

## 회전체 동역학 분야 연구동향

이용복\*

### 1. 서 론

2002년도 회전체 동역학 분야의 주요 연구동향을 요약하여 소개한다. 여기서는 광범위한 회전체 동역학 분야중 유체기계와 관련된 부분만으로 국한시키고, 이와 관련된 국내에서 발행하는 유력 학회지인 대한기계학회논문집 A권, KSME International Journal, 유체기계저널, 한국소음진동공학회는논문집, 윤희학회지 및 KSTLE International Journal에 발표된 논문을 중심으로 분석하였다. 유체기계와 관련된 회전체 동역학 분야의 연구는 크게 로터-베어링으로 구성된 회전체 시스템의 동역학적 해석연구 분야와 베어링/실(seal)/댐퍼와 같은 회전기 요소 연구 분야로 나눌 수 있으며, 그의 회전기의 동역학적 특성에 영향을 줄 수 있는 현상들에 대한 연구가 있다. 2002년 발표된 이 분야의 연구논문은 총 40편이었다. 그 중 회전체 시스템의 동역학적 해석연구와 관련하여 8편의 논문이 발표되었고, 회전 기기 요소인 베어링 관련 논문이 17편, 실 관련 논문이 5편 그리고 감쇠기인 댐퍼 관련 논문이 10편으로 비교적 고른 연구 추세를 보이고 있다.

최근의 회전기계 시스템은 단위 중량 당 에너지 효율을 높이기 위하여 고속화, 소형화, 경량화 추세이며 이에 따른 엄밀한 동역학적 해석 기술과 고속화 기술 및 신뢰성 확보 기술이 요구되고 있다. 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구개발과제 및 기초연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 다음은 2002년도 발표된 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

### 2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

고속 회전하는 축-베어링 시스템에 외란이 작용할 경우, 베어링 내 윤활막에서의 공동 영역에 변화가 수반되며 이로 인해 시스템의 응답 특성이 변화하게 된다. 따라서 원치 않는 외란이 작용할 경우에 공동 영역에 대한 타당한 경계조건을 적용한 비선형 해석이 의미가 있으며, 이의 경계 조건을 적용한 시스템의 응답 해석에 대한 연구를 비롯 회전체 전반에 걸친 안정성 연구들이 이루어졌다.

베어링에 정현파 외란이 작용하는 경우에 케비네이션 알고리즘을 적용한 비선형 해석을 수행하였다. 이를 통해 베어링에 외란이 작용할 때 베어링 내 공동영역이 증가한다는 것과 외란의 크기나 주파수가 증가할수록 베어링 내 하중을 지지하는 완전유막영역의 감소로 인하여 저널의 선회중심이 베어링 하중 방향의 중심선 쪽으로 이동하며, 선형과 비선형 해석결과의 차이에 외란의 주파수도 밀접한 관계가 있다는 것을 확인하였다.<sup>(1)</sup> 또한 베어링의 비례, 미분 및 적분 제어기 축의 불균형 질량에 의한 축 진동 특성에 미치는 영향에 대한 연구로 베어링에서 발생하는 연성 성분의 반력이 비연성 성분의 반력에 비하여 무시할 수 있는 경우 베어링의 비례-미분 제어는 저속에서는 비례 제어로 인하여, 고속에서는 미분 제어로 인하여 전 운전구간에 걸쳐 축 진동 진폭을 효과적으로 저감연구가 수행되었다<sup>(2)</sup>. 회전기 동력 전달 요소인 기어 시스템을 갖는 회전기에 대한 연구로는 연성되어 있는 서로 다른 속도에서 운전하는 기어 전동 2축 로터-베어링 시스템의 유한요소 운동방정식으로부터 불균형 응답 궤적을 구하는 일반화된 해법을 제시하여, 장·단축 반경의 해석적 해를 유도하였다. 이 연구에서 유도된 불균형 응답 궤적의 장·단축 반경 해는 두 축이 기어뿐만 아니라 베어링 등에 의해 연성되어 상호 작용하며 다른 속도로 운전하는 2축 또는 이중축 로터-베어링 시스템에 대해 연구가 수행 되었다<sup>(3)</sup>.

