

원호보간시험에 의한 수치제어 공작기계의 운동오차원인 진단에 관한 연구

홍성욱*, 신영재**, 이후삼**

Identification of Motion Error Sources in NC Machine Tools by a Circular Interpolation Test

Seong-Wook Hong*, Young-Jae Shin**, Hu-Sang Lee**

ABSTRACT

This paper presents an efficient method for the identification of motion error sources in NC machine tools by making use of the circular interpolation test, which is often used in estimating the motion accuracy of NC machine tools. Mathematical formulae are described for motion errors due to various kinds of error sources. Two identification formulae are proposed: one is based on the frequency analysis and the other is formulated with the weighted residual method. Motion error signal is classified into two patterns, mean errors (mean of CW and CCW test signals) and deviation errors (deviation of CW or CCW test signals from mean errors). The sources of the mean errors are identified by using the frequency analysis technique and the sources of the deviation errors by the weighted residual formulation. A menu driven, user oriented, computer program is written to realize the full steps of the proposed identification procedure. Then, the identification method is applied to two NC machine tools.

Key Words : NC Machine Tools(수치제어 공작기계), Circular Interpolation Test(원호보간시험), Motion Accuracy(운동정도), Identification of Motion Errors(운동오차구명), Fourier Analysis(주파수 분석), Weighted Residual Method(가중잔차법)

1. 서 론

근래 초정밀 가공기술의 필요성이 증대함에 따라 공작기계의 가공정도에 영향을 미치는 공작기계의 운동오차에 대한 평가가 많은 관심을 모으고 있다. 최근에는 NC 공작기계의 운동정도를 측정하는 방법으로 원호보간시험을 이용하는 방법이 소개되어 그 효율성이 인정되고

있으며 조직적인 수행을 가능하도록 하는 시험기계의 개발과 더불어 곧 ISO에서는 이방법을 정식규격으로 채택하려는 움직임이 있다¹⁻³.

원호보간시험법이란 공작기계의 3 축중 어느 두축에 대해 원운동을 발생시키면서(주축이나 테이블 이동), 전용의 측정기기에서 측정된 기준축간의 상대적 거리 변동으로부터 기준원운동에서 벗어난 정도를 분석하여 공작

* 국립금오공과대학 정밀기계공학과(정회원)

** 한국기계연구원 공작기계실(정회원)

기계의 운동오차를 파악하는 방법이다. 측정을 위해 개발된 방법으로는 1차원 측정기를 이용하는 방법, 2차원 측정기를 이용하는 방법, 그리고 동적 볼 바(ball bar)를 이용하는 방법¹⁻³등이 소개되어 있으며 측정을 위한 전용기들이 상품화되어 점차 활용되고 있는 추세에 있다⁴.

원호보간시험법에 의해 측정된 운동오차신호는 운동정도(運動精度)에 대한 단순한 평가 뿐만 아니라 근래에는 운동정도에 영향을 미치는 주요 오차 원인의 진단을 목적으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 기본이 되는 운동오차원인의 종류 및 각각의 원인에 의해 발생하는 운동오차 양상에 대해 많은 연구가 계속되어 왔다¹⁻⁶. 그러나 실제 NC 공작기계에서 원호보간시험법으로 운동오차의 원인을 진단하기 위해서는 오차에 대한 세심한 분석을 필요로 하며, 특히 여러가지 오차가 동시에 결과에 영향을 미치므로 결과의 분석을 위해서는 경험이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 NC 공작기계의 운동정도 측정을 위해 개발된 원호보간시험법을 이용하여 공작기계가 갖는 운동오차원인을 진단하는 방법을 개발하였다. 원호보간시험에 의한 측정결과를 이용하여 공작기계의 운동오차원인을 진단하기 위해서는 먼저 공작기계에서 발생할 수 있는 여러가지 형태의 운동오차 원인을 대별하고 각 원인에 대한 운동오차의 양상을 분석하여야 한다. 따라서 본연구에서는 일반적인 공작기계의 여러가지 운동오차요인에 따른 예상결과를 분석, 함수화하였고 이를 운동오차의 원인추출시 기본요소로 활용하였다.

운동오차원인 진단을 위해, 먼저 원호보간 시험을 동일 조건하에서 시계방향과 반시계방향(CW/CCW)에 대해 실시한 결과를 얻어 회전방향에 의존하지 않는 오차(Mean error, 이하 평균오차) 성분과 회전방향에 의존하는 오차(Deviation error, 이하 편차오차) 성분으로 분류하였다. 이와같은 분류의 목적은 평균오차와 편차오차에 각각 영향을 주는 오차 원인들의 특성이 상이하기 때문에 원인분석방법을 달리하는 것이 유리하기 때문이다. 얻어진 평균성분에 대해서는 주파수분석(푸리에 분석)을 통한 오차원인 진단방법을 적용하였고 평균오차를 주는 오차원인을 추출하였다. 한편 편차성분에 대해서는 단차가 있는 운동오차가 나타나는 경우가 많아 주파수 분석이 효율적이지 못하다. 편차성분을 분석하기 위해서는 다입력 단일출력계로 모형화, 가중잔차법(Weighted Residual Method)의 개념을 활용하여 수식화한 후 오

차원인성분을 추출하였다. 이때에는 이미 유도한 운동오차함수를 활용하였으며 Backlash나 테이블 이송시의 Clearance에 의한 회전운동(Roll, Yaw), 그리고 제어 회로 루프이득(Loop gain)의 불일치 등 주요 오차 원인을 추출하였다.

