

# 유동해석 DAY 1



# CONTENTS

## 유동해석을 잘 하기 위해 알아야 할 모든 것

---

**Session1. 유동해석을 위한 기초사항**

**Session2. 경제성 있는 유동해석을 위한 방법**

**Session3. 에너지방정식을 이용한 온도분포 활용하기**

**Session4. 열변형 연성해석 간단하게 이용하기**

## 유체를 어렵다고 느끼는 이유



무색 무형의 매질 특성 - 관찰과 예측이 어려움



경험적 행동

## 건물의 환기 시스템 설계



<https://hvacgnome.com/blog/hvac/what-is-packaged-hvac-system/>

팬의 위치는?  
개수는?

왼...쪽?, 1개는 약하  
니까 2개정도?

건물 내부 구조물의 위  
치?

구조물을 이리로 옮기면  
잘 흐를 것 같은데?

경험적 실험적 접근

## 밸브/관형상 설계

이 부분에서 부품 교체가  
많이 일어나네? 왜?

보이지 않고 유체 속도가  
빨라 상상하기 힘들네..

뭐가 문제지?

다른데선 이렇게 하던  
데? 따라해볼까?

벤치 마킹(역설계)



<https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-piping-system/>



<https://www.oliverheatcool.com/diy/plumbing-repair/how-to-fix-a-leaking-pipe/>



유독가스라 실험하기 위험한  
데..

폭발위험이 있는거  
아닌가?

고온/위험환경

## 정량적 체크 - 실험

<https://boomsupersonic.com/flyby/what-is-wind-tunnel-testing>



제한적 조건으로 실험이 어려움

## 정량적 체크 - 실험

<https://www.youtube.com/watch?v=ubyxYHFv2qw>



# CFD의 필요성

## 유동 분석의 한계와 CFD를 통한 극복

### ① 관찰과 예측이 난해

전산 자료이므로 시각화 용이

### ② 위험성

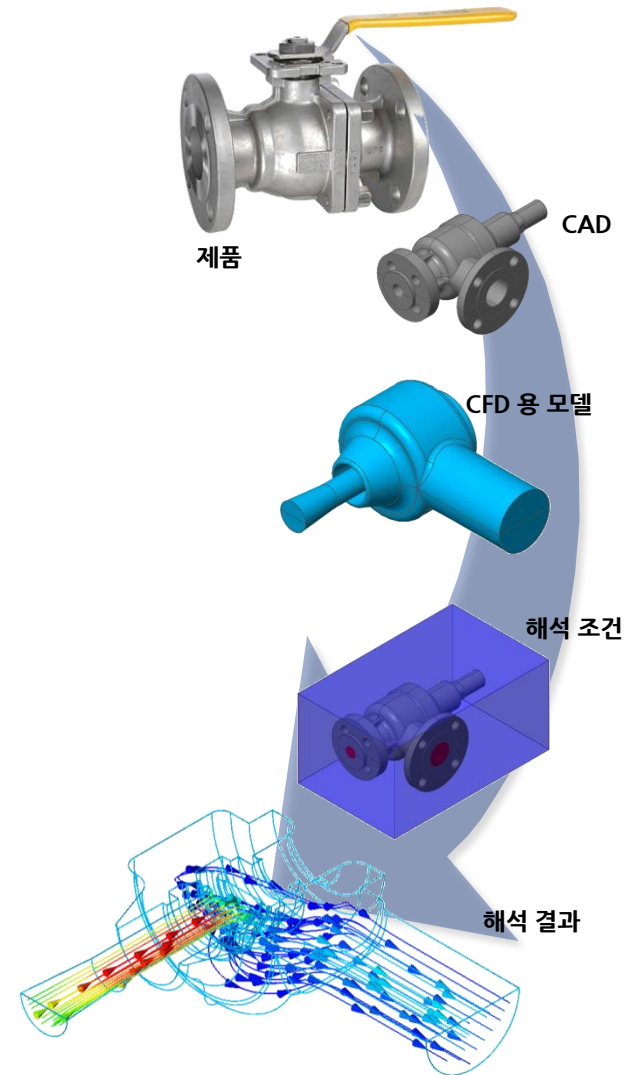
가상의 컴퓨터 환경에서 시뮬레이션

### ③ 밀폐 · 고속운동

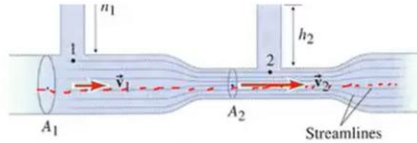
전산 자료이므로 밀폐 용기 내부도 확인 가능

### ④ 저렴한 가격

다양한 컨셉의 형상에 대해 컴퓨터 계산만으로 결과 확인 가능



# 그래도 비싸던데.. 손계산으로 문제들을 풀수는 없을까?



then  $v_2 > v_1$   
 $\downarrow P_1 + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$   
 $P_2 < P_1$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_{atm} + \rho g h_1 \\ P_2 &= P_{atm} + \rho g h_2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \Delta P &= \rho g (h_1 - h_2) \\ \Delta P &= \rho g h \end{aligned}$$

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$y_1 = y_2$$
  

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$
  

$$\rho g h = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

$$g h = \frac{1}{2} \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} v_1^2 - v_1^2 \right)$$
  

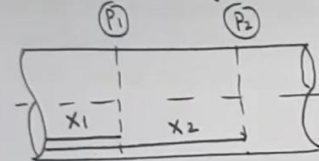
$$g h = \frac{1}{2} v_1^2 \left( \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 g h}{\left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}}$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

간단한 형상에서의 유동문제 풀이 가능  
(이론 식 존재)

③ Drop of Pressure for given length of pipe



$$P_1 - P_2 = \frac{8 \mu \bar{u}}{R^2} (x_2 - x_1)$$

$$x_2 - x_1 = L$$

$$P_1 - P_2 = \frac{8 \mu \bar{u}}{R^2} \cdot L$$

$$R = D/2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{8 \mu \bar{u} L}{(D/2)^2}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{32 \mu \bar{u} L}{D^2}$$

$$h_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

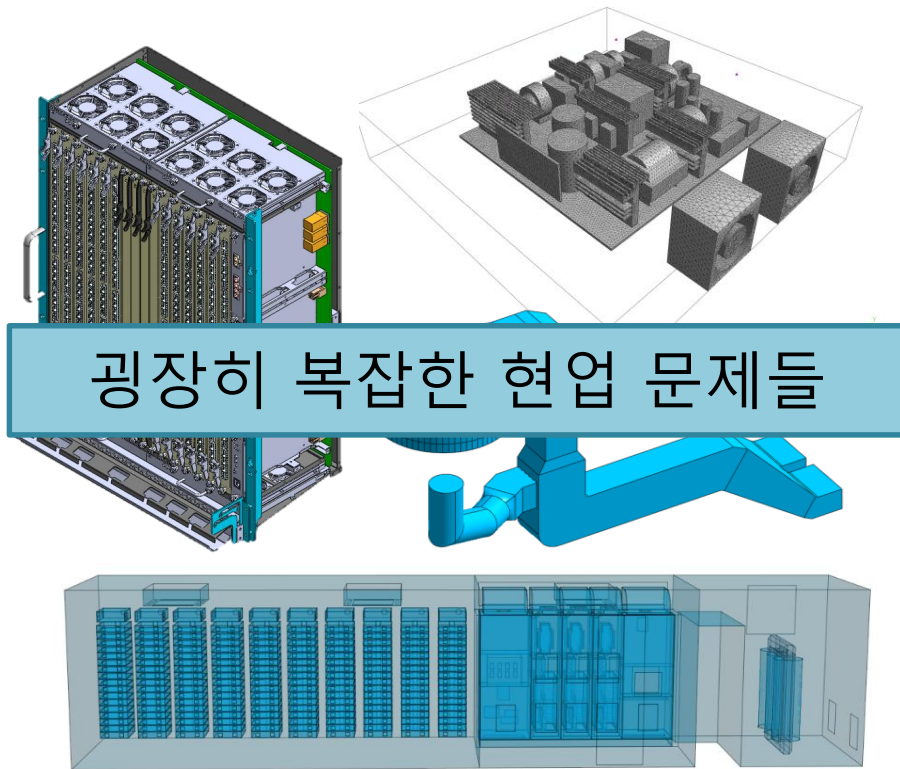
$$h_f = 3$$

Integrating  

$$-\int dp = \int \frac{8 \mu \bar{u}}{R^2} dx$$
  

$$-(P_1 - P_2) = \frac{8 \mu \bar{u}}{R^2} (x_1 - x_2)$$

# Navier-Stokes Equations 의 등장



## Navier-Stokes Equations

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

이산화한 나비에 스톡스 방정식

# Navier-Stokes Equations

연속 방정식

유체의 밀도 변화식

**압축성 유체 / 비압축성 유체**

운동량 방정식

유체는 압력, 점성, 외력으로 인해 움직임이 생겨난다

**압력/ 표면점성효과(경계층) 설정**

# Navier-Stokes Equations

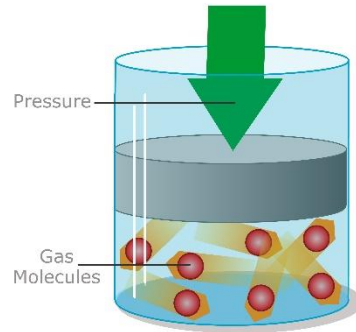
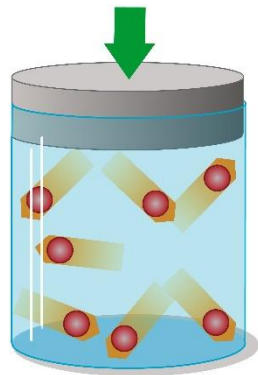
연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho u)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$



Gas Pressure



액체

비압축성 유체

공기 - 속도가 느리다(마하수 < 0.3)

비압축성 유체

공기 - 속도가 빠르다(마하수  $\geq 0.3$ )

압축성 유체

# Navier-Stokes Equations

운동량 방정식(F = ma)

이류(관성)항 — 해석에 따라 달라지는 계산값

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu \left[ \mathbf{u}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] \right) + \rho \mathbf{g}$$

압력항
점성항
외력항  
(중력, 전자기 등)

해석 설정을 위해 필요한 항

$$\boxed{\text{유체의 가속도}} = \boxed{\text{압력항}} + \boxed{\text{점성항}} + \boxed{\text{외력항}}$$

# 운동량 방정식

## 압력항



입구와 출구의 압력차 설정

입구단

선 입구단 면 입구단

이름 면 입구단-3

대상형상

종류 면

대상선택

종류

속도  압력  질량유량

검조방향

종류 법선방향 유입 제어

압력

P 400 N/m<sup>2</sup> 없음

CFD 경계세트 유동해석 경계조건 세트-1

확인 취소 적용

출구단

선 출구단 면 출구단

이름 면 출구단-3

대상형상

종류 면

대상선택

종류

압력  변화없음(속도)

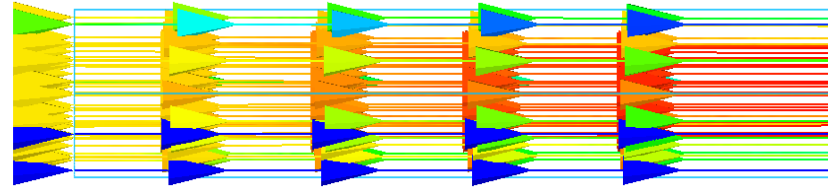
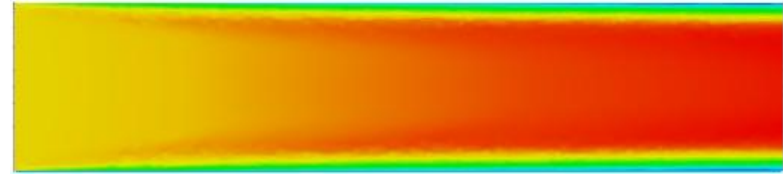
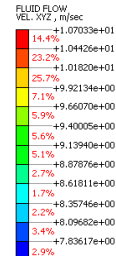
압력

P 100 N/m<sup>2</sup> 없음

역류 제어

CFD 경계세트 유동해석 경계조건 세트-1

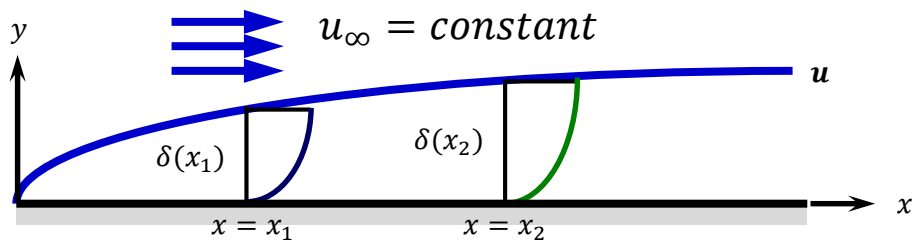
확인 취소 적용



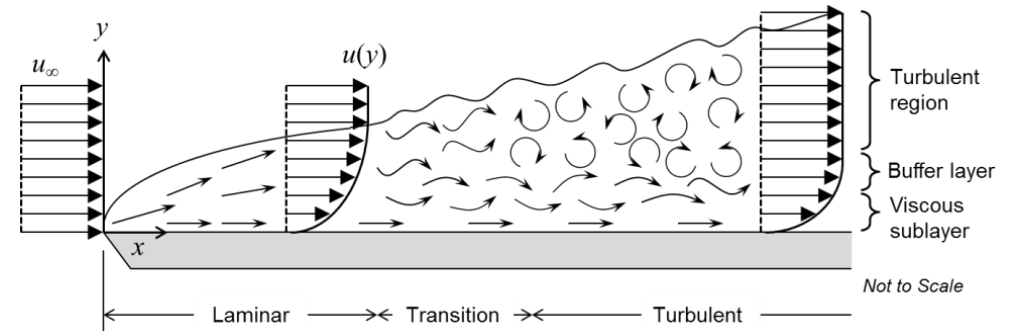
<압력차에 의한 속도 발생>

# 운동량 방정식

## 점성항(경계층 - 벽면 효과)



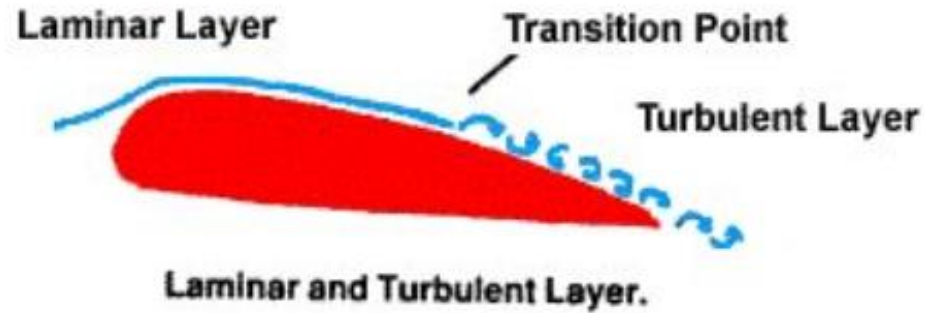
<경계층 - 층류>



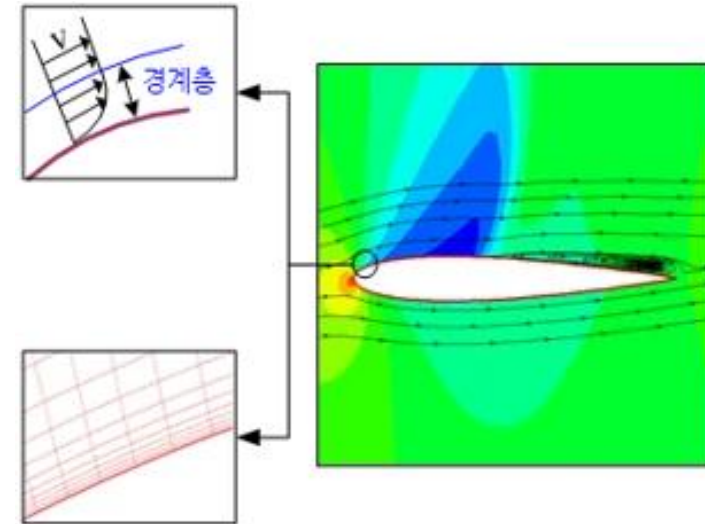
<경계층 - 층류→난류>

# 운동량 방정식

## 점성항(경계층 - 벽면 효과)

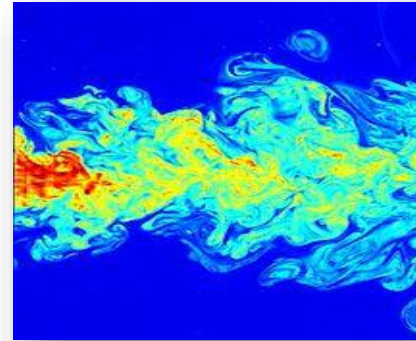


<항공기 에어포일 주위 공기 흐름 예시도>



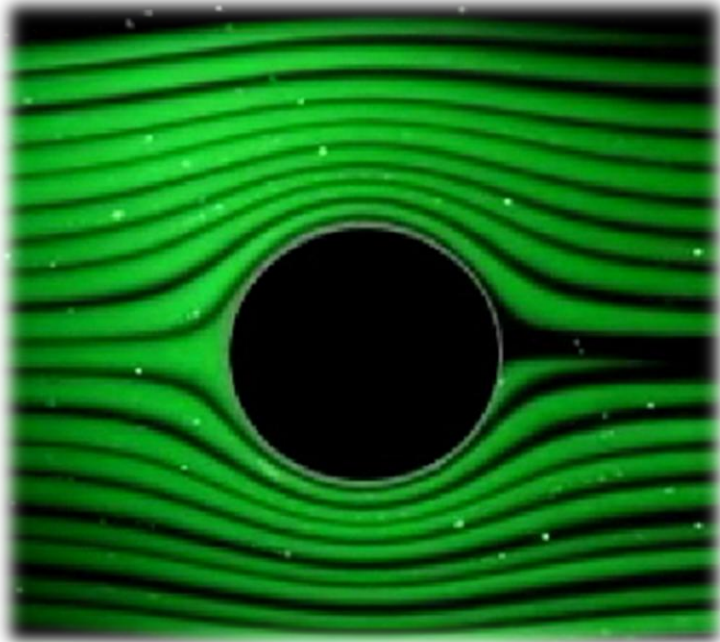
구조물 근처에서 격자 해상도를 높게 설정

# 층류(Laminar flow)와 난류(Turbulent flow)

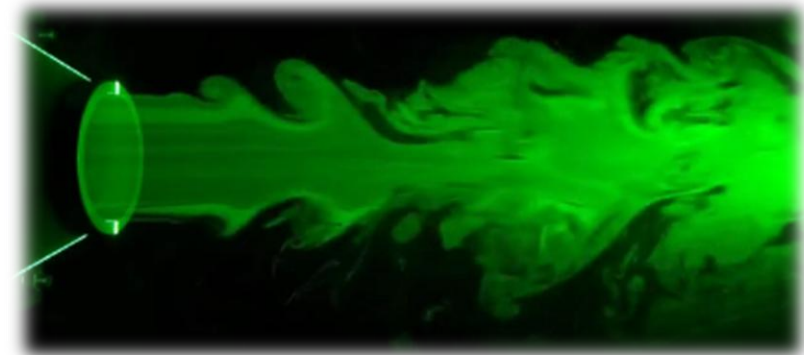


<난류형태의 예>

# 층류(Laminar flow)와 난류(Turbulent flow)

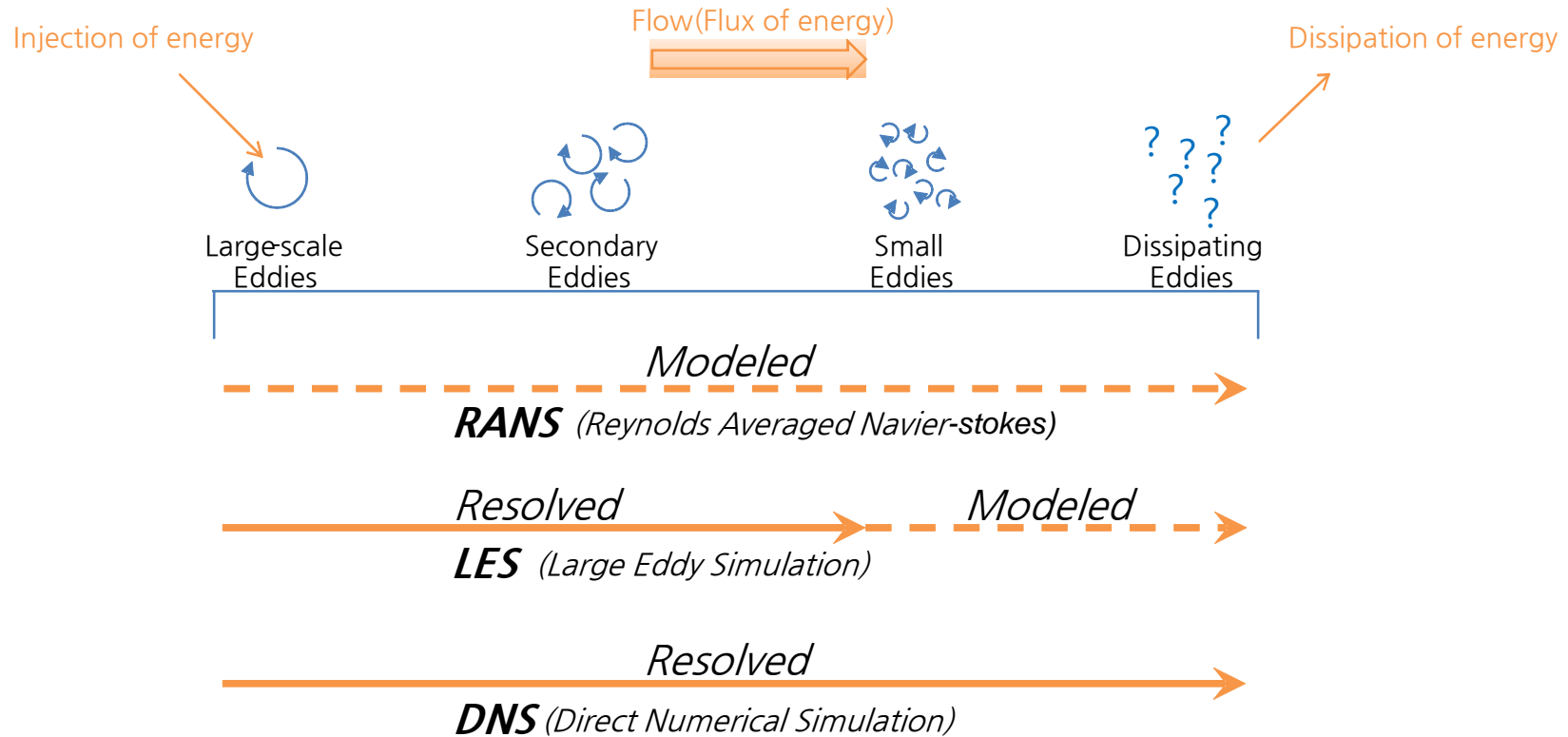


층류(Laminar Flow)



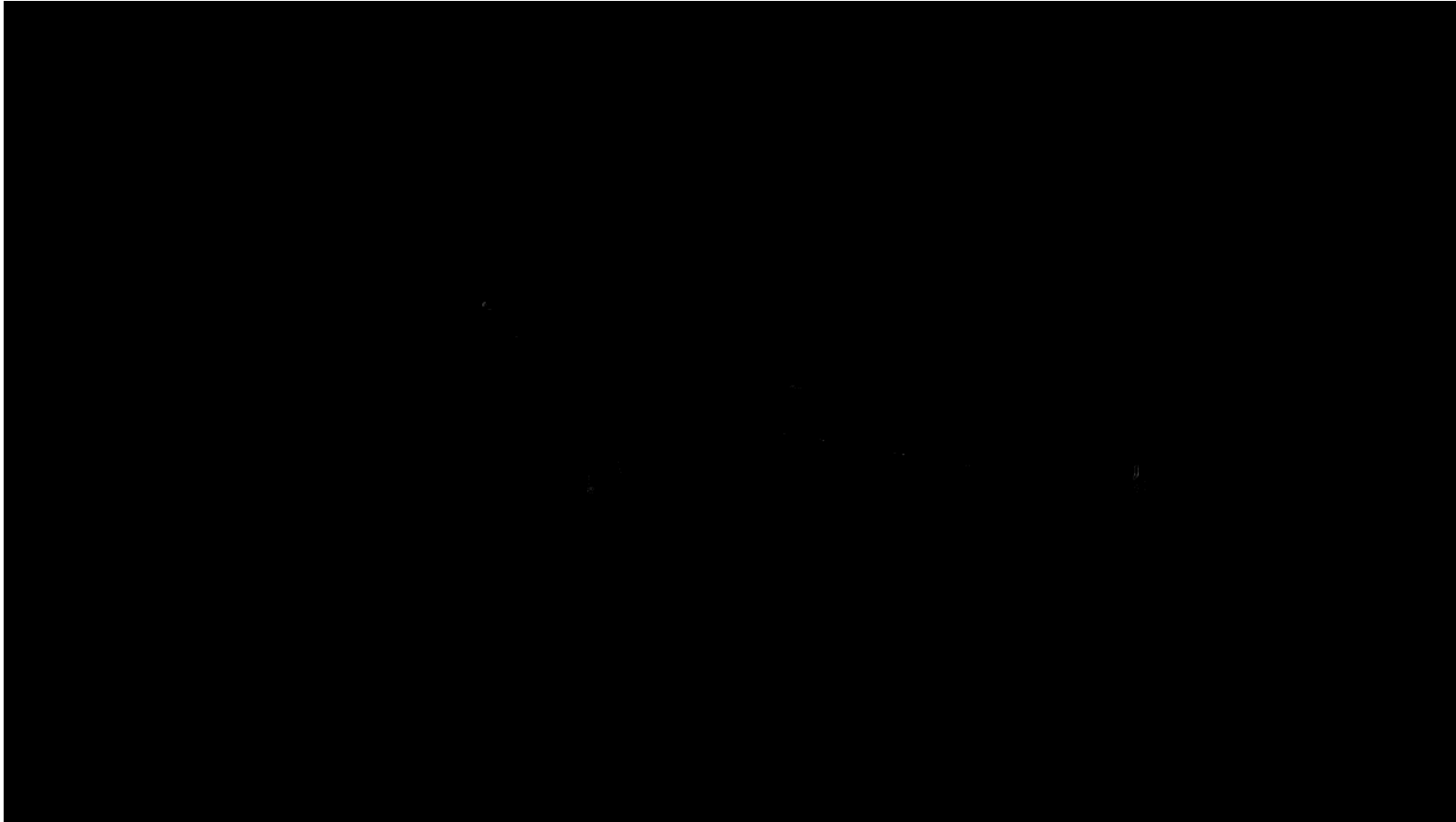
난류(Turbulent Flow)

## CFD에서의 난류 흐름 모사

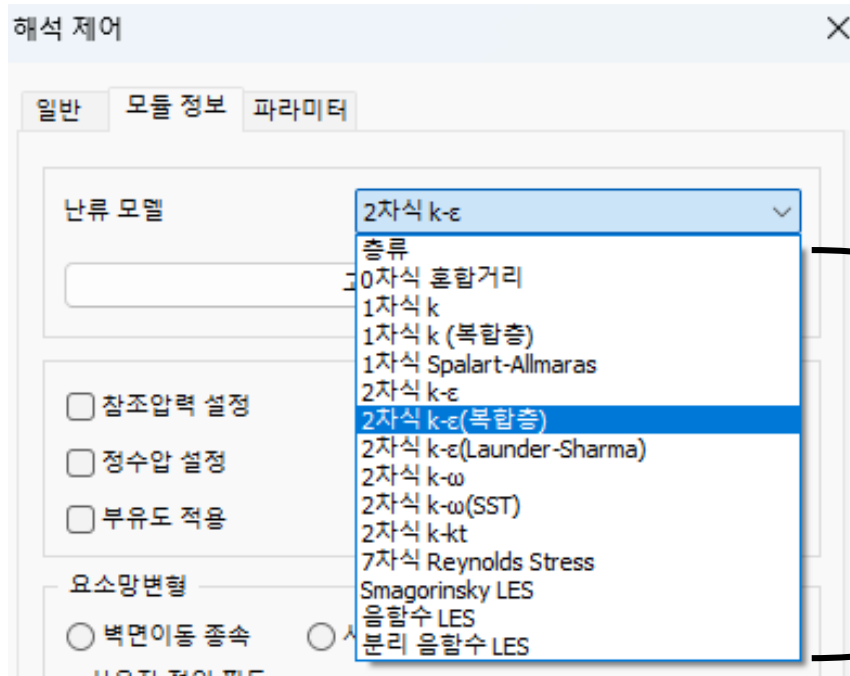


# CFD에서의 난류 흐름 모사

<https://www.youtube.com/watch?v=aR-hehP1pTk>



# 난류모델 설정



해석에 맞는 다양한 난류모델  
선택

# Navier-Stokes Equations

연속 방정식

유체의 밀도 변화식

**압축성 유체 / 비압축성 유체**

운동량 방정식

유체는 압력, 점성, 외력으로 인해 움직임이 생겨난다

**압력/ 표면점성효과(경계층) 설정**

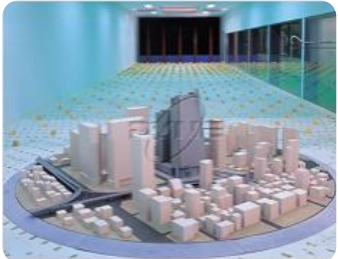
# 쿠웨이트 올림픽 경기장 풍동 해석(외부유동)

## Overview

### □ 해석 목적

- 올림픽 경기장의 형태의 다양성에 의한 기존 풍하중 건설 코드 적용 불가
- CFD 해석을 이용하여 풍하중을 형상에 따라 산출 가능

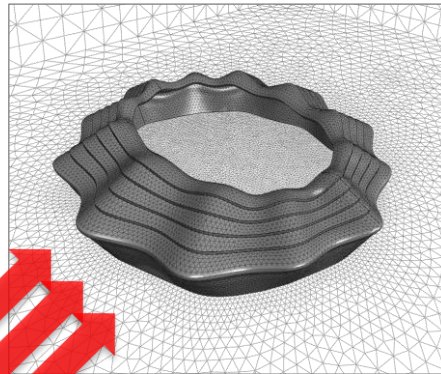
### □ 해석 종류



- 일반유동 해석

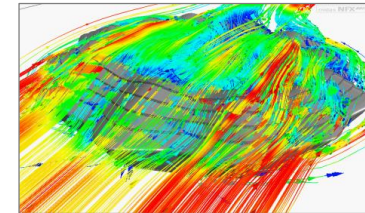
### □ 해석 조건

- $k-\epsilon$  (RANS) 난류 모델, 초기 안정화 스텝 적용
- 지면으로부터의 높이에 따른 속도 프로파일 적용

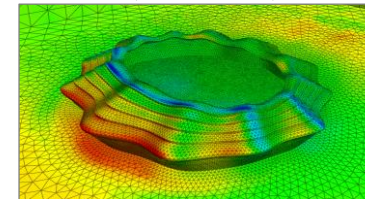


유속조건의 함수입력 가능 : 속도프로파일 입력

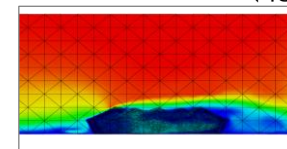
- 경기장 표면에 대한 압력 테이블 산출 가능
- 강한 풍하중에 대한 기류 흐름 분석 가능



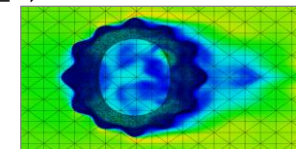
<유선 흐름 가시화>



<하중 분포>



<절단면 속도 분포>



<절단면 속도 분포>

# 혈류 흐름을 고려한 동맥 협착 평가(내부유동)

## Overview

### □ 해석 목적

- 혈관 협착 평가
- 입구부 압력 대비 특정 위치 압력을 나타내는 FFR 값을 산출 하여 해당 값의 변화로 협착 예측 가능

### □ 해석 종류



- 일반유동 해석

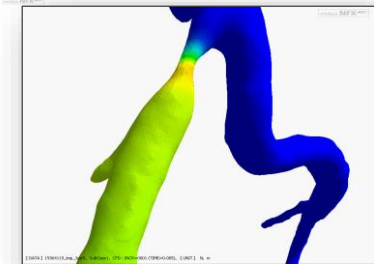
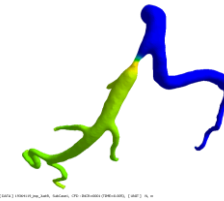
### □ 해석 조건

- 초기 안정화 스텝 적용
- 입구단 조건(유량)
- 출구단 조건(압력)
- 벽면 조건(점착) 이용

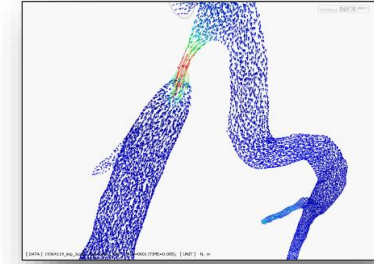
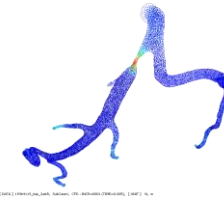
혈관조영술을 통한 해석 형상 확보



- 혈류에 대한 압력분석 (FFR : 입구부 압력 대 해당 위치 압력)
- 속도 벡터 가시화를 통한 혈류 흐름 분석



<협착 부위 유압 평가>



<협착 부위 유체흐름 평가>

# 밸브 시스템 특정 개도에 따른 성능 평가

## Overview

### □ 해석 목적

- 특정 개도에서의 밸브 성능 평가
- 밸브 성능 평가를 위한 차압 평가 및 유량 분석

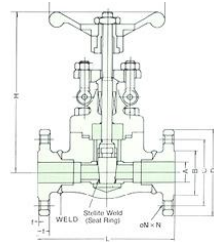
### □ 해석 종류



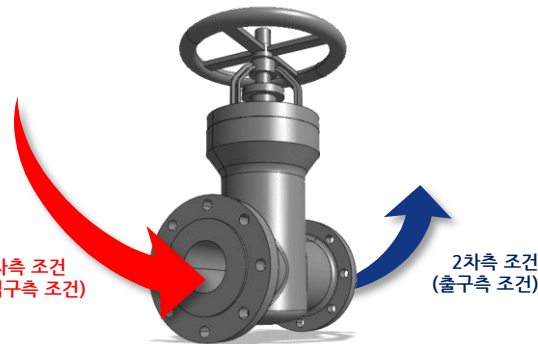
- 일반유동 해석

### □ 해석 조건

- k-ε(RANS) 난류 모델, 초기 안정화 스텝 적용
- 선형적정해석: 결과변환 기능을 통한 압력하중분포 입력



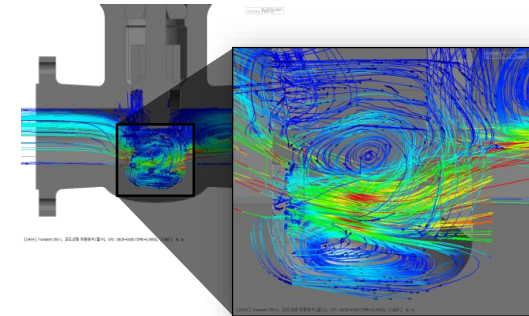
벽면 조건 설정



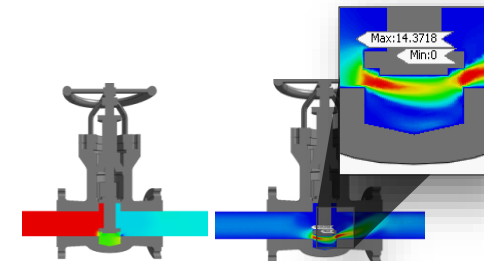
1차측 조건  
(입구측 조건)

2차측 조건  
(출구측 조건)

- 입구측 출구측 압력 계산을 통한 차압 평가
- 유속 분포 확인 및 유량 가시화 기능을 통한 유량 평가



<유체의 흐름 및 와류 평가>



<차압 분석>

<최대 유속 · 동압 평가>

# 헤어드라이어 해석

## Overview

### □ 해석 목적

- 헤어드라이어 성능 분석

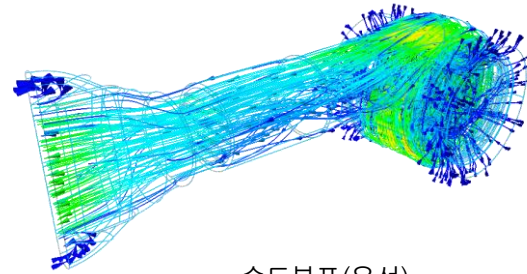
### □ 해석 종류



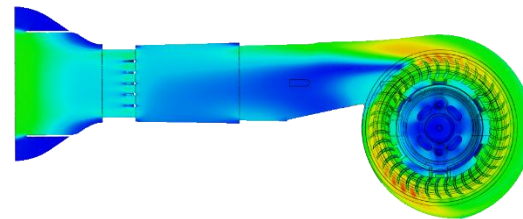
- 일반유동 해석
- 이동참조프레임 해석

### □ 해석 조건

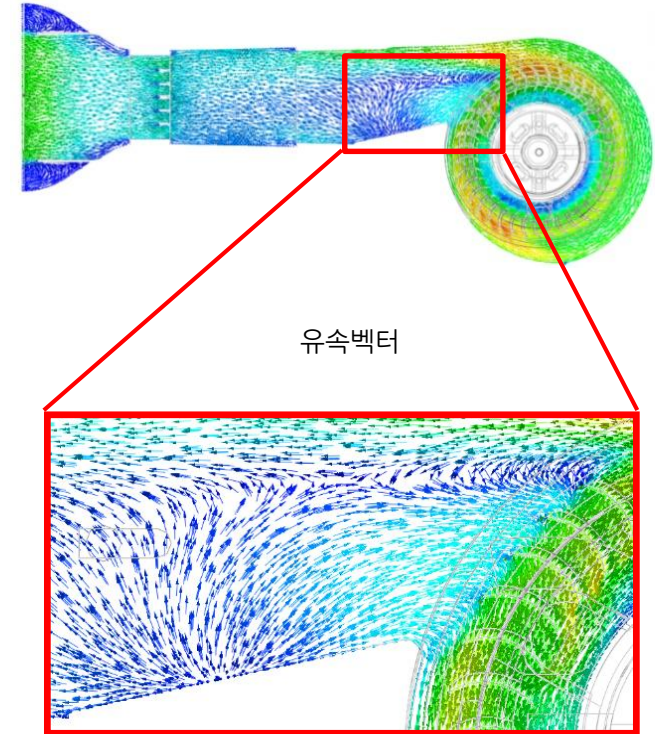
- 헤어드라이어 내부 유동해석
- 제품별 rpm에 따른 최대 토출 풍속 예측



속도분포(유선)



속도분포(컨투어)



유속벡터

# 교반기 유동해석

## Overview

### □ 해석 목적

- 교반기 혼합성능 확인
- 배플의 위치와 크기에 따른 영향 검토

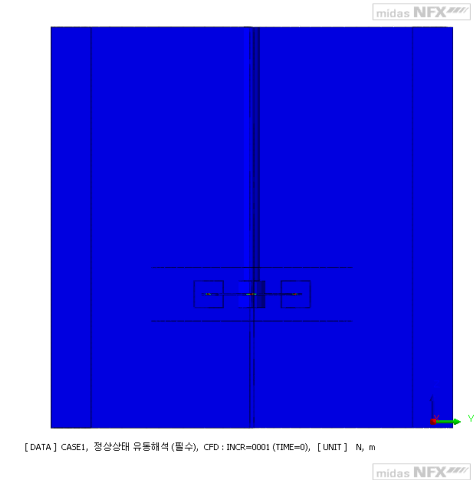
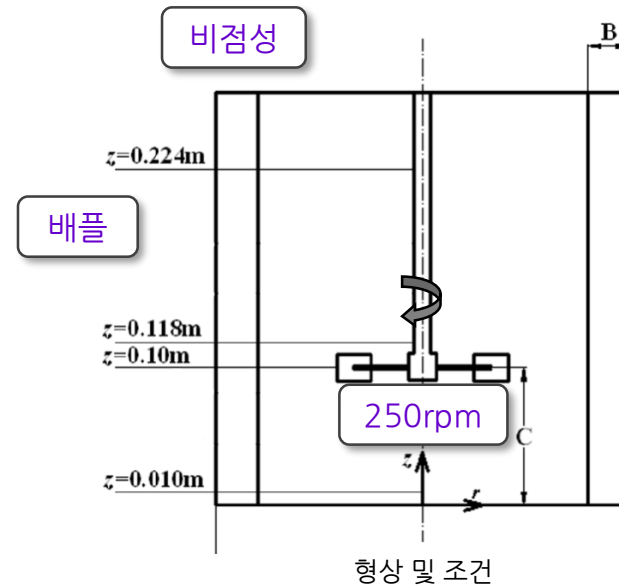
### □ 해석 종류



- 일반유동 해석
- 이동참조프레임 해석

### □ 해석 조건

- 배플이 달린 교반기의 혼합 성능 해석
- MRF(Moving Reference Frame) 기법을 활용하여 계산 속도 향상



속도분포



속도벡터

[DATA] CASE1, 정상상태 유동해석 (일수), CFD : INCR=0001 (TIME=0), [UNIT] N, m

## 2축 교반기 혼합성능 평가

### Overview

#### □ 해석 목적

- 2축 교반기 내부 유동현상 분석

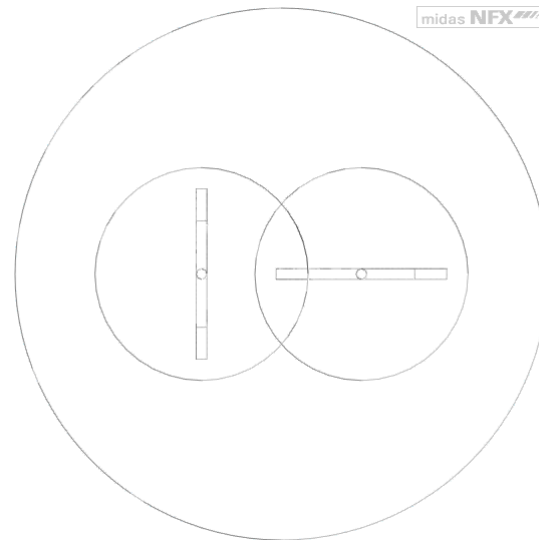
#### □ 해석 종류



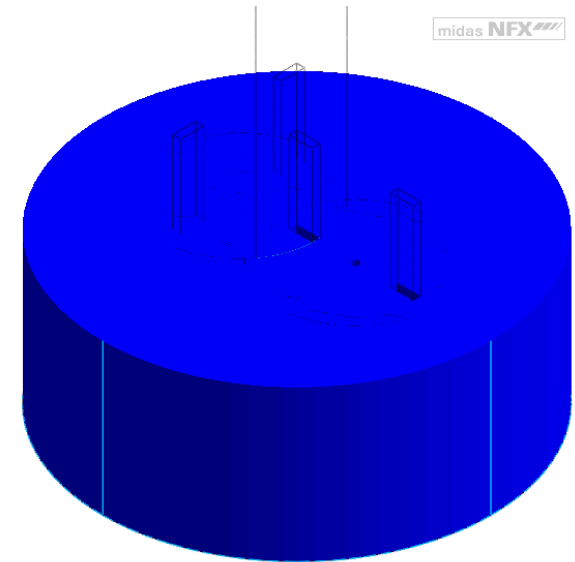
- 일반유동 해석
- 중첩요소망 해석

#### □ 해석 조건

- 공/자전을 하는 2축 교반기 혼합성능 평가
- 속도전파 및 임펠러간 간섭현상 분석

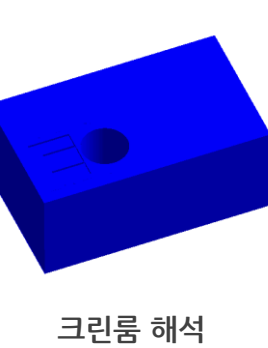
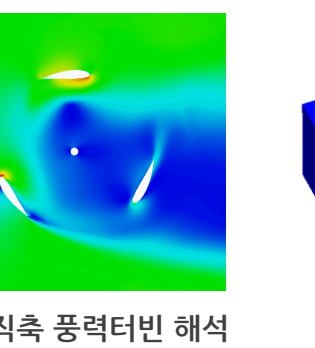
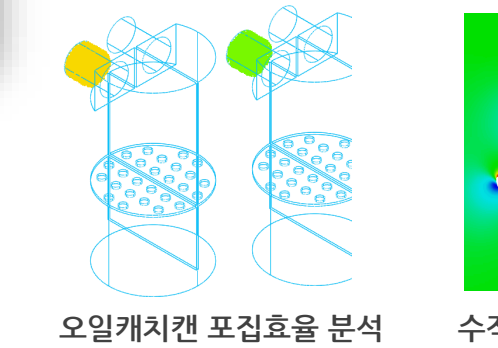
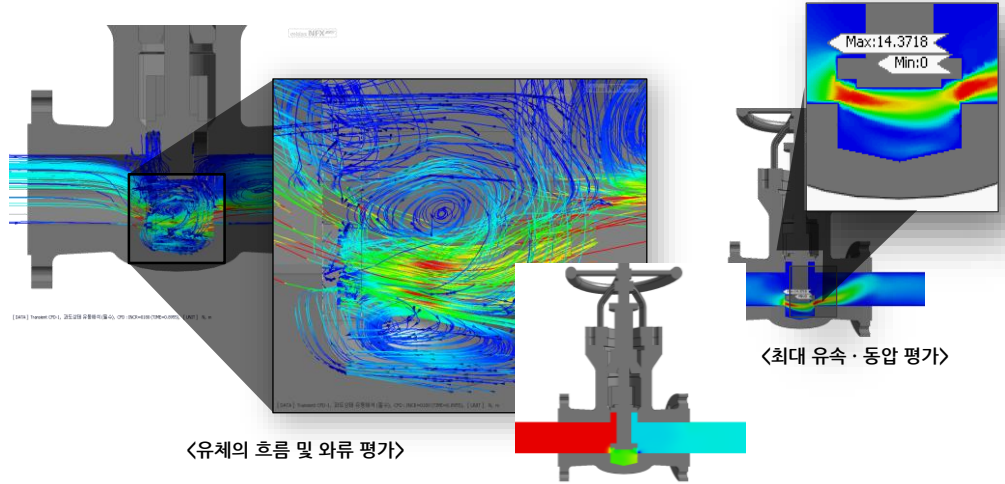
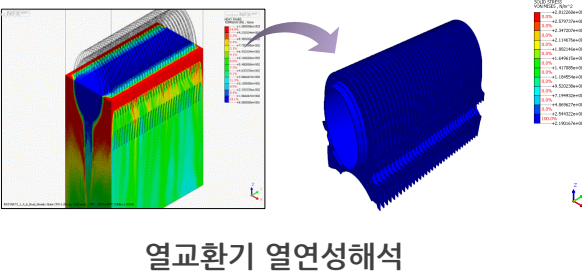
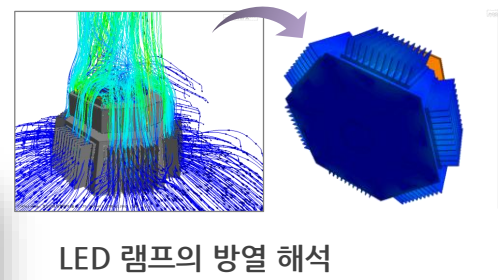
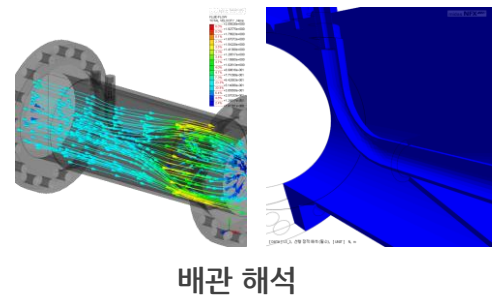
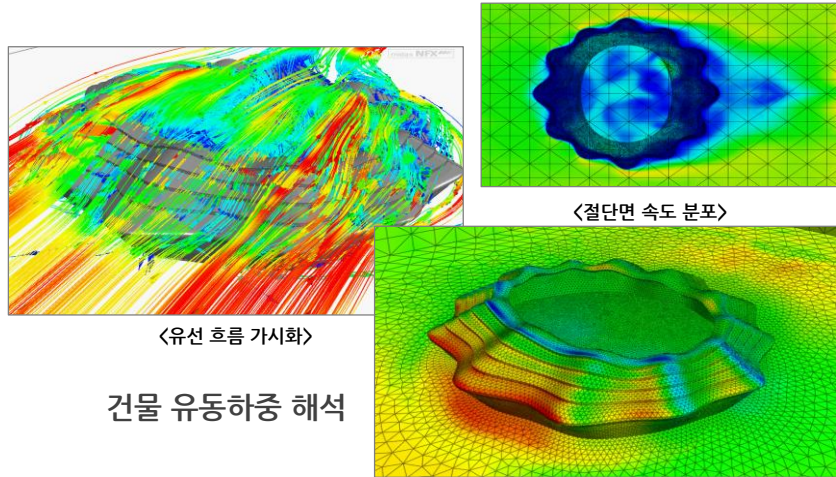


