

# 8.5 완전 발달된 파이프 유동의 난류 속도 형상

## • 구역별 난류 유속 분포

- 점성저층 (viscous sublayer)  $0 \leq y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \leq 5$

- 난류인 경우에도 벽면에 아주 가까운 곳은 유체 덩어리가 출입하지 못함 → 층류구역
- 벽면의 지배를 받음 : 마찰 속도  $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$
- 전단응력 거의 일정 → 선형적 유속 분포

$$\tau \approx \tau_w \approx \rho \nu \frac{\bar{u}}{y} \Rightarrow \frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\nu \bar{u}}{y}$$

## • 벽법칙 (law of the wall)

$$u_*^2 = \frac{\nu \bar{u}}{y} \Rightarrow \frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{y u_*}{\nu} \text{ or } u^+ = y^+$$

- 완충층 (buffer layer) : 부드러운 전환

- 로그층 (logarithmic layer)  $y^+ > 30$

- 난류유동 (벽면에서 먼 쪽에서 우세) 과 층류유동 (벽면에서 아주 가까운 영역) 이 비슷한 중요성

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \frac{y u_*}{\nu} + 5.0 \text{ or } u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.0$$

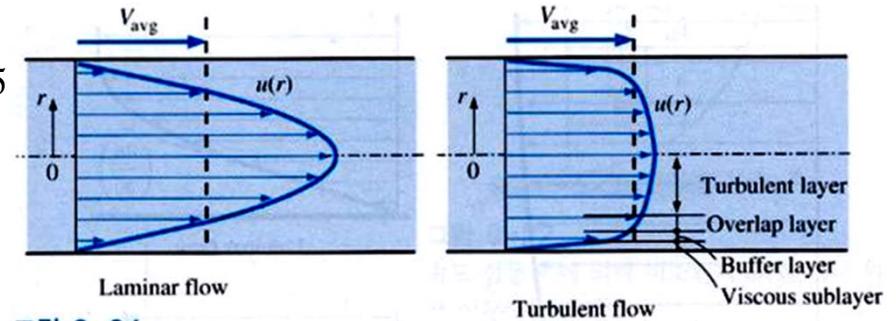
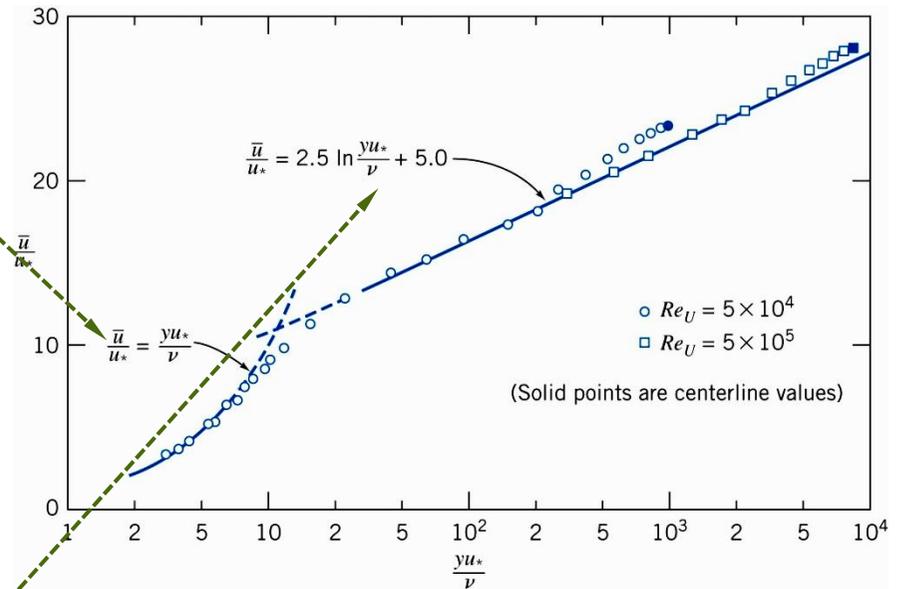


그림 8-24

파이프 내 완전 발달 층류유동의 속도분포는 포물선이지만 난류유동의 경우 훨씬 평평해진다.



# 8.5 완전 발달된 파이프 유동의 난류 속도 형상

## • 구역별 난류 유속 분포 : 계속

### - 외부 영역 (outer region)

- 벽면에서 아주 멀어진 영역으로 난류유동이 활발, 유체의 점성계수와는 무관해짐
- 결손법칙 (defect law) : 관 중심부 유속에서 로그 속도 분포식을 빼서 구함

$$\frac{U - \bar{u}}{u_*} = 2.5 \ln \frac{R}{R-r} = 2.5 \ln \frac{R}{y}$$

### - 구역별 유속분포의 문제점

- 유량을 구할 수 없음 : 단일한 속도 분포가 부재하므로 속도분포를 적분할 때 어디서부터 어디까지 적용해야 하는지 불분명함
- 층류의 경우 : 단일한 속도 분포 존재

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_0^R u \cdot 2\pi r \, dr = \int_0^R \frac{1}{4\mu} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) (R^2 - r^2) 2\pi r \, dr = \frac{\pi}{2\mu} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

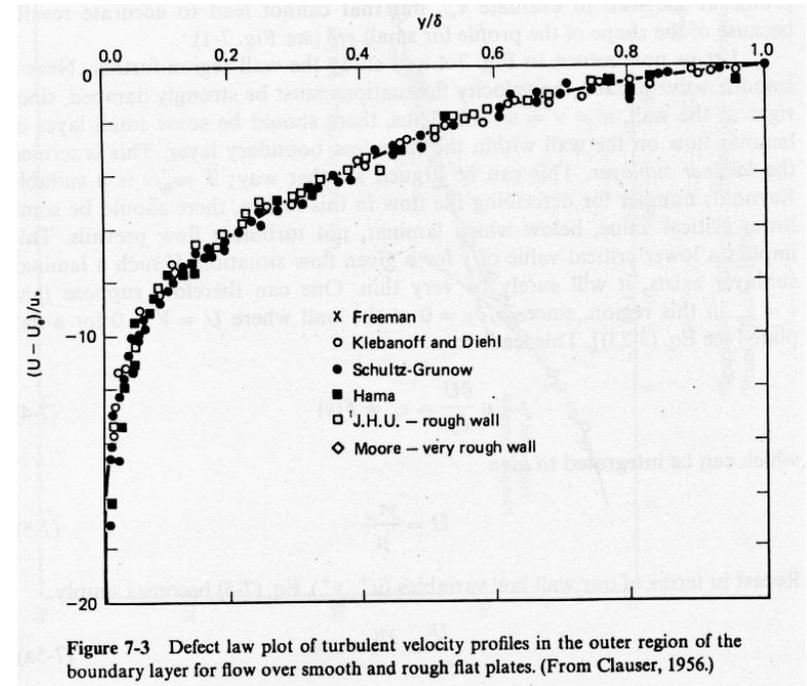


Figure 7-3 Defect law plot of turbulent velocity profiles in the outer region of the boundary layer for flow over smooth and rough flat plates. (From Clauser, 1956.)