\* 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터  
E-mail : lyb@kist.re.kr

또한 기어 쌍의 일반화된 횡-비틀림 연성진동 유한 요소 모델을 적용하여, 불-피니언 증속기어를 갖는 터보 냉동기 로터-베어링 시스템을 대상으로 횡-비틀림 연성 진동 특성을 체계적으로 상세 고찰 분석하였으며, 기어 물림 강성 변화에 따른 비연성과 연성의 고유진동수 및 모드형상, 그리고 횡진동 모드와 비틀림 진동 모드에 대한 스트레인 에너지가 상세히 비교 분석되었으며<sup>(4)</sup>, 회전축의 진동 해석과 관련 티모센코 이론을 적용한 균일 단면 회전체 운동방정식의 완전해로부터 전달행렬을 유도하였고, 이 전달 행렬을 일반회전체 해석에 적용하였다. 이 연구에서 유도한 전달행렬은 티모센코 이론과 자이로스코프 효과, 토크 등을 고려한 운동방정식으로부터 유도하면서 수학적인 가정이나 근사화의 개념을 사용하지 않아 정확한 해를 제공하며, 절점을 정하고 요소의 길이를 결정할 때 유한 요소법 적용한 연구가 시도되었다<sup>(5)</sup>.

유체 기기의 운전 안정성과 관련 고압 다단 펌프의 축방향 하중을 지지하기 위해 사용되는 밸런스 슬리브에 역스웰 유로 입력을 적용한 경우에 대하여, 펌프의 진동 및 누설 특성을 실험적으로 고찰하였다. 연구를 통해 고압 다단 펌프의 밸런스 슬리브에 역스웰 유로 입력을 적용하는 것은 시스템의 진동 및 누설 특성 개선에 효과적이라는 것을 확인하였다<sup>(6)</sup>.

회전기의 상태 진단 기술(Condition Monitoring and Diagnostics)에 대한 연구로는 산업용 회전 기계 시스템을 모사하여 실험 장치를 제작하고 이를 이용하여 인위적으로 발생된 마멸 현상시 시스템의 운전 상태를 나타내는 진동, 마모 그리고 온도 데이터를 실시간으로 측정하고 그들의 변화 특성을 고찰하는 연구가 진행되었다<sup>(7)</sup>.

회전축의 적층된 로터와 베어링으로 구성된 회전계는 로터와 베어링의 관성 및 강성 특성으로부터 위험 속도가 결정되어지며 이 때 기본 축과 적층된 적층판으로 구성된 적층된 로터는 그 강성이 로터의 재질, 형상, 적층판의 재질, 형상, 절연층, 적층압력, 끼워 맞춤 정도 등 여러 가지 인자들에 의해 결정되기 때문에 해석 등의 방법으로 결정하기 어렵다. 이러한 여러 가지 인자들 중 쉽게 변화가 가능한 적층압력 즉, 적층판의 압착력 변화에 따른 로터의 고유진동수 변화에 대하여 실험을 통해 규명하고, 등가 직경의 개념을 도입, 수치해석을 통하여 상관관계를 정량적으로 평가하여 설계자들이 적용할 수 있는 계산 기준을 제시하였다<sup>(8)</sup>.

### 3. 회전 기기 요소 연구

#### 3.1 회전기 요소-베어링

##### 3.1.1 포일 베어링

포일 베어링은 최근 환경 문제 및 유체 기계의 고속화, 고효율화로 연구의 관심 대상이 되고 있다. 이에 대한 연구로는 범프(bump) 베어링으로 지지되는 이단 압축기의 설계에 관한 연구가 진행되었는데, 여기서는 이단 압축기를 설계하기 위해 베어링에 대한 평형 위치 및 강성 계수를 수치적으로 구하였고, 회전체는 유한 요소법을 이용하여 설계를 수행하였다<sup>(9)</sup>.

