

다중물리 시스템의 전산해석

이재연 | 알트소프트 기술지원팀, 연구원 | e-mail : lee.jy@altsoft.co.kr

이 글에서는 다중물리(Multiphysics) 해석에 대한 전반적인 사항들을 살펴보고, 연성해석 분야에서 널리 사용되고 있는 COMSOL Multiphysics의 해석능력에 대하여 나타내고자 한다. 다중물리 해석이 필요한 이유와 적용분야, 해석 시 고려사항, 해석 방식 등에 대하여 전반적으로 소개하고자 한다.

물리분야 학문의 목적은 자연계의 구조를 이해하고 자연현상을 설명하는 데 있을 것이다. 물리분야는 천체물리, 분자물리 등과 같이 자연현상의 크기에 의해 전통적으로 나누어지기도 하고, 현대 과학에서는 전자기학, 유체역학, 양자역학 등과 같이 적용분야별로 나누어지기도 한다.

서로 다른 적용물리분야들을 통해 규정지어진 자연현상들은 각 분야들의 기본 물리 법칙들에 의해 표현될 수 있다. 예를 들면 유체의 흐름은 에너지 보존, 질량 보존, 모멘텀 보존 법칙 등을 통해 표현될 수 있다. 즉 물리법칙(Law of Physics)이란, 자연현상을 묘사하기 위해 정해놓은 기본 규칙이라 할 수 있다.

물리법칙들을 표현하는 정확한 방법 중의 하나는 미분방정식들을 이용하는 것이다. 미분 방정식들은 시간 및 공간에 대한 상태의 변화를 기본 물리법칙에 근거하여 표현한다.

우리가 미분방정식을 풀 때마다 우리는 결과의 특성에 대한 새로운 부분들을 얻게 되고, 묘사하고자 하는 현상과 방정식에 대한 진정한 이해를 하게 된다. 즉 해(solution)의 분석을 통하여 현상 및 과정에 대한 이해가 향상되고, 이는 설계 및 적용의 빠른 진전으로 이어질 수 있다.

전산해석의 목적은 미분 방정식들을 수치해석적인 방법으로 풀어내어 이런 해(solution)들을 제공하는 데 있다. 그림 1에 다중물리 해석의 개념을 보여주고 있다.

다중물리 해석의 개요

앞서 언급된 전산해석의 목적을 실제 자연현상을 대상으로 적용해보면, 이것이 바로 다중물리(Multiphysics) 시스템에 대한 전산해석이 된다. 왜냐하면 자연현상들은 서로 연관되어 동시에 일어나는 경우가 많고, 이것은 결국 각 현상을 대표하는 미분방정식들을 연성하여 풀어야 한다는 것을 의미하기 때문이다.

실제 현상계의 시스템을 모델링 할 때(그림 2), 많은 적용 대상들이 서로 다른 물리영역간의 상호작용을 포함해야 할 필요성이 있으며, 이는 결국 편미분방정식들(PDEs)의 시스템을 수반한다. 예를 들면 도체의 전기저항은 종종 온도에 의해 변하게 되고, 이로 인해 도체 전류의 흐름에 있어서 저항가열(resistive-heating)의 영향을 포함해야만 한다. 즉 전계(electro)해석은 열(thermo)해석과 연관

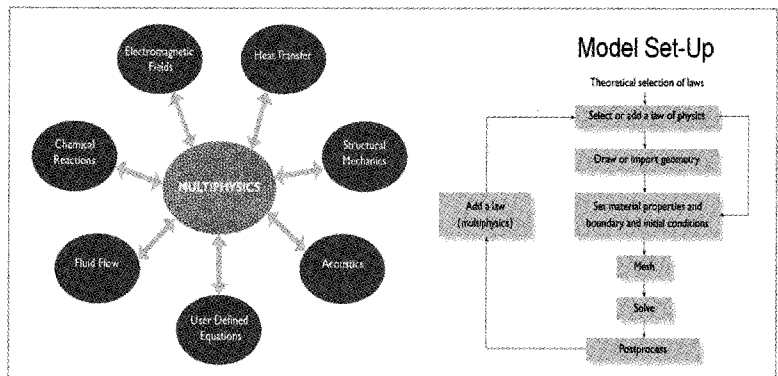


그림 1 다중물리 해석영역(좌)과 일반적인 모델링 작성 순서(우)

다중물리 해석이 필요한 이유를 한 마디로 요약하면, 자연현상에 더욱 가까운 시뮬레이션이기 때문이다. 어떤 대상에 대하여 다중물리가 고려된 모델링의 생성 및 해석이 가능하다면 이는 실제 환경에 대한 실험이나 테스트의 수요를 감소시킬 수 있게 되고, 곧바로 개발비용의 절감으로 이어질 수 있게 되어 더욱 효율적인 운용이 가능하게 된다. 또한 특정 시뮬레이션에 대한 자체(in house) 코드 작성의 필요성을 크게 감소시킬 수 있어, 이를 통한 시뮬레이션 작업에 대한 비용절감효과를 가질 수 있다. 결국 다중물리해석 모델링은, 시스템 레벨 모델링으로 가기 위한 최종 단계라고 표현할 수 있으며, 이는 COMSOL Multiphysics가 추구하는 바이기도 하다.

