

공작기계 기술의 현재와 미래(16)

강 철 회*

Machine Tool Technology; The Present and the Future(16)

C. H. Kahng*

강좌 시리즈 차례

- | | |
|---------------------|----------------------------------|
| (1) 서론 | (11) EDM 가공, Laser 가공 공작기계 |
| (2) 공작기계의 고속화와 고성능화 | (12) CNC 콘트롤의 발전 |
| (3) 고속MC의 Tooling | (13) 공작기계의 새 개념(VARIAx, HEXAPOD) |
| (4) 공작기계의 정밀화 | (14) 측정, Sensing 기술 |
| (5) 공작기계의 동적 특성 | (15) CAD/CAM/CAE와 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 |

16. 공작기계의 성능평가

16-1. 서론

공작기계의 성능을 평가하는 방법에는 제안자 연구소 또는 규격제정기관에 따라서 여러가지가 있다. 우선 학술적으로 볼 때 Fig.16-1에서 보는 바와 같이 Tlusty교수가 제안한 것을 보면 광범위하고 철저한 21가지의 평가 기준을 볼 수 있다.⁽¹⁾ 이와 같이 방대한 실험을 한다는 것은 매우 어렵고 현실적으로 불가능하지만 각 부분마다 연구개발하는 데에는 절대 필요로 할 뿐만 아니라 공작기계

전체의 품질을 향상시키기 위한 21가지의 실험이 상호관계를 가지고 있다. 또 여기 기술한 실험은 공작기계의 성능을 높이기 위해서 해야 할 연구과제이기도 하다. 수없이 많이 쏟아져 나오고 있는 연구 과제와 그 결과를 보면 Tlusty교수가 제안한 실험과제의 일부 또는 거기에 관련된 것을 연구과제로 삼고 있는 것을 알 수 있다.

독일 Aachen 공대 공작기계 연구소에서는 현실적으로 다음 6가지 특성을 중요한 실험대상으로 삼고 있다.(Fig.16-2)⁽¹⁾

- 1) 기하학적 그리고 운동학적(정밀도)특성

* 統一重工業(株) 전 무

1. Accuracy tests
 - 1.1 Geometric accuracy by manufacture
 - 1.2 Influence of weight of work
 - 1.3 Influence of positional changes of moveable units
 - 1.4 Setting of dimensions by hand
 - 1.5 Consistency of feed
 - 1.6 Main motion
 - 1.7 Clamping
 - 1.8 Deformations due to heat
 - 1.9 Forced vibrations
2. Tests for static stiffness
 - 2.1 With respect to accuracy (only for certain machines)
 - 2.2 With respect to stability (only for particular parts of the machine identified in a given case)
3. Tests for limiting conditions to produce cutting stability
4. Tests for noise (volume, source)
5. Tests of automatic control governing the relative motion between tool and work (also examined will be resultant accuracy limiting parameters for velocity, acceleration forces and reliability. in addition tests are carried out for the design characteristics of the control system)
 - 5.1 Devices for limiting the feed movements
 - 5.1.1 System of stops
 - 5.1.2 Devices with limit switches
 - 5.1.3 Cam units
 - 5.1.4 Digital/numerical setting
 - 5.2 Devices to control path of movement
- 5.2.1 Copying systems
- 5.2.2 Numerical control
- 5.3 Tests of devices which activate controls
6. Tests of mechanical and automated transportation storage and loading devices
7. Tests of mechanized and automated devices for tool changing
8. Tests of clamping devices for work and tools
9. Tests of main drive (the drive includes all components which transmit power to the spindle or table)
10. Tests of feed-drive (the drive includes all components which transmit power to the table or tool holder)
11. Tests of guideways (rotary and linear motion)
12. Tests to operating components for manual control
13. Tests of electrical installations
14. Tests of pneumatic systems
15. Tests of hydraulic systems
16. Tests of lubrication systems
17. Tests of coolant systems
18. Tests of section units
19. Tests of safety devices(for protection of operator and machine)
20. Technical-economic evaluation
 - 20.1 Technological tests
 - 20.2 Technical-economic evaluation of the machine
21. Tests for rigidity and wear resistance

Fig.16-1 Glossary of acceptance test by Prof. Tlustý

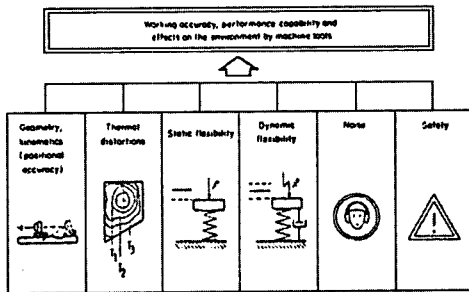


Fig.16-2 Characteristics of metal-cutting machine tools

1. 適用範圍
 2. 一般事項
 3. 試驗을 위한 準備
 4. 工作精度試驗
 5. 靜的精度試驗
 6. 其他의 試驗
- 附屬書(參考) 工作機械精度試驗用測定器

Fig.16-3 ISO 230/1(JIS B1619)'s contents

- 2) 열에 의한 영향을 받는 특성
- 3) 정역학적인 특성
- 4) 동역학적인 특성
- 5) 소음
- 6) 안전

최근의 공작기계는 ISO 규격을 채용하여 국제적으로 공통점을 상호적용하려는 경향이 있다.⁽²⁾ ISO(International Organization of Standardization)의 국제적인 Level로 공작기계 정도실험의 규격을 설정하는데는 각 나라의 National level(국가적인 단계)의 규격에 대한 합의가 있어야 하며 또 National level의 규격은 그 나라의 Professional Association(전문적인 학회)의 합의가 필연적이다. 여기에는 제조업자협회(Manufacturing association)나 연구협회(Research association)의 합의가 있어야 하며 거기에 도달하려면 각 회사(Local)의 규격(Standard)이 만족도를 얻어야 한다. 수십년간에 걸쳐서 사용되고 있는 일본규격 JIS B6201이 국제규격 ISO 230/1에 맞추기 위해서 「JISB6191 공작기계-정적 정도 실험방법 및 공작기계 성도실험방법통칙」이 제정되었다. 그 원문을 보면 ISO230/1「Acceptance code for machine tools-part1: Geometric accuracy of machines operating under no load or finishing conditions」이다. 이 규격의 구성을 보면 Fig.16-3과 같다. 그 내용을 요약하면,

적용범위: 이 규격은 정적 정도실험 및 공작기계 정도실험 방법에 공통된 내용을 규정하고 있으며,

일반사항: 측정 방법에 대하여 규정을 설명하고 있으며,

실험을 위한 준비: 정적 정도실험을 하기 전의 준비사항을 규정하고 있으며,

공작기계 정도실험: 공작기계 정도실험을 하기 위한 조건과 방법을 간단히 정리하고 있으며,

정적정도실험: Fig.16-4에서 보는 바와 같이 5항목에 관한 실험방법을 상세히 규정하고 있다. 구성요소와 기계 부분의 기하학적 정도외에 운동의 정도도 포함되고 있다. 이 항목에 대한 자세한 설명이 후에 있을 것이다.

그 외의 실험: 기본적으로 정적정도의 범위에 속하나 Fig.16-4에 속하지 않는 실험을 말하고 있다.

부속서: 정적정도에 사용하는 측정기를 상세히 설명하고 있다.

본 장에서는 공작기계 성능평가에 핵심적인 실험방법과 첨단 공작기계 기술에 적용하는 평가방법을 논하고자 한다.

