

# 표면미세형상측정을 위한 접촉식 형상측정기의 오차 보정

조남규\*, 이종혁\*\*, 최만용\*\*\*

## An Error Compensation in Rough Surface Measurement by Contact Stylus Profilometer

N. G. Cho\*, J. J. Lee\*\*, M. Y. Choi\*\*\*

### Abstract

In this paper, a new error compensating technique for form-error compensation of rough-surface profile obtained by contact stylus profilometer is proposed. By the method, the real contact points of rough surface and diamond stylus can be estimated and the measured profile data corrected. To verify the compensation effect, the properties(Ra, RMS, Kurtosis, Skewness) of measured profile data and compensated data were compared. And, the cumulative RMS slope was proposed to assess the compensation effect of upper area of profile. The results show that the measuring error could be compensated very well in amplitude parameters and in proposed cumulative RMS slope by the developed form-error compensating technique.

Keyword : surface roughness(표면 거칠기) stylus(촉침), profilometer(형상측정기) measurement(측정), error compensation(오차보정)

### 1. 서론

미세형상의 측정시스템은, 현재 가장 널리 사용되고 있는 접촉식과 근년에 들어 연구개발 및 수요가 급증하고 있는 비접촉식 측정시스템으로 크게 나뉘어진다.<sup>1), 2), 3)</sup>

<sup>4)</sup> 비접촉 방식에 의한 측정시스템은, 레이저간섭계 방식, 임계각식, 반사광의 강도측정식, 광 절단식, 스펙클을 이용한 방식 등, 그 다양성과 빠른 측정 속도, 그리고 현장 적용상의 편리함 등을 장점으로 선호도가 높아 가고 있다. 그러나, 한편으로 접촉식 방식에 의한 측정시스템 역시,

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\* 한국표준과학연구원 계측공학그룹



Table 1 Specimen ( G : Ground Surface, L:Lapped Surface)

Specimen	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>max</sub> (μm)	RMS (μm)	Skewness	Kurtosis	Average Slope
G1	1.2	10.496	1.563	-0.531	3.484	0.183
G2	0.5	4.472	0.620	-0.276	3.212	0.137
G3	0.1	1.187	0.158	-0.525	3.692	0.042
L1	0.5	4.950	0.639	-0.118	3.361	0.155
L2	0.3	2.772	0.377	-0.151	3.133	0.103
L3	0.1	1.096	0.125	0.449	3.679	0.062

Table 2 Percent error of measured profile

	Radius of stylus (μm)	Error of Ra (%)	Error of RMS value(%)	Error of Skewness (%)	Error of Kurtosis (%)
G1	5	3.1	3.3	3.0	-0.4
	10	5.5	5.8	8.5	1.2
	15	7.4	7.7	14.8	4.5
	40	12.7	13.1	26.9	10.2
G2	5	3.9	3.7	19.6	-2.4
	10	6.7	6.3	35.5	-4.1
	15	9.0	8.4	46.9	-5.5
	40	15.9	14.2	91.3	-10.5
G3	5	0.8	1.3	7.6	2.2
	10	2.5	3.2	11.4	3.6
	15	3.4	4.1	15.2	4.8
	40	6.6	7.6	28.4	7.9
L1	5	3.2	3.3	39.8	0.1
	10	5.8	6.0	72.0	-0.2
	15	7.7	8.0	98.6	-0.4
	40	13.3	14.1	241.5	5.8
L2	5	2.3	2.4	10.6	1.1
	10	4.3	4.5	18.5	2.7
	15	5.7	6.2	24.5	4.1
	40	10.0	11.1	57.6	9.9
L3	5	2.0	1.6	-15.4	-5.8
	10	4.0	3.2	-25.8	-10.7
	15	5.6	4.9	-31.5	-13.8
	40	10.1	8.0	-61.0	-25.8

