

공작기계 기술의 현재와 미래(10)

강 철 희*

MACHINE TOOL TECHNOLOGY; THE PRESENT AND THE FUTURE(10)

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 |

10. 초정밀 가공 공작기계(Ultraprecision machine tools)

10-1. 서론

세계에서 가장 권위가 있는 생산공학 학술대회는 CIRP(International Institution for Production Engineering Research, 원어인 불어는 Collège International Pour L'étude Scientifique des Techniques de Production Mécanique)이다. 매년

장소를 옮겨가면서 개최하는 학술대회에서 초정밀공학의 중요성에 관해 1983년에 Taniguchi^[1]가 제창한 후 1984년에는 Loewen^[2]이 1987년에는 McKeown^[3]이 각각 의견을 발표한 바 있으며 이구동성으로 초정밀공학의 중요성을 제기하였다. 특히 초정밀 금속 가공(Ultraprecision metal cutting, UPMC)이야말로 20세기 중 가장 성공한 생산공학의 결과라고 말하고 있다.^[4] 이러한 초정밀 가공 기술은 광학, 기계 그리고 전자 부품에서 Micrometer(μm)또는 Submicrometer

* 統一重工業(株) 전무

단위의 형상(Form)정밀도를 얻고 가공표면(Surface roughness)은 수 Nanometer이내의 초정밀도를 얻는 기술이다.

이 기술인 Nanotechnology를 Extreme technology라고 부르는 사람도 있다. 초정밀 가공 기술은 전자 공학에 많이 쓰이는 매우 작은 부분에 미세한 작업 즉, 미세 Drilling, Slicing등의 작업을 하는 미소, 미세 가공기술(Micro-machining)과는 정밀도의 개념이 다르므로 차별을 두어야 한다.

최근의 첨단기기(High tech device)의 대부분 Optomechatronics부품이다. 그 생산은 초정밀 가공 기술 없이는 불가능하다. 초정밀가공은 가공능력, 복잡한 형상을 가공하는데 있어서 다른 가공법을 능가하는 우수한 특징을 가지고 있다. 초정밀 가공은 기본적으로 창성 운동에 의해서 가공을 하고 있으므로 가공기의 정밀도가 가공면에 직접 옮겨져(Transmit)간다. 따라서, 동작기계의 정밀도 특히 운동정밀도가 요구되는 가공품 정밀도를 실현시키는데 극히 중요한 함수가 된다. 또 가공중의 공구와 공작물 사이의 상대적인 위치와 운동 관계를 완벽하게 하기 위해서는 동작기계의 변형(정적, 동적, 열적)을 억제해야 하는 것이 필수 요건이 된다. 초정밀 가공은 전술한 바와 같이 주로 단결정(單結晶) Diamond 공구를 사용하는 초정밀 절삭(UPMC), 초정밀 Grit으로 된 Diamond wheel로 하는 초정밀 연삭, 극소한 Grit을 이용하는 초정밀 Polishing등으로 분류할 수 있다. 초정밀 절삭은 Laser print용 Polygon mirror나 Laser용 Copper mirror등 연질금속(軟質金屬)재의 Lense, 금형 등을 Diamond tool로서 절삭하는 것이며 초정밀 연삭은 열처리된 강철과 초경 합금 재료의 Lense, 금형 등의 연삭. 초정밀 Polishing은 Glass, Ceramics 등의 Hard and Brittle(硬脆)한 재료의 연마에 이용된다.

최근에는 특수한 방법이 추가로 개발되고 있다. 예를 들면 Diamond 공구에 미소한 초음파 진동(超音波 振動)을 가해 줌으로서 Stainless강이나 열처리한 강철의 초정밀 절삭이 가능한 초정밀 초음파 진동 절삭법, 초 미세 Grit diamond wheel을 연속 전해 Dressing(ELID)시키는 방법이다. 한편 초정밀 가공품에도 변화가 일어나고 있다. Zoom 기구를 내장한 Camera나 Video의 Lense등 종래의 구면(球面) 광학 부품을 비구면(非球面)광학부품으로 교체하므로써 부품 수를 줄이고 광학 정밀도를 향상시킬 수 있다. 종래에

는 평면경이었던 Polygon mirror도 비구면을 사용하므로써 성능 향상과 광학계의 기구 간소화를 얻을 수 있다. 그 결과 종래에는 가공이 곤란했던 복잡한 형상의 비구면 광학부품 가공에 대한 요구가 높아져 가고 있다. 따라서 동작기계의 고도화가 더욱 요구되고 있다. 특수한 용도에 국한되어 있지만 대형의 Laser나 방사경 X선 천체망원경등 대형의 초정밀 기기에 대한 요구가 증대되고 있으므로 그것을 가공할 수 있는 대형 초정밀 동작기계가 국내에 한대 정도는 있어야 할 것으로 본다.

역사적으로 볼 때, 1960년대의 첨단 기술은 Energy, 컴퓨터, 전자 그리고 군사공학의 요구에 따른 연구로부터 시작되었으며 미국에서 J. B. Bryan이 Livermore National Laboratory(LLNL)에서 그 최초의 연구를 시작했다고 볼 수 있다.^[5] 1970년대에는 복잡한 형상을 지닌 광학 Lense를 제작하기 위한 실용 연구가 시작되었고 1980년대에 들어서는 초고정밀 동작기계 개발과 함께 복잡하고 어려운 측정기술과 신뢰성이 있는 Diamond tool의 연구가 진행되었다.

Microelectronics 시대가 새로이 도달하므로써 기계 공업, 전기기계공업, 반도체공업, 광학공업 등 각 분야에 초정밀가공 기술이 필요하게 되었으며 그 필요성은 더욱 커지게 되리라는 것은 명백한 사실이다. 예를 들면 Fig 10-1에서 보는 바와 같이 Laser printer에 사용되는 Polygon-mirror의 요구 정밀도를 보면 거의

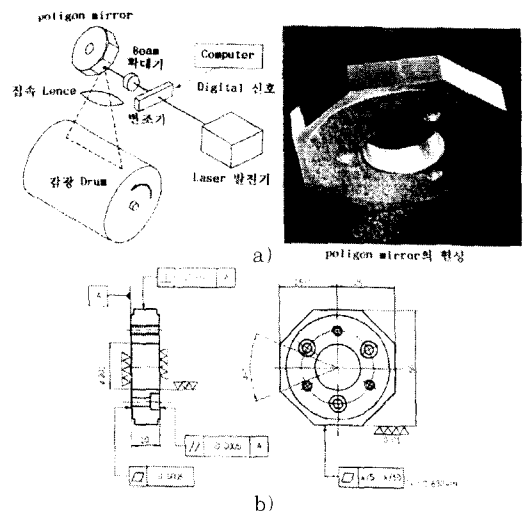
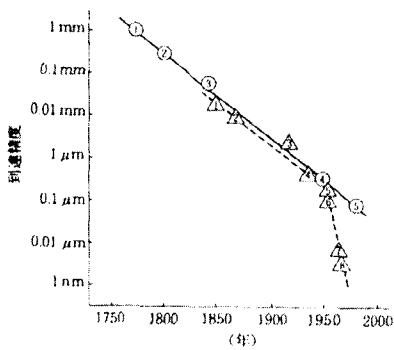


Fig. 10-1 Polygon mirror for laser printer
a)원리 b)요구되는 정도

다 1 μ m이하이며 이 정밀도가 얻어지므로서 Laser printer가 정밀하게 Printing을 하게 될 것이다. 약 200년전에 최초의 공작기계라고 말할 수 있는 1775년 Wilkinson의 Boring machine은 실현 가능한 치수 정밀도가 1mm이었다. 그로부터 120년이 지난 1900년대에는 그 1000배의 정밀도인 1 μ m에 도달할 수 있었고 200년이 지난 최근에는 0.1 μ m까지 발전하고 있다. 가공 표면 정밀도는 치수 정밀도의 10배 내지 100배인 Nanometer단위가 된 것이다. (Fig 10-2)⁽⁵⁾

Taniguchi⁽¹⁾의 논문에 의하면, 정밀도가 10 μ m일 경



Machine Tool

- ①Wilkinson boring machine ②Maudslay lathe
- ③Fitch turret lathe ④Studer cylindrical grinding machine
- ⑤Ultraprecision metal cutting machine tool
- Measuring equipment
- ①Brown calipers, ②Brown&sharp micrometer
- ③Dial indicator, ④Comparator
- ⑤Elect. comparator, ⑥Talyrond roundnessmeter
- ⑦Laser interferometer, ⑧Talystep film thickness measuringmeter

Fig. 10-2 Improvement of accuracy in machine tools and measuring devices

우에는 그 공작기계의 요소(Element)중 Bearing은 Ball 또는 Roller bearing으로 충분하고 정밀 Lead-screw로서 이송장치를 사용하면 충분하다. 그러나, 정밀도가 1 μ m을 요구할 때는Hydrodynamic bearing 또는 Hydrostatic bearing을 사용해야 하며 Pre-load를 준 Ball 또는 Roller bearing으로 Guideway를 운전시켜야 한다. 정밀도 1 μ m까지의 범위를 Microtechnology라고 부르며 0.001 μ m=1nm의 정밀도를 창출할 수 있는 가공기술을 Nano-technology라고

구별하고 있다.

10-2. 초정밀 공작기계의 요소 기술

전술한 바와 같이 초정밀 공작기계에는 분자 그대로 초정밀한 운동 정밀도가 요구되므로 그 구조가 근본적으로 보통 공작기계와 달라야 한다는 것은 당연한 일이다. 초정밀 공작기계의 Bearing-spindle system과 Feed mechanism에 대하여 지금까지 개발한 것을 설명하고자 한다. Spindle에 사용되는 Bearing중에서 Rolling bearing은 정밀도에 한계가 있기 때문에 초정밀 공작기계에는 사용하지 않고 있다.⁽⁶⁾ 초정밀에는 Hydraulic을 사용하는 동압과 정압 베어링이 있고 공기를 사용하는 공기 정압 베어링(Air bearing)과 전자 베어링(Electro-magnetic bearing)을 고려할 수 있다.

