

# 촉침에 의한 표면 거칠기 측정 오차 해석

조남규\*, 권기환\*\*

## Analysis of Measuring Error of Surface Roughness by Contact Stylus Profilometer

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

### ABSTRACT

This paper describes the effect of the stylus tip size on the shape 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 magnitude of this distortion is defined as the ratio of standard deviation, and this is expressed as an analytic function of the stylus tip radius and the geometrical parameter of a sinusoid. In this paper, the spectrum analysis of the profile 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 proposed to assess the shape error of measured data according to the various stylus tip sizes. From these results, a new method to select proper stylus tip radius is proposed

**Key Words** : measurement(측정), surface roughness(표면 거칠기), stylus profilometer(촉침식 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 췌기형과 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  $10\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{m}$ 뿐만 아니라,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $0.2\mu\text{m}$ ,  $0.1\mu\text{m}$ 의 제품까지 선보이고 있다.<sup>1)</sup> 접촉식 미세 형상 측정기는 촉침이 표면을 접촉하며, 일정한 표본 간격을 기준으로 높이 방향의 데이터를 수집하는 래스터 스캔(raster scan) 방식에 의해 표면의 형상을 얻는다.<sup>2)</sup> 따라서, 표면의 형상 데이터는 이러한 구면과 표면이 접촉하였을 때, 선단부의 접촉점이 아닌 중심위치의 궤적을 형상 정보로 채택함에 따른 데이터의 왜곡이 발생한다. Nakamura<sup>3)</sup>는 표면을 여현파로 모델링하여 촉침반경에 따른 출력 파형의 근사식을 계산하여 거칠기값의 응답성을 조사하였

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

으며, Radhakrishnan<sup>4)</sup>는 프로파일을 이산화하여 측정의 기계적인 필터링 효과로 인한 왜곡현상을 시뮬레이션 하였다. 그 외에, 최근에 이르기까지 측정의 측정 왜곡현상 및 측정오차의 해석에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>5),6),7)</sup> 그러나, 위의 연구노력들에도 불구하고, 표면 프로파일의 형상과 측침에 의한 측정오차와의 관계 및 측침의 선정에 따른 측정 데이터의 신뢰영역에 대한 명확한 제시가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 접촉식 표면 미세 형상 측정기에 의한 측정데이터의 획득에 있어서, 측침의 선단 반경과 표면의 기하학적 관계로부터 발생하는 형상오차를 해석하고, 공학표면의 미세 형상 계측에 있어서 측침의 영향으로 인한 측정 프로파일의 왜곡량을 예측하여 측침의 적용한계 및 유용한 데이터의 범위를 제시하고자 하였다.

## 2. 오차 모델에 의한 원인 규명 및 분석

### 2.1 측침에 의한 오차 발생 기구

표면의 프로파일을 정현파로 가정하여 모델화하였다. 진폭이 A이고 파장이 λ 인 정현파형의 표면을 선단반경 R의 측침으로 측정하였을 때, 측침에 의한 오차 발생 기구를 Fig.1에 보인다. 측정에 의한 형상 왜곡량의 변화를 평가하기 위하여, 측정에 의한 프로파일의 평균선을 정현파의 평균선에 일치시킨 후, 표준편차의 비로 측정에 의한 왜곡량의 변화를 평가하였다.

$$G = \frac{\sigma_{measured}}{\sigma_{original}} \tag{1}$$

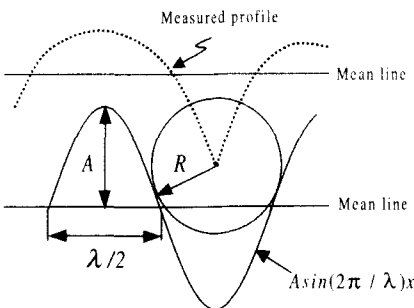


Fig. 1 Distortional effect due to the stylus tip in a sinusoid

### 2.2 진폭, 파장, 입출력비, G의 함수적 관계

Fig.2는 진폭과 파장을 측침 반경 R로 무차원화하여, 다양한 진폭과 파장변화에 따른 G값의 변화를 보이고 있다. x축을 R/λ로 하고, A/R의 변화에 따른 G값의 결과를 log-log축상에 나타낼 때, 근사 곡선(fitting curve)은 다음과 같이 식(2)로 표현된다.

