

3차원 좌표 측정기의 오차 평가 시스템 개발

(Development of the system for error evaluation in coordinate measuring machines)

HEUI-JAE PARK (Dept. of Industrial Eng. POSTECH), M. Burdekin (UMIST), G. Peggs(NPL,UK)

Abstract

Technique of length measurement error is widely used in the accuracy assessment of CMMs(Coordinate measuring machines) and machine tools, as it is simple and direct measurement within the working volume of a machine. In this paper, a new method is proposed for the evaluation of the length measurement error in relation to the volumetric accuracy.

1D, 2D, and 3D measuring lines are considered for respective length measurement error: 1D, 2D, and 3D length measurement uncertainties are evaluated from volumetric accuracy. The relationship between the volumetric accuracy and length measurement error is discussed. PC based system for length measurement error evaluation and simulation is developed.

1. 서론

3차원 측정기와 공작기계는 오늘날 대부분의 생산현장에서 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 좌표측정기의 경우 품질 관리 및 검사의 중요성이 증가함에 따라 그 사용이 증대되고 있는 현실이다. CNC 또는 NC로 구동하는 측정기, 공작기계들은 정밀 선형 또는 각형 스케일을 통해서 위치를 측정, 제어, 표시 하고 있는데, 1 μ m (1/1000 mm) 를 지시하는 마지막 디지털은 정밀도에 대해서 특별한 고려가 없는 한은 무의미한 값들을 지시하는 것이 대부분이다. 이는 측정기, 공작기계 자체가 오차를 갖고 있음에 기인하는데, 이러한 무의미한 값들의 범위는 오차의 범위에 들어가게 된다.

기계의 정밀도를 측정하는 방법중에서도 거리측정오차방법(length measurement error)는 단순하면서도 측정을 원하는 작업공간에서 직접적으로 측정을 수행한다는 장점을 가지고 있어서 전통적으로 많이 사용되어오던 방법이다. 한편 입체적오차방법(volumetric accuracy)은 1980년대 이후 연구가 본격적으로 시작되었는데('1', '2', '3'), 이는 3차원 작업 공간상에서의 모든 오차를 고려하는 종합적인 측정방법으로 알려져 있다. 본 논문에서는 길이측정오차를 평가함에 있어서 입체적 오차에 근거하여 1차원, 2차원, 3차원 길이측정오차를 구할수 있는 오차평가 시스템을 개발하여, 길이측정오차곡선을 유도하는 새로운 방법을 설명하고 더불어 입체적 오차와의 관계에 대해서 설명하고 있다.

2. 길이 측정 오차 (length measurement error)

미리 알고 있는 게이지(스텝게이지, 블록게이지등)를 측정기, 공작기계위에 올려 놓고 측정케 함으로서 기계가 읽는 값(nominal reading)과 실제길이(actual length)와의 차이에 의해서 측정기계의 오차를 평가하는 방법은 간단하면서도 매우 유용한 오차 평가 방법으로 인식되어 왔다.

$$\text{즉, 오차(error)} = \text{실제길이(actual length)} - \text{기계값(nominal reading)} \quad (1)$$

이때 오차(error)와 측정길이(length)에 대해서 영국, 독일등의 유럽에서는 전통적으로 오차를 측정길이의 선형 곡선으로 두어 왔다.('4', '5') 이는 기계의 오차측정의 경험으로부터 얻은 것으로, 기계의 오차가 주로 스케일, 피치, 직각도 오차등일 때 실제와 잘맞게 되며('7'), 실제의 많은 좌표 측정기는 오늘날 이러한 평가 표준으로 정밀도 사양이 나오는 경우가 대부분이다.

기계의 운동을 운동에 동원되는 축의 수에 따라서 1차원, 2차원, 3차원 운동으로 구분할 수 있으며, 기계의 정확도도 기계의 운동에 따라서 1차원, 2차원, 3차원에 따라서 달리 규정하는 것으로 알려져 있다.('4', '5')

2.1 1차원 길이측정오차(1D length measurement error, U1)

기계가 1차원 운동을 하면서 측정하는 1차원 길이측정 오차, U1 은

$$U1=A1 + K1 \times L \leq B1 \quad (2)$$

로 표시한다. 여기서 A1, B1, K1은 결정되어야 할 상수로서, A1은 반복오차와 유관하며, B1은 작업 공간내에서의 최대 오차를 의미한다. 길이측정오차를 측정함에 있어서 측정선의 위치, 즉 피측정 게이지의 위치는 측정 결과에 영향을 주게 되는 데, 통상적으로 많이 사용하는 작업 공간의 점(수평측에서는 1/2지점, 수직측에서는 1/3 지점)을 통과하는 직교 3 축선을 측정선으로 하도록 본 시스템에서는 고려되었다.

