

정보기억장치용 초정밀 회전기기 기술 연구 개발

장 건 희*

(한양대학교 기계공학부)

1. 머 리 말

정보기억장치용 초정밀 회전 기기는 나노(nano) 미터 단위의 회전정밀도를 유지하면서 컴퓨터, 음향 및 영상 등의 데이터 저장 매체(HDD, CD, DVD, VCR, Camcorder 등)의 구동원으로 사용되는 브러시리스 직류모터 등을 포함한 회전기기를 말한다. 21세기 정보화 사회가 도래함에 따라 정보기억장치용 초정밀 회전기기는 그 사용범위가 더욱 커지고 있다. 특히 고용량, 초소형 정보기억장치 개발 등과 같은 미래산업을 주도하기 위해서는 초정밀 회전기기의 고속, 고효율, 저진동, 저소음, 초소형 및 박형화 과제의 달성이 필요하며 한양대학교 국가지정 초정밀 회전기기 연구실(<http://prem.hanyang.ac.kr>)에서는 이에 관련된 기반 기술 연구 및 개발을 추진하고 있다.

2. 연구 분야

정보기억장치용 초정밀 회전기기는 기계와 전기·전자 분야가 결합된 mechatronics의 성격을 가지고 있으며 각 분야의 전문적 연구와 더불어 각 분야간의 유기적, 통합적인 접근이 필요하다. 따라서 본 연구실에서는 크게 (1) 회전체 동역학 해석 및 설계, (2) 회전기기의 초정밀 제어, (3) 기전

* 우리 학회 편집위원

E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr

연성계 해석 및 설계의 세 분야로 나누어 연구를 수행하고 있다.

2.1 회전체 동역학 해석 및 설계

동역학적으로 초정밀 회전기기는 짧은 회전축에 디스크 등의 부가 구조물을 고속으로 구동하는 회전체의 특징을 가지고 있다. 회전기기가 고회전 정밀도를 유지하면서 고속 회전하려면 고유 진동 해석, 강제 진동 해석을 통해 초정밀 회전기기의 동특성을 파악하고 설계에 반영하여야 한다. 이를 위해서는 회전축을 지지하는 베어링의 설계, 해석과 이를 바탕으로 고속 회전체 시스템의 동특성 해석, 회전체 진동 측정, 해석 및 저감 기술이 요구되며 최종적으로는 이와 같은 연구결과를 종합하여 최적의 회전축계 시스템 설계 기술이 필요하다.

(1) 베어링 해석 및 설계

베어링은 고정된 지지부에 대하여 고속 회전하는 회전체를 지지해주는 기계요소로서 회전체의 동역학 해석과 진동 저감을 위해서는 베어링의 강성, 진동 해석 등이 필수적이다. 본 연구실에서는 현재까지 주로 사용되고 있는 볼 베어링의 해석과 더불어 저소음, 저진동의 고성능 회전체 시스템에 적합한 유체 베어링 해석 및 설계에 관한 연구를 수행하고 있다.

- 볼 베어링 해석

볼 베어링 해석을 위해 본 연구실에서는 비선형

• 연구실 소개 (14) • 한양대학교 국가지정 초정밀회전기기연구실

탄성 접촉 이론을 적용한 볼 베어링의 강성 해석과 결함 주파수 및 피로 수명 해석을 수행하였으며 연구 결과를 바탕으로 GUI를 고려한 사용자 친화적인 볼 베어링 해석 프로그램(WinBAP v.2.0)을 개발하였다. 현재는 볼 베어링의 waviness에 따른 가진에 의한 회전체의 비선형 진동 해석을 수행 중이다.

