

[2017학년도 단국대학교 화학공학과 실험실습 교안]

이동현상실험

담당교수: 윤용수, 이우걸, 이용걸, 이환규

실험조교: 김기덕, 박한별, 이동현, 정은진, 허정욱

2017년 3월 1일

단국대학교 공과대학 화학공학과

목 차

I. 이동현상실험 실습 개요	1
II. 실험주제	2
1) 실험1: Reynolds Number	2
2) 실험2: Efflux Time	6
3) 실험3: Measurement of Terminal Velocity	16
4) 실험4: Fluid Circuit Experiment	23
5) 실험5: Bernoulli Theorem Apparatus	30
6) 실험6: Natural and Forced Convection	35
7) 실험7: Melting of Ice by Natural Convection	42
8) 실험8: Double Pipe Heat Exchanger	46
9) 실험9: Thermal Conductivity Measuring Apparatus	52
10) 실험10: Simple Distillation	59
III. 단국대학교 화학공학과 실험/실습 안전관리 지침	65

I. 이동현상실험 실습 개요

본 과정은 화공유체공학과 화공열전달의 강의에서 배운 기본지식과 이론을 실제현장에서 응용할 수 있도록 실험을 통해 유체흐름과 열전달 현상을 직접 관찰하고 그 실험결과를 해석 고찰하는 능력을 배양시키는데 그 목적이 있다.

실험실습 목표:

1. 유체공학 및 열전달 강의에서 배운 원리와 현상을 실습을 통해 실제 현장에서 이를 응용할 수 있도록 한다.
2. 실험을 계획, 고찰, 해석을 통해 결론을 도출할 수 있으며, 이를 발표하고 보고서를 잘 작성하도록 한다.
3. 실험실습을 원만하게 잘 수행하려면 팀원과 협동하는 것이 중요하다는 사실을 인식한다.



Fig. I-1. 이동현상실험 실습실 배치도



Reynolds Number

1. 목적

- (1) 유체가 관을 통해 흘러갈때 흐름 형태에 따른 영향을 이해한다.
- (2) 층류(Laminar Flow)와 난류(Turbulent Flow)의 흐름 형태를 육안으로 확인한다.
- (3) 임계속도를 구하고 문헌과 비교한다.
- (4) Reynolds Number를 명확히 이해한다.

2. 이론

- 유량 : 관 속으로 유체가 흐를 경우 흐르는 방향에 직각인 임의의 단면을 단위 시간에 흐르는 유체의 양
- 평균유속 : 유량을 유로의 단면적으로 나눈 값
- 임계속도 (Critical Velocity) : 층류(Laminar Flow) 또는 점성류(Viscous Flow)에서 유속이 점점 빨라짐에 따라 난류(Turbulent Flow)로 전이되는 지점의 속도

(1) 유체의 유속

직경이 D 인 원형 관에서 부피유속을 흐름의 단면적으로 나누면 평균유속을 구할 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad [m/s] \quad (1-1)$$

where, Q : 유량 [m^3 / sec]

A : 유로의 단면적 [m^2]

\bar{u} : 평균 유속 [m / sec]

D : 관의 내경 [m]

중심부에서는 최대속도와 평균속도 사이에 대체로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\bar{u} = \frac{1}{2} u_{\max} \quad N_{Re} < 2100 \quad (1-2a)$$

$$\bar{u} = 0.82 u_{\max} \quad 4000 < N_{Re} < 2 \times 10^5 \quad (1-2b)$$

(2) 레이놀즈 수 (Reynolds Number)

유체의 흐름상태는 유로의 모양과 유체의 성질에 따라 달라진다. 원관에 유체가 흐를 경우 관의 내경과 평균유속, 유체의 밀도와 점도로서 나타낼 수 있으며 다음과 같이 레이놀즈 수(Reynolds Number, N_{Re})를 정의한다.

$$N_{Re} = \frac{D \bar{u} \rho}{\mu} \quad \left[\frac{(L)(L/T)(M/L^3)}{M/LT} \right]$$

$$= \frac{D \bar{u}}{\nu} \quad [-] \quad (1-3)$$

where, ν : 동점도 계수(Kinematic Viscosity) [m^2/sec]

레이놀즈 수는 차원이 없는 수(dimensinless number)이다. 단위계만 통일되면 같은 값이 얻어진다. 매끈한 원관($k = 0$)인 경우 레이놀즈 수가 2100보다 적으면 층류를 이루고, 4000이 넘으면 완전난류, 그리고 2100 ~ 4000에서는 전이영역을 나타낸다. 이 영역을 임계영역이라 하며 $N_{Re} = 2100$ 일 때의 유속을 임계속도라 한다. 이를 정리하면 다음 표와 같다.

Table 1-1. 흐름종류에 따른 Reynolds Number의 변화

흐름종류	흐름조건	Re. Number 범위
Laminar Flow	No macroscopic mixing Velocity in macroscopic steady flow is constant at any point	$N_{Re} < 2100$
Transition Region (전이영역 또는 임계영역)		$2100 < N_{Re} < 4000$
Turbulent Flow	Mixing by eddy motion between the layers	$N_{Re} > 4000$

3. 실험 장치

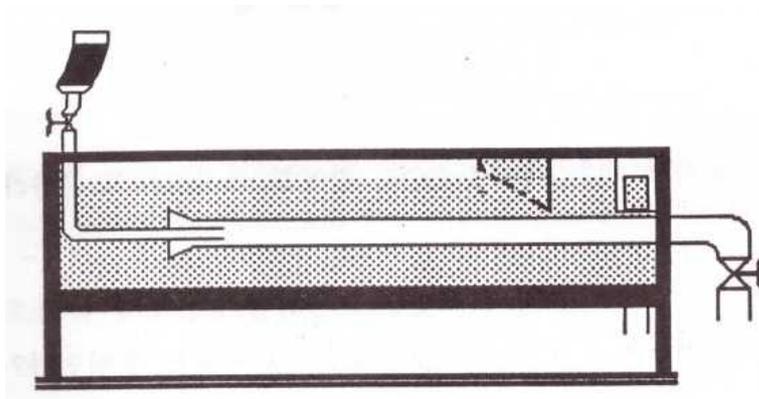
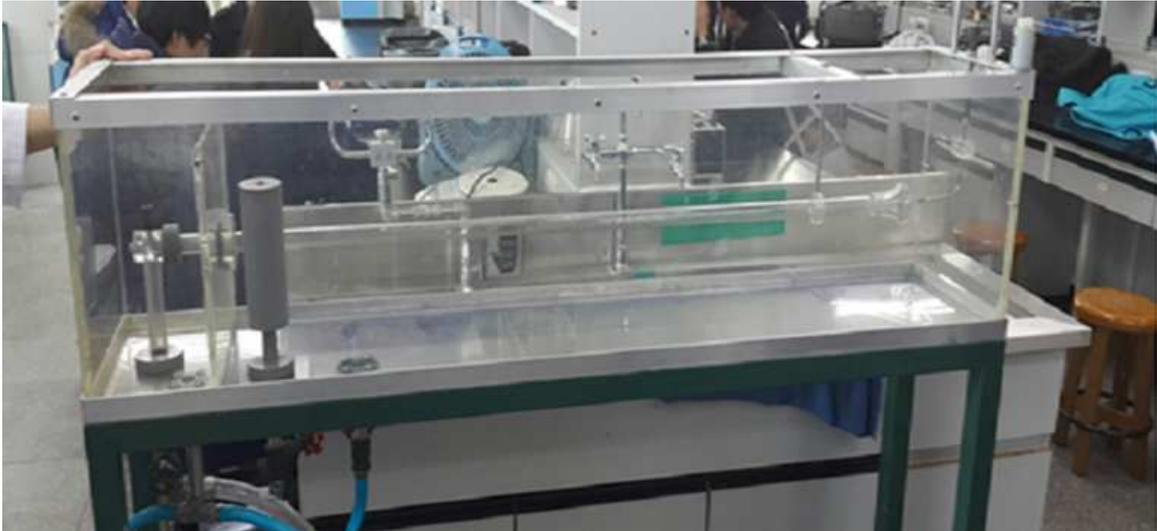


Fig. 1-1. Reynolds Experimental Equipment

4. 실험 준비물

- (1) Stop Watch
- (2) Thermometer
- (3) Beaker
- (4) Mass Cylinder
- (5) Tracer(Dye or Ink)

5. 실험 방법

- (1) 물을 탱크에 넣고 관의 밸브를 조절하여 정상상태에 도달할 때까지 기다린다.
- (2) 배출구를 통해 나오는 유체의 유량을 측정하여 유속을 계산한다.
- (3) 잉크를 흘려 보내면서 흐름의 모양을 관찰한다. 이 때 tracer(dye or ink)는 유체 흐름에 영향을 주는 것을 사용해서는 안된다.
- (4) (2), (3)의 실험을 수회 반복하여 평균값을 얻는다.
- (5) 유속을 차차 증가시켜 가면서 위의 실험을 되풀이 한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 층류에서 난류로 변화하는 임계 레이놀즈수를 구하고 문헌과 비교하여 보라.
- (2) 유속의 변화에 대한 레이놀즈수의 관계를 그래프에 도시하라.
- (3) 실험치와 이론치가 부합되지 않는 경우, 그 이유는 무엇인가?
- (4) 유로가 원관이 아닐 경우 레이놀즈수는 어떻게 변할지 검토하여 보라.
- (5) 유로가 매끈하지 않을 경우 레이놀즈수에 미치는 영향은 무엇인지 생각하여 보아라.
- (6) 유체역학에서 많이 취급되는 무차원군에는 어떤 것들이 있으며, 그것이 무엇을 의미하는지를 조사하라.
- (7) N_{Re} 의 물리적인 의미에 대해 조사하여라.



Efflux Time

1. 목적

- (1) 거시적인 에너지 수지 및 질량수지를 적용하여 탱크로부터의 액체의 유출 시간을 이론적으로 유도하여 보고 실험치와 비교하여 사용된 가정의 영향을 이해한다.
- (2) 실험중의 흐름이 층류인지 난류인지 구별하여 본다.

2. 이론

(1) Hagen-Poiseuille 식¹⁾

모멘텀 수지식으로부터 식을 얻으면, 압력구배의 식을 얻을 수 있다.

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu}{D_0^2} \bar{u} = \frac{8\mu}{r_0^2} \bar{u} \quad (2-1)$$

Hagen-Poiseuille식은 층류일 경우에만 적용되는 식임에 주의해야 한다.

(2) Bernoulli 식

마찰손실과 기계적 에너지를 포함하는 Bernoulli식²⁾을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{\alpha_1 \bar{u}_1^2}{2} + \eta W_p = \frac{P_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{\alpha_2 \bar{u}_2^2}{2} + h_f \quad (2-2)$$

where, W_p : Shaft Work

h_f : Total Friction Loss

η : Efficiency

\bar{u} : 평균유속

① 층류에서의 유출시간

$$t_{efflux} = \frac{8\mu L R^2}{R_0^4 g \rho} \ln\left(\frac{L+H}{L+h}\right) \quad (2-3)$$

1) 李基俊, 金雨植 共譯, 移動現象論, 3rd Ed. 1987, p89

2) W. L. McCabe, Unit Operations of Chemical Engineering, 4th Ed., McGraw-Hill, p66

② 난류에서의 유출시간

$$t_{efflux} = \frac{7R^2}{3R_0^2} \left[\frac{(0.0791)L}{2^{1/4}(\rho)^{1/4}} \frac{\mu^{1/4}}{R_0^{5/4}} \right]^{4/7} [(L+H)^{3/7} - (L+h)^{3/7}] \quad (2-4)$$

3. 실험장치

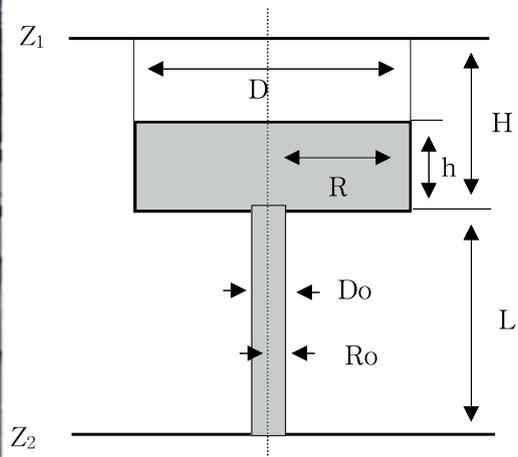


Fig. 2-1. Equipment for Efflux Time

4. 실험 준비물

- (1) Stop Watch
- (2) Beaker
- (3) Mass Cylinder
- (4) Caliper
- (5) Thermometer

5. 실험 방법

- (1) 직경과 길이를 알고있는 파이프를 수조에 연결시킨다.
- (2) 수조에 물을 채운다.
- (3) 액면이 정해놓은 위치까지 내려오는데 걸린 시간을 측정한다.
- (4) 다른 파이프에 대하여도 이와 같은 실험을 되풀이 한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 탱크로부터의 액체의 유출시간을 이론치와 실험치를 비교하여 보라. 그리고 $(\text{실험치}/\text{이론치}) = t_s$, 관의 길이가 L 일때 각각에 대하여 그래프를 그려보고 분석하여 보라.
- (2) (1)번의 t_s 와 관의 직경 D 에 대하여 그래프를 그리고 어느 경우가 오차가 큰지를 조사하여라.
- (3) 유체의 유출 속도로 부터 점도를 구해보고 이론값과 비교하여 보라. 오차가 있다면 그 영향은 무엇인가를 설명하여라.
- (4) 유체의 흐름이 층류인지 난류인지 판별하여 보아라.
- (5) 실험과정을 검토하고 실험결과를 총괄적으로 검토하라.

