韓國精密工學會 '94年度 秋季學術大會論文集 pp.345~350

연삭가공 표면 거칠기 기상계측 방법

김 현 수[1], 안 국 진[2], 홍 성 욱[3]
금오공대 대학원 한화(주) 금오공대 정밀기계과

- ABSTRACT -

This paper presents a new method based upon the light scattering concept for on-the-machine 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 preformed for the purpose of investigating the possibility of the method as well as determining the experimental condition. Experiment is also performed to show the effectiveness of the proposed method. The theoretical and experimental results show that the proposed method has a potential to identify a wide range of surface roughness and is robust enough to be useful in on-the-machine measurement of roughness of ground surfaces.

1. 서 론

연삭공정은 대체로 마무리작업에서 실행되므로 연삭공정에서의 정밀도는 해당 제품의 질을 결정하는 중요한 요인이다. 특히 표면거칠기는 연삭표면의 정밀도를 나타내는 핵심적인 요소로서 지금까지는 가공완료후 측정을 실행하여 합/부 판정을 하였고 연삭작업의 특성상 원래의 상태로 다시 장착하는 것이 어려워 부적합품을 폐기하는 등 경제적 손실이 많았기 때문에 근래에는 연삭표면에 대한 기상(On the machine)계측의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 그러나 표준적인 방법으로 인정되어온 촉침(Stylus)[1]에 의한 표면거칠기의 측정방법이 기상계측에 부적당하기 때문에 비접촉식 측정방법을 개발하려는 연구가 계속되어 왔다 [2-7]. 그중에서도 측정의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법이 기상계측에 가장 적합한 방법으로 평가되고 있다 [2].

광산란법(Light scattering method)은 표면에 광선을 입사할 때 측정물의 표면이 고울수록 산란이 적어 반사광들이 정반사방향으로 집중되고, 표면이 거칠수록 산란이 커서 난반사 방향으로 분산되는 현상을 이용한 것이다 [2]. 표면거칠기 측정에 대한 광산란 현상의 응용은 Beckmann[3]이 표면의 특정부분에 입사되는 광이 표면거칠기의 영향으로 산란될 때 산란광강도(Intensity; Irradiance)와 거칠기의 관계를 수식화한 후 본격화되었다. 광산란을 응용한 표면거칠기 측정방법으로는 정반사광을 이용하는 방법[4], 난반사광을 이용하는 방법 [5,6], T.I.S 방법[7], 산란각 분포를 이용하는 방법 등이 있다[8].

본연구에서는 광속(Light Flux)측정 방식을 사용하여 표면거칠기를 측정하는 방법에 대한 실용적인 이론식과 새로운 광속비 측정방식을 제안하였다. 표면거칠기의 측정은 정반사방향에 집광렌즈를 두어 정반사광(Specularly reflected light)과 일부의 난반사광(Diffusely reflected light)을 포함하는 광속을 측정하였다. 연삭표면이 정규분포한다는 가정하에 산란광의 광속량을 계산하여 적절한 특성설계를 가능하게 하였다. 측정시 표면의 상태나 외부변동요인에 따른 변동이 적도록 서로 다르게 얻어진 두광속을 나눈 광속비(Light flux ratio)를 측정매개변수로 하는 것을 제안하였다. 실험결과 제작된 측정장치로 부터 얻어지는 광속비는 0.2 μm R_a 에서 2.3 μm R_a까지의 넓은 표면거칠기를 측정할 수 있는 바람직한 특성을 보였으며 장착오차에 대해서도 둔감하여 기상계측방식으로 적합함을 알 수 있었다.

2. 광속(Light Flux)측정에 의한 표면거칠기 측정방법

본연구에서는 레이저광을 표면에 대해 일정한 각도로 입사시켰을 때 정반사방향에 놓인 수광렌즈 구경내에 포착되는 반사광(정반사광과 난반사광 일부)에 대한 광속을 측정할 수 있도록 장치를 구성하였다. 신뢰도를 높이기 위하여 두개의 서로 다른 광속을 구해 두광속간의 비(Light Flux ratio)를 측정변수로 하였다.

