

2020년 회전체동역학 분야 연구동향 분석

허준원* · 위민수* · 최승호* · 신세기* · 임호민* · 정현성* · 류근**

1. 서 론

본 특집 논문에서는 2020년에 발간된 국내 학술지 및 국내 학술대회의 논문과 초록 중, 회전체동역학 분야에 관한 연구를 정리하였다. 먼저 회전기계 상태진단 및 회전체동역학 연구에 대하여 정리하였으며, 베어링은 오일베어링, 공기베어링, 구름베어링, 마그네틱 베어링 순으로 구분지어 서술하였다. 이후 뎀퍼, 오링, 실을 차례로 정리하였다.

2. 회전기계 상태진단 및 회전체동역학 연구

2.1 회전기계 상태진단

회전기계 시스템의 구성이 복잡해지고 다양해짐에 따라 기계 시스템 운영 신뢰도 확보에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 임우철 등⁽¹⁾은 인공지능을 활용한 고장 진단 기술 개발의 문제점인 데이터 불균형을 극복하기 위한 방안으로 기계의 물리적 거동을 모사하는 모델을 개발하고 고장 상태의 데이터를 생성하여 인공지능 알고리즘의 학습 데이터로 활용하는 연구를 진행하였다. 물리모델을 통한 데이터 증강 기법을 적용하였으며 티모센코 빔 이론을 바탕으로 멀티 디스크 시스템에 대한 유한 요소 모델을 개발하고 변형률과 운동에너지를 바탕으로 유한요소 행렬을 계산하였다. 강해수 등⁽²⁾은 발전용 가스터빈의 상태 감시 진단을 위해 운영되고 있는 시스템의 한계점을 분석하고 한전 전력연구원 에서 개발한 가스터빈의 최적 운영 지원 시스템을 연구 수행하였다. 이를 통해 네 가지의 시스템을 개발하였으며, 복합 화력발전소의 실시간 성능 저하 분석이 가능하고 성능 저하에 대한 오프라인 진단을 할 수 있게 되었다.

회전기계 상태진단 연구는 해석적 연구뿐만 아니라 실험적으로도 활발히 이루어지고 있다. 백수정 등⁽³⁾은 데이터 간의 유사도를 고려하며 시스템의 상태 정보를 이용한 지도 이산화 기법을 적용하여 회전축-베어링 시스템으로부터 가속도 신호를 수집하여 이산화 기법에 따른 고장 패턴 추출

를 비교하였다. 본 연구에서 제안한 지도 이산화 기법을 적용하였을 때 고장 패턴 추출률이 높을 뿐만 아니라 계산 시간과 분할되는 구간의 수도 작음을 확인하였다. 공준상 등⁽⁴⁾은 합성곱 신경망을 사용하여 오일-휩 현상을 진단하고 오일-휩 시작단계를 진단하여 심각한 오일-휩 현상을 방지할 수 있는 모델을 학습 및 평가하였다.

2.2 회전체동역학

회전기계의 동적 안정성 확보를 위한 성능 예측 및 설계 검증과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 전성민 등⁽⁵⁾은 우주발사체의 1단 엔진에 적용될 터보펌프에 대한 회전체 동역학 연구를 진행하였다. 해석결과로 예측된 1차 임계속도는 무차원화된 설계 회전속도의 1.63 배로서 터빈부 굽힘 모드에 해당되며, 설계 회전속도 대비 충분한 임계속도 분리 여유를 가지고 있어 터보펌프 운용에 안전한 여유를 확보하고 있다고 확인하였다. 광현덕 등⁽⁶⁾은 전기펌프 사이클 로켓엔진의 액체메탄 전기펌프 회전동역학 연구를 진행하였다. 펌프 정격출력은 52.4 kW이며, 정격회전속도는 54,000 rpm인 모델을 사용했으며, 회전축계의 고유진동수는 회전속도가 16,000~72,000 rpm 사이의 영역에서 나타난다. 해석결과, 임계속도 분리여유는 충분한 것으로 확인했으며 임계속도에 의한 불안정성은 나타나지 않을 것으로 예측되었다.

황성호 등⁽⁷⁾은 빔 포일(Beam foil)의 탄성 구조체를 갖는 가스 포일 베어링의 터보압축기 회전체 동역학 연구 및 베어링의 설계 변화에 따른 성능 비교 분석 연구를 진행하였다. 1, 2차 임계속도는 각각 7 krpm, 13 krpm 에 위치하며 3차 임계속도는 187 krpm에서 굽힘 모드를 확인하였다. 해석결과, 고속 터보압축기에 빔 포일 베어링 적용시 회전체 동역학적 안정성에 문제없을 것으로 확인하였다. 황성호 등⁽⁸⁾은 빔 포일(Beam foil)로 지지되는 가스 포일 저널 베어링을 가지는 회전축의 동역학적 특성을 연구 진행하였다. 해석결과, 1차와 2차 임계속도는 각각 2,600 rpm, 12,000

* 한양대학교 대학원 기계설계공학과

** 한양대학교 기계공학과

E-mail : kryu@hanyang.ac.kr

rpm 강제 모드를 갖는 것을 확인하였으며 3차 임계속도는 175,000 rpm에서 급힘 모드를 가지며, 정격 구동 속도 대비하여 75 %의 분리여유 마진을 가져 회전체동역학적 안정성에 큰 문제가 없음을 확인하였다. 이호원 등⁽⁹⁾은 우주발사체 상단로켓엔진의 터보펌프 모델을 이용하여 전기펌프를 개발하기 위한 연구를 진행하였다. 전기펌프의 설계와 유체유희 베어링의 강성과 감쇠계수, 그리고 플로팅 링 실의 강성과 감쇠계수에 따른 회전체동역학 해석을 진행하였다.

해석적 연구뿐만 아니라 실험적 연구도 다수 진행되었다. 김영춘 등⁽¹⁰⁾은 로터의 축소모델 시험과 실제크기의 더미로터시험 및 270 MW급 가스터빈의 실제 로터의 진동시험 및 고속 회전시험을 진행하였다. 로터의 블레이드 조립유무를 통하여 해석의 정확성 및 위험속도를 검증하고 과속도 시험을 통해 제작 건정성 또한 검증하였다. 로터의 충분한 예압력이 적용되면 고유진동수가 수렴됨을 확인하여 해석방법이 실제 로터의 해석에 충분히 유용함을 확인하였다. 박지수 등⁽¹¹⁾은 1 MW급 대용량 유도전동기를 대상으로 축계 진동 모드실험을 통해 회전체동역학 해석 모델을 수립하고 시스템 위험속도를 예측하고자 하는 연구를 진행하였다. 회전체 해석 모델 수립 과정은 총 7단계로 구성되며, 1차에서 3차 고유진동수 해석에서 6%이내의 해석오차를 확인하고 해석 모델 수립과정의 타당성과 유효성을 입증하였다.

