

2023년 회전체동역학 분야 연구동향

김서영* · 이지환* · 이정인** · 김보람** · 이민혁** · 권혁성** · 서준호*†

1. 서 론

본 특집 논문에서는 2023년 발간된 국내 학술대회 발표자료 및 학술지 중에서 회전체동역학 관련된 연구를 분석하여 정리하였다. 회전체동역학은 그 단어에서 의미하는 바와 같이 회전하는 구조물의 동적 특성을 연구하는 학문이다. 하지만 이러한 회전하는 구조물의 진동 특성은 회전하지 않는 구조물의 진동과 다른 특성을 가진다. 그 중에서도 회전기계를 지지하는 베어링에서 발생하는 윤활, 마찰 및 마모 현상은 회전체 동적 특성의 많은 부분 지배하며, 때로는 작동유체의 누설을 방지하기 위해 사용되는 씰에서 발생하는 유체역학적인 힘이 회전체의 진동문제를 일으키기도 한다. 그 외에도 모터, 댐퍼, 임펠러 및 기어 요소 등에서 발생하는 힘이 회전체 진동문제와 깊은 관련이 있다.

본 특집 논문에서 다루는 관련 연구들을 보면 알겠지만, 회전체 구조물의 진동만을 다루는 연구는 흔하지 않으며, 대부분의 연구들은 회전체 구조물 주변의 기계요소와 관련된 연구들이다. 이 중에서도 베어링(저널베어링, 구름베어링, 자기베어링) 및 씰과 관련된 연구들이 주를 이룬다.

2. 회전체동역학

회전체 시스템은 디스크 손상, 베어링 결함 등의 여러 요인에 의해 고장이 발생할 수 있으며 이는 전체 시스템의 효율성과 안정성을 크게 저하시킬 수 있다. 따라서 회전체 시스템의 효율성과 안정성을 확보하기 위해 정확한 고장 진단, 해석 기법이 제안되고 있다.

이정욱 등⁽¹⁾은 회전 축계 형상과 베어링 위치가 정해진 상태에서 최적의 베어링 설계를 위한 모델을 개발하였다. 유전알고리즘을 사용하였으며 설계변수로는 베어링 종류, 축경비, 예압량, 하중 방향, 간극률과 윤활유 종류를 사용하였다.

이준규 등⁽²⁾은 MBD 모델과 PR(확률 잔차) 보정을 통해 회전체 시스템의 정상 및 고장 데이터 부족 환경에서 효율적인 시뮬레이션 모델 제작과 데이터 생성 가능성을 보였으며,

Bently-Nevada Rotor Kit를 사용한 실험으로 모델을 검증하였다.

서동찬 등⁽³⁾은 불연속적인 구조를 갖는 타이로드 로터의 커빅클러링의 탄-소성 해석을 통해 접촉 강성을 예측하였으며, 이를 고려한 회전체 시스템을 Timoshenko 빔 모델을 통해 유한요소 해석을 진행하여 위험 속도와 모드 형상을 예측하였다.

전영주 등⁽⁴⁾은 항공용 가스터빈의 엔진 축계 시스템을 모사한 모의 진동시험 장치를 개발하여 동특성을 분석하였다. 또한 2차원 해석 모델을 통한 고유 진동수와 모드형상을 모달시험과 비교 제시하였다.

이동민 등⁽⁵⁾은 소형 테스트 베드를 대상으로 다물체 동역학 기반의 회전체 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 로터-베어링 시스템의 해석을 통해 고장 데이터 생성 및 결함을 확인하였으며, 실제 테스트 베드에서 취득한 데이터를 통해 모델을 보정 및 검증을 수행하였다.

장민준⁽⁶⁾은 틸팅패드 저널베어링을 사용하는 회전체 시스템의 정적, 동적 경사 환경에서 캠벨 선도, 조화응답 해석과 과도응답 해석 등 회전체동역학 해석을 진행하였다. 저널베어링의 지지하중이 감소하고 강성이 감소할 수 있음을 보였고, 시스템의 진동이 증가할 수 있음을 확인하였다.

이동현 등⁽⁷⁾은 강체 로터에서 복소 좌표계를 기반으로 방향성 주파수 응답 함수를 활용한 회전체 동역학 해석을 소개하였다. 회전체 응답의 Conjugate 모드를 구분할 수 있고, 비등방성 로터에서 발생하는 모드별 진동의 크기를 구분할 수 있음을 확인하였다.

김원빈 등⁽⁸⁾은 수윤활 저널 베어링의 와동 점성을 고려한 전단 응력을 기반으로, 난류 영역의 Reynolds equation을 도출, Perturbed Reynolds equation을 사용해 동적 계수를 구하여 시스템 동적 불안정성을 분석하였다. 층류 해석과 비교하여 난류 해석은 편심율이 낮은 영역에서는 동일한 안정성을 보였으나, 편심율이 높은 영역에서는 불안정성 영역이 증가함을 확인하였다.

* 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

** 부산대학교 대학원 기계시스템설계 (Mechanical System Design, Graduate School, Pusan National University)

† E-mail : junhosuh@pusan.ac.kr

3. 저널베어링

오일 베어링은 윤활 유체로 오일을 사용하여 회전축과 베어링을 분리한다. 구름 베어링보다 고속에서 높은 하중 지지력을 가지고, 소음이 적으며 수명이 길다는 장점이 있다. 하지만 오일 베어링은 윤활유 온도에 따라 베어링 성능이 큰 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 따라서 베어링과 윤활유 온도가 베어링 성능에 미치는 영향을 연구하는 것이 중요하다.