연삭표면의 기하학적 단면곡선이 정규분포를 한다고 가정하면 그 미분도 정규분포한다[9]. 따라서 단면곡선에

대한 미분의 확률밀도함수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

$$\theta_s = \tan^{-1} h_s \quad (2)$$

여기서 θ_s 는 표면경사각이다. 따라서 표면경사각의 확률밀도함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(\theta_s) = \frac{1}{\sigma_s\cos^2\theta_s\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}(\frac{\tan\theta_s}{\sigma_s})^2) \quad (3)$$

Fig.1은 식(3)의 확률밀도함수와 측정되는 표면경사각영역(1/2 x유효수광각)을 나타내고 있다. 표면경사각 측정영역은 반사각이 경사각의 2배가 되므로 유효수광각의 1/2이 된다. 입사광이 평행광으로서 수광렌즈 촛점위치의 표면을 중심으로 매우 작은 반경내에 입사된다고 하면 반사광이 수광렌즈를 통해 포착될 확률은 다음과 같다. 즉,

$$\Phi = 2\int_0^{0.5\theta_o} f(\theta_s)d\theta_s \quad (4)$$

여기서 Φ는 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률을, θ_o는 렌즈유효수광각(Fig.3 참조)을 의미한다. 수광부에서 실제 측정되는 반사광속은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_r = C\,\phi_i\,\Phi \quad (5)$$

여기서 ϕ_r, ϕ_i 는 각각 반사광속과 입사광속을 나타내며 C 는 측정장치나 조건등에 따라 결정되는 계수이며 1보다 작은 값이다. 결국 반사광속은 입사광속과 반사광속이 수광렌즈에서 포착될 확률의 곱으로 나타나게 되며 단면곡선 미분의 표준편차와 직접관련을 갖게된다. 단면곡선 미분의 표준편차는 단면곡선과 관련을 갖게 되므로 측정매개변수는 표면거칠기와 관계를 갖는다. 여기서는 단면곡선 미분의 표준편차가 표면거칠기와 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 가정한다 [5].

$$\sigma_s = a + b \log R_a \quad (6)$$

여기서 a, b는 재질 및 공정에 따른 상수이다.

Fig.2는 한 표준연삭시편들에 대해 유효수광각을 변화시키면서 구한 광속을 보여주고 있다. 유효수광각이 커지면 광속의 변화가 완만해지는 것을 확인할 수 있다. 이 그림으로 부터 측정하고자 하는 표면거칠기 범위에서 가장 변별력이 좋은 유효수광각을 결정하여 측정장치를 구성할 수 있다.

실제 측정을 위해서는 광속을 직접 사용하는 것보다는 광원의 변동 등 외적인 변동 요인의 효과를 줄이기 위해 광속비를 측정하는 것이 유리하다. 만일 입사광속을 측정하여 반사광속과의 비를 구한다면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 즉

$$FR_1 = \frac{\phi_r}{\phi_i} = C\Phi \quad (7)$$

따라서 입사광속에 무관하게 일정한 광속비를 얻을 수 있다. 그러나 표면반사율이나 측정상태 등에 관계되는 C 값이 결과에 영향을 주게 되므로 모든 공정에서 보정을 해야하는 문제가 있다. 이같은 특성은 연삭가공시 동일 작업에 투여한다면 문제되지 않으며 연삭표면의 주요결함인 표면연소 등에는 효과적일 수 있다.

한편 두개의 서로 다른 구경을 갖는 렌즈를 통해 집속한 광속을 각각 ϕ_{r1}, ϕ_{r2} 라고 하면 광속비를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$FR_2 = \frac{\phi_{r1}}{\phi_{r2}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (8)$$

여기서 Φ_1, Φ_2는 각각의 렌즈에 의해 반사광이 포착될 확률을 의미한다. 이경우에는 표면상태 등에 의존하는 계수 C가 제거되어 표면거칠기 측정에 보다 효율적일 수 있다. 그러나 이경우에도 측정매개변수가 표면거칠기에 간접적으로 대응되므로 보정이 필요하다.

