

□ 特 輯

超精密加工 技術의 現況과 展望



工學博士 姜 哲 熙
美國콜로라도大學 名譽教授
韓國科學技術大學 招聘教授

1. 서 론

마이크로 일렉트로닉스 (Microelectronics) 를 중심으로 하는 산업혁명이 진행되고 있는 시점에서 전자, 광학 또는 신소재 부품에 대한 형상과 치수 또는 표면거칠기에 대한 정확도와 정밀도가 엄격하게 요구되고 있다. 예를 들어 경취(硬脆) 재료인 반도체의 웨이퍼(wafer), 수정진동자(水晶振動子) 자기헤드, 비구면렌즈 또는 연질(軟質) 금속의 레이저빔 (Laser Beam) 프린터용 폴리곤 밀러 (Polygon Mirror), 자기디스크, 복사기용 드럼 (drum), 레저기용 반사밀러 등 가공정밀도를 향상시키기 위해서는 과거의 가공기술을 대치할 수 있는 새로운 초정밀가공기술의 도입이 활발하게 진행되고 있다. 경취성(硬脆性) 재료의 초정밀가공은 지금까지는 랩핑 (lapping), 폴리싱 (polishing) 의 가공기술이 주체였으나, 최근의 엄격한 부품정밀도에 대응하기 위하여 전가공을 초정밀 연삭가공으로 평면도, 표면거칠기, 가공변질층을 향상시키고 다듬질가공은 폴리싱으로 하여 표면거칠기를 향상시켜야 하는 가공기술이 보급되고 있다. 일반 연질금속의 다듬질가공은 유리砥粒 (遊離砥粒) 을 이용하는 랩핑이나 폴리싱으로 다듬질가공을 진행하고 있었으나 형상정도와 표면정밀도를 동시에 얻는다는 것이 어렵고 또 가공시간이 너무 길어서 매우 고가인 것이 되고 말았다. 그러나 유리에서 연질금속으로 재료를 전환시키고 저가격화, 양산화의 요구, 정밀도 향상과 부품의 안정화 등등 여러 이유로서 다이아몬드 (Diamond) 공구로 mirror surface 를 만드는 초정밀 경면연삭 가공기술 (precision turning with diamond) 의 발달로 이제 완전히 새로운 가공기술로 대치되고 말았다. 다이아몬드에 의한 초정밀절삭은 공구끝이 매우 예리 (銳利) 하고 마모가 매우 적은 단결

정 (單結晶) 다이아몬드를 이용하고 절삭가공 기계는 운동정도를 피가공물에 정확히 전사(轉寫)시키는 방법이며 따라서 가공기계는 고도의 운동정밀도가 요구되며 그외에 강성, 진동, 열변이, 제어면에서 엄격한 검도가 있어야 한다. Taniguchi[1]에 의하면 가공기술에서 도달할 수 있는 정밀도의 변천을 과거 70년동안 그림 2-1에서 볼 수 있다. 보통가공, 정밀가공, 초정밀가공의 세가지로 분류해서 비교해보면 알 수 있으며, 현재는 $1\mu\text{m}$ 와 1nm 의 중간에 있으며 2000년에는 1nm 에 도달할 것이 예견되고 있다.

여기서 이야기하는 정밀도는 치수의 공차(Dimensional tolerance)이며, 이 시점에서는 초정밀도는 치수에서 $0.01\mu\text{m}$ 이내이고 거칠기는 $0.001\mu\text{m}$ (1nm)이내를 말한다. 그림 1에는 또 공작기계의 발달과 정밀도를 얻을 수 있는 범위를 제시하였다.

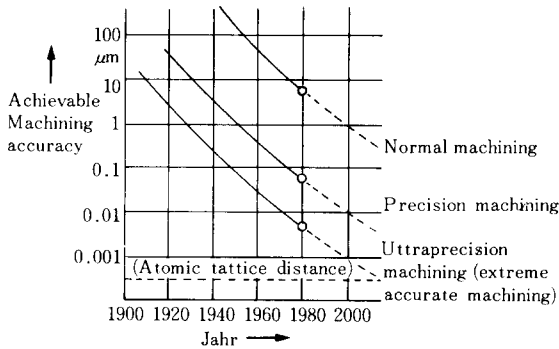


그림1. 초정밀 가공의 발달

2. 초정밀 공작기계의 요건

가공정밀도(치수, 형상, 표면)를 얻으려면 여러 요인을 만족시켜야 한다. 공작기계의 운동, 공작공구의 변위, 그리고 공구의 마모가 그 주 원인이 되고 있으나 가장 중요한 것은 공작기계

