

Chap. 3 유동 현상 (Fluid Flow Phenomena)

- * 열 및 물질 전달에서도 기본적인 유체 역학적 지식이 요구됨
- * 참고: 압축성 유체(compressible fluid)와 비압축성 유체(incompressible fluid)
 - 압축성 유체: 흐름에 의해 밀도가 변화되는 유체 → 예: 기체의 흐름
 - 비압축성 유체: 항상 일정한 밀도가 유지되는 유체 → 예: 대부분의 액체 흐름
- * 퍼텐셜 흐름(Potential Flow)의 정의
 - 점도가 0이고 비압축성인 유체의 흐름을 퍼텐셜 흐름이라 칭함
 - 뉴턴 역학과 질량 보존의 원리에 의해 기술 가능
- * 퍼텐셜 흐름의 특징
 - 흐름 중에 순환(circulation)이나 에디(eddy)가 발생하지 않음
→ 비회전 흐름(irrotational flow)라고 부름
 - 마찰이 발생하지 않음 → 기계적 에너지가 열로 소실되지 않음



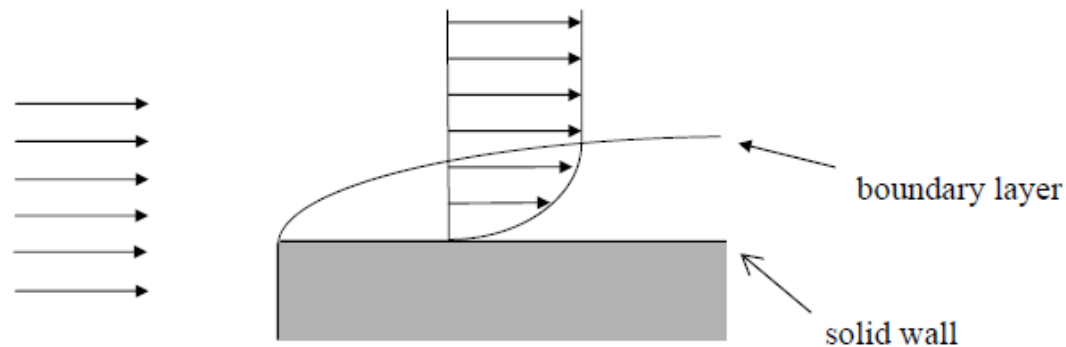
Chap. 3 유동 현상 (Fluid Flow Phenomena)

* 경계층 흐름(boundary layer flow)

- 고체의 경계가 유체의 흐름에 영향을 미칠 때, 이러한 영역을 경계층(boundary layer)라 부름
- 경계층은 고체 벽 부근에 국한되는 경우가 많으며, 경계층 밖은 퍼텐셜 흐름이 됨
→ 실제 흐름 = 경계층 흐름 + 퍼텐셜 흐름

* 경계층이 중시되는 경우와 무시되는 경우

- 관 속에서의 흐름: 흐름 전체가 경계층으로 구성됨
- 수렴 노즐(converging nozzle)에서의 흐름: 흐름 전체가 퍼텐셜 흐름으로 구성



- 벽에 부착된 지점에서는 유속이 0이 됨 (non-slip boundary condition)

* 점성 흐름(viscous flow)

- 경계층에서 발생하는 흐름을 점성 흐름이라고도 부름

Chap. 3 유동 현상 (Fluid Flow Phenomena)

* 속도장 (velocity field)

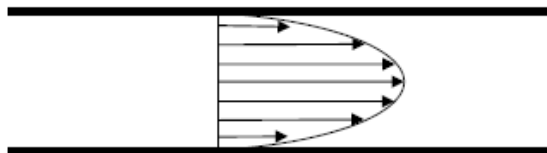
- 유체의 부착(adhesion) 현상: 유체가 고체 표면에 들러붙는 현상.
→ 계면 장력을 유발함
- 벽이 정지해 있는 경우 '계면에서의 유속 = 0' 이 됨
- 고체로부터 떨어진 곳의 유속: 흐름 중의 각 점마다 유속이 변함
→ 유속이 공간 좌표의 함수로써 속도장을 형성
- 정상 상태(steady state flow) 흐름: 각 점에서의 유속이 시간에 따라 변하지 않고 일정하게 유지되는 경우에 해당

* 참고: 벡터(vector)와 스칼라(scalar)

- 벡터: 크기(magnitude)와 방향(direction)을 모두 갖는 물리량
→ 예: 속도, 가속도, 힘, 운동량,...
- 스칼라: 크기만 갖는 물리량 → 예: 질량, 길이, 시간, ...

* 일차원 흐름 (one-dimensional flow)

- 속도: 벡터량 → 공간 좌표에서 3 성분을 가짐
- 속도 벡터가 모두 평행이거나 평행으로 간주할 수 있는 상황
→ 한 개의 속도 성분만으로 충분 & 속도를 스칼라 량으로 취급 가능
→ 이러한 흐름을 일차원 흐름이라 정의함
- 일차원 흐름의 예: 곧은 원관 안의 정상상태 층류 흐름



3.1 층류(laminar flow), 전단율(shear rate), 전단 응력(shear stress)

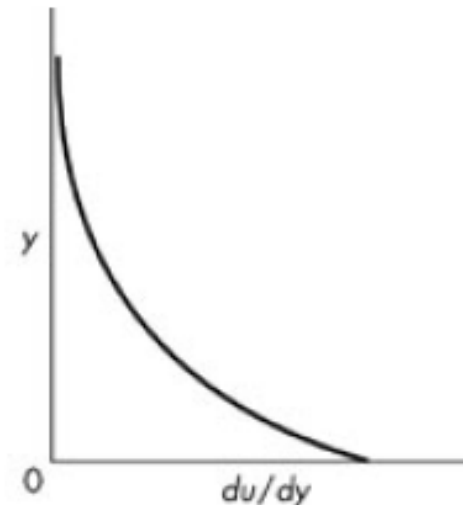
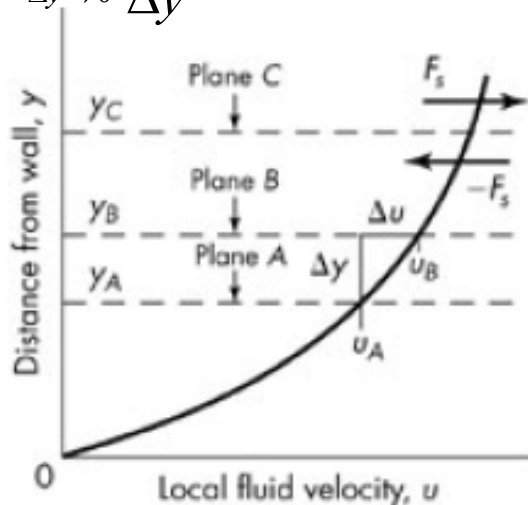
* 층류