3. 유체 유희 베어링

3.1 오일 베어링

3.1.1 동압 베어링

조현준 등⁽¹²⁾은 수직형 강제 공랭식 스러스트 베어링의 사이즈를 최소화하면서 냉각 성능을 향상시키기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 수직형 스러스트 베어링은 케이싱 내부에 오일이 담겨 있는 일체형 구조로 cooling fan과 collar가 조립되어 케이싱 외부의 공기를 순환시키는데 케이싱 내부에 핀을 가공하여 내부 오일과 열전달을 할 수 있는 표면적을 높였으나, 베어링 케이싱 내부에 핀 전과 후의 베어링 스러스트 패드의 온도가 9 °C 감소하는 결과를 얻었다. 이러한 실험을 통해 수직형 강제 공랭식 스러스트 베어링의 크기를 유지하면서 냉각 성능을 향상시킨 베어링을 개발하였다. 송애희 등⁽¹³⁾은 정렬불량에 따른 자려 평형 스러스트 베어링에 대해 연구를 진행하였으며, 정렬불량을 조절하면서 자려 평형 스러스트 베어링의 특성을 평가하는 시험장치를 개발하여 베어링의 여러 조건에서 실험을 진행하였다. 실험 결과 정지 상태와 운전상태의 하중 분포가 유사하며 정지 상태의 자려 평형 스러스트 베어링의 하중분포가 의미가 있고, 스러스트 하중이 클수록 평형이 더 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

장민준 등⁽¹⁴⁾은 유막의 생성 위치를 정확하게 예측하기 위하여 일반화된 레이놀즈 방정식에 JFO(Jakobson, Floberg and Olsson) 경계조건을 사용하여 연구를 진행하였다. 고정 패드 베어링의 압력 분포, 정특성, 동특성 해석을 수행하였으며 일반화된 레이놀즈 방정식과 JFO 경계조건을 도입하여 얻은 레이놀즈 방정식의 해석값을 비교하였다. 송애희 등⁽¹⁵⁾은 정렬불량이 발생한 경우 베어링의 해석과 정렬불량의 양에 따른 베어링의 성능한계 검토를 진행하였다. 스러스트 베어링의 압력분포, 유막의 온도 분포, 스러스트 칼라의 정량 불량을 각각 레이놀즈 방정식, 3차원 에너지 방정식을 이용하였고 표면속도 및 스러스트 단위 하중에 대한 정도를 변경하면서 해석을 진행하였다.

김교봉 등⁽¹⁶⁾은 고체 접촉이 저널베어링에 발생함에 따라 스크롤 압축기에 미치는 영향에 대해서 해석적 연구를 진행하였고 저널베어링의 유막압력을 레이놀즈 방정식에 유한요소법을 적용하여 해석하였다. 저널베어링과 축의 동적 거동 해석결과는 개발한 수치해석 방법과 상용 프로그램 해석 결과를 비교하여 수치 검증을 진행하였고, 축의 동적거동 해석 및 설계에 스크롤 압축기의 작동 가스력과 회전속도는 고려해야할 요소임을 확인했다.

조현우 등⁽¹⁷⁾은 레이놀즈 방정식과 에너지 방정식에 대한 수치해석 기법을 기반으로 오일 저널 베어링 해석 모델을 개발하고, 이를 통해 회전속도 및 하중 변화에 따른 베어링 성능을 예측하는 해석적 연구를 진행하였다. 홍광희 등⁽¹⁸⁾은 회전속도별 마찰계수를 도출하여 베어링-회전체 시스템의 Stribeck curve를 해석하고 유희특성을 연구하였으며, 저널 베어링의 유막반력과 접촉력을 고려하여 베어링-회전체 시스템의 동적 거동을 해석하였다.

3.1.2 정압 베어링

신승훈⁽¹⁹⁾은 가스압축기에 적용하는 틸팅 패드 저널 베어링 온도의 불안정성에 관한 연구를 진행하였고, 베어링의 온도 해석결과와 실험 결과를 비교하였다. 연구 결과, IGV 궤도 변화는 임펠러의 공력파워가 베어링의 저널 하중과 저널 하중 각도 변화를 유도하는 것을 확인하였다. 조현우 등⁽²⁰⁾은 저널 베어링의 하중지지능력 및 마찰손실을 평가하는 평가 장치를 연구하였고, 베어링의 정특성을 파악하기 위하여 연구를 진행하였다. 평가 장치를 통해 저널 베어링에 대한 성능을 평가하였고, 회전속도가 증가하면 베어링의 구동토크가 증가함을 확인하였다.

3.2 공기(가스)베어링

3.2.1 동압 공기베어링

백두산 등^(21~23)은 빔 포일 구조물을 가지는 동압 공기 포일 저널 베어링에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 고정된

축에 포일 저널 베어링을 설치한 후 로드셀과 변위 센서로 정하중과 변위를 측정하였다. 정하중에 따른 변위를 통해 동압 공기 포일 베어링의 구조 특성과 정하중 강성을 규명하였다. 또한 최대 45 krpm 회전 속도의 구동 시험에서 하중지지력 그리고 마찰 손실 등을 실험적으로 측정하였다. 구동 시험 결과, 모터의 회전 시작 및 종료 시점의 증가하는 토크를 제외하고 축 부상으로 인한 낮은 토크를 확인하여 공기 포일 저널 베어링의 하중지지 능력을 확인하였다. 또한 베어링의 반경 방향 정하중 증가에 따라 마찰 토크는 증가하여 자유 정지에 걸리는 시간이 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 향후 공기 포일 저널 베어링을 고속 회전 기계에 적용하고자 검토하였으며 해석적 연구를 통한 예측 결과와 실험 결과를 비교하여 해석 프로그램의 검증 또한 실시하였다. 포일 구조물을 통해 반경 방향 하중을 지지하는 동압 공기 포일 저널 베어링에 대한 연구와 더불어 축 방향 하중을 지지하는 공기 포일 스텝 베어링에 대한 연구도 진행되었다.

이성진 등⁽²⁴⁾은 동일한 설계치수와 제작방법으로 제작된 포일 스텝 베어링 간의 구조강성과 손실 계수를 측정 및 비교하였다. 스텝 베어링 하우징 하단에 120° 간격으로 부착된 3 개의 와전류 타입 변위 센서로 정하중에 따른 변형량을 측정하였다. 실험을 통해 동일한 설계 치수로 제작된 4 개의 포일 스텝 베어링은 최대 35%까지 구조강성이 차이날 수 있음을 밝혔다.

동압 공기 베어링에 대한 실험적 연구와 함께 해석적 연구 또한 수행되었다. 공기 포일 베어링은 오일 윤활 베어링에 비하여 낮은 강성, 감쇠 그리고 하중 지지력을 가지므로 진동과 외부 충격에 민감하다. 황성호 등⁽²⁵⁻²⁶⁾은 이를 고려하여 동압 공기 빔 포일 저널 베어링을 고속회전기에 적용하고자 회전체동역학적 해석을 수행하였다. 빔 포일 저널 베어링을 적용한 시스템의 회전 속도에 따른 모드 형상과 임계 속도 예측을 통해 시스템 안정성을 확인하고자 하였다. 해석 결과 최대 100 krpm으로 회전하는 축은 3차 굽힘 모드가 175 krpm으로 나타나 구동 속도 대비 회전체동역학적 안정성에 문제가 없음을 밝혔다⁽²⁵⁾. 또한 회전속도에 따른 각 모드의 감쇠비를 나타내어 회전체동역학적으로 안정적인지 판단하였다. 최대 100 krpm의 구동 범위에서 강체 모드와 굽힘 모드의 감쇠비는 모두 0.05 이상으로 예측되어 안정적인 구동이 가능함을 밝혔다⁽²⁶⁾. 박준혁 등⁽²⁷⁾은 공기 포일 베어링을 최대 155 krpm으로 회전하는 터보압축기에 적용하고자 스텝 러너 위치에 따른 회전체동역학적 해석을 수행하였다. 스텝 러너는 로터 후방에 있는 경우와 임펠러 측에 있는 경우 두 가지로 구분되었다. 해석 결과 두 가지 경우는 각각 227.5 krpm과 232.5 krpm에서 3차 굽힘 모드가 나타나 회전속도 범위 내에서 안정적인 구동이 가능할 것으로 판단하였다. 베어링 표면에 제작된 스텝으로

공기 동압을 통해 축 방향 하중을 지지하는 스텝 스텝 베어링에 대한 해석적 연구도 진행되었다.

