

2018년 회전체동역학 분야 연구동향

김태호* · 황성호**

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2018년도 국내 발표된 논문을 중심으로 회전체동역학 해석 및 시험과 이와 관련된 베어링, 댐퍼, 실 등의 회전기 요소부품의 연구동향을 알아본다. 회전기 시스템의 경우 주로 국내외 산업현장에서 주로 사용되고 있는 블로워, 압축기, 터빈, 터보차저 등을 중심으로 논문을 분석하였고, 회전기 요소부품의 경우 저널베어링, 스러스트베어링, 볼베어링, 자기베어링, 댐퍼, 실과 관련된 논문으로 구분하여 분석하였다.

2. 회전체동역학 해석 및 시험

최근 전 세계적으로 환경 규제가 강화되고 에너지 자원 고갈 등의 문제에 직면하고 있다. 이에 따라 국내외적으로 친환경, 고효율을 목적으로 하는 새로운 형태의 대체 발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히, 최근 초임계 이산화탄소를 이용한 발전시스템 기술은 기존 기술에 비해 발전효율을 향상시키고 소형 모듈화가 가능한 장점을 지니고 있어 각광받고 있다. 따라서, 초임계 이산화탄소 발전시스템에 적용하기 위한 압축기나 터빈과 같은 유체 기계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이동현⁽¹⁾ 등은 한국기계연구원에서 개발 중인 10MW급 초임계 이산화탄소 발전용 축류 터빈에 대하여 회전체동역학 해석을 수행하였다. 정격속도가 30,000 rpm 이며, 고속안정성이 뛰어난 틸팅 패드 베어링을 사용하였다. 정격 회전속도와 임계속도가 충분한 분리 여유를 가지도록 베어링 강성을 선정하기 위해 베어링 강성에 따른 임계속도해석을 수행하였고, 임계속도는 정격 회전속도 대비 20% 이상의 분리 여유를 가지는 것으로 예측하였다. 또한, 감쇠비를 고려한 고유진동수 해석 결과, 정격 회전속도 이하에 존재하는 1,2,3 차 진동모드에서 감쇠가 충분하여 공진 시 발생하는 진동의 제진이 효과적으로 구현됨을 예측하였다. 신형기^{(2),(3)} 등은 한국에너지기술연구원에서 개발 중인 축류형 충동 터빈을

초임계 이산화탄소 발전 사이클에 적용하였으며, 제작을 완료하고 시험을 수행하였다. 시험 결과, 입구 최대 압력 100 bar, 최대 온도 205 °C 조건에서 45분 연속 운전, 최대 11 kWe의 전력을 생산하였다. 황성호⁽⁴⁾ 등은 틸팅 패드 베어링이 적용된 초임계 이산화탄소 발전시스템용 소형 터보기계에서 베어링의 윤활특성 변화가 회전체동역학 성능에 미치는 영향을 해석적으로 확인하였다. 해석 결과, 윤활특성이 증가할수록 임계속도가 감소하는 경향성을 확인하였고, 베어링의 윤활특성을 조절함으로써 정격 구동속도 대비하여 임계속도의 여유 마진 확보가 가능함을 보였다.

