

2021년 회전체동역학 분야 연구동향

김규만* · 이찬우* · 정현성** · 임호민** · 허준원** · 위민수** · 김지한** · 김예슬*** · 류근***†

1. 서 론

본 특집 논문에서는 2021년에 발간된 국내 학술지 논문, 국내 학술대회 논문 및 초록 중, 회전체동역학 분야에 관한 연구를 분석하여 정리하였다. 먼저, 회전기계 상태진단 및 회전체동역학에 관한 연구를 서술하였으며, 회전기계 지지 요소인 베어링은 오일 베어링, 공기 베어링, 구름 베어링 및 마그네틱 베어링 순서로 구분하여 정리하였다. 이후 댐퍼, 오링 및 실에 대해 서술하였다.

2. 회전기계 상태진단 및 회전체동역학

2.1 회전기계 상태진단

회전기계는 동력의 생성과 전달 등에 핵심적으로 사용되며, 고장으로 인한 예기치 않은 가동 중단은 경제적 또는 사회적으로 손실을 가져온다. 즉 회전기계의 유지보수는 매우 중요하며, 최근에는 효율적인 정비를 위해서 실시간 측정 신호에 기반한 상태진단방법이 도입되고 있다.

이해미 등⁽¹⁾은 SVM (Support Vector Machine) 알고리즘을 사용하여 진단모델을 제작하였으며, 3축 가속도 센서로 측정된 진동 신호를 사용하여 볼 베어링의 스미어링 결함을 높은 정확도로 검출하였다.

서울대학교 연구팀⁽²⁻⁵⁾은 회전기계의 정보가 부족한 상태에서 고장 진단을 수행할 수 있는 딥러닝 기반 알고리즘을 제안하였다. 그리고 딥러닝 알고리즘에 관계없이 입력노이즈에 의한 영향을 최소화 하는 학습 방법론을 제안하였으며, 실제 회전기계에서 발생하는 노이즈가 추가된 불균형질량, 오정렬, 접촉 및 오일 휘돌림 진동을 감지하고 진단하는데 성공하였다. 한편 기존 적대적 학습 방법 알고리즘을 개선하였고 실제 취득된 베어링 데이터로 검증하였다.

이국희 등⁽⁶⁾은 상태감시를 위한 데이터베이스 구축을 하였다. 진동 신호를 시간-주파수 분석 기법인 위그너빌 분포

를 통해서 이미지화 하고 컨볼루션 오토엔코더 모델의 디코더를 활용하여 진동 이미지 데이터를 증강하였다. 생성된 데이터는 실제 진동 신호와 비교를 통해 검증되었다.

이승현 등⁽⁷⁾과 유강민 등⁽⁸⁾은 불균형 질량과 오정렬에 의한 이상 진동을 감지하는 알고리즘을 만들고 결함 검출에 소요되는 시간에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 고장 시뮬레이터 장비를 사용하여 가스터빈에서 발생할 수 있는 고장 진동 신호를 측정하고 주파수 영역에서 분석하였다.

김현두⁽⁹⁾는 회전기계의 신뢰성에 있어서 윤활유의 역할을 강조하였고, 윤활유 내부의 철분 감지 센서와 진동 센서를 활용한 상태 방법을 비교하였다. 기어박스과 같은 저속 회전 기계에 대해서는 기계의 진동보다 윤활유의 상태를 모니터링 하는 것이 더 이른 시기에 고장 징후를 감지할 수 있음을 보였다. 추가적으로 경제적인 유지보수를 위해서 최신 IoT 기술의 도입이 필요함을 주장하였다.

김예진과 김영근⁽¹⁰⁾은 회전체 베어링 고장 진단을 위한 알고리즘과 신호 특성 추출기법, 특성 선별 기법의 조합에 따른 정확도를 비교하였다. 통계적 특성 추출, 포락선 신호 특성 추출, 웨이블릿 패킷 분해 신호 특성 추출 법을 별도로 사용하는 것보다 이들을 모두 합쳐 사용하는 것이 고장을 정확하게 파악할 수 있음을 보였고, 이때 SVM 알고리즘보다는 K-NN (K-nearest Neighbor) 알고리즘이 더 정확도가 높았다.

이경재 등⁽¹¹⁾은 리얼타임 엔진 시뮬레이터를 사용하여 소형가스터빈 엔진을 모사하였고, 구성품이 고장난 경우에 엔진이 정상 상태와 어떻게 다르게 거동하는지 파악하고 정리하였다. 특정 엔진에 대해 모사한 연구이므로 일반화에 한계가 있으나 마이크로 가스터빈의 고장 진단 및 강건한 제어설계에 기여하였다.

서윤호 등⁽¹²⁾은 VAE (Variational Autoencoder)의 특성을 활용하여 실제 고장 데이터가 매우 부족한 대형 회전기계 시스템의 이상 진단을 수행하였다. 학습된 VAE는 기어 감속기를 사용하는 30 MW급 스팀터빈 발전기의 진동 신호를 측

* 한양대학교 대학원 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Hanyang University)

** 한양대학교 대학원 기계설계공학과 소재·부품·장비 융합전공 (Department of Mechanical Engineering, BK21 FOUR ERICA-ACE Center, Hanyang University)

*** 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

† E-mail : kryu@hanyang.ac.kr

정하여 정격 운전 상태와 낮은 발전량 및 정지 상태를 94.5%의 정확도로 구분해 내었다. 더불어 재대로 진단해 내지 못한 경우와 센서의 오작동으로 인한 사례에 대한 분석도 구체적으로 다루었다. Mochammad 등⁽¹³⁾은 회전기계 결함 진단을 위한 강건하고 효율적인 분류모델을 만들었다. 5주간 동일한 조건으로 작동하는 베어링에서 측정된 가속도 데이터를 사용하여 효율성을 확인하였다. 하지만 저자는 단일 데이터셋에 대해서만 수행되었기 때문에 추후 다른 경우에 대해서도 적용되는지 확인해야 한다고 언급하였다.

2.2 회전체동역학

고명진과 박순섭⁽¹⁴⁾은 유도 전동기의 회전자 타입(알루미늄 다이캐스팅, 구리 다이캐스팅, 그리고 알루미늄-구리 하이브리드)에 따른 기계적 특성을 비교 분석하였다. 특히 전동기 효율 저하를 억제하는 미세절입 가공기술의 적용은 축의 흔들림을 50% 가량 감소 시켰으며, 양산 과정에서 밸런싱 기준을 개선할 수 있음을 보였다.

유찬욱 등⁽¹⁵⁾은 2 MW급 대형 차동커플링의 성능 실험을 수행하고 발표하였다. 해당 테스트는 정격조건에서 VDI 2056 Group G 기준, KS C IEC 60034-9 기준에 따라 진동 레벨과 소음레벨을 측정을 포함하였다.

정호연과 구희모⁽¹⁶⁾는 최대 30도의 경사각 조건을 포함하는 모사된 잠수함 운용환경에서 전동기를 대상으로 MIL-STD 규격에 따라 진동 및 소음 평가를 수행하였다. 축소 모델 전동기의 베어링 부분의 진동과 지지대에서 발생하는 소음은 각도에 따라서 유의미하게 변화하였으며, 동기주파수 성분의 진동 및 소음이 가장 두드러졌다. 저자는 함정 설계 단계에서부터 이러한 점을 염두하여 적절한 베어링을 선정해야 하고 경사 오차를 고려한 소음 기준레벨이 필요함을 주장하였다.

백두산 등⁽¹⁷⁾은 빔포일을 갖는 가스 포일 저널 베어링으로 지지되는 소형 공기압축기의 고속 시험 결과 발표하였다. 최대 100 krpm까지 실험이 수행되었으며, 아동기 주파수 성분은 매우 작게 측정되어 압축기의 회전체동역학적으로 안정성이 뛰어난 것을 확인하였다.

김규만과 류근⁽¹⁸⁾은 액체로켓엔진 터보펌프용 하이브리드 저널 베어링 실험 장치를 제작하고 회전체동역학적 특성을 측정하였다. 측정된 진동 신호에는 아동기 주파수 성분은 없었으며 이를 근거로 30 krpm 까지 안정적으로 구동이 가능함을 확인하였다. 위민수와 이호원 등^(19~26)은 액체로켓엔진용 전기펌프 회전축 베어링 시스템의 회전체동역학 특성을 측정하기 위한 실험 장치를 구축하였다. 모사된 전기펌프 회전축은 하이브리드 유체 저널 베어링으로 지지되며, 다양한 유체 공급 조건(온도 및 압력)에서 축 변위 및 하우징의 가속

도 진동을 측정할 수 있다. 큰 압축성을 갖는 공기, 비압축성 유체인 물, 극저온 유체인 액화질소를 사용하여 실험이 진행되었으며, 부상조건 확인, 불균형 질량 응답 측정 등이 수행되었다. 특히 압축성이 큰 유체로 하이브리드 저널 베어링을 작동시키는 경우 Pneumatic hammer 불안정성이 쉽게 야기됨을 확인하였다. 반면 비압축성 유체의 경우, 회전축은 아동기 주파수 성분 없이 안정한 동적 거동을 보였다.

김동희 등⁽²⁷⁾은 유도 전동기 로터의 양 끝에 위치한 엔드링의 기공이 회전체 진동과 베어링 내구성에 미치는 영향을 예측하였다. 불균형 질량을 만드는 엔드링의 기공의 분포 및 크기에 따라 회전축의 거동 및 베어링 수명이 매우 크게 달라짐을 수치해석을 통해 확인하였다. 특히, 양 엔드링에 존재하는 불균형 질량의 위상차가 역위상에 가까워질수록 축 진동의 감소와 베어링의 수명이 증가하였다. 안상규 등⁽²⁸⁾은 주기적인 해를 찾는 유전알고리즘을 사용하여 플로팅 링 베어링으로 지지되는 단순한 대칭구조 회전축을 해석하는 연구를 소개하였다. 그리고 예측된 결과를 슈팅알고리즘으로 수행한 결과와 비교하여 검증하였다.

강현세, 이윤수, 그리고 유홍희^(29,30)는 회전하는 강체 축-블레이드 시스템의 모델링을 수행하고, 축과 블레이드 사이의 질량관성모멘트의 비율에 따라 시스템의 동적 모드가 어떻게 변화하는지 확인하였다. 여기에 이어서 홍태훈과 유홍희⁽³¹⁾는 오일러 빔으로 가정하였던 블레이드를 티모셴코 빔으로 고려하여 모델링하였고, 인장, 굽힘, 비틀림 전단에 관한 고유진동수 분석을 하였다.

곽원일 등⁽³²⁾은 극저온 상태에서 작동하는 LNG 펌프에 적용되는 볼 베어링의 윤활 조건을 반영한 회전체 동역학 해석 연구를 수행하여, 윤활에 사용되는 유량이 펌프 시스템에 미치는 영향을 고찰하였다.

고아라 등⁽³³⁾은 스핀들의 재제조를 위해 역설계로 유한요소모델을 만들었으며, 수치해석을 통해서 구조적으로 안정함을 확인하는 연구를 수행하였다. 문재민 등⁽³⁴⁾은 BLDC 모터의 진동 특성을 정확히 예측하고자 전자기, 구조, 다물체 동역학이 연성된 수치해석을 수행하였다. 로터 회전에 의한 진동 특성을 예측하고 분석하였으며, 실험으로 측정된 진동 데이터와 비교하여 모델을 검증하였다.

