SimulationX를 이용한 기계, 유체, 전기 통합 시스템 모델링 및 해석 SimulationX, Multi-domain Simulation and Modeling tool for the Design, Analysis, and Optimization of Complex systems

윤영환, 장주섭

Y. H. Yoon and J. S. Jang

1. 서 론

컴퓨터의 성능 발달로 인하여 이것을 활용한 시뮬레이션의 활용도가 높아지고 있고, 그 결과 복잡한 시스템을 실제 시스템처럼 모사가 가능하다. 이러한 CAE(Computer Aided Engineering) 기술 활용은 비용 절감 및 개발 기간의 단축이라는 점에서 매우 중요하며, 현재 많은 제품 개발에 해석 기술이 활용되고 있다.¹⁻⁴⁾

SimulationX는 독일의 드레스덴(Dresden)에 본사를 두고 있는 ITI GmbH에서 개발한 Multi-Domain 시뮬레이션 프로그램으로서, 어떤 시스템을 구성하고 있는 부품들의 상호 작용을 해석하고 평가할 수 있는 대표적인 소프트웨어(Software, S/W)이다.

SimulationX를 가장 많이 사용하는 업체로는 유럽의 BMW, Benz와 같은 자동차산업의 선두그룹으로 독일 자동차 회사들이 왜 세계 최고의 제품을 만드는지 알 수 있을 정도로 잘 만들어진 S/W이다.

SimulationX는 이미 라이브러리화 되어있는 기계(1D mechanics, 3D multi-body systems), 유압(Hydraulics), 공압(Pneumatics), 제어(Controls), 전기, 전자(Electric, Electronics), 자장(Magnetics), 파워트레인(Power transmission 1D, 3D), 전기 기계(Electro-mechanical), 열(Thermals), 열 유체(Thermal-Fluid) 등을 포함하는 복합적인 시스템의 물리적 작용을 모델링, 해석 및 분석을 할 수 있는 종합적인 설계 도구(CAE Tool)이다.

여기서 Multi-Domain Simulation S/W란 기계(직선, 회전 운동), 유체, 전기, 열을 통합하여 해석할 수 있는 것을 의미한다. 즉 다른 Physical domain에 있는 시스템을 통합하여 해석할 수 있다.

해석에 이용되는 모델들은 물리적인 실용성이 검증된 것으로서 도식적이며 대화 형식으로 사용할 수 있게 되어 있어 엔지니어들에게는 아주 직관적인 작업 방식이므로 쉽게 필요한 요소를 적당한 수량만큼 배치하여 모델링 할 수 있다.

SimulationX의 사용상 장점은 다음과 같다.

- 1) 각기 다른 분야의 엔지니어들이 각자의 방식으로 부품이나 시스템을 모델링 할 수 있고, 이를 서로 공유함으로써 복합적인 시스템 전체의 해석을 가능하게 하여 Multi-Domain Simulation S/W라고 한다.
- 2) 상호 작용 및 피드백을 포함하는 다양한 도메인 부품들의 상호 작용을 모델링 할 수 있다.
- 3) 시스템 개발에 있어서 공통적인 모델링 및 해석 환경을 이용함으로써 모든 관계자들 간 상호 이해의 기반을 다질 수 있다.
- 4) 시제품(prototype) 제작 및 테스트 기간을 단축하고 개발 비용을 절감할 수 있다.
- 5) 실제로 측정이 어렵거나 불가능한 모델에 대한 관찰이 가능하여 시스템 전반에 대한 이해도를 높여 준다.

SimulationX의 조작 화면(GUI)은 그림 1과 같이 왼쪽의 각종 물리적인 모델을 포함하고 있는 라이브러리, 오른쪽 위에 이러한 모델들을 배치하고 서로 연결하여 시스템 전체의 회로도를 작성하는 Model view와 각 모델의 물리적 특성 파라미터의 표시 및 조정, 해석과 관련된 사항을 조정하는 Model explorer로 구성되어 있다.

3D Multi-body 모델을 작성할 경우에도 마찬가지로 해당 모델 요소(Model elements)를 선택하여 서로 연결하고, 각각의 물리적 특성을 입력한 후에 해석을 수행한다. 시스템 해석은 기본적으로 시간영역(Time domain) 해석이지만, 주파수 영역(Frequency domain) 해석, 안정성(Pole Zero) 해석, 공진 주파수 및 모드 해석(Natural frequencies & Mode shapes analysis), 시스템의 특성 검토를 위해서 주파수 응답함수(Frequency response function)를 얻기 위한 인/아웃 해석(Input-Output analysis), 시간에 따라 회전수가 변하는 시스템의 소음, 진동 신호를 분석하는 오더분석(Order analysis)등의 다양한 해석과 해석 결과를 파형이나 그래프로 볼 수

가 있으며, 해석 데이터의 후처리(Post processing)가 아주 편리하다

그림 1 SimulationX 조작 화면

2. 라이브러리 구성

SimulationX는 그림 2에서와 같이 각기 다른 분야의 부품이나 시스템을 모델링 할 수 있는 Multi-Domain Simulation S/W로 물리적 모델링의 최소 단위를 “Model Elements”라고 하며, 모델 요소에는 질량(mass), 스프링(spring) 등의 일반적인 물리적 요소에서부터 파라미터, 알고리즘, 방정식, 컴포넌트(component)등도 포함되어 있어 사용자는 Drag & drop으로 쉽게 사용이 가능하다.