2.2 2차원 길이 측정 오차 (2D length measurement error, U2)

기계가 2차원 운동을 하는 2차원 측정의 경우, U2 는

$$U2=A2 + K2 \times L \leq B2 \quad (3)$$

로 표시 한다. 여기서 A2, B2, K2는 결정되어야 할 상수이며, 각각의 상수가 갖는 의미는 1차원의 경우와 같다. 2차원의 경우 측정선의 위치는 1차원 길이측정오차에서 고려되는 중심점을 지나는 세 평면 (XY, YZ, ZX)의 주 대각선을 측정선으로 하도록 본 시스템에서는 고려되었다.

2.3 3차원 길이 측정오차 (3D length measurement error, U3)

기계가 3차원 운동을 하는 경우, U3는

$$U3= A3 + K3 \times L \leq B3 \quad (4)$$

로 표시한다. 여기서 A3, B3, K3는 결정되어야 할 상수로서, 각각의 상수가 갖는 의미는 1, 2차원의 경우와 같다. 3차원의 경우 측정선의 위치는 고려하는 작업 공간의 4개의 공간 대각선으로 하도록 본 시스템에서는 고려되었다.

2.4 길이 측정 오차 곡선의 결정

위에서 언급한 것처럼 길이 측정 오차를 평가하는데 있어서 오차를 선형화 시키는 것은 제작자, 사용자등이 전통적으로 합의해 온 점이었다. 이때, 상수 A, K등을 결정하는데 있어서 독일에서는 '평가 템플레이트(evaluation template)'('F 5,)

방법을 사용하였는데, 상수 A는 반복 측정으로부터 구해지는 4s(4배의 표준편차)에 히스테리시스 오차를 합한것으로 하여 구하고, 기울기 K는 구한 A에서 직선을 그어 오차-길이

그래프상의 모든점을 포함하도록 정하는 것이다. 이 방법의 문제점은 측정 데이터의 흠어짐이 큰 경우 기울기 상수 K가 큰 값을 갖게 되어 측정길이가 큰 구간에서는 오차의 한계가 크게 나타나는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하여 A, K상수를 결정하는 방법을 다음과 같이 제안한다.

2.4.1 상수 K의 결정

측정 데이터로부터 오차-측정길이 그래프를 구한후, 각 측정 길이에서의 오차의 절대치들만을 고려해서 최대값을 정하여 측정길이에서의 오차로 한다. 이는 최대값으로 오차의 한계를 주는 것이 가장 안전하기 때문이다. 이제 오차와 측정길이와의 관계를 최소 자승법에 의한 선형곡선으로 근사화하여 직선의 기울기를 구하고 기울기 K로 한다. 이는 측정오차는 측정길이에 따라 증가한다고 하는 경험에 기인하는 것으로서 (이는 입체오차로부터의 시뮬레이션에서도 확인되고 있다.), 최소 자승법에 의한 직선은 측정치의 흠어짐에서도 상당히 안정된 패턴을 보이기 때문이다. 최소 자승법에 의해서 K를 구하는 경우 영(0) 또는 양의 기울기 만을 고려한다. 보정이 되지않은 기계의 경우는 측정길이에 따라 증가하는 오차를 갖는 것이 실제적이기 때문이다. 기울기가 영(0)인 경우는 데이터의 흠어짐이 문제가 되는 경우인데, 잘 보정된 기계의 경우 이론적으로는 영(0)의 기울기를 가질 수 있으며, 데이터의 흠어짐의 최대최소로 측정오차를 결정하는 미국의 공업 표준과 유사하게 된다.

