

회전체 동역학 분야 연구동향

이 용 복*

1. 서 론

2003년도 회전체 동역학 분야의 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(seal)/댐퍼와 같은 회전기기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그 외 회전기기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다. 2003년 발표된 이 분야의 연구논문은 총 27편이었다. 그 중 회전체 시스템의 동역학적 해석연구와 관련하여 8편의 논문이 발표되었고, 회전 기기 요소인 베어링 관련 논문이 11편, 실 관련 논문이 3편 그리고 감쇠기인 댐퍼 및 마운트 관련 논문이 5편으로 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 2003년도 발표된 논문을 중심으로 분야 별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근의 회전기계 시스템은 단위 중량 당 에너지 효율을 높이기 위하여 고속화, 소형화, 경량화 추세이며 이에 따른 엄밀한 동역학적 해석 기술과 고속화 기술

및 신뢰성 확보 기술이 요구되고 있다. 특히 회전체 시스템의 동역학적 해석 및 설계는 고속에서의 안정성 및 내구성과 직결 된 문제로 이에 대한 많은 관심이 고조되고 있다.

베기가스를 이용하여 엔진 연소실 내부에 공기의 질량을 증가시키기 위해 사용되는 터보 과급기(turbocharger)의 로터는 주로 오일 베어링으로 지지되고 있다. 그러나 이러한 형태의 오일 베어링은 현재 베기가스에 대한 규제가 강화되고 있기 때문에 적절하지 않을 수 있다. 따라서 그것을 대체할 수 있는 공기 포일 베어링을 이용한 터보 과급기에 대한 회전체 및 베어링에 대한 설계 방법에 대한 연구를 비롯 회전체 시스템 전반에 걸친 안정성 연구들이 이루어졌다.

터보 과급기 로터-베어링 계에 대한 정적 평형 위치, 위험 속도, 안정성, 불균형 응답, 및 로터 응력에 대해서 고려하기 위해서 섭동법을 통하여 구한 공기 포일 베어링의 강성은 물론, 감쇠 계수를 고려하는 연구가 이루어졌다⁽¹⁾.

또한 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 원심압축기에서 나타나는 공역학적 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향을 실험을 통해서 규명하고, 아울러 공역학적 불안정성이 회전체동역학적 안정성에 미치는 연성 효과를 분석하여 고속회전 터보기계에서 운전 안정성을 향상시키는 방향을 제시하였다⁽²⁾.

유체 윤활 저널 베어링으로 지지되는 축-베어링계에 대하여 각 설계 변수들에 대한 인자가 베어링 소음에 미치는 영향을 알아보기 위하여 축의 불균형 질량에 의한 질량 편심, 베어링 길이 및 간극 그리고 윤활 오일의 점도가 베어링 소음에 미치는 영향을 여러 가지 운전 조건에 대하여 비교하였다⁽³⁾.

또한 Hamilton 원리를 이용하여 4자유도의 회전체-자기베어링 시스템의 운동방정식을 유도하여 이를 상태공간식으로 변환하고, 선형행렬부동식(LMI)에 기초한 H_{∞} 제어를 설계하여 외란(질량 편심)에 의한 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 보였다. 이때, 혼합

* 한국과학기술연구원, 트라이블로지 연구센터
E-mail : lyb@kist.re.kr

감도 최소화와 국소 극점 배치에 의한 루프쉐이핑을 통하여 성능개선을 도모하였다⁽⁴⁾.

열린 균열이 있는 일반 회전체의 새로운 모델링 방법을 제시하고 이를 기초로 동특성 해석을 실시하였다. 먼저, 균열 위치에서의 각변위에 대한 스프링 모델을 적용하였고, 비대칭 회전체에 대해 정지좌표 및 회전 복소좌표계 운동방정식을 유도하였다. 그리고 이를 기초로 열린 균열을 갖는 회전체에 대한 동특성 변화를 분석하였다. 또한 단순 회전축에 균열을 발생시켜 얻은 실험적 고유진동수와 제안된 방법에 의해 계산된 고유진동수를 비교하여 제안된 모델링 방법의 적합성을 검증하였다. 그리하여, 제안된 방법을 회전체에 적용하는 과정을 설명하기 위해 제안된 모델링 방법을 이용하여 균열의 깊이 및 위치에 따른 고유치 변화를 분석하였으며 그 결과로부터 균열의 크기와 위치를 진단하는 방법을 제안하였다⁽⁵⁾.