자동차용 터보차저에는 고속운전에 대응하기 위해 주로 플로팅 링 베어링이 적용되고 있다. Daixu⁽⁵⁾ 등은 공급되는 오일의 압력과 온도에 따라서 플로팅 링 베어링으로 지지되는 터보차저의 진동 특성 변화에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 베어링 하우징에 3축 가속도 센서를 부착 하였고, 오일의 압력 4 bar, 구동속도 210 krpm 구동 조건에서 결과를 취득하였다. 실험 결과, 베어링 하우징에서 0.3x 및 0.6x의 비동기 주파수 성분이 주로 발생하였지만, 그 크기는 1x 성분 크기에 비해 매우 작음을 확인하였다. 또한, 오일 온도에 의한 영향보다 오일 압력에 의한 영향이 터보차저의 전체적인 진동특성에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 김규만과 류근⁽⁶⁾은 볼베어링과 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지되는 차량용 터보차저의 회전체동역학 해석을 수행하였다. 스퀴즈 필름 댐퍼의 설계 인자 중 간극, 길이, 오일 점도, 회전축 불균형 질량의 크기 및 위상이 터보차저의 동적 거동에 미치는 영향을 예측하였다. 해석 결과, 초기 기준 모델의 간극으로부터 33 %의 간극 변화가 회전축 진동 변위가 최대 80 % 변화하고, 불균형 질량의 위상 배치가 역위상을 가질 때 진동의 크기가 40 % 감소함을 해석적으로 확인하였다. 이를 통해, 스퀴즈 필름 댐퍼의 간극과 불균형 질량의 위상이 터보차저 동적 거동에 가장 큰 영향임을 보였다.

가스 포일 베어링은 무급유 베어링으로서 시스템의 단순화가 가능하고 친환경적인 장점을 가진다. 반면, 오일 윤활 베어링에 비해 낮은 동특성 계수와 하중지지능력은 회전체-

* 국민대학교 기계공학부 교수(School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea)

E-mail : thk@kookmin.ac.kr

** 국민대학교 대학원 기계설계학과 박사과정(Department of Mechanics and Design, Kookmin University, Seoul, Korea)

베어링 시스템에 불리하게 적용될 수 있다. 문형욱⁽⁷⁾ 등은 이중 범프와 심포일을 갖는 가스 포일 저널 베어링으로 지지되는 공기압축기의 구동시험을 통해 회전체동역학적 특성 평가를 수행하였다. 실험 결과, 회전동기성분이 지배적으로 발생하는 것을 확인하였고, 회전체-베어링 시스템의 불안정을 야기할 수 있는 비동기 진동성분은 매우 작게 나타나 심포일이 적용된 가스 포일 저널 베어링의 활용 가능성을 실험적으로 확인하였다.

김정완⁽⁸⁾ 등은 다단형식 터빈의 스팀 환경 및 실제 운전 영역에서 회전체 진동 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 해석과 실험을 통해 정격속도인 13,000 rpm 부근에 임계속도가 있음을 확인하였고, 이에 대한 해결책으로 볼 베어링에 축방향 예압을 증가시키고, single plane balancing을 수행함으로써 운전 영역에서 진동 크기가 13 μm 로 매우 안정적인 진동 양상을 확인하였다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1. 베어링

3.1.1. 저널 베어링

유체로 윤활 되는 저널 베어링은 회전축의 회전 시 발생하는 유체 동압이 하중을 지지하는 비접촉식 베어링으로서, 구름베어링과 같은 접촉식 베어링에 비해 마찰 마모가 적어 높은 내구성을 갖는다. 저널 베어링의 한 종류인 틸팅 패드 저널 베어링(Tilting Pad Journal Bearing, TJB)은 교차 강성이 매우 작아 고속에서 진동안정성이 뛰어나기 때문에 대형 터빈 및 압축기 등 고속운전이 필요한 회전기기에 다양하게 사용되고 있다. 이동현⁽⁹⁾ 등은 초임계 이산화탄소 발전시스템용 터빈의 회전축을 지지하는 틸팅 패드 베어링의 온도를 예측하기 위해 열윤활 해석을 수행하였고 구동 시험 결과와 비교하였다. 해석 결과, 하부 패드의 온도가 상부 패드 보다 높게 예측되었으며, 패드 표면의 최대 온도는 윤활유 공급 온도 보다 15 °C 높게 예측 되었다. 구동 시험 결과와 비교하였을 때 측정된 패드 온도는 해석결과와 5 % 내로 잘 일치함을 보여 해석결과에 대한 신뢰성을 검증하였다. 황성호⁽¹⁰⁾ 등은 초임계 이산화탄소 윤활 틸팅 패드 저널 베어링의 해석모델을 제시하고, 기존의 오일 윤활 베어링과 동특성 계수를 비교하였다. 초임계 이산화탄소로 직접 윤활을 할 경우 베어링의 낮은 동력 손실 및 누유방지 시스템의 단순화가 가능하다. 해석결과는 오일 윤활에 비해 초임계 이산화탄소 윤활은 동일한 회전속도에서 베어링의 직교강성 및 감쇠가 각각 최대 97.5 %, 98.4 % 감소하는 것으로 예측하였다. 또한, 감소된 베어링의 강성과 감쇠는 회전체-베어링 시스템 진동특성에 중대한 영향을 주기 때문에 축계 설계 시 회전체 동역학 해석이 필수적임을 보였다. 정성운⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 등은 정지 및

