

측정플레이트를 이용한 공작기계 오차보정 (Machine Tool Error Compensation by using Measuring Plates)

양 종 태 * (한양대 대학원 기계설계학과), 정 성 중 (한양대 기계설계학과)

C.T.Yang * (HanYang Univ. Graduate School), S.C.Chung (HanYang Univ.)

Keyword : Thermal Deformation (열변형), Measuring Plate (측정플레이트), GMDH. Geometric Adaptive Control (GAC, 기하학적 적응제어), Touch Probe (측정프로브), Error Vector (오차벡터), Volumetric Error (체적오차)

ABSTRACT : Thermal deformation causes large amount of machine tool errors. In order to compensate for thermal and geomtric errors of the machine tool an off-line geometric adaptive control (GAC) scheme was developed. The GAC method was realized by using a measuring plate made of precision spheres. Error vectors and volumetric errors were measured by the measuring plate. Error compensation models were obtained from error vectors and a kinematic chain of machine tools. Reliability of the GAC system of thermal and geometric errors were confrimed by large amount of experiments.

1. 서론

자동화 공작기계 특히 머시닝센터에서는 무인화 지향이 강력하게 요청되면서 장시간 사용에도 일정한 가공정도를 유지하는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다. 고정도화를 실현하기 위해서는 공작기계의 공구와 공작물 사이의 가공역이 일정하게 유지되지 않으면 안된다. 실제 절삭공정에서는 여러가지 오차 원인들에 의하여 가공 정밀도가 영향을 받게 된다. 정밀가공에서는 가공정도가 중요하며 가공 중 발생하는 오차를 측정장치를 이용하여 측정한 후 가공조건을 조절하여 공작물 자체의 오차개선을 추구하는 GAC (Geometric Adaptive Control ; 기하학적 적응 제어) 방법이 요구된다. 가공정도를 저하시키는 주요한 원인으로 작용하는 것은 공작기계의 이송부분과 기계구조물의 형상부분에서 발생하는 기하학적인 오차와 이들의 기하학적인 오차가 공작기계의 발열이나 주위의 온도변화에 따라서 야기되는 열변형 오차 등이다. 이들은 공구와 공작물의 설치조건 및 가공조건으로 적절하게 선정된 경우에도 전체 절삭공정에서 야기되는 가공오차량의 70 % 정도를 점유한다. [1] 열변형 오차는 공작기계의 상태와 주위 환경변화에 따라서 비반복적으로 발생하는 랜덤오차로서 그 양을 Postprocessing 방법으로 측정후 제어하는 오프라인 (Off-line) 보상제어법이 신뢰도가 높다. [4~8]

본 연구에서는 공작기계의 기하학적 오차와 온도변화에 의하여 야기되는 공작기계의 정밀도 개선을 다루고 있으며, 비주기적인 보정이 필요시 접촉식 측정 프로브와 진구를 이용한 측정플레이트를 이용하여 공작기계 가공체적 내의 체적오차를 측정후, NC 장치의 피치오차 파라미터 보상법과 가공 프로그램을 직접수정하는 NC 파트프로그램 수정법을 이용하여 체적오차를 보상제어하는 오프라인 열변형 오차 보상제어법을 구현한다.

2. 공작기계 오차거동 규명

기하학적 오차의 열변형 거동의 경향을 분석하기 위하여 정적 오차[이인 피치오차의 배래쉬를 보정한 후, 주축회전에 따른 X,

Y, Z 축 각각의 위치오차를 측정하여 공작물 좌표계의 원점 변화 및 위치오차 거동을 살펴본다.

2.1. Warm-up 에 따른 기계원점의 위치 변화량 규명

큰 열변형 원인 중의 하나는 주축계 스피ndl의 회전에 의한 열발생이다. 이와같은 열영향에 따른 비반복적인 공작기계 변형오차를 규명하기 위하여 Warm-up 에 따른 각축 오차의 변화경향을 측정하였다. 정확하고 신뢰도가 높은 규명을 위하여 레이저 측정 시스템을 이용하였으며, 먼저 각 축 원점의 이동 경향을 측정하였다.

