講座 한국정밀공학회지 제 12권 제5호 1995. 5
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 12. No 5. May. 1995.

공작기계기술의 현재와 미래(2)

강 철 희*

Machine Tool Technology;The Present And The Future (2)

C. H. Kahng*

강좌 시리즈 차례

(1) 서론	(11) 새로운 공구와 공작기계 설계방향
(2) 공작기계의 고속화와 고성능화	(12) CNC 연삭공작기계
(3) 고속회전시 공구의 착탈방법	(13) EDM, Laser가공기계
(4) 공작기계의 정밀화	(14) 다기능 공작기계와 미래공작기계
(5) 공작기계 오차의 원인과 대책	(15) 공작기계의 성능평가
(6) 공작기계의 새개념(VARIAX, HEXAPAD)	(16) 측정 기술, Sensing 기술
(7) 새로운 CNC 콘트롤	(17) 생산시스템(FMC, FMS)
(8) 머시닝센터의 미래	(18) Metal Forming 공작기계
(9) CNC-선반의 미래	(19) 미래의 생산(CIM, IMS)
(10) 초정밀 가공공작기계	(20) 우리의 갈길

2. 고속화·고능률화 기술

2-1 필요성

기술과 과학이 끊임없이 발달되고 있는 가운데 생산기술과 생산공업도 비약적으로 발달되고 있다. 공작기계에 대한 요구사항은 일반적으로 고정도화·고속도화 그리고 고능률화 나아가서는 자동화이다. 다시 말해서 더욱 좋은 품질(고정도화)과 저렴한 가격(고능률화)의 제품을 빨리 사용자에게 공급(고속화)할 수 있고, 다양한 제품을 만들 수 있는 공작기계가 요구되는 것이다.

고능률화 또는 고속화를 위해서는 고속절삭가공을 실현해야하며 그러기 위해서는 Spindle(주축)의 회전수를 높이고 각 축의 이송 속도가 빨라야 되며 절삭 이송을 고속화하여야 한다. 그리고, 머시닝센터에서는 공구를 자동으로 교환하는(ATC) 시간을 줄이고 또 공작물을 부착하는 Pallet의 교환(APC)을 신속히 해야 한다. 이와 같은 고속 공작기계에 대한 요구는 점점 많아지고 있으며 공작기계전시회가 열릴때마다 고속도화는 점점 진전되고 있다. 최근에는 주축의 회전수가 10,000min^{-1}은 보통이고 최고 40,000min^{-1} 이상에 도

* 統一重工業(株) 전무

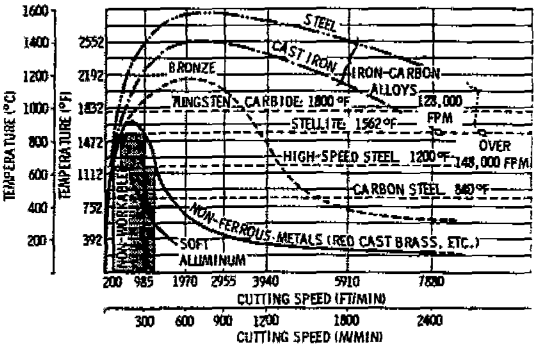


Fig. 2-1 Salomon의 절삭속도와 절삭온도의 관계

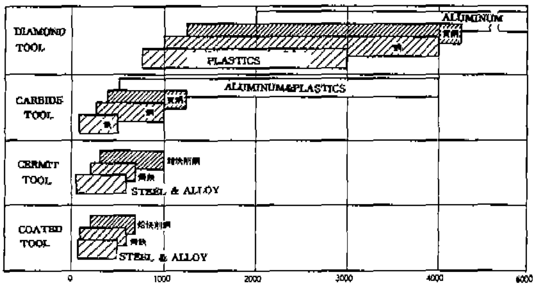


Fig. 2-2 재료와 절삭속도의 범위

달하고 있다.

주축 회전수의 고속화는 1931년에 발표한 Salomon[1]의 논문에 크게 영향을 받고 있다. 각 가공재료에 따라서 다르지만 절삭속도가 어느 일정한 곳을 넘으면 절삭온도가 내려가서 절삭저항도 저하되고 공구수명도 신장된다는 것이다. (Fig. 2-1)[1] 이 그림에서 보면 Non-Ferrous metal(철을 함유하지 않은)은 절삭속도 250m/min을 넘으면 최고 900℃의 절삭온도가 급격하게 내려가는 것을 알 수 있으며 Steel도 700m/min을 정상으로 절삭속도를 높이면 1,600℃의 절삭온도가 하강하게 되는 것이다. 이 원리를 이용하면 고속절삭이 유익하다는 것을 알게 되었고, 이 결과 Al 합금의 End Mill 가공에 응용되어 큰 성과를 얻게 되었고, 주축의 고속화에 박차를 가하게 된 것이다. 여기서 절삭속도란 공작물이 단위시간에 공구를 통과하는 거리이며 공구의 재료, 피삭재, 절삭유, 가공정밀도, 이송속도, 절삭깊이, 공구의 형상 등에 따라 다르다.

절삭속도 Vc(m/min)은 공작물의 지름D(mm)와 주축회전수N(rpm)에 따라

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000}$$

로 표시할 수 있다. 베어링의 성능을 비교할 때, D＊N으로 표시하는데 구라파에서는 더 정확하게 하기 위하여 dm(Pitch diameter)와 n(회전수)을 곱한 dm＊n으로 표시하고 있다.

Fig. 2-2에서는 고속절삭가공의 적용범위를 비교하였다.[2] Al-합금, Plastic, 비철금속은 절삭속도 1000m/min 이상, 4000m/min까지 적용되고 있음을 알 수 있으며 이 때 요구되는 주축의 회전수는(밀링 공구의 Dia가 10mm일 때) 3만rpm내지 12만rpm이 되어야 한다. 이와같이 종래에 없었던 엄청난 주축 회전수를 얻기 위해서는 여러 연구개발이 요구되었고 그것의 성공이 가능해지면서 고속절삭가공이란 새로운 가공기술이 발달되고 있으며, 차후 이 가공의 수요가 점차적으로 증대될 전망이다. 고속절삭의 잇점은

1) 가공시간을 단축시켜 가공능률을 향상 시킨다. 2) 절삭저항이 저하되고, 공구 수명이 길어진다. 3) 특히 End mill의 경우에는 절삭저항이 저하됨으로써 매우 얇은 가공물도 변형을 주지 않고 정밀도를 유지하면서 가공이 가능하다. 4) 표면조도를 향상시킨다. 5) Chip이 가공열을 가지고 제거되기 때문에 공작물에 열이 남지 않는다.

위와 같은 고속 절삭의 이점을 살리기 위하여 공작기계 주축의 고회전을 얻는 것이 중요하지만 거기에 따르는 여러 가지의 부수적인 문제를 해결해야 한다.

2-2 기술과제와 현황

고속절삭을 실현하기 위해서는 주축의 고속화를 위시하여 많은 기술과제가 존재하고 있으며 그것을 Fig. 2-3에 표시하였다.[3] 이 그림은 일반 절삭가공기술에도 적용되지만 특히 고속절삭가공에 있어서는 공작기계 계통의 주축, 공구홀더, CNC-콘트롤러, 이송장치 등의 관련기술과제의 해결만이 그 성공을 보증하게 되는 것이다. 다음은 기술과제중에서 중요한 것을 열거하기로 한다.