저속 구동에서 틸팅 패드 베어링의 패드의 마모 및 베어링 마찰토크 감소를 통한 에너지 효율 향상을 위하여 가압된 오일을 외부에서 주입하는 하이브리드 틸팅 패드 저널 베어링의 해석 모델을 개발하였고, 해석 결과와 기존 문헌의 실험 결과와 비교하여 해석 모델을 검증하였다. 해석 결과, 하중을 받는 하부 패드의 오일 주입구인 리세스 부분에서 최대 압력이 형성됨을 예측하였다. 또한, 단위 하중에 따른 최소 유막두께의 경우 하중 증가에 따라 최소유막두께가 감소함을 예측하였고, 이는 실험결과와 대체로 잘 일치함을 보였다. 이안성과 장선용⁽¹³⁾은 800 MW급 초임계 스팀터빈 트레인의 고압터빈용 틸팅 패드 저널 베어링의 특성을 preload 및 offset 영향에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 결과, preload와 offset이 증가함에 따라 베어링의 편심률이 감소함을 보였다. 방경보⁽¹⁴⁾ 등은 베어링 내부로 공급된 윤활유가 외부로 쉽게 빠져나가지 못하게 막아주는 쉘 투스(tooth)가 적용된 틸팅 패드 베어링에 대하여 쉘 투스 간극이 베어링 성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 시험베어링으로 6 pad 의 LOP(Load on Pad) 타입의 베어링을 사용하였으며, 다양한 운전조건에서 베어링의 동력손실, 온도, 유막두께 등을 관찰하였다. 실험 결과, 쉘 투스의 간극이 작을 수록 동력손실과 온도는 증가하였고 유막두께는 감소함을 확인하였다. 이를 통해 적절한 쉘 투스의 간극 선정을 통해 효율과 신뢰성이 높은 베어링 모델 제시가 가능함을 보였다.

또 다른 비접촉식 베어링의 한 종류인 가스 포일 베어링은 오일 윤활이 필요없어 시스템의 단순화가 가능하기 때문에 소형 고속회전기기에 널리 사용되고 있다. 황성호와 김태호⁽¹⁵⁾는 이중범프를 가지며, 탑포일과 범프포일 사이에 심포일을 갖는 가스 포일 저널 베어링에 대하여 심포일의 길이 변화에 따른 베어링의 정/동적 성능을 해석적으로 예측하였다. 해석 결과, 심포일 적용이 윤활틈새에 경사면을 형성하여 심포일이 없는 경우보다 더 넓은 압력장을 형성함으로써 베어링의 하중지지능력을 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, 심포일의 길이 조절을 통해 베어링의 직교 강성 및 감쇠 성능의 변경이 가능함을 예측하였고, 이를 통해 심포일 적용으로 베어링의 고속구동 및 진동 제진 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 문진혁과 김태호⁽¹⁶⁾는 난류를 고려한 가스 포일 저널 베어링 해석 모델을 제시하였고, 냉매 구동되는 가스 포일 저널 베어링의 특성을 층류모델과 난류모델 두 가지에 대해서 비교하였다. 난류 모델 적용 시 기존 층류 모델보다 편심률이 감소하고 유막두께가 증가함을 확인하였다. 이는 난류 모델의 하중지지능력이 증가함을 의미한다. 또한, 회전속도가 증가함에 따라 층류모델과 난류모델 사이의 해석 결과의 차이가 커짐을 확인하였다. 김동희⁽¹⁷⁾ 등은 가스 포일 베어링의 회전체동역학적 안정성 향상을 위하여 압전소자를 범프와 베어링하우징 사이에 위치시켜 실시간으로 베어링의 프리로드를 제어하는 압전소자 가스 포일 베어링을 설계 및 제

