

## 2019년 회전체동역학 분야 연구동향 분석

김규만\* · 이호원\* · 이찬우\* · Daixu Song\* · 정현성\* · 임호민\* · 류근\*\*

### 1. 서 론

본 특집 논문에서는 2019년 한 해 동안 국내에서 발간된 학술지 및 국내 학술대회에서 발표된 논문과 초록을 바탕으로, 국내의 회전기계 상태진단 및 회전체동역학 관련 연구와 회전기계 지지 요소인 베어링, 댐퍼 및 실에 대한 연구에 대해 다루고자 한다. 먼저 회전기계 상태 진단 및 회전체 동역학에 대한 연구를 조사하였다. 그리고 베어링은 유체 윤활 베어링과 구름 베어링, 자기 베어링으로 구분하여 서술하였으며, 이후 스퀴즈 필름 댐퍼, 구조 감쇠 댐퍼, 오링 댐퍼 및 실에 대해 정리하였다.

최근 5년간 (2014-2018년) 유체기계학회에 특집으로 소개된 회전체동역학 분야에서의 학술대회 논문 및 초록의 수를 Table 1에 정리하였다. 유체베어링 관련 논문은 매년 마다 10편 이상의 높은 투고 수를 보였다. 반면에 마그네틱 베어링은 3편 이내로 상대적으로 발표된 연구가 적다. 이번 연구동향 조사에서는 2019년에 발표 및 출판된 국내 학술지 논문, 국내 학술대회 논문 혹은 초록 뿐 아니라, 국내 대학 석사 및 박사 학위 논문까지 포함하여 정리하였다.

Table 1 Number of technical papers in the field of rotordynamics from 2014 to 2018. Papers published and presented only in South Korea.

	2014	2015	2016	2017	2018
Rotordynamic systems	5	5	5	6	8
Fluid film bearings	8	16	13	11	14
Rolling element bearings	4	5	3	3	4
Magnetic bearings	1	2	3	1	1
Dampers & seals	6	5	3	5	4

### 2. 회전기계 상태진단 및 회전체동역학 연구

#### 2.1. 회전기계 상태진단

발전소의 증기터빈과 같은 대형 회전 시스템은 한 번의 정

지로 큰 경제적, 사회적 비용이 요구되기 때문에 더욱 신뢰성 있는 상태진단 기술을 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다. 정준하<sup>(1)</sup>는 대형회전체 시스템에 대하여 딥러닝 기반 회전기계 진단을 위한 진동신호 전처리 및 변환에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 총 3가지의 기법이 제안되었고, 제안된 기법을 통해 학습된 진단시스템이 기존의 진단 정확도가 높지 않던 경우에 대하여 더 정확한 진단 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 홍규택<sup>(2)</sup>은 머신 러닝 기법을 이용한 회전기계의 이상 상태 감지 및 고장을 진단하는 연구를 수행하였다. 회전기계 종류인 FD fan을 대상 설비로 하여 대상 설비의 이상 상태 감지와 자동화된 고장 진단을 위해 다양한 머신러닝 기법을 적용하였다. 회전기계의 베어링 파손 고장 여부를 판단하기 위해 회전축의 변위 센서 데이터를 기반으로 한계 설정 기법을 사용하여 베어링 고장, 댐퍼 막힘을 파악하고 베어링 고장의 유형을 판단할 수 있었다.

#### 2.2. 회전체동역학 관련 연구

회전체 시스템 연구는 실제 성능 평가를 위해 구동을 통한 연구와 해석을 통한 성능 예측 연구 모두 활발하게 수행되고 있다. 먼저 해석을 통한 연구에서는 다양한 종류의 엔진에 적용되는 회전시스템의 회전체동역학적 연구가 많이 수행되었다. 김정완 등<sup>(3)</sup>은 자동차 엔진에 추가적으로 결합되는 슈퍼 차저용 가압형 압축기에 대하여 초고속 및 극한 환경에서 회전체동역학적 설계 및 해석 연구를 수행하였다. 해석 결과 300,000 rpm 이상에서 첫 번째 굽힘 모드가 발생하였고, 약 13,000-20,000 rpm 영역에서 회전체의 2개의 강체 모드가 관측되었다. 이에 따라 실제 구동 시 위험 속도 영역에서 램프업(Ramp-up) 속도를 조절하여 최대한 피해를 최소화 할 수 있도록 예측하였다. 이호원 등<sup>(4,5)</sup>은 한국형 발사체 상단 로켓엔진에 사용되는 7톤급 액체로켓엔진 연료펌프-터빈 회전체의 회전체동역학 해석을 진행하였다. 또한 극저온 환경에서 적용 가능한 와이어 메쉬 댐퍼를 볼 베어링의 지지 요소로 추가하여 회전체동역학 특성을 예측하였다. 연료펌프-

\* 한양대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

† E-mail : kryu@hanyang.ac.kr

터빈 시스템의 1차 임계속도는 무부하 조건과 부하조건에서 각각 18,500 rpm, 그리고 40,100 rpm으로 예측되었으며, 기존의 연구와 2.2%, 그리고 0.5%의 차이를 나타냈다. 또한 와이어 메쉬 댐퍼를 적용한 해석 결과, 볼베어링만으로 지지되는 시스템과 비교하여 회전체의 강제 모드 및 굽힘 모드의 감쇠비가 향상되었음을 보였다. 전성민 등<sup>(6)</sup>은 다단연소 방식 엔진의 연료펌프-베어링 회전체 회전체동역학 설계 및 해석 연구를 수행하였다. 회전체 시스템은 볼 베어링을 사용하였으며, 회전축은 횡방향 변위와 굽힘 각도를 자유도로 갖는 보로 모델링하였다. 해석 결과 1차 임계속도는 62,300 rpm으로 예측되었으며, 터보펌프 회전속도 18,000 rpm과 비교하여 충분한 분리 여유를 갖는 sub-critical 회전체임을 확인하였다. 또한, 해석적 연구는 발전기 및 전동기를 구성하는 회전체에 대한 성능 예측 연구도 수행되었다. 박지수 등<sup>(7)</sup>은 정격속도는 1,800 rpm의 2.2 kW급 유도전동기 회전자의 적층 구조를 반영하여 회전체동역학 해석모델을 개발하는 연구를 수행하였다. 또한 개발한 해석모델을 통해서 베어링 간극이 회전체 해석에 미치는 영향을 분석하였다. 적층 구조의 영향은 해석모델에 회전자 탄성계수 값의 변화로 반영하였으며, 보정계수를 이용하여 탄성계수 값을 변화시켰다. 해석 결과 축계 불평형 응답은 탄성계수의 변화에 따라 10배 이상 변화하였으며, 축계에 대한 모달 실험을 통해 해석이 타당하게 이루어졌음을 확인하였다. 윤태흠 등<sup>(8)</sup>은 2.5 MW급 발전용 증기터빈발전기를 구성하는 회전체에 대한 회전체동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석을 통해서 증기터빈 회전체의 신뢰성 및 안정성을 평가하였고, 운전조건에 따른 진동응답 특성을 고려하여 케이싱 구조물의 방사소음 해석을 수행하여 회전체와 케이싱 구조물의 상호작용에 의해 발생하는 방사소음레벨을 예측하였다.

실험을 통한 연구는 다양한 분야에 걸쳐서 수행되었는데, 주로 구동 평가와 해석을 통한 예측을 비교하거나 다양한 케이스의 베어링-댐퍼-축 환경에서의 구동을 평가하는 방식으로 연구가 이루어졌다. 이동준 등<sup>(9)</sup>은 풀 플로팅 링 베어링 타입 터보차저의 회전체동역학 연구를 통해 시험 및 해석 상관성을 분석하는 연구를 수행하였다. 시험은 일반적인 가솔린용 터보차저의 압축기 최대 효율라인을 따라서 80,000 rpm부터 210,000 rpm까지 10,000 rpm씩 회전속도를 증가시키며 진행하였고 실험 결과와 해석 결과의 비교를 통하여 해석 파라미터의 영향성을 확인하였다. 서정화 등<sup>(10)</sup>은 베어링의 종류에 따른 회전체-베어링 시스템의 회전체동역학적 특성을 비교하였다. 비교에 사용한 베어링은 볼베어링, 메탈 메쉬 댐퍼-볼베어링 결합체, 가스 포일 베어링으로 총 3가지이며, 고속 전동기를 최대 구동 속도인 100,000 rpm까지 구동하였을 때, 진동 변위 및 가속도를 측정 및 분석하였다. 실험 결과 진동 변위와 가속도 크기는 모든 속도 조건에서 볼베어링으로 지지되는 회전축이 가장 크게 나타났으며, 가

스 포일 베어링으로 지지되는 회전축이 가장 작은 것을 확인하였다. 김태호 등<sup>(11)</sup>은 한국에너지기술연구원에서 개발 중인 초임계 이산화탄소 발전시스템용 터보압축기의 회전체동역학 성능 측정 및 해석에 관한 연구를 수행하였다. 연구에 사용한 70,000 rpm급 초임계 이산화탄소 발전시스템용 터보압축기는 해석을 수행한 결과 30,000 rpm부근에 1차에서 3차 위험속도가 존재하고 약 42,000 rpm부근에 4차 위험속도가 존재하는 것을 예측하였다. 그리고 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치하며 목표 구동속도 내에서 안정함을 확인하였다. 박준혁 등<sup>(12)</sup>은 소형 고속 전동과급기의 회전체동역학 성능 평가 및 해석을 진행하였다. 전동과급기에는 메탈 메쉬 댐퍼와 스퀴럴 케이징 볼베어링이 결합된 회전체 시스템이 사용되었다. 해석을 통해 예측한 임계속도와 구동평가에서 진동 변위가 커지는 속도의 오차는 약 5%로 매우 유사함을 확인하였고, 또한 임계 속도에서 진동이 급격히 증가하지 않고 효과적으로 제진되는 것을 확인하였다. 황성호 등<sup>(13)</sup>은 연료전지 전기자동차용 공기 압축기의 회전체동역학적 성능을 측정 및 예측하는 연구를 수행하였다. 회전체시스템에 사용한 베어링은 가스 포일 베어링이며, 실험 결과 1, 2차 굽힘 모드 고유진동수는 각각 145,000 rpm과 236,000 rpm에서 확인되었다. 회전축의 1차 굽힘 모드 공진 주파수가 최대운전속도 주파수와 비교할 때 60%의 분리 여유 마진을 가지며 감쇠비가 전체 운전영역에서 양의 값을 보여 회전체동역학적으로 안정함을 확인하였다.

