

터닝센터의 형상오차 및 열오차 사상변환



장인배

강원대학교 기계메카트로닉스공학부

1. 서언

본 원고는 미국국립 표준 및 기술연구소에 재직하는 Dr. Alkan Donmez의 박사논문인 “공작기계의 정확도 향상을 위한 일반적 계측방법: 이론, 적용 및 구현”을 요약한 것이다. 이 작업은 공작기계에서 지배적인 형상 오차와 열 오차를 보정하기 위해서, 오차지도(error map)와 전략적으로 설치한 열전쌍들로부터의 귀환(feedback)이 소프트웨어에 기초한 오차보정 알고리즘과 함께 성공적으로 사용된 최초의 사례들 중 하나이다. 따라서 이 글의 주목적은 어떻게 공작기계의 오차를 측정하고, 사상변환(mapping)을 수행하며, 이들을 부분적으로 보상하는가에 대해서 설명하는 것이다.

실험에 사용된 공작기계는 Hardinge Superslant 2축 터닝센터로(Fig. 1) 공작기계의 작동오차 할당을 위한 동차 변환행렬을 만들어내기 위해서 Fig. 2에서와 같이 기계의

좌표계를 배정하였다. 기계의 구조물은 기계의 베드에 연결되어 회전형 조인트로 모델링된 회전주축 형상(prismatic) 조인트(또는 미끄럼 조인트)로 이송기구에 연결된 교차 슬라이드 및 회전형 조인트에 의해서 교차 슬라이드

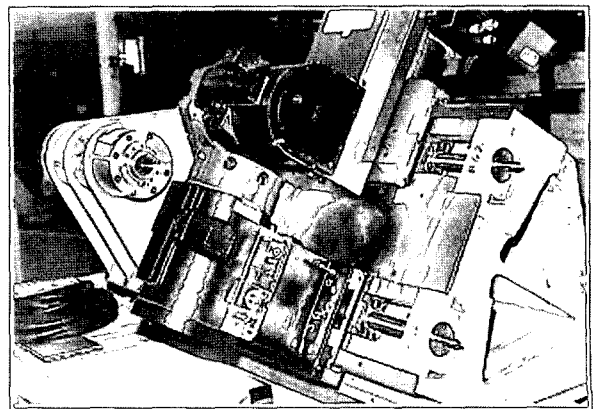


Fig.1 Hardinge Superslant™의 외관형상과 내부형상

이드에 연결된 공구 터릿 등으로 구성된다. 터릿은 기계가 절삭작업을 할 때에 교차 슬라이드 상에 고정된다. 마지막으로, 공구는 공구 터릿에 강체로 고정되며 시편은 회전축에 강체로 고정된다.

2. Superslant™의 동차변환행렬(HTM) 모델조합

Fig. 2에서 도시된 것과 같이, 전체적인 기준 프레임은 주축 선단부에서의 주축프레임과 일치하도록 선정되었다. 기계가 차가운 상태에서, 0T_1 은 기준프레임에 대한 상부 이송기구 좌표 프레임, 1T_2 는 이송기구에 대한 상부 교차 슬라이드 좌표계 프레임, 그리고 2T_3 은 교차 슬라이드 프레임에 대한 공구터릿의 좌표계 프레임이며, 이들 모두는 오차 운동의 측정이 손쉽게 수행될 수 있는 곳에 위치하고 있다.

3T_4 는 공구 터릿 프레임에 대한 절삭공구 좌표계 프레임, 0T_5 는 기준프레임에 대한 주축 좌표계 프레임(이들은 일치한다)이며, 5T_6 은 주축 프레임에 대한 시편의 프레임이다.

이 때 이송기구에 대해서 오차는 다음과 같다.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z)+X_1 \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & \delta_z(z)+Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

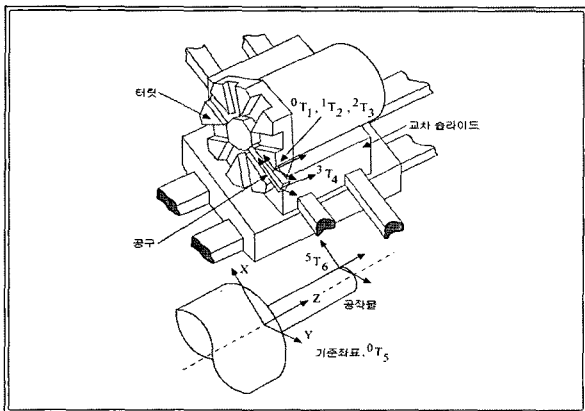


Fig. 2 2축 경사베드 터닝센터의 좌표축 할당

여기서 X_1 은 교차 슬라이드 X방향 오프셋 $\varepsilon_z(z)$, $\varepsilon_x(z)$, $\varepsilon_y(z)$, 는 각각 이송기구의 롤오차, 피치오차, 요오차, $\delta_y(z)$ 는 Y방향 진직도이며 $\delta_z(z)$ 는 변위오차로 $\delta_x(z)=\delta'_x(z)+a_p\Delta z$ 로 표현되며, 여기서 $\delta'_x(z)$ 는 이송기구가 Z방향으로 움직이면서 X방향으로의 진직도, a_p 는 Z방향 운동과 주축의 평균 회전축 중심 사이의 수평방향 평행도 오차, Δz 는 X방향에서의 아베오차를 유발하기 위해 a_p 를 증폭시키는 Z방향 운동의 증분 값이다.

교차슬라이드의 오차는 다음과 같이 주어진다.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x)+X \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 (x)에 대한 오차들은 와 같이 교차슬라이드의 X방향 위치의 함수로 Z방향과 유사하게 표현된다.

공구 터릿의 경우 오차는 다음과 같이 발생한다.

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(t) & \varepsilon_y(t) & \delta_x(t) \\ \varepsilon_z(t) & 1 & -\varepsilon_x(t) & \delta_y(t) \\ -\varepsilon_y(t) & \varepsilon_x(t) & 1 & \delta_z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\delta_x(t)$, $\delta_y(t)$ 및 $\delta_z(t)$ 는 터릿의 병진오차운동, $\varepsilon_x(t)$, $\varepsilon_y(t)$ 및 $\varepsilon_z(t)$ 는 터릿의 회전오차운동이다.

절삭공구의 경우, 좌표프레임이 공구선단 위치에서 정의 되었으므로, 회전오차는 위치에 아무런 영향을 끼치지 않지만, X_4 와 Z_4 의 크기는 다른 좌표축들의 각도오차를 증폭시킨다. 따라서 절삭공구의 오차들은 다음과 같이 구해진다.

