

## 회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복\*

### 1. 서 론

본 특집 기사에서는 2010년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트라이볼로지 요소(베어링/실/댐퍼)의 주요 연구 동향을 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 유체기계 가운데 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구 개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 특히 2010년도에는 녹색에너지 기술과 관련 여러 분야에서의 연구가 활발히 이루어졌다. 다음은 2010년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

### 2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 회전체 시스템은 시대의 요구에 따라 해를 거듭할수록 고효율, 고속화되고 있는데, 이에 따라 특히 가스터빈과 터보압축기 및 블로워와 같은 산업용 기기의 안정성 및 신뢰성확보가 이슈화 되고 있다. 따라서 회전체 동역학적 해석에 대한 연구가 가장 많이 이루어지고 있으며 해석모델 연구도 계속하여 진행 중이다.

국내에서 개발 중인 400W, 200,000rpm 급 마이크로 터빈 발전시스템용 고속 전동/발전기에 대한 발전모드 특성과 전동모드 특성을 수치 해석한 연구<sup>(1)</sup>와 냉각용 7.5 kW, 60,000rpm 의 초고속 블로워 전동기 개발을 위한 로터의 열박음 현상을 시뮬레이션으로 구현한 연구가 진행되었다.<sup>(2)</sup> 시스템 내부의 전동발전기가 받는 고온조건과 초고속 구동에서 로터의 원심력 환경에서도 영구자석이 항상 압축을 받

고 있는가에 대한 것과 제한된 재료의 항복강도 또는 인장 압축강도에 충분한 안전율에 설계되어 있는지에 대한 구조적인 안정성을 검토하였다.

최근 FESS의 Rotor Dynamics를 위한 2D FEM 방식을 응용한 해석 프로그램이 개발되었다.<sup>(3)</sup> 개발된 프로그램을 검증하기 위해 Lalanne & Ferraris 모델을 사용하였고, FESS의 모델을 이용한 해석결과를 상용 해석 프로그램인 MSC. Nastran과 Ansys Workbench를 통하여 모드해석을 수행하였다. 해석결과, 비교대상과 얻어진 모드 형상은 모두 동일한 것을 알 수 있었고, 결과 값 사이의 오차는 최대 11.6%로 근사하게 나타났으며, 해석 수행을 위해 사용된 시간적 측면에선 요소와 노드의 개수가 상용 프로그램에 비해 효율적이라는 것을 검증했다.

300HP 급 60,000rpm 초고속 영구자석형 전동기의 토크 측정 장치를 설계 및 실험함으로써 발전기 전동기와 구동 전동기를 직렬로 체결한 토크 측정 장치가 성공적으로 효율 및 특성을 측정할 수 있음을 보였다.<sup>(4)</sup> 유한요소 모델을 바탕으로 한 축계해석을 통해 예측된 위험구간에서의 구동을 피함으로써 운전속도에서의 안정된 구동이 가능하였다. 적용된 무급유 공기 포일 베어링은 초고속 회전상태 하에서도 낮은 에너지 손실을 가짐으로써 높은 전동기 효율달성이 가능하게 하였다. 또한 2단 터보 압축기의 실험적 성능 평가를 통해 운전 영역 내에서의 안정적 구동 능력을 확인하였다.<sup>(5)</sup>

산소공장의 핵심설비인 ATC 로터-베어링을 시스템에 대한 로터다이나믹(Rotordynamic) 해석을 수행하여 설계특성 데이터가 부족한 상황에서도 실측과 운전데이터를 활용함으로써 현재 운용 중인 ATC의 로터다이나믹 특성 해석을 수행할 수 있음을 보였다.<sup>(6)</sup> 실험에서 제시된 절차와 결과는 현재 운용 중인 설비의 건전성을 평가하고, 유지보수 및 트러블 해결의 지침으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 설비 도입 시 제작사가 로터다이나믹 설계절차를 충실히 이행하였는지 확인 분석하고 시정을 요구하는 자료로도 활용될 수 있을 것이다.