기 정립된 기어 쌍의 자이로스코픽 효과를 고려한 일반화된 횡-비틀림 연성진동 유한요소 모델을 적용하여, 기어로 연성되어 서로 다른 속도에서 운전하는 2축 로터-베어링 시스템의 유한요소 운동 방정식으로부터 불균형 응답 궤적을 구하는 일반화된 해법과 함께 응답 궤적에 대한 최대·최소 반경의 해석적 해가 제시되었다. 그리고, 이들을 적용하여 불-피니언 기어의 증속기를 채택하고 있는 800 냉동톤 터보 냉동기 로터-베어링 시스템의 연성 불균형 응답 해석을 수행하였다⁽⁶⁾.

기계의 종류와 구성 요소, 운전 조건 등의 정보를 고려하여 ISO 진동규격에 맞는 경보 레벨, 비상정지 레벨을 선정하였고, 이를 이용하여 주파수 성분들의 한계값을 정하였다. 추론 과정에 퍼지 이론을 적용하여 정상, 이상 및 중간단계의 정보를 정량적으로 활용한 퍼지 전문가 시스템을 제안하였으며, 규칙 기반 지식들은 기계 종류별로 모듈화 하여, 그 중 대상 기계에 적합한 것을 선택적으로 사용함으로써 진단의 신뢰성을 높였다. 아울러 실험 장치를 통한 모의 실험결과와 사례를 통하여 제안된 시스템의 성능을 확인하였다⁽⁷⁾.

일반적인 비대칭 회전체의 해석과 모드시험에 유용한 일반 복소 모드해석 기법을 제시하였고, 비대칭 회전체에 대한 시간영역에서의 등가시불변 운동방정식을 기반으로 변조 복소 좌표계에서의 고유치와 고유벡터의 특성에 대해서도 자세하게 기술하였다. 또 모드해석법의 검증 및 실용적인 예를 보이기 위해 두 개의 디스크를 포함한 탄성 회전축에 비대칭인 요소가 존재하는 예제를 고려하였으며 응용예로서 비선형 거동을

배제한 열린 균열 모형을 기반으로 회전축의 균열진단에 적용 가능성을 확인하였다⁽⁸⁾.

3. 회전 기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 포일 베어링

최근 포일 베어링을 고속 터보 기기에 적용하기 위한, 고속화, 고효율성, 그리고 환경 문제와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 연구로는, 터보 과급기 회전체 설계에 대한 연구가 진행되었다. 포일 베어링의 강성과 감쇠를 섭동법으로 구한 후, 이를 기반으로 터보 과급기 시스템의 공진, 진동 크기 및 안정성에 대한 설계를 검토 하였고, 포일 베어링의 컴플라이언스와 틈새에 대한 시스템의 영향을 연구하였으며, 터보 과급기에 적용이 가능한 베어링을 제시하기 위한 연구가 있었다⁽⁹⁾.

고속 터보기계용 공기 포일 저널 베어링의 신뢰성에 관한 연구에서는 하중지지 능력 시험과 10,000회 반복 부상 시험을 하였다. 이를 통하여 알게 된, 실험적 결과를 수치해석 및 실험계수의 결과와 비교하였으며, 로터의 회전속도에 따른 포일 베어링의 부상특성을 규명하여, 포일 베어링의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다⁽¹⁰⁾.

로터-베어링 시스템의 신뢰성 향상을 통한 내구성 확보와 공력 요소의 안정성을 위하여, 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기의 공력 불안정성이 로터에 미치는 진동 영향에 관한 연구가 진행되었다. 터보 압축기의 2단 직렬 압축 성능을 고찰하기에 앞서, 두 개의 다단 압축기에 대한 실험을 수행하였다. 압축기에서 발생하는 급격한 외부 충격 및 입구부로 유입되는 외부 유동에 의한 공력 불안정성 및 주기적인 유동의 압력변동에 의한 로터의 진동 영향을 파악함으로써, 압축기의 안정성 향상을 위한 방법을 제시하였다⁽¹¹⁾.

