

공작기계 열변형제어



최 대 봉(KIMM 자동화연구부)

- '78. 2 한양대학교 기계공학과(학사)
- '91. 2 부산대학교 기계공학과(석사)
- '78. 3-'82. 6 KIST 정밀기계센터 연구원
- '83. 7-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 언

최근 항공기, 자동차, 반도체 등 첨단산업의 급속적인 발전에 따라 고정밀 부품가공의 요구가 많아지고 있으며 더구나 고정밀측정기, 비구면가공기, 마이크로머신(micro machine) 등 초정밀가공기 개발에 많은 업체들이 참여하고 있다. 또한 공구의 발달과 더불어 가공품의 생산성 및 품질의 향상을 위하여 공작기계의 고속화기술에 대한 연구가 머시닝센터(machining center)를 중심으로 활발히 진행되고 있으며 절삭시간이 짧은 경합금의 공작물이 증가하고 있다는 점도 그 필요성을 더 크게 부각시키고 있다. 하나의 공구날에 작용하는 절삭저항을 감소시킬 수 있는 고속절삭을 통해서 합금강, 난삭재 등의 재료를 보다 효율적으로 가공하기 위한 연구들이 수행되고 있다. 이와 같이 정밀화, 고속화, 자동화를 위하여 공작기계의 주축계, 이송계, 구조물 등 핵심부의 고정밀가공 및 조립과 동특성, 열특성 등 공작기계의 성능향상이 필수적으로 뒤따르지 않으면 안된다. 특히 기계가공에 있어서 가공정도를 저하시키는 최대의 요인으로 공작기계 내외부의 발열이나 온도변화에 의한 열변형을 지적할 수 있으며 시시각각으로 변하는 공작기계의 열변형을 줄이기 위한 대책이 가공정도 향상을 위한 핵심기술이 되고 있다.

그러므로 이러한 공작기계의 열변형을 최대한 억제하기 위하여 설계단계에서 여러가지 방지대책과 정도보정을 위한 열변형제어 기술의 현황에 대하여 소개하며 국내 공작기계 등 여러 산업분

야에서는 현재 사용하고 있는 열변형 방지기술을 정립하고 새로운 기술의 적용이 시급히 요구되고 있다.

2. 열변형 방지대책 및 설계방향

공작기계의 열변형은 내부열원과 외부열원 나눌 수 있으며 그중 주된 요인은 베어링, 모터, 치차, 공작물, 공구 등에 기인한 내부열원에 의한 발열이다. 어떤 작업 조건하에 발생한 열이 공작기계에 전도되어 각부에 온도상승이 발생된다. 이 온도상승에 따라 공작기계의 구성요소는 열팽창하여 형상과 구조가 신장, 굽힘, 비틀림 등의 형태로 일어난다. 공작기계에서 특히 열발생이 높은 부위는 주축계로서 주축구조, 기하학적 정도, 조립정도, 예압, 윤활유의 조건, 냉각조건 등 많은 열변형 요인이 존재하고 있다. 특히 주축회전수가 올라가면 발열이 크게 일어나고 이러한 베어링의

발열량은 회전수의 5/3승에 비례하므로 주축베어링의 열특성은 주요한 연구과제가 되고 있다. 일반적으로 공작기계 구조물, 요소부의 재료인 강이나 주물의 경우 온도가 1°C 상승할 경우 1 m당 약 11.5 μ m가 늘어난다. 이 크기는 일반적인 공작기계의 최대온도상승이 10°C 에서 20°C의 범위로 보면 매우 큰 양이다. 각 열원에서 발열량, 주위온도는 작업내용과 시간의 경과에 따라 기계와 공작물의 열용량에 의해 온도상승에는 시간차가 생기므로 가공점에서 상대변위는 가공정밀도를 저하시키게 된다. 다음 그림1은 수직형 머시닝센터의 온도상승과 열변위의 측정으로서 주축에서 온도상승이 제일 높으며 이때 15°C 상승시 약 80 μ m이상의 열변위가 발생하고 있다. 현재 수 μ m 정도 이내의 정밀 부품가공이 많이 요구되고 있기 때문에 열변위를 최소화시켜야 하며 가공품의 정도향상과 다량생산, 동일작업 등에 신뢰성을 높여야 할 것이다.

