

다중 프로브 교정 오차 보정에 관한 연구

김형주*, 이동주+, 정광진**

Development of Error Compensation Program for the Articulating Probe Calibration

Hyeong Ju KIM*, Dong Ju LEE+, Kwang Jin JUNG**

Abstract

이 논문에서는 다중 프로브 교정 시 발생하는 오차를 측정하여 보정함으로써 측정 정밀도를 향상시킬 수 있는 프로그램을 개발에 대하여 연구하였다. 교정 시와 동일한 조건으로 기준구를 측정하여 오차를 산출한 다음 프로브 파라미터가 기록된 시스템 파일을 수정함으로써 교정 오차를 보정하는 프로그램을 개발하였다.

실험 결과 이론값과 실제값의 차가 CMM 분해능의 2배 이내임을 확인하였으며 프로그램은 CMM 사용자가 직접 작성 및 편집 가능하도록 DMIS 언어를 사용하였다.

Key Words : 3차원 측정기(CMM), 프로브(Probe), 교정(Calibration), 보정(Compensation), 기준구(Master Sphere)

1. 서론

3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)는 프로빙 시스템을 이용하여 공작물 표면의 공간 좌표를 결정하는 측정시스템이다.⁽¹⁾

CMM에서 좌표를 측정하기 위해서는 프로빙 시 신호를 발생시키는 장치인 프로브⁽²⁾를 이용하게 되는데, 프로브 끝에 장착된 구 형상의 촉침이 공작물에 접촉하는 순간 신호가 발생하면서 각 축에 부착된 스케일의 좌표값을 컴퓨터에서 읽어낸다.

CMM은 촉침 접촉점의 좌표를 직접 산출하는 것이 곤란하므로 촉침의 중심 좌표를 읽어 1차적인 계산을 실시한 후 촉침의 반지름을 1차 계산에서 얻어낸 각 점의 법선 방향으로 보정하여 접촉점을 계산한다.(Fig. 1 참조)

따라서 CMM에서는 항상 측정에 사용되는 촉침의 반지름을 필요로 하게 되는데, 프로브 교정을 통하여 촉침의 반지름을 구하게 된다.

일반적으로 CMM 사용자는 제조 회사에서 제공한 프로브 교정 방법을 사용하게 되는데 대부분의 경우 측정기의 공간 오차 및 프로브 오차를 보정하는 오차 보정 소프트웨어가 제공되므로 사용상 커다란 문제가 없다.

그러나 측정기에는 항상 오차가 존재하게 되고 이 오차가 프로브 교정 과정에 포함될 경우 이 오차를 제거하기 위한 방법이 필요하며 또한 측정기 사용자가 특정한 목적으로 측정하고자 하는 경우 이를 프로브 교정 결과에 반영시킬 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 CMM 제조자가 아닌 사용자 수준에서 프로브 교정 오차를 검출하고 보정할 수 있는 프로그램 개발에 대해서 연구하였다.

* 발표자, 충남대학교 대학원 기계공학과(kimhj@dukin.co.kr)
주소: 305-348 대전시 유성구 화암동 63-7
+ 충남대학교 기계공학과
++ 한밭대학교 산업대학원 기계공학과

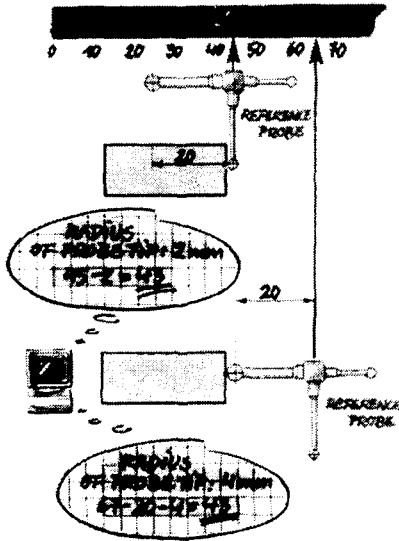


Fig. 1 접촉점 계산 예

2. 프로브 교정 원리

CMM에서 측정값은 축침이 공작물에 접촉하는 순간 CMM 스케일에서 얻어낸 좌표와 프로브 반지름을 이용하여 계산한다. 이 경우 프로브 반지름은 교정을 통하여 이미 알고 있다고 가정한다.

