

# 다중물리 해석 프로그램: COMSOL Multiphysics

김찬홍\*

## 1. Introduction

오늘날의 복잡한 시스템에서 진정한 의미의 시뮬레이션은 하나의 모델로 되어있는 다중물리 (Multiphysics) 속에 서로 다른 물리현상들 간의 여러 가지 결합을 필요로 한다. 그러므로, 우리의 개발 정신의 중심은 하나의 일관된 인터페이스를 통해 모든 경우에 적용할 수 있는 일반화된 솔버 (solver)를 가지고 있는 소프트웨어를 만드는 것이다.

COMSOL Multiphysics는 편미분 방정식 (PDE)으로 구현된 물리현상을 시뮬레이션 할 수 있는 모델링 패키지 소프트웨어이다. 이 공학 분야의 실제현상에서 일어나는 복잡한 문제를 빠르고 신속하게 풀 수 있는 최고의 솔버 (solver)기능을 제공하고 있으며, 사용자 편의를 도모하도록 쉽고 간편하게 되어 있다.

1999년 FEMLAB이란 이름으로 스웨덴 COMSOL사에서 개발된 이후에 매년 40% 정도의 꾸준한 성장률을 보이며, 전 세계적으로 20,000 copy 이상이 보급되어 여러 연구 분야에서 사용되고 있다.

COMSOL Multiphysics는 하나의 물리현상은 물론, 다중물리 (Multiphysics)가 상호 작용하는 현상에 대한 모델링을 구현할 수 있다. 쉽게 사용할 수 있는 응용 인터페이스와 무제한적인 다중물리 연계, 그리고 유연성이 있는 모델 설정을 개발하는데 주력하였고, COMSOL 제품군을 확장하고 개발하는데 이와 같은 점들을 우선적으로 고려하고 있다. COMSOL Multiphysics에서 다중물리 현상 모델링은 그 자체가 간단해 졌다. 모든 종류의 물리현상은 모델 네비게이터(model navigator)라는 GUI환경을 통하여 지정할 수 있으며, 간단한 마우스의 클릭으로 다중물리 모델을 완성할 수 있고, 혹은 이미 정의되어 있는 다중물리 어플리케이션을 선택하여 모델을 만들 수도 있다.

이와 같은 기능은 일반적인 물리 현상만이 아닌 신소재, 에너지원, 생물공학, MEMS, 나노기술, 광전자 공학과 같은 새로운 기술을 개발하는데 응용할 수 있다.

## 2. COMSOL Multiphysics의 특징

2.1 처음부터 다중물리에의 적합성을 바탕으로 한 디자인인 COMSOL Multiphysics의 작업환경은 다중물리현상을 직관적이면서 구체적으로 표현할 수 있는 환경을 제공해 준다. 또한 전처리기 (preprocessor), 후처리기 (postprocessor), 솔버 (solver)가 한 환경에 통합되어 있다. Couple된 모든 equation을 순차적 (sequential)방식이 아닌 동시에 풀어줄 수 있으며, 이로 인해 모델 구성시 어떠한 형태의 물성이나 경계조건도 포함시킬 수 있다 (즉, 모든 해석 영역에 걸쳐 two-way interaction이 가능하다). 이를 바탕으로 실제 현상에 가장 가까운 조건들을 고려하여 시뮬레이션을 할 수 있다.

### 2.2 전문성을 지니면서 사용하기 쉬운 소프트웨어

전통적인 생각들 안에서 좀 더 진보적인 과학적 모델링을 이루기 위한 노력은 새로운 기술혁신을 창출해 낸다. 독창적인 편미분방정식 솔버와 각 응용 분야들 사이의 간편한 인터페이스는 사용의 편리성과 전문성을 잘 나타내어 준다. 이를 통해 유체-구조, 전자기-유체, 전자기-열-구조 등의 다분야 해석을 하나의 환경에서 모델링을 할 수 있다.

