

# 열-유체-구조 연성 해석 특화 도구 ADINA 소개 및 해석 사례

## Introduction and Example of ADINA as the Tool of Thermal-Fluid-Structural Interaction Analysis

이 기사에서는 상용 소프트웨어인 ADINA를 이용한 열-유체-구조 연성 해석 기법을 소개하고 해석 사례를 다루어 현업에 적용 가능한 유효 활용 범위를 제시하고자 한다.

### 1. 다중 물리 해석 동향

현재 많은 연구 분야에서는 단일 분야에서의 결과에 대한 실용성의 한계를 느끼고 있는 실정이다. 이를 극복하기 위해 학제간 연계 연구의 필요성을 느끼고 있으며, CAE 산업계에서도 여기에 발 맞춰 다중 물리(multi-physics) 해석의 많은 관심을 두고 있다.

현재 상용 툴의 경우는 대부분이 한 분야의 해석 결과를 다른 연계 분야의 입력 값으로 설정하여 해석하는 방법이 주를 이루고 있다. 연계의 상호 작용 유무에 따라 1-way(한방향) 연성 해석 또는 2-way(양방향) 연성 해석으로 분류되고 있으며, 이러한 연계적 해석을 수행하기 위해서는 각 분야의 해당 툴이 모두 구비되어야 해석 수행이 가능하다.

MIT교수 Bathe의 연구 성과로 개발된 상용 툴인 ADINA는 자체 solver 내에서 학제간 연계 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이는 CAE 산업계에서 선구적으로 개발된 solver로서 근래에 와서 더욱 활발히 이용되고 있는 것이다. 주로 유체-구조 연성해석(FSI), 열-유체-구조 연성해석(T-FSI)의 기능이 많이 활용되고 있으며, 그 밖에도 전기장-구조, 열-전기, 음향-유체-구조 등 다양한 조합의 연계 해석이 가능하다. 그림 1은 ADINA의 해석 분야와 가능한 연계 해석의 모식도를 나타내고 있다.

- 유체-구조 연성해석 (Fluid-structure interaction, FSI)
- 열-구조 연성 해석 (Thermo-mechanical coupling, TMC)
- 구조-공극압 연성 해석 (Structural-pore pressure coupling, porous media)
- 열-유체-구조 연성 해석 (Thermal-fluid-structural interaction)
- 전기장-구조 연성 해석 (Electric field-structural coupling, piezoelectric)
- 열-전기 연성 해석 (Thermal-electrical coupling, Joule heating)
- 음향 유체-구조 연성 해석 (Acoustic fluid-structural coupling)
- 유체 유동-물질 전달 연성 해석 (Fluid flow-mass transfer coupling)
- 유체 유동-전자기 연성 해석 (Fluid flow-electromagnetic coupling)



우 태 기

에이블맥스(주) CAE사업부 선임연구원

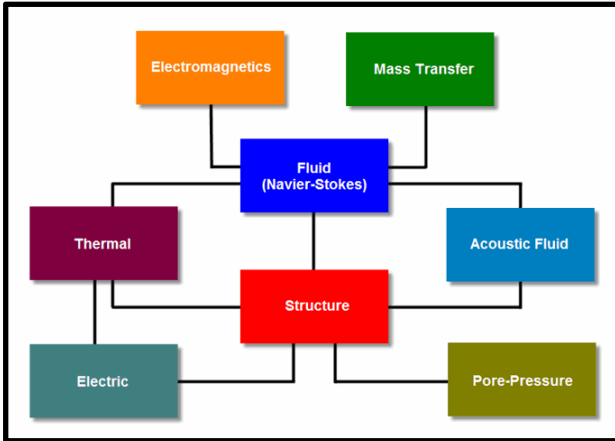


그림 1 ADINA에서 가능한 다중물리해석 개략도

본 기고문에서는 가장 활용도가 높은 T-FSI 즉, 열-유체-구조 연성 해석에 대한 소개를 하고자 하며, 사례를 통하여 여러 연구원과 엔지니어들에게 본 연성 해석의 활용 예시를 소개하고자 한다.

