

# 3차원 미세표면현상 측정을 위한 시료면의 자세제어에 관한 연구

조 남 규\*

## Correction of Specimen Orientation in Three-Dimensional Measurement of Surface Roughness with Small Waviness

N. G. Cho\*

### I. 서 론

현대산업사회의 발달에 따라 제품의 고기능화·고성능화·고부가가치화의 경향이 현저하여지고 그에 따른 기계 및 전자분야의 눈부신 발전은 고정도 부품의 제작을 위한 초정밀 가공기술·및 초정밀 측정기술의 발전에 더욱 박차를 가하여 왔다.

그 중에서 정밀측정기술은, 설계정보로 주어진 Criterion에 대한 적부판정이라는 종래의 계측개념에서 탈피하여, 제품의 종합적인 가치평가기외에도 창조과정의 중요한 역할을 담당하는 주요기술로서 개념이 자리를 굳히고 있다. 즉, 물리량의 검출에 의한 적부검사 및 가동예의 Feedback 정보제공이라는 단순한 역할에서, 고도의 정보처리기술의 도입에 의한 적절한 요구사항의 처리에 의하여 기술전략·가공 및 조립·보수 및 관리·설계 및 개발·판매전략 등에 그 정보가 적극적으로 활용되게 되었다.

가공면의 표면미세형상은 가공부품의 품질뿐 아니라 다수의 부품으로 구성되어지는 최종제품의 기능 및 성

능에 큰 영향을 미친다는 사실이 널리 인식되어 있으며, 이를 평가하기 위한 여러 파라미터들은 표면미세형상의 3차원측정기에 의하여 수집이 가능하다.

### 2. 3차원 미세표면측정과 시료면의 자세보정

표면거칠기 측정기를 이용하여, 시료면을 측정기의 측정레인지내에 자동적으로 설정하는 3차원 표면미세형상 측정 시스템이 보고되어 있으나, 측정기의 측정레인지내에서 측정데이터가 안정하게 얻어질 수 있도록 하기 위하여, 먼저 낮은배율에서 시료면을 측정하여 얻어진 데이터를 사용하여 시료면의 경사와 축침의 높이위치를 제어하도록 하고 있다. 이 방법에서는 낮은 배율에서 얻어진 데이터를 사용하기 때문에 높은 배율에서 측정해야 할 필요가 있는 시료의 경우에는, 배율을 높이 조절하여 재차 측정한 다음, 그 데이터에 의한 자세보정을 되풀이하여야 한다.

이와 같은 배경에서, 최종설정배율의 상태에서 가능한 한 짧은 측정장의 데이터를 사용하여 시료면이 측

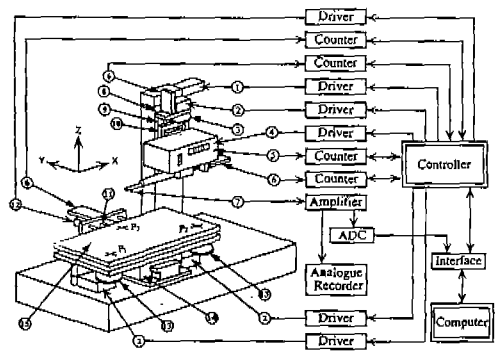
정래인지내에 위치하도록 시료테이블의 자세를 제어하고, 자세보정에 사용한 데이터에 연속한 단면데이터를 측정데이터로 이용하는 수법을 검토하였다. 그 연구에서는 공업분야에서 가장 널리 사용되어지고 있다고 판단되어지는 표면구분  $0.1\mu m \leq Ra \leq 2.0\mu m$ 의 표면을 대상으로 하여, 측정장 5.6mm의 단면곡선을 측정래인지내에 위치하도록 보정하기 위한 시료테이블 자세제어용 데이터의 측정길이를 명백히 하여, 1회의 측정조작으로 시료테이블의 자세제어와 단면곡선의 측정이 가능함을 보였다.

한편, 표면형상의 3차원측정에 있어서의 시료의 설정은 숙련된 오퍼레이터일지라도 골치아픈 작업이다. 그러나, 만일 소량의 데이터에 의하여 시료표면의 자세보정을 수행하는 상기와 같은 수법이 3차원 표면의 측정준비작업에 적용가능하다고 한다면, 수력도가 낮은 오퍼레이터라도 용이하게 3차원 측정을 수행할 수 있게 될 것이다.