1) 유동압 베어링(Hydro-dynamic bearing)

Fig 10-3에서 보는 바와 같이 Shaft와 Bearing 사이에 Oil이 충전되어 있고 Shaft가 회전하면 Oil의 압력이 한 곳에 집중되어 Shaft의 중심 위치가 이동한다. 이와 같은 상태로 계속 Shaft가 회전하면 Spindle의 회전 정밀도는 얻을 수 없다. Shaft와 Bearing 사이에 3개 또는 4개의 Narrow한 Wedge gap을 만들면 Shaft가 회전할 때 발생하는 Oil pressure가 Shaft를 Centralize시키므로 안전하고 정밀하게 회전할 수 있다. 이 Bearing을 Multi-face hydrody-

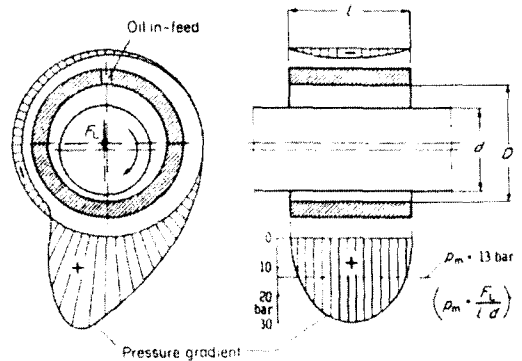


Fig. 10-3 Shaft displacement and pressure gradient of the lubrication film in a circular plain bearing

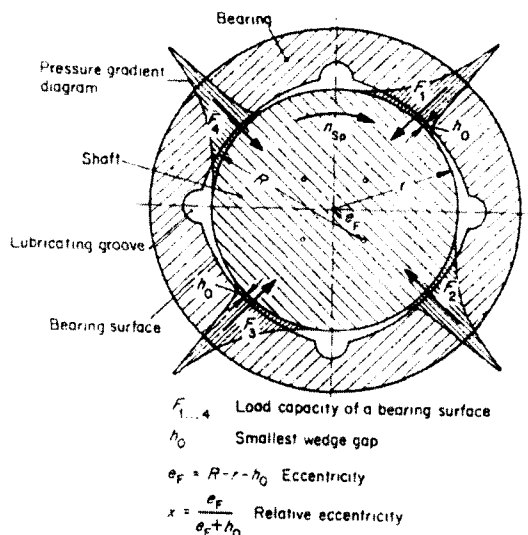


Fig. 10-4 Diagram and fluid-film pressure gradients of a multi-face bearing

dynamic bearing이라고 한다. (Fig 10-4) 이 베어링은 초정밀 공작기계에는 사용하지 않고 있으나 정밀 연삭 공작기계에는 널리 사용하고 있다.

2) 유정압 베어링(Hydrostatic bearing)

초정밀 공작기계의 주축계와 안내계에 많이 사용되는 것은 Hydro-static 또는 Aerostatic bearing이다. Fig 10-5a에서 보는 바와 같이 Oil gap은 10 μ m 정도의 매우 작은 간격이며 여기에 가압된 유체를 강제적으로 공급하고 그 유체막에 의해서 부하를 지지하는 것이다. 작동 유체로서 Oil 또는 공기가 있으나 초정밀 가공용 공작기계에는 통상 공기를 사용한다. 어느 일정한 부하를 지지만 하려면 그 부하와 밸런스가 되게 공급 압력

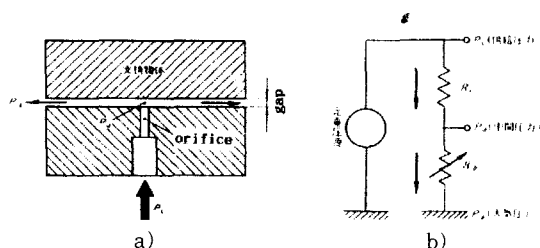


Fig. 10-5 Principles of hydrostatic bearing
 a) structure
 b) similarity with electric circuit

을 조정하면 된다. 그러나, 부하가 변동하면 즉각적으로 밸런스가 파괴되어 부하를 지지할 능력이 없어진다. 이렇게 되면 강성이 없어져 버리므로 공급원과 베어링 사이에 관(Orifice)을 삽입한다. 정압 베어링의 작동 원리는 Fig 10-5b와 같은 전기회로와 비교하면 이해하는데 편리하다. 즉 회로는 정압원(공급압력이 일정한 작동 유체 공급원) Rs, Orifice의 저항 Rr, 그리고 Gap에 있어서의 저항 Rb로 성립된다. 이 회로에 흘러가는 전류(유량) Q는 Ps를 공급압(일정), Pa를 대기압(일정)이라고 하면

$$Q1 = \frac{Ps - Pd}{Rr}$$

$$Q2 = \frac{Pd - Pa}{Rb}$$

$$Q1 = Q2$$

가 된다. 지금 부하가 증가하였다고 하면 Gap이 감소된다. 그러면 저항 Rb가 증가하고 유출 유량 Q2는 감소된다. Q2는 Q1과 같으므로 앞 식에서 볼 때 Pa가 증가해야 한다. Pd는 부하와 밸런스를 얻을 때까지 증가한다. 이와 같이 Orifice를 삽입함으로써 베어링의 강성을 얻게 한다. Orifice의 종류에는 여섯가지가 있으나 가장 많이 사용되는 것이 Self-controlled orifice이다. 직경 0.2mm 정도의 Hole을 뚫는 것이다. Fig 10-6의 위 그림에서 보는 바와 같이 정압 베어링의 기본구조는 반경 방향의 하중을 지지하는 Journal(Radial)bearing과 축방향의 하중을 지지하는 Thrust bearing이 있다. 나머지는 Bearing면이 구형(Ball), 반구형(Half ball), 원추형(Conical)으로 하

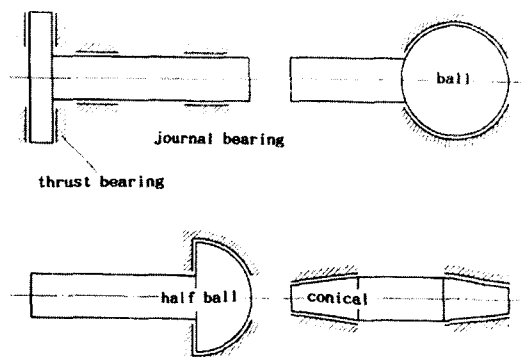


Fig. 10-6 Four different forms of static bearing

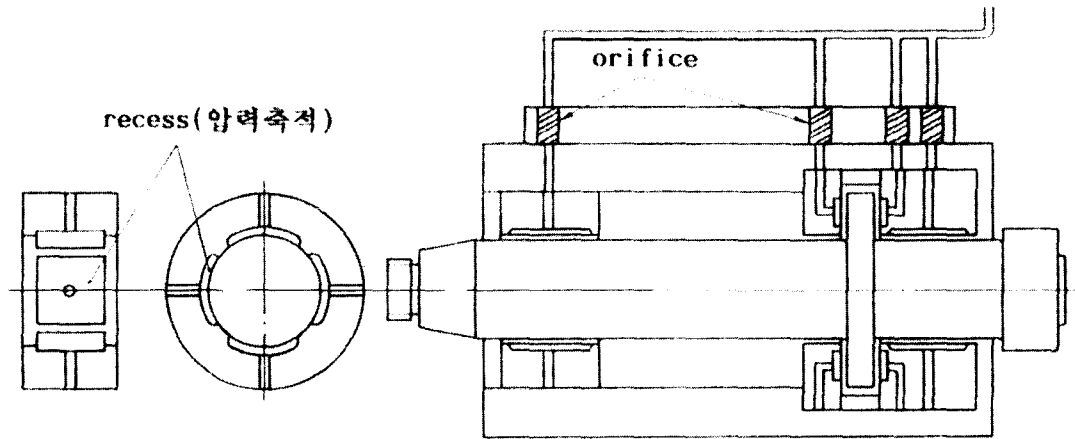


Fig. 10-7 Design of hydrostatic bearing

여 양방향의 하중을 지지하는 방법이 있다. Static bearing의 설계는 여러 제약 조건과 요구되는 사양의 검토를 거쳐야 하므로 여기서는 논술하지 않겠다.

Hydrostatic bearing의 구조는 Fig 10-7에서 보는 바와 같이 가압된 Oil을 Orifice를 통해서 Bearing면에 공급하여 부하능력을 얻는 Bearing이다. Shaft는 Oil의 윤활막에 의해 지지되고 완전 유체 윤활이 이루어진다. Bearing의 강성은 급유경로에 설치된 Orifice에 의해서 결정되어진다. 부하 용량을 증가시키기 위하여 Bearing면에 Recess(pocket)가 설치되어 있다. Hydrostatic bearing에 사용되는 Oil은 점도가 높고(공기의 5,000~10,000배), 공급압력(30~40 kgf/cm²)을 높혀 Bearing면에 비교적 넓은 Recess를 만들면 강성과 부하용량의 여유가 생기기 때문에 Bearing 사양과 제작측면에서 볼 때 비교적 적용이 쉬운 Bearing이라고 볼 수 있다. Air bearing에 있어서는 기체의 압축성 때문에 불안정 진동이 생길 가능성이 있기 때문에 Recess는 만들지 않는다. 축의 회전 정밀도는 Bearing부의 형상 오차에 영향을 받지 아니하고 Shaft 주위의 압력 Balance에 의해서 정해지며 Sub-micron의 회전 정밀도를 얻을 수 있다. 유정압 베어링의 특징으로서.

