

# 고속 공작기계용 자기베어링- 주축의 동향 및 설계에 대한 고찰



김재실  
창원대학교



박종권  
한국기계연구원

## 1. 고속화와 자기베어링

CNC공작기계에서 고속화와 고능률화 가공은 시대를 초월해서 언제나 요구되어온 과제이며 현실적으로 머시닝센터를 위시한 공작기계의 고속화가 급속히 진전되고 있는 것이 세계적인 기술추세이다. 각종 국제공작기계전시회에 출품되고 있는 공작기계의 현황을 보면 주축회전속도 15,000rpm이상의 머시닝센터가 60%이상을 차지하고 있고, 이중에 주축회전속도 70,000rpm, 이송속도 60m/min 이상의 공작기계도 다수 출품되어 선진국의 기술우위를 겨루는 장이 되고 있다. 이를토대로 국내의 공작기계 기술수준을 끌어올릴때 국산품 국제경쟁력 강화를 위해서는 이 분야의 기술개발에 박차를 가하지 않을 수 없는 상황이 되어가고 있다.

고속가공은 종래에는 알루미늄이나 합금과 같은 연질금속의 고속, 고능률가공에 주안점을 두어왔는데 최근에는 주철과 철계재료의 고속, 고능률 가공과 금형용 그래파이트

및 섬유강화 플라스틱(FRP), 그리고 항공기용 내열합금 등의 가공에 종래 이상의 고속, 고능률가공이 요구되고 있다.

이와같이 공작기계의 분야에 있어 고속가공은 중요한 가공기술로서 국내·외적으로 많은 관심을 갖고 있으며, 총체적으로 고속가공이 주는 장점을 요약정리 해보면 Fig. 1과 같다.

일반적으로 공작기계의 고속화는 주축, 이송계, ATC와 APC가 중요한 대상이 되며, 이는 세라믹베어링과 직선베어링 안내방식의 개발, 오일에어 윤활이나 오일젯트 윤활의 채용, 모터와 제어기술의 발전 등에 힘입어 최근 수년간 크게 진전되어 왔다. 즉 대부분의 경우 회전축계에 사용되는 베어링은 Steel Ball Bearing으로서 윤활조건을 고려하여 저속에서 고속영역까지 사용되고있고 근래에 Ceramic Ball Bearing이 보급되면서 고속영역에서도 사용될 수 있도록 하고 있다.