작하였고, 실험을 통해 실시간 압전제어 성능 및 타당성에 대한 평가를 수행하였다. 실험을 통해 실시간 압전소자 프리로드 제어 시 위험속도, 불안정성 발생 속도에서 모두 회전체 진동의 크기가 감소함을 확인하였으며, 특히 불안정성 진동의 크기는 최대 68 % 감소함을 보였다. 이를 통해, 회전체-베어링 시스템의 회전체동역학적 안정성을 압전소자 제어를 통해 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 김태호와 문형욱⁽¹⁸⁾은 탄성구조체인 범프포일 위에 여러 장의 다엽포일이 원주방향으로 일정 부분 겹쳐있는 형상을 갖는, 범프포일로 지지되는 다엽포일 저널 베어링의 성능을 해석적으로 예측하고 특성을 규명하였다. 해석 결과, 구동 토크는 범프 포일 베어링에 비해 작게 나타나며, 윤활특성 및 하중의 변화에 덜 민감하게 변한다. 또한, 동일한 범프 강성을 갖는 범프 포일 베어링에 비해 직교 강성은 유사한 수준이나 직교 감쇠는 작아 외란에 대한 진동 제진 성능은 불리함을 예측하였다.

3.1.2. 스러스트 베어링

스러스트 베어링은 회전체의 축방향 하중을 지지하는 회전기 요소부품이다. 2018년도에는 주로 공기를 윤활유체로 사용하는 무급유 베어링인 포일 스러스트 베어링에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 이종성⁽¹⁹⁾ 등은 15 kW급 무급유 공기압축기에 적용되는 가스 포일 스러스트 베어링의 패드 개수, 외경 변화에 따른 베어링의 온도포화 안정성 및 하중지지능력에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 100,000 rpm 구동 조건에서 20분간 지속 구동하여 온도포화 실험 결과, 열흔 및 변형은 일어나지 않음을 확인하였다. 그러나, 패드 개수 감소 및 외경 축소 시에 베어링의 온도와 하중지지능력이 감소함을 실험적으로 확인하였다. 따라서, 베어링의 패드 및 외경을 감소시킬 경우 냉각을 위한 추가적인 대책이 필요함을 언급하였다. 이성진⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ 등은 터보압축기용 포일 스러스트 베어링의 정/동적 특성 평가를 위한 실험장치를 개발하였고, 이를 통해 정적 하중에 대한 베어링의 구조강성과 손실계수를 측정하였다. 실험 결과, 하중의 증가에 따라 베어링의 구조강성과 소산에너지는 비선형적으로 증가함을 확인하였고, 손실계수는 일정 하중까지는 하중에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향성을 확인하였다. 이를 통해, 베어링의 감쇠 특성을 나타내는 지표인 손실계수는 하중에 크게 영향을 받는 것을 밝혔다. 박지수와 김충현⁽²²⁾은 포일 스러스트 베어링에 대하여 장시간의 시작-정지 사이클 평가에서 베어링의 시작, 구동, 정지 토크 비교를 통해 베어링의 내구성을 실험적으로 평가하였다. 평가 결과, 25,000 사이클 동안 베어링의 시작, 구동, 정지 토크가 유사한 수준을 가짐을 확인함으로써 시험베어링에 대한 내구성을 검증하였다.