$$G \approx \frac{1}{\sqrt{1+k(R/\lambda)^4}} \tag{2}$$

여기서, k는 곡선의 모양을 결정하는 파라미터로 A/R이 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.8일 때, 대응되는 k값은 1.5, 2.05, 2.8, 3.82를 보이고 있다. 즉, A/R이 0.1에서 2 배씩 증가함에 따라, k값은 1.5에서부터 약 1.366배씩 증가함을 확인할 수 있으며, 따라서 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$k = 1.5 \times 1.366^{\log_2(10 \frac{A}{R})} \tag{3}$$

그러므로, 식(2),식(3)을 이용하여 정리하면, G는 A/R과 R/λ의 함수로 다음과 같이 정리된다.

$$\therefore G(A/R, R/\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1+317(A/R)^{1.85}(R/\lambda)^4}} \tag{4}$$

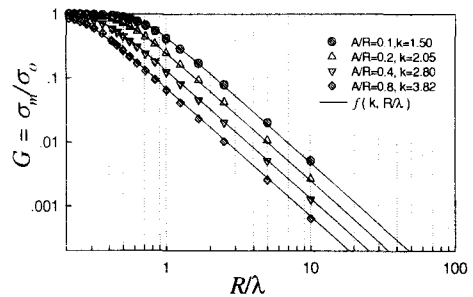


Fig. 2 Relationship between G and A/R, R/λ

또한, 본래의 프로파일로부터 구해지는 σ 값에 대한 측정작업에 의하여 얻어지는 프로파일의 σ 값의 상대오차는 식(5)의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{relative error} &= \left( \frac{\sigma_o - \sigma_m}{\sigma_o} \right) \times 100 \% \\ &= (1-G) \times 100 \% \end{aligned} \tag{5}$$

Fig.3은 식(4)로부터 R/λ 와 A/R에 따른 입출력비 G의 특성을 나타내고 있다. Fig.3에서 보는 바와

값이 측정시 측정체에 의한 기계적인 효과는 일종의 저역 필터(low-pass filter)로서의 특성을 보인다. 이러한 측정의 입출력 특성은 측정시  $\sigma$  값의 상대오차가 측정반경에 비하여, 파장이 짧아질수록, 그리고 진폭이 커질수록 증가되는 현상으로 나타난다.

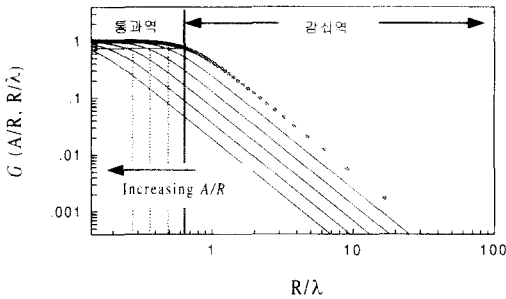


Fig. 3 lowpass filtering effect of stylus

### 2.3 스펙트럼 분석

가 성립하고, 식(4)의 관계로부터 진폭이 A이고, 파장이  $\lambda$  인 정현파에 대하여 반경이 R인 측정으로 측정된 프로파일의 스펙트럼  $Ps_m$ 은 다음과 같이 식 (7)로 정리된다.

$$G = \frac{\sigma_{measured}}{\sigma_{original}} = \frac{Ps_m}{Ps} \quad (6)$$

$$Ps_m = G^2 \cdot Ps = \frac{1}{1 + 317(A/R)^{1.85}(R/\lambda)^4} Ps \quad (7)$$

Fig.4는 본 연구에서 수행된 스펙트럼 분석 과정을 나타내고 있다. 식(7)의 관계로부터, 실제 표면 프로파일이 다양한 파장과 진폭성분을 갖는 정현파의 중첩으로 구성되어 있다고 가정하고, Fig.4의 순서를 적용하여 다양한 크기의 측정 반경에 따른 파워 스펙트럼 변화를 예측하였으며 수치적 방법에 의한 측정 실험을 통하여 비교· 분석하였다.