3. 유체 베어링

유체 베어링(Fluid film bearing)은 회전축과 베어링을 유체를 사용하여 물리적으로 분리하는 비접촉식 베어링이다. 작동 유체에 따라 오일 베어링, 공기 베어링 등으로 나눌 수 있으며, 작동 방식에 따라 동압(Hydrodynamic) 베어링 및 정압(Hydrostatic) 베어링으로 나눌 수 있다.

3.1 오일 베어링

오일 베어링은 윤활 유체로 오일을 사용하여 회전축과 베어링을 분리한다. 볼 베어링과 같은 구름 요소 베어링에 비해 마찰 및 마모가 적고, 고속에서 높은 하중지지력을 가진다. 그러나 오일 베어링은 베어링 성능이 윤활유 온도에 큰 영향을 받으며, 고속에서 불안정성이 쉽게 발생하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 베어링 및 윤활유 온도가 오일 윤활 베어링에 미치는 연구와 불안정으로 인한 축의 휘둘림 거동을 억제 하기 위한 연구가 중요하다. 이러한 특성을 가진 오일 베어링은 현재 다양한 회전기계에 적용되고 있으며, 베어링의 특성을 예측 및 측정하기 위한 해석적 및 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다.

3.1.1 동압 베어링

서준호 등⁽³⁵⁾은 틸팅 패드 저널베어링 주변의 열 경계 조건이 베어링의 정적 및 동적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 고정밀 수치모델을 개발하였다. 3차원 유한요소모델에 기반을 둔 베어링 수치 모델링 방법 및 알고리즘을 제시하고 온도 경계 조건의 변화에 따른 베어링의 성능변화를 분석하였다. 선행 연구를 바탕으로 개발한 수치 해석 모델을 비교 검증하였으며, 등온 조건의 열대류 조건에 비해 베어링 패드 및 저널의 정적 변화량의 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한 패드 등온조건 온도의 감소는 최소유막두께를 증가시키며, 패드 온도 감소로 인한 베어링 건전성 확보에 좋은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이러한 장점에도 불구하고 등온 조건 온도의 감소는 동력 손실량을 증가시키는 원인을 보였다. 따라서 본 연구는 베어링 주변의 열 경계조건을 예측하기보다는 열 경계조건의 변화에 따른 성능변화의 경향을 제시하였다.

박성주 등⁽³⁶⁾은 선박의 선체 변형과 선박 저널베어링의 유막 강성을 고려한 축 정렬 최적화 기초 연구를 수행하였다. Reynolds 방정식을 변형한 Vogelpohl 방정식을 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 유막 압력을 계산하였으며, 이를 바탕으로 추진축계 저널베어링의 지지 효과를 고려하기 위한 등가강성 행렬을 도출하였다. 계산한 등가 강성을 통해 추진축계 정렬 불량 및 지지 베어링의 마찰로 인한 발열 및 파손을 예측 할 수 있다.

유현동 등⁽³⁷⁾은 표면조작가공을 진행한 평행 슬러스트 베어링에서 베어링 패드의 열전도율이 베어링의 열유체윤활 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 윤활유에 대한 지배방정식은 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식, 온도 및 점도 등을 고려하였다. 베어링에 가해지는 열은 전도방정식을 수치해석적으로 계산하였으며, 베어링패드 내에 덤플의 유무와 패드의 재질차이에 따른 온도분포를 비교하였다. 해석 결과, 가열된 윤활유가 덤플에서 출구부로 모두

배출되지 못하고 순화하게 되므로 베어링 출구부 보다 덤플 내에서의 온도가 높아진다. 따라서 덤플에 의한 기하학적 썩기 효과에 추가하여 열 썩기 효과라고 알려진 점도구배에서 의해서 유막 내에서 압력이 발생하는 것을 확인하였다. 이 연구를 통해 베어링 재료의 열전도율은 표면조작가공한 미끄럼 베어링의 윤활특성에 큰 영향을 미친다는 것을 처음으로 제시하였으며, 다양한 설계변수와 운전조건을 고려해야 함을 보였다.

김준호 등⁽³⁸⁾은 RANS(Reynolds Averages Navier-Stoke)모델을 이용하여 2 그루브 저널베어링의 평형점을 찾고, 패드에서의 압력분포와 온도분포를 확인하였다. 평형점을 찾기 위해 Adaptive single object 최적화 기법을 사용하였으며, Laminar와 SST 두 가지 난류모델을 사용하여 해석을 진행하고 이를 실험과 비교하였다. 비교 결과 압력분포, 온도분포 모두 시험 값보다 해석이 높았지만, 최대 압력지점은 동일하였다. 또한 난류 모델에 따라서 저널의 자세각과 편심률이 바뀌었으며, 패드의 압력분포와 온도분포가 변해 베어링의 정특성이 변화하는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 통해 해석 모델 및 방법의 신뢰성을 검증하였다.

장민준 등⁽³⁹⁾은 기존 연구의 한계를 극복하기 위해 평형 위치에 있는 저널에 직접 여러 주파수의 힘을 가하여 변위 응답을 확인하는 연구를 진행하였다. 이를 통해 많은 연구에서 간과하고 있는 패드와 피벗 사이의 마찰을 고려하여 틸팅 패드 저널베어링의 정특성, 동특성을 예측하였다. 연구 결과 평형위치에 있는 저널을 가진 하여 동특성을 구할 수 있음을 확인하였으며, 또한 패드와 피벗의 마찰로 인하여 강성과 점성 행렬의 연성항이 변화함을 확인하였다.

김봉준 등⁽⁴⁰⁾은 표면조작가공이 진행된 슬라이더 베어링의 윤활 효과를 확인하기 위해 수치해석 연구를 진행하였다. 매끄러운 베어링 표면과 덤플이 존재하는 베어링 표면에 대하여 윤활 해석 및 마찰 해석을 진행하였으며, 평균 레이놀즈 방정식과 Greenwood-Williamson 모델을 사용하여 계산하였다. 그 결과 표면조작가공이 진행된 표면의 하중지지력은 덤플 반경이 가장 큰 경우를 제외하고 매끄러운 표면보다 하중 지지력이 낮았으며, 마찰력 측면에서는 덤플 반경이 증가함에 따라 마찰력이 증가하였다. 따라서 표면조작가공에 의한 효과는 무조건적으로 마찰 특성을 향상시키지 않음을 해석적 연구를 통해 입증하였다.

문민주 등⁽⁴¹⁾은 RANS 모델을 기반으로 한 저널베어링 수치모델링에 대한 최근 연구동향을 조사하였다. 오랜 기간 동안 사용되어 온 레이놀즈 방정식 기반 윤활모델과 전산유체역학 기반 RANS 모델을 분류하여 정리하였다. RANS 모델은 유막 두께방향의 압력변화와 유동까지 고려할 수 있지만, 모델링 난이도가 높아 전 세계적으로 성공한 사례가 드물었다. 하지만 오일 그루브 및 유막에서의 3차원 열 유동 해석이 가능하여 베어링의 정확한 성능예측이 가능한 장점이 있

다. 최근에는 틸팅패드 저널베어링에 대한 깊이 있는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 패드의 온도구배 및 열 변형 그리고 피복의 강성을 고려한 다중물리 기반의 해석적 연구가 활발히 진행되고 있음을 밝혔다. 장인규 등⁽⁴²⁾은 다양한 유막 조건에서 그루브 면적이 표면조직가공이 진행된 슬라이더 베어링에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 윤활유는 정상상태, 비압축성 및 뉴턴 유체로 가정하였으며, 동일 셀에 위치한 사각형 덩플이 차지하는 면적을 바꾸며 수치해석을 진행하였다. 해석 결과, 같은 셀에 위치한 덩플이라도 차지하는 면적에 따라 압력 분포 및 지지하중에서 차이가 발생하였으며, 이를 통해 덩플이 차지하는 면적이 윤활 성능에 영향을 미치는 중요 설계 인자임을 입증하였다.

장민준 등⁽⁴³⁾은 실험적 방법에 기초를 둔 주파수 가진법을 사용하여 틸팅 패드 저널베어링의 동특성을 예측하고 이를 선형 연구와 비교 검증하였다. 구형 피복에서 발생하는 마찰을 건마찰로 모델링하였으며, 해석 모델의 저널을 가진하여 마찰 특성, 가진 주파수, 가진력 크기 및 패드의 관성 등이 틸팅 패드 저널베어링의 동특성에 미치는 영향을 확인하였다.

이재원 등⁽⁴⁴⁾은 최적화 설계에 사용되는 유전 알고리즘을 적용하여 스팀터빈, 압축기 등에 적용되는 틸팅 패드 저널베어링의 가중 공존해(Coexisting responses)를 계산하기 위한 비선형 해석연구를 진행하였다. 해석 모델은 로터에서 4개, 베어링에서 12개, 총 16개의 상태 벡터 차원이 존재하는 비자율계(Non-Autonomous)시스템이다. 16개의 차원에 대한 연산을 수행하였으며, 연산과정 중 패드의 유막에서 발생하는 유체 반발력은 레이놀즈 방정식을 통해 계산하였다. 초기 값을 150개로 설정하여 세대별로 6개의 최적 해를 찾고 이를 복제, 교접, 변이의 기법을 적용하여 다시 150여개로 배양 후 총 15세대로 진화시켰다. 마지막 세대에서 선별된 6개의 최종 후계자에 뉴턴-랩슨법을 사용하여 최종 해를 선별하였다. 이러한 과정을 통해 동일 운행 조건에서의 서로 다른 다중 응답 상태와 그 안정성을 확인하였다.

조현우 등⁽⁴⁵⁾은 플레인 저널베어링의 하중, 회전속도 및 온도에 따른 마찰, 마모 등 윤활 특성을 실험적으로 확인하기 위해 압축기 부하 용량에 대응 가능한 신뢰도 높은 베어링 마찰 성능 데이터 베이스를 구축하였다. 실험 장치는 구동 모터부, 베어링 시험부, 하중 부가부로 구성되며 구동 모터는 최대 5 krpm까지 구동 가능하다. 하중 부가 장치는 공압 실린더를 통해 최대 10 kN의 정적 하중을 부여할 수 있으며, 베어링에 고정된 토크암은 인장 케이블을 통해 하중 센서와 연결되어 베어링의 마찰력을 측정한다. 실험 결과, 플레인 저널베어링의 마찰 계수는 하중 및 오일 공급 온도가 증가할수록 감소하였으며, 회전속도가 증가할수록 증가하였다. 그리고 플레인 저널 베어링의 최적 작동점, 부상속도, 마찰 특성 등을 규명하여, 이를 최적화 설계에 활용할 수 있는

을 보였다.

