

2017년 회전체동역학 분야 연구동향

김태호* · 황성호** · 정성윤**

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2017년도 국내 발표된 논문을 중심으로 회전체-베어링 시스템의 회전체동역학 해석 및 시험과 이와 관련된 회전기요소들의 연구동향을 알아본다. 터빈 발전기, 터보 압축기, 터보 차저 등 산업현장에서 주로 사용되는 회전기계류와 관련된 논문을 중심으로 분석하였다. 회전기요소들의 경우 저널베어링, 스러스트베어링, 볼베어링, 자기베어링, 실, 댐퍼와 관련된 논문으로 구분하여 분석하였다.

2. 회전체-베어링 시스템의 회전체동역학적 연구

전 세계적으로 에너지 자원고갈, 환경오염 및 환경규제 등의 문제로 인하여 새로운 형태의 발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그 중 초임계 이산화탄소를 이용한 발전시스템기술은 기존 기술에 비해 발전효율을 향상시키고 소형 모듈화가 가능한 장점을 지니고 있으며, 다수의 경우 고속으로 회전하는 소형 원심압축기 및 터빈이 사용되고 있다. 하지만 초임계 이산화탄소 발전시스템은 고온/고압 조건에서의 회전기기 설계 기술의 어려움으로 인해 설계점에서의 운전 데이터 확보가 쉽지 않다.

이에 조준현⁽¹⁾ 등은 초임계 이산화탄소 발전시스템으로 10 kW급, Sub-kWe급, Sub-MWe급 시험 장치를 개발하였으며, 노즐로 유입되는 유로를 일부만 사용하는 부분유입 노즐을 적용하였다. 시스템의 안정성 확인을 위한 구동 시험 결과 부분 유입 노즐을 통해 유체가 유입되는 경우 회전체동역학적 진동이 증가함을 보였으나 부하기를 통하여 부하가 존재하는 경우 허용 가능한 범위에 있는 것을 확인함으로써 시스템의 동적 안정성을 검증하였다. 또한 이동현⁽²⁾ 등은 초임계 이산화탄소 발전시스템의 구성 요소인 파워 터빈의 설계를 위한 회전체동역학 해석과 구동 시험 결과를 비교하였다. 고속 안정성이 뛰어난 틸팅 패드 베어링을 사용한 회전축계의 회전체동역학 해석을 통해 정격 회전속도인 30,000 rpm까지의 회전체 진동이 개발 요구조건을 만족하였다. 또한 고

온의 압축공기를 사용한 구동 시험결과 역시 정격 회전속도까지 안정적으로 구동되었고, 해석을 통해 예측한 진동성분과 구동시험에서 발생한 진동성분의 유사함을 확인하였다.

자동차용 소형 터보차저에는 고속에서 구동되며 대부분 플로팅 링 베어링을 적용하고 있다. 이동현⁽³⁾ 등은 세미 플로팅 링 베어링으로 지지되는 터보차저의 선형, 비선형 해석 모델을 이용하여 유체동압베어링의 불안정성으로 인해 나타나는 비동기 진동 성분을 예측하였다. 또한, 로터의 가진 실험을 수행하여 고유진동모드를 측정하여 해석모델을 검증하였다. 그 결과 로터의 원통형 강체모드와 원추형 강체모드와 관련된 불안정 모드를 예측하였고, 비선형 해석을 통해 예측한 비동기 진동 주파수 성분이 실험결과와 유사함을 확인하였다. 또한 이인범과 홍성기⁽⁴⁾는 풀-플로팅 베어링이 적용된 자동차용 소형 터보차저의 오일 공급 조건에 따른 동적 거동 특성을 해석과 시험을 통해 확인하고, 회전체의 내구성에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 온도가 상대적으로 낮을수록 위험속도가 높게 나타나며 모드형상이 원추형 모드에서 원통형 모드로 바뀔을 확인하였다. 또한 오일 압력 조건이 높을수록 위험속도, 주파수점프 현상이 높은 회전속도에서 나타나는 것을 밝혔다. 이를 통해 터보차저의 안정성 확인을 위해서는 오일 윤활 베어링 시스템 설계 시 적정한 오일 공급방법 및 조건이 고려되어야함을 보였다.