### 3. 측정 실험을 위한 프로파일의 생성

선삭면(turned surface), 연삭면(ground surface), 연마면(lapped surface)을 대상으로, 반경  $2\mu\text{m}$ 의 측침을 사용하여, 표본 간격이  $1\mu\text{m}$ 인 4096개의 측정데이터를 얻었다. 측침식 표면거칠기에 의한 측정시, 측침의 선단반경을  $2\mu\text{m}$ 로 측정하였기 때문에, 측침의 측정한계로 인하여 고주파 성분의 진폭 형상이 감소한다. 본 연구에서는 고주파 영역의 형상 데이터를 복원하는 방법으로, 측정전의 표면 형상이 자기상사성을 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.<sup>8),9)</sup>

Fig.5의 (a)에서 보는 바와 같이, 고주파 영역에서 그 기울기가 급격하게 감소하는데 이는 측침의 선단반경에 의해 고주파 영역의 형상성분이 측정되지 못하거나 진폭이 감소하고 있음을 나타낸다. 따라서, 고주파 형상 성분이 복원된 프로파일을 얻기

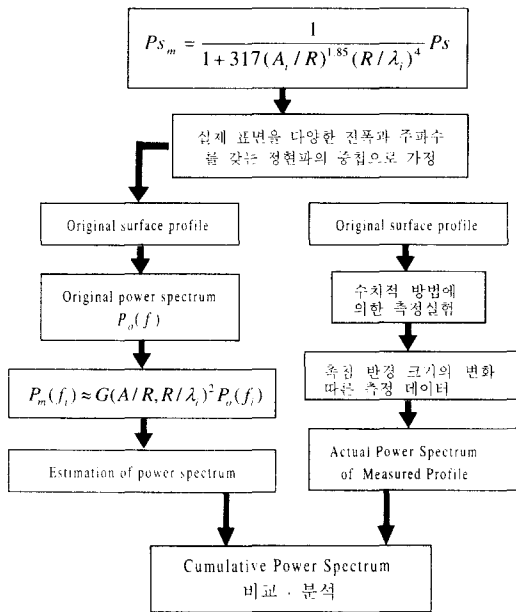
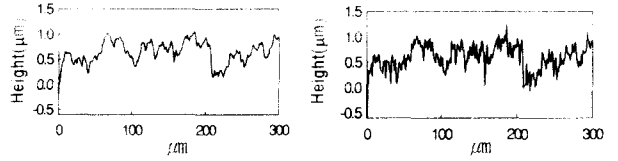


Fig. 4 The process of spectrum analysis

N개의 이산 데이터로 표현되는 임의의 주파수  $f$  ( $=1/\lambda$ )와 진폭 A의 정현파를 Fourier 변환하여 얻어진 스펙트럼의 파워를  $Ps$  라고 하면, 파시발(Parseval)정리에 의해 입출력비 G 는 식(6)의 관계

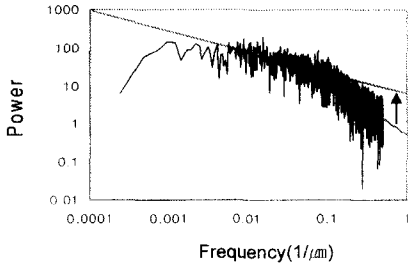
위해 Fig.5의 (b) 에서 보는 바와 같이 측정된 프로파일로부터 얻어진 파워 스펙트럼이 log-log 축상의 모든 주파수 영역에 대하여 기울기가 일정하게 되도록 조정하였으며, 이것을 다시 Fourier 역변환하여 고주파성분의 형상이 복원된 시뮬레이션용의 프로파일을 얻었다.



