◎ 특 집

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.2.073
ISSN (Print): 2287-9706

2013년 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

김태호*

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2013년도 한해 국내에서 발표된 논문을 중심을 하여 국내의 회전체 동역학 및 그와 관련된 트라이볼로지 요소의 연구동향을 살펴보도록 한다. 연구의 적용대상은 유체 기계와 관련된 분야로 국한하여 분석하였으며, 본지에서 정의한 유체기계는 터보 압축기, 송풍기, 터빈, 펌프 등 산업현장에서 사용되는 회전 기계류를 일컫는다. 연구동향 분석은 로터와 베어링 등으로 구성되는 회전체 시스템 동역학 해석 분야와 저널베어링, 트러스트 베어링, 볼 및 롤러 베어링, 자기베어링, 실 댐퍼 등의 회전기 요소 분야로 구분하여 기술하였다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

산업의 고도성장에 따라 산업 현장에서는 고효율화의 요구가 높아지고 있다. 이에 따라 유체기계는 고속화의 경향을 보이고 있으며, 때로는 정격 운전속도에 도달하기까지 다수의 공진주파수를 지나가게 된다. 따라서, 고속화에 따른 시스템의 안정성 및 신뢰성 확보가 필요하여 회전체 요소 특성에 따른 회전체 시스템의 동역학적 특성 연구가 활발히 이루어지고 있다.

김병옥[1] 등은 냉매로 구동되는 터빈과 발전기로 구성되는 연성 회전축계의 동역학적 안정성을 기하기 위하여 마그네틱 커플링을 사용하였다. 동역학적 신뢰성을 예측하기 위해서 터빈과 발전기 각각의 회전축계 시스템을 동역학적으로 모델링하고 로터다이나믹 해석을 통해 고유진동수를 분석하였다. 이를 통해 각 회전축계의 1차 고유진동수와 정격속도의 분리여유를 고려한 회전축 직경을 선정하였다. 이후, 터빈-마그네틱 커플링-발전기로 구성되는 전체 시스템의 모델링 및 로터다이니믹 해석을 통해 전체 시스템의 위험속도를 분석하였다. 예측결과는 마그네틱 커플링 외륜과 가까운 발전기의 축 직경이 시스템의 1차 위험속도에 매우 큰 영향을 미치는 것을 보였으며, 터빈과 발전기 각각의 1차 위험속도가 정격속도와의 분리여유가 충분할 때는 마그네틱 커플링의 연결강성에 무관하게 전체 시스템의 1차 위험속도 또한 정격속도와 충분한 분리여유를 가지고 있음을 밝혔다.

볼 베어링은 반경 방향 뿐 아니라 축 방향 하중도 동시에 지지할 수 있는데, 필요에 따라 적절한 축 방향의 예압을 필요로 한다. 이러한 축 방향의 예압은 볼과 내・외륜과의 접촉각을 변화시켜 베어링의 강성 및 회전체의 동역학적 특성을 변화시킬 수 있다. 김영진[2] 등은 볼 베어링으로 지지된 회전체 시스템에 대하여 축방향 예압에 따른 볼의 접촉각도 및 강성의 변화를 예측하고 강성 변화가 회전체 시스템의 고유 진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 볼 베어링의 성능 변화를 고려하지 않은 기존의 해석결과 및 실험결과와 비교하여 해석 모델의 우수성을 검증하였다.

홍성욱[3] 등은 각접촉 볼 베어링의 베어링 배열 형상에 따른 고속회전기기의 동특성 변화에 대한 연구를 수행하였다. 외륜, 볼, 그리고 내륜이 일정한 접촉 각도를 갖게 조립되는 각접촉 볼 베어링은 회전축에 설치 시에 이웃한 각접촉 볼 베어링과 반대방향으로 배열되어 축방향 하중을 지지한다. 배열 방식으로는 볼이 내・외륜과 접촉하는 점을 지나는 선분이 두 베어링 사이를 X자 모양으로 지나는 방식과 O자 모양으로 바깥 쪽에서 지나게 배열하는 방식이 있는데, 이들 배열 방식에 따라 베어링에 작용하는 힘과 모멘트의 방향이 달라진다. 이에, 접촉각도에 따른 베어링의 반경방향 강성, 모멘트 강성, 연성 강성 등을 예측하여 회전체 동역학 해석을 수행하였으며, 베어링의 배열 방식이 회전축의 고유 진동수와 모드 형상 및 변위에 직접적인 영향을 미침을 보였다.