2-2-1 주축계

공작기계의 주축계에서 일반적으로 요구되는 항목을 정리하면 다음과 같다.

1) 정밀한 고회전 2) 고강성(정, 동, 열) 3) 고속운동 4) 고출력 5) 저소음 6) 광범위한 주축 속도의 범위 7) Maintenance free 8) 다기능(Orientation 기능,

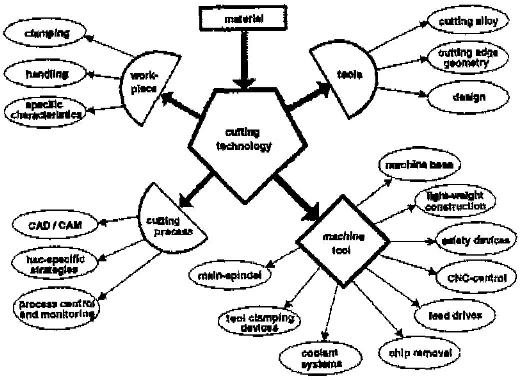


Fig. 2-3 절삭가공기술에 관련되는 여러 기술

회전이송기능, Sensing 기능) 9) 저마찰 Torque 10) 조립 분해의 용이성 11) 제작의 용이성 12) 확실한 Sealing 성능(기름 유출 방지) 13) 소형화 경향

공작기계 주축계에는 90%가 구름베어링을 사용하고 있으나 최대 사용한 회전수에 한계가 있어 회전수 10,000이 넘으면 자기베어링을 사용한다. 이 두 가지 베어링의 자세한 기술과제의 해결 방법을 후에 논하기로 한다.

2-2-2 주축이외의 기술과제

주축계에서는 Bearing 이외에도 수많은 기술과제가 있다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

1) 공구의 Clamp 기구:(원심력에 대한 대책, 공구 교환정도) 2) 원심력 대책:(원심력에 의한 주축의 팽창 대책) 3) 위험 속도 대책 4) 공구 교환에 따르는 동특성의 변화 5) 열변형 대책:(냉각법 Compensation 방법) 6) 주축계의 발란싱 7) 공구 교환 오차의 보정 8) 소형 저진동 고출력 모터 9) 기동정지의 고속화 10) 이송 구동계의 고속화 11) 칩(chip)의 처리 12) ATC의 고속화 13) APC의 고속화 14) 고속 CNC

2-3 구름베어링의 고속화

공작기계의 90% 이상이 구름 베어링을 사용하는 주축을 사용하고 있다. 구름 베어링에는 수많은 종류가 있으며, 그 특징이 각각 상이함으로 그 선택에 있어서 여러가지를 고려해야 한다. Fig. 2-4는 공작기계에 사용되는 베어링의 특징을 비교한 것이다.[4] 공작기계는 Radial과 Axial 방향에 힘을 받음으로 거기에 저항할 수 있는 베어링이어야 한다.

공작기계 Spindle에 가장 많이 사용되는 베어링은 Angular Contact Bearing, Cylindrical Bearing이며 보통 두개를 겹쳐서 복렬로 해서 사용하며, 중절삭용 공작기계에는 Taper Roller Bearing이 사용된다. 대부분의 공작기계에 쓰이는 주축은 중·저속회전 범위내에서 중절삭용 Spindle로써 Fe계통의 공작물을 가공할 목적으로 설계되어 있다. Radial하중은 복렬원통롤러베어링으로 Thrust하중은 두 열로 되어있는 Angular Contact Bearing으로 지지되어 있으며 저속 고 Torque로써 중절삭이 가능하다. 윤활은 Greese 방식으로 Greese교환이 불필요하며 Maintenance free이고 Spindle Housing의 발열은 보통 냉각을 시키지 못하여 고정밀 가공은 불가능하다. 회전수 $5000 min^{-1}$가 널리 사용되는 범위이다.

구름베어링을 고속으로 회전시킬려면 베어링의 구조, 윤활방법, 재료, Damper 등을 고려하여 종합적으로 검토해야 한다. 최근 Angular Contact Bearing에서 Ball만을 강철대신 Si_3N_4인 Ceramic으로 대치하여 소위 Ceramic Ball Bearing(Hybrid Bearing)을 개발하여 적은 Oil로 저마찰이 얻어지는 Oil-Air 윤활방법을 사용하여 고속 주축을 제작가능하게 하였다.[5],[6] 1984년에 최대 dm * n값이 약 100만이었으나 1986년에는 150만으로 비약되게 한 것은 Ceramic Ball Bearing의 역할이 컸다는 것을 알 수 있다. Ceramic Ball Bearing의 장점은,

1) Ball에 작용하는 원심력과 Gyroscopic 모멘트는 Ball의 밀도에 비례함으로 밀도가 적은 Ceramic구를 사용함으로서 베어링의 미끄럼 마찰에 의한 발열을 적

Type	1	2	3	4	5	6	7	8	Type	1	2	3	4	5	6	7	8
	●	●	○	●	○	◐	●	●		●	◐	○	–	●	◐	●	–
	●	●	◐	◐	●	◐	●	●		●	○	●	–	●	○	○	○
	●	●	○	○	○	○	●	●		●	●	○	◐	●	○	●	○
	●	●	○	●	○	○	○	○		●	◐	○	●	○	●	○	○
	●	○	◐	●	○	●	○	○		●	●	○	●	○	●	○	○
	●	○	●	–	●	◐	●	●		–	●	–	–	●	○	●	○
	●	○	◐	–	●	◐	●	–		–	●	–	–	●	○	○	○

Key
● Unrestricted use
◐ Restricted use only
○ Not usable
– Not applicable

1 Radial loading
2 Axial loading
3 Linear self-adjustment of bearing with both rings fixed
4 Linear self-adjustment by angled seating in bore or outer ring
5 Where dismantled bearings are necessary
6 Self-adjustment for misalignments
7 Available in ultra-precision ranges
8 Where abnormal speeds are expected

Fig. 2-4 그름베어링의 성능 비교

게 할 수 있으며 강철구를 사용한 것보다 수 10%이상의 고속 회전이 가능하다.

2) Si_3N_4의 탄성계수가 강철의 약 1.5배임으로 모든 것이 동일하다는 전제아래 동일한 Ceramic의 변위를 일으키는데에 강철구의 그것보다 약 1.2배의 Axial하중이 가해져야 함으로 강성면에서 우위에 있다. 따라서 회전계의 위험속도(Critical speed)를 높게 할 수 있다. 매우 적은 수 mm의 축경을 갖는 연삭 Spindle을 10만 이상의 회전으로 회전시켜야 할 때, 극한 회전속도를 올릴 수 있으며 축계의 고유 진동수에 관계되는 진동·음향의 개선을 도모할 수 있다.

3) 회전속도와 하중 Cycle을 실제 사용되는 머시닝센터와 동일하게 시뮬레이션하여 특수시험장치로 실험을 한 결과 회전 정밀도가 우수했으며, 주축의 마모와 같은 손상은 거의 볼 수 없었다. 따라서 Ceramic Ball Bearing이 회전 정밀도와 내구성이 우수하다는 결론을 얻었다.

