

가공면의 상태 변화 측정에 관한 연구

조남규*, 최한광**, 한창수*, 안유민*, 박균명***

A Study on the Measurement of Changes in the Machined Surface

Nahm-Gyoo Cho*, Han-Kwang Choi**, Chang-Soo Han*, Yoo-Min An*, Gyun-Myung Park***

ABSTRACT

This paper describes a new method for measuring the changes in specific surface asperities arising from processes such as finishing, coating, wear and corrosion. In repetitive measurements, relocation device gives the same position and orientation so that specific profile can be obtained. A low-cost relocation device is designed and its performance is assessed. The error in relocation process is compensated by statistic compensation algorithm. And, a removing process of cusp by grinding is observed by the proposed method.

Key Words : roughness(표면 거칠기), surface asperities(표면 형상), relocation device(고정기구), error compensation(오차 보정)

1. 서론

기계가공면의 표면미세형상 평가는 데이터에 대하여 그 통계량이 안정되어 있다는 가정하에서 통계적 평가값들을 적용하여 이루어지고 있다. 이러한 평가 방법은 최종가공표면의 양, 불량률을 판단하기 위한 적부 검사나 가공에 의한 표면 특성변화의 경향 파악과 같이 일반적인 표면의 평가를 목적으로 하는 경우에 매우 유효한 방법이다.

한편, 가공 공정이 진행됨에 따른 절삭깊이 (removal depth)나 절삭량(removal volume)의 정밀한 측정^{1),2),3),4)}, 재료의 성질에 따른 마모 및 마멸 기구의 엄밀한 분석^{1),2),3)}, 표면형상에 따른 도장성

(paintability) 평가, 정밀금형에 의한 성형결과 평가 등과 같이, 특정한 위치의 표면이 갖는 형상적 특성이 다음 단계의 공정이나 최종 결과에 밀접하게 관련되는 경우에는 단순한 통계적 분포특성뿐 아니라 특정 위치의 표면 프로파일에 대한 직접적인 비교에 의한 평가가 필요하다. 그러나, 이러한 측정에는 시료의 동일위치에 대한 측정이 전제가 되므로, 일반적인 미세형상 측정용의 측정기에서는 그 기능이 제공되지 않으므로, 고가의 시료재 설정 장비를 제작하는 부담을 감수하거나, 대체적으로 인접한 지역의 측정결과를 이용한 통계적인 파라미터의 비교 정도로 만족해야만 하는 실정이다.^{5),6),7),8),9)}

* 한양대학교 기계공학과
** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
*** 생산기술 연구원

시편에서 동일한 위치를 측정하기 위해서는 표면 프로필로미터(profilometer)에 대한 시료의 자세를 일정하게 유지하도록 하기 위한 고정기구가 필요하며, 동일위치 측정의 최종적인 정확도 및 정밀도는 고정기구의 동일 위치 및 자세결정 성능(relocation 성능)에 좌우된다.

이와 같은 배경으로부터, 본 연구에서는 비교적 제작이 간단한 고정기구를 고안하고, 이를 이용하여 목적하는 정밀도로 동일위치에서의 측정이 가능하도록 하기 위한 측정조건 결정법 및 측정 방법, 그리고 이를 위한 데이터 처리기법을 개발하였다.

2. 측정 시스템 구성

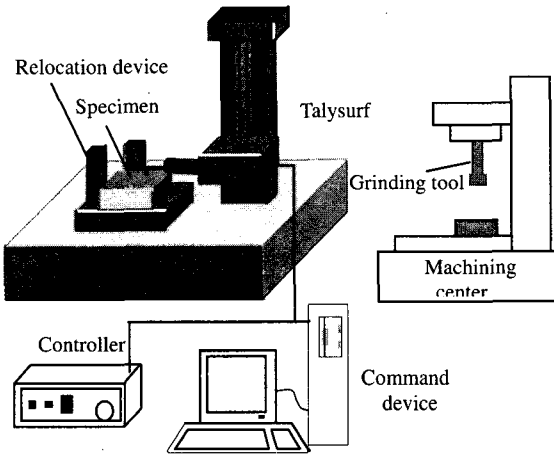


Fig. 1 Measurement system

본 연구를 위한 측정에는 접촉식 표면형상 측정기인 Rank Taylor Hobson 사의 Form Talysurf Series 2가 사용되었다. 동일 위치의 반복측정시험을 위하여, 측정시편은 개발된 고정기구를 이용하여 초기의 표면상태를 측정한 뒤, 연삭가공을 수행한 후에 다시 고정기구를 이용하여 초기 자세와 동일한 상태로 재설정하여 측정되었다.

3. 고정 기구(Relocation Device)의 제작 및 Relocation 성능 평가

Fig. 2.에 개발된 고정기구를 보인다.

