

# 특 집

## 고속 공작기계용 자율대응 주축계 개발



신 동 환

□(주) 성림  
□sdh77@sungrim.co.kr



김 이 니

□(주) 성림  
□kimleenee@hanmail.net



손 현 수

□(주) 성림  
□hsson@sungrim.co.kr

관심 분야

■메카트로닉스 응용 분야

■CAD/CAM

■기계구조 메카니즘 해석 및 설계

### 1. 개발 배경

#### 1.1 기술 개발의 필요성

CNC공작기계에서 고속화와 고 능률화 가공은 시대를 초월해서 언제나 요구되어온 과제이며 현실적으로 머시닝센터를 위시한 공작기계의 고속화가 급속히 진전되고 있는 것이 세계적인 기술추세이다. 최근 일본 국제공작기계전시회(19th JIMTOF)에 출품되었던 공작기계의 현황을 보면 주축회전속도 15,000rpm이상의 머시닝센터가 60%이상을 차지하고 있고, 이중에 주축회전속도 70,000rpm, 이송속도 60m/min이상의 공작기계도 다수 출품되어 선진국의 기술우위를 겨루는 장이 되기도 하였으며, 이를 토대로 국내의 공작기계 기술수준을 끌어올릴 때 국산품 국제경쟁력 강화를 위해서는 기술개발에 박

차를 가하지 않을 수 없는 상황이 되어가고 있다.

고속가공은 종래에는 알루미늄이나 합금과 같은 연질금속의 고속, 고능률 가공에 주안점을 두어왔는데 최근에는 주철과 철계 재료의 고속, 고능률 가공과 금형용 그래파이트 및 섬유강화 플라스틱(FRP), 그리고 항공기용 내열합금 등의 가공에 종래 이상의 고속, 고능률가공을 필요로 하고 있으며 알루미늄 등의 경금속 부품의 증가, 정밀부품의 소경가공 및 박육 Rib 가공의 증가, 금형의 고효율 성력화를 위한 고속 가공기술의 증가 등 질적효율을 향상시킨다는 측면에서 필요성에 대한 요구가 확대되어 가고 있다.

일반적으로 공작기계의 고속화는 주축, 이송계에 대한 연구가 주요 대상이 되며 세라믹베어링과 직선베어링 안내방식의 개발, 오일에어 윤활이나 오일 젯트 윤활의 채용, 모터와 제어기술의 발전 등에 힘입어 최근 수년간 크게 진전되어 왔다. 즉 대부분의 경