COMSOL Multiphysics에는 CAD파일 불러오기 기능에서부터, 제한이 없는 후처리 기능까지 모델링에서의 모든 과정이 완벽하게 구현되어 있다. 보다 진보적이고 상호적인 모델링을 위한 스크립트 언어는 소프트웨어의 다양성을 넓혀줄 뿐만 아니라, 이것은 설계와 모델의 최적화에 당신의 능력을 펼치는데 기여할 것이다.

\* Altsoft, 팀장  
E-mail : chkim@altsoft.co.kr

### 2.3 탁월한 유연성

COMSOL Multiphysics의 모듈은 equation별로 구분된 집합체이며, 각각의 모듈에 들어있는 equation간의 어떠한 조합도 가능하다. 이를 통해 사용자는 모델 구성 시 능동적으로 물리영역간의 조합을 구성 할 수 있다

또한 상용 package로는 유일하게, GUI환경 안에서 built-in 지배방정식을 원하는 대로 수정할 수 있으며, 제공되는 PDE form을 이용하여 새로운 지배방정식을 설정할 수도 있다.

자체 scripter를 통하여 MATLAB의 일부 기능들을 대체할 수도 있으며, MATLAB과의 interface도 유지되고 있다.

이런 기능들을 이용하여 창의적인 요소들이 필요한 연구에 능동적으로 대처할 수 있다.

### 2.4 솔루션을 찾기 위한 시간 최소화

COMSOL Multiphysics는 수치해석 연구자들이 가장 중요하게 생각하는 점 중의 하나인 '결과를 얻는데 걸리는 시간'을 줄여준다. 오늘날에 점점 복잡해지고 어려워지는 이·공학적인 응용문제를 간단하게 해석함으로써, 전반적인 공학적 효율성을 높여 준다.

또한 기하구조 형상, 물성치와 모델변수들의 파라미터 (매개변수)화를 이용하여 설계 컨셉들을 실험하고 검사하는 속도를 높여준다. 다시 말하면 COMSOL 제품들은 복잡한 이·공학 문제들을 해석하고 결과를 얻는데 걸리는 시간을 최소화한다.

## 3. COMSOL Multiphysics 구성 및 applications

COMSOL 제품군의 구성은 아래와 같다.

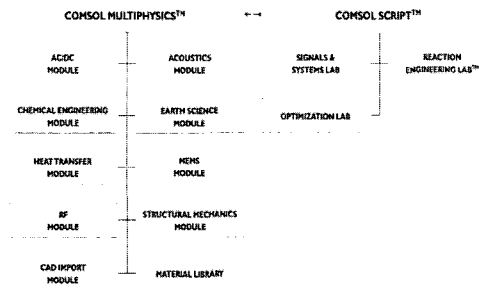


Fig. 1 COMSOL 제품군 구성도

### 3.1 CAD Import Module

CAD Import 모듈은 디자인에서 모델로의 과정을 능률화한다. 디자이너와 모형제작자 간의 긴밀한 협동은 기하학을 다룸에 있어서 좋은 툴을 필요로 한다. 이 유틸리티는 엔지니어들이 전문화된 CAD 툴로서 만들어진 기하학적 디자인에서부터 COMSOL Multiphysics에 있어서 수학적 모델링까지의 변환을 간소화한다. CAD Import 모듈은 Parasolid® 구조체 커널을 기초로 하며, SAT® 형식을 지원하기 위하여 ACIS®를 포함한다.

