韓國精密工學會 2000年度 春季學術大會論文集 pp.621~628

Ball Bar를 이용한 칩마운터의 운동 오차 정밀도 측정 및 평가 기술 개발

이창하*, 김정환*, 박희재*

Development of measuring and calibrating technology for moving error and precision of chip mounter using Ball Bar

Chang Ha Lee*, Jung Hwan Kim*, and Hui Jae Pahk*

ABSTRACT

A kinematic ball bar measuring system can analyze the various errors of a machine tool easil rapidly with only one measurement. But, it cannot be used to measure the errors of the equipment the semiconductor manufacturing (e.g. chip mounter, PCB router etc.) not to use a cir interpolation. This paper presents the method to apply a kinematic ball bar measuring system tc machines which use merely a linear interpolation . Also, the work of measuring and calibratir various errors of a chip mounter with a kinematic ball bar measurement system is accomplished

Key Words : Kinematic Ball Bar (기구 볼바), Chip Mounter(칩 마운터), Volumetric Error Map (입체 오차 지도), Machine Accuracy (기계 정밀도), Error Assessment (오차 평가), Measurement System (측정 시스템)

기호설명

$\tilde{x}$: Actual position in X-axis

$\tilde{y}$: Actual position in Y-axis

$\tilde{z}$: Actual position in Z-axis

x : Nominal position in X-axis

y : Nominal position in Y-axis

z : Nominal position in Z-axis

δ_{ij} : i-straightness error in j-axis

(i = j : positional error)

ε_{ij} : i-direction angle error in j-axis

α : squareness error between X-axis and Y-ax

β_1 : squareness error between X-axis and Z-ax

β_2 : squareness error between Y-axis and Z-ax

1. 서론

공작기계의 가공 정밀도에 영향을 주는 요소로

* 서울대학교 기계항공공학부

서 정적인 오차들로는 기하학적 오차, 기구학적 오차가 있으며, 동적 오차로는 서보게인 오차, 동특성 오차가 있다. 이들 중에서 정적인 오차를 측정하기 위한 장비는 레이저 측정 시스템이 가장 대표적이나, 측정이 까다롭고 기계의 동적 거동을 측정할 수 없는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 새로운 개념의 측정 장비로서 기구 볼바(kinematic ball bar)가 제안되었다.

기구 볼바 측정 시스템은 공작기계가 원호 보간 운동을 하는 동안의 profile 오차로부터 기계 정밀도를 평가하므로 기하학적 오차뿐만 아니라 동적 오차도 평가하며, 측정 시간이 짧은 고능률성을 지녔기 때문에 새로운 측정 장비로서 많은 관심을 모으고 있다.

그러나 반듯이 기계가 원호 보간을 해야 측정할 수 있다는 단점 때문에 PCB router, chip mounter 와 같은 반도체 장비에는 적용하기가 어려웠다. 반도체 장비는 공작기계와는 달리 Point To Point 방식으로 이송하기 때문에 원운동을 할 수가 없다. 물론 static measurement 기능을 사용하여 측정할 수는 있지만 Data 수가 적어 정확히 해석하기 어려우므로 측정 오차가 커지고 작업시간이 오래 걸리게 된다. 또 작업자가 계속 지켜보며 수동으로 측정해야한다. 따라서 산업 현장에서 사용하기에는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 측정 시스템과 알고리즘을 제시하였다. LVDT의 짧은 작동범위에서도 구동 할 수 있도록 구간을 세분화하여 구동하고 측정 Data도 충분히 받아들여 측정오차를 줄였다. 또 RS232C 통신을 이용하여 자동 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 Chip Mounter 에 적용해 보았다.

1. 이론적 배경

1.1 3차원 입체 오차식

Fig 1과 같이 ASME에서 분류된 11가지 machine type 중에서 vertical spindle - fi column machining center를 예로 들어 3차원 입체 오차식과 원호보간 오차식을 유도해 보겠다.