Fig. 1 은 본 실험 대상인 수평형 머시닝 센터의 구조도이다. Fig. 2 와 Fig. 3 은 스피ndl회전기계 Warm-up 에 따른 Y 축과 Z 축의 원점이동 현상을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 10 시간의 주축 온도변화에 의해서 야기되는 Y, Z 축 원점의 이동량은 정적인 위치오차에 10 ~ 20 배 정도로 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 Y 축 과 Z 축 변화경향이 매우 크며, X 축은 스피ndl과 분리되어 있는 형태로써 열변형이 거의 측정되지 않았다.

Fig. 4 는 Z 축과 Y 축의 Warm-up 에 따른 원점 위치의 오차 거동을 시간에 따라 함께 도시한 결과이다.

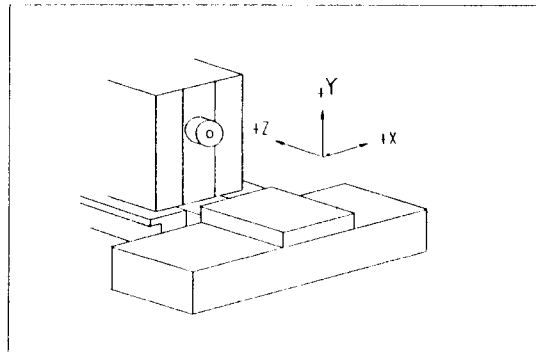


Fig. 1 Schematic diagram of horizontal machining center

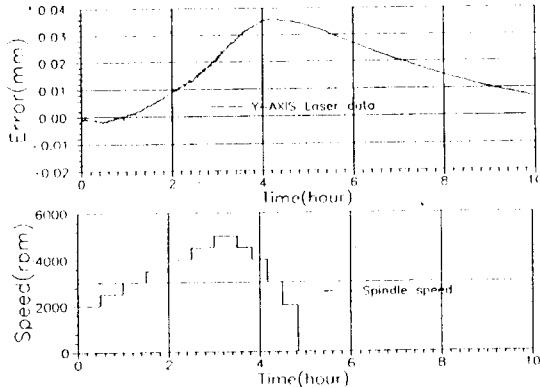


Fig. 2 Variation of Y-AXIS origin due to spindle warm-up

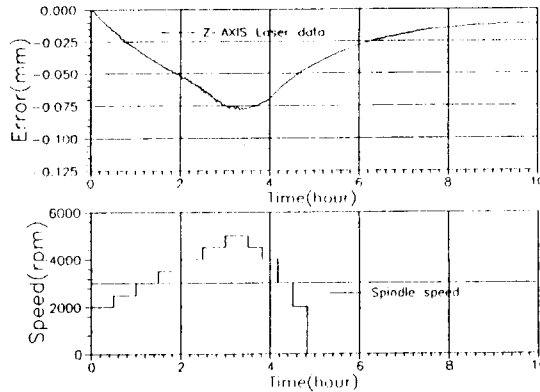


Fig. 3 Variation of Z-AXIS origin due to spindle warm-up

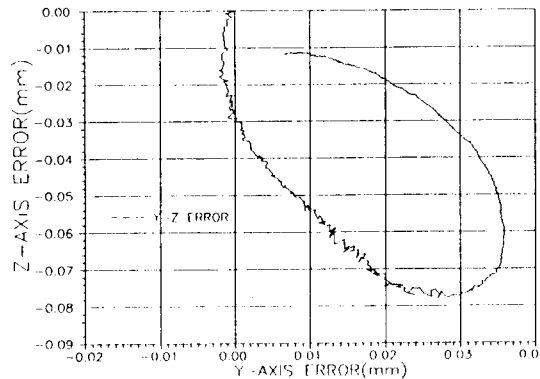


Fig. 4 Behavior of YZ-origin due to spindle warm-up

2.2 이송구간에 따른 Y, Z 축 열오차 규명

원점의 열변형 경향 뿐만 아니라 가공체적 내의 전반적인 위치변화의 기울기의 경향 또한 오차거동 규명에 필요하다.

실험조건으로 주축 회전속도의 변화는 위 2.1 절 실험과 동일하게 하고 5분 간격으로 스트로크의 변화를 10 mm 간격으로 레이저 측정을 수행하였으며 측정 시간은 1분이내로 하였다.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 Y, Z 축의 이송구간 위치에 따른 Warm-up 결과이다.