김대연 등⁽⁴⁶⁾은 플레인 저널베어링의 하중, 회전속도에 따른 마찰 계수 측정결과를 등온 모델 및 열유체동압(THD) 모델의 예측 결과와 비교하였다. 실험과 해석 모두 하중이 증가할수록 마찰 계수가 비선형적으로 감소하였으며, 회전속도가 증가할수록 마찰 계수가 증가하였다. 그리고 2 krpm 및 5 krpm에서 실험한 결과는 열유체동압 모델의 해석 결과와 잘 일치하였다. 이를 바탕으로 등온 해석 모델보다 열유체동압윤활 해석 모델이 실험 결과와 더 잘 일치함을 보였으며, 신뢰도 높은 베어링 설계를 위해 다양한 작동 조건에 따른 플레인 저널 베어링의 마찰 성능 예측 및 검증이 필요함을 보였다.

3.2 공기 베어링

3.2.1 동압 베어링

백두산 등^(47,48)은 빔포일을 갖는 가스포일 저널 베어링의 구조 정특성과 동특성을 측정하고 해석 모델과 비교를 수행하였다. 가스포일 저널 베어링은 단일 포일을 사용하면서도 비선형 강성 특성과 예압 효과를 가질 수 있는 빔포일을 사용하였다. 가스포일 저널 베어링은 각각 3장의 탑포일과 빔포일 탄성구조체를 가지며 포일들은 120° 간격으로 베어링 곡률에 따라 끼워진다. 정적 하중에 대한 구조 특성은 고정된 축에 베어링을 설치한 후 로드셀과 변위 센서로 정하중 변위를 측정하였고, 동적 하중에 대한 구조 특성은 가진기를 통해 조화가진력을 베어링에 전달하여 로드셀, 변위 센서, 가속도 센서를 동적 하중에 대한 변위와 가속도를 측정하였다. 빔포일의 동적 하중은 정적 하중에 비해 큰 이력곡선을 가지며, 가진 진폭이 증가할수록 면적이 커져 고주파수 가진에서 빔포일 스틱 현상이 발생하였다. 동적 하중에 대한 강성 및 감쇠계수는 이중 범프 포일 베어링의 결과보다 높아 진동 제진 성능이 우수할 것으로 확인하였으며 해석 모델과 잘 일치하였다⁽⁴⁷⁾. 또한, 빔포일을 갖는 가스 포일 저널 베어링으로 지지되는 소형 공기압축기의 고속 구동 시험을 통해 회전체동역학적 성능도 평가하였다. 회전축의 회전속도가 증가함에 따라 회전축의 궤도 크기는 증가하며, 최대 진동 변위는 100 krpm에서 발생한다. 불균형 질량으로 인한 회전축 진동은 회전동기주파수가 최대 회전 속도인 100 krpm에서 가장 크게 측정 되었으며, 배수 성분이나 비동기 성분은 매우 작게 측정되어 회전체동역학적으로 안정됨을 확인하였다⁽⁴⁸⁾.

황성호 등⁽⁴⁹⁾은 가스 포일 스러스트 베어링의 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)코팅을 통한 내마모 특성을 규명하였다. 회전기기의 정지 조건의 하중보다 큰 정하중을 부가한 상태에서 실험 장비를 이용하여 구동-정지를 반복하는 가속 수명실험을 진행하였다. 반복 횟수가 증가할수록 시동 및 정

지 토크는 일정한 기울기로 서서히 증가하는 경향을 보이며, 부상(lift-off) 및 접촉(tough-down)속도는 완만히 감소한다. 정상마모인 길들이기(running-in) 과정을 통해 PTFE 코팅의 표면 거칠기가 감소하며, 이를 바탕으로 가스 포일 스러스트 베어링의 수명을 예측하였다.

백건용 등⁽⁵⁰⁾은 에어 포일 스러스트 베어링에 대한 3차원 CFD 복합열전달 해석을 통해 베어링 내부의 유동 특성을 분석하였다. 해석에 사용된 에어 포일 스러스트 베어링은 6개의 패드로 구성되어있고, 최소유막두께는 8.4 μm 로 가정하였다. 스러스트 베어링을 통해 흐르는 공기유동은 Reynolds 식을 사용하지 않고, 완전 3차원 압축성 유동에 대한 지배방정식을 사용하여 유한체적법으로 이산화된 방정식을 수치해석 하여 구하였다. 난류유동을 해석하기 위해 시간평균된 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)식을 사용하였으며, 난류점성계수는 난류운동에너지와 난류소산항에 대한 두 개의 식으로부터 구해지는 $\kappa\text{-}\omega$ SSTs 모델을 사용하였다. 입구경계조건으로 전압력과 전온도, 유동각을 주었으며, 출구 경계조건으로 측정 정압을 사용하였다. 최대압력은 탭 포일 경사면 끝부분에서 형성되며, 곡선형 탭포일 형상은 직선형 탭포일 형상에 비해 베어링 내부 압력은 약 9% 정도, 하중 지지능력은 약 30%정도 높게 나타난다. 경사면이 곡선인 탭포일을 사용한 베어링과 직선인 베어링의 내부 압력분포와 속도분포를 통해 유동특성을 분석하였으며, 베어링으로 유입 및 유출되는 유량을 분석하여 온도분포 특성을 확인하였다.

3.2.2 정압 베어링

신세기 등⁽⁵¹⁾은 액체로켓엔진에 적용하기 위한 하이브리드 저널 베어링의 정하중 특성을 측정하기 위한 실험을 진행하였다. 베어링의 강성을 추정하였고, 실험 중 발생한 진동 및 소음으로 인한 베어링 불안정성의 원인을 파악하기 위해 가진 실험 및 뉴매틱 진동을 측정하였다. 연구 결과 베어링 간극 증가로 인하여 공급 압력에 따라 작동 유체의 유량이 증가하였으며, 이로 인해 베어링의 강성이 증가하였다. 또한, 가진 실험 및 뉴매틱 진동을 측정된 결과로 각각 강성을 추정하여 비교하였다. 위민수 등⁽⁵²⁾은 압축성 유체인 공기를 작동 유체로 사용하여 공급 압력에 따른 하이브리드 베어링의 비회전 특성을 실험적으로 평가하였으며, 예측과 비교하였다. 직경 60 mm, 길이 25 mm와 9개의 정사각형 리세스를 갖는 베어링-회전축 시스템의 비회전 상태에서 베어링의 고유 특성인 오리피스 계수, 회전축의 변위, 토크, 그리고 등가 강성을 측정하였다. 25°C의 공기를 0.1 bar(g)부터 1.6 bar(g)까지의 공급 하여 실험을 진행하였으며, 그 이상의 공급 압력은 뉴매틱 햄머가 발생하였다. 실험결과, 오리피스 계수는 평균적으로 0.7이었으며 공급 압력에 따른 유량은 선형적으로 증가하였다. 압축성과 난류를 고려한 레이놀즈 방

정식과 공급압력에 따른 유량식을 사용하여 얻은 해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며, 뉴매틱 햄머 발생 전까지 잘 일치하는 것을 확인하였다.

이찬우 등⁽⁵³⁾은 디스크와 베어링 사이의 틸팅이 공기로 운할 되는 하이브리드 스러스트 베어링의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 하이브리드 스러스트 베어링은 외경 145 mm, 내경 63mm이며, 표면에는 8개의 리세스가 있다. 120° 간격으로 3개의 변위 센서를 부착하여 베어링과 디스크 사이의 간극을 측정하였으며, 작동 유체인 공기를 공급한 채로 하중을 부여하여 디스크와 베어링 사이의 간극, 공급 유량 등을 측정하였다. 변위 센서를 이용하여 디스크와 베어링 사이의 틸팅을 확인하고, 좌표를 계산하여 각각의 평면 값을 구하였다. 그리고 2개의 평면을 내적 하여 디스크와 베어링 사이의 각도를 계산하였다. 실험 결과 수평 실험에서는 수직 실험에 비해 베어링과 디스크 사이의 틸팅이 더 증가하였으며, 틸팅으로 인해 베어링 강성이 감소하고 공급 유량이 증가하였다.

최승호 등⁽⁵⁴⁾은 적층 제조된 하이브리드 유체 스러스트 베어링의 정하중 특성을 측정하고 기존 절삭가공으로 제조된 동일한 형상의 베어링과 성능을 비교하였다. 적층 제조 베어링은 FDM 방식의 카본파이버 소재로 제작되었으며, 베어링 표면에는 8개의 오리피스와 포켓이 있다. 오리피스(직경 1.5 mm, 포켓의 깊이 0.51 mm)를 통해 가압된 유체는 베어링 패드에 유막을 형성한다. 공기로 운할 되는 적층 제조된 하이브리드 유체 베어링의 특성을 규명하기 위해, 정적 하중에 의한 유막 두께 변화를 확인하고 다양한 작동 조건에서의 베어링의 특성을 측정하였다.

이동현 등⁽⁵⁵⁾은 수소 액화용 터보 팽창기 국산화 개발에 관한 연구로, 터보 팽창기용 기체 정압 베어링 설계와 제작된 터보 팽창기의 상온 구동시험 결과에 대해 분석하였다. 베어링의 직경은 33 mm, 길이는 60 mm이고, 16개의 오리피스를 가진다. 베어링에는 외부에서 가압된 압축 공기가 8.5 bar(g)로 공급된다. 기체 정압 베어링의 압력은 압축성 유체에 대한 Reynolds 방정식을 통해 계산하였다. Euler-Bernoulli beam 요소로 회전축을 모델링하였고, 터빈과 압축기 임펠러는 등가 질량으로 모델링하였다. 해석결과 레이디얼 베어링 강성이 최대가 되는 오리피스 직경을 설계 변수로 선정하였으며, 설계된 베어링의 하중 지지능력은 250 N으로 예측되었다. 정격속도인 75 krpm 아래에는 2개의 위험속도가 존재할 것으로 예측되었으며, 급힘모드 위험속도와 정격속도는 30% 이상의 분리여유가 있을 것으로 예측되었다. 또한, 정격속도인 75 krpm까지 안정적으로 구동함을 확인하였으며, 예측된 회전축의 최대 진동은 2.5 μm 이하로 나타났다.

황규진 등⁽⁵⁶⁾은 리니어 압축기 내에서 가압된 압축 공기를 윤활제로 사용하는 공기 베어링에 대한 연구를 진행하였다. 리니어 베어링의 하중 지지력은 피스톤과 실린더 사이의 상

대 운동과 작동 유체의 점성으로 결정된다. 공기를 윤활제로 사용할 경우 낮은 점성으로 인해 충분한 하중 지지력을 낼 수 없다. 이를 보완하기 위해 실린더 내부의 고압 공기를 급기 시키면서 입력 압력 강하 역할을 하는 오리피스와 적은 수의 급기공으로도 넓은 면적에 높은 압력을 발생시키는 포켓으로 이루어진 오리피스-포켓형 공기 베어링을 이용한다. 포켓의 형상과 체적이 피스톤의 거동에 미치는 정도를 파악하고 최적의 압축기 효율을 낼 수 있는 포켓 형상에 대한 연구를 진행하였다.

정현성 등⁽⁵⁷⁾은 액체로켓엔진용 터보펌프에 적용하기 위한 하이브리드 저널 베어링의 비회전 상태의 정하중 특성을 예측하였다. 베어링이 정지 상태에서 가압 유체에 의하여 윤활 되는 조건을 가정하여 레이놀즈방정식으로 유막의 압력 분포를 구하였다. 실험 결과와 예측 결과를 비교하였을 때, 유사한 경향성이 나타나는 것을 확인하였다.