황평과 Nguyen[4]은 깊은 홈 볼 베어링의 수학적 모델링을 통해 접촉 강성과 접촉력을 계산하고 비선형 운동방정식을 유도하여 볼 개수에 따른 회전체의 질량 불균형 응답을 예측하였다. 해석 결과는 회전축을 지지하는 볼의 개수가 증가할수록 베어링의 강성과 회전축계의 고유진동수가 증가하며 진동의 크기는 감소함을 밝혔다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

저널베어링 연구기술은 회천체 시스템의 안정성과 매우 밀접한 연관성이 있는 기계요소이다. 정확한 베어링 특성의

* 국민대학교 기계시스템공학부
Email: thk@kookmin.ac.kr

예측은 로터다이나믹 설계 시 매주 중요하기 때문에 시스템의 안정성을 위한 베어링의 설계변수에 대한 연구와 베어링의 실제 거동을 정확하게 예측하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다.

기술이 발전함에 따라 다양한 상용코드를 이용한 해석이 많이 이루어지고 있다. 오승태[5] 등은 상용 회전체 동역학 해석툴을 사용하여 대용량 추진 전동기용 베어링 개발연구를 수행하였는데, 본 연구를 통해 베어링 시제품을 제작하였으며, 경사에 따른 베어링의 성능을 실험하여 베어링 경사에 따른 누유 조건을 확인하였다.

조인성과 정재연[6] 은 왕복동식 압축기에 사용하는 저널베어링의 최적화된 오일 통로를 찾는 연구를 수행하였다. 저널베어링의 윤활 해석을 통한 베어링의 압력분포를 바탕으로 최적화된 오일 통로의 위치를 찾아내었다. 또한 베어링 간극에 따라 유막 압력이 크게 변함을 해석하였으며, 베어링의 설계 변수에 따라 이상적인 베어링의 오일 통로가 차이가 있음을 해석적으로 보였다.

홍성호[7] 등은 저널 베어링과 유사한 해석 모델을 갖는 스풀밸브 형상에 따른 윤활 해석에 대하여 연구하였다. 레이놀즈수(Re)에 따라 윤활 해석 시 2차원 Reynolds 방정식과 3차원 Navier-Stokes 방정식의 적용을 구분하여 해석을 수행하였으며, 레이놀즈수에 따른 적절한 스풀밸브의 형상을 제안하였다. 일반적으로 두 해석 방법을 통해 유사한 반경방향 하중지지 능력 및 마찰력 등을 예측하였으나, 그루브 수가 많은 스풀밸브의 측력 계산의 정확성 개선을 위해서는 Navier-Stokes 방정식의 사용을 제안하였다.

회전기기의 고속화를 위해 공기 베어링의 사용이 보편화됨에 따라 공기 베어링의 특성 규명을 위한 실험장치 개발 또한 다양하게 이루어지고 있다. 박철훈[8] 등은 공기포일 저널베어링의 동특성계수 측정을 위한 가진 장치를 개발하였다. 초고속 회전체에 사인파 전자기력을 이용해 가진함으로 공기 포일 저널베어링의 동특성을 측정할 수 있도록 하였다. 가진장치는 가진 방향을 수직, 수평방향으로 선택할 수 있도록 하여, 다양한 가진 방향에 대한 실험이 가능하도록 하였고, 또한 이를 통하여 측정된 변위에 최소자승법을 적용해 공기 포일 베어링의 동특성을 추정하였다.

이종성과 김태호[9] 는 기계적 예압(mechanical preload)을 갖는 3 패드 가스 포일 저널베어링에 대하여 정하중 각도 변화에 따른 조립 윤활 틈새 (assembly radial clearance)와 구조강성을 측정하고 해석결과와 비교하였다. 이를 통해 기계적 예압을 갖는 가스 포일 저널베어링은 정하중의 작용각도에 따라 구조강성이 크게 변하는 것을 확인하였다.

3.1.2 트러스트 베어링

유체기계의 고출력화에 따라 최근의 트러스트 베어링 설계 기술은 축방향의 하중 지지능력을 증가시키고 마찰을 감소시키는 추세이다. 2013년도에는 슬라이더 트러스트 베어링의 표면 처리를 통해 윤활유체의 유체동압 향상에 대한 연구가 주로 수행되었다. 박태조와 이준오[10] 는 CFD 해석을 통해 베어링 표면의 딤플 형상을 적용한 베어링의 윤활 특성을 연구하였다. 베어링 표면의 딤플 크기 및 밀도와 유체동압의 관계를 보여 미세 딤플이 베어링의 하중지지 능력을 감소시키지만 마찰 저감효과가 있음을 보였다.

