

# 스텝게이지를 이용한 3차원 측정기의 입체오차 측정에 관한 연구

(Study on Volumetric Accuracy of a CMM using step gauge measurement)

박 회 재, 문 준 희\*  
( 서울대학교 공과대학 기계설계학과 )  
H.J.Pahk, J.H.Moon\*

( Dept. of Mechanical Design and Production Eng., Seoul National University)

Keywords: CMM(3차원 측정기), StepGauge(스텝게이지), Positional Error(위치오차)

ABSTRACT :This paper presents an useful technique for error assessment of CMM with simple gauges such as step gauge. A computer module for measurement path generation is implemented, where the appropriate measurement sequences are generated in terms of DMIS file format for CMMs of CNC mode. After the CNC codes are downloaded into CMMs, the measurement operations are performed, and the error analysis are followed. Positional errors, angular errors are successfully measured with high precision along the 3 axis in relatively short time. The squareness error is also assessed with the step gauge measurement data. The developed system has been practically applied, and showed good performance.

## 1. 서 론

3 차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)는 피측정물의 3차원 좌표를 측정함으로써 기하학적인 오차를 측정하는 범용측정기이다. 기본적으로 3차원측정기는 X,Y,Z 방향으로 움직일 수 있는데 3차원측정기를 구성하는 기계적인 요소들의 오차들과 이들의 결합에 의해 X,Y,Z 세 축이 동시에 움직일 때는 하나의 축이 움직일 때 보다 더 많은 성분이 오차성분에 영향을 미치게 된다. 이는 많은 경우 더 큰 오차를 발생하게 한다. 따라서 3차원 측정기의오차를 측정하고 보정해주는 작업이 필요하다.

3 차원 측정기의 정밀도를 향상시키는 방법에는 여러가지가 있지만 가장 보편적으로 사용되는 방법은 측정기를 구성하는 요소들이 가지는 오차를 사용해서 기구학적인 모델링에 의해 입체오차방정식을 세운 다음 이에 의거해 입체오차를 보정하는 방법이다. Zang[1], PAIK[2], Szafarczyk[3]등은 3차원측정기의 오차를 측정하고 입체오차를 계산하여 컴퓨터를 이용한 오차보정시스템을 구현하여 상당한 정도의 측정기 정밀도 향상을 이루었다.

이번 연구에서는 스텝게이지라는 비교적 간단하면서도 정밀도가 높은 측정기구를 이용해서 3차원측정기의 기하학적인 오차를 측정하는 방법과 실제적인 적용을 소개하고자 한다.

측정경로 및 방법은 체계적인 측정이론을 기반으로 하여 합리적이면서 효율적인 방법을 고안하였다.

## 2. 측정 이론

### 2.1 한 축 운동에서의 오차요소들

한 방향을 따라서 운동하도록 되어있는 한축 운동기구를 고려할 때 6개의 오차성분이 존재하게 된다. 이는 가이드 웨이와 운동하는 기계요소의 가공의 부정확도 등에 의해서 기인하는데, 운동방향으로는 위치오차(Positional Error), 가이드웨이를 따라서는 수직방향의 진직도 오차 ( Vertical Straghtness Error) , 수평방향의 진직도 오차(Horizontal Straightness Error)가 있게 된다. 또한 각도오차로서 운동방향으로 존재하는 롤오차(Roll Error),그리고 운동평면내에서 수직방향으로 존재하는 피치오차(Pitch Error)가 있다. 운동학적으로는 1자유도 방향으로만 움직이도록 설계, 제작되었지만, 가공에서의 오차등으로 위치오차를 제외한 5개의 오차가 발생하고 운동방향으로는 실제거리와 기계좌표간의 오차가 존재하여 위치오차를 이루게 된다. 즉, 6개의 오차성분을 갖게 되는데 이는 공간상에서의 한점이 6자유도를 갖는 것과 비교될 수 있다.