2-4 윤활기술(Lubrication)

주축의 고속화를 위해서는 베어링 배열 및 주축 조립기술, 윤활기술, 구동기술, 냉각기술및 예압기술을 성공시켜야 한다.[5][9] 여기서는 여러가지 윤활방법에 대하여 논하고자 한다.

1) 오일에어 윤활

이 방법의 특징은 정량을 관리한 극소량의 Oil을 Air와 같이 베어링에 공급하는 방법이다. 베어링 속의 마찰 손실이 적어지고, Greese 윤활에 비하여 고속이면서 온도상승을 적게 할 수 있다.[8] 또, Air에 의한 냉각효과도 기대할 수 있으며, 주위환경도 깨끗하다. (Fig. 2-5)

Fig. 2-6은 오일에어 윤활 방법을 사용하고 있는 주

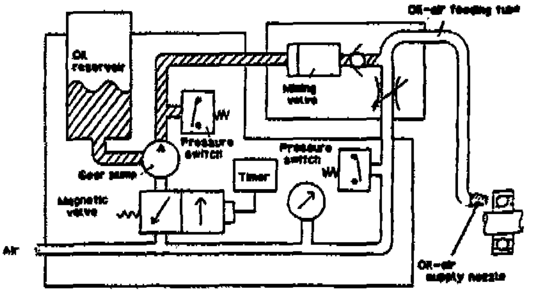


Fig. 2-5 Oil-Air 윤활 방법

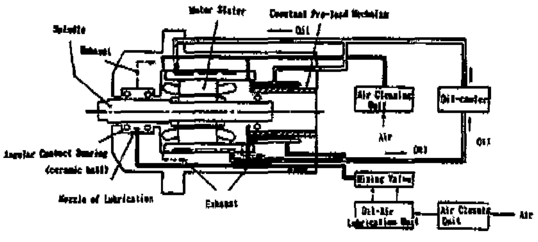


Fig. 2-6 Oil-Air 윤활방법을 사용한 주축

축을 소개하고 있다. 두 줄의 Angular contact 베어링이 절삭력을 지지하고 있으며 볼은 세라믹이고 내경(Inner Race) 및 외경(Out Race)은 강철로 만들어져 있다.

2) 젯트 윤활(강제윤활)

오일에어 윤활과 달리 대량의 윤활유를 베어링에 공급하는 방법이다. 이 방법은 냉각효과가 매우 높고, 정위치 예압일 때 dm*n값이 130*104 이상의 안정된 초고속회전이 가능하다. 이 윤활 방법은 탱크로부터 급유 펌프를 통하여 올라오는 윤활유를 유량 조정밸브로 제어한 유량을 주축의 각 베어링에 공급되게 하는 것이다. 윤활유의 점도가 낮을수록 온도상승과 소비동력이 적어지고 유온은 상온 또는 실온보다 0~3도 적은 것이 좋고, 베어링당 3~4 l/min의 윤활유량이 적당하다. dm*n값 270*104을 얻을 수 있다. (Fig. 2-7)

3) 언더레이스 (Under Race)윤활

이 방법은 젯트 윤활방법과 같이 젯트 엔진용 베어링의 윤활을 위해서 개발된 것이다. Fig. 2-8은 그 방법을 설명하고 있다. 이 윤활방법은 dm*n값 300*10^4 이상의 영역에서 유효하다. 또, Fig. 2-9에서는 볼의 재료(철 또는 세라믹)와 윤활 방법에 따라서 최고 도달할 수 있는 dm*n값을 비교하였고, 세라믹 볼을 사용한 베어링에 젯트 윤활 방법이 최고 300*10^4까지 올릴 수 있다는 것을 알 수 있다.

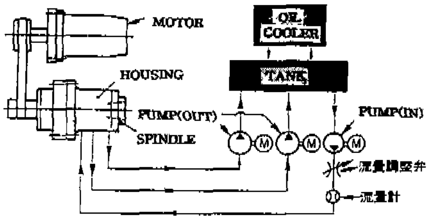


Fig. 2-7 Jet 윤활방법

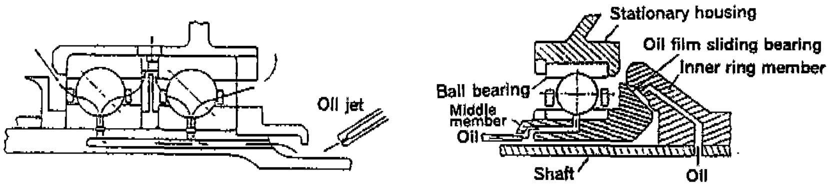


Fig. 2-8 Under Race 윤활방법

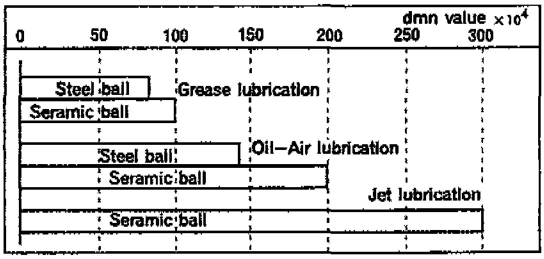


Fig. 2-9 베어링과 윤활방법이 미치는 주축 회전속도

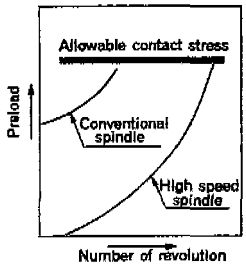
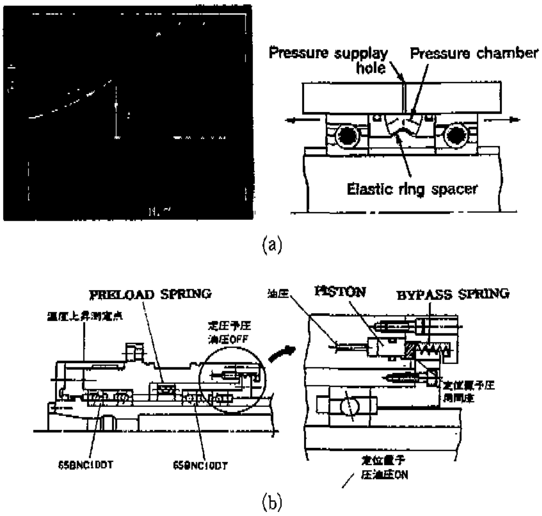


Fig. 2-10 예압과 주축 회전수 관계



(a)

(b)

Fig. 2-11 예압과 가변 교환방법

2-5 예압기술

베어링의 강성을 얻기 위하여 베어링에 예압을 준다. 정적 조건하에서 초기예압을 적게 주고 회전속도를 증가시키면 주축이 원심력에 의해서 팽창되므로 예압은 상승한다. (Fig. 2-10)[9] 이와 같이 예압이 계속적으로 상승하여 회전요소에 가해지는 표면 압력이 허용값 이상으로 올라가면 베어링은 파괴할 위험이 있으므로 초기 예압을 상당히 낮추어서 가하고, 회전속도가 어느정도 상승하면 예압을 내릴 수 있게 하고 또, 회전수가 올라가면 다시 예압을 저하시키게 하는 가변성 있는 장치가 개발되어 고속 주축에 사용되고 있다. 이 장치는 Fig. 2-11(a)에서 보는 바와 같이 W형 얇은링을 거쳐 가변적으로 압력을 가할 때 유압이 작용면에 가해짐으로써 예압을 조정할 수 있는 것이다. (Fig. 2-11(b))[5]