임호민 등⁽²⁸⁾은 공기를 작동유체로 사용하는 공기 동압 스텝 베어링의 하중 지지력과 강성을 스텝 형상에 따라 해석적으로 연구하였다. 유한요소법을 사용하여 레이놀즈 방정식의 해를 구하였으며 유막 두께에 따른 압력장, 하중 지지력 그리고 강성을 도출하였다. 축 방향 스텝 깊이, 원주 방향 스텝 각도 그리고 스텝 개수에 따른 사례 연구를 통해 축 방향 스텝 깊이가 하중 지지력 및 강성에 가장 큰 영향을 주는 변수임을 밝혔다. 동압 공기 포일 저널 베어링의 유한요소법을 사용한 해석적 연구 또한 진행되었다. 김윤지 등⁽²⁹⁾은 압축성 레이놀즈 방정식의 유한요소해석을 수행하여 압력 분포와 회전 속도에 따른 하중 지지력을 예측하였다. 또한 베어링 표면의 Slip flow를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델을 비교하여 Slip flow를 고려할 경우 압력 저하로 인해 하중 지지력이 감소할 수 있음을 밝혔다.

3.2.2 정압 공기베어링

정압 공기베어링은 축 회전으로 발생하는 공기 동압으로 하중을 지지하는 동압공기베어링과는 다르게 외부에서 가압 공기를 공급하여 축을 지지한다. 가압 공기를 공급해야 하므로 추가적인 공기 공급 장치가 필요하지만 외부 가압 압력으로 축이 부상되므로 구동 초기에 마찰에 의한 손실이 없다는 장점을 가진다.

이찬우 등⁽³⁰⁾은 정압 공기 스텝 베어링의 정하중과 공급 압력에 따른 유막 두께, 강성 그리고 뉴매틱 햄머 불안정성을 실험적으로 규명하였다. 실험을 통하여 정하중을 증가시킬 시 뉴매틱 햄머가 발생하는 주파수가 증가하는 것을 밝혔다. 또한 공급 압력 증가에 따라서 뉴매틱 햄머 발생 주파수는 큰 변화가 없지만 더 낮은 정하중에서 뉴매틱 햄머가 발생하기 시작하는 것을 나타내어 공급 압력 및 정하중과 뉴매틱 햄머 불안정성 사이의 관계를 규명하였다.

가압 공기를 공급하는 공기 정압 베어링의 원리를 적용하여 박막 유리 등을 이송하는 스테이지의 윤활면에 대한 해석적 연구가 수행되었다. 류대원 등⁽³¹⁾은 레이놀즈 방정식의 해를 유한요소법으로 구하여 스테이지의 공기 유막 내 압력을 도출하였다. 스테이지는 가이드를 따라서 공기 유막으로 부상한 상태로 한 축으로만 운동한다. 이 과정에서 스테이지의 반경 방향 편심과 틸팅을 운동 오차로 정의하여 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 윤활면의 형상 오차에 따라 진동, 틸팅, 편심 등 스테이지 거동을 나타내었다. 또한 이송 정밀도에 있어 스테이지의 급기공 위치 및 배열이 매우 중요하게 작용함을 규명하였다.

3.3 기타 유체 윤활 베어링

3.3.1 동압 베어링

유체 윤활 베어링의 작동유체로 물, 냉매 등 기타 유체를 사용한 동압 베어링에 대한 연구 또한 진행되었다. 기타 유체를 사용한 동압 베어링 관련 연구 중 실험적 연구는 진행되지 않았으며 해석적 연구만 진행되었다.

압축기는 냉동 공조 기기의 소비 전력 중 약 80%를 차지하므로 압축기의 마찰 손실을 저감하는 것은 에너지 효율 관점에서 매우 중요하다. 이에 따라 압축기에 적용되는 베어링을 볼베어링이 아닌 유체 동압 베어링을 적용하여 마찰 손실을 줄이고자 해석적 연구가 수행되었다. 박상준 등⁽³²⁾은 냉동 공조 기기에 사용되는 왕복동 압축기에 유체 동압 스러스트 베어링을 적용하고자 해석적 연구를 수행하였다. 이 과정에서 피스톤, 커넥팅 로드, 소단부와 대단부, 스러스트 베어링 그리고 상부와 하부 저널 베어링 총 6가지 윤활면을 모두 연동하여 왕복동 압축기의 동적 거동을 확인하였다. 이를 통해 유체 동압 스러스트 베어링이 적용된 왕복동 압축기의 효율 개선에 관한 연구를 수행하였다.

베어링의 표면 거칠기는 축과의 마찰로 인해 마모를 야기할 수 있다. 이에 따라 베어링 표면에 일정한 패턴을 각인하여 표면 텍스처에 따른 마찰 개선에 대한 해석적 연구가 수행되었다. 김봉준 등⁽³³⁾은 표면 텍스처의 효과를 확인하기 위하여 타원형 텍스처가 총 4 개 가공된 베어링과 텍스처가 가공되어 있지 않은 베어링의 최대 압력 및 마찰 토크를 비교하였다. 평균 레이놀즈 방정식을 유한요소법을 사용하여 수치 해석하여 해를 구하였다. 해석 결과 베어링 표면에 타원형 텍스처가 가공된 경우 최대 압력 증가로 인해 하중 지지력이 증가하였으며 마찰을 감소시키는 효과를 입증하였다.

3.3.2 정압 베어링

이동현 등⁽³⁴⁾은 초임계 CO₂ 터빈 시스템에 정압 베어링을 적용하여 베어링 성능해석과 회전체동역학 해석을 수행하였으며 펌프-구동터빈 시험을 수행하였다. 직경과 길이는 70 mm이며 간극은 40 μm인 베어링을 사용하였으며 연구 결과 검증된 정압 베어링 해석 프로그램을 통해 정압 베어링 강성이 최대가 되는 압력비는 0.6임을 밝혔다. 또한, 정압 베어링의 높은 강성으로 최대 21 krpm으로 회전하는 터빈의 불안정 진동을 야기하는 모드가 없어 안정적으로 구동이 가능함을 밝혔다. 이를 통해 공급 온도 136°C의 CO₂를 공급 압력 84 bar로 공급하여 펌프-구동터빈 시험을 실시하였다. 시험 결과 정격속도 21 krpm까지 회전 속도와 동기 주파수인 1X에서 진동이 가장 크게 나타났으며 진폭은 베어링 간극의 10% 이내인 약 3 μm로 나타나 안정적인 구동이 가능함을 보였다.

김규만 등⁽³⁵⁾은 직경 60 mm, 길이 25 mm와 9개의 정사

각형 리세스를 갖는 하이브리드 저널 베어링의 실험 장치를 제안 및 설계하였다. 회전축은 차량용 터보차저와 커플링으로 연결되어 회전하며 로드셀과 와전류 타입 변위 센서를 사용하여 베어링에 작용되는 힘과 변위를 측정하고자 하였다. 실험 장치를 통해 다양한 하중, 회전속도, 온도 조건에서 작동 유체로 공기, 물 그리고 액체 질소를 사용할 수 있도록 고려하였다.

김기훈 등⁽³⁶⁾은 소형 원자로 시스템에 적용하고자 반경 방향 하중과 축 방향 하중을 함께 지지하도록 저널 베어링과 스러스트 베어링이 연성된 유체 베어링에 대하여 해석적으로 연구하였다. 연성된 베어링의 정확한 해석을 위해 병진 및 틸팅을 적용하여 5 자유도 운동을 고려한 유체 베어링의 정특성 계수와 동특성 계수를 규명하였다. 25°C의 물을 1 bar로 공급하였으며 1.5 krpm의 회전 속도일 때 마찰 토크와 하중 지지력을 예측하였다. 해석 결과 저널 베어링이 스러스트 베어링보다 하중 지지력이 약 2.9배 큰 것을 밝혔으며 향후 5 자유도를 고려하여 발전기, 가스터빈, 펌프 등 대형기기에 적용할 수 있을 것으로 기대하였다.

