

회전체 동역학 및 회전기 요소의 연구동향

이 용 복*

1. 서 언

본 특집 기사에서는 2004년도 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 회전기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그 외 회전기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다. 2004년 발표된 이 분야의 연구논문은 총 27편이었다. 그 중 회전체 시스템의 동역학적 해석연구와 관련하여 3편의 논문이 발표되었고, 회전 기기 요소인 베어링 관련 논문이 13편, 실 관련 논문이 5편 그리고 감쇠기인 댐퍼 및 마운트 관련 논문이 6편으로 비교적 고른 연구 추세를 보이고 있다.

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, 환경 오염 문제와 연관 무급유 베어링(oil-free)에 대한 관심 또한 커지고 있다. 다음은 2004년도 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 있다. 또한 고속에서 작동하는 회전기기의 고장원인 전체 설비 및 생산에 커다란 손실을 주기 때문에 이의 상태진단은 매우 중요하게 고려되어 이상이 발생할 경우에서의 정확한 고장진단 및 신속한 조치에 대한 연구가 요구되고 있다. 이에 따라 회전체 동역학적 관점에서 시스템이 안정적으로 구동되는지를 평가하는 회전기기의 진단에 관한 연구들이 이루어졌다. 그리고 회전체 시스템의 경량화에 따라 구조적인 단순화를 이루기 위하여 복합재료의 적용가능성 여부도 연구되었다.

현장에서 시스템을 간편하게 측정 또는 분석할 수 있도록 하기 위하여 위험속도 이전의 낮은 회전속도에서 측정된 응답 실험 데이터를 이용하는 로터-베어링의 불평형 편심량을 규명하는 방법이 제안되었다. 우선 시스템의 회전수와 그에 대한 변위량만을 측정함으로써 시스템의 고유진동수와 감쇠비 그리고 편심량을 구할 수 있는 알고리즘을 제안하고 자체적으로 제작한 로터-베어링 시스템에 적용한 실험으로부터 매개변수를 규명하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다⁽¹⁾.

회전기기의 진단은 현재 전문가 시스템, 신경망, 퍼지 추론 등을 사용하여 결과를 자동으로 인식하는 것에 대한 연구가 진행되고 있다. 이와 더불어 은닉 마르코프 모델(HMM)을 회전기기의 결함인식에 사용하는 새로운 방법이 제안되었다. 은닉 마르코프 모델은 음성인식 프로그램에서 주로 사용되는 방법으로 2중 통계처리 구조로 되어 있어 통계특성이 숨어있는 신호를 모델링 하는데 유용하게 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다⁽²⁾.

헬리콥터의 구동 시스템과 같이 입출력 축의 어긋남이 있는 경우에는 U-조인트와 같은 유연 커플링으로 축의 어긋남을 보상하고 있다. 그러나 횡 방향 진동 및 비틀림 진동에 대한 불안정성을 야기할 수 있으며, 또한 커플링의 추가 등으로 구동계가 복잡해지고 유지 및 보수비용도 증가하게 되는 문제점을 가지고 있다. 그러나 이점은 고강도의 섬유 성분과 유연한 모

* 자료제공 한국과학기술연구원, 트라이볼로지 연구센터 책임연구원

E-mail : lyb@kist.re.kr

재로 이루어진 유연복합재료(FMC)를 이용한 구동 시스템의 사용으로 개선시킬 수 있다. 연구는 FMC의 특성 변화가 구동축의 유연성 및 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이루어졌다⁽³⁾.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 포일 베어링

회전기기의 고속화가 요구되어지면서 공기를 윤활제를 사용하지 때문에 마찰손실이 적은 포일 베어링에 대한 연구의 필요성은 더욱 증가되었다. 이에 따라 포일 베어링의 자체 특성에 대한 연구뿐만 아니라 베어링을 시스템에 적용시키기 위한 연구도 이루어졌다.

탑 포일의 변형모델을 각각 정상상태 레이놀즈 방정식과 비정상상태 레이놀즈 방정식에 적용하여 범프 포일의 강성변화에 따른 정특성과 동특성의 변화가 해석되었다. 탑 포일과 범프 포일을 각각 빔과 스프링으로 모델링한 해석모델을 제안하고 이를 이용하여 범프 포일의 강성변화에 대한 정특성과 동특성을 해석하였다⁽⁴⁾.

