

9. 유 체 역 학

9-1 유체의 성질과 종류

유체 : 일정한 형태가 없고 쉽게 변형되며, 연속성이 있으면서 흐를 수 있는 기체나 액체이며, 유체는 흐르지 않고 정지되어 있는 경우와 흐르는 경우로 구분

유체 흐름의 특성 : 유체가 운동을 할 때는 움직임에 따라 작용하는 힘이 생기는데, 이 힘은 변형속도와 관계

전단응력(shear stress) : 유체는 고체와 달리 그 형태가 쉽게 변화되며, 모양이 변할 때는 변형에 대응하는 힘

표 9-1 유체의 표현방법과 분류

분류	유체구분	구분 내용	적 용 예
상 태	기 체	기체상태로 존재하는 유체	변형률이 크다.
	액 체	액체상태로 존재하는 유체	변형률이 작다.
압 력	압축성 유 체	유체의 밀도가 온도나 압력에 의하여 상당히 변화하는 유체	① 기체는 압축성 유체이다. ② 수압철관 속의 수격작용 ③ 디젤 엔진에서 연료 수송관의 충격과 음속보다 빠른 비행물체 주위의 공기 흐름
	비압축성 유 체	유체의 밀도가 온도나 압력에 의하여 거의 변하지 않는 유체	① 액체는 보통 비압축성 유체로 본다. ② 물속에 주행하는 잠수함 둘레의 수류 ③ 달리는 물체 주위의 기류 ④ 지속운동 항공기 둘레 기류 ⑤ 물체(굴뚝, 건물 등) 둘레를 흐르는 기류
점 성	이상적 유 체	점성이 없는 유체를 가정하여 이상적 유체라 하며, 이 유체는 마찰도 없다.	퍼텐셜 흐름이라고도 한다.
	점성 유체	점성을 고려해야 하는 유체	
전단 변형률	뉴턴 유체	전단응력과 전단변형률이 비례하는 유체(기체, 대부분의 용액, 비교질성 액체)	
	비뉴턴 유 체	전단응력과 전단변형률이 직접 비례하지 않는 유체	

9-2 유체 정역학

9-2-1 압력

정역학 : 정지한 유체의 압력으로 유체가 용기 벽면에 미치는 표면의 힘

- 이 힘은 유체 내부의 어떤 점에서도 존재
- 정지하고 있는 유체 단면에 수직으로 미치는 것과 같은 작용

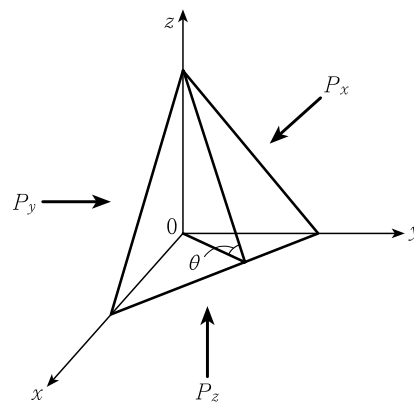


그림 9-1 유체 압력

$$P = P_x = P_y = P_z \quad (9.1)$$

파스칼의 원리(Pascal's principle) : 정지하고 있는 유체 속의 어느 점에 작용하는 압력은 모든 방향에 같은 크기로 작용

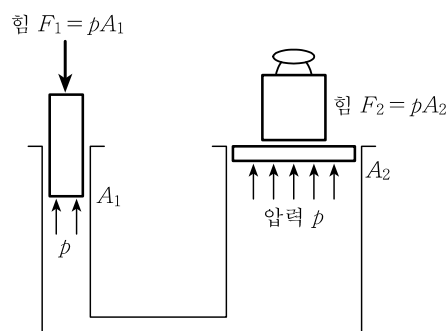


그림 9-2 파스칼의 원리와 수압기

9-2-2 유체 정역학적 평형

정압 : 정지된 액주가 형성되어 액체의 밀도 ρ [kg/m^3], 표면에 π 의압(지구상에서는 대기압, 1 atm)이 작용하여 A와 B 사이 H [m]의 길이 P점에서의 압력

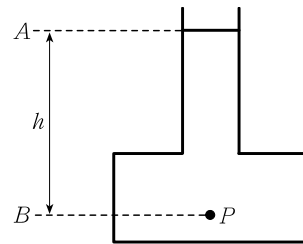


그림 9-3 액주의 정압

$$P = \pi + \rho H \left(\frac{g}{g_c} \right) \quad [\text{kgf}/\text{m}^2] \quad (9.2)$$

예) 모양이 다른 용기 내에 밀도가 같은 액체가 담겨져 있을 때 h 높이의 정압은 파스칼의 원리에 의해 모두 같음

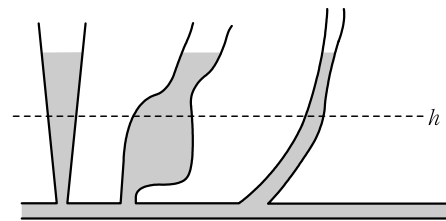


그림 9-4 모양이 다른 용기 내 액체의 정압

게이지(gauge)압 : 공업적으로 압력을 표시하는 경우에는 대기압을 기준(제로)

절대압 : 완전 진공을 기준

$$\text{절대압} = \text{게이지압} + \text{대기압} \quad (9.3)$$

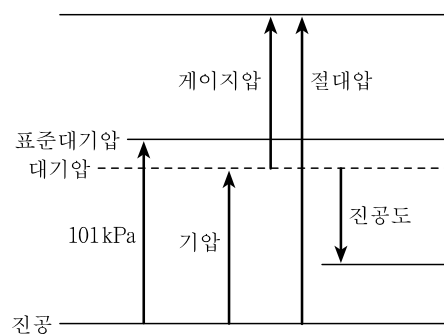


그림 9-5 절대압, 게이지압과 대기압

9-2-3 압력의 측정

【1】 피에조미터(piezometer)

$$P_B = P_{atm} + (\rho_A - \rho_B) \frac{g}{g_c} h$$

【2】 U자관 마노미터(manometer)

마노미터 : 액주의 높이에 의해서 압력을 측정하는 장치

봉액 : U자관 저부에 측정하고자 하는 시스템에 있는 흐름의 유체(ρ_B)와 섞이지 않고 무거운 수은, 사염화탄소(CCl_4) 등의 액체(ρ_A)가 담겨져 있는 액체

$$P_1 + \rho_B h(g/g_c) = P_2 + \rho_A h(g/g_c) \quad (9.4)$$

$$P_1 = P_2 + (\rho_A - \rho_B) h(g/g_c) \quad (9.5)$$

오른쪽의 외압이 대기압이라면

$$P_1 = \pi + (\rho_A - \rho_B) h(g/g_c) \quad (9.6)$$

○ 측정압력이 매우 작으면 봉액의 높이차를 잘 읽을 수 없으므로 경사 마노미터나 봉액의 밀도가 작은 액체를 선택하여 측정.

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= (\rho_A - \rho_B) \frac{g}{g_c} h \\ &= (\rho_A - \rho_B) \frac{g}{g_c} R \sin \alpha \end{aligned} \quad (9.7)$$

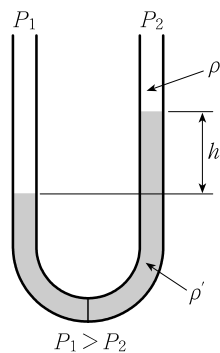


그림 9-6 U자관 마노미터

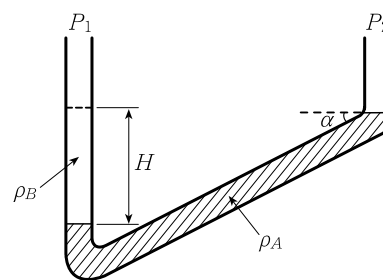


그림 9-7 경사 마노미터

【3】 압력계(pressure gage)

부르동(Bourdon) 압력계 : 금속계 튜브의 탄성변형을 이용해서 압력을 지시하는 것으로 3atm 정도까지의 압력의 측정, 대기압을 0으로 하고 있으므로 측정된 압력은 게이지압.

