

공작기계 기술의 현재와 미래 (9)

강 철 희*

MACHINE TOOL TECHNOLOGY; THE PRESENT AND THE FUTURE (9)

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 공작기계의 현재와 미래 | (19) 미래의 생산(CIM, IMS) |
| (10) 초정밀 가공 공작기계 | (20) 한국 공작기계의 갈 길 |

9. CNC 연삭 공작기계의 현재와 미래

9-1. 서 론

연삭 가공은 인류가 생존을 위한 도구를 만들 때 사용한 2,000년 이상의 가장 긴 역사를 가지는 가공법이며 다른 기계에서 가공된 것을 마지막으로 마무리(Finishing)작업을 하는 가공이다. 연삭 공작기계 발달은 스톨(Grinding wheel)기술 발달과 연삭가공 기술 발달과 더불어 진행되어 왔다.

기록에 의하면 1846년 미국에서 선반에 스톨을 붙인 장치가 등장했으며 이것이 세계 최초의 연삭반이라고 볼 수 있다. 미국 Brown&Sharp사는 1876년에 만능 연삭기를 제작했고 미국 Norton사가 평면 연삭기(Surface Grinding Machine)를 제작하였다. 스톨(Grinding wheel)의 원료인 Carborundum의 제조 방법을 1891년에 Norton사에서 발명하였으며 원통 연삭반은 그 회사가 1901년에 제작하였다. 1924년 Swiss에서 Lead screw 연삭기를 제작하였으며 1930

* 統一重工業(株) 전무

년에 독일 Berlin 대학의 Schesinger 교수가 연삭이론의 기초가 되는 연삭력에 대한 이론을 발표하였다. 미국 GE사에서는 최초로 인조 Diamond를 1953년에 개발하고 1957년에는 CBN을 개발하였다. 1960년 미국 Cincinatti Milacron사는 최초의 NC 원통 연삭기를 제조하고 1964년 일본 Toyota 공장에서 NC Cam Grinder를 제작하였다.

1966년 독일 Aachen 공대 Opitz 교수가 획기적인 발명이라고 할 수 있는 고속 연삭이론을 발표하였고 이 이론을 토대로 Schaudt사에서 스톨의 속도가 60m/s인 고속원통 연삭기를 개발하였다. 1968년 일본에서도 Okuma, Seiko, Toyota, Mitsui 등이 고속 연삭기 제작을 발표하였으며 1970년 독일 Blohm사가 Creep feed 연삭기를 발표하였다.

연삭기 발달과 함께 연삭이론, 연삭온도, 정밀측정 그 외 정밀가공에 대한 수많은 연구가 진행되고 있다. 세계 최대 공작기계 생산국인 일본도 기술도입과 자체 기술개발등 꾸준한 노력을 집중해왔고 정부, 산업체, 학회(정산학)가 삼위일체가 되어 가공기술 특히 정밀 가공 생산 기술에 큰 성과를 보고 있으며 이 방면에서 전세계를 리드하고 있다고 말할 수 있다.

우리 나라에서도 1980년대에 원통, 평면, 내면 연삭기등을 제조하고 있으나 기술적으로 미숙하고 모방 단계에 있어 타 MC기술에 뒤떨어지고 있는 실정이다. 선진국 제품에 비해 품질이 떨어지기 때문에 많은 연삭계통 공작기계를 수입하고 있는 실정이다. 우리나라에서 연간 생산되는 연삭기는 대개 범용이 2,000대이고, CNC 연삭기는 100대 이내이지만 수입은 범용이 8,000대를 넘고 CNC 연삭기는 300대가량 된다. 우리는 노력을 집중하여 고정밀, 고성능 연삭기 특히 CNC 연삭기를 선진국 수준으로 개발하여 국산 연삭 공작기계를 널리 보급해야 할 것이다.

9-2. Grinding machine의 요소 기술

Grinding machine은 정밀 가공 공작기계이며 다른 공작기계 가공(Lathe, Drilling machine, Milling machine)으로 필요한 정밀도(형과 Size, 표면조도)를 얻는데 어려움이 있을 때 Grinding wheel을 사용하여 정밀도를 내는 공작기계이다. Grinding wheel의 종류, Work의 Type, 기계의 구조에 따라서 분류하면 원통 연삭기(External cylindrical grinding), 무심연삭기(Centerless grinding machine),

내면 연삭기 (Internal grinding machine), 평면연삭기(Face-surface grinding machine), 입형 평면 연삭기(Peripheral-surface grinding machine)가 기본적인 연삭기이다. 공구연삭기(Cutter grinding machine), 스크류 연삭기(Screw grinding machine)등의 특수 연삭기도 존재한다.

예를 들어 원통 연삭기를 Fig 9-1에서 보면 Spindle이 두 개가 있다.⁽¹⁾ 하나는 공작물을 저속으로 회전시키는 Work-spindle이고 또 하나인 Wheel spindle은 매우 고속으로 회전하는 것이다. Wheel spindle을 Smooth하게 회전시키려면 Wheel의 Balancing을 잡아야 한다. 또, 스톨을 Sharp하게 하고 성형을 하기 위하여 Dressing, Truing 을 해야 하며 그 방법에는 여러가지가 있고 Dressing unit은 절대 필요로 하는 unit이다. Spindle용 Bearing은 연삭기의 회전 정밀도에 큰 영향을 미치므로 선택을 잘 해야한다. Fig 9-2에서 위에 있는 그림은 Hydrodynamic multi-surface friction bearing이다. 이 Spindle은 큰 Grinding wheel diameter를 가지는 Medium speed용 Spindle이다. Bearing에서 발생하는 Friction이 적어 Spindle 회전시 발생하는 열에 일정한 한계를 준다. 이 System은 Damping과 Stiffness에 좋은 성질을 가지고 있다. 또 하나의 Hydraulic을 사용하는 Bearing 종류에 Hydrostatic bearing system이 있는데 이것은 중부하 연삭기(Very-heavy duty grinding machine)에 사용하며 매우 높은 회전 정도를 얻을 수 있다. 공기 정압 베어링(Aerostatic-bearing system)은 극히 높은 회전과 정밀도를 요구하는

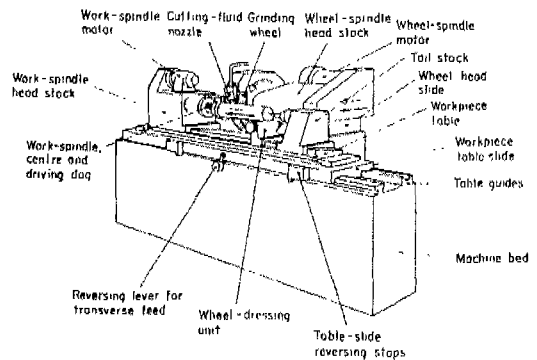


Fig. 9-1 Construction of an external cylindrical-grinding machine

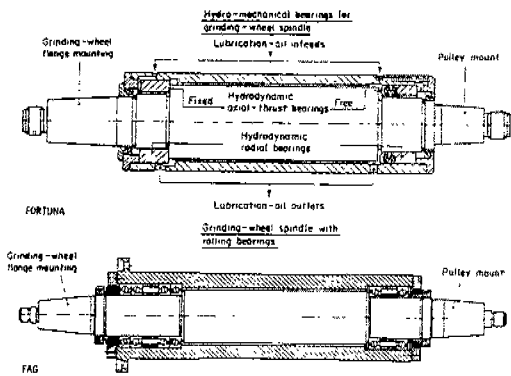


Fig. 9-2 Grinding wheel spindle bearing designs

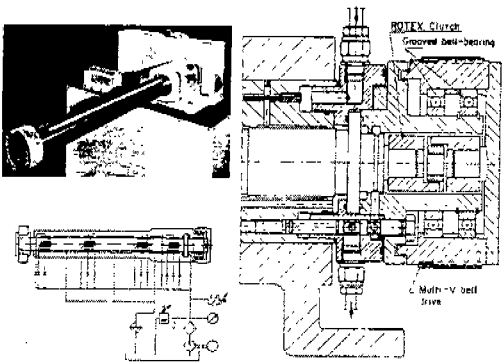


Fig. 9-3 Internal grinding wheel spindle with hydrostatic bearings

곳에 사용한다. Fig9-2의 아래는 제일 광범위하게 사용되고 있는 Pre-loaded(예압을 준) 구름 베어링(Roller-bearing system)이다. Angular contact bearing을 사용하며 고속일 때는 Ceramic ball을 사용한다. Ceramic은 밀도(Density)가 적고 탄성 계수가 크므로 온도 상승이 적어서 연삭력에 잘 견디는 성질이 있다.

