

상용 CFD 코드의 Multiphysics 해석

이재연 · (주)알트소프트 기술지원팀, 팀장

_e-mail : lee.jy@altsoft.co.kr

이 글에서는 다분야 연성해석(Multiphysics)이 필요한 대표적인 해석영역인 MEMS분야에서 널리 사용되고 있는 COMSOL Multiphysics의 해석능력에 대하여 표현하고자 한다. 마이크로 유동학(Microfluidics)과 BioMEMS 영역을 포함하여 센서 및 액추에이터(actuator)와 관련된 해석 영역을 전반적으로 소개하고자 한다.

1980년대에 발전한 반도체공정기술을 이용하여 마이크로(10^{-6} 미터) 단위의 초소형 기계구조물을 제작할 수 있게 되면서, 여러 전기적인 현상과 기계적 현상을 개별적 혹은 종합적으로 이용하여 특정한 기능을 수행하는 소형화된 장치를 의미하는 MEMS(Micro-Electro

Mechanical System ; 미소 전기기계 시스템)이 탄생하였다. 이 기술은 거의 모든 분야에서 응용이 가능하며 현재는 기계, 전기전자, 화학, 물리, 재료, 생체과학 등의 다양한 학문분야에 적용이 증가하는 추세이다. 특히 마이크로 유동학(microfluidics) 및 BioMEMS 분야와 관련하여서는

잉크젯 프린터, 마이크로 열교환기, 각종 센서 및 액추에이터, 바이오칩(bio-chip), 약물전달 시스템(drug delivery system), 미세종합분석 시스템(μ -Tas ; micro total analysis system) 등에 폭넓게 사용되고 있다.

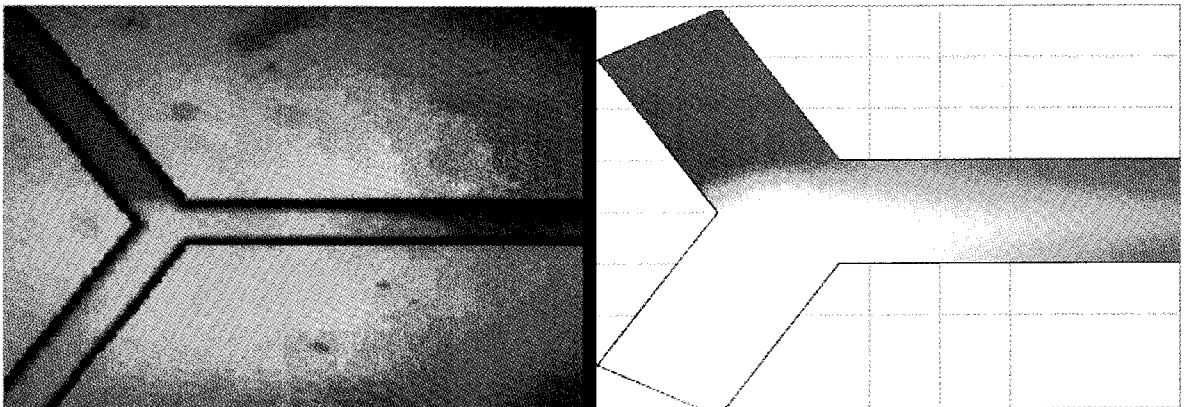


그림 1 Y형 마이크로 채널에서의 유동 유동확산에 대한 실험과 시뮬레이션의 결과 비교

MEMS 장치들의 멀티피직스(Multiphysics) 성격은 시스템 설계자에게 여러 물리분야에 대한 방대한 이해와 지식을 요구하게 한다. 왜냐하면 어떤 마이크로 스케일의 현상들은 큰 스케일에서 나타나는 현상들과 완전히 새롭거나 달라서, 엔지니어들은 시스템 설계에 대한 새로운 체계가 필요하기 때문이다. 그들은 큰 스케일에서 했듯이 하나의 디자인 시스템을 여러 개로 분리하여 각각에 대하여 전담하여 연구하기가 힘들다. 따라서 MEMS 분야의 엔지니어는 몇 가지 물리영역을 동시에 다루는 -COMSOL Multiphysics와 MEMS 모듈이 그리하듯 - 진정한 의미의 시스템 엔지니어이다.

