

## 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복\*

### 1. 서 론

본 특집 기사에서는 2009년도 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 회전기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그 외 회전기기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다.

산업현장에서 전반적으로 사용되고 있는 터보압축기 및 송풍기, 터빈, 펌프 등 유체기계를 중심으로 연구개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 2009년도에는 기존의 유체기계 시스템의 고효율화와 그에 상응하는 신뢰성 확보에 관한 연구가 활발하게 진행되었다. 다음은 2009년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구내용 및 동향을 정리하고자 한다.

### 2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 산업용 가스터빈, 터보압축기 및 블로워 등 회전체 시스템은 에너지의 공급확대 요구에 부응하기 위해 고효율화, 고속화의 경향을 보이고 있다. 이에 따라 운전속도에 이르기까지 다수의 공진주파수가 발생하는 유연축 시스템 등 고속 회전체 시스템의 안정성 및 신뢰성확보를 위해서 회전체 동역학적 해석을 통한 정밀한 동적 거동의 예측 및 설계가 요구되고 있으며, 이에 대한 연구가 주로 진행되었다.

프로세스 가스 터보 압축기는 작동유체 및 반응축매의 압축과 이송을 담당하는 회전기계로서 운전 신뢰성이 극도로 보장되어야 하는 핵심설비이다. 회전체 시스템의 재원결정을 비롯

한 도입단계부터 설비의 안정성과 신뢰성 확보를 위해 설계 감리차원에서의 로터다이나믹 설계해석 및 안정성 해석절차가 필수적이거나, 국내 기간산업 현장에서 오랜 기간 가동 중인 핵심 회전기계 설비의 대부분은 선진 메이커(GE, Siemens, Ebara, MHI, Man Turbo 등)제품으로, 로터-베어링 설계특성이 상세히 제공되지 않아 유지·보수 및 설비의 증설(retrofit)에 많은 어려움을 겪고 있다. 비록 상세한 로터-베어링 설계특성이 제공되지 않았더라도 실측과 운전데이터를 활용하여 운용 중인 핵심 회전기계(터보압축기)의 로터다이나믹 특성 및 안정성 해석이 성공적으로 수행되었다. 특히 API(American Petroleum Institute, 미국석유협회)617 에서 최근에 공표한 안정성 해석절차에 대해 상세히 논의되었고, 해석대상 압축기에 대해서도 안정성해석을 수행하였다. 제시된 절차와 결과는 현재 운용 중인 설비의 건정성을 평가하고, 유지·보수 및 트러블 해결의 지침으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 설비 도입 시 제작자가 설비제작시 로터다이나믹 설계절차를 충실히 이행하였는지 확인·분석하고 시정을 요구하는 자료로도 활용될 수 있다.<sup>(1)</sup>

최근 국내에서 개발 중인 5 MW급 산업용 가스터빈의 회전체 동역학 해석이 상용툴(DYNAMICS 4.3)을 이용하여 해석되었다. 이 가스터빈은 스퀴즈필름 댐퍼를 장착한 볼베어링위에서 운전되므로, 스퀴즈필름 댐퍼 강성을 예측하여 계산에 활용되었으며 댐퍼는 가스터빈의 급힘모드 위험속도를 운전속도보다 높여 주며, 저속에서 스퀴즈필름댐퍼에 의한 2개의 강제모드를 통과하게 만들도록 해석을 통해 보였다. 또 커플링이 위험속도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 디스크를 모델링함에 있어 보요소를 사용한 경우와 디스크 요소를 사용한 경우에 대하여 비교하였다.<sup>(2)</sup>

고속 터보기계 로터에 대한 동역학설계에서 핵심은 운전속도 범위에서 위험속도로부터 충분한 분리여유(SM, separation margin)를 확보하고 동시에 위험속도 통과시 진동 증폭을 최소화하는 설계의 도출인데 이를 결정하는 중요한 작업이 밸런싱 작업이다. 고속 밸런싱이 샵에서 실제 수행될 때 위험속도는 물론 최대연속운전속도(MCS, maximum continuous speed)를 포함하는 실제 운전속도 조건에서 밸런싱 상태가 모니터링되

