

Fluids

- Density, pressure, ...
- Pressure transmitted: Pascal's Principle
- Pressure vs depth for static liquid
- Bouyancy: (Archimedes)
- Fluids in motion
- Equation of continuity
- Bernouli's equation

물질의 상태

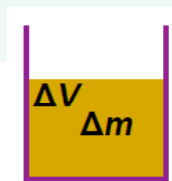
- 상온에서 대부분의 물질은 고체, 액체, 기체 중의 하나의 상태로 존재한다.
 - ❖ 고체(solid) – 형태를 가지면 일정한 경계가 있다.
 - ❖ 액체(liquid) – 형태가 없으나 일정한 경계가 있다
 - ❖ 기체(gas) – 형태도 없고 경계도 없다.
 - 기체를 빈 공간에 놓으면 한 없이 퍼짐.
- **유체(fluid)**: 유체는 약한 응집력으로 뭉쳐진 임의적으로 정렬된 분자들의 집합이다. 또한 용기에 담겨질 수 있으며 동시에 용기벽에 압력을 준다.
 - ❖ 액체, 기체, plasma
 - ❖ 유체의 물리적 현상은 대개 베르누이 원리에 의해 이해될 수 있다.

Physics 1 3

유체

- 유체 : 고체처럼 형태가 없다. 그러나 한정된 공간에 들어갈 수 있는 질량은 유체마다 다른 유체의 고유한 특성이다.
 - ❖ 주어진 공간에 얼마나 질량이 들어가는가 → 밀도의 개념이 필요
- 물질의 **밀도(density, ρ)**:
 - ❖ 단위부피당 물질의 질량
 - ❖ SI-단위: kg/m^3

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \xrightarrow{\text{균일}} \frac{M}{V}$$



물질	밀도	물질	밀도
공기(20°C 1기압)	1.21	지구: 평균	5.5×10^3
물(20°C 1기압)	0.998×10^3	속	9.5×10^3
바닷물(20°C 1기압)	1.024×10^3	지표면	2.8×10^3
얼음	0.917×10^3	중성자별	10^{18}
철	7.9×10^3	블랙홀	10^{19}

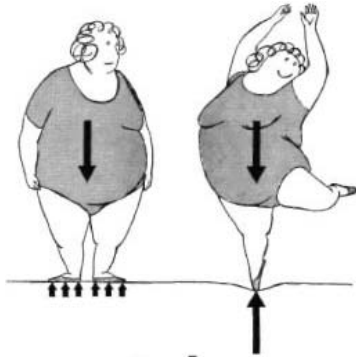


$$\rho(\text{water}) = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$$

밀도가 클수록 같은 질량이 차지하는 부피가 작다

Physics 1 4

압력



- ✓ 땅에 같은 무게가 전달되지만 효과가 다르다
- ✓ 땅이 받는 효과를 적절하게 표현하려면 단위면적당의 힘의 개념이 필요함

- 압력: 단위면적에 수직방향으로 작용하는 힘의 크기

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta A} \Leftrightarrow \text{force}$$

단위: $\text{N/m}^2 = \text{Pa(Pascal)}$

압력의 단위, $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ atm(대기압)} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = 133.332 \text{ Pa} \\ 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} \\ 1 \text{ psi} = 6894.73326 \text{ Pa} \end{array} \right.$

보기: 몇 가지 상황에서의 압력 (단위 Pa)

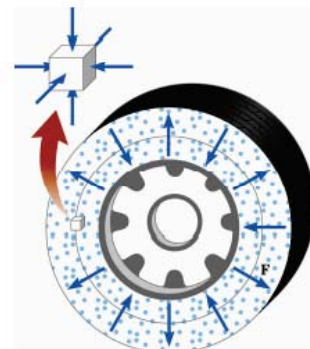
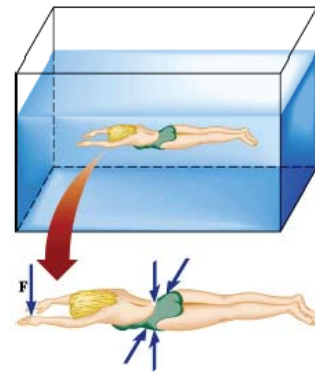
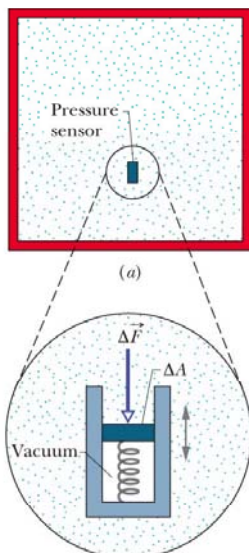
상황	압력	상황	압력
태양의 중심	2×10^{16}	자동차 바퀴	2×10^5
지구의 중심	4×10^{11}	바다표면	1×10^5
실험실 실현 최고 압력	1.5×10^{10}	실험실 실현 최저 압력	10^{-12}

Physics 1 5

$$P = \frac{F}{A}$$

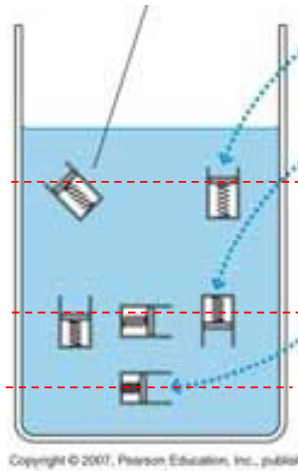


재는방법

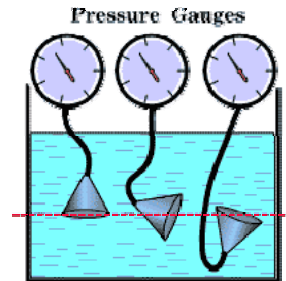


Physics 1 7

압력은 모든 방향에서 동일하다



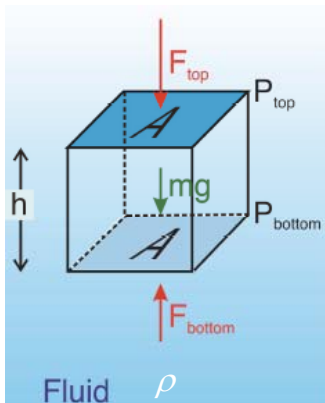
같은 깊이에서는
압력계의 방향에
상관없이 같은
압력을 나타낸다



힘-질량의 관계 → 압력-밀도의 관계

Physics 1 8

정지유체 속에서 압력



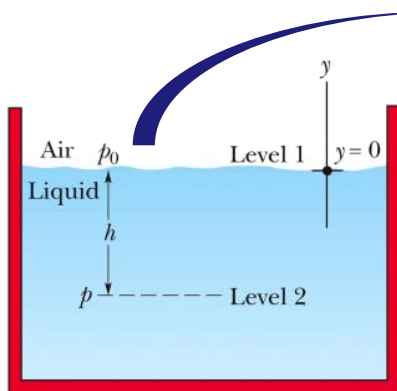
- 정지 유체(밀도 ρ)에 대해서: 임의의 상자 내부 유체가 받는 알짜힘 = 0

- 윗면이 받는 압력: $F_{top} = P_{top} A$ (\downarrow)
- 아래면이 받는 압력: $F_{bottom} = P_{bottom} A$ (\uparrow)
- 상자 내 유체 무게: $mg = \rho Ahg$ (\downarrow)

$$F_{net} = P_{bottom} A - P_{top} A - mg = 0$$

$$P_{bottom} = P_{top} + \frac{mg}{A} = P_{top} + \rho gh$$

$$\Delta P = \rho gh$$



- 깊이 h 인 지점에서 유체의 압력:

$$P = P_0 + \rho gh$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{압력} \\ \text{at } h \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{대기압} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{단위면적당} \\ \text{유체기둥 무게} \end{array} \right)$$

Physics 1 9

압력이 대기압의 두 배가 되는 수면 깊이는?

