

Ball-Bar Artifact를 이용한 CMM의 공간 오차 측정 및 분석

Volumetric Error Measurement and Calibration of Coordinate Measuring Machines Using a Ball-bar Artifact

*구상서(충북대 대학원), 이응석(충북대 기계공학부)

*SangSeo Koo(Chungbuk Graduate School, Chungbuk Univ), EnugSuk Lee(Chungbuk Univ)

ABSTRACT

Volumetric error measurement and calibration of a coordinate measuring machine are studied by using a Ball-Bar artifact. Examples of the Ball-Bar design are shown using invar materials and precision steel balls. Also, for the uncertainty error using the Ball-Bar is discussed. Method of Ball-Bar artifact and the analysis of the error vectors are proposed. Using the Ball-Bar data, we studied the method of volumetric errors analysis of a coordinate measuring machine.

1. 서론

NC공작기계를 이용한 정밀가공을 위해서는 3축 이상오차를 측정, 보상하여야 하는 것이 필수적이다. NC공작기계의 오차를 측정하기 위한 플레이트 형태를 지닌 검사 장치인 Artifact는 Ball/Hole Plate^(1,2,3) 또는 Cone Plate로 제안되었으며, 본 연구에서는 Ball과 Bar로 구성된 Ball-Bar Artifact에 대하여 측정 및 분석 방법 등을 연구하였다.

BSI BS 6808⁽¹⁾의 Part3에서는 3차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)의 오차를 측정할 때 Fig 1과 같은 볼의 구조의 Artifact 사용을 추천하고 있으며, CMM에서 오차를 측정

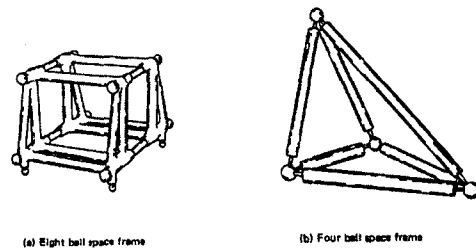


Fig 1. Examples of Balls Artifacts⁽¹⁾

할 때 같은 Artifact나 같은 종류의 Artifact를 사용해야 한다고 규정하고 있다. E.S.Lee⁽³⁾은 Hole Plate (Fig 2)를 이용한 CMM의 공간 오차 측정에 대하여 연구하였으며, Plate에서의 볼과 홀의 중심에서 팽창에 의한 굽힘 영향, Hole Plate의 설계 및 설치시 발생하는 오차, 공간 오차에 대한 분석에 대해 연구하고 있다. 3축 CMM의 공간오차 측정 방법, 온도에 의한 영향, 오차 함수에 대하여서도 연구되었다⁽⁴⁾.

Ball-Bar Artifact로 NC공작기계 또는 CMM의 오차를 측정하기 위해서는 먼저 정확한 볼의 3차원 위치 좌표를 알고 있어야 한다. 다음으로 Ball-Bar의 calibration 테이블을 구성한 후 측정

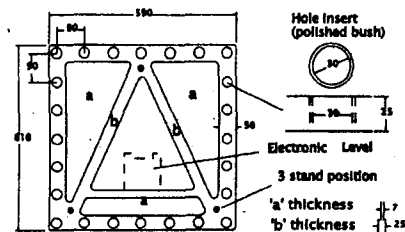


Fig 2. Hole Plate Artifact⁽³⁾

대상 NC공작기계 또는 CMM에서 Ball-Bar에 의한 측정을 수행 한 후 calibration 테이블에 의해 오차 벡터를 구하고, 공간오차 벡터를 구할 수 있다.

2. Ball Bar Artifact 설계 및 교정

2.1 Ball Bar 설계 및 제작

Ball Bar는 Fig 3과 같이 정밀 Bearing Ball을 사용하여 제작되었으며, 다수의 정밀 볼을 열팽창이 적은 막대 위에 부착하고 (볼 직경도 1 μ m 이내), 막대는 열팽창을 최소화 하기 위하여 Inbar재료(선열팽창계수⁽⁵⁾ : $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)로 제작되었다. Fig 4는 Ball Bar Artifact의 경사 설치(45°)의 경우 자중에 의해 얼마나 처짐이 발생하는 지를 알기 위해서 FEM을 이용한 처짐량 계산이며 해석틀은 Working Model FEA Ver 3.0.1로 하였으며 재료는 인바의 재료와 가장 가까운 Steel ANSI 304로 하였고 경계조건은 양쪽에 있는 Count-Boring자리에 볼트로 고정하였다. Balls의 자중은 무시하였으며, 계산결과에서 ϕ 38mm Bar인 경우 최대 처짐량은 2 μ m가 발생하였다.



