

접촉식 형상 측정기에 의한 표면 미세 형상 측정시 촉침 반경이 측정오차에 미치는 영향

권기환*, 조남규**

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학과

Effects of stylus tip radius on the measuring error in surface topography measurement by contact stylus profilometer

Ki-Hwan Kwon*, Nahm-Gyoo Cho**

ABSTRACT

This paper describes the effect of the stylus tip size on the measuring error in surface topography measurement. To analyze the distortional effect of an actual surface geometry originating from the finite stylus size, the surface is modeled as a sinusoid and the stylus tip as a circle. The measuring error is defined as the ratio of the standard deviation of a tracing profile and an original profile. It is shown that this measuring error depends on the amplitude and wavelength of an original profile. In this paper, the spectrum analysis is applied to investigate the distortional effect due to the mechanical filtering of the stylus in the frequency domain. and, the cumulative power spectrum is applied to determinate the minimum wavelength limits to be measured with the various stylus tip radius. From these results, a new method to select proper stylus tip radius is proposed.

Key Words : measurement(측정), surface topography(표면 미세 형상), stylus tip radius(촉침 반경)
contact stylus profilometer(접촉식 형상 측정기)

1. 서론

부품의 성능 및 기능을 좌우하는 가공 표면의 미세 형상을 비롯한 표면 성상의 파악 기술은 제품의 개발 및 생산을 위한 주요 기반 기술로 인정되어, 접촉식 및 비접촉식에 의한 측정 기술이 개발되어 사용되고 있다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 접촉식 미세 형상 측정기의 경우, 측정용 스타이러스(stylus)는 썬기형과 원추형 등이 주로 사용되고 있으며, 원추형의 선단 부분은 구면의 형상으로 가공된다. 근년에 들어 이온 스파터링(ion sputtering) 기법 등의 가공 기술이 향상됨에 따라, KS규격이나, ISO규격에서 추천되고 있는 선단 반경 10 μ m, 5 μ m, 2 μ m뿐만 아니라, 0.5 μ m, 0.2 μ m, 0.1 μ m의 제품까지 선보이고 있다.¹⁾ 한편, 접촉식 미세 형상의 측정에는 구동 및 제어의 편의성과 데이터 처리 등에 유리하도록 하기위하여, 일정한 표본 간격을 기준으로 높이 방향의 데이터를 수집하는 래스터 스캔(raster scan) 방식에 의해 표면의 형상을 얻는다.²⁾ 그러나, 이러한 방식에 의한 데이터의 수집은 촉침이 갖는 선단형상의 특성에 의하여 촉침과 시료면의 접촉에 의한 정보 손실이 발생하고, 결과적으로 실제의 시료면 형상과 수집된 데이터 사이에는 측정오차가 발생하게 된다.

Nakamura³⁾는 표면을 여현파로 모델링하여 촉침 반경에 따른 출력 파형의 근사식을 계산하여 거칠기값의 응답성을 조사하였으며, Radhakrishnan⁴⁾는 프로파일을 이산화하여 촉침의 기계적인 필터링 효과로 인한 왜곡현상을 시뮬레이션 하였다. 그 외에, 최근에 이르기까지 촉침의 측정 왜곡현상 및 측정오차의 해석에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.^{5),6),7),8),9),10)} 그러나, 위의 연구노력들에도 불구하고, 표면 프로파일의 형상과 촉침에 의한 측정오차와의 관계 및 촉침의 선정에 따른 측정 데이터의 신뢰영역에 대한 명확한 제시가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 접촉식 표면 미세 형상 측정기에 의한 데이터의 획득에 있어서, 촉침의 선단 반경과 표면의 기하학적 관계로부터 발생하는 측정오차를 분석하고, 누적파워스펙트럼법을 적용하여 촉침에 의해 측정이 가능한 가공면 프로파일의 최소파장한계의 결정법을 제안하고 촉침의 적용한계 및 유용한 데이터의 범위를 제시하고자 하였다.