☞ 참고 : Hagen-Poiseuille식의 유도³⁾

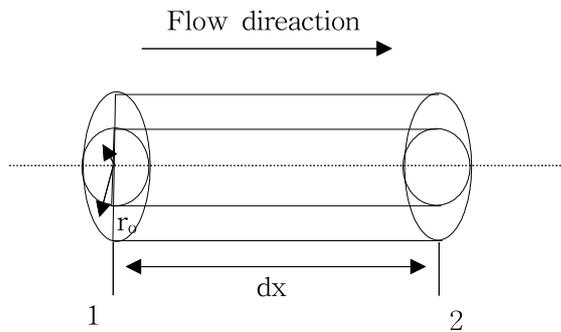


Fig. 2-2. Fluid Element At Steady-Flow In Pipe For Hagen-Poiseuille Eq.

수평한 원형관 속에 흐르는 Uncompressible, Newtonian Laminar Flow를 생각한다. x 축 방향으로 가속은 없다고 가정하며, 따라서 x 방향으로는 외부의 어떤 힘도 작용하지 않는다. 양 끝단에는 반대방향으로 압력이 작용하는데, 그 합은

$$\text{Pressure force} = P_1(\pi r^2) - P_2(\pi r^2) = \pi r^2(P_1 - P_2) \quad (2-5)$$

유체와 관의 벽 사이에는 마찰이 작용하며 그 크기는

$$\text{Shear force} = 2\pi r \Delta x \tau \quad (2-6)$$

where, τ : shear stress at r

이 Pressure Force와 Shear Force는 X 축으로 작용하는 유일한 힘이고 힘들의 합은 0이므로, 두 힘은 크기가 같고 방향이 반대이다. 그러므로

$$\pi r^2(P_1 - P_2) = -2\pi r \Delta x \tau$$

$$\tau = -\frac{r(P_1 - P_2)}{2\Delta x} \quad (2-7)$$

점성의 정의로부터

3) 李基俊, 金雨植 共譯, 移動現象論, 3rd Ed. 1987, p87-p89

$$\tau = \mu \frac{d\bar{u}}{dr} \quad (2-8)$$

이므로, (2-3)식과 (2-4)식을 함께 놓으면

$$\mu \frac{d\bar{u}}{dr} = -r \frac{(P_1 - P_2)}{2\Delta x} \quad (2-9)$$

압력구배 $(P_1 - P_2)/\Delta x$ 는 반지름 R 에 의존하지 않으므로, (2-5)식을 변수분리하여 적분하면,

$$\bar{u} = -\frac{r^2}{4\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} + constant \quad (2-10)$$

이때, 벽에서의 유속이 Zero라고 가정하면, $r = r_0$ 에서의 $\bar{u} = 0$ 이다.

그러므로,

$$0 = -\frac{r_0^2}{4\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} + constant$$

$$\bar{u} = -\frac{r_0^2 - r^2}{4\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \quad (2-11)$$

관의 중심($R = 0$)에서 유속은 최대값 \bar{u}_{\max} 을 가지므로

$$\bar{u}_{\max} = -\frac{r_0^2}{4\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \quad (2-12)$$

관의 단면에서 \bar{u} 를 적분하면 부피유속을 얻을 수 있다.

$$Q = \int_{tube} \bar{u} dA$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{r=0}^{r=r_0} \frac{r_0^2 - r^2}{4\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} 2\pi r dL \\
&= \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \frac{\pi}{2\mu} \left[\frac{r_0^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_{r=0}^{r=r_0} \\
&= \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \frac{\pi}{\mu} \frac{r_0^4}{8} \\
&= \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \frac{\pi}{\mu} \frac{D_0^4}{128} \tag{2-13}
\end{aligned}$$

이로부터 평균유속을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\bar{u} &= \frac{Q}{\pi r^2} \\
&= \frac{D_0^2}{32\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \\
&= \frac{r_0^2}{8\mu} \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} \tag{2-14}
\end{aligned}$$

$$\therefore \frac{P_1 - P_2}{\Delta x} = \frac{32\mu}{D_0^2} \bar{u} = \frac{8\mu}{r_0^2} \bar{u} \tag{2-15}$$

이 식을 미분 형태로 쓰면 최종적인 Hagen-Poiseuille식을 얻을 수 있다.

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu}{D_0^2} \bar{u} = \frac{8\mu}{r_0^2} \bar{u} \tag{2-1}$$

☞ 참고 : 액체 유출시간 결과식의 유도

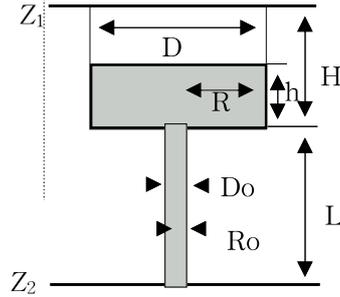


Fig. 2-3. Equipment for Efflux Time

(2-2)식에서, 각 지점 '1', '2'에서 받는 압력의 차는 매우 작고, 이 계가 밖으로 해 주는 일이 없다고 가정하면, ($P_1 = P_2$, $W_p = 0$)

$$\frac{\overline{u_2^2} - \overline{u_1^2}}{2} + h_f = g(Z_1 - Z_2) \quad (2-16)$$

연속 방정식(Continuity Eq.), $\overline{u_1} S_1 = \overline{u_2} S_2$ 이므로

$$\overline{u_1} = \overline{u_2} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (2-17)$$

로 나타낼 수 있다. 마찰손실을 고려하면,

$$\begin{aligned} h_f &= h_{f,s} + h_{f,c} + h_{f,e} + h_{f,f} \\ &= \left[4f \left(\frac{L}{d_0} \right) + K_c + K_e + K_f \right] \frac{\overline{u^2}}{2} \end{aligned} \quad (2-18)$$

그리고 높이의 차는 $Z_1 - Z_2 = H + L$ 이므로 정리하면,

$$\frac{\bar{u}_2^2 - \bar{u}_2^2 \left(\frac{R_0}{R}\right)^4}{2} + \left[4f\left(\frac{L}{d_0}\right) + K_c + K_e + K_f\right] \frac{\bar{u}_2^2}{2}$$

$$= g(H + L) \quad (2-19)$$

관의 축소, 확대 및 밸브 등의 마찰손실을 무시할 수 있으므로,

$$\frac{\bar{u}_2^2 - \bar{u}_2^2 \left(\frac{R_0}{R}\right)^4}{2} + 4f\left(\frac{L}{d_0}\right) \frac{\bar{u}_2^2}{2}$$

$$= g(H + L) \quad (2-20)$$

로 쓸 수 있다.

윗 식을 작은관으로 빠져나오는 유체의 유속에 대해 정리하면,

$$\bar{u}_2^2 = \frac{2g(H + L)}{\left[1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^4 + \left(2f\frac{L}{R_0}\right)\right]} \quad (2-21)$$

$R_0 \ll R$ 이라 가정하면 $\left(\frac{R_0}{R}\right)^4 = 0$ 이므로,

$$\bar{u}_2^2 = \frac{2g(H + L)}{\left[1 + \left(2f\frac{L}{R_0}\right)\right]} \quad (2-22)$$

$R_0 \ll L$ 일 경우,

$$\bar{u}_2^2 = \frac{R_0 g(H + L)}{fL} \quad (2-23)$$

① 층류의 경우

층류일 경우의 Fanning Friction Factor를 적용하면

$$f \equiv \frac{16}{N_{Re}} = \frac{16\mu}{D_0 \rho \bar{u}_2} = \frac{8\mu}{R_0 \rho \bar{u}_2} \quad (2-24)$$

$$\bar{u}_2^2 = \frac{R_0 g(H+L)}{\frac{8\mu}{R_0 \rho \bar{u}_2} L}$$

$$\bar{u}_2 = \frac{R_0^2 g \rho (L+H)}{8\mu L} \quad (2-25)$$

$$\bar{u}_2 = \bar{u}_1 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 = -\frac{dH}{dt} \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \text{ 이므로,}$$

$$-\frac{dH}{dt} = \frac{R_0^4 g \rho (L+H)}{8\mu L R^2} \quad (2-26)$$

변수분리하여 적분하면,

$$-\frac{dH}{(L+H)} = \frac{R_0^4 g \rho}{8\mu L R^2} dt$$

$$-\int_H^h \frac{dH}{(L+H)} = \left[\frac{R_0^4 g \rho}{8\mu L R^2} \right] \int_0^{t_{efflux}} dt$$

$$-\ln(L+h) + \ln(L+H) = \frac{R_0^4 g \rho}{8\mu L R^2} t_{efflux} \quad (2-27)$$

그러므로 층류에서의 유출시간을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t_{efflux} = \frac{8\mu L R^2}{R_0^4 g \rho} \ln\left(\frac{L+H}{L+h}\right) \quad (2-23)$$

② 난류의 경우

난류의 경우에는 Blasius식에 의해

$$f = \frac{0.0791}{N_{Re}^{1/4}} = \frac{(0.0791) \mu^{1/4}}{(\rho \bar{u} D_0)^{1/4}} \quad (4000 < N_{Re} < 10^6) \quad (2-28)$$

이므로,

$$\begin{aligned} \bar{u}_2^2 &= \frac{R_0 g(H+L)}{f L} = \frac{\rho^{1/4} \bar{u}^{1/4} D_0^{1/4} R_0 g(H+L)}{0.0791 \mu^{1/4} L} \\ \bar{u}_2^{7/4} &= \frac{\rho^{1/4} D_0^{1/4} R_0 g(H+L)}{0.0791 \mu^{1/4} L} \\ &= \frac{2^{1/4} \rho^{1/4} R_0^{5/4} g(H+L)}{0.0791 \mu^{1/4} L} \\ \therefore \bar{u}_2 &= \frac{2^{1/7} \rho^{1/7} R_0^{5/7} g^{4/7} (H+L)^{4/7}}{(0.0791)^{4/7} \mu^{1/7} L^{4/7}} \quad (2-29) \end{aligned}$$

층류일 경우와 같은 방법으로 난류일때의 유출시간을 구할 수 있다.

$$t_{efflux} = \frac{7 R^2}{3 R_0^2} \left[\frac{(0.0791) L \mu^{1/4}}{2^{1/4} g \rho^{1/4} R_0^{5/4}} \right]^{4/7} [(L+H)^{3/7} - (L+h)^{3/7}] \quad (2-4)$$



Measurement of Terminal Velocity

1. 목적

- (1) 중력하에서 구체가 유체중에서 침강할 때에 일어나는 현상을 이해한다.
- (2) 항력계수(Drag Coefficient)와 Reynolds Number와의 관계를 알아본다.

2. 이론

(1) 항력(Drag, Drag Force, F_D) :

흐름방향에서 유체가 고체표면에 미치는 힘

$$F_D = \int_A [\tau_w \sin \theta dA + P \cos \theta dA] \quad (3-1)$$

(2) 항력계수(Drag Coefficient) :

유체의 밀도두와 속도두와의 곱에 대한 F_D / A_D (단위 투영면적당 항력)의 비로서 정의된다.

$$C_D \equiv \frac{F_D / A_P}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (3-2)$$

where, F_D : 항력(Drag)

A_P : 투영 면적 (Projection Area)

항력계수는 Reynolds Number와 입자의 형태의 함수이다.

주어진 형태가 구(球)일 경우, 다음과 같은 경우에 따라 항력계수가 변화

① Reynolds Number가 낮을때

항력계수는 Stokes' Law에 비교적 잘 일치한다. ($N_{Re,P} < 1$)

$$F_D = 3 \pi \mu u_0 D_P \quad (3-3)$$

$$C_D = \frac{2 \times 3 \pi \mu u_0 D_P}{\rho u_0^2 \left(\frac{\pi D_P^2}{4} \right)} = \frac{24}{N_{Re,P}} \quad (3-4)$$

점동류(Creeping Flow) :

점도가 작은 기체나 액체 중에서 움직이는 먼지나 안개같은 작은 입자나, 점도가 아주 큰 액체중에서 움직이는 큰 입자의 운동과 같이, 벽 전단이 점성력에만 의존하여 생기는 흐름을 의미한다.

② Reynolds Number가 1000이상일때,
실험적으로,

$$C_D \cong 0.44 \quad (3-5)$$

가 된다.

(3) 중력장에서의 유체를 통과하는 한 입자의 운동

① $N_{Re,P} < 1$ 일때, (Stokes' Law Range)

$$u = \frac{g D_P^2 (\rho_P - \rho)}{18 \mu} \quad (3-6)$$

② $N_{Re,P} > 1000$ 일 때,

$$u = 1.74 \sqrt{\frac{D_P (\rho_P - \rho) g}{\rho}} \quad (3-7)$$

3. 실험 장치

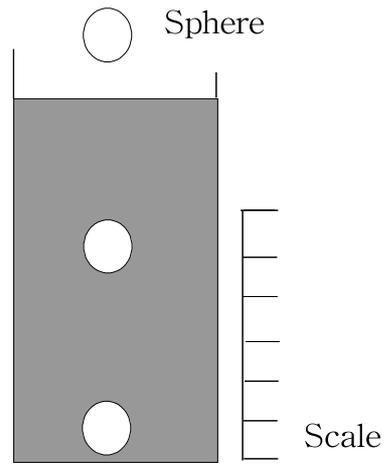


Fig. 3-1. Equipment of Terminal Velocity

4. 실험 준비물

- (1) 밑면이 막힌 두개의 긴 투명관, 직경 약 10cm
- (2) Stop Watch
- (3) 직경과 비중이 다른 여러개의 구체
- (4) 기름

5. 실험 방법

- (1) 물과 기름을 넣은 두개의 관을 수직으로 세운다.
- (2) 구를 떨어뜨리고 구의 침강속도가 어느정도 일정해 졌다고 생각되는 순간에 침강속도를 측정한다.
- (3) 침강속도는 관의 하부에 미리 정해놓은 구간을 구가 떨어지는데 소요되는 시간을 반복 측정하여 계산한다.
- (4) 이상과 같은 실험을 구의 종류를 바꾸어 실험한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 항력계수와 레이놀즈 수의 관계를 log-log chart에 그리고 문헌치와 비교하여라. 또 항력계수를 레이놀즈 수의 함수로 표시하여라.
- (2) 위 그래프에서 Stokes' law가 적용되는 범위를 정하고, 이론과 비교하여라.
- (3) Stokes' law를 적용하여 액체의 점도를 측정하고 문헌과 비교하여 보라
- (4) 위의 실험방법에서 유속을 측정하는 방법 외에 다른 방법이 있을지를 생각하여 보라.