한 가지 유체에 국한하지 않고 여러 가지 비압축성 유체 및 압축성 유체 그리고 동압 베어링과 정압 베어링에 대한 해석을 통해 기존 문헌과 유체 윤활 베어링 성능 해석 결과를 비교한 연구도 수행되었다. 김규만 등⁽³⁷⁾은 기존 문헌과 유체 윤활 베어링의 정하중 특성, 강성 계수 그리고 감쇠 계수 등을 비교하였으며 이를 통해 개발한 유체 베어링 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다. 향후 해석 모델을 통해 회전체-베어링뿐만 아니라 다양한 회전기계를 통합한 수치해석 연구를 수행할 것으로 기대하였다.

4. 구름 베어링

4.1 볼 베어링

리베라 길버트 등⁽³⁸⁾은 각 접촉 볼 베어링에서 스키딩 발생 시의 볼 레이스 접촉 변화에 관련한 해석적 연구를 수행하였다. 고속 작동 시에 주로 마찰력 발생 요인으로 작용하는 스키딩을 예측하기 위해 기존의 미끄럼 마찰 미분 방정식을 기본으로 한 새로운 공식을 제안하였으며, 제안한 방정식이 두 줄의 구름 라인을 식별하는데 효과적인 것을 입증하였다. 또한 제안한 공식을 통해 각 접촉 볼 베어링의 미끄럼 운동을 예측한 결과를 제시하였다.

김영찬 등⁽³⁹⁾은 깊은 홈 볼 베어링의 실(Seal) 형상 최적화에 관한 해석적 연구를 수행하였다. 기존의 상용 프로그램을 활용하여 실 형상에 따라 조립 시에 필요한 힘과 변형량 그리고 조립이 완료되었을 때 실의 형태를 해석하였다. 이를 통해 다양한 조건이 고려되었을 때, 실의 형상을 최적화하는 연구를 수행하였다.

곽재섭 등⁽⁴⁰⁾은 볼 베어링의 축 하중 변화에 대해 전동체 기반 및 응력 기반 접촉 피로수명을 비교하는 연구를 수행하였다. 전동체 기반 볼베어링 수명 예측 모델은 전동체 하중만을 구하여 L-P이론에 적용하여 실험적 모델에 가깝게 구성하였으며, 응력기반 모델은 재료의 피로물성치를 적용하여 해석적으로 전동체 하중 및 표면 아래 응력해석을 진행하였다. 두 해석 모델 모두 볼 베어링의 반경방향 하중에 대해 볼과 내륜간의 접촉압력이 외륜에 비해 높아 피로수명이 낮아짐을 확인하였다.

4.2 롤러 베어링

서충완 등⁽⁴¹⁾은 크로스 롤러 베어링의 축방향 강성에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 외륜이 고정되어 있는 크로스 롤러 베어링에 축 방향 하중을 인가하고 이때 베어링 내륜의 처짐을 측정하기 위한 실험 장치를 설계하고 제작하였다. 내륜의 변형과 외륜의 변형을 각각 측정하였으며, 두 변형의 차이를 통해 얻어지는 상대 변위를 이용하여 베어링의 축 방향 강성을 계산하였다. 또한 실험 결과를 예측 결과와 비교하여 검증하였다.

통반칸 등⁽⁴²⁾은 테이퍼 롤러 베어링으로 지지되는 스핀들에서 베어링의 위치가 미치는 영향과 관련하여 해석적인 연구를 수행하였다. 베어링의 위치에 따라 스핀들의 피로 수명, 고유 진동수, 그리고 정적 강성이 어떻게 다른지 비교하였다. 해석 결과 베어링의 위치에 따른 피로 수명과 정적 강성의 영향은 매우 유사한 경향성을 보였다. 반면, 고유 진동수는 피로 수명 및 강성과 다른 경향을 보였다. 이에 따라 스핀들의 피로 수명, 강성, 고유 진동수의 목표에 따라 베어링 시스템의 설계가 이루어져야 함을 보였다.

5. 마그네틱 베어링

김성학 등⁽⁴³⁾은 마그네틱 베어링을 사용한 초임계 이산화탄소 압축기의 유체 불안정성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과, 초임계 이산화탄소 압축기 내부의 유체 휘돌림 효과에 의한 불안정성이 발생하였으며, 이로 인해 감쇠가 감소하는 것을 확인하였다. 감소한 감쇠는 마그네틱 베어링의 PID 출력 제어 값을 높여주는 것을 통하여 개선하였다. 이를 통해 각 주파수 영역에서 발생하는 불안정성은 마그네틱 베어링의 제어를 통해 개선할 수 있음을 보였다.

또한 김성학 등⁽⁴⁴⁾은 마그네틱 베어링을 사용한 가공기용 고속 스핀들 개발에 대한 연구를 수행하였다. 마그네틱 베어링의 낮은 마찰과 능동적인 제어를 통해 소음 작고, 효율이 우수한 고속 스핀들을 설계하였다. 사용한 마그네틱 베어링은 제작이 용이한 8극 Hetero Polar 타입이며, 와전류 손실을 줄이기 위해 회전자에 적층된 전기강판을 사용하였

다. 스핀들 축은 원심력과 고온 가공 환경을 고려한 유한요소해석을 통해 치수를 검증하였으며, 각 부위에 가해지는 응력을 예측하여 설계에 응용하였다. 또한 개발한 스핀들의 무부하 실험을 통해 45,000 rpm까지 안전 운전을 확인하였다.

권은상 등⁽⁴⁵⁾은 무급유 칠러 압축기에 적용된 마그네틱 베어링의 파라미터 불확실성에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 마그네틱 베어링의 자기력 모델과 바이어스 전류를 이용해 축 방향 힘을 선형적으로 계산하였으며, 가공 공차 및 정밀도, 회전체 질량, 전류 증폭기 오차 등이 액츄에이터 상수와 개루프 강성에 미치는 불확실성을 분석하였다. 이에 따라 가공과 조립 오차에 따른 불확실성이 가장 두드러짐을 확인하였으며, 특히 중심오차에 의한 불확실도가 개루프 강성의 불확실도에 가장 큰 영향을 미침을 보였다.

6. 구조 감쇠 댐퍼

6.1 와이어 메쉬 댐퍼

와이어 메쉬 댐퍼는 극한 환경 속에서도 소재 특성을 바탕으로 우수한 감쇠 특성을 보존할 수 있으며, 히스테리시스 감쇠를 가지기 때문에 별도의 부가적인 감쇠 시스템이 필요 없는 장점을 가지고 있다. 신세기와 류근⁽⁴⁶⁾은 최근 진행되고 있는 고속 회전기계에 적용되는 와이어 메쉬 댐퍼의 연구 동향에 대한 연구를 수행하였다. 와이어 메쉬 댐퍼를 활용하여 극저온 환경, 작동 조건, 베어링 적용에 따른 실험적 연구들에 대하여 정리하였다. 또한, 신세기와 류근⁽⁴⁷⁾은 극저온 터보기계에 적용하기 위한 와이어 메쉬 댐퍼의 동적 계수를 실험적으로 규명하기 위한 실험장치를 설계하였다. 와이어 메쉬 댐퍼의 동적 계수와 에너지 소산 특성을 나타내는 손실 및 마찰 계수를 측정하기 위한 실험장치 설계와 실험방법에 대해 소개하였다. 실험용 와이어 메쉬 댐퍼는 밀도 30%, 40%, 50 %를 가진 구리 소재를 사용하였고, 작동유체는 극저온 유체인 액체질소를 통해 와이어 메쉬 댐퍼의 성능 평가 및 예측을 할 수 있도록 설계하였다.

