

마이컴을 이용한 열변위 보정기 개발 황선창*, 박경근*, 박윤창**, 편영식**

Development of the Thermal Error Compensator using MICOM

S. C. Hwang*, K. K. Park*, Y. C. Park**, Y. S. Pyoun**

*선문대 기계공학과 대학원, **선문대 기계 및 제어 공학부

1. 연구배경

공작기계의 위치오차 원인 중 내·외부 열원으로 인한 공작물과 공구간의 상대위치변화, 즉 열변위는 무시될 수 없는 비중을 차지하고 있다. 특히, 항공기부품, 금형제품, 정밀 광학부품 등의 정밀가공을 위주로 하는 최근의 산업구조를 볼 때 장시간에 걸친 연속가공이 필요하게 되고 공작기계의 열발생에 의한 열변위 오차는 공작물 가공정밀도에 큰 영향을 끼쳐서 불량율을 높일 수 있는 원인으로 작용하고 있다.

이러한 공작기계의 열변위에 대한 대책이 많이 연구되고 있는데, 가장 많이 쓰이는 방법은 공작기계의 온도를 제어하는 방법이다. 공작기계의 내·외부 열원을 제거 혹은 억제시키고, 발생된 열을 차단, 혹은 급속 배출시키는 방식이다. 그리고 일정한 온도의 기름이나 공기 혹은 오일-미스트(oil-mist)를 이용하여 기계 내·외부를 순환시키는 방법이 있다. 또 공작기계를 내부열원에 대하여 열대칭으로 설계하거나, 저열팽창 재료를 이용하는 등, 공작기계의 설계와 제조기술을 통해서 열변형에 강하도록 바꾸는 방법이 있다. 하지만, 이러한 방법들은 다양한 공작기계의 구조와 기능 등에 따라서 이를 적용하기 어려운 경우도 많고, 적용하더라도 공작기계의 제조원가를 높이거나, 열변형을 어느 정도 억제시키는 선에서 끝나기 때문에 사용하기 주저하고 있는 실정이다.

반면에 비교적 저렴한 방법으로서, 열변위 발생

을 허용하되 그 양만큼 서보를 제어하여 보정하는 여러 방법이 연구 발표되고 있다. 그래서 본 연구에서는 열변위량과 직접영향이 있는 온도를 동시에 측정하고, 측정된 온도로부터 열변위 오차를 예측해 보정하는 장치를 개발하게 되었다. 이 열변위 보정장치 개발을 통해 가공오차가 큰 변화 없이 계속적으로 양질의 제품을 생산하므로써 공작기계의 신뢰도를 높일 수 있고, 경쟁력 있는 고품질의 공작기계를 만들 수 있을 것으로 기대된다.

2. 열변위 보정 방법

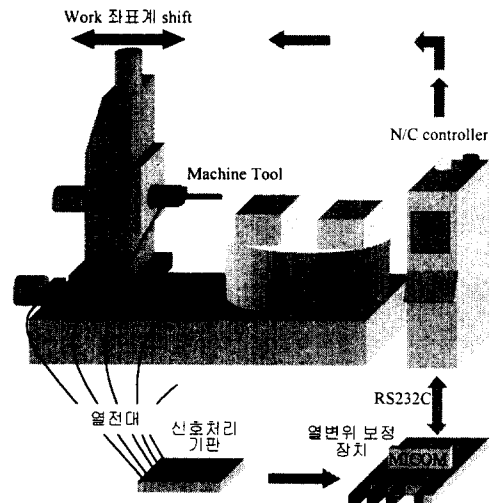


그림 1. 열변위 보정장치

열변위 보정방법을 개략적으로 설명하면, 먼저 공작기계 Z축 열변위에 직접적으로 영향을 주는 온도를 열전대(Thermocouple)로 측정하고, 이 측정온도를 MICOM에 보내면, MICOM은 온도값과 열변위량 관계식으로부터 열변위량을 예측한다. 그리고 예측된 열변위 오차량을 N/C controller에 전송하면, N/C controller가 공작기계의 공작물 좌표계를 이동시킴으로써 보정시킨다. 이 과정은 그림 1.에 도식적으로 나타나 있다.