본 연구는 시료면을 측정래인지내에 설정하기 위한 시료면의 자세보정을 수행함에 있어 필요로 하는 데이터량을 검토하여 측정준비작업의 능률화, 신속화 및 전 측정작업의 자동화를 그 목표로 한다. 이 경우의 데이터는 엘고드성을 가지며, 또한 디지털화하여 컴퓨터처리하는 것으로 한다. 또한, 비교적 단순한 경우로 파장이 긴 웨이비니스등의 형상오차가 작은 평면시료에 대하여, 스키드를 사용하지 않고 단면곡선측정을 수행하도록 한다.

### 3. 측정시스템과 시료자세제어기구

Fig. 1은 본 연구에 의하여 개발된, 축침을 사용하여 시료면상을 매트릭스상으로 측정하는 표면미세형상 측정시스템을 보인다. 시료테이블은  $P_1, P_2, P_3$ 의 3점으로 지지되어 있으며  $P_3$ 는 파벗지지이다. 또한,  $P_1, P_2$ 는 스테핑모터에 의하여  $0.1\mu m/p$ 로 구동되어지는 상하 조절용 스크류유에 의하여 지지되어 있다. X방향의 경사는  $P_1, P_2$ 의 스크류유를 등량 반대방향으로 등량의 제어에 의하여 보정하며, Y방향의 경사보정은 등량 동방향의 제어에 의하여 수행한다. Z방향의 위치는 축침의 구동 유니트를 스테핑모터에 의해  $0.1\mu m/p$ 로 구동한다. 데이터의 샘플링은 축침구동 유니트에 내장되어 있는 최소샘플링간격  $0.2\mu m$ 의 디지털 스케일의 축력필스에 의한다.



① Coarse feed motor in Z-axis ② Fine feed motor ③ Fine feed screw and gear ④ Drive unit in X-axis ⑤ Digital scale Installed in drive unit ⑥ Digital probe for zero-setting ⑦ Stylus ⑧ Column guide for coarse feed ⑨ Coarse feed stage ⑩ Fine feed stage ⑪ Screw of Y-axis ⑫ Motor of Y-axis ⑬ Screw ⑭ Air slide ⑮ Specimen table

Fig. 1 Outline of the three-dimensional measuring system

No.	Ra $\mu m$	H <sub>0</sub>	No.	Ra $\mu m$	H <sub>0</sub>
G1	1.9	1000	G8	0.8	2000
G4	0.4	5000	L1	0.5	5000
G5	0.2	10000	L2	0.2	10000
G6	0.1	20000	T1	2.7	1000
G7	1.6	1000	T2	0.3	10000

Note 1) Symbols G:Ground surfaces, L:Lapped ones, T:Turned ones

Table 1 Characteristics of specimens

시료의 자세제어용 측정데이터의 샘플링간격은  $1\mu m$ 를 기본으로 하여 측정길이는 10mm로 한다. 본 연구에 사용한 측정시료를 표1에 보인다.  $Ra$ 는 cuoff파장 0.8mm의 디지털 필터를 적용시킨 단면 프로파일로부터 구하여진 값이다.

### 4. 종방향 측정래인지와 측정 영역

본 연구에 사용된 측정기에서는, 단면곡선이 기록지의 폭 60mm에 대하여 20mm 정도에 들어가도록 설정할 것이 추천되어 있다. 따라서, 기록지의 폭 20mm에 상당하는 출력을  $2W_R$ 로 하여 단면곡선의 전 진폭이  $2W_R$ 이내가 되도록 증배율을 설정하는 것으로 한다. 또, 측정기의 최대 측정래인지는 선형 출력의 범위인  $2W_L$ 로 한다. 본 연구에 있어서,  $W_R, W_L$ 의 A/D 변환치는

$W_L=720$ ,  $W_R=120$ 이며  $W_R/W_L=1/6$ 로 한다.

