

# CFD 입문자를 위한 모든 것

열 해석의 시작과 끝



# CONTENTS Day-2

## 열 해석의 시작과 끝

---

Session 1. 열은 무엇인가?

Session 2. 방열 및 냉각과 혼합 유동

## 직접 경험해보는 열 유동 해석

---

Session 3. 열 유동 해석 실습

Session 4. 열 및 혼합물 유동 해석 실습

Session 5. 대류 해석 실습

열은 무엇인가?



# 열은 무엇인가?

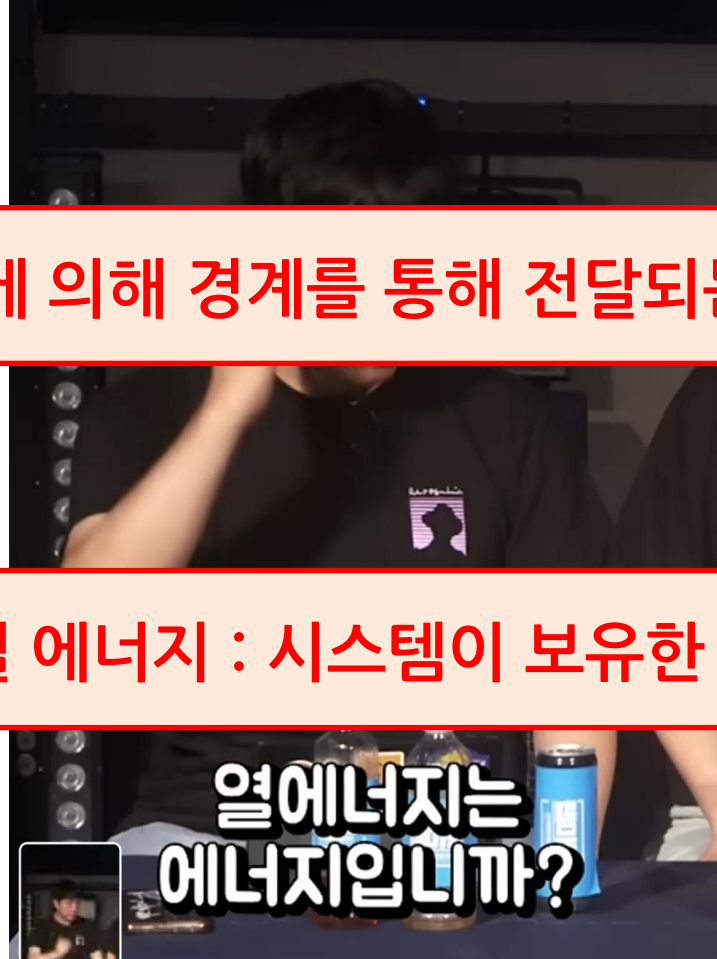


출처 : youtube 국가과학기술연구회nst

# 열, 에너지를 전달 하는 방법

✓ 열 : 온도 차이에 의해 경계를 통해 전달되는 에너지 전달 방식

✓ 열 에너지 : 시스템이 보유한 에너지

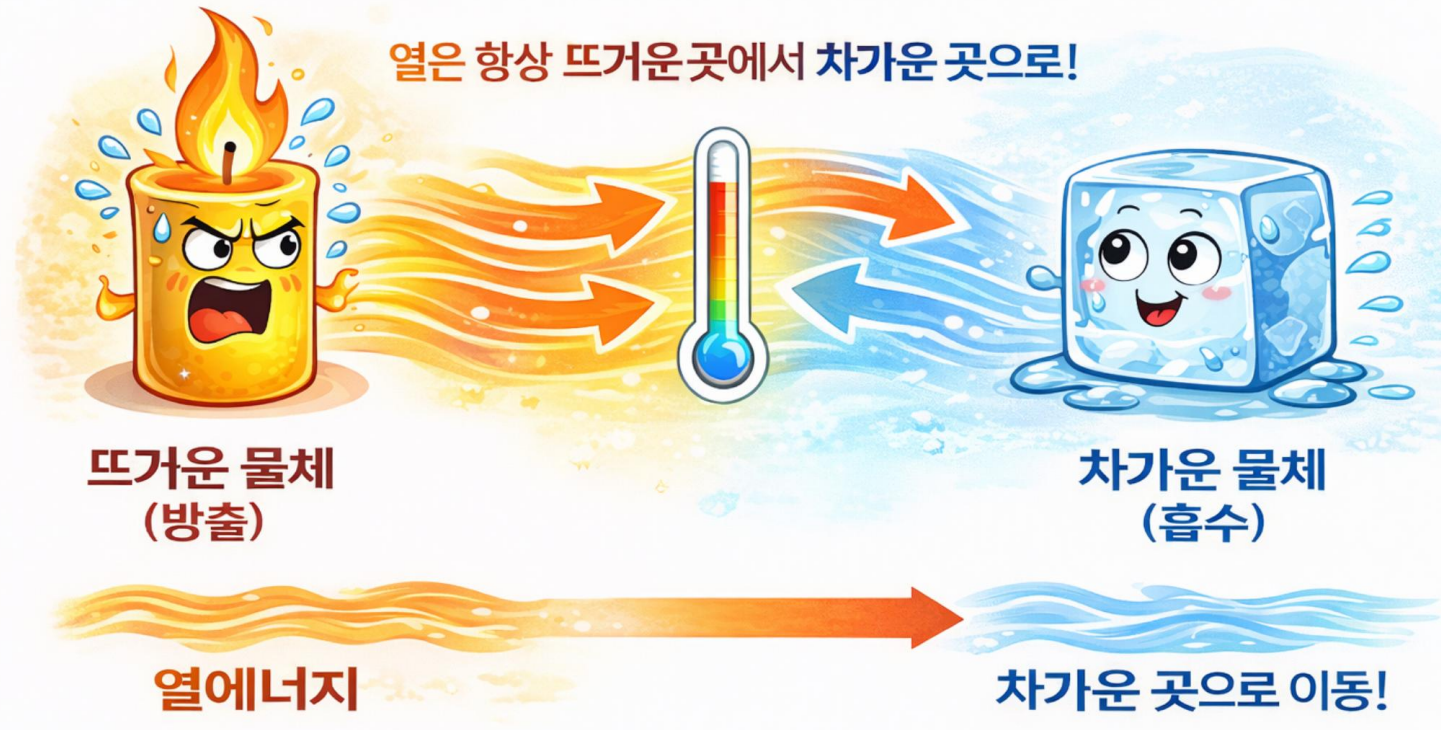


출처 : youtube Unrealscience

# 열의 이동이란?

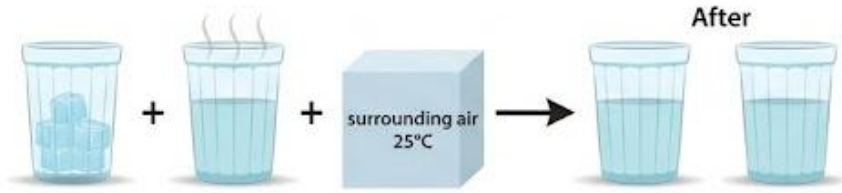
뜨거운 것은 **열을 방출**하고, 차가운 것은 **열을 흡수**해요.

열은 뜨거운 곳에서 차가운 곳으로 이동해요!



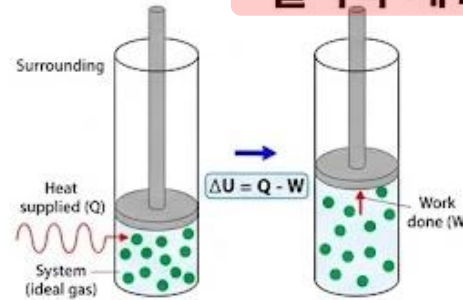
# 열역학 법칙

## 열역학 제0법칙



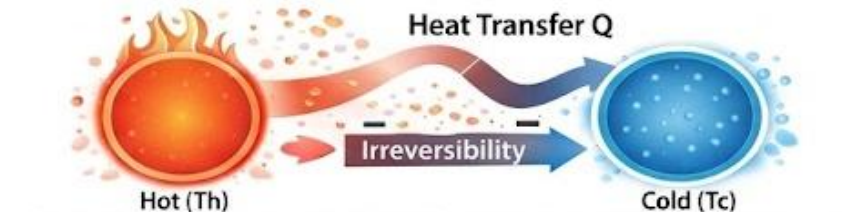
온도가 다르면 열이 이동하며, 모든 물체가 같은 온도가 되면 열평형 상태에 도달한다.

## 열역학 제1법칙



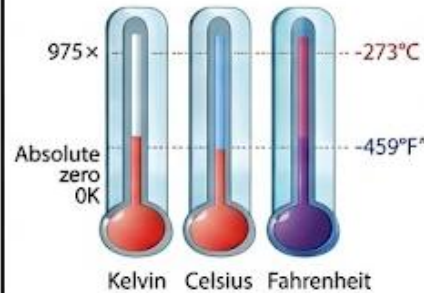
에너지는 생성되거나 소멸되지 않으며, 다른 형태로 전환될 뿐 그 총량은 보존된다.

## 열역학 제2법칙



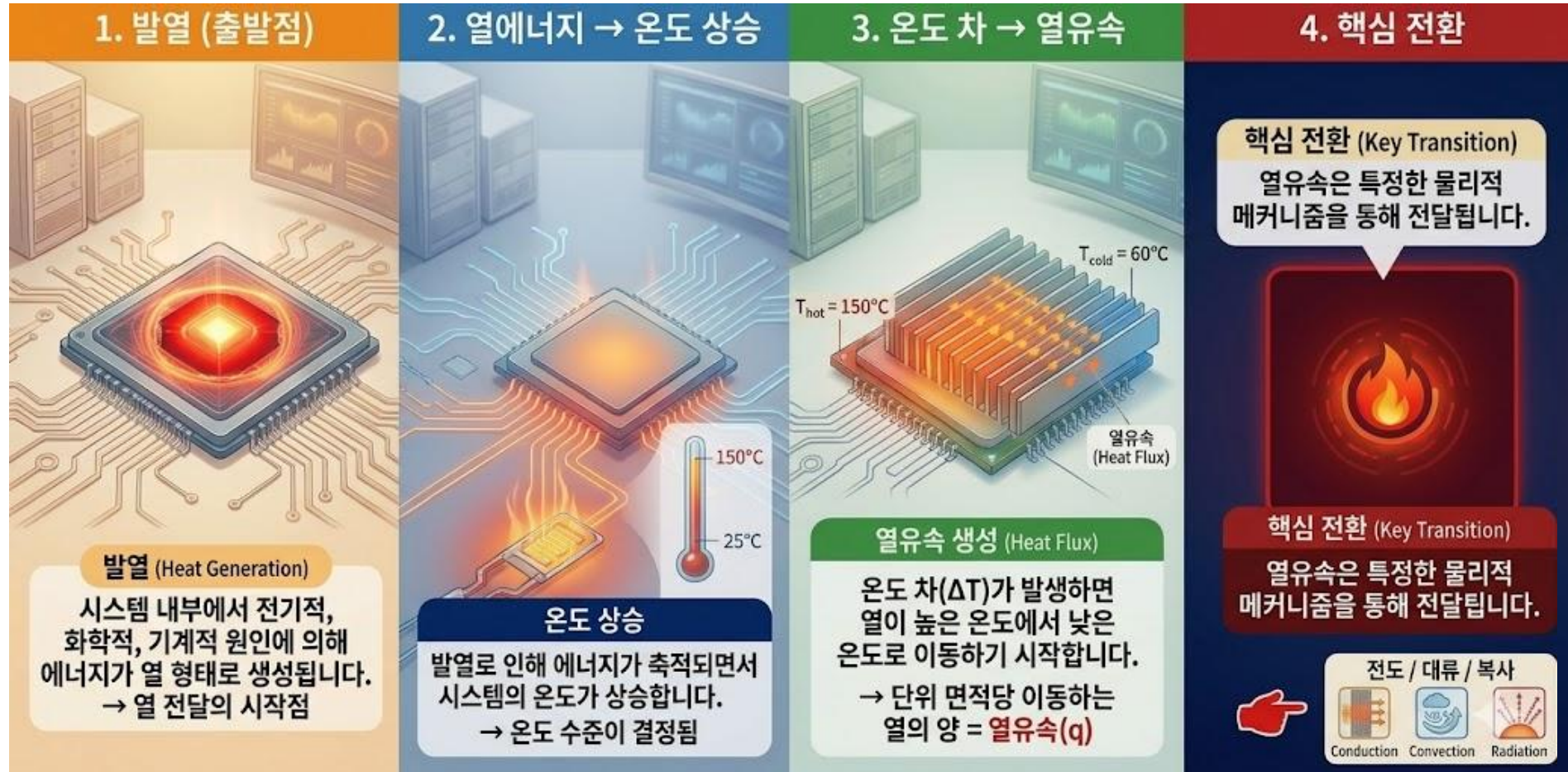
열은 자발적으로 높은 온도에서 낮은 온도로만 이동하며, 엔트로피는 항상 증가하는 방향으로 진행된다.

## 열역학 제3법칙

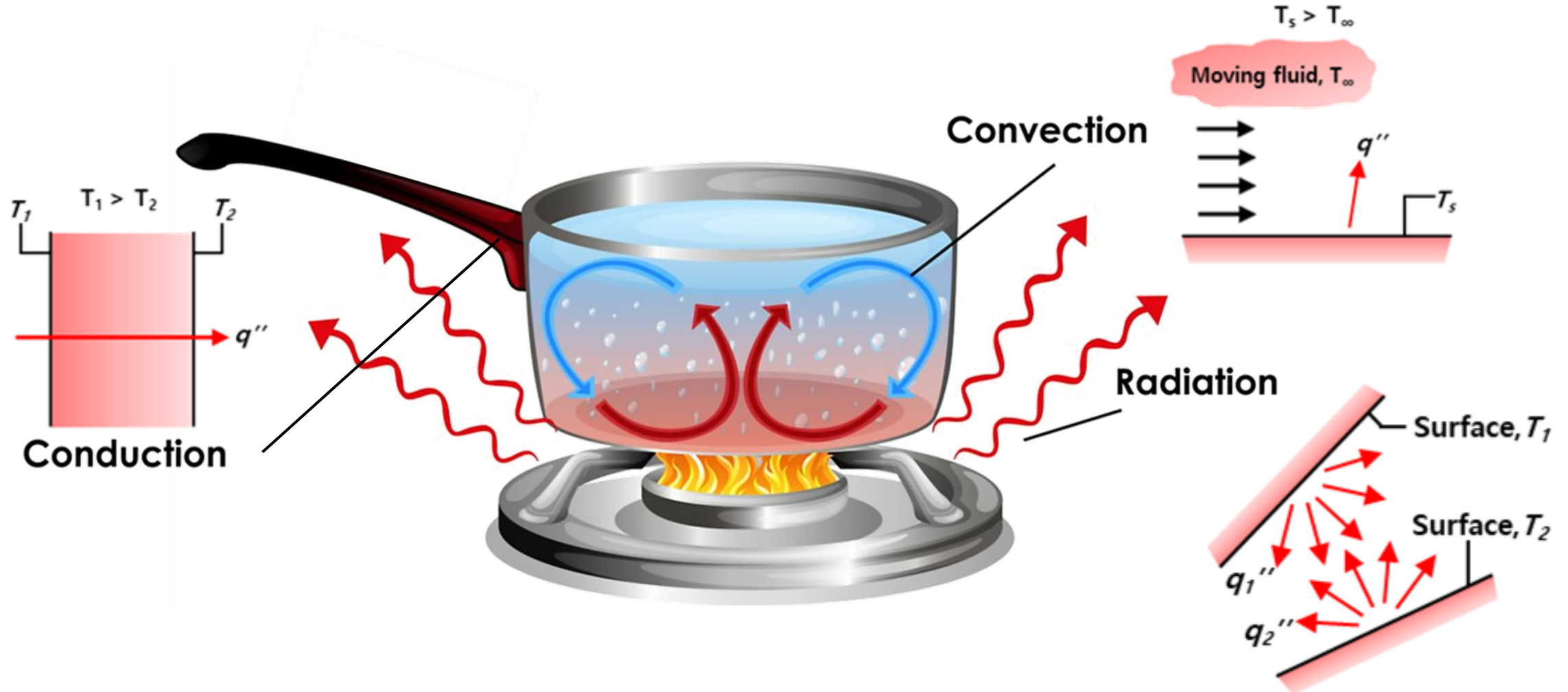


절대온도 0K에 가까워질수록 완전결정 물질의 엔트로피는 0에 수렴한다. (분자 운동의 최소 상태)

# 열 흐름의 이해

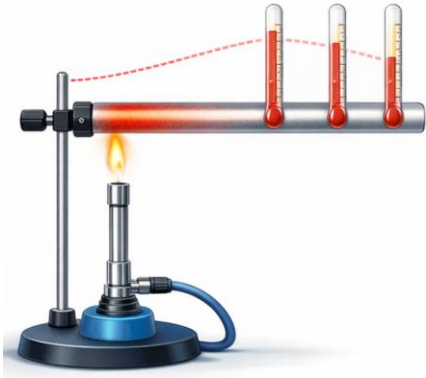


## CFD 열 전달 메커니즘



# CFD 열 전달 메커니즘 수식화

## 전도 conduction



분자가 열에너지로 인해 진동하여 이웃한 분자에 충돌하여 열에너지를 전달

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

$\vec{q}$ : 열유속

$k$ : 전도율

$\nabla T$ : 온도차

## 대류 Convection



열에너지를 지닌 유체가 직접 이동하여 열에너지 전달

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

$Q$ : 열 에너지

$h$ : 대류계수

$A$ : 열전달 대상의 면적

$T_{env}$ : 주변 온도

$T$ : 열전달 대상의 표면 온도

## 복사 Radiation



열에너지가 매질 없이 전자기파 형태로 전달

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

$\sigma$ : 스테판-볼츠만 상수

$F_{1 \rightarrow 2}$ : 형상 계수

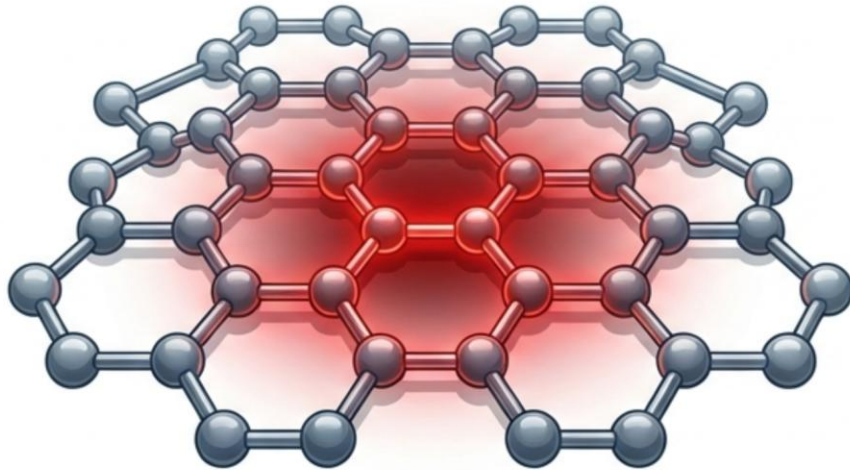
# 열 접촉에 대한 사실



# 입자로 이루어진 열전달?

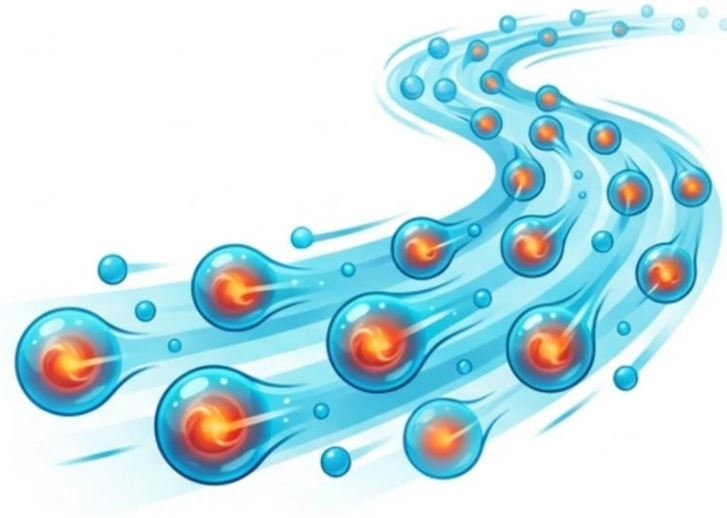
## 전도 (Conduction)

- 고체 (Solid) 내부의 전달
- 매질의 이동 없음
- 제자리에서 에너지를 전달



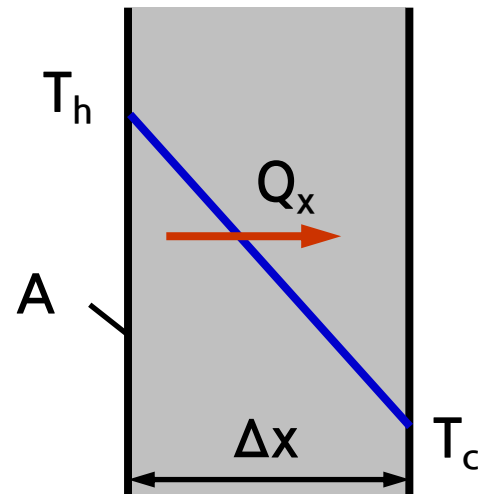
## 대류 (Convection)