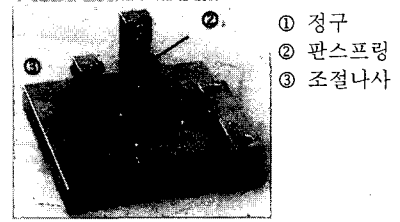


Fig. 2 Relocation device

시료는 공간에서 선형 3 자유도, 회전 3 자유도의 위치 변동 요소를 가지고 있는데, 이 시료의 재설정과정에서 발생하는 시편의 6 가지 자세변동 요소를 최소화하기 위하여, 시편의 밑면에 3 점, 그리고 두 측면에 각각 2 점과 1 점의 점접촉에 의한 고정 이 이루어지도록 고정기구에 6 개의 구가 설정되었다. 그리고, 눈금이 있는 조절나사와 판스프링에 의한 일정한 힘을 부가하여 측면의 불안정한 3 점 접촉을 보완하였으며, 판스프링에 의한 작용력선과 정구의 반력선을 일치시켜 모멘트의 발생을 최소화하였다. 이러한 구조는 시료 자세의 변동요소를 제거하고 사용자의 판단에 덜 의존하여, 시편이 동일한 자세를 유지하도록 한다.

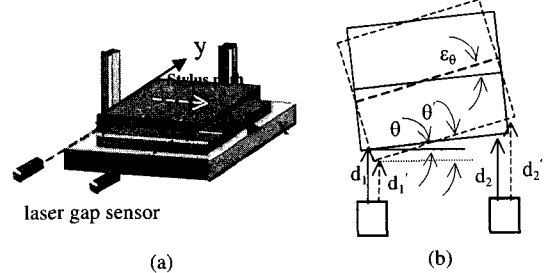


Fig. 3 The measurement of specimen's orientation change

제작된 재설정기구의 성능평가를 위하여 변위 센서를 Fig.3(a)와 같이 설치하여 재설정과정에서 발생하는 시편의 자세변화를 측정하였다. 시편의 자세변화에 의하여 발생하는 측정위치의 변화는 Fig.4(a)에서와 같이 초기 측정위치의 시작점의 이동 성분 ϵ_x, ϵ_y 와 상대적 회전량 ϵ_θ 로 결정된다. 회전에 의한 측정위치의 변화를 최소화하기 위하여 측정구간은 시편의 회전중심에 위치하는 것이 유

리하며, 회전중심을 지나는 중앙선의 자세변화 성분 $\varepsilon_y, \varepsilon_\theta$ 는 Fig.3(b)에 의하여 식(1)로 결정된다.

$$\varepsilon_\theta = \theta' - \theta = \tan^{-1}\left(\frac{d'_2 - d'_1}{L}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{d_2 - d_1}{L}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{d'_2 + d'_1}{2} - \frac{d_2 + d_1}{2}$$

50 회의 측정결과, 표준편차는 $\sigma_{\varepsilon_\theta} = 0.0014^\circ$, $\sigma_{\varepsilon_y} = 0.75\mu\text{m}$ 로 평가되었고, ε_x 는 ε_y 와 같은 확률 분포를 가짐으로, 측정위치의 변동 성분 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\theta$ 의 99% 신뢰구간에서 최대값은 $\varepsilon_{x\text{max}} = \varepsilon_{y\text{max}} = 2.25\mu\text{m}$, $\varepsilon_{\theta\text{max}} = 0.0042^\circ$ 이다.

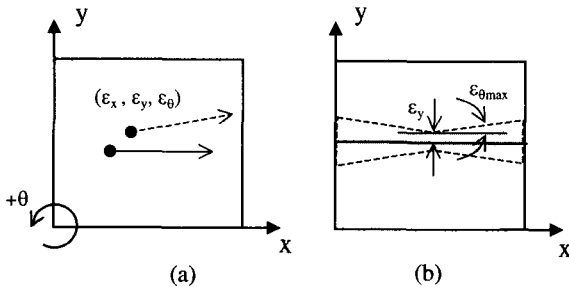
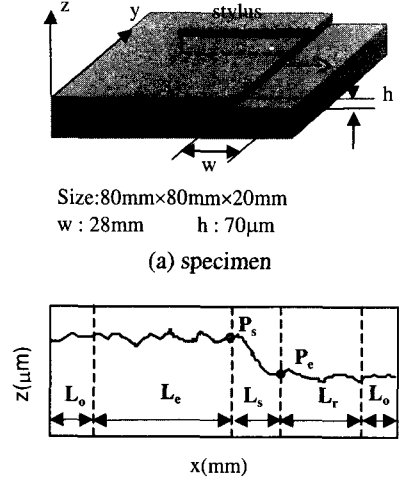


