

공작기계기술의 현재와 미래(6)

강 철 희*

Machine Tool Technology; The Present And The Future (6)

C. H. Kahng*

강좌 시리즈 차례

- | | |
|---------------------|----------------------------------|
| (1) 서론 | (11) EDM, Laser 가공 공작기계 |
| (2) 공작기계의 고속화와 고성능화 | (12) CNC 컨트롤의 발전 |
| (3) 고속MC의 Tooling | (13) 공작기계의 새 개념(VARIAX, HEXAPAD) |
| (4) 공작기계의 정밀화 | (14) 측정, Sensing 기술 |
| (5) 공작기계의 동적 특성 | (15) CAD/CAM/CAE 와 공작기계 |
| (6) 공작기계의 열적 특성 | (16) 공작기계의 성능 평가 |
| (7) CNC-선반의 현재와 미래 | (17) Metal Forming 공작기계 |
| (8) 머시닝 센터의 현재와 미래 | (18) 생산시스템(FMC, FMS) |
| (9) CNC 연삭 공작기계 | (19) 미래의 생산(CIM, IMS) |
| (10) 초정밀 가공 공작기계 | (20) 한국 공작기계의 갈 길 |

6. 공작기계의 열적 특성 (Thermal behavior)

6-1. 서론

공작기계의 가공 정밀도에 영향을 주는 주요 요인은 정적특성(Static behavior), 동적특성(Dynamic behavior), 그리고 열적특성(Thermal behavior)에 있다는 것은 이미 언급한 바 있다. 열적영향으로 인한 정밀도를 안정시키는 완전한 해결책은 아직 발견되지 못하고 있다. 그 이유는 공작기계 자체뿐만 아니라 부품들이 복잡하고 공작기계의 내부, 기계와 주위환경사

이에 복잡한 열적상호작용이 존재하고 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 공작기계에는 더욱 높은 생산능력과 가공정도에 대한 요구가 점점 커지고 있다. 과거 40년간에 걸쳐 공작기계의 열적거동에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔지만 일반적으로 적용하여 만족할 만한 열적 불안정의 해결책은 아직 나오지 않고 있으며 단지 여러가지의 기계구성요소, 즉 Spindle, Column이나 Bed와 같은 본체의 구조나 Table이나 Slide에 대해서 열적 최적화를 얻는 노력이 집중적으로 행해지고 있다. 공작기계의 열변형에 대한 연구는 1950년대부터 시작되

* 統一重工業(株) 전무

있으며, 선반이나 연삭기의 열변형 측정기술과 해당하는 설계변경방법 그리고 냉각을 함으로서 열적 불안정을 극복시키는 방법이 주요 연구과제였으나 1960년대 후반에는 구성요소의 온도분포와 열의 흐름에 관한 수학적 모델을 만들어 해석적 수법으로 열적 거동의 연구가 행하여졌다.⁽¹⁾

그리고 열적문제가 공작기계의 경제적측면에 상당한 영향을 미치고 있다는 것은 분명하며 여러가지 열원의 존재와 이것들의 상관관계 및 가공과 측정 정도에 미치는 영향에 대하여 정리를 했으며⁽²⁾ 절삭공구의 열팽창과 선반을 대상으로하여 열변형의 설계측면에서 본 대책을 논하였다.⁽³⁾

1970년부터는 열에 의한 가공오차의 기본적 발생기 구 소위 가공정도 모델(Thermal Efficiency Chain)이 고려되었고,⁽⁴⁾ 컴퓨터 기술의 진보와 더불어 기계구성요소내의 온도 분포와 그것에 따르는 열변형의 계산이 Finite Element Method(유한 요소법)⁽⁵⁾이나 수치 계산법에 의해서 가능하였다.⁽⁶⁾ 이 시기에는 공작기계의 핵심구조인 Bearing spindle system을 취급하게 되었고, 그 System의 열거동을 집중적으로 연구하였다.

1970년 후반에서는 열적 거동의 Mechanism을 규명하게 되었고 열변형 대책에 대한 개념이 정립되었다.⁽⁷⁾ 이 시기에 열전달에 대한 정확한 지식을 구비하게 되었다고 볼 수 있다. 1970년대에 들어서 널리 보급되기 시작한 NC 공작기계에 대하여 새로운 측면에서 고려하게 되었고, 절삭공구를 적절히 수정함으로써 열변형의 보상을 하게 되었다. 그 외에 변형보다도 온도의 측정 방법이 쉬워져서 기계의 특정 위치의 온도와 열변형의 관계에 대한 연구가 실시되었고, 열 때문에 발생한 오차 및 Finishing된 부품의 정밀도를 고려한 품질관리 방법이 고안되기도 했다.⁽⁸⁾

1980년대에는 열변형을 적게하기 위하여 구조요소에 비금속 재료의 사용을 고려하게 되었다. 고분자 Concrete를 Frame 구조에 사용하여 어느 정도의 성과를 얻었고⁽⁹⁾ Plastic이나 Ceramics을 사용하여 공작기계 기술에 새로운 개념이 도입된 것이다.⁽¹⁰⁾ 이와 같이 혁신적인 개념이 도출되었지만 정통적인 기술 다시 말해서, 열전달을 정확하게 계산하는 방법, 제어 방법 그리고 열적 거동의 기구에 관한 여러 인자의 정수, 센서의 개발 또는 열변형에 대한 보상(Compensation)방법 등은 아직 충분하다고 볼 수 없다.

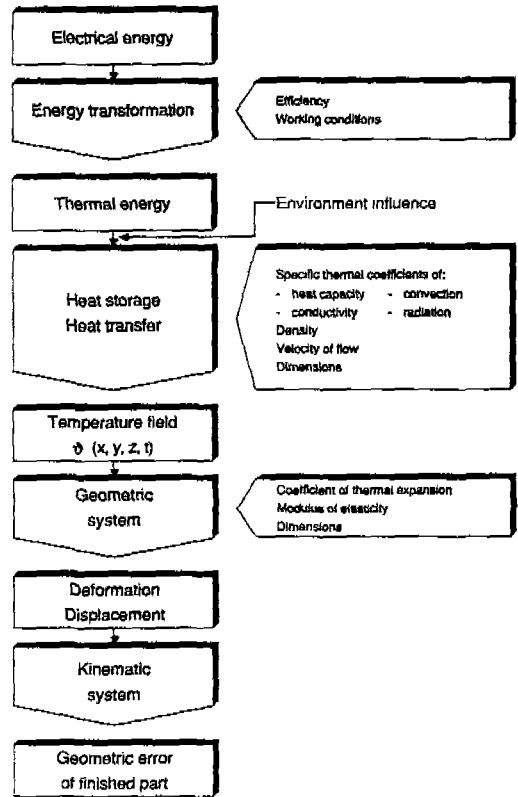


Fig. 6-1 Thermal efficiency chain, showing the machine tool regarded as a thermal system

먼저 공작기계의 설계를 통하여 열변형을 최소화하는 것이 가장 경제적인 방법이지만 장래의 공작기계가 요구하는 높은 가공 정밀도를 실현하려면 별도의 대책을 강구해야된다. 그러나, 현재로서는 가공공정중에 발생하는 열적변동을 최소로 억제하는 기본적인 방법은 구조설계에 있다는 것을 강조하고자 한다.

6-2 열적가공정도 모델(Thermal efficiency chain)

Spur교수⁽¹¹⁾가 제시한 모델을 보면 공구와 공작물의 상대변위 즉 열이 가공 정도에 미치는 영향은 다음과 같은 프로세스로 요약할 수 있다.

Fig. 6-1에서 보는 바와 같이

- 1) 공작기계에 들어간 모든 전기 Energy가 열 Energy로 변환한다.
- 2) 모든 구성요소에서 일어나는 열전달과 축적이 발생한다. 이 때 구성요소내에 있어서의 열 Energy 흐

름의 합계는 그 기계의 효율, 전기효율 그리고 가동 조건에 따른다.

3) 주변환경에서 오는 열 Energy 때문에 얻어지는 열적인 부하가 올라간다.

4) 구성요소내에서 일어나는 시간과 위치의 함수로 되어있는 온도 Field(장)가 형성된다.

5) 열용량, 열전도율 및 밀도와 같은 특정한 재료의 정수, 기하학적 치수 그리고 열의 흐름, 복사에 따른 열 전달에 관계되는 정수에 좌우되어 온도변화가 일어난다.

6) 온도장에서 열변형이 일어난다. 일반적으로 그 열변형은 인접하고 있는 구성요소에 의한 기계적인 구속을 얻게되므로 최종적의 변형 상태는 각 요소의 열팽창 계수뿐만 아니라 그 탄성계수와 기하학적 치수에 영향을 받게된다.

7) 각 요소의 변형은 기계의 소조립(Subassembly)의 변형이 되고 절삭점에 예상치 못한 공구 또는 공작물의 움직임의 일으킨다. 이 움직임의 절삭 방향 성분은 완성부품의 형상(Form)과 치수(Size)에 대하여 일차적인 오차를 발생시킨다.

공작기계의 열적거동은 이와같이 열적가공정도 모델에 대해 충분한 배려를 하면 개선할 수 있다.

