

# 공작기계기술의 현재와 미래(4)

강 철 희\*

## Machine Tool Technology; The Present And The Future (4)

C. H. Kahng\*

### 강좌 시리즈 차례

- |                                 |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| (1) 서론                          | (11) 새로운 공구와 공작기계 설계방향  |
| (2) 공작기계의 고속화와 고성능화             | (12) CNC 연삭공작기계         |
| (3) 고속MC의 Tooling               | (13) EDM, Laser가공기계     |
| (4) 공작기계의 정밀화                   | (14) 다기능 공작기계와 미래공작기계   |
| (5) 공작기계 오차의 원인과 대책             | (15) 공작기계의 성능평가         |
| (6) 공작기계의 새개념 (VARIAX, HEXAPAD) | (16) 측정 기술, Sensing 기술  |
| (7) 새로운 CNC 콘트롤                 | (17) 생산시스템 (FMC, FMS)   |
| (8) 머시닝센터의 미래                   | (18) Metal Forming 공작기계 |
| (9) CNC-선반의 미래                  | (19) 미래의 생산 (CIM, IMS)  |
| (10) 초정밀 가공공작기계                 | (20) 우리의 갈길             |

### 4. 공작기계의 정밀화

#### 4-1. 서론

1775년에 Steam Engine의 Cylinder를 제작하기 위하여 Horizontal Boring Machine이 영국의 John Wilkinson에 의해서 제작되었다. 그것이 인류가 제작한 금속을 절삭할 수 있는 최초의 공작기계라고 기록되고 있다. 그 때의 공작기계 정밀도는 얼마나 되었을까? Tolerance와 Roundness등은 얼마나 되었을까? 라는 의문과 현재 실현할 수 있는 공작기계의 정밀도는 얼마

나 될 것인가를 생각하면서 오늘날의 공작기계가 있게 한 그 동안의 과정과 기술의 발전을 더듬어 보아야 할 것이다.

1983 CIRP Meeting에서 Taniguchi 교수가 특색 있는 Key-Note Paper를 발표하였다.<sup>(1)</sup>

그가 발표한 내용은 Fig 4-1에서 볼 수 있는 바와 같이 도달할 수 있는 가공정밀도를 보통, 정밀, 초정밀의 세 가지로 나누어 1900년과 2000년 사이에 변천하는 과정을 정리하였다. 여기서 정밀도라 함은 Dimensional Accuracy로서 Tolerance(Length, Diame-

\* 統一重工業(株) 전무

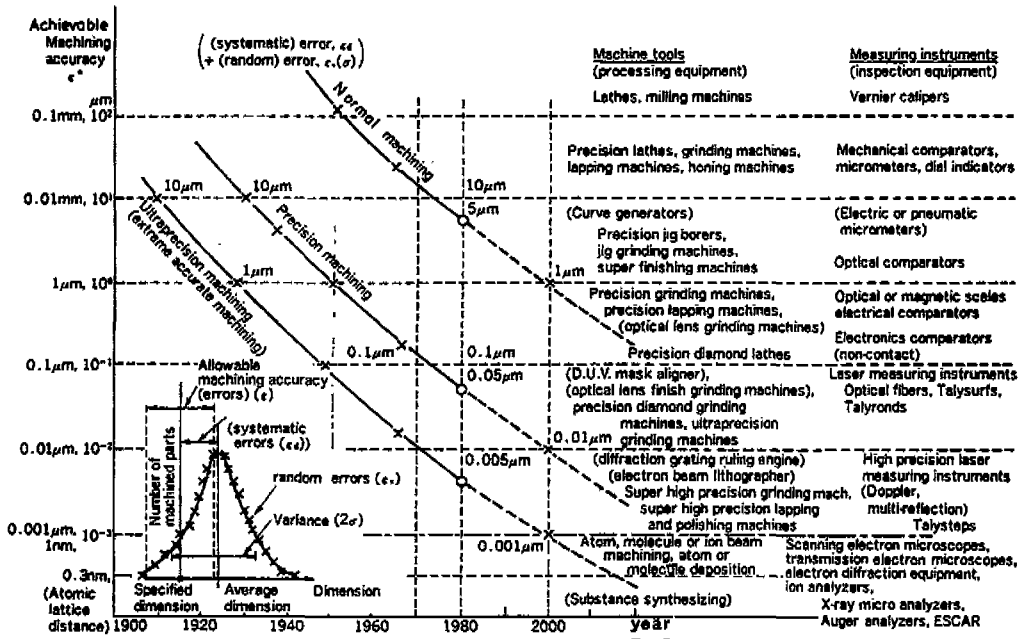


Fig. 4-1 The development of achievable machining accuracy

ter)를 말한다.

보통가공은 1950년에 0.1mm를 실현한 가공정밀도가 2000년에 1μm에 도달하게 된다. 50년 사이에 1/100로 내려가게 된것이다. 초정밀가공은 1900년 10μm, 1930년 1μm, 1950년 0.1μm, 2000년대에는 0.001μm에 도달 할 것이고, 20년 사이에 10배 이상씩 정밀도가 향상된다는 것을 말하고 있다.

2020년경에는 도달할 수 있는 가공 정밀도가 Atomic Lattice Distance (원자의 격자간의 간격)인 0.3nm까지 도달할 것으로 보고 있다. 초정밀가공에서는 1930년 이후 가공정밀도 단위가 μm에서 1000분의 1인 nm(nanometer)로 움직여 가고 있음을 알 수 있고 지금은 Nomometer시대라고도 말하며 정밀도 단위를 nm로 많이 사용하고 있다.

이와 같이 정밀도가 비약적으로 향상된 이유는 User가 가공품의 정밀도를 점점 엄격하게 계속적으로 요구하고 있고, 그럼에서 볼 수 있듯이 정밀하게 가공할 수 있는 공작기계를 설계 제작하는 것이 가능해졌고 그 미세한 단위의 측정을 가능하게 만든 측정기의 발달과 함께 공구 및 신소재의 개발이 병행되기 때문이다. 다시 말해서 이와 같은 정밀도의 요구가 거기에 알맞게 공작

기계와 측정기를 만들 수 있게 했다고 생각할 수도 있다. 측정기 발달을 보면 기계적인 것으로부터 전기, 광학, 전자, Laser 등으로 정밀도에 따라서 발달해 가고 있으며 이것은 과학의 발달과 더불어 가능해진 것이다.

일반 공작기계에 대한 업계의 요구 사항은 시대와 더불어 점차적으로 변하고 있으며 최근 독일에서는,

- (1) 경쟁력을 가지게 하는 기계
- (2) 신뢰도가 있는 기계
- (3) 정밀도가 높고 정적, 동적, 열적으로 우수하고 마모를 적게하여 수명이 긴 기계
- (4) 가공 시간을 단축시킬 수 있는 기계
- (5) 유연성이 풍부한 기계
- (6) 간단한 구조로서 공구, 치구 그리고 체어가 간단한 기계를 요구하고 있다.<sup>12)</sup> 여기서 우리가 주목해야 할 점은 (3)항인 정밀도가 높으며 정적, 동적 그리고 열에 대한 강성이 우수한 기계가 요구된다는 사실이다.

