

칩마운터를 위한 통합 오차 측정 및 평가 시스템 개발에 관한 연구

이동준(서울대 대학원), 문준희* (서울대 정밀연), 박희재(서울대), 정상호(삼성테크윈)

A study on the development of the integrated error
measurement and calibration system for a chip mounter

D.J.Lee(Mech. Eng. Dept. SNU), J.H.Moon* (Institute of Advanced Machinery and Design, SNU),
H.J.Pahk(SNU), S.H.Jung(Samsung Techwin)

ABSTRACT

A kinematic ball bar measurement system can analyze the various errors of a machine tool easily and rapidly in a procedure and can measure many types of equipment such as chip mounter, PCB router, precision stage, etc. In this paper, the thermally induced errors are focused among various errors of a chip mounter because it affects the accuracy of the machine very much. Linear regression technique is adapted for the thermal error modeling. While the measurement and calibration of a chip mounter is difficult in general, this developed system is not only easy to apply for it but also improves the accuracy by 4 times or more.

Key Words : Chip Mounter (칩 마운터), Kinematic Ball Bar (기구 볼바), Error Assessment (오차 평가), Measurement System (측정 시스템), Thermal Errors (열변형 오차), Compensation (보정)

1. 서론

산업이 발달함에 따라 생산 시스템 분야는 소비자의 다양한 요구를 만족시키기 위하여 다품종 소량생산 체제로의 전환을 시도하고 있으며, 이를 위하여, 생산설비의 자동화, 유연화, 고속화를 추구하고 있다. 이는 급격한 전자기술의 발전으로 인하여 가속화되고 있는데, 이 중에서 일반적으로 많이 연구되고 있는 분야 중의 하나가 표면실장기술(surface mounting technology, SMT)이라고 불리는 PCB(printed circuit board)의 조립작업이다. SMT는 PCB의 표면에 각종 소형 전자 부품을 장착하고 납땀하는 일련의 기술을 의미하는 것으로, 전자 기기 및 제품의 소형화, 고신뢰성, 다기능에 대한 요구와 기술적 진보에 의하여 등장한 새로운 부품 장착 기술이다. SMT로 인하여 실장 밀도의 향상 외에도 제품의 소형화로 인한 경비 절감의 효과, 전

기적 특성의 향상, 공장자동화로 인한 전환이 용이한 장점 등으로 인하여 점차 보편화되어 가는 실정이다. 그러나, 부품의 소형화와 미세한 배선으로 인하여 SMT에는 기존의 실장 기술보다 더욱 정교한 장착 기술이 필요하며, 대량 생산을 위하여 고속 동작이 요구된다. 특히, 생산단계에서는 시스템의 성능을 크게 좌우하는 실장 및 Flip Chip Bonder(칩마운터)의 효율적 운용이 필요하며, 그 가운데에서도 반도체의 고집적화, 초소형화의 영향으로 높은 정밀도 또한 요구 받고 있다. 이러한 생산 설비들의 높은 정밀도를 구현하기 위하여 다양한 오차의 원인을 분석 한 후 이 오차 성분들을 맵핑하여 실제 기계의 작업상의 오차를 구한 뒤 그 오차 성분들을 컨트롤러를 통해서 실시간으로 보정하는 방법을 사용한다. 현재 많은 연구가 진행되고 있는 실정이며 최근에는 초보적인 상용화 제품들이 나와서 검증단계에 들어가고 있다.

따라서 본 연구에서는 반도체 장비 중 칩마운터에 대하여 각 오차 성분을 측정하고 이를 오차 보정 방정식으로 3 차원 입체 오차를 구하여 이를 콘트롤러상에서 보정하려고 한다. 또한, 장비의 고속화로 인한 열 발생과 이로 인한 열변형량까지 측정하여 이송오차와 함께 보정하여 장비의 고정밀화를 이루어 그 부가가치를 한층 더 높이려고 한다. 현재까지 대부분의 오차 보정은 레이저 간섭계를 이용하여 수행하였지만, 레이저 간섭계는 측정이 까다롭고 한 번에 한 축의 한 가지 오차만을 측정할 수 있는 반면, 저렴하며 측정이 간편한 기구 불바는 한 번에 여러 가지 오차를 한 번에 측정할 수 있다. 이러한 레이저 간섭계의 단점으로 이를 산업 현장에 적용하기에는 많은 시간과 노력이 필요하며 숙련된 기술자가 필요하다.