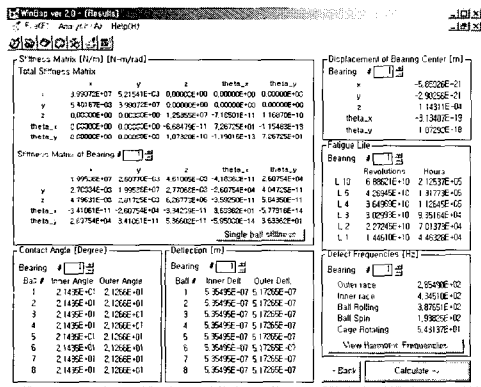
- 유체 베어링 해석

볼 베어링과는 달리 유체 베어링은 회전체와 지지부사이의 직접 고체 접촉이 없으며 따라서 진동과 소음이 적어 현재 사용되고 있는 볼 베어링을 대체할 기계요소로 각광받고 있다. 본 연구실에서는 유체 베어링의 적용을 위해 저널 및 스러

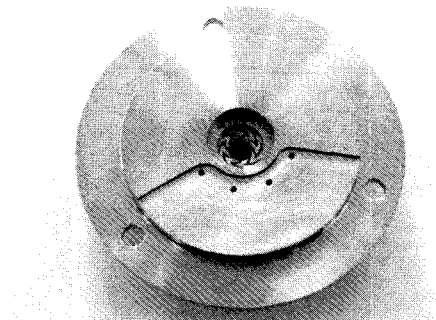
스트가 연성된 유체 베어링의 해석, groove와 reservoir에 따른 유체 베어링의 성능 최적화에 관한 연구를 수행하여 유체 베어링 해석 프로그램을 개발하였으며 또한 해석 결과를 바탕으로 유체 베어링을 적용한 고성능 초정밀 회전기기를 제작하고 있다.

(2) 회전체 시스템의 동특성 해석

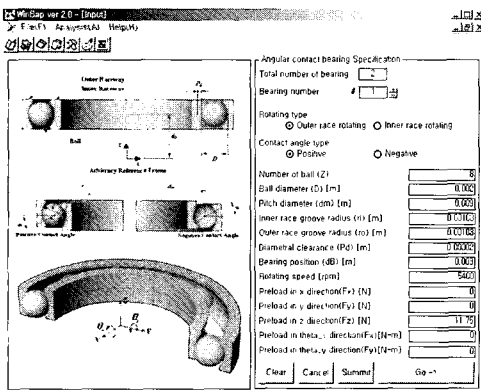
정보 저장기기의 구동에 사용되는 초정밀 회전기기는 동역학적으로 임의 형상의 지지구조를 가지고 디스크 등을 고속 회전시키는 구조로 구성되어 있다. 최근 정보저장기기가 고속화, 소형, 박형화 함에 따라 전체 시스템의 정확한 동특성 해석을 위해서는 고속회전에 따른 디스크의 비선형 효과, 복잡한 형상을 가지는 지지구조 등의 모델링



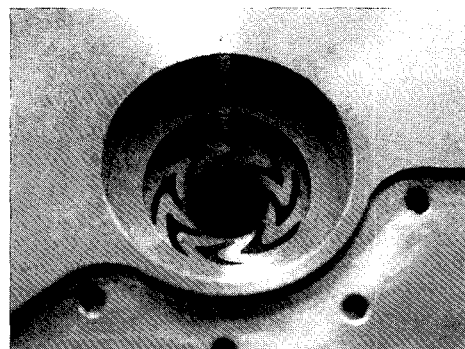
(a) WinBAP Input



(a) Housing



(b) WinBAP Output



(b) Groove

그림 1 WinBAP v.2.0 실행 화면

그림 2 본 연구실에서 개발한 유체 베어링을 적용한 초정밀 회전기기

을 포함한 해석이 필요하다. 고속 회전하는 디스크의 해석을 위해서는 강제 운동과 면내 변위에 의한 비선형 효과를 고려한 디스크 모델링이 필요하며 또한 복잡한 형상의 지지구조의 유연성을 연성시키는 해석 방법이 필요하다. 본 연구실에서는 앞서 기술한 베어링의 연구 결과와 디스크 및 축계 시스템의 해석 결과를 바탕으로 고속회전 하는 Disk-shaft-spindle-bearing 시스템의 동특성 해석 프로그램을 개발하였으며 현재 유한 요소법을 이용하여 임의 형상의 지지구조를 포함한 통합적인 초정밀 회전기기용 동특성 해석 프로그램을 개발 중이다. 그림 3은 1장의 디스크를 장착한 HDD의 회전속도 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸 캠벨선도이다.