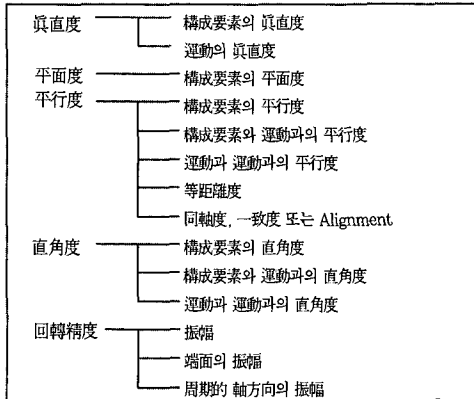


Fig.16-4 Items of static accuracy test(ISO)

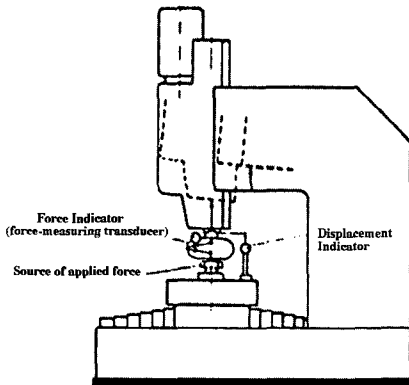


Fig.16-5 Static flexibility test on bed-plate milling machine

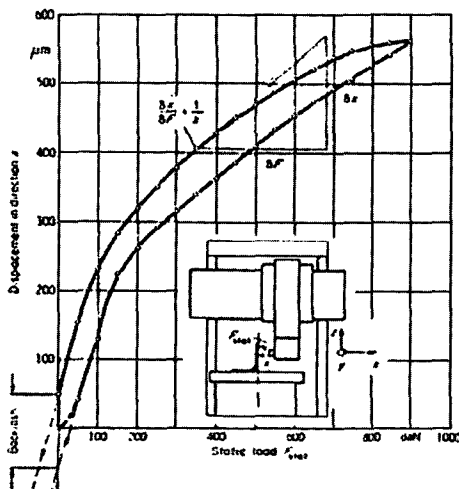


Fig.16-6 Elasticity curve for a vertical boring mill

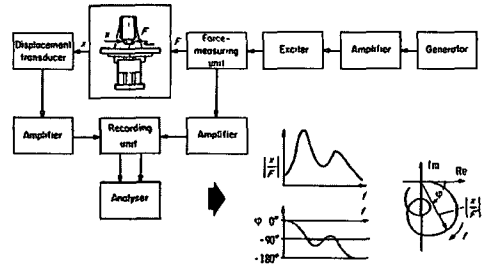


Fig.16-7 Basic set-up for dynamic flexibility tests on machine tools

16-2. 정적 및 동적 flexibility 실험

공작기계가 정적인 힘을 받았을 때 생기는 공작기계의 변위(Displacement)를 측정하는 방법을 Fig.16-5에서 볼 수 있다. Spindle, Table등을 3방향(Directions)으로 Force gauge로 힘을 가하고 각 힘에 따라 일정 부위와 Deformation을 측정하여 기계 각 요소의 정적 Flexibility를 측정하는 방법이다. Fig.16-6은 탄성커브(Elasticity curve)를 얻은 결과를 설명하고 있다. 정적 힘을 증가시키면 Feed 방향(x방향)의 Displacement가 상승하지만 힘을 감소시키면 공작기계 내부의 Contact 조건이 변화해서 Hysteresis가 발생하여 Backlash가 얼마인가를 알 수 있다. 정적 특성에 대한 규격은 없지만 Static flexibility는 정밀가공에 큰 영향을 준다. 공작기계는 Transmission 또는 Transfer element라고 고려할 수 있으므로 기계의 Transfer특성(Transfer behavior)은 Frequency response curve로 표시할 수 있다. 이 Curve는 실제 절삭할 때의 기계의 안정성(Stability)을 평가하는 방법이 될 수 있다. Fig.16-7은 이 방법을 그린 것이다. 이에 대한 설명은 이미 본지의 제12권 제8호(1995.8)에서 설명한 바 있다.

16-3. 원호시험(Circular measurement)

1930년대에 공작기계 공학을 학문적으로 체계화하는데 큰 공을 세운 독일 Berlin 공대 Schlesinger 교수가 제창한 정적실험이 오랫동안 공작기계의 정도, 성능의 평가에 채용되어 왔다. 직선 운동에는 Roll, Pitch 그리고 Yaw 때문에 발생하는 오차를 Axial, Radial 그리고 Tilt 운동에는 회전축과 Spindle의 회전의 오차를 분리하여 느린 회전운동과 이송운동을 하면서 일정한 점을 기준으로 측정하여 그 오차로 공작기계의 성능을 평가하는 방법이다. 이 방법은 범용 공작기계와 NC 공작기계 모두 사용되어 왔다. 그러나, NC 공작기계에는 이 외에 직선

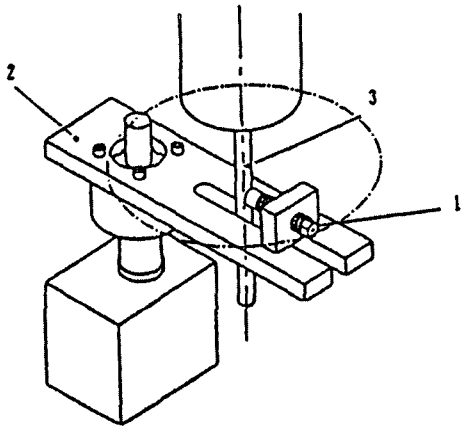


Fig. 16-8 Rotating one-dimensional probe
 1....one-dimensional probe, 2....special rotary fixture,
 3....test mandrel

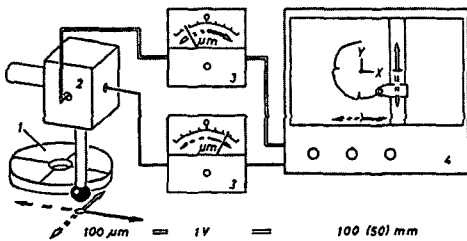


Fig. 16-9 Principle of operation of the disk measuring system
 1....disk with inner and outer diameter,
 2....two-dimensional probe,
 3....indication of probe deflection,
 4....analogous two-dimensional plotter

위치 정밀도와 Repeatability, 그리고 각도 위치 정밀도와 그 Repeatability가 추가로 검사하게 되었다. Laser interferometer의 발달이 위치결정(Positioning)정밀도의 측정을 가능하게 하고 있다. Machining Center와 Turning Center는 최근 NC 기술의 발달과 더불어 2축 또는 3축을 동시에 운동할 수 있고 직선운동과 회전운동을 동시에 할 수 있으므로 특별히 Inclined plane과 Cylinder surface를 가지고 있는 Testpiece를 절삭을 한 결과로 그 성능을 평가하게 된다.

다른 성능 평가는 원호운동으로 직접 측정하는 방법이다.⁽³⁾ ISO-230-1(1992)로 정해진 1차원의 Probe를 특별한 회전장치로 실험 Mandrel을 회전시킴으로서 실험하는 방법을 Fig.16-8에서 볼 수 있다. 공작기계의 축과 Rotary Center가 일치하고 있으면 Probe의 Deflection

은 Constant이지만 Probe가 한번씩 회전할 때마다 Sinuous을 그리면 회전 정도에 문제가 있다는 것을 알 수 있다. 다른 방법은 2차원 Analogues probe을 이용하고 2차원 Plotter을 사용하는 방법이다.

Disk의 Diameter를 Circular path(원호 궤적)보다 약간 적게 Program한다. Disk의 중심과 Circular path의 중심이 일치하는 경우에는 Probe의 Deflection이 일정하고 기계의 축의 회전에 오차가 없다는 것이 증명된다. 그 때 XY Plotter에 Plott한 원주는 진원이 된다.(Fig.16-9)

16-4. DBB(Double Ball Bar)법에 의한 평가 1)개념

공작기계의 운동정도를 측정하는 방법으로서 실제로 가공을 한 다음 가공한 Testpiece를 정밀 측정하여 그 오차를 가지고 평가하는 방법이 있다. 일반적으로 Direct test라고 부르고 있는 이 방법은 가공과 측정의 두 단계를 거쳐야 되며 많은 시간과 노력이 필요로 할 뿐만 아니라 측정하는 측정기의 측정정도의 문제가 있다. DBB(Double Ball Bar)법을 3차원적인 오차(Volumetric error)를 측정하기 위하여 미국 LLNL(Lowrence Livermore National Laboratory)에서 최초로 고안된 고정도의 Ball과 자기구면좌를 사용하는 장치로서 구면상의 2점간의 거리를 고정밀도로 측정하는 방법을 말한다.⁽⁴⁾ NC 공작기계를 검사하는 방법은 2개의 Ball을 연결시킨 것으로서 NC 구동으로 원호보간시험(圓弧補間試驗)(Circular Interpolation Test)이 가능한 공작기계, 3차원측정기, Robot, Manipulator 등의 운동정도를 측정이 가능하게 된다. DBB 측정에 있어서는 측정장치 자체는 구면상의 임의의 점을 지지할 수 있으나 실제에는 1축의 운동을 고정시켜 다른 2축의 원호보간이송을 시켜 원호상의 점을 지지하여 Bar의 신축량을 확대하여 평면상에 극좌표를 표시한다. 이것을 운동 오차 궤적이라고 부르며 이것을 해석하여 3차원의 정도 평가를 하는 것이 통례로 되어있다. 측정된 운동오차 궤적에서 그 기계가 보유하는 중요한 오차 원인을 판정하는 방법으로서 여러 연구자들이 각 원인마다 정해진 오차 Vector를 구하여 궤적 Pattern을 구하고 이 Pattern이 운동 오차 궤적중에서 존재하고 있는가를 판정하는 방법을 개발하였다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