광학식 정보저장기기(optical disk drive)에서 데이터의 저장 용량의 증대와 입출력 속도를 향상시키기 위해서는 데이터 트랙 밀도의 증가와 디스크의 회전 속도의 증가가 필수적이다. 그러나 회전 속도의 증가에 의해 유발되는 디스크의 진동은 입출력시의 에러를 발생시키게 된다. 이러한 광 디스크에서의 진동을 줄이기 위해 공기 베어링 개념을 도입하여 경사베어링의 사용을 제안하고 실험을 수행하였다. 디스크의 진동에 따라 변화하는 공기 경사베어링의 강성계수와 감쇠계수를 구하여 디스크의 진동방정식과 연계하여 수치적으로 디스크 진동의 감소현상을 해석하였다⁽⁵⁾.

반도체 제조장치에서 도입이 점차 늘어나고 있는 공기 베어링(air bearing)은 주입공기의 압력과 간극에 따라 강성이 정해지는 특징을 가지고 있다. 그런데 현재 공기 베어링을 캐리지 구조물(carriage structure)에 적용 시킬 경우에는 완성된 시스템에서 베어링의 간극을 정확히 알 수 없고, 베어링 공급사에서 특정한 공기 압력에서만 간극에 따른 강성 값들을 제공해 준다는 문제점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 일반적인 공급압력에서 강성을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 또한 현재 조립된 구조물에 대한 동특성 해석을 통하여 베어링의 강성을 구하고

이로부터 개발된 프로그램을 이용하여 간극의 크기를 구하였다⁽⁶⁾.

3.1.2 저널 베어링

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

정보저장기기의 성능향상은 스핀들 지지요소인 베어링의 성능향상을 기반으로 이루어진다. 그런데 기존의 볼 베어링 대신에 유체 동압 저널 베어링을 사용하면 우수한 진동 및 소음 특성 등을 얻을 수 있다. 일반적으로 2개의 저널 베어링이 스핀들을 지지하기 위해 사용되는데, 스핀들의 무게 중심으로부터 상부 및 하부 베어링의 중심까지의 거리가 서로 다르게 설계되고 있다. 이에 따라 베어링 span을 고려하여 빗살무늬 홈을 갖는 유체 동압 저널 베어링의 동특성을 해석하였다. 유한요소법을 사용하여 레이놀즈 방정식으로부터 유막내의 압력 분포를 계산하였고, 유막 반력과 마찰 토크는 각각 압력과 전단력을 유막을 따라 적분하여 구하였다. 회전자의 비선형 운동 방정식으로부터 회전자의 병진 변위와 회전 변위와 같은 동적 거동을 해석하였다⁽⁷⁾.

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 상호 충돌 때문에 발생하는 상부패드 선단부의 babbitt metal의 손상이라는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 경우 상부패드의 진동현상을 패드 fluttering이라고 하는데, 틸팅패드 저널베어링의 패드 fluttering현상을 방지하기 위한 패드 fluttering의 발생 메커니즘을 피복에 대한 모멘트 방향 해석을 수행하여 규명하였다. 그리고 패드 fluttering이 발생하는 기존 베어링에서 예압을 적용할 때 발생하는 babbitt면의 온도상승등과 같은 문제점을 규명하고, 해결할 수 있는 베어링 설계 변경 방안을 제시하여 이를 해석적으로 검증하였다⁽⁸⁾.

3.1.3 볼 베어링, 로울러 베어링

현재까지 가장 널리 사용되는 볼 베어링에 대한 연구는 더욱 세분화되어 적용하는 시스템의 조건에서 요구하는 성능을 볼 베어링이 만족하는 지에 대한 평가가 이루어졌다.

원자로에서 구동부가 압력경계 내에 위치할 경우에는 시스템의 기밀 보장을 위해서 뿐만 아니라 원자로 냉각재의 오염 방지를 위해서 베어링부의 별도 윤활은 불가능하게 되므로 베어링은 원자로 냉각재인 물로 윤활되어야 한다. 그런데 이와 같은 수윤활 조건에서 볼 베어링의 원활한 작동을 위하여 내식성과 윤활성이 우수한 소재로 세라믹 또는 고분자 소재가 많이 적용되고 있으나 고 하중을 전달하고 방사선에 오랜 시간 견디기 위해서는 스테인리스강의 적용이 이루어져야 한다. 일반적으로 수윤활에서는 지극히 낮은 점도를 갖는 물만으로 윤활 되어야 하기 때문에 윤활 상태가 매우 열악하며, 이로 인해 접촉부에서의 마찰력은 매우 크게 나타날 것으로 예측된다. 이에 따라 원자로 환경을 모사한 실험 조건에서 볼 베어링의 마찰 특성을 고찰한 실험을 수행하였다⁽⁹⁾.