Product	Prerequisites	Formats	Format Native to CAD Software
COMSOL Multiphysics™		STL (.stl), VRML (.vrl), DXF (.dxf), IGES (.iges), (.glt), and NASTRAN	
CAD Import Module	COMSOL Multiphysics	STEP (.stp), IGES (.igs), SAT (.sat) and Parasolid (.x_b)	SolidWorks®, Solid Edge®, PDM®
CATIA V4 Import Module	CAD Import Module	CATIA V4 (.model)	CATIA V4
CATIA V5 Import Module	CAD Import Module	CATIA V5 (.catpart)	CATIA V5
Inventor Import Module	CAD Import Module	Inventor (.ipt)	Autodesk Inventor®
Pro/E Import Module	CAD Import Module	Pro/E (.prt, .asm)	Pro/ENGINEER®
VEA-FS Import Module	CAD Import Module	VEA-FS (.vda)	

CAD Import 모듈의 또 다른 최대 장점은 COMSOL Multiphysics와 SolidWorks® CAD 환경간의 생생한 라이브 연동이다. 이러한 특징은 SolidWorks에서의 디자인에 어떠한 변화에도 즉각 따르는 COMSOL Multiphysics 구조체의 실시간 업데이트를 가능하게 한다. 이러한 옵션 배열은 시작부터 끝까지 완성된 디자인과 모델링 과정을 능률화하는데 더 나은 유연성으로 나타난다.

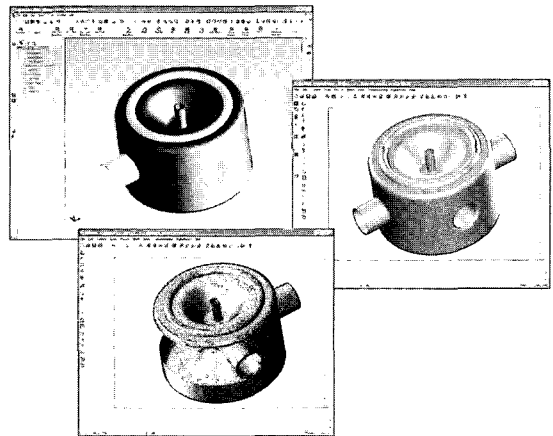


Fig. 2 CAD import module

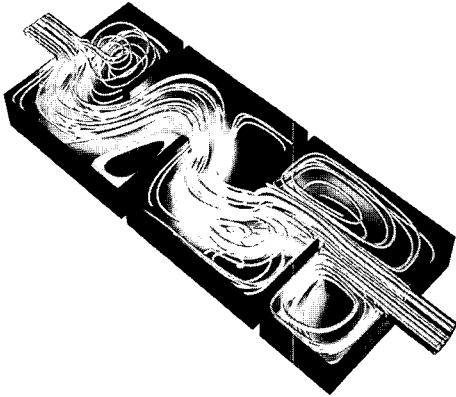


Fig. 3 Residence time in a turbulent reactor

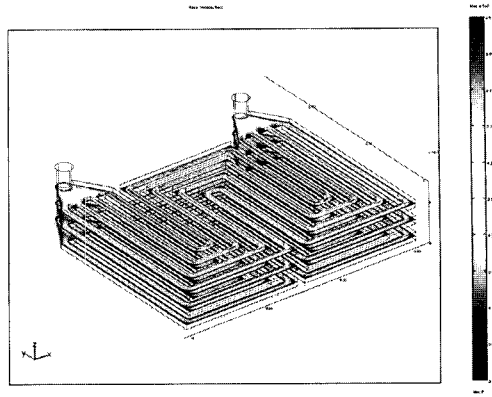


Fig. 5 Flow in a fuel cell stack

### 3.2 Chemical engineering Module

Bird, Stewart and Lightfoot가 쓴 이동현상 (Transport Phenomena)을 기반으로 한 화학공학 모듈은 프로세스와 밀접한 모델링을 위한 완벽한 툴이다.

특히 이동현상-CFD, 물질 전달, 열전달과 화학 반응간에 쉽게 연계되도록 설계되어 있다. 반응기, 여과, 분리장치, 열교환기, 화학 산업에 많이 사용되는 장비들의 모델링을 위해 모듈을 최적화하였다. 다른 모델링 인터페이스로 전기화학시스템 (가령, 연료전지)과 전기이동이나 동전자기 유동과 같은 전기장이 영향을 주는 현상을 고려하였다.