Fig. 4 Relocation performance assessment result

4. 시편에서의 기준구간과 평가구간

본 연구에서는 고정기구를 이용하여 시료의 재설정을 수행하고 있으나, 이러한 재설정만으로는 고정기구 제작에 따른 가공 정도와 조립 과정에서 발생하는 조립 오차 등에 의한 시료재설정의 한계가 있다. 그러므로, 이와 같은 물리적 한계를 보완하기 위하여, 시편상에 가공에 의하여 변화하는 부분(평가 구간)과 변화하지 않는 부분(기준 구간)을 두어 이를 이용한 측정데이터의 보정을 수행하였다. Fig. 5에 제작된 측정 시편을 보인다. 회전중심에 평가구간이 위치하도록 기준면의 폭 w 가 결정되었으며, 이 시료의 측정에 의해 얻어지는 프로파일은 다음과 같은 영역으로 구분된다.



(b) Profile's Region

Fig. 5 Specimen configuration for measurement

L_e (평가구간): 형상변화가 관측되는 구간

$$5 \times 0.8(\text{cut-off length}) = 4\text{mm}$$

L_r (기준구간): 가공에 의해 변하지 않는 구간

L_s (단차구간): 평면가공을 반영하지 않는 구간

L_0 (여유구간): 측침이 가감속되는 구간

5. 오차의 원인과 형태

고정기구와 측정기에 의한 동일위치 측정오차를 파악하기 위하여 평가구간의 가공 없이 시료의 재설정을 전후로 한 두 프로파일을 Fig.6과 같이 얻었다. 두 프로파일은 매우 유사하며, x축과 z축으로의 이동 및 회전에 의해 자세가 변화한 형태로 얻어지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는, 기준구간의 프로파일을 수치적인 방법으로 일치시킴으로써 평가구간의 오차를 보정하고 보정 효과를 평가하였다.

6. 상호 상관 함수를 이용한 X 축 방향의 보정

초기의 측정 프로파일 z_{before} 와 재설정에 의한 측정 프로파일 z_{after} 의 기준구간의 x축상에서의 이동거리 보정량은 상호상관함수(Cross-correlation

Function)를 이용하여 상대적 이동량으로 구할 수 있다. Fig.7 에 그 예를 보이며, 그래프에서 τ_{peak} 는 $-3.25\mu\text{m}$ 이다.

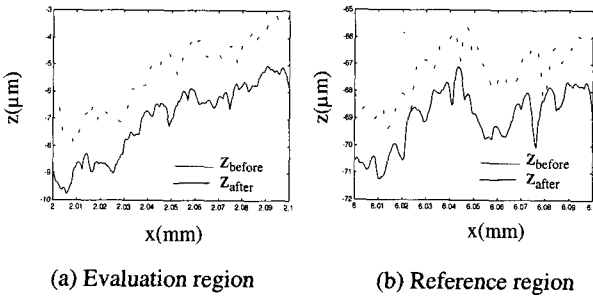


Fig. 6 Relocation error

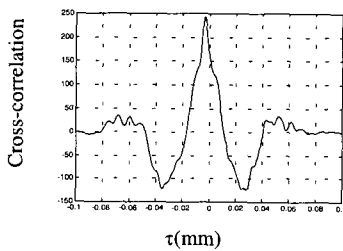


Fig. 7 Cross-correlation function of z_{before} and z_{after}

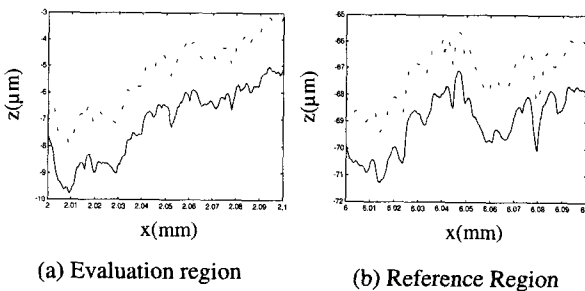


Fig. 8 Profiles after compensation of relocation error in x-axis

이와 같이 하여 산출된 보정량을 적용하여 보정한 결과를 Fig.8 에 보인다. z_{after} 전체를 $3.25\mu\text{m}$ 만큼 이동시킨 후의 평가구간과 기준구간에 대한 x 축의 이동량이 보정되고 있음을 알 수 있다.

y 축 방향의 위치 재설정 능력은 검토한 결과 표준편차 값으로 $0.75\mu\text{m}$ 로 평가되었다. 이러한 결과로부터, 실제의 측정에 있어서 발생할 수 있는 y 축 방향의 위치 재설정 능력의 최대 한계는

99%의 신뢰구간을 전제로 한다고 하더라도 약 $2.25\mu\text{m}$ 정도인 것을 알 수 있다. 또한, ISO, KS, BS, DIN, JIS 등의 규격에서 표면 프로파일로미터용 측정 선단의 곡률반경은 $10\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ 로 되어 있다. 물론, 이 값들은 제한된 측정으로 오차를 무시할 수 있는 정도로 표면미세형상을 분석, 검토할 수 있다는 전제하에 이루어진 것이다. 그러므로 이와 같은 점들을 고려할 때, 상기의 y 축방향 최대 위치결정오차는 매우 작은 오차임을 알 수 있다.