수평펌프 로터시스템과는 달리 수직 베럴형 펌프는 베어링에 작용하는 반경방향하중이 낮기 때문에 베어링 유막에 의한 불안정성 문제가 발생하기 쉽고, 로터에 작용하는 베어링력이 비선형 거동을 나타내는데, 베어링력의 비선형 특성을 고려한 로터다이나믹 과도응답 해석을 수행하여 설계 신뢰성을 높이는 연구가 진행되었다.<sup>(7)</sup>

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

엔진의 효율 및 출력 증강 핵심 모듈부품인 터보차저에 대한 로터다이나믹 해석모델 개발 및 관련 상세해석을 하는데 있어 압축기와 터빈 휠 끝단까지를 로터 축으로 연장한 해석 모델을 채택한 연구가 진행되었다.<sup>(8)</sup> 이 해석모델은 향후 터보 차저 개발 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 해석모델을 토대로 위험속도 해석, Campbell 선도 및 안정성 해석, 불균형 응답해석, 비선형 과도응답 해석 등을 수행하였다. 로터 시스템의 위험속도, 안정성 판별 및 안정 한계속도는 선형화된 베어링 강성과 감쇠계수를 사용하여 예측이 가능했다. 그러나 로터 시스템이 안정 한계속도 보다 높은 불안정 속도영역에서 운전될 경우, 로터의 정확한 진동응답 예측은 유막베어링의 비선형 유막력을 고려한 비선형 과도응답 해석을 수행하여야 가능하고, 해석 신뢰성도 보장할 수 있음을 확인했다.

### 3. 회전기기 요소 연구

#### 3.1 회전기 요소-베어링

##### 3.1.1 저널 베어링

회전하는 기계를 지탱하는 베어링에서 발생하는 심각한 마찰과 마모 현상을 줄이기 위해서는 베어링 표면재의 적절한 선정이 매우 중요하다. 이러한 마모를 줄이기 위한 대표적인 표면재 중 하나가 PTFE (Polytetrafluoroethylene) composite 이다. PTFE composite 은 강한 내마모성 등의 장점이 있는 반면, 열전도도, 표면 조도 등의 부분에서 그 취약점이 발견된다. 이러한 취약점을 극복하기 위해 PTFE 에 비해 상대적으로 내부식성, 열전도도 등의 특성에서 강점이 있는 알루미늄 합금이 베어링 표면재로서 주목을 받고 있으며 이 두 표면재 사용 시의 마찰, 윤활 특성을 실험적으로 비교하기 위한 연구가 진행되었다.<sup>(9)</sup> 같은 하중 조건에서 PTFE 표면재를 사용한 저널 베어링과 알루미늄 합금 표면재를 사용한 베어링을 테스트해 본 결과 알루미늄 합금 표면재를 사용한 베어링이 PTFE를 사용한 베어링보다 마찰 계수가 28% 감소되는 결과를 확인하였다. 또한 알루미늄 합금을 사용한 베어링은 최대 약 8000N의 하중 조건에서도 응착(adhesion) 되지 않고 작동되는 것을 확인하였고, PTFE composite을 사용한 베어링의 경우는 6300N~8000N의 하중에서 강한 응착 현상이 나타남을 확인하였다.

대부분 수입에 의존하고 있는 특수 목적 베어링의 독자 기술을 확보하기 위한 연구를 위해 대용량 추진 모터용 베어링 개발에 대한 연구도 진행되었다.<sup>(10)</sup> 연구는 회전체 동역학 해석용 상용 프로그램을 통해 베어링 정특성, 정특성 해석 데이터를 개념 설계와 상세 설계에 반영하여 진행되었다. 베어링 제작 시 발생할 수 있는 운전 조건에 따른 베어링의 온도 특성을 확인하기 위해 상사법칙을 이용하여 부하조건과 운

전 조건을 설정하여 시험용 베어링을 제작하고 시험하면서 관련 연구가 진행되었고 이를 통해 해외 베어링 기술에 대한 국산화 추진을 통해 베어링 설계 기술 축적 및 비용 절감 효과를 기대할 수 있게 되었다.