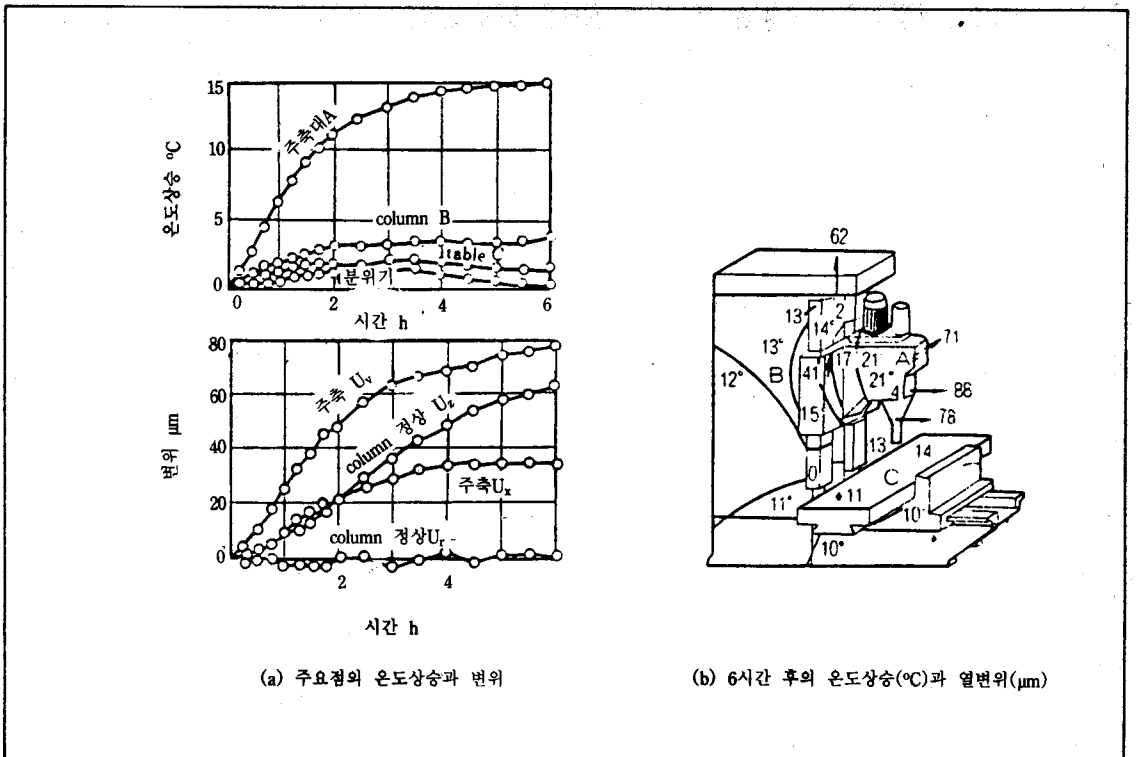


그림 1. 수직형 머시닝센터의 온도상승과 열변위 측정치(1,400 rpm 무부하운전)

