

2015년 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

김태호* · 장경은**

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2015년도 국내 발표된 논문을 중심으로 회전체 동역학 및 그와 관련된 트라이볼로지 요소의 연구동향을 알아본다. 주로 유체 기계과 관련된 분야를 중심으로 분석하였으며, 본지에서 정의한 유체기계는 터보 압축기, 송풍기, 터빈, 펌프 등 산업현장에서 사용되는 회전 기계류이다. 트라이볼로지 요소로는 크게 회전기 요소-베어링, 실댐퍼로 분류하였고, 연구동향의 내용으로는 크게 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구와 회전기기 요소 연구로 구분하여 분석하였다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 자동차 산업의 친환경, 고연비 관련 규제가 강화됨에 따라, 동력을 발생하는 엔진 및 관련 장치에 대한 개발과 회전체 시스템의 필수인 안정성 연구가 활발히 진행되고 있다. 이동현⁽¹⁾ 등은 플로팅 링 베어링으로 지지된 내연기관 자동차용 터보차저 로터의 선형 및 비선형 해석을 통해 진동 특성 결과를 비교하였다. 선형과 비선형 해석 결과는 모두 jump (불안정성 발생) 현상의 모드 모양이 발생하는 순서를 예측할 수 있고, 비선형 해석 결과는 jump 현상이 발생하는 회전 속도를 예측할 수 있음을 확인하였다. 이종성⁽²⁾ 등은 연료전지 자동차에 적용하기 위한 소형 무급유 터보 압축기의 고속 구동 실험 수행하였으며, 서로 다른 간극을 가진 멀티레이어 가스 포일 베어링(GFJB, Gas Foil Journal Bearing)의 안정성을 비교하였다. 이를 통해 베어링 간극 축소는 비동기 진동성분의 발생속도를 높이고, 진동 크기 또한 감소시킴을 보였다. 동일한 터보 압축기에 대해 김태호⁽³⁾ 등은 바닥 가진을 주어 가진 주파수와 가진력에 따라 회전축의 가속도와 임계진동 발생 진동수가 비선형적으로 증가함을 확인하였다. 김태호와 송현승⁽⁴⁾은 다운사이징 3기통 디젤 엔진 샤프트의 불안정한 가진 모멘트를 밸런스샤프트의 적용을 통해 상쇄시킬 수 있으며, 다만 밸런스샤프트를 사용하

면 요잉 모멘트의 급격한 증가는 방지시키고 피칭 모멘트는 효과적으로 감소시킴을 증명하였다.

드럼세탁기는 불평형 질량을 가지는 대표적인 회전 기계로서, 대용량일수록 불평형 질량과 그에 따른 진동 크기가 증가하기 때문에 밸런싱 기술이 중요하다. 정원영⁽⁵⁾ 등은 드럼 세탁기의 불평형 질량의 형태에 맞는 밸런싱 기술을 적용하기 위해 동역학적 해석 모델을 개발하고, 2면 밸런싱 기법을 이용하여 static 불평형 질량과 coupled 불평형 질량의 위치와 형태를 구별 가능성을 보였다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

일반적으로 고출력, 중대형 고속 터보기계는 고속구동 안정성이 뛰어난 틸팅 패드 저널 베어링(TPJB, Tilting Pad Journal Bearing)의 사용한다. 따라서, 정확한 성능을 예측하기 위한 해석적인 연구가 오랜 기간 동안 지속되고 있다. 김태호⁽⁶⁾ 등은 로커백 피벗을 갖는 TPJB의 피벗 강성을 고려한 해석을 진행하여 동특성 예측 결과를 기존의 해석 및 실험 결과와 비교하였다. 피벗의 강성은 하중의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였으며, 베어링의 강성 계수는 회전 속도와 하중의 증가에 따라 증가함을 보였다. 이는 기존 해석 결과에 비해 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다. 감쇠 계수는 회전 속도 감소와 하중 증가에 따라 증가하며, 기존 해석 결과에 비해 고하중, 고속 구동 조건에서의 오차가 감소하였다. 이를 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다. TPJB는 피벗의 형상에 따라 점 접촉과 선 접촉 등의 접촉 형태가 다르며, 피벗의 강성 또한 변화하게 된다. 장경은과 김태호⁽⁷⁾는 레이놀즈 방정식과 에너지 수송 방정식을 사용하여 피벗 형상에 따른 피벗 강성과 TPJB의 구동 성능을 예측하였다. 유연하여 강성이 작은 피벗일수록 하중에 따른 회전축의 편심률이 증가함을 확인하였다. 서준호와 최연선⁽⁸⁾은 레이놀즈 방정식