본 연구의 주된 대상인  $R_a=0.1\sim 2.0\mu m$ 의 범위에서, 웨이비니스와 표면거칠기를 구분하는 cutoff파장  $\lambda_c$ 는  $0.8mm$ 이며, 표면거칠기의 평가길이  $L_0$ 는 ISO의 표준치를 채용할 경우  $5\lambda_c$ 가 된다. 한편, 연삭면이나 선삭면 등의 시료에서는, 일반적으로 Fig. 1의 X방향을 Tool Mark방향에 수직방향이 도록 설정하는 것이 통례이며, 따라서 X방향의 측정길이  $L_{ox}$ 는  $5\lambda_c$ 로 설정하여 지장이 없으나, 디지털 필터의 적용등을 고려하여 본 연구에서는  $L_{ox}=7\lambda_c$ 로 한다. 또한, Y방향의 측정길이  $L_{oy}$ 에 대해서는 아직 기준이 없으므로 X방향과 동일한 값을 적용시키는 것으로 한다.

그리고, 규격에 따라 단면곡선에 cutoff파장  $\lambda_c$ 의 가우시형 LPF를 적용하여 얻은 곡선을 웨이비니스 곡선, 단면곡선으로부터 웨이비니스 곡선을 제한 곡선을 거칠기 곡선으로 정의한다.

본 연구에서는, 표1의 시료들로부터 측정된 거칠기 곡선에 파장  $\lambda$ 의 정현파상의 웨이비니스곡선을 중첩하여 최대진폭이  $2W_L$ 이 되도록 한 데이터를 시물레이션용의 데이터로 하며,  $W_R$ 과  $W_L$ 에 상당하는 출력전압이 종배울에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있는 것으로부터, 단면곡선의 측정치는 A/D 변환치를 사용하기로 한다.

### 5. 시료자세제어의 모델

#### 5.1 시료자세제어의 모델

본 연구의 목적은 측정영역  $L_{ox}\times L_{oy}$ 의 표면프로파일의 중심표면을 적은 량의 데이터에 의하여  $W_L-W_R$ 이내에 설정하는 수법의 개발이다. Fig. 2는 시료자세제어용 데이터를 얻기 위한 측정라인을 보인다.

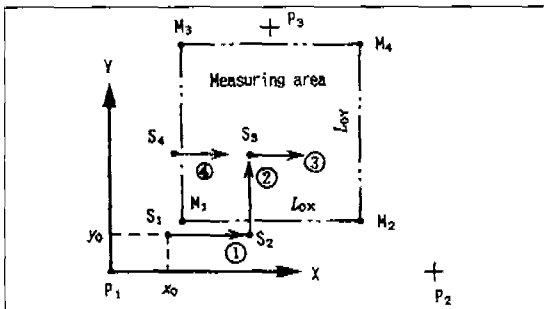


Fig. 2 Measuring area

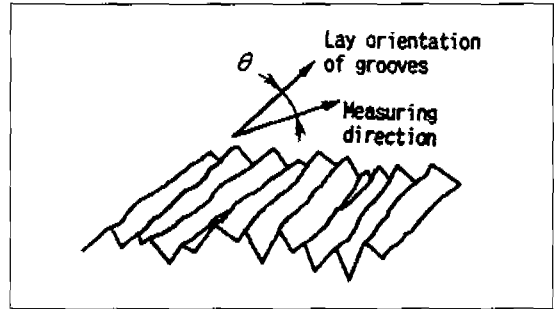


Fig. 3 Definition of measuring direction  $\theta$

먼저 X방향의 시료자세제어를 수행한 후, Y방향의 자세제어를 위한 데이터를 수집하여, Y방향에 대한 자세제어를 한다. X, Y방향의 측정데이터의 최소자승중심선  $f_x, f_y$ 는 다음의 식으로 된다.