7. 실

7.1 페이스 실

페이스 실은 회전 기계의 누수를 방지하기 위한 요소 부품 중 하나로, 로터와 스테이터 사이의 형성된 유막의 압력으로 기밀을 유지하는 축 밀봉 장치이다. 최승호 등⁽⁴⁸⁾은 페이스 실의 마찰, 누설, 동특성 향상에 관한 해석적 연구와 실험적 연구에 대한 분석을 진행하였다. 배준환 등⁽⁴⁹⁾은 한국형 발사체(KSLV-II)에 사용되는 75톤급 개량형 미케니컬 페이스 실의 누수 및 내구 성능을 실험을 통해 검증하였

다. 개량형 미케니컬 페이스 실은 기존 설계안에 비해 연료-카본 접촉 면적 및 카본 노즈 높이가 감소하였으며 카본 접촉면에서의 누설 저감을 위해 벨로우즈 강성이 증가되었다. 개량형 미케니컬 페이스 실의 누수 성능을 검증하기 위해 정적 및 동적 누설 성능 시험이 진행되었으며, 정적 누설량은 1.2 g/min 으로 기존 대비 80% 이상 감소하였고, 동적 누설량은 0.2 g/min 으로 90% 이상 감소하여 누설 성능이 크게 향상되었다. 내구 성능 시험 평가에서는 일정한 회전 속도와 차압 조건에서 시험을 수행한 후 카본의 마모량 및 파손 여부를 관찰하여 시험의 내구성을 확인하였다. 1,500초의 내구 성능 시험에서 개량형 미케니컬 페이스 실의 카본 누적 마모량은 164 μm , 평균 마모율은 0.1094 $\mu\text{m/s}$ 로 나타났다.

7.2 래버린스 실

래버린스 실은 회전기계의 누설 방지를 위해 사용되는 요소부품으로, 저렴한 가격, 간단한 구조, 우수한 내구성능을 갖추어 자주 사용된다. 래버린스 실은 회전부와 비회전부의 이(tooth)를 통해 형성되는 간극과 공동(cavity)을 통해 기밀을 유지한다. 이에 많은 연구자들이 래버린스 실의 누설 성능을 향상시키기 위해 간극 내부 유동 해석, 간극 형상에 따른 유동특성 해석 등 많은 연구들이 진행되고 있다. 문형욱 등⁽⁵⁰⁾은 래버린스 실이 적용된 임펠러에 의해 발생하는 추력을 예측하기 위해 임펠러 후면과 래버린스 실의 압력 분포 및 누설 유량에 대한 동시해 해석 모델을 개발하였다. 동시해 해석 모델을 통한 임펠러 후면의 압력강화와 래버린스 실의 공동 압력 해석 결과를 CFD 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 개발된 동시해 해석 모델을 이용하여 임펠러의 회전속도, 래버린스 실의 클리어런스, 이(tooth)의 개수, 임펠러 케이싱 사이의 간극의 변화와 임펠러에서 발생하는 추력과 누설 유량에 미치는 영향을 확인하였다.

하윤석 등⁽⁵¹⁾은 CFD를 활용하여 소규모 수차의 실링 유닛 형상에 따른 누설 및 동적 특성에 대한 해석을 진행하였다. 해석은 DN 15만 수차 모델을 기반으로 진행하였으며 래버린스 실 높이와 간극 간의 비율 $H/c = 150$ 이상인 경우 누설 유량이 증가하는 것을 보였다. 이는 H/c 가 클수록 래버린스 실링 유닛 안의 Vortex가 감소하여 누설 유량의 에너지 손실 증가하기 때문이다. 이를 통해 적합한 실링 유닛 설계를 통해 효과적으로 누설 유량을 줄일 수 있음을 확인하였다.

박준혁 등⁽⁵²⁾은 터보압축기 임펠러 후면에 반경방향으로 설치한 스트러스트 래버린스 실이 임펠러 추력에 미치는 영향에 대한 해석을 진행하였다. 해석이 진행된 스트러스트 래버린스 실은 일정한 간격으로 6개의 이(tooth)를 포함하며 100 krpm으로 회전한다. 이를 통해 회전부와 비회전부 사

이 간극에서의 모터 내부와 압축기 토출부와의 차압으로 인해 누설 유량을 감소시켜 압축기에 작용하는 추력을 줄일 수 있음을 확인하였다. 허민석 등⁽⁵³⁾은 가스터빈 블레이드 팁에서의 계단형 래버린스 실의 간극 변화에 따른 누설 특성 변화를 CFD 해석을 통해 진행하였다. 해설 결과, 간극의 크기가 증가함에 따라 유량함수가 지속적으로 감소하지만, 일정 간극 크기 이상으로 증가할 경우 오히려 유량함수가 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 이와 이 사이의 공동 면적 대비 간극의 크기가 중요한 요인인 것을 확인하였다. 백승일 등⁽⁵⁴⁾은 직선형 래버린스 실의 간극, 공동 폭, 이 상류각, 이 높이, 이 개수, 로터 반지름 등 설계 변수들의 변화가 누설유량과 토출 계수에 미치는 영향에 대해 RANS 전산유체역학 해석을 진행하였다. 이를 통해 간극을 작게 하고 이 개수를 증가시키며 로터 반지름을 작게 하면 누설유량과 토출계수가 감소하였다. 또한 이 상류각과 공동 폭을 증가시켜도 토출계수는 감소하지만 한계가 있다는 점을 보였다. 손대오 등⁽⁵⁵⁾은 CFX를 통해 Rub-groove 마모형상에 따른 누설량과 동특성을 분석하였다. Rub-groove는 비회전자에 있는 래버린스 실에 의해 회전자가 마모되는 것으로, 연구 결과, 동특성계수는 홈이 깊어질수록 낮아지지만 특정 깊이를 지나면 다시 높아지는 경향을 확인하였고 누설량의 경우 홈이 깊어질수록 줄어드는 경향을 확인하였다. 이를 통해 최적화 된 Rub-groove의 경우 기밀 효과를 얻을 수 있는 것으로 예측하였다.

래버린스 실은 간극이 좁을수록 누설 성능이 개선되지만, 간극이 너무 좁은 경우 회전부와 비회전부의 마찰이 발생하여 내구성능에 악영향을 끼칠 수 있다. 이에 간극에서 발생하는 마찰로 인한 성능 저하를 방지하기위해 허니컴 래버린스 실이 사용된다. 조시영 등⁽⁵⁶⁾은 CFD를 통해 허니컴 직경과 간극의 크기 및 이빨의 개수의 변화에 따른 계단형 허니컴 래버린스 실의 누설 특성 변화에 대해 수치해석을 진행하였다. SST(shear stress transport)난류모델을 적용해 경계조건으로는 출구의 전압력(total pressure)을 대기와 같은 1기압으로 설정하였고, 출구 조건에 따른 압력비(pressure ratio)를 1.1~3.0으로 설정하여 입구조건의 전압력 조건을 설정하였다. 해석 결과를 솔리드 래버린스 실과의 성능 비교를 진행하였다. 일반적으로 허니컴 래버린스 실은 솔리드 래버린스 실보다 누설 성능이 저하된다. 하지만 허니컴 직경이 작고 간극 크기가 넓으면 이빨의 개수가 늘어날 경우 솔리드 래버린스 실과 비슷한 누설 성능이 나타나는 것을 확인하였다.