공작기계의 정밀도라 하면 전술한 바와 같은 Dimensional Accuracy 외에 Geometric Accuracy를 생각하지 않을 수 없다. 공작기계가 가공하는 공작물을 Tolerance에만 만족시킬 것이 아니라 기하학적인 Form(형상)도 만족시켜야 하고 이 요구가 엄격해지는 경향이 있다. Fig. 4-2에 그 기하학적 Tolerance를 정리하였다. 여기서 볼 수 있듯이 가공된 Work는

Type of feature	Type of tolerance	Characteristic	Symbol
(Individual (no datum reference))	Form	Flatness	$\square$
		Straightness	$\text{—}$
		Circularity/roundness	$\bigcirc$
Individual or related	Profile	Cylindricity	$\bigcirc$
		Profile of a line	$\text{—}$
Related (datum reference required)	Orientation	Profile of a surface	$\cup$
		Perpendicularity	$\perp$
	Location	Angularity	$\angle$
		Parallelism	$\parallel$
		Position	$\oplus$
	Runout	Concentricity	$\odot$
		Circular runout	$\nearrow$
		Total runout	$\searrow$

Fig. 4-2 Various geometric characteristics

Form, Profile, 방향, 위치, Runout 등의 형상공차를 만족해야 정밀한 가공품이라고 말할 수 있다. 공작물을 이와 같이 정밀하게 가공하려면 공작기계 자체는 더욱 높은 자체 정밀도를 보유하고 있어야 하며 그 정밀도는 오랫동안 사용하여도 변하지 않고 유지되어 있어야 한다.

공작기계 전반에 걸쳐 정밀도를 논한다는 것은 너무 광범위한 과제이므로 본 장에서는 공작기계 설계와 제조에 있어서의 핵심적인 정밀도를 높이려할 때 고려해야 될 사항들을 논하고자 한다.

#### 4-2. 정밀도에 미치는 인자

공작기계 구조는 Hardware 측면에서 볼때 세 가지로 나눌 수 있다. 주축, 이송장치와 기계 본체라고 말할 수 있다. 주축은 절삭속도를 가지고 있고, 이송장치는 절삭운동에 직각으로 이송(공구 또는 가공물)시키며 기계 본체는 Bed, Column Bed(Saddle), Column 등을 말한다. 그리고 기계에 따라서 다르지만 여러가지 부속장치를 가진다.

공작기계의 가공정도와 가공한계를 지배하는 여러 인자의 관계를 Fig. 4-3에 표시하였다. 공구가 Program한대로 Work의 어떤 궤적에 따라서 상대운동을 하면 요구하는 정도가 얻어져야 하지만 실제로는 설정한 조건으로 작업이 개시되면 공작기계는 정적, 동적, 열적 외부간섭을 받게되어 변형을 일으킨다. 이 변형이 공작기계 자체의 기하학적정도에 추가되어 실질적인 가공품의 가공정도를 결정한다. 따라서, 가공정도를 논하려면 공작기계 자체의 정밀도도 중요하지만, 정, 동강성, 그리고 열강성을 철저히 규명해야 한다. 일반적으로 어떠한 조건하에서는(대체로 중절삭할 때) 가공중에 Chatter 진동이 발생하여 정밀도를 손상시키고, 공구를 파손시켜 작업을 계속할 수 없게 한다. 이것은 공작기계의 동적변형과 관계가 있으므로 과학적인 규명이 필요하다. 가공정도와 가공한계에 영향을 주는 인자들의 발생기구는 매우 복잡하다. 이 문제 해결을 위하여 여러 선진국에서는 끊임없이 연구를 진행하고 있고, 구성요소가 지배하는 가공오차는 크게 나누어 공작기계, 공작물, 공구에서 나온다. 공작기계에 있어서 정변형, 열변형, 동적변형이 없는 것이 가공오차를 없애고, 가공정밀도를 얻는 것이 된다. 주로 주축계, 이송계와 구조물을 정밀하게 운동할 수 있게 설계하고, 제작하면 되는 것이다. 여기서는 가장 중요한 주축과 Guideway의 정밀도 향상에 대하여 논하기로 한다.

#### 4-3. Spindle의 정밀도

##### 4-3-1. Spindle의 설계

Spindle은 공작기계에서 가장 핵심적인 요소로서 정밀도에 미치는 영향은 지대하다. Spindle은 강(Rigid)하게 Clamp되어 있지도 않고 Bearing에 의해서 자유스럽게 지지되고 있다. Spindle Bearing은 저속에서 고속으로 넓은 회전범위 내에서 회전 정밀도를 유지하고 강성을 보유하고 있어야 한다. 그러기 위해서 공작기계용으로 특별하게 Rolling Bearing이 개발되어 회전 정밀도가 높고 강성이 있으며 마찰이 적어 열에 의한 팽창을 적게 하고있다. Fig. 4-4는 일반적으로 사용되고 있는 Bearing의 정밀도에 관한 기준을 표시하고 있다.<sup>(3)</sup> 여기서 보는 바와 같이 각 Bearing의 Type에 따라서 그 성능이 다르다. 각 Type에 따라서 정밀도가 Sp=Special Precision, Up=Ultra-Precision으로 분류할 수 있으며 보통 Tolerance P2급부터 P5급까지의 Bearing이 제작되고 있다. 또 Bearing은 Shaft와

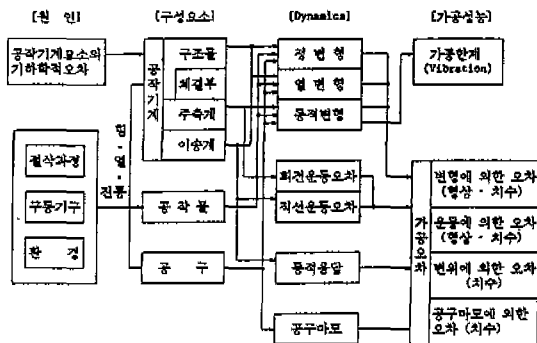


Fig. 4-3 Factors which influence machined accuracies

Bearing			Tolerances		
Type	Precision designation	Mounting position	Tolerance range	Geometry	Alignment
	S P	Shaft		IT 2	IT 1
		Housing	K 5	IT 2	IT 2
	U P	Shaft		IT 1	IT 0
		Housing	K 4	IT 1	IT 0
	P 5	Shaft	js 5	IT 2	IT 2
		Housing	H 6	IT 4	IT 2
	P 4	Shaft	js 4	IT 1	IT 1
		Housing	H 5	IT 3	IT 1
	S P	Shaft	k 4 Fixed	IT 2	IT 2
		Shaft	js 4 Adjustable	IT 2	IT 2
	Housing	H 5 Rigid bearing	IT 3	IT 2	
		H 5 Free bearing	IT 3	IT 2	
	P 5	Shaft	js 5	IT 2	IT 2
		Housing	JS 6 Rigid bearing	IT 3	IT 2
	P 2	Shaft	js 3	IT 0	IT 0
		Housing	JS 4 Rigid bearing	IT 1	IT 0
	S P	Shaft	h 5	IT 1	IT 1
		Housing	K 5 Rigid bearing	IT 2	IT 2
	U P	Shaft	h 4	IT 0	IT 0
		Housing	K 4 Rigid bearing	IT 1	IT 0
			G 6 Free bearing	IT 1	IT 0

Fig. 4-4 Guidelines for the machining of bearing seatings and shaft mountings

Housing 사이에 조립 되는데 그 때의 Shaft Diameter와 Housing Hole에 대한 Tolerance의 범위를 명시하고 있으며 Geometry와 Alignment에 대한 Tolerance를 엄격히 정해 놓고 있다. 이것은 독일 Bearing 제조업자들이 자사 상품을 효율적으로 사용하여 성과를 얻으려면 꼭 지켜야 할 Tolerance 범위내에서 가

공 정밀도를 보증해야 한다는 요구이고 거기에 따라서 독일공업규격(DIN)으로 그 범위를 정해 놓고 있다.

초기의 MC에는 Taper Roller Bearing을 사용하여 진원도가 6~10 $\mu$ m이었으나, 원통 Roller와 Angular Contact Bearing을 같이 사용할 때는 2~4 $\mu$ m의 진원도를 얻어 매우 향상된 결과를 얻었다. 10년전부터 Angular Contact Bearing을 사용하는 경우가 대부분이고 0.5~2 $\mu$ m정도의 Radial 회전정밀도를 얻고 있다. 최근에는 1 $\mu$ m이하 또는 서브마이크론 시대에 도달해 있다. 또한, 초정밀 동작기계 설계를 위해서 Hydrostatic, Hydrodynamic, Aerostatic등 여러 Bearing이 개발되어서 사용하고 있으나 현재 90%이상의 동작기계에는 여전히 Rolling Bearing을 사용하고 있는 실정이다.