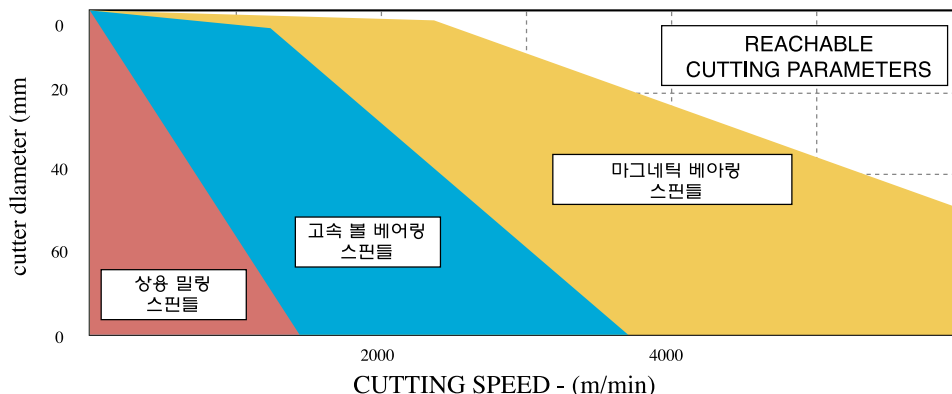


그림 1. Reachable Cutting Parameters

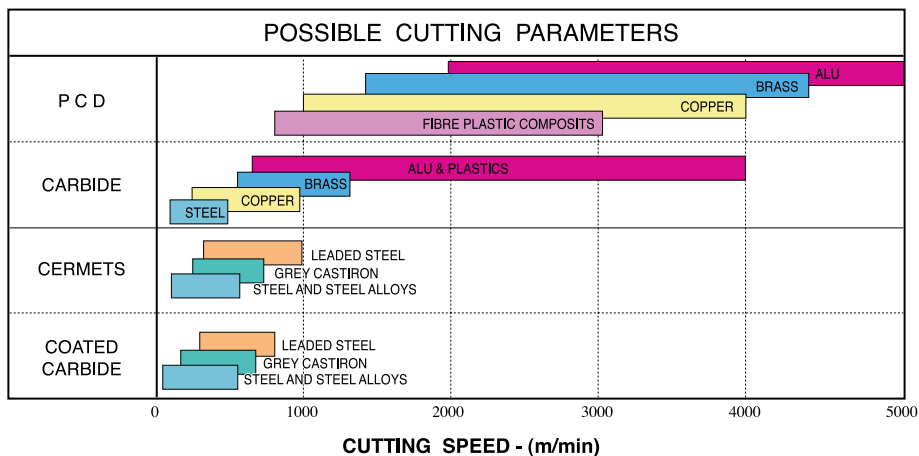


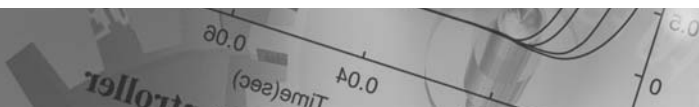
그림 2. Possible Cutting Parameters

우 회전축계에 사용되는 베어링은 Steel Ball Bearing으로서 윤활조건을 고려하여 저속에서 고속 영역까지 사용되고 있고 근래에 Ceramic Ball Bearing이 보급되면서 고속영역에서도 사용될 수 있도록 하고 있다. 그러나 구름베어링은 회전속도를 고속으로 높일수록 상대적인 원심력이 증가되어 베어링수명 단축을 가져오기 때문에 고속회전에는 한계(최대DmN値160만)가 있다. 따라서 이에 대한 대체 방안으로서 磁氣浮上力을 이용한 베어링방식이 각광을 받고 있으며, 즉 마그네틱베어링을 이용하면 초고속 영역까지 높일 수 있는(최대DmN値400만) 장점을 갖게 되므로 최근 들어 각국에서는 이의 활용을 위한 기술개발이 매우 활발한 상태에 있다.

또한 공작기계의 고속화와 더불어 다양한 가공환경

과 고정밀도, 고효율을 극대화시킬 수 있는 지능화의 요구가 증대 되고 있는 상황이며, 이는 전자 제어산업의 발전에 힘입어 빠른 프로세스타임을 갖는 연산 장치가 가능해지고 인간의 지능에 가까운 제어방법이 개발되면서 공작기계 및 가공공정의 지능화는 급속도로 진행되고 있고 그러므로 수년 후의 고속 고효율 공작기계는 이러한 기능이 보유된 지능화된 기계들이 각광을 받을 것이다.

공작기계의 지능화를 위해서는 전체 가공프로세스를 담당하는 컨트롤러의 지능화가 필요하지만 이에 적절히 대처할 수 있는 유연한 요소들이 필수적이다. 즉 수동적인 소자만을 갖는 요소보다는 능동적이고 제어 및 상태감시, 보정이 가능한 요소들로 구성된 기계가 더욱 지능화가 수월하다 할 수 있다.





가공프로세스에 있어 주축계가 자율 대응적인 구조로 되어있다면 다양한 환경, 특히 고속가공에서 발생하는 여러 환경변화에 능동적으로 대처할 수 있기 때문에 가공의 안정성 개선은 물론, 정밀도와 효율을 극대화시킬 수 있다.

