

다물체 동역학과 베어링의 윤활 해석을 연계한 다중 물리시스템 해석 기법

이정희 | 서울대학교 기계항공공학부, 박사후과정 | e-mail : leejg@functionbay.co.kr
 김창완 | 건국대학교 기계설계학과, 교수 | e-mail : goodant@konkuk.ac.kr

최근 다물체 동역학과 다른 물리계에 대한 연성 해석이 활발히 추진되고 있다. 이 글에서는 다물체 동역학을 이용한 윤활 해석을 위한 EHD(Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 해석 사례를 소개함으로써 베어링 동역학을 기반으로 베어링 해석을 이해하고자 한다.

최근에 자동차, 항공기 및 원자력의 산업의 급속한 발전과 함께 설계자들은 보다 안전하고 신뢰성 높은 구조를 설계하고 제작하는데 많은 노력과 관심을 나타내고 있다. 이러한 구조물에 대한 해석은 실제로 매우 다양한 분야의 연구가 복합적으로 이루어져야 가능하다. 예를 들면 물체의 큰 움직임이 있는 경우에는 동역학적 연구가 고려되어야 하고 추가적으로 변형의 문제가 중요하다면 동역학 개념과 구조역학 개념을 동시에 고려해야 할 것이다. 또한 물체간의 마찰이나 열에 의해 변형이 되거나 유체의 영향을 받아 변형되는 경우에는 열-유체에 의한 주위 환경의 변화를 고려해야만 정확한 해석이 가능할 것이다. 과거에는 수치해석 기법의 한계로 인해 동역학, 구조역학, 열유체역

학 분야를 독립적으로 수행하였다. 그러나 최근 들어 수치해석 기법의 향상과 컴퓨터 하드웨어의 급속한 성장으로 실제 설계과정부터 CAE소프트웨어를 이용하려는 경향이 많아지고 있다. 구조물이나 기계시스템의 초기설계 또는 예비 설계 검증과정에 도입하여 시험이나 실험횟수를 줄일 수 있음에 따라 개발에 소요되는 비용이나 시간을 크게 절감할 수 있어 최근에는 전산해석을 이용한 해석이 보편화되고 있는 실정이다. 현재 많은 CAE소프트웨어들은 이러한 요구를 충족시키기 위해 열-유체-고체를 동시에 고려할 수 있는 다중 물리 시스템(Multi-physics System) 해석에 많은 관심을 가지고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그림 1은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 고온 상태에서 밸브 내의 유체 유동을 해석하고, 관련 유동에 의한 고체 부위의 변위를 계산한 결과를 나타낸다. 이러한 해석은 다중 물리 시스템 해석의 대표적인 사례이다.