- (1) 유압력의 평균화 효과에 의해서 초정밀의 회전 정도의 실현이 가능하며
- (2) 수명이나 강성 또는 부하 용량에 문제가 없으나
- (3) Oil 점성의 영향으로 발열량이 커서 열적 Bal-

ance에 문제가 있고

(4) 축 회전에 따르는 진동은 없으나 Pump 압력의 맥동이 진동원이 될 수도 있다.

(5) 또 누유 혹은 먼지, 이물질등의 흡입, 공급유의 냉각, 진동 방지대책 등의 문제가 있다.

따라서 초정밀 가공용 Spindle에 적용할 때는 Spindle의 설계 사양과 제작 정밀도를 검토하여 사용 조건을 한정시키고 Maintenance를 엄격히 해야 한다.

3) 공기 베어링(Air bearing, Aerostatic bearing)

일반적으로 기체 베어링에 사용되는 기체는 대부분 공기로 사용하기 때문에 통상 기체 베어링을 공기 베어링이라 부르기도 한다.

공기 베어링도 유체 윤활이기 때문에 원리는 동일하나 실제 강성이나 부하 용량을 얻기 위해서는 Hydrostatic bearing과 비교해서 불리한 점이 많다. 전술한 바대로 비압축성, 압축성의 차이, 점성의 차이, 공급압력의 차이, Bearing면의 Recess 유무에서 오는 양 Bearing의 차이는 아주 크기 때문에 여기에 대처하려면 오히려 전혀 다른 Bearing이라고 생각하는 것이 적절하다. 1975년에 들어서면서 Electronics 부품과 Optoelectronics 부품의 가공을 Submicron급의 정밀도를 내기 위한 진동이 없는 초정밀 Spindle이 필요하게 되어 여러 연구가 진행되고 있다. 최근에는 Roller bearing과 손색이 없는 강성을 가지고 부하용량이 적절한 Air bearing이 제조되고 있다.(Fig 10-8) Ori-

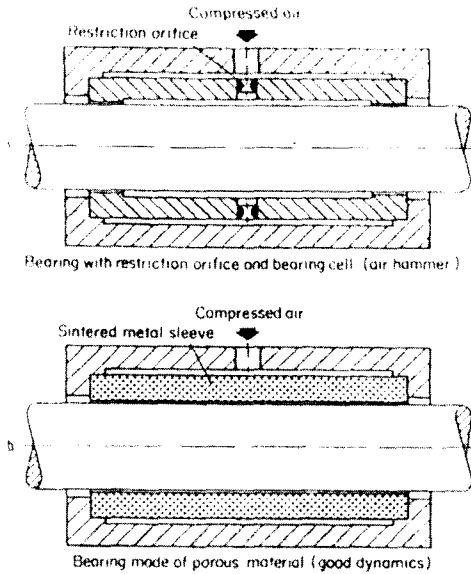


Fig. 10-8 Designs of aerostatic radial bearings

fice도 Self control, Surface, 다공질, 관구형등 여러가지가 있으며 용도에 따라서 선택하여 사용한다. Air bearing의 특징은.

(1) Journal 주위의 기체 압력의 평균화가 잘 되기 때문에 Submicron의 회전 정밀도를 용이하게 얻을 수 있어 정밀도가 오래 지속되며

(2) 진동이 없다. 완전 유체 윤활이 이루어지고 있기 때문에 회전에 기인하는 진동은 거의 발생하지 않으며

(3) 발열이 적기 때문에 열변형에 의한 정도 저하는 없으며

(4) 마모할 부분이 없기 때문에 내구성이 있고 수명이 반영구적이고

(5) 고속 회전이 용이하며 10000rpm이상도 비교적 용이하며

(6) 저속시에도 마찰 계수가 거의 Zero이며 마찰 저항이 적고, 구동력이 작다.

(7) Oil을 사용하지 않기 때문에 Seal이나 Oil leakage의 문제가 없고

(8) 보수관리가 용이하며 급기계(給氣系)에만 문제가 없으면 Maintenance free이다.

4) 자기 베어링(Electromagnetic bearing)

자석의 반발력과 흡인력을 응용하여 Shaft를 부상

(浮上)시키는 Bearing이다. 영구 자석을 이용하여 사력 무제어형과 전자석을 이용하는 자력 제어형이 있다. 진공 중에서도 작동이 가능하기 때문에 점성 저항의 영향을 받지 않고, 마찰 저항은 거의 없는 특징이 있는 Bearing이지만 그다지 사용하지 않는다. 그 문제점으로.

(1) 자기력을 얻기 위한 영구자석 또는 전자석이 회전체에 비하여 너무 대형이기 때문에 외관이 좋지 않으며

(2) 제어 시스템이 기본으로 되어 있기 때문에 기계요소로서 제품화할 수 없어 System설계를 해야 하며

(3) 강성과 부하용량이 현재로서는 매우 적으며 동일한 Air bearing에 비하여 강성치는 1/50~1/100정도이다.

초정밀 Spindle 용으로 거의 다 Air bearing이 사용되고 있는 이유는 여러 Bearing의 특징을 비교한 Fig 10-9를 보면 알 수 있다. 정도, 수명, 진동, 내구 수명이 다른 Bearing에 비하여 월등하다는 것을 알 수 있다.

5) 초정밀 직선안내(Slide bearing)

구분	特 性										製作-使用上 考慮		
	回轉精度	自剛性	減衰	高速回轉	免熱(溫度上昇)	軸心制御	製作難	保命	壽命	價格	備補	備補	備補
油 圧	○	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○
空 氣 圧	○	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○
磁 氣 軸 受	○	×	×	△	○	○	○	○	△	×	×	×	×

Fig. 10-9 Comparison of air bearing with various bearing systems

공작기계용 직선 안내에 사용되는 각각의 Bearing은 형식에 따라 특성이 있으므로 거기에 맞추어 사용해야겠으나 종합적으로 판단하면 초정밀 가공용으로는 그 용도에 따라 개발된 저마찰 계수를 가지고 있는 고분자 재료계의 Slide bearing, 고경도 Roller bearing, 정압 Bearing 안내면이 적합하나 초정밀 가공용으로 검토하여 설계 제작된 Hydrostatic slide bearing 또는

Aerostatic slide bearing이 사용되고 있다. Fig 10-10에 여러 종류의 guide way를 소개하였다. Air guideway는 이 그림에서 b) 또는 c)가 이에 해당된다. 최근에는 직진 정밀도가 1000mm당 0.5 μ m이하이며 Stick slip이나 진동이 없는 Aerostatic slide bearing이 널리 사용되고 있다. Fig 10-11은 Work table에 부착되어 있는 Hydrostatic slide bearing을 보여주고 있다. 양쪽에 구속형 안내면(Guideway)이 있고 그 안내면은 3군데의 유정압으로 지지되고 있으며 Screw가 회전하므로서 Walk table이 직진 안내 운동을 하게 된다. Fig 10-12는 Aerostatic slide bearing으로서 전자와 유사하나 중앙 상부에 Air supply 하는 Hole이 있으며 Air는 Restriction orifice를 통해 Guideway를 양쪽에서 지지하고 있고 중앙에 있는 Ball leadscrew가 직진 운동을 drive한다.

6) 초정밀 Table 이송기구(Leadscrew and nut)

Table에 정확한 이송을 제공하는 이송기구도 초정밀

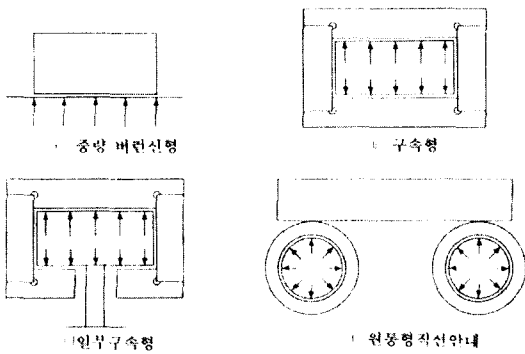


Fig. 10-10 4 different forms of guideway

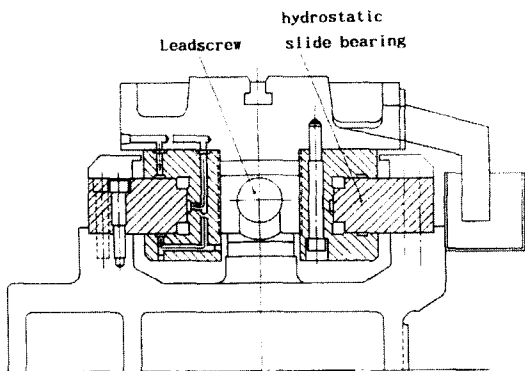


Fig. 10-11 Hydrostatic slide bearing

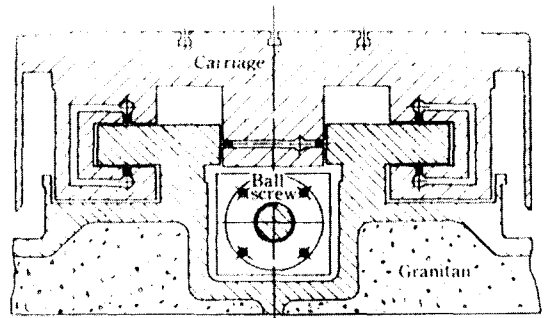


Fig. 10-12 Aerostatic slide bearing

가공에 있어서 매우 중요한 기계 요소이다. 이 이송기구가 적절하지 못하면 Table의 직진 정밀도가 나빠져 진동 원인이 되거나 또는 정확한 위치 결정이 불가능해져 직진안내의 성능에 큰 영향을 준다. 이송 기구를 대별하면 Ball leadscrew 방식, Hydrostatic lead-screw 방식, Linear motor식으로 구별할 수 있다. 초정밀 Table의 이송기구에 대한 요구조건은,

- (1) Table의 직진 정도의 Disorder가 일어나지 않고 정확하게 이루어져야 하며
- (2) 이송속도에 변화가 없어야 하며
- (3) 위치 결정 정밀도가 좋아야 하고
- (4) 매우 고속이거나 매우 미속인 이송이 가능해야 되고
- (5) 정도가 좋고, 내구성이 있어야 되며
- (6) Maintenance가 용이해야 한다.