3.1.3. 볼 베어링

2018년도에는 접촉식 베어링인 볼베어링에 대하여 베어링

의 강성 및 진동 특성에 관한 연구들이 활발히 수행되었다. 서정화⁽²³⁾ 등은 볼베어링의 예압량 변화에 따른 회전축의 진동 특성에 대해 실험적 및 해석적 연구를 수행하였다. 두 개의 깊은 홈 볼베어링으로 지지되는 회전축을 최대구동속도 100,000 rpm 에서 자유 감속하면서 2개의 와전류식 센서를 이용하여 회전축의 진동 변위를 측정하였다. 실험 및 해석 결과 모두 예압이 증가함에 따라 베어링의 강성이 증가함을 확인하였다. 이를 통해 베어링의 예압 조절을 통해 회전체-베어링 시스템의 위험속도 조절이 가능함을 보였다. 통방칸과 홍성욱⁽²⁴⁾은 기존의 각접촉 베어링으로 지지되는 회전체-베어링 시스템의 단순화 해석을 기반으로 응답 및 시간에 따른 베어링 특성을 고려한 시스템 진동 분석 기법을 제시하였다. 유한 요소 해석 기법과 Newmark- β 방법을 사용하여 베어링의 강성 행렬에 시간에 따라 변하는 베어링의 강성을 고려하였다. 또한, 제시된 해석 모델은 기존 문헌의 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 김규복과 이은주⁽²⁵⁾는 각접촉 볼베어링의 하중에 따른 변형량 계산 자동화 모듈을 개발하여 베어링의 강성 평가에 적용하였고, 개발된 모듈의 신뢰성 검증을 위해 상용프로그램의 해석 결과와 비교 하였다. 개발된 모듈은 베어링에 적용되는 하중에 따른 내부 변형량을 예측할 수 있고, 기존 상용프로그램 보다 모델링 및 하중 조건변경을 반복적으로 수행하여야 하는 시간 소요를 줄일 수 있음을 보였다. 또한, 기존 상용프로그램 결과와의 오차율은 최대 2 % 미만으로 개발된 모듈에 대한 검증을 확인하였다. 박찬일⁽²⁶⁾은 깊은 홈 베어링과 롤러 베어링의 변형 특성 및 회전에 따라 변화하는 시변 베어링 강성을 해석하였고, 이를 스피어 기어계의 진동해석에 적용하였다. 해석 결과, 볼베어링에 비해 강성이 더 큰 롤러 베어링의 1, 2 번 고유진동수가 상승함을 확인하였고, 3 번 고유진동수는 기어 강성과 관련됨을 확인하였다. 또한, 구름 베어링의 강성은 시간에 따라 강성이 변하는 기어의 변위에 크게 영향을 미쳤으며, 이를 통해 기어 변위 해석을 위해서는 시변 베어링 강성이 적용된 해석이 필요함을 밝혔다.

3.1.4. 자기 베어링

정세나⁽²⁷⁾ 등은 상대적으로 낮은 가스 포일 베어링의 하중 지지능력을 보완하기 위해 저속에서는 자기베어링이 함께 작용하는 하이브리드 베어링의 하중 분배에 따른 성능을 실험적으로 평가하였다. 마그네틱 베어링의 제어 강성이 클수록 마그네틱 베어링이 하중을 단독으로 지지하게 되고, 제어 강성이 낮으면 포일 베어링의 하중 부담이 증가하는 것을 실험적으로 확인하였다. 다양한 조건의 실험을 통해 베어링의 하중 분배 최적값을 찾았고, 이를 통해 마그네틱 베어링의 제어 강성이 포일/마그네틱 베어링의 안정된 성능을 결정하는 주요 인자임을 밝혔다.