* 국민대학교 기계시스템공학부
E-mail : thk@kookmin.ac.kr
** 국민대학교 대학원 기계설계학과

과 에너지 전달 방정식을 이용하여 패드의 열변형을 예측하였다. 단일 하중과 회전 속도에서 해석한 결과 모든 패드에 양의 예압량 변화가 발생하여 패드가 벌어짐을 보였다. 또한 서준호와 최연선⁽⁹⁾은 각 패드의 클리어런스가 비대칭인 TPJB의 해석을 진행하여 교차 강성과 감쇠 계수가 클리어런스의 비대칭에 큰 영향을 받음을 확인하고, 이를 통해 실험과 해석 결과 차이의 주요 요인일 수 있음을 예측하였다. 연성 피봇(Flexure Pivot[®]) 틸팅 패드 베어링은 베어링 하우징, 패드 그리고 피봇이 일체형으로 제작된 형태로 구조가 단순하며 패드의 떨림현상이 없는 장점을 갖는다. 하지만, 일반적인 TPJB과 달리 불안정성을 야기할 수 있는 연성강성이 발생하기 때문에 피봇의 설계 최적화가 더욱 중요하다. 장경은과 김태호⁽¹⁰⁾는 연성 피봇의 두께 변화가 베어링의 동적 성능에 미치는 영향을 해석적으로 확인하였다. 피봇의 두께가 작아짐에 따라 직교 강성 및 감쇠가 증가하고, 불안정성을 야기하는 교차 강성의 차이가 감소하여 동적 안정성에 유리함을 보였다. 이상표⁽¹¹⁾ 등은 응력 해석을 이용한 연성 피봇의 안전율을 계산하여 최소 두께를 갖는 베어링의 온도 특성을 시험 및 해석하였다. 그 결과 로커백 TPJB의 온도 분포에 비해 최대 온도가 작게 나타나 연성 피봇 TPJB의 성능이 우수함을 검증하였다.

가스 포일 저널 베어링(GFJB)은 급유 시스템이 필요하지 않아 최근의 기술적 추세인 소형화, 친환경, 고효율 회전기기의 핵심 부품으로 사용된다. 이종성⁽¹²⁾ 등은 탑 포일, 심 포일 그리고 범프 포일의 설계 변수를 다양화한 세 종류의 GFJB에 대하여 동하중에 따른 이력곡선을 측정하였다. 심규호⁽¹³⁾ 등은 단일 범프 포일에 대한 구조 동특성과 공기 유막이 존재할 경우의 동특성을 측정하기 위해 가진 실험을 진행하고, 운동방정식과 이력 곡선을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 이를 통해 운동방정식을 이용하여 예측한 강성 계수는 관성항에 의해 크게 예측되어 관성항 수정의 필요성을 확인하였다. 방지훈과 류근⁽¹⁴⁾은 GFJB의 정하중 실험을 통해 이력 곡선을 측정하고 구조 강성과 손실 계수를 계산하였다. 이를 통해 구조 강성은 베어링의 변형량 증가에 따라 비선형적으로 증가하고 손실 계수는 감소함을 보였다.