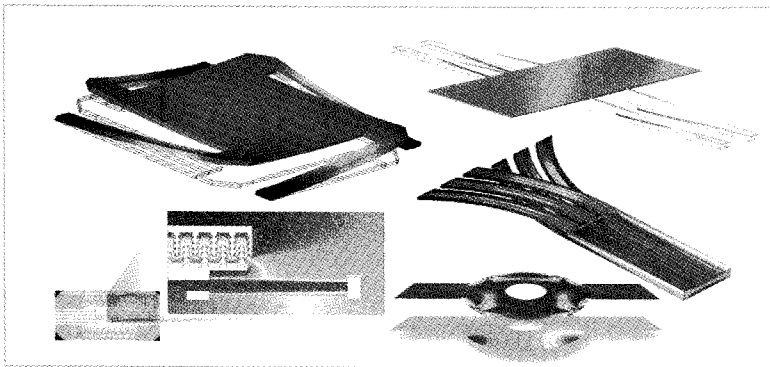


그림 2 각종 MEMS 장치들에 대한 시뮬레이션 예제들

MEMS 분야에서의 전산해석

앞서 언급된 것처럼 MEMS가 초소형의 전기-기계 부분으로 구성된다는 것은 일반적인 상식이 되었다. 그러나 모든 엔지니어들이 대부분의 MEMS 장치들이 서로 다른 여러 물리분야들을 수반하여야(Multiphysics) 한다는 사실을 아는 것은 아니다.

최소한의 의미로서 MEMS 장치는 전기적이거나 기계적인 물리분야를 수반한다. 그런데 이 각각의 분야들은 열적 현상이나 전기화학

적 효과 등에 의해 서로 커플 될 수 있으며, 이 경우에는 제3, 제4의 물리현상이 시스템에 더 해지게 된다. 연구와 산업의 양쪽 영역에서 MEMS의 선구자들은 모델링과 제조에 대한 몇 가지 도전들을 해결해 왔다. 그들은 수치해석적인 방법을 이용하여 MEMS 장치들의 거동을 해석하는데 기존의 상용 툴(tool)들을 사용하여 도움을 받아왔다. 또한 지금이 MEMS 분야에서 유한요소 기반의 훌륭한 수치해석 솔버가 새롭게 소개될만한 적절한 시기임이 분명하다.

MEMS 분야의 시뮬레이션 중

에서, 대표적으로 필요한 연성해석의 분야에는 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, 구조-압력 커플링
 - 동전기(electrokinetic) : 전기삼투(electroosmosis), 전기영동(electrophoresis), 유전영동(dielectrophoresis)
 - 열-유동-화학반응 연성해석
 - 전자기-열-구조 연성해석
 - 전자기-열-구조-유동 연성해석
- 위에 언급된 해석분야들을 위하여 COMSOL Multiphysics는 MEMS 모듈 자체적인 기능을 뿐만 아니라, 다른 모듈들과 연동하여 사용할 수 있다.

MEMS 분야에서의 유동 관련 연성해석

MEMS 구조물에서의 마이크로 유동은 매우 좁은 유로를 지나가는 경우들이 많이 있는데, 이 경우에는 기존의 유동현상과는 다른 물리화학적 거동을 나타낸다. 마이크로 유동은 일반적인 유동 현상과 비교하여 표면적 대비 체적이 훨씬 크기 때문에 중력이나 관성보다는 점성력이나 표면장력 등과 관련된 힘이 크게 작용하게 된다. 마이크로 유동과 관련된 대표적인 사례들을 살펴보기로 하자.

앞서 언급한 것처럼 마이크로 유동은 점성력이 지배적이기 때문에 보통의 유동과 같이 압력차에 의해 유동을 생성하기 어렵다. 따라서 유동을 구동(actuation) 하기 위하여 다른 방법들이 이용되는데 그 중 그림 3은 전기삼투(electroosmosis) 등을 포함하여 동전기(electrokinetics)와 관련된 모델들을 나타낸다. 전기삼투는 하전된 고체표면과 접하고 있는 전해질 용액에 전기장을 가해주면 용액의 벌크(bulk) 움직임이 일어나는 현상을 말한다. 실리콘이나 유리를 사용하여 만든 모세관은 전해질 용액과의 접촉에 의해 벽면이 음전하를 가지게 되고, 그 결과 전해질 용액내의 상대이온(counter-ion)들의 분포로 벽면주위에 전기 이중층(EDL; Electric Double Layer)이 형성된다. 이로 인해 정전위 분포가 형성되는데 이를 제타 전위(zeta potential)이라고 한다. 이 전해질에 전기장을 가해주게