또한, 고속 회전 터보 기기용 포일 베어링의 불안정 진동 제진에 대한 연구로 감쇠능력이 향상된 점탄성 포일 베어링을 제안, 베어링에 대한 감쇠 성능을 입증하기 위해 베어링 가진 실험과 굽힘 모드 운전 실험을 수행하였으며<sup>(10)~(14)</sup> 그 외 터보 과급기에 대한 회전체 및 베어링에 대한 설계 연구에 있어서는 범프 포일 베어링의 강성과 감쇠를 섭동법으로 구한 후, 이를 기반으로 터보과급기 시스템의 공진, 진동 크기 및 안정성에 대한 설계 연구가 있었다<sup>(15)</sup>.

##### 3.1.2 저널 베어링

일체형 원자로에 사용되는 냉각재 순환펌프용 저널 베어링의 윤활 해석을 위해 고온/고압 환경 하에서 물로 윤활되는 그루브 저저널 베어링의 윤활 해석에 관한 연구가 이루어졌다. 이를 통해 각 저저널 요소를 직선 운동으로 묘사하였고, 레이놀즈 방정식을 이용하여 동수압 압력 분포와 하중지지 용량을 구하였다. 그리고 냉각재 순환 펌프용 베어링의 하중지지용량은 베어링 틈새와 베어링 면적비에 큰 영향을 받음을 확인하였고, 지정된 사용 조건에 있어 최적의 설계 데이터를 구축할 수 있는 기초 자료를 제공하였다<sup>(16)</sup>.

또한 축의 불균형 질량을 고려하여 축-베어링 시스템의 비선형 해석을 통한 유체 윤활 저저널베어링의 음향 특성의 연구에서는 베어링 내 유막에서의 소음 성분이 축 회전수에 대응하는 주파수와 이의 고조화 성분들로 구성됨과, 베어링 내 유막 압력 변동에 기인하는 소음의 크기는 축 회전수와 동기된 1차 성분의 주파수 성분이 지배적이고, 축회전수와 동기된 고조화 성분들의 소음은 유막 재형성 위치 및 유막 파단 위치 부근에서 피크값을 가진다는 결론을 유도하였다<sup>(17)</sup>.

우수한 동적 안정성 때문에 화력터빈이나 가스터빈

등과 같은 고속 회전기계 시스템의 증기압이 크고 불안정요인이 많은 고압 터빈 로터를 구축, 지지하기 위해 널리 사용되는 유체윤활 틸팅패드 저널베어링에 대한 패드 fluttering의 진동 특성을 실험적으로 규명하고, anti-fluttering 틸팅 패드 저널 베어링을 개발하기 위한 유용한 데이터를 확보하기 위하여 실험장치를 설계/제작하고 실험한 연구도 진행되었다<sup>(18)</sup>.

우수한 진동 및 소음 특성을 갖는 빗살무늬 홈이 파인 저널 베어링은 기존의 볼 베어링을 대체하여 하드 디스크 드라이브용 스핀들 모터의 지지요소로 사용되고 있다. 이러한 홈이 회전하는 빗살무늬 저널 베어링의 안정성 해석에 대한 연구에서는 베어링의 운동방정식을 Hill의 무한 행렬식 형태인 고유치 문제로 변환함으로써 안정성을 해석하는 방법을 제안하였다. 이 연구를 통해 편심율의 증가와 홈 수의 감소가 강성 계수의 평균값과 변화량을 증가시키는데 큰 역할을 하며 회전하는 빗살무늬 홈을 갖는 유체 동압 저널 베어링의 불안정성을 증가시킨다는 것을 확인하였다<sup>(19)</sup>.

그 외 정보 저장용 기기인 HDD용 미끄럼 베어링의 대표적인 예라고 할 수 있는 빗살무늬 베어링의 최적 설계에 대한 연구에서는 종래의 직사각형 그루브 단면 형상에 더하여, 다양한 그루브 단면 형상을 갖고 있는 빗살 무늬 저널 베어링의 성능, 즉 유막의 강성계수, 감쇄계수 및 마찰 토크를 계산하여, 강성최대, 마찰토크 최소를 실현하는 최적설계를 제안하였다<sup>(20)</sup>.