Fig 9-3에는 Internal grinding machine에 사용되고 있는 Hydrostatic bearing을 보여주고 있다. 이 Spindle은 고속 회전에 적합하며 진동의 발생을 막는 역할을 한다. Internal grinding machine에는 그 외에 Built-in motor를 사용하는 경우가 있는데 이것은 Spindle의 회전수가 120,000rpm까지 올릴 수 있고, Air bearing은 Dia가 매우 적을 때 400,000rpm

까지 올릴 수 있다.

Work-spindle의 역할은 Work piece를 부착시키고 회전운동 시키는데 있다. 여러가지 Head stock의 구동방법 중에서 Variable DC motor로 Pulley를 통하여 Spindle의 속도를 조정하는 것을(Fig 9-4)에서 볼 수 있다.

고속으로 회전하고 Diameter가 매우 큰 Grinding wheel은 Balancing이 절대적이다. (1) 그 방법에는 여러가지가 있는데 하나는 Stroboscopic balancing 방법이다(Fig 9-5 좌). Balancing Weights가 3개의 Epicyclic gear train에 의해서 Position 되고 있다. Internal toothed setting ring을 조절하므로써 그 Position이 결정된다. Hydraulic balancing head는 Fig 9-5(우)에서 보는 바와 같이 세 개의 Ball이 Balancing weights이며 Annular groove속에 있는 Ball이 유압에 의해 Unclamp 되므로써 Unbalanc-

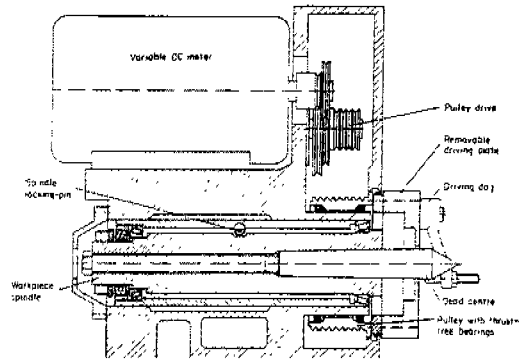


Fig. 9-4 Work spindle head stock

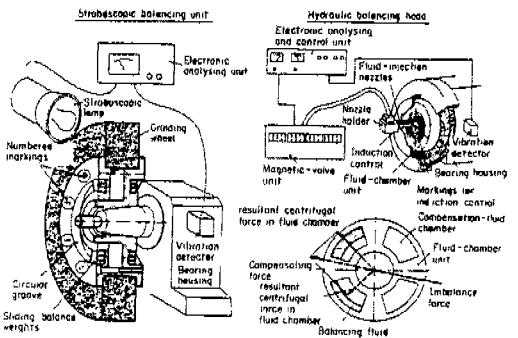


Fig. 9-5 Stroboscopic balancing unit and hydraulic balancing head

ing을 조절할 수 있다.

9-3. 복합 GC와 연삭기의 NC화

Ceramics 부품과 같은 High tech 소재가 속속 개발되고 실용화 되어 가공공수도 다종, 다양화 되어가고 있다. 기계 가공기술의 향상에 의해 일반적인 강재(鋼材)에 있어서도 가공 프로세스가 변경되고 또 단순화 되고 있다. 원형 소재의 가공 프로세스 변화를 Fig 9-6 에서 알 수 있다.⁽²⁾ 이전에는 Forging 등으로 강도를 높이고 나서 Annealing, Turning, Heat treatment를 하고 다음에 Grinding을 하여 Finishing 하였다. 그러나, 새로운 방법은 Forging을 한 다음 열처리를 하고 선삭 가공과 연삭 가공을 복합 MC 공작기계를 사용하여 상호 교환적으로 가공하므로서 Finishing 하는 것이다. 이 방법은 Process를 감소시킬 수 있으며 가공시간이 단축됨에 따라서 가공 비용을 절감시킬 수 있다. 이와 같이 공정을 복합화 함으로서 얻어지는 이익을 얻기 위해 공정 복합 공작기계를 개발하게 되는 것이다.

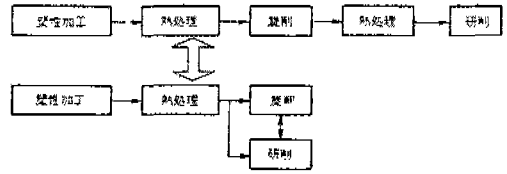


Fig. 9-6 Process change for round workpiece machining

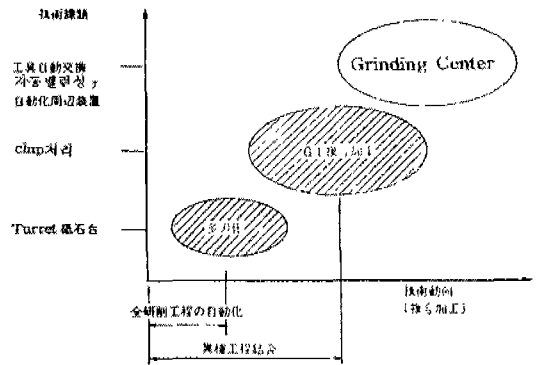


Fig. 9-7 Technical development and Compositeness of machine tools

Fig 9-7에서는 기계 가공 집약화의 기술과제와 기술 동향과의 관계를 정리하였다. 제1단계는 Cutting edge의 집합체인 Grinding wheel을 사용하여 Work를 가공할 때는 1 Cutting edge(Grit)당 일을 하는 양이 극히 적고, Size나 표면 정밀도를 확보하는데 유리한 공구를 보유하는 공작기계 다시 말해서 Grinding Machine이다. 이 때 여러 공구는 Turret 스톨대로서 교환이 가능하다. Grinding Machine을 Base로 한 복합 공작기계의 해결해야 할 기술 과제는 다음과 같다.

- 1) 각종 공구를 부착시키는 것
- 2) 스톨을 Balancing 시키고 성형(Dresssing)할 수 있게 하는 것
- 3) Chip을 처리하는 것
- 4) 자동화 주변장치를 잘 대응시키는 것
- 5) Work의 회전과 Main spindle의 회전을 동시에 어하는 것 등이다.

내면 연삭기(Internal grinding machine)를 복합 기계로 할 때는 복수 스톨축과 내외경 연삭의 자동 Indexing 기능이 있어야 된다.

제 2단계는 이중 공정(二重工程)결합 Level이다. 연삭(G)↔선삭(L) 공정을 결합하게 하는 방법이다. 연삭(G)↔Milling(M)공정의 결합도 가능하다. 연삭기

를 기반으로 하는 복합 공작기계는 시작 단계에 있다. 제3단계는 Grinding center의 Level이다. Grinding center는 공정결합을 목적으로 하는 복합 가공 공작기계의 최종의 형태이다. L.M.G 가공을 포함한 기능을 현대의 공작기계로 집약하는 것은 어렵기는 하지만 목표로서 선삭공구, Milling공구, Grinding wheel을 상호 교환하는 공구 자동 교환장치를 가지고 여러가지 자동화와 계측 시스템을 지닌 단독 가공 시스템으로 설계할 수 있다.

