

2016년 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

김태호* · 정성윤**

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2016년도 국내 발표된 논문을 중심으로 회전체 동역학과 회전 기구요소의 연구동향을 알아본다. 유체 기계 관련 논문을 중심으로 분석하였으며, 유체기계는 터보 압축기, 송풍기, 터빈, 펌프 등 산업현장에서 사용되는 회전 기계류로 본지에서 정의하였다. 회전기구 요소는 크게 베어링, 실, 댐퍼로 분류하였고, 세부적으로는 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구 분야와 저널베어링, 트러스트 베어링, 볼 베어링, 자기베어링, 실, 댐퍼로 구분하여 분석하였다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 탄소 가스총량 규제 등 환경에 대한 문제로 인해 대체 에너지 및 미 활용 에너지를 활용하는 발전 시스템에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다.

그 중에서 초임계 CO₂ 발전 시스템은 넓은 열원 범위에서 사용하며, 상대적으로 고 효율이고 소형 규모로 시스템 구축이 가능한 장점이 있다. 이동현과 김병옥⁽¹⁾은 초임계 CO₂ 발전용 감속기의 축 설계와 관련하여, 입력 축의 유체 윤활베어링의 특성 예측과 감속기어 축계의 회전체 동역학 특성에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 입력 축의 베어링의 강성은 직접 항이 연성 항보다 2~5배정도 큰 값을 가졌으며, 입력 축 정격 회전속도까지 위험 속도는 나타나지 않았다. 또한, 불안정한 모드 또한 존재하지 않음을 보이며 시스템의 안정성을 확인하였다.

구동중인 원심륜의 면외방향 진동저감에 관한 내용은 기존의 연구에서 대부분 고려하지 않았다. 김민성⁽²⁾ 등은 에어킨 슬립화 및 에어킨 구조진동의 원인이 되는 원심륜의 면외방향 진동의 원인을 분석하고, 이를 저감시키는 설계방안을 제시하였다. 축 정렬 불량이 부여된 실제 시스템의 동특성을 구현할 수 있는 해석모델을 정립하고, 실제 구동속도 데이터

를 적용하여 해석을 수행하였다. 그 결과 모터 축과 원심륜 사이의 축 정렬 불량이 과도상태 진동의 원인임을 확인하고, 축 정렬 불량이 감소할수록 과도상태의 진동도 감소함을 보였다. 또한, 축 정렬 불량을 보완할 수 있는 와셔를 고안하고 원심륜에 장착하여 진동이 저감됨을 확인하였다.

벨 컵은 도료를 미립화하여 분사하는 장치로 터빈과 직접 연결되어 고속으로 회전하는 회전형 무화기이다. 박정민⁽³⁾ 등은 도장로봇용 벨 컵에 대하여 여러 형상에 따른 동적 특성과 위험속도, 불평형 진동 해석을 수행하여 정격속도 내에서의 안정성을 확인하였고, 제안된 벨 컵 모델들이 적용 가능한 것을 보였다.

김영민⁽⁴⁾ 등은 공기압축기용 회전체-볼베어링 시스템의 메탈 메쉬 댐퍼 적용 유무에 따른 로터 다이내믹 특성을 회전체 동역학 해석을 통해 비교하였다. 그 결과 메탈 메쉬를 적용하였을 때, 메탈 메쉬의 감쇠특성으로 인해서 볼 베어링이 받는 동하중의 크기가 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다.

깊은 홈 볼 베어링은 그것의 장점인 저렴한 가격과 반경방향 하중지지력으로 인해 회전기계에 널리 사용된다. 석윤지⁽⁵⁾ 등은 깊은 홈 볼 베어링의 예압량에 따른 회전체-베어링 시스템의 동특성을 분석하였다. 그 결과, 예압량이 증가함에 따라 고유진동수와 베어링강성이 높아짐을 확인함으로써 적절한 예압을 가함으로써 구동 시 안정성이 향상됨을 보였다.

3. 회전기구 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

틸팅 패드 저널 베어링(Tilting Pad Journal Bearing, TPJB)은 고속에 대한 구동 안정성이 뛰어나며 고속 회전 기계에 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 틸팅 패드 저널베어링은 피봇의 형상에 따라 점 접촉과 선 접촉 등의 접촉 형태가 다르며, 피봇의 강성 또한 변화하게 된다.

