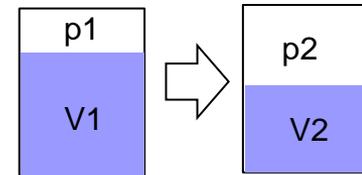


제1장 유체의 기본성질

1.7 유체의 압축성

1.7.1 체적(탄성)계수 (bulk modulus of elasticity, E_v)

- 의미 : 유체의 압축성의 정도를 나타내는 계수
- 정의 : 체적 V 가 미소변화 dV 를 일으키는데 필요한 압력과와의 비
- 차원 : FL^{-2}
- 단위 : $N/m^2 = Pa$
- 체적계수가 크면 유체는 상대적으로 압축하기 어렵다는 뜻 = 비압축성
- 예 : 물의 체적 1%를 압축하는 데는 2,150MPa의 압력이 필요하다.
따라서, 대부분의 액체는 공학문제에서 비압축성으로 본다.



$$E_v = \frac{dp}{dV/V} \quad \text{즉,} \quad E_v = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (\because m = \rho V)$$

[참고] 대표적인
물성치는 책
표지 뒤의 Table
1.3과 1.4참조

제1장 유체의 기본성질

1.7.2 기체의 압축과 팽창

- 기체가 압축 또는 팽창 시, 압력과 밀도의 관계

- 등온 조건 (Isothermal) : 온도가 일정한 경우 $\frac{p}{\rho} = const$

- 등엔트로피 조건 (isentropic) : 마찰이 없고 주위와 열 교환이 없는 경우 $\frac{p}{\rho^k} = const$

(단, 비열비 $k = \frac{C_p}{C_v}$, $R = C_p - C_v$)

[참고] 대표적인 물성치는 책 표지 뒤의 Table 1.3과 1.4와 부록 B의 표B.2 참조

- 기체의 체적탄성계수

- 등온 과정 : $E_v = \frac{dp}{d\rho} \rho = const \times \rho = p$

- 등엔트로피 과정 : $E_v = \frac{dp}{d\rho} \rho = const \times k \times \rho^{k-1} \times \rho = k \times const \times \rho^k = kp$

제1장 유체의 기본성질

- 대기압 101kPa(abs), 비열비 $k=1.4$ 일 때
 - 표준공기 $E_v = 142\text{kPa}$
 - 물 $E_v = 2,150\text{MPa}$ } 15,000배
- 기체의 경우는 압축성의 영향에 주의하여야 한다.
- 단, 압력의 변화가 작은 경우는 기체도 비압축성 유체로 취급할 수 있다.

제1장 유체의 기본성질

예제 1.6 : 기체의 등엔트로피 압축

절대압력 101.3kPa인 공기, 0.03m³가 0.015m³까지 등엔트로피 압축된다.
최종압력은?

• 등엔트로피 과정이므로
$$\frac{p_i}{\rho_i^k} = \frac{p_f}{\rho_f^k}$$

그리고, 기체의 질량은 밀폐되어 있으므로 일정하다.

즉, $m = \rho V = \text{일정}$ 에서, 체적 V 가 반으로 줄면 밀도 ρ 는 두 배가 된다.

따라서,

$$p_f = \left(\frac{\rho_f}{\rho_i} \right)^k p_i = 2^{1.4} (101.3 \text{ kPa}) = 267 \text{ kPa (abs)}$$



제1장 유체의 기본성질

1.7.3 음속 (speed of sound, c)