6-3. 열적거동의 최적화(Optimize)대책

열적거동을 최적화하여 공작기계의 가공정도를 향상시키는 방법은 Fig. 6-2에서 보는 바와 같이 다수 있으나 그것을 크게 나누어 두개 Group으로 구분할 수 있

다.⁽¹¹⁾

1) 열적으로 적합한 설계를 하여 구조적인 최적화 (구조 설계상의 대책)

2) 열에 의해서 발생하는 가공오차의 보상 (Compensation)에 기술에 의한 대책)

여기서 구조설계상의 대책에서는 가공오차의 발생 원인을 최소화하는 방향으로 나아가야 한다. 그러나, 보상기술에 따르는 대책은 공작물에 미치는 열변형의 영향을 감소시키는 방향으로 나아가간다. 구조 설계상의 대책은 특별한 장치나 추가 Energy가 불필요하며 부가적인 Cost는 거의 없거나 혹은 매우 작기 때문에 항상 최우선적으로 고려되어야 한다. 그러나, 실제의 구조 설계상 대책으로는 완전히 열의 영향을 제거할 수 없으므로 때에 따라서는 보상기술을 사용해야 한다. 이와 같은 대책은 공작기계 제조업자들이 공작기계를 제조하는 기간동안에 할 수 있으므로 공작기계를 개선하는데 매우 좋은 수단이다. 일반적으로 금속을 가열하면 열팽창이 일어나는데 열변형 Δl 에 미치는 각 인자의 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같다. 즉,

$$\Delta l = \frac{Q \cdot \beta \cdot l}{\alpha_k \cdot A} \left(1 - e^{-\frac{\rho C_p V}{\alpha_k \cdot A}}\right)$$

여기서 Q는 열량, l은 길이, A는 단면적 체적 V, 재료의 선정에 따른 정수 ρ , C_p 그리고 β 는 변할 수 있고 α_k 는 열전달 상태로서 정해진다. 더욱 간단히 표현하면 열에 의한 Size의 영향(자유팽창량)은 다음과 같다.

Optimization of Thermal Behaviour					
Design Measures to Reduce				Compensation	
Heat Flow	Temperature Difference	Deformation	Displacement	with Auxiliary Energy	without Auxiliary Energy
Heat Sources - cooling - external placement - insulation - increase efficiency Chips - remove Coolant - tempering Environment - air conditioning - inhibit radiation	Heat Transfer - increase coefficient - increase surfaces Material - low thermal conductivity - high storage capacity	Material - low coefficient of thermal expansion - increase static stiffness	Direction - balanced thermal construction - counter-acting displacements - vectors of displacements tangential to working plane	Temperature Control - cooling - heating	Measurement - temperatures - displacements Calculation - displacements

Fig. 6-2 Measures for optimizing thermal behaviour

$$\Delta l = \alpha * l * \Delta t$$

여기서 l :재료의 길이, Δl :재료의 팽창,
 α :재료의 선팽창 계수/°C,
 Steel은 $1.15 * 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, Δt :변화한 온도
 길이 100mm의 Steel bar는 온도가 1°C 상승하면 1
 μm , 10°C 상승하면 10 μm 가 길어진다.

6-4. 설계에 의한 열적거동을 해결

매우 효과적인 대책은 주구동장치, Gear Box, 또는 유압 Unit와 같은 열원을 공작기계와 떨어지게 설치하는 방법인데 이렇게 하므로서 Unit로 부터 오는 열의 유동과 복사에 따르는 전열양은 직접 접촉하고 있는 기계 구성요소간의 열의 유동에 비해서 매우 무시할 수 있을 정도로 적기 때문에 매우 효과적이다. 이것은 Thermal efficiency chain 중 상부에 속하는 해결책이며 우선적으로 고려해야할 원칙이지만 언제든지 실천에 옮길 수 있는 방법은 되지 못한다.

예를 들어 머시닝 센터의 주구동장치는 주축에 직접 연결되어 있는 주축과 이송장치의 Bearing, Guide-way, Hydraulic cylinder 등은 기계 외부에 이동시킬 수 없다. 이와 같은 경우에는 순환하는 냉각 System을 설치하여 열을 그 발생점으로부터 이송시켜야하고, Oil, Water 또는 Emulsion과 같은 냉각액을 열 이송용 매체로서 사용한다.

그 예를 Fig. 6-3(a), (b), (c)에서 볼 수 있다. Fig. 6-3(a)에서는 고정도를 요구하는 머시닝 센터는 기계를 설치한 공장의 환경에 그 정밀도가 크게 좌우되므로 실내온도가 급변할 때나, 실내 공간의 상부와 하부의 온도차가 심할 때나 천장과 벽에서 복사열의 영향을 받아 공작기계 내부는 항상 열적평형이 되풀이된다. 주요 소인 Bed, Column 등에 Oil jacket을 만들어 기준온도 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 콘트롤된 Oil을 강제순환을 시켜 기체가 외부의 변화에 의해서 급격히 변형되지 않게 제어한다. Fig. 6-3(b)에서 보는 것은 Bed의 열전도를 방지시키기 위해서 Cover를 만들어 이중구조로 Bed를 보호하여 열을 가지고 있는 Coolant나 Chip이 직접 Bed위에 떨어져 열변위를 일으키는 것을 방지하고 있다. Fig. 6-3(c)는 주축 모터에 발생하는 열이 Spindle head에 전달되어 거기에서 열변위를 일으키면 가공정밀도를 떨어뜨린다. Spindle head와 모터 브라켓(Bracket)를 씌워서 Oil jacket을 만들고 냉각 Oil을 순환시켜

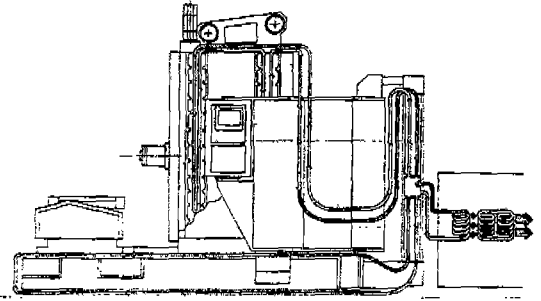


Fig. 6-3 (a) Yasda's cooling system in MC structure

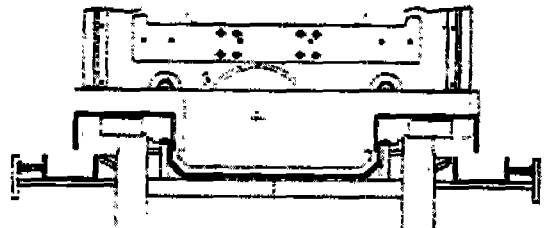


Fig. 6-3 (b) Protection cover over bed

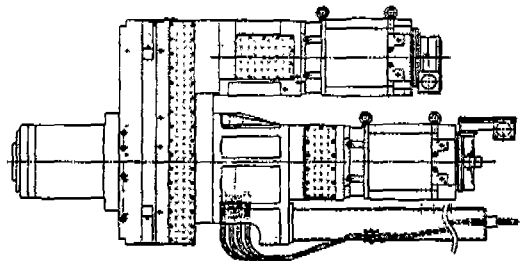


Fig. 6-3 (c) Oil jacket for cooling of Spindle head and motor

Spindle head의 열변위를 방지하여 고정밀도를 유지하고 있다. 그 외에도 Ball screw bracket에 Oil jacket을 만들어 냉각 Oil을 순환시켜 Thrust bearing에서 발생하는 열 때문에 발생할지 모르는 기계본체의 열변위를 방지하고 있다.

이와 관련된 연구논문에서는⁽¹²⁾ 문형 머시닝 센터를 모델로 하여 실내온도가 하루동안 계속 변하는데 이것이 원인이되어 기계 내부의 열변위를 일으키고 있다는 것에 착안하여 공작기계 구조의 Column과 Cross rail section에 Balancing board를 부착하고 Model은 Solid 요소로서 요소 분할을 하여 FEM을 사용, 실온변동에 따른 Model의 온도 부분의 계산, 열변형 계산을 하였다(Fig. 6-4). 해석에 있어서는 구성 재료의 밀도, 비열, 열전도율, Young율, Poisson비, 선팽창

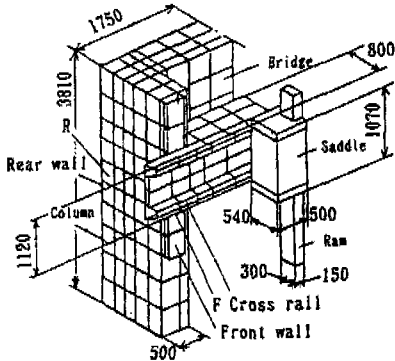


Fig. 6-4 Mesh for FME of machining center

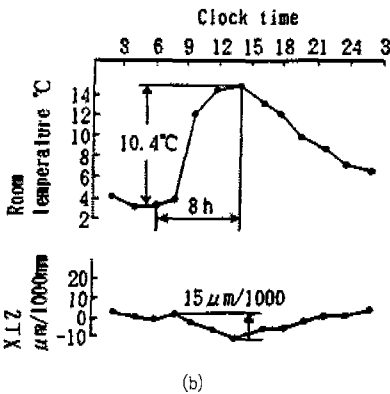
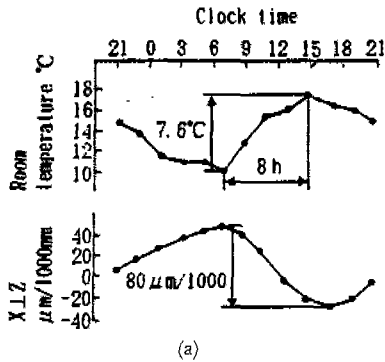


Fig. 6-5 Thermal deformation of machining center without (a) and with (b) thermal balancing board