• Ans : $\Delta P = \rho gh$

for $\Delta P = P_0 \longrightarrow P_0 = \rho gh$

$$h = \frac{1.01 \times 10^5 \text{ Pa}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)} = 10.3 \text{ m}$$

매 10m마다 1기압씩 올라간다

꼭대기: $P = P_0 = \text{대기압}$
 바닥: $h = 30\text{m}$
 $P = P_0 + \rho gh = P_0 + 3P_0 = 4P_0$
 주변의 압력 = $P_0 \rightarrow \Delta P = 3P_0$

바닥의 파이프 끝에서 압력은?

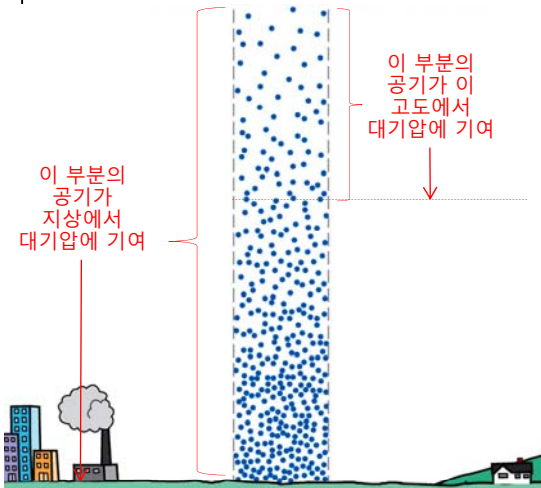


물이 제일 빠르게 나오는 구멍은?



물줄기가 바닥에 닿는 위치가 좀
 이상하지 않는가?

대기압 = 공기기둥의 무게



공기는 액체와 달리 **압축이 된다**. 따라서 압력이 높은 곳에서 공기밀도가 높아진다 (Boyle의 법칙)

- 공기의 압력은 분자들의 충돌에 의해서 생긴다. **중력에 의해서 분자들이 지상으로 내려오지 않는 것은 임의 지점에서 윗부분의 공기무게와 그 지점에서 대기압에 의한 힘이 평형을 이루기 때문이다.**
- 대기압은 지상에서 가장 크고 위로 올라갈수록 작아진다.



• 머리면적이 받는 대기압

$$1 \text{ atm} \sim 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\text{머리면적} \sim \pi \times (0.15 \text{ m})^2 \sim 0.1 \text{ m}^2$$

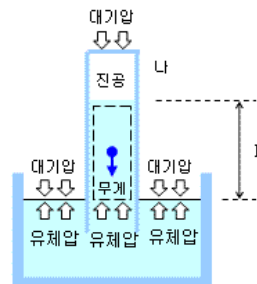
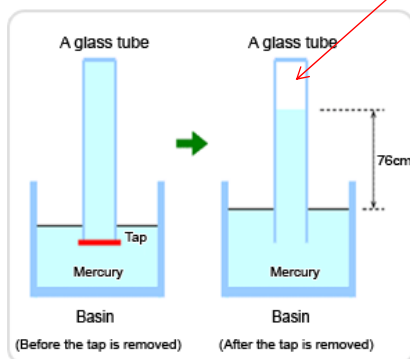
$$\begin{aligned} \text{머리를 누르는 힘} &= \text{대기압} \times \text{머리면적} \\ &= (1 \text{ atm}) \times (0.1 \text{ m}^2) = 10^4 \text{ N} \sim 1 \text{ ton} \text{ 무게} \\ \text{한승연은 두통이 작다...?} \end{aligned}$$

☞ 그러면 왜 체중계에는 1ton이 더해지지 않는가?

수은기둥의 높이는?

- 한 쪽이 닫힌 유리관에 넣은 수은기둥을 거꾸로 세우면 유리관 속의 수은은 일정한 높이에서 더 이상 내려가지 않고 멈추고, 유리관의 윗부분은 진공(**Torricelli vacuum**)이 된다.
- 액체 표면에서 수은 무게에 의한 압력과 대기압이 같을 때 내려가는 것을 멈춘다.

Torricelli vacuum

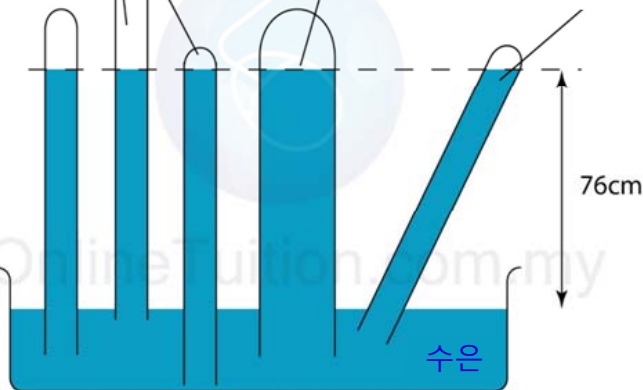


• 대기압(P_0) = 표면에서 유체압력
 = 수은기둥 무게압력($\rho_{Hg}gh$)
 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa} = (13600 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)h$
 $\therefore h = 0.758 \text{ m}$

실린더를 더 깊이
하거나 얇게 하더라도
액체기둥 높이는
변함없다.

실린더의 지름이
달라도 액체기둥
높이는 변함없다

실린더가 경사지더라
도 액체높이는 변함
없다. 추가된 액체의
무게는 벽이 지탱한다

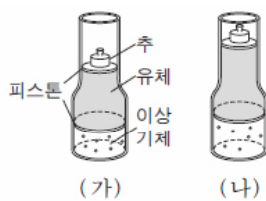


Q. 달에서 같은 실험을 하면 높이는 어떻게 변하는가?

← Slide 14

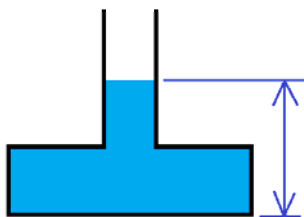
수능문제..

(가)의 이상기체를 팽창시켜서 (나) 처럼 되었다. 아래 실린더가 받는 압력은 어느 쪽이 더 큰가? (두 실린더의 유체의 양은 같다)



한승연: 유체의 무게가 변하지 않으므로 두 실린더에 작용하는 압력은 같다.

구하라: 유체의 높이가 높아졌으므로 (나)의 실린더에 더 큰 압력이 작용한다.



