SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

NuTHEL
Nuclear Thermal Hydraulic Engineering Lab.

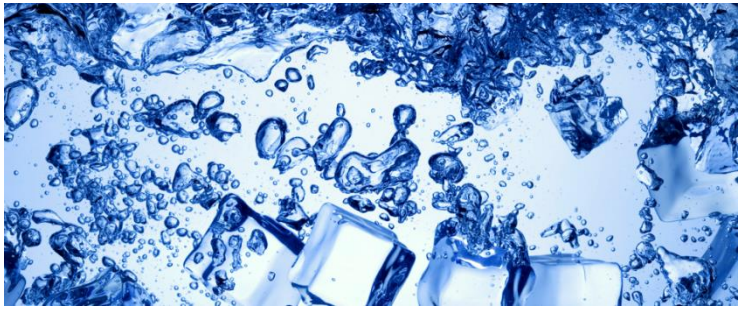
원자로 열유체 실험 (10)

Department of Nuclear Engineering, Seoul National Univ.
Hyoung Kyu Cho

열수력/열유체 기초

❖ 유동 조건/상태

Adiabatic (without heat transfer)	Diabatic (with heat transfer)
Single-component (Single substance)	Multi-component (Two or more substances)
Single-phase	Multi-phase (co-existence of vapor/solid/liquid)
One-dimensional (e.g. pipe flow)	Multi-dimensional (e.g. flow in a large pool or tank)
Steady-state	Transient (change of nominal parameters with time)
Laminar	Turbulent



열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

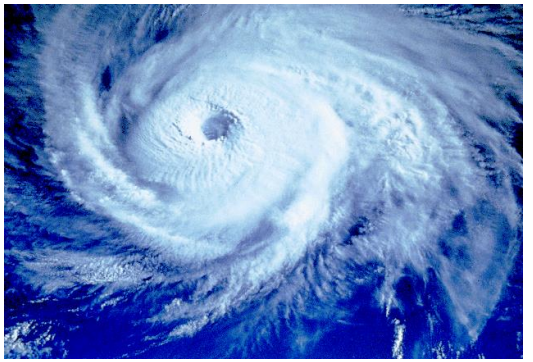
✓ Force (힘)

$$F = ma = [kg] \cdot [m \cdot s^{-2}] \equiv [N]$$

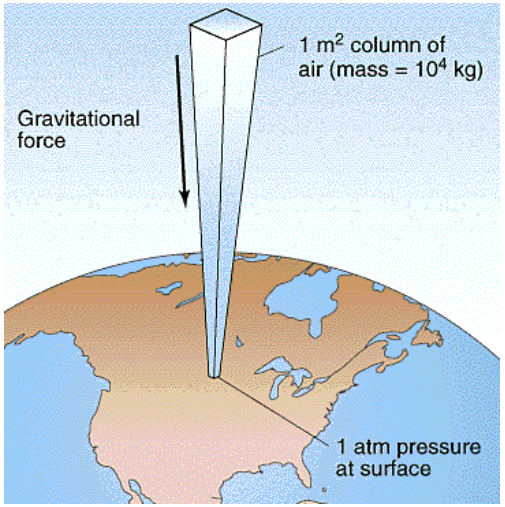
✓ Pressure (압력)

$$P = F / A = [N] / [m^2] \equiv [Pa]$$

- 단위 면적 당 가해지는 힘
- 대기압 (atmospheric pressure): 해수면에서의 압력
  - 10132.5 Pa = 101.325 kPa = 0.101325 Mpa=1.01325 Bar
  - 1 atm = 760 mmHg (Torr) = 14.7 psi (pound per square inch)
  - 1.033 kgf/cm^2 (kilogram force per square centimeter)



950 hPa



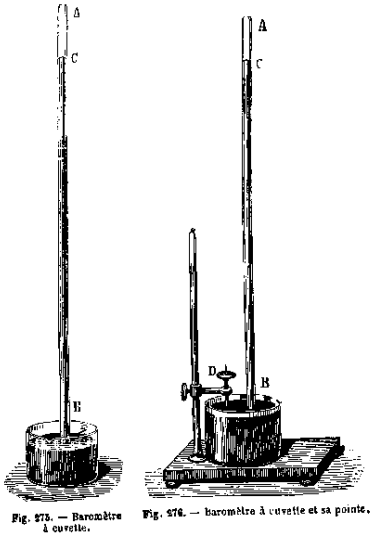


Fig. 275. — Baromètre à cuvette.

Fig. 276. — Baromètre à cuvette et sa pointe.

열수력/열유체 기초

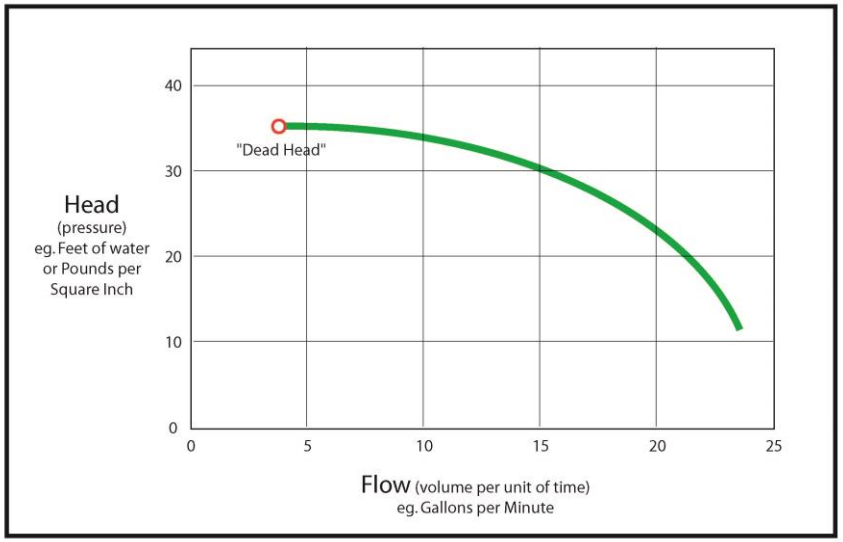
❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Pressure (압력)