- 유체 (Fluid) 거동에 의한 수송
- 매질이 에너지를 직접 품고 이동
- 물리적인 공간을 가로지르는 역동성



# 전도

# 열 전도 - 푸리에 법칙(Fourier's Law)



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

Heat flux

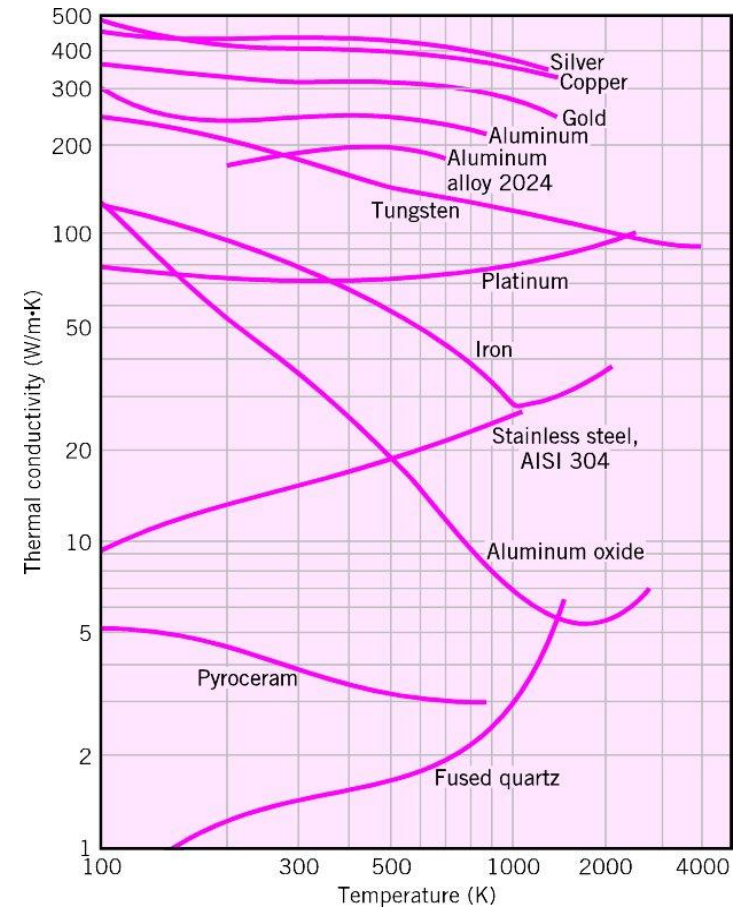
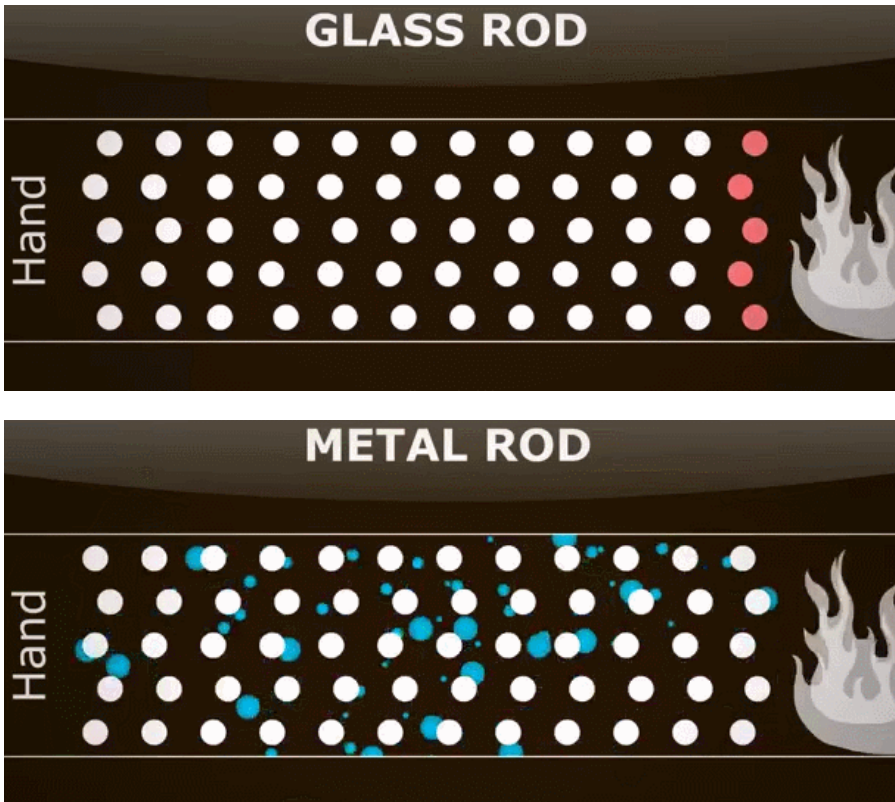
$$q_x'' = \frac{Q_x}{A \Delta t} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{J}/(\text{m}^2\text{s}) = \text{W}/\text{m}^2]$$

$\Delta T = T_h - T_c$

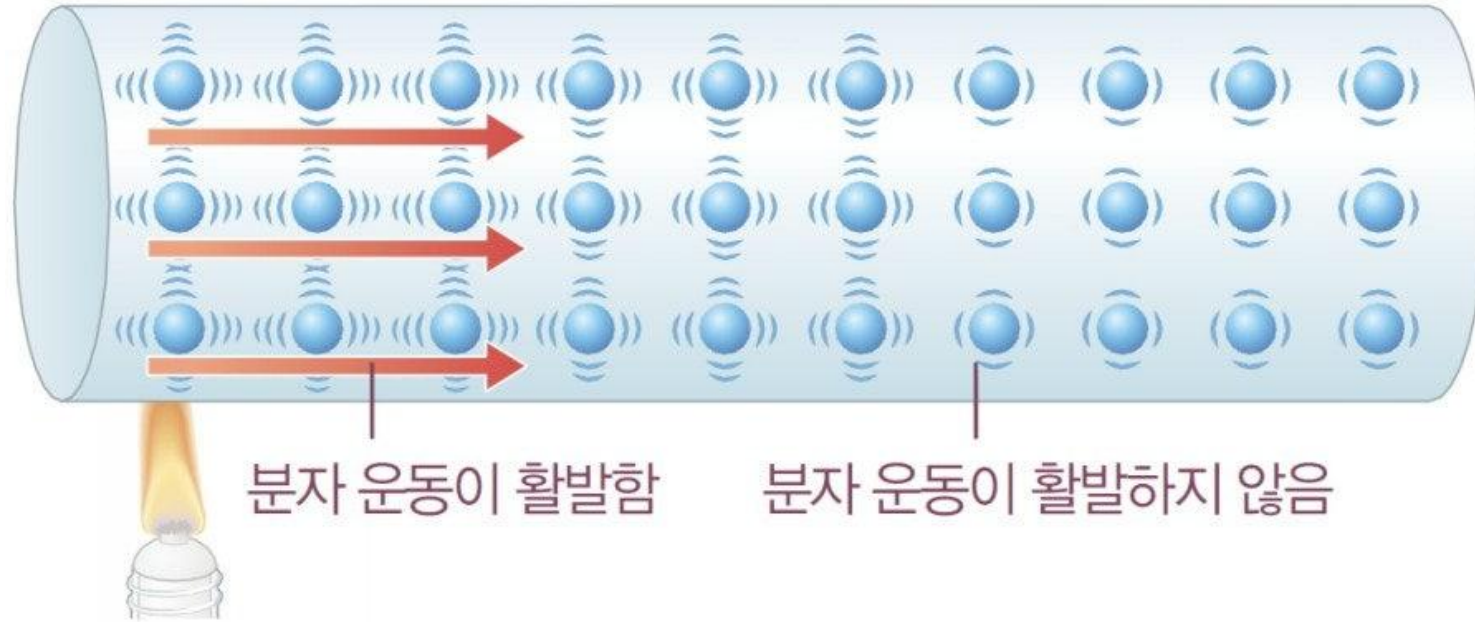
$$\text{As } \Delta x \rightarrow 0, \quad q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

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

# 열 전도율 이해



# 열 전도 원리



# 열 전도율 이해

순서	재료	재료 이미지	$k$ (W/m·K)
1	우레탄 폼		0.02 ~ 0.03
2	물		~0.6
3	유리병		~1.0
4	SUS304		~15
5	후라이팬 (스테인리스)		~15 ~ 20
6	후라이팬 (알루미늄)		~150 ~ 220
7	구리 선		~400

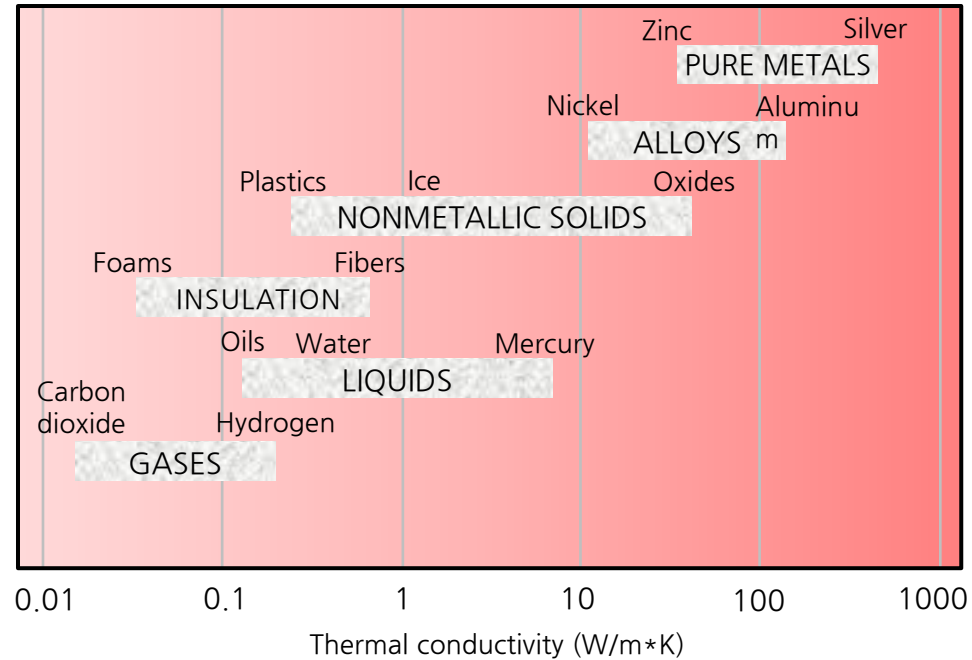
\*  $k$  (W/m·K): 열전달 계수 (conductivity)

# 열 전도의 병목현상 : 공기 단열층

- 표면적의 90%를 차지하는 '공기 단열층'
- 공기의 열전도율( $k \approx 0.026$ )은 금속보다 수만 배 낮아 심각한 온도 단절(Temperature Drop)을 유발합니다.



# 열전도율 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

# 열 전도율 재료 물성치 정의

재료

번호 2 이름 AIR\_25° C-1 색상  

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)

유체 모델 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

물질 이송

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

# 대류의 열전달 이행

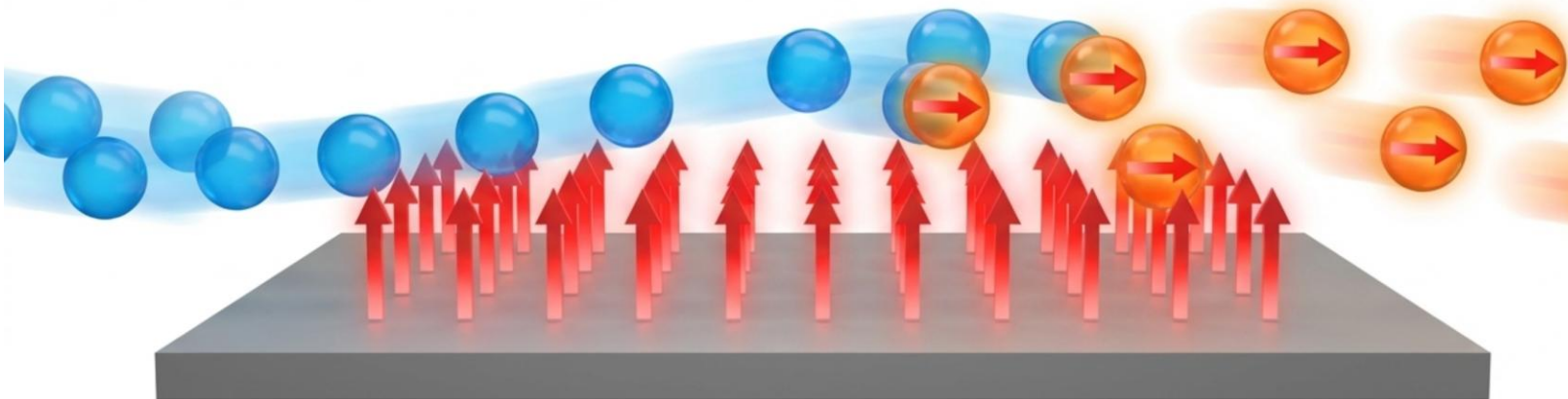
**대류(Convection): 에너지를 직접 수송하는 유체의 역동성**

$$q = h(T_{wall} - T_{\infty})$$

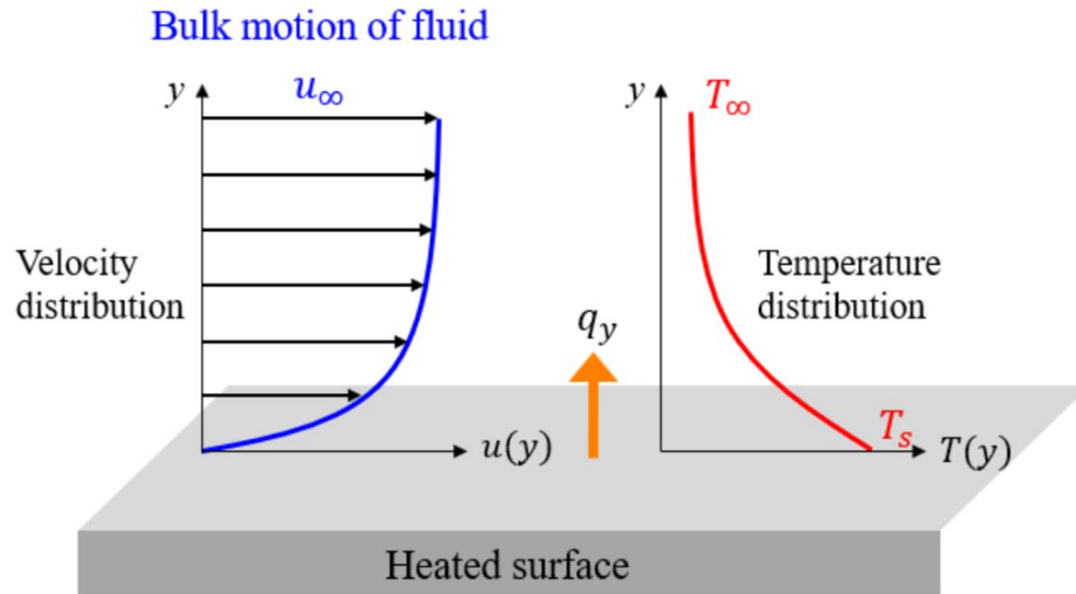
(대류 열전달계수  $h$  의 지배)

표면까지 힘겹게 도달한 열에너지.

이제 유체 입자가 열을 직접 가로채어 물리적인 공간을 이동하며 수송합니다.



# 대류 열전달 현상과 대류 열전달 계수



- Bulk motion of fluid (유체의 운동)  
유체가 실제로 움직이면서 열을 운반하는 효과
- Temperature distribution (유체의 열전달)  
분자 전도 효과

# 대류 열전달계수 이해

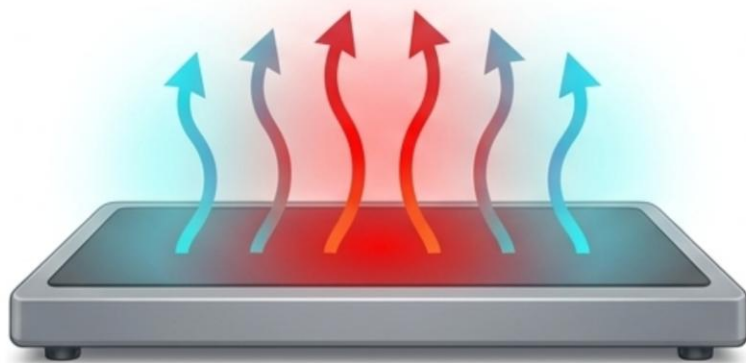


# 대류 열전달계수 구분

## 부력에 의한 느린 흐름 vs 동력에 의한 강제 탈취

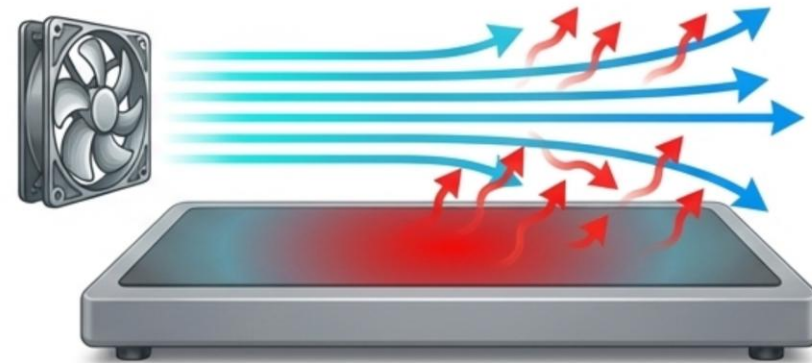
### 자연 대류 (Natural)

