

# 공작기계 기술의 현재와 미래(8)

강 철 희\*

## MACHINE TOOL TECHNOLOGY; THE PRESENT AND THE FUTURE(8)

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                |

### 8. 머시닝 센터의 현재와 미래

#### 8-1. 서론

항공기 기술의 발전은 다양한 과학기술 분야의 발달에 끊임없이 큰 영향을 주어왔고, 또 거기서 파생된 신기술도 수없이 발생하였다. NC 공작기계도 그 하나이다. 제 2차 세계대전 후 미공군은 복잡한 형상의 항공기 부품가공과 고정밀도의 검사용 Gauge를 제작할 필요성을 얻게 되었다. Helicopter의 Rotor blade의

Profile 검사용 Plate gauge를 가공할 수 있는 기계를 개발 중에 있었던 J.T.Person이 Jig boring machine을 전자적으로 제어하면서 Gauge를 가공하는 방법을 1947년 미공군에 제안하게 되었다. 이것이 NC 발달사에 기록된 역사적인 사실이며 이 Project는 후에 MIT로 넘어가고 1952년에 NC milling machine을 완성시켰다. 그 후, 1955년 Gidding & Lewis사가 최초로 NC 공작기계를 공업화한 제1호기 Numericord를 시장에 내 놓게 되었다. 일본에서는 2

\* 統一重工業(株) 전문

년후인 1957년에 동경공업대학교와 협력하여 Ikegai사가 NC 선반을 완성시켰다.

1957년 Hugh 항공회사의 W.E.Brenner는 Milling 가공, Boring 가공 등의 여러 기능을 보유한 항공기 부품가공 전용기계를 자체 개발하게 되었다. 이 기계는 전술한 여러 기능을 보유하고 있는 Transfer unit 방식, Station형의 3 unit 복합 공작기계로서 이 기계의 제작을 맡고 있던 Kerney and Traker(K & T)회사에서 그가 가지고 있는 Know-How를 이 기계에 집중시키게 되었다. Brenner는 일찍부터 자동공구교환(ATC)에 대한 생각을 가지고 있었으나 전술한 공작기계 개발에 그의 Idea가 실용화되지 못했으나 Hugh 항공회사의 협력회사였던 K&T가 세계 최초의 ATC를 부착한 MC를 1958년 완성시켜 "Milwaukee matic II"라고 부르게 하였다. 그 후, K&T에 입사한 Brenner가 오랫동안 꿈꾸어 오던 ATC를 실현시켰으며 Random선택식 Code번호 공구의 ATC 20을 부착한 수평형 MC를 탄생하게 한 것이다. MC의 기능 중에서 제일 중요한 것은 ATC란 것은 말할 필요가 없으며 K&T사는 이 ATC의 특허신청을 1962년에 제출하였으나 절차상의 미비로 인해 타이용자에 대한 강제력을 얻지 못하는 불행을 겪었다. Milwaukee II는 1960 Chicago의 Tool show IMTS에서 내외의 큰 반응을 얻어 "MC 시대"를 열게 되었다고 말하고 있다. K&T사는 1960년 Milwaukee matic III, 1962년에 5 Axis Type III, 1964년에는 New Type으로 Low cost형인 Milwaukee matic Ea형, 1965년에 Bed type인 Eb형등 여러 종류를 시장에 내놓게 되었다. 현재 세계 제1의 MC 생산국인 일본에서는 1966년 Milwaukee matic II가 탄생하기 전 Hitachi seiki가 주동이 되어 역시 항공기 부품가공용 공작기계를 개발하고 있었으나 Bed형 NC milling machine을 효율적으로 하기 위해서는 ATC 방식의 채용이 꼭 필요하다는 것을 느끼고 노력한 결과 2개의 Arm 방식의 Tool 8개를 보유한「NC 만능 공작기계」를 1961년 동경 Tool show에 출품하였다. 이것이 일본의 MC 국산 제1호 기이다.

1966년의 제3회 JIMTOF에서 일본에서는 Ikegai, Hitachi, Makino, Yasda 등이 MC를 출품하였고, 미국은 K&T를 위시하여 Cincinnati Milacron, Giddings & Lewis 등이 출품하였으나 엄밀한 의미의 ATC를 부착하지 않은 NC milling & Boring

machine이라고 부르는 기계도 있었다. 그러나, 1968년 JIMTOF에는 Toshiba, Toyata등이 15대의 MC를 출품하였다. 그 후 MC의 수요가 확대되고 출품기계도 크게 증가하여 그 수가 다른 공작기계의 수를 능가하였다. 1978년 이후부터 MC를 탄생시킨 미국을 압도하는 생산량의 증가를 보여 최근에는 미국의 수배 이상의 생산량과 미국 수요를 충족시키기 위하여 미국에 대량으로 수출을 하고 있는 실정이다. 현재 일본에는 MC가 약 20만대가 가동되고 있으며 년 2만대 이상 생산을 하고 있다. 그 중 Vertical MC가 60.7%, Horizontal MC가 26.2%, 문형이 11.1%, 복합 2%로 되어 있다.

1967년에는 영국 Morins사는 FMS의 원형이라고 말할 수 있는 DNC "System 24"를 발표하게 되었고 1968년에 일본에서 최초의 DNC를 완성시켰다. 이와 같이 MC를 중심으로 생산수단이 System화 되고 있으며 FMC, FMS가 생산수단의 중요한 위치를 차지하여 나아가서 CIM으로 발전해 나가고 있는 실정이다.

한편 우리나라 실정은 어떠하였는가? 1977년 화천(주)이 KIST의 협력을 얻어 최초의 NC 선반을 개발하였고 1982년 통일(주)가 Yasda와 공동으로 최초의 Vertical형 MC를 선보이게 되었고, 1986년 Horizontal형 MC를 일본 Osaka JIMTOF에 출품하게 되었다. 따라서, 일본에 비해 NC 선반은 20년, MC는 22년 뒤에 우리나라에서 생산을 시작하게 되었다는 사

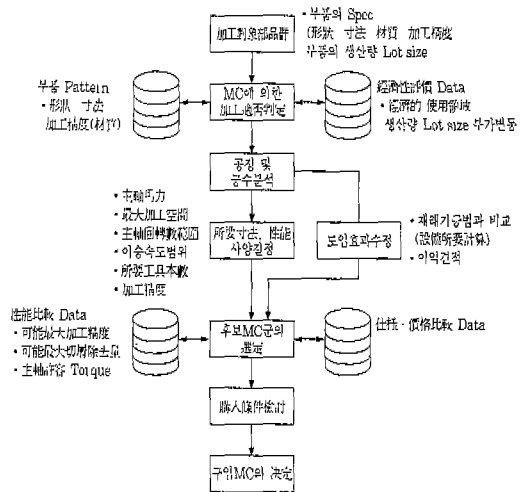


Fig. 8-1 Selection process of MC

실을 여기에서 강조하고자 한다. 다시 말해서 우리 공작기계 기술은 선진국보다 20년이나 뒤떨어져 있다는 사실을 명심해야 한다는 것이다. 20년이란 세월은 전자시대의 척도로 볼 때 너무 긴 세월이다. 우리는 선진국에 뒤떨어진 공작기계 기술의 Gap을 단시간에 좁혀야 한다.

1994년에는 우리 나라가 공작기계 생산에 있어서 세계 9위를 차지하고 있고 1995년은 비약적으로 NC 공작기계의 수출이 신장된 해이고 앞으로 한국 공작기계의 질적, 양적인 면에서 확고한 위치를 차지하게 될 것이다.

### 8-2. MC의 선정 기준

MC는 기계 본체만 하더라도 수천만원이 들고 관련된 공구 및 부속장치 그리고 Pallet changer(APC)나 Robot등을 결합하게 되면 수억원의 투자가 요구된다. 이와같이 투자하여 2, 3년내에 실질적인 상각을 하기 위해서는 기계를 충분히 가동시킬 만한 작업량이 있어야 한다. MC를 구체적으로 선정할 기준으로는 동경공대 Ito 교수가 제안한 Flow chart를 보면 알 수 있다.<sup>(1)</sup> Fig 1에서 알 수 있는 것은, 예정하고 있는 가공대상 부품의 일람표에서 재질, 형상, 치수, 가공정도, 가공소요시간, 가공공정수, 소요공구 종류수 등에 의해서 공통점이 많은 부품을 모아서 그룹으로 만들고 "부품 Pattern"으로 분류해야 한다. 이 프로세스는 Group technology 분류 등에 따라 세심하게 분류할 필요가 있으나 분류 한다가 보다도 부품 리스트 중에서 동류 부품을 모이게 하는 과정이라고 볼 수 있다. 공정 집약화 가능성이 있는 부품을 골라서 집약화를 도모한다. 예를 들면, Milling→Boring→Tapping을 각각 다른 공작기계에서 하던 작업을 한대의 MC의 공정으로 집약화 한다. 또 종래에는 1면밖에 가공할 수 없던 수직형 MC에서는 Set up을 바꾸어 되풀이하면서 가공한 복수면 가공을 수평형 MC에서는 Indexing table을 이용하여 한번의 Set up으로 4면을 가공할 수 있다. 이와 같이 MC의 기능을 집중적으로 이용한다는 것을 전제로 한 "부품 Pattern"을 만들어야 한다. 그 다음에는 경제적인 평가 Data를 비교하여 생산량, Lot size, 부하변 등으로 경제적인 평가가 끝나면 공정 및 공수의 분석을 한다. 소요치수, 성능 등을 결정하면 MC군에서 후보 기종을 선정하는데 그전에 재래식 가공법과 가공원가 등을 비교하고 그 손익을 판정할 필요가

있다. 후보 MC의 선정에 있어서는 최대 가능한 정밀도, 최대 Chip의 제거량, 허용 Torque 등의 성능을 비교하고 또 사양과 가격을 면밀히 비교하여 구입조건을 검토한 후 구입할 MC를 결정해야 한다.