볼 베어링으로 지지되는 하드디스크 회전축계에서 NRRO(non-repeatable runout)에 가장 직접적인 영향을 미치는 것은 스피indle 모터의 회전 운동을 지지하는 볼 베어링이다. 온도 상승에 따른 볼 베어링의 특성 해석 모델을 이용하여 하드디스크 회전축계 볼 베어링 강성과 베어링 가진 주파수 변화를 해석하였다. 그리고 실험을 통해 온도 상승에 따른 하드디스크 회전축계 NRRO의 변화를 측정하고, 이를 볼 베어링 특성 해석 결과 및 온도 상승에 따른 하드디스크 회전축계 고유 진동수 측정 실험 결과와 비교함으로써 온도 상승에 의한 볼 베어링 특성 변화가 NRRO에 미치는 영향을 분석하였다⁽¹⁰⁾.

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 한국항공우주연구원 에서 개발 중인 터보펌프 산화제 펌프에 사용되는 203 및 207 베어링의 성능을 반경 방향 하중과 운전속도 그리고 냉각유량과 작동시간 등을 고려하여 검증하였다⁽¹¹⁾.

자동차에서 허브 베어링은 차량의 하중을 지지하고 바퀴와 차체를 연결하면서 바퀴의 회전 운동을 가능하게 하는 요소이다. 허브 베어링은 외륜과 내륜 사이에 있는 볼들이 접촉하면서 회전하므로 과도한 하중이 작용하면 베어링을 구성하고 있는 요소들에서 결함이 발생할 수 있다. 주기적인 충격신호가 잡음 속에 완전히

몰려 있는 경우에도 결함을 검출할 수 있는 것으로 알려진 방법으로 최소분산 캡스트럼(minimum variance cepstrum-theory)이 있는데, 이는 잡음 신호는 랜덤(random)하여 확정신호(deterministic signal)와는 신호특성이 구별된다는 점을 이용하여 주기신호를 찾아내는 방법이다. 본 연구는 이 방법이 실제 차량에 장착된 허브 베어링의 경우에도 적용이 가능한가를 검증하기 위하여 이루어졌다⁽¹²⁾.

구름 베어링은 적은 마찰력으로 큰 부하를 지지할 수 있기 때문에 모터 및 펌 그리고 펌프와 발전기등과 같은 여러 종류의 회전기기의 지지 베어링으로서 광범위하게 사용되고 있다. 반경 방향의 정하중을 받고 있는 원통형 로울러 베어링에 대한 소음 특성이 측정되고, 하중 변화에 대한 베어링 소음 변화와 하중을 받고 있는 상태에서의 베어링 틈새와 윤활 유체의 점도 그리고 로울러 개수가 베어링 소음에 미치는 영향이 평가되었다⁽¹³⁾.

3.1.4 자기 베어링

전자기력을 이용하여 회전축을 비접촉식으로 지지하므로 윤활없이 작동 가능하며 능동적으로 제어할 수 있다는 특징을 가지고 있는 자기 베어링에서는 다양한 제어방법에 대한 연구가 이루어졌다.

최적 제어 기법인 LQR(Linear Quadratic Regulator)이 자기 베어링 제어에 적용되었다. 회전체의 고속회전에 따른 자이로스코픽 효과를 고려한 자기 베어링 시스템의 운동방정식을 해밀턴의 변분원리로 제시하였고, 시스템의 제어를 위해서 LQR 최적제어기와 H_{∞} 강건 제어를 설계하였다. 회전체의 변위, 속도 및 전류를 상태변수로 하는 LQR제어기에 확장된 Q, R 가중행렬 선정방법을 도입하였고, LMI(Linear Matrix Inequality)에 기초한 H_{∞} 제어기를 이용하였으며, 회전에 의해 발생하는 진동과 시스템에 외란과 센서 잡음을 인가한 경우에서 두 제어기의 회전진동과 외부입력 소거에 대한 제어성능을 수치 해석과 실험을 통하여 비교 분석하였다⁽¹⁴⁾.