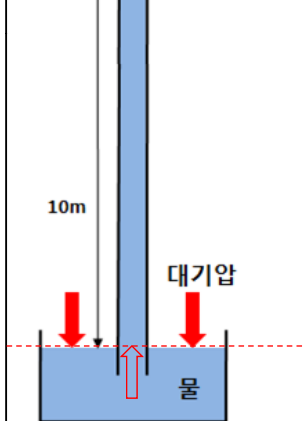
$$Q_1 : P_{\text{용기바닥}} = P_0 + \frac{\text{물무게}}{\text{용기바닥면적}} \quad ?$$

$$Q_2 : \text{용기의 전체무게} = \text{바닥압력} \times \text{바닥면적} \quad ?$$

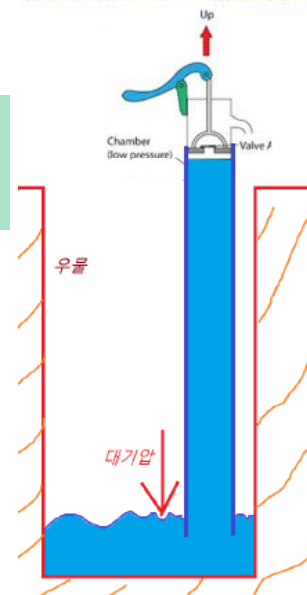
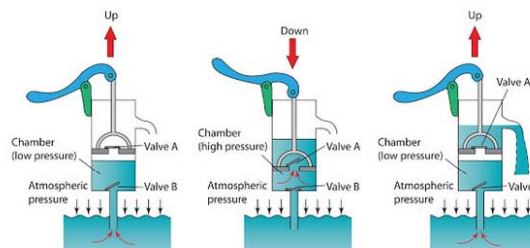
진공

물기둥은?

- 대기압(p_0) = 물기둥 무게 압력($\rho_w gh$)
 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa} = (1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)h$
 $\therefore h = 10.3 \text{ m}$

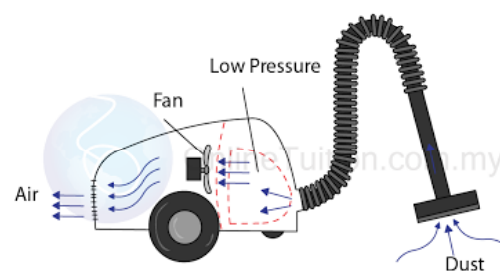
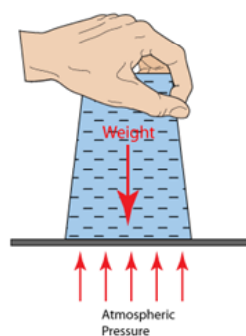
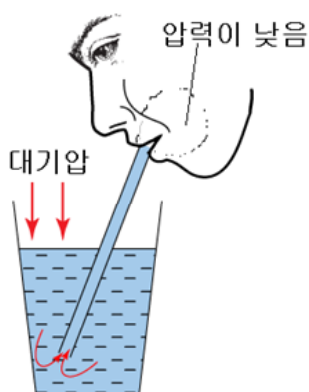
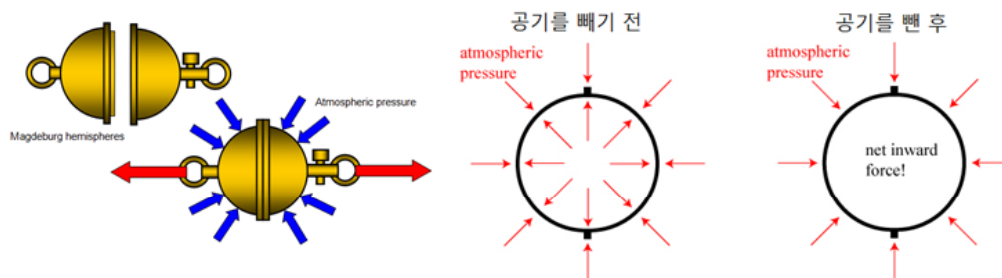


- 진공펌프는 10m 이상 깊은 우물에서는 물을 끌어 올리지 못한다.
- 그럼, 63-빌딩의 물은 어떻게?



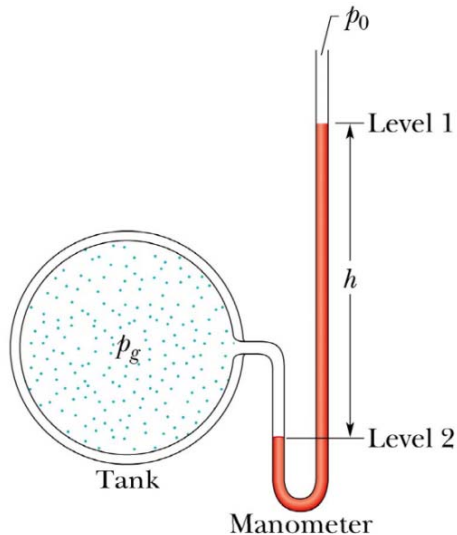
Physics 1 16

대기압으로 인한 현상



Physics 1 17

압력계



•열린관 압력계:
기체압력=level2에서 압력

$$p = p_0 + \rho gh$$

*계기눈금은 대기압과
차이를 표시함:

$$p_g = p - p_0$$

*타이어압력계는 p_g 를 표시

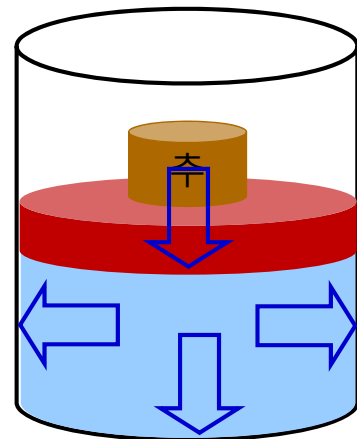
✓Level1에서 압력=대기압

✓Level2에서 탱크기체와 같은 압력(p)

Physics 1 18

Pascal's Principle

- 비압축성 유체에서 한 부분의 압력 변화는 유체의 모든 부분과 그릇의 벽면으로 똑같이 전달된다. (1652, Blaise Pascal)
- 용기의 피스톤을 눌러 압력을 증가시키면, 용기 안의 모든 부분에서 유체압력이 같은 정도로 증가한다.
- 예) Cartesian diver : 뒤에 나옴



•유체내부 압력공식에서: $P = P_0 + \rho gh$
 P_0 가 변하면 (외부에서 추가힘을 작용)

$$\Delta P = \Delta P_0$$

깊이에 상관없이 모든 지점에서
동일한 압력변화가 생긴



치약 튜브를 누를 때도
파스칼의 원리가 끼어든다.

Physics 1 20

Pascal의 원리

•수압레버 동작원리:

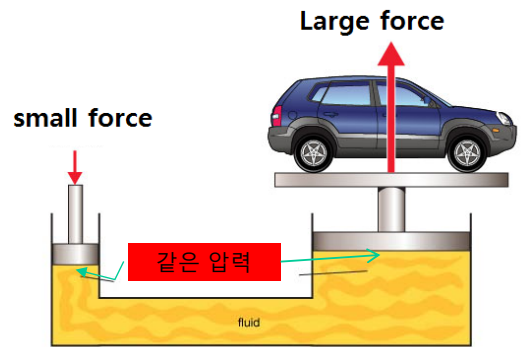
왼쪽피스톤에 힘 F_i 을 주어 유체의 압력에 변화를 주면

모든 부분에서 동일한 압력변화가 만들어짐

→ 오른쪽 실린더에도 동일한 압력의 증가가 생긴다.