- 경수로 정상 운전 압력
  - 150 atm = ? MPa = ? psi

- Head (수두), pressure head (압력 수두)
  - 압력을 등가의 물기둥 높이로 환산한 값
  - 펌프 성능 표기 시 사용됨.
  - 1 atm ≈ 10 m

$$H = \frac{P}{\rho_{water} g} = \frac{\left[N/m^2\right]}{\left[kg/m^3\right]\left[m/s^2\right]} = \frac{\left[N/m^2\right]}{\left[N/m^3\right]} = [m]$$



열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Density (밀도) and specific volume (비체적)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{[kg]}{[m^3]} \qquad v = \frac{1}{\rho}$$

✓ Internal energy (내부 에너지) and enthalpy (엔탈피)

- Internal energy $e \text{ or } u\,[J]$
  - 역학적으로 평형 상태를 가진 물체 내부에 모여있는 에너지

- Enthalpy $h\,[J]$
  - 계 밖에서 가해진 압력과 그에 의해 변화한 계의 부피의 곱을 내부 에너지에 합한 양

$$h = u + \frac{P}{\rho} = u + pv$$

- 열수력 실험에서는 압력, 온도를 측정한 후, 증기표를 이용하여 얻어 냄.

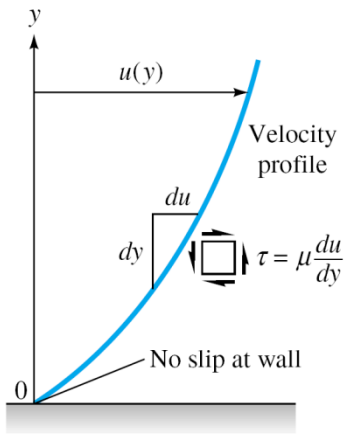
열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Viscosity (점성 계수)

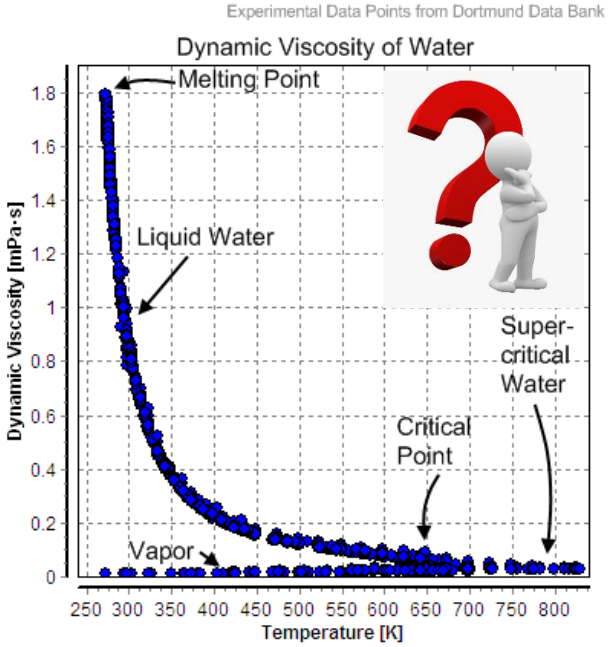
- 전단력에 의해 형태가 변화할 때 나타나는 유체의 저항

$$\mu = \frac{\tau}{(du/dx)} = \frac{[N/m^2]}{[1/s]} = \frac{[kg \cdot m/s^2/m^2]}{[1/s]} = [kg/s \cdot m]$$



- Dynamic viscosity (동점성 계수) $\nu = \mu / \rho$

Fluid	μ, kg/(m · s)†	Ratio $\mu/\mu(H_2)$
Hydrogen	8.8 E–6	1.0
Air	1.8 E–5	2.1
Gasoline	2.9 E–4	33
Water	1.0 E–3	114
Ethyl alcohol	1.2 E–3	135
Mercury	1.5 E–3	170
SAE 30 oil	0.29	33,000
Glycerin	1.5	170,000



열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Specific heat (비열, 비열용량) $c = \Delta Q / m\Delta T = [J]/[kg]\cdot[K]$

- 단위 질량의 물질 온도를 1도 높이는데 드는 열에너지
- 정압 비열 및 정적 비열

$$c_p = (\partial h / \partial T)_v \qquad c_v = (\partial u / \partial T)_P \qquad \gamma = \frac{c_P}{c_v} \geq 1$$

  - 고체와 액체의 경우, 두 비열 값의 차이가 거의 없음.
  - 기체의 경우 차이가 크며, 압축성 유동을 다룰 경우 그 비가 매우 중요함.

- Heat capacity (열용량)