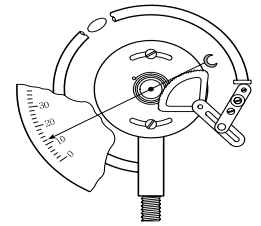


그림 9-8 부르동 (Bourdon) 압력계

9-2-4 부 력

부력(buoyant force) : 액체 내 물체의 표면에 작용하는 압력차에 의한 힘

o 아르키메데스의 원리에 의하여 외력의 가속도에다 입자가 차지한 유체의 질량을 곱한 것이므로 입자의 용적은 밀도가 ρ_p 일 때 m/ρ_p 임.

$$F_p = \frac{m\rho g}{\rho_p g_c}$$

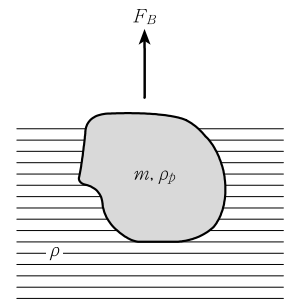


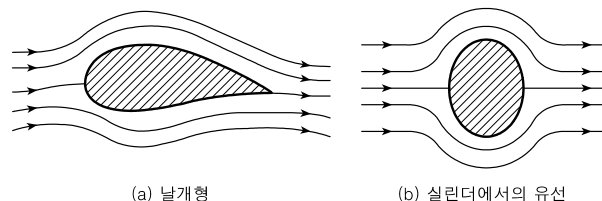
그림 9-9 부 력

9-3 유체 동역학

9-3-1 유선과 유적선

유선(stream line) : 유체의 흐름에 있어서 모든 점에서 속도벡터의 방향을 갖는 연속적인 가상적인 선

유동장(fluid field) : 여러 개의 유선으로 이루어지는 하나의 군



(a) 날개형 (b) 실린더에서의 유선

그림 9-10 유선의 모양

9-3-2 점 성

【1】 유체의 점도

점성(viscosity) : 유체가 각종 외력을 가지고 움직이려고 하는 경우, 유체 내에 이것에 거슬리는 저항 힘이 생기는 유체의 성질, 유체의 고유한 성질인 끈적끈적한 정도.

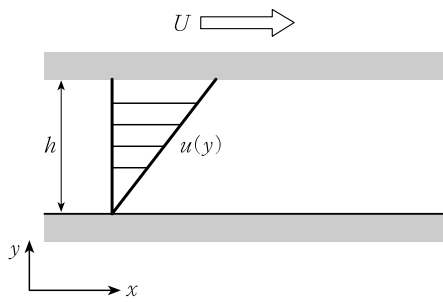


그림 9-11 유체 흐름에서 속도구배

뉴턴의 점성법칙(Newton's law of viscosity) : 벽의 단위 면적에 대한 힘 $F[\text{N/m}^2=\text{Pa}] =$ 판에 유체가 접하는 넓이(A)와 유체의 속도기울기(du/dy)인 전단속도에 비례

전단응력 또는 전단력 τ : $F/A \Rightarrow$ 단위는 압력(면에 수직인 힘, 수직응력은 정지유체에서는 압력).

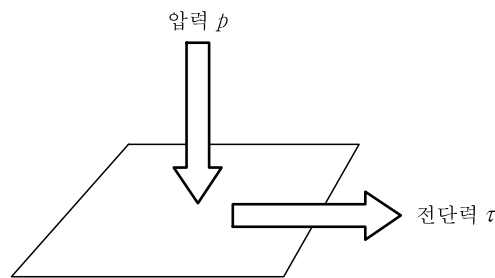


그림 9-13 전단응력과 압력의 차이

층류(laminar flow) : 유체가 흐를 때 마찰저항을 일으키며, 유체 흐름의 유속은 관의 지름 중심거리에 비례하게 된다. 이러한 일정한 속도기울기의 흐름

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [\text{N or kg} \cdot \text{m/s}^2] \quad (9.8)$$

이 점성의 법칙을 환산인자 g_c 를 사용한 공학단위계로 표현하면

$$\frac{F}{A} = \tau = \frac{\mu}{g_c} \frac{du}{dy} \quad [\text{kgf/m}^2] \quad (9.9)$$

점성계수 or 점도(viscosity) : 비례상수 μ 를 점성의 정도를 나타내며,

표준단위 : $\text{kg/m} \cdot \text{s} (= \text{N} \cdot \text{s/m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s})$

관습단위 : 푸아즈(poise) \Rightarrow 절대점도

환산인자 : $1 \text{ poise} = 1 \text{ g/cm} \cdot \text{s} = 100 \text{ cP} = 0.1 \text{ kg/m} \cdot \text{s} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

- o 기체와 액체의 점도 : 약 100배 (물: $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 수증기: $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$).
- o 액체의 점도는 온도가 높아지면 점차 작아지고, 기체의 점도는 이와 반대로 온도가 증가함에 따라 커짐.

동점도(kinematic viscosity) ν : 유체가 흐르면 운동량(ρu) 성분이 생기는데, 유체의 절대 점도와 밀도의 비(μ/ρ)는 운동량기울기로서 운동량 확산계수의 의미를 갖음

$$\tau = \frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dy} \quad (9.10)$$

- o 표준단위 : m^2/s
- o 관습단위 : 스토크스(stokes, st)
- o 환산인자는 $1 \text{ st} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

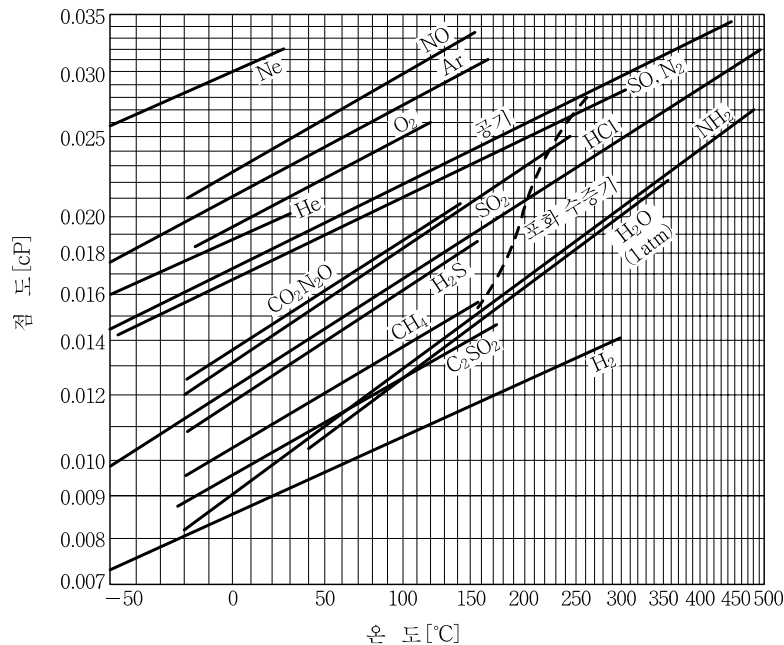


그림 9-14 기체의 온도와 점도의 관계

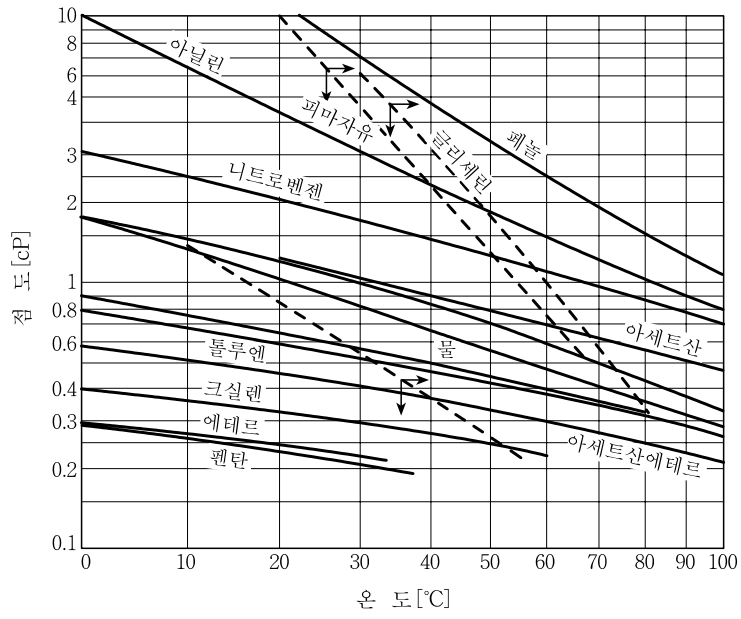


그림 9-15 액체의 온도와 점도의 관계

【2】 점도의 성질에 따른 유체의 분류

속도기울기와 전단응력의 관계

① 뉴턴 유체 : 보통의 유체는 원점을 통과하는 기울기 μ 의 비례관계가 성립

비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid) : 단순한 비례관계가 아닌 것을 총칭

② 빙엄 감소성 유체(Bingham plastic fluid) : 고체입자의 현탁액(슬러리)에서는 전단응력이 어느 값에 달할 때까지는 유동이 일어나지 않음.

③ 의사소성 유체(pseudo plastic fluid) : 콜로이드 용액, 도료, 고분자 용액 등 속도구배의 증가에 따라 전단응력의 증가율이 점점 작아지는 유체.