## 2.2 스텝 게이지 측정법

위치오차를 측정하는 방법에는 여러가지가 있다. 3차원좌표측정기의 선형 정밀도는 BS, ANSI/ASME 와 같은 국가규격이나 CMMA같은 manufacturers' association 에서 레이저 측정기나 스텝게이지, 블록게이지 를 사용하여 측정하도록 권장하고 있는데 레이저 인터페로미터가 비싼 가격에도 불구하고 높은 정밀도를 구하기 위해서 사용되고 있다. 그러나, 레이저 인터페로미터를 사용하여 3차원측정기의 오차를 측정할 경우 3차원 측정기의 접촉식 프로브 대신에 레이저 광학장치를 3차원측정기의 Column에 부착함으로써 인해서 접촉식 프로브의 오차가 배제되기 때문에 3차원 좌표 측정기의 실제 정밀도 보다 더 좋은 결과가 나오게 되는 기술적인 결함이 있다.

스텝게이지의 측정모듈에서는 교정을 거친 스텝게이지와 마이크로 컴퓨터를 이용하여 3차원 측정기의 선형 위치오차와 이를 이용한 다른 몇가지 오차성분을 교정할 수 있는 새로운 측정시스템을 구현한다. 스텝게이지 측정모듈에서 사용되는 스텝게이지는 길이 측정에 사용되며 3차원측정기의 교정이 나 평가시험에 부분적으로 사용되어 왔는데 이 스텝게이지를 미리 정밀한 기기로 교정한 후 사용한다면 교정을 하지 않은 본래의 정밀도보다 더 높은 정밀도를 가지게 될 것이다. 교정한 결과는 마이크로 컴퓨터에 데이터 파일로 저장되며 이 교정 데이터 파일과 3차원측정기로 스텝게이지를 측정할 결과파일을 서로 비교함으로써 3차원측정기의 선형오차를 알 수 있는 것이다. 스텝게이지를 측정할 때 측정의 측정경로는 스텝게이지 측정모듈에 의해 자동으로 생성되며 그 측정결과는 그래프로 나타내었다.

## 2.3 자동 경로 생성

대부분의 3차원측정기들은 CNC기능과 Point-to-Point Vector Driving 기능을 가지므로 목표지점을 선정해서 CNC명령을 주게되면 그 위치로 이동할 수 있는 능력을 가지고 있으며 우리가 실험한 Eagle CMM 도 역시 이 기능을 가지고 있어서 자동측정이 가능하다.

스텝게이지 측정모듈에서 자동으로 CNC형의 측정경로를 생성하려면 3차원 측정기의 작업영역안에 스텝게이지가 현재 어떠한 위치로 놓여 있는지

알 수 있는 정보가 있어야 한다. 작업자가 12개의 초기점을 입력함으로써 스텝게이지측정모듈에서 자동으로 측정경로를 생성할 수 있다. 그림 1 에 측정을 시작할 블록과 마지막 블록에 6개씩의 초기점을 찍는 위치가 나와있다. 점들은 상호 위치가 서로 바뀌거나 순서가 뒤바뀌면 잘 못된 측정경로를 만들게 되므로 입력시 주의가 요구된다.

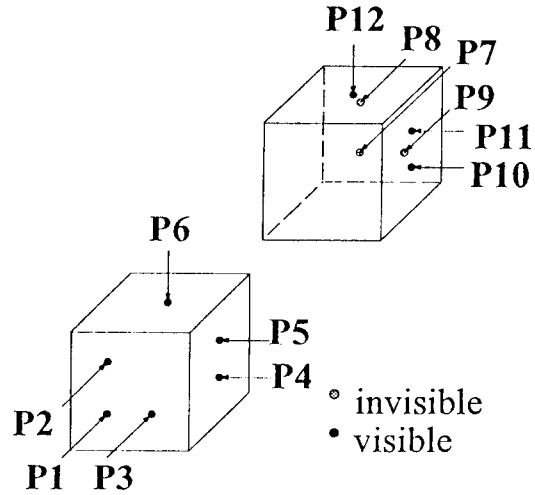


그림 1 가공경로 생성을 위한 초기점 위치

$i$  번째 측정된 초기점을  $P_i$ 라 하면 첫번째 블록에 길이방향에 수직인 면에 위치한  $P_1, P_2, P_3$  로 스텝게이지가 위치한 방향을 결정하게 되는데 벡터  $P_1P_2$ 와 벡터  $P_1P_3$ 의 외적을 하면 외적벡터  $U_{11}$ 을 얻게 된다. 벡터  $P_4P_5$ 와  $U_{11}$ 를 외적하면  $U_{12}$ 를 얻게 되고 또 다시  $U_{11}$ 과  $U_{12}$ 를 외적하면  $U_{13}$ 을 얻게 된다. 이 벡터들은 정규화한다.