(3) 회전체 진동 측정, 해석 및 저감 기술

초정밀 회전기기에서 발생하는 진동은 크게 RRO(repeatable runout)과 NRRO(non-repeatable runout)로 나눌 수 있으며 특히 NRRO는 정보저장기기의 저장매체 용량을 제한하는 주요한 요소이다. 베어링의 결함에 의한 가진은 NRRO의 주요원인으로 알려져 있으며 따라서 초정밀 회전기기의 진동 해석을 위해서는 베어링 결함 해석, 초정밀 진동 측정 기술과 진동 분석 기술이 필요하다. NRRO는 베어링 각 부품의 결함에 의한 기본

결합 주파수의 조합으로 나타나게 되는데 이러한 기본 결합 주파수는 베어링의 기구학적 해석을 통해 구할 수 있다. 또한 nano 단위의 NRRO를 포함하는 초정밀 회전기기의 진동 측정을 위해 본 연구실에서는 정전 용량 센서 및 LDV(laser doppler vibrometer)와 방진 테이블 등을 이용한 초정밀 회전체 진동 측정 시스템을 구축하였으며 각종 초정밀 회전기기의 진동 측정 및 분석 및 해석 방법에 관한 연구를 수행하여 왔다. 위와 같은 회전체 진동 측정, 해석 및 저감기술을 지속적으로 연구하여 본 연구실에서는 효과적인 NRRO분석 방법인 신 주파수 영역법(new frequency domain method)를 개발하였으며 산학 프로젝트를 통해 damping material을 사용하여 상용 초정밀 회전기기의 NRRO 저감 방법을 개발하였다.

2.2 회전기기의 초정밀 제어

초정밀 회전기기의 구동원으로 많이 사용되는 브러시리스 직류모터의 경우 속도는 전압에 비례하고 토크는 전류에 비례하는 제어의 용이성으로 많은 각광을 받고 있으나, 정보기억장치용 구동원으로 사용되기 위해서는 회전자의 정확한 위치 검출과 속도 및 토크의 초정밀 제어 등이 요구된다. 따라서 센서를 사용하지 않고 회전기 자체의 역기