능동(active) 자기 베어링은 마찰의 영향을 근본적으로 해결할 수 있으나 축 방향의 강성을 기존의 기계적 베어링으로 지지하는 경우와 같이 높이기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 차량의 운동에 따른 축의 전자석 기준 상대적 진동이 증가하는 문제가 발생한다. 슬라이딩모드제어(SMC: Sliding Mode Control)는 베이스 외란을 측정하지 않고 외란 응답

을 감소시키는 방법으로 사용된다. 1자유도 전자기 베어링계에서 외란응답 감소를 목적으로 제시된 관측기 기반 슬라이딩모드제어를 다자유도 전자기 베어링계에 적합도록 수정하여 적용하였으며, 2자유도 전자기 베어링계에 적용한 실험결과를 통해 제어기 성능을 검증하였다⁽¹⁵⁾.

이동 차량에 장착되어 정지 또는 이동하는 목표물을 추적하여 목표물 영상을 운용자에게 제공하기 위한 목적으로 사용되는 조준경은 방위각과 고각방향으로 회전할 수 있는 2자유도 김발 구조를 가지고 있다. 이러한 조준경에서 마찰에 의한 안정화 성능 저하를 극복하기 위하여 2자유도 전자기 베어링계를 제작하였으며, 슬라이딩모드 제어를 적용한 실험을 통해 그 적용성 및 성능을 규명하였다⁽¹⁶⁾.

3.2 실(seal)

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. 플로팅 링 실은 이러한 터보펌프에서 산화제 펌프와 연료 펌프의 임펠러에 앞단과 뒷단에 위치하여 액화산소나 연료의 누설을 최소화하기 위하여 사용된다. 이러한 플로팅 링 실에 대한 연구의 신뢰성을 향상시키기 위하여 이론적인 해석과 실험을 통한 연구 결과가 비교 분석되었다. 또한 플로팅 링 실의 누설 특성을 향상시키기 위해 실 내면에 원형 홀(hole)을 가공한 댐퍼(damper) 플로팅 링 실이 제안되었으며 이에 대한 실험적 연구가 수행되었다^{(17),(18)}.

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 스파이럴 그루브 드라이 가스 실에 적용하여 실 면의 코닝(coning)과 그루브의 개수가 실의 윤활 성능지표에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 스파이럴 그루브의 상세 설계 파

라미터인 스파이럴 각도와 그루브의 폭비, 반경비, 깊이비, 테이퍼비가 윤활 성능지표에 미치는 영향을 해석하였다^{(19),(20)}.

스팀터빈에서 비접촉식 환상 밀봉장치로 널리 사용되고 있는 래버린스 실(labyrinth seal)은 스팀의 교축작용(throttling process)을 이용하여 누설을 방지하는 것으로, 날카로운 실 스트립(strip)을 회전부(rotor) 또는 고정부(stator)에 차례로 배열하여 누설 증기가 교축과 확대를 반복하는 과정에서 발생하는 압력강하 효과로부터 누설량을 저감시키게 된다. 초초임계압(ultra super critical) 스팀 터빈에 사용되는 조합형 엇갈린 래버린스 실(combination-type-staggered-labyrinth seal)의 누설 증기량과 동특성 계수들을 예측할 수 있는 해석 기법을 개발하고 제시하였다⁽²¹⁾.

3.3 댐퍼(damper)

고속화에 따른 회전기기에서의 높은 안정성에 대한 요구는 우수한 성능을 갖는 댐퍼의 설계를 필요하게 되었다.

회전체의 불안정 진동을 유발하는 지지 베어링의 동특성을 향상시키기 위해 다양한 베어링이 개발되어 있다. 그러나 그중에서 플레인 유막베어링은 가격이 저렴하나 낮은 속도에서 불안정한 진동이 발생하고 틸팅패드 유막베어링은 안정성이 좋으나 가격이 비싸며 또한 위험속도를 지날 때 진동감쇠력이 작다는 문제점을 가지고 있다. 그런데 대량 생산이 가능하여 저렴한 접판스프링 댐퍼(LSD)를 플레인 유막베어링에 적용한 경우에는 불안정한 진동문제를 해결할 수 있으며 진동감쇠력도 매우 높게 나타났다. 이러한 접판스프링에서 지지강성의 비대칭성이 회전체 안정성에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 연구하였다⁽²²⁾.

MR(Magneto-Rheological) 댐퍼는 자기장이 가해지면 유체의 점성이 바뀌는 지능형유체인 MR유체를 이용하여 감쇠력의 연속적인 조절이 가능한 가변 댐퍼이다. 이러한 MR댐퍼의 고성능화를 위해 MR댐퍼의 설계변수 변경에 따른 감쇠력의 변화를 예측하였으며 또한 제작하여 감쇠력 시험을 수행하고 예측결과를 비교하였다⁽²³⁾.