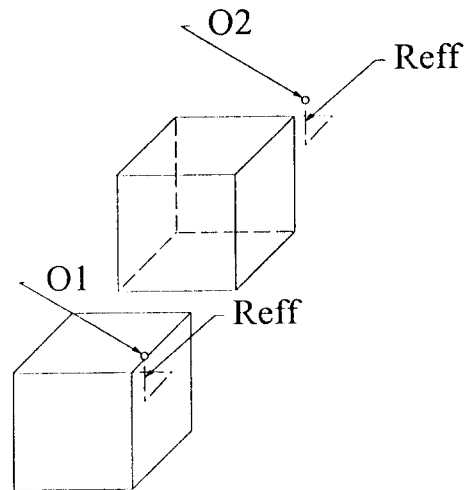


그림 2 기준점  $O_1, O_2$ 의 위치

첫번째 블록에 대해서 이와같이 각 방향에 대한 단위 벡터를 얻은 후 그림 2 에서 보이는 것과 같이 모서리에 X,Y,Z 각 방향으로 프로브 팁의 반지름만큼 떨어진 점의 좌표를 구한다. 떨어진 점의 좌표를 구하는 이유는 그렇게 하는 것이 더 간단하게 계산되기 때문이다. 꼭지점의 좌표를  $O_1$ 이라 하면 벡터  $O_1P_1$ 과  $U_{11}$ ,  $O_1P_3$ 과  $U_{12}$ ,  $O_1P_6$ 과  $U_{13}$ 를 외적하여 각각이 0이되게 하는  $O_1$ 를 구한다.

$$\overline{U_{11}} = \overline{P_1P_2} \times \overline{P_1P_3}$$

$$\overline{U_{12}} = \overline{P_4P_5} \times \overline{U_{11}}$$

$$\overline{U_{13}} = \overline{U_{11}} \times \overline{U_{12}}$$

$$\overline{O_1P_1} \cdot \overline{U_{11}} = 0$$

$$\overline{O_1P_4} \cdot \overline{U_{12}} = 0$$

$$\overline{O_1P_6} \cdot \overline{U_{13}} = 0$$

마지막 블록에도 동일한 방법을 적용하면  $U_{21}, U_{22}, U_{23}$ 를 구할 수 있고  $O_2$ 도 구할 수 있다. 여기서 벡터  $O_1O_2$ 를 정규화하여  $U_1$ 을 얻고 이에 따라  $U_2, U_3$ 를 다시 구한다.

$$\overline{U_1} = \frac{\overline{O_1O_2}}{\| \overline{O_1O_2} \|}$$

$$\overline{U_2} = \overline{P_4P_5} \times \overline{U_1}$$

$$\overline{U_3} = \overline{U_1} \times \overline{U_2}$$

이렇게 구한 단위벡터  $U_1, U_2, U_3$ 과 점  $O_1$ 의 좌표로 게이지좌표를 CMM의 좌표로 바꾸는 변환 행렬을 구할 수 있다.

$$\overline{T} = \begin{pmatrix} U_{1x} & U_{2x} & U_{3x} & O_{1x} \\ U_{1y} & U_{2y} & U_{3y} & O_{1y} \\ U_{1z} & U_{2z} & U_{3z} & O_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이 행렬을 이용해서 자동경로생성 프로그램에서 프로브의 경로를 생성한다. 그리고 이 행렬은 따로 저장되어 나중에 스텝게이지를 측정할 후에 받은 데이터로에서 측정점의 첫번째 블록으로부터의

변위량을 구하는데 쓰이게 된다.

스텝게이지의 측정모듈에서 생성되는 자동측정경로 명령어는 DMIS 타입의 명령어이다. 대부분의 상용 CMM이 수동 동작모드를 가지고 있으며 그 동작 경로를 CNC명령어형식으로 컴퓨터가 파일에 저장시켜 두었다가 자동측정모드에서 그 파일을 읽어 CNC명령어를 CMM으로 보내주는 기능이 있으므로 스텝게이지 측정모듈에서 자동경로파일을 마치 수동동작모드에서 작업자가 기억시킨 것처럼 명령어 체계의 형식을 바르게 만들어 주면 되는 것이다. 그런 다음 자동측정모드에서 자동경로파일을 읽어 측정을 실시하면 되는 것이다.