④ 딜런턴트 유체(dilatant fluid) : 고농도의 고체 현탁액에서는 속도구배의 증가에 따라 전단응력의 증가율이 점점 커지는 유체

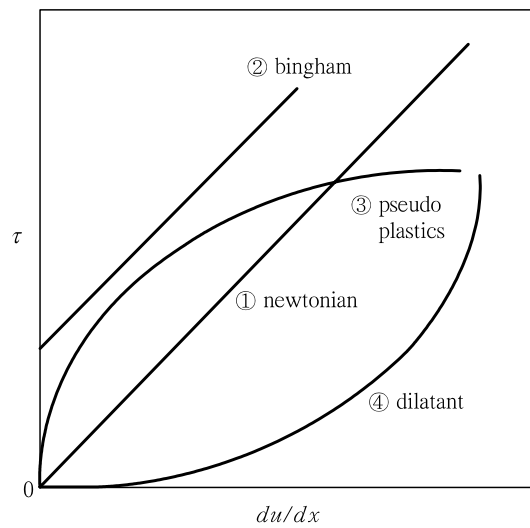


그림 9-16 유동특성

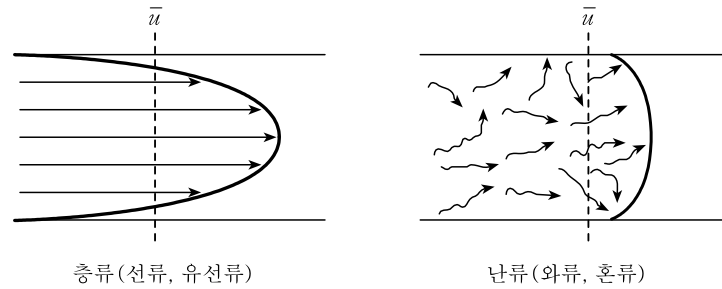
9-3-3 흐름의 모양과 현상

층류(Laminar flow)

유체 입자가 흐름방향으로 향해 모두 평행에 움직이는 흐르며, 관중심에서 가장 빠르게 흐름

난류(turbulent flow)

유체입자가 흐름방향 이외의 방향으로도 분속도를 가지고, 그 크기를 끊임없이 변화시키면서 흐르는 흐트러진 흐름



층류(선류, 유선류)

난류(와류, 혼류)

그림 9-17 흐름의 종류

레이놀즈수(Reynolds number) Re : 두 흐름의 모양을 결정하는 무차원군

$$Re = \frac{D\bar{u}\rho}{\mu} = \frac{DG}{\mu} = \frac{D\bar{u}}{\nu} \quad (9.11)$$

여기서 D : 관지름 [m]

\bar{u} : 평균유속 [m/s]

ρ : 유체 밀도 [kg/m^3]

μ : 유체 점도 [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]

ν : 운동 점도 [m^2/s]

G : 질량속도 [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]

o Re 가 약 2100보다 작으면 층류가 되고 4000보다 커지면 난류로 된다. 중간은 전이영역 또는 임계영역

o 층류 : 속도분포가 관단면에 넓게 분포되어 평균유속은 중심유속(u_{max})의 0.5배

o 난류 : 평균유속은 중심유속(u_{max})의 약 0.81~0.83배

경계층

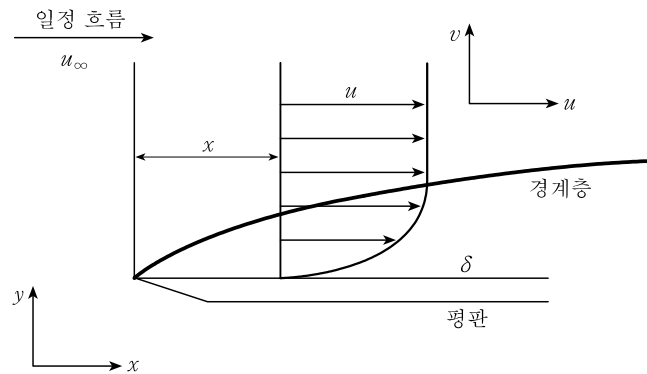


그림 9-18 경 계 층

경막(film) : 관벽에 가까운 부분은 거의 움직이지 않는 유체 흐름층
 o 경막의 개념과 두께 : 열전달이나 물질전달에서 중요한 역할

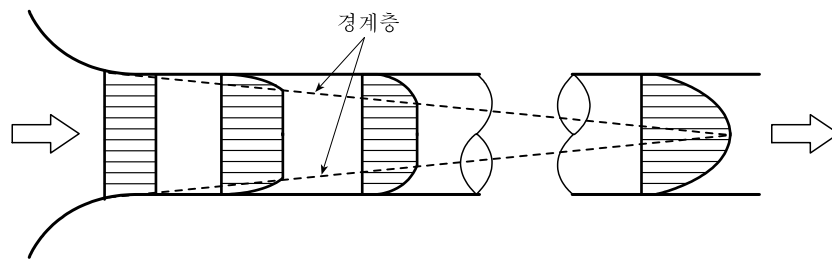


그림 9-19 경계층 형성에 의한 완전발달 흐름

완전 발달된 흐름(fully developed flow) : 유체의 흐름이 고체벽면의 저항을 유체가 흘러갈 경우 관의 중심부분에서 경계층이 끝나는 지점의 흐름
 전이길이, L_e : 유체의 흐름이 완전 발달된 흐름까지 유도되는 거리,

$$L_e(\text{층류일 때}) : 0.05 ReD,$$

$$L_e(\text{난류일 때}) : 40.5D$$

9-4 유체 흐름의 기본식

9-4-1 연속의 식

연속식(equation of continuity) : 유체는 연속성이 있기 때문에 관속에 유체가 가득 차서 흐르는 정상상태 흐름에서 질량 보존의 법칙에 의한 물질수지식

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \text{일정 [kg/s]}$$

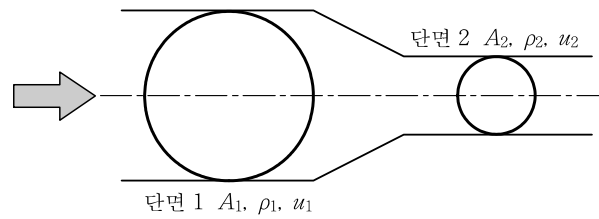


그림 9-20 유로에서 연속성

국부속도(local velocity) u : 유체의 흐름은 경계층 형성에 의해 속도기울기가 있게 되고 관속의 유속은 흐름의 종류에 따라 속도분포는 관중심과 관벽 사이의 다른 유속들

평균유속(mean velocity of flow) \bar{u} [m/s]

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int u dA = \frac{V}{A} = \frac{V}{\pi D^2/4} \quad (9.11)$$

질량 유속 \dot{m} [kg/s]

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \dot{m}_2 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 = \text{일정}$$

연속식

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 \\ &= \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \end{aligned} \quad (9.12)$$

단면적이 같을 경우

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho_1 \bar{u}_1 = \rho_2 \bar{u}_2$$

질량속도(mass velocity) G : $\rho \bar{u}$, 단위는 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

비압축성 유체인 액체의 경우 연속식

$$\bar{u}_1 A_1 = \bar{u}_2 A_2 = \bar{u} A = V = \text{일정}$$

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (9.13)$$

9-4-2 전에너지수지(energy balance)식

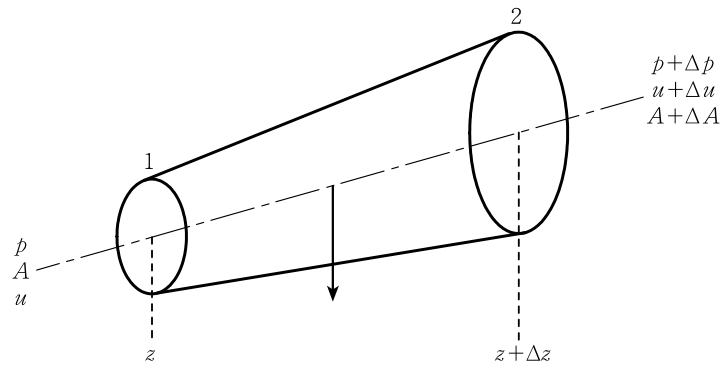


그림 9-21 유로의 미소 단면적에 작용하는 힘, 퍼텐셜 흐름

베르누이식(Bernoulli's equation) : 에너지 관계식

$$\begin{aligned} & (\text{위치 에너지} + \text{운동 에너지} + \text{압력 에너지})_1 \\ & = (\text{위치 에너지} + \text{운동 에너지} + \text{압력 에너지})_2 = \text{일정} \end{aligned}$$

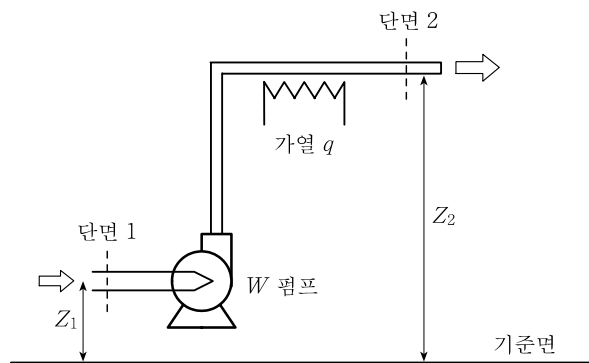


그림 9-22 유로의 에너지 수지

o 실제 유체 흐름의 경우 : 단면 1에서 단면 2까지 단위 질량의 유체를 펌프 또는 송풍기로 수송하는 데 필요한 에너지 W [J/kg], 그밖에 마찰손실(friction loss) 등에 의하여 손실되는 열에너지 등의 합 $\sum F$ 이 있을 때는 베르누이식을 수정한 전에너지수지

$$\begin{aligned} & (\text{위치 에너지} + \text{운동 에너지} + \text{압력 에너지})_1 + W \\ & = (\text{위치 에너지} + \text{운동 에너지} + \text{압력 에너지})_2 + \sum F \end{aligned} \tag{9.15}$$

9-4-3 펌프의 계산

펌프의 에너지량

펌프의 효율 η : 펌프는 펌프 자체의 베어링, 피스톤, 스테핑 박스(stuffing box) 등에서 생기는 마찰에 의해 에너지 손실이 발생하는데 이를 보완함.