## 2. ADINA의 열-유체-구조 연성 해석 기법 소개

T-FSI 연성 해석에 대한 설명에 앞서 유체와 구조 각각의 해석에서 사용되는 기본 알고리즘인 FVM (finite volume method)과 FEM (finite element method) 관련 ADINA의 처리 기법에 대한 설명을 하고자 한다. 대부분의 상용 유체 해석 툴에서 사용되는 방법은 FVM (finite volume method)이며, 구조 해석에서 사용되는 방법은 FEM (finite element method)이다. 연성해석의 경우, FVM과 FEM 간의 소통이 필요한데 계산법의 차이로 인하여 서로간 정보교환에 있어서 정합성을 확보하는데 많은 노력이 필요하고 많은 해석 시간 소요 등의 불편함이 있을 수 있다. 이러한 근본적인 문제들을 해결하기 위하여 ADINA는 프로그램 내에 FVM과 FEM을 함께 사용할 수 있도록 개발되었으며, 유체와 구조영역에서 해석한 정보를 매 해석시간마다 주고 받을 수 있게 하였다. 이러한 내부 통합형 연성 해석 프로그램은 기존의 이종 툴간의 연성 해석 방법과 비교하여 전체 해석시간을 단축시킬 수 있다. 연성 해석의 개발과 상용화는 유체 해석과 구조 해석의 상호작용에 대한 이해를 돕고 실험을 통해 얻기 힘들었던 가시적 결과 확인을 가능하게 하여 많은 연구에 기여하였다.

ADINA 툴의 solver는 다양한 공학 분야 문제를 해결할 수 있도록 구조, 유체, 열전달, 전자기, 음파(유체), 전기,

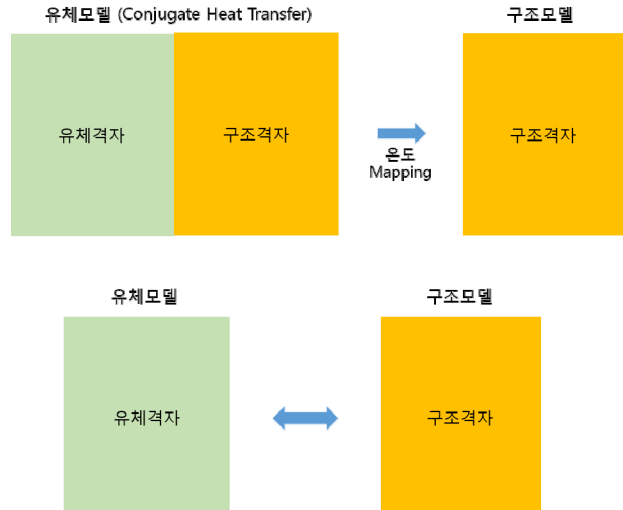


그림 2 1-way(위)와 2-way(아래) T-FSI 의 개념도

물질 전달 모듈로 구성되어 있다. 이러한 여러 분야를 연계하여 해석함으로써 다중 물리 해석을 구현할 수 있는 것이다. 이 중 T-FSI는 thermal-fluid-structure interaction의 약자로서 ADINA에서 가장 활용도가 높다고 할 수 있으며, 본 해석의 구성은 그림 2와 같이 2가지의 방식으로 표현될 수 있다.

1-way 연성 해석의 경우 유체 모델과 구조 모델의 격자를 한번에 모두 생성 후 유체와 열에 대한 해석 먼저 실행한 후, 구조 해석으로 결과 정보를 입력하여 최종 결과인 구조 해석의 결과를 도출한다. 예를 들어 유체의 압력이나 온도 분포 결과들이 구조 모델의 경계조건으로 사용되며, 이것들이 구조 해석의 경계조건과 결합되어 최종 구조 해석이 진행된다.

2-way 연성 해석의 경우 유체 모델과 구조 모델의 격자를 각각 생성해야 하며, 유체 해석 결과를 구조해석으로 전달하고 이것을 경계조건으로 사용한 구조 해석의 결과를 다시 유체 해석의 경계조건으로 입력함으로써 양방향 연계가 가능하다. Steady한 결과를 도출하기 위하여 통상 3회 이상의 해석이 필요한 경우가 많다. 이때 유체 모델 안에서 열 해석이 이루어지는 것과 구조 모델 안에서 열 해석이 이루어지는 방법(thermo-mechanical coupling, 열-구조 연성 해석) 모두 적용 가능하다.

보통 연성 해석을 실시하는 주체는 구조 해석 전공자인 경우가 많다. 열-유체의 거동으로 인한 구조물의 응답을 확인하고자 하는 경우 연성 해석을 요구하기 때문이다. 경험상 유압 또는 열을 동반한 유압에 의한 구조물의 변형 및 피로 파괴에 대한 관심이 상당하다. 반대의 경우로