2) 장치와 측정원리

DBB 장치는 Fig.16-10에서 보는 바와 같이 3점지지

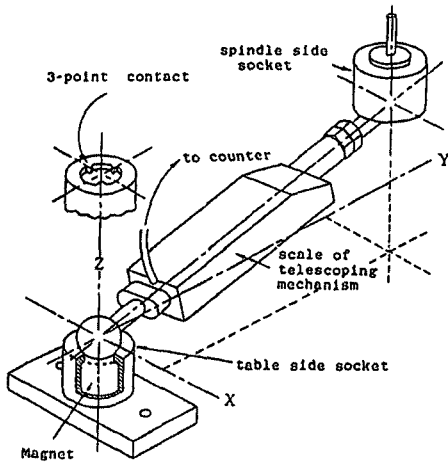


Fig.16-10 Flexible double ball bar (DBB)

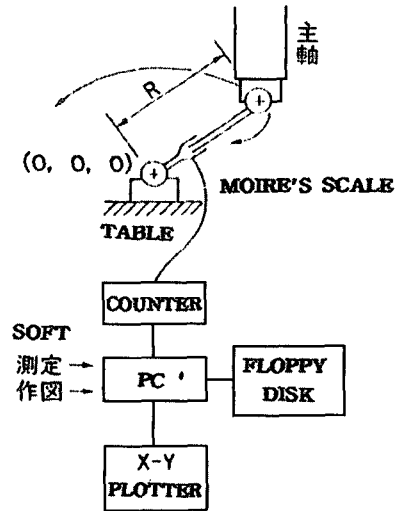


Fig.16-11 Accessories of DBB testing

(3 point contact)의 Table상의 구면좌(Table side socket)와 Spindle과 연결된 구면좌(Spindle side socket)사이 에 신축가능한 Bar의 신축량을 Scale로 측정하여 그 양을 검출하는 방법이다. Table side socket의 Ball의 중심을 회전의 중심으로하여 원호보간운동을 하게 된다. 지금 Table side socket의 중심이 원점(0, 0, 0)에 있고 Spindle축의 중심이 P(X, Y, Z)에 있다고 한다. Bar의 신장을 ΔR 로 하고 원점에 있어서의 기계의 오차를 (0, 0, 0)으로 하고 Point P에서는 (Cx, Cy, Cz) 라고 하면,

$$(R + \Delta R)^2 = (X + Cx)^2 + (Y + Cy)^2 + (Z + Cz)^2$$

$$\therefore \Delta R = (Cx \cdot X + Cy \cdot Y + Cz \cdot Z) / R \dots \dots (1)$$

가 된다. DBB 측정 System의 개요를 Fig.16-11에 표시하였다. Bar의 신축량 ΔR 의 Moire's scale로 검출하고 그것을 Counter를 거쳐 수치로 표시한다. PC는 Counter에 표시된 수치를 일정한 Sampling time을 정하여 이 Time에 맞추어 캐치를 Plotter위의 극좌표로 표시한다. 또, 측정 Data를 보관하기 위하여 Floppy disk에 기록시킨다. Counter의 최소 표시단위는 0.1 μ m이며 Socket 회전정도가 0.3 μ m이다. 중량등에 의한 Deflection등을 고려할 때 종합적인 측정 정도는 0.5 μ m가 된다.

일반적으로 Machining Center의 경우 XY평면, YZ 평면, XZ평면을 원호운동을 하는 원호보간 Program에 의해서 원(XY평면) 또 반원(YZ, XZ평면)이 움직이게 기계를 구동시킨다.(Fig.16-12) 측정범위, 각도, Over-shooting, 측정속도, 측정 반경은 Set up면 상에 기계의

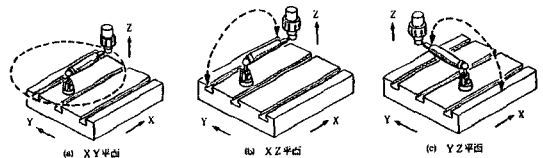


Fig.16-12 DBB testing for XY, YZ, and XZ Planes.

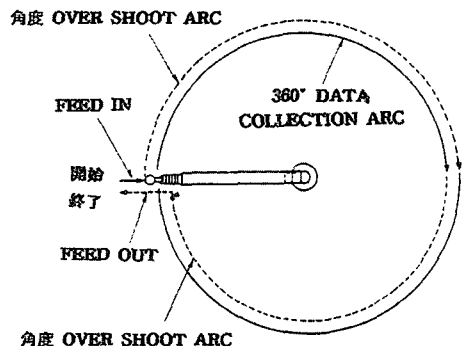


Fig.16-13 Moving path of DBB's bar

Program 구동에 맞추어 입력한다. CW와 CCW방향의 측정을 최대 6회까지 입력할 수 있다. Circular test법은 두 개의 Axis를 동시에 NC제어에 의한 원호보간이송 정도를 진원에서 얼마만큼 벗어나는가를 기준으로 평가하는 방법이다. 매우 손쉬운 방법이며 DBB 방법은 이 벗어난 량 다시 말해서 착오를 일으키고 있는 양을 Linear transducer로 감지하여 원형 Graph로서 표시한다. Program에 의해서 Fig.16-13에 표시한 바와 같이 두

개의 연속된 원을 그리도록 이동시킨다. 원을 하나가 아니고 두 개 그리게 하는 이유는 Data를 얻을 때 Arc의 Data를 얻기 전에 각도의 Overshoot arc를 그리는 사이에 기계가 일정한 윤곽작성 속도를 얻게하기 위해서이다.⁽⁹⁾ Feed in과 Feed out의 이동은 Data취득 Software의 기동을 시키기 위해서 사용된다.

3) Direct test와의 비교

DBB 측정에 사용한 기계를 이용하여 같은 위치에서 주철재의 Plate를 End mill로 절삭한 것을 Roundness meter로 측정하였다. CCW 방향(Counter clock wise, 반시계 방향)으로 측정한 DBB 측정방법으로 측정한 운동 오차 궤적과 가공된 Workpiece의 진원도를 비교한 것이 Fig.16-14이다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 실제 가공한 형상의 진원도가 $8\mu\text{m}$ 이고 DBB 방법으로 측정한 운동 오차 궤적의 진원도가 $10\mu\text{m}$ 로 표시하고 있으며 특히 주의할 점은 두 가지의 형상(Profile)이 유사하다는 점이다. 이 예로서 DBB의 공작기계 정도 진단이 매우 정밀하고 신뢰성을 가진 측정방법임을 입증하고 있다.

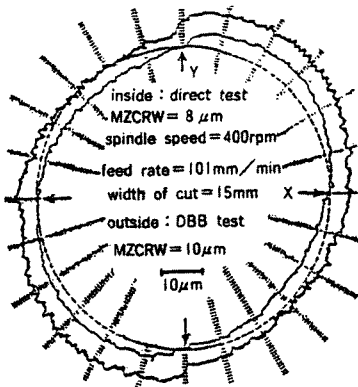


Fig.16-14 Comparison of direct test with DBB test

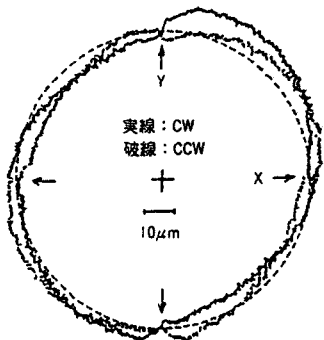


Fig.16-15 Moving paths on XY plane

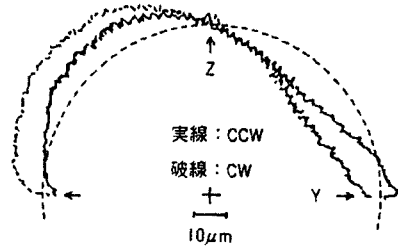


Fig.16-16 Moving paths on XZ plane

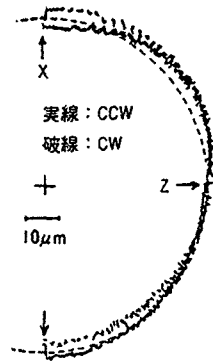


Fig.16-17 Moving paths on ZX plane

4) DBB의 측정

DBB 장치를 이용하여 Semi-closed loop 방식의 NC를 사용하는 Vertical MC의 운동 궤적을 측정한 예를 소개하겠다. Ball의 중심간 거리가 $R=201.3\text{mm}$ 이고 측정을 0.2° 마다 실시하므로써 360° 를 측정하는데 XY 평면에는 1800점이며 180° 만 측정하는 YZ, ZY 평면에는 900점이 된다. 이송 속도는 실제 절삭시의 속도를 고려하여 506mm/min 으로 한다. 측정은 각 평면마다 Clock wise방향(CW 방향, 시계방향)과 CCW 방향에 대해서 한다. XY평면을 측정한 운동 오차 궤적을 Fig.16-15에서 볼 수 있다. YZ면 측정 궤적을 Fig.16-16에서, ZX평면 측정 궤적은 Fig.16-17에서 볼 수 있다.

