◎ 특 집

회전체 동력학 및 Tribo 요소의 연구동향

이 용 복*

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2005년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트라이볼로지 요소 (베어링/실/댐퍼)의 주요 연구동향을 요약하여 소개한다. 여기서는 광범위한 회전체 동역학 분야 중 유체기계와 관련된 부분만으로 국한시키고, 이와 관련된 국내에서 발행되었던 논문을 중심으로 분석하였다. 유체기계와 관련된 회전체 동역학 분야의 연구는 크게 로터-베어링으로 구성된 회전체 시스템의 동역학적 해석연구 분야와 베어링/실/댐퍼와 같은 회전기기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그 외 회전기기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다. 2005년 발표된 이 분야의 연구논문은 총 27편이었다. 그 중 회전체 시스템의 동역학적 해석연구와 관련하여 5편의 논문이 발표되었고, 회전기기 요소인 베어링 관련 논문이 13편, 실 및 댐퍼, 마운트 관련 논문이 9편으로 주로 베어링과 실 댐퍼에 고른 연구가 수행 되었다.

예년과 같이 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 유체 기계 가운데 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 특히 고압 비접촉 실의 경우 우주 산업과 관련 베어링 및 실 관련연구가 꾸준히 진행되었고, 환경오염 문제와 연관 무급유 베어링 (oil-free)에 대한 관심 또한 커지고 있다. 다음은 2005년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

회전기기의 연구에서는 시스템의 효율 증가를 위한 고속화와 이에 따른 안정성 향상에 많은 관심이 모아지고 있으며, 회전체 시스템의 진동과 소음을 줄이기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 또한, 기계시스템의 복잡한 진동을 유발하는 회전기계의 간극을 진단하는 연구가 진행되고 있다.

볼 베어링으로 지지되는, 통상적인 컴퓨터 하드디스크 드라이브의 스핀들 시스템은 볼과 레이스의 기하학적 불균형과 고체 간의 직접적인 접촉에 의한 높은 레벨의 진동, 특히 NRRO (non-repeatable runout)를 발생시켜 트랙밀도를 높이는데 한계가 있다. 그러나 FDB 스핀들의 유체윤활이 회전부와 정지부의 고체접촉을 방지하고 결과적으로 진동과 소음을 줄여줌으로써 자기 저장밀도를 높일 수 있다. FDB 스핀들 시스템의 X, Y와 Z방향의 변위를 과도상태로부터 정상상태까지 측정함으로써 FDB 스핀들 시스템의 휠링, 플라잉과 틸팅 거동 변화에 대한 연구를 수행하였다[1].

전자기 베어링은 전자기력을 이용한 비접촉 지지를 기본 개념으로 마찰과 마멸의 감소, 소음 및 진동 특성향상으로 고속 회전 기계와 고정밀 구동 장치에 적용되어왔다. 그러나 항공기, 선박, 자동차 등 이동 중인 차량이나 인공위성, 휴대용 전투장비까지 영역을 확장하였다. 이러한 배경에 의해서 차량에 적용하기 위한 전자기 베어링으로써 전력 소모를 최소화한 영구자석 (permanent magnet)을 이용한 호모 폴 (homo-pole)형 전자기 베어링을 설계했으며, 베이스 움직임에 따른 외부 가진을 제어하기 위하여 각도 피드포워드와 normalized filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 가속도 피드포워드 기법을 제안하고, 실험을 통하여 이의 특성을 검증하였다[2].

지금까지 로터 시스템의 진동에 관한 연구들은 구동축에서 발생되는 진동과 블레이드의 진동 현상 사이에 어떠한 연성 효과도 발생하지 않는다는 가정을 가지고 연구가 수행되어왔다. 그러나 실제 로터 시스템에서는, 블레이드를 회전시키는 구동축인 로터뿐만 아니라 로터 축과 축을 연결하는 커플링 요소 또한 유연

* 한국과학기술연구원, 트라이볼로지연구센터, 학회편집이사
E-mail: lyb@kist.re.kr

성을 갖고 있으며 따라서 블레이드의 최종단의 진동은 블레이드의 굽힘 진동 현상뿐만 아니라 추가적으로 모터 축의 비틀림 진동을 받게 된다. 그리하여 유연체 블레이드가 부착된 디스크와 이를 구동시키는 로터와 축 그리고 축과 축을 연결하는 유연체 커플링으로 구성된 시스템 모델을 소개하며 또한 모델의 운동방정식은 라그랑지 방정식으로부터 유도하는 과정을 제시하고자 한다. 또한 로터의 구동 토크 조건과 유연체 커플링의 강성 변화에 따른 블레이드 끝단의 처짐 현상과의 상관관계를 보여줌으로써 축의 비틀림 현상과 블레이드의 굽힘 현상과의 연성관계를 규명하고자 하였다[3].

