

## 2022년 국내 회전체동역학 분야 연구동향 분석

이찬우\* · 김규만\* · 백채연\*\* · 권예원\*\* · 임호민\*\* · 정현성\*\* · 김지한\*\* · 김예슬\*\* · 류근\*\*\*†

### 1. 서 론

회전기계는 동력을 전달하기 위해 회전축을 사용하며, 마찰 및 마모를 줄이기 위해 베어링을 사용한다. 회전기계는 산업 전반에 걸쳐 다양하게 사용되고 있으며, 신뢰성 있는 회전기계는 산업 전체의 안전성을 향상시킨다. 그러므로 회전기계의 성능을 예측하고 상태를 진단하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 효율을 향상시키기 위해 현재도 많은 연구들이 진행되고 있다.

본 특집 논문에서는 2022년에 발간된 국내 학술지 논문, 국내 학술대회 논문 및 초록 중, 회전체동역학 분야에 관한 연구를 분석하여 정리하였다. 먼저, 회전기계 상태진단 및 회전체동역학에 관한 연구를 서술하였다. 그리고 회전기계 지지요소인 베어링은 오일 베어링, 공기 베어링, 구름 베어링 및 마그네틱 베어링 순서대로 구분하였으며, 작동 방식에 따라 정리하였다. 이후 댄퍼, 오링 및 실에 대해 서술하였다.

### 2. 회전기계 상태진단 및 회전체동역학

회전기계 상태진단은 고장으로 인한 심각한 경제적 손실 또는 안전 문제를 방지하는 시스템 유지보수 관련 핵심 기술이다. 최근의 연구는 고장사태 데이터양이 부족한 실정을 극복하기 위한 기술 또는 진단 성능이 높은 모델들의 개발이 이루어지고 있다.

#### 2.1 회전기계 상태진단

박지수<sup>(1)</sup> 등은 베어링 이상 상태의 데이터 부족을 해소하고자 정상 운전 데이터를 기반으로 베어링 이상 탐지 방법을 제안하였다. NASA의 IMS (Intelligent Maintenance Systems) Bearing Dataset에 제안한 방법을 적용한 기계 학습 진단 방법은 90%이상의 정확도로 베어링의 고장을 판별하였다.

김태형<sup>(2)</sup> 등은 측정 신호에서 고장 신호를 추출하는 방법을 개선하였다. 기존의 방법은 노이즈를 억제하는 평균화 과정에서 고장 신호도 같이 소멸될 여지가 있었으나, 저자는 고장 관련 신호의 위상을 정렬하여 노이즈와 고장 신호를 더 잘 구분하는 방법을 도입하였다. 제안된 방법은 풍력터빈 테스트 베드에서 측정된 고장난 유성 기어의 진동 신호를 사용하여 검증되었다. 개선된 방법은 기존의 방법보다 고장 특성 신호를 강화하였다.

황주호<sup>(3,4)</sup> 등은 기계 학습 기법을 활용한 공작기계 상태 진단용 신호처리 모듈 개발에 관해 발표하였다. 연구 목표는 스핀들에 가해진 충격에 의해 발생하는 주파수 기반의 고장 진단과 윤활 및 마모에 기인한 고장 진단이 모두 가능한 시스템을 구성하는 것이었다.

오호근<sup>(5)</sup> 등은 연속 생산 공정에서 롤투롤(Roll-to-roll) 회전체에 사용되는 베어링의 고장을 진단하는 알고리즘을 개발하였다. 고장 진단에 용이한 특징 조합을 선별하고 구성하는 밀도조합함수를 활용한 진단 방법은 산업 규모의 롤투롤 시스템을 통해 검증되었다. 새로운 알고리즘은 정규화 특징을 사용하는 방식과 PCA(Principle Component Analysis)를 사용하는 방식에 비해서 진단 정확도와 훈련 시간면에서 이점을 보였다.

강정민<sup>(6)</sup> 등은 중대형 위성용에 사용되는 고속회전 모멘텀 휠의 고장 분석에 대해 발표 하였다. 고장 진단 방법은 주기적 충격 신호를 찾기 위해서 포락선 스펙트럼(Envelope Spectrum) 분석을 포함하고 있으며, 특정 주파수 밴드에서 동기 주파수의 조화 성분과 베어링 결함 주파수를 검출하는 방식을 사용한다. 고장 진단 프로그램은 실제 실험에서 측정된 모멘텀 휠 진동 신호를 사용하여 볼 베어링 내륜의 결함을 정확하게 진단했다.

김예진<sup>(7)</sup> 등은 볼 베어링 결함 진단 연구를 위해서 풍력 발전기의 증속기-발전기 회전축을 모사 시스템을 구축하였다. 그리고 학습된 딥러닝 CNN (Convolution Neural Network) 모델은 회전축 시스템에서 측정된 가속도 신호를

\* 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

사용하여 베어링의 건전성 상태를 진단한다. 저자는 Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Map)을 사용해서 CNN 모델이 높은 가중치를 둔 고장 주파수 범위를 확인하였다.

안형준<sup>(8)</sup> 등은 터보 기계에 대한 데이터 기반 진단에 필요한 자료를 수집하기 위해 자기 베어링으로 지지되는 소형 압축기의 실시간 모니터링 시스템을 제작하였다. 측정 데이터는 온도, 압력, 변위로 구성된다.

한동주<sup>(9)</sup> 등은 IMM (Interacting Multiple Model) 필터 및 GLRT (Generalized Likelihood Ratio Test) 기법을 사용하여 무인기용 가스터빈 엔진의 실시간 결합 진단 모델을 개발하였다. 구동기 및 여러 센서 고장에 대한 수치 모의시험 결과는 두 진단 모델이 ‘결합 검출 및 분리’와 ‘결합 값 추정’에 대한 효율성을 정량적 수치로 보여준다. 저자는 IMM 필터와 GLRT 기법을 연계한 효과적인 결합 진단 방안을 도출하였다.

오현석<sup>(10)</sup> 등은 ‘정상 및 고장상태’에 관한 데이터 확보가 매우 어려운 상황을 극복하기 위한 도메인 적응 (Domain adaptation) 기술에 대해 서술하였다. 서로 다른 회전체 테스트베드의 데이터를 활용한 사례 연구는 도메인 적응을 방식이 진단 정확도를 높임을 보였다. 저자는 다양한 스케일에 적용 가능한 회전체 건전성 진단을 위해서는 외삽 방식의 도메인 적응 기법이 중요함을 강조하였다.

유진오<sup>(11)</sup> 등은 속도 센서가 없는 상황에서 회전체 고장 진단을 위해 진동 신호로부터 속도 정보를 직접 추정하는 기법을 개발하였다. 주요 목적인 속도 추정 정확도 달성과 연산 시간 단축을 위해 MOPA (Multi Order Probabilistic Approach)와 Viterbi 알고리즘을 융합한 방법론이 제안되었다. 유효성 검증은 풍력 터빈 기어박스의 오픈 데이터셋을 활용하여 진행되었으며, 개발된 진단 방법은 빠른 시간내에 정확하게 회전속도를 추정하였다.

김채연<sup>(12)</sup> 등은 터보팬 엔진의 결합 분류 및 진단 알고리즘에 필요한 실험데이터의 부재를 극복하기 위해서 SOLA (Synchronous Overlap-and-Add) 기법을 사용하여 회전 속도 신호를 모사하였다. FFT (Fast Fourier Transform)와 PSD (Power Spectral Density)를 활용한 신호 분석은 생성된 신호가 실제 항공기 엔진 신호를 모사할 수 있음을 보였다.

전하민<sup>(13)</sup> 등은 데이터 기반 엔진 회전체 결함을 실시간 분류 및 진단하는 알고리즘을 제안하였고, 분류 알고리즘 기법에 따른 성능을 비교하였다. 동일 신호를 사용하여 K-평균 방법, K-근접 이웃 분류 방법, 마할라노비스 거리 (Mahalanobis distance) 방법에 따라 시뮬레이션을 진행한 결과, 산정한 대부분의 결합 케이스에 대해 모든 알고리즘은 1초 이내의 실시간으로 결함을 진단하였다. 분류 정확도를 분석한 결과에서 정상 신호를 결합 신호로 오진단하는 경우가 존재하였고, 마할라노비스 거리 방법이 정상 분류 성능

측면에서 높게 평가되었다.

한동주<sup>(14)</sup> 등은 터보 팬엔진 구성품에 대한 건전성 진단을 위한 알고리즘을 구현하였고, 그 효율성을 확인하는 연구를 수행하였다. 알고리즘은 실시간 건전성 추정 이후 노이즈 제거를 통해 오정보 발생을 최소화하고 운전중 결함과 열화를 식별할 수 있도록 구성되었다. Pratt & Whitney JT9D 터보 팬 엔진 모델을 대상으로 진행한 수치 모의시험 결과는 제안된 기법이 높은 효율성을 가지는 것을 보여주었다. 연구 결과의 실제 온보드 컴퓨터 적용을 위한 HILS (Hardware In the Loop Simulation)등이 향후 연구로 언급되었다.

