

Chapter 1: Introduction

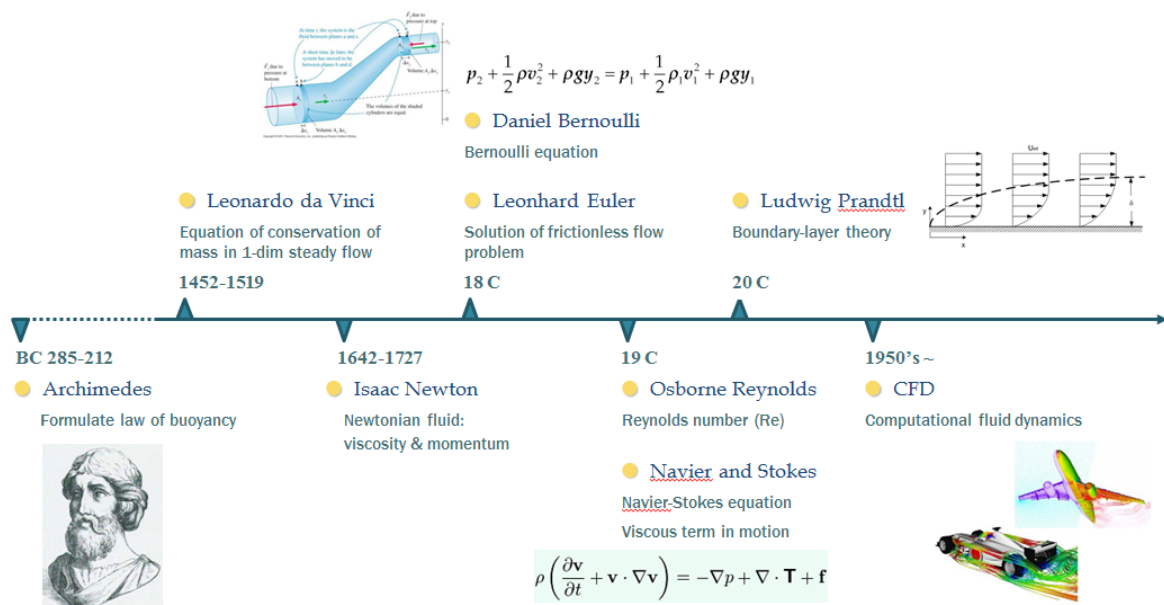
■ 서론

1) 유체역학이란?

- 정의: 운동하고 있거나 정지하고 있는 유체 자체를 연구하는 학문
- 유체: 액체와 기체
- 활용: 기계공학 (팬, 터빈, 비행기, 배, 엔진, 미사일 등), 생체역학 (호흡, 혈액유통 등), 환경 혹은 에너지 (풍차, 배관, 하천 등), 운동 (수영)

2) 유체 역학의 역사

1. 노가 달린 돛단배나 관개계통은 이미 선사시대에 알려졌다.
2. 기원전 아르키메데스는 부력의 법칙들을 공식화하고, 떠있거나 잠겨 있는 물체에 적용함으로써 해석의 일부로서 미분학의 한 형태를 실제로 유도
3. 로마인들은 기원전 4세기에 대규모의 수로계통을 축조하였으나 설계원칙에 대한 기록은 남지 않았음
4. 다빈치는 1차원 정상유동에서의 질량보존의 방정식을 유도
5. 프랑스인 마리오트는 최초의 풍동을 만들어 그 안에서 모형 실험을 하였다.
6. 유체의 운동량과 관련된 문제는 뉴턴의 운동법칙과 선형유체(Newtonian)에 관한 점성 법칙이 뉴턴에 의해 확립
7. 오일러는 운동방정식과 지금은 베르누이 방정식이라고 하는 운동방정식의 적분형태를 유도
8. 이 이론은 완전유체(무마찰 유체)에만 적용할 수 있기에, 점성효과에 지배되는 공학적 유동에 어긋나므로 이후의 공학자들은 비현실적인 이론을 거부하여 수력학이라는 과학을 발전 시킴 - 이론을 간과함으로써 물리원칙을 고려하지 않은 문제가 발생
9. 19세기 말에 이르러 실험적인 수력학과 이론적인 유체역학 사이의 통일이 시작
10. 레이놀드는 레이놀드 수의 중요성을 보여줌 (Re : 유체의 거동을 결정하는 수)
11. 나비에-스토크 방정식을 통해 유체의 운동 방정식에 점성항이 성공적으로 추가되어서 점성유동이론이 이용될 수 있게 됨 - 해석이 매우 어려웠기 때문에 사용이 제한적
12. 1904년 프란틀은 경계층 이론을 발표 - 작은 점성에서의 유체유동(물유동이나 공기유동)과 같은 경우는 경계층을 통하여 점성유동과 앞선 완전유체에만 적용할 있는 이론을 적용할 수 있는 거의 비점성의 외부층으로 구분할 수 있음을 지적
13. 20세기 중반에는 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics)와 같은 새로운 방법이 소개 - 대부분의 층류는 모델링이 정확하지만 난류는 실증적 모델에 의해서 계산