이와 같은 요구조건을 만족시키는 초정밀 가공용 Table 이송기구로서 Hydrostatic leadscrew와 Nut가 사용되고 있다. 이 기구는 다른 기구와 비교하면 진동을 Damping시키고 Backlash가 없으며 마모의 걱정이 없다는 것이다. 이 Hydrostatic leadscrew nut

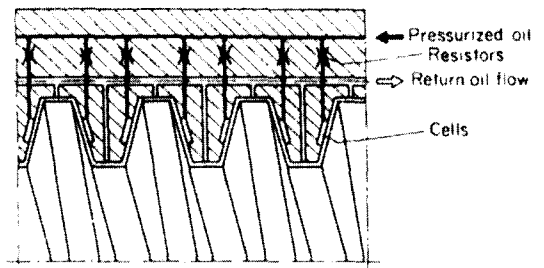


Fig. 10-13 Principle of a hydrostatic lead-screw nut

의 원리를 Fig 10-13에서 볼 수 있다. Thread flank 에 Cell이 있으며 가압된 Oil이 Capillary resist를 통하여 Cell에 회송되는(Return)Oil은 Thread flank 의 Crest와 Root의 작은 구멍을 통하여 빠져나간다. 보통 한 Flank에 4개의 Cell이 있으며 4내지 8 Pitch 길이를 Hydrostatic leadscrew로 해야 하기 때문에 Capillary resistor을 통해서 한 개의 Pump가 Oil을 Supply하는 System이어야 한다. Fig 10-14는 Hydrostatic leadscrew nut의 작동 원리를 설명하기 위한 그림이다. 좌측 그림은 Nut의 단면도이다. Oil은 축(Axial)방향으로부터 공급되어 Connecting hole을 통하여 바깥 원주(Outer circumference)를 따라서 Groove 속에 들어간다. Groove속에 Cell이 있으며 Oil은 우측 그림에서 보는 바와 같이 Flank의 Cell을 통하여 작은 Hole을 거쳐서 나오게 된다.

7) 미소 이송기구

미소 이송장치로서 마찰구동을 사용하는 연구가 많이

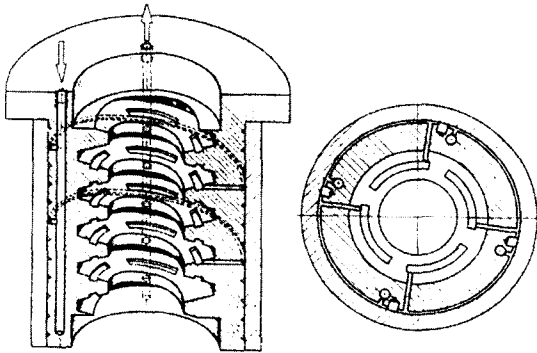


Fig. 10-14 Oil supply for hydrostatic lead-screw nut

진행되고 있으며 앞으로 초정밀 미소 구동 장치의 주류가 될 것으로 보고 있다. Fig 10-15는 미국 LLNL에서 개발하여 초정밀 선반에 응용한 구동기구이다.^[7] Capstan의 회전이 Rod의 직선 운동으로 변환시키며 그때의 접촉력은 Plate spring에 의해 주어지고 추력은 1.3kN이다. 접촉부의 응력을 균이하게 하기 위해서는 접촉 원통부에 Crowning 가공을 해야 된다. 구동 축에는 Servo 보상 장치가 있는 고강성 Hydrostatic bearing으로 지지되고 있으므로 위치 결정을 정밀하게 할 수 있다. 또 구동원은 Direct-drive motor를 사용하며 Laser interfermeter로 Feedback을 하여 Slide의 위치를 결정하고 Resolution이 0.005 μ m

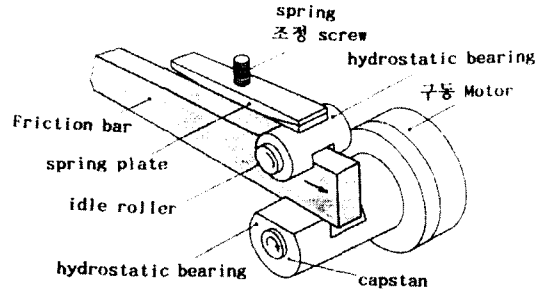


Fig. 10-15 Frictional feed mechanism

(motor의 Indexing angle로 0.05"에 해당)이다. 이 기구는 현재 시판되고 있으며 영국 CUPE(Cranfield Unit for Precision Engineering)도 유사한 기구를 시판하고 있다.

마찰 구동에 의해서 초정밀 위치 결정 장치에 대한 연구는 여러 곳에서 행해지고 있다. 여기에 그 예를 소개하면 Fig 10-16에서 볼 수 있다.^[8] DC servomotor의 회전을 유성 Roller 감속기(이것도 역시 마찰 구동)로 감속시키고 구동 Wheel인 Pinion roller를 회전시켜 Pinion roller와 Slide 사이에 발생하는 마찰력에 의해서 일어나는 마찰력으로 Slide를 직선 운동시키고 그 변위를 Linear encoder로 측정하여 Feedback시키는 방식이다. 또 한 가지 연구는 Fig 10-17에서 볼 수 있다.^[9] Direct drive motor의 회전이 Pinion roller에 전달되고 Pinion roller와 Slide사이의 예압 P에 의해 발생하는 Friction F에 의해서 Slide를 구동시켜 Table을 운동시킨다. Table의 변위를 Laser interfermeter로 검출하여 Controller를

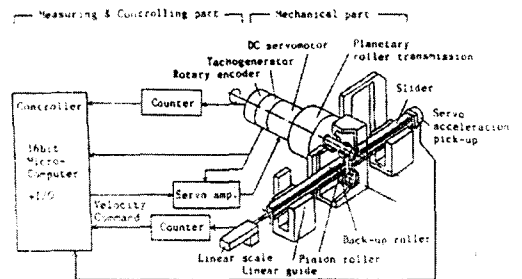


Fig. 10-16 Experimental device for friction drive system

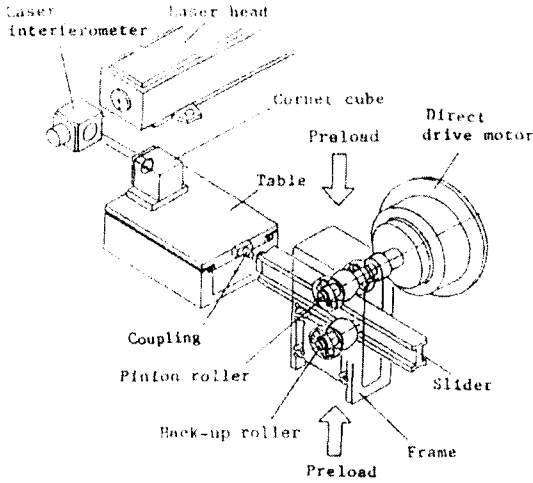


Fig. 10-17 Structure of experimental apparatus for friction drive system

거쳐 DD motor에 Feedback 시킨다는 방식이다.

10-3. 초정밀 Diamond 절삭 가공 공작기계

고정도, 고강성의 절삭 가공 기계를 개발하여 Build-up edge가 발생하지 않는 예리한 Diamond 공구를 사용한 절삭 가공에 의해서 고도의 형상 정밀도와 매우 정밀한 표면 거칠기를 가지는 부품을 얻을 수 있게 하는 기술을 초정밀 Diamond 절삭 가공이라고 한다. 최근 약 30년간에 급속도로 진보를 하고 있다. 여기에 주목할만한 개발 사례를 소개하고자 한다.

1) Union Carbide사 및 Du Pond사에서 혁신적인 발명과 개발이 시작되었으며 초정밀 가공 공작기계도 그 예외는 아니다. 1960년대에 Laser로 핵융합 실험장치에 사용되는 금속 반사경과 적외선장치 부분의 가공등 주로 군수 관련 수요에 따라서 정부 또는 군수 관계의 연구소가 주동이 되어 강력히 추진되어 왔다. 따라서, 최근의 초정밀 경면 가공기술을 논할 때는 우선 미국의 개발사례를 참고로 해야 한다. 초정밀 가공 기술의 연구개발은 미국 국방성, Energy성에 관련된 국립연구소나 군관계 연구소 외에 여러 유력한 민간 기업이 참가하였으나 소재 Maker인 양사가 처음부터 깊이 여기에 참여한 것은 특기할 만한 일이다. 양사 모두 당시의 최첨단 기업이었으며 Submicron 정도의 가공

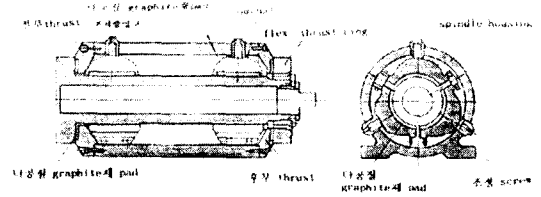


Fig. 10-18 Air bearing of Du pont Type#1

에 절대적으로 요구되는 Air bearing의 재료로서 다공질인 Graphite가 사용되었기 때문에 이 연구 Project에 참가하게 된 것이다. 최초로 Union carbide사와 계약으로 1960년에 개발한 초정밀 가공기이며 직경 100mm의 Aluminum 합금재의 구면 Mirror를 0.6 μ m의 형상 오차로 가공할 수 있는 Du pond Type #1에 부착된 Air bearing을 사용한 Spindle이 Fig 10-18에서 볼 수 있다. Du pond사는 직경 150mm의 구면 가공기를 1966년에 Du Pond Type #2를 개발했고 이어서 구면 이외의 형상 가공도 가능한 Du Pond Type #3도 계속 개발했고 Air bearing spindle도 개량하였다. Fig 10-19에서 보는 바와 같이 Journal 부분이 다공질 Graphite의 구면 형상으로 되어있고 구동에는 Built-in motor방식을 사용하고 있다. 이 Spindle에서 알 수 있는 것은 Air bearing을 사용하므로써 강성이 부족하여 Journal과 Bearing이 서로 접촉되어 손상이 발생할 문제를 재질이 고정 윤활재인 다공질 Graphite를 채용하므로써 손상의 방지를 고려하였고 구면 형상으로 한 것은 가공정도를 얻기가 용이하였기 때문인 것으로 생각된다. Union carbide사는 정밀 공작기계 제작자로 유명한 Moore special tool company와 공동으로 공군 병기 연구소 주도 아래 직경 800mm의 대형 구면 광학 부품을 0.1 μ m의 형상정도로 가공하려고 한 유명한 POMA(Point One Micrometer Accuracy) project에 참가하였다. 목표 정밀도가 현재의 기준으로 보아도 매우 엄격한 목표를 세웠으며 Moose Type #5가 탄생한 것도 그 무렵이었다.