$$C = Q / \Delta T = mc$$

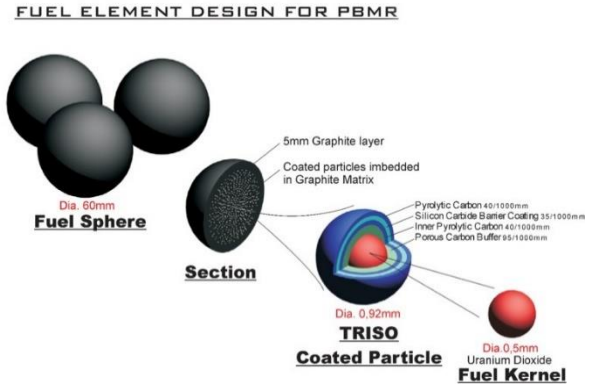
  - 유체 혹은 물질이 에너지를 저장할 수 있는 능력

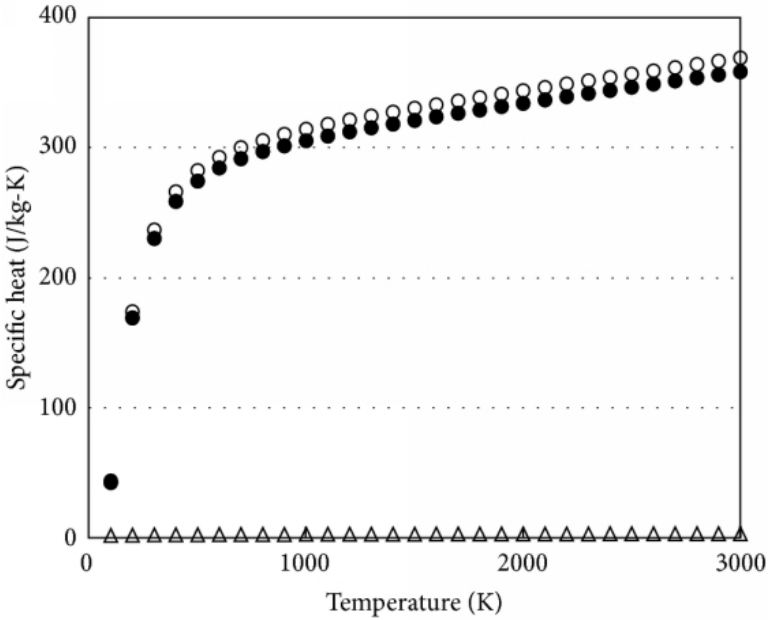
- 주요 물질의 비열

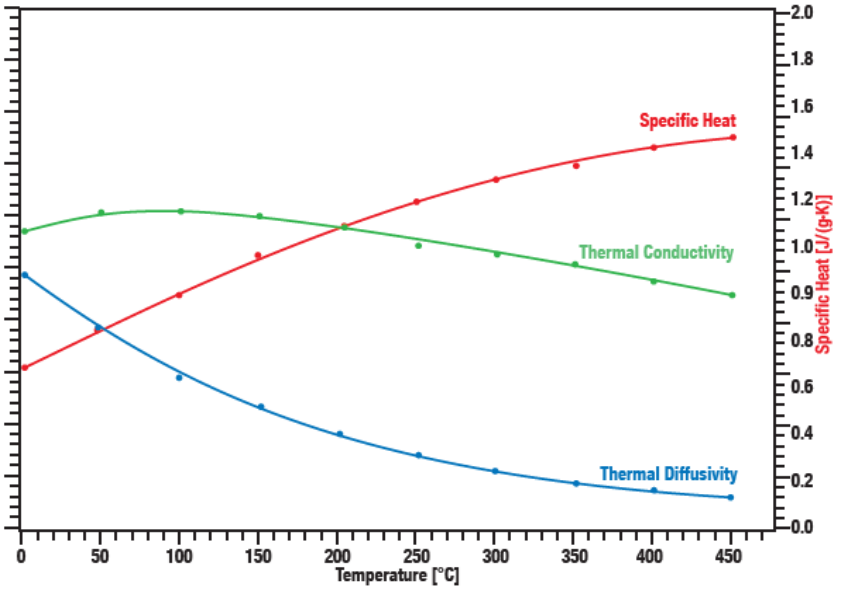
Material	Specific heat J/kg·K
Water/steam	4200/2080
Human body	3500
Air	1010
Aluminum	896
Copper	390
Lead	130
Wood	1800
Soil	800
Ethanol	2440
Uranium	116
Hydrogen	14300
Graphite	

열수력/열유체 기초

- 유체역학 및 열전달의 기본 변수
  - ✓ Specific heat (비열, 비열용량)







열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Thermal conductivity (열전도도)

$$\dot{Q} = kA\Delta T / L \quad \rightarrow k = (\dot{Q}L)/(\Delta TA) = [W][m]/[K][m^2] = [W/m \cdot K]$$

- 열을 전달할 수 있는 물질의 능력
- Fourier's Law for heat conduction
- Thermal diffusivity (열확산도)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{[W/mK]}{[kg/m^3][J/kgK]} = [m^2/s]$$

– 먼 거리에서의 열적 변화가 얼마나 오래 걸려서 현 위치에서의 온도 변화를 일으킬 수 있는가에 관한 물리량

$T_{cr} = 374^{\circ}C \quad P_{cr} = 22.1MPa$

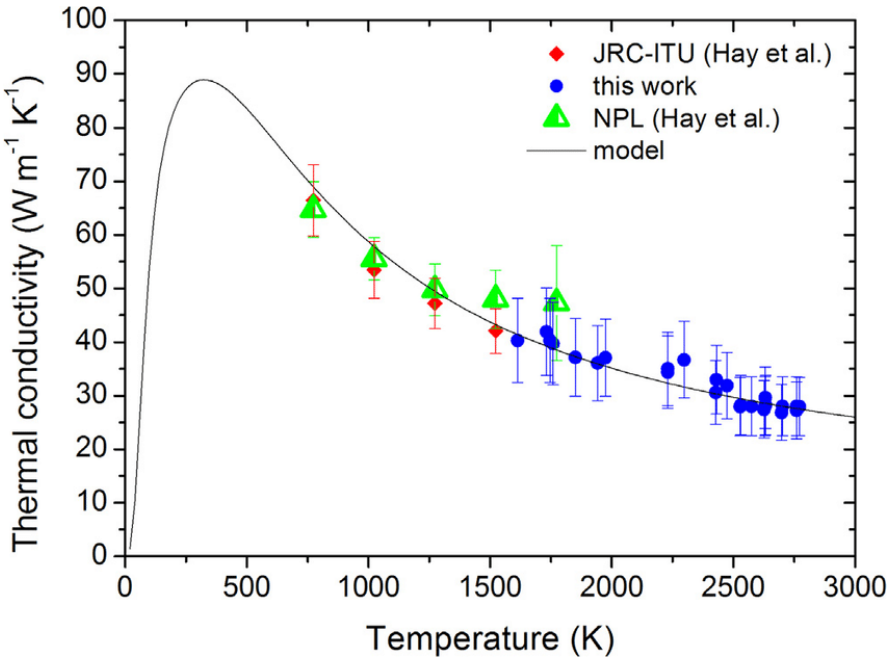
	Liquid	Vapor	Supercritical
Density	998	0.46	125.1
Viscosity	10^{-3}	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$
Thermal conductivity	0.6	0.033	0.102

Material	Thermal Conductivity W/m·K
Water/steam	0.6/0.03
Diamond	1000~41000
Air	0.024
Aluminum/Copper	220/390
Lead	35
Wood	0.1~0.4
Soil	0.15~2
Helium	0.15
Hydrogen	0.19