아직까지 Grinding Center라는 용어의 정의는 완전히 확립되어 있지 않고 있으며 사용자나 공작기계 제조자들도 확실하게 하지 못하고 있다. 그러나, 현재 연삭가공만 할 수 있고 여러 종류의 스톨을 자동 교환할 수 있는 기계가 있으며 또 머시닝 센터 Base에 Boring bar 대신 CBN 스톨을 장착하는 기계가 실용화 되고 있다. 공작기계 자체로 볼 때 고속화되고 정밀도가 수십nm(나노메터) 오더까지 가공이 가능한 기계도 서서히 개발되어가고 있다. 한가지 문제는 이와같은 초고급 기계를 마음대로 조작할 수 있는 인원이 한정되어

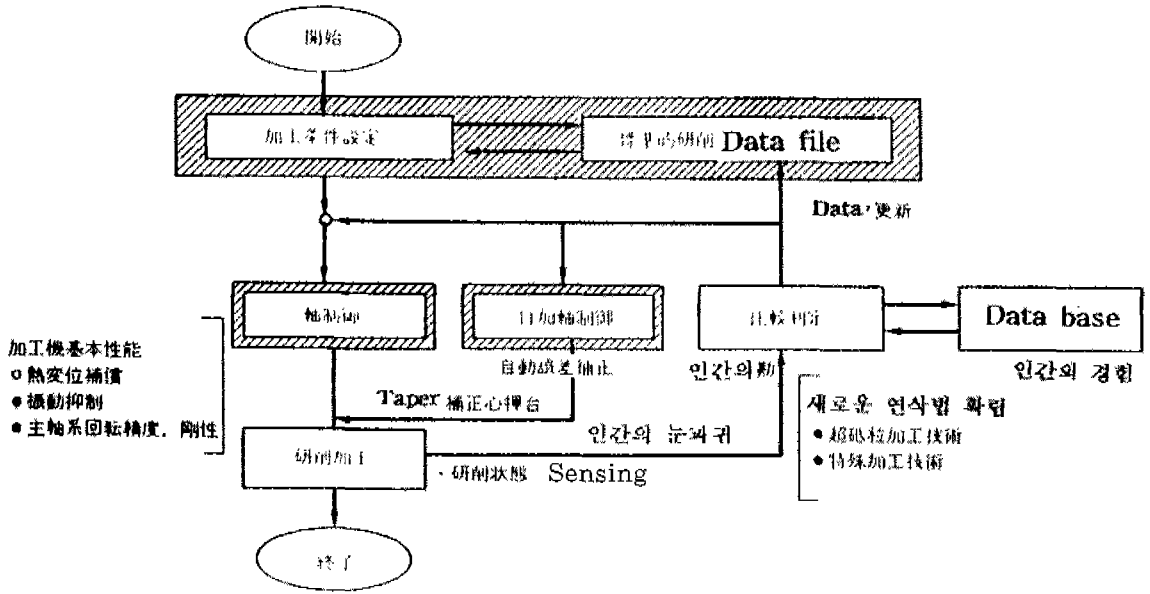


Fig. 9-8 Flow charts of intelligent grinding process

있다는 것이다. 조작 인원을 육성 배출 한다는 것이 어려운 일이다. 안정된 가공 정밀도를 확보하기 위해서는 기계의 기본 성능을 항상 검토해야 함은 물론이지만 작업자의 오랜 경험 즉 가공 조건 결정과 가공 상태 감시, 측정기술, 보정치 산출, Feedback 등 연삭가공의 중요한 Parameter를 Software 기술로서 확립시켜 놓아야 한다.

Fig 9-8에 Intelligent 연삭가공 프로세스를 설명하고 있다. 연삭 가공을 시작할 때 Data base의 도움으로 가공 조건을 설정하고 주축과 부가축을 제어하면서 가공을 실시하게 한다. 그 때 기계의 열변위 보상, 진동억제 그리고 주축의 강성, 정밀도를 확립시켜야 한다. 연삭 가공시 Sensor를 사용해서 연삭 상태를 감지하여 Data base와 비교해야 한다. 그 때 새롭게 개발된 연삭 가공기술과도 비교하여 필요시 새로운 방법을 도입해야 한다. 변경해야 할 Data가 있으면 가공 조건을 설정할 때 Input할 Data를 수정해야 한다.

Fig 9-9는 선삭, 연삭을 복합 가공 공작기계의 구성을 보이고 있다.⁽²⁾ 스톱대 위에 내면 연삭기(T1)와 측정 장치(T2) 그리고 선삭 지그 Unit(T3)가 있으며 스톱대는 0°, 90°, 180°로 Indexing이 가능하다. T1에는 다수의 연삭 공구를 교환할 수 있으며 T2에서 접촉

식 Sensor 방식을 채용하여 Work의 위치, Size의 변화 등을 Process전에 측정하고 보정을 한 후 다시 Process후에 계속하는 기능을 가지고 있다. T3은 선삭용으로 NC 기능이 최대 10 Tools의 Data 등록이 가능하며 Chip guard에서는 Chip의 처리를 할 수 있다. CNC 법선 Dressor는 B축(회전축)이며 X, Z, B축을 동시에 제어할 수 있고 스톱 수정용 Diamond를 스톱 수정면에 항상 수직으로 유지시키고 임의의 형상의 Grinding wheel을 성형할 수 있다. 출력은 2.2kW의 Motor를 가지며 종래의 내면 연삭기 출력의 약 2배이다. 주축은 최고 20000min⁻¹의 회전수로 높은 회전 정밀도를 유지하고 있다. 이 시스템은 과거에는 각각 독자적으로 확립되어 있었던 Taper 보정 Grinding과 Matching grinding을 한꺼번에 합친 기술이라고 볼 수 있다. Spindle 제작과정과 같은 숙련 작업자의 경험과 Sense를 필요로 하는 Know-how를 수치화하여 CNC로 제어하는 한 예이다. 가공 정밀도는 1.0 μm를 목표로 하고 있다. 지금까지 공정 결합의 능력을 향상시키기 위한 복합가공 기술의 한 예를 소개하였다. 이것은 장래의 연삭기는 선삭과 연삭을 같이 복합적으로 하는 기계로 나아가야 한다는 것을 명시하고 있다.

독일에서도 Gas turbine을 한번의 Chucking으로

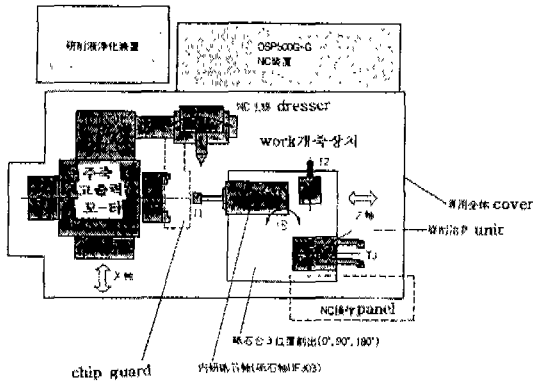


Fig. 9-9 Construction of complex machine for turning and grinding

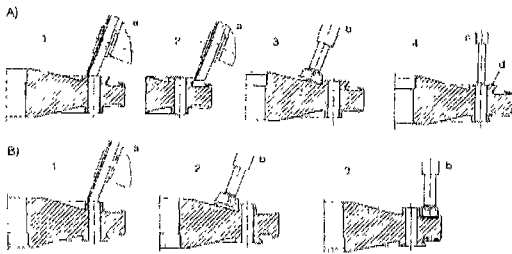


Fig. 9-10 Complex machining of grinding and boring

부착가공을 한 후 상하 양면을 차례로 가공한 후 정밀 Boring을 하여 전 가공을 완성시키는 복합화 된 공작 기계가 제조되고 있다. (Fig 9-10)⁽³⁾

9-4. GC의 개념과 현황

최근 수요가 급증하고 있는 신소재인 Ceramics를 효율있게 가공하기 위하여 MC를 Base로 한 Grinding Center(GC)가 개발된 것은 수년전이고 최근에는 Internal grinding machine을 Base로 한 GC가 개발되고 있다는 것을 언급한 바 있다.

지금까지 MC, TC에 비해서 복합 연삭 가공 공작 기계의 개발이 지연되고 있으나 NC가 32bit화, 고분해 Scale이 개발됨으로서 제어 정도가 매우 향상. Guide way의 정밀도 향상, 초미소 Grain을 가지는 Grinding wheel(CBN)의 이용 기술등도 발전되어 연삭 가공 기능의 복합화가 급격하게 이루어지고 있다.