그림 2에서와 같이 다른 Physical domain의 물리량도 같은 Grade로 분류하여 모델링 및 Solving할 수 있다. 단, 모델 상태에 물리적으로 분리되어 있어야 한다. 즉 기계시스템에 물리적인 분리 없이 바로 전기시스템이 연결되지 않는다. 이런 문제는 모델링 할 때 S/W가 사전에 Sub-model간 연결을 방지하기 때문에 사용자는 고민하지 않아도 된다.

그림 2 SimulationX 라이브러리 구성

- 1) Signal Block & Signal Processing : 신호처리 및 제어시스템 설계 관련 모델링
- 2) Mechanics(MBS) : 선형, 회전운동 및 기구 관련 (Linear, Rotational, Multi Body System) 모델링
- 3) Power Transmission 1D, 3D : 엔진 및 트랜스미션 관련 모델링
- 4) Electronics, Electro-Mechanical, Magnetics : 전기, 전자 및 아날로그 소자, 각종 모터, 컨버터, 인버터, 자기 소자 관련 모델링
- 5) Hydraulics, Pneumatics : 유압 및 공압 외 가스 혼합(Gas mixture) 모델링
- 6) Thermals, Thermal-Fluid : 열 및 열 유체 시스템 모델링
- 7) ITI Subsea Library : Subsea 관련 모델링
- 8) Code Export : C, Simulink, LabVIEW, Function mockup을 위한 Code generation 기능
- 9) Interface : Pro/E, SolidWorks, Inventor 등 CAD S/W 외 ANSYS, Simulink등의 Interface 환경 제공
- 10) TVA Package : Torsional Vibration Analysis를 위한 Special library 제공

이외에 SimulationX에서 제공되지 않는 물리적 모델은 라이브러리의 모델 요소를 바탕으로 또는 모델리카(Modelica) 언어를 병용해서 타입 디자이너(Type designer)를 이용하여 만들거나 확장시킬 수가 있다.

엔지니어링 S/W 사용자들이 중요하게 생각하는 몇 가지 분야를 각 소프트웨어 별로 각각에 대하여 세부적으로 설명하면 다음과 같다.

2.1 유공압 분야

SimulationX는 유체역학적인 부품과 시스템의 동적 특성을 분석하고 최적화 하는데 아주 적합하다. 카탈로그(catalog)나 사양을 모델에 반영하기 위한 다양한 요소를 제공하고 있어 유공압 회로도들을 구성함에 있어서 효율적이고 빠른 모델 작성이 가능하다. 유공압 라이브러리의 모델들은 유체역학적인 부품의 비선형적인 특성까지 고려하고 있다. 압력과 온도에 의존하는 유체의 특성, 밸브의 비선형 동특성과 유동 특성, 액추에이터의 기계적인 효율, 실린더의 복잡한 마찰과 엔드 스톱(End stop) 모델, 어큐뮬레이터의 실제적인 가스 특성 등이 내장되어 있다.

그림 3은 유압 라이브러리와 비례제밸브의 엘리트먼트를 보여주고 있다.

그림 3 유압 밸브의 라이브러리

2.2 자동차 및 건설기계 분야

SimulationX는 승용차, 트럭 및 건설기계와 같은 Mobile hydraulic 같은 분야의 기계 부품 및 시스템 개발에 널리 사용되고 있다. 가장 널리 사용되는 분야는 시스템 및 기계 부품의 동적 특성 해석을 통한 진동현상 연구와 최적화 설계이다. 이미 검증된 SimulationX의 모델들은 아래의 분야에 초점을 맞추어 라이브러리를 제공하고 있다. 그림 4는 파워트레인 모델링 사례를 보여주고 있다.

- 1) Powertrain/Transmission & Clutch system
- 2) Actuation system & Gearbox system design
- 3) Lubrication & Engine Modeling
- 4) Air Conditioning & Engine Cooling

그림 4 파워트레인 모델링 사례

2.3 인터페이스(Interface)

SimulationX는 그림 5와 같이 CAD외에도 다양한 엔지니어링 S/W와의 인터페이스가 가능하다.

그림 5 SimulationX interface

1) CAD 인터페이스

3D Multi body system의 모델 작성을 위하여 CAD 데이터를 Import 할 수 있다. Pro/Engineer, SolidWorks, Inventor의 데이터는 그 어셈블리 전체를 한꺼번에 Import 할 수가 있으며, 다른 CAD 데이터의 경우에는 하나씩 STL 파일로 Import하여 모델을 작성할 수 있다.

2) MATLAB/Simulink

어떤 어플리케이션에서는 시스템의 일부를 외부의 다른 시뮬레이션 툴에서 실행하는 것이 유리한 경우 또는 SimulationX에서 제공되지 않는 분야를 포함하고 있는 경우, SimulationX는 외부의 시뮬레이션 툴과 Co-simulation을 하기 위하여 별도의 모델 오브젝트를 제공한다. 그림 6과 같이 S-function에 의한 Co-simulation과 C-code 인터페이스가 있다. Simulink의 S-function 기능을 이용하여 TCP/IP통신으로 SimulationX와 Co-simulation이 가능하다. 또한 SimulationX의 C-code를 Export/import 기능으로 Simulink가 읽어 들일 수 있는 C-code

(SimulationX에서 작성한 Function)를 작성하여 실행할 수 있다. 반대로 Simulink에서 작성한 C-code를 읽어서 SimulationX에서도 실행시킬 수가 있다. 보다 더 빠른 연산처리를 원하면 C-code의 Export/import 기능이 더 유리하다.