2. 촉침의 선단 반경과 프로파일의 왜곡

범용의 표면형상곡선 측정기로부터 기계가공 표면 등의 표면형상곡선을 얻고자 하는 경우, 접촉

식 형상측정기의 데이터 수집은 다이아몬드 촉침을 사용하여 시료면의 표면을 접촉하여 이루어진다. 다이아몬드 촉침에는 원추형, 썸기형, 사각뿔형 등이 있으며, 이 중에서 현재 가장 널리 사용되고 있는 형태는 원추형으로, 그 선단부는 구면의 형태를 갖도록 가공되어진다. 따라서, 시료표면의 형상데이터는 구면과 시료면이 접촉하였을 때의 촉침선단부 중심의 위치로서 얻어지게 되며, 결과적으로 이러한 방식에 의한 표면의 측정데이터는 실제의 접촉위치 대신에 촉침 선단부 중심의 궤적을 채택함에 따른 데이터의 왜곡을 수반하게 된다.

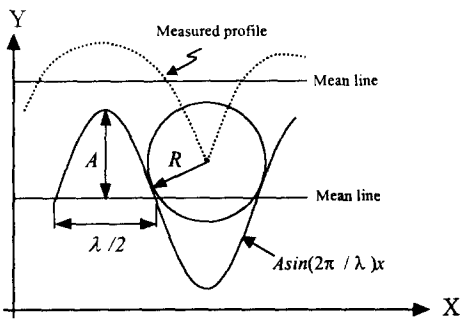


Fig.1 distortional effect due to the stylus tip in a sinusoid

Fig.1은 데이터의 수집을 위한 프로브의 진행 방향을 X축, 시료표면의 높이방향을 Y축으로 하고, 촉침선단부를 진구로 가정하였을 때, 사인파형으로 모델링된 표면형상과 측정 형상곡선에 포함되는 측정 오차의 발생 기구를 보인다.

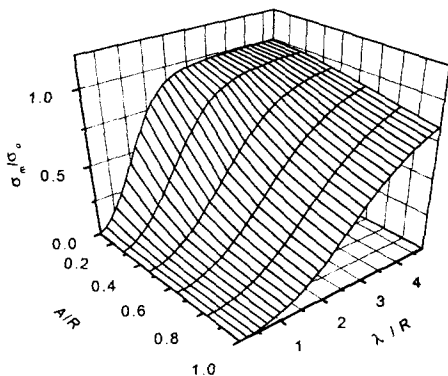


Fig.2 effect of amplitude and period of profile, stylus tip radius

본 연구에서는 촉침의 반경(R), 진폭(A)과 파장(λ)이 측정오차에 미치는 영향을 평가하기 위해, 사인함수를 이용하여 단일 주파수의 프로파일을 생성하여 측정을 수행하였으며, 측정 이후의 표준편차의 변화로 형상 왜곡량을 평가하였

다. fig.2 는 촉침 반경, 진폭, 파장이 오차 발생에 미치는 영향을 평가한 결과이다. 촉침반경에 비해 파장이 짧을수록, 진폭이 커질수록 σ 값의 상대오차가 증가되는 현상으로 나타난다.

3. 측정 데이터를 얻기 위한 알고리즘

임의의 선단반경을 갖는 촉침에 의한 측정결과를 얻기 위해서는 현실적으로 어려움이 있으므로, 표면 형상 데이터로부터 수치적인 방법을 적용하여 촉침에 의한 측정 데이터를 얻었다. fig.3 은 선단 반경, R 의 촉침으로부터 수집되는 측정데이터의 발생원리를 보인다. 반경 R 인 원의 하반구의 방정식을 $R(x)$ 라 하고, 큐빅 스플라인(cubic spline)보간법을 적용하여 주어진 이산 데이터의 구간마다 3차 다항식의 연속함수로 보간하여 연속데이터화된 시료 표면의 프로파일 식을 $f(x)$ 라고 하면 x 좌표축상의 임의의 한 점 x_0 에서의 실제 접촉점은 구간 $[x_0-R, x_0+R]$ 사이에 존재한다. 접촉위치에서의 원의 중심좌표의 산출을 위해

$$F_i(x) = R_i(x) + f_i(x) \quad (1)$$

라고 두면, 접촉점에서 $F_i(x)$ 값은 $[x_0-R, x_0+R]$ 의 구간에서 최대값을 갖는다. 따라서, 최대값 $F_i(x)$ 를 갖는 x_0 점을 수치계산에 의한 방법으로 탐색함으로써 얻을 수 있다.