3. 측정장치 구성 및 표면거칠기 측정

3.1 측정장치의 구성

Fig. 3 은 개발한 표면거칠기 측정장치의 개념도를 보여주고 있다. 사용된 레이저는 4mW급 He-Ne 레이저로 0.8 mm의 빔직경(Beam diameter)을 갖고있으며 파장 λ 는 632.8 nm 이다. 레이저 광을 광섬유의 한쪽 끝단에 집속시켜 원하는 위치까지 이동시킨 후 평행광으로 환원(Collimation)하여 표면에 입사시킨다. 입사광 33%를 광분할기로 분할하여 입사광의 광속을 측정한다. 표면에서 산란된 광을 2개의 평면-볼록렌즈로 받아들이고, 다시 광분할기에서 분할된 33%의 광을 광다이오드를 이용하여 반사광속을 측정한다. 광분할기에서 통과된 나머지 광을 구경이 작은 렌즈를 통해 집속하여 또다른 반사광속을 측정한다. 두 수광렌즈의 유효수광각은 Fig.2의 결과로 부터 넓은 표면거칠기 범위에서 변별력이 좋도록 각각 16.7°, 10° 을 선정하였다. Fig.4는 실제 제작된 표면거칠기 측정장치를 보여주고 있다.

3.2 표면거칠기와 광속비 관계 측정

제안된 측정방식의 특성을 살펴보기 위해 표준시편을 이용하여 광속비와 표면거칠기와의 관계를 구하였다. Fig.5는 FR_1과 표면거칠기와의 관계를 보여주고 있다. 입사각이 클수록 광속비가 높아지는 것을 확인할 수 있으며 측정영역 전체에 걸쳐 일관되고 완만하게 단조감소하는 것을 볼 수 있다. Fig.6은 FR_2 와 표면거칠기와의 관계를 보여주고 있다. 측정범위에서 충분한 변별력을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 선택된 수광렌즈를 사용하여 광속비를 측정하면 실용성이 높을 것으로 생각된다. Figs.5,6에는 각각 이론식(7),(8)로 부터 계산한 결과를 포함하고 있는데 실험결과에 잘 부합되고 있음을 볼 수 있다.

4. 측정장치의 기상계측 특성 평가

4.1 광속비의 시간변화

Fig.7은 동일시편에 인가한 입사광 및 반사광의 광속, 그리고 반사광속을 입사광속으로 나눈 광속비를 보이고 있다. 전원을 가한 초기에 큰폭의 변화를 보이던 입사광속과 반사광속이 일정시간이 경과하면 수렴하지만 여전히 변동성분이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와는 달리 광속비는 비교적 시간에 무관하게 일정한 값을 나타내고 있으므로 측정변수로서 광속비를 택하면 실제조건에서 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

4.2 수직 위치 변동에 따른 광속의 변화

정확한 광속을 측정하기 위해서는 표면으로 부터 수광렌즈의 촛점이 화보되도록 일정한 수직거리가 유지되어야 한다. 그러나 표면거칠기 측정장치의 수직위치 오차가 결과에 큰 영향을 준다면 기상계측장치로서는 적합하지 않으므로 표면거칠기 측정장치에 수직위치오차가 있을 때의 효과를 검토하였다. Fig.8은 측정장치 센서부(입사부와 수광부)를 수직축으로 이동하였을 때의 광속변화를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축 값이 0인 점이 측정장치의 정상위치이다. 결과를 보면 측정장치의 수직위치 변화에 대한 광속의 변화가 충분이 둔감함을 알 수 있다.

4.3 측정장치 각오차에 따른 광속의 변화

측정장치의 장착오차 또는 표면 자체의 파상도(Waviness) 등에 의해 실제 측정해야할 표면과 측정장치 간에는 수직을 이루지 못할 가능성이 많다. 여기서는 측정표면과 측정장치간에 수직을 이루지 못하는 경우, 즉 수광렌즈의 중심이 정반사각에 놓이지 않을 때의 효과에 대해 검토하였다. Fig.9는 측정장치가 수직축에 대해 각오차가 있을 때 광속변화를 측정한 결과이다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 큰 폭의 각오차가 있어도 광속의 변화는 크게 나타나고 있지 않다.