### 3. 유체윤활베어링

#### 3.1. 오일 윤활 베어링

오일 윤활 베어링은 윤활유체로 오일을 사용하며, 회전축과 베어링을 물리적으로 분리하는 비접촉식 베어링이다. 볼베어링과 같은 접촉식 베어링에 비해 마모가 매우 적고, 고속에서 높은 하중 지지력을 가지는 장점을 가지고 있다. 그러나 오일 윤활 베어링은 베어링 성능 및 신뢰성이 윤활유 온도에 큰 영향을 받으며, 고속에서 불안정한 자려진동을 쉽게 야기하는 단점을 가지고 있다. 따라서 윤활유 및 베어링의 온도가 오일 윤활 베어링에 미치는 연구와 불안정으로 인한 축의 휘돌림 거동을 억제하기 위한 연구가 상당히 중요하다. 방경보<sup>(14)</sup>는 베어링의 윤활유가 쉽게 누출되는 것을 방지하기 위한 실 투스(Seal tooth) 간극이 적용된 틸팅 패드 저널 베어링에 대한 실험적 연구를 진행하였고, 실 투스 간극을 고려한 베어링 해석 프로그램을 통해 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 정특성 및 동특성을 평가하기 위하여 사용된 베어링은 6개의 패드를 가진 LOP 베어링이며, 다양한 실험조건에서 측정을 진행하였다. 실험 결과, 실 투스 간격이 작을 경우 베어링 내부의 동력 손실과 베어링 메탈의 온도는 증가하였고, 베어링 유막 두께는 감소함을 확인하였다.

이러한 실험을 통해 실 투스 간극 최적화가 베어링 효율 및 신뢰성 향상이 가능하다는 것을 제시하였다. 이후 실 투스 간극을 최적화시킨 틸팅 패드 베어링을 실제 터빈에 설치하여 2년간 시험구동을 하였으며, 최적화를 적용한 베어링이 충분한 신뢰성이 있음을 보였다. 이운실<sup>(15)</sup>은 원심압축기에 적용되는 5 패드 LBP 틸팅 패드 베어링에 발생하는 비정상적인 고온 현상을 규명하기 위하여 주요 설계 변수들을 변경해가며 윤활 및 열평형 해석을 진행하였다. 틸팅 패드 베어링의 온도 저감을 위해 예압(preload) 감소, 오일 공급유량 증가 및 운전 속도를 증가시킬 것을 제안하였으며, 이를 고려하여 상세 해석을 진행하였다. 이러한 개선 설계를 적용한 베어링을 3년 이상 구동하였으며 베어링 메탈 온도가 목표 온도를 유지하고 있어 비정상 고온구동 문제를 완전히 해결한 것으로 평가하였다. 이동준 등<sup>(16)</sup>은 폴 플로팅 링 베어링이 적용된 차량용 터보차저에 대한 연구를 진행하였으며, 베어링 유막의 온도와 점성 해석을 실제 측정값과 비교하였다. 연구 결과, 베어링 외측 간극이 증가할 경우 저속에서 아동기 주파수(Subsynchronous frequency)성분이 발생하며, 내측 간극이 증가할 경우 고속에서 진동이 발생하였다. 1X 주파수(Synchronous frequency) 진동 성분의 경우 베어링 간극 혹은 베어링 유막으로부터 전해지는 열 영향성은 상대적으로 적고, 불균형 질량의 크기 및 분포의 영향성이 더 크다는 것을 밝혔다.

임의진 등<sup>(17)</sup>은 유체-고체 복합 열전달을 고려하여 5 패드 LBP 틸팅 패드 저널 베어링의 3차원 CFD 열유동 해석을 진행하였으며 이를 통해 운전 중 패드 내부의 온도 분포를 확인하였다. 해석 결과, 복합 열전달을 고려한 해석의 경우 트레일링 엣지 부근의 최대 온도는 유체만을 고려한 해석에 비해 약 20°C 낮은 온도를 보였다. 또한, 패드 면에서 발생하는 온도 구배 역시 복합 열전달 계산이 더 낮은 것을 확인하여, 3차원 CFD해석에서 복합 열전달을 고려하는 것이 중요함을 밝혔다. Mehdi 등<sup>(18,19)</sup>은 난류를 고려한 4 패드 LBP 틸팅 패드 베어링에 대해 해석적 연구를 진행하였으며, 패드에 공급되는 오일의 유량을 변화시켜가며 베어링 특성을 확인하였다. 공급 오일이 증가할수록 베어링 편심률이 감소하였으며 하중이 적용되는 패드에서의 압력은 증가하였다. 반면 하중이 가해지지 않는 패드에서의 압력은 변화를 보이지 않음을 확인하여, 오일 유량 변화는 하중이 가해지는 부분의 패드에 만 영향을 미침을 확인하였다. 장무연 등<sup>(20)</sup>은 저널 베어링 내부의 그루브 형상에 의한 최소 유막두께 및 유막 압력을 계산하였으며, 그루브 형상이 윤활 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 온승윤과 김성수<sup>(21)</sup>는 탄소섬유 및 에폭시를 라이너 층에 적용한 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링에 대한 연구를 진행하였다. 베어링의 동특성 및 정특성을 파악하기 위하여 해석적 연구를 수행하였으며 이를 실제 베어링과 비교함으로써 검증을 진행하였다. 또한, 기존 금속

베어링과 복합재료 베어링의 비교실험을 통해 복합재료 틸팅 패드 베어링이 베어링 시스템의 진동 저감에 효과적이라는 결과를 보였다. 이안성과 장선용<sup>(22)</sup>은 틸팅 패드 저널 베어링의 다양한 설계(6 패드 LOP, 6 패드 LBP, 5 패드 LOP, 5 패드 LBP, 하이브리드 3 패드 LOP)가 초임계 고압 터빈의 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위해 공력 연성강성을 고려한 로터-베어링 시스템의 대수감쇠율 안정성 해석을 진행하였다. 대수감쇠율 안정성 관점에서, 하이브리드 3 패드 LOP 베어링이 가장 안정함을 보였으며, 높은 공력 연성강성 범위에서는 전체동역학적 안정성을 강화하기 위한 베어링으로 5 패드 LOP 및 6 패드 LOP 베어링을 추천하였다. 변상원 등<sup>(23)</sup>은 틸팅 패드 저널 베어링의 패드와 피벗에서 발생하는 마찰이 비선형 회전체동역학 현상에 미치는 영향에 대해서 해석적 연구를 진행하였다. 베어링 설계변수는 패드 예압, 피벗 오프셋, 베어링 길이 등으로 설정하였으며, 패드-피벗 사이의 마찰모델은 스트라이베크 커브 모델(Stribek curve model)을 적용하였다. 해석 결과 앞서 설정한 베어링 설계변수들은 마찰로 인한 Hopf 분기 기점 및 불안정 상태에서 limit cycle 진폭에 큰 영향을 미쳤으며, 디스크의 편심률이 커질수록 회전축의 비선형 회전체동역학 현상은 마찰 보다는 편심의 영향을 더욱 받음을 보였다. 전상명<sup>(24)</sup>은 차량용 엔진에 적용되는 저널 베어링의 파이어링 시동 시의 마모 발생에 관한 연구를 수행하였다. 해석 조건으로 베어링 표면 거칠기 및 오일 온도를 변화시켰으며, 엔진 파이어링 시동 시 변동되는 축 각속도 및 변동 하중이 적용되는 메인 베어링, 커베크 로드 및 대단부 베어링에 대해 해석을 진행하였다. 연구 결과, 하중이 가장 크게 형성되는 크랭크 각도 30도 및 74도 전후로 마모가 발생하였으며, 그 중 크랭크 각도 10-20도 부분에서 마모가 가장 심하게 발생함을 밝혔다. 또한, 오일 공급 온도가 동일할 경우, 표면 거칠기가 클 때 마모량이 증가하는 것을 확인하였으며, 메인 베어링보다 대단부 베어링에서 마모량이 많이 발생함을 보였다.

## 3.2 공기 베어링

### 3.2.1 공기 동압 베어링

공기를 윤활 유체로 사용하는 공기 베어링은 회전축의 회전 시 발생하는 유체 동압으로 회전축을 부상시키는 비접촉식 베어링이다. 이러한 공기 베어링은 구동 마찰력이 매우 작기 때문에 시스템 효율이 높은 장점이 있다. 또한, 별도의 오일 공급 시스템을 사용하지 않아 시스템 구성을 단순화 할 수 있다.

공기 포일 베어링은 위와 같은 특징으로 인해 ACM 및 터보 압축기 등 고속 회전체에 널리 사용되고 있다. 포일 베어링을 구성하는 탑 포일과 범프 포일의 거동은 회전체 시스템에 큰 영향을 주기 때문에 그들의 구조적 특성을 고려한 베

어링 단품 성능 해석은 필수적이다. 문지승과 박상신<sup>(25)</sup>은 포일 스톱베어링 동적 특성인의 강성과 감쇠를 셸 모델링(Shell Modeling)을 사용하여 계산하는 연구를 진행하였다. 특히, 탭 포일의 경사면을 수식으로 정리하여 틱새 함수에 적용하였으며, 탭 포일과 범프 포일을 셸 모델링 하여 베어링의 강성과 감쇠를 계산하는 연구를 진행하였다. 이정우<sup>(26)</sup>는 셸 모델 해석을 사용한 포일 베어링 해석프로그램을 개발하였다. 이를 통해, 베어링 압력구배, 강성 및 감쇠계수를 계산하였으며, 불안정 시작 속도 예측과 시간에 따른 비선형 해석도 함께 진행하였다.