기계가 가진 x, y, z 세 방향의 오차를 구하기 위해서 먼저 다음의 Fig 2와 같이 각각의 축에 고정 된 좌표계들을 설정한다. 이들 좌표계를 통해 work piece와 tool 간의 상대좌표를 구하고, 여기서 command량과 tool offset을 제외하여 세 방향의 오차 성분을 구할 수 있다.

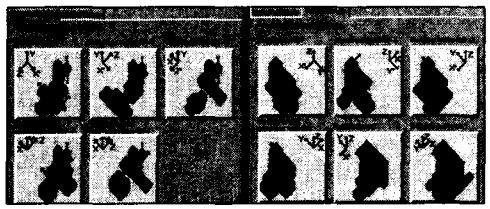

Fig 1. 11 types of machine tools classifi by ASME B5.54

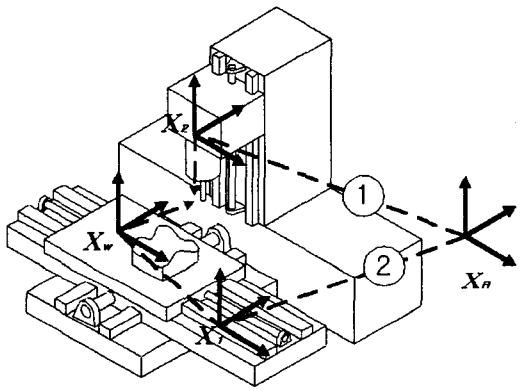

Fig 2. vertical spindle fixed column typ M/C

X_w : Coordinate fixed on X axis

X_1 : Coordinate fixed on Y axis

X_2 : Coordinate fixed on Z axis

X_R : Reference coordinate

2.1.1.1 Translation & Rotation Matrix

X, Y, Z 세 방향의 translation & rotatio matrix를 각각 다음과 같이 정의한다.

Translation Matrix :

$$L(x)=\begin{bmatrix}\tilde{x}+\delta_{xx}\\ \delta_{yx}\\ \delta_{zx}-\beta_1\tilde{x}\end{bmatrix}\quad L(y)=\begin{bmatrix}\delta_{xy}-\alpha\tilde{y}\\ \tilde{y}+\delta_{yy}\\ \delta_{zy}\end{bmatrix}$$

$$L(z)=\begin{bmatrix}\delta_{xz}\\ \delta_{yz}-\beta_2\tilde{z}\\ \tilde{z}+\delta_{zz}\end{bmatrix}$$

Rotation Matrix :

$$R(x)=\begin{bmatrix}1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx}\\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx}\\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1\end{bmatrix}$$

$$R(y)=\begin{bmatrix}1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy}\\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy}\\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1\end{bmatrix}$$

$$R(z)=\begin{bmatrix}1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz}\\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz}\\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1\end{bmatrix}$$

세 축의 위치 변수로 구성되어있는 각각의 matrix들을 기구 볼바에 사용할 수 있도록 세 축 방향의 command의 변수로 바꾼다. 모든 machine type에 대하여 앞의 세가지 rotation matrix는 공통적으로 사용한다. 단 translation matrix $(\tilde{x},\ \tilde{y},\ \tilde{z})$에 $(x,\ y,\ z)$를 대입할 때, tool이 위치한 쪽의 축에서 command는 축의 정방향 이동을 의미하므로 위치와 동일한 부호로, workpiece가 올려진 쪽의 축에서 command는 축의 역방향 이동을 의미하므로 위치의 반대부호로 대입한다.