• 음속 (c) : 작은 교란이 전파되는 속도

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (11\text{장 참조})$$

• 체적탄성계수로 나타내면 $c = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}}$

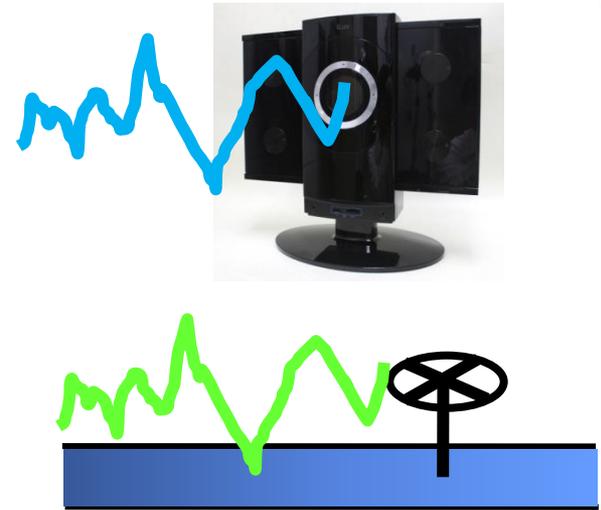
• 등엔트로피 과정(교란小, 열전달 무시)으로 가정하면 $E_v = kp$ 이므로 $c = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}$

• 이상기체법칙을 적용하면 $c = \sqrt{kRT}$: 음속은 \sqrt{T} 에 비례한다.

• 공기의 음속 : $k=1.4$, $R=286.9\text{J/kg.K}$, $T=15^\circ\text{C}(288\text{K}) \rightarrow \underline{C=340.4\text{m/s}}$

• 물의 음속 : $E_v=2.19\text{GN/m}^2$, $\rho=998.2\text{kg/m}^3$, $T=20^\circ\text{C}(293\text{K}) \rightarrow \underline{C=1,481\text{m/s}}$

• if, 완전 비압축성 유체($E_v=\infty$) $\rightarrow C = \infty$



제1장 유체의 기본성질

예제 1.7 : 음속과 Mach 수

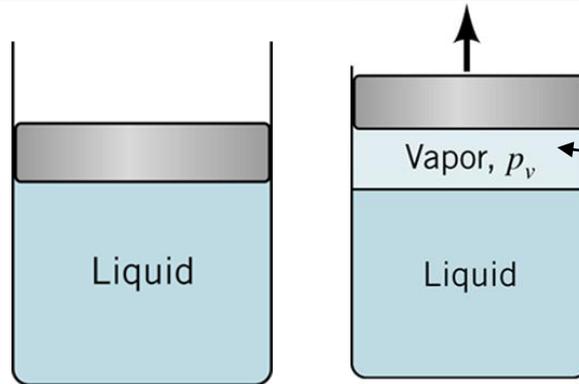
제트비행기, $T = -54^\circ\text{C}$, 비열비 $k = 1.4$, 고도 10,500m에서 $V = 885\text{km/h}$ 로 비행
비행기 속도 v 와 주어진 높이에서의 음속 c
와의 비?

- $c = \sqrt{kRT} = 297\text{m/s}$
- $V = 885\text{km/h} = 246\text{m/s}$
- 그러므로, $V/C = 0.828$: **Mach number**
- [참고] $Ma < 1$: 아음속 (subsonic speeds)
 $Ma > 1$: 초음속 (supersonic speeds)



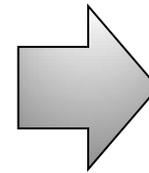
제1장 유체의 기본성질

1.8 증기압 (vapor pressure)



- 증기압 : 액체 표면에서 탈출하는 증기(공기방울)에 의해 형성된 압력
- 이러한 현상을 비등 (boiling) 이라 한다.

- 평지(**101.3kPa(abs)**) : 물, 100°C (373K) 에서 비등(기포발생)
- 해발 9,000m (**30kPa(abs)**) : 69°C (294) 에서 비등(기포발생)



주위의 압력이 낮으면 낮은 온도에서 (비등) 라면이 끓는다.