☞ **참고 : 중력장에서 유체를 통과하는 입자의 운동**

< Assumption >

- ① 각 입자의 모양은 구형이다.
- ② 유체를 통과하는 고체입자는 벽이나 다른 입자들의 영향을 받지않고 침강한다. (Free Settling)
- ③ 특성길이(Characteristic Length, D_p)가 $1 - 2\mu M$ 보다 크다.
- ④ 유체는 흐르지않고 정지되어 있다.

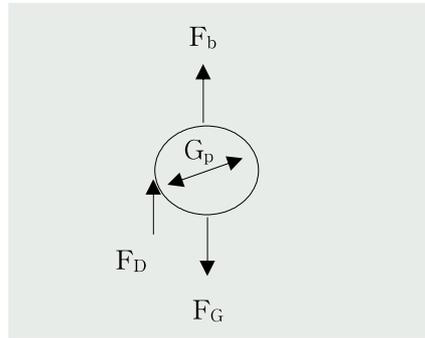


Fig. 3-2. The Forces for Sphere in Fluid

뉴턴의 제 2 운동법칙에서,

$$F = m a \quad (3-8)$$

$$F = F_g + F_b + F_D \quad (3-9)$$

(3-8)식에서 구체의 질량과 그 가속도는 다음 두 식으로 표현할 수 있다.

$$m = \rho_P V_P = \rho_P \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) \quad (3-10)$$

$$a = \frac{du}{dt} \quad (3-11)$$

(3-9)식에서 힘의 성분을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_g (\text{gravitational force}) = mg = \rho_P \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g \quad (3-12)$$

$$F_b(\text{buoy force}) = \rho \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g \quad (3-13)$$

$$F_D(\text{drag force}) = \left(\frac{C_D}{2} \rho u^2 \right) A_P = \left(\frac{C_D}{2} \rho u^2 \right) \left(\frac{\pi D_P^2}{4} \right) \quad (3-14)$$

< Force Balance >

(3-8)식과 (3-9)식을 같게 놓고, (3-10), (3-11), (3-12), (3-13), (3-14)식들을 대입하면

$$\rho_P \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g - \rho \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g - \frac{C_D}{2} \rho u^2 \left(\frac{\pi D_P^2}{4} \right) = \rho_P \left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) \left(\frac{du}{dt} \right) \quad (3-15)$$

종말속도에 도달하면 속도는 일정하므로 $\frac{du}{dt} = 0$ 가 된다.

그러므로,

$$\left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g (\rho_P - \rho) = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 \left(\frac{\pi D_P^2}{4} \right) \quad (3-16)$$

① $N_{Re,P} < 1$ 일때, (Stokes' Low Range)

$$C_D = \frac{24}{N_{Re,P}} \text{이므로,}$$

$$C_D = 24 \frac{\mu}{\rho u D_P} \quad (3-17)$$

(3-17)식을 (3-16)식에 대입하면

$$\left(\frac{\pi D_P^3}{6} \right) g (\rho_P - \rho) = \frac{1}{2} \frac{24\mu}{\rho u D_P} \rho u^2 \left(\frac{\pi D_P^2}{4} \right)$$

$$\frac{1}{3} D_P (\rho_P - \rho) = 6 \frac{\mu u}{D_P} \quad (3-18)$$

(3-18)식을 정리하여 유속을 구하는 식으로 만들 수 있다.

$$u = \frac{gD_P^2(\rho_P - \rho)}{18\mu} \quad (3-6)$$

② $N_{Re,P} > 1000$ 일 때,

$C_D \cong 0.44$ 이므로,

$$u^2 = \frac{8 D_P g (\rho_P - \rho)}{6 \times 0.44 \times \rho} \quad (3-19)$$

$$u = 1.74 \sqrt{\frac{D_P (\rho_P - \rho) g}{\rho}} \quad (3-7)$$



Fluid Circuit Experiment

1. 목적

- (1) 비압축성유체가 관내를 흐를 때 발생하는 압력의 강하를 이해한다.
- (2) 흐름에서 유속과 마찰계수, Reynolds Number, 조도, 두손실의 관계를 실험을 통해 알아본다.
- (3) 관 내를 흐르는 유체의 압력차이를 확대, 수축, 밸브, 이음쇠, 직선관에서 각각 측정하여 그 손실을 구해본다.
- (4) 마찰계수, 레이놀즈 수, 유속, 압력강하 등의 유체관계식들을 이론적으로 검토하고 실험결과와 비교, 분석하여 본다.

2. 이론

유체가 직선 관, T자, 엘보(Elbow), 벤츄리 유량계, 오리피스 유량계 등을 통해 흘러가는 동안에 생기는 두손실을 구하는 것이 이 실험의 목적이므로, 각 과정의 압력강하를 측정하여 두손실과 마찰계수를 구한다. 각 과정에서 유속이 변할 때 두손실이 어떻게 변하는지 관찰하고 유속과 레이놀즈 수, 마찰계수, 그리고 두손실간의 관계에 대하여 생각하며 실험을 한다. 관부속물의 조도에 대한 영향도 생각해 본다.

(1) 연속방정식(Continuity Equation)과 Bernoulli Equation

$$Q(\text{Volumetric Flow Rate}) = u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (4-1)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{a_1 u_1^2}{2} + Z_1 g = \frac{P_2}{\rho} + \frac{a_2 u_2^2}{2} + Z_2 g + h_f \quad (4-2)$$

(2) 두 손실(Head Loss)의 원인

- ① 관의 총 길이에 걸쳐 일어나는 점성 저항(Viscous Resistance)에 의한 두손실
- ② 국부적인 영향 - 밸브, 흐름면적의 갑작스러운 변화, Bend 등의 국부적인 영향에 의한 두손실

(3) Venturi Meter

< Assumption >

- ① 유체는 미소구간 내의 압력변화를 무시할 수 있는 비 압축성 유체이다.
- ② 축일(Shaft Work)은 없다.
- ③ 정상상태의 흐름이다.
- ④ 유량계는 수평흐름이다.(Horizontal Flow)
- ⑤ 파이프 내에 마찰손실이 없다.
- ⑥ 완전 발달 흐름이다.(Fully Turbulent Flow : $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$)

$$\Delta K.E + \Delta P.E + \frac{\Delta P}{\rho} + W_s + h_f = 0 \quad (4-3)$$

가정에 의해 (4-3)식은

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{constant} \quad (4-4)$$

로 쓸 수 있고, 그러므로

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\alpha_2 u_2^2 - \alpha_1 u_1^2}{2} = \text{constant} \quad (4-5)$$

연속방정식 $u_1 A_1 = u_2 A_2$ 이므로,

$$u_1 = u_2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right) = u_2 \left(\frac{\pi D_2}{\pi D_1} \right)^2 = u_2 \beta^2 \quad (4-6)$$

$$\text{where, } \beta = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$$

(4-6)식을 (4-5)식에 대입하여 정리하면

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{1}{2} [\alpha_2 u_2^2 - \alpha_1 (u_2 \beta^2)^2] \quad (4-7)$$

u_2 에 대해 정리하면

$$u_2^2 = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1 \beta^4} \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4-8)$$

위 식은 마찰이 없는 비 압축성 유체에 엄격히 들어 맞는다. 작은 값이지만 마찰손실을 고려하기 위하여 실험인자 C_V (Venturi Coefficient)를 도입하여 수정하면,

$$u_2 = \frac{C_V}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4-9)$$

위 식을 이용하여 부피유량을 계산하여 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 q \text{ (volumetric flow rate)} &= \frac{\dot{m}}{\rho} \\
 &= \frac{C_V S_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4-10)
 \end{aligned}$$

(4) Orifice Meter

Orifice Meter는 Venturi Meter와 비슷하지만 급작스러운 축소 및 확대에 의한 마찰손실이 생길 수 있다. 이를 (5-7)식에 보정인자 C_o 를 사용하여 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$u_o = \frac{C_o}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4-11)$$

(4-10)식과 마찬가지로 부피유량을 구하면

$$\begin{aligned}
 q \text{ (volumetric flow rate)} &= \frac{\dot{m}}{\rho} \\
 &= \frac{C_o S_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4-12)
 \end{aligned}$$

(5) 직선관에서의 손실(Losses in Straight Pipes)

$$h_{f,s} = 4 f \frac{\Delta L}{D} \frac{u^2}{2} \quad (4-13)$$

$$\text{where, } f = \frac{\Delta P D}{2 \Delta L \rho u^2}$$

(6) 확대에 의한 손실(Losses in Sudden Expansion)

$$h_{f,e} = K_e \frac{u_1^2}{2} \quad (4-14)$$

$$\text{where, } K_e = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

(7) 축소에 의한 손실(Losses in Sudden Contraction)

$$h_{f,c} = K_c \frac{u_2^2}{2} \quad (4-15)$$

where, $K_c = \text{neglect}$ for laminar flow

$$K_c = 0.4 \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right) \quad \text{for turbulent flow}$$

(8) 이음쇠 및 밸브에 의한 손실(Losses In Pipe Fittings)

$$h_{f,f} = K_f \frac{u_1^2}{2} \quad (4-16)$$

(9) 총괄손실(Losses In Overall Pipe Bend)

$$h_f = \left(4f \frac{L}{D} + K_e + K_c + K_f\right) \frac{u^2}{2}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} + g(Z_1 - Z_2) = \left(4f \frac{L}{D} + K_e + K_c + K_f\right) \frac{u^2}{2} \quad (4-17)$$

3. 실험 장치



Fig. 4-1. Losses in Pipe Bend Apparatus.

4. 실험 준비물

- (1) Fluid Circuit Apparatus
- (2) Mass Cylinder
- (3) Stop Watch

5. 실험 방법

- (1) 우회 밸브(Bypass Valve)를 이용하여 유량을 조절하고, 단위 시간당 유량을 측정함으로써 유속을 산출한다.
- (2) 유체가 정상상태를 유지하도록 잠시 기다린다.
- (3) 직선 관, T자, 엘보(Elbow), 벤튜리 유량계, 오리피스 유량계 등 각 장치양단에 걸리는 두손실을 측정한다.
- (4) 위 실험을 반복하여 평균값을 낸다.
- (5) 위 과정을 유속을 달리하여 수행한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 유량(Q)과 두손실(Δh)을 도시하여 고찰하라.
- (2) 관의 직경과 길이에 따른 두손실의 변화에 대해 쓰라.
- (3) 각 부분에서의 두 손실의 크기를 비교하여 보라.
- (4) 층류와 난류에서의 마찰계수 변화에 대해 논하라.
- (5) 직선관 또는 관 부속품에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수는 어떠한 영향을 미치는가.
- (6) 직선관에서 관의 직경이 커짐에 따라 마찰계수는 어떠한 영향을 미치는가.
- (7) 이상의 실험으로부터 공정설계시 어떻게 해 주는것이 두손실을 최소로 해 줄 수 있는지 그 방안을 검토하라.



Bernoulli Theorem Apparatus

1. 목적

유량 및 유속의 측정에 유용한 Venturi-Meter, Pitot Tube 등의 사용법 및 원리를 이해함으로써 실제 공정상의 유체흐름에 대하여 이해한다.

2. 이론

(1) Venturi Meter

< Assumption >

- ① 유체는 미소구간 내의 압력변화를 무시할 수 있는 비 압축성 유체이다.
- ② 축일(Shaft Work)은 없다.
- ③ 정상상태의 흐름이다.
- ④ 유량계는 수평흐름이다.(Horizontal Flow)
- ⑤ 파이프 내에 마찰손실이 없다.
- ⑥ 완전 발달 흐름이다.(Fully Turbulent Flow : $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$)

$$\Delta K.E + \Delta P.E + \frac{\Delta P}{\rho} + W_s + h_f = 0 \quad (5-1)$$

가정에 의해 (5-1)식은

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{constant} \quad (5-2)$$

로 쓸 수 있고, 그러므로

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\alpha_2 u_2^2 - \alpha_1 u_1^2}{2} = \text{constant} \quad (5-3)$$

연속방정식 $u_1 A_1 = u_2 A_2$ 이므로,

$$u_1 = u_2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right) = u_2 \left(\frac{\pi D_2}{\pi D_1} \right)^2 = u_2 \beta^2 \quad (5-4)$$

$$\text{where, } \beta = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$$

(5-4)식을 (5-3)식에 대입하여 정리하면

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{1}{2} [\alpha_2 u_2^2 - \alpha_1 (u_2 \beta^2)^2] \quad (5-5)$$

u_2 에 대해 정리하면

$$u_2^2 = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1 \beta^4} \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (5-6)$$

위 식은 마찰이 없는 비 압축성 유체에 엄격히 들어 맞는다. 작은 값이지만 마찰손실을 고려하기 위하여 실험인자 C_V (Venturi Coefficient)를 도입하여 수정하면,

$$u_2 = \frac{C_V}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (5-7)$$

위 식을 이용하여 부피유량을 계산하여 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 q \text{ (volumetric flow rate)} &= \frac{\dot{m}}{\rho} \\
 &= \frac{C_V S_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (5-8)
 \end{aligned}$$

(2) Pitot Tube

피토관은 유선에서의 국부속도를 측정하는 기구이다. 축일이 없는 평행흐름을 가정했을 때, 비 압축성 유체에 대한 Bernoulli 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\left(\frac{\dot{u}^2}{2}\right) + \frac{\Delta P}{\rho} + h_f = 0 \quad (5-9)$$

Where, \dot{u} : 국부속도

마찰손실을 무시하고 국부속도에 대하여 정리하면 아래 식으로 정리된다.

$$\dot{u} = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (5-10)$$

다른 유량계와 마찬가지로 위 식은 실제에 꼭 적용되지는 않는다. 따라서 보정인자를 사용하여 그 정확도를 높일 수 있다.

$$\dot{u} = C_{P_i} \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (5-11)$$

주의해야 할 것은 오리피스 및 벤츄리 유량계에서는 전체 흐름의 평균속도를 측정하는데 비하여, 피토관은 단지 한 점에서의 속도를 측정한다는 것이다. 속도는 파이프의 단면에서 위치에 따라 달라진다. 그러므로 피토관을 이용하여 평균속도를 구하려면, 관 중심에서의 최대속도를 구하여 계산이나 그래프를 이용해야 한다.