가스포일베어링으로 지지되는 고속 회전기계에서 충분한 감쇠력이 형성되지 못하면 고속 구동 시 불안정한 진동이 발생하게 된다. 이에 문진혁과 김태호⁽⁵⁾는 공기포일 베어링으로 지지되는 고속 회전축-베어링 시스템의 모델링 및 유한요소해석을 통해 회전속도에 따른 위험속도를 예측하였으며, 이를 바탕으로 터보압축기를 제작하고 진동 안정성 확인을 위해 구동시험을 수행하였다. 126 krpm까지의 구동시험을 통해 측정된 회전축의 진동 데이터 주파수 분석 결과는 질량 불균형에 따른 동기성분이 지배적이며 비동기성분의 크기는 매우 작아 시스템이 안정적임을 보여주었다.

일반적인 회전기계는 회전부와 지지부로 이루어지므로 회전기계의 설계 및 해석 시 이들의 동특성이 모두 고려되어야

* 국민대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea)

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

E-mail : thk@kookmin.ac.kr

한다. 한상섭⁽⁶⁾은 지지부 강성변화에 따른 회전기계의 위험 속도 변화를 예측함으로써 지지부 강성 변화에 따라 회전기계 케이싱의 공진주파수가 상승하고 케이싱 고유진동수와 회전체의 위험속도가 교차할 때 회전체 위험속도의 차수 및 주파수의 변화가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통해 지지부의 모델링이 가스터빈 회전체역학 해석에 미치는 영향이 클 수 있음을 보였다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

유체 윤활 저널 베어링은 저널의 회전으로 인한 유체 동압으로 축을 부상시키는 형태의 비접촉식 베어링을 말하며, 구름베어링과 같은 접촉식 베어링에 비해 마모가 적어 내구성이 좋다.

틸팅 패드 저널 베어링(TPJB, Tilting Pad Journal Bearing)은 저널 베어링의 한 종류로 회전체의 불안정성을 야기하는 교차 강성이 매우 작아 구동 안정성이 뛰어나며 특히 고속 안정성이 매우 뛰어나 대형 터빈 및 다양한 고속 회전기계에서 사용된다. TPJB는 피벗의 형상에 따라 피벗 강성이 변화하며, 김태호와 최태규⁽⁷⁾는 Hertzian 접촉 응력 이론을 적용한 볼 쇼트 피벗의 비선형 강성이 고려하여 TPJB 등온조건 해석을 하였다. 이를 통해 베어링의 정, 동특성 예측 및 실험값과 비교 검증하였으며 기존 문헌에서 보고된 결과보다 향상된 정확도를 보이며 해석 모델의 정확성을 검증하였다. 또한 최태규⁽⁸⁾ 등은 TPJB의 설계 단계에서 피벗의 형상을 고려한 해석 모델을 통해 정, 동특성을 예측하고 Sommerfeld number에 따른 무차원 강성을 실험값과 비교하였다. 그 결과 피벗의 형상에 따라 피벗 강성이 결정되고, 피벗 설계가 베어링의 성능에 매우 큰 영향을 미침을 확인함으로써 베어링 설계 시 피벗의 형상을 고려해야함을 보였다.

이안성⁽⁹⁾ 등은 순환재 보일러에 열을 공급하기 위한 1단 히트펌프 원심 압축기의 DE-side (drive end side) TPJB에서 비정상적인 고온거동 발생에 대해 설계해석 검토를 수행하여 베어링의 문제점을 파악하였다. 기존 설계 데이터를 활용한 해석결과로 베어링 메탈 온도에 영향을 미치는 변수를 파악하였고, 트러블슈팅을 통해 Preload를 감소시켜 오일 공급유량을 증가시키는 Retrofit 설계로 베어링의 비정상 고온 문제를 해결하였다.