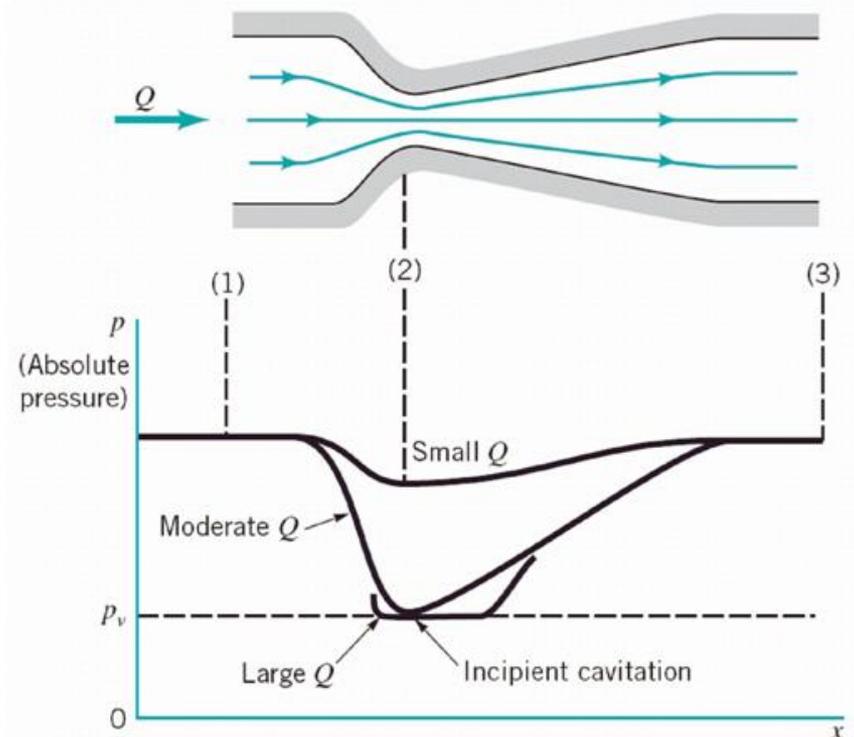
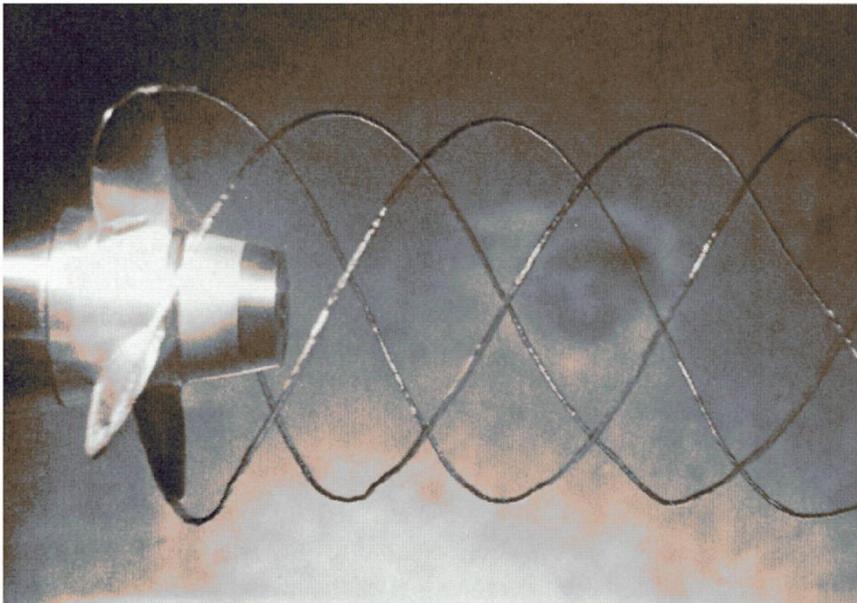
극단적으로, **0.61kPa(abs)** 에서는 0도에서 라면이 끓기 시작한다. 그러나 라면에 열이 충분히 전달 되지 않으므로 설익는다. 맛이 없다.