김용채<sup>(15,16)</sup> 등은 딥러닝 (Deep learning)기반의 회전체 고장 진단에 걸림돌이 되는 도메인 이동 (Domain shift)과 레이블이 없는 데이터 (Unlabeled data) 문제를 해결하고자 도메인 적응 기법을 제안하였다. 인스턴스 거리 기반 손실 함수와 수도 라벨링 (Pseudo-labeling)이 앞서 언급된 두 가지 딥러닝 성능 저하 문제를 해결하기 위해 알고리즘에 도입되었다. 두 오픈소스 데이터셋을 활용하여 제안된 기법의 볼 베어링 고장 진단 성능이 검증되었으며, CNN (Convolution Neural Network)와 DANN (Domain Adversarial Neural Network)에 비해서 본 연구의 기법이 더 높은 진단 성능을 나타내었다.

## 2.2 회전체동역학

장민준<sup>(17)</sup>은 경사 환경이 회전체 베어링 시스템의 동적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 밝히기 위해 유한요소 수치해석을 수행하였다. 경사 조건에 의해 변하는 하중의 영향은 회전체 베어링 시스템의 위험속도 변화로 나타났으며, 수치 해석 분석 결과에서 권장되는 API (American Petroleum Institute) 표준 분리여유를 만족시키지 못하는 경우가 발견되었다. 이러한 연구 결과는 회전체 베어링 시스템 설계 과정에서 경사 조건과 같은 환경적 요소의 중요성 강조한다.

김지한<sup>(18)</sup> 등은 회전체동역학 연구에 사용되는 상용 해석 프로그램들을 비교하여 발표하였다. 회전축의 1D, 2D, 3D 모델링의 가능 여부와 다축 로터 구현, 비틀림 해석, 시간 도메인 비선형 해석 지원 등에 대해서 각 프로그램들이 모델, 기능, 편의성 등의 기준으로 비교되었다. 또한 예측 결과를 사용자에게 전달하는 후처리 기능의 장단점을 정리하였다.

이동민<sup>(19)</sup> 등은 데이터 기반 건전성 진단 기술의 개발에 필요한 고장 모드 데이터를 확보하기 위해서 회전체동역학 수치해석 모델을 개발하였다. 불균형 질량과 오정렬에 의한 진동 데이터를 수치적으로 생성하기 위해 해석 모델 검증이 진행되었다. 제작된 유한요소 수치해석 모델은 다양한 운전 조건 및 고장 심각도에 대한 데이터 구축에 사용된다.

이동현<sup>(20)</sup> 등은 수소 액화용 터보 팽창기의 국산화 연구를 위해서 회전체동역학 해석을 수행하였다. 동적 거동을 예측

하기 위해서 회전축과 헬름 외부가압 베어링이 연동된 수치 해석 모델이 만들어졌다. 시간 도메인에서 계산된 회전축의 동기 주파수 성분의 진동과 베어링의 유량 특성은 실험 결과와 잘 일치하였다.

김수원<sup>(21)</sup> 등은 1,000 kW급 축류 펌프를 개발하는 과정에서 시험용 축소 모델 펌프의 회전안정성을 확보하기 위해서 회전체동역학 해석을 수행하였다. 저자는 Undamped Critical Speed Map으로 충분한 분리 여유를 갖기 위한 베어링 강성을 도출하였다.

### 3. 유체 베어링

유체 베어링(Fluid film bearing)은 회전축과 베어링 표면을 유체 압력으로 분리하는 비접촉식 베어링이다. 작동 유체에 따라 오일 베어링, 공기 베어링 등으로 나눌 수 있으며, 작동 방식에 따라 동압 베어링(Hydrodynamic bearing) 및 정압 베어링(Hydrostatic bearing)으로 구분할 수 있다.

#### 3.1 오일 베어링

오일 베어링은 윤활 유체로 오일을 사용하여 회전축과 베어링을 분리한다. 구름 요소 베어링에 비해 고속에서 높은 하중지지력을 가지고, 저소음 및 긴 수명의 장점을 가진다. 그러나 오일 베어링은 베어링 성능이 윤활유 온도에 큰 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 따라서 베어링 및 윤활유 온도가 오일 윤활 베어링에 미치는 연구가 중요하다. 국내에서 2022년 오일 베어링에 관한 연구는 실험적 연구 한 편만 발표되었다.

조현우<sup>(22)</sup> 등은 다양한 하중 조건에서 오일 공급 유량에 따른 플레인 저널 베어링(Plain journal bearing)의 패드 온도 및 동력 손실 측정 실험을 수행하였다. 베어링 패드 온도를 측정하기 위해 베어링 중간 면의 원주 방향으로 총 13개의 홀을 가공하여 열전대를 설치하였다. 먼저 모터를 구동하여 목표 속도에 도달시키고, 베어링 패드 온도가 열적 평형 상태에 놓이게 하였다. 그리고 오일 공급 유량을 감소시키고 같은 방식으로 하중을 증가시키며 베어링 성능을 측정하였다. 동력 손실 실험 결과, 오일 공급 유량이 감소하면 베어링 온도는 증가하고, 오일 공급 유량과 하중이 감소하면 동력 손실이 감소하였다.

#### 3.2 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 낮은 점도로 인해 오일 베

어링에 비해 낮은 강성과 감쇠를 갖는다.

##### 3.2.1 동압 베어링

이종성<sup>(23)</sup> 등은 에어 포일 베어링으로 지지되는 수소 전기차용 공기 압축기의 회전체동역학적 안정성에 관한 연구를 발표하였다. 저자는 에어 포일 저널 베어링 개발 방향을 확립하고 발생 가능한 문제를 해결하는데 기여하고자 윤활 유체의 특성, 진동 발생 특성, 작동 영역에 따른 아동기 주파수 성분을 분류하여 정리하였다.

백두산<sup>(24)</sup> 등은 빔 타입 가스 포일 베어링으로 지지되는 고속 압축기 회전축의 거동을 수치해석으로 예측하였다. 회전체 베어링 시스템의 선형해석 뿐만 아니라 단순화된 1 자유도 바닥 가진 비선형 해석 또한 회전속도, 가진 주파수, 가진력에 따라 수행되었다. 회전축의 예측된 거동은 실험 결과와 잘 일치하였으며, 해석 모델의 신뢰성이 검증되었다.

김대연 등<sup>(25,26)</sup>은 가스 포일 스톱 베어링의 각가속도 변화에 따른 마찰 계수와 마찰 거리 변화를 측정하고 결과를 비교 고찰하였다. 저자는 회전축을 높은 가감속도로 구동함으로써, 베어링의 시동 및 정지 마찰 계수와 마모 거리의 감소가 가능함을 밝혔다. 또한 외경 길이가 다른 세 가지 가스 포일 스톱 베어링의 부상 성능 및 구동 토크 성능을 실험적으로 측정하고, 결과를 비교하였다. 그 결과 외경이 큰 베어링이 작은 베어링에 비해 부상성능과 구동 토크가 우수하였다.

황성호 등<sup>(27)</sup>은 이전에 수행되었던 가스 포일 스톱 베어링의 하중지지 능력을 최대화하기 위해 설계된 해석 모델을 기반으로 곡선 경사 형상을 갖는 가스 포일 베어링에 대한 해석 모델을 개발하였다. 선형 경사 형상과의 비교를 통해 곡선 경사 형상에 대한 효과를 제시하였으며, 다양한 유막 두께에서 선형 경사와 곡선 경사에 대한 하중에 따른 마찰 토크 결과를 확인하였다. 결과적으로, 동일 유막 두께에서 곡선 경사 모델이 높은 하중 지지 능력을 가지며, 동일 하중에서는 낮은 마찰 토크를 가졌다. 그리고 탑 포일이 곡선 경사 형상을 가질 때 하중 지지 및 마찰 성능이 향상되었다.

정권중<sup>(28,29)</sup> 등은 2 패드 빔 타입 가스 포일 저널 베어링(Two-pad Beam-type gas foil bearing)이 적용된 전동식 공기 압축기의 회전체 동역학적 거동을 측정하였다. 심(Shim) 포일로 조절되는 저널 베어링 간극 변화에 따른 회전축의 동적 거동 특성 변화를 0-100 krpm 범위에 걸쳐서 집중적으로 다루었다. 베어링의 간극이 감소할수록 아동기 주파수(Sub-synchronous)진동 성분의 크기가 눈에 띄게 작아졌으며, 20 krpm 이하의 저속 영역에서는 점성 마찰로 인한 동력 손실이 줄어들었다. 그리고 동기 주파수 성분의 진동 크기는 40 krpm 이상의 고속 영역에서는 간극에 큰 영향을 받지 않았다.