실제의 펌프의 에너지 W_p :

$$W_p = \frac{W}{\eta}$$

동력 : 단위 시간에 행하여지는 일

관습단위 : hp(마력, horse power), PS(pferde stärke)

환산인자 : 1PS = 75 kgf · m/s = 735.5 W

펌프가 단위 질량의 유체를 수송하는 데에 필요한 동력

$$P = \frac{\dot{m}W}{75\eta} \text{ [PS]} = \frac{\dot{m}W}{102\eta} \text{ [kW]}$$

9-4-4 베르누이식의 응용 예

【1】 토리첼리(Torricelli)

$$\frac{\bar{u}^2}{2g_c} = (h) \frac{g}{g_c} + \sum F$$

$$\bar{u} = \sqrt{2gh + (2g_c/g)(\sum F)}$$

음미 : 분출속도가 액의 높이에 따라 결정되며, 액의 종류에는 무관.

마찰, 기타 두 손실이 없다면 토리첼리식

$$\bar{u} = \sqrt{2gh}$$

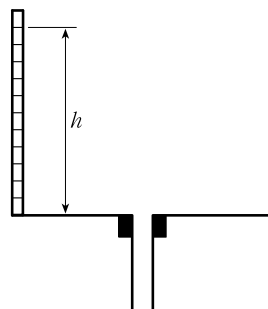


그림 9-23 저장조 유출장치

[2] 분무기의 원리

베르누이식에서 $Z_1 = Z_2$ 이고 $D_1 \gg D_2$ 와 $u_2 \gg u_1 \Rightarrow$ 대기압 $\gg P_2$ (감압)

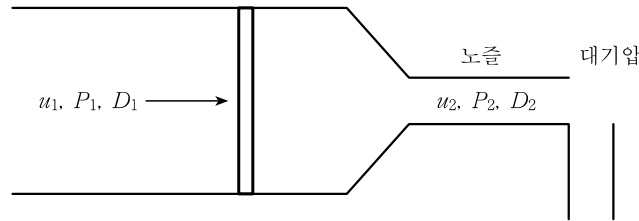


그림 9-24 분무기 원리

9-4-5 원관 내의 마찰손실

마찰손실

- ① 관 표면의 여러 요인에 의한 표면마찰손실(skin friction loss)
- ② 관 부속품의 형태에 의한 유체 흐름의 경계층 분리 등의 방해로 인한 형태마찰손실(form friction loss)

[1] 표면마찰손실

팬닝의 식(Fanning's equation)

$$\text{표면마찰손실, } h_{f_s} = f [\text{운동에너지, 관길이, } 1/\text{관지름}] \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{kg}] \quad (9.17)$$

f : 표면마찰계수(skin friction coefficient)라 하며, 레이놀즈수와 관벽의 성질에 따라 달라지는 상수

하겐-푸아죄유의 식(Hagen Poiseuille's equation) : 직관에서 층류인 경우의 두 손실

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{16}{Du\rho/u}$$

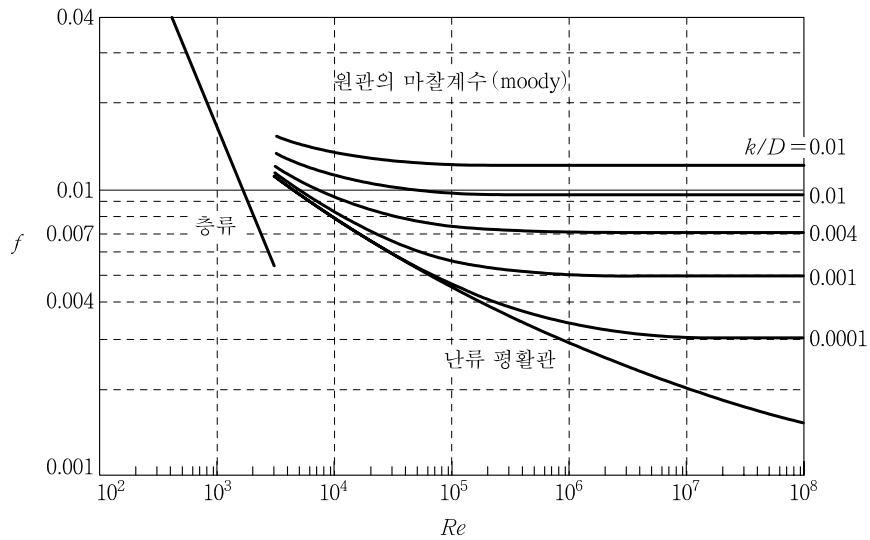


그림 9-26 원관의 마찰손실계수

o 난류인 경우의 f : 레이놀즈수와 마찰계수의 관계를 나타낸 그림에서 관 내벽의 거칠음도(roughness) k 를 이용하여 구함.

【2】 각종 관부속품들의 마찰손실

(1) 확대마찰손실. h_{bc}

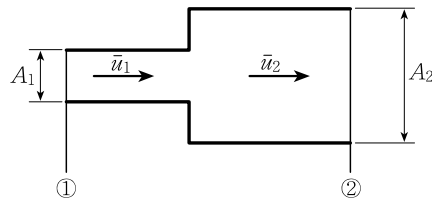


그림 9-27 확대관

(2) 축소마찰손실. h_{bc}

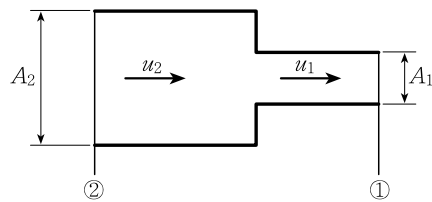


그림 9-28 축소관

(3) 이음쇠와 밸브. h_{bl} : 각종 관이음쇠와 밸브에 따른 마찰손실

표 9-2 표준 나선형 관이음쇠의 손실계수 K_f

밸브		이음쇠	
글로브(globe) 밸브, 크게 열림	10.2	귀환벤드(return bend)	2.2
앵글(angle) 밸브, 크게 열림	5.0	티(tee, T)	1.8
게이트(gate) 밸브, 크게 열림	0.2	엘보(elbow), 90°	0.9
반쯤 열림	5.6	45°	0.4

상당길이(equivalent diameter) L_e : 각 관부속품에 대한 마찰손실값을 직선 원관의 길이에 대한 마찰손실값으로 환산

표 9-3 상당 길이를 구하는 계수(n)

관 부품과 그 상태	n	관 부품과 그 상태	n
45° 엘보	15	3/4 개방	10~40
90° 엘보 25.4~68.2mm	30	1/2 개방	100~200
90° 엘보 76.2~152.4mm	40	1/4 개방	800
90° 엘보 177.8~254mm	50	글로브(globe) 밸브 25.4~38.1mm	45
		76.2~152.4mm	60
		117.8~254mm	75
99° 벤드(bend) $r_i/D=3$	24	앵글 밸브(angle valve)	100~120
$r_i/D=4$	10		
180° 벤드	75	양수기 디스크형	135~400
티(tee)	40~60	피스톤형	100
크로스(cross)	50	프로펠러형	200~300
게이트 밸브	0~7	유니언(union)	0
개방		커플링(coupling)	0

* 표 중의 r_i/D 에서 D 는 관의 지름이고, r_i 는 굽은 관의 곡률반지름을 말한다.