3. 실험 장치



Fig. 5-1. Bernoulli Theorem Apparatus

4. 실험 준비물

- (1) Bernoulli Theorem Apparatus
- (2) 풍향계

5. 실험 방법

- (1) Power를 끈 상태에서 마노미터의 튜브 내에 있는 증류수의 눈금을 모두 Zero로 맞춘다.
- (2) 공기 송풍기를 가동시켜 관 내에 일정한 유속의 유체흐름을 만든다.
- (3) 풍속계의 Voltage는 빨간 눈금을 넘어가지 않게 작동한다.
- (4) Power를 올리고 유속을 조정하여 압력 손실을 벤투리미터와 피토관을 이용하여 마노미터로부터 읽는다.
- (5) 유속을 달리하여 위 실험을 반복한다.
- (6) 벤추리미터의 압력강하를 이용하여 유량을, 피토관을 이용하여 유속을 각각 계산한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 이 실험에서 세웠던 여러가지 가정들에 대하여 실험시에 문제가 되었던 것이 있다면 적어보라.

- (2) 2가지 유량계의 장·단점과 그 차이를 설명하여 보아라.

- (3) 각 유량계의 이론식에서 보정인자가 필요한 이유는 무엇인가?



Natural and Forced Convection

1. 목적

- (1) 열전달의 한 형태인 대류를 이해한다.
- (2) 자연대류에 있어서 대류 대상물의 시간경과에 따른 온도변화를 기록 관찰함으로써 열전달 계수와 Grashof, Prandtl Number와의 관계를 조사하고, 그 현상을 이해한다.
- (3) 강제대류에 있어서 온도와 시간과의 관계를 알아본다.
- (4) 자연대류와 강제대류의 차이점을 알아본다.

2. 이론

Heat Convection은 크게 자연대류(Natural Convection)와 강제대류(Forced Convection)으로 나눌 수 있다.

(1) Newton's Equation

$$q = h A \Delta T \quad (6-1)$$

where, h : Heat Transfer Coefficient [$W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $Btu/hr ft^2 \text{ } ^\circ\text{F}$]

전열계수는 Geometry, Physical Property, Flow Velocity, Temperature Profile 등에 따라 변한다.

(2) 무차원군(Dimensionless Group)

Dimension Analysis로 부터 Nusselt Number, Reynolds Number, Prandtl Number, Grashof Number 등을 구할 수 있는데, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_{Nu} = \frac{hD}{k} \quad (6-2)$$

$$N_{Pr} = \frac{C_{p\mu}}{k} \quad (6-3)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (6-4)$$

$$N_{Gr} = \frac{(\beta g)(\Delta T)(\rho^2 D^3)}{\mu^2} \quad (6-5)$$

where, β : 열팽창 계수(Termal Expansion Coefficient)

$$\left(\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right)$$

(3) 자연대류(Natural Convection)

자연대류가 관 지름, 비열, 열전도도, 점도, 열팽창계수, 중력 가속도 그리고 온도차 등에 의존된다는 가정에 따라 차원해석을 하게되면, 아래의 관계가 성립된다.

$$N_{Nu} = N_{Nu} (N_{Pr}, N_{Gr}) \quad (6-6)$$

(6-12)식과 같은 실험식을 이용하여 아래와 같은 결과식이 얻어진다.

$$h = K \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6-7)$$

시간과 온도와의 관계식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$(\Delta T)^{\frac{1}{4}} = a't + b' \quad (6-8)$$

$$\text{where, } a' = -\frac{a}{4}$$

$$b' = \frac{b}{4}$$

따라서 $(\Delta T)^{1/4}$ 과 t 를 그래프에 도시하면 기울기 a 로부터 열전달 계수를 산출할 수 있다.

(4) 강제대류 (Forced Convection)

강제대류에서는 밀도차이에 의한 자연대류는 무시할 만큼 작으며, 유체의 강제적인 유속에 의존하게 되어 열전달 계수 h 를 내포하는 무차원 계수 Nussult Number는 Prandtl Number와 Reynolds Number의 함수이다.

$$N_{Nu} = N_{Nu}(N_{Pr}, N_{Re}) \quad (6-9)$$

실험시 사용될 온도계를 구로 가정하면 다음 실험식을 적용할 수 있다.

$$N_{Nu} = 2.0 + 0.6 \left(\frac{\rho_P G}{\mu_f} \right)^{0.5} \left(\frac{C_P \mu_f}{k_f} \right)^{1/3} \quad (6-10)$$

적용 범위 :

D	=	0.0004 - 5.9 in
u_{air}	=	0 - 62 ft/sec
T_{air}	=	60 - 500 °F
P	=	0.4 - 4.0 atm

(6-10)식을 (6-7)식과 같이 온도차와의 관계로 실험에 의해 나타낸다면 (6-8)식과같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\ln(\Delta T) = a't + b' \quad (6-11)$$

3. 실험 장치

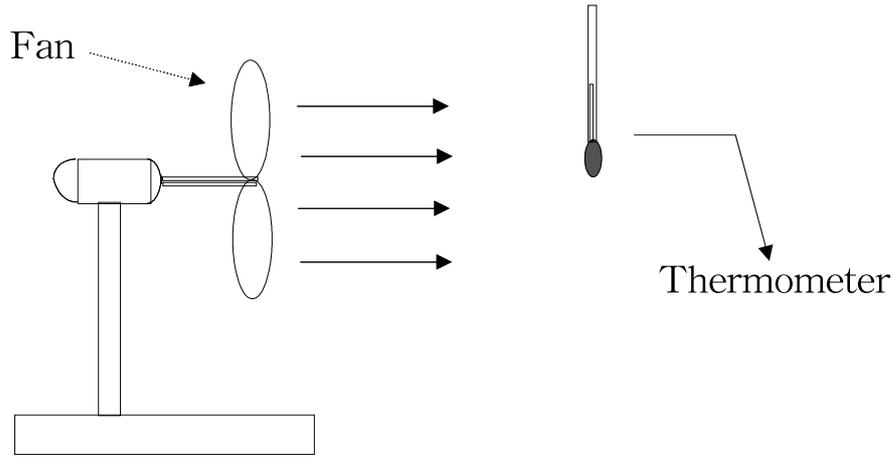


Fig. 8. Forced Convection Apparatus.

4. 실험 준비물

- (1) 송풍기
- (2) 온도계
- (3) 진열기
- (4) 초시계
- (5) 유속 측정기

5. 실험 방법

- (1) 먼저 실험실 내의 온도를 측정한다.
- (2) 온도계를 물 속에 넣은 상태에서 물의 온도를 80 ~ 90 °C 정도 높인다.
- (3) 일정시간이 지난 후에 온도계를 꺼내어 빨리 물기를 제거한다.
- (4) 시간에 따른 온도변화를 대기온도와 같아질 때 까지 측정한다.
- (5) 강제대류 실험시에는 여러 유속 하에서 위의 실험을 반복한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 자연대류와 강제대류를 시간에 따른 온도변화를 Plot 하라.

- (2) 자연대류와 강제대류에서 구한 h 값을 비교하라.

- (3) 강제대류와 자연대류 현상을 비교 설명하여라.

- (4) 유속에 따른 열손실의 차이에 대하여 논하여라.

- (5) 이 실험에서 발생하는 오차의 원인에는 무엇이 있을지 열거하여라

☞ 참고 : 자연대류에서의 실험식 유도

기체와 액체의 Prandtl number가 0.6보다 크고 $\log_{10}(N_{Gr} \cdot N_{Pr})$ 이 4보다 클 경우의 실험식이 다음과 같이 주어진다.

$$N_{Nu} = 0.525 (N_{Pr} \cdot N_{Gr})^{1/4} \quad (6-12)$$

윗식에 (6-3)식과 (6-5)식을 대입하여 전개하면 다음과 같다.

$$\frac{hD}{k} = 0.525 \left(\frac{C_P \mu}{k} \right)^{1/4} \left(\frac{\beta g \Delta T \rho^2 D^3}{\mu^2} \right)^{1/4} \quad (6-13)$$

$$\begin{aligned} h &= 0.525 D^{-1} k C_P^{1/4} \mu^{1/4} k^{-1/4} \mu^{-1/2} \beta^{1/4} g^{1/4} \Delta T^{1/4} \rho^{1/2} D^{3/4} \\ &= 0.525 D^{-1/4} k^{3/4} \Delta T^{1/4} (C_P^{1/4} \mu^{-1/4} \beta^{1/4} g^{1/4} \rho^{1/2}) \end{aligned} \quad (6-14)$$

여기서, $k, C_P, \mu, \beta, g, \rho = Constant$ 이므로

$0.525 k^{3/4} C_P^{1/4} \mu^{-1/4} \beta^{1/4} g^{1/4} \rho^{1/2} = K$ 라고 하면

$$h = K \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} \quad (6-7)$$

한편, 대류에 의한 열손실은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{dq}{dt} = h A \Delta T \quad (6-15)$$

$$dq = -m C_P dT \quad (6-16)$$

실험에서 공기의 온도(T)가 일정하다고 가정하면

$$dT = d(T_1 - T_2) = (T_1 - T) - (T_2 - T) = d(\Delta T) \quad (6-17)$$

시간에 따른 열손실은 비정상상태로서 비선형이다. 그러나 계산의 복잡성을 피하기 위해서 선형으로 가정하고 결과를 얻는다.

(6-15)식과 (6-16)식을 같게 놓고, (6-17)식을 대입하여 전개하면

$$h A \Delta T = - \frac{m C_p d(\Delta T)}{dt} \quad (6-18)$$

(6-7)식을 대입하여 정리하면

$$K \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} A \Delta T dt = m C_p d(\Delta T) \quad (6-19)$$

$$\begin{aligned} dt &= \frac{m C_p}{A K \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} \\ &= \frac{m C_p}{A K \left(\frac{1}{D} \right)^{1/4}} (\Delta T)^{-5/4} d(\Delta T) \end{aligned} \quad (6-20)$$

$C_p = \text{Constant}$ 라 가정하면 A, K, D, m 이 Constant 이므로,

$a = \frac{A K (1/D)^{1/4}}{m C_p}$ 로 놓고 양변을 적분하면

$$\int_0^t a dt = \int (\Delta T)^{-5/4} d(\Delta T) \quad (6-21)$$

$$a t = -4 (\Delta T)^{-1/4} + b \quad (6-22)$$

$(\Delta T)^{1/4}$ 에 대하여 정리하면 1차 방정식의 형태로 기술될 수 있다.

$$(\Delta T)^{1/4} = a' t + b' \quad (6-23)$$

where, $a' = -\frac{a}{4}$

$$b' = \frac{b}{4}$$

실험7 Melting of Ice by Natural Convection

1. 목적

여러가지 형태의 기계류에 대하여 열전달이 달라지게 된다는 열전달의 기본개념을 토대로 여러가지 형태의 얼음의 자연대류조건에서의 열전달 실험을 통하여 자연대류현상에 대한 지식을 습득한다.

2. 이론

얼음이 외부공기로부터 받은 열량은 녹아내린 얼음의 양으로 생각할 수 있다. 따라서 $dq = mCdt$ 이며 이를 시간의 변화에 따라서 녹아내린 얼음의 양을 측정하여 열량의 변화(dq)를 살펴본다.

자연대류의 이론에서

$$h = K \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0.25} \quad (7-1)$$

임을 알 수 있었다.

이 관계로부터

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{d(mC\Delta T)}{d\theta} = hA\Delta T \quad (7-2)$$

공기의 자연대류에 의해 전달된 열이 얼음의 질량변화를 초래하고 ΔT 값과 C 값에는 변화를 주지 않는다. 따라서 (7-2)식은 (7-1)식에 의해 다음과 같은 식으로 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C\Delta T \frac{dm}{d\theta} &= K \left[\frac{\Delta T}{D} \right]^{1/4} A \Delta T \\
 &= K \left[\frac{\Delta T}{V^{1/3}} \right]^{1/4} V^{2/3} \Delta T
 \end{aligned}$$

$$= K' V^{7/12} \Delta T^{5/4} \quad (7-3)$$

얼음의 밀도를 안다면 V 는 m 의 차원이므로

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\therefore V = \frac{m}{\rho} \quad (7-4)$$

식 (7-4)를 (7-3)식에 대입하면

$$C \Delta T \frac{dm}{d\theta} = K' \left(\frac{m}{\rho} \right)^{7/12} (\Delta T)^{5/4} \quad (7-5)$$

dm 과 $d\theta$ 를 제외하고는 모두 실험과 자료를 통하여 알 수 있는 값이 되므로 변수 dm 과 $d\theta$ 에 대하여 수식을 정리하면

$$\int \frac{dm}{m^{7/12}} = \int K'' d\theta \quad (7-6)$$

양변을 적분하면

$$\frac{12}{5} m^{5/12} = K'' \theta + C \quad (7-7)$$

따라서 $m^{5/12}$ vs θ 를 도시하면 직선관계를 얻는다.