2.4.2 상수 A의 결정

기울기 K가 구해지면 상수 A는 쉽게 구해지게 된다. 오차-측정길이 데이터의 최소자승 직선의 기울기와 평행하면서 오차-길이의 모든 데이터를 포함하는 직선을 고려하여 그 직선이 오차축과 만나는 점의 오차값을 A 값으로 정한다. 이때 A 값은 각 측정 위치에서의 반복오차와 비교하여 최대값의 것으로 한다. 이는 상수 A 가 가장나쁜 반복오차를 포함시키도록 하기위해서이다. 한편 이 방법의 단점은 작은 측정거리에서는 실제의 오차보다도 큰 오차를 가질수 있다는 점이다.

2.4.3 기타 측정오차 평가 방법

위의 방법에서 작은 측정거리에서의 오차특성을 좋게 하기위해서 오차는 측정길이의 3승근에 비례하는 평가방법도 본 시스템에는 개발되었는데, 이는 일반적으로 허용공차및 오차는 크기(dimension)의 3승근과 비례하는 경험에서이다.('7,)

즉 오차를 U, 측정길이를 L이라 하면

$$U= A + K \times L \leq B \quad (5)$$

여기서 K는 최소자승법에 의해서 결정하는 상수이며 A는 직선의 경우와 마찬가지로 모든 오차-길이 데이터를 포함하도록

특 결정한다.

미국 공업 규정('6.)은 앞에서 언급한것 같이 데이터의 흠어 짐만을 고려해서 최대와 최소와의 차이 (peak to peak)를 측정 길이가 무관하게 두는 것으로 하는데, 이경우는 위의 선형의 경우에서 기울기가 영(0)인 경우와 일치한다.

3. 입체 오차(volumetric error)

한축을 따라서 움직이는 1차원 운동의 기계요소는 6개의 오차 성분을 갖게되어, 즉, 3개의 직선운동요소(1개의 위치오차, 2개의 진직도오차), 3개의 작운동요소(yaw, pitch, roll)가 존재하게 된다(그림1). 흔히 고려되는 3축기계의 경우, 18개(3X6)의 오차성분과, 3개의 축간의 직각도 오차(squareness error)로서 모두 21개의 오차가 독립적으로 존재하게 된다. 따라서 실제 작업(측정, 가공)이 일어나는 3차원 작업공간에서의 기계의 오차는 위의 21개의 오차의 기구학적인 조합에 의해서 더욱 복잡성을 띄게 된다. 일반적인 3차원 측정기의 입체오차 평가 시스템이 개발되었으며('8.), 이러한 입체오차는 구성된후 입체오차의 보정, 측정오차의 시뮬레이션등에 사용될수 있다.

4. 실제기계로의 적용

개발된 길이측정오차 평가 시스템과 입체 오차시스템을 실제 기계에 적용하였으며, 적용된 기계는 영국의 KEMCO사의 이동수평축 형식의 기계였다. (주:이 기계는 검고정되지 않은 상태에서 측정이 수행되었으며, 따라서 측정된 오차들 역시 이 기계의 실제 정밀도와는 관계가 없음을 밝힌다.)

1200 mm X 1200 mm X 1200 mm 의 작업공간에서 이 기계의 입체오차가 측정 평가되었으며, 입체오차측정의 결과가 그림2에 있다. 여기서 대각선1,2,3,4는 작업공간의 4개의 주 대각선을 의미한다. 그리고 대각선의 오차는 대각선의 실제 길이와 공칭 길이의 차이를 의미한다. 오차가 영(0)일 경우의 공간 격자의 형태가 점선으로, 실제오차의 거동이 실선으로 표시되어있다. 측정, 평가된 입체오차로부터 길이측정오차가 도출되었으며, 그림3,4는 3차원 길이측정오차를 보이고 있다. 즉, 대각선1,2,3,4를 따라서 길이오차가 계산되었으며, 그림3은 위에서 제안된 최소자승법에 의하여 오차거동을 선형화시키는 것을 나타내며, 여기서 기울기 1/20.5 (um/mm)를 얻는다. 이제 상수 A3를 구하기 위해서 최소자승 곡선을 평행 이동시켜 모든 오차를 포함하도록 하는 직선을 구하여, 상수 100.7을 얻는다.

그림3에서 이기계의 3차원 길이측정오차(U3)는 $U3=100.7 \cdot L/20.3$ 임을 구할 수있다. 그림4는 작은길이구간에서의 오차표시성능을 좋게 하기위하여 최소자승법에 의한 3승근의 형태로 근사화한 격산을 보인다. 즉, 3차원 길이측정 오차(U3)는, $U3= 94.6 + 9.3 \text{ Cubic Root } (L)$ 로 표시할 수있다.