한편 본연구에서 제시한 운동오차 원인진단 방법을 기초로, 사용자 친숙도를 강화한 PC용 프로그램을 개발하여 작업자가 손쉽게 사용할 수 있도록 하였고 두개의 공작기계에 적용해 본 결과 공작기계의 운동오차 원인진단에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2. 원호보간시험 및 운동오차

2.1 원호보간시험시의 운동오차신호 특성

NC 공작기계의 원호보간에 의해 발생하는 운동의 궤적을 실제로 측정하면 기계의 명령에 대해 다소의 오차를 나타내게 되는데 오차벡터의 2차항을 무시하고 반경오차를 수식적으로 표현해보면 다음과 같다^{4,5}.

$$\Delta R = \frac{1}{R} (C_x X + C_y Y + C_z Z) \quad (1)$$

여기서 R, ΔR 은 각각 이상적인 반경(명령반경) 및 반경오차를 의미하고 X, Y, Z는 bed상의 관심위치로부터 주축선단까지의 이상적인 상태좌표(명령좌표), C_x , C_y , C_z 는 공작기계 오차 벡터를 의미한다. 식 (1)에 의하면 원호보간시험중 반경의 변화를 측정한다면 측정된 신호는 공작기계 오차벡터와 선형적인 관련을 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서 공작기계의 여러가지 오차원인에 대한 오차벡터를 미리 구할 수 있다면 운동오차신호인 ΔR 을 통해 운동오차의 원인을 추정할 수 있다.

2.2 운동오차의 분류

원호보간시험시 공작기계에 나타나는 운동오차는 대별하여 회전방향에 의존하는 것(편차오차, Deviation error)과 회전방향에 무관한 것(평균오차, Mean error)으로 구분할 수 있다. 주요 운동오차함수식이 부록에 주어져 있으며 운동오차패턴에 대한 자세한 분석은 참고문헌⁷에 기술하고 있다.

평균오차는 동일조건 원호보간시험시 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)의 두가지에 대한 측정결과를 평균하여 얻어낼 수 있으며, 각 측정값에서 평균을 빼게 되면 방향에 의존하는 편차오차성분을 추출할 수 있다.

평균오차와 편차오차는 매우 상이한 양상을 갖는데 평균 오차는 오차곡적이 부드러운 곡선을 이루며 주파수분석을 통한 오차원인추정이 간단한 반면, 편차오차는 급격한 단차가 발생하는 것이 많으므로 주차수 분석이 유리하지 않다. 한편 양자 모두 이송속도를 증가시키면 그 크기가 변하는 것이 있는데 이와 같이 속도에 의존하는 성분은 원호보간시험 조건에서 이송속도를 바꾸면서 측정한다면 원인을 진단해낼 수가 있다.

3. 운동오차신호분석에 의한 운동오차원인 진단방법

원호보간시험시 운동오차신호분석에 의한 공작기계 운동오차 원인진단은 앞에서 기술한 바와 같이 오차의 원인 별로 서로 다른 형태의 운동오차를 유발한다는 것에 기초한다. 그러나 여러가지 오차가 동시에 개입되어 결과 신호가 발생되기 때문에 운동오차 원인을 분석하는 것은 Fig.1에 나타난 것과 같은 다입력 단일출력(MISO : Multi Input Single Output)계에 대한 입력성분 규명문제가 된다. 특히 각 오차패턴이 서로 독립적인 양상을 갖지 않기 때문에 오차 원인별로 순차적으로 분리할 수 없으므로 모든 오차원인에 대해 동시에 파악할 수 있는 방법이 필요하다. 다음에는 본연구에서 적용한 운동오차 원인 진단의 두가지 기본 방안을 기술하도록 한다.

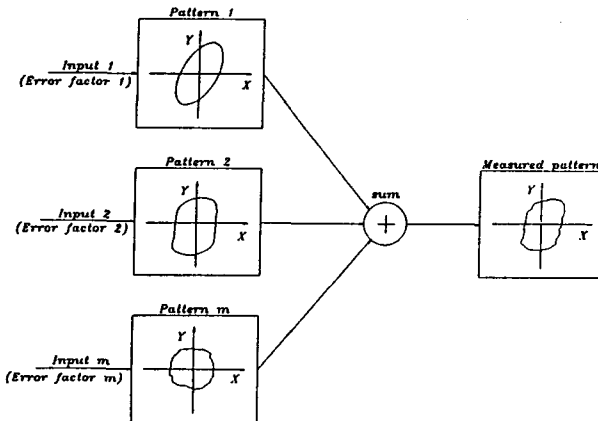


Fig.1 Conceptual Diagram for Error Source Identification : Motion Error Generation Mechanism Model with a MISO (Multi Input and Single Output) System

3.1 주파수분석(Fourier Analysis)을 이용한 원인진단 방법

원호보간시험에 의한 운동오차신호는 이미 언급한 바와 같이 편차오차와 평균오차로 구분할 수 있는데 편차오차는 대부분 상한절환시에 단차가 발생하는 오차양상을 나타내므로 주파수분석방법을 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 주파수분석 방법은 단차가 발생되지 않는 평균오차에 국한하여 적용하는 것을 원칙으로 한다.