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(c) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(c) \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(c) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_4+\delta_x(c) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(c) \\ 0 & 0 & 1 & Z_4+\delta_z(c) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 X_4 와 Z_4 는 각각 X 및 Z방향으로의 이상적인 공

구 치수 $\delta_x(c)$, $\delta_y(c)$ 및 $\delta_z(c)$ 는 X, Y 및 Z 방향으로의 공구 길이 변화이다.

주축의 경우, Z 축 방향으로의 구속받지 않은 회전을 하기 때문에, $\epsilon_z(s)=0$ 으로 가정하며, 오차는 다음과 같이 주어진다.

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \epsilon_y(s) & \delta_x(s) \\ 0 & 1 & -\epsilon_x(s) & \delta_y(s) \\ -\epsilon_y(s) & \epsilon_x(s) & 1 & \delta_z(s) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $\delta_x(s)$, $\delta_y(s)$ 는 민감한 방향으로 주축의 반경방향 및 민감하지 않은 방향으로의 주축의 반경방향 운동이며, $\delta_z(s)$ 는 주축의 축방향 운동, $\epsilon_x(s)$ 는 민감하지 않은 방향으로 주축의 기울기, $\epsilon_y(s)$ 는 민감한 방향으로의 주축의 기울기이다.

회전오차가 없다고 가정하면, 시편의 오차 행렬식은 다음과 같이 주어진다.

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x(w) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z(w) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(w) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(w) \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(w) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x(w)+\delta_x(w) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(w) \\ 0 & 0 & 1 & z(w)+\delta_z(w) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $x(w)$ 와 $z(w)$ 는 원하는 시편형상을 얻기 위해서 절삭공구와 상호작용하는 시편상의 접촉점 좌표, $\delta_x(w)$, $\delta_y(w)$ 및 $\delta_z(w)$ 는 각각 이 위치의 X, Y 및 Z방향 위치오차이다.

이 전달행렬식들을 사용해서, 기준좌표에 대한 절삭공구의 위치는

$${}^{Ref}T_{tool} = {}^{Ref}T_{carriage} {}^{carriage}T_{cross\ slide} {}^{cross\ slide}T_{turret} {}^{turret}T_{tool} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (7)$$

이며, 기준좌표계에 대한 시편상의 이상적인 시편-절삭

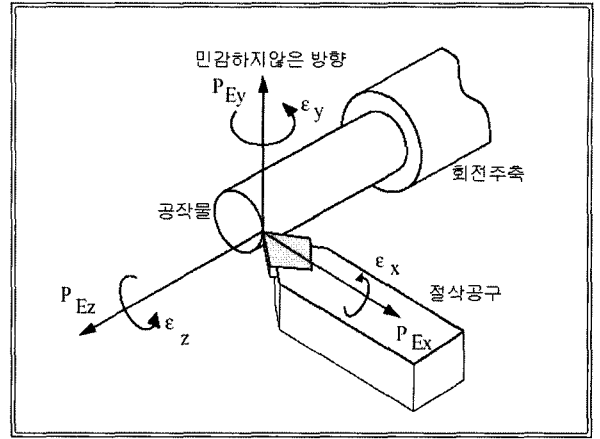


Fig. 3 절삭공구 선단에서의 최종적인 오차 성분들

공구 접촉점은 식 (8)과 같다.

$${}^{Ref}T_{work} = {}^{Ref}T_{spindle} {}^{spindle}T_{workpiece} = {}^0T_5 {}^5T_6 \quad (8)$$

직교좌표계 기계의 경우 기준좌표계에서 오차보정 벡터를 구하는 것이 바람직하다. 따라서 오차보정 벡터는 $P_E = {}^{Ref}P_{work} - {}^{Ref}P_{tool}$ 이며, 여기서 벡터 P는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{Ex} = x(w) + \delta_x(w) + \epsilon_y(s) \times z(w) + \delta_x(s) - X_4 - \delta_x(c) - [\epsilon_y(z) + \epsilon_y(x) + \epsilon_y(t)] \times Z_4 - \delta_x(t) - x - X_1 - \delta_x(x) - \delta_x(z) \quad (9)$$

$$P_{Ey} = \delta_y(w) + \epsilon_x(s) \times z(w) + \delta_y(s) - [\epsilon_z(z) + \epsilon_z(x) + \epsilon_z(t)] \times X_4 - \delta_y(c) + [\epsilon_x(z) + \epsilon_x(x) + \epsilon_x(t)] \times Z_4 - \delta_y(t) - \epsilon_z(z) \times x - \delta_y(x) - \delta_y(z) \quad (10)$$

$$P_{Ez} = -\epsilon_y(s) \times x(w) + Z(w) + \delta_z(w) + \delta_z(s) + [\epsilon_y(z) + \epsilon_y(x) + \epsilon_y(t)] \times X_4 - Z_4 - \delta_z(c) - \delta_z(t) + \epsilon_y(z) \times x - \delta_z(x) - \delta_z(z) - z \quad (11)$$

Fig. 3은 절삭공구 선단에서의 최종적인 오차 구성성분

들을 보여주고 있다. 변위오차에 대해서만 서보로 제어되는 공작기계의 이송축들을 보정할 수 있기 때문에 공구 선단에서의 각도오차는 오차보정 알고리즘에서 고려하지 않지만, 기계의 설계 엔지니어와 사용자들에게는 중요할 수도 있다. 다행히도, 각도오차는 크게 발생하지 않는다.

3. 공작기계의 측측

기계의 작업영역 내의 임의의 위치와 시간에서의 최종적인 오차를 구하기 위해서는, 이 오차 성분들 모두를 측정하거나 그들의 크기를 현명하게 가정해야만 한다. 문제가 더 복잡해지는 것은, 열 효과와 부하조건에 의해서 공작기계 구조 요소들의 기하학적인 오차 역시 변한다는 점이다. Superslant™은 정적이 아닌 부하에 의한 오차를 무시할 수 있을 정도로 튼튼하게 설계되었다. 따라서 형상 및 열에 의해 유발되는 기하학적인 오차의 변화만 산출하면 된다.

형상오차에 영향을 끼치는 두 개의 독립적인 변수들인 기계의 공칭위치와 열 분포를 고려하기 때문에, 이들의 변화 가능한 범위 내에서 이 변수들 사이의 관계를 도출하기 위해서 측정을 수행해야만 한다. 기계에 프로브를 설치하여 크기를 알고 있는 시편의 형상을 측정하면서 기계에 설치된 스케일을 사용해서 위치측정을 수행하여 오차지도를 구할 수 있다.