각 Bearing에는 Play가 있으며 정적인 상태의 Play가 회전운동을 할 때는 Running Play라고 하여 정적이 상태의 Play와 다르게 나타난다. 이것은 회전할 때 Bearing 내에서 발생하는 열이 원인인 것으로 보고 있다. Bearing Resilience  $\delta$ 는 Bearing Ring에 가해지는 외부힘 F에 의해서 Play가 Negative Play를 ( $\Delta r < 0$ ) 얻는 것이다. (Fig. 4-5) 그림의 왼쪽부터 설명하면 보통 Bearing은 외부에서 가해지는 힘이 없는 경우 Ball과 Ring사이에서 + $\Delta r$ 이란 Play를 만든다. 그러나, 이와같은 Bearing은 외부에서 힘이 가해지면 Bearing의 중심위치가  $\delta$ 만큼 가해지는 힘 Fr 방향으로 변위한다. 그리고, 힘을 받은 범위는 각 - $\psi$ 에서 + $\psi$ 사

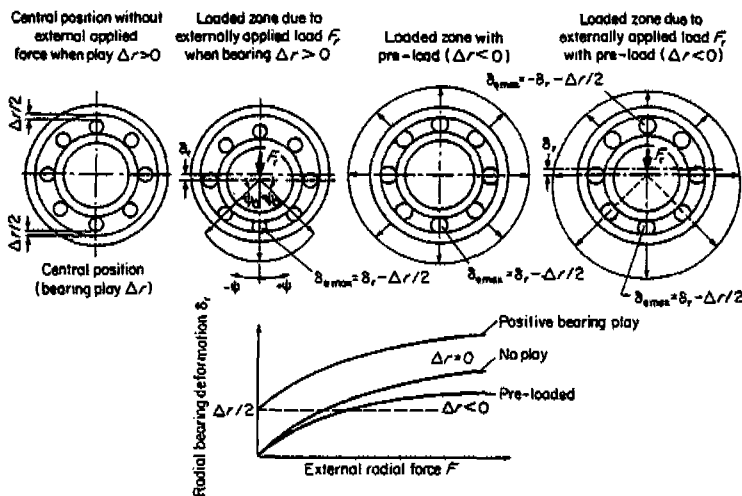


Fig. 4-5 Relationship between bearing play, loaded zone and bearing resilience

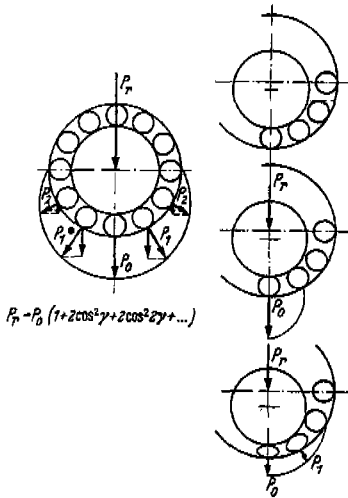


Fig. 4-6 Load distribution in a ball bearing

이 뿐이고 360°보다 훨씬 적으며 외부힘을 지지하는 Ball은 전부다 아니고 몇 개에 지나지 않는다. 이 결합을 없애기 위하여 Preloading(예압)을 해야한다. Ring의 Dia를 Bearing의 Dia보다 적게하여 강제로 조립시키면 Play가  $-\Delta r$ 이 되고 외부에서 힘이 가해질 때 힘을 Ball 전체가 받게 되며 Radial 방향의 Deformation(변형)을 감소시킬 수 있다. 그럼 하부에 Play의 세 가지 경우 Positive, No Play, Preload의 차이를 나타내고 있다. 이와 같이 Bearing에 예압을 가해 줌으로써 Spindle이 절삭시 외부의 부하에 견디고 회전 정밀도를 얻게하는 노력이 일찍부터 실행되고 있다.

Honrath<sup>(4)</sup>는 Aachen공대 공작기계 연구소에서 Bearing-Spindle System에 관한 귀중한 연구를 하였으며 그 결과가 공작기계 업계에서 많은 참고가 되고 있다. Ball Bearing에 외부 힘을 점점 크게 해 주면 변형이 각 부분에 균등하게 되며 Specific Pressure(단위압력)가 적어진다. 이것은 Back Bending Effect(굽힘을 되돌려 보내는 효과)라고 부르며 자유롭게 지지되고 있는 경우와 다르다는 것을 말하고 있다. (Fig. 4-6) 이 결과가 Bearing의 Play가 Stiffness(강성)에 영향을 준다는 것을 증명하고 있으며 특히 Negative Play는 Preloading한 Bearing에서 일어난다. (Fig. 4-7) Fig. 4-8에서 보는 실험 결과는  $-15\mu\text{m}$ 의 Negative Play의 Spindle Deformation은  $16\mu\text{m}$ 인 것에 비해  $15\mu\text{m}$ 의 Positive Play를 가지는 Spindle은  $30\mu\text{m}$ 의 Deformation을 얻게되므로 어떤 Bearing을 사용

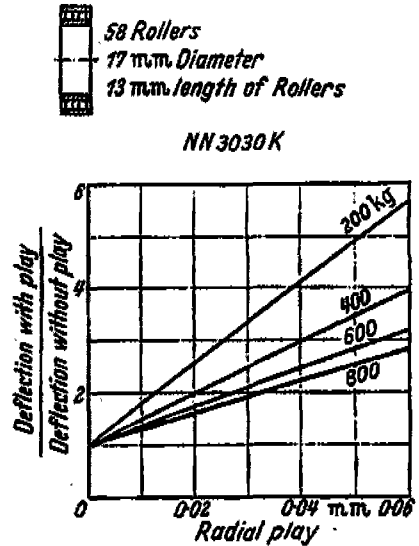


Fig. 4-7 Stiffness as a function of play in a roller bearing

해야 하는 것인지 잘 나타내고 있다. Honrath는 이것을 증명하기 위하여 Mohr's Graphical Method를 쓰면서 하중 1000kg이 Spindle의 선단에 가해질 때 Spindle의 Deflection 상태가 어떠한가를 이론과 실제 측정된 결과를 비교하였으며 양자가 잘 일치한다는 것을 증명하였다. (Fig. 4-9) Spindle 설계에 있어서 두 Bearing의 위치선정이 중요하다는 것은 Fig. 4-10에서 보여주고 있다. 그림은 b/a에 대한 Bearing의 Play에 의해서 얻어지는 Deflection과 Cantilever 때