왼쪽 피스톤 압력변화 = 오른쪽 피스톤 압력변화

$$\Delta p = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_o}{A_o} \Rightarrow F_o = F_i \frac{A_o}{A_i}$$



•유체:비압축성

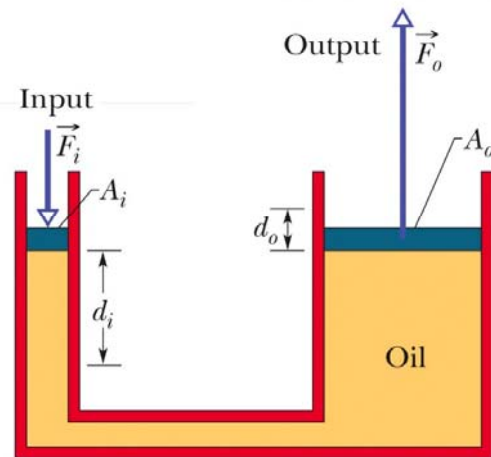
왼쪽 내려간 부피 = 오른쪽 올라간 부피

$$\Delta V = A_i d_i = A_o d_o \Rightarrow d_o = d_i \frac{A_i}{A_o}$$

•에너지 증폭은 없다:

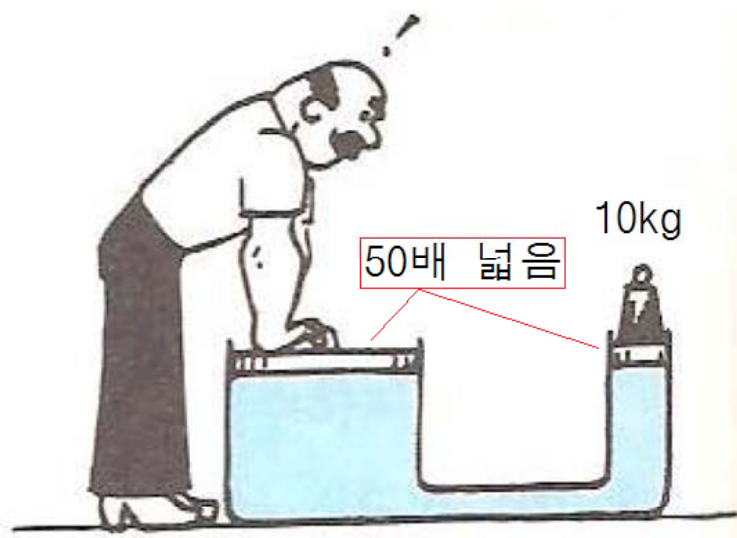
$$W_o = F_o d_o = \left(F_i \frac{A_o}{A_i} \right) \left(d_i \frac{A_i}{A_o} \right) = F_i d_i = W_i$$

;단순기계임-지렛대



Physics 1 21

오른쪽에 **10kg**의 추를 놓을 때 사람의 힘만으로 왼쪽 실린더를 밀어서 추를 위로 올릴 수 있을까?



Physics 1 22

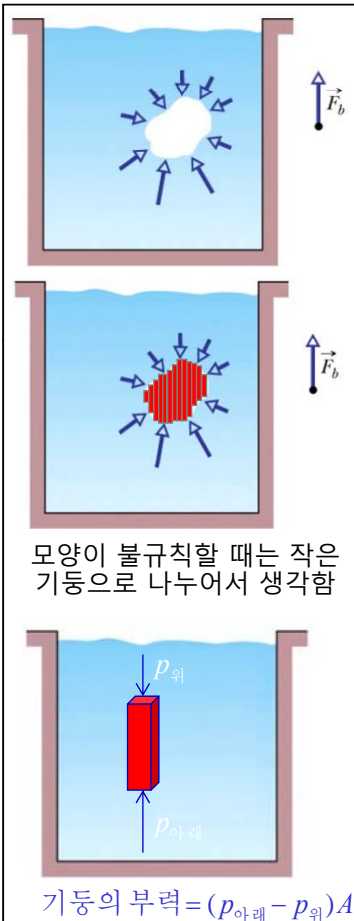
Archimedes의 원리

- 유체는 깊이에 따라 압력이 달라진다: $P = P_0 + \rho_f g d$
- 유체에 물체가 완전히 잠기거나 혹은 일부분이 잠겨 정지하고 있으면
 - ✓ 물체는 윗부분과 아래 부분에 작용하는 압력 차이 때문에 중력과 반대 방향인 윗방향의 힘을 유체로부터 받게 되는데 이 힘을 **부력(buoyancy, 浮力)**이라 한다.

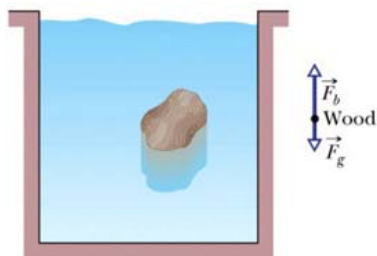
• 부피가 V 인 물체가 밀도가 ρ_f 인 유체에 잠길 때:

$$\begin{aligned} \text{부력} &= \sum (\text{기둥 아래 압력} \times \text{면적} - \text{기둥 위 압력} \times \text{면적}) \\ &= \sum (\text{유체기둥 무게}) \\ &= \text{물체가 대체한 유체 무게} \\ &= \rho_f g V \end{aligned}$$

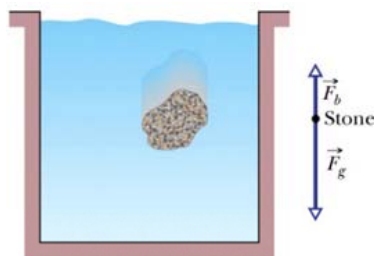
일부만 잠긴 경우: $V = \text{물체의 잠긴 부피}$
 $= \text{물체가 대체한 유체 부피}$



Physics 1 23

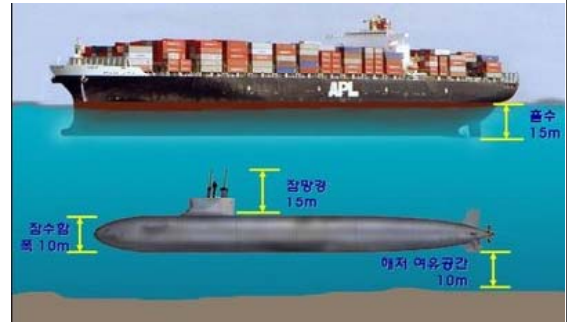
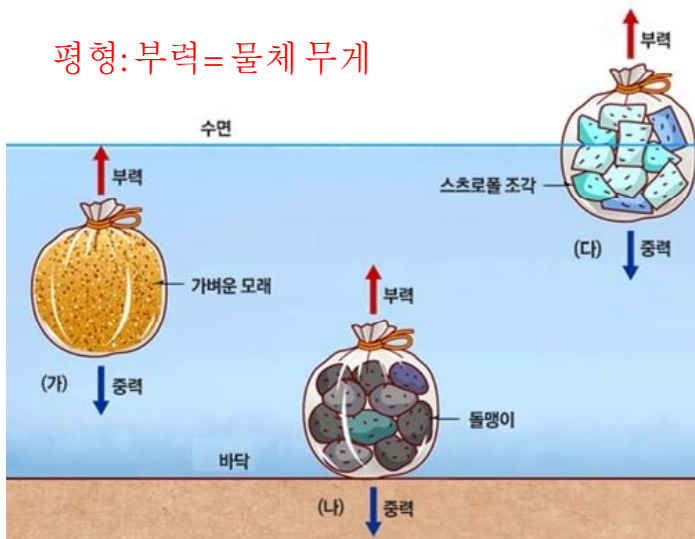