운동오차를 시각적으로 관찰하는 목적으로는 극좌표그림(Polar plot)이, 측정신호에서 반경의 변화만을 관측하여 특징을 분석하고자 할 때에는 평면좌표그림(ΔR , θ 영역)이 유용하다. 평면좌표그림에서 오차원인별 패턴을 분석하기 위해 $2\pi(360^\circ)$ 를 주기로 두고 그주기에서 반복횟수(주파수)에 따른 성분의 특징을 살펴보면 서로 다르게 나타난다. 주파수분석방법을 도입하기 위해 주요 평균오차신호를 FFT(Fast/Finite Fourier Transform)한 결과 나타나는 주파수성분들의 특징을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Classification of Major Mean Error Sources Based upon Frequency Component Characteristics

Items	Error Sources(Frequency Components)
Low Frequency Components	<ul style="list-style-type: none"> • Decrease in radius due to servo delay (DC) • Positioning error(1st) (DC, 2X) • Squareness error(2X) • Positioning error(2nd) (1X, 3X) • Straightness error(2nd) (1X, 3X) • Straightness error(3rd) (2X, 4X)
High Frequency Components	<ul style="list-style-type: none"> • Periodic errors due to linear scale • Noises from position and speed sensors • Vibrations in hydraulic valves or chains • Stick slip

주파수분석을 이용한 원인진단은 분석결과 나타난 주파수 성분들을 통해 주요오차원인을 대별하고 이를 기초로 오차원인분석을 하는 것이다. 주파수분석을 이용할 때의 장점은 측정된 데이터를 주파수 성분만으로 압축할 수 있으므로 처리해야할 데이터가 압축되어 원인평가가

수월해지게 된다. 또한 측정시 개입되는 고주파의 측정 오차 영향을 쉽게 제거할 수 있다. 그러나 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 각주파수성분에 영향을 미치는 오차원인이 여러가지가 있기 때문에 오차 원인별로 성분을 추출하기 위해서는 각각의 오차원인이 측정된 운동오차의 주파수성분에 어느정도 기여하고 있는지를 파악하기 위한 관계식이 필요하다.

스틱슬립(Stick slip)이나 센서잡음등 고주파 성분들은 주파수 성분이 고르게 나타나지 않으며 발생위치(위상각)에 따라 주파수 특성이 달라지거나 측정오차가 같이 결합되기도 하므로 원인평가가 쉽지 않다. 그런데 이와 같은 불균일 고주파성분은 저주파성분들과 별개로 고려할 수 있으므로 저주파성분에 대한 분석에 거의 영향을 미치지 않는다. 한편 저주파성분들은 앞에서 정리한 바와 같이 대체로 DC-4X성분까지 존재하므로 주파수성분을 4X까지로 국한하면, 주파수분석시 DC 및 각주파수에 대한 실수 및 허수 성분을 포함 총 9개의 변수가 있으므로 최대 9개의 오차원인을 추정할 수 있다. 만일 여기서 더 높은 차수의 오차를 고려한다면 주파수성분도 더 높은 차수까지 고려할 수 있으므로 추정대상이 되는 오차원인을 더 많이 택할 수 있다.

부록에서 기술한 운동오차함수를 이용하게 되면 각오차원인별 주파수 성분을 FFT를 통해 손쉽게 얻어낼 수 있으며 일반적으로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있게 된다.

$$\sum_{k=1}^m \alpha_{ik} a_k = \beta_i \quad (2)$$

여기서

a_k = k번째 오차요인의 크기

α_{ik} = k번째 요인의 i번째 주파수성분에서의 영향계수

β_i = 측정된 운동오차신호의 주파수성분

$i=1$ (DC), 2 (1X 실수), 3 (1X 허수), ..., n (n : 주파수성분갯수)

$k=1, 2, \dots, m$ (m : 오차요인수)

또는

$$A u = b \quad (3)$$

여기서 $A = [\alpha_{ij}]$, $u = [a_1 a_2 \dots a_m]^T$, $b = [\beta_1 \beta_2 \dots \beta_n]^T$. 즉 각요인별로 단위크기 오차원인이 개입되었을 때의 운동오차함수에 대한 주파수성분을 미리 구해두고 측정된 운동오차신호의 주파수성분들과 같아지도록 각성

분의 크기를 결정하는 것이 된다. 한편 식 (3)은 $n=m$ 일때 유일해가 있으며 $n>m$ 일 경우에는 최소오차자승법에 의거 일반화된 역함수를 이용하여 해를 구할 수 있다.

오차원인에 따른 주파수성분은 이미 Table 1에서 정리한 바와 같이 매우 다양한 형편이므로 추출하고자 하는 오차원인의 선택에는 대상 공작기계에 대한 사전지식이나 경험의 필요가 있다. 여기서 주의할 것은 추출하고자 하는 어떤 오차원인도 다른 오차원인들과는 독립적이어야 한다는 점이다. 즉 다른 오차원인들의 운동오차함수를 적당히 조합하여 만들어질 수 있는 오차원인이 포함될 경우, 특히 $n=m$ 이면 식 (3)은 Singular가 되어 해가 존재하지 않게 된다.

본연구에서는 위치오차(Linear Scale 또는 Ball screw 오차)의 X, Y방향 1, 2차 성분과 축간직각도오차 및 X, Y축 진직도오차(2차) 등 7가지를 오차원인으로 가정하여 실제 문제에 적용하였고 DC-3X까지의 주파수성분을 고려하였다. 따라서 고려하지 못한 오차원인들은 다른요인들의 영향으로 산정된다. 그밖에 고주파영역의 신호들은 주요원인들의 효과를 제거한 후 잔류신호를 이용하여 관측할 수 있으나 일반적으로 정량적인 분석은 곤란하며 다른 요인에 비교할 때 두드러지는 원인이 있다면 개별적인 오차원인에 대한 패턴함수를 참고로 하여 판단한다.

3.2 가중잔차법(Weighted Residual Method)에 의한 오차원인 진단방법

운동오차 원인별로 결과에 대해 미치는 오차양상은 부록에서 나타낸 바와 같이 이미 알려져 있으므로 원호 보간시험에 의한 오차원인 진단의 개념적인 관계는 Fig. 1을 이용하여 설명할 수 있다. 즉 결과에 영향을 미치는 패턴은 이미 주어져 있고 각 패턴에 어느 정도의 입력(오차)이 있을 때 측정된 결과나 나오는가를 파악하는 문제가 된다. 측정된 운동오차는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^m a_i R_i(\theta) \quad (4)$$

여기서 사용된 변수들은 다음과 같다.