(4) 관부속품에 의한 총마찰손실

이음쇠손실계수를 활용한 총마찰손실

$$\Sigma F = h_{fs} + h_{fk} + h_{fe} + h_f$$

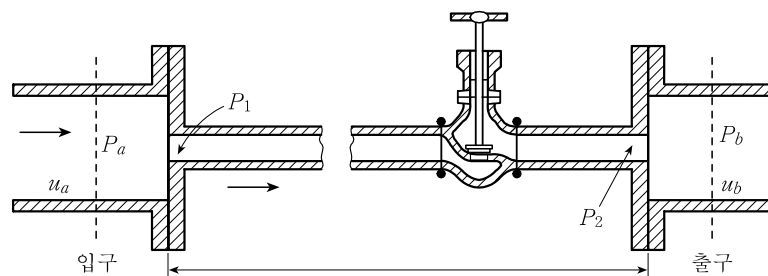
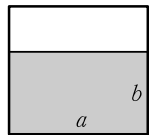
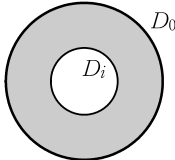


그림 9-29 각 관부속품의 연결

9-4-6 상당지름

표 9-4 상당지름의 예

흐름관의 모양	상당지름
	$D_e = 4 \cdot \frac{ab}{a+2b}$
	$D_e = 4 \cdot \frac{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_i^2)}{\pi (D_i + D_0)} = D_0 - D_i$

상당지름(equivalent diameter) D_e : 원관이 아닌 모든 관에 대해 원관에 상당하는 값으로 환산

수력학적 반지름(hydraulic radius)

$$r_H = \frac{\text{젖은 면의 단면적}}{\text{젖은 면의 둘레길이}} = \frac{S}{L_p}$$

$$D_e = 4 \times r_H$$

9-4-7 항 력

항력(drag force) : 점성이 있는 유체를 지나는 어떤 고체 또는 고정된 고체에 유체가 지날 때 저항을 이기는 힘

벽전단에 의한 표면항력(surface drag)

압력에 따른 형태항력(form drag)

입자에 작용하는 합력 =

1개의 입자가 유체 내에서 움직일 때 가속도에 대한 외력(external force) F_e , 또는 중력 F_g

-반대방향으로 작용하는 부력(buoyant force) F_B

-항력 F_D

9-4-8 유 동 층

표 9-5 유동층의 응용예

응 용	예
고 체 수 송	슬러리상의 석탄 파이프라인 fly ash의 공기 컨베이어, flour, etc.
열 교 환	뜨거운 세라믹 분체로부터 열회수
건 조	석탄, 곡식, dolomite 등의 더운 공기 건조
연 소	석탄 연소 촉매 반응 Fischer-Tropsch synthesis, 폐기물 연소 탄화수소 촉매 크래킹

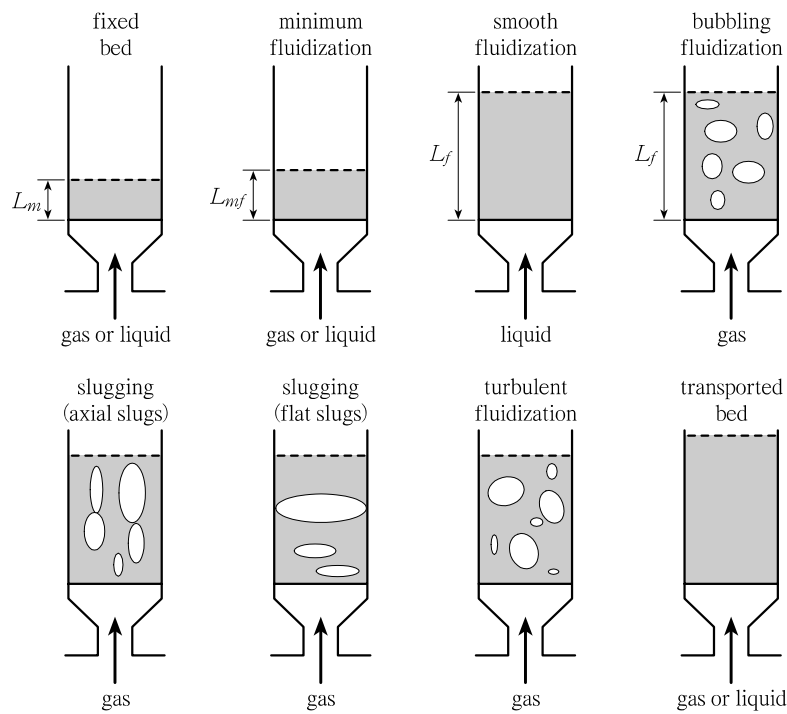


그림 9-30 유체의 종류와 입자 상태에 따른 유동화 모양

(1) 고정층(fixed bed)

저속 공기가 상부로 통과할 때 입자는 움직이지 않고 공기가 층속의 입자 사이로 스며들어 국부적으로 높거나 낮은 저항이 생긴다.

(2) 초기유동화(incipient or minimum fluidization)

공기의 속도가 높아져 입자가 움직이기 시작하고 유체가 유동층 내부로 공기가 통과할 때 접촉효율이 증진되며 압력강하가 커짐.

(3) 입체유동화(particulateor smooth fluidization)

유속이 더욱 증가되면 입자가 가능한 한 느슨한 상태에 놓여 입자는 서로 분리되고 실제 유

동현상이 일어나서 유동층이 팽창하고 공극률과 압력강하가 증가.

(4) 응집비등유동화(aggregate or bubbling fluidization)

유속이 더욱 증가되면 입자끼리의 충돌이 늘어나며 층 전체가 끓는 물처럼 보이고 소용돌이가 발생. 이 상태에서 고-액접촉이 효과적으로 이루어지고 열전달효과도 증진.

(5) 밀집상 유동화(dense-phase fluidization)

유동층은 수직관 안에 있으며 혼합상태가 매우 좋으며, 완전히 유동화되며 불연속적인 거품이 생기고 입자는 순환.

(6) 슬러깅(slugging)

입자가 피스톤처럼 들어올려지고 버블(bubble)에 의해 내려오거나 버블을 통과해서 아래로 내려옴.

(7) 공기이동에 의한 분산상 유동화(lean phase fluidization with phenatic transport)

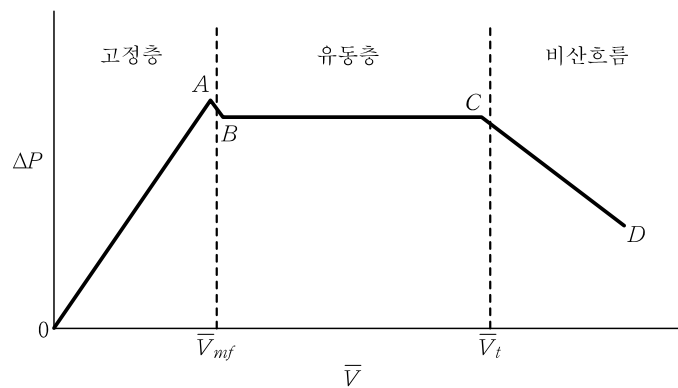


그림 9-31 유속과 압력손실

CA : 고정층 압력손실이 일정하게 증가

A : 유속이 증가되면 압력손실 Δp 가 입자층 단면적당 입자군의 전질량과 같아지므로 입자군이 정지상태에서 유동상태로 이동되고 이때의 유속 V_0 를 유동화속도

BC : 유속이 더욱 증가되면 전면적으로 유동화, 유동층 팽창률이 커지나 압력손실은 일정

C : 입자의 종말속도 이상에서는 입자가 유동화장치를 넘쳐 흐르게 되어 수송이 이루어 짐.

유동화의 장단점

<장점>

- ① 입자의 격렬한 혼합으로 반응기 내의 열전달이 좋다.
- ② 반응기 전체가 거의 등온상태이고 간단하고 확실하게 작동시킬 수 있다.
- ③ 대규모 조작에 적합하다.

- ④ 유체와 입자 사이의 열전달, 물질전달속도가 다른 반응기에 비해 아주 높다(표면적이 넓음).
- ⑤ 열전달속도가 높기 때문에 적은 면적을 가진 열교환기를 사용할 수 있다.

<단점>

- ① 입자의 마모현상으로 부식이 쉽게 일어난다.
- ② 입자가 마모되어 입자손실이 생긴다.
- ③ 유동화할 수 있는 입자의 크기가 한정되어 있다.

