

회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복*

1. 서 론¹⁾

본 특집 기사에서는 2008년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트라이볼로지 요소(베어링/실/댐퍼)의 주요 연구동향을 요약하여 소개한다. 여기서는 광범위한 회전체 동역학 분야 중 유체기계와 관련된 부분만으로 국한시키고, 이와 관련된 국내에서 발행되었던 논문을 중심으로 분석하였다. 유체기계와 관련된 회전체 동역학 분야의 연구는 크게 로터-베어링으로 구성된 회전체 시스템의 동역학적 해석연구 분야와 베어링/실/댐퍼와 같은 회전기기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그 외 회전기기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다.

예년과 같이 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 유체 기계 가운데 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 특히 2008년도에는 녹색 에너지 기술과 관련 여러 분야에서의 연구가 활발히 이루어졌다. 다음은 2008년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 회전기기의 적용 분야의 다양화로 인하여 회전기기의 소형화와 청정 에너지원의 구성 부품 또는 에너지 저장장치로서의 연구와 개발이 많이 이루어지고 있다. 이러한 경향과 함께 회전기기의 고속화에 따른 안정성 향상 및 시스템의 효율증가를 위한 회전체 시스템의 동역학적 연구에 관한 관심이 높아지고 있다.

MEMS 마이크로 가스 터빈 엔진은 외부 가압 베어링인 hydrostatic 베어링으로 지지된다. 하지만 가공방법의 한계로 인해 로터의 형상비(L/D ratio)가 매우 작은 값으로 제한되는데, 이런 경우 베어링의 하중지지력 및 안정성이 기존의 베어링에 비해 현저히 떨어진다. 또한 고속으로 회전하는 압축기로부터 발생하는 축 방향 하중은 로터 자중에 의한 하중과 더불어 로터의 안정적 부상 및 회전에 가장 큰 어려움으로 작용한다. 이를 보완하기 위하여 에어포일 베어링을 적용하게 되는데, 고속의 영역에서 진동의 크기가 한계치보다 커지면 불안정해지는 단점을 가지고 있고, 이러한 단점을 해결하기 위한 탑 포일 뒷면에 점탄성 물질을 삽입하여 탄성 구조물에 추가적 감쇠를 준 점탄성 공기 포일베어링을 적용하는 연구가 진행 되었다.⁽¹⁾

국내에서도 분산발전용 연료전지 시스템의 연구개발이 활발하게 진행되고 있으며, 250 kW급 고온 발전용 연료전지 시스템을 대상으로 터보제너레이터(Turbo Generator, TG)의 회전축계에 대한 연구도 수행 되었다. 이 연구에서 터보차저 축계의 레이디얼 에어포일 베어링과 회전축계에 대한 회전체 동역학적 해석은 유한요소법에 의해 수행되었으며, 베어링의 정적 및 동적해석은 유한차분법에 의해 수행되어졌다.⁽²⁾

플라이휠 에너지 저장 장치(FESS)는 양수발전, 압축공기 저장 방식과 같은 기계적 에너지 저장방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능한 전자식 기계전지이다. 플라이휠 에너지 저장 장치는 에너지 저장 용량을 최대화하기 위해 일반적으로 반경방향이 두꺼운 회전체를 사용함으로써 주 질량관성 모멘트가 횡 질량관성 모멘트보다 커지게 되며 이로 인해 야기되는 자이로스코프 효과 때문에 회전속도에 따라 회전체의 동역학적 특성이 변하게 된다. 플라이휠은 가능한 많은 에너지를 저장하기위해서 첫 번째 임계속도 근처까지 운전해야하는 경우도 생기므로 자기

* 한국과학기술연구원, 에너지메카닉스 연구센터장
E-mail : lyb@kist.re.kr

베어링의 제어기 설계에는 회전속도에 따라 변하는 연성 회전체의 동역학적 특성이 반드시 고려되어야 한다. 유한요소법을 이용하여 5kWh급 플라이휠 에너지 저장장치의 연성 회전체 모델을 유도하고, 그로부터 예측된 결과와 실제 실험 결과를 비교하는 연구도 진행 되었다.⁽³⁾