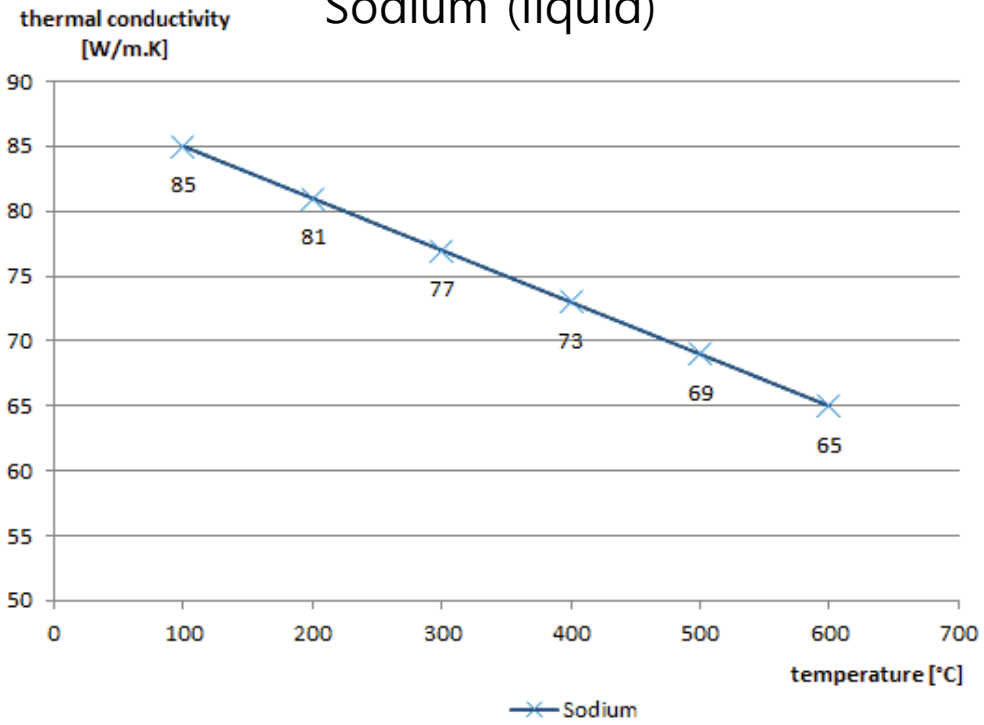
열수력/열유체 기초

- **유체역학 및 열전달의 기본 변수**
  - ✓ **Thermal conductivity (열전도도)**

Graphite (solid)



Sodium (liquid)

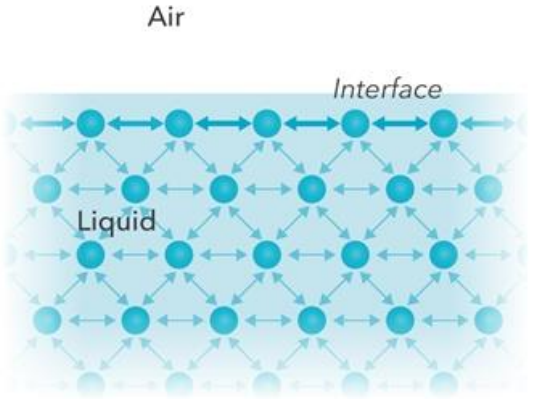


열수력/열유체 기초

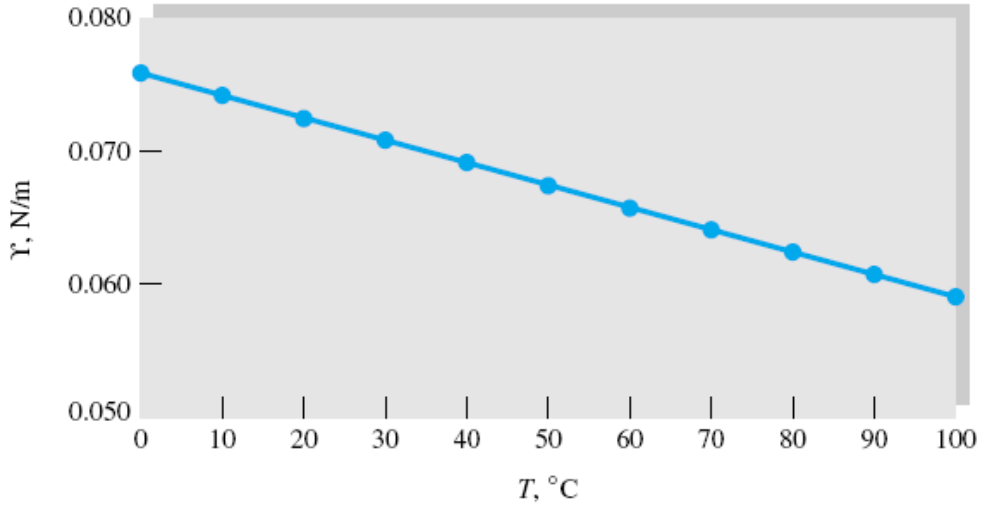
❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Surface tension (표면 장력)

$$\sigma = F / L = [N / m]$$

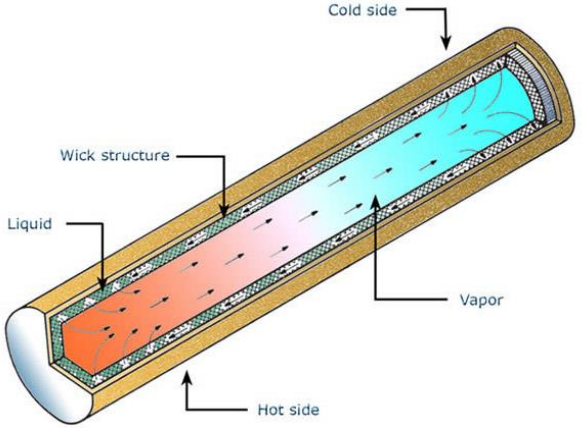


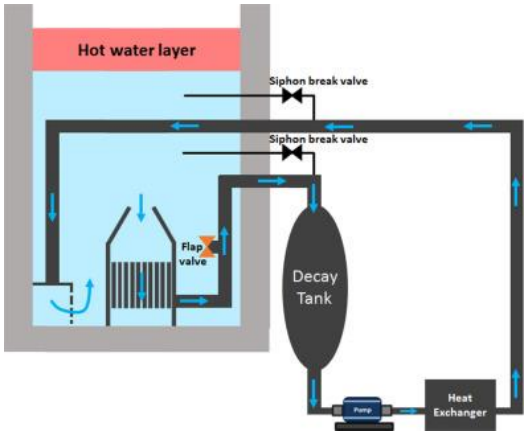
- 액체의 자유표면에서 표면을 작게 하려고 작용하는 장력
  - 물-공기 (0.072 N/m), 수은-공기 (475 N/m)
- 액적 또는 기포 크기를 결정