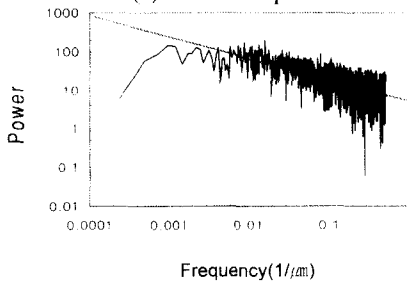
(a) turned surface profile

Fig. 6 Measured surface profile(left) vs. generated new profile(right)

본 연구에서는, 재생된 프로파일을 대상으로, 임의의 선단반경을 갖는 축침식 측정기에 의한 형상 곡선을 얻기 위하여 큐빅 스플라인(cubic spline)보간법을 적용하여 주어진 이산 데이터의 구간마다 3차 다항식의 연속함수로 보간하여 연속데이터화가 수행되었으며, 축침의 선단 형상을 반경 R인 원으로 가정하고, 표면 형상곡선상에 원이 접했을 때, 원과 곡선과의 기하학적 관계로부터 원의 중심좌표를 수치적인 탐색방법<sup>10),11)</sup>으로 산출하였으며, 이로부터 축침 반경의 변화에 따른 각각의 측정데이터를 얻었다.



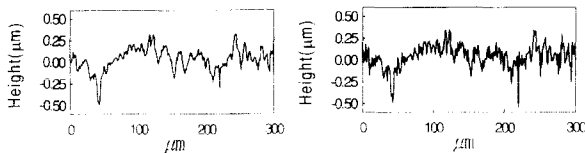
(a) measured profile



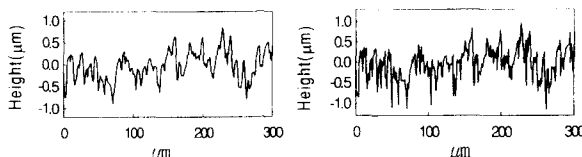
(b) generated profile

Fig. 5 Power spectrum of surface profile

Fig.6은 연삭면, 연마면, 선삭면에 대하여, 축침을 사용하여 측정된 프로파일(왼쪽)과 고주파 형상성분이 재생된 프로파일(오른쪽)의 일부분을 보인다.



(a) ground surface profile



(b) lapped surface profile

#### 4. 결과분석 및 고찰

##### 4.1 축침반경에 따른 누적 파워스펙트럼

누적 파워스펙트럼(cumulative power spectrum)은 표면 프로파일의 스펙트럼 파워를 최소 주파수부터 나이퀴스트 주파수까지 누적하여 총파워로 정규화하여 표현한 값이며, 누적 파워의 값이 0.95(총 파워의 95%)가 되는 지점의 주파수를 프로파일이 함유하고 있는 최대 주파수 성분이라고 정의한다.<sup>12),13)</sup> 본 연구에서는 이러한 누적 파워스펙트럼의 특성을 적용하여 축침의 반경 변화에 따른 측정 프로파일의 누적 파워스펙트럼을 분석하였으며, 앞에서 연삭면과 연마면, 그리고, 선삭면으로부터 얻어진 재생된 표면 프로파일에 대하여 적용되었다. Fig.7~9는 재생된 세가지 가공면에 대하여 각각 축침 반경이 0.8μm, 2μm, 4μm, 6μm, 8μm 인 경우, 측정에 의한 누적 파워스펙트럼의 변화추이를 보이고 있다. 측정 실험에서 얻어진 스펙트럼과 예측된 스펙트럼이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 축침 반경의 크기가 증가함에 따라 누적파워가 0.95가 되는 지점의 주파수가 저주파쪽으로 진행되고 있음을 볼 수 있다.

