

NC공작기계의 공구위치 정밀도 측정 및 보상 연구



이 응 석

(충북대학교 기계공학부)

1. 서 론

일반산업 및 군수업계에서 요구되는 초정밀 가공기는 수십억원대의 고가로 주로 주문 생산에 의해 제작된다. 보다 경제적인 방법으로 기존의 산업체에서 사용중인 범용 NC공작기계를 이용하여 정밀도를 향상시켜 수마이크로미터급의 정밀가공을 수행하기 위한 연구가 수행되고 있다. 일반 산업체에서는 정기적으로 Laser Interferometer 등을 이용하여 NC가공기의 오차를 측정하여 Pitch / Back-lash Compensation 등의 기능을 통하여 공구의 위치 오차를 보정토록 하고 있지만 대부분의 실제 작업자들은 가공오차의 명확한 규명 능력이 부족하여 이들 오차 보정 기능을 효율적으로 사용하지 못하는 실정이다. 기존 공작

기계의 오차 측정 및 검증 방법이 보편화되면 가공오차의 많은 부분이 S/W에 의한 보정으로 가능하기 때문에 최소한의 비용으로 H/W의 교체 즉, 공작기계의 개수(Over-haul) 비용이 절감될 수 있다.

NC공작기계의 오차는 크게 스피들의 회전이 수반되지 않는 무부하 조건과 스피들 회전과 함께 실제 가공에서 수반되는 열부하, 절삭력 등에 기인하는 오차로 크게 구분된다. 실제 가공에서 필수적으로 수반되는 절삭력에 기인되는 오차는 절삭력 모델, Tool deflection, 열부하 구멍 등 그 복잡한 메커니즘으로 인하여 지금까지의 수많은 연구에도 불구하고도 정밀 가공에 대한 표준화된 방법으로는 아직 미흡한 실정이다. 반면에 스피들 회전이 수반되지 않는 무부하 조건 (No load condition)에서는 적은 열부하로 인하여

비교적 명확하게 주로 이송계의 위치 오차를 중심으로 검증 방법들이 규명되어 있다 (ISO 230, 1984, KS B4001, 4001, 4204, 4404, 4408 등). 그림 1의 Rotary Table이 포함된 5축 NC밀링머신이며, 5축 무부하 조건에서의 위치오차는 3축 이송계 (X, Y, Z 축) 이외에 공구자세를 포함하는 2축 공구회전 축과, Rotary Table의 2축(C, A) 각도 오차를 포함한다. 밀링, 선반 및 보링머신 등 대부분의 가공기에서 필수적으로 수반되는 또 하나의 오차는 스피ndl의 회전 오차 (Spindle run-out) 이다. 스피ndl 회전의 Run-out 오차에 의한 가공결과는 공구와 가공표면사이의 규칙적인 상대 운동에 의하여 가공면의 표면거칠기를 나쁘게 한다.

최근 국내에서도 개발되고 있는 공작기계용 NC제어기는 자체 제어 특성에 의한 Encoder에서의 불명확한 Pulse오차에 의해 결국 이송계의 위치오차를 유발한다. 공작기계 관련 NC제어기 오차는 Interpolation errors, Master slave change over, Servo mismatch 등으로 알려져 있으며, 이들을 별도로 분리하여 측정 및 분석하는 연구가 NC제어기 개발에서 필수적일 것이다. 또한 NC제어기를 공작기계에 장착하기 위한 제어 Parameter 설정 및 조정을 위해서도

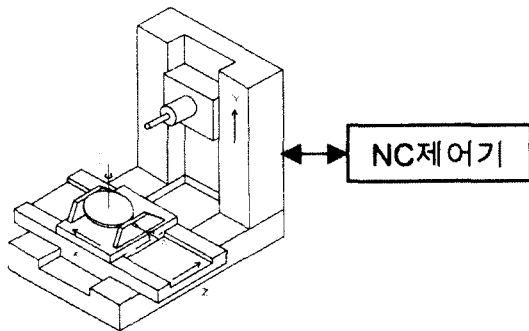


그림 1. Rotary Table이 포함된 5축 수평형 NC 밀링머신 (X, Y, Z, A, C축)

공작기계 장착 NC제어기 연구는 그 비중이 높을 것이다. NC공작기계를 이용하여 정밀가공을 위해서는 필수적으로 선행되어야 하는 것이 NC공작기계의 기하학적 이송 오차 측정 및 보정 연구이다. 여기서는 공작기계중 산업체에서 사용 빈도가 높은 NC밀링머신에 대한 Volumetric 오차 측정 및 보정과 기타 오차 측정에 대하여 주로 저자를 중심으로 수행된 최근의 연구를 소개한다. 일반적인 3축 운동에서 공구자세 및 곡면가공을 위해 필수적인 2축 Rotary Table의 각도 오차분석에 대한 연구를 소개한다. 또한 NC공작기계의 오차 원인중 비교적 측정 및 분석이 명확한 이송계 및 스피ndl Run-out 등 기하학적 오차 (Geometric error)에 대하여 언급한다. 마지막으로 NC가공기에서 필수적인 제어기 오차의 측정 및 분석에 대한 연구도 소개 한다