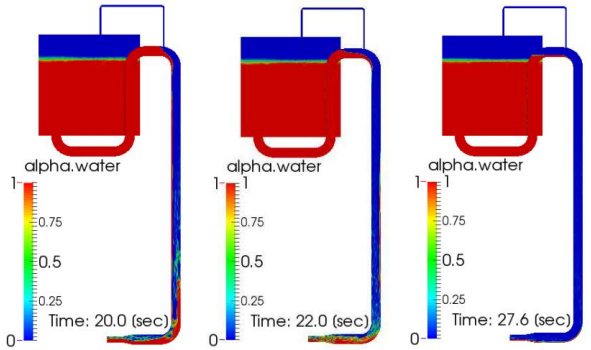


열수력/열유체 기초

- 유체역학 및 열전달의 기본 변수
  - ✓ Surface tension (표면 장력)





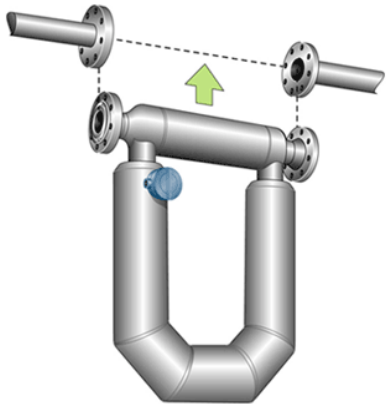


열수력/열유체 기초

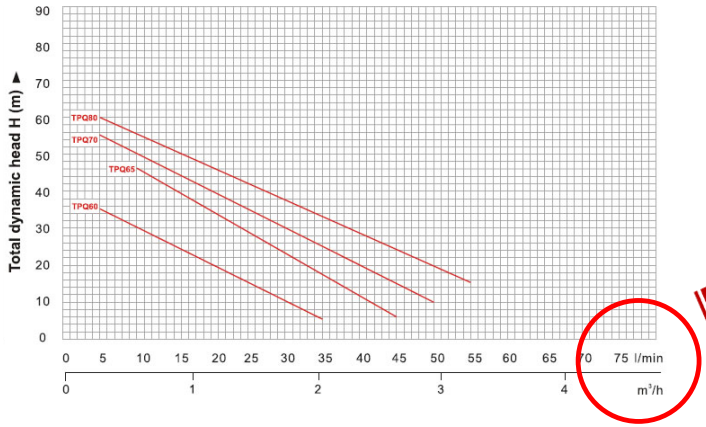
❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

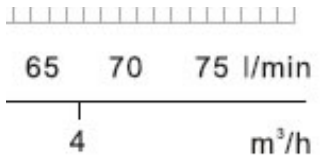
✓ Flow rate (유량)

- Mass flow rate (질량 유량) $\dot{m} = \rho u A = [kg/s]$
  - Coriolis mass flow meter
- Volume flow rate (체적 유량) $Q = uA = [m^3/s]$
  - 일반적인 유량계의 측정 단위
  - 질량 유량을 계산하기 위해 압력, 온도 추가 측정 필요
  - 현장에서 주로 사용하는 단위
    - ➢ LPM (Litter per minute), GPM (Gallon per minute)
    - ➢ m^3/hr (Cubic meter per hour): 루베 ⇒ 일제 잔재 용어



헤베 : $1m^2$. 평방미터 '헤이베이'(へいべい)에서 유래
루베 : $1m^3$, '입방미터' '류베이(りゅうべい)'에서 유래





열수력/열유체 기초

- **유체역학 및 열전달의 기본 변수**
  - ✓ **Flow rate (유량)**
    - Normal flow rate (기준 조건 유량)
      - 0°C, 101.325 kPa
    - Standard flow rate (표준 조건 유량)
      - 15.5°C, 101.325 kPa
    - Actual flow rate (실제 조건 유량)
      - Actual volume of fluid, m^3/hr

열수력/열유체 기초

❖ 유체역학 및 열전달의 기본 변수

✓ Quality

- Thermodynamic [equilibrium] quality (건도) vs. mass quality

$$x_T = \frac{h - h_f}{h_{fg}} = \frac{\text{mixture enthalpy - saturated liquid enthalpy}}{\text{latent heat of vaporization}} \qquad x = \frac{m_g}{m_g + m_l}$$

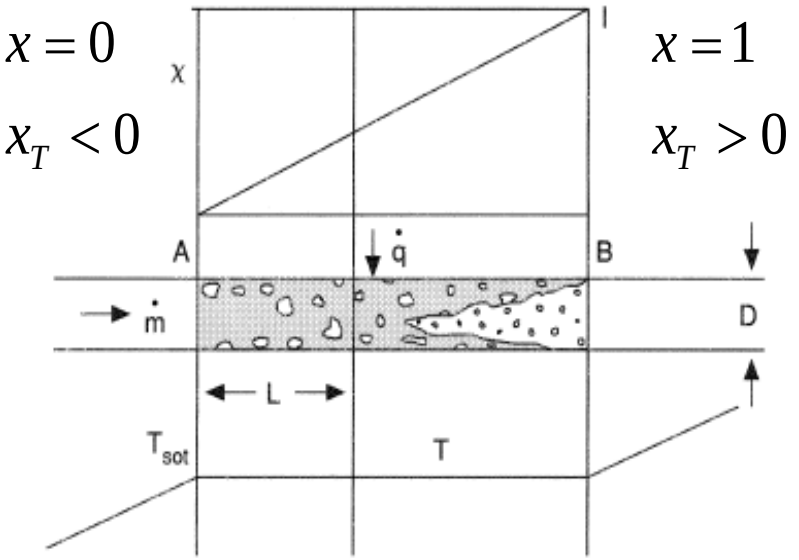
- 포화 상태 (열적 평형 상태)인 경우 ($T_l = T_g = T_{sat}$)