### 3.1.3 스러스트 베어링

스파이럴 그루브 스러스트 베어링의 부하용량 향상을 위한 설계변수에 대한 연구에서는 유한개의 그루브를 가지는 베어링을 해석하여 부하용량향상을 위한 설계변수들의 최적치를 제시하고, 설계변수들의 변화에 따른 부하 용량의 변화에 대해 살펴보았다. 이를 통해 스파이럴 그루브 스러스트 베어링의 부하용량을 계산하기 위한 식을 유도하였고, 설계변수인 그루브폭비, 그루브높이비, 그루브각의 변화에 대해 부하용량의 변화를 살펴보아 이들 3개의 설계변수는 서로 상관관계를 가지며 부하용량에 영향을 주는 것을 확인하였다<sup>(21)</sup>.

지금까지 알려진 몇 가지 형식의 동압 공기 베어링을 선정하여 각각의 성능을 해석하고 비교하여 상대적으로 우수한 그루브 형상을 제시하는 연구에서는 스텝-포켓 베어링, Inward pumping 스파이럴 그루브 베어링, Outward pumping 스파이럴 그루브 베어링, 헤링본 그루브 베어링을 선정하여, 그루브의 형상을 결정

하는 설계변수로 중심반지름비, 그루브깊이비, 그루브폭비, 그루브높이비, 그루브각, 시일비의 변화에 따른 베어링의 성능 변화를 수치해석하였다<sup>(22)</sup>.

### 3.1.4 볼베어링

구름 베어링인 볼 베어링에 대한 연구는 미끄럼 베어링의 연구에 비하여 상대적으로 연구 논문 편수가 적은 2편으로, 이는 기기의 사용 기간 동안 윤활제의 교환이 없는 밀봉형 베어링에 가장 많이 사용하고 있으며 내열성과 내수성 및 전단안정성이 양호한 증주제인 리튬 증주제와 광유계 기유로 제조된 그리이스에 대해 베어링 수명시험을 실시하여 OIT, 전산가, 유분리율 측정값이 그리이스의 노화를 판정하는 지표로 사용 가능할 것을 판단하였고, PDSC에 의한 OIT 측정값 또한 그리이스의 잔류수명 예측을 가능하게 하는 지표값을 사용할 수 있음을 확인하였다<sup>(23)</sup>.

또한 회전계의 회전중 waviness에 의해 발생하는 고유진동특성의 변화는 최근 고속, 고정밀화 경향의 초정밀 회전기기의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 안정된 회전특성을 가지는 회전계의 설계를 위해 waviness의 영향을 고려한 회전계의 안정성 해석이 요구된다. 이에 waviness가 있는 두 개의 볼베어링으로 지지되는 강체회전계의 안정성 해석 모델이 제안되었다. 이 연구에서는 볼베어링의 waviness와 볼의 원심력 그리고 자이로스코픽 모멘트를 고려한 5자유도 강체 회전계의 해석모델을 사용하여 비선형 접촉력에 의한 강성 행렬과 회전에 따른 각 성분의 변화를 계산하였다. 그리고 안정성 판별결과를 검증하기 위해 5자유도 회전계의 비선형 해석모델에 의한 시간응답을 구하여 안정성선도와 비교하는 과정보도 연구 수행하였다<sup>(24)</sup>.

### 3.1.5 기타

변압기용 오일펌프의 추력베어링에서 발생하는 마모의 진단 사례에 대한 연구도 있었다. 이 연구에서는 추력베어링의 마모는 절연유의 점성이 매우 낮으므로, 오일의 유막 형성이 어려워 비교적 작은 추력에도 유막이 쉽게 파괴되고 마모가 발생에 대한 연구 논문이 있었다<sup>(25)</sup>.