3.3 기타 유체 베어링

3.3.1 동압 베어링

이안성 등⁽⁵⁸⁾은 틸팅 패드 저널 베어링 설계에 따른 초임계 고압터빈의 안전성에 관한 해석적 연구를 진행하였다. 해석 모델은 대수 감쇠율을 적용한 유한 요소 분석 로터 모델을 사용하였으며, 연성 강성 및 감쇠를 고려하였다. 해석 결과 설계에서 고려된 오프셋 및 프리로드 증가로 인한 영향은 크지 않았으며, 회전체 동역학적 안정성을 고려한 해석에서는 3-Pad LOP 틸팅 패드 저널 베어링이 전체 범위에서 성능이 우수함을 입증하였다. 그리고 높은 연성 강성 범위에서는 6-Pad LOP 와 5-Pad LOP 틸팅 패드 저널 베어링이 회전체 동역학 안정성을 높이는 설계임을 보였다.

장민준 등⁽⁵⁹⁾은 과도 응답 해석을 통해 틸팅 패드 저널 베어링의 동적 특성과 성능을 예측하는 연구를 진행하였다. 베어링의 정적 평형 위치에서 저널에 조화력을 가하여 틸팅 패드 저널 베어링의 성능 예측을 진행하였다. 각 주파수에 해당하는 임피던스를 획득한 후 선형 회귀 방식을 통해 동적 특성 계산하였으며, 기존 섭동법을 통해 구한 동적 특성과 비교하였다.

3.3.2 정압 베어링

김규만 등⁽⁶⁰⁾은 액체로켓엔진용 하이브리드 저널 베어링의 정하중 특성을 확인하기 위해 공기와 물을 사용하였다. 정하중에 따른 베어링 변위를 통해 강성을 계산하였으며, 공기와 물 모두 일부 구간에서 급격한 강성 변화를 나타냈다. 그리고 하중이 리세스 중심으로 향할수록, 공급 압력이 높을수록 쉽게 불안정해지는 경향을 보였다. 연구 결과를 통해 강성을 균일하게 하여 하중과 변위를 선형적으로 만들기 위해서는 리세스 압력을 제어하는 오리피스의 개선된 설계가

필요하다는 것을 제시하였다.

이찬우 등⁽⁶¹⁾은 직경 145 mm, 내경 63 mm 인 하이브리드 스러스트 베어링을 사용하여 비회전 정하중 실험을 진행하였다. 작동 유체로 공기와 물을 사용하였으며, 물의 온도는 27°C - 55°C까지 변화시켰다. 공급 압력을 변화시켜 가며 실험을 진행하였으며, 열전대 및 유량계 등의 센서를 사용하여 베어링의 작동조건을 확인하였다. 실험 결과, 작동 유체로 물을 사용하였을 때 공기보다 강성 및 간극이 더 높았으며, 틸팅은 더 감소하였다. 물의 온도가 증가하여 물의 점성이 감소할수록 간극이 감소하고, 피크 강성은 증가하였다.

이호원 등^(62~63)은 하이브리드 베어링으로 지지되는 전기 펌프 시스템의 회전체 동역학 실험장치를 개발하고, 실험장치를 이용하여 유체 공급 조건에 따른 비회전 특성 변화를 측정하였다. 실험장치는 작동유체를 공기, 물, 그리고 극저온 유체인 액체질소를 사용할 수 있도록 설계 되었으며, 와전류 변위센서, 3축 가속도 센서를 이용하여 회전축의 변위와 진동 신호를 측정한다. 실험장치를 활용하여 작동유체와 공급 압력에 따른 특성, 그리고 회전속도에 따른 응답 특성과 불균형 질량 응답 특성을 측정할 수 있다. 공급 압력을 증가시키면서 회전축의 변위, 토크, 가진 실험을 통한 강성 추정을 비회전 상태에서 진행하였다. 또한, 회전 속도와 공급 압력에 따른 회전축의 변위, 진동 신호, 그리고 불균형 질량에 따른 응답 특성을 회전 실험을 통해 확인할 수 있다. 또한, 베어링의 공급 조건에 따른 베어링 특성을 비회전 상태에서 측정을 하였을 때, 작동 유체의 유량은 온도가 증가할수록 동일한 공급 압력 조건에서 더 큰 유량 특성을 보였다. 회전축의 변위는 공급 압력에 따라 급격하게 증가하였으나, 5 bar(g)이후에는 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 또한, 작동유체의 온도가 낮을수록 더 큰 회전축의 변위를 보였다. 베어링의 강성은 작동 유체의 온도가 낮을수록 더 커지는 경향을 확인하였다. 허준원 등⁽⁶⁴⁾은 액체로켓엔진 터보펌프용 하이브리드 저널 베어링에 물과 공기를 작동유체로 사용하여 베어링의 공급압력에 따른 오리피스 계수를 측정하였다. 측정 결과, 공기 및 물의 평균 오리피스 계수는 각각 0.89, 0.77였다.

박천홍 등⁽⁶⁵⁾은 소비유량을 감소시킬 수 있는 가변보상장치를 이용하여 유정압베어링의 강성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 유연한 다이어램프를 이용하여 패드 압력에 따라 유량을 보상할 수 있는 패시브형 가변보상장치를 설계하고 부하특성의 이론적 해석방법을 제시하였다. 다이어램프의 압력에 따른 처짐과 가변 간극을 갖는 압력 특성을 반복 계산을 통해 가변보상장치의 유량특성을 구하였다. 구한 유량특성을 입력 값으로 사용하였고, 유한요소해석을 통해 베어링의 부하특성을 해석하였다. 기존 가변보상장치의 부하특성과 해석 결과를 비교한 결과, 부하특성은 가변보상장치의 형상 치수에 따라 민감하게 변화하지만 일반적인 고정형

보상요소에 비해 월등히 높은 베어링 강성을 제공하였다.

임호민 등⁽⁶⁶⁾은 적층 제조 기술로 제작된 하이브리드 스텝 베어링의 정하중 특성을 실험 및 해석적으로 규명하였다. 유한요소해석 모델은 가공 공차 및 실제 측정 치수를 고려하여 모델링 되었으며, 작동 유체인 공기의 압축성이 고려된 수정된 레이놀즈 방정식을 통해 압력장을 계산하였다. 계산된 압력장을 베어링 표면적으로 적분하여 하중 지지력을 도출하였으며, 미소 변위에 따른 섭동법으로 스텝 베어링의 강성을 구하였다. 해석 결과 가공 공차로 인해 오리피스 직경 및 리세스 깊이가 설계 치수와 다르게 가공되어도 하중 지지력 및 강성에 큰 차이가 없음을 확인하였다.

정현성 등⁽⁶⁷⁾은 멀티피직스 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 유체 베어링의 성능을 예측하고 기존 문헌과 비교하여 검증을 진행하였다. 유체 베어링 내의 압력 분포를 예측하기 위해 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하였으며, 작동 유체의 특성, 베어링과 회전축의 변형 및 거동이 고려되었다. 이를 바탕으로 실제 회전기계 시스템에서 발생하는 다양한 물리 현상이 반영된 베어링의 특성을 확인하였다.

4. 구름 베어링

4.1 볼 베어링

볼 베어링은 크게 회전축과 접촉하는 내륜, 여러 개의 볼 그리고 외륜으로 구성되며 축 회전 시 발생하는 마찰과 마모를 줄이는 역할을 한다. 볼 베어링은 레이스와 볼이 점접촉을 하며 회전하므로 롤러 베어링과 비교하여 마찰 계수가 낮은 장점이 있다. 이러한 특징을 가진 볼 베어링으로 지지되는 회전축-베어링 시스템의 신뢰성 확보를 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

구름 요소에서 발생하는 마찰, 베어링의 강성 및 피로 수명 등을 예측하기 위한 해석적 연구들이 수행되었다. Rivera 등⁽⁶⁸⁾은 각 접촉 볼 베어링의 볼과 레이스의 마찰 토크를 진단하기 위해 각 볼의 Pure Rolling Line(PRL)을 예측하였다. 최대 15 krpm의 회전 속도 범위에서 축 방향 예하중, 반경 방향 하중 및 접촉각 등에 따라 PRL을 예측하였으며, 이를 통해 볼과 레이스웨이 간의 마찰 토크를 평가 할 수 있을 것으로 기대하였다.

윤관식 등⁽⁶⁹⁾은 상용 시뮬레이션 툴을 사용하여 상온 및 고온 조건에서 Steel을 재질의 볼 베어링에 축 방향 하중이 작용할 때의 강성을 예측하였다. 예측 결과 200°C의 고온에서 베어링 강성은 상온에서보다 약 6% 가량 감소하는 것을 확인하였다. 이에 따라 작동 온도 범위에서 베어링의 부품 선정 및 설계가 가능함을 나타내었다.

김봉준 등⁽⁷⁰⁾은 시스템의 고속 회전에 따른 원심력, 자이로스코픽 모멘트 그리고 온도 상승을 고려한 볼 베어링의 피

로수명을 예측하였다. 예측 모델을 통해 볼베어링을 구성하는 요소의 온도 상승을 고려하여 하중 분포를 도출하였다. 피로 수명 방정식을 적용하여 간극과 공급 유량이 베어링 피로 수명에 미치는 영향을 계산하였다.

실험적 연구는 해석적 연구와 병행하여 수행되었으며 회전축의 회전에 따른 볼 베어링의 수명 등의 특성을 평가하고자 하였다. Zhao 등⁽⁷¹⁾은 케이지가 없는 볼 베어링의 파손 및 결함을 진단하기 위해 실험적 및 해석적 연구를 수행하였다. 먼저 최대 9 시간에 걸친 구동 실험을 통해 예측된 레이스웨이의 마모 깊이와 측정된 깊이를 비교하여 예측 모델을 검증하였으며, 이를 통해 가변형 직경을 가지는 레이스웨이의 마모 깊이는 볼의 파손과 관계가 있음을 밝혔다.

송민국 등⁽⁷²⁾은 볼베어링의 수명 확보를 위해 하우징 내부 온도와 회전 속도에 따른 그리스 누유량을 성능평가 인자로 하여 주입 주기를 평가하였다. 실험을 통해 결정된 온도 및 회전 속도 범위 내에서 시간에 따른 그리스 누유량 변화를 예측하여 제조사 제공 데이터와 비교하였다.

이용도 등⁽⁷³⁾은 최대 3,600 rpm의 회전 속도 및 극저온 펌프의 구동 조건을 적용하여 볼베어링의 토크를 실험적으로 측정하였으며, 이를 예측 결과와 비교하였다. 연구 결과, 구동 과정에서 전체적으로 베어링 토크는 일정하게 유지된 반면에 측정과 예측은 약 50% 가량의 차이를 보여 예측 모델 개선의 필요성을 강조하였다.

이해미 등⁽⁷⁴⁾은 3축 가속도센서를 사용하여 획득한 진동데이터를 기반으로 SVM(Support Vector Machine) 알고리즘을 적용하였다. 볼베어링(NTN Bearing 7014) 내륜 결함을 SVM 알고리즘을 통해 정상과 결함 상태를 진단하였다. 예측 모델과 실험으로 측정된 진동데이터의 비교를 통해 모델의 정확성을 검증하였으며 베어링 및 회전기계의 상태 진단 시스템을 구축하였다.