자동경로생성을 위해 가장 먼저 할 일은 12개의 초기점을 측정하는 것이다. CMM의 수동동작모드에서 작업자가 수동으로 12개의 초기점을 올바른 위치에 찍어준 다음, 다음과 같은 정보를 부가적으로 입력한다.

- 1) 프로브 팁의 종류
- 2) 반복측정 횟수
- 3) 측정 스텝수
- 4) 자동측정경로의 종류

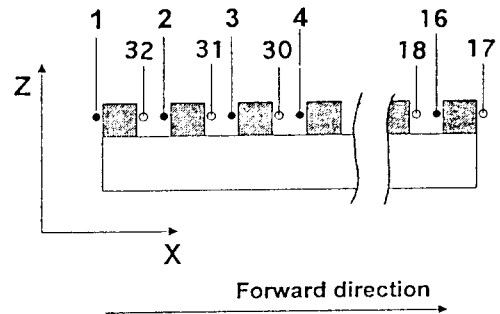


그림 3 스텝게이지의 측정 순서

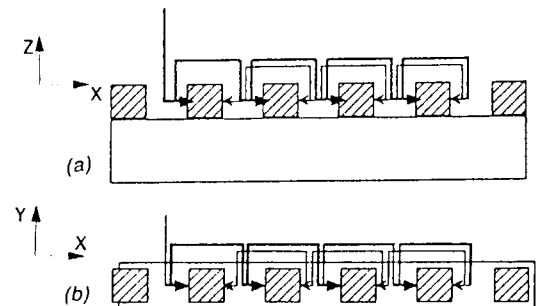


그림 4 측정 경로의 두 가지 형태  
(a) vertical (b) horizontal

자동측정경로는 위의 4번째 항목처럼 2가지 종류가 있는데 수직경로와 수평경로이다.(그림 4) 수직경로는 프로브를 스텝게이지의 위쪽으로 빼내고 수평경로는 프로브를 좌우방향으로 빼낸다. 이 두가지 경로는 어떤 한 축이 다른 두개의 축과 결합해서 움직일 때의 정밀도를 서로 비교하는데 사용될 수 있다. 측정은 초기점 P<sub>1</sub>이 존재하는 면에서 시작하여 초기점 P<sub>12</sub>이 존재하는 면까지 순행방향으로 홀수 번째 면측정을 하며, 초기점 P<sub>9</sub>이 존재하는 면에서 초기점 P<sub>4</sub>가 존재하는 면까지 역행방향으로 짝수번째 면측정을 하면 한 번의 측정주기가 끝난다. 그림 3에 한 주기의 측정순서가 나와 있다. 일단 생성된 경로는 CMM에서 제공하는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 미리 점검해 볼 수 있으며 점검이 끝나면 CMM에 다운로드되어 자동측정에 들어간다. 그림 5는 생성된 자동경로파일의 예이다.

```

DMISMN/ 'p_x1.dmi'
MODE/PROG,MAN
V(document) = VFORM/ALL
DISPLY/PRINT, V(document)
TEXT/MAN, 'Element 1'
S(Taster_1) = SNSDEF/PROBE, FIXED, 0, 0, 50, 0, 0, 1, 3.9945
SNSLCT/S(Taster_1)
FROM/216.7160, 169.4910, 339.1080
GOHOME
PRCOMP/OFF
F(POINT_0) = FEAT/POINT, CART, 110.9656, 191.3387, 137.0020
MEAS/POINT, F(POINT_0), 20
GOTO/108.9925, 181.1151, 146.7787
GOTO/109.0088, 181.3326, 136.7811
GOTO/108.9656, 191.3302, 136.9986
PTMEAS/CART, 110.9656, 191.3387, 137.0020
GOTO/108.9656, 191.3302, 136.9986
GOTO/109.0088, 181.3326, 136.7811
GOTO/129.0085, 181.4183, 136.8155
GOTO/128.9654, 191.4158, 137.0330
PTMEAS/CART, 130.9653, 191.4244, 137.0364
GOTO/128.9654, 191.4158, 137.0330
GOTO/129.0085, 181.4183, 136.8155

