

3차원 좌표 측정기의 Software에 의한 Volumetric 오차 교정

박 준 호*, 이 응 석**, 양 증 화*, 조 소 형*

Volumetric Error Compensation of a Coordinate Measuring Machine using a Software Method

June-Ho Park*, Eung-Suk Lee**, Jong-Hwa Yang*, So-Hyug Cho*

ABSTRACT

A volumetric error compensation method was studied with measuring systematic error of a Coordinate Measuring Machine(CMM). The volumetric error equations were proposed for a Moving Bridge type CMM. Using the error equations, error vectors in the measuring volume were corrected by a software method. The CMM was controlled by the compensation program separately in the measuring and moving function of the CMM proving. The linear accuracy of the CMM was measured by the Laser Interferometer and compared with the data before the volumetric error compensation. This method was proved as low cost and effective to reduce the systematic error of the CMM, as no hardware modification is required.

Key Words : Volumetric Error compensation (3차원 오차보상), Systematic Error (계통적 오차), Volumetric Error Equation (3차원 오차방정식), Moving Bridge type CMM (브릿지이동형 CMM), Abbé Offset Vector (아베오차 벡터), Laser Interferometer (레이저간섭계)

기호설명

\vec{A} : Angular error vector

e_x, e_y 및 e_z : X, Y 및 Z방향 오차성분

$E_x(X), E_y(Y), E_z(Z)$: X, Y, Z-축 Roll 오차

$E_y(X), E_x(Y), E_y(Z)$: X, Y, Z-축 Pitch 오차

$E_z(X), E_z(Y), E_x(Z)$: X, Y, Z-축 Yaw 오차

\vec{L} : Linear error vector

S_{xy}, S_{xz} 및 S_{yz} : X-Y, X-Z 및 Y-Z 직각도 오차 (Squareness Error)

$\delta x(X), \delta y(Y)$ 및 $\delta z(Z)$ ($D_x(X), D_y(Y)$ 및 $D_z(Z)$) : X, Y 및 Z-위치오차 (Position Error)

$\delta y(X), \delta z(X)$ ($D_x(X), D_z(X)$) : Y, Z-방향 X-진직도 오차 (Straightness Error)

$\delta x(Y), \delta z(Y)$ ($D_x(Y), D_z(Y)$) : X, Z-방향 Y-진직도 오차 (Straightness Error)

$\delta x(Z), \delta y(Z)$ ($D_x(Z), D_y(Z)$) : X, Y-방향 Z-진직도 오차 (Straightness Error)

σ : 표준편차

1. 서 론

3차원 좌표 측정기 (CMM, Coordinate Measuring Machine)는 가공물을 3차원으로 측정키 위한 장비로서 세

* 대성중앙연구소

** 산업과학기술연구소(RIST)

계적으로 이미 그 사용도가 주요하게 인정되고 있고, 국내에서도 최근 그 보급이 확산되고 있는 추세이다. CMM은 가공물의 곡면을 공간적인 좌표로 정밀하게 표시하여 가공물의 설계도면과 수치상으로 비교할 수 있는 장비로서, 금형 및 주조물의 측정에서 필수적인 장비이다. CMM의 생명은 인지되는 바와 같이 그 측정 정밀도가 생명이며, 사용자의 숙련과 사용조건 등이 완벽하게 지켜진다면 결국 CMM 그 자체의 정밀도, 즉 오차가 문제시 될 것이다.

NC-공작기계 또는 CMM에서 현재 널리 사용되는 Software 오차 교정 방법으로는 Back-Lash 교정과 함께 Pitch error*(Linear error) compensation이 일반화되어 있다. 이중 Pitch Error compensation은 임의의 가공 또는 측정 축에서의 길이 방향 오차를 측정하여 그 값을 Controller에 입력시켜, 작업자가 지시한 (NC-공작기계에서) 또는 측정된 (CMM에서) 수치로부터 자동적으로 보상하여 주는 방법이다. 이 방법의 단점은 일단 교정된 축에서의 길이 방향 오차는 없어질 수 있지만 교정된 축에서 평행하게 다른 축으로 옮겨 가공 또는 측정한다면 각도 오차(Angular error)로 인한 오차가 다시 발생하게 된다. 그림-1과 같이 L, L'를 점 A, B 사이 오차 발생 전후의 측정길이라고 하고, 2차원 평면 (X-Z) 상에서 위치오차 [$\delta x(Xi)$]와 Angular 오차로는 Pitch 오차 [$Ey(Xi)$]만 있다고 가정된 운동기계에서의 점 A, B 사이의 2차원 길이 오차는 다음과과 같이 된다.

