

## 회전체 동역학 및 Tribo 요소의 연구동향

이용복\*

### 1. 서론

본 특집 기사에서는 2006년도 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 논문 (유체기계공업학회, 한국소음진동공학회, 한국윤활학회, 한국기계항공학회, 대한기계학회)을 중심으로 분석하였다. 유체기계와 관련된 회전체 동역학 분야의 연구는 크게 모터-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. 2006년 발표된 이 분야의 연구논문은 총 25편이었다. 그 중 회전체 시스템의 동역학적 해석연구와 관련하여 5편의 논문이 발표되었고, 회전기 요소인 베어링 관련 논문이 13편, 실 및 댐퍼, 마운트 관련 논문이 7편으로 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, 환경 오염 문제와 연관 무급유 베어링 (oil-free)에 대한 관심 또한 커지고 있다. 다음은 2006년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

### 2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

회전기의 연구에서는 시스템의 효율 증가를 위한 고속화와 이에 따른 안정성 향상에 많은 관심이 모아지고 있다. 이에 따라 회전체 시스템의 정확한 동적 모델링에 관한 연구가 이루어졌고 고속화에 따른 재료의 한계를 극복하기 위해 복합재를 이용한 회전원판의 강도 및 진동해석이 이루어졌다. 또한 고속에서 작동하는 회전기의 고장은 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 회전기의 진단에 관한 연구들이 이루어졌다.

데이터를 기록 및 재생하는 헤드와 회전 디스크 사이의 진동 성분 중 NRRO (Nonrepeatable runout)는 디스크와 헤드 사이에서 트랙 비정렬 (Track misregistration)을 야기함으로써 정보기억장치의 오작동을 유발시켜 디스크 자기기록의 고밀도화를 저해하는 가장 큰 요인으로 작용하고 있다. 또한 충격에 의한 과도한 진동은 헤드와 디스크 표면의 접촉 및 이로 인한 자기필름 (magnetic film)의 마모를 발생시킬 수 있는 Head crash라는 오작동을 유발한다. 그러나 디스크 회전 시에 헤드-디스크 인터페이스의 고유 및 강제 진동을 해석할 수 있는 전체 HDD의 시뮬레이션 모델은 아직 개발되지 않았다. 따라서 유한 요소법과 모드 중첩법을 이용하여 복잡한 형상을 가진 베이스 플레이트, 액츄에이터를 포함하고 유체 동압 베어링으로 지지되는 유연 회전 디스크-스핀들 시스템에 대한 고유 및 강제 진동 해석을 수행하였다. 또한 실험을 통해 해석 방법 및 해석 결과의 타당성을 검증하였다<sup>(1)</sup>.

회전하는 주기적 순환 구조물의 형태를 가진 것으로 터빈 블레이드, 헬리콥터 회전익, 터보엔진의 웬 등을

\* 한국과학기술 연구원, 트라이볼로지 연구센터.  
E-mail: lyb@kist.re.kr

들 수 있는데 이러한 순환 구조물들은 기준 축을 중심으로 외팔보 형태의 블레이드들로 구성되어 있으며 기준 축 혹은 측판의 강성으로 인하여 블레이드에 영향을 미치게 된다. 이로 인해 단일 블레이드와 동적 특성이 달라지며 블레이드간의 연성효과로 인해 고유진동특성이 변화하게 된다. 따라서 이러한 순환 구조 시스템의 적절한 설계를 위해 그 동적특성을 정확히 예측할 수 있는 해석방법이 요구된다. 블레이드를 외팔보로, 디스크 혹은 측판의 연성효과를 스프링으로 가정하여 각 블레이드 간에 연결된 연성스프링의 강성 및 위치 등을 고려한 다중 블레이드 폐쇄계 시스템의 운동방정식을 유도한 연구가 이루어졌다. 이를 바탕으로 최종적으로 개방계 시스템인 6개 블레이드로 이루어진 팩트 시스템에 관한 진동특성을 연구하였다<sup>(2)</sup>.