# 8.5 완전발달된 파이프 유동의 난류 속도 형상

## • 난류 유속 분포 : 근사적 대안

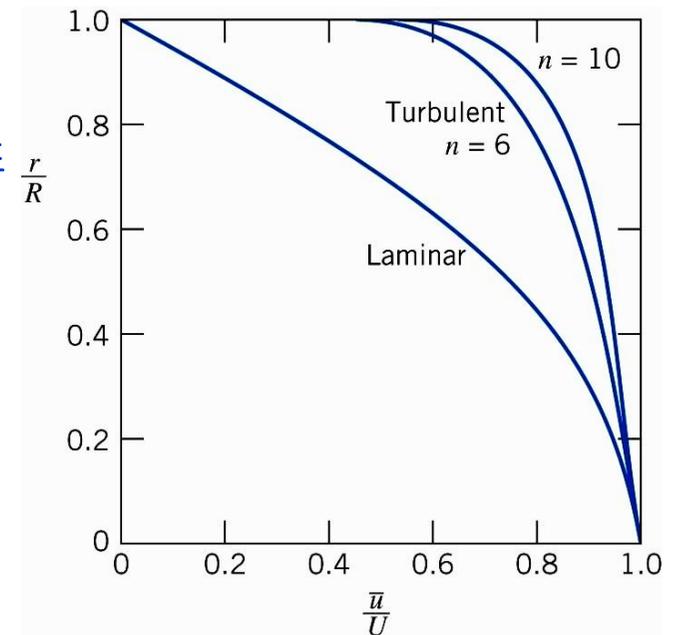
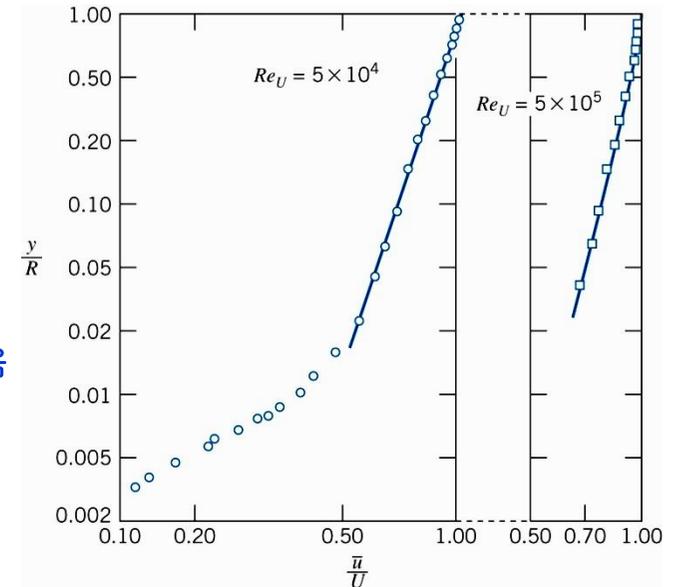
### - 멱법칙 (power law)

• 경험식  $\frac{\bar{u}}{U} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/n} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}$  (n은 정수)

- 관의 중심부 (벽면에서 먼 곳) 에서 실험결과와 잘 들어맞음
- 주의 : "경험 법칙" 이므로 물리적인 근거는 전혀 없음
- 벽면 부근에서 맞지 않지만 억지로 유량을 구할 수는 있다.

$$\frac{\bar{V}}{U} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}$$

- 보통 n = 7 사용 → "1/7승 법칙"
- n 이 커질수록 더 볼록한 (혹은 중심부에서 더 평평한) 속도 분포 형상이 됨
- 문제점 : 벽면에서 속도 구배가 무한대 → 벽면 전단응력을 구할 수 없음



## 8.6 파이프 유동의 에너지 고찰

### • 에너지 방정식

- 파이프 시스템에 대하여 열역학 1법칙 적용

#### • 단순화 조건

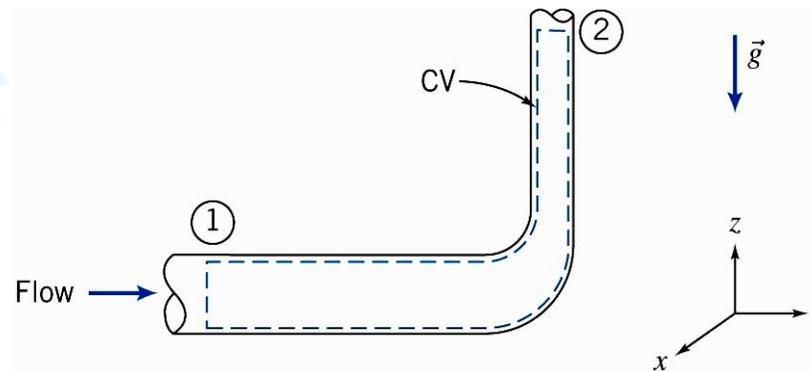
1. 축 일 = 기타 일 = 0 ; 2. 전단응력에 의한 일 = 0; 3. 정상유동; 4. 비압축성 유동;
5. 단면 ①과 ②에서 균일한 내부에너지, 압력

#### • 검사체적에 적용되는 열역학 제1법칙

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{\text{shear}} - \dot{W}_{\text{other}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} e \rho dV + \int_{\text{CS}} \left( u + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

#### • 단일 입구, 단일 출구에 대하여 단순화된 방정식 (입구 및 출구 단면에서 균일한 내부에너지, 압력)

$$\dot{Q} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m} \left( \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} \right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \int_{A_2} \frac{V_2^2}{2} \rho_2 V_2 dA_2 - \int_{A_1} \frac{V_1^2}{2} \rho_1 V_1 dA_1$$



## 8.6 파이프 유동의 에너지 고찰

### • 운동에너지 보정계수

- 에너지 방정식에 대한 보정계수

• 배경 : 운동에너지 플럭스 항을 어떻게 계산하는가?  $\int_{A_1} \frac{V_1^2}{2} \rho_1 V_1 dA_1 \stackrel{?}{=} \dot{m}_1 \frac{V_1^2}{2}$

✓ 불가능, 왜냐하면  $\int_{CS} \frac{V^2}{2} \rho V dA \neq \frac{\bar{V}^2}{2} \rho \bar{V} A$