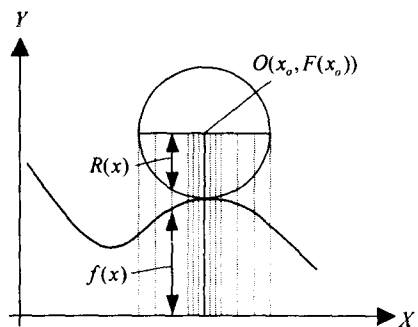


Fig.3 Generation of the measured data profile

4. 시뮬레이션 측정 실험을 위한 가공면 프로파일의 생성

연삭면(ground surface)과 연마면(lapped surface) 대상으로, 실제의 측정에는 반경 $2\mu\text{m}$ 의 다이몬드 촉침에 의해 측정압 70mf 로 측정하였으며, 표본 간격은 $0.75\mu\text{m}$, 측정 데이터의 개수는 4096개의 측정 데이터를 얻었다. 한편, 접촉식 형상 측정기에 의한 표면 형상 측정시, 촉침의 선단 반경을 $2\mu\text{m}$ 로 측정하였기 때문에, 촉침의 측정간격에 의하여 고주파 성분의 진폭 형상이 감소한다.

본 연구에서는 고주파 영역의 형상 데이터를 복원하는 방법으로, 측정전의 표면 형상이 자기 유사성을 갖는 프랙탈(fractal)면이라 가정하였다. 일반적으로, 프랙탈 표면의 복잡성(irregularity)을 정량화 하는 파라미터로 프랙탈 차원(fractal dimension)이 이용된다. 프랙탈 차원은 표면 프로파일의 파워 스펙트럼이 log-log축 상에서 파워(Power)와 주파수(frequency)가 일차적인 선형관계로 나타날 때, 최소제곱법을 적용하여 얻어진 직선의 기울기로부터 계산되며, 직선의 기울기가 완만할수록 프랙탈 차원은 증가하며, 프로파일의 형상이 더 복잡하다는 것을 의미한다.^{11),12)}

fig.4는 2 μm 의 선단반경을 갖는 촉침에 의해 측정된 연삭 가공면의 파워스펙트럼을 log-log축 상에서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 고주파 영역에서 그 기울기가 급격하게 감소하는데 이는 촉침의 선단반경에 의해 고주파 영역의 형상성분이 측정되지 못하거나 진폭이 감소하고 있음을 나타낸다. 그래프에 나타난 v_i 는 프로파일의 파워 스펙트럼을 최소제곱법으로 선형화 하였을 경우 직선과 파워간의 변위를 나타낸 것이며, w_i 는 가로축의 간격이 동일하지 않아 발생하는 오차를 제거하기 위해 적용된 가중치이다. 두 직선의 교점을 n_c 라고 할 때 직선과 파워 스펙트럼간에 발생하는 총오차를 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 교점 n_c 가 변함에 따라 총오차의 크기가 변하게 된다.

$$\text{Total error} = \sum_{i=1}^{n_c} v_i w_i + \sum_{n_c}^N v_i w_i \quad (2)$$

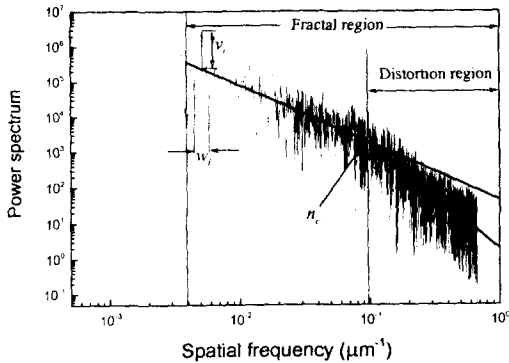


Fig.4 Power spectrum of ground surface profile measured by contact stylus profilometer with($R=2\mu\text{m}$)