5) 대표적인 측정결과와 판정 예

DBB에서 얻은 Data는 원형표시로 되어 있으며 완벽한 진원으로부터 벗어난 원형으로 표시되어 있고 이 벗어난 형상의 Graph를 보면서 기계의 상태를 판명하고 그 원인과 대책을 강구할 수 있다. 여기에 대표적인 예를 4가지 골라서 설명하겠다.⁽⁹⁾

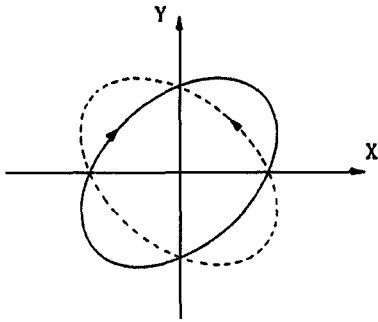


Fig.16-18 Moving path under unbalanced loop gain

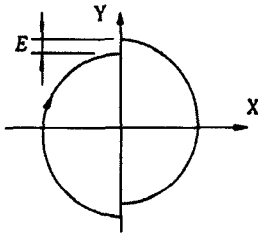


Fig.16-19 Moving path under backlash

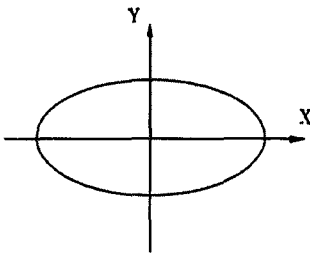


Fig.16-20 Moving path under unequal length of 2 axis

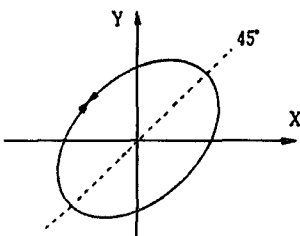


Fig.16-21 Moving path under errors in rectangular of two axis

a) Servo-mismatch

Fig.16-18에서는 45° 또는 135° 방향으로 타원이 되어 있고 CW(실선)와 CCW(점선)의 측정 결과가 방향이 각각 다르다. 위치 Loop gain이 축간 사이가 일치되어 있지 않기 때문이며 절삭 궤도가 원이 안된다. 따라서, Loop gain의 Balance를 Controller로 조정해야 한다.

b) Back lash 발생

Fig.16-19에서 보는 바와 같이 X, Y 양 축상의 외측에 Step이 발생한다. 그 이유는 Ball leadscrew의 Drive system 또는 Guideway에 Tolerance가 크게 발생한 형태의 그 원인이다. 그 결과 원형을 가공할 때 Curve가 있는 부분이 직선이 된다. Drive system과 Guideway의 Tolerance를 제거하거나 Controller의 Backlash의 보정이 필요하다.

c) Scale mismatch

Fig.16-20와 같이 CW, CCW에 관계없이 원형이 아닌 타원형이 된다. 이 그림과 같이 Y-X면에서 X방향의 타원이 되었을 때의 경우 다음과 같은 원인을 생각할 수 있다. X방향이 신장되고 있거나 Y축이 축소되어 있다. X축의 Leadscrew가 Overheat되어 있거나 X축의 Table scale이 신장되어 있다. 역으로 Y축의 Scale이 축소되어 있다. Controller의 Leadscrew 보정 Parameter가 착오가 있거나 Ball leadscrew가 불량품이 그 원인이 된다. 또는 Axis guide가 직선이 아닌 경사되게 설치되어 있는 각도 Error의 경우이다. 이 상태의 기계로 가공을 하면 Size를 제대로 얻을 수 없다. 그 원인이 각도 Error 인가를 규명하려면 측정위치를 바꿔가면서 하면 타원의 크기가 증가함을 알 수 있다.

d) 직각도 Error

Fig.16-21에서 보는 바와 같이 45° 또는 135° 방향의 타원이 된다. 또, CW, CCW 양 방향에 관계없이 측정결과가 동일 방향인 타원이다.

6) DBB 방법의 잇점

NC 동작기계로 가공된 부품은 그 기계의 정도와 성능에 지배된다. 지금까지는 가공후 부품을 검사하여 시간이 많이 소요되었다. 불량품이 발생한 경우 그 원인을 발견하기 위해서 종래하던 가공부품의 검사가 아닌 DBB 방법은 여러 각도에서 많은 잇점을 제공하고 있다.

User에게 주는 잇점:

ISO230 규격으로 정해져 있으므로 기계의 구입 및 납입 검사할 때 유리하다.

DBB 방법으로 기계의 정도를 미리 알 수 있으므로 그

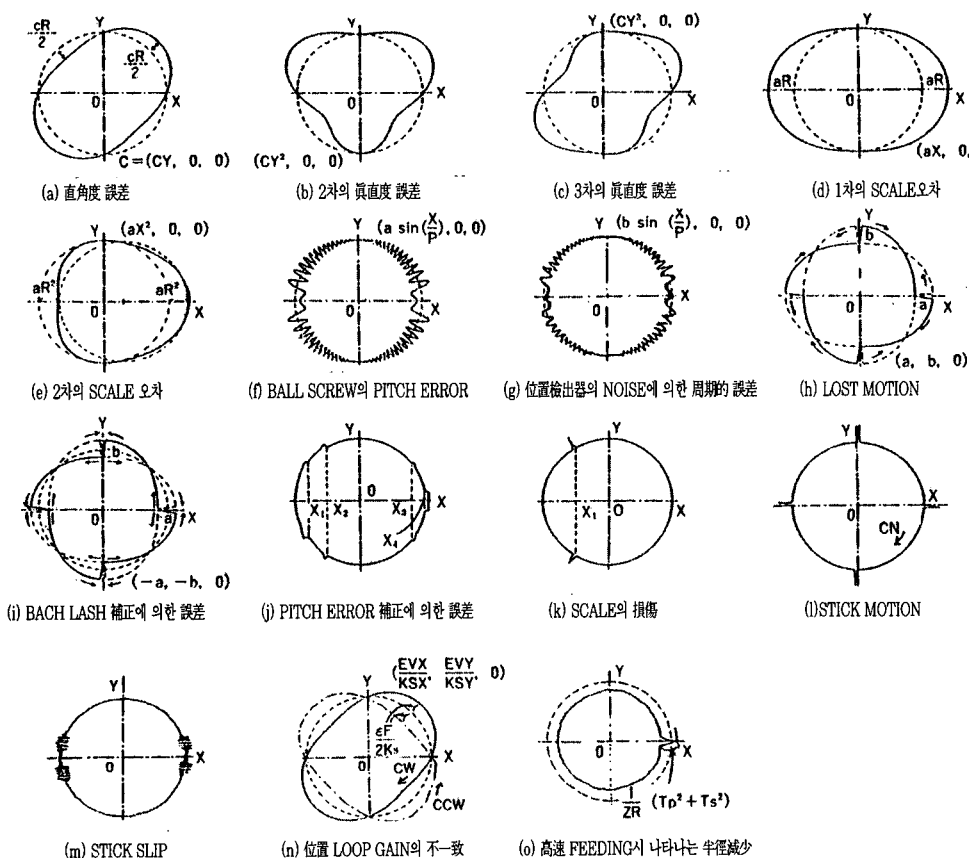


Fig.16-22 Various moving paths caused by each errors

기계의 정도에 적합한 부품의 생산을 계획할 수 있다.

정기적으로 기계를 점검함으로써 불량품의 발생을 미리 방지하고 공작기계의 결점을 조기에 발견할 수 있다.

기계의 운동정도를 간단하게 진단할 수 있다. 특히 기계를 부주의로 충돌시켰을 때 기계를 그대로 사용할 것인지 수리해야 할 것인지를 그 자리에서 판단할 수 있다.

기계 제조업자에게 주는 이점:

DBB 방법을 사용하므로서 Oiling의 효과, Bearing의 선택등 사양변경의 영향을 알 수 있다. 또 새로 설계제작한 기계에 Feed back을 할 수 있으므로 기계의 개발기간을 대폭 단축시킬 수 있다.

공작기계의 Parameter 설정과 조정시 도움이 된다. 예를 들면 Servo-gain의 Balance와 Backlash의 보정등을 바로 Check할 수 있다.

제조된 기계가 목표로 한 정도를 DBB 방법으로 최종적으로 확인할 수 있다. DBB로 직각도(Squarness), 스

케일의 설정오차(Scale mismatch), 진원성, Repeatability 등의 정보를 얻을 수 있다.