이동현과 신경호⁽¹⁰⁾는 TPJB의 열윤활 해석을 위해 3차원 대류 및 열전달 방정식을 적용한 모델을 제시하고, 기존 연구 결과와 비교하였다. 또한 제작된 터빈 시뮬레이터용 베어링의 온도 해석을 측정결과와 비교하였다. 그 결과로 상부 패드는 4 °C, 하부 패드는 1 °C 미만의 오차를 보이며 해석

모델의 신뢰도를 검증하였다. 또한 이동현⁽¹¹⁾ 등은 마모가 패드의 온도 특성에 미치는 영향을 예측하기 위해 패드 마모 형상에 대한 해석모델을 제시하고, 패드 전체 길이의 20% 마모를 가지는 실험 장치의 실험결과를 통해 해석 모델을 검증하였다. 마모된 하부 패드의 온도는 증가, 상부 패드의 온도는 감소하였으며 마모깊이가 증가할수록 편심을 증가 및 최소유막두께가 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 회전축의 편심을 모니터링을 통해 마모진단이 가능함을 보였다.

정성윤⁽¹²⁾ 등은 TPJB의 패드사이에서 혼합되는 오일에 대한 모델 및 혼합계수(λ)의 변화에 따른 온도해석을 수행하고, 기존 실험 데이터와 비교하였다. 그 결과 적절한 혼합계수 선정을 통하여 해석결과의 정확도를 향상시켰으며, 혼합계수 증가에 따라 윤활 오일의 최대온도가 증가함을 보였다.

연성피벗 틸팅 패드 저널 베어링(FPTPB, flexure pivot tilting pad journal bearing)은 접촉식 피벗이 아닌 패드-피벗-하우징 일체형의 구조를 가지며, 피벗 web의 탄성변형량이 틸팅 거동의 정도를 결정한다. 이러한 구조는 접촉형 피벗을 갖는 TPJB의 단점인 피벗 마모, 높은 접촉응력, 누적공차를 제거할 수 있는 장점이 있다. 하지만 베어링에 하중이 가해지면 피벗 웹에 응력집중이 일어나므로 구조적 안정성을 분석해야 한다. 따라서 Mehdi⁽¹³⁾ 등은 대형 터빈에 적용되는 FPTPB의 피벗 형상에 따른 응력 해석을 수행하였다. 베어링 형상에 대해 유한요소법을 통해 정적하중과 변동하중에 따른 응력을 계산하고 modified-Goodman diagram을 통해 피로수명 안전성을 확인하였다. 이를 통해 안전계수를 높이기 위해서는 피벗 웹의 두께 및 필렛을 증가시켜야함을 보였으며 최적설계를 위한 두께 및 필렛 반경을 제시하였다.

수직형 수력 터빈 발전기에 일반적으로 사용되는 터빈가이드 베어링(TGB, turbin guide bearing)은 축의 원활한 회전 및 지지를 위해 사용된다. 이안성과 장선용⁽¹⁴⁾은 분할된 각 패드의 선단에 테이퍼를 도입하여 저편심, 저부하 조건에서 유막 강성이 낮은 TGB의 단점을 보완하고, 테이퍼의 높이에 따른 해석을 비교하였다. 그 결과 테이퍼가 존재하는 경우 더 큰 부하용량을 가지며 편심이 증가함에 따라 동력손실이 감소함을 확인하였다. 또한 테이퍼의 높이변화에 따라 평균 직접강성이 변화함을 확인하여 설계변수로 사용할 수 있음을 보였다.

안성찬⁽¹⁵⁾ 등은 연료 펌프에 적용된 저널베어링의 설계인자인 간극비와 저널 부분의 그루브 형상을 결정하기 위해 탄성유체윤활 해석기법을 활용하였다. 최소유막두께, 최대유막압력, 윤활유 온도 상승량을 고려하여 최적의 간극비를 해석을 통해 선정하였다.