복합적축 회전원판의 강도해석과 진동해석이 수행되었다. 적층원판의 회전에 의해 발생하는 응력분포식을 극좌표계에서 유도하고 이로부터 최대변형률 이론을 적용하여 파손을 판정하므로써 정적강도에 대한 최대 허용회전수를 구하였다. 적층원판의 임계속도를 구하기 위해 지배방정식의 정식화를 수행하였으며 급수해를 구하기 위해 갤러킨 방법을 적용하였다. 해석에 사용된 원판은 대칭 직교적층판으로 유리섬유강화 복합재료 (glass fiber-reinforced plastic: GFRP)와 탄소섬유강화 복합재료 (carbon fiber-reinforced plastic: CFRP)에 대한 해석 결과를 제시하였다<sup>(3)</sup>.

회전기계의 진동은 종류, 용도, 사양 등에 따라 다르며 동일한 기계도 완전히 같은 진동을 갖지는 않기 때문에 단일 특징 데이터를 이용하여 진단하는 것은 많은 제약이 따르고 좋은 결과를 얻기 어렵다. 따라서 각 상태의 진동신호에 웨이브릿 변환 (wavelet transform)을 적용하여 특징 추출 벡터를 구성하고 패턴 인식의 간단한 알고리즘인 K-means clustering 알고리즘을 통해 초기 이상 진단을 하였다. 이상 진단의 정확성을 높이기 위해 검출 오차 최소화 (minimum detection error) 알고리즘을 적용하여 이상 진단 시스템을 개선하였다<sup>(4)</sup>.

또한 진동 신호를 양자화 하여 정상과 고장의 각각에 대한 확률적 거동관계 (behavior relation)를 유도함으로써 고장여부를 진단하는 정성적 모델 진단법 (qualitative modeling diagnosis)을 개발한 연구가 이루어졌다. 특히 ATM (automated teller machine)기용 베어링의 고장 진단을 위하여 진동신호를 양자화하고 정상과 고장 각각의 경우에 대해 확률적 거동으로 거동반응을 도출하여, 정상 베어링과 고장 베어링을 자동적으로 구분하는

알고리즘을 개발하였다<sup>(5)</sup>.

### 3. 회전기기 요소 연구

#### 3.1 회전기 요소-베어링

##### 3.1.1 포일 베어링

탄성 구조로부터 얻게 되는 고온, 고속에서의 안정성과 무급유, 고효율 등의 장점을 바탕으로 꾸준히 진행 중인 포일 베어링에 대한 연구 방향은 점차 실제 고속 회전 기기에의 적용으로 나아가고 있으며 보다 신뢰성 있는 해석을 위해 다양한 해석 방법이 제시되었다. 특히 범프 포일의 구조적 강성 및 감쇠에 대한 연구를 기반으로 포일 베어링의 성능 예측 및 동압 발생 요소인 얇은 공기막의 유동 양상에 따른 해석적 연구가 이루어졌다.

기존 터보 기기의 베어링으로 사용되던 오일 윤활 플로팅 링 베어링 및 구름 베어링은 고온에서의 오일 성질 변화에 따른 베어링 성능 저하 및 고속 불안정성의 요인을 갖고 있다. 이러한 기존 베어링의 단점 보완 및 시스템 효율 증대를 위한 목적으로 터보 기기의 일종인 차량용 터보 차저에 포일 베어링을 사용하여 적용 가능성 및 시스템 효율에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 기존 플로팅 링 베어링과 비교하여 같은 조건에서 최대 70% 이상의 효율 증가 효과를 가짐을 확인하였다<sup>(6)</sup>.