1970년대에 여러 기술을 집중하여 개발한 Air bearing spindle의 구조도를 Fig 10-20에서 볼 수 있다.^[10] 축의 양쪽에 반구면의 Journal을 가지고 있는 구조이며 공기 정압으로 지지되고 있다. 앞자리 Journal 축은 고정되어 있고, 뒷자리 Journal은 Flexible

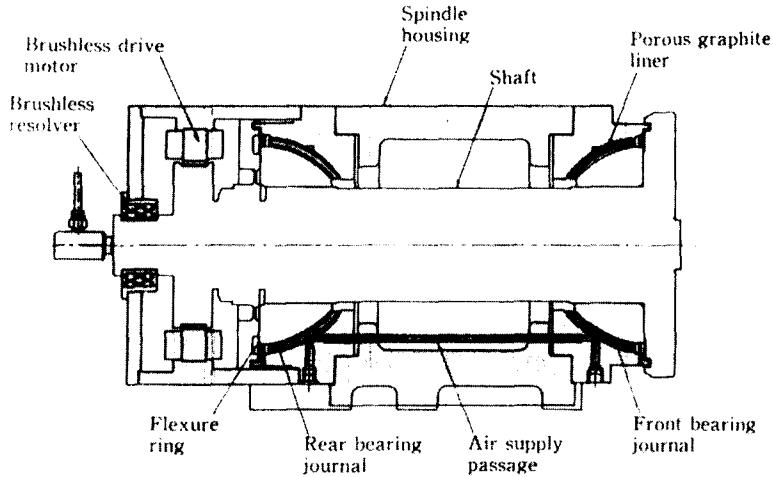


Fig. 10-19 High Precision high stiffness Workhead Spindle using porous graphite bearing elements

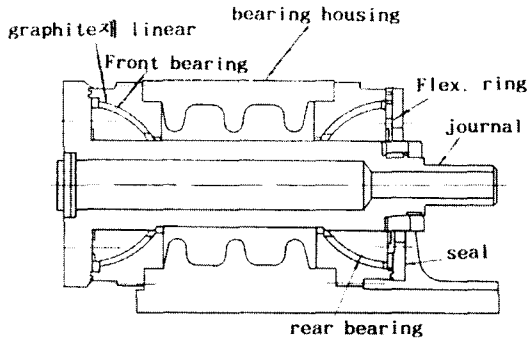


Fig. 10-20 Air bearing for reducing of thermal expansion(Moore Co.)

한 Ring을 통하여 축에 연결되고 있다. Bearing에 작용하는 공기 압력에 저항할 수 있는 이 Ring에 예압이 가해지고 있다. 이와같이 하여 Bearing과 Journal과의 축방향 위치를 조정할 수 있고 작업중에 축이 열팽창 하는 것에도 대응할 수 있다. 반경 153mm의 축에 대해서 회전 정도가 0.3 μ m이하이고, 축강성은 117.6N/ μ m이다. 1,000rpm으로 회전할 때 온도 상승은 1.1 $^{\circ}$ C이하이다.

일본 Toshiba에서도 1975년부터 미국에서 개발한 여러 Spindle을 참고하여 독자적인 것을 개발하기 시작하여 Fig 10-21과 같은 것을 만들어 냈다.^[11] 이 개

발에 참여했던 A. Kobayashi씨는 그의 저서^[5]에서 그 때의 상황을 잘 설명하고 있다. 즉, 100mm 구형으로 되어 있는 Journal의 앞부분과 그것을 받은 Housing부 구형의 정밀가공 때문에 고생한 Story이다. 정밀도가 1 μ m에서 0.1 μ m로 올라갈 때 10배가 되지만 노력은 10배가 아닌 100배 이상이 필요하며 1 μ m에서 0.1 μ m, 0.1 μ m에서 0.01 μ m로 올라가서 기술장벽을 넘는다는 것이 얼마나 어려운가를 말하고 있다. 우리의 생산 업체에서 정밀도를 향상시키는 과정에 참고가 되는 이야기이다.

2) Lawrence Livermore 국립 연구소는 LLNL의 약칭으로 이 연구소에서 대형 반사경 개발의 중심적 역할을 하였다. Moore special tool company사의 협력을 얻어 LLNL에서 시작된 Moore Type #1은 Moore

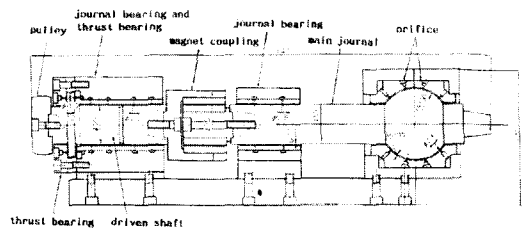


Fig. 10-21 Air bearing having ball journal(Toshiba)

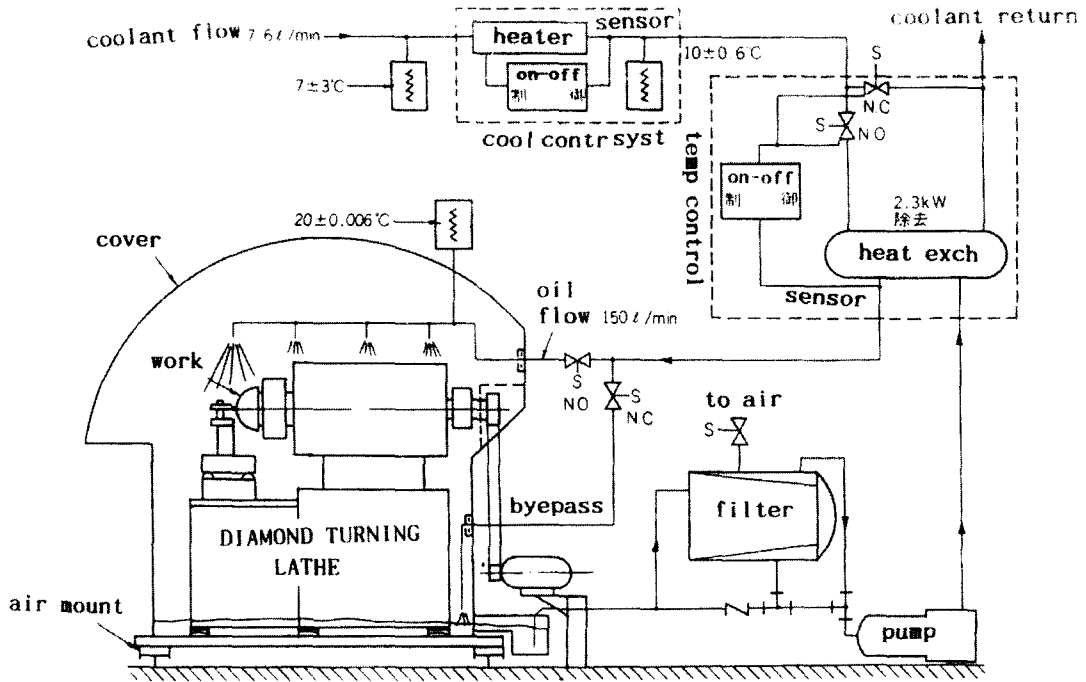


Fig. 10-22 Concerts of oil shower for ultraprecision machine tools

사의 측정기를 개량해서 만들어졌으나 직경 150mm의 방물면경의 Diamond 절삭 가공을 25~50nm RMS의 좋은 표면을 얻게 하고 있다. 여기에는 Fig 10-22에서 보는 바와 같이 열변형 대책으로서 기계 전체를 Plastic으로 된 Cover를 씌워 $20 \pm 0.006^\circ\text{C}$ 의 온도가 제어되게 Oil shower를 한 것이다.^[12] 이 장치는 공작기계의 정밀 가공시 사용하는 항온실을 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 하는 것도 어려운데 1/100의 정밀도인 $20 \pm 0.006^\circ\text{C}$ 의 항온실을 만들 수 있었다는 것을 주목할 만한 일이다.

Moore Type#2는 직경 800mm의 반사경 가공용으로 Laser로 Feedback하는 제어방식을 최초로 채용한 것이다. 다음에 제작된 84inch의 정면 선반으로 직경 2100mm의 대형 반사경의 가공을 목적으로 한 것이다. 이 가공기는 Base가 6.4*4.6*1.5m의 거대한 Graphite 정반이 사용되고 있었으나 기계 Base와 측정 Base를 분류하여 Laser light의 경로를 Helium gas로서 Shield하여 구동시 마찰 Roller 방식을 채용하는 획기적인 LODTM의 개발을 위한 기초 기술이 확립되었다.