3.1.2 스러스트 베어링

스러스트 베어링은 회전체의 축 방향 하중을 지지하는 베어링으로, 하중지지력이 중요한 성능 지표이다. 이러한 베어

링은 가스 및 공기를 윤활 유체로 사용할 경우 낮은 마찰과 우수한 열적 안정성 그리고 무급유의 장점을 갖는다.

다공성 타입의 공기 윤활 스리스트 베어링은 기존 오리피스 타입의 공기베어링에 비해 일정한 압력분포 및 우수한 하중지지력을 갖는다. 이성진과 류근⁽¹⁶⁾은 공급하중 및 적용하중에 따른 외부가압 다공성 스리스트 베어링의 유막두께를 실험적으로 측정하였다. 스리스트 베어링의 공급압력이 증가함에 따라 유막두께와 유량이 증가하였으나, 적용하중이 증가함에 따라 감소하였다. 이를 통해 측정 유량으로 접촉을 예상하고 공급압력 및 적용하중 조절을 통해 회전축과 베어링의 접촉을 방지할 수 있음을 확인하였다.

접촉식 베어링인 볼베어링이 적용된 기계부품의 경우 윤활은 기계부품의 내구성과 수명을 결정짓는 주요 요소이다. 이에 정순비⁽¹⁷⁾ 등은 스리스트 볼베어링의 볼 개수, 회전 속도, 적용 하중에 따라 변화하는 회복유막두께를 해석적 방법을 통해 예측하였다. 그 결과 스리스트 베어링에 적용될 수 있는 최적의 볼 개수와 회전속도를 예측하였으며, 적용 하중이 증가함에 따라 유막 두께가 감소하고, 미니스커스 위치를 통해 윤활 상태 천이를 구분함으로써 해석적 접근을 통하여 개선된 윤활환경을 찾을 수 있음을 보였다.

3.1.3 볼 베어링

볼 베어링과 롤러베어링은 구름 베어링의 한 종류로 볼 또는 롤러와 내륜과 외륜이 접촉하는 형태로 이루어져있기 때문에 접촉에 의한 파손 또는 피로수명에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

통반간과 홍성욱⁽¹⁸⁾은 두 개의 열을 갖는 각 접촉 볼 베어링(D-ACBBs, Double row angular contact ball bearings)에 대해 5자유도의 하중 및 변위가 적용된 해석 모델을 개발하였다. 이를 통해 D-ACBBs의 강성 및 피로 수명에 대한 분석을 하였으며, 상용 프로그램으로 검증을 진행하였다. 다양한 하중 조건하에서 계산된 D-ACBBs의 강성 및 피로 수명에 포괄적인 연구가 수행되었고, 그 결과 D-ACBBs는 피로수명과 강성 측면에서 향상된 성능을 나타냈다. 이를 통해 제시된 모델은 D-ACBBs를 포함하는 회전체 베어링 시스템의 정적 및 동적 분석에 유용함을 보였다.

박찬일⁽¹⁹⁾은 스피어 기어계에서 주로 사용하는 원통 롤러 베어링의 시변 강성의 특성을 해석하고 3자유도 모델을 통해 기어계의 동하중을 분석하였다. 롤러 베어링의 강성이 볼 베어링의 강성보다 크므로 첫 번째, 두 번째 고유진동수가 고주파로 이동함을 보였다. 이에 첫 번째, 두 번째 고유진동수는 베어링 강성, 세 번째 주파수는 기어 강성과 관련됨을 확인하였다.

서정화⁽²⁰⁾ 등은 볼베어링-메탈 메쉬 댐퍼 조합체로 지지되는 고속 모터의 베어링 예압에 따른 회전축의 진동 특성을 실험적으로 밝혔다. 웨이브스프링을 사용해 베어링의 예압

량을 변화시켰으며, 예압량이 증가함에 따라 베어링 강성의 증가로 회전축의 위험속도가 증가함을 보였다. 실험결과를 통해 볼베어링 예압 조절을 통해 회전축-볼베어링 시스템의 위험속도 조절이 가능할 것이라 판단하였다.