3.1 동압 베어링

서동찬 등⁽⁹⁾은 틸팅 패드 저널베어링(Tilting pad journal bearing)의 하우징 조화 가진 실험을 수치적으로 모사하여 동특성을 예측하는 모델을 제시하였다. 베어링 하우징이 가진되는 상황에서 저널과 피봇의 운동 방정식을 세우고, 시간과 과도 해석으로 가진 주파수에 따른 베어링 구조물의 응답을 계산하였다. 구해진 응답을 FFT 변환하여 시스템 전달 행렬을 계산하고 동특성 계수를 예측하였다. 계산 과정에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 Instrumental Variable Filter (IVF) 법을 사용하였다. 비선형 효과를 고려하지 않고 계산한 베어링 동특성을 기존의 섭동법 결과와 비교하고, 틸팅 패드 저널베어링의 패드-피봇 간 마찰 효과에 따른 비선형성 분석을 진행하였다.

이동현 등⁽¹⁰⁾은 3차원 유한요소모델 기반의 패드 동역학 모델을 사용하여, 틸팅 패드 저널베어링에서 패드와 피봇의 탄성 변형으로 인한 베어링 성능변화를 예측하였다. 패드의 유한요소모델에서 라이닝(Lining)과 백메탈(Back metal)의 물성을 각각 고려하였다. 시스템 해석 시간을 단축하기 위해 모드 좌표 변환(Modal coordinate transformation)을 사용하였다. 피봇의 탄성 변형을 해석하기 위해 록커백(Rocker-back) 형태의 피봇의 수치해석 모델링을 수행하였다. 해석 결과 베어링 패드의 탄성 변형에 따른 예압의 변화는 강성보다 감쇠에 큰 영향을 미쳤다.

정연승 등⁽¹¹⁾은 화천 4호기 수차 발전기용 베어링의 운전 조건 및 기술 사양을 고려하여 정적 속도, 부하 차단 속도(Load rejection speed), 무구속 속도(Runaway speed)에서 베어링의 최소 유막 두께, 동력 손실량, 최대 압력 및 최대 온도 등을 해석하였다.

조현우 등⁽¹²⁾은 축의 탄성 변형에 의한 오정렬 시, 연성 엣지(Flexible edge)가 플레인 저널베어링의 정적 성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 실험 결과 연성 엣지가 존재할 때 편심과 자세각이 증가하고, 베어링 온도는 감소함을 보였다. 연성 엣지 구조가 있는 경우, 베어링에 작용하는 유막 압력으로 인해 연성 엣지의 탄성 변형이 발생하여 더 두꺼운 유막을 유지할 수 있다.

조현준 등^(13,14)은 압축기용 저널베어링과 수직형 펌프용

스러스트 베어링과 가이드 베어링의 특성을 해석하였다.

3.2 정압 베어링

이지훈 등⁽¹⁵⁾은 개발 중인 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump, RCP) 저널베어링의 설계를 위하여 베어링 재료 후보 2가지에 대해 가속 수명시험을 통한 마모평가를 수행하였다. RCP의 기동과 정지 시에만 마모가 발생하므로 RCP 설계수명 동안 발생할 수 있는 정지/기동 운전 횟수를 고려하여 마모평가를 수행하였다. 실험 결과, 2가지 후보 재료 모두 가속 수명시험 동안 극소량의 마모가 발생하였으며, 회전축계의 특성에는 영향이 없는 수준이었다.

조현우 등⁽¹⁶⁾은 간극 변화에 따른 하이브리드 저널베어링과 래버린스 실의 성능변화를 해석을 통해 예측하였다. 해석 결과, 간극은 타 조건들보다 베어링과 실 성능에 큰 영향을 미치는 설계 인자임을 확인하였다.

3.3 공기 베어링

공기 베어링은 윤활 유체로 공기를 사용하여 회전축과 베어링을 분리한다. 오일 베어링과 달리 별도의 유체 공급 시스템이 필요하지 않고, 유체 점성으로 인한 동력 손실이 적다는 장점이 있다. 그러나 공기의 점도가 낮아 오일 베어링에 비해 강성과 감쇠가 낮다.

3.3.1 동압 베어링

이정인 등⁽¹⁷⁻¹⁹⁾은 가스 포일 저널베어링의 정적 및 동적 성능에 관한 연구를 수행하였다. 접촉 알고리즘을 사용하여 포일 간 접촉과 분리, 마찰을 모델링하고 페널티 방법을 사용하여 접촉 알고리즘을 구현하였다. 저널, 유막, 포일의 지배방정식을 다변수 Newton-Raphson 방법을 적용하여 결합하고 베어링의 정적 특성을 예측하였다⁽¹⁷⁾. 또한, 가스 포일 저널베어링의 주파수 의존 동특성 계수를 예측하기 위해 실험적 방법을 모사한 수치해석 모델을 개발하였다. 과도 해석을 통해 저널에 다양한 가진 주파수의 조화력을 가했을 때 로터의 주파수 응답을 얻고 회귀 분석하여 동특성 계수를 예측하였다^(18,19).

