

유체역학 (04 차)

1장. 유체의 기본 성질

④ 유체의 성질

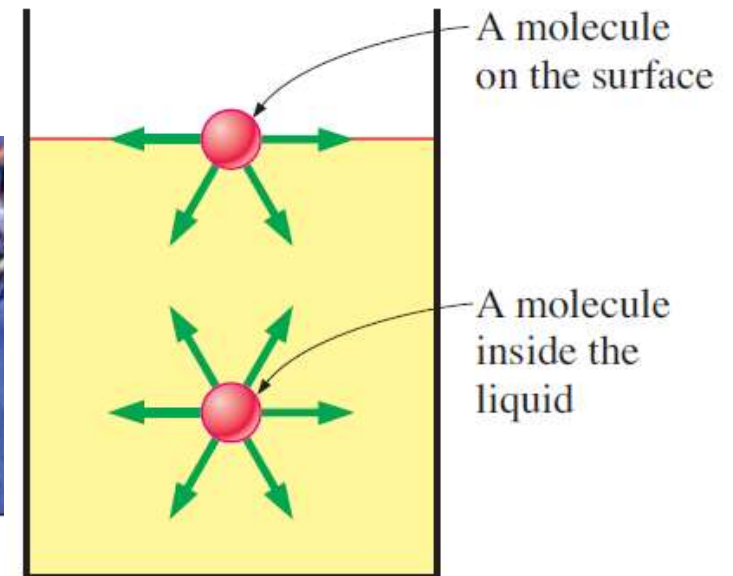
(표면 장력, 모세관현상)



1-8 유체의 성질 - 표면장력

◆ 표면 장력 (Surface Tension)

- 컵에 물이 넘치기 직전, 수면이 컵 상단보다 조금 높다
- 액체 방울이 고체 표면에서 풍선처럼 거동한다
- 액체 표면이 장력 하에서 탄성 막처럼 거동한다
- 표면 장력은 액체와 다른 유체(보통 기체)의 경계면에서 발생하는 액체의 특성
- 동종 분자들간 인력 ≠ 이종 분자들간 인력
 - 서로 다른 두 유체가 접한 경계면에서 한 쪽으로 치우치는 힘 발생
- 액체 표면을 최소화하려는 장력이다



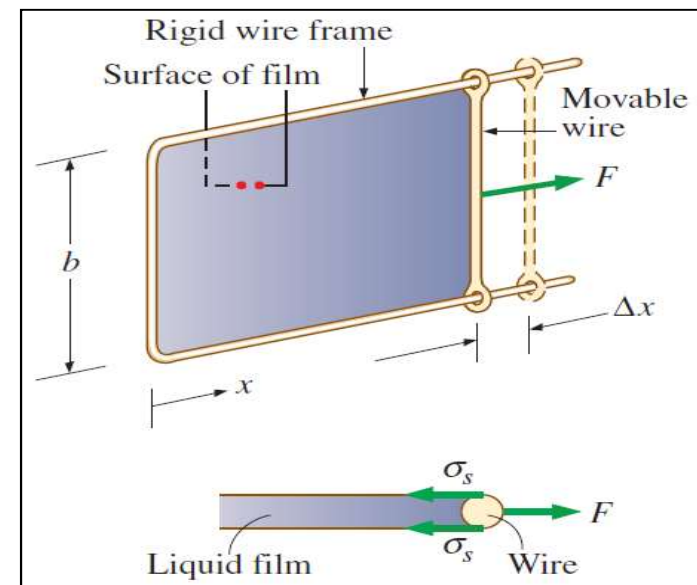
1-8 유체의 성질 - 표면장력

◆ 표면 장력 계수 (Coefficient of Surface Tension), σ_s

- 두 유체의 경계면 상에서 단위경계면적을 넓히는 데 필요한 에너지
→ 표면의 잘린 둘레 길이당 작용하는 힘으로 간주됨
- $[\sigma_s] = [\text{에너지/면적}] = [\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^2] = [\text{힘/길이}] = [\text{N}/\text{m}]$
- $T \uparrow \Rightarrow \sigma_s \downarrow$

표 1-6 액체의 표면장력 [N/m]

물질	표면유체	0°C	10°C	20°C	40°C	70°C	100°C
물	공 기	0.075558	0.074186	0.072716	0.069482	0.064386	0.058800
	포화증기	0.073206	0.071932	0.070560	0.067424	0.062524	0.057134
수은	진 공	0.47334	0.47236	0.47138	0.46746	0.46256	0.4557
에틸알콜	공 기	0.02401	0.023128	0.022246	0.020580	0.018228	—
	알콜증기	—	0.023618	0.022736	0.020972	0.018326	0.015484