### 8-3. MC의 종류와 구성

공작기계의 기본 기능은 여러 종류의 공구와 소재간에 상대적인 운동을 하면서 소재를 최종의 필요 형상으로 가공하는데 있다. 그 기본기능은 「더욱 정확하게, 빠르게, 싸게, 사용하기 쉽게」 하는 목적을 실현하기 위해 성능을 높이는 것이 공작기계 발달의 역사이기도 하다. 가공에 있어서는 다음 세가지 성능이 요구된다.

#### 1) 가공 정밀도

(치수 정밀도, Form 정밀도, 표면 정밀도)

#### 2) 생산 능력

(구입/유지 비용, 가동율, 실제 가공율, 작업 능력)

#### 3) 다용도성(가공능력/용량, 가공기능, 확장기능)

MC는 이와같은 공작기계의 주성능과 수치제어에 따라 가공운동의 자동화 기능, 그리고 공구/가공물의 자동 교환 기능을 가진 것으로 볼 수 있다. 다시 말해서 사람이 하던 중요한 가공작업을 Program으로 MC에 지시함으로써 기계가 충실하게 자동적으로 가공을 계속

요 소	주 기 능
기계본체 구조재료, 구동안내기구	기계지지, 자립 부가에 대응, 이송안내
가공운동의 구동장치 주축구동장치, 이송구동장치 구동모터, 속도위치 검출기	공구와 가공물의 상대운동 ①주축 회전구동, 가공 Torque 발생 ②이송구동(직진 회전) 이송력 발생
제어장치	가공운동, 동작 기능의 제어, 표시 프로그램 입력, 출력, 연산, 기억
조작반	기계의 운전지령, 입출력 조작
보조기 윤활유/절삭유공급, 회수장치 공압, 유압 발생장치	가공/기계운동의 원활화 구동매체의 발생/제어 칩의 자동회수 및 배출
Splash guard	안전과 보호, 칩과 절삭유 비산방지 칩의 회수와 환경보전, 기계외관의 미화
작업자동화장치 자동공구/Pallet 교환장치	공구, 가공물의 수납 및 자동교환
기계성능자동화/보완장치 Tool, Pallet ID, 열변위대역장치 계측센서, 이상감시 자동프로그램	공구/가공물의 상태인식과 관리 가공 정밀도 유지, 향상과 안전관리, 가공준 비의 자동화, 가공상태의 감시
Tool 공구 부속기구	절삭에 의해서 재료 제거 가공물위치결정과 고정

Fig. 8-2 Structural elements and functions of MC

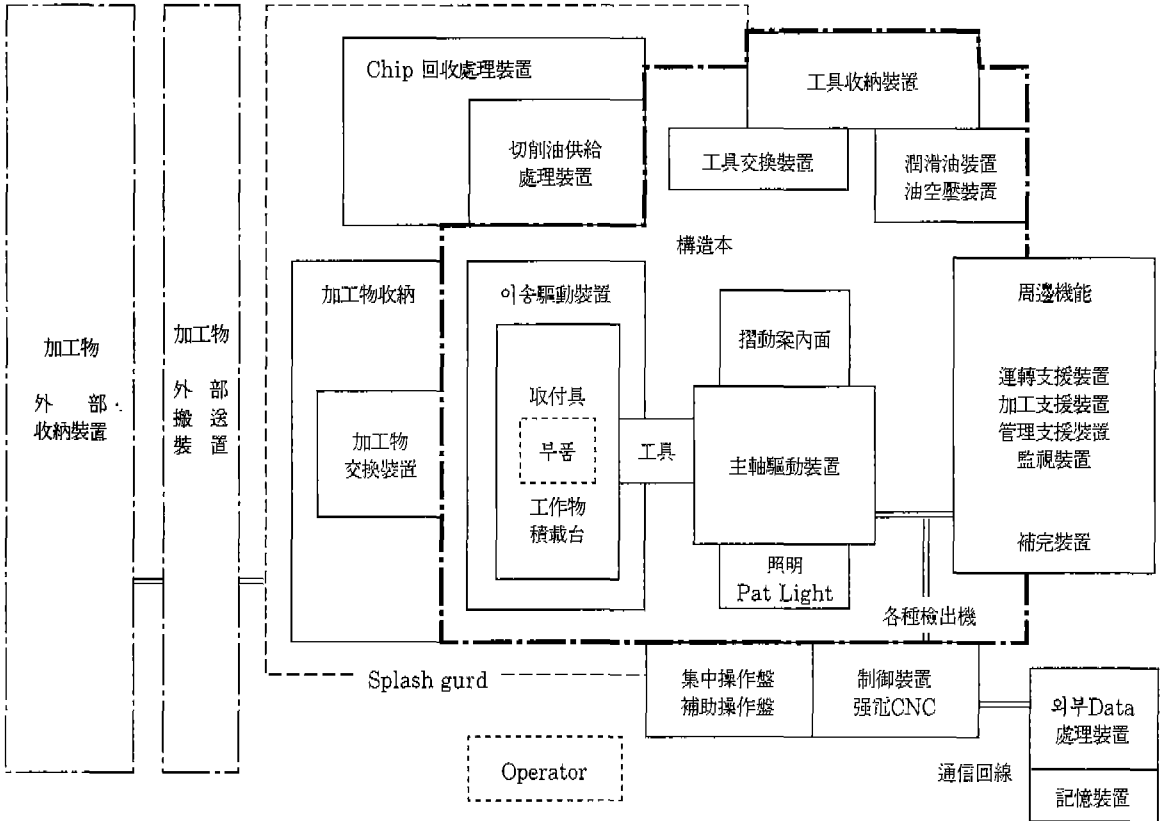


Fig. 8-3 Layout of structural element of MC

하는 기계인 것이다. 최근의 MC는 이와같은 성능이 매우 높은 Level에 도달하고 있고 작업의 자동화 범위도 복수가공물의 우선 선택, 교환, 가공후의 계측, 보정, Chip의 제거, 가공상태의 감시, 공구 가공물의 관리, 가동관리, 안전과 진단, System 확대 전개 등 성숙된 상태까지 완성도를 높여가고 있다.

MC를 도입하여 사용할 때 효율적인 가동을 하기 위해 그 MC의 기본 성능의 어느 항목에 중점을 두고 어떠한 가공을 할 것인지 용도를 중요시 하여 사양, 기능을 설정해야 한다. 고도로 발달한 MC라 할지라도 한 기종으로 3가지 기본 성능의 모든 면에서 User를 만족시킨다는 것은 매우 어려운 일이다. MC의 용도가 확대되어 다양화 되고 있을 뿐만 아니라 User의 입장에서 볼 때 자사 공장에 적합한 사양성능을 요구하는 경향이 커지기 때문이다. 한 예를 들면 한 User는 철강재, 난삭재를 마음대로 중절삭하고 싶고, 다른 User는

경금속을 고속 절삭하고 싶은 경우이다. 생산 능률보다도 가공정도가 더 중요하다. 가격보다도 72시간 무인 운전할 수 있는 MC가 더 필요하다. 각(角)형 공작물보다 긴 원형 가공을 더 많이 해야 한다. 복잡한 부품을 가공해야 하지만 간단하게 미숙련자도 조작할 수 있는 MC가 바람직하다. 연삭 가공도 가능한가, MC로 선삭도 할 수 없는가, 기계에 명랑한 Image가 있는 설계를 해 줄 수는 없는가 등등 여러 가지 요구가 속출한다. 통상 공작기계 메이커가 설계하는 MC는 기본성능을 평균화하여 Level up하고 최대한의 다용도성을 고려하는 것이 일반적이다.