##### 3.1.2 볼 베어링, 롤러 베어링

구름 베어링은 회전기계에서 아주 중요한 요소로써 아주 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. 회전하는 시스템에서 직접적으로 작용하는 요소이기 때문에 구름 베어링은 기계의 성능이나 효율을 좌우하게 된다. 또한 회전체, 통상적으로 축을 지지하는 구름 베어링이 운용 중에 파손을 일으키는 경우 시스템 전체가 사고의 위험에 노출 되게 된다. 이로 인해 경제적 손실이 발생하게 되며, 이러한 경제적 부담은 사용자에게 주어지게 된다. 따라서 사용자의 경우는 효율이 높은 기계를 안정적인 운전 상태에서 사용하고자 할 것이다. 이러한 사용자의 요구에 맞추어 최근에는 베어링의 높은 성능을 오랜 시간 동안 유지하기 위한 설계에 대한 연구와 시스템의 파괴를 막기 위한 베어링의 상태를 모니터링 하는 연구가 활발하게 진행되었다.

자동차에서 휠 베어링은 동력을 전달하고 차량의 무게를 지지하는 핵심적인 요소로 베어링의 수명과 강성, 강도 무게 등은 자동차의 성능을 결정짓게 된다. 따라서 설계 변수법을 이용한 자동차용 휠 베어링의 최적설계 기법이 시도되었다.<sup>(11)</sup>

과다 예압이 테이퍼 롤러 베어링에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었는데, 예압에 의한 수명 단축 효과를 실험적으로 검증하고 그 결과에 의한 베어링의 수명 분포를 분석하였다. 이로 인해 현장의 작동 조건에 따른 실질적인 수명을 산출할 수 있는 수명식을 도출하여 설계 및 생산 현장에서 활용할 수 있는 연구도 진행되었다.<sup>(12)</sup>

베어링의 결함을 감지하기 위한 연구도 진행되었는데, 열화상 카메라를 이용하여 고속, 원거리 조건에서 베어링이 방출하는 적외선 복사에너지를 측정하여 베어링의 결함을 감시하는 방법을 제시하였다.<sup>(13)</sup>

베어링 결함 감지에 대한 연구뿐만 아니라 베어링의 성능 저하를 감지하기 위한 연구가 진행되었다. 베어링의 경우 결함이 발생하면 파손 시까지 급격히 결함이 진행되기 때문에 결함이 발생하기 이전의 성능의 저하에 따른 신호 변화의 특성을 분석하여 베어링의 수명을 예측하고자 하였다.<sup>(14)</sup>

##### 3.1.3 자기 베어링

자기 베어링은 유체 베어링이나 구름 베어링과 달리 축의 거동에 따라 전자기력을 제어하고 회전축을 비접촉 부상시키는 베어링이며, 무마찰, 무윤활, 능동 제어가 가능해 회전체의 진동 및 소음을 줄일 수 있는 장점으로, 가스터빈, 공작기계, 펌프, 에너지 저장장치 등의 고속, 고성능 회전기에 적용되고 있다. 또한, 자기 베어링 기술의 안정화, 최적화를

위해 하이브리드 베어링, 초소형 베어링, 초전도 베어링, 셀프-센싱(self-sensing) 베어링 등의 연구가 진행되고 있고, 특히,  $H_{\infty}$  제어,  $\mu$ -synthesis 제어, 슬라이딩 모드 제어 등의 강건 제어와 최적 제어, 퍼지 제어, 피드 포워드(feed forward) 제어, 시간지연 제어 등의 기법이 적용된 논문들이 발표되고 있다.

자기 베어링의 단점으로는 큰 전력 소모와 복잡한 제어 시스템, 높은 제작비를 꼽을 수 있고, 이러한 문제 해결을 위해 부분적으로 영구 자석을 장착하는 방식이 일반적으로 알려져 있다. 자기 베어링의 단점을 보완해 적용된 사례들로 플라이휠, 셀프-센싱 자기 베어링 등의 연구가 수행되고 있다.