의 정밀한 운동이다. 공작기계의 정밀한 운동을 얻으려면 공작기계의 각 요소의 정밀도가 우선 확보되어야 한다. 공작중에 발생하는 열에 의한 열변형(Thermal deformation)이다. 열이 발생하는 원천을 없애기 위해서는 항온(恒溫)된 환경에서 작업을 하면 된다. 공작기계의 각 요소를 분류하면 그림 2에서 보는 바와 같이 Driving System, Slideway, Bearing Bed, Column, Mounting System, Control System 인데 여기서는 제일 핵심이라고 볼 수 있는 베어링에 관해서 논하려고 한다.

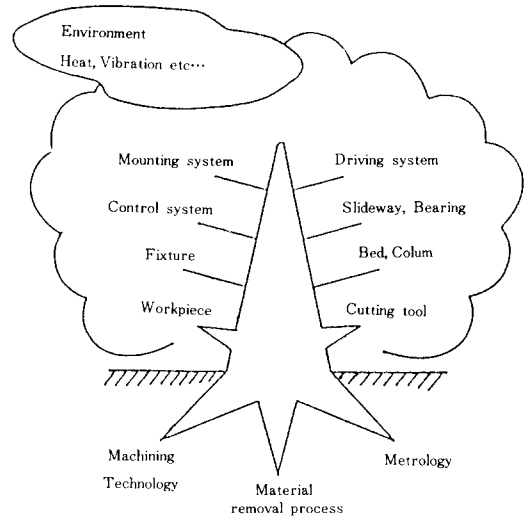


그림2. 초정밀 가공기술의 구조

2-1 공압베어링

공작기계에 사용되고 있는 여러 종류의 베어링을 비교한 것이 그림 3에서 볼 수 있다. 정압베어링이 회전정밀도면에서 우수하다. 그러나 공압베어링에는 고속회전, 열발생, 수명에 장점이 있으나 강성(stiffness), 방진성(damping)면에서 부족한면이 있다. 그러나 공압베어링을 초정밀가공용 공작기계에 사용하는 것이 전 세계의 통례로 되고 있으며 각 연구소에서

이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

Charac- teristics	Oil lubrication		Air lubrication		Rolling contact
	Hydrody- namic	Hydros- tatic	Hydrody- namic	Hydros- tatic	
Moving accuracy	○	◎	○	◎	×
Load carrying capacity	○	◎	×	○	◎
Stiffness	○	◎	×	△	◎
Damping	◎	◎	△	△	×
High speed rotation	×	△	○	◎	△
Heat generation	×	△	◎	◎	○
Life cycle	○	◎	○	◎	×
Maintenance	○	◎	○	△	○

◎ : Best ○ : Better △ : Ordinary × : Poor

그림3. 여러 베어링 종류의 성능 비교

원형부쉬 (bush) 를 일일 또는 이일로 원주에 동거리로 작은 feed hole 을 만들어(6개 8개 또는 12개) Journal 과 소립하여 공압 베어링이 제작된다. 그림 4는 Shaft 에 부하 (load) 가 주어져 있는 것과 없는 것을 비교한 것이다. P_o 는 외부에서 주어진 압력이고 베어링 Clearance 에 진입되는 공기압력은 P_a 이다. $Pd1$ 와 $Pd2$ 는 양 clearnauce 에 발생하는 공기압력이며 shaft 에 load 가 가해 지느냐 알가해 지느냐에 따라서 공기압력의 차는 다르다.