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

고 필요시 밸런싱이 수행되는데 정유공장의 가솔린 수소화탈황 공정용 재순환-가스 8단 압축기 로터에 MCS를 포함하는 운전속도 고속 밸런싱에 관한 연구가 진행되었다.<sup>(3)</sup>

### 3. 회전기기 요소 연구

#### 3.1 회전기 요소-베어링

##### 3.1.1 저널 베어링

현재 저널 베어링의 마멸 파손을 감지할 수 있는 진단기술로 윤활유의 온도 측정, 진동 해석, 유막 두께 측정 방법 등이 적용되고 있으나 대부분 베어링의 손상이 어느 정도 진행된 후에야 진단이 가능하고 그 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 이에 전기적 특성을 이용한 윤활 판별기를 통하여 저널과 베어링의 접촉 여부를 2분법적으로 판단하는 판별 방식이 새롭게 제안되었고, 윤활 해석을 통해 그 타당성이 검증되었다.<sup>(4)</sup>

원자력 발전소의 터빈 설비의 신뢰성을 확보하기 위해 터빈 저널 베어링 정비 주기의 최적화에 대한 연구도 진행되었다. 이 연구에서는 저널 베어링의 고장 모드 및 영향분석, 국내외 저널 베어링의 저널 베어링 정비 이력들을 분석하여 최적화된 정비 주기가 제안되었다. 또한 제안된 베어링 정비 주기를 실제 운전 적용한 후 그 효과를 분석한 결과 터빈 베어링 정비 인력 축소 및 정비 시간의 단축, 베어링 외주 수리와 신품 교체에 따른 비용 절감 등과 같은 직접 효과와 더불어 불필요한 정지로 인한 인적 실수에 따른 베어링 손상 방지 등과 같은 간접 효과가 기대될 수 있는 것으로 나타났다.<sup>(5)</sup>

원자력 발전소 터빈 설비와 더불어 양수 발전소의 펌프 수차에 사용되는 수직형 텀링 패드 저널 베어링에 대한 연구도 진행되었다. 양수 발전소 수차 최초 운전 시 발전기 상부 가이드 베어링 패드의 메탈 온도가 설계 위험 수치를 상회하는 문제점을 해결하기 위해 터빈 설비 내부 베어링에 가해지는 예압 변화가 베어링 패드 메탈 온도에 줄 수 있는 영향에 대해 연구가 진행되었다. 이 연구에서는 예압이 온도 상승에 주는 효과를 고려한 베어링 최적 설계를 통하여 저널 베어링을 제작되었고 이를 실제 양수 시스템에 장착하여 예압 증가에 따른 패드 온도와 베어링의 강성 값을 비교하고 이를 해석 결과와 비교하여 예압 변화와 패드 메탈 온도, 진동 크기 변화의 관계를 고찰하였다.<sup>(6)</sup>

LPG 자동차에 사용되는 LPLi 연료 펌프에 사용되는 저널 베어링의 설계에 대한 연구도 진행 되었다. 실제로 연료 펌프의 내구성 운전 능력의 주요 문제점 중 하나는 윤활제로 사용되는 LPG의 낮은 점성으로 인한 마찰 부위 부품의 조기 마모

손상 발생이다. 이에 LPLi 로터리 베인 연료 펌프에 적용을 위한 평 저널 베어링과 3축방향 홈 저널 베어링에 대한 설계 적합성 해석이 수행되었고, 이에 따른 설계 인자와 성능 인자 간의 관계가 제시되었다.<sup>(7)</sup>

##### 3.1.2 볼 베어링, 롤러 베어링

회전기계들의 고속화, 고정도화, 고강성화, 무인 자동화와 더불어 그 중요성이 더욱 대두되고 있는 구름 베어링은 정밀도와 내구성을 검증하는 분야의 연구가 진행되고 있다. 구름베어링이 시스템의 요구조건을 충분히 만족시키지 못할 경우 과도한 마찰이 발생 할 수 있고, 베어링의 파괴 등으로 인한 안전사고의 위험성과 보수비용에 의한 경제적 손실을 입게 될 가능성이 있으며, 설계치를 상회하는 베어링을 선정 할 경우 시스템 제작비용이 증가함으로 인해 손실이 발생 할 수 있다. 따라서 구름 베어링의 정밀도와 내구성에 대한 검증은 반드시 진행되어야 하는 연구로 볼 수 있다.