본 연구에서는 기구 불바를 이용하여 더욱더 간편하고 능률적으로 CP60 과 같은 다양한 기종의 칩마운터에 대하여 기하학적오차 및 열변형 오차를 측정하여 보정하는 한편, 생산 단계에서도 기구 불바를 쉽게 적용하여 쓸 수 있도록 하고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 칩마운터의 입체오차 해석

입체오차(volumetric error)는 공작기계에서 공구 끝이 이송축 임의의 위치에서 가지는 오차를 정의하는 것으로, 각 축의 공칭값(nominal position)에 의존한다. 입체오차는 21 개의 기하학적 요소들에 의해서 계산되어져 결정된다. 물론 여기에 시스템 내의 열원과 주변 환경에 의한 오차도 포함된다. 특히 아베의 원리에 따르면 각도오차에 의해서 변위 오차가 확대된다. 이를 표현하기 위한 수학적인 도구가 동차변환행렬이다. 동차변환행렬은 기계의 기구학적 구성형태에 따라 다르게 구성되며, 체적오차를 구성하였을 때 공구 끝의 오차에 대한 기하학적 오차의 각 구성요소의 민감도에 대해서도 해석할 수 있다.

우선 X 축에 대해서만 생각해 보면(Fig1 참조), 먼저 임의의 원점을 (X_R, Y_R, Z_R) 라 하고 X 축 슬라이드 위의 좌표계를 (X_1, Y_1, Z_1) 라 둔다, 이 때 기하학적 오차성분중 X 축의 오차만 있다고 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -E_z(x) & E_y(x) \\ E_z(x) & 1 & -E_x(x) \\ -E_y(x) & E_x(x) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

또한 위치오차 및 진직도 오차 직각도 오차까지 고려하여 위의 식을 정리하면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 + X_N - E_z(x)Y_1 + E_y(x)Z_1 + \delta_x(x) \\ Y_1 + E_z(x)X_1 - E_x(x)Z_1 + \delta_y(x) - \alpha x \\ Z_1 + E_y(x)X_1 + E_x(x)Y_1 + \delta_z(x) \end{bmatrix}$$

여기에서 우변의 X_1, X_N, Y_1, Z_1 을 제외한 나머지 값들이 오차가 되는 것을 알 수 있다.

위의 식은 1 축에 관한 경우이며 일반적인 기계는 3 축이지만, 칩마운터는 Z 축이 없는 2 축이므로 위의 방법을 2 차원에 대하여 전개하면 된다. 또한 그 복합된 식들도 정형화되어 있는 것이 아니라 기계의 구조에 따라 특징적이므로 주어진 기하학적오차를 가지고 기계의 입체적인 공간상에서의 오차를 얻기 위해서 각 기계의 구조에 따라 특성화된 이송오차보정 방정식을 구한다.

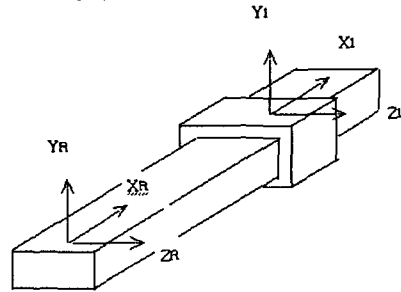


Fig. 1 Coordinates for X slide

2.2 기구 불바에 사용된 오차식

기구 불바는 임의의 평면에서의 원호 보간 운동의 profile 오차만으로 그 평면의 위치오차, 각도오차 등의 모든 기하학적 오차와 그 밖의 서보 오차 같은 동적인 오차를 유도해 내는 시스템이다. 다음은 profile 오차에서 여러 오차를 유도하는 알고리즘이다.

먼저 앞서 설명된 동차변환행렬을 이용하여 그 기계에 알맞은 오차식을 구해낸다. 그 다음 유도된 X, Y, Z 세 방향의 오차 성분을 이용하여 기구 불바의 오차 해석에 필요한 원호 보간의 반경방향 오차식을 유도한다. 먼저 반경방향 변위와 X, Y, Z 세 방향 변위의 관계식은 다음과 같다

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

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

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

여기에 세 방향 오차성분을 대입한다. 앞에서 구한 기하학적 오차 이외에 기구 불바로 평가 가능

한 backlash 오차 ($\delta_{tb}, \delta_{yb}, \delta_{zb}$), lateral play 오차 ($l_{xy}, l_{yx}, l_{yz}, l_{zy}, l_{zx}, l_{xz}$) servo-gain disagreement (s_{xy}, s_{yz}, s_{zx}) 오차 등을 더한다.

