

회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구동향

이용복

1. 서 론

본 특집 기사에서는 2007년도 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.

예년과 같이 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 유체 기계 가운데 펌프, 압축기, 터빈 등 산업현장과 연계된 연구개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다. 다음은 2007년도 발표된 국내 논문을 중심으로 분야별 연구 내용 및 동향을 정리하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 동역학적 해석 연구

최근 회전기기의 성능 및 효율 향상을 위해 회전기기의 고속화에 관한 연구 및 개발이 많이 이루어지고 있다. 이러한 경향과 함께 회전기기의 고속화에 따른 안정성 향상 및 시스템의 효율증가를 위한 회전체 시스템의 동역학적 연구에 관한 관심이 높아지고 있다.

디스크와 로터가 회전할 때 유연축(flexible shaft)이 휘어지거나 질량의 불균형분포, 베어링의 불충분한 지지로 인하여 회전이 정숙하지 못할 경우가 많다. 이러한 임계 휘링속도(critical whirling speed)를 알아내기 위해서는 회전축의 진동모드해석이 필수적이다. 이와 관련하여 로터 시스템을 구성하는 디스크, 회전

축, 베어링의 운동방정식을 모두 통합하는 과정에서 기존 연구자들이 채택한 디스크 강체와 회전축 유연체 운동방정식의 단점과 한계성을 규명하고 이를 극복하기 위하여 회전운동을 매개화 할 수 있는 4원법(quaternion)을 적용하여 새로운 운동방정식을 제시한 연구가 진행되었다.⁽¹⁾

터보 압축기는 임펠러와 회전부를 고속으로 회전하도록 하기 위한 고속 모터의 설계가 중요한문제이며, 이를 위하여 Axial gap type의 BLDC(Brushless direct current) 모터를 채용하고 있다. BLDC 모터는 로터 내부에 자석이 삽입되는 구조이며, 이 자석이 고속으로 회전할 때 유발하는 원심력에 의해서 로터의 파손 문제가 대두되고 있다. 따라서 접촉 문제를 보다 편리하고 정확하게 해석하기 위하여 접촉면에 접촉 요소를 구성하고, 계면 요소(Interface element)를 이용하여 접촉 문제를 잘 구현할 수 있도록 구성된 접촉 요소를 이용한 터보 압축기회터의 접촉 문제를 해석한 연구가 진행되어졌다.⁽²⁾

건식 진공 펌프는 극도의 청결도를 요구하는 반도체 및 평판 디스플레이 제조공정에서 진공분위기를 생성하고, 공정유지 및 부산물 처리를 위해 사용되는 핵심 장비 중 하나이다. 이러한 건식 진공 펌프에 관하여 기존에 집중되어 있던 공력설계 및 소음 저감 기술 개발에 관한 연구에 반하여 거의 소개되지 않았던 건식 진공 펌프의 진동 저감 기술, 특히 진공 펌프 로터-베어링 시스템의 저진동 설계 기술과 관련하여 건식 진공 펌프의 회전기계 동역학 설계절차가 적용된 진공 펌프 로터-베어링 시스템에 상세 FE 모델을 적용하여 위험속도 및 모드해석, 불균형 응답해석 및 불균형 민감도 분석등이 수행되어졌다.⁽³⁾

3. 회전기기 요소 연구

3.1 회전기 요소-베어링

3.1.1 저널 베어링

산업의 발달과 더불어 각종기기 장치의 다기능화와 소형화, 집적화로 회전기계의 효율이 증대되고 있으며, 고속 스핀들에 대한 필요성이 점차 커지면서, 베어링과 관련된 진동문제가 고속 회전 기계에서 빈번히 발생하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위한 다각적인 방법이 제안되고 연구가 수행되었다.

