

유체-구조 연성 해석의 이해와 활용 방안

이준용 | 에이블맥스, 기술연구원 | e-mail : support@ablemax.co.kr

현재 많은 학교 및 연구단체에서는 한 분야에서 이루어지는 연구와 연구결과에 대한 실용성의 한계를 느끼고 있으며, 이를 극복하기 위해 타 분야와의 협력이 적극 이루어지고 있고 멀티피직스와 같은 다영역 해석을 수행하고 있다. 이 글에서는 대표적 해석 프로그램인 ADINA을 위주로 설명하고자 한다.

유체압이 고려된 구조물의 변형 및 파괴 또는 구조물의 구동에 의한 유체 유동의 영향을 고려해야 하는 문제나 온도에 지배를 받는 구조물과 유체의 상호작용에 대한 해석의 필요성이 점차 증대하면서 관련 문제에 대한 수치적 해석 개발이 활발하게 이루어지고 있고 수치적 연성해석 결과에 대한 신뢰도가 이미 여러 연구단체나 산업체로부터 검증받으면서 연성 해석 프로그램이 담당하는 역할의 중요성이 커지고 있다. 수치적 연성 해석의 개발과 상용화는 유체와 구조의 상호작용에 대한 이해와 실제 실험을 통해 얻기 힘들었던 시각적, 물리적 해석 결과를 확인하는 것을 가능하게 하였다(그림 1). 이에 수치 해석 프로그램에서 이루어지는 유체-구조(열 포함) 연성 해석 과정을 살펴보고, 활용 방안을 제시함으로써 고비용의 실험장치와 장시간의 실험기간을 요구하는 분야에서 적극 활용될 수 있도록 구체적인 ADINA의 해석 과정을 소개하였으며 해석 틀에 대한 이해를 돕고자 하였다.

Fluid-Structure Interaction 해석의 이론적 배경

ADINA는 유체(ADINA-CFD), 구조(ADINA-Structure), 열(ADINA-Thermal) 해석을 위한 solver로 구성되어 있으며, 유체-구조, 열-구조 결합(coupling)을 위한 interface solver인 ADINA-FSI, ADINA-TMC(Thermo-Mechanical Coupling)가 한 프로그램에 구성되어 있어 변형이 큰 비선형 문제를 해결할 수 있는

능력을 가지고 있다. ADINA에서 유체와 구조의 coupling은 그림 2와 같이 유체와 구조의 interface에서 압력과 변위의 정보를 교환하며 이루어지는데 이때 계면(interface)에서는 정확한 계산을 위해 트래クション(traction) 조건과 변위 적합성(displacement compatibility)이 만족되어야 한다.

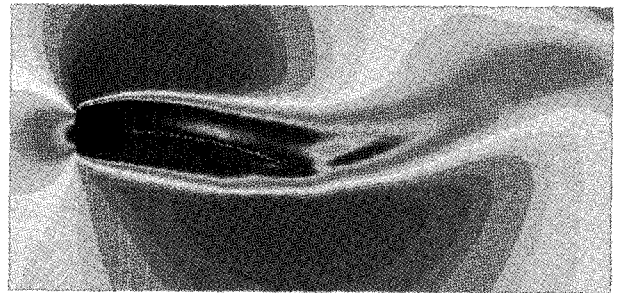


그림 1 유체-구조를 연성해석을 통한 가시화 결과

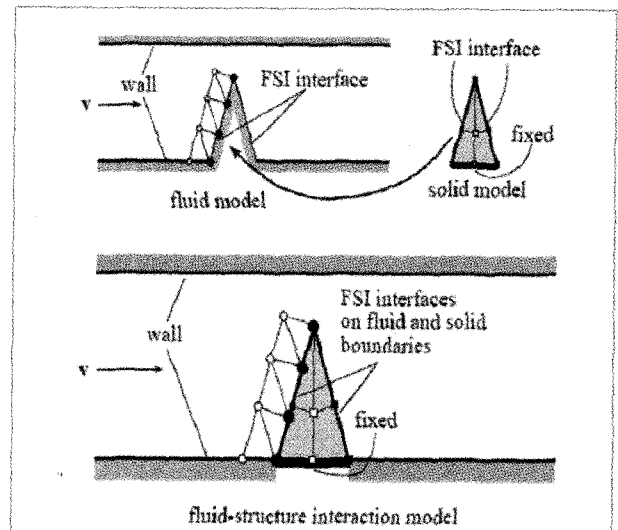


그림 2 ADINA에서 유체-구조를 계면에서의 격자

유체 구조 경계면에 적용되는 기본적인 조건들은 다음과 같은 변위 적합성(혹은 kinematic condition)이 있게 된다.