기계의 결점의 원인을 측정결과와 Plott에 의해서 바로 해석이 가능하며 Maintenance도 단축된다. 따라서, 고객이 만족하는 Service를 제공할 수 있다. 또한 Z축과 X축 사이의 직각도가 90°가 아닌 오차가 원이고 이 기계로 가공하면 가공면의 완전 직각도를 얻기 어렵다. 이와 같이 위치를 바꿔가면서 몇 번 Test를 해야하며 Axis의 직각도를 잘 내어서 조립해야 한다. 이와같이 DBB를 사용하여 공작기계의 특성을 평가시 손쉽고, 정확하게 할 수 있다는 것을 전술한 바와 같이 Fig.16-22에 15개의 여러 오차원인을 가지는 궤적 Pattern을 소개한다.⁽¹⁰⁾

16-5. 기계 진단의 지능화(Intelligent diagnosis)

1) 개념

80년대 후반부터 지금까지 Computer의 성능이 비약

적으로 향상되어 정보통신처리 기술의 진전과 Software 기술의 향상이 병합되어 FA, CIM으로 대표되는 새로운 자동생산시스템이 구축되었다. 최근에 와서 생산 환경의 전환에 대응하는 새로운 생산 구상(Paradigm)이 제안되고 있다. 여기에는 Computer의 지적처리기술이 Key technology의 하나로 응용하는데 기대를 걸고 있다. 기계 System의 고지능화의 연구를 진행하는데 기계 지능(Machine Intelligent)을 다음과 같이 정의하고 있다.

「주어진 환경 속에서 그 환경을 포함한 작업 대상과의 상호작용의 Sensing data를 얻어서 이것을 구조화하여 지식 Base로서의 Memory로 축적하여 작업의 목적을 위해 지식을 유효하게 사용할 수 있는 능력이다.」 Computer 기술, 정보처리 기술의 향상은 기계에 더욱 많은 기능을 가지게 하고, 이것은 종래에는 없었던 것만큼 복잡하게 되었다. Jet전투기의 조종석에 있는 조종사가 1920년으로부터 1980년에 이르기까지 지수관이 수적으로 증가하였으며 기능의 증가와 더불어 조작의 복잡성도 증가하였다. 공작기계나 생산설비기계도 같은 추세로 나아가고 있다. 따라서, 여기에 발생하는 고장도 다양화되고 있기 때문에 이상한 상태가 발생했을 때 적절한 대응과 처리를 하기 위해서 고도의 능력이 요구된다는 것은 당연한 일이다. 이 장에서는 공작기계와 자동화 설비를 중심으로 하는 System의 진단을 논하기로 한다.

2) 이상(異常)과 진단(診斷)

일반적으로 사람이 하는 기계 시스템의 진단을 하는 순서는 다음과 같다. 즉 이상현상이 발생했을 때 여러가지 상태를 종합하여 그 인과관계에 관한 지식경험을 토대로 검토하고 이상의 원인을 결정한다. 이것에 의해서 적절한 처리를 실시하여 기계 System의 정상화가 실현된다. 지능화된 지적진단도 사람이 하는 것과 대동소이할 것이며 기본 구성은 Fig.16-23과 같이 어떤 환경에서 작

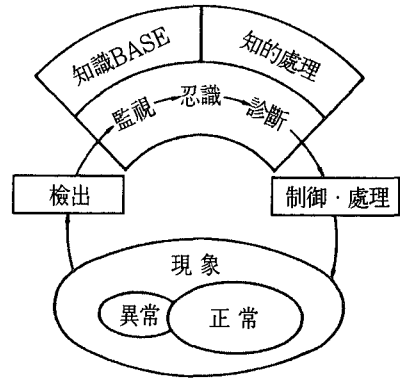


Fig.16-23 Basic concepts of intelligent diagnosis

동하는 기계 시스템의 현상을 Sensor등에 의해서 검출하고 감시하게 된다. 감시 정보로부터 상태를 인식하고 진단을 하며 진단 결과에 따라서 적절한 조치 또는 제어를 기계 System에 주어 Closed loop가 형성된다.⁽¹¹⁾ 여기에 감시(Monitoring), 인식(Recognition) 또는 진단(Diagnosis)은 지적처리의 대상이 되는 기능이다. 감시는 주의하여 잘 관찰하는 것이며 여기에서 중요기술은 검출 기술이다. 인식이란, 상태를 알 수 있는 작업 또는 지식이며 신호처리, 정보 처리기술이 중심이다. 진단은 얻어진 상태를 인식하고 정상인가 이상인가의 판단을 하거나 이상한 곳을 고정시켜 놓고 적절한 처리를 한다. 지적 진단의 이와같은 기능을 지식 Base 또는 지적 처리 기술에 의해서 실현시키고 있다.

3) 공작기계의 지적 진단기술

Fig.16-24는 공작기계의 지적진단 System의 기본적인 구성을 설명하고 있다. 공작기계를 구성하는 여러 요소로부터 동작현상이 검출되어 얻어진 정보에 의해서 지적처리가 이루어진다. 진단결과에 따라서 진단 System

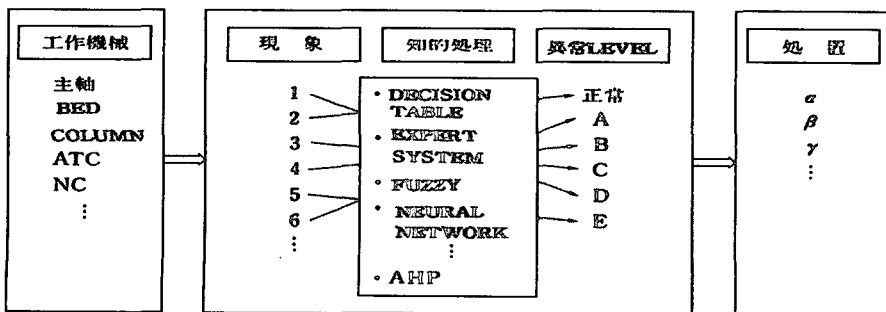


Fig.16-24 Basic structure of intelligent diagnosis in machine tools

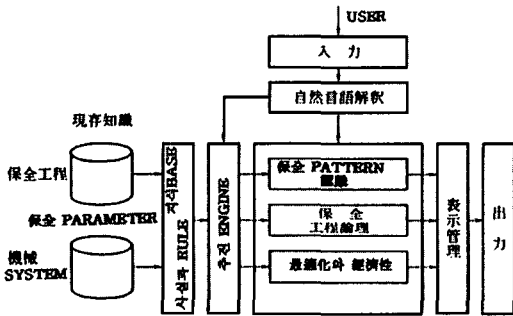


Fig.16-25 FMS diagnosis by Expert system

番號	結論名	可能性
1	主軸MOTOR BRUSH의 마모	70
2	主軸SERVO ALARM	30
3	加工 TABLE 變位不良(X方向)	20
4	主軸 제어 UNIT 不良	20
5	AIR FILTER의 BLOCK	10
6	가공 TABLE의變位不良(Y方向)	10
7	가공 BED의 變位不良(左X方向)	10

結論：主軸MOTOR BRUSH의 교환

Fig. 16-27 An Example of diagnosed result

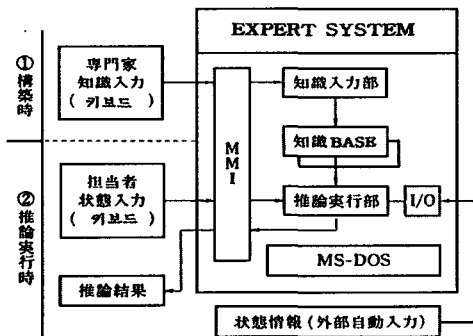


Fig. 16-26 Machine tool diagnosis by Fussy-Expert systems

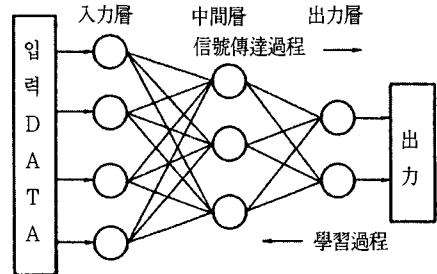


Fig. 16-28 Feed forward type Neural Network

SERVO ALARM	危險行爲	誤操作	工具破損	工具壽命
SYSTEM ERROR	自動測定 ALARM		AE MONITOR ALARM	
PULSE CODER ERROR	自動測定 UNIT ALARM		SL MONITOR ALARM	
OVER HEAT	動作開始條件이 未整理		AC MONITOR ALARM	
PROGRAM ERROR	動作規定時間內에 未完了		周邊機器 BRAKE 作動	
OVER TRAVEL	動作中條件 未整理		BATTERY 電壓	
회전조건이 미정리	指令대로 不作動		FILTER BLOCK	
起動中 CLAMP OFF	動作開始狀態가 아님		周邊機器 THERM 異常	
主軸이 指令대로 不作動	動作中狀態가 不安定		切削油壓力·流量異常	
主軸關連 THERM 異常	本體 THERMAL 異常		油LEVEL	

Fig. 16-29 Abnormality occurrences in machine tools

에 대응처리 또는 제어정보를 진단 대상에 실시한다. 여기서 지적 처리에는 Expert system, Fussy 논리, Neural network 또는 AHP(Analytical Hirarchy process)법 등의 의사결정 수법을 이용하고 있다.