Interfaces to MATLAB/Simulink®

그림 6 Simulink interface 개념도

3) ADAMS interface

기존의 기구학 분야의 해석에 사용하는 ADAMS 모델과 SimulationX를 인터페이스 하기 위해 SimulationX의 COM 인터페이스 기능을 이용하여 구현한다. 각 프로그램 간은 노드의 변위, 회전량 등을 서로 주고받는다. SimulationX가 작성한 토크 모델 및 제어량을(모터, 엔진, 유압 등)을 ADAMS에 보내고 ADAMS가 작성한 변위량을 SimulationX로 피드백 등 해석 모델상의 모든 물리량을 주고받을 수 있다.

4) Hardware-in-the-Loop

NI, dSPACE, Cosateq 등과 같은 공급자들과 긴밀한 협조로 시스템의 Real-Time Prototyping을 위한 완벽하고도 유연한 PC 기반 솔루션을 제공한다.

3. SimulationX의 특징

3.1 Analysis4 기능

SimulationX의 해석기능에는 그림 7과 같이 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 분석에 활용할 수 있는 주파수 분석 및 오더 분석 등의 다양한 분석기법을 제공하고 있다. 사용자가 분석하기 편한 기법 및 다이어그램(diagram)을 선정하여 분석에 활용하면 된다. 시간 영역 및 주파수 영역 분석 외 Analysis에서 제공하는 분석기법을 통해 사용자가 원하는 분석 방법을 통해 설계에 활용할 수 있다.

그림 7 SimulationX의 Analysis 기능

시스템의 특성과악을 위해 고유진동수 및 구조물의 모드형태(Mode shape)등 시스템 거동(behavior)을 분석하기 위한 방법을 제시한다.

오더분석은 시간에 따라 회전수가 변하는 시스템의 소음, 진동 신호를 분석하는 것으로 오더(Order)는 회전수의 Normalization으로 정의한다. 사용자가 원하는 물리량의 차수 별 공진주파수를 회피할 수 있는 설계 변수 도출에 활용할 수 있다. 엔진 회전수에 따라서 진동주파수가 달라지는 회전체에서는 주파수 분석(Frequency analysis)방법을 사용하는 경우, 엔진 회전수(입력회전수)에 따라서 진동주파수가 수시로 변하게 된다. 따라서 주파수분석 방식으로는 진동의 원인을 찾고 문제점을 해결하는데 한계가 있다. 회전수가 수시로 바뀌어 진동주파수가 변하는 진동시스템에서 주파수가 변하는 원인이 되는 입력 회전수(1차 order)로 회전수와 연동된 진동성분들을 무차원화 시키는 개념이 오더분석 방법이다. 입력회전수를 상시 측정하여 입력회전수는 1차 오더로, 입력회전수와 연동된 진동을 오더성분으로 표시하게 되면, 입력회전수에 상관없이 입력회전수와 연동된 성분은 항상 일정한 오더성분으로 나타낼 수 있다. (예로 발란싱 진동은 항상 1차 오더성분으로 표현됨) 이러한 오더성분으로 자동차와 같이 수시로 회전수가 변하는 진동시스템에서 기어 진동, 베어링 진동 등의 원인을 분석할 수 있다.

오더분석은 구동계 시스템(driver system)등 에너지 전달계에 대한 주파수 해석의 한 방법으로 Analysis process는 T시간 동안 시간영역에서 해석을 수행한 후 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 주파수영역으로 옮겨 분석한다. 그림 8은 오더분석의 한 예로 Sonogram & waterfall diagram에서는 대상 물리량과 주파수 그래프에 차수성분을 표현하여 쉽게 대상 물리량이 어떤 차수, 어떤 주파수에서 공진이 일어나는 것을 알 수 있다. 즉 차수별 공진주파수 및 Analysis signal의 가중의 정도를 Sonogram & waterfall diagram으로 분석할 수 있다. 2D view는 차수 별로 Analysis signal의 독립적

인 그래프를 보여 준다.

(a) Sonogram

(b) Waterfall diagram

(b) Order 별 2D view

그림 8 오더분석 사례

3.2 Special library

SimulationX에서는 Special library로 Torsional Vibration Analysis와 Subsea hydraulic library를 제공하고 있다.

그림 9는 Torsional Vibration Analysis library로 구동계 시스템의 모델링을 위해 엔진, 기어, 샤프트, 커플링, 댐퍼 등의 모델 요소를 제공하고 있어 쉽게 설계 데이터 또는 스펙이나 카탈로그 사양을 입력하여 모델링 가능하다.

그림 10은 Subsea Hydraulic library로 해양 원유 생산시스템을 모델링하기 위한 모델 요소를 제공하고 있다. 그림 11, 12는 해양 원유 생산시스템의 개념도 및 Subsea 유압시스템의 모델링 사례로 최근 해저공학(Subsea engineering)이란 단어가 사용되고 있다.^{5, 6)} Subsea 분야는 고온, 고압을 다루고 파이프라인을 통해 원유를 수송하기 위한 여러 가지 제어밸브 및 저장탱크를 사용하기 때문에 유압분야 엔지니어가 새롭게 접근할 수 있는 분야이다.