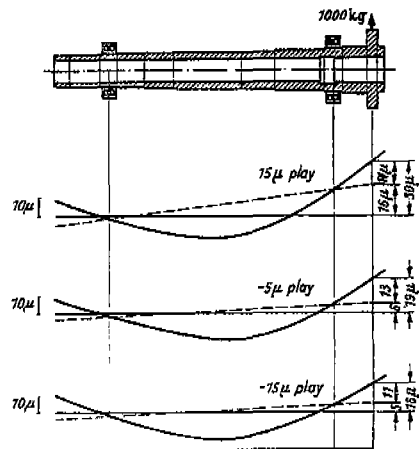


Fig. 4-8 Static spindle deflection at different values of play

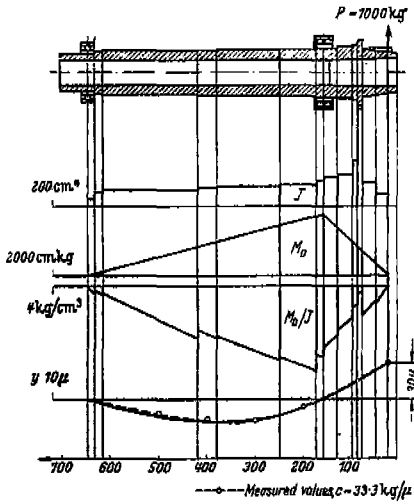


Fig. 4-9 Comparison of measured and graphically determined spindle deflection

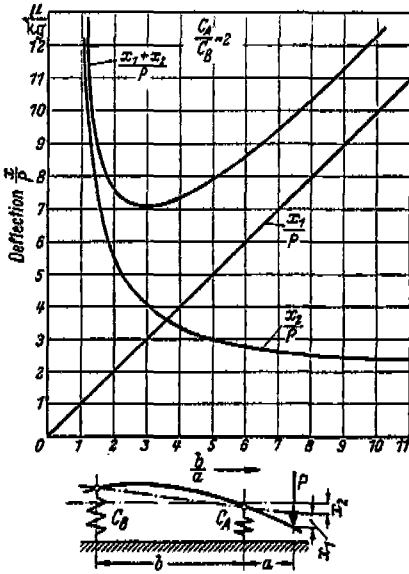


Fig. 4-10 Determination of optimum bearing spacing

문에 일어나는 것을 합한 것이 포물선으로 표시되어 있고, 양 Bearing의 Stiffness는 다르지만 비율이 2라는 것을 전제하고 있다. 여기서 최소의 Deflection은 그림에서 보는 바와 같이  $b/a=3$ 인 경우임을 알 수 있으며 Spindle의 긴 Overhang은 Deflection의 관점에서 바람직하지 못하다는 것을 증명하고 있다.

Aachen 공대 교수 Weck<sup>(2)</sup>는 Spindle Deflection

을 Spindle에서 일어나는  $Y_{sp}$

$$Y_{sp} = \frac{Fba^2}{3JE} \left(1 + \frac{a}{b}\right)$$

Bearing에서 일어나는  $Y_L$

$$Y_L = \frac{F}{b^2} \left[ \frac{(a+b)^2}{k_A} + \frac{a^2}{k_B} \right]$$

그리고, Bearing Housing의 Bending  $Y_K$ 의 세가지를 합한 것으로 보고 있다.  $Y_K$ 는 매우 계산하기가 복잡하여 FEM을 사용하면 가능할 것이다.

따라서, 전체 Deflection  $Y$ 는,

$$Y = Y_{sp} + Y_L + Y_K$$

로 표시할 수 있다. (Fig. 4-11) 질삭시 일어나는 점의 Flexibility  $1/k$ 은,

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{sp}} + \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_K} = \frac{Y_{sp}}{F} + \frac{Y_L}{F} + \frac{Y_K}{F}$$

로 나타낼 수 있다.

다시 한번 여기서 알 수 있는 것은 전체 Bearing-Spindle System의 Flexibility는 Bearing의 Stiffness 두 Bearing 간의 거리 ( $b$ ), Cantilever의 거리 ( $a$ ), 그리고 Spindle의 결합구조에 좌우된다는 것이

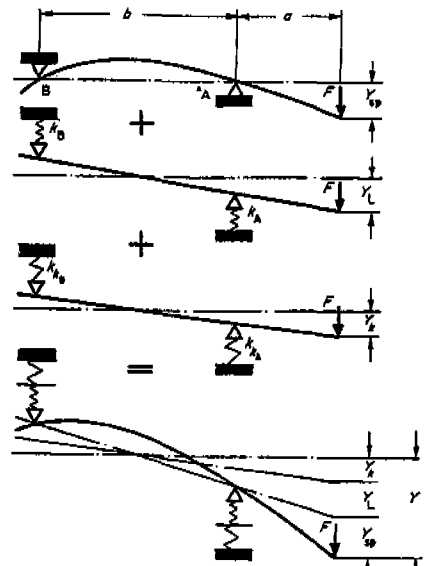


Fig. 4-11 Deflections of a main spindle

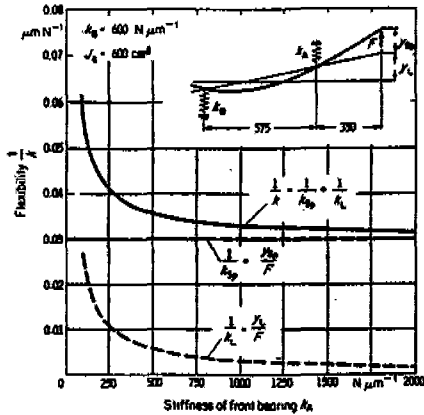


Fig. 4-12 Flexibility of a system in relation to the stiffness of the front bearing

다. Front Bearing의 Stiffness  $K_A$ 가 Bearing-Spindle System에 어떤 영향을 주는지를 실험한 결과가 Fig. 4-12에서 볼 수 있다. Front Bearing의 Stiffness가 적을수록 절삭가공시 발생하는 절삭력  $F$ 에 대한 Flexibility가 커지고 따라서 절삭이 일어나고 있는 Tool Nose에 변위가 크게 발생하여 가공정밀도를 저하시키게 된다. 이 실험에 있어서  $K_A > 750 N \mu m^{-1}$ 일 때는 Flexibility에 아무런 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

4-4-2. Bearing-Spindle System 제작

전술한 바와 같이 Spindle의 설계에서는 Radial 방향의 Rotation Accuracy보다도 System의 Deflection을 최우선으로 고려한 Bearing의 선택 위치선정, Bearing의 Play 등의 최적 조건을 선택해야 한다. 아무리 설계가 잘 되었다 하더라도 실제 Spindle을 제조, 조립하는 과정에서 Error가 속출하면 그 Spindle을 사용하는 공작기계는 정밀한 가공을 할 수 없게 된다. Spindle의 종류는 아주 많으며, 제조과정도 수많은 Case가 있으므로 이것을 여기에서 다 논한다는 것은 불가능하다. 일반적인 Spindle 제작에 있어서의 고려 사항만을 여기에 기술하겠다.

Spindle은 공작기계에 있어서 핵심 요소이며 가공중에 열의 영향을 받지 않아야 하지만 전술한 바와 같이 급속은 1m의 길이에 1℃의 온도 상승에 따라서 10μm의 신장을 일으킨다. 그러므로 중요 공작기계 Maker에서는 항온, 항습실을 설치하여 항상 동일한 온도 (20℃ ±

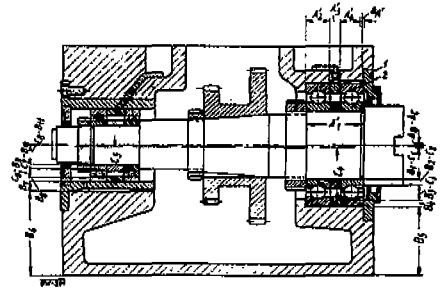


Fig. 4-13 An example of spindle construction

1℃)를 유지해 가면서 가공, 조립을 하고 있다.