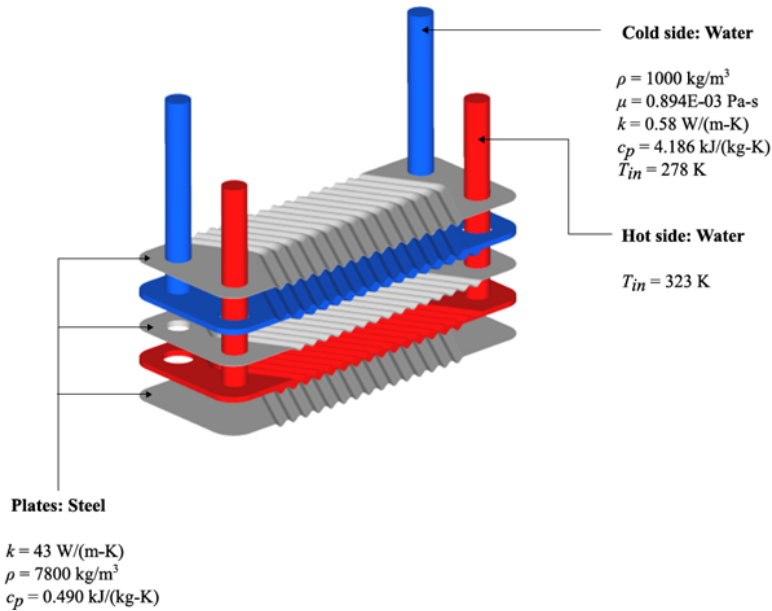


그림 3 열교환기 형상 및 물성

구조모델 격자: 366,558 3D Solid 요소로 구성

유체모델 격자: 7,190,413 3D Fluid 요소로 구성

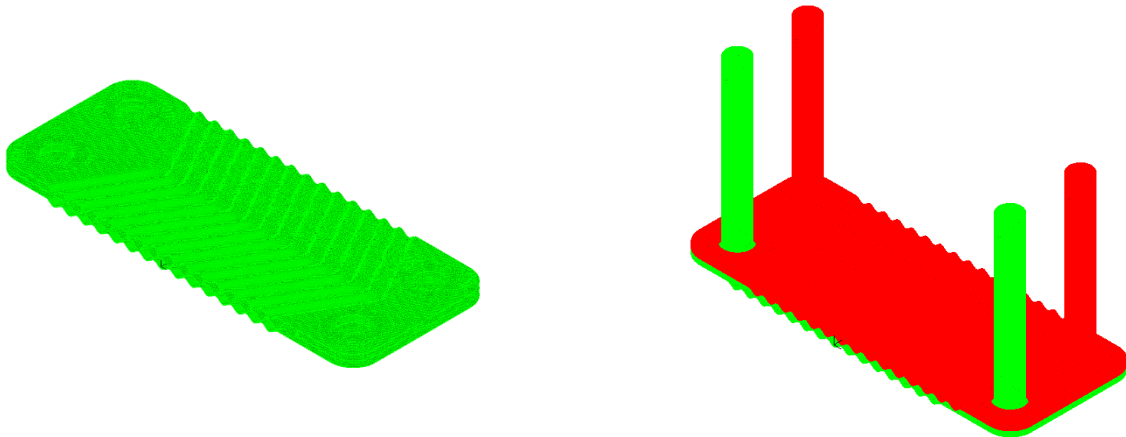


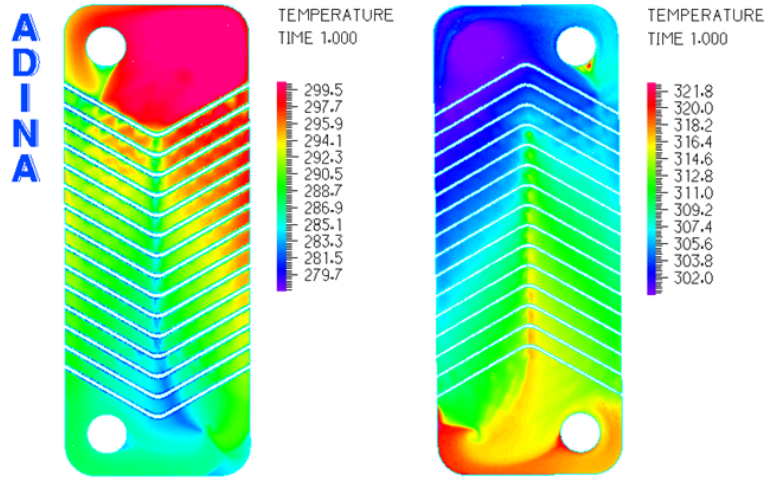
그림 4 ADINA 해석 모델

서 구조물의 거동에 의한 유체 유동의 영향 그리고 특정 온도 범위에 따른 유체와 구조물의 특성변화를 고려한 연성해석의 필요성이 점차 증대하면서 2-way 연성 해석의 관심이 증가하는 추세에 있다.