- 측방향 혼합(lateral mixing): 유속이 느린 경우 교차 흐름(cross flow)이 발생하지 않음
→ 인접한 유체층이 서로 미끄러지듯 지나가며 에디(eddy)가 형성되지 않음
- 난류(turbulent flow): 유속이 커지면 에디가 형성되어 측방향 혼합이 발생

* 속도 구배(velocity profile)와 전단율

- 정상 상태의 일차원 층류 흐름을 고려
- 속도 구배(velocity profile): 속도 u 는 벽으로부터의 거리 y 에 따라 증가하지만 증가율은 거리에 따라 감소
- 전단율: du/dy 로 정의됨

$$\frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y}$$



평판으로부터의 거리에 따른 전단율의 변화

3.1 층류(laminar flow), 전단율(shear rate), 전단 응력(shear stress)

* 전단응력장

- 힘 F_s : 평면 C의 유체가 평면 C와 벽 사이의 유체에 작용하는 힘으로 정의됨
- Newton의 운동 법칙(3법칙)에 의해 평면 C의 아래에 있는 유체는 그 위의 유체에 대해 $-F_s$ 의 힘을 미침
- 전단 응력의 정의: 단위면적당 미치는 전단력으로 정의됨

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$

- 전단 응력은 층류와 난류의 구분이 없이 발생함
- 점성 흐름(viscous flow), 즉 층류에서 발생하는 응력은 다음과 같이 표기함

$$\tau \longrightarrow \tau_v$$

* 참고: 뉴턴의 운동 법칙

- 제1법칙(관성의 법칙): 물체에 외력이 가해지지 않는 한, 물체의 질량 중심은 일정한 속도로 움직임

$$\vec{F} = 0, \frac{d\vec{v}}{dt} = 0$$

- 제2법칙(가속도의 법칙): 물체에 가해지는 운동량의 시간에 따른 변화율은 그 물체에 가해지는 알짜힘과 같음

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d m \vec{v}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \vec{a}$$

- 제3법칙(작용 반작용의 법칙): 물체 A가 다른 물체 B에 힘을 가하면, 물체 B는 그 힘과 크기는 같고 방향이 반대인 힘을 가함

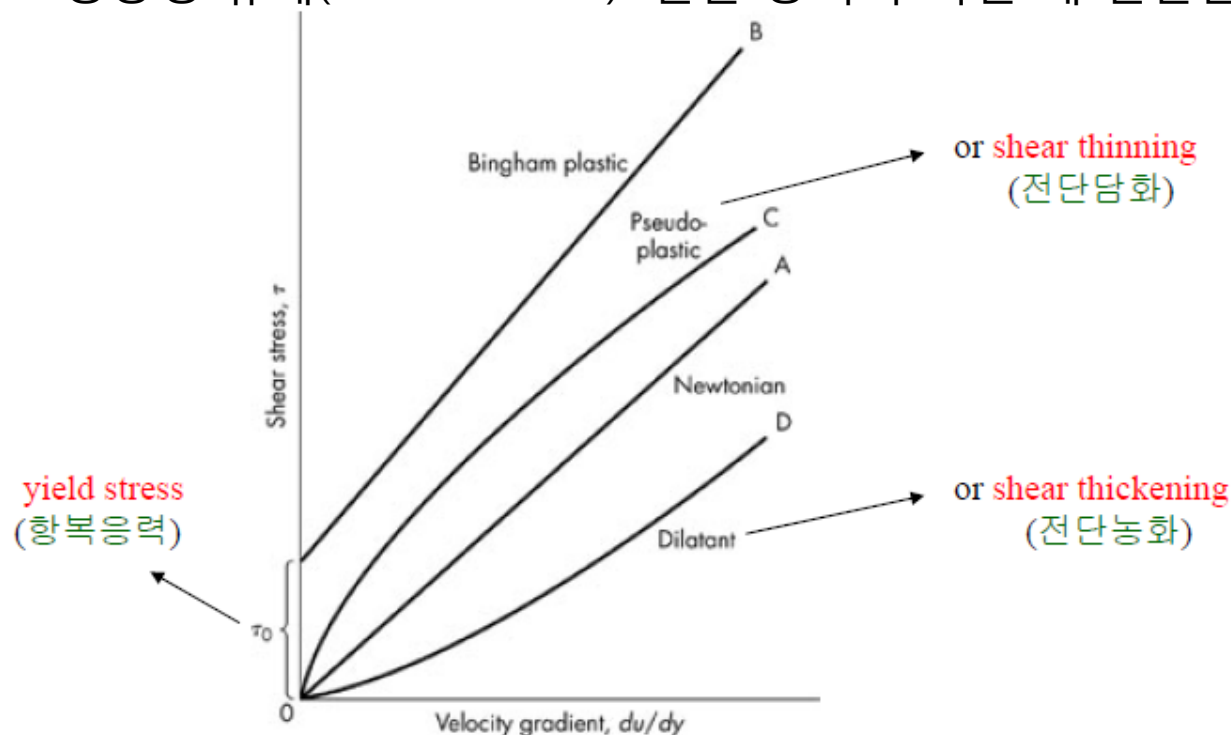
3.2 유체의 유변학적 성질

* 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체

- 실제 유체의 전단 응력과 전단율 사이의 관계: 유변학(rheology)에서 다룸
- 뉴턴 유체(Newtonian fluid): 전단응력과 전단율 사이의 관계가 원점을 지나는 단순한 선형 관계인 경우
- 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid): 뉴턴 유체와 거동이 다른 모든 유체를 칭함