정성윤<sup>(30)</sup>은 틸팅 패드 베어링으로 지지되는 증속 기어형

압축기에 대한 회전체동역학 예측 정확도 향상 연구를 수행하였다. 수치해석 예측 결과와 실험 결과의 차이를 줄이기 위해서는 가능한 불균형 질량과 틸팅 패드 베어링의 강성을 고려해야함을 제시하였다.

### 3.2.2 정압 베어링

김규만 등<sup>(31)</sup>은 낮은 편심률 조건에서 회전속도에 따라 공기로 작동하는 하이브리드 저널 베어링의 동적 특성을 측정하였다. 공기 유향 베어링의 특성을 고려하여, 유막과 베어링을 1차원의 mass-damper spring 구조시스템으로 단순화하였다. 회전축 불균형 질량에 의한 동기주파수 휘돌림 운동을 시스템의 바닥 가진 입력으로 사용하였다. 베어링의 동적 특성을 파악하기 위해, 측정된 저널 베어링의 상대 변위와 베어링 하우징 가속도 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하였다. 변환한 값에 베어링 하우징의 질량과 가속도를 곱하여 유막 반력을 도출하고 이를 토대로 동적 강성을 계산하였다. 실험에서 얻어진 직접 강성계수는 회전속도에 따라 감소하였다.

허준원 등<sup>(32)</sup>은 적층 제조기법 DMLM(Direct Metal Laser Melting) 방식을 이용하여 하이브리드 틸팅 패드 저널 베어링을 제작하였으며, 공기로 작동하는 외부 가압 틸팅 패드 저널 베어링의 정하중 특성을 확인하였다. 수평 및 수직 방향에 위치한 변위센서를 통해 베어링 유막 두께를 측정하고 다양한 공급 압력 조건에 따른 베어링의 성능을 측정하여 비교하였다. 연구 결과를 토대로 적층 제조된 베어링의 활용 가능성이 제시되었다.

### 3.3 기타 유체 베어링

임호민 등<sup>(33)</sup>은 극저온 유체의 낮은 점성과 축의 고속 회전에 따른 난류 운동을 반영하여, 수치해석을 통해 하이브리드 스톱스 베어링의 정하중 특성을 예측하였다. 회전 속도와 난류 유동에 의해 오리피스 및 리세스에서 발생하는 원주 방향 입력 구배를 규명하였다. 회전 속도가 증가할수록 하이브리드 스톱스 베어링의 하중 지지력이 향상되며, 소모되는 유량이 감소하였다. 그리고 회전 속도가 증가할수록 리세스 내에서 원주 방향 압력 구배가 발생하였다. 원주 방향 압력 구배에 의해 오리피스 위치가 베어링 정하중 특성에 미치는 영향을 확인하였으며, 비회전 조건에서는 오리피스의 위치 변화가 하중 지지력 및 강성에 영향을 주지 않았다.

허준원 등<sup>(34)</sup>은 금속 적층 제조를 이용하여 극저온 터보기계용 하이브리드 틸팅 패드 베어링을 인코넬 718 소재로 제작하였다. 추가적으로 상온과 저온에서의 온도별로 베어링 패드의 고유진동수를 측정하여 패드 회전강성을 추정하였다. 저온에서 패드의 고유진동수 측정을 위해, 실험장치 챔버에 저온의 질소가스를 공급하여 베어링을  $-40^{\circ}\text{C}$  까지 냉각하였

으며, 상온  $20^{\circ}\text{C}$ 까지 구간을 나누어 베어링 패드 고유진동수를 측정하였다. 측정된 고유진동수로 틸팅 패드 베어링의 중요 특성인 베어링 패드 회전강성을 추정하고, 빔 이론을 통해 계산한 값과 비교하였다. 제작된 베어링 3종 모두 온도가 낮아질수록 고유진동수 및 패드의 회전 강성이 증가하였다.

위민수, 이호원<sup>(35,36)</sup>은 하이브리드 저널 베어링으로 지지되는 회전축 진동을 작동 유체 공급 조건에 따라 측정하였다. 회전축 진동 측정 결과에서 동기 주파수(Synchronous frequency)성분이 지배적이며, 불안정성으로 인한 아동기 주파수 성분은 나타나지 않았다. 회전 속도에 따른 회전축의 모드 형상은 측정된 변위와 센서간의 위상차 정보를 통해 파악되었다. 베어링에 액체 질소가 공급되는 조건의 경우, 상변화가 일어나면 동적 거동의 변화가 크게 나타나는 것이 밝혀졌다.

## 4. 구름 베어링

### 4.1 볼 베어링

볼 베어링은 베어링 외륜, 내륜 및 볼을 활용하여 회전기계의 동력을 전달하는 기계요소이다. 적용되는 회전축과 구동 조건에 따라 볼베어링의 치수가 표준화 되어있으며 롤러 베어링에 비해 낮은 마찰계수를 가진다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 볼베어링은 고속 회전기계에 다양하게 사용되고 있으며 회전체 동역학적 특성 및 결함, 수명 등에 관한 여러 연구가 진행되어왔다.

고한별 등<sup>(37)</sup>은 회전체(볼)와 베어링 내·외륜의 기계적 접촉으로 인한 결함을 사전에 방지하고자 합성곱 신경망(CNN: Convolution Neural Network)을 적용한 모델을 제시하였다. 정상 상태와 볼, 내륜 그리고 외륜에 결함이 발생한 상태 비교를 통해 모델을 개발하였으며 데이터 수집 환경에 따라 기존의 다른 모델과 비교하여 신뢰성을 확보하였다. 연구 결과, 볼베어링의 마찰에 따른 결함 데이터가 부족한 환경에서도 상태를 효과적으로 분류할 수 있는 모델을 제안하였다.

박정수 등<sup>(38)</sup>은 EV 모터 시스템에서 볼베어링으로 흐르는 전류로 인해 발생하는 전식 파손 모드를 베어링 파손 주파수를 통해 규명하였다.

이어서 박정수 등<sup>(39)</sup>은 전기자동차 모터 기술에 적용되는 세라믹 볼베어링에 대해 볼 평가 기준을 마련하고자 압쇄시험을 수행하였다. 압쇄시험 조건에 따른 반복 시험으로 세라믹 볼의 양산성 또한 검증하였다.

서동찬 등<sup>(40)</sup>은 회전 속도에 따른 베어링 시스템의 온도를 고려하여 각 접촉 볼 베어링의 열팽창 및 강성 변화를 예측하였다. 예측 모델을 통해 베어링 회전속도 및 윤활유 공급량이 강성에 미치는 영향을 연구하였다.

박형준 등<sup>(41)</sup>은 볼베어링에서 발생하는 다양한 결함을 빠르게 규명하며 사전에 방지하기 위해 합성곱 신경망(CNN: Convolution Neural Network) 알고리즘을 제시하였다. 총 여섯 가지 종류의 볼베어링 결함 상태에 따른 가속도 신호를 모델 학습에 적용하였으며 그 신뢰성을 확인하였다.

이학준 등<sup>(42)</sup>은 극저온 조건에서 액체질소로 윤활하는 볼베어링에서 유체 상변화에 따른 유동 특성을 분석하였다.  $k-e$  난류 모델을 사용하여 축 회전에 따른 마찰열을 반영하였다. 이를 통해 베어링 내 발생하는 상변화에 따른 국부적인 고온지점 등 열전달 성능 저하에 미치는 영향을 연구하였다.

조채령 등<sup>(43)</sup>은 다중물리 해석을 통해 오일 압력에 의한 볼베어링 요소의 탄성 변형을 예측하였다. 정밀한 예측을 위해 볼의 타원 접촉 형상을 반영하여 실제 볼베어링의 탄성유체 윤활 및 구동 특성을 분석하였다.

설계 단계에서 볼베어링의 성능을 예측하고 시스템에 적용하는 것은 매우 중요하다.

Taylor 등<sup>(44)</sup>은 두 가지 상용 구름요소베어링 해석 소프트웨어의 가정, 계산 방법 그리고 해석 결과를 분석하였다.

김용하 등<sup>(45)</sup>은 개념 설계 단계에서 계산 효율성을 높이기 위해, 딥 그루브 볼베어링의 강성 예측에 대한 해석 기법을 제시하였다. 한 개의 볼에 대해 준해석적 기법으로 예측한 강성을 전체 모델에 대한 유한요소해석 결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 검증된 모델은 설계 단계에서 해석에 소모되는 시간과 비용을 줄여 계산 효율성을 향상시켰다.

문선우 등<sup>(46)</sup>은 세라믹 볼베어링의 볼 연마 측면에서 효율적인 연마시스템을 구축하고자 방법론적 연구를 수행하였다. 연구를 통해 안정적인 연삭메커니즘을 확보하기 위한 조건을 규명하였으며 생산성 향상에 이바지하였다.

김윤지 등<sup>(47)</sup>은 고속 회전하는 회전체-베어링 시스템에서 각 접촉 볼베어링의 접촉면에서 발생하는 마찰과 윤활유의 점성 마찰 등으로 발생하는 발열을 고려하였다. 발열로 인한 베어링의 열팽창과 함께 회전축의 불균형 질량에 의한 과도 응답을 반영하였다. 즉, 온도와 함께 시스템의 불균형 크기에 따른 베어링의 피로 수명을 예측하였다.

