

초정밀 가공기의 구조설계



박 종 권(공작기계실 선임연구원)

목 차

1. 서 론
2. 가공오차의 요인 검토
 - 2.1. 힘에의한 변형
 - 2.1.1. 정강성
 - 2.1.2. 동강성
 - 2.2. 열에의한 변형
3. 초정밀 가공기 구조설계의 검토사항
 - 3.1. 운동기능에 따른 전체구조의 구성
 - 3.2. 본체구조의 설계
 - 3.3. 구조재료의 검토
 - 3.4. 기 타
4. 결 론

1. 서 론

초정밀 가공기의 개발 例로서는 미국 LLNL (로렌스 리버모어 국립연구소)의 LODTM이 유명하며 이는 생산기술 분야에 경면 가공의 고부가 가치시대를 열어 주었다. 이와같이 초정밀 공작 기계의 개발이 시작된 이후 20년이 지난 현재 초정밀 공작기계의 설계기술은 많은 발전이 되어 있으며 심지어는 다른 분야에 까지도 응용이 되어 가고 있다. 즉 초정밀 공작기계의 설계기술은 일반 공작 기계류의 설계에도 응용이 될 수 있을 뿐만 아니라 파급기술로서 VTR HEAD DRUM, COMPUTER 의 HARD DISK 등의 가공기술은 좋은 예가 된다.

일반적으로 초정밀 공작기계의 구조물은 상기와 같은 첨단기술에 대응하기 위해서는 시간과 온도 변화에 따라 형상 및 치수 정밀도가 안정되어야 하고 기계의 내·외부로부터 전달되어 오는 진동 현상을 억제 할 수 있는 감쇠능이 우수해야 한다. 또한 정·동적의 불안정한 힘에 대하여 구조의 기능이 안정화 되도록 고강성을 유지하며, 가공 부를 기준으로한 운동부가 진동모우드의 절점(Node)에 오도록 구조의 배치와 지지위치등에 세심한 배려를 하여야 한다.

따라서, 本稿에서는 국내 공작기계 산업의 첨단화에 도움이 되고자 초정밀 공작기계 구조의 설계기술에 관하여 기본이 되는 사항들을 토대로 以下에 기술하고자 한다.

2. 가공오차의 요인 검토

공작기계의 설계방법을 논하기에 앞서 가공오

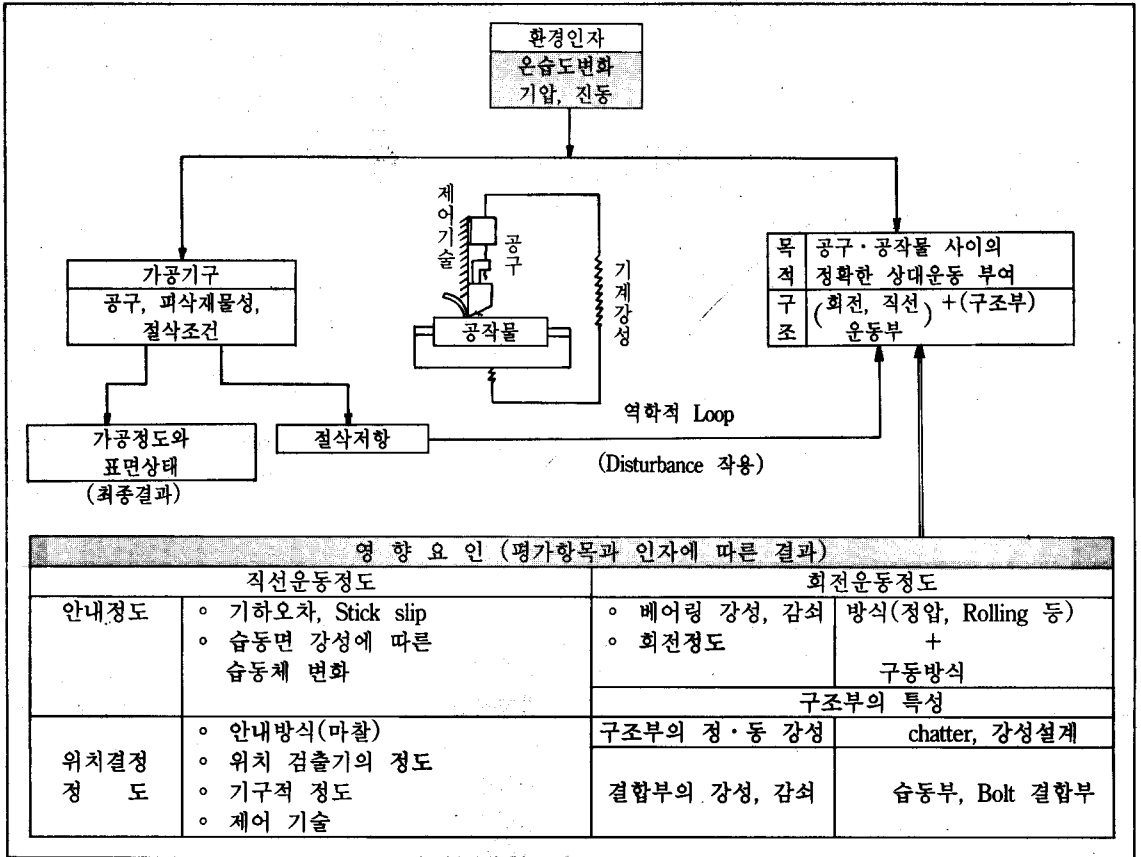


Fig.(2-1) 절삭가공 기구와 가공정밀도에의 영향인자.

차에 영향을 미치는 요인을 분석해 보면 Fig(2-1)과 같다. 즉 운동기구에 의해 정해지는 절삭중의 공작기계는 공구와 공작물이 상호접촉 유지되어 Machine Tool Structural Dynamics와 Cutting Process Dynamics에 대한 일정한 Closed Loop를 형성하게 되며 이 system에 절삭조건과 기계구조의 특성 및 환경조건등에 따른 정·동적인 불안정한 힘이 작용하게 될 때에는 공구와 공작물사이에 상대운동을 야기시키게 되어 가공시스템은 불안정해지고 이에 의해 정밀도는 떨어지게 된다.

초정밀 공작기계의 설계단계에서는 정·동적 및 열적 강성등에 관한 상기의 모든 인자에 착안하여 대책을 세워야 될것이며 이때 중요한 것은 가공오차에 영향을 미치는 지배적인 요인들을 분석하고 억제하는 일이다. Fig(2-2)는 상기 요인 중의

일부에 대한 영향정도를 나타낸 것으로서 측정평가와 공구 및 피삭재 등의 문제도 무시할 수 없을 정도로 영향을 주고 있는 것을 알 수 있으며 이들을 밝히기 위한 연구도 함께 수행되어야 할 것이다.