1.2 두가지 경로식을 이용한 오차 계산

Translation, rotation matrix를 바탕으로 경로식을 유도하면 다음과 같다. (Fig 2 참조)

$$X_R = R(z)X_2+L(z) \quad \cdots\cdots\text{경로식①}$$

$$X_R = R(y)X_1+L(y) \quad \cdots\cdots\text{경로식②}$$

$$X_1 = R(x)X_w+L(x)$$

이를 workpiece에서 tool을 바라본 상대좌표인 X_w에 대해서 정리한다.

$$X_w = R(x)^{-1}\ [R(y)^{-1}[R(z)X_2+L(z)-L(y)] - L(x)]$$

여기에 translation & rotation matrix를 대입 정리하면 다음과 같다.

$$X_w = \begin{bmatrix} x_p-\varepsilon_{zz}y_p+\varepsilon_{yz}z_p+\delta_{xz}-\delta_{xy}-\alpha y \\ +\varepsilon_{zy}y_p+\varepsilon_{zy}y-\varepsilon_{yy}z_p-\varepsilon_{yy}z+x \\ -\delta_{xx}+\varepsilon_{zx}y_p+\varepsilon_{zx}y-\varepsilon_{yx}z_p-\varepsilon_{yx}z \\ \\ \varepsilon_{zz}x_p+y_p-\varepsilon_{xz}z_p+\delta_{yz}-\beta_2 z \\ +y-\delta_{yy}-\varepsilon_{zy}x_p+\varepsilon_{xy}z_p+\varepsilon_{xy}z \\ -\delta_{yx}-\varepsilon_{zx}x_p-\varepsilon_{zx}x+\varepsilon_{xx}z_p+\varepsilon_{xx}z \\ \\ -\varepsilon_{yz}x_p+\varepsilon_{xz}y_p+z_p+z+\delta_{zz}-\delta_{zy} \\ +\varepsilon_{yy}x_p-\varepsilon_{xy}y_p-\varepsilon_{xy}y-\delta_{zx}-\beta_1 x \\ +\varepsilon_{yx}x_p+\varepsilon_{yx}x-\varepsilon_{xx}y_p-\varepsilon_{xx}y \end{bmatrix}$$

여기서 구한 X_w에서 command량과 tool offset량을 뺀 값이 x, y, z 세 방향의 오차량 ΔX 이다. 그리고, tool offset은 값을 정하기 어려므로 0으로 가정한다.

$$(\Delta X = X_w-X-X_p\ ,\ X_p \simeq 0)$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{xz} - \delta_{xy} - \alpha y + \varepsilon_{zy} y - \varepsilon_{yy} z \\ -\delta_{xx} + \varepsilon_{zx} y - \varepsilon_{yx} z \\ \delta_{yz} - \beta_2 z - \delta_{yy} + \varepsilon_{xy} z - \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{zx} x + \varepsilon_{xx} z \\ \delta_{zz} - \delta_{zy} - \varepsilon_{xy} y - \delta_{zx} - \beta_1 x \\ +\varepsilon_{yx} x - \varepsilon_{xx} y \end{bmatrix}$$

…… 〈3차원 입체오차식〉

그런데, 기구 볼바는 roll 오차성분을 구할 수 없으므로 roll 오차성분을 무시한다. 그러므로 ΔX의 최종식은 다음과 같다.

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{xz} - \delta_{xy} - \alpha y + \varepsilon_{zy} y - \delta_{xx} \\ +\varepsilon_{zx} y - \varepsilon_{yx} z \\ \delta_{yz} - \beta_2 z - \delta_{yy} + \varepsilon_{xy} z \\ -\delta_{yx} - \varepsilon_{zx} x \\ \delta_{zz} - \delta_{zy} - \varepsilon_{xy} y - \delta_{zx} \\ -\beta_1 x + \varepsilon_{yx} x \end{bmatrix}$$

…… 〈기구볼바에 적용될 최종오차식〉

1.3 기구 볼바의 원호 보간 오차식

유도된 X, Y, Z 세 방향의 오차 성분을 이용하여 기구 볼바의 오차 해석에 필요한 원호 보간의 반경방향 오차식을 유도한다. 반경방향 변위와 X, Y, Z 세 방향 변위의 관계식은 다음과 같다.