3.1.4 마그네틱 베어링

고속 회전기에 적용되는 무급유 베어링으로는 주로 가스(공기) 베어링과 마그네틱 베어링이 주로 사용된다. 그러나, 가스 베어링의 경우 낮은 하중지지능력과 감쇠력으로 인해 저속 및 외란 발생 조건에 있어 안정적이지 못한 단점이 있다. 이에 정세나⁽²¹⁾ 등은 가스포일베어링의 하우징을 마그네틱 베어링으로 적용하여 압축기 구동시험을 수행하였다. 그 결과 비동기 진동 성분이 발생할 경우 마그네틱 베어링의 전자력힘을 부가하여 포일베어링의 윤활 두께를 유지시켜 진동 안정성을 확보하였다. 이를 통해 포일-마그네틱 베어링으로 지지되는 압축기의 불안정 진동제어를 효과적으로 할 수 있음을 보였다.

3.2 실(seal)

실은 작동 유체의 누설을 최소화하여 회전기가 적용된 발전시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 요소부품이다. 다양한 형태의 실이 기기 구동 조건에 따라 적용되고 있다.

김어진, 하진웅⁽²²⁾은 Vermes 해석모델을 활용하여 가스터빈에 사용되는 staggered 래버런스 실의 축방향 위치에 따른 누설량 변화를 예측하고 원인 분석을 하였다. 그 결과 실의 축 방향 위치에 따라 유량변화가 기준점 대비 -9 ~ 17 % 범위에서 나타남을 확인하였고, 간극의 변화에 따라라도 누설유량 변화가 존재함을 보였다. 이를 토대로 래버런스 실의 위치를 고려한 설계가 필요할 것이라 판단하였다.

방제성⁽²³⁾ 등은 기존에 널리 사용되고 있는 4가지 실(labyrinth, guardian, brush, honeycomb)에 대해서 누설 유동 특성을 해석하고 시험을 통해 비교 분석하였다. 해석은 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)를 활용한 CFX 프로그램을 사용하였다. 그 결과 모든 종류의 실에서 온도 상승, 회전속도 증가에 따라 누설 질량 유량이 감소하는 것을 시험 및 해석에서 확인하였고, 실 간의 비교에서는 동일 조건에서 brush 실이 가장 우수한 누설 감소 효과를 보이는 것을 확인하였다.

3.3 댐퍼(damper)

댐퍼는 회전축의 운동 에너지 소산을 통해 진동을 감쇠시키는 요소부품이다. 그 중 스퀴즈 필름 댐퍼는 유체 점성 저항을 통한 진동 감쇠 효과를 갖는다. 김규만과 류근⁽²⁴⁾은 스퀴즈 필름 댐퍼의 설계 변수가 자동차용 소형 터보차저용 회

전축의 동적 거동에 미치는 영향에 대해 해석하였다. 해석에서 변수로 사용된 파라미터는 댐퍼의 간극, 길이, 오일 온도, 축의 불균형 질량 위상 및 크기이다. 해석 결과 댐퍼의 길이가 회전축의 동적 거동에 미치는 영향이 가장 작았으며, 댐퍼 간극의 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다. 불균형 질량의 경우 동 위상을 가지는 회전축의 변위 응답이 역 위상을 가지는 회전축의 변위 응답보다 더 크게 나타남을 보였다.