2.1. 힘에 의한 변형

가공중에 있어서 공작기계, 공구 및 가공물에 작용하는 힘은 ①기계각부의 자중 ②운동요소의 관성력 ③마찰력 ④체결력 ⑤절삭력 등이며 이들 작용하는 힘에 대해 변형하기 어려운 정도를 강성(剛性)이라고 한다. 강성은 공작기계의 평가기준으로 중요시 되어 왔으며 새로운 공구재료의 개발 및 초정밀화로 지향해가는 오늘날의 공작기계

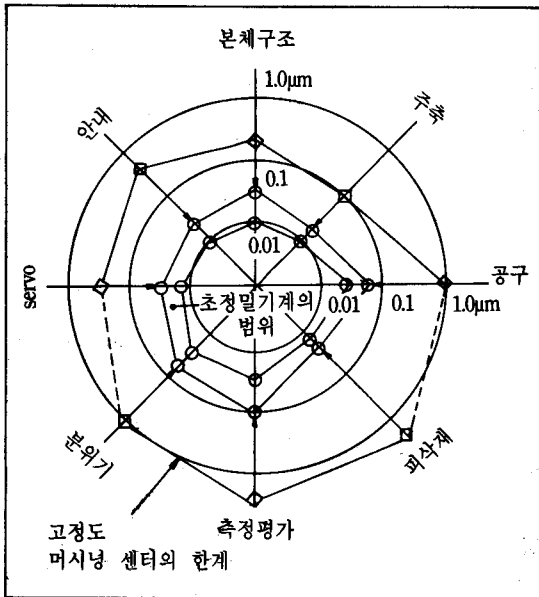


Fig.(2-2) 범용기계와 초정밀 기계의 정밀도 구성비, (가공치수 500mm를 기준)

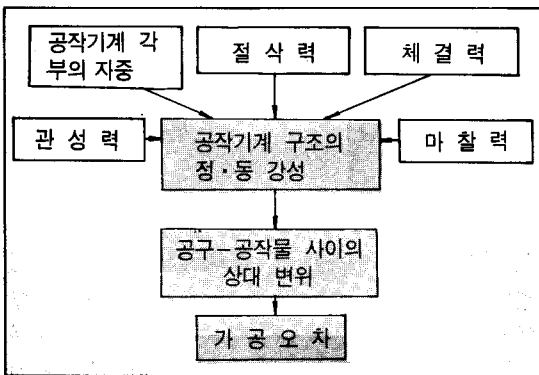


Fig.(2-3) 공작기계에 작용하는 힘

구조는 고강성으로 설계 되어야 한다.

2.1.1. 정강성(Static Stiffness)

공작기계에 있어서 정강성이 크면 절삭저항에 의한 기계의 변형이 적으므로 중절삭이 가능하고 제품의 치수 정밀도와 안정성도 높게 된다.

특히, 정강성은 구성요소의 기하학적인 형상과 재질(탄성계수)에 의존하며 변형량을 최소화 함에 있어서는 가공조건과 공구인선의 형상을 최적으로

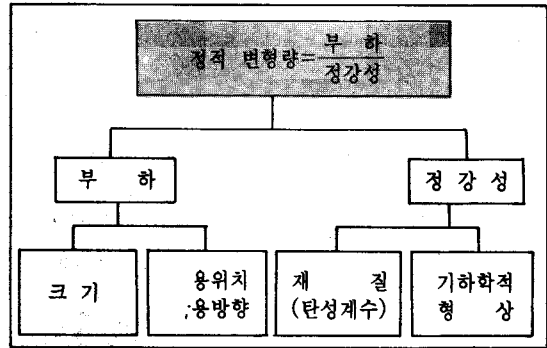


Fig.(2-4) 정적 변형량을 좌우하는 인자.

설정하여 가공면에 작용하는 수직 방향의 절삭 성분을 최소화 하는 것이다. 다이아몬드 공구를 사용하여 미소 절삭을 행하는 경우에 절삭력은 미소하게 작으나 기계구조 시스템의 정강성은 무한대에 있지는 않기 때문에 반드시 탄성 변형은 나타나게 마련이다. 일례로 초정밀 공작기계와 같은 미소 절삭에 있어서 가공오차에 직접적으로 관계하는 배분력은 일반적으로 數十 gf 정도에 지나지 않기 때문에 정강성은 數Kgf/µm order에 있으며 이에의해 약 0.01µm order의 탄성변형이 발생하는 것으로 계산 되므로 초정밀 가공에서 기대되는 치수 및 형상 정밀도가 예측이 된다.

따라서 기계시스템의 종합적인 정강성은 각 구성요소와 이들을 접합시키는 부분에서의 정강성이 직렬결합으로 나타나는 결과로 생각되며 이에따라 정강성이 낮은 어느 요소부분이 존재하게되는 특성에 의해 종합적인 정강성은 좌우되고 있으므로 기계 각부의 정강성은 크기가 크면서 상호 균형되게 배분이 되도록 구조를 설계함이 요구된다.

2.1.2. 동강성(Dynamic Stiffness)

동강성은 변동외력에 의한 변형량의 주파수 응답을 의미하는 것으로서 강제진동과 자려진동에 대한 공작기계의 안정성을 논하는 측면에서 매우 중요하다. 동강성이 큰 공작기계는 절삭 저항이 변동하여도 자려진동(Self Excitations)에 의한 chatter 현상이나 단속절삭 등에 의해서 나타나는 강제진동 (External Excitations)의 현상이 억제되어

안정된 가공을 이룰수가 있다. 초정밀 가공에 있어서는 실제적으로 중절삭을 행하는 경우는 없기 때문에 강제진동을 억제하는데 특히 주의를 기울여야 할 것이며 이중에

- ① 기초에서 전달되는 진동
- ② 기계 구성요소의 불균형 등에 기인되는 진동
- ③ 단속절삭 등 가공 process에서 기인되는 진동 등에 관해서는 설계시 대책을 강구 해야 될 사항이다.

동강성을 정량적으로 평가하는 지표로서는 기계 구조물이 공진시($r=1$) 나타나는 진동진폭이며 진동시스템을 1자유도계로 간주 할 경우에 공진 진폭(A)은 다음식으로 표현된다.

$$A = \frac{F}{2\zeta K} \quad \dots(2-1)$$

단 F: 변동의력의 크기
 ζ : system의 감쇠비
 K: 정강성

여기서 기계구조물의 감쇠비는 일반적으로 0.01 order이고, 그러므로 공진시의 변형량은 정적변형량의 10배에서 100배가 됨을 알 수 있으며 이에 따라 동적변형량을 억제하기 위해서는 정적인 변형량의 억제 대책과 함께 새로운 구조재 개발을 통한 감쇠능의 증대와 Simple한 구조에 의한 진동 절량의 감소 방안이 필요하다.

따라서, 현대 공작 기계에서는 각부의 정강성을 높일 필요가 있음은 물론이지만 무엇보다도 동강성에 주목하여 이것을 높이는데 역점을 두어야 한다.

2.2. 열에 의한 변형

열에 의한 공작기계의 가공정밀도 저하는 Fig(2-5)와 같은 메카니즘으로 발생하기 때문에 열변형 대책의 기본은 熱収支의 경로를 차단하는 것이나 중요한 것은 주축베어링, 모터, 브레이크 및 클러치, 절삭 Chip등의 내부 열원에 대한 방지대책 기술이다.

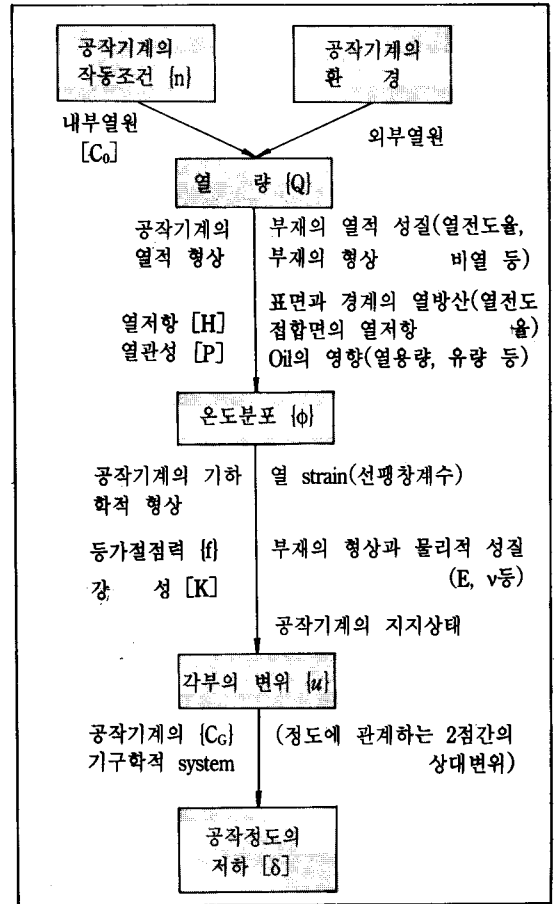


Fig.2-5) 공작기계의 열변형기구.