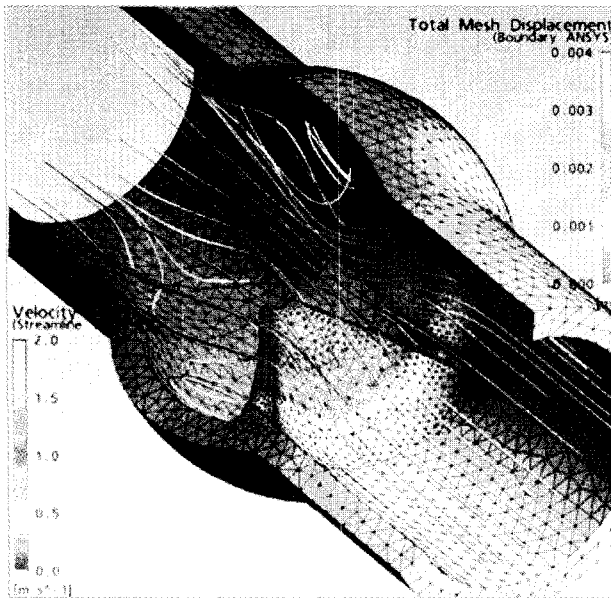


그림 1 상용 프로그램 ANSYS를 이용한 밸브의 고온 조건에서의 고체에 대한 연성해석⁽¹⁾

다중 물리 시스템

다중 물리는 여러 가지 의미로 쓰이고 있다. 일반적으로

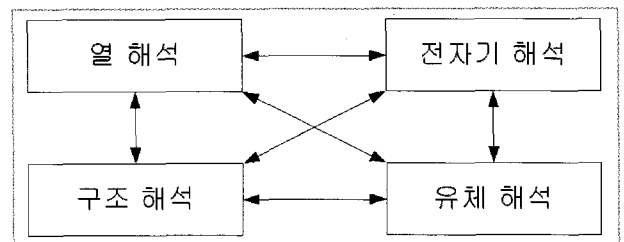


그림 2 서로 다른 물리 시스템간의 연성해석 종류의 예

기계공학 분야에서 다중 물리 시스템은 일반 기계 구조물에서 열, 구조, 유체 역학 등을 동시에 고려해야 하는 복잡한 시스템을 일컫는다. 그림 2는 현재 산업계에서 필요성이 대두되는 다양한 물리 시스템의 연성해석의 사례를 나타낸다. 학계 및 산업계에서도 대부분 이들 물리 시스템간의 상호 연성 해석에 대한 연구가 진행되고 필요성이 있다. 현재 상용 CAE 소프트웨어들도 이러한 물리시스템간의 상호 연성 해석 기능에 대해 연구하고 제품을 출시하고 있다.

베어링 관련 해석 이론

기계 시스템이나 항공 우주 시스템에서 많이 사용되는 터보 기계, 블레이드와 같이 실제 동적 회전을 하는 회전체의 경우 베어링의 사용이 필수적이다. 이러한 베어링의 역할은 추과 하우징 사이에 하중을 지지하고 최대한 마찰손실을 줄이면서 회전이 가능하도록 하는 것이다. 따라서 이러한 베어링에 관한 연구는 추과 하우징 사이의 접촉에 의한 마찰의 특성을 분석하는 것이 매우 중요하며 트라이볼로지(Tribology)의 한 분야로 그 중요성이 계속 대두되고 있다. 트라이볼로지라는 용어는 원래 마찰(rubbing)을 의미하는 그리스어의 'tribos'로부터 유래되었다. 그러므로 용어 자체로 해석하면 '마찰학'으로 이해될 수 있으며, 총체적인 의미로는 '마찰, 마모, 윤활학'으로 해석된다. 사전적 의미는 "상호 운동하는 표면과 연관된 물체 및 현상을 연구하는 학문이나 기술"을 의미한다. 트라이볼로지는 기계 제품 전반에 걸친 각종 기계장비들의 마찰, 마

모, 윤활을 분석 연구하는 응용학문 분야로서 물리, 화학, 응용수학, 고체역학, 열역학, 열전달, 재료공학, 물성학, 윤활, 기계설계, 신뢰성공학 등의 다양한 관련 분야들에 대한 이해를 필요로 한다.

전통적으로 Hertz의 접촉 이론이 그림 3과 같이 베어링에서 발생하는 두 탄성체간의 접촉 하중 및 영역에 대한 해석에 널리 이용되고 있다. 고속 회전하는 경우에는 내륜과 외륜의 접촉부에 대한 마찰해석이 매우 중요하며 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 따라서 베어링에 대한 연구는 접촉 해석 외에 윤활 해석이 동시에 이루어져야 할 것으로 판단된다. 베어링의 윤활해석은 오랫동안 많은 연구가 진행되어 왔고 앞으로도 꾸준히 연구되어야 할 연구 분야로 사료된다.

윤활의 목적은 상대운동을 하는 물체를 전단력이 적은 윤활막에 의하여 분리시킴으로써 표면의 손상을 방지하는 것이다. 윤활을 위해 적정량의 유체를 주입한 후에 압력이 발생하여 탄성체에 변형을 가하고 동시에 하중을 지지할 수 있어야 한다. 이러한 윤활 이론은 유체역학의 이론에 바탕을 두고 있다. 예를 들면 Reynolds는 유체를 뉴턴유체, 비압축성, 층류, 점도 일정 등을 가정하여 Navier-Stoke 방정식에 적용한 후에 연속 방정식과 조합하여 Reynold 방정식을 얻었다. 또한 점 접촉이나 선 접촉을 하는 윤활 상태에서는 그 접촉 면적이 극단적으로 작아 매우 높은 압력이 발생하게 되고 그 압력에 의해 접촉면에 탄성변형이 일어난다. 이러한 경우처럼 접촉면에 무시할 수 없는 탄성 변형이 발생 하는 윤활 상태를 탄성유체윤활(EHL; Elasto-Hydrodynamic Lubrication)이라고 정의한다.