김태호⁽¹⁵⁾ 등은 오일-링 저널 베어링의 해석 모델을 개발하고 레이놀즈 방정식과 에너지 수송 방정식을 사용한 해석 결과를 베어링 제작 업체의 데이터와 비교하였다. 저널 편심률, 자세각, 강성 그리고 감쇠계수 해석 결과는 데이터와 비교적 잘 일치하여 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

3.1.2 트러스트 베어링

트러스트 베어링은 축방향의 하중을 지지하는 베어링으로서 하중지지력이 중요한 요소이다. 최근 타보기계의 비출력(단위 부피 당 출력) 향상 추세로 인하여 무급유 윤활이 가능한 가스 포일 트러스트 베어링(GFTB, Gas Foil Thrust

Bearing)에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 김태호⁽¹⁶⁾ 등은 GFTB의 하중지지력과 토크를 측정하기 위한 실험 장치를 개발하고, 부상 실험과 하중지지 실험을 수행하였다. 부상 실험을 통해 베어링의 부상 속도를 확인하고, 하중의 증가에 따라 토크와 온도가 선형적으로 증가함을 하중지지 실험을 통해 확인하였다. 박문성⁽¹⁷⁾ 등은 GFTB의 경사 높이와 회전 속도에 따른 하중지지력을 실험을 통해 측정하였다. 토크는 최대 하중지지력 지점에서 급격히 상승하였으며, 최대 하중지지력은 경사 높이의 감소와 회전속도의 증가에 따라 증가하였다. 또한, 박문성⁽¹⁸⁾ 등은 바닥 가진 실험을 진행하여 GFTB의 가진 주파수, 입력 가속도 그리고 간극 변화에 따른 동하중을 분석하였다. 단일 간극 조건 하에서 입력 가속도의 증가에 따라 동기 성분 진폭은 증가하며, 하중지지력은 단일 입력 가속도 조건에서 간극에 무관하게 동일한 값을 가짐으로서 베어링에 작용하는 동하중의 크기가 같음을 보였다. 류근과 이호원^(19,20)은 예하중과 베어링 변형량의 조건을 변화시켜가며 GFTB의 정하중 구조 강성과 손실 계수를 측정하였다. 베어링의 구조 강성의 하중에 따라 비선형성을 보이고, 손실 계수는 동일 변위의 예하중 증가와 동일 예하중의 변위 감소에 따라 증가하였다. 더 나아가, 범프 포일을 두 겹으로 겹친 GFTB를 동일하게 실험하여 베어링 강성이 약 50%로 감소함을 확인하였다.

김민규⁽²¹⁾ 등은 CFD 프로그램을 사용하여 평행 트러스트 베어링 면의 타원형 딥플 형상의 장축 위치에 따른 마찰 특성을 수치해석 하였다. 해석 결과 장축이 윤활 유체의 운동 방향에 일치하게 배치되었을 때 마찰력이 감소함을 보였다.

3.1.3 볼 베어링

구름 베어링의 한 종류인 볼 베어링은 볼과 하우징이 접촉하는 형태이기 때문에 주로 접촉에 의한 파손에 대한 연구가 이루어지고 있다. 백해연 등⁽²²⁾은 깊은 홈 볼 베어링의 볼과 케이지 사이의 불순물이 야기하는 파손과 마멸 등으로 인해 베어링 수명이 줄어드는 현상을 방지하기 위해 케이지에 펀칭 홀을 가공하여 볼 베어링의 내구성을 시험하였다. 펀칭 홀을 통해 이물질들이 배출되어 베어링의 내구 수명이 최대 66% 이상 증가함을 확인하였다. 변재승⁽²³⁾ 등은 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식을 적용하여 우주발사체의 연료 펌프에 사용되는 볼 베어링의 수류 환경에서의 열과 유동을 해석하였다. 이를 통해 볼과 케이지 사이의 열전도가 온도 상승의 주요 요인이며, 유동 면적 차이로 인해 내륜부의 유동이 외륜부에 비해 빠름을 보였다. 김정균과 이재학⁽²⁴⁾은 LNG 운반선에 사용되는 극저온 볼 베어링에 대해 Solidworks와 Ansys 프로그램을 이용하여 구조 해석하였다. 반경 방향과 축 방향에 하중을 가하였을 때, 하단의 볼에서 최대 응력과 변형률을 나타내었다.