Fig. 4-13에 표시한 바와 같이 Spindle은 Bearing, Journal (Shaft) 그리고 Housing으로 구성되어 있다. Journal이 오차가 없이 가공되어 있어야 한다는 것은 절대 조건이다.<sup>(6)</sup> Spindle을 조립할 때 Journal에 Bearing을 끼워 Housing에 삽입해야 한다. 이 때의 Housing은 대체로 주물로 되어 있으며 균일한 Wall Thickness를 가지고 있다. 이 Housing에 어떤 Tolerance를 만족하면서 두 개 또는 그 이상의 Hole에 Boring을 해야 한다. 이 때 일어나기 쉬운 것이 Fig. 4-14에서 제시한 Concentricity 오차이다. Hole의 Concentricity 오차는 Boring Bar가 Cantilever로 되어있기 때문에 절삭력에 의해서 먼 곳에는 Deflection이 발생하여 첫번째 Hole과 똑같은 중심을 지키지 못하기 때문이다. 또, 열상승에 따라서 열변위를 일으키기 때문인 경우도 있다. 또한 Journal (Shaft)를 Housing Hole에 조립할 때 발생하기 쉬운 것은 Wall의 면과 Journal의 축 사이의 직각도를 맞추는데 오차가 발생하는 것이다. 숙련 기술자가 하거나 해당되는 측정기를 사용해 가면서 작업을 해야 한다. Housing Wall과 Journal축의 직각도 오차가 발생하는 경우를 그림 Fig. 4-15에서 볼 수 있다. 이와 같은 수많은 오차는 가공에서 또는 조립과정에서 발생한다. 조금 복잡한 Spindle Housing의 예를 들면 Fig. 4-

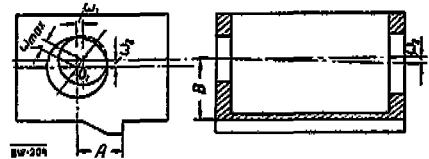


Fig. 4-14 Concentricity error after boring

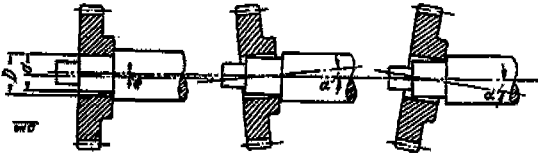


Fig. 4-15 Parallelism errors in Spindle assembling

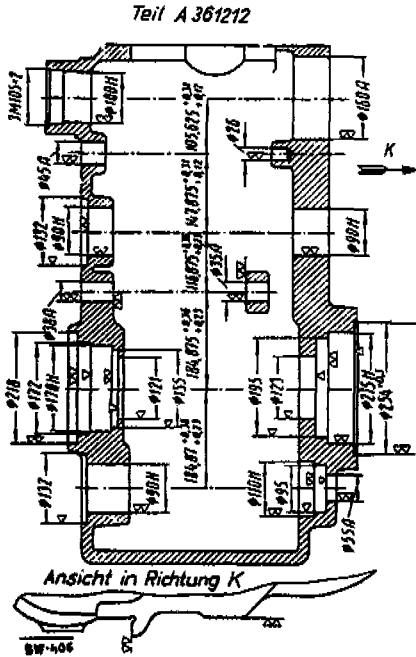


Fig. 4-16 Bored holes for spindle housing

16에서 볼 수 있다. Journal을 지지하기 위하여 Bearing을 삽입시키기 위한 Bored Hole이 서로 상호 관계를 가지고 그 위치를 차지하고 있다. 일부 Hole은 3단계, 4단계의 Diameter가 다른 것이 있다. 이 Hole들의 Diameter Tolerance와 Location Tolerance가 정밀할수록 Spindle의 성능은 좋아지는 것이다. 다시 Fig. 4-13을 보면 수평방향의 Location Tolerance Group A와 수직 방향의 Location Tolerance Group B가 표시되어 있으며 전면의 Housing Hole과 Journal의 중심의 오차인  $C_4$ 와 후면의 오차  $C_5$ 를 잘 나타내고 있다. Spindle 뿐만이 아니고 공작 기계 전체의 정밀도는 설계와 제작 부분 모두 똑같은 책임이 있으며 좋은 장비를 보유하고 시설이 완벽하며 장인정신을 지닌 숙련공들이 최선을 다하는 공장만이

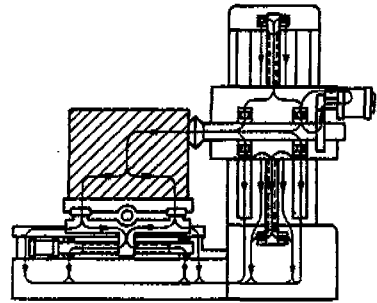


Fig. 4-17 Force-flux diagram of a machine tool

정밀한 공작기계를 생산할 수 있는 것이다.

#### 4-5. Bed, Column의 정밀도

Fig. 4-17에서는 Horizontal Boring Machine의 Force Flux(힘의 흐름)을 나타내고 있다. 절삭할 때 발생한 절삭력이 기계의 각 요소에 전달되는 것을 나타내고 있으며 이 Flux는 Bearing, Spindle, Sliders, Lead Screw 등에 전달된다.

또, 단순히 공작기계의 각 요소가 Series 또는 Parallel의 탄성요소로 서로 연결되어 있다고 가정할 때 전 Flexibility( $d_{tot}$ )는 Series 연결한 요소와 Parallel(평행) 연결된 요소를 합한 것 즉,

$$d_{tot} = \frac{1}{k_{tot}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3 k_4}$$

으로 표시할 수 있다.

Force Flux Diagram에서 볼 수 있듯이 공작기계의 모든 요소가 가공할 때 다 같이 동시에 힘을 받고 있기 때문에 각 요소의 강성이 충분하게 설계되어 있어야 한다는 것을 알 수 있다. 더 나아가서 실제 눈으로 볼 수 있도록 Horizontal Boring Machine의 Deformation을 해석하기 위하여 실험한 결과를 Fig. 4-18에서 볼 수 있다.  $F_x=F_y=F_z=40,000N$ 의 힘을 준 결과 Column, Main Spindle and Housing, Bed의 순으로 Deformation이 발생하였다. Main Spindle and Housing의 Deformation은 Y 방향으로 가장 작고 Bed의 Deformation은 Z방향으로 가장 작게 나타나고 있으며 Column의 Maximum Deformation은 200 $\mu m$ 이라는 것에 주목할 필요가 있으며 각 구조물에 대한 설계가 얼마나 공작기계 전체의 정밀도에 어떤 영향을 미치는지를 알 수 있다.



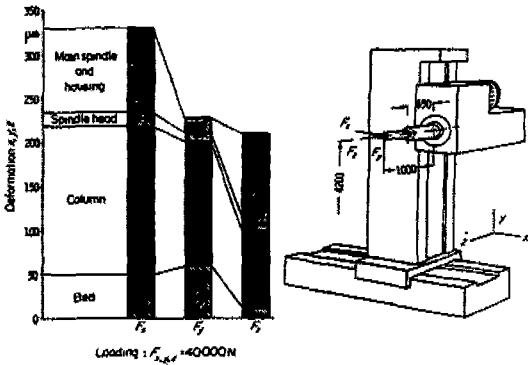


Fig. 4-18 Deformation analysis of a horizontal boring machine

Bed는 Bending과 Torsion의 두 가지 힘을 동시에 받게된다. 따라서 Bed의 구조는 양 힘에 대하여 충분한 저항력을 가져야 한다. 최근의 공작기계에는 Bed의 Cross Section을 Box형으로 하고 또 Stiffness를 올리기 위하여 Bed에 Rib를 만드는 것이 보편화되고 있다. Fig. 4-19에서는 Ribbing과 Box형 단면을 지닌 두 Bed를 비교한 것이다. 새로운 설계가 Bending과 Torsion에 30% 이상의 많은 강성이 있다는 것을 알 수 있다. 여러 Cross Section과 Rib의 형태를 지닌 구조물의 외력에 견딜수 있는 저항능력에 관한 연구가 Aachen 공대 공작기계 연구소에서 광범위하게 진행되었다. 그 한 예가 Welded Bed에 대해서 연구한 결과가 Rib의 형태, 재료의 Volume, Stiffness의 반대개념인 Flexibility, 용접한 총 길이에 대해서 21개의 설계사례를 정리한 것을 Fig. 4-20에서 볼 수 있다. Rib