표 1. 열변위 방지대책

대책분류	요소부	내 용
균일화	모 터	주축 모터 본체의 냉각(외부원통부의 냉각, 오일자켓)
	모 터	모터 부착부의 냉각오일자켓
	모 터	모터 부착부의 단열재료 삽입
	가공물	절삭제의 대량공급분사, 대용량 탱크의 채용
	기계본체	팬에 의한 열방출
	기계본체	열원근방 기계본체부의 복사열 차단, 피복
	주 축	주축베어링외륜부의 냉각(오일자켓)
	주축대	헤드내 베어링, 치차의 윤활유 냉각
	주축대	헤드내 냉각오일 포켓의 삽입
	제어장치	heat-pipe에 의한 내부발열의 간접냉각
	제어장치	기계본체와 제어장치의 격리(단열층) 부착
	이송계	이송 볼스크류 중공나사채용, 냉각오일순환
	이송계	볼스크류 지지베어링의 외부원통부 냉각오일자켓
발열감소	구조물	유압유니트, 윤활유니트의 본체로부터 격리설치
	구조물	칩콘베어에 의한 고온 칩의 외부배출
	유압유니트	작동유의 냉각
	구동원	유압구동의 폐지(에어구동의 채용)
변형감소	주 축	주축베어링의 세라믹 볼베어링 채용
	주 축	주축베어링의 오일에어윤활방식채용
	주 축	주축베어링의 예압량, 윤활 그리스 봉입량의 적정화
	주축유니트	주축내의 윤활은 저점도윤활유 채용(내마모type)
보정제어	주 축	주축테이퍼부의 세라믹재료의 채용
	주 축	주축중심=구속면간 거리의 최소화
	이송계	이송 볼스크류를 예장력을 double anchor지지
	이송계	이송계 위치검출의 리니어 스케일 채용
	구조물	저열팽창계수 재료의 채용
	구조물	좌우 열대칭구조설계
	구조물	기계본체(컬럼, 베드)내 냉각유 샤워 분사
온도조절기	구조물	기계본체 3점지지에 의한 기초변형의 영향감소
	온도조절기	기준온도(실온 등)에 고추종적인 유온조절기 채용
	주 축	축방향 신축량의 자동계측에 의한 위치제어계 보정
	주축유니트	주축내 윤활유량과 유온의 자동적용제어
	이송계	자동계측 및 위치제어계의 보정
	이송계	온도변화와 열변형data에 기초한 인프로세서 제어
구조물	구조물	컬럼 열변형 검출에 의한 기체 온도평균화

이러한 열변형을 억제하기 위한 대책으로 공작기계 구조의 대칭성의 이용, 열원을 구조에서 분리, 재질의 개선, 발열의 냉각 등이 검토 되고 있으나 이러한 수단을 사용하여도 발열의 영향을 완전히 배제하기는 어렵다. 공작기계 열변형의 근본적인 원인은 열에 의한 온도상승과 불균일한 온도분포이다. 따라서 비용을 염두에 두지 않으면 대량의 일정온도의 액체를 외부에서 혹은 내부에서 순환시켜 균일한 온도분포를 얻을 수 있고 열변형을 적게할수 있으나 실제 문제로서 경제적, 작업성을 고려하여야 한다. 열발생원, 열전달계, 열변형기구, 온도상승기구에 대한 대책으로 균일화, 발열감소, 변형감소, 보정제어 등 여러가지 대책의 실효를 표1과 같이 정리하였으므로 공작기계의 크기, 구조, 정밀도, 사용조건 등을 고려하여 적절한 대책을 강구해야 한다.

열변형 방지 대책으로 알려진 바에 의하면 발열원에 대한 대책으로서 모터, 기어박스, 유압장치 등은 가능한 한 기계본체로 부터 격리시켜야 하며, 부분적으로 본체에 설치할 경우 단열재를 사용하도록 한다. 또한 발열을 극소화하기 위하여 기어나, 베어링등의 요소부품은 품질이 좋은 것을 사용하여 효율성이 있도록 하며, 기기의 고효율화나 저발열 요소의 채용 등이 필요하고, 베어링 형식의 적절한 선정과 윤활유의 종류, 양 및 윤활방법등에 대해서도 세심한 주의가 필요하다. 칩은 많은 열을 가지고 있기 때문에 이 열이 기계본체에 전달되지 않도록 칩이 직접 아래로 떨어지게 한다. 이때의 칩과 절삭액을 받을 수 있는 탱크는 기계본체와 분리되어야 한다. 열전달계에 대한 대책으로서는 열전달을 방지하기 위하여 열원을 냉각하는 것에 의해 발생열을 배출하는 방법으로 팬을 돌린다던지 주축대, 컬럼 등에 냉각액을 순환시키는 방법이다. 베드, 컬럼, 주축대 등에 heat pipe 를 설치하여 발생하는 열이 기계에 전도되기 전에 외부로 열을 발산시켜 열특성을 개선한 예도 있다. 공구의 경우 공구의 표면에 공기를 불어 넣어 강제공냉시키는 방법도 강구될수 있고, 공구 메이커에서 특수한 공구에 구멍이 뚫려있어 절삭