• 해결방법 : 등호가 성립하도록 보정계수  $\alpha$  도입  $\rightarrow$  운동에너지 보정계수

$$\alpha = \frac{\int_A \rho V^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} = \frac{\int_A \rho V^3 dA}{\rho \bar{V} A \cdot \bar{V}^2} = \int_A \rho \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^3 dA \Rightarrow \int_A \frac{V^2}{2} \rho V dA = \alpha \dot{m} \frac{\bar{V}^2}{2}$$

• 층류유동에 대한 운동에너지 보정계수  $V = U \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) = 2\bar{V} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$

$$\begin{aligned} \alpha &\equiv \frac{1}{A} \int_{CS} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^3 dA = \frac{8}{\pi R^2} \int_0^R \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^3 \cdot 2\pi r dr = \frac{16}{R^2} \int_0^R \left( r - 3\frac{r^3}{R^2} + 3\frac{r^5}{R^4} - \frac{r^7}{R^6} \right) dr \\ &= \frac{16}{R^2} \left[ \frac{r^2}{2} - \frac{3}{4} \frac{r^4}{R^2} + \frac{3}{6} \frac{r^6}{R^4} - \frac{1}{8} \frac{r^8}{R^6} \right]_0^R = \frac{16}{R^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{4} + \frac{3}{6} - \frac{1}{8} \right) R^2 = \frac{16}{R^2} \cdot \frac{R^2}{8} = 2 \end{aligned}$$

• 난류유동에 대한 운동에너지 보정계수  $\frac{V}{U} = \left( \frac{y}{R} \right)^{1/n} = \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n} \Rightarrow \alpha = \left( \frac{U}{\bar{V}} \right)^3 \frac{2n^2}{(3+n)(3+2n)}$

✓  $n = 7$  일 때  $\alpha = 1.06$

✓ 난류유동일 때에는  $\alpha = 1$  을 사용해도 무방하다.

## 8.6 파이프 유동의 에너지 고찰

### • 수두 손실 (Head Loss)

- 비가역적인 에너지의 변환

- 에너지 보정계수를 도입한 에너지 방정식

$$\dot{Q} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m}\left(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}\right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \dot{m}\left(\frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2}\right)$$

- 양변을 질량유량으로 나누고 정리

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \frac{\delta Q}{\delta m} = u_2 - u_1 + \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} + gz_2 - gz_1 + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2}$$

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} + gz_2\right) = (u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{\delta m}$$

- $h_{lT} = \left(u_2 - u_1 - \frac{\delta Q}{\delta m}\right) = ?$  : 단위 질량당의 기계적 에너지 (유용한 에너지)의 손실

✓ 외부에서 전달된 열량을 초과하는 여분의 내부 에너지 상승 (예: 마찰열)

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{lT}$$

- 수두 손실 : 단위 중량당 전체 에너지의 손실 (단위 : 길이)

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2\right) = \frac{h_{lT}}{g} = H_{lT}$$

## 8.7 수두 손실의 계산

### • 파이프 계통의 수두 손실

- 총 수두 손실 = 주 손실 (major loss) + 부 손실 (minor loss)

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{1_T} = h_1 + h_{1_m}$$

- 주 손실  $h_1$  : 파이프에서의 마찰로 인한 손실
- 부 손실  $h_{1_m}$  : 파이프 연결 부품 내에서의 손실

### • 주 손실

- 정의

- 단면적이 일정한 파이프 에서  $\alpha_1(\bar{V}_1^2/2) = \alpha_2(\bar{V}_2^2/2)$  이고, 수평일 때 ( $z_2 = z_1$ )  $\rightarrow \frac{p_1 - p_2}{\rho} = h_1$
- 주 손실 = 수평 파이프의 완전 발달된 유동에 대한 압력 손실

- 층류유동의 주 손실 및 마찰계수

- 압력 손실 : 해석적인 방법 (이론적)으로 구할 수 있음  $\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = \frac{128 \mu L \bar{V} (\pi D^2/4)}{\pi D^4} = 32 \frac{L \mu \bar{V}}{D D}$

- 주 손실의 계산  $h_1 = \frac{\Delta p}{\rho} = 32 \frac{L \mu \bar{V}}{D \rho D} = \frac{L \bar{V}^2}{D 2} \left( 64 \frac{\mu}{\rho \bar{V} D} \right) = \left( \frac{64}{\text{Re}} \right) \frac{L \bar{V}^2}{D 2} \equiv f \frac{L \bar{V}^2}{D 2}$

- 마찰계수  $f = \frac{64}{\text{Re}}$

## 8.7 수두 손실의 계산

### • 주 손실

#### - 난류유동의 주 손실 및 마찰계수

- 압력 손실 : 해석적인 방법 (이론적)으로 구할 수 없음 → 실험 결과의 경험식 (차원해석 필요)
- 차원 관계식  $\Delta p = \Delta p(D, L, e, \bar{V}, \rho, \mu)$  , ( $e$  : 파이프 표면 거칠기)
- 차원 해석법 적용, 무차원 관계식 도출

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = f \left( \frac{\mu}{\rho \bar{V} D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right) = \phi \left( \text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right) \Rightarrow \frac{h_1}{\bar{V}^2} = \phi \left( \text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right)$$

- 무차원 수두손실  $\propto L/D$  이고, 분모에 비례상수  $1/2$  (관례상 사용) 도입

$$\frac{h_1}{\bar{V}^2/2} = \frac{L}{D} \phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$$

- 마찰계수 (friction factor): 미지함수  $\phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$  로 정의  $f \equiv \phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$

