

회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복*

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2011년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트라이볼로지 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 회전기 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. 특히 2011년도에는 회전체 시스템이나 사용되는 베어링의 안정성을 검증하는 연구가 활발히 진행되었다. 다음은 2011년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 산업의 발달에 따라 산업용 회전기기는 점점 고속화, 고효율화의 경향을 보이고 있다. 이에 따라 회전기기의 안정성과 신뢰성 확보가 크게 주목받고 있으며, 회전기기의 회전체 동역학적 해석을 통한 정밀한 동역학적 거동의 예측과 실제 실험을 통한 안정적인 설계가 요구되고 있다.

국내에서는 출력밀도 500 W급의 마이크로 가스터빈 발전기의 개발이 진행되고 있다.⁽¹⁾ 500 W의 출력을 발생시키기 위해서는 전동모드로 20만 rpm까지 압축기의 속도를 증가시키고, 이후 계속 속도를 증가시켜 50만 rpm까지 정상상태 발전을 하는 시스템이다. 초고속으로 운전하는 회전체의 동역학적 모델링을 정확히 하기 위해서 베어링의 대한 강성과 감쇠계수 등의 회전체 동역학적 계수들을 해석적으로 예측하거나 실험적으로 추출하는 방법이 있다. 이 논문에서는 공

기충을 이용한 임팩트 테스트 방법을 소개하였고 그 실험결과를 나열하여 그 타당성을 입증하였다.

최근 에너지 플랜트 핵심 기자재인 API 610 BB5 펌프 개발품에 대한 회전 신뢰성 예측을 위한 연구가 진행되었다.⁽²⁾ API 610 BB5 펌프는 기동전 정시(stand by) 없는 메인 펌프로 사용되기 때문에 수력 및 회전 신뢰성이 극도로 보장되어야 하는 문제를 안고 있다. 이에 로터-베어링 시스템의 동특성 해석뿐만 아니라 베어링 선정의 적절성, 시일 효과등을 포함한 상세 로터다이나믹 설계 해석을 수행하였다. 작동 유체의 영향을 고려하지 않은 dry-run 상태와 그 영향을 고려한 wet-run 상태에 대한 해석모델을 구축하였으며, 추가로 평활(plain circular) 베어링과 압력 댐(pressure dam) 베어링을 선정하여 각 베어링이 펌프 로터 시스템의 동특성에 미치는 영향을 검토하였다.

FPSO(Floating Production Storage and Offloading) 심정용 수직 해수 펌프 시제품에 대한 운전 신뢰성 예측을 위한 상세 로터다이나믹 해석이 수행되었다.⁽³⁾ 시일의 영향을 고려한 위험속도 해석, 베어링의 비선형 유막력을 고려한 과도응답 해석을 진행하였으며, 추가로 수직로터의 정상상태 해석기법을 제안하였다. 또한, 그 결과를 과도응답과 서로 비교, 분석하였다. 제안된 해석 기법을 토대로 정상상태 응답 해석을 수행한 결과, 과도해석의 응답 수준과 거의 일치하는 결과를 도출하였다.

최근 내연기관의 엔진효율 및 출력을 증가시키기 위해 터보차저에 의한 과급이 널리 사용되고 있다. 이에 터보차저용 터빈의 스핀 테스트를 수행하기 위하여 터빈, 터빈축, 연결아머, 플랜지 및 스핀들 조립체에 대한 상세 로터다이나믹 해석을 수행한 연구들이 진행되었다.⁽⁴⁾ 정격속도 근방에서 위험속도와 마진이 충분하지 않아 과도한 진동이 나타났으며, 마진이 20% 이상인 새로 설계된 모델을 이용하여 성공적인 스핀 테스트가 수행되었다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

저널 베어링의 오일필과 오일휩 등의 불안정성을 극복하

* 한국과학기술연구원
E-mail : lyb@kist.re.kr

기 위해 개발된 틸팅 패드 베어링의 1.2 MW급 터보블로워 적용을 위한 체계적인 설계방법에 대한 고찰이 이루어졌으며, 이에 대한 시뮬레이션과 측정실험을 통한 검증으로 회전축 안정성이 분석되었다.⁽⁵⁾

