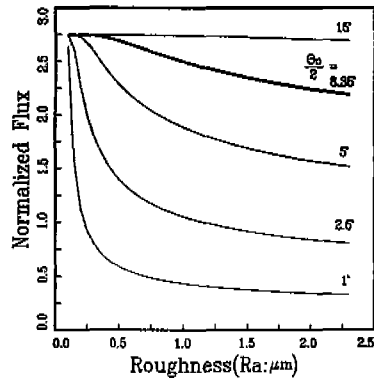


Fig. 8 Flux of scattered light due to effective angle of detection (simulation with data of the current samples)

3.3 표면 거칠기의 측정

제안된 측정방식의 특성을 살펴보기 위해 연삭 표준시편을 이용하여 광속비와 표면 거칠기의 관계를 실험적으로 구하였다. 측정결과의 비교를 위해 표준시편에 대해 광촉침식 측정장치를 이용하여 표면 거칠기(R_a)를 미리 측정하였다. 표면 거칠기 측정시, 시편의 위치에

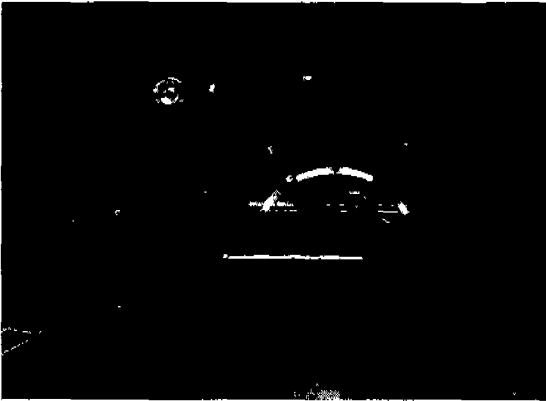


Fig. 9 Experimental setup for measurement of fluxes of scattered light(Photo)

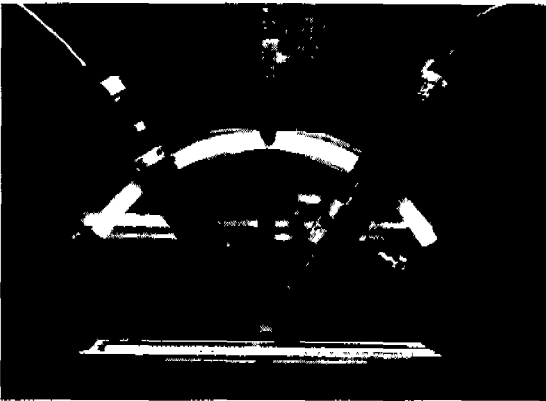


Fig. 10 Close-up of the probe in the experimental setup(Photo)

따른 편차를 고려하여 동일 시편의 4곳을 임의로 선정하여 평균을 취하였다. Fig. 11은 광속비 FR_1 과 표면 거칠기와의 관계를 보여주고 있다. 입사각이 클수록 광속비가 높아지는 것을 확인할 수 있으며 측정영역 전체에 걸쳐 일관되고 완만하게 단조 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 사용한 시편은 앞절에서 고려하였던 시편에 비해 전체적으로 상관거리가 작기 때문에 산란광이 정반사 방향으로 더 많이 집중되고 있는 것으로 나타나고 있어 집속렌즈의 유효 수광각이 작아도 상대적으로 더 큰 광속을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한편 입사각이 커짐에 따라 광속이 커지는 것은 입사각이 클수록 C 값이 커지는 것을 의미하며 C 값에 따라 측정치가 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 이미 앞에서 언급한 바와 같이 동일한 표면에서도 표면의 광택이나 반사율 등에 따라 광속비가 달라질 수 있다. Fig. 11에는 실험치와 이론치를 동시에 나타내고 있다. 이론치는 실험치를 통해 추정된 a, b 값을 식 (7)에 대입하여 결정된 표면 거칠기와 단면곡선 미분의 표준편차의 관계를 이용해 식 (8)로부터 계산된 광속비로서 실험치와 동일한 양상을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 식 (7)의 가정이 연삭시편에 대해 잘 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 광속비 FR_2 와 표면 거칠기의 관계를 보여주고 있다. 비교적 고운 표면에서 감도가 좋으며 넓은 표면 거칠기 범위에서 충분한 변별력을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 선택된 수광렌즈를 사용하여 광속비를 측정하면 측정대상 표면에 대해 효과적인 표면 거