더욱이, 본 연구에서 적용하고 있는 엔드밀 가공면은 측정방향에 따라 그 표면 프로파일의 특성이 명백히 달라지는 이방성 표면이다. 일반적으로 표면 특성 측정에 있어, 그 측정 방향은 제한된 측정 길이로부터 표면 미세형상 정보를 최대로 얻을 수 있는 측정 방향을 정하는 것이 상례이며, 본 연구에서도 이러한 점을 고려하여 측정방향을 결정하였으며, 결과적으로 y 축 방향의 표면 프로파일은 x 축 방향의 측정에 의해 얻어지는 프로파일과는 비교가 안될 정도로 완만한 변화를 보인다. 본 연구에서의 예비 실험결과에서는 최소 독립간격(일정간격으로 이산데이터 형식의 표면 프로파일 데이터를 측정에 의해 얻을 경우, 인접한 두 데이터 점에서의 측정값이 서로 독립하다고 평가될 수 있는 최소의 데이터 간격으로, 일반적으로 자기상관함수값이 0 또는 $1/e$ 이 되기까지의 길이를 말한다.)이 20~50 배의 차이를 보임을 알 수 있다.

이러한 점들을 고려할 때, 가공되지 않는 기준면을 이용하여 재설정된 시편으로부터 측정된 결과는 거의 동일위치에서 얻은 측정값이라고 해도 좋다.

7. 기준구간의 일치에 의한 평가구간의 보정

x 축 보정후, z 축으로의 이상적 보정은, 평면 가공된 기준면 전체의 자세를 충분히 반영하는 충분한 길이의 기준구간 데이터에 의한 선형회귀 직선 L_{before} , L_{after} 을 일치시킴으로써 이루어진다. 그러나, 실제의 경우에는 언제나 이와 같이 충분한 길이의 기준구간을 확보하기 어려운 경우가 많으며, 또한 요구되는 재설정 정도를 확보하기 위한 기준구간의 길이는 상황에 따라 변화하는 값이다. 따라서, 요구되는 재설정 정도에 따른 기준구간의 설정을 위하여 다음과 같은 검토를 수행하였다.

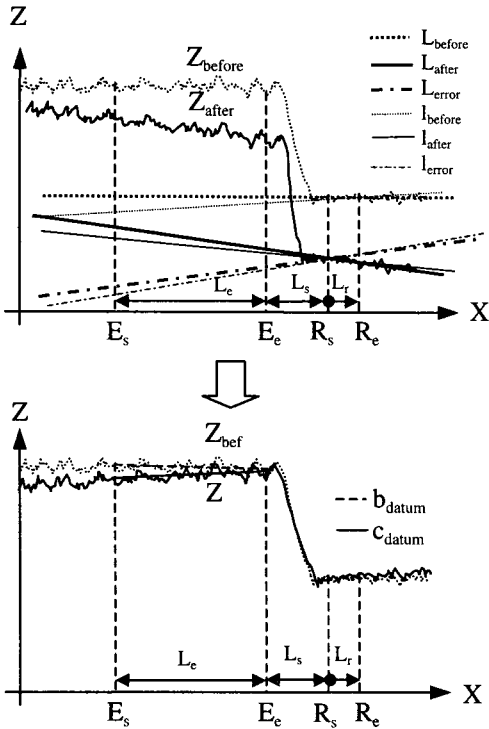


Fig. 9 z-axis compensation by least-square line of shorter reference length

일반적인 기계가공 평면을 약엘고딕 표면으로 생각하면, 가공표면으로부터 얻어진 프로파일을 직선회귀하여 얻은 단면은 프로파일의 길이가 10mm 이상에서 거의 안정한 모습을 보이며, 그보다 짧은 측정 프로파일을 이용한 경우에는 10mm 이상의 충분한 길이의 프로파일로부터 얻은 회귀 직선과 비교할 때 기울기와 높이에 편차를 보인다. 이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 10mm를 회귀 직선 자세가 안정되는 충분한 측정 길이로 가정하고, 이 때의 회귀 직선을 시료 기준구간의 자세 평가를 위한 이상적인 회귀 직선 L 로 하였으며, 그에 반해 상대적으로 짧은 측정 길이를 기준구간으로 하였을 때의 회귀 직선을 l 로 표기하였다.