신정훈[11] 등은 슬라이더 베어링의 표면에 웨이브 형상을 주어 베어링의 축방향의 지지하중과의 관계를 연구하였다. 이를 통해 최소유막두께가 존재하는 지점에서의 웨이브 형상이 지지하중에 가장 큰 영향을 미침을 밝혔으며, 웨이브의 진폭이 크고 파장이 길수록 그 영향이 현저히 증가함을 보였다.

3.1.3 볼 베어링, 롤러 베어링

구름 베어링은 공작기계, 자동차, 컴퓨터 등 다양한 산업분야에 걸쳐 사용이 되어져 왔다. 특히, 범용적으로 사용 중인 구름 베어링의 동역학 및 윤활 해석을 통한 성능, 손상, 및 수명 예측은 베어링 사용의 매우 중요한 요소이며, 이에 따른 다양한 연구가 진행되어져 왔다.

최근, 나로호 발사의 성공으로 인해 우주 발사체에 적용되는 부품의 국산화 개발의 필요성이 더욱 중요해 졌다. 우주발사체에 사용되기 위한 볼 베어링은 극한의 운전조건에서 고속의 회전속도와 심한 동적하중을 견뎌야 한다. 따라서, 베어링의 내구성의 확보는 매우 중요하다. 이용복[12] 등은 우주 발사체용으로 개발 중인 볼 베어링에 대해 실제 구동조건을 모사하여 내구성 실험을 수행하여, 실험 볼 베어링이 상기 구동조건에서의 내구성이 확보됨을 확인하였다.

조준현과 김충현[13] 은 CFD해석을 통해 수 윤활 볼 베어링의 표면 거칠기에 따른 유동 특성과 마찰 토크에 관한 해석 연구를 수행하였다. 볼베어링의 표면에 동일한 크기의 거칠기를 부과하여 해석하였을 때, 볼 크기가 큰 베어링의 마찰토크의 증가율이 더 큰 것을 확인하였다. 이는 동일한 크기의 거칠기로 인해 대형 볼 베어링의 파손을 일으키는 마찰토크에 대한 영향이 더 큼을 알 수 있다. 또한 베어링에 부과해지는 유량 값에 따라, 마찰토크에 영향을 미치는 거칠기의 영향은 다르게 나타남을 확인 하였다.

이향과 조용주[14] 는 볼베어링의 표면 거칠기를 고려한 탄성유체윤활 해석을 통하여 표면의 거칠기와 유막두께의 관계, 이를 통한 유막 압력을 해석하였다. 일반적으로 표면의 거칠기가 커질수록 유막의 두께가 감소하였으며, 이는 유막 압력의 증가를 가져왔다. 또한 유막 압력의 증가는 압력 스파이크의 증가를 유발하므로 베어링의 수명 단축에 큰 영향을 미치는 것을 확인 하였다.

차축에 사용되는 롤러베어링의 내구수명에 대한 연구는 일반적으로 베어링의 하중과 회전속도에 따른 수명 분석이 일반적이었으나, 유대원과 이재학[15] 은 열적영향으로 인한

롤러의 축 방향 열 변형을 포함한 수명 예측을 수행하였다. 이를 통해 온도가 증가할수록 베어링의 내 외측에 작용하는 하중이 증가하는 효과를 보임을 밝혔다. 또한, 온도를 고려할 경우 일반적인 내구수명 예측보다 예측수명이 감소함을 확인함으로써, 구름 베어링의 수명 예측 시 온도가 중요한 설계인자임을 밝혔다.

김영진[16] 등은 풍력발전기에 사용되는 피치베어링에 대한 신뢰성을 높이기 위해 모멘트 하중과 경방향, 축방향 하중이 동시에 작용할 경우에 대해 베어링의 하중분배 및 접촉응력, 표면 아래 응력 해석, 피로 해석을 통한 수명예측 연구를 수행하였다. 해석을 통한 수명 예측 결과를 얻었으며, 실험을 통한 수정계수분석을 향후 연구 방향으로 설정하였다.

베어링의 파손은 회전기기 파손의 가장 큰 원인 중 하나로 베어링 파손의 예측은 회전기기 작동에 있어 매우 중요한 검사 요소이다. 이에 이도환과 김양석[17] 은 미래의 베어링 손상을 예측하는 함수를 작성하여 현재 상태의 측정값을 바탕으로 예측 시점의 상태를 추정하는 연구를 수행하였다. 데이터의 표본은 축 방향과 반경방향의 하중을 변화하여 베어링의 손상을 가속화 하는 시험 장치를 사용하여 데이터를 수집하였으며, 이를 바탕으로 예측을 위한 관계식을 적용해 베어링의 파손을 예측 하였다.