제1장 유체의 기본성질

• 공동현상 (cavitation)

- 압력이 증기압까지 떨어져서 비등(기포발생) 발생
- 발생한 기포 → 순간적인 와해 → 충격 발생 → 부식, 고장의 원인

▷ 선박의 프로펠러에서의 케비테이션 (cavitation from a propeller)



제1장 유체의 기본성질

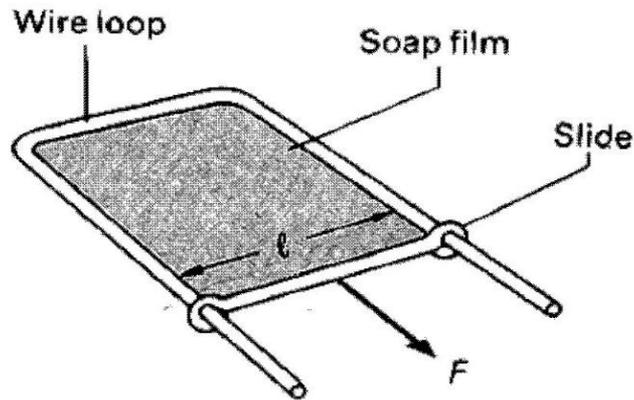
1.9 표면장력 σ

- 정의 : 액체, 기체, 고체 사이의 접촉면에서 작용하는 분자간 인력의 단위길이 당 작용하는 힘
- $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 72 \text{ dyne/cm @ S.T.P}$
(S.T.P: Standard Temperature and Pressure, 표준대기압, 0°C, 1기압)
- 차원 : FL⁻¹
- 현상
 - ① 액체 속의 기포의 크기 (Bubble Formation in liquids)
 - ② 물방울의 분열 (Breakup of liquid jets into drops)
 - ③ 와인의 눈물 (Wine Tears)

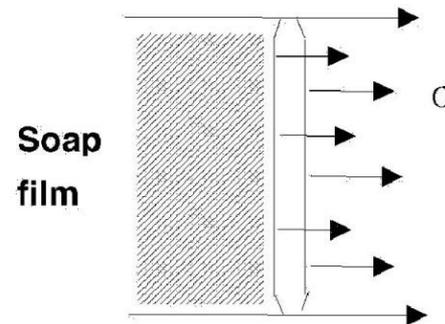


제1장 유체의 기본성질

(Ex) Wire loop and soap film



(only a few molecules thick)



Find force, F

(Solution)

Consider the free-body diagram of soap film around the slide.

This film has surfaces, one on each side which surface tension occurs.

Ignore the effect of corner.

$$\Sigma F = \sigma (2\ell)$$

$$\therefore F = 2\sigma\ell$$

제1장 유체의 기본성질

(Ex) **원형 물방울**에 작용하는 압력과 표면장력에 의한 힘(Forces due to pressure and surface tension acting on a spherical droplet)

Force due to surface tension (F_σ) = $2\pi R\sigma$ (1)

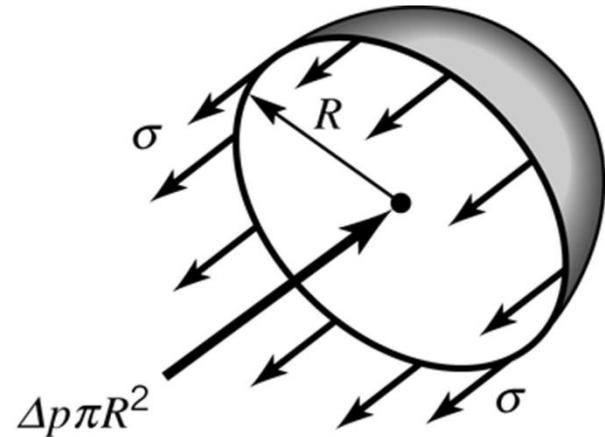
Force due to pressure (F_p) = $\pi R^2(P_i - P_o)$ (2)

By force balance, $F_\sigma = F_p$

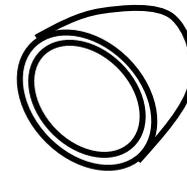
$$2\pi R\sigma = \pi R^2(P_i - P_o)$$

$$\therefore P_i - P_o = \frac{2\sigma}{R}$$

→ 액체의 질량은 무시하였음



(Discussions)