측정된 온도 데이터로부터 가공에 영향을 미치는 열변위량을 예측하는 관계식을 구하는 방법으로는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법 등의 해석적인 방법들이 주로 이용되고 있다. 하지만, 이러한 방법들은 경계조건을 예측하기 어렵거나, 경계면에서의 미소오차에 매우 민감하게 작용하기 때문에 신뢰성 높은 결과를 얻기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 공작기계로서 갖추어야 할 신뢰성과 안정성을 고려하여 통계학적 분석방법의 하나인 회귀분석법이 이용되었다. 회귀분석이란, 한 변수를 설명변수(Explanatory variable)라 하고, 다른 변수를 반응변수(Response variable)로 지정한 후에 얼마만큼 반응변수를 잘 예측할 수 있는가를 분석하는 통계적 분석방법이다.

본 실험에서는 공작기계 몸체 5곳의 온도값 (T_1, T_2, \dots, T_5)을 설명변수로, 열변위로 인한 위치오차값 (E_c)을 반응변수로 하고, 온도와 열변위 사이에는 1차함수의 관계를 갖는다고 가정하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$E = \beta_0 + \beta_1 T_{1i} + \dots + \beta_5 T_{5i} + \epsilon_i \quad (1)$$

식(1)에서 미지의 계수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$ 는 식(2)와 같이 추정오차인 ϵ_i 제곱의 합이 최소가 되도록 최소제곱법(Least Square Method)에

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^n (E_i - \beta_0 - \beta_1 T_{1i} - \dots - \beta_5 T_{5i})^2$$

의해 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$ 이 구해진다.

이를 위해서 S 를 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$ 에 대하여 각각 편미분하여 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \beta_5} = 0. \quad (3)$$

식(3)에서 얻어진 6개의 연립방정식으로부터 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$ 의 값을 구하게 된다. 이 식을 행렬(Matrix)형태로 표시하면,

$$[T]^T [T] \{ \beta \} = [T]^T \{ E \} \quad (4)$$

여기서, $[T]$ 는 온도-매트릭스, $[T]^T$ 는 $[T]$ 의 전치매트릭스, $\{ E \}$ 는 열변위-매트릭스이다. 여기서 $\{ \beta \}$ 를 계산하는 방법에는 반복계산법(Iteration Method)이 이용되었다.

본 연구에서는 그림 5.에서와 같이 수평형 머시닝센터가 이용되었으며, 이 공작기계의 온도와 열변위 관계식 도출을 위해 다양한 운전조건에서의 10여 차례에 걸친 실험에서 최종적으로 식(5)와 같은 관계식이 구해졌다.

$$E = 43.34 + 4.03\Delta T_1 + 3.80\Delta T_2 + 3.31\Delta T_3 - 12.59\Delta T_4 \quad (5)$$

여기서 $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4$ 은 각각 볼스크류 너트, 볼스크류 후방 베어링, 스피들 하우징, 볼스크류 전방 베어링의 온도와 대기온도와의 차이값으로서 Z축 열변위에 영향을 크게 미치는 부위들이다.

3. 열변위 보정장치 구성

3.1 온도 신호증폭 및 잡음제거

공작기계의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 이용하여 Z축 열변위와 직접 연관 있는 공작기계 상의 온도를 측정하게 되는데, 이 K형 열전대는

온도값을 전기적 신호로 출력하게 된다. 하지만, 열전대에서 출력되는 값이 0.04 mV/℃로 매우 미약하기 때문에 이 신호를 증폭시켜주고, 또 전기적인 잡음으로부터 신호를 보호하기 위해 필터링(Filtering) 해줄 필요가 있다.

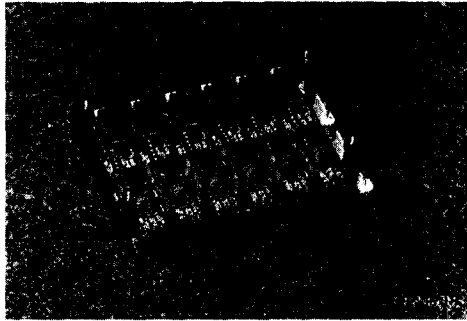


그림 2. 신호처리 기관

이를 위해 신호처리 기관 구성은 열전대용 전용 증폭기인 AD595 및 3극 저역-통과 능동필터와 10배 증폭회로로 구성되어 있다. 먼저 AD595는 열전대의 출력신호를 1차적으로 247.3배 증폭하면서 참조부의 온도를 보상(Cold junction compensation)하여 약 10mV/℃의 신호를 출력하게 된다. 이 신호는 다시 차단주파수가 16Hz인 3극 저역-통과 능동필터를 통과하면서 60Hz의 전원으로 인한 잡음 등이 제거되고, 또한 이 필터를 거치면서 10배로 증폭되어 최종적으로는 100mV/℃의 신호로 변환되게 된다.