Subsea분야도 자동차, 선박, 반도체 산업에 이어 한국의 미래 먹거리가 될 것이 확실하기 때문에 유압공학 엔지니어가 관심을 가지고 연구할 필요가 있다.

그림 9 Torsional Vibration Analysis library

그림 10 Subsea library

그림 12 Subsea 유압시스템의 모델링 예

4. 해석 모델 개발 절차

설계 도구(design tool)인 엔지니어링 S/W를 사용하는 이유는 유압 부품 및 시스템의 제작 이전 단계에서 컴퓨터상에서 시뮬레이션을 실시함으로써 설계사양의 타당성 및 문제점을 사전에 예측하고, 설계 변경 및 문제 해결에 이용하기 위한 것이다.

그림 13에 나타난 것과 같이 유압시스템은 에너지원인 유압 펌프, 제어 밸브, 액추에이터로 구성되어 있다. 모델 개발은 개발자의 위치에 따라 시스템 설계 목적 인지, 부품 개발용 인지에 따라 개발 방향이 결정된다. 시스템 설계자는 사용 부품의 내부 구조 설계 보다는 시스템 관점에서 사양을 정의(define)하면 된다. 설계자 관점에서는 구매 사양 또는 카탈로그 사양에 따라 모델을 개발하면 된다.

그러나 부품 설계자의 경우 주어진 조건에 맞게 부품을 설계하는 관점에서 해석모델을 개발해야 한다. 즉 설계 사양을 결정하기 위해 설계를 고려한 해석모델을 개발해야 한다. 해석모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 유압장치의 시험 데이터를 이용하여 해석모델에 활용 할 수 있다. 해석 목적에 맞게 시험 데이터가 있는 경우 해석모델에서 사용한 마찰력 등 추정변수에 대한 연관성(correlation)이 있는 해석 모델 검증 수행을 통해 신뢰성 있는 해석모델을 개발할 수 있다.

그림 11 Subsea 플랜트의 개념도

그림 13 Configuration of hydraulic system

그림 14는 저자가 항상 따르는 해석 모델 개발 절차이다. 대상 시스템과 해석목적이 결정되면 시스템 작동원리 및 평가방법을 완벽하게 알아야만 신뢰성을 갖는 해석모델을 개발할 수 있다. 또한 기능 부품 하나하나에 대해 논리적인 타당성을 확인한 후 점점 복잡한 모델로 확장한다.

설계에 활용할 수 있는 일차원적 해석모델(1-D modeling)은 자연계에서 일어나는 물리적인 현상을 그대로 모델화 한다고 이해하면 된다. 즉 작동 메커니즘(mechanism) 또는 시험하는 방법을 모델링하는 것이기 때문에 시스템의 작동 원리 및 시험 방법을 구체적으로 알아야만 한다.

기계 시스템의 일차원적 해석모델은 회전운동과 선형운동으로 구분할 수 있다. 선형운동은 질량 선형 스프링 및 댐퍼(linear spring and damper)등 선형 운동에 관련된 요소이며, 회전 운동은 관성(inertia) 회전 스프링 및 댐퍼(rotary spring and damper)등 회전 운동에 관련된 요소이다.

그림 14 해석 모델 개발 절차

유압부품 및 시스템은 기본적으로 그림 15에서와 같이 어떤 움직이는 물체를 통한 유체의 흐름을 구하는 것이기 때문에 운동 방정식, 연속 방정식, 오리피스 방정식에 필요한 모델링 변수(modeling parameter)는 다음과 같다.

- 1) 운동방정식에 관련된 물리량 : 질량, 수압 면적(diameter), 스프링 탄성계수, 초기 압축량 등
- 2) 연속방정식에 관련된 물리량 : 검사 체적(control volume), 작동유 특성, 검사 체적 변화에 관련된 물리량 등
- 3) 오리피스 방정식에 관련된 물리량 : 오리피스, 포핏(poppet), 볼(ball)등의 개도 면적 조건 등
- 4) 기타 솔레노이드 전류, 힘 특성 및 모터의 전류, 회전수, 토크 특성 등이 필요하다.

먼저 부품 및 시스템에 대한 기능분석을 통해 각 기능부품의 모델을 구성해야 한다. 구성된 부품의 모델을 이용하여 시스템에 대한 모델링이 필요하다. 모델링은 부하 조건 및 운전자 입력 조건 등 평가방법이 포함되어 있어야 한다. 따라서 다양한 운전자 입력 조건 및 부하 조건에 대한 성능 평가 및 설계 변수 변경에 따른 민감도 해석 등을 통해 유압 부품 및 시스템개발에 활용할 수 있다.

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} \sum Q \quad (2)$$

$$Q = C_d A_x \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

그림 15 Concept design of check valve

5. 엔지니어링 S/W 비교

유공압 분야를 해석할 수 있는 상용 소프트웨어로 국내에 소개된 엔지니어링 S/W는 SimulationX(독), Flowmaster(미), AMESim(프), Hypneu(미), Easy5(미), DSHplus(독) 정도이다. 이중 필드에서 많이 사용되는 있는 S/W로 SimulationX, Flowmaster, AMESim이다.