$$(R+\Delta R)^2 = (x+\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2 + (z+\Delta z)^2$$

여기서 오차의 2차 성분을 무시하고 정리하면 반경방향의 원호보간 오차식이 유도된다.

$$\Delta R = \frac{1}{R}(x\Delta x + y\Delta y + z\Delta z)$$

…… 〈원호보간 오차식〉

여기에 세 방향 오차성분을 대입한다. 앞에서 구한 기하학적 오차 이외에 기구 볼바로 평가가 가능한 backlash 오차 (δ_{xb}, δ_{yb}, δ_{zb}), lateral play 오차 (l_{xy}, l_{yx}, l_{yz}, l_{zy}, l_{zx}, l_{xz}) servo-gain disagreement 오차 (s_{xy}, s_{yz}, s_{zx})등을 더한다.

$$\begin{aligned} \Delta R = {} & \frac{x}{R}(\delta_{xz} - \delta_{xy} - \alpha y + \varepsilon_{zy} y - \delta_{xx} + \varepsilon_{zx} y - \varepsilon_{yx} z \\ & + \delta_{xb} + l_{xy} + l_{xz}) \\ & + \frac{y}{R}(\delta_{yz} - \beta_2 z - \delta_{yy} + \varepsilon_{xy} z - \delta_{yx} - \varepsilon_{zx} x \\ & + \delta_{yb} + l_{yx} + l_{yz}) \\ & + \frac{z}{R}(\delta_{zz} - \delta_{zy} - \varepsilon_{xy} y - \delta_{zx} - \beta_1 x + \varepsilon_{yx} x \\ & + \delta_{zb} + l_{zy} + l_{zx}) \\ & + s_{xy} + s_{yz} + s_{zx} \end{aligned}$$

이 식의 양변을 R로 나누어 무차원화한 뒤에, 각 오차 성분에 modeling된 다항식을 대입하여 원호보간 오차식의 최종식이 구해진다. Vertical spindle-Fixed column Machining cent의 경우 최종식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} = {} & d_{xx1}\left(\frac{x}{R}\right)^2 + d_{yy1}\left(\frac{y}{R}\right)^2 + d_{zz1}\left(\frac{z}{R}\right)^2 \\ & + d_{xy2}\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right)^2 - d_{yx2}\left(\frac{x}{R}\right)^2\left(\frac{y}{R}\right) \\ & + d_{xz2}\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)^2 - d_{zx2}\left(\frac{x}{R}\right)^2\left(\frac{z}{R}\right) \\ & + d_{yz2}\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)^2 - d_{zy2}\left(\frac{y}{R}\right)^2\left(\frac{z}{R}\right) \\ & - \alpha\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right) - \beta_1\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right) - \beta_2\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right) \\ & - \frac{1}{2} d_{xb} sign(x)\left(\frac{x}{R}\right) - \frac{1}{2} d_{yb} sign(y)\left(\frac{y}{R}\right) \\ & - \frac{1}{2} d_{zb} sign(z)\left(\frac{z}{R}\right) \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2} d_{xy1} sign(\dot{y})(\frac{x}{R}) - \frac{1}{2} d_{xz1} sign(\dot{z})(\frac{x}{R})$$

$$- \frac{1}{2} d_{yx1} sign(\dot{x})(\frac{y}{R}) - \frac{1}{2} d_{yz1} sign(\dot{z})(\frac{y}{R})$$

$$- \frac{1}{2} d_{zx1} sign(\dot{x})(\frac{z}{R}) - \frac{1}{2} d_{zy1} sign(\dot{y})(\frac{z}{R})$$

$$+ m_{xy}(\frac{x}{R})(\frac{y}{R})Dir + m_{xy}(\frac{y}{R})(\frac{z}{R})Dir$$

$$+ m_{xy}(\frac{z}{R})(\frac{x}{R})Dir$$

…… 〈원호보간오차 최종식〉

앞의 최종식은 위치오차는 1차식, 진직도 오차는 2차식으로 가정한 경우이다.