일본의 공작기계 업자가 User를 상대로 하는アンケート를 실시한 결과 연삭 가공에 있어서 선삭의 경우와 마찬가지로 원통과 각형 공작물을 한 기계로연삭할 수 있게 다시 말해서 원통과 평면 연삭 가공의 통합을 강하게 요망하고 있을 뿐만 아니라 나아가서 Gear, Screw의 연삭도 원통 연삭과의 복합화를 요망하고 있다. 현재로서 평면, 원통, 내면을 Base로 하는 가공 기능의 통합화가 진행되고 있으나 User들은 더 나아가서 원통과 평면 연삭 가공의 복합화를 요망하고 있다는 것을 주목할 필요가 있다.

Grinding Center의 정의는 아직 확실히 정해져 있지 않지만 GC는 MC와 같이 복합 가공 공작기계의 하나라고 생각할 수 있다. 미국의 NMTB(미국 공작기계 공업회)에서는 1977년에 「MC는 자동 공구 교환기능을 가지고 공구를 회전시키면서 가공하는 다기능 NC 기계」라고 정의하고 있으며 JIS에서는 「공작물을 고정시켜 이동시키지 않고 2면 이상에 대하여 다종류의 가공을 하는 수치 제어 공작기계이며 공구의 자동 교환 기능 또는 자동 선택 기능을 가지고 있는 기계」라고 되어 있다. 따라서, GC의 정의는 「주로 연삭공구의 자동 교환기능 또는 자동 선택 기능을 구비하여 공작물의 셋팅을 바꾸지 않고 각종 연삭 가공을 하는 NC 공작기계」라고 할 수 있을 것이다. 현재 선진국의 GC 개발동향을 보면 전술한 바와 같이 Ceramics를 고능률적으로 가공하기 위해서 개발한 MC Base의 GC외에 여러가지 가능성을 볼 수 있다.

Jig Grinding Machine에 ATC, AWC(Auto-automatic wheel change)를 장비한 것이 출현되고 있다. 그다지 보급되고 있지는 않지만 평면 연삭기를 Base로 한 것도 몇 가지 제안되고 있다.

원통형 공작물 가공용으로 여러가지 Type이 제안되고 있으나 가장 보편화 된 것이 내면 연삭기를 Base로 한 GC이다. 내면, 외면, 단면의 연삭 가공을 One Chucking으로 가공이 가능하고 Work Diameter의 변화를 Flexible하게 대응할 수 있으며 장시간 고정도 무인 운전이 가능하면서 Turning과 유사한 구조를 가지고 있다. 원통 연삭기를 Base로 한 것과 Centerless Grinding Machine을 Base로 한 것도 있고 특히 공구 연삭기를 Base로 하여 ATC를 장착하여 One chucking으로 각종 공구의 전 자동연삭이 가능해지고 있다. (Fig 9-11)⁽⁴⁾ 독일에서는 CNC gear cutting machine을 개발하였으며 8 Axis인 이 기계는 복잡한

형상을 가진 여러 종류의 Gear를 정밀하게 연삭시킬 수 있다. (Fig 9-12)⁽⁵⁾

이상에서 설명한 바와 같이 GC의 개념을 포함해서 MC, TC와 비교하면서 장래의 포괄적인 개념인 Machining Center의 발전을 다음 Fig 9-13과 같이 분류하는 것을 일본에서 제안되고 있다. 질삭, 연삭 그 외의 가공법을 통합한 복합 가공기계를 廣義의 Machining Center라고 부르고 그 하위(下位)에 질삭 가공을 하는 Cutting Center(CC)와 연삭가공을 주로 하는 Grinding Center(GC)로 분류하였다. 종래의 MC를 Milling Center(Mic)라고 하고 CC에는 Turning Center(TC), Drilling Center(DC),

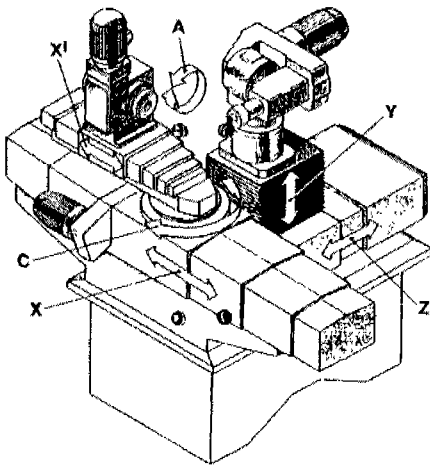


Fig. 9-11 Grinding machine for complex tool cutter

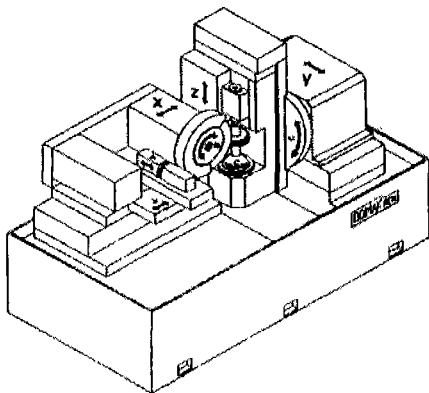


Fig. 9-12 8 Axis gear grinding machine

Broaching Center(BC), 아직 개발되고 있지 않지만 Gear cutting center(GCC)등으로 기계의 종류를 가공법을 기본으로 정의될 수 있다. 그 외에 EDMC와 LBMC도 추가로 생각할 수 있다. GC에도 이 기준을 채용하면 EGC(External Cylindrical Grinding Center), IGC(Internal Grinding Center), JGC(Jig Grinding Center), CGC(Centerless Grinding Center), SGC(Surface Grinding Center), TGC(Tool Grinding Center)등으로 분류하여 Fig 9-13과 같이 여러가지 명칭을 부여하고 모든 가공을 할 수 있는 다기능 복합 공작기계를 Machining Center라고 부르는 것이 타당하다고 한다.⁽⁶⁾ 연삭 가공 기능을 복합화하는 GC의 Merit를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 한번 가공물을 Chucking시키면 여러 종류의 가공이 가능해지므로 공정을 단축시킬 수 있고 공작물 착탈, 이동시간을 절약할 수 있으므로 비가공시간이 단축된다.
- 2) Work를 한번 Chucking한 다음 여러 가공을 하게 되므로 가공 정밀도가 향상된다.
- 3) 기계의 구성 요소를 공용화할 수 있으므로 Space를 절약할 수 있다.

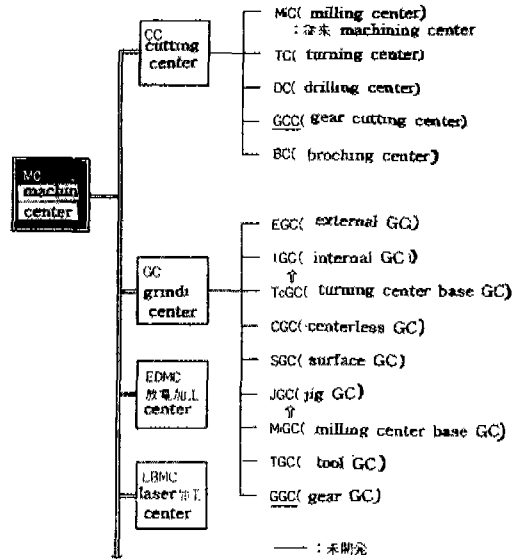


Fig. 9-13 Suggested classification of various machining center(MC)

4) Chuck등 공작물을 부착하는데 필요한 기구를 공 용화하므로써 경비를 절약할 수 있다.

5) 슷들(Grinding wheel)의 교환, Dressing등 작 중 가공 준비 과정을 자동화 할 수 있다.

6) 연삭 가공 공정을 생산 시스템에 포함시킬 수 있 으므로 이상적인 FMS, FA, CIM을 구축하는 것이 가 능해진다.

7) 여러 대의 기계를 여러 사람이 따로 조정하던 것 을 한 사람이 여러대의 기계를 조정하기 때문에 인건비 를 절감할 수 있다.