그러나 Ball Bearing은 회전속도를 고속으로 높일수록 상대적인 원심력이 증가되어 베어링수명 단축을 가져오기

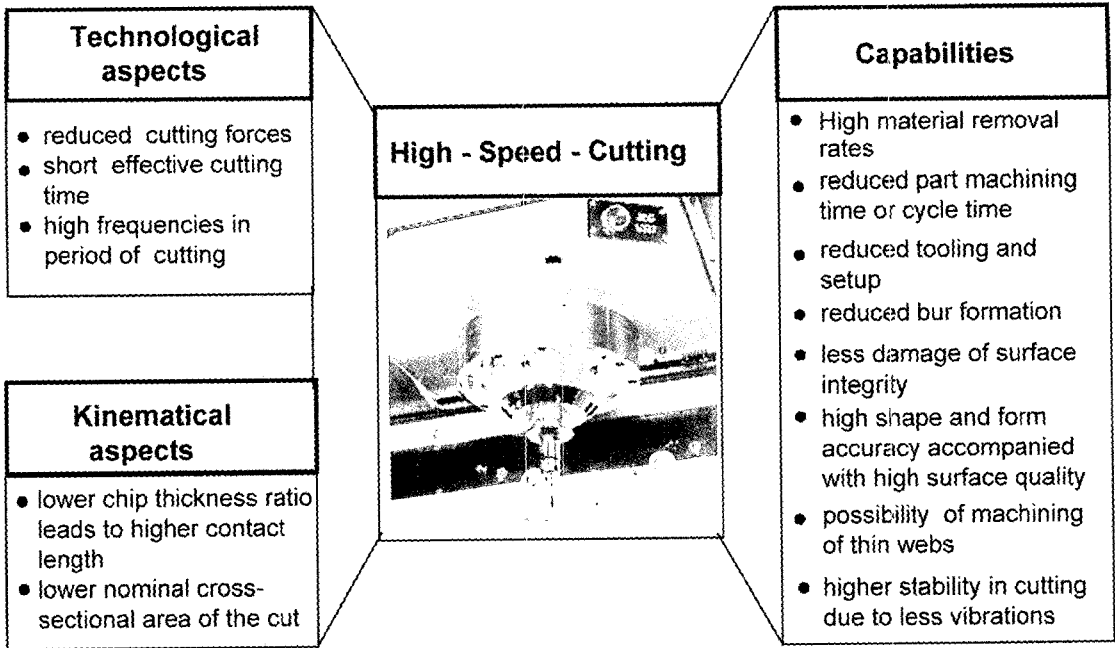


Fig. 1 Conditions and advantages of high speed machining

때문에 고속회전에는 한계(최대DmN値160만)가 있다.

그래서 이에대한 대체 방안으로서 磁氣浮上力을 이용한 베어링방식이 각광을 받고 있으며, 즉 자기베어링을 이용하면 초고속 영역까지 높일 수 있는(최대DmN値400만) 장점을 갖게 되므로 최근들어 각국에서는 이의 활용을 위한 기술개발이 매우 활발한 상태에 있다.

자기베어링은 비접촉베어링이므로 피로 및 마모가 없고 윤활이 필요없으며, 회전체의 원심력 파괴한도까지 고속이 가능할 뿐만 아니라 극저온, 초고압, 진공등 극한환경에서 사용가능하다. 또한 동작중 제어가 가능하므로 축 중심에 대한 고정도, 고강성을 유지할 수 있고 동강성(강제진동 및 고유진동) 제어 및 자동 밸런싱이 가능하며 베어링에 부과되는 절삭력의 측정이 가능한 장점이 있다.

따라서 공작기계에서의 고속화는 지속적인 능률향상에의 요구, 신소재의 활용 영역 증가, 절삭기술의 연삭영역에의 적용 등 새로운 니즈의 확대와 더불어 앞으로 더욱 발전

될 것으로 예상되므로 주축시스템의 고속화연구 수행은 필수적이라 아니할 수 없으며, 특히 전자기력을 이용한 지능화된 고속주축계에 대한 연구는 신기술로서 세계적인 관심사이자 기술파급 효과가 매우 큰 고부가가치 기술에 해당된다고 할 수 있고, 국내에서도 반드시 확보되어야 할 기술이다.

## 2. 국내의 자기베어링-주축의 동향

최근 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 자기 베어링(Magneti Bearing)의 회전축계 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 특히 프랑스를 중심으로 한 미국, 일본 등이 이 대한 연구를 활발하게 수행하여 고속 공작기계 스펀들

비롯한 고진공 펌프 및 각종 터빈 등에 실용화로 상품화 판매를 하고 있는 상황에 있다.

그러나, 지금까지 국내에서 수행된 자기베어링 관련 분야에 대한 연구는 연구소(KIMM, 삼성종합기술원 등), 학계(KAIST, 항공대, 연세대, 창원대 등)를 중심으로 기초연구를 수행하고 있고 최근 들어 한국기계연구원을 비롯한 몇몇 연구기관에서 40,000rpm용 공작기계에 시험적으로 채용하는 수준에 있으나 전반적으로는 상품화가 아직 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 여기서 일본의 工作機械技術振興財團이 오래전에 조사한 보고내용을 토대로 외국 유명기관의 개발실태를 요약·정리하면 다음과 같다.