검사대상인 슬라이드가 이송범위의 한쪽 끝에 가 있을 때에 위치측정을 시행한다. 매 측정간격마다 측정을 시행하면서 슬라이드를 이송범위의 반대쪽 끝까지 이동시킨다. 이송범위의 끝에 도달하면 매 측정간격마다 측정을 시행하면서 운동을 반전시켜서 슬라이드를 다시 출발위치로 이동시킨다. 이 과정을 통해서, 각 이송축들의 반전오차를 측정할 수 있다. 측정간격을 선정할 때에는, 리드스크루 부정렬 등과 같은 주기적인 오차 성분들 역시 고려해야만 한다. 측정값들로부터 주기적인 리드오차를 소거하기 위해서는 리드스크루 리드의 짝수배로 측정간격을 선정해야만 한다. 열에 의해서 데이터가 영향을 받지 않으면서, 주기적인 리드오차를 특성화시키기 위해서는, 주기적인 오차의 측정은, 전체 이송범위에 대해서 균일한 열 분포를 가지고 있다

고 가정하면서, 매우 짧은 이송범위(리드길이의 한배나 두배)에 대해서 개별적으로 수행되어야만 한다.

측정이 시행되는 전체 이송범위에 대한 이송을 수행하면서 다섯 주기의 측정을 수행한 후에, 기계를 약간 예열한다. 여기에서는 두 가지 유형의 예열방법이 사용되었다. 첫 번째 방법에서는 기계를 켜고 이송축 구동모터는 서보루프에 의해서 동력을 공급받으며 슬라이드를 주어진 위치에 정지시키지만, 이송은 하지 않는다. 이를 통하여 가열이 느린 속도로 진행된다. 두 번째 방법에서는 기계를 앞뒤로 움직여서 가열을 시행한다. 이 과정을 통하여, 기계는 2일 동안의 주기로 서서히 가열되며, 각 예열과정이 시행된 후에 측정이 시행된다. 온도측정이 시행된 주요 위치들에는 리드스크루 양단의 베어링 하우징, 슬라이드 안내면, 구동모터, 슬라이드가 움직이는 베드, 측정센서의 치구 및 대기온도 등이 포함되었다. 이 측정과정을 통해서 기계의 열 분포 상태의 변화에 따른 형상오차의 변화양상의 고찰이 가능하다.

식 (9)~(11)의 오차 성분들은 특징적 유사성, 필요한 측정과정 및 사용된 센서 등에 따라서 직선변위오차, 각도오차, 진직도, 평행도 및 직각도 오차, 주축 열 드리프트 오차 등 네 개의 그룹으로 분류되었다.

3.1 직선변위오차

직선변위오차는 기계요소의 이송축 방향에 대한 병진오차운동으로 정의된다. 일반적으로, 이러한 유형의 오차는 구동 메커니즘과 귀환유닛의 기하학적인 부정확성에 의해서 유발된다. 볼 스크루 의해서 구동되는 슬라이드의 경우, 볼 스크루의 리드오차, 회전축과 중심선 사이의 부정렬, 형상 불균일, 볼 스크루와 귀환유닛 사이의 결합오차 등이 직선변위 오차를 유발한다. 이 직선변위 오차를 측정하기 위해서 휴렛팩커드 5528모델 레이저 간섭계 시스템이 사용되었다.

Fig. 4는 터닝센터의 직선변위 측정을 위한 레이저 간섭계 광학계의 설치를 보여주고 있다. 높은 정확도 수준을 유지하기 위해서, 측정기간 동안 레이저빔 근처에서의 온도와 대기 압력에 대한 측정을 시행하였으며, 간섭계로부터의 측정값들에 대해서 그에 따른 보상을 수행하였다.

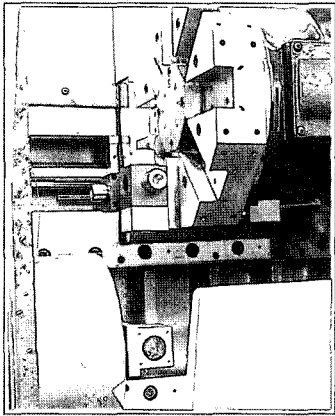


Fig. 4 X축 변위오차 측정을 위한 간섭계 설치

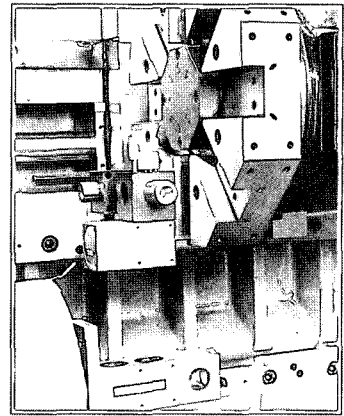


Fig. 5 X축 요오차 측정을 위한 간섭계의 설치

3.2 각도오차

롤-피치-요 각도오차는 슬라이드 안내면의 부정확한 형상과 공작기계 구조물 요소들의 조립시 발생하는 부정렬에 의해서 유발되는 회전오차이다. 터닝센터의 경우, 롤 및 피치오차의 주 구성성분들은 기계의 두 슬라이드가 움직이는 방향에 대해 직각인, 민감하지 않은 방향에 위치하고 있다. 따라서 대부분의 터닝센터의 경우에 요오차에 대해서만 측정 및 사상변환을 수행한다.

X축 방향으로의 위치의 함수로 교차 슬라이드의 요오차를 측정하기 위한 레이저 광학계의 설치가 Fig. 5에 도시되어 있다. Z축 방향으로의 위치의 함수로 이송기구의 요오차를 측정하기 위해서 이와 유사한 설치를 90° 회전시켜서 사용하였다.

3.3 진직도, 평행도 및 직각도의 측정

진직도는 슬라이드의 이송축 방향에 직각인 두 방향 모두에서 발생하는 기계요소의 병진오차이며 고정밀 비접촉 용량형 프로브와 정밀하게 래핑 된 시험축을 측정과정에서 사용하였다.

Z방향 운동에 대한 X방향으로의 진직도를 측정하기 위한 설치가 Fig. 6에 도시되어 있다. 이 측정의 원리는 주축에 시험축을 설치하고 이송기구를 Z방향으로 움직이면서 이송기구에 장착되어있는 프로브들 사이의 간극변화를 측

정하는 것이다.