```

그림 5 생성된 자동 경로 코드 (DMIS type)

## 2.4 프로브 팁의 유효반지름 계산

3차원좌표측정기에는 프로브몸체가 부착되어 있고 거기에 스타일러스가 부착되어 있으며 스타일러스의 끝에 둥근구모양의 팁이 있다. 그림 3에서 스타일러스와 팁의 그림을 볼 수 있는데 프로브는 피측정체를 접촉에 의해서 감지하므로 비록 수gram force 정도로 작은 힘이지만 접촉하는 순간에 스타일러스와 프로브몸체의 스프링이 휘어지는 현상이 일어나서 프로브 팁제조회사에서 제공하는 팁의 반지름보다 더 작아지게 된다. 따라서 측정을 하기 전에 측정을 하는 방향으로 팁의 유효반지름 R<sub>eff</sub>를 구하는 것이 바람직하다.

스텝게이지 측정모듈에서는 측정을 하는 도

중에 자동적으로 유효반지름 R<sub>eff</sub>를 구한다. R<sub>eff</sub>는 어떤 블록에서 순행방향측정과 역행방향측정에서 그 블록의 실제거리를 빼서 2로 나누면 되는데 Linear displacement error가 순행방향 측정을 한 후 역행방향측정을 할 때 포함되게 된다. 그러나 첫번째 블록과 마지막 블록의 경우 순행방향과 역행방향의 측정이 연이어 일어나므로 Linear displacement error가 무시할 수 있을 정도로 작다. 유효 반지름 R<sub>eff</sub>는 다음 식에 의해서

$$R_{eff} = \frac{(\text{측정된블록거리} - \text{블록의실제거리})}{2}$$

구해진 유효반지름 R<sub>eff</sub>는 스텝게이지 측정모듈에서 오차계산에 사용된다.

## 2.5 측정 데이터 분석

이번 연구에서 사용된 StepGauge는 Mitutoyo에서 제작된 것으로서 300mm길이의 20 °C에서 보정된 데이터를 가지고 있다. 교정데이터와 측정데이터를 가지고 스텝게이지의 오차를 계산할 수 있는데 만약 3차원측정기의 오차가 없다면 두 데이터가 동일한 값을 낼 것이지만 오차가 있다면 두 데이터가 다른 값을 나타낼 것이다. 그림 3은 측정이 순행방향과 역행방향으로 이루어지는 것을 나타내는데 2<sub>i-1</sub>번째 측정된 것이 순행방향이고 2<sub>i</sub>번째 측정된 것이 역행방향측정이다.

$$M_{2i-1}(X_{2i-1}, Y_{2i-1}, Z_{2i-1}), M_{2i,j}(X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i})$$

각각 j번째 반복측정에서 2i-1번째 순행방향 측정면과 2i번째의 역행방향 측정면의 좌표값이라고 하고 S<sub>2i-1</sub>, S<sub>2i</sub>를 교정데이터에 의한 스텝게이지의 원점에서 2i-1, 2i번째 측정면까지의 실제거리라고 한다. 또, M<sub>ref</sub>를 3차원 좌표측정기로 측정된 기준면인 첫번째 측정면의 첫번째 측정 좌표값이라 하고, S<sub>ref</sub>를 교정데이터에 의한 스텝게이지의 원점에서 기준면인 첫번째 측정면까지의 실제거리라고 하면, j번째 측정에서 2i-1번째 순행방향 측정면과 2i번째 역행방향 측정면의 위치오차 XF<sub>2i-1,j</sub>와 XB<sub>2i,j</sub>는 식(1), (2)에 의해 구할 수 있다.

$$XF_{2i-1,j} = (S_{2i-1,j} - S_{ref}) - \frac{[(M_{2i-1,j} - M_{ref}) \cdot C_1 C_2]}{|C_1 C_2|} \quad (1)$$

$$XB_{2i,j} = (S_{2i} - S_{ref}) - \frac{|(M_{2i,j} - M_{ref}) \cdot C_1 C_2|}{|C_1 C_2|} \quad (2)$$

식 ( 1 ), ( 2 )에서 벡터  $(M_{2i,j} - M_{ref})$ 를 벡터  $C_1 C_2$ 에 projection시키는 이유는 자동경로프로그램에서 프로브팁의 벡터  $C_1 C_2$ 를 따라가면서 측정을 하도록 CNC명령을 내리더라도 실제 측정이 항상 벡터  $C_1 C_2$ 위에서 일어나는 것은 아니므로 그 영향을 없애기 위한 것이다.