#### 4.2 롤러 베어링

롤러 베어링(Roller bearing)은 베어링 내륜과 외륜 사이 구름요소로 롤러가 삽입되는 구름베어링이다. 볼베어링과 비교하여 구름요소가 베어링 내륜 및 외륜과 접촉하는 면적이 넓어 높은 하중 지지력을 가진다는 장점이 있다. 볼베어링과는 다르게 롤러베어링에 대해서는 열효과, 응력 그리고 진동 특성에 대해 해석적인 연구만 수행되었다. 롤러베어링의 접촉 상태는 베어링 구동 특성과 형상 치수 변화에 영향을 미치므로 해석 모델을 통해 예측할 필요가 있다.

김태우 등<sup>(48)</sup>은 복열테이퍼 롤러베어링의 접촉 상태 변화

를 예측하고자 열변형, 윤활유 물성치 변화 그리고 간극 변화 등을 고려하였다. 이를 통해 베어링 시스템에서 발생하는 열효과를 억제하기 위한 설계 방향을 제시하였다.

박성호<sup>(49)</sup>는 축 회전 시 발생하는 롤러베어링 내·외륜과 구름요소의 미끄러짐을 분석하고자 롤러의 크기 별 발열량을 연구하였다. 연구 결과, 롤러의 수와 발열량의 관계를 규명하였으며 롤러의 개수를 제한할 시 발열량을 최소화할 수 있음을 밝혔다. 또한 적용되는 시스템에 대하여 베어링 수명, 하중 지지력 그리고 적용 가능성 등을 포괄적으로 고려하여 롤러의 수를 결정할 것을 제안하였다.

이윤권 등<sup>(50)</sup>은 상용 차량에 적용되는 테이퍼 롤러베어링에 대한 연구를 진행하였다. 실제 운전 조건을 고려한 하중 조건을 통해 차량 중량에 의한 축 하중과 모멘트 조건에 따른 베어링 내륜과 외륜의 최대 전단응력을 예측하였다.

Duan 등<sup>(51)</sup>은 유성 기어에 적용되는 롤러베어링의 다물체 동역학 모델을 통해 롤러와 케이지 간의 하중 특성을 규명하였다. 해석 모델을 통해 하중이 베어링 및 롤러에 미치는 영향을 분석하고 설계 방향을 제시하였다.

#### 5. 마그네틱 베어링

마그네틱 베어링은 자기력을 통해 회전축의 하중을 지지하는 베어링으로 비접촉 회전이 가능하고, 기계적인 마찰이나 마모가 없어 수명이 길다. 그러나 단순히 전자석 자체만으로는 비접촉 부상이 불가능하여 위치 제어가 필수적이다. 따라서 주로 마그네틱 베어링 시스템의 효율적인 제어와 상태 감시를 위해 설계 파라미터를 연구하고, 실험을 통해 검증하는 연구가 진행되었다.

노명규 등<sup>(52)</sup>은 마그누스 효과(Magnus effect)를 사용하여 선박의 추진을 돕는 로터 세일(Rotor Sail)을 지지하기 위한 마그네틱 베어링 개념설계를 진행하였다. 베어링 설계 시, 회전축에서 발생하는 마찰을 줄이고 시스템의 효율을 개선할 수 있도록 로터 세일의 동적 특성, 하중 및 공급 전원을 고려할 것을 제안하였다.

조성원 등<sup>(53)</sup>은 소형 풍력 발전기의 발전량 감소와 잦은 유지 보수의 원인인 베어링 마찰을 줄이고자 기존의 구름 베어링을 대체할 수 있는 마그네틱 베어링을 개발하였다. 풍력 발전기의 하중에 적합한 자기력을 가지는 N35 등급 네오디뮴 자석을 사용하여 마그네틱 베어링을 설계하였다. 자체 제작한 소형 풍력 발전 시스템에 제작한 마그네틱 베어링을 적용하여 성능 평가를 진행하였으며, 기존 베어링 대비 최대 약 2.5배의 많은 전압이 출력되는 것을 확인하여 그 우수성을 증명하였다.

노명규 등<sup>(54)</sup>은 상용 3상 인버터 적용이 가능한 9극 마그네틱 베어링을 설계하였다. 9극 마그네틱 베어링의 극을 3개의 그룹으로 나눠 전류분배행렬식을 구해 3상 인버터로 구동

가능하도록 설계하였다. 마그네틱 베어링의 부상 제어기를 적용하여 측정된 출력민감도가 ISO14839-3의 기준을 넘지 않아 성능이 적합하였다.

윤태광 등<sup>(55)</sup>은 전자석 설계 사양과 비교 검증하여 신뢰성을 확보한 능동 마그네틱 베어링의 하중지지 성능 평가 방법을 제시하였다. 마그네틱 베어링 단품에 대한 성능을 실험하기 위해 각각 반경 방향, 축 방향에 대한 성능 평가가 가능한 실험장치를 설계 및 제작하였다. 능동 마그네틱 베어링 샘플을 제작하여 하중지지력을 측정된 결과 전자석 설계 결과와 부합하는 것을 확인하였다. 이에 따라 제작한 실험장치를 통해 능동 마그네틱 베어링의 신뢰성 있는 단품 성능평가 가능성이 보였다.

마그네틱 베어링 제어기의 설계를 위해서는 마그네틱 베어링의 자기중심, 공극, 그리고 정적 부하와 같은 설계하고자 하는 시스템의 정확한 정보가 필요하다. 하지만, 제작 공차와 조립 등의 문제로 인해 자기중심, 정적 부하와 같은 시스템의 파라미터에 불확실성이 존재한다.

노명규 등<sup>(56)</sup>은 측정이 어려운 베어링의 기계중심과 자기중심 간의 차이인 중심 오차를 추정할 수 있는 이론적 배경을 제시하였다. 다수의 극을 가진 마그네틱 베어링의 전류와 힘의 관계를 표현한 벡터-행렬 식과 힘의 평형 공식을 활용하여 중심 오차와 정적 부하를 추정하였다. 향후 저자는 이를 반영한 불확실성 모델을 실험을 통해 검증할 예정이다.

송미선 등<sup>(57)</sup>은 마그네틱 베어링 제어기의 성능 향상을 위해 공극과 베어링의 자기중심에 대한 불확실성이 반영된 불확실성 모델을 제안하였다. 또한 이를 실험적으로 검증하기 위해 두 개의 반경방향 하중을 지지하는 마그네틱 베어링으로 구성된 실험 장치를 활용하여 시스템의 주파수 응답을 측정하였다. 이를 바탕으로 불확실성 모델의 검증을 완료하였으며, 제시된 방법을 통해 실험적으로 공극과 베어링의 중심 위치를 추정할 수 있음을 보였다.

## 6. 스퀴즈 필름 댐퍼

스퀴즈 필름 댐퍼(Squeeze film damper)는 회전체 베어링 시스템에 감쇠를 부여하여 회전축 임계속도에서의 동적 거동 크기를 줄이거나 불안정성이 나타나는 회전 속도를 증가시킨다. 이를 통해 불균형 질량으로 인한 시스템의 응답과 회전체동역학적 불안정성을 효과적으로 억제한다. 2022년에는 스퀴즈 필름 댐퍼가 상대적으로 큰 진폭으로 거동할 때 발생하는 비선형성을 강조하며 이에 관련한 연구가 수행되었다.

정현성 등<sup>(58)</sup>은 스퀴즈 필름 댐퍼의 보다 정확한 동적 특성 예측을 위해 비교적 큰 진폭의 진동 환경에서 비선형화된 기법을 활용한 동적 계수 예측을 진행하였다. 유체의 관성 효과를 고려하였으며, 정적 상태에서의 압력장, 유량, 그리

고 변위 등을 계산하여 동적 상태의 초기 조건으로 활용하였다. 동적 계수는 정적 상태 모델을 특정 주파수와 궤적으로 가진하여 얻어진 응답을 통해 계산하였으며, 이를 참고 문헌과 비교하여 검증하였다. 이를 통해 구축한 해석 모델은 비교적 큰 진폭으로 진동하는 환경에서는 기존의 해석 모델의 한계점을 극복할 수 있으며 보다 유효하게 사용할 수 있음을 보였다.

류근<sup>(59)</sup>은 스퀴즈 필름 댐퍼의 비선형 동적 거동을 야기하는 원인을 고찰하였으며, 터보기계에서 발생하는 갑작스러운 동적 거동의 증가 현상을 예측할 수 있는 방법을 연구하였다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 성능은 회전체 거동의 크기, 편심, 유체의 공급 조건, 실링 형상 그리고 캐비테이션 등 매우 복합적인 요소들에 의해 결정된다. 하지만, 스퀴즈 필름 댐퍼의 동적 계수의 실험적 측정 및 규명에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없으며, 단순한 조건 및 형상에 국한되어 설계 및 예측 과정에 사용되고 있다. 이에 스퀴즈 필름 댐퍼의 정확한 설계와 특성 예측을 위해 다양한 작동 조건에서의 실험적 연구가 필요함을 보였다.