## 3.2 실(Seal)

고압 비접촉 유체 실은 접촉 실인 기계 실에 비하여 연구가 활발하였는데, 스텝 터빈이나 압축기에 널리

적용되고 있는 엇갈린 래버린스 실의 누설량과 유체력을 나타내는 동특성계수들을 예측할 수 있는 해석방법에 대한 연구가 이루어졌다. 이 연구에서는 래버린스 챔버 내에 한 개의 제어체적을 설정하고 Moody의 마찰계수식을 사용한 표면 전단응력의 정의로부터 지배방정식을 유도하였으며, 로터 축이 타원체적을 갖는 휘돌림 운동을 한다는 가정으로부터 섭동압력을 구하고 엇갈린 래버린스 실의 동특성 계수를 결정하였다<sup>(26)</sup>. 또한 압축기 및 터빈 등에 사용되어온 비접촉 환상실은 다양한 형상의 래버린스 실이다. 그러나 래버린스 실은 회전체 동역학적 불안정성을 야기할 수 있는 가능성이 있어 래버린스 실보다 더 누설량과 회전체 동역학적 안정성을 향상시킬 수 있는 허니콤 실이 제안되어 사용되고 있다. 허니콤 표면과 평면부를 갖는 이중표면실의 누설량 및 동특성계수를 예측할 수 있는 이론적 해석방법과 전체 실 길이중 허니콤부와 평면부의 길이에 따른 누설특성 및 동특성 결과를 분석한 연구도 이루어졌다<sup>(27)</sup>.

또한, 고압부에 노출된 허니콤 실의 구조적 취약성을 보완하기 위해서 고압측의 일정길이를 실 구조물과 일체로한 smooth land부를 갖는 honeycomb/smooth land 실을 제안하였으며, 누설량과 동특성 계수를 예측할 수 있는 해석법을 제시하였다<sup>(28)</sup>.

반면 접촉식 기계 실은 실 장치에서 문제점이 발생되지 않도록 하기 위해 회전속도를 높인다 하더라도 미끄럼 마찰면에서 발생하는 건조마찰 접촉조건을 어떻게 유체막이 형성된 유체마찰 조건으로 바꾸어 주고, 동시에 마찰면의 냉각조건을 어떻게 유지해줄지나 기계 실 장치의 밀봉성과 내구성을 동시에 확보하는 가장 중요한 설계변수이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제시된 경사면을 갖는 실링과 기존의 직각형 마찰면을 갖는 평면 실링에 대한 해석을 수행한 연구가 진행되었다<sup>(29)</sup>.

그 외 댐퍼 실에 적용되는 원형 단면의 구멍을 갖는 표면에 대한 마찰 계수를 평판 시험기를 사용하여 측정하고, 구멍 요철을 갖는 표면의 마찰특성을 규명하는 연구 또한 진행되었다<sup>(30)</sup>.

### 3.3 댐퍼 (Damper)

#### 3.3.1 MR 감쇠기

MR 감쇠기는 능동감쇠기와 달리 동력기를 이용하지 않고 적은 전압으로 제어력을 발휘할 수 있는 안정

적인 감쇠기인데, 이러한 준능동 감쇠기인 MR 감쇠기의 비선형 해석 모델과 피드백 제어기법인 준최적 제어기법 그리고 변형된 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 3층 건물의 지진응답을 분석한 연구도 이루어졌다<sup>(31)</sup>. 아울러 유연지지 회전체에 감쇠력을 외부적으로 부가하는 수동형 SFD에 MR유체를 이용한 SFD를 개발하기 위한 기초연구의 수행에서는 MR 유체를 이용한 SFD 자체의 특성을 상세하게 파악하기 위해 하나의 질량을 지지하는 SFD를 설계, 제작하였고, 이에 따라 감쇠특성을 실험적으로 조사하였다. 이를 통해 MR SFD 로 지지된 회전체의 지배방정식이 Coulomb 마찰이 없는 선형 방정식으로 고려할 수 있음을 확인하였다<sup>(32)</sup>.

또한, MR 유체의 유동특성을 해석할 수 있는 일반적인 Herschel-Bulkley 모델을 이용하여 MR 유체를 봉입한 승용차용 댐퍼의 제어 특성을 확인하였다. 여기서는 스카이 훅 제어기를 사용하였으며, 부하되어야 하는 자기장의 크기는 Bingham 유체에서 전단 농후로 특성이 변하는 유체에 더 많은 자기장이 부하되어야 함도 확인하였다<sup>(33)</sup>.