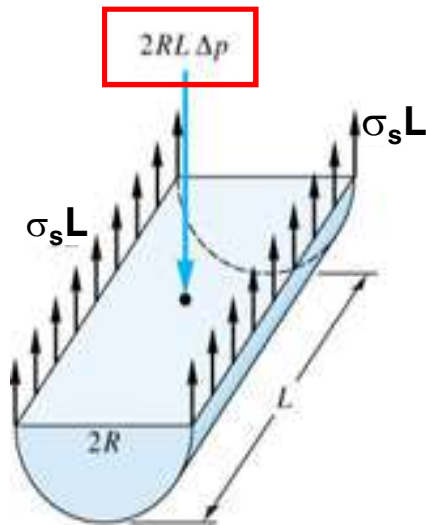
$$W = \text{Force} \times \text{Distance} = F \Delta x = 2b\sigma_s \Delta x = \sigma_s \Delta A \quad \sigma_s = \frac{F}{2b}$$



1-8 유체의 성질 - 표면장력

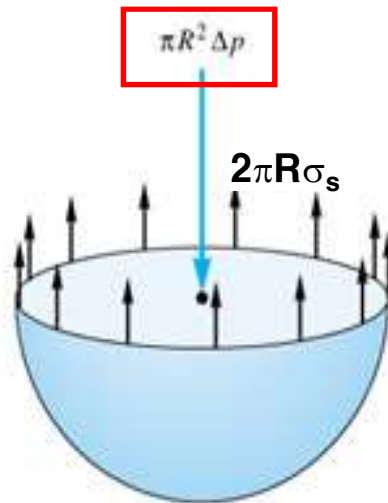
※ 표면 장력과 압력 변화 관계식

- 표면 장력에 의해 물방울의 내부 압력이 외부 압력보다 높게 된다
- 표면장력은 표면의 잘린 둘레를 따라 접선방향으로 작용한다 (표면에 평행)



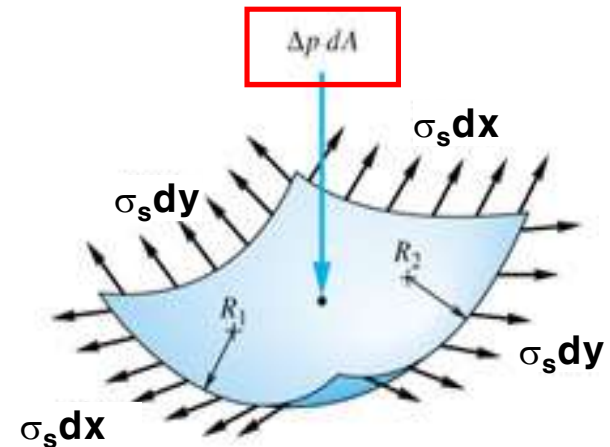
$$\Delta P = \frac{\sigma_s}{R}$$

(a) 원통형경계면



$$\Delta P = \frac{2\sigma_s}{R}$$

(b) 구형경계면



$$\Delta P = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

(c) 임의경계면

< 경계면의 표면장력으로 인한 압력변화 >



1-8 유체의 성질 - 표면장력

➤ 구형 유체 방울 :

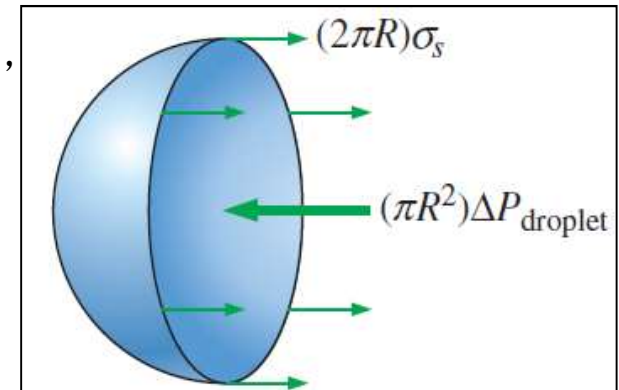
구 내부 압력 P_i , 외부 압력 P_o , 구의 반경을 R 이라고 할 때,