* 비뉴턴 유체의 예

- Bingham 가소성 유체: 전단 응력이 문턱값을 넘어야 흐름이 발생하는 경우
- 유사 가소성 유체(pseudo-plastic): 전단 응력이 커질 때 전단율이 증가하는 경향이 포화됨
- 팽창성 유체(dilatant fluid): 전단 응력이 커질 때 전단율이 증가하는 경향이 가속화됨



3.2 유체의 유변학적 성질

* 시간 의존성 흐름(time-dependent flow)

- 전단 응력이 작용한 시간의 장단에 관계하여 흐름 거동이 변하는 경우
- 요변성 액체(thixotropic liquid): 시간이 흐를수록 전단율이 일정하더라도 전단 응력이 감소 (시간에 따라 걸보기 점도가 감소)
- 리어패틱 물질(rheopetic substance): 시간에 따라 걸보기 점도가 증가하고 전단 응력이 커짐

* 점탄성 유체(viscoelastic fluid)

- 점성과 탄성을 모두 갖는 유체를 점탄성 유체라 정의함
- 흐름 중에 발생하는 변형은 탄성에 의해 모두 회복 & 전단을 제거하더라도 변형이 완전히 복구되지 않음
- 점탄성 유체의 예: 밀가루 반죽, 네이팜, 몇몇 용융 고분자

* 참고: 탄성(elasticity)

- 힘을 가하면 변형이 되지만, 힘을 제거하면 본래 형상을 복원하는 물질
- 어원: '돌아오다'는 뜻의 그리스어
- 원칙적으로 고체에서 관찰되는 성질
- Hook의 법칙: 탄성을 갖는 물체에 힘이 가해질 때 본래 데로 돌아가려는 복원력과 변형 사이에 선형 관계가 성립 $\rightarrow F = -kx$

3.2 유체의 유변학적 성질

* 점도(viscosity)

- 뉴턴 유체에서 전단 응력과 전단율 사이의 비례 관계가 성립
→ 비례 상수를 점도라 정의

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

- 점도의 단위: Pa•s (kg/m•s), P(g/cm•s), cP (1 cP = 10⁻² P)

* 점도와 운동량 플럭스

- 전단 응력은 운동량 플럭스로 해석할 수 있음
- 움직이는 유체는 그 보다 빨리 움직이는 유체층으로부터 운동량을 전달 받음
(어떤 유체층은 그 보다 빨리 움직이는 유체층으로부터 운동량을 전달 받음)
- x 방향의 운동량이 -y 방향으로 전달되어 u = 0인 벽에 이르게 됨
- 벽전단(wall shear): 벽에서의 전단 응력에 해당
- 흐름 방향에 수직인 방향으로의 운동량 플럭스는 속도 구배에 비례하며, 비례 상수는 유체의 점도에 해당
- 속도 구배는 운동량 전달의 구동력(driving force)임

3.2 유체의 유변학적 성질

- * 운동 점도(kinematic viscosity, 동점도)
- 유체의 절대 점도와 밀도의 비로 정의됨

$$\nu \equiv \frac{\mu}{\rho}$$

- 운동 점도의 단위: m^2/s , $\text{cm}^2/\text{s} = \text{St}$, ft^2/s (운동 점도는 확산 계수와 단위가 같음)

- * 비뉴턴 유체의 전단율과 전단 응력

- Bingham 가소성 유체의 경우: 항복 응력 보다 큰 전단 응력을 받았을 때만 유동이 발생

$$\tau - \tau_o = K \frac{du}{dy} \quad \text{at } \tau > \tau_o$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \text{at } \tau < \tau_o$$

- 팽창성 유체와 유사 가소성 유체의 경우: Ostwald-de Waele 식으로 기술할 수 있음
→ 멍수법칙 유체(powder law fluid)라고도 부름

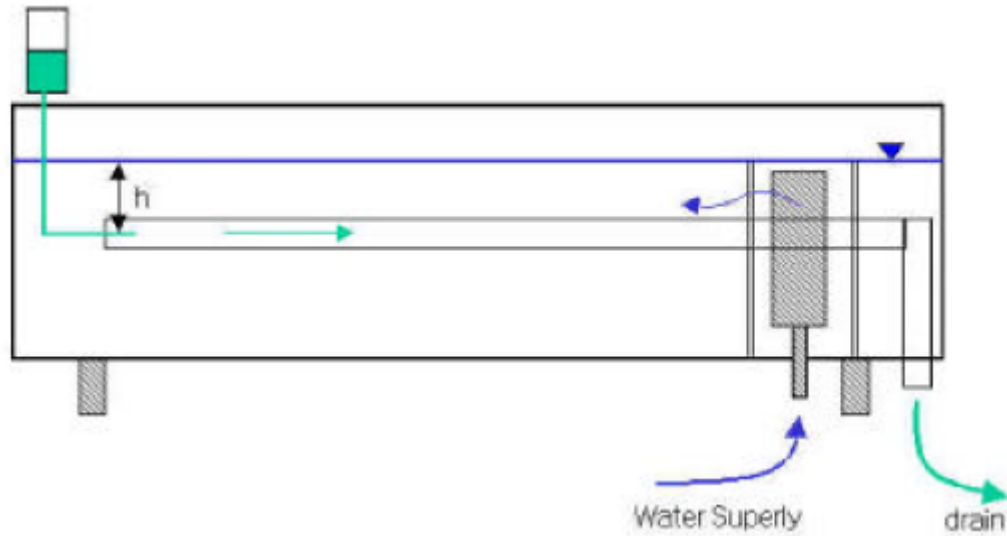
$$\tau = K \frac{du}{dy}^n = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy}$$

- $n > 1$: 팽창성 유체
- $n < 1$: 유사 가소성 유체
- $n = 1$: 뉴턴 유체

3.3 난류 (turbulent flow)

* Reynolds experiment (1883년)