오일윤활베어링의 내구성 및 불안정성의 제약을 극복할 수 있는 공기 베어링의 설계 및 정하중 지지능력이 예측되었다. 특히 260 kW급 영구자석 동기 전동기에 적용을 위하여 상세 설계가 진행되었다.⁽⁶⁾

동압 저널 베어링보다 높은 강성, 하중 지지 용량, 저마찰, 높은 댐핑 특성을 갖는 정수압 베어링의 특성에 대한 이론적 해석이 이루어졌다. 베어링 형상, 틸새, 외부압력, 윤활유 점도, 온도 등을 복합적으로 고려하여 Reynolds 방정식에 적용한 해석이 실행되었으며 이를 바탕으로 고성능 베어링의 설계가 가능해졌다.⁽⁷⁾

고효율의 압축기 개발을 위한 구름접촉 스톱스트 볼 베어링에 대한 마찰손실 해석이 진행되었다. 왕복동형 압축기의 피스톤, 크랭크축을 모델링하여 스톱스트 볼 베어링이 적용된 압축기의 마찰손실 및 동역학적 거동 해석이 설계에 활용 가능해졌다.⁽⁸⁾

기계요소들의 가장 중요한 현상 중 하나인 마모에 대한 연구도 진행되었다. 3개의 저널 베어링을 사용하는 선박용 엔진에 와전류 센서를 사용하여 마모를 감지해내는 실험 방법이 소개되었다.⁽⁹⁾

선박용 대형 크랭크 핀(Crank Pin) 가공기에 적용되는 유정압 베어링의 형상 오차의 윤활특성에 대한 중요성과 베어링 간극의 영향이 수치 해석적으로 평가되었다.⁽¹⁰⁾

MEMS 기술을 사용한 초소형 가스터빈용 저널 베어링의 유동장 수치 해석이 이루어졌다. 정상상태에서 반발력의 형성유무와 유량을 계산하였고, 입구압력과 유량이 베어링에 미치는 영향이 예측되었다.⁽¹¹⁾

대칭 및 비대칭 오일 홈을 갖는 타원형 저널베어링에 대한 연구도 이루어졌다. 간극비가 최적화된 비대칭 오일 홈을 갖는 타원형 저널베어링이 개발되어 해석과 실험을 신뢰성이 확인되었다.⁽¹²⁾

3.1.2 볼 베어링, 롤러 베어링

구름 베어링은 산업 전체적으로 널리 쓰이고 있는 베어링으로, 베어링의 내륜과 외륜의 사이에서 회전하는 강구에 의해 축의 하중을 지지하는 베어링이다. 구름 베어링은 아주 작은 공차를 가지도록 가공되기 때문에 높은 회전 정밀도를 얻을 수 있으며, 베어링의 종류에 따라 다양한 하중의 크기와 방향, 운전속도 등을 선택하여 설치 할 수 있다.

고정밀, 고속회전을 하는 스피들에 가장 널리 쓰이는 각접촉 볼 베어링의 경우 내륜의 형상오차가 있을 때, 회전체의 회전 정밀도를 계산하기 위한 연구와 축방향의 변위를 추정하기 위한 연구가 진행되었다.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

볼베어링의 마찰 토크 성능과 내구성은 전체 시스템의 경제성과 연관되어 산업에서는 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 그러나 이러한 베어링의 성능은 장착된 시스템의 조건에 따라 변할 수 있는데, 이를 검증하기 위한 연구가 실험적으로 진행되었다. 이 연구에서는 터보펌프의 작동환경을 모사하여 이 조건하에서 터보펌프의 회전속도, 하중, 냉각유량 등을 변화시켰을 때, 베어링의 토크와 내구성을 확인하였다.⁽¹⁵⁾

볼베어링의 유동 및 열전달 특성을 분석하기 위한 연구의 일환으로서, 베어링 내부의 공기 유동에 대한 해석적인 연구가 진행되었다. 이 연구에서는 고속으로 회전하는 볼 베어링 내부의 공기유동에 대하여 전산해석을 통하여 베어링의 회전속도에 따른 3차원 유동구조의 변화를 파악함으로써 최적의 오일미스트(oil-mist) 윤활점을 찾는 연구가 진행되었다.⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