$R_i(\theta)$: i번째 오차원인에 대한 운동오차함수

(단위크기의 오차요인 개입시 운동오차)

m : 고려한 오차원인의 수

$R(\theta)$: 측정된 운동오차신호

a_i : 운동오차원인의 크기(입력, 미지수)

이때 $R_i(\theta)$, $i=1, \dots, m$, 은 서로 일차독립인 함수들 이라고 가정한다. 즉 다음과 같은 조건식은 모든계수 a_i 가 0인 경우에만 성립한다.

$$\sum_{i=1}^m a_i R_i(\theta) = 0 \quad (5)$$

실제적인 경우에는 운동오차함수들이 모두 일차독립인 함수집합이 되지 못한다. 따라서 원호보간시험에 의한 오차원인진단 방법으로는 동일한 패턴의 오차를 야기시키는 두개 이상의 오차원인이 있다면 이를 구분할 수 있는 방법이 없다. 예컨대 Backlash와 Lost Motion은 동일한 양상의 운동오차를 주게되므로 원호보간시험에 의한 운동오차진단방법으로는 어느것에 의한 효과인지 결정하기 곤란하다.

한편, 이와같은 근사화의 결과, 측정운동오차와의 차이 $e(\theta)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e(\theta) = R(\theta) - \sum_{i=1}^m a_i R_i(\theta) \quad (6)$$

이상의 식에서 나타나는 오차항이 모든 θ 영역에서 최소가 되도록 계수 a_i 를 결정하면 원래의 운동계적오차 $R(\theta)$ 의 발생원인을 찾는 것이 된다. 따라서 a_i 를 미지수로 하여 결과에 최소의 오차를 발생시키는 값을 결정하는 비선형방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\| R(\theta) - \sum_{i=1}^m a_i R_i(\theta) \| < \epsilon \quad (7)$$

여기서 $\| \cdot \|$ 은 norm을 나타내며 ϵ 은 충분히 적은 수를 의미한다. 일반적으로 이와같은 문제는 비선형의 최적화방법을 사용하여 풀어낼 수 있을 것으로 기대되나 다음에 기술하는 수식화를 통해 보다 간편한 방법을 얻어낼 수 있다.

식(6)으로 주어지는 오차(또는 잔차: Residual)는 평균적인 관점에서 다음과 같은 가중적분을 통해 최소화시킬 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} e \psi_i d\theta = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

여기서 ψ_i , $i=1, \dots, m$,은 서로 독립적인 가중함수(Weighting function)이며 항의 수를 늘리게 되면 오

차는 점차 감소함이 잘 알려져 있다⁸. 이때 가중함수는 편의에 따라 정의할 수 있으나 여기서는 오차패턴함수 $R_i(\theta)$, $i=1, \dots, m$, 자체를 가중함수로 두기로 한다. 이것은 잘알려진 Galerkin 방법이 되며 결국 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} \{R(\theta) - \sum_{k=1}^m a_k R_k(\theta)\} R_i d\theta = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

따라서 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{k=1}^m \gamma_{ki} a_k = \zeta_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

여기서

$$\zeta_i = \int_0^{2\pi} R(\theta) R_i d\theta, \quad i=1, 2, \dots, m$$

$$\gamma_{ik} = \int_0^{2\pi} R_k(\theta) R_i d\theta, \quad k, i=1, 2, \dots, m$$

또는

$$C u = d \quad (11)$$

여기서 $C=[\gamma_{ij}]$, $u=[a_1 a_2 \dots a_m]^T$, $b=[\zeta_1 \zeta_2 \dots \zeta_m]^T$. 각 오차의 정량적인 추출을 위해서는 결국 식(11)과 같은 연립방정식을 풀어야 하며 일차독립인 오차함수들을 택한 경우에는 행렬 C 가 Nonsingular가 되어 유일해가 있다. 부록에 기술한 운동오차함수와 이 수식을 이용한 도형분석으로부터 실제적으로 서로 독립인 운동오차함수의 수는 10여개 정도임을 알 수 있으며 본 연구에서는 각 축방향의 Backlash와 테이블의 이송시 Clearance에 의한 Roll과 Yaw, 그리고 Yaw가 위치의 함수로 나타나는 오차항 및 루프이득의 불일치 등, 9개의 오차원인을 선정하여 상기의 이론을 적용하였다. 여기서 특히 Backlash는 Lost motion이나 주축 두(또는 테이블)의 Pitching 등과 동일한 영향이 나타나게 되며, 어느 것을 요인으로 볼 것인가는 경험이나 다른 측정방법과의 병행을 필요로 한다.

3.3 잔류오차에 대한 분석

앞의 두방법에 의해 추출되지 않는 오차는 두방법에 의해 추출된 오차를 제거한 잔류오차를 분석하여 파악할 필요가 있다. 이와같은 오차로는 stick motion, stick

slip, 호스의 간섭 등 수식화가 곤란한 오차성분으로부터 발생된 것으로서 작업자가 이와같은 오차에 대한 패턴을 주지하였다가 잔류오차 형상을 관찰하여 오차의 존재여부를 파악하는 방법이 가능하다.

4. 운동오차원인 진단 프로그램의 주요기능 및 특성

본연구에서는 앞에서 소개한 운동오차원인 진단방법을 실제시스템에 적용할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 PC286 이상의 전기종에서 사용가능하며 국내에서 사용되고 있는 대부분의 Graphic Board 및 프린터를 지원하고 있고 다음과 같은 기능을 갖도록 구성하였다.