Z 축 오차의 변화경향은 이송구간 영역내에서 선형성을 띄고 있음을 알 수 있다. 즉 기울기의 변화가 작고 원점이동량이 많음을 알 수 있다. Y 축의 경우 원점의 변화와 함께 기울기의 변화가 같이 존재한다. Y 및 Z 축의 Warm-up 에 따른 열변형 거동 규명결과 동작기계 컬럼이 확모양으로 Y 축 정방향에 대하여 Z 축 정방향으로 휘어지는 경향을 유지하고 있음을 알 수 있다.

축이 회전에 의한 열변형 거동은 Z 축 동작물표의 변화에 관계없이 선형적인 관계유지의 원점이동량으로 대표되며 Y 축의 경우는 원점이동과 함께 이송구간에 따라서 2 차 곡선의 형태로 발생함을 알 수 있다.

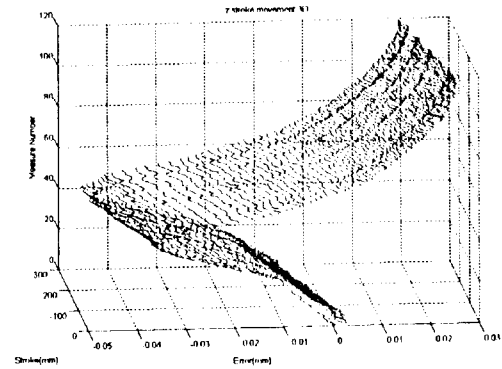


Fig. 5 Y-AXIS Position Error Behavior due to spindle warm-up (3D)

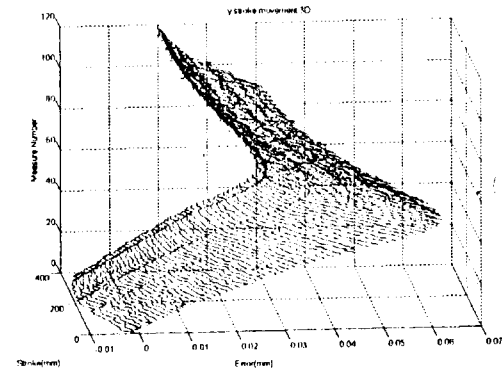


Fig. 6 Z-AXIS Position Error Behavior due to spindle warm-up (3D)

3. 온라인 열변형 오차 보상

위 실험을 통하여 얻어진 레이저 측정 오차 데이터와 동작기계의 전략적 위치에 설치한 16 개 열전대의 데이터를 이용하여 GMDH (Group Method of Data Handling)[10] 규명법을 수행하였으며 열전대의 GMDH 모델을 이용한 보상치의 추정과 그 오차를 계산하였다.

Fig. 7 은 스피들 입업에 따른 Y 축 원점이동에 대한 GMDH 모델링을 통한 원점거동 추정결과로서 10 시간 운전시 $\pm 3 \mu\text{m}$

이하의 추정오차를 가지고 있음을 알 수 있다. Z 축의 경우도 마찬가지로 결과를 보여준다.[11]

Fig. 8 은 스핀들 워엄과 이송구 구동에 따른 Z 축 위치오차의 변화를 랜덤한 이송구간에서 채취한 후 GMDH 방법으로 추정한 결과이다. Fig. 7 의 원점 추정결과에 비하여 $\pm 10 \mu\text{m}$ 정도의 비교적 큰 추정오차가 발생함을 알 수 있다. Y 축의 경우도 마찬가지로 결과를 보여준다.[11]

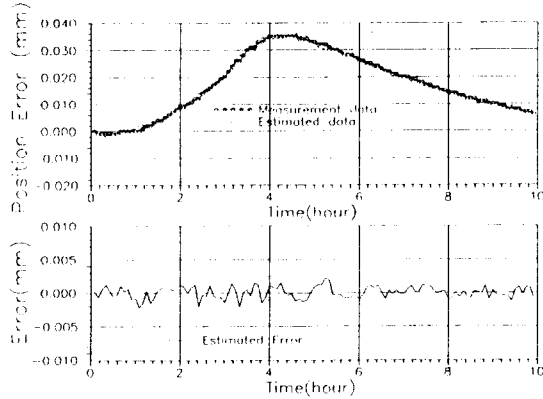


Fig. 7 Estimation of variation of Y-AXIS origin by GMDH

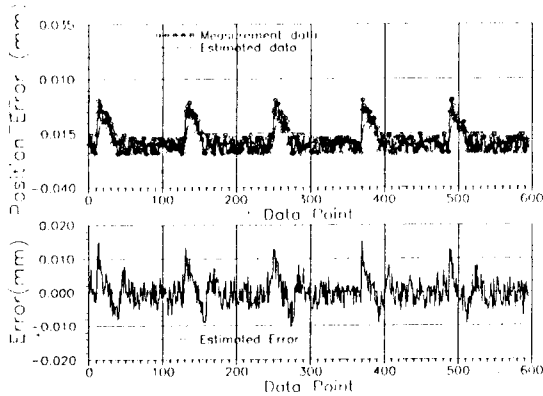


Fig. 8 Estimation of Position Error of Z-AXIS by GMDH (Random Sample)