임의의 기준구간 L_r 의 영역에 대한 선형회귀 직선 l_{before} 와 l_{after} 를 일치시키는 경우의 z축 오차 보정은 식(2)와 같다.

$$l_{error}(x) = l_{before}(x) - l_{after}(x) \quad (2)$$

$$Z_{com}(x) = Z_{after}(x) + l_{error}(x)$$

$$A_{datumeror} = \frac{1}{(E_c - E_s)} \int_{E_s}^{E_c} |c_{datum}(x) - b_{datum}(x)| dx$$

$$\approx \frac{1}{(E_c - E_s)} \int_{E_s}^{E_c} \{ |L_{after}(x) - l_{after}(x)| - \{ |L_{before}(x) - l_{before}(x)| \} \} dx$$

$$= \frac{1}{(E_c - E_s)} \int_{E_s}^{E_c} |l_{error}(x) - L_{error}(x)| dx$$

where, $E_c = R_s - L_s$ (3)

Fig. 9에서 b_{datum} , c_{datum} 은 각각 Z_{before} 와 Z_{com} 의 평가구간 ($E_s \sim E_c$)에서의 선형회귀 직선이다. 이때 평가구간에서의 중심선오차($A_{datumeror}$)는 식(3)과 같다. 사용한 기준구간 L_r 에 따른 평가구간의 중심선 최대추정오차($A_{rw_maxerror}$)는 99% 신뢰도로서 실험식¹⁰⁾에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$l_{before\ max}(x) = (\eta_{w\ max} + 3\sigma_\eta)x + (\delta_{w\ max} + 3\sigma_\delta) \quad (4)$$

$$A_{rw_maxerror} = \frac{1}{(E_c - E_s)} \int_{E_s}^{E_c} |l_{before\ max}(x)| dx \quad (5)$$

$l_{before\ max}$ 는 한 프로파일의 중심선을 그 프로파일의 제한된 길이의 데이터로써 추정된 직선이다. $l_{before\ max}$ 의 기울기 성분과 절편은 기준면의 R_s (중심선평균거칠기), 기준구간의 길이 L_r 및 웨이비니스 성분의 파장 λ 의 함수이다. 본 연구에서는 최대오차를 고려하여 웨이비니스 성분의 파장을 $\lambda=800\mu m$ 로 가정하였다. 식(3)에서 $E_c - E_s = 4mm$ 로서 상수이지만 E_c 가 L_s 의 함수이므로 $A_{rw_maxerror}$ 는 R_s , L_s , L_r 의 함수이다. Fig.10(a)에 몇 가지 경우의 $A_{rw_maxerror}$ 를 보인다. 또, 단차구간 $L_s = 1mm$, 기준구간의 $R_s = 0.77\mu m$ 인 시편을 대상으로 하였을 때, 식(5)에 의한 중심선 최대 추정오차($A_{rw_maxerror}$)와 재설정에 의한 실제오차($A_{datumeror}$)를 Fig.10 (b)에 보인다. Fig.11에 Fig.10 (b)에서 기준길이 4mm를 채용하여 보정한 결과를 보이며, 보정 후의 결과로부터 식(3)을 이용하여 산출된 중심선 오차 $A_{datumeror}$ 는 약 $0.1\mu m$ 이다.

Fig. 11은, 오차보정 후의 두 프로파일은 부분적인 형상변화는 있지만, x-z 평면상에서의 이동량과 회전이동량이 보정되었음을 보

여준다. 이 결과로써 앞에서의 데이터 처리에 의한 오차보정 알고리즘이 유효함을 알 수 있다.