연료전지 시스템의 BOP (Balance of Plant) 중 공기 공급 장치로 사용되는 터보 블로워의 고속, 고효율화 및 양질의 공기를 연료전지 스택에 공급하고자 하는 목표를 가지고 포일 베어링 적용 연구가 진행되었으며 실험으로부터 포일 베어링으로 지지되는 터보 블로워의 안정성 및 신뢰성을 입증하였다<sup>(7)</sup>. 또한 포일 베어링이 적용된 MCFC용 터보제너레이터의 작동 속도 구간에서의 안정성을 검토하고 그 결과를 통해 적용 가능성을 확인하였다<sup>(8)</sup>.

얇은 공기막의 동압으로부터 발생하는 분포 하중은 범프 포일의 변형에 영향을 미치며 변형 크기에 따라 동압의 발생 양상도 다르게 나타나기 때문에 범프 포일의 구조 해석 결과가 베어링 해석 성능에 중요한 역할을 한다. 범프 포일 해석의 신뢰성 있는 해석을 위해 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 변형 방정식

을 유도하여 해석하였고 기존의 결과보다 실제에 가까운 변형 결과를 가짐을 확인하였다<sup>(9)</sup>.

범프의 변형에 의한 접촉면과의 마찰은 포일 베어링의 강성, 감쇠 성능에 영향을 미치며 이러한 효과를 고려한 해석이 이루어졌다. 이 연구에서는 마찰을 고려하지 않은 경우의 해석 결과와의 비교를 통해서 범프 포일의 마찰이 베어링 하중 지지력을 증가시키며 강성, 감쇠 및 안정성이 향상됨을 밝혔다<sup>(10)</sup>. 또한 이러한 범프 포일의 마찰 효과에 따른 범프 간의 상호작용을 고려하여 다양한 경계조건을 제시하였으며 범프의 위치에 따른 구조적 성능 해석이 수행되었다. 해석 결과로서 고정단 쪽의 범프가 갖게되는 변형 양상과 구조적 강성 및 감쇠 변화를 고찰하였다<sup>(11)</sup>.

유체의 유동 형태는 온도와 필름 두께 그리고 압력에 따라 변하며 포일 베어링 내 얇은 공기 막은 미끄럼 유동으로 간주될 수 있다. 이러한 미끄럼 유동 경계조건으로부터 유도되는 희박계수에 대한 식을 적용하여 포일 베어링의 정, 동특성을 해석하였으며 미끄럼 유동에 따른 동압의 감소로 정특성 및 베어링 강성 및 감쇠가 감소됨을 확인하였다<sup>(12)</sup>.

### 3.1.2 저널 베어링

고속 회전 기기에서 기술의 발전으로 인해 새로운 기계 시스템이 도입되고 수입에 의존하는 기계 부품의 국산화가 요구되어지면서 그에 적합한 저널 베어링의 개발과 그 특성에 대한 연구가 진행되었다.

지금까지 대부분의 엔진 크랭크샤프트 베어링 오일공급시스템은 전 운전 영역에서 연속적으로 커넥팅 로드 베어링으로 오일을 공급해주는 연속오일공급 방식을 사용하였으나 최근 들어 이러한 전통적인 방법 대신 불연속적으로 오일을 공급하는 방식을 채택하는 엔진이 개발되고 있다. 따라서 연속 오일공급 시스템 및 불연속 오일공급 시스템을 채택한 크랭크샤프트 베어링의 윤활특성을 비교하였고 이를 위해 상용 유동해석프로그램인 Flowmaster 프로그램을 사용하여 엔진의 윤활유 공급온도 및 압력, 베어링 간극 및 베어링 주요치수 (폭/직경) 등을 변수로 과도비정상해석 (unsteady transient analysis) 을 수행하였다. 그리고 해석 시 해석결과의 현실성을 유지하고자 온도에 따른 베어링 열팽창에 의한 간극의 변화를 해석과정에서 고려하였다<sup>(13)</sup>.