이정인 등⁽⁵⁷⁾은 스웰 브레이크가 설치된 래버린스 실의 누설량과 입구 유속에 대해 하이브리드 방법으로 해석을 시도하였다. 하이브리드 방법은 CFD 해석 결과를 Bulk-Flow 방법의 입구 조건으로 사용하는 해석방법으로 하이브리드 방법 해석 결과와 Bulk-Flow 해석 결과, CFD 해석 결과와

의 비교를 진행하였다. 하이브리드 방법은 원주 방향 유속 해석 결과에서 CFD 해석과 비슷하게 나타났고 누설량 해석 결과는 Bulk-flow 해석과 동일하게 나타났다. Sanjar Mamatov 등⁽⁵⁸⁾은 래버린스 실과 플레인 실의 간극과 축 직경에 따른 누설 성능에 대한 CFD 해석과 열역학적 분석을 진행하였다. 해석결과는 간극과 축 직경 치수가 증가할수록 플레인 실 보다 래버린스 실에서 더 나은 누설 성능을 보였고, 배수 온도는 래버린스 실이 플레인 실 보다 약 17% 정도 더 높음을 보였다.

이수인 등⁽⁵⁹⁾은 허니콤 랜드 실의 다양한 형상 변수에 따라 기밀 성능에 미치는 영향에 대한 실험을 진행한 후 솔리드 래버린스 실의 실험 결과와 비교하였다. 실의 형상 변수는 실 종류(직선, 계단), 이 개수, 간극, 셀 직경이며 이 두께, 이 앞 각도, 셀 높이, 셀 벽두께는 고정하였다. 입·출구 압력비는 1.1에서 3.0까지 조정하며 실험을 진행하였다. 실험 결과, 설정한 실 형상 변수가 허니콤 랜드 기밀 성능에 미치는 영향이 솔리드 랜드에는 다르게 나타나 더 정확한 예측을 위하여 추가적인 형상 변수에 대한 실험적, 해석적 데이터의 확보가 필요하다.

7.3 브러쉬 실

이경호와 하태웅⁽⁶⁰⁾은 CFD 분석을 통해 하이브리드 브러쉬 실 위치와 간극에 따른 회전체동역학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 하이브리드 브러쉬 실은 브러쉬 실의 위치에 따라 SSB(두 개의 래버린스 이와 후면에 위치한 하나의 브러쉬 실)와 BSS(두 개의 래버린스 이와 전면에 위치한 하나의 브러쉬 실) 타입으로 나뉘며, 두 가지 타입에 대한 회전체동역학적 특성을 비교하였다. 해석 결과 WFR(Whirl Frequency Ratio)의 경우 SSB 타입이 BSS 타입보다 작게 나타났으며 회전체 시스템에서 더 안정하다는 것을 보였다. 두 타입 모두 누설량은 간극이 작을수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 하이브리드 브러쉬 실의 해석결과를 바탕으로 스팀 및 가스 터빈에 장착되는 실의 설계에 응용할 수 있다고 제시하였다.

7.4 기타 실

김영찬과 김정식⁽⁶¹⁾은 MSC.MARC 해석프로그램을 통해 실 형상에 따라 장착 전과 후의 힌과 변형량에 대한 연구를 수행하였다. Wu 등⁽⁶²⁾은 새로운 나선형 그루브 표면을 가진 실에 대해 소개하였다. CFD 해석을 통해 매끈한 그루브 표면을 가진 실과 유동 특성을 비교하였다. 해석 결과, 나선형 그루브 표면을 가진 실은 압력장을 형성하였고, 강성 및 누설 특성이 향상되는 것을 확인하였다. 이를 통해, 실 표면에 나선형 그루브를 형성함으로써 동압 특성을 향상 시킬 수

있고, 마찰 및 마모를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 우성준 등⁽⁶³⁾은 CFD를 통해 헬리컬 그루브(Helical Groove) 펌프 실의 누설 특성에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 해석 결과, 고정자와 회전자 양쪽 모두 헬리컬 그루브가 형성되었을 때 누설 특성이 향상되는 것을 파악하였다. 그루브 두께와 깊이가 작을수록 유체 순환이 원활이 이루어지지 않고, 증가할수록 유체와 접촉하는 면적이 커지게 되므로 누설량이 증가하는 것을 확인하였다. 따라서, CFD 분석을 바탕으로 향상된 모델을 소개하였고, 누설량은 1.113 kg/s에서 0.518 kg/s로 감소시켰다.

박준혁 등⁽⁶⁴⁾은 정적 실의 간극 및 압력비에 따른 누설량과 실 하단의 압력분포에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 작동유체인 공기를 통해 실 패드와 베이스 플레이트 사이의 간극과 압력 분포를 측정하였다. 실험 결과, 패드와 플레이트의 간극은 10 μm - 50 μm 까지 변동하였고 간극과 압력비가 작을수록 누설 성능이 향상되는 것을 파악하였다. 또한 압력비가 작을수록 실 패드 선단에서 발생하는 압력강하가 감소하는 것을 보였다. 강경대⁽⁶⁵⁾는 편심을 변화에 따른 Piston-ring과 Side-plate 실의 감쇠 특성에 대한 연구를 수행하였다. 간극은 0.1 mm, 편심을 0~0.7을 갖고 있는 실을 사용하여 시험 장치를 통해 추정된 감쇠계수와 이론적으로 예측한 값을 비교하였다. 실험결과, 일정 편심을 영역 이상에서는 예측된 값과 차이를 보였다.

배준환 등⁽⁶⁶⁾은 수정된 후방 플로팅 실을 적용한 7톤급 터보펌프 산화제 펌프의 진동 및 압력 측정에 대한 연구를 수행하였다. 노즈의 직경만 다른 두 개의 플로팅 링에 대해 터보펌프 실매질 성능 시험을 수행하였다. Brass 재질의 플로팅 링 실과 작동유체는 액체산소를 사용하였다. 압력 섭동과 정압 신호를 계측하여 주파수 분석을 통해 플로팅 링 노즈의 위치와 관계없이 회전수 성분과 관련된 특이 주파수 성분들이 관측되었음을 보였다. 노즈 직경이 작은 플로팅 링은 외력에 따른 이동성이 높아, 안정된 자세 제어가 어려워 강한 압력 섭동이 발생할 수 있다. 그리고 노즈 접촉면에서 마찰 흔적이 발생한 것을 확인하였다. 따라서 노즈 위치에 따른 접촉압과 마찰력이 플로팅 링의 거동 안정성에 큰 영향을 끼치는 것을 파악하였다.

8. 결 론

2020년에는 전체적으로 공기(가스)베어링 관련 연구가 가장 많이 발표 되었다. 회전기계 시스템이 복잡해짐에 따라 시스템 운영 신뢰도 확보 및 운전안정성 확보를 위한 성능예측 및 설계검증 관련한 연구를 비롯하여, 오일 공급 장치를 필요하지 않은 동압베어링에 대한 연구와 윤활유 및 베어링의 온도가 미치는 영향에 대한 연구가 다수 진행되었다. 구름베어링의 형상 및 위치가 미치는 영향에 대한 연구

및 마그네틱 베어링 연구 또한 다수 진행되었다. 실과 관련된 연구에서는 CFD를 활용한 연구가 활발히 이루어졌다. 반면, 댐퍼 및 오링 등 감쇠 요소부품에 대한 연구는 상대적으로 연구가 많이 이루어지지 않았다.

매년 이어지고 있는 국내의 회전체동역학 분야의 연구 성과들을 살펴보면, 다양한 분야에 응용되는 유체기계에 적용하기 위한 베어링과 실 등의 연구는 꾸준히 활발히 이어지고 있는 것을 알 수 있다. 이 분야의 해석적 연구가 실험적 연구보다 상대적으로 많이 이루어지고 있어, 향후에는 예측된 회전체의 동적 거동을 비롯하여 베어링, 실, 댐퍼 등의 정적, 동적 특성을 실험적으로 측정하고 평가하는 연구가 보다 더 활발히 이루어질 것으로 기대된다.