화학공학 모듈은 다중물리를 위한 COMSOL Multiphysics의 능력과 방정식기반의 모델링을 매끄럽게 결합시킨다.

### 3.3 Heat transfer Module

전도, 대류와 복사가 조합된 문제들은 열전달 모듈로 쉽게 해결된다. 이것은 여러 형태로의 열의 생성과 흐름을 포함하는 시스템에 폭넓게 사용된다. 다양한 전문 모델링 인터페이스는 표면 대 표면의 복사, 비등은 유체, 얇은 층과 막으로 된 구조에서의 열전달과 생물 조직에서의 열전달과 같은 용도와 다양한 형식으로 이용할 수 있다.

열전달모듈은 COMSOL Multiphysics에서의 다른 응용모드와 각각의 모듈과 다채롭게 결합을 할 수 있다. 이는 특히 전자산업에서 열관리와 열처리, 제조, 의학기술, 생체공학과 같은 분야에 적용 가능하다.

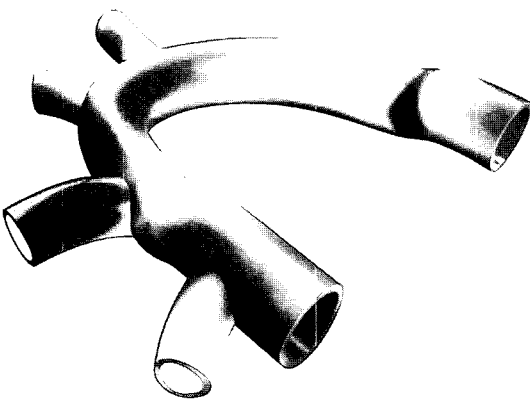


Fig. 4 Structural-fluid interaction in a network blood vessel

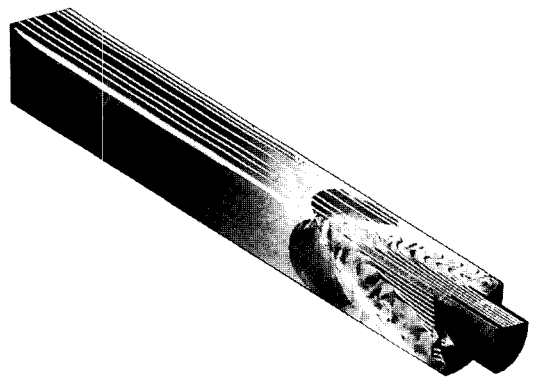


Fig. 6 Continuous casting of copper

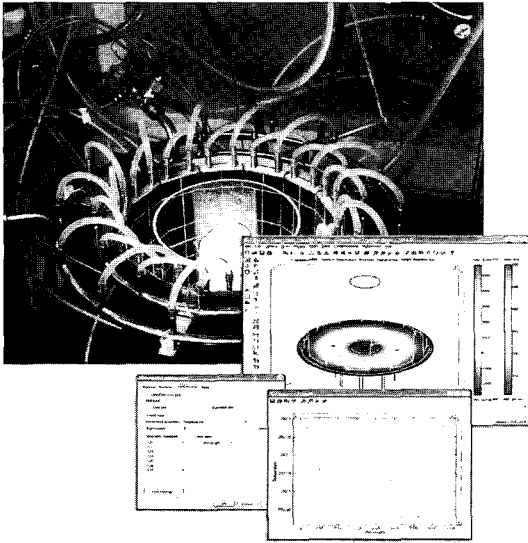


Fig. 7 A Thermal photovoltaic (TPV) device

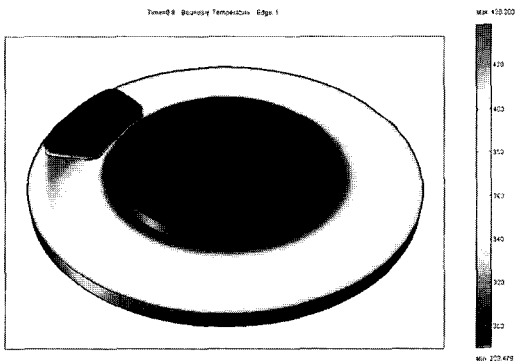


Fig. 8 Heat generation in a disk brake

### 3.4 MEMS Module

MEMS 모듈은 마이크로 세계에서 발생하는 디자인 이슈에 초점을 맞추었다. 이것은 액츄에이터 (actuator), 센서, 마이크로 유체공학과 작은 압전체에 일어나는 물리적 현상을 모델링한다.