일반적으로 윤활은 그림 4의 스트라이벵 곡선(Stribeck curve)에서 보는 바와 같이 윤활막 두께와 표면의 조도에 따라 유체윤활, 혼합윤활, 경계윤활로 분류할 수 있다. 스트라이벵 곡선은 가로축의 $\eta N/P$ 를 베어링 특성치라고 하며 이들은 점도(η), 축의 회전수(N), 그리고 축의 단위면적당 압력(P)으로 구성되어 있다. 즉 베어링의 윤활 해석에서 동역학적인 인자가 매우 중요함을 알 수 있다.

따라서, 그림 5와 같이 베어링의 윤활해석은 탄성체에 대한 변형, 유체 역학, 그리고 회전을 고려하는 동역학 해

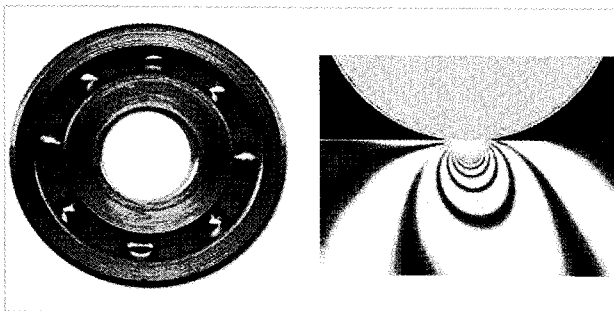


그림 3 볼 베어링 및 광탄성 방법에 대한 접촉부위 응력 분포 가시화

석, 즉 다물체 동역학(MBD; Multi-Body Dynamics)과 탄성유체윤활 해석의 연성해석 고려가 필수적이다. 그러나 이들을 동시에 고려하여 다중 물리 시스템의 해석하는 것은 매우 드물며 현재까지도 구현하기가 쉽지 않은 문제로 생각된다.

기존의 연구들은 회전체에 대한 동역학 또는 다물체 동역학 해석, 탄성유체윤활 해석이 별개로 진행되어서 연구가 진행되어 왔다. 그러나 고품질의 회전체 기계시스템 설계를 위해서는 회전하는 구조물을 지지하는 베어링의 다중 물리 해석(Multi-Physics Analysis)이 반드시 필요한 실정이다.

다물체 동역학

다물체 동역학은 여러 물체들이 조인트로 연결되어 이루어진 기계 시스템에 대한 동역학 해석이다. 산업 현장에서 사용되는 대부분의 움직이는 기계 시스템은 다물체 시스템이므로, 다물체 동역학은 산업 제품 개발에 필수적인 학문이다. 그림 6은 다물체 동역학의 예로서, 널리 사용되는 물체들간의 조인트 종류를 나타낸다. 다물체계의 형상을 정확히 표현하기 위해서는 계에 포함된 각 물체의 위치 및 자세가 정확히 기술되어야만 한다. 좌표계는 크게 상대 좌표계와 절대좌표계로 나뉜다. 최근에는 다물체 동역학의 해석 분위가 강체뿐만 아니라 탄성체 해석까지 포함시키는 것이 일반적이며, 탄성체에서는 선형뿐만 아니라 비선형 효과까지 포함한 탄성체 해석까지 확대되고 있다.

다물체 동역학과 베어링의 탄성유체 윤활 해석 연성

그림 5와 같이 회전하는 기계 부품에 사용되는 베어링의 정확한 설계를 위하여 다물체 동역학과 전통적인 베어링 윤활해석이 연계된 해석이 최근에 진행되고 있다. 전통적인 탄성유체 동역학적 윤활(EHD; Elasto-Hydrodynamic Lubrication)은 일반적인 베어링 동역학을 기반으로 베어링 해석, 접촉압력하에서도 유막 두께 및 압력 분