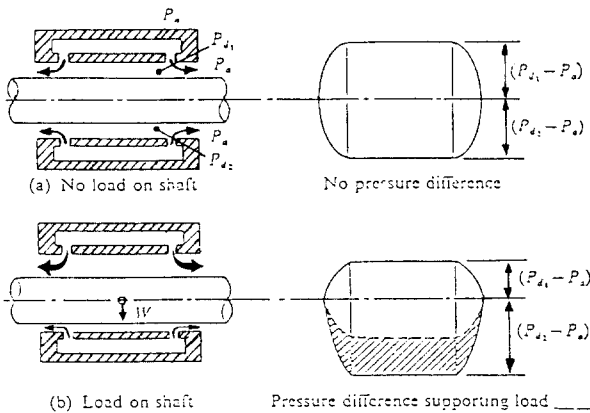


그림4. 공압 베어링의 작동원리

공기베어링의 설계에 있어서 부하 (Load capacity, W) 를 dimensionless 인 부하 계수 (load coefficient C_L) 와의 관계는 [2]

$$C_L = \frac{W}{(P_o - P_a) LD}$$

로 표시할 수 있다. 여기서 W 는 부하, L 은 베어링의 길이, D 는 직경이다.

세가지 ϵ 의 값에 대한 부하계수 C_L 와 gauge pressure ratio, K_{go}

$$K_{go} = \frac{P_a - P_a}{P_o - P_a}$$

와의 관계가 그림 5 에서 보는 바와 같다.

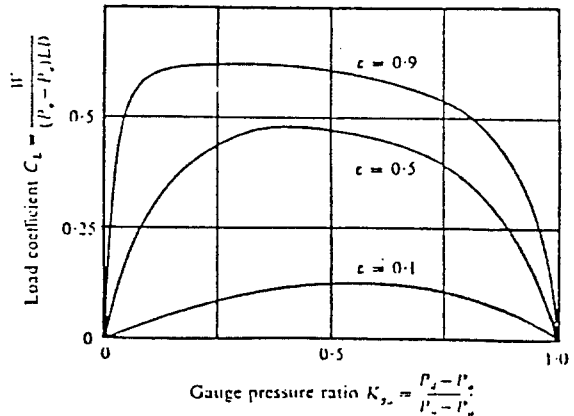


그림5. Load Coefficient 와 Gauge Pressure 의 관계

베어링의 강성 (stiffness) 는 eccentricity ratio, ϵ 와 비례관계를 갖으며 강성 K 는

$$K = \frac{W}{\epsilon h_o} \quad (\epsilon < 0.5)$$

로 표시할 수 있다. 여기서 h_o 는 Radial c-

learance이다. 그림 6은 Clearance와 Stiffness 그리고 Air flow의 관계를 표시하였다. 공압베어링의 특징의 하나는 회전수의 고하(高下)에 무관하게 최대부하(load)가 일정하게 할 수 있다는 특징이다. 공압베어링은 다음과 같은 여러 장점이 있다.

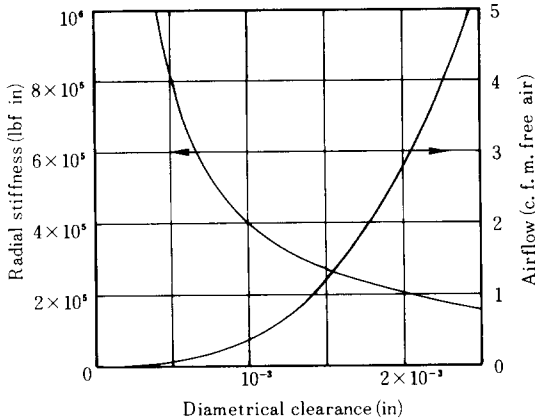


그림 6. Clearance와 Stiffness의 관계

- 1) 마찰이 적고 Power의 손실이 적으며 냉각 구동장치이다.
- 2) 매우 높은 회전속도를 얻을 수 있다.
- 3) 정확한 축의 지지를 얻을 수 있다.
- 4) 마모가 거의 없다.
- 5) 정기적인 Maintenance가 거의 불필요하다. 고·저온 어떤 온도하에서도 운전할 수 있다.

6) Noise가 적고 진동이 심하지 않다.

그러나 결점으로서는

- 1) Load에 제한이 있으므로 정확한 Load를 산출한 다음 베어링을 사용하여야 한다.
- 2) 공기를 습도가 없고 깨끗하게 해야한다.
- 3) Clearance가 매우 적기 때문에 제재에 애로가 있다.