식 ( 1 ), ( 2 )의 결과를 이용하여 순행방향 측정오차의 평균  $XF_{2i-1}$ 과 표준편차  $SF_{2i-1}$ , 역행방향 측정오차의 평균  $XB_{2i}$ 와 표준편차  $SB_{2i}$ 를 구할 수 있다. N은 반복측정의 횟수이다.

$$XF_{2i-1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N XF_{2i-1,j} \quad (3)$$

$$SF_{2i-1} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (XF_{2i-1} - XF_{2i-1,j})^2} \quad (4)$$

$$XB_{2i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N XB_{2i,j} \quad (5)$$

$$SB_{2i} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (XB_{2i} - XB_{2i,j})^2} \quad (6)$$

스텝게이지 측정에서 순행방향 측정면은 역행방향으로는 측정을 할 수 없고, 역행방향 측정면은 순행방향으로는 측정할 수 없으므로 연속하는 두 순행방향 측정면이나 연속하는 두 역행방향 측정면 사이의 오차값은 interpolation에 의해서 구한다.

$$XF_{2i} = \frac{XF_{2i-1} + XF_{2i+1}}{2} \quad (7)$$

$$SF_{2i} = \frac{SF_{2i-1} + SF_{2i+1}}{2} \quad (8)$$

$$XB_{2i} = \frac{XB_{2i-2} + XB_{2i}}{2} \quad (9)$$

$$SB_{2i} = \frac{SB_{2i-2} + SB_{2i}}{2} \quad (10)$$

이렇게 해서 모든 측정면에 대해서 순행방향 오차와 역행방향 오차를 구했는데 순행방향 오차와 역행방향 오차를 평균낸 값  $MX_i$  i번째 측정면의 위치오차의 평균이라 하고 systematic error라고도 한다. 그리고 역행방향 오차에서 순행방향 오차를 뺀 값  $XR_i$ 를 i번째 측정면의 Reversal error라고 한다.

$$MX_i = \frac{XF_i + XB_i}{2} \quad (11)$$

$$XR_i = XB_i - XF_i \quad (12)$$

위치오차 해석결과는 순행방향의 위치오차의 평균, 역행방향의 위치오차의 평균, 평균오차, 순행방향 오차의 표준편차, 역행방향 오차의 표준편차, 평균 반복도, 대역폭, 평균 Reversal error이다.

$$\text{평균반복도} = 2 \cdot \frac{\text{순행방향평균오차} + \text{역행방향평균오차}}{2}$$

$$\text{대역폭} = \text{최대평균오차} - \text{최소평균오차}$$

### 3. 개발된 측정방법의 적용

#### 3.1 기구 및 환경

측정대상으로서는 진영정기에서 생산되는 EAGLE 3차원 측정기이다. Fixef Bridge Type으로서 micrometer order의 해상도를 가지고 있다. linear scale을 내장하고 있으며 Servo motor로 구동된다. 스텝게이지는 Mitutoyo에서 생산된 No. 515-720를 사용하였다.

주위 온도는 18.5 ℃이고 항온이 비교적 잘 유지되는 장소에서 측정하였다.( 측정 중 온도의 편차가 1℃내외였다.)

#### 3.2 측정 순서

스텝게이지 측정을 위하여 가장 먼저 할 일은 스텝게이지를 CMM의 작업영역에 고정시키는 일이다. 스텝게이지 측정모듈에서는 3차원상의 어떤 위치로 존재하더라도 측정이 가능하며 스텝게이지를 고정시킬 때는 반드시 고정구를 사용하여야 한다. CMM의 작업테이블의 표면이 잘 가공되어 있기 때문에 테이블과 스텝게이지와의 마찰이 적어서 프로브 팁이 접촉하는 순간 스텝게이지가 수마이크론 정도 밀리는 경우도 발생할 수 있다.