일반적으로 공작기계의 열강성(Thermal Rigidity)은 온도 1°C상승(ΔT)했을때의 열변형량(δ)에 대한 관계로 식(2-2)와 같이 정의 되며

$$\text{열강성}(K) = \frac{\text{온도상승}(\Delta T)}{\text{열변형량}(\delta)} \quad \dots(2-2)$$

여기서, 주변에서의 온도 상승량(ΔT)은 공작기계의 내부 발열량(Q)과 외부 표면에서의 방열량(Q_{loss})의 차에 의해 구해지나 구체적으로는 식 (2-3)과 같이 표현된다.

$$\Delta T = \left(\frac{Q}{\lambda \cdot S} \right) \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right) \right\} \right] \quad \dots(2-3)$$

여기서, λ : 공작기계 표면의 평균 열전도율
 S : 전열면적 (傳熱面積)
 t : 시간
 t_s : 시정수(時定數)
 $t_s = WC / \lambda \cdot S$
 W : 공작기계의 총중량
 C : 단위중량당 열용량

식(2-3)을 관찰할때 시정수(t_s)가 작을 경우에는 조기에 안정된 온도 상태로 되어 예비운전시간을 줄일 수 있고 시정수가 반대로 클 경우에는 안정화 단계까지의 온도상승 구배가 완만해지기 때문에 공작기계의 예비운전시간은 길어짐을 알 수가 있다. 또한 공작기계의 온도 상승량(ΔT)을 작게하기 위해서는 기계 내부의 발열량(Q)을 작도록 설계하고 공작기계의 방열 특성인 $\lambda \cdot S$ 를 크도록 재료를 선정함이 요구되나 $\lambda \cdot S$ 가 너무 크면 주변의 온도 변동에 영향을 받기 쉬우며 일반적으로 공작기계의 열전도율(λ)은 $10(W/mK)$ 을 전·후 한 값이 적당하다. 한편 고체의 선팽창 계수는 약 $10^{-6} \sim 10^{-5} / ^\circ C$ 의 order이며 초정밀 가공에서 요구되는 가공 정밀도의 比 10^6 과 대응 시키면 $0.1^\circ C \sim 1^\circ C$ 의 온도 제어가 필요하게 된다. 또한 Bite Shank의 경우에도 선팽창 계수를 약 $1 \times 10^{-5} / ^\circ C$ 라 하고 돌출길이를 $10mm$ 로 가정한다면 돌출부의 열팽창을 $0.1\mu m$ 이하로 억제하기 위해서는 $1^\circ C$ 이상의 온도 변화가 나타나서는 안 됨을 알 수 있다.

3. 초정밀 가공기 구조설계의 검토사항.

3.1. 운동기능에 따른 전체 구조의 구성

공작기계에서 가공되는 부품의 형상은 공구와 공작물사이의 상대운동에 의해 결정이 되고 가공면의 창성을 위해 공작기계구조는 적어도 절삭운동, 이송운동, 절입운동이 필요해지며 이들기능을 어떻게 효율적으로 배치할 것인지는 공작기계 구조설계상 기본이 되는 중요사항이다. 예를 들면 절삭가공을 기능에 따라 표현한 Fig(3-1)과 같이 공작기계의 전체구조에 대해 각 모듈을 효

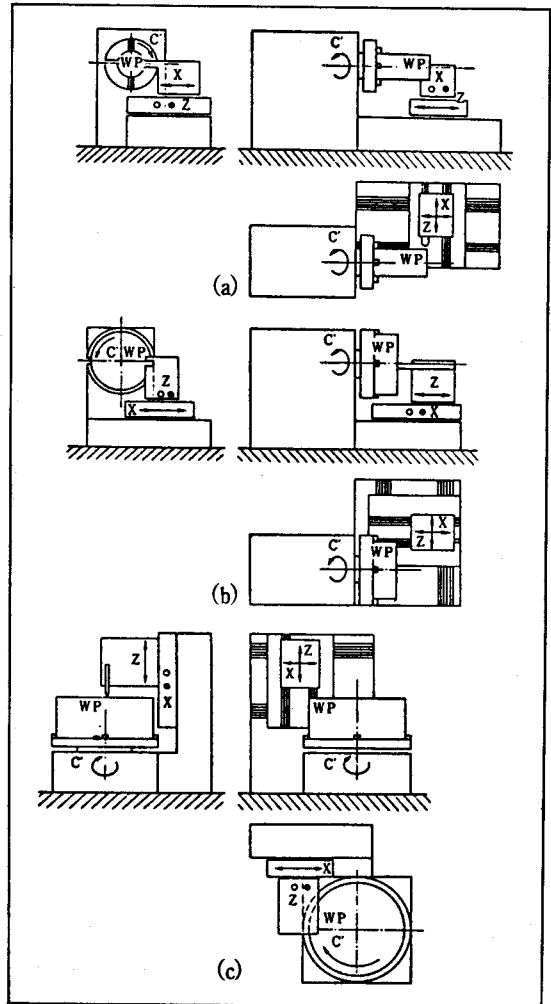


Fig.(3-1) 선반의 구조 배치에

율적으로 배치하는 방법이나 원하는 부품 형상을 얻기 위하여 공구·공작물 사이의 3차원 자유궤적이 주어질때 필요로 해지는 회전, 직선 운동에 대한 각 軸 조합의 최적화 또는 기능설계의 지침등에 관해서는 지금까지도 연구되고 있는 사항들이다.

참고로 Fig(3-1)에서 (a)는 원통면 가공에 적합하도록 배치구성된 구조이고 (b)는 단면(정면) 절삭에 적합하도록 구성된 구조이며 이들에서 슬롯체의 안내면은 기초부분 가까이에 배치해야 하고 (C)는 수직축 구조로서 중량이 큰 가공물에 맞도록 합리적으로 구성된 구조이다.

한편 초정밀 공작기계에 대한 가공요구는 단순한 평면가공에서 구면, 비구면가공으로 고도화되고 있고 NC의 윤곽 가공 등에 이를 실현하고 싶을때는 기계시스템의 오차와 제어시스템의 오차가 중첩되어 가공오차를 발생시키기 때문에 정밀도의 Balance를 고려하여 제어시스템 또는 기계 시스템에 대한 개선책을 도모할 필요가 있으며 비구면 가공의 창성운동 일부를 기구학적 메카니즘으로 실현한 로크웰사의 Omega-X 기종은 하나의 좋은 예이다.