✓ Subcooling (과냉도)

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T$$

✓ Superheating (과열도)

$$\Delta T_{sup} = T - T_{sat}$$



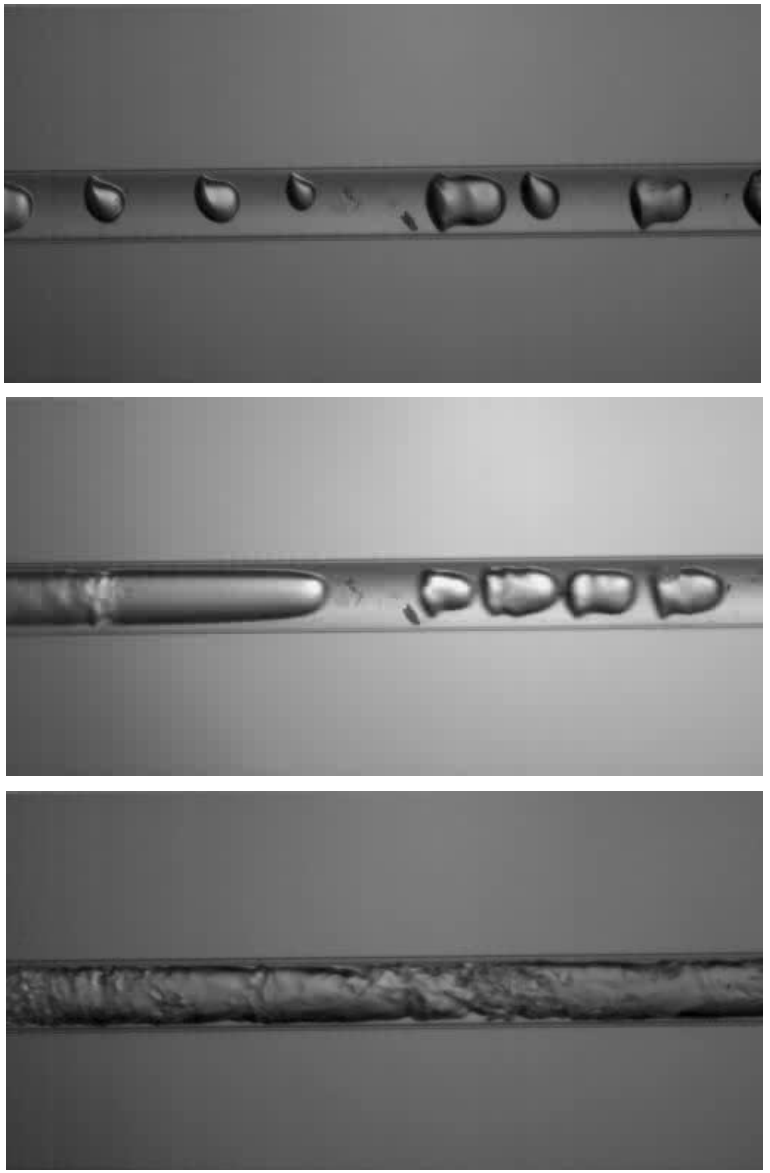
열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

- ✓ Single-component two phase flow
- ✓ Multi-component two phase flow

❖ 2상 유동의 특성

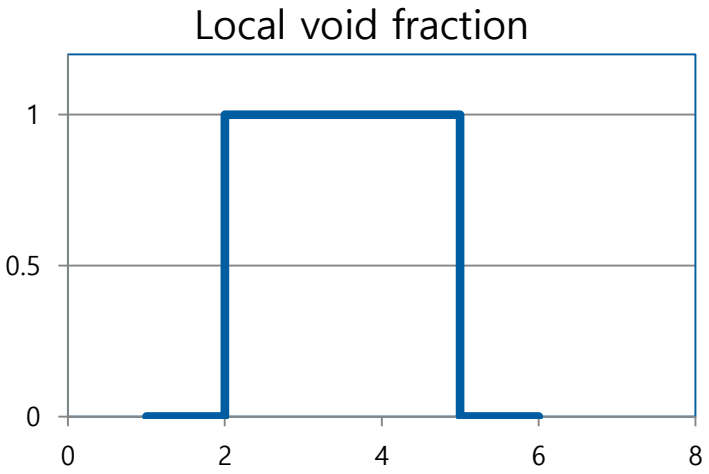
- ✓ 유동장 내부에서 두 상(Phase)의 경계면(Interface)이 다양한 형태로 존재
- ✓ 경계면 형상이 상(Phase)간의 물질/운동량/에너지 전달의 통로가 됨
- ✓ 유동양식(Flow Pattern, regime)
  - 2상유동의 경계면 형상 또는 상분포 특성을 나타내는 정성적인 구분



열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

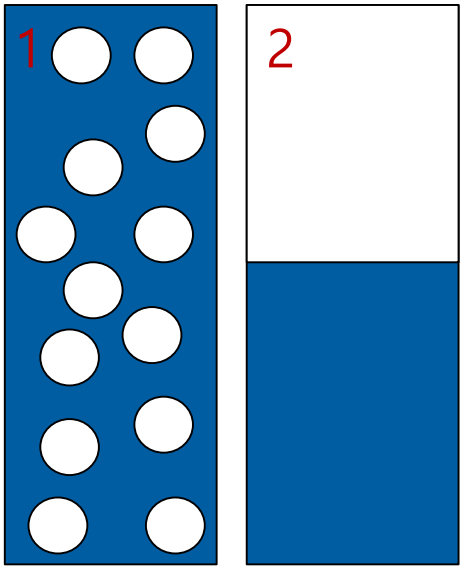
- ✓ Void Fraction (기포율, 기공율)
- ✓ Gas volume fraction
- ✓ Averaged and local void fraction