- 도관을 따라 흐르는 유체에 물감을 흘리면서 흐름을 관찰



Reynolds 실험 장치



층류



천이 흐름



난류

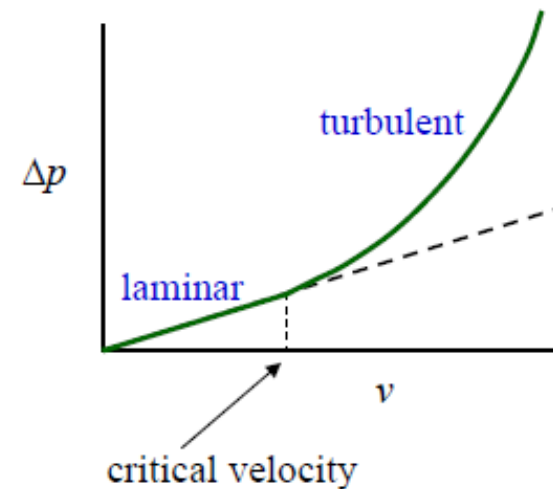
3.3 난류 (turbulent flow)

* Reynolds experiment (1883년)

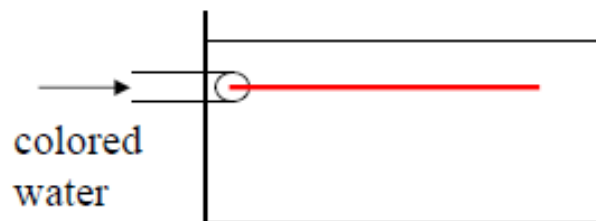
- 유체 흐름의 두 가지 양상: 도관을 따라 흐르는 유체의 압력 강하 Δp 는 유속에 대해 다음과 같은 양상을 보임

Pressure drop (Δp)

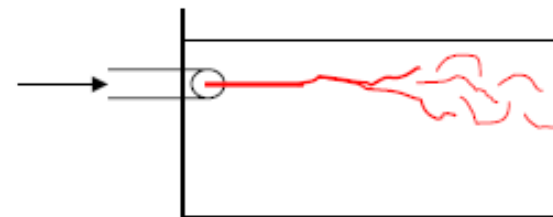
$$\propto \begin{cases} v & \text{at low flow rates} \\ v^2 & \text{at high flow rates} \end{cases}$$



- 유량이 작을 때 물감이 흩어지지 않고 실 모양을 그대로 유지: 층류라고 정의함
- 임계 유속 이상에서는 물감이 실처럼 흐르지 못하고 점점 흩어지기 시작
→ 관의 단면 전체에 퍼짐 (교차 흐름과 에디의 형성 때문): 난류라고 정의함



straight line, no cross mixing
→ laminar flow



wavy and gradually disappeared
→ turbulent flow

3.3 난류 (turbulent flow)

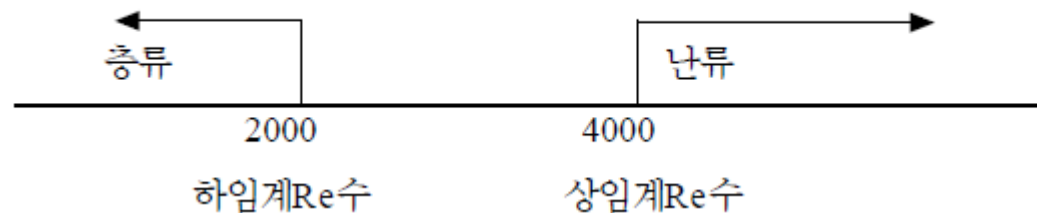
* Reynolds 수와 층류-난류 전이

- 층류와 난류로 바뀌는 임계 유속은 관지름, 유체의 점도/밀도, 평균 유속에 따라 변함
→ 무차원군 Reynolds 수를 정의

$$\text{Re} = \frac{D\bar{V}\rho}{\mu} = \frac{D\bar{V}}{\nu}$$

-원형 도관에서의 층류-난류 전이

- 층류 영역: $\text{Re} < 2,100$ → 언제나 층류로 흐름 (교란이 생겨도 감쇠되어 층류가 유지 됨)
- 전이 영역: $2,100 < \text{Re} < 4,000$ → 관 입구의 조건과 입구로부터의 거리에 따라 층류가 되기도 하고 난류가 되기도 함
- 난류 영역: $\text{Re} > 4,000$ → 유속 변동 등에 의해 흐름을 교란시키면 즉시 난류가 됨



3.3 난류 (turbulent flow)

(예) 내경이 $40[mm]$ 인 관을 동점성계수 $1.79 \times 10^{-6}[m^2/s]$ 인 유체가 $0.5[m/s]$ 로 흐르고 있다. 이 흐름은 층류인가 난류인가를 판별하시오.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} = \frac{0.5 \times 0.04}{1.79 \times 10^{-6}} = 11173 > 2000$$

따라서 이 흐름은 난류이다.

3.3 난류 (turbulent flow)

* 난류의 성질

- 벽난류(wall turbulence): 유체 흐름이 고체 경계와 접촉할 때 발생하는 난류
- 유리 난류(free turbulence): 유속이 다른 두 흐름이 접촉할 때 발생하는 난류
- 정체 유체 중에 유체를 분사하는 경우, 고체 벽으로부터 경계층이 분리되어 유체를 통해 흐르는 경우 발생

* 난류를 구성하는 에디(eddy)

- 에디: 난류 흐름에 공존하는 소용돌이 (회전하는 작은 팽이와 같음)
- 유체 흐름의 일부가 본류와 반대 방향으로 소용돌이 치는 현상
- 큰 에디가 계속 발생하며 일부는 파괴되어 작은 에디로 분할되면서 소멸
- 에디의 소멸 과정에서 회전 에너지가 점성 작용에 의해 열로 소실됨 (점성 소실, viscous dissipation)
- 에디 안의 흐름은 층류이며, 작은 에디의 크기는 $10 - 100 \mu\text{m}$ 수준
- 에디는 거시적인 현상이며, 분자 수준의 현상이 아님

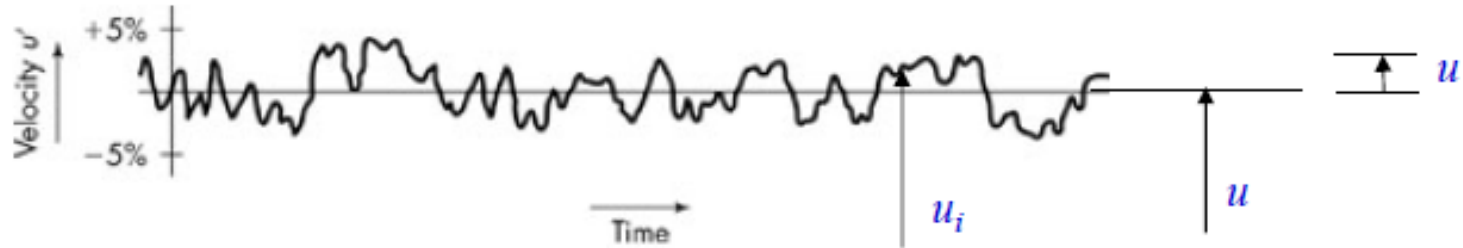


에디의 모식도와 사진

3.3 난류 (turbulent flow)