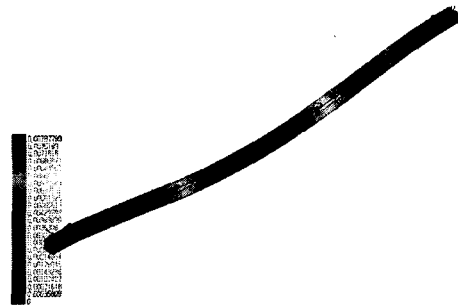
(a) Horizontal Set-up



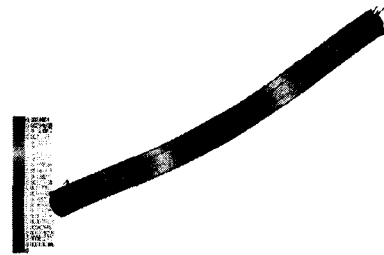
(b) Inclined position Set-up for CMM

Fig 3. Manufactured Ball Bar Artifact (17 Bearing Balls, ϕ 19mm, Inbar bar) and measurement in a CMM

Ball Bar Artifact 방법은 CMM과 NC공작기계의 작업공간에서 3차원 위치 오차 벡터를 측정하는 장치 및 방법이며, 3차원 위치오차 벡터값은 다음의 목적으로 사용된다. 1차원 오차값 : 기존의 Pitch Error Compensation 보상 데이터로 사용하고 3차원 오차값 : Error Map으로 구성하여 NC제어기에 ROM Data로 저장, 가공 프로그램의 자동 위치 보상 목적으로 사용된다.



(a) ϕ 19mm Bar (Max deflection 7 μ m)



(b) ϕ 38mm Bar (Max deflection 2 μ m)

Fig 4. Deflection calculation for inclined Ball Bar Artifact using FEM

2.2 볼 위치 좌표 교정

정밀한 CMM을 사용하여 볼 중심의 3차원 좌표를 Fig 5의 좌표로 측정하여 Ball Bar Calibration Table 1을 작성한다 (사용 CMM 덕인 Model Zodiac). Fig 6은 Ball Bar Calibration Data의 6회 측정 값의 좌표축 표시이며, CMM의 자체 오차를 고려하여도 편차는 그리 크지 않음을 보인다. 6회 측정은 CMM 작업 임의의 공간에서 측정 위치를 선정하였다.

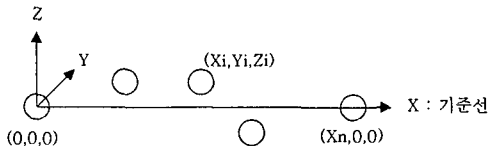
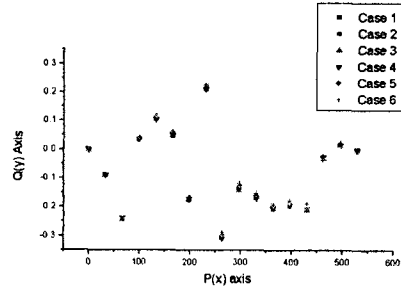


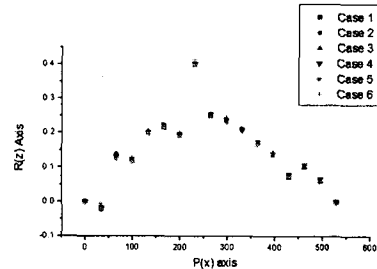
Fig 5. Ball Bar calibration coordinate for n(17) balls

Table 1. Ball bar Calibration Table (Unit : mm)

Ball No.	P(x)	Q(y)	R(z)
1	0	0	0
2	33.06293	-0.08918	-0.01617
3	66.0843	-0.24208	0.13162
4	99.08047	0.03748	0.1204
5	132.27022	0.1092	0.20215
6	165.38897	0.05373	0.21917
7	198.12677	-0.17068	0.1953
8	230.84455	0.231685	0.40368
9	263.74422	-0.30085	0.25192
10	296.89133	-0.13162	0.23563
11	329.8017	-0.16362	0.21105
12	363.16117	-0.2	0.17143
13	395.9437	-0.19065	0.21105
14	429.48497	-0.20325	0.07625
15	461.95275	-0.02878	0.10542
16	495.48877	0.01648	0.06355
17	528.46643	0	0