3. 실험 장치

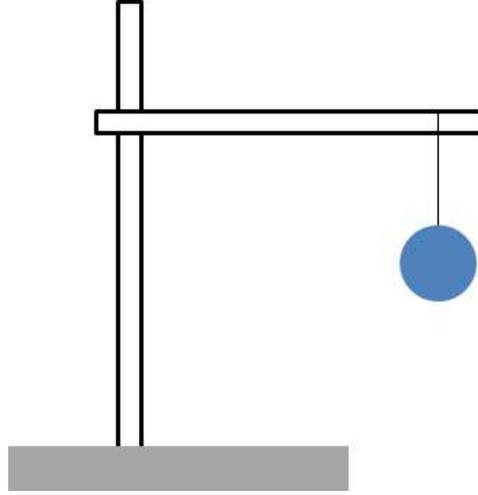


Fig. 7-1. Ice Melting Assemblies

그림과 같이 stand에 얼음을 setting하고 밑에 얼음이 녹아내린 물을 받을 수 있는 작은 용량의 메스실린더를 놓고 정밀한 무게를 측정할 수 있는 무게 측정 장치로서 녹아내린 얼음의 양을 시간의 간격을 두고 측정한다.

4. 실험 준비물

- (1) Stand
- (2) 클램프
- (3) Stop watch
- (4) 메스실린더
- (5) 저울

5. 실험 방법

- (1) 실린더, 정사각형, 구 등의 형태로 얼음을 얼리고 이의 무게를 측정한다.
(0°C 물의 밀도 : 0.917 g/cc)
- (2) 실험장치를 setting한 후 시간간격을 두고 이의 무게변화를 측정한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 각 형태별로 $m^{5/12}$ vs θ 를 도시한다.

- (2) 열량을 추정하여 본다.

- (3) 각 형태에 따른 열전달을 비교하여 본다.



Double Pipe Heat Exchanger

1. 목적

- (1) 간단한 열교환기의 기본식을 연구한다.
- (2) 열교환기의 열수지를 계산한다.
- (3) 총괄전열계수(Overall Heat Transfer Coefficient)를 실측하고 유체의 유량과의 관계를 연구한다.

2. 이론

(1) 2중관 열교환기의 열 수지식

2중관 열교환기는 Fig. 10-1과 같이 Single Tube와 Jacket로 구성되어 있다. 고온 유체는 내관으로 흐르고 저온 유체는 외관으로 흐르며 열량은 정상상태하에서 관벽을 통해 이동한다.

$$q_h = \dot{m}_h C_{ph} (T_1 - T_2) \quad (8-1)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{pc} (t_1 - t_2) \quad (8-2)$$

각각의 열손실량과 얻은 열량이 같다고 가정하면

$$q_h = q_c = q \quad (8-3)$$

where, q_h : 고온 유체의 열손실량 [Kcal/hr]

T : 고온유체의 온도 [Deg. °C]

\dot{m}_h : 고온유체의 유량 [Kg/hr]

C_{ph} : 고온유체의 비열 [$Kcal/Kg Deg. ^\circ C$]

q_c : 저온유체의 열손실량 [$Kcal/hr$]

T : 저온유체의 온도 [$Deg. ^\circ C$]

\dot{m}_c : 저온유체의 유량 [Kg/hr]

C_{pc} : 저온유체의 비열 [$Kcal/Kg Deg. ^\circ C$]

(2) 장치 내의 각 유체의 온도변화

양 유체 사이의 평균 온도차를 ΔT_m 이라 하면, 교환된 열량은 다음과 같다.

$$q = UA \Delta T_m \quad (8-4)$$

$$q = \frac{(q_h + q_c)}{2} \quad (8-5)$$

where, q : 교환된 열량 [$Kcal/hr$]

A : 전열 면적 [M^2]

U : 총괄 전열 계수 [$Kcal/M^2 hr Deg. ^\circ C$]

ΔT_m : 대수 평균 온도차 [$Deg. ^\circ C$]

① 흐름이 병류(Parallel Flow)일 때

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (8-6)$$

② 흐름이 향류(Counter Flow)일 때

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (8-7)$$

총괄 전열 계수가 온도차에 따라 직선적으로 변한다고 가정하였을 때

$$q_T = A_T \frac{U_2 \Delta T_1 - U_1 \Delta T_2}{\ln (U_2 \Delta T_1 / U_1 \Delta T_2)} \quad (8-8)$$

(3) 열교환기의 효율

Fig. 8-2를 비교하면서 계산한다.

① 병류 흐름(Parallel Flow)

$$\eta_h = \frac{\text{실제 열교환량}}{\text{이론 열교환량}} = \frac{\dot{m} C_p (T_1 - T_2)}{\dot{m} C_p (T_1 - t_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (8-9)$$

where, t_1 : 입구에서의 저온유체의 온도

② 향류 흐름(Counter Flow)

$$\eta_h = \frac{\text{실제 열교환량}}{\text{이론 열교환량}} = \frac{\dot{m} C_p (T_1 - T_2)}{\dot{m} C_p (T_1 - t_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (8-10)$$

where, t_1 : 출구에서의 저온유체의 온도

(4) 레이놀즈 수(N_{Re})

유체의 흐름형태가 층류인지 난류인지를 결정하는 레이놀즈 수는 다음 식으로 표현된다.

$$N_{Re} = \frac{D V}{\nu} \quad (8-11)$$

where, D : 직경 [m]

ν : 동점성 계수 (Kinematic Viscosity, $\frac{\mu}{\rho}$) [m^2 / sec]

V : 유속 (= $\frac{\dot{m}}{A}$) [m / Sec]

정리하면,

$$N_{Re,h} = \frac{4 \dot{m}}{\pi d_i v_h} \quad (8-12)$$

$$N_{Re,c} = \frac{4 \dot{m}}{\pi d v_h} \quad (8-13)$$

(5) 총괄 전열 계수

이중관 열교환기에 있어서 총괄전열계수 U는 오염인자를 무시할 경우,

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{D_i h_i} + \frac{x_w D_o}{k_w \bar{D}_L} + \frac{1}{h_o}} \quad (8-14)$$

또는,

$$U_i = \frac{1}{\frac{D_i}{D_o h_o} + \frac{x_w D_i}{k_w \bar{D}_L} + \frac{1}{h_i}} \quad (8-15)$$

where, U_o, U_i : 내관의 내,외표면적을 기준으로한 총괄 전열 계수

D_o, D_i : 내관의 외경 및 내경

\bar{D}_L : 내관의 내경과 외경의 대수평균직경

x_w : 관벽의 두께

k_w : 관벽의 열전도도

h_i, h_o : 내관 및 외관에서의 개별 전열계수⁴⁾

4) 개별 전열계수는 간단히 식으로 구해 지지는 않는다. Bird의 'Transport Phenomena' 또는, McAdams의 'Heat Transmission'에서 개별 전열 계수를 실험적으로 또는 j_H factor를 이용하는 방법 등을 소개하고 있다.

☞ 참고 : Equivalent Diameter

Jacket을 흐르는 저온 유체의 레이놀즈 수를 알기 위해서는 냉각수의 통과 면적이 $\frac{\pi}{4} (D_i^2 - D_o^2)$ 이므로 상당직경(Equivalent Diameter), D 를 사용해야 한다.

$$D = 4 \times \frac{\text{유로의 단면적}}{\text{젖은 벽의 총 길이}} = 4 \times \frac{\frac{\pi}{4} (D_i^2 - D_o^2)}{\pi (D_i + D_o)}$$

$$= D_i - D_o$$

3. 실험 장치



Fig. 8-1. Double Pipe Heat Exchanger

4. 실험 준비물

- (1) 이중관 열교환기
- (2) 온도계
- (3) 압력계
- (4) 밸브
- (5) 유량계

5. 실험 방법

- (1) 수증기 응축 열교환기의 외관에 수증기를 10 psig가 되도록 조절하여 보내고 내관에는 밸브를 조절하여 일정한 속도로 냉수를 보낸다.
- (2) 정상상태에 도달하면 내관의 출입구의 온도를 측정한다.
- (3) 수증기의 소비량을 알기 위하여 응축물의 양을 직접 평량하여 측정한다.
- (4) 모든 실험치는 정상상태에서 측정하여야 하며 적어도 4번이상 유속을 변화 시켜서 실험치를 얻어야 한다.
- (5) 밸브를 조작하여 병류와 향류로 각각 실험한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 열교환기에 있어서 개별전열계수와 총괄전열계수를 각각 구하여라.
- (2) 전열계수의 유속변화 의존성에 대해 알아본다.
- (3) 일정한 조건에서 향류흐름과 병류흐름에서의 총괄전열계수를 비교·설명하여라.
- (4) 병류와 향류흐름에서 열교환기의 효율에 대하여 설명하시오.
- (5) 열교환기에는 어떤 종류가 있고 그 특징은 무엇인지 알아본다.



Thermal Conductivity Measuring Apparatus

1. 목적

- (1) 일반적인 로(爐)건설의 기초적인 계산방법을 익힌다.
- (2) 로 벽에서의 열손실을 계산한다.
- (3) 보온, 보냉재의 선정에 있어서의 기준을 이해한다.
- (4) 화학 장치 내외의 재료선택의 중요성을 알아본다.

2. 이론

- 열전도 (Heat Conduction) : 물질의 혼합이동을 동반하지 않고 구성분자의 열진동이 순차적으로 전달되어 이루어지는 전열
- 열전도도 (Thermal Conductivity) : 열의 전달 정도를 나타내는 물질에 관한 상수

(1) Fourier's Law

고체를 통하여 일어나는 순수한 열전도 식은 Fourier에 의해 제안되었다.

< Differential Form >

$$q \left(= \frac{dQ}{dt} \right) = - K_{av} A \frac{dT}{dx} \quad (9-1)$$

where, q : heat transfer rate

K_{av} : average thermal conductivity bwn $T_1 \sim T_2$

미소시간 dT 사이의 열 이동속도(dQ/dt)는 열의 흐름방향에 직각으로 측정된 단면적 A 와 흐름의 방향에 있어서의 온도변화의 구배(dT/dx)의 곱에 비례한다. 여기서 K 는 비례상수로서 열전도도 (Thermal Conductivity, [Kcal/

$m hr ^\circ C])$ 라 한다.

< Integral Form >

$$q = - K_{av} A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (9-2)$$

$$q = \frac{(\Delta T) : \text{driving force}}{\left(\frac{\Delta x}{K_{av} A}\right) : \text{resistance}} \quad (9-3)$$

$T ^\circ C$ 에 있어서의 열전도도를 K 라 하고 $0^\circ C$ 에서의 열전도도를 K_0 라 하자. 대개의 물질은 거의 다음과 같은 관계를 가진다.

$$K = K_0 (1 + \alpha T) \quad (9-4)$$

여기서 α 는 온도계수로 대개의 보온물질에서는 양(+)의 값을 나타내고 금속과 같은 것은 음(-)의 값을 나타낸다.

식(9-1)에서 $dQ/dt = q$ 라 하면 q 의 단위는 $[Kcal/hr]$ 이며, 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dQ}{dT} = q = - K A \frac{dT}{dx} \quad (9-5)$$

(9-5)식을 정리하여 (9-4)식을 대입하면

$$q \frac{dx}{A} = - K dT = - K_0 (1 + \alpha T) dT \quad (9-6)$$

(9-6)식을 길이 ($x_1 \rightarrow x_2$), 온도 ($T_1 \rightarrow T_2$) 범위로 적분하면

$$q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} = (T_1 - T_2) K_0 \left(1 + \alpha \frac{T_1 + T_2}{2}\right) \quad (9-7)$$

여기서 $K_0 \left(1 + \alpha \frac{T_1 + T_2}{2}\right)$ 는 온도 T_1 과 T_2 사이의 K 의 평균값 K_{av}

이고 $T_1 - T_2$ 는 ΔT 로 나타낼 수 있다. 그러므로

$$q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} = K_{av} (\Delta T) \quad (9-8)$$

$A = Constant$ 이므로, 적분하면

$$q = \frac{A K_{av} \Delta T}{x_2 - x_1} = \frac{A K_{av} \Delta T}{\Delta x (= L)} \quad (9-9)$$

여기서 L 은 열전달이 일어나는 물질의 두께를 나타낸다.

위 식(9-9)는 대류와 복사가 일어나지 않는 간단한 고체의 열전도도를 측정하는 식으로 쓰일 수 있다.

(2) 접촉저항을 고려한 열전도도 계산

정상상태(Steady-state)에서

$$q = q_x = q_R \quad (9-10)$$

여기서 Standard Cylinder를 R 로, Test Piece를 X 로 표시하면 열전달 속도 Q 는 (9-11)식과 같다.

$$q = K_R A \frac{\Delta T_R}{\Delta X_R} = K_x A \frac{\Delta T_x}{\Delta X_x} \quad (9-11)$$

여기서 A 는 양쪽 모두 같고, 또 K_R , ΔT_R , ΔT_x , L_R , L_x 를 알 수 있으면 K_x 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_x = \frac{\Delta T_R}{\Delta T_x} \frac{\Delta X_x}{\Delta X_R} K_R \quad (9-12)$$

(9-12)식은 Standard Cylinder와 Test Piece사이의 접촉저항을 고려하지 않은 식이다. 그러나 일반적으로 금속의 접촉표면(Standard Cylinder와 Test Piece)에서는 접촉저항에 의하여 온도강하가 발생하므로 이를 보정해야 한다.