그러나 프로브 교정은 축침의 반지름을 알 수 없는 상태이므로 공작물 대신 기준 게이지를 사용한다. 프로브의 지름은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = (X_2 - X_1) - L \quad (1)$$

여기서, d : 프로브 지름

X_2, X_1 : 이론적인 스케일 읽음값

L : 기준게이지 치수

이 경우는 게이지 블록을 이용한 축 방향 프로브 교정 예이며 실제로는 기준구를 이용한 프로브 교정이 가장 많이 사용되고 있다. 경우에 따라서는 링 게이지가 사용되기도 한다.

기준구를 이용하는 경우 프로브 지름은 다음과 같이 계산

된다. 링 게이지의 경우도 마찬가지이다.

$$d = D_m - D \quad (2)$$

여기서, d : 프로브 지름

D_m : CMM에서 구한 지름

D : 기준구 지름

이론적으로 볼 때 상기와 같은 방법으로 계산된 축침의 지름은 축침의 실제 지름과 동일하여야 하나 축침 연결부의 휨 등의 영향으로 인해 계산된 지름이 실제 지름보다 작아지는 현상이 발생한다. 이와 같이 실제 교정을 통해서 얻은 축침의 지름을 유효 지름이라고 한다.⁽³⁾ (Fig. 2 참조)

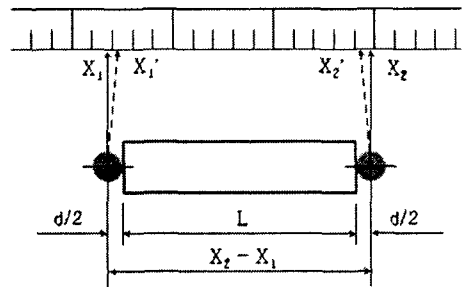
유효 지름은 다음과 같이 계산된다.

$$d' = (X'_2 - X'_1) - L \quad (3)$$

여기서, d' : 유효 지름

X'_2, X'_1 : 오차를 포함한 스케일 읽음값

L : 기준게이지 치수



$$d = (X_2 - X_1) - L$$

$$d' = (X'_2 - X'_1) - L$$

$$(X_2 - X_1) > (X'_2 - X'_1)$$

$$\rightarrow d > d'$$

Fig. 2 실제 지름과 유효 지름 계산 비교

측정 시 단일 프로브를 사용하는 경우에는 축침의 지름 오차만이 측정 결과에 영향을 미치지만 다중 프로브를 사용하는 경우에는 축침의 지름 오차 뿐만 아니라 각 축침 간의 상대위치 오차도 측정 결과에 영향을 미친다. 따라서 다중 프로브를 사용하는 경우에는 각 축침간의 상대 위치 교정도

중요하게 고려되어야 할 항목이다.

자동 회전 프로브 헤드를 사용하는 경우 각 축침간의 상대 위치는 다음과 같이 계산된다.(Fig. 3 참조)

$$X' = X - (L * \sin(A)) * \sin(B) \quad (4-1)$$

$$Y' = Y + (L * \sin(A)) * \cos(B) \quad (4-2)$$

$$Z' = Z - (L - L * \cos(A)) \quad (4-3)$$

여기서, X, Y, Z : 기준 프로브(A0, B0) 축침의 좌표
 X', Y', Z' : A, B 각도에서의 축침의 좌표
 A, B : 프로브 헤드의 회전 각도(deg.)
 L : 프로브 헤드 회전 중심에서 축침 중심
 까지의 길이(mm)