포일 베어링의 단품 성능 해석뿐만 아니라 실험을 통한 베어링의 단품 성능 검증은 해석 결과의 신뢰성과 타당성을 위해 필수적이다. 또한, 베어링의 단품 성능을 정확하게 규명할 수 있는 실험장치의 개발도 중요하다. 김태호 등<sup>(27)</sup>은 포일 베어링의 정하중 특성과 동하중 특성을 측정할 수 있고, 80 krpm까지 구동되는 실험 장치를 개발하여 포일 저널 베어링의 정특성과 동특성을 실험적으로 규명하는데 활용할 수 있음을 보였다. 이 실험 장치를 통하여 신용준 등<sup>(28)</sup>은 심포일이 적용된 이중 범프 포일 저널 베어링의 부상 특성을 평가하였다. 포일 베어링 부상 특성은 3.4, 10, 그리고 15 N의 하중에 따른 자유 감속 실험으로 진행되었으며, 반경방향 하중이 증가함에 따라 터치다운 속도가 증가하였다. 동일 연구실의 신용준과 김태호<sup>(29)</sup>는 포일 스톱베어링의 부상 속도와 구동토크에 대한 실험적인 연구도 진행하였다. 실험을 통해 5, 15, 그리고 30 N의 정하중을 부여한 상태에서 회전속도에 따른 토크를 80,000 rpm까지 측정하였으며, 이를 통해 부상속도를 추정하였다. 초기 예하중이 증가함에 따라 베어링의 시동 토크는 선형적으로 증가하였으며, 베어링이 완전히 부상 후 구동 토크는 회전속도에 따라 선형적으로 증가함을 보였다. 류대원 등<sup>(30)</sup>은 이중 탭포일을 사용한 포일 베어링의 성능 해석을 통해 하중지지력과 강성, 그리고 감쇠계수를 계산하였다. 해석은 탭 포일과 범프 포일의 변형과 마찰을 고려한 틱새 함수를 고려하였으며, 윤활 면의 압력구배는 레이놀즈 방정식을 사용하여 계산하였다. 더불어, 예측한 포일 베어링의 하중지지력은 실험을 통해 얻은 결과와 비교되었으며 이를 통해 해석모델의 타당성을 검증하였다. 문지승과 박상신<sup>(31)</sup>은 포일 스톱베어링의 탭 포일 중 일정면의 기울기를 식으로 유도하여 틱새 함수를 적용하고, 범프 포일과 탭포일 사이의 변형을 연동시켜 베어링의 최대하중 지지력을 계산하는 해석을 진행하였다. 또한, 해석에 사용된 포일 베어링의 치수를 기반으로 실제 베어링을 제작하여 최대하중지지력을 측정하는 실험을 진행하여 해석의 타당성을 검증하였다. 또한, 포일 베어링의 조립 상태에 따라 달라지는 베어링의 기울기에 따른 성능 평가와 해석을 진행하였다. 신현장과 박건웅<sup>(32)</sup>은 수소전기차용 공기압축기에 사용되는 포일 스톱베어링의 성능을 평가하기 위해 2

Way-FSI(Fluid Structure Interface) 해석기술을 개발하였다. 이는 유동해석에서 계산된 압력 값과 이에 따라 변형되는 범프 포일의 변형을 계산하고, 변형된 범프 포일이 유체 유동에 미치는 영향을 다시 해석하는 방법으로, 상호작용하는 유동해석과 구조해석을 동시에 진행하는 방법이다. 해석을 통해 작동유체의 압력, 온도, 그리고 속도 분포를 계산하였으며, 수직 하중에 따른 토크를 계산하였다. 또한, 해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 하중에 따른 토크를 실험적으로 측정하여 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

포일베어링으로 지지되는 회전체 시스템의 해석적 연구와 실험적 연구로는 고속의 작동환경에서 회전축의 구동특성 평가와 범프 포일 구조물의 비선형 특성에 의한 불안정한 진동성분 분석 등이 진행되어왔다. 특히, 포일 베어링으로 지지되는 회전체 시스템의 구동특성 연구는 다양한 회전기계에 적용되어 진행되었다. 김정완과 이용복<sup>(3)</sup>은 포일 베어링으로 지지되는 슈퍼차저 시스템을 설계하고 회전체동역학 해석을 진행하였다. 슈퍼차저는 높은 압축비를 위해 60,000 rpm으로 운전되도록 설계되었으며, 고속의 작동환경에서 시스템이 안정적으로 구동될 수 있도록 포일 저널 베어링으로 양단을 지지하였다. 또한, 축방향 진동 제진과 시스템 구조의 단순화를 위해 포일 스톱베어링도 함께 사용하였다. 문형욱 등<sup>(33)</sup>은 포일 베어링 시스템과 메탈 메쉬 댄퍼로 지지되는 볼 베어링 시스템의 회전체 동역학적 성능을 비교·예측하는 연구를 진행하였다. 회전체동역학 해석 결과 포일 베어링으로 지지되는 회전체 시스템은 각각 1,000 rpm, 그리고 11,000 rpm의 속도에서 원추, 원통형 강제 모드가 발생하였으며, 볼 베어링으로 지지되는 회전체 시스템은 볼 베어링보다 상대적으로 강성이 매우 작은 메탈 메쉬 댄퍼로 인해 회전축지지 강성이 감소하여 60,000 rpm에서 원추형 강제 모드가 발생하였다. 문형욱 등<sup>(34)</sup>은 포일 베어링으로 지지되는 회전체 시스템과 볼 베어링으로 지지되는 회전체 시스템의 관성정지 특성에 대한 실험을 진행하였다. 실험은 100,000 rpm에서 회전축을 관성정지 시켰으며, 회전축이 정지할 때까지 볼베어링 시스템은 9.6초, 포일 베어링 시스템은 18.5초가 각각 소요되었다. 특히 포일 베어링 시스템의 경우 40,000 rpm까지는 천천히 감속한 후, 혼합 윤활 구간인 40,000 rpm에서부터 10,000 rpm을 지나, 경계윤활 10,000 rpm부터는 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 실험의 예측 결과는 혼합 윤활 구간을 제외하고는 잘 일치하는 경향을 보였다. 또한, 문형욱 등<sup>(35)</sup>은 포일 베어링으로 지지되는 전동기 시스템과 볼 베어링으로 지지되는 전동기 시스템의 관성 정지 실험과 가속 성능 예측에 대한 연구를 진행하였다. 실험을 통해 회전축이 100,000 rpm부터 관성 정지하는 동안, 각 회전체 시스템의 진동 특성과 시간에 따른 회전속도를 평가하였다. 또한, 고속 전동기의 가속 성능을 전동기의 구동 토크와 측정된 베어링의 마찰 토크를 사용하여

계산하였다. 가속 성능의 경우 두 회전체의 극관성 질량 모멘트가 동일하다는 가정 후에 해석한 결과 베어링의 마찰 토크 성능 차이가 전동기의 구동 토크 및 구동 동력에는 큰 영향을 주지 않는 것을 예측하였다. 서정화 등<sup>(10)</sup>은 포일 베어링, 볼 베어링, 그리고 메탈 메쉬 댄퍼로 지지되는 볼 베어링 시스템의 진동 특성을 비교하는 실험을 진행하였다. 이를 통해, 100,000 rpm에서 각각의 시스템의 회전축 거동을 비교하였고, 회전체 시스템의 수직방향 진동의 가속도 성분을 0 rpm부터 100,000 rpm까지 비교하였다. 실험결과 볼 베어링으로만 지지되는 회전축의 동적 궤적 크기와 진동의 크기가 가장 크게 나타났으며, 메탈 메쉬 댄퍼가 지지하는 볼 베어링-회전체 시스템은 상대적으로 진동의 크기가 작은 것을 확인하였다. 또한, 포일 베어링으로 지지되는 회전축의 동적 궤적의 크기와 진동이 가장 작은 것으로 나타났다. 이를 통해 볼 베어링 보다 상대적으로 감쇠력이 우수한 메탈 메쉬 댄퍼-볼베어링 시스템과 포일 베어링 시스템이 우수한 성능을 가졌다고 평가하였다. 또한, 서정화 등<sup>(36)</sup>은 추가적인 실험을 통해 다양한 회전 속도에서 포일 베어링, 볼 베어링, 그리고 메탈 메쉬 댄퍼로 지지되는 볼 베어링의 회전축 거동과 진동특성을 측정하는 실험을 진행하였다. 황성호 등<sup>(37)</sup>은 포일 저널 베어링과 포일 스러스트 베어링으로 지지되는 연료 전지 전기자동차용 공기압축기의 회전체동역학적 성능 측정과 예측을 진행하였다. 공기압축기에 사용된 포일 저널 베어링은 두 개의 탭 포일을 가지고 있으며, 내측 탭 포일과 외측 탭 포일 사이에는 심 포일이 삽입되어 있다. 회전체동역학 실험을 통해 불균형 질량 응답특성, 회전체 시스템의 강제모드, 회전축의 부상속도, 그리고 속도에 따른 최대진동변위를 평가하였다. 또한, 회전체동역학 해석으로 통해 강제모드에서의 감쇠비를 예측하여 회전체동역학적 안정성을 예측하였으며, 1차 굽힘 모드가 발생하는 160,000 rpm이 운전속도인 100,000 rpm와 비교하였을 때 60%의 분리 여유 마진을 갖는 것을 예측하였다. 이종성 등<sup>(38)</sup>은 포일 저널 베어링 및 포일 스러스트 베어링으로 지지되는 10 kW급 모터 구동되는 공기압축기의 구동특성을 측정하였다. 진행된 실험은 기저속도인 15,000 rpm부터 100,000 rpm까지 속도를 증가시키는 실험과, 15,000 rpm부터 10,000 rpm씩 구동 속도를 증가시키는 실험이며, 두 실험 모두 최대 속도에서 관성 정지한다. 회전축의 거동은 와전류 변위 센서를 통해 전후방에서 측정하였으며, 가속도 센서를 모터 하우징에 부착하여 시스템 전체의 진동을 측정하였다. 또한, 포일 베어링의 패드 수, 베어링의 두께, 그리고 카트리지 결합 구조의 변경 등에 따른 특성 변화를 서로 비교·평가하였다. 더불어, 이종성 등<sup>(39)</sup>은 포일 베어링으로 지지되는 10 kW급 모터-발전기 시스템의 포일 베어링 간극이 구동성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 실험은 회전축 양 끝단에 수직으로 위치한 두 쌍의 변위 센서를 통해 속도와 모터 부하에 따른 진동을

측정하며 진행하였으며, 포일 베어링의 간극을 40  $\mu\text{m}$  감소시켜 동일한 실험을 진행하였다. 실험 결과 베어링 간극이 40  $\mu\text{m}$ 작을 경우 비동기 주파수의 진동성분이 완화되었다. 그 외에도 김동희 등<sup>(40)</sup>은 압전제어를 통해 실시간으로 포일 베어링의 예압을 제어하는 압전제어 가스 포일 베어링을 개발하여 특정 회전체 운전 조건에 따라 포일 베어링의 예압을 제어할 수 있는 연구를 진행하였다. 이 외에도 공준상 등<sup>(41)</sup>은 포일 베어링이 갖는 취약점인 저속에서 발생하는 마찰로 인한 불안정성을 해결하기 위하여 저속에서는 마그네틱 베어링이 구동되는 하이브리드 베어링을 개발하였으며, 이를 통해 하이브리드 베어링의 진동특성 및 동특성에 대한 연구를 진행하였다.