유를 흘리는 방법도 유효한 열변위 억제 방법이다. 볼스크류에도 위의 방법이 적용되고 있다. 열변형기구에 대한 대책으로서 저열팽창재료를 사용하여 열변형을 감소시키는 것과 열변형을 둔감하게 하기 위하여 열대칭구조 즉 더블컬럼 등, 주축대, 베드안내면의 대칭도 고려해야 하며 조립시 서로 열팽창계수가 다른 재료의 사용도 응용하고 있다. 볼스크류의 열변위는 가공정도에 직접 영향을 미치므로 부착시 장력을 주어 열응력을 인장응력으로 변화시킴으로서 위치결정정도를 향상시키고 있다.

정도 창성(創城)기구에 대한 대책으로는 열변위 보정기능을 갖도록 한 제어기능의 부가방법이다. 열변형 측정하여 inprocess 보정이라던가 온도에서 열변위를 추정하여 위치를 보정하는 것이다. 이와 같은 방법은 앞의 여러가지 방법에서 처리되지 않는 양을 가공정도나 열변형의 측정결과로부터 열변형에 대응되는 온도의 측정결과를 근본으로 보정한다. 계측보정의 한 예로서 테이블위에 셋팅한 기준 블럭에 주축에 장착한 공구를 정점으로 공구와 테이블 사이의 상대변화를 검출하는 것이 가능하다. 공구가 기준 블럭내의 리미트 스위치를 누르는 위치를 자동적으로 기계의 NC 부가 읽어두고 그 변화를 산출하여 위치를 보정한다. 이때의 보정량에는 주축의 열변형, 주축의 늘어남, 공구마모가 포함된다. 그리고 기계의 여러 곳에서 온도를 검출하여 온도에서 기계의 Z축방향의 열변형을 예측계산하여 기계원점을 이동하는 방법도 시행되고 있다.

3. 공작기계의 온도제어

설계의 단계에서 여러가지 열변형 방지대책을 시행한 후 실제의 가동시에 열변형의 변형상태를 가공전과 가공후에 구별하여 가공하기전 공작기계 구조의 열변형 변동을 가능한 한 빨리 안정화해야 한다. 3차원적으로 높은 가공정도를 요구하는 경우에 공작기계의 온도 제어는 반드시 필요하게 된다. 여러가지 오차중 위치정도 향상을 위

한 열변형 제어에 대해 수직형 머시닝센터의 경우, 기계 구성상 주축대가 컬럼 앞면에 돌출되어 있기 때문에 열적 요소로서 주축대, 컬럼 각 부분에서 각각 1차 지연계의 단순한 열변위 패턴을 나타내고 있으나 이러한 열적시정수 및 구속상태가 틀리기 때문에 주축, 테이블사이의 상대적 열변위는 매우 복잡한 거동을 나타내게 된다. 실제 일본의 大阪機工(株) 등에서는 머시닝센터 전용의 열변위 보정제어장치는 기계에서 광범한 열변위 측정 데이터를 기초로 주축대의 자켓 냉각에 의한 유온, 유량제어와 함께 주축대 온도변화율에서 외부 보정을 이용하여 위치보정을 행하고 있다. 이것은 머시닝센터 기동시 실온을 냉각유 설정치로 유온을 고정하고 주축회전수 및 기계본체 온도변화에 따라 냉각유량을 제어하고 있다. 이 방법에서 열변위의 급격한 변화를 완화시키고 주축대의 온도 변화율에 따라 외부 보정치를 입력시키고 있다. 기계본체의 온도 변화율에 대한 외부 보정량의 크기는 각 기종마다 열변위특성을 충분히 파악하여 여러단계의 최적 파라메타를 설정하고 있다. 이에 따라 실온이나 가동조건의 변화에 좌우되지 않고 고정도의 열변형제어가 가능하다. 제어결과는 3,500rpm, 9시간 연속운전에서 Y축은 보정하지 않는 경우 50 μ m의 열변위 생겼으나 보정장치에 의한 보정으로 $\pm 10\mu$ m 이내의 보정정도를 얻고 있다.