2. Closed-loop 오차 보상 개념

그림 2는 최근 관련 연구에서 개념적으로 제시 또는 부분적으로 수행중인 NC공작기계의 Closed-loop 오차 보상 개념이다⁽¹⁾. 지금까지는 CMM (3차원 좌표 측정기, Coordinate Measuring Machine) 등을 이용하여 가공물의 형상을 측정하여 가공오차를 평가하는 방법 (Off-line)이 일반적이었다. CMM은 가공물의 3차원 형상이 가능한 측정기이며 대부분의 중소형 가공 공장에서 필수적으로 사용되고 있다 (그림 3). CMM은 그 사용 빈도 및 수천만원 이상 고가의 가격으로 국내에서도 (쥬터인 및 진영정기 등에서 생산되고 있으며, 일본 등의 제품에 비교하여 정밀도가 떨어지지 않는다. 최근 NC 공작기계와 함께 구입 가능한 공작기계용 Touch Probe를 공구대신 장착하여 가공후 가공물을 분리시키지 않고 NC공작기계를 3차원 위치 측정기로 사용하여 측정시간 절약 및 CMM 구입 비용을 절감하는 연구가 수행되고 있다⁽²⁾. 이 경우 공작기계는

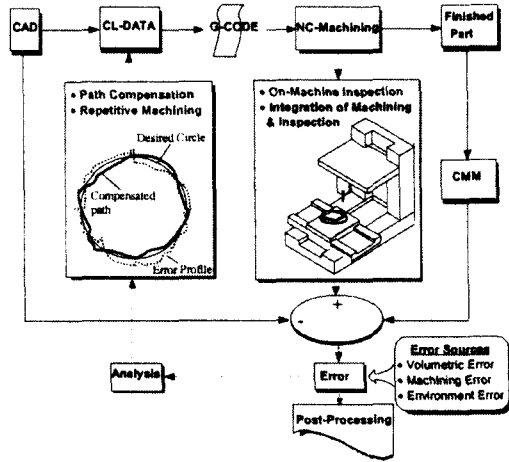


그림 2. NC공작기계의 Closed-loop오차 보상 개념

Dulim COORDINATE MEASURING MACHINE
Astro Series

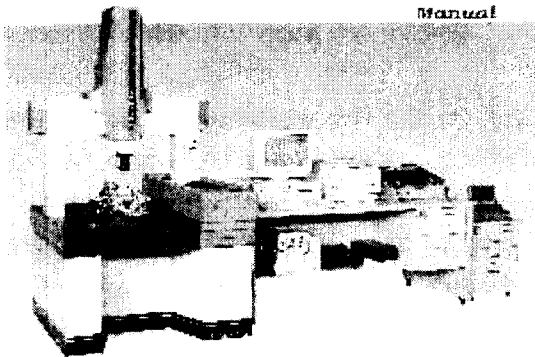


그림 3. 3차원 좌표 측정기 (CMM)

CMM에 비교하여 좌표축의 이송 정밀도가 떨어지기 때문에 S/W적인 위치 오차 보상이 필수적이다.

공작기계용 Touch Probe를 활용하는 연구는 가공물의 측정 Path 설정 등 별도의 연구가 필요하며 Touch Probe자체의 가격 또한 현재 천만원대의 고가로 수입되고 있어 향후 CMM등에서의 사용과 함께 국내 개발이 필요하다.

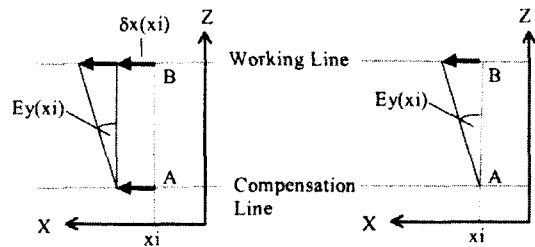
3. Volumetric 위치 오차 모델

현재의 NC제어기는 직선오차보상(Linear error compensation)으로 한정 되어있어 그림 4와 같이 보상축의 위치오차(δx)만이 제거가 되고 평행한 다른 축에서의 각도오차(E_x)는 여전히 존재하게 된다. 각도오차 E_x 는 이 경우 일반적으로 알려진 21's Error 중 Pitch error에 해당되고 근본적으로는 Abbe Error에 기인한다. Abbe Error는 3축이송계의 경우 각축에 그림 5와 같이 독립적으로 존재하게 된다. 따라서 각각의 축에서 존재하는 6개씩의 오차성분을 인수로 식(1)과 같이 오차를 포함하는 좌표에서 좌표변화 Transformation Matrix를 구성하여 오차를 보상하는 방법이 작업공간 전체를 대상으로 오차를 보상하는 즉 Volumetric 오차 보상 방법이다.

Volumetric 오차 인수는 1축인 경우 3개의 직선 방향오차 ($\delta x, \delta y, \delta z$, Liner error)와 3개의 각도오차 (E_x, E_y, E_z , Angular error)를 포함한다.

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & -E_z(x) & E_y(x) & D_x + \delta x(x) \\ E_z(x) & 1 & E_x(y) & \delta y(x) \\ -E_y(x) & E_x(x) & 1 & \delta z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, D_x : X축 방향의 위치이송.