울등의 물성치를 사용하였다. 이 모델을 이용하여 계산한 Board의 Thickness를 조정하여 수축이 Z축운동과 Table의 X축 운동과의 직각도가 90이하로 저하시킬 수 있다. (Fig. 6-5(a),(b))

생산 시스템의 기능 구성에 있어서 모든 열원이 균등하게 분배, 배치되어 있지 않기 때문에 Subassembly된 부품이나 구성요소사이의 부품간에도 항상 온도 구배(Slant)가 발생한다. 이 구배를 최소화하기 위하여 특별한 Heat pipe를 사용하여 주축의 각도 변위를 70% 감소시킨 바 있다. (Fig. 6-6)

6-5. 신소재를 이용하여 해결

비금속재료는 강철 또는 주철에 비하여 바람직한 특성을 가지고 있기 때문에 공작기계 제조에 있어서 그 중요성이 증가하고 있다. 예를 들면 Polymer concrete는 그 우수한 동적 성능 때문에 공작기계의 여러 요소로서 최근에 사용되고 있다. Modulus of elasticity가 주철보다 적기 때문에 Concrete 재구성요소의 단면적은 크게 해야 하지만 구성요소의 Thermal inertia(열강성)이 크기 때문에 실내온도의 변화에 대하여 있점이 있다. Concrete의 적은 열전도율은 국부적으로 고온을 발생시켜 그 결과 주철체보다 큰 변형을 일으킨다. 그렇기 때문에 Concrete를 사용할 때는 온도의 균등화 대책을 세워야 하는데 대책으로서 순환 냉각 System의 채택이 추천되고 있다. Heat pipe로 부가적인 냉각을 하여 주축변위를 대폭 감소시키는 효과를 얻고 있다. 공작기계에 널리 사용되고 있는 비금속 재료로서 Fibre reinforced plastic(FRP)을 꼽을 수 있다. 이 재료는 저밀도와 고강도에 의해서 특히 고속도 또는 고가속도하에서 구성 요소에 유리한 경량 설계에 적합하다. 예를 들면 고속공작기계의 Table, Slide 또는 주축 Head는 이 FRP로 제작할 수 있을 것이다. 이상 설명

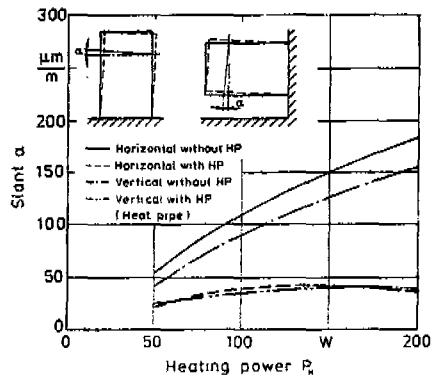


Fig. 6-6 Reduction of the slant of an experimental spindle by the use of heat pipes

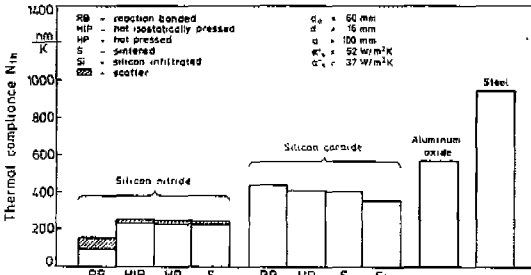


Fig. 6-7 Calculated thermal compliance of a spindle overhang section made of different materials /32/

한것 외에 적은 열전도율 (Low thermal conductivity)은 환경 온도의 변화에 대하여 기계를 열적으로 안전한 것으로 만들고 있다. 또 탄소나 Aramid fibers의 Reinforced plastics는 적은 열팽창율의 구성요소로서 예를 들면 축방향 열변위가 Zero에 가까운 주축이 제조된다는 것이다. 그러나, FRP는 재료비가 비싸고 윤활유 또는 냉각재와 같은 액체가 재료의 표면에 침투하기 쉽고해서 기계적 강도를 저하시킨다.

전술한 복합재료 이외에 최근 공작기계에 Ceramics가 차지하는 역할이 점점 커져가고 있다. FRP와 비교하면 Ceramics는 높은 기계적 강도, 내마모성, 표면을 정밀하게 가공할 수 있는 성질, 금속부품과 잘 접합할 수 있는 성질등이다. 최근에 개발된 Silicon carbide, Silicon nitride 그리고 Aluminium oxide 등의 고강도 재료들이다. 이 재료들은 열 전달율, 열팽창율이 적으나 고강도의 특성을 가지고 있으므로 정밀 공작기계의 주축재료로서 적합하다. Fig. 6-7에 여러 종류의 Ceramic으로 제작하여 주축 끝에 일어나는 Thermal compliance를 Steel과 비교한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 Silicon nitride와 Silicon carbide의 경우 그 제조과정에 따라서 조금씩 다른 열적 성질을 가지고 있으나 반응접착형 (Reaction bonded) Silicon nitride가 제일 적은 Thermal compliance를 표시하고 있다. Video나 Computer의 고정 Disk의 생산에서 볼 수 있듯이 「정밀」과 「품질」을 요구하고 있는 초정밀 선반을 전부 Ceramics로 제작하여 사용하고 있다. 이 기계의 구동력은 1.5kW이지만 가공 Space와 절삭동력은 매우 적다. 그 외에 Lens나 Mirror와 같은 광학 부품을 가공할 수 있는 초정밀 선반의 Bed는 Polymer concrete로 만들고, Table과

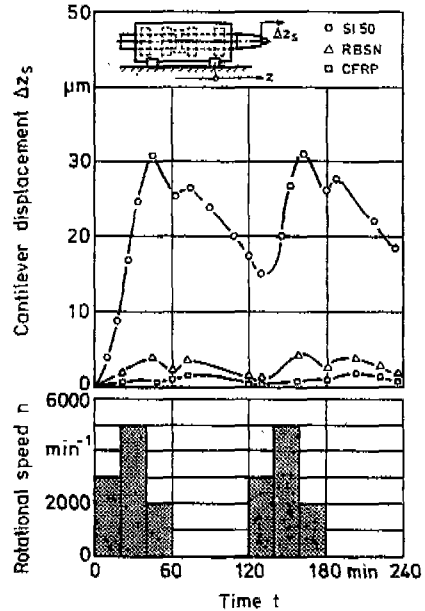


Fig. 6-8 overhang section displacement for three different materials

Spindle은 Aluminium oxide로 만들고 있다. 적은 열전달율은 온도변화에 대하여 기계에 높은 열적 안정성을 가져오게 한다. Fig. 6-8은 Thread grinding machine에 쓰이고 있는 Spindle을 실험한 결과이다. 이 Spindle unit에서 여러 회전수를 번갈아가며 일정한 시간동안 회전시킨 후 Spindle Cantilever의 변위를 측정된 결과 비금속 Spindle을 사용한 것이 Steel 재료보다 월등한 우수성을 가지고 있으며 Ceramic재의 Spindle은 전 최대변위를 1/7로 FRP재는 더 좋은 1/15로 감소된 것을 알 수 있다.

6-6. 주축계의 열특성 해결책

공작기계에 있어서 Spindle의 발열 대책은 가공정도의 향상과 기계 공장의 무인화등 가공기계나 기계 시스템의 성능향상 대책을 수립하는데 중요한 문제로 되어 있다. 여러 연구자들은 Rolling bearing을 사용하는 공작기계의 Spindle계가 열적 평형 상태에 도달할 때까지의 과도상태에서는 Bearing의 Ring 또는 전동체의 열팽창 구속에 있어서 발열량이 운전시간과 더불어 변화하고 특히 고속회전 할 때 Burning이 발생하는 경우가 생긴다는 것을 알고 있다. 또, Spindle의 구속과 강제냉각등으로 열변형을 억제하게 하는 대책을 취하면

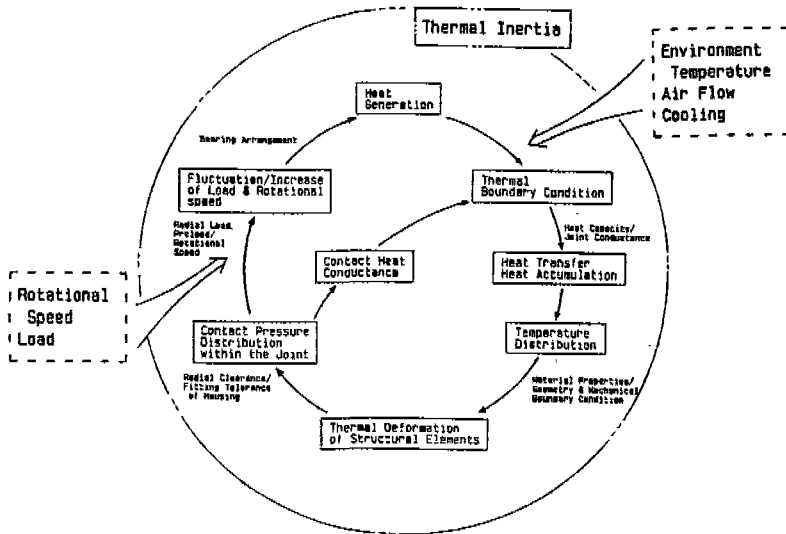
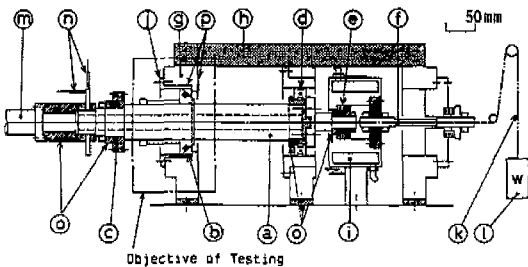


Fig. 6-9 Thermal loop concept

과도한 구속 또는 과도냉각을 일으켜 Spindle의 열적 System을 불안정화로 하는 경우도 있다. 따라서, 어떠한 조건하에서 회전하는 Spindle계를 열변형, 열원 그리고 열적 경계조건이 상호간에 영향을 주어가면서 변동하는 열적 루프 시스템 (Thermal-Loop concept) 으로서 파악하여 이 개념을 가지고 열변형 억제 대책을 검토할 필요가 있다. 일반적으로 Spindle계에 Rolling bearing을 사용한 역학적, 열적상태의 변화는 Fig. 6-9에서 보는 바와 같은 Thermal loop system 으로 Model화 된다.⁽¹³⁾ 즉, Bearing과 Spindle 또는 Bearing housing과의 초기 접촉 압력 및 초기 접촉

열 Conductance가 정해지고 반경 방향 및 축방향 하중이 가해지면 Bearing의 초기 부하가 된다.