지적 처리 방법 중 제일 먼저 응용되고 있는 지식 공학 적 수법은 Expert system이다. 진단 지식 Base의 구축 과 추론기능에 의한 처리의 유연성, 그리고 대화지향 System등 종래의 임의적 수법과 매우 다른 우의성을 가

지고 있다. Fig.16-25은 FMS의 진단과 보수에 Expert system을 응용한 것이다. Fig.16-26은 Fussy이론과 Expert system을 조합한 공작기계의 고장진단에 응용한 System의 기본구성이다. 여기서 Fussy이론을 응용하고 정서적(감각적)인 지식처리는 사용하는 전문가가 용이하게 지식 Base를 구축할 수 있게 되어있다. 진단은 공작기 계로부터 자동적으로 신호가 입력되고 진단 정보를 기초 로 하여 출동한 고장원인을 진단담당자에게 제시한

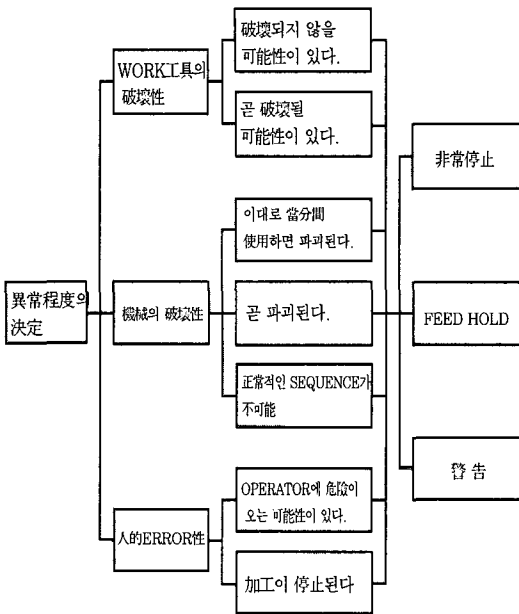


Fig. 16-30 Steps of abnormality by AHP method

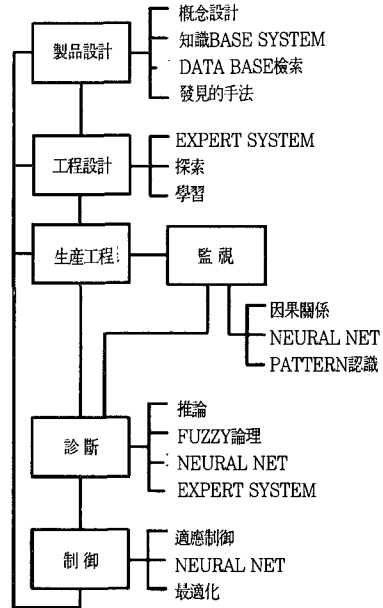


Fig. 16-31 Proposed structure of intelligent production system

다.(Fig.16-27) 본 System을 사용하므로써 대폭적인 보 전시간의 단축이 가능해진다.

지적처리로서 최근 주목을 받고 있는 것이 Neural network의 응용이다. Pattern인식, 신호처리, 학습 또는 Simulation하는데 우수성이 있다는 것 등으로 진단의 응용에 기대가 되고있다. Fig.16-28은 전형적인 Feed forward형 Neural network을 나타내고 있다. 이것은 학습기능을 가지고 있는 Network로서 사용하고 있다. 지적 진단 System에서는 Sensor의 정보로부터 환경을 학습하고 대상물을 제어하는 것이 가능하다. Network는 Newron간의 연결의 강도를 학습에 의해서 추진변화시키는 것이 가능하므로 환경의 변화에 대하여 유연하게 대응 하는 것이 가능해진다. 현재는 공구의 마모감시, 가공상태의 인식 등에 응용되고 있다.

공작기계의 진단에 AHP를 응용한 예가 있다. Machining Center로부터 Sensor에 의해서 600개의 Aram 신호를 발생하게 한다. Aram의 신호에 따라서 경고, 비상정지, Feedhold등의 판단을 하고 작업자로 하여 금 처리를 하도록 한다. Fig.16-29에는 공작기계에서 발생할 수 있는 이상상태를 30가지 정리하였다. Fig.16-30은 이상상태가 발생하였을 때 AHP법으로 처리해야 할 계층도를 표시하고 있다. 이상상태가 발생한 항목을

상위 Level의 각 항목의 중요도와 하위 Level의 각 요소의 중요도를 비교하여 종합 중요도를 결정한다. 종합 중요도의 크기에 따라서 비상정지, Feed hold, 경고 등으로 결정된다. AHP법은 평가기준이 많이 존재할 때의 의사결정 수법이지만 기계 System이 더욱 복잡해짐에 따라서 이와같이 다양한 방법으로 평가를 하는 의사결정 수법을 응용하게 될 것이다.

4) 장치의 동향과 문제점

고도의 자동 생산 System에서는 장기간의 무인기계 가동이 고려된다. 제안되고 있는 지적 생산 System에 있어서도 진단기능이 중요한 요소로 되어있다.(Fig.16-31) 장래의 지적진단에 의한 기술적 과제로서,

- 검출기술의 고도화
- 이상의 예측
- Human error에 대한 대응
- Remote 진단기술의 확립

등을 열거할 수 있다. 가공중의 이상, 그중에서도 공구의 파괴를 검출하는 기술은 이미 알려져 있는 바대로 어느 정도 성공하고 있으나 공작기계를 포함하는 가공 전체 System으로서의 진단에 대해서는 아직 성공하였다고 볼 수 없다. 그 이유는 Sensor에서 나오는 정보가 기계 System의 다양성에 대응이 잘 안되어 있기 때문이다. 최

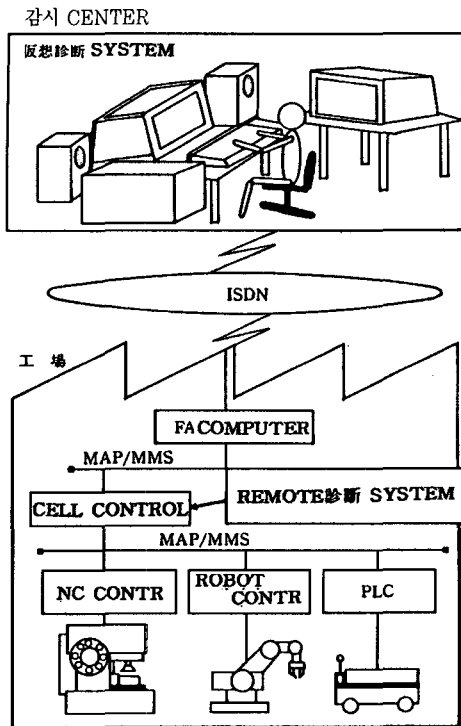


Fig. 16-32 Diagnosis systems connected with network system

근 Sensor fusion에서 볼 수 있듯이 다양한 정보를 검출하여 지식 Base에 의해서 이상을 인식하는데까지는 되고 있으나 더욱 신뢰성이 높은 판단이 요구되고 있다. 이상의 발생과 상태를 미리 예측한다는 것은 매우 중요한 과제이다. 예측에 대응하는데 감시의 Real time성과 지식 Base에 의한 학습이 중요한데 여기에 새로운 Sensor 기술의 개발과 Neural network와 같은 AI적 수법을 적용하는 것이 차후의 과제가 될 것이다. Human error에 관해서는 진단을 위한 정보제시 System의 개발, 미숙련자의 교육법, 그리고 나아가서는 고령자에 대한 대응이 해결해야 할 점이다.