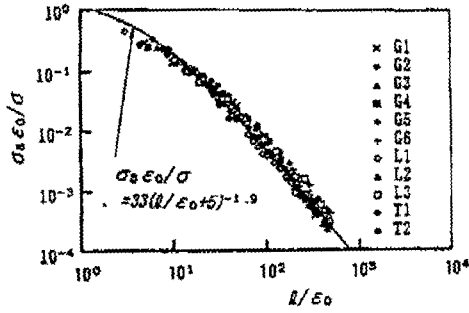
$$f_x = \eta_x(x_o + x_i - L_x/2) + \delta_x \quad (1)$$

$$f_y = \eta_y(y_o + y_i - L_y/2) + \delta_y \quad (2)$$

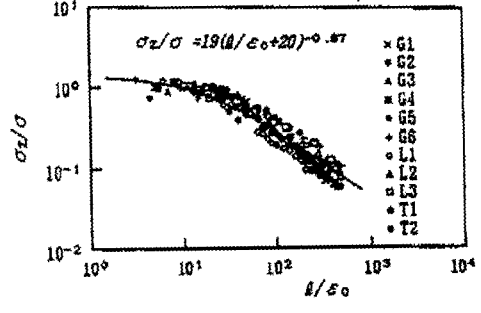
$\eta_x, \eta_y$ 는 X, Y방향의 중심선의 경사,  $x_o, x_i, y_o, y_i$ 는  $P_1$ 을 원점으로 하는 측정개시점과 그로부터의 거리,  $L_x, L_y$ 는 Fig. 1에 보이는 지지점간의 거리이다. 이 변환에 의해 X방향에서는  $P_1, P_2$ 의 제어량이  $\eta_x L_x/2, -\eta_x L_x/2$ 가 되고, 측정구동유니트의 Z방향 제어량은  $\delta_x$ 이 된다. Y방향에서는  $P_1, P_2$ 의 제어량이  $\eta_y L_y$ 이며 측정구동유니트의 Z방향 제어량은  $\delta_y$ 이다.

제어프로세스는, 먼저,  $S_1$ 으로부터 측정된 ① 방향의 데이터로부터 X방향의 경사와 Z방향의 추리를 제어하고, 다음에  $S_2$ 로부터 ② 방향의 측정 데이터에 의하여 Y방향의 제어를 한다. 이 방법을 방법 I이라고 한다.

그러나, 이방성표면에서는 측정의 주사방향은 표면의 기하학적 정보량이 많은 방향, 즉 tool-mark방향에 수직인 방향으로 설정하는 것이 일반적이므로, tool-mark방향에 가까운 방향이 Y방향으로 된다. 이러한 경우, 측정방향  $\theta$ 를 Fig. 3과 같이 생각하면,  $\theta \approx 0^\circ$ 에 가까운 방향의 단면곡선은 장파장성분이 주성분으로 되며, 따라서 이 부근에서의 시료자세제어에 필요로 하는 데이터의 측정길이는 증대한다. 본 연구에서는 이러한 경우에 대응하기 위하여, Y방향의 측정데이터를 사용하는 대신에, Fig. 2의 X방향 ①의 데이터로부터의 자세

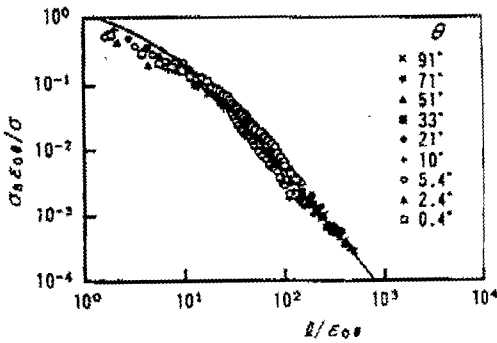


(a) Standard deviation  $\sigma_\epsilon$  of inclination

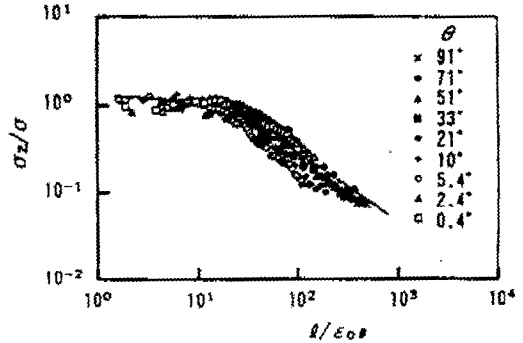


(b) Standard deviation  $\sigma_z$  of bias

Fig. 4 Standard deviation of  $\sigma_\epsilon$  and  $\sigma_z$



(a) Standard deviation of  $\sigma_\epsilon$  for G8



(b) Standard deviation of  $\sigma_z$  for G8

Fig. 5 Standard deviation of  $\sigma_\epsilon$  and  $\sigma_z$  of center lines in the direction of  $\theta$

정보를 이용하여 X방향의 자세제어를 수행하고, 같은 X방향인 ③의 데이터에 의하여 Y방향의 자세를 보정하는 수법을 생각하여 방법 II로 한다.