* 난류 중의 편차 속도(편의 속도, deviation velocity)

- 난류장(turbulent field)에서 한 점의 순간 유속 변동: 속도의 세 성분 모두 빠르게 변함



- 일차원 난류 흐름에서 $v = w = 0$

• u_i, v_i, w_i : x, y, z 방향의 순간 속도 성분

• u, v, w : x, y, z 방향의 평균 속도 (실질 속도)

• u', v', w' : x, y, z 방향의 편차 속도 (속도의 요동량)

cf.) In laminar flow,

$$u_i = u \quad v_i = 0 \quad w_i = 0$$

$$u_i = u + u' \quad v_i = v' \quad w_i = w'$$

- 편차 속도의 시간 평균은 0이 됨

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u' dt = 0$$

- 편차 속도의 제곱에 대한 시간 평균은 0이 아님

$$\overline{(u')^2} = \overline{(v')^2} = \overline{(w')^2}$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (u')^2 dt = \overline{(u')^2}$$

3.3 난류 (turbulent flow)

* 등방성 난류 (isotropic turbulence)

- 한 점에서 편차 속도의 제곱 평균이 모든 방향에 대해 같은 경우에 해당

$$\overline{(u')^2} = \overline{(v')^2} = \overline{(w')^2}$$

- 관의 중심선이나 경계층의 외부와 같이 속도 구배가 없는 영역에서 등방성 난류가 관찰됨
- 에디가 큰 경우 비등방성, 소멸 직전의 작은 경우 등방성 난류 거동을 보임

* Reynolds 응력 (Reynolds stress)

- 난류 흐름에서는 층류에서 보다 전단 응력이 훨씬 커짐
: 편차 속도에 의해 추가적인 전단 응력이 발생하기 때문

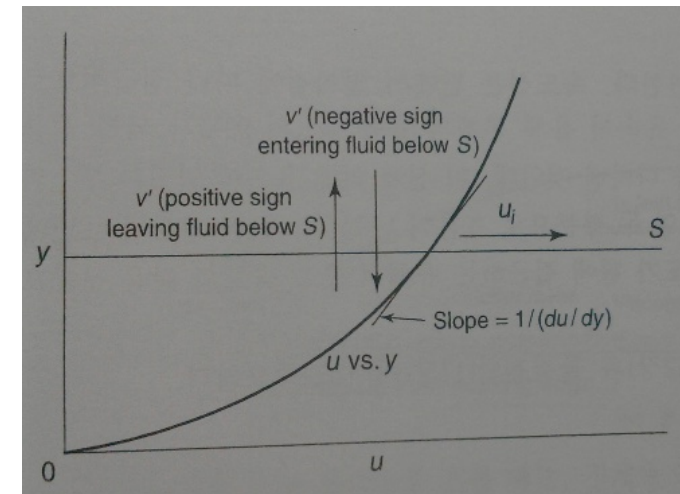
- x 방향으로의 순간 속도: $u_i = u + u'$
(평균 유속과 순간 유속의 합)

- 평면 S 밑으로의 질량 플럭스 = $\rho v'$

- 난류에 의한 평면 S 밑으로의 운동량 플럭스
(단위 면적당 운동량 전달 속도) = $-\rho \overline{u'v'}$

- 모든 에디를 시간에 대해 평균하여 난류에 의한 운동량 플럭스를 정의 가능 (Reynolds stress)

$$\tau_t = \rho \overline{u'v'}$$



3.3 난류 (turbulent flow)

* 에디 점도 (eddy viscosity)

- 난류에서의 전단 응력(난류 응력)과 속도 구배 사이의 관계를 활용하여 에디 점도 E_v 를 정의

$$\tau_t = E_v \frac{du}{dy}$$

- 에디 운동량 확산 계수(eddy diffusivity of momentum): 에디 점도를 유체의 밀도로 나눈 값으로 정의됨

$$\varepsilon_M = E_v / \rho$$

- 절대 점도 μ 와 운동량 점도는 유체의 물성치 (무수한 분자의 운동과 운동량을 평균한 거시적인 양)

- 에디 점도 E_v 와 에디 운동량 확산 계수는 유속과 계에 따라 달라지는 양 (측정이 어렵고 특수 기기가 필요)