■ 유체란 무엇인가?

쉽게 얘기할 때, 고체는 단단하고 쉽게 변형되지 않지만 유체는 부드럽고 변형이 용이하다. 고체와 유체를 구분하는 기준은 전단응력에 대한 반응: 유체란 임의의 크기로 전단응력을 받을 때 연속적으로 변형하는 물질 혹은 전단응력에 저항하지 못하는 물질

♠ 유변학 (Rheology): 어떤 물질(슬러리, 치약, 잼 등)은 전단응력이 작으면 고체의 성격을 나타내지만, 임계값 이상의 응력에서는 유동이 일어나므로 유체와 고체의 구분이 용이하지 않는데, 이러한 물질에 대한 학문을 유변학이라 한다 - 유체역학의 범위에서 벗어남

♠ Food rheology

Food rheology is important in the manufacture and processing of food products, e.g. cheese. Food rheology is the study of the rheological properties of food, that is, the consistency and flow of food under tightly specified conditions. The consistency, degree of fluidity, and other mechanical properties are important in understanding **how long food can be stored, how stable it will remain, and in determining food texture**. The acceptability of food products to the consumer is often determined by food texture, such as how spreadable and creamy a food product is. Food rheology is important in quality control during food manufacture and processing. Thickening agents, or thickeners, are substances which, when added to an aqueous mixture, increase its viscosity without substantially modifying its other properties, such as taste. They provide body, increase stability, and improve suspension of added

ingredients. Thickening agents are often used as food additives and in cosmetics and personal hygiene products. Some thickening agents are gelling agents, forming a gel. The agents are materials used to thicken and stabilize liquid solutions, emulsions, and suspensions. They dissolve in the liquid phase as a colloid mixture that forms a weakly cohesive internal structure. Food thickeners frequently are based on either polysaccharides (starches, vegetable gums, and pectin), or proteins.

- 전단응력: 힘이 주어질 때 면과 평행한 방향으로 작용하는 힘 (수직응력: 면에 수직으로 작용하는 힘)
- 유동: 변형의 연속성
- 연속체: 유체내에서 연속적으로 변하는 유체의 성질. 성질변화가 대단히 완만하여 그 물질을 해석하는데 미분학을 사용할 수 있다는 것을 의미

♠ A shear stress, denoted (Greek: tau), is defined as the component of stress coplanar with a material cross section. Shear stress arises from the force vector component parallel to the cross section. Normal stress, on the other hand, arises from the force vector component perpendicular or antiparallel to the material cross section on which it acts.

■ 차원과 단위

1) 차원

물리현상은 공간 중에 존재하는 물질이 시간의 경과에 따라 변화하는 현상으로, 이 현상을 다루는 물질, 변위, 시간을 규정하는 기본량을 차원이라 한다. 물질의 특징을 규정하는 물리량을 차원 질량, 변위의 특징을 규정하는 물리량을 차원 길이, 시간을 규정하는 물리량을 시간이라고 하며 이 세계의 독립된 차원을 기본차원이라고 한다. 또한, 유체 자체가 갖는 분자특성을 대표하는 물성치를 다룰 때 영향을 많이 끼치는 것이 온도이므로 기본차원에 온도가 포함된다. 이 기본차원으로부터 유도될 수 있는 차원을 유도차원이라고 한다.

차원을 정의하는 기호는 FLT계와 MLT계로 구분할 수 있으며, 이는 힘을 규정하는 방법에 따라 다르다.