### 5.2 단면곡선에 있어서 중심선의 위치와 경사의 추정

단면곡선으로부터 임의의 측정길이  $l$ 의 데이터를 추출하여 최소자승중심선  $\eta_s x_s + \delta_s$ 를 구하였을 때,  $\eta_s$ 와  $\delta_s$ 의 표준편차  $\sigma_\epsilon$ 와  $\sigma_z$ 를 Fig. 4에 보인다. 또, 측정방향  $\theta$ 를 고려하여  $\theta$ 방향의 데이터로부터 얻어진 결과를 Fig. 5에 보인다.  $\sigma_\epsilon$ 와  $\sigma_z$ 는  $\eta_x$ 와  $\delta_x$ 의 보정에 의하여 발생한 측정길이  $L_0$ 의 단면곡선이 갖는 중심선자세의 분포를 나타내며,  $l$ 이 길어짐에 따라 0에 수렴한다.

여기에서  $\epsilon_0$ 는 거칠기곡선의 최소독립간격이며, 다음의 식으로 된다.

$$\epsilon_{00-90} \doteq 3R_\alpha + 4 \quad (3)$$

$$\epsilon_{00-90} \doteq \pi\sigma / (3.1\sigma_{\epsilon_0}) \quad (4)$$

윗식에서  $\sigma$ 와  $\sigma_{\epsilon_0}$ 는 각각 거칠기곡선의 표준편차와  $\theta$ 방향의 미소돌기의 사면경사의 표준편차이다. 한편,  $\theta$ 방향의 최소독립간격  $\epsilon_{00}$ 와 자기상관함수의 상관길이  $L_{c0}$ 는  $\epsilon_{00-90} / \epsilon_{00} = L_{c0-90} / L_{c0}$ 의 관계를 가지므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{00} = \epsilon_{00-90} L_{c0} / L_{c0-90} \quad (5)$$

이와 같이,  $\epsilon_{00}$ 를 도입하여  $\sigma_\epsilon$ 와  $\sigma_z$ 는 다음과 같은 근사식으로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} \sigma_\epsilon &= 33\sigma(\ell/\epsilon_{00} + 5)^{-1.9} / \epsilon_{00} \\ \sigma_z &= 19\sigma(\ell/\epsilon_{00} + 20)^{-0.87} \end{aligned} \quad (6)$$

시뮬레이션에서는 근사적으로  $\sigma = W_R/3$ 의 관계를 이용한다.

시뮬레이션용의 웨이비니스곡선을 파장  $\lambda$ , 진폭  $a$ 의 정현파형으로 나타내면, 웨이비니스곡선의 최소자승중심선의 경사  $\eta_w$  및 Z방향의 위치  $\eta_w$ 의 최대치  $\eta_{wmax}$ ,  $\eta_{wmax}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_{wmax} &= 78a(\ell/\lambda + 1.5)^{-3.9}/\lambda \\ \delta_{wmax} &= a/\ell \end{aligned} \quad (7)$$

### 6. 시뮬레이션용 알고리즘

#### 6.1 방법 I의 알고리즘

목표로 하는 측정영역의 Fig. 6과 같이  $M_1$ - $M_4$ 로 하여, 영역  $L_{OX} \times L_{OY}$ 의 데이터 중심평면인 CP면에 대하여, 시료자세제어용의 측정길이  $l_{OX}$  및  $l_{OY}$ 의 데이터로부터 구한 시료자세제어에 의하여 추정된 면을 EP면으로 둔다.