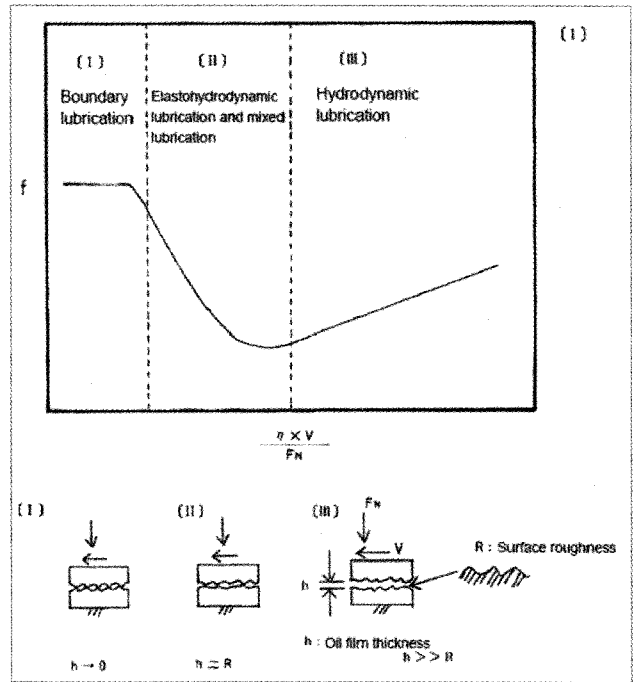


그림 4 Stribeck 곡선

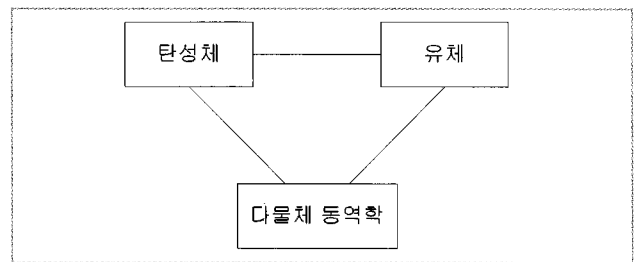


그림 5 다물체 동역학과 탄성유체윤활 이론의 연성

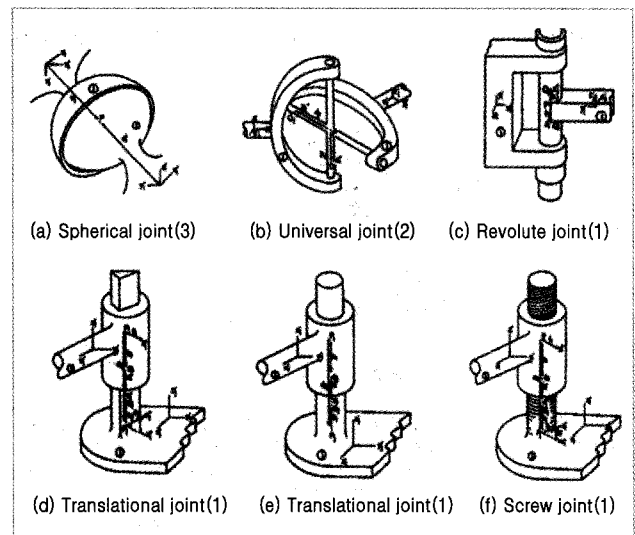


그림 6 다양한 조인트의 사례(4)