2차원 길이오차

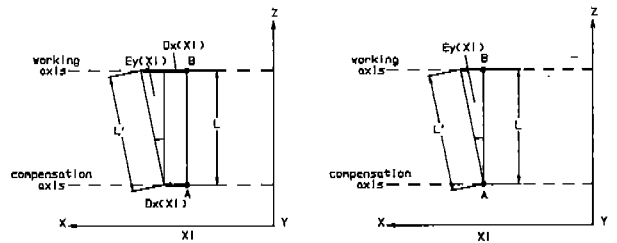
$$=L'-L=\sqrt{[Ey(Xi) \cdot L]^2+L^2}-L \quad (1)$$

Linear error compensation에 의해 위치 오차가 교정된 후 (그림-1b) 이동된 축 (Working axis)에서의 2차원 길이오차는 여전히 Pitch 오차에 의하여 같은 값을 존재함을 알 수 있다. 따라서 Linear Error Compensation은 주로 교정된 축에서만 작업이 된다고 가정한 것이며 실제로 가공 또는 측정물이 큰 부피인 경우 작업축을 옮김에 따른 오차를 피할 수 없다. 실제 대부분의 공작기계에서는 평행 축(X 또는 Y)에서의 마모로 인한 Pitch 오차가 심각한 것으로 알려져 있으며 작업물의 높이가 높아지면 이에 따른 오차가 클 것이다.

Volumetric 오차 교정방법은 기계의 Angular 오차를 포함한 모든 오차 성분을 고려하여 교정하는 방법이며, 이 방법으로는 측정공간 내에서는 어떤 방향으로 작업 축을

옮겨도 모든 공간 좌표점을 교정할 수 있다. 이 방법은 기계의 마모 및 외부환경조건 등으로 변화되는 오차성분을 정기적으로 측정하여 Controller에 입력하고 자동적으로 오차보정이 되게 할 수 있다. 또한 Controller 내부를 바꾸지 않고도 Software로 외부에 연결시켜 활용할 수도 있을 것이다.

최근에 이와 같은 Volumetric 오차교정 방법에 의한 실험실에서의 시도가 발표되고 있으며 [1], 또한 국제 규정에서도 규격화 움직임을 보이고 있다. 이 방법은 같은 원리로 Robot의 공간적인 위치교정에도 활용할 수 있을 것이다. (주 * : Angular 오차 Pitch가 아닌 리드 스크류 Pitch)



(a) before linear compensation (b) after linear compensation

그림-1. 2차원 운동 기계에서의 Linear error compensation 전후의 2-D length

2. 오차방정식

2.1 3차원 운동계

운동기계에서 존재하는 오차는 크게 기구학적 형상의 설계오차 및 부정확한 눈금 등에 의하여 고정적으로 나타나는 Systematic 오차와 Control Error, 외부환경 (온도, 압력), Back-lash 및 하중에 대한 변형 등에 의해 기인되는 Random 오차성분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 그림-2와 같이 측정 점을 여러 차례 반복하여 Random 오차에 대한 폭(Band)의 평균값(\bar{X})으로 Systematic 오차를 정의한다. Random 오차는 주로 Hardware에 의해 발생하며 이미 제작된 기계에서는 그 부품 또는 구동방식을 바꾸지 않는 이상 교정이 불가능하다. 반면에 Systematic 오차는 언제나 같은 값의 오차로 나타나기 때문에 그 교정

이 가능하며, Software 방법으로도 쉽게 처리될 수 있다.

Systematic 오차는 일반적으로 운동기계를 강제로 가정하여 1차원 운동의 경우 (X축) 그림-3a와 같이 6개의 성분으로 분류된다. 이들 성분 중 Angular 오차 (Roll, Pitch 및 Yaw)는 Abbé offset (\overline{AP}) [2]에 의해 운송체의 축이 실제 작업 또는 측정되는 축과 일치하지 않는 이유로 위치 오차에 영향을 미친다. 2차원 평면에서는 직각도 오차 (Sxy, Sxz 및 Syz)가 존재하는 경우 그림-3b와 같이 기울어진 축위로 운송체가 운동하게 된다. 따라서 이들 3차원 운동계에서 이들 21개의 오차 성분들에 의해 공간상의 임의 점에서 발생하는 Linear error vector는 90°보다 큰 직각도 오차를 +로 정의하면 X, Y 및 Z 축에서 각각,