위민수<sup>(60)</sup> 등은 볼 베어링과 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지되는 고속 전기 모터 설계를 위해 회전체동역학 해석을 수행하였다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 동하중 계수를 도출하기 위해 선형 해석이 반복되었으며, 고유진동수, 모드 형상, 안정성 및 불균형 질량 응답이 예측되었다. 모든 작동 영역 범위 안에서 회전축-베어링 시스템은 안정한 것으로 나타났고, 스퀴즈 필름 댐퍼의 변위는 간극의 10% 이하로 계산되었다. 이후, 예측된 회전체동역학 특성에 근거하여 고풍력 전기 모터의 제작이 진행되었다.

## 7. 구조 감쇠 댐퍼

구조 감쇠 댐퍼는 댐퍼의 소재가 가지는 자체적인 구조 감쇠 특성을 이용하는 기계 요소 부품으로 다양한 회전체 시스템에 적용되어 극심한 진동을 방지한다. 추가적으로 이러한 구조 감쇠 댐퍼는 회전체 시스템의 동적 안정성을 향상시킬 수 있다. 구조 감쇠 댐퍼의 종류로는 범프 포일 댐퍼, 와이어 메쉬 댐퍼, 폴리머 댐퍼 및 점탄성 댐퍼 등이 있다.

정권중 등<sup>(61)</sup>은 2 패드 빔 포일 댐퍼가 적용된 베어링의 간극을 변화시키며 베어링의 동적 성능을 실험적으로 평가하였다. 실험 결과, 간극이 감소할수록 베어링 강성과 감쇠 계수는 증가하였다. 또한 감쇠 계수는 가진 주파수의 증가에 따라 비선형적으로 감소하였다.

## 8. 실

### 8.1 래버린스 실

래버린스 실(Labyrinth Seal)은 비접촉 실로서 가스 터빈이나 압축기, 펌프 등 터보 기계에서 자주 사용되는 부품이며 제작 및 설치가 용이하고 기밀 특성이 우수하다. 래버린스 실은 다양한 속도 및 압력에서 사용이 가능하다는 이점이 있으나 실과 로터 사이 간극으로부터 발생하는 유체의 힘에 의해 회전기에 불안정한 진동을 유발할 수 있다. 팁 이(teeth)의 개수, 팁 형상 및 간극 등에 의해 래버린스 실의 기밀특성이 달라질 수 있기 때문에 래버린스 실의 정확한 누설 유량 및 동특성 계수에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다.

이정인 등<sup>(62)</sup>은 단순한 형상을 가지는 스월 브레이크(Swirl Brake)가 장착된 래버린스 실의 동특성 계수를 예측하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였으며 기존 스월 브레이크가 없는 래버린스 실과 특성을 비교하였다. 해석 모델의 지배방정식으로는 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 이상 기체방정식을 사용하였으며, 열전달 및 난류 해석에 등은 열전달 모델과 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다. 해석 결과, 스월 브레이크가 장착된 래버린스 실의 연성강성계수는 기존 스월 브레이크가 없는 래버린스 실과 동일하게 프리스월 비(Pre-Swirl Ratio) (유체의 원주방향 유속 성분/로터 표면 속도)가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 감쇠계수는 두 래버린스 실에서 프리스월 비와 관계 없이 모두 일정하게 나타났다. 그리고 정방향 프리스월의 경우, 유효감쇠계수는 스월 브레이크가 장착된 래버린스 실이 높게 나타났으며, 역방향 프리스월의 경우에는 기존 래버린스 실의 유효감쇠계수가 더 높게 나타났다. 이를 통해 스월 브레이크 형상 최적화를 통해 더 넓은 프리스월 범위에서 래버린스 실의 동특성을 개선할 수 있음을 보였다.

박근서 등<sup>(63)</sup>은 데이터 예측 모델로 Feed Forward Neural Network(FFNN)을 활용하여 래버린스 실의 성능을 예측하고 이를 CFD 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과, FFNN을 활용한 해석은 약 2초 이내로 빠르게 결과를 예측할 수 있으며 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 데이터양을 72개부터 216개까지 다르게 학습하여 데이터의 양질을 확인하였고 120개 지점에서 가장 낮은 오차(1.7%)가 나오는 것을 확인하여 양질의 데이터로 판단하기 위한 학습 변수를 제시하였다.

전예완 등<sup>(64)</sup>은 래버린스 실의 공동 폭, 계단부 높이, 그리고 계단부 위치의 형상변화에 따른 토출계수 수치해석적으로 계산하였다. 해석 결과, 토출계수는 실의 공동 폭, 계단부

높이 및 위치에 따라 변하는 것을 확인하였으며 최대수축단면적의 크기, 간극 입구에서의 Y축 방향 속도 분포, 공동 내 유동장은 토출계수와 밀접한 연관성을 가지고 있다는 것을 제시하였다. 또한, Wall shear stress는 공동 폭 및 계단부 위치와 토출계수와 연관성이 있는 반면에 계단부 높이와는 토출계수가 연관성이 없는 것을 보였다.

문민주 등<sup>(65)</sup>은 래버린스 실 형상에 따른 누설 특성 및 동특성 계수의 변화를 기존 연구와 비교하기 위해 ANSYS CFX를 사용한 해석적 연구를 수행하였다. SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였으며 3차원 Reynolds Averaged Navier Stokes(RANS) 방정식을 적용하였다. 해석 결과, 동특성 계수는 기존 연구와 약 10%의 편차가 있었으며, 유체의 유동 특성과 압력 분포를 통해 래버린스 실의 형상에 따른 편차의 원인을 분석하였다.

이현균 등<sup>(66)</sup>은 누설 유량을 저감하기 위해 새로운 디자인을 가지는 직선형 래버린스 실 tooth의 오른쪽 윗부분을 비스듬히 잘라내는 방식을 고안하였다. 이를 통해 누설 유량에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, Top tooth의 두께를 변경하여 진행한 4가지 케이스 모두 전통적인 직선형 래버린스 실의 토출계수가 감소하는 것을 확인하였다. Top tooth width가 감소하면 토출계수 또한 감소하였으며 Bottom tooth width가 7.5 mm까지 증가할 때 토출계수는 감소하였지만 이를 초과할 시 토출계수가 증가하였다. 반면, Tooth shape과 Tooth inclination angle은 토출계수에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

이정인 등<sup>(67)</sup>은 로터-실 시스템의 동적 안정성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 로터는 유한요소 기반의 플렉시블 로터 모델을 사용하였으며 실은 다목적 유전 알고리즘을 사용하였다. 연구 결과를 통해 누설 유량은 감소하였으며 분리 여유 15% 이상, 최대 불균형 응답 진폭은 간극을 초과하지 않는 것을 확인함으로써 최적의 실 형상을 선정하였다.

곽용준 등<sup>(68)</sup>은 작동 유체로 액화 메테인을 사용하여 CFD 해석을 수행하였으며 기존 연구에서 사용한 직선형 래버린스 실의 형상에 따른 누설 특성을 연구하였다. 래버린스 실의 내부 유동은 3차원 비압축성 정상유동으로 간주하였으며 수치해석을 위해 연속방정식, 운동량 방정식, 난류 운동에너지 방정식, 그리고 난류 운동에너지 소산율 방정식을 사용하였다. 해석 결과, 간극의 크기가 증가할수록 실의 누설 유량도 크게 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 공동의 개수가 1개 일 때 보다 5개 일 때 누설 유량이 줄어드는 것을 예측하였으며 공동 너비 또한 6 mm까지 증가할수록 누설 유량이 감소하는 것을 확인하였다. 해석 결과 분석을 통해 래버린스 실의 누설 유량이 23.85% 감소하는 최적형상을 제시하였다.

조현우 등<sup>(69)</sup>은 누설 성능 및 열변형률을 예측하기 위한 래버린스 실 및 틸팅 패드 저널 베어링의 해석 모델을 제시하였다. 래버린스 실 경우, 속도 분포 불균일성 보정계수와

오리피스 수축 계수, 실 간극의 면적, 질식 현상 판별 여부, 그리고 질식 현상이 발생할 경우에 대한 식을 활용하여 공동 누설 유량을 계산하였다. 틸팅 패드 저널 베어링 경우, 베어링 패드 간극 변화량 및 베어링 간극 변화량을 계산하기 위한 수식을 사용하였으며 열효과에 의한 모멘트 힘 식을 나타냈다. 이를 바탕으로 제안한 해석 모델이 향후 가변 유체 기기용 베어링 및 실 설계의 참고 자료로 활용 될 수 있음을 보였다.