이와 같이 주축대의 온도변화를 유온자켓냉각 등에 따라 억제시키면 상당한 가공정도의 향상을 기대할 수 있고 비용도 그다지 높지 않기 때문에 이 방법이 범용의 경우 넓게 사용된다. 유온제어에 의해 주축대의 온도제어는 일종의 간접제어이며, 주축대의 냉각에 필요한 냉각액의 온도를 일정하게 유지하는 방법이다. 공작기계의 주축대를 자켓냉각하는 경우 on/off 온도제어를 행할 경우 필요냉각유량 과 냉각조작에 대한 전달함수에 의한 제어방법이 사용되고 있다. 이 방법은 발열량이 적고 냉각부의 열저항이 적은 주축대에서는 충분히 온도변화를 억제할 수 있다. 일반적으로 자켓을 설치할 수 있는 주축대의 스페이서가 제

약되어 있기 때문에 열저항은 크게되고, 특히 고속의 경우 발열량이 단시간에 크게 변동하는 공작기계에서는 간접제어방식으로 기계본체의 온도변동에 적절히 대처할 수 없다. 유온제어는 유온을 측정하여 제어하는 반면 주축대의 온도를 직접 검출하고 제어하는 방식인 직접온도 제어방식이 제안되었다. 이것은 냉각효과가 좋은 프레온 냉매가스를 직접자켓에 순환시켜 주축대를 제어하는 방식이다. 냉각매체를 기름으로 이용한 경우 열전달율 $\alpha_0=30\sim 100\text{Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 정도이고 프레온은 $\alpha_f=1,000\text{Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 전후로 매우 크므로 동일 면적내 자켓을 사용하는 경우 열저항은 간접제어 방식에 비해 1/10이상 작게할 수 있다. 직접냉각 방식을 적용한 예로서 냉매로서 R-144를 사용하였고 제어방식은 ON-OFF 제어를 적용하고 있다. 다음 그림2에서 유온제어에 의한 간접제어방식과 프레온에 의한 직접제어방식의 예를 나타내었다.

수평형 머시닝 센터에서는 수직형에 비해 열변위 오차요소는 비교적 간소화되어 주축 노즐부의 단순 팽창과 컬럼의 휘어짐 등 2가지로 볼 수 있다. 주축 노즐부에 대해서는 열팽창량을 직접 측

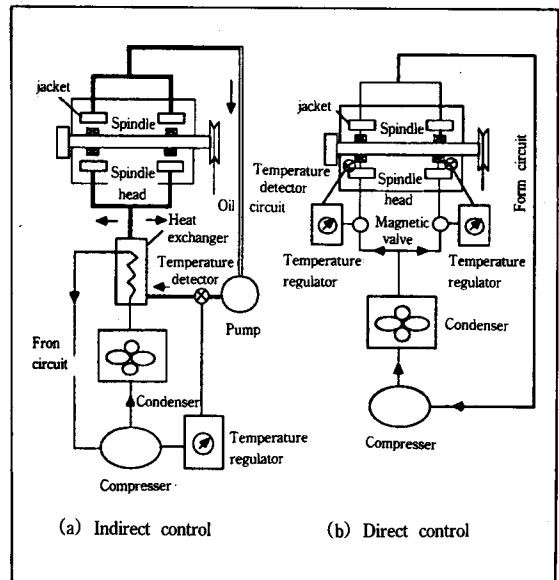


그림 2. Comparison With indirect temperature control and direct temperature control