8. 기준면의 상관성을 고려한 최대추정오차

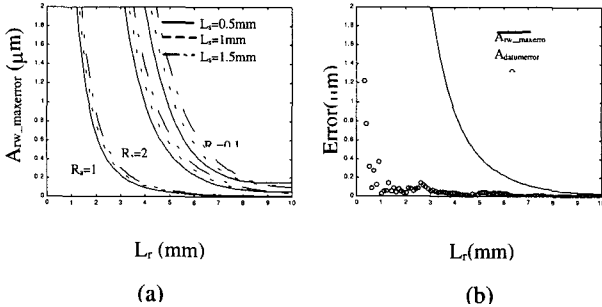


Fig.10 Maximum estimation error

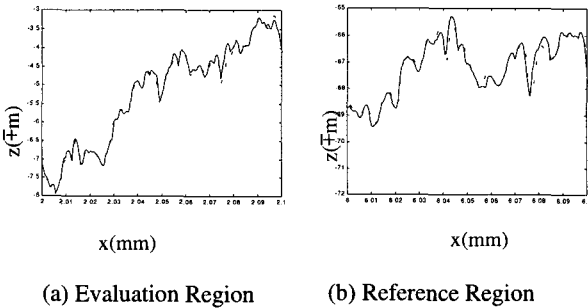


Fig. 11 Compensation Result

Z 축의 오차 보정에서, Fig.10 (b)에 나타난 평가구간의 중심선 최대추정오차($A_{rw-maxerror}$)는 실제 오차($A_{datumerror}$) 보다 크게 평가되고 있음을 알 수 있다. 이는 시편 재설정과정에서 얻어진 두 프로파일의 기준구간이 독립이라는 가정하에서 유도되었기 때문이다. 제작된 고정기구의 성능(Fig.4)에 의해, 시편 재설정 과정에서 얻어지는 두 프로파일의 기준구간은 매우 인접한 영역에서 측정되므로, 기준구간은 동일한 웨이비니스(waviness)성분을 가지며 측정 위치 변동으로 인한 거칠기 성분에 의한 차이만 존재한다고 가정할 수 있다. 웨이비니스 성분과 거칠기 성분에 의한 오차를 모두 고려한 경우의 중심선 최대추정오차를 나타내는

식(5)에서 웨이비니스 성분을 제외하고 거칠기 성분만을 고려한 중심선 최대추정오차($A_{r-maxerror}$)는 식(7)과 같다.

$$r_{maxerror} = 3\sigma_{\eta}x + 3\sigma_{\delta} \quad (6)$$

$$A_{r-maxerror} = \frac{1}{(E_c - E_s)} \int_{E_s}^{E_c} |r_{maxerror}(x)| dx \quad (7)$$

$r_{maxerror}$ 는 한 프로파일의 중심선을 추정된 식(4)에서 웨이비니스에 의한 오차를 제외한 경우의 추정식이다. 식(7)에 의한 중심선 최대추정오차를 Fig.10과 비교하면 Fig.12과 같고, 동일한 기준구간의 길이(L_r)에서 최대추정오차가 줄어들었으므로 $A_{r-maxerror}$ 에 의해 더 효율적인 측정이 가능해진다. 예를 들어 절삭깊이 측정시 요구되는 오차의 한계가 $0.2\mu m$ 인 경우, 식(5)로써 중심선 최대오차를 추정하였다면 오차 보정에서 사용되는 기준구간의 길이는 6mm가 되지만 기준구간의 상관성을 고려한 중심선 최대추정오차 식(7)에 의하여 3mm 기준구간만으로 요구되는 오차 범위 내에서 측정이 이루어질 수 있다. 요구되는 측정 정도를 실현하기 위한 기준구간의 길이가 적어진다는 것은 측정 시간과 데이터 처리 시간이 단축됨을 의미한다.

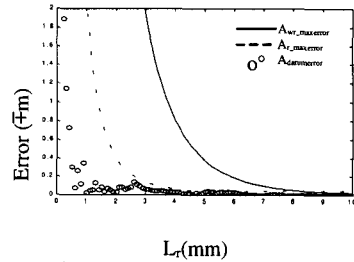


Fig. 12 Modified maximum estimation error

9. 오차 보정 후의 평가구간의 중심선 오차와 미세 형상오차

예로서 측정된 시편(Fig.6)의 평가구간은 x, z 축으로의 오차 보정 후 최종적으로 Fig.13와 같은 형태의 최종오차(f_{error})를 가지게 된다.

최종오차의 형태는 0 선으로부터의 중심선(datum, least square line)의 이동과 중심선으로부터의 미세형상오차 분포로 이루어진다. 중심선의 오차는 절삭깊이(removal depth) 평가에 직접 관련되는 오차로서 z 축 오차 보정에서 중심선 최대추정

오차를 나타내는 식(7)에 의해서 평가된다. Fig. 14는 단차구간 $L_s=1$, 기준구간 $L_r=6\text{mm}$ 이고 기준면이 $R_a=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0\mu\text{m}$ 일 때의 중심선의 최대 추정오차를 나타내고 있다. 예를 들어, 기준면이 $R_a=1\mu\text{m}$ 이면 $1\mu\text{m}$ 의 절삭깊이가 6%이내의 오차 범위로서 측정될 수 있음을 의미한다.