$$d_f = d_s$$

또한 트래션 평형(혹은 dynamic condition)은 다음과 같다.

$$n \cdot \underline{T} = \underline{T}$$

여기서 d_f 와 d_s 는 유체와 고체의 변위이고 \underline{T} 와 \underline{T} 는 유체와 구조물의 스트레스(stress)이다. 밑줄은 유체 구조 경계면에서 정의된 값이라는 것을 나타낸다. 유체 속도 조건은 kinematic condition에 기인한다. 만약 미끄럼이 없는(no slip) 조건이 적용되었다면 $v = \underline{d}_s$ 이고 미끄럼(slip) 조건이 적용되었다면 $n \cdot v = n \cdot \underline{d}_s$ 이다. 유체 구조 경계면에서 유체 절점의 위치들은 kinematic 조건에 의해 결정된다. 나머지 유체 절점들의 변위는 최초의 격자품질(mesh quality)을 유지하기 위하여 프로그램에 의해 자동으로 결정된다. 그 후에 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 공식에서 유체 유동의 지배 방정식이 해석된다. 정상 상태 해석에서 메시 속도들은 유체 절점 변위들이 갱신되더라도 항상 0으로 설정된다. 따라서 유체 구조 경계면에서 유체 속도는 0이다. Dynamic condition에 따라 유체 트래션은 유체 구조 경계면을 따라 유체력을 적분하여 구조 절점에 입력한다.

$$\underline{F}(t) = \int h^d \underline{T} \cdot d_s$$

여기서 h^d 는 고체변위의 각 방향에 대한 크기이다.

일반적인 FSI 해석 과정은 물성 정의, 요소 그룹, 하중조건, 경계조건, 메시 생성과 같은 과정으로 구조 해석과 유

체 해석을 위한 과정은 일반 수치 해석과 유사하다. 여기에서 연성해석을 위해 추가적으로 주어지는 것이 FSI 경계조건에 대한 정의이다. 유체와 구조모델에서 생성된 절점은 상호 경계면에서 절점이 일치하지 않아도 주위의 절점들로부터 정보를 불러와 평균값을 산출하므로 두 영역의 메시는 크기에 상관없이 생성할 수 있다.

유체 격자의 보정

유체압에 의한 구조물의 움직임 또는 자체 운동에 의해 유체 영역이 변하게 되며, 이러한 해석영역의 변화에 따라 유체의 메시를 보간 또는 재생성 해 주어야 한다. 메시 보간 기능으로 'Adaptive Mesh'와 'Leader-Follower' 그리고 일반적으로 회전체에 사용되는 'Sliding Mesh'를 사용할 수 있다. 그림 3은 유체압에 의해 움직이는 밸브에 대한 유체 메시를 보간하기 위하여 적응적 메시(adaptive mesh)를 사용한 모델을 예로서 나타낸 것이다.

ADINA-FSI 해석의 검증

각 구조와 유체 모델에서 정의된 해석 조건에 대한 정보를 가진 데이터 파일을 생성 후 각각의 solver를 이용하여 연성해석을 수행한다. FSI 해석이 완료되면 결과에 대한 확인은 Post-Processing에서 graph 및 수치적 결과값을 확인할 수 있으며, 주어진 해석 시간에 대한 시뮬레이션을 통해 유체의 유동 및 구조물의 움직임, 압력 분포 등 다양한 해석 결과를 확인할 수 있다. ADINA-FSI 해석 결과에 대한 신뢰성은 이미 수 년간 여러 산학 단체 및 연구기관들로부터 검증은 받아 왔으며 실제 실험데이터와 비교한 몇 가지 사례들을 소개하고자 한다.