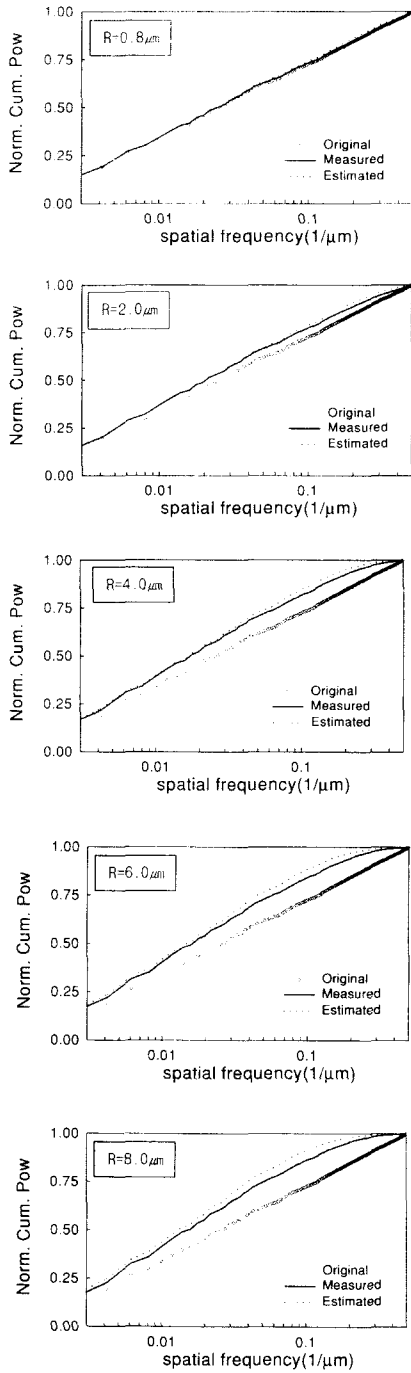


Fig. 7 The variation of cumulative power spectrum according to tip radius R in ground surface

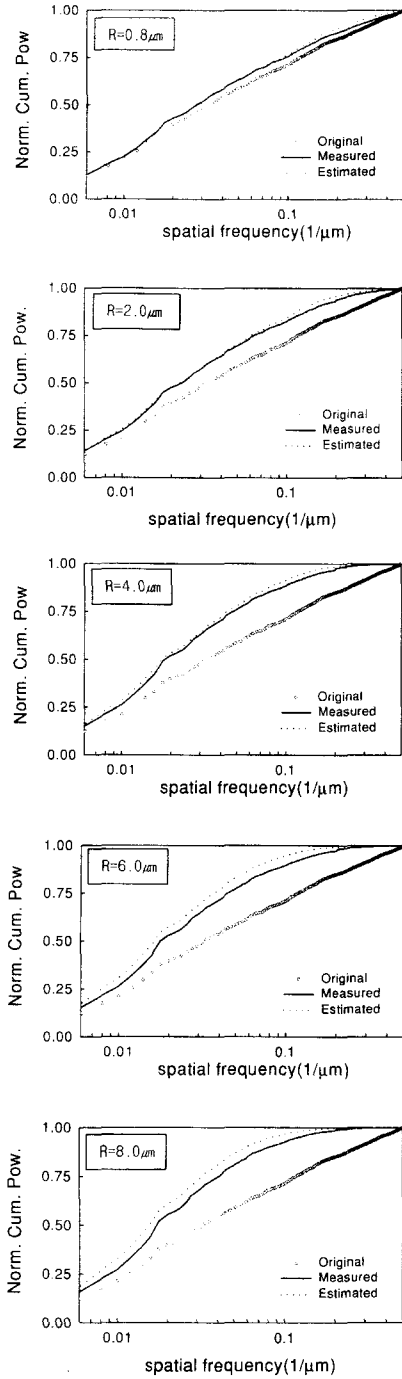


Fig. 8 The variation of cumulative power spectrum according to tip radius R in lapped surface