고속 고효율 디젤엔진용으로 널리 이용되고 있는 미끄럼 베어링은 국내 관련 업계의 실제 및 제작기술이

미흡하여 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 디젤 엔진의 핵심부품인 고 내하중용 미끄럼 베어링의 국산화가 시급하다. 따라서 특장차량용으로 사용되고 있는 회전수 2600 rpm, 출력 1200 ps/cyl의 디젤엔진용 연강과 알루미늄합금의 이중금속 미끄럼 베어링을 개발목적으로 베어링의 운전조건에 따라 베어링의 마멸량을 예측할 수 있는 수학적 모델에 대해 반응표면기법을 적용하여 베어링 마멸량에 대해 산정하고, 베어링의 운전조건에 따라 베어링의 마멸량을 예측할 수 있는 수학적 모델을 반응표면기법을 이용하여 개발하였다<sup>(14)</sup>.

### 3.1.3 볼 베어링, 로울러 베어링

구름 베어링의 한 종류인, 볼 베어링에 대한 연구는 더욱 세분화되어 윤활제의 성능 향상 연구와 수명에 미치는 인자에 대한 연구가 진행되었다.

베어링용 윤활은 일반적으로 그리스와 오일을 사용하는 경우가 대부분이며, 이러한 윤활제는 유동상과 반고체상이 대표적이다. 이와 다르게 폴리머 윤활제는 고형의 상태로 구성되어 있다. 상기의 특징을 가지는 윤활제는 먼지와 이물질 및 수분의 접촉을 갖는 산업용 베어링과 원심력을 받아 윤활제의 누설과 비산이 심한 곳에 적용이 가능하다. 이러한 특징을 갖는 고온용 폴리머 윤활제의 특성과 윤활적인 메커니즘에 대한 연구 및 고찰을 진행하고 실제로 베어링에 적용이 가능한 최적의 폴리머 윤활 조성물을 합성하기 위하여 윤활제 (Grease, Base oil)와 HDPE (High Density Polyethylene)의 함량을 로버스트 공학 (Robust Engineering)을 응용한 공학적인 표준 직교표를 이용하여 실험하였으며, 이렇게 최적화된 윤활 조성물을 실제로 구름베어링에 적용하여 윤활 수명 성능을 평가하였다<sup>(15)</sup>.

일반적으로 볼 베어링은 회전체의 원활한 회전을 담당하는 역할뿐만 아니라, 베어링의 궤도륜과 볼의 표면 파형으로 인해 가진원의 역할도 하게 된다. 이러한 가진원의 영향은 베어링이 하우징 및 축에 억지끼움맞춤 되었을 때 더욱 심각하다. 상기의 상황을 전, 후로 하여 베어링 궤도륜의 진원도에 대한 형상을 측정하였으며, 측정된 진원도 형상을 수학적 모델이 가능하도록 하기 위하여, 수치적 방법을 통해 표면파형 차수 (order)에 따른 크기와 위상을 도출하였다. 도출된 표면파형 형상을 Newton-Raphson 반복법을 이용한 3자유도 진동해석 프로그램에 적용함으로써, 베어링 궤도의 변형에 따른

베어링 진동을 예측하였다. 또한, 90% 신뢰도를 갖는 이론적인 베어링 피로수명의 영향을 평가하였다<sup>(16)</sup>.

### 3.1.4 자기 베어링

전자기력을 이용하여 회전축을 비접촉식으로 지지하므로 윤활 없이 작동 가능하며 능동적으로 제어할 수 있다는 특징을 가지고 있는 자기 베어링에서는 소형 모터 시스템에의 적용을 위한 셀프-베어링 모터 (self-bearing motor) 연구가 이루어졌다.

셀프-베어링 모터들은 대부분 능동형 마그네틱 베어링의 원리를 이용하지만 능동형 마그네틱 베어링은 복잡한 제어시스템으로 인해 소형경량화가 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 따라 고정밀성과 고토크를 요구하지 않는, 작고 값싸고 안정적으로 자기부상을 구현할 필요가 있는 회전 시스템에 적용하기 위한 스텝모터에 수동형 마그네틱 베어링을 적용하는 연구를 수행하였다. FEM해석을 통하여 그 가능성을 확인하고 성능을 예측하였으며 구조적으로는 할바크 배열의 양단에 요크를 붙여 모터의 코어로서도 활용할 수 있도록 하였다<sup>(17)</sup>.