1980년대까지 저널 베어링에 대한 연구가 많이 진행되어 저널 베어링의 설계자료가 많이 축적되었다. 이러한 설계자료를 이용하여 스크롤 압축기의 저널 회전축을 설계하여 왔지만, 스크롤 압축기에 적용하기에는 한계를 가지고 있다. 스크롤 압축기의 경우, 회전축이 수직으로 서 있으며, 원활한 오일 공급을 위하여 축이나 베어링 표면에 깊은 홈이 축 방향 또는 나선형으로 파여있다. 이러한 깊은 홈이 파여있는 베어링에 대한 설계 자료의 필요성에 따라 오일 공급용 그루브가 있는 저널 베어링을 해석할 수 있는 수치 해석기법의 필요성이 대두되고 있다. 이 연구에서는 오일 공급용 그루브가 축에 파여있으며, 이 홈이 축과 평행하거나 나선형인 경우를 모두 해석할 수 있는 임의의 경계 조건을 가진 저널 베어링의 수치해석 방법을 적용하여 실제 압축력에 의해 하중이 가해지는 베어링 내의 축 운동을 해석하는 프로그램을 제시하고 있다. 또한 해석결과의 검증의 일환으로 3점법을 이용하여 압축기의 축 궤적에 대한 실험을 수행하여 해석 프로그램과의 결과를 비교하는 실험을 수행하였다. 이러한 해석을 통하여 스크롤 압축기의 설계에 요구되는 시간을 줄일 수 있도록 하였다.⁽⁴⁾

포일저널베어링의 동적 특성 파악을 위하여 수행된 연구들은 마찰에 의한 쿨롱감쇠를 점성감쇠로 취급하여 해석을 수행하거나, 포일 구조의 강성, 감쇠 특성을 파악하는 연구로만 한정이 되었다. 이러한 연구들은 쿨롱감쇠를 점성감쇠로 모델링하여 해석을 수행함으로써 마찰력이 가지는 강한 비선형성으로 인한 수치해석의 어려움은 감소시켰지만 쿨롱감쇠가 마찰계수, 하중의 분포형태, 가진 주파수, 포일의 형상등 여러 가지 변수에 영향을 받으므로 이러한 모든 변수를 고려하여 포일구조의 정확한 등가 점성감쇠계수를 계산하는데는 많은 어려움이 따른다. 따라서 포일저널베어링의 동적

특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 마찰력을 성능해석에 직접적으로 반영할 수 있는 해석모델이 필요하게 되었다. 따라서 이 연구에서는 포일베어링의 성능해석시 포일 구조에 적용하는 마찰력을 직접적으로 고려할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 공기막에서의 압력은 비 정상상태 레이놀즈 방정식을 통하여 계산하였으며, 유한요소법을 이용하여 범포포일의 거동을 해석하였다. 또한, 탐포일과 범포포일, 범포포일과 베어링 하우징 사이의 접촉점에서 마찰에 의해 생기는 Stick-slip 현상을 고려하였다. 이러한 해석 기법을 통하여 포일저널베어링의 여러 가지 설계변수가 회전 불균형 응답에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 하였다.⁽⁵⁾

자동차 터보차저와 같이 고속으로 회전하는 축을 지지하는 저널베어링은 오일 주입구를 통하여 공급되는 윤활유에 의한 얇은 막의 형성에 의해 지탱한다. 이러한 환경에서의 베어링은 쉽게 고온에 도달하기 때문에 내구 측면에서 정밀하게 설계되어야 한다. 더 나아가 이러한 높은 온도환경에서는 점도에 민감하기 때문에 엔진오일의 선택도 중요하다. 따라서 터보차저베어링의 윤활환경특성과 공기혼입조건이 베어링의 성능에 미치는 영향을 수치해석 적으로 고려하게 되었다. 이 논문에서는 여러 가지 윤활유를 갖는 베어링이 고속 회전 시, 베어링 벽으로의 대류 열전달 조건과 더불어 고속 회전에 의하여 많은 발열이 일어나므로 온도가 낮은 주입유와 발열에 의해 높은 온도를 나타내는 순환유의 혼합이 이루어지는 조건을 고려하였으며, 밀도와 비열을 베어링 내 유막의 실 온도영향에 의해 변하는 조건을 고려하였다. 또한 엔진 시험 데이터에 근거한 베어링 벽과 축의 정확한 경계조건과 설계인자로 오일주입구의 종류, 주입온도, 엔진오일 종류 및 축 회전속도를 선택하였으며, 이들 매개변수들이 베어링 성능 즉, 베어링 내 온도와 압력 및 마찰 손실 등에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.⁽⁶⁾