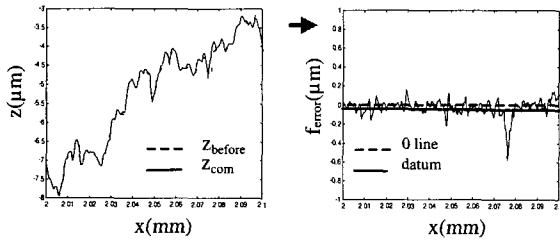


Fig. 13 Final error

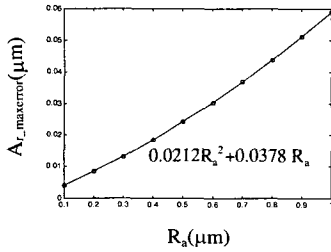


Fig. 14 Maximum estimation error according to R_a of reference region

중심선으로부터의 미세형상오차는 시편의 자세변동에 의한 측정위치의 변동 성분 $\epsilon_y, \epsilon_\theta$ 에 의해 발생하며, 미세형상오차의 크기(R_a)는 중심선으로부터의 절삭깊이의 평균으로 평가되고, 다음과 같이 표현된다.

$$R_a' = \frac{1}{E_e - E_s} \int_{E_s}^{E_e} |f_{\text{error}}(x) - \text{datum}(x)| dx \quad (8)$$

$$\text{상대오차량, } e_r(\%) = \frac{R_a'}{R_a} \times 100 \quad (9)$$

평가된 고정기구의 성능하에서 R_a' 크기는 측정 대상이 되는 시편의 표면 형상의 진폭성분과 y 축으로의 공간주파수성분에 영향을 받는다. 평가면의 R_a 값이 각각, 1.75, 0.77, 0.55, 0.27 μm 인 연삭 가공면에서 시편 재설정 과정에 의해 얻어진 프로파일(15 쌍) 들의 상대오차량(e_r)의 평균값은 각각 3, 7, 10, 10% 로 평가되었고, R_a 값이 작아질수록 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 R_a 값이 작을

면일수록 표면 프로파일이 첨예화되어 측정위치변동으로 인한 프로파일의 변화율이 커지는 현상에 기인한다.

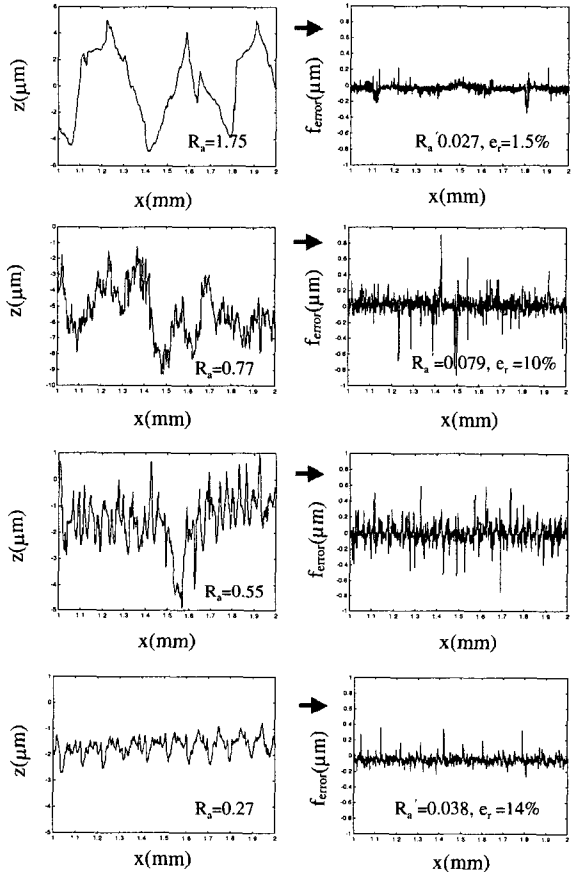


Fig. 15 Maximum estimation error according to R_a of reference region

Fig.16은 각 시편에서 시편 재설정을 전후로 하여 얻은 프로파일들에 오차보정을 수행한 결과를 보이며, 우측의 그림은 좌측의 두 프로파일의 차를 보인다. 오차보정의 결과로 두 프로파일의 재설정 오차가 동일위치에서의 형상 변화 관찰이 가능한 정도로 보정되었으며, 두 프로파일로부터 구해지는 거칠기 파라미터 값에의 오차 요인도 충분히 제거되고 있음을 확인할 수 있다.

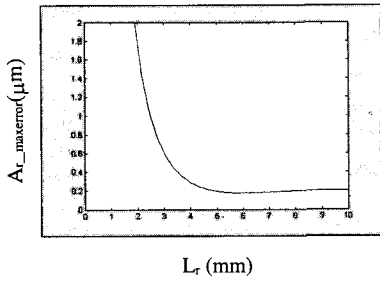


Fig. 16 Maximum estimation error in evaluation region

Table 1 Roughness parameters

	Z _{before}	Z _{after1}	Z _{after2}	Z _{after3}	Z _{after4}
R _v (μ m)	3.47	3.08	1.85	0.43	0.08
R _s (μ m)	4.06	3.55	2.34	0.77	0.23
R _t (μ m)	18.95	15.27	12.20	6.24	3.78
R _{sk}	-0.18	-0.62	-1.25	-2.89	10.1
R _{ku}	1.972	2.28	3.88	13.31	126.5
Removal depth		1.37	3.85	9.14	13.26