① 無限한 “高速化”에의 挑戰  
(프랑스 S2M社의 자기베어링)

마그네틱베어링의 연구에 대하여 세계적으로 유명한 기관은 프랑스의 S2M社(Societe de Mecanique Magnetique)로서 여기서 마그네틱베어링을 개발하게 된 발단은 1969년 프랑스 국군연구소에서 자이로用 자기베어링을 개발하게 된것에서부터 그 시초의 동기를 찾을 수 있다. 이의 개발을 계기로 '76년 SEP社와 SXF社가 공동 투자하여 S2M社를 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 출품된 이래 각국에서 고속공작기계의 활용분야에 널리 이용되고 있다.

즉 전·후베어링 위치에 배치된 자기베어링의 전자석이 회전로타를 서로 끌어당겨 공간중에 회전축계를 부상시키는 방법으로 위치센서에 의해 회전로타의 위치 검출 정보를 제어장치에 전송하여 회전축이 항상 축중심선상에 위치되도록 제어되어 고속회전 운동을 가능케 한다. 이와같이 자기베어링은 비접촉베어링이라는 점과 전자제어방식이라는 잇점에 의해 능동형 자기베어링으로의 장점을 유지시켜 주며 공작기계用으로서의 다음의 Fig. 2와 같은 구조를 갖는다.

② 歐洲의 其他地域에서의 高速化 研究

a) 樹脂CONE채용의 고속공작기계

서독의 다르름슈·닷트 공과대학에서는 감쇠특성이 우수한 수지(메탈아크릴) 콘크리트 베드와 자기베어링 고속주축을 채용하여 고속 절삭용 밀링머신을 개발하였다.

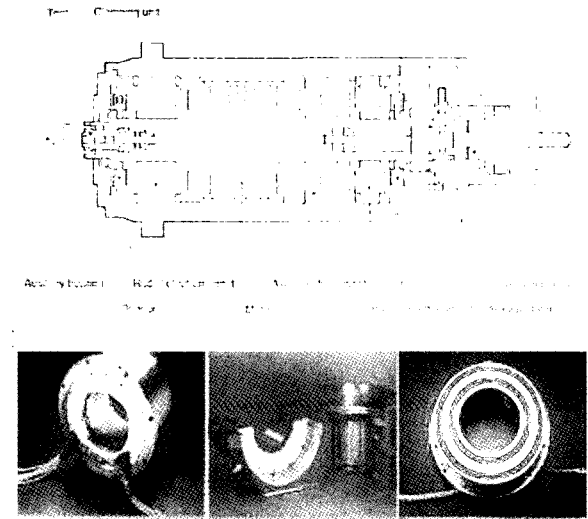


Fig. 2 Magnetic bearing-spindle system

여기서의 주축은 능동제어형으로 60,000rpm, 회전정도 2.0μm, 주축직경 110mm, 모터출력 20kW로 하였고, 주축계의 냉각은 수냉식 Water Jacket방식으로 강제냉각을 하도록 하였다. 이렇게 하여 개발된 공작기계는 주로 고속절삭에 관한 연구로서 항공기용 알루미늄 부품과 탄소섬유 복합재를 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 절삭가공기

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

- 경제적인 측면에서, 고속절삭에 의한 생산성향상 추구
- 기술적인 측면에서, 종래의 절삭열 등의 원인으로 불가

능했던 가공정도, 형상정도의 고도화를 고속절삭에 의하  
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 자기베어링을 채용한 60,000rpm주축이며, 이  
송계는 유정압 안내면을 채용한 것으로 고실리콘 알루미늄  
늄합금(실리콘 17%)의 다이아몬드 공구에 대한 고속 절  
삭특성을 시험하는 것이었다.

따라서 자기베어링을 이용한 고속주축은 Fuzzy알고리  
듬 등을 이용한 비선형제어 이론을 토대로 한 지능제어형  
(Intelligent Control)으로 설계되어 자동밸런싱, 高회전  
정도, 진동제어가 가능하기 때문에 초고속 회전축베어링으  
로 이용 가능하므로 공작기계산업 뿐만이 아니라 항공우주  
산업, 터보 기계산업 및 고진공분자펌프 산업 등 활용범  
위는 넓다 하겠다.