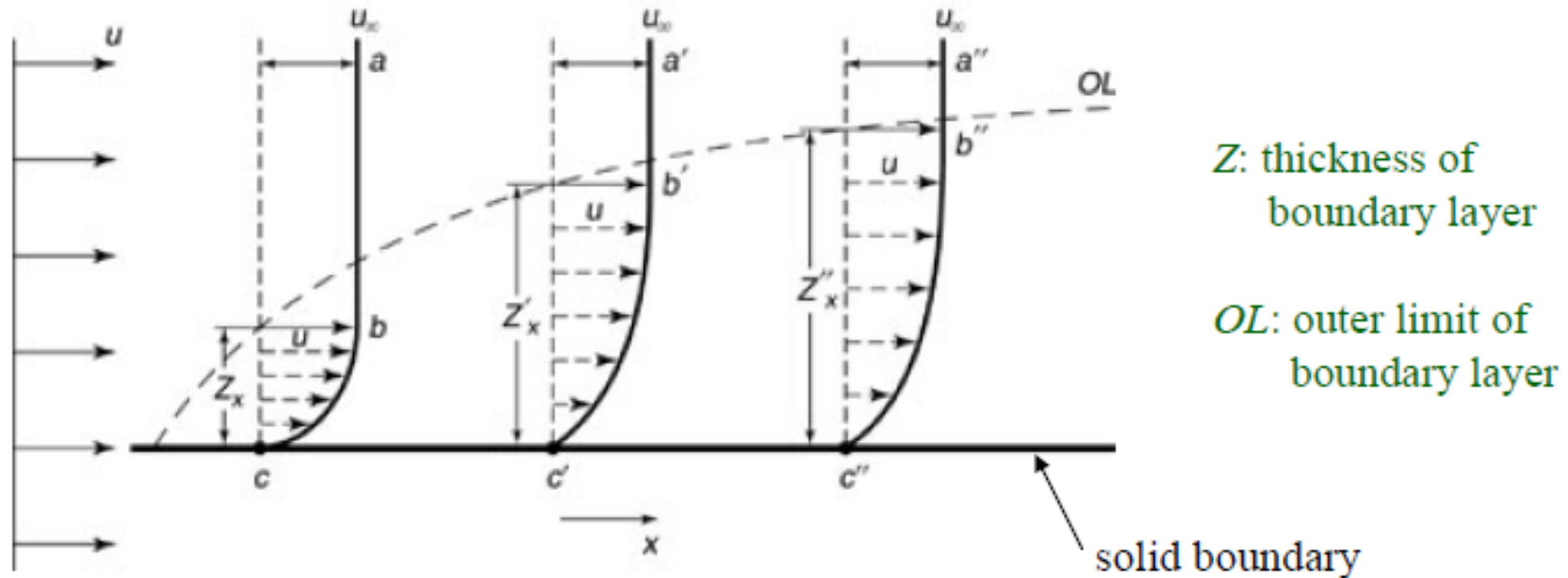
- 난류의 전체 전단 응력은 점성 응력과 난류 응력의 합

$$\tau = \tau_v + \tau_t = (\mu + E_v) \frac{du}{dy}$$

3.4 경계층 (boundary layer)

* 경계층 안의 흐름

- 경계층(boundary layer): 움직이는 유체 중에 고체 경계의 영향을 받으면서 흐르는 부분으로 정의



- 판 선단(leading edge)의 상류에서 유속은 전체 단면에서 균일 ($u = u_\infty$)
- 고체와 유체의 계면에서 유속은 0 → 판으로부터 떨어질수록 유속이 증가
- 판 근처에서 유속이 급변 → 국부 유속은 점근적으로 본체 흐름 유속 u_∞ 에 접근
- 선 OL : 유속이 유체 본체의 유속 u_∞ 의 99%가 되는 점을 연결한 것

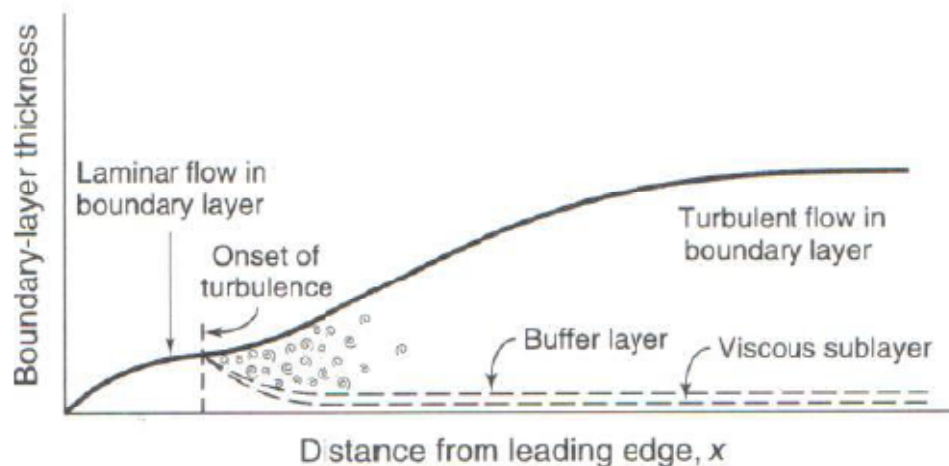
3.4 경계층 (boundary layer)

* 경계층 안의 층류 흐름

- 고체 표면에 가까운 부분은 층류에 해당
- 일시적으로 경계층 내부로 유입된 에디에 의해 층류 흐름이 교란될 수 있음
- 에디는 경계층 내부의 속도 프로파일에는 큰 영향을 미치지 않으나, 열 및 물질 전달에서는 중요하게 작용할 수 있음

* 경계층 안의 난류 흐름

- 고체 표면에서 멀리 떨어진 부분은 경계층 내부라고 하더라도 난류가 발생 가능
- 난류 경계층의 구성: 점성 하층(점성 부층, viscous sublayer), 완충층(buffer layer), 난류 영역
- 경계층의 두께(Z_x) 변화: 선단으로부터 하류측으로 갈수록 경계층이 두꺼워지며, 어떤 점에 이르면 난류가 발생하기 시작



$$Z_x \propto x^{0.5} \text{ (층류 경계층에서)}$$

$$Z_x \propto x^{1.5} \text{ (난류 발생 직후)}$$

$$Z_x \propto x^{0.8} \text{ (난류가 완전히 발달한 경우)}$$

평판 위의 난류 경계층 발달

3.4 경계층 (boundary layer)

* 층류-난류 전이: Reynolds 수

- 층류 경계층에서 난류가 발생하는 점은 무차원 Reynolds 수와 연관시킬 수 있음

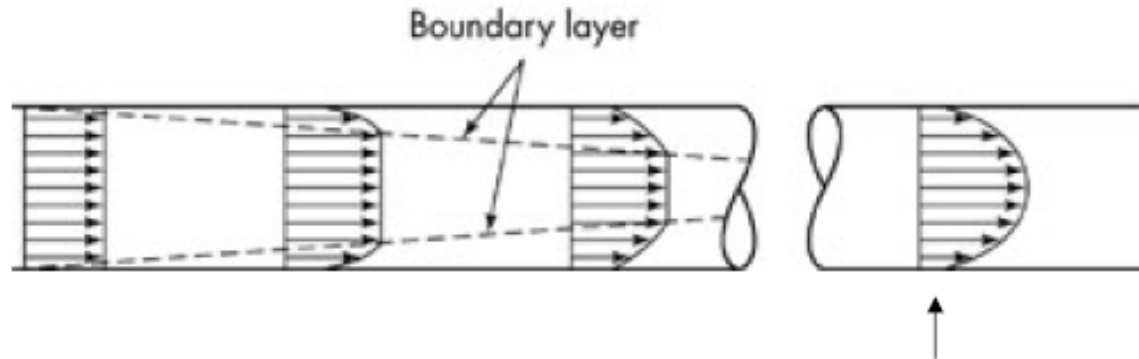
$$\text{Re}_x = \frac{xu_\infty\rho}{\mu}$$

