

2014년 회전체동역학 분야 연구동향

김태호·장경은*

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2014년도 국내 발표된 논문을 중심으로 회전체 동역학 및 그와 관련된 트라이볼로지 요소(베어링·실·댐퍼)의 연구동향을 알아본다. 유체 기계와 관련된 논문을 중심으로 분석하였으며, 본지에서 정의한 유체기계로는 터보 압축기, 송풍기, 터빈, 펌프 등 산업현장에서 사용되는 회전 기계류를 적용하였다. 트라이볼로지 요소로는 크게 베어링, 실 댐퍼로 분류하였고, 연구동향의 내용으로는 크게 회전체 시스템의 동역학적 해석 분야와 저널베어링, 트러스트 베어링, 구름베어링, 자기베어링, 실, 댐퍼 등으로 구분하여 분석하였다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 산업용 회전기기는 고효율·고속화의 경향을 보이고 있다. 설계된 정격 운전속도에 도달하기까지 위험속도를 통과하며 이에 따라 고속화에 따른 시스템의 안정성 및 신뢰성 검증에 대한 회전체 시스템의 동역학적 특성 연구가 활발히 이루어지고 있다.

대형 발전용 가스터빈과 발전기는 정격 운전속도 이내에서 위험속도를 통과하고, 그 위험속도에서 가진되는 동적 응답 특성을 나타내는 로터 시스템이다. 대형 발전용 가스터빈은 가동 후의 온도 변화로 인해 지지부의 열팽창이 나타나므로 커플링부에서 변위가 발생하고 굽힘 모멘트가 작용될 수 있다. 하진웅과 정대석⁽¹⁾은 발전용 가스터빈과 발전기의 로터 시스템의 정상상태 동적 응답을 구하는 유한요소 모델을 제시하고, 고정 커플링의 오프셋 변화에 따른 동적 응답 해석을 수행하였다. Cold 상태일 때, 열팽창이 발생하지 않아 오프셋이 클 경우에는 고정 커플링과 근접한 발전기와 가스터빈의 베어링에서 진동 trip 설정을 넘어서는 것이 확인되었다. 하지만 hot 상태일 때, 열팽창으로 인해 고정 커플링의 초기변위가 줄어들어 오프셋이 큰 경우에도 진동 trip 설정을 넘지 않음을 보였다. 이를 통해 정격 운전속도에서 지

속적 운전 시에는 고정 커플링의 오프셋 영향이 거의 없음을 예측하였다.

최근 무인이동시스템이 활발하게 개발되고 있는 실정이다. 하지만 무인이동시스템에 장시간 에너지를 공급할 에너지원이 확보되지 않아 개발에 장애가 되고 있다. 개발되고 있는 에너지원으로는 마이크로 가스터빈 발전기(MTG, Micro Gas Turbine Generator)가 적합한 것으로 알려져 있다. 박철훈⁽²⁾ 등은 정격 속도가 400krpm인 500W급 MTG의 고온부(터빈/연소기)와 저온부(전동/발전기) 사이 단열재와 주입하는 압축공기의 단열 기능을 실험적으로 검증하였다. 이전 해석은 압축기에 의해 유입되는 공기 압력이 3bar 이상이며 고온부의 온도가 700℃까지 상승하지만, 압축기에 의해 빠르게 흐르는 공기가 로터를 충분히 냉각시켜 로터에 장착되는 영구자석이 감자되지 않는 것을 예측하였다. 본 실험에서는 주입압력을 다르게 하고 고온부의 온도를 700℃로 유지하였을 때, 고온부와 저온부의 온도를 측정하여 고속 구동시의 냉각 성능을 확인하였다. 주입압력 1.5bar와 1.0bar에서 저온부는 각각 45℃와 48℃로 유지되는 것을 확인하였다. 따라서 실제 구동시 실험 조건보다 높은 주입압력인 3bar에서도 로터가 충분히 냉각되어 MTG가 정상적으로 작동할 수 있을 것이라고 검증하였다.