2개의 시편의 접촉저항이 R_c 로 같다고 가정하면 총 저항값은,

$$R_{a'} = 2R_c + R_a \quad : \text{resistance of test piece(4 mm)}$$

$$R_{b'} = 2R_c + R_b \quad : \text{resistance of test piece(2 mm)}$$

그러므로,

$$R_{a'} - R_{b'} = R_a - R_b \quad (X_a > X_b) \quad (9-13)$$

(9-3)식 에서 저항은 전도도의 역수이므로

$$\begin{aligned} R_a - R_b &= \frac{\Delta X_a}{K_a A} - \frac{\Delta X_b}{K_b A} \\ &= \frac{1}{K_x} \frac{(\Delta X_a - \Delta X_b)}{A} \end{aligned} \quad (9-14)$$

$$\text{where, } K_x = K_b = K_a$$

접촉면의 두께를 무시하면,

$$\begin{aligned} R_{a'} - R_{b'} &= \frac{\Delta X_a}{K_{a'} A} - \frac{\Delta X_b}{K_{b'} A} \\ &= \frac{1}{A} \left(\frac{\Delta X_a}{K_{a'}} - \frac{\Delta X_b}{K_{b'}} \right) \end{aligned} \quad (9-15)$$

where, $K_{a'}$, $K_{b'}$: (접촉저항 + *test piece*)의 열전도도

(9-12)식으로부터

$$K_{a'} = \frac{\Delta T_R}{\Delta T_a} \frac{\Delta X_a}{\Delta X_R} K_R$$

$$K_{b'} = \frac{\Delta T_R}{\Delta T_b} \frac{\Delta X_b}{\Delta X_R} K_R \quad (9-16)$$

(9-13), (9-14), (9-15)식으로부터

$$\frac{1}{A} \left(\frac{\Delta X_a}{K_{a'}} - \frac{\Delta X_b}{K_{b'}} \right) = \frac{1}{K_x} \frac{(\Delta X_a - \Delta X_b)}{A} \quad (9-17)$$

정리하면

$$K_x = \frac{(\Delta X_a - \Delta X_b)}{\left(\frac{\Delta X_a}{K_{a'}} - \frac{\Delta X_b}{K_{b'}} \right)} \quad (9-18)$$

$$\begin{aligned} \text{where, } \Delta X_a &= 4 \text{ mm} \\ \Delta X_b &= 2 \text{ mm} \\ \Delta X_R &= 30 \text{ mm} \\ K_R &= 320 \text{ Kcal / m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

결과적으로 (9-18)식으로부터 시편의 열전도도를 구할 수 있다.

여기서 ΔT_a , ΔT_b 는 T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 , T_8 을 측정하여 그래프에 도시해서 얻고 ΔT_R 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta T_R = \frac{\Delta T_{1,2} + \Delta T_{2,3} + \Delta T_{3,4} + \Delta T_{7,8} + \Delta T_{8,9} + \Delta T_{9,10}}{6} \quad (9-19)$$

3. 실험 장치



Fig. 9-3. Thermal Conductivity Measuring Apparatus.

4. 실험 준비물

- (1) Thermal Conductivity Measuring Apparatus
- (2) Standard Piece
- (3) Test Piece

5. 실험 방법

- (1) 열전도도를 측정할 시편의 두께를 잰다.
- (2) 시편을 설치하고 유량계를 통하여 냉각수를 일정량 하부로 통과시킨다.
- (3) 전원을 넣은 후 온도와 냉각수량을 조절한다.(∵ 정상상태를 만들기 위해)
- (4) 온도 지시계의 전환 스위치를 바꾸면서 온도를 읽고, 온도를 바꿔가며 실험한다.
- (5) 동일실험을 3회 하여 평균치를 사용한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 시편의 열전도도를 구하고 열전도도가 무엇을 의미하는지 써라.

- (2) 효과적인 열전달을 위한 방안에는 어떠한 것들이 있는지 알아본다.

- (3) 이 실험에서 시편과 기준기동사이의 접촉저항이 주는 영향은 무엇인지 알아본다.

- (4) 이 실험에서 생길 수 있는 오차를 열거하고, 그것을 최소화하기 위한 방법을 열거하라.



Simple Distillation

1. 목적

단증류 실험장치를 사용하여 장치의 조작법과 이성분계의 단증류 실험을 행하여 유출액 조성을 시간의 변화에 따라 측정하여 회분조작으로서 단증류의 원리를 이해하고 실험결과와 Rayleigh 식에 따라 의해 계산한 계산값과 비교해 본다.

2. 이론

일정량의 혼합물을 증류기에 넣고, 열을 가해 비등시켜 발생하는 증기를 응축기로 냉각시켜 유출액을 얻는 증류방법을 단증류(simple distillation), 또는 미분증류(differential distillation)라 한다.

이 때 혼합물 중의 휘발성 물질이 증발함에 따라 증류기에 남아 있는 용액의 양과 조성은 계속 변화하는데 이론적으로는 이들 관계를 다음과 같이 구할수 있다.

단증류를 시작한 후의 어떤 순간에 증류기 내의 액량을 W [kg-mol], 저비점 성분의 몰분율을 x 라 하면 증류기 내에는 $(W)(x)$ 의 저비점 성분이 있게 된다. 이 때 액과 평형상태에 있는 증기 중의 저비점 성분의 몰분율을 y 라고 하자. dW 만큼 증류되었다고 하면 유출액 중의 저비점 성분의 양은 $(y)(dW)$ 이며, 증류기 내에 남은 액량은 $(W - dW)$ [kg-mol]이며, 이것의 몰분율은 $(x - dx)$ 가 되므로 증류기 내에 남은 저비점 성분의 양은 $(W - dW)(x - dx)$ [kg-mol]이 된다. 따라서 총괄 물질 수지식은 (10-1)식과 같다.

$$(W)(x) = (y)(dW) + (W - dW)(x - dx) \quad (10-1)$$

(10-1)식에서 2차 미분항을 무시하고 정리하면 (10-2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dW}{W} = \frac{dx}{y - x} \quad (10-2)$$

최초의 증발기내 액량 W_1 으로부터 단증류 후의 증발기내 액량 W_2 , 이에 따른 액의 조성변화 x_1 으로부터 x_2 까지 적분하면 (10-3)식과 같다.

$$\int_{W_2}^{W_1} \frac{dW}{W} = \ln \frac{W_1}{W_2} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{y-x} \quad (10-3)$$

(10-3)식을 Rayleigh 식이라 한다.

여기서 원료에 대한 유출액량의 비를 유출률 β 라 하면 (10-4)식과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (10-4)$$

따라서, (10-3)식을 (10-5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{1}{1-\beta} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{y-x} \quad (10-5)$$

여기서, y 는 플라스크 내에서 증기가 조금도 분축을 일으키지 않는다고 생각하면 x 와 평형한 증기 조성에 있으므로 우변의 적분항은 x - y 곡선이 알려져 있으면 도식 적분에 의해서 다음과 같이 계산된다.

먼저 2성분계의 평형곡선을 그리고 이것으로 x 와 $1/(y-x)$ 의 관계를 그린다. 그 다음 $1/(y-x)$ 곡선과 x 축과의 사이에 면적을 구해 x 에 대항하는 $\int \frac{dx}{(y-x)}$ 의 값을 구한다.

$$s = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{y-x} = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{y-x} - \int_{x_0}^{x_2} \frac{dx}{y-x} = I_1 - I_2 \quad (10-6)$$

이들에서 x 대 $\int \frac{dx}{(y-x)}$ 의 선도를 그리고, 이들의 모양은 Fig. 10-2에 표시하였다.

(10-3)식 및 (10-6)식에 의해 W_1 , x_1 , x_2 가 구해지면 (10-7)식으로부터 W_2 를 구할 수 있다.

$$\ln W_2 = \ln W_1 - I_1 + I_2 \quad (10-7)$$

또한 W_1 , x_2 , W_2 가 구해지면 (10-8)식에서 I_2 가 구해진다.

$$I_2 = -\ln(W_1/W_2) + I_1 \quad (10-8)$$

여기서, I_2 를 구해 x 대 I 곡선에 의해 x_2 가 결정된다.

다음에 유출량을 $D[\text{kg}]$, 유출액의 평균조성을 $x_{Dav}[\text{wt}\%]$ 라 하면 물질수지식은 (10-9)식과 같이 된다.

$$W_1 - W_2 = D \quad (10-9)$$

$$W_1 x_1 - W_2 x_2 = D x_{Dav} \quad (10-10)$$

(10-9)식과 (10-10)식으로 부터 평균조성은 (10-11)식과 같이 된다.

$$x_{Dav} = (W_1 x_1 - W_2 x_2) / (W_1 - W_2) \quad (10-11)$$

그리고 Raoult's law가 성립하는 2성분계, 즉 (10-12)식이 성립하는 계라면 (10-12)식을 (10-5)식에 대입하여 적분하면 (10-13)식과 같이 된다.

$$y = \frac{ax}{1 + (a-1)x} \quad (10-12)$$

$$\ln \frac{W_1}{W_2} = \ln \frac{1}{1-\beta} = \frac{1}{a-1} \left[\ln \frac{x_1(1-x_2)}{x_2(1-x_1)} \right] + a \ln \frac{1-x_2}{1-x_1} \quad (10-13)$$

비휘발도 a 와 유출률과의 관계는 (10-14)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{\ln \frac{x_1}{(1-\beta)x_2}}{\ln \frac{1-x_1}{(1-\beta)(1-x_2)}} \quad (10-14)$$

x - y 곡선을 알면 (10-5), (10-13)식에서 β , x_1 , x_2 의 관계가 실측되면 (10-14)식에 의해 임의의 x 에 대해서는 a 를 구할 수 있다.

3. 실험 장치

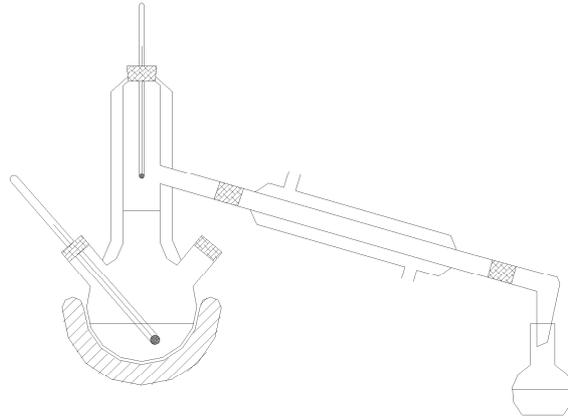


Fig. 10-3. Simple Distillation App.

4. 실험 준비물

- (1) 증류 플라스크 1l
- (2) 가열기(Heating mantle)
- (3) 리비냉각기
- (4) 삼각 플라스크(500 ml)
- (5) Adapter
- (6) 온도계(100℃)
- (7) 비등석
- (8) 메스 실린더
- (9) 비중병 혹은 굴절계
- (10) 물과 메탄올
- (11) 슬라이 닥스(1 kw)

5. 실험 방법

Exp. 1. 일정농도에서 시간변화에 따른 단증류 실험.

- (1) 50 wt% 메탄올 수용액을 조제한 다음 600 cc 를 건조한 증류 플라스크에 넣고, 무게 를 측정하여 수용액의 밀도를 구한다.
- (2) 단증류 실험장치를 조립하고 메탄올 수용액과 비등석을 투입한다.
- (3) 냉각기에 냉각수를 흐르게 한다.
- (4) 가열기 전원을 넣어 가열을 시작한다.
- (5) 메스 실린더로 응축액을 수집하면서 일정시간 간격으로 온도와 유출량을 측정한다.
- (6) 원액의 절반 정도가 증발되어 응축액으로 나왔을 때 가열을 중지한다.
- (7) 증류 플라스크에 남아있는 용액의 온도가 상온에 도달할 때까지 방치한 후 잔액과 유출액의 양과농도를 측정한다. (메탄올의 농도는 각각의 밀도를 측정 하거나 굴절률을 측정하여 부록에서 구한다.)
- (8) 밀도와 조성관계로부터 잔류액과 응축액의 농도를 구하고 결과를 표로 작성 한다.
- (9) 잔류액의 양과 조성으로 부터 이론값을 구하고 실험에서 얻은 측정값을 비교 한다.

Exp. 2. 농도 변화에 따른 단증류 실험.

- (1) 30, 40, 50, 60, 70, 80 wt% 메탄올 수용액을 조제한다.
- (2) 조제한 메탄올 수용액 600ml 를 취하여 천칭으로 질량을 측정한 후 건조한 증류 플라스크에 넣은 다음 비등석을 넣는다.
- (3) 단증류 실험장치를 조립한다.
- (4) 응축기에 충분한 냉각수를 통과시키고 건조된 메스 실린더를 유출물을 받도록 설치한다.
- (5) Mantle heater 에 연결된 전압조절기를 50 V 정도에 조절하면서 증류를 시작한다.
- (6) 실험은 증류 플라스크 내의 액이 약 절반정도 유출시킨 후 증류를 멈추고 상온에 도달할 때까지 방치한 후 잔류액과 유출액의 무게를 측정한다.
- (7) 각 액의 밀도를 (30℃에서 측정하는 것이 좋다.) 측정해서 부록에 나타낸 조성대 밀도표를 사용하여 밀도를 구한다.

6. 결과값의 고찰

- (1) 단증류의 원리와 응용면에 대하여 설명하시오.

- (2) 식 (10-13) 을 유도하여라.

- (3) 유출시간과 온도와의 관계를 그래프에 도시하여라.

- (4) 유출시간과 유출량의 관계를 그래프에 도시하여라.

- (5) 실험치와 Rayleigh 식에서 계산한 값과 비교하여라.

- (6) 물질수지 결과를 설명하여라.

- (7) 농도측정법을 비교하여라.

단국대학교 화학공학과 실험 · 실습
안전관리 지침

2017. 03.

단국대학교 화학공학과

목 적

본 실험실습 안전관리 지침은 화학물질과 다양한 실습도구의 안전한 활용에 관한 이해를 도모하여, 화학공학 실험실습의 완성도를 높이고 그에 따른 교과목 학습목표에 부합하는 학습성과를 거두기 위해 마련함.