이 외에도 볼 베어링의 궤도륜의 형상 함수와 영향함수법으로 3차원 접촉 해석을 실행하여 무차원 shoulder-height와 무차원 하중을 찾고 이를 다양한 볼베어링에 적용하는 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 각 접촉 볼베어링에도 적용이 가능하여 shoulder-height를 정량화 할 수 있게 되었다.⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

로울러 베어링의 경우 LM가이드에 부착된 로울러 베어링을 모델링하고 이를 실험과 비교하는 연구가 진행되었다.⁽²⁰⁾

3.1.3 자기 베어링

자기베어링은 무급유, 무마찰 베어링으로서 회전축의 거동에 따라 전자기력을 제어하여 회전축을 비접촉 부상시키는 전자기 베어링이다. 기존의 볼베어링과 저널베어링의 단점들을 보완할 수 있고, 진공 또는 특수 환경에서 사용할 수 있으며, 마찰손실이 거의 없어 수명이 길다. 이러한 장점으로 인해 자기베어링은 공작기계 스피들, 터보압축기, 플라이휠 에너지저장장치 등에 적용되고 있으며, 각 연구기관과 기업에서 소형화, 낮은 제작비용, 고성능을 지향하여 자기베어링 구성부품의 삭감, 기능의 복합화에 관해서 연구 개발이 진행되고 있다. 예를 들면, 셀프 센싱 기술이나 모터 일체 자기베어링, 축 방향 자기베어링과 반경 방향 자기베어링을 일체화한 방식, 전자석의 수를 삭감한 방식 등이 있다.

수동형 자기베어링은 센서와 제어기 없이도 안정된 부상이 가능하지만, 이론적인 해석이 복잡하고 특히 감쇠가 매우 작다는 단점이 있어 적용분야가 제한된다. 반면, 능동형 자기베어링은 실시간 감시를 통한 제어가 용이하고, 정밀 구동이 가능하며, 베어링의 감성과 감쇠 계수를 변화하여 고속에서도 안정성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이러한 능동형 자기베어링에 여러 가지 제어기법을 도입하여 고급제어, 강인제어, 적응제어에 관한 연구들이 수행되고 있고, 자기베어링 시스템의 비선형성에 대한 해석 방안으로 퍼지 모델링 및

제어 알고리즘의 정당성을 시뮬레이션을 통해 검증된 논문이 발표되었다⁽²¹⁾.

원판 형 코어를 갖는 축 방향 자기베어링은 일반적으로 손실을 줄이기 위해 규소 강판을 적층한 형태로 제작이 불가능하므로 저탄소강으로 제작되며, 재료의 특성에 기인한 시간 지연 현상이 불가피하다. 이를 보상하기 위한 제어기를 설계하여, 전류의 증가 없이도 기존 비례-미분 제어기에 앞섬-뒤짐 보상을 추가하여 시간 지연이 보상됨을 실험적으로 검증하였다⁽²²⁾.

플라이휠 에너지 저장 장치에 적용된 자기베어링은 능동 제어를 통해 불균형 질량에 의한 불균형 응답을 개선시킬 수 있고, 이러한 방법으로 추정자를 이용한 제어방법과 영향계수법을 이용한 보상방법 등에 관한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 영향계수법을 이용하여 불균형 응답을 개선하기 위해 회전 속도계를 이용하는 방법을 제시하고 실험적으로 검증한 사례가 발표되었다⁽²³⁾.

자기베어링에 공기포일 베어링을 결합하여 각 베어링의 장점을 극대화하고, 단점을 서로 보완하는 하이브리드 베어링에 관한 연구도 진행중이며, 회전축의 위험 속도 및 굽힘 모드에서의 진동을 줄이고, 전자기의 전력 소모를 절감하는 실험 연구가 발표되고 있다⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾. 또한, 자기 베어링의 전력 최소화 제어 알고리즘들의 성능을 전력소비량과 힘 슬루율 측면에서 비교한 연구가 이루어졌고, 일반적인 비례-미분 제어기와 전력최소화 제어기의 성능을 비교한 실험 결과가 발표되었다⁽²⁶⁾.