## 3.2 실

고압용 터보펌프, 스팀 터빈 등의 회전기기 시스템에서 작동유체의 누설량을 최소화하기 위하여 사용되는 실은 누설 특성을 향상시키고 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되었다.

액체 연료를 사용하는 로켓의 산화제와 연료제를 가압하여 연소기에 보내는 역할을 하는 터보펌프에서는 임펠러에 앞단과 뒷단에 위치하여 액화산소나 연료의 누설을 최소화하기 위하여 플로팅 링 실이 사용된다. 플로팅 링 실에 대한 연구의 신뢰성을 향상시키기 위하여 이론적인 해석에 대한 연구로서 실의 지배 방정식을 미세 섭동법을 이용하여 기존의 해석 결과보다 더 정확한 해를 추출하였다. 또한 기존의 플로팅 링 실의 안정성을 향상시키기 위한 연구의 하나로 플로팅 링 실의 외면에 범프 포일을 장착한 범프 플로팅 링 실이 제안되고, 이에 대한 정특성과 동특성을 실험적으로 규명하는 연구가 진행되었다<sup>(18),(19)</sup>.

스팀 터빈의 비접촉식 환상 밀봉장치로 널리 사용되고 있는 래버린스 실은 증기의 교축 작용을 이용하여 누설 유량을 감소시키는 것으로 날카로운 실 스트립을 회전부 또는 고정부에 차례로 배열하여 누설 증기가 교축

과 확대를 반복하는 과정에서 압력강하가 일어나 누설 유량을 저감시키게 된다. 스팀터빈의 효율 향상을 위한 중요한 요소 중 하나인 래버린스 실에 대한 누설특성은 그 형상을 변경함으로써 다양한 시도가 연구되었는데, 이러한 다양한 형상의 래버린스 실의 누설 특성에 대하여 범용 CDF 해석 소프트웨어를 사용한 해석 방법이 제시되고, 개선된 실의 누설 유량 해석법이 연구되었다<sup>(20),(21)</sup>.

수력 터빈이나 펌프의 회전축에 설치되어 반경방향으로 누설되는 유량을 차단시키기 위하여 사용되는 부품인 기계평면실은 실링과 실 시트의 접촉 표면이 건조 마찰 작동과정에서 발생하는 축방향의 접촉면압에 의해 작동 유체의 통과를 차단하여 밀봉 작용을 한다. 누설 특성이 우수한 기계평면실은 작동유체의 누설을 차단할 수 있을 정도의 접촉면압을 축방향으로 가하고, 열팽창계수가 대단히 낮고, 내마멸성과 윤활성이 우수한 실소재를 선정하여 설계하는 것이 중요하다. 이러한 기계평면실의 최적화된 설계하기 위하여 실의 형상과 작동조건에 따라 발생하는 마찰표면의 온도, 변형량, 응력들을 FEM해석을 이용한 연구가 진행되었다<sup>(22)</sup>.

## 3.3 댐퍼 (damper)

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

MR 유체는 부하되는 자기장에 의해 그 유변학적 특성이 변화하는 지능형 유체이다. MR 댐퍼는 MR 유체의 이러한 특성을 이용하여 가역적이면서 연속적으로 감쇠력을 제어할 수 있다. 기존의 대부분 MR댐퍼는 상대적으로 작은 진폭의 진동을 절연하기 위해 연구, 개발되어 왔다. 그러나 큰 진폭을 갖는 충격력을 효과적으로 제어하기 위한 MR 댐퍼에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 최근 연구에서는 고충격 시스템에 장착할 MR 충격 댐퍼 시제품을 제안하고, 제작된 충격흡수기의 충격력 제어성능을 예측하고 있다<sup>(23)</sup>.