2-6 모터내장형 (Built-in motor)

범용공작기계에 사용되는 주축은 모터와 분리하여 벨트나 커플링을 사용하여 동력 전달하는 방법이 대부분이었다. 그러나, 주축이 고속회전할 때, 벨트와 커플링에는 회전 속도에 한계가 있으며 그 한계를 넘으면 파동적인 운동이 발생. 격심한 진동을 일으켜 모터 및 주축에 진동과 충격력이 전달되어 고속회전이 불가능하게 된다. 특히, 주축 시스템에 매우 적은 Misalignment이 존재하더라도 고속 회전 때는 진동의 원인이 되므로 새로운 주축 시스템을 생각하게 된 것이다.[10, 11, 12, 15] 그것이 AC모터를 직접 Spindle의 축에 부착시키는 방법 즉, Built-in Type Spindle(모터 내장형 주축)이다. (Fig. 2-12) 이 주축은 구조가 간단하고, 외부 구동에 따른 벨트 및 풀리등에 의한 진동문제, 고속 회전시의 벨트 파손등의 문제가 없으므로 정밀 및 고속 회전에 적합하며 또 모터의 권선절환방식이 채용되고 있어 저속에서 고속으로 회전시킬 수 있으므로 유연성을 요구하는 최근의 공작기계 특히 머시닝 센터, 터닝 센터 등 여러 기종에 활용되고 있으며, 그 수요가 증가되고

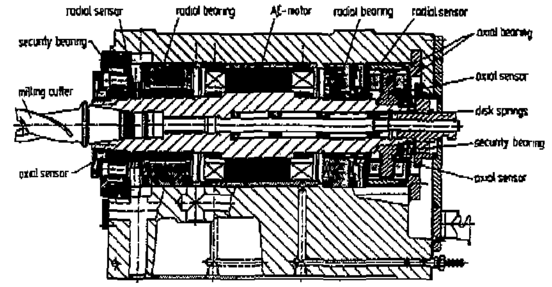


Fig. 2-12 Built-in motor

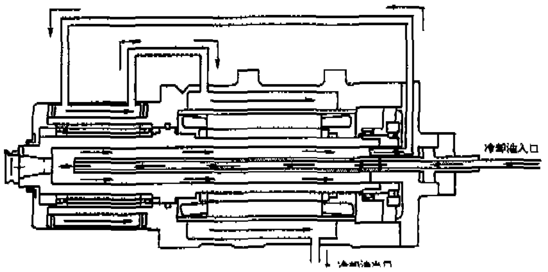


Fig. 2-13 Makino의 냉각 주축

있다. 그러나 "모터 내장형 주축"의 가장 큰 문제점은 가동시 모터에서 발생하는 열이다. 이 열은 열변형을 일으킬 뿐만이 아니라 베어링에 이상발열, 예압하중을 높게 하는 등 베어링에 손상을 일으키게 함으로 여러 연구기관에서 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구를 활발히 하고 있다. 주축 모터에서 발생하는 열을 모터 하우징부와 축내부에서 냉각하는 두 가지 방법이 있다. 일반적으로 모터 하우징에 냉각 자켓을 만들어 공기, 유 또는 물로 강제 냉각시키는 것이다. 이 방법은 설치가 간단하지만 추축의 외륜축만 냉각하기 때문에 모터의 Rotor및 축의 열 방출에는 효과적이지 못하고 베어링 내,외륜의 온도차를 증대시켜 고속회전을 불가능하게 한다.

최근에는 축과 하우징 사이의 온도차를 최소화시킬 필요가 있어서 축내부의 냉각방법을 사용하고 있다. 그 대표적인 것이 일본 MAKINO가 1992년 JIMTOF에 출품한 것이다.(Fig. 2-13)[2] 축내부에 냉각 자켓을 설치하여 외부에서 냉각유를 축내부에 흘려 보내어 냉각시키는 방법으로 일반적인 하우징에 냉각 자켓을 설치하는 것과 같다. 주축 외부를 냉각시킨다는 것은 외부 하우징을 수축시키는 반면 내륜에서는 발열과 원심력에 의한 팽창을 일으키기 때문에 바람직하지 못하며 이런 관점에서 볼 때, 축심 냉각방법은 매우 적합한 방법임에 틀림없다. 그러나, 공구의 클램핑기구가 내부에 있고, 여러 기능을 갖고 있어야 하며, 고속으로 회전하는 주축내에 냉각액을 공급하고 또 회수하기 위해서는 고도의 Sealing기술이 필요할 것이며 여러가지의 문제가 있을 것이다. 그러나, 이 방법은 열팽창에 의한 베어링의 예압 변화의 문제가 적어짐으로써 예압관리가 쉬워지고 지금까지 있었던 저속과 고속에 따르는 예압 교체장치 등이 불필요하게 되었다.

구름 베어링형 주축에 비해 "모터 내장형"주축은 여러가지 이점이 있고, 비접촉이기 때문에 수명이 길고 Rotor의 원심파괴 강도(매초 200m~250m) 축심 흔들림이 0.05㎛까지 가능하며, 저진동, 센서기능, Actuator기능, Autobalancing기능 등을 용이하게 실현할 수 있어 매우 주목을 받게한다. 그러나, 문제가 없는 것은 아니다. 가격이 높고 고속시 소음이 들리고, 국부의 냉각을 골고루 하기 힘들다는 것이다.

2-7 각종 주축의 비교

공작기계에 사용되는 주축의 설계에 있어서 고려해야 할 점은 주축의 회전속도, 베어링의 선정, 베어링의 윤활방식, 냉각방법, 주축의 구동방법 등이다. 전술한 바와같이 베어링의 윤활방식은 dm * n값을 파라메터로 하여 그 값이 올라갈수록 그리스윤활, 오일에어윤활, 젯트윤활로 구분할 수 있다. 일반적으로 주축회전 10,000min^{-1}이상인 경우를 고속주축이라고 부른다. 여기에 회전수가 5000, 12,000, 25,000인 세 개의 주축을 선택·주축테이퍼, dm * n값, 베어링의 배치, 예압, 냉각, 출력, 토르크, 구동방식 등을 비교하였다.(Table 1)[7] 고속일수록 툴 홀더(Tool Holder)의 Taper가 내려가고 있으며, 고속주축에는 세라믹 볼을 사용하는 것을 알 수 있다. 회전수에 따라 윤활, 냉각, 구동방식도 크게 달라지는 것을 알 수 있다. Table 1과 Fig. 2-14 (a),(b),(c)에서 보는 바와 같이 고속일수록 구동장치가 간단해지고 있다. 범용주축일 때는 몇 단계의 치차를 거쳐 구동을 하며 고속주축(A)는 벨트로 모터와 연결시키고 있는데 반해 25,000회전의 "모터 내장형"은 주축에 모터가 부착되고 있다. 이 주축의 특징은 예압 가변기구를 구비하고 있다.