틸팅 패드 베어링(TPB, Tilting Pad Bearing)은 연성 강성(cross-coupled stiffness)이 발생하지 않아 고속에서의 안정성이 매우 높다. 하지만 고속의 프로세스 압축기에서 공기역학적 부작용에 의해 연성 강성 불안정 인자가 발생하게 된다. 실제로 국내 정유 플랜트에서 운전 시 안정된 시스템이 경미한 상태 변화에 민감하게 반응하여 불안정 진동이 증가하여 trip되는 경우가 종종 발생하고 있다. 이는 공기역학적 연성 강성의 증가가 TPB의 안정성 설계를 초과하였기 때문으로 볼 수 있다. 틸팅 패드 베어링의 설계변수를 다르게 하여 압축기의 안정성을 변화시킬 수 있다. 이안성⁽³⁾은 LBP 형태의 TPB의 설계변수를 다르게 하여 그 영향을 해석하였다. 설계변수는 clearance, preload, LBP/LOP 상태를 고려하였다. 해석 결과 LBP/LOP 상태를 바꾸었을 때는 LogDec의 차이가 크게 없었지만, 베어링 틈새의 크기를 바꾸었을 때 LogDec이 크게 상승하는 결과를 보였다. 이를 통해 TPB의 clearance를 증가시키고 preload를 감소시킬 경우 압축기의 안정성을 개선시킬 수 있음을 밝혔다.

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

가스 포일 베어링(GFB, Gas Foil Bearing)은 탄성 구조체간의 상호 작용을 통하여 발생하는 마찰력으로 인해 강성을 증가시키고 마찰 감쇠를 생성하여 회전체-베어링 시스템의 안정성을 향상시킨다. GFB는 회전속도에 따라 공기 유막의 강성과 감쇠계수가 변화하기 때문에 회전체 시스템의 불안정성 예측이 필수적이다. 박문성⁽⁴⁾ 등은 3 pad GFB의 preload와 회전축의 경사각의 변화에 따라 12가지 경우에 대하여 시스템의 고유진동수와 불안정성에 대하여 해석하였다. 회전체의 경사각과 preload가 감소할수록 1, 2차 mode의 고유진동수와 불안정성 발생 속도(OSI, Onset Speed of Instability)가 증가함을 확인하였다. 일반적으로 회전축의 경사각과 preload 또는 clearance가 작을수록 회전체 시스템의 안정성 향상에 유리함을 보였다.

해양시추 설비의 머드 탱크와 임펠러는 형상이 정형화되어 있지 않기 때문에 설계 및 평가하기가 힘들어 CFD 해석을 사용한다. 순환 시스템에서 사용하는 머드는 첨가물의 비율에 따라 다양한 점도를 가지므로 그 점도가 해석에 반영되어야 한다. 하지만 이전까지의 논문은 대부분 뉴턴 점성 유체로 가정하여 해석하였다. 임효남⁽⁵⁾ 등은 머드 탱크에 사용되는 머드를 비뉴턴 점성 유체로 적용하여 교반기의 성능을 해석하고 뉴턴 유체로 가정한 해석과 비교하였다. 비교한 결과, 물리량과 운동량의 전달 패턴 및 분포가 다르게 나타남을 보였으며 뉴턴 유체로 모델링한 경우 임펠러의 소비 동력을 높게, 토출 성능을 낮게 추정함을 밝혔다. 따라서 임펠러의 입·출구 선정에 대하여 머드를 비뉴턴 점성 유체로 모델링하여야 하는 것을 확인하였다.

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

TPB는 설계 및 구동 조건이 미치는 영향이 크기 때문에 다양한 실험적·해석적 연구를 통해 개선이 이루어지고 있다. 특히 패드를 지지하는 피벗 강성을 고려한 해석 모델 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이태원과 김태호⁽⁶⁾는 패드와 피벗의 유한 요소 해석 모델을 개발하여 비선형 접촉 해석을 통해 볼-소켓 형태와 락커백 형태의 피벗 강성을 예측하고 Hertzian 접촉 모델의 해석 결과와 비교하였다. 동일한 조건으로 해석하였을 때 곡률직경 차이가 감소할수록 Hertzian 접촉 모델을 통해 계산된 피벗 강성 결과와 유한 요소 모델 결과의 차이가 커짐을 확인하였다. 이는 Hertzian 접촉 모델이 작은 접촉 면적을 가정하기 때문인 것으로 보이며 작은 곡률직경 차이를 갖는 경우 유한 요소 모델 해석이 더 적합한 것을 보였다.