유속벡터



속도분포

# CFD 해석예시



# Navier-Stokes Equations

연속 방정식

유체의 밀도 변화식

**압축성 유체 / 비압축성 유체**

운동량 방정식

유체는 압력, 점성, 외력으로 인해 움직임이 생겨난다

**압력/ 표면점성효과(경계층) 설정**

# Navier-Stokes Equations

유체 종류/물성 설정

압축성 유체 / 비압축성 유체

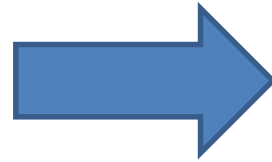
밀도/점성계수

요소망 설정

표면점성효과(경계층) 설정

경계설정

입/출구, 벽면, 열 등



해석 설정

형상정의

물질특성 정의

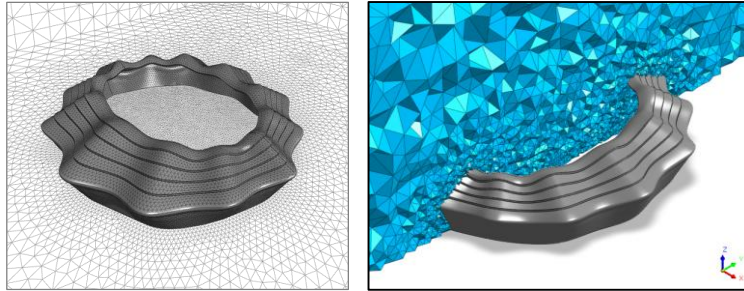
도메인 정의

요소망 정의

경계조건 정의

해석

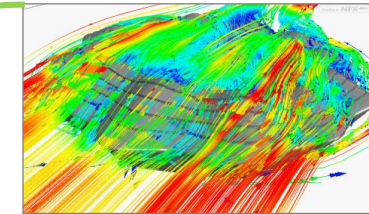
결과 확인 및 분석



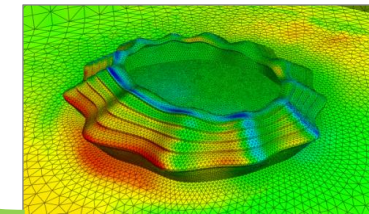
$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$



<유선 흐름 가시화>

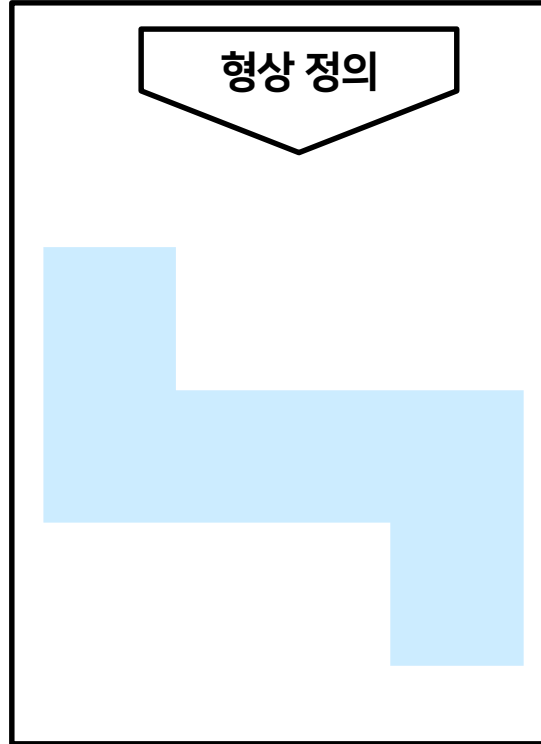


<하중 분포>

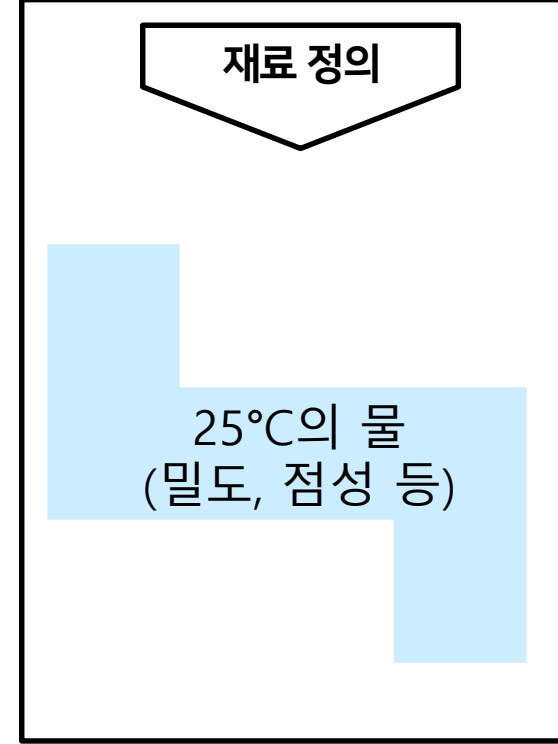
## CFD 해석 절차 - 전처리



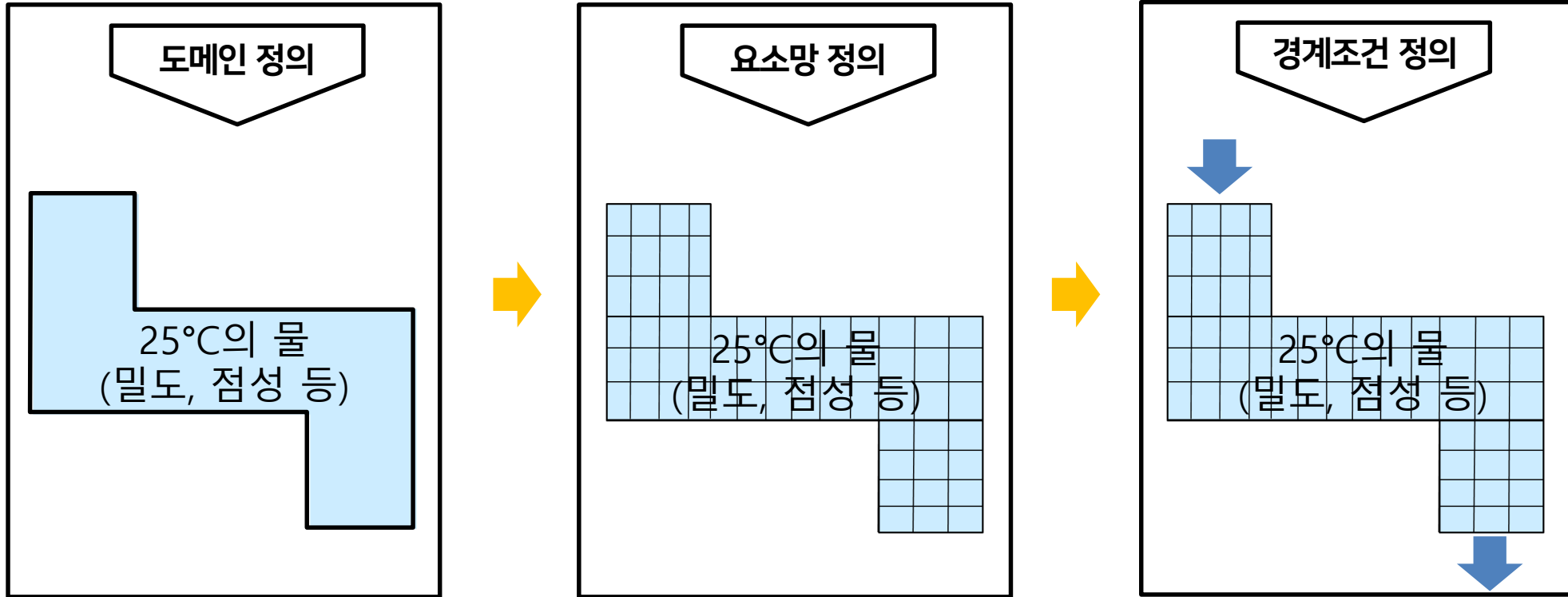
형상 정의



재료 정의

25°C의 물  
(밀도, 점성 등)

## CFD 해석 절차 - 전처리



## CFD 해석 절차 - 전처리

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V}$$

Material  
Derivative

Pressure  
Force

Gravity  
Force

Viscous  
Force

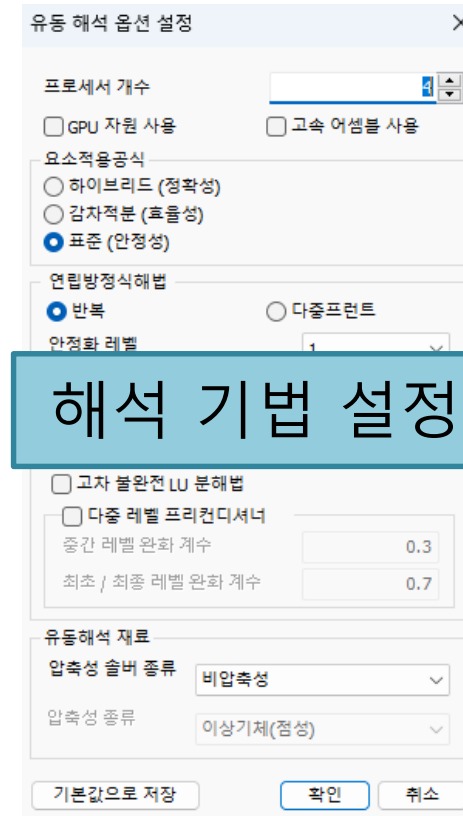
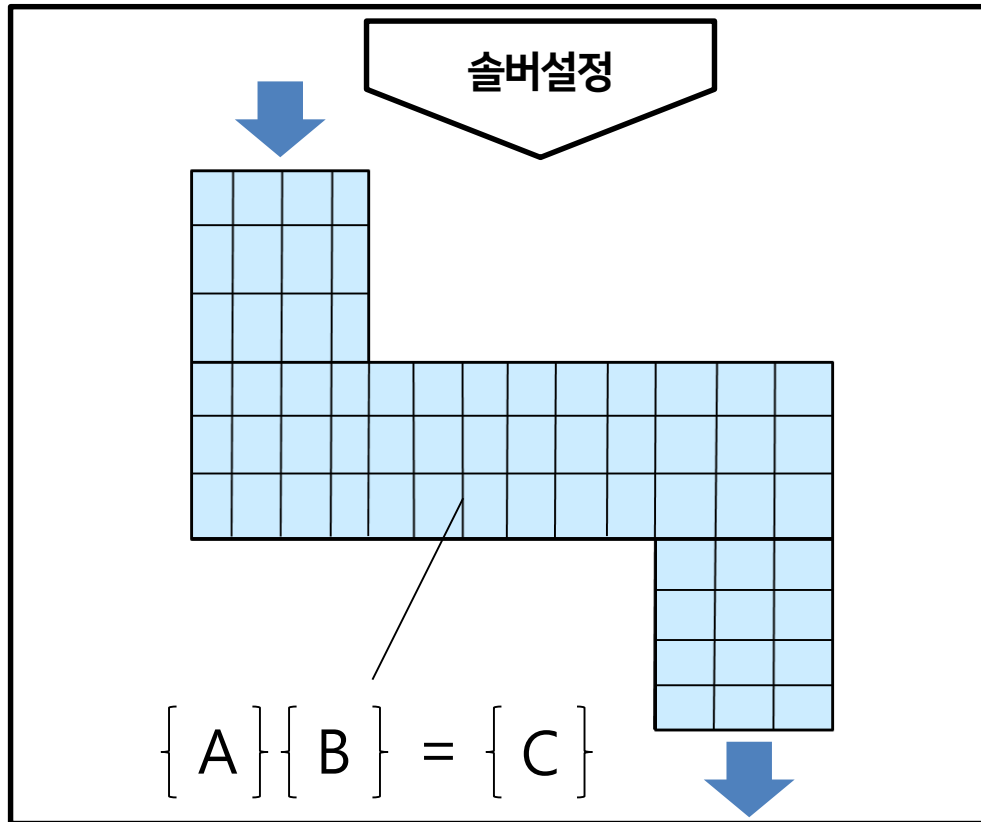
$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V}$$

Steady state Highly viscous  
(Stokes flow,  
Creeping flow)

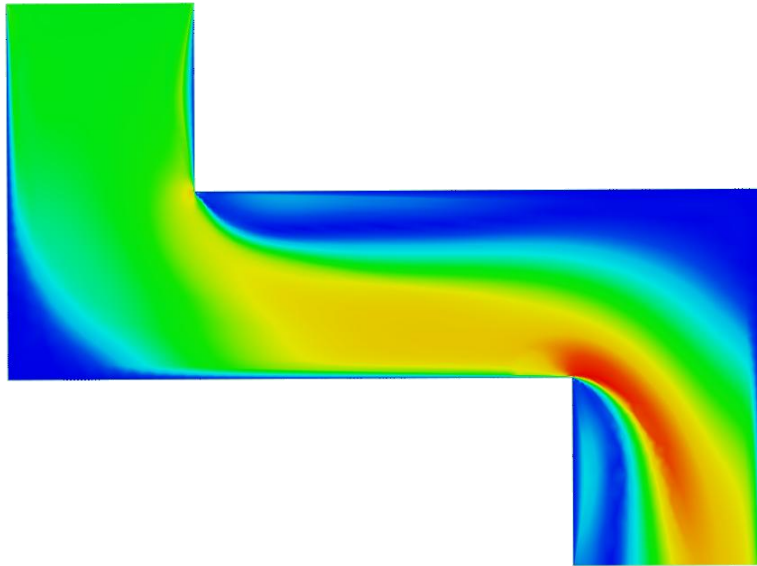
Gas Inviscid  
(Potential flow,  
Euler eq.)

전처리 설정 완료

## CFD 해석 절차 - 솔버



## CFD 해석 절차 - 후처리



- 1) 설정한대로 해석이 잘 수행이 되었는지?  
(입/출구, 벽면 경계조건 등)
  - 2) 전체적인 유동이 어느 방향으로 흐르는지?
  - 3) 특정 벽면에는 압력이 얼마나 걸리는지?
  - 4) 압력이 센 곳이 있으면 그 부분을 고려하여 설계가 되었는지?
- :  
:  
:  
:

결과 확인 및 분석

## CAE 기술력 수준

### Level 1

CAE 단순 참조 수준

### Level 2

정성적 경향 파악  
상대적 비교 분석

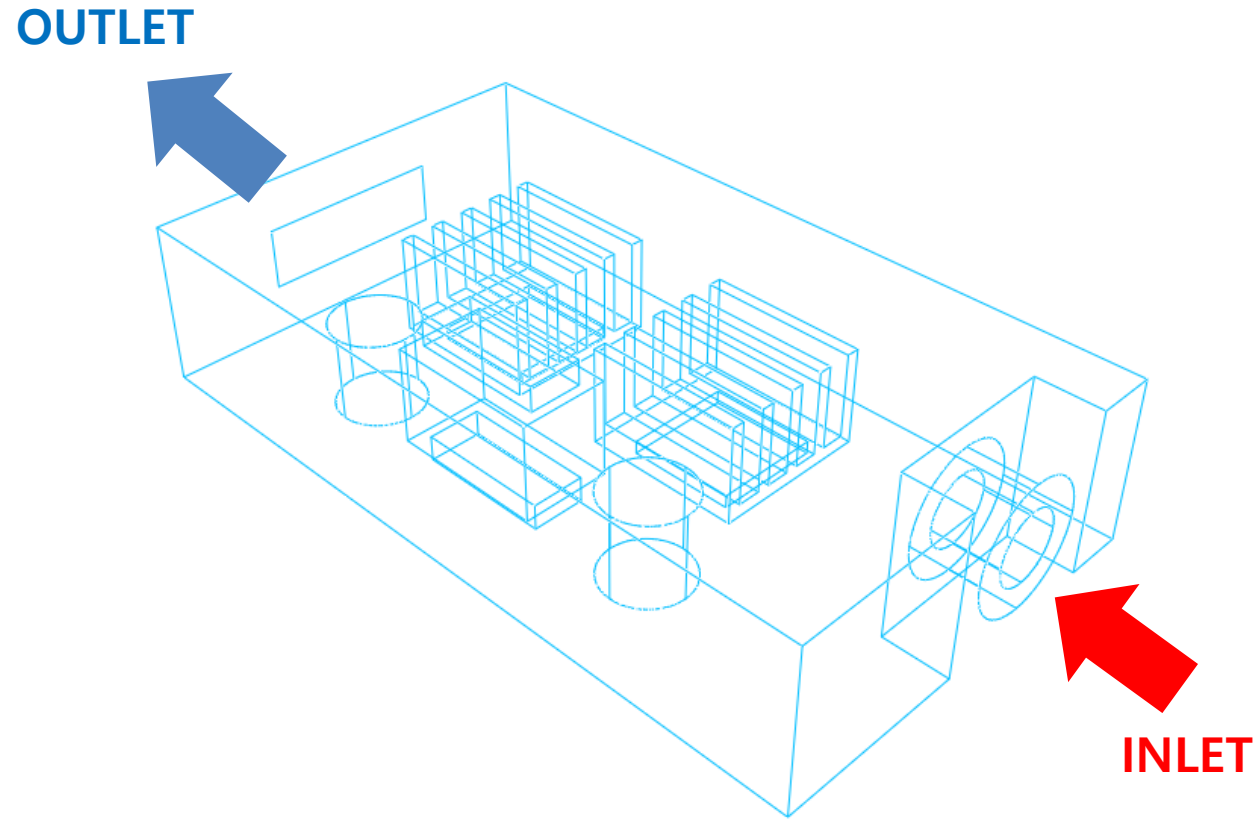
### Level 3

정략적 성능 예측  
절대적 판단 가능

### Level 4

실물평가 대체 가능  
가상 제품 개발 구현

## 예제 - 케이스 내부유동 해석



# 체험형 교육 세미나에 대한 설문조사 참여해주세요!



CAE 지식 채널  
**반·디·통**

CAE에 대해 더 알고 싶다면?  
CAE 지식 공유 채널 '반디통'  
바로가기 > <https://www.banditong.com/>

국내 기술로 개발한 CAE 제품을 한눈에!  
CAE 통합 솔루션 'MTS'  
바로가기 > <https://www.midasmts.com/>

# CONTENTS

## 유동해석을 잘 하기 위해 알아야 할 모든 것

---

Session1. 유동해석을 위한 기초사항

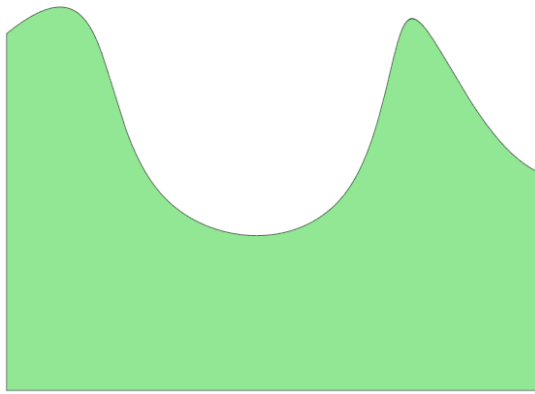
**Session2. 경제성 있는 유동해석을 위한 방법**

Session3. 에너지방정식을 이용한 온도분포 활용하기

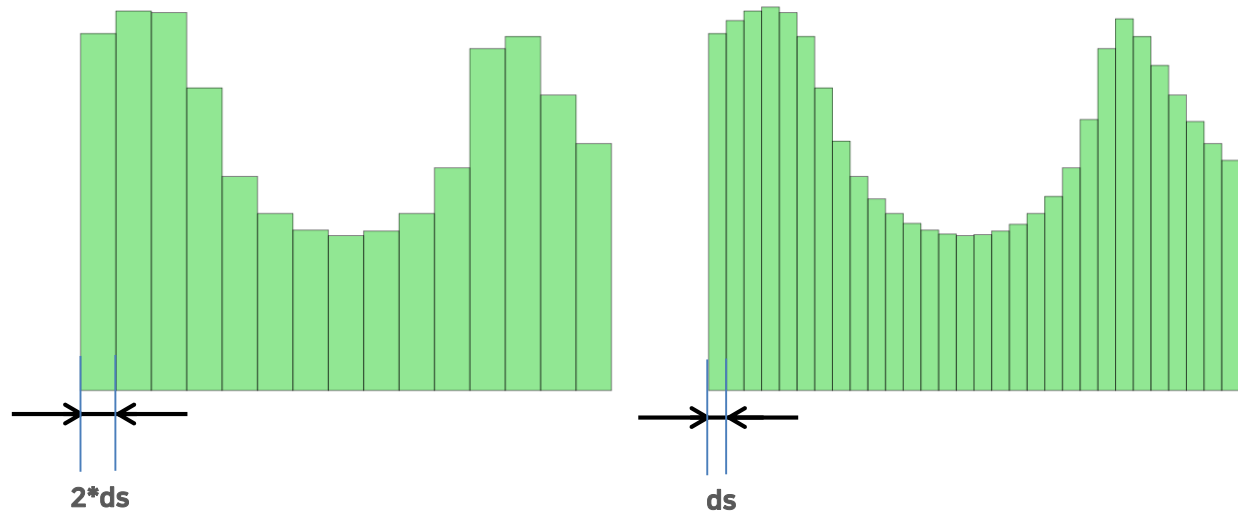
Session4. 열변형 연성해석 간단하게 이용하기

# CFD 해석에 대한 이해

○ 시간과 공간에 대한 미분방정식(지배방정식)을 이산화(discretization)하여 대수방정식으로 치환



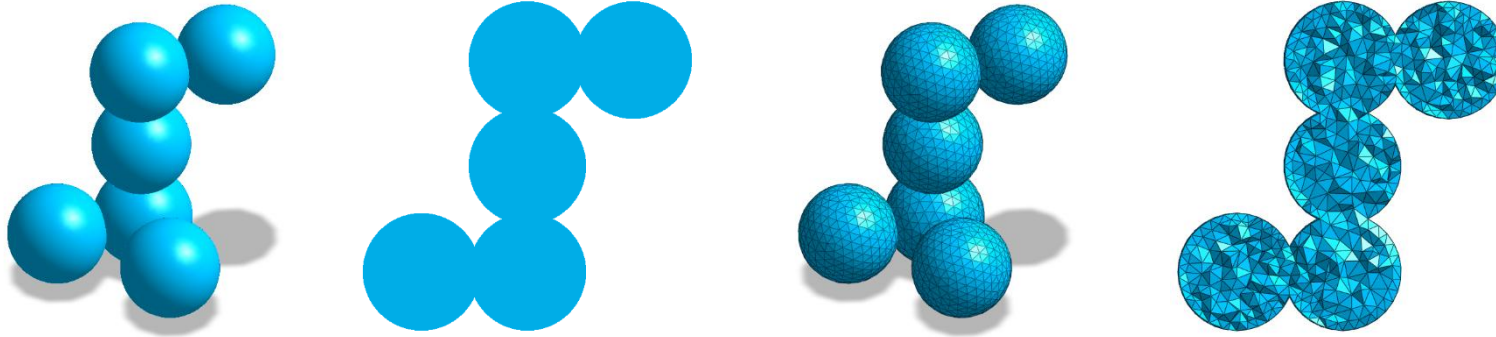
실제 면적



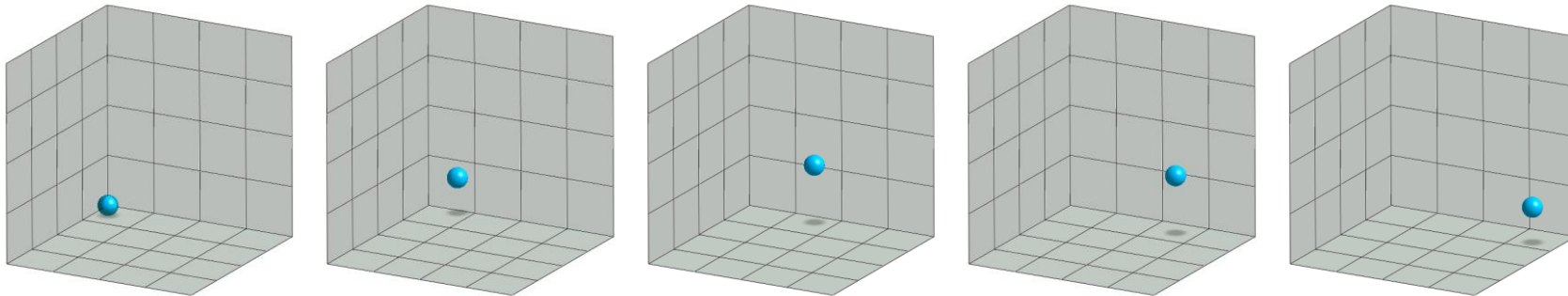
이산화를 통해 본 면적

# CFD 해석에 대한 이해

○ 미소 공간 총족 → 요소망

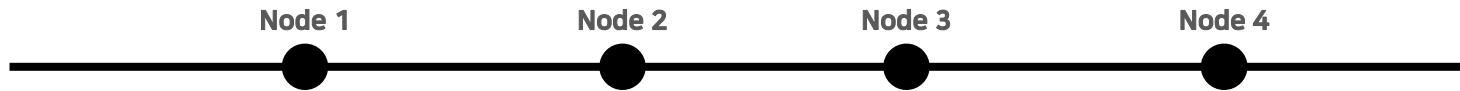


○ 미소 시간 총족 → 시간간격

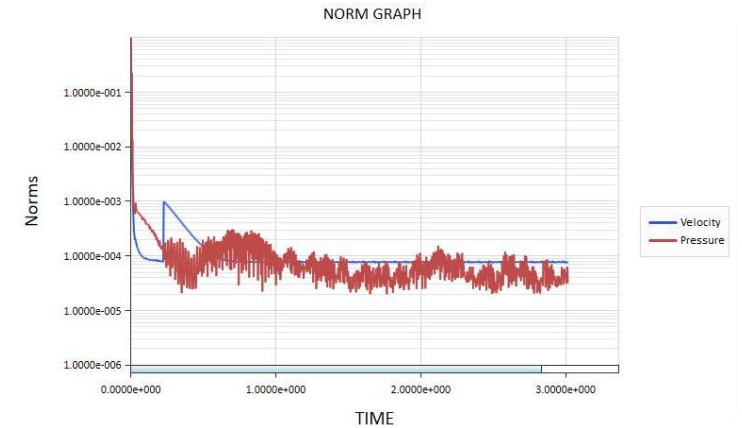


# 연속적인 요소에 대한 해석 과정?

○ 네트워크를 이루는 계산점(절점, 요소)의 값이 규칙(지배방정식)에 따라 값을 갱신



세대 수 (n)	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4
0	$X_{S=1,n=0}$	$X_{S=2,n=0}$	$X_{S=3,n=0}$	$X_{S=4,n=0}$
1	$X_{S=1,n=1}$	$X_{S=2,n=1}$	$X_{S=3,n=1}$	$X_{S=4,n=1}$
2	$X_{S=1,n=2}$	$X_{S=2,n=2}$	$X_{S=3,n=2}$	$X_{S=4,n=2}$
		⋮		
$n_0$	$X_{S=1,n=n_0}$	$X_{S=2,n=n_0}$	$X_{S=3,n=n_0}$	$X_{S=4,n=n_0}$
$n_0+1$	$X_{S=1,n=n_0+1}$	$X_{S=2,n=n_0+1}$	$X_{S=3,n=n_0+1}$	$X_{S=4,n=n_0+1}$



$$Norm = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n} \approx 0 \text{ (Converged)}$$

# 유동해석 지배방정식

- 일반적인 유체흐름에 대한 분석 (Session.1, Session. 2 진행예정)

**Continuity:** 
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

**X-Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

**Y-Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

**Z-Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

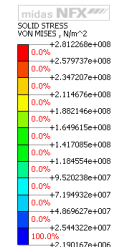
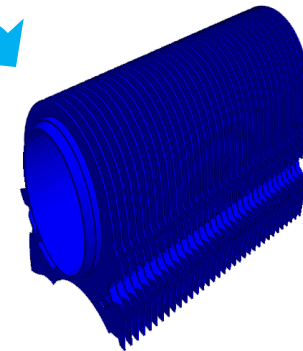
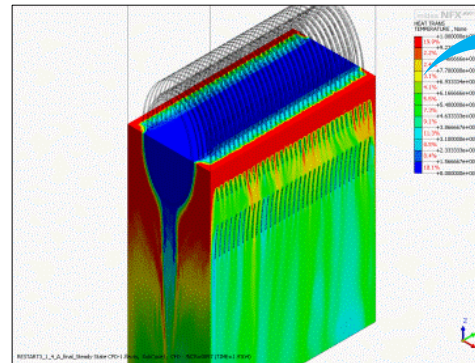
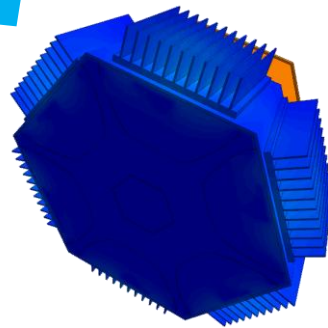
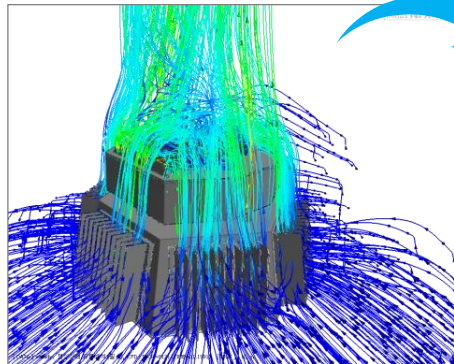
# 유동해석 지배방정식

- 방열, 냉각, 열교환 성능에 대한 분석 (Session.3 진행예정)

**Energy:**

$$\frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_r)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_r)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_r)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$$

$$+ \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right]$$

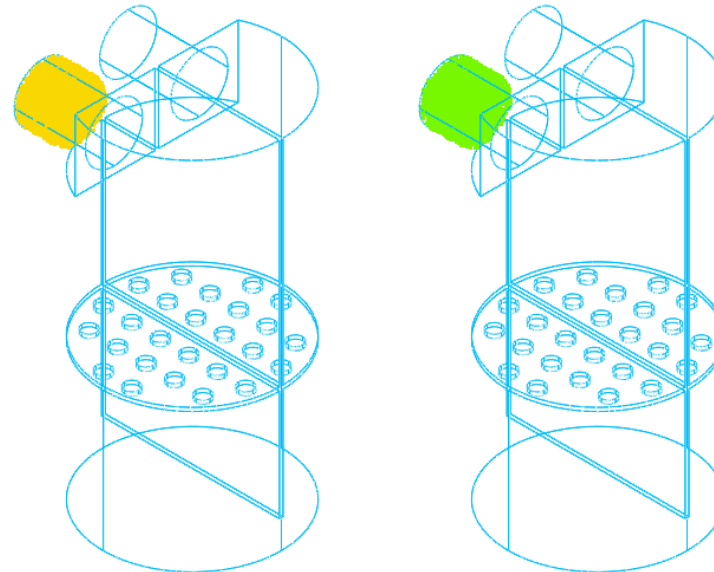
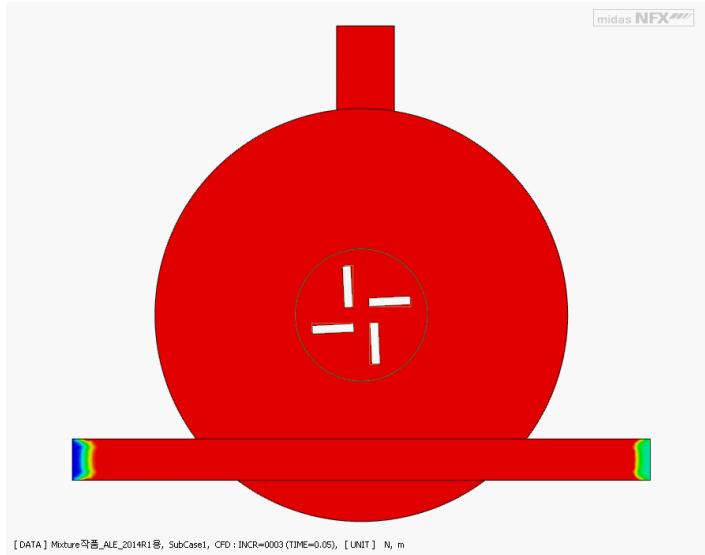


# 유동해석 지배방정식

- 혼합물, 다상유동, 파티클, 줄발열 등 특수상황에 대한 해석 (체험판 사용 추천)

물질전달 방정식: 
$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mathbf{D} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + S$$

파티클 운동 방정식: 
$$\frac{du_i^p}{dt} = F_D(u_i - u_i^p) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i/\rho_p$$



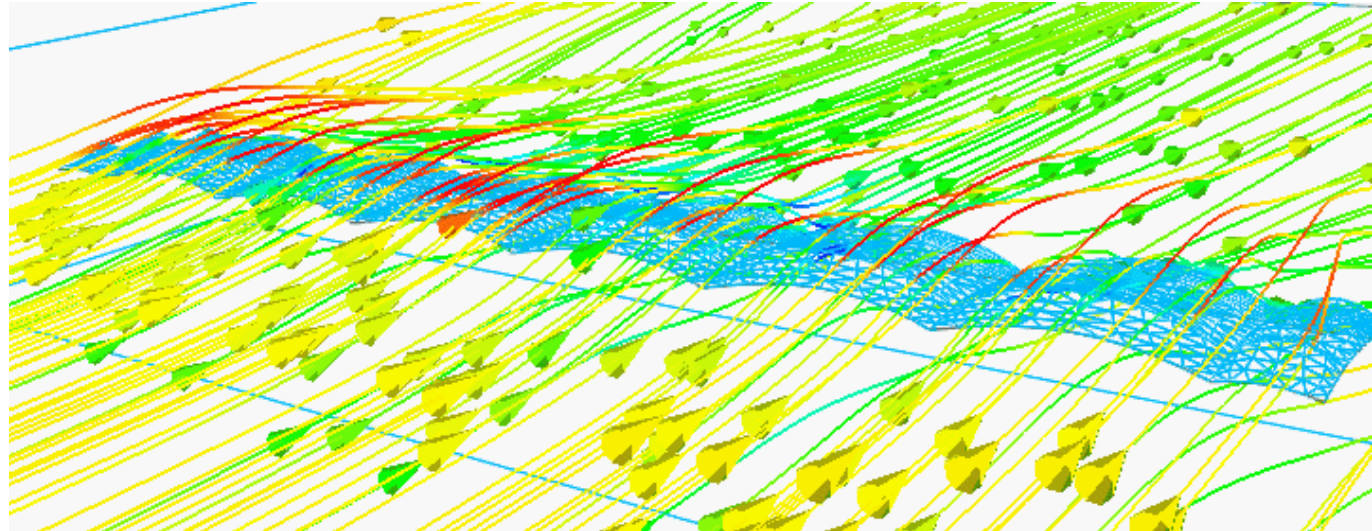
# 유체의 흐름 특성 분석 유체와 기체의 흐름을 보다

Session. 1 일반유동

## 일반유동해석

다양한 유동 모델을 이용하여 유체흐름 분석이 가능합니다.

13가지 난류 모델을 이용한 정확한 흐름 분석이 가능합니다.



## 막구조물 풍하중 해석

- 풍하중에 의한 압력분포 확인
- 각막에 걸리는 방향별 하중 분석

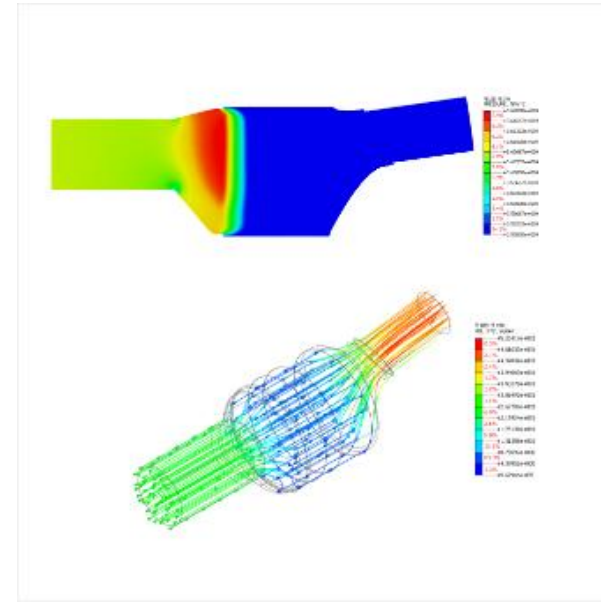
# 유체의 흐름 특성 분석 유체와 기체의 흐름을 보다

## Session. 2 일반유동 경제성

### 일반유동해석

다양한 유동 모델을 이용하여 유체흐름 분석이 가능합니다.

다공성 매질, 팬 경계조건, MRF, 대칭조건 등 다양한 이상화 모델을 제공합니다.



### 다공성 매질을 이용한 축매 변환기 해석

- 좁은 유로로 인해 발생하는 많은 요소망을 이상화
- 다공성 매질 기능을 활용하여 해석 시간 단축

# 회전체 영향 평가

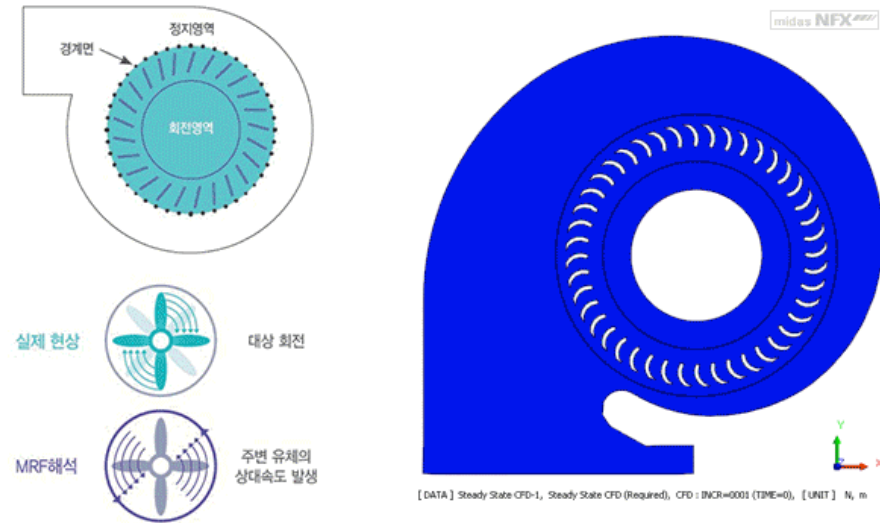
## 송풍기, 교반기, 펌프의 성능을 알고 싶다면

### Session. 2 일반유동 경제성

#### 회전체 해석

송풍기, 펌프, 교반기에 특화된 회전체 해석 기능을 제공합니다.

MRF (Moving Reference Frame) 기능으로 효과적인 검증이 가능합니다.



#### MRF 기능을 활용한 원심팬 해석

- MRF 기능은 회전하는 시스템의 실질적인 회전을 고려하는 대신, 회전부의 상대속도를 부여하여 회전에 대한 계산 시간을 감소
- 펌프 성능 해석, 압축기, 교반기, 회전체에 대해 빠른 검토가 가능

# 방열과 냉각 성능 평가

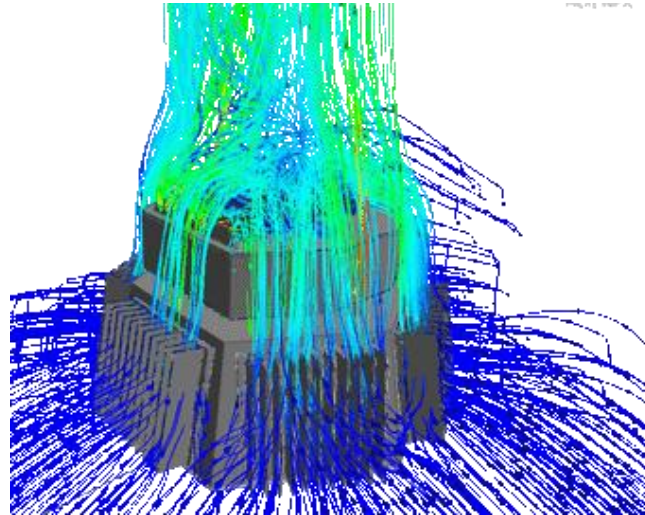
## 뜨거운 공기는 위로 차가운 공기는 아래로

### Session. 3 열유동해석

#### 열유동해석

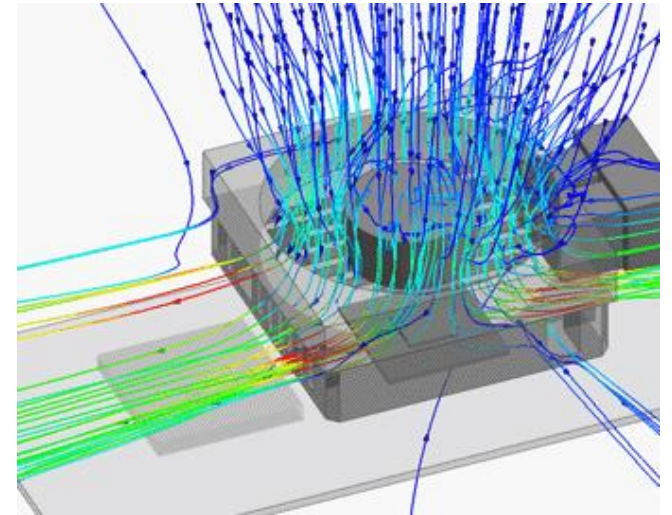
냉각, 발열, 열교환 성능 분석에 특화된 기능을 제공합니다.

자연대류, 강제대류, 복사조건을 고려하여 유체와 고체의 온도를 동시에 검토합니다.



#### LED 조명 방열 성능 평가

- 자연 대류에 의한 LED 조명 방열 해석
- LED 칩 배열과 Heat Sink 형상에 대한 검토
- 최대 온도를 예측하고 열 집중현상 최소화



#### 그래픽카드 냉각 성능 평가

- 팬에 의한 냉각 성능 평가
- 정상상태에서의 칩 최대 온도 평가

# 방열과 냉각 성능 평가

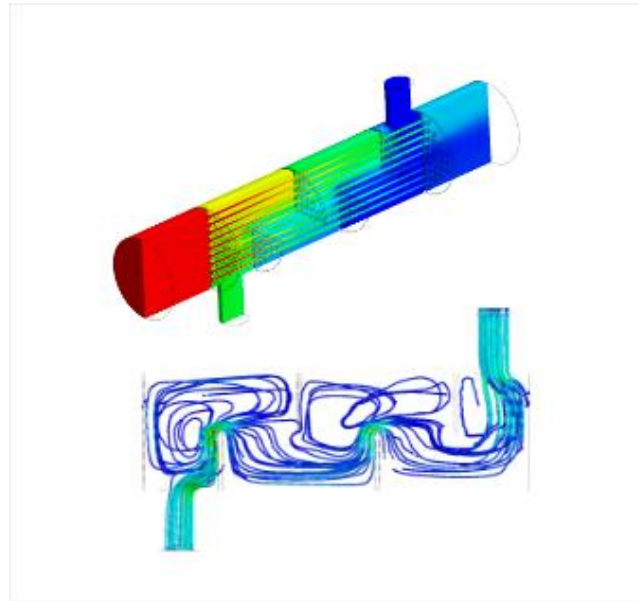
## 뜨거운 공기는 위로 차가운 공기는 아래로

### Session. 3 열유동해석

#### 열유동해석

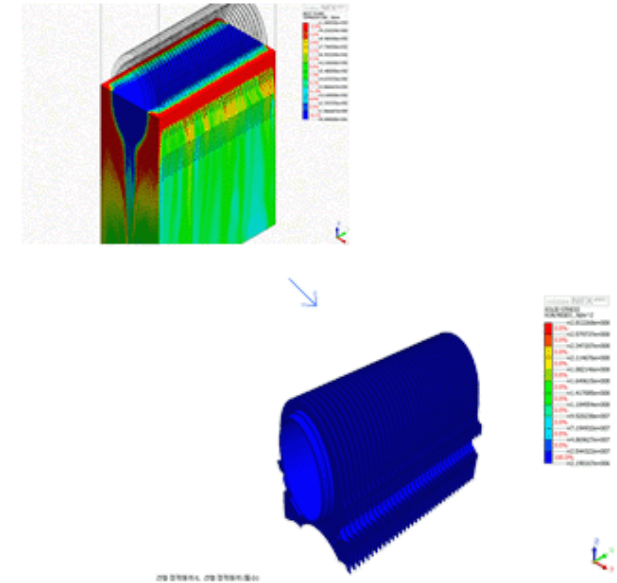
냉각, 발열, 열교환 성능 분석에 특화된 기능을 제공합니다.

유체와 구조 연성해석을 통하여 온도와 구조물의 변형을 함께 볼 수 있습니다.



#### 열교환기의 열유동 및 열변형 연계해석

- 열유동해석을 통한 열교환기 성능 예측
- 열교환기의 열변형/열응력 해석



#### 방열핀의 열교환 및 구조 안전성 검토

- 열유동 해석을 통한 열교환 성능 예측
- 구조해석 연계를 통한 열변형 및 응력 예측

# 방열과 냉각 성능 평가

## 뜨거운 공기는 위로 차가운 공기는 아래로

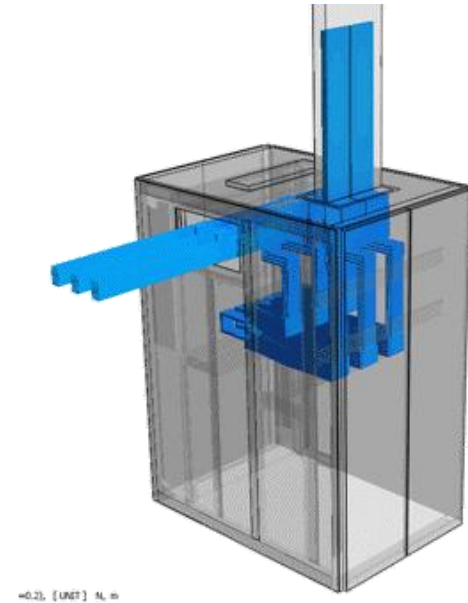
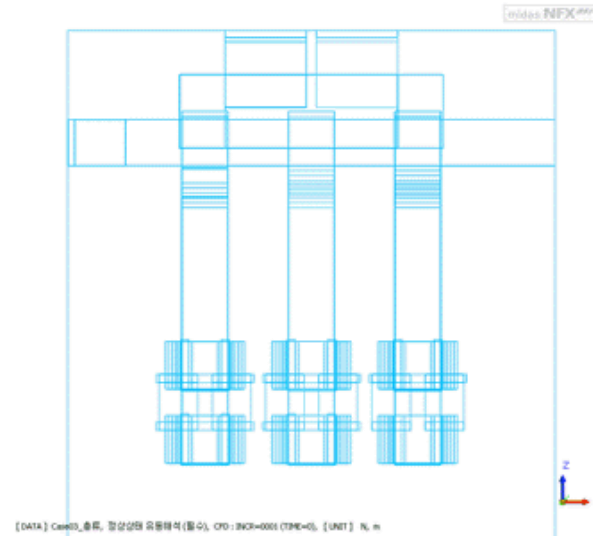


15일 체험판 신청

### 열유동해석

냉각, 발열, 열교환 성능 분석에 특화된 기능을 제공합니다.