스텝게이지가 고정되면 CMM에서 지원하는 수동모드나 자동모드에서 초기점 12개를 정해진 위치에 찍고 그 X Y Z 좌표 12쌍을 파일에 저장시킨다. 파일에 저장하는 순서는 P<sub>1</sub>부터 P<sub>12</sub>까지이다. 초기점 저장이 끝나면 자동경로 생성 프로그램에 초기점 파일과 프로브 팁의 종류, 반복측정 횟수, 측정 스텝수, 자동측정경로의 종류를 입력한다. 자동경로

생성프로그램에서는 CNC형의 명령어 파일을 만든다. 이 파일을 CMM의 자동모드에서 실행하여 측정 결과파일을 얻는다. 각도 오차의 측정은 그림 6을 참고하기 바란다.

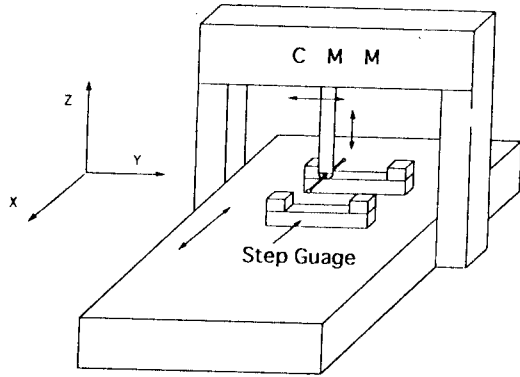
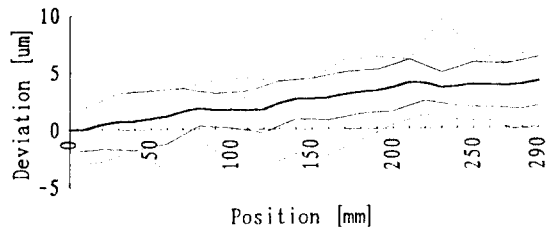


그림 6 CMM 오차 진단을 위한 스텝 게이지 측정 방법

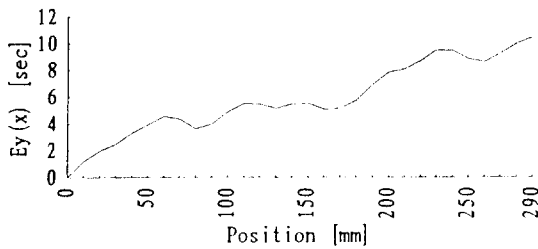
### 3.3 측정 결과

그림 7부터 그림 15까지에 결과를 나타내었다.



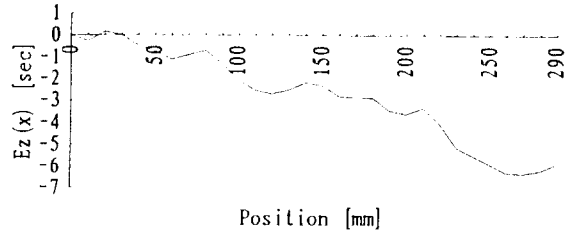
Mean Reversal Error = 3.843945  
 2 Sigma = 1.274812  
 Bandwidth = 4.072073

그림 7 Positional Error of X Axis



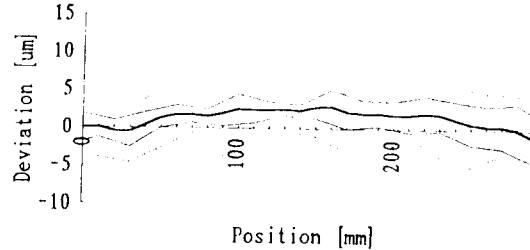
Bandwidth = 10.43566

그림 8 Pitch Error of X Axis



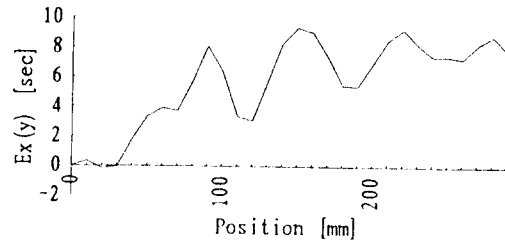
Position [mm]  
 Bandwidth = 6.462345

그림 9 Yaw Error of X Axis



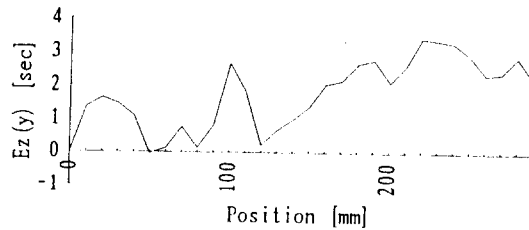
Mean Reversal Error = 3.792182  
 2 Sigma = 2.8008325  
 Bandwidth = 4.136559