특히 Fig(2-1)에서 표시한 역학적 Loop의 강성이 가공정도에 영향을 미치기 때문에 강성을 높이기 위해서는 Loop의 길이를 짧게 하면서(구조의 단순화) 이것을 구성하는 요소인 구조부재, 베어링, 안내면, Bolt체결부 등 모든 요소의 강성을 높이는 것이 중요하다. 이것은 직렬로 접속되는 Spring 요소로 고려되어 이중 한곳 만이라도 취약한 요소가 있으면 기계 전체의 강성을 저하 시키는 결과가 되기 때문이며 그러므로 공구·공작물사

이의 Loop를 구성하는 요소에 대해서는 가능한 「剛」하게 접속 시켜야만 한다. 뿐만 아니라 구동 모터등 Loop에 병렬로 접속시킨 機器類나 기계 본체와 지면사이에는 Air Spring등에 의해 「柔」한 접속이 되도록하여 불필요한 힘을 절연시켜야 하며 이경우에 기계 전체가 搖動을 할 우려도 있으나 搖動의 회전 중심을 Fig(3-2)와 같이 가공점에 오도록 일치시키는 방법을 강구하면 문제 해결이 용이해진다.

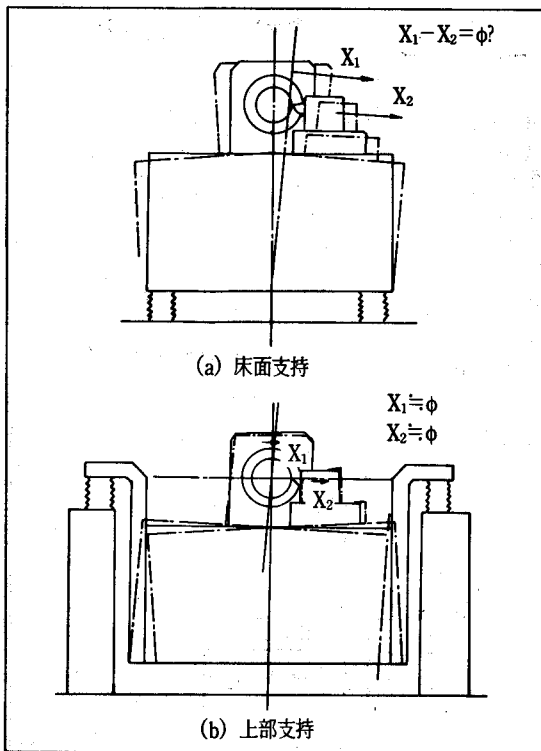
따라서 초정밀 공작기계의 설계에서는 역학 Loop의 구성 요소를 무턱대고 늘리는 것은 오차 요인을 증대시키고 전체의 강성을 저하시키기 때문에 양호한 운동상태를 기하기 위해서는 가능한 최저 갯수의 軸으로 구성된 단순한 기계 구조로 설계 되어야 한다.

3.2. 본체 구조의 설계

공작기계의 본체구조는 Bed, Column등 가장 기본이 되는 구조 부분을 뜻하며 이들은 전술한 바와 같이 힘 및 열에 의한 변형을 최소화 할 수 있는 구조로 설계 되어야 한다. 이를 위해 ①경년변화가 적고 ②열전도율이 낮고 ③열팽창 계수가 작고 ④감쇠능이 큰 특징이 있는 재료를 선정함이 중요하며 Table(3-1)은 현재 사용되고 있는 각종 초정밀 공작기계류의 기본 구조 상태를 나타낸다.

일반적으로 초정밀 공작기계의 설계에는 FEM 해석에 의해 정·동적 및 열적 변형의 특성을 예측한 기본설계를 한후 모델 실험(실험적 모드 해석)을 통해 전체구성의 Balance를 보면서 세부적으로 설계하는 방법을 취하게 되는데 이 설계 과정의 기본적인 흐름과 구조해석사 전산처리 시스템의 각 processor에서 출력되는 해석결과와 개요를 Fig(3-3), Fig(3-4)에서 보여준다.

특히 진동특성에 관하여는 우선적으로 생각할 수 있는 것이 가공에 따르는 진동으로서 보통 행해지고 있는 연질의 미소가공에서는 數十 gf정도 이므로 전체구조의 설계에는 큰 문제가 없으나 기계 내부의 강제진동 만큼은 고려되어야 할 사항이다. 대책으로는 운동(진동체)부분의 경량화와



Fig(3-2) 지지위차와 Locking Mode의 영향.

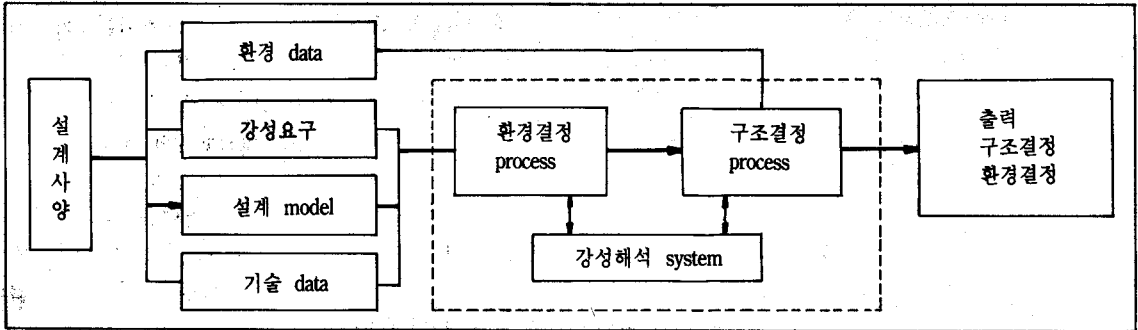


Fig.(3-3) 설계 processor의 흐름.