대부분의 MEMS 분야는 당연히 다중물리적이며 대부분 전자기-구조, 열-구조, 유동-구조 (FSI), 전자기-유동 상호작용을 포함한다. 그런 이유로, MEMS 모듈은 이러한 상호작용이 요구되는 단일의 그리고 연동되는 물리 모델링을 위해 방정식과 최적화된 조건을 제공한다.

이 모듈은 고유주파수, 준-정적, 파라메트릭과 주파수 응답 분석 뿐만 아니라 정적상태와 시변 영역에 대한 분석을 포함한다.

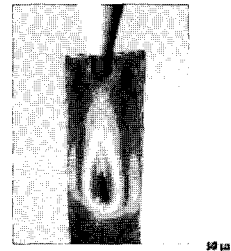
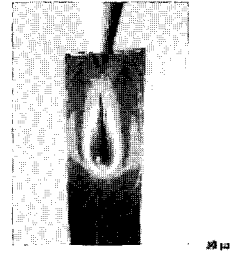
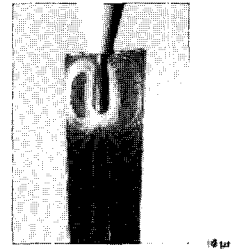


Fig. 9 Droplet release and velocity field from an ink jet

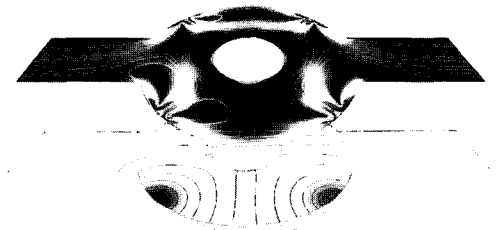


Fig. 10 Electroosmotic micromixer

### 3.5 Structural Mechanics Module

구조역학 모듈은 구성요소의 분석과 구조변형 평가가 필요한 하부시스템을 분석하는 모듈이다. 이것은 셸과 빔, 평판의 모델링을 위해 특정한 응용 모드를 포함한다. 이 모듈에서 응용모드는 정적인 것과 동적인 모델을 해결하며, 고유주파수, 파라미터해석, 준-정적과 주파수응답을 분석한다. 2차원 평면응력, 평면 변형 그리

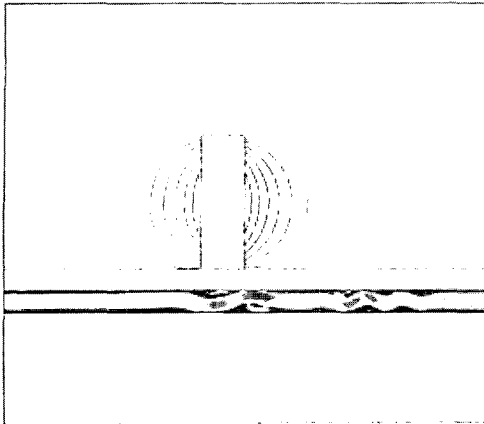


Fig. 11 Magnetic drug targeting in cancer therapy

고 축대칭 분석 뿐 아니라 3차원 구조는 탄소성과 대변형 해석의 물질법칙의 세부사항뿐 아니라 커다란 변형도 수용한다.

구조역학 모듈은 COMSOL Multiphysics와 다중물리 현상에 대한 구조적 해석을 연동시키는 다른 특정 모듈 과도 연동된다.