5. 결 론

본 연구에서는 광산란법에 기초하여 산란광의 광속을 측정하여 표면거칠기를 결정하는 방법을 제안하였다. 이론과 실험적인 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 광속측정에 의한 표면거칠기 측정방법은 비교적 넓은 범위의 표면거칠기 측정이 가능하다.

(2) 입사광속과 반사광속의 비를 측정매개변수로 하면 표면연소감지에 효과적이며 서로 다른 두 반사광속의 비를 측정매개변수로 하면 표면거칠기 측정에 더욱 효과적이다.

(3) 개발된 측정장치는 0.2 μm R_a의 비교적 고운 연삭표면에서의 2.3 μm R_a의 매우 거친 표면까지 우수한 변별력을 보인다.

(4) 개발된 측정장치는 측정표면과 유지해야할 수직위치의 편차와 각오차에 대해 비교적 둔감하므로 기상계측방식으로서 바람직하다.

참고문헌

1. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology : part I, stylus instrument", Wear, Vol.125, 1988, pp.271- 288.

2. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology : part II, optical instruments", Wear, Vol.125, 1988, pp.289-308.

3. P. Beckmann and A. Spizzichino, The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, Pergamon press, Oxford, 1963.

4. 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, 1979, pp299-316.

5. 塚田忠夫, 谷村吉久, 非接觸式による精密加工表面の性狀評價, 日本精機學會, 1985.

6. M. Shiraishi, "A consideration of surface roughness measurement by optical method", Trans. ASME, Journal of Engineerig for Industry, Vol.109, 1987, pp100-105.

7. H.E. Bennett, "Scattering characteristics of optical materials", Optics Engineering, Vol.17, 1978, pp480-488.

8. 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, 1990, pp.283-289.

9. J.S. Bendat and A.G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

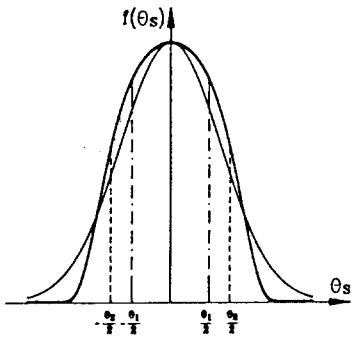

Fig. 1 Probability density function of surface slope and effective angle of detection