최태규와 김태호⁽⁷⁾는 Hertzian contact stress 이론을 사

용하여 해석한 피벗 강성을 고려한 틸팅 패드 저널 베어링(TPJB, Tilting Pad Journal Bearing)의 해석을 진행하여 실험결과와 비교하였다. 임의의 피벗 강성을 고려한 기존의 해석 결과에 비해, 강성 해석 결과는 실험과 매우 잘 일치하며, 감쇠의 경우 실험에 비해 약간 높은 예측을 하지만 경향이 일치함을 보였다. 기존의 해석결과 및 실험결과와의 비교를 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다.

또한, 최태규와 김태호⁽⁸⁾는 TPB의 피벗 형상에 따른 피벗 강성을 예측하여 기존의 논문과의 비교를 통해 신뢰성을 검증하고 피벗 강성을 고려한 베어링의 강성 및 감쇠를 해석적으로 분석하였다. 피벗의 형상은 볼-소켓 형태와 락커백 형태로 해석하였다. 피벗 강성을 고려하였을 때, 편심률은 증가하고 베어링의 강성과 감쇠는 감소함을 보였다. 특히 볼-소켓 피벗의 경우 하중 증가에 따라 피벗 강성이 급격히 변화하여 베어링 하중이 중요한 설계 요소임을 확인하였다.

박문성과 김태호⁽⁹⁾는 3 패드 가스 포일 저널 베어링(GFJB, Gas Foil Journal Bearing)에 대하여 기계적 예압과 가진 주파수의 증가에 따른 강성과 감쇠를 해석하였다. 일반적으로 기계적 예압의 증가에 따라 직교 강성이 증가하고 교차 강성이 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 가진 주파수의 증가에 따라 불안정성을 야기하는 값이 감소함을 보였다. 이를 통해 가진 주파수의 증가에 따라 베어링의 안정성이 증가하는 것을 확인하였다.

이종성과 김태호⁽¹⁰⁾는 preload 증가가 3 패드 GFJB의 정·동특성에 미치는 영향을 연구하였다. 먼저 회전 속도와 preload 증가에 따른 1 패드 GFJB와 3 패드 GFJB의 최소유막두께와 회전축 중심의 자세각 변화를 비교하였을 때 3 패드 GFJB가 더 작은 최소유막두께를 보이지만 교차강성을 유발하는 수평방향의 회전축 중심 자세각 변화가 적어 동적 안정성이 뛰어난 것을 보였다. 3 패드 GFJB의 해석을 통해 일반적으로 프리로드가 증가할수록 저널 편심량, 자세각, 최소유막두께, 교차강성 그리고 수직방향 직교감쇠가 감소하고 마찰토크, 직교강성과 감쇠가 증가함을 보였다.

이인범과 홍성기⁽¹¹⁾는 터보차저 공급 오일 압력과 온도가 풀-플로팅 베어링(FFRB, Full-Floating Ring Bearing)의 로터 응답에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 실험 장치는 ISO1940-1에 따라 저·고속의 구동 조건에서 balancing 되었다. 실험 결과 고속 조건에서 떨림현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 오일 공급 압력과 온도가 베어링의 불안정성을 유발하는 sub-synchronous 진동을 야기하는데 영향을 미치는 것을 보였다.

3.1.2 트러스트 베어링

트러스트 베어링은 축방향의 하중 지지능력을 증가시키고 마찰을 감소시키는 베어링이다. 이태원과 김태호⁽¹²⁾는 가스 포일 스러스트 베어링에 대하여 포일 경사높이(ramp height)

와 최소유막두께(minimum film thickness) 변화에 따른 베어링 동특성을 해석하였다. 이를 통해 하중지지 능력과 토크는 포일 경사높이와 최소유막두께에 의존적임을 밝혔고, 최적화 설계를 통해 베어링의 성능 향상을 도모할 수 있음을 보였다.

정요한과 박태조⁽¹³⁾는 CFD 해석을 통해 베어링 표면의 딥플 반경과 깊이에 따른 열유체 유희특성을 연구하였다. 딥플 반경이 크고 깊이가 얕을수록 딥플 내에 강한 와류로 인한 속도구배 때문에 유희유 온도가 높고 딥플부 출구 압력이 높아짐을 보였다. 열유체(THD, ThermoHydroDynamic) 해석에서의 마찰력과 누설량은 등은 해석에 비해 작게 나타나며 딥플의 개수가 많을수록 더 많은 차이가 날 것으로 예상했다.