공압베어링의 설계에는 Powell[2]가 추천하는 Feasibility study가 있다. [그림 7]

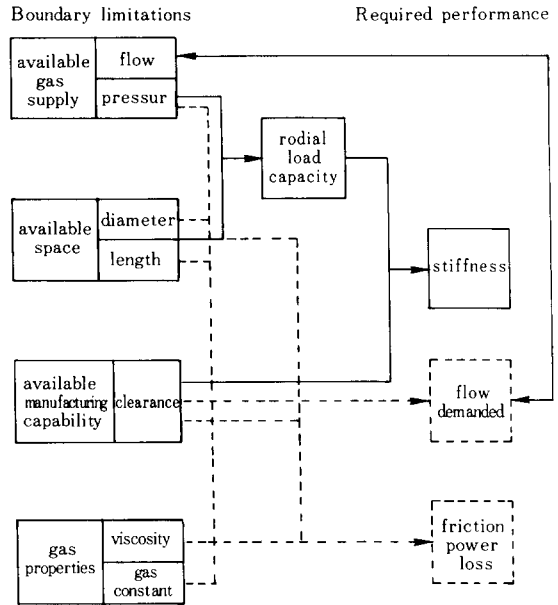


그림 7. Powell가 추천한 공압베어링 설계에 필요로 하는 과정

2-2 초정밀 공작기계의 열변형과 그 대책
공작기계에 주어지는 전기 에너지는 절삭에너지로서 소비될 뿐만 아니라 주축과 모터 등에 열에너지로서 전달되어 소모된다. 그 결과 공작기계에 전류를 넣으면 공작기계는 가열되고 열변형을 이룬다.[3]

공작기계 내부에서 소모되는 열에너지 Q_{in} (Kcal/h)라고 하고 공작기계 전체의 열용량을 C_w (Kcal/°C)라고 하고 기계에서 떠나는 열량을 Q_{loss} (Kcal/h)라고 하고 기계전체의 평균온도 상승량을 T_m (°C)이라고 할때 시간 t 에 대한 변화는

$$C_w (dT_m/dt) = Q_{in} - Q_{loss}$$

기계에서 떠나는 열량 Q_{loss} 는

$$Q_{loss} = \alpha_m \cdot T_m S_0$$

이고 공작기계의 평균온도 상승량 T_m 의 시간

적 거동은

$$T_m = \frac{Q_{in}}{\alpha_m S_o} (1 - e^{-(t/t_o)})$$

이고, 이때 정수는

$$t_o = \frac{C_w}{\alpha_m \cdot S_o}$$

공작기계의 중량을 4 ton이라고 하고 6 시간 후에 열적으로 안정이 된다고 가정하면 시간정수 t_o 는 약 두시간이 되고 철계통 물질의 열용량이 0.11 Kcal/Kg°C 이므로 $C_w = 440$ Kcal/°C가 되고 따라서 S_o 는 220 Kcal/h°C가 된다.

일반 기계 내부에서 발생하는 열 Q_{in} 을 2.5 Kw라고 하면 기계의 평균 온도 상승량 T_m 은 10 °C정도가 된다. 지금 열변형에 영향을 주는 길이를 500~1000 mm로 하고 열 팽창계수를 $(1 \times 2) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 라고 할때, 이 경우 열변형량은 50~200 μm 가 된다. 그 외 여러 연구자[12,13]들이 여러 공작기계의 열변형량을 계산한 바가 있으나 거의 동일한 결과를 보고 있다.

이와같이 정밀공작기계에 있어서 작업중에 발생하는 열변형이 중대한 함수이므로 여기서 특별한 조치가 가해져야 한다. 그 방지책으로서 온도를 Control 할 수 있는 항온실에서 작업을 하는 것이 바람직하나 거기에 다음과 같이 예로사항이 있다.

초정밀 공작기계의 길이를 500 mm라고 하고 열팽창량을 0.5 μm 또는 0.05 μm 보다 적게 해야 할 때는 이 부분의 온도변화를 0.05~0.1°C 이하 또는 0.005~0.01°C로 해야한다. 그러나 이 미소온도변화를 정확히 측정하는 방법이 무엇이나 하는 문제이다. Thermocouple 은 1°C당 약 50 μV 의 기전력이 됨으로 0.01°C의 온도변화에 0.5 μV 의 정밀도가 필요한데 지금 이것이 가능한지 의심스럽다. 그래서 Thermis-