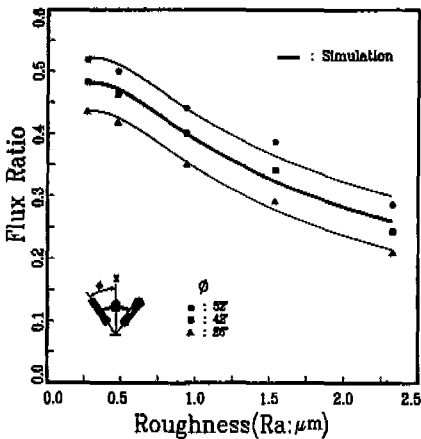


Fig. 11 Measured and computed flux ratio FR_1 with respect to surface roughness

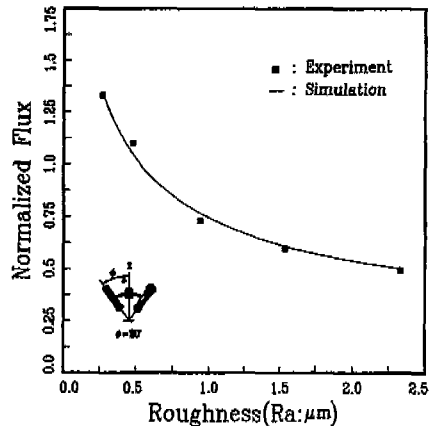


Fig. 12 Measured and computed flux ratio FR_2 with respect to surface roughness

칠기 측정이 가능할 것으로 생각된다. 여기서 제시한 계산치는 앞 실험(Fig. 11)에서 얻어진 a , b 값을 이용하여 식(9)로부터 계산한 결과로서 실험결과에 잘 부합되고 있음을 알 수 있다. 따라서 식(7)로 가정한 표면 단면곡선 미분의 표준편차와 표면 거칠기와의 관계식이 실험결과에 잘 부합되고 있음을 알 수 있다. 결국 개발된 이론식이 광속 또는 광속비 예측에 유용하며 식(4)-(9)를 활용한다면 적절한 특성을 갖는 측정장치를 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

본연구에서 제안한 표면 거칠기 측정방법은 정확한 광속을 측정하기 위해 표면으로 부터 수광렌즈의 초점이 확보되도록 일정한 수직거리가 유지되어야 한다. 또한 측정표면과 측정장치가 수직이 되어야 한다. 그러나 측정장치의 장착오차 또는 표면 자체의 파상도(waviness)등에 의해 측정장치가 일정 수직거리를 유지하지 못하거나 표면과 측정장치 간에 수직을 이루지 못할 가능성이 있다. 표면 거칠기 측정장치의 장착 오차가 결과에 큰 영향을 준다면 기상 계측장치로서는 부적합하다. 이같은 기상 계측시의 문제점은 이미 참고문헌⁽¹⁵⁾에서 자세히 다룬바 있으며 새롭게 설정한 측정매개변수에 대해서도 기존의 광속비 측정방식과 유사한 특성을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 광속비 측정방식도 기상 계측에 적합할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 산란광의 광속을 측정하여 표면 거칠기를 결정하는 간편한 방법을 제안하였다. 또한 실용적으로 사용이 가능한 이론식을 개발하였고 제안한 방법에 기초한 측정장치를 개발하였다. 실제 표면 거칠기 측정을 위해 정반사 방향에 놓인 두개의 서로 다른 렌즈를 통해 받아들인 산란광의 광속비를 측정변수로 하는 방법을 사용하였으며 입사광속과 정반사 방향에 놓인 렌즈에 의해 집속되는 광속간의 비를 측정하는 기존의 방법과 비교하여 그 특성을 논하였다. 이론과 실험적인 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 광속비 측정에 의한 표면 거칠기 측정방법은 정 반사광과 난반사광을 동시에 받아들이므로 비교적 넓은 범위의 연삭 표면 거칠기 측정이 가능하다.
- (2) 도입된 이론식은 제안된 연삭 표면 거칠기 측정 방법에서 결과를 예측하는데 적합하며 측정장치 설계에