3.2 실(seal)

국내에서 현재 개발 중인 30톤, 75톤급 액체로켓엔진용 단단 원심 터보펌프를 이용하여 플로팅 링 실의 간극에 따른 효율을 측정하는 연구가 진행되었다⁽²⁷⁾. 그 결과 플로팅 링 실의 간극이 작은 펌프일수록 누설유량의 감소 효과로 인해 효율이 높은 것으로 나타났다.

최근 CFD를 이용한 실의 해석 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 래비린스의 누설유량을 줄이기 위하여 주 이(Main tooth)양쪽으로 딤플(Dimple)을 배치하여 CFD로 유동해석을 한 연구가 발표되었다⁽²⁸⁾. 해석결과 딤플이 없는 실에 비교하여 누설유량의 감소에 미미한 것을 검증하였다.

기존의 Mechanical seal의 경우 고체마찰을 일으키기 때문에 마모에 의한 분진이 생긴다. 이에 높은 청정조건을 필요로 하는 반도체 공정용 진공 챔버 등에서는 독점적으로 마그네틱 Seal을 사용하고 있다. 이에 기존 문헌발표자료를 바탕으로 마그네틱 Seal을 개발 및 실제 성능 측정을 하였으며 ANSYS 프로그램을 통하여 마그네틱 Seal의 자장을 FEM으로 해석하여 이론적 성능을 측정하고 실제 성능과 비교 및 검토하였다⁽²⁹⁾.

한국항공우주연구원에서 터보펌프의 추진제 혼합 방지 Seal이 단품 수준에서의 성능과 달리 조립체 시험 중 과도한 마모가 생겨 이에 대한 정밀 검토를 하였다⁽³⁰⁾. 그 결과 카본 플로팅 링 실의 간극이 단품 수준에 비하여(16 m~19 m) 조립체일 때 너무 작아 실이 정상적으로 부상되지 못한 것이 원인으로 판명되었으며, 스플릿 카본 실과 카본 플로팅 링 실을 조합한 총 2단의 실 조립체의 경우 누설성능이 매우 향상되는 것을 입증하였다.

Seal과 축 사이의 이물질에 의하여 상대적으로 경도가 아주 높은 축에서 발생하는 마멸에 대하여 연구가 진행되었다. 일반적으로 이물질의 형태가 구형이 아닌 점을 감안하여 이물질을 완전탄소성 상태의 육각형입자로 가정하고 스틸면 또한 완전탄소성 상태로 가정 하여 MARC(FEM)를 사용하여 해석하였다. 그 결과 육각형 입자와 Seal의 간섭이 증가하자 높은 Von-Mises 응력 분포를 나타냈으며 Seal과 축의 상대 운동에 의하여 육각형 입자가 굴러감(Tumbling)에 따라 축의 상당한 깊이까지 항복응력 이상의 응력이 집중되는 것을 검증하였다⁽³¹⁾.

3.3 댐퍼(damper)

2011년도에는 회전기기 댐퍼의 연구 동향에서 많은 연구가 자동차의 현가장치 부문에 치중이 되어 있었고, 구조/재료적인 측면에서의 접근보다는 제어를 통해 진동을 감쇠시키는 연구가 대부분이었다. 본 파트에서는 유체기계에 적용할 수 있는 댐퍼에 대한 연구만을 서술하였다.

MR 유체는 적은 전력으로도 진동 감쇠 시스템 구현이 가능하며 반응속도가 빠르기 때문에 여러분야에서 응용이 되는 지능형 유체이다. MR 유체의 자기장에 변화에 따른 유동 변화를 실험적으로 관측하여 MR 유체의 유동속도 및 자기장 세기 변화에 따른 클러스터의 형성과정과 거동을 측정하였다. 이는 MR 댐퍼의 최적설계를 위한 기초자료로 참고될 수 있을 것으로 사료된다⁽³²⁾.