이와 같은 특징을 가지고 있는 주축계에 얇은 Adapter를 장착시키면 초기 부하에 따른 Bearing Race의 구속이 적어져서 초기 마찰 모멘트가 저하되고 그 결과 초기 발열양도 적어진다. 또 운전 초기에 있어서는 Adapter 반경방향의 Clearance 때문에 Bearing의 열 팽창의 구속이 완화되어 Bearing의 발열도 억제된다. 그러나, 주축계의 열적 평행상태에 가까워지면 Adapter의 열팽창이 구속, 풀림이 되풀이되면서 접촉 상태와 열이 발생하는 상태가 역시 되풀이 될 것이다. 이 Adapter의 역할을 실험하기 위하여 Fig. 6-10에서 보는 바와 같은 실험장치와 Heat flux sensor (Fig. 6-11)을 준비하였으며 실험결과는 Thermal loop concept가 타당성이 있으며 Adapter 부착이 열변형완화에 효과가 있다는 것을 증명하게 되었다. 똑같은 Thermal loop concept을 사용하여 Bearing hous-



- Objective of Testing
- a. Main Spindle
 - b. Main Bearing
 - c. Driving Gear
 - d. Supporting Bearing
 - e. Thrust Bearing
 - f. Draw Bar
 - g. Bearing Housing
 - h. Casing
 - i. Cooling Water
 - j. High Speed Spindle Adapter
 - k. Wire Rope
 - l. Dead Weight
 - m. Slip Ring
 - n. Gap Sensor
 - o. Insulator
 - p. Heat Flux Sensor

Fig. 6-10 Test devices

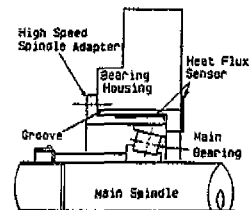


Fig. 6-11 Heat flux sensor

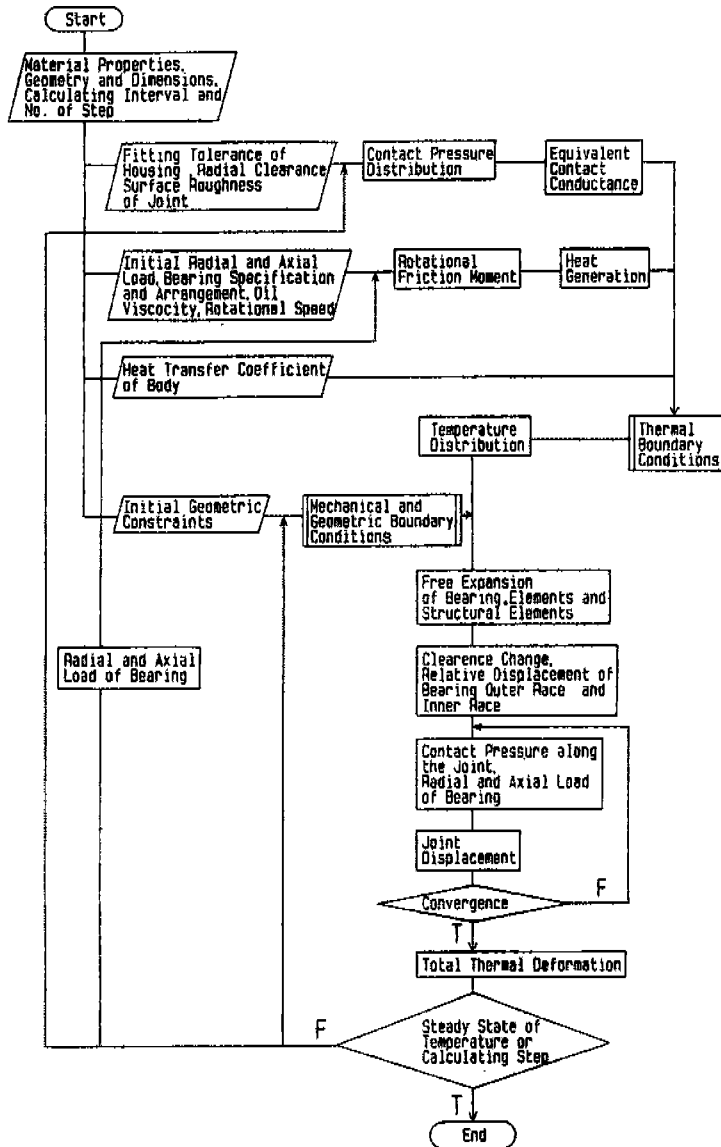


Fig. 6-12 Simulation flow chart

ing과 Quill 구조의 열적 특성을 규명하기 위하여 실험을 한 결과 Bearing의 종류 (이 경우는 Angular contact bearing과 Taper roller bearing의 두 종류)가 큰 영향을 주고 또 Bearing 주변 구조체가 열특성을 크게 변화시키기 때문에 주축계의 설계에 있어서 Bearing 종류, Bearing 주변 구조의 Combination에 충분히 유의해야 한다는 결론을 얻었다.⁽¹⁴⁾ 열적 루프 개념(Thermal loop concept)을 토대로 공작기

계의 열적 특성에 새로운 해석 방법을 확립시키기 위해서 주축계에 이 개념을 적용하여 Simulation 방법을 검토하였다. 이 때 주축계의 스프링 선단의 열변위를 Zero로 가정하여 즉, 가공 공간에 대한 주축 끝단의 위치에 변화가 없는 이상적인 조건하에서 그 구속력에 의한 Bearing 발열량의 변동에 주목하면서 Simulation 하는 방법을 제안하였다. (Fig. 6-12) 이 Simulation 방법으로 열변형억제에 효과적인 구조를 선정할 때 때

우 유효하다는 것을 확인하였고 종래 그 효과가 명확하지 못한 Bearing housing 및 Quill의 구조, 보강 Rib 등에 관한 열변형 역제의 관점에서 FEM을 사용 Simulation을 하였다.⁽¹⁵⁾ 이 Simulation을 사용하여 여러인들이 주축계의 열적 특성에 미치는 영향을 명백히 규명하였다. 이선규⁽¹⁶⁾는 동경공대에서 박사논문을 이 열특성 해결에 관한 연구를 하였으며, Fig. 6-13과 Fig. 6-14는 그 대표적인 연구결과를 보이고 있다. Spindle내부의 미세한 온도변화 상태를 잘 나타내고 있다.

6-7. 측정에 의한 보정 방법

어떤 작업 조건 하에서 발생한 열은 공작기계에 전도하여 각 부의 온도상승이 일어난다. 이 온도 상승에 따라서 공작기계의 구성 요소는 열팽창된다(강철과 주철은 1°C의 온도상승에 따라 1m에 대하여 10μm가 팽창한다.) 이 현상과 구조에 따라서 신장 (Elongation), 처짐 (Deflection), 비틀어짐(Twisting)등 여러 종류의 변형을 일으킨다. 이와 같은 열변형 속에서 정도에 관계되는 두 점간의 상대 변위가 작업 시간내에 발생하는 것이 가공 정도의 저하가 된다. 전술한 바와 같이 각 열원에 있어서의 발열양이나 분위기, 온도는 작업내용과