기존의 전형적인 해석 분야인 유체, 전자기, 구조 해석 등의 단일 영역 시뮬레이션 시에는, 수치해석으로 얻어지는 결과의 타당성만 어느 정도 보장이 되면, 사용자는 시뮬레이션 툴의 사용 환경이 불편하다고 하더라도 이 부분을 감소하였고 크게 비효율적이지 않았다. 그러나 MEMS 분야처럼 고려해야 할 물리적인 상황들이 많아지는 경우에는 수치해석 모델링을 작성하는 것부터가 하나의 일이 되어버린다. 툴의 사용 환경의 습득에 시간을 할애하기보다는 풀려고 하는 모델링에 집중할 수 있는 직관적인 사용 환경이 요구되어지는 이유가 여기에 있다. COMSOL Multiphysics의 가장 큰 장점 중의 하나가 바로 이것이다.

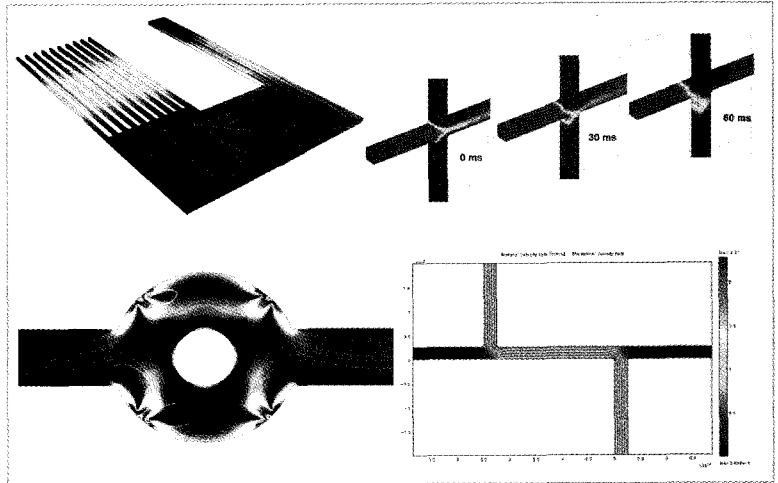


그림 3 전기삼투 마이크로 펌프, 동전기 밸브, 전기삼투 마이크로믹서, 전기삼투 바이오칩

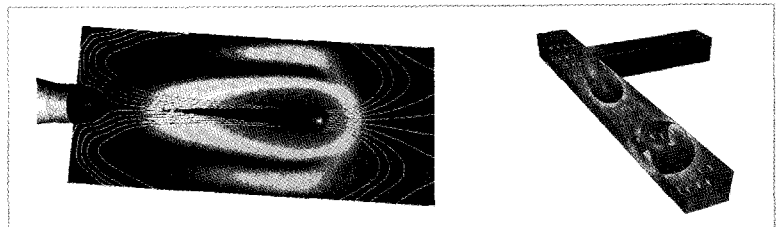


그림 4 이상(two phase) 유동: 잉크젯 방울, 방울분리(bubble separation)

되면 유동이 구동하게 되는 방식이다.