3.1.3 볼 베어링, 롤러 베어링

볼베어링은 기하학적 불안정성(waviness)이 존재하면 회전에 따라 접촉력, 접촉각 및 강성 등이 변화하기 때문에 베어링 자체가 지지하는 역할 뿐 아니라 가진원이 될 수 있다. 황평과 Nguyen⁽¹⁴⁾은 깊은홈볼베어링(Deep-groove ball bearing)의 기하학적 불안정성 요소에 따른 영향을 4th Runge-Kutta 수치해석 기법을 통해 해석하였다. Waviness가 없을 경우 베어링의 진동은 무시할 수 있는 수준이지만, waviness가 증가할수록 nonsynchronous 요소가 많아져 불안정성을 야기할 수 있기에 볼 베어링의 진동 분석에 있어 waviness를 고려해야 함을 확인하였다.

류솔지⁽¹⁵⁾ 등은 극저온 환경에서 액체질소의 주입 유량에 따른 볼 베어링 토크, 마찰계수, 음향진동, 실험 전후 마모량을 통해 케이지의 불안정성을 실험적으로 평가하였다. 실험은 지속적으로 액체질소를 주입하는 방식과 주입하지 않는 방식 두가지로 진행하였다. 실험 결과, 구동 후 액체질소를 주입하지 않는 경우에서 급격한 마찰계수 증가를 보였고, 지속적으로 주입한 결과와 비교했을 때 약 6배의 마모량 차이를 확인하였다. 이를 통해 주입 유량이 없는 경우의 케이지가 더 불안정함을 보였다.

국외 베어링 제조 기업들은 베어링 재제조 공정을 통한 자원과 비용절감에 앞장서고 있다. 다리스랭 스트렝다와⁽¹⁶⁾ 등은 국내 특허기술을 이용해 자동조심 롤러 베어링의 초음파 나노표면개질(UNSM, Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification) 재제조 공정 적용을 통한 수명향상을 실험적으로 확인하였다. UNSM은 기존 재제조 공정에 비해 연마된 표면의 거칠기 감소, 경도 증가 그리고 압축잔류응력 형성 등의 장점이 있다. 본 논문에서는 신품 베어링에 비하여 UNSM 기술을 적용하였을 때 베어링 수명이 크게 늘어나는 것을 보여 베어링 성능 복원 및 향상에 효과가 있음을 입증하였다.

진도훈과 윤문철⁽¹⁷⁾은 슬라이더 베어링의 엠보싱 개수와 경사의 조건에 대한 유희특성을 연구하였다. 경사도는 유막

두께의 비로 정의하였다. 평균압력분포량과 최대 부하용량은 엠보싱의 개수에 관계없이 같은 유막두께비에서 발생하였다. 이를 통해 베어링의 부하용량을 증가시키기 위해서는 유막두께비가 영향력이 크다는 것을 밝혔다.

3.1.4 자기 베어링

자기베어링은 일종의 전자석으로 회전체와 고정된 전자석이 가까워질수록 간극이 작아져 서로 붙을 가능성이 있는 불안정한 시스템이기 때문에 위상을 조절하는 것이 매우 중요한 요소이다. 위상을 조절하기 위해서는 구동 회전속도 범위의 게인 값을 데이터베이스화 해야한다. 김재실⁽¹⁸⁾ 등은 LabVIEW를 이용하여 제어 알고리즘을 구성하고 실시간 통신이 가능한 Compact RIO를 통해 게인과 위상을 조절하여 자기베어링의 능동 진동 제어의 가능성을 실험적으로 확인하였다.

3.2 실(seal)

스크롤 압축기는 고정 스크롤과 선회 스크롤 사이 밀폐공간을 통해 흡입과 압축이 동시에 이루어지는 시스템이다. 선회 스크롤의 회전각이 증가할수록 밀폐체적이 줄어들어 기체가 압축되어 토출이 이루어지는 것이다. 스크롤 사이의 누설 손실을 방지하기 위해 틱실을 회선 스크롤의 홈에 삽입하여 밀봉작용을 한다. 정봉수⁽¹⁹⁾는 틱실과 상대 스크롤 사이의 유희 상태 해석을 실험과 비교하였다. 선회 스크롤의 선회각에 따른 마찰력은 해석과 실험이 유사한 경향을 보이며, 이를 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다.