수평 회전체에 존재하는 횡방향 균열은 중력의 영향으로 인하여 축이 회전하면서 개폐를 반복한다. 이렇게 반복되는 균열의 개폐 운동은 균열선단에 피로응력을 일으켜 균열 진전의 원인이 된다. 이러한 균열은 큰 사고를 일으킬 위험을 초래하며, 시스템의 강성이 비선형 특성을 갖게 한다. 이를 해결하기 위한 연구가 진행 중이며, 내용으로는 시스템의 선형 전달함수를 사용하고 균열 위치에서의 추가 기울기 (additional slope)를 자려 진동원으로 표현하여 이를 운동방정식에 함유시켰다. 균열 회전체의 진동을 해석하기 위하여, 응답과 균열에 의한 추가 기울기를 연성시킨 반복기법 (iterative method)를 제안하였다. 균열 위치에서의 응답은 영향계수를 사용하여 표현하였으며, 회전 중인 균열에서의 추가 기울기는 응답의 하나인 굽힘 모멘트로 표현하였다. 이 방법을 단순한 회전체 모형에 적용하였다[4].

기계시스템을 설치할 때 오류가 있거나 장시간 사용하게 되면 하중에 의한 변형, 마모 등에 의해 기계부품 사이에는 간극 (clearance)이 발생하게 된다. 간극은 부품 상호간에 마찰과 충격을 유발하여 기계시스템의 복잡한 진동을 발생시킴으로써 기계의 성능과 수명을 단축시키게 된다. 현재 주로 사용되고 있는 회전기계의 고장진단은 시간영역 응답에 대한 주파수 분석, 캡스트럼 (cepstrum), 스펙트로그램 (spectrogram)과 같은 퓨리에 급수에 기초한 신호처리 기법에 많이 의존하고 있다. 그러나 최근 비선형 동역학 이론에 근거한 새로운 기법들이 발표되고 있다. 축과 부싱 (bushing) 사이 간극에 의한 회전기계의 결함신호를 비선형 기법인 상과차원 해석을 이용하여 간극의 크기와 간극 내 윤활유의 존재 유무를 파악할 수 있음을 보였다[5].

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 포일 베어링

포일 베어링에 대한 다양한 해석 방법이 제시되어 해석이 이루어졌고 이러한 해석을 통해 밝혀진 포일 베어링이 가진 다양한 장점은 회전체의 베어링 요소로서 실제 시스템에 적용시키기 위한 연구의 바탕이 되었다. 기존의 air cycle machine의 베어링으로 이용되었던 공기 포일 베어링은 최근 고속 회전, 고온 환경의 터보 기기에 적용을 앞두고 실험적인 연구와 더불어 다양한 환경에서의 공기 포일 베어링의 특성 해석에 대한 연구가 이루어졌다.

포일 베어링에 있어서 구조적 강성, 감쇠를 발생시키는데 중요한 역할을 하는 범프 포일 변형에 따른 마찰력을 고려하여 해석이 이루어졌다. 이 해석에서는 새로운 쿨롱 마찰 감쇠력의 계산방법이 제시되었으며 이 결과는 실험적인 데이터와 비교 제시되어 해석 결과의 타당성을 밝혔다. 또한 고온 환경에서의 포일 베어링의 특성을 열응력을 고려하여 유한요소법(FEM)을 통해 도출해 내었다[6].

범프 포일 베어링은 공기막과 범프 형상의 탄성체로 구성되어 있고 공기막에 의해 생성된 압력에 의해 탄성체가 탄성 변형을 일으킨다. 따라서 타 유체 베어링과는 달리 편심율이 1 이상인 상태에서도 축의 부상 및 운전이 가능하다. 이러한 실제 현상과 해석과의 괴리를 극복하기 위한 해석이 이루어졌다. 범프 변형에 관한 영향계수를 유한요소법에 의해 계산하고, 이를 공기 포일 베어링의 성능해석에 적용하는 방법을 제시하였다. 이 해석에서는 기존의 해석 모델을 확장하여 마찰과 영향계수 효과를 포함하는 범프의 변형방정식을 유도하였고 기존의 결과보다 실제에 가까운 변형 결과를 가짐을 확인하였다[7].