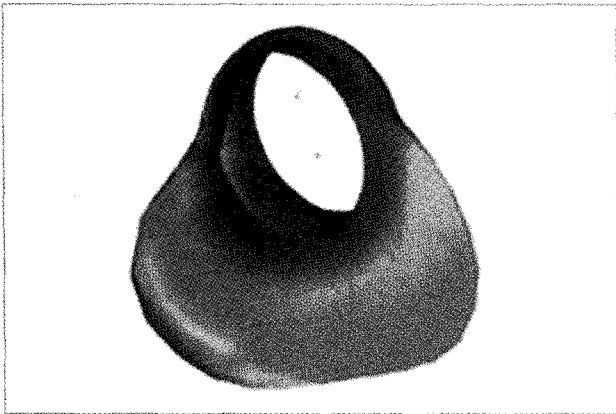


그림 7 베어링 주위의 압력 분포⁽⁴⁾

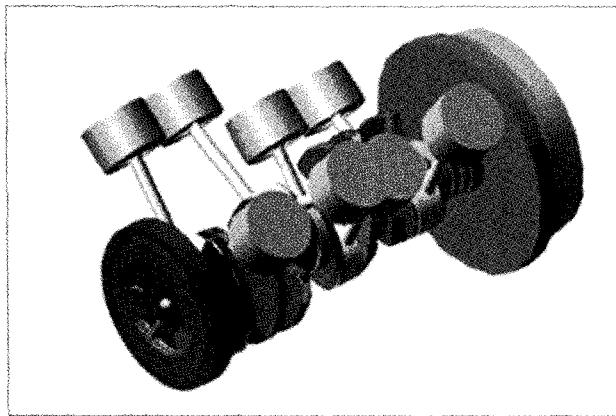


그림 8 회전하는 엔진 시스템에 장착된 베어링 해석⁽⁴⁾

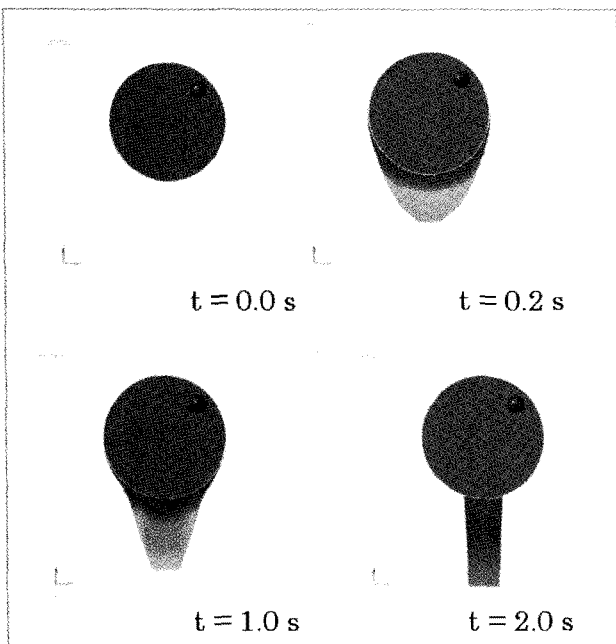


그림 9 회전 시 베어링 압력 분포의 변화

포, 베어링 하우징 부위의 국소 탄성 변형, 베어링 탄성 및 감쇠 계수 영향 분석 등이 주요 관심사이다.

탄성유체 동역학적 윤활과 다물체 동역학을 동시에 고려할 경우, 그림 8과 같은 엔진 시스템에 장착된 베어링에 대해서 작용하는 압력뿐만 아니라 회전하는 탄성체들의 변형, 응력 등을 360도 회전하는 조건에서 매 시간마다 계산할 수 있다. 그림 9는 매 시간마다, 즉 회전함에 따라, 달라지는 베어링의 압력 분포를 나타낸다.⁽⁵⁾

맺음말

기계 시스템이나 항공 우주 시스템에서 많이 사용되는 터보 기계 또는 블레이드와 같이 실제 동적 회전을 하는 회전체의 경우, 장착된 베어링에 대해서 전통적인 탄성유체 동역학적 윤활 해석(EHD)뿐만 아니라 회전체 구조물에 대한 동역학, 구조해석 및 열유동 해석도 필수적이다. 기존의 연구들은 회전체에 해석이 별개로 진행되어서 연구가 진행되어 왔다. 그러나 고품질의 회전체 기계시스템 설계를 위해서는 회전하는 베어링 구조물에 대한 유체-탄성체-다물체 동역학을 동시에 고려하는 다중 물리 해석 (Multi-Physics Analysis)이 반드시 필요하고, 이에 대한 학계의 관심이 필요하다.

참고 문헌

- (1) ANSYS User's Manual ver. 11.0, www.ansys.com.
- (2) 트리보솔루션, www.tribology.co.kr
- (3) 최동훈, 탄성유체윤활이론을 적용한 볼 베어링 역학, 기계학회지, 29권, 3호, 1989.
- (4) 유완석, 다물체 동역학 해석 방법 및 발전 추세, 2000년도 춘계기계학술대회 초록, 51-65., 2000.
- (5) FEMFAT User's Manual ver.4.6, 2007
- (6) 이정희, 김재형, 김창완, 유체-다물체 동역학 연성해석을 통한 베어링 윤활해석, 2008년도 추계기계학술대회 초록, 2008.