1.2 마그네틱 베어링의 특징

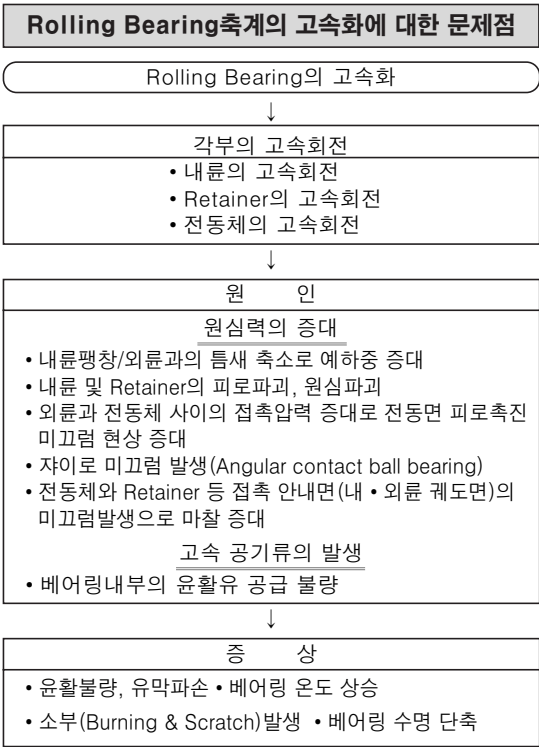


표 1. 베어링 종류에 따른 주요특징

종류 항목	구름 베어링	動壓流體 베어링	靜壓流體 베어링	靜壓空氣 베어링	磁 氣 베어링
高速 回轉性	△	○	△	△	◎
回轉 精密度	△	○	◎	◎	○
負 荷 容 量	◎	○	◎	△	○
剛 性	◎	○	◎	△	○
減 衰 比	×	◎	◎	△	○
發 熱	○	×	×	×	△
壽 命	×	○	◎	◎	◎
保 守	○	○	○	△	○
周速度(m/s)	40~60	50~80		200	

(注 : ◎특히 良好, ○良, △普通, ×不良)

■ Rolling Bearing의 고속화에 대한 한계점 :

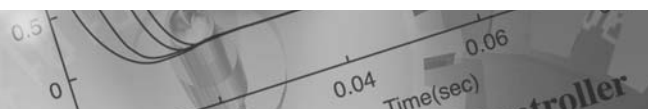
- Grease윤활 : Dm치 60만(보수유지 용이)
- OIL-mist윤활 : Dm치 100만  
(냉각효과 양호, 환경오염 大)
- Air-oil윤활 : Dm치 120만 (냉각효과 우수)
- Zet윤활 : Dm치 160만  
(냉각효과 大, 동력손실 大)  
(평가지표=윤활방법에 따른 Dm치)

**Magnetic bearing system의 장점**

- ◆ 비접촉에 의한 이점
  - 피로 및 마모가 없다.
  - 무윤활이다.
  - 회전체의 원심력 파괴 한도까지 고주속이 가능하다.
  - 小소강판의 경우 허용주속200m/sec(DmN值400만)
  - 마찰손실이 적고 진공중에서는 Zero에 가깝다.
  - 극저온, 초고압, 초진공 등 극한환경에서 사용가능 함.
- ◆ 제어형에 의한 이점
  - 축 중심에 대한 고정도, 고강성을 유지할 수 있다.
  - 동강성(강제진동 및 고유진동) 제어가 가능하다.
  - 자동Balancing 기능이 가능하다.
  - 전류제어로 베어링에 부가되는 외력(절삭력)의 측정이 가능하다.

**2. 국내 · 외 관련기술의 현황**

최근의 고속가공의 요구증가에 따라 회전기계(Rotating Machinery)에 대한 세계적인 기술추세를 볼 때 더욱 정밀해지고 고속화에 대한 요구가 한층 증대되고 있으며, 이러한 측면에서 볼 때 여러 분야에서 탁월한 장점을 지니고 있는 마그네틱 베어링(Magnetic Bearing)의 회전축계 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 특히 프랑스를 중심으로 한 미국, 일본 등이 이에 대한 연구를 활발하게 수행하여 자율대응형 고속 공작기계 스핀들을 비롯한 고진공 펌프 및 각종 터빈 등에 실용화로 상품화 판매를 하고 있는 상황에 있다. 여기서 일본의 공작기계기술진흥재단이 오래전에 조사한 보고내용을 토대로 외국 유명기관의 개발실태를 요약·정리하면 다음과 같다.



① 무한한 “고속화”에의 도전

(프랑스 S2M사의 마그네틱베어링)

마그네틱베어링의 연구에 대하여 세계적으로 유명한 기관은 프랑스의 S2M사 (Societe de Mecanique Magnetique)로서 여기서 마그네틱베어링을 개발하게 된 발단은 1969년 프랑스 국군연구소에서 자이로용 자기베어링을 개발하게 된 것에서부터 그 시초의 동기를 찾을 수 있다. 이의 개발을 계기로 '76년 SEP사와 SXF사가 공동 투자하여 S2M사를 설립했다. 이에 따라 다치안社, CERMO(프랑스 국립공작기계연구소) 등이 개발한 초고속 밀링머신에서는 S2M社의 마그네틱베어링이 채용되고 있으며, S2M社의 마그네틱베어링은 영구자석을 사용한 수동형 마그네틱베어링을 전자석으로 대체하여 전자석의 흡인력을 전류에 의해 제어함으로써 능동형기능을 갖도록 개발하고 있고, 88년 제14회 일본국제공작기계전시회에 출품 된 이래 각국에서 고속공작기계의 활용분야에 널리 이용되고 있다. 즉 전·후 베어링 위치에 배치된 마그네틱베어링의 전자석이 회전로타를 서로 끌어당겨 공간 중에 회전축계를 부상케