하드 디스크 드라이브 (hard disk drive)는 최근 여러 휴대용 미디어 장치 (portable media device)에 이용되어짐에 따라 고용량, 고속, 저소음 및 높은 신뢰도가 요구되어 지고 있다. 그러나 회전 속도의 증가에 의해 유발되는 디스크의 진동은 큰 소음을 발생시키게 되고 기존의 볼베어링 지지 시스템으로는 진동, 소음에 있어서의 요구사항을 만족시키지 못하고 있다. 이러한 디스크에서의 진동을 줄이기 위해 공기베어링 개념을 도입하여 해석이 수행되었으며, 특히

저널과 스러스트가 연성된 베어링의 압력분포를 해석하고 정특성 해석을 수행하였다. 해석 결과를 검증하기 위해 실제 하드 디스크용 스핀들 모터의 부상 높이를 측정하여 스러스트 베어링의 부하용량 해석으로 유추한 부상 높이와 비교하였다[8],[9].

포일 베어링의 터보 기기에의 도입이 점차 늘어나고 있는 추세에서 연료전지 스택 내의 공기공급장치의 베어링 요소로서 포일 베어링의 적용 연구가 이루어졌다. 일반적으로 연료전지 공기공급장치의 베어링으로 볼베어링이 사용되어지고 있다. 하지만 고압, 고유량의 공기를 공급하기 위해서는 고속 환경의 요구사항이 생기고 이러한 환경에서 충분한 지지효과를 낼 수 있는 베어링으로 공기 포일 베어링이 적용되고 있다. 이러한 추세에 발맞추어 고속에서의 공기 포일 베어링의 특성 해석과 입출력 데이터를 실험적으로 얻어내어 이론적인 해석과의 비교를 통해 연료전지에의 적용 가능성을 검토하였다[10].

3.1.2 저널 베어링

저널 베어링은 회전기기의 고속화에 따라 증가하는 시스템의 진동과 소음을 저감시키기 위한 연구들이 진행되었다.

정보저장기기 (HDD)는 고용량, 고속, 저소음 및 높은 신뢰도가 요구된다. 이러한 HDD의 성능향상은 스핀들 지지요소인 베어링의 성능향상을 기반으로 이루어진다. 따라서 최근에는 기존의 볼베어링 대신 진동과 소음이 적은 유체 동압 베어링 (FDB)이 HDD에 사용되는 추세이다. Reynolds 경계조건과 half-sommerfeld 경계조건을 이용하여 유체 동압 베어링의 저널 베어링과 스러스트 베어링을 연성하여 해석하는 방법을 제안하였다 실제 HDD용 스핀들 모터의 부상 높이를 측정하여 해석결과와 비교함으로써 검증하였고 HDD의 FDB 해석 시 저널 베어링과 스러스트 베어링의 연성 효과가 고려되어야 함을 확인하였다[11]. HDD용 FDB 스핀들 시스템의 동적 운동은 매우 작고, 정교한 실험장치를 요구하기 때문에 이를 실험적으로 연구한 것은 매우 적은데, 하나의 디스크가 장착된 FBD의 거동을 휠링, 플라잉과 틸팅 거동으로 구분하여 실험적으로 연구하였다[12]. 정확한 HDD 시스템의 동특성 및 고유 모드를 규명하기 위해서는 지지 구조 (고정자, 하우징과 베이스 플레이트)에 대한 정확한 고려가 필요하다. 유한 요소법을 이용하여 유연한 지지 구조를 가진 스핀들 시스템에 대한 해석을 수행하고 실험을 통해 타당성 및 정확성을 검증하였다[13],[14]. HDD용 FDB의 모델을 Navier-Stokes Equation과 에너지 방정식을 이용한 상용유체해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 객체지향 프로그램인 파이썬 (python)을 이용하여 FDB 모델링 자동화를 이루었다[15].