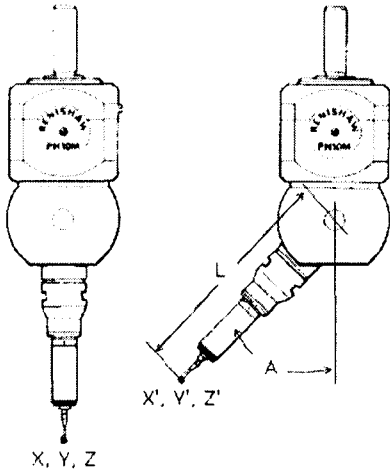


Fig. 3 축침의 상대 위치 계산

3. 교정 오차 보정

3.1 교정 방법

프로브 교정은 Table 1에 표시한 바와 같이 5개 각도에서 실시하였다. 각의 방향에서 기준구를 6점씩 프로빙하여 교정 결과를 산출하였다. 프로빙은 프로브 축 방향에서 2점, 프로브 축과 수직인 원주 상에서 4점을 실시하였다.

CMM은 주식회사 덕인에서 제작된 SIGMA 785를 사용하였으며 프로브 헤드와 트리거 프로브는 Renishaw 사의 PH10T와 TP-2를 사용하였다. 여기서 사용된 기준구의 지름은 25.0000 mm 이다.

프로브 헤드와 트리거 프로브 자체에서 발생하는 오차는 CMM에서 발생하는 오차에 비해 상대적으로 작으므로 여기서는 교정 오차에 영향을 크게 미치는 CMM의 상세 규격만을 Table 2에 표시하였다.

Table 1 프로브 헤드 각도

번호	A(deg.)	B(deg.)	축침지름(mm)
1	0	0	3.00
2	90	90	3.00
3	90	180	3.00
4	90	-90	3.00
5	90	0	3.00

Table 2 실험에 사용된 CMM 규격

모델	SIGMA 785
제작처	주식회사 덕인(대한민국)
측정범위	X:700, Y:800, Z:500(mm)
정밀도(MPE _E)	2.5 + L/300 (μm), L:mm
분해능	0.0005(mm)
최대 이동 속도	400 mm/s

3.2 교정 오차 산출

교정 오차는 프로브 교정과 동일한 조건으로 실시하였다. 기준구를 설치한 후 기준구의 중심 좌표를 데이터으로 설정한 후 각 방향의 프로브를 이용하여 기준구의 지름과 중심 위치를 측정하였다.(Fig. 4 참조)

이론적으로 볼 때 모든 측정 결과의 지름은 기준구의 지름과 동일하여야 하고 중심 좌표는 X, Y, Z이 각각 0, 0, 0이 되어야 한다. 그러나 실제로는 다음과 같은 오차기 발생한다.

$$dD = D' - D \quad (5-1)$$

$$dX = X' - X \quad (5-1)$$

$$dY = Y' - Y \quad (5-3)$$

$$dZ = Z' - Z \quad (5-4)$$

여기서, D, X, Y, Z : 기준값, X, Y, Z은 0이 됨.