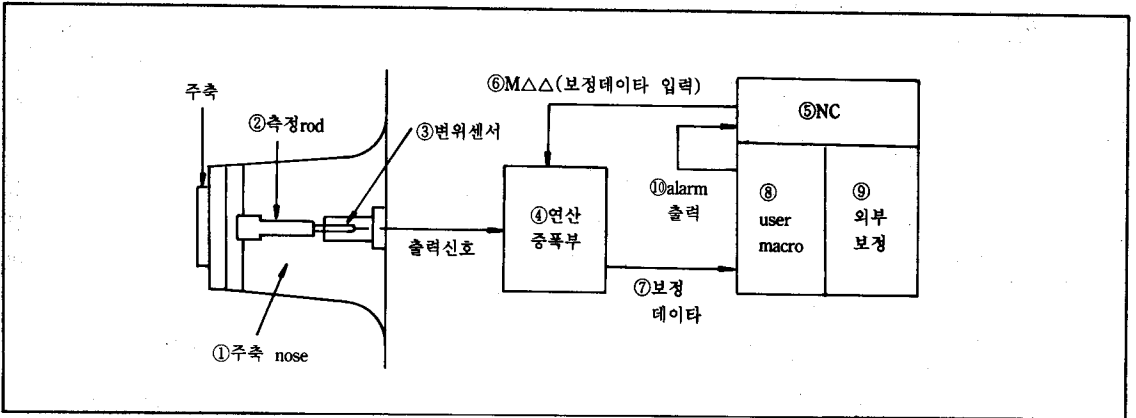


그림 3. 주축늘어남 보정장치의 구성(大阪機工)

정하여 위치를 보정하는 주축 신장 보정장치를 구성하고 컬럼의 휘어짐은 컬럼 상단의 휨량을 레이저 반사경을 이용하여 컬럼 배면에 열전소자에 의해 가열 또는 냉각을 행하고 있다.

그림3은 주축 신장 보정장치의 구성을 나타낸 것으로 주축 회전시의 발열이나 실은 변동에 의한 주축 노즐부의 신축량을 차동 트랜서로 검출하고 외부 보정 입력 데이터로 주축(Z축)방향의 위치보정을 행하여 위치보정정도 $\pm 2\mu\text{m}$ 이내로 제어하고 있다.

지능화의 관점에서 인공지능의 한 분야인 신경회로망(Neural network)의 특성인 영상, 음성인식, 적응제어 등에 탁월한 성능을 보이고 있어 이의 연구결과가 최근 발표되고 있다. 신경회로망의 특징으로 한번에 한 두가지의 연산을 순차적으로 수행하는 기존의 컴퓨터 정보처리 방식과는 달리 수많은 뉴런(neuron)에 분산 저장되는 정보가 동시에 처리될 수 있는 병렬처리방식과 연산기억능력, 고장극복의 특징이 있으며 특히 가장 중요한 학습능력을 통하여 공작기계의 열변형을 보정할 수 있다. 가공중의 공구와 공구물사이의 상대 열변위를 기계 각부의 온도측정 정보를 기본으로 하여 고정도로 예측 보정하는 방법이 시도되었다. 즉 수직형 머시닝센터를 대상으로 신경회로망을 응용하여 주축을 무부하회전시키고 열변위를 예측하였다. 예를 들어 그림4는 공작기계 각부의 대