- x: leading edge로부터의 거리
- u_∞ : 유체 본체의 유속
- 임계 Reynolds 수: $10^5 - 3 \times 10^6$ 정도의 Re 수에서 난류가 처음 발생
(거친 판이나 접근 흐름의 난류 강도가 큰 경우 더 작은 값에서 난류 전이가 발생)

3.4 경계층 (boundary layer)

* 곧은 관 안의 경계층 형성

- 벽이 얇은 직관에 유체가 균일한 속도로 유입되는 경우를 가정
- 관 입구에서 경계층이 형성되기 시작 → 계속 흐를수록 경계층이 두꺼워짐 → 관의 하류로 갈수록 경계층이 차지하는 부분이 증가 → 막대 모양의 중심부가 사라지고 경계층만 남음



fully developed flow (완전발달흐름)

: 속도분포가 더 이상 변하지 않는 흐름

- 완전 발달 흐름(fully developed flow): 경계층이 완전히 형성되어 속도 분포가 완성된 흐름
- 난류와 층류의 전이 길이(transition length): 관 입구에서부터 완전 발달 흐름이 되기까지의 길이로 정의됨. 도관에서의 전이 길이는 다음과 같음 (D: 관지름)

$$\frac{x_t}{D} = 0.05 \text{Re} \sim \text{by Nikuradse}$$

- 관에 유입되는 유체가 난류인 경우에는 전이 길이가 Re 수에 무관 ($x_t = 40D \sim 50D$)

3.4 경계층 (boundary layer)

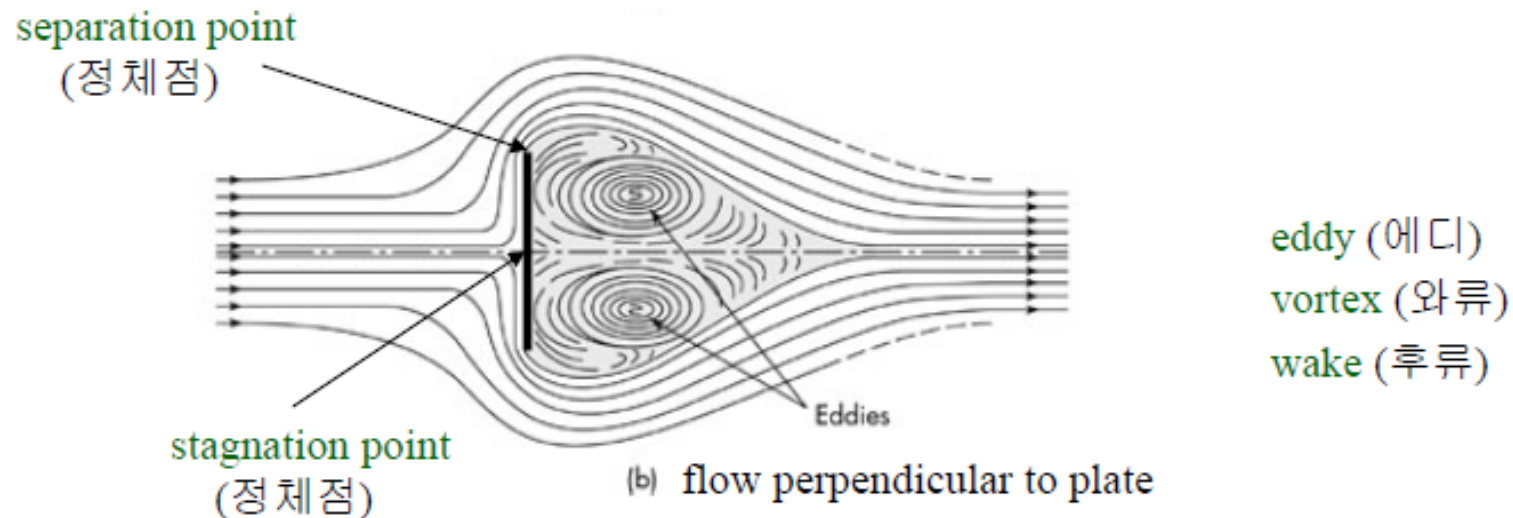
* 경계층의 분리와 웨이크 생성

- 흐름 방향에 평행인 평판의 후단: 유체가 평판을 떠난 뒤 잠시 동안 층과 속도 구배가 유지 → 경계층이 없어지며 다시 균일한 속도를 회복



(a) flow parallel with plate

- 평판이 흐름 방향에 직각으로 있는 경우: 흐름이 판 가장 자리에 이르면 표면을 따라서 돌아 흐르지 못하고 판에서 분리되어 유체 본체 쪽으로 흐름
→ 판의 뒷부분에 감속된 유체의 배후(backwater) 영역이 발생, 와류(vortex)가 형성 (웨이크, 후류) → 기계적 에너지가 유실, 유체의 압력 손실이 커짐



(b) flow perpendicular to plate

3.4 경계층 (boundary layer)

* 경계층의 분리를 방지하는 방법

- 경계층의 분리가 예상되는 영역에 흡인(suction) 장치 설치: 유체를 강제로 끌어들이м
- 유로 단면적의 급격한 변화를 피할 수 있도록 고체를 유선형으로 설계

Chap. 12 상변화 없는 유체로의 열전달 (Heat Transfer to Fluids without Phase Change)

* 상변화 없는 유체로의 열전달 예

- 발열 반응기로부터 나오는 뜨거운 유출물의 활용: 찬 급송물의 예열용
 - 뜨거운 기체 흐름으로부터 냉각수의 열전달
 - 공기에 의한 뜨거운 액체 흐름의 냉각
- 두 흐름은 열전달 표면인 금속 벽에 의해 격리됨

* 열 재생기(thermal regenerator): 고체 형태의 층을 유체에 의해 가열
→ 그 고체가 찬 유체를 가열하는데 재사용

12.1 경계층 (boundary layer)