목 차

1. 실험실 안전의 원칙

- 1.1 안전한 실험
- 1.2 다른 사람의 안전에 대한 고려
- 1.3 실험과 관련된 위험성에 대한 이해
- 1.4 사고시 행동요령

2. 화공약품의 취급안전

- 2.1. 화공약품의 취급과 사용
- 2.2 화공약품의 성상별 안전조치

3. 유해 위험물질의 안전대책

- 3.1 폭발성 물질
- 3.2 발화성 물질
- 3.3 산화성 물질
- 3.4 인화성 액체
- 3.5 독성물질의 누출방지 대책

4. 실험기구 및 장치의 취급안전

- 4.1 실험기구

5. 실험실 폐기물의 처리

- 5.1 수집 운반상의 일반적 주의
- 5.2 처리상의 일반적 기준

6. 기계·물리실험의 안전

- 6.1 기계·물리실험실에서 일반적인 주의사항
- 6.2 기계·기구 사용작업

7. 위험장비 및 장치사용 작업

- 7.1 가스용기
- 7.2 고온로
- 7.3 일반적인 전기안전 작업요령

8. 사고시 응급조치

- 8.1 호흡정지
- 8.2 심한 출혈
- 8.3 화상
- 8.4 화학약품에 의한 화상
- 8.5 외상

1. 실험실 안전의 원칙

1.1 안전한 실험

- (1) 위험성을 가진 작업이 있을 경우 반드시 보안경을 착용하고 추가적으로 적절한 보호구를 착용한다.
- (2) 위험하거나 독성이 있는 물질 또는 휘발성이 있는 화학약품 등은 후드 내에서 사용한다.
- (3) 금연 등 준수사항을 지키고 모든 위험물 용기에는 위험성에 관한 표지를 부착하여 안전하게 사용할 수 있도록 하여야 한다.

1.2 다른 사람의 안전에 대한 고려

- (1) 주위 사람들의 안전에 대해서도 고려하여야 한다.
- (2) 불안정한 행동을 하는 사람이 있을 경우 안전한 행동을 하도록 주지시켜야 한다.
- (3) 동료에게 실험을 돕도록 할 경우에는 필요한 보호구를 착용시켜 실험 하도록 한다.
- (4) 화재나 사고시 주위사람에게 알린다.

1.3 실험과 관련된 위험성에 대한 이해

- (1) 예방은 안전에서 가장 중요한 요소이므로 어떠한 실험을 계획하거나, 새로운 장비의 사용 및 화학약품을 다루기 전에 작업에 관계된 위험성과 안전조치에 대하여 알고 있어야 한다.
- (2) 작업에 대한 위험과 안전조치에 대한 정보를 공개하여 실험실내 모든 사람이 이용할 수 있도록 한다.

1.4 사고시 행동요령

- (1) 사고가 발생하였을 때에는 정확하고 빠르게 대응하여야 한다.
- (2) 실험실내 존치물, 복도 비상 샤워기, 세안장치, 소화전, 소화기 등 안전장비 및 비상구에 대하여 잘 알고 있어야 하며 이러한 안전장비 및 비상구는 항상 사용가능한 상태로 유지하여야 한다.

- (3) 사고가 발생하면 다음 각 호와 같이 행동하도록 한다.
 - (가) 신속히 인접부근의 사람들에게 알리고 관련 부서에 도움을 요청하도록 한다. (교내 2133)
 - (나) 가능한 한 화재나 사고를 초기에 신속히 진압한다.
 - (다) 초기진압이 어려운 경우에는 진압을 포기하고 대피하도록 한다.
 - (라) 건물에서 피신한다.
 - (마) 소방서, 경찰서, 병원 등에 긴급전화를 하여 도움을 요청한다.
 - (바) 응급요원에게 지금까지의 진행상황에 대하여 상세히 알리도록 한다.

2. 화공약품의 취급 안전

2.1. 화공약품의 취급과 사용

- (1) 사용한 물질의 성상, 특히 화재, 폭발 중독의 위험성을 잘 조사 연구한 후가 아니면 위험한 물질을 취급해서는 안 된다.
- (2) 위험한 물질을 사용할 때는 가능한 한 소량을 사용하고, 또한 미지의 물질에 대해서는 예비시험을 할 필요가 있다.
- (3) 위험한 물질을 사용하기 전에 재해 방호수단을 미리 생각하여, 만전의 대비를 하여야 한다.
- (4) 화재 폭발의 위험이 있을 때는 방호면, 내열 보호복, 소화기 등을, 중독의 염려가 있을 때는 장갑, 방독면, 방독복 등을 구비 또는 착용하여야 한다.
- (5) 유독한 약품 및 이것을 함유하고 있는 폐기물의 처리는 수질오염, 대기 오염을 일으키지 않도록 배려하여야 한다.

2.2 화공약품의 성상별 안전조치

- (1) 독성
 - (가) 실험자는 자신이 사용하거나 근처 다른 사람이 사용하는 약품의 독성에 대하여 알고 있어야 한다.
 - (나) 독성물질을 취급할 때는 체내에 들어가는 것을 막는 조치를 취해야 한다.
 - (다) 밀폐된 지역에서 많은 양을 사용해서는 안 되며 항상 후드 내에

서만 사용한다.

(2) 산과 염기물

- (가) 항상 물에 산을 가하면서 희석하여야 하며, 반대의 방법은 엄금한다.
- (나) 희석된 산, 염기를 쓰도록 한다.
- (다) 강산과 강염기는 공기 중 수분과 반응하여 치명적 증기를 생성시키므로 사용하지 않을 때에는 뚜껑을 닫아 놓는다.
- (라) 산이나 염기가 눈이나 피부에 묻었을 때 즉각 섭씨 15도 정도의 물로 씻어내고 도움을 요청하도록 한다.
- (마) 불화수소는 가스 및 용액이 맹독성을 나타내며 화상과 같은 즉각적인 증상이 없이 피부에 흡수되므로 취급에 주의를 요한다,
- (바) 과염소산은 강산의 특성을 띠며 유기화물, 무기화물 모두와 폭발성 물질을 생성하며, 가열, 화기와 접촉, 충격, 마찰에 의해 저절로 폭발하므로 특히 주의해야 한다.

(3) 산화제

- (가) 강산화제는 매우 적은 양으로 강렬한 폭발을 일으킬 수 있으므로 방호복, 가죽장갑, 안면보호대 같은 보호구를 착용하고 다뤄야 한다.
- (나) 많은 산화제를 사용하고자 할 경우 폭발방지용 방벽 등이 포함된 특별계획을 수립해야 한다.

(4) 금속분말

- (가) 초미세한 금속분진들은 폐, 호흡기 질환 등을 일으킬 수 있으므로 미세분말 작업 시 올바른 호흡기 보호대책이 강구되어야 한다.
- (나) 실험실 오염을 방지하기 위해 가능한 한 후드에서 분말을 취급한다.
- (다) 많은 미세 분말들은 자연발화성이며 공기에 노출되었을 때 폭발하기도 하므로 특별히 주의 하여야 한다.
- (라) 석면섬유와 유사결정들은 피부에 묻지 않고 흡입하지 않도록 조

심스럽게 다뤄야 한다.

3. 유해 위험물질의 안전대책

3.1 폭발성 물질

- (1) 잠재적 위험성이 큰 자기 반응성 물질은 사전에 충분한 시험평가를 실시하고 그 성질에 따른 엄격한 안전관리가 이루어져야 한다.
- (2) 화염, 불꽃 등 점화원의 접근을 차단하고 가열, 충격, 타격, 마찰 등을 피한다.
- (3) 직사광선 차단, 습도에 주의하고 통풍이 양호한 찬 곳에 저장한다.
- (4) 강산화제, 강산류, 기타물질이 혼입되지 않도록 한다.
- (5) 가급적 적은 양으로 나누어 저장하고 용기의 파손 및 위험물의 누출을 방지한다.
- (6) 화약류의 기폭제 원료로 사용되는 미세한 분말상태의 것은 정전기에 의 해서도 폭발의 우려가 있으므로 완전한 접지 등 철저한 안전대책을 강구하고 전기기구는 방폭 조치를 한다.
- (7) 폭발현상으로 나타나는 위험물이기 때문에 도난방지 등의 보안에도 주의하지 않으면 안 된다.
- (8) 종류를 달리하는 위험물과는 동일한 저장소에 함께 저장하지 않도록 한다.

3.2 발화성 물질

- (1) 저장용기는 완전히 밀폐하여 공기와의 접촉을 방지하고 물, 수분, 물의 변형된 형태(눈, 얼음, 우박 등)의 침투 및 이의 접촉을 엄금하여야 한다.
- (2) 산화성 물질과 강산류와의 혼합을 막아야 한다.
- (3) 용기는 금속제의 견고한 것을 이용하고, 저장용기가 파손되거나 용기가 가열되지 않도록 한다.
- (4) 칼륨, 나트륨 및 알카리금속은 석유, 등유 등의 산소가 함유되지 않은 석유류에 저장하며, 보호액의 증발을 막고 보호액 중에 물이 들어가지 않도록 한다.

- (5) 종류를 달리하는 위험물과 동일한 저장소에 저장해서는 안 된다.
- (6) 저장 또는 취급 장소는 부식성 가스가 발생하는 장소, 습도가 높은 장소, 빗물이 침투되는 장소 및 습지대를 피한다.
- (7) 다른 위험물, 수용액, 합습물, 흡습성 물질, 수용성 위험물 또는 결정수를 가진 염류 등과의 저장을 피한다.
- (8) 알킬알루미늄, 알킬리튬 및 유기금속 화합물류는 화기를 엄금하고 용기 내 압력이 상승되지 않도록 한다.
- (9) 알킬알루미늄과 알킬리튬을 취급하는 설비는 불활성기체를 봉입할 수 있는 장치를 설치해야 한다.
- (10) 자연발화 위험성이 있는 물질은 불티, 불꽃 또는 고온체와의 접근을 막는다.

3.3 산화성 물질

- (1) 화기 및 분해를 촉진하는 물품을 엄금하고, 직사광선을 차단하며, 가열을 피하고 강환원제, 유기물질, 가연성 위험물과의 접촉을 피한다.
- (2) 염기 및 물과의 접촉을 피한다.
- (3) 용기는 내산성의 것을 사용하고 용기의 파손방지, 전도방지, 용기변형 방지에 주의한다.
- (4) 강산화성 고체와의 혼합, 접촉을 방지한다.
- (5) 종류를 달리하는 위험물과는 동일한 저장소 내에 저장하여서는 안 된다.

3.4 인화성 액체

- (1) 불꽃, 스파크, 고온체 등과의 접근 또는 과열을 피한다.
- (2) 용기는 완전밀폐해서 차가운 장소에 저장한다.
- (3) 취급시 증기의 발생이 있는 경우에는 가연성 증기가 낮은 곳에 체류하므로 충분한 통풍, 환기를 행한다.
- (4) 가연성 증기가 체류하는 장소에서는 스파크를 발생하는 기계기구 등을 사용하지 않으며, 전기설비는 방폭형의 것을 사용한다.
- (5) 위험물질의 유동이나 그로 인하여 정전기가 발생하는 경우에는 접지 등을 하여 정전기를 제거하도록 한다.
- (6) 유독한 증기를 발생하는 것은 특별히 주의하여야 한다.

3.5 독성물질의 누출방지 대책

- (1) 실험실 내에 독성물질의 저장 및 취급량을 최소화 한다.
- (2) 독성물질을 취급 저장하는 설비의 연결부분은 누출되지 아니하도록 밀착시키고 정기적으로 연결부분의 이상유무를 점검한다.
- (3) 독성물질의 폐기·처리하여야 하는 경우에는 냉각·분리·흡수·흡착·소각 등의 처리공정을 통하여 당해 독성물질이 외부로 방출되지 아니하도록 한다.
- (4) 독성물질의 취급설비의 이상운전으로 인하여 당해 독성물질이 외부로 방출될 때에는 저장·포집 또는 처리설비를 설치하여 완전하게 회수할 수 있도록 한다.
- (5) 독성물질을 취급하는 설비의 작동이 중지된 때에는 작업자가 쉽게 알 수 있도록 필요한 경보설비를 작업자로부터 가까운 장소에 설치한다.
- (6) 독성물질이 외부로 누출된 때에는 감지·경보할 수 있는 설비를 갖춘다.

4. 실험기구 및 장치의 취급안전

4.1 실험기구

- (1) 화학실험용 기구
 - (가) 비커류에 용매 등을 넣을 때는 크리이프 현상(액이 벽면을 따라 상승하여 외측으로 나오는 것) 및 증발에 의한 비산에 주의해야 한다.
 - (나) 플라스크류는 압력 및 변형에는 약하므로 직화에 의한 가열 및 감압 조작에 사용해서는 안 된다.
- (2) 실험장치
 - (가) 행하려는 화학실험은 어떠한 종류와 기계적 강도가 요구되는가를 예상한다.
 - (나) 사용으로 인하여 기계적 강도가 떨어지는 기구를 사용해야 할 때

는 보호, 보강, 방어 등 적절한 조치를 강구한다.

- (다) 유리관은 직접 사용하여, 클램프로 고정하지 말고 부드러운 고무 등으로 고정한다
- (라) 온도가 변화하면 기계적 강도가 변화하는 것에 유의하여야 한다.
- (마) 사용하는 약품에 따라 기계적 강도는 변화한다는 것에 유의한다.

(3) 부식의 점검

- (가) 기구의 내식성을 미리 알아둔다.
- (나) 부식성 환경에 기구를 놓지 않도록 한다.
- (다) 부식성의 환경을 만들지 않도록 주의한다.
- (라) 부식을 방지한다.
- (마) 부식 장소의 발견에 힘쓴다.