의 추천을 따라 5개의 표본을 얻는 경우를 상정하고, 디지털필터의 적용을 고려하여 평가길이의 7배인 5.60mm를 측정길이로 하였다. 임의의 선단반경을 갖는 측정기에 의한 형상곡선을 얻기 위하여 큐빅 스플라인의 적용에 의한 연속데이터화가 수행되었으며, 앞에서 언급된 접촉 원리를 적용하여 수치적인 방법으로 실제의 접촉위치의 추정 및 그에 의한 측정데이터의 좌표가 산출되었다. 이와 같이 하여 얻어진 형상곡선 데이터에 대하여 표면가공 정도의 평가지표인 Ra, RMS값, Skewness, Kurtosis 등과 함께 거칠기 높이 분포가 검토되었다. Table 2에 시뮬레이션에 의하여 발생된 측정데이터로부터 계산된 평가지표가 갖는 백분율 오차를 보인다.

표의 결과로부터 알 수 있듯이, 오차는 측정 축침의 반경이 커짐에 따라 비례하여 증가하고 있다. 연삭면의 경우, Ra값은 축침의 선단반경이 5μm, 10μm, 15μm, 40μm로 증가함에 따라 최대오차는 각각 3.9%, 6.7%, 9.0%, 15.9%를 보이고 있으며, RMS값의 경우에도 이와 비슷한 양상을 보이고 있다. 또, 분포형태의 참고지표인 Skewness의 오차 역시, R=5μm, 10μm, 15μm, 40μm의 경우에 대하여 최고 19.6%, 35.5%, 46.9%, 91.3%를 각각 보이고 있다.

Fig. 2의 (a)는 Ra = 0.5μm인 시료G4의 진폭분포를 보이며, (b),(c),(d)는 G4를 각각 5μm, 10μm, 40μm의 축침으로 측정된 형상곡선의 진폭분포를 보이고 있다. 축침의 선단반경이 커질수록, 진폭분포의 모양은 본래의 진폭분포로부터 다른 모양으로 변하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이, 진폭 파라미터보다 Skewness의 오차가 더욱 현저한 이유는 축침의 선단반경이 증가함에 따라 측정에 의하여 미소돌기 상단부의 왜곡현상과 함께 계곡부의 추종불가능영역이 증가함에 따른 현상으로 판단된다.

## 2.2 누적R.M.S.경사 그래프

Fig. 3은 측정에 의하여 축침선단부의 형상에 의하여 경사각오차가 발생하는 모습을 보이고 있다. 상층부 경사각의 오차가 심각하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 경사변화의 정량적 평가를 위한 평가 지표로서 다음에 설명하는 누적R.M.S.경사를 제안한다.