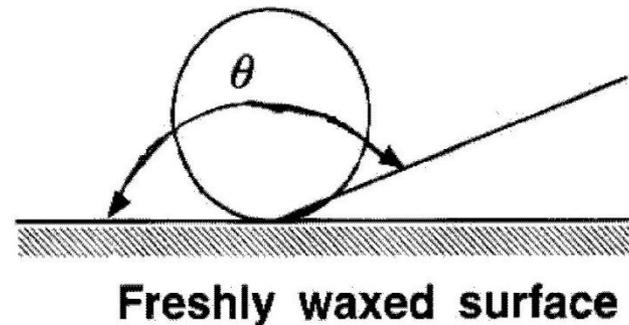
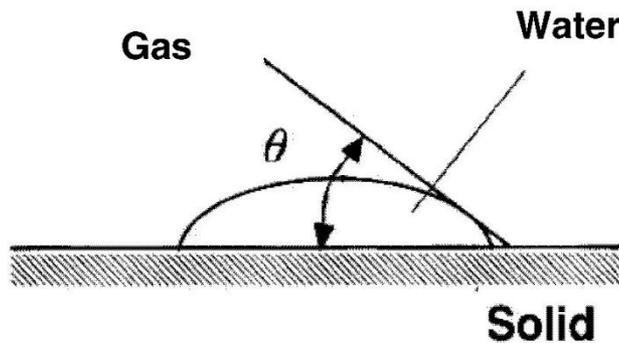
- $\Delta P_{bubble} = \frac{4\sigma}{R}$ (White, P33)

→ 비누방울은 거의 동일한 반경 R의 내부 및 외부표면을 가지고 있으므로

$$\Delta P_{bubble} \approx 2\Delta P_{droplet}$$

제1장 유체의 기본성질

Wetting & Non-Wetting



θ = contact angle

Wetting : $\theta < 90^\circ$

Non-Wetting : $\theta > 90^\circ$

(Ex)

$\theta = 0$, for water, air, and clean glass(깨끗한 유리위의 물)

$\theta = 129$, for mercury, air, and glass.(유리위의 수은)

$\theta = 105$, for water, air, and parafin wax.(파라핀왁스 표면)

제1장 유체의 기본성질

예제 1.8 : 튜브에서의 모세관 현상

작은 직경의 유리튜브를 물속에 담그면, 물은 튜브의 벽을 따라 표면장력에 의해 위쪽으로 작용하는 힘과 액체 기둥의 질량에 아랫방향으로 작용하는 힘이 평형을 이루는 지점까지 올라온다.

∴ Cohesion(물분자의 응집력) < Adhesion(벽과 물 사이의 점착력 또는 부착력)
적시지 않는 상황에서는 튜브속의 액체는 바깥쪽 액체보다 낮은 위치에 있다.

(Proof)

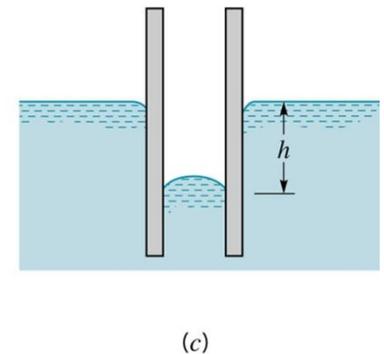
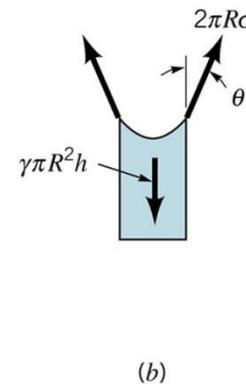
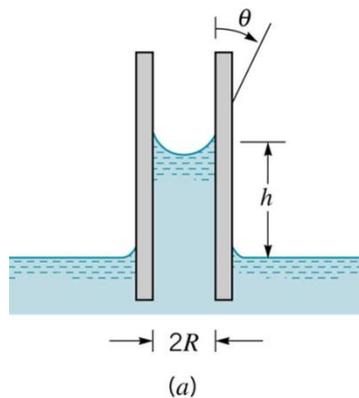
$$\sum F_y = \sum F_\sigma + \sum F_g + \sum F_{\text{pressure}} = 0$$