- 운동오차 신호를 받아 도시하는 기능
 - 운동오차 신호에 대한 극좌표 및 평면좌표(좌표값 확인기능)
 - 운동오차 신호에 대한 FFT 분석(주파수 분석)
 - 운동오차 신호에 대한 저대역 주파수 통과 디지털 필터
- 운동오차 신호로부터 오차원인을 진단하는 기능
 - 평균오차로부터 7개의 오차원인을 추출(주파수성분 이용)
 - 편차오차로부터 10개의 오차원인을 추출(가중잔차법)
 - 추출된 오차원인에 대한 타당성 검토 및 선택/제외
- 운동오차합수 발생 기능
 - 선정된 30여개의 오차원인에 대해 운동오차합수를 발생
 - 진단결과 얻어진 오차원인에 대해 운동오차합수를 발생, 검증
- 사용자 편의를 위한 기능
 - Setup(데이터에 대한 조건 재입력, 데이터 재입력등)
 - 결과에 대한 Report, Error Message, Cursor, Side Menu Driven 방식 Screen Save/Retrieve, File 조작
 - 다양한 Graphic Board 지원, Mouse 사용
 - Print(다양한 프린터, 프린트 방식 통제), Plotter 지원

5. 적용사례

개발된 NC 공작기계 운동오차원인 진단방법을 두가지

의 공작기계에 적용하였다. 먼저 한 Machining Center에 대해서 1차원 측정방정식의 운동오차측정시스템을 구성하여 직접 측정, 분석하였고, 다음으로 CNC Milling Machine에 대해서 Kinematic Link Transducer를 이용하여 측정된 운동오차신호⁹를 사용하여 운동오차 원인을 분석하였다.

5.1 Machining Center (Vertical Type)

1) 측정 시스템 및 조건

M/C의 원호보간 운동오차 신호를 1차원 측정기 방식(1개의 측정센서와 테스트 바를 이용하는 방식)에 의해 측정하였다. 측정평면은 XY로, 측정센서는 Gap sensor를 이용하였고 데이터 트리거를 위해 회전당 1800의 펄스를 발생시키는 Encoder를 사용하였다. 한편 원호보간반경은 95mm, 원호보간이송속도는 550mm/min으로 두었다. Fig.2는 측정시스템의 실물을 보여주고 있다.

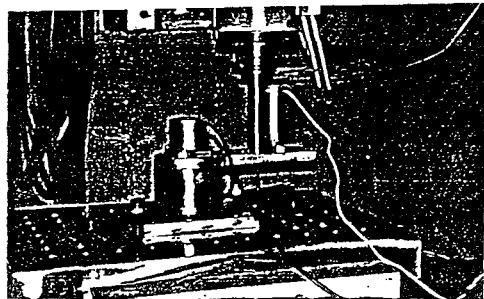
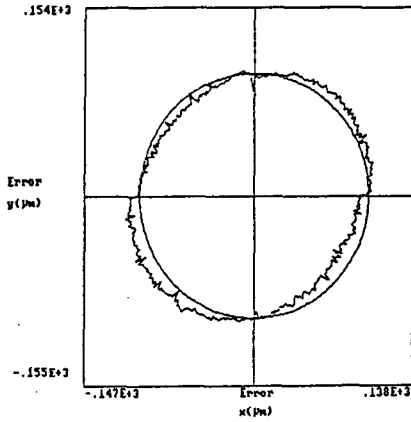


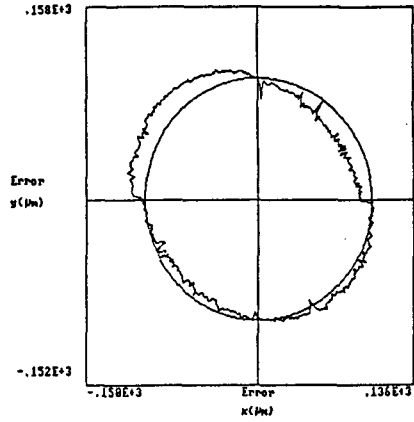
Fig.2 Photo : Motion Error Measurement System with a One Dimensional Probe

2) 측정 및 오차원인 진단결과

Fig.3은 CCW, CW 방향의 운동오차 형태를 극좌표에서 보여주고 있는데 타원형의 양상이 서로 반대되는 방향으로 기울어져 있음을 알 수 있다. Fig.4는 앞의 두운동오차를 평균하여 얻어낸 평균오차(Mean error)를 극좌표에서 나타낸 것으로서 오차원인 추출후 생성한 운동오차와 실제 평균오차를 비교한 그림인데 고주파 성분을 제외하면 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편 Fig.5는 추출한 편차오차원인 성분을 이용해 합성(Synthesis)한 운동오차합수와 측정된 편차오차를 비교한 것으로 고주파의 미미한 변동치를 제외하면 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다.



(a) CCW



(b) CW

Fig. 3 Motion Error Signals Measured from the Machining Center

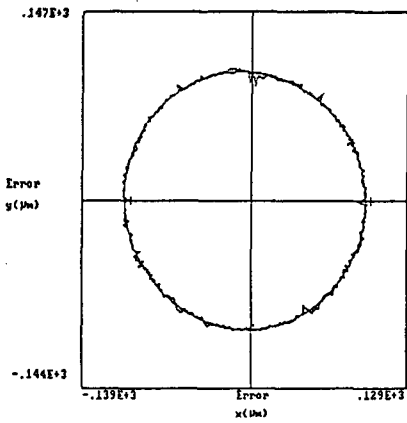
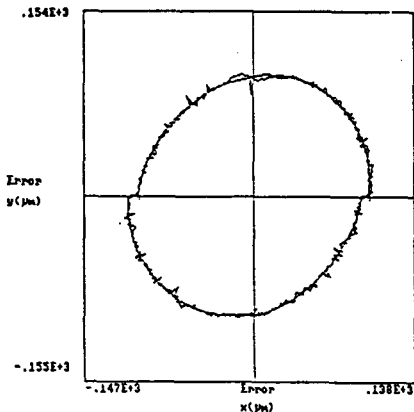
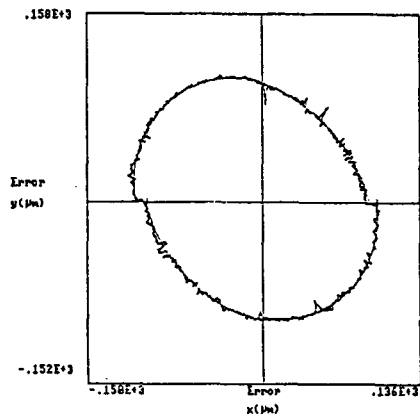