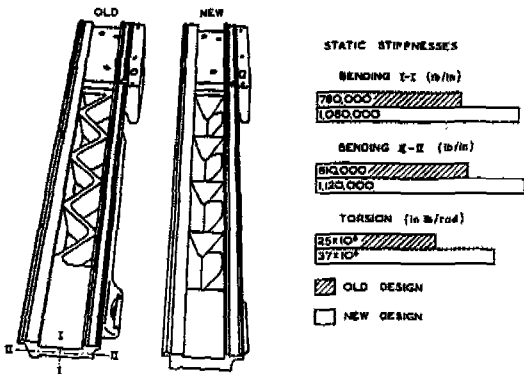


Fig. 4-19 Combined ribbing and box section arrangement

Diagram of rib design	Flexibility (loading by unit loads)		Material volumes		Joint lengths	
	Design Percentage	Design Percentage	Design Percentage	Design Percentage		
[Diagram 1]	1	100	0	100	0	100
[Diagram 2]	2	80	2	95	2	95
[Diagram 3]	3	60	3	85	3	85
[Diagram 4]	4	40	4	75	4	75
[Diagram 5]	5	20	5	65	5	65
[Diagram 6]	6	10	6	55	6	55
[Diagram 7]	7	5	7	45	7	45
[Diagram 8]	8	2	8	35	8	35
[Diagram 9]	9	1	9	25	9	25
[Diagram 10]	10	0	10	15	10	15
[Diagram 11]	11	0	11	10	11	10
[Diagram 12]	12	0	12	5	12	5
[Diagram 13]	13	0	13	2	13	2
[Diagram 14]	14	0	14	1	14	1
[Diagram 15]	15	0	15	0	15	0

Fig. 4-20 Flexibility, material volumes and joint lengths of closed machine-bed designs

의 형태에 따라서 그 결과가 30% 이상 차이가 있다는 것을 알 수 있다. Aachen 공대에서는 독일 공작기계 제조업자가 요구하는 충분한 Data를 제공하고 있으므로 공작기계 제조업자들은 대학의 연구 결과를 아낌없이 이용하고 있다. Fig. 4-18에서 관찰한대로 힘이 가해질 때 제일 많은 Deformation을 일으키는 부품은 Column이다. 이 Column Design에 있어서도 Rib의 형태가 Bending과 Torsion에 매우 큰 영향을 준다. 여기에 대한 실험한 결과를 Fig. 4-21(a), (b)에서 볼 수 있으며 Design에 따라서 수배이상의 강도 차가 나타나고 있다. 이 연구결과를 토대로 Bending과 Torsion에 대한 강도를 고려해가면서 Rib 형태를 선택할 필요가 있다. 그러나, 역학적인 고려보다도 생산가격, 생산시간등이 중요한 Factor이기 때문에 공작기계 기술자는 FEM 등을 사용하면서 전체적인 관점에서 판단하여 우수한 공작기계를 설계해야 한다.

4-6. Finite Element Optimization

독일 Aachen 공과대학을 위시하여 여러 연구기관에서는 공작기계의 요소를 물리학 또는 수학적으로 해석하여 정적, 동적, 열역학적으로 풀어보자는 노력을 옛날부터 시도하고 있었으며 Finite Element Method (FEM)를 사용하여 좋은 성과를 얻고 있다. 공작기계 설계 기술에 혁명적인 동기를 마련했다고 해도 과언이 아니다. FEM 방법은 Computer를 이용하여 구조를 세분화 해서 필요한 계산을 하여 결과를 얻게 되는 것이다. 현재 여러가지 Computer Program이 개발되어 있으며 이 방법을 사용하면 전에는 도저히 알 수 없었

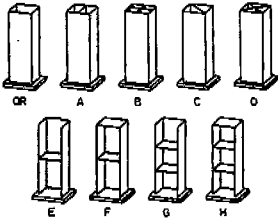


Fig. 4-21 (a) Different rib designs for machine columns

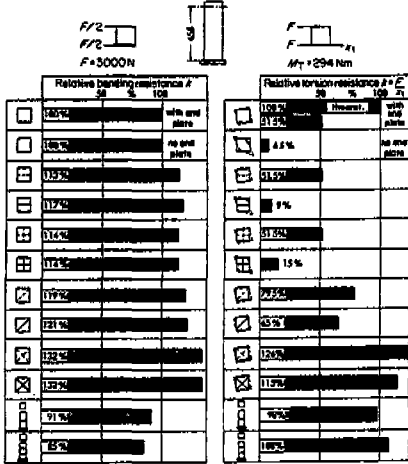


Fig. 4-21 (b) Bending and torsion resistances for machine columns

던 자세한 정보를 빠르고 정확하게 알 수 있다. Aachen 공대에서는 FINEL, FINELT 그리고 DYN-FIN 등 여러 Program을 개발하고 이 FEM을 사용하여 공작기계의 Static, Dynamic, Thermal Behaviour를 해석한 결과를 발표하여 공작기계 설계에 새로운 idea를 제공해 주었다.<sup>(6)</sup>

요소설계 분야에 있어서는 계산을 담당하는 기술자는 최적화 (Optimization)의 문제에 직면하게 된다. 수많은 해결방법과 처리방법이 있지만 FEM을 이용하여 최적화 하려면 Parameter의 최적화를 해야한다. Parameter의 최적화 방법을 사용하기 위해서는 소위 Mathematical Model Construction (수학적 모델의 구축)이 필요하다. 「수학적 모델의 구축」이란 용어는 회답을 얻고자 하는 문제를 수학적인 모델로 변환하는 과정을 말하는 것으로서 이것에 의해서 특별한 최적화 Algorithm을 적용할 수가 있다. 최적 Algorithm은 대개의 경우 반복적으로 사용된다. 반복할 때마다 이 Algorithm은 문제를 표시하는 함수를 계산하고 동시

에 최적화 Parameter에 따라서 적어도 한번은 Derivation Calculation을 계산한다. FEM을 사용하여 최적화의 계산을 하게 되면 FEM 분석에 따라서 Target 및 Constraint Function(제약 함수)의 계산이 실현된다. 이것과 별도로 현재의 최적화 Algorithm의 대부분은 Derivation Calculation(동함수)의 계산이 필요한데 이것을 Sensitivity Analyses(감도분석)이라고도 한다. FEM Optimization 계산을 하기 위해서는 Fig. 4-22와 같이 강력한 Program System이 필요하다. Column, Bed 등의 강성에 관해서 최적화 시켜야 할 기계요소의 대부분은 얇은 Wall을 결정하는 것이고 기계적 거동은 평면 Strain의 예측이 가능하므로써 평면이나 Shell 등의 FEM을 사용하여 충분한 근사치를 산출해 낼 수 있다. 중량이 일정한 경우 강성을 최대에 한다는 것이 Wall의 Thickness를 최적화 한다는 것과 같다. 원칙적으로 요소의 Thickness는 Group으로 나누어 최적 Parameter에 적용된다. 실제의 구조는 벽, Rib를 구성하는 요소를 조합한다. 그러므로써 「수학적 모델」의 최적화 결과가 현실적으로 응용될 수 있다는 것이 입증 되는 것이다.