시험축 프로파일 오차를 소거하기 위해서 반전기법을 사용하였으며, 최적화 기술기 공제를 통해서 결과 데이터에서 부정렬 오차를 제거하였다.

이상적으로는 Z방향 운동과 주축의 평균회전축선 사이의 평행도는 거리가 1만큼 떨어진 시험축상의 두 위치를 측정하면 구할 수 있다. 하지만 이러한 측정에는 몇 가지 오차가 게재된다. 비록, 시험축을 180° 회전시켜서 수정과정을 시행할 수 있지만, Z방향 이송축 진직도 오차, 시험축 프로파일 오차 및 시험축과 주축 사이의 부정렬 오차 등이 주요한 원인들이다.

여타의 오차들이 측정에 영향을 끼치지 않는 상태에서 측정을 수행하기 위해서 180° 간격으로 설치된 두 개의 프

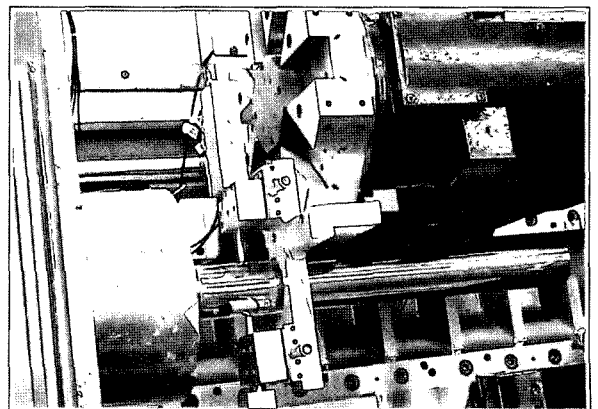


Fig. 6 Z방향 운동에 대한 X 방향 진직도와 평행도 측정을 위한 설치

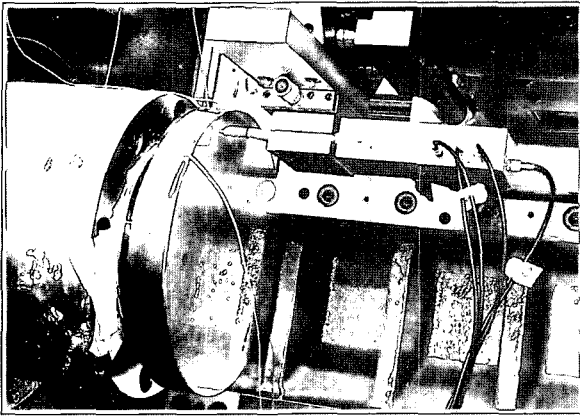


Fig. 7 X방향 운동의 Z방향 진직도와 직각도 측정용 설치

로브를 사용하였다. 주축의 오차운동을 최소화하기 위해서, 주축을 매우 느린 속도로 회전시켰으며 Z축방향으로 12" 떨어진 두 위치에 대해서 두 개의 프로브를 사용해서 한 회전에 대해서 512개의 점들을 측정하였다. 이러한 측정결과로서, 완벽한 진원형 시편과 오차운동이 없는 주축 사이의 부정렬은 함수도형을 생성한다고 알려져 있다³⁾. 시편의 진원도 오차와 주축의 오차운동이 함수도형을 왜곡시키는 현상을 소거하기 위해서 주축의 1회전에 대한 512개의 점들로부터 최적합 원을 추출, 분석에 사용하였다.

X방향 운동의 Z 방향 진직도와 주축의 회전축 평균회전축선에 대한 X축의 직각도 측정을 위하여 Fig. 7에서와 같은 장치를 사용하였다. 시험축은 7" 직경으로, 스캔이 가능한 수준으로 표면이 연마 및 래핑 되어있다. 이 시험축을 주축에 장착한 후 측정을 위해서 터릿에 용량형 프로브를 설치하였다.

부정렬과 시험축의 직각도 오차를 소거하기 위해서, 다음의 방법이 사용되었다: 교차 슬라이드가 시험축의 전면을 향하여 움직이는 동안, 용량형 프로브는 매 측정간격마다 측정값을 읽는다. 그런 다음, 시편을 180° 회전시킨 후에 동일한 프로브를 사용해서 측정을 반복한다. 이 과정을 통해서 직각도뿐만 아니라 X방향 운동의 Z방향 진직도를 알아낼 수 있다. Fig. 8에 도시된 형상으로부터 다음의 관계식들을 도출할 수 있다.

$$m_1(x) = -\delta_z(x) + e(x) \quad (12)$$

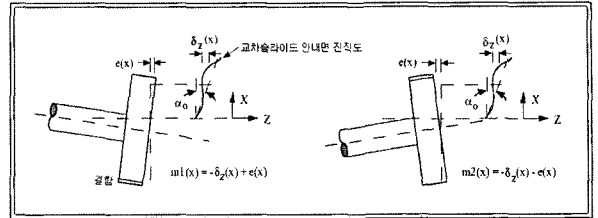


Fig. 8 X방향 운동의 Z 방향 진직도 계산을 위한 반전기법 (두 번째 측정을 위해서 주축에 설치된 시편을 180° 회전시킴)

$$m_2(x) = -\delta_z(x) - e(x) \quad (13)$$

여기서 $m_1(x)$ 는 첫 번째 측정에 의한 프로브 출력 값, $m_2(x)$ 는 주축을 180° 회전시킨 후의 프로브 출력 값, $e(x)$ 는 시험축의 직각도와 부정렬 오차의 조합이다. 따라서 식 (15)와 (16)으로부터 진직도를 계산할 수 있다:

$$\delta_z(x) = \frac{-m_1(x) - m_2(x)}{2} \quad (14)$$

또한 직각도는 측정값 M_1 과 M_2 각각에 대한 평균값에서 구한 최적합 직선의 기울기로부터 계산해 낼 수 있다.

3.4 주축의 열 드리프트

ANSI 표준 B89.6.2에 따르면 열 드리프트는 “내부 및 외부의 열원에 기인하여 구조물 루프 내에서 온도분포의 변화에 의해 발생하는 두 물체 사이의 거리의 변화”라고 정의되어 있다. 주축 오차운동의 경우에는 주축의 열 드리프트들 중 (1) 축방향 열 드리프트; (2) 반경방향 열 드리프트; (3) 경사 열 드리프트 등의 인자들이 공작기계의 전체적인 성능에 중요한 영향을 미친다.