- 부력(Buoyancy)에 의한 밀도 차이 이동
- 두꺼운 경계층 정체
- 느린 열적 평형 도달



### 강제 대류 (Forced)

- 팬(Fan) 물리적 동력
- 열 경계층의 무자비한 파괴
- 압도적인 국부 냉각 효율



# 대류 열전달계수 구분

## <Natural Convection>

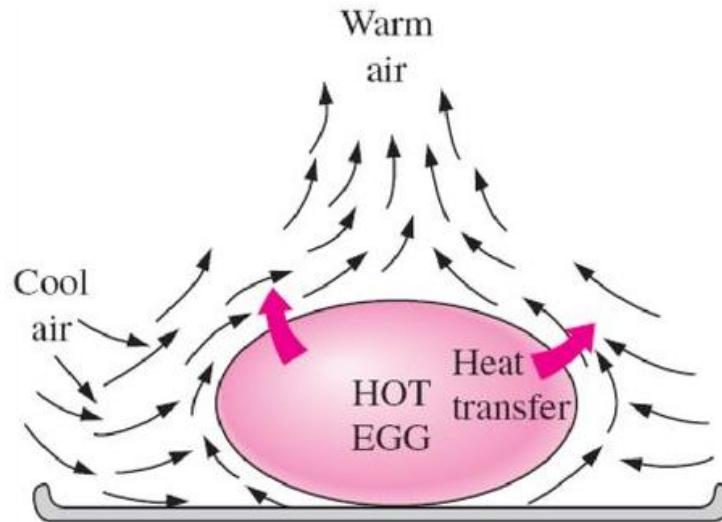


## <Forced Convection>



# 대류 열전달계수 구분

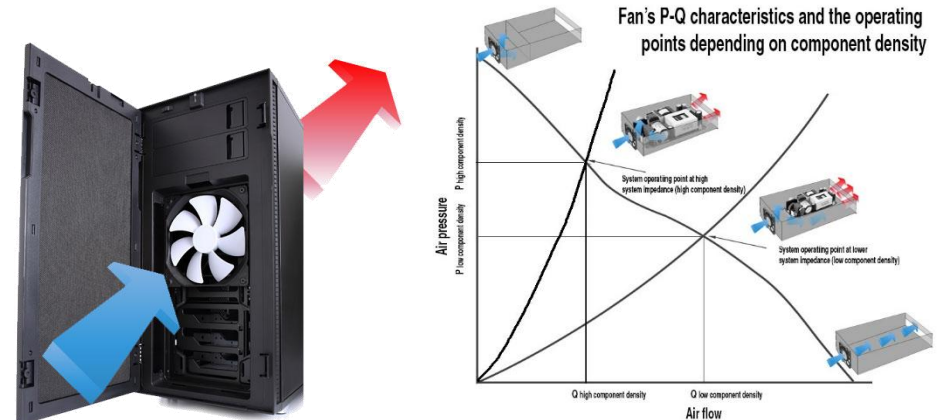
## <Natural Convection>



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

자연대류

## <Forced Convection>

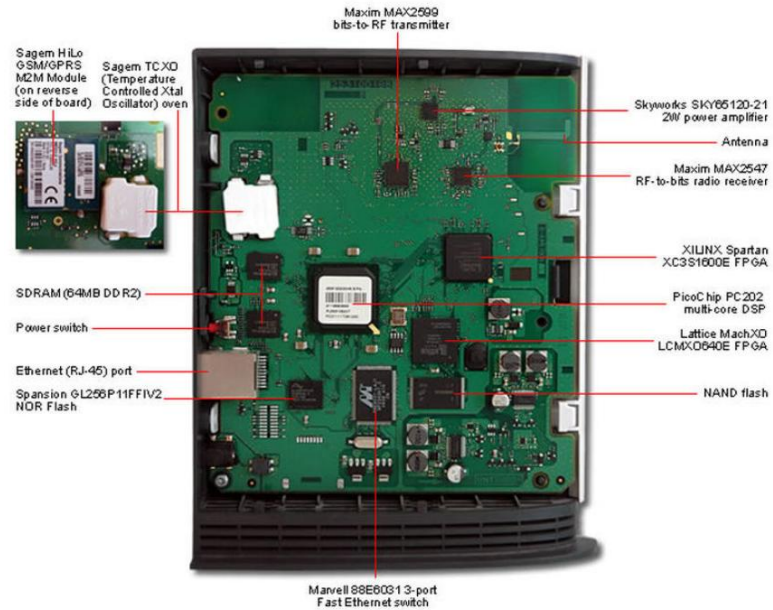


<https://www.engineerlive.com/content/design-system-cooling-using-dc-axial-fans>

강제대류

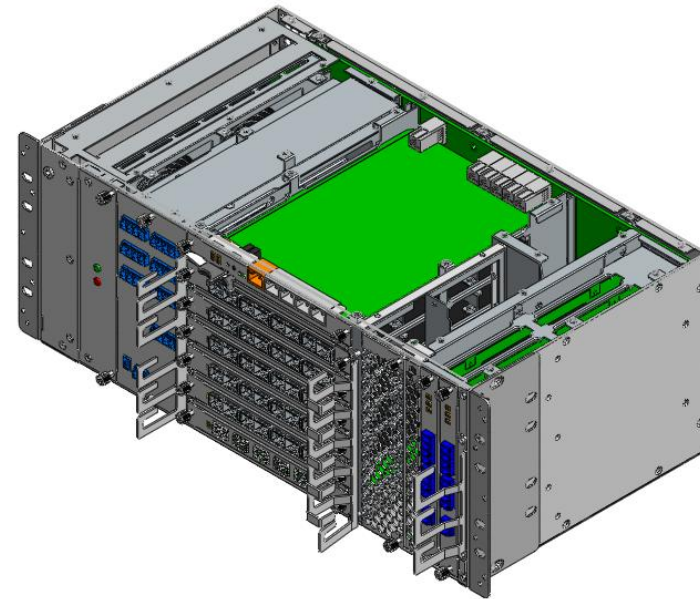
# 대류 열전달계수 구분

## <Natural Convection>



자연대류

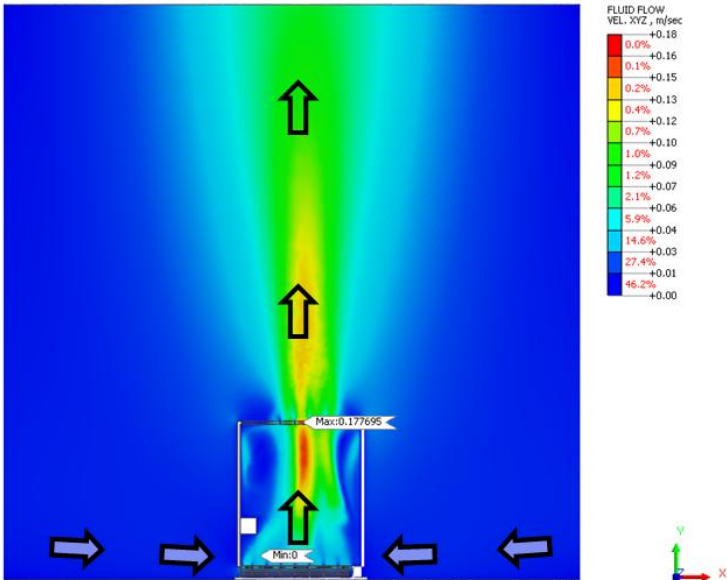
## <Forced Convection>



강제대류

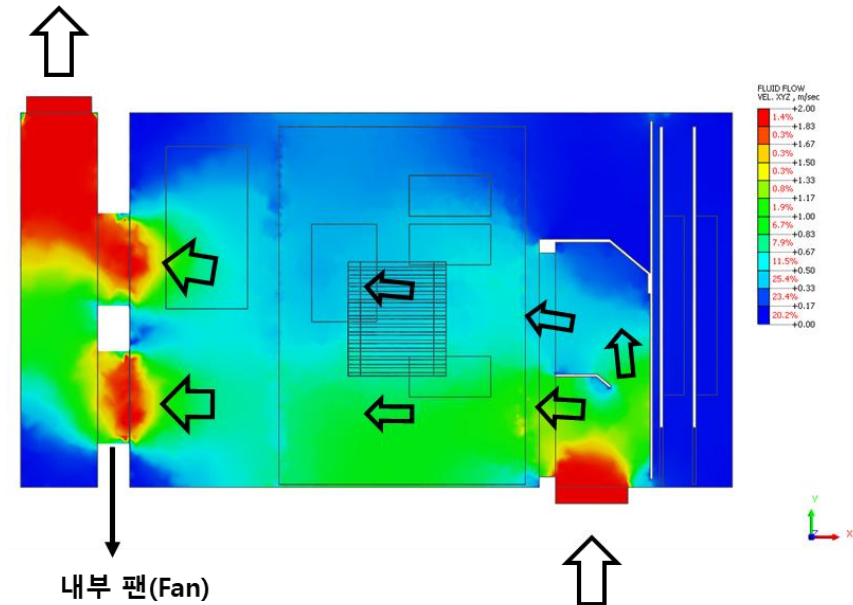
# 대류 열전달계수 구분

## <Natural Convection>



### 자연대류

## <Forced Convection>

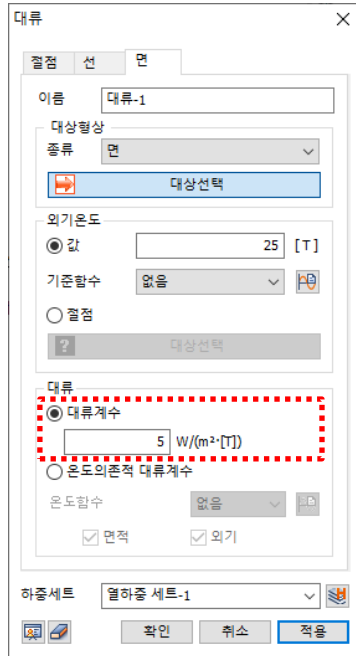


### 강제대류

# 대류 열전달계수 해석조건 적용

## <Natural Convection>

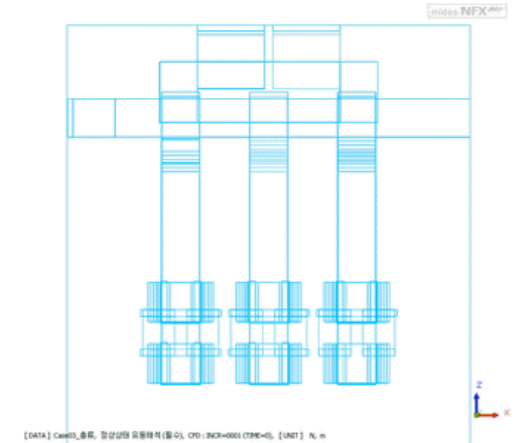
대류조건 h 값 상수 적용 (상승기류 영향 없을 시)



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 위치 별 h 값 계산



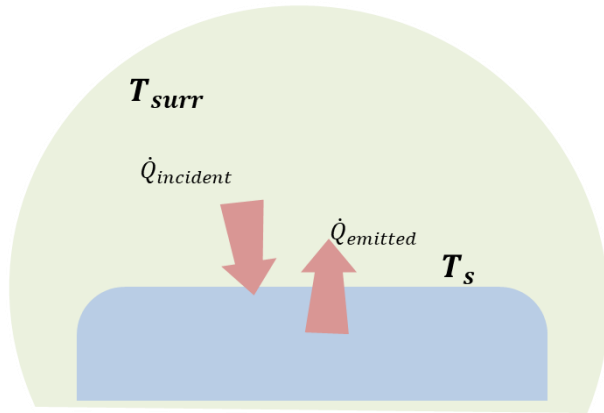
A glowing orange sphere is the central focus, surrounded by several concentric rings of particles that create a ripple effect. The background is a dark blue grid pattern.

# 복사

# 복사에 대한 이해



# 복사에 대한 고민



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

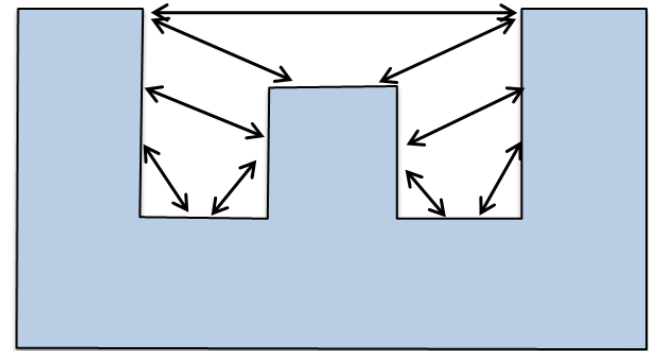
$\epsilon$  : 방사율 ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )

$\sigma$  : 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



# 특별 세션

## 서정세 교수 (Suh Jeong Se)

- 경상국립대학교 기계항공공학부 교수
- 서울대학교 기계공학 학사/석사/박사
- UC Berkeley Visiting Professor



### 전문 분야

- 열유동 및 열전달
- 에너지 시스템 / 신재생에너지
- CFD 기반 해석 및 응용

### 성과 및 위상

- 국제 학술 발표 및 수상 다수
- 공공기관 및 정부 기술 자문위원 활동
- 에너지 및 건설 분야 평가/심의위원 다수 참여

### 핵심 키워드

- Heat Transfer
- Thermal System
- CFD
- Energy Engineering

### 주요 경력

- ✓ 경상대학교 공과대학 학장
- ✓ 융합과학기술대학원 원장
- ✓ 항공특성화대학원 원장
- ✓ 방위산업기술융합연구소 소장

**학계 + 산업 + 정책 경험을 모두 갖춘 국내 열유동 분야 전문가**

# CONTENTS Day-2

## 열 해석의 시작과 끝

---

Session 1. 열은 무엇인가?

Session 2. 방열 및 냉각과 혼합 유동

## 직접 경험해보는 열 유동 해석

---

Session 3. 열 유동 해석 실습

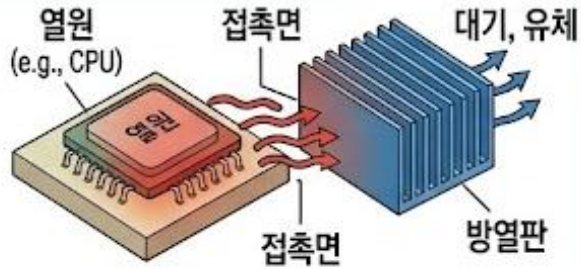
Session 4. 열 및 혼합물 유동 해석 실습

Session 5. 대류 해석 실습

# 방열이란?

# 방열(放熱, Dissipation)의 이해와 핵심 이론

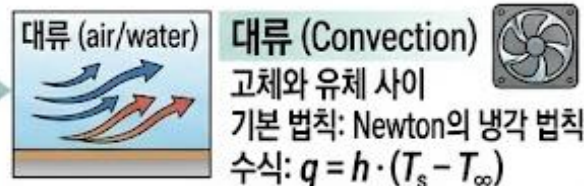
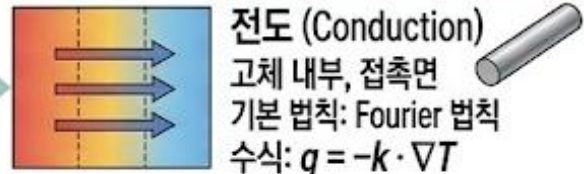
## 1. 방열의 정의 및 목적



정의: 물체의 내부 에너지를 열 형태로 외부로 방출하는 과정 (외부 냉각 포함)  
목적: 소자/기기의 온도 상승 억제, 성능 및 신뢰성 확보



## 2. 열전달의 3대 메커니즘 (방열의 방식)



$\nabla T$ : 온도 구배     $h$ : 대류 계수     $\epsilon$ : 방사율

## 3. 방열 설계 핵심 이론: 열저항 (Thermal Resistance)

열원 ( $T_{source}$ ) (e.g.,  $T_j$ )



$R_{th}$ : °C/W,  $\Delta T = Q \cdot R_{th}$

### 열저항의 개념 및 계산

(Concept and Calculation of Thermal Resistance)

$$T_{source} - T_{amb} = P_{total} \cdot R_{th,total}$$

$P_{total}$ : 총 발열량 (W)

$$R_{th,total} = R_{th,jc} + R_{th,ch} + R_{th,ha} \text{ (°C/W)}$$

$$R_{th,solid} \propto \frac{L}{k \cdot A} \text{ SOLID}$$

$$R_{th,convection} \propto \frac{1}{h \cdot A} \text{ CONVECTION}$$

방열 성능 향상을 위해서는 총 열저항 ( $R_{th,total}$ )을 최소화해야 함

# 생활 속의 방열



# 생활 속의 방역



# 생활 속의 방열



# 생활 속의 방열



# 생활 속의 방열



+



# 전도 + 대류

## Fourier's Law

$$q''_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \nabla T$$

[W/m<sup>2</sup>]      [W/m K]      [K/m]

↑  
Thermal Conductivity

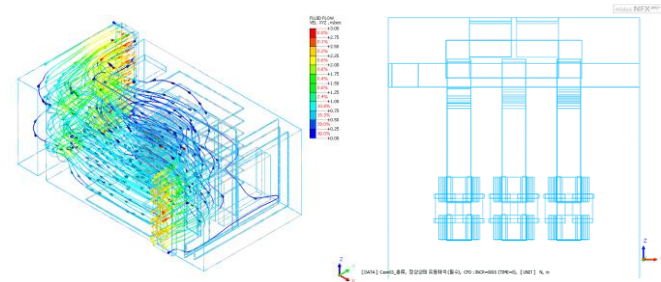
비열	1006	J/(kg·[T])	없음
전도율	0.0242	W/(m·[T])	없음
부유도	0		없음
밀도	0	W/m <sup>3</sup>	없음

## Newton's Cooling Law

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

[W/m<sup>2</sup>]      [W/m<sup>2</sup> K]      [K]

↑  
Heat Transfer Coefficient



# 대표적 방열 설계

## 실무에서의 열 방열 설계

- ✧ 직접 공기 냉각(Direct Air Cooling)
- ✧ 유체 분사 냉각(Impingement Cooling)
- ✧ 냉각 플레이트 (Cold plate)
- ✧ 히트 파이프(heat pipe)
- ✧ 침지 냉각(Immersion Cooling)
- ✧ 열전 냉각(Thermoelectric Coolers)
- ✧ 방열 면전 확장(Extended Surfaces (e.g Heat Sinks))

# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

- 직접 공기 냉각(Direct Air Cooling) : 팬과 같이 강제 대류를 통해 공기로 직접 냉각하는 방법



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

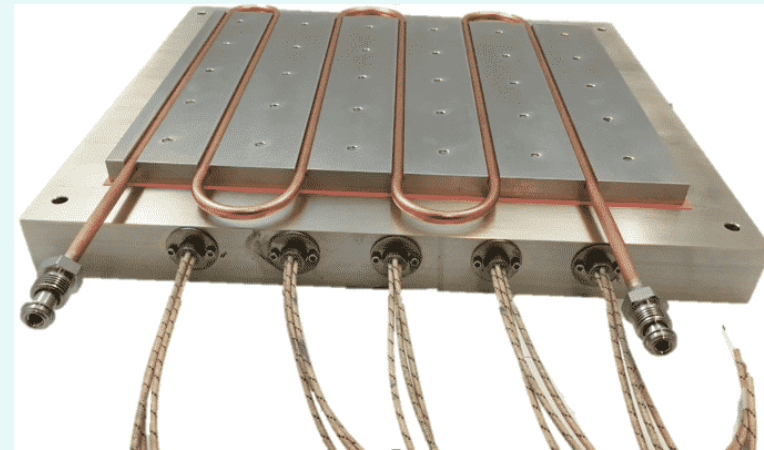
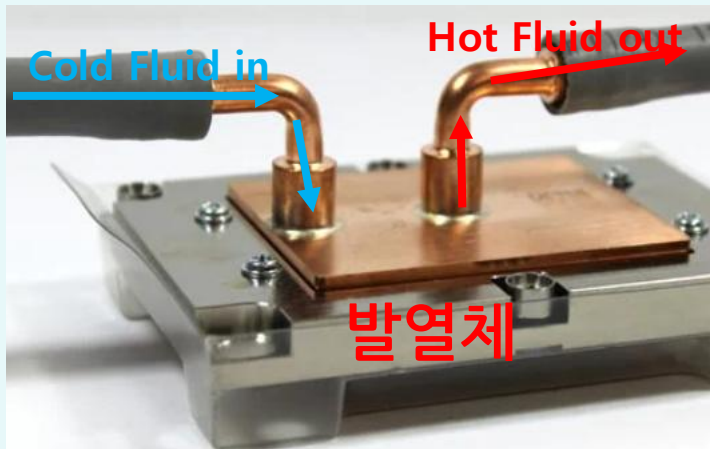
- 유체 분사 냉각(Impingement Cooling) : 발열 장비에 유체를 분사시켜 장비를 냉각하는 방법



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

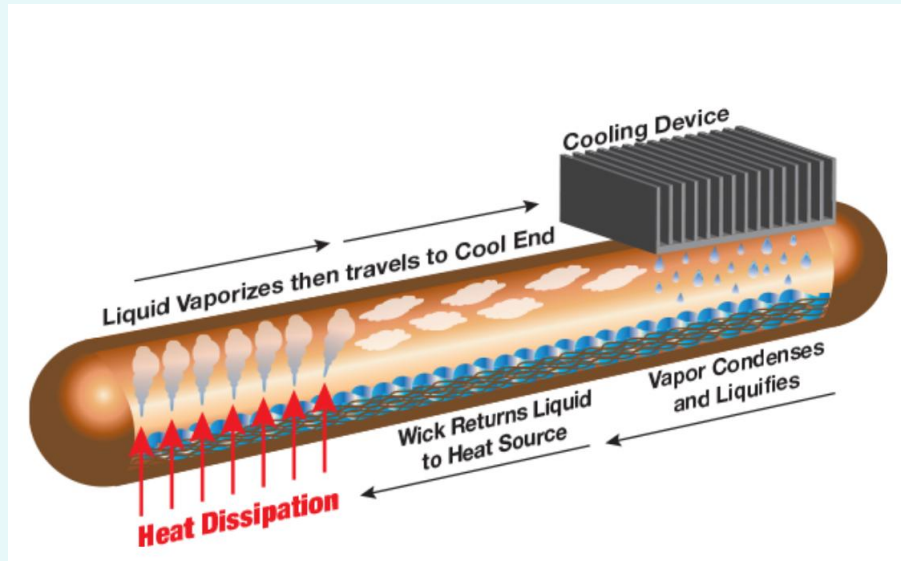
- ❖ 냉각 플레이트 (Cold plate) : 금형 구조물 내부 유체를 흘려 보내 냉각하는 방법



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

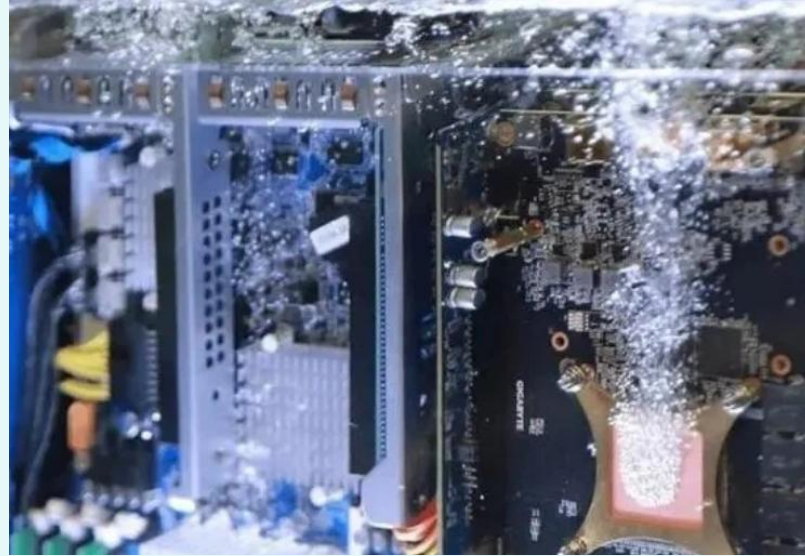
- ❖ 히트 파이프(heat pipe) : 유체의 상변화를 이용한 냉각 방법



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

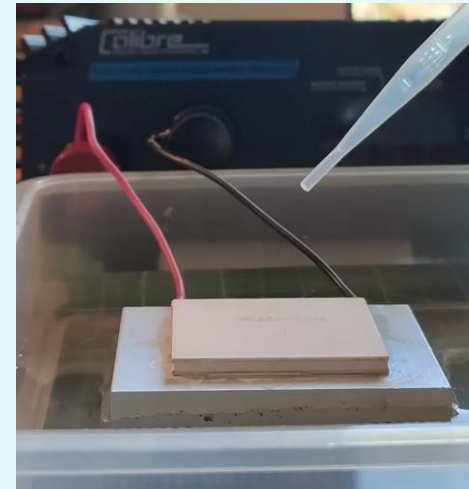
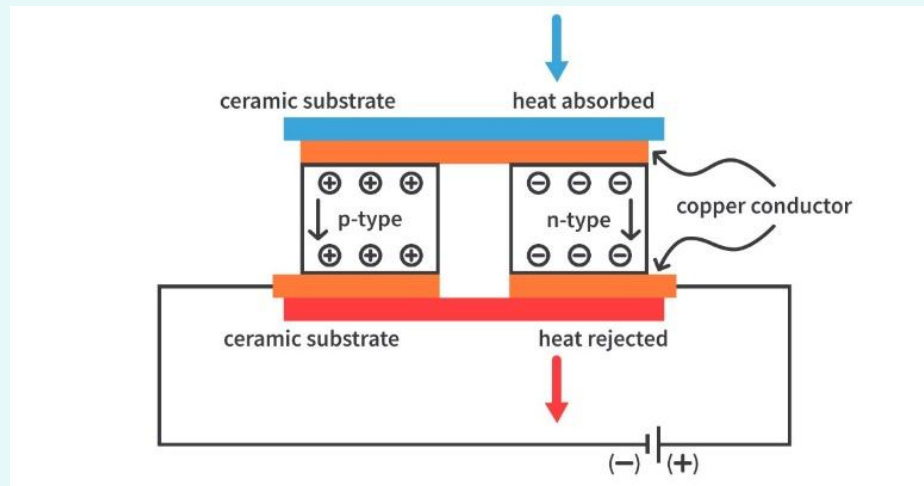
- ❖ 침지 냉각(Immersion Cooling) : 발열체(전자장비)를 직접 유체 (부도체)에 담궈 냉각 시키는 방법