물리학이나 공학에서 취급하는 모든 관계식은 차원 동차가 되어야 한다 - 쉽게 말해, 식에서 모든 항목은 같은 차원을 가져야 한다.

2) 단위

차원의 크기를 나타내기 위해서 사용하며, 국제표준단위계(SI: International System of Unit)가 학술적으로 통용되는 단위계이다. 단위를 여러양에 대하여 하나하나 개별적으로 규정하면 매우 불편하므로 기본이 되는 몇개의 단위만을 정하고 다른 양의 단위는 물리법칙 또는 그 정의에 따라 기본단위를 조합해서 만들 수 있다.

- CGS단위계: cm, g, s를 기본으로 하는 단위계
- MKS단위계: m, kg, s를 기본으로 하는 단위계 – SI 단위
- BF: ft, lb, s, °F를 기본으로 하는 단위계 (미국, 영국에서 쓰임)

♠ dyne: 질량 1g의 물체에 작용하여 1cm/s^2 의 가속도가 생기게 하는 힘이다 ($=10^{-5}\text{ N}$)

Dimensions	Symbol	FLT system	MLT system
Length	l	L	L
Time	t	T	T
Velocity	v	LT^{-1}	LT^{-1}
Acceleration	a	LT^{-2}	LT^{-2}
Mass	m	FT^2L^{-1}	M
Density	ρ	FT^2L^{-4}	ML^{-3}
Force, Weight	f, w	F	MLT^{-2}
Specific weight	γ	FL^{-3}	$ML^{-2}T^{-2}$
Pressure	p	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Torque, Work	T, W	FL	ML^2T^{-2}
Power	L	FLT^{-1}	MLT^{-3}
Stress	σ, τ	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Volume flow rate	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Absolute viscosity	μ	FLT	$ML^{-1}T^{-1}$
Kinematic viscosity	ν	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Modulus of elasticity	E	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Surface tension	σ	FL^{-1}	MT^{-2}
Temperature	T	θ	θ
Angular velocity	w	T^{-1}	T^{-1}
Momentum	mV	FT	MLT^{-1}
Angular momentum	R	FLT	ML^2T^{-1}

3) 차원의 동차성과 단위의 일치

- ▶ 차원의 동차성: 특정 방정식의 모든 항은 같은 차원을 가져야 한다.
- ▶ 단위의 일치: 특정 방정식의 모든 항은 같은 단위를 가져야 한다.

예시) Bernoulli equation

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gZ = \text{constant}$$

베르누이 방정식을 예시로 살펴보면, 차원의 동차성이란 측면에서 볼 때 현재 식은 압력이 모든 항목에 있어서의 차원이면 단위는 압력의 단위인 Pa 혹은 lbf/ft²으로 통일이 되어야 한다.

♠ 실제로 1998년 12월에 발사되어 1999년 9월 23일에 화성의 궤도에 진입할 예정이었던 위성이 화성표면에 너무 가까이 접근하면서 파괴되었나 타버린 것을 추정되는데, 그 이유는 지상에서의 통제 실수로 위성이 적정거리인 93 마일을 유지하지 못하고 37 마일로 접근했기 때문이다. 이는 실수로 단위계를 혼합하였기 때문이었다. 위성 통제 팀중 한팀은 SI단위를 다룬 팀은 BG단위를 사용함으로써 발생한 사고였다.

■ 유체의 거동 분류

- ▶ 점성에 의해 점성유체와 비점성 유체로 분류할 수 있음
- ▶ 압축성에 의해 압축성 유체와 비압축성 유체로 분류할 수 있음
- ▶ 비압축성, 비점성유체를 이상유체라 한다

♠ 실제로 모든 유체는 점성이 있고 압축성이기 때문에 이상유체를 가정할 수 없지만, 점성과 압축성의 효과가 매우 작은 유체의 경우는 일반적으로 이상유체로 가정한다.