정진우 등<sup>(70)</sup>은 동적 상태에서의 래버린스 실(Labyrinth Seal), 브러쉬 실(Brush Seal), 하이브리드 동압 실(Hybrid Hydrodynamic Seal)의 누설 유량을 실험적으로 측정하고 비교하기 위해 회전체 실험장치를 구축하였다. 입구 압력과 압력비 조절은 입출구 압력조절 장치를 사용하였으며 공기의 누설 유량을 측정하기 위해 입구와 입구 압력조절 장치 사이에 유량계를 설치하였다. 실험 결과, 래버린스 실의 누설 유량이 브러쉬 실 누설 유량의 약 2배로 가장 크게 측정되었다. 또한, 하이브리드 동압 실의 누설 유량 변화는 압력비 증가에 따라 둔감하다는 것을 확인하였다. 이를 통해 현 실험결과를 향후 낮은 누설 특성을 가지는 실의 해석 모델 개발의 데이터베이스로 활용이 가능함을 보였다.

강병운 등<sup>(71)</sup>은 래버린스 실을 활용하여 이차 유로를 구성하였으며 실이 75톤급 터보펌프의 수력 성능에 미치는 영향에 대해 실험적으로 비교 및 평가하였다. 작동 유체는 상온의 물을 사용하였으며 폐회로로 구성된 실험장치를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 래버린스 실을 적용하였을 때 터보펌프의 양정은 1.77%, 효율은 1.47% 상승한 것을 확인하였다. 또한, 래버린스 실의 불안정성은 기존 플로팅 링 실(Floating Ring Seal) 보다 낮다는 것을 확인하였다.

김혁제 등<sup>(72)</sup>은 허니콤 셀의 크기와 깊이가 래버린스 실 성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여, 공기의 압력비를 조절하며 누설 유량을 실험적으로 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 다양한 실의 형상 인자와 압력비를 고려하여 누설 유량을 예측하기 위한 상관 관계식을 도출하였으며, 압력비가 높지 않은 구간에서는 도출한 상관 관계식이 실험 결과를 잘 예측함을 확인하였다. 실험을 통해 향후 허니콤 및 실 형상에 대해 최적 설계를 진행할 예정이다.

## 8.2 림 실

이차 유로 시스템을 가지는 림 실(Rim Seal)은 가스 터빈의 고정자와 회전자 사이 간극으로 주 유동이 유입되는 것을 차단함으로써 디스크 내부의 열 손상을 방지한다. 림 실에 사용되는 냉각 유량 사용량이 많아질수록 터빈 전체 효율이 감소하기 때문에 최소한의 냉각 유량을 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

윤태두 등<sup>(73)</sup>은 가스터빈 회전부 림 실의 두께에 따른 내

부 압력, 실링(sealing) 효율 및 유동 변화에 대해 수치 해석을 수행하였다. 고온 및 고압에서 발생할 수 있는 전향 디스크 상황 및 전향 계단 상황을 고려하여 해석을 수행하였으며 비정상상태 유동을 분석할 수 있는 URANS (Unsteady Reynolds - averaged Navier - Stokes) 해석 방법을 사용하였다. 로터 디스크에서 반경 방향 및 축 방향의 단차가 발생했을 경우에 대해 해석을 수행하였으며 이차유량이 0.0222kg/s 일 경우 실링 효율은 각 21.7%, 7% 증가하였으며 0.0444kg/s 일 경우 실링 효율은 각 22.4% 감소 및 24.6% 증가하는 것을 확인하였다.

이재성 등<sup>(74)</sup>은 곡선형 성곽구조 형상을 가지는 림 실을 가스터빈에 적용하여 실의 최적 위치 및 범위를 찾기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 상용 프로그램을 이용한 해석을 수행하였다. URANS (Unsteady Reynolds - averaged Navier - Stokes) 해석 방법을 사용하였으며, 난류를 고려하여  $\kappa$ - $\epsilon$  모델을 사용하였다. 해석 결과를 바탕으로 곡선형 성곽구조를 가지는 실의 최적 위치를 선정하였으며, 아우터 휠 스페이스(Outer Wheel-Space)에서의 실링 효율이 증가함을 보였다.

윤태두 등<sup>(75)</sup>은 고속 회전 실험 리그를 구축하였으며 림 실 내부 냉각 유량과 교차 유동의 비율을 변경하여 실링 효율을 실험적으로 측정하여 분석하였다. 총 냉각 유량은 유지한 상태로 휠 스페이스(Wheel Space)와 교차 유동을 통해 유입되는 냉각 유량의 비를 1:1과 3:1로 나누어 진행하였다. 멀티 채널 압력스캐너 장치를 사용하여 압력을 측정하였으며 냉각 유량에 CO2 기체를 일정 농도로 유입시킨 후 포집된 기체의 CO2의 농도를 측정하였다. 실험 결과, 냉각 유량의 비가 3:1인 경우 최대 10.2%의 효율 증가를 확인하였으나 냉각 유량의 비가 1:1인 경우에는 실링 효율이 최대 4.6% 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 냉각 유량의 비가 실링 효율에 미치는 영향을 제시하였다.

## 8.3 평 실

김보람 등<sup>(76)</sup>은 편심 효과를 고려한 CFD 과도해석을 수행하여 비접촉 평 실(Plain Seal)의 누설 유량을 실험 결과와 비교 및 분석하였다. 평 실은 반지름 38.15 mm, 간극 0.11 mm, 길이 34.93 mm를 가지며 등온과정 및 비압축성으로 가정하여 해석을 진행하였다. 해석 결과, SST 난류 모델을 적용하고 표면거칠기 0.5 micron 조건에서 예측을 가장 잘 진행하는 것을 확인하였다.

문민주 등<sup>(77)</sup>은 Bulk Flow 모델 및 CFD 모델을 통해 평 실의 간극과 표면 거칠기에 따른 누설 유량 및 동특성 계수를 예측 및 비교하였다. Bulk Flow 모델은 Navier-Stokes 방정식과 Reynolds 방정식을 사용하여 원주 및 축방향의 운동량 방정식을 유도하였다. 두 모델을 통해 누설 유량 및 동



특성 계수를 예측하였으며 기존 해석 결과와 비교를 통해 수행한 두 개의 해석 모델을 검증하였다.

#### 8.4 기타 실

김보람 등<sup>(78)</sup>은 서로 다른 디자인을 가지는 일자 실 (Straight Seal), 계단형 실(Stepped Seal), 그리고 제트 실 (Z Seal)에 대해 유동해석을 수행하여 각각의 누설 유량을 예측 및 비교하였다. 해석 결과, 일자 실, 계단 실, 그리고 제트 실의 누설 유량은 각각 4.87 kg/s, 3.54 kg/s, 그리고 3.48 kg/s로 제트 실의 유량이 가장 작게 나오는 것을 확인함으로써 누설 유량 측면에서 가장 우수함을 보였다.

방혜진 등<sup>(79)</sup>은 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정에서 사용되는 로터리 유니온 실 유닛(Rotary Union Seal Unit)에 대해 수명 및 내환경성 시험을 진행하였다. 수명시험에는 5개의 시료, 내환경성 시험에는 2개의 시료가 각각 사용되었으며 수명시험에서는 5개의 시료가 동시에 시험이 가능한 시험 장비를 설계 및 제작하여 실험을 진행하였다. 또한, 건전성을 확인하기 위해 헬륨 누설시험에 2개의 시료를 사용하였으며 사전에 수행한 구조 해석을 통해 건전성을 입증하였다. 또한, 실 유닛 외관의 이상여부를 확인하였으며 내부 실에서 누설이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 로터리 유니온 실 유닛에 대한 신뢰성을 입증하였다.

### 9. 결 론

2022년도에는 회전기계 상태 진단 및 회전체 동역학 분야 관련 연구가 많이 발표되었으며, 그 뒤를 이어 작동 유체의 누출을 막기 위한 실 관련 연구가 진행되었다. 이와 같이 회전기계 시스템의 효율을 향상시키기 위한 연구 및 회전기계의 동력을 원활하게 전달하기 위한 베어링 연구가 진행되고 있다. 표준화 되어있는 볼 베어링 및 유체 베어링에 대한 연구의 수는 비슷하게 이루어지고 있었으며 상대적으로 마그네틱 베어링에 대한 연구는 적었다. 또한 댐퍼, 오링 등의 감쇠 요소 부품에 대한 연구 역시 많이 이루어지지 않았다.