$$\sum F = (P_i - P_o)\pi R^2 - 2\pi R\sigma_s = 0$$

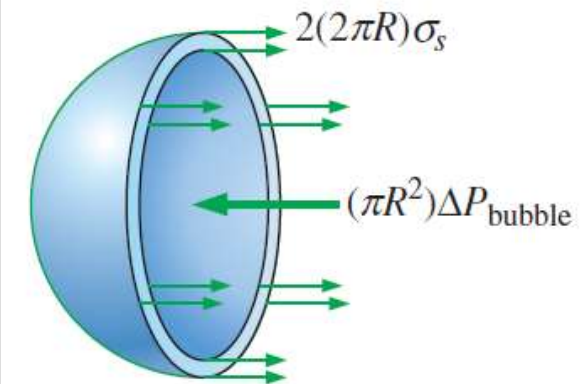
$$\rightarrow \boxed{\Delta P = \frac{2\sigma_s}{R}} \quad (\Delta P = P_i - P_o)$$

➤ 기포 : $\Delta P_{\text{기포}} = 2 \cdot \Delta p_{\text{구형방울}} = \frac{4\sigma_s}{R}$

➤ 원통형 표면 : $\boxed{\Delta P = \frac{\sigma_s}{R}}$



(a) Half of a droplet or air bubble



(b) Half of a soap bubble



1-8 유체의 성질 - 표면장력

➤ 임의 표면 :

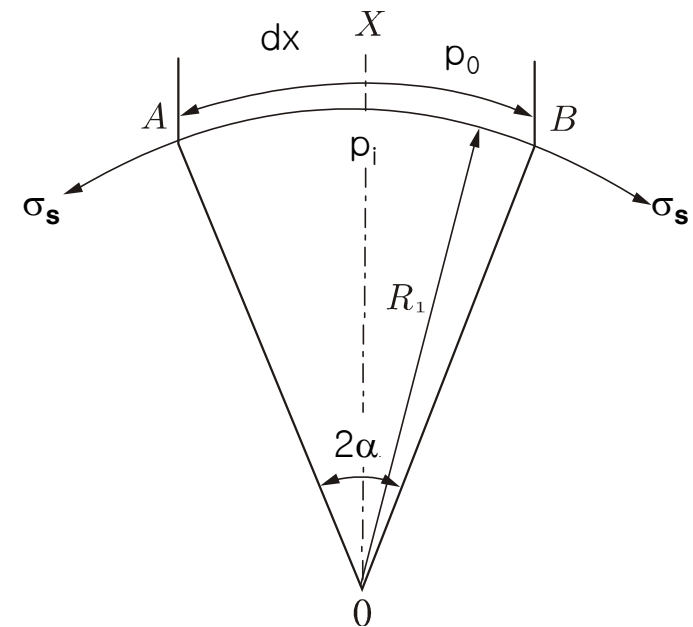
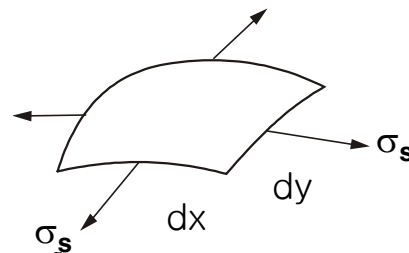
R_1, R_2 : 표면에 수직한 dx, dy 방향의 곡률.

OX 방향의 힘의 합력은 0 이므로

$$\sum F = (P_i - P_o)dxdy - (\sigma_s \sin \alpha) \cdot 2dy - (\sigma_s \sin \beta) \cdot 2dx = 0$$

$$\sin \alpha \approx \frac{dx/2}{R_1}, \sin \beta \approx \frac{dy/2}{R_2}$$

$$\rightarrow \Delta P = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



1-8 유체의 성질 - 표면장력

예제

1-12

20°C 물방울의 내부압력을 외부압력보다 0.01 kgf/cm^2 만큼 더 크게 하려면 물방울의 지름은 얼마가 되어야 하는가? 단, 20°C 물의 표면장력은 0.0074 kgf/m 이다.

예제

1-13

반경 5mm 비누기포의 내부 압력과 외부 압력의 차이를 구하라. 단, 비누기포의 표면장력은 $4.0 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ 로 한다.



1-8 유체의 성질 - 표면장력

예제

1-12

20°C 물방울의 내부압력을 외부압력보다 0.01 kgf/cm²만큼 더 크게 하려면 물방울의 지름은 얼마가 되어야 하는가? 단, 20°C 물의 표면장력은 0.0074 kgf/m이다.