4.2 롤러 베어링

롤러 베어링은 내륜과 외륜 사이에 여러 개의 롤러가 삽입된 구름 요소 베어링이다. 롤러의 접촉면이 볼보다 넓으므로 볼 베어링보다 하중 지지력이 높다는 장점을 가진다. 롤러 베어링의 형상 및 구동 조건에 따른 특성을 평가하기 위한 해석적 연구가 진행되었다.

오현일 등⁽⁷⁵⁾은 테이퍼 롤러 베어링의 형상에 따른 특성 변화를 규명하고자 롤러의 각오차가 베어링 특성에 미치는 영향을 시간 영역 해석을 통해 예측하였다. 베어링 강성은 시간에 따른 각오차와 롤러에 미치는 하중 변화를 통해 계산하였다. 연구 결과, 롤러의 각오차가 베어링 회전 과정에서 하중 분포, 강성 변화 및 피로 수명에 영향을 미침을 보였다.

2,000,000 이상의 DN 넘버에서 회전하는 항공기 엔진은 롤러 및 케이지가 축보다 느리게 회전하는 슬립(Slip)이 발생

할 수 있다. 김선제⁽⁷⁶⁾는 슬립에 따른 베어링의 피로 및 파손을 방지하고자 반경 방향 간극을 반영하는 롤러 베어링 해석 모델을 개발하였다. 다양한 DN 넘버, 하중, 공급 오일 특성 및 베어링 형상이 케이지의 슬립에 미치는 영향을 예측하였다. 연구를 통해 개발한 케이지 슬립 예측 모델은 롤러 베어링의 구동 조건을 평가하며 효율적인 반경 방향 간극 설정 방법을 제공할 것으로 기대하였다.

김재승 등⁽⁷⁷⁾은 풍력 터빈의 주축을 지지하는 테이퍼 롤러 베어링의 강성을 1차원화 된 유한요소모델을 통해 계산하였다. 상용 유한요소해석 프로그램을 통해 롤러를 스프링 요소로 모델링하였으며, 강성 기울기가 일정한 선형 모델의 경우 ISO 16281 베어링 강성과 다른 거동을 보여 강성의 비선형성이 고려되어야함을 강조하였다. 스프링 요소의 비선형성을 반영한 예측 모델을 통해 테이퍼 롤러 베어링으로 지지되는 풍력 터빈 시스템의 구조 강도를 정확히 평가할 수 있음을 보였다.

김태우 등⁽⁷⁸⁾은 스쿠잉이 베어링 하중 분포와 롤러의 동적 거동에 미치는 영향을 예측하기 위해 테이퍼 롤러 베어링 열 네트워크 모델을 사용하였다. 온도 상승 요인으로 축 회전 속도, 베어링에 적용되는 하중 및 유량 등을 고려하였으며, 이를 바탕으로 스쿠잉이 해석 모델에 미치는 영향을 연구하였다.

한중우 등⁽⁷⁹⁾은 풍력발전기에 적용되는 롤러 베어링의 강성을 확보하기 위해 Partition of Unity(PU) 기반 유한요소 모델을 개발하였다. 개발한 모델을 통해 롤러 베어링의 비선형 동적 응력해석을 수행하였으며, 기존 상용 유한요소 프로그램과 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다.

김태우 등⁽⁸⁰⁾은 복열테이퍼 롤러 베어링의 윤활유 및 구조물의 마찰과 점성전단으로 인한 열 팽창을 고려한 수치해석 모델을 개발하였다. 이를 통해 외부 하중, 유량 및 회전 속도에 따른 열 팽창이 베어링 하중 분포에 미치는 영향을 계산하였다.

장서영 등⁽⁸¹⁾은 선형 연구에 사용된 해석 모델을 검증하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 지름과 길이가 10 mm인 롤러에 정하중을 가하여 변위를 예측하였으며, 하중과 변위의 관계를 통해 강성을 계산하였다. 연구 결과, 기존 수식을 통해 도출된 강성은 유한요소 해석을 통한 결과와 약 9%의 오차를 보였으며, 이를 바탕으로 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다.

5. 마그네틱 베어링

마그네틱 베어링은 자기력을 통해 마찰 없이 회전축을 구동시키며, 효율적인 시스템 제어와 상태 감시를 위해 마그네틱 베어링의 설계 파라미터에 대한 연구들이 수행되었다. 권은상 등⁽⁸²⁾은 무급유 칠러 압축기에 적용된 마그네틱 베어링

의 최적 파라미터 선정에 대한 연구를 진행하였다. 해석 모델은 유전 알고리즘을 사용하여 마그네틱 베어링 제어기 파라미터를 결정하였으며, 제어 성능과 파라미터 간 수학적 관계를 이용하여 파라미터 간의 연관성을 분석하였다. 연구 결과로 선정된 최적의 파라미터를 통해 관리 비용과 원가를 절감할 수 있으며, 제어 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

마그네틱 베어링 내 코일 전류를 바이어스 전류와 제어 전류의 합으로 나타내는 바이어스 선형화는 제어가 용이하지만 시스템을 복잡하게 하는 단점을 가진다.

노명규 등⁽⁸³⁾은 바이어스 전류를 사용하지 않는 반경 방향 능동 자기베어링을 설계하였으며, 전류에 따른 하중 지지력을 해석 모델을 통해 규명하였다. 홀수개의 극을 갖도록 베어링을 설계하였으며 전류와 힘의 관계를 벡터-행렬 형태로 표현하고, 전류와 자속의 수치를 최소화하여 전류분배 행렬을 구하였다. 이를 적용한 해석 결과, 최대전류에서 2000 N의 하중 지지력을 만족하고, 포화자속밀도는 1.6 T 이하로 유지됨을 확인하였다.

노명규 등⁽⁸⁴⁾은 능동 자기베어링에 적용되는 비례-적분-미분(PID) 기반 제어기의 최적 파라미터 탐색에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 회전체-마그네틱 베어링 시스템은 유연 모드보다 낮은 구동 속도 환경에서 제어 안정성 확보를 위해 노치필터를 사용하며, 노치필터의 설계 변수를 최적으로 결정하기 위해 유전자 알고리즘을 사용하였다. 해석 모델의 계산 시간을 단축시키고자 유전자 알고리즘과 기울기 기반 최적화 방법을 혼합하였다. 실험을 통해 도출한 마그네틱 베어링 제어기의 출력민감도는 2.13으로 ISO 14839-3의 기준을 만족함을 확인하였다.

김성학 등⁽⁸⁵⁾은 회전축과 자극 사이 간격을 측정하여 시스템 제어를 용이하게 하도록 와전류 타입의 변위 센서를 개발하여 성능을 실험적으로 규명하였다. 개발한 PCB 형태의 센서를 통해 전자석과 비동위로 인한 제어 성능 저하를 개선하였다. 변위에 따른 센서의 응답 측정 결과, 잡음이 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 인 것을 확인하였고, 민감도 함수 측정을 통해 상용 변위 센서와 비교하여 제어 안정성이 공진 시 5% 그리고 굽힘 모드 시 53% 향상되는 것을 확인하였다. 또한, 개발한 센서는 시스템의 제어 안정성을 확보하며 제작 단가와 시스템의 크기를 줄일 수 있음을 나타내었다.

6. 구조 감쇠 댐퍼

구조 감쇠 댐퍼는 댐퍼의 구조적인 특성을 바탕으로 다양한 환경에서 우수한 감쇠 특성을 제공한다. 특히, 댐퍼의 구조 특성에 대한 연구를 통해 회전체 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다. 김정태 등⁽⁸⁶⁾은 심공드릴 공구 축에서 진동댐퍼의 초기위치에 따른 축의 변위를 해석적으로 예측하였다. 해석 모델은 국내 상용 장비를 반영하여 모델링하였으며, 공

구 축과 댐퍼 사이의 마찰은 고려하지 않았다. 연구 결과 진동댐퍼의 초기 위치에 따라 축의 변위 값에 상당한 차이를 보였다. 그리고 최적화 연구를 통해 최소변위 값을 가지는 진동댐퍼의 위치를 찾고 변수간의 상관관계에 대한 분석의 필요성을 제시하였다.

7. 실

7.1 레버린스 실

레버린스 실은 비접촉 실로서 다양한 유체 기계에서 누설을 최소화 하고 효율을 상승시키기 위해 사용되고 있다. 특히, 온도의 영향이 적고, 회전저항이 거의 없기 때문에 다양한 속도 및 압력에서도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 레버린스 실에서 유체는 여러 개의 이(teeth)와 공동(cavity)이 반복적으로 설치된 미로(Labyrinth) 형태의 유로를 통과한다. 이 때 와류가 발생하여 유체의 운동에너지를 감소시키며, 유동을 제한하고 누설유량을 감소시킨다. 레버린스 실의 종류에는 회전부(Rotor)에 팁이 있는 Tooth on Rotor(TOR)형상, 비회전부(Stator)에 팁이 있는 Tooth on Stator(TOS)형상, 그리고 교차 형상인 Interlocking Labrtinth Seal(ILS)형상이 있다. 레버린스 실은 회전체의 전방 휘돌림(Forward whirling)을 악화시키는 연성강성계수의 값이 크게 나타나는 경우가 많이 발생하여 동특성계수의 해석 및 예측에 관한 연구가 많이 진행된다. 레버린스 실에 생기는 마모의 종류로는 축과 실 팁의 마찰 및 마모로 인한 문지름홈(Rub-groove)과 작동유체의 흐름으로 인한 팁의 마모(Wear) 등이 있다. 레버린스 실은 기밀 특성이 우수하며 제작과 설치가 쉬운 장점이 있지만 실과 로터 사이 간극에서 발생하는 유체의 힘은 회전기에 불안정 진동을 유발한다. 또한 레버린스 실의 기밀특성은 팁 이(teeth)의 개수, 팁 형상, 팁 간극 등에 의해 달라질 수 있기 때문에 정확한 누설유량 및 동특성 계수 예측이 반드시 필요하다.

장현준 등⁽⁸⁷⁾은 LNG 연료 펌프에 적용되는 레버린스 실의 누설유량 및 동특성 해석 연구를 수행하였다. 연구는 흡입 케이싱, 회전차, 디퓨저, 토출 케이싱 및 Wear-ing 틈새를 포함하여 5단 LNG펌프시스템 전체의 유동해석을 전산유체역학 모델을 이용하여 수행하였다. 그리고 실의 동특성 및 누설유량을 해석하기 위해 각 단 실 입구의 Swirl 성분을 고려하였으며, 실의 입구로 유입되는 유동 분포를 각각의 Stage의 실 입구 경계 조건으로 적용하였다. 이를 통하여 다양한 휘돌림 주파수에서 로터에 가해지는 법선력과 접선력을 계산하고, 플레인 실과 레버린스 실의 동특성을 예측하였다.

김지환 등⁽⁸⁸⁾은 작동유체의 누설을 효과적으로 감소시키기 위해 계단식 레버린스 실의 형상변수의 변화에 따른 토출

계수 해석 연구를 수행하였다. 해석 결과, 공동 폭 및 간극 위치를 변경함으로써 약 10%가량의 토출계수 저감 효과를 확인하였다.