### 3.6 Acoustics module

음향 모듈은 특별히 음향을 만들고, 측정하고, 활용하는 장치를 다루는 사람들을 위해 설계되었다. 사용하기 쉬운 응용 모드는 움직이는 영역에서의 공력음향 뿐만 아니라 고체와 정적 유체에서의 음향 전달을 구현하는데 필요로 하는 모든 툴을 제공한다.

다중물리의 본질을 유지하면서, 음향 모듈은 음향의 움직임을 구조 역학, 유동 흐름과 같은 COMSOL에서

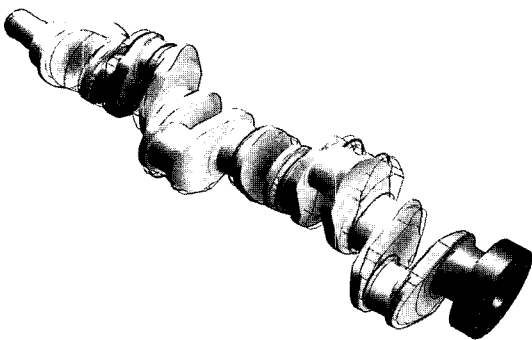


Fig. 12 Eigenvalue analysis of a crankshaft

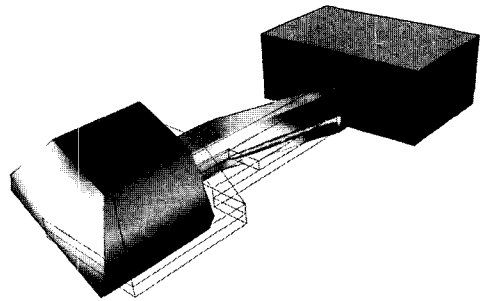


Fig. 13 Piezoelectric actuator

모델링된 다른 물리적 현상과 매끄럽고 직관적으로 결합한다. 강력한 솔버 (solver)와 쌍방향 메시 (mesh)로 정확하게 음파를 분석하도록 결합되어 있으며, 동시에 PML (Perfectly Matched Layers)과 far-field 프로세싱과 같은 내장형 툴은 문제 규모를 측정할 수 있는 레벨로 최적화한다.

이러한 기술혁신으로 음향모듈은 음향 모델링이 필요한 모든 것에 대해 세계적 수준의 솔루션을 제공한다.

### Key Features

- Pressure acoustics application mode
  - Transient
  - Time-harmonic, total field or scattered field
  - Modal analysis
  - Eigenfrequency analyses using eigenfrequencies, eigenvalues, or angular frequency
- Aeroacoustics
  - Compressive potential flow
  - Acoustics in ideal gas with irrotational mean flow
  - Predefined multiphysics coupling: aeroacoustics with flow
- Structural acoustics -linear plane strain, 3D solid, and axisymmetric stress-strain
  - Static, eigenfrequency, transient, and frequency response analyses
- Damping
  - Damping in fluids: complex materials, Delany-Bazley, bulk viscosity
  - Damping in solids: Rayleigh damping, loss-factor damping

- Perfectly matched layers (PMLs) for pressure waves in fluids and solids
- Far-field postprocessing

- Optional application-specific add-ons
- Excel® import/export

### 3.7 COMSOL Script and optional add-ons

모든 COMSOL Multiphysics 모델링 능력은 COMSOL Script를 통해서 이용 가능하다. 이것은 상호 GUI인 COMSOL Desktop을 통해 여러분이 생각할 수 있는 어떠한 분석적인 목적에 관해서라도 모델을 소통할 수 있다. COMSOL Script는 데이터 분석을 위한 600개 이상의 고차원 명령과 시각화를 포함한다. COMSOL Multiphysics 모델을 간단히 m-file로 저장하고 시뮬레이션하고 분석하는 부분으로 확장하면 된다. 다른 사람들이 모델링 작업에 접근할 수 있도록 사용자 인터페이스 형식으로 구성하여 당신의 모델링을 기호에 맞게 만들어 준다.