■ 유체의 성질

- ▶ 밀도: 기체의 밀도는 압력에 비례한다 ($p = \rho RT$). 하지만, 액체는 일반적으로 압력에 대해 일정한 밀도를 가진다고 할 수 있다. 즉, 액체는 비압축성 유체로 가정할 수 있다.
- ▶ 비중량: 단위 부피당 무게

Specific weight of air and water at 20°C and 1 atm

$$\gamma_{\text{air}} = (1.205 \text{ kg/m}^3)(9.807 \text{ m/s}^2) = 11.8 \text{ N/m}^3$$

$$\gamma_{\text{water}} = (998 \text{ kg/m}^3)(9.807 \text{ m/s}^2) = 9790 \text{ N/m}^3$$

밀도에 중력가속도를 곱한 것이 비중량이다.

▶ 비중 (비중량과 구분할 것): 기준 유체의 밀도에 대한 측정하고자 하는 유체의 밀도 (단위가 없음에 유의)

Standard reference fluid: water at 4°C for liquid and air for gases

$$SG_{gas} = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{air}} = \frac{\rho_{gas}}{1.205 \text{ kg/m}^3}$$

$$SG_{liquid} = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{water}} = \frac{\rho_{liquid}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

■ 점성

1) 정의: 유동에 대한 유체의 저항을 나타내는 정량적인 치수로서 주어진 전단응력에 의해 생성된 유체 전단율을 결정

2) 전단응력과 점성 그리고 유체속도

전단응력이 가해지면 유체는 연속적으로 변화하므로, 그림에서 보듯이, 전단응력 τ 가 한 평면에 작용할 때, 위 표면은 아래 표면 보다 δu 만큼 큰 속력으로 움직이며, 전단변형각 $\delta\theta$ 는 시간에 따라 계속적으로 커질 것이다. 이때, 물, 기름, 공기와 같은 일반적인 유체의 경우 작용된 전단과 그로 인해 발생하는 변형률 사이에 선형비례관계가 정의된다.

이때 비례상수가 점성계수이며 차원의 동차성에 의해 점성계수는 응력-시간의 차원을 갖으며 단위는 N sec/m^2 이다.

♠ 이렇게 전단응력과 유체의 속도사이에 선형관계를 만족하는 유체를 **Newtonian**이라 한다.

♠ 유체역학에서는 일반적으로 변형각보다는 속도분포에 관심이 있다.

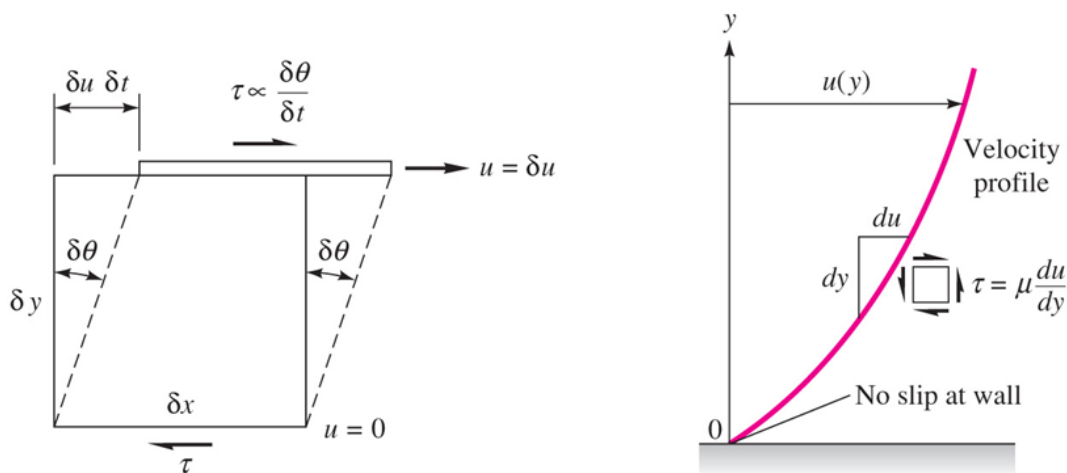


그림 1. 유체전단 응력과 속도사이의 관계 (White, 2012, Fluid Mechanics)

벽 근처의 전단층에서 뉴턴 전단응력 분포를 보면 유체의 속도는 경계층에서 Newtonian을 가정할 수 있음을 알 수 있다 - 전단응력은 속도분포의 기울기에 비례하며 벽에서 가장 크다. 특히, 벽에서의 속도 u 는 벽에 상대적으로 0이며 이것을 점착조건이라고 하며 모든 점성유체유동 특유의 성질이다.