플라이휠 에너지 저장장치는 공기 마찰을 최소화하기 위해서 진공 내에서 회전하는 경우가 많고, 이 때 자기 베어링이나 초전도 베어링과 같은 비접촉 베어링을 사용하며, 초전도 베어링을 쓰는 경우에도 낮은 감쇠력을 보완하기 위해서 자기 베어링을 댐퍼로 사용하는 경우가 많다. 이에 있어, 회전체를 장시간 부상시키기 위해 자체적으로 소모하는 전력이 크다는 문제를 극복하는 방법으로 영구자석이 정적인 힘(static force)을 제공하고 전자석이 제어력만을 담당하는 하이브리드 구조의 자기베어링이 연구 되었다.<sup>(15)</sup> 또한, 자기 베어링 시스템을 포함한 플라이휠 에너지 저장장치의 최적 설계를 위해 제어 강인성 및 외란에 대한 회전 시스템의 안정성을 고려한 연구가 수행되었다.<sup>(16)</sup>

자기 베어링의 소형화와 경량화에 있어서는, 반경방향 자기 베어링과 축 방향 자기 베어링을 결합한 일체형 자기 베어링에 대한 연구가 진행 되었다.<sup>(17)</sup> 이는 기존의 로터-베어링 시스템을 구성하는 2개의 반경방향 자기 베어링과 1개의 축 방향 자기베어링이 차지하는 공간을 줄임으로서 로터의 길이를 축소할 수 있고, 간단하고 강인한 구조로 제작에 유리하며, 제어의 유연성을 확보하여 자기 베어링의 향상된 성능을 기대할 수 있다.

### 3.2 실(seal)

실은 압력이 발생하는 유체기계에서 작동유의 누설을 방지하는 역할을 한다. 또한 터보기계의 실은 작은 틈새를 가지고 있으며 여기서 발생하는 유체력은 회전축계의 진동을 일으키는 중요한 문제로 지적된다. 이것으로부터 발생하는 유체 불균형은 회전축이나 베어링에 의한 것보다 상대적으로 작다고 할 수 있다. 그러나 실은 회전축계의 중앙부에 위치하기 때문에 상대적으로 큰 모멘트를 발생시켜 회전축계의 진동해석에서 간과할 수 없으며, 이상적인 설계를 통해 회전축계의 진동을 저감할 수 있으므로, 회전기계의 안정적인 운전을 위해 매우 중요한 역할을 차지한다.

기계적 실은 고정된 기계설비와 회전축 사이에서 압력과 유체가 유출되는 것을 극소화하는 장치를 말한다. 기계적 실은 접촉면에서 거칠기의 차이가 있을 때 공동현상을 유발하

여 접촉면의 손상을 일으켜 누설원인을 제공하는 주요인이다. 이에 기존 산소주입 수처리기에 의해 발생하는 급수펌프 실의 누설방지를 위해 기계식 실의 냉각수에 산소제거제인 하이드라진 주입설비를 설치하여 용존산소를 제거한 연구가 진행되었다.<sup>(18)</sup>

스팀터빈의 비접촉식 환상 밀봉장치로 알려진 레버린스 실은 누설유량을 효과적으로 차감하는 것으로 알려져 있으며 실 스트립을 배열하여 누설증기가 교축과 팽창을 반복하며 압력강하를 이용하는 방법이다. 또한 누설량을 최소화시키기 위해서 straight type과 stepped type 등 그 형상을 변화시켜 적용하고 있다.

누설량 예측은 실의 해석에서 성능을 좌우하는 중요한 부분을 차지하고 있으며 좀 더 정확한 예측을 하고자 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 누설량을 예측한 연구가 진행이 되었다.<sup>(19)</sup>

실의 작은 간극에서 발생하는 유체력은 회전기계의 안정적인 운전을 위하여 정확한 예측이 필요하다. 그 대표적인 예로 기존 이론모델인 Bulk-flow model은 코드 작업 시간이 오래 걸리고, 형상이 복잡해짐에 따라 해석이 어려워지는 단점을 가지고 있다. 이에 CFD를 이용하여 회전축계의 로터와 스테이터의 동적거동을 steady-state로 가정하여 회전기계의 안정성을 판단할 수 있는 회전체동역학적 계수를 해석하는 연구가 일부 진행되었다.<sup>(20)</sup>

### 3.3 댐퍼(damper)

댐퍼는 건축/토목구조물 및 산업설비뿐만 아니라 육상과 수상 수송 장비 등 다양한 구조 장비의 진동 및 충격을 저감하기 위해 널리 사용되고 있다. 또한 특히 수송 장비의 운전 중 엔진 및 프로펠러 추진축계에서 발생하는 비틀림 진동에 의해서 각 요소에 부가되는 과도한 진동의 저감 목적으로 비틀림 댐퍼를 사용한다.