공작기계와 자동화기기의 고장을 먼 곳에서 진단하고 대처하는 방법이 연구되고 있는데 이것이 Remote control이다. 이것은 Network를 사용하여 정보 통신기술의 진전과 공장의 분산화 및 기계의 자율화(自律化)가 Remote진단의 중요성을 증대시키고 있다. Fig.16-32는 Remote진단의 한가지 구성도이다.⁽¹¹⁾ 생산을 위한 자동화기기는 공장내 LAN으로 연결되고 있다. 기기를 총괄 제어할 수 있는 Cell Computer가 기기의 진단을 한다. 공장으로부터 먼 곳에 떨어져 있는 감시 Center에서 공

장의 감시와 이상발생에 대해서 적절한 대응이 있어야 한다. 공장과 감시 Center에는 Digital network로 연결되어 있으며 Multi media정보와 가상현실의 환경에 따라서 진단이 실행되고 있다. 이와같은 구상은 실현이 가능한 기술환경이 점차 정리되어 가고 있다. 공작기계의 이상에 대한 진단기술에 장차 기대되는 응용기술로서는,

- 인공현실감(Partial reality)
- SA(Subsumption architecture)

이 열거되고 있다. 인공현실감은 최근 그 응용이 각 분야에 파급되어 가고 있는 기술이다. 생산 분야에 있어서도 Partial factory의 제안 설계 또는 Simulation에 그 응용이 기대되고 있다. 진단의 분야에 있어서도 특히 Remote 진단에 Partial reality의 응용을 생각할 수 있다. SA는 최근 Robot의 제어를 중심으로 새로운 지적 처리를 위해서 등장한 기술이다. SA 방식에 의한 인식수법의 개발, 더 나아가서 SA 진단 Robot의 개발등 새로운 진단기술의 전개가 가능해지고 있다. 생산 System에 있어서의 지적진단의 적용 예는 많지 않으며 차후 적용 사례가 증가함에 따라서 해결해야 할 여러 문제가 발생할 것으로 예측된다. 진단에 있어서 오진이 없는 진단기술의 확립이 기본이라는 것은 당연한 일이다.

16-6. Remote 진단 System

1) 개념

금후의 NC공작기계 System을 고생산성과 고정도화로 추진시키기 위해서 각종 주변장치를 유기적으로 연결하여 여러가지 요구조건을 만족하는 System구축이 절대 조건이다. 다시 말해서 특징있는 NC장치와 Maker의 Know-how가 포함된 System구축이 필연적이므로 NC장치와 더불어 System을 제어하는 PC장치(Programmable controller)의 역할이 매우 커져가고 있다. 이와같은 시장의 요구에 대해서 일본의 공작기계 Maker인 H사에서는 Tool setter기능, Work setter기능, Easy setter기능, 안전 Guard기능, Over write자동 Memory기능, 그리고 가공완료 예고기능등 특수기능을 포함한 자세한 NC장치(SEICOS .M-II)를 개발함과 동시에 Seiki Local Bus(SL Bus)를 사용한 Remote I/O방식의 PC장치(MICON16-II)를 개발하였다.⁽¹²⁾ MICON16-II는 SL Bus라고 하는 고속 Real interface기능을 구비하고 있으므로 System element로서 Pallet poolline, Robot, ATC, Loading장치, 계측장치 등을 쉽게 조립하여 각종 System을 구축할 수 있다.

2) Remote 진단 System

기계의 운용에 관해서 Line관리와 부품 제작의 동기화 즉 Synchronize화가 중요해지고 있다. 이와 같은 System을 효율있게 운영하기 위해서는 각종 요인이 있으나 그 외관요인이 되는 기계의 고장에 관해서 검토해 보면,

- ① MTBF(평균고장간격)
- ② MTTR(평균수리시간)
- ③ 보수성

으로 대별할 수 있다. 다시 말해서, 보수성이 좋고, 고장이 적은(MTBF가 큰) 그리고 재빨리 수리할 수 있는(MTTR이 적은)System이 좋은 System이 된다. 실제로 기계에 고장이 발생한 경우 어떻게 해서 빨리 기계를 수리하는가가 최대의 Point이다. 그러나, 현재의 공장은 각사마다 다양한 System으로 조합되어 구성되어 있고 자동화도 진전되어 있으며 기계 Operator의 부담도 경감되어가고 있다. 이와같은 상황에서 보수 담당자가 전 System의 내용과 조작의 상세한 부분을 이해하고 고장에 대한 적절한 판단력을 유지해 나간다는 것은 많은 노력과 시간을 요구하고 있다. 일반적으로 고장이 발생하면 Operator나 담당 기술자는 고장 발생시의 상황과 Aram 정보에 의해서 기계의 Maintenance기능에 따라서 다음 작업을 한다.

- ① 고장 상황의 파악
- ② 고장 원인의 추구와 판단
- ③ 고장에 대한 처리

담당자가 판단할 수 없을 때는 Maker의 Service부분과 전화연락에 의해서 고장상황을 검토한다. 이 때 고장의 대응과 해결에 시간이 걸리고 기계의 정지시간이 길어져 생산계획에 지장을 초래하는 경우가 많이 있다. 그 이유는,

- ① 기계의 자동화가 추진되어 있으며,
- ② System화가 진척되어 복잡해지고 있으며,
- ③ 무인화가 진행되고 있기 때문에 고장 상황의 파악이 어려워지고 있다.
- ④ 기계와 전화가 떨어져 있으며,
- ⑤ 상호간에 지식과 상황을 판단하는데 차이가 있다.

이와 같은 문제는 고장 발생시 기계상태가 담당자를 경유하지 않더라도 Maker까지 정확히 전달되면 해결된다. H사가 개발한 「Remote 진단 System」은 보수의 기본 Data가 되는 고장시의 Maintenance 정보를 자동적으로 수집하는 System이다. 이 System은 Service center의 Remote진단 Center국과 User의 기계 쪽에 설치하는 Remote진단 Local 국과의 사이를 공중전화 회선으

로 연결하고 Maker의 Service man이 User의 기계를 항상 감시하고 Monitoring할 수 있게 하고 있다. 즉, User의 기계에 고장이 발생하면 User에게 설치되어 있는 Remote진단 Local국이 기계의 Maintenance 정보를 수집하여 Remote 진단 Center국에 자동적으로 Data를 송출한다. 따라서, User의 기계가 고장난 상태가 정확히 파악된다. 그렇기 때문에 User까지의 수리시를 정확하게 할 수 있을 뿐만 아니라 Service man 파견에 있어서도 적절하고 신속한 대응이 이루어지는 것이다. Remote 진단 System은 Maker의 Service man이 User쪽에 상주하고 있는 것과 동일한 효과를 발휘한다.

정보시대에 걸맞는 Maintenance system이라고 말할 수 있다. H사의 Remote 진단 System은 H사의 Service Center에 설치되어 있는 「Remote 진단 Center기기」와 User쪽에 설치하여 Maintenance 정보를 수집하는 「Remote 진단 Local국」과 「공중전화 회선」으로 구성되어 있다. 「Remote 진단 Center」의 구성을 보면, Fig.16-33에서 보는 바와 같이 User로부터 Mainte-

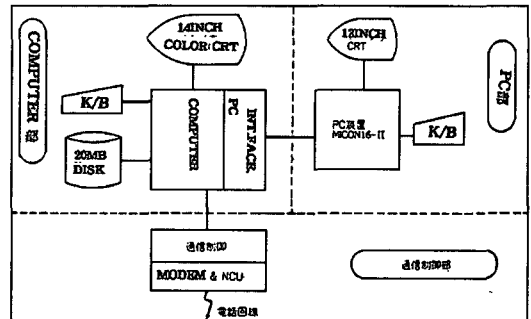


Fig. 16-33 Main station of remote diagnosis

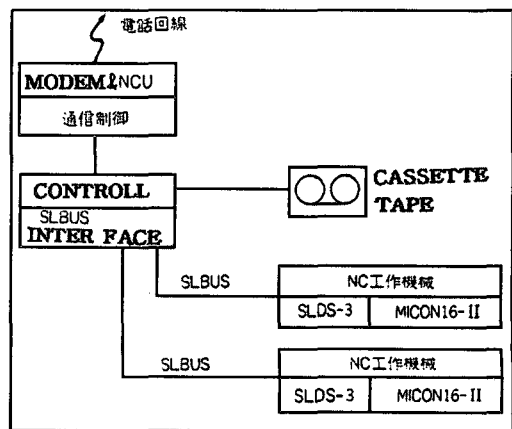


Fig. 16-34 Local stations of remote diagnosis

nance 정보를 기억, 분석, 표시하는 Computer부와 User 쪽과 동일한 조작으로 고장을 탐지할 수 있는 PC부 「MICON16-II」가 주요부로 되어있다. Remote 진단 Local국은 Panel속에 기기가 내장되어 있으며 기계를 포함한 구성은 Fig.16-34에서 볼 수 있다. Local국은 SL Bus를 통하여 Maintenance 정보를 수집하는 정보수집부와 공중전화선을 통하여 정보를 교환하는 통신제어로 구성되어 있다. 1대의 Local국이 8대의 기계를 감시할 수 있으며 Local국에서 기계까지의 거리는 최대 360m까지 가능하다. Remote 진단 System은 주로 다음 기능을 가지고 있다.