방법 I은 ①의 데이터를 이용하여 X방향의 시료의 자세제어를 한 후에 ②의 데이터에 의한 Y방향의 자세제어를 하는 방법이므로, CP면이 보정 후 측정레이저의 중심에 일치한다는 보장은 없다. 식 (6) (7)은 이러한 오차를 나타내며, 이 식들과 Fig. 6의 관계로부터 표면형상성분에 의한 EP면과 CP면과의 최대차  $Z_{smax}$ 와 웨이비니스성분에 의한 최대차  $Z_{wmax}$ 는 다음의 관계에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{smax} &= \eta_x L_{OX} + \eta_y L_{OY} + \delta_x + \delta_y \\ &\leq 3\sigma_{sx} L_{OX} + 3\sigma_{sy} L_{OY} + 3(\sigma_{zx} + \sigma_{zy}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$Z_{wmax} = \eta_{wmax} L_{OX} + \eta_{wy} L_{OY} + \delta_{wy} + \delta_{wy} \quad (9)$$

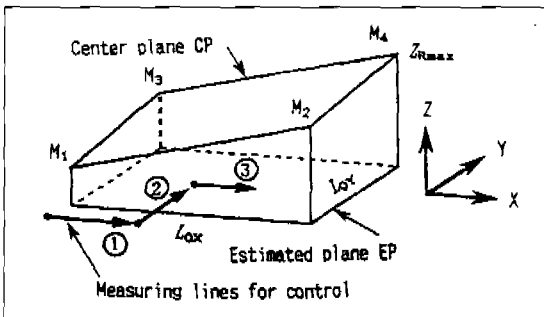


Fig. 6 Corner points of  $M_1$ - $M_4$  on the center plane

웨이비니스곡선의 전진폭을  $2W_w$ , 거칠기곡선의 전진폭을  $2W_s$ 라 하여,

$$W_w/W_R = K, \quad W_s/W_R = 1 - K \quad (10)$$

라고 하면, EP면과 CP면과의 최대의 간격  $Z_{Rmax}$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{Rmax} &= (1 - k)Z_{smax} + kZ_{wmax} \leq (W_L - W_R) \\ &= 5W_L/6 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)은 평면회귀시킨 3차원 표면프로파일의 최대진폭을 목적의 측정영역내에서 측정레이저내에 설정되는 조건을 나타낸다.

따라서, 본 연구에서는 위의 조건을 만족함과 동시에, 시료자세제어용 데이터수집을 위한 X방향 및 Y방향의 측정속도에 의존하는 계수  $k_1$ ,  $k_2$ 를 도입한 다음의 목적함수가 최소로 되는 조건 즉, 측정작업의 최적화를 도모한다.

$$F_1 = k_1 \ell_{OX} + k_2 \ell_{OY} \quad (12)$$

#### 6.2 방법 II의 알고리즘

방법 II는 X방향에 대한 자세제어용의 측정길이  $l_{OX}$ 의 데이터와 그로부터 Y방향으로  $l_{OY}$ 의 간격을 두고 ③의 방향으로 측정된 측정길이  $l_{OY}$ 의 데이터를 이용하는 이방성 시료면에 대응하기 위한 방법이다.

③의 데이터로부터 구한 최소자승직선 ( $\eta_3 x_i + \delta_3$ )을 고려하여 식 (1) (2)의 경우와 마찬가지로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_Y &= \eta_Y (y_o + y_j - L_Y/2) + \delta_Y, \\ \eta_Y &= (\delta_o + \delta_3)/\ell_{OY} \\ \delta_Y &= (\delta_o + \delta_3)(L_Y - y_o)/\ell_{OY} - \delta_o \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 뒷식에 의하여 측정라인 ①과 측정라인 ③의 중심선을 측정레이저의 중심에 설정하는 방법이 되나, Fig. 2의  $S_2$ 점과  $S_3$ 점에서의 ①과 ③의 최소자승중심선의 Z방향의 위치를  $\delta_{x1}$ ,  $\delta_{x3}$ 라 하면 양자의 차  $\Delta Z$ 는

$$\Delta Z = \delta_{x3} - \delta_{x1} \quad (14)$$

로 된다.  $\delta_{x1}$ ,  $\delta_{x3}$ 을 각기 표준편차  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z3}$ 을 가지며