5. 실험실 폐기물의 처리

5.1 수집 운반상의 일반적 주의

- (1) 화학폐기물 수집 용기는 반드시 운반 및 용량 측정이 용이한 플라스틱 용기를 사용하여야 한다.
- (2) 수집용기 외부에는 부서명과 호실, 전화번호, 품명, 특성 및 주의사항 등을 기록한 특정폐기물 표지를 부착한다.
- (3) 화학 폐기물을 수집할 때는 폐산, 폐알카리, 폐유기용제(할로젠족, 비할로젠족) 폐유 등 종류별로 구분하여 수집하여야 하며, 절대로 하수구나 싱크대에 버려서는 안 된다.
- (4) 수집한 화학폐기물 용기는 직사광선을 피하고 통풍이 잘되는 곳을 폐기물 보관장소로 지정하여 보관하여야 하며 복도, 계단 등에 방치하여서는 안 된다.
- (5) 화학폐기물 취급 및 보관장소에는 금연, 화기취급엄금 표지와 폐기물 보관수칙을 부착한다.
- (6) 빈 시약병은 깨어지지 않도록 기존 상자에 넣어 폐기물 보관장소에 보관한다.
- (7) 수집·보관된 화학폐기물 용기는 폐액의 유출이나 약취가 발생되지 않도록 2중 마개를 닫는 등 필요한 조치를 하여야 한다.

- (8) 수집된 폐기물을 운반할 때는 손수레와 같은 안전한 운반구 등을 이용 하여 운반한다.

5.2 처리상의 일반적 기준

- (1) 폐액에 의하여 처리 중 유독가스의 발생, 발열, 폭발 등의 위험을 충분히 조사하고, 첨가하는 약제를 소량씩 넣는 등 주의하면서 처리해야 한다.
- (2) 약취가 나는 폐액, 유독가스를 발생하는 폐액 및 인화성이 강한 폐액은 누설되지 않도록 적당한 처리를 강구하여 조기에 처리한다.
- (3) 폭발성 물질을 함유하는 폐액은 보다 신중하게 취급하고 조기처리한다.
- (4) 간단한 제거제로는 처리가 어려운 폐액은 적당한 처리를 강구하고, 무 처리 상태로 방출되는 일이 없도록 주의한다.
- (5) 처리후의 폐수가 유해하게 될 경우가 있으므로 이들을 더욱 후처리할 필요가 있다.
- (6) 유해물질이 부착된 거름종이, 약봉지, 폐 활성탄 등은 적절한 처리를 한 후에 보관한다.

6. 기계 · 물리실험의 안전

6.1 기계 · 물리실험실에서의 일반적인 주의사항

- (1) 공작기계, 측정기기를 사용할 때에는 정해진 공구를 사용하여야 한다.
- (2) 실험 중에는 작업복을 착용하고 안전화를 신도록하며 슬리퍼나 샌들 등은 신지 않도록 한다.
- (3) 전기배선작업이 필요한 실험을 할 때에는 전선피복의 벗겨짐이나 공구 파손으로 인한 부상이나 감전의 우려가 있으므로 주의해야 한다.
- (4) 필요한 장소에서는 보호안경이나 보호구를 착용한다.
- (5) 자외선 조사장치를 취급하는 경우에 자외선은 살균효과가 있으며 강한 자외선을 직접 눈에 쬐이면 실명을 할 수도 있으므로 주의해야 한다.
- (6) X선 발생장치를 취급하는 경우에는 반드시 책임자(또는 지도교수)의

지시에 따르도록 하며 방사선 취급 안전사항을 준수한다.

- (7) 장기간의 실험을 하는 경우 전기, 급배수, 증기, 가스 등의 사용은 작업자가 없을 때에 정전, 단수, 기체의 누출 등의 사고가 발생할 수 있으므로 미연에 대비책을 세워놓아야 한다.
- (8) 실험실은 항상 정리·정돈되고 청결한 상태로 유지되어야 작업의 능력이 향상되고 안전 확보에 만전을 기할 수 있다.

6.2 기계·기구 사용작업

(1) 기계취급 일반수칙

- (가) 작업자는 그 작업에 적합한 복장을 하고 있어야 한다.
- (나) 장갑은 거치른 작업물을 만질 때 사용하고 기계 운전시 사용을 금해야 한다.
- (다) 기계의 이상 유무를 철저히 점검하고 고장중인 기계는 고장 사용 못 함 등의 표지를 붙여야 한다.
- (라) 기계가 운전되고 있는 상태에서는 기계 곁을 떠나지 않아야 한다.
- (마) 실험 중에 통행자에 의해 접촉될 가능성이 있는 운동부위는 덮개를 설치한다.
- (바) 기계는 항상 잘 손질되어 있어야 하며 청소 혹은 점검, 수리를 할 때 에는 필히 기계를 정지시키고 행하여야 한다.
- (사) 기계에 너무 자신을 갖고 방심하여 일하지 말고 원리원칙을 충분히 알고 나서 기계를 작동해야 한다.
- (아) 정전으로 인하여 기계작동이 중지되었을 때에는 반드시 스위치를 작동정지 위치로 전환하여야 한다.
- (자) 원칙적으로 구동중인 기계부분에 직접 접촉하는 것은 피하고, 작동중인 기계에 주유 하면 위험하므로 금해야 한다.
- (차) 공작물을 견고하게 물려서 작업 중 공작물이 이탈하는 사례가 있어서는 안 된다.
- (카) 길이가 긴 공작물은 지지대를 사용하고 타인의 접근을 막아야 한다.
- (타) 기계를 정지시킬 때 완전히 정지될 때까지는 손을 대지 말아야 하며 기계의 타력(여력)을 손이나 공구, 기타 물건으로 정지시키

려 하지 말아야 한다.

(파) 회전 물체의 방향 쪽에서는 작업을 금해야 한다.

(2) 기계작업 수칙

(가) 기계의 취급은 인가자에 한하여 실시하며 정지중 타인에 의해 구동되지 않도록 관계자 외 접촉금지 표지를 걸어 놓는다.

(나) 기계 가동 전에 기름 주입상태와 각종 레버를 점검한다.

(다) 기계 사용시 필요한 안전장치 및 보호구를 사용한다.

(라) 기계를 처음 가동할 시에는 저속으로 시운전한 후 작동한다.

(마) 기계 운전시 주위에 화기물질의 유무를 확인한다.

(바) 기계운전자는 타인과 잡담 및 흡연을 금지한다.

(사) 기계 운전시 절삭공구를 교체코자 할 때에는 반드시 회전을 정지시키고 한다.

(아) 기계에 이상이 발생하면, 즉시 스위치를 끈다.

(자) 작업 종료시에는 기계 상태를 점검한다.

(4) 공구취급 수칙

(가) 작업에 적절한 것을 용도에 맞추어 사용해야 한다.

(나) 사용 전에 점검하고 불안정한 것은 사용하지 말아야 한다.

(다) 신중히 취급하고 사용 중에 파손되면 즉시 교환하여야 한다.

(라) 공구는 일정한 장소에 두고 분실되지 않도록 유의하여야 한다.

(마) 공구는 던져서는 안되며 손으로 취급하여야 한다.

(바) 사용시 너무 무리한 힘을 가해서는 안 된다.

(사) 손이나 공구가 젖어 있을 때에는 잘 닦아낸 후 사용하여야 한다.

7. 위험장비 및 장치사용 작업

7.1 가스용기

(1) 가스용기는 사용할 때나 보관 중에 안전한 물체(벽이나 무거운 실험용책 상 등)에 가죽끈이나 체인으로 안전하게 고정시키며, 사용하지 않을 때에는 항상 뚜껑을 씌어 놓도록 한다.

- (2) 가스용기를 운반할 때에는 뚜껑을 씌워 안전한 손수레를 사용토록 한다.
- (3) 가스용기 옆에서는 화기를 사용하지 않는다.
- (4) 계측기나 연결부위는 산소가스와 혼합하여 폭발할 수도 있으므로 그리스나 윤활제를 바르지 않는다.
- (5) 가스를 사용하기 전에 시스템에 누출이 없음을 확인한다.
- (6) 용기는 정기적으로 규정된 검사를 받아야 한다.
- (7) 조정기를 연결하기 위해 어댑터는 쓰지 않으며, 각각 가스의 특성에 맞는 조정기를 사용하도록 한다. 그리고 모든 조정기는 정기적으로 검사를 받아야 한다.
- (8) 사용가스에 맞는 배관, 조정기 및 부속품을 사용한다. 수소의 경우 완전히 잠기지 않은 상태는 누출 또는 폭발의 원인이 된다.
- (9) 가스용기는 가열로 등과 같은 열기기 근처에 놓지 않도록 한다.
- (10) 산소와 가연성 가스는 분리하여 저장한다.

7.2 고온로

- (1) 고온로는 안쪽으로 뜨겁기 때문에 방열복과 내열장갑을 끼도록 한다.
- (2) 집계를 사용하도록 하고 보안경과 보안면을 착용하도록 한다.
- (3) 시편을 공기에 냉각시킬 때 고열 표시를 시편앞에 달아 놓는다.
- (4) 응급조치용 장비를 비치해 놓고 화상의 경우에는 화상시의 응급처치 절차를 따르도록 한다.

7.3 일반적인 전기안전 작업요령

- (1) 장비를 검사하기 전에 회로의 스위치를 끄거나 장비의 플러그를 뽑아서 전원을 끈다.
- (2) 스위치를 끌 때에는 가죽이나 면으로 된 절연성 장갑을 착용하고 오른손을 사용하며, 얼굴은 스위치함을 향하지 않게 하고 손잡이를 내린다.
- (3) 전기설비 작업을 할 때는 공구나 비품의 손잡이는 부도체로 된 것을 사용한다.
- (4) 전기장치의 충전부는 전기적 절연을 한다.
- (5) 전원에 연결된 회로배선은 임의로 변경하지 않는다.

- (6) 작업공간은 충분히 확보하고 항상 청결하게 유지한다.
- (7) 플러그를 전원에 연결한 채 회로변경 작업을 하지 않는다.
- (8) 회로가 확실하게 연결되어 있지 않으면 플러그를 꽂지 않는다.
- (9) 젖은 손이나 물건으로 회로에 접촉하면 안 된다.
- (10) 전기설비에 연결된 접지선의 접속을 확인한다.
- (11) 연결 코드선은 가능한 한 짧게 사용한다.
- (12) 전기설비 근처에서는 인화성 액체등을 사용하지 않는다.
- (13) 다중 콘센트는 가능한 한 사용하지 않도록 한다. 만일 추가콘센트가 필요하다면 전기담당 부서에 의뢰해서 설치해야 한다.
- (14) 배전반의 진입로와 스위치 앞에는 장애물이 없도록 하고 청결하게 유지해야 한다.

8. 사고시 응급조치

8.1 호흡정지

- (1) 환자가 의식을 잃고 호흡이 정지된 경우 즉시 인공호흡을 해야 한다.
- (2) 주변의 도움을 청하려고 시간을 낭비하지 말고 환자를 소생시키면서 도움을 청해야 한다.

8.2 심한 출혈

- (1) 심한 출혈은 상처부위를 패드나 천으로 눌러서 지혈시킨다.
- (2) 위급할 때는 의류를 잘라 사용토록 한다.
- (3) 충격을 피하기 위해서 상처부위를 감싸고 즉시 응급요원을 부르도록 한다.
- (4) 피가 흐르는 부위는 신체의 다른 부분보다 높게 하여 계속 누르고 있도록 한다.
- (5) 환자는 편안하게 누이도록 한다.
- (6) 지혈대는 쓰지 않도록 한다.

8.3 화상

- (1) 경미한 화상은 얼음이나 생수로 화상부위를 식힌다.

- (2) 옷에 불이 붙었을 때는 다음 각 호의 요령에 따른다.
- (가) 바닥에 누워 구르거나 근처에 소방담요가 있다면 화염을 덮어 싸도록 한다.
 - (나) 불을 끈 후에는 약품에 오염된 옷을 벗고 비상샤워기에서 샤워를 하도록 한다.
 - (다) 상처부위를 씻고 열을 없애기 위해서 얼마동안 수돗물에 상처부위를 담근다.
 - (라) 상처부위를 깨끗이 한 후 얼음주머니로 적시고 충격을 받지 않도록 감싼다.
 - (마) 사람을 향해 소화기를 사용하지 않도록 한다.

8.4 화학약품에 의한 화상

- (1) 화학약품이 묻거나 화상을 입었을 경우 즉각 물로 씻는다.
- (2) 약품에 의하여 오염된 모든 의류는 제거하고 접촉부위는 물로 씻어낸다.
- (3) 약품이 눈에 들어갔을 경우 15분 이상 흐르는 물에 깨끗이 씻고 즉각 도움을 청한다.
- (4) 몸에 약품이 묻었을 경우 15분 이상 수돗물에 씻어내고, 조금 묻은 경우에는 응급조치를 한 후 전문의의 진료를 받는다.
- (5) 위급한 경우 비상샤워, 수도 등을 이용하고 구급차를 부른다.
- (6) 약품이 몸에 얼질러진 경우 오염된 옷을 빨리 벗는다.
- (7) 보안경에 약품이 묻은 경우 시야가 묻은 부분은 완전히 세척하고 사용한다.

8.5 외상

외상 쇼크의 경우 재해의 성격이 분명하지 않다면 환자를 따뜻하게 하고 편안하게 눕힌 뒤 병원으로 이송시킨다.

본지침은 한국산업안전공단 KOSHA CODE
(G-7-1999실험실 안전지침)자료를 8조하여 작성되었음

이동현상실험 교안

발행: 2017년 3월 1일

개정/편집인: 김기덕, 김성호, 이용걸

발행처: 단국대학교 화학공학과

주소: (16982) 경기도 용인시 죽전로 152 단국대학교 화학공학과

본 교안은 단국대학교 화학공학과 실험실습 교재로만 활용됩니다.