5. 토론 및 결론

(1) 3차원측정기 및 공작기계의 오차 표현을 위한 선형식이 제안되었다. 즉, 오차-측정길이데이터로부터 근사직선을 구하고, 모든오차를 포함하도록 평행이동한것으로부터 상수들을 구하는 것을 제안하였으며, 실제 기계에 적용시켜 보았다.

(2) 1,2,3차원에서의 선형측정오차를 측정할때, 측정선의 위치에 대해서 제안하였다.

(3) 입체오차로부터 길이측정오차를 시뮬레이션하는 시스템을 개발하여, 다양한 길이오차측정을 직접 도출해낼수 있었으며, step gauge, length bar등을 통한 측정의 결과들을 매우 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있었다.

(4) 좌표측정기와 공작기계의 정확한 오차평가를 위해서는 입체오차평가를 고려해야 함을 제안한다. 이는 길이측정오차가 매우 적은 값을 갖는 경우라도 입체오차, 즉 기계의 실제오차는 무시할수 없는 값을 가질수 있음을 시뮬레이션 결과에서 확인 할수 있었다. 그림5는 무시할 수없는 입체오차가 있는 기계가 3차원 길이측정오차는 영(0)을 낼수 있음을 보이고 있다.

참고 문헌

(1) Busch, K., Kunzmann, F., and Waldele, F. Numerical error correction of a coordinate measuring machine, Proceedings of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, Tokyo, 1984

(2) Zhang, G., Veale, R., Chorlton, T., Borchardt, B. and Hocken, R. Error compensation of coordinate measuring machines, Annals of CIRP Vol 24/1/1985

(3) Pahk, H. Computer aided volumetric error calibration of coordinate measuring machines, PhD Thesis, UMIST, 1990

(4) BS 6808:1987 British Standard Coordinate Measuring Machines, British Standard Institution, 1987.

(5) VDI/VDE 2617 Accuracy of coordinate measuring machines characteristic parameters and their checking, VDI/VDE, 1986 (Germany Standard)

(6) ANSI/ASME B89.1.12M-1985 An American National Standard, Methods of performance evaluation of coordinate measuring machines, the ASME, 1985

(7) Pahk, H., and Burdekin, M. Numerical simulation of coordinate measuring machines, Research Report to the NPL, 1991, UMIST

(8) Pahk, H., Burdekin, M. and Peggs, G. Development of computer software for calculation of volumetric error map in 3 axis CMMs, 김동원 교수님 정년퇴임기념논문집, 1991년(발간 예정)