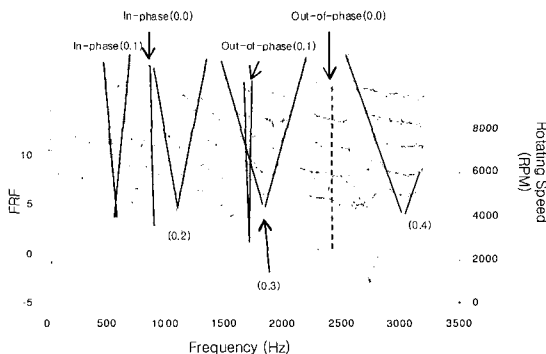


그림 3 회전속도변화에 따른 HDD 스핀들시스템의 고유진동 변화

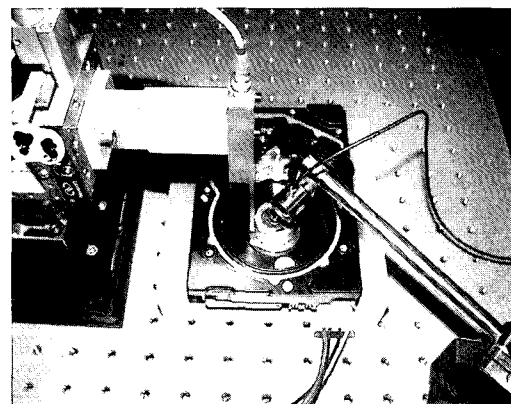


그림 4 초정밀 회전기기 진동 측정 시스템

• 연구실 소개 (14) • 한양대학교 국가지정 초정밀회전기기연구실

전력, 인덕턴스 변화 등을 이용한 회전자 위치 검출 및 센서리스 제어 기법, 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 제어 기술, 그리고 user interface를 강화한 모니터링 시스템 제어 환경 개발 등의 회전 기기 초정밀 제어 기술 개발이 필요하다. 본 연구실에서는 위와 같은 초정밀 제어에 관한 연구를 수행하여 구동회로를 개발하였으며 PC와 DSP를 이용한 초정밀 회전기기 구동 및 GUI를 고려한 모니터링 시스템을 개발하였다. 이를 이용하여 초정밀회전기기 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화를 감지하여 회전자의 초기 및 구동시 위치를 기존의 센서를 사용하지 않고 감지할 수 있는 방법 등을 개발하였다. 또한 초기에 기동토크를 최대로 하고, 구동 속도를 증가 시킬 수 있는 다상기동 단상구동에 관한 연구를 수행중이다.

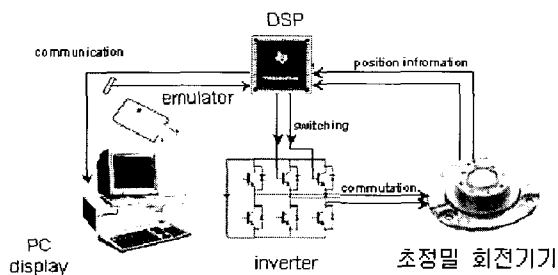


그림 5 초정밀 회전기기 구동 및 모니터링 시스템

2.3 기전 연성계 해석 및 설계

정보기억장치용 초정밀 회전기기는 전기에너지로 회전운동에너지로 변환하는 에너지변환 기기로, 전기적 변수와 기계적 변수가 상호 복합적으로 작용하는 기전 연성계의 특성을 가지고 있다. 따라서 전기, 기계 및 제어 성능을 정확히 해석하기 위해서 이들이 연성된 기전 연성계 방정식에 대한 통합적인 접근이 필요하다. 초정밀 회전기기의 전기에너지는 구동에 필요한 토크 뿐 아니라 초정밀 회전기기를 가진하는 비평형 자력을 발생시키게 된다. 따라서 초정밀 회전기기의 과도 및 정상응답을 구하기 위해서는 Maxwell 방정식과 회로 방정식 그리고 기계 방정식의 연성을 모두 고려한 통합적인 해석이 필요하게 된다. 본 연구실에서는 이러한 연성된 시스템의 해석을 위해 회전자 위치에 따른 요소 재정렬 방법인 automatic moving mesh 기법을 도입한 통합적인 기전 연성 시스템의 유한 요소 해석 방법을 개발 하였고 이를 이용하여 초정밀회전기기의 전기 및 기계적 성능을 향상 시키는 연구를 수행중이다.