줄히팅, PCB, 열저항 네트워크 모델 등의 열해석 전용 기능으로 편리하게 해석 가능합니다.



### 전기 배전반 열유동 해석

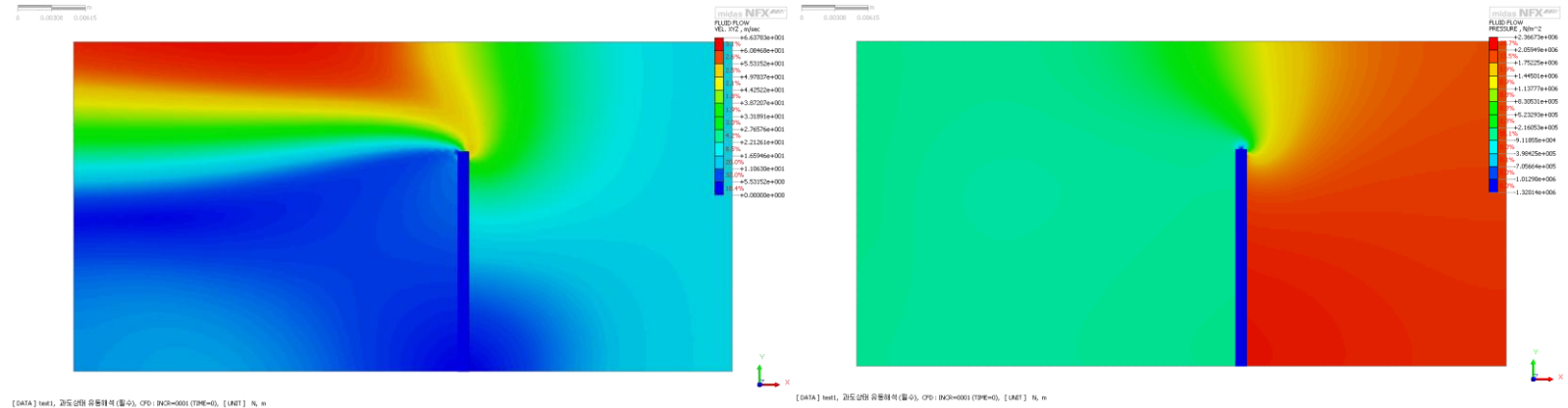
- 시간에 따른 온도변화 확인 (줄히팅 기능 활용)
- 내부 유동 현상 파악

# 유체에 의한 구조 영향성 평가 바람이 불면 내 구조물은 어떻게 흔들릴까?

## Session. 4 연성해석

요소망 변형 / 구조-유동 연성해석  
유체 내부에서 거동하는 시스템과  
상호작용하는 물리현상 관찰이 가능합니다.

신축요소망을 활용하여 구조-유동 연성해석이 가능합니다.



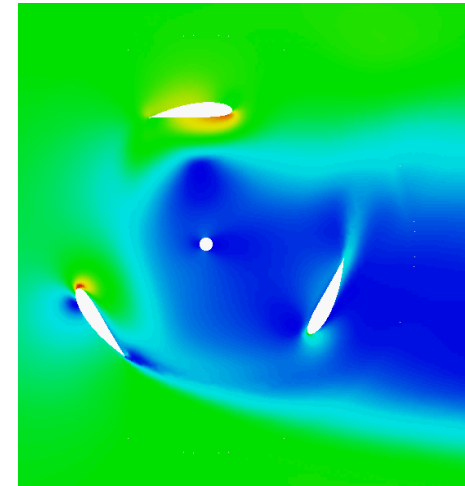
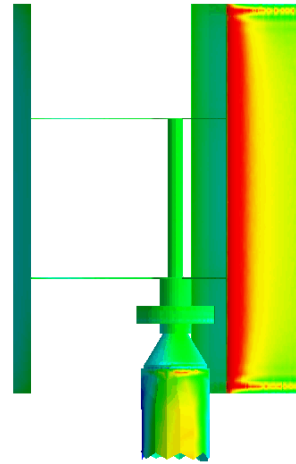
- 신축요소망을 적용한 2-way FSI
- 유체해석 및 구조해석을 연계한 2-way FSI해석
  - 절점을 이동시켜 움직임을 모사하는 신축 요소망 기법 적용

# 유체에 의한 구조 영향성 평가 바람이 불면 내 구조물은 어떻게 흔들릴까?

## 요소망 변형 / 구조-유동 연성해석

유체 내부에서 거동하는 시스템과 상호작용하는 물리현상 관찰이 가능합니다.

슬라이딩, 중첩 요소망을 이용하여 구조물의 영양에 의한 유체의 흐름을 분석할 수 있습니다.



## 수직축 풍력 발전기 유동해석

- 풍속 조건에 따라 풍력발전기가 받는 토크 및 회전수 산정

# 혼합성능 평가

## 다양한 유체의 혼합을 보고 싶으세요?

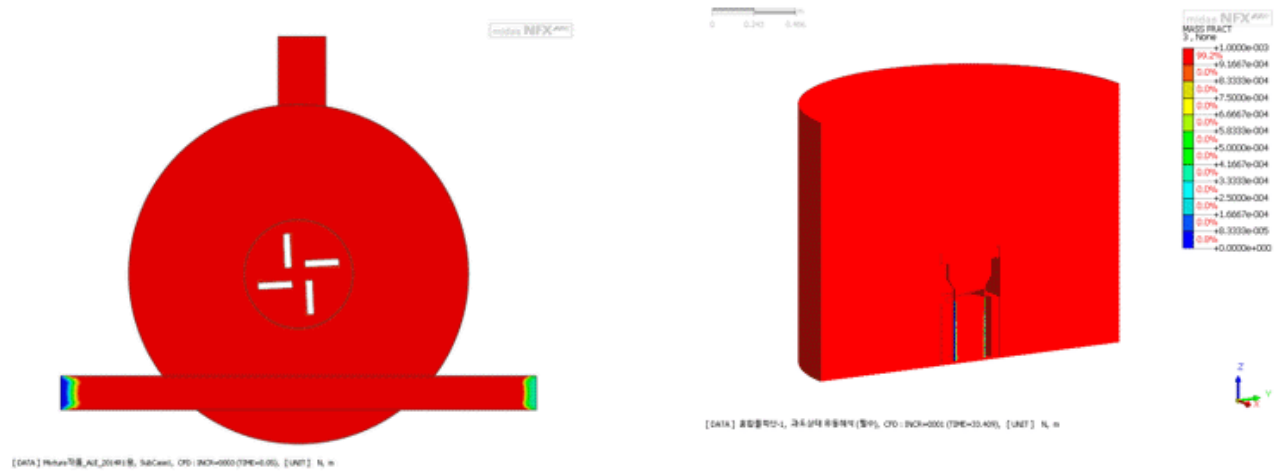


15일 체험판 신청

### 혼합물 해석

다양한 유체의 혼합을 고려한 유동해석이 가능합니다.

기체-기체, 액체-액체 등 유체혼합 및 다양한 혼합 현상 표현이 가능합니다.



### 요소망변형과 혼합물 해석을 활용한 가스혼합해석

- 서로 다른 유체 유입시 혼합 현상 검토
- 요소망 변형 기능을 활용하여 유체 혼합

### 공기청정기 성능 검증

- 오염된 공기의 정화 성능 검증

# 다상 유동 평가 상이 다른 유체의 혼합도 볼 수 있습니다.

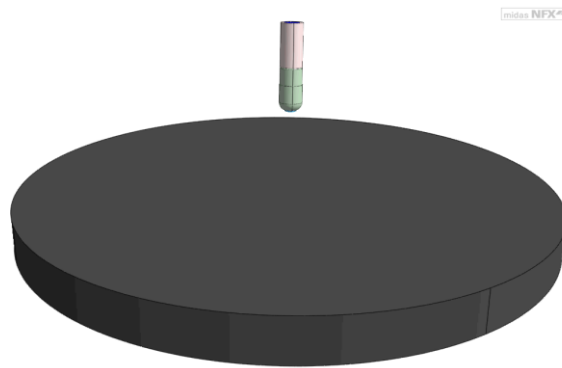


15일 체험판 신청

## 다상유동해석

자유수면을 가진 액체와 기체를  
동시에 분석 가능합니다.

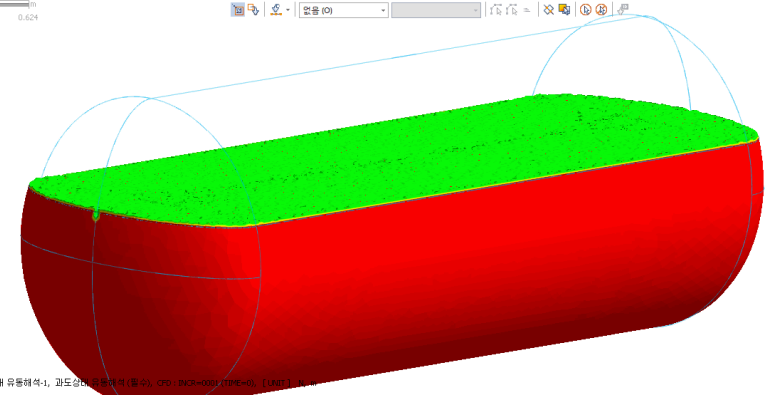
Level set / Wave elevation 기법을 이용한 자유수면 해석을 할 수 있습니다.



[DATA] 인. 과도상면 유동해석(물), CFD-INCH=000(TIME=0), [UNIT] N, m

### 웨이퍼 표면 세척 해석

- 노즐 분사시 약액의 거동 분석



[DATA] 과도상면 유동해석-1, 과도상면 유동해석(물), CFD-INCH=000(TIME=0), [UNIT] N, m

### LNG 운반 탱크 슬로싱 해석

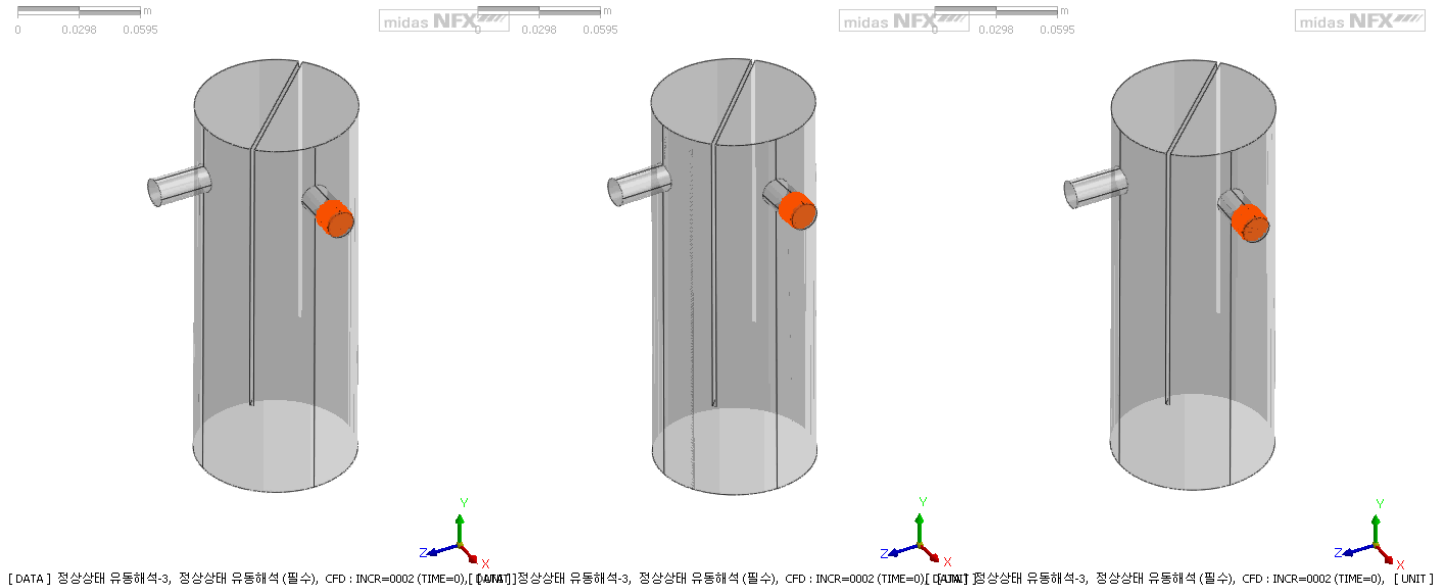
- 운반 중인 선박의 LNG 운반 탱크 내부의 수면거동 분석
- 파향하중을 함수로 생성하여 탱크의 움직임을 제어

# 다상 유동 평가 상이 다른 유체의 혼합도 볼 수 있습니다.

## 다상유동해석

자유수면을 가진 액체와 기체를  
동시에 분석 가능합니다.

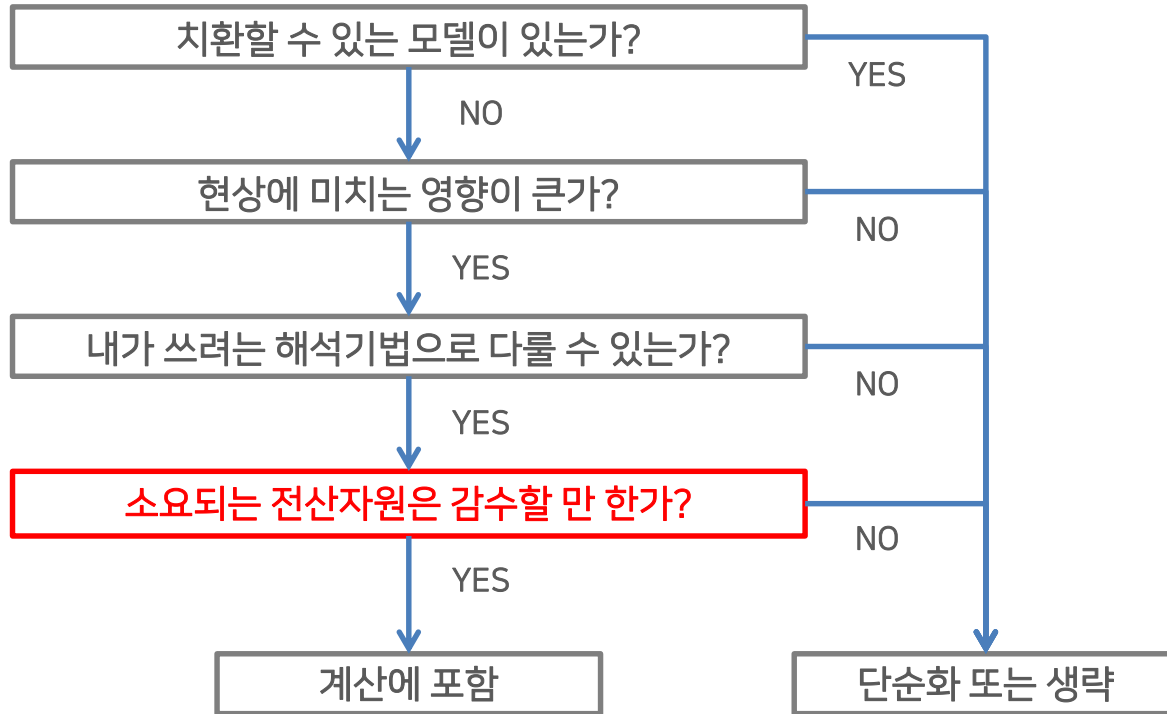
유체내 입자 거동 해석이 가능합니다.



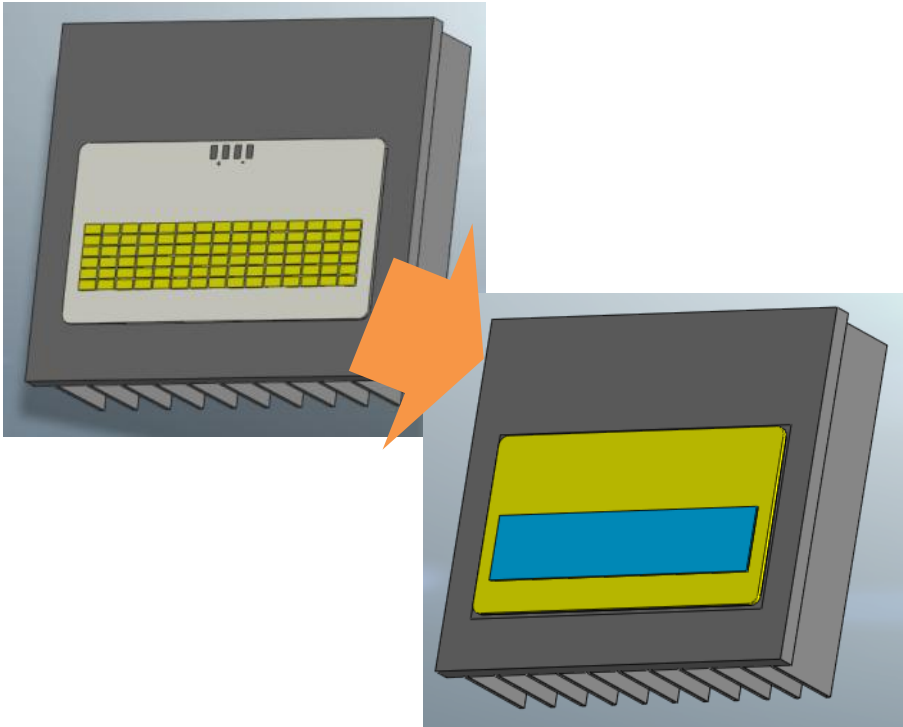
## 오일 캐치캔 유동해석

- 기름 입자 크기별 포집율 분석
- 유체입자가 벽에 닿는 경우 포집

# 유동해석시 고려해야할 사항



# 유동해석시 고려해야할 사항



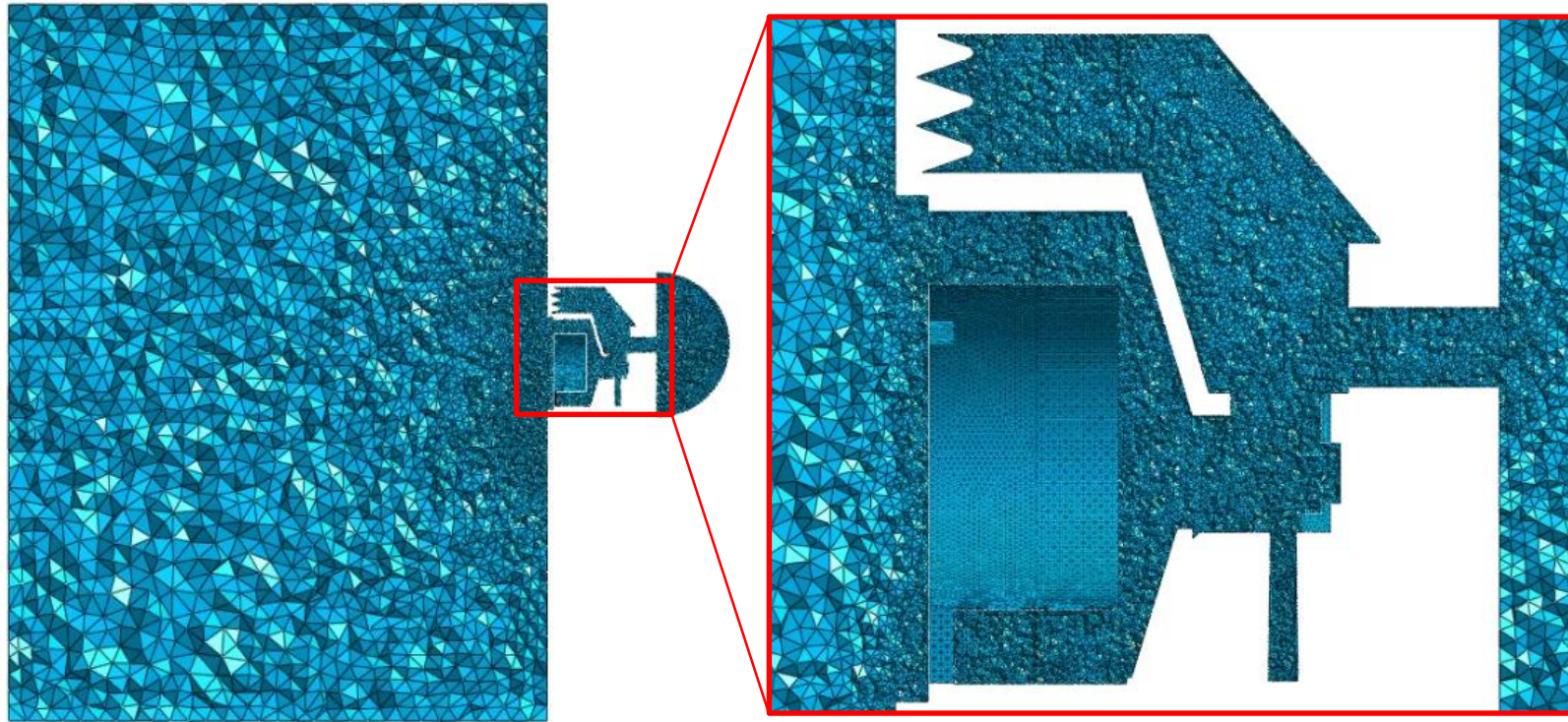
해석 종류	계산 물리량	계산식	가정
일반유동해석	$P, \vec{v}$	Continuity Momentum	uniform $T$ uniform $\rho$ uniform $c_i$
열유동해석 (강제대류)	$P, \vec{v}, T$	Continuity Momentum Energy	uniform $\rho$ uniform $c_i$
열유동해석 (자연대류)	$P, \vec{v}, T, \rho$	Continuity Momentum Energy Ideal-gas	uniform $c_i$
물질확산 해석	$P, \vec{v}, c_i$	Continuity Momentum Species transport	uniform $T$ uniform $\rho$

# 경제성 있는 유동해석 방법론



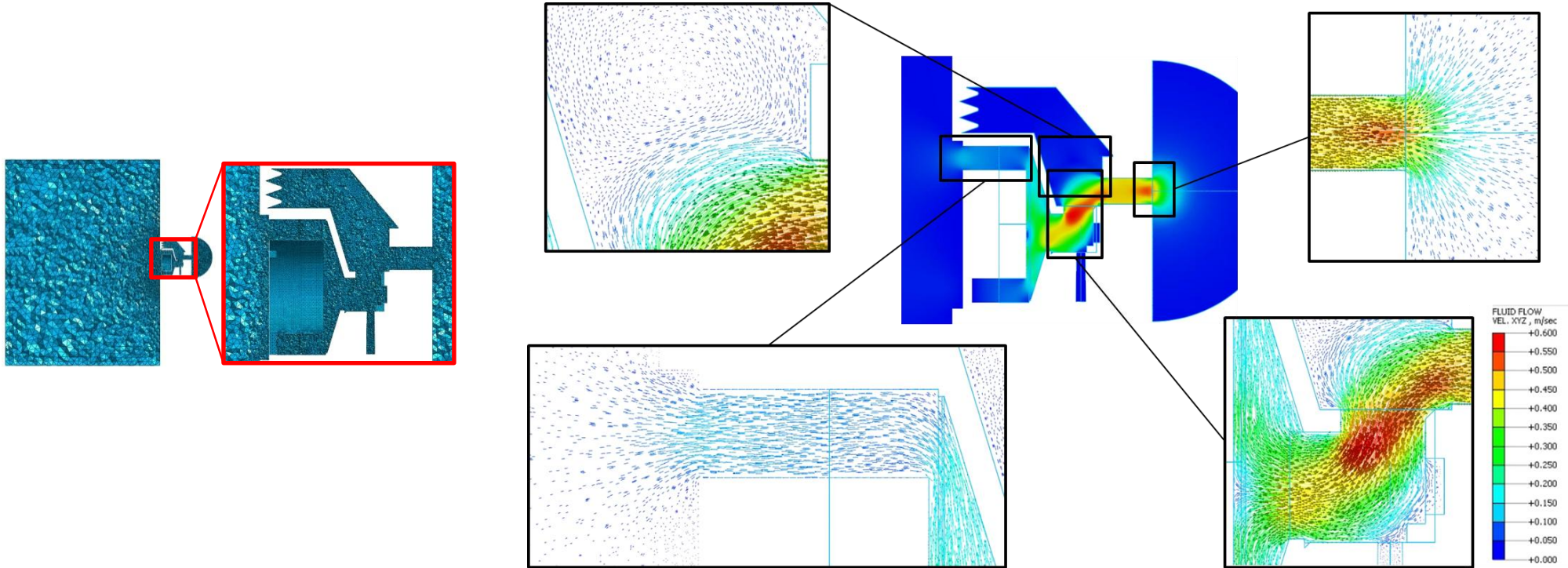
# 경제성 있는 유동해석 방법론-1

- 유동해석 요소망 개수 줄이기 (압력변화 큰 곳에 집중적으로)



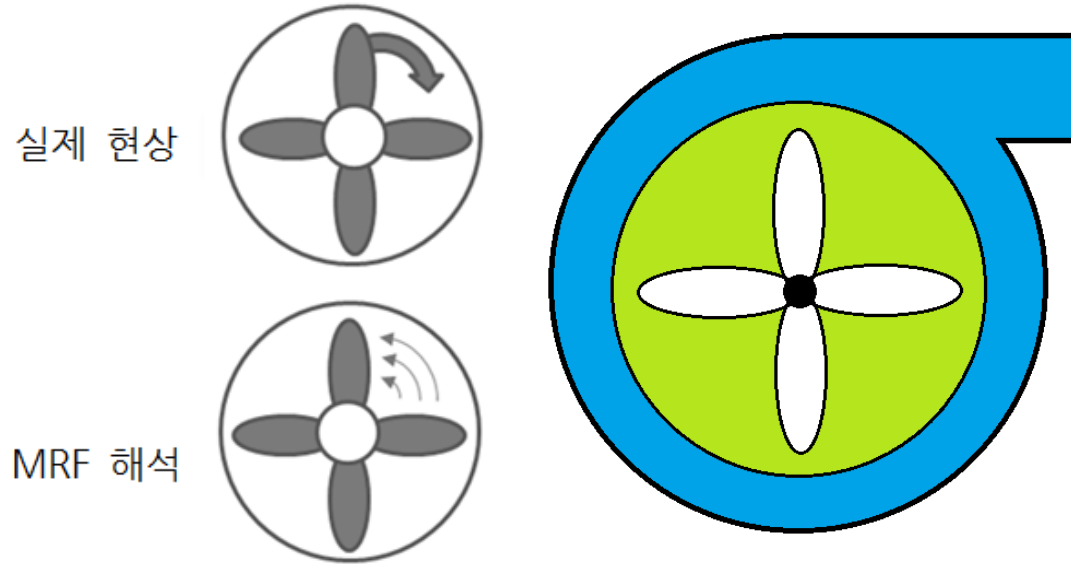
# 경제성 있는 유동해석 방법론-1 : 요소망

- 유동해석 요소망 개수 줄이기 (압력변화 큰 곳에 집중적으로)

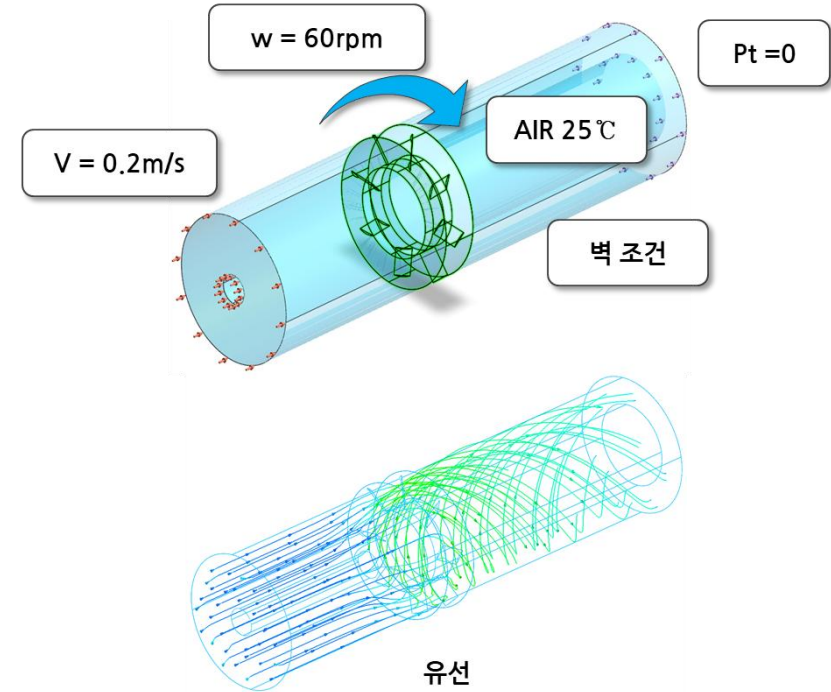


# 경제성 있는 유동해석 방법론-2 : MRF

- 움직이는 대상을 고정된 물체로 가정하여 접근



일반 유동영역(푸른색)은 기존 운동량 보존 방정식 적용,  
회전영역(녹색)은 각속도  $\omega$ 에 의한 운동량 생성항이 추가됨



# 회전체 영향 평가

## 송풍기, 교반기, 펌프의 성능을 알고 싶다면



15일 체험판 신청

### 회전체 해석

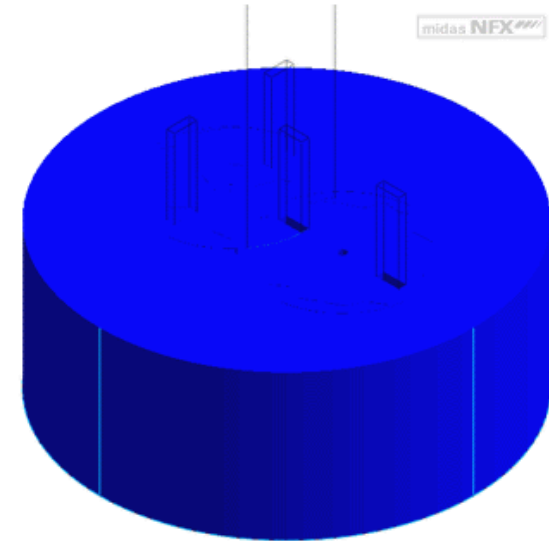
송풍기, 펌프, 교반기에 특화된 회전체 해석 기능을 제공합니다.

MRF (Moving Reference Frame) 기능으로 효과적인 검증이 가능합니다.



#### MRF 기능을 활용한 교반기 해석

- MRF 기능을 이용하여 교반기의 교반 성능 검증
- 회전체의 효과적인 해석 및 성능 확인

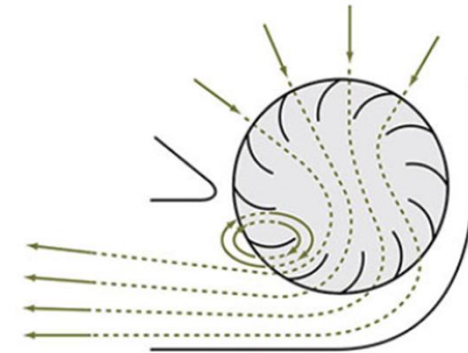
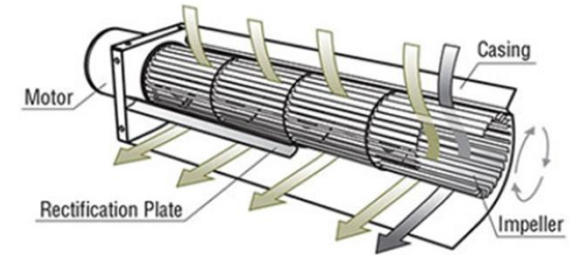
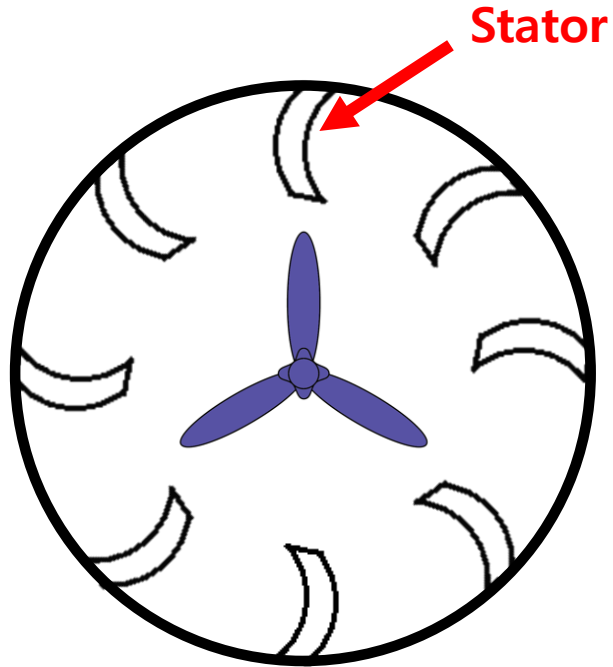
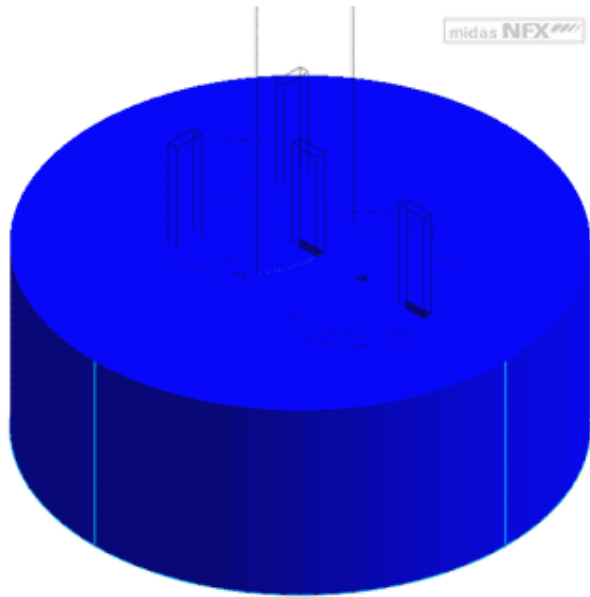


#### 2축 교반기 혼합 성능 평가

- 공/자전을 하는 2축 교반기 혼합성능 평가
- 속도 전파 및 임펠러 사이 간섭현상 분석

# 경제성 있는 유동해석 방법론-2 : MRF

- 움직이는 대상을 고정된 물체로 가정하여 접근 (적용 불가능한 상황)



# 경제성 있는 유동해석 방법론-3 : 팬 성능곡선

- 팬으로부터 발생하는 유체흐름만 관심이 있는 경우 함수로 가정하여 접근



출처 : 스마트PC사랑

1. 회전시 날개 주변의 변화를 확인.  
: 요소망변형 해석
2. 회전의 효과를 가정하여 주변흐름 확인.  
: MRF 해석 (일반유동)
3. 팬 이후에 공급되는 시스템 유체 확인.  
: 팬 경계조건 (일반유동)

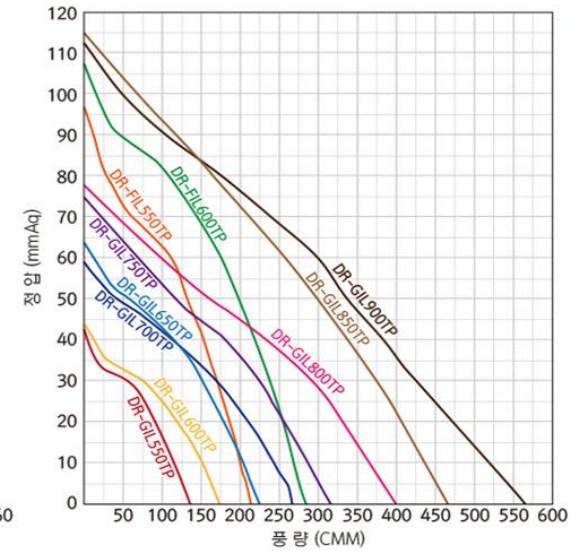
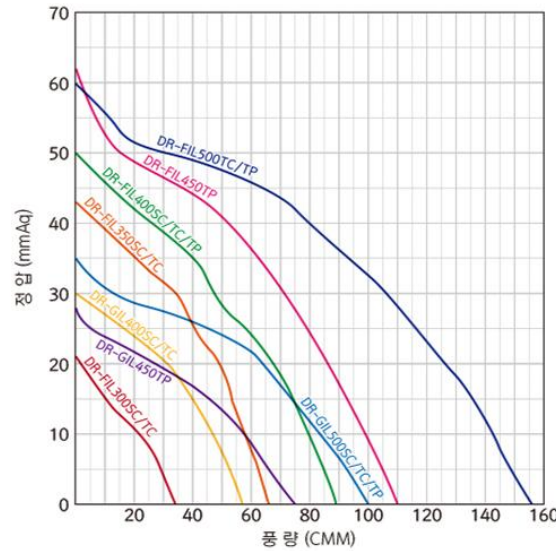
# 경제성 있는 유동해석 방법론-3 : 팬 성능곡선

- 팬으로부터 발생하는 유체흐름만 관심이 있는 경우 함수로 가정하여 접근



출처 : 바람나라

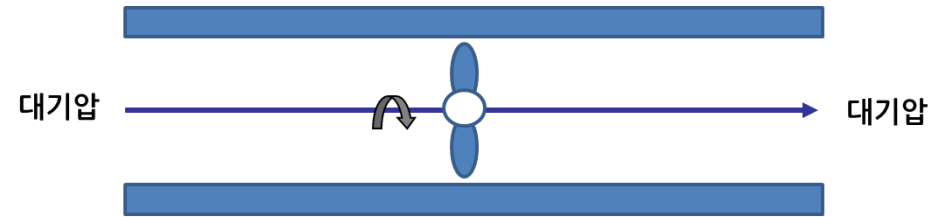
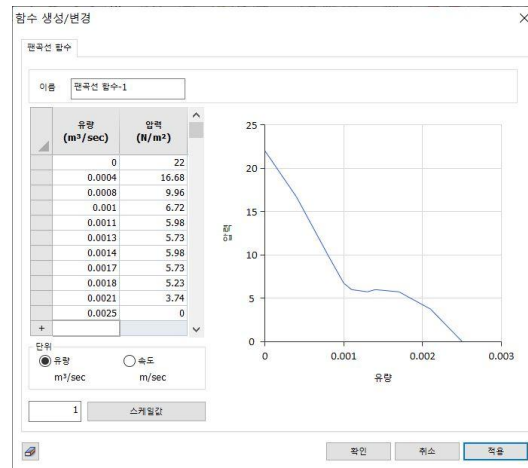
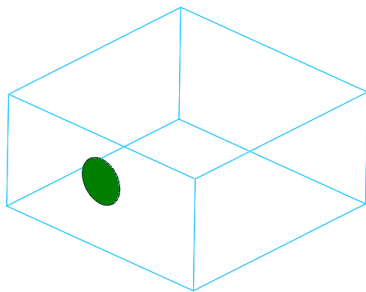
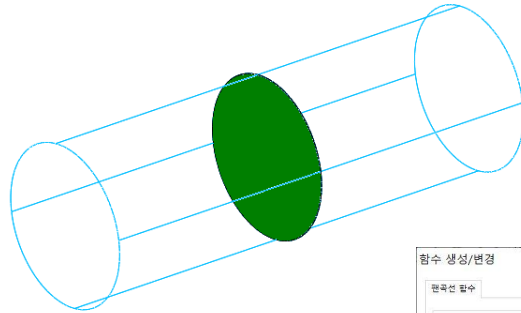
## ■ 성능곡선



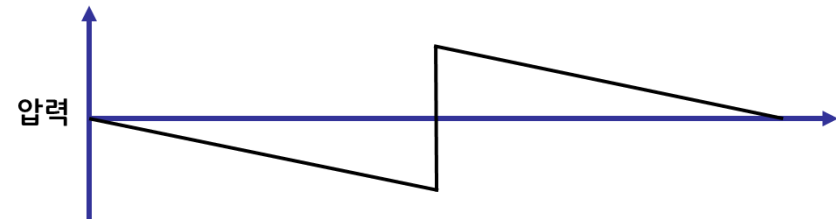
형명	날개지수 (mm)	최대풍량 (m³/h)	최대정압 (mmAq)	상·정압 (φ · V)	극수 (P)	입력 (W)	소비전력 (W)	전류 (A)	소음 (dB)	중량 (Kg)	외형도	제품 검사 성적서
DR-FIL500TC	Ø500×183	9370	60	3 φ .220/380V 60Hz	4	1300	1148	4.84/2.72	69	57	<a href="#">DOWNLOAD</a>	<a href="#">DOWNLOAD</a>
DR-FIL500TP	Ø500×183	9370	60	3 φ .220/380V	4	1500	1093	5.1/2.87	69	57	<a href="#">DOWNLOAD</a>	<a href="#">DOWNLOAD</a>

# 경제성 있는 유동해석 방법론-3 : 팬 성능곡선

- 팬으로부터 발생하는 유체흐름만 관심이 있는 경우 함수로 가정하여 접근



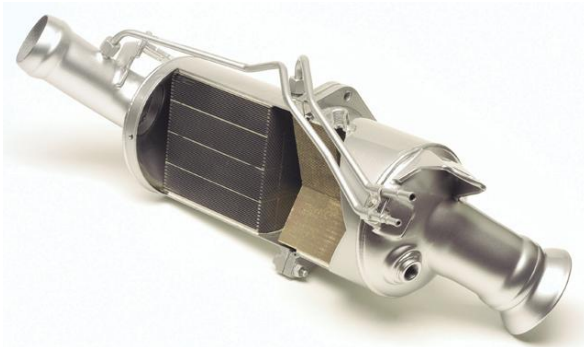
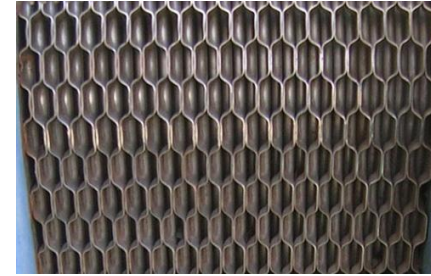
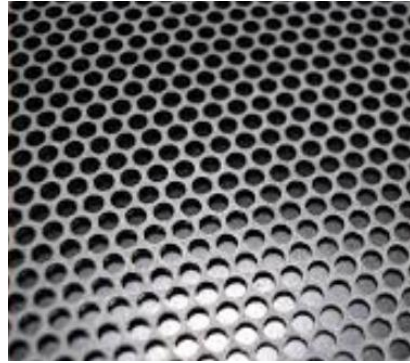
벽면 마찰저항






# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

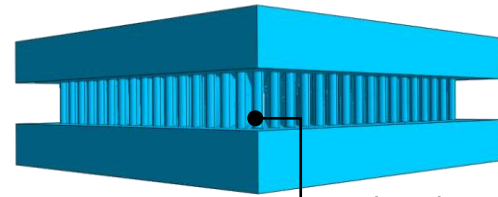
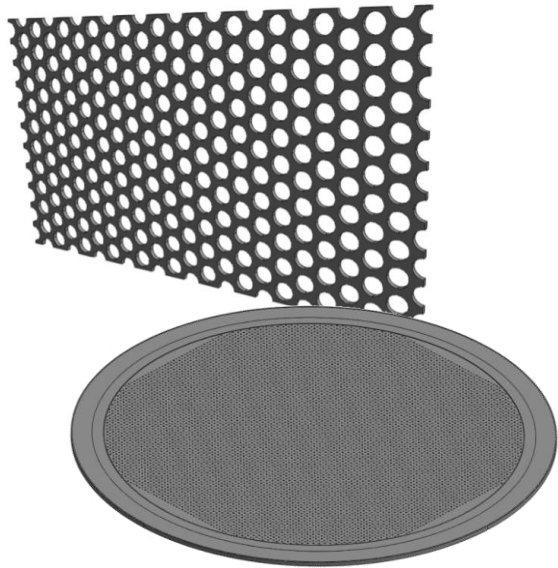
- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용



# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

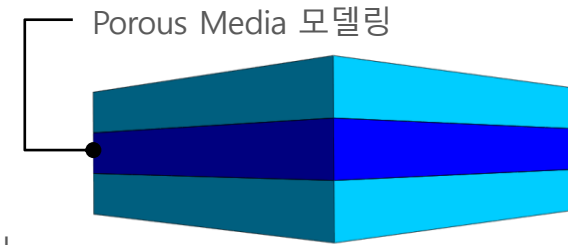
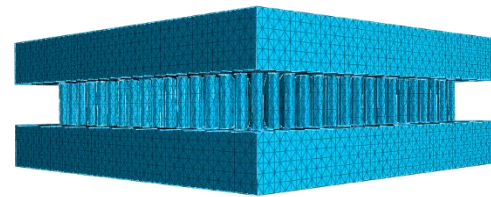
- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

- 다공성 매질(Porous media) 



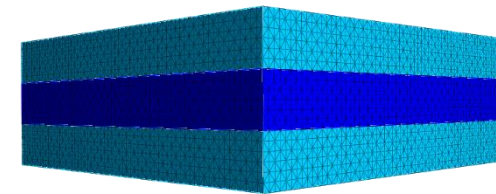
타공판 모델링

1800 만개 요소



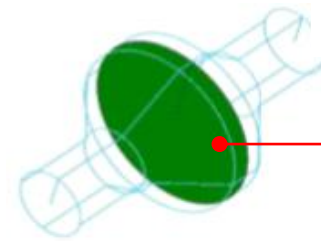
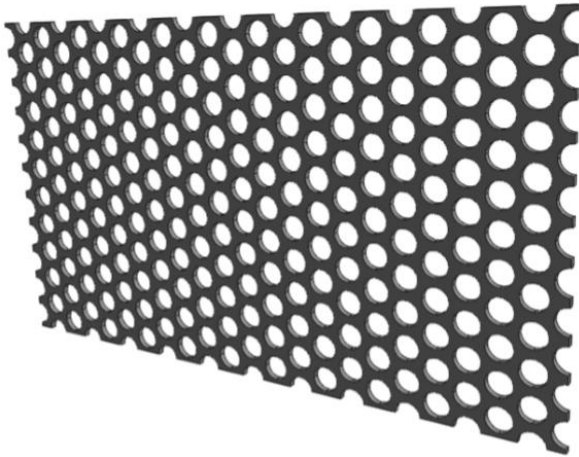
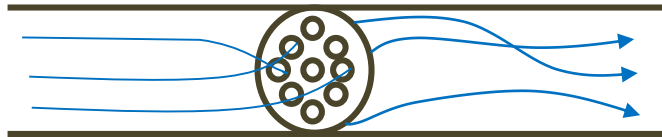
Porous Media 모델링

300 만개 요소



# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용



$$\Delta p = D\mu\Delta n v + \frac{1}{2}C\rho\Delta n v^2$$

- $D$  : 점성 저항
- $C$  : 관성 저항
- $\Delta n$  : 매질 두께

# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

$$\Delta P = \frac{1}{2} C_p \Delta n v^2 + D \mu \Delta n v$$

관성저항

점성저항

$\rho$  : 유체의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta n$  : Porous Media의 두께(m)

$\mu$  : 유체의 점성계수(kg/m·s)

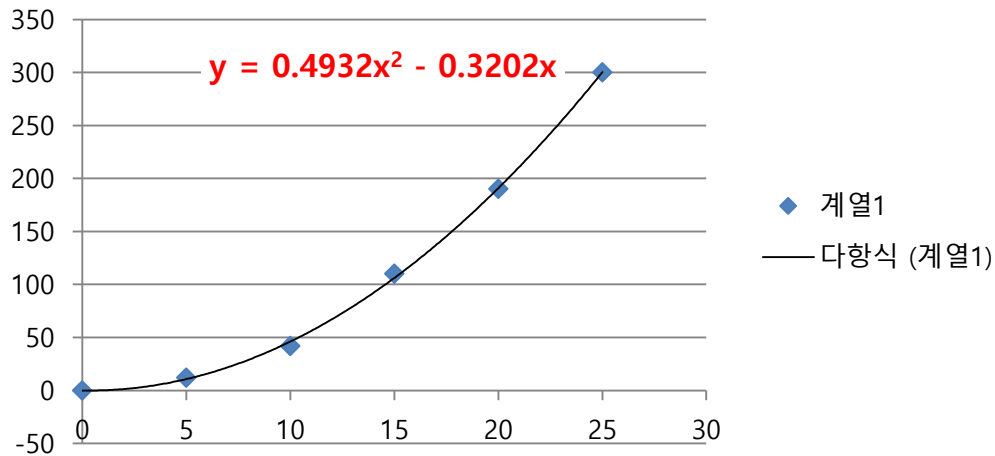
관성저항-X	1000	1/m	없음	▼
관성저항-Y	1000	1/m	없음	▼
관성저항-Z	1000	1/m	없음	▼

