

## 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복\*

### 1. 서 론

본 특집 기사에서는 2012년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트리보(Tribo) 요소(베어링/실/댐퍼)의 주요 연구 동향을 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.

예년과 같이 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 유체기계 가운데 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구 개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 본 특집 기사에서는 유체기계와 관련된 회전체 요소인 베어링, 실, 그리고 댐퍼 및 회전기기의 설계 그리고 운전 기술과 관련된 2012년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

### 2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

산업이 고도화됨에 따라 현재 산업 기술은 시스템의 소형화와 대용량화를 지향하고 있다. 따라서 회전기기의 속도를 고속화하는 경향을 띠고 있다. 그러므로 고속영역에서 회전기기의 안정성과 신뢰성 확보가 전체 시스템을 구성하는 부분에서 큰 비중을 차지하고 있다. 이에 따라 회전기기의 회전체 동역학적 해석을 통한 정밀한 동역학적 거동의 예측과 실제 실험을 통한 안정적인 설계가 중요시되고 있다.

국내에서는 기존 알루미늄 다이캐스팅을 동 다이 캐스팅으로 교체하여 효율과 발열감소량을 상승시키는 연구가 진행되었다.<sup>(1)</sup> 고효율 유도 전동기를 개발하는데 있어 중요한 기술인 위험속도 회피기술을 적용하고, 불평형 응답 해석을 수행하여 1X 동기 성분의 정보를 획득하였다. 또한 알루미늄

과 동 다이캐스팅의 동적 특성을 상호비교, 분석하였다. 이렇게 해석한 결과를 바탕으로 실제 유도전동기를 제작하여 약 87%의 효율을 측정하였으며, 위험속도 회피기술을 적용하여 고속에서도 안정적인 구동이 되는 결과의 타당성을 입증하였다.

최근 컴퓨터 성능의 향상과 신뢰성 있는 상용 소프트웨어가 다양하게 개발되어, 이를 이용한 회전체 동역학적 해석이 활발히 진행되고 있다. 이 논문에서는 실제 상용 회전체 동역학 해석 소프트웨어를 이용하여 경사 운전 조건을 고려한 대용량 추진 전동기용 베어링 개발을 하였다.<sup>(2)</sup> 추진 전동기의 정특성뿐만 아니라 동특성에 대한 해석도 함께 진행되어 개념설계와 상세설계에 실제 반영되었다. 또한 실제 베어링 제작 시 발생할 수 있는 운전조건에 따른 온도 특성을 파악하기 위해 해석한 데이터를 바탕으로 상사법칙을 활용한 시험도 함께 검토되었다.

한국항공우주연구원에서는 한국형발사체 상단엔진에 사용될 7톤급 액체로켓엔진용 터보펌프의 임계속도 해석이 진행되었다.<sup>(3)</sup> 이 논문에서는 산화제 펌프 회전체와 연료펌프-터빈 회전체에 대하여 무부하 조건 및 부하 조건에서 볼 베어링 강성과 1차 임계속도를 예측하였다. 터보펌프가 정상 작동하는 부하조건에서 1차 임계속도는 연료 펌프-터빈 회전체에서 나타내며, 7톤급 터보펌프는 충분한 임계속도 분리 여유를 가지는 Sub-critical 회전체로 예측을 하였다. 또한 75톤급 터보펌프의 무부하 회전 시험을 통하여 얻어진 임계속도를 회전체 동역학적 해석의 결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 검토하였다.<sup>(4)</sup> 해석모델을 이용하여 유동해석 및 성능시험 결과를 바탕으로 얻어진 펌프와 터빈의 반경하중으로부터 상대각도에 따른 베어링 강성 변화를 고려하여 임계속도 변화를 예측하였다. 해석결과 펌프와 터빈의 반경하중 상대 각도는 임계 속도에 지대한 영향을 미치는 것을 확인했고, 추가로 축 하중이 부과되는 경우 반경하중의 상대 각도에 대한 영향은 감소하는 것으로 연구되었다.

\* 한국과학기술연구원  
E-mail : lyb@kist.re.kr

### 3. 회전기기 요소 연구

#### 3.1 회전기 요소-베어링

##### 3.1.1 저널 베어링

유동압 저널 베어링은 회전축과 베어링 사이의 틈새에 윤활유를 공급하여 축 운동에서 발생하는 동압으로 하중을 지지하는 베어링이다. 회전축과 베어링의 직접적인 마찰이 없어 수명이 길고, 큰 하중을 지지할 수 있으며, 윤활유에 의한 감쇠효과로 일반적인 강체 베어링보다 높은 운전정밀도를 갖는다.