(a) 보상전 ($\delta x, E_x$ 존재) (b) 보상후 (E_x 존재)

그림 4. NC제어기의 직선오차 보상효과

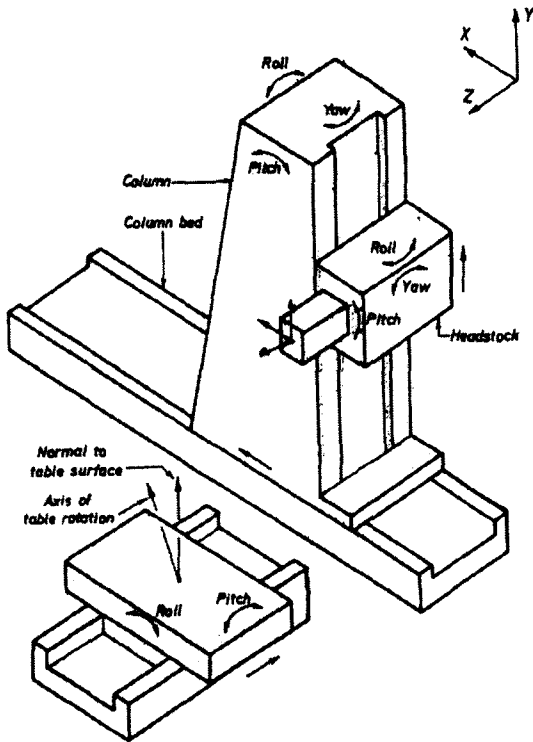


그림 5. 3축 공작기계에서의 각축에 독립적으로 작용하는 Abbe Error

이 방법은 현재 다수의 연구자들에 의해 실험실에서 이론적인 오차모델을 구성하여 수행되고 있으며, 부분적으로 CMM등에서 시도되고 있다⁽³⁾.

그림 6은 Volumetric 오차 보상 방법에 의한 직선 방향 오차 δx 의 감소를 비교한 것이다. Forward & Backward의 이송방향을 바꾸어서 2회 측정된 것이며, 그림에서 이송방향이 역전되면서 발생하는 오차(Back-lash)가 위치에 따라 차이가 있음을 볼 수 있다. 이것은 1축에서 1개의 Parameter만을 보정하는 현재의 Back-lash compensation 방법이 부적절함을 의미한다. 따라서 앞서 언급한 Transformation Matrix 식(1)에 Back-lash를 또 하나의 인수로 하여 Volumetric 오차를 모델링하는 연구도 수행된다⁽⁴⁾.

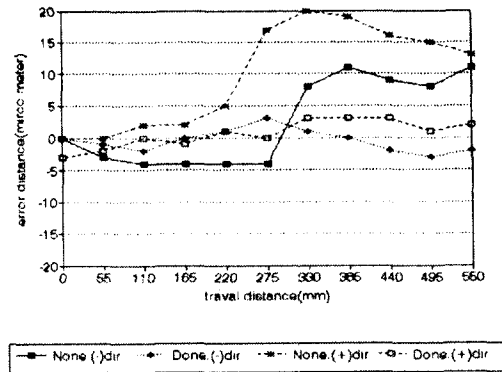


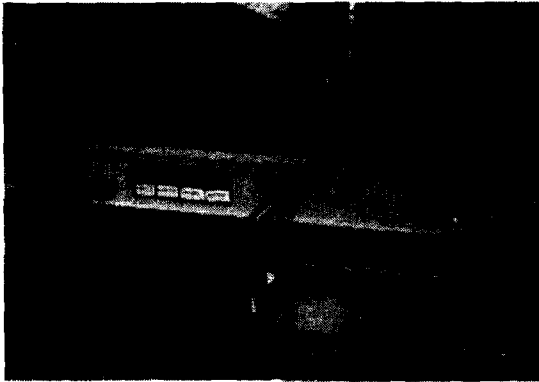
그림 6. Volumetric 오차 보상 전후의 (δx 비교 (Forward & Backward 2회 측정))

4. Volumetric 오차 측정 및 검증

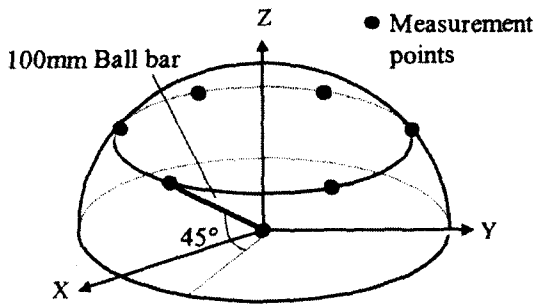
4.1 Ball-Bar Method

Laser Interferometer는 기존에 소규모 공장에서 NC공작기계 및 CMM의 위치오차 측정을 위해 사용되었던 Step Gage를 대체하여 최근 널리 사용되고 있다. Laser Interferometer는 Step Gage에 비하여 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이상의 고정밀도와 연속측정을 가능하게 하지만 수천만원대의 고가와 장시간의 설치시간을 요구한다. 또한 Laser Interferometer는 특성상 임의 공간에서의 위치 측정이 불가능하고 따라서 이러한 단점을 해결하기 위하여 최근 개발되어 사용되는 측정 기구가 Ball link bar이다 (그림 7)

Ball link bar (또는 Ball-bar) 기구는 2개의 Master ball 사이에 연결된 LVDT에 의해 공간 길이를 측정하고 NC공작기계의 기계좌표로부터 계산되는 공간길이를 비교하여 3차원 길이오차 (Volumetric 오차)를 측정한다. 이 방법은 CMM의 위치오차 검증 규정에서 사용되는 3-D length uncertainty를 측정하는 수단으로도 이용 가능하다. Ball bar기구는 저렴한 가격과 편리한 사용성 및 단시간내에 측정 및