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

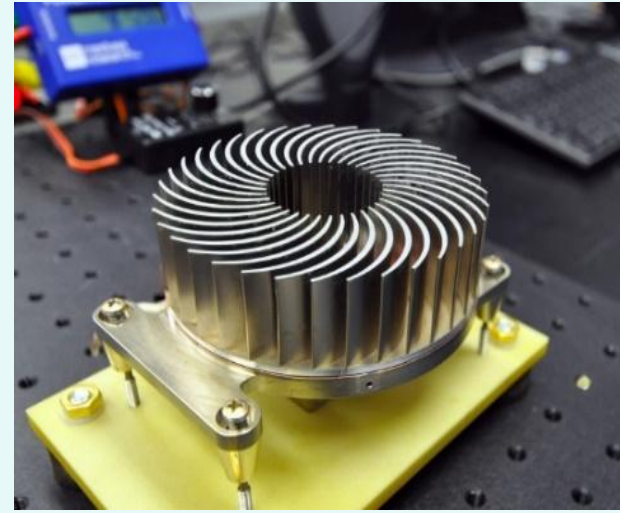
- 열전 냉각(Thermoelectric Coolers) : 전류 에너지의 특성을 이용하여, 발열/냉각 시키는 방법(펄티어 소자)



# 대표적 방열 설계 방안

## 실무에서의 열 방열 설계

- 방열 면적 확장(Extended Surfaces (e.g Heat Sinks)) : 유체와 맞는 면적을 넓혀 냉각시키는 방법



동력 필요 X, 붙이기만 하면 되는 가장 간단한 방법

# 전구 Heat sink 장비 해석(외기 자연대류 열 유동 해석)

## Overview

### 해석 목적

- 광원에 의한 방열 설계 해석
- CFD 해석을 이용하여 Heat sink 방열 설계 성능 확인

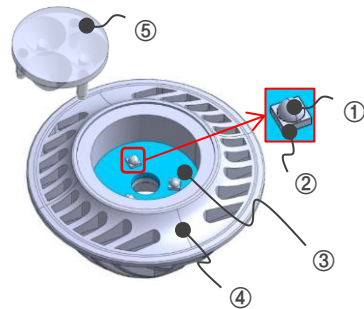
### 해석 조건

- 대류계수 :  $20 \text{ W/m}^2[\text{T}]$
- LED PKG 초기온도 : 고정온도  $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- 메탈 PCB의 열전도도 :  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

### 해석 종류

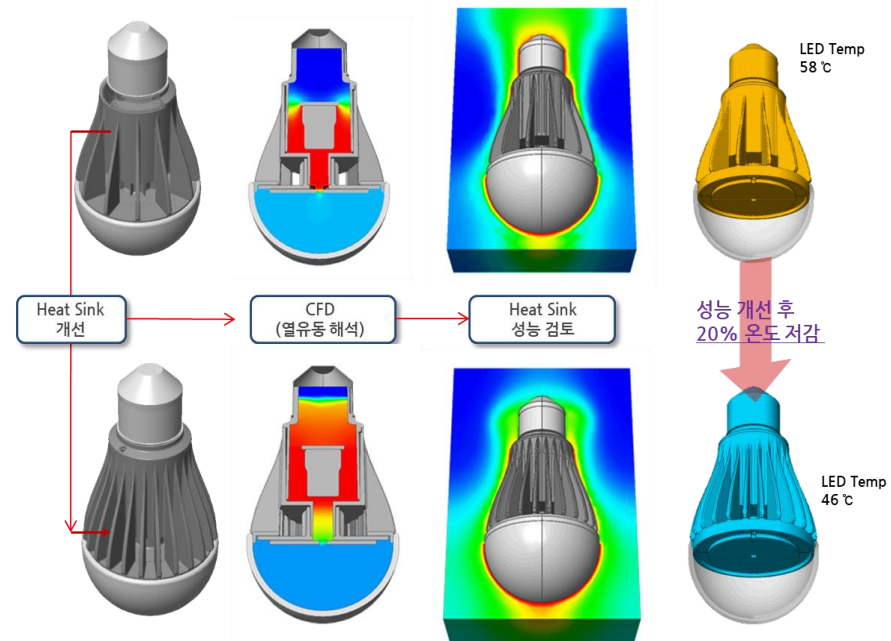
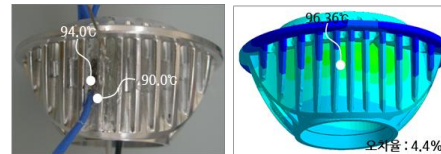
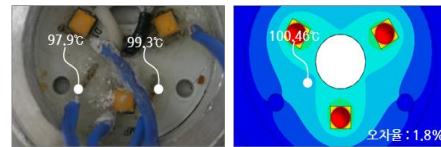
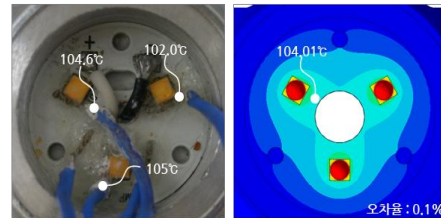


- 자연대류 열 유동 해석
- 구조물 열전달



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



# 광원장비 열 전달 해석(외기 자연대류 열 유동 해석)

## Overview

### □ 해석 목적

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

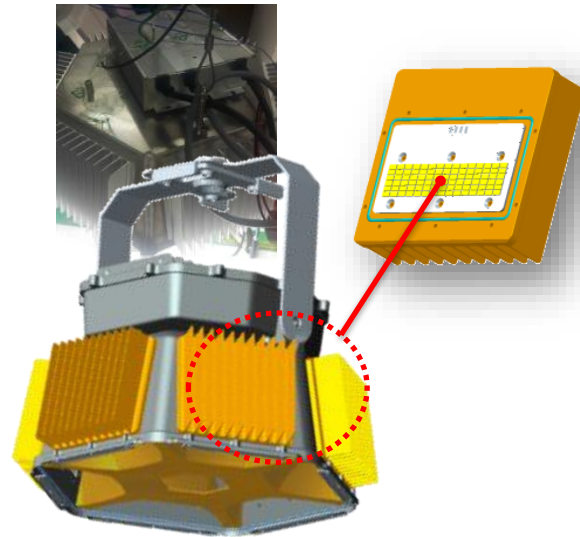
### □ 해석 조건

- 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 종류

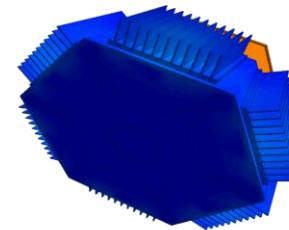


- 자연대류 열 유동 해석
- 복합 열 전달 해석

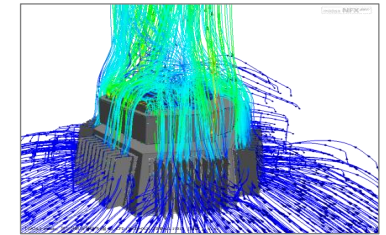


해석 모델링

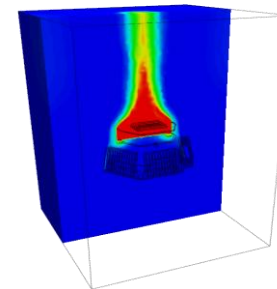
- 유체의 온도 및 속도 분포 확인 : 히트싱크 성능 평가
- 고체부 온도 평가를 통한 정션온도 안전성 평가



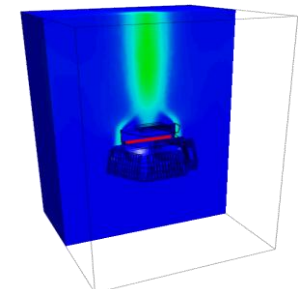
<고체부 온도>



<고체부 주변 기류 평가>



<전체 온도 분포>



<유체 속도 분포>

[DATA] ready, 정션온도 유동해석(물-G), CFD: PCH=0004 (TYPE=2,36000), [UNIT] K, m

INFX

# 배전 시설 내부 열 전달 해석(내기 강제대류 열 유동 해석)

## Overview

### □ 해석 목적

- 배전 시설 내부 발열체 해석
- 장비 내부 열원에 의한 열전달 해석

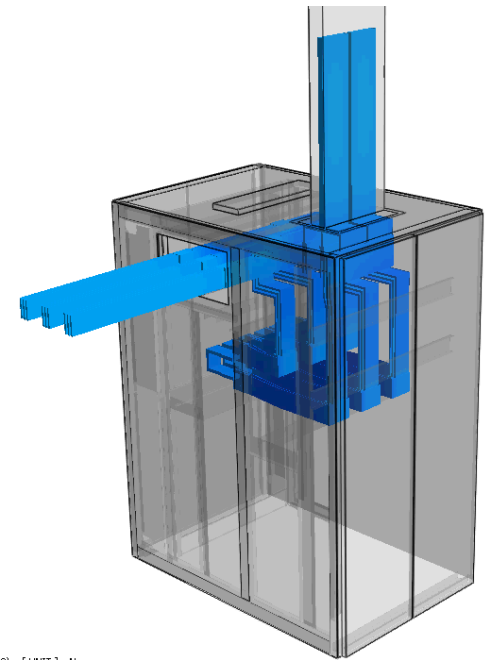
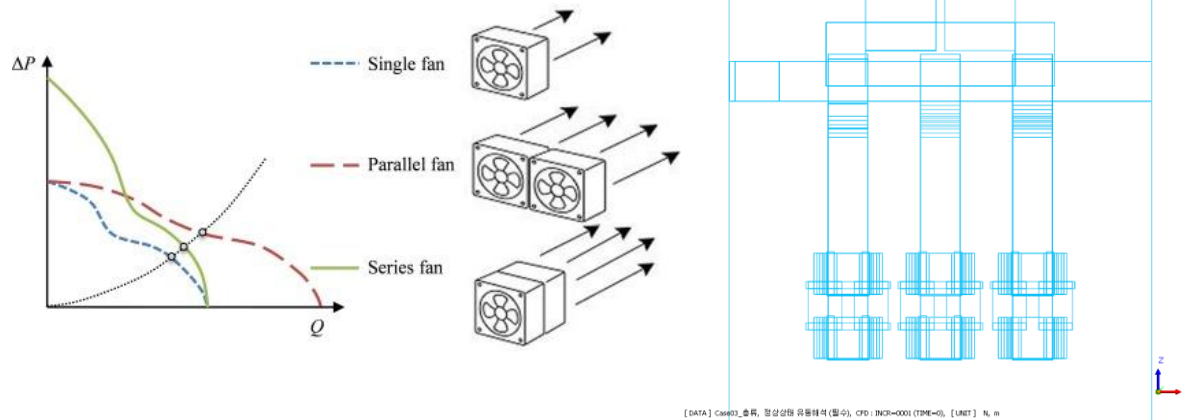
### □ 해석 조건

- 열에 의한 자연 대류 조건
- 부유도 조건을 부여한 열 대류 현상 모사
- 팬 경계조건 부여를 통한 방열 조건 부여

### □ 해석 종류



- 강제 대류 열 유동 해석
- 열 유동 해석



=0.2), [UNIT] N, m

# 배전 시설 내부 열 전달 해석(내기 강제대류 열 유동 해석)

## Overview

### 해석 목적

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

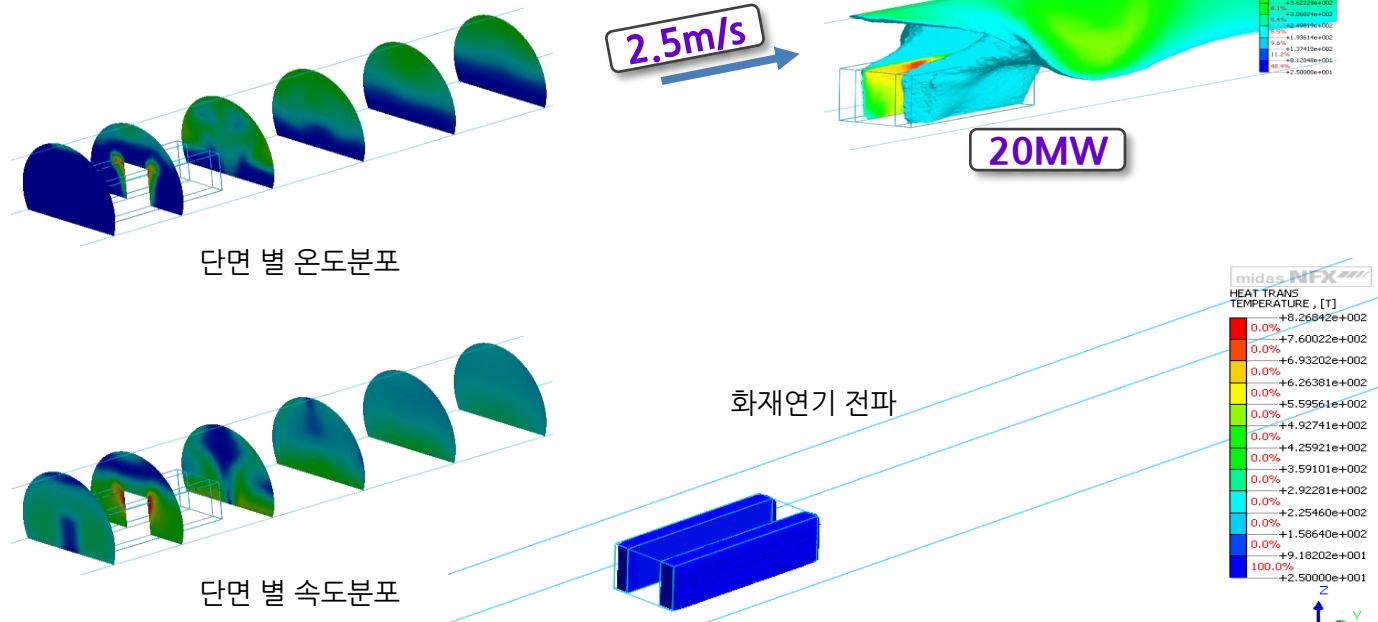
### 해석 조건

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

### 해석 종류



- 강제대류 열 유동 해석
- 혼합물 해석



[ DATA ] 20M, 과도상태 유동해석 (필수), CFD : INCR=0001 (TIME=0.2), [ UNIT ] N, m

# 배전 시설 내부 열 전달 해석(내기 자연대류 열 유동 해석)

## Overview

### 해석 목적

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

### 해석 조건

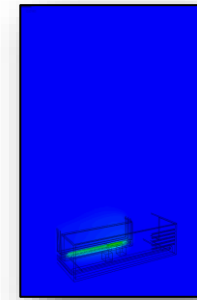
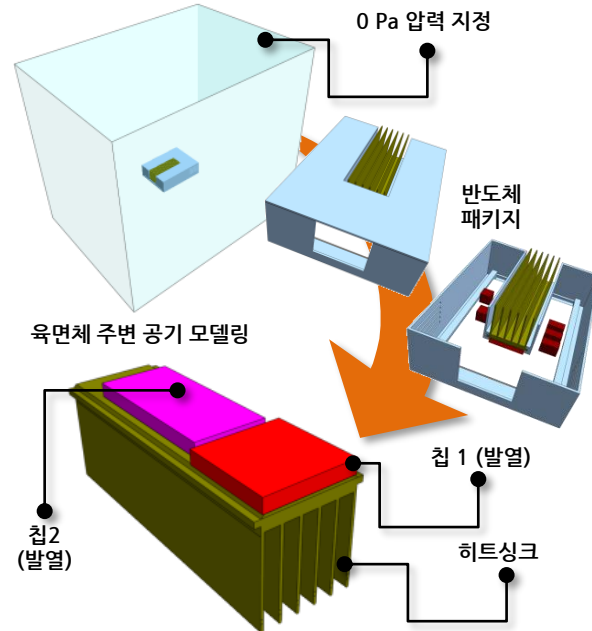
- 모델링 : 2D Solid Element
- 자연 대류를 위한 비압축성 이상기체 모델
- 외부 공기 모델링 후 최 외곽 벽면 압력 0 Pa 적용
- 25°C 외부 공기 모델링

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

### 해석 종류



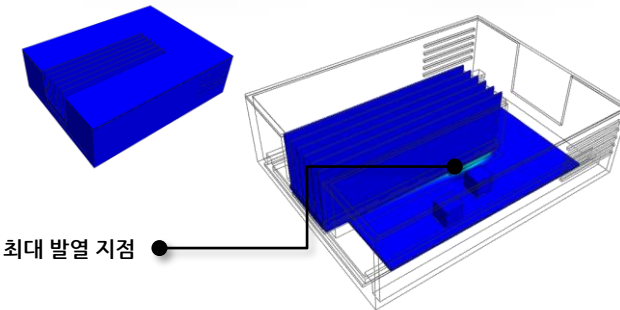
- 자연대류 열유동 해석
- 복합열전달 해석



<열 기류 온도 분석>



<열 흐름 유선 분석>



칩 최대 발열 지점

<시스템 내부 온도 검토>

# 혼합물이란?

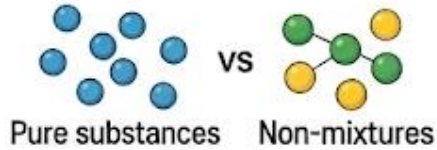
# 혼합법칙에 대한 이해



출처 : youtube YTN 사이언스

# 혼합물이란?

## 혼합물 (Mixture)



- 두 개 이상의 순물질(원소, 화합물)이 화학 반응 없이 섞여 있는 물질  
(Substances formed by physically)
- 성분 물질의 성질을 그대로 가짐  
(Combining compounds)  
Retain the properties of constituent substances)
- 물리적 방법으로 분리 가능  
(Separable by physical methods)

## 균일 혼합물 (Homogeneous Mixtures/Solutions)



용액  
(Solution)

• 조성이 고르고, 어느 부분이나 성질이 같음  
(Uniform composition, same properties throughout)



Salt



Sugar in water



Air  
(nitrogen,  
oxygen..)  
(oxygen, etc.)



Vinegar



불균일 혼합물  
(Heterogeneous Mixtures)

• 조성이 고르지 않음, 부분마다 성질이 다름  
(Non-uniform composition, different properties across parts)



Muddy water



Milk

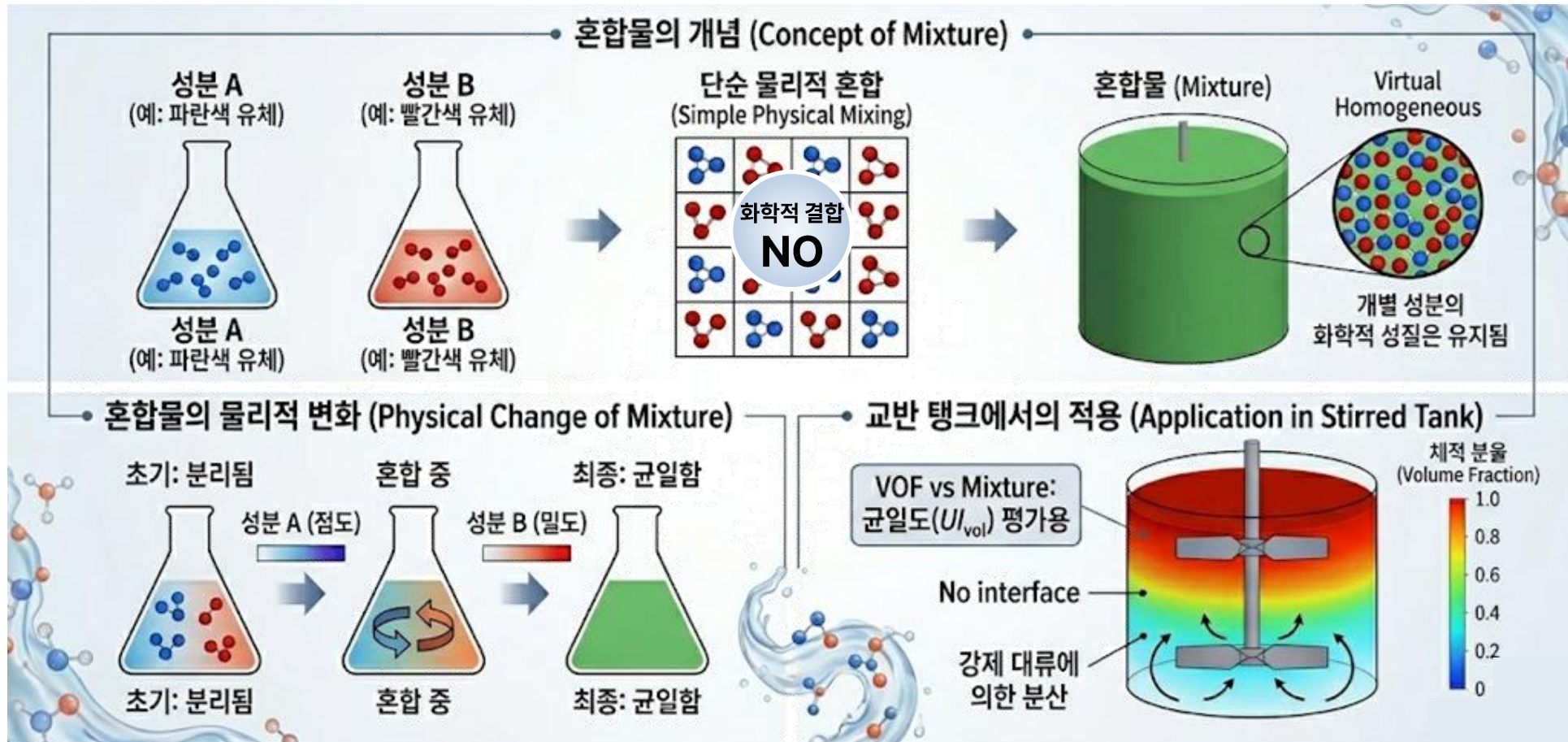


Salad dressing



Granite

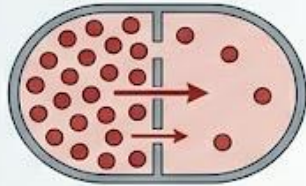
# 혼합물 이해



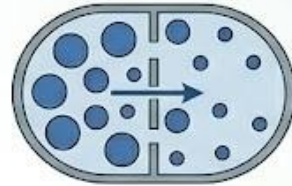
# 혼합법칙에 대한 이해

## 물질의 확산 원리 비교 (농도차 vs 밀도차 vs 압력차)

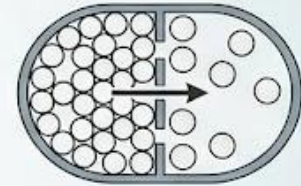
1. 농도차 (분자 확산)  
(예: 농도  $\Delta C$ )