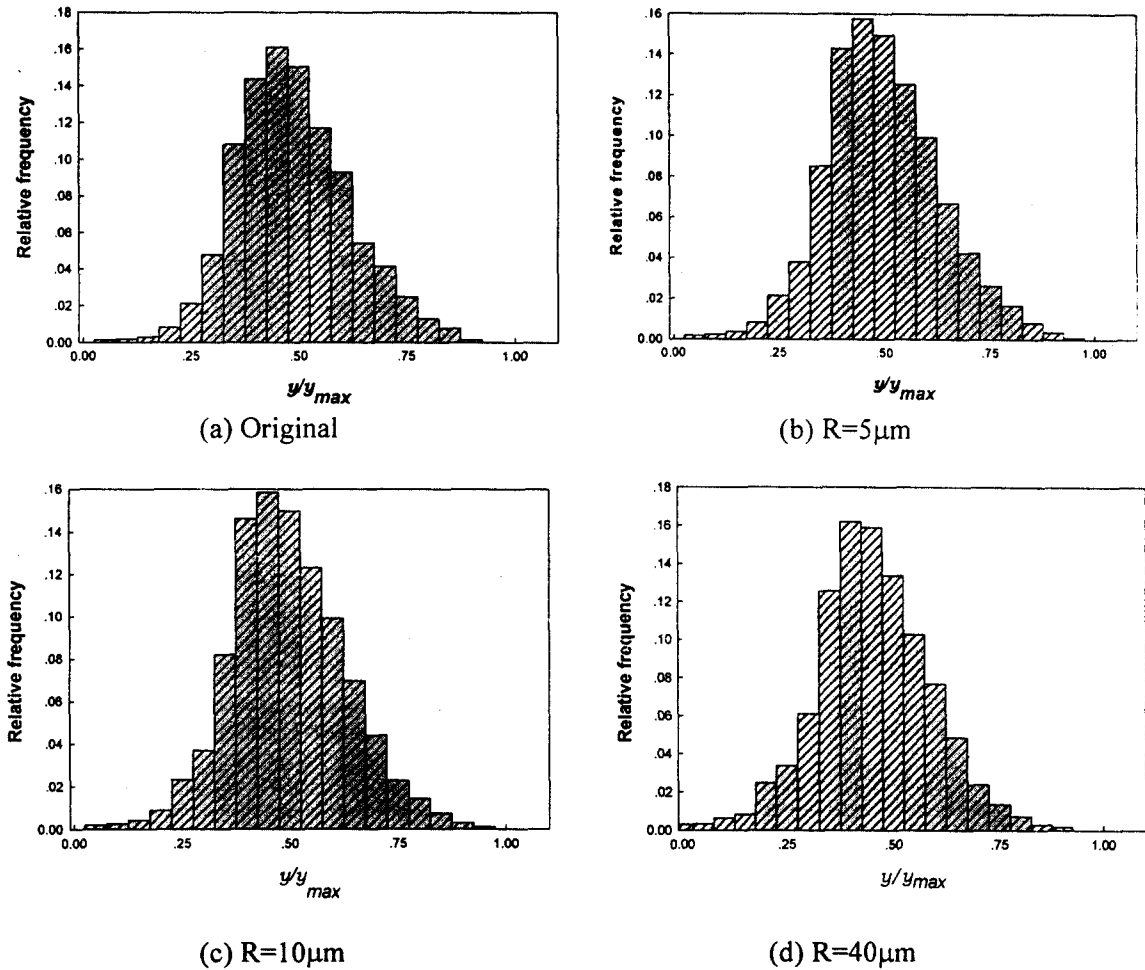


Fig. 2 Amplitude distribution of measured profile of G4

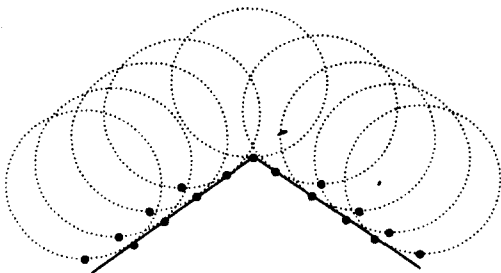


Fig. 3 Change of slope by stylus profilometer

Fig. 4에 누적R.M.S.경사의 산출 방법을 보인다. 그림에서 보이는  $i=0$ 의 위치에 있는 직선과  $i=N$ 의 위치에 있는 직선은 각각 전체 형상곡선의 최대값과 최소값에 접하고 형상곡선의 중심선에 평행한 직선이다. 먼저, 베어링영역에 대한 누적경사의 계산을 위하여, 이 두 직선 사이의 거리를 100%로 설정하고 그 사이를  $N$ 등분한다. 다음에,  $i=0$ 에서  $i=k$ 까지의  $((100/N) \times k)$  % 사이에 있는 형상곡선을 이용하여 R.M.S.값으로 경사를 구하여 그 값을 형상곡선의  $((100/N) \times k)$ %에서의 누적R.M.S.경사값으로 채택한다. 동일한 방법으로  $i=0$ 에서부터 순차적으로  $i=N$ 까지의 누적

R.M.S.경사를 구하여 그래프로 나타낸 것이 본 논문에서 제안하는 누적R.M.S.경사 그래프이다. Fig. 5에 시료 G1 으로부터 측정된 형상곡선을 이용하여  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ 의 촉침을 사용하여 측정된 경우의 누적R.M.S.경사 그래프를 보인다. 그림에서 알 수 있듯이, 촉침의 반경이 증가함에 따라 오차가 증가하고 있으며, 또한 형상곡선의 하부쪽으로 내려갈수록 형상곡선의 상층부에서의 오차보다 증가하고 있다. 이것은 형상곡선의 아래쪽에서 촉침의 형상 및 촉침 반경의 영향에 의하여 발생하는 추종불가능 영역에 의한 현상이다.