4. 오프라인 오차보정 시스템

앞절의 GMDH 와 열전대를 이용한 온라인 GAC 의 경우는 장시간 거동에서 발생하는 온도 및 변위오차 등을 채취할 수 있는 데이터 수집장치의 필요성과 GMDH 모형화 작업이 반드시 요구되는데, 이들 작업시 요구되는 비용발생과 추정오차가 비교적 크게 발생하는 점에서 현실적으로 적용하기에는 한계가 있다.[10~12] 이때문에 가공현장의 원하는 시점에서 빠른 시간내에 설치 및 측정 보상이 가능한 공작기계에 Tool 형식으로 장착하여 오차를 바로 측정후 보상제어할 수 있는 오프라인 GAC 가 요구된다.[11~13]

본 연구에서는 측정프로브와 링게이지, 블록게이지 및 진구 등을 이용하여 공작기계의 보정을 수행한 후 오차추정을 위한 측정 플레이트를 12 개의 서로 다른 높이를 가진 진구들을

이용하여 제작하였다. 긴 프로브와 짧은 프로브를 사용하여 이중한개의 진구를 10 번 측정한 결과를 레이저 측정결과와 비교하면 공작기계 작업영역 (300×300×300 mm) 내에서 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같이 된다.

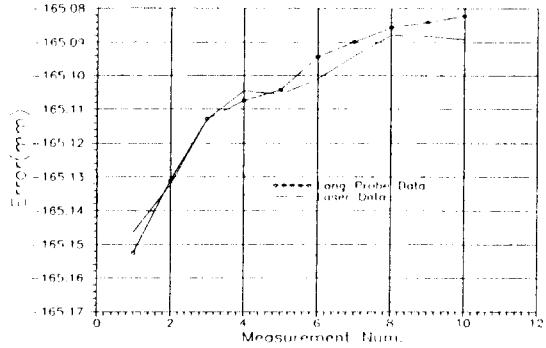


Fig. 9 Comparisons between Laser and Measuring Plate Measurement (Long Probe)

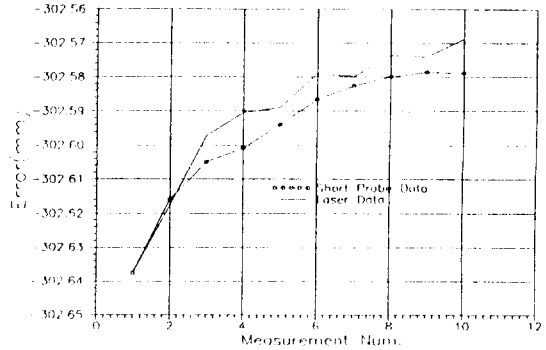


Fig. 10 Comparisons between Laser and Measuring Plate Measurement (Short Probe)

그림에서 보는 바와 같이 레이저 측정 데이터와 측정 프로브 데이터는 같은 경향을 보이며 오차량도 $\pm 5 \mu\text{m}$ 정도이다. 따라서 측정플레이트와 프로브를 이용하여 측정된 오차는 오프라인 GAC 를 위한 공작기계 열변형 오차추정에서 $10 \mu\text{m}$ 내의 높은 신뢰도를 가질 수 있게 된다.

본 오프라인 GAC 방법은 측정 후 보상제어를 수행하는 Postprocessing 방법[13]을 사용하는 것으로서 온라인 GAC 에서 열변형 오차규명에 필요한 레이저 및 온도 측정, 그리고 보상제어시 온도 측정과 보상제어법 등의 실현에서 신뢰도 저하의 극복은 물론 적용성과 사용 편의성이 우수하다.