Machine type에 따라 달라지는 항은 $(d_{xy2},\ d_{yx2},\ d_{xz2},\ d_{zx2},\ d_{yz2},\ d_{zy2})$의 진직도 2차 성분의 계수들이다. 즉, machine type에 따라 네 가지 최종식 중의 하나로 각각 해석해야 함을 의미한다. Chip Mounter 의 경우 로봇을 기반으로 한 것이기 때문에 좌표계가 일반 공작기계와는 다르다. 따라서 계수들도 다르게 설정해 주어야 한다. 좌표계는 아래 Fig 3 과 같고 계수는 앞의 Vertical spindle-Fixed column Machinin center에서 d_{xy2} = -1 , d_{yx2} = 1 로 바꾼다.

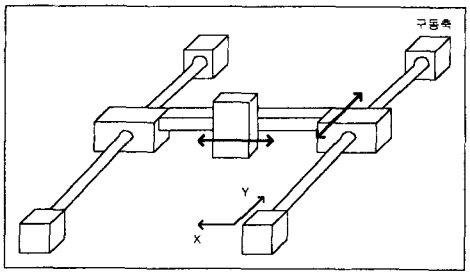

Fig 3. Coordinate of Chip Mounter

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성

실험을 위해 앞의 식들을 바탕으로 개발된 기구볼바와 삼성항공의 Chip Mounter가 사용되었다. 기구 볼바 측정 시스템은 크게 기구부, sensor interface부, 운용 소프트웨어로 구성되며, 실험실 벤처기업인 SNU Precision(주)를 통해 직접 개발한 시스템(제품명 AVEC-100)이 공작기계에 장착된 모습을 Fig 4에 나타내었다 공칭 길이 300mm의 기구 볼바를 사용하였으며, 기구부의 정확한 길이 교정을 위해서 인바(Invar)로 제작한 calibrator를 사용하였다

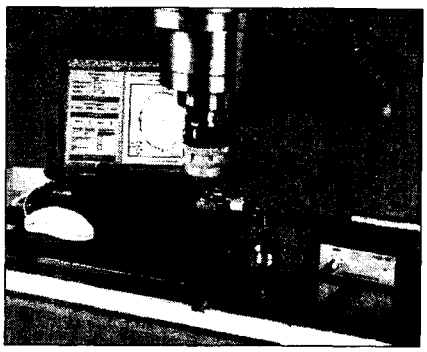

Fig 4. AVEC-100 system setup

기구 볼바는 RS232C를 통해 측정용 PC와 연결된다. 측정용 PC의 또 다른 RS232C port는 Chip Mounter의 컨트롤러와 연결되어 측정해야 할 순간에 신호를 받는다.

기구 볼바 센서의 stroke이 2mm로 매우 짧기 때문에 작은 각도를 여러번 움직인 후 측정하게된다. Fig 5과 같이 원주를 따라 이송하면서 작은 각으로 움직이면 볼바를 장착한 상태로 기계를 계속 작동하고 측정할 수 있게 된다