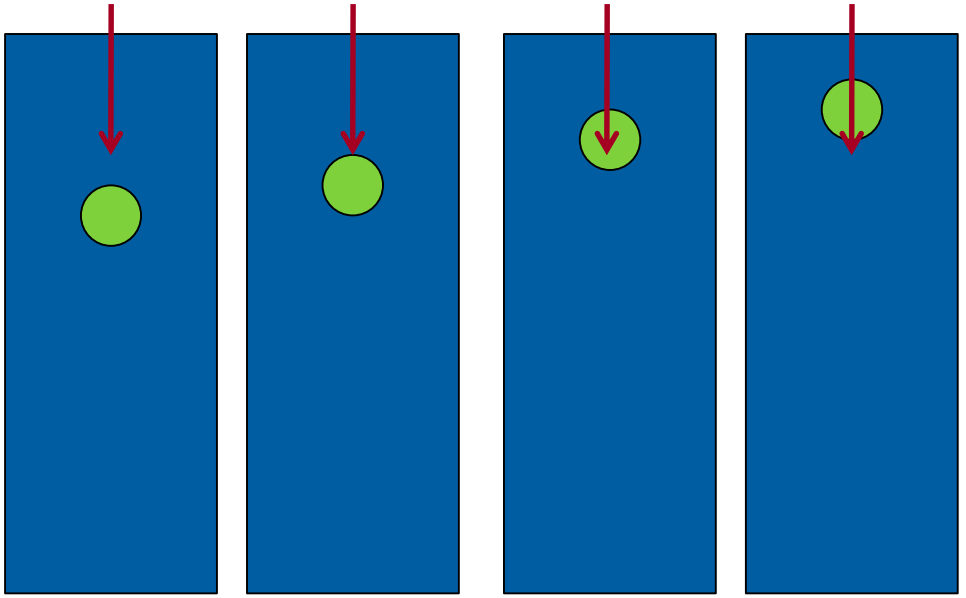


$$\alpha_g = \frac{V_{gas}}{V_{gas} + V_{liquid}} \qquad \alpha_l = \frac{V_{liquid}}{V_{gas} + V_{liquid}}$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1$$

$$\alpha_{g,1} = \alpha_{g,2}$$





열수력/열유체 기초

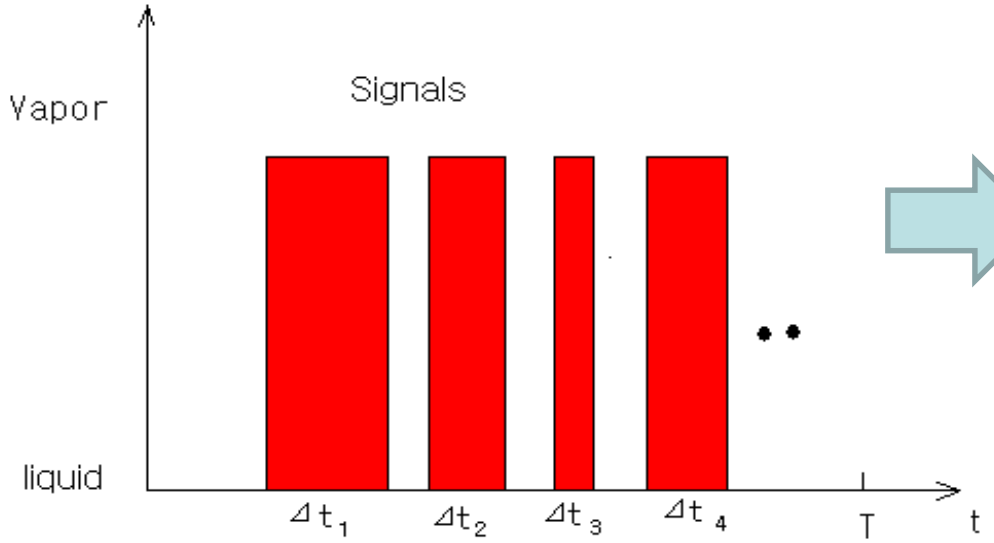
❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Void Fraction (기포율, 기공율)

✓ Time averaged void fraction

$$\alpha(\mathbf{x}) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} X_v(\mathbf{x}, t')\,dt' \qquad X_v(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{when vapor is at point } \mathbf{x} \text{ at time } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 전체 시간 중 기포가 차지하는 시간대의 합



$$\alpha(\mathbf{x}) = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N}\Delta t_i$$

열수력/열유체 기초

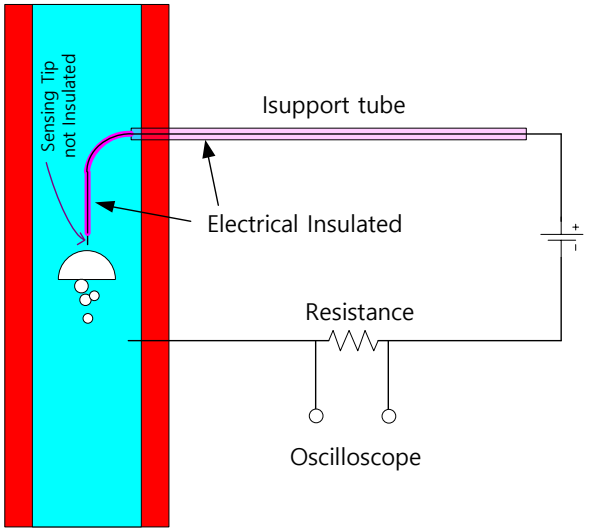
❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Void Fraction (기포율, 기공율)

- Volume averaged void fraction
- 전체 공간 중 기포가 차지하고 있는 공간의 비

✓ 정상 상태 시 기포율

- Time averaged, volume averaged void fraction
- 국소 센서 사용 시
  - Time averaged void fraction 측정
  - 센서를 이동시키며, 공간에 대해 평균
- 단면 촬영 시
  - Space averaged void fraction 측정
  - 장시간에 걸쳐 촬영 반복한 후, 시간에 대해 평균



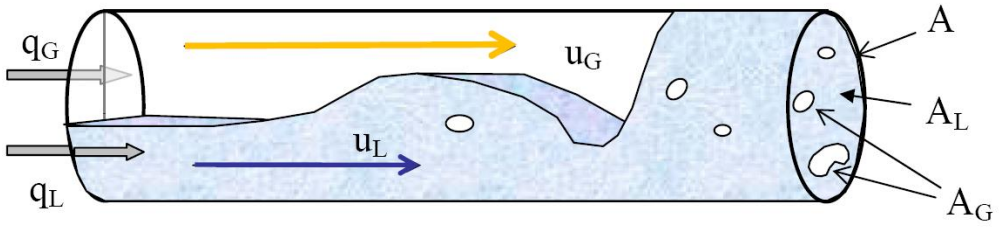
열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Phase Velocity (actual velocity, 실제 속도)