9-5 유체의 수송 및 수송장치

9-5-1 유체의 수송장치

[1] 관

표 9-6 관과 튜브의 차이점

	관(pipe)	튜브(tube)
두께	두꺼움	얇음
크기	큼	작음
길이	6~12m	수백 ft의 코일
벽 두께	거침	매끄러움
이음 방법	나사법, 플랜지	압착법, 팜
제조 방법	주물법	압출법, 냉간압연

표 9-7 관의 종류에 따른 특성

구분	종류	특성
금속관	강관	<ul style="list-style-type: none"> 탄소강 : 물, 증기가스 등 비교적 낮은 압력(10 kg/cm²)의 유체 배관에 사용 압력배관 : 350℃ 이하의 온도에서 사용하는 관으로 10~100 kg/cm²의 보일러 증기관, 수압관 등에 사용 고압배관 : 350℃, 100 kg/cm² 이상의 고압배관, 암모니아 합성관, 화학공장 배압관 등에 사용 고온배관 : 350~450℃의 고온배관의 과열 증기관에 사용 배관용 합금강 강관 : 고온배관에 사용하며, 내식성이 좋아 증기관, 석유 정제관에 사용 오스테나이트 스테인리스 강관 : 내식·내열 및 고온용 배관, 화학공장 배관에 사용
	주철관	<ul style="list-style-type: none"> 내식성·내마멸성이 우수하고, 내구성이 강관이나 다른 금속관에 비해 우수하며, 수도용 급수관, 도시가스 공급관, 통신용 케이블 매설관에 많이 사용
	구리관	<ul style="list-style-type: none"> 복사난방과 같이 배설하는 온수관에서는 열전달효과, 내구성·내식성이 좋고, 장시간 사용해도 내면에 스케일이 생기지 않으며, 열전도율이 높아 난방효과가 우수하며, 위생설비 배관에 좋고, 급열, 전단, 변형용점이 쉽다.
	납관	<ul style="list-style-type: none"> 오래 전부터 급수관 등으로 사용되어 왔던 관으로, 재질이 부드럽고 연하여 상온 가공이 용이함. 초산·염산·질산 등에 침식되지만 그밖의 산에는 내산성이 강하나 알칼리에 약함
	알루미늄관	<ul style="list-style-type: none"> 열전도성이 좋고 가벼우며, 전성 및 연성이 좋고 가공하기 쉬우며, 공기·물·증기에 강하며, 아세트·아세틸렌에 침식되지 않으나 알칼리·염산·황산 등에 약함
비금속관	석면 시멘트관	<ul style="list-style-type: none"> 금속관에 비하여 내식성·알칼리성이 우수
	철근 콘크리트관	<ul style="list-style-type: none"> 해수도용, 육의 배수관으로 많이 사용되며, 원심력을 이용한 흙관(hume pipe)은 압력을 필요로 하는 배수관으로 사용
	도관	<ul style="list-style-type: none"> 도자기와 같이 점토를 주원료로 성형·소성하여 만든 관으로, 외압이나 충격에 약하고 접합이 불안정하나 내산성·내알칼리성이다.
	플라스틱관	<ul style="list-style-type: none"> 경질 염화비닐관은 가볍고 부식되지 않으며, 전기·절연 및 가공이 우수함. 저온과 50℃ 이상의 고온의 배관에 부적당. 온도변화가 심한 곳에 노출된 직선 배관에는 30~40m마다 신축 이음 필요 폴리에틸렌관 : 직사광선에 의한 표면산화의 단점을 보완하기 위하여 카본 블랙을 혼합한 흑색관. 염화비닐관에 비해 화학적·전기적 성질이 좋고 충격에 잘 견디며, 영하 60℃에도 견딤다.

최적관지름(optimum pipe diameter) 선정 : 단위 시간에 일정한 양의 유체를 수송하는 데는 동력비, 배관설비비, 유지관리비 등의 합계가 최소가 되도록 설계

- o 유체수송에서 관지름이 클수록 마찰손실이 적어져 동력비는 근사적으로 관지름의 5제곱에 반비례하여 급격히 감소
- o 배관설비비, 감가상각비, 수리비, 세금 등의 합계(고정비)는 관지름의 1~1.2제곱에 비례하여 커짐.

표 9-8 여러 가지 유체의 유속 범위

기 체	유속범위 [m/s]	액 체	유속범위 [m/s]
공기(낮은 압력)	10~15	보통 액체(1~10 atm)	1.5~3
공기(높은 압력)	20~25	점도가 큰 액체	0.5~2
송풍기(흡입)	7~13	공장 폐수	0.4~0.8
송풍기(배출)	10~13	상수도	0.61
압축기(흡입)	~10	피스톤 펌프(흡입)	1
압축기(배출)	~20	피스톤 펌프(배출)	1.5~3
포화수증기	25~30		
과열수증기	30~50		

【2】 관의 두께

스케줄 번호(schedule number) : 벽두께에 따라 커지며, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 140, 160

- o 지름이 8인치 이하의 관에서는 보통 40, 80, 120 등을 사용

$$\text{스케줄 번호} = \frac{\text{내부 작업 응력 [kgf/cm}^2\text{]}}{\text{재료의 허용응력 [kgf/cm}^2\text{]}} \times 1000$$

BWG(birmingham wire gauge) 번호 : 튜브의 벽두께 규격으로 제일 얇은 24에서 제일 두꺼운 7까지 있다. 구리튜브가 많이 사용되며, 응축기와 열교환기에 많이 이용.

【3】 관부속품(pipe fittings)

(1) 관이음쇠



그림 9-32 관이음쇠

- 2개의 관을 연결할 때 사용하는 부속품 : 유니언(union), 커플링(coupling), 니플(nipple), 소켓(socket), 플랜지(flange)
- 관선의 방향을 바꾸기 위한 부속품 : 엘보(elbow), 티(tee), 십자(cross), Y지관(Y-branch)
- 관의 지름을 바꿔 주는 부속품 : 리듀서(reducer), 부싱(bushing)
- 관을 막는 부속품 : 플러그(plug), 캡(cap), 밸브(valve)
- 지름이 큰 관을 연결하는 부속품 : 플랜지(flange), 가스킷(gasket), 볼트(bolt), 너트(nut)

(2) 신축이음쇠

유체의 온도와 관에 접하는 외기의 변화가 클수록 관은 팽창 또는 수축을 보완하는 관부속품

그림 9-32의 벤드(bend)류가 이에 속하고, 이외에 루프(loop), 주름관(bellow), 호스(hose) 등.

(3) 밸브(valve)

직선배관 도중에 설치하여 유체의 흐름을 조절하는 기구

① 게이트 밸브(gate valve) : 유체의 흐름과 직각으로 움직이는 게이트의 상하운동에 의해 유량을 조절

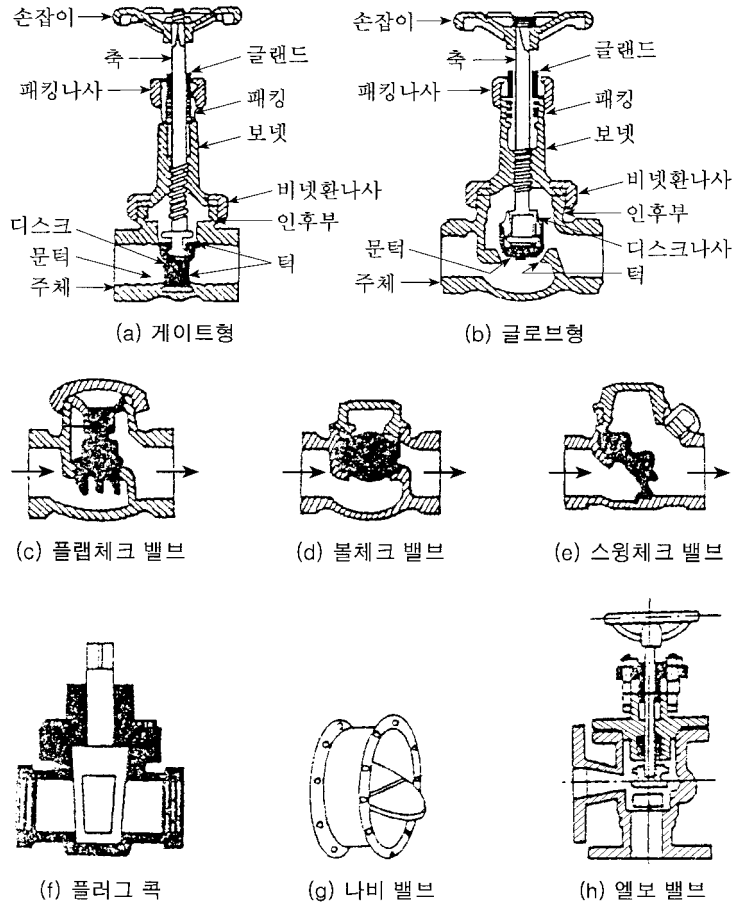
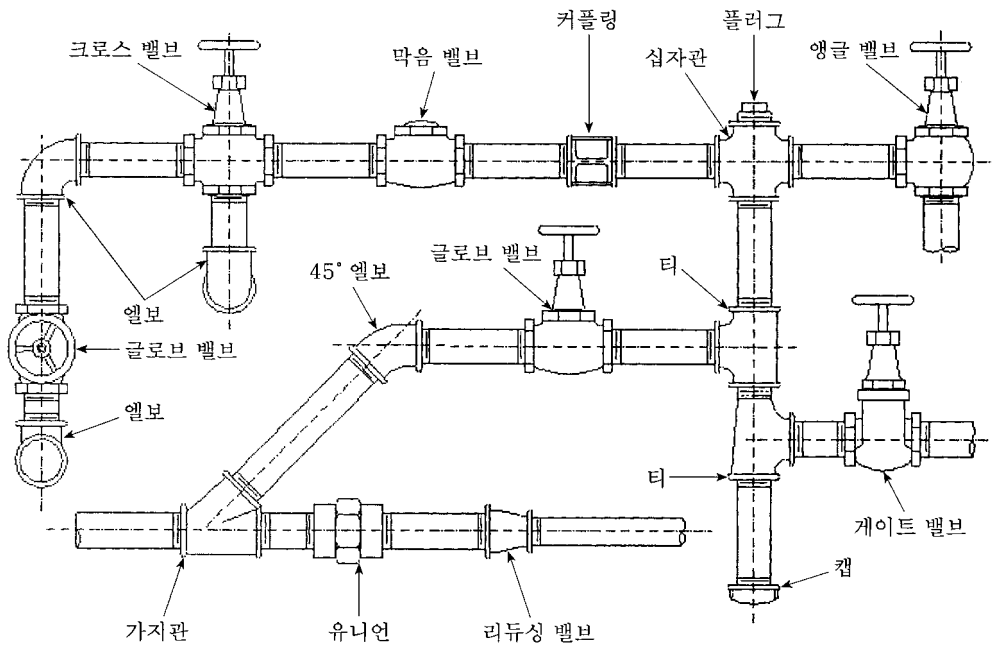