♠ 점착조건: 유체가 고체 경계면에 점착한다는 것이며 액체든, 기체든 모든 유체는 이 조건을 만족한다 (먼지가 오랫동안 쌓이면 먼지를 손으로 쓸어도 잘 안떨어지는 현상이 점착조건 때문이다).

3) Reynolds number: 모든 뉴턴유체의 점성 거동들을 상호 관련시키는 무차원의 매개변수

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

V 는 Characteristic velocity (유동의 특성 속도), L 은 characteristic length scale (유동의 특성길이)
 ν 는 kinematic viscosity(동점성 계수)로서, 차원은 길이의 제곱을 시간으로 나눈 것이고 단위는 m^2/s 이다 (동점성 계수 = 점성계수/밀도)

레이놀드 수의 범위에 따라 유체의 유동을 분류할 수 있다. 극히 낮은 Re 이면 점성의 느린 운동을 의미하며 중간정도는 층류를, 높은 값은 난류를 유동으로서 천천히 변화지만 강한 불규칙 운동을 보여준다 (조건에 따라 Re 의 값은 달라진다).

♠ 담배연기에서 불에 가까운 쪽은 층류, 먼쪽은 난류가 되며, 물의 흐름에서도 층류와 난류를 구분할 수 있다.

■ 평판 사이의 유동

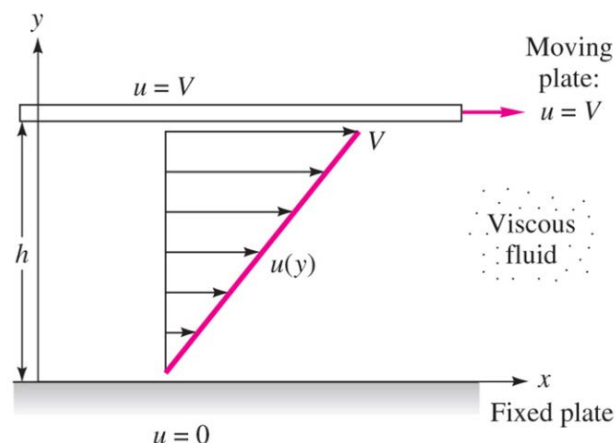


그림 2. 평판 사이의 유동 (White, 2012, Fluid Mechanics)

고전적인 문제로서 그림에서 보여진 바와 같이 고정된 아래 평판과 속도 V 로 정상적으로 움직이는 위 평판 사이에서 일어나는 유동을 고찰하자. 두 평판 사이의 간격은 h 이고, 유체는 뉴턴 유체로서 양 평판 위에서 미끌어지지 않는다고 하면 그림처럼 선형의 속도분포가 나타날 것이다.

가속도가 없고, 유동방향으로 압력변화가 없다고 가정하면, 힘의 평형에 의해 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\mu} = \text{constant}$$

양변을 적분하면 유체의 속도분포 u 는 선형의 형태로 쓸 수 있고, 경계조건을 이용하면 유체의 속도는 평판의 속도와 사이 간격에 대한 현재 높이의 비율의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$u = V \frac{y}{h}$$

$y/u = \tau/\mu$ 에서 전단응력을 점성계수와 평판속도 그리고 간격으로 표시 할 수 있고, 힘은 전단응력에 평판의 면적을 곱해서 얻을 수 있다 (응력은 단위면적에 작용하는 힘이다).

► Example 1.7

그림에서 전단되는 유체가 20°C의 SAE30 기름이라고 할 때 $V=3 \text{ m/s}$ 및 $h=2 \text{ cm}$ 일 때, 기름내의 전단응력을 구하여라.

전단응력을 구하는 식은

$$\tau = \mu \frac{V}{h}$$

이고, SAE30 기름의 점성계수는 $0.29 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이므로, 주어진 조건을 대입해서 구할 수 있다.

$$\therefore \tau = \mu \frac{V}{h} = 0.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{s} \times \frac{3 \text{ m/s}}{0.02 \text{ m}} = 43.5 \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m}^2} = 43.5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 43.5 \text{ Pa}$$

단, 단위의 일치에 의해서 cm 를 m 로 바꾸어서 계산해야 하며, 최종 단위는 Pa 이 된다.