하는 방법으로 위치센서에 의해 회전로타의 위치 검출 정보를 제어장치에 전송하여 회전축이 항상 축 중심선 상에 위치되도록 제어되어 고속회전 운동을 가능케 한다. 이와 같이 마그네틱베어링은 비 접촉 베어링이라는 점과 전자제어방식이라는 이점에 의해 능동형 마그네틱베어링으로의 장점을 유지시켜 주며 공작기계용으로는 다음의 그림 3과 같은 구조를 갖는다.

② 구주의 기타지역에서의 고속화 연구

a) 수지CONE채용의 고속공작기계

서독의 다르름슈·닷트 공과대학에서는 감쇠특성이 우수한 수지(메탈아크릴) 콘크리트 베드와 자기베어링 고속주축을 채용하여 고속 절삭용 밀링머신을 개발하였으며, 여기서의 주축은 능동 제어형으로 60,000rpm, 회전정도 2.0 $\mu$ m, 주축직경 110mm, 모터 출력 20kW로 하였고, 주축계의 냉각은 수냉식 Water Jacket방식으로 강제냉각을 하도록 하였다. 이렇게 하여 개발된 공작기계는 주로 고속절삭에 관한 연구로서 항공기용 알루미늄 부품과 탄소섬유 복

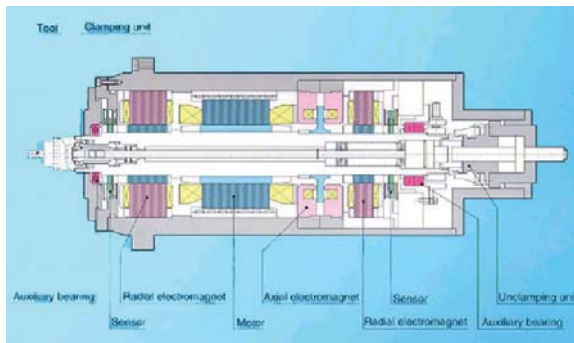


그림 3. 마그네틱베어링 주축계의 구조



그림 4. 마그네틱 베어링

합계를 가공하는데 활용하였으며, 이경우의 가공조건은 절삭속도 2,400~5,400m/min, 이송속도 2,000~10,000mm/min, 피삭재는 알루미늄합금 AlCuMgPb, 사용공구 Ø50(초경 엔드밀)mm를 사용하였다.

b) 고속밀링 절삭 가공기

프랑스 CERMO(국립공작기계연구소)에서도 고속밀링용 절삭 가공기를 개발하였으며, 이의 활용에 대한 주요목표는

- ▶ 경제적인 측면에서, 고속절삭에 의한 생산성향상 추구
- ▶ 기술적인 측면에서, 종래의 절삭열 등의 원인으로 불가능했던 가공정도, 형상정도의 고도화를 고속절삭에 의해 가능성 추구
- ▶ 과학적인 측면에서, C.J.Salomon(서독)이 1931년도에 예측했던 바와 같이 절삭속도를 증가시킬 때 절삭온도의 상승이 최대치에 도달되다가 점차적으로 감소하는 온도 범위가 존재하는지의 여부확인 등이었다. 여기서 사용된 주축계는 마그네틱 베어링을 채용한 60,000rpm주축이며, 이송계는 유정압 안내면을 채용한 것으로 고실리콘 알루미늄합금(실리콘 17%)의 다이아몬드 공구에 대한 고속 절삭특성을 시험하는 것이었다.