5. 기하학적 연쇄기구를 이용한 오차 모형화

가공영역내에서 생기는 체적오차는 위치오차, 각오차, 직각도 오차 및 직진도 오차등이 기구학적 연쇄에 의해 서로 연관되어 형성되어진다. 각 축의 위치에 따른 오차량을 동차변환행렬 (Homogeneous Transformation Matrix) 을 사용하여 정리하면

$H' = \text{Pitch} \cdot \text{Roll} \cdot \text{Yaw} \cdot \text{Position Error}$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -e_x & e_y & dx \\ e_x & 1 & -e_x & dy \\ -e_y & e_x & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 되고[6,10,14], 3축 공작기계의 경우 최종 오차행렬은

$$H = H'(z) H'(y) H'(x) S(r) \quad (2)$$

이 된다. 각 축방향에서 발생하는 오차성분은 뒤에 서술할 오차벡터의 형태와 수많은 실험 결과[11]를 종합하면,

$$\begin{aligned} e_x(x) &= c_1 & e_y(x) &= c_7x + c_5 & e_z(x) &= c_4x + c_3 \\ dx(x) &= c_6x^2 + c_7x + c_5 & dy(x) &= c_9 & dz(x) &= c_{10} \\ e_x(y) &= c_{11} & e_y(y) &= c_{12}y + c_{13} & e_z(y) &= c_{14}y + c_{15} \\ dy(y) &= c_{16} & dy(y) &= c_{17}y^2 + c_{18}y + c_{19} & dz(y) &= c_{20} \\ e_x(z) &= c_{21}z + c_{22} & e_y(z) &= c_{23}z + c_{24} & e_z(z) &= c_{25}z + c_{26} \\ dz(z) &= c_{27} & dy(z) &= c_{28} & dz(z) &= c_{29}z^2 + c_{30}z + c_{31} \\ e_x(r) &= c_{32} & e_y(r) &= c_{33} & e_z(r) &= c_{34} \end{aligned} \quad (3)$$

가 되며, 식 (2) 에 대입 후 x, y 및 z 축 방향의 최종 오차성분을 구하면

$$\begin{aligned} Error(x) &= c_7zx + c_5z - c_4xy - c_3y + c_6x^2 + c_7x + c_8 + c_{13}z - c_{14}y^2 - c_{15}y \\ &+ c_{16} + c_{23}z^2 + c_{24}z - c_{25}yz - c_{26}y + c_{27} + c_{33}z - c_{34}y \\ Error(y) &= -c_{12}z + c_{13}x^2 + c_7x + c_6 - c_{11}yz - c_{12}y + c_{15}x + c_{17}y^2 + c_{18}x + c_{19} \\ &- c_{21}z^2 - c_{22}z + c_{23}zx + c_{28}x + c_{29} - c_{32}z - c_{34}x \\ Error(z) &= c_{14}y - c_4x^2 - c_3x + c_{10} + c_{11}y^2 + c_{12}y - c_{13}x + c_{20} + c_{21}yz + c_{22}y \\ &- c_{23}zx - c_{24}x + c_{25}z^2 + c_{30}z + c_{31} + c_{32}y + c_{33}x \end{aligned} \quad (4)$$

가 된다. 4 절에서 사용한 측정플레이트 상의 12 개 진구를 긴 프로브와 짧은 프로브를 이용하여 제측 후 정리하면

$$\begin{bmatrix} Error(x_1) \\ Error(y_1) \\ Error(z_1) \\ Error(x_2) \\ Error(y_2) \\ Error(z_2) \\ \vdots \\ Error(x_{24}) \\ Error(y_{24}) \\ Error(z_{24}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -z_1x_1 & \cdot & \cdot & \cdot & z_1 & -y_1 \\ -z_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -z_1 & x_1 & 0 \\ y_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & y_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -z_{24}x_{24} & \cdot & \cdot & \cdot & z_{24} & -y_{24} \\ -z_{24} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -z_{24} & x_{24} & 0 \\ y_{24} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & y_{24} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{32} \\ c_{33} \\ c_{34} \end{bmatrix}$$

$\underline{m} \qquad \qquad \underline{K} \qquad \qquad \underline{c}$

가 되며, 여기서,
 \underline{m} = Measurement Error Matrix
 \underline{c} = Unknown Coefficient Matrix

\underline{K} = Measurement Value Matrix (5)

이다. 그러므로 식 (4) 오차함수의 계수 \underline{c} 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\underline{c} = (\underline{K}^T \underline{K})^{-1} \underline{K}^T \underline{m} \quad (6)$$