3.1.2 볼 베어링, 로울러 베어링

볼나사 일체형 LM가이드는 정밀 직선운동이 가능한 기구로서, 각종 정밀 공작기계나 반도체 제조 및 측정 장비, 산업용 로봇, 일반산업기계 등의 직선운동에 사용되는 기계요소이다. 볼나사 일체형 LM가이드는 볼베어링을 사용하는 LM가이드와 LM가이드의 런너 블록을 직선방향으로 이송시켜주는 볼나사로 구성되어 있다. 정밀한 LM가이드의 성능과 수명은 가이드

레일과 러너 블록사이의 볼 베어링에 의해서 결정되게 된다. 레일과 러너 블록사이의 볼 베어링에는 점접촉의 극단적인 압력의 응력이 작용하게 된다. 이러한 응력집중은 영구변형과, 크랙, 마멸, 막피 현상을 초래하여 볼 베어링의 수명을 단축시키는 요인이 되게 된다. 볼나사 일체형 LM가이드의 설계과정으로서 구조물예상, 하, 좌, 우 방향의 힘과 XY평면, XZ평면, YZ평면의 3방향의 모멘트를 적용하였을 때, Von Mises Stress, Deformation, Safety Factor 등의 변화를 사용 유한요소프로그램을 사용하여 연구가 수행이 되었다.⁽⁷⁾

3.1.3 자기 베어링

자기 베어링(magnetic bearing)은 무 윤활, 능동 감성 및 감쇠조정 등 많은 장점을 가지지만 제어루프에 있는 구성요소 중 하나라도 고장을 일으키면 전체 제어 시스템의 붕괴로 이어지기 때문에 높은 신뢰도를 요구하는 회전 기계에는 사용이 제한적이다.

8극 동극형 자기베어링의 4개의 코일 중 2개 이하의 코일이 손실되었을 경우에 자기베어링에 공급되는 전류를 재분배하여 정상적인 베어링의 역할을 할 수 있도록 하였다. 유연로터모델(flexible rotor)을 이용한 시뮬레이션을 통하여 4개의 코일 중 3개의 코일이 고장을 일으킨 경우에도 자기베어링의 자기력이 고장이전과 동일하게 유지되어 전체 회전체 동역학 거동에는 변화가 없으며, 고장강건 기능이 보장된 동극형(homopolar) 자기베어링이 자속분리법을 이용한 모델링과 고장강건 제어 기법을 이용한 연구가 진행되었다.⁽⁸⁾

소형 터보기계에 일반적인 전자석 자기베어링을 장착하기에는 하중 지지 용량과 크기 문제로 제한을 받는다. 전자석의 자기력은 에나멜 코팅 동선의 성능에 영향을 받기 때문이다. 일반적인 전자석 자기 베어링의 단점을 보완한 영구자석 혼합형 자기 베어링을 개발하여 소형 터보기계에 적용하여 회전 실험을 수행하였으며, 진동 특성 향상 및 능동적 서지 제어에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁹⁾

플라이휠 에너지 저장 장치(Flywheel energy storage system)는 다른 형태의 에너지 저장장치와 달리 환경오염의 위험이 없으며 오랜 수명을 가지고 있다. 플라이 휠 에너지 저장 장치가 다른 에너지 저장 장치를 대체하기 위해서는 자체 전력 소비 또한 최소화 되어야 하는데, 그 방안으로 축 방향 베어링으로

영구 자석을 함께 사용한 하이브리드 타입을 채택하여 전력 소비를 줄였다. 영구자석이 포함된 플라이휠 에너지 저장장치의 동역학적 모델 유도, 제어기 설계, 시뮬레이션 구현을 통한 전달함수 획득을 통하여 실제 시스템의 전달함수와 동역학적 모델을 통한 전달함수를 비교하게 됨으로써 신뢰성을 규명하는 연구가 진행되었다.⁽¹⁰⁾

3.2 실

고압용 터보펌프, 그턴 터비등의 회전기기 시스템에서 작동유체의 누설량을 최소화하기 위하여 사용되는 실은 누설 특성을 향상시키고 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되었다.