2. 밀도차 (부력 확산)  
(예: 밀도  $\Delta \rho$ )



3. 압력차 (압력 확산)  
(예: 압력  $\Delta P$ )



비교 구분	1.1. 농도차 (분자 확산)	1.2. 밀도차 (부력 확산)	1.3. 압력차 (압력 확산)
핵심 정의	분자의 무작위 운동으로 고농도에서 저농도로 이동	부력/중력 차이로 인한 물리적 이동 (상 분리)	압력 구배에 의한 강제 대류 이동
주요 구동력	농도 구배 ( $\nabla C$ ) (Chemical Potential 차)	밀도 구배 ( $\nabla \rho$ ) 및 중력 ( $\vec{g}$ ) (부력)	압력 구배 ( $\nabla P$ ) (전압/정압 차)
모델링	CFD 모델링 (NFX)	Mixture/VOF 모델 내 슬립 속도 (Slip Velocity) 모델	압력 기반 지배 방정식 (Navier-Stokes)의 대류 항
특성	정량적 특성 매우 느림, 분자 수준의 최종 균일화	보통 ~ 빠름, 상 분리 유발, 교반 효율 저하	빠름, 대류 혼합의 시발점, 유동 흐름 형성

# 물질 이송 방정식 (Fick's Second Law)


$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

시간에 따른 농도 변화율  
(Rate of Concentration Change Over Time)

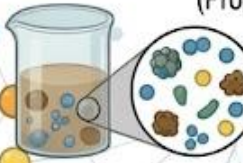
확산 계수  
(Diffusion Coefficient, constant, m<sup>2</sup>/s)

농도 곡률  
(Concentration Curvature, spatial second derivative)

### 확산 패턴 (Diffusion Patterns)



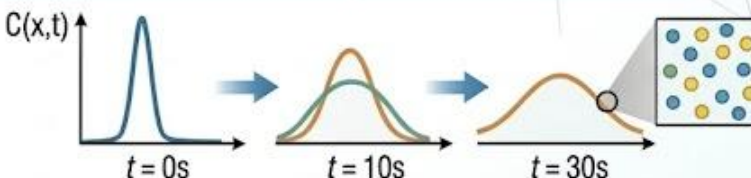
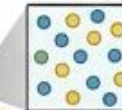
균일 확산  
(Homogeneous like Sugar)

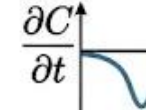


불균일 확산  
(Heterogeneous Diffusion, like Muddy water)

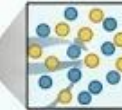
물질의 성질(D)에 따라 확산 속도와 패턴이 결정됨  
(Properties (D) determine speed and pattern)

### 개념 시각화 (Conceptual Visualization)




$\frac{\partial C}{\partial t} \propto \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$




농도 구배(∇C)의 곡률에 비례하여 농도가 변화  
(Concentration changes proportional to the curvature of the gradient)

### 예시 및 적용 (Example & Application)



시간에 따른 농도 평활화 분석  
(Volume fraction)

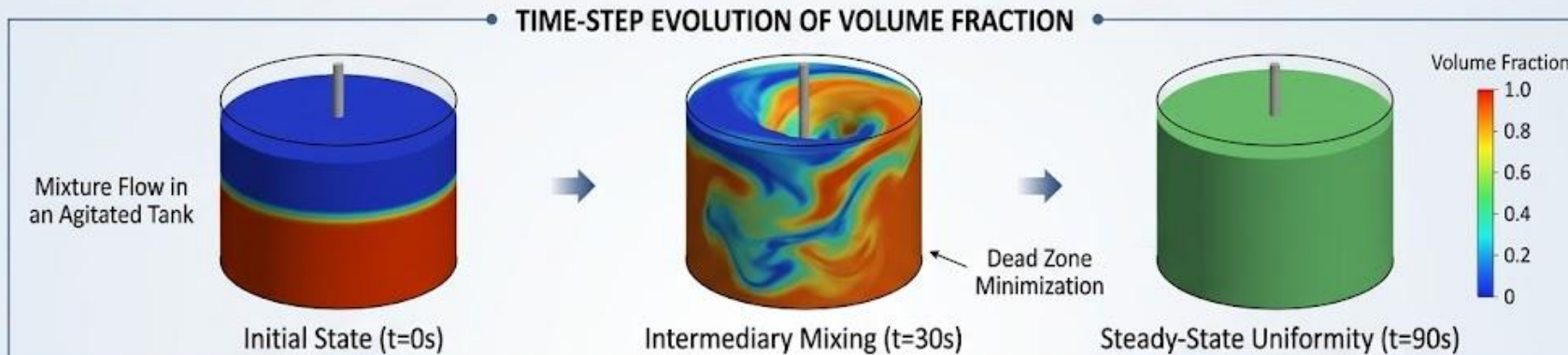
혼합물 교반기 해석  
(Mixture Agitator Analysis)



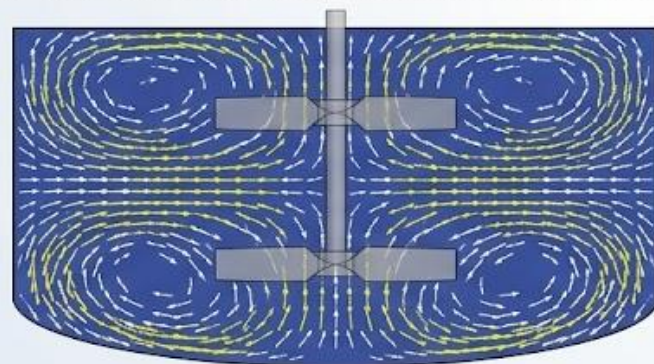
사구역(Dead Zone) 최소화  
(Dead Zone Minimization)

# 혼합 과정

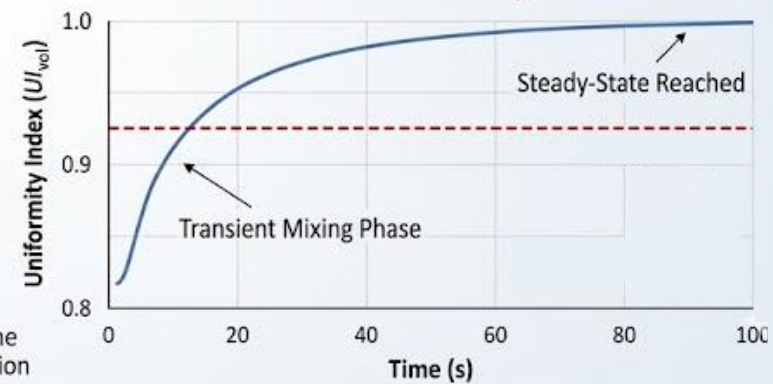
## VISUALIZING MIXTURE FLOW: FROM TRANSIENT MIXING TO UNIFORMITY



• VELOCITY VECTOR DISTRIBUTION & CIRCULATION PATH



• QUANTITATIVE ANALYSIS:  $UI_{vol}$  VS. TIME



# NFX 혼합물 설정

1. **질량 분율의 기본 정의 수식**  
혼합물 내에서 특정 성분  $i$ 가 차지하는 질량의 비율을 나타내는 기본 식

$$w_i = \frac{m_i}{M_{total}}$$

2. **총 질량의 구성**  
전체 질량은 각 성분들의 질량을 모두 더한 값과 같다.

$$M_{total} = m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_{j=1}^n m_j$$

3. **질량 분율의 성질**  
모든 성분의 질량 분율을 합산하면 반드시 1이 되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

번호	이름
1	Alloy Steel
2	AIR_25°C-1
3	AMMONIA_VAPOR_25°C-1
4	CARBON_DIOXIDE_25°C-1

① 가장 먼저 재료들을 추가

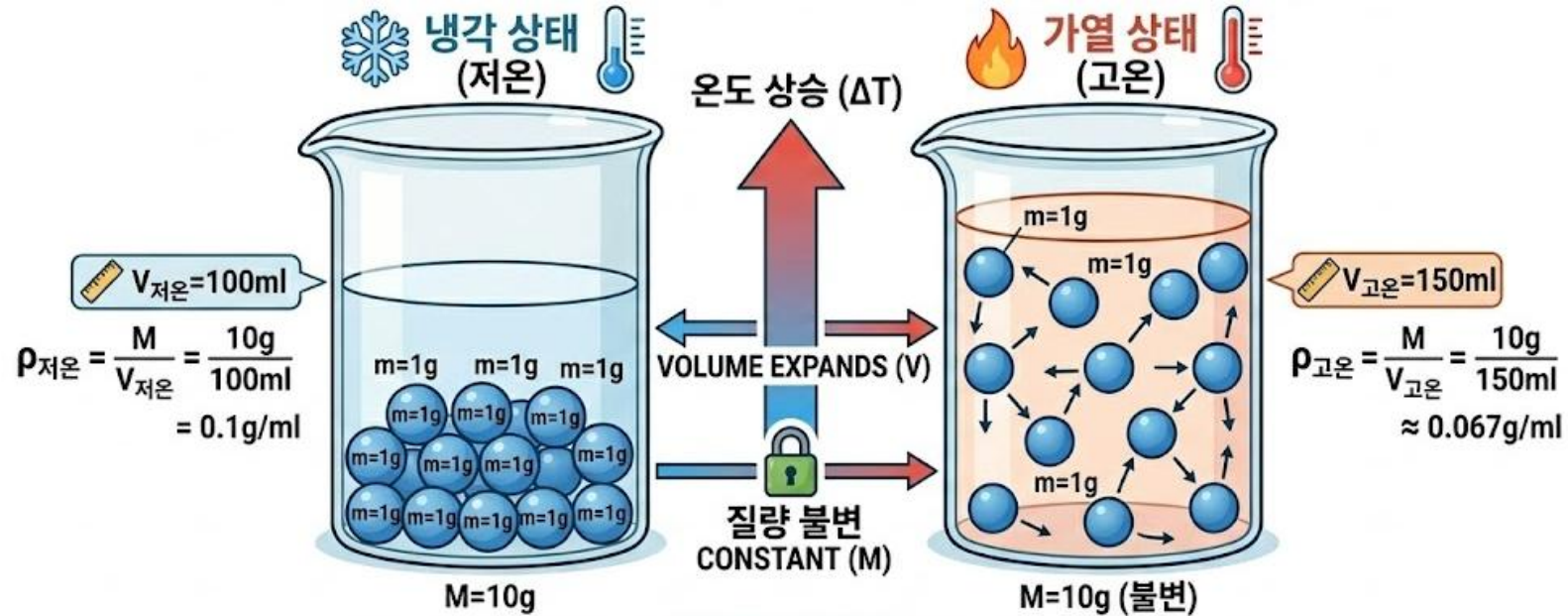
② 유동해석-혼합물-혼합물 정의 클릭

③ 혼합물 관리 항목 창에서 생성 클릭

④ 추가했던 재료들 중 혼합물로 사용할 유체들 추가 및 질량 분율 설정

**Tip)** 혼합물이 분리된 상태로 초기 조건을 지정하고 싶을 때, 사용자 정의 함수로 초기 필드 설정 가능

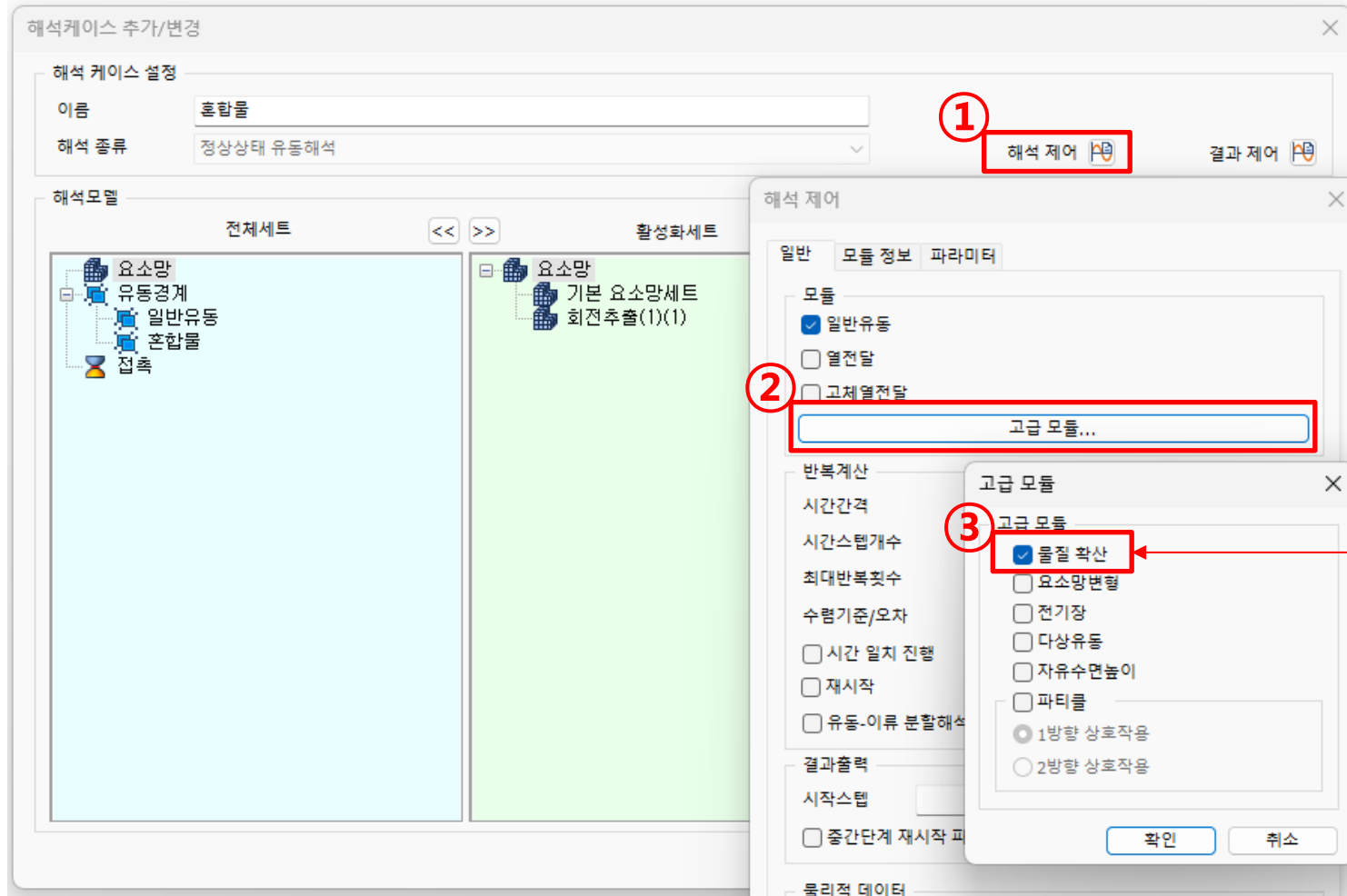
# 왜 부피가 아닌 질량 분율을 쓸까?



## 결론: 신뢰성

- ✓ 질량은 보존되며 온도/압력(T/P)의 영향을 받지 않습니다.
- ✓ 부피는 T/P에 따라 변하므로 분율이 부정확해질 수 있습니다.
- ✓ 질량 분율 ( $M_i / M_{\text{total}}$ )은 안정적이고 정확한 계산을 보장합니다.

# NFX 혼합물 설정



① 해석 제어 클릭

② 고급 모듈 클릭

③ 물질 확산 체크

※ 물질 이송 방정식(Fick's 2nd law)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

# 혼합물 vs 다상 유동 비교

혼합물 유동 (극성이 같음 or 무극성)

midas NFX

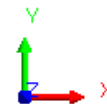
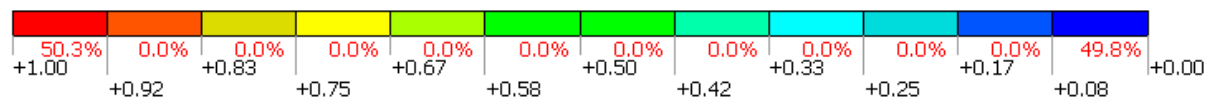


다상 유동 (극성이 다름)

midas NFX



VOLUME FRACT  
1, None



[DATA] 정상상태 유동해석-1, 정상상태 유동해석 (필수), CFD : INCR=0001 (TIME=0), [UNIT] N, m

# 혼합 모델 vs VOF 모델

## VOF MODEL VS. MIXTURE MODEL: KEY DIFFERENCES IN STIRRED TANK SIMULATION

Multiflow in a stirred tank approaches

### MIXTURE MODEL (Interpenetrating Phases)

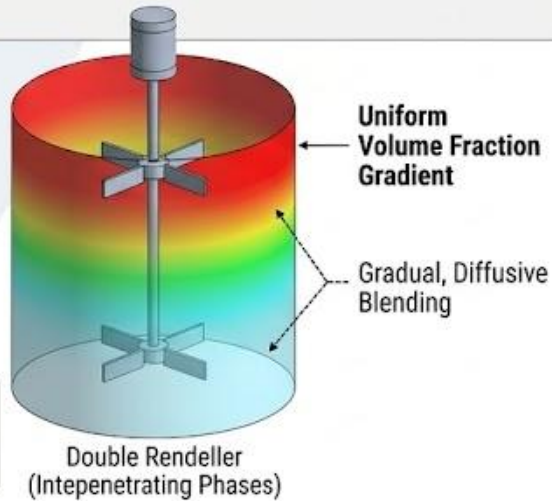
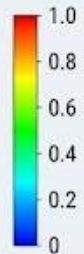
Physical Hypothesis: Virtual Single Fluid



$$\rho_m = \sum \alpha_i \rho_i$$

$$\mu_m = \sum \alpha_i \mu_i$$

Volume Fraction

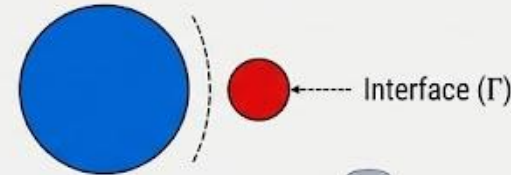


Best For:

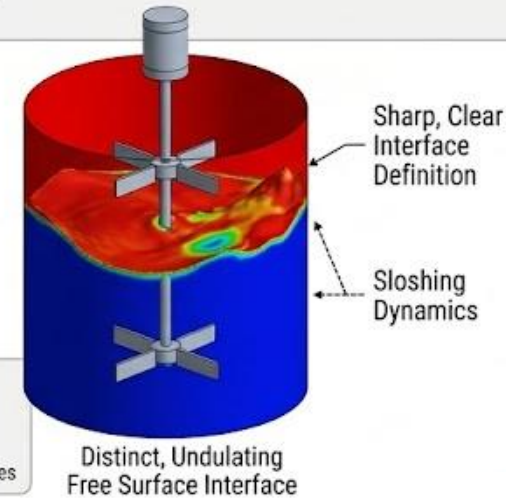
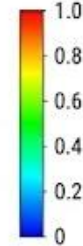
- Homogeneous Mixing
- Concentration Uniformity
- Slip Velocity Calculation

### VOF MODEL (Interface Tracking)

Physical Hypothesis: Distinct Phases



Volume Fraction

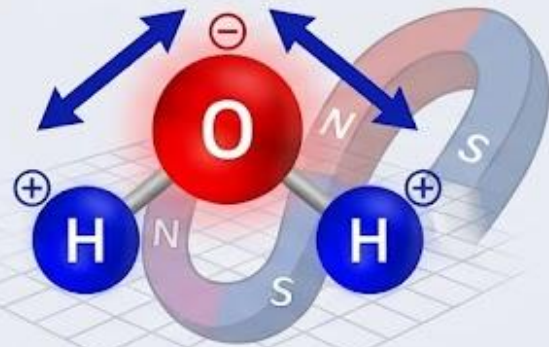


Best For:

- Free Surface Flow
- Sloshing
- Bubble Dynamics
- Non-interpenetrating Phases

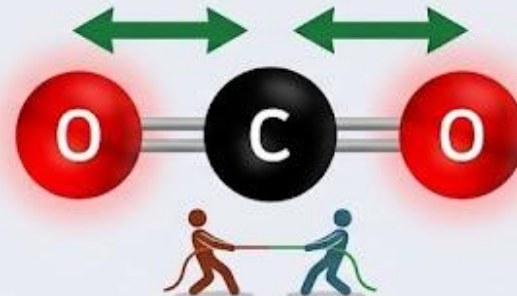
# 극성에 대한 이해

1. 극성 분자 (Polar Molecule)  
- 자석처럼 나뉘는 힘!



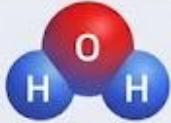



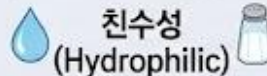
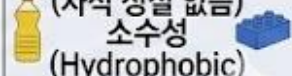
비대칭 구조  
자석 같은 부위별 전하 분리

2. 무극성 분자 (Non-polar Molecule)  
- 대칭되어 상쇄되는 힘!