떠오름:
물체무게 < 부력



가라앉음:
물체무게 > 부력

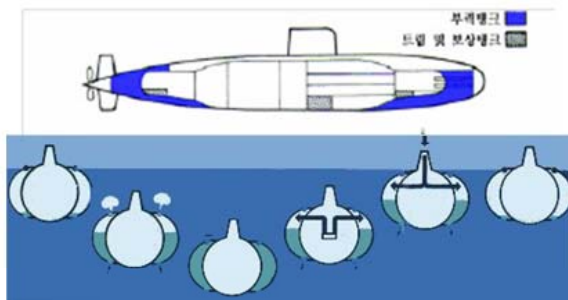
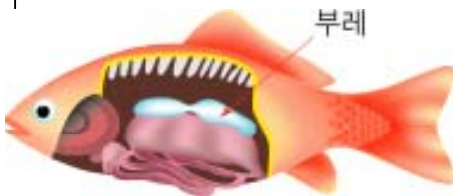
평형: 부력 = 물체 무게



Physics 1 24

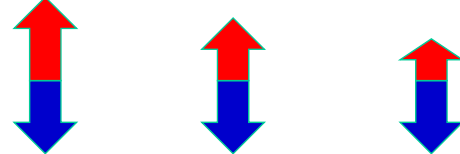
액체 속에 잠긴 부피를 늘리면 부력이 커진다.

물고기가 부레를 팽창을 시키면 물고기는 가라앉는가 아니면 위로 뜨는가?



blast 탱크와 잠항/부상의 관계

물고기 부피 증가 → 부력증가



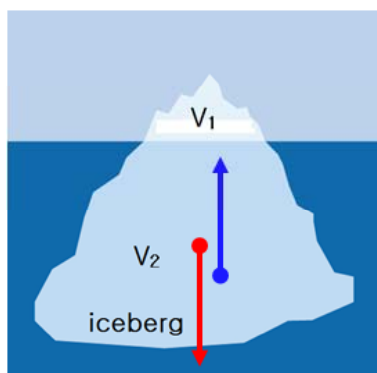
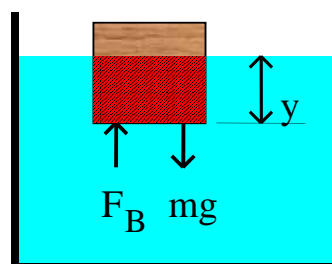
물고기 무게 = same

물에 뜨는 물체는 얼마나 잠기는가?

• 물체평형: $F_B = mg$

$\rho_f V_{\text{잠긴부피}} g = m_{\text{물체}} g$

$$\rightarrow V_{\text{잠긴부피}} = \frac{m_{\text{물체}}}{\rho_f}$$

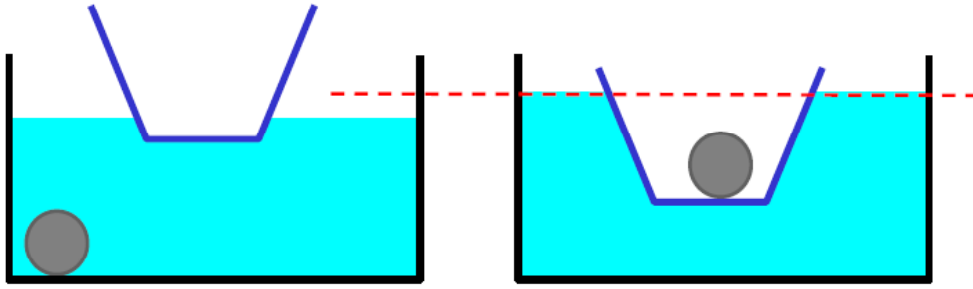


• 빙산의 경우

$$V_2 = \frac{m_{\text{빙산}}}{\rho_{\text{바다물}}} = \frac{\rho_{\text{얼음}} (V_1 + V_2)}{\rho_{\text{바다물}}}$$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1 + V_2} = \frac{\rho_{\text{얼음}}}{\rho_{\text{바다물}}} = \frac{920 \text{ kg/m}^3}{1030 \text{ kg/m}^3} = 0.89$$

수영장 바닥에 있던 바위를 배에 실기 전과 실은 후의
수영장의 수위 변화는?



왼쪽: 밀려난 부피 = 보트무게에 해당하는 물의 부피 + 바위 부피

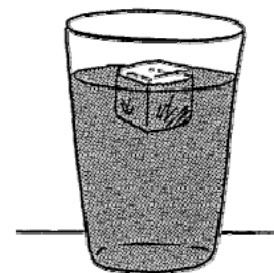
오른쪽: 밀려난 부피 = (보트무게 + 바위무게)에 해당하는 물의 부피

차이 = (바위무게에 해당하는 물의 부피) - (바위부피)

얼음 녹이기

Q1. An astronaut on Earth notes that in her soft drink an ice cube floats with 9/10 its volume submerged. If she were instead in a lunar module parked on the Moon, the ice in the same soft drink would float with

- ① less than 9/10 submerged.
- ② 9/10 submerged.
- ③ more than 9/10 submerged.

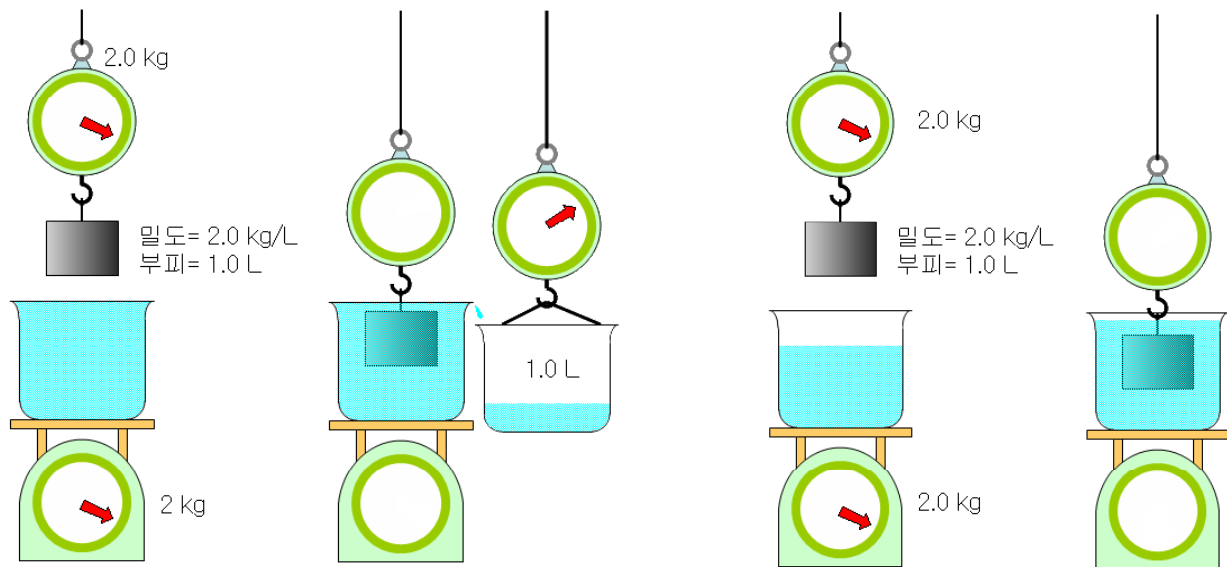


Q2. 얼음이 녹으면 컵 안의 물 높이는 올라가는가 아니면 내려가는가?