#### 3.3.2 ER 유체 감쇠기

회전체에 쉽게 적용 가능한 간소형의 ER 유체감쇠기를 설계, 제작하여 작은 용량의 모터로도 고속 회전축계의 특성을 보이도록 제작된 유연회전축계에 적용하는 연구에서는 ER 유체를 이용한 간소형 감쇠기를 적절히 설계하고 그 수학적 모델과 ER 감쇠기용 증폭기의 입출력 동적모델을 유도하였다. 그리고 이를 포함한 전체 회전축 계의 유한 요소 모델을 통해, 회전체에서의 쿨롱 감쇠가 갖는 특유성을 고려하여 ER 감쇠기의 기능을 극대화하는 반능동식 인공지능 귀환 제어를 제안하였다<sup>(34)</sup>.

실린더 형태의 중형급 승용차용 ER 댐퍼를 제작하여 댐핑력 측정 실험으로부터 얻은 실험데이터를 이용하여, Hydraulic 모델의 주요 파라미터를 추출하고 ER 댐퍼의 댐핑력에 나타나는 이력현상을 표현하고, 기계적 요소로 구성되어 물리적 의미를 갖는 hydraulic 모델을 유도하였다. 또한 이 연구를 통해 간단한 Bingham 모델과의 비교를 통해 전향복영역의 이력현상을 정교하게 표현하는 우수성을 입증하였다<sup>(35)</sup>.

#### 3.3.3 혼합형 리니어 모터 댐퍼

혼합형 리니어 모터 댐퍼를 이용한 실험용 철골 구

조물의 진동제어에 대한 연구에서는, 실규모 철골 구조물의 진동제어 장치로 복합형 리니어 모터 댐퍼를 개발 제작하여 적용 시험을 하였으며, 수치 시뮬레이션을 통해 예측한 성능지수와 유사한 결과를 얻었다. 그리고 실험을 통해서 정형과 가진에 대한 진동제어 성능을 시뮬레이션하고 실험을 통해 검증하기도 했다<sup>(36)</sup>.

**3.3.4 탄성 댐퍼**

점탄성 댐퍼보다 구조가 간편하고 제작이 용이한 납으로 이루어진 탄성댐퍼를 이용하여 고층 건물 구조물에 지진 발생시 건물에 탄성 댐퍼를 추가함으로써 지진 진동이 얼마나 저감되는가에 대한 계산을 하였는데, 4단 크기의 철골 구조물을 만들어 납으로 특수한 형상의 댐퍼를 만들어 실험하여 그 적용 효과를 예측해 보았다<sup>(37)</sup>.

**3.3.5 비선형 점탄성 댐퍼**

비선형 점탄성 댐퍼를 갖는 시스템의 반응을 알아보기 위해 비선형 스프링과 대쉬포트 요소를 여러 가지 방법으로 조합하여 각각의 반응을 조화균형법을 이용하여 알아보는 연구를 통해, 가진력과 댐핑의 크기에 따른 반응을 관찰하여 여러 가지 모델이 상이한 반응을 보인다는 것과 분기점을 구함으로써 분기를 일어나는 조건을 찾았다<sup>(38)</sup>.

**3.3.6 다중 동조 질량 감쇠기**

다중 동조 질량 감쇠기(MTMD)의 진동특성에 대한 연구를 통해 복합 구조물에서 부 구조물이 주 구조물의 동특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이 연구를 통해 부구조물에 의한 감쇠 효과는 부 구조물 각각의 감쇠비에는 무관하고 전체 질량에 의해 결정된다는 것을 확인하였다. 정상상태 운동의 경우 주 구조물의 운동 에너지는 부구조물에 의하여 흡수되고, 부 구조물이 가지는 댐핑에 의해 소멸된다. 충격가진 시에는 모드중첩조건을 만족하지 못하는 경우에는 부 구조물의 공진 주파수 간격에 의해 결정되는 주기가 지난 후, 부 구조물의 운동 에너지가 주 구조물로 재유입되는 현상이 발생됨도 알게 되었다<sup>(39)</sup>.