$$\begin{aligned} \overline{Lex} &= [\delta x(X), \delta y(X), \delta z(X)] \\ \overline{Ley} &= [\delta x(Y) - Sxy \cdot Y, \delta y(Y), \delta z(Y)] \\ \overline{Lez} &= [\delta x(Z) - Sxz \cdot Z, \delta y(Z) \\ &\quad - Syz \cdot Z, \delta z(Z)] \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 되고, 또한 Angular error vector는 각 축에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \overline{Aex} &= [Ex(X), Ey(X), Ez(X)] \\ \overline{Aey} &= [Ex(Y), Ey(Y), Ez(Y)] \\ \overline{Aez} &= [Ex(Z), Ey(Z), Ez(Z)] \end{aligned} \quad (3)$$

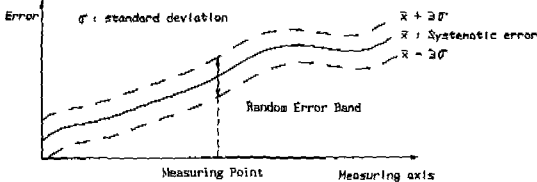


그림-2. 측정 데이터로부터의 일반적인 기계 오차(Systematic, Random)의 정의

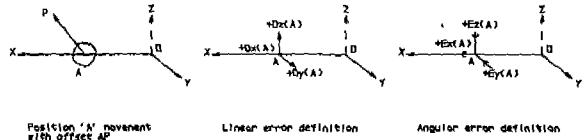
따라서 일반적인 3차원 운동계에 운송체가 원점으로 부터 점 P까지 움직였을 때 발생가능한 오차 벡터 \overline{Ep} 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{Ep} &= \overline{Lex} + \overline{Ley} + \overline{Lez} + \overline{Aex} \times \overline{Xp} + \overline{Aey} \times \overline{Yp} \\ &\quad + \overline{Aez} \times \overline{Zp} \end{aligned} \quad (4)$$

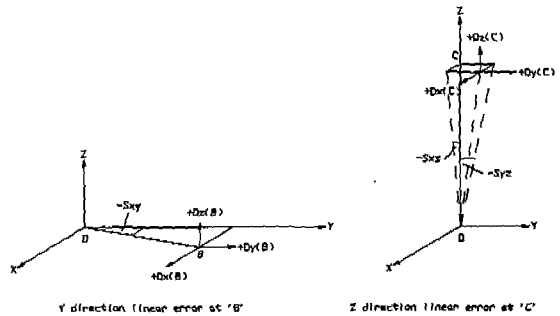
윗 식에서 기계의 구조에 따라 달라지는 Abbé offset vector \overline{Xp} , \overline{Yp} 및 \overline{Zp} 는 일반적으로 다음과 같이 되고,

$$\begin{aligned} \overline{Xp} &= \overline{Y} + \overline{Z} + \overline{Ky}, z, \quad \overline{Yp} = \overline{X} + \overline{Z} + \overline{Kx}, z, \\ \overline{Zp} &= \overline{X} + \overline{Y} + \overline{Kx}, y \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \overline{K} 은 CMM의 구조적인 상수이며, 예로서 \overline{Ky}, z 은 Y 및 Z 방향의 offset이다.



(a) One-dimensional movement with Abbé offset (\overline{AP}) on the carriage system and parametric error definition at position 'A'



(b) Y, Z direction linear error with squareness, Sxy, Sxz and Syz

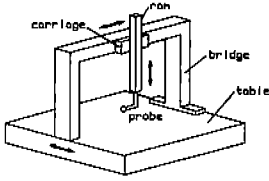
그림-3. 3차원 운동계 Systematic 오차 성분들의 정의

2. 2 Moving Bridge type CMM

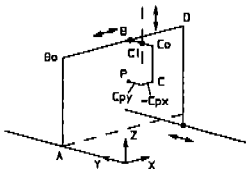
일반적인 3차원 오차방정식 (4)에서 그림-4와 같은 Moving Bridge type CMM의 경우 각각의 축 방향에서 점 P에 대한 Abbé offset vector는

$$\begin{aligned} \overline{Xp} &= \overline{Z} + \overline{Ky}, z \\ &= [0, -BCo + CPy, -(ABo - Z)] \\ \overline{Yp} &= \overline{X} + \overline{Z} + \overline{Kx}, z = [BoD - X, 0, Z] \\ \overline{Zp} &= \overline{Kx}, y = [CPx, -C_0C_1 + CPy, 0] \end{aligned} \quad (6)$$

윗 식에서 \overline{X} , \overline{Y} 및 \overline{Z} 는 원점에서 점 P까지 각축에서의 좌표 벡터이다.