메탈 메쉬 댐퍼는 메탈 와이어로 이루어진 메쉬 형태의 댐퍼로서 와이어의 구조이력 감쇠 및 마찰 감쇠력을 이용하여 회전체의 진동을 감소시킨다. 석윤지⁽²⁵⁾ 등은 고속회전체를 지지하는 볼베어링에 메탈 메쉬 댐퍼를 적용하기 위하여 재질 및 밀도가 다른 8가지 종류의 메탈 메쉬 댐퍼에 대한 강성 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 각각 2가지 재질(steel, copper), 4가지 밀도(20, 25, 30, 35%)로 총 8가지이며, 정하중 시험을 통해 강성을 평가하였다. 그 결과 밀도가 증가함에 따라 메탈 메쉬 댐퍼의 구조강성이 증가하고, 스틸의 경우가 구리보다 댐퍼의 강성이 높게 측정됨을 확인하였다. 또한 석윤지⁽²⁶⁾ 등은 금속 와이어의 마찰 및 구조이력 감쇠 모델을 이용하여 메탈 메쉬 댐퍼가 볼베어링과 조합되었을 때의 등가 강성 및 감쇠계수를 예측하였다. 볼베어링은 감쇠가 없는 단순 강성체로 가정하였으며, 메탈 메쉬 댐퍼-볼베어링의 조합체는 베어링과 댐퍼가 직렬로 연결된 두 개의 동 강성체로 가정 모델링 하였다. 조합체의 등가 강성 및 감쇠 계수는 상대적으로 강성이 작고 감쇠가 큰 메탈 메쉬 댐퍼의 성능에 의존적임을 밝혀냈다. 이를 통해 메탈 메쉬 댐퍼가 적용된 회전체-볼베어링 시스템의 회전체 동역학 특성을 변화시킬 수 있을 거라 판단하였다.

4. 결 론

2017년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 회전기계의 소형화 및 고속화 추세에 따라 고속에서 높은 안정성과 효율을 가지는 가스 포일 베어링, 틸팅 패드 베어링에 관한 많은 연구가 진행되었으며, 발전시스템의 효율을 높이기 위한 실에 관한 연구도 활발히 진행되었다. 또한 다양한 해석기법을 활용하여 회전체 시스템에 대한 거동을 예측하고 시험결과와 유사한 결과 값을 가지는 다양한 연구들이 발표되었으며, 회전체의 동역학적 안정성 확보를 위한 베어링 댐퍼에 관한 연구들이 수행되었다.

References

(1) J. H. Cho, H. K. Shin, Y. S. Kang, B. H. Kim, G. B. Lee, and Y. J. Baik, 2017, "Research on Development of Turbo-generator with Partial Admission Nozzle for Supercritical CO₂ Power Generation," Transactions of

the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 41, No. 4, pp. 293~301.

(2) D. H. Lee, B. O. Kim, K. H. Sun, and H. S. Lim, 2017, "Rotordynamic Performance Analysis and Operation Test of a Power Turbine for the Super critical CO₂ Cycle Application," Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 1, pp. 9~14.

(3) D. H. Lee, Y. C. Kim, B. O. Kim, K. Y. Ahn, and Y. D. Lee, 2017, "Subsynchronous Vibration Behavior of Turbocharger Supported by Semi Floating Ring Bearing," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 1, pp. 15~20.

(4) I. B. Lee, and S. K. Hong, 2017, "Effects of Oil Inlet Pressure and Temperature on the Dynamic Behaviors of a Full-Floating Ring Bearing Supported Turbocharger Rotor," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 2, pp. 53~62.

(5) J. H. Mun, and T. H. Kim, 2017, "Study on Vibration Frequencies of High Speed Rotating Machinery Supported on Gas Foil Bearings," 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 375~376.

(6) S. S. Han, 2017, "The effects of the support stiffness and the natural frequency on GT rotordynamics," Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 375~376.

(7) T. H. Kim, and T. G. Choi, 2017, "Performance Predictions of Tilting Pad Journal Bearing with Ball-Socket Pivots and Comparison to Published Test Results," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 2, pp. 63~68.

(8) T. G. Choi, S. S. Han, and Y. C. Kim, 2017, "Effect of Pivot Design on Bearing Performance," Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 63~64.

(9) A. S. Lee, W. S. Lee, and D. H. Choi, 2017, "Abnormal High-Temperature Behavior Troubleshooting of Process Compressor Tilting Pad Journal Bearing," Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol 33, No. 2, pp. 37~44.