저널 베어링은 다양한 형상오차에 의하여 그 특성이 바뀌고, 이 중 특히 파상도가 베어링의 강성, 압력, 자세각 등을 변화 시킴으로써 베어링의 회전오차를 유발 한다는 것이 해석적으로 밝혀졌다<sup>(5,6)</sup>. 또한, 베어링의 길이가 길 수록 최소 유막 두께와 마찰 손실이 증가하고, 틈새의 변화에 따른 마찰 손실과 최소 유막 두께가 조절가능하다는 에 대하여 해석적으로 연구되었다<sup>(7)</sup>.

저널 베어링의 윤활 분석은 회전체 시스템의 고성능 출력과 무게를 줄이는 목표를 달성하는데 중요하다. 이러한 저널 베어링의 윤활 특성을 분석하기 위한 방법으로 유연 다물체 동역학 해석과 탄성유체 역학 해석을 이용한 저널 베어링의 운동을 해석하는 알고리즘이 개발되었다<sup>(8)</sup>

이러한 해석적인 연구에 대한 노력에도 불구하고 회전체-베어링 시스템은 구조 및 유체에서 복합적으로 발생하는 현상들로 인하여 높은 복잡성을 요구하며, 이에 따라 해석적인 연구뿐만 아니라 실제 적용된 기계 및 실험장치로 검증하는 연구도 반드시 동반되어야 한다.

냉동용 가전인 냉장고, 에어컨과 같은 기계장치에서 사용되는 왕복동 압축기는 소형화, 저소음화 및 고 신뢰성을 요구받고 있으며, 왕복동식 압축기 저널 베어링부의 마찰손실 측정 연구를 바탕으로 실제 압축기 환경 하에서의 마찰 손실을 측정하는 실험장치가 개발되고, 일정 온도에서 회전수가 증가할수록 마찰손실량이 증가한다는 사실이 밝혀졌다.<sup>(9)</sup>

현재 가스터빈 엔진은 대부분 해외 유명 메이커에 의존하고 있으며 이로 인해 보수 및 복구에 많은 시간과 비용이 소모되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 25MW 급 수입 가스터빈의 보수 및 복구를 국내 기술로 해결한 사례가 소개되었다.<sup>(10)</sup>

##### 3.1.2 볼 베어링, 롤러 베어링

구름 베어링은 회전기계의 주축을 지지하고 요소로써 산업체에서 널리 사용되고 있고 효율에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 구름베어링이 정압, 동압베어링 및 자기 베어링 등에 비해 뛰어난 장점 중 하나는 높은 강성으로, 높은 가공정밀도가 요구되는 동작기계의 주축에 많이 사용되고 있다.

구름베어링의 강성은 베어링의 내부설계, 예압하중 및 예압 방법에 따라 결정되고 일반적으로 강성과 고속성은 상반되는 항목이다. 최근의 추세로 환경부하저감이 주된 연구주제이며 에너지절약, 저소음화 및 오일윤활에서 그리스윤활로의 윤활방법 변경 등 여러 가지가 있으며 베어링 형상변경, 윤활시스템의 개선 등의 방법이 활발히 연구되고 있다.

산업체 현장에서 시스템의 결함은 매우 큰 손실과 재앙을 가져올 수 있다. 따라서 주기적인 결함 진단과 상태를 조기에 파악하고 대책을 수립해야 한다. 그 방법 중 볼베어링의 결함 진단을 위해 적외선 열화상 장치를 이용한 감시방법이 제시되었고 이 방법으로 비파괴와 비접촉이 필요한 회전체 분야에도 적용할 수 있을 것으로 기대한다.<sup>(11)</sup> 저속 회전기계 시스템 진단 방법으로는 위너필터(wiener filter)를 이용한 잡음제거를 통해 베어링결함에 의한 충격펄스를 판별하여 신뢰성 있는 방법을 확인하였다.<sup>(12)</sup>

볼베어링의 불량유형에 따른 진동 및 소음 측정방법, 계산식 도출에 대한 연구를 수행하여 불량유형을 확인 관리할 수 있도록 제시하였다.<sup>(13)</sup> 볼베어링 중 앵귤러콘택 타입은 다른 베어링에 비해 열화가 많이 일어나는데 정렬에 대한 문제를 해결함으로써 열화를 감소시킬 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였다.<sup>(14)</sup>