3.1.4 자기 베어링

자기 베어링은 자기장에 의하여 회전축을 부양시켜 그 위치를 제어함으로써 회전체를 지지한다. 유도식 자기 베어링은 베어링의 자극과 회전체 사이 간극의 초기 설정 및 제어가 매우 중요하며, 특히 회전속도 증가에 따른 회전체의 진동 변위가 제어범위를 넘지 않는 것이 성공의 관건이다. 따라서, 경험을 바탕으로 구축한 제어 게인 값의 회전속도에 따른 데이터베이스화는 매우 중요한 요소라 하겠다. 김재실[18] 등은 LabVIEW를 이용한 제어 알고리즘을 구성하였으며, 실험적 연구를 통해 Compact RIO와 실시간 통신을 통해 자기베어링의 능동 제어를 가능하도록 하였다.

유승열과 노명규[19] 는 능동형 자기베어링의 제어 시스템 중 동기 노치필터 제어기와 스위칭 제어기의 안정성과 소비전력에 대하여 비교 분석하였다. 저속의 영역에서 스위칭 제어기를 통해 소비전력이 효과적으로 감소됨을 보였으나, 회전속도가 증가함에 따라 굽힘 모드 근방의 회전속도에서 스위칭 제어기가 정상작동 하지 않음을 확인하였다. 또한 노치필터 제어기의 경우 굽힘 모드 회전속도에서도 안정적으로 제어가 가능함을 보여 소비 전력 측면에서는 단점이 있으나, 시스템의 변화에 따른 안정성이 높음을 확인하였다.

3.2 실(seal)

하태웅[20] 은 가스 누설 방지를 위한 평실에 대한 CFD해석 연구를 수행하였다. 터보기계에서의 선회류가 누설량과 동특성에 미치는 연구에 대해 CFD해석 결과를 가스실 이론해석의 가장 보편적 모델인 Bulk-flow 모델 해석 결과 및 실험의 결과와 비교하여 검증하였다. 선회류가 누설량에 미치는 영향은 크지 않음을 밝혔으며, 선회류가 커짐에 따라 Bulk-flow 모델은 큰 영향이 없으나 CFD해석은 민감하게 증가함을 보였다. 감쇠의 경우 CFD 해석이 Bulk-flow 모델이 비하여 예측의 정확성이 떨어짐을 확인하였다.

3.3 댐퍼(damper)

댐퍼는 회전기기의 가진력으로부터 유발되는 진동 및 소음 감소에 매우 효과적인 기계 부품요소이다. 대형 엔진류의 바닥마운트용 댐퍼로서는 일반적으로 고무가 널리 사용되나 저 주파수 및 공진주파수 대역에서 그 성능이 한계를 가지고 있다. 이에 지능형 재료를 이용한 반 능동형 댐퍼의 연구 및 개발이 이루어지고 있다.

도쑤엔푸[21] 등은 선박용 디젤엔진의 진동 저감을 위하여 MR 유체를 이용한 MR 마운트의 최적설계를 진행하였다. 디젤 엔진의 가진력을 분석하여 엔진의 크기와 가진력에 따른 최적화된 MR 마운트의 크기를 해석적으로 분석하였다. 또한 기하학적 제한조건이 고려된 최대 구동력을 얻기 위해 상용 유한요소 프로그램을 통한 유한요소 해석을 수행하였으며, 자기 밀도 분석을 통해 바닥 간격과 코일의 반지름 같은 설계 변수를 결정하였다. 이후 박준희[22] 등은 선박용 디젤엔진이 필요로 하는 댐핑력을 예측하는 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 MR 유체의 자극부를 annular 부와 radial 부까지 고려한 해석방법을 고려하였으며, 이러한 설계시 기존의 댐퍼보다 20% 이상 개선된 댐핑력을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

2013년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 회전기계 시스템과 설계 요소 전반에 걸쳐서 다양하게 연구가 진행 되었다. 주로 친환경을 위한 저마찰, 저진동 에너지 기기와 관련된 회전체 연구의 경향이 뚜렷하다. 회전체동역학 및 베어링에 대해서는 비교적 다수의 연구가 진행되었으나, 실이나 댐퍼에 대한 연구는 예년에 비하여 상대적으로 적은 경향이 있다.