스퀴즈 필름 댐퍼 (SFD)는 항공 엔진 회전체에 적용되는 볼 베어링의 댐퍼로 널리 사용되고 있다. 이는 볼 베어링 자체가 댐핑효과를 거의 가지고 있지 않기 때문으로, 고속의 터보기계에서 스퀴즈 필름 댐퍼는 진동 에너지 흡수와 동역학적 특성을 높여 로터의 안정성을 보장해준다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 최적 설계에 관한 연구 중, 단순축의 선형, 비선형 응답에 대한 최적의 스퀴즈

필름 댐퍼 설계에 관한 기술을 개발하기 위해 ‘체네틱 알고리즘 (GA)’과 ‘어니얼링 알고리즘 (SA)’을 결합한 ‘하이브리드 GA-SA 알고리즘’을 적용한 기법의 연구가 수행되었다<sup>(24)</sup>.

현가장치는 자동차가 주행시 노면 불규칙성 외란에 대한 진동을 흡수하여 운전자로 하여금 승차감을 좋게 하고 안정성 확보차원에서 매우 중요하다. 현가장치는 제어입력에 따라 크게 댐퍼 내부의 오리피스가 고정되어 감쇠력을 내는 수동 현가장치와 비례제어 밸브 등을 통한 가변 오리피스를 조절하여 감쇠력을 발생시키는 반능동 현가장치 및 외부 동력으로 바로 감쇠력을 발생 시켜주는 능동현가장치로 구분된다. 종래의 대부분의 연구에서의 댐퍼는 오일 또는 가스를 매체로 하는 감쇠력 제어를 수행하였다. 이는 기계적 메커니즘 또는 전자 제어시스템으로 이루어져 있기 때문에 성능향상을 위해서는 그 구조가 매우 복잡하고 작동시 마찰이나 마모 등으로 소음이 발생하는 원인이 된다. 이와 같은 문제들을 해결할 수 있는 새로운 시스템을 실현하기 위해서는 종래의 성능을 뛰어넘는 새로운 기능재료를 이용한 액추에이터의 개발이 필요하다. 일반적으로 지능유체로 알려져 있는 전기유변유체 (이하 ER 유체라 칭함)는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. ER 유체는 외부에서 가해지는 전단력에 대해 전기장 부하시 ER 유체는 저항을 갖는다. 그러므로 외부 조건에 따라 ER 유체에 부하되는 전기장의 크기만을 변화시키면 연속적인 제어가 가능하다. 차량 적용 가능성을 제시하기 위한 ER 유체 댐퍼특성연구를 통하여 1/4차량에서의 지능제어 진동 감쇠력 성능 향상에 관한 연구가 수행되었다<sup>(25)</sup>.