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

핀부시(pin bush)는 커넥팅로드의 소단부에 삽입되어 장착된 후에 내마모성이 우수한 피스톤핀으로 회전·지지되어 피스톤과 연결된다. 오일탱크에서 피스톤 상부로 압상된 윤활유는 커넥팅로드의 작은 오일구멍을 통해 핀부시의 내면과 피스톤핀의 외면 사이의 미세한 간극에 공급되도록 설계되어 있다. 그러나 피스톤핀과 핀부시 상호간의 마찰접촉 운동표면은 제한된 진자운동을 하기 때문에 충분한 윤활유가 공급되지 못할 경우는 유체유막을 형성하기가 어려워 엔진베어링보다 하중지지 용량은 떨어지고 마찰손실은 증가하므로, 이로 인한 열적마멸과 표면손상이 빠르게 진행된다는 사실이다. 이에 따라 디젤엔진에서 사용되는 엔진오일의 점도조건에 따라 유막거동에 미치는 영향이 크기 때문에 이에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

핀부시의 유막거동을 살펴보면 고온에서 크게 낮아진 오일의 점도는 최소유막두께에 미치는 영향이 작지만 마찰손실에 의한 동력손실에는 큰 영향을 미치고 있었다. 핀부시는 실린더에서 전달되는 폭발압력에 의한 충격반복하중을 직접적으로 받기 때문에 최소유막에 의한 하중지지력 저하, 마찰손실동력 증가 등에 연결된 마찰접촉 표면손상을 예상할 수 있어 충분한 윤활유의 공급과 유막강도를 높이고, 핀부시의 가공정밀도를 함께 고려한 윤활설계가 중요함을 알 수 있다.⁽⁴⁾

최근 들어 제품에 요구되는 정밀도의 고도화에 따라, 지금까지보다도 고강성, 고정도를 갖는 공작 기계가 요구되어 오고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서 주축 베어링의 강성 및 정도를 향상을 시킬 필요가 있다. 이를 위하여 제작의 정밀도를 더 이상 요구하지 않는 제어형 정압 공기 베어링을 고안하였다. 축의 반경 방향에 대해서 2 자유도의 변위 제어가 가능

한 가진 장치를 고안하여 설계, 제작한다. 또한 제어 시스템의 설계에는 상태 피드백법을 이용하며 제어 시스템의 극배치는 최적 레귤레이터를 이용하여 해석된 계인을 사용하였다.

정압 저널 공기 베어링의 틈새를 압전 소자를 이용하여 능동적으로 제어하고 외란에 의한 축진동을 억제하고, 베어링의 고강성화를 추구하는 방법의 가능성을 실험적으로 검토하였다. 이를 통해 원통형 정전 용량형 변위센서를 장착함으로써 실시간 궤적을 얻을 수 있으므로 공기베어링의 궤적 제어를 수행 할 수 있었다.⁽⁵⁾

최근 설계되는 엔진에서의 증가된 연소 압력과 증가한 관성력은 피스톤 핀과 핀 베어링 사이 접촉면에 주기적인 하중을 증가시킨다. 따라서 피스톤 초기 설계 시 피스톤 핀 보스 베어링의 압력분포를 미리 예측하여 최적의 핀 보스 형상을 설계하는 것이 매우 중요하다. 최근에 비고정식 피스톤 핀에 대해 이제까지 경계유행이나 혼합 유행 상태로 운전된다고 알려진 바와는 달리 피스톤 핀 베어링은 본질적으로 유체유행 상태에서 운전되나 아주 가끔 혼합 유행 모드로 운전되는 특성이 있다는 것을 보였다. 또한 압력-점도지수가 피스톤 핀 속도와 관계된 주요 매개변수라는 것을 밝혔다.

이와 같이 비고정식 피스톤 핀 베어링은 대부분의 운전 사이클 동안 유체유행상태에서 운전이 되고 아주 짧은 기간 동안 만 혼합 유행상태에서 운동되므로 피스톤 핀 보스 베어링의 이차원 유체유행해석의 적용이 가능하며, 이로부터 핀 보스 베어링의 유막 압력분포를 알아낼 수 있다고 본다. 따라서 압력-점도지수가 피스톤 핀 회전속도 및 유막 압력분포에 미치는 영향을 연구하였다.

연구의 결론은 유막압력의 크기는 압력-점도지수의 영향이 크며, 압력-점도지수를 고려하면 점도가 하락되어 압력이 떨어졌다는 것을 알 수 있었다.⁽⁶⁾

폴리머 윤활제(MPLs, microporous polymer lubricants)는 일반적으로 베어링용으로 이용되는 폴리머 윤활제의 적용은 먼지와 수분의 접촉이 되는 각종 산업용 베어링 또는 원심력을 받아 윤활제의 누설이 심한 곳의 베어링 분야에서 활용이 기대된다.