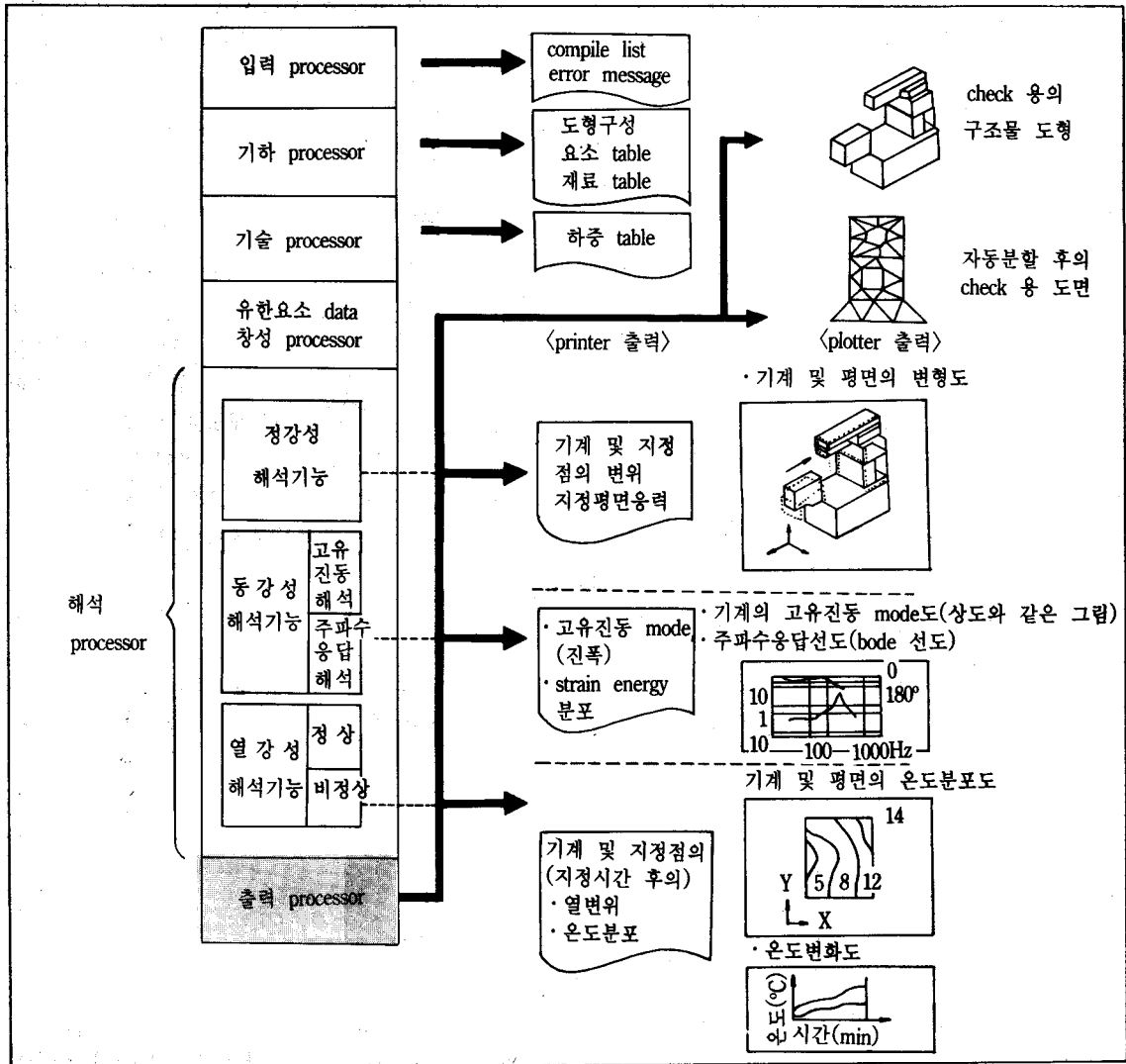


Fig.(3-4) 전산처리 시스템에서 각 processor의 출력 개요.

Table(3-1). 각종 초정밀 공작기계의 구조

기종	기계의 기본구조	기계의 기초
pneumo	<ul style="list-style-type: none"> 공작물 주축, 수평공구대, X, Z축의 NC제어 Abbe의 원리에 의한 Laser계측 시스템 Granite Base 	<ul style="list-style-type: none"> 자동조심형 Air방진대에 의한 3점지지
Ex Cello	<ul style="list-style-type: none"> 수평주축, 2축 NC제어 Granite Base Laser 계측 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 방진대위에 기계설치
Omega-X	<ul style="list-style-type: none"> X, Z, Ω축, 수평축에서 work 保持, 미소 위치결정 경량공구 Bar. 주철Bed 	<ul style="list-style-type: none"> servo 마운트 4개에 의한 설치
LLL-DTM3	<ul style="list-style-type: none"> 주축, 공구축의 수평 L자 배치 Laser 계측, 저중심기계 Granite Base 	<ul style="list-style-type: none"> 빋드식 독립기초 공기 spring 10개에 의한 지지 계획용 정압지지 Base 채택
philips DTM	<ul style="list-style-type: none"> 선반과 공통인 축 배치 	
Du pont 1 (union Carbide)	<ul style="list-style-type: none"> 수평공구축, 수직공작물축 구조의 간소화 	
LLL-DTM 1	<ul style="list-style-type: none"> X, Y, B축(Rotary Table) Oil Shower 방식 	<ul style="list-style-type: none"> 외부 진동방지용 공기 마운트 3점 지지
Moore	<ul style="list-style-type: none"> X, Y, B축 3형 측정기에 의해 column 수직 spindle을 제외한 형태 	<ul style="list-style-type: none"> 공기 방진대 3점지지 (자동수평 조정식)
Du pont3 (Y-12)	<ul style="list-style-type: none"> 수평 work축(회전) 수직 공구축(회전+이동) 	<ul style="list-style-type: none"> 공기방진대 3점 지지
NC 선반 COLATH (philips)	<ul style="list-style-type: none"> 조립 slider상의 work 수평 주축 X, Z축의 NC제어 	
CNC선반 (CUPE)	<ul style="list-style-type: none"> 수직축 Bed와 Bridge는 경량강판 용접구조에 인조 Granite의 충전 기계위에서 계측(Abbe의 원리) 	

Dynamic Balance를 유지토록 하는 것이며 이중에 외부진동으로 부터의 안정화는 공작기계에서 주로 대두되고 있는 Rocking Mode에 대한 사항이다. 일반적으로 Rocking Mode는 Bed의 支持강성과 支持위치, Bed의 구조강성에 의해 결정이 되는 것으로 동일 위상의 강체로 진동하는 진동형(Mode Shape)을 가지며 $0.01\mu\text{m}$ 대의 진동을 고려하는 공작기계의 강체구조물에서는 검토되어야 할 사항이다. 즉 Bed의 지지 위치는 Fig(3-2)의 (a)와 같은 하부에서의 지지하는 방법보다는 (b)와 같이 지지위치를 높게하여 가공점이 Rocking Mode의 Node 점에 위치하도록 구조설계를 고려해야 되며 이때 강성제고를 위해 상부구조물은 경량화를

도모하고 하부의 Bed는 관성이 증대 되도록 무겁게 할 필요가 있다. 또한 외부로 부터 전달 되어오는 진동은 Fig(3-5)의 원리에 의해 진동 전달율이 0.1 이하($r>3$)가 되도록 방진장치를 부착하고 이경우 방진장치는 고유진동수 (ω_n)가 매우 낮은 것을 선택함으로써 방진 효과를 얻을 수가 있으며 대부분의 초정밀 공작기계에서는 공기 Spring을 이용한 방진 장치(3-point regulated system)가 주로 이용된다. 이는 고유진동수가 매우 낮고(0.7~3.5Hz)하중변화에 대해 고유진동수를 일정히 유지할 수 있으며 기계 각부의 운동에 의한 重心변화에도 수평으로 자동조절할 수 있는 반면 스프링 설계시 스프링 높이, 지지하중, 스프링

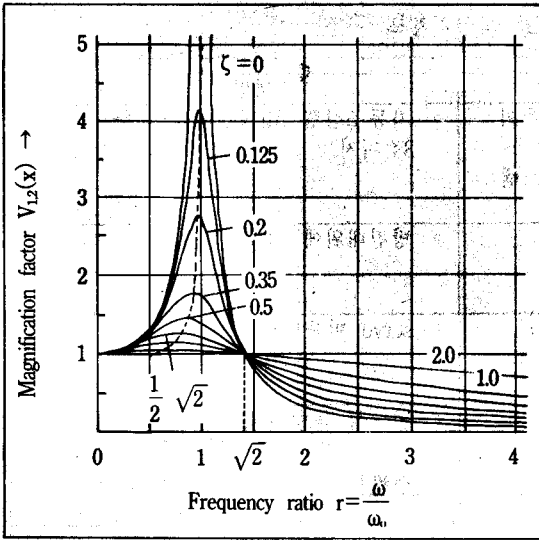


Fig.(3-5) 진동전달율

상수를 각기 독립적으로 산정할 수 있는 장점을 갖기 때문이다.

그리고 초정밀 공작기계의 구조설계시 다음으로 고려하여야 될 사항은 열변형 문제를 억제 할 수 있는 방안이다. 즉 공작기계 구조는 열대칭 구조로

설계 되어야 하며 이에 본체 구조를 기하학적으로 단순하고 대칭이 되도록 하는 구조설계와 열용량, 열전도를 포함한 열의 흐름 및 온도 분포를 가급적 대칭이 되도록 배치하는 방법이다. 여기서 공작기계 구조가 대칭일 경우에는 대칭면에 대해 면바깥으로 변위가 발생하기 때문에 대칭면 가까이 정도를 필요로 하는 기준점(가공점)을 배치하면 온도가 상승해도 정밀도 저하를 막을 수가 있다.