그림 9-33 각종 밸브 모양



- o 섬세한 유량조절은 힘들.
- o 게이트를 절반 정도 열 경우에는 압력손실이 큼.

② 글로브 밸브(globe valve) : 다소 섬세한 유량을 조절. 스톱 밸브(stop valve), 앵글 밸브(angle valve), 니들 밸브(needle valve) 등.

③ 막음 밸브(check valve) : 유체의 역류를 방지하고 유체를 한 방향으로만 보내고자 할 때 사용.

④ 콕 밸브(cock valve) · 플러그 밸브(plug valve) : 작은 관에 사용하는 것으로 유량조절이 용이하며 완전 개폐에 사용.

9-5-2 수송장치

【1】 액체 수송장치

펌프

표 9-10 펌프의 형식상 종류

형 식	구 조	성 능
터 보 형 (비용적형)	원 심 식	벌류트 펌프 터빈 펌프
	축 류 식	축류 펌프
	경사류식	경사류 펌프
용 적 형	왕 복 식	피스톤 펌프 플런저 펌프
	회 전 식	기어 펌프 날개 펌프 재생 펌프
특 수 형		제트 펌프 수격 펌프

- 왕복 펌프(reciprocating pump)
 - 저압용 : 피스톤 펌프(piston pump)
 - 고압용 : 플런저 펌프(plunger pump)
- 회전 펌프(rotary pump), 기어 펌프(gear pump)
- 원심 펌프(centrifugal pump)
 - 저압용 : 벌류트 펌프(volute pump)
 - 고압용 : 터빈 펌프(turbine pump)

(1) 원심 펌프(centrifugal pump)

날개차(impeller)의 회전으로 액체가 회전운동을 일으키게 하여, 이때 생기는 원심력의 작용으로 액체의 압력을 증가시켜서 양수하는 펌프.

안내판(guide vane)이 없는 것 : 벌류트 펌프(volute pump),

안내판이 있는 것 : 터빈 펌프(turbine pump)

공기 바인딩(air binding) : 운전을 시작할 때는 펌프 속에 들어 있는 공기에 의해 수두(head)의 감소가 일어나 펌핑이 정지되는 현상

프라이밍(priming) : 공기 바인딩(air binding) 현상을 막기 위해 최초 가동시 임펠러에 액체를 채워 넣음

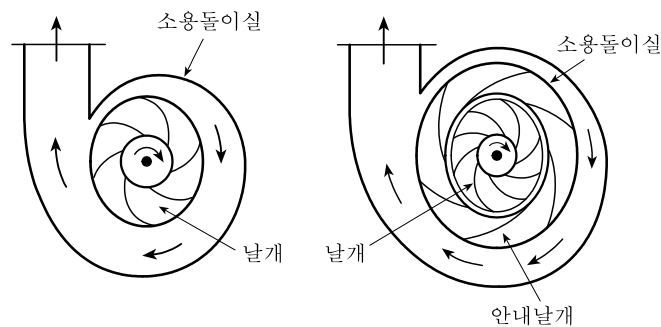


그림 9-35 원심 펌프의 구조

(2) 왕복 펌프(reciprocating pump)

피스톤 펌프, 고압용인 플런저 펌프

격막 펌프 : 산·펌프·오염액의 부식성 액체나 고체 현탁액에는 내산 펌프와 부식 및 마찰에 강한 고무·가죽·플라스틱 등의 가소성 재료의 격막으로 피스톤을 보호

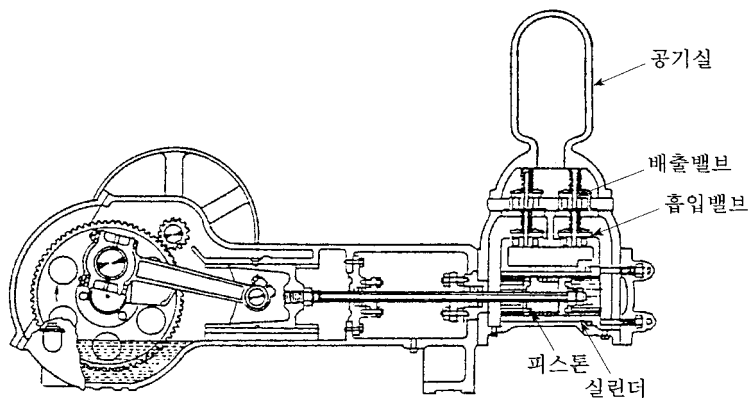


그림 9-36 피스톤 펌프

(3) 회전 펌프(rotary pump)

피스톤 대신 회전자(rotor)를 이용하여 유체를 수송하는 기계로서, 펌프 케이스에 빈틈없이 꼭 들어맞는 기어(gear)나 스크류(screw) 등으로 유체를 연속적으로 밀어내는 펌프.

회전자의 종류 : 기어 펌프(gear pump), 스크류 펌프(screw pump), 로브 펌프(lobe pump), 회전 피스톤 펌프 등으로 나누어짐.

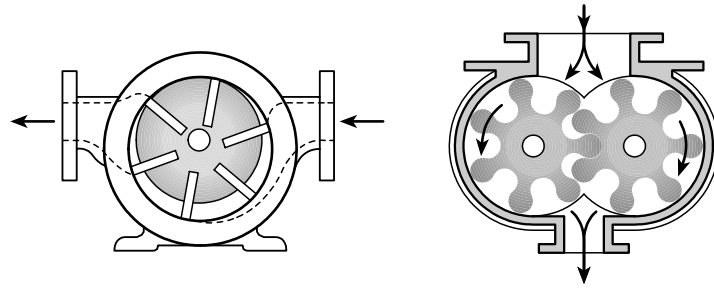


그림 9-37 회전 펌프와 기어 펌프

(4) 특수 펌프(special pump)

① 제트 펌프(jet pump) : 제트 분류작용으로 액체를 끌어올려서 송출하는 펌프로 물이나 압축공기를 수송

② 에어 리프트 펌프(air lift pump) : 양수관을 물 속에 넣고 그 밑 끝으로부터 압축공기를 분출시키면 기포가 혼합되어 밀도가 작아진 물과 공기의 혼합물이 양수관을 지나 배출

③ 에시드 에그 펌프(acid egg pump) : 한 액체가 단순히 다른 액체로 바뀌면서 밀어내어 지는 것이다. 움직이는 부분이 없는 간단하고도 비교적 값이 싼 펌프

【2】 기체수송장치

기체의 수송장치 : 송풍기(팬) < 송풍기(블로워) < 압축기(컴프레서)

표 9-11 기체 수송기의 종류

명 칭	유효 정압 범위	비 고
압축기(compressor)	1.5~1000 kg/cm ²	압축시 온도상승에 대한 냉각이 필요
송풍기(blower)	5000 mmH ₂ O ~ 2 kg/cm ²	압축시 냉각을 고려 안해도 좋음
통풍기(fan)	500 mmH ₂ O 이하	기체의 압축을 고려 안해도 됨
진공 펌프	760 mmHg abs 이하	

(1) 왕복압축기(reciprocating compressor)