정규분포에 따르는 양이라 하면,  $\Delta Z$ 의 확률밀도함수는  $N(0, \sigma_{Z_e}^2)$ 로 나타낼 수 있으며, 다음의 관계식이 사용될 수 있다.

$$\sigma_{Z_e}^2 = \sigma_{Z_1}^2 - \sigma_{Z_3}^2 \quad (15)$$

이상의 관계로부터  $S_3$ 점과  $S_2$ 점을 연결하는 직선의 경사는  $\eta_Y^*$ 는

$$\eta_Y^* = \Delta Z / \ell_{OY} \quad (16)$$

로 되며, 방법 I의 경우와 마찬가지로, 거칠기곡선에 의하여 추정되는 EP면과 CP면의 최대의 간격  $Z_{Smax}$ 와 웨이비니스곡선에 의한  $Z_{Wmax}$ 는 다음과 같다.

$$Z_{Smax} = \delta_{X1} + \eta_Y^* L_{OY} + \eta_{X1} L_{OX} \leq 3\sigma_{Z1} + 3\sigma_{Z_e} L_{OY} / \ell_{OY} + 3L_{OX} \sigma_{SX} \quad (17)$$

$$\sigma_{W_e}^2 = (\delta_{Wmax1} / 3)^2 + (\delta_{Wmax3} / 3)^2 \quad (18)$$

$$Z_{Wmax} = \delta_{Wmax1} + 3\sigma_{W_e} L_{OY} / \ell_{OY} + \eta_{WXmax} L_{OX} + \delta_{Wmax1} + \delta_{WXmax} L_{OX} \quad (19)$$

따라서, 거칠기 곡선과 웨이비니스곡선의 합으로 나타내어지는 단면곡선에 대해서 다음의 관계를 갖는다.

$$(1-k)Z_{Smax} + kZ_{Wmax} \leq (W_L - W_R) = 5W_L / 6 \quad (20)$$

이상의 관계로부터, 방법 II는 위의 조건을 만족함과 동시에, 계수  $k_1, k_2, k_3$ 를 도입한 다음의 목적함수가 최소로 되는 조건을 구하는 것에 의하여 달성되어진다.

$$F_2 = k_1 \ell_{OX} + k_2 \ell_{OY} + k_3 \ell_{OZ} \quad (21)$$

### 7. 결과 및 결론

Fig. 7은 본 연구에 의하여 측정된 측정결과에의 예를 보인다.

본 연구에 의한 시료자세보정을 한 후, 본 연구가 의도한 바와 같이 3차원 측정데이터가 측정레이저내에 설정되었는가를 다음과 같이 검토하였다.