황성호 등⁽²⁰⁻²³⁾은 다양한 작동 환경이 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 먼저 외부 가압 여부에 따른 시험을 통해 외부 가압이 가스 포일 스러스트 베어링의 마찰 토크를 감소시킬 수 있으며 회전 기기 시스템 전체적인 효율을 향상할 수 있음을 보였다⁽²⁰⁾. 또한, 다양한 축 하중 조건에서 회전각가속도 변화에 따른 베어링의 마찰계수, 부상속도, 착지 속도, 마모 거리를 실험하였다. 실험 결과, 같은 회전각가속도에서는 축 하중이 증가함에 따라 초기 시동 마찰계수는 증가하였으며, 같은 하중

에서는 회전각가속도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하였다. 회전각가속도가 증가함에 따라 시동 시 발생하는 부상속도는 증가하였고, 정지 시 발생하는 착지 속도는 감소하였다. 마모 거리는 같은 회전각가속도에서 축 하중이 증가함에 따라 증가하였고, 같은 하중에서는 회전각가속도가 증가함에 따라 마모 거리는 비선형적으로 감소하였다⁽²¹⁾. 저자는 부상속도 및 하중 지지력 평가를 통해 스러스트 러너의 표면 조도 차이가 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 낮은 표면 조도가 베어링의 마찰 및 마모를 줄이고 수명을 증대할 수 있음을 밝혔다⁽²²⁾. 냉각 유량이 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 다양한 정적 하중 조건에서 냉각 유량 공급에 따른 베어링의 온도, 마찰 토크 그리고 마찰계수를 평가하였다. 실험 결과, 냉각 유량 공급에 따라 베어링 온도가 효과적으로 감소함을 보였고, 이에 따라 공기의 점도가 감소하여 베어링의 마찰 토크 및 계수 또한 감소하였다⁽²³⁾.

3.4 수윤활 베어링

수윤활 베어링은 작동 유체로 물을 사용하여 회전축과 베어링을 분리한다. 수윤활 베어링은 주로 수력 발전소나 선박 등 오일에 의한 환경 오염을 피해야 하는 곳에서 사용된다. 그러나 물의 점도가 오일에 비해 상당히 낮으므로 충분한 유막 두께를 확보할 수 없어 베어링에서 마찰과 마모가 쉽게 발생한다.

3.4.1 동압 베어링

공호성 등⁽²⁴⁾은 수윤활용 플라스틱 베어링 소재 종류에 따른 기계적 물성 및 트라이볼로지 특성을 파악하고 이를 통하여 복합소재 개발하였다. NBR-10wt.%-변성 에폭시 소재에 윤활 첨가제로서 UHMWPE 20wt.% 및 Paraffin Wax 6wt.%를 첨가하고, 이를 격자 형태의 탄소 섬유로 강화한 복합소재가 기계적 물성, 트라이볼로지 특성 및 내하중성 측면에서 상용 제품인 Thordon 베어링의 성능을 웃도는 매우 우수한 성능이 나타남을 확인하였다.

권혁성 등^(25,26)은 혼합윤활 조건에서 운전되는 저널베어링의 접촉력과 정특성, 동특성을 예측하기 위해 베어링의 표면 거칠기를 고려한 윤활 해석을 수행하였다. 평균 레이놀즈 방정식과 Greenwood-Williamson 모델을 도입하여 유막 압력과 접촉 압력을 계산하였다.

김원빈 등⁽²⁷⁾은 외동 점성을 고려한 전단응력을 기반으로, 지배방정식인 난류 영역에서의 레이놀즈 방정식을 도출하였으며, 수학적 섭동법을 기반으로 섭동된 레이놀즈 방정식을 구하고, 유한차분법을 통해 시스템의 동적 계수를 구하였다. 이를 기반으로 수윤활 시스템의 동적 불안정성을 분석하였

다. 편심율이 낮은 영역에서는 층류 해석과 난류 해석이 거의 같은 결과를 보이지만, 편심율이 높은 영역에 대해서는 약간의 편차가 발생하였다.

정연승 등⁽²⁸⁾은 정격 속도, 부하 차단 속도(Load rejection speed), 무구속 속도(Runaway speed)에서 30MW 수차 터빈용 수윤활 베어링의 최소 유막 두께, 동력 손실량, 최대 압력 및 온도, 강성, 감쇠 계수를 해석하였다.

최태규 등⁽²⁹⁾은 수직형 펌프 하부 가이드 베어링으로 사용되는 저널베어링의 회전속도 및 하중에 따른 베어링 특성을 예측하였다. 추가로 베어링의 부분적인 마모 고려 여부에 따른 베어링 특성 변화를 확인하였다. 해석 결과 마모를 고려한 경우 마모를 고려하지 않은 경우보다 저널의 편심률이 크고, 최소 유막 두께는 작게 예측되었다. 또한 베어링의 하중 방향이 베어링 압력 생성에 영향을 미치고 이는 마모 상태가 수력학적 썸(Hydrodynamic Wedge) 효과와 관련 있음을 밝혔다.

3.5 기타 유체 베어링

3.5.1 동압 베어링

문소연 등⁽³⁰⁾은 COMSOL Multiphysics를 활용하여 원심 압축기용 킬팅 패드 저널베어링의 성능과 회전체동역학 해석을 수행하였다.

박태조 등⁽³¹⁾은 나노 윤활유의 실제 적용을 위한 기초 연구를 목적으로 열전도도와 점도의 변화가 평행 슬라이더 베어링의 열유체윤활(Thermo-hydrodynamic lubrication, THD) 특성에 미치는 영향을 CFD 해석을 통해 확인하였다. 해석 결과 열전도도와 점도가 하중 지지 능력과 마찰력에 미치는 영향은 유막의 온도 경계 조건에 따라 크게 달라졌으며 온도에 따라 증가하는 열전도도는 냉각 성능을 향상 시키지만, 하중 지지능력을 감소시키고 마찰력을 미세하게 증가시켰다. 저자는 나노 윤활유에 관한 이론적 연구에는 THD 해석이 필수적이며, 온도에 따라 달라지는 윤활유 물성과 유막의 온도 경계 조건을 필수적으로 고려해야 한다고 밝혔다.