냉장고 압축기

냉장고의 왕복동식 압축기에서 피스톤의 움직임에 대한 실린더 내부의 압력변화와 밸브의 기능에 의한 유체의 유동을 분석하기 위해 ADINA를 이용하여 연성해석을 수행하였다. 밸브는 압력에 의해 움직일 수 있도록 flexible body

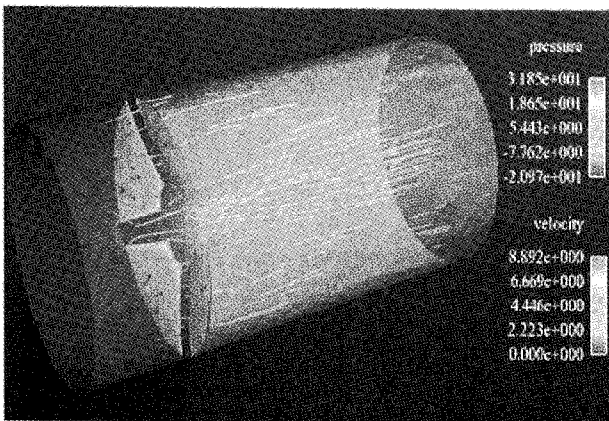


그림 3 밸브의 유체-구조물 해석에서 적응적 메시를 사용한 유체 격자의 보간

로 설정하고 그 외의 구조물과 피스톤은 변형이 없는 강성체로 가정하였다. 피스톤의 움직임과 함께 실린더 내부의 압력 변화로 인해 밸브의 개폐 조건을 gap 조건에서 설정해 주었다. 피스톤 운동의 사이클에 대한 실린더 내 압력변화를 실험에서 얻어진 측정 데이터와 ADINA-FSI와의 해석결과를 비교하였다. 그림 4는 피스톤의 움직임에 의한 실린더 내부 크기의 변화에 따라 ADINA에서 계산된 압력값을 나타내었으며, 실험데이터와 유사하게 나타난 것을 확인하였다.

유압엔진지부

차량진동 감소 및 차량진동 흡수장치인 유압엔진지부부(hydraulic engine mount)를 유체압에 의한 구조의 거동을 해석하기 위해 FSI 해석을 수행하였다. 진동수에 따른 동적강성(dynamic stiffness)과 손실각도(loss angle for 1.0mm excitation(2000N, 1mm)에 대한 해석결과(그림 5)

를 도출하여 실험 데이터와 유사하게 나타남을 확인하였다.

오일 제진기

기름으로 채워진 실린더와 작은 구멍을 가진 피스톤으로 구성된 오일 제진기(oil dash pot)는 피스톤이 움직이면서 구멍을 통과하는 유체의 점성 저항을 이용하여 장치의 운동을 완만하게 해 준다. 서로 다른 위치의 구멍이 막히는 시간대를 시간함수(time function)와 갭(gap) 조건을 이용하여 기름의 유출량을 설정하였으며, 해석 후 피스톤에 가해지는 반력(reaction forces)를 분석해 실험 데이터와 비교하였다.(그림 6)