최근에는 이와 같은 경향에 대응해서 고정도 MC, 고속절삭 MC, 대량생산 전용 MC, 복합 Maching Cell, Grinding Cell 등과 같이 일부의 성능을 특화시킨 MC가 출현하고 있다. MC를 구성하는 요소의 일람표는 Fig 8-2에서 볼 수 있고, 그 모의적인 배치예를

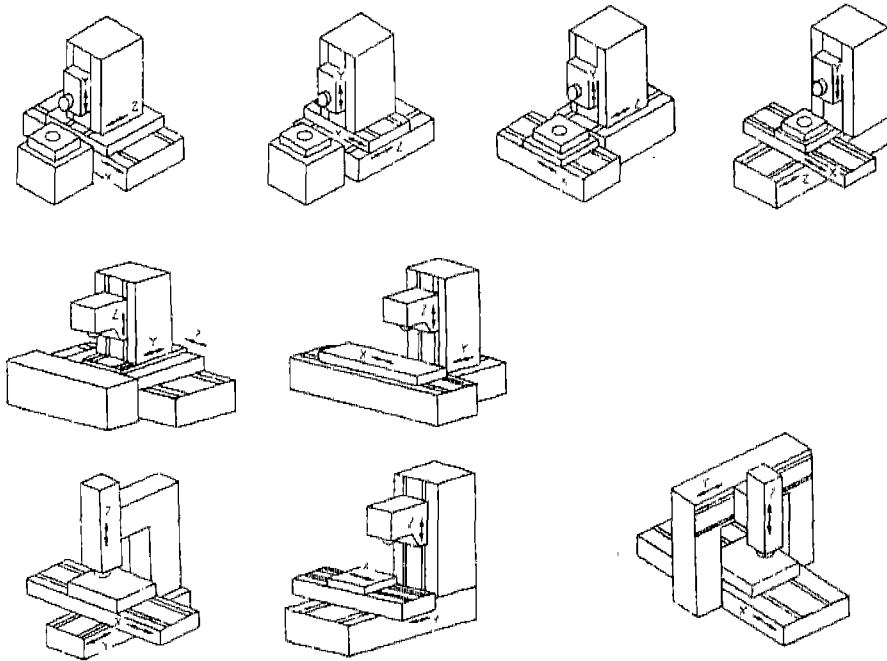


Fig. 8-4 MC groups by structural types

Fig 8-3에서 볼 수 있다. (2) 그림에서 각 요소의 중요 기능과 성능 특성을 상세하게 설명할수는 없지만 주축 Head만을 볼 때 사용할 수 있는 공구의 Shank의 크기, 주축의 회전속도 범위, 가감속도 크기, 높은 구동추력과 Torque, 정적, 동적 강성, 정밀도, 열변위, 냉각 구조, 진동소음, 공구의 Clamping Force, 윤활성, 절삭유 공급법 등이 특성 요건에 관계되어 있다. 똑같이 기계 본체의 구조, Guideway 구조, 이송 구동계, 공구 교환계, 주변기 제어기능 구조등의 특성요건이 있다. MC를 사용하는 쪽으로부터는 필요한 사양과 성능이 보증되고 계속적으로 안정된 운전을 할 수 있으면 만족할 수 있고 도입 계획을 검토해야할 경우에는 각 제조회사의 MC의 구조나 구성특성을 충분히 연구조사할 필요가 있다. 현재 판매되고 있는 MC의 종류는 통계에 의하면 Vertical이 약 176종, Horizontal이 약 121종 그 외 102종으로 되어 있다. MC의 구조, 용도, 성능 등을 고려하여 분류하면 다음과 같다. (Fig 8-4)

1) Horizontal MC(수평형)

주축(공구)의 방향이 수평이고, 공작물을 부착하는 Table은 수평면내에서 선회하고 360°를 임의의

Indexing이 가능하고 연속 선회 가공을 가능하게 하고 있다. 기본직선 이동축을 X, Y, Z의 3축 중에서 어느 축을 선택하느냐에 따라서 Fig 8-4 상부에서 볼 수 있는 여러 형태가 있다. Table의 선회가 가능하기 때문에 가공물을 One chucking으로 가공을 완료시킬 수 있고 구조상 대부분의 Chip이 공구 바로 밑에 떨어지기 때문에 Chip의 회수, 배출이 용이하다.

2) Vertical MC(수직형)

Fig 8-4의 하단에서 볼 수 있는 것과 같이 주축의 방향이 수직이고 가공물은 수평 Table위에 부착시키고 있으므로 가공물의 윗면만 가공이 가능하다. Table을 전후, 좌우로 이동시키는 구조, Column이 전후로 이동하는 구조, Table이 고정된 구조 등등 여러 종류의 MC가 판매되고 있다. 구조상 가공점에 공구를 접근시키는 접근성이 좋고, 가공물의 Clamping, Unclamp가 용이하고 가공상태의 감시가 용이하며 작업성이 Milling과 유사하므로 조작하기가 쉽다. MC의 약 70%가 이 부류에 속한다.

3) Bridge(문형) MC

Fig 8-4의 우측 아래에서 보는 바와 같이 두개의

Column에 지지된 Cross beam에 주축 Head가 상하, 좌우로 이동하고 Table이 전후로 이동한다. 공작물은 양 Column 사이로 Table에 따라 이동하며 수직(또는 수평)방향의 공구에 의해서 가공된다. 기계의 강성이 좋고 중량물의 취급이 용이하므로 대형가공물에 채용되고 있다.

4) 5축 MC

X, Y, Z의 직교축에 각각 회전 운동이 가능한 5축 MC가 복잡한 형태의 가공에 필수적이다. 5축 MC의 수요가 점점 늘고 있다. 이 장에서는 상세한 설명을 생략하고 한국정밀공학회지 제12권 13호에 상세한 설계예가 소개될 것이다.

5) 복합형 MC

주축의 방향이 수평 또는 수직이고 가공물과 공구와의 상대운동 관계가 전술한 Type과 다른 특이한 구조 형태를 가지는 MC이다. 선반과 복합(Work를 회전시키는)되고 있거나 경사진 Table, Tilting bed등 특징적인 형태의 MC이다. Slotting, Grinding, EDM, FTL등을 포함시키는 MC등이 있다.

8-4. Horizontal MC의 최신기술

MC의 생산과 기술을 리드하고 있는 일본에서는 Bubble 경제 이전에는 고가이고 성능이 우수하지 않

라도 잘 팔리던 공작기계가 Bubble 경제가 붕괴된 후 부터는 아무리 성능이 좋다하더라도 가격이 맞지 않으면 팔리지 않는다는 엄격한 인식이 지배하게 되었다. 1994 JIMTOF를 계기로 각 회사에서는 새로운 MC 기술, 특히 고속화, 고능률화에 대하여 노력하고 있다. (3) 필자는 이미 제2장에서 공작기계의 고속화, 고능률화 기술에 대하여 기술한 바 있으나 여기에서 실례를 들고 보충하고자 한다.

1) 주축의 고속화

고속 주축의 특성을 파악하는데 있어서 회전수의 범위뿐만 아니라 주축경과 회전수를 곱한 dn치를 고려할 필요가 있다. 똑같은 회전수라도 축경이 크면 그 회전수를 얻기가 쉽지 않기 때문이다. 각 회사마다 주축경과 회전수의 관계를 정하고 거기에 맞게 주축을 설계하고 있다. 현재 최고 dn level은 200만 정도이다. 주축의 고속화에 있어서 중요한 것은 Bearing의 윤활(Lubrication)기술이다. 고속 주축에는 Oil & air, Jet, Under race 윤활 방법이 채용되고 있는 실정이다. Oil & air 윤활 방식은 윤활유의 회수가 불필요하고 이론상 가장 적은 유량으로 윤활을 하게 할 수 있으며 발열이 적다는 특징이 있어 많이 사용되고 있다. Jet 윤활 방식은 윤활유의 회수가 필요하며 각란(Disturbance)의 저항 때문에 동력의 손실이 크다는 결점이 있어서 최근에는 그다지 많이 쓰이고 있지 않다. Under race 윤활방식은 dn이 300만 이상에 적합하다고 말하고 있으나 윤활유 회수가 기술상 어려움이 있어

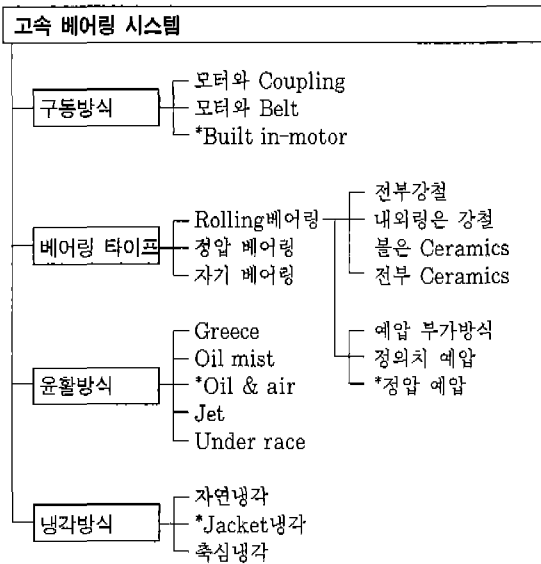


Fig. 8-5 Various technology for high speed bearing

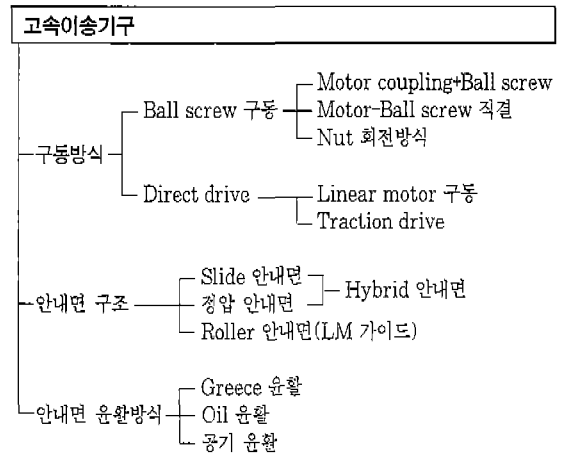


Fig. 8-6 Various technology for high speed feeding mechanism

최근에는 일부 Maker만 채용되고 있는 실정이다.