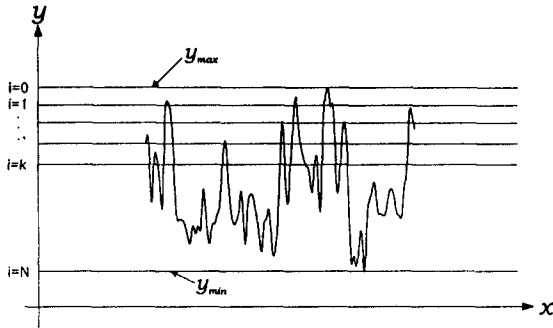
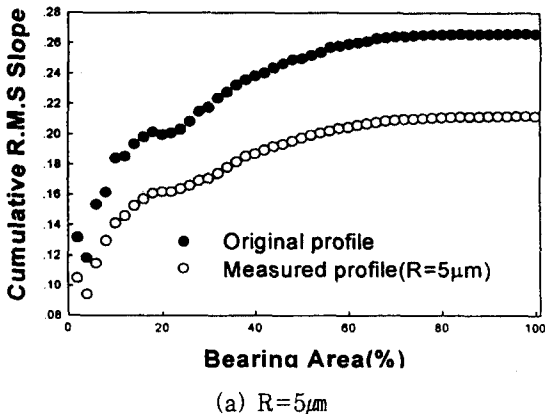
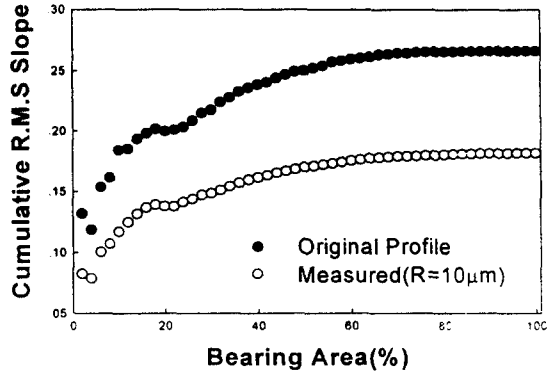


Fig. 4 Method of calculating the cumulative squared root slope

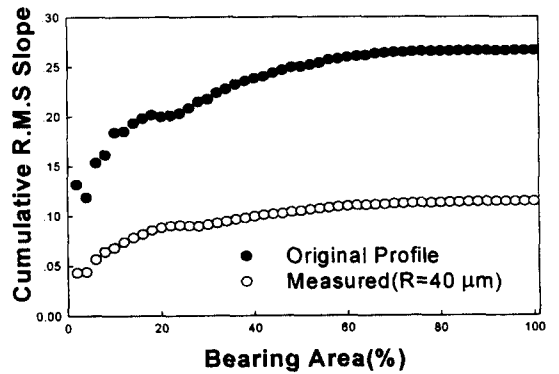
이 방법은 형상곡선의 진폭방향에 따른 경사값의 변화 정도를 관찰할 수 있으므로, 본 연구에서와 같이 진폭방향의 위치에 따른 왜곡 등의 형상변화 관찰 뿐 아니라 위치에 따른 미세형상의 특성이 부품의 성능을 좌우하는 광학 부품이나 접촉에 의한 마모 및 마멸에 관한 연구 등에 유효하게 응용될 수 있으리라 생각된다.



(a)  $R=5\mu\text{m}$



(b)  $R=10\mu\text{m}$



(c)  $R=40\mu\text{m}$

Fig. 5 Cumulative R.M.S slope of measured G1

### 3. 실제 접촉위치 산출에 의한 보정법

#### 3.1 측정 데이터를 이용한 촉침과 시료면의 접촉위치

본 논문에서는 측정데이터로부터 촉침선단부와 시료면의 접촉위치를 산출하고 그로부터 측정데이터를 보정하는 방법을 채용하였다.