이정욱 등^(32,33)은 축계의 형상과 베어링 위치가 이미 정해진 상황에서 최적의 저널베어링 설계 변수 선정을 위한 알고리즘을 개발하였다. 기존 문헌의 저널베어링 해석 결과를 이용하여 정특성 및 동특성 데이터베이스를 생성하고 이를 회전체 시스템 해석에 적용하였다. 저자는 유전 알고리즘을 이용하여 증폭비와 분리 여유 등으로 나타나는 회전체 시스템의 동적 안정성과 베어링 성능을 동시에 만족하는 베어링 설계 변수를 도출하였다.

이종성 등⁽³⁴⁾은 차량용 공기 압축기를 개발하는 과정에서 차량 적용 환경에서 베어링에 가해지는 내·외란을 분류하고 그 크기를 비교하였다. 또한, 차량 환경에서 발생하는 동하중을 실제 단품평가 결과와 비교하고 그 결과와 일치함을

보였다. 이러한 과정을 통해 기울기를 가지는 에어포일 베어링의 내부간극 설계 기법을 확립하였다.

4. 구름베어링

구름 베어링은 낮은 마찰, 높은 정밀도와 강성, 유지보수의 용이성 그리고 경제성 등을 이유로 자동차, 항공기 등 다양한 분야에서 사용되며, 크게 볼, 롤러 베어링의 종류로 구분 된다.

김선제 등⁽³⁵⁾은 케이지 속도 및 슬립에 의한 베어링 발열량 간의 관계를 규명할 수 있는 근사모델을 제시하였고, 이를 토대로 베어링 발열량으로부터 케이지 속도를 예상하였다.

박지수⁽³⁶⁾는 회전축 조립에 의한 영향, 온도에 의한 영향, 회전에 의한 간극 변화 영향을 고려한 베어링 작동간극 계산 수식을 수립하였고, 기존 문헌 상의 베어링의 내/외륜 온도 시험데이터를 활용, 작동 중의 베어링의 내륜, 롤러, 외륜의 반경방향 변형량과 응력, 작동간극 변화를 분석하였다.

이경구 등⁽³⁷⁾은 실제 시스템에서의 구름 베어링 수명을 FEM과 베어링엑스를 사용하여 검토하였다. 이는 베어링 장착 주변부를 강체로 고려한 경우와 주변부의 강성을 고려한 경우 2 가지에 대해 수행되었다.

이민혁 등⁽³⁸⁾은 열적 효과를 고려한 ACBB(Angular Contact Ball Bearing)의 하중분배 결과를 토대로 주요 설계 요구 조건인 강성, 피로 수명 그리고 발열량을 최적화하는 알고리즘을 제시하였다.

이어서 이민혁 등^(39~40)은 기존 Hertz 접촉 이론을 사용하던 ACBB(Angular Contact Ball Bearing) 하중 분배 이론에서 탄성유체윤활(Elasto Hydrodynamic Lubrication)을 적용하였을 때 피로수명 및 베어링의 동특성이 어떻게 변화하는지에 대해 연구하였다.

사진혁 등⁽⁴¹⁾은 아치거리의 변화가 외륜 분할 볼 베어링(Split-outer-ring 3 Point Contact Ball Bearing, OY-ACBB)의 주요 특성, 그중에서 접촉점의 변화에 어떤 영향을 미치는지 검토하였다.

김병직 등⁽⁴²⁾은 단순 추력을 받는 깊은 홈 볼 베어링에 대해 적절한 예압을 설정하는 기준을 간단한 모델로부터 유도하였다.

박신향 등⁽⁴³⁾은 CFD 해석을 통해 대류 열전달계수 상관식을 정립하였고, 열 네트워크 모델(Thermal network model)을 사용해 구름 베어링의 온도를 예측하였다.

Taylor 등⁽⁴⁴⁾은 ADORE와 FORTRAN-90을 기반으로 가스터빈 엔진의 주축용 볼 및 롤러 베어링에 대한 기하학적 구조와 입력 조건을 분석하였으며, 열 발생 및 피로 수명을 포함한 다양한 성능 변수의 개선과 설계 방법론을 제시하였다.

김태우 등⁽⁴⁵⁾은 DTRB(Double-row Tapered Roller Bearing)로 지지된 유한 요소 오버형 회전축 수치해석 모델

을 정립하였으며, DTRB의 강성 특성을 설명하고 동시에 베어링의 지지 위치, 예압, 톨러 프로파일 등과 같은 DTRB 지지 특성에 따른 RBR 시스템의 진동 특성 및 접촉 압력을 예측하였다.

김성기 등⁽⁴⁶⁾은 볼 원심력이 베어링 피로수명과 한계 운전 속도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 반경 방향의 하중이 없고 축방향 예압만을 받는 깊은 홈 볼 베어링을 대상으로 상용 해석 소프트웨어를 사용하여 베어링의 등가 기준 하중과 볼 자전/구름 비를 해석하였다.

이영도 등^(47~49)은 LNG 펌프용 볼 베어링의 열화 및 고장 발생과정에서의 케이지의 거동을 측정하였다. 이를 토대로 베어링의 고장이 발생하는 과정에서 같은 케이지의 오빗(orbit)이 선명해지고, 액체질소가 기화되는 것을 확인하였다.