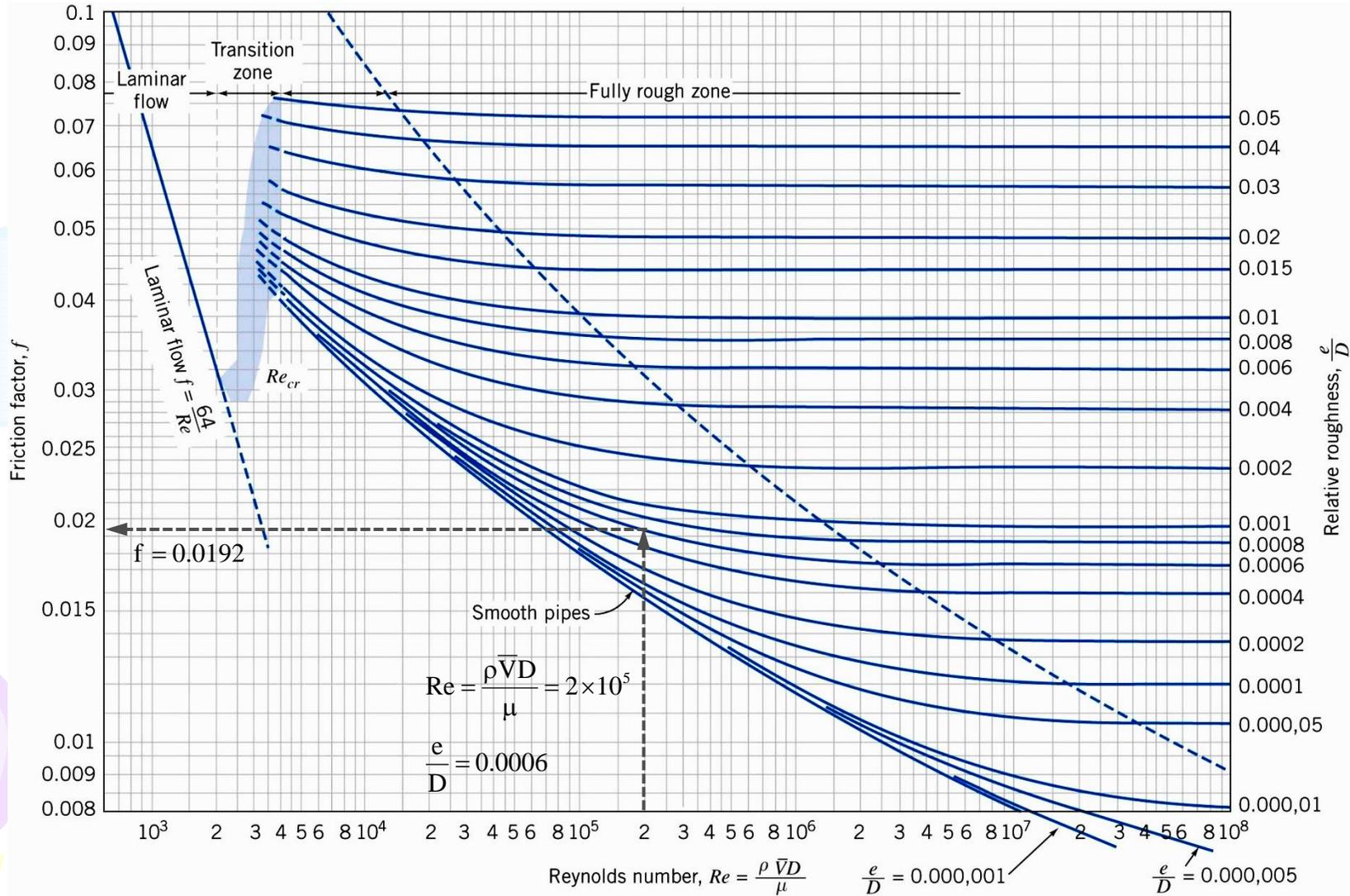
- 주 손실 및 마찰계수  $h_1 = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2}$

- 수두 손실 및 마찰계수  $H_1 = \frac{h_1}{g} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$

- **Moody chart** : 실험적으로 결정된 마찰계수 도표

# 8.7 수두 손실의 계산

## • Moody Chart



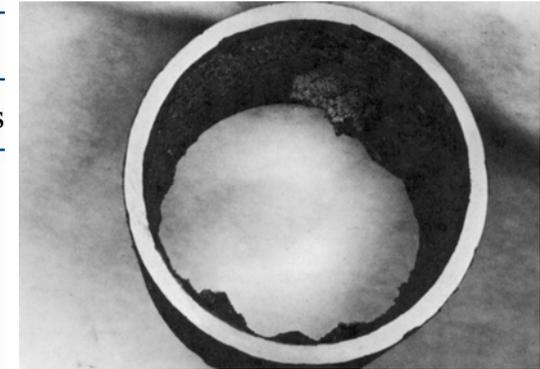
# 8.7 수두 손실의 계산

## • Moody Chart

Table 8.1

Roughness for Pipes of Common Engineering Materials

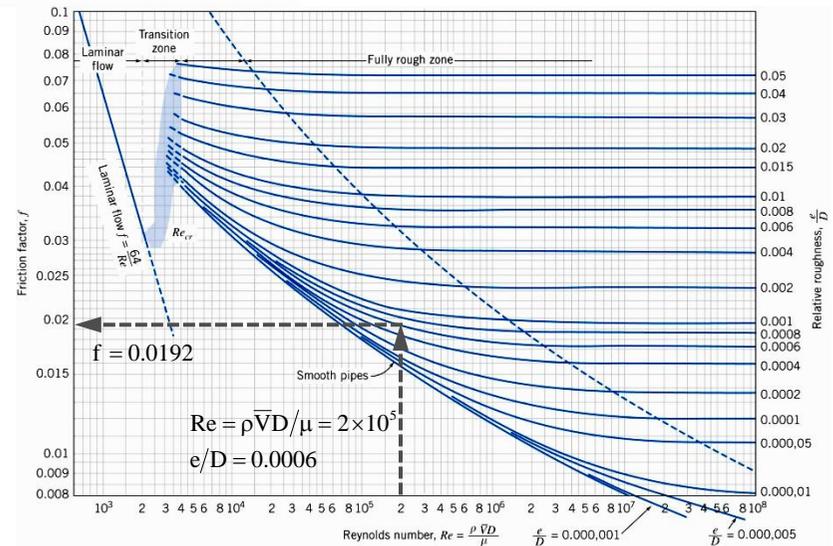
Pipe	Roughness, $e$	
	Feet	Millimeters
Riveted steel 리벳 강관	0.003–0.03	0.9–9
Concrete	0.001–0.01	0.3–3
Wood stave	0.0006–0.003	0.2–0.9
Cast iron 주철관	0.00085	0.26
Galvanized iron 아연도금강관	0.0005	0.15
Asphalted cast iron 아스팔트 포장 주철관	0.0004	0.12
Commercial steel or wrought iron 상용강관/연철관	0.00015	0.046
Drawn tubing 인발관	0.000005	0.0015



오래된 파이프 안쪽 면에 발생하는 석회 퇴적물 (scale) 및 녹 :  $e/D$  가 5~10배 증가함

### - 읽는 방법

- 주어진 밀도, 유량, 직경, 점성계수 →  $Re$
- 재질에 따른 파이프 거칠기 →  $e/D$
- 계산된  $Re$  값에서 수직으로 올리고  $e/D$  값에 해당되는 곡선과 만나는 점에서 수평으로 연장,  $f$  값을 읽는다.