(a) P(x)-Q(y) coordinate



(b) P(x)-R(z) coordinate

Fig 6. Ball-Bar calibration data in P(x), P(y), P(z) Coordinates (6 times measurement)

3. 볼 막대 사용 및 오차벡터 측정

1) 1차원 볼막대는 Fig 7과 같이 반시계 방향으로 순서대로 위치시키고 각 볼 중심값을 측정한다. 이때 Fig 8과 같이 Case (c), (d)에서는 보상이 필요하다. 볼막대의 수직 설치 측정 경우는 Fig 9와 같다.

2) 볼 중심 좌표에서의 오차 벡터는 다음 식과 같이 구해지고, Fig 10과 같이 각 볼 중심 측정점에서 Ball Calibration 좌표를 제하여 구한다.

$$\text{오차벡터}(ex, ey, ez) = \text{측정된볼중심좌표} - \text{Ball Calibration Data} \quad (1)$$

3) NC제어기의 Pitch Error Compensation값은 Fig 10과 같이 각축의 4가지 경우의 평균오차값을 구하여 보상값으로 사용한다.

4) 볼막대의 경사 설치의 경우는 Fig 11과같이 4가지 방향으로 설치하고 시계방향으로 각각 NC공작기계의 Touch Probe 또는 CMM을 이용하여

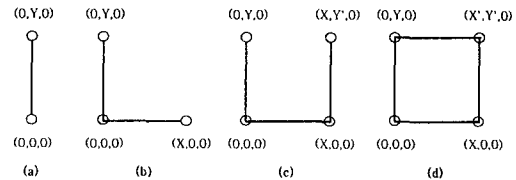


Fig 7. 1-D Ball Bar measuring procedure in XY plane, Case (a) -> (d)

볼 중심좌표를 측정한다. 볼 중심 좌표에서 오차 벡터는 같은 방법으로 구해지고, Fig 12에서 볼막대(볼 17개)에서 4가지 (Case 1-4)의 경우에서의 오차 벡터 측정 예를 표시하였다.

5) 가, 나, 다, 라의 방법으로는 직각도를 측정을 할 수 없기 때문에 Fig 13과 같은 2차원 Ball-bar Artifact를 설계하였다.

Artifact 측정시 온도변화가 클 경우는 Artifact의 열팽창계수를 사용하여 20° C로

Calibration 값을 보정하고, 실제 측정시의 온도를 측정하여 다시 20° C로 보정하여 비교하여야 한다.

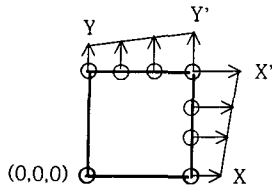


Fig 8. Compensation of the measured data in Case (c), (d)

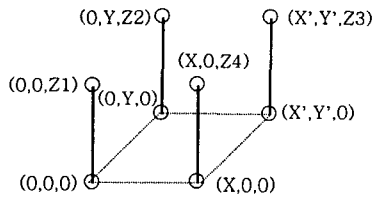
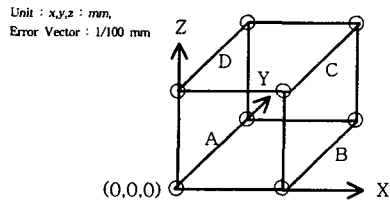


Fig 9. Vertical set up and measuring procedure of 1-D Ball Bar



Unit : x,y,z : mm,
Error Vector : 1/100 mm

Fig 10. Four cases data sets in each axis

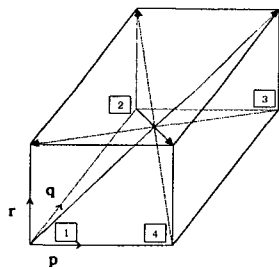


Fig 11. Measuring procedure and set up for inclined measurement of 1-D Ball bar artifact