게다가, 명령형식은 MATLAB®과 호환이 가능하다. 어떠한 스크립트라도 자동 제어 디자인과 같은 cross-disciplinary applications을 MATLAB으로 적용 가능하다.

#### Key Features (주요 특징)

- Interactive programming language for scientific computations and visualization
- Desktop GUI with editor/debugger
- More than 600 built-in functions
- High-speed graphics
- GUI-builder

### 3.7.1 Optional Add-ons

COMSOL Script는 개방적이고 확장 가능한 환경이다. Optional Labs는 field-specific solutions를 추가한다. 각각의 Lab은 상호 명령어로부터 직접적으로 접근 가능한 풍부한 함수 셋트로 구성되어 있다. 함수들은 사용자의 응용분야 환경으로 확장하기 위해 쉽게 수정 가능한 M-Files을 기초로 한 텍스트로 되어 있다. GUIs는 일반적인 업무를 포함한다. 강력한 툴과 빠른 스피드의 그래픽의 쉬운 액세스는 초보자 뿐만 아니라 숙련된 사용자에게도 생산성을 향상 시킨다.

#### 3.7.1.1 SIGNALS & SYSTEMS LAB

Signals & Systems Lab은 신호 처리, 시스템 시뮬레이션, 시스템 검증, 제어 시스템의 설계 및 분석, 어답티브 필터링, 동적 (non-stationary) 신호 분석, 그리고 통계를 지원하기 위하여 백 가지가 넘는 기능을 포함한다.

세 가지 GUIs는 측정과 스펙트럼 가시화, 확률 밀도 함수, SISO/MIMO 시스템의 동적 (dynamic) 응답, ARMA 시간 연속 분석, 선형 시간 불변 시스템과 같은 응용지향적인 업무들을 용이하게 해준다. 각 GUI는 각각 지원하는 분야와 관련된 향상된 명령어, 상호작용 툴과 그래픽 능력을 포함한다. 모든 명령어와 알고리즘은 COMSOL Script 명령어 인터페이스를 통해 접근할 수 있다.

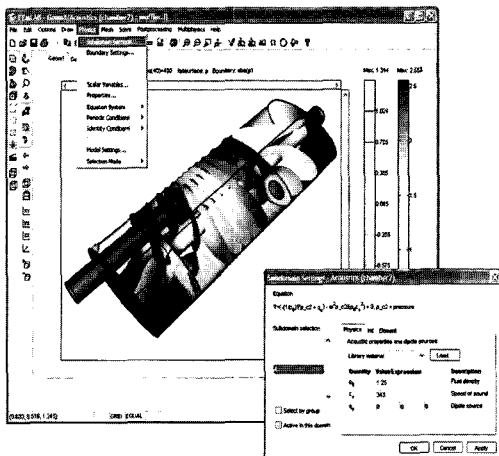


Fig. 14 Acoustics of muffler

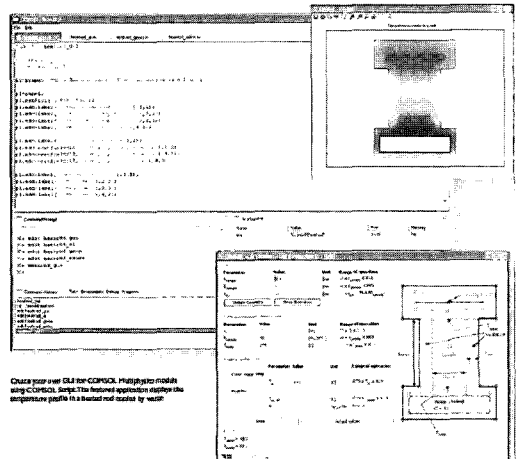


Fig. 15 COMSOL Script

## Key Features

- Signal processing
- Spectral tool GUI
- System identification/Model estimation
- Control systems modeling
- TF (Transfer Function) tool GUI
- Statistics analysis
- PDF (Probability Density Function) tool GUI

### 3.7.1.2 COMSOL REACTION ENGINEERING LAB

COMSOL Reaction Engineering Lab은 반응 시스템의 모델을 만들기 위해 반응식을 사용한다. 이것은 조성 과 온도가 시간에 따라서만 다양해지는 화학반응식을 포함하는 시스템들의 물질과 에너지 수지를 해결한다. 게다가, 사용자는 실험값과 모델 결과를 비교할 수 있다 (간단하게 실험데이터를 불러와서 값과 모델 결과를 함께 그릴 수 있다).