따라서 마그네틱베어링을 이용한 자율 대응형 고속 주축은 Fuzzy알고리즘 등을 이용한 비선형제어 이론을 토대로 한 지능 제어형 (Intelligent Control)으로 설계되어 자동밸런싱, 高회전정도, 진동제어가 가능하기 때문에 초고속 회전축베어링으로 이용 가능하므로 공작기계산업 뿐만이 아니라 항공우주산업, 터어보 기계 산업 및 고진공분자펌프 산업 등 활용범위는 넓다 하겠다. 여기서 추구하고 있는 자율 대응형 제어시스템은 그림 5와 같은 유형들이며 참고로 종래의 선형 제어방법과 비선형 제어방법으로서 Fuzzy알고리즘에 의한 제어상태를 비교한 특성을 그림 6에서 보여준다. 그리고 상품화 판매되고 있는 제품을 대표적으로 표 2에서 보여준다.

③ 자율 주축 국내외 기술 수준

고속 주축계에 대한 연구는 국내에서는 세라믹 볼

베어링을 이용한 고속화 연구가 진행되어 왔지만 자기베어링을 이용한 자율 대응형 고속주축에 대한 연구는 아직은 기본 개발기술 단계에 있다. 그러나, 외국의 경우는 많은 연구를 통하여 실용화가 이루어져 있으며, 고속 공작기계용의 제품은 물론 본 기술을 이용하여 몇몇 분야에서는 실제로 첨단 기술 분야(NASA Project)에까지 적용하고 있는 상황이다.

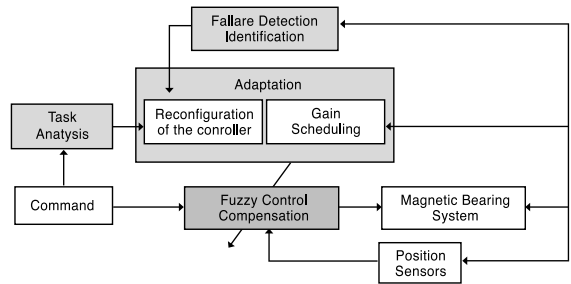


그림 5. Integrated intelligent control system structure

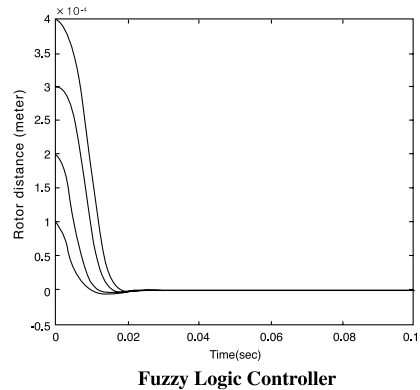
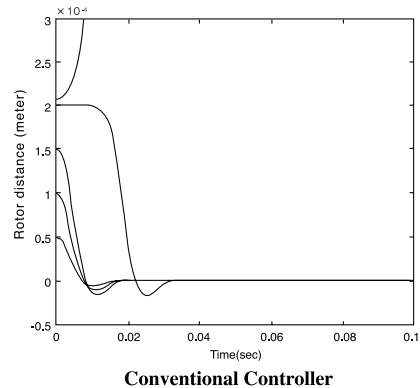


그림 6. Comparison of control system for magnetic bearing system

표 2. 선진사 마그네틱 베어링 주축 사양

APPLICATIONS	MAKERS	NATIONS	SPECIFICATION
HIGH SPEED Machining Spindle (Grinding, Milling Drilling)	SEIKO SEIKE	JAPAN	-Max. speed(rpm):150,000 -Spridle Dia.(mm) : 15
	IBAG Zurich AG	SWISS	-Max. speed(rpm) : 40,000 80,000 -Useful Power(km) : 40/60 7.0/10.0
	S2M	JAPAN	-Max. speed(rpm) : 60,000 180,000 -Useful Power(km) : 15~22
	JMB	JAPAN	-Max. speed(rpm) : 45,000 30,000 -Useful Power(km) : 20, 25 -Spridle Dia.(mm) : 50, 74.5

표 3. 국내외 자율주축에 대한 기술수준 비교표

내 용	국 외	국 내
축의 최대 회전속도	200,000 rpm	50,000 rpm
축의 직경	14 ~ 1250 mm	50mm
지지 하중	300,000 N	750 N
운전가능 온도	-253 ℃ ~ 450 ℃	
회전 정도	≥ 0.05 μm	≥ 2 μm
적용 성공 사례	High Speed spindle, Turbomolecula Pump, Turbomachinery(Compressors & Pumps), Milling & Grinding Spindle, Flywheel or Momentum Wheel, Gas Turbine, etc.	연구 수행중
종류	Active Type, PM/EM Hybrid, Passive Type, Cone shaped, Sensorless, etc.	Active Type

### 3. 자율대응 주축 SYSTEM

자기부상에는 많은 방식이 있으며 상전도전자석을 사용하는 것, 초전도 자석을 사용하는 것, 영구 자석을 사용하는 것으로 구분되고, 흡인력을 사용하는 방식, 반발력을 사용하는 방식 등으로 나뉜다.