제영원⁽²⁰⁾ 등은 유압 실의 마멸 및 파손 특성을 분석하는 방법인 부품 실험과 벤치 실험을 비교하여 실험 방법의 타당성을 검증하였다. 실제 산업 현장에서 사용된 유압 실과 실험 후의 유압 실의 마멸에 의한 스크레치가 일치하는 경향을 보여 두 실험의 적합성을 확인하였다. 벤치 실험의 경우 부품 실험에 비해 소요 시간과 비용을 절감할 수 있기에 유압 실의 내구성 검증에 더 적합함을 확인하였다.

신정훈⁽²¹⁾ 등은 NSWC 핸드북의 데이터베이스를 이용하여 유공압 액추에이터에 적용되는 U형 실의 수명예측을 수행하였다. NSWC 핸드북에 따르면 현장 데이터베이스를 기반으로 정한 기본고장률에 구동 조건, 유희 특성, 불순물 등의 곱셈인자를 적용하여 기계의 수명 예측을 가능하게 한다. 본 논문은 수명시험과 Ansys의 유한요소 모듈을 이용한 해석을 통한 곱셈인자들을 토대로 실의 마찰, 유희제열화, 마모 등의 특성이 수명예측에 보완되어야 함을 보였다.

3.3 댐퍼(damper)

최근 자동차의 저진동 저소음의 규제 강화에 대한 연구로

능동형 마운트 개발이 촉진되고 있다. 능동형 마운트는 실제 구현 과정에서 문제가 많아 준 능동형 마운트 중 하나인 하이브리드 마운트의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 안영공과 김동우⁽²²⁾는 자석이 적용된 고무 마운트, 즉 하이브리드 마운트의 정적 및 동적 특성을 실험 분석하고 시스템의 운동 방정식을 유도하여 그 타당성을 검증하였다.

속업소버(shock absorber)는 자동차의 승차감을 결정짓는 요소 중 하나이다. 현재 대부분의 자동차에는 능동형 속업소버가 장착되는데 그 원리는 수동형과 같아 성능 해석에는 일반적으로 수동형을 사용한다. 노대경⁽²³⁾ 등은 승용차용 수동형 속업소버의 감쇠 특성을 확인하기 위해 SimulationX 프로그램을 사용하였다. 속업소버의 3개의 디스크와 2개 슬릿의 다양한 조합 조건에서의 해석모형을 개발하였고 압력과 홀의 크기 등에 따른 영향을 분석하여 구조적인 최적화를 진행하였다.

김도영⁽²⁴⁾ 등은 MR 댐퍼의 해석에 적용되는 매개변수 규명을 위하여 공기스프링지지 제진대와 공기스프링과 MR 댐퍼지지 제진대의 모달테스트를 실시하였다. 실험을 통해 추출한 주파수응답함수를 바탕으로 최소자승법과 보조변수법을 이용하여 매개변수 규명을 실시하였다. MR 댐퍼의 비선형 감쇠 특성을 고려하여 해석할 시 해석 오차가 줄어들음을 확인하였고, MR 댐퍼의 전류 상승에 따라 강성계수와 고유진동수가 증가함을 보였다.

4. 결 론

2014년도 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구는 회전체를 지지하는 베어링에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 특히 회전체의 안정성과 관련된 기존 연구들의 해석을 보완하는 경향을 보였다. 또한, 2013년에 비하여 실이나 댐퍼에 대한 연구가 상대적으로 많이 발표되었다.

References

(1) 하진웅, 정대석, 2014, “고정 커플링의 오프셋을 갖는 발전용 가스터빈-발전기의 동적 응답해석,” 한국유체기계학회 논문집, 제17권, 제4호, pp.70~75.

(2) 박철훈, 최상규, 함상용, 2014, “500W급 마이크로 가스터빈 발전기 회전체-베어링부의 단열 및 냉각 성능에 대한 실험적 연구,” 한국유체기계학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.19~24.

(3) 이안성, 2014, “프로세스 고속 경량 원심 압축기의 로터 다이나믹 안정성 강화를 위한 설계해석-Part II: 로터다이나믹 안정성 개선,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제1호, pp.9~14.

(4) 박문성, 이종성, 김태호, 2014, “가스 포일 베어링으로 지원 고속 회전체의 경사각과 베어링의 기계적 제약이

고유 진동수와 불안정성 발생 속도에 미치는 영향.” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제3호, pp.131~138.