점성저항-X	10000000	1/m <sup>2</sup>	없음	▼
점성저항-Y	10000000	1/m <sup>2</sup>	없음	▼
점성저항-Z	10000000	1/m <sup>2</sup>	없음	▼

# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

유속(m/s)	5	10	15	20	25
압력손실(Pa)	12	42	110	190	300



추세선 서식

추세선 옵션 ▾

추세선 옵션

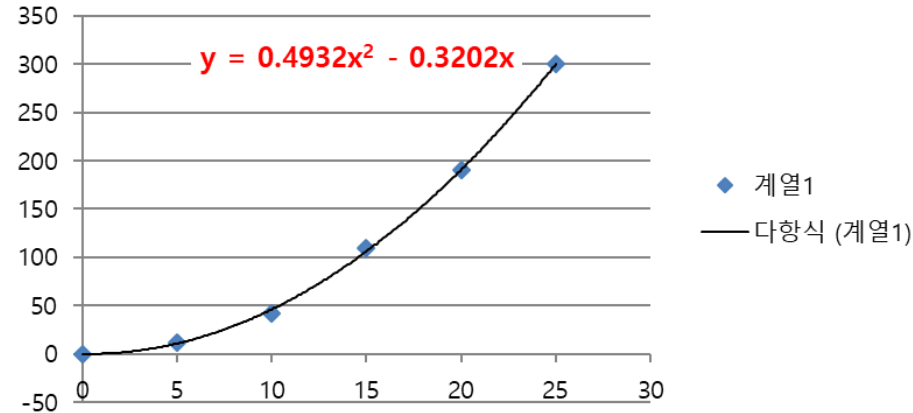
- 지수(X)
- 선형(L)
- 로그(O)
- 다항식(P) 차수(D) 2
- 거듭제곱(W)
- 이동 평균(M) 구간(E) 2

# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

$$\Delta P = \frac{1}{2} C \rho \Delta n v^2 + D \mu \Delta n v$$

$$\Delta P = 0.4932 v^2 - 0.3202 v$$



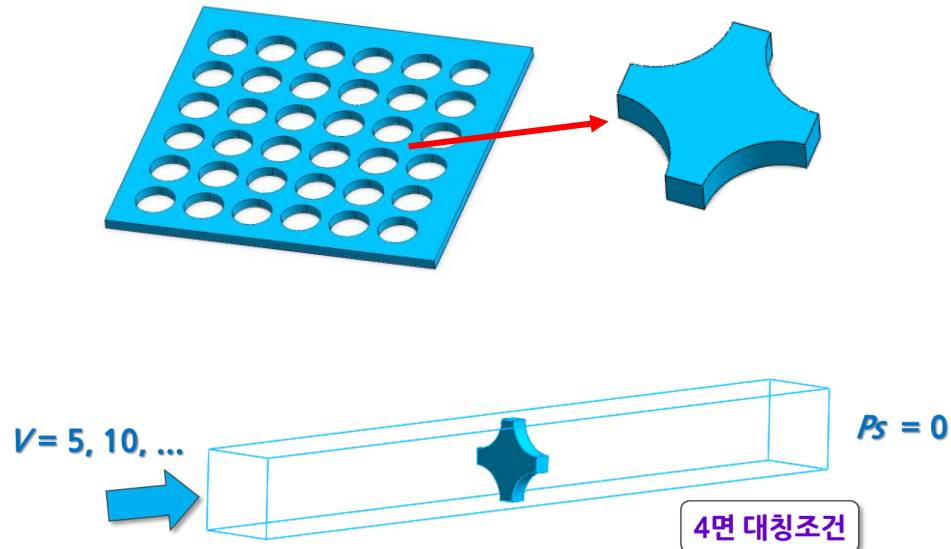
- 사용된 유체가 공기( $\rho=1.17\text{kg/m}^3$ ,  $\mu=1.8 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )이고, 두께가 0.005m라고 한다면

$$C = 168.62 \text{ (1/m)}$$

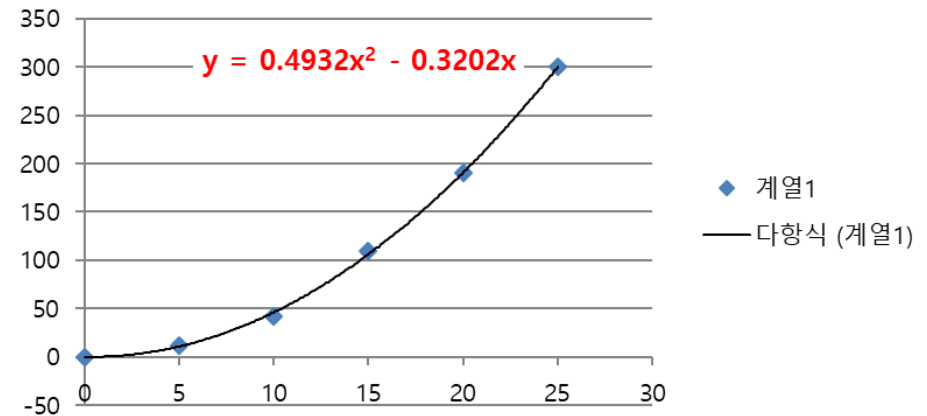
$$D = -3,557,778 \text{ (1/m}^2\text{)}$$

# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

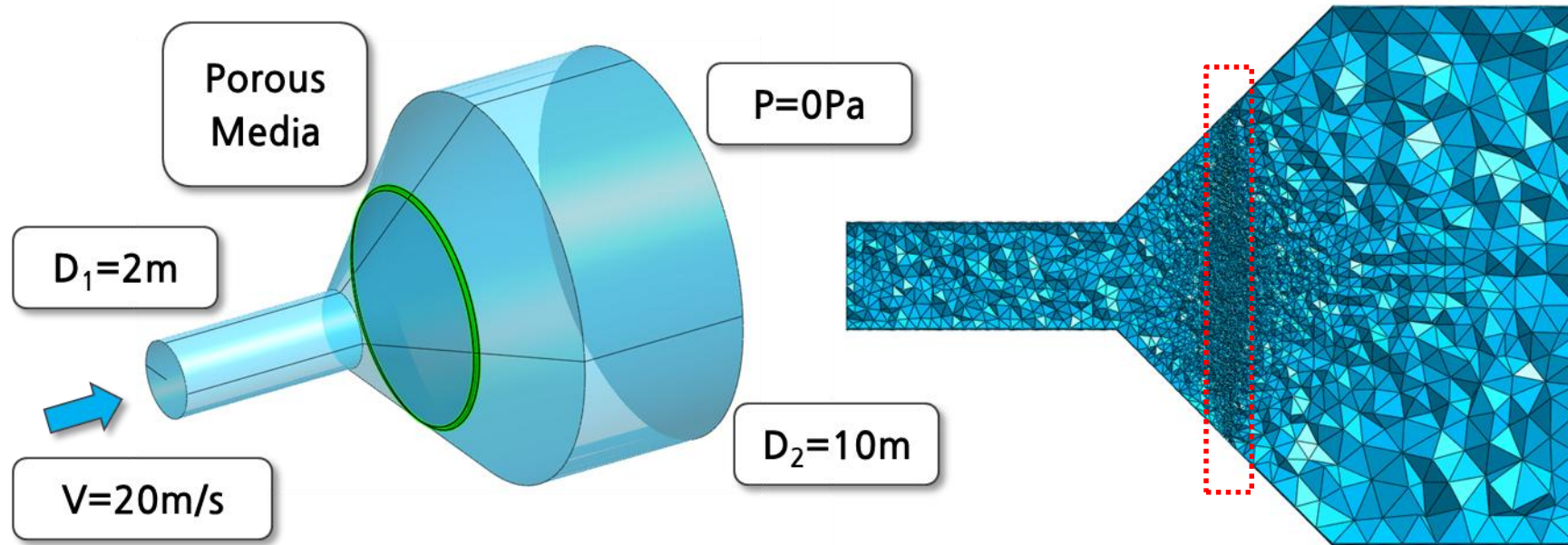


유속(m/s)	5	10	15	20	25
압력손실(Pa)	12	42	110	190	300



# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

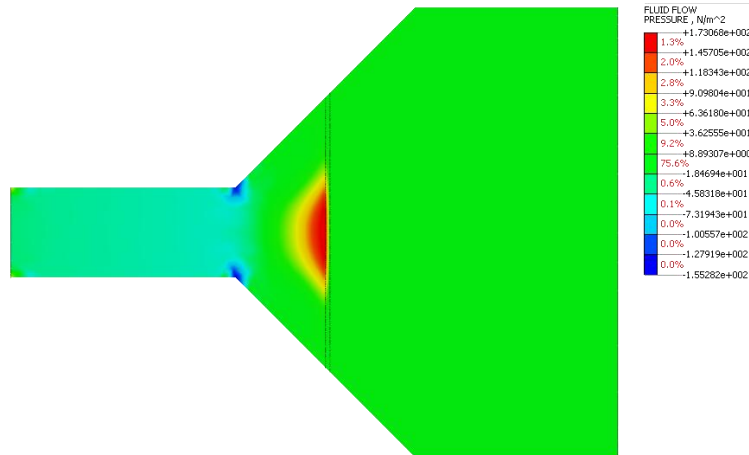
- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용



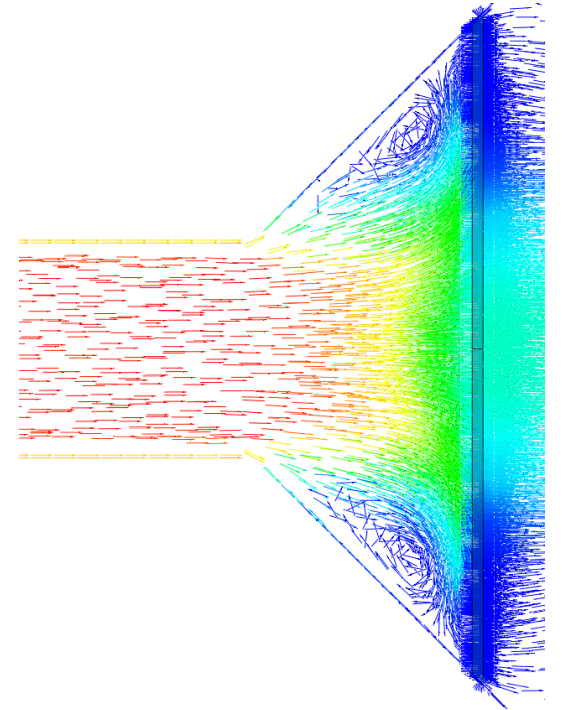
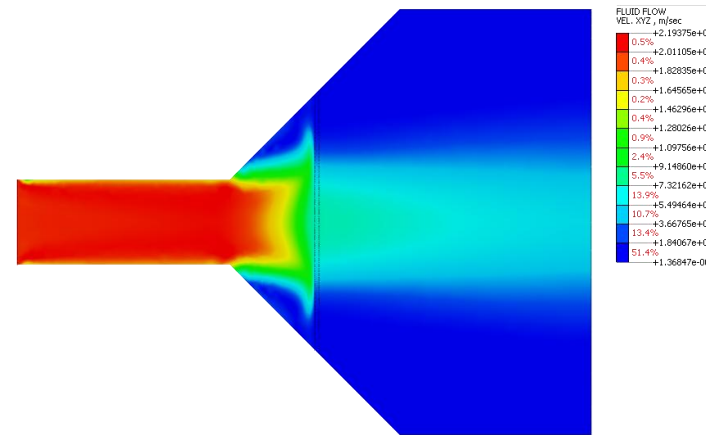
# 경제성 있는 유동해석 방법론-4 : 흐름 저항성 단순화

- 일정한 배열을 가진 저항체의 경우 저항계수로 가정하여 Porous Media 혹은 타공판 적용

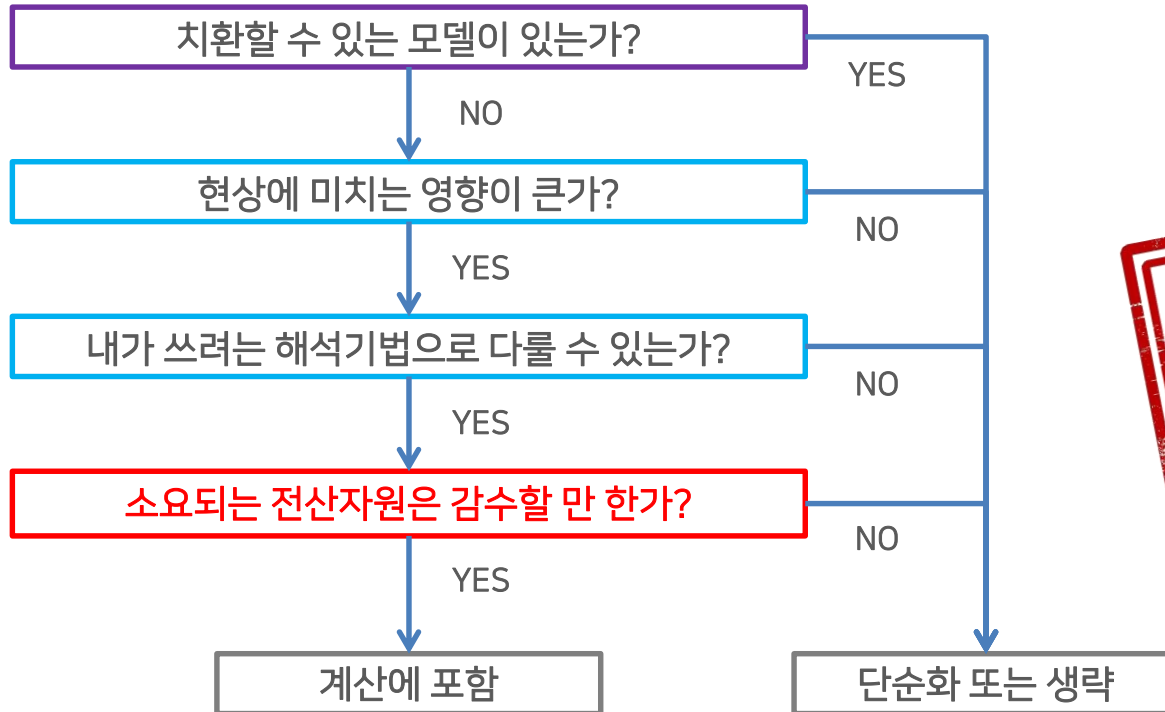
[Pressure Distribution]



[Velocity Distribution]

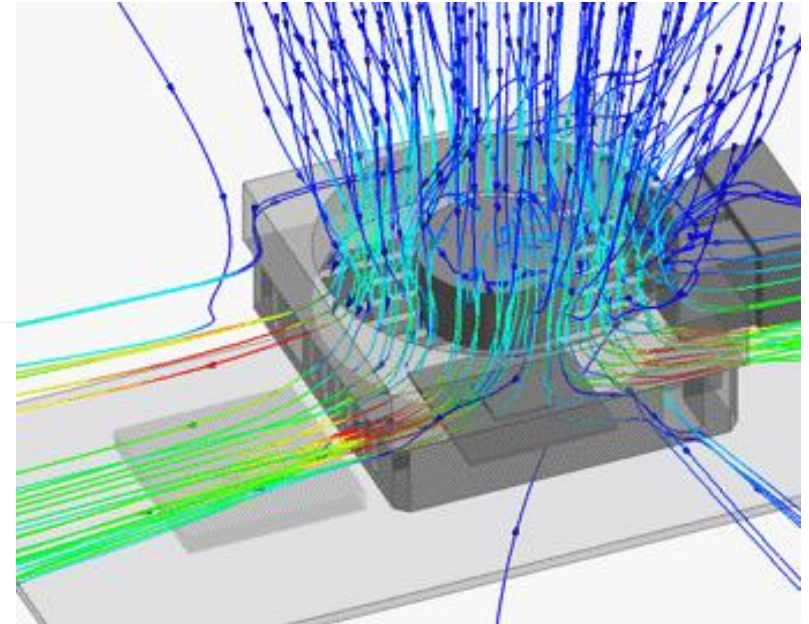
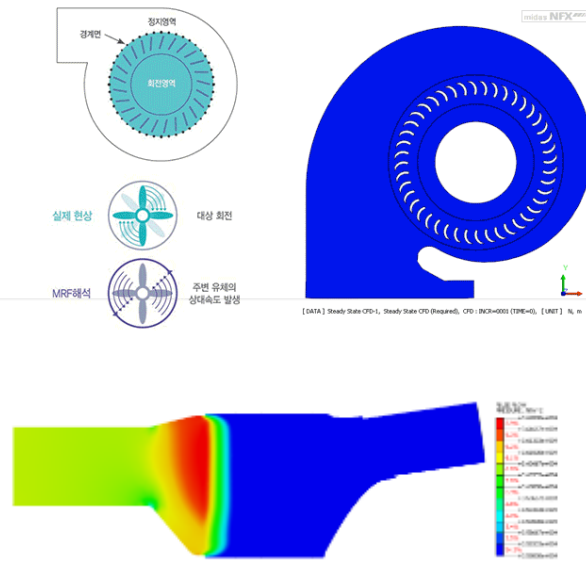
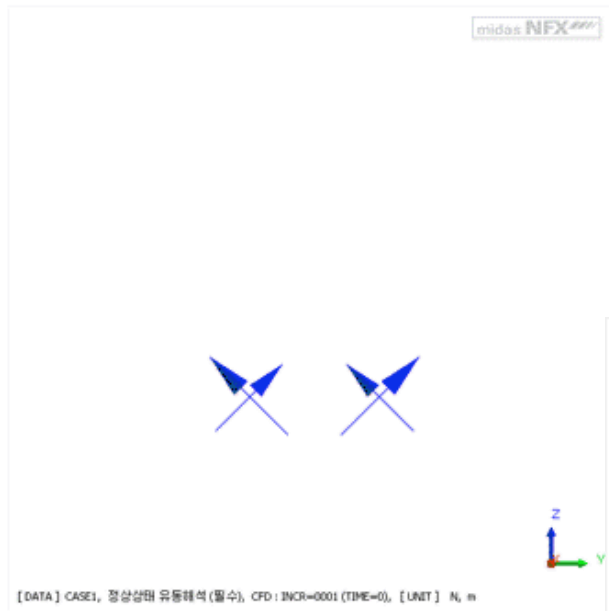


# 유동해석시 고려해야할 사항

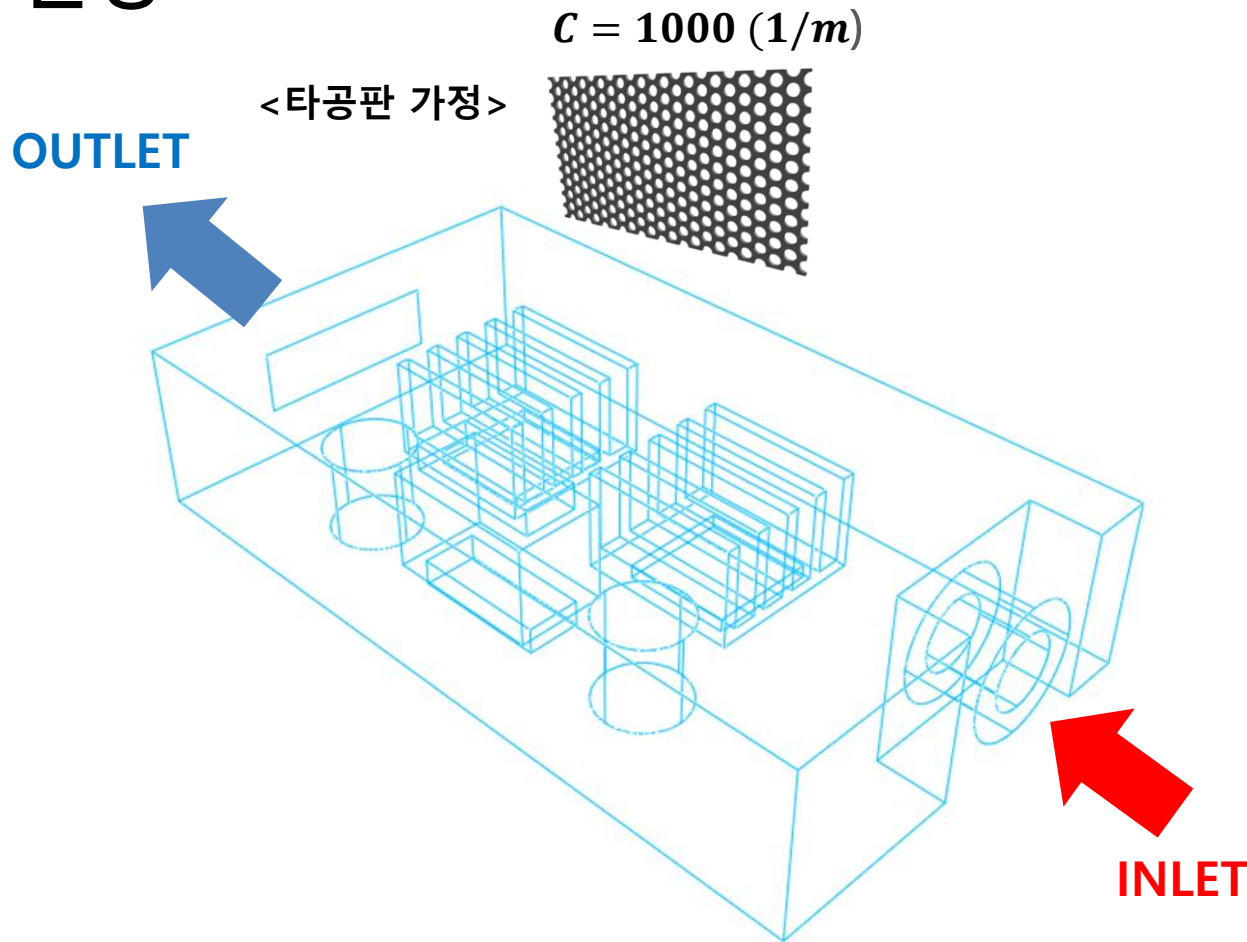


★ LIMITED-TIME ★  
GREAT PRICES

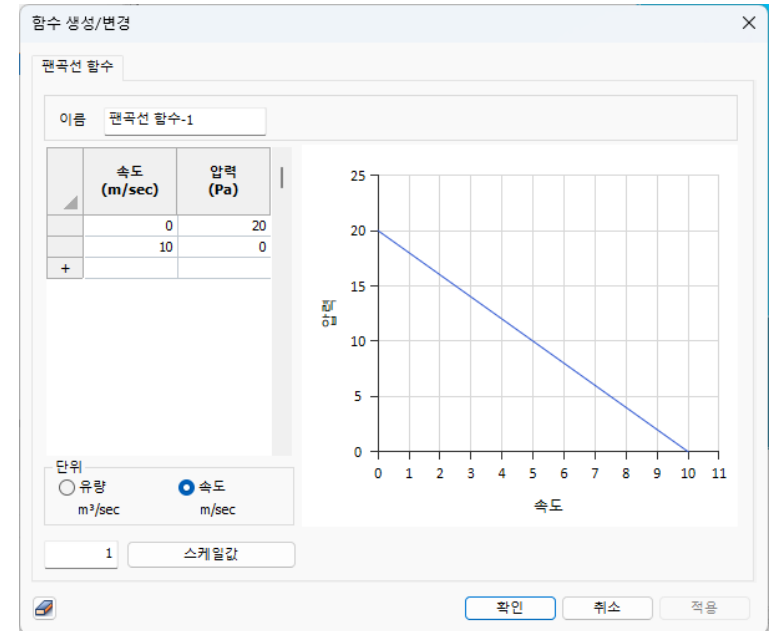
# 유동해석 실무사례



# 예제 설명



## <팬 경계조건 가정>



# CONTENTS

## 유동해석을 잘 하기 위해 알아야 할 모든 것

---

Session1. 유동해석을 위한 기초사항

Session2. 경제성 있는 유동해석을 위한 방법

**Session3. 에너지방정식을 이용한 온도분포 활용하기**

Session4. 열변형 연성해석 간단하게 이용하기

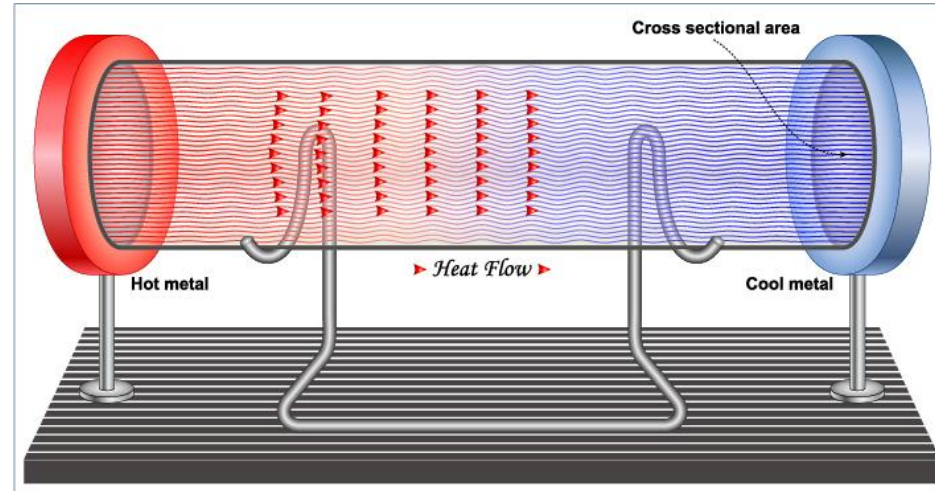
# AI 그림 생성 / 뜨거운 냄비 사진



# 열에 대한 사진



# 열, 온도에 대한 이해



## 열역학 제 2법칙, 엔트로피

- 에너지 흐름의 방향성에 대한 법칙 (총량에 대한 것은 1법칙)
- 열은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다
- 인위적인 일이 없으면 비가역적이다
- 우주의 무질서도는 증가한다(엔트로피가 증가하는 방향으로 현상이 발생한다)

# 열역학, 열전달에 대한 이해

## 열역학 Thermodynamics

- 에너지의 총량
- 에너지의 이동 방향

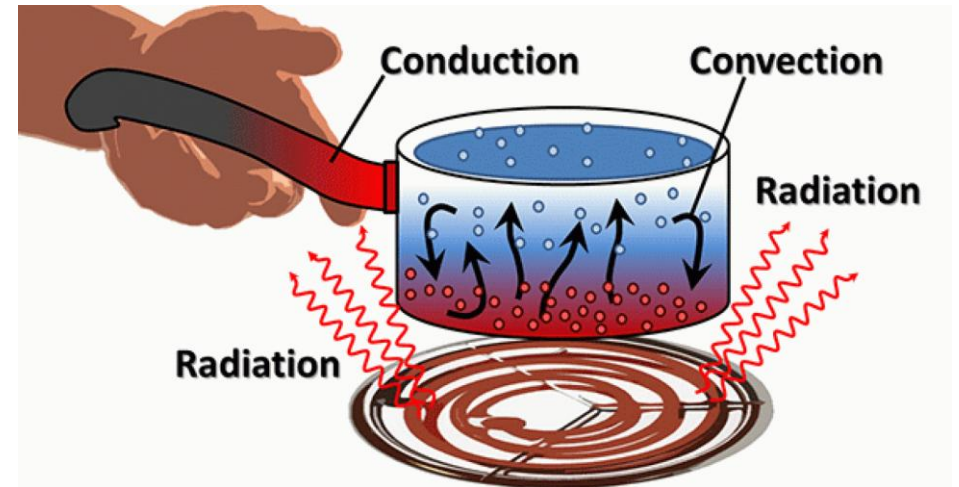
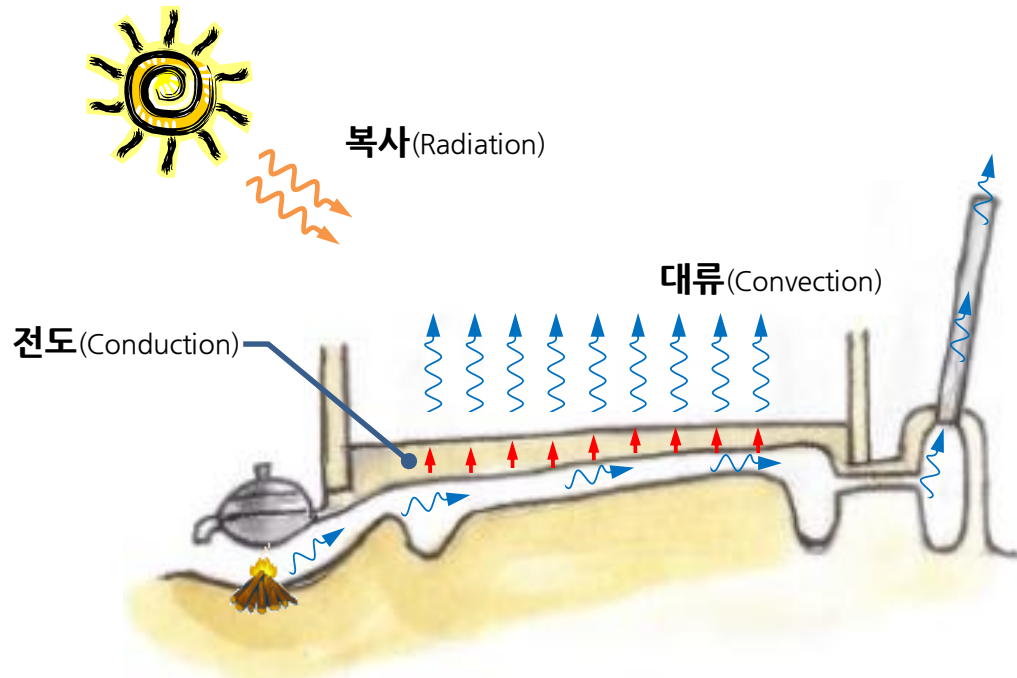
## 열전달 Heat Transfer

- 에너지가 전달되는 속도
- 에너지가 전달되는 방식

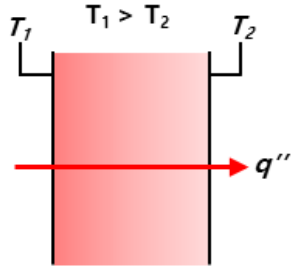
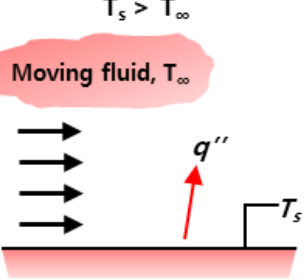
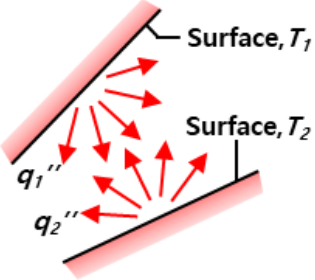
산업에서는 "얼마나 빨리"가 관건 (발열속도 vs 냉각속도 → 화재여부)

열전달은 열역학보다 조금 더 실용적인 느낌의 학문

# 열전달 매커니즘



# 열전달 매커니즘

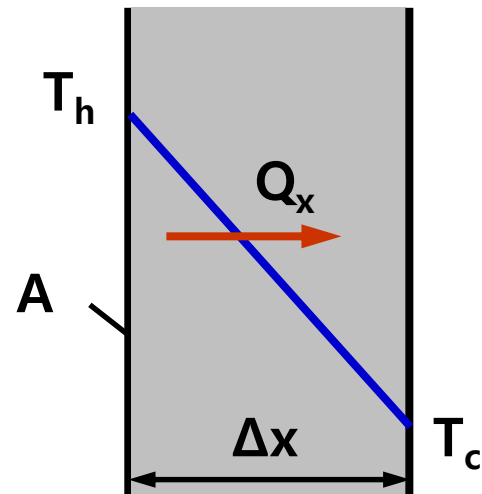
Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces
		

**Conduction** : Molecular interaction

**Convection** : Fluid motion

**Radiation** : Electromagnetic wave

# 전도 열전달 - 푸리에의 법칙(Fourie's Law)



$$Q_x \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta t \cdot A \quad [\text{J}]$$

heat flux

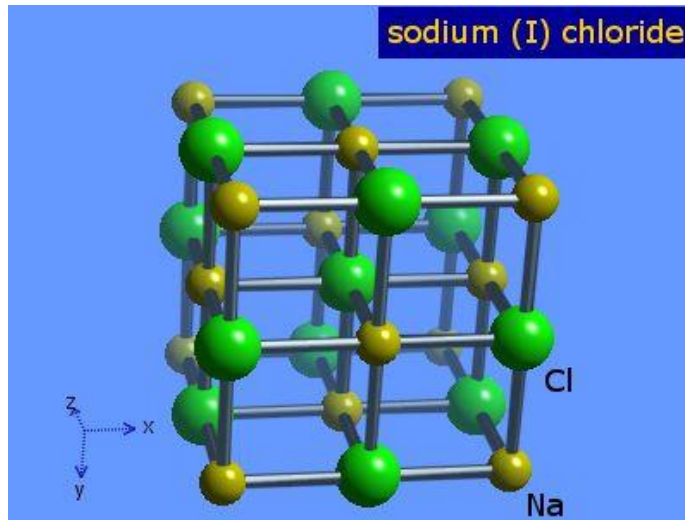
$$q_x'' = \frac{Q_x}{A \Delta t} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{J}/(\text{m}^2\text{s}) = \text{W}/\text{m}^2]$$

$\Delta T = T_h - T_c$

$$\text{As } \Delta x \rightarrow 0, \quad q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$k$  : thermal conductivity  $[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$

# 전도 열전달 원리



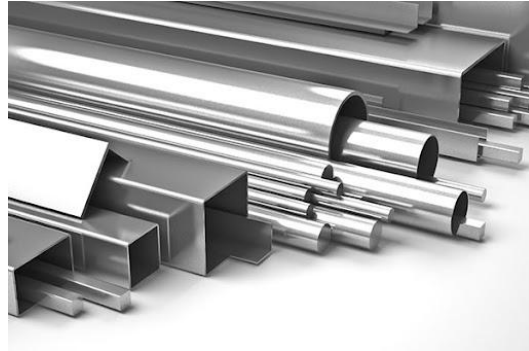
**Phonon (lattice vibration)**  
: Oscillation of atoms about their various positions of equilibrium

**Conductors** ↔ **Dielectrics**  
: Free electrons

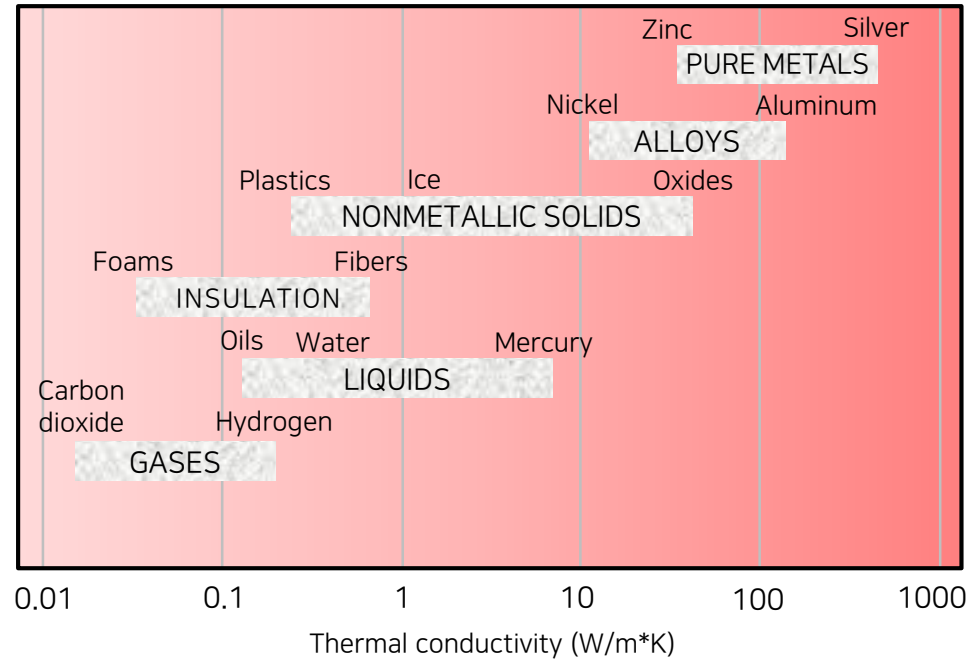
# 전도 열전달 원리



# 전도 열전달계수 이해

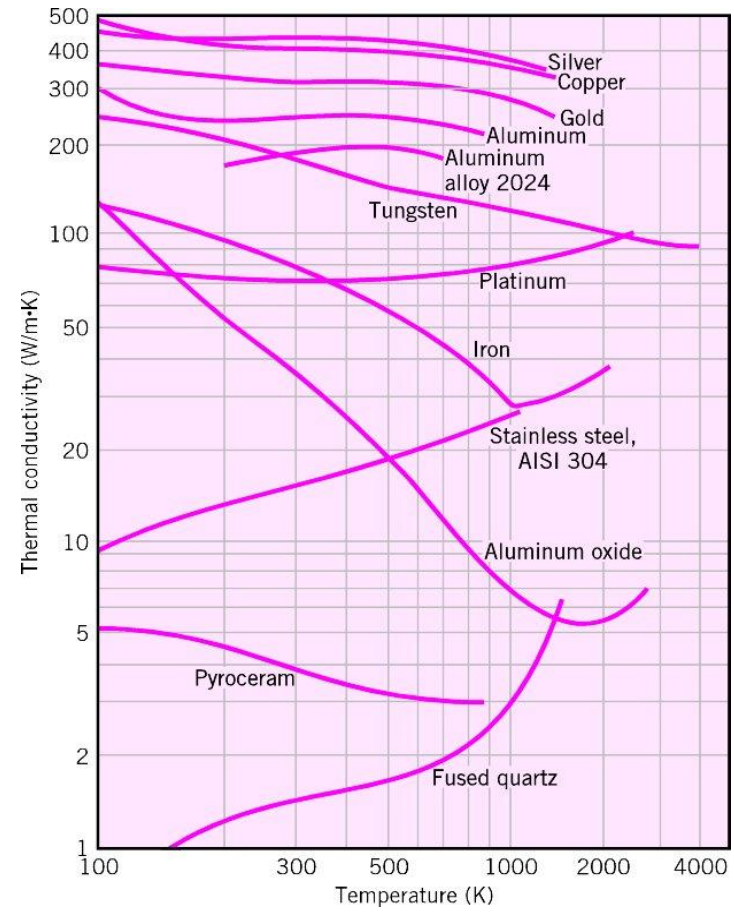
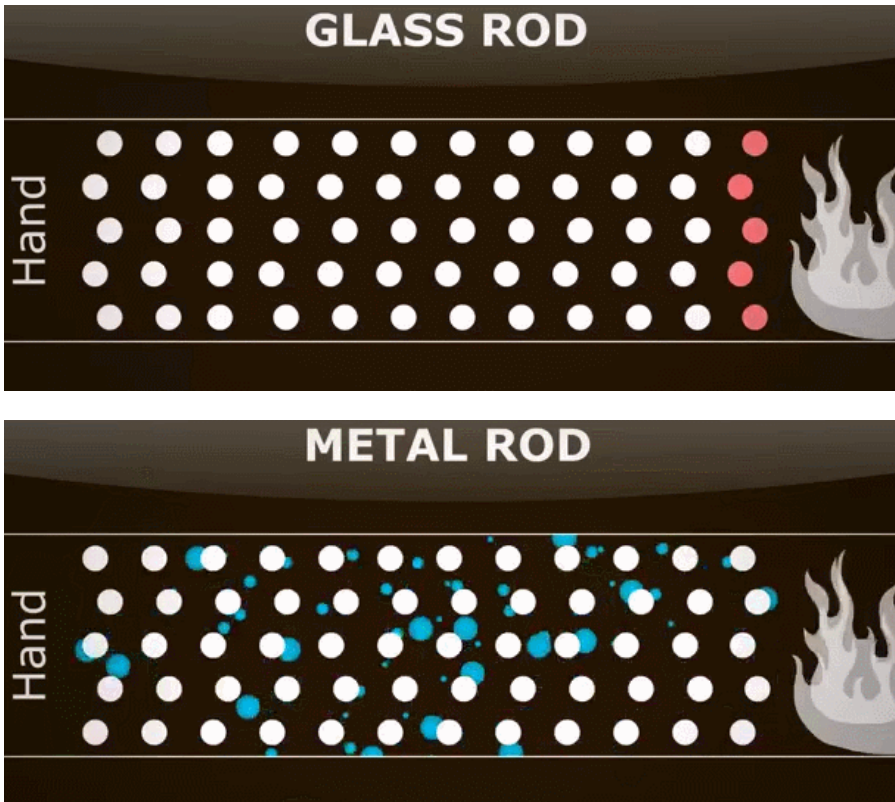


# 전도 열전달계수 이해

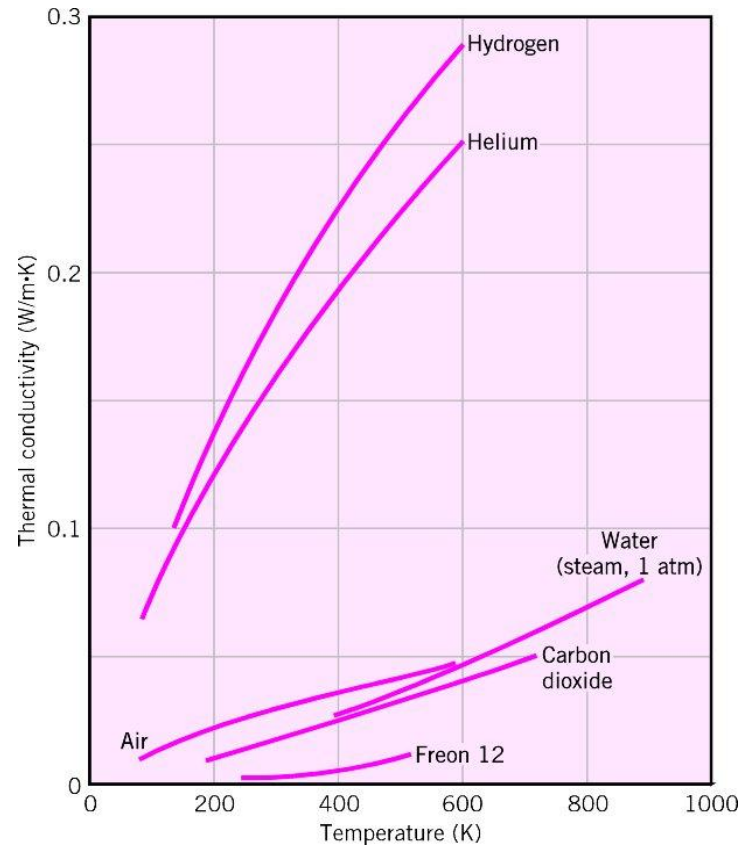
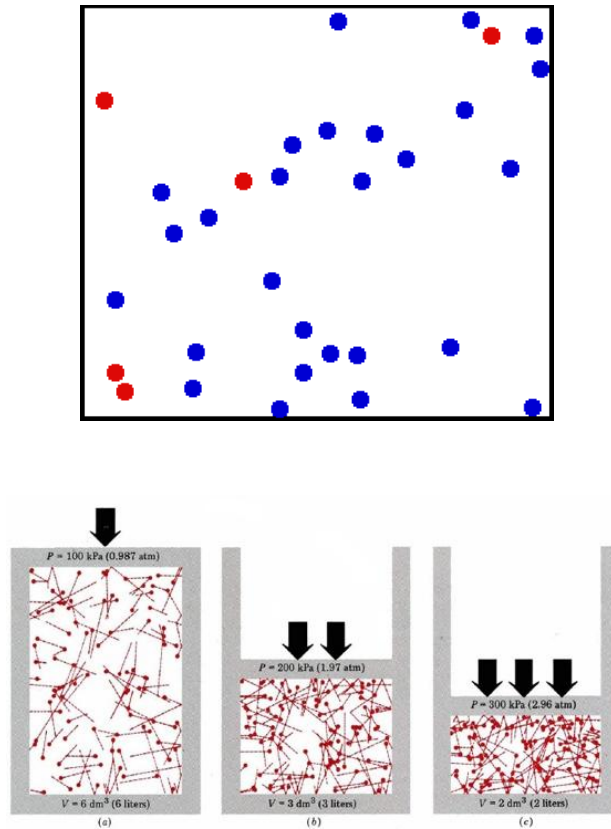


Material	W(m·K)
Diamond	2300
Copper	401
Gold	317
Aluminum	237
Iron	80.2
Glass	0.78
Water	0.613
Hunman Skin	0.37
Wood	0.17
Air(g)	0.026

# 전도 열전달계수 이해



# 전도 열전달계수 이해



# 전도 열전달계수 재료물성치 정의

재료

번호: 2 이름: AIR\_25° C-1 색상: [Yellow]

All

- FRESH\_WATER\_0° C
- FRESH\_WATER\_25° C
- FRESH\_WATER\_50° C
- SEA\_WATER
- AIR\_0° C
- AIR\_25° C**
- AIR\_50° C
- AIR
- OXYGEN\_25° C
- HELIUM\_25° C
- NITROGEN\_25° C
- CARBON\_MONOXIDE\_25° C
- CARBON\_DIOXIDE\_25° C
- WATER\_VAPOR\_25° C
- ARGON\_25° C
- HYDROGEN\_25° C
- CHLORINE\_25° C
- FLUORINE\_25° C
- AMMONIA\_LIQUID
- AMMONIA\_VAPOR\_25° C
- SULFUR\_DIOXIDE\_25° C
- METHANE\_25° C
- ACETYLENE\_25° C
- ETHANE\_25° C
- PROPANE\_25° C
- PROPYLENE\_25° C
- ETHYLENE\_25° C
- GLYCERIN
- GASOIL\_LIQUID
- GASOIL\_VAPOR\_25° C
- DIESEL\_LIQUID
- ETHYL\_ALCOHOL\_LIQUID
- ETHYL\_ALCOHOL\_VAPOR\_25° C
- METHYL\_ALCOHOL\_LIQUID
- METHYL\_ALCOHOL\_VAPOR\_25° C
- ETHYLENE\_GLYCOL
- BENZENE\_LIQUID
- BENZENE\_VAPOR\_25° C
- MERCURY
- TOLUENE\_LIQUID
- TOLUENE\_VAPOR\_25° C
- NITROUS\_OXIDE\_0° C
- SILANE\_25° C
- TETRAFLUOROMETHANE\_25° C
- OCTAFLUOROCYCLOBUTANE\_25° C
- NITROGEN\_TRIFLUORIDE\_25° C
- SULFUR\_HEXAFLUORIDE\_25° C

유체 (유동해석)