소프트웨어가 발전함에 따라 시뮬레이션 프로그램 역시 발달하였으며, 구조 및 열적 특성까지 포함하는 다중물리해석 기법들이 적용되고 있다. 이와 같이 성능 예측은 보다 정교해지고 있으며, 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) Park, J., Lee, B., Hwang, S., and Kim, C., 2022, "Anomaly Detection of Bearing Failure using Acceleration Data and Isolation Forest," Proceedings of the KTS Fall Conference, p. 137.
- (2) Kim, T., Yoo, J., Park, J., Ha, J., and Youn, B., 2022, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Fault Feature Enhancement Method and Time Synchronous Averaging," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 9~10.
- (3) Hwang, J., Dan, C., Shim, J., Song, C., and Nam, S., 2022, "Intelligent Bearing Fault Diagnosis of a Smart Ball Bearing Spindle System," Proceedings of the KSPE Spring Conference, p. 653.
- (4) Hwang, J., Dan, C., Shim, J., Song, C., Kim, J., and Nam, S., 2022, "Sensor Data Processing Module and Its Embedded SW for Machine Tool Status," Proceedings of the KSPE Autumn Conference, p. 653.
- (5) Oh, H., Choi, J., Kim, M., and Lee, C., 2022, "Compactness-based Feature Engineering Algorithm for Diagnosing Driven Roll in Roll-to-roll Continuous Process," Proceedings of the KSPE Spring Conference, p. 939.
- (6) Kang, J., Song, T., Lee, J., Song, D., Kwon, J., Lee, I., and Seo, J., 2022, "Fault Diagnosis of High-Speed Rotating Machinery With Control Moment Gyro for Medium and Large Satellite Using Envelope Spectrum Analysis," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 50, No. 6, pp. 413-422.
- (7) Kim, Y., Jeon, H., and Kim, Y., 2022, "A Study of Ball Bearing Fault Classification using CNN and Interpretation using Grad-Cam," Proceedings of the KSME Spring Conference, p. 52.
- (8) Ahn, H., Jeon, H., Zheng, Y., and Vo, N., 2022, "Real-time Monitoring System for a Meglev Small Compressor," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 71~72.
- (9) Han, D., Kim, S., Kim, Y., and Lee, S., 2022, "Real Time Fault Diagnosis of UAV Engine Using IMM Filter and Generalized Likelihood Ratio Test," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 50, No. 8, pp. 541-550.
- (10) Oh, H., Choi, M., Yoo, D., and Lee, C., 2022, "Potential and Limitations of Domain Adaptation on Rotating Machine Diagnosis," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 77~78.
- (11) Yoo, J., Park, J., Kim, T., Ha, J., and Youn, B., 2022, "Potential and Limitations of Domain Adaptation on Rotating Machine Diagnosis," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 97~98.

- (12) Kim, C., Jeon, H., Yu, K., and Ryoo, C., 2022, "Trubofan Engine Signal Generation Based on Experimental Data," Proceedings of the KSAS Fall Conference, pp. 1413~1414.
- (13) Jeon, H., Yu, K., Kang, T., Kim, C., and Ryoo, C., 2022, "Performance Analysis of Real-Time Fault Classification/Detection Algorithm for Engine Rotor," Proceedings of the KSAS Spring Conference, pp. 723~724.
- (14) Han, D., Kim, S., and Lee, S., 2022, "A Realization of Real Time Algorithm for Fault and Health Diagnosis of Turbofan Engine Components," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 50, No. 10, pp. 717~727.
- (15) Kim, Y., Lee, J., Ko, J., Kim, T., and Youn, B., 2022, "Pseudo-labeling-based Domain Adaptation for Fault Diagnosis in Rotating Machinery," Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 79~80.
- (16) Kim, Y., Lee, J., Ko, J., Kim, T., and Youn, B., 2022, "Instant Distance in Latent Space based Domain Adaptation for Fault Diagnosis in Rotating Machinery," Proceedings of the KSME Annual Meeting, pp. 1595~1596.
- (17) Jang, M., 2022, "Rotor Dynamic Analysis of Rotor-Bearing System in Sloped Environments," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 192~193.
- (18) Kim, J., and Ryu, K., 2022, "Commercial Rotordynamics Software Tools: A Review," Proceedings of the KSAS Fall Conference, pp. 1572~1573.
- (19) Lee, D., Oh, H., and Kim, C., 2022, "Rotor Unbalance and Misalignment Simulation using Finite Element Model," Proceedings of the KSME Annual Meeting, p. 1526.
- (20) Lee, D., Kim, B., Jung, J., and Lim, H., 2022, "Rotordynamic Analysis and Operation Test of Turbo Expander with Hydrostatic Bearing," Tribology and Lubricants, Vol 38, No. 2, pp. 33~40.
- (21) Kim, S., Choi, W., Yoo, I., Park, M., and Hwang, S., 2022, "Layout Design and Dynamic Characteristic Analysis for Rotational Stability of the Axial Pump," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 406~407.
- (22) Cho, H. W., Kim, T. H., 2022, "Measurements of the Static Performance of a Plain Journal Bearing: Influence of Oil Flow Rate," Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 15~16.
- (23) Lee, J., Park, J., Choi, K., Park, C., and Yang, H., 2022, "A Study on the Determination of Rotordynamic Stability of FCEV Air-compressor Supported by Air Foil Bearing," Proceedings of the KSFM Summer Conference, pp. 71~72.
- (24) Baek, D., Hwang, S., Kim, T., Lee, J., and Kim, T., 2022, "Measurements and Predictions of Rotordynamic Performance of a Motor-Driven Small Turbocompressor Supported on Oil-Free Foil Bearings," Tribology and Lubricants, Vol 38, No. 2, pp. 53~62.
- (25) Kim, D. Y., Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2022, "Effects of Shaft Angular Acceleration on Friction Coefficient of Gas Foil Thrust Bearings," Proceedings of the Tribology and Lubricants Fall Conference, pp. 105~106.
- (26) Kim, D. Y., Hwang, S. H., Kim, T. H., Lee, J. S., and Park, J. H., 2022, "Identification of Lift-off and Drag Torque Performances of Gas Foil Thrust Bearings for Increasing Outer Dimeters," Proceedings of the Tribology and Lubricants Spring Conference, pp. 33~34.
- (27) Hwang, S. H., and Kim, T. H., 2022, "Performance Prediction of Gas Foil Thrust Bearings with Curved Incline Geometry,," Proceedings of the 2022 KSFM Summer Annual Meeting, pp. 13~14.
- (28) Jeong, G., Baek, D., and Kim, T., 2022, "Identification of Rotordynamics Performance of Gas Foil Journal Bearing with Two-Pad Beam Foils," Proceedings of the KTS Spring Conference, pp. 35~36.
- (29) Jeong, G., Hwang, S., Baek, D., Kim, T., and Kim, T., 2022, "Rotordynamic Performance Measurements of a Two-Pad Beam-Type Gas Foil Journal Bearing for High Speed Motors," Tribology and Lubricants, Vol 38, No. 5, pp. 205~212.
- (30) Jeong, S., 2022, "A Study on the Improvement of Rotordynamics Prediction Accuracy of Integrally-gear Turbo Compressor with Tilting Pad Journal Bearing," Proceedings of the KSFM Winter Conference, pp. 118~119.
- (31) Kim, K., and Ryu, K., 2022, "Measurements of Dynamic Force Coefficients of Compressible Fluid Lubricated Hybrid Journal Bearings for Various Rotor Speeds," Proceedings of the 2022 KSPE Spring Conference, pp. 134~135.
- (32) Heo, J., and Ryu, K., 2022, "Additively Manufactured Hybrid Tilting Pad Journal Bearings: Measurements of Static Load Characteristics," Proceedings of the 2022 KSAS Fall Conference, pp. 460~461.
- (33) Lim, H., and Ryu, K., 2022, "Turbulent Flow Hybrid Thrust Bearings for Cryogenic Applications: Predictions of Static Load Characteristics," Proceedings of the 2022 KSAS Fall Conference, pp. 462~464.
- (34) Heo, J., and Ryu, K., 2022, "Effect of Temperature on the Structural Characteristics of Tilting Pads in an Additively Manufactured Hybrid Tilting Pad Bearings: Measurements," Proceedings of the 2022 KSPE Spring Conference, pp. 83~85.
- (35) Wee, M., Kim, K., and Ryu, K., 2022, "Effect of