손대오 등⁽⁸⁹⁾은 비회전부(Stator)에 팁이 있는 Tooth on Stator(TOS)형상의 레버린스 실에서 문지름홈(Rub-groove)의 형상을 사각형 형태로 가정하고 해석을 진행하였다. 문지름홈(Rub-groove)의 깊이를 증가시키면서 해석한 것은 Model 1, 너비를 증가시키면서 해석한 것은 Model 2로 하였다. 해석 결과, Model 1은 문지름홈(Rub-groove)이 없는 경우에 비해 감쇠계수와 연성강성계수 그리고 누설유량이 감소하였다. Model 2는 문지름홈(Rub-groove)이 없는 경우에 비해 연성강성계수만 감소하였고, 감쇠계수와 누설유량은 증가하였다. 이를 바탕으로 문지름홈(Rub-groove)의 너비증가에 의한 밀봉효과가 감소하였으며, 이를 통해 레버린스 실과 그루브 실의 최적화를 통해 실의 밀봉효과를 향상시킬 수 있음을 보였다.

박준혁 등⁽⁹⁰⁾은 교차형 스톱트 레버린스 실의 Bulk flow 모델을 개발하고 누설 특성에 대해 연구하였다. 개발한 예측 모델을 기존 CFD를 이용한 해석 결과와 비교하여 검증하였으며, 검증 모델을 사용하여 스톱트 레버린스 실을 갖는 원심형 임펠러의 축력을 예측하였다. 예측 결과 스톱트 레버린스 실의 간극이 증가함에 따라 누설유량은 증가하였다. 교차 형상의 누설유량은 이(teeth)의 개수가 증가하면 감소하였고, 교차 형상이 적용된 임펠러는 회전속도와 실 간극이 증가할수록 누설유량이 증가하였다. 이를 바탕으로 스톱트 베어링이 하중지지성능 설계에 활용이 가능하게 하는 축력 예측 결과를 확인하였다. 또한, 배면에 스톱트 레버린스 실을 갖는 임펠러의 누설 성능을 예측하였다.

김지환 등⁽⁹¹⁾은 누설유량의 저감을 용이하도록 하기 위해 엇갈린 레버린스 실의 형상변수의 변화에 따른 토출계수를 해석하였다. 해석 결과, 엇갈림 높이가 증가할수록 토출계수에 영향이 커졌고, 약 3 배 이후부터는 영향이 작아지는 것을 확인하였다. 또한, 공동 폭과 간극의 위치를 변화함으로써 약 10%의 토출계수 저감 효과가 나타난 것을 확인하였다.

허민석 등⁽⁹²⁾은 직선형 레버린스 실과 계단형 레버린스 실에서 회전속도와 간극에 따라 달라지는 누설 특성을 분석하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 해석 결과, 계단형 실의 유량함수는 모든 간극 크기에서 직선형 실보다 더 작게 나타났다. 계단형 실은 간극의 크기가 증가함에 따라 유량함수는 감소하였으나 일정 크기 이상으로 증가했을 때에는 유량함수가 증가하였다. 반면에, 직선형 실은 간극이 증가함에 따라 유량함수가 감소하였다.

이정인 등⁽⁹³⁾은 Bulk flow 모델을 이용하여 레버린스 실의 누설유량과 동특성 계수를 해석하였다. 공동의 압력과 실 끝단의 누설유량을 해석하기 위해 Neumann의 누설유량 경험식과 Fliegner의 질식 상태 누설유량 방정식을 이용하였

다. 전단응력 계산은 Blasius의 벽면 마찰계수 모델을 이용하였고, Bulk flow 모델의 지배 방정식을 제어체적 모델에서 유도하여 압력, 유속, 간극의 섭동을 고려한 변수를 대입하고 비정상상태 지배방정식을 유도하였다. 또한, 해석 결과를 기존 발표된 실험 결과와 비교해 신뢰성을 검증하였다. 이정인 등⁽⁹⁴⁾은 스윙 브레이크가 있는 래버린스 실의 동특성 계수를 예측하기 위해 Bulk flow 모델과 CFD 해석을 사용하였다. Bulk flow 모델에서는 Neumann과 Fliegner의 누설유량 방정식을 이용하여 각각의 공동의 압력과 래버린스 실 끝단의 압력을 해석하였다. 또한, 공동 내 원주방향 유속과 벽면 전단응력을 계산하기 위해 Blasius의 벽면 마찰계수 모델을 사용하였다. CFD 해석에서는 스윙 브레이크를 프리스윙 속도만큼 회전하도록 설정하였다. 실제 실에서 발생하는 휘돌림 효과를 정상상태 해석에서 모사하였으며, 로터에 작용하는 힘을 휘돌림 속도에 대해 Curve-fitting을 하여 동특성 계수를 해석하였다.

7.2 정적 실

정진우 등⁽⁹⁵⁾은 정적 상태에서의 필름 라이딩 실 누설 측정 실험 장치를 개발하고 필름 라이딩 실의 그루브 형상 변화에 따라 달라지는 누설 방지 성능에 대하여 연구를 진행하였다. 그루브가 존재하지 않는 실과 그루브의 깊이가 각각 0.6과 1을 가지는 실에 대하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 그루브 깊이가 감소할수록 누설 방지 성능이 향상되었고, 그루브가 없는 경우에 누설 방지 성능이 가장 우수하였다. 정권중 등⁽⁹⁶⁾은 정적 실 누설 평가 실험 장치를 개발하여 유막 두께의 변화와 총 5가지의 압력비에 따른 누설유량 측정 실험을 수행하였다. 측정 실험 결과, 실의 유막에서 압력강하 형태가 나타났으며, 압력비와 간극이 증가하면 유량도 증가하였다.

7.3 기타 실

조시영 등⁽⁹⁷⁾은 실의 팁 상단에 부분적으로 작은 크기의 허니컴 셀을 가진 혼합형 허니컴 실(mixed honeycomb seal)에 대한 CFD 해석을 통해 간극의 변화에 따른 누설 특성을 분석하였다. 일반적인 허니컴 실과 비교한 결과, 혼합형 허니컴 실은 모든 간극에서 누설 성능이 향상되었다. 그리고 셀이 더 작아질수록 누설 성능이 더욱 향상되는 것을 밝혔다.

윤태두 등⁽⁹⁸⁾은 림 실 내부에 에어포일 형상과 스윌러 형상의 도입이 실링 효율에 미치는 영향에 대한 수치 해석을 진행하였다. 해석 결과, 스윌러 형상은 약 14.7%의 실링 효율이 증가하였고, 에어포일 형상은 스윌러 형상보다 약 20%의 효율이 증가하였다.

윤태두 등⁽⁹⁹⁾은 에어포일 형상을 림 실 내부에 도입하여 URANS(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방식으로 비정상상태 수치해석을 진행하였다. 해석 결과, 에어포일 형상과 기본 형상인 더블 림 실은 endwall 위치에서 동일한 실험 값이 도출되었다. 또한, 실링 효율은 에어포일 형상이 기본 형상보다 약 20% 증가하였다.

성지훈 등⁽¹⁰⁰⁾은 Double C-Type의 메탈 실을 설계하였으며, 해석 결과를 기존 O-Type 및 C-Type 메탈 실의 기계적 특성과 비교하였다. 비교 결과 누설유량의 효과는 기존 메탈 실보다 향상되었으며 극저온, 고온, 고압 등의 조건이 요구되는 극한환경에서도 사용 가능함을 보였다.

최용철 등⁽¹⁰¹⁾은 누설부 간격에 따른 펌프의 특성 변화를 연구하였으며, 누설부 존재 여부에 따른 볼류트 형상변화가 펌프 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 볼류트의 기존 단면 형상을 둥근 사다리꼴에서 원형으로 바꿀 경우 볼류트 내부 유동장에 비대칭성이 발생하였으며, 이로 인해 유동 역류가 발생하여 펌프 효율이 감소하였다. 연구 결과를 통해 펌프 효율을 증가시키기 위해서는 볼류트 형상 및 비 대칭성을 고려해야 함을 보였다.

황성호 등⁽¹⁰²⁾은 동적 실의 누설 성능을 평가할 수 있는 실험 장치를 개발하여 필름 라이딩 실의 부상 및 누설 특성을 확인하였다. 실험 장치는 회전속도, 입구 압력과 출구 압력에 따른 누설유량, 진동 가속도, 실 패드의 변위 변화 등을 측정하였다. 대기압 상태에서 회전축의 자유감속 실험을 한 결과, 누설유량은 압력비에 따라 달라졌다. 또한, 유체 동압에 의해 필름 라이딩 실이 부상하여 유막을 형성하는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 필름 라이딩 실은 누설 유량 감소에 유리함을 보였다.

8. 결 론

2021년도에는 회전기계 상태 진단 및 회전체 동역학 분야 관련 연구가 많이 발표되었다. 회전기계 시스템의 고속화, 고성능화가 이루어짐에 따라 시스템 운전 안정성 및 신뢰도 확보를 위한 회전체동역학 관련 연구가 많이 진행되었으며, 효율적인 정비를 위한 실시간 측정 신호를 기반으로 하는 상태진단방법들이 도입되었다. 회전기계의 동력을 원활하게 전달하기 위한 오일 베어링, 공기 베어링 등의 연구는 이전과 같이 활발하게 이어지고 있으며, 실험적 연구보다 해석적 연구가 많이 이루어지고 있음을 확인하였다. 구름 베어링의 신뢰성 및 파손이 미치는 연구와 마그네틱 베어링을 제어하기 위한 연구 또한 다수 진행되었다. 실의 누설 성능을 향상시키고 이를 예측하기 위해 CFD를 활용한 연구가 많이 진행되었다. 반면 댄퍼, 오링 등의 감쇠 요소 부품에 대한 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 않았다.

이와 같이 회전기계 시스템의 성능 향상을 위해 국내에서

는 회전체 동역학 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 다양한 분야에 응용 가능한 베어링 및 실에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며, 구조 및 열적 특성까지 포함하는 다중물리해석 기법들이 적용되고 있다. 성능 예측을 위한 해석적 연구가 많이 진행되었으며, 향후에는 이를 검증하기 위한 실험적 연구들이 활발하게 이루어 질 것으로 기대된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1A2C1003915).