오리피스를 이용한 유체 댐퍼를 설계하기 위해서는 유체 댐퍼의 특성을 정확히 파악하고 있어야 한다. 일반적으로 실린더 내부의 유체가 좁은 오리피스로 빠져 나갈 때 발생하는 점성유체 감쇠력은 점성 유체의 지배 방정식을 이용한 힘과 변형 속도의 관계식을 유도함으로써 예측할 수 있다. 하지만 유체 댐퍼에서 발생하는 제어력은 점성유체 감쇠력뿐만 아니라 가속도 및 강성에 비례하여 발생하는 힘의 성분으로 구성되어 있다. 따라서 유체 댐퍼의 제어력을 넓은 주파수 영역에서 정확히 추정할 수 있다면, 댐퍼의 설계에 유용한 자료가 될 것이다. 다양한 댐퍼에 적용이 가능한 단순한 실린더형 유체 댐퍼를 대상으로 일련의 동특성 실험을 수행한 후 실험결과를 바탕으로 유체 댐퍼의 특성을 규명하고자 하였다.<sup>(21)</sup>

다양한 진동원에 대응하기 위하여 복합 작동기를 이용한 진동 제어 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 수동형 공기 스프링, 능

동형 전자기 작동기, 반능동형 MR 댐퍼를 통합적으로 연동하여 진동을 방진/제진하는 통합 제진 마운트를 제안하고, 이 중 반능동형 작동기인 MR 댐퍼를 제작하고 실험을 통해 MR 댐퍼의 성능을 검증한다. 이를 위하여 통합 제진 마운트 시스템의 구조 및 특이성을 확인하고 이로부터 통합 제진 마운트에 적합한 형태의 MR 댐퍼를 설계, 제작한다. 제작된 MR 댐퍼의 댐핑력 특성을 실험을 통해 진동 제어성능을 시뮬레이션을 통해 평가한다.<sup>(22)</sup>

선박용 디젤엔진의 크랭크축과 프로펠러 추진축 사이에서 발생하는 비틀림 진동은 선체 동력 전달 축 계통에 악영향을 미칠 수 있다. 이를 방지하기 위해 리프 스프링형 유체 점성 댐퍼를 사용하여 스프링의 변형에 의해 유체가 스퀴징 되면서 채널을 통해 다른 방으로 펌핑되면서 시스템에 감쇠력을 제공한다. 과도상태에서 외부 진동에 의한 스프링의 변형 해석을 수행하고, 이 결과를 이용하여 유체의 유동현상을 과도상태에서 해석함으로써, 결국 댐퍼의 상세설계 관점에서 강성 및 감쇠특성을 해석하고 최적화하는 연구가 진행되었다.<sup>(23)</sup>