Q3. 얼음에 기포가 많이 있다. 얼음이 녹으면 컵 안의 물 높이가 올라가는가 아니면 내려가는가?

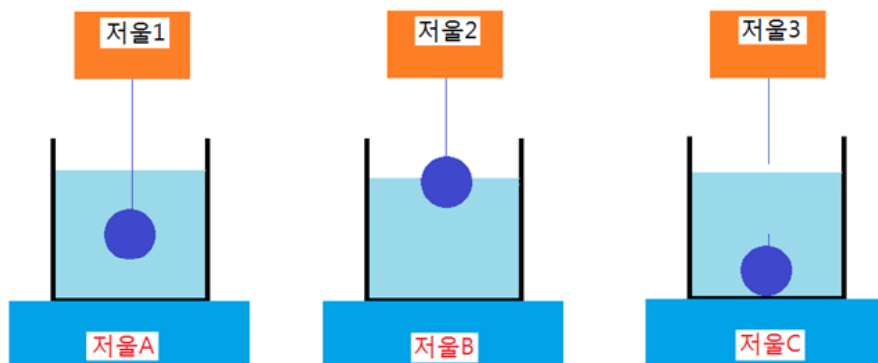
Q4. 얼음에 모래가 많이 박혀있다. 얼음이 녹으면 컵 안의 물 높이가 올라가는가 아니면 내려가는가?

저울의 눈금은?



Physics 1 29

용수철 저울과 바닥 저울 눈금은?



머리 아픈 질문: 매달린 줄이 끊어진 직후 저울의 눈금은 어떻게 될까?

Physics 1 30

아르키메데스는 어떻게 왕관의 진실을?



Q. 왜 왕관이 순금인지 아닌지 판단이 어려운가?

A. 모양이 불규칙해서 부피를 재기가 어렵다!

- ✓ 아르키메데스는 물이 가득 찬 용기에 왕관을 넣을 때 넘치는 물의 양이 왕관의 부피와 같다는 사실을 깨달은 것이다
- ✓ 또, 하나는 밀도가 물질의 고유한 성질이라는 것을 이용한 것이다.

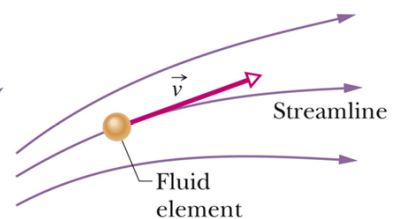
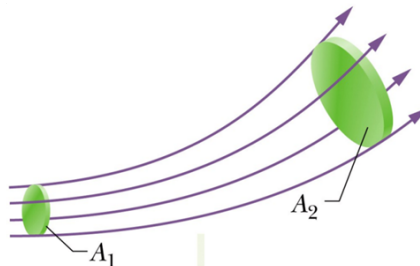
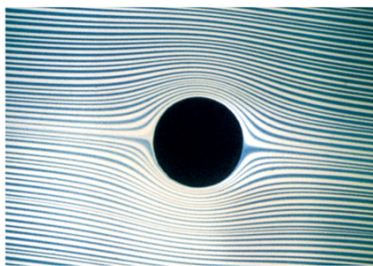


정말로 이 논리는 완벽한가?

Physics 1 32

유선

- 유선(fluid line)
 - ❖ 정의: 유체를 이루는 입자들이 흘러가는 자취
 - ❖ 성질: 유체 순간속도의 방향은 유선의 접선방향 → 그러므로 유선은 서로 교차하지 않는다
 - ❖ 밀한 곳 → 빠름, 소한 곳 → 느림
- 유관
 - ❖ 정의: 유선으로 이루어진 관
 - ❖ 성질: 유체입자는 유관의 벽면을 빠져나가지 않는다

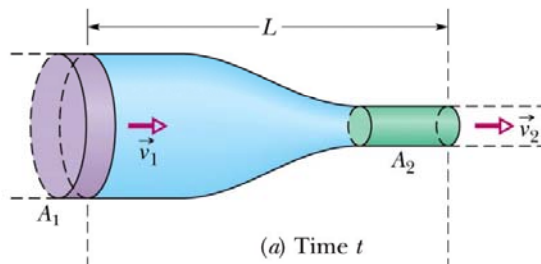


Physics 1 33

유체의 흐름

이상유체(ideal fluid):

1. 임의의 지점에서 유체의 속도가 시간에 따라 변하지 않는 정상흐름
2. 비압축성 흐름
3. 맴돌이가 없음



● 이상유체 연속방정식: (질량보존법칙)

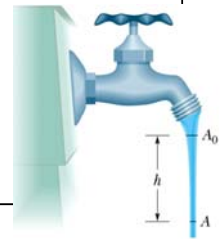
$$\text{mass enters} = \rho A_1 v_1 \Delta t = \rho \Delta V = \rho A_2 v_2 \Delta t = \text{mass exits}$$

$$\therefore A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\therefore \boxed{R \equiv Av = \text{const}} \quad : \text{부피흐름율} (\text{m}^3/\text{s})$$

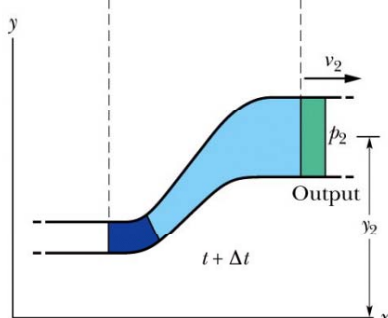
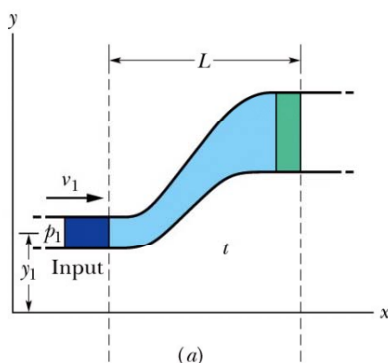
의미: 비압축성 유체가 단위시간동안 유관의 단면을 지나는 양 \Rightarrow 일정

Q. 수도꼭지에서 떨어지는 물줄기가 가늘어지는 이유는?



Bernoulli 방정식

유체의 운동은 기본적으로
뉴턴역학의 법칙을 따르므로



- Δt 동안 유체의 이동 ($A_1 v_1 = A_2 v_2$)

$$\text{청색부피} = \rho A_1 v_1 \Delta t$$

$$= \text{녹색부피} = \rho A_2 v_2 \Delta t = \rho \Delta V = m$$

- Δt 동안 압력차가 한 일:

$$\begin{aligned} W_{\text{일}} &= (p_1 A_1)(\rho v_1 \Delta t) + (-p_2 A_2)(\rho v_2 \Delta t) \\ &= (p_1 - p_2) \rho \Delta V \end{aligned}$$

- Δt 동안 역학적-E 변화:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m v_2^2 + m g y_2 - \left(\frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_1 \right)$$

- 에너지 보존: $W_{\text{ext}} = \Delta E$:

$$\begin{aligned} (p_1 - p_2) \Delta V &= \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) + \rho \Delta V g (y_2 - y_1) \\ \Rightarrow \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 + \rho g y_2 &= \frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 + \rho g y_1 \end{aligned}$$

$$\boxed{p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{const}}$$

; 새로운 법칙이 아니고

에너지 보존법칙의 다른 표현임!