본 장에서는 저자가 많이 사용해 본 상용 S/W인 SimulationX⁷⁾와 AMESim⁸⁾에 대해 동일한 유압 부품 및 시스템에 대해 비교 분석하여 상용 S/W의 장단점을 기술하고자 한다. 상용 S/W는 사용자가

아는 것만큼 설계도구로서 활용도가 상승되고 해석 모델의 신뢰성을 확보할 수 있기 때문에 유압과 관련된 분야에 종사하는 사용자는 본 장의 내용을 완벽하게 이해하면 상용 S/W의 고급 사용자가 되어 필드에서 발생하는 문제 해결 및 설계에 도움이 될 것으로 확신한다.

5.1 유압 작동유의 설정

유압 작동유는 식(2)의 체적탄성계수(bulk modulus)와 식(3)의 밀도(density)에 영향을 주는 것으로 밀도변화는 해석결과에 큰 변화가 없으나 동점성 계수(kinematic viscosity)와 체적탄성계수는 해석결과에 큰 영향을 미치기 때문에 아주 중요한 모델링 변수이다.⁹⁾

체적탄성계수는 압축률(compressibility)과 관계되며 작동유 중에 공기가 혼합되면 압축률은 크게 변하게 된다. 특히 작동 영역이 저압인 경우 그림 16에서와 같이 압력에 따라 체적탄성계수가 크게 변하기 때문에 일정한 값으로 가정하면 실제 시험결과와 크게 달라지는 문제가 발생한다.

동점성 계수는 압력 진동주기와 진폭에 영향을 미치는 인자로 온도의 영향을 받으므로 유압작동유의 온도-점도 지표를 사용하여야 하며 온도변화에 대한 영향을 최소화하기 위해 작동유 온도조건을 시험 시의 온도와 동일하게 설정해야 한다.

그림 16 Pressure vs. bulk modulus for a hydraulic fluid

그림 17은 SimulationX와 AMESim의 유압 작동유 특성을 정의하는 방법으로 SimulationX의 경우 (a)에서와 같이 작동유의 종류 및 해석하고자 하는 압력의 범위에 따라 유압 작동유를 다양하게 설정할 수 있는 데이터베이스를 제공하고 있다.

(a) SimulationX

Parameters		
Title	Value	Unit
type of fluid properties	elementary	
index of hydraulic fluid	0	
temperature	40	degC
name of fluid	unnamed fluid	
General properties		
density	850	kg/m**3
bulk modulus	17000	bar
absolute viscosity	51	cP
Aeration		
absolute viscosity of air/gas	0.02	cP
saturation pressure (for dissolved air/gas)	1000	bar
air/gas content	0.1	%
polytropic index for air/gas/vapor content	1.4	null

(b) AMESim

그림 17 Define of hydraulic fluid properties

오일업체에서 생산하고 있는 유압 작동유에 대한 물리량이 정의되어 있어 사용자는 비슷한 작동유를 선택하여 사용하면 된다. 단, 작동 중에 공기 혼입에 따른 유효체적탄성계수는 사용자가 조정할 수 있게 되어 있다. AMESim의 경우에는 (b)에서와 같이 사용자가 유압작동유의 물리량을 입력해야 하기 때문에 작동유의 특성 변수를 모르면 정확한 작동유 정의가 어렵다. 따라서 유압작동유의 특성을 완전히 파악하기 위해서는 동점도, 체적탄성계수, 밀도의 온도에 따른 특성곡선을 입수해야 하나 성분 분석을 완전히 할 수 없기 때문에 현실적으로 구하기가 어려워 사용자의 능력에 의존하기 때문에 작동유 파라미터 설정 시 주의가 요구된다.

5.2 유압 부품 모델링의 비교

유압 부품모델링에는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 유압회로 해석을 위해 카탈로그 사양을 입력하는 방법과 시제품의 성능 분석을 위해 유압 부품의 설계 사양입력이 가능해야 한다. 또한 개념 설계

(concept design)된 것을 구체화 설계 및 성능 목표를 만족하는 설계 변수를 찾아낼 수 있어야 도면작성이 가능하다.

그림 18은 유압회로 해석을 위해 카탈로그 사양을 정의할 수 있는 요소(element)를 비교한 것이다. 전 세계 수많은 유압 부품 메이커의 다양한 밸브 및 부품을 정의할 수 있어야 한다. 특히 SimulationX의 경우 유압회로에서 사용하고 있는 다양한 로직 밸브를 제공하고 있지만 AMESim의 경우 사용자가 일일이 만들어 사용해야 하는 어려움이 있다. 특히 SimulationX의 경우 유압 전문 메이커인 Bosch Rexroth사의 카탈로그 기준으로 파라미터 입력을 할 수 있어 사용자는 유압회로 모델링을 쉽게 할 수 있다.