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

이 식의 양변을 R 로 나누어 무차원화 한 다음에, 각 오차 성분에 각각의 오차 특성에 맞게 modeling 된 다항식을 대입한다. 이러한 과정을 통해 기구 불바에 사용되는 원호보간 오차식의 최종식이 구해진다. 구해진 최종식을 바탕으로 측정된 데이터에 대해서 최소자승법을 이용하여 24 가지 무차원 오차변수들을 정하면 30 가지 오차 성분을 구할 수 있다. 그리고 각 축에 대한 reversal spike 오차 3 가지를 더하면 기구 불바에서 구할 수 있는 오차 성분은 총 33 가지가 된다.

3. 실험 및 결과

3.1 측정시스템의 구성 및 실험 방법

기구 불바는 RS232C 를 통해 측정용 PC 와 연결된다. 측정용 PC 의 또 다른 RS232C port 는 칩마운터의 컨트롤러와 연결되어 측정해야 할 순간에 신호를 받는다. Fig.2 는 칩마운터에 기구불바를 장착한 사진이다. 기구 불바는 300mm 길이의 바를 사용하였다. 실제 측정은 Fig.3 과 같이 원 주위를 따라 이송하면서 원호 보간 운동을 하다가 측정 위치에 도착하면 측정하게 된다. 원을 따라 움직이면서 3 도 간격으로 측정하였고, 반시계방향과 시계방향 2 번을 측정하였다.

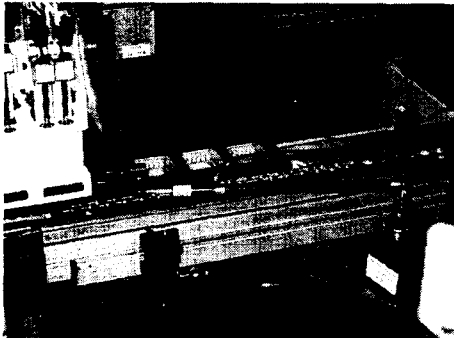


Fig.2 AVEC-100 system setup

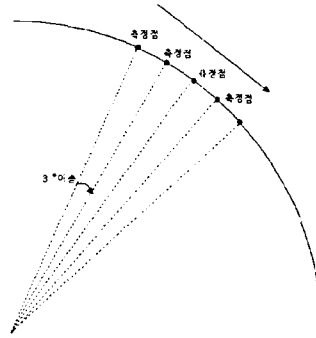


Fig.3 Measure points along with moving

3.1.1 기하학적 오차 보정 결과

위의 방법으로 칩마운터를 측정한 결과, 직각도가 $-47.4\mu\text{m}/300\text{mm}$ 으로 가장 크며, X 축, Y 축 위치 오차가 각각 $42.1\mu\text{m}$, $42.9\mu\text{m}$ 이었다. 이러한 기구 불바로 측정한 데이터를 이용하여 X 축과 Y 축의 위치오차를 보정해 보았다. 측정결과를 이용하여 파라미터 생성후 보정 여부를 확인하였다. 보정 전 데이터는 Fig.4, 보정 후 데이터는 Fig.5 이다.

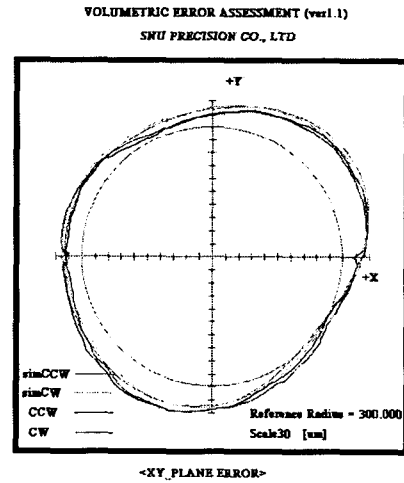


Fig.4 Measured data before compensation

새로운 파라미터를 이용하여 보정한 결과, X 축 위치 오차는 $42.1\mu\text{m}$ 에서 $-4.8\mu\text{m}$ 으로, Y 축 위치 오차는 $42.9\mu\text{m}$ 에서 $-4.5\mu\text{m}$ 으로 대략 1/10 수준으로 오차량이 줄어든 것을 관찰할 수 있다.