## 참고문헌

- (1) 서찬희, 장건희, 이호성, 2006, “회전 디스크-스핀들, 액추에이터와 지지구조의 유연성을 고려한 하드 디스크 드라이브의 고유 및 강제 진동 해석,” 한국소음진동공학회 2006년 춘계학술대회는 문집, pp. 1~6.
- (2) 임하성, 권성훈, 유희희, 2006, “연성강성 효과를 고려한 회전하는 다중 블레이드 시스템의 굽힘진동 해석,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 912~918.
- (3) 구교남, 2006, “복합적층 회전원판의 응력 및 진동 해석,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 982~989.
- (4) 정의필, 조상진, 이재열, 2006, “특징 추출과 검출 오차 최소화 알고리즘을 이용한 회전기계의 결합진단,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제1호, pp. 27~33.
- (5) 김도현, 최연선, 2006, “진동신호 양자화에 의한 거동반응을 이용한 베어링 고장진단,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 495~502.
- (6) 박동진, 이용복, 김창호, 2006, “공기 포일 베어링으로 지지되는 무급유 터보차저의 성능 평가에 관한 연구,” 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, 제1권, pp. 321~329.
- (7) 이희섭, 김창호, 이용복, 2006, “고분자 전해질 연료 전지용 공기 공급계의 동특성 및 성능에 대한 연구,” 유체기계저널 제9권, 제6호, pp. 45~53.
- (8) 김영철, 안국영, 박무룡, 박준영, 최범석, 이안성, 2006, “공기포일베어링에 지지된 터보제너레이터의 회전체동역학적 설계,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집.
- (9) 김영철, 이동현, 김경웅, 2006, “포일변형 영향계수를 이용한 공기포일베어링 해석,” 한국유타학회지, 제22권, 제1호, pp. 40~46.
- (10) 김영철, 이동현, 김경웅, 2006, “범프마찰을 고려한 공기포일베어링의 성능해석,” 유체기계저널 제9권, 제1호, pp. 47~55.
- (11) 박동진, 김창호, 이용복, 2006, “범프들의 상호작용을 고려한 공기 포일 베어링의 구조적 강성 및 클론 감쇠에 대한 연구,” 한국유타학회지, 제22권, 제5호, pp. 251~258.
- (12) 박동진, 김창호, 이용복, 2006, “회박 계수의 섭동을 고려한 공기 포일 베어링의 특성 해석,” 한국유타학회 춘계학술대회논문집, pp. 117.
- (13) 윤정의, 2006, “크랭크샤프트 베어링시스템 설계 연구,” Journal of the KSTLE Vol. 22, No. 4, pp. 203~210.
- (14) 황영모, 이상진, 전재익, 광재섭, 하만경, 2006, “메탈베어링의 개발과 반응표면모델에 의한 마멸량 예측,” 韓國機械加工學會 2006年度 春季學術大會論文集 pp. 254~259.
- (15) 김상근, 한중대, 2006, “고온용 폴리머 윤활제 베어링의 합성과 특성평가 연구,” 한국유타학회 추

- 계학술대회 발표 논문집, pp. 78~85.
- (16) 이영근, 이석훈, 정일권, 차철환, 한효섭, 2006, “볼 베어링과 형상오차를 갖는 하우징의 끼워 맞춤에 따른 베어링 진동 및 피로 수명의 영향,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 441~451.
- (17) 광호성, 김승중, 최동훈, 2006, “수동형 마그네틱 베어링이 결합된 스텝 모터의 설계,” 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제12호, pp. 1201~1207.
- (18) 김경욱, 이용복, 김창호, 2006, “섭동법을 이용한 고압 터보 펌프의 플로팅 링 실에 관한 연구,” 제 7회 우주발사체 심포지움, pp. 37~43.
- (19) 이용복, 김경욱, 김창호, 안경민, 이성철, 2006, “범프 포일을 장착한 고압 터보펌프용 플로팅 링 실의 실험에 관한 연구,” 한국윤활학회지, 제 22권, 제2호, pp. 105~111.
- (20) 하태웅, 2006, “CFD를 사용한 복잡한 형상을 갖는 래버런스 실의 누설양 예측,” 한국윤활학회지, 제22권, 제22호, pp. 66~72.
- (21) 하태웅, 2006, “CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설양 예측,” 유체기계저널, 제9권, 제3호, pp. 14~22.
- (22) 김청균, 2006, “소수력 터빈용 기계평면시일의 표면마찰형상에 따른 접촉특성 해석에 관한 연구,” 한국윤활학회지, 제22권 제3호, pp. 119~126.
- (23) 남윤주, 김동욱, 박명관, 이육형, 2006, “바이패스형 MR 충격 댐퍼의 설계 및 성능 해석,” 대한기계학회논문집 A권, 제30권 제5호, pp. 550~559.
- (24) 안영공, 김용한, 양보석, 안경관, Shin Morishita, 2006, “Optimal Design of Nonlinear Squeeze Film Damper Using Hybrid Global Optimization Technique.” Journal of Mechanical Science and Technology(KSME Int. J), Vol. 20, No. 8, pp. 1125~1138.
- (25) 송준호, 이육형, 2006, “디지털 댐퍼의 지능제어 특성,” 한국기계공학회지, 제5권, 제3호, pp. 5~10.