장진우와 장건희⁽²⁵⁾는 볼의 자이로스코픽 모멘트, 원심력

을 고려한 힘 평형 방정식을 정립하고 볼 베어링의 내외륜 접촉각과 마찰 토크를 계산하여 실험 결과와 비교하였다. 접촉각의 해석 결과는 회전 속도의 증가에 따라 차이가 생기며 토크는 증가함을 보였으며, 이는 실험 결과와 비교적 잘 일치하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 김강석⁽²⁶⁾ 등은 동작 기계에 적용되는 앵글러 콘택트 볼 베어링에 대해 Stribeck, Palmgren 그리고 Kispert 등의 이론적 계산식과 발열 조건에 따른 실험값을 이용하여 베어링의 마찰 토크 실험식과 보정식을 유도하였다. 동일한 베어링 제원과 구동 조건 하의 해석과 실험을 비교하여 5% 이하의 산포도를 보여 새로운 유도식의 유효성을 확인하였다.

3.1.4 자기 베어링

자기베어링은 자기력으로 회전축을 부상시켜 비접촉식 구동을 한다. 다른 베어링에 비해 자기력의 제어와 전자석의 용량에 따라 높은 회전 속도와 하중지지력을 유지할 수 있는 장점을 가져 정밀 가공 기계와 터보 기계에 사용된다. 박철훈⁽²⁷⁾ 등과 박철훈⁽²⁸⁾ 등은 터보 블로워와 동작기계용 고속 스핀들에 적용할 저널 자기베어링과 트러스트 자기 베어링을 요구 성능에 맞춰 설계하고 실험을 통해 하중지지 능력과 불안정성을 확인하였다.

3.2 실(seal)

실은 작동 유체의 누설을 최소화시키는 역할을 하며, 적용 기기와 기기 구동 조건에 따라 다양한 형상의 실을 사용한다. 래버린스(labyrinth) 실은 주로 터빈의 회전부와 비회전부 사이의 틈새를 막아 유체의 누설을 방지한다. 하태웅⁽²⁹⁾은 래버린스 실의 동특성과 누설량을 예측하기 위한 CFD 해석법을 제시하고 Bulk-flow 모델 해석과 실험 결과와 비교하였다. 압축성 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식, 에너지 수송 방정식 그리고 이상기체방정식을 고려한 CFD 해석은 압력 기반 해석과 밀도 기반 해석을 사용하였다. 동특성은 전반적으로 압력 기반 CFD 해석과 실험 결과가 Bulk-flow 해석보다 잘 일치하며, 누설량은 밀도 기반 CFD 해석이 대체적으로 일치함을 보였다. 김태형⁽³⁰⁾은 세탁 분말 세제의 충전 입자 크기에 따른 세탁기 구동 조건에서의 고무 실의 마모와 탄성 회복율을 분석하였다. 충전 입자의 크기가 클수록 실의 마모가 크게 발생하고 밀봉 능력도 저하됨을 보였다. 충전 입자의 크기가 매우 작으면 높은 탄성 회복율을 가짐을 확인하였다. 곽동우⁽³¹⁾ 등은 ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 사용하여 극저온 환경의 스프링 보강 정적(spring-energized static) 실의 열전달 해석을 수행하였다. Outer lining의 온도가 1초에 1도 정도 감소하였고, 이를 통해 극저온 환경에서는 적용할 수 있는 실의 스프링 강성 범위가 넓어짐을 나타내었다.