3) LODTM(Large Optics Diamond Turning

Machine)LLNL이 국방성과 공군 병기 연구소의 후원을 얻어 1983년에 완성한 대형 광학용 Diamond 선반은 LODTM이란 약칭으로 유명한 초정밀 가공 선반이다.^[13] Fig 10-23에서 보는 이 LODTM은 세계 각국의 수많은 학술지에 소개되었다. LLNL이 1960년대부

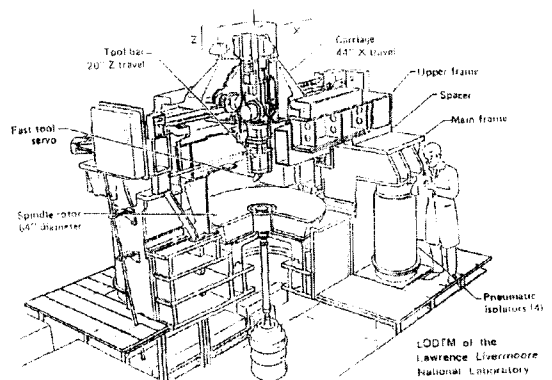


Fig. 10-23 LODTM of the LLNL

다 1970년대를 통하여 얻은 정밀 절삭 가공 기술의 집합한 결과를 종합한 결과품으로 볼 수 있으며 직경 1625mm까지의 대형 반사경의 가공용으로 2.5 μ m의 이송 Resolution을 얻을 수 있다. 이 가공기는 하중의 영향을 피하기 위하여 수직형으로 되고 있으며 구조적으로도 특수한 여러 Idea가 다수 포함되어 있다. 가공기는 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 이내의 온도 제어를 보장할 수 있는 전용 건축물내에 설치되어 있으며 거대한 Frame은 Air damper로서 지지되고 있다. Laser계측계의 Frame은 가공계의 Main frame과 완전분리된 구조로 되어 있으며 또 열팽창 계수가 매우 적은 Invar 재료를 사용하고 있다. 또 Laser light의 방사를 방해할 차단하기 위하여 통로는 금속 Case로 진공을 만들어 주고 있다. Spindle과 직진 Guideway의 구동에는 Air bearing 또는 Hydrostatic bearing을 사용하고 있다. Tool bar spindle은 Air bearing으로 지지되고 있으나 Work spindle과 직진 안내는 Hydrostatic bearing으로 작동하고 있다. 그 작동 속도나 부하 중량에 따라서 세 종류의 점성이 다른 작동유를 사용하고 있으며 Bearing의 강성과 발생열의 관계를 세밀하게 조정하는 배려를 하고 있다. 이 기계의 정밀 이송기구는 Fig 10-15에서 설명한 바와 같이 마찰 Roller 구동방식을 사용하고 있다.

이 LODTM을 전학하기 위하여 수많은 기술자들이 전세계에서 와서보고 간다. 필자도 1990년 이 곳을 방문한 바 있으며 이 방면에 관심이 있는 사람 중 미국 국적을 가지지 않은 사람은 미리 방문 허가신청을 제출해서 심사를 받은 후 허가를 받아야 방문이 가능하다고 하는데도 방문객의 수를 헤아릴 수 없다고 한다.

10-4. 비구면 초정밀 가공 공작기계

Camera등의 광학기기뿐만 아니라 Laser를 이용하는 CD player등 AV 기기 Laser printer등의 OA기기에 다수의 Lense 또는 반사 Mirror가 사용되고 있다. 종래의 구면형 Lense는 초점의 수차(收差)가 발생하므로 여러 Lense를 조합하여 Lense를 수정함이 필요하지만 비구면 Lense가 생긴 후부터는 이 문제가 해소되어 여기에 필요로 하는 가공기의 개발이 요구되었다. 광학 Glass lense는 Diamond 슛들을 사용하는 연삭이 주류이지만 Laser용으로 쓰이는 직경이 수mm 정도의 소형 Lense에는 Plastics재가 대부분 사용되고

있으며 그 제조는 Press 가공으로 제작한다. 이 금형의 가공에 있어서도 절삭 가공이 중요한 역할을 하고 있다. 여기서 절삭 가공은 금형 표면에 Nickel 도금한 층을 Finishing하는 것이다. 그리고 최근에는 초 LSI의 노광장치(露光裝置)나 Micro 현미경 분야에 Soft X-ray와 같이 단파장의 광학 부품의 수요가 많이 발생하고 있으며 비축대칭(非軸對稱)의 비구면 반사경의 가공 기술과 가공기의 개발이 요구되고 있다. 가공물의 형상과 정도는 Work와 공구간의 위치가 시시각각의 상대위치에서 결정되므로 비구면 형상의 창성법에는 미국에서 Omega-X Nanometer, $\alpha-\theta$ Machine등이 발표되고 있다. 그러나, 광학 Lense, 반사 Mirror등은 비교적 소형으로 2축 또는 3축 동시 제어 방식으로 창성하는 방법을 주로 사용하고 있다.

1982년에 BODTM(Baby Optics Diamond Turning Machine)의 이름으로 개발된 비구면 정밀 공작기계를 보면 Fig 10-24와 같다. 이 기계는 2축 수치제어 되고 있으며 직경 100mm까지의 비구면 광학 부품을 0.25 μ m까지의 정밀도와 25~40nm RMS의 표면 조도를 얻을 수 있다. 이 기계의 구조를 보면 Air bearing spindle을 사용한 Laser interferometer system으로 Positioning 정밀도를 보증하고 있다.

민수용 비구면 가공기는 미국에서 국가 주도형의 대형 금속 반사경 가공기의 개발에 협력한 Moore spe-

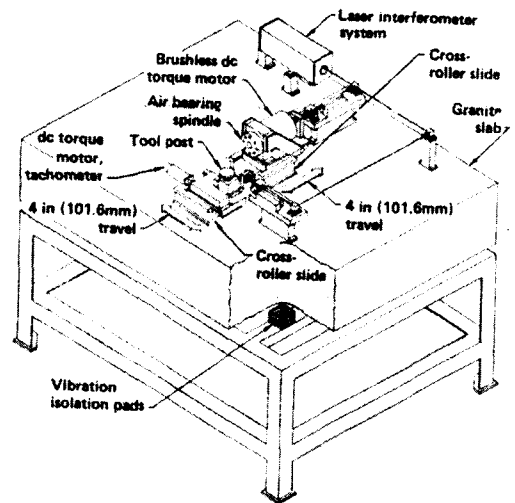


Fig. 10-24 Isometric view of the BODTM design

cial tool사나 Rank Pneumo Precision사에서 1970년대부터 시판을 시작하고 있다. LLNL이 주도하여 Moore Type#1, Type#2의 시작에 참가하여 1978년부터 M18AG를 시판하고 있다. 이 기계는 직경 356mm까지의 금속 반사경을 10nm 이상 Resolution으로 가공이 가능하며 최초부터 3축 동시제어 방식을 채택하고 있다. Work spindle은 PI(Professional Instruments)의 Air spindle을 사용하고 Base는 Air suspension으로 지지되고 있다. Moore사는 1982년에 직경 1800mm까지의 반사경 가공이 가능한 가공기를 개발 시판하고 있다. Rank Pneumo precision사도 여러 종류의 직경 300mm, 600mm등의 가공이 가능하고 이송 Resolution이 2.5nm까지의 성능을 지닌 가공기를 개발하였다.

한편 일본에서는 1980년후부터 직경 100mm이하의 소형 가공기를 개발하고 A사에서는 1982년에 B사는 1986년에 C사는 1988년에 각각 여러 가공기를 개발 시판하고 있다. Fujikoshi사가 개발한 것을 보면 Fig 10-25에서 보는 바와 같다. Base에 Granite 정반을 사용해서 X축, Z축은 T자형 배치로 하고 Guideway는 Hydrostatic sliding bearing으로 구동시키고 있다. Table 운동은 Hydrostatic leadscrew nut로 운전시키고 있으며 CNC 2축 동시제어로 10nm의 Feeding Resolution을 가지고 있다. Fig 10-25에서 나타낸 Fujikoshi의 초정밀 비구면 가공기의 Layout을 Fig 10-26에 표시하였다. X축, Z축의 Sliding을 Laser interferometer로 Compensation하게 하며 공구는 회전용인 B축에 장치하여 3축 동시제어 형식이다. Granite base는 수 Hz 정도의 고유 진동수가 적으

므로 흡진율이 좋고 외부로부터의 진동을 차단하기 위하여 Air damper를 사용하여 만족할 만한 결과를 얻었다. Spindle의 열변위를 줄이기 위해서 Super invar(32Ni, 4Co, Fe)의 사용을 검토하였다. 이 재료는 열팽창 계수가 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이며 Steel계의 1/20정도이다.

10-5. 특수한 초정밀 가공 공작기계

1970년과 1980년대에 미국에서 주도했던 초정밀 가공 공작기계 개발은 1990년대에는 일본으로 그 주도권이 옮겨져 가고 있다. CNC 공작기계 생산이 미국, 독일을 능가하여 세계를 리드하고 있는 일본은 우연히 그

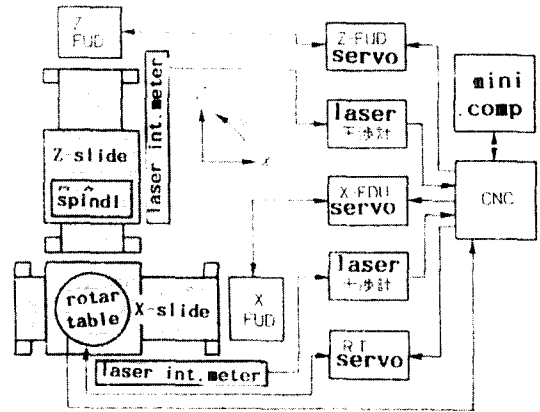


Fig. 10-26 Layout of the Ultraprecision lathe

렇게 된 것이 아니다. 정부, 학회 업계가 피나는 노력으로 맺어진 결과이다. 여기에 최근 일본에서 개발되어 세계의 주목을 끌고 있는 예를 소개코져 한다.