3.2. 댐퍼

베어링용 댐퍼는 공진 시 회전축의 진동 크기를 감소하고 회전체동역학적 안정성을 향상하기 위하여 회전기기에 널리 적용되고 있으며 특히, 스퀴즈 필름 댐퍼(Squeeze Film Damper, SFD)가 가장 널리 사용되고 있다. 황지수⁽²⁸⁾ 등은 200,000 rpm 이상으로 고속 구동되는 차량용 터보차저 회전체-베어링 시스템에 적용되는 스퀴즈 필름 댐퍼의 동적 계수를 측정하기 위한 실험장치를 개발하고, 이를 사용하여 스퀴즈 필름 댐퍼의 동적 계수를 측정하기 위한 실험 과정에 대해 소개하였다. 또한, 정하중 실험과 임팩트 실험을 통해 실험장치의 구조강성 및 감쇠특성을 파악하였다. 이는 추후 오일이 공급되는 조건에서의 동적 계수와 비교를 통해 순수 스퀴즈 필름 댐퍼만의 동적 계수를 추정하는데 활용가능하다.

볼베어링은 높은 신뢰성과 규격화된 설계사양으로 인해 접근성이 좋으며, 사용이 용이한 장점이 있다. 하지만 별도의 감쇠 성능이 없기 때문에 고속 회전기기에 적용 시 진동과 소음 측면에서 불리하다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 서정화⁽²⁹⁾ 등은 볼베어링으로 지지되는 3kW급 소형 고속 전동기를 100,000 rpm 으로 구동하며, 메탈 메쉬 댐퍼 적용 전/후의 전동기 진동 및 소음을 실험적으로 평가하였다. 실험 결과, 50,000 rpm 이상에서 메탈 메쉬 댐퍼 적용 시 전동기의 진동과 소음이 현저히 감소함을 확인하였으며 특히, 최대 구동속도인 100,000 rpm 에서는 진동 가속도의 크기가 70 %, 소음은 14 % 감소함을 보였다.

3.3. 실

실은 유체의 누설을 최소화하여 회전기기의 효율을 향상시킬 수 있는 요소부품이다. 우상무⁽³⁰⁾ 등은 CFD 해석을 통해 회전기계의 운전 중 발생할 수 있는 래버린스 실의 마모에 대한 해석적 연구를 수행하였으며, 실의 폭과 깊이 방향 마모가 진행됨에 따른 누설 계수 및 특성을 분석하였다. 간극이 작을수록 누설계수의 변화가 커지고, 마모 형상이 간극의 변화에 영향을 미침을 예측하였다. 이를 통해, 회전체의 특성 상 접촉과 마모가 발생할 수 있음을 고려한다면 초기 설계점 대비 변형 후의 누설 변화가 적도록 적절한 간극을 확보해야함을 밝혔다. 박대성과 하태웅⁽³¹⁾은 스팀터빈에 적용되고 있는 래버린스 실과 브러쉬 실이 결합된 하이브리드 실의 설계 기술 확보를 위해 진동 안정성을 예측할 수 있는 회전체동역학적 특성 해석법을 제시하였다. 브리스틀 요소를 다공질 매질로 가정하고, 상대좌표계를 사용한 동특성 해석법을 기초로 3D CFD 해석법을 통해 예측하고, 그 결과를 기존 문헌의 실험결과와 비교 분석하였다. 하이브리드 실의 3D CFD 해석 결과는 실험결과와 강성계수는 17.5 % 작게,

연성강성계수는 3 % 크게, 감쇠계수는 10 % 크게 예측됨을 보여 해석모델 및 방법의 타당성을 검증하였다.

4. 결론

2018년도에는 초임계 이산화탄소 발전시스템용 회전기기를 위한 회전체동역학 및 고속회전이 가능한 틸팅 패드 베어링과 가스 포일 베어링에 관한 연구가 많이 진행되었다. 또한, 각접촉 볼베어링에 대한 해석적 연구와 진동안정성 향상을 위한 베어링 댐퍼에 관한 연구도 활발하였다. 유체의 누설을 방지하기 위한 실에 대한 연구는 주로 CFD를 통한 해석이 주를 이루었으며 다양한 해석기법을 활용하여 성능을 예측한 후 결과를 기존의 실험결과와 비교하고 검증하였다.