풀이

$$\Delta p = p_i - p_o = \frac{2\sigma}{R} \text{ 에서}$$

$$R = \frac{2\sigma}{\Delta p} = \frac{2 \times 0.0074}{0.01 \times 10^4} = 0.000148 \text{ m} = 0.148 \text{ mm}$$

따라서 물방울의 지름은

$$d = 2 \times R = 0.296 \text{ mm}$$

예제

1-13

반경 5mm 비누기포의 내부 압력과 외부 압력의 차이를 구하라. 단, 비누기포의 표면장력은 $4.0 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ 로 한다.

풀이

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{R} = \frac{4 \times 4.0 \times 10^{-4} \text{ N/m}}{5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 0.32 \text{ N/m}^2$$



1-8 유체의 성질 - 표면장력

예제.
1-14

비누 기포의 반경이 5mm에서 10mm로 팽창했을 때 소요된 일을 구하라. 단, 비누 기포의 표면장력은 $4.0 \times 10^{-4} \text{N/m}$ 로 한다.



1-8 유체의 성질 - 표면장력

예제.
1-14

비누 기포의 반경이 5mm에서 10mm로 팽창했을 때 소요된 일을 구하라. 단, 비누 기포의 표면장력은 $4.0 \times 10^{-4} \text{N/m}$ 로 한다.

풀이

일 = 힘 \times 거리 = $F \times dr$ (거리: dr)

힘 = 압력 \times 면적 = $P \times 4\pi r^2$, (비누 기포 표면적: $4\pi r^2$)

비누 기포 내부/외부 압력차 = $P = \frac{4\sigma}{r}$

$$\begin{aligned} W &= \int_{r_1}^{r_2} F dr = \int_{r_1}^{r_2} P \times 4\pi r^2 dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{4\sigma}{r} \times 4\pi r^2 dr = \int_{r_1}^{r_2} 16\pi\sigma r dr \\ &= 8\pi\sigma(r_2^2 - r_1^2) \\ &= 8 \times 3.14 \times 4.0 \times 10^{-4} \text{N/m} \times [(10 \times 10^{-3} \text{m})^2 - (5 \times 10^{-3} \text{m})^2] \\ &= 0.75 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} = 0.75 \mu\text{J} \end{aligned}$$



1-9 유체의 성질 – 모세관 현상

◆ 모세관 현상 (Capillary effect)

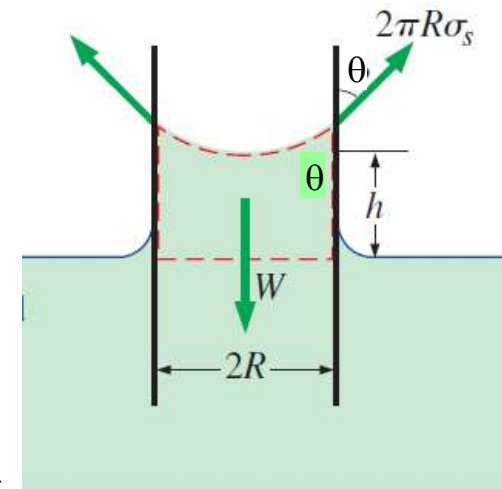
- 액체 중에 가는 관을 세우면, 관속의 액면의 높이가 높거나 낮게 되는 현상
- 액체의 응집력과 부착력에 기인한다
- 표면장력에 의한 수직분력=상승된 액체에 의한 무게 변화
- $\sum F = 2\pi R \cdot \sigma_s \cdot \cos \theta - (\gamma - \gamma_g) \cdot \pi R^2 \cdot h = 0$

$$\rightarrow h = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{(\gamma - \gamma_g) \cdot R}$$

- $\gamma \gg \gamma_g$ 인 경우(일반적), $\rightarrow h = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{\gamma R} = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{\rho g R}$

※ 접촉각, θ :