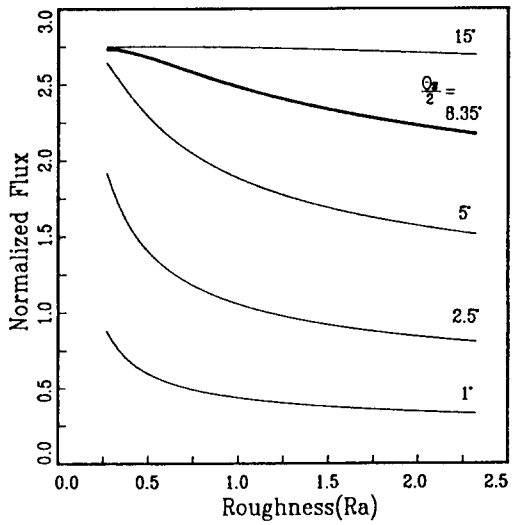

Fig. 2 Change of flux with respect to effective angle of detection

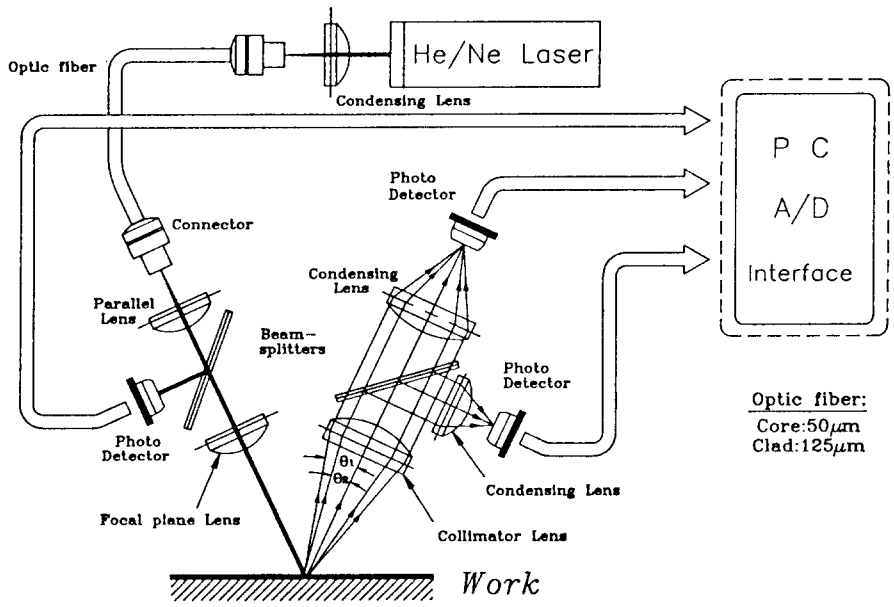

Fig. 3 Schematic diagram of the surface roughness measurement system.

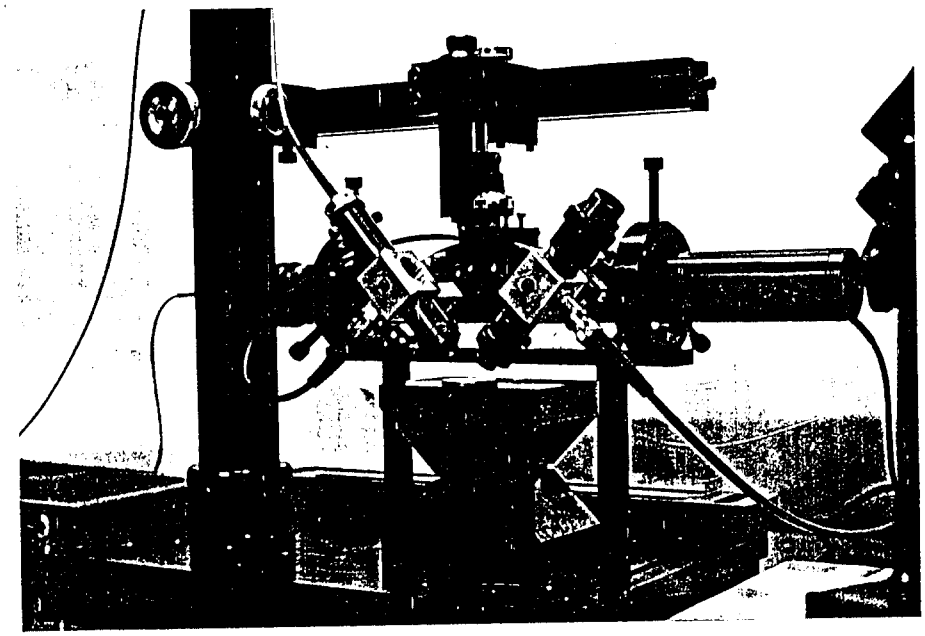

Fig. 4 The surface roughness measurement system.