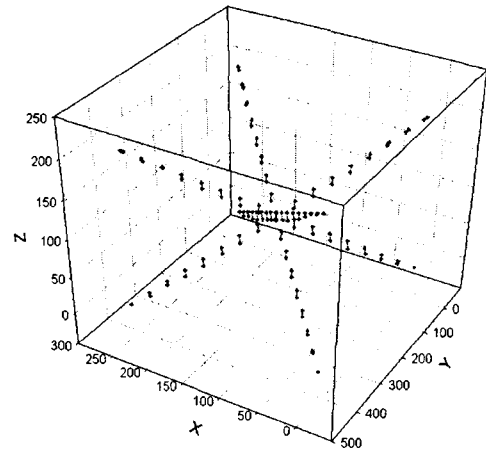


Fig 12. 3-D error vector measurement (17 balls, 4 cases of inclined set-up, CMM Model HAWK-5640 CB, Jinyoung)

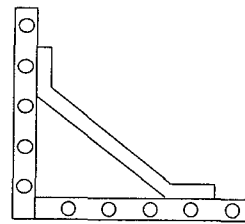


Fig 13. 2-D Ball Bar artifact design for squareness measurement

4. 오차 분석

4.1 각도 오차(Angular error)

각도 오차중에 X축에서의 Pitch오차(Fig 14)를 예를 들면, Fig 11에서의 측정순서 중 1, 4 번을 선택을 하여 Pitch를 구하면 Ep41벡터와 Ep11벡터의 차이 때문에 각도가 기울어지게 되고 이것을 계산식으로 나타내면

$$\sum_{i=1}^{17} E_{y_i}(x) = \sum_{i=1}^{17} \tan^{-1} \frac{E_{p4i} - E_{p1i}}{Z_i} \quad (2)$$

으로 나타낼수 있고, Yaw, Roll오차도 같은 방법으로 구할 수 있다.

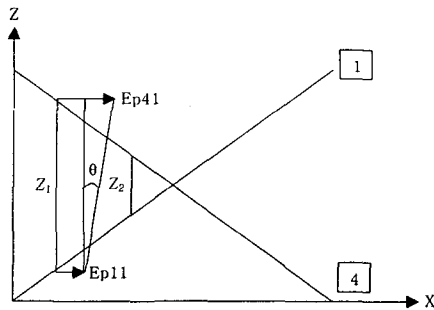


Fig 14. Pitch error calculation in X-axis

4.2 위치 오차(Position error)

위치 오차 중에 X축 위치오차(Fig 15)의 측정 예를 들면, 위에서 구한 X축 Pitch오차의 각도를 가지고 Ep41, Ep11를 통과하는 직선을 기준 X축으로 연장을 하면 기준 X축과의 교점을 구할 수 있는데 이때의 기준 X축과의 교점에서의 X값과 첫 번째 볼의 X값과의 차이를 X축 방향의 위치 결정 오차라고 한다. 다른 Y, Z축의 위치 결정 오차도 같은 방법으로 구할 수 있다.

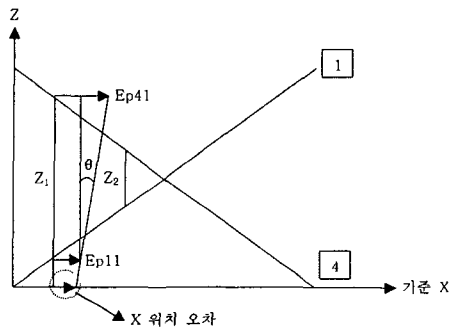
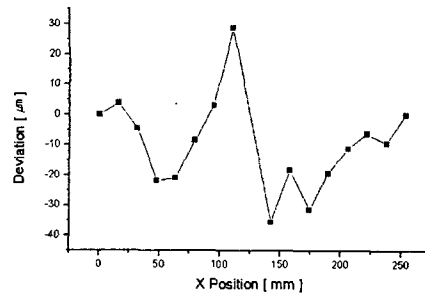