증기터빈에서 틸팅패드 (tilting pad) 저널베어링은 우수한 동적 안정성 때문에 상대적으로 증기압이 크고 불안정 요인이 많은 고/중압 터빈 축을 지지하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 틸팅패드 저널베어링에서는 상부패드의 진동에 의한 패드와 로터의 상호충돌 때문에 발생하는 상부패드 선단부의 babbitt metal의 손상이라는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 경우 상부패드의 진동현상을 패드 fluttering이라고 하는데, 틸팅패드 저널베어링의 패드 fluttering 현상을 방지하기 위해 패드의 선단부에 쐐기형상의 홈을 가공한 새로운 베어링 모델을 제시하였다. 실험적으로 fluttering 현상이 발생하지 않음을 확인하였고 실제 화력 고/중압 터빈에 적용하여 1년간 연속운전을 수행한 결과 베어링 파손이 일어나지 않았다[16].

3.1.3 볼 베어링, 로울러 베어링

현재까지 가장 널리 사용되는 볼 베어링에 대한 연구는 더욱 세분화되어 성능시험설비의 개발과 수명성능을 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

극한 상황에서 운전되는 터보펌프에서 베어링의 파손은 시스템의 비정상적인 진동을 야기할 수 있으며 심한 경우에는 터보펌프의 운전 자체를 불가능하게 하기도 한다. 따라서 터보펌프가 안정적으로 구동하기 위해서는 회전계를 지지하는 요소인 베어링의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 이에 현재 한국항공우주연구원에서는 국내 최초로 액체산소 환경에서 베어링 하중시험 및 내구시험을 수행한 바 있다. 그러나 시험부 유량한계 및 기타 설비운용의 제약으로 인해 지속적인 시험은 어려운 상황이며, 이에 터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비의 구축을 통해 향후 진행될 베어링의 성능시험을 수행할 예정이다[17].

정밀 부품에 적용되는 구름 베어링용 윤활 그리스는 베어링의 수명성능에 중요한 인자로서 이에 대한 중요성은 일반화되어 있다고 할 수 있다. 자동차 전장 베어링용으로 적용되는 urea/ether계 그리스를 증주제 및 기유 (base oil)의 함량을 변화시켜 시작품을 제조하여 기초적인 물성실험과 그리스 수명실험을 통

하여 최적의 증주제 함량을 정하기 위한 예비실험을 실시하였다. 그리고 최적화 기준으로 적용된 그리스 특성값인 OIT값과 dropping point (적점)에 대하여 비교하고자 하였으며, 시험 전 후의 물리 화학적인 특성을 비교 평가하였다[18].

3.2 실

회전기기 시스템에서 작동유체의 누설량을 최소화하기 위하여 사용되는 실에 대한 연구는 작동유체가 액체인 경우와 기체인 경우로 나누어 볼 수 있다.

터보펌프는 액체 연료를 사용하는 로켓에서 산화제와 연료를 가압하여 연소기에 보내는 역할을 하는 장치이다. 터보 펌프의 산화제 펌프와 연료 펌프의 임펠러에 앞단과 뒷단에 위치하여 액화산소나 연료의 누설을 최소화하기 위하여 플로팅 링 실이 사용된다. 플로팅 링 실에 대한 연구의 신뢰성을 향상시키기 위하여 이론적인 해석과 실험을 비교 분석하는 연구가 활발히 이루어졌다. 이러한 플로팅 링 실에 대한 연구 결과를 이용하여 터보펌프의 설계에 있어서 기초적인 데이터를 제공할 수 있는 DB를 구축하였다. 그리고, 터보펌프에 사용되는 베어링과 실링 요소들의 극저온 환경 검증시험을 수행하기 위하여 극저온 베어링 및 실 시험설비를 구축하고 이에 대한 실험준비가 이루어졌다. 또한 플로팅 링의 기하학적 변화가 실의 누설 특성 및 안정성에 미치는 영향을 해석과 실험을 통하여 평가하였다[19]~[22].