References

- (1) Lee, H., Lee, Y., and Lee, C., 2021, "Fault Diagnosis of Bearing Inner Race Defect with Classification based on a Three-axis Vibration Data," Proceedings of the KSPE 2021 Spring Conference, p. 317.
- (2) Kim, M., Ko, J., Lee, J., Kim, T., and Youn, B., 2021, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Unsupervised Domain Adaptation Method Based on Discriminative Feature Learning," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 289~290.
- (3) Lee, J., Kim, M., Ko, J., Kim, T., and Youn, B., 2021, "Unsupervised Domain Adaptation with Class-Conditional Sampling for Fault Diagnosis of Rotating Machinery," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 296~297.
- (4) Ko, J., Jung, J., Kim, M., Kong, H., Lee, J., and Youn, B., 2021, "Development of Noise-Robust diagnosis by Multi-Task Learning for Rotor System," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 252~253.
- (5) Kim, T., Ko, J., Lee, J., and Youn, B., 2021, "An Quantitative Evaluation Metrics for Generative Model Improving Fault Diagnosis Performance of Rotating Machinery in Class Imbalance Problem," Proceedings of the 2021 KSME Conference, pp. 1142~1144.
- (6) Lee, K., Seo, Y., and Oh, H., 2021, "Vibration Image Generation of 15 kW Screw compressors Using Convolutional Autoencoder," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, p. 119.
- (7) Lee, S., Kang, T., Lee, H., and Ryoo, C., 2021, "Fault Simulation and Real Data Analysis for Fault Diagnosis of Rotor Machinery," Proceedings of the 2021 KSAS Fall Conference, pp. 178~179.
- (8) Yu, K., Kang, T., Jeon, H., Lee, S., Ryoo, C., and Lee, H., 2021, "Fault Detection in Engine Rotor Using Wavelet Transform and K-mean Clustering," Proceedings of the 2021 KSAS Fall Conference, pp. 580~581.
- (9) Kim, H., 2021, "On-line Monitoring Technology for Lubricating & Hydraulic Oil to Improve the Reliability of Rotating Machineries," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 300~301.
- (10) Kim, Y., and Kim, Y., 2021, "Comparison Study of Feature Extraction and Classification Methods for Bearing Fault Diagnosis of a Rotary Machinery," Proceedings of the KSME 2021 Conference, pp. 1901~1904.
- (11) Lee, K., Kim, S., Back, K., Rhee, D., Kang, Y., and Kho, S., 2021, "Research of Small Gas Turbine Engine Control Logic by Engine Failure Mode Simulation," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 25, No. 2, pp. 88~97.
- (12) Seo, Y., Ma, P., Woo, J., Sun, K., Kim, B., and Kim, B., 2021, "Data & Knowledge-Based Anomaly Detection of Rotating Machine Using Variational Autoencoder," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 289~297.
- (13) Mochammad, S., Noh, Y., and Kang, Y., 2021, "Integration of Extra-Trees Classifier with Exhaustive Technique as a Feature Selection Method for Rotating Machinery Fault Diagnosis," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 272~273.
- (14) Ko, M., and Park, S., 2021, "A Study on the Mechanical Properties of 2.2 kW Induction Motor According to the Rotor Type," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, p. 149.
- (15) Ryu, C., Jo, J., Jeong, S., Kim, J., and Kim, S., 2021, "Differential Coupling Performance Test for 2 MW Class Large Capacity Variable Drive Control," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, p. 210.
- (16) Jeong, H., and Goo, H., 2021, "Effect of Inclination Angles on Motor Vibration and Structure-Borne Noise Characteristics," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 668~674.
- (17) Baek, D., Hwang, S., Kim, T., and Kim, T., 2021, "Identification of Rotordynamic Characteristics of a Small Air Compressor Supported on Beam-Foil Gas Journal Bearings," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 113~114.
- (18) Kim, K., and Ryu, K., 2021, "Rotordynamic Characteristics of a Hybrid Fluid Film Journal Bearings Test Rig for Liquid Rocket Engine Turbopumps," Proceedings of the 2021 KSAS Fall Conference, pp. 186~187.
- (19) Yi, H., Wee, M., and Ryu, K., 2021, "Rotordynamic Test Rig for Hybrid Bearings in Liquid Rocket Engine Electric Pumps," Proceedings of the 2021 KSPE Spring Conference, pp. 48~49.

- (20) Yi, H., Wee, M., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Liquid Rocket Engine Electric Pump Rotor-Hybrid Bearing System Characteristics with Various Supply Pressures at a Nonrotating Condition," Proceedings of the 2021 KSPE Spring Conference, pp. 91~93.
- (21) Wee, M., Yi, H., Jung, H., and Ryu, K., 2021, "Bearing Characteristics Measurements of a Rotor-Hybrid Journal Bearing System at a Non-rotating Condition: Tests with Compressible Fluid," Proceedings of the 2021 KSPE Spring Conference, pp. 163~165.
- (22) Wee, M., Yi, H., and Ryu, K., 2021, "Rotordynamic Test Facility for Hybrid Fluid Film Journal Bearings Lubricated with Cryogenic Fluid," Proceedings of the 2021 KTS Fall Conference, p. 165.
- (23) Yi, H., Wee, M., and Ryu, K., 2021, "Imbalance Response of a Rotor Supported On Hybrid Fluid Film Journal Bearings: Measurements versus Predictions," Proceedings of the 2021 KTS Fall Conference, pp. 136~137.
- (24) Wee, M., Yi, H., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Rotordynamic Characteristics of a Rotor Supported on Hybrid Fluid Film Journal Bearings: Effect of Test Fluid Temperature," Proceedings of the 2021 KTS Fall Conference, pp. 140~141.
- (25) Wee, M., Yi, H., Jung, H., and Ryu, K., 2021, "Static Load Characteristics of a Rotor Supported on Hybrid Journal Bearings Lubricated with Incompressible Fluid for Various Lubricant Supply Conditions at a Non-rotating Condition: Tests and Predictions," Proceedings of the 2021 KSAS Fall Conference, pp. 190~191.
- (26) Wee, M., Yi, H., and Ryu, K., 2021, "Shaft Motion and Acceleration Measurements of a Hybrid Fluid Film Bearing Supported Rotor for Various Lubricant Supply Conditions," Proceedings of the 2021 KSAS Fall Conference, pp. 192~193.
- (27) Kim, D., Park, J., Sim, K., and Lee, S., 2021, "Rotordynamic Analysis of 1.5 kW Induction Motor Regarding the Effect of End-Ring Porosity on Rotor Vibration and Bearing Durability," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 24, No. 3, pp. 32~41.
- (28) An, S., Lee, J., and Kim, S., 2021, "Genetic Algorithm Based Nonlinear Rotordynamic System Analysis: Application to Floating-Ring Bearing," Proceedings of the 2021 KTS Spring Conference, pp. 90~91.
- (29) Kang, H., and Yoo, H., 2021, "Modeling and Modal Analysis of a Rotating Rigid Shaft-Blade System considering Shaft Inertia," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 69~71.
- (30) Lee, Y., and Yoo, H., 2021, "Dynamic Modeling and Transient Analysis of Rotating Shaft-Blade System," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 75~76.
- (31) Hong, T., and Yoo, H., 2021, "Linear dynamic modeling and vibration analysis of a rotating Timoshenko beam based on von Karman strain measures," Proceedings of the 2021 KSME Conference, pp. 894~895.
- (32) Kwak, W., Lee, Y., and Lee, Y., 2021, "A Study on the Rotor Dynamics Analysis of LNG (Liquefied Natural Gas) HPSO Pump Support Bearings according to the Lubrication Flow Model," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 277~278.
- (33) Go, A., Seol, S., Kim, H., Ha, E., and Hong, D., 2021, "Structural Analysis of the Main Spindle for Remanufacturing of a Deteriorated Planner Miller Using the Reverse Engineering Model," Proceedings of the KSPE 2021 Spring Conference, p. 433.
- (34) Moon, J., Jeon, K., Cho, S., and Kim, C., 2021, "Electromagnetic-Structural-MBD coupled Analysis Considering Electromagnetic and Rotational Characteristics of Electric Motor," Proceedings of the 2021 KSME Spring Conference, pp. 118~119.
- (35) Suh, J., and Hwang, C., 2021, "Performance of Tilting Pad Journal Bearings with Different Thermal Boundary Conditions," Tribology and Lubricants, Vol. 37, No. 1, pp. 14~24.
- (36) Park, S. J., Lee, H., and Kim, K., 2021, "Study on the Estimation of Equivalent Stiffness Matrix in Journal Bearing for Propulsion Shaft of the Ship," Proceedings of the Tribology and Lubricants Spring Conference, p. 45.
- (37) You, H. D., Jang, I. G., and Park, T. J., 2021, "THD Analysis of a Surface Textured Parallel Thrust Bearing: Influence of Bearing Thermal Conductivity," Proceedings of the Tribology and Lubricants Spring Conference, pp. 99~100.
- (38) Kim, J., and Suh, J., 2021, "Analysis of Fluid Journal Bearing Static Characteristics Using the RANS Model," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 168~170.
- (39) Jang, M., and Suh, J., 2021, "Development of an Analysis Method for Dynamic Characteristics of a Tilting Pad Journal Bearings Considering Dry Friction," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 166~167.
- (40) Kim, B., Kim, Y., Yu, Y., and Suh, J., 2021, "Lubrication Performance Analysis of Dimple Textured Slider Bearing Using an Average Reynolds Equation," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 160~162.
- (41) Moon, M., Kim, J., and Suh, J., 2021, "Recent Research Trends on RANS Model based Numerical Modeling of Journal Bearings," Proceedings of the Tribology and Lubricants Fall Conference, pp. 177.
- (42) Jang, I. G. and Park, T. J., 2021, "Lubrication Analysis of Surface Textured Inclined Slider Bearing," Proceedings