현재 실용화에 이른 자기주축으로는 상전도전자석이 철을 흡입하는 힘을 이용한 방식을 기본으로 하고 있다.

일반적으로 회전자를 강체로 고려하면 6개의 자유도를 가지나 자기 주축에서는 통상 5개의 자유도를 제어하며 앞뒤 RADIAL 자기 베어링 4축, THRUST 자기 베어링 1축을 제어하여 5축 제어형 자기 주축이라 불리운다.

#### 3.1 구성요소

Hardware	기계적 요소	회전체, 보조베어링, 구동 시스템, 시일 등
	전기적 요소	파워 앰프, 자기베어링의 전자석 액튜에이터, Power suply 등
	전자적 요소	시스템의 제어장치(Analog /Digital), 센서 시스템, 신호처리 및 상태감시 장치 등
Software	제어 알고리즘, 상태 감시 및 진단 알고리즘	

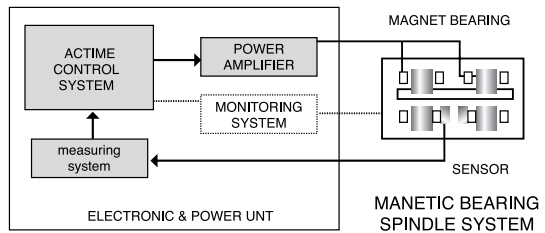


그림 7. 자기베어링 주축 system 개략도

### 3.2 구성 요소의 특징

#### 1) 변위 센서

변위 센서로 해서 사용되고 있는 형식으로는 과전류형 센서, 인덕턴스형 센서, 광학형 센서가 있고 그 변위 센서에 요구 되는 항목을 아래와 같이 고려하고 각각의 형식에 따라 센서의 장·단점을 갖고 있다.

- ① 외부에서 자계의 영향을 받지 않을 것.
- ② 온도 변화, 경년 변화가 없을 것.
- ③ 소형, 저 COST
- ④ 축표면의 기계적 상처, 전기적 상처를 감지하지 않을 것.

흡인력을 이용한 방식에서는 SENSOR신호에 의해 전자석을 제어해서 축을 부상케 한다.

센서로서는 과전류형 SENSOR가 가장 많이 이용된다.

#### 2) 고주파 모터

자기주축에서는 통상 회전력을 이용해서 동작이 행해지도록 하기 때문에 모터를 내장한다. 모터로 구동하기 위해서 비접촉으로 동작을 해야 되기에 정류자와 브러시가 없는 모터를 이용하고 고속으로 회전되어야 하는 특성으로 강력한 원심력에 견딜 수 있는 구조도 필요로 한다. 구동으로는 고주파 인버터를 사용한다.

#### 3) DIGITAL CONTROLLER

여러 가지의 기능을 자기 주축이 지니고 있고, 가진 회전축의 진동 특성 변화에 대응해서, 로버스터제어, 적응제어를 실현하기 위해서는 아날로그 회로에 의한 컨트롤라로써는 대응 곤란하다. 이러한 연유로 DSP를 이용한 디지털 컨트롤러를 채용하게 되었다.

DSP 자체는 고속, 고정도, 저가격으로 되어 있어 디지털 컨트롤러를 제작하는데는 중대한 문제가 없지만 그 반면 주변의 IC에 아래의 과제가 있다.

- ① 고속, 고정도, 저가격의 A/D 변환기
- ② 메모리의 고속화 : 병렬처리의 메모리에 사용하는 dual port memory와 buffer의 고속화.

#### 4) 전력 증폭기

제어회로에서 연산된 신호에 의해 전자석의 제어를 행하지만 전자석에는 가전압, 전류가 필요해서 전력 증폭기를 사용한다.

작은 자기주축에서는 트랜지스터와 파워연산증폭기에 의해 선형제어으로써 되지만 대형 자기주축의 경우는 PWM제어를 이용해서 전력 손실 최소화를 도모 하고 있다.

## 4. 자율대응 주축계 개발

### 4.1 개발 사양과 성능

일반적으로 주축의 성능을 표현하는 중요한 지표로 다음과 같이 목표로 하고 있다.