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 18 Catalog specification define of hydraulic valve

그림 19는 유압 부품 설계를 위한 목적으로 설계 사양을 입력할 수 있는 각각의 요소를 비교하여 나타낸 것이다. 설계자의 요구를 만족시키는 다양한 개념 설계안을 구체화하기 위해서는 앞에서 설명한 운동 방정식, 연속 방정식, 오리피스 방정식에 필요한 설계 변수를 정의할 수 있어야 한다. SimulationX의 경우 비선형 개도 변화 등에 대해 직관적으로 설계 변수를 정의할 수 있으나 AMESim의 경우 변위 대면적 변화(displacement vs. flow area)에 대한 함수 처리 형태로 도면에 표현할 수 있는 변수의 정의에는 어려움이 있는 것으로 파악되었다.

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 19 Design parameter define of hydraulic valve

그림 20은 유압 부품 설계를 위해 많이 사용하고 있는 오리피스 및 노즐의 설계 사양을 입력할 수 있는 요소들을 비교한 것이다. 모델링을 쉽게 하기

위해서는 오리피스와 형태 및 반경, 폭에 대한 정의가 가능해야 한다. SimulationX의 경우 원형 외 삼각형, 사각형 등 여러 형태 및 형상을 정의할 수 있으나, AMESim의 경우 오리피스를 직경 하나로만 정의함으로써 도면에 표현할 수 있는 변수 정의는 어려운 점이 있고 해의 정확성에도 문제가 있어 시험을 통해 확인할 필요가 있다.

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 20 Orifice and nozzle define of hydraulic component

6. 실제 적용한 해석 모델 개발 사례

6.1 유량 제어 밸브 모델링

차량용 유압식 조향 장치(hydraulic power steering)의 펌프 토출 측에 사용하는 유량 제어밸브의 계략도를 그림 21에 나타내었다. 일반적으로 사용되고 있는 자동차의 경우 유압펌프는 엔진과 브이벨트(V-belt)로 연결되어 있으며 엔진 회전수에 따라 펌프의 토출량(cc/rev)이 급격히 변하게 된다. 토출 유량의 급격한 변화를 그대로 유압시스템에 이용하기 어렵기 때문에 회전수 즉 토출 유량이 변해도 유압시스템에 일정한 유량을 공급하기 위해서 유량 제어밸브를 사용한다. 그림 20에 나타낸 것과 같은 형태의 유량 제어밸브를 사용한다.

그림 21 Schematic diagram of flow control valve

유량제어밸브에 대한 설계도면 기준으로 각 부품을 모델링하면 그림 22와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보면 AMESim 경우 오리피스 직경만 정의할 수 있지만 SimulationX의 경우 오리피스 직경과 폭에 대한 정의가 가능하며, 각 오리피스 사이의 검사체적에 대한 정의도 가능하였다.

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 22 Simulation model of flow control valve

그림 23은 동일한 조건에서 시험과 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 (a) SimulationX의 경우 스폴의 2가지 유로형태에 대해 해석을 수행한 결과 시험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. (b) AMESim의 경우 시험결과와

일치하지 않아 스프링의 여러 가지 조건 등 설계 사양 및 유량계수를 변경하면서 해석을 수행하여 보았으나 시험결과와 차이가 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. AMESim에서는 식(3)의 오리피스 방정식 처리에 문제가 있을 것으로 판단된다. 임계 유량계수(Critical flow number)와 최대유량계수(Maximum flow coefficient)를 조정해도 시험결과와의 차이를 해결할 수 없었다.

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 23 Flow rate characteristics according to revolution

6.2 유압식 조향장치 모델링

자동차에 장착되는 유압식 조향장치는 엔진으로 구동되는 유압 펌프, 핸들의 조향력에 대응해서 타이어의 방향을 제어하는 기어박스(gear box), 오일 탱크(reservoir) 및 배관계로 구성되어 있으며 해석 모델 개발에 관한 많은 연구사례가 있다.^{10, 11)}

그림 24는 조향 기어박스를 나타낸 것으로 로터리 밸브(rotary valve), 토션바(torsion bar) 및 실린더, 랙/피니언(rack & pinion)으로 구성되며 내부 누유(leakage) 특성 및 점성마찰은 시험 결과를 이용하여 신뢰성을 확보할 있는 해석모델 구축이 가능

하다.

로터리 밸브는 회전각에 의해 밸브 개도가 발생하여 유로를 형성하는 것으로 로터리 밸브 스푼(spool)과 밸브 바디의 에지(edge) 설계 조건이 폭, 각도 등 7가지가 된다. 따라서 설계 사양 선정이 어려워 필드에서는 시행착오로 설계 사양을 조정(tuning)하여 시스템 요구조건을 맞추는데 많은 시간과 비용을 소비하고 있다.

그림 24 Schematic diagram of gearbox

유압식 조향장치의 성능 평가 방법 중, 기어박스를 고정하여 핸들 토크 입력에 대해 실린더 양단의 압력을 측정하여 토크에 따른 압력 특성을 변화가 가장 기본적인 성능평가 방법이다. 이것을 통하여 가장 기본적인 어시스트(assist) 성능인 시스템 Effort 특성 외 히스테리시스 및 밸브 대칭성을 평가할 수 있다. 토크에 따른 압력특성을 해석하기 위한 모델은 그림 25와 같다. 에너지원인 유압 펌프는 용적효율을 고려하지 않은 이상적인 펌프로 단순하게 모델링하였으며 토션바의 비틀림 각도 차이가 로터리 밸브의 입력 값이며 이에 따라 로터리 밸브 개도가 결정된다. 평가조건과 동일하게 기어박스는 탄성체에 의한 고정된 조건으로 모델링 하였다. 운전자의 조향입력에 의해 발생하는 토션바 비틀림 각에 의해 로터리 밸브의 비선형 개도 사양은 스톱 밸브를 이용하여 정의 가능하다. 비선형 개도 사양은 실제 CAD도면 값을 이용하였기 때문에 실제 로터리 밸브 에지 설계에 활용할 수 있는 모델이다. 따라서 유압식 조향장치의 핵심부품인 기어박스 설계 사양 검토 및 설계 민감도 해석이 가능한 해석 모델이다.