또한, 무급유 터보 기기에 적용되는 고온 공기 포일 저널 베어링의 연구 현황을 알아보았는데, 무급유 공기 포일 베어링의 하중지지 능력, 고온 고체 윤활 코팅, 그리고 해석과 모델링 툴 기술의 큰 발전을 통해, 군수용 추진 및 동력 시스템의 범위에 무급유 기술을 적용할 수 있게 하였다. 또한, 이러한 연구를 통해, 시스템의 신속성을 향상시키고, 군사 시스템의 민감성과 내구성을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다⁽¹²⁾.

3.1.2 저널 베어링

점차 고속으로 운전되는 회전 기계들에 있어서, 회전 기계의 진동 및 소음이 설계자에게 큰 관심으로 대두되고 있다. 축-베어링계의 저소음 설계에 관한 연구에서는 축의 불균형 질량에 의한 질량 편심, 베어링 길이 및 간극 그리고 윤활 오일의 점도가 베어링 소음에 미치는 영향을 여러 가지 운전 조건에 대하여 비교하였다. 2차원 Newton-Raphson 법을 이용하여 축 중심의 정적평형위치를 구하였으며, 4차 Runge-Kutta 적분법을 이용하여 운동방정식의 적분을 수행함으로써, 유체 윤활 저널 베어링으로 지지 되는 축-베어링계에 대하여 베어링의 설계 변수 및 윤활제 점도 그리고 축의 질량편심이 베어링의 소음에 미치는 영향을 분석 하였다⁽¹³⁾.

극저온 정압 저널 베어링의 성능해석에 관한 연구에서는 난류유동, 압력강하, 가변 밀도 및 점도의 영향에 대해서, 각각 진행되었는데, 2열의 리세스를 갖는 극저온 정압저널베어링을 대상으로 난류효과, 리세스 경계에서의 압력강하 그리고, 압력에 따른 밀도 및 점도의 변화를 선택적으로 고려한 다양한 수치해석을 수행하여, 각 효과가 극저온 정압저널베어링의 정특성에 미치는 영향을 규명하였다⁽¹⁴⁾.

흡이 회전하는 빗살무늬 저널 베어링의 안정성 해석에 관한 연구도 진행 되었다. 회전하는 빗살무늬 흡을 갖는 유체 동압 저널 베어링을 계수가진계로 간주하였다. 이의 안정성을 해석하기 위해 유한요소법과 섭동법을 이용하여 동특성 계수를 구하였으며, 운동 방정식의 해를 푸리에 급수 전개로 가정 하였고, 그 결과 운동 방정식은 푸리에 계수에 대한 선형 대수 방정식으로 표현되었다. 이 대수 방정식으로부터 Hill의 무한 행렬식을 구함으로써 계수가진계의 안정성을 구하였다⁽¹⁵⁾.

증기터빈용 대형 틸팅패드 저널 베어링에서 가장 빈번하게 발생하는 문제점 중의 하나는 상부패드 선단부의 babbitt metal의 손상이다. 이에 대한 근본 원인을 규명하고 방지대책을 수립하는데 있어서, LOP형 6-패드 틸팅패드 저널 베어링의 상부패드 Fluttering 특성에 대한 연구가 진행되었다. 증기터빈용 대형 틸팅패드 저널 베어링에 대한 상부패드의 fluttering 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 실제 베어링과 거의 동일한 시험베어링을 설계/제작하고, 실험을 수행하였으며, 틸팅패드 저널베어링의 패드 fluttering 하는 진동특성의 충분한 이해와 Anti-fluttering 틸팅패드 저널베어링을 개발하는데 필요한 참고자료로서 매우 유용하게 활용되었다⁽¹⁶⁾.

3.1.3 로울러 베어링

구름 베어링은 적은 마찰 특성을 가지며 큰 부하를 지지할 수 있기 때문에 펌프와 발전기 등과 같은 회전 기계에 광범위하게 사용되고 있다. 특히, 환경 소음의 규제로 인해 소음과 관련된 문제에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 원통형 로울러 베어링의 소음 특성에 관한 연구에서는 구름 베어링의 음향학적 특성 규명을 위한 기초연구로써, 무부하 조건에 있는 무한장 원통형 로울러 베어링에 대한 소음 특성을 수치해석을 통하여 소음원의 성분 및 기본 주파수에 관한 관계식을 규명하였고, 베어링의 경방향 내부 틈새와 윤활 유체의 점도 그리고 로울러 개수가 베어링의 소음 특성에 미치는 영향을 알아보았다⁽¹⁷⁾.