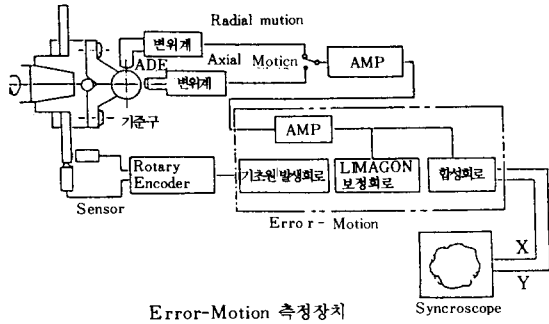
tor 또는 수정(水晶)의 공진주파수의 온도특성을 사용하는 방법이 있는데 Bryan[14]이 20 °C \pm 0.006 °C의 온도 컨트롤을 성공시켰다. 공작기계의 열변형 방지책으로서 다음과 같은 방법이 필요하다.

- 1) 열원을 공작기계 밖으로 낸다.
- 2) 기계의 열원을 직접 공기 오일, 오일미스트, 물 등으로 냉각시킨다.
- 3) 공작기계 내부의 발열을 적게 한다.
- 4) 기계의 내부 또는 외부로 부터 적극적으로 오일, 공기 등으로 냉각시킨다.
- 5) 열팽창계수가 적은 재료를 기계의 구조물에 사용한다.

Lawrence Livermore National Laboratory에서 개발한 Oil shower[4]와 같은 고가인 장치만이 완전 항온을 유지할 수 있기 때문에 이 방면에 어려움이 있다. 열의 영향이 초정밀 공작기계에 미치는 영향은 매우 심각한 바가 있으며 거기에 대한 연구발표가 많이 나오고 있다.[5] 이 연구과제는 공작기계의 역학적 인 변형연구[6]와 동등하게 중요하다.

3. 초정밀 측정기술

초정밀 가공에서 취급하는 단위가 0.1~0.01 μm (100nm, 10nm)이므로 이 Nanometer 단위의 측정 방법이 과거의 방법으로는 불가능하다. 첫째 회전운동하는(Spindle) 기계구조의 회전 정밀도를 어떻게 측정할 것인가가 큰 논란이 되고 있다. Lawrence Livermore National Laboratory에서 개발한 측정기술이 있지만[7] 현재로서는 그림 2-27에서 보는 바와 같이 Master ball 대신 self-cutter 한 기준 원반을 이용한 측정방법이 있다[8] 이 방법으로 초정밀 공작기계에 요구되는 0.01 μm 단위의 회전 정밀도를 측정할 수 있다(그림 8). 보통 측정기구로서는 1 μm 정도



Error-Motion 측정장치

그림8. Spindle의 회전 정밀도 측정장치

밖에 측정이 가능하지 못하므로 초정밀 측정방법에 대하여 여러 연구가 진행되고 있다. 초정밀 가공에서는 $0.001 \mu\text{m}$ (1nm) 단위의 표면 거칠기를 얻은 것이 보통이고 이것을 정확히 측정해야 한다. 동시에 가공품의 형상정밀도(Form accuracy)도 측정해야 하는데 종래 사용해왔던 Stylus를 사용하는 측정방법보다 월등히 정확하고 정밀 측정이 가능한 Laser Interferometer이 많이 사용되고 있다(그림 9). 또 Laser Interferometer는 미소 Displacement를 Compensation할 수 있는 장치가 가능하기 때문에 초정밀가공 공작기계에 Feed back control 용으로 사용이 가능하다[9].

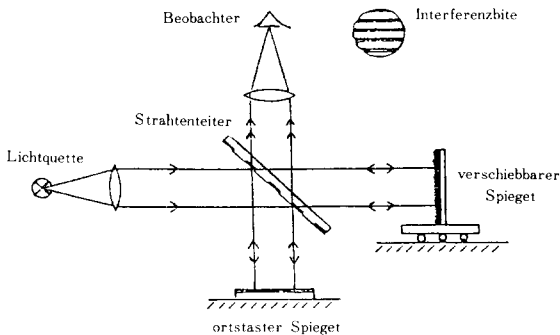


그림9. Interferometer의 원리

4. 초정밀 Guideway와 이송장치

Workpiece을 신속하고 정밀하게 보내주어야 하는 Guideway는 Yaw, Pitch, Roll에 의해서 Workpiece가 Spindle에 부착되고 있는 Tool과의 상대 위치에 오차를 가져오게 해서는 안된다. 따라서 그렇게 하기 위해서 Hydrostatic 또는 Aerostatic을 이용하여 이송 정밀도를 높이는 동시에 Strick Slip 현상이 일어나지 않도록 유의하고 Friction이나 Lead Screw을 사용하면서 Guideway을 소기의 기점에 정밀하게 움직이게 하고 있으며[28] 여러 종류의 설계가 있다.