1) Toshiba의 초정밀 CNC 공작기계

Toshiba는 일본에서 제일 먼저 小林昭修 주도 아래 초정밀 가공 기술의 연구를 하고 있는 세계적인 연구소이다. Fig 10-27에서 보는 Ultra precision CNC machine은 여기서 개발 하였고, 650mm의 Diameter와 1.500N의 무게를 가지는 소재를 정밀 가공할 수 있는 초정밀 공작기계이다.^[16] 진동을 제거하기 위하여 Reinforced concrete platform위에 조립한 고무로 된 방진 Pad위에 Granite base에 기계를 설치하고 있다. 전체 무게가 15,000kg가 되는 기계는 T자형으로

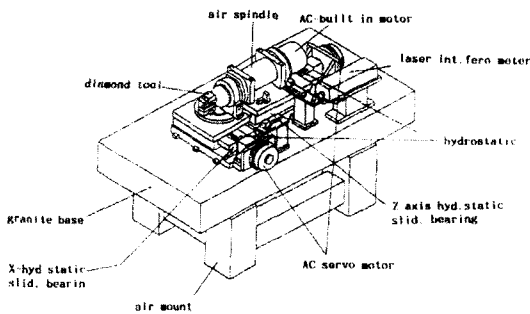


Fig. 10-25 Ultraprecision lathe for curvature lence machining(Fujikoshi)

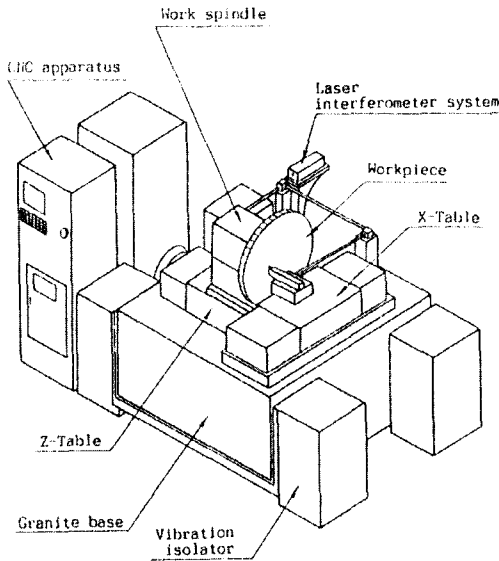


Fig. 10-27 Ultra precision CNC machine(Toshiba)

X축과 Z축을 배치하였다. 두 축은 강성과 동역학적인 성질이 완전 동일하게 설계하였다. Spindle은 Work의 하중에 따라서 두 개를 선택하였다. Spindle A는 150N이상의 하중을 취급하며 Hydrostatic bearing을 쓰는 Built-in motor로 Drive하고, 500rpm을 낸다. Spindle의 Stiffness는 Radial 방향에 750N/μm, Axial 방향에 1,100N/μm을 가진다. Spindle B는 Air bearing을 채택하고 전자와 같이 Built-in motor를 쓴다. Spindle speed는 5,000rpm이며 회전 정밀도는 양축 다 0.01μm이다. 2.5nm의 Resolution을 가지는 Laser interferometer system은 Work table을 정확하게 위치를 결정하도록 Feedback시키는데 사용되고 있다. Table 위치의 정확도를 Compensation할 수 있게 Optical system을 설치하였고 CNC는 9-digit의 Command를 취급하고 Increment가 1nm이다. 이 기계로 650mm 직경의 Al 부품을 Concave curvature radius가 1,400mm가 되게 Turning할 수 있으며 이 때 얻어진 0.6nmRa의 표면 조도와 형상 오차는 0.1μm P-V/600mm이었다. 그리고 정밀 Grinding할 때는 수직형 Air bearing grinding spindle을 사용한다. Spindle speed는 3,000~30,000rpm까지 얻을 수 있으며 Fine grain을 가지는 Grinding wheel은 500mm의 직경이고 1,200mm 곡률

반경(Curvature radius)의 Glass ceramic mirror를 Grinding한 결과 표면은 0.6nm Ra이고 형상 오차는 0.3μm P-V이었다.

2) Ceramics재 초정밀 공작기계

Alumina ceramics는 주철, Invar에 비해서 Young's modulus가 두 배 정도인데 반해 Density는 그 반대로 1/2정도이며 Specific rigidity는 5배 가량 높으며 Coefficient of thermal expansion은 Invar의 10배가 되지만 Cast Iron의 60%밖에 되지 않는 좋은 성질을 가지고 있다. 따라서 이 재료를 사용하여 초정밀 공작기계를 제작하면 그 성능이 우수할 것이라는 전제하에 만들은 Proto type을 Fig 10-28에서 볼 수 있다.^[17] 이 그림에서 번호가 1부터 6까지는 Alumina ceramics를 정밀 Finish한 재료를 사용한 것이고 각 부품의 정밀도를 높였다. 직선 운동 X, Y 두 축은 고강성의 공기 Sliding bearing을 사용한 Guideway로 지지하여 원활한 운동을 하게 하고 있다. 공구의 Depth of cut을 구동하는 Z축은 Piezo electric actuator를 사용하고 있으며 0.03μm 정도의 Resolution으로 제어되고 있다. 이 기계의 공구 이송 기구는 Fig 10-29에서 볼 수 있듯이 원통형의 Friction drive mechanism을 사용하며 양쪽 원통의 직경이 35mm이다. Air bearing으로 지지되고 있으며 Rolling contact를 하고 있다. 이송 Stroke는 70mm이며, 0.008μm의 Resolution을 가지는 Laser interferometer로 Feedback control을 하고 있다. 이 기

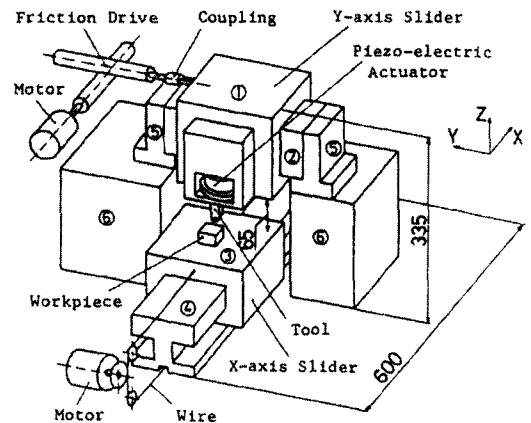


Fig. 10-28 Structure of the ultraprecision machine tool made of ceramics

계를 사용 하여 Aluminum Alloy를 정삭한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다. 실용 단계까지는 더 연구에 보아야 단정할 수 있을 것이다.

3) Canon Super-Smooth Polisher (CSSP)

일본 정부의 국가 연구 프로젝트인 Advanced material-processing and machining system(최첨단 가공 시스템 기술)의 연구 과제의 하나로서 연구 개발한 초정밀 공작기계의 복잡한 구조를 Fig 10-30에서 볼 수 있다.^[18] 이 기계는 Exeimer-laser나 Soft X-

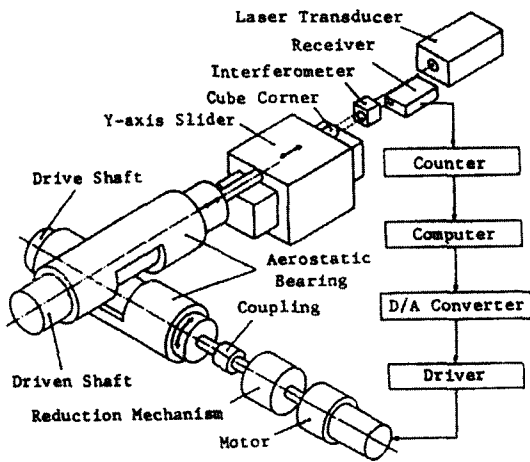


Fig. 10-29 Laser Feedback Friction Drive System

ray의 단파장 길이(Short-wave length)의 빛의 성질을 얻기 위해서 급격히 수요가 증가하고 있는 Aspherical optical element를 초정밀한 형상과 초고급으로 표면을 정밀하게 가공할 수 있게 개발하였다. 이름을 CANON의 생산 연구소에서 개발하였기 때문에 CCSP(Canon Super-Smooth Polisher)라고 짓고 있다. 이 기계의 목적은 여러 형체를 만들고 500mm의 직경 재료를 형상 정밀도 80nmPV, 가공 표면 0.2nmRMS를 얻을 수 있고 재료를 경사 각 35°까지 연을 수 있어야 한다. 가공 물질은 Silicon carbide, Calcium fluoride 등이며 가공품의 자유롭게 창성된 형상의 Contour를 측정하여 Profile을 수정할 수 있게 하는 기술도 개발해야 한다. 기계는 20ton의 무게를 가지며 2.3*3.6*3.7m의 크기를 가지는 대형이며 가공 범위는 540*540*200mm이다. 이 기계는 23.3±0.05℃의 항온과 40±5%의 항습을 유지하는 공간에서 작업을

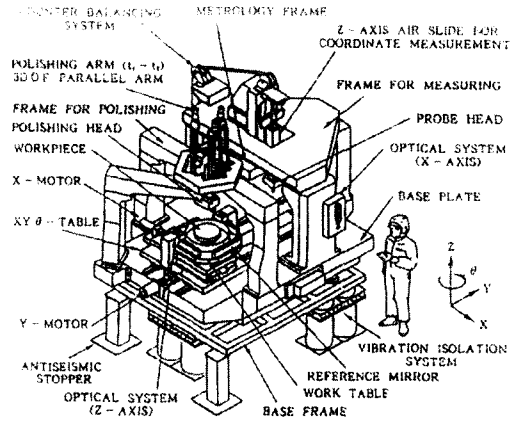


Fig. 10-30 High precision coordinate measuring and corrective polishing system CSSP

하게 되어 있다. Polishing을 하기 위해서는 임의의 위치에서 임의의 방향으로 운동을 해야 하기 때문에 6개의 자유도가 있어야 한다. Y방향 Table은 1760mm의 Stroke를 가지고 있고 Roller guide와 Ballscrew로 된 Feed mechanism으로 구동된다. 560mm의 Stroke를 가지는 X방향 Table은 Air bearing을 사용한다. θ도 회전 Table은 X table위에 위치하고 있고 0.36μ radian의 Resolution을 가지는 Encoder로 회전 운동