Fig. 6에 실선으로 보이는 시료면의 표면형상곡선을  $f(x)$ , 측정에 의하여 얻어지는 측정데이터를 점선으로 표현된  $g(x)$ 로 하여, 촉침의 중심위치  $O(x_0, y_0)$ 와 실제 접촉점  $A(x_A, y_A)$ 의 위치관계를 보인다.  $l_1$ 과  $l_3$ 는 각 접촉에서의 접선과 법선을 나타낸다. 촉침 중심의 궤적  $g(x)$

상의 점 O에서의 접선과 실제 형상곡선상의 점A에서의 접선은 서로 평행하게 되므로, 점A(x<sub>A</sub>, y<sub>A</sub>)에서의 법선l<sub>3</sub>는 l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>와 직교하게 된다. 따라서

$$(x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 = R^2 \quad (1)$$

$$y_0 - y_A = -\frac{1}{f'(x_A)}(x_0 - x_A) \quad (2)$$

의 두 방정식으로부터 실제의 접촉점은 다음과 같이 구하여진다.

$$x_A = x_0 + g'(x_0) \cdot y_0 - \frac{g'(x_0) \cdot y_0 \cdot (1 + g'(x_0)^2)}{(1 + g'(x_0)^2)} + \frac{g'(x_0) \cdot R}{\sqrt{1 + g'(x_0)^2}}$$

$$y_A = \frac{y_0 \cdot (1 + g'(x_0)^2) - R \cdot \sqrt{1 + g'(x_0)^2}}{1 + g'(x_0)^2} \quad (3)$$

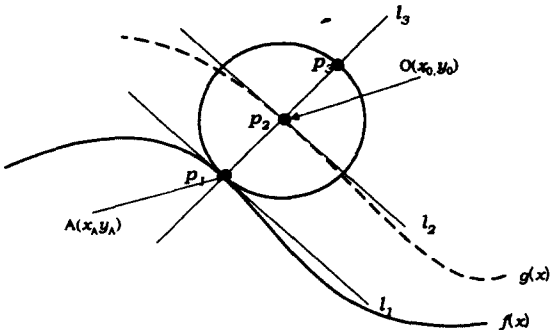


Fig. 6 Measured point O(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) and compensated point A(x<sub>A</sub>, y<sub>A</sub>)

### 3.2 측정 데이터의 보정

본 연구에서는 측정기에 의하여 수집된 형상곡선을 실제 접촉점의 추정에 의하여 보정하였다. 먼저, 측정기로부터 수집된 이산데이터열은 큐빅 스플라인을 이용하여 구간다항식 형태의 연속데이터로 보간 되었으며, 각 측정점에 대한 측정선단부와 시료면의 실제 접촉점의 좌표가 구간다항식과 식(3)으로부터 추정되었다. 그리고, 이렇게 해

서 얻어진 데이터열은 x축의 측정좌표가 불규칙한 간격으로 얻어지게 되므로, 실제의 보정과정에는 다시 스플라인 보간과 표본재추출작업을 통하여 처음에 측정기에 의한 측정조건과 동일한 표본간격으로 재조정되었다.

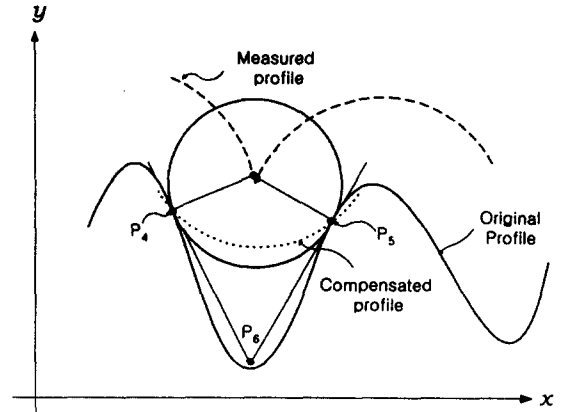
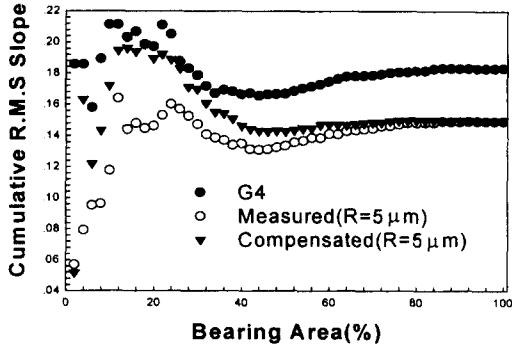