액체로켓엔진에 장착되어 엔진의 연소기에 고압의 연료 및 산화제를 공급하기 위한 목적으로 사용되는 터보펌프에는 산화제, 연료 그리고 터빈 사이에 실링이 필수적인데 연료펌프와 터빈사이에 기계키랄 페이스 실을 이용하여 연료와 터빈 구동가스의 혼합을 예방한다. 하지만 산업용 펌프에 사용되는 기계키랄 페이스 실과는 달리 터보펌프에서는 높은 선속도(70m/s), 극심한 열하중 및 큰 차압조건에서 운용되며 파손되었을 경우 액체로켓엔진 전대의 실패와 직결될 수 있으므로 실제 운용환경을 모사한 수락실험이 필수적이며 이에 대한 실험이 진행되었다.⁽¹¹⁾

또한 최근에는 터보펌프에 주로 사용되는 플로팅 링 실에 관한 연구도 수행 중에 있는데, 주로 플로팅 링 실만을 독립적으로 연구하였다. 그러나 플로팅 링 실의 경우 펌프의 수력성능에 상당한 큰 영향을 미치는 부분이므로 펌프와 연계해서 플로팅 링 실의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 플로팅 링 실의 간극이 펌프의 성능에 미치는 영향을 연구하여 플로팅 링 실의 간극이 펌프의 수력성능 뿐 아니라 흡입 성능에도 영향이 미치는 것을 확인하였다.⁽¹²⁾ 기존의 플로팅 링의 단점인 편심을 증가로 인한 불안정성 증가를 극복하기 위한 범프 플로팅 링 실에 대한 연구도 진행되었다. 이 연구에서는 플로팅 링 실의 동역학적 안정성을 향상시킨 범프 플로팅 링 실의 특성을 해석적으로 연구하였고, 회전 속도, 범프 포일의 두께, 압력 강하량의 변화에 대한 범프 플로팅 링 실의 특성을 파악하였다. 범프 포일의 특성을 유한 요소법을 사용하여 해석하였고, 플로팅 링 실 내부의 유동은 섭동법을 이용하여 해석하여 두 결과를 연성시켜 범프 플로팅 링 실의

특성을 해석하였다.⁽¹³⁾

누설 유량 저감은 스티머빈의 효율 향상을 위해서도 중요한 요소로 이를 위해 래버린스의 형상이 유동의 저항을 증가시킬 수 있도록 보다 복잡하게 설계되고 있다. 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 저감을 위하여 짧은 래버린스 스트립이 모두 오리피스를 이루도록 로터의 돌출부인 랜드 부 길이를 확장한 형상으로 설계 개선을 제안하였다. 개선된 실에 대하여 bulk-flow 모델 해석을 확대 적용하여 누설량 예측 기법을 개발하고 누설량 저감 효과를 확인하고자 하였으며, FLUENT를 사용한 CFD 해석을 수행하여 bulk-flow 모델 해석 결과를 비교 검증하였다.⁽¹⁴⁾

화력발전용 스티머빈에 사용되는 래버린스 경우, 이론적, 해석적 평가는 이미 많은 연구가 진행되었으나 실의 환경이 고온, 고압의 스티머를 작동유체로 사용한다는 까다로운 실험조건 등의 이유로 실의 성능을 실험적으로 평가하는 것은 미흡한 단계이다. 이에 마그네틱 베어링을 회전축 가진기로 적용하여 실제 시스템과 같이 로터를 가진 할 수 있는 실험 장치를 구성하고 1/3모델 로터와 래버린스 실 사이에서의 누설량 및 동특성 계수 추출에 대한 실험 방법을 정립하였다.⁽¹⁵⁾