가스를 윤활 매체로 하는 비접촉 미케니컬 (mechanical) 페이스 실인 드라이 가스 실은 실링 인터페이스로 액체 필름 부상 비접촉 또는 고체 접촉 미케니컬 페이스 실에서 보다 매우 작은 마찰열을 발생시키고 높은 안정성을 보이는 얇은 가스 필름을 갖기 때문에 탁월한 성능을 나타낸다. 이를 해석하기 위해서 원통 좌표계 압축성 레이놀즈 방정식에 대한 윤활 필름의 섭동을 고려한 Galerkin 유한요소 윤활 성능해석 기법이 제시되고, 이를 최대 500 rpm의 저속에서 운전되는 화학공정 믹서에 적용되는 내부의 원형 그루브를 갖는 스파이럴 그루브 드라이 가스 시일을 해석하는데 적용되었다. 특히 외경압력에 따른 윤활 특성에 대한 연구가 수행되었다. 또한, 고속 비행체에 적용되는 초고속 운전 스파이럴 그루브 드라이 가스 시일의 동특성에 관한 이론적 해석이 수행되었다[23],[24].

3.3 댐퍼(damper)

회전기기의 고속화에 의해 발생하는 진동을 저감하기 위해 우수한 성능을 갖는 댐퍼에 대한 연구가 수행되었다.

MR유체 (Magneto-Rheological fluid)와 유사하게 자장을 부가하면 유체의 점도특성이 변하는 자성유체 (magnetic fluid)는 MR유체에 비해서 자장을 부가하지 않았을 때 나타나는 기본 점도가 낮기 때문에 비교적 작은 장치에 적용이 용이하고 적용 범위가 넓고 유체를 구성하는 입자의 크기가 MR유체에 비해 작기 때문에 윤활유로서 사용이 가능하며, EH한 침전이 없는 장점을 가지고 있다. 이러한 자성유체를 스퀴즈 필름 댐퍼 (Squeeze Film Damper)에 적용하고, 자성유체를 이용한 SFD의 효과적인 회전체의 진동 제어에 대한 연구가 수행되었다. 또한 SFD의 강성 및 감쇠계수를 분석하고 부가전류에 따른 특성에 대한 연구가 수행되었다. 또한, 반능동형 스퀴즈 필름 댐퍼의 개발에 대한 연구로 MR유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼를 설계 및 제작하고, 그 동특성을 실험적으로 규명하는 연구가 진행되었다[25],[26].

차량은 주행 중에 다양한 운전조건에 따라 상하운동 및 피칭 (pitching), 롤링 (rolling), 요잉 (yawing) 운동을 한다. 이중 차량의 상하운동과 피칭은 승객의 불쾌감을 유발하는 요인으로 현가장치의 특서에 따라 좌우된다. 따라서 차량의 설계 시 현가장치의 동특성을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 차량의 현가장치요소 중 댐퍼의 비선형성을 실험을 통해 확인하고, 실험 데이터의 비선형 시스템 규명법에 적용하여 댐퍼의 비선형 모델을 시하는 연구가 수행되었다. 또한 이 모델을 ADAMS의 CSM(Conceptual Suspension Module)을 사용하여 현가장치의 부품하중에 대한 해석에 대한 연구가 수행되었다[27].

4. 결 론

2005년도 회전체 동력학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지는 않는 예년에 비슷한 수준이며, 새로이 연료전지 관련 회전체 및 윤활계에 대한 연구가 시도되었다. 특히 고성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실 등의 회전기 요소에 많은 부분을 차지하고 있는 외국의 연구 현상과는 다소 다른 모습을 띄고 있지만 국내 기술 수준

의 향상을 고려할 때 향후 이 분야에 대한 보다 많은 연구가 기대된다.

참고문헌

(1) 오승혁, 이상훈, 장건희, 2005, "3.5인치 HDD용 FDB스핀들 시스템의 휠링, 플라잉과 틸팅거동에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 39~45.

(2) 김하용, 심현식, 이종원, 강태하, 2005, "이동 차량 탑재용 전자기 베어링 시스템 설계," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 364~370.

(3) 나성수, 오병영, 이선숙, 윤형원, 차석주, 2005, "유연체 로터-커플링-블레이드 시스템의 로터 축과 블레이드의 연성 진동에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제9호, pp. 1023~1029.

(4) 전오성, 2005, "개폐균열이 존재하는 유연 회전체의 진동해석," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제10호, pp. 1137~1147.

(5) 박상문, 최연선, 2005, "상관차원을 이요완 회전기계의 간극 진단," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제7호, pp. 781~787.

(6) 조준현, 이용복, 김창호, 임윤철, 2005, "쿨롱마찰 감쇠를 고려한 공기 포일 베어링의 범프 포일 동특성에 관한 연구," 한국윤활학회 41회 추계 학술대회논문집, pp. 100~106.