다른 공기 베어링에 대한 연구로는 로브 형상의 공기 베어링의 베어링 특성 및 회전체동역학 연구가 있다. 송영식<sup>(42)</sup>은 3 로브 형상을 갖는 공기 베어링으로 지지되는 고속 회전체 시스템을 개발하기 위하여 3 로브 베어링의 성능 예측 및 실험을 진행하였고, 150,000 rpm까지 회전체동역학 실험과 예측을 진행하였다.

### 3.2.2 공기 정압 베어링

공기 정압 베어링은 외부에서 압축공기를 베어링에 공급하여 회전축을 부상시킨다. 동압베어링과 달리 구동 초기에 마모가 발생 하지 않으며, 가압 공기의 유량과 압력을 조절함으로써 베어링의 성능을 조절할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 별도의 공기압축 시스템이 수반되기 때문에 시스템이 동압 베어링과 비교하였을 때보다 상대적으로 무거워지고 복잡하다.

정압베어링의 해석적 연구는 박상신 등<sup>(43)</sup>이 고속 스피너들에 적용되는 정압 베어링의 하중지지력, 강성 및 감쇠 계수, 회전오차, 한계 회전속도를 해석적으로 계산하였으며, 회전체 시스템의 회전체동역학적 해석도 진행하였다. 또한, 비선형 해석을 통하여 회전축의 거동을 예측하였다. 이재혁과 박상신<sup>(44)</sup>은 정압 베어링으로 지지되는 고속 스피너들을 설계하기 위하여 베어링의 강성과 감쇠 특성을 계산하고, 회전체동역학 해석을 통하여 회전체 시스템의 위험속도를 예측하였다. 특히, 해석시간을 줄이기 위한 근사식을 제시하였으며, 근사해석 결과와 수치해석결과는 거의 일치하였다. 임호민 등<sup>(45)</sup>은 급기공의 치수공차에 따른 하중지지력 예측을 위해 수치해석을 진행하였다. 수치해석으로 베어링의 급기공 직경, 공급 압력, 그리고 유막 두께에 따른 압력 분포와 하중지지력을 계산하였다. 또한 해석의 타당성을 검증하기 위하여 계산에 사용된 식을 다양한 선행연구 결과와 비교하였다. 해석을 통해 오리피스스의 높은 가공 정밀도가 확보되지 않은 설계는 낮은 하중지지력을 가질 수 있다는 것을 보였다. 김규만 등<sup>(46)</sup>은 정압 베어링의 베어링 간극, 급기공의 직경, 급기공의 위치, 그리고 공급 압력의 영향에 따른 베어링 성능을

해석적으로 비교하였다. 또한, 다중물리해석을 통해 축의 동적 거동과 베어링의 특성을 연성시킨 해석을 수행하였다.

이재혁 등<sup>(47)</sup>은 정압 베어링으로 지지되는 시스템의 동적 거동 예측과 실험을 진행하였다. 급기공 부분에서의 오염물을 걸러내기 위한 다공성 물질을 고려한 베어링 해석이 진행되었고, 피스톤과 실린더 사이의 최소 유막 두께를 계산하였으며 이를 실험과 비교하였다. 김진이 등<sup>(48)</sup>은 정압 베어링의 압력분포, 하중지지력, 그리고 강성과 감쇠 계수에 큰 영향을 미치는 Orifice Discharge Coefficient를 실험적으로 측정하는 연구를 진행하였다. 실험결과 압력비의 증가에 따라 Orifice Discharge Coefficient는 0.65로 일정한 값을 보였으며, 정압 베어링의 하중지지력과 강성 등의 특성을 예측하는데 사용되었다. 정현성 등<sup>(49)</sup>은 정압 공기 베어링의 정적 강성을 측정하는 실험을 진행하였다. 정압 베어링의 강성은 정압 베어링의 하중에 따른 간극 변화를 측정하고 이를 미분하여 계산하였다. 실험 결과, 가압 공기의 압력이 증가함에 따라 강성이 증가하였으며, 정하중의 크기가 증가함에 따라 강성이 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3 기타 유체 베어링

#### 3.3.1 동압 베어링

오일 및 공기 이외의 유체로 윤활 되는 베어링에 관한 연구는 문진혁과 김태호<sup>(50)</sup>의 R134a냉매로 윤활 되는 베어링에 관한 연구가 있다. 난류유동모델인 Bulk flow model을 레이놀즈 방정식에 적용하여 포일 저널 베어링의 성능을 기존의 층류 해석 모델과 비교하는 연구를 진행하였다. 해석에 사용된 작동유체는 공기와 R134a냉매이며, 공기의 경우 150,000 rpm의 회전속도에서 난류 발생에 따른 유의미한 성능 차이를 보였다. 반면, R134a 냉매의 경우, 10,000 rpm의 회전속도에서부터 레이놀즈 수가 1000을 초과 하였으며, 100,000 rpm의 회전속도에서는 전 영역에서 레이놀즈 수가 5000 이상의 값을 보여 지배적인 난류 거동을 보였다. 포일 베어링에서 난류 발생은 압력장의 분포를 넓게 하여 하중지지력을 증가시키고, 이에 따라 저널의 편심량이 감소하고 최소유막두께가 증가하는 결과를 보였다. 특히, 베어링의 마찰 토크가 증가하여 회전속도에 따른 급격한 동력손실이 초래됨을 보였다. 또한, 난류의 영향으로 직교 강성과 감쇠 계수의 크기는 저속에서 감소하고 고속에서 증가하는 경향을 보였다. 또한, 문진혁과 김태호<sup>(51)</sup>는 포일 스러스트 베어링의 성능을 난류 유동을 고려한 해석으로 예측하였다. 위 문헌과 동일하게 포일 스러스트 베어링의 윤활유체는 공기와 냉매인 R134a이다. 해석 결과 공기의 경우 베어링의 경사면에서는 난류 유동이 발생하였으나, 윤활막의 두께가 작고 평탄한 부분에서는 난류가 발생하지 않았다. R134a 냉매의 경우 선속도가 빠른 베어링의 외곽 부분을 따라 경사면과 평탄한 면

모두에서 난류가 발생했다. 특히, R134a 냉매 윤활의 경우 난류 모델이 층류 모델과 비교하였을 때보다 높은 압력이 넓은 범위에 걸쳐 발생하기 때문에 하중지지력이 증가하는 경향을 보였고, 동력손실 또한 증가하였다. 그 외에도 정현성과 류근<sup>(52)</sup>은 물로 윤활되는 원통형 저널 베어링의 유체 동압을 간단한 실험 장치를 통하여 측정하였다. 실험 장치는 원통형 저널 베어링 상단에 뚫린 구멍에 원통형 실린더를 삽입한 형태이며, 발생하는 유체 동압은 베어링 상단에 삽입된 실린더의 윤활유체 높이로 나타난다. 회전속도가 빨라질수록 실린더 속에 물의 높이는 점차 증가하는 것을 실험을 통해 나타냈다.

#### 3.3.2 정압 베어링

이찬우 등<sup>(53)</sup>은 액체로켓엔진에 사용되는 터보펌프용 정압 스러스트 베어링의 정하중 및 동하중 특성을 측정하기 위해 윤활유체로 물과 액체질소를 사용할 수 있는 두 실험 장치를 개발하였다. 첫 번째 실험 장치는 정압 베어링의 마찰 손실, 토크, 하중지지력과 강성 및 감쇠 계수를 측정할 수 있도록 설계되었다. 두 번째 실험 장치는 정하중과 동적하중을 동시에 부과할 수 있는 디스크를 연결하여 정지 상태에서 베어링의 강성과 감쇠, 그리고 유막 두께를 측정할 수 있다.

## 4. 구름 베어링

### 4.1. 볼 베어링

볼 베어링에 관한 해석적 연구에서 최동철 등<sup>(54)</sup>은 각 진동체에서 하중과 접촉 각도를 계산하기 위하여 정적 해석을 수행하였다. 또한 볼과 궤도륜의 형상 함수와 영향 함수법을 이용하여 수치적인 3차원 접촉해석을 실행하였으며 볼 베어링의 틱 높이와 틱의 곡률 반경을 결정하는 효과적인 방법을 제시하였다.

실험적 연구에서는, 광원일 등<sup>(55,56)</sup>은 극저온 유체 환경에서 구동되는 볼 베어링의 성능 및 내구 특성평가에 대한 연구를 수행하였다. 마찰 실험을 통해 극저온 환경에서 구동하는 베어링의 마찰 수명 및 마찰 계수 경향을 확인하였으며, 이러한 마찰 특성이 하중 및 미끄럼 속도의 두 가지 변수 조건에서 어떤 상관관계를 가지는지 규명하였다. 또한 깊은 홈 볼 베어링에 대하여 내구 특성을 평가하였으며, 이를 통해 각 마찰 계수의 변동 특성에 따라 파손 시점 예측 가능성을 제안하였다.