유동: 비압축성

도열: 비압축성

질량밀도: 1.1845 kg/m<sup>3</sup> 없음

일반화된 뉴턴 유체

점성: 1.8444e-05 kg/(m·sec) 없음

비뉴턴 점성: 상세정의

몰질량: 0.02897 kg/mol 없음

표면장력: 0 N/m 없음

압축률: 0 sec<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> 없음

가속도장

Tx: 0 m/sec<sup>2</sup> 없음

Ty: 0 m/sec<sup>2</sup> 없음

Tz: 0 m/sec<sup>2</sup> 없음

열

비열: 1006 J/(kg·[T]) 없음

**전도율: 0.0242 W/(m·[T])** 없음

부유도: 0 없음

열원: 0 W/m<sup>3</sup> 없음

물질이송

확산계수: 2.82e-05 m<sup>2</sup>/sec 없음

소스: 0 1/sec 없음

복사

흡수계수: 0 1/m 없음

산란계수: 0 1/m 없음

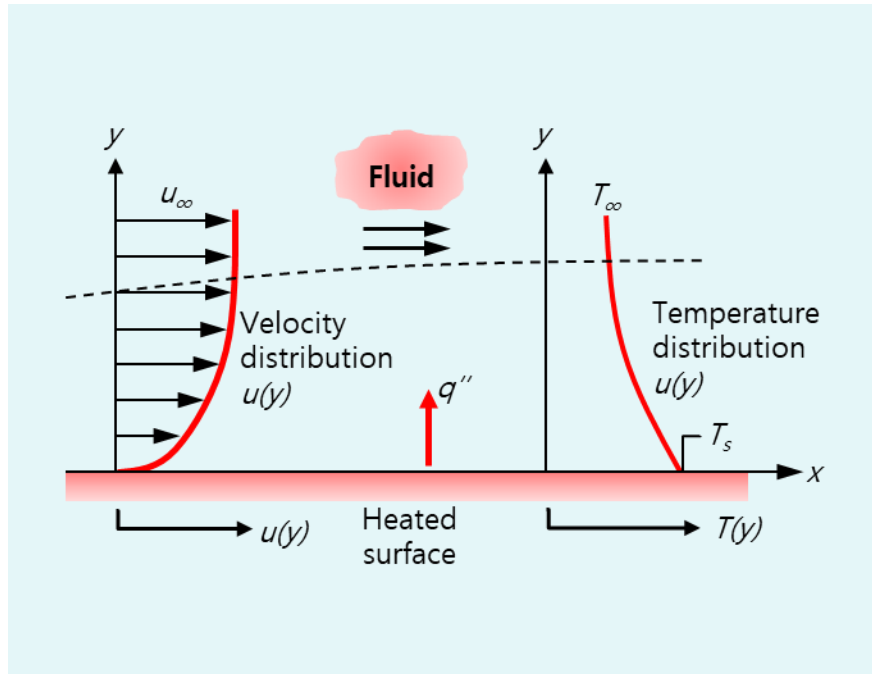
산란 위상각수: 불방성

굴절률: 0

불러오기... 편집... 확인 취소 적용

비열	1006	J/(kg·[T])	없음
<b>전도율</b>	<b>0.0242</b>	<b>W/(m·[T])</b>	없음
부유도	0		없음
열원	0	W/m <sup>3</sup>	없음

# 대류 열전달계수 이해



## Convection

Bulk fluid motion

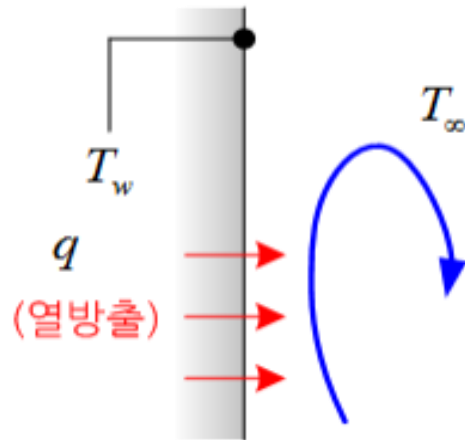
Random molecular motion

# 대류 열전달계수 이해

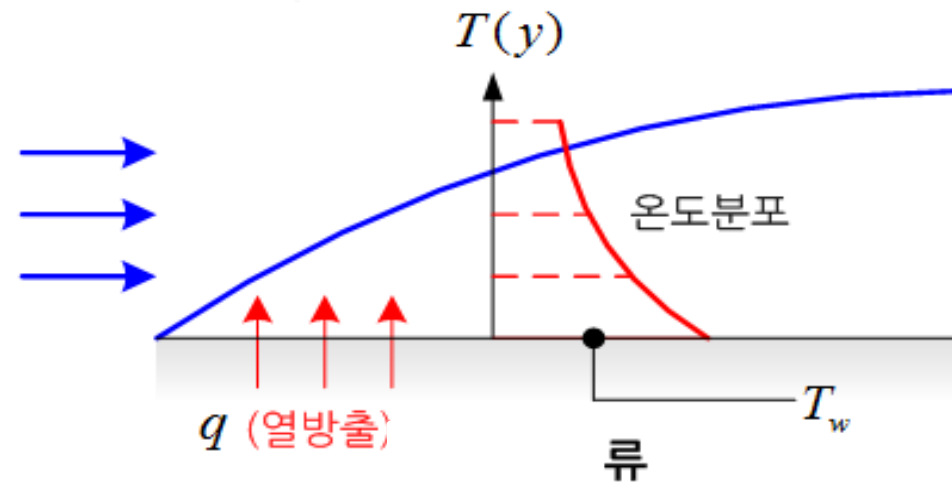


# 대류 열전달계수 구분

<Natural Convection>



<Forced Convection>

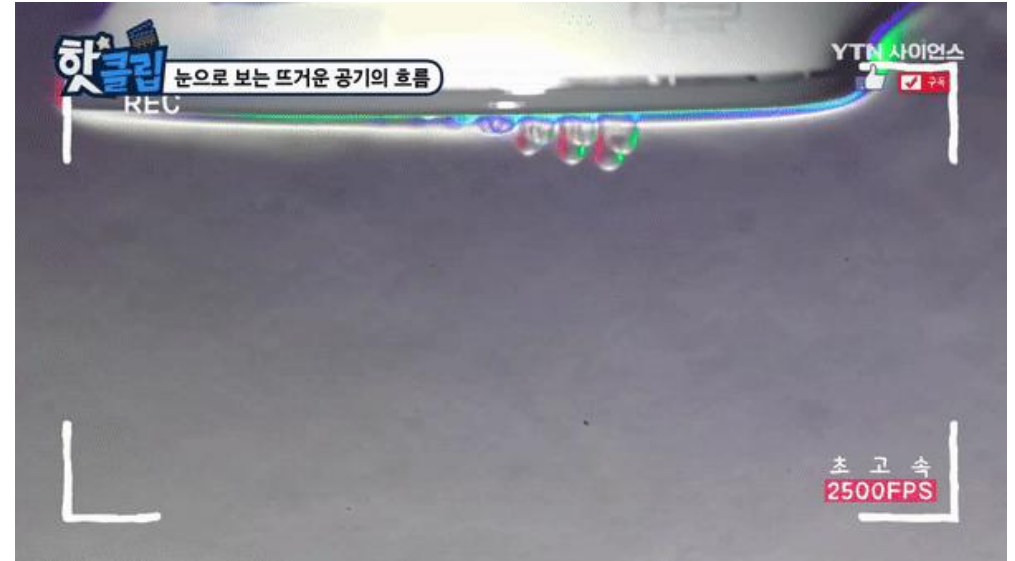


# 대류 열전달계수 구분

<Natural Convection>

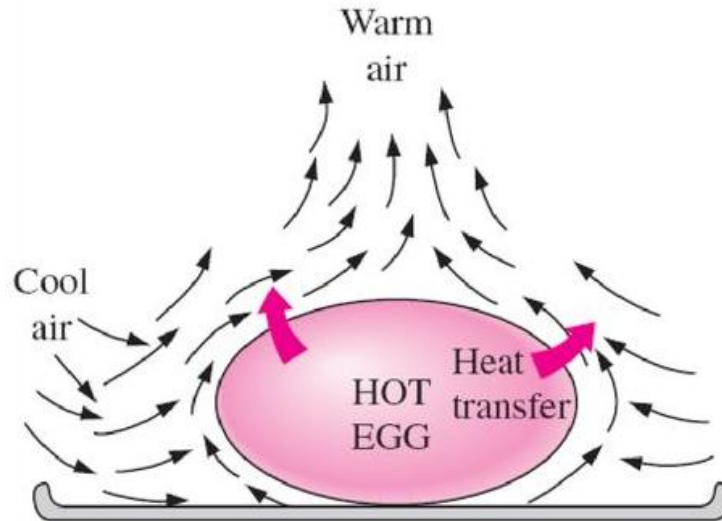


<Forced Convection>



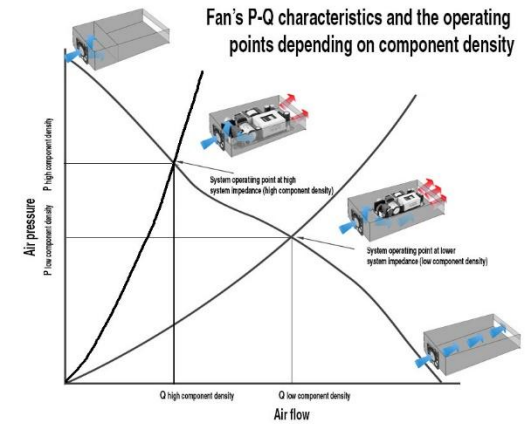
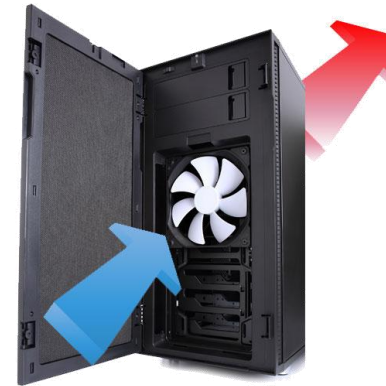
# 대류 열전달계수 구분

## <Natural Convection>



<https://slideplayer.com/slide/16931023/>

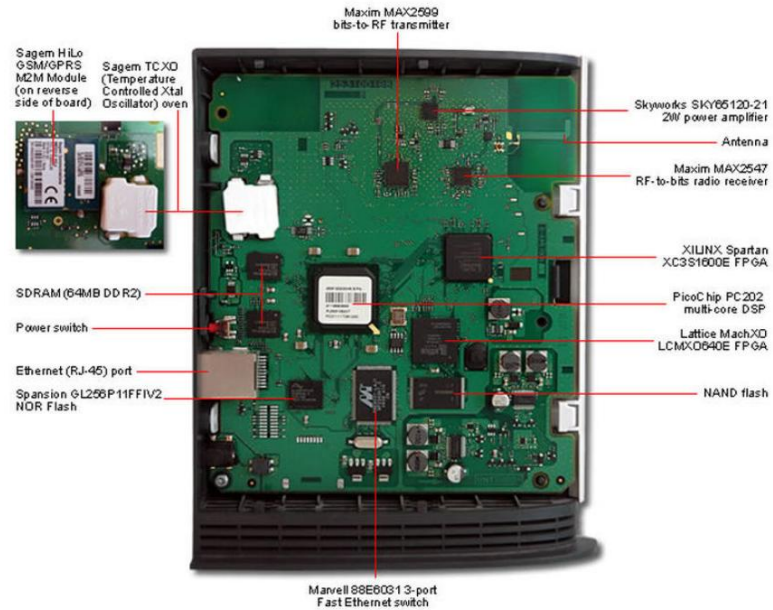
## <Forced Convection>



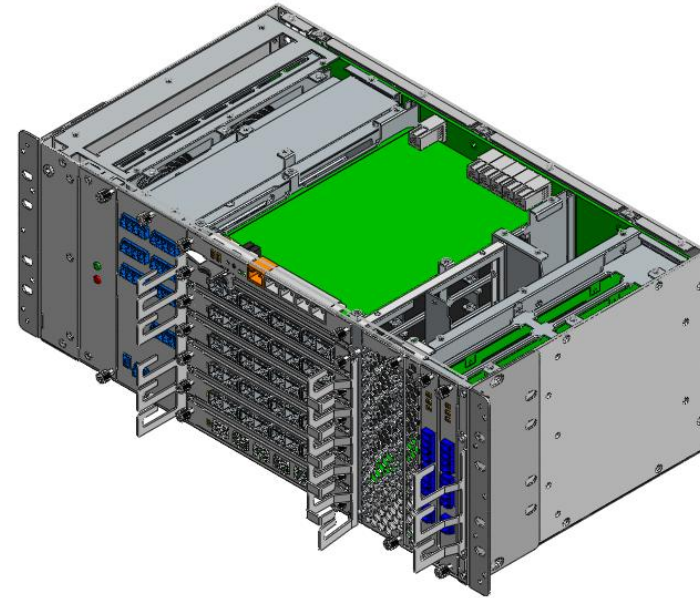
<https://www.engineerlive.com/content/design-system-cooling-using-dc-axial-fans>

# 대류 열전달계수 구분

<Natural Convection>

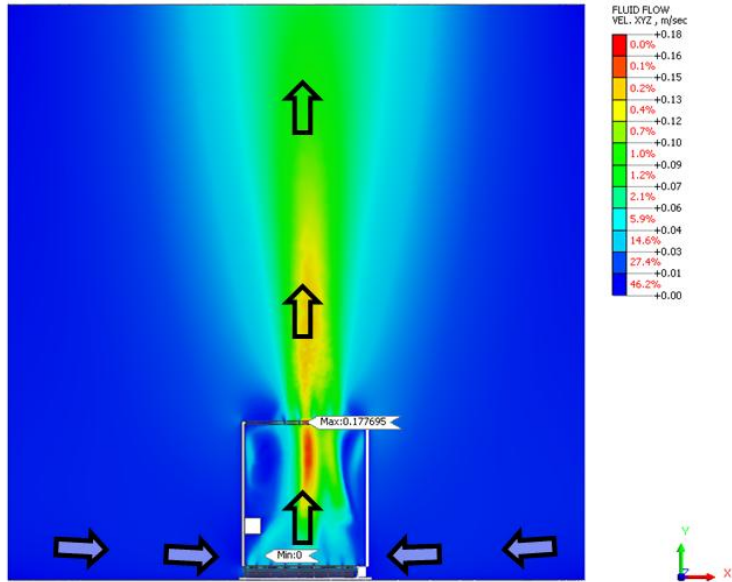


<Forced Convection>

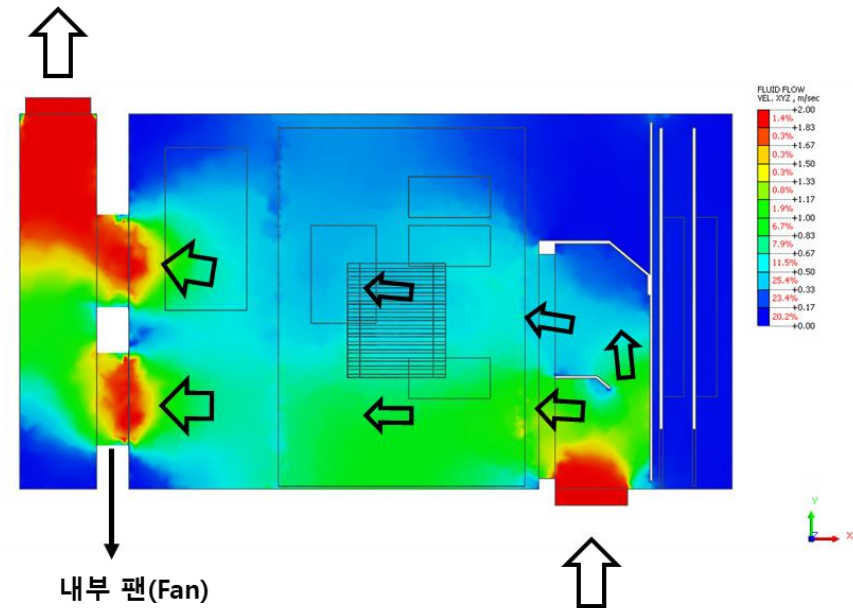


# 대류 열전달계수 구분

## <Natural Convection>



## <Forced Convection>



# 대류 열전달계수 해석조건 적용

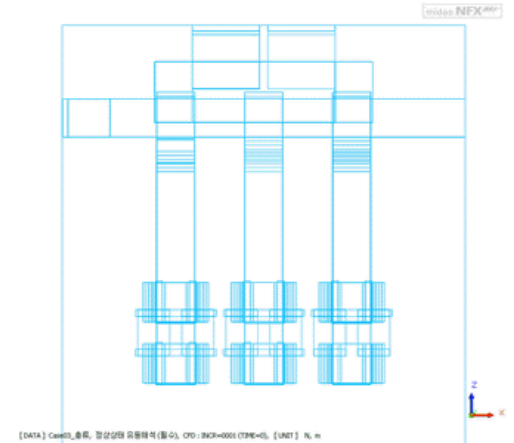
## <Natural Convection>

대류조건 h 값 상수 적용 (상승기류 영향없을시)

자연대류 (W/m²·K)		강제대류 (W/m²·K)	
0.3m 수직평판, 공기	4.5	0.2m 수직평판, 2m/s 공기	12
수평원통, 지름 5cm	6.5	0.75m 수직평판, 35m/s 공기	75
		지름 2.5cm, 관 10m/s 공기	65
		지름 5cm, 관 50m/s 공기	180
		지름 2.5cm, 관 0.5kg/s 물	3500

## <Forced Convection>

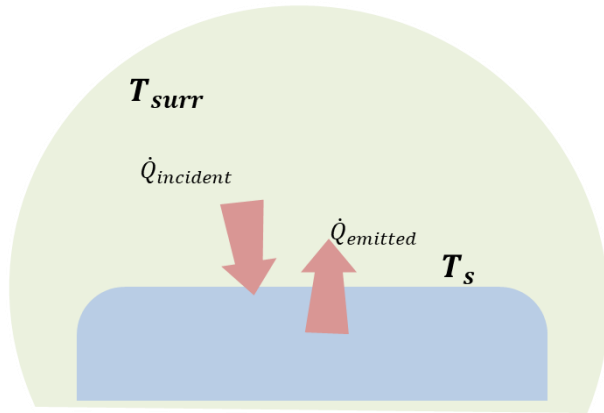
유동해석을 통한 위치별 h 값 계산



# 복사에 대한 이해



# 복사에 대한 고민



$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) [W]$$

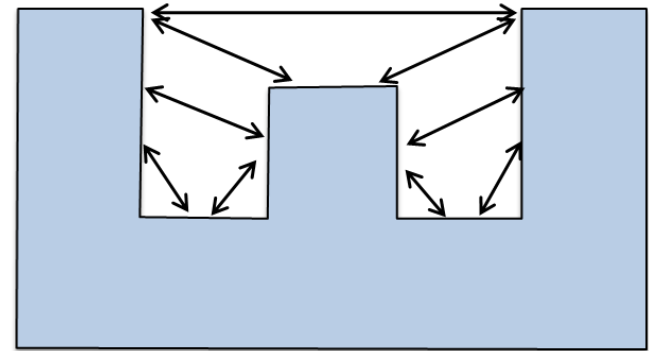
$\epsilon$  : 방사율 ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수  
( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{T}^4$ )

$T_s$  : 고체 표면 온도

$T_{surr}$  : 주변 공기 온도

$A$  : 고체 표면 면적



# 전도 vs 대류

## Fourier's Law

$$q''_x = \underbrace{k}_{\substack{[\text{W/m}^2] \\ \uparrow \\ \text{Thermal Conductivity}}} \underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}}_{[\text{K/m}]} = -k \nabla T$$

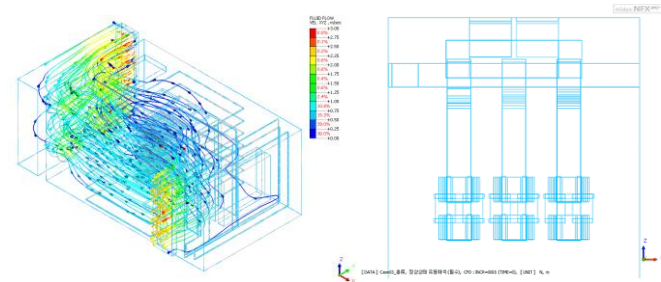
Thermal Conductivity

비열	1006	J/(kg·[T])	값 없음
전도율	0.0242	W/(m·[T])	값 없음
부유도	0		값 없음
밀도	0	W/m <sup>3</sup>	값 없음

## Newton's Cooling Law

$$q'' = \underbrace{h}_{\substack{[\text{W/m}^2 \text{ K}] \\ \uparrow \\ \text{Heat Transfer Coefficient}}} (T_s - T_\infty)$$

Heat Transfer Coefficient



# 열/유동 해석 적용방법

**유체 흐름**  
일반유동 해석

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f}$$

**전도 열전달**  
재료물성치 정의

$$\vec{q} = -k \nabla T$$

**대류/확산 열전달**  
대류열전달 반영

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A (T_{env} - T(t))$$

**복사 열전달**  
필요시에만, 대부분 무시

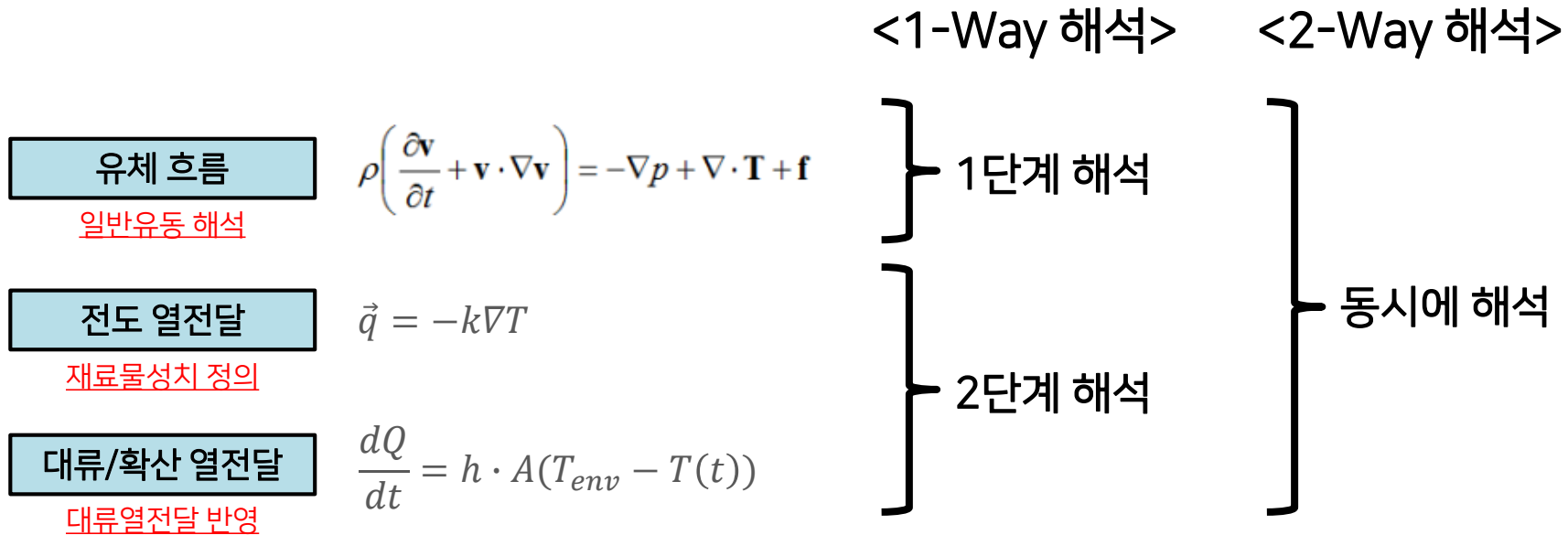
$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \sigma A_1 F_{1 \rightarrow 2} (T_1^4 - T_2^4)$$



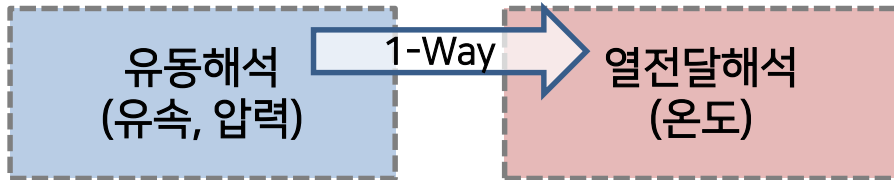
내 제품 해석에는 어떤 부분을 고려하거나 생략할지 결정 필요!



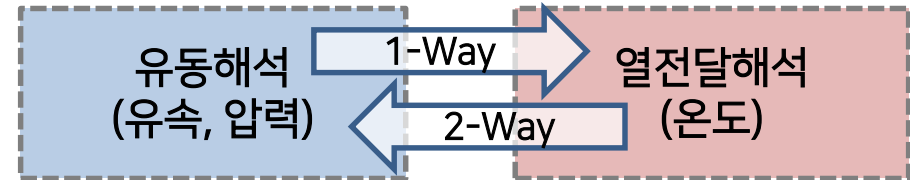
# 열/유동 해석 적용방법



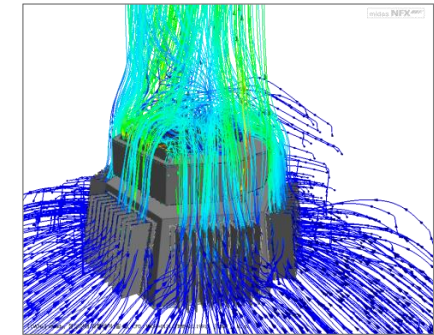
# 1-Way, 2-Way 해석법의 차이



- 온도의 변화(밀도차)에 의한 흐름 영향이 미미한 경우
- 동력원이 사용, 유체흐름의 변화가 빠른 상황 (**강제대류**)

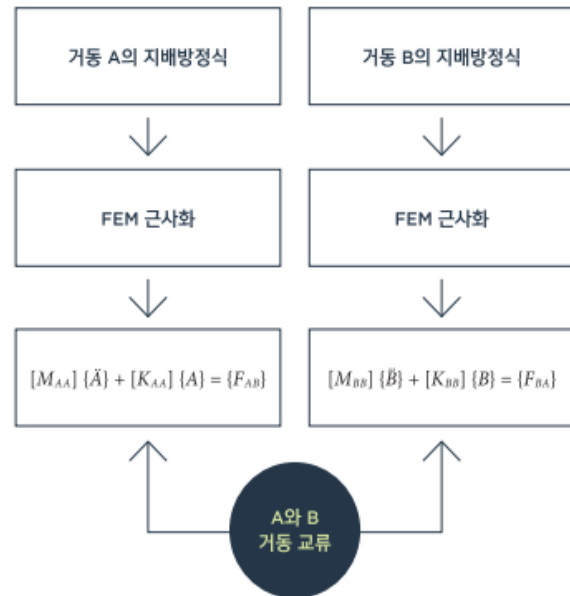


- 온도의 변화(밀도차)에 의한 흐름 영향이 지배적일 때
- 자연현상에 의존적 혹은 흐름이 느린 경우 (**자연대류**)

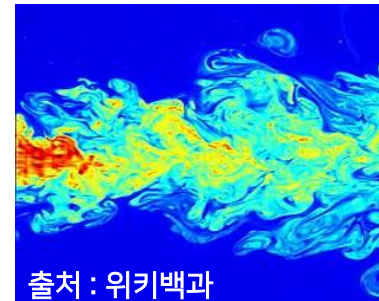


# 1-Way, 2-Way 해석법의 차이

✓ 변화에 따라 반복적인 연산이 요구됨



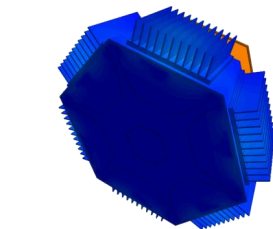
✓ Field 에 따른 계산 시간이 다름  
✓ 충분한 결과값을 위해 많은 해석시간 요구



공기의 변화 시간??

→ 0.001 ~

0.00001s



열이 전달되는 시간??

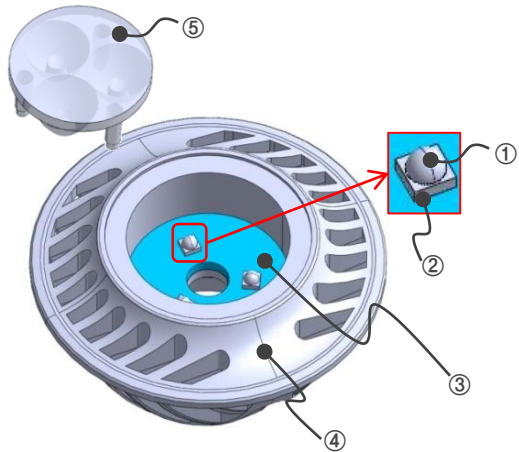
→ 1 ~ 100s

**→ 예외/필수 상황을 제외하고는 1-Way 접근이 효율적임**

# 유동-열 1-Way 연성해석 사례

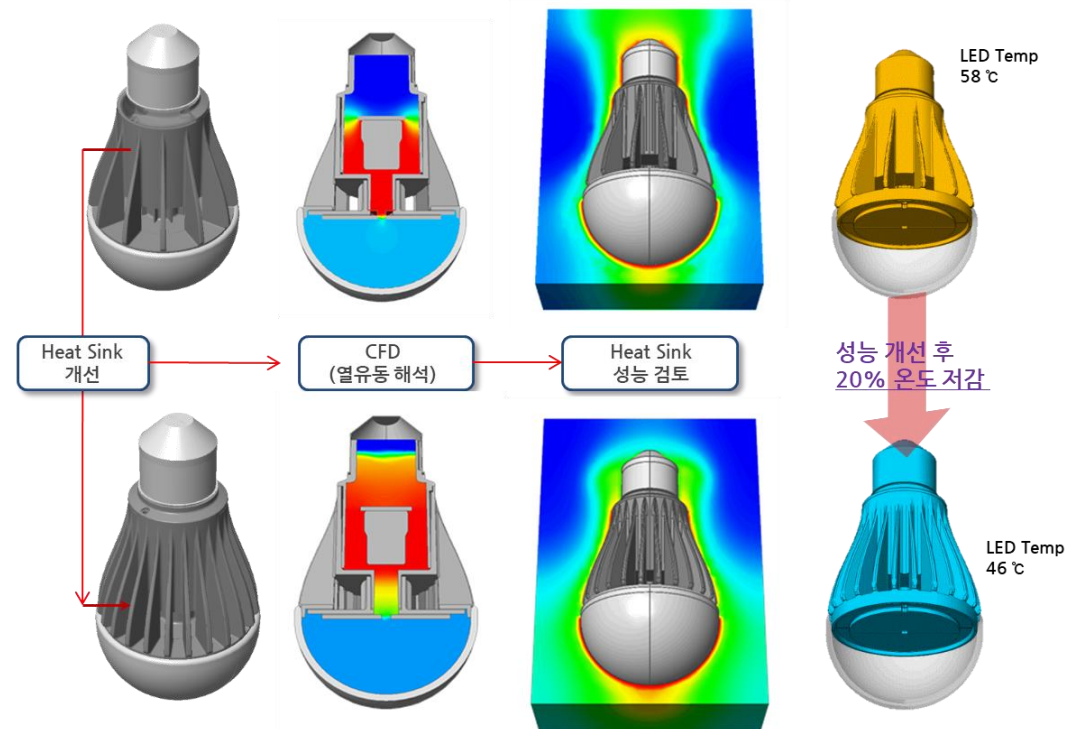
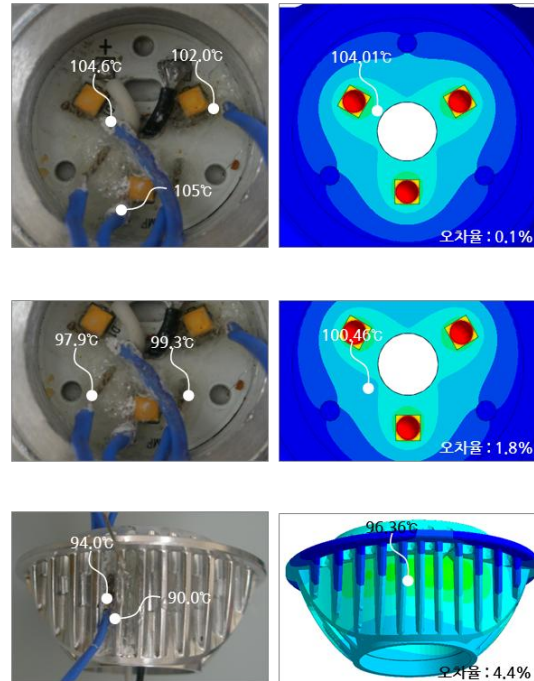
## 해석 조건

- 대류계수 : 20 W/m<sup>2</sup>[T]
- LED PKG 초기온도 : 고정온도 120 °C
- 메탈 PCB의 열전도도 : 180 W/m·K

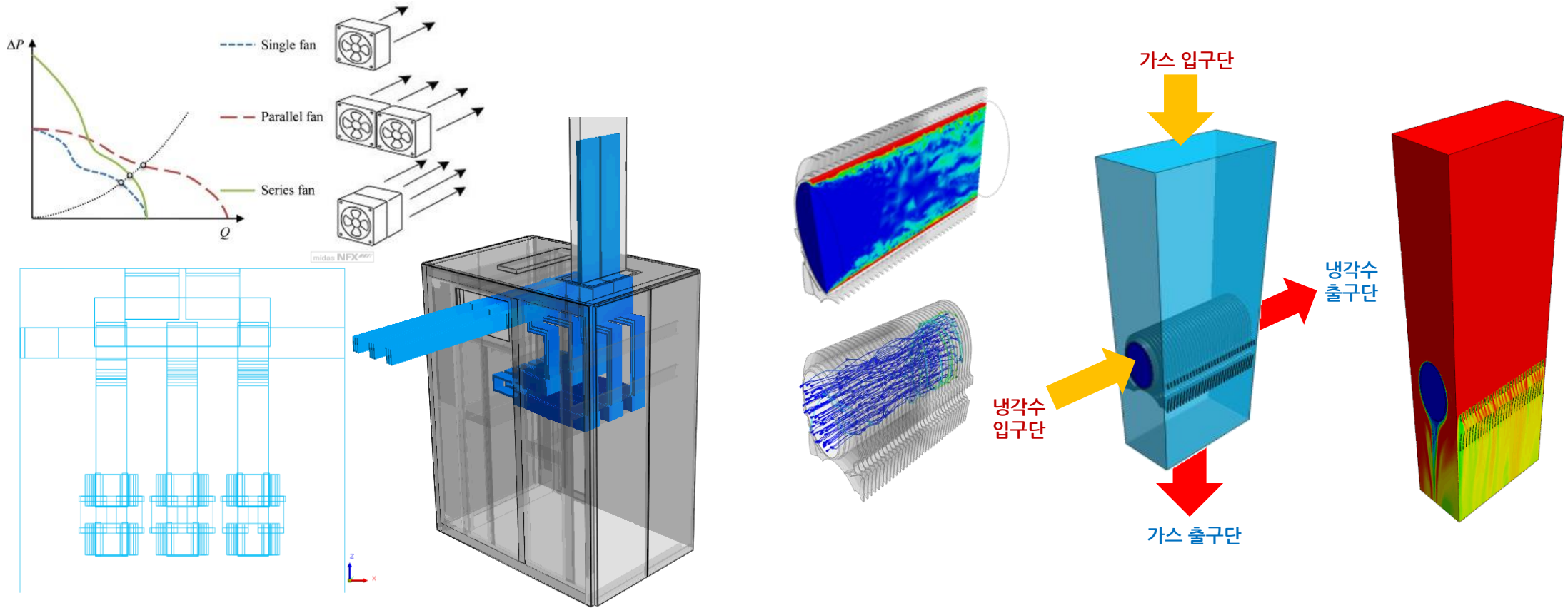


부품 번호	부품명	재질명
①	LED Dome	-
②	LED 기판	PCB
③	Metal PCB	메탈 PCB
④	Body	AL6061
⑤	렌즈	Plastic

• 실험과 동일한 위치에서 주요부 온도 평가



# 유동-열 1-Way 연성해석 사례



# 유동-열 1-Way 연성해석 사례

## □ 해석 목적

- 연기의 역류를 방지할 수 있는 임계풍속 산출
- 대형버스 화재(20MW)를 산정하여 계산

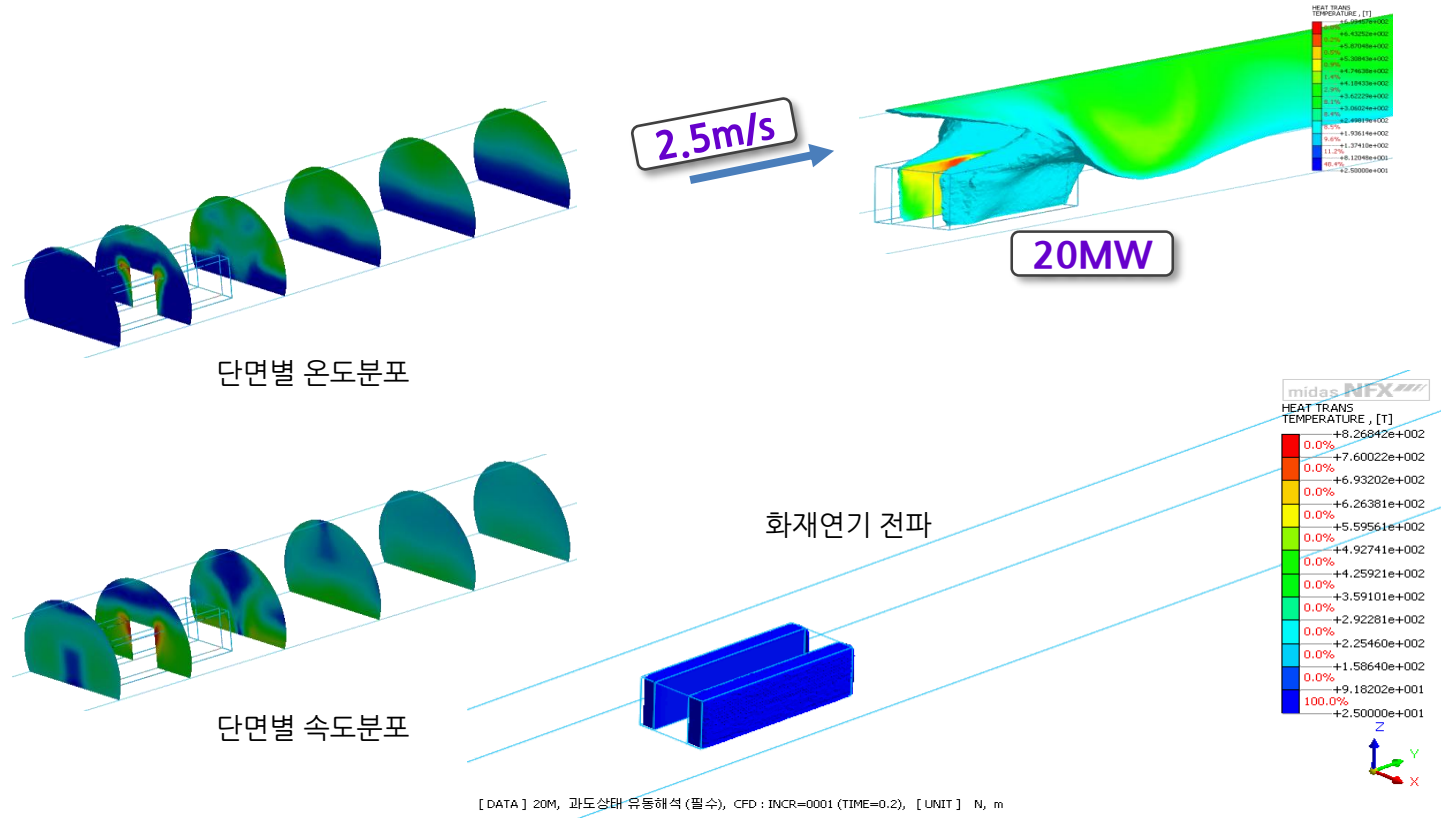
## □ 해석 종류



- 일반유동 해석
- 혼합물 해석

## □ 해석 조건

- 터널 내 화재 발생 시 연기가 한 방향으로만 빠져나갈 수 있는 속도(제연 풍속) 산출



# 유동-열 2-Way 연성해석 사례

## 해석 목적

- 히트싱크의 크기, 형상, 시스템 내 위치에 따른 방열 성능 분석
- 정상상태에서의 칩 최고 온도 평가

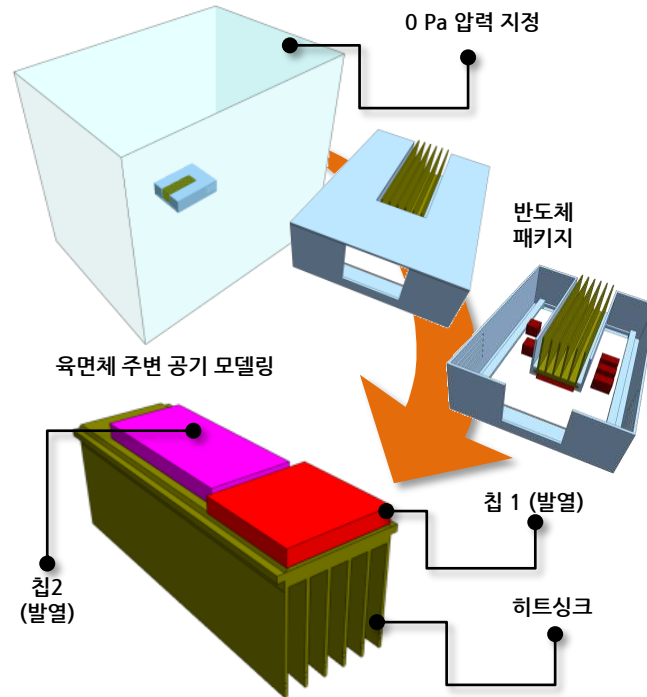
## 해석 종류



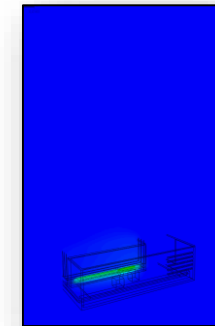
- 일반유동 해석
- 복합열전달 해석

## 해석 조건

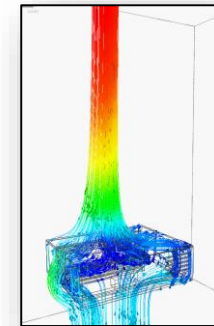
- 모델링 : 2D Solid Element
- 자연 대류를 위한 비압축성 이상기체 모델
- 외부 공기 모델링 후 최 외곽 벽면 압력 0 Pa 적용
- 25°C 외부 공기 모델링



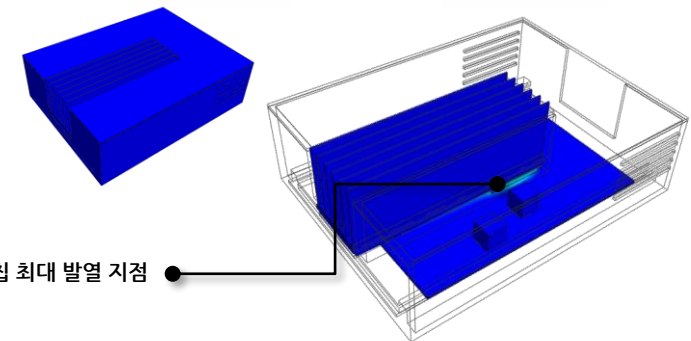
- 외부 자연 대류에 의한 내부 냉각 성능 평가
- 히트 싱크와 칩의 열전달 현상 분석 가능



<열 기류 온도 분석>



<열 흐름 유선 분석>



칩 최대 발열 지점

<시스템 내부 온도 검토>

# 유동-열 2-Way 연성해석 사례

## □ 해석 목적

- LED 시스템의 자연대류
- 방열 해석 분석
- LED 정션 온도 측정을 통한 제품 열 안전성 평가

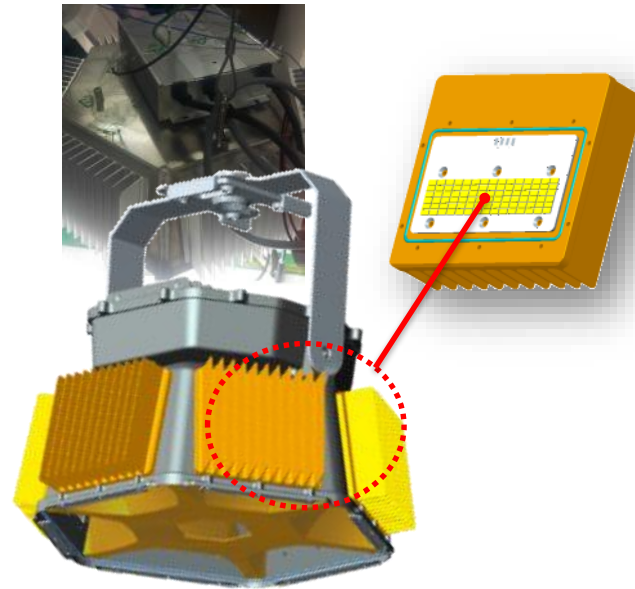
## □ 해석 종류



- 일반유동 해석
- 복합열전달 해석

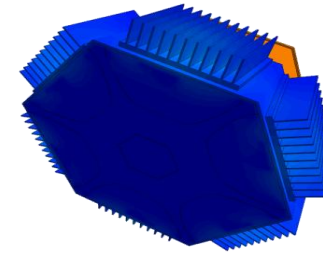
## □ 해석 조건

- 비압축성 이상기체 적용을 통한 부유도 고려
- 입구단 조건(압력)
- 출구단 조건(압력) 적용
- 벽면 조건(점착) 적용
- 요소망 인접면 맞춤을 통한 접촉 조건 최소화

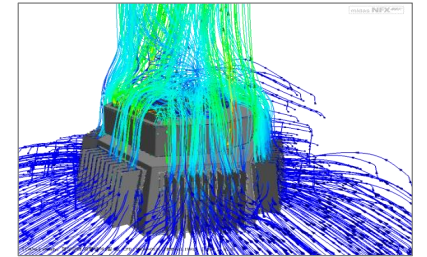


해석 모델링

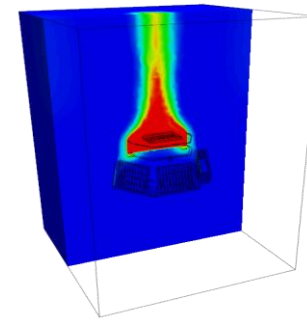
- 유체의 온도 및 속도 분포 확인 : 히트싱크 성능 평가
- 고체부 온도 평가를 통한 정션온도 안전성 평가



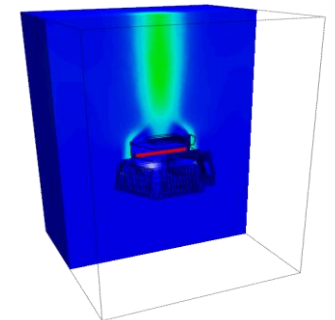
<고체부 온도>



<고체부 주변 기류 평가>



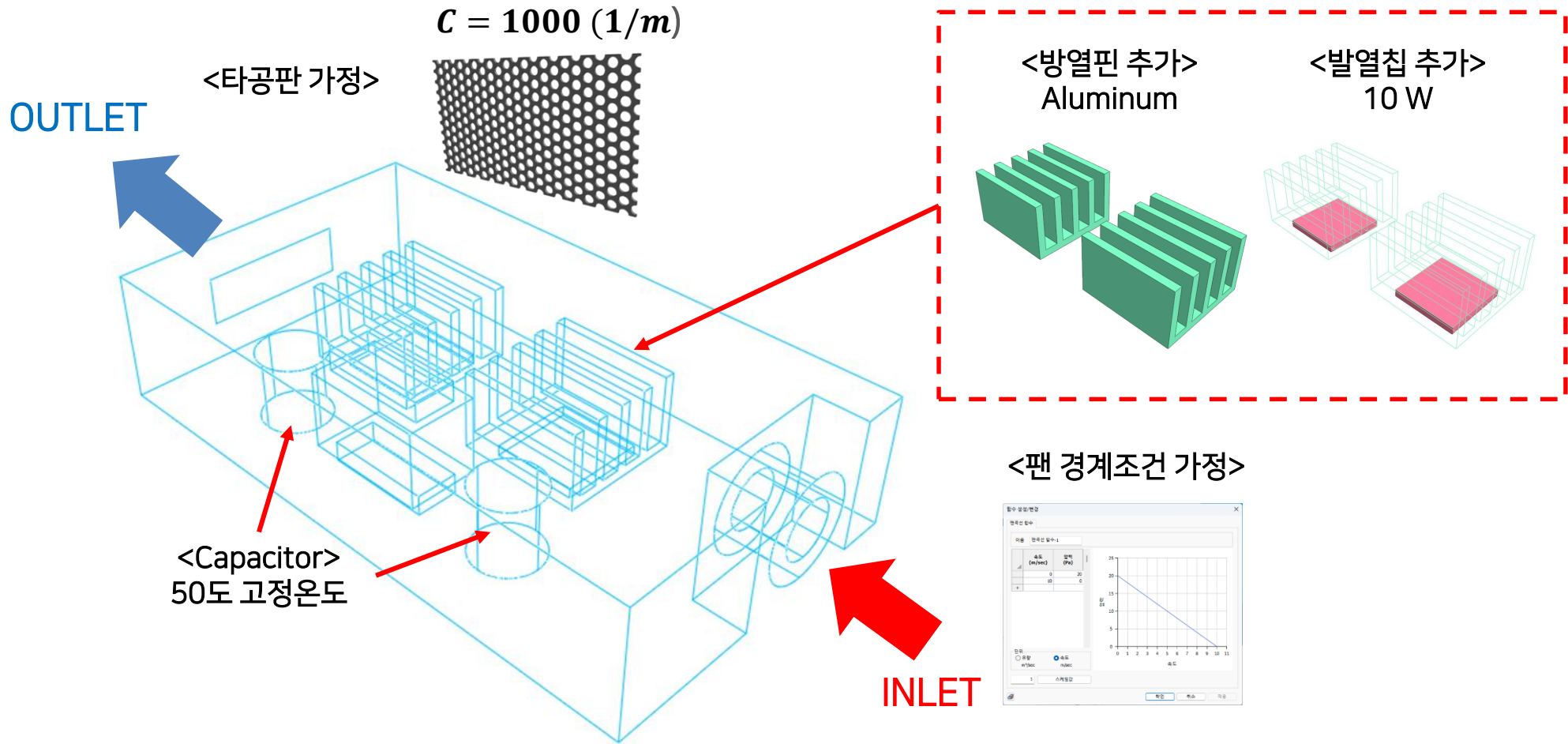
<전체 온도 분포>



<유체 속도 분포>

[DATA] steady, 정상상태 유동해석 (불-0), CPU : 2408=0004 (7PM=0.24626), [UNIT] N, m

# 예제 설명



# CONTENTS

## 유동해석을 잘 하기 위해 알아야 할 모든 것

---

Session1. 유동해석을 위한 기초사항

Session2. 경제성 있는 유동해석을 위한 방법

Session3. 에너지방정식을 이용한 온도분포 활용하기

**Session4. 열변형 연성해석 간단하게 이용하기**

# 다분야 연성해석 정의

태진 CAE 연성해석이란 무엇인가



CAE(Computer-Aided Engineering) 연성해석은 컴퓨터를 사용하여 공학 및 과학 문제를 해결하기 위한 수치적인 방법과 소프트웨어 도구를 활용하는 공학 분야의 하위 분야입니다. 이는 기존의 실험 및 분석 기술을 보완하고, 제품 및 시스템의 설계, 해석 및 최적화를 지원하는 데 사용됩니다. 연성해석은 CAE의 중요한 부분 중 하나이며, 다양한 공학 분야에서 다음과 같은 목적으로 사용됩니다:

1. 구조 연성해석(Structural Analysis): 구조물(예: 건축물, 다리, 자동차 프레임)의 응력, 변형 및 안전성을 평가하고 예측합니다. 이를 통해 재료 및 디자인 변경에 대한 영향을 조사하고 효율적인 설계를 개발할 수 있습니다.
2. 열구조 연성해석(Thermal-Structural Analysis): 열 및 기계적로 인한 고체 구조물의 동작을 이해하고 예측합니다. 이를 통해 열 팽창, 온도 변화에 따른 응력, 그리고 열 전달 및 열 변환을 모델링합니다.
3. 유체-구조 연성해석(Fluid-Structure Interaction, FSI): 유체 역학과 고체 역학을 결합하여 유체와 구조 간의 상호작용을 모델링합니다. 예를 들어, 항공기 날개나 선박 구조물이 물 또는 공기 중에서 작동할 때 발생하는 응력 및 변형을 예측합니다.
4. 복합재료 및 공정 분석: 다양한 재료의 특성 및 조합에 대한 연성해석을 수행하여 제품 및 부품의 특성을 최적화하고 공정 설계를 개선합니다.
5. 모델 최적화: CAE 연성해석을 사용하여 제품 디자인을 최적화하고 원하는 목표와 제약 조건에 부합하는 최적 설계를 찾습니다.