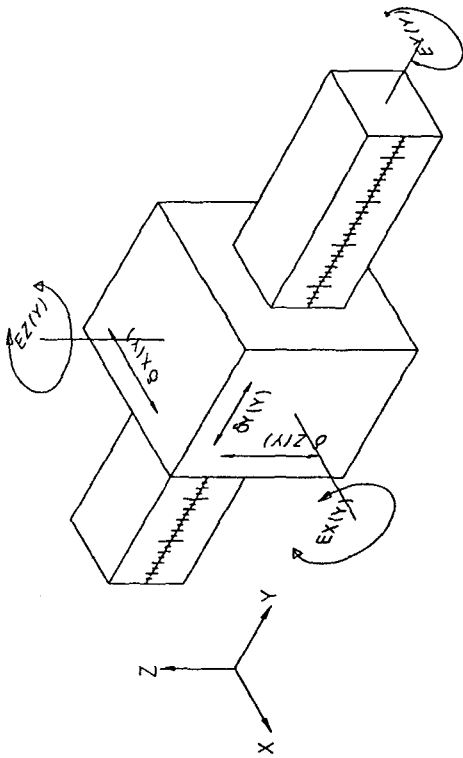


그림 1 : 한축을 따라진 측정점의 기계요소의 오차성분

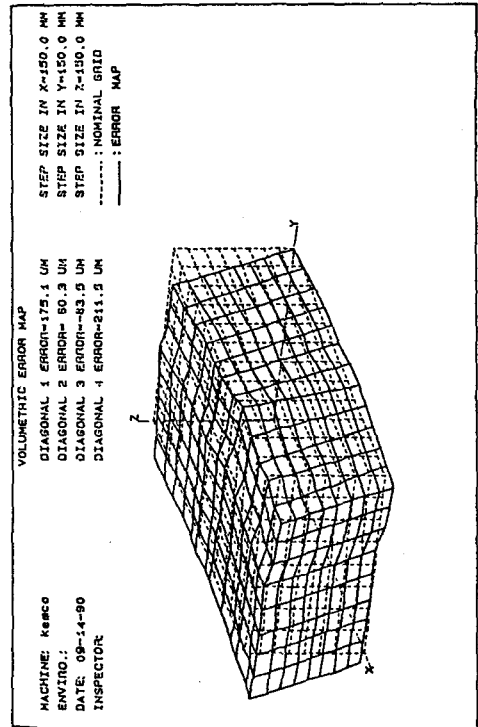


그림 2 : 3차원 좌표 측정기의 입체 오차 측정 실험

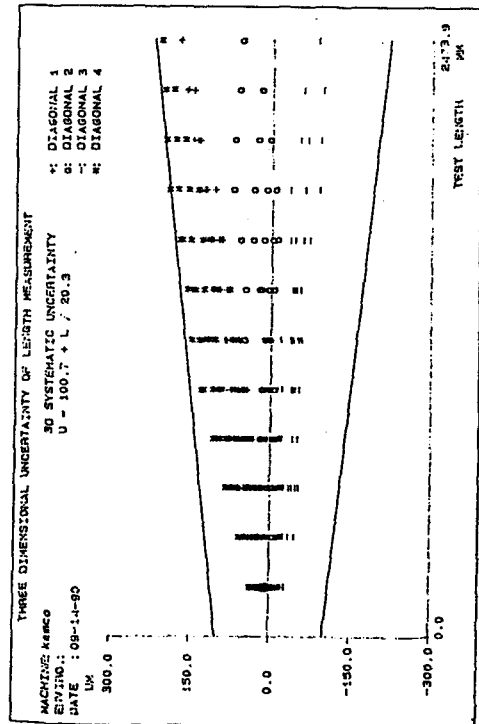


그림 3 : 3차원 길이 측정 오차 (선형 근사식)

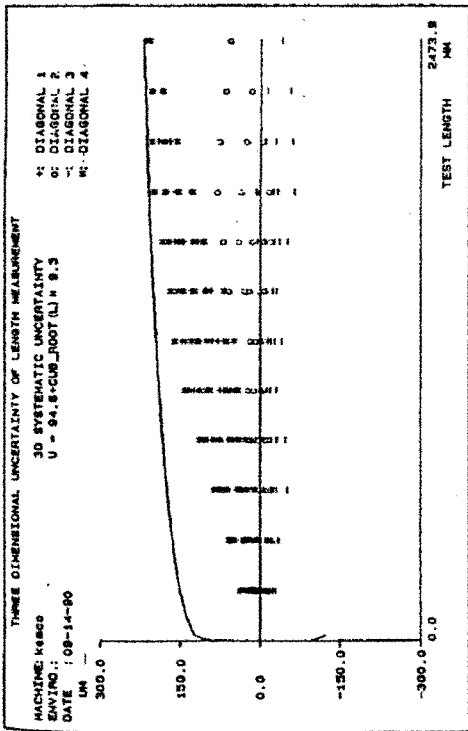


그림 4 3차원 길이 측정 오차 (3승근 근사식)

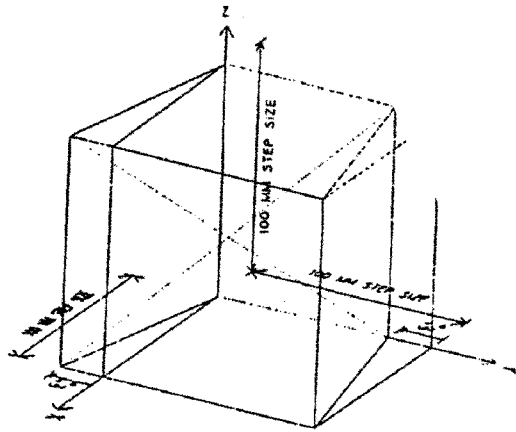


그림 5 입체 오차와 선형 측정 오차