이와 같이 열거한 Merit는 MC, TC의 Merit와 별 차이는 없지만 2)의 Merit는 절삭할 때와 비교하여 큰 기대를 할 수 있다. 예를 들면 다단(多段)공작물의 내, 외경의 동심도(Concentricity)는 절삭에서 요구되는 것보다 월등히 높으므로 One Chucking가공으로 그 정밀도의 안정성 확보가 용이하고 타가공에서 요구되는 Chuck 자체의 정밀도도 완화할 수 있는 것이다. 6)의 Merit도 중요하다. 연삭 가공을 FMS에 Input할 때 어느 정도의 양산 공작물이나 유사 공작물에 한정된 경 향이 있었으나 GC의 투입에 따라서 다종 소량에의 대 응이 용이해지고 절삭, 연삭 가공이 혼합될 때는 더욱 유연한 FMS 구축이 가능해지고 있다. 또 GC를 더욱 고도화, 각종 기능을 통합화 하므로써 FA, CIM의 기 본 요소로서의 기능이 더욱 충실해지고 완성도가 높은 생산 시스템의 실현이 가능해진다. 전술한 각종 GC의 생산 시스템에 대한 적용 범위를 Fig 9-14에 정리하였 다. 현재는 원통 연삭기, Centerless 연삭기 Base의 GC는 슷들이 크기 때문에 슷들을 빈번하게 교환할 경 우에는 불리하며 중 Lot size에만 적합하다. 다종 소량 생산에 대해서는 대부분의 경우 IGC가 적합하지만 Spindle 종류나 대경 Roller류 등 큰 공작물에 대해서 는 EGC가 적합하다. JGC와 MIGC, IGC와 TCGC 는 Z축의 Oscillation 기능의 유무의 차 밖에 없으므로 기계 정도가 양자가 접근하게 되면 나중에는 통합될 것 이라고 보고 있다.

9-5. GC의 기술과제

1) 개발현황

전술한 바와 같이 일반적으로 연삭가공은 절삭가공후 Finishing을 하는 가공법이므로 한 차원 높은 가공정 도와 깨끗한 표면조도를 요구한다. 연삭용 공구는

GC 種類	適宜生産形態				機械 特徴
	작트 사이즈	작物 徑	작物 寸法	加 工 精 度	
EGC	中	中	大~中	高	砥石交換裝置: 가공관
IGC	中~小	多	中~小	高	柔軟性:이 높음
TcGC	中~小	多	中~小	中	切削加工: 硬 容易
SGC	小	多	大~小	高	工作物交換方式: 어려움
JGC	小	多	中~小	高	
MIGC	中~小	多	大~中	中	切削加工: 硬 容易
CGC	中	中	中~小	高	砥石交換裝置: 에공관
TGC	小	多	中~小	高	全種類: 工與 대응 어려움
GGC	中~小	多	中~小	高	

*) -- 기계관

Fig. 9-14 Applications of various grinding center

Al₂O₃와 SiC를 주로 하는 슷들을 사용하여 왔으며 슷 들의 원주가 마모가 심하고 또 슷들의 각 Grit 사이에 적은 Chip이 충전되어 슷들의 예리도(Sharpness)가 결여되어 Dressing과 Truing을 해 가면서 Operator 가 주의를 집중시켜야 하는 가공법이다. 따라서 NC화 가 절삭 가공 공작기계에 비하여 상당히 뒤떨어지고 있 었다. 최근 기능 인력 부족과 사회적 배경으로 NC 기 술이 매우 진보되어 있으므로 연삭가공의 여러 문제점 을 극복하고 새로운 개념의 Grinding Center(GC)가 1988년 JIMTOF에 출품된 후 급속도로 확장되고 있 다. GC의 모체는 절삭가공용의 MC이다. MC는 Milling, Drilling, Boring, Tapping, Reaming 등의 절삭 가공을 한 대의 공작기계로 가공할 수 있게 절삭가공을 복합화한 것이다. 현재까지 MC는 일본에서 만 약 20만대가 가동되고 있다. MC는 물론 NC로 제 어되고 있고 Spindle 회전수도 15,000rpm 이상이 되 며 강성도 연삭기와 비교하여 아주 높은 잇점을 이용하 여 MC에서 연삭가공을 시도하였다. 즉, 종래의 MC에 마모가 극히 적은 Diamond나 CBN 슷들을 Tool holder에 붙여 Ceramics 등을 연삭해 본 결과 매우 좋은 결과를 얻었다. 또 종래의 MC와 마찬가지로 NC 기능을 갖고 있는 Table과 공구간의 3차원적 상대운동 을 시킬 수 있어 Fig 9-15에서 보는 바와 같이 복잡한

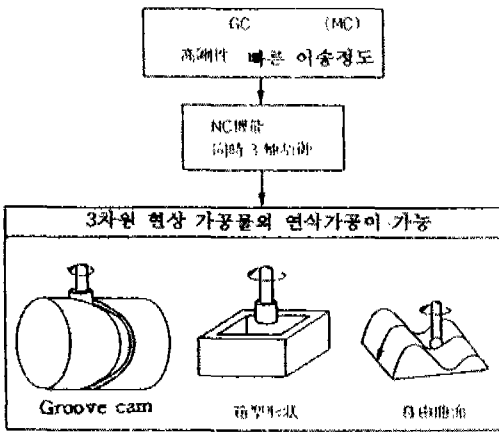


Fig. 9-15 3 Dimensional grinding by GC+MC

형상의 연삭가공도 가능해졌다. 그러나, MC로 연삭가공을 하는데 있어서 그 한계와 문제점이 있다는 것을 알게 되었다. 주축의 최고 회전수, 강력한 Coolant 공급장치, Truing, Dressing 장치, Chip의 침입을 방지하는 문제들은 종래의 MC로서는 완전히 해결할 수 없다는 결론을 얻었다.

그 결과 연삭가공 전용 MC를 개발하는 것이 유익하다고 확인되었다. 이것이 Grinding center(GC)의 출발이다. 이와 같이 새롭게 개발된 GC는 질삭 가공은 물론, 평면연삭, 외면 원통연삭, 내면연삭, Groove 연삭, Cam 연삭 등 복잡한 형상 등의 모든 연삭가공을 한 대의 GC로 할 수 있으므로 가공 공정의 집약화가 용이하게 되었다. 과거에는 평면연삭기→내면연삭기→원통연삭기→Jig 연삭기등 여러 연삭기를 거치면서 완성시켰던 연삭가공을 한 대의 기계에서 전 공정을 완성시킬 수 있으므로 가공비를 크게 감축시킬 수 있고 Work를 Chuck에 반송시켜 그것을 Clamp하고 또 Work의 축을 Alignment시켜야 할 필요가 없어지기 때문에 전반적인 제조 공정을 합리화시킬 수 있다. 또한 GC의 잇점은 복잡한 형상의 가공시 필요한 정밀도를 얻으면서 진행되기 때문에 기계를 구성하는데 필요로 하는 부품수를 대폭 삭감시킬 수 있다. 기계 설계를 이 GC에 적용할 수 있다면 가공 작업의 합리화는 물론 인건비가 많이 들어가는 조립 작업도 합리화 할 수 있다. GC의 사용조건이 종래의 연삭 작업과 매우 상이한 점이 많으므로 실제 GC로 연삭할 때 해결해야 할 문제점이 여러가지가 있다. 그것은 Hardware 측면

과 Software 측면에 있다. GC에 사용되고 있는 기계에 문제점이 있는 것 외에 연삭 가공용 Data base의 부족과 자동 Programming이 아직 미완성이라는 점에서 Software 쪽에 더 큰 문제점이 있다.

2) GC의 구성

현재 시판되고 있는 GC의 구조는 다음 세 가지 Type로 분류할 수 있다.

- (1) Vertical GC(문형 포함)
- (2) Horizontal GC
- (3) 다축 (Multi-spindle)형 GC

Vertical GC는 시판되고 있는 GC의 대부분이 이 Type에 속한다. 대체로 가공되는 공작물이 소형이다. 슷들의 Oscillation은 주축 Head의 Z축 왕복 운동에 의해서 이루어지고 Z축 이동체를 소형으로 하는 것이 쉬운 Vertical 구조가 유리하기 때문에 이 Type이 선호되고 있다. 또한 공작물을 Table에 부착시키기가 쉬운 조작성도 그 원인의 하나이다.