풍력 발전기의 저속축과 기어 박스를 포함한 드라이브 트레인은 풍력 발전기의 구성 요소 중 가장 많은 피로하중을 받는다. MW급 풍력 발전기의 드라이브 트레인은 매우 낮은 댐핑을 가진 재료로 만들어진다. 때문에 반복적인 하중이 가해지게 되면 드라이브 트레인의 피로 파괴현상이 나타날 수 있다. 매우 낮은 댐핑을 가진 드라이브 트레인의 특성상, 반복적인 하중을 견디기 위해 풍력 발전기에서는 발전기 토크를 제어하는 방식을 사용하여 피드백된 발전기 회전축 속도 신호에 밴드 패스 필터나 노치 필터 등을 부착하여 발전기 토크를 제어하는 것이다. 시뮬레이션을 통해 드라이브 트레인에 드라이브 트레인 댐퍼인 밴드패스필터와 노치 필터를 적용할 경우 드라이브트레인의 피로하중뿐만 아니라 타워의 하중도 감소함을 검증하였다⁽³³⁾.

4. 결 론

2011년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 기존 연구들의 방향과 많은 차이가 나지 않는 것으로 보였다. 특히 에너지 효율 향상과 관련, 시스템과 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.

참고문헌

- (1) 박철훈, 최상규, 함상용, 2011, “임팩트 테스트를 이용한 초고속 회전체용 공기 포일 베어링의 동특성 계수 측정,” 유체기계저널, 제14권, 제1호, pp. 5~10.
- (2) 김병옥, 이안성, 김성기, 2011, “API 610 BB5 펌프 개발을 위한 로터다이나믹 특성 분석,” 유체기계저널, 제14권, 제4호, pp. 38~44.
- (3) 김병옥, 양성진, 이명호, 2011, “FPSO 심정용 수직 해수 펌프의 로터다이나믹 과도해석,” 유체기계저널, 제14권, 제5호, pp. 69~74.
- (4) 김병옥, 양성진, 이명호, 2011, “터보차저용 터빈의 스핀 테스트를 위한 로터다이나믹 특성분석,” 유체기계저널, 제14권, 제6호, pp. 91~95.
- (5) 조현민, 정훈형, 김재실, 조수용, 2011, “1.2MW급 터보블로워용 틸팅패드 저널베어링의 설계에 관한 고찰,” 한국기계공학회지, 제10권, 제2호, pp. 26~31.
- (6) 최복성, 구분진, 이용복, 김창호, 김태호, 2011, “260kW급 초고속 전동기용 공기 포일 저널 베어링과 스투트 베어링의 설계 및 정하중 지지능력 예측,” 한국윤활학회, 제52회 춘계학술대회 논문집, B-03.
- (7) 박성환, 박상신, 2011, “물 정수압 저널 베어링의 이론적 해석,” Journal of the KSTLE, Vol. 27, No. 2, pp. 71~76.
- (8) 김태중, 2011, “스투스트 볼 베어링이 적용된 왕복동형 압축기의 마찰손실 해석,” Journal of the KSTLE, Vol. 27, No. 2, pp. 101~108.
- (9) 비스와스, 광용길, 황경환, 김태옥, 안중환, 2011, “와전류 센서를 이용한 선박엔진 저널베어링의 마모감지,” 한국생산제조시스템학회, 2011년 추계학술대회 논문집.
- (10) 하양협, 이승준, 이상민, 이득우, 2011, “저널 형상오차에 따른 Pin Turning용 유정압 베어링의 윤활 특성 해석,” 한국생산제조시스템학회, 2011년 추계학술대회 논문집.
- (11) 서준혁, 백제현, 2011, “초소형 가스 터빈용 저널 베어링 내 유동장 수치해석을 통한 응답특성 분석,” 한국전산유체공학회, 2011년도 춘계학술대회, pp. 387~391.
- (12) 강병연, 류재몽, 조영천, 2011, “타원형 저널베어링에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회, 2011년 에너지 및 동력공학 부문 춘계학술대회 논문집 pp. 8~12.
- (13) 배규현, 황주호, 홍성욱, 2011, “각접촉 볼베어링의 내륜오차에 의한 회전정도 해석,” 한국정밀공학회 2011년도 춘계학술대회논문집, pp. 139~140.
- (14) 배규현, 이찬홍, 황주호, 홍성욱, 2011, “각접촉 볼베어링으로 지지된 회전축의 축방향 변위 추정,” 한국정밀공학회 2011년도 추계학술대회논문집, pp. 299~300.
- (15) 전성민, 광현덕, 김진한, 2011, “터보펌프 볼 베어링의 마찰토크 평가,” 한국윤활학회지, 제27권, 제1호, pp. 25~33.