그 외 마찰 기인 자력진동의 복잡한 동적 역학을 설명하기 위해 새롭게 제안된 2자유도계 모델을 이용한 비선형 해석과 댐핑의 중요성에 대해 언급되었다. 여기서는 댐핑 파라미터가 모델의 동적 역학을 분석할

때 강조됨과 극한 사이클의 크기를 조사함으로써, 댐핑의 중요성에 대해 심도 있게 논의 되었다. 그리고 시스템의 고유진동수에 따라 극한 사이클의 변화의 경향이 분석되었다<sup>(40)</sup>.

**4. 결 론**

2002년도 회전체 동력학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지는 않지만 향후 유체 기계의 스마트(Smart), 지능화(Intelligent)를 대비한 요소 및 스마트 소재의 활용을 통한 지능화 요소 및 시스템의 고려가 있었다. 이는 향후 전통 유체 기계의 IT와의 접목을 통한 “스마트 유체기기” 전단계로서 볼 수 있으며 이러한 변화를 통하여 새로운 연구 방향 모색 및 시장의 확대를 기대 할 수 있겠다.

**참고문헌**

- (1) 노병후, 김경웅, 2002, “외란을 받는 축-베어링 시스템의 동적 거동에 대한 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제1호, pp. 9~15.
- (2) 노병후, 김경웅, 2002, “축-베어링 계의 불균형 응답에 대한 능동 제어 베어링의 효과”, 한국윤활학회지, 제18권, 제2호, pp. 99~104.
- (3) 이안성, 하진웅, 2002, “2축 로터-베어링 시스템의 연성 불균형 응답해석”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 220~226.
- (4) 이안성, 하진웅, 최동훈, 2002, “중속 기어전동 로터-베어링 시스템에서 횡-비틀림 연성진동 특성의 상세고찰”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 116~123.
- (5) 전오성, 2002, “회전축요소의 전달행렬의 이용과 진동해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 161~169.
- (6) 곽현덕, 이용복, 김창호, 이봉주, 2002, “역스윙유로 입력을 가지는 밸런스 슬리브를 적용한 고압다단 펌프의 진동 특성”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 214~219.
- (7) 백두진, 이용복, 김승중, 윤의성, 김창호, 공호성, 장건희, 2002, “마멸현상에서 발생하는 회전기기 시스템의 진동·마모·온도의 상관 관계 연구”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 453~459.