3.3 댐퍼(damper)

회전체 시스템 축계는 점성 감쇠량을 조정하여 비틀림 진동의 제어가 가능하다. 박상윤⁽³²⁾ 등은 전달매트릭스법을 이용하여 축계에 작용하는 비틀림 진동을 해석하기 위해, 일반적인 감쇠계수식과 기하학적 설계 변수를 사용하여 진동을 최소화하는 최적의 점성 댐퍼 모델을 제시하였다. 이종명⁽³³⁾ 등은 해양 플랜트의 물 분사 펌프의 축계 고유진동수를 모드 해석을 통해 확인하였다. 해석 결과는 1X에 의한 진동 크기가 지배적으로 나타남을 보여주었으며, 따라서 마운트의 강성을 증가시켜 고유진동수를 상승시킴으로써 공진회피 설계를 달성하였다.

4. 결 론

2015년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 최근 효율과 환경에 관한 규제 강화로 인해, 높은 비출력을 갖는 틸팅 패드 베어링과 무급유 가스 포일 베어링에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 또한, 회전기 시스템의 성능 향상에 따른 요소부품의 설계 형상이 다양해짐에 따라 새로운 해석 모델을 제시하는 경향을 보였다. 2014년에 비하여 저널 베어링에 대한 연구가 상대적으로 많이 발표되었다.

References

- (1) 이동현, 김영철, 김병욱, 2015, “플로팅 링 베어링으로 지지된 터보차저 로터의 안정성 해석,” 한국윤활학회 논문집, 제31권, 제6호, pp. 302~307.
- (2) 이종성, 박문성, 김영민, 김태호, 하경구, 이창하, 김치면, 2015, “멀티레이어 가스 포일 베어링으로 지지되는 소형 무급유 터보 기계의 고속 구동 특성: 베어링 간극의 효과,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 59~60.
- (3) 김태호, 김영민, 이종성, 박문성, 김치명, 이창하, 하경구, 2015, “바닥 가진을 갖는 소형 무급유 터보 압축기의 Duffing 진동 특성,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 682~683.
- (4) 김태호, 송현승, 2015, “밸런스샤프트 모듈을 갖는 직렬 3기통 엔진의 동역학적 모델 기반 진동해석,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 809~817.
- (5) 정원영, 장건희, 박재석, 2015, “2면 밸런싱 기법을 이용한 드럼 세탁기 불평형 질량 예측,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 784~789.
- (6) 김태호, 최태규, 김충현, 2015, “로커-백 피벗을 갖는 틸팅 패드 저널 베어링의 회전체동역학적 성능 예측 및 기존 결과와의 비교,” 한국윤활학회 논문집, 제31권, 제6호, pp. 294~301.
- (7) 장경은, 김태호, 2015, “유연한 피벗을 갖는 틸팅 패드 저널 베어링의 열유체 해석,” 한국유체기계학회 동계학술대