후 기

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

References

- (1) Lim, W. C. and Kim, H. S., 2020, "AI-based turbine fault diagnosis with physical model-based data augmentation," Proceedings of the KSNVE Spring Conference, p. 95.
- (2) Kang, H. S., Choi, W. S., Jang, S. H., Lee, S. M., and Bang, M. H., 2020, "Development and Implementation of an Optimal Operation and Maintenance System for Gas Turbines," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 44, No. 7, pp. 529~538.
- (3) Baek, S. J., Namgung, K. C., and Oh, H. Y., 2020, "Supervised Discretization of Multivariate Sensor Data for Fault Detection in Bearing Shaft Systems," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 44, No. 1, pp. 63~69.
- (4) Kong, J. S., Ha, T. W., and Lee, Y. B., 2020, "Study of an Oil Whip and Oil Whip Initial State Detect in Rotating Machine Using by Convolution Neural Network," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 23, No. 3, pp. 05~12.
- (5) Jeon, S. M. and Choi, C. H., 2020, "Rotordynamic Design of Fuel Pump-Turbine Rotor System for KSLV-IIA Upgrading Engine," Proceedings of the KFMA Annual Conference, pp. 46~47.
- (6) Kwak, H. D. and Choi, C. H., 2020, "Preliminary Rotordynamic Design of Rocket Engine ElecPump," Proceedings of the KFMA Annual Conference, pp. 44~45.
- (7) Hwang, S. H. and Kim, T. H., 2020, "Rotordynamic Performance Predictions of a Turbocharger Supported on Gas Foil Bearings with Beam-Foils-Effects of Beam-Foil Designs," Proceeding of the KSNVE Autumn Conference, p. 128.
- (8) Hwang, S. H., Baek, D. S., and Kim, T. H., 2020, "Rotordynamic Performance Predictions of High Speed Rotating Machinery Supported on Beam Type Gas Foil Journal Bearing," Proceedings of the KFMA Annual Conference, pp. 50~51.
- (9) Yi, H. W. and Ryu, K., 2020, "Prediction of Rotordynamic Characteristics of Electric Pumps for Liquid Rocket Engines Supported on Fluid Film Bearings: Case Study for Various Rotor Configurations," Proceedings of the Tribology and Lubricants Autumn Conference, p. 166.
- (10) Kim, Y. C. and Kim, Y. C., 2020, "Verification of the Rotor Dynamics Design of Large Gas Turbine for 270 MW Class Power Generation," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 23, No. 3, pp. 28~34.
- (11) Park, J. S., Choi, J. H., Kim, D. J., and Sim, K. H., 2020, "Rotordynamic Model Development and Critical Speed Estimation Through Modal Testing for the Rotor-Bearing System," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 5, pp. 279~289.
- (12) Jo, H. Y., Choi, S. P., Jo, Y. C., and Ha, H. C., 2020, "Cooling performance improvement for forced air cooling vertical bearing," Proceedings of KSFM Winter Conference, pp. 204~205.
- (13) Song, A. H., Jo, H. J., Choi, S. P., and Kim, S. J., 2020, "Experimental Study on the Characteristics of Misaligned Self-equalizing Tilting Pad Thrust Bearing," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 1, pp. 27~33.
- (14) Jang, M. J., Kim, Y. J., Kim, B. J., and Suh, J. H., 2020, "Dynamic Analysis of Fixed Pad Bearings with JFO Boundary Condition," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 291~299.
- (15) Song, A. H., Choi, S. P., and Kim, S. J., 2020, "Operating Performance Limitations of Tilting Pad Thrust Bearings Due to Misalignment," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 2, pp. 82~87.
- (16) Kim, K. B., Hong, G. H., and Jang, G. H., 2020, "Dynamic analysis of a flexible shaft in a scroll compressor considering oil film pressure and solid contact of journal bearing," Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, p. 111.
- (17) Cho, H. W., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, "Prediction of performance for rotational speed and load of Oil Journal bearings," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 172~173.
- (18) Hong, G. H., Kim, K. B., Park, Y. J., and Jang, G. H., 2020, "Analysis of Stribeck curve of bearing-rotor system and investigation of lubrication characteristics," Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, p. 202.

- (19) Shin, S. H., 2020, "Bearing Temperature Fluctuation in Gas Compressor for ASU Plant," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 313~317.
- (20) Cho, H. W., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, "Experimental Study on Load Bearing Capacity and Friction Loss of Plan Journal Bearing," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 206~207.
- (21) Baek, D. S., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, "Comparison of Structural Performance Prediction and Measurement for Beam Type Gas Foil Journal Bearing," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 48~49.
- (22) Baek, D. S., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, "Predictions of Structural Stiffness of Gas Foil Journal Bearings with Beam-Foil and Experimental Validations," Proceedings of the KTS Autumn Conference, pp. 191~192.
- (23) Baek, D. S., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, "Experimental Study on Load Capacity and Friction Loss of Gas Foil Journal Bearing," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 210~211.
- (24) Lee, S. J., Ryu, K., Jeong, J. H., and Ryu, S. J., 2020, "On the Bearing-to-Bearing Variability in Experimentally Identified Structural Stiffnesses and Loss Factors of Bump-Type Foil Thrust Bearings under Static Loads," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 6, pp. 332~341.
- (25) Hwang, S. H., Baek, D. S., and Kim, T. H., 2020, "Rotordynamic Performance Predictions of High Speed Rotating Machinery Supported on Beam Type Gas Foil Journal Bearing," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 50~51.
- (26) Hwang, S. H. and Kim, T. H., 2020, "Rotordynamic Performance Predictions of a Turbo Compressor Supported on Gas Foil Bearings with Beam-Foils-Effects of Beam-Foil Designs," Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, p. 128.
- (27) Park, J. H. and Kim, T. H., 2020, "Rotordynamic Performance Predictions of a Turbo Compressor Supported on Gas Foil Bearing - Effects of Thrust Runner Locations," Proceedings of the KTS Autumn Conference, pp. 193~194.
- (28) Lim, H. M., Kim, K. M., and Ryu, K., 2020, "Load Capacity Prediction of Hydrodynamic Step Thrust Bearings: Effects of Step Configuration," Proceedings of the KTS Autumn Conference, p. 264.
- (29) Kim, Y. J., Suh, J. H., Kim, B. J., and Jang, M. J., 2020, "Prediction of Gas Journal Bearing Performance by Finite Element Method," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 311~313.
- (30) Lee, C. W. and Ryu, K., 2020, "Static Load Characteristics Measurements of Fluid Film Hybrid Thrust Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps of Reusable Launch Vehicles: Pneumatic Hammer Instability While Supplying Compressed Air," Proceedings of the KTS Autumn Conference, p. 164.
- (31) Ryu, D. W., Lee, J. H., Park, S. S., and Kim, G. H., 2020, "Effect of Shape Error of an Air Stage on Motion Precision," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 2, pp. 68~74.
- (32) Park, S. J., Park, S. S., and Kim, Y. H., 2020, "Effect of Hydrodynamic Thrust Bearing on the Behavior in a Reciprocating Compressor," Proceedings of the KTS Autumn Conference, p. 201.
- (33) Kim, B. J., Kim, Y. J., Jang, M. J., and Suh, J. H., 2020, "A Study on the Texturing Effect of Journal Bearing Using Average Reynolds Equation," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 298~290.
- (34) Lee, D. H., Kim, B. O., Park, M. R., and Yoon, E. S., 2020, "Development of Pump-Drive Turbine with Hydrostatic Bearing for Supercritical CO₂ Power Cycle Application," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 3, pp. 153~160.
- (35) Kim, K. M. and Ryu, K., 2020, "Fluid Film Hybrid Journal Bearings for Liquid Rocket Engine Turbopumps of Reusable Launch Vehicles: Design of Component-Level Test Rig for Performance Measurements and Experimental Evaluation Methods," Proceedings of the KTS Autumn Conference, p. 165.
- (36) Kim, K. H., Kim, K. B., Hong, G. H., and Jang, G. H., 2020, "Static and Dynamic Analysis of Externally Pressurized Fluid Bearings in the General Rotor-Bearing System with Five Degrees of Freedom," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 73~74.
- (37) Kim, K. M. and Ryu, K., 2020, "Prediction of Fluid Film Bearing Characteristics Using Commercial Multiphysics Simulation Software: Comparisons to Open Literature," Proceedings of the KTS Autumn Conference, p. 262.
- (38) Rivera, G., Amri, M. N. A., Tong, V. C., and Hong, S. W., 2020, "Study on Ball-Race Contacts of Angular Contact Ball Bearing Subjected to Skidding," Proceedings of the JKSPE Annual Conference, p. 495.
- (39) Kim, Y. C. and Kim, J. S., 2020, "A Study of the optimization of seal shape of deep groove ball bearing," Proceedings of the Tribology and Lubricants Autumn Conference, p. 245.
- (40) Kwak, J. S., Park, Y. W., Kim, C. J., and Kim, T. W., 2020, "Comparison of Rolling Element Loads and Stress-based Fatigue Life Predictions for Ball Bearings," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 6, pp. 371~377.
- (41) Seo, C. W., Choi, J. H., Jeong, E. W., and Hong, S. W., 2020, "Experimental Study on Axial Stiffness of Crossed Roller Bearings," Proceedings of the JKSPE Annual Conference, p. 494.
- (42) Tong, V. C., Hwang, J. H., and Hong, S. W., 2020,