- (8) 김영춘, 박철현, 박희주, 문태선, 2002, “적층된 로터에서 적층판 압착력의 강성 효과”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 565~568.
- (9) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, “이단 압축기의 동력학적 설계 및 운전 특성에 관한 연구”, 유체기계저널, 제5권, 제1호, pp. 55~61.
- (10) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, “고속 회전 터보 기기용 포일 베어링의 불안정 진동 제진에 관한 연구”, 유체기계저널, 제5권, 제3호, pp. 7~14.
- (11) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, “범프 포일 베어링들의 동적계수에 관한 실험적 연구”, 윤활학회지, 제18권, 제1호, pp. 42~48.
- (12) 김태호, 이용복, 김창호, 이남수, 장건희, 2002, “공기윤활 범프 포일 저널 베어링의 내구성 특성에 관한 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제2호, pp. 153~159.
- (13) 김태호, 이용복, 김창호, 김광호, 이남수, 2002, “공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기의 공력 불안정성이 로터에 미치는 진동 영향”, 2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 191~198.
- (14) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 2002, “고속 터보 기계용 공기 포일 저널 베어링의 신뢰성에 관한 연구”, 2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 199~206.
- (15) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 2002, “공기 포일 베어링으로 지지되는 무급유 터보 과급기 회전체 설계에 대한 연구”, 2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 453~458.
- (16) 이재선, 박진석, 김종안, 2002, “고온/고압 환경 하에서 물로 윤활되는 그루브 저어널 베어링의 윤활 해석”, 한국윤활학회지, 제18권, 제2호, pp. 105~108.
- (17) 노병후, 김경웅, 2002, “유체 윤활 저널 베어링의 음원 특성에 관한 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제5호, pp. 333~338.
- (18) 양승헌, 김재실, 하현천, 2002, “틸팅패드 저어널 베어링의 패드 Fluttering 특성에 관한 실험적 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제5호, pp. 357~363.
- (19) 윤진욱, 장건희, 2002, “흙이 회전하는 빗살무늬 저널 베어링의 안정성 해석”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 166~174.
- (20) 유진규, Y.Muraki, M.Tanaka, 2002, “HDD 스펀들용 빗살무늬 저널베어링의 최적설계”, 한국소음진동공학회 2002년 춘계학술대회논문집, pp. 530~532.
- (21) 강지훈, 김경웅, 2002, “스파이럴 그루브 스톱스트 베어링의 부하용량 향상을 위한 설계 변수에 대한 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제3호, pp. 181~186.
- (22) 강지훈, 김경웅, 2002, “여러 가지 형식의 동압 공기 윤활 스톱스트 베어링의 성능에 대한 연구”, 한국윤활학회지, 제18권, 제5호, pp. 364~370.
- (23) 최인혁, 김경길, 김지현, 손성구, 2002, “밀봉형 볼 베어링용 그리이스의 노화와 잔류수명”, 한국윤활학회지, 제18권, 제4호, pp. 273~278.
- (24) 정성원, 장건희, 2002, “Waviness가 있는 볼베어링으로 지지된 회전체의 안정성 해석”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 181~189.
- (25) 최원호, 2002, “변압기 오일펌프용 추력베어링 마모 개선 사례”, 2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 539~542.
- (26) 하태웅, 2002, “엇갈린 래버린스 실의 누설량 및 동특성 해석”, 한국윤활학회지, 제18권, 제1호, pp. 24~33.
- (27) 하태웅, 2002, “Honeycomb/Smooth 표면을 갖는 비접촉 환상 실의 특성해석”, 유체기계저널, 제5권, 제4호, pp. 40~46.
- (28) 하태웅, 2002, “이종 표면을 갖는 실의 특성해석”, 2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 447~452.
- (29) 김청균, 조승현, 2002, “접촉면 형상에 따른 비접촉식 기계시일의 열거동 특성에 관한 유한요소해석”, 한국윤활학회지, 제18권, 제1호, pp. 34~41.
- (30) 하태웅, 주영찬, 이용복, 김창호, 2002, “임의로 거칠게한 표면의 점성 마찰 특성”, 2002 유체기계연구개발 발표회 논문집, pp. 465~470.
- (31) 민경원, 정진욱, 2002, “MR 감쇠기를 이용한 구조물의 변형된 슬라이딩 모드 제어”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 243~250.
- (32) 안영공, 양보석, 신동춘, 김동조, 2002, “MR 유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 응답특성”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 67~70.

- (33) 이덕영, 황우석, 2002, "Herschel-Bulkley 모델을 이용한 MR 댐퍼 승용차의 제어 성능 고찰", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 323~328.
- (34) 임승철, 채정재, 박상민, 윤은규, 2002, "ER 유체 감쇠기를 이용한 유연 회전축 계의 진동제어", 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제5호, pp. 365~373.
- (35) 홍성룡, 송현정, 한상수, 최승복, 2002, "ER 댐퍼의 이력현상을 고려한 댐핑력 특성 고찰", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 489~494.
- (36) 정정교, 김두훈, 박해동, 박진일, 정대영, 문석준, 임채욱, 2002, "혼합형 리니어 모터 댐퍼를 이용한 실규모 철골 구조물의 진동제어", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp. 740~745.
- (37) 배춘희, 조철환, 양경현, 박영필, 2002, "탄성 댐퍼가 추가된 대형철골 구조물의 응답특성", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 808~812.
- (38) 장서일, 송덕근, 최진권, 2002, "비선형 히스테리시스 진동시스템의 분기해석", 한국소음진동공학회 논문집, 제12권, 제1호, pp. 57~64.
- (39) 최성훈, 김양한, 2002, "다수의 진동체로 구성된 부구조물에 의한 감쇠 효과", 한국소음진동공학회 논문집, 제12권, 제6호, pp. 445~452.
- (40) 조용구, 신기홍, 이유엽, 오재응, 2002, "마찰 기인 2자유도계 시스템의 자력진동에 대한 댐핑의 영향", 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제7호, pp. 502~509.