베어링의 경우 회전 정밀도를 높이고, 진동을 억제하는 등의 목적으로 예압을 작용시키고 있는데 볼 베어링 분야에서는 고속 회전에서 열변형, 원심력 등으로 인한 베어링의 끼워 맞춤 및 내부틈새에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었다. 이 연구에서는 베어링 내륜과 추축을 모델링하여 유한요소법을 이용해 회전을 변화시켜가며 발생하는 발열량에 대한 연구를 시행하여 적절한 억지끼워맞춤량을 산출할 수 있도록 하였다.<sup>(8)(9)</sup>

롤러 베어링의 경우도 과다 FEA와 같은 방법을 이용하여 예압을 받는 테이퍼 롤러 베어링의 실질적인 수명을 산출하는 연구가 진행되었다.<sup>(10)</sup> 그 외에 롤러 베어링의 진동 특성을 이용하여 결함을 검출하는 연구도 진행이 되었다. 이 연구에서는 자동 변속기의 조립시 결함 발생 빈도가 높은 롤러 베어링의 케이스 안쪽에 인위적으로 결함을 내어 실험을 수행하였다. 마이크로폰을 이용하여 소음을 측정하고 각 시스템의 정보는 IN-Line 소음검사 시스템을 이용하여 취득하여 이 결과를 정상적인 롤러 베어링의 경우와 비교하는 연구가 진행 되었다.<sup>(11)</sup>

##### 3.1.3 자기 베어링

전자기 베어링은 기계적인 접촉 없이 전자기력을 통한 축의 비접촉 지지를 실현시키는 개념으로 1892년 Eamshow 가 최초로 수동형 자기부상을 도입한 이후 꾸준히 발전해오고 있다. 기존의 기계 베어링은 가동 시 윤활 성능의 저하와 그로 인한 마찰과 마멸의 증가, 이로 인한 소음과 진동, 수명과 성능의 감소 등의 문제를 지니고 있다. 이에 비해 자기 베어링은 비접촉 지지를 실현시키기 때문에 기계적 마찰이나 마모, 진동, 소음이 작다는 이점을 지니고 있다. 이러한 장점으로 인해 전자기

베어링은 최근 고속회전기계와 구동장치의 등장에 따라 활용 영역이 증가하여 항공기, 차량 및 인공위성, 소형 혈액 펌프 시스템 등에 이르기까지 광범위한 영역에서 사용되게 되었다.

외력에 의해 축이 회전하여 발전하는 발전기 시스템에서 영구자석을 이용한 수동형 자기베어링으로 축을 지지하고 진동 제어를 위한 자기베어링과 발전기센서를 동일 하드웨어 상에서 수행되었다.<sup>(12)</sup>

고속에서의 안정적 회전성을 구현하기 위해서는 다자유도 자기베어링의 운동을 제어하기 위한 MIMO(다변수)제어기법, 실제 거동의 제어시 발생하는 오차보정 및 궤적의 추종에 대해 다루어졌다. 로터의 모드해석을 수행하고 자이로효과를 고려한 다중입출력 시스템의 모델링을 수행하였으며 적분기가 추가된 형태의 LQR 제어기를 설계하여 시스템에 적용 하였다. 그 후 정상상태 오차, 상승시간과 오버슈트를 비교하고 반복적인 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였으며 자기베어링의 전체 시스템을 제작하고 설계된 제어기를 다중 입출력 자기베어링시스템에 적용하여 부상실험과 회전실험을 수행하여 성능을 분석하였으며 센서를 통해 운전상태의 진단 및 모니터링을 할 수 있도록 자기베어링 모니터링 시스템을 구축하였다.<sup>(13)</sup>

자기베어링 제어용으로 제작된 앰프 회로와 자기베어링 시스템을 대상으로 수학적 모델을 구한 후, 선정된 수학적 모델을 구성하는 파라미터의 값들 중 알 수 없는 파라미터 값들을 실험 데이터를 통해 동정하는 것을 목적으로 하여 연구를 진행하였으며, 결과로부터 앰프 회로의 전달함수와 앰프 회로를 포함하는 자기베어링 시스템의 전달함수를 도출해 내는 연구도 진행되었다.<sup>(14)</sup>