- Operating Time on the Rotordynamic Characteristics of a Hybrid Journal Bearing Supported Rotor System,” Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 131~132.
- (36) Yi, H., Wee, M., Jung, H., Kim, K., and Ryu, K., 2022, “Dynamic Behavior of Liquid Nitrogen Lubricated Shaft Support System,” Proceedings of the KSAS Spring Conference, pp. 219~220.
- (37) Ko, H. B., Park, H. J., Lee, K. K., and Han, S. H., 2022, “Fault Classification of Ball Bearings Using a Convolution Neural Network,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 46, No. 5, pp. 521~527.
- (38) Park, J., Lee, C., and Choi, J., 2022, “The Study of Electric Erosion for High Speed Deep Groove Ball,” Proceeding of the 2022 KTS Fall Conference, pp. 45~45.
- (39) Park, J., and Kim, J., 2022, “The Evaluation Guideline of Ceramic Ball for Hybrid Bearing used in Electric Vehicle,” Proceeding of the 2022 KTS Fall Conference, pp. 44~44.
- (40) Seo, D., Kim, Y., and Suh, J., 2022, “Stiffness of High-Speed Angular Contact Ball Bearing According to Thermal Effect,” Proceeding of the 2022 KTS Spring Conference, pp. 125~125.
- (41) Park, H. J., Kang, H., and Han, S. H., 2022, “Activation Functions for Fault Classification of Ball Bearings based on CNN Algorithm,” Proceeding of the 2022 KSME Spring Conference, pp. 285~285.
- (42) Lee, H. J., Jung, H. Y., and Kim, S. M., 2022, “Two-Phase Flow Pattern Analysis for LN<sub>2</sub> Lubricated Cryogenic Ball Bearing,” Proceeding of the KSME Fall Conference, pp. 171~171.
- (43) Jo, C., and Park, S. S., 2022, “Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of Ball Bearings with Elliptical Contact,” Proceeding of the 2022 KTS Fall Conference, pp. 31~31.
- (44) Taylor, R., and Kim, D., 2022, “Rolling Element Bearing Performance Prediction Comparison using Different Commercial Software,” Proceeding of the 2022 KSPE Spring Conference, pp. 129~129.
- (45) Kim, Y., 2022, “A Study on the Semi-Analytical Method for Prediction of Stiffness of Ball Bearings,” Proceeding of the KSAS Spring Conference, pp. 631~632.
- (46) Moon, S., and Lee, S., 2022, “A Methodological Study for Grinding Ceramic Balls,” Proceeding of the 2022 KTS Spring Conference, pp. 41~43.
- (47) Kim, Y., Suh, J., Yu, Y., 2022, “A Study on the Prediction of Fatigue Life of an Angular Contact Ball Bearing-Rotor System Considering Thermal Effect based on EHL,” Proceeding of the KTS Spring Conference, pp. 87~87.
- (48) Kim, T., Yu, Y., and Suh, J., 2022, “Evaluation of Contact Condition of Double-Row Tapered Roller Bearings with Thermal Effects based on EHL,” Proceeding of the 2022 KTS Spring Conference, pp. 88~89.
- (49) Park, S., 2022, “A Study on Heat Generation According to Design Parameters and Radial Load of Cylindrical Roller Bearing applied to Gas Turbine Main Shaft,” Proceeding of the 2022 KSAS Fall Conference, pp. 101~102.
- (50) Lee, Y. K., Lee, K. J., Jung, W. K., and Lee, S. P., 2022, “Proceeding of the 2022 KTS Fall Conference, pp. 49~49.
- (51) Duan, X., Liu, Y., Xu, X., Sheng, J., Guo, W., and Lai, J., 2022, “Vibration Characteristics of Roller Bearing in Planetary Application,” Proceeding of the 2022 KSME Fall Conference, pp. 885~885.
- (52) Noh, M., Song, N., Eom, T., and Park, Y. W., 2022, “Preliminary Design of Active Magnetic Bearings for Supporting Rotor Sail, Proceeding of the KSPE Fall Conference, 22AP20-002, pp. 689~683.
- (53) Jo, S., Kim, E., Park, J., Lee, J., Lee, J., and Kim, S., 2022, “Development of Magnetic Bearings that Improve the Efficiency of a Small Wind Turbine,” Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers C, Vol. 10, No. 1, pp. 47~55.
- (54) Noh, M., Jeong, W., and Park, Y. W., 2022, “Design and Implementation of Unbiased Levitation Control for 9-Pole Active Magnetic Bearings,” Proceeding of the KSME Conference, pp. 2113~3114.
- (55) Yoon, T. G., Hong, D. E., and Lee, W. Y., 2022, “Development of a Method for Evaluating the Load Capacity of Active Magnetic Bearing,” Proceeding of the KSPE Fall Conference, 22APP05-002, p. 335.
- (56) Noh, M., Song, M., and Park, Y. W., 2022, “Estimation of Center Mismatch and Stator Load of Active Magnetic Bearings,” Proceeding of the KSME Conference, pp. 2103~2104.
- (57) Song, M., Park, Y. W., and Noh, M., 2022, “Experimental Validation of Active Magnetic Bearing Uncertainty Model,” Proceeding of the KSPE Spring Conference, 22SP24-003, p. 900.
- (58) Jung, H., and Ryu, K., 2022, “Dynamic Force Coefficients of Squeeze Film Damper Using an Orbit-Model: Predictions Comparisons to Literature,” Proceeding of the KSAS Fall Conference, pp. 465~466.
- (59) Ryu, K., 2022, “Squeeze Film Dampers in Turbomachinery: On the Nonlinear Dynamic Behavior,” Proceeding of the KSAS Fall Conference, pp. 467~468.
- (60) Wee, M., Kim, K., and Ryu, K., 2022, “Design of a High Speed Electric Motor System Supported on Ball Bearings and Squeeze Film Dampers,” Proceedings of the KSAS Spring Conference, pp. 1570~1571.
- (61) Jeong, G. J., Baek, D. S., and Kim, T. H., 2022,

- “Identification of Dynamic Characteristics of Beam Foil Bearing Dampers,” Proceeding of the 2022 KTS Fall Conference, pp.107~108.
- (62) Lee, J. and Suh, J., 2022, “Rotordynamic Analysis of Labyrinth Seal with Swirl Brake,” Tribology and Lubricants, Vol. 38, No. 2, pp. 63~69.
- (63) Park, G. S., Hur, M. S., Kim, T. S., Kim, D. H. and J, I. Y., 2022, “Performance prediction method for Labyrinth Seal using Feed Forward Neural Network,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 403~404.
- (64) Chun, Y. H. and Ahn, J., 2022, “Analysis of factors of change in discharge coefficient of stepped labyrinth seals,” Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 309~310.
- (65) Moon, M., Lee, J., Jang, H. and Suh, J., 2022, “Effect of Labtrinth Seal Shape on Flow Characteristics and RotorDynamic Coefficients,” Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 401~403.
- (66) Lee, H. K., Baek, S. I. and Ryu, J., 2022, “Numerical analysis on the influence of new geometrical parameters on leakage in Straight-through labyrinth seal,” Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 358~359.
- (67) Lee, J., Yu, Y. and Suh, J., 2022, “Improvement of Rotordynamic Stability by Modifying Labyrinth Seal Geometry,” Proceedings of the 2022 KTS Spring Conference, p. 90.
- (68) Kwak, Y., Kim, S., Cho, Y., Chang, K. and Baek, H., 2022, “Numerical Study of Labyrinth Seal Geometry for Minimum of Leakafe Flow in LNG Pump,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 25, No. 4, pp. 30~38.
- (69) Cho, H. W., Mehdi, S. M., Jung, J. W. and Kim, T. H., 2022, “Predictions of Thermal Deformation of a Tilting Pad Journal Bearing and Leakage Performance of a Labyrinth Seal for Fluid Machinery,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 385~386.
- (70) Jung, J. W., Hwang, S. H., Jung, G. J. and Kim, T. H., 2022, “Experimental Comparison of Leakage Flow Rates of Labyrinth Seal, Brush seal, Hybrid Hydrodynamic Seal,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 399~400.
- (71) Kang, B. Y., Kim, D. J., Kwak, H. D. and Choi, C. H., 2022, “Hydraulic Performance Evaluation of 75 Tonf Thrust Turbopumps Applied by the Labyrinth Seal,” Proceedings of the 2022 KSAS Fall Conference, pp. 1596~1597.
- (72) Kim, H. J., Kim, W., Kwak, J. S., Kim, D. H. and Jung, I. Y., 2022, “Effect of Honeycomb Cell Size and Depth on the Performance of Stepped Labyrinth Seal,” Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 311~312.
- (73) Yoon, T., Choi, S., Kim, T., Park, H. S. and Cho, H. H., 2022, “Numerical Study on Sealing Effectiveness Changes with Increased Turbine Rotor Rim Seal Thickness,” Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 38~46.
- (74) Lee, J., Yang, H., Kim, D. and Lee, C., 2022, “Positioning of Curved-Castellated Seal in the Gas Turbine Rim Seal to Improve Sealing Effectiveness,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 43~44.
- (75) Yoon, T., Choi, S., Park, H. S., Heo, J. and Cho, H. H., 2022, “Effect of crossflow injection on sealing performance in gas turbine rim seal,” The Korean Society of Mechanical Engineers, p. 312.
- (76) Kim, B., Jang, H. and Suh, J., 2022, “Investigation of eccentric plain seal leakage analysis with transient CFD,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 416~417.
- (77) Moon, M. and Suh, J., 2022, “Prediction on Leakage and Rotordynamic Coefficient of Plain Seal,” Proceedings of the KSFM 2022 Winter Annual Meeting, pp. 614~616.
- (78) Kim, B. and Suh, J., 2022, “A study of leakage flow in different wearing seal design,” Proceedings of the KSFM 2022 Summer Annual Meeting, pp. 368~369.
- (79) Bang, H., Park, J. W., Choi, J. S., An, S. B. and Rhee, H. J., 2022, “Reliability Study on Life Guarantee of a Rotary Uunion Seal Unit for CMP,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 46, No. 12, pp. 1057~1062.