이 밖에 진동 및 열변형의 대책으로서 Table(3-1)에서 사용된 구조재 처럼 공작기계 구조물에 새로운 재료를 이용하는 방안을 생각해 볼 수가 있다. 예를 들어 Fig(3-6)과 Fig(3-7)과 같이 granite와 동일한 성능을 가진 그라니텐이라고 불리는 세라믹 계통의 재료를 연삭반 Bed에 응용했을때의 진동과 열변형의 관계를 보면 가공성능에 큰 영향을 미친다고하는 저주파 진동은 신재료의 이용에 의해 해소할 수 있으나 열변형은 진동 감소 효과 만큼 좋은 결과를 얻지는 못하는 것을 알수 있다. 이것은 아무리 단열재 구조라 할지라도 열전도는 시간지연이 있기때문에 구조의 일부가

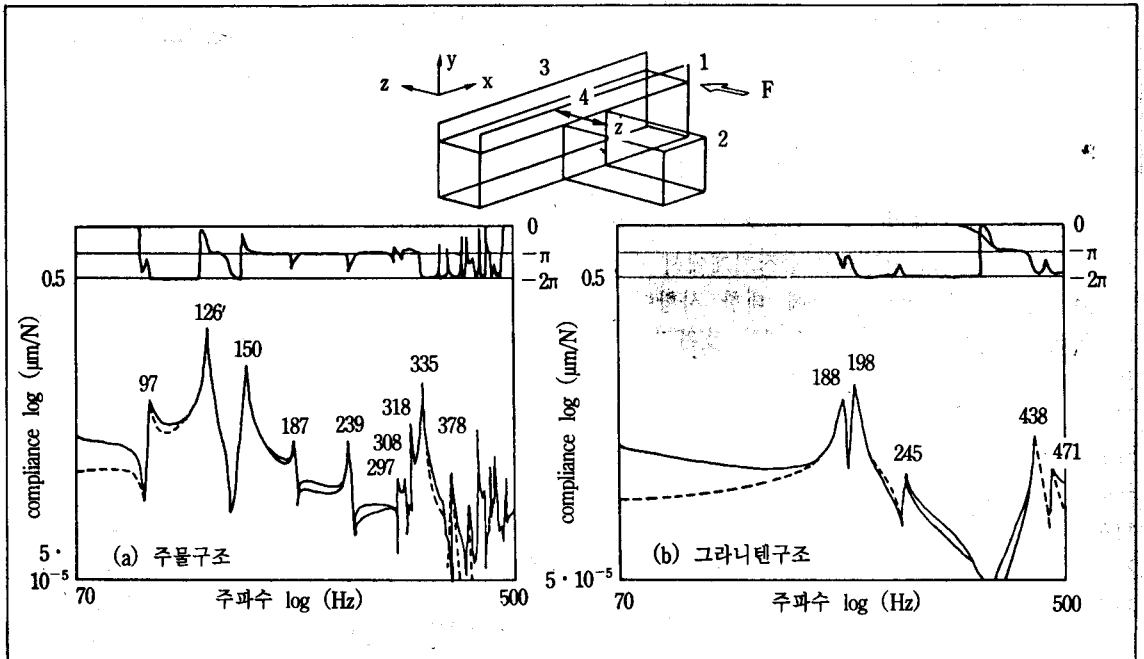


Fig.(3-6) 그라니텐 베드의 진동특성(가진점 : 1, 측정점 : 4, Z방향)

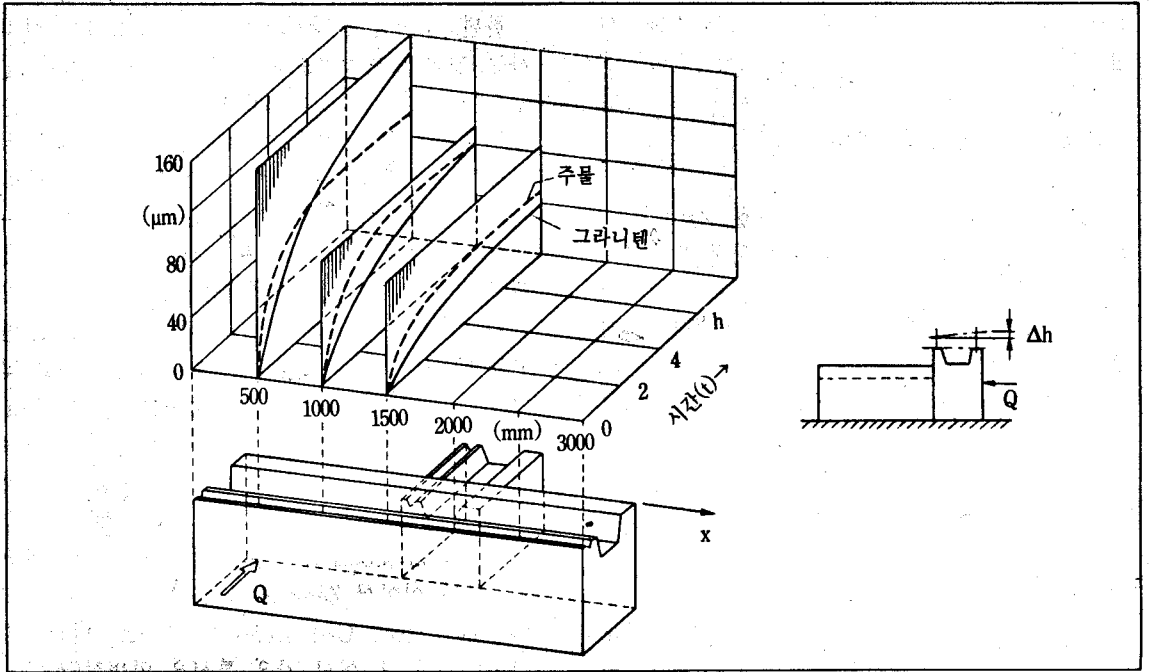


Fig.(3-7) 그라니텐 베드의 시간에 따른 열변형 특성.

일단 발열하면 열은 점차로 구조전체에 전달되어 열변형을 일으키기 때문이며 그러므로 일부에서는 신재료의 이용이 열변형 특성에 기대할 만큼 특별한 효과를 얻을수는 없다고 보고한 예도 있다. 일반적으로 그라니텐 등의 단열재료는 열의 흐름중에 열의 분산을 저지하는 효과는 있으나 시

간의 경과와 함께 전열이 진행된다면 단열효과가 적어 열변형 발생의 원인을 가져오며 이의 억제 대책으로는 열용량을 크게하여 발열을 둔감하게 하는 방안이 이용된다. 한편 초정밀 공작기계 주변의 환경사항으로 미국 LLNL의 초정밀 선반에서는 Oil Shower방식을 이용하여 주변온도를 20±

Table(3-2) 구조재료의 특성비교

재 료	Alumina Ceramic	주 철	강	Invar	Granite	Resin Concrete	Zerodur
young율(E)(GPa)	240	100	210	140	40	33	91
밀 도(γ)(KN/m ³)	34	73	78	82	26	25	25
比剛性(E/γ)(×10 ⁶ m)	7	1.4	2.7	1.7	1.5	1.3	3.6
대수감쇠율(δ)(×10 ⁻³)	0.6	1~3	0.5	-	6	20	-
선행장계수(α)(×10 ⁻⁶ /K)	7	12	11	0.6	8.3	12	0.05
열전도율(λ)(W/m·k)	16	53.5	44	10.5	3.8	0.47	1.64
온도전도율(k)(λ/cθ) (×10 ⁻⁶ m ² /s)	6.2	12	11	2.8	2	0.3	0.8
parameter(β) (α×k) ×10 ⁻¹² m ² /(S·K)	43	144	121	1.7	17	3.6	1.3

0.006°C로 실현시키고 있는 것은 고도의 기술로서 잘 알려진 사실이다.