6. 측정플레이트를 이용한 오프라인 오차모형화 실험

식 (5) 에서 \underline{K} 행렬은 양정치 (Positive Definite) 행렬이 되어야 하고, 식 (4) 오차함수 계산시 유효한 오차계수 값을 산출할 수 있도록 풍부한 (Rich) 위치공간에서 측정이 이루어지도록 진구 위치를 선정하여야 한다. 이를 위해 서로 다른 높이를 갖는 진구를 측정플레이트에 설치하였다. 주축에 열변형 영향을 주어 측정 플레이트의 진구 측정실험을 반복하며 이 결과를 가지고 원점의 변화와 기울기의 변화를 측정하였다. 공작기계 주축의 회전에 의한 열영향은 주위 실내 온도보다 높으므로 측정 프로브에 이 열영향이 적게 미치도록 하기 위하여 프로브 설치 후 측정시간을 최소화 하였다. 길고 짧은 프로브와 서로 다른 높이의 진구 스탠드를 이용하여 x, y, z 가공체적 내에서 풍부한 위치 데이터를 얻을 수 있었다.

공작기계 상에서의 가공은 상대운동에 의한 가공이기 때문에 실험조건은 공작기계 출하시 측정플레이트를 보정한 체적오차를 오차없는 기준위치로 가정한다. 공작기계에 일반적인 가공 조건과 같이 주축의 회전과 이송부의 이동을 주어 오차 발생을 유발시킨다. 일정 시간 후에 오차를 측정하기 위하여 측정 플레이트를 설치하고 길고 짧은 프로브를 이용하여 진구들의 위치를 측정한다. 서로 다른 길이를 가진 두개 프로브의 상대적인 위치 차이는 1 개의 진구를 동시에 측정하여 보정치를 계산한 다음 측정 프로그램내에서 이를 보정한다. 측정된 데이터를 이용하여 수학적으로 모형화된 위치오차 함수 식 (4) 의 계수들을 식 (6) 을 이용하여 규명하고 이를 공작기계 보정에 사용한다.

Fig. 11 에서 Fig. 14 는 열오차 발생전과 발생 후의 체적오차 변화경향을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 측정된 오차벡터는 가공체적내에서 위치 오차변화량을 나타낸다.