Horizontal GC는 그 구조가 평면 연삭기에서 발달되었으며 Horizontal MC와 달리 공작물은 Mass-block등을 사용하지 않고 직접 Table에 부착시킨다. 이 구조는 ATC를 잘 연구하면 대형 슷들도 사용할 수 있고 2차원의 복잡한 형상의 부품을 성형 슷들로 가공하는데 편리하다. 슷들의 Oscillation 운동을 하는데 구조적으로 복잡해지지만 공작물을 부착시키는 방법이 MC와 동일하고 구조도 그와 유사한 GC가 출현하게 된 것이다. 다축 Spindle형 GC는 Horizontal scroll 가공에서 발달된 것이다. Lathe와 같이 공작물을 회전시키는 주축(C축)에 붙여서 이 주축이 Column과 같이 수직 방향으로 직선운동(Y축)을 한다.

3) 주축 구동 시스템

GC와 일부 MC의 주축 회전수가 최근에 매우 높아졌으며 25,000rpm에 도달하고 있다. 이것들은 경합금 가공용 기계이며 축경이 45mm이하이다. BT40의 공구를 사용하는 축경 60mm 이상인 경우 최고 회전수는 20,000rpm 정도이지만 CBN 슷들의 사용 연삭속도 1,800m/min을 확보하려면 직경 40mm의 슷들이 한계라고 생각할 때 이상적인 최고 회전수는 60,000rpm정도인 것을 알 수 있다. 내면 연삭기, Jig 연삭기와 같이 소형 공구만을 사용하는 주축에는 수만 rpm이 필요하므로 Built-in motor를 사용하고 있다. 일본 O사에서는 Hydro dynamic bearing을 사용하고 있으며 그 회전 정도가 0.02μm이하이고, 강성은 100kg/μm이다.

Hydrostatic bearing의 경우 회전 정밀도는 $0.022\mu\text{m}$ 이 확인 되었다.

4) 이송구동계

GC의 최대 직선 이송 속도는 현재 $12\text{m}/\text{min}$ 정도가 많으며 왕복 이송 연삭에 사용되고 있는 이송 속도는 $25\text{m}/\text{min}$ 보다 적다. 그러나, 왕복 운동이 장시간 계속 되면 Guideway나 Ball screw에 열이 발생하여 열변형이 일어나 문제가 생긴다. Creep feed와 같이 $10\text{mm}/\text{min}$ 정도의 저속에는 큰 문제가 없으나 Creep feed 때 발생하는 큰 연삭 저항에 대해서는 문제가 될 수 있다. 이 때는 Ball leadscrew의 이송 구동 기구를 강화하면 큰 염려가 없다. 연삭가공은 가공 정도가 $1\mu\text{m}$ 단위 이어야 하므로 NC 제어는 Closed loop 방식이고 $0.1\mu\text{m}$ 분해능력을 가지고 있는 Linear scale을 사용하는 것이 바람직하다. 일본 O사에서는 5면 정압 안내면을 사용하고 있으며 Lead screw pitch가 5mm 이므로 최소 이동 단위가 $0.03\mu\text{m}$ 이고 지령 속도가 $0.01\mu\text{m}/\text{sec}$ 이다. 이 안내면의 특징은 Table이 $30\text{kg}/\mu\text{m}$ 인 고강성이다 급속접촉이 없기 때문에 수명이 길다.

5) 공구교환

종래의 연삭기에서 숫들은 사람의 손에 의해서 교환이 되었으나 GC에서는 자동 공구 교환(Automatic tool changer ATC)에 의해서 자동적으로 숫들이 교환이 된다. 공구의 지름이 100mm 정도이고 중량이 10kg 정도로 제한하고 있으므로 대형 숫들은 사용이 불가능

하나 장차 이 제한이 완화될 전망이다. ATC에 의한 숫들 교환에 있어서 문제가 되는 것은 숫들 인선(刃先) 위치의 재현성이다. 숫들의 마모를 계산하여 적어도 GC의 ATC는 $1\sim 2\mu\text{m}$ 의 재현성을 가져야 한다. ATC에서 교환되고 있는 숫들은 Fig 9-16에서 볼 수 있으며 2면 구속 Clamping을 사용하고 있다.⁽⁷⁾ Fig 9-17은 원통 Grinding head와 Internal grinding head를 Indexing table로 교환시키는 방법을 나타내고 있으며 Fig 9-18에는 4 Spindle turret 구성을 표시하고 있다.⁽⁸⁾ 일본 KY사에서는 4개의 Built-in motor를 장치한 Turret형 Tool changer를 사용하고 있다.(Fig 9-19) 공정 연삭반은 One chucking에 의해서 복합연삭이 가능한 시스템이며 다음과 같은 특징이 있다.⁽⁹⁾

(1) 최대 4종류의 숫들과 절삭 공구를 사용할 수 있는 4 Position turret이다

(2) 일반 숫들을 3축 동시 제어할 수 있는 형상 창성

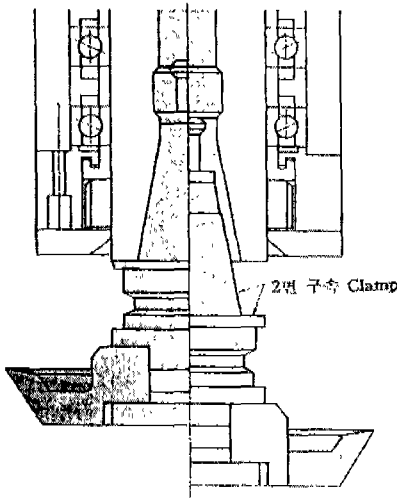


Fig. 9-16 Grinding tool holder for ATC

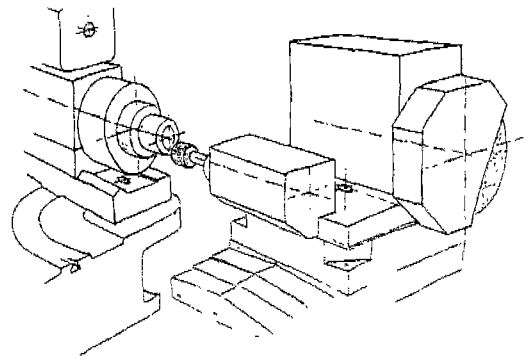


Fig. 9-17 Cylindrical and internal grinding head on indexing bed

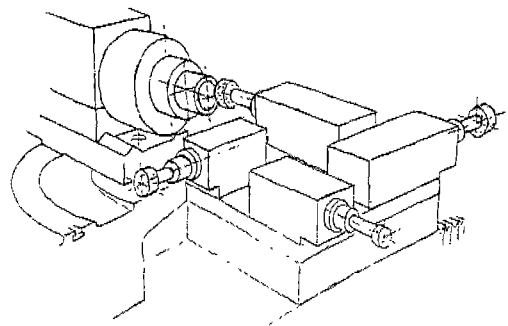


Fig. 9-18 Modular type of 4 spindles in GC

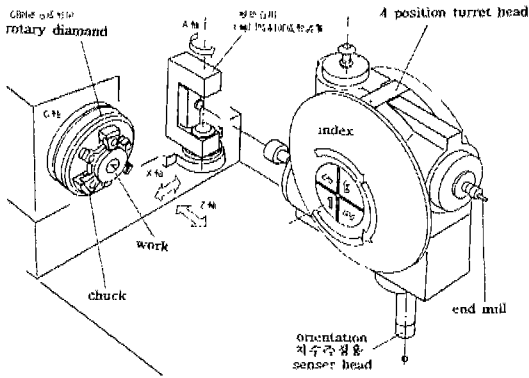


Fig. 9-19 CNC operated turreted tools and dressing apparatus

(創成) Dresser가 있다.

(3) CBN 슷돌용 Rotary traverse dresser가 있다.

(4) 제어단위 0.1 μ m의 Linear scale에 의한 Full closed loop 제어 장치가 있다.

(5) 0.5~100,000rpm까지의 속도조정이 가능한 Built-in motor를 가지고 있다.

(6) Touch-sensor에 의해서 연삭 치수의 측정과 Feedback이 가능하다.

(7) Work head의 C축 제어(회전방향)에 의한 비원형 제품의 연삭이 가능하다.

특히, 공구 교환은 Spindle과 같이 하기 때문에 슷돌면의 위치가 변하지 않으므로 빈번한 Dressing이 불필요하고 CBN 슷돌을 유효하게 사용 가능하다.