그림 10 Positional Error of Y Axis



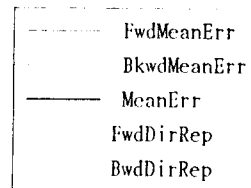
Bandwidth = 9.520095

그림 11 Pitch Error of Y Axis



Bandwidth = 3.463506

그림 12 Yaw Error of Y Axis



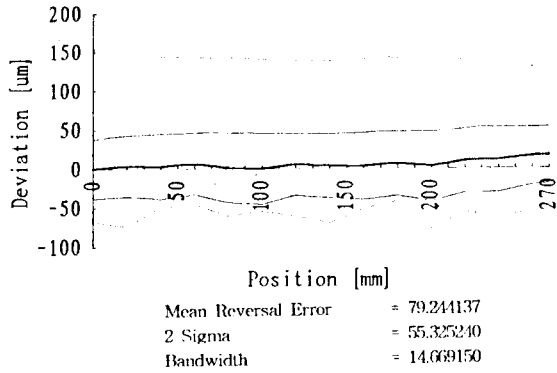


그림 13 Positional Error of Z Axis

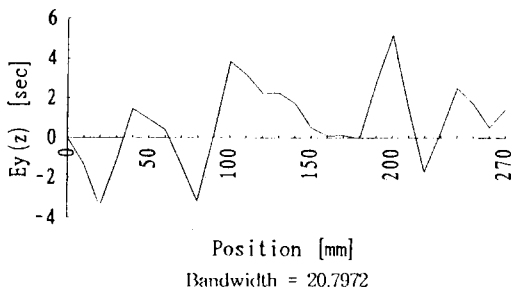


그림 14 Pitch Error of Z Axis

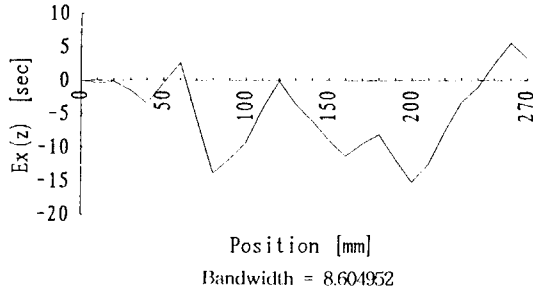


그림 15 Yaw Error of Z Axis

#### 4. 결론

스텝게이지를 이용한 입체오차측정과 보정을 위한 모듈이 개발되었으며 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 교정된 스텝게이지를 이용하여 위치오차 및 각도 오차를 측정 해석하는 컴퓨터 모듈이 개발되었다.

(2) 이 연구를 통해서 스텝게이지와 같은 저렴하고 사용하기 간편한 기구로도 높은 정밀도로 3차원측정기의 오차요소들을 평가할 수 있음을 보였다.

(3) 적각자나 링게이지 등의 다른 측정기구들을 병행해서 3차원측정기의 각종 오차요인들을 측정하는 모듈개발을 시작하였고 입체오차맵을 이용하여 측정기의 오차요인들을 종합적으로 보정하는 모듈을 개발하고자 한다.

#### 5. 참고 문헌

[1] G.Zhang et al., "Error Compensation of the Coordinate Measuring Machine", Annals of CIRP, Vol.34, No.1, 1985

[2] PAIHK II., Burdekin M., "Computer Aided Volumetric error Calibration of Coordinate Measuring Machine using the base as a metrological reference", The 28th international MATADOR Conference, Manchester, U.K., 1990

[3] M.Szafarezyk, B. Klein, W. Szala, "Extention of Typical CNC Systems by External Controllers", Annals of CIRP, Vol. 38/ No. 1, 1989

[4] BS6808:1987 British Standard for Coordinate Measuring Machine, British Standard Institution

[5] ANSI/ASME B 89.1.12 M-1985 An American National Standard, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines, 1985, The ASME.

[6] 산업과학기술연구소, MORA 3차원측정기 입체 정밀도 측정 시스템 개발, 1992.11.30