COMSOL Multiphysics 및

MEMS 모듈은 전자기장의 영향을 받는 이온용액의 흐름을 모사할 수 있는 기능들을 제공하고

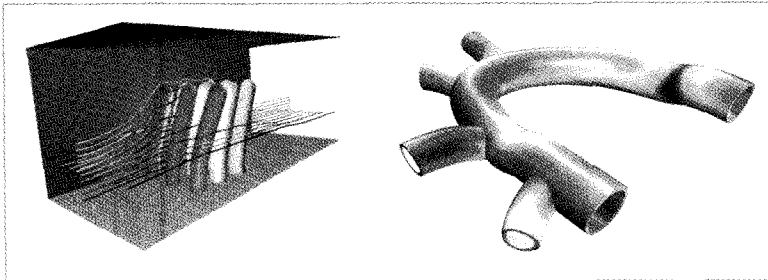


그림 5 유동-구조 상호작용: 여러 개의 대상 구조물, 혈액에 의한 혈관 변화

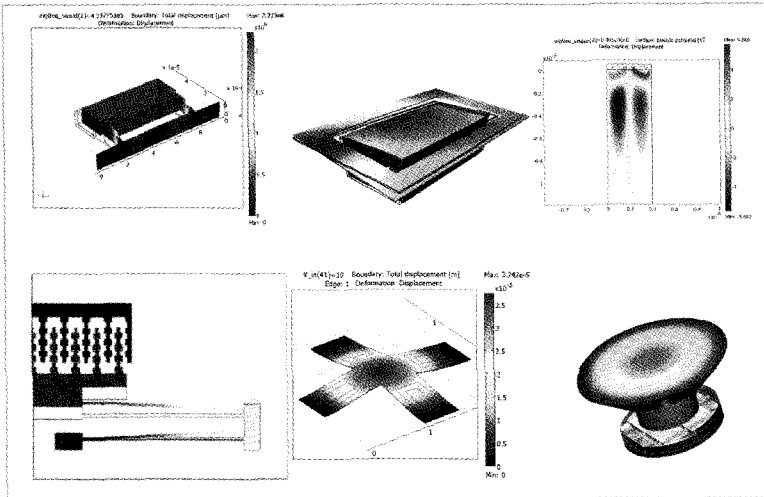


그림 6 자이로스코프, 센서, 표면탄성파 센서, 콤 드라이브(comb drive), 열-구조 밸브, 압전소자 등을 이용한 스위치

있다. 즉 확산 대류, 이온이동에 의한 부분을 포함하여 유체 및 전자기분야와 함께 이동현상을 시뮬레이션 할 수 있는 기능들을 제공한다.

그림 4의 이상(two-phase) 및 다상(multi-phase)해석에 대하여는 레벨셋(level-set) 방법을 이용하여 모델링을 구현할 수 있다. GUI 환경하에서 간단한 설정을 통해 상(phase) 사이의 인터페이스를 설정할 수 있다.

대표적인 연성해석의 한 분야인 유동-구조 연성해석(FSI;

Fluid-Structure Interaction) 또한 MEMS 모듈에서 이용할 수 있다(그림 5). FSI 해석 시에는 유동의 압력과 저항에 의한 총 힘(total force; pressure force+ viscous drag force)을 구조해석에 자동으로 넘겨주고, 구조해석의 결과로 얻어진 변위에 의한 변화된 위치에서의 노 슬립(no-slip) 조건을 유동해석이 자동으로 받아오는 형태로 구성이 된다. 양쪽 영역의 시뮬레이션을 순차적(sequential) 방법이 아닌 동시적(simultaneous) 방법으로

풀어내며, 필요한 경우 순차적 방법으로 풀 수도 있다.

MEMS 분야에서의 센서 및 액추에이터 관련 해석

모든 센서 및 액추에이터가 그러하지는 않지만 상당부분의 해석은 마이크로 유동과 직간접적으로 관련되어 있다. 가속계(accelerometer)나 자이로(gyroscope) 같은 대상은 구조물의 둘러싸고 있는 기체의 영향으로 필름 댐핑(film damping)에 의한 영향을 고려하여 시뮬레이션 할 수 있다.

구조물을 구동시키는 방법으로 사용할 수 있는 요인들 중에는, 전자기력에 의한 것과 열적 팽창-수축에 의한 것, 그리고 압전 소자(piezoelectric material)에 의한 것 등이 있다.

COMSOL Multiphysics 및 MEMS 모듈에서는 전자기장의 해석을 통하여 얻어진 전자기력(electromagnetic force)을 구조해석의 외력으로 사용하여 전자기-구조 연성해석을 시뮬레이션할 수 있고, 열 해석을 통해 얻어진 온도분포를 이용하여 열-구조 연성해석을 진행할 수 있으며, 또한 압전소자와 자체의 모델링뿐 아니라, 여기에 음향, 구조, 열 해석 등을 더 하여 연성해석을 구현할 수 있는 기능들을 제공하고 있다.