D', X', Y', Z' : 측정값

dD, dX, dY, dZ : 교정 오차

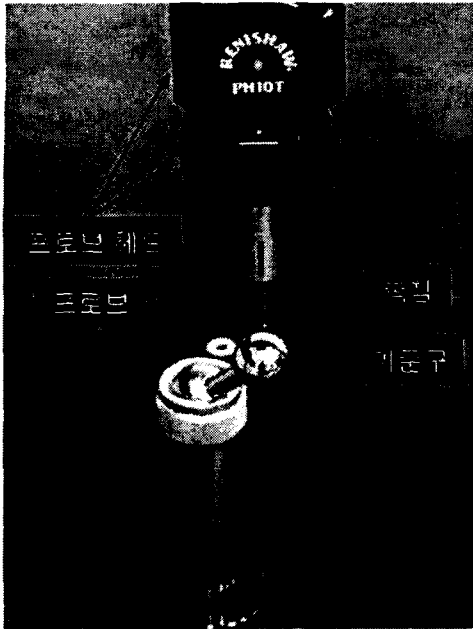


Fig. 4 교정 및 오차 산출을 위한 설정

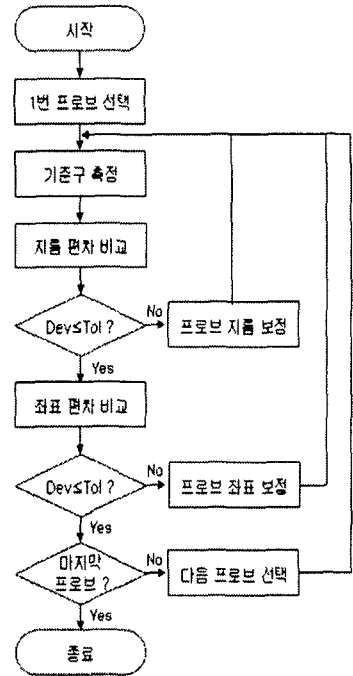


Fig. 5 교정 오차 보정 프로세스

3.3 오차 보정

교정 오차 보정은 식 5에서 보여주는 바와 같이 교정 오차를 산출한 다음 그 결과를 프로브 교정 결과 파일 내에 있는 관련 파라미터를 수정함으로써 오차를 보정하는 과정이다.

이 과정은 CNC 프로그램에 의해 자동으로 실시되어야 하고 보정하고자 하는 정밀도 수준을 미리 입력함으로써 이 수준에 도달할 때 까지 반복 실행되어야 한다. 이 실험에서는 보정 정밀도 수준을 CMM의 분해능과 같은 0.0005mm로 설정하였다.

CNC 프로그램은 CMM 사용자가 자유롭게 작성하고 수정할 수 있도록 하기 위해 DMIS 언어를 사용하였고 계산 및 조건문 실행을 위해 DMIS HLL⁽⁴⁾(High Level language)를 사용 하였다.

오차 보정 프로그램 작성을 위한 프로세스는 Fig. 5에서 보여주는 바와 같고 Fig. 6에서는 작성된 프로그램의 일부를 보여주고 있다.

```

AX=VALUE/TA( ?2_X),ACT
AY=VALUE/TA( ?2_Y),ACT
AZ=VALUE/TA( ?2_Z),ACT
AD=VALUE/TA( ?2_DIAM),ACT

```

```

DX=ASSIGN/AX
DY=ASSIGN/AY
DZ=ASSIGN/AZ
DD=ASSIGN/AD-25.00

```

```

AAX=ASSIGN/ABS(AX)
AAZ=ASSIGN/ABS(AZ)
AAD=ASSIGN/ABS(DD)

```

```

TEMP=ASSIGN/0
IF/((AAX.GT.EVAL).OR.(AAZ.GT.EVAL))
  READ/DID(FILENAME),PX,'GROUP1','PROBE2',2
  PX=ASSIGN/PX-DX
  WRITE/DID(FILENAME),PX,'GROUP1','PROBE2',2

  READ/DID(FILENAME),PY,'GROUP1','PROBE2',3
  PY=ASSIGN/PY-DY
  WRITE/DID(FILENAME),PY,'GROUP1','PROBE2',3
  TEMP=ASSIGN/1
ENDIF

```

```

IF:(AAZ,GT,EVAL)OR:(AAD,GT,EVAL)
  READ/DID(FILENAME),PZ,'GROUP1','PROBE2',4
  PZ=ASSIGN/PZ=DZ
  WRITE/DID(FILENAME),PZ,'GROUP1','PROBE2',4

  READ/DID(FILENAME),PD,'GROUP1','PROBE2',1
  PD=ASSIGN/PD=DD
  WRITE/DID(FILENAME),PD,'GROUP1','PROBE2',1
  TEMP=ASSIGN/1
ENDIF

```

Fig. 6 작성된 DMIS 프로그램의 일부

3.4 실험 결과

실험 결과는 오차 보정 프로그램 사용 전과 후의 데이터를 비교하였다.(Table 3, 4 참조)

Table에서 보는 바와 같이 프로브 파라미터 보정량과 기준구 측정 오차 보정량이 유사함을 알 수 있다.