* 열전달 영역

- 가열되거나 냉각되는 유체의 흐름 형태: 층류, 난류, 전이 영역(transition range) 등
- 경계층 분리(boundary layer separation): 유체의 흐름 방향이 가열 표면에 직각으로 놓이는 경우 발생

* 마찰열(frictional heat)

- 보통 유속에서 유체 마찰로 인한 발생 열은 유체간 전달되는 열량에 비해 무시할 수 있음
- 마찰열을 무시할 수 없는 예
 - : 고분자의 사출 성형에서와 같이 점성이 큰 유체가 관여되는 공정
 - : 알래스카 송유관 내 원유의 마찰-가열(frictional heating) → 원유의 상온 유지에 필요
 - : $Ma > 1$ 인 고속 유체의 흐름: 마찰열을 감지할 수 있을 정도로 큼
 - : 우주선의 대기권 재진입

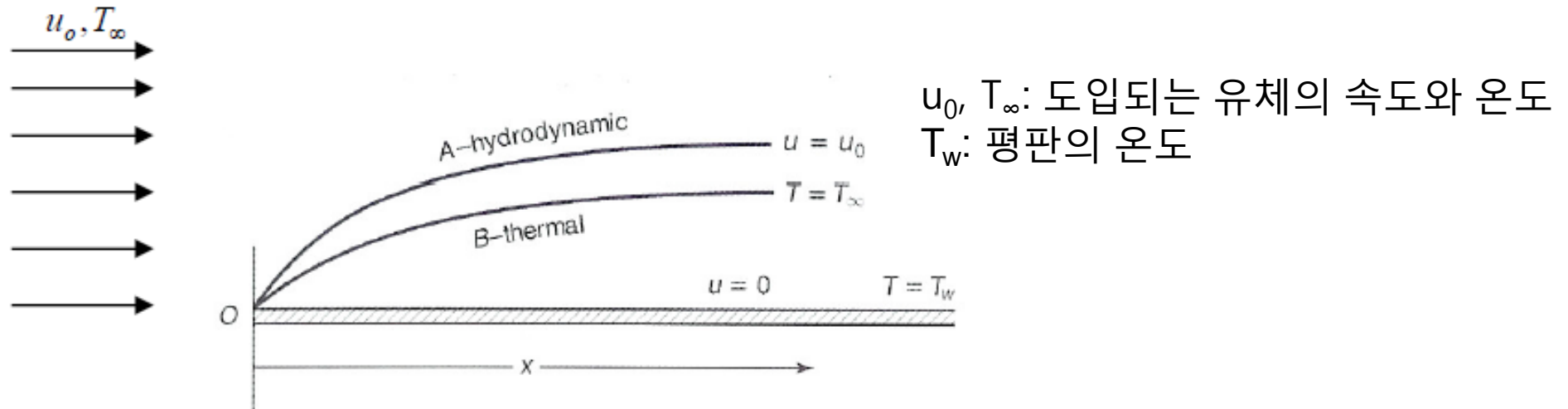
* 참고: 마하 수

- 어떤 유체의 흐름 속도를 그 유체에서 음파의 전달 속도로 나눈 것
- $Ma > 1$ 인 경우 초음속에 해당: 음속 폭음이 발생
- $Ma < 0.3$ 인 경우 공기를 비압축성 유체로 가정할 수 있음

12.1 경계층 (boundary layer)

* 열경계층(thermal boundary layer)

- 평판이 정상 유체 흐름에 잠긴 경우를 가정한다.



- 유체동역학적 경계층(hydrodynamic boundary layer): 경계층에서 유속 $u = 0$ 부터 u_∞ 까지 속도 구배가 형성 (선 OA)

- 열경계층(thermal boundary layer): 벽의 온도 T_w 부터 도입 유체의 온도 T_∞ 까지 온도 구배가 형성 (선 OB)

12.1 경계층 (boundary layer)

* 프란틀 수(Prandtl number)

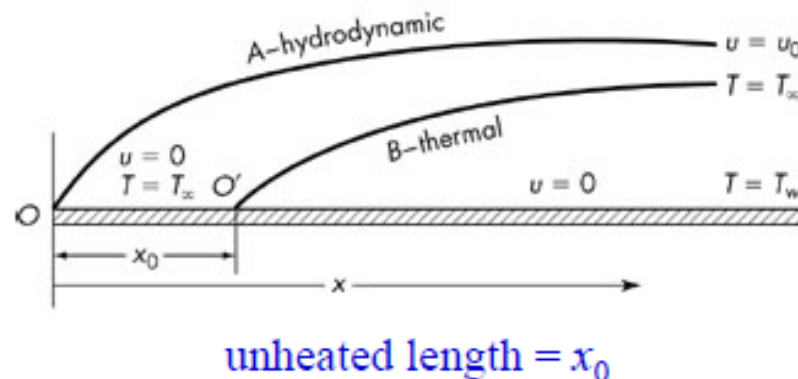
- 프란틀 수는 열확산 계수와 운동량 확산 계수의 비로 정의됨

$$\boxed{\text{Pr} \equiv \frac{C_p \mu}{k}} \quad \leftarrow \frac{\nu}{\alpha}$$

kinematic viscosity
thermal diffusivity

: 즉, 운동량확산계수/열확산계수

- $\text{Pr} > 1$: 열경계층 두께 < 유체동역학적 두께
(열전달 속도가 운동량 전달 속도보다 낮으므로 열경계층 두께가 더 얇음)
- $\text{Pr} < 1$: 열경계층 두께 > 유체동역학적 두께
- 액체의 Pr: 점도 감소 때문에 온도에 따라 줄어듦
- 기체의 Pr: 온도에 대해 거의 일정
- 액상 금속 (liquid metal): 높은 열전도도 때문에 낮은 Pr 값을 갖음 ($\text{Pr} = 0.01 \sim 0.04$)
- 평판 처음 부분이 가열되지 않고 열전달 면이 앞머리로부터 x_0 의 거리에 존재하는 경우 → 열경계층이 나중에 생김



12.1 경계층 (boundary layer)

* 완전 발달 흐름에서의 온도 구배

- 속도 이력과 달리 온도 이력은 관 길이가 증가함에 따라 납작하게 되며, 긴 관에서는 온도 구배가 없어지며 열전달이 그치게 됨