# 8.7 수두 손실의 계산

## • Moody Chart

- 특징

- 층류 유동 ( $Re < 2,300$ )  $f_{laminar} = \frac{64}{Re}$
- 천이구역 : 전단응력 및 마찰계수 대폭 증가
- 난류 구역 : Colebrook 공식 (음함수)

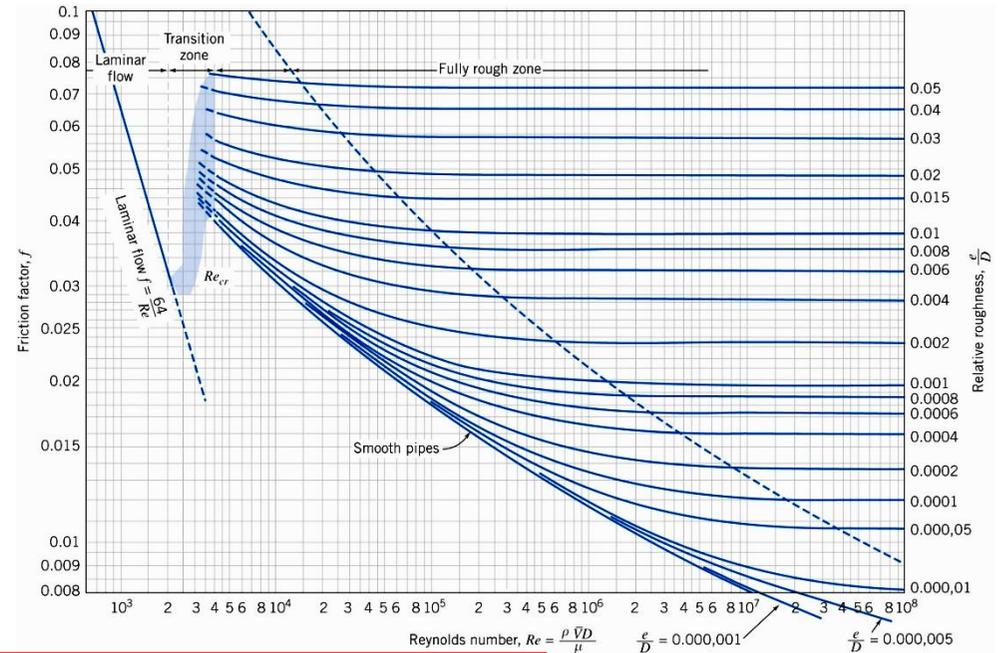
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

- 난류구역 : Haaland 근사식 (양함수)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} \right], 2\% \text{ 오차}$$

- $Re$  가 아주 커질 때 : 마찰계수 곡선이 수평이 됨 ( $f$  는  $Re$  와 무관,  $e/D$  만으로 결정) → **완전 거침 영역 (fully rough region)**, von Kármán 공식  $1/\sqrt{f} = -2.0 \log(\epsilon/D/3.7)$
- 매끈한 관 ( $e = 0$ ) : Colebrook 공식 → Prandtl 공식  $1/\sqrt{f} = 2.0 \log(Re \sqrt{f}) - 0.8$
- 매끈한 관에 대한 대체 공식, Blasius 실험식 활용

$$f = 0.316 Re^{-0.25}, h_1 = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} = \frac{\Delta p}{\rho}, \tau_w = \frac{R}{2} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta p}{L} \Rightarrow \tau_w = \frac{f}{8} \rho \bar{V}^2 = 0.0332 \rho \bar{V}^2 \left( \frac{UR}{\nu} \right)^{-0.25}$$



## 8.7 수두 손실의 계산

### • 부 손실 (Minor Loss)

#### - 정의

- 배관 계통 (piping system) 은 다양한 부품 (fitting, valve, bend, elbow, tee, inlet, exit, expansion, contraction) 들이 관과 관을 연결하고 있음
- 부 손실 = 관 사이의 연결 부품 내에서의 손실
- 특징 : 연결 부품 내에서는 유동이 굽이쳐 흐르므로 유동의 박리 (separation) 가 흔히 일어나기 때문에 동일한 길이의 관에서 보다 훨씬 큰 손실이 발생한다.

#### - 부 손실의 계산

- 부 손실 및 부 손실계수 (minor loss coefficient)  $h_{l_m} = K \frac{\bar{V}^2}{2}$
- 손실계수 K : 각 유형의 연결 부품마다 실험적으로 구해진 값을 (보통 제조업자가 제공하는) 차트 혹은 표로부터 찾아 쓴다.

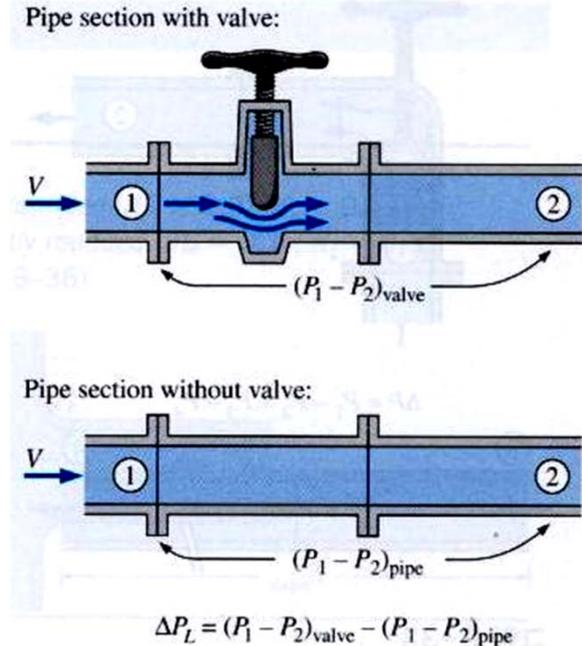


그림 8-32

부차적 손실이 있는 부품이 장착된, 직경이 일정한 파이프에서 부품의 손실계수(예를 들면 그림의 게이트 밸브)는 부품에 의해 추가되는 압력손실을 파이프 동압으로 나누어 구한다.