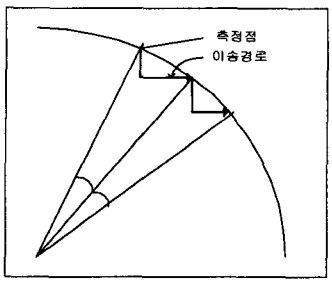

Fig 5. moving & measurement

기구볼바로 측정을 행하면 측정프로그램에서 각각의 오차성분이 모델링된 파라미터 정보와 그 외 보정에 필요한 정보들이 저장되어 있는 cmp파일

을 생성한다. 이 때 Chip Mounter의 구조상의 문제 - gantry 타입 - 로 인해 백래쉬의 양이 크므로 각각의 오차성분 측정, 그리고 X-Y평면에서의 백래쉬값 측정 이렇게 두가지의 측정을 행한다. 이렇게 두가지 측정 데이터를 기구볼바 프로그램에서 로드하면 cmp 파일이 생성된다. 이제 이 파일을 칩마운터의 콘트롤러에서 인식하여 보정에 필요한 정보들을 변수에 저장하고 미리 이식되어 있는 알고리즘에서 현재의 X, Y좌표값과 목적점의 X, Y좌표값으로부터 보정된 목적점의 좌표값으로 변환하여 Chip Mounter를 이송하게 된다.

cmp파일에는 X-Position Error, Y-Positio Error , Y-Yaw Error, X-Ydir. Straightnes Error, Y-Xdir. Straightness Error, X-Backlas Y-Backlash 에 관한 정보가 담긴다

3.2 백래쉬 측정

앞서 언급한 바와 같이 실험용 Chip Mounter는 백래쉬가 매우 크고 위치에 딸서 값이 상이하게 나타났다. 이를 보정하기 위해서 따로 백래쉬에 대해 한번 더 측정하였다. 측정방법은 Fig 6에서 보는 것과 같이 번호 순서에따라 X방향, Y방향으로 이송 하면서 가운데 점에서 4개의 Data를 얻는다. 그러면 그 값의 차로써 X,Y의 백래쉬를 계산할 수 있다. 물론 측정된 값이 반경방향의 값이기 때문에 Fig7에서와 같이 축방향의 값으로 바꾸어 주어야 한다.

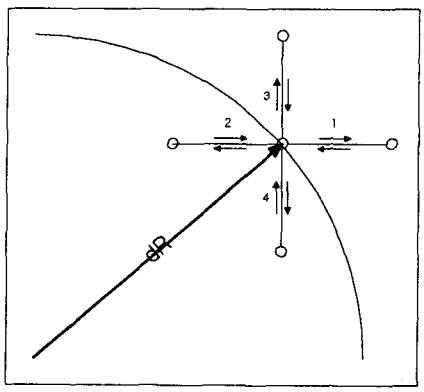

Fig 6 Backlash Measurement

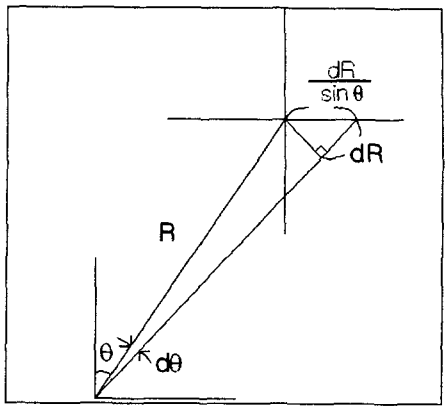

Fig 7 Analysis of Backlash

3.3 실험 결과

기구볼바를 이용하여 측정하고 이 결과를 이용하여 칩마운터를 보정하고 다시 기구볼바로 확인하였다. 또한 레이저 인터페로미터로 보정 전과 보정 후의 Chip Mounter X, Y축의 이송오차를 각각 측정하여 기구볼바의 성능을 확인하였으며, 이 결과 Chip Mounter의 정밀도가 약 3배 향상되었다. Fig8,9에 보정 전,후의 기구 볼바 측정 결과를 나타내었다. Fig 10,11에는 볼바로 보정하기 전후의 Chip Mounter를 레이저인터페로미터로 측정한 결과를 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 PC의 RS232C 통신을이용하여 기구 볼바와 Chip Mounter의 컨트롤러를 인터페이스하여, 기구 볼바의 적용이 어려웠던 반도체 장비 분야에 적용할 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한 PC를 통한 자동 측정 프로그램의 구현을 통해 손쉬운 방법으로 고정도의 측정과 보정을 할 수 있게 하였다