### 4.2. 롤러 베어링

롤러 베어링은 구름 베어링의 종류 중 원통형의 롤러를 미끄럼 윤활 요소로 활용하는 베어링이다. 안태길 등<sup>(57)</sup>은 테이퍼 롤러 베어링 케이지의 불완전성이 베어링의 동특성에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 해석을 통하여

케이지의 고유진동수와 모드 형상을 관찰하였고 대칭성이 깨짐에 따라 인접해 있던 고유진동수의 분리가 발생하고 분리되는 고유진동수 사이의 간격은 고차 모드로 갈수록 증가한다는 것을 확인하였다. 정의욱 등<sup>(58)</sup>은 롤러의 테이퍼 각 오차에 관한 테이퍼 롤러 베어링 피로 수명의 통계적 분석이라는 제목의 연구를 수행하였다. 피로 수명은 롤러의 형상 오차에 크게 영향을 받기 때문에 설계와 제작 과정에서 발생하는 각 오차와 롤러 베어링의 피로 수명 관계를 통계적으로 분석하였다. 이때, 테이퍼 각 오차에 의한 치수 공차는 매우 작으므로 와이블 분포를 이용한 피로 수명 계산이 베어링 설계와 제작에 도움이 될 것으로 제안하였다. 김강석 등<sup>(59)</sup>은 고속 조건에서 테이퍼 롤러 베어링에 적용되는 리테이너의 특성에 관한 연구를 수행하였다. 테이퍼 롤러 베어링의 리테이너를 스틸과 플라스틱으로 모델링하여 회전 특성 및 가도를 검토하였다. 서로 다른 형상 및 재질을 가진 리테이너에 대한 비교 해석을 수행하여 결과를 통해 고속 작동조건에서 최적의 성능특성을 구현하는 인자를 찾아서 베어링의 최적 설계에 활용하도록 제안하였다.

## 5. 자기 베어링

자기 베어링은 자기 부상 효과를 통하여 반경 방향 하중을 지지하는 윤활요소이다. 축과 저널의 물리적 접촉이 없기에 마찰에 의한 손실을 고려하지 않을 수 있으며 오일을 사용하지 않기에 친환경적이므로 이에 따른 연구가 진행되었다. 김도규 등<sup>(60,61)</sup>은 초임계 이산화탄소(Supercritical CO<sub>2</sub>)를 사용하는 브레이튼 사이클 기반 소형 터보기계에 대하여 작동 유체로 인한 문제를 해결하고자 오일 윤활 베어링 대신 자기 베어링을 적용하여 실험을 진행하였다. 자기 베어링을 적용하여 구동 시 최대 30,000 rpm까지 회전 속도를 증가시킴에 따라 회전 속도에 대한 진폭을 분석하였다. 실험 결과, 초임계 이산화탄소 가압 조건에서의 축 궤적이 고속일수록 불안정해짐을 밝혔다.

고온/고압의 조건에서 기존의 가스 포일 베어링은 수시로 파손 및 변형되어 내구성에 있어 문제를 가지고 있었다. 고희환 등<sup>(62)</sup>은 이를 해결하고자 120°C의 고온수/증기 공급을 위한 히트펌프에 자기 베어링을 적용한 냉매 압축기를 탑재하였다. 자기 베어링을 적용한 압축기에 대한 실험을 진행하여 고온/고압에서의 내구성과 에너지 효율 목표를 확인하고자 하였으며, 히트펌프 시스템에 압축기를 탑재하여 추가 실험을 진행하였다. 압축기는 작동 유체로 R254fa 냉매를 사용하였으며 35,500~38,000 rpm범위에서 구동하였다. 실험 결과, 400시간 이상 구동 과정에서 압축기의 단독 공력 성능과 내구성에 이상이 없음을 확인하였다. 또한, 300 kW급 히트펌프 시스템에 압축기를 탑재한 실험에서도 자기 베어링이 이상 없이 구동함을 확인하였다. 즉, 자기 베어링은 기존

의 내구성에 문제를 보이는 가스 포일 베어링을 대체하여 고온/고압 조건에서 구동하는 압축기에 적용하는 것이 적합함을 확인하였다.

기존에 자기 베어링을 적용한 실험적 연구와 함께 해석을 통한 연구 또한 진행되었다. 공준상 등<sup>(43)</sup>은 자기 베어링과 함께 공기 포일 베어링을 추가한 시스템의 해석을 수행하여 자기 베어링이 진동을 제어하여 회전체에 구동 안정성을 제공할 수 있음을 보였다. 기존 공기 포일 베어링을 단독으로 사용한 경우에는 9,000, 10,200 그리고 12,000 rpm의 구간에서 마찰로 인한 진폭이 커지는 것을 확인하였다. 진폭이 커지는 구간에서 안정적인 구동을 목표로 하여 공기 포일 베어링에 추가로 자기 베어링을 적용하여 상용 해석 툴을 사용한 해석을 수행하였다. 마찰로 인해 진폭이 커지는 구간에서 자기 베어링을 통한 제어는 마찰이 발생하는 것을 방지할 수 있음을 나타내었다. 즉, 자기 베어링은 저속에서 불안정성을 보이는 공기 포일 베어링의 단점을 보완하며 회전체에 구동 안정성을 부여할 수 있음을 확인하였다.

시스템에 자기 베어링을 적용하기 위해서는 자기 베어링의 정확한 제어가 필요하다. 또한, 자기 베어링은 전류를 변화시켜 베어링 면과의 접촉 없이 축을 부상시킴에 따라서, 주로 코일의 전류와 진동의 크기를 측정하는 모니터링이 요구된다. 노명규 등<sup>(63)</sup>은 기존의 코일 전류에 따른 회전축의 x, y 축 진동을 분석하는 Cross-Correlation 방법과 FFT를 기초로 하여 주파수를 통해 두 신호의 상관관계를 확인하는 Coherence 방법의 한계를 극복하고자 속도 동기 Coherence 방법을 제시하였다. 이를 통해, 기존의 Coherence 방법에서 FFT가 아닌 축의 회전 속도에 따라 계산하여 계산량을 줄일 수 있었다. 즉, 데이터 계산량을 줄여 제어기에 부담을 감소 시키고 동시에 회전 속도 기반의 모니터링 방법을 제공하였다.

## 6. 스퀴즈 필름 댐퍼

스퀴즈 필름 댐퍼는 얇은 오일 막을 통해 압력장을 형성하여 감쇠를 부여하는데 오일의 유출은 스퀴즈 필름 댐퍼의 감쇠력을 하락시키는 원인이 된다. 강경대 등<sup>(64)</sup>은 공급 오일의 축 방향 유출을 막아 압력장의 효율적인 형성을 제공하는 사이드 간극 형태의 실(seal)을 스퀴즈 필름 댐퍼에 적용하여 감쇠 성능을 실험적으로 규명하였다. 오일의 원활한 공급을 위해 댐퍼면 중앙에 그루브가 제작되어 있고, 100 μm의 간극을 가지며 편심율은 0인 스퀴즈 필름 댐퍼를 통하여 실험을 진행하였다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 원형 궤도 운동은 가진기를 통해 구현하였다. 실험을 통하여 열린 형태(Open type)와 실(seal)을 적용한 경우 각각에 대하여 감쇠 값을 측정하였다. 실험 결과, 열린 형태(Open type)의 스퀴즈 필름 댐퍼는 Full-Film을 가정한 감쇠식보다 3.9배 큰 감쇠값을 나타

났다. 실(seal)을 통해 측면 간극을 40  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$  그리고 100  $\mu\text{m}$ 로 조정하는 경우는 열린 형태(Open type)보다 각각 3.2, 2.3 그리고 1.3배 큰 감쇠 값을 보였다. 이를 통해 실(seal)을 통해 간극 조절할 경우 감쇠력을 최대 3.2 배 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 즉, 실(seal)을 통해 공급 오일의 축 방향 유출을 막을 시 효율적으로 스퀴즈 필름 댐퍼를 통해 감쇠력을 제공할 수 있음을 나타내었다.

스퀴즈 필름 댐퍼에 대하여 실험적 연구와 더불어 해석적 연구도 진행되었다. 주경진 등<sup>(65)</sup>은 CFD를 사용하여 단순한 형태의 원형 평판 틈새를 가정하여 수치 해석을 진행하였다. 해석은 정적 상태(Steady-State)로 수행되었으며, 36  $\mu\text{m}$ , 42  $\mu\text{m}$  그리고 54  $\mu\text{m}$ 의 틈새 조건에 대하여 열린(Opening) 출구 조건을 가정하였다. 또한 그루브에 의한 효과를 확인하고자 여러 그루브가 있는 모델과 평평한 모델을 비교하였으며 각각의 조건에 따른 하중 지지 특성을 확인하였다. 평평한 평판 모델, 그루브를 1 줄 가지는 모델 그리고 그루브를 1-3줄 가지는 모델에 대해 해석을 수행하였다. 수치 해석 결과, 54  $\mu\text{m}$ 의 틈새 조건을 제외하고 수식을 통한 이론적 결과와 최대 2 %의 오차 범위를 가지므로 해석의 타당성을 확인하였다. 그루브가 없는 모델과 그루브를 가지는 모델 모두 틈새의 크기가 커질수록 하중 지지력이 감소하는 경향을 확인하였다. 틈새가 5  $\mu\text{m}$ 이며 그루브가 없는 조건일 경우 679.7 N의 가장 큰 하중 지지력을 나타냈지만, 그루브의 수가 증가함에 따라 최대 압력이 낮아짐에도 불구하고 전체적인 압력장 보존의 효과로 인하여 평균 하중 지지력에는 큰 차이를 보이지 않았다. 즉, 그루브는 유막의 전체적인 압력장을 보존하므로 하중 지지력에 큰 영향을 미치지 않음과 동시에 작동 유체를 저장하는 효과로 평평한 모델보다 부품의 고착 방지와 윤활 효과가 우수할 것으로 예상하였다.

## 7. 구조감쇠 댐퍼

댐퍼는 회전체 시스템에 추가 감쇠를 부여하는 요소이다. 그 중에서 금속 와이어를 압축하여 만든 와이어 메쉬 댐퍼는 제조 단가가 저렴하며 극한 환경에서도 일정한 감쇠력을 가진다. 따라서 일반 회전체 시스템뿐만 아니라 극한 환경에서 작동하는 회전체 시스템에 와이어 메쉬 댐퍼를 적용한 연구도 진행되고 있다.