(a) Moving Bridge type CMM



(b) Linkages of Moving Bridge type CMM

그림-4. Moving Bridge type CMM 및 각 링크에서부터 구조상의 거리로 표시된 연결시스템

따라서 식 (2), (3) 및 (6)을 벡터방정식(4)에 대입하고 X, Y 및 Z 성분으로 분해하면

$$\begin{aligned}
 ex = & \delta x(X) + \delta x(Y) + \delta x(Z) - Sxy \cdot Y \\
 & - Sxz \cdot Z - Ey(X) \cdot (ABo - Z) \\
 & + Ey(Y) \cdot Z - Ez(X) \cdot (-BCo + Cpy) \\
 & - Ez(Z) \cdot (-C_0C_1 + Cpy) \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ey = & \delta y(X) + \delta y(Y) + \delta y(Z) - Syz \cdot Z \\
 & - Ex(X) \cdot (ABo - Z) - Ex(Y) \cdot Z \\
 & - Ez(Y) \cdot (-BoD - X) + Ez(Z) \cdot Cpx \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ez = & \delta z(X) + \delta z(Y) + \delta z(Z) \\
 & + Ex(Z) \cdot (-C_0C_1 + Cpy) \\
 & + Ey(Y) \cdot (BoD - X) - Ey(Z) \cdot Cpx \\
 & - Ex(X) \cdot (-BCo + Cpy) \quad (9)
 \end{aligned}$$

윗 식은 측정공간 내 임의 점의 3방향 (X, Y, Z) 오차 ex, ey, ez가 21개의 Systematic 오차 성분들에 의해 구성됨을 보이며, 이들 오차 벡터는 측정 점의 위치에 따라 달라질 것이다. 따라서 각 측정 점에서의 오차 벡터를 윗 식에 의해 계산하여, 운동계의 volumetric 오차교정이 가능할 것이다.

3. 3차원 좌표 측정기의 오차 측정

그림-5. 에서와 같이 CMM의 기준 점 (0, 0, 0)으로부터 Laser interferometer를 설치하여 측정공간의 각 모서리에서 일정간격으로 길이 방향 (Position) 오차를 측정한다. 길이 방향 오차 측정은 Back-lash 및 Random 오차를 제거하기 위하여 각 측정 점에서 전방 및 후방 방향으로 3번씩 측정하며 그 평균값을 취하였다 [3]. X-Pitch 오차의 경우 그림-5의 XB 및 XC 축의 Position 오차측정 데이터를 이용하고, X-Yaw 오차의 경우 XA 및 XB 축 측정 데이터를 이용하여 각각 그림-6과 같이 Angular 오차를 계산한다. 같은 방법으로 Y 축의 경우 YA, YB 및 YC 축에서의 Position 오차 측정 데이터, 그리고 Z축에서는 ZA, ZB 및 Zc 측정 데이터를 이용하여 Pitch 및 Yaw 오차를 계산한다.

XA, YA 및 ZA 기준 축에서의 직각도 및 진직도 오차는 그림-7과 같이 Laser interferometer를 이용하여 측정하였다.

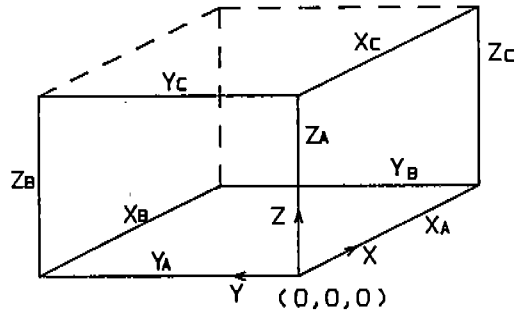
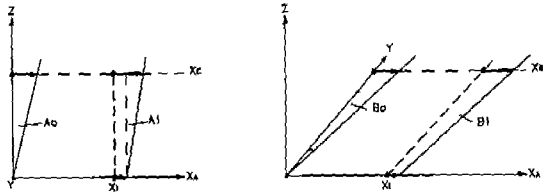