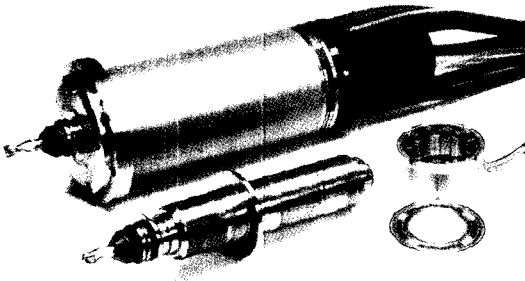


Fig. 3 S2M magnetic bearing-spindle

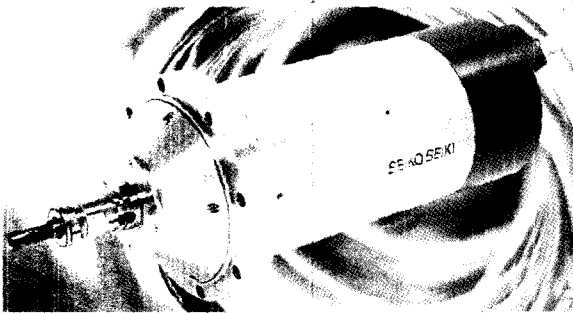


Fig. 4 SEIKO SEIKI magnetic bearing-spindle

그리고 상품화 판매되고 있는 S2M社(프랑스) 및  
SEIKO SEIKI社(일본), IBAG社(스위스) 제품을 대표적으  
로 Fig. 3부터 5에서 보여준다.

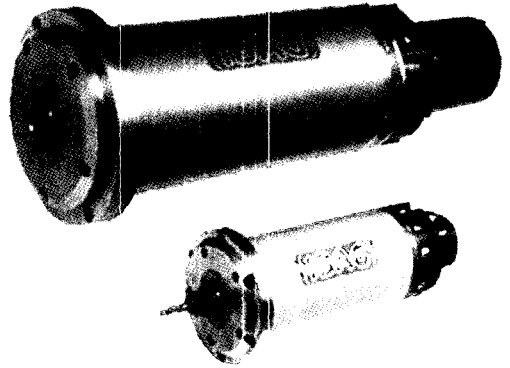


Fig. 5 IBAG magnetic bearing-spindle

### 3. 자기베어링의 설계 고찰

자기베어링은 자기장에 의해 발생하는 힘을 변화시켜 회  
전체를 부양하고 그 위치를 제어하는 일종의 전자적으로  
써, 적용되는 전자석 재료의 특성이 전형적인 비선형성을  
나타내며 다양한 기하학적 제한조건을 만족시켜야 하는 등  
설계과정이 복잡하다.

지금까지 자기베어링은 전자석 재료의 선형특성으로 가  
정되는 영역에서 1차원 자기장회로 해석법에 의해 기하학  
적 조건에 부합하도록 시행착오적으로 설계가 이루어지고  
있어 자기력의 최대값을 얻기가 어렵다. 또한 비선형성에  
의해 발생하는 오차는 제어기의 설계시에 고려하여 보상하  
고 있지만 과도한 오차가 발생한다면 많은 제어력 및 복잡  
한 제어 알고리즘이 요구된다. 그러므로 비선형성을 고려  
한 정확한 자기력 계산이 필요하다. 아울러 제한조건을 만  
족시키고 동시에 선형영역이 확보되면서 자기력 또는 베어  
링 강성을 최대도 하는 설계변수를 도출하기 위하여 체계  
적인 최적설계가 필요하다.

여기서는 초고속 공작기계용 주축에 사용할 8극형 이극  
성(Heteropolar) 반경방향 자기베어링의 설계를 위하여

최적화문제를 정립하고 자연선택과 유전학에 근거한 병렬적이고도 전역적인 탐색 방법인 0차의 유전자 알고리즘과 2차원 비선형 유한요소 자기장해석에 의해 보다 정확한 자기력을 계산하는 과정을 접목하여 수행한 최적설계를 소개한다.