* 국민대학교 기계시스템공학부(School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea)
E-mail : thk@kookmin.ac.kr

** 국민대학교 대학원 기계설계학과(Department of Mechanics and Design, Kookmin University, Seoul, Korea)

장경은⁽⁶⁾ 등은 로커백 피벗, 볼-실린더 피벗, 실린더-실린더 피벗의 3가지 형상의 비선형 피벗 강성 모델을 적용한 틸팅 패드 저널베어링의 동적 성능을 해석하여, 피벗 형상에 따른 피벗 강성 및 동특성 계수에 대한 비교를 하였다. 그 결과 피벗 강성과 동특성 계수는 선 접촉을 하는 로커백 피벗에서 가장 큰 값을 갖고, 접촉 면적이 가장 작은 실린더-실린더 피벗에서 가장 낮은 값을 가짐을 확인하였다.

목진명⁽⁷⁾ 등은 틸팅 패드 저널 베어링에서 피벗 하우징의 접촉으로 인한 파손에 대한 연구로 Hertzian 접촉응력이론과 유한요소를 통한 응력분포를 비교하였다. 그 결과 Hertzian 접촉응력 이론을 통한 해석은 하중과 곡률직경차가 증가할수록 응력 값이 증가했으며, 유한요소법을 통한 응력분포와 비교했을 때 볼과 소켓의 접촉 조건 차이에 의해 유한요소법 해석 최대응력 값이 저하중에서는 작고 고하중에서는 더 높음을 보였다. Mehdi^(8,9) 등은 Hertzian 접촉응력 이론 기반의 피벗강성을 계산하고 동적계수를 측정하였다. 피벗강성을 포함한 모델이 강제 피벗모델보다 직접 강성 및 감쇠계수가 크게 감소하였고, 강제 피벗 모델의 예측결과보다 실험데이터와 더 잘 일치함을 보였다. 또한 동적특성에 대한 피벗강성과 열 유체역학적 영향을 모두 고려한 모델을 보이고 비교한 결과 열 유체역학과 피벗강성을 모두 고려한 모델이 실험데이터와 더 잘 일치하였다.

서준호와 황철호⁽¹⁰⁾는 틸팅 패드 베어링에서 패드의 열팽창에 따른 예압 변화 및 베어링 패드의 온도변화, 동특성변화를 레이놀즈방정식, 에너지방정식, 열전달 및 열변형 해석 모델을 유한요소법을 통해 구축하였다. 또한 등점도(iso-viscosity) 베어링 모델과 다른 열에 의한 효과를 고려하는 새로운 알고리즘을 구성하고 예압량의 변화 모델을 통해 정밀한 해석모델의 시뮬레이션을 하였다. 그 결과 유체 점도와 공급 온도 증가는 모두 예압을 증가시켰으며, 점도의 증가는 강성, 감쇠계수 둘 다 증가하였지만 공급온도의 증가는 강성 계수를 증가시키고 감쇠계수를 감소시키는 경향을 보였다. 이를 통해 동특성 및 정특성과 밀접한 관계를 가지는 예압량이 열로 인해 변하게 되며 운전 특성에 영향을 주는 것을 확인하였다.

연성피벗 저널베어링(flexure pivot journal bearing)은 피벗에서 접촉을 통한 틸팅 운동이 아닌 web의 탄성변형으로 인한 운동을 한다. 그로인해 틸팅 패드 저널베어링의 단점인 피벗 부분에서 접촉으로 인한 탄성변형 및 마모로 생기는 회전체 시스템의 불안정성을 보완할 수 있는 베어링이다. 또한 패드와 하우징의 정밀가공으로 생기는 생산단가 증가를 줄일 수 있다. 서준호와 최연선⁽¹¹⁾은 패드와 피벗의 연성을 동시에 고려한 모델을 유한요소법과 Matlab을 이용하여 패드 두께증가에 따른 동특성 변화를 예측하였다. 그 결과 직교 강성계수는 특정 두께 이후 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며 이는 일반적인 틸팅 패드 베어링과 반

대의 경향이였다. 직교 점성계수는 일반 틸팅 패드 베어링과 같이 증가하는 것을 보였다.