그림-5. CMM 작업공간에서의 Laser interferometer에 의한 오차측정 축



X-Pitch : $E_y(XI) = A1 - A0$ X-Yaw : $E_z(XI) = B1 - B0$

그림-6. Position 오차 측정 데이터(→)를 이용한 X 축에서의 Pitch 및 Yaw 오차 계산

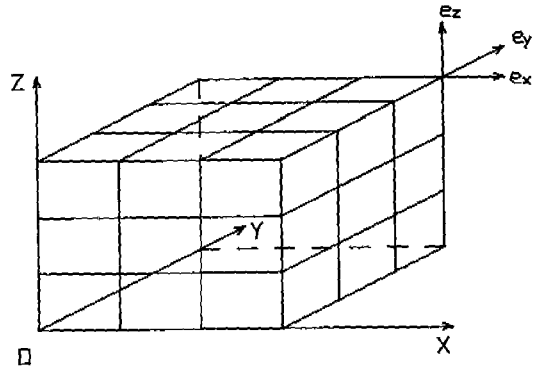


그림-8. 측정공간의 각 격자 점에서의 오차벡터 (e_x, e_y, e_z) 교정

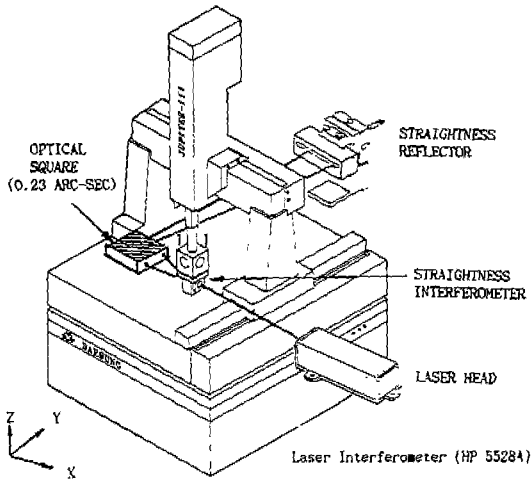


그림 7. 기준 축(X)에서의 X-Y 직각도 (S_{xy}) 및 X, Y 축에서의 진직도 [$\delta y(X), \delta x(Y)$] 오차측정 예

4. Volumetric 오차 교정

4.1 Error map 이용

이 방법은 위치오차 벡터를 격자점에서 측정하여 작업 공간 내에서 육면체와 같은 오차 map을 그림-8과 같이 구성하고, 격자점 이외의 점에서는 보간법으로 오차 벡터를 구하여 보정하는 방법이다. [4]

이 방법은 실제 사용의 경우 격자점의 수가 측정공간 내에서 충분하다면 그 교정효율은 높을 것이지만 입력해야 하는 데이터 수가 많아지게 되면 Controller의 용량에 한

계가 있을 것이다. 또한 많은 격자점에서의 오차 측정방법 및 시간도 문제가 될 것이다.

4.2 오차 방정식 이용

이 방법은 먼저 21개의 CMM 오차 성분 모두가 측정 되면 2節에서 설명된 바와 같이 이들 성분들을 인수로 하는 오차 방정식의 구성이 가능해진다. 따라서 임의 측정좌표에서의 교정치는 오차방정식으로 계산되며, 일정간격으로 측정된 오차성분은 보간법으로 또는 오차성분을 다항식 등의 식으로 표시하여 오차방정식에 대입시킬 수도 있다.

이 방법은 Error map 방법보다는 측정시간이 절약되고 간편한 장점이 있지만, 완벽한 오차 방정식이 아니면 작업 공간 내부의 오차 교정에는 교정 효율이 떨어질 것이다.

4.3 오차 교정 System 구성 및 결과

본 연구에서는 일정 간격으로 측정된 오차 성분들을 오차 방정식에 대입시키고 보간법으로 그 사이 값을 계산하였다.