원리와 구조 : 왕복 펌프와 같음

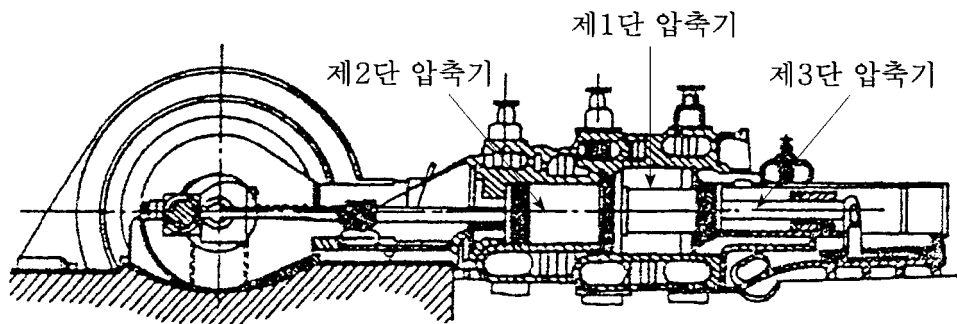


그림 9-38 왕복압축기

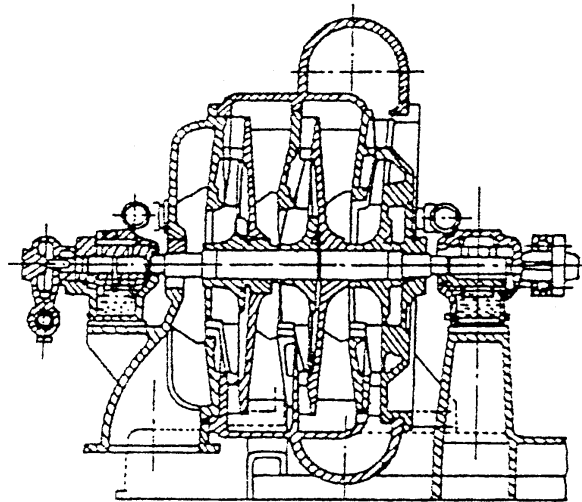


그림 9-39 3단 터보 압축기

(2) 원심송풍기(centrifugal blower)

원심 펌프와 같이 기체를 회전하는 날개 사이에 끌어들여 원심력으로 기체를 운반하는 장치로서 통풍기(fan), 송풍기(blower), 압축기(compressor) 등이 있음.

(3) 회전압축기(rotary compressor)

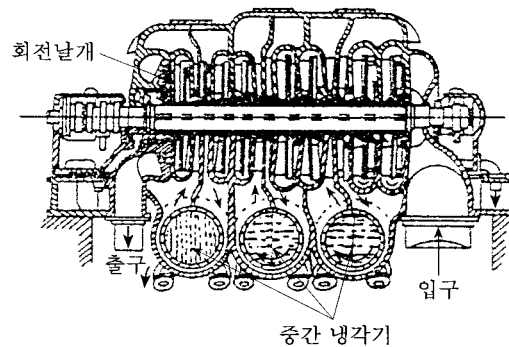


그림 9-40 회전(다단식) 압축기

(4) 회전식 루트 송풍기(rotary roots blower)

(5) 회전 진공 펌프(rotary vacuum pump)

(6) 이젝터(ejector)

9-6 유량 측정

9-6-1 유량측정의 분류

- 직접법 : 부피 유량계, 속도 유량계 등
- 간접법 : 압력차 유량계, 넓이 유량계, 전자 유량계 등

(1) 부피 유량계

부피 유량계의 종류로는 습식 가스미터, 기어 유량계, 왕복식(피스톤) 유량계, 회전식(피스톤) 유량계, 원판형 유량계, 회전원판형 유량계 등.

(2) 속도 유량계

유체가 흐를 때의 프로펠러의 회전수를 측정하여 유량을 측정. 풍속계, 수도미터 등의 유량계로서 구조가 비교적 간단하고, 작은 계기로 많은 유량을 측정.

(3) 압력차 유량계

유체가 흐르는 통로의 일부를 좁혀 유체가 좁혀진 부분을 흐를 때 생기는 압력차를 측정. 오리피스 미터(orifice meter), 벤투리 미터(venturi meter), 노즐(nozzle), 피토관(pitot meter) 등이 있으며, 특히 피토관은 국부속도를 측정하는 데 유용.

(4) 넓이 유량계

유체가 흐르는 단면적을 변하게 하여 유량을 측정하는 계기로써 눈금이 새겨진 원통 안에 플로트(float)를 수직으로 세우고 밑으로부터 유체를 흘러들어가면 플로트가 위로 올라가다가

유체의 밀어올리는 힘과 플로트의 유효무게가 같아지는 점에서 플로트가 정지하면, 이 눈금을 읽어 유량을 측정.

유량계 중에서 가장 많이 쓰이는 것 : 로터미터(rotameter).

(5) 전자 유량계

9-6-2 유량의 측정

1] 오리피스 미터(orifice meter)

유체가 흐르고 있는 관은 관로에 구멍이 뚫린 얇은 판[오리피스(orifice)]을 삽입하면 흐름이 되어 그 전후의 압력차로부터 유속을 구하는 방법

o 구조가 간단하여 제작하기 쉽고, 값이 싼

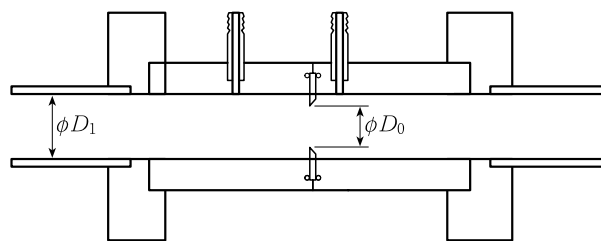


그림 9-41 오리피스 미터

o 유체가 오리피스를 통과할 때 압력손실이 크기 때문에 수송에 많은 동력이 필요한 것이 결점

【2】 벤투리 미터(venturi meter)

오리피스 미터의 원리와 비슷하며, 압력손실을 감소시키기 위하여 오리피스판 대신에 노즐 뒷면에 확대관을 두어 압력을 회복하도록 만들어진 것.

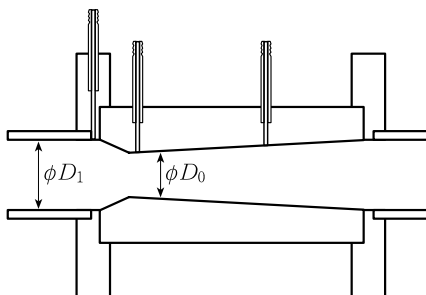


그림 9-42 벤투리 미터와 압력측정부

○ 오리피스 미터에 비하여 손실수두가 작으므로 계기로서 이상적이나, 설치공간을 많이 차지하고 값이 비쌈.

【3】 피토관(pitot pipe)

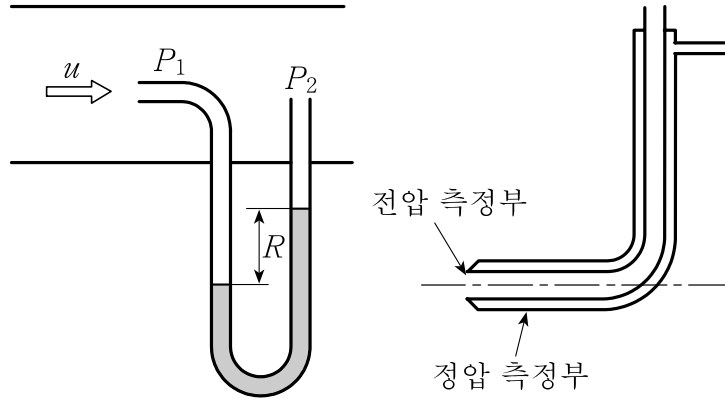


그림 9-43 피토관의 유량 측정 원리

【4】 로터미터(rotameter)

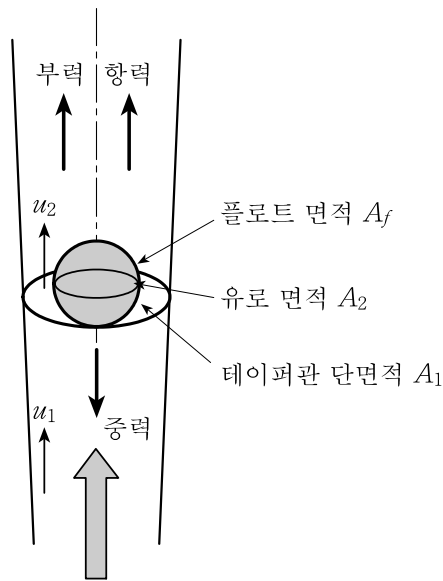


그림 9-44 구조와 원리

【5】 위 어(weir)

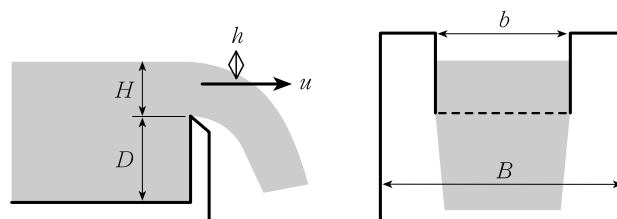


그림 9-45 사각위어

【6】 습식 가스미터(wet gasmeter)