연성 해석의 적용 범위

연성 해석의 범위는 구조나 유체 해석을 위한 모델링 작

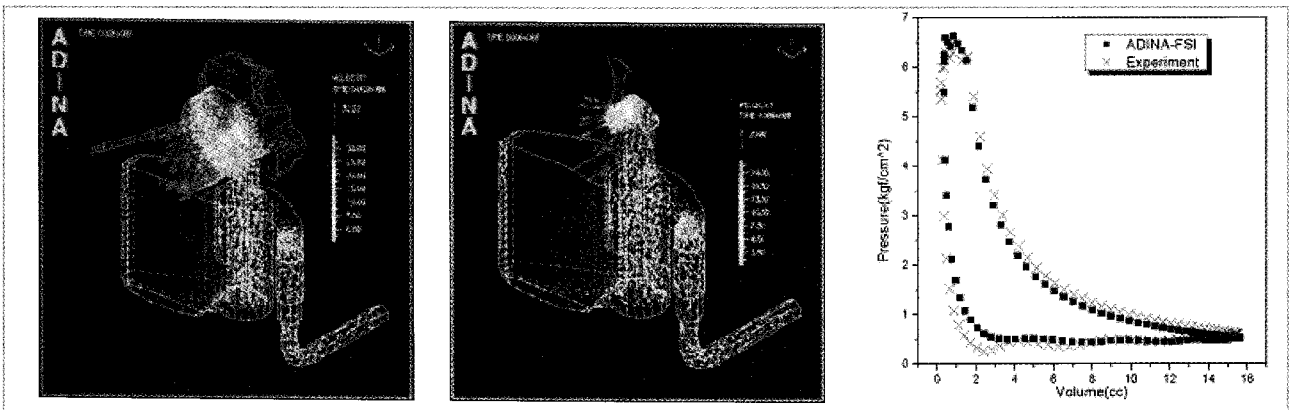


그림 4 실린더 압력변화에 대한 FSI 해석과 실험과의 비교

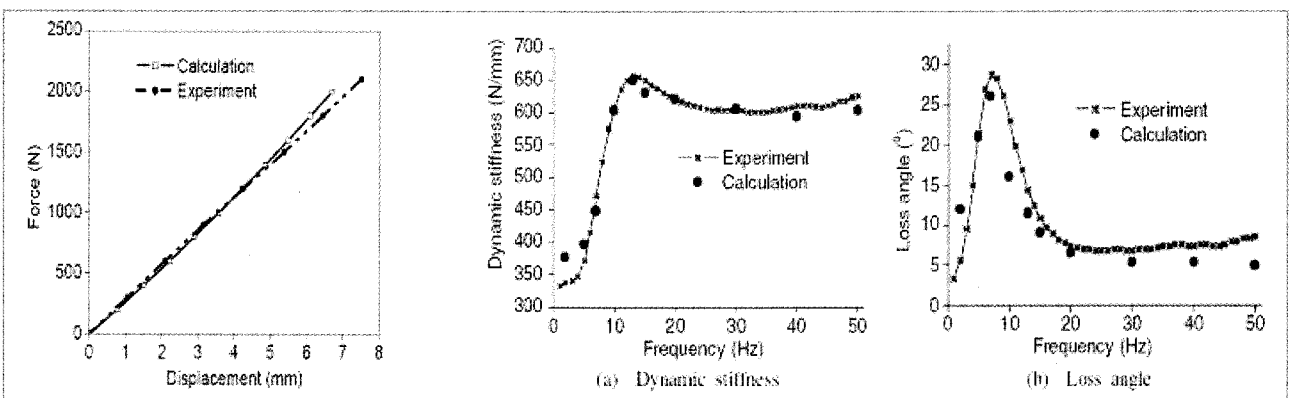
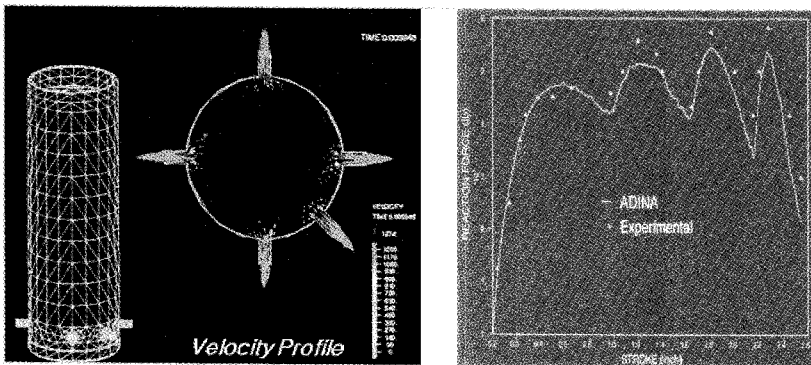
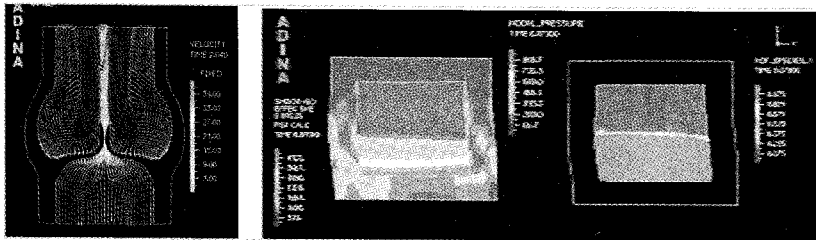