그림 26은 동일한 조건에서 시험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 설계 사양을 정의할 때는 차랑 크기 및 레이아웃에 따라 토크 대 압력 기준을 정하게 된다. SimulationX의 경우 시험결과(green)와 잘 일치하는 것을 알 수 있었지만 동일한 조건에서

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 25 Simulation model of hydraulic power steering

(a) SimulationX

(b) AMESim

그림 26 Pressure characteristics according to input torque

AMESim은 시험결과(green)와 많은 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 AMESim에서 해석결과와 차이가 발생하는 것은 S/W의 솔버(Solver)문제로 생각되지만 아래 식(4)에서와 같이 로터리 밸브 회전에 따른 면적 개도방정식에서 사용하는 임계유량계수(Critical flow number) λ 와 최대유량계수(Maximum flow coefficient) C_q 를 이용하여 조정이 가능할 것으로 예상된다.

$$Q = C_q(\lambda) \sqrt{\frac{2}{\rho}} A(\theta) \sqrt{\Delta P(\theta)} \quad (4)$$

그림 27은 AMESim에서 가변 오리피스 변수로 고정(default) 값은 Critical flow number는 0.7, Maximum flow coefficient는 100으로 설정되어 있다. 식(4)에 의해 이 두 값을 조정하면 압력과 유량 특성이 변경되기 때문에 시험결과를 이용한 조정 작업을 진행하였다.

Submodel		
<div> <div>3</div> <div>1</div> <div>2</div> </div> variableorifice_3.2.3.2.2.2.2 [VOR02] <div>External variables</div>		
variable hydraulic orifice with tables or equations I		
Parameters		
Title	Value	Unit
index of hydraulic fluid	0	
hydraulic diameter gain	1	null
area gain	4	null
maximum flow coefficient	0.7	null
critical flow number (laminar -> turbulent)	100	null
lower limit on input signal	-100000	null
upper limit on input signal	100000	null
filename or expression for hydraulic diameter $hd=f(x)$ [mm]	hd.dat	
filename or expression for area $area=f(x)$ [mm ²]	area.dat	

그림 27 Parameter list of variable orifice in AMESim

그림 28 (a)는 임계유량계수와 최대유량계수 값을 조정하면서 해석한 결과를 나타낸 것이다. 기본(default) 값(run1)을 기준으로, 0.6, 100(run2), 0.7, 300(run3)로 변경하였을 때 입력 토크에 따른 압력 특성이 변화되는 것을 알 수 있다. 그림 28 (b)는

시험결과와 맞추기 위해 임계유량계수와 최대유량계수 값을 시행착오를 통해 구한 값 0.52, 110을 적용하면 시험결과와 어느 정도 일치하는 것을 알 수 있다.

반면에 그림 26 (a) 에서와 같이 SimulationX를 이용하였을 경우는 고정 값인 0.7, 100에서 시험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 AMESim에서는 사용자가 시험결과를 이용하여 이 값을 조정해야만 신뢰성 있는 모델을 만들 수 있기 때문에 해석 모델을 설계에 활용하기 위해서는 할 수 있기 때문에 AMESim사용자는 이 점을 염두에 두고 해석을 수행해야 한다.

(a) Sensitivity analysis for parameter tuning

(b) After tuning

그림 28 Pressure characteristics according to input torque in AMESim

7. 결 론

독일 ITI GmbH에서 개발한 Multi-Domain 시뮬레이션 프로그램인 SimulationX에 대해 알아보면서

해석 모델 개발 절차에 대해 설명을 하였다.

상용 S/W를 잘 활용하면 시행착오에 의한 시간과 비용을 절감할 수 있으며, 사용자가 상용 S/W를 아는 것만큼 설계 도구로서 활용도가 높아지고 해석 모델의 신뢰성을 확보할 수 있다.

저자의 경험에 의하면 상용 S/W를 빨리 습득하는 방법은 다음과 같다.

1) 가장 먼저 S/W에서 제공하는 데모 모델을 분석하여 라이브러리에 대한 이해 및 S/W 명령어의 활용도를 높여야 한다. 데모 모델을 분석할 때는 항상 물리적인 개념을 통한 작동 메커니즘을 항상 생각하면서 모델을 이해해야 한다. SimulationX의 경우 가장 중요하면서 기본이 되는 예제모델 6개에 대한 동영상을 제공하고 있어 쉽게 배울 수 있다.

자연계에서 일어나는 물리적인 현상(작동 메커니즘, 시험조건)을 상용 S/W로 그대로 표현하는 것이 모델링이라고 생각하고 이런 관점에서 데모 모델을 분석해야 한다.