공간 종속의 모델인 경우, Reaction Engineering Lab은 화학공학 모델에 직접 값을 제공하고 이를 기반으로 2차원과 3차원에서 모델을 만들 수 있다. 반응 시스템에 대한 반응식이 이 모델들에 포함되어 있고, 자동적 혹은 수동적으로 Reaction Engineering Lab에서 정의된다. 또한 시스템의 열역학과 전달 값을 계산하기 위해서 다양한 기존의 표현들에 접근할 수 있다.

반도체 산업에서의 CVD 반응기, 신경으로의 약물 투여와 같은 시스템에도 이러한 잘 짜여진 제품은 여러분들에게 반응식을 구현하고 계산하는데 탁월한 능력을 발휘할 것이다.

### 3.7.1.3 OPTIMIZATION LAB

Optimization Lab은 최적화 문제를 만들고 푸는데 COMSOL Script 기능들의 최고의 기술을 제공한다. UC 샌디에이고 Philip E. Gill와 스탠퍼드대학 Walter Murray 및 Michael A. Saunders가 만든 SNOPT와 SQOPT 코드를 기초로 하여, 최적화 모듈은 구속 조건 선형, 2차, 비선형 객체 함수의 최적화뿐만 아니라, 구속 조건 선형, 비선형 최소자승법 문제를 위한 솔버 (solver)를 포함한다. 복합적인 선형, 비선형 구속조건이 있을 수도 있으며, 희소성이 사용되어진다. 분리된 Nelder-Mead solver는 상대적으로 적은 변수의 매끄럽지 않은 함수의 비강제적 최적화 기능을 추가한다. 명령어 통

계배열은 여러분의 문제 요소를 쉽게 제시할 수 있게 한다. 알고리즘은 문제를 분석하고 가장 적당한 최적화 기능을 고른다.

COMSOL Script 제품 라인의 가장 중요한 부분인 Optimization Lab은 다른 Lab들과 완전히 통합되어져 있으며, COMSOL Multiphysics 모델을 최적화하는 것에도 사용할 수 있다.

## Key Features

- Constrained optimization
- Linear problems
- Quadratic problems
- Nonlinear problems
- Constrained least-squares optimization
- Linear problems
- Nonlinear problems
- Solver for unconstrained optimization problems (Nelder-Mead)

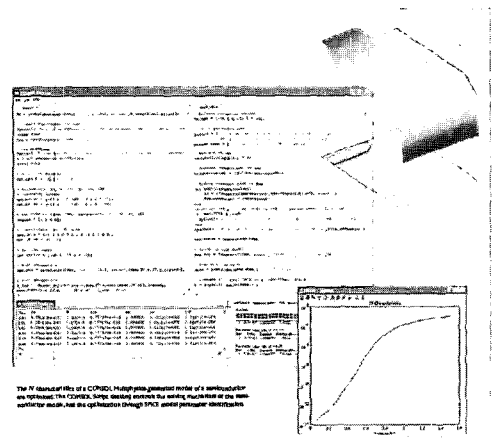


Fig. 16 Optimization Lab

## 3.8 그 외의 module들

아래의 module들도 앞서 언급된 모든 모듈들과 상호연동해석이 가능하다.

- AC/DC Module: Low frequency 전자장 해석
- RF Module: High frequency field 및 wave 해석
- Earth Science Module: 지표, 지하수, 토목 구조물 등 해석