- 특정한 고체, 액체, 기체의 경계면이 고체면과 이루는 각
- 모세관현상에 의한 상승 높이 결정



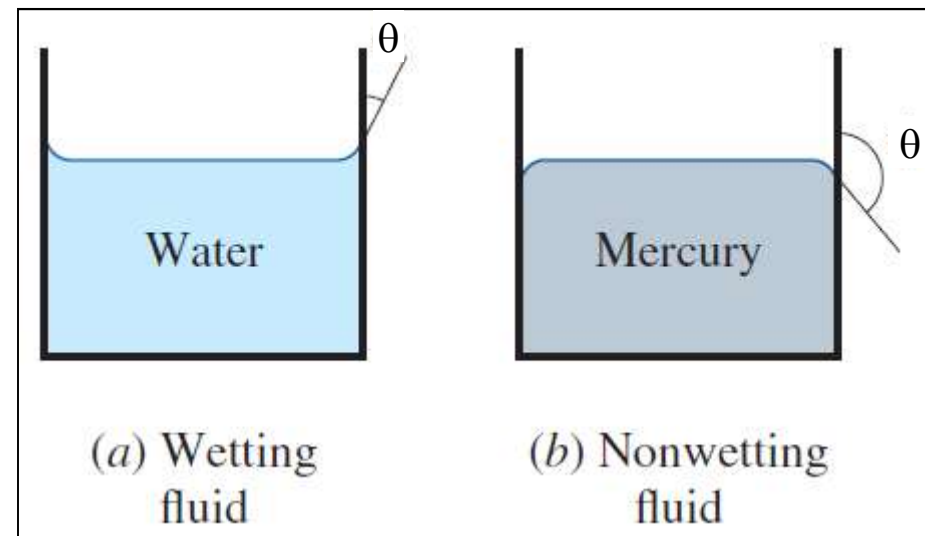
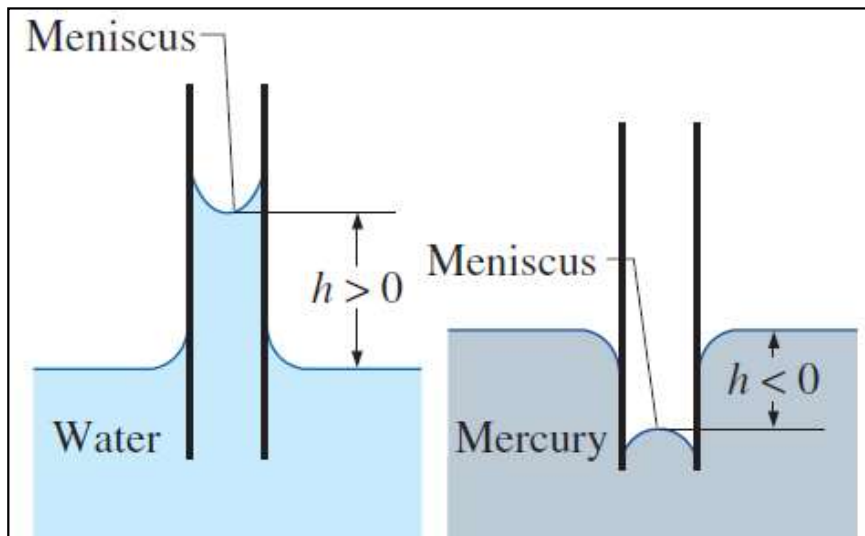
1-9 유체의 성질 – 모세관 현상

※ 상승 높이와 접촉각 θ : ($h = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{\gamma \cdot R}$)

- $\theta < 90^\circ$: $h > 0$ (응집력 < 부착력)
- $\theta > 90^\circ$: $h < 0$ (응집력 > 부착력)