3.1.4 자기 베어링

자기베어링은 고온, 진공 중에서 작동할 수 있고, 센서와 연계하여 진동을 능동적으로 제어할 수 있는 등의 장점이 있는 베어링이다. 비대칭 로터-자기베어링 시스템의 LMI에 기초한 H_{∞} 강건제어에 관한 연구에서, 선형행렬부동식(LMI)에 기초한 H_{∞} 강건 제어를 설계하여 질량 편심에 의한 타원형 단면 회전체의 진동을 자기베어링을 작동하여 제어하기 위한 연구를 수행하였다. 질량 편심 하중에 의한 외란 및 센서 잡음에 대한 주파수 응답 및 시간응답을 고찰하여, LMI에 기초한 H_{∞} 제어기 설계의 편이성을 확인하였고, LQR 제어기와 비교하여 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다.⁽¹⁸⁾

자기 베어링 시스템을 가진기로 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 계수 규명에 관한 연구도 진행되었다. 스퀴즈 필름 댐퍼는 볼 베어링과 저널 베어링을 복합적으로 이용하고 있는 형태이며, 그 거동이 복잡하다. 이 연구에서는 자기 베어링 시스템을 가진기로 하는 스퀴즈 필름 댐퍼 실험 장치를 제안하여, 중앙 이송 흡이 설치된 무한 소폭 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성을 이론적, 실험적인 방법으로 규명하였다. 이론적인 해석을 위해, 이송 흡에 의한 효과가 고려된 해석을 통하여 동특성 계수들을 유도하였고, 이를 검증하기 위해 자기 베어링 시스템을 이용하여 실험을 수행하였다. 이러한 실험장치와 해석방법을 사용하여 공극의 변화에 따른 동특성 계수의 변화를 이론치와 비교하였으며, 자기 베어링 시스템이 기존 시스템에 비하여 유체 베어링의 실험에 이상적으로 사용될 수 있음을 보였다⁽¹⁹⁾.

3.2 실(Seal)

최근 원심 펌프의 고성능화에 따른 고속화 및 소형화 설계 추세에 따라 나선 홈 실 틈새에서 발생하는 유체력이 증가하여 펌프 회전축계의 불안정 진동을 유발하는 원인이 되고 있다. 따라서 three-control-volume 해석 방법과 나선 홈 실의 펌프 작용에 의한 겹보기 압력차와 평행 홈 내의 유속에 나선 홈의 압력흐름을 고려한 해석방법을 조합한 나선 홈 실 틈새를 통한 누설량과 유체력을 나타내는 회전체 동역학적 계수 해석 방법을 제시하고 해석결과를 주요한 실험결과와 비교함으로써 타당성을 검증하는 연구가 이루어졌다.⁽²⁰⁾

또한, 매끈한 면을 갖는 후로딩 링 실의 누설량을 줄이기 위한 방법으로 링의 내면에 원형 단면의 구멍을 새긴 댐퍼 후로딩 링 실을 제안하고, 원형 단면 구멍의 밀도에 따른 누설 특성 및 회전체 동역학적 특성을 이론적으로 예측할 수 있는 해석방법을 제시한 연구도 이루어졌다.⁽²¹⁾

이와 아울러 실을 통한 누설량을 감소시키기 위해서, 실 틈새를 작게 설계할 수 있지만, 고속회전시 로터의 진동에 따른 접촉 마멸의 문제로 인해 틈새를 줄이는 데는 한계가 있기 때문에 실 표면의 점성 마찰 계수를 크게 하는 방법으로 다양한 표면의 형상을 갖는 실이 제안되기도 하였다. 환상 비접촉 실의 표면 형상에 적용이 되는 임의로 거칠게 한 표면의 마찰 특성을 규명하고자 마찰시험장치를 설계, 제작하였으며 매끈한 표면의 마찰계수에 대한 실험결과와 이론적 해석결과로부터 실험 장치의 성능을 검증하였으며 댐퍼 실에 적용되는 원형단면의 구멍을 갖는 표면에 대한 마찰계수를 평판 시험기를 사용하여 측정하는 연구가 이루어졌다.⁽²²⁾