본 연구에서는 총오차의 크기가 최소가 되는 지점의 n_c 를 경계주파수(boundary frequency)라고 정의하였으며, 이 지점을 촉침의 선단반경에 의해 고주파 영역의 형상성분이 감소되기 시작하는 주파수라고 정의하였다. fig.5의 그림에서 보

는 바와 같이, 전체영역의 파워스펙트럼 중 경계주파수부터 나이퀴스트 주파수까지의 파워스펙트럼을 프랙탈 영역에 대하여 기울기가 일정하게 되도록 조정하고, 이것을 다시 Fourier 역변환하여 고주파성분의 형상이 복원된 시뮬레이션용의 가공면 프로파일을 얻었다.

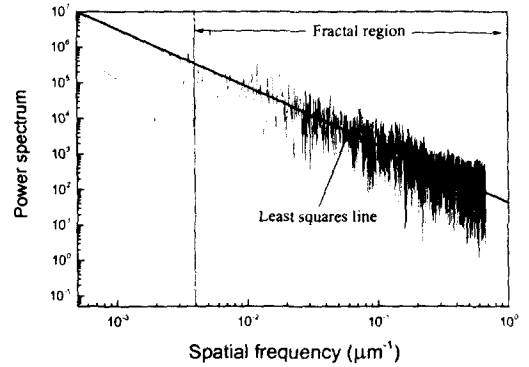
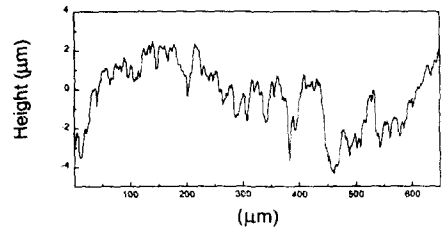
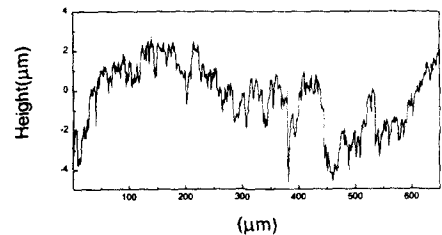


Fig.5 Power spectrum of generated ground surface profile

fig.6은 선단반경, 2 μm 의 촉침을 사용하여 측정된 프로파일(a)과 고주파 형상성분이 재생된 연삭 가공면 프로파일(b)의 일부분을 보인다. 본 연구에서는, 재생된 가공면 프로파일을 대상으로, 3장의 측정 알고리즘을 적용하여 촉침 반경의 변화에 따른 시뮬레이션 측정 실험을 수행하였다.



(a) Ground surface profile measured by contact stylus profilometer with($R=2\mu\text{m}$)



(b) Generated ground surface profile

Fig.6 Measured surface profile(a) vs. generated new profile(b)

5. 결과 분석 및 고찰

5.1 누적파워스펙트럼을 이용한 유용한 측정 데이터의 경계영역 결정

누적파워스펙트럼(cumulative power spectrum)은 표면 프로파일의 스펙트럼 파워를 최소 주파수부터 나이퀴스트 주파수까지 누적하여 총파워로 정규화하여 표현한 값이며, 누적 파워의 값이 0.95(총파워의 95%)가 되는 지점의 주파수를 프로파일이 함유하고 있는 최대 주파수 성분이라고 정의한다.^{13),14),15)}