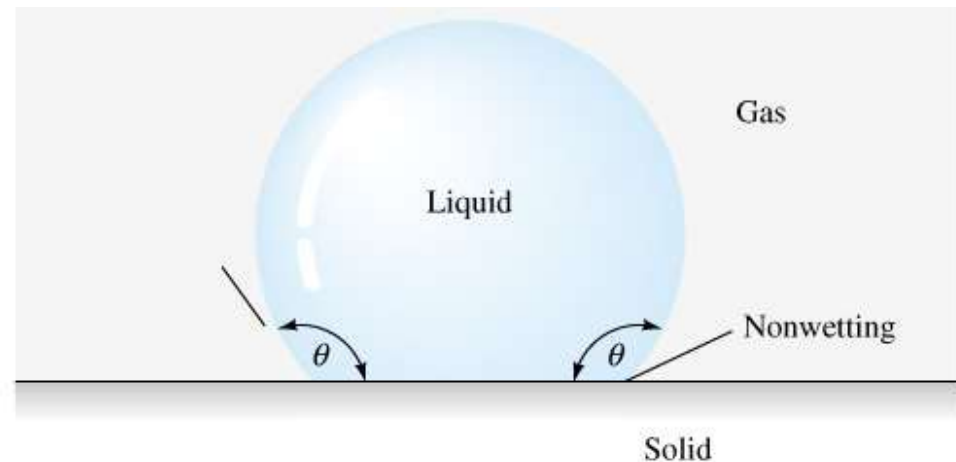
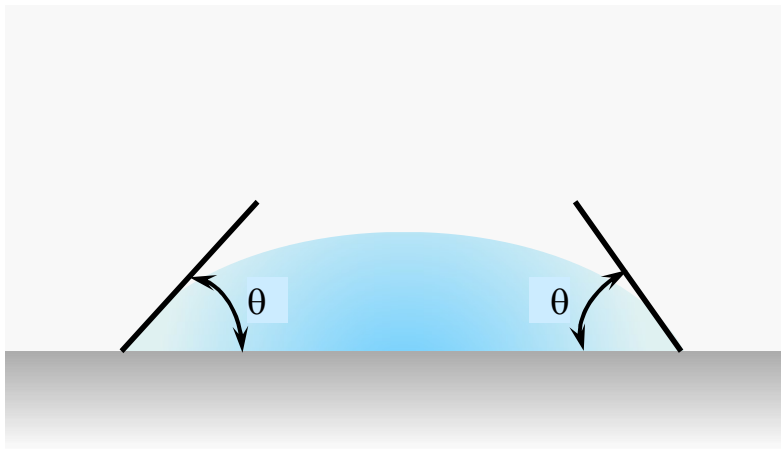
표 1-7 유체의 접촉각

고체	유체	표면유체	온도	접촉각
유리	수은	공기	실온	139°
	수은	물	실온	41°
	물	오래인산	실온	80°
운모	수은	공기	실온	126°
	물	아밀알콜	실온	0°
철(Fe)	올리브유	공기	실온	27° 33'
	물	공기	실온	5° 10'
동(Cu)	물	공기	실온	6° 41'
납(Pb)	물	공기	실온	2° 36'



1-9 유체의 성질 – 모세관 현상

- $\theta < 90^\circ$: 젖은 고체면 예) 물은 비누를 적신다
- $\theta > 90^\circ$: 젖지 않은 고체면 예) 물은 왁스를 적시지 않는다
- 물-공기-유리 $\theta=0^\circ$ 수은-공기-유리 $\theta=130^\circ$
단, 표면의 청결도에 영향을 받음.



1-9 유체의 성질 – 모세관 현상

예제.
1-15

지름 3mm의 유리관이 접촉각 10° 인 유체가 담긴 그릇 속에 세워져 있다. 유리와 액체사이의 표면장력이 $0.6 \text{ kg}_f/\text{m}$, 유체 밀도가 $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ 일 때, 액면으로부터의 모세관 액체 높이를 계산하시오.

예제.
1-16

지름 2 mm인 유리관 속을 올라가는 20°C 물의 모세관 상승높이를 구하여라. 단, 물의 비중량 γ 는 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, 표면장력 σ 는 $0.0074 \text{ kg}/\text{m}$ 이며, 접촉각 β 는 0° 이다.



1-9 유체의 성질 – 모세관 현상

예제.
1-15

지름 3mm의 유리관이 접촉각 10° 인 유체가 담긴 그릇 속에 세워져 있다. 유리와 액체사이의 표면장력이 $0.6 \text{ kg}_f/\text{m}$, 유체 밀도가 $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ 일 때, 액면으로부터의 모세관 액체 높이를 계산하시오.

풀이

$$h = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{\rho g R} = \frac{4\sigma_s \cos \theta}{\rho g D} = \frac{4 \times 0.6 \text{ kg}_f/\text{m} \times \cos 10^\circ}{800 \text{ kg}_f/\text{m}^3 \times 3 \times 10^{-3} \text{ m}} = 0.98 \text{ m}$$

예제.
1-16

지름 2 mm인 유리관 속을 올라가는 20°C 물의 모세관 상승높이를 구하여라. 단, 물의 비중량 γ 는 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, 표면장력 σ 는 $0.0074 \text{ kg}/\text{m}$ 이며, 접촉각 β 는 0° 이다.

풀이

$$h = \frac{4\sigma \cos \beta}{\gamma d} = \frac{4 \times 0.0074 \times \cos 0^\circ}{998.2 \times 0.002} = 0.0148 \text{ m} = 14.8 \text{ mm}$$





1장 유체의 성질



연습과제 (REPORT 03)

- 연습문제 1장 19번, 22번을 풀어보시오.
- 각종 고체/유체/표면유체의 접촉각을 조사하라.