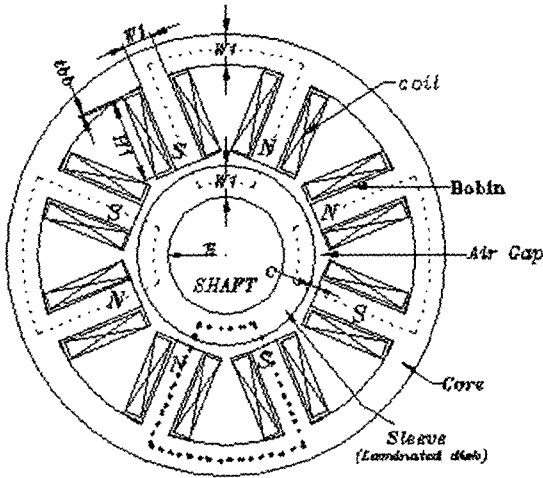


Fig. 6 Heteropolar radial magnetic bearing

Fig. 6은 8극형(N-S-S-N-N-S-S-N배열)의 이극성 자기 베어링의 반경방향 단면을 나타내고 있다. 자기베어링의 최적화 문제는 자기베어링의 유한요소모델에 설계변수들의 다양한 조합을 적용하여 비선형 전자기장(Electromagnetic Field) 해석을 수행하고 그 결과로 얻어진 자기력(Magnetic Force)  $F_{MF}$  중에서 최대값을 가질 때의 설계변수를 찾는 것이다.

그리고 초고속 공작기계의 전체 외경 및 베어링 지지부의 크기를 고려하여 자기베어링의 외경을 제한하고, 최대 에너지 손실을 제한하고, 코일의 온도 상승은 코일의 절연막을 손상시키므로 코일의 발열온도를 제한한다. 그리고 보빈의 크기와 코어 다리의 폭을 고려하여 보빈 밑부분에 일정층 이상의 권선이 적층되도록 설계제한조건을 부여한다.

자기력에 직접적인 영향을 미치는 3가지 인자, 즉 베어링의 축방향 길이(axial length), 코어 다리의 높이(leg height)와 코어다리의 폭(leg width)은 서로 기하학적으로

상대적인 연관성을 가지고 있으므로 이 3개의 인자를 설계 변수로 설정한다. 초고속 공작기계 주축의 전장을 고려하여 베어링의 축방향 길이  $B_1$ 의 가용범위를 제한하고, 축의 반경을 감안하여 코어 다리의 높이  $H_1$ 의 가용범위를 제한하며 그리고 극 배치와 보빈의 폭을 고려하여 코어 다리의 폭  $W_1$ 의 가용범위를 설정한다.

설계변수의 구간이 정해지게 되면, 각 설계변수에 대한 정보를 가지는 염색체의 길이를 결정해야 한다. 염색체의 길이는 각 설계변수의 정보를 몇개의 비트(Bit)로 나타내느냐의 문제이다.

자기장 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS를 이용, Plane13(4절점) 유한요소를 사용하여 비선형해석을 수행한다. 그리고 자기력은 공기간극 주위의 자성체(Sleeve)의