Fig. 7 Error compensation in valley

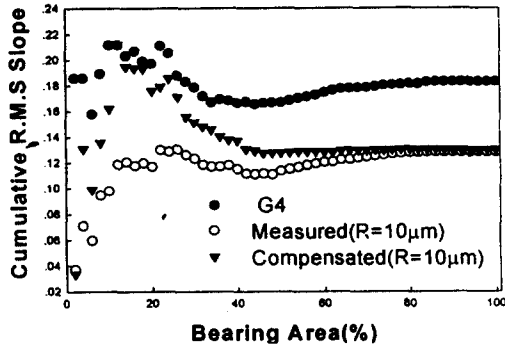
식(3)은 측침이 한 점에서 시료표면과 접하는 경우를 전제로 하고 있다. 그러나, 측침의 형상에 비하여 미세한 표면돌기들이 존재하여 측침의 추종이 불가능한 계곡부분이 존재하므로, 실제의 보정을 위한 추정식으로는 적절하지 못하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 형상곡선 상층부분의 특성해석을 위한 보정을 주된 목적으로 하고 있어, Fig. 7에 보이는 바와 같이 계곡부분의 손실된 형상의 보정을 간이적으로 수행하였다. 계곡부분의 보정은, 앞에서 언급한 보정 데이터의 X좌표상의 측정간격을 일정하게 하기 위한 표본재추출과정에서, 접선의 기울기가 음에서 양으로 변화하는 보정된 데이터상의 두 점을 찾아, 두 점에서의 접선의 교점을 새로운 보정데이터로 채택하므로써 이루어진다. 물론, 이 방법에 의하여 추정불가능 영역에 대한 오차가 어느 정도까지는 보완이 가능하다고 할지라도, 여전히 완전한 정보 손실에 대한 대책으로는 부족할 것으로 생각된다.

### 3.3 보정효과

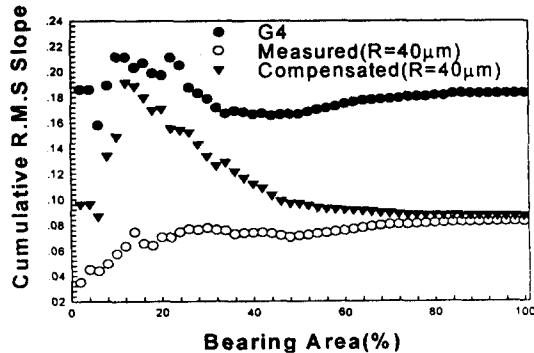
Fig. 8에 시료 G4에 대한 보정 효과를 보인다. 본 논문에서 제안한 오차보정법에 의하여 형상곡선의 형상왜곡 현상이 보정되어 경사각이 개선되고 있음을 알 수 있다. 그런데, 형상곡선의 하단부가 포함되지 않는 영역에서 보정



(a)  $R=5\mu\text{m}$



(b)  $R=10\mu\text{m}$



(c)  $R=40\mu\text{m}$

Fig. 8 Cumulative R.M.S. slope of G4

효과가 둔화하고 있는 것을 알 수 있다. 축침의 추종불

가능 영역에 의하여 손실된 정보의 누락에 대한 대책으로 곡저부분의 보정을 위하여 접선의 교점을 수용하는 개선안을 채택하였으나, 이것만으로 고주파 성분에 대한 다량의 정보손실의 충분한 대책이 될 수 없다는 것을 보여주고 있다. 따라서, 관찰하고자 하는 주파수 대역이 고주파 성분영역을 포함하는 경우에는 이러한 점을 고려하여 충실하게 추종할 수 있도록 축침을 선정이 필요함을 알 수 있다.