초정밀 가공에 있어서는 이송장치가 특별히 고려되어야 한다. Diamond turning만 하더라도 feed rate가 $7 \sim 30 \mu\text{m}/\text{rev}$ 정도이고 더구나 신소재 초정밀 연삭 가공에서는 거칠기에 $15 \mu\text{m}/\text{min}$, Finishing에 $5 \mu\text{m}/\text{mm}$ 의 미소 이송을 해야 하기 때문에 새로운 이송장치가 개발되고 있다. 유압 또는 공기정압 Lead Screw의 연구가(그림 10) 활발히 진행되었고[10] 거기에 Piezoelectric device를 부착시

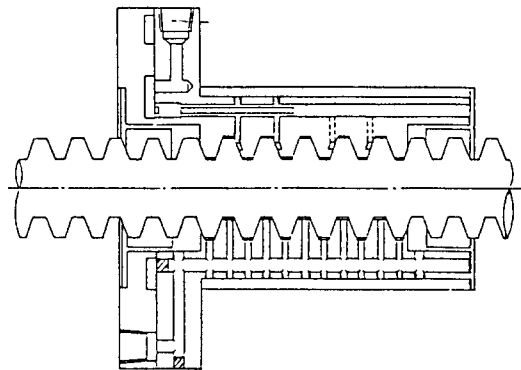


그림10. Air Lead Screw

킨 복합 초정밀 이송장치 개발이 성공되고 있다. [11] (그림 11). 이 방식은 공기 슬라이드(Air Slide)의 구동기구로서 Stroke가 큰

부분에는 Slide Screw 로 이송시키고 미소부분을 Piezoelectric 로 움직이게 하는 방법이다. 전압을 2.5 volt 로 구분함으로써 5nm 의 단계 이송이 가능하며, 최대 150mm의 전역에 따라 5 nm의 미소 이송이 가능하다.

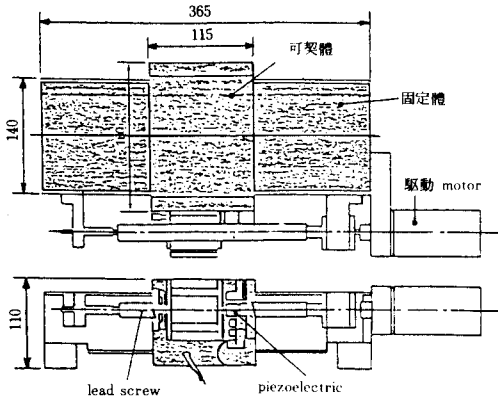


그림11. 복합 초정밀 이송장치

5. 새로운 공작기계 개발 연구

최근 초정밀 가공을 만족하게 하기 위한 공작기계 개발이 여러곳에서 활발히 일어나고 있는데 그 목적은 열변위를 줄이고 진동을 억제하는데 있다. 그 한 예로서 Ceramics를 Spindle, Guideway, Table에 사용하고 Bed를 Ferriteresin과 Concrete와 복합해서 만들고 그 Bed를 Pneumatic Isolator를 써가면 방진과 열 변위를 막고 있다. 그림 12에 그 실험한 결과를 표시하고 있는데 운전시간 3시간 후에 Expansion이 $1\mu\text{m}$ 이하고 Spindle와 Worktable 사이에 1°C 의 온도차와 $12\mu\text{m}$ 의 Displacement가 발생했으며 Dynamic Characteristics 에도 좋은 결과를 나타내고 있다[12]. 이 외에도 Graphite Epoxy Composite로 Spindle를 만들어 Thermal Stability와 Dyna-

amic stability에 좋은 결과를 얻은 예가 있다[13]. 또 Polymer Concrete와 Cast Iron으로 Machine Tool Element를 만들어 공작기계의 성능을 높이고 있으며[14], Concrete Machining Center를 만들어 열과 진동에 대한 효과를 얻을 것이 있다[15]. 또 Cementitious materials 즉 ferrocement, fibrous ferrocement and polymer impregnated ferrocement 등을 Cast Iron 대신 사용하여 진동에 대한 특성을 얻는 경우도 있다[16].