References

- (1) Lee, D. H., Kim, B. O., Lim, H. S., Park, M. R., Kang, D. W., and Choi, B. S., 2018, "Rotordynamic Characteristic Analysis for Axial Turbine for the 10 MW Super-critical CO₂ Cycle Application," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 21, No. 1, pp. 13~18.
- (2) Shin, H. K., Cho, J. J., Cho, J. H., Ra, H. S., Choi, B. S., Roh, C. W., Lee, B. J., Lee, G. B., Baik, Y. J., Kang, Y. S., and Huh, J. S., 2018, "Axial Impulse Turbine Design for Supercritical CO₂ Cycle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 42, No. 5, pp. 379~385.
- (3) Baik, Y. J., Cho, J. H., Shin, H. K., Cho, J. J., Roh, C. W., Lee, G. B., Lee, B. J., Choi, B. S., Kang, Y. S., and Huh, J. S., 2018, "Initial Test Running of the World's First Axial Supercritical Carbon Dioxide Turbine Generator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 6, No. 2, pp. 107~115.
- (4) Hwang, S. H., Jeong, S. Y., and Kim, T. H., 2018, "Rotordynamic Analysis of Microturbomachinery Supported on Tilting Pad Bearings for Supercritical CO₂ Power Generation Systems," *Proceedings of KSFM summer meeting*, pp. 387~388.
- (5) Daixu Song, Kim, K. M., and Ryu, K., 2018, "Rotordynamic Characteristics of Small Turbochargers for Gasoline Engines—Effect of Supply Oil Temperature and Pressure," *Proceedings of KSTLE autumn conference*, pp. 164~164.
- (6) Kim, K. M., and Ryu, K., 2018, "Rotordynamic Analysis of Automotive Turbochargers Supported on Ball Bearings and Squeeze Film Dampers in Series : Effect of Squeeze Film Damper Design Parameters and Rotor Imbalances," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 34, No. 1, pp. 9~15.
- (7) Mun, H. W., Hwang, S. H., Kim, T. H., Lee, J. S., and Park, G. W., 2018, "Evaluations of Rotordynamic Characteristics of Gas Foil Journal Bearing with Shim Foils,"