10. 결론

동일 위치에서 변화해 가는 표면 미세형상을 측정하기 위한 고정기구와 수치적 오차보정 알고리즘 개발을 목표로 한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 저비용으로 제작이 가능하고, 부가적 장치로 인한 오차발생 요소가 없는 비교적 단순한 형태의 고정기구를 고안하고 신뢰성을 확인하였다.
- (2) 동일 위치 측정시 발생하는 오차 요인을 밝히고, 보정 효과를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하여, 측정조건 및 방법을 제시하였다.
- (3) 실제 기계가공의 진행에 따른 동일 위치에서의 미세형상 변화를 측정하여, 고안된 고정기구와 오차보정 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

참고 문헌

1. Tadao Tsukada, Kazuyuki Sasajima, "A three-dimensional measuring technique for surface asperities," *Wear*, 71, pp. 1-14, 1981.
2. Tohru Kanada, Tatsusei Kubota and Atsushi Suzuki, "A three-dimensional surface profile measuring system with a specimen-levelling device," *Meas. Sci. Technol.* 2, pp. 191-197, 1991.
3. 최경용, "공기압 시스템을 이용한 경면 다듬질 자동화 장치 개발에 관한 연구," 한양대학교 산업경영대학원, pp. 1-9, 1997.
4. 이두찬, 정해도, 안중환, 三好隆志, "자동금형연마의 최적조건선정 전문가시스템 개발," 한국

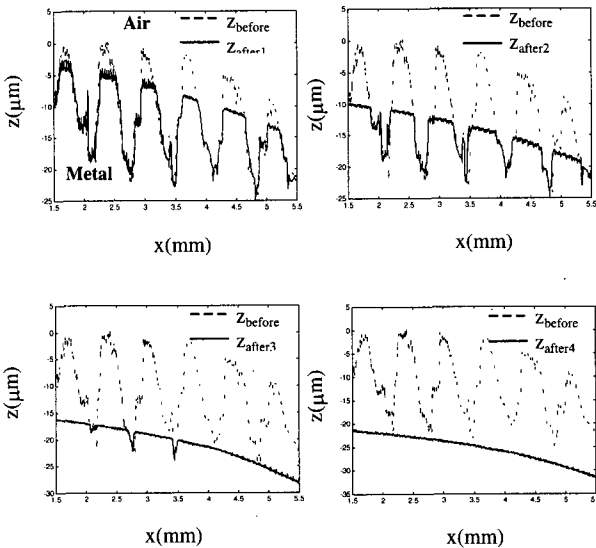


Fig. 17 The removing process of cusp

머시닝 센터를 이용하여 시편에 볼 엔드밀 가공으로 R_t(Peak-to-Peak value)가 20 μ m 인 cusp 가 생성되었으며, 이 cusp 가 연삭가공에 의하여 제거되어 가는 과정이 동일 위치에 대하여 측정되었다. 제작된 시편의 단차구간은 L_s=1mm 이고, 기준면의 거칠기는 R_a = 2.14 μ m 이다. 이 때, 보정 후 평가구간의 최대추정오차를 Fig.16 에 보인다.

또, Fig.16로부터 기준구간의 길이를 6mm 로 설정하여 cusp 제거과정의 관찰 결과를 Fig.17 에 보이며 각 가공 단계에서의 거칠기 파라미터와 절삭깊이는 Table 1 과 같다.

- 정밀공학회지, 제 14 권, 제 10 호, pp.58-67, 1997.
5. D. G. Chetwynd, F. A. McKee and C. H. Wride, "The measurement of wear damage," Proceeding of The Institution of mechanical engineering," Vol. 201, pp. 251-258, 1982 .
 6. P. A. Engel and D. B. Millis, "Study of Surface Topography in Impcat Wear," Wear, 75, pp. 423-442, 1982 .
 7. A. Bengtsson and A. Ronnberg, " The Absolute Measurement of Running-In," Wear, 109, pp. 329-342, 1986 .
 8. Sherrington and E. H. Smith, "Design and performance assessment of a Kelvin clamp for use in relocation analysis of surface topography," PRECISION ENGINEERING, Vol. 15, No. 2, April, pp. 77-85, 1993.
 9. P. J. Sullivan and N. Luo, " The Use of Digital Techniques for Error Correction in Surface Roughness Measurement," Surface Topography, 2, pp.143-157, 1989.
 10. Nahmyoo CHO, Tadao TSUKADA and Masaaki TAKAHASHI, "Measurement of Surface Roughness with Small Waviness by Contact Stylus Instrument Correcting Specimen Orientation," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 29, No. 1, March, pp. 74-79, 1993.