#### 4. 결 론

2010년도 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, 실 등의 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) 홍도관, 우병철, 정연호, 김종무, 조운현, 2010, "400W, 200,000rpm 급 마이크로터빈용 회전체의 위험속도 해석," 대한기계학회 2010년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 1543~1548.
- (2) 이상국, 이선기, 이도환, 박성근, 2010, "터보 블로어용 초고속 전동기의 회전체 동역학 해석," 대한기계학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp. 160~165.
- (3) 구동식, 배용채, 이육룡, 김재구, 김효중, 최병근, 2010, "2차원 유한요소법을 적용한 플라이휠 에너지 저장 장치 동특성 해석 프로그램 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제34권, 제11호, pp. 1757~1763.
- (4) 김태영, 김태호, 최상호, 정진택, 이용복, 2010, "300마력(225kW) 초고속 무급유 영구자석전동기의 회전체동역학 특성 및 성능 측정," 유체기계공업학회 2010 유체기계 연구개발 발표회, pp. 68~69.
- (5) 조상범, 김태영, 김태호, 김창호, 이용복, 2010, "300마력 무급유 터보 압축기의 회전체 동역학적 성능에 관한 연구," 유체기계공업학회 2010 유체기계 연구개발 발표회, pp. 144~145.
- (6) 김병욱, 이안성, 2010, "산소공장 공기터보압축기(ATC)의 회전체동역학 설계특성 분석 및 진동저감," 유체기계저널, 제13권, 제3호, pp. 43~48.
- (7) 김병욱, 이안성, 하기영, 2010, "수직배럴형 다단 원심펌프의 로터다이나믹 과도응답 해석," 유체기계공업학회 2010 유체기계 연구개발 발표회, pp. 172~173.
- (8) 김병욱, 이안성, 2010, "터보차저의 로터다이나믹 해석모델 개발 및 진동응답 해석," 유체기계저널, 제13권, 제5호, pp. 35~42.
- (9) Bonchoel Ku, Youngdo Park, Chiun Sung, Youngchul Han, Junghoon Park, Yujin Hwang, 2010 "Comparison of tribological characteristics between aluminum alloys and polytetrafluoro ethylene composites journal bearings under mineral oil lubrication," Journal of Mechanical Science and Technology, 24 (8), pp. 1631~1635.
- (10) 오승태, 박세홍, 최성필, 빈재구, 공영경, 2010, "대용량 추진 전동기용 베어링 개발에 대한 연구," 2010년도 대한기계학회 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 1615~1620.
- (11) 이승표, 이인하, 김용찬, 김현우, 배현욱, 박중양, 2010, "설계 변수법을 이용한 자동차용 휠 베어링의 구조설계 및 해석," 2010년도 대한기계학회 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 574~577.
- (12) 박종원, 김형의, 김종억, 심양진, 정원욱, 2010, "과다 예압을 받는 테이퍼롤러 베어링의 수명단축효과에 대한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 A권, 제34권, 제9호, pp. 1161~1166.
- (13) 홍동표, 김동연, 이제완, 유정환, 김원태, 최만용, 2010, "적외선 열화상 카메라를 이용한 윤활 상태에 따른 회전요소 볼 베어링의 온도 특성 연구," 한국소음진동공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp. 262~263.
- (14) 이도환, 이상국, 노영진, 강태석, 이병학, 2010, "베어링 성능 저하 신호 특성," 한국소음진동공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp. 278~279.
- (15) 김우연, 이종민, 배용채, 김승중, 2010, "플라이휠 에너지 저장장치를 위한 저 전력소모 하이브리드마그네틱 베어링의 설계," 한국소음진동공학회논문집, 제20권, 제8호, pp. 717~726.
- (16) 김정완, 유승열, 배용채, 노명규, 2010, "강체모델 기반 시스템 안정성을 고려한 자기부상 플라이휠 에너지 저장 장치의 최적 설계," 대한기계학회논문집 A권, 제34권, 제3호, pp. 283~289.
- (17) 나연주, 2010, "전자석 바이어스 반경방향-축방향 일체형 자기베어링 해석," 한국소음진동공학회논문집, 제20권, 제11호, pp. 1038~1045.
- (18) 신정국, 유호선, 이재현, 문승재, 2010, "산소주입 수처리 에 의해 발생하는 급수펌프 밀봉장치의 누설방지," 대한기계학회 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 2583~2589.

## 이용복

- (19) 김동섭, 강수영, 2010, "Investigation of Leakage Characteristics of Straight and Stepped Labyrinth Seals," International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 253~259.
- (20) 최복성, 하태웅, 2010, "CFD를 사용한 고성능 펌프 실의 동특성 계수 예측," 한국윤활학회, 윤활학회지, 제26권, 제1호, pp. 37~43.
- (21) 문석준, 김홍섭, 정태영, 이동환, 황재영, 2010, "넓은 주파수 범위에서의 실린더형 유체 댐퍼에 대한 실험적 동특성 규명 연구," 한국소음진동공학회논문집, Vol. 20, No. 6, pp. 528~536.
- (22) 성민상, 최승복, 김철호, 이흥기, 백재호, 한현희, 우제관, 2010, "통합제진마운트용 MR 댐퍼의 실험적 성능 평가," 한국소음진동공학회논문집, Vol. 20, No. 12, pp. 1161~1167.
- (23) 김영철, 이동환, 함덕용, 이형우, 김영배, 2010, "비틀림 진동 댐퍼의 강성 및 감쇠계수 해석," 한국소음진동공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp. 215~216.