주축 드리프트에 관련되어 온도가 변화되는 위치들을 찾아내기 위해서 주축의 드리프트를 측정하는 동안에 다음과 같은 주축대 주변의 다양한 위치에서의 온도를 함께 측정하였다: (1) 주축 베어링 양단; (2) 주축 전면과 주축대 베이스의 네 귀퉁이; (3) 주축대와 치구 사이에 위치한 베드상의 한 점; (4) 대기온도; (5) 프로브 치구온도.

전형적인 측정 사이클 동안에, 주축은 8시간동안 일정한 속도로 작동하며, 매 10분마다 온도와 반경방향 및 축방향

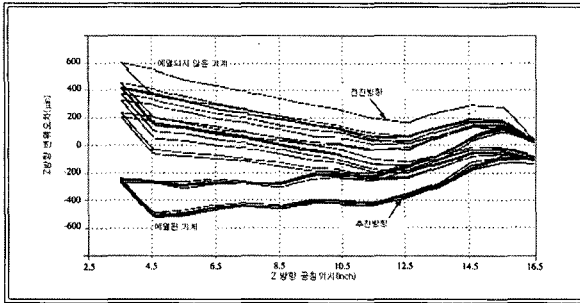


Fig. 9 기계를 예열하면서 측정된 Z방향 편위오차 측정값의 원 데이터

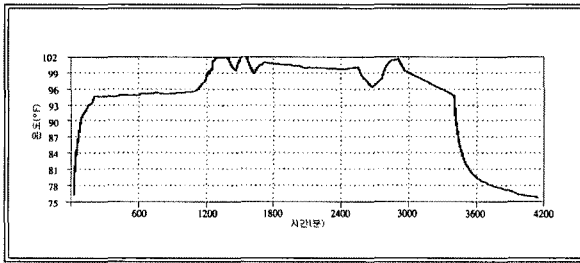


Fig. 10 Z 편위오차 측정기간 동안 Z축 구동모터의 온도 프로파일

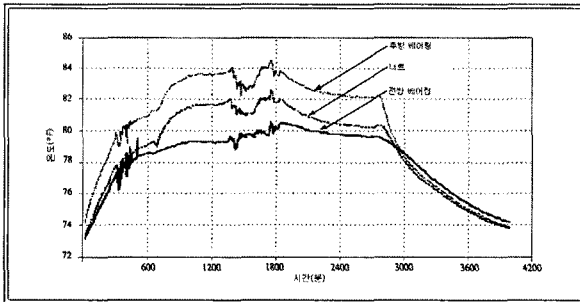


Fig. 11 Z방향 편위오차 측정기간 동안 이송기구 리드스크루 너트와 베어링의 온도 프로파일

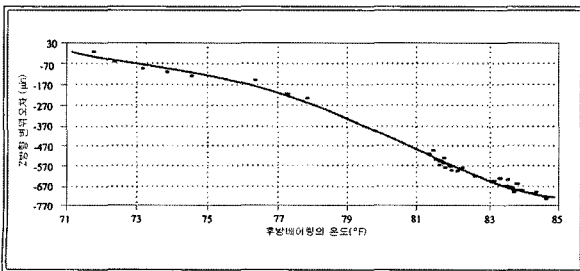


Fig. 12 고정된 Z 방향 공칭위치에서 온도변화에 대한 전형적인 Z방향 (전진방향) 편위오차 데이터

위치측정을 수행하였다. 시험축의 진원도 오차와 근본적인 주축의 오차운동을 소거하기 위해서 항상 동일한 주축의 각도위치에 대해서 프로브의 측정이 수행되었다. 8시간 동안의 작동시간이 경과한 후에, 기계를 정지시키고 밤새 냉각하였으며 이 동안에도 온도와 프로브 측정은 계속 시행하였다. 다른 작동속도에 대해서 이 과정이 반복되었다. 두 프로브에 의해서 측정된 두 프로브들 사이의 거리에 따른 두 반경방향 변위의 차이를 나누어서 특정 시간에 경사 드리프트의 양을 구하였다.

4. 측정결과와 교정

4.1 이송기구의 직선변위 오차

측정기간 동안 Z축을 따라가면서 측정된 전형적인 변위 오차 데이터들은 Fig. 9와 같다. 예하중을 받는 볼/너트 조립체를 사용하고 있음에도 불구하고 리드스크루에 약 200 μm 의 백래시가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 백래시를 보정하기 위해서는 전방 및 후방 이송에 대해서 서로 다른 오차교정이 필요하다.

기계가 가열되면서, Fig. 9에서와 같이 오차곡선의 기울기가 현저하게 변화한다. 이 측정기간 동안 이송기구 주변의 다양한 점들에서의 온도 프로파일은 Fig. 10과 11에 도시되어 있으며 유사한 경향을 나타내고 있다.

데이터의 최적 곡선근사를 구하기 위해서 2변수 비선형 최소자승 회귀분석이 수행되었다. 그런데, 회귀분석을 수행해 보니 어느 변수도 산출된 변위오차에 대해 허용할 만한 표준편차를 나타내지 못하였다. 따라서 모든 개별적인 측정 점들(Z축에 대해서 1" 간격, X축에 대해서 0.2" 간격)에서의 오차거동을 앞서 선택된 위치들에서의 온도에 대하여 분석하였다. 이를 위해서, 온도를 단일변수로 하여, 단일변수에 대한 비선형 최소자승 곡선근사 기법을 각각의 공칭위치와 양쪽 이송방향에 대해서 수행하였으며 다양한 위치에서의 온도에 대해서 이와 동일한 형태의 분석을 수행하였다. Fig. 16은 곡선근사의 결과를 사례로 보여주고 있다. 반대방향에 대해서는 매우 상이한 형태의 곡선이 도

출되었다. 이송기구의 전진 및 후진운동 모두에 대하여 이송기구의 Z 방향 변위오차 $\delta_z(Z)$ 와 이송기구 볼 스크류의 후방 베어링 하우징 온도 T 사이의 상관관계가 최소자승 곡선근사를 사용하여 구해졌다.

$$\delta_z(Z) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (15)$$

4.4 열에 의한 주축의 반경방향 및 경사 드리프트

Fig. 13은 주축의 반경방향 및 경사 드리프트의 측정 데이터를 보여주고 있다. 데이터 내의 노이즈는 주축 오차운

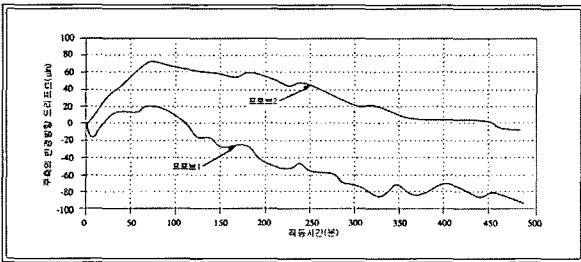


Fig. 13 반경방향 주축 드리프트(2000rpm)