무급유 직결구동 소형 터보냉매압축기의 성능 및 신뢰성 향상을 위한 회전체-베어링계에 관한 연구를 수행하였으며, oil-free 베어링중의 하나인 에어포일 베어링을 사용한 정격 운전속도 60,000 rpm 의 50 RT(냉방 톤)급 터보냉매압축기를 개발하였다. 터보냉매압축기에서 oil-free 베어링을 사용할 경우 냉매가 오일에 오염되지 않기 때문에 지속적인 운전이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 에어포일 베어링은 초기 기동시 축과 베어링 사이의 마찰이 발생하며, 유지보수비용이 높은 편이고 안정성이 낮은 문제점이 있다. 이에 비해 자기 베어링은 초기 기동을 포함한 모든 운전영역에서 접촉이 발생하지 않으므로 유지보수의 부담이 거의 없으며, 기존 oiled 베어링에 비해 1/500 이하의 마찰 손실을 가지므로 에너지효율이 높고, oil-free 베어링 방식 중 가격이 저렴한 편인 것으로 알려져 있다. 50 RT 급 터보냉매압축기를 PID 제어기를 사용한 전자석 자기베어링으로 지지할 경우의 위험속도, 불평형 응답 등의 동적 거동을 유한요소법을 사용하여 예측하였다.<sup>(15)</sup>

### 3.2 실

O-ring은 유동부위나 고정부위에 장착되어 두 표면 사이에 가깝게 밀착되면서 장착되어 두 표면 사이에 가깝게 밀착되면서 유동체가 흘러 들어올 수 있는 통로에 누설을 막아주는 특성을 갖는다.

진공장비 출입구에 주로 사용되는 도브테일 그루브(dovetail groove) 안에 장착된 오링의 반복적인 접촉에 의해 발생하는 표면파손 현상을 pin-on-reciprocating tribo-tester를 이용하여 마찰/마모 실험을 실험적으로 고찰하였다. 높은 마찰계수는 오링의 마모를 유발 시키는 원인이 되므로 오링의 형상 설계나 선택에 있어서 오링의 내마모성은 중요시 고려되어야 할 인자로 판단되었으며, 오링의 마모는 다양한 복합적인 요인에 의하여 마모가 발생 된다는 것을 실험적으로 연구되었다.<sup>(16)</sup>

공압실린더의 핵심은 피스톤에 설치된 탄성체 실에 공기압이 작용할 때, 공기의 누출을 최소화 하면서 실린더 보어와 탄성체 실 사이의 마찰을 최소화하는 것이다. 이런 마찰은 실의 마모 및 수명과 밀접한 관계가 있으며 다양한 영향인자가 작용하게 된다. 이 고무 실의 거동 및 특성이 해석적으로 연구되었다.<sup>(17)</sup>

실과 접촉하는 스틸면에서의 정확한 마멸기구를 조사하는 연구가 진행되었다. 실과 접촉하는 스틸면에서의 마멸기구를 정확하게 조사하기 위하여 경질의 구형 입자가 실과 코팅된 스틸면 사이에 존재하는 경우의 접촉문제를 비선형문제해석 S/W 인 MARC를 사용하여 해석하였으며, 이 결과, 간섭량이 커질수록 경질입자의 존재로 인하여 코팅된 스틸면에 작용하는 von-Mises응력, 접촉응력 및 접촉반폭은 크게 되었다. 특히, 간섭량이 아주 작은 경우에도 스틸면이나 코팅층에는 항복상태나 이에 가까운 응력이 발생하였다.<sup>(18)</sup>

실의 주된 기능은 임펠러의 회전에 의해 압력이 높아진 작동유가 역류하거나 외부로 누출되는 것을 최소화하여 유체기계의 효율을 향상시키는 것과 실의 틈새에서 발달되는 유체력에 의한 회전축계의 불안정 진동을 저감하도록 하는데 있다. 실을 통한 누출 유량을 최소화하기 위해서는 실 틈새를 작게 하면 되나 로터의 진동에 의해 한계가 있어 실을 통한 작동유의 유로를 미로화하여 흐름저항을 증가시키는 방향으로 설계되고 있다. 평행 홈 실의 누설량을 저감시키고자 FLUENT를 사용하여 홈을 작동유체의 흐름방향에 대하여 일정각도 만큼 기울여 설계할 경우에 대한 누설량 특성을 해석하고 최적한 기울기각을 찾는 연구가 수행되었다.<sup>(19)</sup>