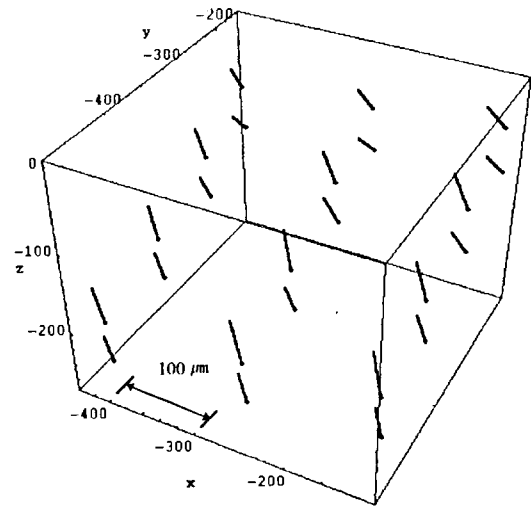


Fig. 11 Volumetric Error vectors on the spheres due to warm-up

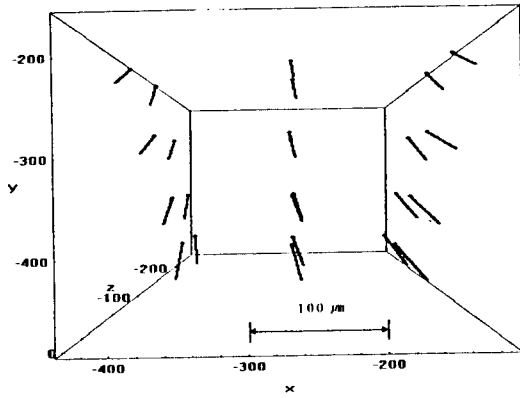


Fig. 12 Error vectors on the XY plane

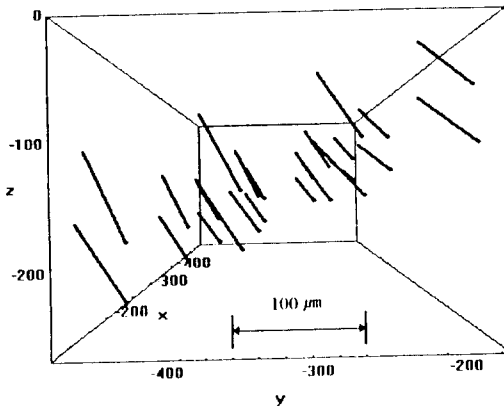


Fig. 13 Error vector on the YZ plane

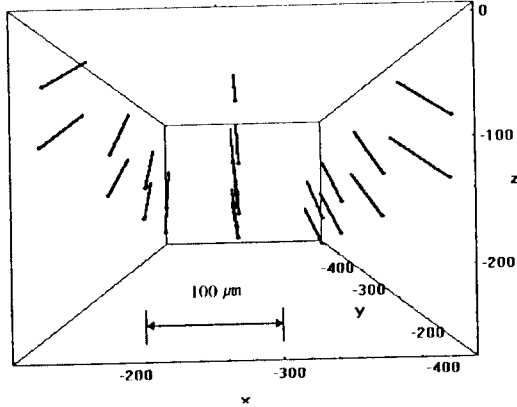


Fig. 14 Error vectors on the ZX plane

7. 오프라인 기하학적 적응제어 시스템

측정플레이트상의 진구 측정 데이터를 이용하여 모형화된 수식 (4)의 계수를 결정하고, Macro-B 프로그램 수정기법으로 기계작동중에 체적오차를 계산하여 기계이동중에 보상제어한 후 진구의 위치에서 오차를 재측정하여 보정된 결과를 구하였다. Fig. 15 ~ Fig. 17 은 GAC 법 적용 후 계측된 체적오차를 나타낸다.

X 및 Z 축의 경우 좋은 제어특성을 보여주는데 비하여 Y 축의 경우는 $10 \mu\text{m}$ 정도의 제어오차를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 실험대상 공작기계의 ISO 규격상의 위치결정정도 오차가 X, Y, Z 축에서 각각 4, 20, $10 \mu\text{m}$ 정도 발생하는데 기인한다고 볼 수 있다. 많은 GAC 실험결과 이외같은 수준에서 보상제어가 이루어졌으며[11], 이로부터 오프라인 GAC 법이 온라인 GAC 법보다 효율적임을 입증하였다.