2-8 직선운동의 고속화

공작기계의 고속화는 주축을 고속화하면 끝나는 것이

Table 1 저고속 주축의 성능 비교

	범용주축(a)	고속주축(b)	고속주축(c)
주축테이퍼	NT50	NT40	NT30
최고회전수 RPM	5,000	12,000	25,000
dm * n값	50 * 10⁴	78 * 10⁴	112.5 * 10⁴
베어링 배치	앞:복렬원통볼+앵귤러볼2열 중:복렬원통볼 후:단열원통볼	앞:앵귤러볼4열 후:복렬원통	앞:세라믹 앵귤러볼2열 후:세라믹 앵귤러볼2열
베어링예압	정위치	정위치	정위치/정압교체
윤활방법	그리스	오일, 에어	오일, 에어
냉각방법	하우징 외주를 강제유냉	하우징 외주를 강제유냉	하우징 외주와 모터스테터 외주를 독립 강제 유냉
출력 kW	22/15	7.5/5.5	15/11
토르크 kg * m	67/47	2.4/1.8	1.0/0.7
주축구동구조	2단계 변속 치차	Belt 구동	Built-in motor 직접 구동
가공분야	일반 부품의 중저속 중절삭	A1 주물의 소물품 경절삭	항공기 부품 고속, 고마력 절삭

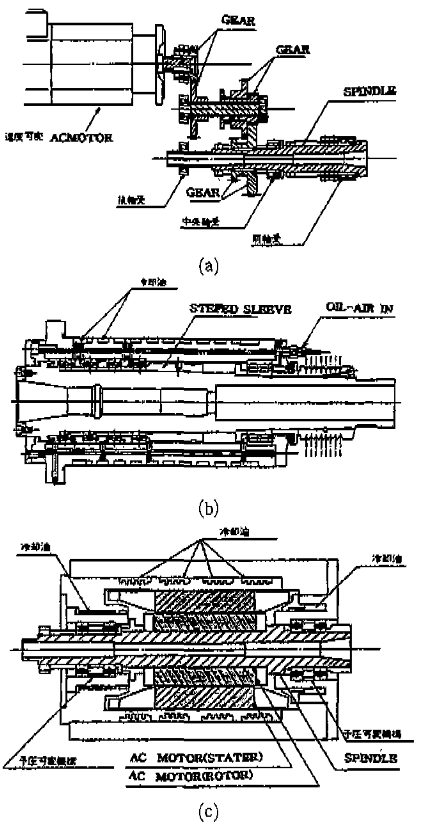


Fig. 2-14 저고속 주축의 설계비교

아니다. 많은 사람들은 아직 공작기계의 고속화가 고생산성을 얻는데 그 목적이 있는 것을 알지 못한다. 고생산성은 곧 재료의 절삭량(Metal removal rate)을 높여 생산시간을 단축시키고, 품질을 향상시켜 생산가를 저하시키는데 있다. 따라서, 고속화는 주축의 회전을 높이는 것만으로는 아무 의미가 없고, 이송속도도 빨라지고 또, 그 빨라진 운동을 충분히 콘트롤할 수 있는 CNC가 있어야 비로소 고속화가 성공했다고 볼 수 있다.[13] 최근 금속절삭가공에 있어서 Fig. 2-15[3][14]에서 보는 바와같이 절삭속도와 그 이송속도를 세 개의 재료 그룹으로 나누어 표시하였다. 프라스틱에서는 최대 절삭속도가 8000m/min, 이송속도가 45m/min이고, 경금속이 5500m/min에 20m/min인 것을 알 수 있다. 고속화는 이 범위내의 가공을 차질없이 해야하며 따라서, 공작기계는 기술면에서 완벽하게 이 문제를 해결해야 한다.

Fig. 2-16(a)의 밀링머신에서 주축과 가공물이 X, Y, Z 세 방향으로 직선운동을 하게하는 가이드웨이(Guideways)를 표시하였다. Fig. 2-16(b)에서 볼 수 있는 것은 CNC선반의 베드 위에서 미끄럼 직선운동을 하게 하는 Guideways를 볼 수 있다. 이 Guideways 문제는 주축문제와 더불어 공작기계공학에 있어서 핵심적인 연구과제로 많은 개발이 성공했고, 실용화되고 있으며, 앞으로도 계속적인 개발연구가 기대되고 있다.[4]

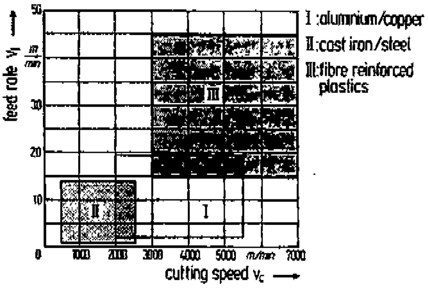


Fig. 2-15 여러재료의 고속 절삭 속도와 이송 속도

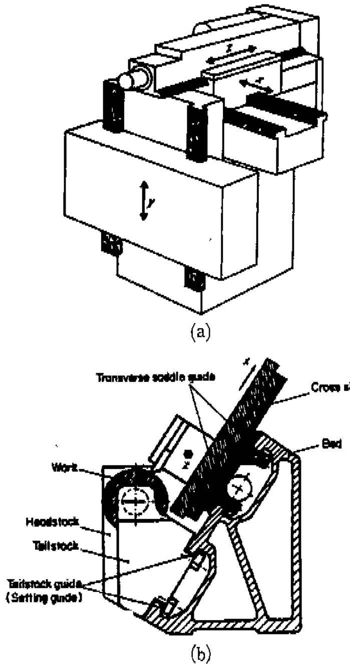


Fig. 2-16 공작기계의 Guideway의 구조

2-9 볼스크류의 고속화

공작기계의 이송운동은 베드위에 놓여 있는 안내면이 Nut와 연결되어 있고, Servo-motor의 회전운동이 볼스크류(나사)와 짝지어져 있는 너트(Nut)를 좌우로 직선운동시킴으로써 너트가 같이 좌우로 이동하게 된다.(Fig. 2-17)

최초의 볼스크류는 1874년 미국에서 특허출원된 이송 Unit로써, 일본에서는 1930년에 실용화되었고, 우리 나라에서는 1978년 통일(주)에서 개발·생산을 시작하였다. 볼스크류는 나사축과 너트사이의 볼이 회전접촉으로 높은 효율을 가지며 Feed screw(4각나사)와 비교하여 약 $\frac{1}{3}$정도의 Torque가 요구된다. 직선 이송장치의 구동·전달 요소에는 여러 종류가 있으나 그 중 볼스크류를 사용하는 이송장치가 가격측면, 장기간의 작동 안전성, Stroke, 강성, 부하용량, 속도에 대한 대응성, 용이한 제어성등 많은 특징이 있으므로 NC공작기계, 로보트 등의 핵심 부품이 되고 있다.[16][17]

최근 각종 기계의 이송속도가 10년내에 2~3배 가량 상승되고 있으므로 볼스크류에 대한 고속화가 요구되고 있으며 그것에 대한 과제를 다음에 기술한다.