- of the Tribology and Lubricants Fall Conference, pp. 102.
- (43) Jang, M., and Suh, J., 2021, "Prediction of Tilting Pad Journal Bearing Dynamic Coefficients using Transient Analysis," Proceedings of the Tribology and Lubricants Fall Conference, pp. 91.
- (44) Lee, J., An, S., and Kim, S., 2021, "Numerical Analysis on Coexisting Response States of Tilting Pad Journal Bearing System Using Genetic Algorithm," Proceedings of the Tribology and Lubricants Fall Conference, pp. 193~194.
- (45) Cho, H. Y., Hang, S. H., Kim, D. Y., Kim, T. H., and Lee, J. B., 2021, "Experimental Study On Friction Characteristics of a Plain Journal Bearing With Increasing Oil Supply Temperatures," Proceedings of the Tribology and Lubricants Spring Conference, pp. 59~60.
- (46) Kim, D. Y., Cho, H. W., Hwang, S. H., Kim, T. H., and Lee, J. B., 2021, "Investigation of Friction Coefficient of a Plain Journal bearing – Comparison of Experimental Test data to Predictions," Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 48~49.
- (47) Baek, D. S., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2021, "Identification of Load Carrying and Vibration Characteristics of Oil-Free Foil Journal Bearing Structures for High Speed Motors," Tribology and Lubricants, Vol. 37, No. 6, pp. 261~272.
- (48) Baek, D. S., Hwang, S. H., Kim, T. H., and Kim, T. Y., 2021, "Identification of Rotordynamic Characteristics of a Small Air Compressor Supported on Beam-foil Gas Journal Bearings," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 113~114.
- (49) Hwang, S. H., Kim, D. Y., and Kim, T. H., 2021, "Investigation of Anti-Wear Characteristics of PTFE Coated on Gas Foil Thrust Bearing by Accelerated Life Tests," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 111~112.
- (50) Baek, G. W., Joo, W. G., Mun, H.W., Hwang, S., Jeong, S. Y., and Park, J. K., 2021, "The Effects of Inclined Foil Shape on Flow Characteristics in Air Foil Thrust Bearing Using CFD," Tribology and Lubricants, Vol. 37, No.4, pp. 117~124.
- (51) Sin, S., and Ryu, K., 2021, "Static Load Characteristics of Hybrid Journal Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps: Experiments," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 168~170.
- (52) Wee, M., Yi, H., Jung, H., and Ryu, K., 2021, "Bearing Characteristics Measurements of Rotor-Hybrid Journal Bearing System at a Non-rotating Condition: Test with Compressible Fluid," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 163~165.
- (53) Lee, C., Lim, H., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Non-rotating Static Load Characteristics of Hybrid Thrust Bearings with Tilted Thrust Collar," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 123~125.
- (54) Choi, S., and Ryu, K., 2021, "Additively Manufactured Hybrid Thrust Bearings: Measurements of Static Load Bearing Characteristics," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 14~15.
- (55) Lee, D., Kim, B., Park, M., and Lim, H., 2021, "Development of Turbo Expanders with Hydrostatic Bearings for Hydrogen Liquefaction Plants," Tribology and Lubricants, Vol. 37, No. 3, pp. 91~98.
- (56) Hwang, G. J., Park, S. S., and Kim, D. H., 2021, "A Study of the Behavior of Linear Compressors considering the Pocket Shape and Volume of Air Bearings," Proceedings of the Tribology and Lubricants Spring Conference, p. 95.
- (57) Jung, H., and Ryu, K., 2021, "Prediction of Characteristics of Hybrid Journal Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 35~36.
- (58) Lee, A. S., and Jang, S. Y., 2021, "Stability Characteristics of Supercritical High-Pressure Turbines Depending on the Designs of Tilting Pad Journal Bearings," Tribology and Lubricants, Vol. 37, No.3, pp. 99~105.
- (59) Jang, M., Kim, J., and Suh, J., 2021, "Prediction of Tilting Pad Journal Bearing Performance through Transient Analysis," Proceedings of the Tribology and Lubricant Spring Conference, p. 37.
- (60) Kim, K., and Ryu, K., 2021, "Measurements of non-rotating Static Load Characteristics of Hybrid journal Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps using Test Fluid," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 179~180.
- (61) Lee, C., Lim, H., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Non-rotating Static Load Characteristics of Hybrid Thrust Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps using Test Fluid," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 127~139.
- (62) Yi, H., Wee, M., and Ryu, K., 2021, "Rotordynamic Test Rig for Hybrid Bearings in Liquid Rocket Engine Electric Pumps," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 48~49.
- (63) Yi, H., Wee, M., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Liquid Rocket Engine Electric Pump Rotor-Hybrid Bearing System Characteristics with Various Supply Pressures at a Nonrotating Condition," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 91~93.
- (64) Heo, J., Kim, K., and Ryu, K., 2021, "Measurements of Orifice Discharge Coefficients of hybrid Journal Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps", Proceedings of the KSPE Conference, pp. 12~13.
- (65) Park, C. H., Kim, H. S., Kim, G. H., and Oh, J. S.,

- 2021, "Analysis on the Stiffness of Hydrostatic Bearing Using a Flexible Compensator," Proceedings of the KSPE Spring Conference, p. 93.
- (66) Lim, H., Choi, S., and Ryu, K., 2021, "Predictions of Static Load Performance of Additively Manufactured Hybrid Thrust Bearings: Effect of Dimensional Tolerance," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 37~38.
- (67) Jung, H., and Ryu, K., 2021, "Predictions of Fluid Film Bearing Characteristics using a Multi-physics Simulation Software: Comparisons to Open Literature," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 31~32.
- (68) Rivera, G., Tong, V. C., and Hong, S. W., 2021, "A Study on Ball-Race Contact in Angular Contact Ball Bearing during Rotation," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 38, No. 11, pp. 851~862.
- (69) Yoon, K. S., Lee, Y. M., and Koo, J. C., 2021, "Simulation of Axial Stiffness Change due to Thermal Expansion of Inner and Outer Rings of Ball Bearings in High Temperature Environments," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 57~58.
- (70) Kim, B., Yu, Y., and Suh, J., 2021, "A Study on Fatigue Life Analysis Considering Thermal Effect of High-Speed Angular Contact Ball Bearings," Proceedings of the KTS Fall Conference, pp. 92~93.
- (71) Zhao, Y., Zhang, J., and Zhou, E., 2021, "Automatic Discrete Failure Study of Cage Free Ball Bearings based on Variable Diameter Contact," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 35, No. 11, pp. 4943~4952.
- (72) Song, M. K. and Park, H. Y., 2021, "A Study on the Reliability Validation of Grease Replenishment Frequency for Ball Bearings Using the Accelerated Life Test," Proceedings of the KSME Spring Conference, p. 8.
- (73) Lee, Y., Kwak, W., and Lee, Y., 2021, "Friction Torque Analysis using Experimental and Theoretical Method for DN 396,000 Cryogenic Pump Ball Bearing," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 279~280.
- (74) Lee, H., Lee, Y., and Lee, C., 2021, "Fault Diagnosis of Bearing Inner Race Defect with Classification based on a Three-axis Vibration Data," Proceedings of the KSPE Annual Conference, p. 317.
- (75) Oh, H. I., Tong, V. C., and Hong, S. W., 2021, "Effect of Tapered Roller Angle Error on the Characteristics of Tapered Roller Bearing," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No. 5, pp. 373~381.
- (76) Kim, S. J., 2021, "Analytical Consideration of the Radial Clearance to Reduce Cage Slip of the Turbo Engine Roller Bearing," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 35, No. 7, pp. 2827~2839.
- (77) Kim, J., Kim, S., Lee, G., and Kim, M., 2021, "Development of a Taper Roller Bearing Finite Element Modeling Method for Wind Turbine Using a Nonlinear Spring Element," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 45, No. 7, pp. 543~551.
- (78) Kim, T. and Suh, J. H., 2021, "Thermal Network Analysis of Tapered Roller Bearings Considering Skewing," Proceedings of the KTS Spring Conference, p. 117.
- (79) Han, J. and Jun, H., 2021, "Development of Partition of Unity-based Finite Element for Rolling Bearing Analysis," Proceedings of the KSME Spring Conference, p. 5.
- (80) Kim, T., Yu, Y., and Suh, J., 2021, "Thermo-mechanical Behavior of Double-row Tapered Roller Bearings Considering Thermal Expansion," Proceedings of the KTS Fall Conference, pp. 94~95.
- (81) Jang, S. Y. and Jeong, J. I., 2021, "Comparison of Formula and Simulation of Roller Bearing Contact Stress," Proceedings of the KSME Autumn Conference, pp. 1950~1951.
- (82) Kwon, E. S., Lee, N. S., Baek, S., Park, Y. W., and Noh, M., 2021, "A Study on How to Select Control Parameters of PID-based Controller for Magnetic Bearing used in Oil-free Chiller Compressors," Proceedings of the KSPE Spring Conference, p. 685.
- (83) Noh, M., Song, M., Jeong, W., and Park Y. W., 2021, "Design of Radial Active Magnetic Bearing for Unbiased Control," Proceedings of the KSME Autumn Conference, pp. 1615~1616.
- (84) Noh, M., Lee, N. S., Baek, S., and Park Y., 2021, "A Study on Selection Strategy for Optimal Parameters of PID-based Control of Active Magnetic Bearings," Proceedings of the KSME Autumn Conference, pp. 1619~1620.
- (85) Kim, S. H., Vu, V. N., and Ahn, H. J., 2021, "Performance Verification of Displacement Sensor for Active Magnetic Bearing," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 44~45.
- (86) Kim, J., Park, J., and Hong, J., 2021, "A Study on Displacement Analysis according to Initial Position of Tool Shaft Vibration Damper of Deep Hole Drill," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 44~45.
- (87) Jang, H. J. and Suh, J., 2021, "Analysis of leakage and rotordynamic coefficient of labyrinth seal of LNG fuel pump," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 171~173.
- (88) Kim, J. H. and Ahn, J., 2021, "Optimal Design to Reducing Leakage Flow Rate of Stepped Labyrinth Seal," Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting, pp. 269~270.
- (89) Son, D. and Suh, J., 2021, "Changes in leakage and Dynamic characteristics according to Labyrinth Seal rub-groove," Proceedings of the KSFM 2021 Summer

- Annual Meeting, pp. 322~323.
- (90) Park, J. H. and Kim, T. H., 2021, "Analysis of the Axial Thrust Force of a Centrifugal Impeller with a Thrust Labyrinth Seal at its Backside," *Tribology and Lubricants*, Vol. 37, No. 1, pp. 31~40.
- (91) Kim, J. H. and Ahn, J., 2021, "Discharge Coefficient Changes with Geometrical Parameter of Staggered Labyrinth Seal," *Proceedings of the KSME Spring Conference*, pp. 125~126.
- (92) Hur, M. S., Moon, S. W., Kim, T. S. and Kim, D. H., 2021, "Effect of clearance on the leakage characteristics of rotating labyrinth seal," *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 273~274.
- (93) Lee, J. and Suh, J., 2021, "Leakage and Rotordynamic Analysis of Labyrinth Seals," *Proceedings of the KSPE Spring Conference*, pp. 389~389.
- (94) Lee, J. and Suh, J., 2021, "Rotordynamic Analysis Methods Comparison of Labyrinth Seal with a Swirl Brake," *Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting*, pp. 375~377.
- (95) Jung, J. W., Hwang, S. H., Baek, D. S., Kim, T. H., Kim, E. and Ha, J. W., 2021, "Identification of Leakage Performance of a Static Seal with Various Grooved Shapes," *Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting*, pp. 42~43.
- (96) Jeong, G. J., Hwang, S. H., Kim, D. Y., Cho, H. W., Kim, T. H., Kim, E. J. and Ha, J. W., 2021, "Identification of Leakage Performance of a Static Seal for Various Pressure Ratios and Film Thicknesses," *Proceedings of The KFMA Annual Conference*, pp. 44~45.
- (97) Jo, S. Y., Hur, M. S., Moon, S. W. and Kim, T. S., 2021, "Numerical study on the stepped seal with mixed honeycomb about leakage characteristic," *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 294~295.
- (98) Yoon, T., Choi, S., Song, H. S., Lee, H. J., Cho, M. H. and Cho, H. H., 2021, "Study on optimal airfoil rim seal configuration for improvement of gas turbine rim seal sealing effectiveness," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, p. 5.
- (99) Yoon, T., Choi, S., Song, H. S., Lee, H. J. and Cho, H. H., 2021, "Study on improving sealing effectiveness by introducing airfoil shape inside gas turbine rim seal," *Proceedings of the KSFM 2021 Summer Annual Meeting*, pp. 324~325.
- (100) Sung, J. H., Roh, Y. J., Lee, S. G. and Koh, G. M., 2021, "Investigation of mechanical properties of Double C-Type Seal to prevent fluid leakage in extreme environments," *Proceedings of the KSME Autumn Conference*, pp. 1213~1213.
- (101) Choi, Y., Choi, J. and Hur, N., 2021, "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics according to Seal Gaps in a Centrifugal Pump," *Proceedings of the KSME Spring Conference*, pp. 264~265.
- (102) Hwang, S. H., Jung, J. W., Jeong, G. J., Baek, D. S., Kim, T. H., Kim, E. J. and Ha, J. W., 2021, "Identification of Lift-Off and Leakage Characteristics of Film Riding Seal," *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 46~47.