실 누설량 예측을 위한 이론적 해석방법은 윤환이론을 기본으로 한 Bulk-flow model 해석 법과 수치해석기법(CFD)을 사용한 해석방법이 있다. 실 틈새의 유동을 실제 흐름과 가장 근사하게 모사하기 위하여 CFD해석 소프트웨어인 FLUENT를

사용한 3차원 해석을 수행하여 실의 누설량을 예측하고 그 결과를 기존에 발표되었던 Bulk-flow model을 사용한 해석 결과 및 FLUENT를 사용한 2차원 해석 결과와 비교 분석한 연구가 수행되었다.<sup>(20)</sup>

### 3.3 댐퍼(damper)

세탁기에 적용되고 있는 윤활마찰 댐퍼는 단가가 낮은 장점으로 인해 널리 쓰이고 있으나, 더 높은 진동, 소음 저감 성능이 요구되며 이를 대체하기 위해 여러 가지 댐퍼가 개발되고 있다. 유한요소기법(FEM)을 이용하여 이러한 몇 가지 댐퍼의 동적특성을 예측하고자 하는 연구가 진행되었다. 먼저 이중마찰댐퍼가 적용되어 해석, 및 검증되었는데 이 과정에서 가장 중요한 특성중 하나인 점탄성 특성을 구현하는 연구가 진행되었다. 이를 통해 제품을 생산하여 실제 실험을 통해 모델의 성능을 검증하는 방법 대신 해석을 통한 가변수 성능검증 시험이 가능함을 보였다.<sup>(21)</sup> 나아가 세탁기 드럼의 정상상태 탈수과정에서의 힘의 전달 경로를 제거하기 위해 Free-friction stroke 댐퍼가 개발되었으며 특성 및 메카니즘을 고려하여 유한요소 모델이 성공적으로 구성되어 해석되었다. 이를 위해 Ogden Hyper-elastic 재료의 물성인자를 최적화 기법을 이용하여 구현하였고 실제 모델과의 특성 비교를 통해 검증하였다.<sup>(22)</sup>

Electrorheological(ER) 유체는 지능 재료의 하나로써 전기장 비인가시 비전도성 용매에 분산된 입자들이 자유로운 운동을 하는 Newtonian 유체의 움직임은 보이지만, 전기장 인가시 입자들이 대전되어 마치 고체와 같은 유체의 움직임을 보인다. 이와 같은 ER 유체의 특성을 이용, 자동차 댐퍼에 적용하기 위해 ER 유체의 내구성 실험이 진행되었다. 실험실에서 제작된 인산화 전분 ER 유체를 이용하여 구현된 실험장치에서 100만 사이클의 내구실험이 수행되어 상용적으로 자동차 댐퍼에 사용될 수 있음을 보였다.<sup>(23)</sup>

## 4. 결 론

2009년도 회전체 동역학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지 않는 예년에 비슷한 수준이며, 특히 에너지 기기와 관련하여 요소기술의 개발을 통한 시스템의 효율향상에 많은 초점이 맞추어져 진행되어 왔다. 또한 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구 또한 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있으며 이러한 경향은 올해도 계속되리라 전망된다.