3.3. 구조재료의 검토

Fig(2-1)에서와 같이 공구·공작물 사이의 역학적 Loop의 종합 강성을 높이기 위한 또하나의 수단으로서는 기계의 각 요소를 구성하는 구조재료의 특성 검토이며 대부분의 초정밀 공작기계에서 요구되는 구조재의 특성은 전술한 바와 같이 경년변화 및 열변형에 대한 치수의 안정화와 내진성 등이다. 일반적으로 초정밀 공작기계에서 이용되는 구조재료는 알루미늄 세라믹, Zerodur, Invar, Granite등이며 이들에 대한 물리적 특성은 Table(3-2)와 같다.

초정밀 공작기계의 구조는 가능한 단순한 대칭구조로 설계하는 것이 바람직하며 이를 위해 직선 운동기구는 양단지지한 Guide Beam에 승동체를 지지한 형식이 주로 이용된다. 특히 자중에 의한 변형은 비강성(E/γ)이 중요한 인자로 작용하며 Table(3-2)에서 Alumina Ceramic의 비강성은 7×10⁶m로 주철, Invar, Granite에 비해 약 4배로 큼을 알 수 있고 이는 자중에 의한 변형을 Fig(3-8)과 같이 약 1/4로 줄이는 결과를 가져온다. 그러나 진동을 흡수할 수 있는 구조재의 내부 감쇠는 Granite, Resin Concrete가 우수하게 나타나고 있음이 관찰된다.

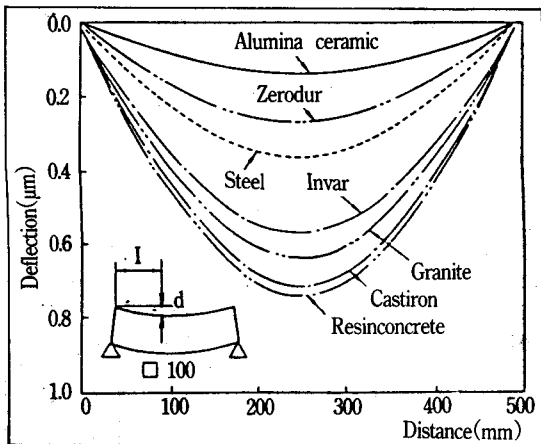


Fig.(3-8) Beam의 자중에 의한 Deflection.

한편, 초정밀 공작기계는 항온·항습실에 설치하는 것이 일반적이므로 열변형 문제는 간과될 수도 있지만 실제로는 1°C이하의 온도변화가 운동정밀도에 큰 영향을 미치는 수도 있다. 이 경우 구조재료의 평가는 온도변화를 전후에서 열변형의 척도가 되는 선팽창률과 온도구배를 나타내는 과도상태인 Warming UP시간에서 열변형의 척도를 뜻하는 온도 전도율을 병행해서 고려할 필요가 있다. 즉 재료의 열변형을 실험한 Fig(3-9)를 보면 Table(3-2)에서 선팽창계수(α)가 가장 큰 주철 및 Steel이 열변형이 제일크고 Alumina Ceramic, Granite는 중간 크기로 되고 Zerodur, Invar등은 가장 작게 변형상태를 나타내고 있으며, 과도적인 치수변동은 온도전도율(k)에 의존하여 이 값이 가장 작은 Resin Concrete(0.3)가 온도 변화에 가장 둔감하고 이어서 Zerodur, Granite, Invar, Alumina Ceramic, Steel, Cast Iron등의 순서로 민감하게 나타나고 있다. 이와 같은 특성은 열변형(Δℓ)을 나타내는 식(3-1)에서 열변형(Δℓ)에 직접적으로 작용하는 선팽창계수(α)와 과도 상태를 뜻하는 온도 전도율(k)관계를 보면 쉽게 이해 된다.

$$\Delta \ell = \alpha \theta_0 \ell \left\{ 1 - \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{i^2} \right) e^{-\left(\frac{i\pi \ell}{2} \right)^2 \frac{kt}{\ell^2}} \right\} \quad \dots(3-1)$$

또한 열팽창 지수 Parameter(β)를 도입하면 재료의 열변형 특성을 편리하게 이해할 수가 있으며

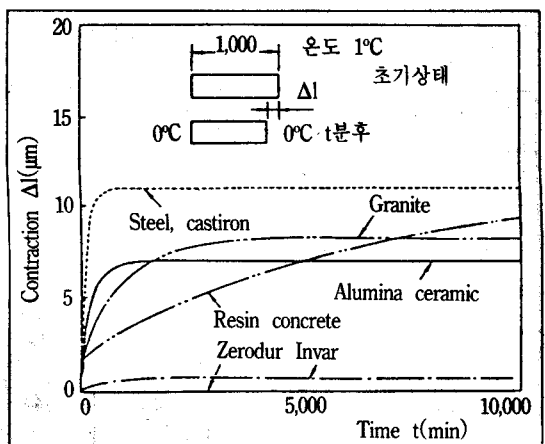


Fig.(3-9) 재료의 열변형

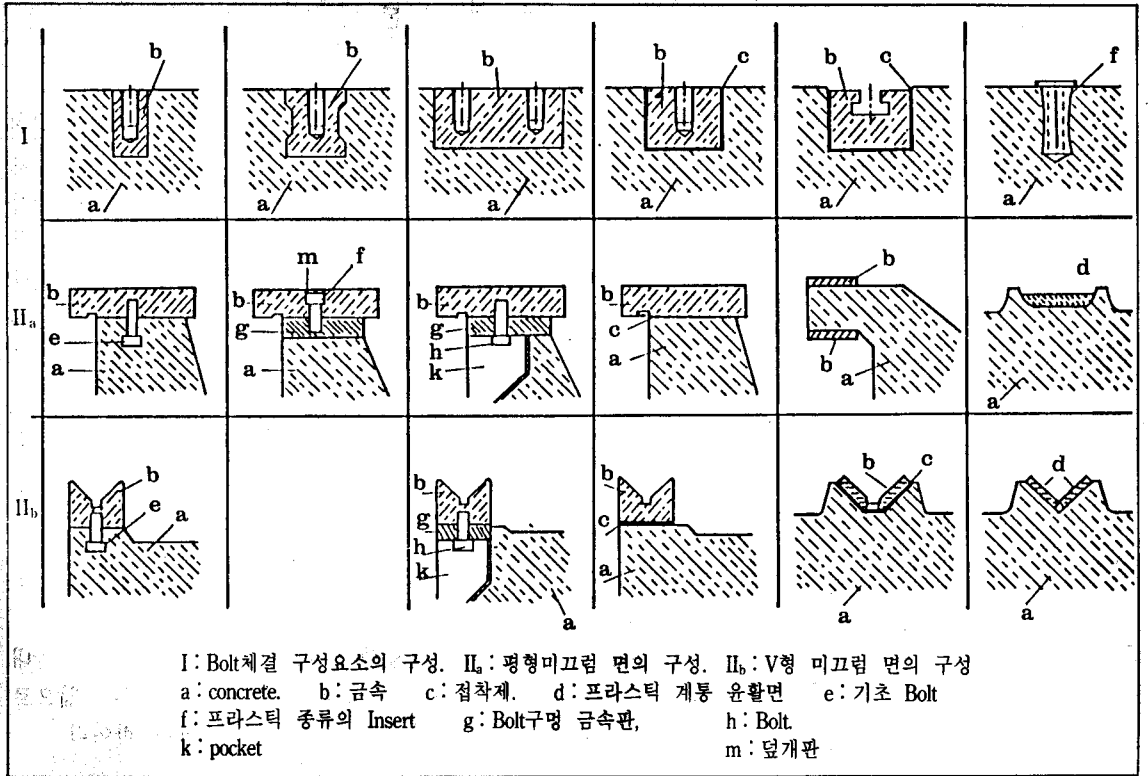


Fig.(3-10) concrete등의 신재료에 금속 부품을 결합하는 방법(schulz)