참고문헌

(1) 김병옥, 박무룡, 최범석, 2013, “마그네틱 커플링으로 연결된 터빈-발전기 시스템의 로터다이나믹 해석 및 실험적 고찰,” 한국유체기계학회 논문집, 제16권, 제3호, pp.32~38.
(2) 김영진, 이종만, 오동호, 2013, “볼 베어링의 접촉 메커니즘을 고려한 회전체 시스템의 동적 해석,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제12호, pp.1535~1540.

(3) 홍성욱, 최춘석, 이찬홍, 2013, “베어링 베열방식이 고속 스핀들의 동특성에 미치는 영향,” 한국정밀공학회지, 제30권, 제8호, pp.854~863.
(4) Hwang Pyung, Nguyen van Trang, “Dynamic Analysis of Effect of Number of Balls on Rotor-Bearing System.” 한국윤활학회 논문집, 제29권, 제4호, pp.248-254.
(5) 오승태, 최진우, 강병희, 김진, 최성필, 빈재구, 2013, “경사조건을 고려한 대용량 추진 전동기용 베어링 개발ㅇ 대한 연구,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제2호, pp.241~248.
(6) 조인성, 정재연, 2013, “왕복동식 압축기의 저널 베어링 오일 패스 설계를 위한 연구,” 한국정밀공학회지, 제30권, 제8호, pp.839~846.
(7) 홍성호, 손상익, 김경웅, 2013, “다양한 그루부 단면형상에 대한 스풀밸브의 윤활특성 연구,” 한국윤활학회 논문집, 제29권, 제3호, pp.149~159.
(8) 박철훈, 최상규, 함상용, 2013, “초고속 회전체용 공기 포일 베어링의 동특성 계수 측정을 위한 전자석 가진장치에 관한 연구.” 한국유체기계학회 논문집, 제16권, 제3호, pp.18~25.
(9) 이종성, 김태호, “기계적 예압을 갖는 3 패드 가스 포일 저널 베어링의 강성 측정,” 한국유체기계 학회 학술대회 논문집, pp.301~303.
(10) 박태조, 이준오, 2013, “Micor-Texturing한 Slider Bearing의 윤활특성 : 딤플 밀도의 영향,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제4호, pp.437~442.
(11) 신정훈, 이기천, 박종원, 강보식, 김경웅, 2013, “표면웨이브가 존재하는 유한폭 슬라이더 베어링의 지지후중 특성에 관한 연구,” 한국윤활학회 논문집, 제29권, 제1호, pp.13~18.
(12) 이용복, 류솔지, 최복성, 김창호, 공호성, 이전국, 2013, “우주 발사체 (75톤급)용 터보펌프의 극저온 볼 베어링의 운전 내구성 평가,” 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 논문집, pp.110~111.
(13) 조준현, 김충현, 2013, “CFD를 이용한 수윤활 볼베어링의 구름 요소 주위의 마찰 토크분석,” 한국윤활학회, 제29권, 제4호, pp.218~222.
(14) 이향, 조용주, 2013, “표면 거칠기를 고려한 볼베어링의 탄성유체윤활.” 한국윤활학회논문집, 제29권, 제4호, pp.228~234
(15) 유대원, 이재학, 2013, “휠 로더 차축 테이퍼 롤러 베어링의 내구수명,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제11호, pp.1323~1330.
(16) 김영진, 문석만, 조용주, “풍력발전기용 피치베어링의 하중분배, 접촉 및 피로수명 해석,” 한국윤활학회 논문집, 제29권, pp.33~38.
(17) 이도환, 김양석, 2013, “볼 베어링 손상 예측진단 방법,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제11호, pp.1315~1321
(18) 김재실, 정훈형, 신민재, 2013, “자기베어링 예측 제어 기법의 실험적 연구,” 한국정밀공학회지, 제31권, 제2호, pp.99~104.
(19) 유승열, 노명규, 2013, “능동 자기 베어링을 위한 동기 노치필터 제어기와 스위칭 제어기의 성능 비교 연구,” 대한기계학회 논문집 A권, 제37권, 제4권, pp.511~519.
(20) 하태웅, 2013, “CFD를 사용한 비접촉식 가스 실의 입구 선회류 영향 해석,” 한국유체기계학회 논문집, 제16권, 제3호, pp.26~31.
(21) 도쑤엔푸, 박준희, 우제관 최승복, 2013, “선박용 디젤엔진을 위한 새로운 MR 마운트의 최적설계,” 한국소음진동공학회 논문집, 제23권, 제3호, pp.209~217.
(22) 박준희, 도쑤웬푸, 구오홍, 강옥현, 최승복, 2013, “선박용 MR 마운트의 최적설계: 최대 댐핑력,” 한국소음진동공학회 논문집, 제23권, 제5호, pp.472~478.