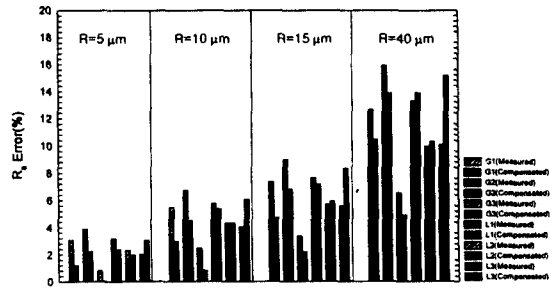


Fig. 9 Compensation effect in Ra

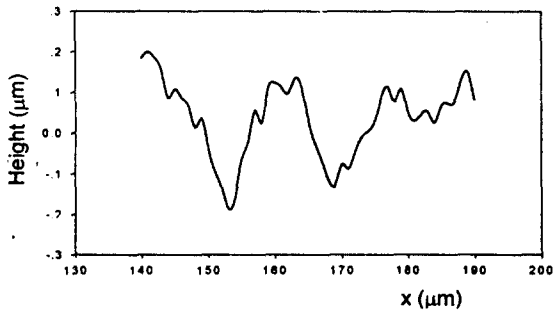
Fig. 9는 본 논문에서 사용된 시료들을 선단반경이 각기 다른 축침을 사용하여 측정 및 보정을 수행하였을 때 나타난 Ra값의 백분율 오차를 막대 그래프로 도시한 것이다. 전반적으로 축침의 선단반경이 커질수록 오차의 비율도 증가하고 있으며, 보정에 의하여 개선되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 래핑 가공면의 경우, 측정된 형상곡선이 갖는 오차보다 보정된 형상곡선의 오차가 오히려 더 크게 나타나는 현상이 보인다. 이러한 현상은 가공법의 특성을 반영한 것으로, 가공 방법에 따른 가공면의 독특한 기하학적 형상에 따른 것이다.

측정에 의하여 형상곡선의 돌기 부분의 진폭은 확대되고, 계곡 부분은 축침이 추종하지 못하는 영역만큼 진폭이 감소한다. Fig. 10에 본 연구에 사용된 시료에서 얻은 전형적인 연삭면과 래핑 가공면의 형상을 보인다. 연삭면의 돌기부분이 전체 형상곡선에서 차지하는 비율이 래핑 가공면에 비하여 적음을 알 수 있다.

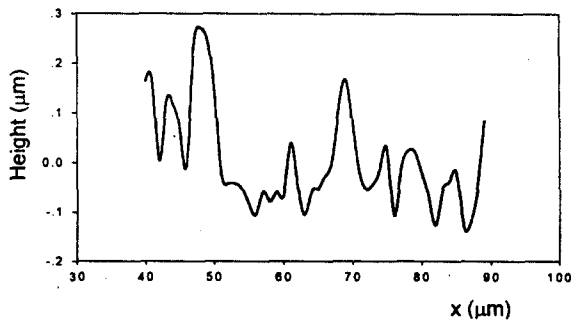
연삭면의 경우, 측정데이터는 돌기부분의 진폭이 확대량이 소폭임에 비하여 계곡에서의 진폭손실이 상대적으로 크게 영향을 미치게 된다. 이러한 측정데이터가 보정에 의하여 돌기부분의 진폭확대요인이 제거되고 계곡부분에서의 진폭손실이 어느 정도 보정됨에 따라 진폭 평가지표의

오차는 감소하게 된다. 한편, 래핑면에서는 돌기부분에서의 진폭 확대량이 측정오차에 큰 비중으로 나타나게 되어 계곡에서의 진폭손실을 상당량 보상하는 효과로 작용하게 된다. 따라서, 보정에 의하여 돌기부분의 진폭확대효과가 제거됨에 따라 보정된 형상곡선으로부터 산출되는 결과의 오차는 오히려 큰 값으로 나타난다.

그러나, 진폭 평가지표가 측정데이터에서보다 더 감소하였다고 하여, 보정의 효과가 없는 것은 아니며, 실제로 보정 이후에는 돌기부분의 형상이 본래의 형상을 잘 복원하고 있음을 상층부의 누적R.M.S.경사에 의하여 확인할 수 있다.