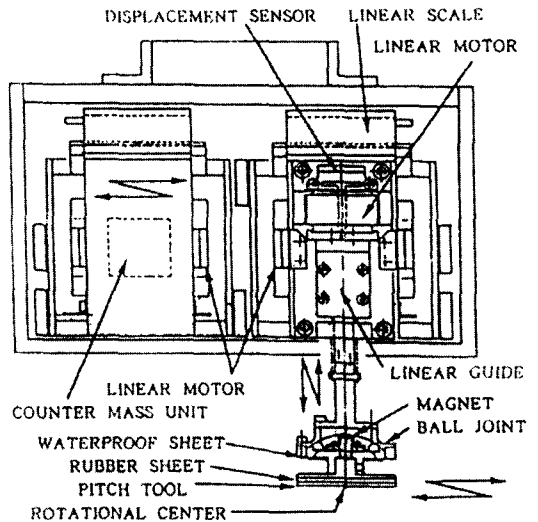


Fig. 10-31 Polishing head by which a pitch tool can be oscillated with various amplitude and frequencies

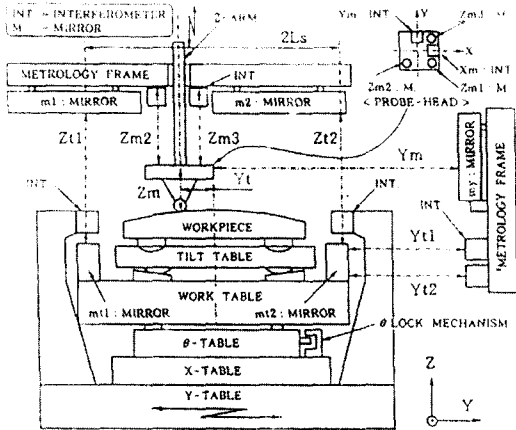


Fig. 10-32 Coordinate measuring system of CSSP

을 측정한다. 이상과 같이 운동하는 요소는 모두 합해서 100 μ m 이상의 오차를 내서는 안된다. Polishing head는 Smooth하고 일정한 재료의 제거를 해야 하며 좋은 표면 조도를 얻어야 하기 때문에 여러가지 진폭과 진동수로 Oscillation이 가능해야 한다. Fig 10-31에 그 구조가 설명 되어져 있다. 이 기계에서 Contour 측정 기술이 가장 중요하게 여기는 부분이다. Fig 10-32에서는 X축과 Z축의 측정 방법을 알 수 있다. Metrology frame은 측정하려고 하는 상부에 위치되어 있으며 두 개의 Mirror가 설치되어 있다. 이 그림에서 INT는 Laser interferometer를 M의 기호는 Mirror를 표시하며 그림 윗부분의 Corner에는 Probe head에 3-mirror와 2-Interferometer가 설치되어 있는 것을 알 수 있다. 합하여 14 Axis의 Interferometer가 구비되어 있다. 이 기계로 Silicon glass를 Polishing한 결과 가공 표면이 0.13nmRMS이고 정밀도는 0.078 μ mPV를 얻었다.

4) ELID에 의한 경면 연삭

통상적인 연삭 기술에서는 어느 정도의 미세 Grit을 가지고 있는 스톨을 사용하더라도 Nanometer 단위의 고급 연삭면을 안전성있게 얻는다는 것이 거의 불가능하다. 그 원인은 Resinoid bond의 스톨을 효과적으로 Inprocess dressing하는 방법이 없었기 때문이다. Ohmori는 Metal bond의 미세한 스톨에 특수한 전기 분해(Electrolytic)를 일으키는 In process dressing 방법을 발견하여 Silicon 그 외 Hard and brittle한 재료를 경면 연삭하는데 성공하였다.^[19] 그것이

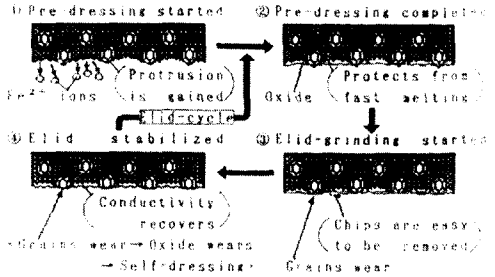


Fig. 10-33 mechanism of the Elid-grinding method

ELID(Electrolytic In-process dressing)이며, 이 방법을 Fig 10-33에서 설명하고 있다. 초기 ELID후 스톨로 연삭을 시작하면 미세 Grit은 피가공물과 간섭을 시작한다. 돌출되어 있는 Grit이 마모함에 따라서 부도체(不導體)인 피막도 동시에 제거 된다. 부도체막이 없어지면 스톨면의 전기 전도가 증가하고 전해가 촉진되며 따라서 부도체 피막이 어느 정도 재생된다. 가공에 따라서 전해는 진행되므로 Grit의 돌출은 항상 유지시킬 수 있다. 따라서 미세 Grit이 표면을 Nanometer 단위의 경면을 만든다. Fig 10-34와 같이 Rotary grinding machine, In-feed grinding machine, Surface grinding machine에다 ELID를 이용하면 여러가지 Mirror surface를 얻을 수 있다.

10-6. 결론

1. 선단 기술의 발달과 더불어 초정밀 가공방법(Ultraprecision machining)과 그것을 가능하게 하는 초정밀 공작기계 개발은 1970년대부터 시작되었다. 미소, 미세 가공 기술(Micro machining)은 초정밀

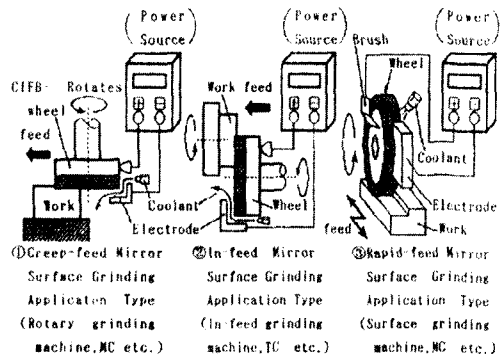


Fig. 10-34 the typical applications of the Elid-grinding method

가공기술과 그 개념이 다르기 때문에 완전히 분리하여 다루어야 한다.

2. 초정밀 가공 기술은 미국에서 주로 군사 산업용으로 초정밀 Spindle, 초정밀 이송기구의 발명과 그것을 이용한 공작기계 발달과 더불어 발달되었으나 현재는 전세계에서 사용되고 있다.

3. 이 가공법은 Nanometer 단위의 정밀도와 표면을 얻어야 하기 때문에 공작기계의 각 요소가 근본적으로 종래 공작기계와 다르며 정밀도는 0.2 μ m PV, 표면은 0.2nm 단위까지 도달하고 있다.

4. Spindle의 유.공.정압 베어링을 설명하였고, 미세 이송기구를 설명하였다.

5. Diamond 공구를 사용 비철물질의 Mirror surface를 가공하는 공작기계 설계를 여러가지 예를 들어 설명하였으며

6. 비구면 경면 가공용 공작기계를 검토하였다.

7. 최근 개발된 초정밀 공작기계 중에는 여러 가지가 있으나 그 중 일본에서 개발된 초정밀 CNC 선반, Ceramics로 만든 초정밀 공작기계, 초정밀 Polishing 공작기계 등을 설명하여 최근의 초정밀 공작기계의 동향에 대하여 논술하였다.

참고문헌

1. N. Taniguchi, "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing" Annals of the CIRP. 32/2/1983 PP. 573/582.
2. E.G.Loewn, "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining" Annals of the CIRP. 32/2/1984 PP.413/415.
3. P.A.McKeown, "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future" Annals of the CIRP. 36/2/1987 PP.495/501.
4. N.Ikawa et al. "Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future" Annals of the CIRP Vol. 40/2/1991 PP. 587-594
5. 小林昭, "超精密加工入門" 台技術センター-1986
6. M. Weck, "Handbook of Machine Tools"

Vol.2 John Wiley & Sons. 1984

7. R.R.Donaldson et al. "Design and Construction of an Large Vertical Axis Diamond Turning Machine" Proc. SPIE 433. 1983 62/67.
8. 大塚二郎 et al. "摩擦駆動による精密位置決めの研究 (第2報)" 精密工學會誌 55/1/1989 PP.123-128
9. 高橋道郎 et al. "摩擦駆動による精密位置決めの研究 (第3報)" 精密工學會誌 57/2/1991 PP.102-107
10. W.H.Pasnick et al:SME Technical paper MRR-74-02. 1974.Society of Manufacturing Engineers
11. 伊東 謙, "構造形態と創成運動機能" 工作機械 超精密加工 大河出版 1984 PP. 27-44
12. 西脇 信彦, "熱變形の制御および耐振性" 工作機械 超精密加工 大河出版 1984 PP. 83-87
13. J.B.Bryan, "Design and Construction of an Ultraprecision 84 in Diamond Turning Machine" Precision Engineering, 1. 1979. 1. 13/18.
14. J.L.Thomson et al. "Precision Engineering " 4/2. Apr. 1982
15. 薄木雅雄, "超精密非球面加工機について" 精密工學會誌55/6/1989. PP.967-971
16. K.Ueda et al. "Machining High-Precision Mirrors Using Newly Developed CNC Machine" Annals of the CIRP Vol 40/1. 1991 PP.555-558
17. Y. Furukawa et al. "Development of Ultra Precision Machine Tool Made of Ceramics" Annals of the CIRP Vol 35/1/1986 PP.279-282
18. M.Negish et al. "Studies of Super-Smooth Polishing on Aspherical Surfaces" Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.29.No.1 (Mar. 1995) PP.1-4
19. H.Ohmori et al. "Mirror surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing" Annals of the CIRP Vol.39/1/1990 PP.329-332