박준혁 등<sup>(66)</sup>은 재질이 구리이고 밀도가 20%인 와이어 메쉬 댐퍼를 볼베어링으로 지지되는 전동 슈퍼차저에 적용하여 해석을 진행하여 와이어 메쉬 댐퍼의 전동 슈퍼차저 적용 가능성을 보여주었다. 스쿼럴 케이지(squirrel cage)와 조합된 베어링-댐퍼 시스템의 강성을 125,000 rpm까지 해석을 통해 예측하였다. 그 결과, 20,000 rpm이하 영역에서 스쿼럴 케이지 강성이 지배적이고, 20,000-65,000 rpm영역에서 와이어 메쉬 댐퍼 강성이 지배적이며, 65,000-125,000

rpm영역에서 볼베어링과 와이어 메쉬 댐퍼의 혼합강성이 지배적인 것을 확인하였다. 이호원 등<sup>(65)</sup>은 액체로켓용 터보펌프에서 연료펌프의 회전체 구조 모델링하고 와이어 메쉬 댐퍼와 볼베어링을 지지요소로 적용하여 회전체동역학 해석을 진행하였다. 그 결과, 볼베어링만으로 지지되는 연료펌프-터빈 시스템에 비하여 회전체의 강제 모드 및 굽힘 모드의 감쇠비가 향상되었다. 이를 통해 극한 환경에서 작동하는 터보펌프 회전체 시스템의 안정성 향상 및 신뢰성 개선에 대한 와이어 메쉬 댐퍼의 활용 가능성을 확인하였다.

## 8. 오링 댐퍼

오링은 일반적으로 고무계통 재료로 제작되어 체결에 의해 오링이 변형하고 이때 발생한 접촉응력에 의해 기밀을 유지하는 기능을 수행한다. 또한 회전축 베어링 시스템에서 베어링 뒷면에 장착되어 진동을 감쇠하는 기능을 가지고 있다. 오링이 밀봉 기능을 상실할 경우 작동유체가 누출되어 고장 및 사고 등으로 이어지기 때문에 오링이 압축 및 내압을 받는 상황에서 접촉응력 등 거동 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다.

고준복 등<sup>(67)</sup>은 2D 축대칭(axisymmetric) 유한요소법을 이용하여 고무 오링의 기계적 거동 특성을 해석적으로 예측하였다. 또한, 마찰계수, 조립 틈새(extrusion gap) 등이 미치는 영향에 대해서도 분석하였다. 그 결과, 오링의 밀봉 성능은 작동압력이 오링을 가압하여 오링과 구조물이 접촉을 하면서 최대 접촉응력을 발생, 밀봉 기능을 수행함을 확인할 수 있었고 오링과 구조물과의 마찰계수는 압축 단계에서 최대 접촉응력의 소폭 상승하고 조립 틈새가 작을수록 오링의 압축률이 높아져 접촉압력이 소폭 상승하였다. 응력완화 효과는 완화시간이 증가함에 따라 접촉응력의 하락폭이 더 커졌다. 압축 단계에서도 접촉응력이 약 42% 감소하여 밀봉 성능 지수가 1 이하로 오링이 밀봉 기능을 수행할 수 없음도 확인하였다. 따라서 오링 설계 시 이러한 응력완화 효과 고려의 필요성을 제시하였다.

## 9. 실

실은 작동유체가 외부로 누설되는 것을 막거나, 외부로부터의 이물질 침입을 막는 역할을 하는 기계요소이다. 설계되는 실의 간극이 클 경우에는 작동유체가 과하게 누설되게 되는 문제가 발생할 수 있으며 이는 회전기계의 효율저하를 초래하게 된다. 반면, 실의 간극이 작은 경우에는 실의 동적 특성이 회전체의 불안정한 진동성분을 발생시킬 수 있기 때문에 체계적인 실 간극과 형상의 설계가 필수적이다.

실의 누설특성 및 동적특성에 대한 해석적 연구로는 허민석 등<sup>(68)</sup>이 가스터빈에 사용되는 계단식 래버린스 실의 누설

특성에 대한 연구를 진행하였다. 계단식 래버린스 실은 기존에 사용되었던 로터 블레이드 팁에 이를 가지는 계단식 래버린스 실과 케이싱 부분에 이를 추가한 개선된 계단식 래버린스 실의 누설특성을 비교하였다. 유동해석에는 난류모델이 적용되었으며, 경계조건으로 입구와 출구에 유량과 전온도, 그리고 벽면에 단열조건과 점착조건을 주어졌다. 해석결과 케이싱에도 이를 추가하는 것이 누설방지에 더 효과적인 결과를 보였다. 또한, 허민석 등<sup>(69)</sup>은 계단형 래버린스 실의 리브 길이와 각도가 누설 특성에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 진행하였다. 난류를 고려한 유동해석을 수행하였으며, 경계조건으로는 출구의 전압력 조건을 대기압으로 설정하고, 입구의 전압력 조건을 출구 조건에 따라 1.1-1.4의 압력비로 설정하였다. 벽면은 단열조건과 점착조건을 설정하였다. 해석 결과 리브의 높이 변화가 누설특성에 더 지배적인 영향을 미침을 확인하였다. 문형욱과 김태호<sup>(70)</sup>는 래버린스 실이 적용된 소형 터보압축기 시스템의 래버린스 실 이수에 따른 누설유량과 누설 유량에 따른 임펠러 후면의 압력 분포 해석을 통해 래버린스 실을 갖는 소형 압축기의 축력을 예측하는 연구를 진행하였다. 래버린스 실 내부의 유동은 bulk-flow 모델을 사용하였으며, 임펠러에 발생하는 축력은 유입압력에 의한 하중, 슈라우드에서 발생하는 압력에 의한 하중, 유동의 흐름에 의해서 발생하는 하중, 그리고 압축압력에 의해 임펠러 후면에서 발생하는 하중으로 계산하였다. 해석결과 래버린스 실의 이 수가 증가할수록 축력이 증가하였으며, 누설유량은 감소하는 경향을 보였다. 또한, 박준혁 등<sup>(71)</sup>은 래버린스 실의 차압이 임펠러의 축방향 하중에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 진행하였다. 유동해석과 축력 계산에 대한 과정은 위 연구와 동일하며, 해석결과 회전 속도가 증가함에 따라 누설 유량과 임펠러의 축력은 증가하였으며, 간극 증가에 따라 임펠러의 축력은 감소하고 누설 유량은 증가하였다. 이해진 등<sup>(72)</sup>은 래버린스 실 형상에 따른 누설변화를 해석적인 연구를 통해 나타냈다. 해석에 사용된 래버린스 실은 스테이터에 이가 달려있는 래버린스 실이며, 실의 간극, 피치, 끝단길이에 따른 누설량의 변화 경향에 대한 연구를 진행하였다. 또한, 김윤지 등<sup>(73)</sup>은 래버린스 실의 압력 및 유동장을 해석하고, 이 피치 길이에 따른 래버린스 실의 동특성 계수와 누설량을 계산하였다. 동특성 계수는 휘돌림 주파수에 따른 유체 반력을 커브피팅하여 계산하였으며, 해석결과 피치의 길이가 증가함에 따라 누설량은 감소하고 불안정성을 나타내는 연성강성계수는 감소하는 경향을 보였다. 신수원과 서준호<sup>(74)</sup>는 압축기 터빈에 사용되는 래버린스 실의 압력 및 유동장 해석을 진행하였으며, 17,735 rpm에서 래버린스 실의 이 개수에 따른 특성을 예측하였다. 해석에 사용된 래버린스 실 모델은 각각 5, 7, 그리고 9개의 이를 갖으며, 작동유체는 압축기 냉매인 R134a를 사용하였다. 해석 결과 이의 개수가 증가함에 따라 래버린스 실의 직

접 강성계수는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 허성재 등<sup>(75)</sup>은 한국형 발사체 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 터빈의 구리 실 체결부의 해석을 진행하였다. 무산소용 소재의 구리 실은 넓은 온도 범위에서 안정적으로 누설을 차단하는 특성이 있으나, 온도에 따라 구리의 물성치가 급격하게 변하기 때문에 해석적 연구를 통한 누설 특성의 연구가 필수적이며, 연구를 통해 터빈 케이싱 체결부의 축대칭 해석 모델에 대한 열-구조 유한요소해석을 통해 터빈 케이싱 체결부의 기밀 특성을 분석하였다. 윤현철 등<sup>(76)</sup>은 트랜스미션에 사용되는 오일 실의 2차원 유한요소해석을 진행하였다. 오일 실은 피팅부와 립으로 구성되어 있으며 피팅부는 하우징에 오일 실을 고정하는 부분이며, 립은 작동유체의 누설과 외부 오염물을 막는 역할을 한다. 립은 더스트립과 메인립으로 구성되어 있다. 해석을 통해 더스트립의 개수와 메인립의 오일 축 각도에 대한 누설 특성과 강건성을 비교하였다. 해석 결과 더스트립의 개수는 누설 특성에 큰 영향을 주지 않았으며, 메인 립의 오일축 각도가 작아질수록 최대 접촉 압력이 증가하여 누설 특성이 개선되었다. 그러나 과도한 접촉 압력은 오일 실의 마모와 변형을 일으켜 급격한 누설 특성을 감소시키는 결과를 보였다.