## 참고문헌

- (1) 김병옥, 이안성, 2009, "API 617 규격에 의거한 프로세스 가스 터보압축기의 로터다이나믹 해석 및 안정성 검토," 유체기계저널, 제12권, 제5호, pp. 47~53
- (2) 김영철, 하진웅, 명지호, 2009, "소형 가스터빈 회전체의 위험속도 해석," 유체기계저널, 제12권, 제3호, pp. 26~30
- (3) 이안성, 김병옥, 2009, "정유공정 압축기의 10,500 rpm 운전 속도 밸런싱을 통한 MCS의 확장," 유체기계저널, 제12권, 제6호, pp. 41~46
- (4) 김명환, 이상돈, 조용주, 2009, "저널 베어링의 윤활상태 판별 기법에 관한 연구," Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 1, pp. 56~60
- (5) 이혁순, 이병학, 김오근, 2009, "저널 베어링 정비 최적화를 통한 터빈설비 신뢰도 향상," 대한기계학회 에너지 및 동력공학부 춘계학술대회 논문집 pp. 17~22
- (6) 김준성, 김두영, 김동관, 박상호, 2009, "수직형 저널 베어링에서 Preload 변화에 따른 베어링 패드 온도 변화," 유체기계저널, 제12권, 제6호, pp. 33~40
- (7) 이안성, 김창업, 2009, "LPLi 연료펌프 적용을 위한 저어널 베어링의 설계 적합성 해석," Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 5, pp. 324~329
- (8) 김웅, 이춘만, 황영국, 2009, "공작기계용 볼 베어링의 역지끼워맞춤과 내부틈새변화에 관한 해석적 연구," 한국정밀공학학회지, 제26권, 제5호 pp. 135~14
- (9) 김웅, 이춘만, 이문재, 박성진, 2009, "공작기계용 볼 베어링의 열박음 공정에 관한 연구," 한국 정밀공학회 2009년도 추계학술대회논문집, pp. 575~576
- (10) 박종원, 김형의, 김종억, 심양진, 정원욱, 2009, "과다 예압을 받는 테이퍼롤러 베어링의 수명단축효과에 대한 실험적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 강연 및 논문 초록집 pp. 1447~1452
- (11) 박기호, 정상진, 위혁, 이국선, 조성호, 2009, "롤러 베어링의 진동특성을 이용한 자동변속기 결함 검출에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집 제 19권, 제3호, pp. 268~273
- (12) 김숙영, 백윤수, 2009, "셀프 센싱 자기 베어링을 이용한 베어링리스 발전기의 설계 및 해석", 대한기계학회 추계학술대회 Vol.9, pp. 1024~1029
- (13) 윤주형, 박인환, 박영호, 장인배, 한동철, 2009, "고속터보 머신용 자기베어링의 제어와 모니터링에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 Vol.9, pp. 1083~1088
- (14) 정황훈, 김영복, 양주호, 2009, "실수 코딩 유전알고리즘을 이용한 자기베어링 제어시스템 파라미터의 동정", 한국동력기계공학회지 제13권 제4호 pp. 68~73
- (15) 박철훈, 최상규, 윤동원, 함상용, 손영수, 2009, "자기베어링으로 지지된 터보냉매압축기의 동적 거동 해석", 한국정밀

- 공학회 춘계학술대회논문집, pp491~492
- (16) 오준철, 김대은, 김현준, 김문환, 김춘일, 2009, "O-ring의 마찰, 마모 특성에 관한 실험적 고찰," 대한기계학회논문집 A권, 제33권, 제10호, pp. 1125~1131.
- (17) 허신, 박준식, 김동수, 2009, "서보실린더 고무 실의 기계적 성능 해석 기술," 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 597~602
- (18) 박태조, 조현동, 2009, "시일과 코팅된 스틸면 사이의 구형 입자에 의한 접촉해석," Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 4, pp. 225~230.
- (19) 최복성, 하태웅, 2009, "각이 진 평행 홈 펌프 실의 누설량 특성 해석," Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 2, pp. 96~101.
- (20) 석희수, 하태웅, 2009, "3차원 CFD를 사용한 환상 실의 누설량 예측," Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 3, pp. 150~156.
- (21) 구희춘, 이재욱, 유완석, 2009, "FEM기법을 이용한 이중마찰댐퍼의 동특성 해석," 대한기계학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 제5호, pp. 154~156
- (22) 구희춘, 이재욱, 유완석, 2009, "유한요소법을 이용한 Free-Friction Stroke 댐퍼의 동특성 해석," 대한기계학회논문집 A권, 제33권, 제12호, pp. 1417~1426
- (23) 이철희, 장민규, 손정우, 한영민, 최승복, 2009, "인산화 전분 ER 유체의 댐퍼 내구 특성," 윤활학회지, 제25권, 제5호, pp. 285~291.