구름베어링의 윤활은 베어링 수명에 큰 영향을 미친다. 이러한 윤활 현상을 규명하기 위해 평균 레이놀즈 방정식(average Reynolds equation)을 압력 유동계수와 전단 유동계수를 이용하여 풀이하고 수치적으로 생성한 표면 형상을 고려한 해석모델과 비교하여 표면 거칠기의 영향을 알아보았다.<sup>(15)</sup> 테이퍼 롤러 베어링의 탄성유체윤활(EHL) 해석을 불균일 격자계를 채용한 수치적 방법으로 연구를 수행하였다.<sup>(16)</sup> 한편, 기존의 하중, 회전속도에 대한 테이퍼 롤러 베어링의 연구는 열 변형에 따른 초기 예압량을 포함한 내구수명 및 예압특성을 제시하였다.<sup>(17)</sup>

다양한 환경에서 구름베어링은 사용되고 개발되어지는데 극저온 환경에서 액체로켓 터보펌프 구동을 위한 연구가 수행되고 있으며<sup>(18)</sup>, 진동스크린, 풍력발전시스템, 연속 주조기계 등에 널리 사용되는 자동조심 롤러베어링에 대한 연구도 활발히 진행 중이다.<sup>(19)</sup>

##### 3.1.3 자기 베어링

자기 베어링은 장시간 고속 회전에 적합하고, 긴 수명, 저진동, 클린 등과 같은 요구를 충족시키며, 고전적 형태의 구름요소 베어링으로는 구현 불가능한 고속, 고정밀 회전축의 필수적인 기계요소이다. 따라서, 동작기계 산업과 반도체 산업을 비롯하여 바이오산업 및 항공우주산업 등에 적용되고 있고, 높은 성능과 안정성 및 강인성, 신뢰성을 충족하기 위해서 축의 회전 궤적을 능동적으로 제어하는 것이 매우 중요하며, 여러 제어 알고리즘을 적용한 연구들이 발표되고 있다.

반도체 공정에서 사용되는 터보 분자 펌프는 다층의 회전 깃을 갖는 로터를 회전시켜 분자를 배출시키는 진공펌프이고, 이러한 분자 펌프는 베어링에서의 오염이 없는 자기 베어링이 주로 적용된다. 최근 개발 중인 2,500 1/s급의 자기 부상형 고진공 복합분자펌프의 시작품에 대하여 고속회전의 안정성에 대한 연구가 수행 중이고<sup>(20)</sup>, 디지털 제어를 적용하여 고속회전시의 진동 특성과, 연속 작동시의 안정성에 관해 보고되었다.

100kW급 터보 블로워에 자기 베어링이 적용된 시스템의 진동 제어를 위해, 예측 제어 알고리즘을 제안하고, 제어기 시뮬레이션을 수행하여 제어 안정성에 관한 연구가 수행되었고<sup>(21)</sup>, 이러한 회전체 시스템에 예측 전문가 제어기법을 활용한 시뮬레이션을 구현하고, 임의로 입력된 속도에서 진동 제어가 가능한 연구가 발표되었다<sup>(22)</sup>.

능동형 자기 베어링의 고속 회전시 자이로효과에 의한 직교 제어 축 간의 자기력 간섭 현상이 나타나는 불안정성을 해결하기 위한 여러 제어 알고리즘들이 연구되어 왔고, 3방향 이하의 자유도에서 해석된 기존의 연구와 달리, 6자유도를 지닌 능동형 자기 베어링의 시스템 해석 및 강인 안정도 분석에 초점을 맞춘 논문이 발표되었다<sup>(23)</sup>. 해당 논문에서는 비선형적 구조를 가지고 있는 자기 베어링 시스템을 퍼지 모델링 기법으로 해석하고, 퍼지 모델에 적합한 제어기를 접목해 시스템의 안정도를 증명하였다.

수동/능동형 자기 베어링의 장점을 갖는 하이브리드 자기 베어링 시스템을 대상으로 퍼지 스위칭 제어기를 설계하여 자기 베어링 시스템의 스위칭 안정도 해석이 수행되었다<sup>(24)</sup>. 기존의 자기 베어링에 적용되었던 이론을 보완하여 상위 모델인 하이브리드 자기 베어링에 대한 스위칭 퍼지 제어기를 제안하고, 타당성을 검증하였다. 또한, 자기 베어링 시스템에 적용되는 비례미분 제어 알고리즘과 동기 노치필터를 적용한 제어 알고리즘의 전력소모량을 비교하여 제어 성능을 개선한 연구 결과가 발표되었다<sup>(25)</sup>.