이어서 이영도 등^(48~49)은 LNG 고압 펌프용 볼 베어링의 수명 시험을 진행하여 케이지가 열화됨에 따라 나타나는 케이지의 거동을 측정하고 분석을 진행하였으며, LNG 펌프용 베어링의 개발과정에서 극저온 안테론미터와 극저온 볼 베어링 시험장치, 두 가지 트리보 시험장치를 개발하였다.

5. 자기베어링

자기베어링은 일반적인 오일 베어링과 비교하여 오염, 마찰, 마모에 강하며, 하중지지 능력과 감쇠를 조절할 수 있는 장점이 존재한다.

하윤석 등⁽⁵⁰⁾은 공기 포일 베어링(AFB)와 능동 자기 베어링(AMB)을 조합한 하이브리드 스러스트 베어링을 설계하였다. 여기 신호(excitation signal)를 활용하여 베어링의 대역폭과 동적 계수를 추출하였다.

박철훈 등⁽⁵¹⁾은 하이브리드 호모폴라 자기베어링의 설계 절차를 제시하였다. 위험 속도와 불균형 응답을 예측하고, 자이로스코프 효과가 큰 로터 제어를 위해 베어링 제어기에 크로스 피드백 컨트롤러 및 불균형 제거 컨트롤러를 설계하였다. 샤프트 회전 시험과 무부하 회전 시험을 통해 베어링의 부상 성능과 제어 알고리즘의 안정성을 확인하였다.

노명규 등⁽⁵²⁾은 능동자기베어링의 궤환제어를 위한 제어기 설계의 파라미터를 sine-sweep 실험과 최소자승법을 통해 실험적으로 추정하였다.

이영환과 장지욱⁽⁵³⁾은 히트펌프 압축기의 요구 사양을 바탕으로 회전축과 자기베어링의 기본 설계를 진행하였다. RoDAP을 이용하여 회전체 시스템의 안정성 해석을 수행하였다.

6. 우주항공

임호민 등⁽⁵⁴⁾은 최대 15 krpm의 축 및 스러스트 칼라 회전 조건에서 하이브리드 스러스트 베어링의 정하중 특성과 동

하중 특성을 실험적 및 해석적으로 규명하였다. 지배방정식에서 난류 유동을 고려하였으며 축 회전 속도의 동기주파수를 적용하여 동하중 계수를 예측하였다.

허준원 등⁽⁵⁵⁾은 존의 리세스 구조를 가지는 유체 베어링은 압축성 유체를 작동 유체로 외부 가압 시 뉴매틱 해머 불안정성이 나타날 가능성이 높은 단점을 극복하는 것을 목표로, 적층 제조 공법 중 하나인 DMLM(Direct Metal Laser Melting)방식으로 다수의 오리피스 구조를 가지는 하이브리드 저널 및 스톱스트 베어링 제작 연구를 진행하였다.

위민수 등⁽⁵⁶⁾은 고속 터보기계용 유체 베어링 시험평가를 위한 볼 베어링 및 스쿠즈 필름 댐퍼로 지지되는 초고속 고출력 전기모터를 개발하고 성능평가를 수행하였다.

김지한 등⁽⁵⁷⁾은 유체 베어링 및 씰의 성능 예측을 위한 해석 툴을 개발하고 이를 검증하였다.

김예슬 등⁽⁵⁸⁾은 외부 가압 스톱스트 베어링 수직 실험 장치를 개선하는 연구를 수행하였다. 개선된 실험 장치는 스톱스트 칼라의 변형을 방지하고, 정렬과 조립이 용이하도록 제작되었으며, 측정된 정하중 특성을 해석 결과와 비교하였다.

정현성 등⁽⁵⁹⁾은 극저온 터보펌프용 유체 정압 베어링의 설계 파라미터에 대한 연구를 수행하였다. 베어링 단품 성능에 영향을 미치는 다양한 파라미터를 조사하기 위해 실제 극저온 환경에서 실험하고 이를 예측과 비교하였다.

김규만 등⁽⁶⁰⁾은 액체 질소로 작동하는 하이브리드 저널 베어링에서 측정된 비선형적 거동을 분석하기 위하여 연속적으로 측정된 데이터를 조사하였다.

전성민 등⁽⁶¹⁾은 100톤급 다단 연소 엔진 터보펌프의 회전체동역학 해석을 수행하여 임계속도를 예측하고 안정적인 작동이 가능한지 여부를 검토하였다.

7. 씰

씰은 터보기계 고압부에서 저압부로의 작동유체 누설을 막기 위한 장치이다. 씰의 누설유량은 회전기계의 효율에 큰 영향을 미치는 기계이지만, 애기치 않은 회전체진동문제를 일으키기도 한다. 씰 관련 연구는 누설량만을 다루는 연구와 누설량과 회전체동역학적 성능을 함께 다루는 연구로 나눌 수 있다. 본 연감에서는 회전체동역학적 특성과 관련된 씰 관련 연구만을 다루고자 한다.

문민주 등⁽⁶²⁾은 회전체 시스템의 안정성을 보장하는 최적의 TOS(tooth on stator) 래버린스 씰을 설계하기 위해 Bulk Flow Model(BFM)을 이용하여 래버린스 씰의 동특성 계수와 누설유량을 예측하였다. 이후 예측된 래버린스 씰 동특성 계수를 사용하여 회전체 시스템의 동적 안정성 예측에 사용하였다.