실의 해석적인 예측뿐만 아니라 실험을 통한 성능 검증은 필수적이며, 실의 특성을 규명하는 다양한 실험적 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이수인 등<sup>(77)</sup>은 직선 래버린스 실과 계단식 래버린스 실의 팁 간극과 이의 개수에 따른 특성에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 래버린스 실의 이 사이마다 압력탭을 설치하여 압력계와 차압계로 국소압력을 측정하였고, 유동 입구의 온도는 열전대를 이용하여 측정하였다. 실험 결과 팁 간극이 증가함에 따라 실의 성능이 향상되었으며, 압력비가 증가함에 따라 유량계수는 증가하다가 일정해지는 경향을 보였다. 이승표<sup>(78)</sup>는 자동차용 휠 베어링 실의 초탄성 및 점탄성 물성을 고려한 드래그 토크를 예측하기 위해 고무의 초탄성 특성 실험과 점탄성 응력이완시험을 수행하였다. 초탄성 특성 실험은 단순인장시험, 평면인장시험, 그리고 등가 2축 인장시험을 진행하였다. 실험을 통해 구한 실의 변형량으로 위치벡터를 계산하였고, 실 립 끝단의 반력으로 하중벡터를 계산하였다. 고무의 점탄성 특성 실험은 응력이완시험으로 진행되었으며 이를 통해 실의 드래그 토크 유한요소해석으로 계산할 수 있었다. 실험 결과 신뢰성 있는 드래그 토크를 계산하기 위해서는 초탄성 특성과 점탄성 특성을 모두 고려해야함을 보였다. 구본한 등<sup>(79)</sup>은 고온가스 유입 방지를 위해 사용되는 립 실의 반경 간극에 따른 성능을 실험을 통해 실 형상과 유량에 따른 데이터를 획득하였고, 이에 따라 실링에 필요한 최소 유량 파라미터를 도출하였다. 하윤석 등<sup>(80)</sup>은 고속, 고온의 스팀 환경에서 운전되는 단열 브러쉬 실의 마모 효과에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 실험은 로터 표면에 거칠기에 따른 강모의 마모 및 탈락 현

상을 확인하였고, SEM 현미경과 EDX 데이터를 활용하여 과열증기 공급에 따른 강모의 산화 현상을 정량적으로 확인하였다. 실험결과 거칠기가 큰 케이스의 경우 강모의 마모 및 영킴 현상이 발생하였으며 거칠기가 작은 케이스의 경우 점착성 과열증기에 따른 점착성 마모 현상이 발생했다. 또한, 과열증기가 강모의 산화를 가속시키는 결과를 도출하였다.

## 10. 결론

2019년에는 이전년도와 마찬가지로 유체베어링 관련 연구가 가장 많이 발표되었다. 특히 공기 베어링에 대한 연구가 상당히 높은 비중을 가지고 있으며, 정압 베어링 보다 동압 베어링에 관한 문헌의 수가 많다. 자기 베어링 연구 또한 활발하게 이루어졌으며 여러 회전기계에 적용하기에 적합함을 밝힌 연구와 더불어 제어/모니터링에 관한 연구도 진행되었다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 여러 형상에 대한 실험적/해석적 연구가 같이 수행되었다.

유체베어링 및 실의 성능을 더 정확하게 예측하기 위해 유막 뿐만 아니라 구조적, 열적 특성까지 연동하는 다중물리해석 기법이 소개 되었다. 추후 이를 이용하여 복잡한 회전체 베어링 시스템의 다양한 성능을 예측하는 연구가 기대된다.

## 후 기

본 논문은 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2018M1A3A3A02065864)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- (1) Jung, J. H., 2019, "Investigation on Preprocessing and Transformation of Vibration Signals for Deep Learning Based Diagnosis of Rotating Machinery," Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul.
- (2) Hong, G. T., 2019, "Fault Detection and Diagnosis of Rotating Machine with Machine Learning Methods," M.S. Thesis, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon.
- (3) Kim, J., and Lee, Y., 2019, "Rotordynamic Design and Analysis of Supercharged Compressor for High Speed and Extreme Environment," Proceedings of KSAE Autumn Conference, p. 439.
- (4) Yi, H. W., and Ryu, K., 2019, "Prediction of Rotordynamic Characteristics for Oxygen Pumps in Liquid Rocket Engines," Proceeding of KTS Spring Conference, pp. 182~183.
- (5) Yi, H. W., and Ryu, K., 2019, "Prediction of Rotordynamic Characteristics for Wire Mesh Damper Supported Fuel Pump-Turbine Systems in Liquid Rocket Engines," Proceeding of KTS Autumn Conference, p. 140.
- (6) Jeon, S. M., and Choi, C. H., 2019, "Rotordynamic Design of Fuel Pump for Staged Combustion Cycle Engine," Proceeding of KSPE Spring Conference, pp. 277~278.
- (7) Park, J. S., Sim, K. H., and Lee, S. H., 2019, "Rotordynamic Model Development with Consideration of Rotor Core Laminations for 2.2 kW-Class Squirrel-Cage Type Induction Motors and Influence Investigation of Bearing Clearance," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 3, pp. 158~168.
- (8) Yoon, T. H., Park, Y. H., and Jeon, S. D., 2019, "Rotordynamic Analysis and Radiation Noise Analysis for 2.5 Steam Turbine Generator," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 3, pp. 157~162.
- (9) Lee, D. J., Kim, D. M., and Park, J. J., 2019, "A Rotordynamics Analysis of Full Floating Ring Bearing Type Turbocharger," Proceeding of KSNVE Autumn Conference, p. 222.
- (10) Seo, J. H., Mun, H. W., and Kim, T. H., 2019, "Comparison of Rotordynamic Performance of High Speed Rotor by Bearing Type," Proceeding of KSNVE Spring Conference, p. 103.
- (11) Kim, T. H., Hwang, S. H., and Shin, Y. J., 2019, "Comparison of Rotordynamic Measurements to Model Predictions of Turbo compressor for Supercritical CO<sub>2</sub> Power Generation System," Proceeding of KSNVE Autumn Conference, p. 168.
- (12) Park, J. H., Mun, H. W., and Kim, T. H., 2019, "Rotordynamic Performance of High Speed Electric Supercharger : Measurements and Predicts," Proceeding of the KFMA Annual Conference, pp. 187~188.
- (13) Hwang, S. H., Moon, C. G., Kim, T. H., Lee, J. S., Cho, K. S., Ha, K. K., and Lee, C. H., 2019, "Rotordynamic Performance Measurements and Predictions of a FCEV Air Compressor Supported on Gas Foil Bearings," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 1, pp. 44~51.
- (14) Bang, K. B., 2019, "The Influence of Seal Tooth Clearance of Tilting Pad Journal Bearings on Power Loss and Temperature," Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan.
- (15) Lee, W. S., 2019, "A High Bearing Temperature Trouble Shooting of Centrifugal Compressor," M.S. Thesis, Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul.
- (16) Lee, D. J., Kim, D. M., and Park, J. J., 2019, "A Rotordynamics Analysis of Full Floating Ring Bearing Type Turbocharger," Proceedings of KSAE Autumn Conference, pp. 105~106.
- (17) Lim, E. J, Park, J. K., and Joo, W. G., 2019, "Three-Dimensional CFD Heat Flow Analysis of Tilting Pad

- Journal Bearing Considering Fluid-Solid Conjugate Heat Transfer,” Proceedings of KTS Spring Conference, pp. 65~66.
- (18) Mehdi, S. M., Jeong, S. Y., and Kim, T. H., 2019, “Performance Predictions of Tilting Pad Journal Bearing with Increasing Jacking-Oil Flow Rate,” Proceedings of KFMA Annual Conference, pp. 22~23.
- (19) Mehdi, S. M., Jeong, S. Y., and Kim, T. H., 2019, “Performance Predictions of Hybrid Tilting Pad Journal Bearing,” Proceedings of KTS Autumn Conference, pp. 46~47.
- (20) Jang, M. Y., Cho, Y. J. and Kim, T., H., 2019, “Effect of Groove Shape of Journal Bearing on Lubrication Performance,” Proceedings of KSTLE Spring Conference, p. 197.
- (21) On, S. Y., and Kim, S. S., 2019, “Operational Characteristics of Composite Tilting Pad Journal Bearing for Turbine/generator Applications,” Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 130.
- (22) Lee, A. S., and Jang, S. Y., 2019, “Designs of Tilting Pad Journal Bearings and Their Effects on Stability of Supercritical High-Pressure Turbine,” Proceedings of KTS Spring Conference, pp. 67~70.
- (23) Byun, S. W., Baek, J. H., and Kim, S. T., 2019, “Effects of Design Parameters of a Tilting Pad Journal Bearing to the Pad-Pivot Friction and Nonlinear Rotordynamic Behaviors,” Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 116.
- (24) Chun, S. M., 2019, “Wear Simulation of Engine Bearings in the Beginning of Firing Start-up Cycle,” Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 4, pp. 244~266.
- (25) Moon, J. S., and Park, S. S., 2019, “Analysis of Air Foil Thrust Bearing Using Shell Modelling on Stiffness and Damping,” Proceedings of KTS Spring Conference, p. 157.
- (26) Lee, J. W., 2019, “Dynamic Characteristics Analysis of Air Foil Bearing Considering Bump Shape,” M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan.
- (27) Kim, T. H., Hwang, S. H., and Shin Y. J., 2019, “Structural and Rotordynamic Characteristics of Gas Foil Journal Bearing Test Rig Operating up to 80 krpm,” Proceedings of KSNVE Autumn Conference, p. 167.
- (28) Shin, Y. J., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2019 “An Experimental Study on Lift-off Speed Performance of Gas Foil Journal Bearing,” Proceedings of the KFMA Annual Conference, pp. 185-186.
- (29) Hwang, S. H., and Kim, T. H., “A Study on the Lift-off Speed and Drag Torque of Gas Foil Thrust Bearing,” Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 183-184.
- (30) Ryu, D. W., Park, S. S., Kim, K. H., and Kim B. H., 2019, “Performance Analysis and Experiment of Double Top Foil Air Bearing,” Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 190.
- (31) Moon, J. S., and Park, S. S., 2019, “Analysis Using Shell Modeling and Experimental of Air Foil Thrust Bearing,” Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 43.
- (32) Shin, H. J., and Park, G. W., 2019, “2-FSI Analysis of an Air Foil Thrust Bearing of Air Compressor for a Hydrogen Electric Car,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 762~769.
- (33) Mun, H. W., Seo, J. H., and Kim, T. H., 2019, “Effect of Bearing Selection on Design of Rotordynamic Performance of a Small High Speed Motor,” Proceedings of KTS Autumn Conference, pp. 76~77.
- (34) Mun, H. W., Seo, J. H., and Kim, T. H., 2019, “Study on Coast-down of Bearings for High-Speed Motors” Proceedings of KSNVE Spring Conference, p. 184.
- (35) Mun, H. W., Seo, J. H., and Kim, T. H., 2019, “Rotor Coastdown and Acceleration Performances of High-Speed Motors Supported on Ball Bearings and Gas Foil Bearings,” Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 2, pp. 123~131
- (36) Seo, J. H., and Kim, T. H., 2019, “Vibrational Characteristics of High-Speed Motors with Ball Bearings and Gas Foil Bearings Supports,” Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 2, pp. 114~122.
- (37) Hwang, S. H., Moon, C. G., Kim, T. H., Lee, J., Cho, K. S., Ha, K. K., and Lee, C. H., 2019 “Rotordynamic Performance Measurements and Predictions of a FCEV Air Compressor Supported on Gas Foil Bearings,” Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 1, pp.44~51.
- (38) Lee, J., Lee, K. N., Yang, H. S., and Cho, K. S., 2019 “A Comparative Study of Rotor Behavior for Air Foil Journal Bearing by Using Air-Compressor,” Proceedings of KTS Autumn Conference, pp. 95~96.
- (39) Lee, J., Choi, K. S., Kim, H. C., Park, C. Y., Park, G. Y., Yang, H. S., and Cho, K. S., 2019, “An Effect of earing Clearance for Rotordynamic Behavior on 10kW Class Motor-Generator System Supported by Gas Foil Bearing,” Proceedings of KTS Autumn Conference, pp. 53~54.
- (40) Kim, D., Park, J., and Sim, K., 2019, “Experimental Performance Evaluation on Real-Time Preload Control of Piezo-Controllable Gas Foil Bearings” Proceedings of the KFMA Annual Conference, pp. 147~148.
- (41) Kong, J., Andriy Z., Lee, J., and Lee, Y., 2019, “A Study on Vibration Control and Dynamic Characteristics of Rotor Supported by Hybrid Bearing,” Proceedings of KSNVE Spring Conference, p. 105.
- (42) Song, Y. S., 2019, “Dynamic of High Speed Rotor-Gas Bearing Systems: Experiments and Predictions,” M.S. Thesis, Department of Mechanical Design Engineering, Hanyang University, Seoul.