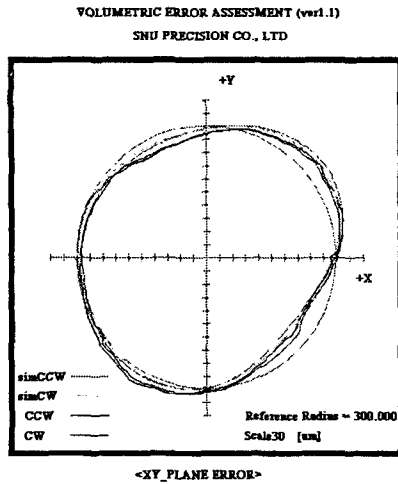


Fig.5 Measured data after compensation

3.2 칩마운터의 열변형 오차 측정

복잡한 구조물의 열변형을 해석하기 위해 유한 요소해석법(FEM)으로 계산 할 수 있으나, 실제적인 방법으로 각 부분의 온도와 그 때의 기하학적 오차를 측정함으로써 그 사이의 관계를 모델링하여 온도값만으로 오차를 예측할 수 있는 방법을 사용하였다. 열전대는 가이드웨이, 베어링, 볼 스크류등에 고루 부착하여 온도의 변화를 측정하였다. 열전대는 가장 일반적인 T type 으로 0.1°C의 분해능을 가졌다. Fig.6 은 온도측정시스템을 보여준다.

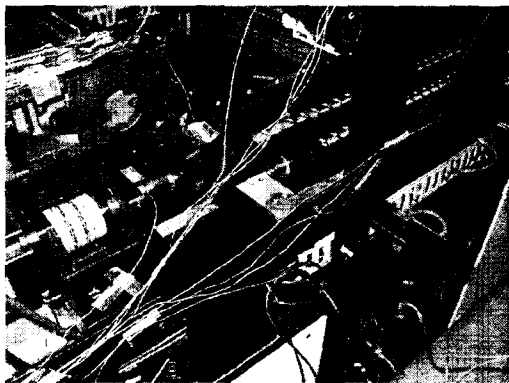


Fig.6 Temperature measurement system

3.2.1 실험 방법 및 결과

기본적으로 X-Y 평면에 대하여 가동 중에 칩마운터 각 부분의 온도를 체크하고 그 순간의 기하학적 오차를 측정하였다. 전체적으로 feedrate 1.37m/s 로 10 분 동안 이송하며 온도 상승후 오차를 측정하였다. 측정에는 약 20 분이 소요되며 feedrate 16.7mm/s 이다. 전체 시간 30 분을 기준으로 반복적으로 이송과 측정을 하였다.

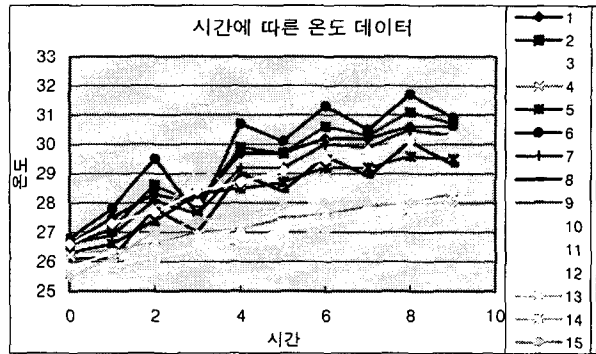


Fig.7 Variation of temperature

칩마운터는 고속 이송으로 인하여 빠른 온도상승을 관찰할 수 있으며, 특히, 볼스크류의 온도상승이 두드러지며, 측정하는 동안 온도가 빠르게 하강하였다. Fig.8은 온도에 따른 기하학적 오차의 변화를 나타내었다.