1) dm * n과 위험속도(Critical speed)

통상 dm*n값이 70000이하로 잡고 있다. 그 주 요인은 순환부에 있는 볼을 감싸고 있는 외통의 강도에 기인하고 있으며, 특별히 순환부 설계를 개량하면 14,000까지 가능하다. 그러나, 회전수를 올리면 새로운 위험속도, 온도상승, 수명저하, 소음발생, 진동문제가 발생하여 여기에 적절하게 대응할 수 있는 리드(Lead)가 큰 볼스크류가 요구된다. 현재는 축경과 리드를 거의 동일하게 하는 것이 보통이다. 축경에 대하여 리드를 크게하면 너트의 정밀가공이 어려워진다. 새로운 볼스크류는 리드를 축경의 1.7배로하여 제작하고 있다. 이와 같은 볼스크류는 너트를 콤팩트하게 해야하며 고속시 축의 회전 밸런스와 부하 밸런스를 고려하여 3줄로 된 나사가 개발되었다. CNC 프레스용으로 60m/min의 고속 이송속도를 얻게 되었다.

고속회전에 사용할려면 관성 모멘트(Inertia moment)때문에 축경을 될 수있는대로 적게 잡아야 하지만 이 경우 위험속도(Critical speed)의 문제가 야기된다. 위험속도는 나사의 양축을 지지하는 베어링의 지지구조와 밀접한 관계가 있다. 고속회전을 위한 구조는 Angular Contact 베어링 두개로 각각 양축에 지지시키는데 모터 쪽에는 고정 지지 베어링을, 자유축에는 단순 지지 베어링을 사용하여(반고정 방법) 온도가 상

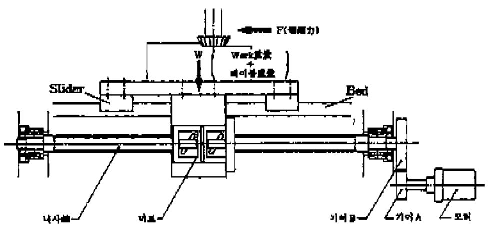


Fig. 2-17 Ball Lead Screw에 의한 이송장치

승하더라도 축의 신장을 흡수하게 하는 것이 유익하다는 것이 증명되었다.

2) 진동·소음 문제

볼스크류의 진동·소음 문제는 ①볼스크류 자체에 기인하는 경우, ②기계의 특성에 원인이 있는 경우, ③기계의 타 요소에 의해서 발생하는 경우가 있다.

첫째의 경우는 볼스크류 구조상 순환부가 있으며, 이것이 불연속부의 성격을 가진다. 볼이 여기를 통과할 때, 스프링 특성이 변동하면서 진동이 발생한다. 또, 순환 튜브속에서 볼들이 상호 충돌하여 소리를 낼 수 있다. 대책으로서는 볼을 도입하는 부분을 매우 Smooth하게 설계하거나, 볼의 직경을 적게하는 방법이 있으며, 후자가 비교적 효과를 얻고 있는 실정이다.

둘째의 경우는 볼스크류를 부착함에 있어서 조립정밀도가 문제가 된다. 베어링 하우징(Housing), 너트 하우징 및 안내 부품등이 상호 Alignment가 완전치 못할 때, 너트의 이동에 따라서 베어링과 볼나사 내에서 일어나는 부하의 변화를 크게하여 전체 시스템의 강성도 점차 변화시키며 결국은 공진 현상이 일어나고 특정 너트 위치에 오면 기복형의 파장음을 발생시킨다. 셋째의 경우는 이송장치에는 볼스크류 이외에 지지 베어링, Coupling, Gear, Timing-belt, 모터 등이 포함되고 있다. 이와같은 외적인 원인에 의해서 진동이 발생하는 경우가 허다하다.

상술한 바와같이 바람직하지 못한 현상을 제거하기 위해 여러가지 측정 장치가 개발되어 연구가 진행되고 있으며, 그 해결을 위하여 노력하고 있다. 최근의 문헌[17] 을 보면 "3배의 리드 볼스크류"를 개발하여 고속 공작기계용 볼스크류가 40~60m/min의 이송속도를 얻을 수 있게 되었다. 리드를 축경의 3배 이상으로 크게 잡고 2조 나사로 되어 있으며 리드 각이 45°이고 볼경을 최소로 하여 강성을 높이고, 소음 제거를 성공시켜 고강도의 순환로와 Groove설계가 적용 되었으며, 착실한 기초 연구와 그것에 기인하는 최적 설계를 하여 고속화에 대응한 것이다.

최근 연구[17]를 보면 볼스크류의 축이 Hollow(중공)으로 되어 있는 것만 만들어 그 속에 가느다란 바를 삽입시킴으로써 축본체가 진동할려고 할 때, 삽입된 바가 연성되어 진동하고 축본체와 충돌함으로써 감쇄를 주게 되어 진동을 감소시킬 수 있다. 이와 같이, "Damper"가 적용됨으로써 소음도 제거할 수 있었다.

3) 열팽창 대책

고속화가 되면 볼스크류의 온도상승과 열 변위를 크게 한다. 온도상승을 억제하려면 발열량의 억제와 냉각능력을 향상시키는 것이 필요하다. 발열량을 볼리드스크류 관점에서만 볼 때, 마찰토르크와 회전수의 곱하기로 생각할 수 있다. 마찰토르크를 낮추기 위해서는 예압과 적절한 윤활방법을 써야한다. 온도상승은 회전속도의 약 0.5승으로 비례한다. 따라서, 리-드를 크게하고, 회전수를 적게 하는 것이 열 변위에 대하여 유리하다. 이미 중공(Hollow)리드스크류에 강제 냉각한 연구가 보고되고 있으며, 고속화의 진전에 중공 냉각 볼스크류의 사용이 확대될 것을 예측할 수 있다.

2-10 안내면(Guideway)의 고속화

직선이동 운동은 베드와 같은 기반위에 미끄러지는(Sliding)이동 부분으로부터 이루어진다. 이 두 부분의 접촉운동 상태가 매우 중요하며, 그 성질을 규명하여 어떻게 하면 두 부분을 효과적으로 작동할 수 있을까 하는 문제가 여러 연구를 통하여 규명되고 있다.