- (43) Park, S. S., Lee, J. H., and Lee, S. J., 2019 "Dynamic Analysis for Design of High Speed Air Spindle," Proceedings of KSPE Autumn Conference, p. 309.
- (44) Lee, J. H., and Park, S. S., 2019, "Comparison of Approximation and Rotordynamics Solutions for Design of a High Speed Spindle," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 5, pp. 310~316.
- (45) Lim, H., Kim, K., and Ryu, K., 2019, "Prediction of Load Capacity in Externally Pressurized Thrust Bearings: Effects of Geometrical Tolerance in Orifice," Proceedings of KTS Autumn Conference, pp. 143~144.
- (46) Kim, K., Lim, H., Ryu, K., and Lee, J., 2019, "Prediction of Externally Pressurized Gas Bearings Performance: Effects of Bearing Clearance, Orifice Diameter, Orifice Location, and Supply Pressure," Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 100.
- (47) Lee, J. H., Park, S. S., and Kim, D., 2019, "Dynamic Analysis and Measurement of Gas Bearing in a Linear Compressor," Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 41.
- (48) Kim, J., Jung, H., Kim, K., Yi, H., Ryu, K., and Lee, J., 2019, "Measurement of Orifice Discharge Coefficients in Externally Pressurized Gas Bearings: Effects of Supply Pressure and Bearing Static Load," Proceedings of KTS Autumn Conference, p. 98.
- (49) Jung, H., Kim, J., Kim, K., Yi, H., Ryu, K., and Lee, J., 2019, "Measurement of Static Stiffnesses in Externally Pressurized Gas Bearings: Effects of Bearing Static Load, Displacement, and Supply Pressure," Proceedings of KTS Autumn Conference, p.99.
- (50) Mun, J. H., and Kim, T. H., 2019, "Performance Predictions of Gas Foil Journal Bearings with Turbulent Flows," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 3, pp.190~198.
- (51) Mun, J. H., and Kim, T. H., 2019, "Performance Predictions of Gas Foil Thrust Bearings with Turbulent Flows," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 5, pp.300~309.
- (52) Jung, H., and Ryu, K., 2019, "Estimation of Hydrodynamic Pressure in a Fluid Film Bearing Using a Simple Test Rig," Proceedings of KTS Spring Conference, pp.192~193.
- (53) Lee, C., Yi, H., Kim, K., and Ryu, K., 2019, "Test Rig for Measurements of Static and Dynamic Load Performances in Externally Pressurized Thrust Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps," Proceedings of KTS Autumn Conference, p.141.
- (54) Choi, D. C., and Kim, T. W., 2019, "Optimum Shoulder Height Design using Non-dimensional Shape Variables of Ball Bearing," Tribology and Lubricants, Vol. 35, No. 1, pp. 37~43.
- (55) Kwak, W. I., and Lee, Y. B., 2019, "Correlation between Friction Characteristics and Life-time of Ceramic Ball Bearing according to Slip velocity in Cryogenic Fluid Environment," Proceeding of KTS Spring Conference, p. 75.
- (56) Kwak, W. I., and Lee, Y. B., 2019, "A Study on the Performance and Durability Characteristics of Deep Groove Ball Bearings in Cryogenic Liquid Nitrogen Environment," proceeding of KFMA Annual Conference, p. 28.
- (57) Ahn, T. K., and Park, J. W., 2019, "The Effects of Geometrical Imperfections on the Dynamic Characteristics of a Tapered Roller Bearing Cage," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 20, No. 4, pp. 464~469.
- (58) Jeong, E. W., and Oh, H. I., Tong, V. C., Hong, S. W., 2019, "Statistical Analysis on the Fatigue Life of Tapered Roller Bearing with Distributed Roller Taper Angle Error," proceeding of KSPE Fall Conference, p. 227.
- (59) Kim, K. S., Lee, K. K., Lee, D. Y., Lee, D. W., Choo, D. G., and Ahn, H. H., 2019, "A Study on the Characteristics of the Retainer Applied to Taped Roller Bearings Under High Speed Operating Condition," proceeding of KSPE Spring Conference, p. 230.
- (60) Kim, D. K., Baik, S. J., and Lee, J. I., 2019, "Magnetic Bearing Instability Experiments and Analysis in Supercritical CO<sub>2</sub> Condition," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 329~330.
- (61) Kim, D. K., Baik, S. J., and Lee, J. I., 2019, "Development of Experimental Quasi Steady State Analysis Model of Magnetic Bearing Instability in Supercritical CO<sub>2</sub>," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 22~23.
- (62) Ko, H. H., Jeong, D. J., Lim, S. M., and Kim, K. Y., 2019, "Performance Test of an Oil-free Centrifugal Compressor Equipped with Magnetic Bearing for a High Temperature Heat Pump," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 72~80.
- (63) Noh, M. G., Kwon, E. S., Lee, N. S., Jang, S. M., and Park, Y. W., 2019, "Signal Processing Algorithm for Status Monitoring of Chiller Compressor with Magnetic Bearings," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp.1~3.
- (64) Kang, K. D., and Kim, T. K., 2019, "An Experimental Evaluation of Squeeze Film Dampers with a Central Groove and Side Gap Type Seals," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 100~101.
- (65) Ju, G. J., Kim, S. T., and Kim, Y. K., 2019, "A Study on the Load Characteristics of Swash Plate Piston Pump Holder considering Squeeze Effect," Proceedings of the KSFC Spring Conference, pp. 371~376.
- (66) Park, J. H., Mun, H. W., and Kim, T. H., 2019, "Rotordynamic Performance of Electric Supercharger Supported on Ball bearings with Metal Mesh Dampers," Proceedings of KSNVE Autumn Conference, p. 136.

- (67) Ko, J. B., Kim, S. S., Park, Y. S., Yi, S. D., Baek, K. B., and Suh, S. H., 2019, "A Study on the Mechanical Characteristic of Elastomeric O-ring Compressed and Highly Pressurized," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 36, No. 8, pp. 721~728.
- (68) Hur, M. S., Moon, S. W., and Kim, D. S., 2019, "Leakage Characteristics of Improved Stepped Labyrinth Seal," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 177~178.
- (69) Hur, M. S., Moon, S. W., Kim, D. S. and Kim, D. H., 2019, "Influence of Rib Shape on Leakage Characteristics of Stepped Labyrinth Seal," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp.9~10.
- (70) Mun, H. W., and Kim, T. H., 2019, "Predictions of Thrust Force due to Impeller with Labyrinth Seal," *Proceedings of KTS Autumn Conference*, pp.44~45.
- (71) Park, J. H., Mun, H. W., and Kim, T. H., 2019, "Effect of Differential Pressure on the Labyrinth Seal for Axial Thrust Force to Impeller," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 104~105.
- (72) Lee, H. J., Ku, H., and Suh, J., 2019, "Analysis of Leakage Characteristics of Labyrinth Seal with Seal Geometry," *Proceedings of KTS Autumn Conference*, pp.122~123.
- (73) Kim, Y. J., Ku, H., and Suh, J., 2019, "Analysis of Leakage and Dynamic Characteristics of Labyrinth Seal with Different Pitch Length," *Proceedings of KTS Autumn Conference*, p.121.
- (74) Shin, S. W., and Suh, J., 2019, "Analysis of Labyrinth Seal Dynamic Characteristics with the Number of Teeth," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 314~316.
- (75) Heo, S., Yoon, S. H., and Choi, C. H., 2019, "Analysis of Turbine Copper Seal Joint in 75-tonf Turbopump for KSLV-II Liquid Rocket Engine," *Proceedings of KSPE Spring Conference*, pp.410~413.
- (76) Yoon, H. C., Jeon, G. H., and Choi, J. Y., 2019, "A Study on the Design of Transmission Oil-Seal Using 2D Finite Element Analysis," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 85~93.
- (77) Lee, S. I., Kang, Y. J., Kim, D. H., and Kwak, J. S., "Study on the Seal Performance of Straight and Stepped Labyrinth Seals with Tip Clearance and Number of Teeth," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 7~8.
- (78) Lee, S., 2019, "Drag Torque Prediction for Automotive Wheel Bearing Seals Considering Viscoelastic as Well as Hyperelastic Material Properties," *Tribology and Lubricants*, Vol. 35, No. 5, pp. 267~273.
- (79) Goo, B., Cho, G. H., and Song, C. S., 2019, "Measurement of the Effect of a Radial Clearance on a Single Radial Clearance Rim Seals" *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 179~180.
- (80) Ha, Y. S., Ha, T. W., and Lee, Y. B., 2019, "Experimental Study on the Wear Effects of a Brush Seal in DN 2.5 Million in a 250°C High-Temperature Steam Environment," *Tribology and Lubricants*, Vol. 35, No. 2, pp. 99~105.