사용된 CMM의 사양은 표-1과 같으며, Volumetric 오차 방정식을 이용한 위치보상 프로그램의 수행 과정은 그림-9와 같다. 위치보상은 측정기능인 경우 Control 프로그램 후에 작용하여 실제 CMM이 표시하는 값을 보상하며, CMM의 능동운동인 위치제어 경우에는 Control 프로그램 전에 동작하여 실제 운동거리를 보상한다. 위치보상 프로그램에 의해 Volumetric 오차가 교정된 것을 확인하기 위하여 먼저 측정공간 내 각 평면상의 임의 축에서 Laser interferometer로 길이 방향 오차가 측정, 비교되었다. 일반

표-1. 본 연구에 사용된 3차원 좌표 측정기 사양 (DAE-SUNG JUPITER-III)

측정범위	X, Y, Z : 920×700×300mm
이송방식	Air Bearing X축 9EA, Y축 8EA, Z축 8EA
공기사용조건	2.8Kg/cm ² , 50NL/min
S/W 기능	측정기능 디지털링 기능 -수동 측정 -선택적 구간 설정 -자동 측정 -단방향, 양방향 설정 -학습 측정 -3차원 반경 보정 -좌표 시스템, -입수변환, 대칭 변환, 기하학적 요소, 치수 변환 기능 기하학적 관계

적으로 Bridge 이동형 3차원 좌표 측정기 경우에는 Y축 (Bridge 이동축)의 오차요인이 2개의 Column에 의한 운동으로 다른 X, Y축에 비해 상대적으로 크며 구간 별로도 차이가 발생하기 마련이다. 그림-10(a)는 X=100mm, Z=100mm 위치에서 (b)는 X=350mm, Z=100mm 위치에서 20mm 간격으로 6회 반복 측정한 교정전후의 결과를 보여주고 있다. 전반적으로 오차 방정식을 사용하여 X축의 중앙 부근을 제외하고는 좋은 보상 효과를 얻을 수 있었으며, 이것은 Y축 운동시 움직이는 2개의 Column에 의한 상대운동으로 발생하는 Angular 오차가 비선형적인 것으로 추측된다.

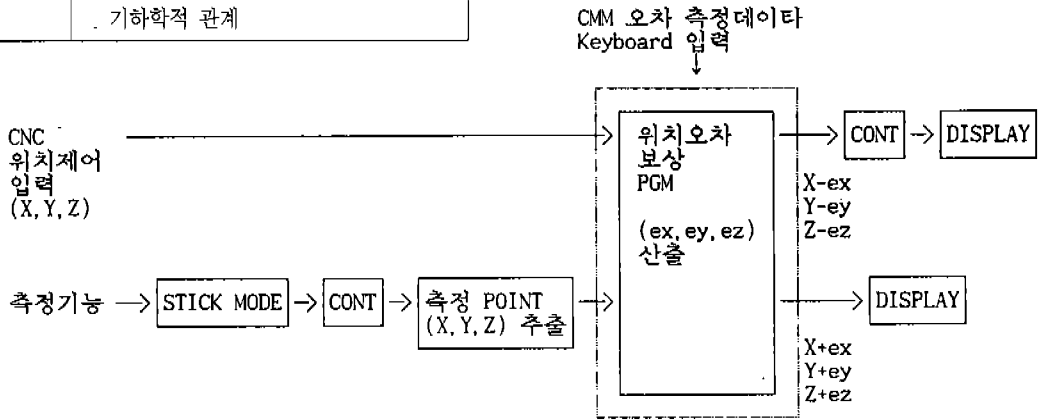
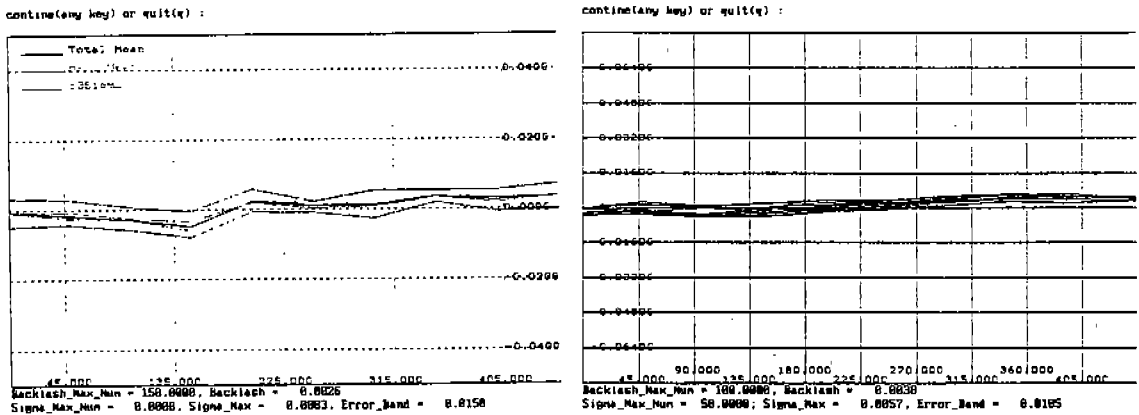
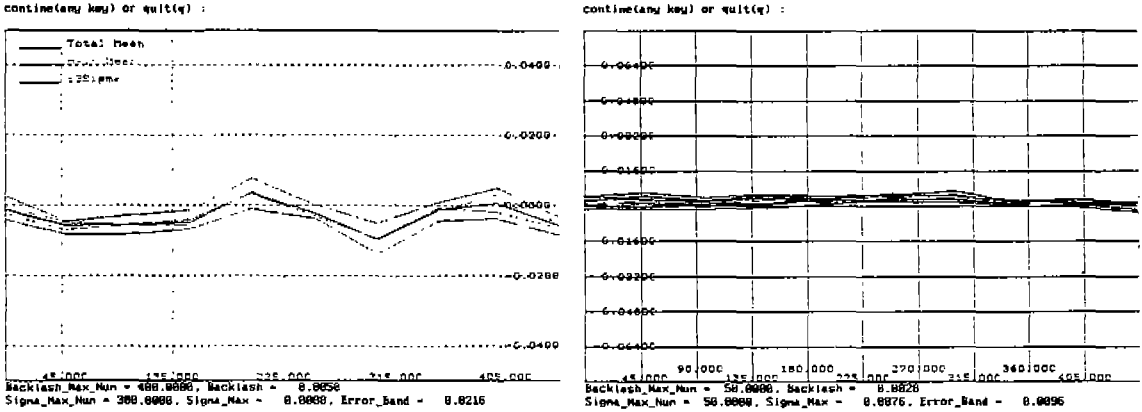