Fig. 4 Comparison of Measured and Synthesized Mean Error Signals (for the Machining Center)



(a) CCW



(b) CW

Fig. 5 Comparison of Measured and Synthesized Deviation Error Signals (for the Machining Center)

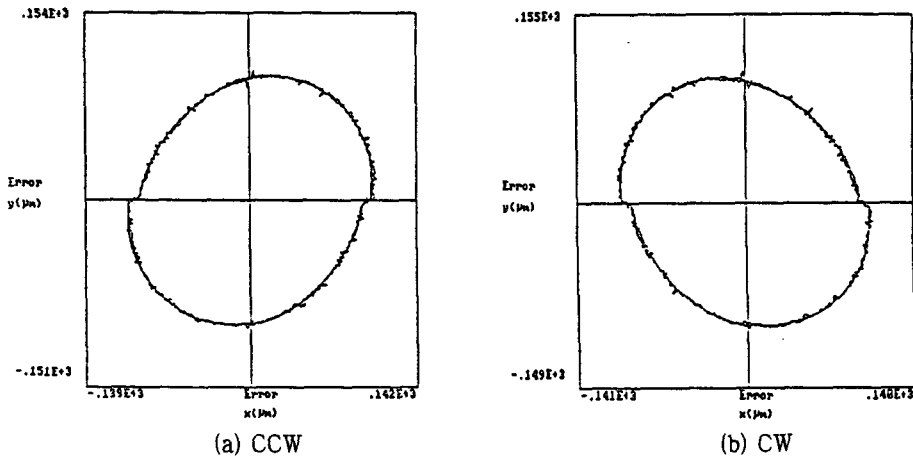


Fig. 6 Comparison of Measured and Synthesized Motion Error Signals (for the Machining Center)

Table 2 Major Motion Error Sources in the Tested Machining Center

	Error Sources	Max Error (μm)
Mean Errors	• Positioning error (x, 1st)	0.404
	• Positioning error (y, 1st)	-0.404
	• Positioning error (x, 2nd)	4.777
	• Positioning error (y, 2nd)	-0.413
	• Squareness error	-2.397
	• Straightness error (x, 2nd)	-1.3
	• Straightness error (y, 2nd)	-5.123
Deviation Errors	• Table clearance roll (x)	-1.097
	• Table clearance roll (y)	-1.447
	• Table clearance yaw (x, 1st)	2.087
	• Table clearance yaw (y, 1st)	1.597
	• Table clearance yaw (x, 2nd)	2.747
	• Table clearance yaw (y, 2nd)	1.903
	• Backlash (Lost motion, x)	8.543
	• Backlash (Lost motion, y)	2.037
	• Loop gain discrepancy	-7.599
Identification Errors	• RMS of measured motion error	7.320
	• RMS of difference between measured and synthesized motion error	1.685

Fig. 6은 각각 추출한 평균오차원인 및 편차오차 원인들을 결합하여 합성한 운동오차와 실측운동오차 신호를 비교한 것으로서 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 오차 성분에 대한 정량적인 결과를 Table 2에 요약하였는데 측정신호의 평균(Rms, Root Mean Square)과 합성신

호와 측정신호의 차이에 대한 평균(rms)을 비교할 때 진단결과가 매우 우수함을 알 수가 있다. 주요 오차 성분은 x축 Linear Scale(또는 Ball Screw)의 2차 편심축과 안내면의 2차 진직도 오차가 평균오차의 주요성분을 이루고 있으며 x축의 Backlash(또는 Lost motion)

Table 3 Major Motion Error Sources in the Tested CNC Milling Machine

	Error Sources	Max Error (μm)
Mean Errors	• Positioning error (x, 1st)	-2.180
	• Positioning error (y, 1st)	1.854
	• Positioning error (x, 2nd)	0.624
	• Positioning error (y, 2nd)	1.130
	• Squareness error	-1.712
	• Straightness error (x, 2nd)	-0.954
	• Straightness error (y, 2nd)	0.721
Deviation Errors	• Table clearance roll (x)	-0.957
	• Table clearance roll (y)	-0.837
	• Table clearance yaw (x, 1st)	-0.336
	• Table clearance yaw (y, 1st)	0.575
	• Table clearance yaw (x, 2nd)	3.927
	• Table clearance yaw (y, 2nd)	-2.711
	• Backlash (Lost motion, x)	3.725
	• Backlash (Lost motion, y)	8.320
	• Loop gain discrepancy	-1.133
Identification Errors	• RMS of measured motion error	1.973
	• RMS of difference between measured and synthesized motion error	0.469

와 x, y축간의 루프게인의 불일치가 편차오차의 주요성분을 이루고 있다.

3) 검토

여기서 사용된 데이터는 1차원측정기에 의해 얻어진 것으로서 측정시에 센서 취부상태에 의존하는 DC 성분이 존재하게 되므로 데이터 분석을 위해서 DC 성분을 제거하였다. 따라서 자체에 DC 성분을 발생시키는 오차원인 평가에 오류의 가능성이 있다. 한편 테스트바의 결합상태가 중심에 정확히 일치하지 않거나 경사지게 결합된 경우, 또는 원호보간의 중심점이 테스트 바의 중심에 일치하지 않는 경우에는 측정결과가 한쪽으로 치우치는 양상을 나타내게 되는데 이것은 1X 성분이 되며 따라서 1X성분을 갖는 오차원인이 잘못 평가될 수도 있다. 결국 1차원측정방식에 의한 측정시에는 이와같은 오류가 없도록 측정시스템 장착시의 오차를 최소화하는 방법의 고안이 필요하다.