폴리머 윤활제의 오일은 표면장력에 의하여 미세한 다공질 내부에 존재하게 되며, 압력, 열, 모세관 흡수력의 작용으로 스며 나오고 마찰면에 공급되어 윤활작용을 하게 된다. 폴리머 윤활제에 직접적인 하중에 의한 압축을 가하면 수지의 다공질 구조는 탄성변형을

한다. 압축변형에 의한 체적이 감소하여도 함유한 유분은 압축되어 폴리머 윤활제의 내압을 상승시키고 이와 같은 내압에 의해 유분이 스며 나온다. 다시 하중을 제거하면 수지구조는 탄성력에 의해 원상태로 복원된다. 이때 유분을 배출한 표면 부근과 폴리머 윤활제 내부와의 유압차가 발생하여 내부에 저장되었던 유분은 표면 부근에 보충된다.

이렇게 베어링에 적용이 가능한 폴리머 윤활제에 대한 기초적 물성시험과 구름베어링에 응용한 수명시험으로 성능 비교 평가하여 최적화된 폴리머 윤활제는 장수명을 나타내고 높은 온도에서도 적용이 가능하였다.⁽⁷⁾

3.1.2 볼 베어링, 로울러 베어링

회전기계 시스템의 핵심적인 기계요소인 구름 베어링은 고 신뢰성 및 소형화/경량화에 초점이 맞추어 최근 연구가 진행되고 있다. 구름베어링이 시스템의 요구수명을 초과 또는 파손 설계된 경우, 동력손실 및 제작비용증대로 인한 경제적인 손실을 초래하기도 하며 반대로 기계시스템의 조기 파손으로 인한 안전사고의 위험과 보수비용이 증가하게 되는 결과를 초래하기도 한다. 이에 외부적 요인에 영향을 많이 받는 볼베어링의 경우 기능상 문제가 없는 범주 내에서 shoulder height를 최소화할 수 있는 설계기법이 요구되며, 하중과 접촉각도등을 고려한 정적해석을 통해 이를 해석하여 설계하려는 연구가 진행되었다.⁽⁸⁾

초음파를 이용한 볼 베어링의 상태진단에 관한 연구도 진행되었는데, 운전 중인 볼 베어링에서 방출되는 초음파 성분을 취득하고 베어링 구성 요소인 외륜, 내륜, 볼 및 기본적인 케이징 주파수를 정상치와 dB(데시벨)진폭의 증가 값과 비교 분석하여 볼 베어링의 손상을 조기에 검출하는 기술을 개발하기 위한 연구도 활발히 수행되었다.⁽⁹⁾

3.1.3 자기 베어링

자기 베어링(magnetic bearing)은 무 윤활, 능동 강성 및 감쇠조정 등 많은 장점을 가지지만 제어루프에 있는 구성요소 중 하나라도 고장을 일으키면 전체 제어 시스템의 붕괴로 이어지기 때문에 높은 신뢰도를 요구하는 회전 기계에는 사용이 제한적이다.

플라이휠 에너지 저장 장치는 효율적 측면에서 운전 중 마찰을 최소화해야 하기 때문에 일반적으로 능동형 혹은 수동형 비접촉 자기 베어링을 사용하여 회

전체를 지지한다. 능동형 자기베어링의 경우 개루프 불안정성을 극복하기 위해 제한 제어가 필요하지만 수동형 자기베어링에 비해 양호한 감쇠(damping)특성을 가지기 때문에 많이 이용된다. 플라이휠은 가능한 많은 에너지를 저장하기 위해서 첫 번째 임계속도 근처까지 운전해야하는 경우도 생기므로 자기 베어링의 제어기 설계에는 회전속도에 따라 변하는 연성 회전체의 동역학적 특성을 고려하는 연구가 진행이 되었다.⁽¹⁰⁾

회전체 기계 시스템은 일반적으로 회전체의 진동을 감시하기 위해서 위치센서를 사용한다. 특히 자기 베어링을 사용하여 회전체를 부상하는 경우, 회전체의 변위를 측정하여 되먹임 제어를 하여야만 안정화될 수 있다. 회전체의 변위는 자기 부상 시스템의 안정적인 동작에 필수적인 역할을 하기 때문에, 센서의 일부 고장에도 불구하고 정상적인 운전이 가능하다면 시스템의 신뢰도를 크게 향상할 수 있다. 센서는 회전체 방향으로 다수의 극을 갖는 링 형태의 고정자로 이루어지며, 측정 코일은 각 극에 위치하게 된다. 이러한 다극형 구조로 인해 다자유도의 측정이 용이하게 된다. 다양한 코일의 권선 패턴을 이용하여 센서 출력에 중복성을 도입할 수 있으며, 이를 통하여 고장허용 작동을 실현할 수 있는 연구가 진행되었다.⁽¹¹⁾

3.2 실

Seal은 기계적으로 시스템에 압력이 작용할 때 유체나 가스의 누수를 방지하는 중요한 역할을 한다. Seal 중에서 고무 O-ring은 생산성 및 신뢰성 그리고 장착성이 우수하여 대단히 광범위하게 사용되고 있다.