Fig. 2-18에서 보는바와 같이 공작기계에 있어서는 Hydrodynamic, Hydrostatic 그리고, Rolling의 세가지 방법을 사용하고 있다. 이것은 더 나아가서 공기정압 Slide, 자석 Slide를 추가해서 고려할 수 있으나 공작기계에서 제일 많이 사용되는 것이, Linear rolling guide(직선 롤러 안내면)이다. 이 안내면의 구조를 보면,

1) Slider 또는 전동체의 현상(볼 또는 로라) 2) Rail(고정축)의 형상 (각형레일, 이형레일, 원통축, 이형축등) 3) Stroke의 한정(유한스트록, 무한순환)등의 여러가지로 분류할 수 있다. Fig. 2-19는 Linear rol-

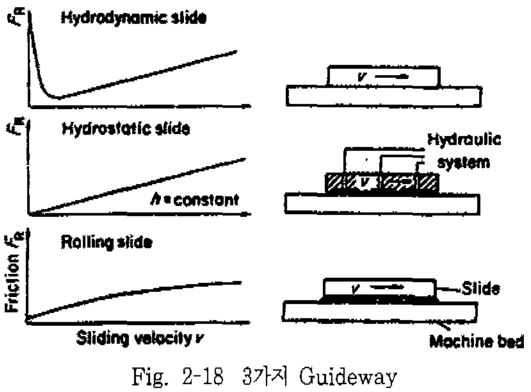


Fig. 2-18 3가지 Guideway

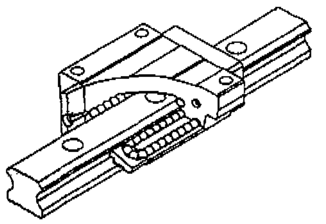


Fig. 2-19 Linear Rolling guideway

ling guideway(볼순환식 회전직선 안내)이다. 볼은 4줄로 되어있는 Rail(고정축)과 직선운동을 하는 Block과 볼을 그 속에서 순환시키는 Box로 되어있다.

이 Linear rolling guide는 직선운동 속도면에서 보면 순수한 Sliding 안내면보다 마찰계수가 1/50~1/100보다 적기 때문에 Strick-slip이 발생하지 않고 이송속도도 크게 향상시킬 수 있다.[18] 그러나, Hydrostatic(유정압), Aerostatic(공정압), Linear motor(LSM)로 되어 있는 안내면이 이송 속도는 월등이 우수하다. 여기서 전술한 Hydrostatic, Aerostatic guideway에 대해서는 다른 기회에 논하기로 하겠다. Linear rolling guideway의 고성능을 위해서는 다음과 같은 대책이 필요하다.

1) Anti-Friction

고정도 위치 결정을 위해서는 Lost-motion을 적게 해야 한다. 그 중요 요인은 구동계의 강성, Space등이 있으나 마찰의 변동이 제일 큰 원인이다. 그렇게 하기 위한 Roller와 Rail과의 접촉 방법에 대한 개발이 필요하다.

2) 강성

기도대와 Block groove간의 Space에 삽입된 볼의 직경을 변동시킴으로서 예압량을 변화시킬 수 있다. Guideway의 강성은 전동체인 볼의 탄성변위 량에 의해서 결정되는 경우가 크다. 예압량을 조정함으로서 최적의 강성을 얻을 수 있으며, 선반이나 밀링머신의 안내면을 얻을 수 있다.

3) 운동정도

볼이 고탄성체임을 고려하여 직선 안내면에 탄성체를 운동방향에 다수 나열시켜 4줄의 구속구조를 만들면 정압 안내면과 유사한 구조가 됨으로 운동 정도를 얻을 수 있다. 안내면의 직선 운동에는 1축 테이블일때 Yawing(한쪽으로 흔들림)과 Pitching(경사진다)의 오차가 발생하지만 현재 사용되고 있는 공작기계의 경우 다같이 그 오차가 0.5㎛/110mm이내가 표준임을 알게 되었다.

4) 평균화 효과

Rolling 안내면은 다축구속의 안내구조가 형성되어 있어 직선 안내가 베이스나 조립정밀도에 일어나는 진직도, 평면도, 평행도 등의 Misalignment를 평균화하여 흡수하는 정도 즉, 평균화효과가 일어난다. 이 효과의 양은 Misalignment의 길이, 안내면의 예압, 다중구속수에 따라서 상이하다. 이상과 같이 안내면의 정밀도가 복잡한 파라메터에 의해 결정되며 그 운동속도는 볼리드스크류의 회전속도에 의해 좌우된다.

2-11 Linear motor에 의한 고속 이송

공작기계의 고속 이송 장치로서 Linear motor를 사용할 수 있다라고 하는 생각은 독일의 Ex-Cell-O 회사나 미국 Ingesol사가 최초이고, 일본의 회사가 아니었다. 미국의 Anorad사와 제조·판매 계약을 체결한 일본 FANUC사가 최대 출력 6000N의 Linear synchronize motor(LSM)을 출품 하였다.[19] 그 기능을 보면,

최대출력(N)			:6000
연속출력	냉각없이	(N)	:2129
	공냉(AC)	(N)	:2555
	수냉(WC)	(N)	:4259
가동 Slider질량 (수냉시)		(kg)	:34
Unit의 폭		(mm)	:210
Unit의 길이		(mm)	:777

다른 회사에서 개발한 것을 보면,

최고속도	(m/min)	:180
최대가속도	(m/S^2)	:50
지령단위	(㎛)	:2

종래의 볼리드스크류에 의한 이송 속도는 최고 30m/min이고, 가속도는 0.3G(1G=9.8㎨)인 것에 비하면 월등한 이송 속도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며, 1994 JIMTOF에서 Linear motor를 사용하는 공작기계를 전시하여 많은 주목을 끌게 하였다. LSM의 원리는 Fig. 2-20에서 보는 바와 같이 영구자석 N과 S의 자극을 고정축에 순번으로 나열한다. 영구자석은 Nd-Fe-B의 성분으로 된 것을 사용한다. 1차 Coil선은 3상이고 대응하고 있는 자극의 위치에 따라서 3상의 정류 이상을 Pulse 복변조(PWM)제어로 Shift시킨다. 그러면, Fleming 왼손의 법칙에 의해서 그림과 같이 추진력이 연속적으로 얻어지는 것이다. 연속추진력에 냉각이 없는 것과 공냉, 수냉과 상이한 이유는

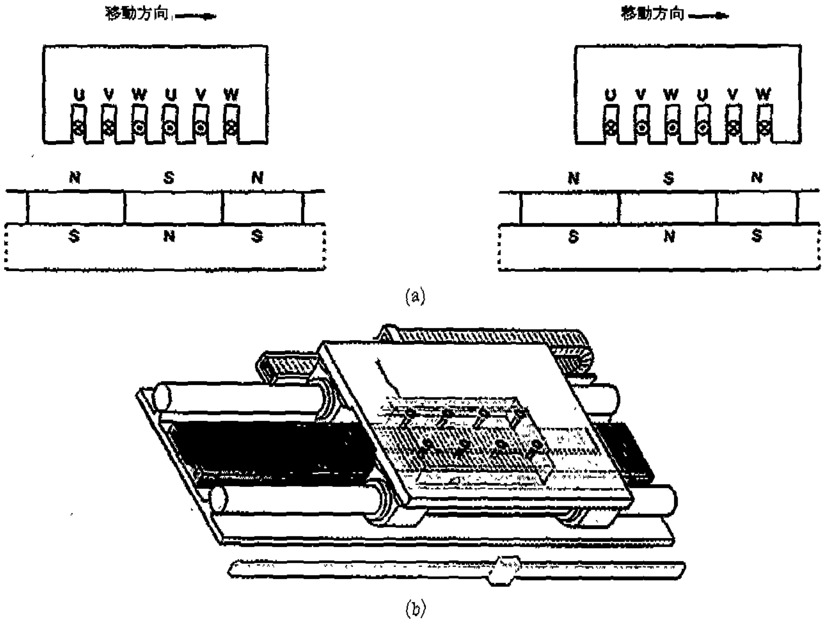


Fig. 2-20 Linear motor의 구동원리

Slider의 1차 Wiring선의 대열성에 한도가 있기 때문이다.