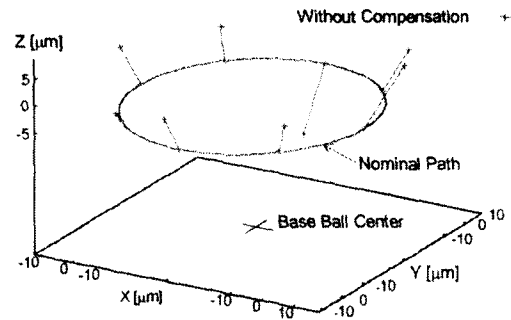
(a) 수직형 밀링머신에 장착된 Ball link bar



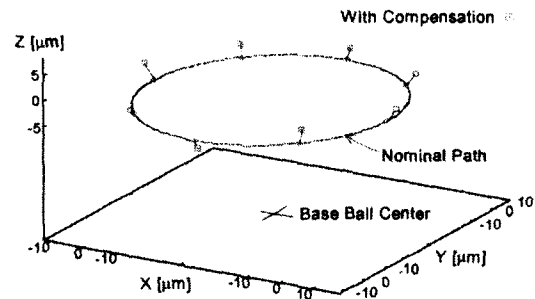
(b) Ball bar의 경사각 45°에서의 측정 범위

그림 7. Ball bar의 장착 및 측정 범위

분석이 이루어 지며 NC밀링머신 이외 NC선반, CMM 및 Robot Calibration 등에 까지 그 사용범위가 확대 되고 있다. Ball bar는 영국 Ranishaw사에서 상품으로 개발되어 전세계에 보급되었으며, 최근에는 국내에서도 변형된 형태로 개발 되었다. Ball bar는 반구형(Hemisphere surface)내에서 측정범위가 제한되는 단점 때문에 LVDT보다 큰 측정범위의 Linear Scale 사용 또는 2차원 Grid Encoder를 사용하는 상품이 소개 되고 있으며 특히 Grid Encoder의 경우 반구상의 제한이 없고 측정속도도 빠르지만 Grid Encoder의 비접촉 거리를 엄격하게



(a) Volumetric 오차 보상전



(b) Volumetric 오차 보상후

그림 8. Ball bar를 이용한 공간오차 측정 (NC밀링머신)

조정해야 하는 단점이 있다. 그림 8은 Ball bar 기구를 사용하여 NC밀링머신에서 전술한 Volumetric 오차 보상 전후의 오차를 측정 및 비교한 것이다⁽³⁾.

4.2. On-Machine 측정 및 보상

NC가공기의 공구 위치에 Touch Probe를 장착하여 공구의 Volumetric오차의 보상 후 CMM과 같이 사용하는 연구가 수행되고 있으며, 그림 9는 NC밀링머신에서 가공 후 공작물을 장착한 상태에서 On-Machine 측정을 수행하는 것을 보여준다⁽³⁾.

그림 10은 On-Machine측정에서 얻어진 데이터에



그림 9. Touch Probe를 사용한 On-Machine 측정

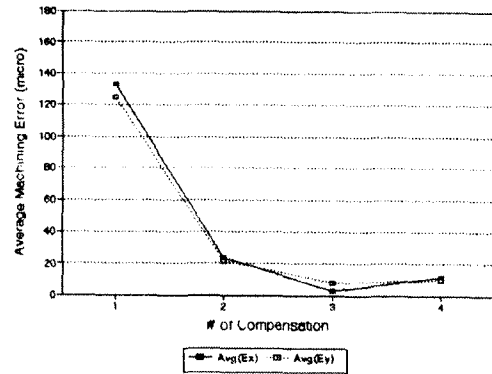
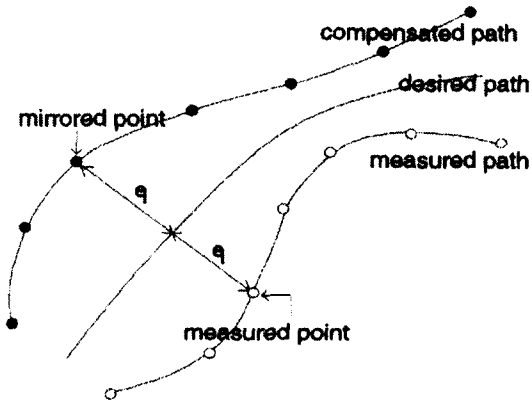
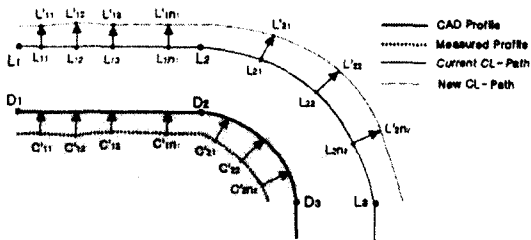


그림 11. 반복 가공 횟수에 따른 오차감소



(a) Mirror Image를 이용한 위치오차 보상



(b) CAM 데이터로부터 공구 경로 보상

그림 10. On-Machine 측정 데이터로부터 Mirror Image를 이용한 오차 및 공구경로 보상

서 Mirror Image를 이용하여 보상 데이터를 구하고 최초의 CAM 데이터로부터 공구 경로를 수정하여 재가공을 수행하는 과정을 보여 준다. 이 방법은 On-Machine 측정에 의한 반복가공으로 알려져 있으며 같은 형태의 제품을 다량 가공할 경우 최초의 몇 개를 버리고 나머지를 고정밀도로 가공하는 방법이다. 그림 11은 수 차례의 반복 가공 후 오차의 감소를 보여 준다. 1회 반복 가공 후 현저한 오차의 감소를 보이며, 3회 이후에는 크게 오차의 감소가 없고 오히려 증가함을 보이며, 이것은 On-Machine 측정 정밀도 및 보상 Algorithm 등에 기인 한다.

4.3 Artifact Method

주로 CMM등에서 사용되어지는 Touch Probe를 이용하여 NC 공작기계 상에서 기준형상(Artifact)을 측정하여 공구위치 정밀도를 측정하는 방법이 가능하다.