- 회 논문집, pp. 193~194.
- (8) 서준호, 최연선, 2015, “저널 베어링의 열변형에 따른 예압량 변화,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 5~6.
- (9) 서준호, 최연선, 2015, “비대칭 유막 두께를 지니는 틸팅 패드 저널 베어링,” 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp. 19~20.
- (10) 장경은, 김태호, 2015, “피봇 두께가 연성 피봇 틸팅 패드 저널 베어링의 성능에 미치는 영향,” 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp. 23~24.
- (11) 우상표, 임도형, 최익준, 2015, “공기압축기용 Flexure pivot type 틸팅 패드 베어링 최적 설계,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 355~357.
- (12) 이종성, 김영민, 김태호, 2015, “멀티레이어 가스 포일 저널 베어링의 동적 구조 성능 규명,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 11~13.
- (13) 심규호, 박지수, 이상훈, 2015, “가스 포일 베어링 범프 구조의 1자유도 가진/가압 실험을 통한 주파수 의존 동특성 규명,” 대한기계학회 논문집, 제39권, 제10호, pp. 1029~1037.
- (14) 방지훈, 류근, 2015, “포일 저널 베어링의 정하중 구조 특성 측정,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 7~8.
- (15) 김태호, 최태규, 최우형, 2015, “오일-링 저널 베어링의 발열 및 동적 성능 예측,” 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp. 21~22.
- (16) 김태호, 이태원, 박문성, 박정민, 김진성, 정진희, 2015, “가스 포일 스러스트 베어링의 하중지지 성능 및 구동 토크에 관한 실험적 연구,” 한국윤활학회 논문집, 제31권, 제4호, pp. 141~147.
- (17) 박문성, 김태호, 박정민, 김진성, 정진희, 2015, “가스 포일 스러스트 베어링의 경사 높이에 따른 최대 하중지지력 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 55~56.
- (18) 박문성, 김영민, 이종성, 김태호, 하경구, 이창하, 김치명, 2015, “바닥 가진을 갖는 가스 포일 스러스트 베어링의 동하중 연구,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 57~58.
- (19) 류근, 이호원, 2015, “포일 스러스트 베어링의 정하중 구조 강성과 손실계수 측정,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 280~281.
- (20) 이호원, 류근, 2015, “겹쳐진 포일 스러스트 베어링의 강성과 감쇠 계수 측정: 단일 베어링과의 비교,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 61~62.
- (21) 김민규, 박태조, 최진석, 2015, “타원체 미세 딥플로 Texturing 한 평행 스러스트 베어링의 마찰 특성,” 대한기계학회 춘추학술대회 논문집, pp. 3006~3007.
- (22) 백혜연, 편정민, 이대용, 박태조, 2015, “자동차 변속기용 깊은 홈 볼 베어링의 내구수명 향상,” 한국윤활학회 논문집, 제31권, 제6호, pp. 281~286.
- (23) 변재승, 이진국, 이용복, 2015, “수류환경 볼 베어링의 열적 거동,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 9~10.
- (24) 김정균, 이재학, 2015, “LNG Spray Stripping Pump에 이용되는 극저온 볼 베어링의 구조해석,” 대한기계학회 춘추학술대회 논문집, pp. 2735~2737.
- (25) 장진우, 장건희, 2015, “볼의 자이로스코픽 모멘트와 원심력을 고려한 고속 볼베어링의 마찰 토크 해석 및 실험,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 316~321.
- (26) 김강성, 황주호, 이득우, 이상민, 이승준, 2015, “실험식을 이용한 공작기계 주축용 앵글러 콘택트 볼 베어링의 마찰토크에 관한 연구,” 한국정밀공학회 논문집, 제32권, 제2호, pp. 149~157.
- (27) 박철훈, 윤태광, 박준영, 2015, “200 마력급 터보 블로워 적용을 위한 자기베어링 설계,” 한국유체기계학회 논문집, 제18권, 제6호, pp. 12~18.
- (28) 박철훈, 함상용, 홍두의, 김준규, 2015, “자기베어링 적용 공작기계용 고속 스피들 개발,” 한국소음진동공학회 논문집, 제25권, 제12호, pp. 895~900.
- (29) 하태웅, 2015, “3D CFD를 활용한 관통 래버린스 실의 회전체 동역학적 해석,” 한국유체기계학회 논문집, 제18권, 제1호, pp. 44~50.
- (30) 김태형, 2015, “세탁기용 고무 회전 씨일의 밀봉 성능에 관한 연구,” 한국윤활학회 논문집, 제31권, 제3호, pp. 102~108.
- (31) 광동우, 차오란, 우지에, 황성균, 성인하, 2015, “스프링 보강 정적 실의 극저온 열전달 특성 고찰,” 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 81~82.
- (32) 박상윤, 한국현, 박주민, 권성훈, 송오섭, 2015, “추진축계비틀림 진동 감쇠를 위한 점성 댐퍼의 최적 설계,” 한국소음진동공학회 논문집, 제25권, 제9호, pp. 606~613.
- (33) 이종명, 유현탁, 박규진, 최현철, 최병근, 2015, “모드해석을 통한 마운트 공진회피 설계,” 한국소음진동공학회 논문집, 제25권, 제7호, pp. 481~486.