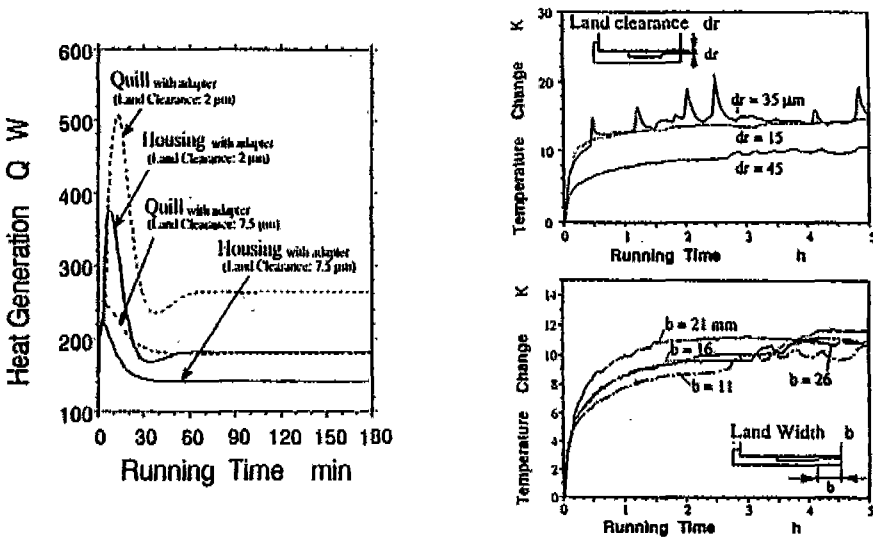


Fig. 6-13 Heat generation and displacement under high speed adapter

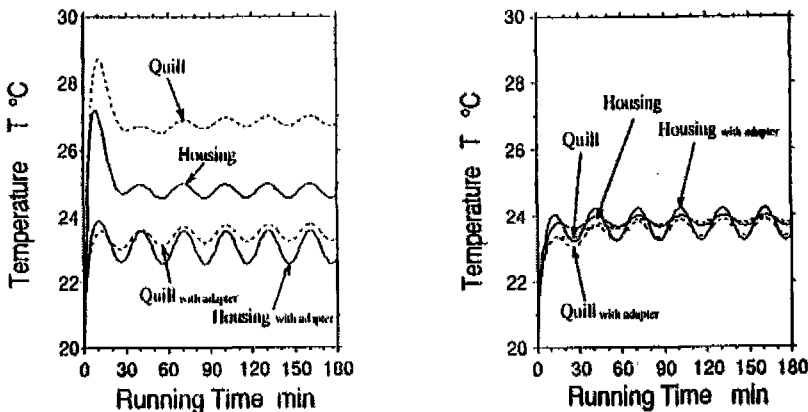


Fig. 6-14 Comparison of environment condition on temperature flow

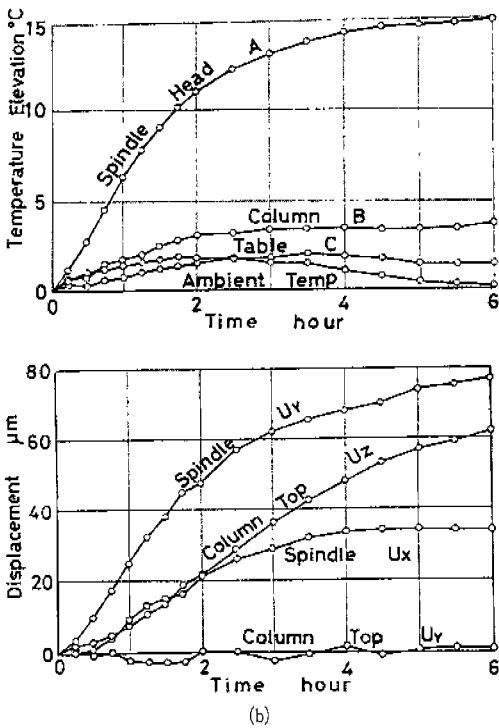
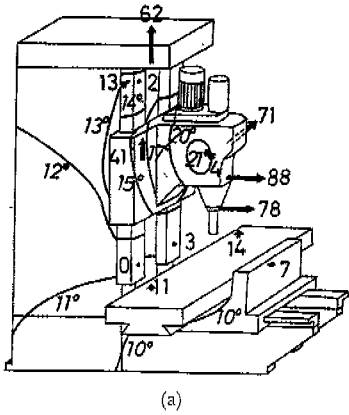


Fig. 6-15 Temperature elevations and thermal displacements measured under loadless operating condition at 1400 rpm spindle speed

시간의 경과와 더불어 변화하고 또 기계나 공작물의 열 용량에 따라 온도상승에는 시간차이가 발생하므로 열변형은 본질적으로 시간과 더불어 변화하는 비정상 현상이다. Fig. 6-15에는 1975년에 제조된 Vertical MC의

온도상승과 열변위를 표시하고 있다. 이 MC는 7.6ton 이므로 6시간을 연속운전한 뒤에도 Column 상부의 열 변위는 안정되지 않고있다. 또 이 MC는 Double Column 구조이므로 온도 분포는 좌우대칭으로 되어 있다. 그러나, 주축의 Slide는 구조가 대칭이 되어 있지 않으므로 주축은 Y축 방향에 매우 큰 열변위가 발생한다. 초기의 MC에 있어서는 주축 Bearing으로서 Taper roller bearing을 사용하고 강제 윤활을 하는 경우가 많았다. 이런 경우 윤활유를 유온냉각장치에서 실온 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 정도로 Controll하므로서 비교적 간단하게 열변형을 억제할 수 있었다. 그러나, 주축의 고속화가 진행되면 강제 윤활로서는 열량이 급속히 증대한다. 발열량은 회전수의 5/2승에 비례하면서 증대한다. 이것을 생각하려면 또다시 대량의 Energy가 필요하게 된다. 따라서 Bearing은 Grease로 윤활시키고 최근에는 (Air oil 윤활법 사용) Bearing 외부의 Housing에 Jacket을 부착하여 냉각액을 통하며 온도 제어하는 방법이 채택되게 되었다. 이 Jacket도 소형, 고속의 주축에서는 충분히 큰 열교환 면적을 확보한다는 것이 점점 어렵게 되어가고 있다. 무리하게 Jacket의 구조를 복잡하게하면 오히려 강성이 저하된 원인이 된다. Okushima⁽¹⁷⁾가 고안한 것은 MC 주축 Head의 온도를 검출하여 온도상승에 비례한 보정량을 Y축 방향으로 주면 가공정도의 저하를 막아주는 방법이다. (Fig. 6-16) 이 방법은 1차원적인 위치만을 보정하는 방법이다. 이 그림에서 보는 것은 보정장치 (Compensation network)를 통하여 온도의 신호를 특별한 열전대 (Thermocouple)로 검출한 것을 Feedback시켜 Y축 방향으로 Position을 보정시키는 방법이다. 이 보정방법은 매우 간단한 방법에 속하며 두 가지 Network가 가능하다. 사진(Broken line)으로 된 것은 Analogue 보정장치이고 AD(Con-

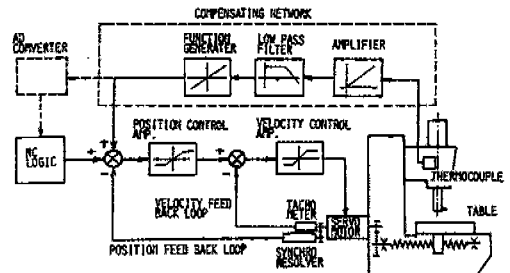


Fig. 6-16 Compensation network used in correcting thermal displacement

verter)를 추가로 System에 부착한 것은 Digital 보정장치가 되는 것이다. Fig. 6-17 상부는 가동시간과 더불어 증대된 열의 변위에 의해서 Hole의 Profile은 Center 위치가 변하고 있는 것을 보이고 있으나, 그림 하부에서는 Compensation한 후 Hole Center의 위치가 변위를 멈추고 있는 것을 보여 주고 있다. Fig. 6-18에서는 두 가지 회전 속도에서의 온도상승과 Spindle의 위치가 변위되는 관계를 표시한 것이다. 매우 직선적인 경향을 나타내고 있다. Fig. 6-19는 전술한 보정 장치를 사용하여 Spindle의 변위를 6시간동안 온전하면서 얻어진 절대치와 보정한 변위를 두번씩 반복하여 실험한 결과이다. 보정을 하지 않으면 변위가 거의 90 μm 에 도달하였지만 보정하므로써 평균 10 μm 이내로 그 변위를 축소시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다. Fig. 6-20은 전술한 바와 같이 Analogue signal로 측정된 결과이며 Fig. 6-19와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

6-8. 열변위 계산에 의한 보정 방법

Sata⁽¹⁸⁾가 연구한 것을 보면, 공작기계의 요소 또는 공구의 열변위를 정확한 계산방법으로 FEM등을 사용하여 산출하고 그것으로서 어떤 조건하에서 발생하는

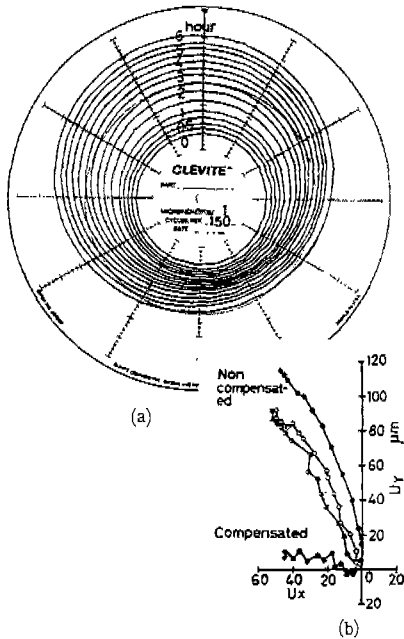


Fig. 6-17 Surface profiles of the cylindrical holes and the shift of their centers at 1400 rpm spindle speed

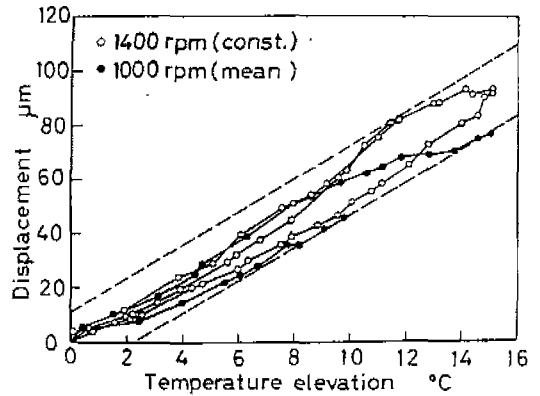


Fig. 6-18 Relationships between the temperature elevation of point A and displacement of the spindle