그러므로 동작기계 몸체부의 온도신호는 열전대와 신호처리 기관을 통과하게 되면, 100mV/℃로 변환되어 마이크로프로세서(μ -Processor)에 입력되게 된다. 즉 동작기계의 온도변화가 0~50℃라고 볼 때 0~5V의 신호가 마이크로프로세서에 입력되게 된다.

3.2 마이크로 컴퓨터(이후 "MICOM"으로 표기)

본 연구를 수행하기 위해서는 동작기계로부터 발생하는 열을 검출하고 이로부터 계산된 열변위

를 동작기계 컨트롤러에게 알려주는 역할을 하는 장치가 필요하다. 이 장치를 일반 퍼스날 컴퓨터에 별도의 응용카드(A/D변환카드)장착하여 사용할 수 있으나 장치의 크기와 가격대 성능관계를 고려해 볼 때 One Chip Micro Processor를 장착한 MICOM을 제작하여 본 연구를 수행하였다.

그림 3은 제작된 마이컴 보드에 부품이 장착된 상태를 보였다.

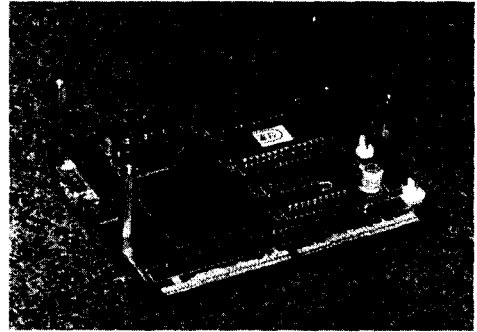


그림 3. 마이컴 보드에 부품이 조립된 모양

3.2.1 H/W 사양

열변위보정장치의 MICOM사양을 다음과 같이 선정하였다.

- CPU : INTEL, 80C196KC
16BIT ONE CHIP MICRO PROCESSOR
완전이중방식의 직렬포트
8Channel 8/10비트 AD 변환기
- CLOCK : 16.000MHz - 125nsec 상태시간
- ROM : AMD, 27C256-12 호환
- RAM : SAMSUNG, KM62256CLP-7 호환
- RS232 : MAXIM, MAX232CPE

3.2.2 주요 동작 기능

(1) A/D Converter

동작기계 각 부위의 온도를 열전대를 이용하여 신호처리회로를 거쳐 나오는 신호는 아날로그 데이터이므로 A/D변환 과정을 통해 디지털 데이터로 바꾸게 된다.

MICOM에 탑재된 80196은 8또는 10bit A/D변환기를 장착하고 있으며, 본 연구에서는 계산의 정확도를 높이기 위하여 10bit변환을 사용하였다. 80196은 자체에 내장된 8채널의 멀티플렉서에 의해 순차적인 A/D변환이 가능하며, 본 연구에서는 열전대를 5개 사용하여 열변위를 감지하고 있으므로 8개의 채널 중 5개만 사용하였다.

(2) 시리얼 통신(Serial Communication)

마이컴과 공작기계 컨트롤러간에 열변위 전달을 위하여 그림 4.와 같은 프로토콜(PROTOCOL)을 적용하였다.

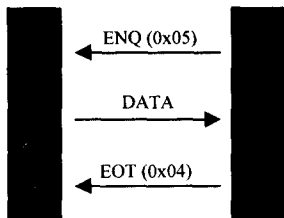


그림 4. 통신 프로토콜

Case 1 : Normal

그림 4.에 보인것과 같이 NC가 열변위보정을 시작할 준비가 된 시점에서 ENQ신호를 보냄으로서 마이컴에게 보정할 변위 데이터를 요구한다. 마이컴은 NC로부터의 통신신호를 계속 기다리다가 ENQ신호를 수신하면 그 시점에서의 각 열전대로부터 들어오는 온도값을 계산하여 보정 데이터를 만들고 이 데이터를 NC쪽으로 송신한다. NC는 마이컴이 보낸 데이터의 BCC값을 확인하고 이상이 없으면 EOT신호를 마이컴에 보냄으로 일련의 통신을 마친다.