그림 11은 1차원 볼막대 Artifact를 이용하여 방법이며⁽⁷⁾ Artifact는 열팽창이 적은 Inbar등의 재료에 정밀한 기준 볼이 일정 간격으로 부착된다. 볼의 중심 좌표는 정밀한 CMM을 이용하여 Calibration하고, NC공작기계 상에서 볼의 재 측정한다. 이때 제어기에 표시되는 볼중심 좌표값과 Calibration좌표 값의



그림 11. CMM을 이용한 불막대 Calibration

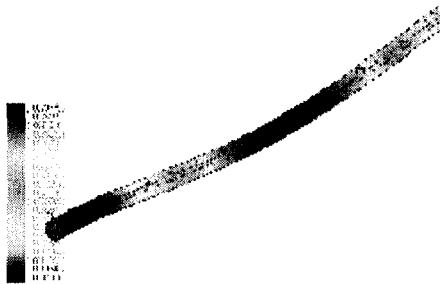


그림 12. FEM으로 계산된 불막대의 자중에 의한 처짐량 (양쪽 Bolt Fix, 19mm Steel Bar, Max deflection 7 μ m)

차이가 3차원 공간에서의 NC공작기계의 이송오차가 될 것이다. 현장에서 사용시에는 Calibration 온도를 보정해 주어야 할 것이다. Artifact 방법은 자체 하중에 의한 변형이 또 하나의 문제이며, 그림 12는 FEM을 이용하여 설계된 불막대의 자중에 의한 변형량을

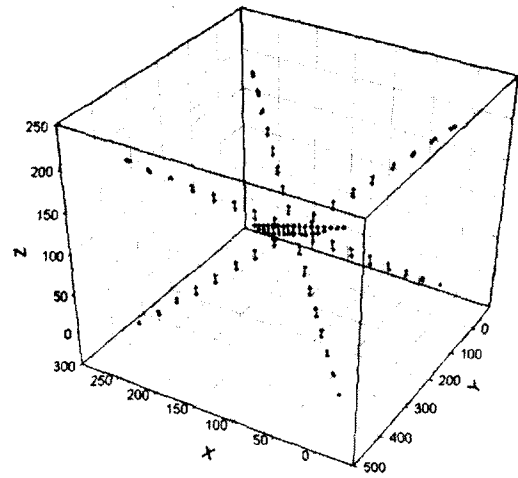


그림 13. 불막대로 측정된 대각선 방향의 3차원 오차 벡터 측정 예

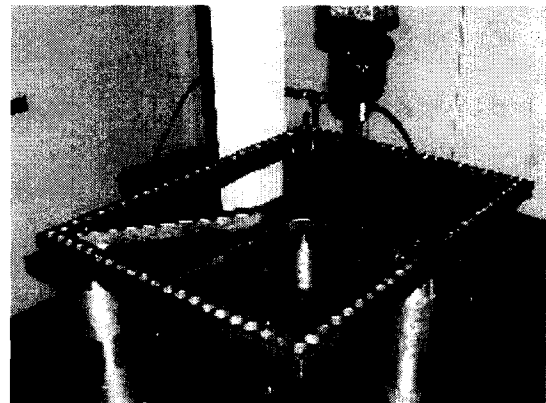
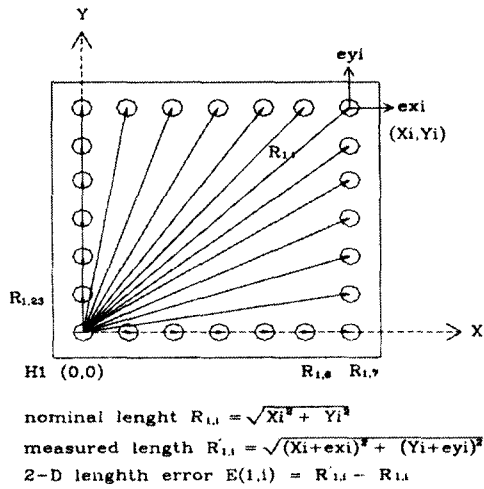
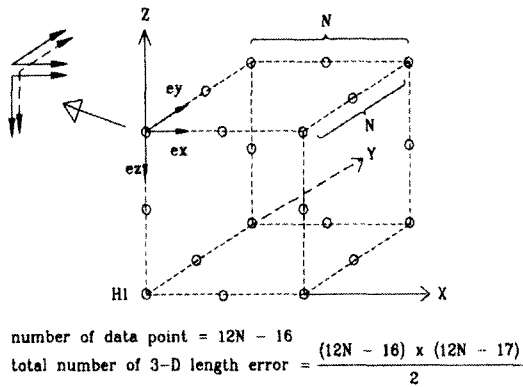


그림 14. CMM에서의 Hole Plate Calibration

예측한 것이다. 그림 13은 1차원 불막대에서 측정된 대각선 방향의 오차 벡터 측정 데이터이다. 오차벡터는 3축 이송계의 위치오차 보상값 이외, Pitch, Yaw 오차 등 이송계의 각도오차 분석으로 이용된다. 1차원 불막대는 여러가지의 2차원 형태로도 사용 가능할



(a) 2차원 길이오차 측정



(b) 3차원 길이오차의 조합

그림 15. Hole Plate Artifact에 의한 공간 길이 오차 측정 방법

것이며, 그림 14는 2차원 Hole-Plate Artifact이며, 불막대에 비하여 가공이 유리하고 오차분석을 위한 데이터 측정시간이 단축된다⁽⁸⁾. Hole 내경가공으로 방전가공 또는 베어링부시와 같은 정밀한 실린더형 Hole이 사용될 수 있을 것이다.