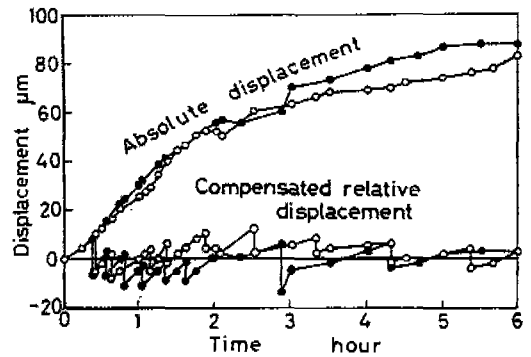


Fig. 6-19 Absolute and compensated relative displacements by digital compensation at 1400 rpm spindle speed

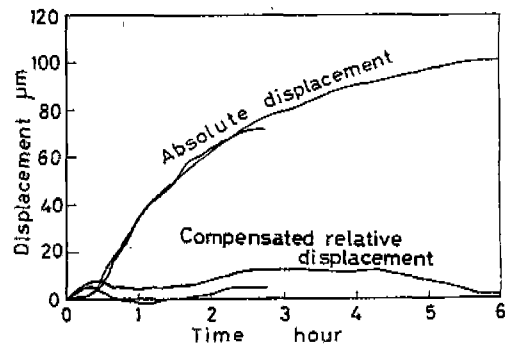


Fig. 6-20 Absolute and compensated relative displacements by analogue compensation at 1400 rpm spindle speed

열변위를 예측하여 그 값을 Controller나 Feedback할 수 있는 기계에 입력시켜 Compensation하는 방법을 제시하고 있다. 공구의 열팽창 α 는 열량 Q_s 와 시간 t 의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\alpha = f(Q_s, t)$$

Fig. 6-21에 명시된대로 열 Q_{s1} 과 Q_{s2} 가 주어졌을 때 온도 $\theta_{s1}(t)$ 과 $\theta_{s2}(t)$ 가 발생했다고 하면 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \theta_{s1}(t-t_1) & \text{ in A} \\ \theta_{s1}(t-t_1) - \theta_{s1}(t-t_2) & \text{ in B} \\ \theta_{s1}(t-t_1) - \theta_{s1}(t-t_2) + \theta_{s2}(t-t_3) & \text{ in C} \end{aligned}$$

열변위(Thermal displacement)는 열과 직선적인 관계가 있으므로 다음과 같은 상호관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha A &= f(Q_{s1}, t-t_1) & \text{in A} \\ \alpha B &= f(Q_{s1}, t-t_1) - f(Q_{s1}, t-t_2) & \text{in B} \\ \alpha C &= f(Q_{s1}, t-t_1) - f(Q_{s1}, t-t_2) + f(Q_{s2}, t-t_3) & \text{in C} \end{aligned}$$

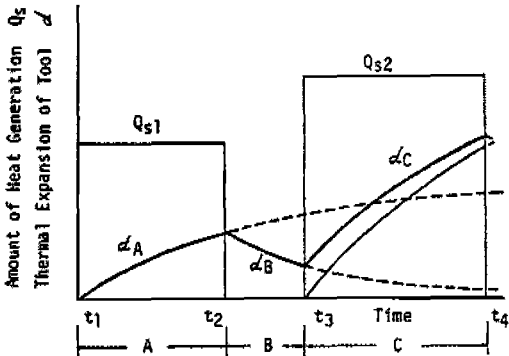


Fig. 6-21 Relation between amount of heat generation and the thermal expansion of tool

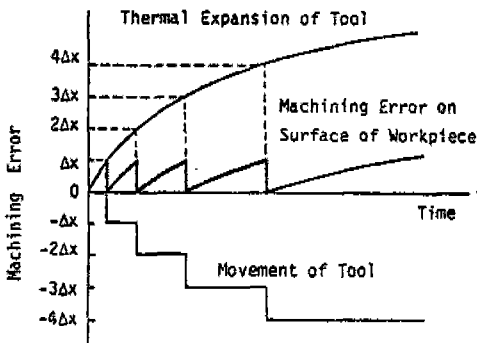


Fig. 6-22 Outline of compensation

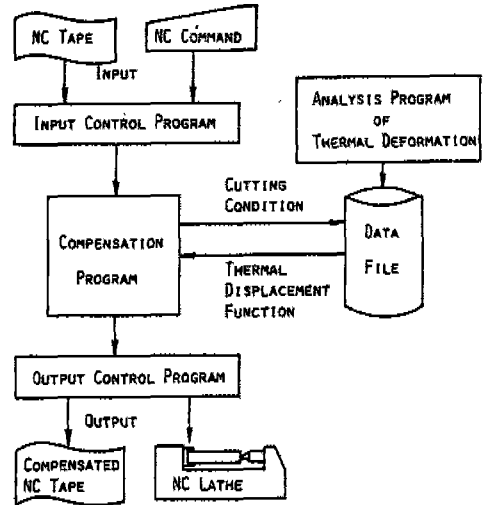


Fig. 6-23 Blockdiagram of compensation system

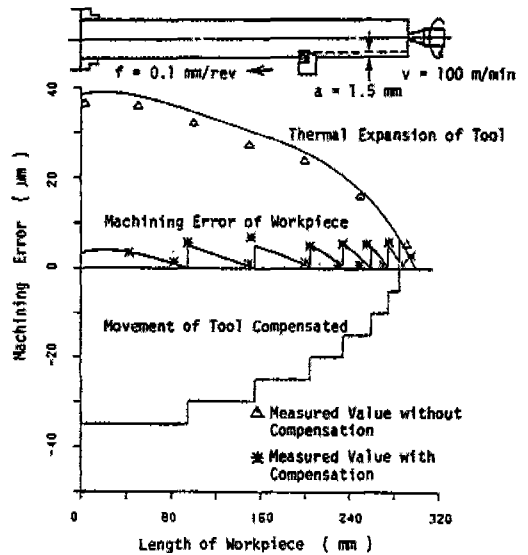


Fig. 6-24 Comparison between machining error with compensation and that without compensation

이와 같은 관계를 되풀이하면 공구의 열팽창을 어떤 절삭조건하에서 예측(Estimate)할 수 있다. Fig. 6-22와 Fig. 6-23에서 알 수 있듯이 가공 오차는 열팽창에 따르는 공구위치의 변동에 따르기 때문에 열변위 함수(Thermal Displacement Function)에서 얻어지는 신호를 보정 프로그램(Compensation Program)

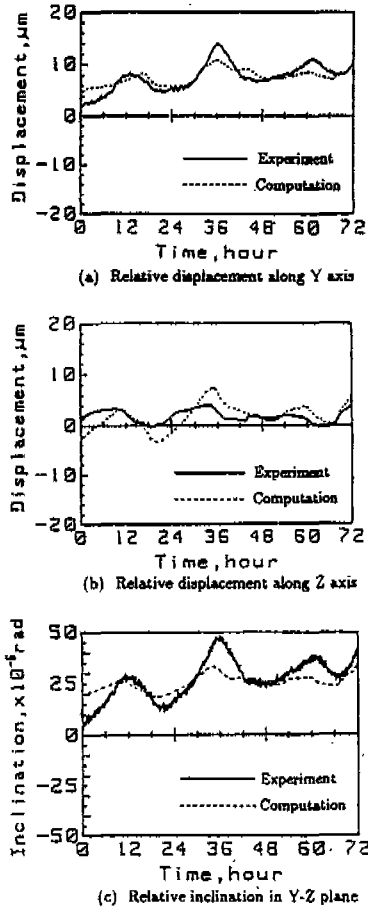


Fig. 6-25 Comparison of computed with experimented result

을 통하여 NC Control을 조정하면 Compensation이 성립되는 것이다. FEM을 이용하여 Thermal deformation of tool을 계산하였고 실험한 결과 이론과 실제가 잘 일치하고 있는 것을 보였으며 Fig. 6-24에서

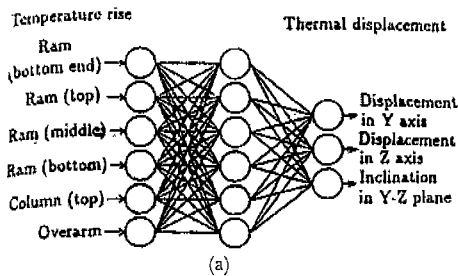


Fig. 6-26 (a) Neural network model

여러가지 실험한 결과 중 한 가지를 소개하였다. Compensation을 하지 않은 Tool의 변위가 40μm인 것에 비해 Compensation한 것은 약 10μm로 저하시킬 수 있음을 보여주고 있다.