문민주 등⁽⁶³⁾은 1체적(one-control-volume) BFM을 사용하여 래버린스 씰의 누설량과 회전체 시스템의 동특성이 고

려된 최적의 TOS(tooth on stator) 래버린스 씰을 설계하였다. 멀티그리드 방법을 사용하여 설계 가능한 모든 씰 모델에 대하여 누설유량 및 회전체동역학적 성능을 비교하여 최적의 씰 설계변수를 도출하였다.

김보람 등⁽⁶⁴⁾은 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX를 이용해 원심펌프 임펠러의 슈라우드 표면 유체력에 기인한 회전체 동역학적 성능을 예측하였다.

8. 결 론

회전체동역학 관련 국내 학술대회 발표는 주로 유체기계 학회와 트라이볼로지학회 학술대회를 통해 이루어지고 있다. 분야에 따라 다르지만 한국항공우주학회 및 기계학회 학술대회를 통한 발표도 이루어지고 있다.

앞에서 발표된 문헌들을 살펴본 바와 같이 회전체동역학이라는 학문은 회전체 구조물 자체의 구조적인 문제만을 다루기보다는 회전체를 지지하는 베어링과 작동유체에 의한 힘을 함께 이해하고자 하는 학문으로 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2021R1I1A3060132)

References

- (1) Lee, Junguk, & Suh, Junho (2023). Development of Journal Bearing Design Algorithm considering Rotordynamic Stability and Bearing Performance. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA 2023 Summer Annual Meeting, pp. 248 - 249.
- (2) Jun Gyu Lee, Dongmin Lee, Chang Wan Kim, & Hyunseok Oh (2023). Rotor System Fault Data Generation through Multi-Body Dynamics Model Calibrated Utilizing Probability Residual. The Korean Society of Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Fall Annual Meeting, pp. 1,320 - 1,320.
- (3) Dongchan Seo, & Junho Suh (2023). Numerical Model for Bending Stiffness of a Tie-Bolt Fastened Rotor System Based on Elasto-Plastic Contact. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, pp. 246 - 247.
- (4) Young-Ju Chun, Young-Min Kwon, Samg-Jo Kim, & Yu-Il Kim (2023). Shaft System Dynamic Analysis of Rotor Vibration Test Rig. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA 2023 Winter Annual Meeting, pp. 572 - 573.

- (5) Dongmin Lee, Jun Gyu Lee, Hyunseok Oh, Cheonha Park, & Chang Wan Kim (2023). Multibody Dynamics Model for Digital Twin of Rotor Systems. The Korean Society of Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Fall Annual Meeting, pp. 282 – 283.
- (6) Minjun Jang (2023). Evaluation of Rotordynamics Characteristics of Rotating Machine in a Sloped Environment. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, The KSFJ Journal of Fluid Machinery, 26(3), pp. 23–31, 10.5293/kfma.2023.26.3.023
- (7) Donghyun Lee, Byungock Kim, Byungchan Jeon, & Hyungsoo Lim (2023). Rotordynamic Analysis Using a Direction Frequency Response Function. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(6), pp. 221–227.
- (8) Wonvin Kim, Su Hyun Lim, Hyunsoo Hong, & Seong Su Kim (2023). Dynamic instability analysis of the water-lubricated journal bearing system. The Korean Society of Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Fall Annual Meeting, pp. 711 – 713.
- (9) Dongchan Seo, & Junho Suh (2023). Dynamic Performance Prediction Model for Tilting Pad Journal Bearing through Harmonic Excitation on the Housing. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Winter Annual Meeting, pp. 455 – 456.
- (10) Donghyun Lee, & Junho Suh (2023). Elastic Deformation Induced Preload Change in Tilting Pad Journal Bearing. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(3), pp. 102–110.
- (11) Yeonseung Jeong, Seongpil Choi, Youngcheon Jo, & Hyunjun Jo (2023). Characteristic Analysis of Thrust Bearing for 30MW Hydraulic Turbine Generator. Proceedings of the KFMA Annual Meeting, Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 224 – 225.
- (12) Hyun Woo Cho, & Tae Ho Kim (2023). Measurements of the Static Performance of a Plain Journal Bearing for Heavy loads: Influence of Flexible Edges. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 344 – 345.
- (13) Hyunjun Jo, Seongpil Choi, Youngcheon Jo, & Yeonseung Jeong (2023). Characteristic Analysis of Journal Bearing for Compressor. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Winter Meeting, pp. 75 – 76.
- (14) Hyunjun Cho, Seongpil Choi, Youngcheon Jo, & Yeonseung Jeong (2023). Characteristic Analysis of Thrust & Guide Bearing for Vertical Pump. Proceedings of the KFMA Annual Meeting, Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Winter Meeting, pp. 346 – 347.
- (15) Jihoon Lee, Byeonggeon Bae, & Tae-Kyoon Kim (2023). Evaluation of Tribological Properties of Journal Bearing Materials for RCP by Accelerative Wear Test. The Korean Society of Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Spring Annual Meeting, pp. 210 – 210.
- (16) Hyun Woo Cho, Syed Muntarzir Mehdi, & Tae Ho Kim (2023). Performance Predictions of a Hybrid Journal Bearing and a Labyrinth Seal for Various Radial Clearances. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 73 – 74.
- (17) Jeongin Lee, & Junho Suh (2023). Performance Analysis of Gas Foil Journal Bearings considering Contact and Friction. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Summer Annual Meeting, pp. 165 – 165.
- (18) Jeongin Lee, Dongchan Seo, & Junho Suh (2023). Prediction of Rotordynamic Performance for Gas Foil Bearings using Journal Excitation Model. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Summer Annual Meeting, pp. 248 – 249.
- (19) Jeongin Lee, Dongchan Seo, & Suh, Junho (2023). Determination of Rotordynamic Coefficients for Gas Foil Bearings Using a Journal Excitation Model. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 57 – 57.
- (20) Sung Ho Hwang, & Tae Ho Kim (2023). Effects of External Pressurization on the Static Performance of Gas Foil Thrust Bearing. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFJ 2023 Winter Annual Meeting, pp. 460 – 461.
- (21) Sung Ho Hwang, Dae Yeon Kim, & Tae Ho Kim (2023). Effects of Angular Acceleration on the Friction and Wear Characteristics of Gas Foil Thrust Bearings. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(5), pp. 203–211.
- (22) Sung Ho Hwang, Dae Yeon Kim, & Tae Ho Kim (2023). Effects of Surface Roughness on the Performance of a Gas Foil Thrust Bearing. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(2), pp. 81–85.
- (23) Sung Ho Hwang, Dae Yeon Kim, & Tae Ho Kim (2023). Effects of Cooling Flow Rate on Gas Foil Thrust Bearing Performance. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(2), pp. 76–80.
- (24) Hosung Kong, & Hung-gu Han (2023). Development of Water-lubricated Plastic Bearings. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(6), pp. 235–243.
- (25) Hyucksung Gwon, JeongIn Lee, & Junho Suh (2023). Analysis of static characteristics of journal bearing considering asperity contact under mixed lubrication condition. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 60 – 60.
- (26) Hyucksung Gwon, JeongIn Lee, & Junho Suh (2023). Analysis of contact force of water-lubricated journal bearings considering surface roughness. Korean Society for Fluid

- Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Winter Meeting, pp. 457 – 458.
- (27) Wonvin Kim, Su Hyun Lim, Hyunsoo Hong, & Seong Su Kim (2023). Dynamic stability analysis based on dynamic coefficients in water-lubricated journal bearing system. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 25– 27.
- (28) Yeonseung Jeong, Seongpil Choi, Youngcheon Jo, & Hyunjun Jo (2023). Characteristic Analysis and Design of Water Lubrication Bearing for 30MW Water turbine. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 194 – 195.
- (29) Tae Gyu Choi, Jin Woong Ha, Min Chul Kim, & Dae Hee Jeong (2023). Analysis of Performance on Vertical Pump Guide Bearing Operating Condition. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 161, 162.
- (30) Soyeon Moon, Jongwan Yun, & Sangshin Park (2023). Analysis of Tilting Pad Journal Bearing Characteristics and Rotordynamics for Centrifugal Compressors Using Multiphysics Software. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(6), pp. 268 – 272.
- (31) TaeJo Park, & JeongGuk Kang (2023). Lubrication Analysis of Parallel Slider Bearing with Nanolubricant. Korean Tribology Society, 2023, Tribology and Lubricants, 39(3), pp. 87–93.
- (32) Junguk Lee, Junho Suh. (2023). Development of Tilting Pad Journal Bearing Algorithm considering Rotordynamics Stability and Bearing. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 121 – 121.
- (33) Junguk Lee, & Junho Suh (2023). RTilting Pad Journal Bearing Design Algorithm considering Bearing Performance and Rotordynamic Stability. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 459 – 459.
- (34) J. Lee, C. Y. Park, & H. S. Yang (2023). A Study on Experimental Relationship Between the Radial Clearance and Vibration Durability Test of Air Foil Journal Bearing for FCEV Air Compressor. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 78 – 79.
- (35) Sun Je Kim, Dong Min Kim, Hyun Min Song, Ji Su Park, Young Ju Chun, & Gyong Won Ryu (2023). A Study on the Heat Generation and Cage Dynamics of Roller Bearings for Turbo Engines. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, pp. 59 – 67.
- (36) Jisu Park (2023). Variation of Operating Clearance Depending on Cooling Methods of High-Speed Roller Bearings for Aerospace Applications. Tribology and Lubricants, 39(4), pp. 123–132.
- (37) Kyoungku Lee, Donggyun Choo, Junghoon Kim, & Jeongho Do (2023). A study on the rolling bearing's rating life considering the rigidity of the housing. he Korean Society Of Automotive Engineers, 2023, Proceedings of the KSAE 2023 Spring Annual Meeting, pp. 194 – 194.
- (38) Lee, MinHyeok, & Suh, Junho (2023). Optimal Design of Angular Contact Ball Bearing Using Genetic Algorithm. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, pp. 245 – 245.
- (39) Minhyeok Lee, Yonghun Yu, & Junho Suh (2023). Thermo-Mechanical Behavior and Fatigue Life Analysis of Angular Contact Ball Bearing. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 59 – 59.
- (40) Minhyeok Lee, Younghun Yu, & Junho Suh (2023). Effect of Elastohydrodynamic Lubrication on Fatigue Life and Dynamic Performances in Thermo-Mechanical Behavior of Angular Contact Ball Bearings. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, pp. 246 – 247.
- (41) J. H. Sa, G. Rivera, & S.-W. Hong (2023). A Study on the Characteristics of Split-outer-ring Ball Bearing Subject to Axial and Radial Loads. The Korean Society for Precision Engineering, 2023, Proceedings of the KSPE 2023 Spring Annual Meeting, pp. 545 – 545.
- (42) Byung-Jik Kim, Sung Gi Kim, Eunji Hwang, Jisu Hwang, & Kyung-Woong Kim (2023). Setting Preload for Deep Groove Ball Bearings Under Thrust Load. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 74 – 75.
- (43) Shinhyang Park, & Dongjoo Kim (2023). Temperature Prediction of Ball Bearing Using Thermal Network Model and CFD Simulation. The Korean Society for Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Annual Meeting pp. 912 – 912.
- (44) Robert Taylor, & Gyongwon Ryu (2023). Rolling Element Bearing Performance Analysis Using the ADORE Code. The Korean Society of Propulsion Engineers, 2023, Proceedings of the 2023 KSPE Spring Annual Meeting, pp. 158 – 158.
- (45) Taewoo Kim, Junho Suh, Min-Soo Kim, & Yonghun Yu (2023). Prediction of the Dynamic behavior and Contact Pressure of Overhung Rotor Systems According to the Support Characteristics of Double-row Tapered Roller Bearings. Tribology and Lubricants, 39(4), pp. 154–166.
- (46) S. G. Kim, B. J. Kim, E. J. Hwang, J. S. Hwang, J. H. Ahn, & K. W. Kim (2023). Effect of Centrifugal Force on High Speed Ball Bearings. The Korean Society for Precision Engineering, 2023, Proceedings of the KSPE