Hole-Plate는 그림 15(a)와 같이 2차원 오차벡터만의 측정이 가능하며, 3차원 오차벡터 측정의 경우에는 그림 15(b)와 같이 2차원 평면 데이터를 서로 수직으로 조합하여 구성 한다.

5. Rotary Table 각도오차 측정

공구자세 변경 및 다양한 형상의 곡면 가공을 위하여 2축 Rotary Table이 기존의 3축 머신과 함께 사용된다. 이 경우도 Rotary Table의 각도오차를 검증해야 하며 오차의 인수는 전술한 직선운동에서의 Angular Pitch, Yaw, Roll 오차와 같은 개념을 사용하여 그림 16과 같이 분석이 가능하다. 직선운동에서와 같은 방법으로 식(2)와 같이 Angular Coordinate Trasformaton Matrix를 구성하여 각도 위치 오차의 Volumetric보상이 가능하다⁽⁹⁾.

$$T_c(\theta_z) = \begin{bmatrix} 1 & -R_z(\theta_z) & R_y(\theta_x) & L_x(\theta_z) \\ R_x(\theta_z) & 1 & -R_x(\theta_z) & L_y(\theta_z) \\ -R_y(\theta_z) & R_x(\theta_z) & 1 & L_z(\theta_z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rotary Table의 각도 오차 측정에는 일반적으로

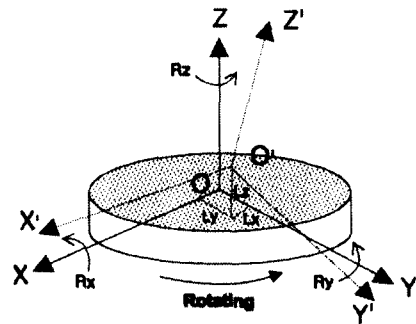


그림 16. C축 Rotary Table의 오차 성분

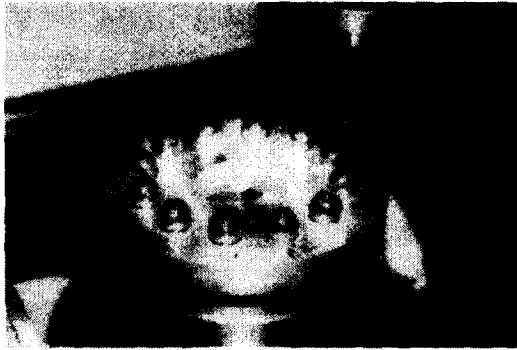


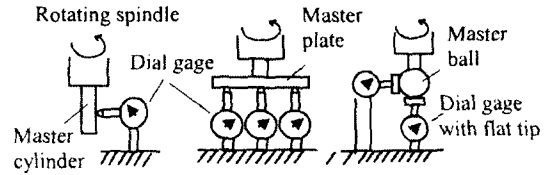
그림 17. Rotary Table의 각도 측정을 위한 Ball table과 공작기계용 Touch probe

Autocollimator 및 Polygon mirror를 사용하여 Angular indexing / tilting 오차를 그리고 1개의 Master ball을 회전축에 장착하여 회전 축의 흔들림을 측정한다. 다른 방법은 그림 17과 같은 일정각도로 Master ball을 심은 Ball table을 제작하여 Rotary table의 오차측정이 가능하다. Master ball의 3차원 위치좌표는 CMM을 이용하여 각도 등을 측정하여 각도 위치 기준으로 하고, Ball table을 Rotary table상에서 동기 회전시키면서 공작기계용 Touch probe를 이용하여 각도 측정이 수행된다.

5축 공작기계의 Volumetric 오차 모델은 기본 3축(X,Y,Z)에 Rotary Table의 2축(C,A)의 Transformation Matrix식(2)를 합성하여 가능하다⁶⁾.

6. 스피들 Run-out 및 위치오차 측정

그림 18은 스피들 Run-out 측정을 위한 일반적인 방법들이다. (KS B4001,4204,4404, 4408 공작기계 시험 방법 통칙) 일반적으로는 대부분 2차원 Run-out의 측정이 수행되며 접촉식 Dial Gage를 사용하기 때문에 100 rpm이하의 낮은 회전속도에서만 사용 가능하다.



(a) Roundness (b) Pitching, Yaw (c) 3D positioning

그림 18. 일반적인 스피들 Run-out 측정 방법

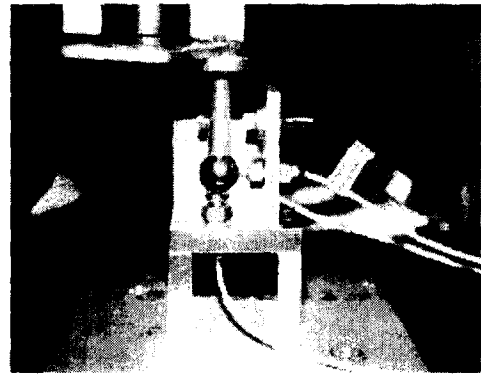


그림 19. 1개의 Master ball과 3개의 비접촉 미소 거리 센서를 사용한 3차원 스피들 Run-out 측정

그림 19는 Master ball과 3개의 비접촉 센서를 사용하여 고속회전에서도 3차원 스피들의 Run-out 측정이 가능한 시험연구를 보여준다. 스피들 측정의 경우도 그림 20과 같이 6개의 회전오차 성분으로 분리가 가능하고 여기서는 회전속도의 변동은 Roll오차에 해당된다. 이 방법은 구조물의 진동 등 무작위로 운동하는 물체의 미소 공간위치 측정에도 사용 가능하다.