Moriwaki는 머시닝 센터의 열변형 거동을 명백히 하기 위해서는 주위환경의 온도 제어가 되어 있지 않은 실험실내에서 머시닝센터 주위의 환경, MC 각 부의 온도변화와 거기에 따르는 열변형을 실험과 FEM을 이용한 계산식과 비교해 가면서 해설을 한 바 있다. 주축과 Table 사이의 상대변위와 기울기의 계산치와 실험치를 비교한 것을 Fig. 6-25에서 볼 수 있으며 결과가 매우 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

Moriwaki⁽¹⁹⁾ 그룹이 연구한 것을 보면, 가공중 공구, 공작물간의 상대 열변위를 기계 각 부의 온도 측정 정보에 따라서 매우 정확한 예측으로 보정하는 방법을 확립함을 목적으로 Neural network를 적용하여 Vertical MC를 대상으로 주축을 무부하 회전시키면서 열변위 예측을 하게 하였다. 그 결과 3층 Neural network model을 사용하여 Y축 방향, Z축 방향 그리고 Y-Z 평면내의 기울기 등 세 가지 변위량을 예측할 수 있게 되었으며 다양한 가동조건하의 실험 데이터를 동시에 사용하여 Network의 학습을 통해 예측 정도를 향상시킬 뿐만 아니라 학습을 하지 않은 조건의 변위량의 예측도 가능하다는 것이 명백해졌다. Neural network는 뇌신경회로의 사고 Mechanism을 모방한 정보처리 시스템이며 다수의 입력과 다수의 출력을 갖고 있는 비선형 함수를 학습에 의해서 결정지을 수 있다는 특징을 가지고 있다. 또 이론적으로 중간층의 Unit수를 적당히 선택하므로써 3층의 Network를 사용하여 임의의 함수를 근사될 수 있다는 것을 증명하고 있다. 여기서 사용한 Neural network의 모델을 Fig. 6-26 (a)에서 볼 수 있으며 입력 온도의 측정점을 Fig. 6-26

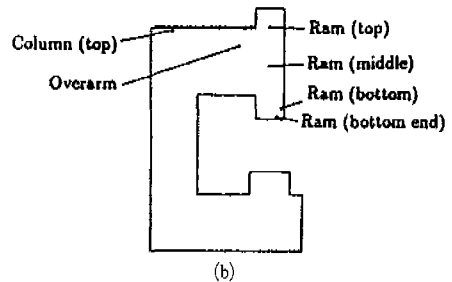


Fig. 6-26 (b) Measuring points

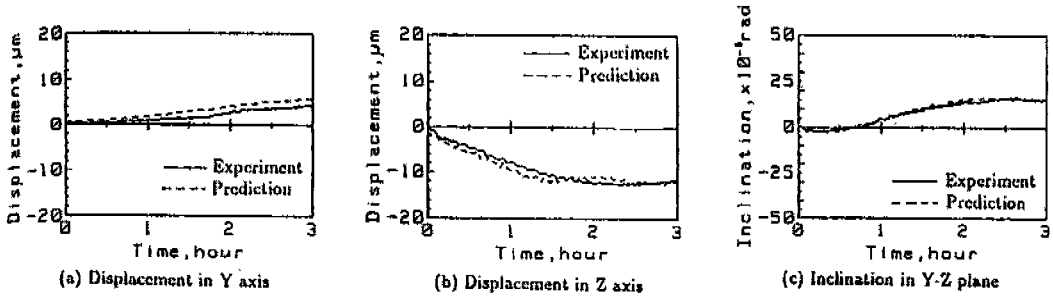


Fig. 6-27 Comparison of predicted with experimented results

(b)에 표시하였다. 여러 실험을 실시하였으며 그 중 대표적인 것을 Fig. 6-27에서 전술한 세가지 변위량을 예측한 값과 실제 측정한 값을 비교하였으며 이 방법으로 정밀한 MC의 열변형 예측이 가능하다는 것이 증명되었다. 이 외에 수많은 연구결과가 발표되고 있다. 그 대표적인 것이 Compensation에 관한 Piezo-electric element를 이용하여 공작기계의 열변형을 보정하는 방법⁽²⁰⁾ 그리고, Touch-probe sensor와 수확모델을 이용하여 MC의 열변형을 해석한 것들이 있다.⁽²¹⁾

6-9. 공작기계 주축의 전자 냉각

Spindle의 고속화에 Rolling bearing을 사용하는 Spindle계에 있어서 Spindle의 고속화에 Bearing 발열이 문제가 되는데 고속화에 따르는 Bearing의 Burning과 열변위를 방지하는 대책으로서 Ceramic ball bearing이나 Air oil 윤활방법을 이용하면서 Bearing의 발열량을 적게하는 방법, Jacket cooling으로 발열열을 제거하는 방법이 연구되어왔다. 그러나 이 Jacket 냉각방법은 냉각능력이 커져서 Housing 외부의 온도상승을 너무 억제하게 되어 Bearing 내부의 Ring의 온도가 Bearing 외부의 온도보다 높아져서 Bearing의 내부 Ring이 상대적으로 열팽창(Thermal expansion)이 일어나 Burning이 발생할 위험이 크다. 반대로 Jacket의 냉각능력을 작게하여 온도상승을 크게 허용하여 Spindle 열변위의 제거가 매우 어렵게 된다는 문제가 발생한다. 이 이유로서 Built-in motor가 보급되어 가고 있음에 따라 점점 문제가 커져가고 있다. 이 해결책으로는 주축을 냉각하면 된다는 결론을 얻었다. Koreta⁽²²⁾ 등은 연구를 통하여 Thermoelectric cooling(전자 냉각)을 사용하고 주축 Bearing의 발열에 의해서 예압이 회전중에 증가하는

Mechanism을 FEM을 이용하여 Simulation하는 방법으로 해석하였다. 그 결과로서 Jacket cooling과 전자냉각을 반복하면 예압증가를 억제시키고 회전수의 한계를 상승시키게 하면서 Spindle의 축방향의 변위를 적게하는 방법을 성공하게 되었다. 전자냉각법은 Thermoelectric의 반대되는 원리로서 두 종류의 물질이 접합되고 있을 때 이 두 종류의 물질간에 전류를 흐르게 하면 그 접합면에 열이 흡수되거나 발열이 발생된다는 원리를 이용하는 방법이다. Fig. 6-28에서 보는 바와 같이 Bi₂Te₃을 소재로 하는 P와 N 반도체를 그림과 같이 배열하고 전압을 주면 흡열면에서 발열면 쪽으로 열이동이 발생한다. 발열면과 흡열면의 온도차는 압력전압에 의해서 결정되고, 발열면을 냉각시켜 온도를 내리면 흡열면은 그이하의 적은 온도로 할 수 있으므로 흡열면에 냉각해야 할 대상물을 배치시키면 열을 효과적으로 흡수할 수 있다. Koreta는 실험장치로서 Fig. 6-29(a)와 같은 구조로 설계하였다. Front는 Angular contact bearing을 사용하여 초기예압을 0.5kN, Rear는 Roller bearing을 사용 Tolerance는 0 μ m로 만들었다. Spindle 중간에는 Fig. 6-29(b)와 같은 전자 냉각 장치를 삽입하고 전자 냉각 장치의 발열쪽을 냉각유로 냉각한다. 온도 측정의 위치는

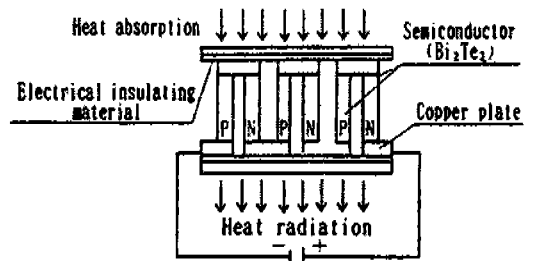
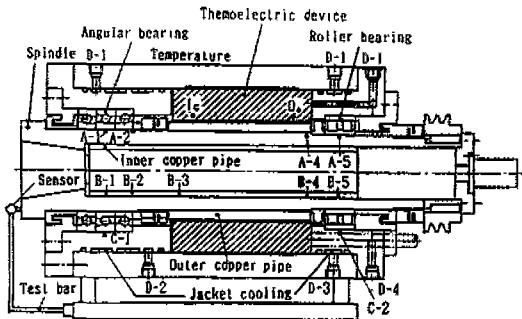
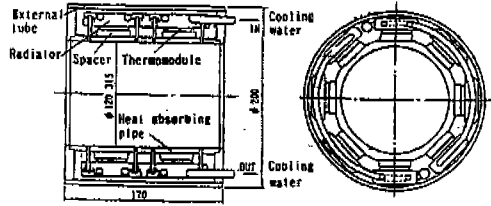


Fig. 6-28 Principle of thermoelectric cooling

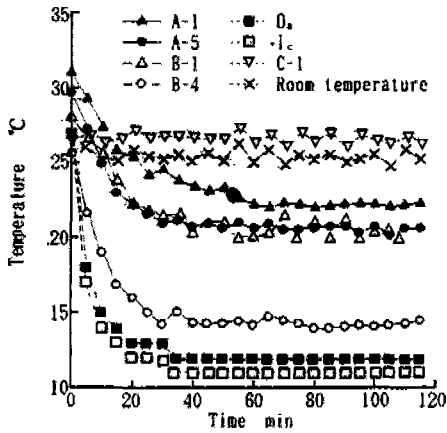


(a) Construction of spindle head

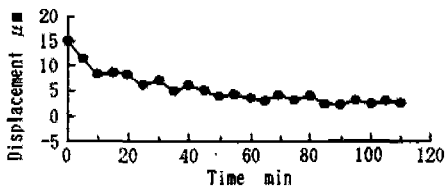


(b) Construction of thermoelectric device

Fig. 6-29 Testing device of spindle head



(a) Temperature of structures



(b) Axial displacement

Fig. 6-30 Temperature and axial displacement change caused by thermoelectric cooling(experiment)