베르누이 원리 적용

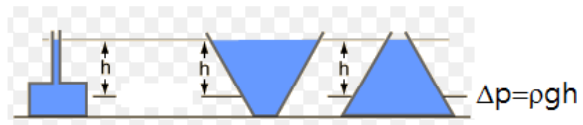
$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 + \rho g y_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 + \rho g y_1$$

(1) 정지상태 ($v = 0$):

$$\Rightarrow p_2 = p_1 + \rho g (y_1 - y_2) = p_1 + \rho g h$$

$$\Rightarrow p_2 - p_1 = \rho g h$$

; 깊이에 따른 유체의 압력:

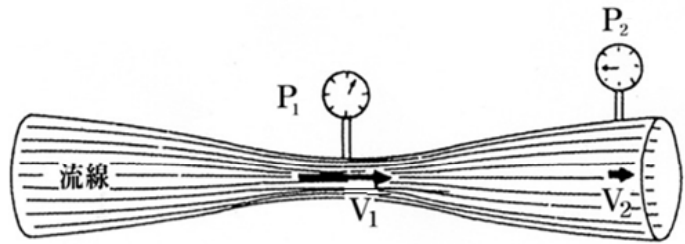


(2) 같은 높이 ($y_1 = y_2$):

$$\Rightarrow p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

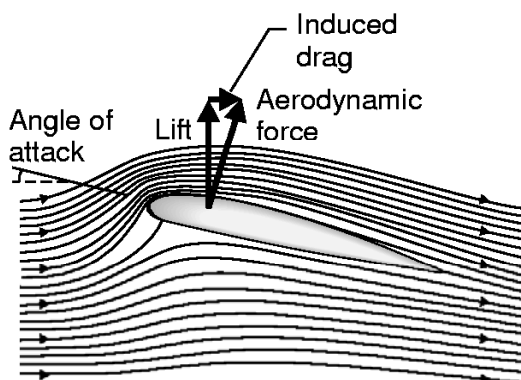
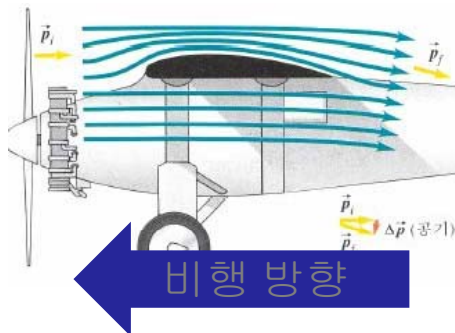
; 유속이 빠른 곳 ($v_1 > v_2$)에서

압력이 낮다 ($p_1 < p_2$)

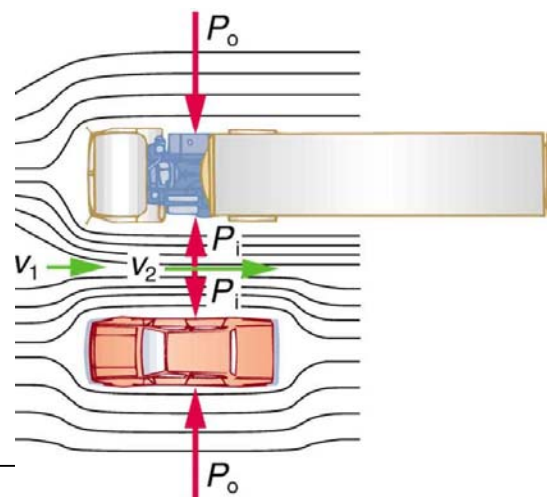
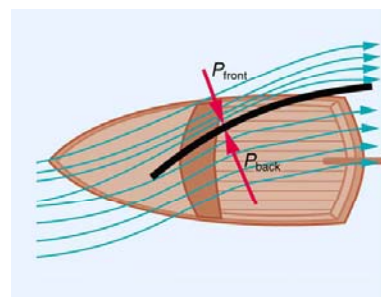


Physics 1 37

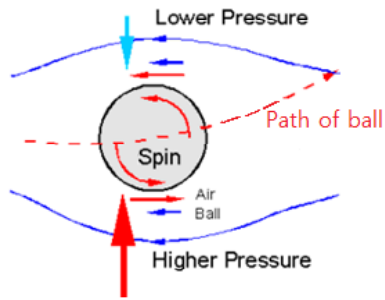
Bernoulli explains...



비행기와 같이 움직이는 관찰자가 보는 공기의 흐름임

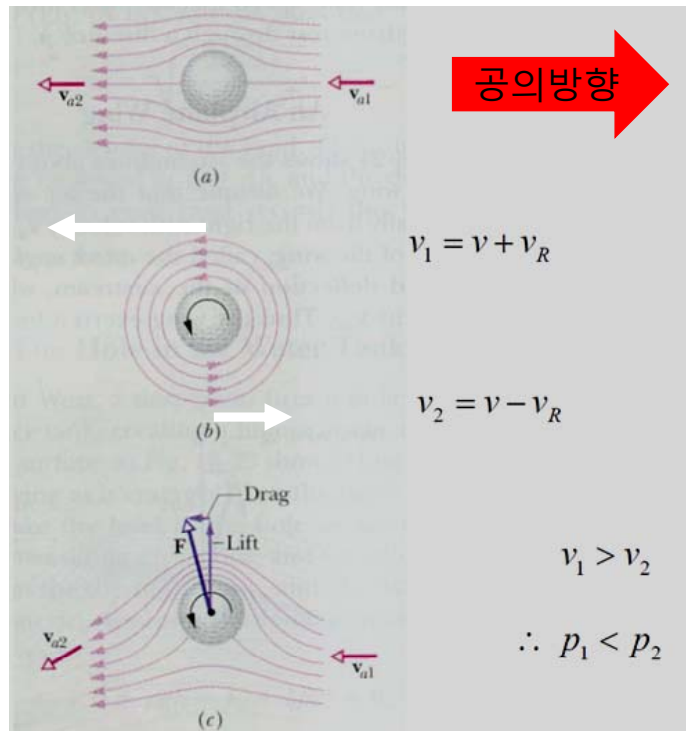


공과 같이 움직이는
좌표계에서 본 유체의
흐름임.