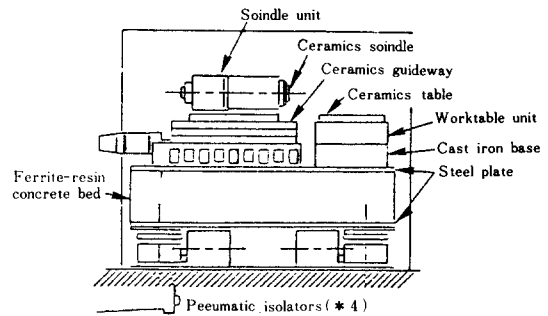


그림12. Ceramics를 사용한 공작기계

6. 초정밀가공기술의 전망

초정밀 가공기술 (Ultraprecision Technology) 이 여러 관심 연구자들의 흥미를 북돋아 연구를 활발히 진행시키고 그 결과를 서로 발표함으로써 지식을 교환할 목적으로 International Congress for Ultraprecision Technology (UPT) 가 결성 다음과 같은 여러곳에서 회합을 갖은바 있다.

- 제 1 회 1985 미국
- 제 2 회 1986 구라과
- 제 3 회 1987 봄 미국
- 제 4 회 1987 여름 구라과
- 제 5 회 1987 가을 중국

제 6 회 1988 독일 Aachen 공대 거기서 발행되는 Proceeding 을 면밀 검토 해 보면 앞으로의 초정밀 가공기술의 방향을 알 수 있다 [17]. 최근의 경향을 보면 20 년전부터 Diamond turning 으로 mirror surface 을 얻은 가공법은 관심도가 적어지는 경향이다. 초정밀 가공기술에는 Proceeding 에서 보는 바와 같이 분류해서 연구를 해야한다.

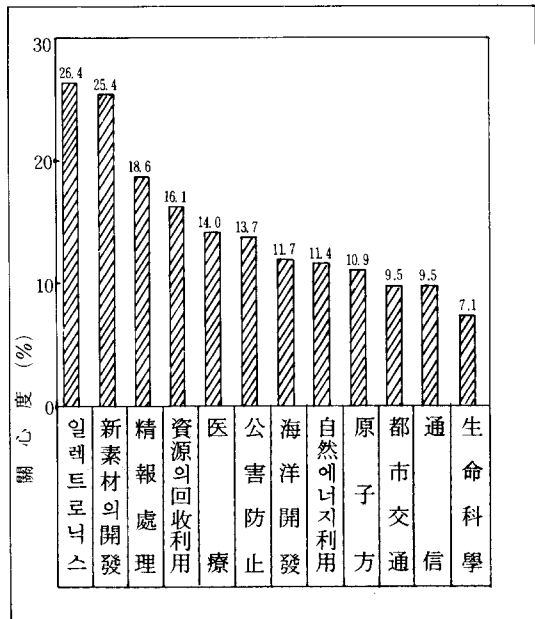
- 1) manufacturing Technology
- 2) Machine Development and Improvement
- 3) Measurement Techniques and Equipments

이 세가지가 서로 상호관계를 유지하므로써 초정밀 가공기술은 향상될 것이다.

처음 초정밀 가공을 시작한 것이 미국에서 대형 경면을 절삭할 수 있는 선반을 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)에서 제작한 때부터 시작되었으며 그후 일본에서 군사용이 아닌 상업용의 Mirror Surface 을 위한 정밀 Diamond Lathe 를 개발하고 [18] 이 기술로 세계를 리드하고 있다.

UPT의 Proceeding 을 보면 Diamond Turning 에 관한 논문이 적어지고 그대신 신소재의 Grinding이나 Lapping 에 관한 논문이 두드러지게 증가하고 있다. 그 이유로서는 Diamond Turning 은 이미 20년 이상의 연구가 계속되고 있는 반면 여러 신소재가 새로운 공업 재료로 등장하고 거기에 대한 초정밀 가공기술이 미지수이기 때문이다. 한 예를들면 Video-head 를 가공함에 있어서 Slicing 과 Grinding 이 중요한 가공기술이라 할 수 있는데 이 신소재가 Brittle 하고 hard 한 성질을 갖고 있으므로 종래 방법으로는 재료의 표면에 Fracture 가 생기기 때문에 새로운 초정밀 연삭기계와 연삭방법을 개발해야 한다 [19]. 이 신소재 연삭 mechanism 의 기초연구가 중요성

을 띠게 되었다. 이미 여러나라 정부에서 조사한 바 있지만 장래의 생산관심분야가 Electronics 다음에 신소재의 개발이라는 사실을 알 때 (그림 13) 우리나라에서도 이 신소재의 정밀 가공기술을 개발하는 것이 바람직하다고 사료된다.