성능 시험용 모델수차는 실제 수차의 성능을 예측하기 위해 만들어진 축소된 형태의 수차이며, 모델수차를 통한 성능 시험은 실험수차의 성능을 판단할 수 있다. 특히, 효율시험은 정밀하게 측정되어야 하는 시험으로 마찰력을 줄이고 프레임 자유회전상태로 유지하기 위해 정압(hydrostatic)베어링을 주로 사용한다. 박무룡⁽¹²⁾ 등은 모델수차용 레이디얼 정압베어링의 간편 설계 절차와 설계변수에 대한 추천 값을 제시하고, 그 후 실험결과 및 2차원 해법을 통해 초도설계 단계에서 유용하게 활용 가능성을 검증하였다.

가스 포일 저널 베어링(GFJB)은 구름 베어링과 다르게 급유시스템 및 실링이 필요 없기 때문에 소형화가 가능하며, 극한 조건에서도 작동이 가능하다는 장점이 있다. 방지훈과 류근⁽¹³⁾은 범프 포일 단품에 정하중을 부여하여 구조강성 및 감쇠를 실험적으로 규명하였다. 또한, 범프 포일이 겹쳐진 형태 및 수에 따른 구조강성의 변화를 실험적으로 확인하였다. 이동현⁽¹⁴⁾ 등은 소형 가스터빈에서 범프 포일 베어링의 온도 특성을 예측하기 위해 구동 중인 가스 터빈의 온도를 조건별로 측정하고, 열역학적 모델의 예측결과와 비교하였다. 그 결과 설계된 가스 터빈은 2차유로로 공급되는 유량이 충분히 열을 냉각시키고 있음을 확인하였고, Plenum에 공급되는 냉각된 공기의 온도로 베어링온도를 조절 가능함을 보였다.

수직형 수력 터빈 발전기에는 일반적으로 터빈가이드 베어링(turbin guide bearing, TGB)이 사용된다. 원통형 TGB는 회전지지 및 반경방향 설치 공간이 작다는 장점이 있다. 이안성과 장선용⁽¹⁵⁾은 저편심, 저부하 조건에서 매우 낮은 유막 강성을 갖는 단점을 보완하기 위해 분할된 각 패드의 선단에 테이퍼를 도입하여 설계하였다. 그 결과 저부하, 저편심 조건에서도 일정한 평균 직접강성을 얻음을 보였고, 테이퍼의 높이를 조절해서 평균 직접강성을 조절할 수 있음을 보였다.

3.1.2 트러스트 베어링

트러스트 베어링은 회전축 방향의 하중을 지지하는 베어링으로 낮은 마찰을 가지며, 하중지력이 중요한 요소이다. 그 중 가스를 윤활 유체로 사용하여 낮은 마찰과 높은 고속 안정성 및 무급유의 장점을 가진 가스 포일 트러스트 베어링(GFTB, Gas Foil Thrust Bearing)에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 문창국과 김태호⁽¹⁶⁾는 윤활 유체인 가스의 점도변화에 따라 베어링의 성능특성을 분석하였다. 무차원 레이놀즈식을 유한차분법으로 윤활 해석한 결과 윤활유체의 점도 증가 및 회전속도의 증가에 따라 베어링의 동력손실이 증가하였다. 추가적으로 가스포일 저널베어링의 경우 축 방향 길이가 증가할수록 동력손실이 커지는 것을 해석적으로

확인하였다.

이호원과 류근⁽¹⁷⁾은 다양한 조건의 가스포일 트러스트베어링의 정하중의 변화에 따른 특성을 비교, 분석하였다. 그 결과 모든 경우에서 정하중 크기가 증가함에 따라 구조강성이 비선형적으로 증가하였다. 또한, 점탄성 소재를 부착한 베어링이 일반적인 베어링보다 강성이 작은 것을 확인하였고, 에너지 소산으로 인해 발생하는 이력곡선의 넓이가 더욱 큰 것을 보이며 가스포일 트러스트 베어링에 점탄성 소재를 부착하였을 때 감쇠 능력이 향상됨을 보였다. 또한 포일을 이중으로 겹치면 감쇠의 경우는 차이가 없었지만 구조강성, 에너지소산 및 등가점성 감쇠계수는 직렬로 연결된 댐퍼와

박태조와 김민규⁽¹⁸⁾는 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 타원형 댐플의 배치방향과 평행 트러스트 베어링의 유향 특성과의 관계를 조사하였다. 해석 결과 유체의 운동방향과 타원형 댐플의 장축이 같은 방향일 때 지지하중이 가장 컸으며, 그 다음으로 반구형 댐플, 장축과 수직인 댐플 순서로 지지하중이 감소하였다. 마찰력은 그와 반대의 순서로 감소함을 보이며, 장축과 유체운동방향이 일치할 때 최대지지 및 최소마찰을 가짐을 확인하였다.