한편 천연가스의 수요가 늘면서 압축천연가스(CNG)를 이용한 연료공급라인이 천연가스버스, 가스탱크등을 충전하는데 쓰이고 있다. 비록 대기중에 노출되어도 공기보다 가벼운 특성으로 인해 위험성은 떨어지지만 공급라인의 체크밸브에서의 누설로 인한 위험성이 지적되어 체크밸브실의 거동해석에 관한 연구가 진행되었다.⁽¹⁶⁾

3.3 댐퍼(damper)

MR(Magneto-rheological)유체는 자기장의 세기에 따라 길보가 점도가 가역적으로 변화하는 지능형 유체이다. ER(Electro-rheological)유체와 비교하여 높은 항복응력(yield stress)을 나타내는 MR유체는 MR유체 자체뿐만 아니라 MR유체의 특성을 이용한 응용장치의 설계와 제어에 관한 연구가 많은 연구자들의 관심이 되어있다. 또한, 다양한 분야에서 기존 시스템의 성능을 향상시키기 위해 MR유체를 사용한 응용장치를 적용하는 연구가 수행되어지고 있다.

그와 관련하여 회전조인트에서 감쇠토크의 제어가 가능한 RMR(Rotary Magneto-rheological)댐퍼의 설계개념 및 방법을 제안한 연구가 수행 되었다.⁽¹⁷⁾

MR 유체 작동기의 성능을 향상시키기 위해서는 MR 유체에 자기장을 효과적으로 부하해야 한다. MR 유체의 응답시간은 수 msec 이내인데 반해, MR 유체 작동기의 응답시간은 상대적으로 느리다. 이는 MR 유체 작동기 내에 설치된 자기회로의 전자기적 특성과 밀접한 관계를 갖는다. 특히, 자기회로에 사용된 강자성체의 자화특성은 작동기 입출력의 비선형성에 영향을 미친다. 따라서 MR 유체 작동기의 응답특성과 이력특성을 향상시키기 위해서는 전자기적 관점에서 자기회로를 설계하는 것이 매우 중요하다. 최근 연구에서는 MR 댐퍼의 성능 향상을 위해, MR 댐퍼 내에 설치된 자기회로의 해석적 설계 방법을 제시하였다.⁽¹⁸⁾

최근 고층건물의 방진시스템 및 자동차의 현가장치 분야에 MR 유체를 이용한 반능동 진동제어에 관한 연구가 활발히 진행되면서 MR 유체의 밸브 모드 특성을 이용한 선형 MR 댐퍼가 널리 사용되고 있다. 일반적으로 외부로부터 가해지는 진동에 의한 영향을 최소화하기 위한 진동제어기법은 수동형, 능동형, 그리고 반능동형 진동제어 기법으로 나뉜다. 수동형 진동제어 기법의 경우 저렴하고 신뢰성이 높은 장점을 가지는 반면 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있으며, 능동형 제어기법의 경우 제어성능은 우수하지만 외부의 추가적인 파워 소스가 필요할 뿐만 아니라 안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반능동형 진동제어 기법의 경우, 가제어성 유체(controllable fluid)를 사용함으로써 수동형 진동제어기법의 안정성을 유지하면서 능동형 현가시스템의 단점을 해결하기 위해 추가적인 파워 시스템이 필요 없게 되었다. 회전형 MR 댐퍼를 내장한 무한회전형 액츄에이터를 이용하여 주행로봇의 반능동 진동제어에 관한 연구를 수행하였고, Bouc-Wen 히스테리시스 MR 댐퍼모델과 TSE의 역댐퍼 모델을 이용하여 회전형 MR 댐퍼를 채용한 현가시스템용 반능동 퍼지 스카이훅 제어 알고리즘을 제안하였다.⁽¹⁹⁾