#### (1) DN치

:주축부의 직경(mm) X회전 속도(rpm)의 치로 315만 값을 목표로 한다.

#### (2) 회전정도

:축을 회전 시킬 때 축의 중심축 흔들림을표현하는데 자기 주축의 경우 주로 위치 센서의 정도, 제어계의 성능에 의해 결정된다.

#### (3) 축강성

:축에 힘을 가했을 때 그 힘에 대하여 축의 어긋남의 비율을 뜻한다.(단위:N/ $\mu$ m)  
능동 제어형 자기 주축에서는 그값이 FEED-BACK 제어의 강도에 의해 어느 정도 조정이 가능하다.

#### (4) 진동감쇄능력

:어떤 원인으로 축이 진동했을 때, 그 진동을 감쇄 시킬 수 있는 능력. 능동 제어형 자기 주축에서는 제어계의 성능에 의해 정한다.

표 4. 성립 개발 Magnetic Bearing Spindle System

평가 항목 (주요 성능 SPEC)	단 위	실 적
1.회전 속도	rpm	50,000rpm 70,000rpm
2.회전 정밀도	$\mu$ m	2
3.Peak Power	kW	9.5/5.5
4.최소가속시간	sec	15
5.Clamping Force	kN	5.5
6.축선단하중	N	450
7.열발생 온도	$^{\circ}$ C	50
8.자율대응 알고리즘	-	적용

표 4는 폐사에서 연구 개발 중인 자기베어링 스피ن들의 개발 현황이다.

## 5. 어플리케이션의 예

- 1) The machine-tool industry
  - Electrospindles for very high speed machining
  - Large-diameter grinding machines
  - Precision lathes, etc.
- 2) The space industry
  - Inertia wheels and gyroscope flywheels for satellites
  - Equipment to reproduce satellite pictures
  - Cryogenic and Rocket engine turbo pumps
- 3) Light industry
  - Turbomolecular vacuum pumps
  - Centrifuges, X-ray tubes
  - Small cryogenic compressors
- 4) Heavy industry
  - Compressors and blowers
  - Expansion and energy recovery turbines
  - Long lines of shafting (large turbine-generator)

## 6. 결론

능동형 주축을 공작 기계용 주축 SPINDLE에 중요한 것은 자기 주축을 단순한 스피ن들 축으로 한 고려가 아니라 모니터 기능과 액츄에이터 기능을 구사해서 고정도 고능률 가공을 실현 하는 것으로 가공 상태를 모니터해서 공구수명예측, 가공 품질 안정화, 고장 예측을 기본으로 Intelligent한 기계를 실현 하는데 있다.

현재 자기 능동형 주축을 조합해서 구축한 기계 본체로 서브미크론 가공정도를 실현하는 생산

SYSTEM 연구에 각사와 노력하고 있으며 금후의 이러한 생산 SYSTEM의 중심에 자기주축이 위치해 있어 자기 능동형 주축 SPINDLE의 중요성은 증대되고 있다고 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] 최연돈 외, 고속 공작기계용 자율대응 주축 시스템 개발, 산업자원부 중기거점과제 보고서, 2000
- [2] 박종권, 노승국, 안대균, “연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 15권 11호, pp.233-243, 1998
- [3] 김승중, 김하용, 이종원, “LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃 규명”, 소음진동학회 1998 추계학술대회, pp.532-537, 1998
- [4] F. Betchon, R. Schob, “On-line-adaptive vibration control”, 6th ISMB, pp.362-371, 1998
- [5] K. Astrom, “Adaptive Control”, Addison Wesley, 1995
- [6] 노승국, 경진호, 박종권, “적응Feedforward를 이용한 연삭기용 자기베어링 주축계의 회전오차 제어”, 한국정밀공학회 1999 춘계학술대회, pp.337-340
- [7] 노승국, 경진호, 박종권, “자기베어링으로 지지된 연삭 스피ن들의 런아웃 제어”, 한국정밀공학회 2000 추계학술대회
- [8] 최연돈 외, 고속 공작기계용 자율대응 주축시스템 개발, 산업자원부 중기거점과제 보고서, 2001
- [9] 박종권, 노승국, 경진호, “내면연삭기 고속주축용 원추형 자기베어링시스템 설계”, 한국정밀공학회지, 19권, 2호, pp.213-219, 2002