“ 연성해석이란 무엇인가요? ”

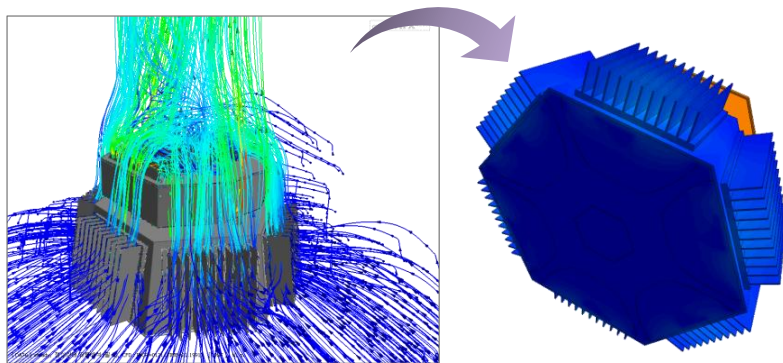
공학 및 과학 문제를 해결하기 위한 수치적인 방법과 SW 도구 활용의 공학 하위 분야



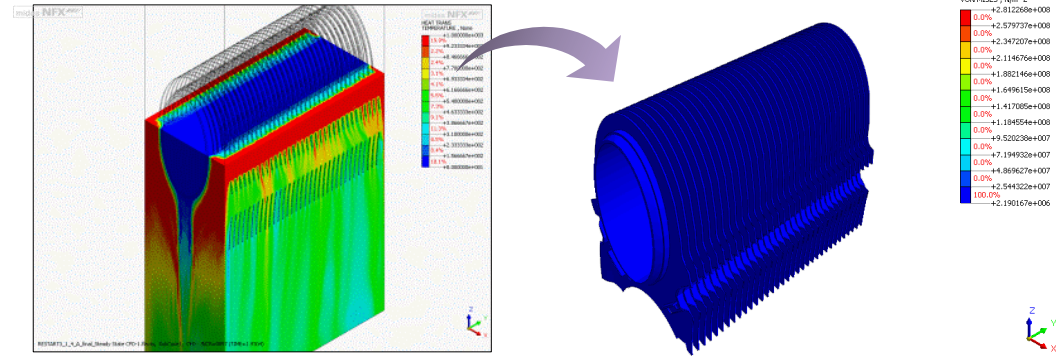
## 다분야 연성해석 정의

다분야 연성해석 : 유체흐름, 열 전달, 변형 등 여러 물리적 현상을 결합한 해석

→ 연속체 해석을 활용한 기계분야 다물리학 현상을 결합



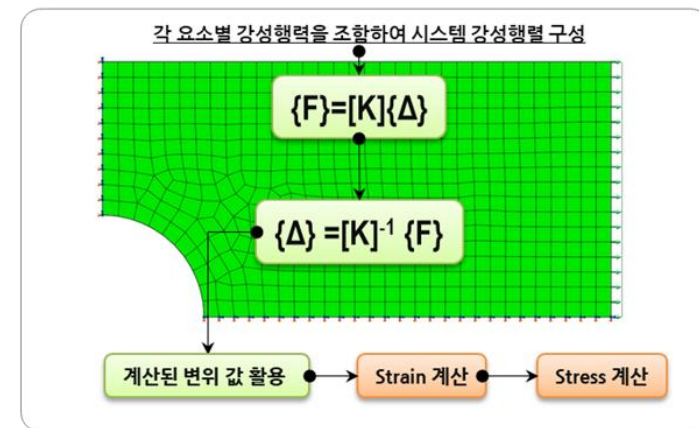
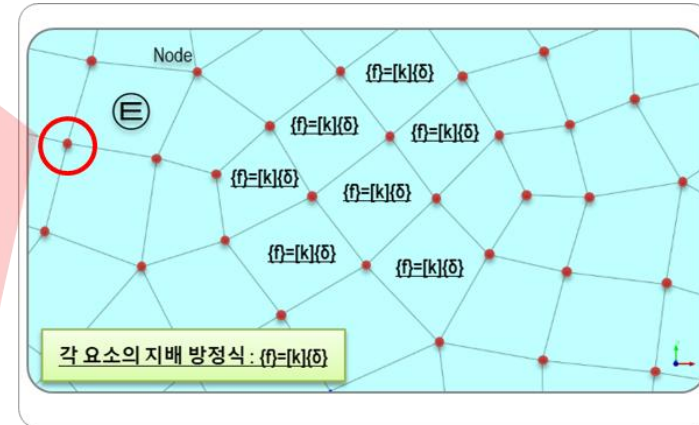
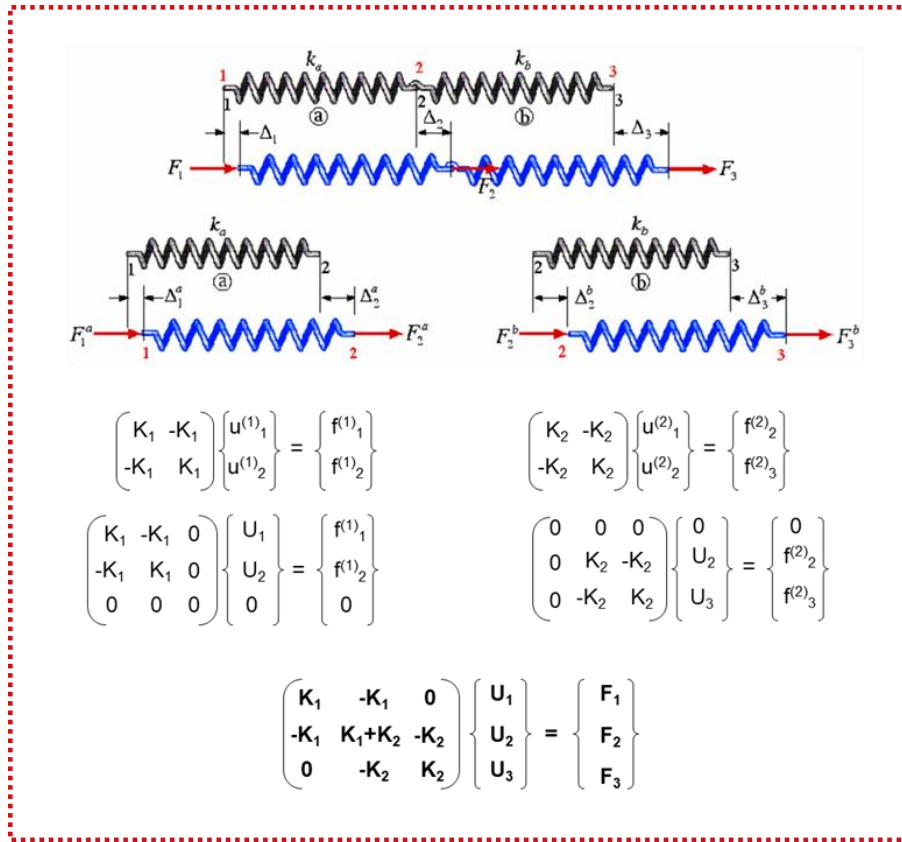
LED 램프 유체-열 연성해석



열교환기 유체-열-구조 연성해석

# 연속체(Continuum) 해석에 대한 이해 (유한요소법)

: 연속 매체로서의 물질 및 시스템을 이산적 입자나 구성 요소 대신에 수학적으로 다루는 과정



# 연속체(Continuum) 해석에 대한 이해 (유한요소법)

## 외부공기 (Air @200도)

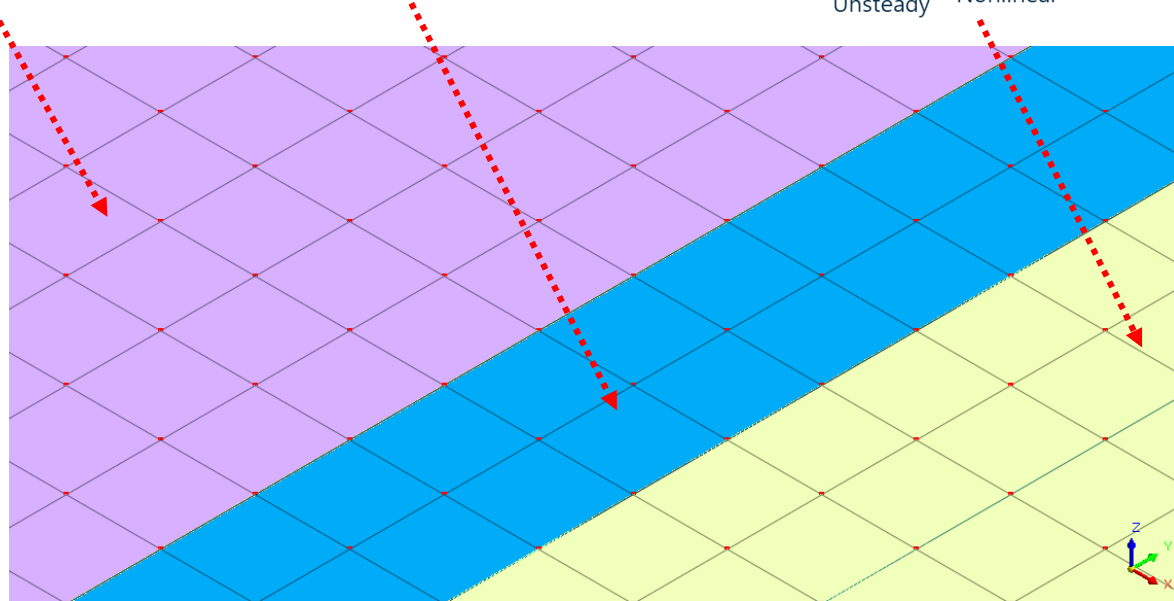
$$\rho \underbrace{\left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right)}_{\text{Unsteady Nonlinear}} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{V}}_{\text{2nd Order PDE}}$$

## 케이스 (Steel @25도)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

## 냉각수 (Water @25도)

$$\rho \underbrace{\left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right)}_{\text{Unsteady Nonlinear}} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{V}}_{\text{2nd Order PDE}}$$



# 연속체(Continuum) 해석에 대한 이해 (다분야 연성해석)

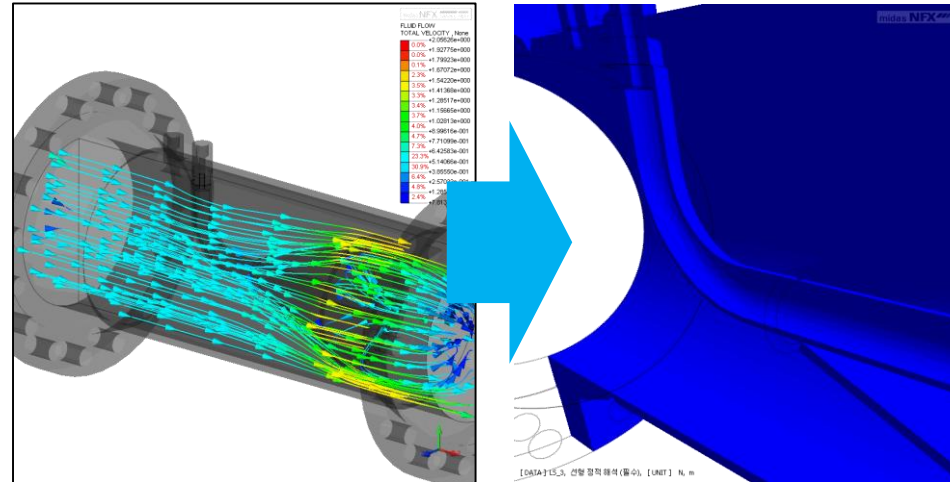
## 운동량 보존방정식

Navier-Stokes Equation

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

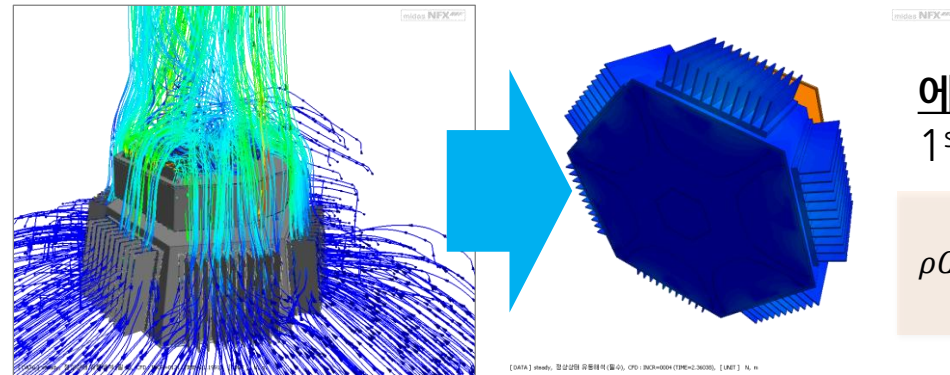
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$



## 운동방정식

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$



## 에너지 보존방정식

1<sup>st</sup> Law of thermodynamics

$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \rho Q - p \nabla \cdot \mathbf{u}$$

# 실제현상과 CAE 접근방식 차이점

아르테미스 고체로켓 부스터 연소 (NASA)



실제현상 : 모든 Unknowns/Equations 동시 계산

12 Unknowns		12 Equations	
Material	$\rho$ (or $V$ ), $T$ , $P$	Conservation law { Mass Momentum Energy } Linear Angular	State relationship $\rho = f(T, P)$
Kinetics	$\sigma_{ij}$ ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ )		
Kinematics	$u_i$ or $v_i$ ( $v_i = \dot{u}_i$ )		
Differential Strain-displacement relationship $\epsilon_{ij}$ or $\dot{\epsilon}_{ij}$		Integral Compatibility equation $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$ or $D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}$	

CAE : 계산이 가능한 범주로 구분하여 다분야 물리현상에 대한 연계해석

1. 연소가스 유체흐름 분석

$$\rho \left( \underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{Nonlinear}} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}_{\text{2nd Order PDE}}$$

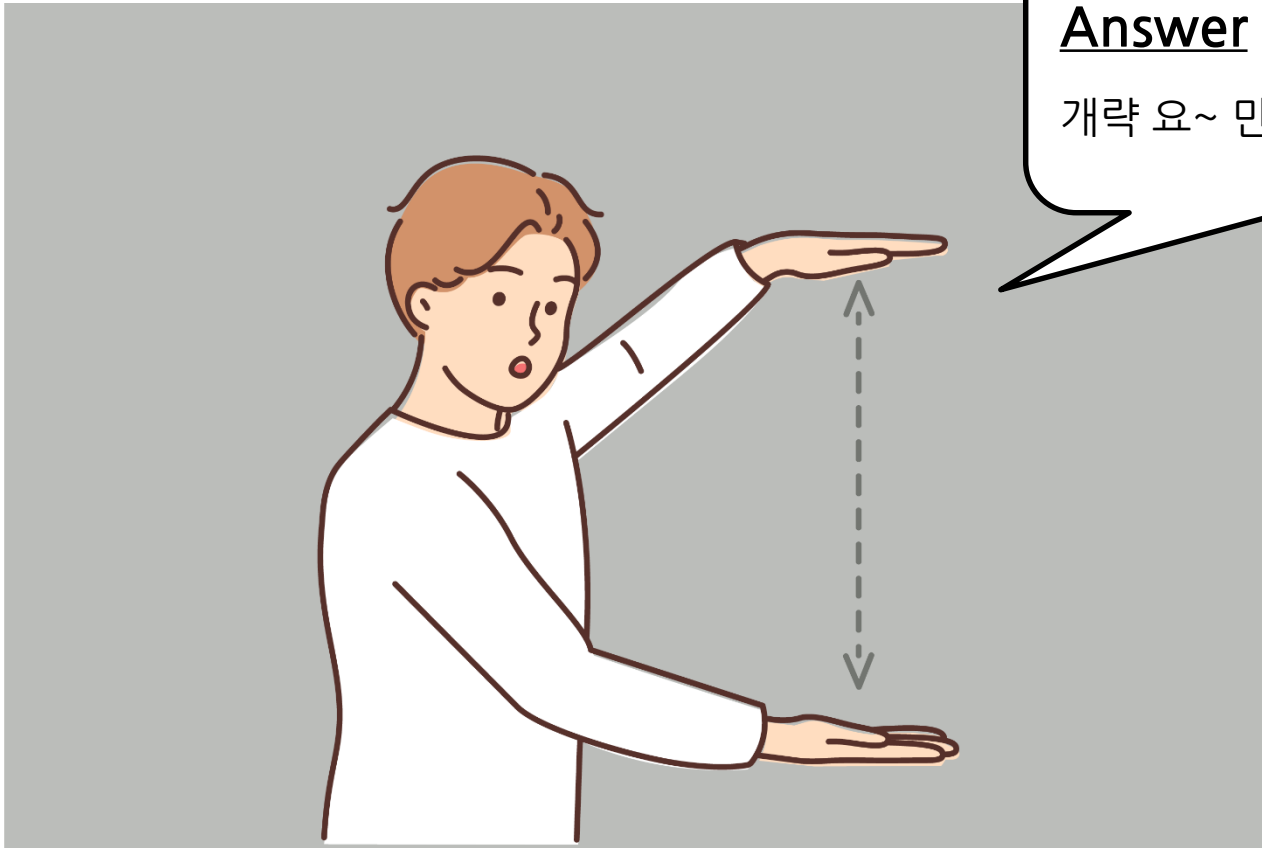
2. 연소에 의한 온도변화 계산

$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \rho Q - p \nabla \cdot \mathbf{u}$$

3. 온도, 압력 구조안전성 검토

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

## 연계해석시 고려사항

Answer

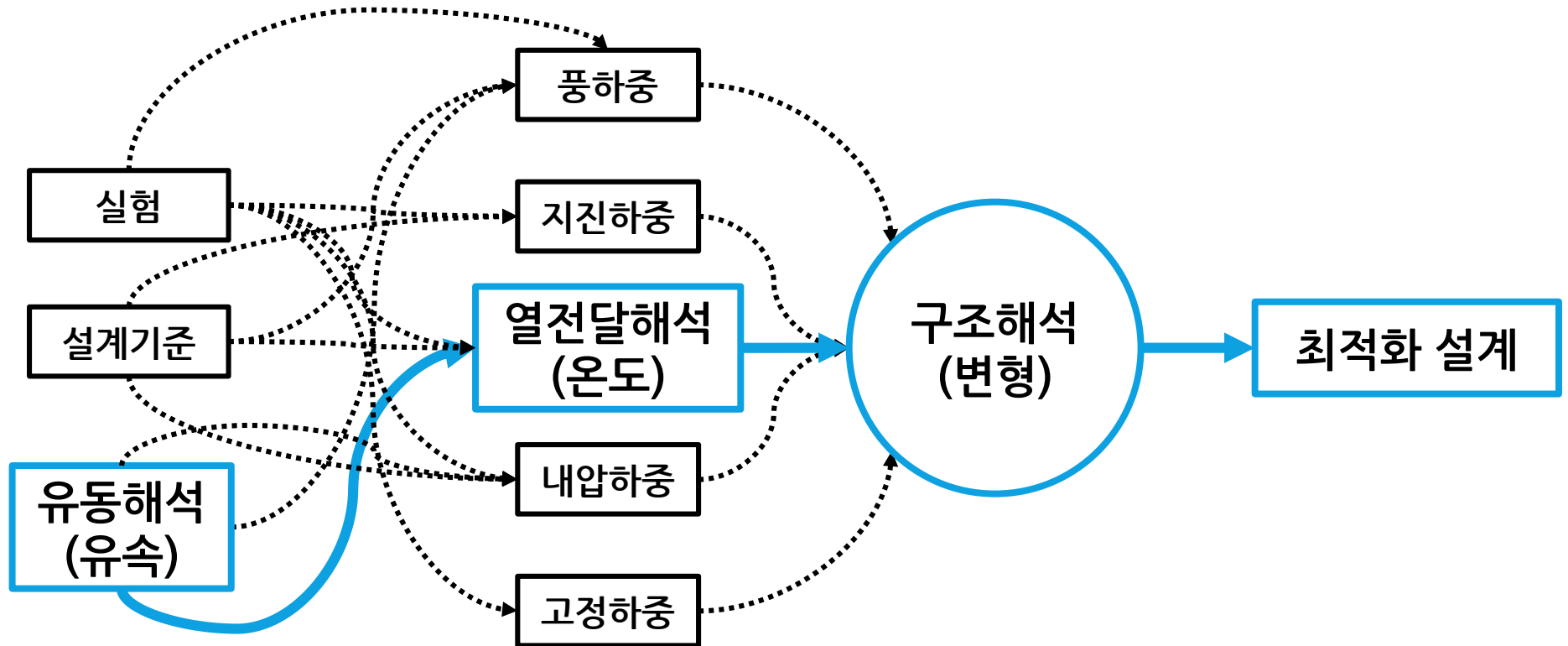
개략 요~ 만큼..? 입니다.

Q. 체결부의 변형은 얼마나 되나요?

Q. 발열부 온도는 몇도 인가요?

Q. 냉각될 정도로 유체속도가 충분한가요?

## 구조물에 대한 CAE 접근방법



# 연계해석시 데이터 전달 문제

타분야에 대한 데이터를 어떻게 전달할 것인가??

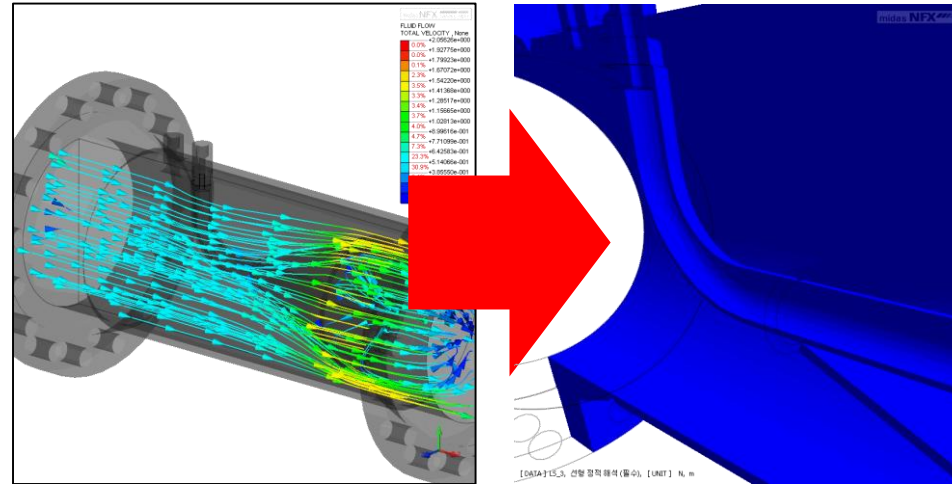
## 운동량 보존방정식

Navier-Stokes Equation

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

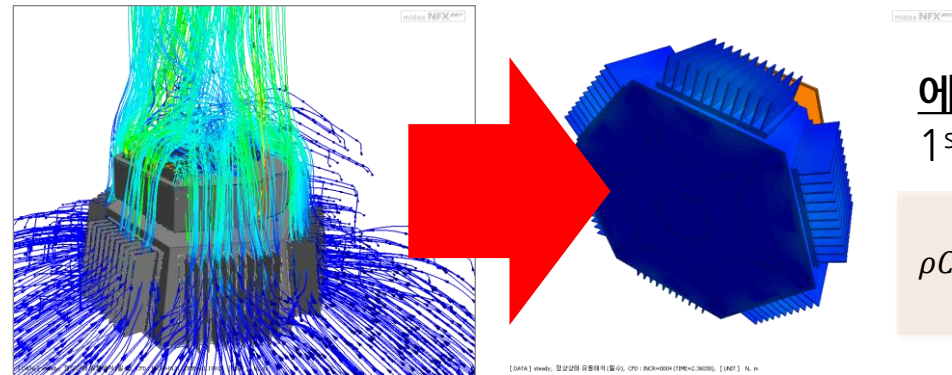
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$



## 운동방정식

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

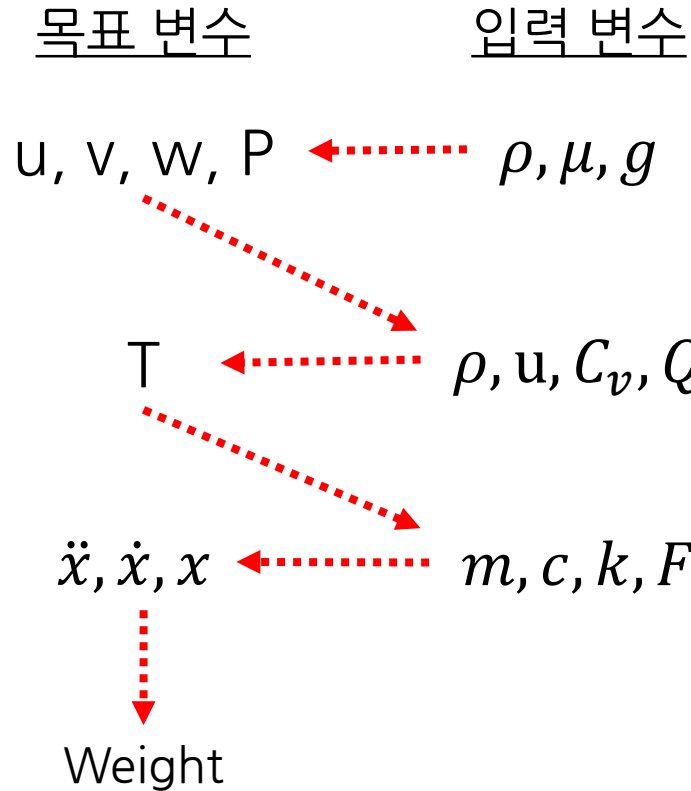
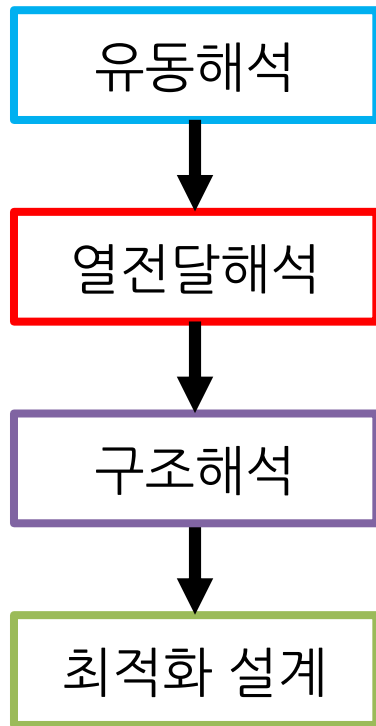


## 에너지 보존방정식

1<sup>st</sup> Law of thermodynamics

$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \rho Q - p \nabla \cdot \mathbf{u}$$

# 기계분야 연계해석을 위한 변수 파라미터



$$\rho \underbrace{\left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right)}_{\text{Unsteady Nonlinear}} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}_{\text{2nd Order PDE}}$$

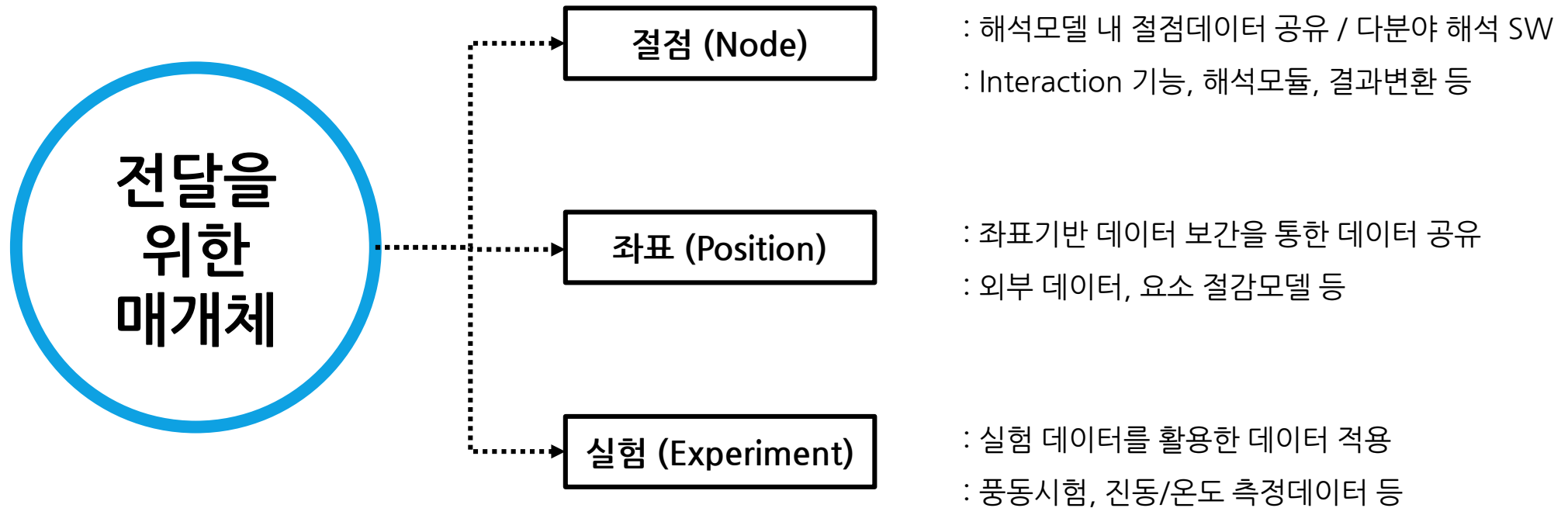
$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \rho Q - p \nabla \cdot \mathbf{u}$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

## 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)



## 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)



# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

**절점 (Node)**

: 해석모델 내 절점데이터 공유 / 다분야 해석 SW  
 : Interaction 기능, 해석모델, 결과변환 등

**외부공기 (Air @200도)**

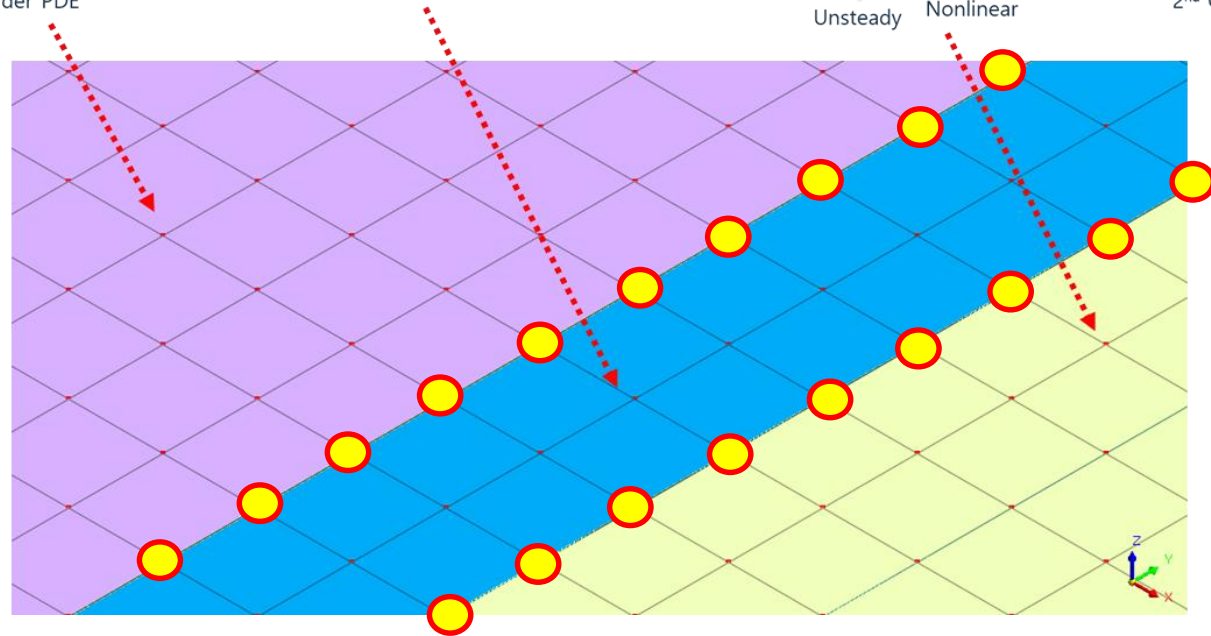
$$\rho \left( \underbrace{\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V}}_{\text{Nonlinear}} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{V}}_{\text{2nd Order PDE}}$$

**케이스 (Steel @25도)**

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

**냉각수 (Water @25도)**

$$\rho \left( \underbrace{\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V}}_{\text{Nonlinear}} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{V}}_{\text{2nd Order PDE}}$$



# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

## 절점 (Node)

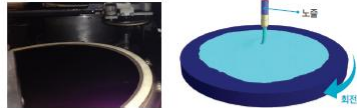
: 해석모델 내 절점데이터 공유 / 다분야 해석 SW  
 : Interaction 기능, 해석모델, 결과변환 등



오일 캐치 캔



파티클 모델링



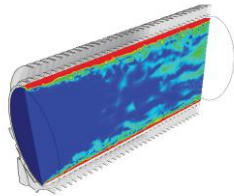
웨이퍼 회전 시 액체 분사



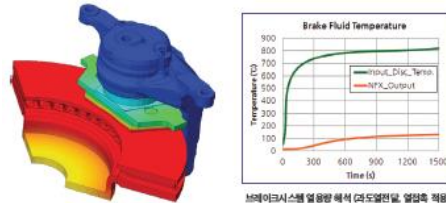
방직용 섬유 가이드라인 액체 노즐



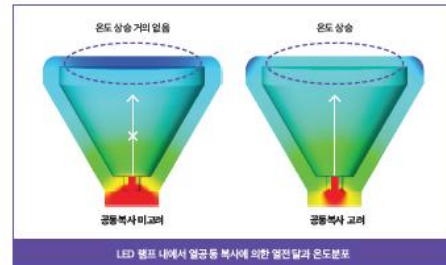
보일러 열교환기



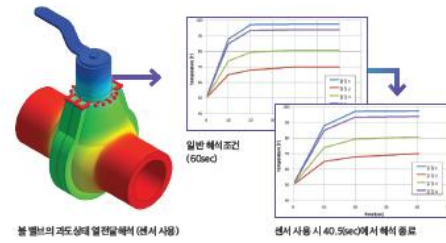
열 흐름 분석 (CFD)



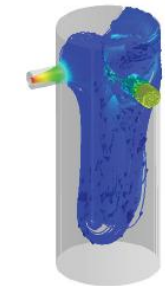
브레이크시스템 열유량 해석 (과도열전달, 열장축 적용)



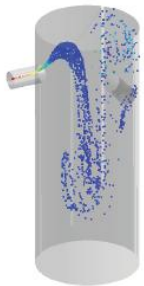
LED 램프 내에서 열공통 복사에 의한 열전달과 온도분포



볼 밸브의 과도상태 열전달해석 (연서 사용)



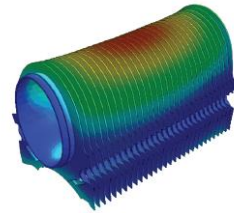
파티클 경로



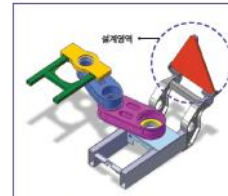
파티클 분포



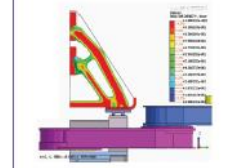
사이클론에 유입된 파티클의 거동



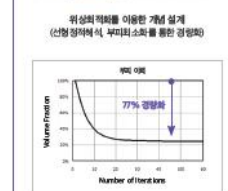
열 변형 분석 (구조열응력해석)



실제영역 지정



위상 최적화



해석모델 생성



실제기초

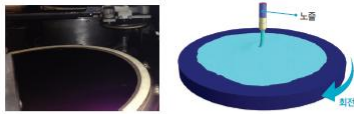
위상 최적설계의 활용 과정



# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

## 절점 (Node)

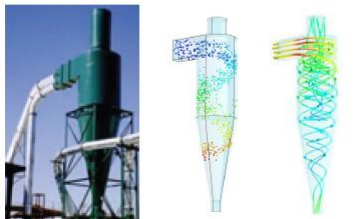
: 해석모델 내 절점데이터 공유 / 다분야 해석 SW  
 : Interaction 기능, 해석모델, 결과변환 등



웨이퍼 회전 시 액체 분사



방직용 섬유 가이드라인 액체 노즐



사이클론에 유입된 파티클의 거동

위상 최적화

위상 최적화

Water fraction

Number of iterations

77% 감량률

향간 검토

상계영역 지정

위상 최적화

해석모델 생성

상계영역

위상 최적 설계의 활용 과정

## midas NFX - 해석 모듈 추가(유동)

모듈

일반유동

열전달

고체열전달

고급 모듈...

고급 모듈

고급 모듈

물질 확산

요소망 변형

전기장

다상유동

자유수면 높이

파티클

1방향 상호작용

2방향 상호작용

확인 취소

파티클 해석

해석 시간

시간스텝개수 1000

자동 시간 간격

시간간격 0.1 sec

외력 모델

할력 모델 스톱스

열영동

부력

브라우니안

사프만 양력

난류 랜덤 이동

사용자 정의

Tx 0 mm/sec<sup>2</sup> 없음

Ty 0 mm/sec<sup>2</sup> 없음

Tz 0 mm/sec<sup>2</sup> 없음

기계 속성

기계 분자 반지름 4.17 An

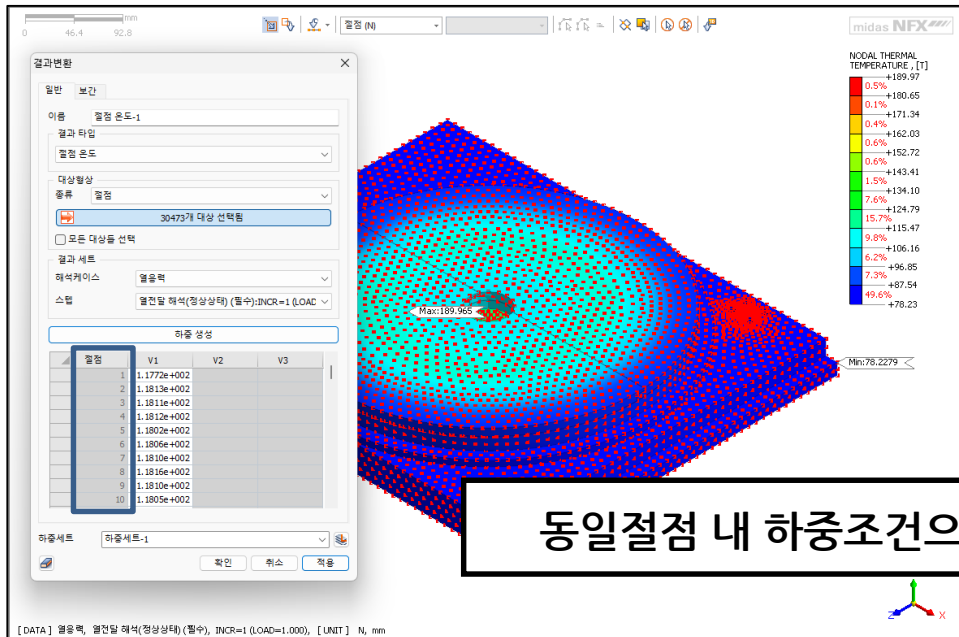
확인 취소

# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

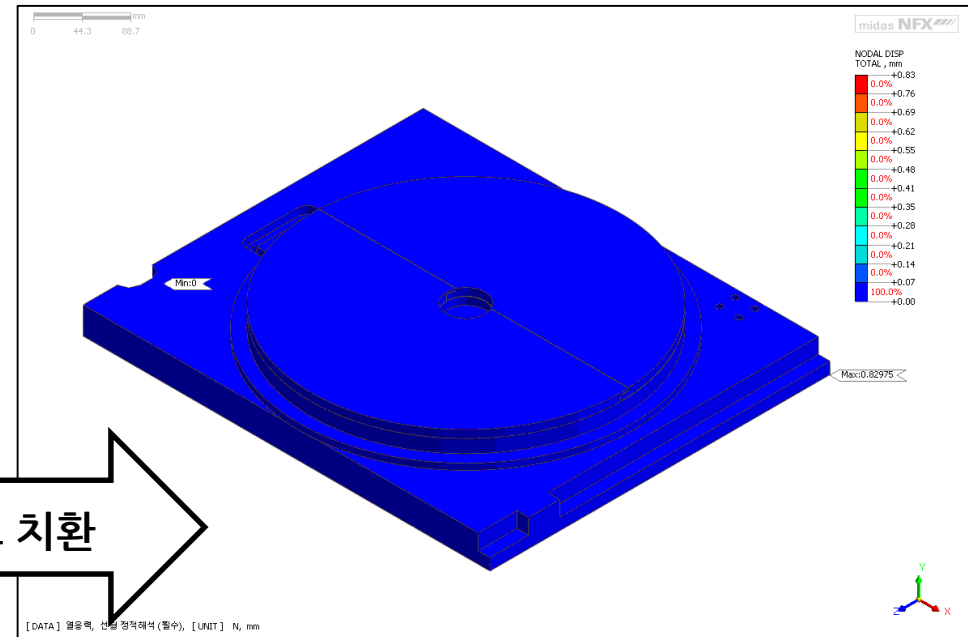
**절점 (Node)**

- : 해석모델 내 절점데이터 공유 / 다분야 해석 SW
- : Interaction(ex. FSI), 해석모듈, 결과변환 등

## <midas NFX SW 내 데이터 적용>



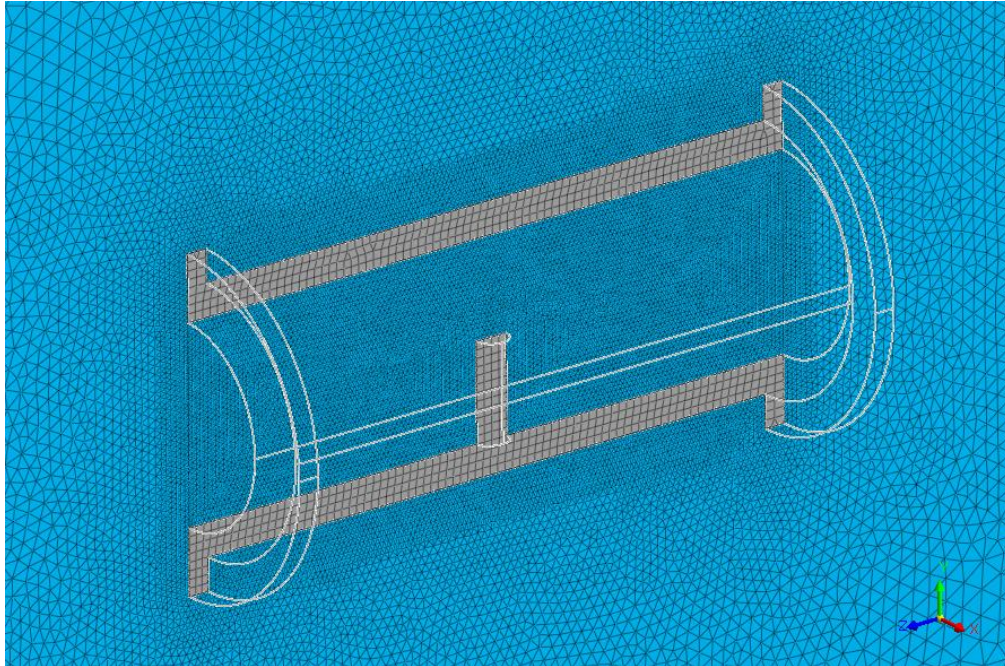
동일절점 내 하중조건으로 치환



## 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

**좌표 (Position)**

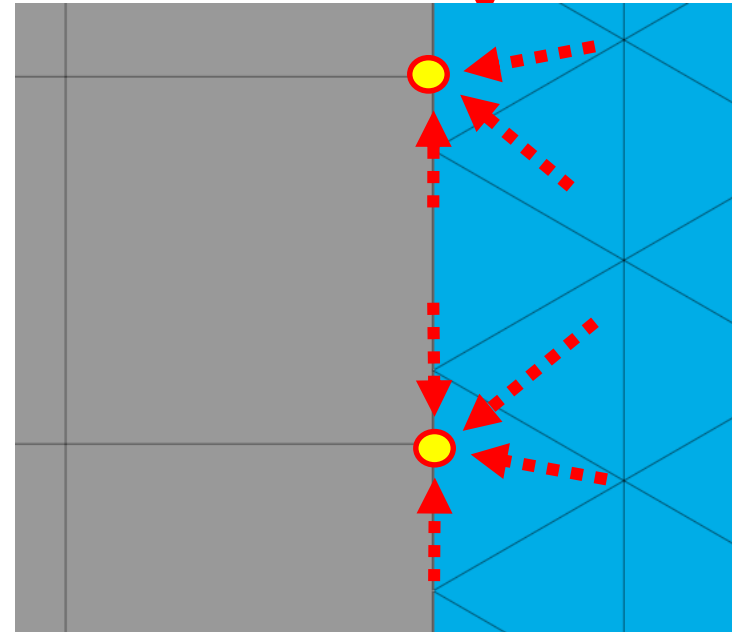
: 좌표기반 데이터 보간을 통한 데이터 공유  
: 외부 데이터, 요소 절감모델 등