5.2 CNC Milling Machine

1) 주요 측정 조건

여기서 사용한 데이터는 참고문헌⁹에서 발표한 바 있는 것으로서 Kinematic Link Transducer를 이용하였으며 XY 평면데이터이고 원호보간반경을 180mm, 이송속도를 1200mm/min, 그리고 데이터는 1회전당 360개(1°에 1개씩)를 얻었다.

2) 오차원인 진단결과

Fig. 7은 운동오차원인 진단에 의해 추출된 평균오차원인 및 편차오차 원인들을 결합하여 생성한 운동오차합수와 실측오차합수의 비교로서 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 한편 오차에 대한 전체적인 종합결과를 Table 3에서 살펴볼 수가 있는데, 추정결과가 매우 우수함을 알 수가 있고 평균오차는 데이터의 직각도오차가 비교적 확연하게 나타나고 있으며 편차오차는 x, y 양축의 Backlash와 위치에 의존하는 편요 등이 주요 오차원인으로 대별할 수 있다.

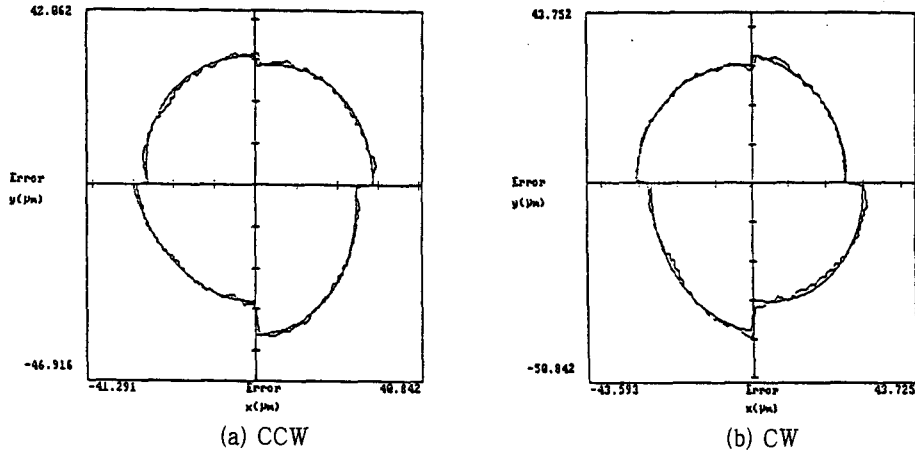


Fig. 7 Comparison of Measured and Synthesized Motion Error Signals (for the CNC Milling Machine)

3) 검토

여기서 분석한 데이터는 축간 상대거리를 직접 측정하는 방식으로 얻은 것이기 때문에 1차원측정센서를 이용한 측정시스템에서 문제가 되었던 센서취부상태에 의해 발생하는 오차가 나타나지 않고 있으며 따라서 진단 결과에서의 오류 가능성이 적다. 앞에서 분석하였던 공작기계에 비할 때 전반적으로 운동정도가 우수함을 알 수가 있으나 Backlash가 기계정도에 주요 오차원인이 되고 있는 것으로 파악된다.

6. 결 론

본 연구에서는 원호보간시험에 의해 측정되는 원운동 오차 신호를 이용하여 NC 공작기계의 운동오차 원인을 진단하는 방법을 개발하였다. 이와같은 목적을 달성하기 위해 공작기계의 운동오차원인에 따른 운동오차패턴 분석 및 수식화와 오차원인별 운동오차 특성화를 하였고 이를 기초로 복합 오차원인으로부터 발생된 운동오차신호에서 오차원인을 추출하는 방법, 즉 FFT 분석방법 및 가중잔차법에 의한 오차원인 추출 선형식을 제안하였다. 제안한 방법을 기초로 운동오차진단을 위한 사용자 편의 강화 프로그램 개발하였고 이를 두개의 실제 시스템(Machining Center, NC Milling Machine)에 적용하였다. 그결과 본 연구에서 개발된 방법은 NC 공작기계의 운동오차 원인진단에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 공작기계의 여러가지 오차원인들이 원호보간 시험시 모두 독립적인 운동오차를 발생시키지 않기 때문

에 원호보간시험법에 의해 모든 오차원인을 추출할 수는 없으며, 따라서 동일한 운동오차가 나타나는 오차원인들을 분리하기 위한 보완책이 개발될 필요가 있다.

참고문헌

1. Knapp, W., "Test of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors", Annals of the CIRP, 32(1), 459., 1983.
2. Kakino, Y., Ihara, Y. and Nakatsu, Y., "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of Their Origin by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method", Annals of the CIRP, 36, 377., 1987.
3. 堤 正臣, "數値制御工作機械の 圓運動測定方法と 精度診斷方法", 한국정밀공학회 '92년 춘계학술대회 초록집, 1~5, 1992.
4. 垣野 義昭 外, "DBB法による NC 工作機械の 精度評價法", REALIZE INC., 1990.
5. 垣野 義昭 外, "NC 工作機械の 運動精度に 關する 研究-第2報: DBB法による 運動誤差原因の 診斷", 일본정밀기계학회지 52권 10호, 1739~1745. 1986.
6. 垣野 義昭 外, "NC 工作機械の 運動精度に 關

- する 研究-第5報:回轉誤差原因の診斷”, 일본정밀 기계학회지 55권 3호, 587~592. 1989.
7. 이후상 외, NC 공작기계의 원호보간정도 측정에 의한 종합평가, 상공부 NC 개발사업과제 연구보고서, 1992.
 8. Brebbia, C.B., The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press Ltd, 1980.
 9. 박준호, “키네마틱 링크 트랜스듀서 시스템에 의한 NC 공작기계의 정밀도 측정”, 한국기계연구소 공작 기계기술 세미나 초록집, 25~37, 1990.