- “Effects of Bearing Locations on the Characteristics of a Spindle System Supported by Tapered Roller Bearings,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 37, No. 8, pp. 615~624.
- (43) Jin, S. H., Cha, J. E., Chang, J. U., Choi, S. H., and Ahn, H. J., 2020, “Controlling the Fluid Induced Instability of a Supercritical CO₂ Compressor Supported by Magnetic Bearing,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 37, No. 10, pp. 737~742.
- (44) Jin, S. H., Choi, S. H., Lee, Y. H. Chang, J. U., and Ahn, H. J., 2020, “Development of High-Speed Spindle with Magnetic Bearings for Processing IGT(Inner Grooved Copper Tube),” *Proceedings of the the JKSPPE Annual Conference*, pp. 31~32.
- (45) Kwon, E. S., Noh, M. G., Lee, N. S., Baek, S. K., and Park Y. W., 2020, “Uncertainty Analysis of Magnetic Bearing Parameters in Oil-Free Chiller Compressors,” *Proceedings of the KSME*, pp. 1565~1566.
- (46) Sin, S. K. and Ryu, K., 2020, “Research Trends of Wire Mesh Dampers for High-Speed Rotating Machinery,” *Proceedings of the KTS Autumn Conference*, p. 265.
- (47) Sin, S. K. and Ryu, K., 2020, “Wire Mesh Dampers for Cryogenic Turbomachinery: A Test Rig for Experimental Identification of Dynamic Force Coefficients,” *Proceedings of the KSPE Autumn Conference*, p. 35.
- (48) Choi, S. H. and Ryu, K., 2020, “Static and Dynamic Forced Performance of Face Seals for Turbomachinery : Literature Review,” *Proceedings of the KTS Fall Conference*, p. 266.
- (49) Bae, J. H., Kwak, H. D., Lee, C. H., and Choi, J. S., 2020, “Development of Mechanical Face Seal in 75-tonf Turbopump for Leakage Reduction,” *Tribology and Lubricants*, Vol. 36, No. 2, pp. 75~81.
- (50) Mun, H. W. and Kim, T. H., 2020, “Effect of Journal Labyrinth Seal Design on Thrust Force and Leakage of an Impeller,” *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 23, No. 4, pp. 12~24.
- (51) Ha, Y. S. and Lee, Y. B., 2020, “Numerical Study on Labyrinth Sealing Unit of DN 150,000 Hydraulic Turbine Runner using Computational Fluid Dynamic,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 283~284.
- (52) Park, J. H. and Kim, T. H., 2020, “Effects of Thrust Labyrinth Seal Design on Thrust Force of an Impeller,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 170~171.
- (53) Hur, M. S., Moon, S. W., Kim, T. S., and Kim, D. H., 2020, “Analysis of leakage characteristics according to the clearance change of stepped labyrinth seal,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 251~252.
- (54) Baek, S. I. and Ahn, J., 2020, “Effect of geometry of straight-through labyrinth seal on discharge coefficient,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 66~67.
- (55) Son, D. O. and Suh, J. H., 2020, “Numerical sturdy of dynamic coefficient in Labyrinth Seals with Shpaes of Rub-Groove.” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 285~286.
- (56) Jo, S. Y., Hur, M. S., Moon, S. W., Kim, T. S., and Kim, D. H., 2020, “Numerical study of geometrical parameters on the honeycomb stepped labyrinth seal,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 64~65.
- (57) Lee, J. I. and Suh, J. H., 2020, “Hybrid Method for Rotordynamic Analysis of Labyrinth Seal With a Swirl Brake,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 287~288.
- (58) Mamatov, S., Shin, D. W., and Park, S. S., 2020, “Investigation on Leakage Characteristics of Two Kinds of Injection-type Shaft Seals Using CFD,” *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 635~645.
- (59) Lee, S. I., Kwak, J. S., Kim, D. H., and Jung, I. Y., 2020, “Study on the sealing performance of the straight and stepped labyrinth seals with honeycomb land: effects of tip clearance, number of teeth, and cell diameter,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 68~69.
- (60) Lee, K. H. and Ha, T. W., 2020, “Analysis of Hybrid Brush Seal Rotordynamic Coefficients According to Position of Brush and Clearance Using 3D CFD,” *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 90~102.
- (61) Kim, Y. C. and Kim, J. S., 2020, “A Study of the optimization of seal shape of deep groove ball bearing,” *Proceedings of the KTS Autumn Conference*, p.245.
- (62) Wu, Y. Z., Chen, H. L., Uzojinwa, B. B., Uzojinwa, B. J., and Xu, D., 2020, “Hydrodynamic Characteristics of Cylindrical Spiral Grooves for Pump Annular Seals,” *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 556~566.
- (63) Woo, S. J., Jang, H. S., Kwak, H. S., Moon, Y. H., and Kim, C., 2020, “Leakage analysis of helical grooved pump seal using CFD,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, No. 10, pp. 4183~4191.
- (64) Park, J. H., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2020, “Experimental Study on Static Leakage Performance of Static Seals,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 208~209.
- (65) Kang, K. D., 2020, “Comparison of Eccentricity Effects on Damping Coefficients for Squeeze Film Dampers with a Central Groove,” *Proceedings of the KFMA Annual Conference*, pp. 72~73.
- (66) Bae, J. H., Kwak, H. D., Choi, C. H., and Choi, J. S., 2020, “Measurements of Vibration and Pressure of an Oxidizer Pump for a 7-tonf Turbopump with a Modified Rear Floating,” *Tribology and Lubricants*, Vol. 36, No. 5, pp. 253~261.