## 8.7 수두 손실의 계산

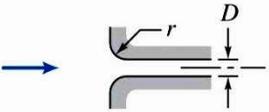
### • 부 손실 (Minor Loss)

#### – 입구 (inlet or entrance)

- 각진 모서리는 유동 박리가 많이 일어나고 손실이 증가  $\leftrightarrow$  약간만 둥글게 해도 손실이 크게 감소

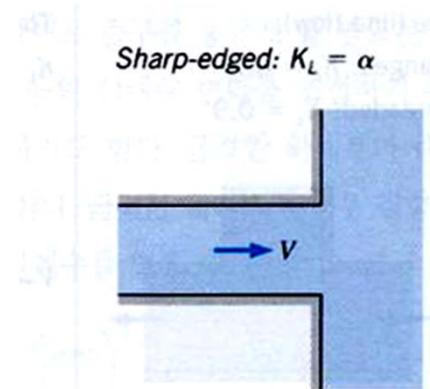
Table 8.2

Minor Loss Coefficients for Pipe Entrances

Entrance Type	Minor Loss Coefficient, $K^a$								
Reentrant 	0.78								
Square-edged 	0.5								
Rounded 	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>r/D</math></th> <th><math>K</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.02</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>0.06</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td><math>\geq 0.15</math></td> <td>0.04</td> </tr> </tbody> </table>	$r/D$	$K$	0.02	0.28	0.06	0.15	$\geq 0.15$	0.04
$r/D$	$K$								
0.02	0.28								
0.06	0.15								
$\geq 0.15$	0.04								

<sup>a</sup>Based on  $h_{l_m} = K(\bar{V}^2/2)$ , where  $\bar{V}$  is the mean velocity in the pipe.

Source: Data from Reference [11].



#### – 출구 (outlet or exit)

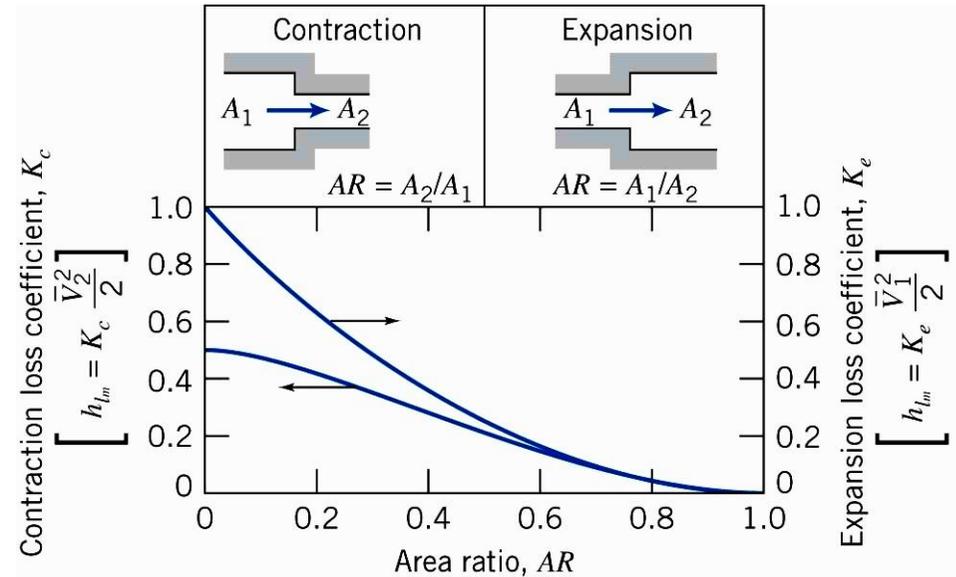
- 유동이 파이프에서 (아주) 넓은 영역으로 퍼져나가는 부품 : 운동에너지 전부가 사라짐
- 손실계수 = 운동에너지 보정계수  $K = \alpha$
- **Note** : 모서리 **rounding** 여부와 관계 없이 일정함

# 8.7 수두 손실의 계산

## • 부 손실 (Minor Loss)

- 급 확대 (sudden expansion)와 급 축소 (sudden contraction)

- 주의 : 부 손실을 계산할 때의 유속은 면적이 작은 쪽 (유속이 큰 쪽)을 기준으로 함
- 급 확대부의 부 손실계수  $K = \alpha(1 - AR)^2$



- 점진적 축소 (gradual contraction)

Table 8.3

Loss Coefficients (K) for Gradual Contractions: Round and Rectangular Ducts

$A_2/A_1$	Included Angle, $\theta$ , Degrees						
	10	15-40	50-60	90	120	150	180
0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Note: Coefficients are based on  $h_{lm} = K(\bar{V}_2^2/2)$ .

## 8.7 수두 손실의 계산

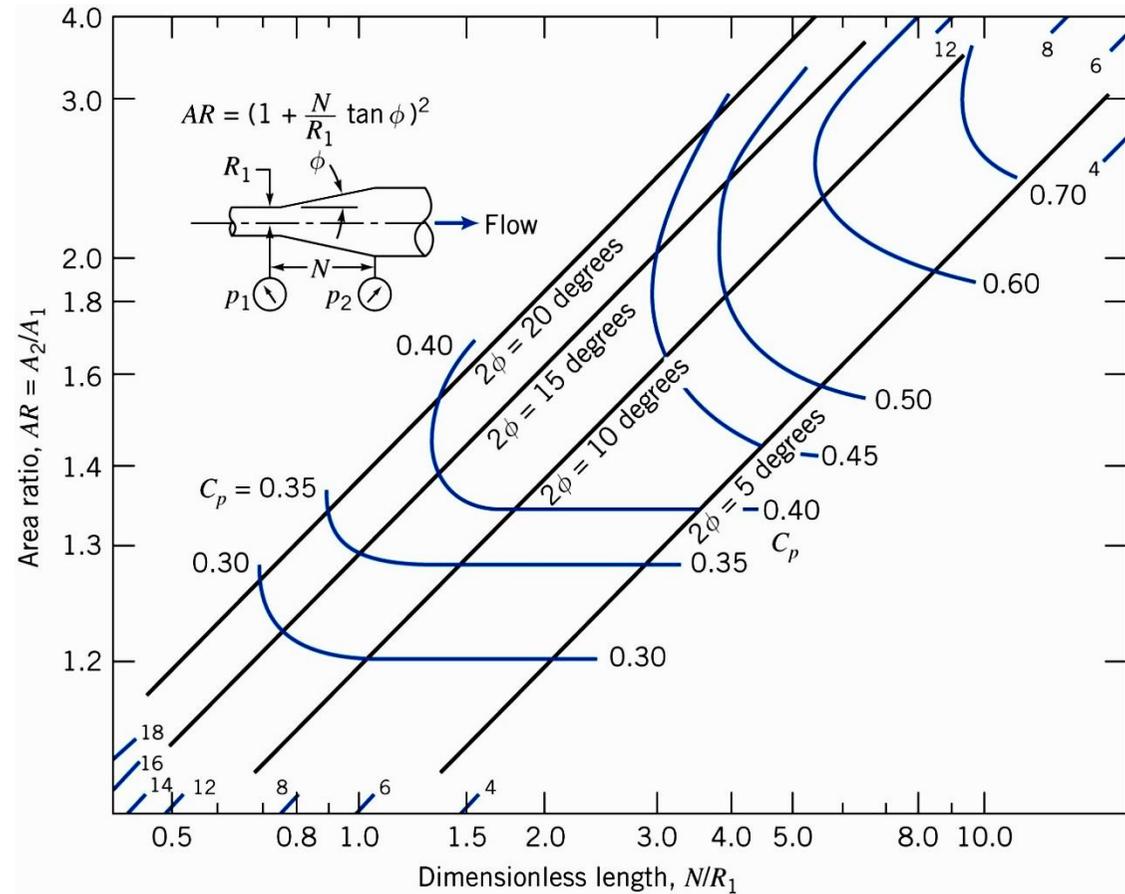
### • 부 손실 (Minor Loss)