6) 공작물 교환

Horizontal MC에는 거의 다 자동 팔렛트 교환기 (Automatic pallet changer, APC)가 있어 공작물을 자동 교환하므로써 장시간 가공을 지속할 수 있다. 이 특징이 FMC, FMS의 핵심이 되는 장점이라고 말할 수 있다. 현재 APC는 최대 5 μ m정도의 재현성의 오차를 피할 수 없으며 정도적으로 더 높은 정밀도를 요구하는 GC에는 1~2 μ m의 재현성을 확보해야 한다. GC에는 주변장치동이 필요하기 때문에 APC를 부착할 여유가 없지만 장래에는 Dresser등을 단독 Pallet에 부착시키고 필요할 때 APC를 교환해 가면서 사용하면 작업 영역을 넓게할 수 있다.

7) Coolant 공급

NC로 2축 제어하면서 연삭할 때 종래의 방법과는 다른것은 Table 운동에 따르는 연삭점과 그 방향이 변한다는 것이다. 따라서 Coolant nozzle의 위치, 방향 제어를 할 필요가 있다. 또 연삭시 발생하는 연삭 Chip과 슷돌이 탈락하여 Grit의 대부분이 Coolant속에 스며들기 때문에 강력한 Filter를 준비해야 한다. Graphite나 Ceramics를 전문으로 연삭할 때는 강력한 분진 제거장치와 밀폐 Cover를 장착할 필요가 있

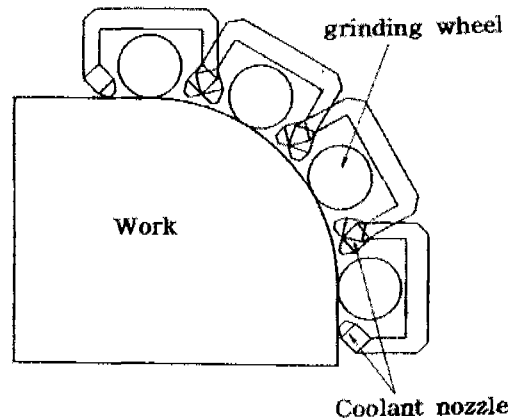


Fig. 9-20 Coolant nozzles

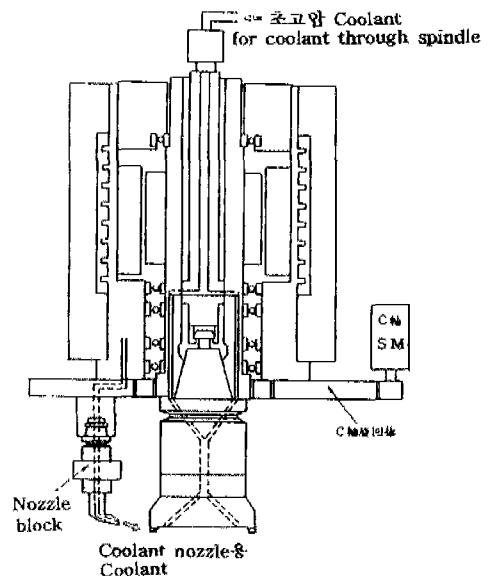


Fig. 9-21 High pressure coolant through spindle

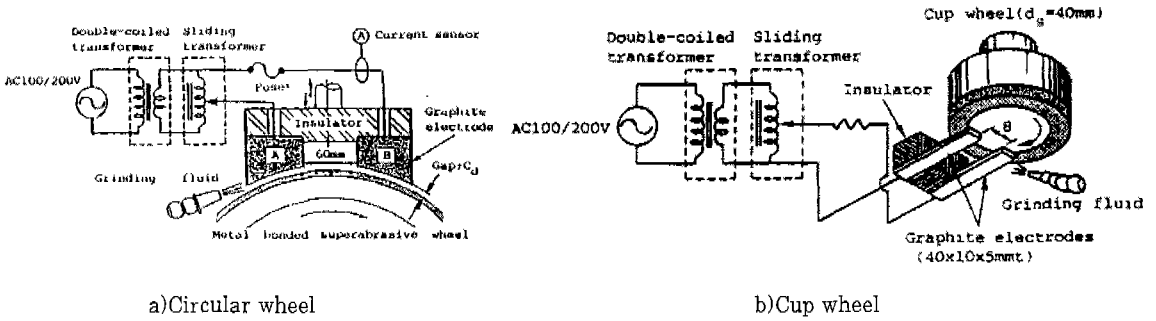


Fig. 9-22 Set up for Twin-ECD

다. 연삭 가공에 있어서 Coolant의 적절한 공급은 매우 중요하며 슷들의 수명과 가공 표면조도에 결정적인 영향을 준다. 따라서, GC에 있어서는 고압 Coolant를 외부에서 공급하는 것만으로는 불충분하고 Spindle-wheel spindle을 통해서 Coolant를 확실하게 필요한 양만큼 연삭점에 공급해야 한다. Coolant nozzle index는 주축 주위를 선회하는 C축 제어 선회판에 부착되고 일정 방향으로 제어되어 슷들의 X, Y축 이동에 따라서 항상 초고압 Coolant를 적절한 연삭점에 주입시키게 할 수 있다. 이 Nozzle은 슷들과 같이 교환되고 공구 Magazine에 들어가게 한다. (Fig 9-20)주축 단면 급유방식과 Coolant through spindle을 사용한다. (10) Fig 9-21에서 보는 바와 같이 초고압 Coolant가 주축 축심을 통하여 Spindle의 하부 단면에 공급된다. DIN 규격을 많이 사용하고 있다.

8) Dressing 방법

이상적인 GC의 구축에는 Dressing이 불필요하다.

그러나, ATC의 오차 및 슷들의 마모와 형상 수정 때문에 Dressing이 필요하다. Grinding wheel을 Dressing하는 목적은 Sharpness를 되찾는 것과 공작물에 요구되는 Form 또는 Profile을 정확하게 얻기 위해서이다. Dressing 방법은 여러가지가 있으며 Al_2O_3 계통은 Diamond, Steel을 사용하면 간단하게 할 수 있으나 CBN 슷들의 경우 전기식을 사용하는 것이 좋다. 요구되는 표면 조도가 Submicron 단위가 되므로 Grit도 초미소한 Wheel을 사용한다. Grit과 Grit 사이에 미소한 Chip을 제거하기 위해서는 Wheel을 Metal bond로 하고 전기를 통하여 In processing 방법을 쓰는 것이 양호하며 이 방법이 많이 개발되었다. (11)

Fig 9-22a는 Twin electrode를 사용하여 원형 Wheel을 Dressing하는 것을 보여주고 있으며 전기 회로 구성도 잘 나타내고 있다. Fig 9-22b는 Cup wheel을 Dressing하는 Set up이다. Electrode를 하나만 사용하는 Single electrode도 있다. Fig 9-23은

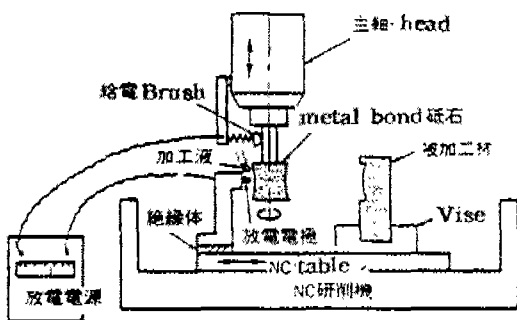


Fig. 9-23 EDM-dressing

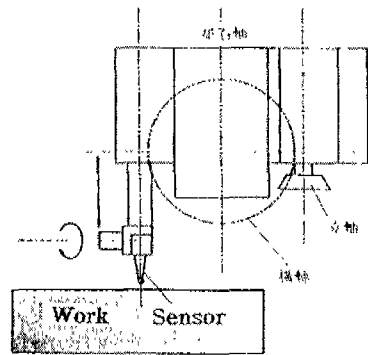


Fig. 9-24 Automatic measurement using touch sensor

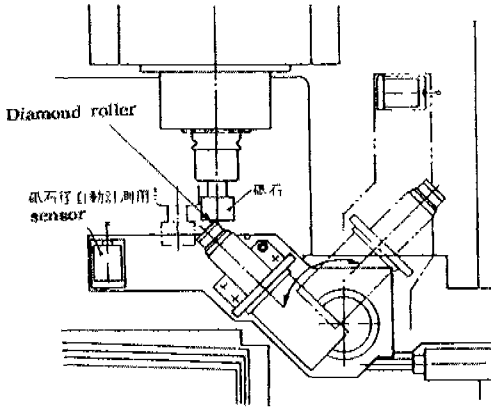


Fig. 9-25 Tooling system for dressing and automatic measurement

Electro-discharge dressing방법이다. 역시 Metal bond를 가지는 Grinding wheel을 전극간의 방전을 이용하여 Bond를 제거하므로써 Dressing하게 된다.