Fig 8-5는 고속 Bearing의 요소 기술을 요약 하였다. T사에서 성공한 수평형(Horizontal) MC의 한 예를 보면 구동방식을 Built in-motor이고, Bearing은 Ceramic Ball bearing을 쓰고 있으며 윤활방식은 Oil & air를 채용하고 Cooling jacket으로 Spindle을 Cooling 하고 있다. 주축의 고속화에 따라 종래 사용하던 7/24 Taper shank는 원심력 때문에 Taper가 벌어져서 Shank가 안쪽으로 들어가기 때문에 Tool의 Nose 위치가 변위하여 가공정밀도가 저하되므로 2면 구속 Tool holder인 HSK type를 사용하고 있다. (필자가 이미 제3장 고속 MC의 Tooling에서 이 문제를 자세히 설명한 바 있다.) 2면 구속 Taper부와 Face부가 접촉하기 때문에 고속회전시에도 정도의 확보는 물론 강성도 커진다. BT shank와 2면 구속 Tool holder를 비교한 여러 실험결과는 2면 구속 Tool holder의 우수성을 증명하고 있다.

## 2) 이송기구(Feeding mechanism)의 고속화

Fig 8-6에 고속 이송 기구의 요소 기술을 정리하였다.<sup>(3)</sup> 이송의 고속화는 구동 방식, 안내면(Guideway)형식이 중요한 기술이다. 구동방식으로는 일반적으로 Ball screw + AC servo motor를 채용하고 있다. 이 방식은 Ball screw의 Return tube와 Screw의 위험(Critical Speed)속도때문에 제한을 받게 된다. Return tube의 dn치 한계가 20만 정도이므로 외경  $\phi 50\text{mm}$ , 리드가 12mm인 Ball screw로 48m/min가 그 한계 속도이다. 그 이상의 고속화에는 Linear motor를 사용하는 Direct drive 방식을 사용해야 한다. Linear motor를 채용한 MC는 Ingersoll(미) Ex-Cell-O(독)에서 발표되었고 1995년 Milano EMO에서는 많은 회사가 이 분야에 참여하고 있는 것이 보도 되었다. 고속 이송속도는 상기 두 회사 제품은 각각 80m/min, 60m/min이지만 특이할 점은 가속도가 1G이상이라는 점이며 Ball lead screw 구동장치로서는 달성하기 어렵다는 점이다. 앞으로 Linear motor의 활용이 점점 확대된다는 것은 자명한 사실이다. 일본 T사의 경우 Ball lead screw 방식으로 40m/min의 이송속도를 얻었고 Guideway로서 Linear roller guide를 채용하였다. Ball type보다 Roller type가 감쇄성이 우수하고 강성이 높으며 구동속도가 변하더라도 동마찰력의 변화가 적다는 특징이 있다.

## 3) ATC의 고속화

기계가 가동하고 있을 동안 공구가 Chip을 만들고 있지 않은 시간을 비절삭시간이라고 한다. 이 비절삭 시간 중에는 가공 위치까지 공구를 이동시켜 위치를 정하는(Positioning)시간, 공작물을 부착시킨 Pallet을 교환하는 Pallet 교환시간, Table을 회전시켜 가공하는 평면을 Index하는 Indexing 시간, 공구를 교환하는 ATC시간이다. 이들 중에서 사용빈도가 가장 많고, 비절삭시간 중 제일 큰 것이 위치 결정시간과 ATC 시간이다. Die 가공과 같이 여러 개의 공구를 사용할 때는 ATC 시간은 기계 가동시간의 10%를 넘는 경우가 있다. 일반적으로 ATC시간이라고 하면 교환 Arm이 주축 속에 있는 공구와 대기 공구를 교환을 시작해서 끝날 때까지의 시간을 말한다. 이 T-T(Tool to Tool)시간과 가공이 끝나고 나서 ATC를 거쳐 다음 가공까지 들어갈 때까지의 시간 C-C(Chip to chip)이 있다. C-C 시간이 짧은 기계는 T-T 시간도 짧지만 T-T 시간이 짧다고 해서 반드시 C-C 시간이 짧은 것은 아니다. T-T 시간을 단축시키는 방법에는 유압방식과 Mechanical 방식이 있는데 유압방식을 사용함으로써 발생하는 단점과 교환속도에 한계가 있기 때문에 최근에는 거의 다 Mechanical 방식을 채용하고 있다.(Fig 8-7)<sup>(4)</sup>

이 방식은 외주와 상하면에 Cam의 Groove를 가공한 Drum이라고 부르는 부품이 구동 모터에 의해서 한

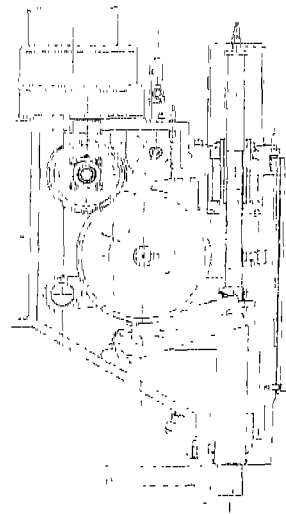


Fig. 8-7 Mechanical ATC

회전하는 동안 모든 동작을 완성시키는 구조이다. Cam의 회전에 따르는 Lever의 동작이 Link에 의해서 확대되고 연속적으로 회전과 전진, 후진 동작을 하게 된다. 확인 Switch는 Drum의 1회전후 회전이 종료되었다고 검출하기 위한 것이므로 한개로 충분하다. Drum의 회전각도를 검출하면 확인 Switch가 없어도 괜찮다. 이 방식에서는 고속을 위하여 ATC 동작중 주축의 공구를 Clamp하는데 쓰여지는 Collect chuck은 꼭 필요한 만큼만 운동하므로 ATC속도를 고속화하는데 적합하다는 것이다. 또 Cam 곡선의 설계에 있어서 가감속도와 가감하는 시간, 교환 Arm의 회전과 전진, 후퇴의 Rap, 주축속에서 공구를 Clamp할 때 동작대기시간을 임의로 바꿀 수 있다. 온도, 동작빈도등의 환경에 따라서 동작속도가 변하지 않는다. Limit switch의 수를 최소화 시킬 수 있으므로 신뢰성이 높다. Drum cam의 회전속도를 올리면 교환 암(Exchange arm)의 회전 속도도 역시 비례해서 올라간다. Exchange arm은 두 개의 공구를 가진 상태에서 회전 동작을 하므로 Inertia를 적게할 필요가 있다. Inertia는 Arm 자체와 공구 자체의 Inertia로 나눌 수 있다. Arm 자체의 Inertia를 감소시키려면 무게를 줄이고 길이를 축소시켜야 한다. 그러나, Arm의 Jaw 부분이 Arm 회전시 공구의 Inertia를 전부 받고 있어야 하므로 충분한 강성을 가지면서 중량을 줄여야 한다. 이 목적으로 여러 연구가 진행되었고 FEM으로 Computer simulation을 한 결과 S자 Arm의 최적형상을 Fig 8-8에서 볼 수 있다. Arm의 중량을 줄이고 Jaw의 강성을 얻기 위하여 Jaw 부분만 강철로 만들고 그것을 Al합금의 Arm에 주입시키는 방법도 생각할 수 있다. 열팽창율이 다르기 때문에 극복해야 할 문제들

도 있다.