대칭 직선형 구조  
전하 분포 균일 (상쇄)

3. 성질 비교 및 일상생활 예시

극성 분자 (물과 친함)	무극성 분자 (물과 안 친함)
 Water H <sub>2</sub> O	 Carbon Dioxide CO <sub>2</sub>
전하 분포 비유 	전하 분포 비유 
부분 전하로 '자석' 성질 친수성 (Hydrophilic) 	전하 쏠림 없음 (자석 성질 없음) 소수성 (Hydrophobic) 
예: 물, 소금, 에탄올	예: 기름, 지방, 플라스틱

# 유체 탱크 혼합물 유동 해석

## Overview

### 해석 목적

- 혼합 탱크의 물질 혼합 성능 평가
- 형상 수정 및 물질 농도 평가

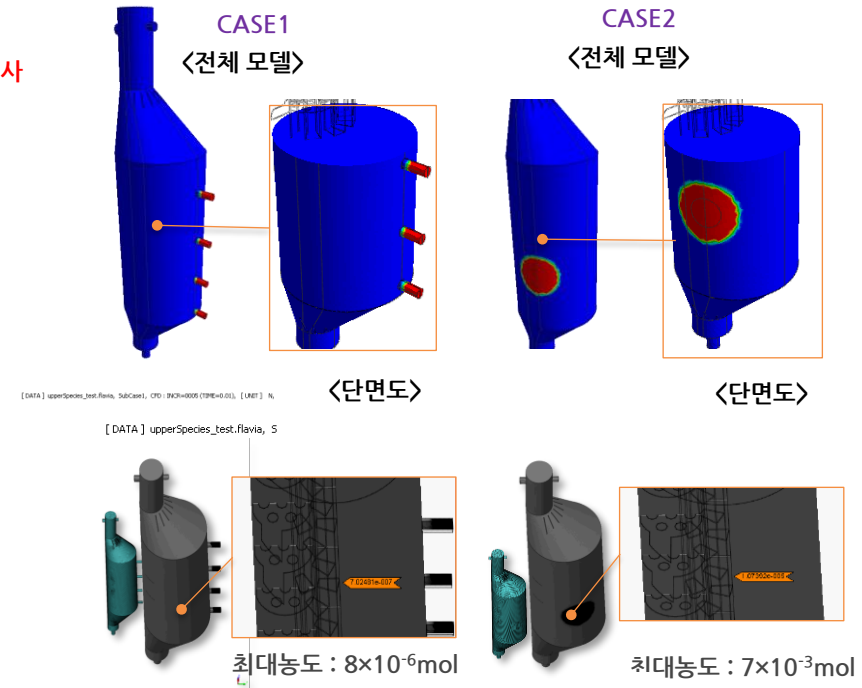
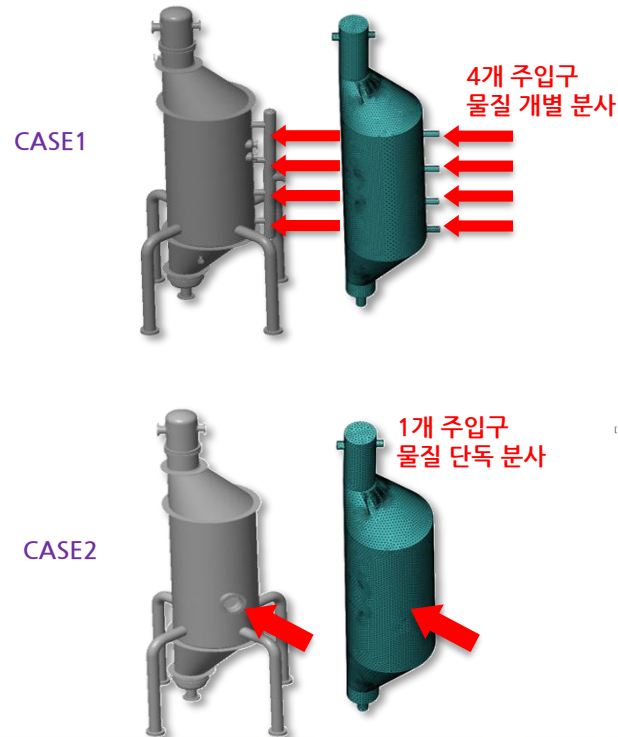
### 해석 종류



- 일반 유동 해석
- 혼합물 해석

### 해석 조건

- 혼합물 유동 해석
- Case 1: 유입구 소형 4개
- Case 2: 유입구 대형 1개



# 가스 혼합 해석

## Overview

### 해석 목적

- 요소망변형과 혼합물 해석을 활용한 가스 혼합해석
  - 서로 다른 유체 유입 시 혼합 현상 검토
  - 요소망 변형 기능을 활용하여 유체 혼합

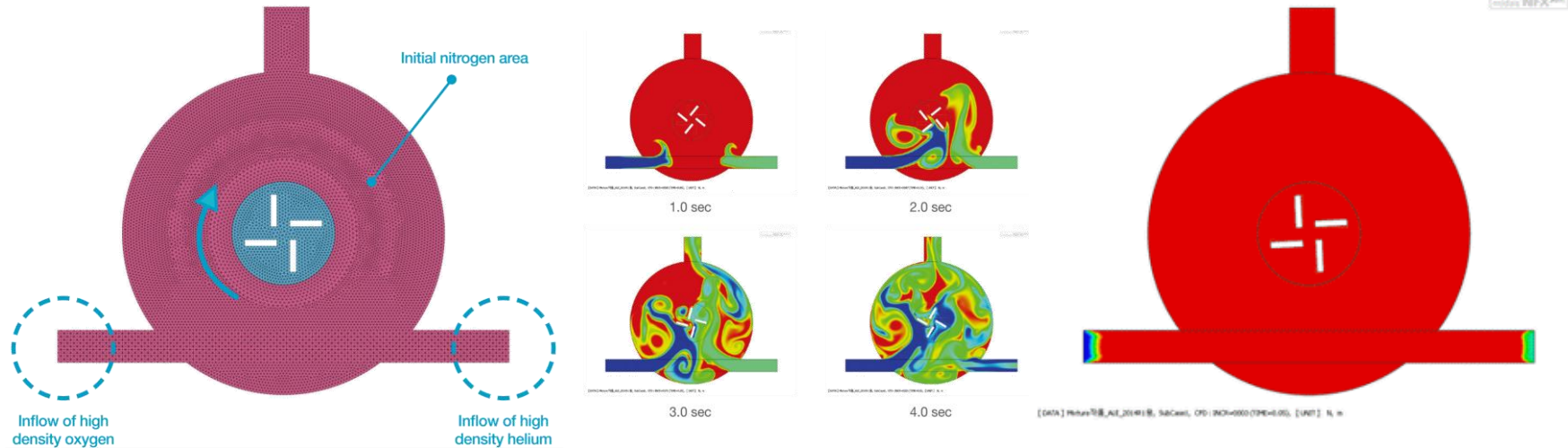
### 해석 조건

- 혼합물 유동 해석(산소, 헬륨, 질소)
- 초기 조건: 내부 질소 충전 상태
- 입구 조건: 서로 다른 밀도의 가스 유입
- 출구 조건: 압력 조건
- 회전체 모델: MRF 적용
- 난류 모델  $k - \epsilon$  적용

### 해석 종류



- 혼합물 유동 해석
- MRF 해석



# 교반기 성능 평가 해석(1축 교반기 유동 해석)

## Overview

### □ 해석 목적

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

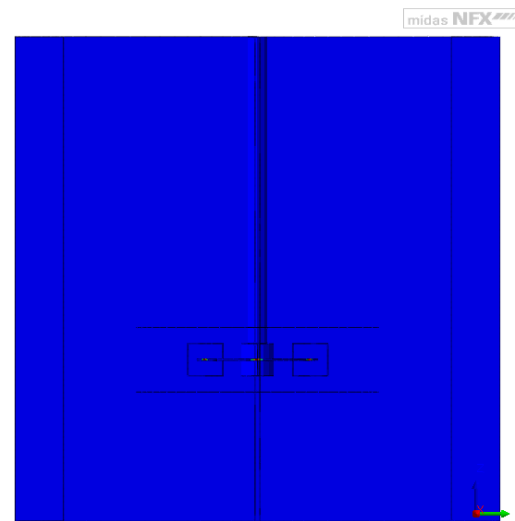
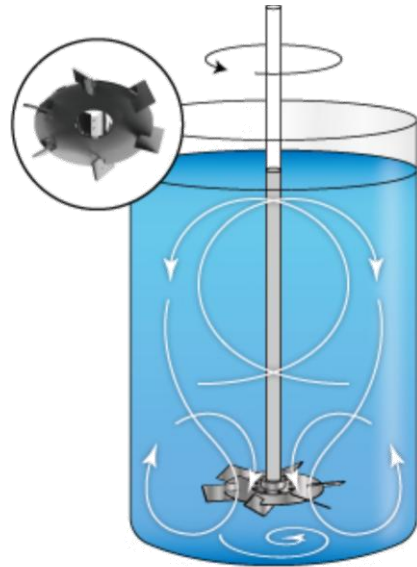
### □ 해석 종류



- 일반 유동 해석
- 이동참조프레임 해석

### □ 해석 조건

- 배플이 달린 교반기의 혼합 성능 해석
- MRF(Moving Reference Frame) 기법 활용
- 자유 수면은 고정 또는 단순화 모델 적용
- 난류 모델  $k - \epsilon$  적용



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



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

# 교반기 혼합 성능 평가 해석(2축 교반기 혼합물 유동 해석)

## Overview

### □ 해석 목적

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

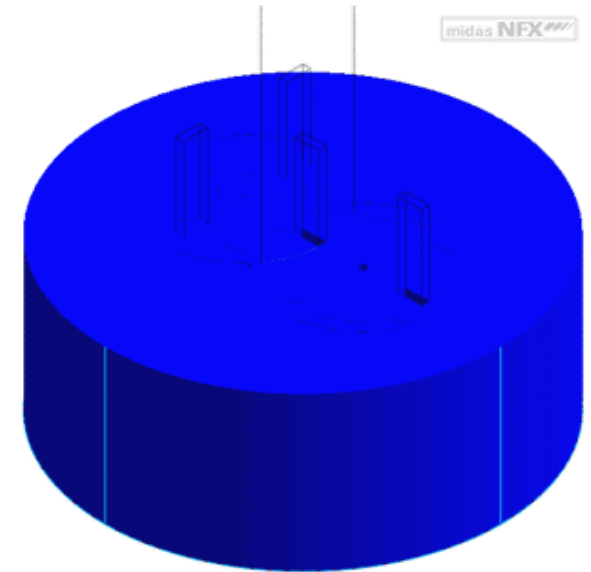
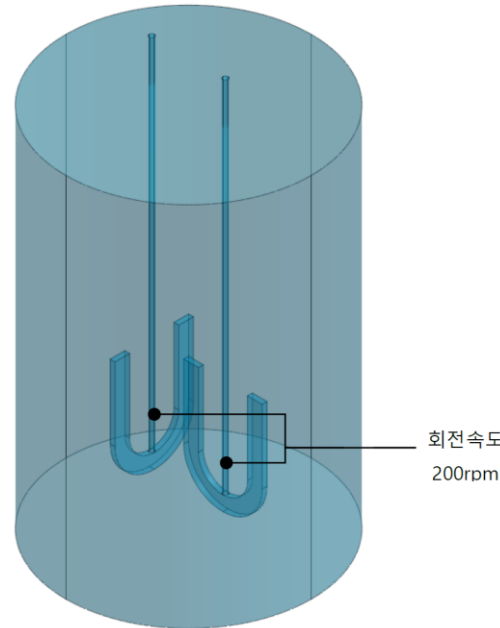
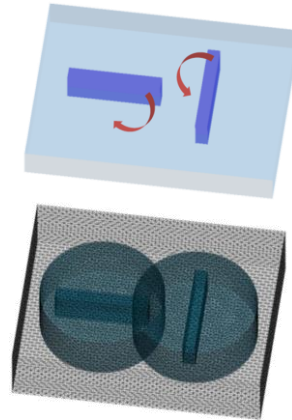
### □ 해석 종류



- 일반 유동 해석
- 중첩요소망 해석
- MRF 해석

### □ 해석 조건

- 혼합물 유동 모델 적용
- 질량 분율 또는 체적 분율로 초기 분리상태 설정
- 임펠러 회전 속도 RPM 지정
- 회전체 모델: MRF 또는 슬라이딩 메쉬 적용
- 자유 수면은 고정 또는 단순화 모델 적용
- 난류 모델  $k-\varepsilon$  적용



# CONTENTS Day-2

## 열 해석의 시작과 끝

---

Session 1. 열은 무엇인가?

Session 2. 방열 및 냉각과 혼합 유동

## 직접 경험해보는 열 유동 해석

---

Session 3. 열 유동 해석 실습

Session 4. 열 및 혼합물 유동 해석 실습

Session 5. 대류 해석 실습

# 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

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

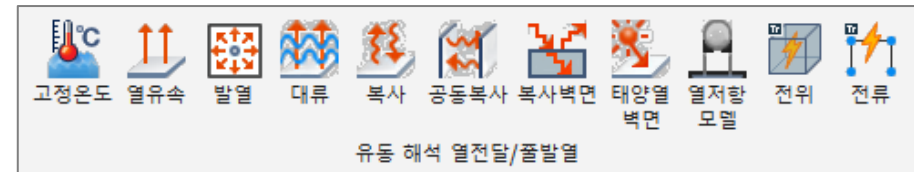
**복사 열전달**

필요시에만, 대부분 무시

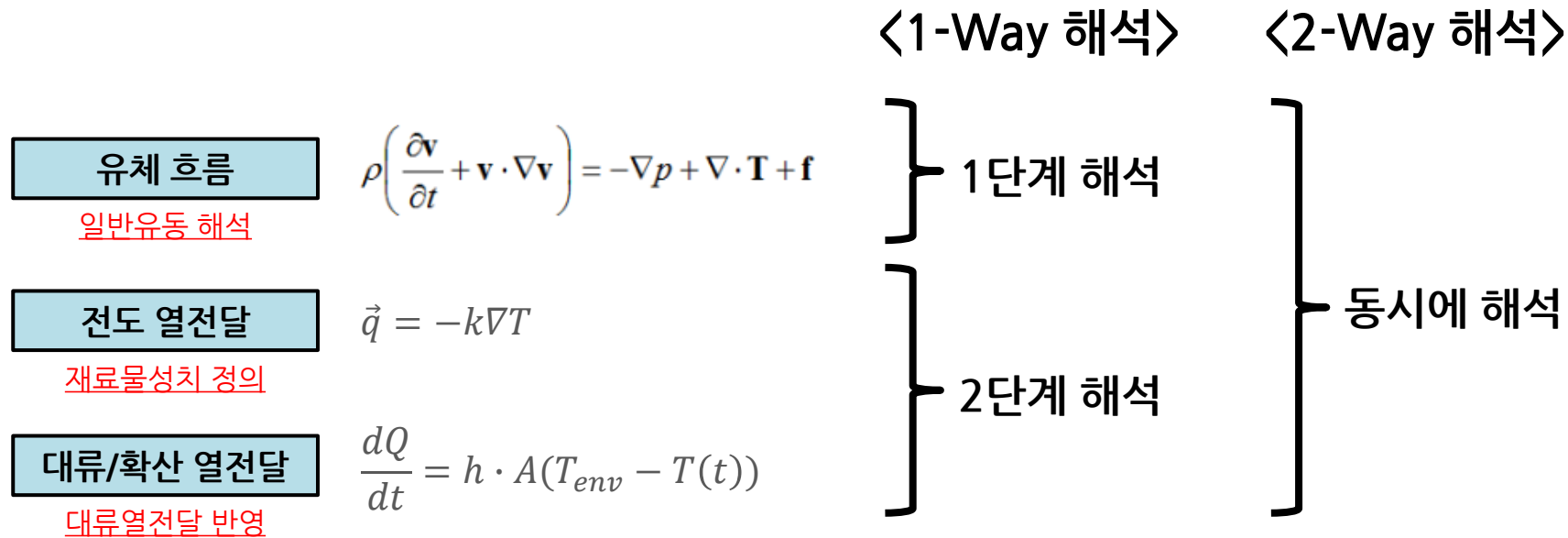
$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \sigma A_1 F_{1 \rightarrow 2} (T_1^4 - T_2^4)$$



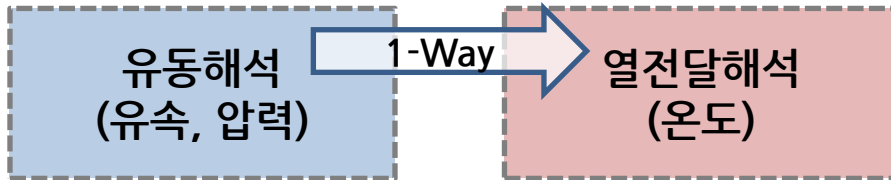
내 제품 해석에는 어떤 부분을 고려하거나 생략할지 결정 필요!



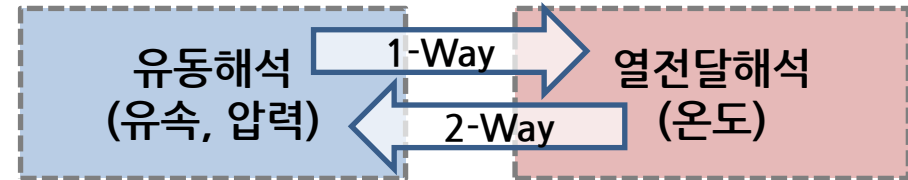
# 열/유동 해석 적용방법



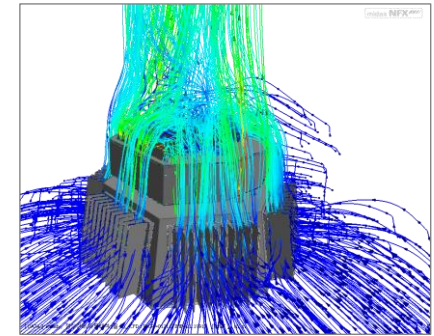
# 1-Way, 2-Way 해석법의 차이



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

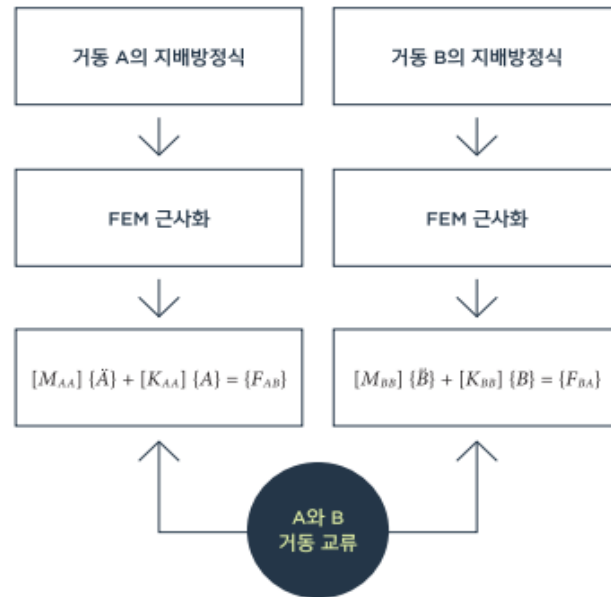


- 온도의 변화(밀도차)에 의한 흐름 영향이 지배적일 때
- 자연현상에 의존적 혹은 흐름이 느린 경우 **(자연대류)**

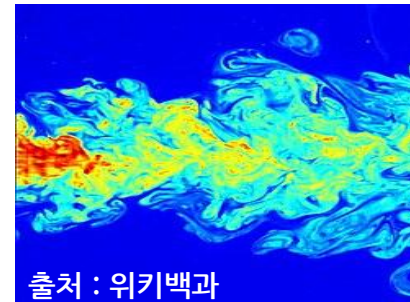


# 1-Way, 2-Way 해석법의 차이

✓ 변화에 따라 반복적인 연산이 요구됨

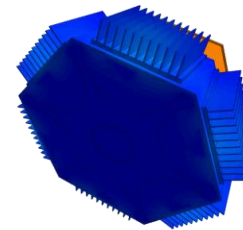


✓ Field 에 따른 계산 시간이 다름  
✓ 충분한 결과값을 위해 많은 해석시간 요구



공기의 변화 시간??

→ 0.001 ~ 0.00001s



열이 전달되는 시간??

→ 1 ~ 100s

**→ 예외/필수 상황을 제외하고는 1-Way 접근이 효율적임**

# 열 유동 해석 CFD워크 플로우

## NFX에서는 9단계로 열 유동 CFD 해석 수행 가능

### 1. 해석조건설정

- 고체-고체 열전달, 고체-열전달이 필요한 면들의 정의 → 열유속, 열원, 대류 조건 등 열 경계조건 입력
- 이 외의 해석 조건 설정 항목들은 일반 유동과 동일

### 2. 기하 형상제작

- 열 경계조건 입력을 위한 면 생성
- 구조물 열전달까지 고려해야 하는 경우 - 요소망 생성을 통해 구조물 열전달을 해석해야 하기 때문에 구조물 기하형상 제작 필수
- 이 외의 해석 조건 설정 항목들은 일반 유동과 동일

### 3. 재료 · 특성 정의

- 질량 밀도(density) } 일반 정상상태 유동 해석 시 필수 기입 항목
- 점성(Viscosity) }
- 이외의 열, 물질 이송, 복사 입력 항목 - midas NFX의 열 모듈과 물질 확산 모듈을 사용하는 경우 필수 입력
- 특성 정의 : 1차원, 2차원, 3차원 특성과 해석 움직임 특성, 유동 특성 정의 - 일반 정상상태 유동 해석 시 필수 생성

### 4. 경계 조건 입력

- 열 경계조건 : 열 유동 해석 - 1개 이상의 등온조건, 열유속, 열원 등의 열 관련 경계조건 입력 필수
- 이 외의 해석 조건 설정 항목들은 일반 유동과 동

### 5. 인접 조건 설정

- 접촉조건 - 절점 병합을 이용하지 않고 열 전달 해석을 수행하는 경우 유동장과 구조물 경계에서의 열적 접촉 및 접촉면 지정 필수

### 6. 요소망 생성

- 절점 병합 - 접촉조건을 이용하지 않고 열 전달 해석을 수행하는 경우 요소망 생성시 절점 병합 기능을 이용한 요소망 생성 필수
- 고체영역 요소망 생성 - 고체의 열전달을 고려한 해석을 수행하는 경우 고체 요소망 생성 필수
- 이 외의 해석 조건 설정 항목들은 일반 유동과 동

### 7. 해석케이스 설정

- 열전달 : 유체의 열전달이나 대류 해석을 수행하는 경우 - 해석제어의 열전달 체크 필수
- 고체 열전달 : 고체-고체, 고체-유체의 열전달을 해석하는 경우 - 해석 제어의 고체 열전달 체크 필수
- 고체와 유체의 모든 열전달을 고려하는 경우 - 해석제어의 열전달, 고체 열전달 체크 필수
- 이 외의 해석 조건 설정 항목들은 일반 유동과 동일

### 8. 해석 수행

### 9. 결과검토

- CFD Residual 차트 확인(모든 값이 0.0001이하로 수렴하는지)
- 해석 결과가 이론적으로 타당성이 있는지 확인
- 유체역학, 열역학 이론에 따른 유체의 속도, 압력, 온도 값 변화 확인

# 간단한 예제 수행 #1

## ☞ 다음 실습 안내

내부 직경이 좁아지는 파이프에 50도의 물이 유입될 때, 대류에 의한 물의 온도와 파이프의 온도 변화를 계산하기  
 목표: 지금까지 학습한 내용을 바탕으로 해석자의 시점에서 어떤 관점이 필요한지 생각해본다.