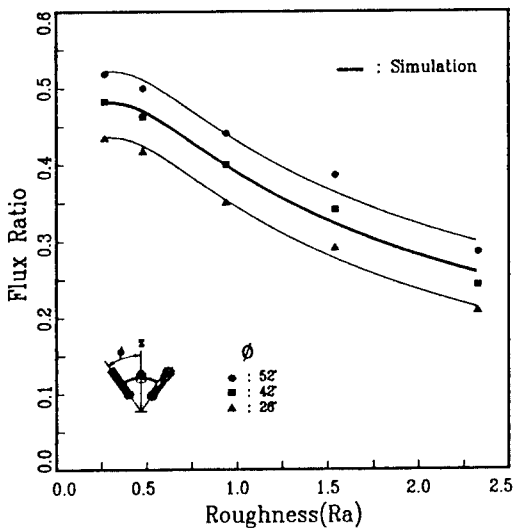

Fig. 5 Flux ratio FR_1 as a function of surface roughness

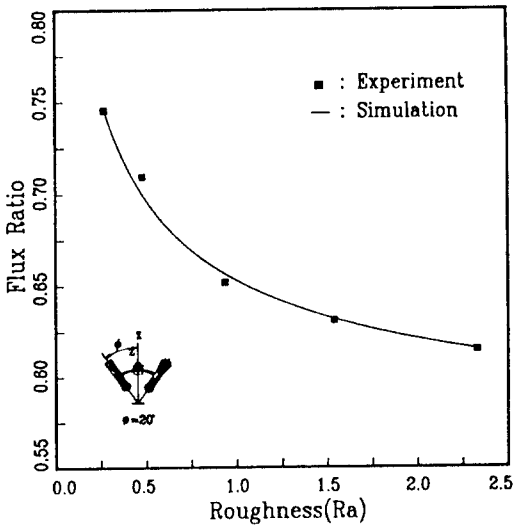

Fig. 6 Flux ratio FR_2 as a function of surface roughness

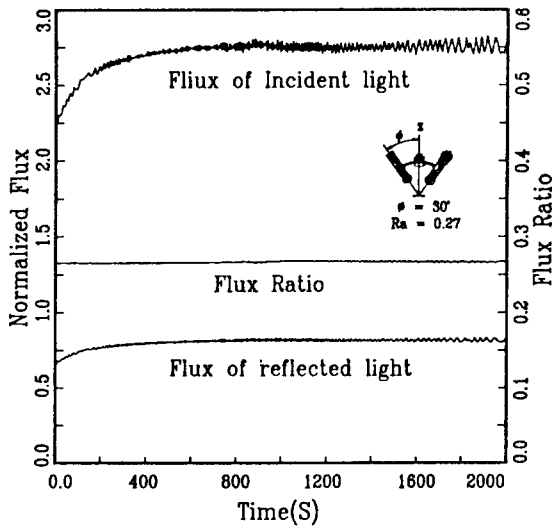

Fig. 7 Variation of incident light flux, reflected light flux, and the flux ratio just after power is on.

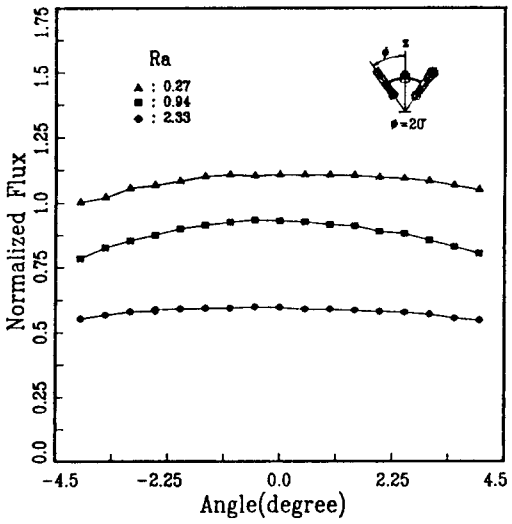

Fig. 9 Flux variation subject to angular deviation of the probe

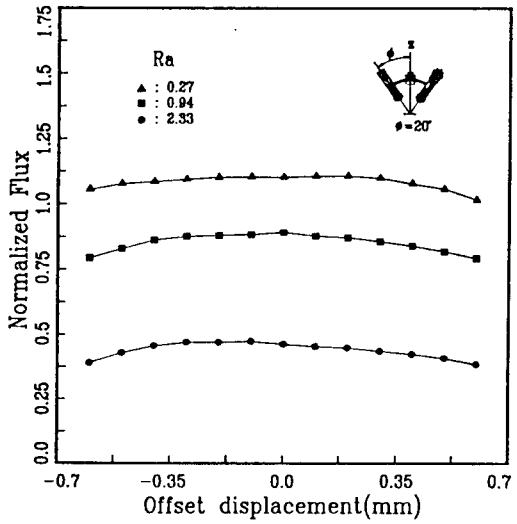

Fig. 8 Flux variation subject to vertical offset of the probe