최대 공구 질량을 기계의 사양에 의해서 결정될 문제이므로 Inertia를 감소시킬려면 Arm의 회전 반경을 적게할 필요가 있다. 주축과의 거리 관계를 고려하여 여러가지 최적구조를 생각할 수 있다. T-T 시간을 아무리 단축시키더라도 ATC전의 준비동작 또는 ATC후의 돌아오는 시간이 길면 Cycle time을 단축시킬 수 없다. C-C 시간을 단축시킬려면 가공위치로부터 ATC 위치까지의 왕복시간, ATC 주축 Head사이의 자동 Cover 개폐시간, 주축 Key의 위상을 일치시키는 Orient 시간 등이 단축되어야 한다. 이와 같은 동작은 순서적(Sequential)으로 하지 않고, 각각의 동작이 균등하도록 고려 되어야 한다. 축 이동시간의 단축은 이송속도를 고속으로 하고 가감속 시간을 단축시키면 가능하다. 그러기 위해서는 이동체의 Inertia를 적게 하고 Servo-motor의 용량을 크게 하면 된다. 자동 Cover의 개폐시간 단축도 Arm과 자동 Cover를 연결하여 같이 운동을 하게 하든지, Cover를 최소한 적게 그리고 가볍게 설계하여 고속 개폐 동작을 얻게 해야 한다. 주축 Orient 시간은 주축 Motor의 능력에 의존하게 되지만 주축계의 Inertia를 어떻게 감소시키느냐에 달려 있다. MC의 기술경향을 보면 전술한 바와 같이 고속화 고정도화가 점점 엄격해지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 기계뿐만 아니라 공구, Holder등 주변기기과 가공기술 등도 엄격해지고 있다. 여기서 또 언급해야 할 것은 고속가동은 Servo-motor등이 거기에 대응하는 운동을 해 주어야 하고 그것을 Control할 때 High gain제어, 고정도제어, Lost motion 제어, 보정기능 등을 사용상 최적 Parameter를 설정하므로써 동작중의 위치 Loop gain을 높이고 위치 Loop의 지연을 적게 해야 한다. 고속에 따르는 Control 문제는 다음에 상세히 기술할 것이다.

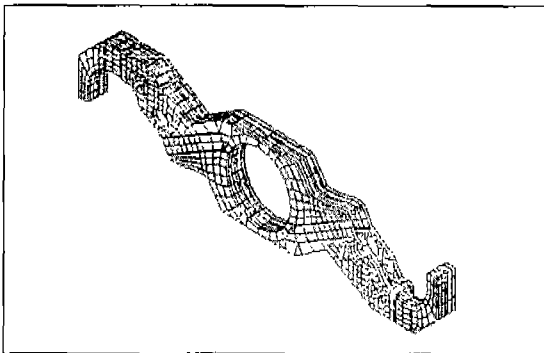


Fig. 8-8 Computer simulation of light arm

### 8-5. Vertical MC의 최신 기술

일반적으로 1면만의 가공으로 가공을 완성해야 될 부품은 없다. 가공이 측면과 상면에 교차되는 형상의 부품을 가공할 경우 Horizontal MC에서는 적어도 2공정이 필요하고 Vertical에 있어서는 더 많은 공정이 필요하게 될 뿐만 아니라 공정에 따라서는 Jig와 Fixture가 필요하게 된다. 이와 같이 여러가지 Set up을 거치면 거칠수록 어느 정도의 Mount 하는데 발생하는 오차를 피할 수 없을 것이며 측면 가공과 상면 가공할



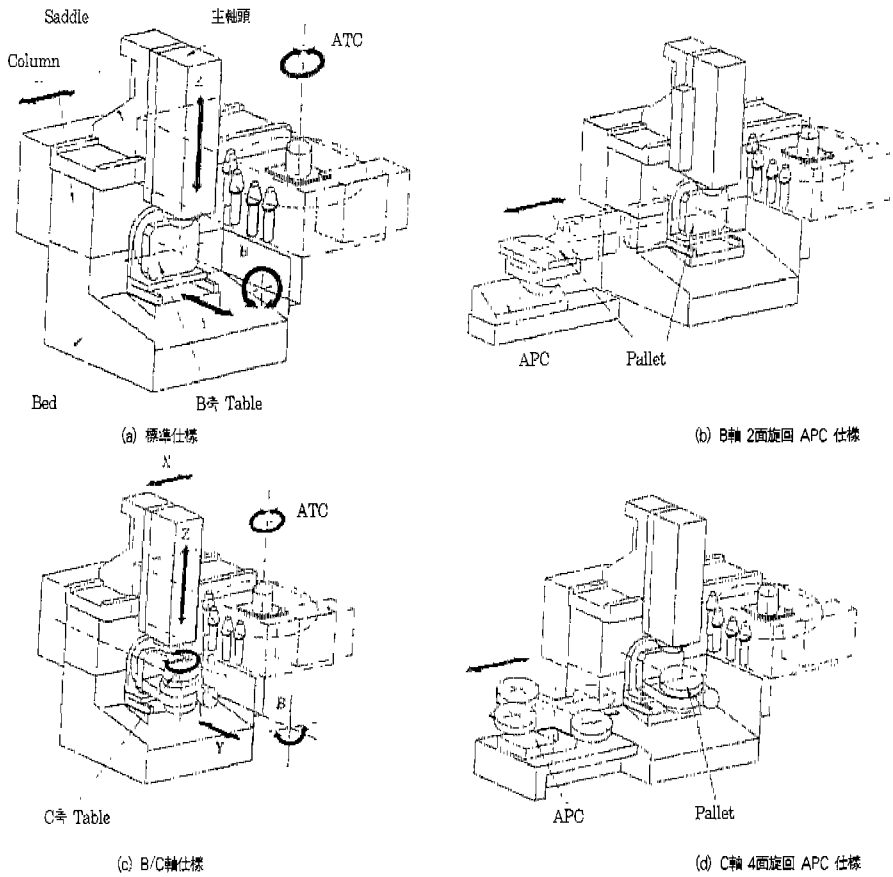


Fig. 8-9 Vertical MC and pallet arrangement

때의 위치 정밀도 확보가 매우 어렵게 될 것이다. Set up을 바꿀 때마다 Centering 작업도 매우 어렵게 된다. 측면과 상면에 대하여 경사진 면과 Inclined hole이 있는 각종 Bar를 가공할 때 수평은 Horizontal MC + Indexing Table이 요구되는데 반하여 수직형은 Vertical MC + 2-Inclined Table이 있어야 하기 때문에 기계 본체 Size에 따른 가공품의 치수의 제한이 있어야 할 뿐만이 아니라 고가의 설비가 필요하고 값이싼 소물 부품 가공에는 채산성이 맞지 않을 뿐 아니라 Set up change나 Work의 Clamp와 Unclamp때문에 여러 기계를 한꺼번에 조작을 할 수 없게 되어 많은 문제가 발생하게 된다. 일본 O사에서는 적은 투자로 공정 집약이 가능한 소물 부품의 가공영역을 대폭 확대하여 더 많은 이익을 낼 수 있게 Compact한 Vertical MC를 개발하였다.<sup>(5)</sup> 이 MC를 One chucking으로

다면 가공하고 가공정도, 생산성을 올릴 수 있는 소물 품가공의 합리화 요구를 충족시키고 있다. Fig 8-9에 그 구조를 설명하고 있으며 One chucking으로 다면 가공시 가공정도와 생산성을 증가시키는 소물품가공에 적합을 보여주고 있다.

1) 강성이 높은 Ram type 주축이 상하 이동하고 (Z축) Saddle이 Column위로 좌우이동(X축)할 수 있는 안정된 본체구조이다.

2) Bed 위를 전후 이동(Y축)하는  $\phi 500\text{mm}$  수직 Table(B축)은 Gear에 의해서 강하게 지지되어 있으며 고정도 Indexing(B축 Index, 표준  $5^\circ$ , 특별  $1^\circ$ )가 가능하다.

3) B축 Table에 대하여 직각 방향으로 향한  $\phi 300\text{mm}$  Table을 부가한 B/C축의 사양이 있고

4) APC는 B축 2면 선회 APC, C축 4면 선회

APC와 사양에 따라서 최적 구조 System을 준비하고

5) ATC는 교환 Arm의 Direct 교환 방식을 채용, 공구의 착탈이 용이하다.

이와 같은 MC의 구조가 다음과 같은 잇점을 제공하고 있다.

1) 공정 집약

One chucking에 의해서 다면 가공이 실현되므로 공정이 집약되어 가공 Cost가 절감되고

각형 bar의 가공이 용이하게 되었다.

2) 소형 기계이지만 고성능이고 Compact하여 열변

위를 적게하는 대칭구조로 설계하여 Space(2m 사방)가 적고, 고속절삭, 강력절삭이 가능하다.

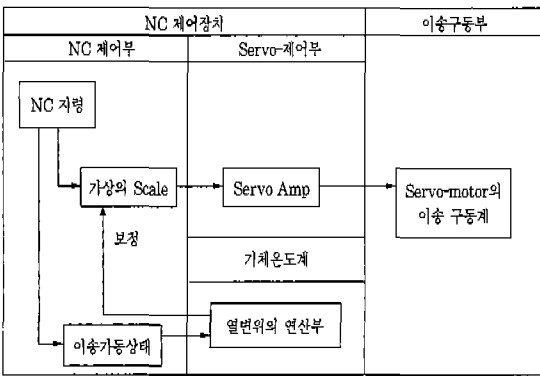
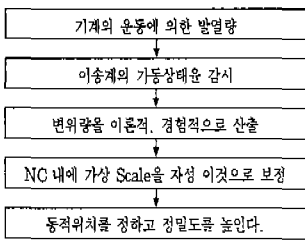
3) Chip의 처리가 용이하다.