O-ring 중에서 단면이 X 형상을 갖는 O-ring을 X-ring이라 불린다. O-ring은 구조물에 장착을 하면 상부와 하부에 각각 한 개의 접촉면을 갖는다. 그에 비해 X-ring은 구조물에 장착하면 상부와 하부에 각각 2개의 접촉면을 갖게 되어 총 4개의 접촉면을 갖게 된다. O-ring은 잘 알려진 바와 같이 동적인 구조물에 대하여 비틀림 등의 불안정성을 갖고 있다. 하지만 X-ring은 이와 같은 O-ring의 문제점을 이중 접촉으로 극복하였다. 또한 사각의 홈에 잘 맞는 형상으로 쉽게 장착할 수 있는 장점을 갖고 있다. FE 해석을 수행하며, X-ring과 O-ring 응력 및 변형의 차이에 대한 연구가 진행되었다.⁽¹²⁾

고압 터보 펌프의 임펠러 입구 및 출구에서의 누설량을 최소화하기 위해 비접촉 실인 플로팅 링 실을 주

로 사용하게 된다. 플로팅 링 실은 러빙(rubbing) 현상 없이 간극을 최소화 시키는 장점이 있으나, 누설량이 감소하면서 실을 부상시키는 유체력이 감소되어 편심율이 증가하는 특성이 있다. 편심율의 증가는 유체의 전단 마찰력을 증가시키고 이는 실의 불안정성이 증가하는 원인이 된다. 이러한 플로팅 링 실은 플로팅 링과 클램핑 너트 사이에 범프 포일을 삽입하여 플로팅 링의 부상력을 지지해주어 편심율을 감소하게 되고, 범프 포일이 변형하면서 감쇠력을 향상시켜 실의 안정성을 향상시키는 장점이 있다. 범프 플로팅 링 실의 특성을 해석적으로 예측하기 위한 해석 기법을 개발하는 연구의 일환으로 범프 플로팅 링 실의 정특성에 대한 해석 기법 연구가 진행되었다.⁽¹³⁾

3.3 댐퍼(damper)

가스 터빈 엔진용으로 약 40년 전에 처음 개발된 스퀴즈 필름 댐퍼(SFD : Squeeze Film Damper)는 구조가 단순하면서도 감쇠성능이 우수하여 구름베어링에 지지된 고속회전체의 축 진동 감쇠장치로 이용되고 있다.

SFD는 구름베어링과 저널베어링을 복합적으로 사용하는 구조를 갖고 있다. 구름베어링의 외륜은 오직 하우징 사이의 틈새 내에서 오직 휘돌림(whirling) 운동만 가능하도록 설계되어 있으며, 회전축이 진동할 때 구름 베어링의 외륜에 해당하는 SFD 저널이 오일을 압축하게 되어 축 진동을 감소시킨다. 이와 같은 SFD의 축 진동 감쇠성능을 해석하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 주된 연구 분야는 SFD에 지지된 회전체의 진동해석, SFD의 형상에 따른 윤활방정식 해석, 유체 관성의 영향 및 공동현상 해석 등을 규명하는 이론적, 실험적 연구 분야가 있으며 최근에는 새로운 형태의 SFD 연구개발도 진행된 바 있다.