- 점진적 확대 (gradual contraction) : 디퓨저 (diffuser) 라고 불림

- 부 손실 계산 공식  $h_{l_m} = (C_{pi} - C_p) \frac{\bar{V}_1^2}{2}$  (기준 유속은 면적이 작은 쪽)
- 이상적 압력회복 계수

$$C_{pi} = 1 - \frac{1}{AR^2}$$

- 실제 압력회복 계수  $C_p$  :  
오른쪽 그래프 참조



## 8.7 수두 손실의 계산

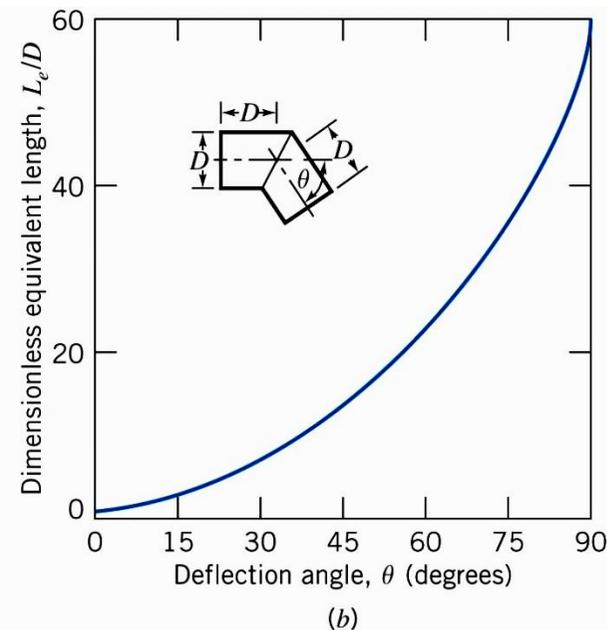
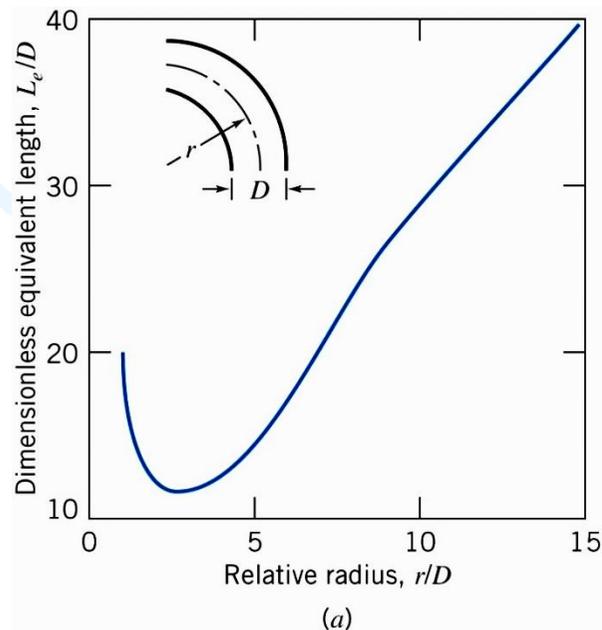
### • 부 손실 (Minor Loss)

– 파이프 벤드 : 구부러지거나 꺾인 관

- 직관과 비교 : 2차유동으로 인하여 수두손실이 증가
- 상당길이 (equivalent length) : 동일 직경 직관으로 치환할 때 어느 정도의 길이가 되는가 ?

$$h_{l_m} = f \frac{L_e}{D} \frac{\bar{V}^2}{2}$$

- 90° bend (그림 8.17a) : 곡률 반경에 따라 수두 손실 변화
- Miter bend (그림 8.17b) : 현장 설치 용이, 가격 저렴 (대구경 관로) ↔ 큰 수두 손실



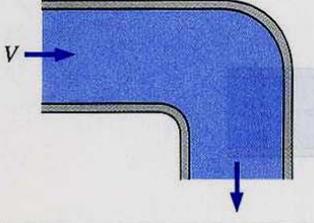
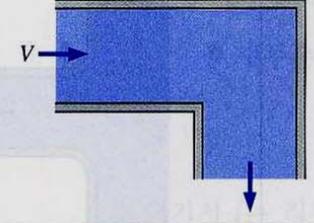
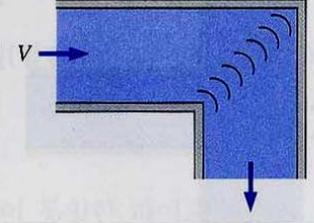
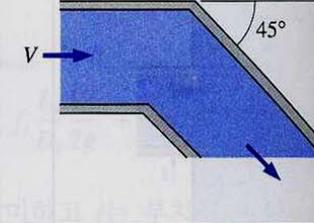
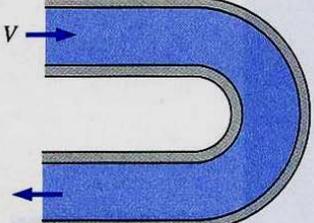
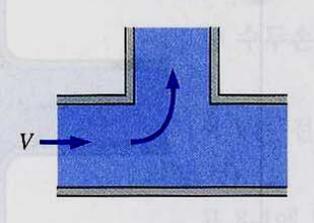
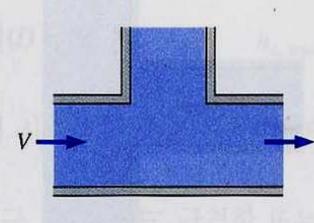
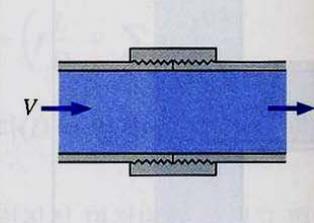