그림 21은 이 방법으로 측정된 3차원 스피들 Run-out이며 회전속도 별로 분석된 것이다⁶⁾. 여기에 사용된 대형수평 밀링머신은 오히려 100rpm에서 안정되고 300rpm의 정격회전속도 이상에서는 상하방향의 흔들림이 심하게 나타난다. 이와 같은 스피들

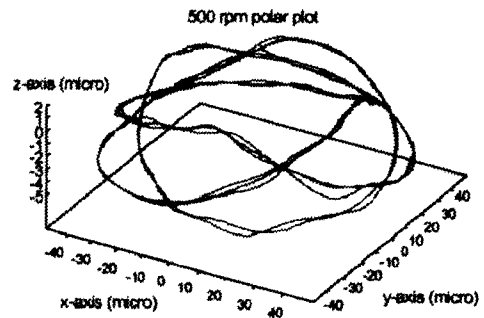
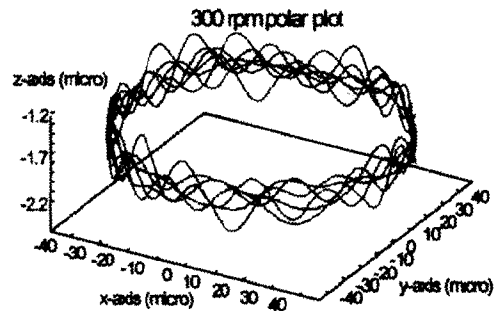
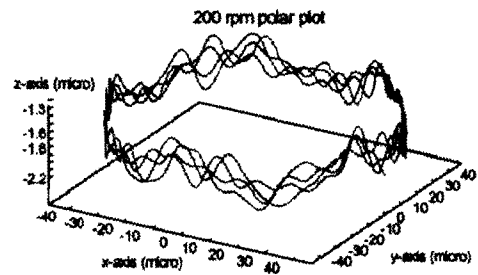
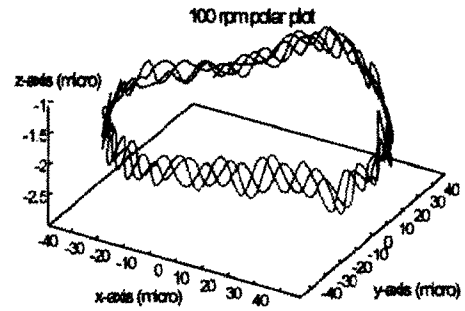
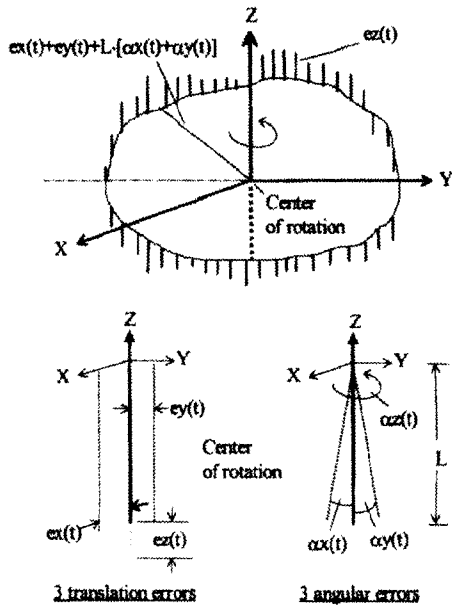


그림 20. 스피들 Run-out의 오차분석 및 6개 오차 성분 분리

Run-out 분석 결과는 기계 진동모드의 해석과 함께 베어링 이상 등 스피들 시스템 H/W 진단에 이용될 수 있을 것이다.

스피들 Run-out 측정은 결국 최종적인 스피들 공구 위치를 가공 중 실시간으로 측정하는 것이므로, 최근 활발하게 연구가 진행중인 공작기계의 열변형 오차 보상을 위한 측정 데이터로 활용된다⁽¹⁰⁾. 최근에 개발되는 NC제어기에는 공작기계의 스피들 부분적인 온도를 측정하여 이를 변수로 구성된 실험 오차식을 구성하여 실시간으로 열변형 오차를 보상하는 방법이 채택되고 있다⁽¹¹⁾. 이것은 특히 수평형 보링 머신에서는 스피들 부위의 온도 상승으로 인한 Ram의 처짐 현상이 심각하여 필수적으로 사용된다.

열변형 보상을 위한 측정은 온도센서의 부착위치와 센서 수에 따라 구성되는 실험식의 정확성을 위하여 각각의 공작기계에 대하여 많은 실험 데이터가 요구

그림 21. 회전 속도에 따른 3차원 스피들 Run-out 오차측정

되는 단점이 있어 현장 작업자들이 보상 Parameter를 조정하기에는 어려운 문제가 있다. 따라서 공작기계 메이커에서 각 기계 구조에 따른 일반적인 수식을 FEM 해석 등에 의하여 제공하고 최소한의 계수만을 현장에서 측정, 입력하도록 하여야 할 것이다.