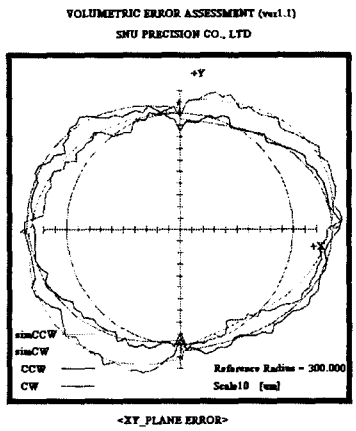

Fig 8. Measurement data before compensation

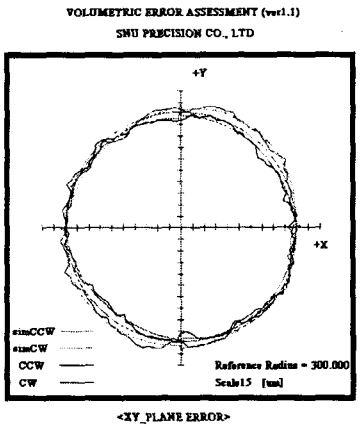

Fig 9. Measurement data after compensation

실험에 사용된 Chip Mounter의 경우 Resolution이 5um이다. 보정 후에는 정도가 10um 정도가 되었으므로 매우 효과적이었다고 여겨진다. 또한 레이저 인터페로미터와의 비교를 통해 실험 Data의 신뢰도를 검증하였다. 향후 이를 통해 더욱 다양한 장비에 자동화된 기구 볼바 측정 시스템을 적용할 수 있을 것이다.

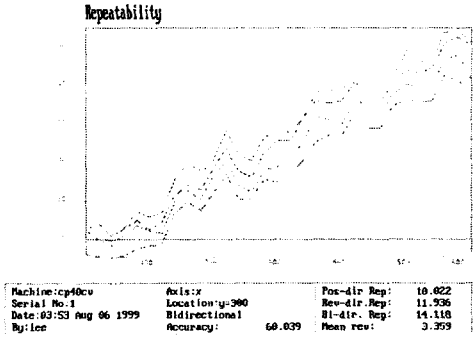

Fig 10 . Measurement data before compensation

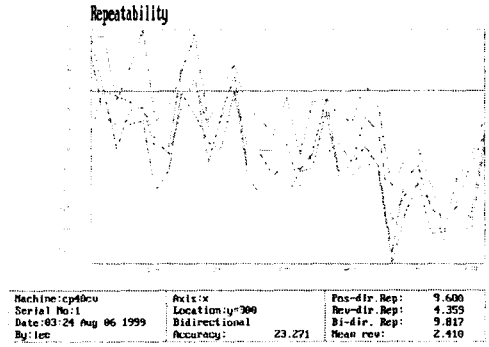

Fig 11 . Measurement data before compensation

참고문헌

(1) W.Knapp, Test of Three Dimensional Uncertainty of machine Tools and Measuring Machines and its relation to the machine errors, Annals of CIRP, Vol.32, No.1, pp.459-464, 1983

(2) J.Bryan, A simple method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Precision Engineering, Vol.4, No.2, 1982

(3) Y.Kakino et al., The measurement of motion errors of NC Machine Tools and diagnosis

of their origins by using telescoping magnetic ball bar method, Annals of CIRP, Vol.36, No.1, pp.377-380, 1987

(4) H.J.Pahk, Y.S.Kim, A new technique for volumetric error assessment of CNC machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model, Int. J. Machine Tools and Manufacture, 37(11), 1583-1596, 1997

(5) S. Yang, Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation, J. Manufacturing System, Vol 15, No. 2, 1996

(6) H. Kinzmann, On testing coordinate measuring machines with kinematic referenc standards, Annals of CIRP, Vol.32 No.1, 1983

(7) N. Hai, Reverse kinematic analysis of machine tool error using telescoping ball bar, Manufacturing Science and Engineering, Vol 1, 1994