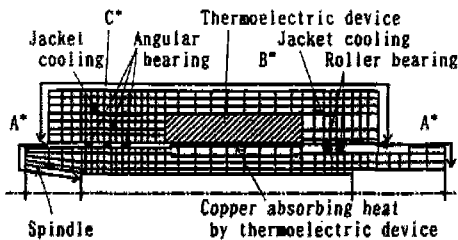


Fig. 6-31 Model of spindle head calculated by FEM

Fig. 6-29(a)에 A, B, C 세 Group으로 정하고 여러 곳을 측정할 수 있게 하였다. 회전수 4,000rpm, Jacket cooling은 ON으로 하여 120min Running 한 결과를 Fig. 6-30에 정리하였으며 이 실험장치가 성공적인 것을 보이고 있다. Spindle 회전시 Bearing 부분에서 열이 발생하고 Inner ring, Outer ring을 통하여 주축과 Jacket에 열이 전달되어 그 온도분포에 변화를 일으킨다. 그 결과 Bearing, Spindle, Jacket에 열변형을 일으킨다. 이와 같이 예압이 변화함에 따라 Bearing에서의 발생열이 변하고 나아가서는 온도분포를 바꾸고, 시간과 더불어 온도가 변화해 나가면서 어느 지점에서 정상 상태에 도달한다. 이와 같은 변화를 Computer로 Simulation 하였다. 단면이 회전축에 관하여 대칭인 Fig. 6-31에 보는 FEM Model을 이용하였다. 발열원은 전부의 Angular contact bearing과 후부의 Roller bearing이고 흡열원은 Jacket 주위의 공기, Jacket 내부의 유냉각, 전자냉각장치이다. 내,외 Ring의 열변형과 예압과의 관계는 종래의 실험에서 얻어진 실험식을 사용하였다. 이 Simulation의 Algorithm을 Fig. 6-32에 표시하였다. 전자냉각이 너무 잘 되어 주축의 신장(-)가 된다는지 Bearing의 예압이 초기예압보다 감소되어 강성이 적어져서 저속회전시 절삭 성능을 저하시킬 가능성이 발생할 수 있다. 이와같은 위험을 방지하기 위하여 Fig. 6-33에서 보는 Control method of cooling power를 만들었다. 여러 실험을 한 결과 Spindle의 냉각은 저속에서는 Jacket cooling으로, 고속에서는 Thermoelectric cooling을 병행함이 좋으며 저속회전과 고속회전을 거쳐서 Bearing의 강성을 높게 유지하고 Spindle의 Axial displacement를 적게할 수 있는

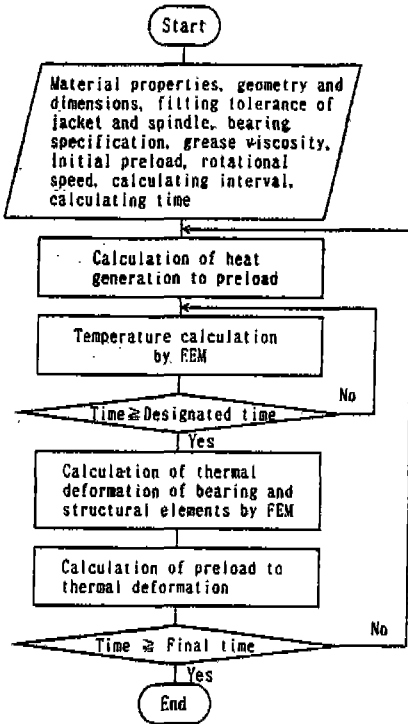


Fig. 6-32 Algorithm of simulation

이상적인 Bearing-spindle system을 만들 수 있다는 것이 증명되었다.

6-10. 결 론

1. 공작기계의 정밀도를 향상시키기 위한 공작기계의 열적특성을 규명한다는 것이 매우 중요한 과제이지만 매우 복잡하기 때문에 어려움이 있다.
2. 열적 특성에 관계되는 연구는 40년전부터 시작되어 여러 방면을 취급하여왔다.
3. Thermal efficiency chain에 대한 Concept가 정리되고 있다.
4. 열적거동의 최적화는 설계측면에서, 가공오차의 보상면에서 해결할 수 있다.
5. 설계측면에서 본 열적거동해결 예를 열거하였다.
6. 신소재를 이용하여 해결한 예를 들었다.
7. 주축계의 열특성을 해결하려면 거기에 발생하는 역학적, 물리적 현상을 잘 해석해야 되며, 그 방법들을 소개하였다.
8. 공작기계 열특성의 보정방법에 여러가지가 있겠으나 두 가지로 나누면 열변위를 측정하고 그것을 토대로 보정방법을 강구하는 방법이다. 몇 가지 예를 들었다.
9. 또 다른 방법은 FEM을 사용하여 Simulation해서 계산으로 예측을 하여 거기에 대응하여 보상하는 방법이다. 몇 가지 예를 설명 하였다.
10. Spindle 내부와 외부로 Cooling 시킴으로써 고속, 고강도를 얻을 수 있다. 그 방법이 전자냉각방법이다.

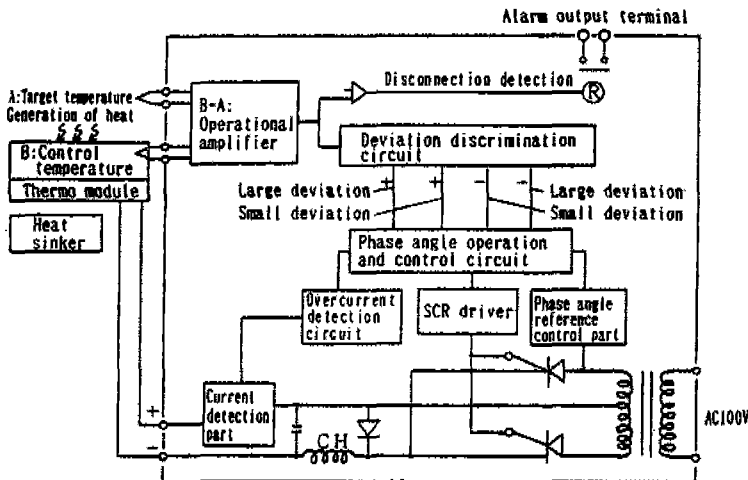


Fig. 6-33 Control method of cooling power of thermoelectric cooling device by input voltage control

참고문헌

1. F. Zawistowski, "Temperaturgeregelte Werkzeugmaschinen", *Microtecnic* 19, 6(1965) 336.
2. J.B. Bryan, "International status of thermal error research", *Annals of the CIRP* 16 (1968) 203.
3. G. Spur, B. Dencker, "Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Drehmaschinen", *Konstruktion* 21, 6 (1969), 205.
4. G. Spur, H. Fischer, "Untersuchung des thermischen Verhaltens der Tischgruppe einer Grosswerkzeugmaschine", *Annals of the CIRP* 16 (1968) 75.
5. T. Sata, et al., "Analysis of thermal deformation of machine tool by the Finite Element Method", *Annals of the CIRP* 21, 1, (1972) 123.
6. H. Brauning, "Ein Numerisches Rechenmodell zur Bearbeitung der instationären Temperaturverteilung in Werkzeugmaschinen, programmiert für elektronische Datenverarbeitungsanlagen", Dr.-Ing. Diss., RWTH Aachen 1972.
7. G. Spur, U. Heisel, G. Lechner, "Methods for reducing thermal influence on the accuracy of machine tools", *Proc. of 3rd ICPE Kyoto*, July 1977, 10.
8. D. Pfeiffer, "Kompensation thermisch bedingter Bearbeitungsfehler durch prozessnahe Qualitastregelung", Dr.-Ing. Diss., TU Stuttgart 1987.
9. E. Salje, H. Gerloff, J. Meyer, "Comparison of machine tool elements made of polymer concrete and cast iron", *Annals of the CIRP*, 37, 1 (1988) 381.
10. Y. Furukawa, et al., "Development of ultra precision machine tool made of ceramics", *Annals of the CIRP* 35, 1 (1986) 279.
11. G. Spur, "Thermal Behaviour Optimization of Machine Tools using Design measures and Compensatory Techniques" 4th IMEC, Session 1, 1990. pp.3-21
12. 是田規之 et al, "熱平衡壁板を利用した室温變動による 工作機械 熱變位抑制に関する研究" 精密工學會誌 Vol.60, No.6, 1994 pp.853-857
13. 李 宣 珪 et al, "熱的閉ループ 概念による工作機械主軸系の熱特性解析" 日本機械學會論文集(C編) 59卷 538號(1991-6) pp.2085-2091
14. 李 宣 珪 et al, "工作機械主軸系の軸受ハウジングおよびクイル構造の熱的特性" 日本機械工學會論文集(C編) 57卷 543號(1991-11) pp.3612-3617
15. 李 宣 珪 et al, "工作機械構造の熱的適合設計のためのシミュレーション方法" 日本機械工學會論文集(C編) 57卷 538號(1991-6) pp.2092-2099
16. 李 宣 珪 "閉ループ概念による 工作機械主軸系の熱的特性解析" 1990年度博士學位論文 東京工業大學
17. K. Okushima et al "Compensation of Thermal Displacement by Coordinate system Correction" *Annals of the CIRP*, Vol.241, 1975, pp.327-331
18. T. Sata "Improvement of working Accuracy on NC lathe by Compensation for the Thermal Expansion of Tool" *Annals of the CIRP*, Vol.30/1, 1981 pp.445-449
19. 森脇俊道 et al, "ニューラルネットワークによるマニピュレータの 熱變形豫測" 日本機械工學會論文集(C編)58卷550號(1992-6) pp.246-251
20. 片山剛之丞 et al "壓電素子による工作機械 熱變形補正に 關する研究" 精密工學會誌 57/10/1991 pp.1780-1785
21. 松尾光恭 et al, "タッチセンサと數學モデルを利用したマシニング センタの熱變形の測定と分解" 精密工學會誌 55/9/1989 pp.1681-1686.
22. 是田規之 et al, "工作機械の電子冷却" 精密工學會誌 Vol.60, No.5, 1994 pp.652-656