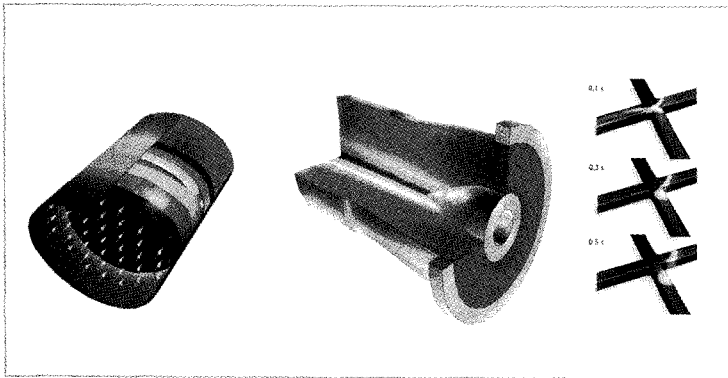


그림 2 다중물리해석 예제 : 디젤엔진 필터(열-유동-화학반응), 노즐(음향-유동), 동전기(electrokinetic) 밸브(전기-유동-화학반응)

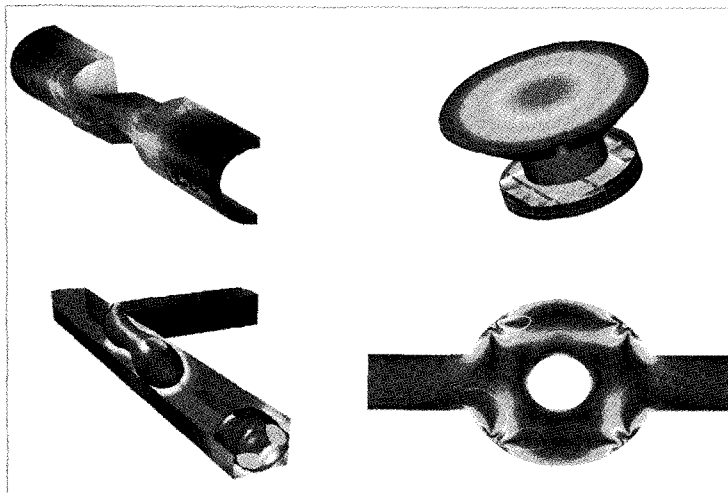


그림 3 다중물리해석 예제 : 접촉 해석(구조-전기-열), 압전소자 스위치(전기-구조), 방울 분리(다상 유동), 전기삼투 마이크로 펌프(전기-유체)

될 때 자연현상과 더욱 가까워지게 된다.

이런 부분에 있어서 COMSOL Multiphysics는 독창적인 작업환경을 제공하고 있으며, 이는 더욱 확장된 다중물리로서 쉽게 적용이 가능하다.

연성해석이 적용되고 있는 대표적인 분야들에는 아래와 같은 것들이 있다.

- 전자기-구조 연성해석 : 정전기 작용(Electrostatic actuation), 압전효과(Piezoelectric effect), 압전저항효과(Piezoresistive effect), 전기용량 계산
- 전자기-열 연성해석 : 저항열(Resistive heating), 온도에 영향을 받는 전기적 재질 특성
- 열-구조 연성해석 : 열팽창(Thermal expansion), 열탄성 댐핑(Thermo-elastic damping)
- 유동-구조 연성해석 : 유동-구조 상호작용(FSI, 구조-압력 커플링)
- 전자기-유동 연성해석 : 전기유체역학(EHD; Electrohydrodynamics), 자기유체역학(MHD; Magnetohydrodynamics), 동전기(Electrokinetic)
- 열-유동-화학반응 연성해석
- 전자기-열-구조 연성해석
- 전자기-열-구조-유동 연성해석

위에 언급된 해석분야들을 위하여 COMSOL Multiphysics는 전·후처리가 포함된 솔버(solver)와 함께 총 12개의 해석영역별 모듈을 제공하고 있다. 이 모듈들은 자체적인 기능들뿐만 아니라, 사용자의 필요에 따라 다른 모듈들과 무제한 연동하여 사용할 수 있다.

물리현상 해석의 선택

그림 3과 같은 물리현상에 대한 수치적 모델링은 적절한 물리법칙의 선택, 모델 구성, 해석,

결과의 확인, 모델의 검증 등의 과정으로 이루어진다.