(10) D. H. Lee, K. H. Sun, B. O. Kim, and D. H. Kang, 2017, "Thermohydrodynamic Analysis and Pad Temperature Measurement of a Tilting Pad Journal Bearing for a Turbine Simulator," Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 3, pp. 112~118.

(11) D. H. Lee, K. H. Sun, B. O. Kim, and D. H. Kang, 2017, "Thermohydrodynamic Analysis and Pad Temperature Measurement of Tilting Pad Journal Bearing with Worn Pad," Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 4, pp. 134~140.

(12) S. Y. Jeong, S. M. Mehdi, and T. H. Kim, 2017, "Temperature Prediction of Tilting Pad Journal

- Bearings with different Oil Injection Methods,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 67~68.
- (13) S. M. Mehdi, S. Y. Jeong, S. H. Hwang, and T. H. Kim, 2017, “Structural Analysis of a Flexure Pivot Tilting Pad Journal Bearing,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 69~70.
- (14) A. S. Lee, and S. Y. Jang, 2017, “Low-Load/Low-Eccentricity Performance Improvement Designs for Hydro Power Application of Cylindrical Turbine Guide Bearings-Introduction of Pad Leading-Edge Tapers,” Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 2, pp. 65~70.
- (15) S. C. An, S. D. Lee, J. H. Son, and Y. J. Cho, 2017, “A Study on the Optimum Clearance Selection of Fuel Pump Journal Bearing with Elasto-hydrodynamic Lubrication Analysis,” Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 1, pp. 23~30.
- (16) S. J. Lee, and K. Ryu, 2017, “Air Film Thickness Measurements of Externally Pressurized Porous Air Thrust Bearings with Increasing Supply Pressures and Applied Loads,” 한국윤활학회 추계학술대회, pp. 110~111.
- (17) S. B. Jung, B. R. Lee, Y. H. Yu, and Y. J. Cho, 2017, “A Study on the Change in the Film Thickness of Ball Bearing in Starved EHL,” Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, No. 3, pp. 119~125.
- (18) V. C. Tong, and S. W. Hong, 2017, “Analysis of the Stiffness and Fatigue Life of Double-Row Angular Contact Ball Bearings,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 34, No. 11, pp. 813~821.
- (19) C. I. Park, 2017, “Time-varying Stiffness Analysis of Roller Bearings and Vibration Analysis of the Spur Gear System,” 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 861~862.
- (20) J. H. Seo, Y. J. Seok, and T. H. Kim, 2017, “Effect of Ball Bearing Preloads on Vibration Characteristics of High Speed Motor with Metal Mesh Dampers,” 한국윤활학회 학술대회, pp. 7~8.
- (21) S. N. Jeong, J. W. Kim, and Y. B. Lee, 2017, “Vibration Control of High-Speed Compressor with Foil-Magnetic Bearings,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 53~54.
- (22) E. J. Kim, and J. W. Ha, 2017, “Study on the Leakage characteristics based on Axial Position of Labyrinth Seal for Gas Turbine,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 253~254.
- (23) J. S. Bang, B. O. Kim, H. S. Lim, S. S. Byun, and W. G. Yun, 2017, “Studies on Leakage Flow Characteristics of Steam Turbine Seal Packing,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 241~242.
- (24) K. M. Kim, and K. Ryu, 2017, “Rotordynamic Analysis of Automotive Turbochargers Supported on Ball Bearings and Squeeze Film Dampers in Series : Effects of Bearing Design Parameters and Rotor Imbalances,” pp. 11~12.
- (25) Y. J. Seok, Y. M. Kim, J. H. Seo, and T. H. Kim, 2017, “Stiffness Measurements of Metal Mesh Ball Bearing Dampers,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 379~380.
- (26) Y. J. Seok, J. H. Seo, and T. H. Kim, 2017, “Prediction of Equivalent Stiffness and Damping Coefficient for Ball Bearing-Rotor System Supported on Metal Mesh Dampers,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 514~515.