유용하게 활용할 수 있다.

(3) 입사광속과 반사광속의 비를 측정매개변수로 하면 표면 반사율에 영향을 받으므로 표면연소 감지에 효과적이며, 서로 다른 두 반사광속간의 비를 측정매개변수로 하면 표면 거칠기 측정에 더 효과적이다.

(4) 개발된 측정장치는 측정 대상시편으로 사용하였던 약 $0.2 \mu m R_a$ (약 $0.8 \mu m R_{max}$)의 비교적 고운 연삭 표면에서 약 $2.3 \mu m R_a$ (약 $12.5 \mu m R_{max}$)의 비교적 거친 연삭표면까지 우수한 변별력을 보인다.

(5) 개발된 표면 거칠기 측정장치에서 측정된 광속비는 표면이 거칠어지면 단조적인 감소를 하며 표면 거칠기에 대한 절대적인 값을 구하기 위해서는 최소 2개의 표준시편을 이용한 보정이 필요하다.

참고문헌

1. T.R. Thomas, "Surface roughness: The next ten years", Surface Topography, Vol.1, pp.3-9, 1988.
2. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology: part II: optical instruments", Wear, Vol.125, pp.289-308, 1988.
3. E.C. Teague, T.V. Vorburger and D. Maystre, "Light scattering from manufactured surfaces", Annals of the CIRP, Vol.30, No.2, pp.563-569, 1981.
4. P. Beckmann and A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", Pergamon press, Oxford, 1963.
5. L.H. Tanner and M. Fahoum, "A study of the surface parameters of ground and lapped metal surfaces using specular and diffuse reflection of laser light", Wear, Vol. 36, pp.299-316, 1979.
6. D.Y. Yim and S.W. Kim, "Optical roughness measurement of ground surfaces by light scattering", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.30, No. 2, pp.283-289, 1990.
7. G.N. Clarke and T.R. Thomas, "Rough-

- ness measurement with a laser scanning analyser", *Wear*, Vol.57, pp.107-116, 1979.
8. 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, 1985.
 9. M. Shiraishi, "A consideration of surface roughness measurement by optical method", *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.109, pp.100-105, 1987.
 10. M. Shiraishi, "In-process measurement of surface roughness in turning by laser beams", *Trans. ASME Journal of Engineering for industry*, Vol.103, No.2, pp.203-209, 1981.
 11. H.E. Bennett, "Scattering characteristics of optical materials", *Optics Engineering*, Vol.17, pp.480-488, 1978.
 12. T.V. Vorburger, et al., "Optical measurement of the roughness of sinusoidal surfaces", *Wear*, Vol.109, pp.15-27, 1986.
 13. R. Brodmann and G. Thurn, "Roughness measurement of ground, turned and shot peened surfaces by the light scattering method", *Wear*, Vol.109, pp.1-13, 1986.
 14. D.Y. Yim and S.W. Kim, "Light scattering patterns of simulated engineering surfaces when the surfaces have a sinusoidal waviness", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.34, No.1, pp.33-41, 1993.
 15. 김현수, 홍성욱, "기상 계측을 위한 광학적 표면 거칠기 측정센서의 개발", *한국정밀공학회지* 제11권 6호, pp.168-178, 1994.
 16. J.S. Bendat and A.G. Piersol, "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991.