4. 결 론

2007년도 회전체 동역학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에 크게 벗어나지는 않는 예년에 비슷한 수준이며, 특히 고성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실등의 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) 윤성호, 2007, “로터 시스템 해석을 위한 회전운동 매개화,” 한국정밀공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집
- (2) 이승표, 고병갑, 2007, “접촉을 고려한 터보 압축기 로터의 안정성 해석,” 한국공작기계학회논문집, Vol.16, No.3
- (3) 김병욱, 이안성, 노명근, 2007, “고속 운전용 건식 진공펌프 로터-베어링 시스템의 진체동역학 해석,” 유체기계저널, 제 10권, 제 3호, pp. 47~54.
- (4) 박상신, 김규하, 이진갑, 2007, “스크롤 압축기 저널 회전축의 궤적 계산 및 측정,” 한국윤활학회지, 제 23권, 제 3호, pp. 83~88.
- (5) 이동현, 김영철, 김경웅, 2007, “마찰을 고려한 포일저널베어링의 동특성 해석:회전불균형 응답,” Journal of the KSTLE Vol. 23, No. 5, pp. 219~227.
- (6) 전상명, 2007, “터보차저 저널베어링의 설계에 관한 매개변수 연구,” Journal of the KSTLE Vol. 23, No. 1, pp. 1~8.
- (7) 윤영식, 신동우, 2007, “불나사일체형 LM가이드 설계에 대한 연구,” 대한기계학회, 대한기계학회 춘추학술대회 대한기계학회 2007도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 2819~2824
- (8) 나연주, 2007, “자속 분리법을 이용한 동극형 자기 베어링의 고장강건 제어,” 한국소음진동공학회논문집, Vol.17, No.11, pp. 1102~1110.
- (9) 박인황, 박영호, 한동철, 2007, “자기베어링으로 지지되는 터보기계의 효율 향상에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회, 대한기계학회 춘추학술대회 대한기계학회 2007도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 15~20.
- (10) 유승열, 모상수, 최상규, 이정필, 한영희, 노명규, 2007, “자기부상형 플라이휠 에너지 저장 장치의 자기 베어링 시스템 설계,” 대한기계학회, 대한기계학회 춘추학술대회 대한기계학회 2007도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 2143~2147.
- (11) 박현덕, 전성민, 김진한, 2007, “터보펌프용 메카니컬 페이스 실의 수막 실험,” 유체기계저널, 제 10권, 제 1호, pp. 20~25.
- (12) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2007, “플로팅 실 간극이 터보펌프용 펌프의 성능에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제 10권, 제 6호, pp. 38~43.
- (13) 김경욱, 박동진, 정진택, 김창호, 이용복, 2007, “펌프 플로팅 링 실의 동특성에 대한 해석적 연구,” 한국윤활학회지, 제45회 추계학술대회, 발표논문집 pp. 133~140.
- (14) 하태웅, 2007, “누설량 저감을 위한 래버린스 실의 설계개선 및 해석,” 한국윤활학회지, 제 23권 제 2호, pp. 43~48.
- (15) 안상규, 김승중, 이종민, 이용복, 임윤철, 2007, “마그네틱 베어링을 이용한 고속 회전체용 비접촉식 실 시험기의 설계와 실의 누설 특성 및 동특성 규명,” 한국윤활학회지, 제45회 추계학술대회, 발표논문집 pp. 141~149.
- (16) 유재찬, 여경모, 박태조, 강병루, 2006, “CNG차량의 연료공급라인용 Check Valve Seal의 거동해석,” 한국윤활학회지, 제 22권 제 6호, pp. 329~334.
- (17) 이종석, 이지웅, 백운경, 2007, “로터 MR댐퍼의 설계,” 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 2125~2130.
- (18) 남윤주, 박명관, 2007, “MR 댐퍼의 전자기적 설계,” 대한기계학회 2007년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 158~163.
- (19) 조정목, 허남, 조중선, 2007, “MR 댐퍼를 이용한 회전형 현가장치의 제어에 관한 연구,” 한국정밀공학회 2007년도 춘계학술대회 논문요약집, pp. 45~46.