### 1 해석 조건 파악 해보기

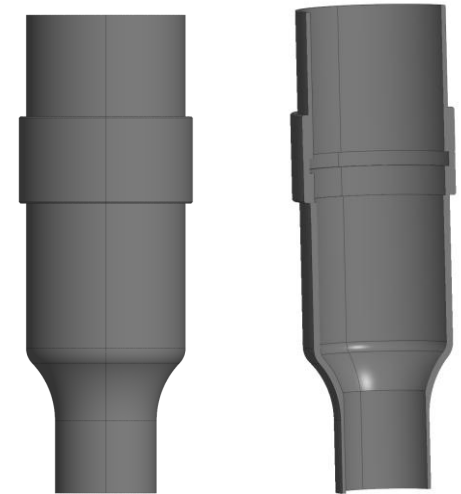
- 입구에 유입되는 유체의 물성치는와 온도는? → 유체의 온도에 따른 물성 확인하기
- 입구에서 유입되는 유체의 속도/ 압력은?? → 유입 조건
- 출구에서 유체의 속도/ 압력은? → 유출 조건
- 파이프의 재질과 전도특성은 어떻게 되는가? → 벽 경계층 특성, 열전도 특성 확인
- 파이프 외기의 대류 특성을 어떻게 되는가? → 파이프 외부의 대류 특성 확인
- 파이프 내부 형상의 굴곡은 없는가? → 격자 생성시 조밀하게 생성해야 하는지 고민

### 2 모델의 구조적 특성을 파악하여 유동 형태 예상하기

- 구조적 특성이 유동에 어떻게 출현할까? → 물리적으로 타당한 해석 결과 도출을 위한 유동 특성 예상
- 파이프 내부 유동이 어떠한 특성을 보이게 할까? → 유동 특성 확인

### 3 경계조건 부여 위치 및 유동 조건 설정하기

- 입구 또는 출구 조건이 유동에 영향을 줄 수 있는가? → 다양한 경계조건
- 입출구 조건의 위치가 무엇이 될지? → 유동에 적합한 경계조건 결정
- 난류인가 층류인가? → 난류 모델 선택 및 유동 특성 해석
- 유체의 열이 전달되는 영역과, 대류는 어느 면에서 발상하는가? → 특성이 발현되는 면 위치 확인 및 접촉, 대류 조건 결정



Reducer Pipe - 내부 직경이 점차 좁아지는 파이프 구조

# 간단한 예제 수행 #1

## ☰ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 유동 해석 수행

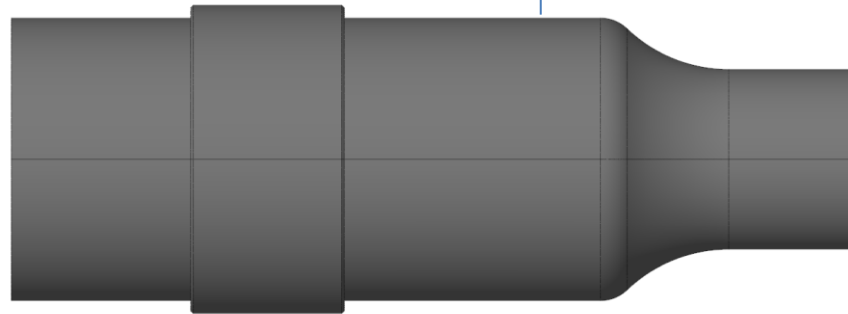
### 부여된 해석 조건

요소 크기: 0.005

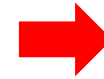
유체 물성 : water (50℃)  
입구속도 : 0.01 m/sec



파이프 재질 : SUS304



외기온도 : 25 ℃  
대류계수 : 6



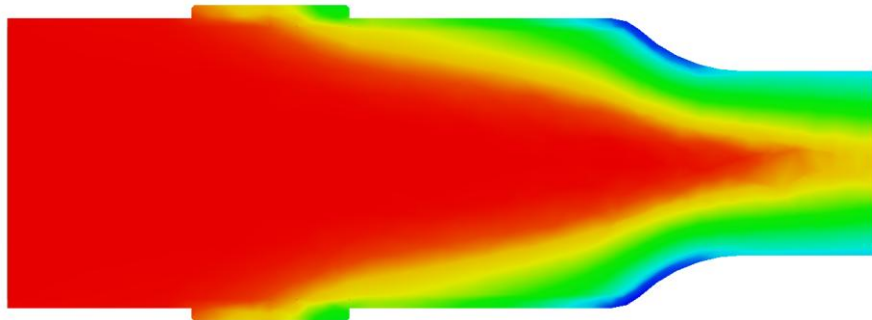
압력 : 0 (대기압)

# 간단한 예제 수행 #1

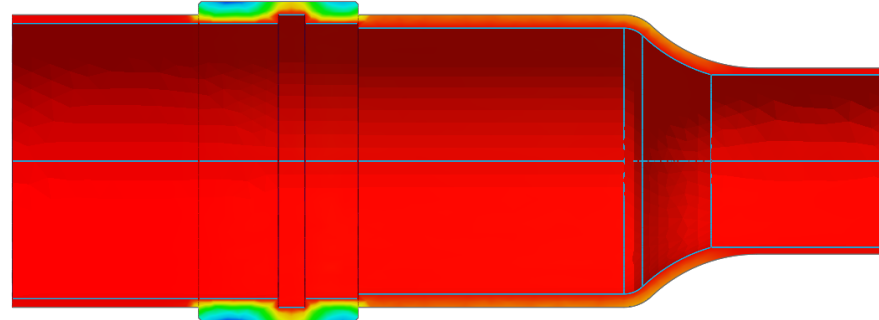
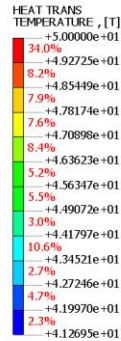
## ☰ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 유동 해석 수행

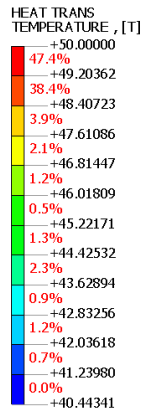
해석 도출결과 - 입출구 온도 구배 및 파이프 열전달 확인하기



유체 온도



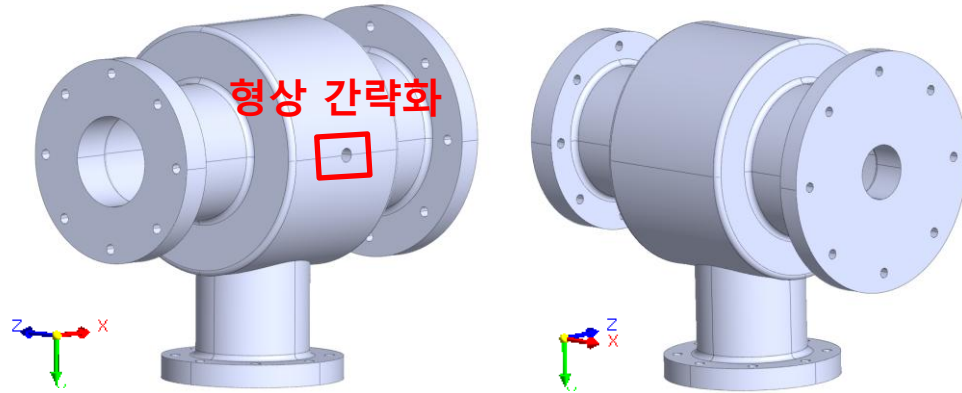
파이프 온도



- 대류조건, 구조물 전도 특성 등을 고려 하였을 때, 타당한 결과를 얻었는지 정성적인 타당성 검증하기
- 접촉조건, 절점병합 기능을 이용하여 해석을 수행하기

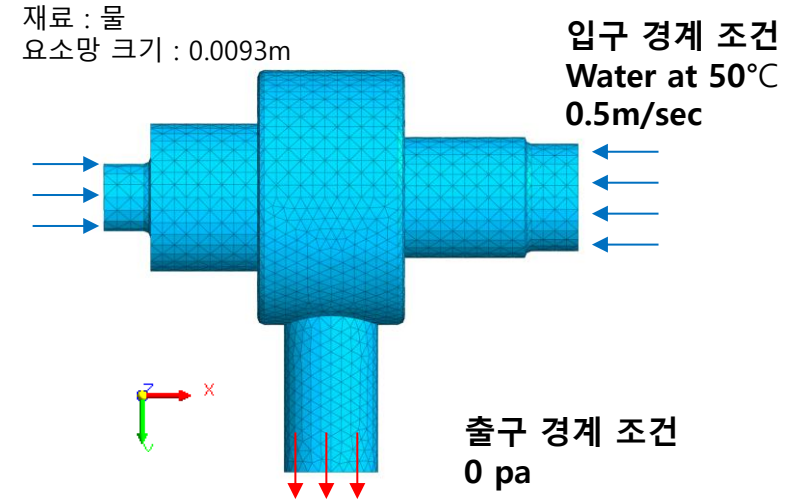
# 실습 케이스 - T 파이프

## T 형 파이프 온도가 다른 유체의 내부 유동



재료 : SUS304  
 요소망 크기 : 0.01m  
 구조물 초기 온도 : 25 °C  
 외기온도 : 25 °C  
 대류계수 : 6

입구 경계 조건  
 Water at 25°C  
 0.5m/sec



### 문제 설명

- ✓ T 파이프 형상 T-pipe.LSDPRT
- ✓ 입구가 여러 개인 파이프 내부 열 유동 해석
- ✓ 2개의 입구에서 0.5m/s 유속 발생
- ✓ 온도가 다른 유체 유입
- ✓ 출구 압력 0

### 해석 목적

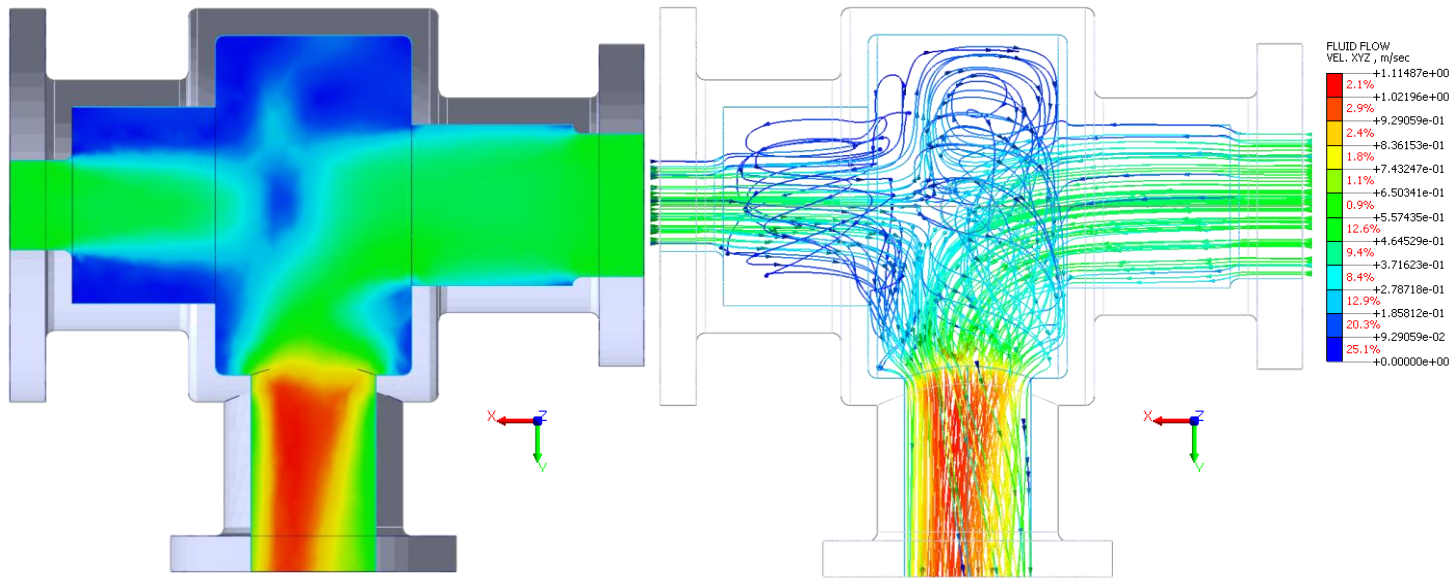
- ✓ 파이프 내부 열 유동 특성 확인
- ✓ 내부 유동장 모델링 방법(유동영역 추출)
- ✓ 유체의 가속도 특성 확인

### 학습 주요 아이템

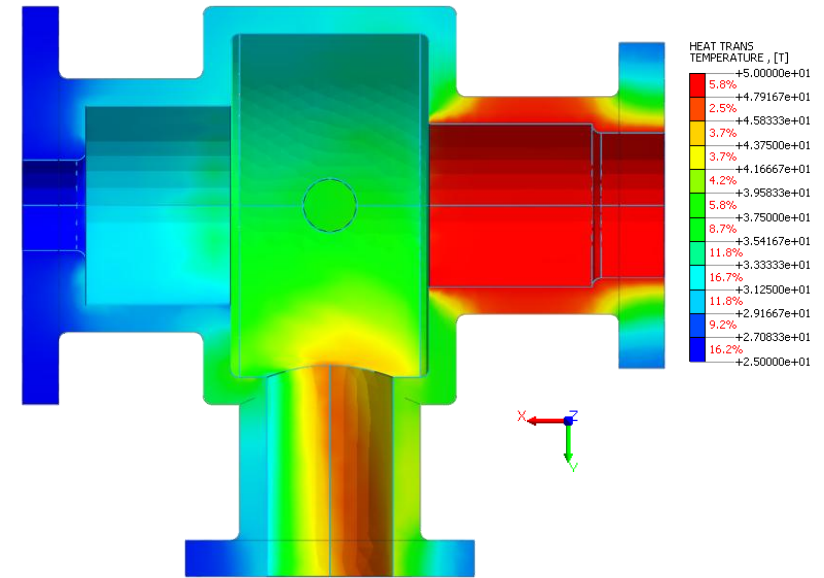
- ✓ 과도 상태 해석 수행 방법
- ✓ 해석 재시작 기능
- ✓ 1-way 해석 학습
- ✓ 다양한 경계 조건 부여
  - 입구, 출구, 온도, 벽면

# 실습 케이스 - T 파이프

T 형 파이프 온도가 다른 유체의 내부 유동



유체 속도 분포



파이프 온도 분포

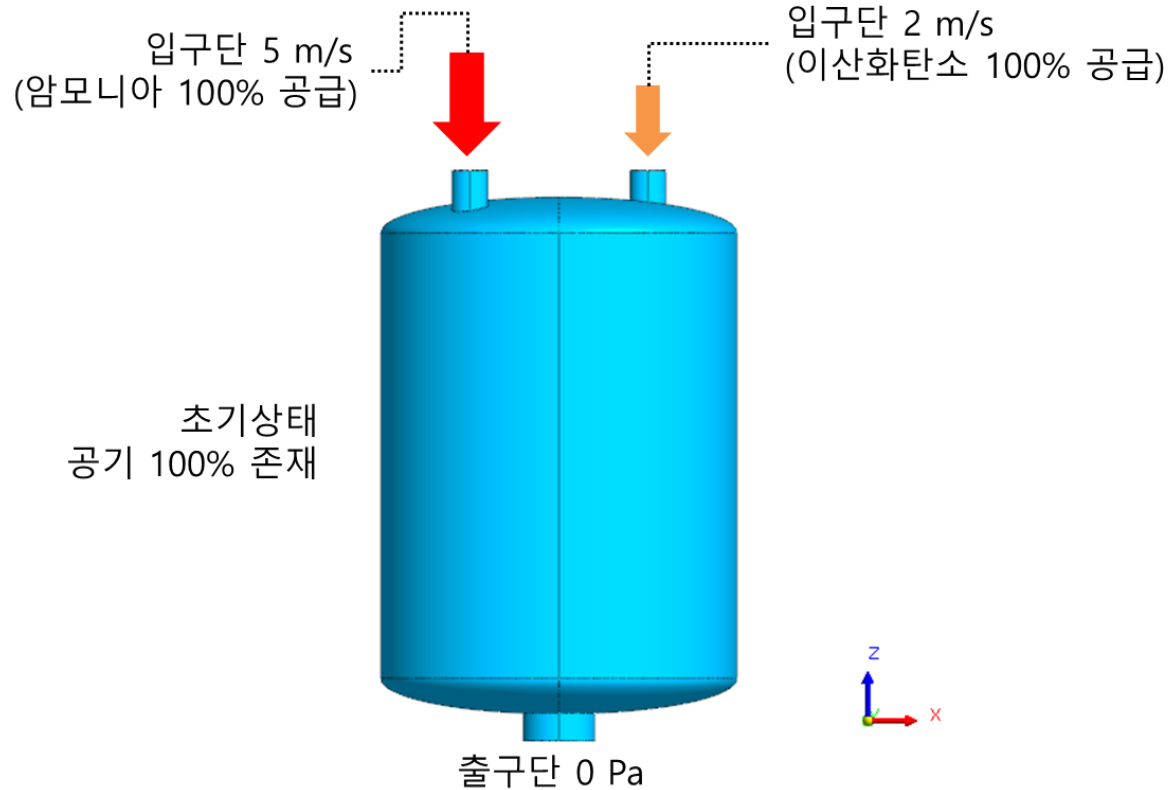
# 간단한 예제 수행 #2

## 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

### 부여된 해석 조건

요소망 크기: 0.02

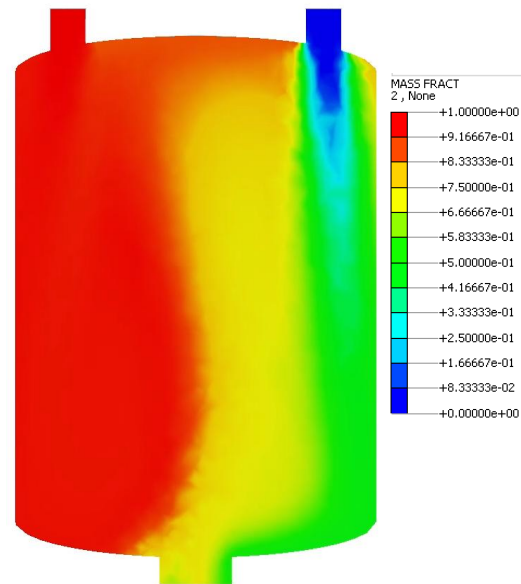


# 간단한 예제 수행 #2

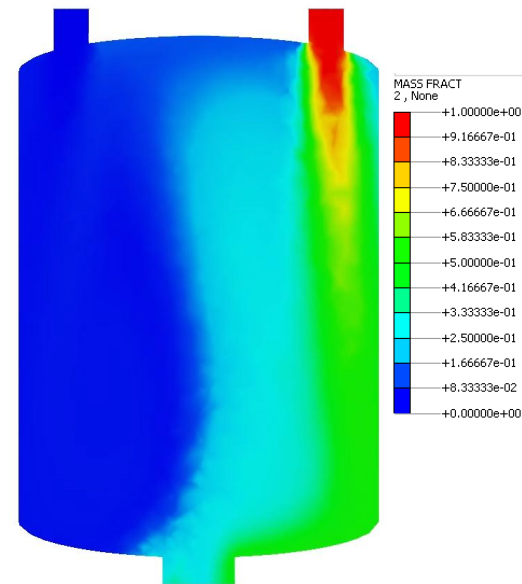
## ☰ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

해석 도출결과 - 내부 혼합물 특성 확인하기



암모니아 거동



이산화탄소 거동

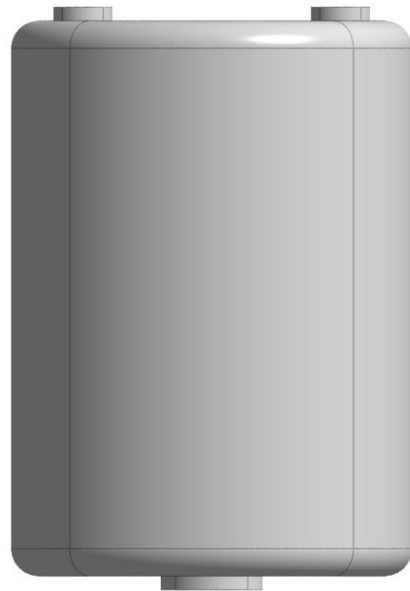
# 간단한 예제 수행 #3

## ☞ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

### 부여된 해석 조건

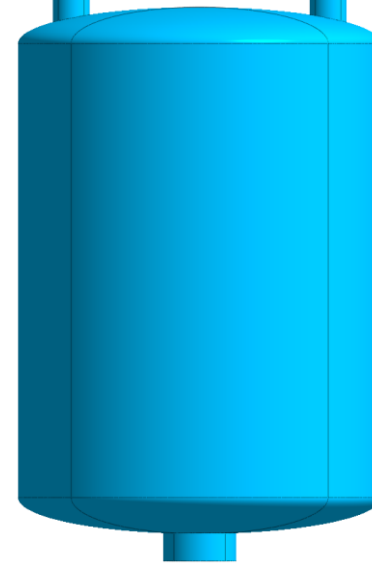
재료 : SUS304  
 요소망 크기 : 0.02  
 구조물 초기 온도 : 25 °C  
 외기온도 : 25 °C  
 대류계수 : 6