고성능 고출력 엔진의 등장으로 인해 엔진의 비틀림 진동의 크기는 더욱 증가하고 있는 반면, 구동계는 최적 설계 기술의 발달에 따라 중량감소가 이루어져

구동계 전체의 진동측면에서는 매우 열악해졌다. 지금까지 개발된 모든 댐퍼는 일정한 감쇠력을 갖는 구조로 되어 있어, 엔진의 모든 가진 주파수 영역에서 효과적인 감쇠특성을 발휘하는 데에는 한계를 보이고 있다. 따라서 효과적인 구동계의 진동저감을 위해서는 엔진 및 차량의 운전조건에 따라 댐퍼의 특성이 변하는 댐퍼나 댐퍼의 특성을 능동적으로 제어할 수 있는 가변 댐퍼 시스템이 필요하다. 이에 따라 구조가 간단하여 제작이 용이하고 가격이 저렴한 건 마찰 댐퍼를 이용하며 능동적 제어가 가능한 댐퍼시스템에 대하여 연구하였다⁽²⁴⁾.

기존의 수동형 댐퍼와 같이 단순한 형식을 가지고 순간적인 운동 상태에서 댐퍼관을 조절하여 감쇠력을 변화시킴으로써 제어력을 발생시키는 반능동식 장치가 제안되었다. 그리고 자성 유체를 이용하여 점성댐퍼를 개발하고자 할 때 사용될 수 있도록, 영구 자석과 전자석을 사용한 자장의 작용이 반능동식 댐퍼의 진동특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다⁽²⁵⁾.

하드디스크에서 저장용량의 향상을 위한 트랙밀도의 증가는 미세한 진동에도 트랙을 읽고 쓸 때 생기는 오동작인 트랙 비정렬 (TMR: track misregistration)을 자주 유발하게 되어 결국 미세진동이 정보저장능력 증가의 제한요소로 작용하게 된다. 따라서 하드디스크에서 회전체의 진동과 가진원을 억제하는 것이 고용량의 정보저장기술에서 저장 용량 증가를 위한 중요한 요소가 된다. 댐퍼의 설계를 위한 유동해석의 방법을 소개하고 그로부터 디스크에 가해지는 가진원을 분석하여 적절한 댐퍼형상을 고안하고 이를 장착한 하드디스크에서 PES(Position Error Signal)가 저감되는 것을 확인하였다⁽²⁶⁾.

외부 가진력이 제거되었을 때 스틱(stick)의 발생 없이 항상 시스템의 원점으로 복귀하도록 특성을 설정할 수 있는 변위비례식 마찰댐퍼를 실제로 고안하고 수학적 모델링을 통해 감쇠력에 영향을 미치는 인자들을 파악하였다. 그리고 변위비례식 마찰댐퍼가 철도차량의 연결장치나 자동차 구동계의 비틀림 댐퍼등과 같이 충격하중이 작용하는 시스템에 사용될 경우를 가정하여, 임펄스 가진 시의 응답특성을 해석적으로 구하고 점성댐퍼 시스템의 응답특성과 비교하였다⁽²⁷⁾.

4. 결론

2004년도 회전체 동력학 분야의 연구는 과거의 연

구 방향에 크게 벗어나지는 않지만 예년에 비슷한 수준이며 국내 우주 발사체 관련 고압 실에 대한 논문 수가 증가 하였다. 고성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실들의 회전기 요소에 많은 부분을 차지하고 있는 외국의 연구 현상과는 다소 다른 모습을 띄고 있지만 국내 기술 수준의 향상을 고려할 때 향후 이 분야에 대한 보다 많은 국가의 지원이 요구되어 진다.