■ 온도에 따른 점성의 변화

점성계수에 대한 온도의 영향은 매우 크지만, 압력의 영향은 크지 않다.

1) 기체의 점성계수

기체의 점성계수는 온도에 따라 증가한다. 온도에 대한 일반적인 근사식으로서 power law와 Sutherland 법칙이 있다. 여기에서 μ_0 는 유체의 절대온도에서의 점성계수이다. 상수 n 과 S 는

유체에 따라 다르다. 예를 들어서, 공기에 대해서는 $n=0.7$ 이고, $S=100K$ 이다.

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n & \text{Power law} \\ \frac{(T/T_0)^{2/3}(T_0 + S)}{T + S} & \text{Sutherland law} \end{cases}$$

$\mu_0 = \text{known viscosity at a known absolute temperature } T_0 \text{ (usually 273K)}$
 For air $n = 0.7$ and $S = 100K$

2) 액체의 점성계수

액체의 점성계수는 온도에 따라 대략 지수적으로 감소한다. 이를 잘 예측하는 실험식으로 다음과 같은 2차 다항식을 쓸 수 있다.

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} = a + b \left(\frac{T}{T_0}\right) + c \left(\frac{T}{T_0}\right)^2$$

계수의 값(a, b, c)은 유체에 따라 다르며, 물의 경우 $T_0=273.16K$, $\mu_0=0.001792 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $a=-1.94$, $b=-4.80$, $c=6.74$ 이다.

■ 표면장력

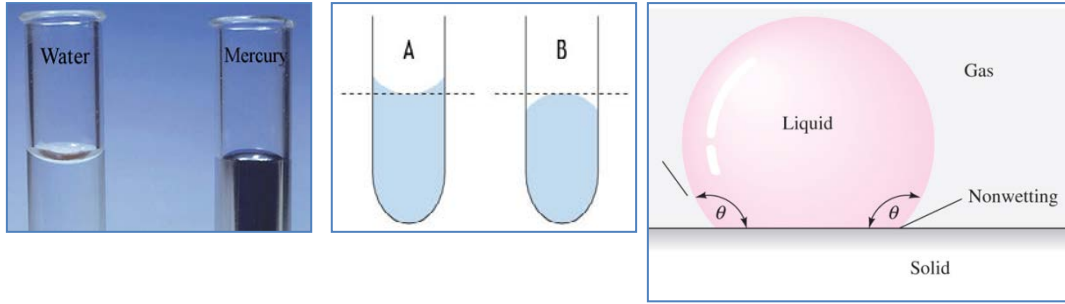
액체와 기체, 또는 두개의 섞이지 않는 액체의 접촉면에서는 액체 표면에 힘이 발생하여, 표면이 유체덩어리를 에워싸는 막처럼 보이게 한다. 예를 들면, 잎사귀의 물방울과 같은 경우, 바늘을 물속에 살머시 놓았을 때 물위에 뜨는 현상과 같은 경우이다. 쉽게 설명하면, **액체는 액체분자의 응집력에 의해 표면을 작게 하려는 성질이 있는데 이 때문에 액체 표면을 따라 발생하는 장력을 표면장력이라 하며, 정량적으로 표면장력은 자유표면의 단위 길이당 분자간의 인력으로 정의되고, 방향은 항상 접해있는 표면의 접선방향이다.**

1) 정의

액체는 자유롭게 팽창할 수 없기 때문에 제2의 액체 혹은 기체와 interface를 형성한다. 이때 액체 속에 깊숙이 있는 분자들은 밀집되어 있으므로 서로 반발하지만, 표면에 있는 분자들은 덜 밀집되어 있으므로 서로 끌어당겨서 이에 대한 역학적인 효과로서 표면에 장력이 나타난다. 이를 표면 장력이라 한다. 간단히, **표면의 임의의 선에서 단위길이 당 작용하는 분자 인력의 강도** 표면장력은 액체의 물성치중 하나로 그 크기는 접하고 있는 액체의 종류와 온도에 영향을 받는다. 일반적으로 온도가 올라갈수록 표면장력은 줄어든다.

2) 표면장력 계수: 차원은 FL^{-1} 이고 SI단위로는 N/m 를 사용한다.