입구단 5m/s  
 (암모니아 100% 공급 / 25°C)



입구단 2m/s  
 (이산화탄소 100% 공급 / 80°C)



요소망 크기: 0.02  
 초기 상태:  
 공기 100% 존재 / 25°C

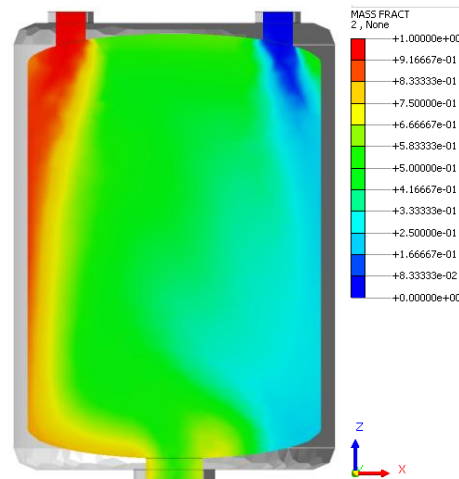
출구단 0 Pa

# 간단한 예제 수행 #3

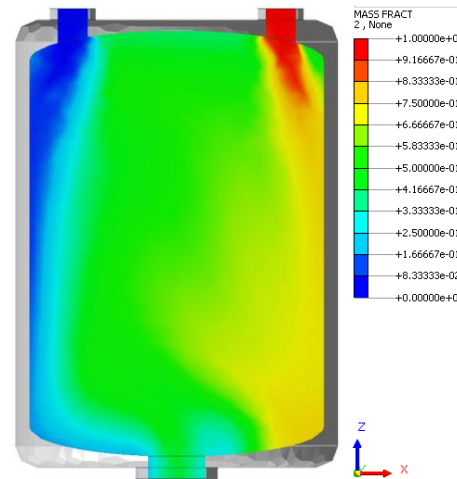
## ☰ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

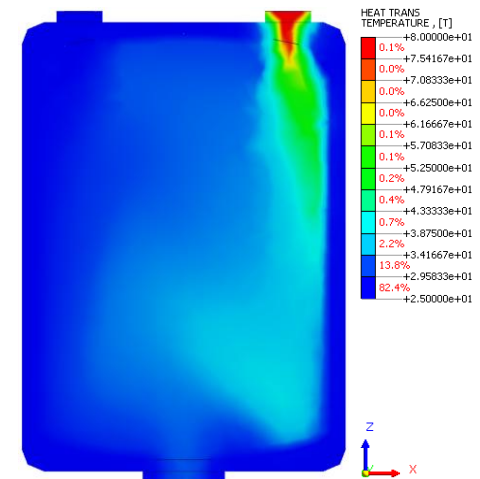
### 해석 도출결과 - 내부 열 전달 특성 분석하기



암모니아 질량 분율



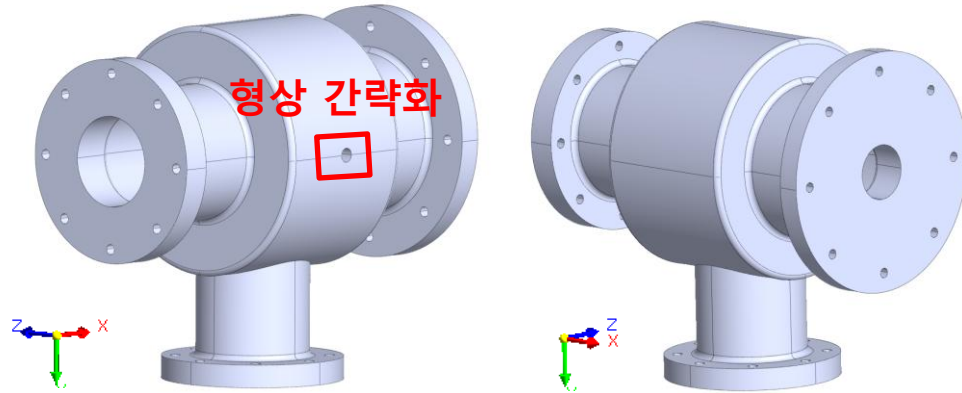
이산화탄소 질량 분율



탱크 온도

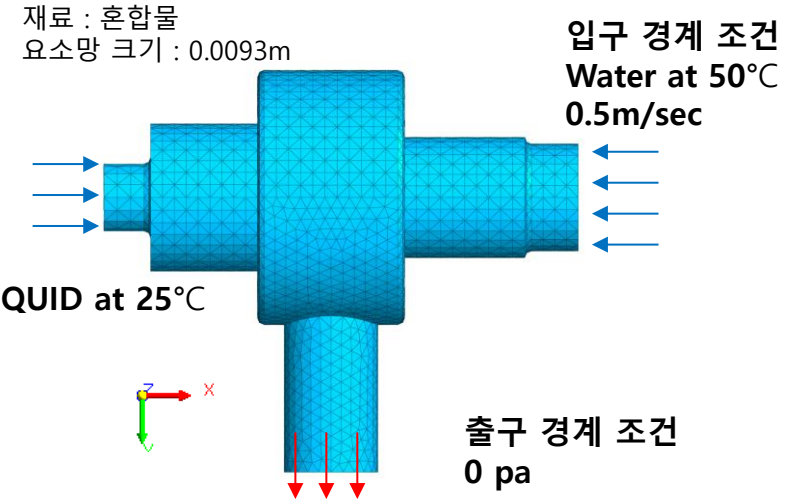
# 실습 케이스 - T 파이프

## T 형 파이프 열 및 혼합물 유동 해석 - 자가학습



재료 : SUS304  
 요소망 크기 : 0.01m  
 구조물 초기 온도 : 25 °C  
 외기온도 : 25 °C  
 대류계수 : 6

입구 경계 조건  
 ETHYL\_ALCOHOL\_LIQUID at 25°C  
 1m/sec



### 문제 설명

- ✓ T 파이프 형상 T-pipe.LSDPRT
- ✓ 입구가 여러 개인 파이프 내부 열 유동 해석
- ✓ 2개의 입구에서 0.5m/s 유속 발생
- ✓ 다른 온도의 두 종류 유체 유입
- ✓ 출구 압력 0

### 해석 목적

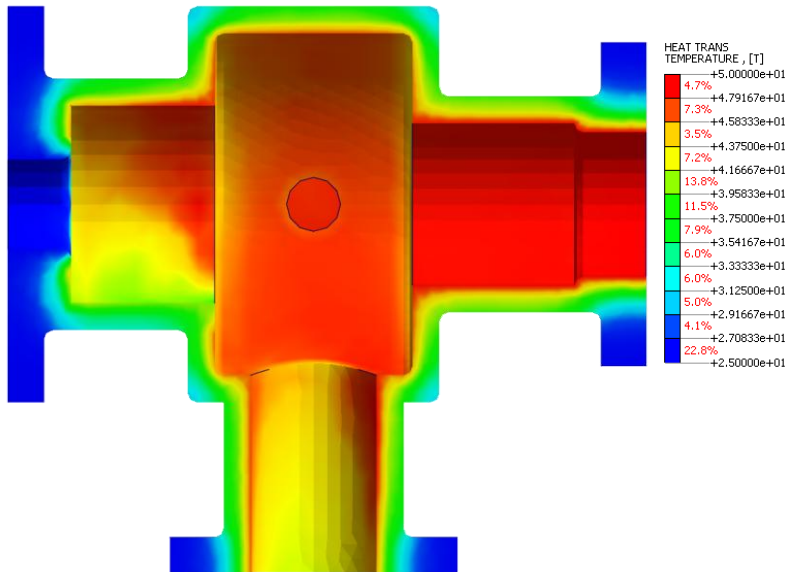
- ✓ 파이프 내부 열 유동 특성 확인
- ✓ 혼합물 유동 특성 확인
- ✓ 내부 유동장 모델링 방법(유동영역 추출)
- ✓ 유체의 가속도 특성 확인
- ✓ 파이프 구조물 열 전달 확인

### 학습 주요 아이템

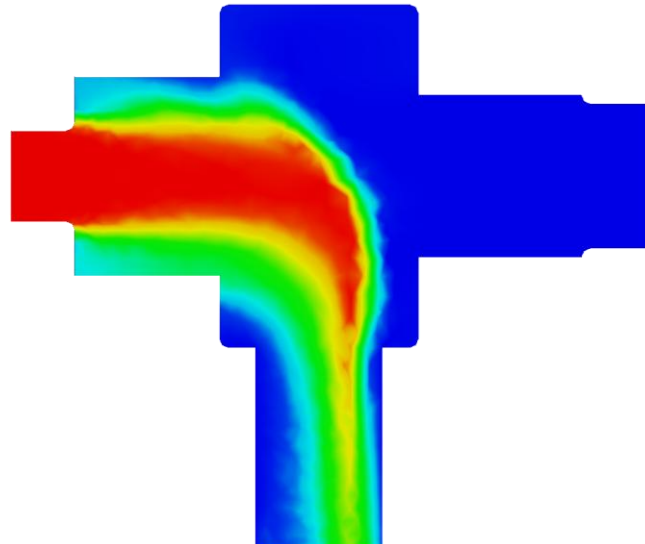
- ✓ 과도 상태 해석 수행 방법
- ✓ 절점 병합 기능 학습
- ✓ 해석 재시작 기능
- ✓ 1-way 해석 학습
- ✓ 다양한 경계 조건 부여
  - 입구, 출구, 온도, 벽면

# 실습 케이스 - T 파이프

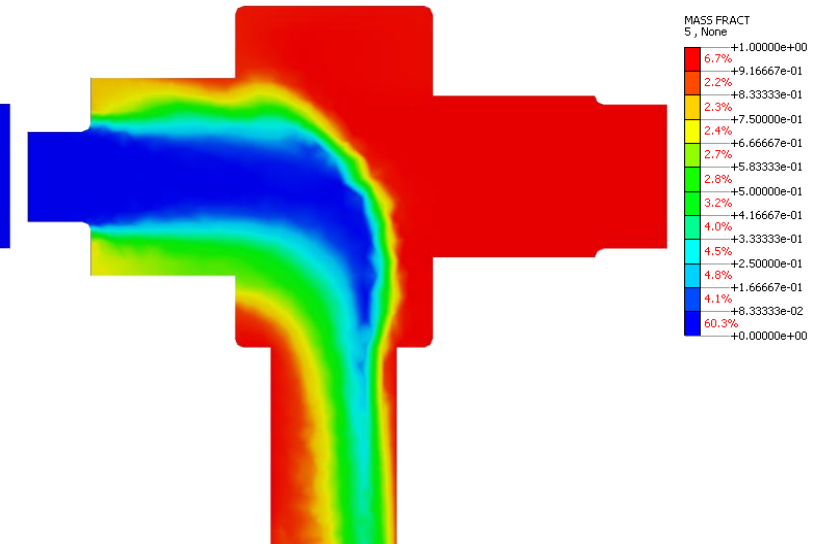
## T 형 파이프 열 및 혼합물 유동 해석 - 자가학습



파이프 온도



에틸알코올 질량 분율



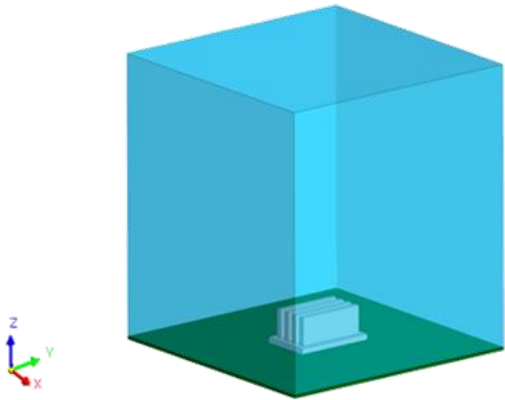
물 질량 분율

# 간단한 예제 수행 #4

## ☰ 해석 수행 해보기

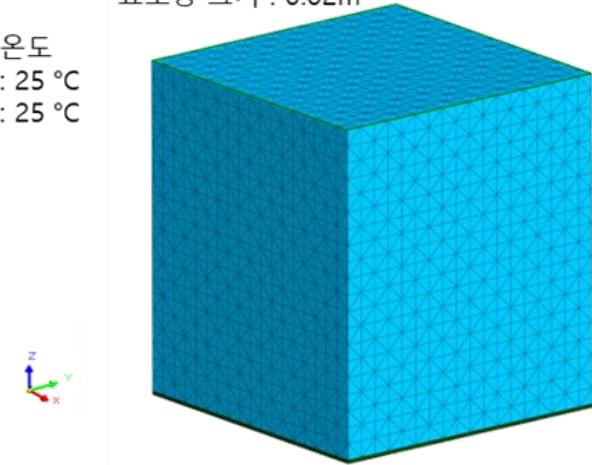
주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

### 부여된 해석 조건



재료 : air 25 °C(비압축성 이상기체)  
요소망 크기 : 0.02m

초기 온도  
유체 : 25 °C  
고체 : 25 °C

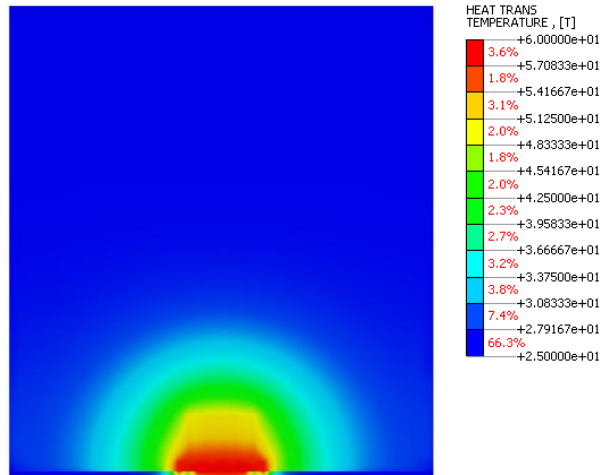


# 간단한 예제 수행 #4

## ☰ 해석 수행 해보기

주어진 해석 조건을 따라 일반 혼합물 유동 해석 수행

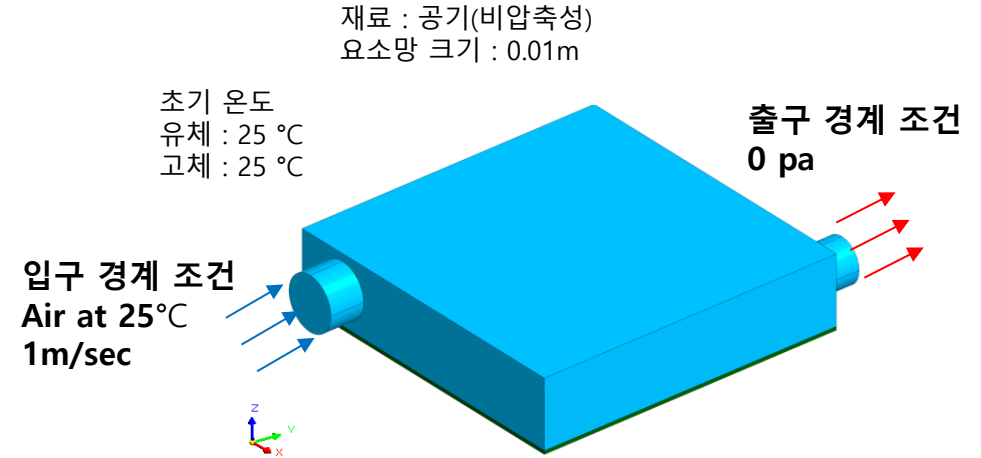
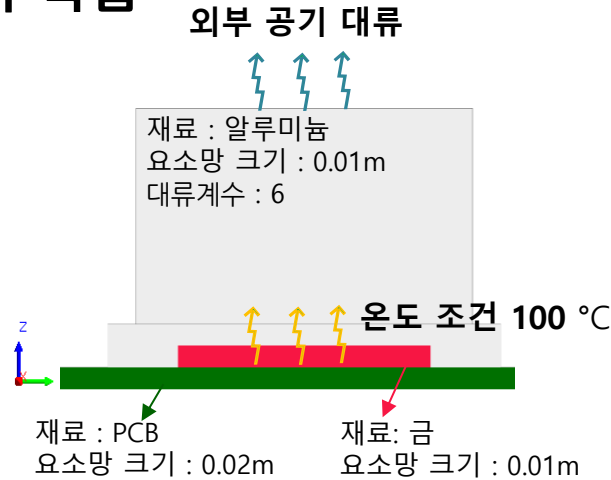
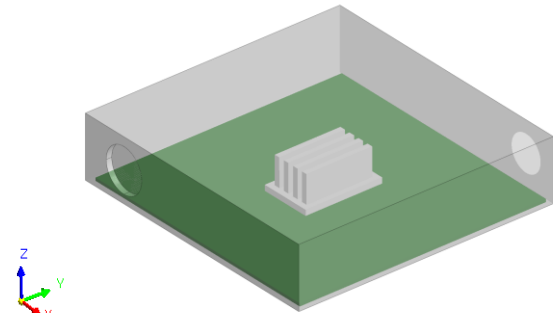
### 해석 도출결과 - 내부 열 전달 특성 분석하기



온도 분포

# 실습 케이스 - 반도체 칩 강제대류 해석

## 반도체 칩 강제대류 - 자가 학습



### 문제 설명

- ✓ 방열핀 해석 heatsink\_forced\_convection.x\_t
- ✓ 입구에서 1m/s 유속 발생
- ✓ 출구 압력 0

### 해석 목적

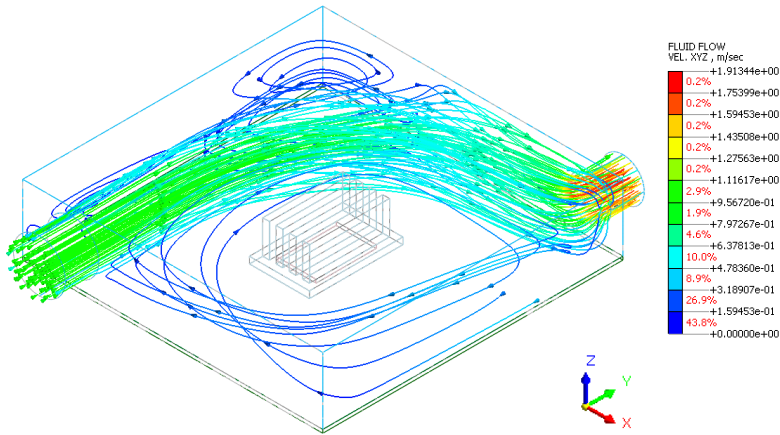
- ✓ 내부 유동장 모델링 방법(유동영역 추출)
- ✓ 내부 속도 특성
- ✓ 유체의 가속도 특성 확인

### 학습 주요 아이템

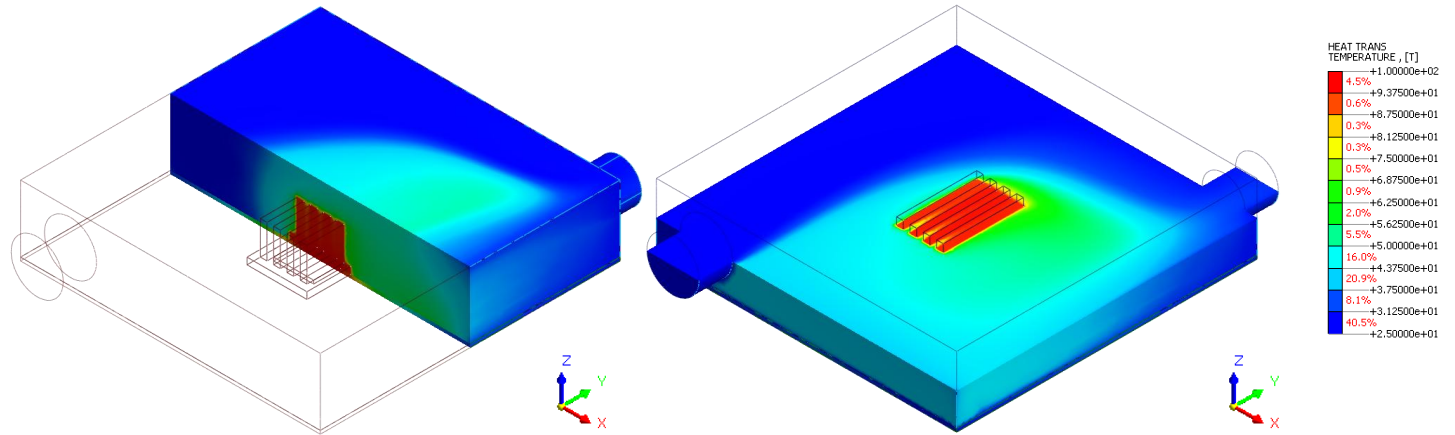
- ✓ 정상 상태 해석 수행 방법
- ✓ 절점 병합 기능 학습
- ✓ 다양한 경계 조건 부여  
- 입구, 출구, 온도, 벽면

# 실습 케이스 - 반도체 칩 강제대류 해석

## 반도체 칩 강제대류 - 자가 학습



속도 유선



내부 온도 분포

교육에 참석해 주셔서 감사합니다.  
설문을 통해 의견을 남겨주세요.