Linear motor의 장점을 열거하면[20]

1) 볼리드스크류의 5배이상인 150m/min의 고속 직선운동 속도를 얻을 수 있으며 2) 강성을 높게할 수 있으므로 높은 운동 정밀도를 얻을 수 있으며 3) Maintenance free이기 때문에 고장 수리가 불필요하며 4) 운동거리의 한계가 없으며 5) 여러 안내면을 동시에 작동시킬 수 있고 6) 청결하고, 진공된 장소에 적합하며 7) 소음이 적고, 구조가 간단하다.

결점으로서는,

1) 안내면을 상승시킬 때는(Z-Axis)중력이 가해지기 때문에 Counterbalance가 필요하고 2) 부하변동을 조정하기 어렵고 3) Magnetic을 노출되게 하기 때문에 높은 자력을 접하게 하고 4) 또 자력의 적은 분말이 발생한다.

다음 Linear motor(LSM)와 볼스크류의 성능을 비교하면 다음 Table 2와 같다.

Table 2 볼리드스크류와 Linear motor의 성능 비교

	Ballscrew	Linear(motor)
Max Speed	0.5m/s(30m/min)	2.5m/s(150m/min)
Max Accel	0.5~1G	2~10G
Static stiffness	9~18t/mm	7~27t/mm
Dynamic stiffness	9~18t/mm	16~21t/mm
Settling Time	100ms	10ms
Max force	26,700N	9000N/coil

2-12 고속화에 따르는 Tooling

Fig. 2-21에서 보는 바와 같이 주축을 고속으로 회전하면 원심력에 의해서 Tool Holder가 Radial방향으로 Expansion되고, Axial 방향으로 Mismatch(빠져나온다)가 되어 가공을 지속할 수 없게 될 것이다. 이 문제는 다음 논문에서 자세히 논할 것이다.

2-13 고속화에 따르는 CNC System

주축이 수만 RPM으로 상승하고, 이송속도가 종래의

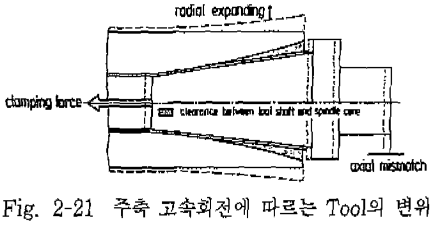


Fig. 2-21 주축 고속회전에 따르는 Tool의 변위

5배 이상으로 빨라져서 공작물이 고속으로 가공될 때 콘트롤은,

1) Data가 고속으로 transfer되어야 하고 2) Micro-segments가 고속으로 processing되어야 하며 3) Curvature를 사용하여 자동적으로 Speed가 control되어야 하며 4) 가속·감속이 유연하게 되어야 하며 5) Interpolation(보간)하기 전에 가속·저속이 Control 되어야 하며 6) 미세한 interpolation이 되어야 한다.

이 CNC-control의 문제는 다음 논문에서 자세히 논하기로 하겠다.

2-14 결 론

1. 금속 절삭의 고능률화는 주축의 고속회전뿐만 아니라, 고속이송속도, 고속공구 교환속도 그리고 CNC의 고속처리에 적용되어야만 가능하다.

2. 볼 베어링을 사용하는 주축에는 회전속도에 제한이 있으나 볼재료를 철대신 세라믹으로 개량함으로써 dm * n값을 300 * 10^4까지 얻을 수 있다.

3. Oil-Air, Jet 윤활 방법이 고속회전에 매우 유익하다.

4. 냉각을 잘한 Built-in motor type 주축이 고속회전에 적합하며, dm * n=110 * 10^4(25,000rpm)의 고속을 용이하게 얻을 수 있다.

5. 베어링에 대한 예압(Prelood)이 중요하며, 일정고회전에 도달하면 예압 교환장치를 사용하여 예압을 줄임으로써 베어링의 안전을 얻을 수 있고 회전을 더 높일 수 있다.

6. 이송장치에 중요한 볼리드스크류는 개량면 30m/min의 이송 속도를 얻을 수 있다.

7. 그러나 Linear 모터를 사용하면 150m/min까지 이송속도를 올릴 수 있다.

8. 공작기계의 고속화는 기술적으로 시작단계이며, 앞으로 더 많은 연구와 개발이 요구된다.

참고문헌

1. C.Salomon. German Patent No.523594 1931.
2. 清水 伸二 "高速切削加工のために要素技術" 應用機械工學, pp.62-67 1992.7
3. H.Schulg "Current State of Art Concerning HSC-Machine-Tools" Proceedings of the 5th International Machine Tool Engineers Conferance(IMEC), Japan Machine Tool Build. Assoc(JMTBA), pp.117-130, 1992.
4. M.Weck "Handbook of Machine Tools" Vol.2 John Wiley & Sons
5. 田島清和 外 "スピンドル 高速化技術の動向" MACHINIST pp.58-63, 1989-11
6. 正田 義雄 "工作機械主軸用 セラミック轉がり軸受の技術動向" MACHINIST Vol.32, No.1, pp.34-37, 1988.
7. 竹原 幸治 "MCにおける 高速切削技術の 標準化と切削效率" 應用機械工學, pp.74-79, 1990.7
8. 近藤 英夫 "オイル&エア潤滑, 高周波モ-タで 高速高精度おはかる" 應用技械工學, pp.76-81, 1985.8
9. K. Watanabe. "Examples of High-Speed Spindle Design and Balancing methods" Proceedings of the 6th International Machine Tool Engineers Conference (IMEC), Japan Machine Tool Build Assoc. (JMTBA) pp.141-153, 1994.
10. U.Ronde "Drehmaschinen mit Hohlwellen-Motoren" Werkstatt und Betrieb 126, pp.561-566, 1993. 9
11. M. Satoh "Structual Design of Advanced Machining Center" 4th IMEC, JMTBA, pp.22-34, 1990.
12. 머시닝센터용 초고속 주축 유니트 개발(2) 한국기계연구원, 과학기술처, 1993.
13. J.R.Coleman. "No-Myth High-Speed Machining" Manufacturing Engineering, Oct, pp.61-64, 1992.
14. U. Ronde, etal. "Fertigung mit Motorspindeln" Werkstatt und Betrieb 125, pp.113-122, 1992. 2
15. "1~4万RPMで 長時間, 高精度加工" NIKKEI MECHANICAL, pp.25-29, 1994. 12. 12.
16. 江口 省悟 "高速送り機構における ボ-ルねじの對應" MACHINIST Vol.32, No.1 pp.38-, 1988.
17. 山口 利明 "ホ-ルねじの高性能化技術" 精密工學會

誌 Vol. 61, No. 3, pp. 333-338, 1995.
18. 輿石宏 "轉がり直動案內の高性能化とろの應用" 精密工學會誌 57/4, pp. 11-16, 1991.
19. "高速送りの切り札として急浮上" NIKKEI MECHANICAL, pp. 20-24, 1994. 12. 12
20. 莉田充二 "リニアモータにおける高性能化技術" 情密工學會誌 Vol. 61, No. 3, pp. 347-350, 1995.