3.3 댐퍼(Damper), 마운트(Mount)

3.3.1 스퀴즈필름 댐퍼

종래의 윤활유가 충전된 기존의 스퀴즈필름 댐퍼(SFD)에 단순한 전자석을 설치함으로써 ER 또는 MR 유체를 이용하는 SFD에 비해서 내구성, 부식, 산화 문제 등이 발생하지 않는 반면에 가제어성 감쇠특성을 갖는 새로운 SFD를 제안하고 그 특성을 실험적으로 평가하는 연구가 이루어졌다.⁽²³⁾

또한, 자기 베어링 시스템을 가진기로 하는 스퀴즈 필

름 댐퍼 실험 장치를 제안하고, 중앙 이송 홈이 설치된 무한 소폭 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성을 이론적, 실험적인 방법으로 규명하는 연구가 이루어졌다. 이와 아울러 추가적으로 실링 효과가 고려된 향상된 모형을 만들고, 이를 실험을 통해 검증하는 연구가 수행되고 있었다.⁽²⁴⁾

영구자석을 이용한 감쇠기는 높은 전류 및 구동 드라이브가 필요 없으며, 전원이 없어도 사용 가능하므로 시스템을 경량화 및 간략화 시킬 수 있다는 장점에 기인하여 와전류 감쇠기(ECD)에 대한 연구가 수행되었다. 외팔보의 끝단에 부착된 ECD를 대상으로 이론적인 모델링 방법을 제시하였고 ECD가 구조물의 진동 특성에 미치는 영향을 조사하고 이론 모델을 통해 ECD의 최적 파라미터 추출 방법을 제시하였으며 실험 장치를 통한 진동 제어를 검증하기도 하였다.⁽²⁵⁾

MR유체를 이용하여 준 능동형 다 방향 제진용 MR 마운트를 제작하여 실험적으로 마운트의 응답특성을 검토한 연구가 이뤄졌는데 이 연구 결과는 MR유체를 이용한 스퀴즈필름 댐퍼의 기본특성 파악을 위한 기초 자료로서 이용될 가치가 있을 것으로 사료된다.⁽²⁶⁾

MR 유체를 이용한 스퀴즈 모드형 마운트를 개발하여 마운트의 성능 및 부가하는 자장의 변화에 따른 마운트의 동특성을 실험적으로 검토한 연구가 이루어졌다.⁽²⁷⁾

4. 결 론

2002년도 회전체 동력학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지는 않지만 예년에 비하여 30% 정도의 논문의 수가 줄어들었다. 고성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실등의 회전기 요소에 많은 부분을 차지하고 있는 외국의 연구 현상과는 다소 다른 모습을 띄고 있지만 향후 유체 기계의 스마트(smart), 지능화(Intelligent)를 대비한 요소 기술의 발전을 위하여는 본 분야에 더 많은 연구의 활성화가 요구되어진다.

참고문헌

- (1) 이용복, 김태호, 김창호, 사종성, 이남수, 2003, “공기 포일 베어링으로 지지되는 무급유 터보 과급기 회전체 설계에 대한 연구”, 유체기계저널, 제6권, 제1호, pp. 51~56.
- (2) 김태호, 이용복, 김창호, 이남수, 이광호, 신유환, 2003, “공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축