Fig. 4-23에서는 Column의 설계에 있어서 주어진 중량을 초과하지 않고 안내면 (Guideway)의 변위를 최소로 할 수 있는 최적화 계산을 통해 얻어진 결과를 표시하였다.<sup>(7)</sup> 변위의 최소화는 강성의 최대화를 말하며 그러기 위해서는 각 요소의 Wall을 최적화하는 결과가 되는 것이다. 설계 중 기계가 주물일 때는 Parameter의 변동범위를 상한치와 하한치를 직접 얻어내면 되고 용접하는 경우에는 기존의 Plate Thickness에 한정시

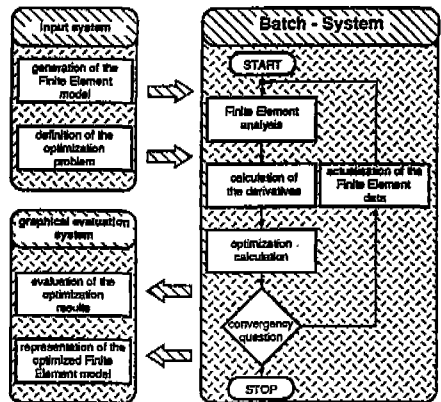


Fig. 4-22 Principle construction of finite element optimization program system

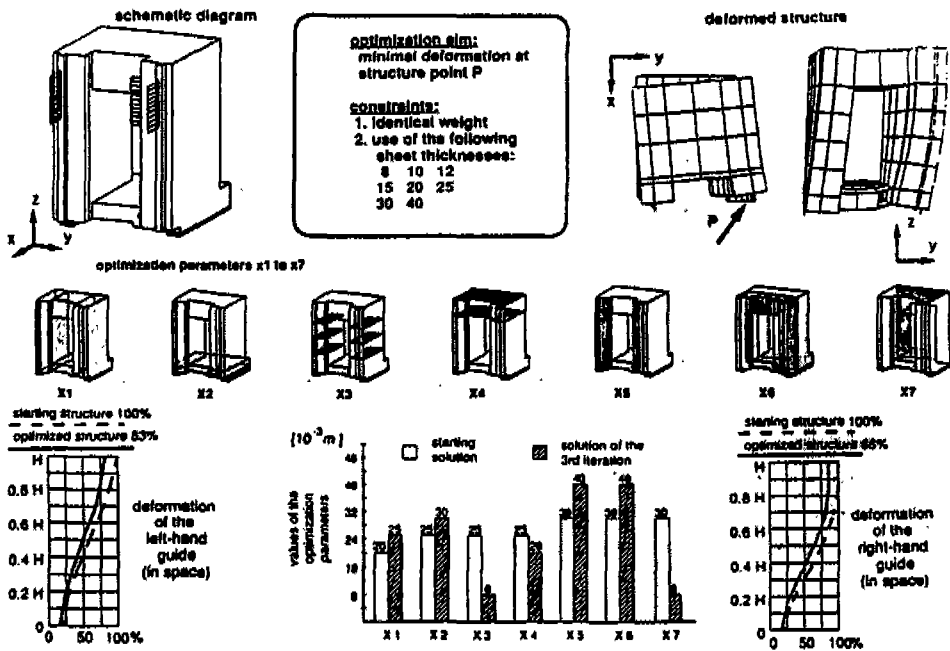


Fig. 4-23 Discrete wall thickness optimization to maximize the stiffness of a machine tool system

키면 되는 것이다. Fig. 4-23에서 보는 바와 같이 합계 7개의 최적화 Parameter가 주어져 있으며 FEM의 Thickness가 8, 10, 12, 16, 25, 30, 40의 7가지로 한정되어져 있다. 이 문제는 Point P에 힘이 가해지고 있을 때 Guideway의 변위를 17% 감소시켜야 한다는 것이다. 이것은 근차법과 이동최적화법을 합한 해석법을 지닌 Program System에 의해서 구할 수 있다. 이 그림의 하부에는 최적화를 개시할 때의 변위 Thickness와 3번 반복하여 계산하고 얻은 Thickness를 비교한 것을 7개의 Parameter별로 표시하고 있다.

FEM과 그 외 다른 방법으로 쓰고 있는 최적화방법의 특징은 개시할 때 건설적인 해답이 필요하다는 점이다. 시작할 때 필요로 하는 구조를 구상하여 설계나 내부구조 등 각 요소의 Topology(位相)에 관한 모든 질문에 대하여 설계자는 직감적으로 해답해야 할 필요가 있다. 최적한 기계요소의 자동설계를 목적으로 Topology의 최적화 방법을 알면 상황은 좋아진다. Topology의 최적화 방법은 매우 강력하며 힘이 가해지는 점, 지지점, 유효부하 등 몇 가지 조건이 있으면 기계적 구조의 예비적인 결합구조가 명백해 질 수 있다. 최적 Cross Section의 결정이 공장기계 설계에 있어서 매우

중요한 과제이다. Fig. 4-24는 Topology Optimization을 이용하여 공장기계 Column의 무게만을 최소화하는 방법을 설명하고 있다.<sup>(6)</sup> FEM의 Wall Thickness와 Rib의 위치를 결정하는 것이며 Wall Thickness의 가능성은 두 개이며 0.01mm와 10mm이고 Point P에서 변위는 1.4mm이다.

이 방법을 이용한 예가 Fig. 4-25에서 볼 수 있다. 6개의 다른 Cross Section을 가진 Column을 Initial Topology에 다 포함시키고 두번째 Iteration(반복) 후에 세계 정도의 가능한 Cross Section을 선택한 후 3, 4, 8, 10번째 반복을 하고 최종적으로 17번째 반복 후 Optimal Topology의 Design을 얻었다. FEM 방법으로 Bending, Torsion, 축면에서 주어지는 힘의 관계를 최적화 한 결과이다.

#### 4-7. Bed, Column의 제작 정밀도

일반 공장기계의 Guideway를 Flat, Vee/Flat, Vee, Double-Vee, Narrow, Dove-Tail 등이 있고 초정밀 공장기계에는 Hydrostatic Slideway를 사용하며 고속에는 Linear Motor로 이송운동을 하고 있다. 여기서는 범용 Guideway만 설명하고자 한다.

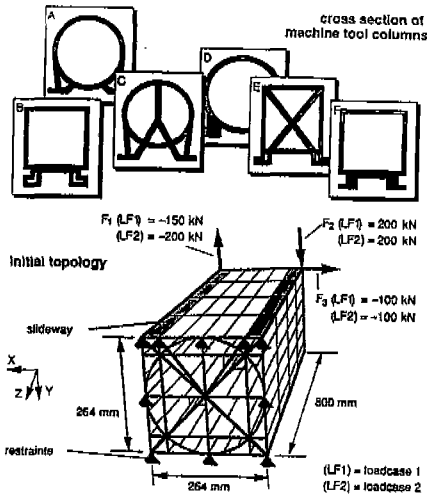


Fig. 4-24 Topology in the beginning of the optimization of a machine tool column

Bed위에 놓여있는 Slide가 공작기계의 Program에 의해서 직선운동을 할때 Guideway와 Slide의 제조정밀도에 차이는 있지만 Fig. 4-26에서 보는 바와 같이 Rolling, Yawing, Pitching이 운동 오차를 일어나게 하고 그 결과가 가공오차의 원인이 된다. Bed는 주물 또는 용접한 것으로 제조되어 있고 전술한 바와 같이 강성을 높여서 가공운동할 때 Bed의 Deflection을 적게 하기 위하여 Ribbing을 하고 또 Box형으로

Design하게 되는 것이다. 이와 같이 Design된 구조물을 정밀가공하여 이송운동에 오차가 없게 해야한다. 보통 주물로 되어 있는 Bed는 문형 5면 Milling Machine으로 한 번 Set up 한 후 Work를 이리저리 움직이지 않고 전체 5면의 Milling 작업을 완료한다. Work의 Set up을 바꾸면 바꿀수록 오차는 누적되어 커지는 것이다. 이 Milling 작업 즉, Rough Cutting이 끝나면 열처리를 한다. 열처리후에 열처리 깊이가 Uniform하고 규정된 경도가 나와야 하며, Finishing Grinding에서 최종 정밀도 결정한다. Plano Type인 문형 Grinding Machine의 정밀도가 그대로 가공된 Work에 Copy되는 것으로 생각할 수 있다. 그래서 완전한 Flatness와 Straightnes를 얻기 위한 방법이 유명한 Moor's의 저서<sup>10)</sup>에서 상세히 배울 수 있다.