(5) 임효남, 이희웅, 이인수, 최재용, 2014, “시추용 머드혼합탱크의 비뉴턴 유체 모델에 대한 교반성능의 수치해석적 연구,” 한국유체기계학회 논문집, 제17권, 제6호, pp.29~37.

(6) 이태원, 김태호, 2014, “유한 요소 해석을 통해 계산된 틸팅 패드 베어링의 피벗 강성과 Hertzian 접촉 모델 해석 결과 비교,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제4호, pp.205~211.

(7) 최태규, 김태호, 2014, “볼 소켓형 피벗을 갖는 틸팅 패드 저널 베어링의 해석과 실험결과와의 비교,” 한국유체기계학회 학술대회 논문집, pp.318~319.

(8) 최태규, 김태호, 2014, “피벗 강성을 고려한 틸팅 패드 저널 베어링의 해석,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제2호, pp.77~85.

(9) 박문성, 김태호, 2014, “3 패드 가스 포일 저널 베어링의 가진 주파수에 따른 동특성 해석,” 한국유체기계학회 학술대회 논문집, pp.322~323.

(10) 이종성, 김태호, 2014, “3 패드 가스 포일 저널 베어링의 프리로드 증가에 따른 성능 해석,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제1호, pp.1~8.

(11) 이인범, 홍성기, 2014, “터보차저 공급오일 압력과 온도가 풀-풀로팅 베어링의 동적 거동에 미치는 영향,” 한국유체기계학회 학술대회 논문집, p.317.

(12) 이태원, 김태호, 2014, “가스 포일 스톱스트 베어링의 디자인 최적화 및 성능 해석,” 한국유체기계학회 학술대회 논문집, pp.320~321.

(13) 정요한, 박태조, 2014, “Surface Texturing한 평행 스톱스트 베어링의 열유체유효 해석: 딥플 반경과 깊이의 영향,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제5호, pp.303~310.

(14) Pyung Hwang, Van Trang Nguyen, 2014, “Dynamic Model to Predict Effect of Race Waviness on Vibrations Associated with Deep-Groove Ball Bearing.” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제1호, pp.64~70.

(15) 류술지, 최복성, 이진국, 이용복, 2014, “극저온 환경에서 운용되는 볼 베어링의 주입 유량에 따른 케이지의 불안정성 평가,” 한국유체기계학회 학술대회 논문집, pp.324~325.

(16) 다리스랭 스톱멩닥와, 아마노프 아웨즈한, 김준형, 이승철, 최갑수, 편영식, “자동조심 롤러 베어링의 재제조 공정 및 피로수명 향상,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제6호, pp.350~355.

(17) 진도훈, 윤문철, 2014, “등근 엠보싱 형상이 있는 슬라이더 베어링의 경사도에 따른 유효효과,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제5호, pp.284~290.

(18) 김재실, 정훈형, 신민재, 2014, “자기베어링 예측 제어 기법의 실험적 연구,” 한국정밀공학회지, 제31권, 제2호, pp.99~104.

(19) 정봉수, 2014, “스크롤 컴프레서 팁실의 마찰특성,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제6호, pp.370~377.

- (20) 제영완, 김한솔, 김류운, 정구현, 안중혁, 전홍규, 2014, “부품 및 벤치 실험을 통한 폴리우레탄 유압 왕복 실의 가속 실험,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제5호, pp.271~277.
- (21) 신정훈, 장무성, 김성현, 정동수, 2014, “NSWC를 활용한 유공압 액추에이터 U형 쉘의 수명예측,” 대한기계학회 논문집, 제38권, 제12호, pp.1379~1385.
- (22) 안영공, 김동우, 2014, “자력을 이용한 하이브리드 고무 마운트,” 한국소음진동공학회 논문집, 제24권, 제3호, pp.236~246.
- (23) 노대경, 장주섭, 서원진, 2014, “승용차용 Passive Damper의 설계변수에 관한 특성 분석,” 한국윤활학회 논문집, 제30권, 제1호, pp.46~51.
- (24) 김도영, 전종균, 권영철, 2014, “MR 댐퍼의 비선형해석을 이용한 반능동형 제진대에 관한 연구,” 한국소음진동공학회 논문집, 제24권, 제11호, pp.861~867.