- 2023 Fall Annual Meeting, pp. 55 – 55.
- (47) Yeongdo Lee, & Yongbok Lee (2023). Investigation on failure mechanism of ball bearing used in LNG pumps through analysis of cage dynamics. Korean Tribology Society, 2023, Proceedings of the KTS 2023 Fall Annual Meeting, pp. 72 – 73.
- (48) Yeongdo Lee, & Yongbok Lee (2023). Experimental approach to cage degradation behavior of ball bearings for LNG emergency pumps through life test. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, pp. 68 – 69.
- (49) Yeongdo Lee, Wonil Kwak, Yunseok Ha, Jeonkook Lee, & Yongbok Lee (2023). Tribo Test Apparatus for Deep Groove Ball Bearing used in LNG Pumps: Evaluation of Dynamic Stability. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 26(6), pp. 21–30, 10.5293/kfma.2023.26.6.021
- (50) Yunseok Ha, & Yongbok Lee (2023). Design Parameters and Vibration Control of Hybrid(Magnetic + Air Foil) Bearing applied to Turbo Blower. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, pp. 163 – 164.
- (51) C. H. Park, K. J. Choi, & S. J. Park (2023). Design of Hybrid Magnetic Bearings for Turbomolecular Pumps. The Korean Society for Precision Engineering, 2023, Proceedings of the KSPE 2023 Spring Annual Meeting, pp. 393 – 393.
- (52) Myounggyu Noh, & Miseon Song (2023). Estimation of Magnetic Bearing Parameters Using Sinusoidal Excitations and Least Square Method. The Korean Society for Mechanical Engineers, 2023, Proceedings of the KSME 2023 Annual Meeting, pp. 1,428 – 1,429.
- (53) Young Hwan Lee, & Jeeuk Chang (2023). Oil-Free Centrifugal Compressor Rotor Design of a Heat Pump using Magnetic Bearing. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, pp. 316 – 317.
- (54) Homin Lim, & Keun Ryu (2023). Experimental and Numerical Investigations for Static and Dynamic Load Characteristics of Hybrid Thrust Bearings. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 309 – 310.
- (55) Junwon Heo, Cheayeon Baek, & Keun Ryu (2023). Additively Manufactured Hydrostatic Porous Tilting Pad Journal Bearings: Design and Fabrication. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 1,273 – 1,274.
- (56) Minsoo Wee, Yewon Kwon, & Keun Ryu (2023). High Speed Electric Motor with High Power Density for Fluid Film Bearing Testing: Design and Fabrication. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 1,271 – 1,272.
- (57) Jihan Kim, Hyunsung Jung, & Keun Ryu (2023). Performance Prediction of Fluid Bearings and Seals: Model Validation and Predictive Tool GUI Development. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 1,269 – 1,270.
- (58) Yeseul Kim, & Keun Ryu (2023). Revamping Test Rig for a Hydrostatic Thrust Bearing: Measurement of Static Load Characteristics. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 1,275 – 1,276.
- (59) Hyunsung Jung, Kyuman Kim, & Keun Ryu (2023). Major Design Parameters of Hydrostatic Journal Bearing for Cryogenic Turbopumps: Test Results with Liquid Nitrogen and Predictions. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 311 – 312.
- (60) Kyuman Kim, & Keun Ryu (2023). Nonlinear Behavior of Hybrid Fluid Film Journal Bearings Lubricated by Liquid Nitrogen. The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2023, Proceedings of the KSAS 2023 Spring Annual Meeting, pp. 307–308.
- (61) Seong Min Jeon (2023). Critical Speed Analysis of a Turbopump for a 100 tonf Class Staged Combustion Liquid Rocket Engine. The Korean Society of Propulsion Engineers, 2023, Proceedings of the KSPE 2023 Spring Annual Meeting, pp. 140 – 141.
- (62) Moon, Minju, Lee, Jeongin, & Suh, Junho (2023). Labyrinth Seal Design considering Rotor Vibration and Leakage. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, pp. 86–87.
- (63) Minju Moon, Jeongin Lee, & Junho Suh (2023). Labyrinth Seal Design Considering Leakage Flow Rate and Rotordynamic Performance. Tribology and Lubricants, 39(2), pp. 61–71.
- (64) Boram Kim, & Junho Suh (2023). Fluid Force and Rotordynamic Performance Prediction of Shrouded Impeller Seal Using CFD. Korean Society for Fluid Machinery, 2023, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, pp. 244 – 245.