3. 연구 실적

초정밀 회전기기 연구실은 초정밀 회전기기에

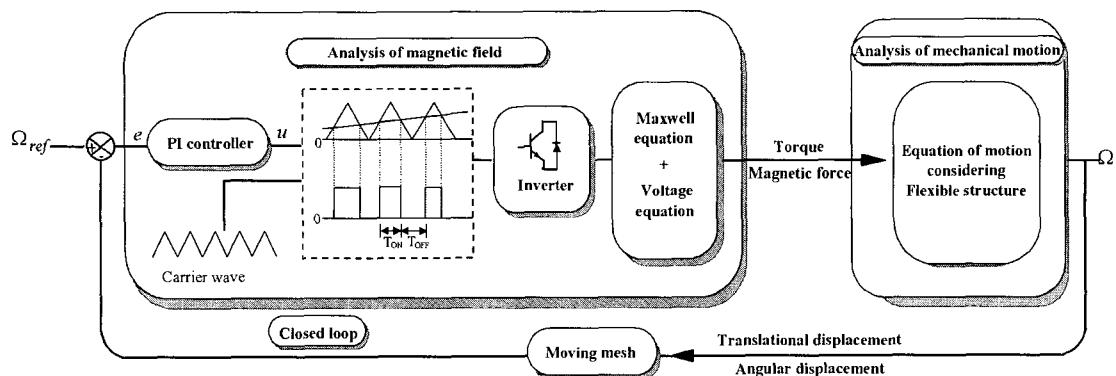


그림 6 초정밀회전기기 기전연성계 해석 흐름도

대한 지속적인 연구 결과를 바탕으로 장건희 교수가 부임한 최근 9년간 ASME, IEEE 등의 국제 저명학술지(SCI)에 34편, 한국소음진동공학회, 대한기계학회 등의 국내 학술지에 26편, 국내외 학회 발표 논문집에 65편 등의 초정밀 회전기기 관련 논문을 게재하였으며 국내외에 7건의 관련 특허 출원과 4건의 특허 등록 등의 실적을 가지고 있다. 1999년에는 BK21사업에 선정되었으며 2000년에는 국가지정 연구실(NRL)로 지정되어 초정밀 회전기기 기반기술에 대한 집중적이고 체계적인 연구를 수행하고 있다. 주요 연구 결과물로는 PCB를 이용한 BLDC 모터 개발, 점탄성 물질을 이용한 HDD의 NRRO저감, DSP를 사용한 인덕턴스 변화를 이용한 초기 구동 알고리즘 및 제어기 개발, 볼·유체 베어링 해석 프로그램 개발 등이 있으며 특히 최근에는 두께 3.3mm인 PCMCIA Type I 규격의 HDD용 초정밀 회전기기를 제작하였다.

4. 국제 공동 연구 및 교육

초정밀회전기기 연구실은 1997년 10월 UC Berkeley의 Dennis K. Lieu 교수와 Research Consortium인 PREM(<http://www.me.berkeley.edu/prem>), pacific rim electromechanical lab)

을 구성하여 HDD관련 국내외 기업체등과 국제공동연구를 꾸준히 추진하고 있으며, 개발된 관련 기술을 국내외 산학연에 보급하고 있다. 특히 1999년에는 한양대학교와 UC Berkeley간에 자매결연을 추진하였으며, 2002년 1학기에는 대학원과정의 기초기전시스템 설계(design of basic electromechanical system)과목을 개설하여 양교의 교수가 격주제로 양교의 학생들에게 인터넷을 통해 강의를 하는 국제공동영어화상강의를 개발 시행하였다. 그림 8에서와 같이 UC Berkeley의 Dennis K. Lieu 교수가 Berkeley 학생들에게 강의를 할 때 한양대학교 학생들이 인터넷과 화상장비를 통하여 강의를 듣고 실시간으로 질문과 토의를 할 수 있었으며(그림 8의 좌측), 한양대학교 장건희 교수가 한양대학교 학생들에게 강의를 할 때 UC Berkeley 학생들이 인터넷과 화상장비를 통하여 강의를 듣고 실시간으로 질문과 토의를 할 수 있었다(그림 8의 우측). 또한 양교의 교수는 항상 강의에 참가하여, 강의를 하지 않을 때에도 질문과 토론에 참가하여 교육의 질을 높힐 수 있었다. 특히 인터넷을 이용한 국제공동화상강의는 새롭게 도래하는 IT시대 교육의 한 가지 가능성으로 확인되었으며, 서로 다른 문화와 교육방법을 가진 두 대학간에 협력을 확인할 수 있었다. 또한 이번 인터넷을 이용한 국제공동화상강의의 결과를 2002년 추계 미국공학교육회(American Society of Engineering Education) 학술대회에 발표되었으며, 2002년 추계 대한기계학회-ASME Korea Section에서도 발표하였고, ASEE Journal of Engineering Education에 논문을 투고하였다.