(7) 김영철, 이동현, 김경웅, 2005, "포일 변형 영향계수를 이용한 공기 포일 베어링 해석," 한국윤활학회 41회 추계학술대회논문집, pp. 169~175.

(8) 김학운, 이상훈, 장건희, 2005, "컴퓨터 하드 디스크 드라이브에 사용되는 저널과 스러스트가 연성된 유체 동압 베어링의 유한 요소 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 87~95.

(9) 한재혁, 장건희, 2005, "유연한 지지 구조와 유체 동압 베어링으로 지지되는 HDD의 회전 유연 디스크-스핀들 시스템에 대한 유한 요소 고유 진동 해석," 한국소음진동공학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 251~258.

(10) 이용복, 박동진, 김창호, 2005, "연료 전지용 터보 익스펜더의 공기 포일 베어링에 대한 연구," 윤활학회지, 제21권, 제3호, pp. 114~121.

(11) 김학운, 이상훈, 장건희, 2005, "컴퓨터 하드 디스크 드라이브에 사용되는 저널과 스러스트가 연성된 유체 동압 베어링의 유한 요소 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 87~95.

(12) 오승혁, 이상훈, 장건희, 2005, "3.5인치 HDD용 FDB스핀들 시스템의 휠링, 플라잉과 틸팅 거동에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 39~45.

(13) 한재혁, 장건희, 2005, "유연한 지지 구조와 유체 동압 베어링으로 지지되는 HDD의 회전 유연 디스크-스핀들 시스템에 대한 유한 요소 고유 진동 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 251~258.

(14) 임승철, 전상복, 한윤식, 이호성, 김철순, 2005, "고정자의 유연성을 고려한 유체베어링 지지 HDD 스핀들 계의 진동해석," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 749~756.

(15) 이남훈, 권정민, 구자춘, 2005, "HDD용 유체 베어링 설계를 위한 형상 모델링의 자동화," 한국소음진동공학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 148~155.

(16) 양승헌, 나운학, 박희주, 김재실, 2005, "상부 패드의 형상 변경을 통한 'Anti-fluttering 틸팅패드 저널베어링' 개발," 유체기계저널, 제8권, 제5호, pp. 35~45.

(17) 곽현덕, 전성민, 김진한, 2005, "터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 341~347.

(18) 김상근, 박창남, 한종대, 2005, "최적화 구름 베어링용 Urea계 그리스의 특성평가 연구," 윤활학회지, 제21권, 제1호, pp. 21~26.

(19) 곽현덕, 전성민, 김진한, 2005, "터보펌프용 극저온 베어링/실 성능 시험설비", 2005 유체기계 발표회 논문집, pp. 341~347.

(20) Y. B. Lee, K. M. Ahn, K. W. Kim, C. H. Kim, T. W. Ha 2005, "The Construction of Database about the Performance for Floating Ring Seal Used in the Turbopump" ICMDT 2005, Seoul THB-103

(21) 이용복, 안경민, 김경욱, 김창호, 하태웅, 전성민, 곽현덕, 2005, "고압용 터보펌프 실의 형상에 따른 성능 평가 연구" 제 6회 우주발사체 기술 심포지움, pp. 96~100.
(22) 하태웅, 2005, "고압 터보 폄르 후로팅 링 실의 후로팅 링 거동 해석", 한국윤활 학회지, 제21권, 제3호, pp. 122~129.
(23) 이안성, 김준호, 2005, "고속비행체용 스파이럴 그루브 드라이 가스 시일의 윤활 성능해석", 윤활학회지 제21권 제1호, pp. 8~15.
(24) 이안성, 김준호, 2005, "내부 원형 그루브를 갖는 저속 드라이 가스 시일의 윤활 성능해석 및 실험", 윤활학회지, 제21권, 제2호, pp. 53~62.
(25) 김근주, 이종원, 2005, "자기유변유체를 이용한 반능동형 스퀴즈 필름 댐처의 해석 및 회전체 불균형 응답 제어", 한국 소음 진동 공학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 354~363.
(26) 안영공, 하종용, 김용한, 양보석, 안경관, 2005, "자성유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 분석", 한국 소음 진동 공학회 논문집, 제15권, 제11호, pp.1262~1267.
(27) 조성진, 전광기, 최성진, 최규재, 최연선, 2005, "자동차용 댐처의 비선형 동특성", 한국소음진동공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 873~876.