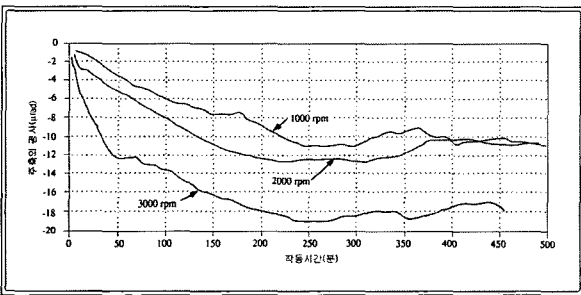


Fig. 14 주축의 경사 드리프트

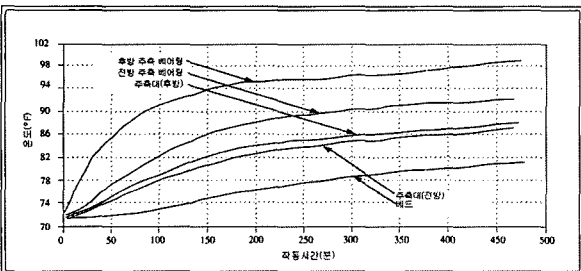


Fig. 15 2000rpm에서 주축의 드리프트를 측정하는 동안의 온도 프로파일

동의 임의성분에 의해서 유발된 것으로 경사운동에 의해서 증폭되기 때문에, 시험축의 자유단 쪽 프로브에서 측정된 데이터에 더 노이즈가 많이 섞여 있다. 주축의 경사 데이터는 Fig. 14에 도시되어 있다. 데이터를 평활화하기 위해서 7점 작동 평균화 기법이 사용되었다⁴⁾.

주축대 주변의 특정한 위치에서의 온도 프로파일들이 Fig. 15에 도시되어 있다. 주축 경사의 열에 의한 드리프트는 주축의 회전속도 범위에 대해서 방정식으로 표시할 수 있으며, 경사값 $\epsilon_y(s)$ 는

$$\epsilon_y(s) = 1.67831 - 0.168393\Delta T - 0.0206067\Delta T^2 + 0.259273 \times 10^{-3}\Delta T^3 \quad (16)$$

으로 계산된다. 열에 의한 회전주축의 반경방향 드리프트는 가열기간 동안에는

$$\begin{aligned} \delta_x(s) = & -16.1931 + 3.00839(\Delta T_4 - \Delta T_1 + \Delta T_5) \\ & + 24750.7/\omega + 1.55985(\Delta T_4 - \Delta T_1)\Delta T_5 \\ & + 10015.2(\Delta T_4 - \Delta T_1)/\omega - 0.291304(\Delta T_4 - \Delta T_1) \\ & \Delta T_5^2 + 0.130897 \times 10^{-3} \times (\Delta T_4 - \Delta T_1)\Delta T_5\omega \\ & + 0.538512 \times 10^{-4}(\Delta T_4 - \Delta T_1)^2\Delta T_5\omega \end{aligned} \quad (17)$$

로, 냉각기간 동안에는

$$\begin{aligned} \delta_x(s) = & 39.959 - 21.2883(\Delta T_4 - \Delta T_1 + \Delta T_5) - 0.012886\omega \\ & - 7.29782(\Delta T_4 - \Delta T_1)\Delta T_5 + 59019.9(\Delta T_4 - \Delta T_1)/\omega \\ & - 0.293672(\Delta T_4 - \Delta T_1)\Delta T_5^2 + 224.213(\Delta T_4 - \Delta T_1) \\ & \times \Delta T_5^2\omega - 51018.8(\Delta T_4 - \Delta T_1)\Delta T_5/\omega - 9164.44 \\ & \times (\Delta T_4 - \Delta T_1)^2\Delta T_5/\omega \end{aligned} \quad (18)$$

로 표현된다. 여기서 ΔT_4 와 ΔT_1 은 주축 전방과 후방 베어링의 온도변화, ΔT_5 는 베드의 온도변화, ω 는 주축의 회전속도이다.

4.5 열에 의한 주축의 축방향 드리프트

가열 및 냉각 기간 동안 회전속도에 대해서 주축의 축방

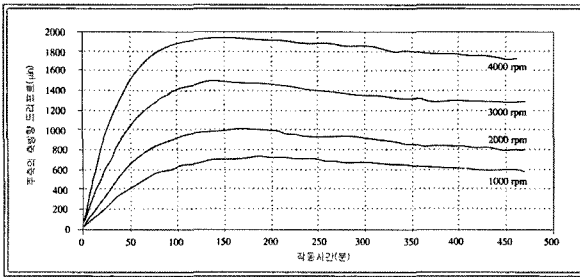


Fig. 16 서로 다른 주축 회전속도에 대한 회전주축의 축방향 드리프트

향 드리프트를 측정된 데이터를 Fig. 16에서 도시하고 있다. 측정된 주축의 회전속도에 대해서 계산된 드리프트 값과 측정값 사이의 차이는 단지 20 μ m 이내로 판명되었다.

이 고찰에 기초하여, 다중변수 다항식 회귀분석이 수행되어 다음의 관계식이 도출되었다. 가열기간 동안에는,

$$\begin{aligned} \delta_2(s) = & 39.5964(\Delta T_1 + \Delta T_4) - 89.4055 \Delta T_5 \\ & + 0.0022638\omega(\Delta T_1 + \Delta T_4) \\ & - 0.153 \times 10^{-7} \omega^2(\Delta T_1 + \Delta T_4) \Delta T_5 \end{aligned} \quad (19)$$

냉각기간 동안에는

$$\begin{aligned} \delta_2(s) = & 22.6971(\Delta T_1 + \Delta T_4) - 56.3001 \Delta T_5 \\ & + 0.0038758\omega(\Delta T_1 + \Delta T_4) \\ & + 0.3 \times 10^{-7} \omega^2(\Delta T_1 + \Delta T_4) \Delta T_5 \end{aligned} \quad (20)$$

과 같으며 이 방정식들에 따르면, 주축의 드리프트 특성은 측정된 다른 어느 오차 성분들 보다 훨씬 더 복잡하다는 것을 알 수 있다.