- 기의 공력 불안정성이 로터에 미치는 진동 영향”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 62~69.
- (3) 노병후, 김대곤, 김경웅, 2003, “축-베어링계의 저소음 설계”, 한국윤활학회지, 제19권 제1호, pp. 15~20.
- (4) 강호식, 송오섭, 2003, “비대칭 로터-자기베어링 시스템의 LMI에 기초한 H_{∞} 강건제어”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제3호, pp. 172~179.
- (5) 홍성욱, 최성환, 이종원, 2003, “열린 균열이 있는 일반 회전체계의 동적 모델링 및 해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제4호, pp. 290~300.
- (6) 이안성, 하진웅, 2003, “기어 진동 2축 로터-베어링 시스템의 연성 불균형 응답해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제8호, pp. 598~604.
- (7) 백두진, 이용복, 김승중, 김창호, 장건희, 2003, “산업용 터보기기 결합 진단을 위한 복합적 데이터베이스 구조의 퍼지 전문가 시스템”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제9호, pp. 703~712.
- (8) 서정환, 홍성욱, 이종원, 2003, “변조 좌표계를 이용한 비대칭 회전체계의 일반화된 모드해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제10호, pp. 813~820.
- (9) 이용복, 김태호, 김창호, 사중성, 이남수, 2003, “공기 포일 베어링으로 지지되는 무급유 터보 과급기 회전체 설계에 대한 연구”, 유체기계저널, 제6권, 제1호, pp. 51~56.
- (10) 김태호, 이용복, 김창호, 이남수, 2003, “고속 터보 기계용 공기 포일 저널 베어링의 신뢰성에 관한 연구”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 7~14.
- (11) 김태호, 이용복, 김창호, 이남수, 김광호, 신유환, 2003, “공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기의 공력 불안정성이 로터에 미치는 진동 영향”, 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 62~69.
- (12) 이용복, 김창소, 류근, 2003, “무급유 터보 기기에 적용되는 고온 공기 포일 저널 베어링의 연구 현황”, 유체기계저널, 제6권, 제3호, pp. 115~121.
- (13) 노병후, 김대곤, 김경웅, 2003, “축-베어링계의 저소음 설계”, 한국윤활학회지, 제19권, 제1호, pp. 15~20.
- (14) 김성기, 강지훈, 김경웅, 2003, “극저온 정압 저널 베어링의 성능해석에 관한 연구 : 난류유동, 압력강하, 가변 밀도 및 점도의 영향”, 한국윤활학회지, 제19권, 제3호, pp. 342~348.
- (15) 윤진욱, 장건희, 2003, “흙이 회전하는 빗살무늬 저널 베어링의 안정성 해석”, 한국소음진동공학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 247~257.
- (16) 양승현, 박희주, 박철현, 김재실, 2003, “LOP형 6-패드 틸팅 패드 저널 베어링의 상부 패드 Fluttering 특성 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 467~473.
- (17) 노병후, 김대곤, 김경웅, 2003, “원통형 로울러 베어링의 소음 특성에 관한 연구”, 한국윤활학회지, 제19권, 제6호, pp. 342~348.
- (18) 강호식, 송오섭, 2003, “비대칭 로터-자기 베어링 시스템의 LMI에 기초한 H_{∞} 강건 제어”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 172~179.
- (19) 김근주, 이종원, 2003, “자기 베어링 시스템을 가진기로 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 계수 규명”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제7호, pp. 508~516.
- (20) 하태웅, 이안성, 2003, “나선 홈 펌프 실의 누설 및 로터다이내믹 해석”, 유체기계저널, 제6권, 제1호, pp.14~22.
- (21) 하태웅, 이용복, 김창호, 2003, “원형 단면 구멍 표면을 갖는 댐퍼 후로딩 링 실의 누설량 및 회전체 동역학적 특성 해석” 윤활학회지, 제19권, 제6호, pp.349~356.
- (22) 하태웅, 주영찬, 이용복, 김창호, 2003, “임의로 거칠게 한 표면의 점성 마찰 특성”, 유체기계저널, 제6권, 제3호, pp.15~20.
- (23) 안영공, 하종룡, 양보석, 김동조, 2003, “전자석을 이용한 가제어형 스퀴즈필름댐퍼”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제6호, pp.484~489.
- (24) 김근주, 이종원, 2003, “자기 베어링 시스템을 가진기로 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 계수 규명”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제7호, pp. 508~516.
- (25) 박문규, 이명일, 허석, 2003 “와전류 감쇠기를 이용한 진동 억제”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권 제10호, pp. 760~766.
- (26) 안영공, 신동춘, 양보석, 이일영, 김동조, 2003, “MR 유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 응답 특성”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제7호, pp. 517~523.
- (27) 안영공, 2003, “MR 유체를 이용한 스퀴즈모드형 마운트의 동특성”, 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 490~495.