표적인 측정점을 입력으로도 신경회로망의 모델을 나타낸 것이다. 그 결과 3층 신경회로망 모델을 이용하여 Y축 및 Z축방향의 변위량, Y-Z평면 경사의 3종류의 변위량을 예측 가능하게 되었다. 이와 같이 여러가지의 가공조건하에서 실험데이터를 동시에 이용하여 네트워크(network)의 학습을 행하는 것에 의해 예측정도를 향상시킬 수 있으며 더욱 학습하지 않은 조건에서 변위량의 예측도 가능하게 되어 NC기능에서 보정하여 열변형을 제어할 수 있는 방법이 제시되었다. 더욱 고정밀한 예측을 위하여 컬럼 뿐 만아니라 주축, 테이블 등 측정점을 증가시켜 예측보정에서 신뢰성 향상과 이의 학습제어를 통해 열변형을 줄이는 연구가 필요하다.

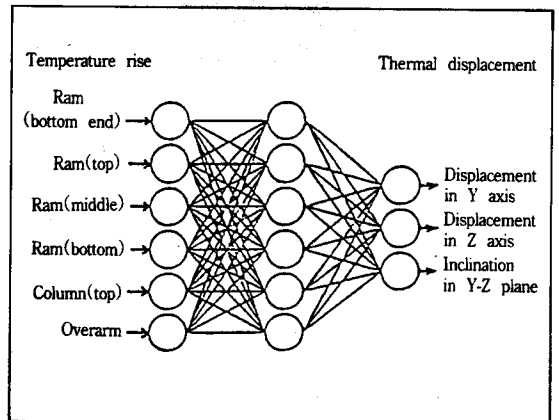


그림 4. 제안된 neural network model

4. 결 언

공작기계의 생산성을 향상과 고정도를 유지하기 위해서 각종의 열변형 대책이 제시되었다. 특히 주축대의 열변위는 가공정도에 중대한 영향을 주기때문에 최근의 공작기계는 유온제어에 따라 주축대의 열적안정을 도모하는 경우가 많다. 프레온가스에 의한 직접냉각방식은 냉각효율은 매우 좋으나 프레온은 현재 환경문제로 사용하기가 어려우므로 환경오염이 없는 새로운 냉매가스가 나오고 있지만 구입, 가격, 냉매가스의 종류별 특성 등 많은 제약조건이 따르기 때문에 적절한 냉매 구입 및 설치가 용이하지 않다. 앞으로 냉매가스의 여러조건이 좋아지게 되면 점차 사용이 많아지리라 생각하며 이의 연구도 필요하다.

공작기계 온도제어방식은 주축계에서 타코제너레이터(tachogenerator)에 의한 주축 속도제어, 이송계에선 레졸버(resolver) 등에 의한 이송속도, 위치제어, 구조계에서 변위에 대한 자동계측 보정에 의한 위치오차 보정, 가공위치에 대해 자동계측에 의한 위치오차보정, 가공프로세서에 대해 인프로세서 계측에 의한 형상치수 적용제어, 가공품의

자동계측에 의한 가공오차 보정 등을 각각 또는 단계적으로 행할 수 있을 것이다. 이러한 보정은 기계본체의 위치오차 뿐 만아니라 기계 이외의 오차요인, 피삭재의 전가공에 의한 오차나 장착에 의한 보정도 가능할 것이다. 새롭게 제안된 신경회로망을 이용한 열변형 제어기술이 제안되었고 인공지능을 응용한 열변형 예측과 제어 등 새로운 열변형제어 방법이 금후 더욱 많이 제안 될 것으로 예측되며 이의 연구개발에 한층 노력이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 李奉珍 著, 最新工作機械講義, 電設文化社, 1983
- 2) 西村直禎, “マシソグセンタの熱對策設計”, 機械技術 第37卷 第9號, 1989
- 3) 千輝淳二 외 3人, “工作機械の溫度制御に關する研究 (第2報)”, 精密機械 50卷 6號, 1984
- 4) Toshiminchi Moriwaki & Chenghe Zhao “Neural network approach to identify thermal deformation of machining center”, Proceeding of 8th International IFIP WG5.3 Conference, PROLAMAT '92, June, Tokyo, Japan