최형섭 “신소재 산업과 우리의 대응 방안” 대한민국의학술원 1989. 4. 15 P. 3 1980. 일본 경제기획청에서 조사한 자료

그림 13. 새로운 관심분야의 비교

이미 여러 논문에서도 발표되고 있고 초정밀 학회에서 논의되고 있는 신소재용 초정밀 연삭기는 Nano Grinding technology 용 공작기계라고 말할 수 있다. 이미 일본에서는 Nano Grinding Technology Association 이란 학술단체를 발족시키고 있는 것을 보아도 이 분야가 장래 얼마나 중요한가를 말해 준다 [20].

7. 결 론

- 1) 초정밀가공기술은 앞으로의 첨단산업에 중요한 가공기술이다.
- 2) 초정밀가공용 공작기계는 공압베어링을 사용하고 초정밀 이송기수, 반진동 Bed 그리고 CNC Control, 그리고 feed back system을 사용하여야 초정밀가공이 가능하다.
- 3) 열변위(Thermal deformation)가 적고 진동을 억제할 수 있는 여러 공작기계가 연구되고 있다.
- 4) 앞으로의 초정밀가공기술에는 신소재의 Grinding, Lapping이 중요한 위치를 차지하게 될것이다.

參 考 文 獻

- (1) Taniguchi N. "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) Powell J.W. "Design of Aerostatic Bearing" The the Machinery Publishing Co., Ltd.
- (3) 西脇信彦 "熱變形の抑制及び耐振性" 工作機械シリーズ超精密加工, 大河出版
- (4) Bryan J.B. et al SME Tech Paper MR 72-138, 1972
- (5) Venugopal, R "Thermal Effect on the Accuracy of Numerically Controlled Machine Tools" Annals of the CIRP Vol 35/1/1986, pp.255-258.
- (6) Weck, M, "An Examination Technique to Determine Static Weakpoints of Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol 36/1/1987
- (7) Bryan J.B. "Concerning the Error Motion of Axes of Rotation" Annals of the CIRP Vol 24/2/1975
- (8) 垣野義昭 "主軸構造と回軸精度の測定" 工作機械シリーズ超精密加工, 大河出版.
- (9) Weck M et al "Limit of Workpieces Accuracy Caused by the Geometrical and Dynamical Behaviour of Ultraprecision Diamond Turning Machines" Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology, May 1988 Aachen, FRG pp.153-170.
- (10) Satomi, T., "Studies on the Aerostatic Guiding System-Theory and Experiments on the Static Rigidity and Stability-Bulletin of JSPE Vol.17/2, 1983.
- (11) 伊庭剛二, "微れ送り機構とその抑制" 應用機械工學 2/1988.
- (12) Tsutsumi, M. et al "New Material Application to Ultraprecision Lathe" Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology, May 1988, Aachen, FRG, pp.171-183.
- (13) Lee Dai Gil "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool" Annals of the CIRP Vol. 34/1/1984

- pp.365-369.
- (14) Salje, E et al "Comparison of Machine Tool Elements Made of Polymer Concrete and Cast Iron" Annals of the CIRP Vol.37/1/1988 pp.381-384.
- (15) Sugishita H et al "Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamic and Thermal Structure Behavior" Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988. pp.377-386.
- (16) Rahman. M, et al "Evaluation of Advanced Cementitious Composites for Machine-Tool Structure" Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988 pp.373-376.
- (17) Proceeding of the International Congress for Ultraprecision Technology, May 1988, Aachen, FRG.
- (18) 小林昭, 超精密加工入門 総合技術センター
- (19) Filano T., et al "Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials" Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology, May 1988, Aachen, FRG
- (20) ナノ研削技術協会の發足 精機工學會誌, Vol.94 No.851, p.952.