5.6mm×5.6mm의 측정영역에 대하여 측정된 3차원 표면데이터의 최소자승중심평면과 측정레이저중양의 최대

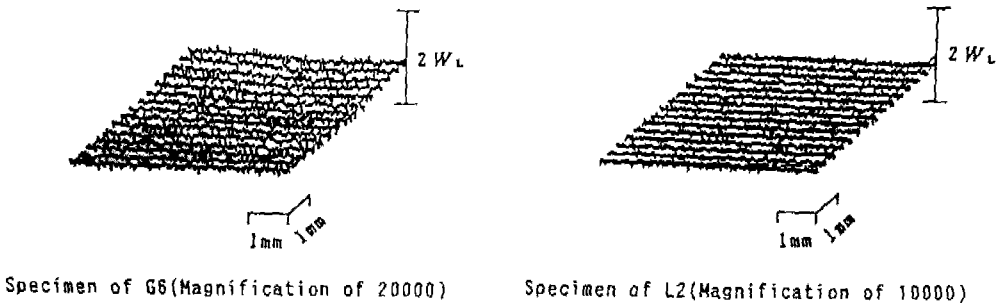


Fig. 7 Profiles after control by the optimum magnification

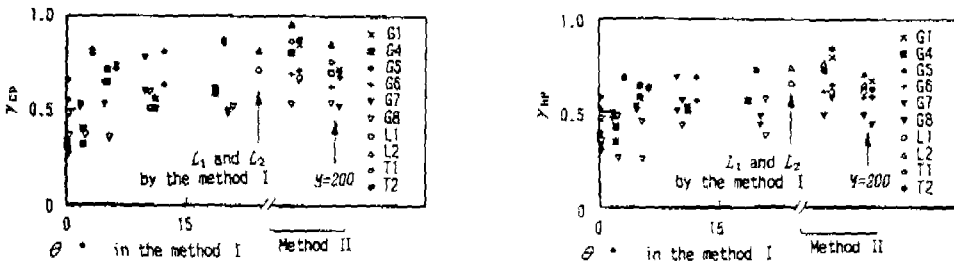


Fig. 8  $\gamma_{CP}$  and  $\gamma_{RF}$  by experiments

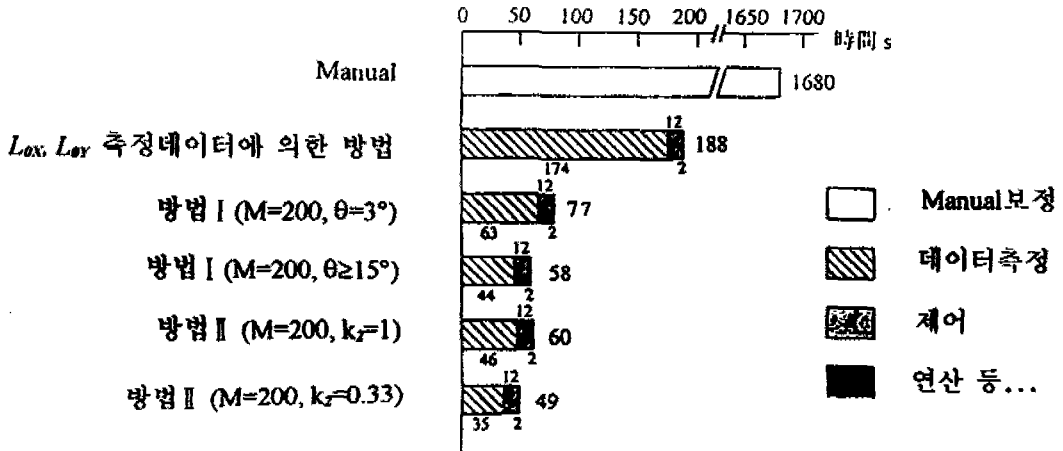


Fig. 9 Time for compensation of specimen surface orientation

간격을  $C_{Pmax}$ , 측정데이터와 측정레이저중양의 최대간격을  $R_{Fmax}$ 로 하여 각 측정레이저인  $5W_L/6$  및  $W_L$ 에 대하여 다음식으로 표현되는 여유도  $\gamma_{CP}$ ,  $\gamma_{RF}$ 에 의한 평가를 하였다.

$$\gamma_{CP} = 1 - 6C_{Pmax}/5W_L \quad (22)$$

$$\gamma_{RF} = 1 - R_{Fmax}/W_L \quad (23)$$

Fig. 8에 본 연구의 결과를 보인다. 방법 II 및 L1, L2에 대한 방법 I의 결과는 200배의 측정배율에서 측정된 데이터에 의하여 자세보정을 한 뒤, 적정의 측정배율에 의하여 측정된 결과로 M = 200으로 표기하여 구분하였다. 어느 경우의 결과도  $\gamma_{CP} \leq 0$ ,  $\gamma_{RF} \leq 0$ 로 측정 가능한 상태를 보이고 있다. 따라서, 본 연구에서 개발

한 시료의 자세보정방법이 유효함을 알 수 있다.

Fig. 9는 배율 5000배에서의 측정을 요하는 시료의 경우, 측정영역  $5.6\text{mm} \times 5.6\text{mm}$ 을 측정하기 위한 메뉴얼에 의한 자세제어와 개발된 방법에 의한 제어에 소요된 시간을 보인다. 본 연구에 의한 시료자세보정수법에 의하여, 자세보정에 소요되는 시간이 메뉴얼에 의한 자세제어에 비하여 1/20이하로 단축되었음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구는, 데이터의 통계적 처리수법에 의하여 시료의 자세보정을 위한 최적의 데이터량을 제시함으로써, 3차원 표면을 측정하기 위한 측정준비작업의 능률화, 신속화 및 측정작업의 전자동화가 가능함을 보였다.