4) 작업자의 조작이 편리하다.

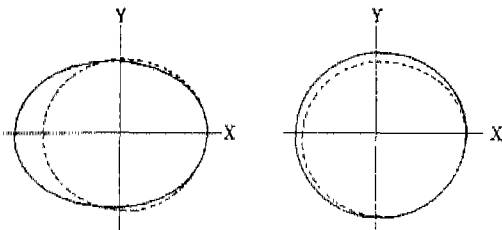
5) B축 2면 APC 또는 C축 4면 APC 부착 단체기로부터 시작하여 확장 가능한 다면 APC, 입체 APC 또는 Robot loader를 채택하여 자동화, Line기계, System 기계로 구축이 가능하다. 입체 APC는 처음에 B축 2면 APC 또는 C축 4면 APC를 부착한 것을 시작으로 나중에 최소한의 개조구조로서 다면 APC, 입체 APC로 확장이 가능한 것을 말한다. 이상과 같이 기존 Vertical MC의 구조를 변경하여 다면 가공을 가능하게 한 것 외에 여러가지 신기술을 개발한 것이 있다. 그것을 소개하면 다음과 같다.

1) Softscale

열적 특성에 의한 공작기계의 정밀도의 영향을 탐구하는 것은 여러 연구소에서 주로하는 연구과제이다.<sup>(6)</sup> 특히 주축과 이송계는 기계운전에 따라서 발열하고 직접 열변위를 나타낸다. 이 열변위의 감소를 위한 보완 대책으로 여러 방법이 고안되어 MC에 적용되어지고 있다.<sup>(7)</sup> 일본 OK사에서는 주축의 통일된 열변위 대책으로서 냉각/보정/유량제어 방식에 의해 24시간 동안의 열변위를  $\pm 0.01\text{mm}$  이내로 억제할 수 있게 하고 있으며 이송용 Ball lead screw의 열변위 대책은 Linear scale feedback을 사용하고 있다.<sup>(8)</sup> 새로운 방법은 Maintenance free, 저가격으로 할 수 있는 신기술을 개발하였다. 이 방법은 Fig 8-10(a)에서 보는 바와 같이



(a)



① 기능 OFF

② 기능 ON

열변위의 보정이 없을 때(실선) 있을 때(점선)

(b)

Fig. 8-10 Soft scale structure(a) and performance(b)

① 공작기계의 각 부의 가동상태로부터 이론적, 경험적으로 열적 오차를 해석하여 미리 NC 내부에 가상의 Scale 기법을 구축해 놓는다.

② 실가동시 각 부의 운동을 항상 감시하여 열적 상태의 변화에 따르는 Scale의 자동 보정을 하게 된다.

③ 전원 투입(ON)과 동시에 자동적으로 작동시키고 기계의 가동상태를 항상 감시하며 즉시 보정제어를 실행한 결과를 Fig 8-10(b)에서 볼 수 있다.

2) One motor 통합 구동방식 ATC

공구를 교환할 때 Exchange arm의 선회 상하동작 중 주축내의 공구를 Clamp, Unclamp

하는 동작이 필요하다. ATC와 주축 Head와 분리 배치되어 이 두 동작을 종래에는 각각 다른 Actuator로서 운전 되었었다. 그렇기 때문에 두개의 Actuator

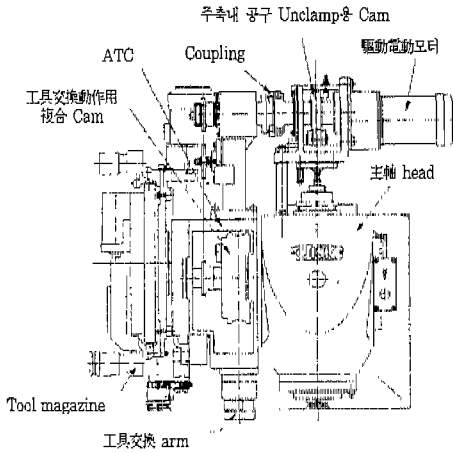


Fig. 8-11 One motor operated ATC

의 제어와 부착부품, 상호 Timing을 검출하는 검출기와 조정이 필요하게 되고 교환속도를 줄이는데 방해가 되고 있었으나 이 새기술은 한 개의 Motor로 두개의 동작을 통합 구동시키는 방법이다.<sup>(8)</sup> Fig 8-11은 Spindle head가 공구 교환 위치에 복귀하여 주축내의 공구 Unclamp 동작 장치의 Motor 끝에 있는 Coupling이 ATC의 공구 교환 구동장치의 입력 축 끝에 있는 Coupling과 연결되고 있는 상태이다. 이 상태에서 Motor가 한 회전을 하는 사이 Exchange arm 선회→주축내 공구 Unclamp→Exchange arm 하강→Arm 180° 선회→Arm 상승→주축내 공구 Clamp→Exchange arm 복귀 등의 순서로 공구 교환에 필요로 하는 전체 동작이 신속원활하게 진행된다. 교환시간이 2.0sec에서 1.3sec으로 단축된다.

### 8-6. MC의 다기능화

최근의 공작기계의 Trend는 다기능화에 있다. 대량 생산시대는 Transfer line과 같이 단능기가 중요한 역할을 했었으나 최근에는 제조품목이 매우 Flexible화를 요구하고 있으므로 MC는 다기능화를 요구하고 있다. 여기서는 그 중 몇 가지를 소개하겠다.<sup>(9)</sup>

#### 1) Slotter 가공을 구비한 MC

MC는 주로 Milling가공이 주로 되어 있고, Drilling, Tapping, Boring등 회전 공구를 사용하는 것이 보통이고 Turning tool과 같은 고정공구는 사용하는 것이 거의 없다. 여기서 소개하는 것은 Tool을

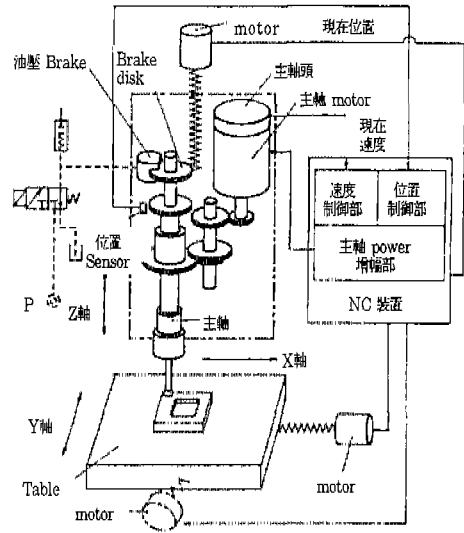
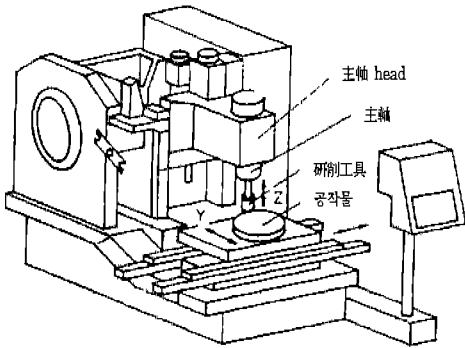


Fig. 8-12 MC with slotting function

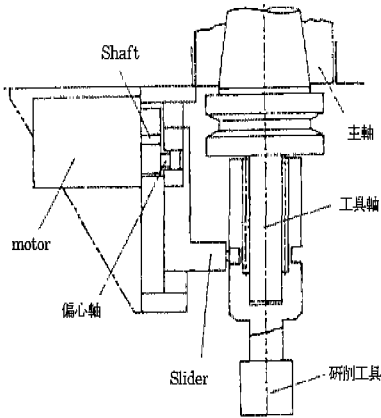
사용하여 Slotting 가공을 하는 MC이다. Slotting 가공은 각 형 구멍이나 Key Groove등을 가공하는 작업이다. Fig 8-12에서 보는 바와 같이 주축은 Gear를 경유해서 회전한다. 주축의 상부에는 Disk brake가 유압에 의해서 작동되어 있어 임의 각도로 Indexing할 수 있다. 이 Fig에서 Work가 회전공구의 가공이 끝나고 4개의 Edge에 R부의 Slotting 작업을 시작하는 장면을 그린 것이다. Slotting 가공용 고정공구의 진행 방향은 전술한 바 대로 Indexing에 의해서 조정된다. 구체적으로는 주축 모터의 회전에 의해서 주축을 임의의 각도로 회전하고 Disk brake로 위치를 정한다.