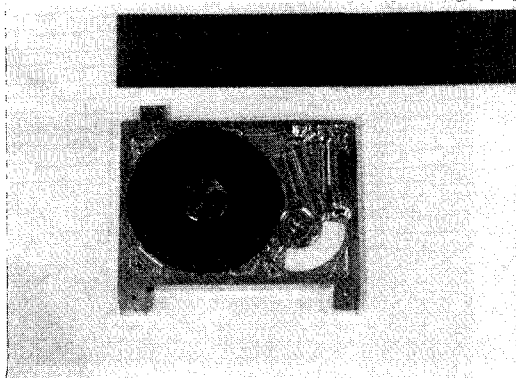


그림 7 PCMCIA Type I 용 HDD 구동 초정밀 회전기기

5. 맺음말

초정밀 회전기기는 HDD, DVD 및 CD등의 컴퓨터, 영상 및 음향 등의 데이터 저장 매체의 구

• 연구실 소개 (14) • 한양대학교 국가지정 초정밀회전기기연구실

동원으로 사용될 뿐만 아니라, 의료장비 및 군사 우주 항공장비의 구동원으로 다양한 분야에 응용되고 있으며 21세기 정보화사회가 도래함에 따라 그 사용범위가 더욱 커지고 있다. 초정밀 회전기기 연구실은 이러한 요구에 부응하기 위해 초정밀 회전기기의 공통 기반 기술 개발을 목표로 집중적이고 체계적인 연구를 수행 중이다. 초정밀 회전

기기 관련 기계, 전기 및 제어 기술의 통합적 연구 개발 성과는 고용량의 정보 저장 기기 구현을 가능하게 하여 21세기 정보 관련 산업의 제품 생산과 해석기술 향상에 많은 기여를 할 것으로 기대되며, 본 연구실은 개발된 기술 이전과 정보 전달을 위해 활발한 교육, 산학 연계 활동과 학회 활동을 수행할 것이다.

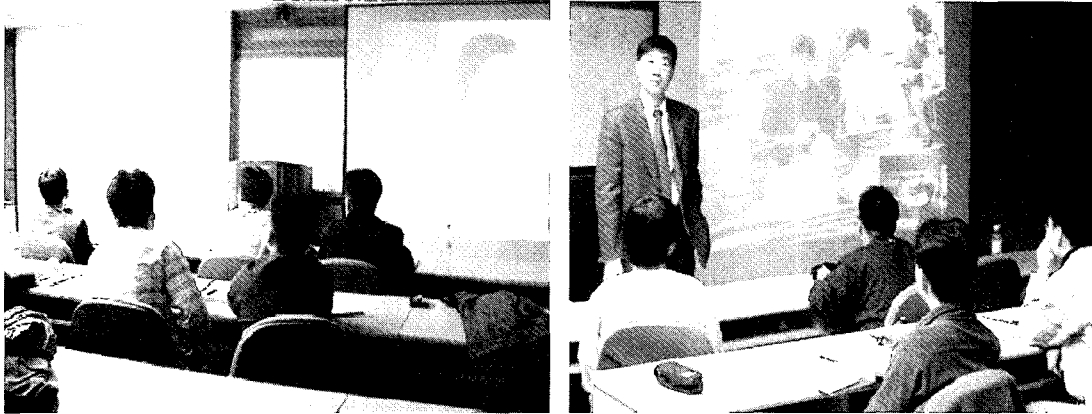


그림 8 2002년 1학기에 시행한 한양대학교 국제공동강의실



그림 9 연구실 산행(2003년 3월 북한산 백운대)