참고문헌

- (1) 이동환, 이형우, 박노길, 김영일, 2004, "현장 불평형 응답에 의한 로터-베어링 시스템 매개 변수 규명에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 8호, pp. 684~694
- (2) 이종민, 황오하, 송창섭, 2004, "터보회전기기의 진동모니터링 및 진단을 위한 이산 은닉 마르코프 모델에 관한 연구," 유체기계저널, 제 7권, 제 2호, pp. 41~49
- (3) 홍을표, 신승수, 2004, "축어긋남이 있는 유연 복합재 고속구동축의 특성 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 1호, pp. 32~39
- (4) 이동현, 김영철, 김경웅, 2004, "범프포일 강성변화에 대한 포일저널 베어링의 정적, 동적 성능해석," 윤활학회지, 제 20권, 제 5호, pp. 245~251
- (5) 최의근, 임윤철, 2004, "공기 베어링 개념을 이용한 디스크 진동 저감 연구," 윤활학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 197~203
- (6) 정순철, 김덕수, 유충준, 장승환, 이재웅, 2004, "공기베어링으로 지지된 캐리지 구조물의 동특성 해석," 한국소음진동공학회 논문집, 제 14권, 제 11호, pp. 1059~1065
- (7) 윤진욱, 2004, "베어링 Span을 고려한 저널 베어링의 동특성 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 9호, pp. 779~784
- (8) 양승현, 박철현, 김재실, 하현천, 2004, "에압변경을 통한 틸팅패드 저널베어링의 패드 Fluttering 방지에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 4호, pp. 344~351
- (9) 이재선, 김종민, 김지호, 박홍윤, 지성균, 2004, "스테인레스강 볼베어링의 수윤활 마찰 특성," 윤활학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 140~144

- (10) 김동균, 장건희, 2004, “볼 베어링에 의해 발생하는 HDD회전축계 NRRO의 온도 상승에 따른 변화,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 9호, pp. 792~800
- (11) 박현덕, 전성민, 김진한, 조광래, 김선용, 우관제, 2004, “터보펌프용 극저온 볼 베어링의 성능검증,” 윤희학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 177~182
- (12) 박춘수, 최영철, 김양한, 고을석, 2004, “신호대 잡음비에 무관한 허브 베어링 결함 검출 방법,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 12호, pp. 1287~1294
- (13) 노병후, 김대근, 김경웅, 2004, “반경 방향 하중을 받는 원통형 로울러 베어링의 음장 해석,” 윤희학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 77~83
- (14) 강호식, 정남희, 윤일성, 송오섭, 2004, “자기 베어링을 이용한 회전축의 최적제어 및 강건제어,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 12호, pp. 1330~1337
- (15) 강민식, 2004, “베이스 운동을 받는 다자유도 능동자기베어링계에서 외란 관측기 기반 슬라이딩모드 제어,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 11호, pp. 1182~1194
- (16) 강민식, 2004, “능동자기베어링계의 슬라이딩모드 제어,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 5호, pp. 439~448
- (17) 이용복, 안경민, 김창호, 하태웅, 2004, “액체 추진 로켓 터보 펌프용 플로팅 링 실에 대한 해석 및 실험 결과의 비교 연구,” 유체기계저널, 제 7권, 제 6호, pp. 21~27
- (18) 안경민, 이용복, 김창호, 하태웅, 2004, “플로팅 링 실의 누설 특성에 관한 실험적 연구,” 윤희학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 183~189
- (19) 이안성, 양재훈, 최동훈, 2004, “스파이럴 그루브 드라이 가스 시일의 윤활 성능해석 - Part I: 유한요소 해석 및 기본 성능평가,” 윤희학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 58~67
- (20) 이안성, 양재훈, 최동훈, 2004, “스파이럴 그루브 드라이 가스 시일의 윤활 성능해석 - Part II: 그루브 설계 파라미터의 상세 성능평가,” 윤희학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 68~76
- (21) 하태웅, 이용복, 김승중, 김창호, 2004, “스팀 터빈용 조합형 엇갈린 래버런스 실의 누설량 및 동특성 해석,” 유체기계저널, 제 7권, 제 6호, pp. 45~54
- (22) 제양규, 2004, “베어링 지지댐퍼 강성의 비대칭이 회전체 동특성에 미치는 영향,” 한국소음진동공학회, 제 14권, 제 6호, pp. 463~469
- (23) 백운경, 이종석, 2004, “고성능 MR댐퍼의 설계,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 6호, pp. 470~477
- (24) 박동훈, 최명진, 2004, “차량구동계용 가변 댐퍼시스템에 관한 연구,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 9호, pp. 837~845
- (25) 황승식, 2004, “자성유체를 이용한 반능동식 댐퍼에 관한 실험적 연구,” 유체기계저널, 제 7권, 제 4호, pp. 24~31
- (26) 권정민, 구자춘, 강성우, 한윤식, 황태연, 2004, “HDD의 DISK 진동감쇠 및 PES 저감을 위한 Disk Damper의 설계와 그 해석,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 3호, pp. 201~207
- (27) 박동훈, 최명진, 2004, “변위비례식 마찰댐퍼 시스템의 임펄스 가진 응답해석,” 한국소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 5호, pp. 377~384