3.1.3 볼 베어링

볼베어링은 구름베어링의 한 종류이며, 볼과 하우징의 접촉으로 인한 파손과 소음저감 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

각 접촉 볼베어링은 반경방향 하중과 축 방향 하중을 지지하는 것이 가능하여 주로 스피들같이 뒤로 밀림현상이 없는 곳에서 사용된다. 배규현⁽¹⁹⁾ 등은 고속 스피들에 사용되는 각 접촉 볼 베어링의 각 어긋남과 피로수명사이의 관계 확인하였다. 기존의 베어링 모델을 개선해서 각 어긋남에 따른 볼 베어링의 특성을 예측할 수 있도록 하였으며, 수명공식에 적용하여 수명을 예측하였다. 1mrad 이후 각 어긋남이 증가함에 따라 접촉력의 변화가 급격하게 발생하였고, 수명 또한 급격하게 감소함을 확인하였다.

기어박스의 소음은 기어가 맞물려 있을 때의 동적 힘으로 인한 소음이 축, 베어링을 통해 전달되어 나타난다. 베어링 강성은 그러한 면에서 소음을 줄이는데 큰 영향을 준다. 박찬일⁽²⁰⁾은 베어링의 반경방향 틈새를 고려한 베어링 강성을 계산하고, 3자유도 모델의 스피어 기어계 운동방정식에 적용하여 모드해석을 하였다. 그 결과 저 하중 조건에서는 반경방향 틈새가 증가하면 베어링 강성, 하중 분포영역이 급격히 감소하였고, 고 하중조건에서는 반경방향 틈새가 증가하면 강성과 하중분포영역은 감소했지만 차이가 크지 않았다. 모드해석 결과 베어링과 축의 조합 강성이 첫 번째와 두 번째, 기어 맞물림 강성은 세 번째 고유진동수와 관련이 있음을 확인하였다.

최근 환경 규제에 의한 자동차의 경량화 요구가 늘어나고

있으며, 그로 인해 차체 무게를 지탱하면서 회전운동을 전달하는 자동차용 휠 베어링의 수명 평가에 대한 중요성이 부각되고 있다. 이승표⁽²¹⁾는 자동차용 휠 베어링의 수명에 영향을 주는 작동하중과 회전속도 의 변화에 따른 시험수명을 ISO 국제 표준에서 제안하는 이론수명인 기본정격수명, 보정정격수명 결과와 비교하였다. 그 결과 기존정격수명, 보정정격수명 모두 실험수명과 차이가 존재했으며, 시험수명과의 차이는 보정정격수명이 더 적은 것을 보이며 보정정격수명이 실제 시험수명을 상대적으로 잘 예측함을 보였다.

3.1.4 자기 베어링

자기베어링은 자기력으로 인해 부상되어 회전체를 지지하는 비 접촉식 베어링이다. 공기로 인한 마찰을 제외한 마찰 손실이 없기 때문에 선속도를 높일 수 있다. 또한, 제어시스템과 전자석 용량에 따라 하중지지력을 유지할 수 있는 장점이 있다. 최경준⁽²²⁾ 등은 전류제어기에 공급전압 변화가 자기 베어링의 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 공급전압 및 회전속도가 변함에 따라 축 방향 자기베어링의 공급전류는 차이가 미미함을 확인하며, 상대적으로 낮은 전압에서도 정상운전이 가능함을 보였다. 최경준⁽²³⁾ 등은 고속, 고회력의 스피들에 적용하기 위한 반경방향 센서 일체형 하이브리드 자기베어링을 설계하고 출력을 예측하였다.

홍두의⁽²⁴⁾ 등은 초임계 CO₂구동 터빈용 높은 부하를 지지하는 하이브리드형 자기베어링(Hybrid Magnetic Bearing, HMB)을 설계하고 자속밀도 분포 및 부하지지능력을 예측하였다.