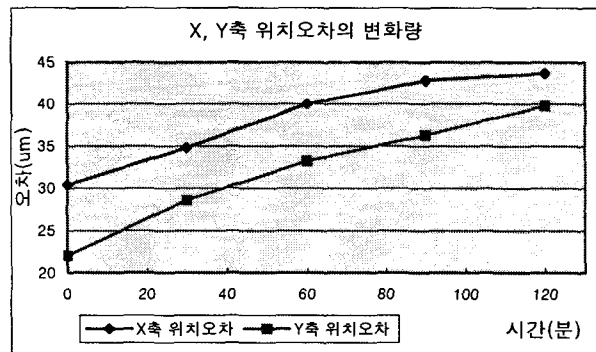


Fig.8 Variation of positioning error

3.3 이송축의 열변형 오차 모델링

이송축과 관계된 열변형 오차는 온도와 이송축의 위치를 동시에 고려하는 모델을 구성한다.

$$Error(P,T) = Error_g(P) + Error_l(T)$$

P 는 이송축의 위치, T 는 칩마운터 각 부분의 온도를 의미하며, $Error_g(P)$ 는 순수한 기하학적인 오차로 축의 이송위치에 의존하는 함수이며, $Error_l(T)$ 는 열변형 오차와 관계되는 함수로 이송축의 위치에 비례하여 나타나는 특성을 가지고 있으므로 다음과 같이 정의한다.

$$Error_g(P) = a_0 + a_1P + a_2P^2$$

$$Error_l(T) = m_1(T) \times P + m_2(T)$$

여기에서 a_0, a_1, \dots 는 기하학적인 오차와 관계되는 계수이며, $m_1(T)$ 는 열변형 오차항의 이송축

에 대한 기울기 값이며, $m_2(T)$ 는 온도에 대한 1 차 다항식이다. 각각의 계수는 최소자승법(Least mean square)으로 구하였으며, X 축과 Y 축에 대한 모델링 식은 다음과 같다.

$$Error(P,T)_x = -0.3514 \times 10^{-3} X + (-0.0166 \times 10^{-3} T_{guide} + 0.0285 \times 10^{-3} T_{bearing} + 0.0050 \times 10^{-3} T_{vt}) X$$

$$Error(P,T)_y = -0.7679 \times 10^{-3} Y + (-0.0105 \times 10^{-3} T_{guide} + 0.0420 \times 10^{-3} T_{bearing} + 0.0011 \times 10^{-3} T_{vt}) Y$$

4. 결론

본 논문에서는 기구 볼바를 이용하여 칩마운터의 기하학적 오차를 측정하여, 파라미터 수정을 통하여 보정하였다. 열전대를 이용하여 칩마운터의 각 부분의 온도를 확인하면서 기구볼바를 이용하여 기하학적 오차를 시간별로 측정하였다. 또한 열변형 오차를 측정하여 오차를 예측하기 위한 모델링을 해보았다.

장시간 구동에 따른 기계 각 부분의 온도변화를 적절히 파악하였고 기구 볼바를 이용하여 칩마운터의 기하학적 오차의 변화량도 확인할 수 있었다.

기구 볼바를 이용하여 기존의 레이저 간섭계보다 더욱 빠르고 간편하게 일련의 작업을 수행하였다. 향후 열변형 모델링을 이용하여 온도에 따른 오차를 실시간으로 예측하여 보정할 수 있는 시스템을 완성할 것이다.

참고문헌

1. Manfred Wec, "Handbook of Machine tools Volume 4 Metrological analysis and performance tests"
2. SHYH-CHOUR HUAND, "Analysis of a model to forecast thermal deformation of ball screw feed drive systems", Int.J. Mach. Tools Manufacture., Vol.35 No.8, pp 1099 - 1104, 1995..
3. G. Sohlenius, "The Accuracy Improvement of Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol. 39 1/1990
4. Raghunath Venugopal, Moshe Barash, "Thermal Effects on the Accuracy of Numerically Controlled Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol. 35 1/1986
5. P.A.McKeown, "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol. 44 2/1995
6. 박희재, 이석원, "실시간 온도계측에 기초한 신경망을 이용한 공작기계의 열변형 오차 모델링", 대한기계학회 추계학술대회집 pp964-969, 1995

7. H.J.Pahk, Y.S.Kim, J.H.Moon, 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
8. 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
9. J.Bryan, A simple method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Precision Engineering, Vol.4, No.2, 1982
10. 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