### 3.2 실(seal)

국내에서는 저마찰, 고속형 공기압 실린더에 적합한 실 형상을 설계하기 위해 접촉면이 O-ring 형상을 갖는 스퀘즈형 피스톤 실에 대한 연구가 진행되었다.<sup>(26)</sup>

해석을 위해 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS가 사용되었고, 공기압 실린더에 공급압력이 일정할 경우 스퀘즈형 피스톤 실이 립형 실보다 마찰력이 낮게 나타나는 것으로 보고되었다.

상대운동을 하는 대부분의 기계장치에서 윤활유나 작동유체의 누설과 외부의 이물질의 침투를 막기 위해 Seal이 사용되고 있다. 하지만 상대운동면인 축과의 접촉으로 인해 Seal의 노화 등으로 인해 성능이 점차 저하된다. 따라서 그 메커니즘과 최적 코팅조건을 설계하기 위한 연구가 진행되었다.<sup>(27)</sup>

코팅층이 두꺼우면 코팅층 내부에서 높은 응력이 발생하지만 표면은 소성변형되지 않으며, 연삭마멸과 피로마멸의 발생을 동시에 억제할 수 있을 것이라 발표되었다.

스테이터와 로터에 다양한 조합의 코닝을 적용할 경우의 기계적 페이스 실의 작동 성능 예측에 대한 해석이 수행되었다.<sup>(28)</sup> 스테이터와 로터에 코닝을 적절히 적용하면 물결 프로파일의 형상을 바꾸는 노력없이 기계적 페이스 실의 작동 유체막 두께의 최소값, 작동 유체누설량, 마찰토크, 작동 유체막의 강성 등을 적절히 변화시킬 수 있는 것으로 발표되었다.

### 3.3 댐퍼(damper)

최근 점성 유체 감쇠기의 주파수 변화의 따른 점탄성 거동 예측을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 분수 도함수를 이용한 Maxwell model, Kelvin-Voigt model 등과 같이 감쇠기를 수학적으로 모델링 하여 주파수 변화에 따른 탄성 및 감쇠특성을 예측하는 기술들이 연구 되었으나 이러한 것들은 실험 결과를 이용해서 얻을 수 있는 제작 후 예측법으로 점성 유체 감쇠기의 성능을 확인하기 위해서는 실 제작 후 동적 실험 및 수학적 모델링의 과정을 필수적으로 거쳐야 한다. 이러한 다양한 크기의 감쇠기 설계 시 수반되는 비용 및 시간 소모의 절감을 위하여 동적 실험 및 모델링 과정을 거치지 않고 감쇠기의 성능을 예측하는 법이 제안 되었다.<sup>(29)</sup>

MR(Magnetorheological) 유체는 자기장의 세기에 따라서 항복응력이 변하는 점소성 거동을 한다. 그리고 MR 유체는 비교적 작은 에너지원으로 우수한 감쇠력을 얻을 수 있고, 빠른 반응속도를 가지며, 외부 온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지할 수 있다. 따라서 MR 유체를 매체로 사용하는 MR 댐퍼를 이용하여 차량의 반능동 현가장치를 개발하고자 하는 연구가 활발하게 수행되고 있다. 수동 현가 장치와 MR 댐퍼를 이용한 반능동 현가장치의 승차 성능을 모의 시험을 통해 비교한 결과 MR 댐퍼를 장착한 현가장치가 더 빨리 안정화된 것을 확인하였다.<sup>(30)</sup>

토션 댐퍼는 엔진에서 발생한 동력을 변속기에 전달하는 장치로서 엔진의 다양한 비틀림 진동을 흡수 할 수 있고, 댐퍼의 저 강성화가 가능하여 하이브리드 차량 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 성능을 증대시킬 수 있는 장치이다. 또한 토션 댐퍼의 질량 관성 조절 등을 통해 변속기와 엔진 간의 공진점(공명점)을 회피할 수 있게 하며, 댐퍼 스프링 특성 및 내부 단품간 형상, 마찰 등을 최적화 하여 차량에 적합한 히스테리시스 구현도 가능하게 한다. 토션 댐퍼 단품의 변화에 국한하여 쉘-와셔를 지지하고 있는 디스크 스프링의 형상 변화를 통한 히스테리시스 최적화를 연구하여 목표 성능에 근접하는 최적의 형상을 구현하였으며 정적, 동적 히스테리시스 영향성 평가를 통해 형상 및 회전속도 인자 등에