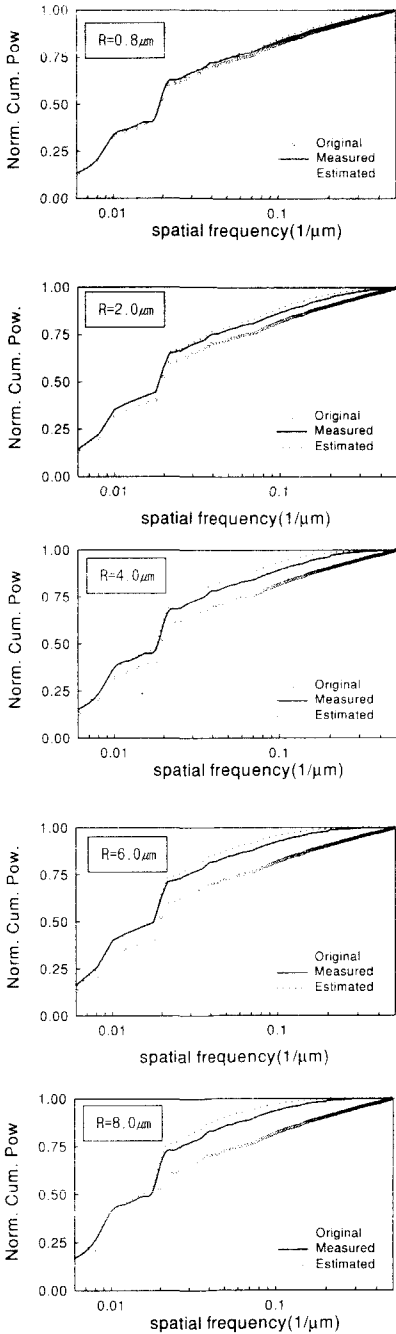


Fig. 9 The variation of cumulative power spectrum according to tip radius R in turned surface

#### 4.2 축침 반경에 따른 유용한 측정 데이터의 경계영역 결정

Fig.10은 누적 파워 스펙트럼 그래프를 이용하여 축침 선단 반경에 따른 측정 프로파일의 최소 파장길이를 결정하는 방법을 개략적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 누적 파워가 0.95(총 파워의 95%)인 지점에서의 파장을 측정 프로파일이 포함하고 있는 최소 파장이라고 정의됨으로, 본 연구에서는 연삭면, 연마면, 선삭면에 대하여 측정된 측정 프로파일의 누적 파워스펙트럼을 이용하여 축침에 의하여 측정이 가능한 파장의 한계를 검토하였다.

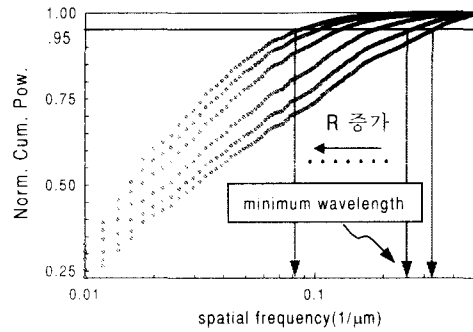


Fig. 10 The high frequency limits of measured data according to stylus tip radius R in cumulative power spectrum graph

Fig.11은 연삭면, 연마면, 그리고 선삭면에 대하여 축침 반경과 최소 파장(minimum wavelength)과의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이, 축침 반경의 증가와 함께 측정 프로파일의 최소 파장이 점차 증가하고 있으며, 이들의 관계가 선형에 가까운 경향을 보이고 있다. 실제 측정으로부터 얻어진 최소 파장과 비교해 볼 때, 예측된 길과로부터 얻어진 값이 실제 측정치 보다, 측정 프로파일의 최소 파장을 더 크게 예측함을 관찰할 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 축침 반경의 결정 및 측정 시료의 가공방법에 따른 측정 조건의 선정이 가능함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 표면 미세 형상 측정시 축침의 의한 측정 프로파일의 형상 오차를 해석하기 위하여 시뮬레이션 모델을 통한 원인 규명 및 스펙트럼 분석을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1 축침에 의한 미세 형상 측정시 측정에 의한 오차의 발생기구를 분석하고, 정현파를 대상으로 하여 축침의 선단반경과 측정 오차와의 함수적 관계를 파악하여 오차량 예측 기법을 제안하였다.
2. 누적 파워스펙트럼을 이용하여 데이터 분석시, 측정 데이터 영역의 경계와 이에 상응하는 축침 반경의 선정이 가능함을 제시 하였다.