- Proceedings of KSNVE autumn conference, pp. 303~303.
- (8) Kim, J. W., Ha, Y. S., Choi, B. S., and Lee, Y. B., 2018, "A Study of the Dynamics Characteristics of Multi-stage Steam Turbine," Proceedings of KSFM winter meeting, pp. 333~334.
- (9) Lee, D. H., Kim, B. O., and Lim, H. S., 2018, "Thermal Analysis and Temperature Measurement of Tilting Pad Bearings Supporting a Power Turbine for the Supercritical CO₂ Cycle Application," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 34, No. 2, pp. 43~48.
- (10) Hwang, S. H., Jeong, S. Y., Mehdi, S. M., and Kim, T. H., 2018, "Dynamic Performance Analysis of Tilting Pad Journal Bearing Lubricated with Super Critical Carbon Dioxide," Proceedings of KSFM winter meeting, pp. 417~418.
- (11) Jeong, S. Y., Mehdi, S. M., and Kim, T. H., 2018, "Performance Analysis of Hybrid Tilting Pad Journal Bearing," Proceedings of KSFM summer meeting, pp. 385~386.
- (12) Jeong, S. Y., Mehdi, S. M., and Kim, T. H., 2018, "Performance Prediction of Hybrid Tilting Pad Journal Bearing and Comparison to Published Test data," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 53~54.
- (13) Lee, A. S., and Jang, S. Y., 2018, "Design Characteristics of HPT Bearings in 800 MW Class Supercritical Steam Turbines Train," Proceedings of KSTLE spring conference, pp. 33~35.
- (14) Bang, K. B., Choi, Y. H., and Cho, Y. J., 2018, "Effect on Seal Tooth Clearance on Power Loss and Temperature of Tilting Pad Journal Bearing," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 34, No. 5, pp. 183~190.
- (15) Hwang, S. H., Moon, C. G., Lee, J. S., and Kim, T. H., 2018, "Performance Predictions of Gas Foil Journal Bearing with Shim Foils," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 34, No. 3, pp. 107~114.
- (16) Mun, J. H., and Kim, T. H., 2018, "Performance Prediction of Gas Foil Bearings Considering Turbulent Flows," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 51~52.
- (17) Kim, D. H., Park, J. S., and Sim, K. H., 2018, "An Experimental Feasibility Study on Real-time Piezoelectric Control Performance of Gas Foil Bearings," Proceedings of KSFM winter meeting, pp. 341~342.
- (18) Kim, T. H., and Mun, H. W., 2018, "Performance Predictions of Gas Foil Bearing with Leaf Foils Supported on Bumps," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 34, No. 3, pp. 75~83.
- (19) Lee, J. S., Park, C. Y., Park, G. W., Choi, K. S., Kim, H. C., Yang, H. S., and Cho, K. S., 2018, "The Experimental Research for Load Capacity of Gas Foil Thrust Bearing using an Oil-free Aircompressor," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 88~89.
- (20) Lee, S. J., and Ryu, K., 2018, "Test rig Development for Foil Thrust Bearings in Turbocompressors," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 159~159.
- (21) Lee, S. J., Ryu, K., Jeong, J. H., and Ryu, S. J., 2018, "Measurements of Structural Characteristics of Foil Thrust Bearings for Oil-Free Micro Gas Turbines," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 56~57.
- (22) Park, J. S., and Kim, C. H., 2018, "Evaluation of the Operation Characteristics of a Foil Thrust Bearing," Proceedings of KSTLE autumn conference, pp. 111~111.
- (23) Seo, J. H., Seok, Y. J., and Kim, T. H., 2018, "Effects of Ball Bearing Preloads on Rotordynamic Performance of High Speed Motor : Measurements and Predictions," Proceedings of KSNVE spring conference, pp. 275~275.
- (24) Tong, V. C., and Hong, S. W., 2018, "Vibration Analysis of Flexible Rotor with Angular Contact Ball Bearings Using a General Bearing Stiffness Model," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No. 12, pp. 1179~1189.
- (25) Kim, K. B., and Lee, W. J., 2018, "Development of Angular Contact Ball Bearing Stiffness Calculation Module," Proceedings of KSME spring conference, pp. 249~251.
- (26) Park, C. I., 2018, "Stiffness Effect of Rolling Bearings in the Vibration Analysis of the Spur Gear System," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 42, No. 5, pp. 461~469.
- (27) Jeong, S. N., Kim, J. W., and Lee, Y. B., 2018, "Experimental Study on Load Distribution of Foil/Magnetic Bearings," Proceedings of KSTLE spring conference, pp. 97~98.
- (28) Hwang, J. S., Ryu, K., and Jeung, S. H., 2018, "Test Rig Development for Identification of Rotordynamic Force Coefficients of Squeeze Film Dampers in Automotive Turbocharger Bearing Systems," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 34, No. 1, pp. 33~41.
- (29) Seo, J. H., Seok, Y. J., and Kim, T. H., 2018, "Vibration and Noise Evaluations of High Speed Motor Supported on Ball-Bearing integrated with Metal Mesh Damper," Proceedings of KSNVE spring conference, pp. 272~272.
- (30) Woo, S. M., Kang, Y. H., and Park, W. G., 2018, "Numerical Study of Leakage Characteristic in Labyrinth Seals with Shapes of Rub-Groove," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 1, pp. 27~33.
- (31) Park, D. S., and Ha, T. W., 2018, "Rotordynamic Characteristic Analysis of Brush Seal Using CFD," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 5, pp. 21~27.