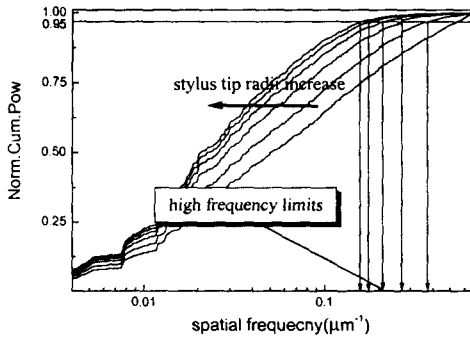


Fig.7 The high frequency limits of measured data according to stylus tip radius R in cumulative power spectrum graph

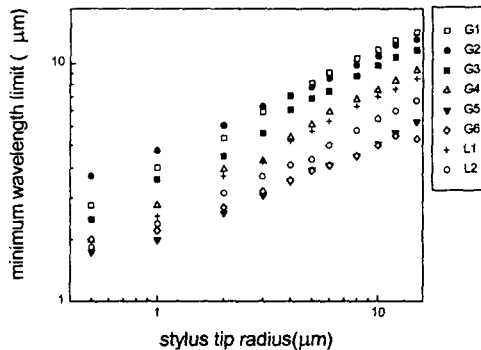


Fig.8 The relationship between stylus tip radius and minimum wavelength

Fig.7은 누적 파워 스펙트럼 그래프를 이용하여 다양한 선단반경에 따라 측정의 의해 측정이 가능한 최소파장한계(minimum wavelength limit)를 결정하는 방법을 개략적으로 나타낸 그림이다. Fig.7에서 보는 바와 같이, 측정의 선단반경이 증가할수록 고주파 성분의 형상이 사라지게 되어 누적파워가 0.95가 되는 지점의 주파수가 저주파 쪽으로 진행되고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 누적

파워가 0.95(총파워의 95%)인 지점에서의 주파수를 측정 프로파일이 포함하고 있는 최대 주파수 성분이라고 정의되므로, 이때의 파장을 측정의 의해 측정이 가능한 최소파장한계라고 정의하였다.

Fig.8은 연삭면(G1,G2,G3,G5,G6), 연마면(L1,L2),에 대하여 측정의 선단반경이 0.5μm,1μm,2μm,3μm,4μm,5μm,6μm,8μm,10μm,12μm,15μm 인 경우, 측정의 의해 측정이 가능한 최소파장한계의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이, 측정 반경의 증가함에 따라 최소파장한계가 점차 증가하고 있으며, log-log축 상에서 이들의 관계가 선형에 가까운 경향을 보이고 있다.

5.2 가공면의 표면 거칠기 파라미터와 유용한 측정 데이터의 경계영역

Fig.9는 측정전 가공면 프로파일의 표준편차, σ_0 와 측정 선단반경, R의 변화에 따른 측정이 가능한 최소파장한계의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig.9의 x축은 σ_0 를 R로 정규화시켜 로그를 취하여 나타내었으며, y축은 최소파장한계, λ_{limit} 를 R에 대하여 정규화된 값을 나타내고 있다. 그림에 나타난 굵은 실선은 주어진 데이터에 대한 근사 곡선을 나타내며, 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda_{limit}/R = 3.3727(\sigma_0/R)^{0.4791} \quad (3)$$

식(3)의 관계로부터 측정전 가공면 프로파일의 표준편차와 측정의 선단 반경의 크기를 알 경우, 측정의 의해 측정이 가능한 최소파장한계를 결정할 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 예측에 의하여 최소경계파장의 추정이 유용하며, 이를 바탕으로 표면 미세 형상 측정시, 얻어진 측정 데이터의 분석을 위한 데이터의 경계영역과 이에 상응하는 측정 반경의 결정 및 측정 시료의 가공방법과 표면 거칠기에 따른 측정 조건의 선정이 가능함을 알 수 있다.