5. 측정된 오차의 보상

열에 의한 주축의 반경방향 및 축방향 드리프트에 대한 회귀모델을 도출하기가 어려우며 이전의 식에서 제시된 총 오차에 대한 식과 합쳐진다. 또한, 절삭공구의 오차 항들인 $\delta_x(c)$ 및 $\delta_z(c)$ 도 구해야만 한다. 이 항들은 절삭공구의 열팽창, 정하중 변형, 공구대 및 인서트의 장착오차 및 공구마

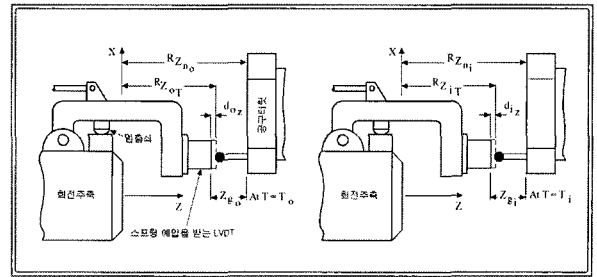


Fig. 17 공구조절 스테이션의 형상

모 등을 포함하고 있다. 이들 중에서, 열팽창과 정적 변형은 온도 프로파일과 정하중에 대한 충분한 정보를 알고 있다면 해석적으로 구할 수 있다. 그런데, 임의의 시점에서 공구마모량을 산출하기 위해서 사용할 수 있는 만족할 만한 모델이 존재하지 않는다. 게다가, 공구 및 절삭용 인서트의 장착 및 교체과정에서 수반되는 오차 때문에, 충분한 정확도로 $\delta_x(c)$ 및 $\delta_z(c)$ 를 예측하는 것이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 17에서와 같은 공구조절 스테이션을 사용하는 방안이 채택되었다.

6. 오차보정 시스템의 실시간 구현

절삭공구의 전체적인 오차백터가 결정되고 나면, 가공된 시편의 정확도를 개선하기 위해서 오차를 보상할 수 있는 방안을 개발해야만 한다. 오차를 보상은 일반적이고도 손쉬운 방법은 수치제어 프로그램의 수정이지만, 이는 오랜 시간이 소요되며, 다른 많은 단점들을 가지고 있다. 그러므로 전용, 저가의 단일보드 마이크로컴퓨터를 사용해서 이기계의 오차보정 알고리즘을 구현하기로 결정하였다.

Fig. 18에서는 이러한 제어기의 블록선도를 보여주고 있다. 실시간 오차보정 시스템은 제어기에 추가된 것으로 오차보정 신호를 위치서보루프에 주입시키는 역할을 수행한다. 이 장치는 컴퓨터 수치제어기(CNC)에 포함시켜 설계하거나 별도로 추가할 수 있다. 이번 경우에는 제어기의 하드웨어나 소프트웨어가 정해져 있기 때문에 후자의 경우가 필요했다.

현재의 공칭위치, 운동방향, 온도데이터, 공구조절 스테

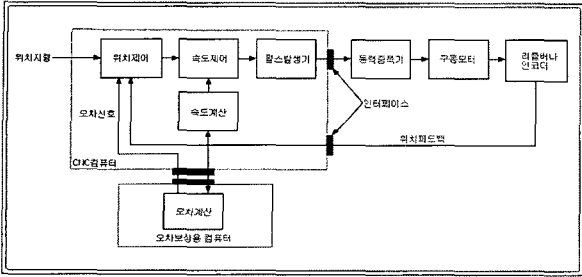


Fig. 18 오차가 보정되는 CNC 이송축 구동시스템

이선 데이터 및 초기조건 등에 기초하여 기계의 두 이송축에 대한 오차를 계산하여 공작기계 제어기로 전달하였다. 제어기는 병렬 입력/출력(I/O) 포트를 통해서 이 값들을 수신하며 추종오차를 저장하는 레지스터에 이들을 합산시킨다. 추종오차 값들과 합산된 위치지령신호들은 그 다음번 서보 사이클에서 이송축 서보의 구동을 위해 사용되었던 오차신호이다. 이 기법을 사용함에 따라서, 공작기계 제어기의 서보제어 주기를 변화시키지 않았으며 기본적인 서보 제어 알고리즘도 영향을 받지 않았다.

6.1 시스템 하드웨어

전체적인 보정 시스템은 원격 조절되는 온도측정 시스템, 터닝센터 키보드 인터페이스 모듈, 공구조절 스테이션, 공작기계 제어 인터페이스 보드로 이루어져 있다.

온도센서로는 T형 구리-콘스탄탄 열전대가 사용되었다. 보정제어기(ISBC 86/30)와의 통신은 온도측정시스템에 내장되어있는 RS-232 직렬 인터페이스 모듈을 사용해서 수행되었다. 주문자 설계된 키보드 인터페이스 모듈은 Intel-8048 단일 칩 마이크로컴퓨터를 기반으로 하였다. 이 모듈은 공작기계의 이송축을 적절한 위치로 이송하여 공구조절 스테이션이 기계의 기준위치 오프셋을 구할 수 있도록 하는 데에 필요하다. 공구조절 스테이션 자체는 본질적으로 직선형 가변 차동 트랜스포머(LVDT) 변위측정 장치로 구성되어 있다. 이 장치는 직선형 가변 차동 트랜스포머(LVDT)의 출력을 선형화하기 위해서 Intel 8088 마이크로프로세서를 내장하고 있으며 레이저 간섭계를 사용해서 출력 값의 사상변환을 수행하면 선형성을 $\pm 0.25\%$ 에

서 $\pm 0.024\%$ 로 높일 수 있다.

6.2 절삭시험

터닝센터에 실시간 오차보정 시스템을 구현한 후에, 오차보정 시스템의 효용성을 검증하기 위해서 과도상태의 온도조건 하에서 절삭시험을 수행하였다. 이 절삭시험의 결과가 시편이 가공된 순서에 따라서 Fig. 19~22에 나열되어 있다. 이 테이블에서 알 수 있듯이, 오차보상이 수행되지 않은 시편에 대한 오차보상이 수행된 시편의 치수정확도 개선비율은 기계가 가열됨에 따라서 증가하였다.

또한 시간이 경과함에 따른 치수정확도가 개선된 것처럼 보이는 것은 공작기계 자체가 가열됨에 따른 정확도 저하의 결과이다. 따라서 오차보정을 통해서 가공된 시편의 테이퍼 개선도는 평균 3배에 달하는 것처럼 보이지만, 이것이 가공 정확도가 개선되었다는 강력한 증거는 되지 못한다. 또한, 기계가 가열됨에 따라서 테이퍼는 감소된다. 그러므로 이 특정한 기계의 경우에는, 일단 정상상태 온도에 도달하면, 테이퍼에 대한 오차보정은 길이나 직경 정확도에 비해서 중요치 않다. 아마도 시편의 직경과 길이에서 가장 큰 개선도를 발견할 수 있을 것이다.