Case 2 : Error Mode 1 (ENQ Failure)

NC는 마이컴에게 ENQ를 송신하여 보정데이터를 요청한후 마이컴이 보낸 데이터를 받기위해 수신 대기 상태에 들어간다. 그러나 만약 통신선로에 잡음에 의해 마이컴이 ENQ신호를 받지 못했다

면 NC는 프로그램 상에서 무한 Loop에 빠지게 된다. 이를 막기 위하여 NC는 ENQ를 보낸 후 타이머를 동작시켜 2초가 지나도 마이컴으로부터 데이터가 수신되지 않으면 다시 ENQ를 보낸다.

Case 3 : Error Mode 2 (BCC Failure)

마이컴이 NC의 요청에 의해 열변위 데이터를 송신하였으나 잡음에 의해 데이터가 망가졌을 경우 프로그램적으로 BCC값이 틀리게 된다. NC는 데이터를 받아 BCC값을 계산하고 그 결과값이 데이터에 담겨진 값과 차이가 있다면 전송 중 데이터가 잘못된 것으로 판단하고 마이컴에게 NAK 신호를 송신한다. 마이컴은 NAK신호를 수신하면 다시 보정 DATA를 NC에게 재송신한다. 이 과정이 3회 반복되었는데도 Error가 발생하면 모든 과정을 무시하고 NC가 다시 ENQ신호를 송신함으로써 새롭게 통신을 시작한다.

표 1 통신 포맷

항목	사양
BAUD RATE	4800
STOP BIT	2 BIT
PARITY BIT	NON
DATA TYPE	BINARY
DATA	8BIT

송신 데이터 포맷

STX	07	'D'	00	34	FF	F1	00	52	ETX	BCC
-----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----	-----

- data 1: Start of Text 02H
- data 2: data 수 (data 4부터 16까지)
- data 3: data type 'D' : 열변위 보정 data
- data 4,5: X축 열 변위 보정 Data
- data 6,7: Y축 열 변위 보정 Data
- data 6,7: Z축 열 변위 보정 Data
- data 10: End of Text 03H
- data 11: Block check Character
 - data 1부터 10까지의 배타적논리합 (XOR)를 수평Parity data로 부가한다.

4. 실험 및 결과

본 연구에서 구성된 열변위 보정장치는 미리 정해진 대상 공작기계의 열적특성을 파악하여 공작기계 중요부위의 온도에 따른 열변위 관계식을 내장하고 있게 된다. 여기서는 2절에서의 모델링 과정을 거쳐서 식(5)의 관계식을 MICOM에 내장시키게 된다. 공작기계가 열변위 보정장치를 사용할 경우에는 N/C 컨트롤러(controller)에서 열변위 보정장치에 열변위량을 요구하게 되고, 그러면 열변위 보정장치는 그때의 온도 값을 읽어서 내장하고있는 관계식에 따라 열변위를 예측하여 이를 RS232C를 통해서 N/C 컨트롤러로 전송하게 된다. N/C 컨트롤러는 넘겨받은 열변위량만큼 공작물 좌표계를 이동시켜서 열변위 오차를 보정하게 된다.

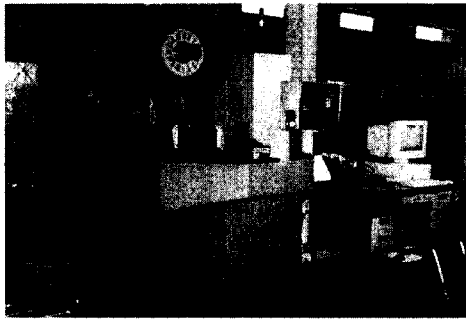


그림 5. 온도값을 획득하는 장면

표 2. 실험 조건 및 실험 시작시간

운전상태	이송속도 (mm/min.)	주축속도 (rpm.)	지속시간 (min.)
1	10,000	0	30
2	7,000	4,000	60
3	10,000	0	120
4	7,000	2,000	30
실험시간	1회 : PM 08:00 2회 : AM 10:00 3회 : AM 05:00		

이러한 과정에 있어서, 본 연구에서 개발된 열

변위 보정장치의 보정효과를 검증하기 위해서 그림 5.에서 보이는 바와 같은 실험을 실시하였다.

이 실험에서는 다양한 환경하에서의 보정효과를 조사해 보기 위해서 운전 조건은 동일하지만 실험 시작시간을 각기 다르게 하여 총 3회가 실시되었으며, 실험조건은 표 2.에 표시되어 있다.