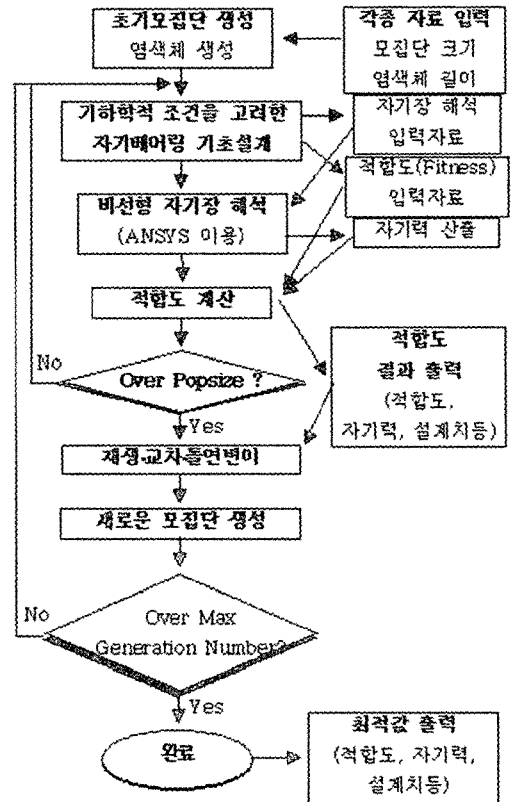


Fig. 7 G.A.를 이용한 자기베어링의 최적화과정

절점에 가상 변위(Virtual displacements)를 적용하여 발생하는 가상일에 의해 ANSYS 후처리과정에서 국부 Jacobian 해석법으로 산출한다.

유전자 알고리즘을 이용한 제약 최적설계문제의 경우, 제약조건 만족과 목적함수 최대화를 동시에 고려해야 한다. 이를 위해 정립된 최적화 문제로부터 적합도(Fitness)를 정의한다.

그리고 제약조건들이 한계를 벗어날 때, 그에 상응하는 벌칙계수(Penalty)를 가함으로써 최적화가 이루어지도록 한다. 이때 벌칙계수는 제약조건 만족여부 및 자기력의 분포를 감안하여 적절하게 적용한다.

유전자 알고리즘을 이용한 자기베어링(Heteropolar Magnetic Bearing)의 최적 설계는 Fig. 7과 같은 과정으로 벌칙함수가 0이 되면서 적합도가 수렴치를 나타낼 때까지 반복적으로 최적화를 수행한다.

#### 4. 결론

공작기계의 고속화, 고능률화에 부응하여 자기베어링 활용의 동향을 살펴 보았고, 국내외의 기술 수준 및 외국에서의 상품을 소개하였다. 아울러 국내에서 자기베어링의 설계 및 제작 기술을 확보하여야 할 당위성을 설명하였다. 그리고 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법에 비선형 전자기장 해석에 의한 자기장 계산과정을 포함시켜 일반적인 반경 방향 자기베어링을 체계적으로 최적설계를 수행하는 절차를 기술하였다. 향후 자기베어링의 연구개발 및 상품화를 이룩하는데 도움이 되기를 바란다.

#### 참고 문헌

1. Kim C., "Magnetic Bearing Eddy Current Effects on Rotordynamic System Response", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, Texas A&M University, 1995
2. Dussaux, M., "Industrial Applications of the Active Magnetic Bearings Technology", Proc. of the 2nd Int. Symp. on Magnetic Bearings, pp.33~38, 1990
3. Imlach, J., Allaire, P.E., Humphris, R.R. and Barrett, L.E., "Magnetic Bearing Design Optimization", IMechE, pp53~59, 1988
4. Pang, D., Kirk, J. A. An and, D.K. and Huang, C., "Design Optimization for Magnetic Bearing", Proc. of the 26th IECEC, USA, Vol.35 No.4, pp186~191, 1991
5. David E. Goldberg, "Genetic Algorithm in search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989
6. Zbigniew Michalewicz(著), 공성근 외(譯), "유전자 알고리즘," 도서출판 그린, 1996
7. 황상문, "유전자 알고리즘을 이용한 동역학적 시스템의 최적설계에 관한 연구," 창원대학교 기계공학과 석사학위 논문, 1997
8. ANSYS, "Magnetics", User's Guide for Revision 5.0A, Swanson Analysis System, Inc., Vol. I, DN-S231, Houston, PA 15342, 1994
9. 김재실외, "비선형성이 고려된 이극성 자기베어링의 최적 설계," 한국정밀공학회 논문집 제 16권, 53-58, 1999