대한 연구 결과를 도출하였다. 이를 통한 유한 요소 모델은 하이브리드 차량 변속기에 적합한 최적의 히스테리시스 연구를 수행하는데 활용될 수 있다.<sup>(31)</sup>

#### 4. 결 론

2012년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 기존 연구들의 방향과 많은 차이가 나지 않는 것으로 보였다. 특히 에너지 관련 기기와 관련한 회전체 연구 경향이 뚜렷하며, 이는 향후 앞으로도 계속될 것이라 예상된다. 전체적인 흐름을 볼 때 고도의 연구보다는 아직 기초적인 연구에 기반한 연구가 많이 진행되었으나, 국내 기술 수준의 향상을 고려할 때 회전체 분야의 연구가 좀 더 활발히 진행될 것으로 사료된다.

특히 에너지의 고효율화와 연계 된 실 분야의 연계 연구가 발전 분야의 터빈등의 회전기기에서의 연구가 활발하였다.

#### 참고문헌

- (1) 홍도관, 정승욱, 우변철, 구대현, 안찬우, 2012, “동 다이캐스팅 고속 유도전동기의 불평형 응답 해석,” 한국소음진동학회논문집, 제22권, 제7호, pp. 642~649.
- (2) 오승태, 최진우, 강병희, 김진, 최성필, 변재구, 2012, “경사조건을 고려한 대용량 추진 전동기용 베어링 개발에 대한 연구,” 대한기계학회, 2011년도 추계학술대회 논문집, 제37권, 제2호, pp. 241~248.
- (3) 전성민, 김진한, 2012, “7톤급 액체로켓엔진 터보펌프 임계속도 해석,” 한국추진공학회, 2012년도 춘계학술대회 논문집, pp. 11~15.
- (4) 전성민, 박현덕, 홍순삼, 김진한, 2012, “75톤급 액체로켓엔진 터보펌프의 하중특성에 따른 임계속도 해석,” 한국추진공학회지, 제16권, 제4호, pp. 42~49.
- (5) 하양협, 이상민, 서미나, 황주호, 이득우, 2012, “저널의 파상도가 저널베어링의 윤활특성에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국윤활학회 2012 춘계학술대회 논문집, pp. 75~76.
- (6) 서미나, 이득우, 하양협, 이상민, 황주호, 2012, “형상오차에 따른 저널 베어링의 윤활특성에 관한 연구,” 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 499~500.
- (7) 전우주, 김경웅, 2012, “베어링의 길이와 틈새가 저널 베어링의 성능에 미치는 영향,” 한국윤활학회 2012 춘계학술대회 논문집, pp. 19~20.
- (8) 정윤식, 김지훈, 최주환, 최진환, “탄성유체 윤활과 유연 다물체 동역학을 고려한 저널 베어링의 수치적인 연구 소개,” 대한기계학회 2012 춘추학술대회, pp. 3~4.
- (9) 박광현, 박상신, 2012, “동적하중을 고려한 왕복동 압축기의 저어널 베어링 부의 마찰 손실 측정,” 한국윤활학회 2012 춘계학술대회 논문집, pp. 21~22.
- (10) 김병욱, 선경호, 이안성, 2012, “25MW급 산업용 가스터빈

의 저널과 베어링 손상 보수사례에 관한 연구”, 유체기계저널, 제15권, 제6호, pp. 64~69.