- Single phase flow: 면적=배관 면적

$$Q = uA \qquad u = Q / A$$



- Two-phase flow
  - 면적=각 유체가 차지하고 있는 면적

$$u_g = Q_g / A_g \qquad u_l = Q_l / A_l$$

  - 각 유체의 면적

$$A_g = \alpha_g A \qquad A_l = \alpha_l A = (1-\alpha_g) A$$

  - 기포율은 유동 조건에 따라 달라지며, 실험 입구 조건으로부터 실제 속도를 얻어 낼 수 없음

$$Q_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \qquad Q_l = \frac{\dot{m}_l}{\rho_l}$$

실험 조건

$$u_g = \frac{Q_g}{A_g} = \frac{Q_g}{\alpha_g A} \qquad u_l = \frac{Q_l}{A_l} = \frac{Q_l}{\alpha_l A}$$

기포율을 측정해야 알 수 있음.

열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Superficial Velocity (가상 속도)

$$j_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{Q_g}{A_g + A_l} = \frac{Q_g / A_g}{1 + A_l / A_g} = \frac{u_g}{1 + \dfrac{(1-\alpha_g)A}{\alpha_g A}} = \frac{u_g}{\dfrac{\alpha_g + (1-\alpha_g)}{\alpha_g}} = \alpha_g u_g$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} = \alpha_l u_l$$

기포율과 무관하게 실험 조건으로 결정됨.

$$j = j_g + j_l = \frac{Q_g + Q_l}{A}$$

Total volumetric flux of the mixture

✓ Actual velocity vs. superficial velocity ?

열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Relative velocity (상대 속도)

$$u_R = u_g - u_l$$

- 수직 유동 시 상대 속도 ?

✓ Slip ratio (속도 비)

$$S = u_g / u_l$$

- 수직 유동 시 속도 비 ?

✓ Mass flow rate (질량 유량)

$$\dot{m}_g = \rho_g u_g A_g = \rho_g u_g \alpha_g A = \rho_g j_g A$$

$$\dot{m}_l = \rho_l u_l A_l = \rho_l u_l \alpha_l A = \rho_l j_l A$$

Homogenous Flow

$$u_g = u_l \qquad u_R = 0 \qquad S = 1$$

$$u_g = \frac{j_g}{\alpha_g} = u_l = \frac{j_l}{\alpha_l} = \frac{j_l}{1-\alpha_g}$$

$$\therefore \ \alpha_g = \frac{j_g}{j_g + j_l}$$

열수력/열유체 기초

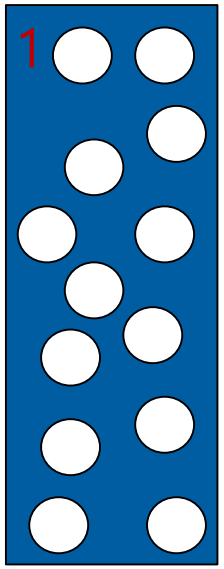
❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Interfacial Area Concentration (계면 면적 밀도)

- 단위 부피 당 계면 면적

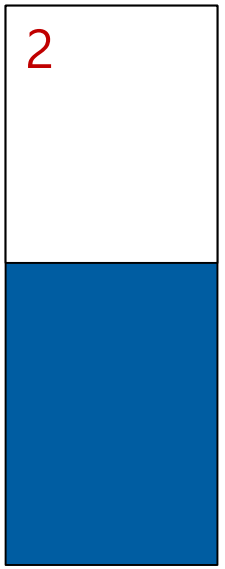
$$a_i = \frac{A_i}{V} = \left[\frac{1}{m}\right]$$

  – 기포율이 같더라도 유동양식, 기포 크기에 따라 크게 달라짐.



$$\alpha_{g,1} = \alpha_{g,2}$$

$$a_{i,1} >> a_{i,2}$$



열수력/열유체 기초

❖ 2상 유동(Two-Phase Flow)

✓ Interfacial Area Concentration (계면 면적 밀도)

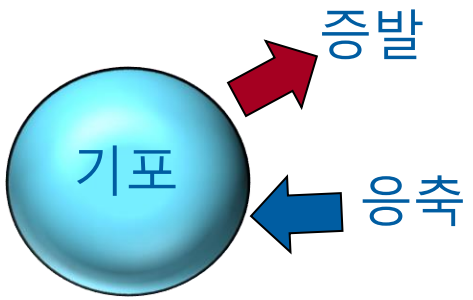
- 계면 면적 밀도의 중요성: 상 간 운동량 및 에너지 전달항에 비례

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) = \Gamma_v$$

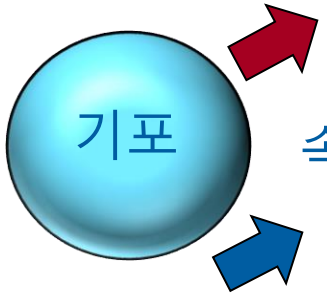
$$\int \Gamma_v dV = -\frac{V}{h_g^* - h_f^*}\left[\left(\frac{P_s}{P}\right)\left[H_{ig}\left(T^{s,n+1} - T_g^{n+1}\right) + H_{if}\left(T^{s,n+1} - T_l^{n+1}\right)\right]\right]$$

$H_{ig} = a_i h_{ig}$ 계면면적밀도

$H_{if} = a_i h_{if}$



$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g \rho_g \vec{u}_g\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g\right) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \left(\alpha_g \mathbf{T}_g\right) + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \mathbf{M}_g^{mass} + \mathbf{M}_g^{drag} + \mathbf{M}_g^{ndrag} + \mathbf{M}_g^{VM}$$



속도 차에 의한 마찰

$$\mathbf{M}_l^{drag} = F_{gl}(\vec{u}_g - \vec{u}_l)$$

$$\underline{F}_{gl} = \frac{1}{8} a_i \rho_c C_D \,|\underline{u}_g - \underline{u}_l|(\underline{u}_g - \underline{u}_l)$$

계면면적밀도