7. NC제어기 오차

NC공작기계를 이용한 정밀가공에서 최종적으로 고려 되는 것이 NC제어기의 성능이 될 것이다. NC 제어기는 현재 대부분 수입되어 장착되고 있으므로 이 부분의 연구는 주로 공작기계제작사에 국한 된다. 그림 22는 전술한 Ball-bar 기구를 이용하여 2축 운동에 대한 Contouring 데이터로부터 NC제어기의 오차 성분들을 분석한 것이다⁽¹²⁾. NC제어기의 오차 종류들은 제어방법에 따라 별도로 정의 되어야 할 것

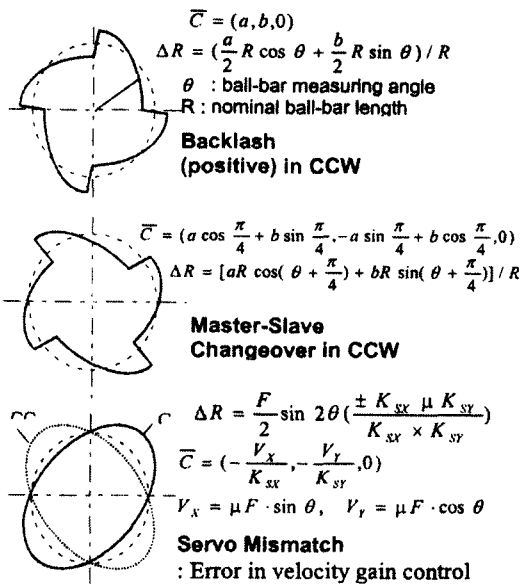


그림 22. NC제어기의 Contouring 데이터 분석에 의한 오차 Pattern

이다. Ball-bar 측정 데이터는 이송계의 기계적 오차와 제어기의 오차를 포함하기 때문에 이들로부터 제어기의 오차만을 분리하는 통계적인 방법이 필요하게 된다.

또 하나의 방법으로는 제어기에 연결된 서보 이송 모터의 Encoder Pulse를 분석하여 제어기의 명령을 직접적으로도 분석가능하며 이 경우 Encoder Pulse 신호를 디지털화하기 위한 Interface 장치를 필요로 한다. 이러한 연구는 공작기계업체에서 이송계에 제어기 장착을 위한 최적 Match Parameters로 조정하기 위해서 필수적으로 연구 되어야 할 것이다.

8. 결론

NC정밀가공을 위해 가공부하에 의한 가공오차를 제외한 공작기계자체의 정밀도 검증 작업은 필수적이며, 또한 현장작업자가 이러한 공작기계 자체의 정밀도 개념을 이해하면 기계의 보수 유지비를 경제적으로 관리 할 수 있게 될 것이다. 정도 검증을 위해 사용되는 계측기는 일반적으로 고가이지만 오차의 원리를 이해하면 보다 간단한 방법으로도 검증이 가능할 것이다. Volumetric 오차의 보상 개념은 현재의 NC공작기계에서는 각축의 위치오차, 진직도 오차 보정 등 제한적으로만 사용되지만, 다수의 연구자들에 의해서 그 필요성이 확인 되었으므로 향후 CMM 및 공작기계 제어기에 Software방법에 의한 직각도 오차, 각도 오차 보정 등 관련 기능들이 추가될 것으로 보인다. 따라서 Volumetric 오차를 보다 실용적인 방법으로 측정하는 연구와 함께 및 NC공작기계의 정밀도 항목 관련 규정 등도 보완되어야 할 것이다. 또한 현재의 3축 공작기계에 첨가하여 2축 Rotary Table, 공구 자세, 스피들 Run-out, NC제어기 오차 등 통합적인 오차 관리에 대한 연구와 관련 Hardware의 보정 방법들도 고려 되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) E.S.Lee & S.H.Suh, "A close-loop method for reducing total machining errors : experiment and analysis", NAMRI/SME, Vol.24, 1997.
- (2) J.Mou and C.Richard Liu, "A method for enhancing the accuracy of CNC machine tools for On-machine inspection", J. of Manuf. Sys., Vol.11, No.4, 1993
- (3) E.S.Lee & S.H.Suh, "A comprehensive method for calibration of volumetric positioning accuracy of CNC-Machine", Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol.14, No.4 1998.
- (4) 안경기, 조동우, "공작기계의 21개 기하학적 오차에 대한 백레쉬 특성에 관한 연구", 추계한국정밀공학회논문집, pp.1282~1286, 1998
- (5) E.S.Lee & S.H.Suh, "Accuracy measurement and compensation of rotary table in machine tools", NAMRI/SME, Vol.25, 1998
- (6) 양승한, 이철수, "5축 CNC 공작기계의 오차합성 모델 및 보정에 관한 연구", 추계한국정밀공학회논문집, pp.1116~1119, 1998
- (7) 이용석, 구상서, "불막대 Artifact를 이용한 CMM의 공간 오차 측정 및 분석", pp.143~148 춘계공작기계학회 논문집, 2001.4
- (8) E.S.Lee and M.Burdekin, "A hole plate artifact design for the volumetric error calibration of CMM", Int J Adv Manuf Technol (U.K), Spring-Verlag, Vol.17, No.7, pp.508~515, 2001.
- (9) E.S.Lee, "A comprehensive technique for measuring the three-dimensional positioning accuracy of a rotating object", Int. J. of Adv. Manuf. Technol., Vol.14, No.5, 1998.
- (10) J.S.Chen, J.Yuan and J.Ni, "Thermal error modeling for real-time error compensation", Int J. of Adv. Manuf. Technol., Vol.12, 1996
- (11) J.S.Chen and J.X.Yuan et al., "Real time compensation for time variant volumetric errors on a machining center", Trans. of ASME, Vol.115, 1993
- (12) E.S.Lee & S.H.Suh, "A study on the performance evaluation of NC controller using a ball-bar", 31th CIRP International Seminar on Manufacturing System, 1998.