Fig 15. Position error calculation in X-axis

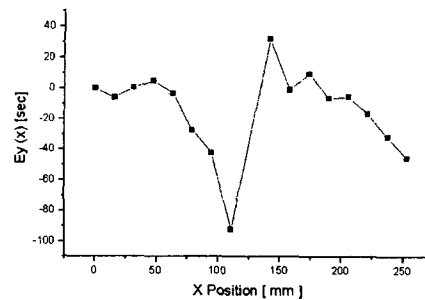
4.3 오차 분석 결과

Fig 11과 같이 4가지 방향으로 측정 순서와 측정방향으로 볼 막대를 경사로 설치하여 측정하여 오차벡터를 구하고 구한 오차 벡터를 가지고

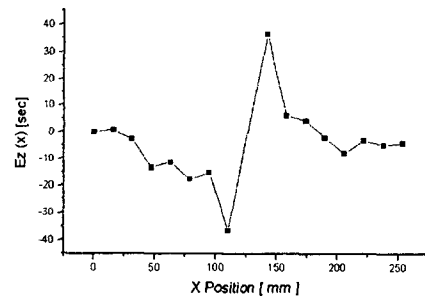
x, y, z축에서의 위치오차 3개, 각도오차인 피치(pitch), 요(yaw)을 구하였다. 진영 CMM (Model HAWK-5640 CB)에서 측정하여 계산된 오차 성분 결과를 Fig 16, 17에 나타내었다.



(a) Position error

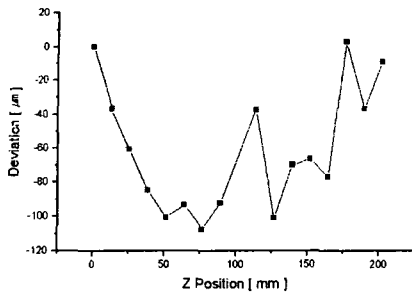


(b) Pitch error

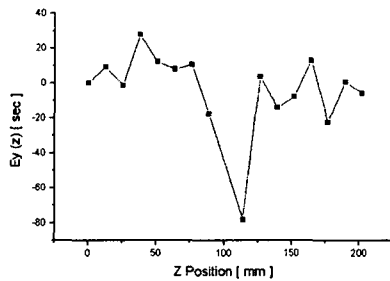


(c) Yaw error

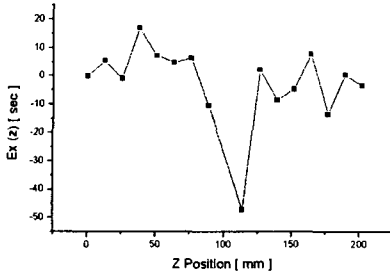
Fig 16. Position and angular error calculation data in X axis



(a) Position error



(b) Pitch error



(c) Yaw error

Fig 17. Position and angular error calculation data in Z axis

5. 결론

Ball-Bar Artifact를 이용하여 CMM의 공간 오차 측정 및 분석에 대한 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 교정된 Ball-Bar Artifact를 이용하여 위치오

차 및 각도 오차를 측정 분석하는 컴퓨터 알고리즘이 연구되었다.

(2) 본 연구에서는 위치오차 및 각도 오차를 측정 분석을 하였으며 직각도 측정을 위하여 그림 11과 같은 Ball-Bar Artifact를 설계하였다.

(3) Ball-Bar Artifact를 설계하여 기존의 레이저 시스템이나 다른 Artifact보다 효율적인 3차원 작업공간 내의 공간오차를 측정 및 분석이 가능하다.

(4) 본 연구는 CMM에서 공간오차를 측정 및 분석하였으며 향후 터치 프로브를 이용한 공작기계의 공간오차를 측정 및 분석할 예정이고 1차원 오차값은 기존의 Pitch Error Compensation 보상 데이터로, 3차원 오차값은 Error Map으로 구성하여 NC제어기에 ROM Data로 저장, 가공 프로그램의 자동 위치 보상 목적으로 활용할 수 있다.

참고문헌

- (1) British Standard BS 6808 Part 3 : Coordinate measuring machines, 1989
- (2) Lee, S. E. , "Computer Aided Volumetric Error Calibration of CNC-Machines and Coordinate Measuring Machines by the Artifact Method," Ph. D thesis, UMIST, 1993.
- (3) 이용석, 위현곤, M. Burdekin, "홀-플레이트를 이용한 3차원 좌표 측정기의 공간오차 측정", Vol.13, No.4, 1996.
- (4) Zhang, G., "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines, Annals of the CIRP Vol. 34/1/1985
- (5) 원시태, "인바 재료의 기계적 성질에 미치는 풀림 열처리의 영향", 한국 정밀공학회지 제18권 제1호 pp.129-138, 2001