**파이프 바디**  
 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$

**내/외부 공기 유동장**

$$\rho \left( \underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{U_{\text{steady}}} + \underbrace{(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{Nonlinear}} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}_{\text{2nd Order PDE}}$$





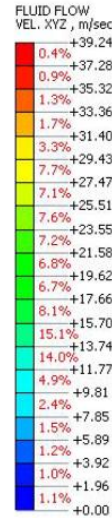
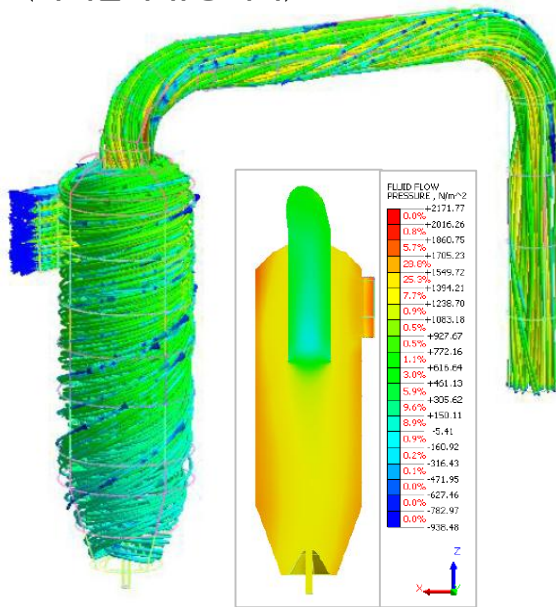
# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

**좌표 (Position)**

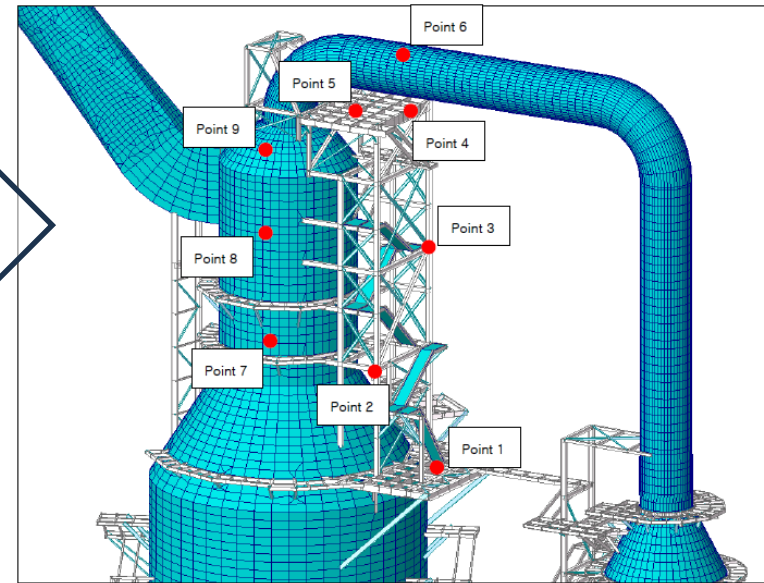
: 좌표기반 데이터 보간을 통한 데이터 공유  
 : 외부 데이터, 요소 절감모델 등

<타 분야 데이터 적용>

<기계분야 유동해석>



<건축분야 구조해석>



# 데이터 전달을 위한 방법론 (일반사항)

**실험 (Experiment)** : 실험 데이터를 활용한 데이터 적용  
 : 풍동시험, 진동/온도 측정데이터 등

## <풍동시험>

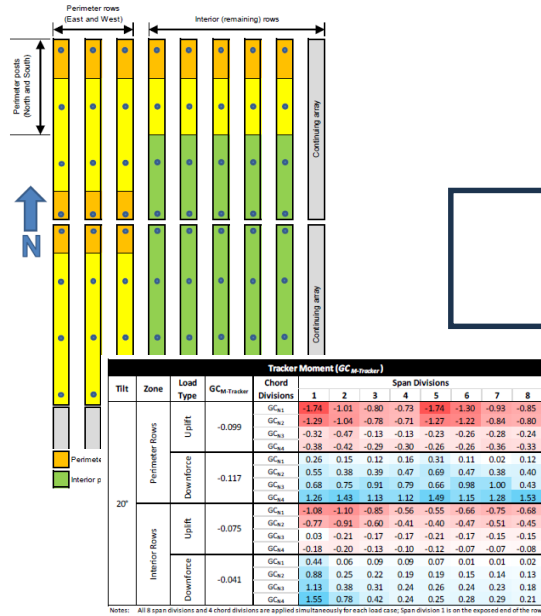
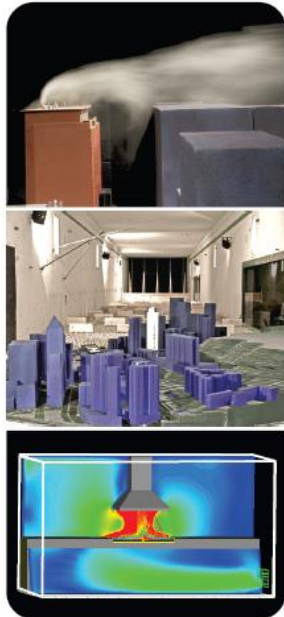
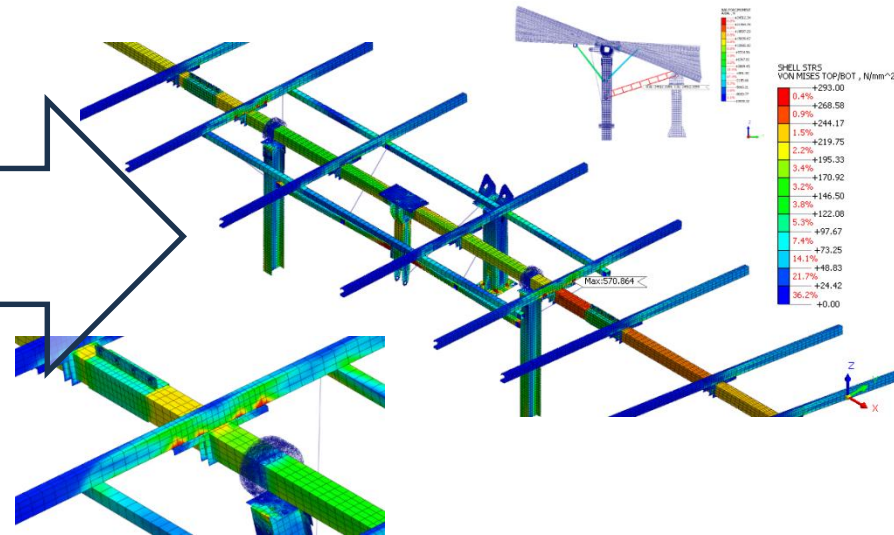


Figure 7: Load cases, tracker moment, 20° tilt

## <구조해석>



# 데이터 전달을 위한 방법론 (연구개발 분야)

: 실험 상호 보완적 접근방법으로 미래 플랫폼 개발에서 핵심적 역할 수행 중

NFXCFD

## CAE 베이직 클래스

유동해석편

단, 3시간 만에 CFD 기초와 최신 트렌드까지

#신청 즉시 바로 시청
#무료 무제한 수강 가능

CAE 베이직 클래스 - 유동해석편 : 단, 3시간 만에 CFD 기초와 최신 트렌드까지

김종암 교수

👁 4501 ★ 평점 : 8

세미나 바로 보기 →

- 다상 유동: 액체 및 기체 상이 공존하는 유동
  - 넓은 의미로 다종 (multi-species), 다물질 (multi-material) 유동을 포함
  - 액체와 기체는 매우 이질적이므로 → 다상 (single-phase) 유동 대비 복잡한 유동 특성
- 다양한
  - 상 변화
  - 상 경계
- 다상 유동 해석에서의 이슈
  - 상 변화 과정에서의 잠열 교환 및 질량 전달 모사가 가능한 지배방정식
  - 상 경계면 및 다상 충격파의 정밀한 포착을 위한 수치기법
  - 액체 및 기체 상의 물성치 정확도 향상
  - 다상 유동 해석을 위한 수치기법/물리적 모델 개발 사례
    - 다상 충격파 포착을 위한 수치플럭스 기법 개발
    - 상 경계면의 퍼짐을 방지하기 위한 상 경계면 재구성 기법 개발
    - 정밀한 상 변화량 예측을 위한 물리적 모델 개발
- 균질 혼합
  - 산업계
  - 이론/실험




Fig. 프로펠러 주

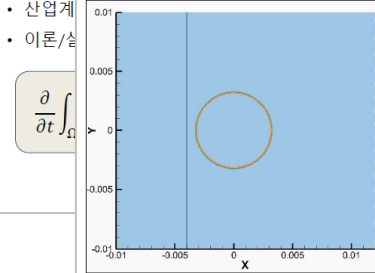


Fig. 공기 충격파-물 기동 상호작용 (Kim et al., 2019)

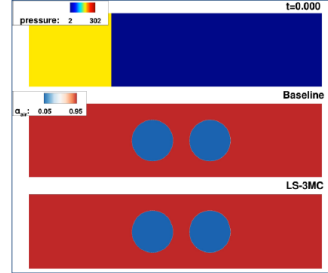


Fig. 공기 충격파-헬륨-물 기동 상호작용 (Kim & Kim, 2019)

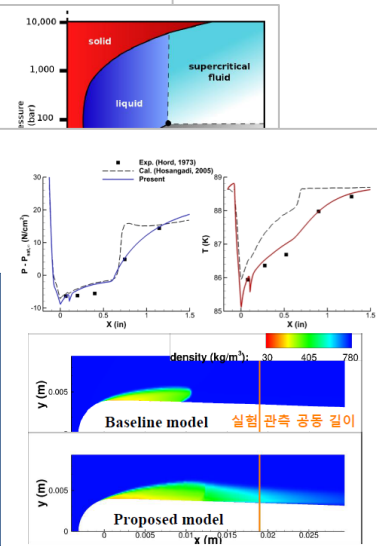
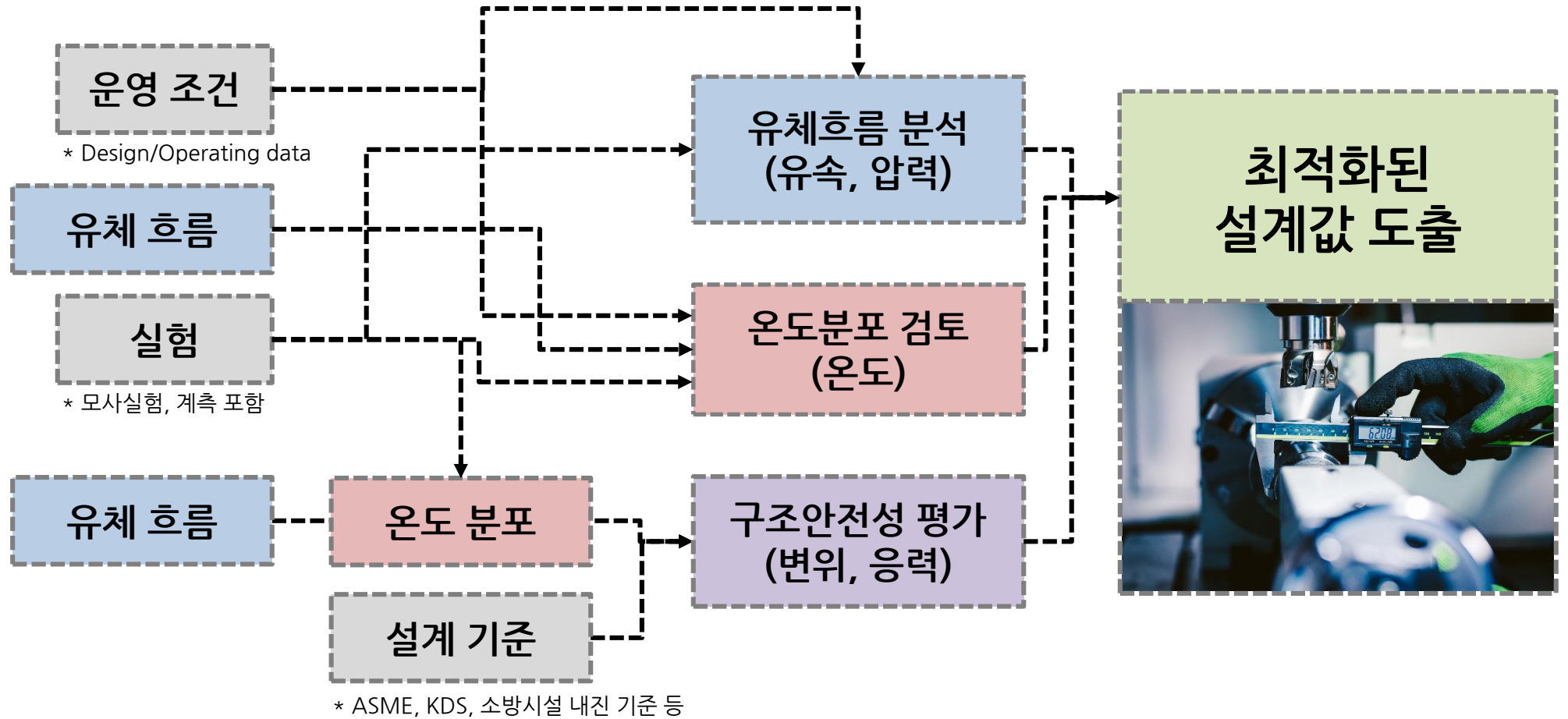
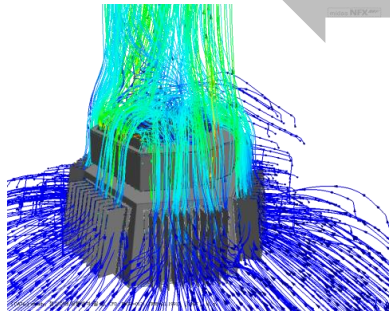


Fig. LN2 hydrofoi에서의 공중 유동 해석 (상: 표면 압력/온도 분포, 하: 밀도 분포) (Kim & Kim, 2021)

# 일반적인 관점에서의 설계목표

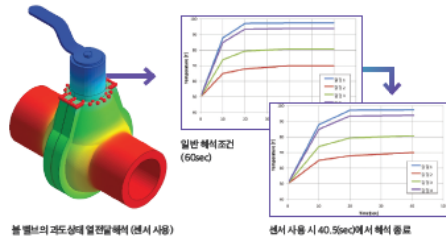


# 분야별 설계 고려사항 이해



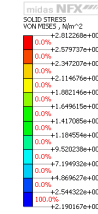
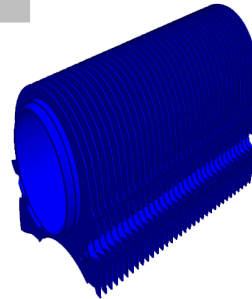
## 유동해석 (유체흐름, 속도, 대류)

- 변화가 심한 유체에 대한 변화를 추적하기 위해 해석 수행
- 흐름이 가시화, 냉각 효율성 등 유체의 영향성 평가를 위함



## 열전달해석 (온도분포, 전도)

- 에너지방정식에 근거하여 계산
- 열이 발생하고 냉각되는 현상에 대하여 계산하고 온도분포 확인



## 구조해석 (변형, 안전성)

- 운동방정식에 근거하여 계산
- 변형에 의한 응력 안전성 평가
- 열팽창, 풍압, 지진 등 다양한 변수에 대한 접근



## 설계 목표값 (최적화)

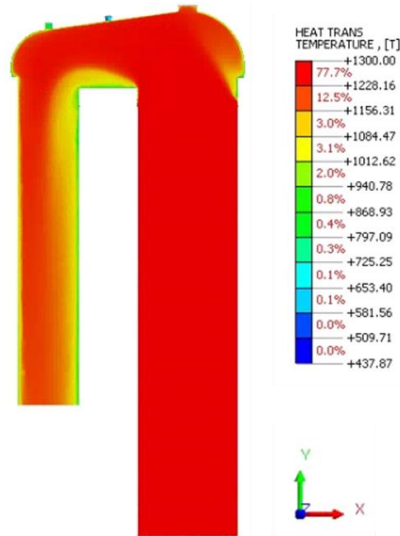
- 설계자의 주요 목표값
- 부재, 시스템 등 다양하게 존재

# 설계자 관점 연성해석 Flow 설정 예시

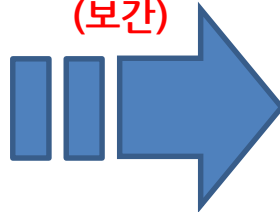
\* 열전달/구조 1-Way 연성해석을 한번에 푸는 것도 가능 (열-구조 연성해석)

## 유체 일반/열전달 1-Way 해석

유체 흐름 및 온도분포 확인



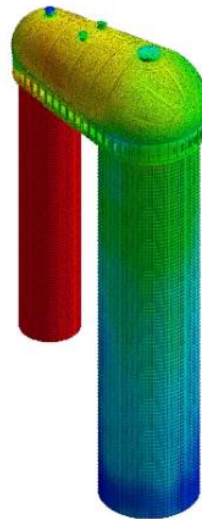
결과변환  
(보간)



유체 표면온도  
데이터 전달

## 구조 열전달 해석

구조물 주요위치 온도분포 확인



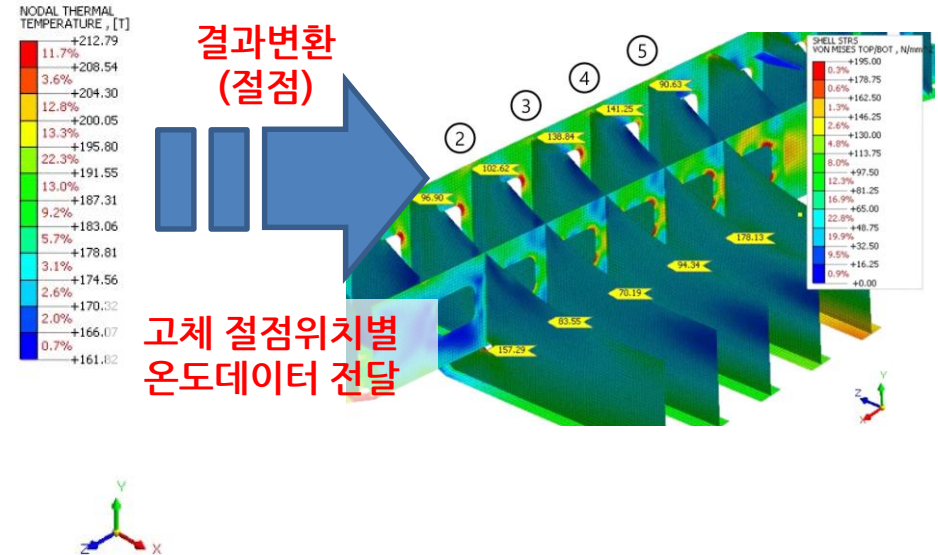
결과변환  
(절점)



고체 절점위치별  
온도데이터 전달

## 구조 해석

열팽창 구조안전성 검토 필요



- \* 해석결과 : 유체속도, 표면 대류값 등 계산
- \* 1-Way : 일반유동해석 - 결과변환(절점) - 열전달 해석 과정과 동일한 효과

# 연성해석에 대한 해석적 의문점

Q. 어렵게 구분하지 않고  
한번에 풀면 안되는가?



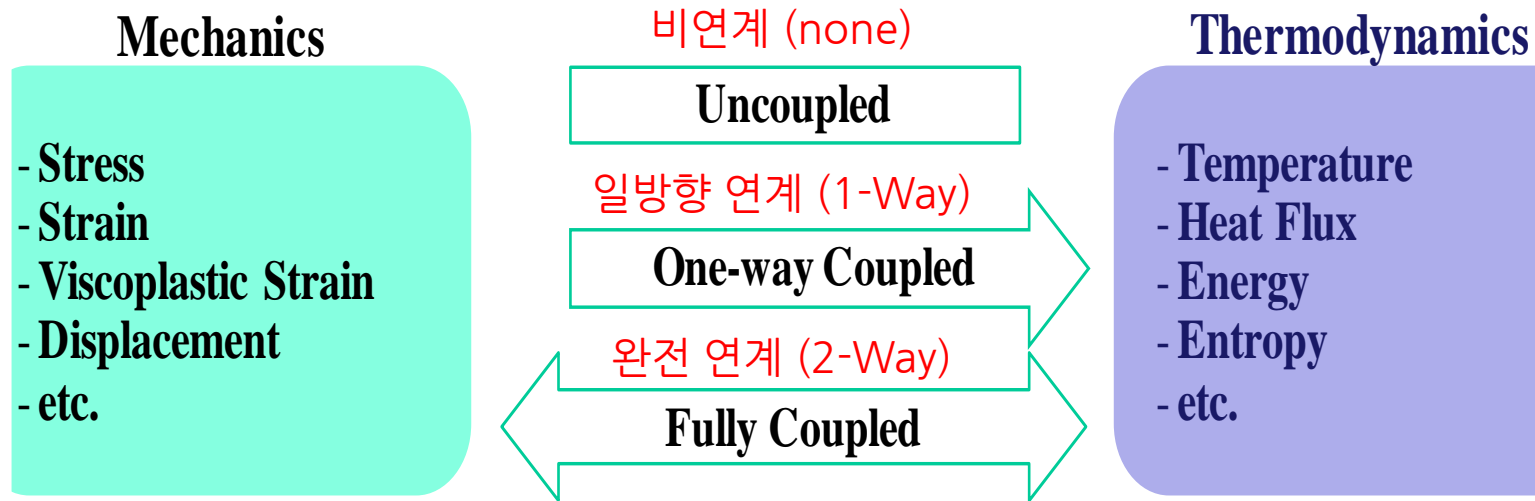
아르테미스 고체로켓 부스터 연소 (NASA)



실제현상 : 모든 Unknowns/Equations 동시 계산

12 Unknowns		12 Equations		
· Material	$\rho$ (or $V$ ), $T$ , $P$	· Conservation law	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Mass} \\ \text{Momentum} \\ \text{Energy} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Linear} \\ \text{Angular} \end{array}$	
· Kinetics	$\sigma_{ij}$ ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ )	· State relationship		$\rho = f(T, P)$
· Kinematics	$u_i$ or $v_i$ ( $v_i = \dot{u}_i$ )	· Constitutive law		$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$ or $D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}$
	$\begin{array}{c} \text{Differential} \\ \text{Strain-displacement} \\ \text{relationship} \\ \epsilon_{ij} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Integral} \\ \text{Compatibility} \\ \text{equation} \\ \dot{\epsilon}_{ij} \end{array}$		

# 연성해석시 분야별 관계성



연계효과 : 해석의 효과/효율성을 위해 연계 방식 설정이 필요

## 비연계 (none) 과 연계 (1-Way, 2-Way) 조건 차이



### 비연계 (none) 조건

- : 주변 온도장, 유동장이 구조물에 영향을 거의 주지 않는 경우
- : 변화가 미미하여 특정값으로 대체가 가능한 경우



### 연계 (1-Way, 2-Way) 조건

- : 온도장, 유동장, 구조물 상호간의 영향이 발생하는 경우
- : 직접법, 시차제 반복법을 통해 연계하여 행렬방정식 계산

## 일방향 연계 (1-Way) 과 양방향 연계 (2-Way) 조건 차이



### 일방향 연계 (1-Way) 조건

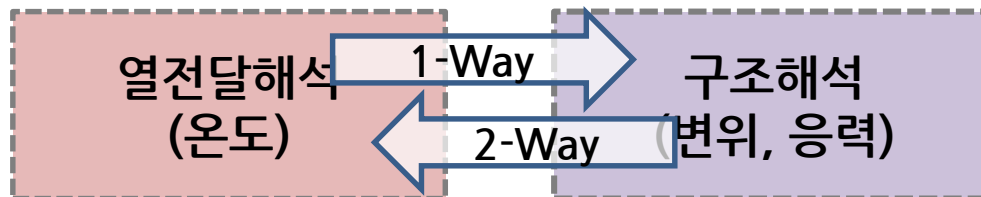
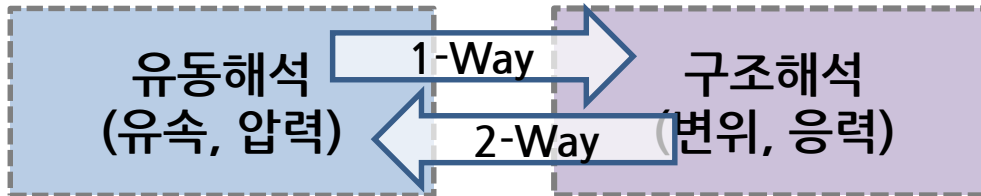
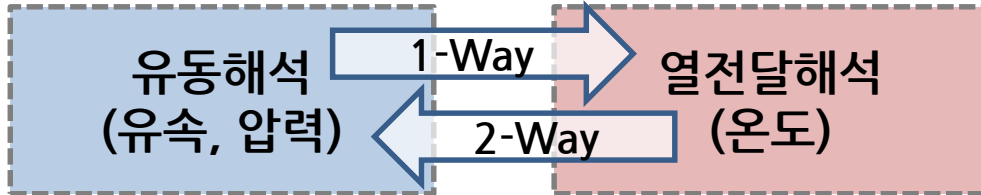
- : 변수에 의한 영향이 있으나 반대의 영향은 거의 없는 경우
- : 유체에 의한 구조 변형은 있으나, 구조 변형에 의한 유체변화는 없음 (다른 변수 동일)



### 양방향 연계 (2-Way) 조건

- : 변수간 영향성이 상호간에 존재하는 경우
- : 유체에 의한 구조 변형이 있으며, 구조 변형에 의한 유체흐름 변화 발생 (다른 변수 동일)

## 유동/열/구조 연성해석 구분



- 온도의 변화(밀도차)에 의한 흐름 영향이 지배적일 때
- 온도에 의한 밀도변화가 필요한 자연대류의 경우 2-Way 연계 적용
- 동력원, 환경 요인에 의해 흐름이 빠른 강제대류의 경우 1-Way 연계 적용

- 구조물의 변형이 유체의 흐름에 영향을 줄 때
- 대변형성을 가진 물체(ex. 고무), 힌지 구조, 막 구조 등 2-Way 연계 적용
- 일반적인 미소변형 구조물은 영향성이 거의 없으므로 1-Way 연계 적용

- 구조물의 변형이 온도 변화에 영향을 줄 때
- 비탄성 거동시, 표면온도가 다른 경계면이 접촉시, 극심한 열하중에 의해 재료의 열화학 반응과 표면 후퇴현상 발생시 2-Way 연계 적용
- 일반 환경, 조건에서는 변위에 의한 온도 영향성이 작아 1-Way 연계 적용

# 비연계 해석사례 - 설계하중 적용시 구조해석

실험기반의 설계하중화



Tilt	Zone	Load Type	GC <sub>max</sub> Tracker	Tracker Moment (GC <sub>max</sub> × m <sup>2</sup> )								
				Chord Divisions		Span Divisions		Span Divisions		Span Divisions		
45°	Perimeter Rows	U/eff	-0.061	GC <sub>1</sub>	-1.48	-1.32	-1.17	-1.07	-1.05	-1.23	-1.26	-1.21
				GC <sub>2</sub>	-1.43	-1.27	-1.08	-0.99	-1.04	-1.18	-1.07	-1.08
	Overforce	-0.080	GC <sub>1</sub>	-0.95	-0.85	-0.72	-0.73	-1.04	-0.90	-0.84	-0.77	
			GC <sub>2</sub>	-0.92	-0.81	-0.70	-0.66	-0.85	-0.74	-0.75	-0.72	
Interior Rows	U/eff	-0.045	GC <sub>1</sub>	0.78	0.66	0.37	0.35	0.50	0.34	0.34	0.31	
			GC <sub>2</sub>	1.13	0.78	0.65	0.59	0.85	0.70	0.68	0.58	
	Overforce	0.034	GC <sub>1</sub>	1.39	1.07	0.91	0.79	1.15	1.05	0.92	0.82	
			GC <sub>2</sub>	1.50	1.21	1.08	0.89	1.43	1.21	1.11	1.03	

설계기준의 설계하중화

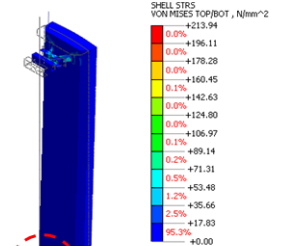
$q_s = 0.613 K_z K_d K_{zt}^2$   
 $K_z = 1.00$  (Exposure : C)  
 $z = 1.50$  m  
 $V = 25.00$  m/s  
 $K_d = 0.85$   
 $p_s = q_s / GC_z$

Load Case	Wind Direction, $y=0^\circ$				Wind Direction, $y=180^\circ$			
	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow
A	1.2	0.3	-0.5	-1.2	1.2	0.3	-0.5	-1.2
B	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6

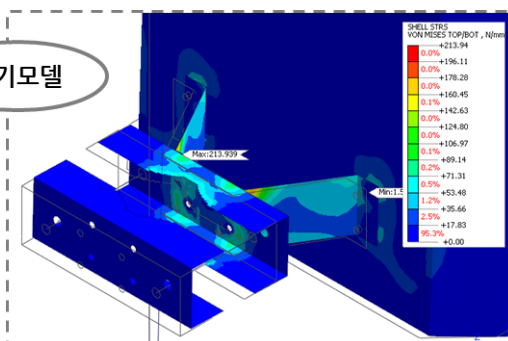
$p_s$  (N/m<sup>2</sup>)  

Load Case	Wind Direction, $y=0^\circ$				Wind Direction, $y=180^\circ$			
	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow	Clear Wind Flow	Obscured Wind flow
A	282	71	-118	-282	282	71	-118	-282
B	-259	-24	-259	-141	-259	-24	-259	-141

초기모델 해석결과



초기모델

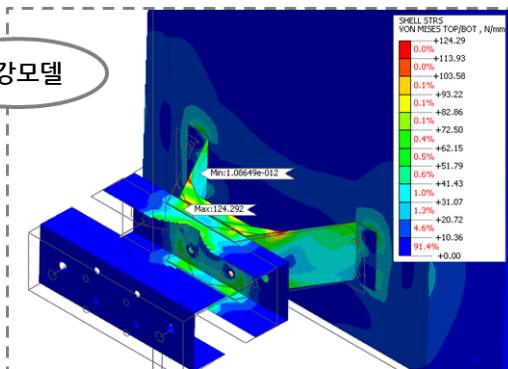
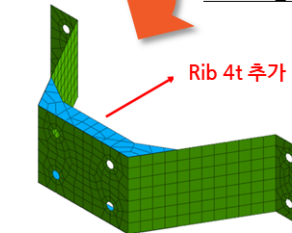


최대 발생응력 : 213.94 MPa > \*165 MPa ... **N.G.**

Rib 보강

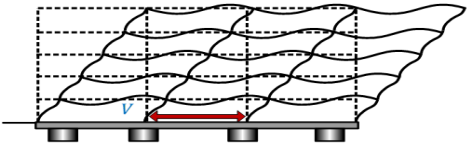
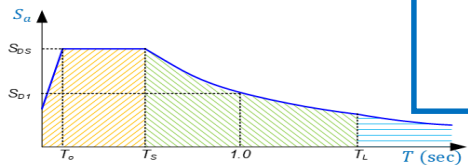
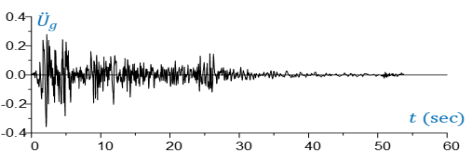
Rib 4t 추가

보강모델



최대 발생응력 : 124.29 MPa < \*165 MPa ... **O.K.**

# 비연계 해석사례 - 설계하중 적용시 구조해석

Procedure (ASCE 7-16; KBC-16)	Governing Equation	Seismic Force
I. Equivalent Lateral Force (ELF) Procedure (등가정적해석법)	$V = C_s W$	
II. Modal Response Spectrum Analysis (동적해석법: 응답스펙트럼해석법)	$F = S_a M$	
III. Seismic Response History Procedure (동적해석법: 시간이력해석)	$M\ddot{U}_g = M\dot{U} + c\dot{U} + KU$	

• **Situation**  
지진하중 발생 시 GIB의 안정성과 사용성 검토

• **Consulting Solution**  
내진에 대한 응력과 변위 분석 후 안정성과 사용성 검토

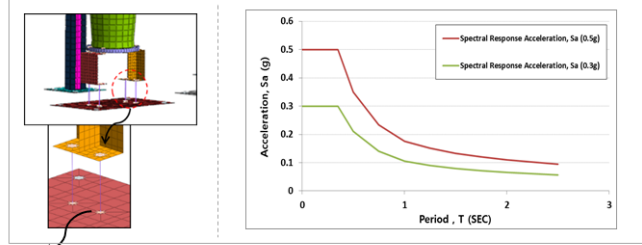
• **Analysis Fields**  
- Linear Static Analysis  
- Response Spectrum Analysis



■ **General**

- 적용하중  
Dead Load (자중)  
Earthquake Load
- 평가 방법  
AISC-ASD (Stress Evaluation)

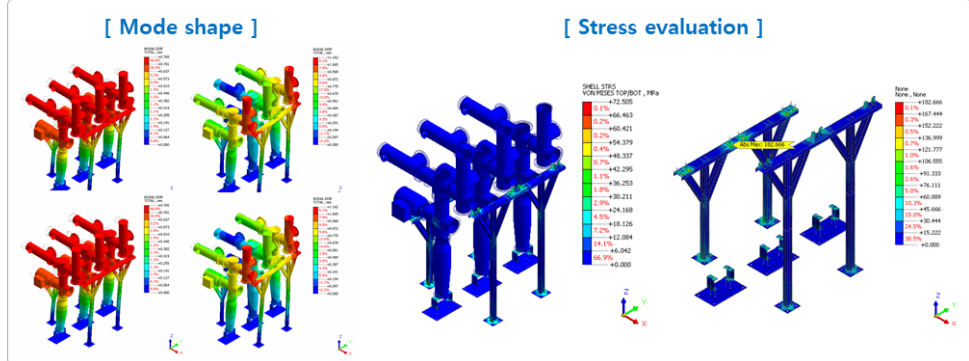
■ **Modeling**



• Stud 볼트의 모델링은 Bolt의 정확한 응력을 평가하기 위하여 rigid 요소에 1D 요소를 연결하여 모델링

• 600-SI-INF-001를 이용한 응답스펙트럼 하중 생성

■ **Results**



# 비연계 해석사례 - 운용조건 적용시 구조해석

• Situation

구조물 Lifting 및 이송시 구조안전성 검토

• Consulting Solution

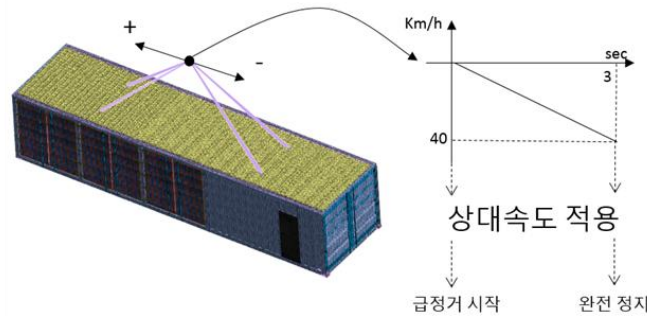
리프팅 조건에 대한 구조해석  
 급가속/감속 조건에서의 구조해석  
 구조위험부 분석 및 개선방향 모색

• Analysis Fields

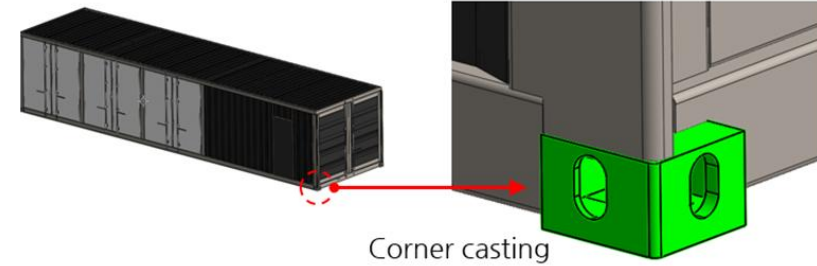
- 선형 정적해석 (Linear static analysis)
- 과도응답해석 (Transient response analysis)



■ General

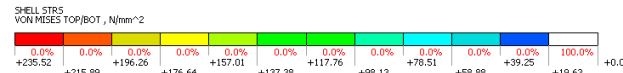
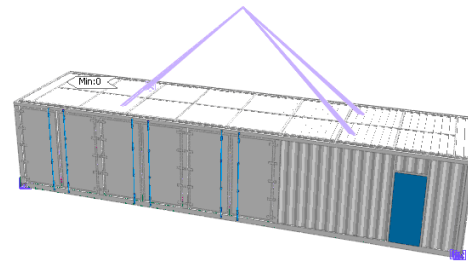


■ Model

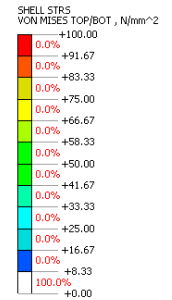
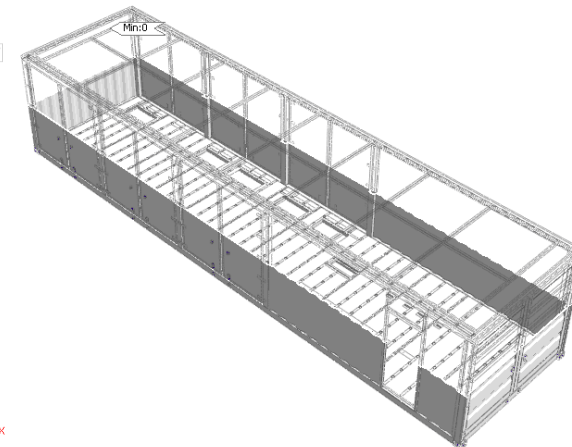


■ Results

0 492 984 mm



midas NFX



# 비연계 해석사례 - 유동해석

## □ 해석 목적

- 특정 개도에서의 밸브 성능 평가
- 밸브 성능 평가를 위한 차압 평가 및 유량 분석

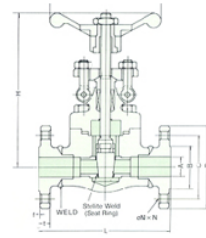
## □ 해석 종류



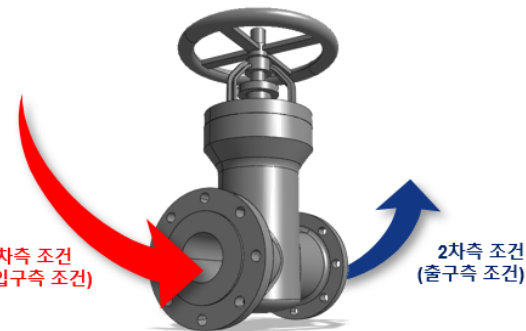
- 일반유동 해석

## □ 해석 조건

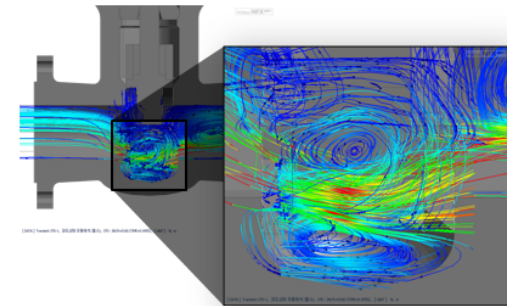
- k-ε 난류 모델, 초기 안정화 스텝 적용
- 선형적정해석: 결과변환 기능을 통한 압력하중분포 입력



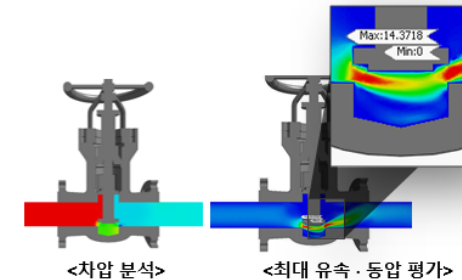
벽면 조건 설정



- 입구측 출구측 압력 계산을 통한 차압 평가
- 유속 분포 확인 및 유량 가시화 기능을 통한 유량 평가



<유체의 흐름 및 와류 평가>



<차압 분석>

<최대 유속 · 동압 평가>

# 비연계 해석사례 - 유동해석

## □ 해석 목적

- 화력 플랜트 시스템에 사용 되는 배관 시스템 수송 성능 향상
- 가이드 베인 위치 선정 및 해당 가이드 베인 설치 전 후의 유동양상을 예측

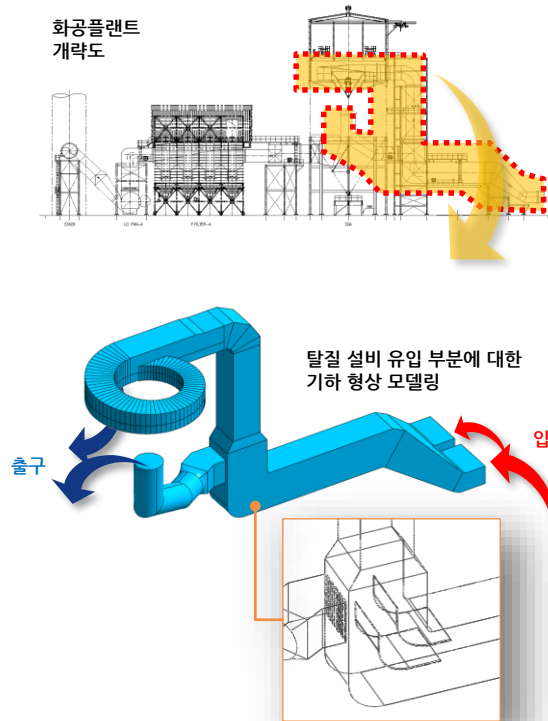
## □ 해석 종류



- 일반유동 해석

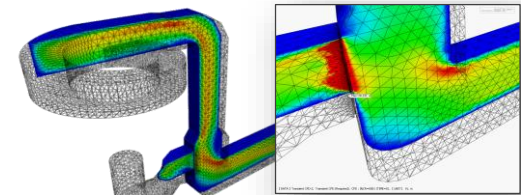
## □ 해석 조건

- k-ε 난류 모델, 초기 안정화 스텝 적용



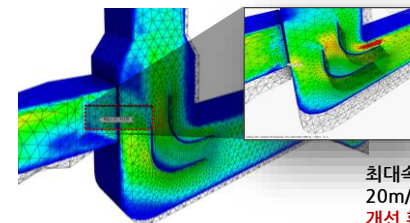
- 유체 속도 분포 확인을 통해 박리 구간, 고속 영역을 규명
- 박리 구간이 기하 형상 초기 직각부에 나타나며 고속 현상도 해당 영역에서 관찰
- 해당 영역에서 가이드 베인 설치 후 속도 분포 비교 및 개선 확인

가이드 베인 생성 전 검토



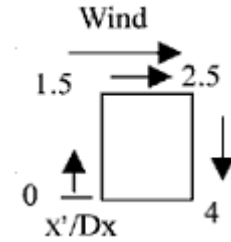
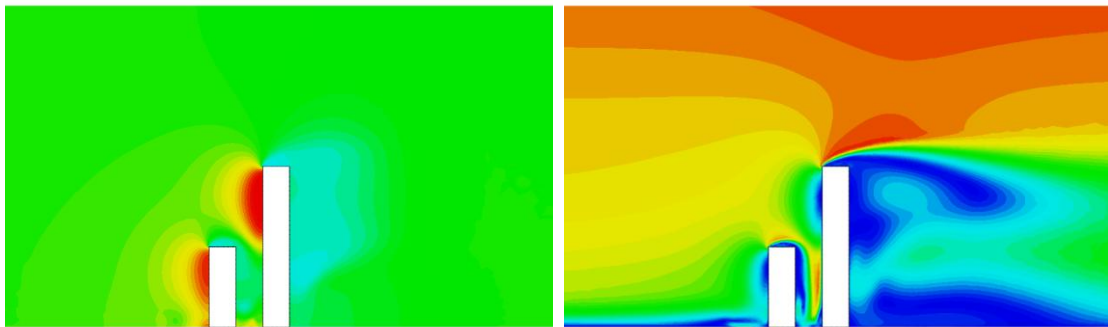
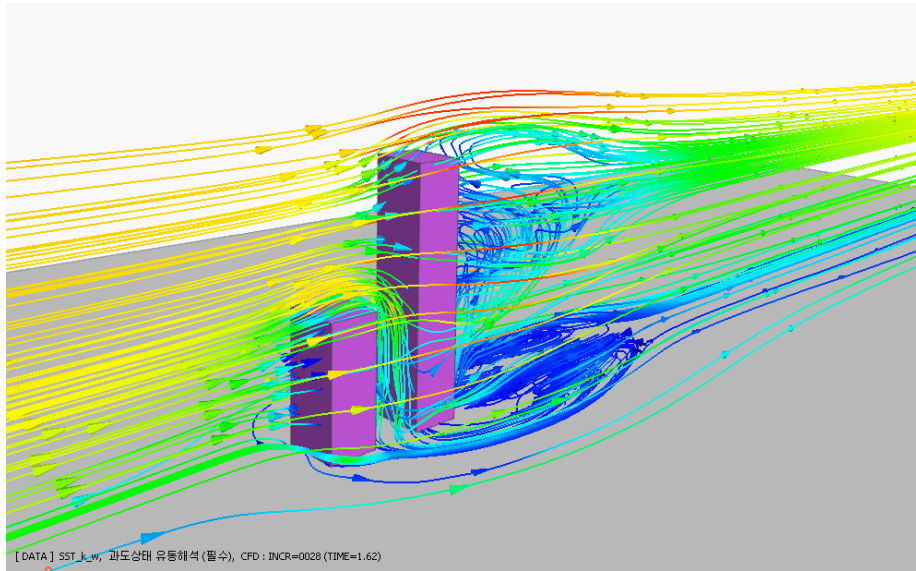
<속도 검토>

가이드 베인 생성 후 검토

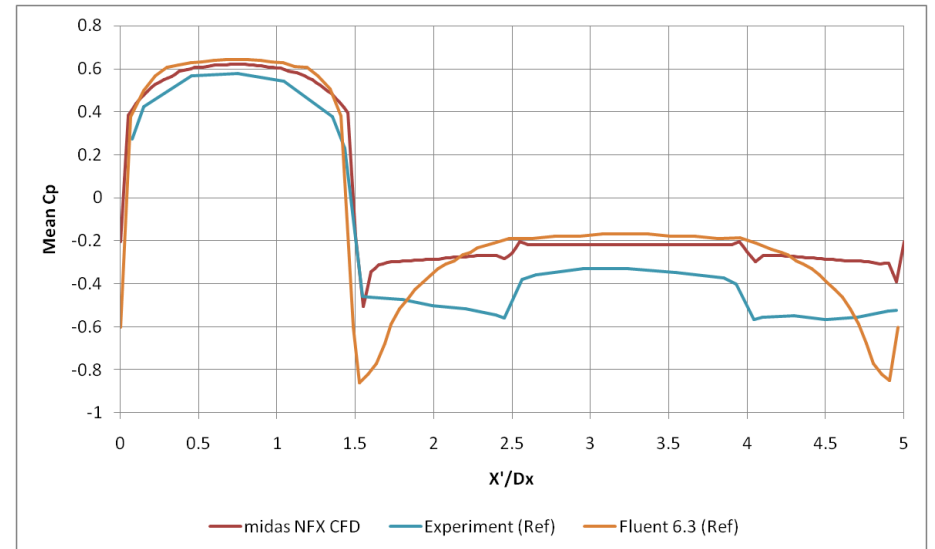


최대속도가 20m/s 이하로 평가 개선 확인

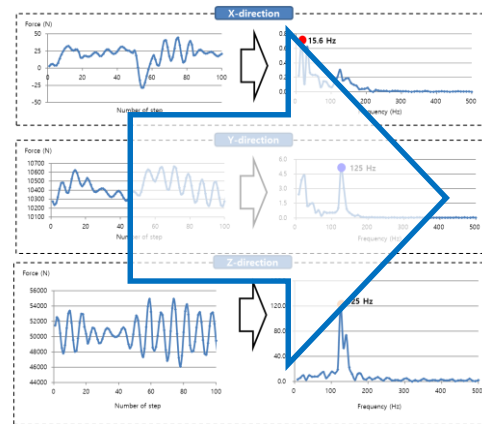
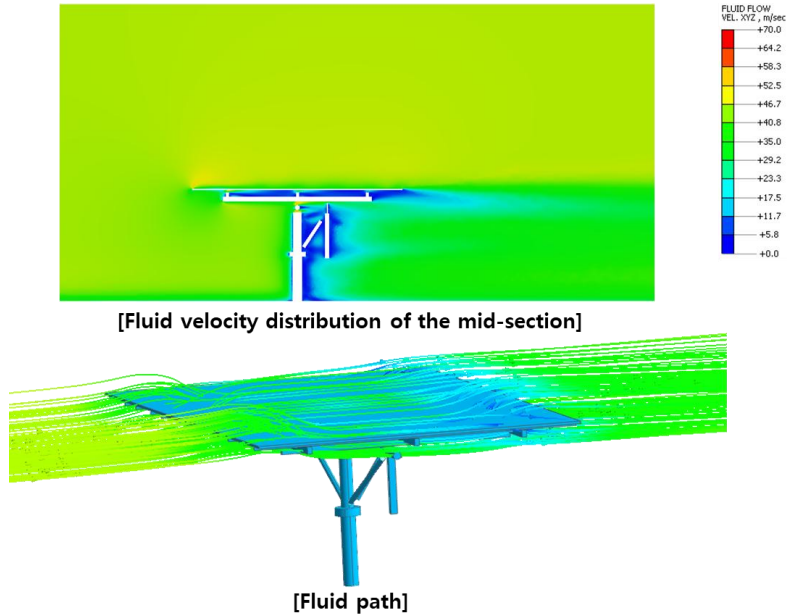
# 비연계 해석사례 - 유동해석



단면에 따른 항력계수 산정

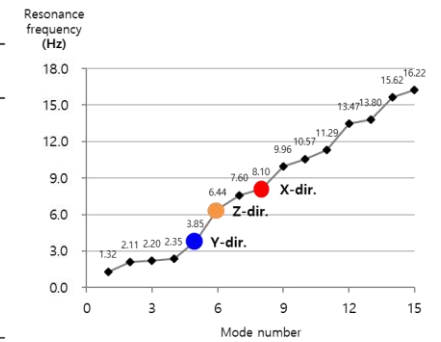


# 비연계 해석사례 - 유동해석

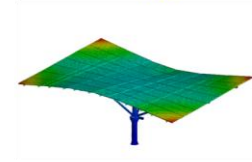


## Eigenvalue analysis result

PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS				
Mode number	X-dir.	Y-dir.	Z-dir.	Resonance Frequency
1	0.00%	0.00%	0.00%	1.3189 Hz
2	30.44%	0.08%	0.00%	2.1126 Hz
3	0.12%	17.64%	0.03%	2.1953 Hz
4	0.01%	0.02%	0.00%	2.3495 Hz
5	0.00%	59.45%	0.04%	3.8515 Hz
6	0.01%	0.03%	29.66%	6.4368 Hz
7	0.05%	9.11%	7.43%	7.5981 Hz
8	39.91%	0.01%	0.02%	8.0957 Hz
9	0.00%	0.00%	0.00%	9.9566 Hz
10	0.00%	2.12%	20.52%	10.5746 Hz
11	6.08%	0.00%	0.00%	11.2883 Hz
12	5.61%	0.00%	0.69%	13.4688 Hz
13	2.98%	0.00%	1.64%	13.8034 Hz
14	0.00%	0.03%	0.06%	15.6218 Hz

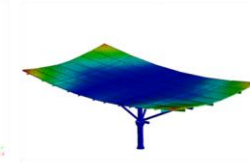


5th mode shape (Y-dir.)