3.2 실(seal)

실은 기기 내부 유체의 혼합을 방지하거나 작동 유체의 누설을 최소화 및 외부 이물질의 내부 유입 차단 기능을 한다. 실은 적용 기기와 기기 구동 조건에 따라 다른 형태의 실을 사용한다. 배준환⁽²⁵⁾ 등은 7톤급 터보펌프의 연료와 터빈 구동 가스의 혼합을 막는 기계평면 실(Mechanical face seal)에 대한 시제품 제작과 상사시험기를 통한 성능검증을 시행하였으며, 인증조건을 만족함을 보였다. 또한 이후 분해 검사 및 터보펌프에 실제 장착되어 성능 검증을 하여 문제가 없음을 확인하였다.

일반적으로 접촉실(Contact seal)에서는 탄성체가 사용되며, 압축된 상태로 실링 면에서 미끄럼접촉을 한다. 박태조⁽²⁶⁾ 등은 실링 유체 내의 구형 미세입자로 인한 실 마멸에 대해서 코팅 층 두께에 따른 실링면의 마멸해석을 하였다. 해석은 비선형해석 프로그램인 MARC를 사용하였으며, 해석결과 실링면의 손상은 미세입자로 인한 연삭마멸이 원인을 확인하였다. 또한 코팅 층이 얇을 경우 모재부분에서 소성변형이 발생하였다. 그와 반대로 상대적으로 두꺼울 경우 항복

상태에 도달하지 않았으며, 실의 코팅면에 미세입자가 반복적으로 응력을 가해 피로마멸로 코팅이 손상될 수 있음을 보였다.

3.3 댐퍼(damper)

회전체 시스템 축계는 강성 및 감쇠량을 조정하여 고속 안정성을 확보할 수 있다. 서정화⁽²⁷⁾ 등은 고속에서 진동, 소음 영향이 큰 볼 베어링의 감쇠특성 보안을 위한 메탈 메쉬 댐퍼가 장착된 볼 베어링의 메탈 메쉬 댐퍼의 크기에 따른 강성, 감쇠계수를 해석하였다. 그 결과 회전속도가 늘어나면 강성은 비선형적으로 증가하였으며 메탈 메쉬 댐퍼의 축 방향 길이와 베어링 축 방향 단면적이 작을수록 강성, 감쇠계수는 높아짐을 확인하였다.

4. 결 론

2016년도 회전체 동역학 및 회전기기 요소의 연구는 2015년과 마찬가지로 환경에 관한 규제 강화로 인해 고속에서 효율이 높은 틸팅 패드 베어링과 가스 포일 베어링에 대한 많은 연구가 진행되었다. 또한 기존 연구들의 해석을 보완하였고, 기존과 비교했을 때 더욱 실험데이터와 근접하며 안정적인 회전체 시스템 및 회전기기 요소에 대한 연구가 발표되었다.

References

- (1) 이동현, 김병옥, 2016, “250 kW급 초임계 CO₂ 발전용 감속기의 유체유회환 베어링 및 회전체 동역학 특성해석,” 한국윤활학회 논문집, 제32권, 제4호, pp. 107~112.
- (2) 김민성, 임종혁, 정진태, 2016, “벽걸이어어컨 원심환에 대한 과도진동 규명 및 저감,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 26권, 제 4호, pp. 383~390.
- (3) 박정민, 최승복, 손정우, 2016, “형상 및 치수 변화에 따른 고속 회전 벨 컵의 진동 특성 해석,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 26권, 제 7호, pp. 857~864.
- (4) 김영민, 서정화, 김태호, 2016, “메탈 메쉬 댐퍼가 설치된 볼베어링으로 지지되는 공기압축기의 로터다이나믹 특성 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 17~18.
- (5) 석윤지, 김영민, 김태호, 2016, “예압량에 따른 회전체-볼 베어링 시스템의 회전체역학 성능 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 79~80.
- (6) 장경은, 세이드 문타지르 메디, 김태호, 2016, “피벗 형상에 따른 틸팅 패드 저널 베어링의 동적 성능 비교,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 21~22.
- (7) 목진명, 장경은, 김태호, 2016, “유한요소 해석을 통한 틸팅 패드 저널 베어링의 피벗 응력 해석,” 한국윤활학회 추계학술대회, pp. 73~74.