그림-9. 3차원좌표 측정기 CNC 위치제어 및 측정기능 수행시의 위치오차 보상 프로그램의 DIAGRAM



(a) Y축 (X=100mm, Z=100mm 위치) 보상전후 결과 비교 (왼쪽 : 보상전, 오른쪽 : 보상후)



(b) Y축 (X=350mm, Z=100mm 위치) 보상전후 결과 비교 (왼쪽 : 보상전, 오른쪽 : 보상후)

그림-10. Volumetric 오차 교정 전후의 Laser interferometer 측정에 의한 위치 오차 평균 데이터 비교
(Backlash_Max_Num : 최대 Backlash가 발생하는 위치, Sigma_Max : Backlash+3σ (Forward)+3σ (Reverse), Sigma_Max_Num : Sigma_Max가 발생하는 위치)

5. 결 론

- 이상의 CMM 오차 교정방법은 특히 정확히 오차성분의 측정이 수행되면 CMM 자체의 위치 재현성(Repeatability) 내에서까지 Volumetric 오차가 교정될 수 있으며 측정되어야 할 오차데이터가 적고 (측정공간에서 모서리 부분만 필요) 또한 Software에 의한 방법이므로 비용이 적게 드는 장점도 있다.
- 오차교정에 앞서 선행되어야 할 점은 기계의 위치 재현성 및 Back-Lash의 크기를 재확인 해야 할 것이며, 측정된 데이터로 부터 Systematic 오차 추출시 Back-lash 등에 의한 Random Error가 포함되지 않도록 주의하여야 할 것이다.
- 이상과 같은 Software에 의한 Volumetric 오차 교정방법을 CMM Controller에 접목 또는 연결시키기 위한 Programming 기술이 필요하며, 또한 측정된 Error map 또는 21개의 오차 성분들을 사용자가 쉽게 입력시키기 위한 방법도 고안되어야 할 것이다.

참고문헌

1. H.Kunzmann and F.Waldale, "Two Numerical Error-Correction Methods for Coordinate Measuring Machines", Proceeding of a Conference, NPL, Sep. 1985
2. British Standard BS 6808 Part 1 and 2, Coordinate Measuring Machines, 1989
3. British Standard BS 3800 Part 2, General tests for machine tools, 1991
4. H.J. PAHK and M.BURDEKIN, "Computer Aided Volumetric Error Calibration of Coordinate Measuring Machine using the base as a metrological reference". MATARDOR Conference, 1991