물의 경우는 공기와 형성하는 표면 장력이 수은이 공기와 형성하는 표면장력에 비해 매우 작다. 그 결과로서 물은 오목한 형태가 되고, 수은은 볼록한 형태를 형성한다.



3) **접촉각:** 액체 계면이 고체 계면과 교차할 때 생기는 각도로서 각도가 90보다 작거나 같으면 액체는 고체를 적신다라고 하고 각도가 90보다 크면 적시지 않는다고 한다.

■ 곡면에서의 표면 장력의 예시

액체 실린더 내부에서의 압력증가는 2개의 표면 장력 힘에 의하여 평형되므로, 다음 식이 성립된다.

$$2RL \Delta p = 2YL$$

$$\Delta p = \frac{Y}{R}$$

구형 액체방울의 내부 압력증가는 원주상의 표면장력과 평형을 이루어서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\pi R^2 \Delta p = 2\pi RY$$

$$\Delta p = \frac{2Y}{R}$$

일반적으로 곡률 반경이 R_1 과 R_2 인 임의의 곡면에 적용할 수 있는 (표면에 수직한 방향의 힘의 평형으로부터 오목한 측의 압력증가) 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta p = Y(R_1^{-1} + R_2^{-1})$$

구형 액체 방울을 이용하면 비누방울 내의 압력증가를 예측하는데 이용할 수 있다. 물방울 2개를 (반구 2개) 합치면 방울형태가 된다는 점에 착안하여 다음과 같이 단순히 구할 수 있다.

$$\Delta p_{bubble} = 2\Delta p_{droplet} = \frac{4Y}{R}$$

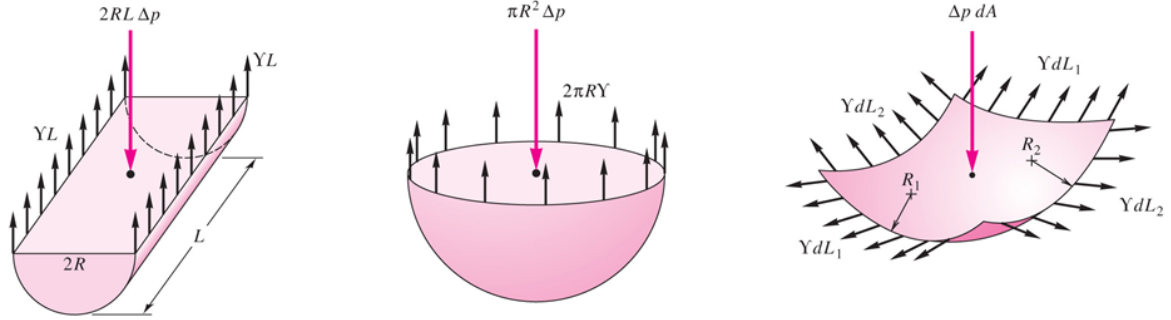
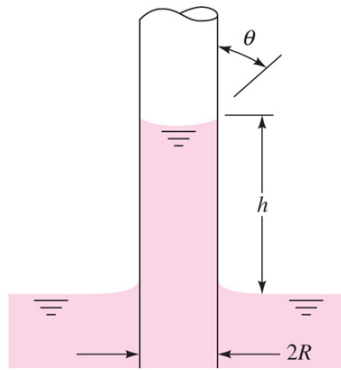


그림 3. 다양한 표면장력 (White, 2012, Fluid Mechanics)

► Example 1.8

그림에서와 같이 표면 장력이 γ , 접촉각이 θ 일 때 액체가 원형관에서 나타내는 높이변화 h 에 대한 표현식을 유도하여라 (White, 2012, Fluid Mechanics)



관 내의 계면에서 원주를 따른 표면장력 힘의 수직성분은 높이 h 의 유체기둥의 무게와 평형을 이루어야 한다.

$$\gamma \pi R^2 h = 2\pi R Y \cos \theta$$

그러므로, 높이에 대해서 풀면,

$$h = \frac{2Y \cos \theta}{\gamma R}$$

모세관 높이는 관반경 R 에 반비례로 증가하며, 접촉각이 90도 보다 작으면 (적시면) 양이고, 90도 보다 크면 음(모세관 침하)이다 - 이 예제는 모세관에서 유체 계면이 표면장력에 의하여 얼마만큼 오르거나 또는 내리는가를 보여준다.