#### 2) 연삭가공을 구비한 MC

연삭가공은 MC에서 하기 힘든 작업의 하나이다. Milling등과 같은 회전 공구이지만 가공조건이 매우 다르다. Fig 8-13(a)는 주축에 연삭공구를 부착한 MC의 전체도이다. Fig 8-13(b)는 그 핵심인 Z축 방향 왕복이동기구의 상세도이다. 이 기계에서는 Ceramics 등의 매우 강질인 재료를 연삭하므로 연삭공구의 마모가 심해서 가공정밀도의 유지가 어려워진다. 연삭가공은 원천적으로 고정밀 가공이므로 Work에 대하여 주축을 X, Y축 방향으로 동시 2축을 제어함과 동시에 연삭공구의 마모가 균일하게 되도록 Z축 방향에도 특수 고정 Cycle로 왕복 구동을 하게한다. Z축 방향의 왕복



(a) 全體圖



(b) Z軸方向 往復移動機構

Fig. 8-13 Grinding MC(a) Sliding mechanism(b)

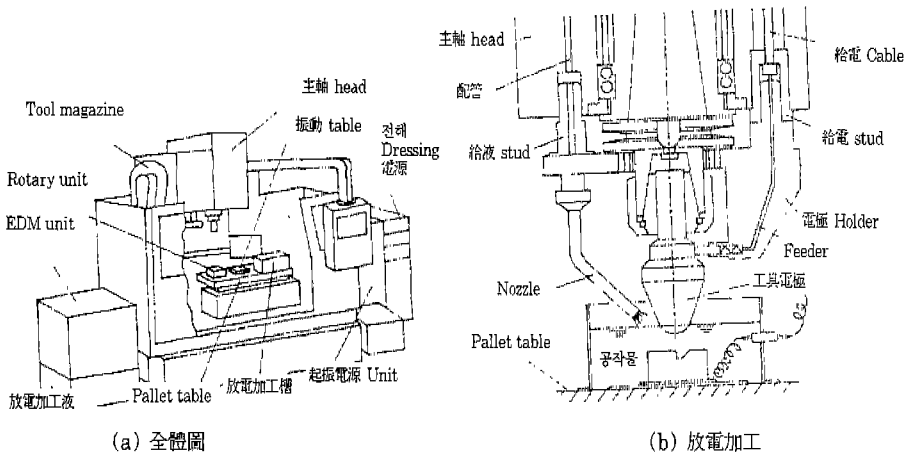
운동기구로서 주축 옆에 왕복구동용 모터와 그 모터 Shaft에 대하여 편심(Eccentric)된 Pin을 주고 이 Pin의 회전 운동을 왕복운동으로 변환시키는 Slider가 있고 이 Slider가 공구축에 왕복운동을 가능하게 하여 연삭공구를 Z방향으로 왕복운동하게 한다. 예를 들면, Cam을 연삭가공할 때 X, Y축만 제어를 하면 연삭공구가 한쪽만 마모하므로 적당한 Cycle로 상하운동(Oscillation)을 시킴으로써 가공정밀도를 얻게된다.

### 3) EDM을 구비한 MC

보통 MC에서 취급하는 것은 절삭 가공이 추가된다. 그러나, 연삭가공을 구비하면 공통점이 있는 하나 그 가공 조건은 매우 상이하다. 거기에 다시 EDM 가공을 구비하게 되면 가공조건은 말할 필요없이 크게 다르다. 이 MC에는 Magazine에 절삭공구 이외에 연삭공구 전해 가공(ECM), 방전 가공(EDM), 초음파(USM)등의 특수 공구를 ATC로 부착시키게 하고 그때 특수공구에 부속되는 보조기구도 주축의 소정 위치에 부착하게 한다. Fig 8-14(a)는 이 MC의 전체도를, Fig 8-14(b)에는 EDM 가공장치를 표시하고 있다. 특수 EDM에 관해서는 차후에 자세한 설명을 하게 될 것이다.

### 4) Machining & Measuring Center

절삭가공, 연삭가공, 기상계측에 표면 열처리 기능까지 갖춘 MC를 새롭게 개발한 것이 보도되고 있다.(10) 여러 공정을 한대의 동작기계로 처리할 수 있는 기계이다.(Fig 8-15) 지금까지는 다수의 기계를 사용하는 가공이었기에 이송, 반송, Fix in, Fix out



(a) 全體圖

(b) 放電加工

Fig. 8-14 MC with EDM(a) Operations(b)

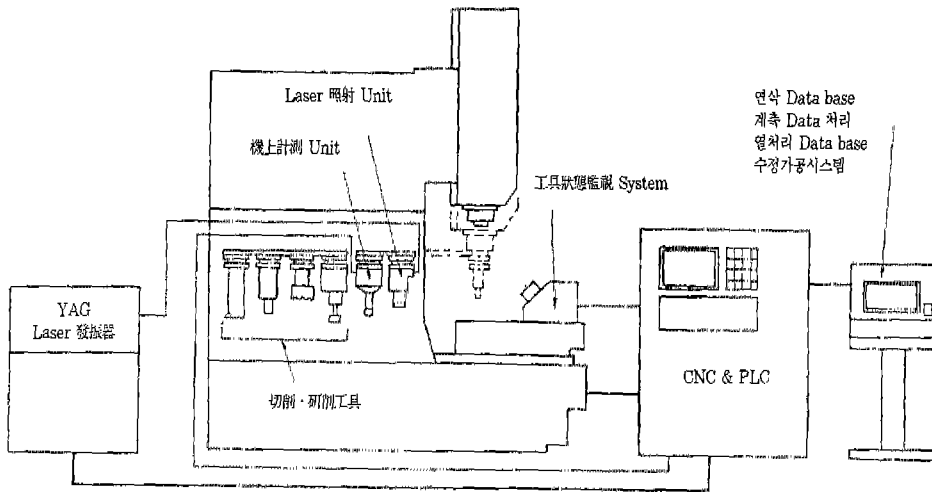


Fig. 8-15 Machining and Measuring Center

등의 여러 공정이 불필요하고 여러 공정을 집약할 수 있으므로 Lead time도 극한적으로 감소시킬 수 있고 소요 바닥 면적(Floor space)을 축소시킬 수 있다. MMC는 고정도, 고강도 부품가공용으로 개발된 복합공작기계이다. 따라서 고가이지만 공정집약 효과에 의해서 충분히 보상될 것으로 보고 있다. 공정집약으로 인해 Flexibility는 높아지지만 능률은 저하된다고 보아야 할 것이다.

5) Flexible transfer line(FTL)

1981~1985년 사이의 생산 설비 투자 목적은,

- ① Family work를 혼합하여 생산하고
- ② 생산준비 시간을 단축시키고
- ③ Energy를 적게 쓰고, Space를 적게 차지하는 생산 설비를 선호하였으나

1986~1990년 사이에는,

- ① FA화(자동화+Flexibility)
- ② Lead time의 단축
- ③ 투자액 감소
- ④ 생산 준비, 생산 관리 System 운영의 자동화
- ⑤ Reliability의 향상을 위한 설비를 선호하는 방향으로 움직이고 있다.

최근 자동차 산업의 생산 Line은 양산성을 기초로 하는 고능률 설비를 목적으로 Line 설비의 전용화, 작업의 단순화, 고정화를 하여 자동화, 고속화, 고정도화의 3대 목적을 달성하여 발전해왔다. 자동차 산업은

제품의 다종 다양화, Model life의 단명화에 대응이 필수 조건이 되고 있다. Model change를 신속히 하고 제품 종류의 변동에 대응하여 Flexibility가 있고 시설투자를 적게 하면서 고생산성이 있는 생산 시스템의 구축이 요구되고 있다.

이와 같은 배경을 주로하여 Fig 8-16과 같은 새로운

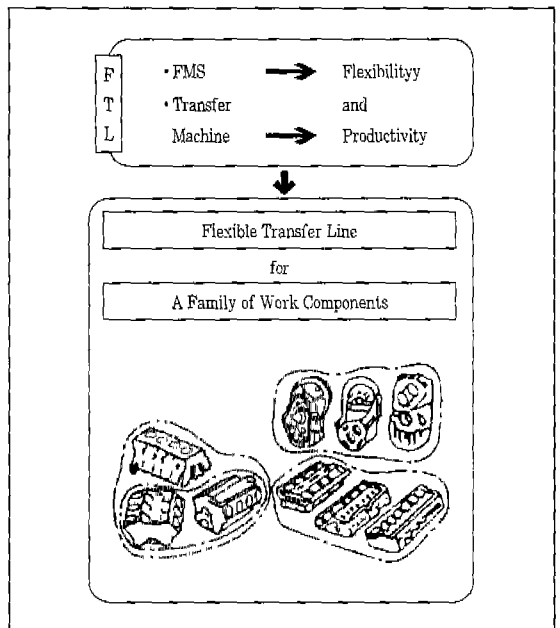


Fig. 8-16 Concept of FTL

FTL의 개념이 발생되고 FMS 등이 가지는 Flexibility와 Transfer machine이 보유하는 고생산성 양자를 겸유하는 line이 요구된다. 유사형상의 피가공물의 Group(Family work)을 동일 설비에 포함시키고 혼류 생산을 가능하게 하는 생산 Line(FTL)이 개발되고 있다. FTL은 설비투자를 효율있게 하고 최대의 효과를 달성시키면서 제품의 생산 Cost를 절감하려면 다음과 같은 특성이 필요하다.