- (11) 서진주, 홍동표, 김원태, 2012, “마모 단계의 볼 베어링에 대한 적외선 열화상 비파괴 결함 진단 연구” 비파괴검사학회지, Vol.32, No.1, pp. 7~11.
- (12) 박성태, 원종일, 박성범, 우홍식, 2012, “위너 필터와 충격 펄스 카운팅을 이용한 저속 기계용 구름 베어링의 결함 검출,” 한국소음진동공학회논문집, 제22권, 제12호, pp. 1227~1236.
- (13) 김태식, 주경훈, 강연준, 2012, “전동기기용 볼 베어링의 소음·진동 분석,” 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 부문종합 학술대회, 2012.5, pp. 730~733.
- (14) 송우석, 김원택, 2012, “회전기기 앵글러콘택볼베어링의 오정렬에 따른 열화영향 고찰,” 한국에너지공학회 2012년도 추계 학술발표회, 2012.13, pp. 34.
- (15) 임동진, 문석만, 조용주, 2012, “속도의 영향에 따른 3차원 거친 표면의 혼합윤활해석,” Journal of the KSTLE, Vol. 29, No. 1, pp. 27~32.
- (16) 유대원, 이재학, 2012, “온도변화에 따른 테이퍼 롤러 베어링의 수명 및 예압특성,” 2012 년도 대한기계학회 신뢰성 부문 춘계학술대회 논문집, pp. 152~153.
- (17) 박태조, 2012, “프로파일링한 테이퍼 로울러의 탄성유체윤활해석,” Journal of the KSTLE, Vol. 28, No. 4, pp. 153~159.
- (18) 조준현, 임윤철, 이성철, 김충현, 2012, “극저온 환경용 볼 베어링 시험장치 개발 및 터보펌프용 볼베어링 시제품의 성능평가,” Journal of the KSTLE, Vol. 28, No. 4, pp. 167~172.
- (19) 다리스랭 스트렝다와, 편영식, 김준형, 카유모르 라빌, 2012, “자동조심 롤러 베어링 재 제조 공정 개발,” 한국정밀공학회 2012년도 추계학술대회논문집, pp. 931~932.
- (20) 노승국, 경진호, 박용태, 고득용, 2012, “초고속 터보 분자펌프의 자기부상 회전 안정성 연구,” 한국진공학회, 제42회 동계학술대회 논문집
- (21) 신민재, 정훈형, 김재실, 조수용, 2012, “100kW급 터보 블로워용 자기베어링 축의 능동 제어 시뮬레이션에 관한 연구,” 한국정밀공학회, 2012년도 춘계학술대회논문집
- (22) 신민재, 정훈형, 김재실, 조수용, 2012, “예측 전문가 제어 기법을 사용한 자기베어링-축의 제어 시뮬레이션,” 한국기계공학회, 2012년도 추계학술대회논문집
- (23) 성화창, 박진배, 주영훈, 2012, “6자유도를 갖는 능동 자기베어링 시스템의 강인 퍼지 제어기,” Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 267~272.
- (24) 성화창, 주영훈, 박진배, 2012, “자기베어링 시스템의 스위칭 안정도 해석,” Proceedings of KIIS Spring Conference, 2012, Vol.22, No.1
- (25) 유승열, 이학인, 정진홍, 노명규, 2012, “자기베어링 제어기에서의 동기 노치필터 적용에 따른 소리 전력 및 성능 변화의 실험적 연구,” 대한기계학회, 2012년도 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 논문집
- (26) 김도태, 장중길, 2012, “고속 공기압 실린더의 피스톤 실 단면형상 변화에 따른 마찰특성,” 유공압건설기계학회논문집, 제9권, 제1호, pp. 18~24.

- (27) 박태조, 이준혁, 2012, “시일과 코팅된 스틸면 사이의 구형 입자에 의한 미끄럼 접촉 해석,” 한국윤활학회, 2012, Vol.28, No.6, pp. 283~288.
- (28) 김동욱, 진성식, 김준호, 김경웅, 2012, “코닝 조합이 물결 프로파일이 가공된 미케니컬 페이스 실의 작동 성능에 미치는 영향,” 한국윤활학회, 2012, Vol.28, No.2, pp. 70~80.
- (29) 박화용, 윤종민, 유성환, 김창열, 이재웅, 2012, “접성 유체 감쇠기의 크기 변화에 따른 성능 변화 예측,” 한국소음진동공학회논문집, Vol. 22, No.1, pp 53~60.
- (30) 윤호상, 문일동, 김재원, 오재윤, 이형원, 2012, “MR 댐퍼를 이용한 대형 버스 현가장치의 반능동 제어,” 한국생산제조시스템학회지, Vol. 21, No. 4, pp. 683~690.
- (31) 이용철, 홍순석, 장재덕, 주인식, 2012, “토션댐퍼 히스테리시스 최적화를 위한 디스크 스프링 형상에 관한 연구,” 한국자동차공학회 부문종합 학술대회, 2012.5, pp. 210~214.