Table 3 프로브 파라미터 변화량(mm)

No.		X	Y	Z	d
1	전	0.0000	0.0000	0.0000	2.9990
	후	0.0000	0.0000	0.0000	2.9983
	차				-0.0007
2	전	2.0419	-182.9539	183.4337	2.9984
	후	2.0411	-182.9535	183.4343	2.9980
	차	-0.0008	0.0004	0.0006	-0.0004
3	전	183.0904	2.4059	183.2642	2.9986
	후	183.0914	2.4044	183.2642	2.9986
	차	0.0010	-0.0014	0.0000	0.0000
4	전	-2.2900	183.4812	183.0231	2.9990
	후	-2.2869	183.4805	183.0241	2.9983
	차	0.0031	-0.0007	0.0010	-0.0007
5	전	-183.3542	-1.8717	183.2395	2.9982
	후	-183.3525	-1.8702	183.2409	2.9987
	차	0.0017	0.0015	0.0014	0.0005

- 주 : 1) 전, 후는 오차 보정 전, 후를, 차는 편차를 의미함.
 2) No.는 프로브 번호를 의미함.
 3) X, Y, Z는 프로브 중심 좌표를 의미함.
 4) d는 프로브 지름을 의미함.

Table 4 측정 결과 변화량(mm)

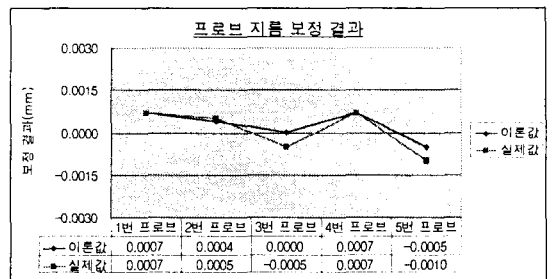
프로브 번호		X'	Y'	Z'	D
1	전	0.0000	0.0000	0.0000	24.9993
	후	0.0000	0.0000	0.0000	25.0002
	차				0.0009
2	전	0.0005	0.0003	-0.0006	24.9997
	후	0.0005	0.0002	-0.0002	25.0002
	차	0.0000	-0.0001	0.0004	0.0005
3	전	-0.0010	0.0015	0.0001	25.0001
	후	-0.0003	0.0000	0.0001	24.9996
	차	0.0007	-0.0015	0.0000	-0.0005
4	전	-0.0031	0.0007	-0.0010	24.9993
	후	0.0000	-0.0003	0.0000	25.0000
	차	0.0031	-0.0010	0.0010	0.0007
5	전	-0.0017	-0.0015	-0.0014	25.0005
	후	0.0002	0.0005	0.0005	25.9995
	차	0.0019	0.0020	0.0019	-0.0010

- 주 : 1) 전, 후는 오차 보정 전, 후를, 차는 편차를 의미함.
 2) No.는 프로브 번호를 의미함.
 3) X', Y', Z'는 기준구 중심 좌표를 의미함.
 4) D는 기준구 지름을 의미함.

Fig. 7 에서는 오차 보정 전, 후의 측정 결과 변화량을 프로브 파라미터 보정량과 비교하여 도표로 작성하였다.

CMM의 오차가 전혀 없다고 가정하면 교정 파라미터 변화량과 기준구 측정 오차 보정량이 동일하여야 하나 CMM 자체가 가지고 있는 오차로 인하여 0.001mm 이내에서 차이가 있음을 볼 수 있다.