모델을 구성하는 물리법칙의 선택이 서로 다른 두 개 이상의 물리분야에서 이루어졌다면, 그 모델을 다중물리 모델이라 할 수 있다. 다중물리 모델링의 경우에는 모델을 구성하는 과정에서 물리영역 서로간의 상호작용이 포함되어야 한다. 이는 주로 해석도메인의 물성(property) 및 경계조건(boundary condition)을 통하여 고려될 수 있다. 상호작용의 원활한 포함을 위하여 아래의 부분에 대한 고려가 필요하다.

첫째로, 여러 물리분야의 조건들을 동시에 고려할 수 있는 일괄된 작업환경이 필요하다.

기존의 전형적인 해석 분야인 유체, 전자기, 구조 해석 등의 단일영역 시뮬레이션 시에는, 수치해석으로 얻어지는 결과의 타당성만 어느 정도 보장이 되면, 사용자는 시뮬레이션 툴(tool)의 사용 환경이 불편하다고 하더라도 이 부분을 감소하였고 크게 비효율적이지 않았다. 그러나 고려해야 할 물리적인 상황들이 많아지는 경우에는 수치해석 모델링을 작성하는 것부터가 하나의 일이 되어버린다. 툴(tool)의 사용 환경의 습득에 시간을 할애하기보다는 풀려고 하는 모델링에 집중할 수 있는 직관적인 사용 환경이 요구되는 이유가 여기에 있다. COMSOL Multiphysics의 가장 큰 장점 중의 하나가 바로 이것이다. 해석 도메인 간, 물리영역 간 구분 없이, 모든 작업을 하나의 작업창에서 일괄적으로 진행 할 수 있다.

둘째로, 통합 환경 하에서 다중물리 모델링을 진행하는 경우에는, 여러 분야들을 다룰 수 있는 범용솔버(general purpose solver)가 필요하다.

다중물리 해석에는 다양한 솔버가 필요하다. 해석 대상의 수학적 타입이나 모델링 되었을 때의 연산 크기가 다양하게 변할 수 있기 때문이다.

솔버는 크게 나누어 반복솔버(iterative solver)와 직접솔버(direct solver)가 있을 수 있고, 다양한 하부 preconditioner들의 선택에 따라 다수의 솔버 조합이 나올 수 있다.

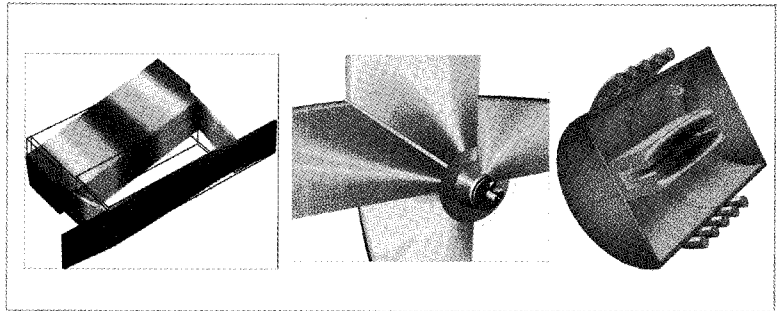


그림 4 다중물리해석 예제 : 필름 댐핑(유체-구조), 라우드스피커(전기-구조-음향), 유도 가열로(전기-열)

이를 위해, 최적의 솔버 선택을 위해 자동으로 모델의 특성을 파악하는 범용(general-purpose) 솔버를 위한 하나의 일괄된 인터페이스를 구성하는 것을 중심으로 COMSOL의 솔버는 디자인 되었다.

셋째로, 다중물리 시뮬레이션의 특성상 고정된 작업환경보다는 유연한 환경이 필요하다.

다중물리 모델링을 구성하기 위해서는, 두 개 혹은 그 이상의 물리영역이 하나의 모델링에 포함되어야만 한다. COMSOL은 독자적인 인터페이스를 이용하여 이런 부분을 제한 없이 수행할 수 있다. 모델링에 필요한 물리영역 및 개수를 사용자가 필요에 따라서 능동적으로 선택하여 조합할 수 있다.

만약 사용자가 적합한 편미분 방정식을 선택할 수 없으면, 'PDE 모드' 라는 부분을 이용하여, 직접 방정식을 정의할 수 있다. 이를 이용하여 COMSOL Multiphysics가 제공해드리는 지배방정식들 및 경계조건 이외의 것들도 사용자가 능동적으로 포함하여 시뮬레이션을 모델링을 구성할 수 있다. 즉, 수식에 대한 유연성을 통하여, 상용 시뮬레이션 툴이 업그레이드 되기를 기다리지 않고, 사용자가 능동적으로 대처할 수 있는 환경을 제공하고 있다.