- ① Transfer machine과 동등하게 고생산성과 자동화를 확보해야 하며
- ② FMS의 Flexibility를 최소한도 보유해야 하고
- ③ FMS와 같이 큰 Sapce가 불필요하고
- ④ 작업자가 사용하기 용이한 시스템이어야 한다.

FTL의 기본 Unit를 여러가지로 설계할 수 있으나 여기에 그 대표적인 것을 소개하면 Fig 8-17에서 볼 수 있으며 그 한 예로서 In line형 FTL의 구조를 Fig 8-18에서 표시하였다.<sup>(10)</sup> Ingersoll가 Ford 회사를 위하여 개발한 것은 Linear motor를 응용 가속도가 1~1.5G, 최고속도가 76m/min에 달하고 있다. 현재 평균 고속 MC가 가속도 0.3G, 최고속도가 30/min

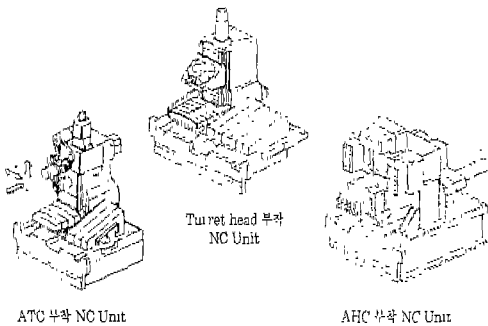


Fig. 8-17 FTL units

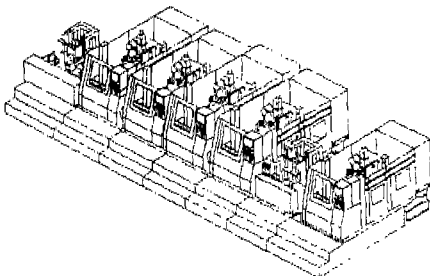


Fig. 8-18 In-line FTL

이므로 그 3배 이상의 고속을 얻을 수 있다.

6) U축 기능을 가지는 MC

MC는 Face milling, End milling, Drilling, Boring, Tapping, Reaming등 다종, 다양한 가공을 할 수 있고, 공구의 발달, NC 기능과 주변 장치의 발달에 따라 그 능력은 비약적으로 증대되고 있다. 그러

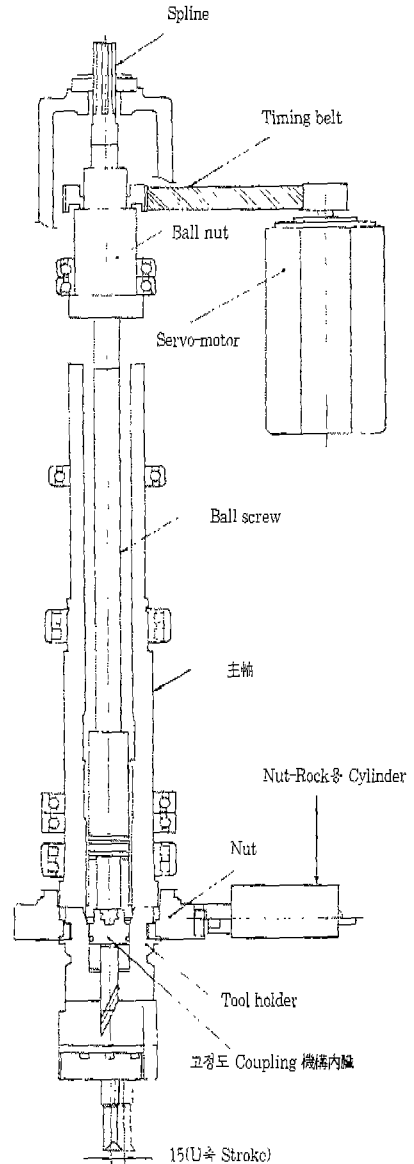


Fig. 8-19 U-axis spindle in MC

나, 최대 약점은 Boring할 때와 같이 Tool bit을 Radial 방향으로 제어가 불가능하다는 것이다. 다시 말해서, 선반과 같이 공구대에 해당하는 기능이 없다는 것이다. 선삭 가공을 해야 할 경우, 공작물을 동일한 기계로 가공해야 할 경우, MC에 선반의 공구대 기능, 다시 말해서 주축의 직각 방향으로 Tool bit을 이동하는 기능을 구비하여 복합 가공기로 만든 것을 U축 기능 부착 MC이다. U축 기능은 공작물을 고정시킨대로 Boring 공구를 제어(U축 제어)를 하여 다양한 Boring 가공과 외주 가공을 하는 것이다. 이 U축 기능은 수평형, 수직형 MC 모두에 다 부착할 수 있으며 공작물의 종류나 가공 내용에 따라 효과적으로 이용되고 있으며 수많은 실적을 가져오고 있다. U축 기능은 U축의 구동 기구와 U축의 관리 Soft로 구성되고 있다.<sup>(12)</sup>

Fig 8-19는 U축 기구의 개략을 표시하고 있다. 주축 내부에 Ball screw를 삽입시키고 Servo-motor와 Ball nut를 Timing belt로 연결시키고 있다. Ball screw의 끝은 고정도 회전 Coupling에 의해서 U축 head에 연결되고 있다. U축의 이동량은 NC에서 Servo-motor에 지령을 주고 Servo-motor가 회전하고 Ball nut에 전달되어 Ball screw만이 상하로 이동한다. 그리고 상하운동이 U축 head 내부의 Taper guide에 의해서 직각운동(U축 운동)으로 변환된다. Servo-motor 1회전당 Ball screw의 상하 이동량은 3mm이며 U축 이동량으로서 다시 Taper guide부에서 1/2로 변환된다. U축 Stroke는 15mm이고, 전체 길이는 300mm이다. 이 U축 기구를 부착한 MC는 선반으로만 가공이 가능한 각형물과 이형물의 가공도 할 수 있으며 Engine의 다기관(Manifold), Steering knuckle, 그리고 Pump 관계 부품 등의 가공에 매우 유익하다. 이상과 같은 물품은 복잡한 형상을 가지는 이형물이기 때문에 선반에서는 특수 치공구를 사용하여 가공 하였으나 치구와 Work와의 Unbalance 때문에 절삭 속도를 올릴 수 없어 가공시간이 길어졌다. 또 MC와 선반은 공정이 다르기 때문에 Set up을 교체해야 했으나 U축 기능을 사용하면 선반 공정이 생략되어 공정을 집약시킬 수 있어 Total 가공시간을 단축시킬 수 있다. 이와같이 U축 기능을 사용함으로써 다품종 부품의 가공에 널리 응용할 수 있다.

### 8-7. 결론

1) MC는 여러 개발과정을 거쳐 현재 제일 수요가 많

고 앞으로 FMC, FMS의 구축에 필수적인 가장 중요한 공작기계이다.

- 2) 그러기 때문에 MC 선정에는 여러 기준을 거쳐야 하며 그 기준을 논하였다.
- 3) MC의 필요 기능을 검토하였고, 4가지 Group으로 분류하였다.
- 4) 수평형(Horizontal)과 수직형(Vertical) MC의 최신기술 몇 가지를 소개하였다.
- 5) MC의 복합화에 대한 최신기술을 소개하며 장래의 MC 발전방향에 대하여 논하였다.

### 참고문헌

1. 安井武司, “マシニングセンタを選定する 手順” 工作機械 シリーズ, マシニングセンタ 大河出版 PP. 13-20
2. 西村眞禎, “種類と構成” 應用機械工學, 1993. 4, PP. 62-65
3. 吉岡咀伍, “構形 マシニングセンタ” 機械と工具, 1995. 5, PP. 29-34
4. 登玉神人, “非切削時間を短縮する ATCの高速化技術” 應用機械工學, 1993. 11, PP. 48-53
5. 藤村政利, “立形マシニングセンタ” 機械と工具, 1995. 5, PP. 23-28
6. M. Weck et al, “Konstruktionskatalog zur Optimierung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen” ZWF CIM 88(1993)1, PP. 24-27
7. E. E. Sprow, “Turning machines and systems” Manufacturing Engineer, August 1994, PP. 48-49
8. 西村眞復, “立形マシニングセンタ” 機械と工具, 1995. 5, PP. 41-45
9. 特許ハイライト: “マシニングセンタの多機能化”, 應用機械工學, 1992. 7, PP. 168-171
10. 垣野義昭, “工作機械に求められる機能と技術”, 機械と工具, 1995. 5, PP. 18-22
11. 高木正義, “自動車産業用 FTLの多機能化”, Machinist, 1989. 11, PP. 44-48
12. 阪木吉正, “マシニングセンタによる U軸 加工の特性と應用”, 應用機械工學, 1993. 3, PP. 117-123