- (16) 오일석, 김동주, 홍성욱, 김경진, 2011, “볼의 스핀이 볼베어링 내 공기유동에 미치는 영향,” 한국정밀공학회 2011년도 춘계학술대회논문집, pp. 289~290.
- (17) 김동주, 오일석, 홍성욱, 김경진, 2011, “고속 회전하는 볼베어링 내 공기 유동구조 수치해석 연구,” 한국정밀공학회지, 제28권, 6호, pp. 745~750.
- (18) 최동철, 최해운, 김태완, 2011, “볼 베어링 설계 변수가 Shoulder Height 설정에 미치는 영향,” 한국기계공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, pp. 177~178.
- (19) 최동철, 김태완, 조용주, 2011, “볼베어링 케도론 턱 형상의 최적화,” 한국윤활학회 2011년도 제52회 춘계학술대회 논문집, pp. 133~134.
- (20) 정재일, 노기훈, 2011, “롤러 LM가이드 베어링의 단순화 모델링에 대한 연구,” 한국생산제조시스템학회 2011 춘계학술대회 논문집, pp. 116~117.
- (21) 성화창, 박진배, 탁명환, 주영훈, 2011, “하이브리드 자기 베어링 시스템의 강인 안정도 해석,” 한국지능시스템학회 논문지, Vol. 21, No. 3, pp. 372~377.
- (22) 이종민, 김우연, 강민수, 김승중, 2011, “하이브리드 축 방향 자기 베어링에서의 시간 지연을 보상하기 위한 제어기,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 63~64.
- (23) 강민수, 이종민, 김승중, 유정훈, 배용채, 2011, “자기베어링으로 지지된 플라이휠 시스템에서의 영향계수법을 이용한 불균형 응답 개선,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집.
- (24) 정세나, 안형준, 김승중, 이용복, 2011, “공기포일 자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 연성 축의 휨 모드 진동 제어,” Journal of the KSTLE, Vol. 27, No. 2, pp. 57~64.
- (25) 조성하, 이명기, 이춘세, 안형준, 2011, “공기포일 자기 하이브리드 베어링으로 지지되는 연성 축의 무부하 마찰 특성,” 대한기계학회 동역학 및 제어 부문 춘계학술대회.
- (26) 유승열, 이학인, 노명규, 2011, “자기베어링 시스템을 위한 저전력 제어기의 비교연구,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집.
- (27) 김대진, 최창호, 홍순삼, 김진한, 2011, “임펠러 및 플로팅 링 실이 원심펌프의 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회, 대한기계학회 2011년도 유체공학부문 춘계학술대회 논문집, 2011. 4, pp. 113~118.
- (28) 서정민, 박준영, 최범석, 윤의수, 2011, “딴플을 가진 래비린스 실의 CFD 유동해석,” 대한기계학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, pp. 291~292.
- (29) 김옥현, 이민기, 2011, “마크네틱셀 개발 및 기밀 평가 시험,” 한국기계공학회, 한국기계공학회지, 제10권, 제2호

- 2011.4, pp. 79~83.
- (30) 전성민, 곽현덕, 김진한, 2011, “추진제 혼합 방지 실의 카본 플로팅 링 실 및 스플릿 카본 실 개발,” 한국윤활학회, 한국윤활학회 2011년도 제52회 춘계학술대회 2011.4, pp. 59~60.
- (31) 박태조, 이준혁, 남기하, 2011, “미끄럼 운동하는 시일과 스틸면 사이의 육각형 입자의 거동,” 한국윤활학회, 한국윤활학회 2011년도 제52회 춘계학술대회 2011.4, pp. 83~84.
- (32) 김정석, 이권재, 이기원, 백대성, 권영철, 2011, “자기장에 의한 MR 유체의 유동해석 기초연구,” 대한설비공학회 2011 하계학술발표대회 논문집, pp. 1239~1241.
- (33) 김현건, 남윤수, 손재훈, 2011, “풍력 발전기의 피로 하중 감소를 위한 드라이브 트레인 댐퍼 적용,” 한국정밀공학회 2011년도 춘계학술대회논문집, pp. 1023~1024.