# 8.7 수두 손실의 계산

## • 부 손실 (Minor Loss)

- 참고자료 : 이전 교과서

**표 8-4(계속)**  
 난류유동 시 다양한 파이프 부품의 손실계수  $K_L$ (손실수두  $h_L = K_L V^2 / (2g)$ )임, 여기서  $V$ 는 부품을 포함하는 파이프 내의 평균속도임\*

<p><i>Bends and Branches</i>                      90° smooth bend:                      Flanged: <math>K_L = 0.3</math>                      Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>90° miter bend                      (without vanes): <math>K_L = 1.1</math></p> 	<p>90° miter bend                      (with vanes): <math>K_L = 0.2</math></p> 	<p>45° threaded elbow:  <math>K_L = 0.4</math></p> 								
<p>180° return bend:                      Flanged: <math>K_L = 0.2</math>                      Threaded: <math>K_L = 1.5</math></p> 	<p>Tee (branch flow):                      Flanged: <math>K_L = 1.0</math>                      Threaded: <math>K_L = 2.0</math></p> 	<p>Tee (line flow):                      Flanged: <math>K_L = 0.2</math>                      Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>Threaded union:  <math>K_L = 0.08</math></p> 								
<p><i>Valves</i></p> <table border="0"> <tbody> <tr> <td>Globe valve, fully open: <math>K_L = 10</math></td> <td>Gate valve, fully open: <math>K_L = 0.2</math></td> </tr> <tr> <td>Angle valve, fully open: <math>K_L = 5</math></td> <td>1/4 closed: <math>K_L = 0.3</math></td> </tr> <tr> <td>Ball valve, fully open: <math>K_L = 0.05</math></td> <td>1/2 closed: <math>K_L = 2.1</math></td> </tr> <tr> <td>Swing check valve: <math>K_L = 2</math></td> <td>3/4 closed: <math>K_L = 17</math></td> </tr> </tbody> </table>				Globe valve, fully open: $K_L = 10$	Gate valve, fully open: $K_L = 0.2$	Angle valve, fully open: $K_L = 5$	1/4 closed: $K_L = 0.3$	Ball valve, fully open: $K_L = 0.05$	1/2 closed: $K_L = 2.1$	Swing check valve: $K_L = 2$	3/4 closed: $K_L = 17$
Globe valve, fully open: $K_L = 10$	Gate valve, fully open: $K_L = 0.2$										
Angle valve, fully open: $K_L = 5$	1/4 closed: $K_L = 0.3$										
Ball valve, fully open: $K_L = 0.05$	1/2 closed: $K_L = 2.1$										
Swing check valve: $K_L = 2$	3/4 closed: $K_L = 17$										

\* 이 값들은 손실계수의 대표적인 값들임. 실제 값은 설계와 제작사에 따라 크게 달라질 수 있으므로(특히 밸브에 대하여는), 최종 설계 시는 제작자의 데이터를 사용하여야

## 8.7 수두 손실의 계산

### • 유체 시스템의 펌프, 환, 송풍기

- (마찰에 맞서서) 유동을 유지하는 구동력 공급

- 펌프, 환, 송풍기에 대한 열역학 제1법칙  $\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m} \left[ \left( \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \right)_{\text{discharge}} - \left( \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \right)_{\text{suction}} \right]$
- 펌프 수두 (단위 질량당 에너지 공급량) : 펌프는 주로 압력을 올려준다!

$$\Delta h_{\text{pump}} = \frac{\dot{W}_{\text{pump}}}{\dot{m}} = \left( \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \right)_{\text{discharge}} - \left( \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \right)_{\text{suction}} \Rightarrow \Delta h_{\text{pump}} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

- 중요 개념 : 펌프 수두 = 파이프 시스템의 수두 손실 → 유량 결정

- 동력과 수두 사이의 관계식  $\frac{\Delta p_{\text{pump}}}{\rho} = \frac{\dot{W}_{\text{pump}}}{\dot{m}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{pump}} = \dot{Q} \Delta p_{\text{pump}}$

- 펌프효율 적용, 소요동력 계산  $\eta = \frac{\dot{W}_{\text{pump}}}{\dot{W}_{\text{in}}}$

- 점1과 점 2사이에 펌프가 포함될 때, 펌프 수두를 음의 손실 수두로 더한다.

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{l_T} - \Delta h_{\text{pump}}$$

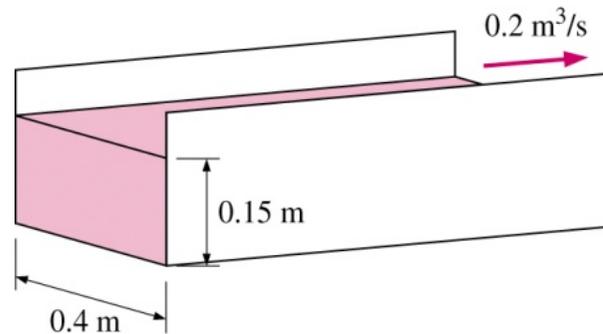
## 8.7 수두 손실의 계산

### • 비원형 덕트

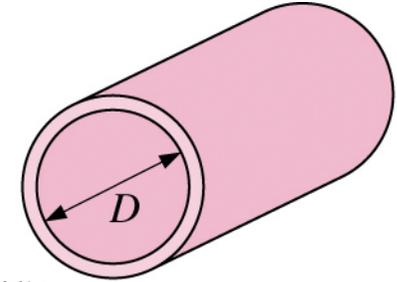
- 수력직경 (hydraulic diameter) 사용

- 정의  $D_h \equiv \frac{4A}{P}$  (**P** : 접수주변 (wetted perimeter), 유체가 접촉하는 둘레 길이)
- 분자의 4 ? : 원관의 경우는 직경 = 수력직경 !
- 수력직경을 직경 대신 사용하여 Reynolds 수, 손실계수를 계산한다.
- 주의 : 개수로 (아래 그림) 의 경우는 ?

$$D_h = \frac{4 \times (0.15\text{m} \times 0.4\text{m})}{(0.4\text{m} + 2 \times 0.15\text{m})} = \frac{4 \times 0.06\text{m}^2}{0.7\text{m}} = 0.34\text{m}$$

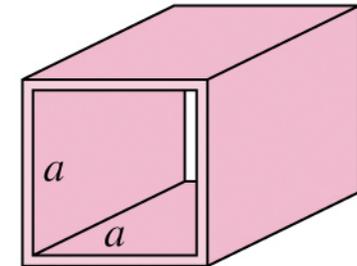


Circular tube:



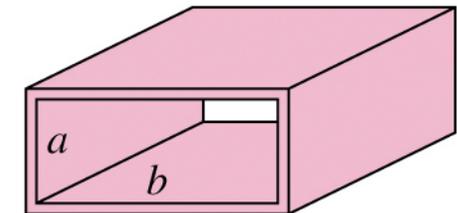
$$D_h = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D$$

Square duct:



$$D_h = \frac{4a^2}{4a} = a$$

Rectangular duct:



$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$