① User로부터의 Maintenance 정보를 기본으로 하는 Service Center에서 신속하고 적절한 고장 분석과 진단이 가능하다.

② User로부터의 Maintenance 정보를 500가지를 보존할 수 있으므로 과거의 고장의 Data base가 Support된다.

③ Remote 진단 Local국은 24시간 기계상태를 감시하고 이상이 발생한 순간의 Maintenance 정보를 Center에 자동 발신한다.

④ Remote 진단 Center는 Local에서 보내져오는 정보로 Data base를 작성한다.

⑤ Service Center에서는 User와 동일한 Ladder sequence를 사용한다. Ladder활선 표시로 고장 진단이 가능하다.

⑥ 한대의 Local국에서 8대의 NC공작기계를 감시할 수 있다.

⑦ Service Center로부터 필요에 따라서 수시로 기계상태를 Monitoring할 수 있다.

⑧ 기계 제어를 하는 Sequence program을 이 System에서 송수신 할 수 있다.

3) Hardware와 Software

Remote 진단 Center 측도 User와 같이 동일한 PC장치를 조합해서 User와 동일하게 조작할 수 있게한다. 다시 말해서, User의 PC data를 Center의 PC 장치에 이동시킴으로서 Center에서 User의 기계를 진단할 수 있게 한다. 그러므로, Center의 Computer와 PC 장치를 Interface할 수 있는 PCSLIF를 개발하여 Computer와 PC사이의 Data를 주고 받고 있다. NC 공작기계 System을 제어하는 PC부는 자동화 되어있기 때문에 복잡해지고 있고, 점접수(내부 Terminal 포함)는 2500~4000 점접이고, Program량은 8KB~12KB로 되어 있다. 전기 도면으로 하면 180~230 Page가 된다. 이와같은 Data는 기계에 따라서 달라지며 수집 Data의 내용분

석을 사람 손을 거쳐서 하면 효율이 올라갈 수 없다. 따라서, 각 기계마다의 분석 Software에 의한 표시로 곧 상황을 판단하게 하였다. 또, User의 PC data를 PC data center PC장치에 이동시켜 Ladder program의 점접 내용을 이해하지 못하면 정확한 판단을 할 수 없다. 실제로 도면을 기초로 하는 점접내용을 조사하는 작업이 전 작업의 60~90%를 점유하고 있다. CAD에 의해서 전기 도면 작성을 하고 있으므로 CAD data를 Remote 진단에 이용하므로써 점접 정보가 Computer로 인해서 Backup

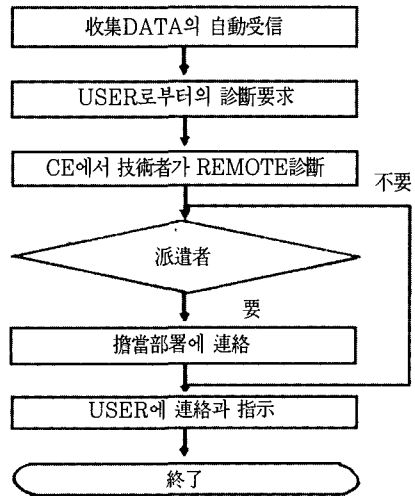


Fig. 16-35 Flowchart of remote diagnosis

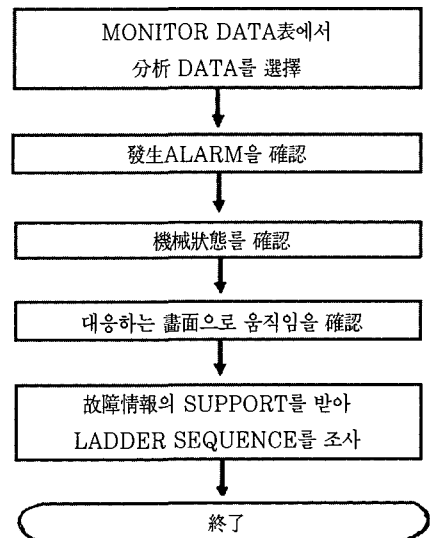


Fig. 16-36 Operation of remote diagnosis

되므로 효율이 좋은 Operation체제로 된다. User와의 Remote 진단은 Fig.16-35와 같이 하고 있으며 그 구체적 조작은 Fig.16-36에서 알 수 있다.

4) 특징

Remote 진단 System의 큰 특징은 고장이 발생한 순간의 Data를 수집할 수 있다는 것이다. 이것은 어떤 우수한 기술자가 기계에 붙어 있더라도 불가능하지만 Remote 진단으로는 간단히 할 수 있다. 이 기능의 효과는 다음과 같은 경우에 효력을 발휘한다.

- ① 빈번하지 않게 발생하는 고장
- ② 고장상태가 곧바로 복구되어 버리는 고장
- ③ 무인 자동 운동중 발생하는 고장

이상의 어떤 경우라도 종래의 방법으로는 고장해석이 어렵고 많은 시간과 노력이 필요하였다. 실제로 Remote 진단의 대상 User가 동작확인용 근접 Switch를 On할 때 가끔 초기 불량 발생하여 Error신호가 들어가서 기계가 동작을 잘 못하는 경우가 있었으나 Remote진단 System에 의해서 그 순간의 Data를 해석할 수 있으므로 재빠른 판단과 처리를 할 수 있다. Remote 진단 System은 고장이 발생한 순간에 Data 수집이 되어 자동적으로 Data를 Center로 보낸다. 따라서, User가 제조회사에 전화할 때는 이미 Data가 Center에 도착되어 있다. 실제 운용에서는 User의 조작 Miss에 의해서 Aram이 발생하거나 복구 조작에 대한 질문을 할 때 기종마다의 분석 Soft에 의해서 기계상태를 재빨리 알 수 있으므로 User로부터 최소의 정보와 적절한 조작과 지시를 Feedback할 수 있다. 일본의 H사가 개발한 Remote 진단 System은 Service의 Neck으로 되어있던 Data 수집을 하므로써 보수의 자동화를 강력하게 진행하였고 계속 System의 개량을 하게 될 것이며 User와의 On line동맥으로서 발전시켜 각종 Service 기능을 추가시킬 예정이라고 한다.

16-7. 결론

- 1. 공작기계의 성능을 평가하는 방법에는 제안자 연구소, 규격제정 기관에 따라서 여러가지가 있다.
- 2. 최근에는 국제규격인 ISO를 채택하여 국제적으로 상호적용하려는 경향이 있다.
- 3. 공작기계의 정적및 동적 Flexibility를 시험하는 방법을 설명하였다.
- 4. 원호시험에 대한 두 가지 방법을 설명하였다.
- 5. DBB법에 의한 공작기계 특히 MC의 성능평가가 최

근 가장 널리 사용되고 있는 방법이며 여러가지 특징이 있다. 측정 원리와 그 방법, 측정결과와 판정 등 자세히 설명하였다.

6. 기계 진단의 지능화에 현재기술과 장래의 전망에 대하여 논술하였다.

7. 자동화된 생산 System을 원활하게 운전하려면 Remote 진단 System이 절실히 요구된다. H사의 개발 예를 설명하였다.

참 고 문 헌

1. M.Weck, "Handbook of Machine Tools" Volume 4. John Wiley & Sons 1984.
2. 堤正臣, "ISO規格に準拠した工作機械の精度試験方法通則のポイント" 應用機械工學, 1994.5 PP.100-103,
3. W.Knapp, "Machine Tool Acceptance by Circular Measurements" 5th IMEC Session I, PP.15-29
4. J.B.Bryan, "A Simple Measuring for Testing Measuring Machines and Machine Tools(Part I & Part II) Precision Engineering(April 1982) & (July 1982)
5. 垣野義昭, et al, "NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報)" 精密工學會誌 52.7(1986) PP.1193
6. 同上(第2報), "精密工學會誌 52.10(1986) PP.1739
7. 홍성욱, 신영재, 이후상, "원호보간시험에 의한 수치 제어 공작기계의 운동오차원인 진단에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제10권 제2호 (1993.6) PP.126-137
8. 문준희, 박희재, 주종남, "기구불바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상" 한국정밀공 학회지 제13권 제6호(1996.6), PP.114-121
9. 松永三郎 et al, "QC-10 ポールバーステムによる NC工作機械精度評價, 保守管理法" 機械と工具, 1994-7 PP.114-120,
10. 垣野義昭, "DBB法による マシニングセンタの精度評價" Machinist, 1990-7 PP.75-79.
11. 神田雄, "機械診断の知能化" 精密工學會誌 59/11/1993, PP.1778-1783
12. 寺嶋厚, "NC機のリーモト診断システム" 應用機械工學, 1988-1, PP.112-116,