이 실험에서의 온도 측정부위는 식(5)를 얻기위한 실험에서와 동일한 부위로 하였으며, 대상 공작기계도 동일한 기계가 이용되었다. 여기서 얻어진 온도변화는 열변위 보정장치에서 측정된 결과로서 그림 6.에 나타나 있다.

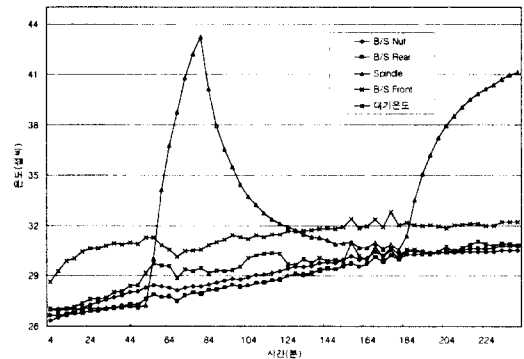


그림 6. 측정된 온도값

또한 열변위 보정장치의 보정효과를 검증하기 위해서 발생하는 열변위를 직접 보정하지 않고 그 양을 측정하였으며, 여기서 측정된 열변위량과 열변위 보정장치에서 예측하는 열변위량을 비교함으로써 보정효과를 조사하였다.

이 실험에서 발생된 열변위량은 그림 7.에서 ■로 표시되어 있는데, 최고 0.070mm로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그리고, 그림 6.의 측정된 온도 데이터로부터 식(5)를 이용한 보정장치에서의 예측치가 그림 7.에 ●로 표시되어 있다. 이 그림 7.에서 실제 발생된 열변위량과 보정장치에서의 열변위에 대한 예측치와의 차이가 결국 보정후의

잔류오차로 남게 되는데, 이것은 그림 7.에 ▲로 표시되어 있다.

이 결과를 살펴보면 보정후의 잔류오차가 약 0.015mm로서 온도상승으로 인한 열변위오차를 약 1/4정도로 줄일 수 있음 볼 수 있다.

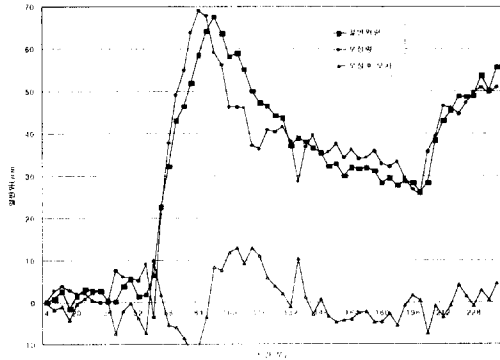


그림 7. 열변위 보정결과

5. 결론

산업의 고도화가 진행될수록 공작기계의 열변위로 인한 오차에 대한 관심은 날로 높아지고 있고, 이에 따라 다양한 연구들이 발표되고 있는데, 그 중에서도 측정된 온도로부터 열변위를 예측하여 보정하는 방법이 가장 현실성 있는 열변위 대책으로서 인식되고 있다.

이러한 배경하에서 진행된 본 연구에서는 공작기계의 열변위 보정장치를 시제작하고 이를 적용하여 보정효과를 실험을 통해 조사해 보았으며, 그 내용들을 정리해 보면 다음과 같다.

- (1) 열전대의 신호를 증폭하고, 잡음을 제거하는 신호처리회로가 제작되었다.
- (2) 마이크로 프로세서를 이용한 열변위 보정장치가 시제작되었다.
- (3) MICOM과 N/C controller간의 통신을 통한 위치 보정 시스템이 구축되었다.

- (4) 여기서 개발된 보정장치는 열변위를 약 1/4로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 박성현, "현대실험 계획법", 민영사
- [2] Thomas G. Beckwith 외, "Mechanical Measurements". ADDISON-WESLEY
- [3] Toshimichi Moriwaki, "Thermal Deformation and Its On-Line Compensation of Hydrostatically Supported Precision Spindle", Annals of the CIRP Vol. 1988년 1월
- [4] G. Spur, E. Hoffman, "Thermal Behaviour Optimization of Machine Tools", Annals of the CIRP Vol. 1988년 1월
- [5] J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research(1990)", Annals of the CIRP, Vol. 1990년 2월
- [6] 박주용 외, "공작기계의 열변위 보정에 관한 연구", 기공기보 제 8 권 제 2 호 1994년
- [7] (사) 기계기술협회, "생산가공기술에 따른 열의 문제", 1988년 12월 (일본)
- [8] Intel, 80X96 Assembly Manual, Intel, 1990.