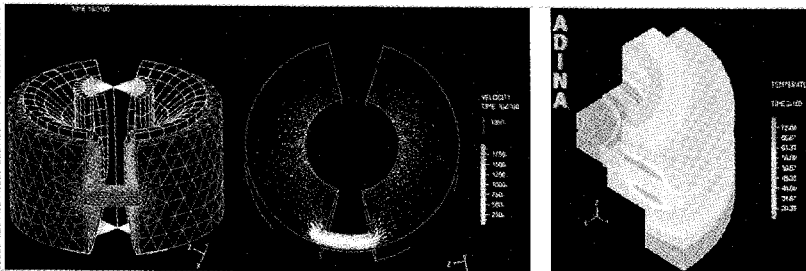
그림 5 유압엔진지부부의 FSI 해석 결과



오일 펌프의 FSI 해석 결과



혈류유동과 기름탱크 슬로싱의 FSI 해석 결과



유압지지부의 FSI 해석과 자동차 디스크 브레이크의 TMC(Thermal Mechanical Coupling) 해석

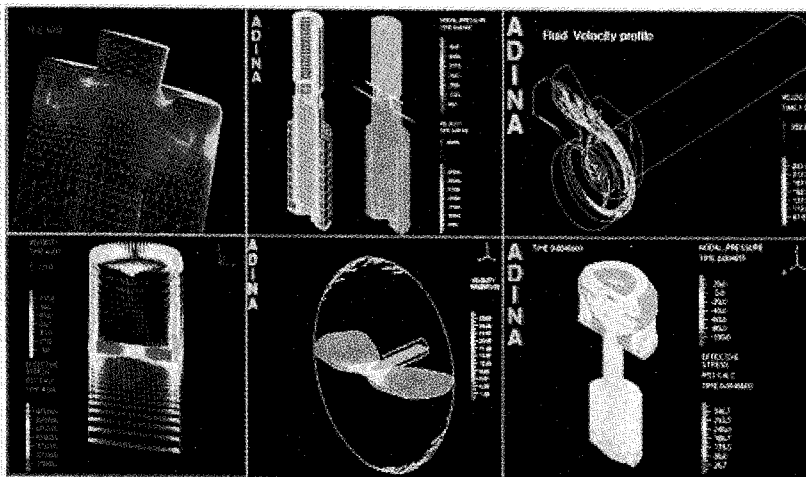


그림 9 ADINA를 사용한 멀티피직스 해석들

업에서 제약을 받지 않는 이상 FSI 해석 영역은 제한이 없다고 볼 수 있으며, 유체 슬로싱(sloshing)에 대한 구조와의 연성, 유체유발 진동, 열을 포함한 유체와 구조와의 열 전달 및 열팽창에 대한 상호 작용 등 다양한 분야에서 연성 해석 프로그램을 이용한 분석이 가능하다. 그림 7은 대동맥에서 혈류 유동에 따른 밸브의 움직임을 분석한 것으로서 혈관조직을 비탄성 재질로 정의하고 접촉조건을 주어 해석한 경우이다. 이 외에도 심장, 미세 혈관 등 혈류 유동에 변형이 일어나는 신체 기관에 대한 연구가 연성해석 프로그램과 함께 병행하여 추진되고 있다. 또한 자유표면(free surface) 해석을 위해 VOF 방식을 이용하여 sloshing 분석을 수행할 수 있으며, 유체 유동에 의한 구조에 미치는 영향을 연성해석으로 확인할 수 있다.

유체에 의해 유발되는 구조물의 진동에 대한 분석 역시 FSI 해석을 통해 가능하며, 자동차 분야, 원자력 분야, 교량건축 분야 등에서 적용되고 있다. 단순한 유체-구조 연성해석(FSI) 외에 온도 범위에 따른 구조물과 유체의 물성 변화를 고려해야 하는 경우 TFSI(Thermal-Fluid-Structure Interaction)를 통해 해석이 가능하다(그림 8). 이로써 유체에 의한 구조물의 변형뿐만 아니라 고온의 유체로부터 전달되는 열에 의한 변형까지 분석할 수 있으며, 구조에서 마찰에 의한 열 발생량을 분석, 구조물의 변형 해석은 물론 주위의 유체 흐름에 의한 냉각 상태를 확인할 수 있다. 그림 9에 ADINA를 활용한 다양한 멀티피직스 해석 결과를 보여주고 있다.