2) 모델링할 때는 가장 먼저 모델링 목적을 정해야 한다. 사용자가 시스템 설계자인지 부품 설계자인지에 따라 모델링 접근방법이 다르다. 또한 설계 전 단계, 설계 검증 단계, 시험 단계, 샘플 분석 단계인지에 따라 모델링 접근 방법이 다른 것을 이해해야 한다. 항상 논리적이 메커니즘을 이해하고 시험 평가를 고려하여 모델링해야 한다.

3) 모델링은 단순한 모델에서 점점 더 복잡한 모델로 접근해야 한다. 즉 부품단계에서 시스템단계로 모델링하면서 각 단계별로 모델 검증을 해야 한다. 시험 결과가 없는 경우에도 힘 또는 면적비등 논리적인 타당성으로 모델 검증을 수행할 수 있다.

4) 마지막으로 모델링 과정에서 이해 안 되는 부분은 Help 및 매뉴얼을 활용하여 S/W 활용도를 올리면서 이론적인 내용(theoretical background)도 파악해야 한다.

유압 부품 및 시스템 설계에 활용하기 위해 2가지의 상용 S/W를 이용하여 유량 제어밸브와 유압식 조향장치에 대한 해석모델 개발을 수행하였다. 부품 모델링 시 각 부품의 도면을 기준으로 설계에 활용할 수 있는 도면 기준 세부(detail) 해석모델을 개발하여 해석과 시험결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 설계 도구에 많이 활용되고 있는 상용 S/W인 SimulationX와 AMESim에 대해 해석 결과의 정확성을 비교 분석하였다.

2) AMESim 모델의 경우 시험결과와 비교해 보면 임계유량계수와 최대유량계수에 대한 조정이 필요하며 시험 전 단계에서 해석할 때에는 이러한 문제에 의한 시험결과와의 차이를 염두에 두고 설계에 활용해야 한다.

3) 동일한 해석 모델의 해석 시간은 정량적으로 표현하기 어렵지만 AMESim이 SimulationX보다 약간 빠른 것을 확인하였다.

4) 개발된 해석 모델을 이용하여 운전 조건에 대한 압력거동 및 유압시스템의 동적 특성 등을 분석하기 위한 배관계의 특성 및 타이어에 대한 차량동역학 모델이 보완 되면 유압부품 및 시스템 최적화 설계에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Joosup Jang, Younghwan Yoon, "Analysis Model Development for Designing of Hydraulic Power Steering System", Transactions of the KSAE, Vol 16, No1, 2008
- 2) Andreas Abel, Uwe Schreiber, Jens Schindler, "Engine and gear Modeling and Simulation for Improving the Shifting Behavior of Powertrains with Manual or Automated Transmission", SAE, 06P-480, 2005
- 3) Wang Chengbin, Quan Long, "Study on Simulation and Experiment of Hydraulic Excavator's Work Device Based on SimulationX", IEEE, 2011
- 4) Joosup Jang, Younghwan Yoon, "Analysis Model Developments of Hydraulic Power Steering System", The Korean Society of Automotive Engineers, 2007 Spring Conference Proceedings, Vol 2, pp. 674~680, 2007
- 5) www.subsea.org
- 6) 이재영, Offshore Pipelines and Risers, 2009
- 7) SimulationX user manual and library manual, ITI GmbH, 2011

- 8) AMESim user manual, LMS IMAGINE S.A., 2010
- 9) Baek-Hyun Cho, Hyoun-Woo Lee, Jong-Sun Oh, "Estimation Technique of Air Content in Automatic Transmission Fluid by Measuring Effective Bulk Modulus", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000
- 10) 탁태오, 황병하, "차량동역학 해석을 위한 조향 장치의 모델링", 1997년도 추계학술대회 논문집, pp. 741~746, 한국자동차공학회, 1997
- 11) 장주섭, 윤영환, "유압식 동력조향 장치의 해석 모델 개발", 한국자동차공학회 2007 춘계학술대회 논문집, 제2권, pp. 674~680, 2007

[저자 소개]

윤영환

E-mail : jnfsolution@gmail.com

Tel : 02-6207-9939

1966년 7월 17일생

1989년 부산대학교 기계공학과

학사, 1991년 동대학원 석사, 202년 경희

대학교 기계공학과 박사,

1990~1999년 만도기계(주) 선임연구원, 1999~2010 신호시스템 상무이사, 2010~현재 제이엔에프솔루션 대표이사, 관심분야는 유공압 부품 및 시스템 설계/해석, Multi-Domain Simulation S/W를 이용한 동역학 해석, MIL/SIL/HIL/EIL Solution 제공, 우리학회 총무이사 및 편집위원

장주섭

E-mail: jjs1@kyungwon.ac.kr

Tel : 031-750-5652

1960년 5월 15일생

1987년 경희대학교 기계공학과 학사,

1989년 동대학원 석사, 2000년 동대학원

박사 졸업,

2004. 2~2005. 2 독일 아헨대학교 IFAS Post. Doc. 1988. 11~1996. 2 만도기계(주) 선임연구원, 1996. 3~현재 가천대학교 기계자동차공학과 교수, 관심분야는 자동차와 중장비의 유공압제어시스템, 계측제어분야, 한국자동차공학회 편집이사, 평의원, 다수의 기계관련 학회의 회원, ITEP, KMAC, KICTEP의 심사위원, 우리학회 총무이사 및 편집위원