9) 측정, 감시

GC를 사용하는 연삭 가공에 있어서는 당분간은 숙련 공에 의한 작업감시가 불가결하겠으나 장래에는 기기의 신뢰성을 향상시키고 동시에 NC 가공의 이점을 살려 반숙련공에게 2대의 기계를 책임지게 해야 한다. 그러기 위해서는 감시용 Sensor를 사용하여 품질보증용 Sensor에도 사용할 수 있는 치수, Surface finish의 검출기가 필요하다. Fig 9-24는 Touch sensor식 측정장치이다. 가공전, 후의 공작기계 정도를 측정하여 NC 장치에 Feedback하게 되므로 허용치 내의 정밀도를 얻을 수 있다.

Truing이나 Dressing하기 전, 후에 슷들의 지름을 Sensor를 이용하여 측정하는 장치도 개발되고 있다. (Fig 9-25)

10) CNC

현재의 MC용 CNC는 그대로 GC에서 그대로 사용할 수 있는 기능을 가지고 있으나 운동 제어용으로 2, 3가지의 기능을 추가하면 만족할만하다. 추가해야 할 운동기능이란 연삭점에 있어서 이송속도를 일정하게 하는 제어와 적절한 Operation의 Pass pattern을 작성하는 것이다. 현재는 공구 중심의 이송속도가 일정하게 제어되고 있다. 앞으로는 연삭 가공의 자동화에 필수 항목인 기상제측, 보정후 재가공의 자동화 기능을 CNC에 포함시키는 것도 필수 항목이다.

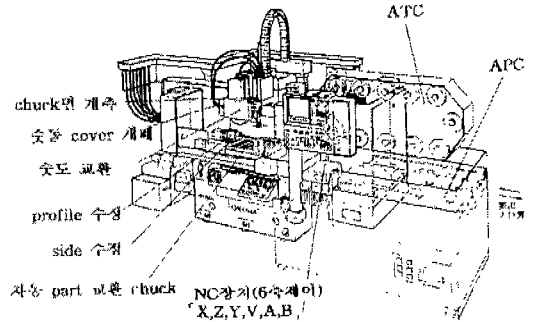


Fig. 9-26 An examples of GC

11) 연삭 Data base

GC에 사용되고 있는 슷들은 아직 사용 기준이 확립되어 있지 않아서 연삭 Data base의 구축이 시급하다. 이와같은 Data base를 얻으려면 슷들의 GT에 입각해서 표준화가 꼭 필요하다. 부품 정보를 입력하면 필요로 하는 가공용 Programm을 자동적으로 또는 반자동적(대화형)으로 작성이 가능한 GC용 자동 Programm system의 개발이 필요하다. 이것을 사용할 수 있는 시기에는 GC가 MC와 동등하게 보급될 것이다.

12) GC의 예

Fig 9-26은 일본 O사에서 개발한 GC이다. (12) Table(X축)의 안내면을 5면 유정압으로 채택하였으며 40kg/μm의 높은 강성을 가지고 Ball lead screw에 의해서 Direct drive로 3~30m/min의 고속 이송시 0.1μm 제어가 가능하다. 슷들 Spindle은 Hydrodynamic bearing이고 Y축과 Z축은 Inductosyn에 의해서 Direct 절대위치 검출이 가능하다. 슷들 10개는 ATC로 교환할 수 있고 6축(X, Z, Y, V, A, B)을 제어할 수 있는 NC장치를 보유하고 있다.

독일 문헌을 보면 Fig 9-27에서 설명하는 바와 같은 FMS형인 자동 연삭 시스템이 개발되고 있다. (3) 그림에서 보면 Workpiece는 a에서 Loading되고 b에서 그것을 식별하여 그 Data를 입력하면 c에서 가공을 하며 d에서는 Workpiece를 교환시킨다. e에서는 필요로 하는 슷들을 교환시키며 f에서 측정하고 g에서 Laser로 Marking을 하며 h는 Cell 단위 Computer, i는 Line을 총괄하는 Computer, k는 Host-computer이다. 이 시스템으로 중소형 Workpiece를 Flexible하게 대량 생산할 수 있다.

참고문헌

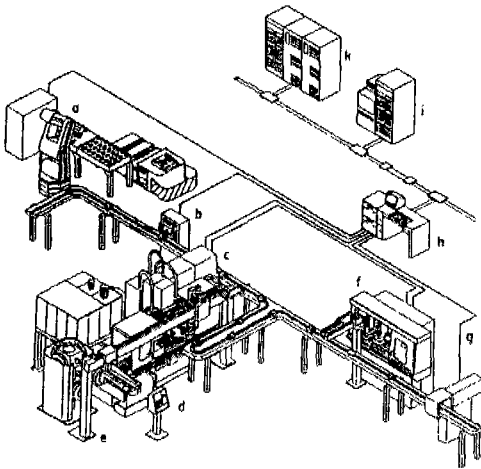


Fig. 9-27 FMS of GC

9-6. 결 론

1. Grinding machine은 고도의 정밀도가 요구되고 있기 때문에 다른 공작기계 기술과 다른 요소기술을 필요로 한다. Spindle, 이송장치, Balancing, Dressing등의 요소에 각별히 주목해야 한다.

2. Grinding process를 다른 가공 Process와 복합시켜서 가공 능력을 향상시키기 위한 여러 종류의 복합 가공 공작기계가 개발되고 있다.

3. Cutting Center와 Grinding Center 그리고 그 외의 Center를 총망라한 것을 광범위한 Machining Center(MC)라고 부르자는 제안이 있으며 이것을 설명하였다.

4. GC의 발전과정과 거기에 따르는 기술과제를 설명하였고 미래의 GC 발전 방향을 논하였다.

5. 몇 가지 예를들어 설명한 대로 Grinding Machine은 단독으로 사용하지 않고 한 시스템으로 완전 자동화되고 다른 절삭가공과 복합화된 모습으로 변하고 있으며 장래는 L.M.G가 복합한 생산 시스템으로 나아갈 것이다.

1. M.Weck, "Handbook of machine tools Vol 1." John Wiley&Sons, 1984
2. 横山朋之, "研削加工に求められる新しい技術" 應用機械工學, 1991.5 PP.82-85
3. H.P Sielemann "Mit Vertikal Rundschleifmaschinen schleifen und bohren" Werkstatt und Betrieb 127(1994) 12, PP. 944-947
4. N.N "Werkzeuge numerisch gesteuert schleifen" Werkstatt und Betrieb 125(1992) 12, PP.898
5. N.N "Beachtenswerte Entwicklungen beim Schleifen" Werkstatt und Betrieb 126(1993)2, PP.111
6. 清水伸二, "GCの概念と現状" 應用機械工學 1991, 5, PP.62-68
7. 高野建市, "GCと研削プロセスの無人化" 應用機械工學 1991, 5, PP.106-109
8. N.N, "EMO ショー" 應用機械工學 1993, 9, PP.126-127
9. 井ノ口久與志, "研削盤のNC化と 多様化の現状" 應用機械工學 1990, 11 PP.97-98
10. 志野 憲太郎, "ケーラントシステムが重要だ" 應用機械工學 1991, 5, PP.90-93
11. K. Suzuki, et al "Development of a Simplified Electrochemical Dressing Method with Twin Electrodes" Annals of the CIRP, Vol 40/1/1991 PP.363-366
12. 久田三郎, "CNC 研削盤による多機能研削加工" マシニスト Vol 32 No 7PP. 40-45
13. H. Mushardt et al, "Flexible Automatisierung von Schleifanlagen" Werkstatt und Betrieb 125(1992)1, PP.24-28