### 후기

본 연구는 99년도 한양대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 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関する研究," 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

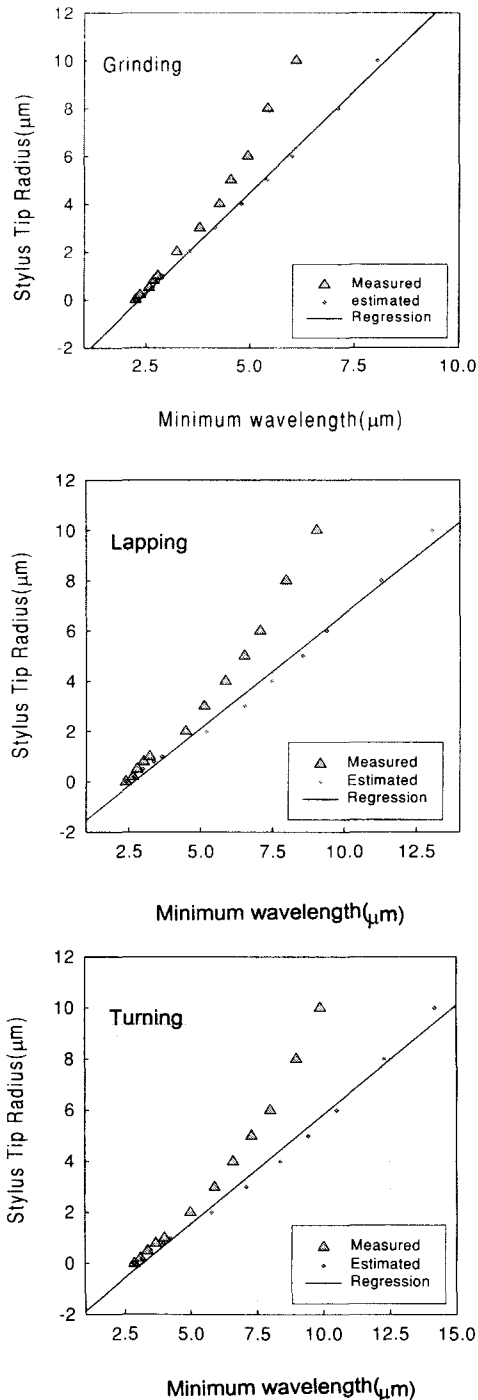


Fig. 11 The relationship between stylus tip radius and minimum wavelength

- 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.
  8. A. Majumdar and C.L.Tien, "Fractal Characterization and simulation of rough surfaces," *Wear*, Vol. 136, pp. 313~327, 1990.
  9. L.He., and J. Zhu., "The fractal character of processed metal surfaces," *Wear*, Vol. 208, pp. 17~24, 1997.
  10. 李鍾赫, "표면 미세 형상 측정에 있어서 촉침에 의한 오차의 보정," 漢陽大學校 大學院 碩士學位論文, 1997.
  11. 조남규, 이종혁, 최만용, "표면미세형상 측정을 위한 접촉식 형상 측정기의 오차 보정," 한국공작기계학회지, 제 8권 1호, pp. 126~134, 1999.
  12. 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.
  13. Pawel Pawlus, "Change of cylinder surface topography in the initial stage of engine life," *Wear*, Vol. 209, pp. 69~83, 1997.