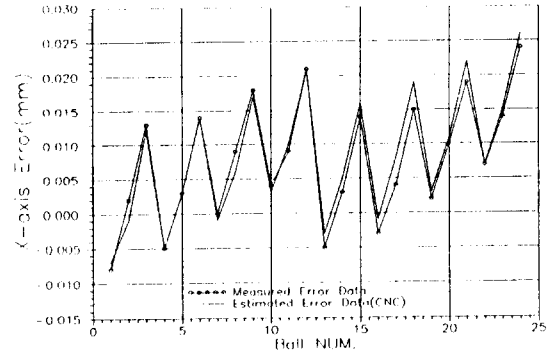


Fig. 15 Compensated volumetric error component in X-AXIS

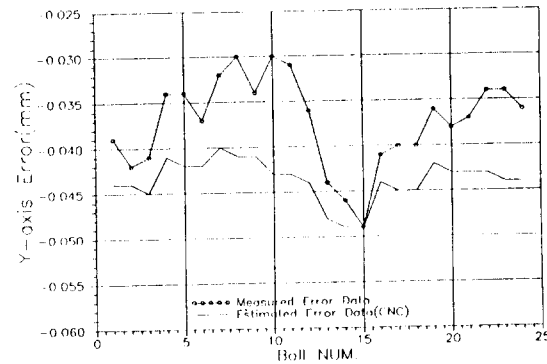


Fig. 16 Compensated volumetric error component in Y-AXIS

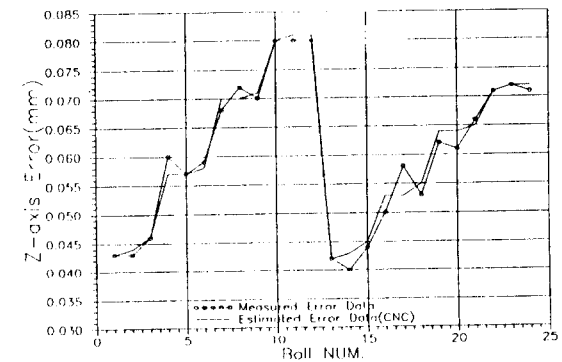


Fig. 17 Compensated volumetric error component in Z-AXIS

8. 결 론

측정플레이트를 이용한 공작기계의 기하학적 오차의 열변형 오차를 오프라인으로 적응제어할 수 있는 GAC 기법 제어시스템을 개발함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비반복적 랜덤오차의 주요한 요인이 되는 열변형에 의한 각 축의 위치오차 변화 거동을 규명하였다.
2. 측정오차의 3 차원 공간상에서의 벡터 표시를 통하여 수평형 머시닝센터의 경우, X 축은 공작기계 Warm-up 에 따른 열변형 오차량이 Y 나 Z 축에 비하여 상대적으로 적으며, 이동구간에 따라서 Y 축의 경우는 2 차 형태 그리고 Z 축의 경우는 선형적인 오차량으로 나타난다.
3. 진구를 이용한 측정 플레이트를 개발함으로써 기존의 레이저 측정 시스템보다 효율적인 3 차원 작업공간 내의 체적오차 측정 및 규명 시스템을 개발하였다.
4. 체적오차 규명을 위한 기하학적 연쇄를 이용한 수학적 오차 모형화방법 및 제어법을 제시하였다.
5. 측정된 공작기계의 체적오차를 보상할 수 있는 User Macro-B 를 이용한 NC 프로그램 수정기법을 개발하였으며 보상정도는 $\pm 10 \mu\text{m}$ 정도의 정확성을 가진다.

참고 문헌

- (1) J.Bryan, 1990, "Intenational Status of Thermal Research (1990)", *Annals of the CIRP* Vol. 39/2, pp.645-656.
- (2) 정성종, 1988, "공작기계의 자동화를 위한 적응제어 기술의 개발 동향", *대한 기계학회지*, 제28권, 제3호, pp.167-170.
- (3) 정성종, 박정균, 1992, "유한차분법을 이용한 볼스크류 시스템의 열팽창해석", *한국정밀공학회지*, 제 9 권, 제 4 호, pp.44-57.
- (4) S. C. Chung, C. W. Lee and J. S. Kim, 1988, "Geometric Adaptive straightness Control System for the Periphecal End Milling Process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.27 No.4, pp.417-430.
- (5) S. C. Chung and C. W. Lee, 1990, "Geometric Adaptive straightness Control System for the Peripheral End Milling Process with Large Error Sources", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.30, No.3, pp.447-465.
- (6) 정성종, 현광익, 1989, "삼차 오차 모형을 이용한 다축공작기계의 기하학적 오차규명 및 측정장치 개발", *한국정밀공학회 추계학술대회 초록집*, pp.132-139.
- (7) N. Nishiwaki, et al., 1988, "Thermal Deformation of Machine Tools Caused by Temperature Variations in Machine Shops", *Transactions of the JSME (C)*, Vol. 53, No. 495, pp. 2408-2413.
- (8) M. Matsuo, T. Yasui and T. Inamura, 1989, "Mcasurement and Decomposition of Thermal Deformation of a Machining Cencter", *Transactions of the JSPE*, Vol. 55, No. 9, pp. 1681-1686.
- (9) 일본공업규격, 1990, 공작기계-시험방법 통칙, JIS B 6201.
- (10) P. M. Ferreira and C. R. Liu, 1986, "A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of Machining Center", *Annals of the CIRP*, Vol. 35, No. 1, pp. 259-262.
- (11) 정성종, 박영진, 김승철, 김창성, 양종태, 1994, "고정밀 고생산성 머시닝센터 개발을 위한 절삭상태 및 열변형 적응제어 기술", 제 2 회 G7 첨단생산시스템 중간보고서.
- (12) 정성종, 박영진, 김승철, 김창성, 양종태, 1994, "고정밀 고생산성 머시닝센터 개발을 위한 절삭상태 및 열변형 적응제어 기술", 제 2 회 G7 첨단생산시스템 Workshop, pp.124-131.
- (13) K.F.Eman, 1986, "A New Approach to from Accuracy Control in Machining", *International Journal of Production Rescersch*, Vol.24, No.4, pp.825-838.
- (14) 정성종, 신동수, 박우열, 1993, "NC 공작기계에서 자동가공측정 및 오차보정을 위한 DNC 시스템의 개발", 제 1회 G7 첨단시스템 Workshop.