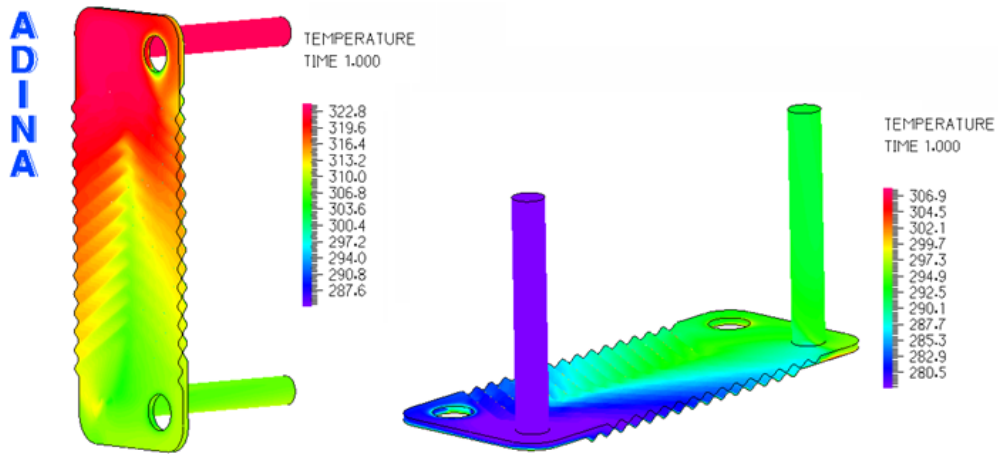
### 3. T-FSI 해석 사례 : 판형 열교환기

판형 열교환기는 대표적인 T-FSI 해석의 대상이다. 본 사례는 유체와 구조물을 통한 열전달의 결과인 온도 분포와 온도 구배로 인한 구조물의 열응력 평가를 목적으로

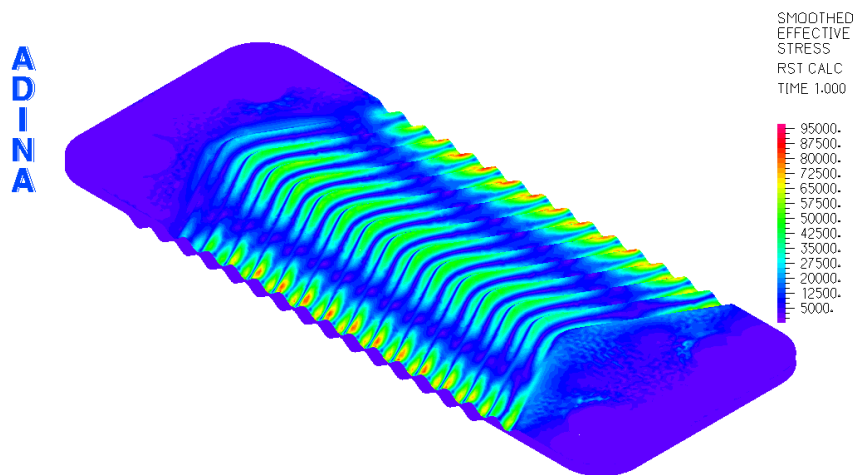
진행되었으며 2-way 연성 해석 방법을 사용하여 수행되었다. 그림 3은 해석을 위한 3차원 CAD 모델과 재료의 물성 및 경계조건을 나타내고 있으며, 그림 4는 구조 영역의 FE mesh 모델과 유체 영역의 FV mesh 모델의 정보를 나타내며, 해석 결과는 그림 5에 나타내었다. 구조물의 온도 분포, 경계면 유체의 온도 분포, 구조물의 응력 분포를 순서대로 나열하였다. 참고사항으로 본 해석에서 판형 열교환기의 열 전달계수는  $1512 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 로 계산되었으며 해석대상과 동일한 3개의 plate로 구성된 일반적인 판형 열교환기의 열전달계수는  $1000 - 4000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  범위 안에 있는 것으로 확인되었다.



〈Hot side & Cold side Plate 온도 분포〉



〈Hot side & Cold side 경계면 유체의 온도 분포〉



〈중간 Steel Plate의 응력〉  
그림 5 ADINA 해석 결과

2-way 연성 해석 방법의 경우 유체가 미치는 고체의 변위량이 유의할 경우 이 변위가 유체에 미치는 영향을

해석하여 최종적인 유체 거동의 변화까지 관찰할 수 있는 장점이 있다. 구조의 미세한 변위도 성능에 지대한 영향

을 줄 수 있는 미세구조물 또는 유체에 민감도가 높은 구조물 등의 해석 시에 매우 유용한 해석 방법으로 추천된다.

ADINA T-FSI 해석은 위와 같이 열을 동반한 유체와 구조 문제에 있어서 어떠한 적용분야라도 쉽고 빠르게 해결할 수 있는 도구로 활용될 수 있을 것으로 전망한다. 