다중물리 해석의 적용 방법

해(solution)를 얻어 나가기 위한 관점에서 보면, 다중물리 모델링의 해석 방법은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있을 것이다. 하나는 동시적(simultaneous)인 방법이고, 다른 하나는 순차적(sequential)인 방법이다.

순차적(sequential)인 방법과 동시적(simultaneous)인 방법 모두 각각의 장단점이 있을 것이다. 동시적인 방법은 상대적으로 쉽고 편리하게 다중물리 시스템을 모델링할 수 있고, 물리영역간 별도의 인터페이스가 필요 없으므로 불필요한 수치적 에러를 발생시키지 않는 장점이 있을 수 있지만, 상대적으로 많은 메모리 사용량으로 인하여 큰 시스템 리소스(resource)를 필요로 하는 단점이 있다. 반면 순차적인 방법은 동시적 방법과 상반되는 장단점을 가지고 있으며, 더욱 큰 문제들의 다중물리 현상을 모델링 할 때, 시스템 리소스(resource) 사용 측면에서 유리할 수 있다. COMSOL Multiphysics는 두 방법 모두 적용 가능하며, 사용자가 이를 적절히 조절할 수 있다.

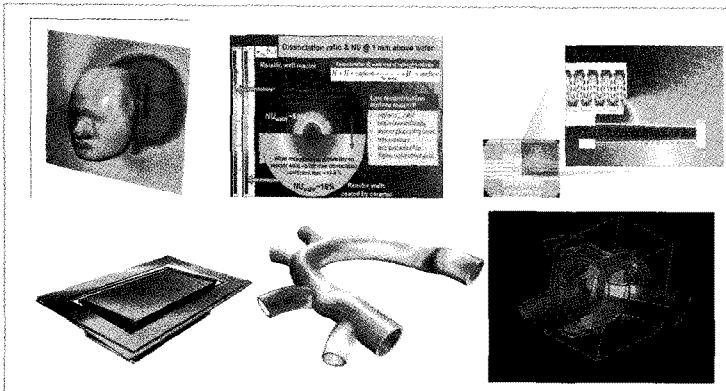


그림 5 다중물리해석 예제 : 전자파가열(RF-열), 플라즈마(전기-열-유동-화학반응), Comb드라이브(전기-구조), 센서(전기-열-구조), 혈관변화(유동-구조), 웨이브 가이드(RF-열-구조)

순차적인 방법은 해석 대상의 물리영역을 하나씩 순차적으로 풀고, 그 과정을 미리 정해진 수치적 에러의 허용치(tolerance)가 만족될 때까지 반복(iteration)하여 최종 결과를 얻어내는 방식이다. 일반적으로는 원인이 되는 물리현상을 먼저 풀고, 그 결과를 다른 물리영역의 초기 값(initial condition)으로 넘겨주어 반복계산을 진행한다.

몇 년 전부터 다중물리 해석에 대한 관심이 본격화 되면

서, 전자기·구조·열유동 등 단일 영역에서 주로 사용되던 전용 시뮬레이션 툴(tool)들도 다중물리를 지원해 나가는 방향으로 발전해 나아가고 있다. 자신들의 메인(main)해석 분야를 기반으로 하여 다른 해석영역을 지원하는 해석 툴들과 연계하여 진행하는 경우도 있고, 아예 다른 해석 영역의 툴들을 자신의 기본 환경에 통합하여 발전해 나아가기도 한다. 양쪽 모두의 경우, 각각의 해석 영역에 대하여 서로 다른 수치해석 방법을 적용하는 별도의 솔버(solver)를 이용하는 것이 대부분이며, 서로 다른 환경을 가지는 그 결과들을 코드 커플링 인터페이스(code coupling interface)를 통해 주고 받으며 다중물리 해석을 진행한다. 이런 부분들이 순차적인 방법의 대표적인 사례들이다.

동시적인 방법은 해석 대상의 모든 물리영역 간 상호작용을 한 번에 고려하여, 그 결과로 생성된 미분방정식들(PDEs)의 시스템을 단일 행렬(matrix)에서 한 번에 해석해내는 방법이다. 따라서 해석 영역간 별도의 인터페이스가 필요 없고, 일단 해석이 시작되면 해(solution)가 나올 때까지 별도의 추가적인 과정을 고려하지 않아도 된다.

일반적으로 해석 대상이 크거나 아주 복잡한 다중물리 시스템인 경우에는 순차적인 방법이 유리할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 동시적 방법이 유리할 수 있다. 해석 시에는 사용될 하드웨어 시스템의 환경에 대해서도 필수적으로 고려가 되어야하기 때문이다.

COMSOL Multiphysics는 동시적인 방법을 기본으로 하나, 사용자의 필요에 의하여, 순차적인 방법을 같이 포함할 수 있는 환경을 제공하고 있다.