후 기

논문에 사용된 일부의 측정데이터를 제공해 주고 결과에 대해 조언해 준 포항공대 박희재 박사에게 감사드립니다.

부록 : 주요 운동오차원인 및 운동오차함수⁴

아래의 운동오차 함수식은 XY 평면에 대한 것을 중심으로 기술한 것이며, 여기서 R, ΔR은 각각 원호보간반경(mm), 운동반경오차(μm), 그리고 F는 이송속도(mm/s)이며, a, b, c, d 등은 오차함수의 계수를 나타낸다. 또 φ_x, φ_y는 오차발생 위상각(rad)을 의미한다.

1. 평균오차(mean error)원인 및 운동오차함수

1) linear scale(ball screw)의 편심축

- 위치에 1차관계 경우 :

$$\Delta R = 0.5(a+b)R + 0.5(a-b)R \cos 2\theta$$
- 위치에 2차관계 경우 :

$$\Delta R = -aR \cos^3\theta - bR \sin^3\theta$$

2) linear scale의 주기적 오차

$$\Delta R = a \cos\theta \sin(2\pi R \cos\theta/p - \phi_x) + b \sin\theta \sin(2\pi R \sin\theta/p - \phi_y)$$

3) 위치검출기, 속도검출기 noise에 의한 주기적 오차

$$\Delta R = F/2 \sin 2\theta [-b_x \sin(2\pi R \cos\theta/p - \phi_x) + b_y \sin(2\pi R \sin\theta/p - \phi_y)]$$

4) pitch error 보정

각축에 있어 과도한 pitch error 보정 : step형의 단차가 발생되나 수식화 불가능

5) 2축간의 직각도 오차(Squareness error)

$$\Delta R = cR/2 \sin 2\theta$$

6) 안내면의 진직도(Straightness error)

- 위치의 2차함수 :

$$\Delta R = -aR^2 \cos\theta \sin^2\theta - bR^2 \sin\theta \cos^2\theta$$
- 위치의 3차함수 :

$$\Delta R = -aR^3 \cos\theta \sin^3\theta - bR^3 \sin\theta \cos^3\theta$$

7) stick slip motion

이송속도가 작을 때 미찰저항에 의해 순간적으로 정지와 운동을 반복. 상한절환시 한축의 속도가 작아질 때 발생하며 축에 대해 대칭적으로 발생

8) servo의 응답지연에 의한 반경감소

$$\Delta R = -\frac{1}{2R} \frac{F^2}{K_s} \times 1000$$

9) 유압 valve, chain의 진동에 의한 오차

유압밸브의 진동이나, 체인 피치의 1/2 주기의 변동력에 의한 주기적인 운동오차가 발생, 오차의 양상은 Linear Scale의 Pitch 오차와 동일

2. 편차오차(deviation error)원인 및 운동오차함수

다음의 오차계수들은 일반적으로 좌표증가시 음(-), 감소시 양(+)의 값을 취한다.

1) Backlash 및 Backlash의 과도한 보정, lost motion

- Backlash :

$$\Delta R = -a/2 \cos\theta \operatorname{sign}(X') - b/2 \sin\theta \operatorname{sign}(Y')$$
- Backlash 보정 :

$$\Delta R = a/2 \cos\theta \operatorname{sign}(X') + b/2 \sin\theta \operatorname{sign}(Y')$$
- lost motion :

$$\Delta R = -a \cos\theta \operatorname{sign}(X') - b \sin\theta \operatorname{sign}(Y')$$

2) Table의 x(y) 축 이동시 clearance에 의한 rolling (b_x, b_y)

$$\Delta R = L_z b_x \sin\theta - L_z b_y \cos\theta$$

L_z : 회전중심에서 주축선단부까지의 거리(mm)

- 3) Table의 x(y) 축 이동시 clearance에 의한 pitching 이 있는 경우(a_x, a_y)

$$\Delta R = L_z a_x \cos\theta - L_z a_y \sin\theta$$

- 4) Table의 x(y) 축 이동시 clearance에 의한 yawing 이 있는 경우(c_x, c_y)

$$\Delta R = L_x c_x \sin\theta - L_y c_x \cos\theta - L_y c_y \cos\theta - L_x c_y \sin\theta$$

- 5) Table의 x(y) 축 이동시 clearance에 의한 yawing 이 안내면의 경사에 의존

- $c_x = c_{x0}(R+X), c_y = c_{y0}(R+Y)$
- $c_x = c_{x0}(R+X)(R-X), c_y = c_{y0}(R+Y)(R-Y)$

- 6) 안내면의 평행도 오차

직각도오차나 진직도오차 및 접동체에 작용하는 회전 오차 패턴이 복합하게 조합된 결과: 일반적인 기술이 곤란

- 7) stick motion

이송방향이 반전(상한절환시)될 때 속도가 작아지면 stick 상태에 있다가 제어계의 지령위치와 오차가 커지게 되어 급속한 위치변경지령이 발생하여 오차가 발생. 그 크기는 서보계의 강성, 이송속도, 원호보간반경등에 지배됨.

- 8) 위치 loop gain의 불일치에 의한 오차

$$\Delta R = \pm \frac{\Delta K_s F}{K_s^2} \sin 2\theta \times 1000$$

$K_s, \Delta K_s$: 평균위치루프게인 및 두게인의 차이(1/sec)