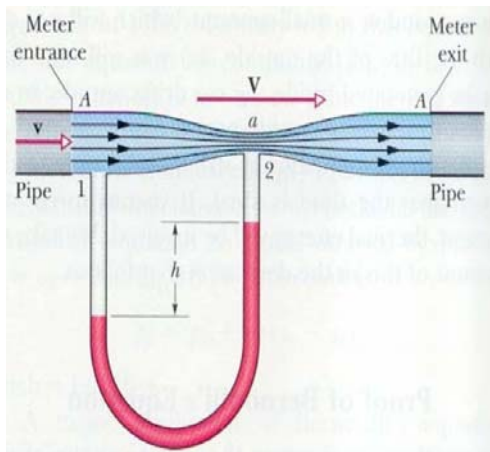
회전구

공의 입장에서는 공기저항 때문에
유체가 흐르는 방향 (자신의
움직임에 반대 방향)으로 drag
force도 받는다



Physics 1 39

Venturi 관



연속방정식: $A v_A = a v_a$
베르누이 방정식 ($y_1 = y_2$)

$$\frac{1}{2} \rho v_a^2 + p_a = \frac{1}{2} \rho v_A^2 + p_A$$

$$\therefore v_a > v_A \Rightarrow p_a < p_A$$

$$v_A^2 - \left(\frac{A}{a}\right)^2 v_A^2 = -\frac{2(p_A - p_a)}{\rho}$$

$$\Rightarrow v_A = \sqrt{\frac{2a^2 \Delta p}{\rho(A^2 - a^2)}}$$

압력차 Δp 는 h 와 액체(red)의 밀도로
→ A 와 a 를 알면 관을 통과하는
유체의 속도 v_A 를 알 수 있다.

Physics 1 40

물이 나오는 속도는?

• 베르누이 방정식:

$$\underbrace{\frac{1}{2}\rho v_o^2 + p_o + \rho gh}_{\text{표면}} = \underbrace{\frac{1}{2}\rho v^2 + p_o + \rho g \cdot 0}_{\text{구멍밖}}$$

• 연속방정식 이용: $Av = \text{const}$

A = 물통 단면적;

a = 구멍 단면적;

$$Av_o = av$$

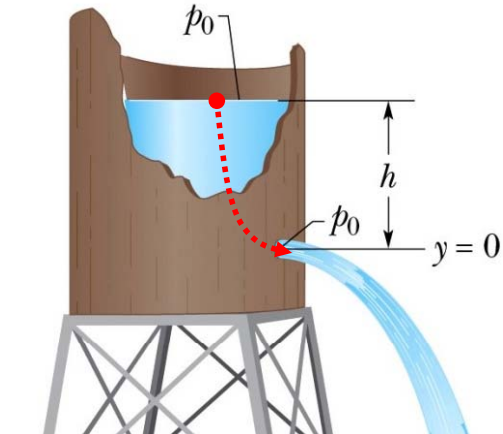
$$\Rightarrow v_o = (a/A)v \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \rho gh = \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$\therefore v = \sqrt{2gh}$$

(Torricelli's theorem)

표면의 물분자가 h만큼을 자유낙하했을 때의 속력과 같다.



s 1 41

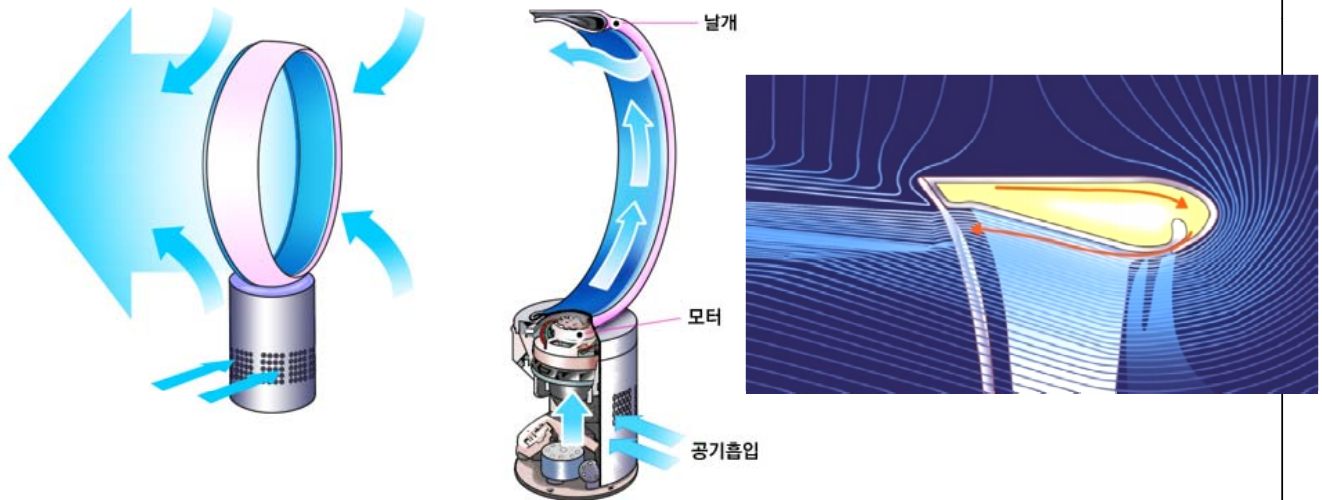
구멍뚫린 페트병을 낙하시키면 구멍에서 물이 나오는가?



다이슨 선풍기

둥근 고리 속의 비밀 : 베르누이 원리

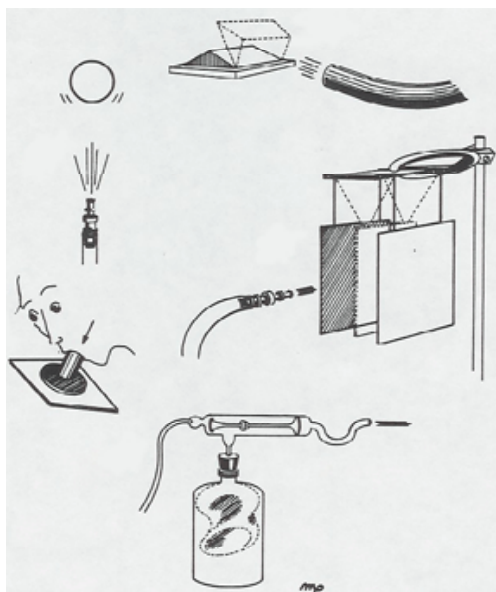
동근 고리의 단면은 속이 빈 비행기 날개의 모양입니다. 속이 빈 동근 고리 내부로 밀려 올라간 공기는 고리의 구조적 특징 때문에 약 88km/h 정도로 유속이 빨라지며, 이 빠른 속력의 공기가 빈 고리 내부의 작은 틈을 통해 빠져나오면서 동근 고리 안쪽 면의 기압은 낮아지게 됩니다. 이때문에 **선풍기 고리 주변의 공기는 고리 안쪽으로 유도되어 고리를 통과하는 강한 공기의 흐름을 생기게 합니다.**



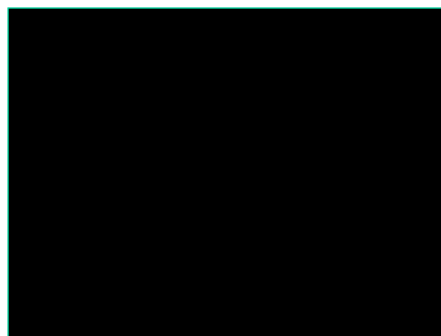
모터에 의해서 날개고리 테두리 속으로 흡입된 공기 양의 ~15배 정도가 고리 안쪽을 통과하는 바람을 형성하게 된다.

Physics 1 43

Bernoulli 원리로 설명이 가능한 현상들



- ✓헤어 드라이기로 공 띄우기
- ✓위로 각진 지붕 날리기
- ✓바람불어 종이 흡착
- ✓두 종이 사이로 바람불어 밀착
- ✓분무기 원리



Physics 1 44

폭두 타나카