SFD의 유막압력 측정실험에서 흔히 볼 수 있는 공동현상(cavitation)이 무한 소폭 SFD의 감쇠성능에 미치는 영향을 분석에 대하여 연구가 진행이 되었다. 공동현상은 공기공동(gaseous cavitation)과 증기 공동(vapor cavitation) 현상으로 구분할 수 있다. 공기 공동현상은 대기압 보다 약간 낮은 압력 하에서 오일에 용해되어 있던 공기나 가스가 분출되어 발생하는 공동현상을 말하며, 증기 공동은 0의 절대기압(증기압) 하에서 오일이 비등하여 발생하는 공동현상을 말한다. 공기 공동현상은 주로 SFD의 양단이 열려있는 구조 또는 비가압 형태의 운전을 하는 경우에 나타나는 반

면에, 증기 공동현상은 SFD의 양단이 대기와 차단되어 있거나 또는 가압 형태의 운전을 하는 경우에 주로 발생한다. 증기 공동현상이 발생하는 무한 소폭 SFD의 감쇠성능에 미치는 오일 공급압력의 영향을 해석하고 또한 이로 인한 강성 회전체의 축 진동 현상에 미치는 영향에 분석의 연구가 진행이 되었다.⁽¹⁴⁾

4. 결 론

2008년도 회전체 동역학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지는 않는 예년에 비슷한 수준이며, 특히 에너지 기기와 관련한 회전체의 연구 경향이 뚜렷하며 이는 올해도 계속 되리라 전망된다. 또한 고 성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실등의 회전기 요소에 많은 부분을 차지하고 있는 외국의 연구 현상과는 다소 다른 모습을 띄고 있지만 국내 기술 수준의 향상을 고려할 때 향후 이 분야에 대한 보다 많은 연구가 기대된다.

참고문헌

- (1) 박용석, 김창호, 정진택, 이용복, 2008, “공기 포일 베어링으로 지지되는 초고속 마이크로 터보차저의 구동 안정성 향상에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제32권 제7호, pp. 541~548.
- (2) 박무룡, 안국영, 최범석, 김영철, 박준영, 이영덕, 2008, “MCFC/터보제너레이터 하이브리드 발전시스템용 터보차저 연구 사례,” 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 81~89.
- (3) 유승열, 박철훈, 최상규, 이정필, 노명규, 2008, “유한요소법을 이용한 대용량 플라이휠 에너지 저장 장치의 연성 회전체 모델의 검증,” 대한기계학회논문집, A권, 제32권, 제12호, pp. 1096~1101.
- (4) 김청균, 이병관, 2008, “오일점도에 따른 디젤엔진용 핀부시 베어링의 유막거동에 관한 연구,” Journal of the KSTLE, Vol. 24, No.1, pp. 21~26.
- (5) 박상신, 김규하, 2008, “원통형 변위센서를 장착한 능동 공기 베어링에 관한 연구,” Journal of the KSTLE, Vol. 24, No. 1, pp. 34~43.
- (6) 전상명, 2008, “연소실 저압변화와 압력-점도지수가 디젤엔진 고압피스톤의 핀-보스 베어링 윤활에 미치는 영향 연구,” Journal of the KSTLE, Vol.

- 24, No. 2, pp. 55~62.
- (7) 김상근, 김병관, 한중대, 2008, “고온용 폴리머 윤활 베어링의 특성 연구,” *Journal of the KSTLE*, Vol. 24, No. 4, pp. 179~185.
- (8) 김태완, 윤기찬, 조용주, 2008, “접촉해석을 이용한 볼 베어링의 Shoulder Height설계,” *Journal of the KSTLE*, Vol. 24, No. 5, pp. 228~233.
- (9) 이상국, 이선기, 이도환, 박성근, 2008, “초음파를 이용한 발전용 회전기기 베어링 손상상태 평가 연구,” *대한기계학회논문집*, A권, 제32권, 제7호, pp. 583~589.
- (10) 유승열, 최상규, 이정필, 노명규, 2008, “유한요소법을 이용한 대용량 플라이휠 에너지 저장 장치의 연성 회전체 모델의 검증,” *대한기계학회 논문집*, A권, 제32권, 제12호, pp. 1096~1101.
- (11) 백승국, 박병철, 노명규, 2008, “고장 허용 유도형 위치 센서 설계,” *대한기계학회 논문집*, A권, 제32권 제3호, pp. 232~239.
- (12) 이현승, 이영신, 이중현, 천병선, 백준호, 김석윤, 2008 “X-ring의 접촉 응력 해석에 관한 연구,” *대한기계학회논문집* A권 제32권 제9호, pp. 733~739.
- (13) 김경욱, 정진택, 김창호, 이용복, 2008, “범프 플로팅 링 실의 정특성에 대한 해석적 연구,” *한국윤활학회, 윤활학회지*, 제24권, 제3호, pp. 140~146.
- (14) 정시영, 2008 “증기 공동현상이 발생하는 무한 소폭 스퀴즈 필름 댐퍼 성능과 오일 공급압력의 영향,” *한국윤활학회, 윤활학회지*, 제24권, 제3호, 2008. 6, pp. 147~153.