그래프에서는 프로브 파라미터 변화량을 이론값, 기준구 측정 오차 보정량을 실제값으로 표기하였으며 1번 프로브는 기준 프로브 이므로 위치 보정값은 0이 된다.



(A) 프로브 지름 보정 결과

4. 결론

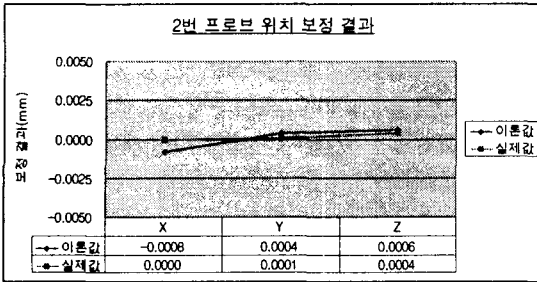
본 연구를 통하여 CMM 사용자가 프로브 교정 시 발생하는 오차를 측정하고 보정함으로써 측정 정밀도를 높일 수 있는 프로그램을 개발하였다.

또한 실험을 통하여 이론적으로 산출한 보정값과 실제 측정 결과가 CMM분해능의 2배(0.001mm) 이내에 있음을 확인함으로써 실제 측정에 적용할 수 있음을 증명하였다.

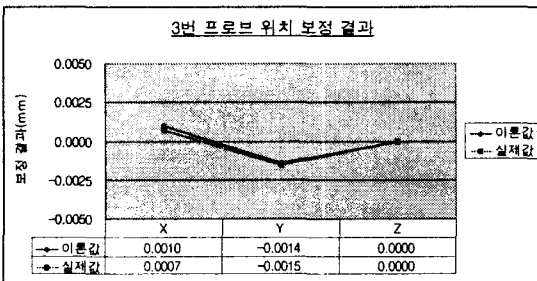
길이가 긴 프로브를 사용하거나 환경이 다소 부적합한 장소에 설치된 CMM에 본 프로그램을 적용할 경우 커다란 효과가 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

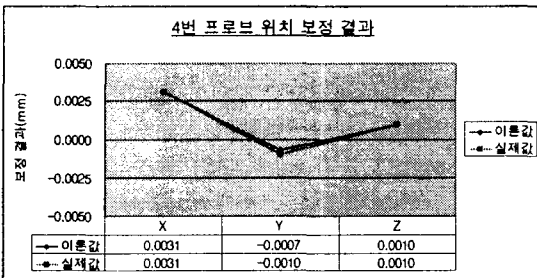
- (1) ISO 10360-1, 2000, *Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machine(CMM) Part 1:Vocabulary*, ISO, Geneva, pp. 27~35.
- (2) ISO 10360-1, 2000, *Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machine(CMM) Part 1:Vocabulary*, ISO, Geneva, pp. 1~8.
- (3) KS B 5542, 1990, *Test Code for Accuracy Of Coordinate Measuring Machines*, KSA, Seoul, pp. 10~14.
- (4) ANSI/CAM-I 104.0, 2001, *Dimensional Measuring Interface Standard*, CAM-I, inc., Bedford, pp. 389~420.



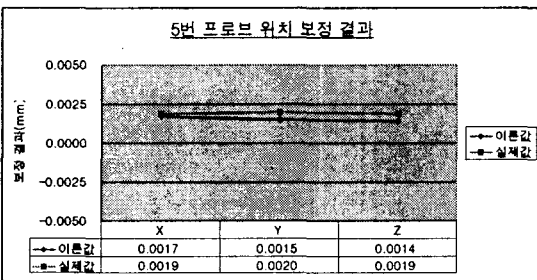
(B) 2번 프로브 위치 보정 결과



(C) 3번 프로브 위치 보정 결과



(D) 4번 프로브 위치 보정 결과



(E) 5번 프로브 위치 보정 결과

Fig. 7 오차 보정 전, 후의 측정 결과 비교