고정도의 부품을 제조하려면 가공하는 공작기계는 그 부품의 몇 배 이상의 정밀도가 필요하다. 고정밀도를 요구하는 공작기계 부품은 Interchangeability(호환성)를 가지게 하면서 제조한다는 것은 불가능하고 두 부품을 맞추어가면서 오차를 수정하여 가공해야 한다. 공작기계의 Guideway정밀도를 얻기 위해서는 Scraping이나 Lapping을 함으로써 Straightness와 Fine Surface Roughness를 얻고 있으나 이 방법은 생산성이 낮다는 이유로 다른 방법을 쓰고 있는 회사가 증가하고 있다. 그러나, 아직 우리나라와 같은 경우는 Scapping 방법을 쓰는 것이 좋다고 사료된다. 이 방

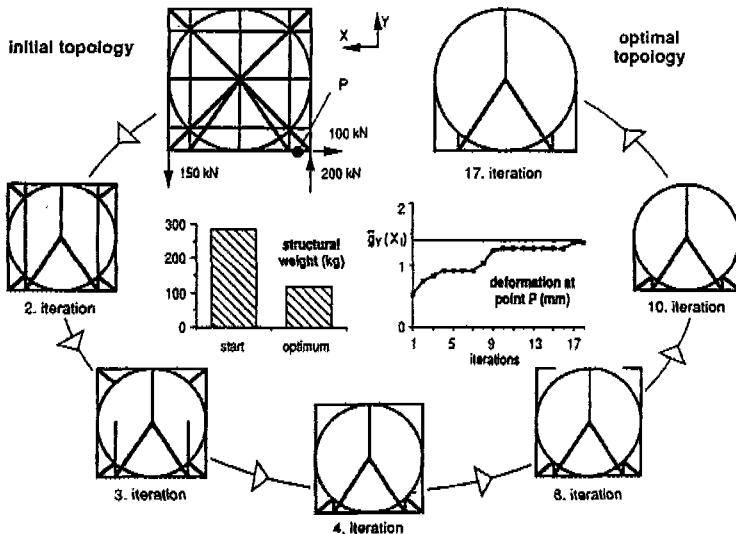


Fig. 4-25 Results of the optimization for bending, torsion and lateral force

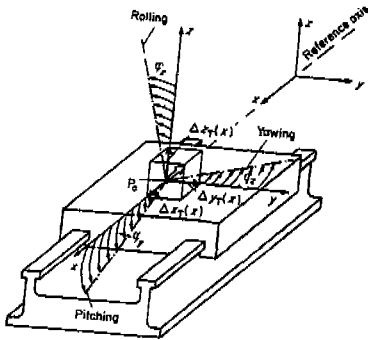


Fig. 4-26 Three translatory and three rotary deflection of a machine component

법은 접촉하여 움직이는 Work의 두 면을 맞추어 Sliding시키면 높은 부분과 낮은 부분을 알 수 있으며 이때 높은 부분을 Scrapper로 깎아내어 완전한 면접촉이 될때까지 Scraping하면 두 면이 정밀하게 되며 이송운동도 정밀하게 된다. 이 Scraping이 Guideway의 최종적인 정밀도를 결정하는 중요한 수작업이다. 인쇄심과 다년간의 경험이 있어야 하기 때문에 유명한 공작기계 Maker에서는 숙련기술자를 확보해 놓고 있다. Bed 또는 Column의 길이가 길 때에는 측정기를 사용하여 단계적으로 오차를 수정하면서 전체길이를 완성시킨다. 옛날에는 Autocollimator를 사용했으나 요즘은 Laser Interferometer를 사용하고 있다.

Hydrostatic, Aerostatic Bearing과 같은 초정밀 가공품에는 Lapping과 Scraping을 통하여 진원도  $0.1\mu\text{m}$ , 표면조도  $0.04\mu\text{m}$ 의 정도를 무난하게 얻을 수 있다. 주철 Bed를 Scraping한 결과 800mm의 길이에 진직도(Starightness)가  $0.5\mu\text{m}$ , 표면조도  $0.1\mu\text{m}$  Ra를 얻을 수 있으나 Surface Grinding Machine만으로는 각각  $3\mu\text{m}$ ,  $1.6\mu\text{m}$  이내 도달할 수 있는 정밀도이다.

이송운동은 Ball Lead Screw를 통하여 이루어지기 때문에 Screw의 정밀 가공이 중요한데 Screw를 Turning한 다음 열처리하여 초정밀 Grinding Machine으로 Finishing하지만 Pitch Error가 발생하는 것이 보통이다. 이 이송오차를 보정 할 목적으로 Encoder를 부착하여 Controller를통하여 보정해 주면 위치 결정 정도를  $1\mu\text{m}$ 이하의 정밀도를 얻을 수 있다.

#### 4-8. 진동과 열변형

공작기계는 열에 대하여 민감한 변형을 일으키기 때

문에 오차의 원인이 된다. 열변형을 막기 위하여 열 발생의 주원인이 되는 Spindle을 외부 또는 내부에 Cooling할 수 있는 Jacket을 만들어 냉각을 하고 있으며 특정한 기계에는 공작기계 내부 전체에 냉각수를 순환시킬 Pipe를 부설하여 Cooling을 효율적으로 하고 있다.

주로 난삭재를 절삭할 때 발생하는 진동(Chatter Vibration)을 잘 분석하여 예방을 해야한다. 여러가지 방법이 있고, 이상의 두 가지 문제가 공작기계 정밀화에 필히 해결해야 할 일이다.

#### 4-9. 결 론

1. 공작기계에 대한 정밀도는 점점 엄격해지고 있으며 과거 20년동안 정밀도가 약 10배 이상 향상 되었다. Micrometer 시대로부터 Nanometer 시대로 전환되고 있다.

2. 공작기계 정밀도는 정적, 동적, 열역학적으로 해석해야 하며 각 요소의 정밀도를 종합한 것이 공작기계 자체의 정밀도가 된다.

3. 우선 Bearing-Spindle System에서 Bearing의 Play, Bearing간의 거리, Bearing의 종류, Housing의 구조를 고려한 설계가 정밀도를 결정하는 중요한 변수이다.

4. 항온실에서 초정밀 가공기로 가공 조립해야 정밀한 Spindle을 얻을 수 있다.

5. Bed, Column은 Ribbing, Structure등이 강성을 높이고 FEM을 이용하여 설계 Optimization을 실현할 수 있다.

6. 주조로 된 Bed, Column의 정밀도는 정밀 기계로 가공한 후 마지막 공정으로 Scraping을 하는데 Scraping을 잘할 수 있는 수작업자의 기능이 중요하다.

7. 열변형과 진동이 정밀도에 미치는 영향은 다음 장에서 논술하게 될 것이다.

#### 참고문헌

1. N. Taniguchi, "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing" Annals of the CIRP Vol. 32/2 1983 pp.573-582
2. Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik-

- Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium  
1993. VDI-Verlag pp. (4)1-(4)41
3. M. Weck, Handbook of Machine Tools  
Vol.2 John Wiley & Sons, 1984 pp.177
  4. Honrath, K., "Werkzeugmaschinenspin-  
deln und deren Lagerungen" Industrie-  
Anz., 4 Oct. 1957.
  5. B.S. Balakschin "Technologier der  
Werkzeug Maschinenbaus," VER Verlag  
Technik Berlin, 1953 pp.411-474
  6. R. Noppen "Berechnung der Elastizitat-  
seigenschaften von Maschinenbauteilen  
nach der Methode Finite Elemente," Dis-  
sertation, TH Aachen, 1973.
  7. M. Weck "Computer-Aided Optimization  
and Metrological Recording of the Stiff-  
ness Behavior of Machine Tools" 5th  
IMEC, Session I/ 1992 pp.1-14
  8. M. Weck et al, "Development of Machine  
Tools with Respect to Economical and  
Ecological Demands" Flexible Manufac-  
turing Systems: Faculty of Mechanical  
Engineering, Ljubljana 1993 pp.179-209
  9. W.R. Moore "Foundation of Mechanical  
Accuracy" The Moore Special Tool Compa-  
ny, 1970.