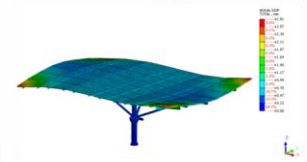
Resonance frequency : 3.8515 Hz

6th mode shape (Z-dir.)

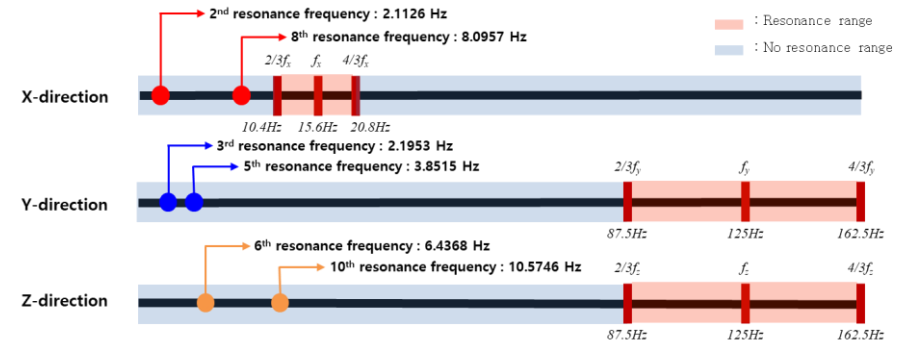


Resonance frequency : 6.4368 Hz

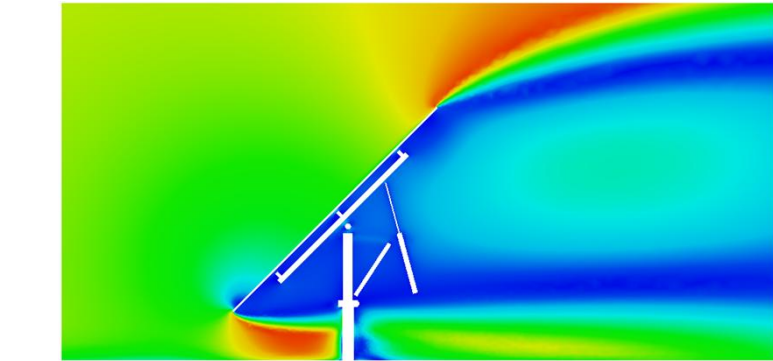
8th mode shape (X-dir.)



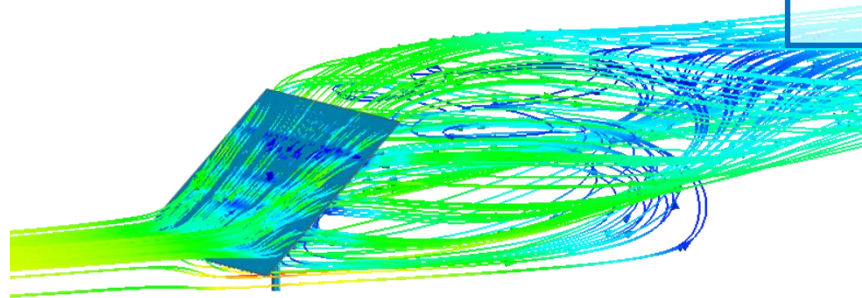
Resonance frequency : 8.0957 Hz



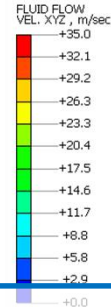
# 유동-구조 연성해석(FSI) 사례



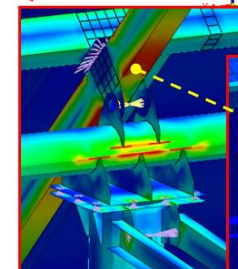
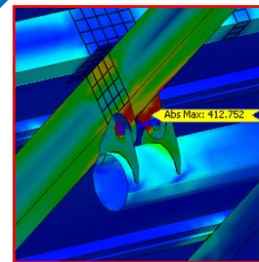
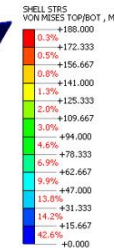
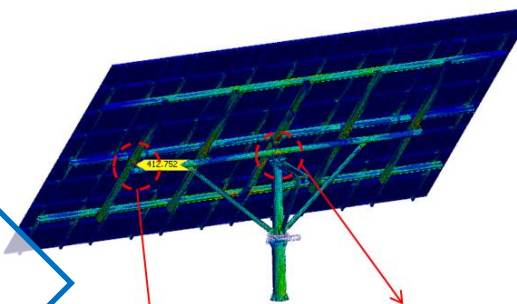
[중앙단면 속도 분포]



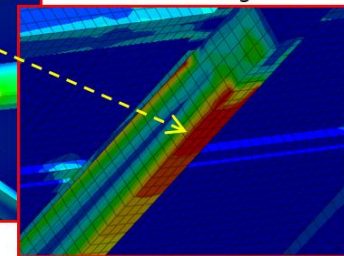
[유선]



## ✓ 48매 전면 풍하중 - 응력 결과



<Torque tube>



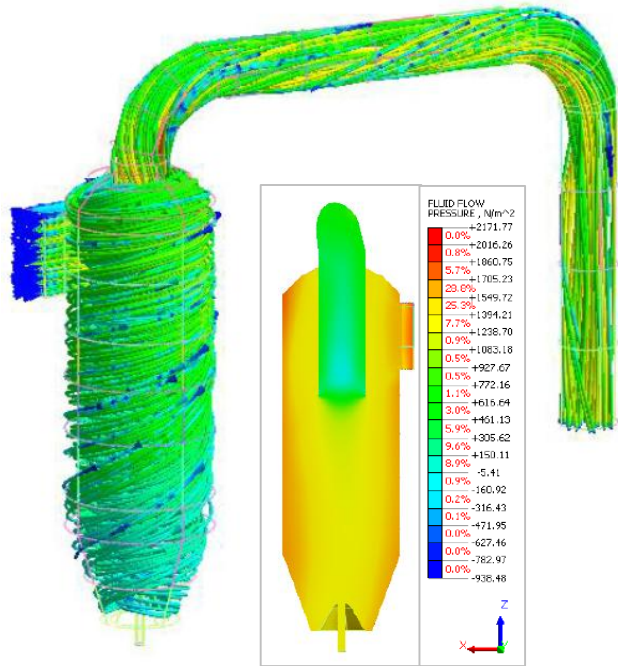
<Stringer-C>

## ✓ 결과 분석

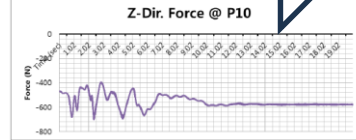
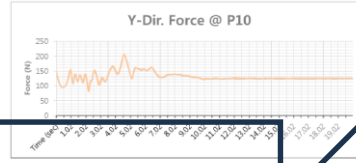
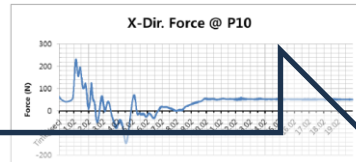
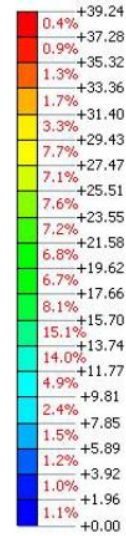
- 해석결과 중 붉게 표현된 영역은 SS400재질의 허용응력 (188MPa) 을 초과하는 요소임.
- 그림에 표기된 Bracket, Stringer-C 에 대하여 과도한 하중이 발생.
- 상기 세 파트는 대부분의 전지판의 무게와 바람 하중의 저항하는 주요 부재임.

# 유동-구조 연성해석(FSI) 사례

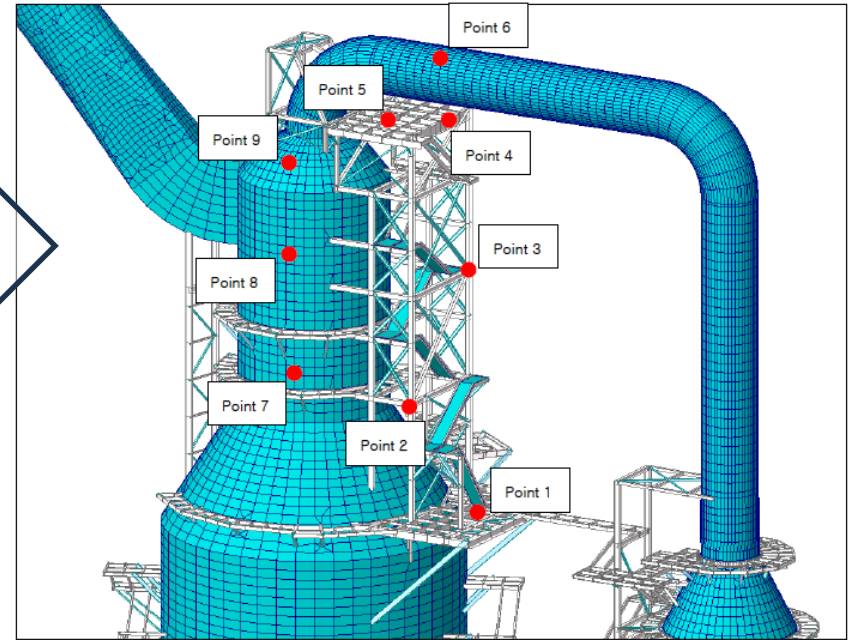
<기계분야 유동해석>



FLUID FLOW VEL. XYZ, m/sec



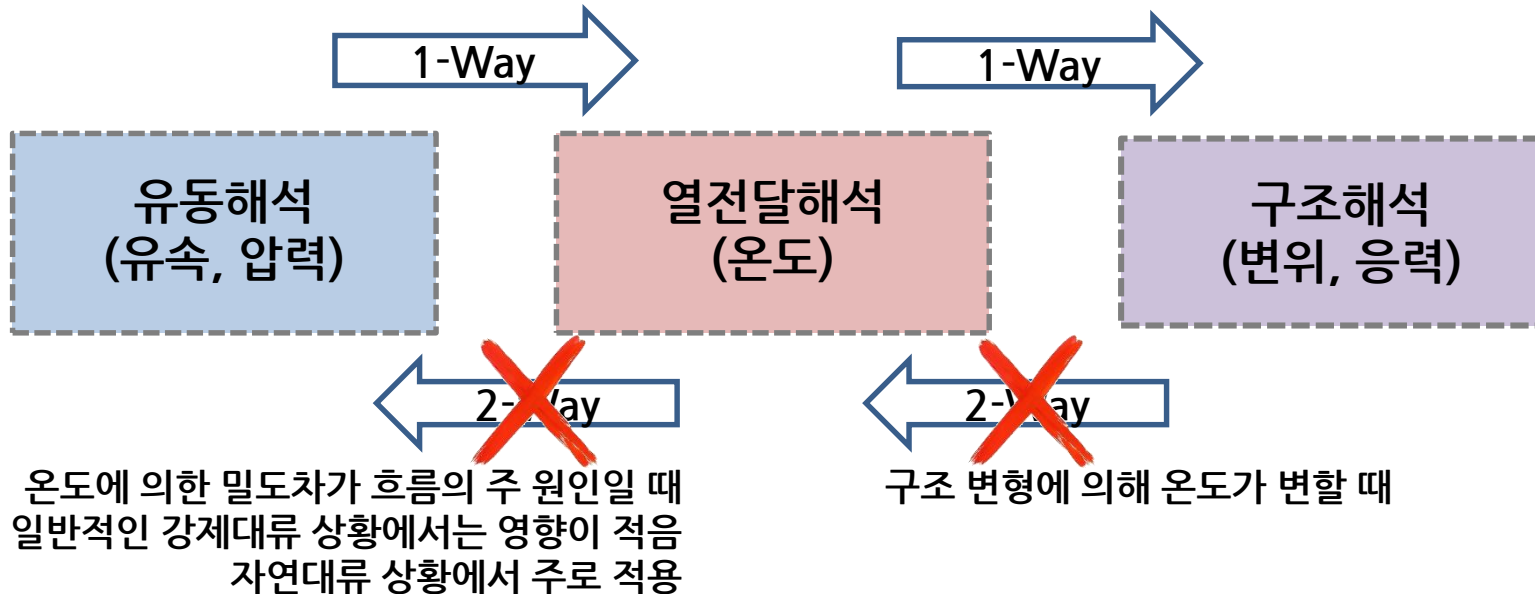
<건축분야 구조해석>



# 유동-열-구조 연성해석 구분

예측 불가능한 복잡도, 흐름 존재시  
“유체 표면 온도(T)”와 “대류열전달계수(h)” 계산/전달

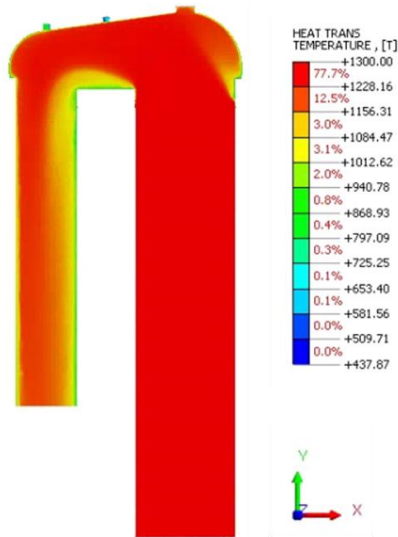
고체 발열과 재료 열전도를 고려하여  
구조물 전체의 절점온도(T)를 계산/전달



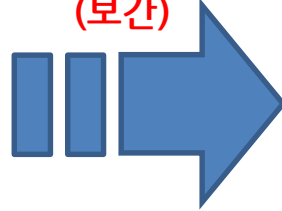
# 유동-열-구조 1-Way 연성해석 사례

## 유체 일반/열전달 1-Way 해석

유체 흐름 및 온도분포 확인



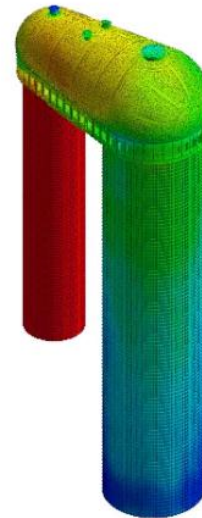
결과변환  
(보간)



유체 표면온도  
데이터 전달

## 구조 열전달 해석

구조물 주요위치 온도분포 확인



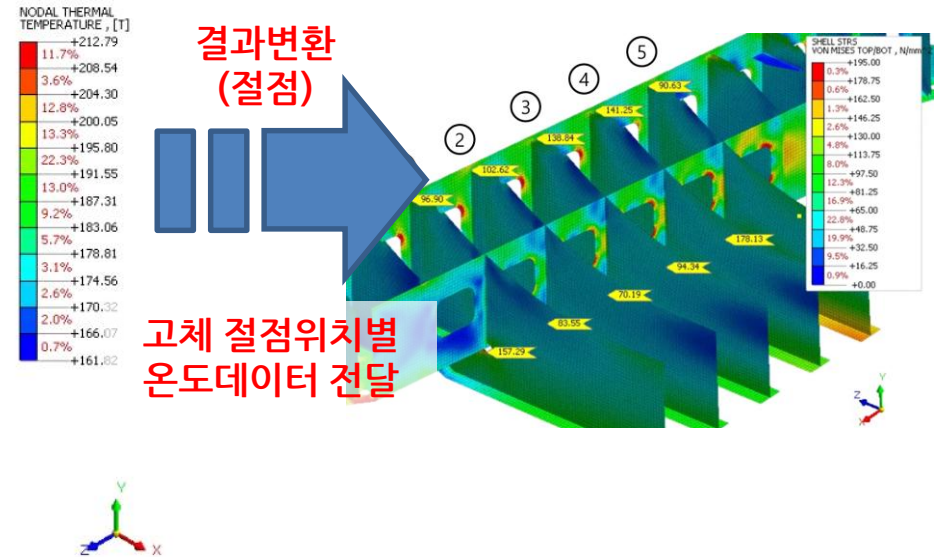
결과변환  
(절점)



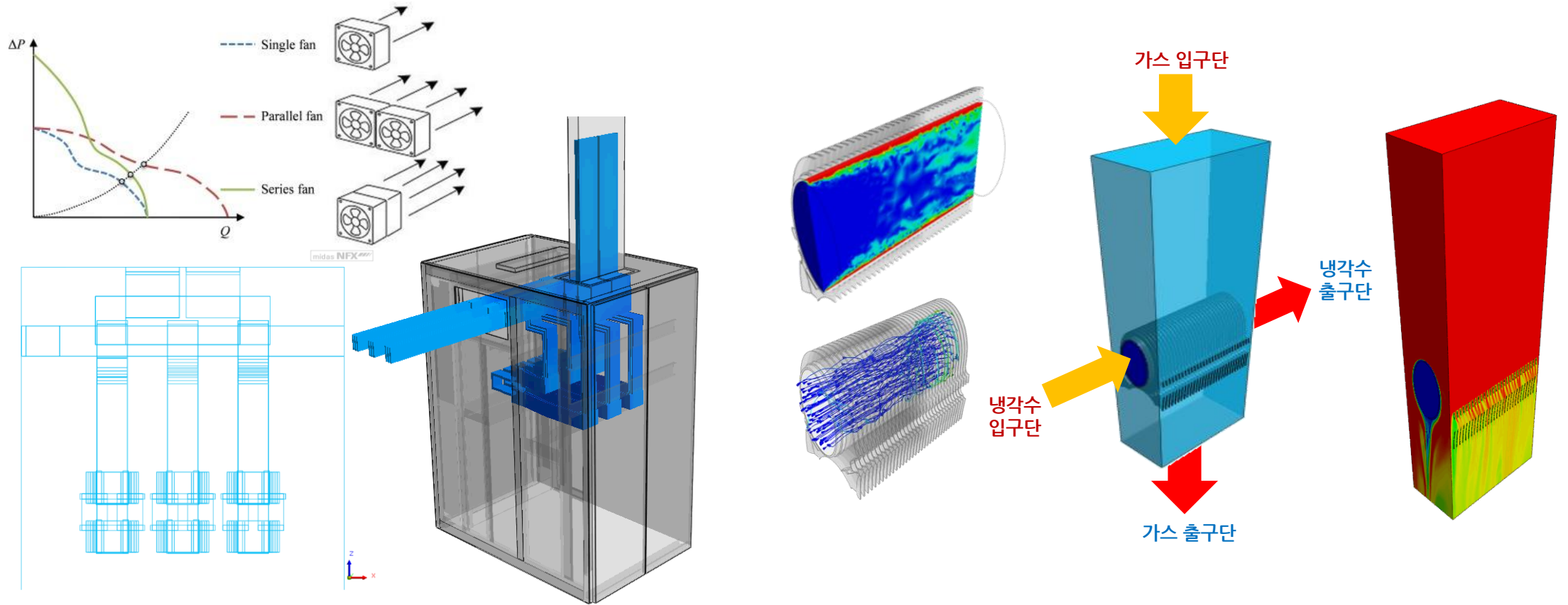
고체 절점위치별  
온도데이터 전달

## 구조 해석

열팽창 구조안전성 검토 필요



# 유동-열 1-Way 연성해석 사례



# 유동-열 1-Way 연성해석 사례

## □ 해석 목적

- 연기의 역류를 방지할 수 있는 임계풍속 산출
- 대형버스 화재(20MW)를 산정하여 계산

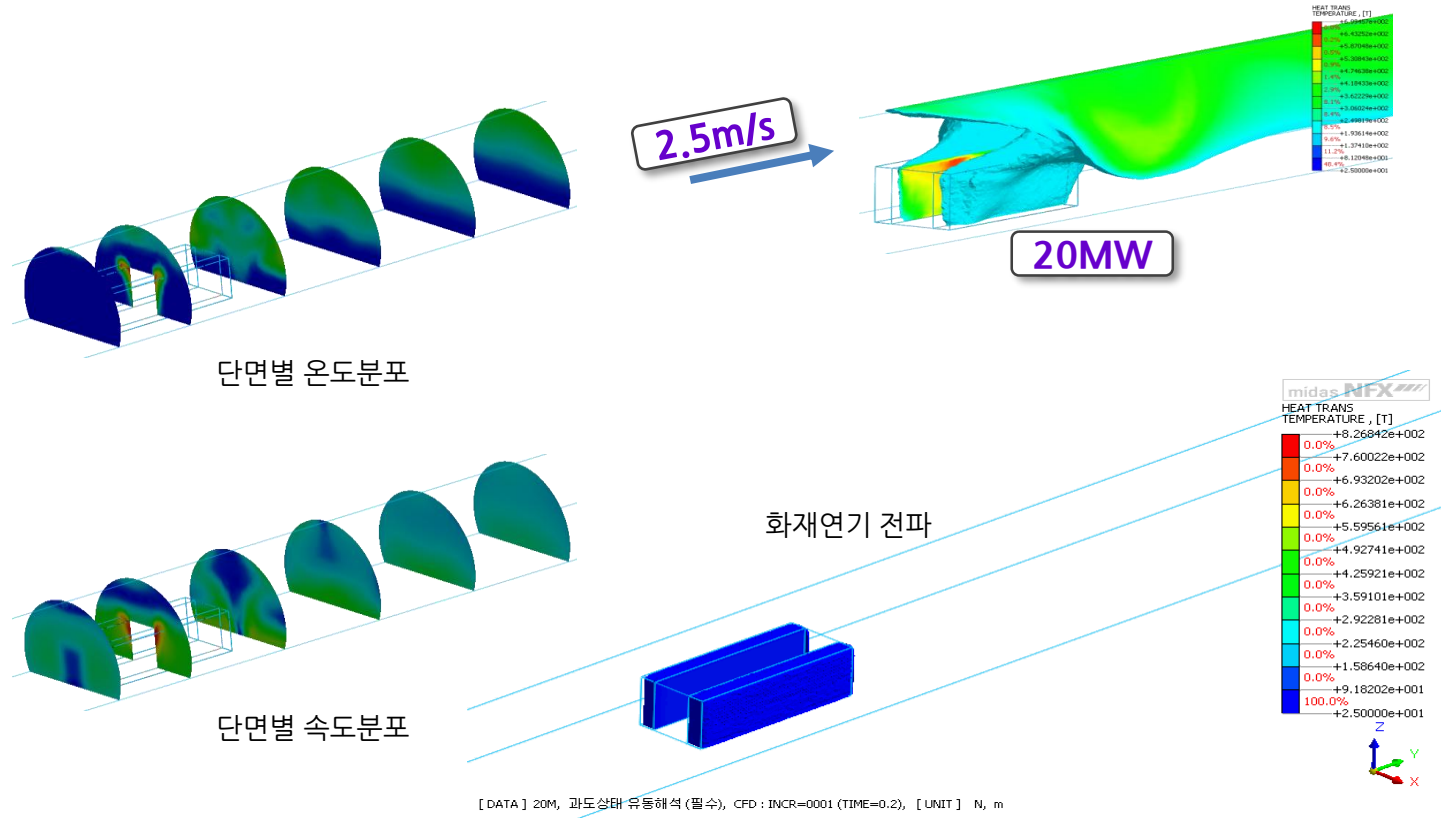
## □ 해석 종류



- 일반유동 해석
- 혼합물 해석

## □ 해석 조건

- 터널 내 화재 발생 시 연기가 한 방향으로만 빠져나갈 수 있는 속도(제연 풍속) 산출



# 유동-열 2-Way 연성해석 사례

## □ 해석 목적

- 히트싱크의 크기, 형상, 시스템 내 위치에 따른 방열 성능 분석
- 정상상태에서의 칩 최고 온도 평가

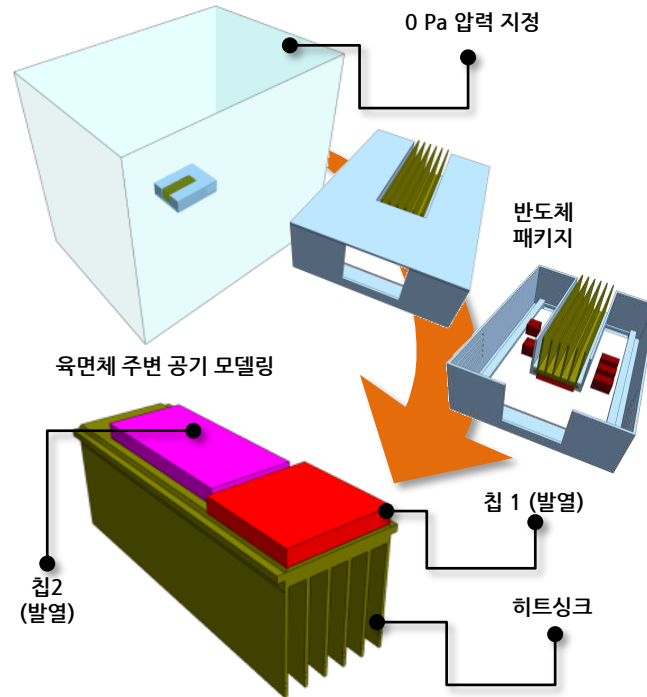
## □ 해석 종류



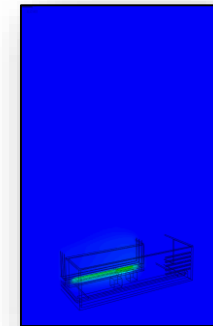
- 일반유동 해석
- 복합열전달 해석

## □ 해석 조건

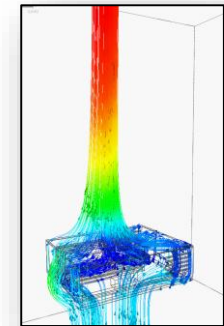
- 모델링 : 2D Solid Element
- 자연 대류를 위한 비압축성 이상기체 모델
- 외부 공기 모델링 후 최 외곽 벽면 압력 0 Pa 적용
- 25℃ 외부 공기 모델링



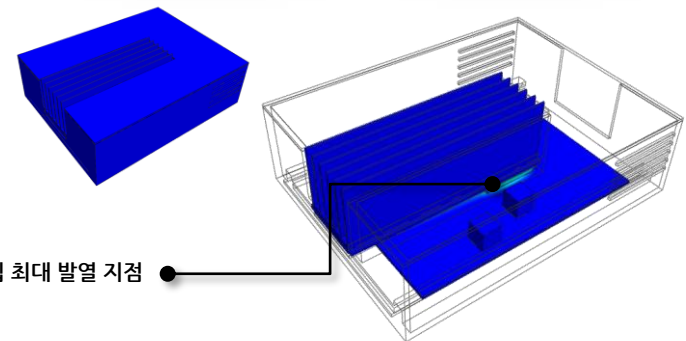
- 외부 자연 대류에 의한 내부 냉각 성능 평가
- 히트 싱크와 칩의 열전달 현상 분석 가능



<열 기류 온도 분석>



<열 흐름 유선 분석>



칩 최대 발열 지점

<시스템 내부 온도 검토>

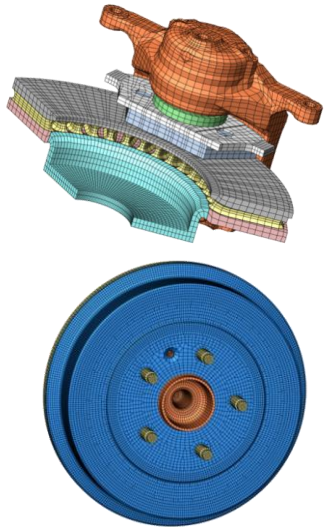
# 열-구조 1-Way 연성해석 사례

## 해석의 목적

브레이크액에 전달되는 온도를 예측하여 Vapor Lock 현상 방지

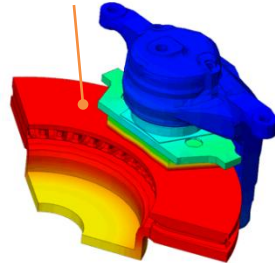
## 해석 종류

열전달해석

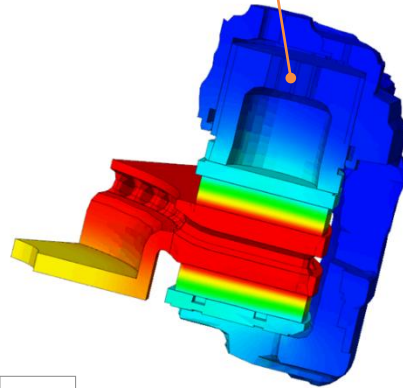


## 해석 결과

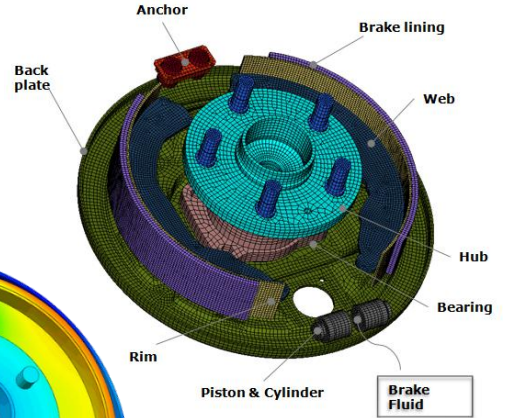
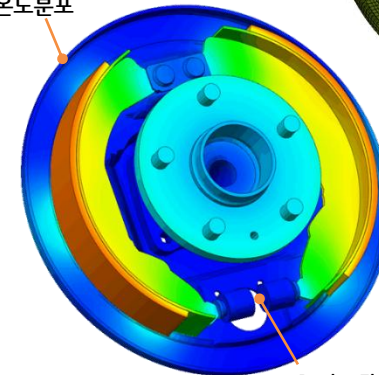
온도분포 해석결과



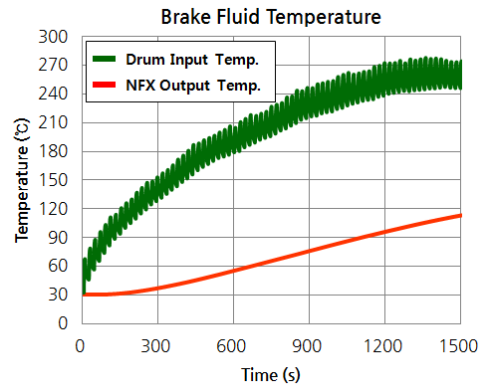
Brake Fluid 온도 측정점



온도분포



Brake Fluid 온도 측정점



No.	Fluid	끓는점(Dry)	끓는점(Wet)	적용차종
1	DOT3	205 °C	140 °C	중 소형차
2	DOT4	230 °C	155 °C	대형 고급 승용차
3	DOT5	260 °C	180 °C	스포츠 카

※ Vapor Lock : 브레이크액이 끓는점까지 온도가 상승하여 생긴 기포로 인해 브레이크 성능이 저하되는 현상

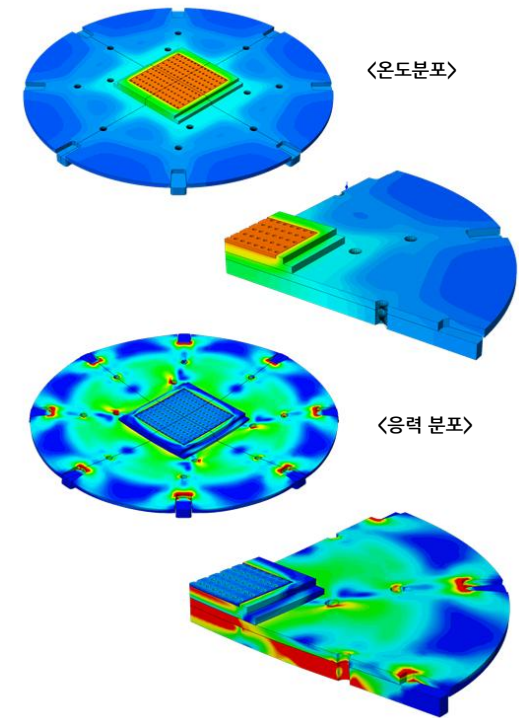
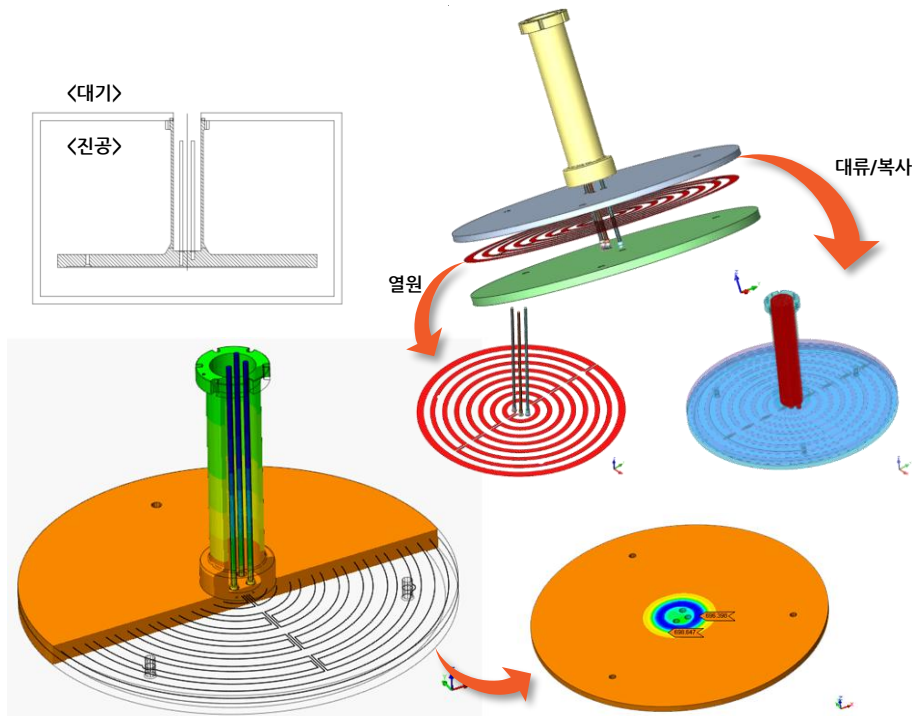
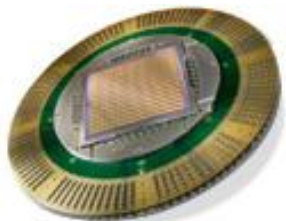
# 열-구조 1-Way 연성해석 사례

## 해석의 목적

진공조건에서 열원에 의한 발열 시 대류와 복사를 동시에 적용하여 각 부품 표면에서의 온도 분포 검토

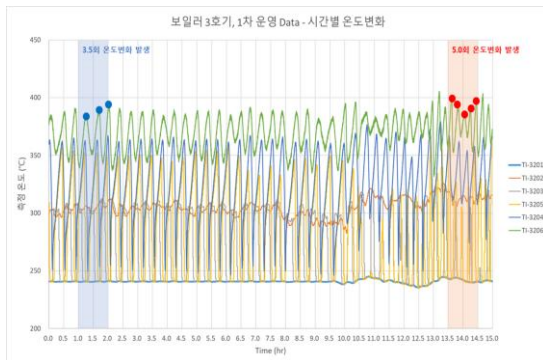
## 해석 종류

과도상태 열전달해석



# 열-구조 1-Way 연성해석 사례

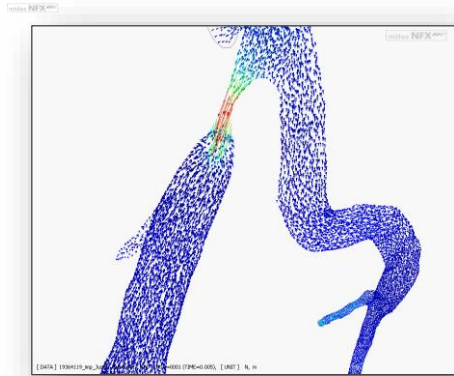
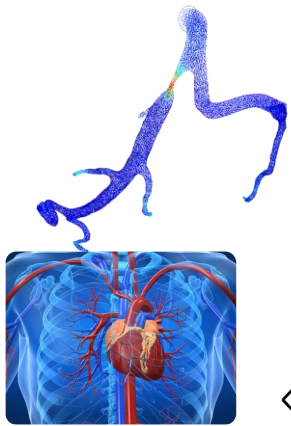
: 비정상 운영하중(Operation loading)에 의한 보일러 과열기 노즐 열피로파손 문제 수명확인.



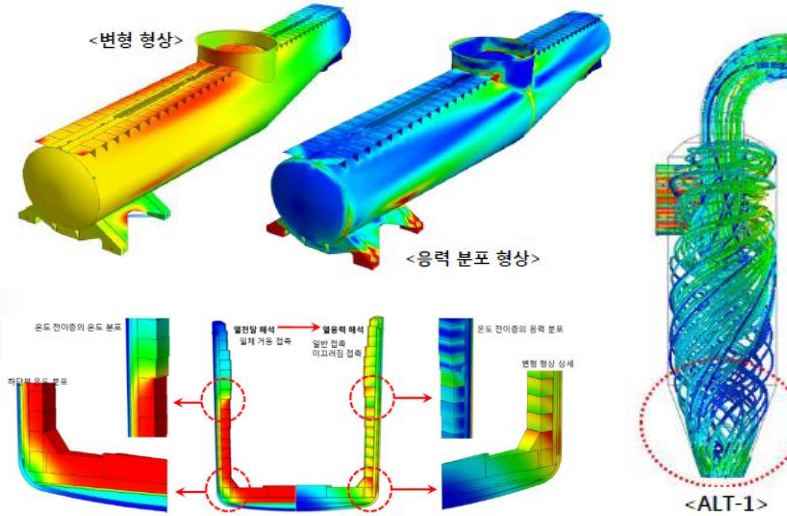
Condition	Input data	Max. stress on nozzle(외기온도 25도)	Max. stress on nozzle(외기온도 -10도)
Operating Max.	1) S/H 온도 : 366.41 °C	 #16 nozzle : Max. stress : 485.82 MPa(513.47 MPa)	 #16 nozzle : Max. stress : 545.41 MPa(572.34 MPa)
	2) Gas side 온도 : 504.38 °C		
Operating Min.	3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C	 #16 nozzle : Max. stress : 247.38 MPa(260.60 MPa)	 #16 nozzle : Max. stress : 287.07 MPa(316.64 MPa)
	1) S/H 온도 : 234.91 °C		
	2) Gas side 온도 : 504.38 °C		
	3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C		

외기 온도조건	최대온도 발생응력 S <sub>T,max</sub> (MPa)	최소온도 발생응력 S <sub>T,min</sub> (MPa)	응력편차 S <sub>dT</sub> (MPa)	재료 허용응력 S <sub>ps</sub> (MPa)	K <sub>e,k</sub>	K <sub>f</sub>	m	n	대체 응력 S <sub>alt</sub> (MPa)	Fatigue limit cycle	Life time (years)	
											3.5회/hr	5회/hr
25도	485.82	229.42	256.4	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	217.94	1.43.E+04	0.47	0.33
-10도	545.41	287.07	212.7	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	219.59	1.40.E+04	0.46	0.32

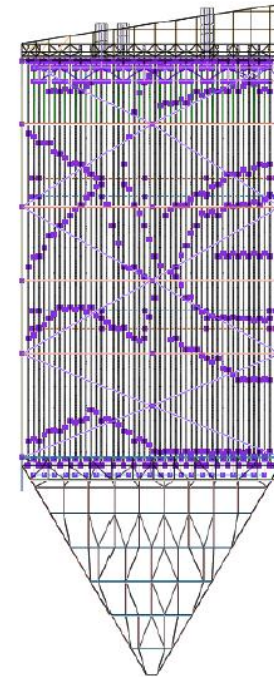
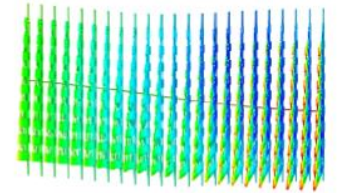
# 다양한 CAE 적용사례



<협착 부위 유체흐름 평가>



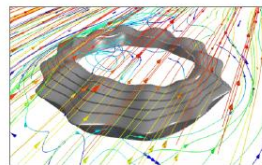
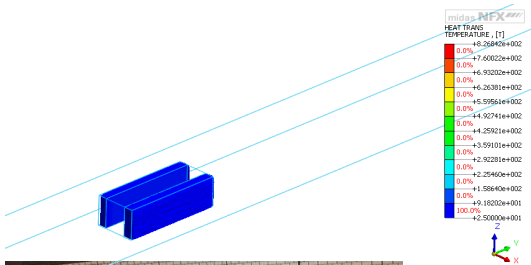
<ALT-1>



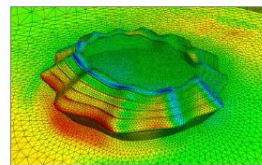
Temperature distribution



Deformed Shape



유선 흐름 가시화



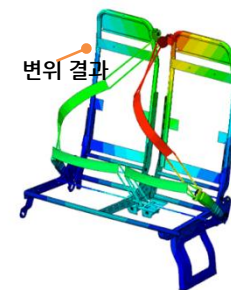
하중 분포



응력 결과



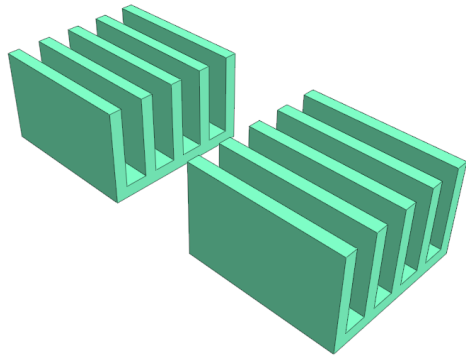
응력 결과



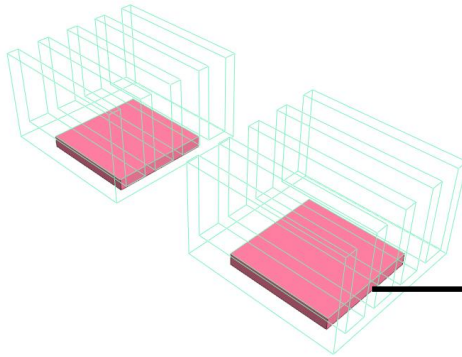
변위 결과

# 예제 설명

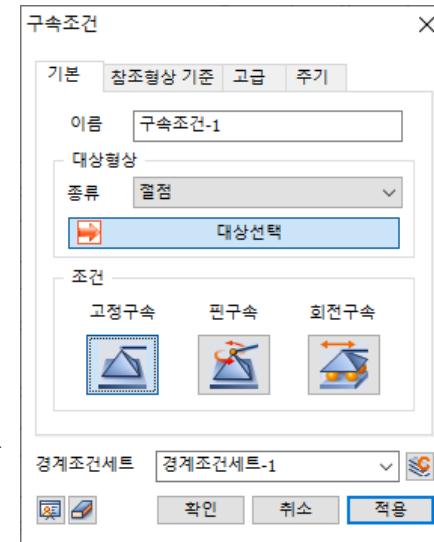
<방열핀 추가>  
Aluminum



<발열칩 추가>  
10 W



<발열칩 하부 고정조건 가정>



유한요소 해석 소프트웨어가 문제를 풀어주지 않습니다.

단지 엔지니어가 문제를 풀 수 있도록 도와줍니다.

**Try to be an engineer, not a technician**

15일간 모든 기능을 무료로 경험해 보세요!



CAE 지식 채널  
반·디·통

CAE에 대해 더 알고 싶다면?  
CAE 지식 공유 채널 '반디통'  
바로가기 > <https://www.banditong.com/>

국내 기술로 개발한 CAE 제품을 한눈에!  
CAE 통합 솔루션 'MTS'  
바로가기 > <https://www.midasmts.com/>

**Thank you**

**-기술 상담 및 제품 문의-**

**Call : 1577-6648**

**E-mail : [mts@midasit.com](mailto:mts@midasit.com)**