- (8) S. M. Mehdi, K. E. Jang, T. H. Kim, 2016, “Thermal and Pivot Softness Effects on performance of Tilting Pad Journal Bearings,” 한국윤활학회 추계학술대회, pp. 19~20.
- (9) S. M. Mehdi, K. E. Jang, T. H. Kim, 2016, “Thermohydrodynamic Model Predictions of a Tilting Pad Journal Bearing with Rocker-Back Pivots,” 한국윤활학회 추계 학술대회, pp33~34.
- (10) 서준호, 황철호, 2016, “열변형으로 인한 틸팅 패드 저널 베어링의 예압변화,” 한국윤활학회 논문집, 제 32권, 제 1호, pp. 1~8.
- (11) 서준호, 최연선, 2016, “패드 두께가 연성피벗 저널베어링의 특성에 미치는 효과,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 23~24.
- (12) 박무룡, 김병옥, 윤의수, 황순찬, 조용, 박노현, 2016, “모델수차 성능시험용 정압베어링 설계해석 및 검증(1) - 레이디얼베어링,” 한국유체기계학회 논문집, 제 19권, 제 5호, pp. 35~41.
- (13) 방지훈, 류근, 2016, “범프포일 저널베어링의 구조특성에 대한 종합적 고찰과 정리 : 정하중을 부여한 회전하지 않는 축에서의 강성 및 감쇠 규명,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 101~102.
- (14) 이동현, 김병옥, 방계성, 임형수, 최범석, Y. Kim, 2016, “소형 가스 터빈을 지지하는 범프 포일 베어링의 열 유회 해석 및 온도 측정,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 27~28.
- (15) 이안성, 장선용, 2016, “수력 원통형 터빈 가이드 베어링의 저부하/저편심 성능향상,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 49~50.
- (16) 문창국, 김태호, 2016, “유회환유체의 점도 변화에 따른 가스 포일 베어링의 성능 특성 해석,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 75~76.
- (17) 이호원, 류근, 2016, “범프포일 트러스트 베어링의 구조특성에 대한 종합적 고찰과 정리 : 정하중을 부여한 회전하지 않는 축에서의 강성 및 감쇠 규명,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 105~106.
- (18) 박태조, 김민규, 2016, “타원체 팀플로 Texturing한 평행 스러스트 베어링의 유회환특성,” 한국윤활학회 논문집, 제 32권, 제 5호, pp. 147~153.
- (19) 배규현, 통반칸, 홍성욱, 2016, “각 어긋남을 고려한 각접촉 볼베어링의 피로수명 해석,” 한국정밀공학회 논문집, 제33권, 제1호, pp. 53~61.
- (20) 박찬일, 2016, “볼 베어링의 강성과 스퍼기어 계의 모드 특성,” 대한기계학회 논문집 A권, pp. 489~495.
- (21) 이승표, 2016, “작동하중과 회전속도를 고려한 자동차용 휠 베어링의 수명평가,” 대한기계학회 논문집 A권, pp. 595~602.
- (22) 최경준, 박철훈, 홍두의, 2016, “자기베어링용 전류제어기의 공급전압에대한 성능 비교,” 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 604~604.
- (23) 최경준, 박철훈, 홍두의, 김준규, 2016, “80,000rpm급 스핀

- 들 적용을 위한 센서일체형 자기베어링 설계,” 한국소음진동공학회 학술대회 논문집, pp. 673~674.
- (24) 홍두의, 박철훈, 최경준, 2016, “초임계 CO₂ 발전 구동 터빈용 축 방향 자기베어링 설계,” 한국정밀공학회 학술대회 논문집, pp. 605~605.
- (25) 배준환, 곽현덕, 최창호, 2016, “7톤급 터보펌프 기계평면실의 성능 시험 연구,” 한국윤활학회 춘계학술대회, pp. 47~48.
- (26) 박태조, 김민규, 이희장, 2016, “구형 입자에 의한 TiN 코팅된 실링면의 마멸해석,” 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp. 56~57.
- (27) 서정화, 김영민, 김태호, 2016, “볼베어링 지지용 메탈 메쉬 댐퍼의 설계 및 해석,” 한국윤활학회 추계학술대회, pp. 77~78.