$$\sum F_\sigma = \pi d \sigma \cos \theta$$

$$\sum F_g = - \frac{\pi}{4} d^2 h \rho g$$

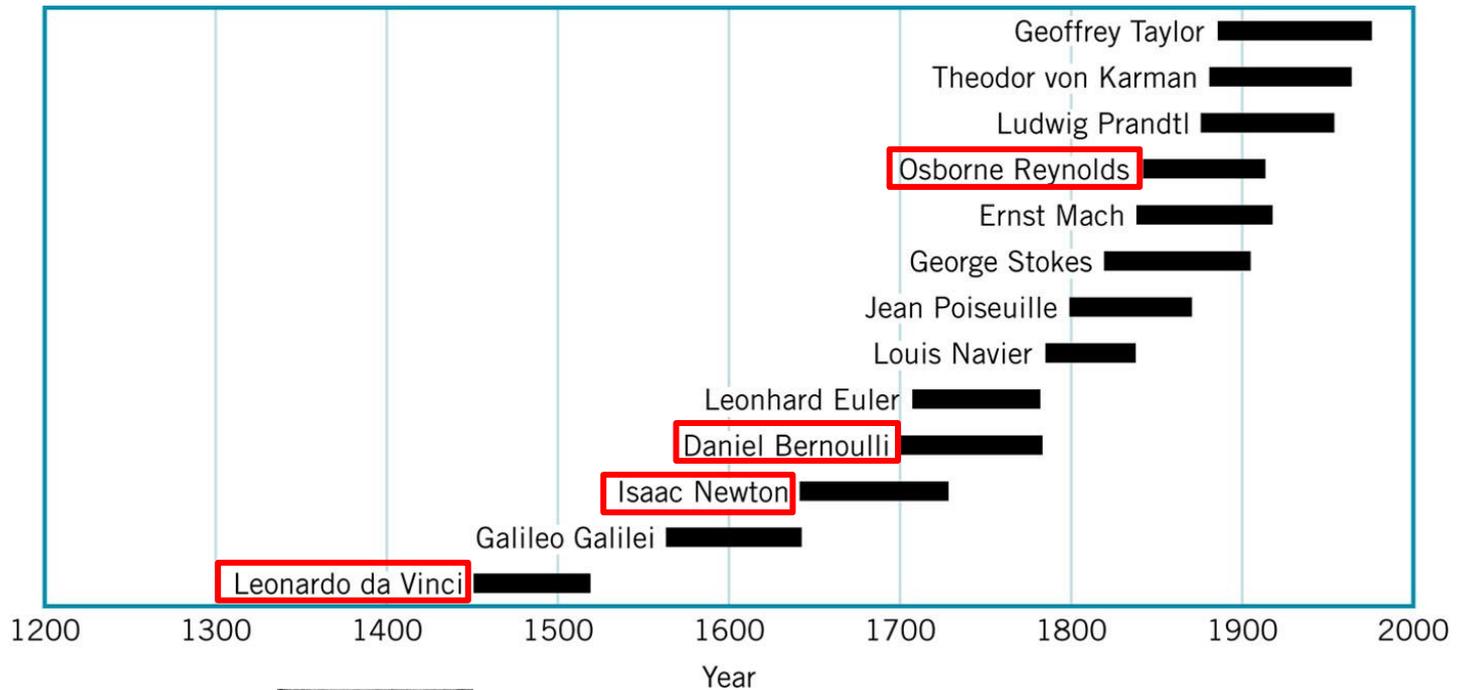
$$\sum F_{\text{pressure}} = 0 \quad (\because P_{\text{surface}} = P_{\text{atm}})$$