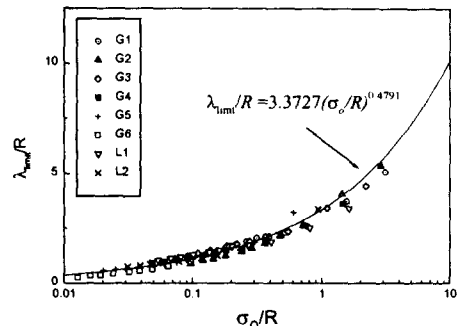


Fig.9 Relation between the standard deviation of original surface profile(σ_0) and minimum wavelength limit(λ_{limit})

6. 결론

접촉식 형상 측정기에 의한 표면 미세 형상 측정시 측정선단반경에 의한 영향을 분석하기 위하여 수행된 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 측침에 의한 미세 형상 측정시 측정대 의한 오차의 발생기구를 분석하고, 프로파일의 진폭과 파장이 측정에 의해 발생하는 진폭 파라미터의 오차와 상관이 있음을 확인하였다.
2. 누적 파워스펙트럼을 이용하여 다양한 선단반경에 따라 측침에 의해 측정이 가능한 가공면 프로파일의 최소파장한계(minimum wavelength limit)의 결정법을 제안하였으며, 유용한 측정 데이터의 경계영역을 결정할 수 있음을 확인 하였다.
3. 측정전 가공면의 표준편차와 측침선단 반경에 따른 최소파장한계와 관계를 명확히 하였다.

이러한 관계로 결과로부터, 예측에 의하여 최소 경계파장의 추정이 유용하며, 표면 미세 형상 측정시, 얻어진 측정 데이터의 분석을 위한 데이터의 경계영역과 이에 상응하는 측침 반경의 결정 및 측정 시료의 표면 거칠기 파라미터에 따른 측정 조건의 선정이 가능하다.

참고문헌

1. ISO 4288-1985, "Rules and procedures for the measurement of surface roughness using stylus instruments"
2. 趙 南圭, "二次元及び三次元表面微細凹凸測における試料姿勢補正に關する研究," 1994年度博士學位論文(東京工業大學)
3. Nakamura T., "On deformation of surface roughness curves caused by finite radius of stylus tip and tilting of stylus holder arm," Bull. Jap. Soc. Prec. Eng., Vol. 1, pp. 240~248, 1966.
4. Radhakrishnan, V. , "Effect of stylus radius on the roughness values measured with tracing stylus instruments," Wear, Vol. 16, pp. 325~335, 1970.
5. J.I. McCool., "Assesment the effect of stylus tip radius and flight on surface topography measurements," Transactions of the ASME Tribology, Vol. 106, pp. 202~209, 1984.
6. Ibrahim Elewa and Monir M. Koura, "Importance of checking the stylus radius in the measurement of surface roughness," Wear, Vol. 109, pp. 401~410, 1986.
7. N. Anbari, Syria, Ch. Beck, H. Trumpold, "The influence of surface roughness in dependence of

- the probe ball radius with measuring the actual size," German Demographic Republic, Vol. 19, pp. 577~580, 1990.
9. Vladimir Ya. Mendeleyev, "Dependence of measuring errors of rms roughness on stylus tip size for mechanical profilers", Applied Optics, Vol.36, No.34, pp9005~9009, 1997.
10. 조남규, 이종혁, 최만용, "표면미세형상 측정을 위한 접촉식 형상 측정기의 오차 보정," 한국공작기계학회지, 제 8권 1호, pp. 126~134, 1999.
11. A. Majumdar and C.L.Tien, "Fractal Characterization and simulation of rough surfaces," Wear, Vol. 136, pp. 313~327, 1990.
12. L.He., and J. Zhu., "The fractal character of processed metal surfaces," Wear, Vol. 208, pp. 17~24, 1997.
13. T.Y.Lin, L.Blunt and K.J. Stout, "Determination of proper frequency bandwidth for 3D topography measurement using spectral analysis," Wear, Vol. 166, pp. 221~232, 1993.
14. W.P.Dong, E.Mainsah, and K.J.Stout, "Determination of appropriate sampling conditions for three-dimensional micro topography measurement", Int.J.Mach. Tools Manufact., Vol.36, No.12, pp.1347~1362, 1996
15. Pawel Pawlus, "Change of cylinder surface topography in the initial stage of engine life," Wear, Vol. 209, pp.69~83, 1997.