β 는 선팽창율(α)과 온도 전도율(k)을 곱한 것이 이 값이 작을 수록 온도변화에 대한 시간적인 치수변화가 작음을 뜻한다. 그러므로 Table(3-2)에서 β 의 값을 보면 Zerodur, Invar, Resin Concrete, Granite, Alumina Ceramic, Steel, Cast Iron 순으로 크게 나타나고 있으며 이순서에 따라 재료는 온도 변화에 민감하고 열변형도 크게 되어 가고 있음을 이해 할 수가 있다.

따라서 상기의 재료를 구조성능, 제작성, 경제적 측면 등에서 종합적으로 고려할때 조정밀 공작 기계의 구조에 이용할 수 있는 재료는 Granite가 적당한 것으로 판단된다.

3.4. 기 타

Concrete 및 Ceramic계통의 신재료 Bed에 안내면 등의 기계 부품을 결합하는 방법은 Bed의 구조

형식에 따라 달라지나 다음 4가지의 구성방법을 기본으로 한다.

- ① 안내면·등의 기계 부품까지도 신재료(Concrete, Ceramic)로 제작하는 방법.
 - ② 안내면은 주철이나 Steel로 제작하여 신재료 Bed에 부착하는 방법
 - ③ 신재료 Base에 주철 Bed를 장착하는 방법
 - ④ 강판 구조에 신재료를 충전하는 방법
- 여기서 ③, ④ 방법은 제작 조건에서 큰 문제는 되지 않으나, 방법 ②의 안내면 고정방법은 주의가 기울여야 할 사항이다. 참고로 Schulz의 연구보고에 의하면 신재료에 금속 부품을 결합하는 방법으로서 Fig(3-10)과 같은 내용을 제안하고 있다.

즉, Fig(3-10)에 의하면 Concrete구조를 제조할 때 미리 Steel Block등을 구조에 심어 놓는 방법과 Concrete가 경화한 후에 접착제 등으로 접합하는 방법을 주요내용으로 하고 있으며 상기 그림에서

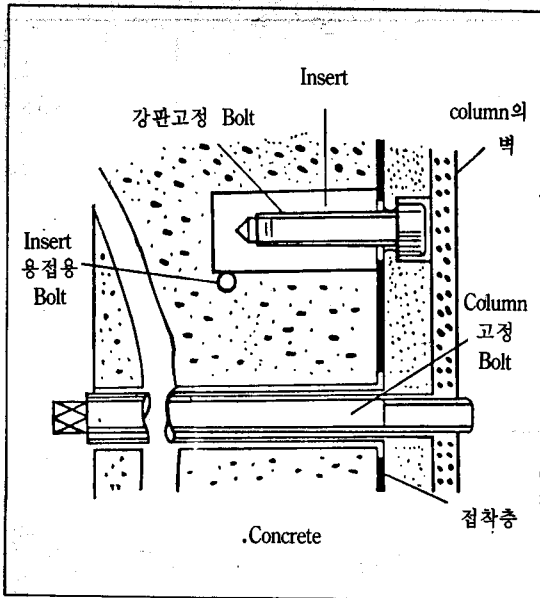


Fig.(3-11) Concrete Bed와 column의 결합방법의 예 (MTIRA)

(항목 I)은 기계 부품을 Block등으로 고정하는 방법이고 (항목 II)는 안내면의 구성방법을 나타내고 있다. 특히 금속 부품을 결합시 비교적 간단한 설치법인 접착제에 의한 방법은 접착제가 굳을 때 部材가 수축하는 특성에 주의를 기울여야 하며 일례로 (항목 I)의 T형 구조와 같은 금속을 접착하는 경우에는 접착층 두께를 일정히 유지해 변형이 방지 되도록 접착 부분의 구조는 높은 평면도로 가공되어야 하고 더불어 설치시에는 T형구조 전체를 한꺼번에 부착하는 것이 아니고 低面, 側面으로 분리해 접착제를 유입시키는 것이 좋다. 또한 접착한 후 기계 가공을 할 경우에는 접착에 의한 수축 및 변형량과 가공여유를 미리 고려하여 실시할 필요가 있다. 한편 철근 Concrete구조에서 Bolt를 체결하기 위한 Insert는 부착 강도가 증가되도록 Fig(3-11)과 같이 미리 Concrete구조내의 철근에 Insert를 용접하여 제조하면 Concrete구조가 파괴 되지 않는 한 Insert는 강하게 부착이 된다.

4. 결 론

초정밀 공작기계에서 구조설계 방법의 중요사항은 대칭성을 고려해야 하는 것이며 이는 본체의 기하학적인 대칭구조 뿐만 아니라 습동부의 세부사항과 발열 및 열유동의 대칭성까지도 고려하여 가공점이 역학적인 Node점에 위치되도록 해야 한다는 사실이고, 이밖에 열변형 및 시간에 대한 치수적 안정화와 감쇠능이 우수한 Granite 등의 신재료의 선정과 외부로 부터의 진동차단을 위한 Air Spring 등의 방진장치 설계에 관한 사항도 중요한 사실로서 검토하였다. 이상으로 검토된 여러 내용은 초정밀 공작기계로서의 성능을 다 하도록 정밀도의 안정화를 위한 방안들이며 이들은 공작 기계의 설계론 입장에서 볼때 결국 기본이 되는 사항들에 지나지 않으므로 일반 공작계류의 설계 기술에도 활용이 가능하다.

따라서, 본稿에서 기술된 여러 사항들은 국내 공작 기계류의 성능향상에 보탬이 되어 앞으로 많은 발전이 있게 되기를 기대하는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) 古川勇二 “超精密 工作機械의設計(1)”, 機械と工具 OCT. (1989)
- 2) 堤正臣 “コンクリート 構造 工作機械의性能と設計資料” マシニスト Vol.28 No.1
- 3) 稻崎一郎 “超精密工作機械의 性能と條件” 工作機械 84
- 4) 西脇信彦 “工作機械의熱變形特性に關する基本式” 機械と工具 APR. (1990)
- 5) 古田嘉太郎 “超精密加工機械의基礎技術”, 超精密加工 マニュアル 應用機械工學別冊, (1989)
- 6) 坂場晃三, “超精密加工用 防振技術(基礎編)” 機械と工具, SEP. (1988)
- 7) F. KOENIGSBERGER, J. TLUSTY “Machine Tool Structure, Vol.1” Pergamon press, (1970)
- 8) 市川語 “有限要素法 による 工作機械 의 設計” 應用機械工學 APR.(1978)