$$\therefore h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d}$$



제1장 유체의 기본성질

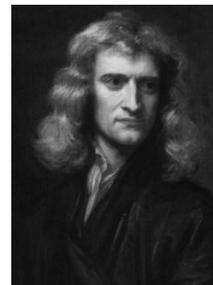
1.10 유체역학 역사의 요약



Leonardo da Vinci



Daniel Bernoulli

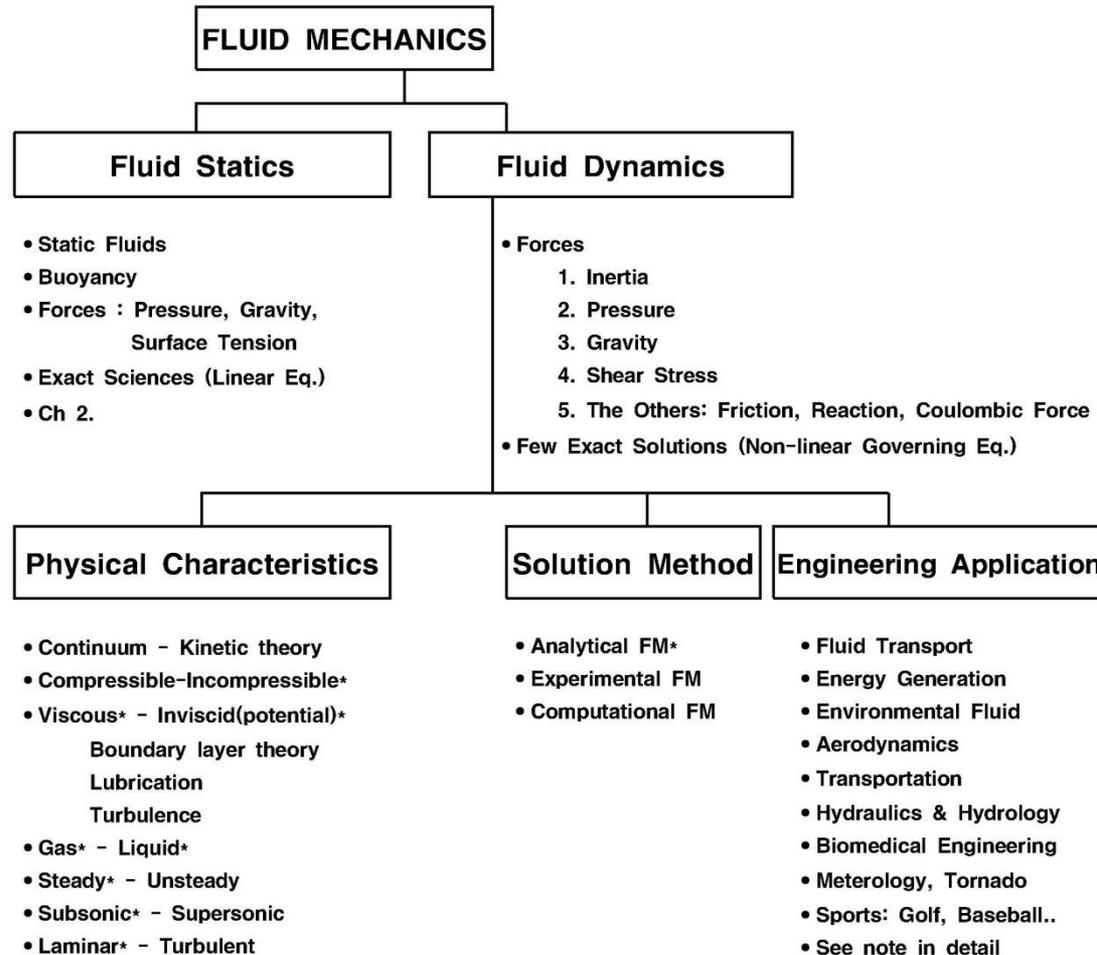


Isaac Newton



Osborne Reynolds

Scope of Fluid Mechanics



Analytical Fluid Mechanics

- ① Integral Analysis (Control Volume) (ch5)
- ② Differential Analysis (Infinitesimal Elements) (ch6)
- ③ Dimensional Analysis (ch7)