한편, 오차보정 시스템을 사용해서 가공한 시편의 직각도에서는 그리 큰 개선이 관찰되지 않는다. 이 결과에 따르

Fig. 19 직경오차(공칭치수 : 1.605in)

| 오차보상 가공시편(4in) | 오차보상이 없는 가공시편(4in) | 개선도(비율) |
|----------------|--------------------|---------|
| 650 | 1300 | 2.00 |
| 530 | 1050 | 1.98 |
| 270 | 1030 | 3.81 |
| -130 | 1470 | 11.31 |
| -150 | 2230 | 14.87 |

Fig. 20 길이오차(공칭치수 3.44in)

| 오차보상 가공시편(4in) | 오차보상이 없는 가공시편(4in) | 개선도(비율) |
|----------------|--------------------|---------|
| -150 | 570 | 3.80 |
| 390 | 4410 | 11.31 |
| -250 | 5240 | 20.96 |
| -90 | -480 | 5.33 |
| 450 | 6390 | 14.20 |

Fig. 21 테이퍼 오차(직경 1.605, 길이 2.7in)

| 오차보상 가공시편(.4in) | 오차보상이 없는 가공시편(.4in) | 개선도(비율) |
|-----------------|---------------------|---------|
| 26 | 85 | 3.27 |
| 18 | 88 | 4.89 |
| -44 | 95 | 2.16 |
| -8 | -7 | 0.88 |
| 4 | 17 | 4.25 |

Fig. 22 직각도 오차(1.99in 반경 상에서)

| 오차보상 가공시편(.4in) | 오차보상이 없는 가공시편(.4in) | 개선도(비율) |
|-----------------|---------------------|---------|
| 33.5 | 44.1 | 1.32 |
| 39.5 | 8.7 | 0.22 |
| 25.7 | 36.8 | 1.43 |
| 54.3 | 78.6 | 1.45 |
| 32.0 | 58.2 | 1.82 |

면 기계와 시편에 대한 추가적인 측정시스템이 필요한 것으로 판단된다. 일부 선반의 경우, 직각도 오차는 보정이 필요한 주 오차인자가 아닌 것으로 판단되었다.

7. 요약과 결론

공작기계에서 온도변화에 기인한 오차는 형상오차와 동일한 수준의 크기를 갖고 있음을 알 수 있었다. 더욱이, 많은 수의 오차 성분들이 존재하기 때문에, 이들에 대한 측정, 사상변환 및 보상의 문제에 체계적으로 접근할 필요가 있다. 이 과정을 보여주기 위해서 2축 터닝센터에서 형상 및 열에 의해서 유발된 오차들을 이송축상의 공칭위치와 선정된 위치에서의 온도의 함수로서 측정하였다. 공작기계에서의 주요 열원들은 구조물에 의해서 고정 및 연결되어 있으므로, 소수의 위치에서의 온도 모니터링을 통해서 임의의 시점에서의 온도분포를 예측할 수 있다. 그 결과, 강력한 외부열원을 공작기계의 구성요소들 중 일부분으로 부착하는 것과 같이, 격렬한 온도조건의 변화가 발생하지 않는다면 오차의 거동은 온도분포에 대해서 일의적으로 결정된다. 만약 온도조건에 영구적으로 격렬한 변화가 발생한다면 새로운 온도조건에 대해서 기계를 다시 교정해야만 한다. 기계를 서서히 가열하면서 선정된 위치에서 온도를

측정하는 동안, 오차 값들은 레이저 간섭계와 고정밀 용량형 프로브들을 사용해서 측정하였다. 오차를 특성화하기 위해서 데이터들에 대한 최소자승 분석법이 사용되었다. 열에 의한 영향을 예측하기 위해서 공구조절 스테이션을 사용해서 기계의 기준위치들을 온라인으로 측정하였다. 이 방법을 통해서, 기계가 과도 온도상태일 때에 발생하는 오차를 예측할 수 있었다.

단일보드 마이크로컴퓨터를 사용해서 소프트웨어를 사용한 보정시스템을 구축하였다. CNC 공작기계 제어기와 인터페이스 된 이 마이크로컴퓨터는 공칭 이송축 위치, 선정된 위치에서의 온도 및 공구조절 스테이션에서 측정된 마지막 측정값의 함수로 오차를 구할 수 있다. 이 오차 값을 공작기계 제어기의 소프트웨어 서보루프 내로 주입한다. 오차주입은 공작기계의 주기비율에 따라서 갱신되며, 이는 20ms이다.

과도적인 온도조건 하에서 절삭시험이 수행되었다. 보통 10시간이나 소요되는 비생산적인 예열기간을 줄이면서도, 보상되지 않은 시편에 비해서 20배 이상의 정확도 향상을 달성할 수 있었다.

비록 결과가 좋게 나왔지만, 흥미롭게도 형상오차에 대한 지도를 작성하는 데에 소요되는 것보다 더 많은 노력을 열 오차 지도를 작성하는 데에 기울여야 한다는 점에 유의해야 한다. 일반적으로, 많은 제조업체들은 형상오차 보정 개념을 지지하는 반면에, 열 오차 보정의 효용성에 대해서는 회의적이다. 이는 열 오차 지도의 작성이 어렵고 많은 시간이 소요되며, 많은 경우 기계가 어떻게 설계, 제작 및 사용되는가에 의존하기 때문이다. 계측 프레임이 없는 상황에서, 오차를 줄이는 더 나은 총체적인 방법은 형상오차의 지도를 작성하고 기계의 온도를 조절하는 것이다. 후자의 경우에는 구성요소와 인터페이스들에 대한 더 나은 설계와 구조물의 능동적인 냉각을 통해서 달성할 수 있다. (오일샤워와 같은) 능동적인 냉각이 열 오차를 조절하는 가장 효과적인 방법이라는 것이 이미 증명된 바 있다.

참고 문헌

1. Slocum, Precision Machine Design, 1994.

2. Axis of Rotation: Methods for Specifying and Testing, ANSI Standard B89.3.4M-1985, American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, 345 East 47th St., New York, NY 10017.
3. Axis of Rotation, ANSI Standard B89.3.4-1985.
4. A. Savitsky and M. J. E. Golay, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Square's Procedures," Anal. Chem., July 1964.