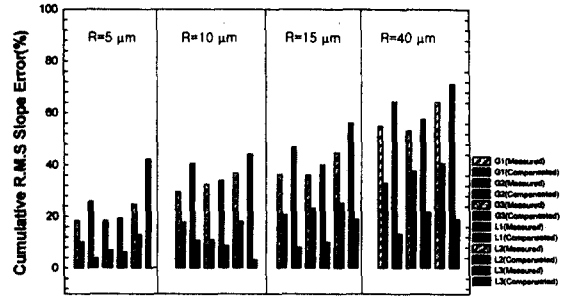
(a) Ground surface



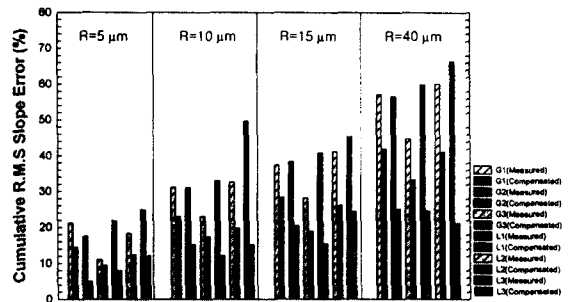
(b) Lapped surface

Fig. 10 Profile of ground and lapped surface

Fig. 11에 기계 가공면의 초기마찰 거동에 큰 영향을 미치는 부분으로 마찰 및 마모 해석등에 유용한 정보를 제공하는 20%와 30%의 베어링 영역에 대한 누적 R.M.S.경사를 보인다. 진폭 평가지표의 경우와는 달리 효과적으로 보정되고 있음을 알 수 있다.



(a) At 20% bearing area.



(b) At 30% bearing area

Fig. 11 Comparison of cumulative R.M.S slope error

#### 4. 결론

축침선단부 형상에 의한 형상곡선왜곡의 문제점에 대한 해결을 대상으로 하여, 측정오차의 효율적인 보정수법을 검토개발함으로써 공학표면의 미세형상 계측에 있어서의 측정정도 향상에 목표를 둔 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 축침식 표면 미세형상측정기에 의한 표면형상의 측정 에 있어서, 축침의 선단반경에 의하여 발생하는 형상 곡선의 왜곡현상을 확인하고 그 형성 기구를 분명히 하였다.
- 형상곡선의 왜곡을 효과적으로 보정하기 위한 보정기법을 제안하였다.
- 실제의 가공표면으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 시뮬레이션에 의한 실험에 의해 보정기법의 효과 및 유용성을 확인하였다.
- 누적R.M.S.경사를 제안하고, 이를 이용하여 미세형상의 경사분포 평가가 가능함을 확인하였다.



## 참고 문헌

- 1)塚田 忠夫, "サーフェステクスチャーと部品性能", 日本設計工學會誌, 22(146), pp.344, 1987
- 2) 中川 泰夫, 電子回路のノーマン缺陷高精度認識の研究, 1990年度博士學位論文(東京工業大學)
- 3)塚田 忠夫, 他, "表面粗さをもつ齒車齒面の接觸變形", 日本設計工學會誌, 18(104), pp.251, 1983
- 4) 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整に関する研究", 1994年度博士學位論文(東京工業大學)
- 5) Thomas, "Rough Surface", 1987
- 6) TSUKADA & T. KANADA, "Evaluation of two- and three-dimensional surface roughness profiles and their confidence", WEAR, 109, pp.69, 1986
- 7) ISO 4288-1985, "Rules and Procedures for the Measurement of Surface Roughness Using Stylus Instruments"
- 8) Nahmgyoo CHO, Tadao TSUKADA, Masaaki TAKAHASHI, "Correction of Specimen Orientation in Three-Dimensional Measurement of Surface Roughness with Small Waviness by Contact Stylus Instrument - 2nd Report -", International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 29(3), pp.253-258, 1995
- 9) WEBSTER, M. A. WEST, R. S. SAYLES, "A Method of Three-dimensional Topography Measurement and Analysis on Accurate Surface", WEAR, 109, pp.385-399, 1986
- 10) IBRAHIM ELEWA, MONIR M. KOURA, "Importance of Checking the Stylus Radius in the Measurement of Surface Roughness", WEAR, 109, pp.401-410, 1986