

제 1 장 유체의 기본성질

1.1 개요

- 수리학(hydraulics)은 유체흐름을 역학적으로 해석하는 학문의 한 분야로서, 물의 운동이나 또는 물과 물체 상호간에 작용하는 힘의 관계를 일반역학의 원리를 이용하여 수리시스템(hydraulic system) 설계에 적용

1.2 유체의 정의

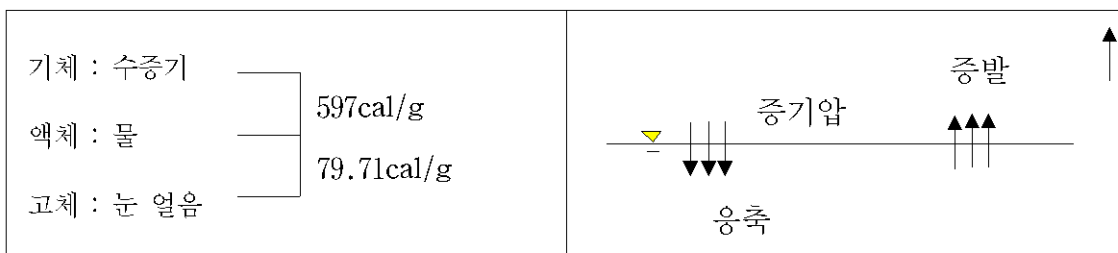
- 점성 유체 (Viscous Fluid) or 실제 유체(Real Fluid)
- 비점성 유체 (Inviscid Fluid)
- 압축성 유체 (Compressible Fluid)
- 비압축성 유체 (Incompressible Fluid)

- 해석의 편리를 위해 점성과 압축성을 완전히 무시하는 경우의 유체를 이상유체(ideal fluid) 혹은 완전유체(perfect fluid)라 하며, 반대로 점성과 비압축성을 가지는 유체를 실제유체(real fluid)

- 수리학에서 다루는 물은 압축성과 점성을 가지는 유체이나 압축성이 대단히 작으므로 무시하고 비압축성으로 가정하며, 점성은 무시할 수는 없으나 크기가 크지 않으므로 해석의 간편화를 위해 우선 무시하여 이상유체로 가정하여 물의 흐름에 대한 기본방정식을 정립한 후 점성 또는 압축성의 고려가 필요한 경우에는 기본방정식을 보정하는 절차로 해석

1.3 물의 세 가지 상태

- 물 분자는 산소와 수소원자로 구성(H_2O)되며 온도와 압력 등의 에너지의 크기에 따라 기체상태인 수증기와 액체상태인 물 및 고체상태의 얼음 등의 세 가지 상태(three phases)로 존재
- 물분자에 에너지를 증감시키면 한 상태에서 다른 상태로 바뀌게 되며 이러한 상태변화를 위해 소요되는 에너지를 잠재에너지(latent energy)라 하며 열이나 에너지의 형태를 취함



- 비열(specific heat) : 어떤 물질의 온도를 1°C 올리는데 필요한 열에너지(cal/g)
- 표준대기압하에서 물의 비열은 $1.0\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, 얼음의 비열은 $0.465\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$
- 증발(evaporation)과 응축(condensation)이 평형을 이룬 상태의 증기압을 포화증기압이라 하며, 포화증기압은 온도에 따라 상승하며 어떤 온도에 도달하면 포화증기압이 국지대기압과 같아지게 되어 증발현상이 급속도로 활발해져 물이 끓게 되는데 이 온도를 비등점이라 하며 평균해면 높이에서 약 100°C
- 흐르는 물에 국부적으로 부압(-압력)이 걸리게 되어 물의 압력이 포화증기압보다 낮아지면 물의 증발현상이 가속되어 공기방울(cavity, cavitation bubble)이 생기게 되는데 이러한 현상을 공동현상(cavitation)이라 하며, 공동현상이 발생하면 다량의 공기방울이 물의 흐름에 따라 고압부에 이르렀을 때 단시간에 찢그러져 터지면서 구조물에 충격을 가하게 되므로, 이를 방지하기 위해서는 물의 압력이 포화증기압보다 낮지 않도록 설계하는 것이 필요

1.4 자원과 단위

1.4.1 자원

- 독립된 기본량 3개
 - 물리학 → 질량(Mass), 길이(Length), 시간(Time)
 - 공학 → 힘(Force), 길이(Length), 시간(Time)
- MLT계 vs. FLT계
 - 상관 관계 : Newton 제 2 법칙 $F = ma$

$$[F] = [M][L T^{-2}] = [M L T^{-2}]$$

$$\begin{aligned} \text{예제) 밀도} &= \text{질량} / \text{체적} = [M]/[L^3] = [M L^{-3}] && : \text{MLT} \\ &= [F L^{-1} T^2][L^{-3}] = [F L^{-4} T^2] && : \text{FLT} \\ \text{압력} &= \text{힘} / \text{면적} = [F][L^{-2}] = [F L^{-2}] && : \text{FLT} \\ &= [M L T^{-2} L^{-2}] = [M L^{-1} T^{-2}] && : \text{MLT} \end{aligned}$$

1.4.2 단위

- 단위(unit)는 물리량의 크기를 나타내는 일정한 기준을 말하며 일반적으로 그 크기는 기준량을 설정하여 기준량과의 상대적 크기로 표현
- 단위계는 미터를 기초로 하는 SI단위계와 관습단위계로 대별
- 물리학에서는 질량을 중심으로 한 MLT계를 공학에서는 힘 또는 중량을 중심으로 한 FLT계를 주로 사용

- MLT 계 : 질량, 길이, 시간

$$g_0 \longrightarrow g, \text{ cm}, \text{ sec} : \text{CGS 단위계}$$

$$kg_0 \longrightarrow kg, \text{ m}, \text{ sec} : \text{SI 단위계}$$

- FLT 계 : 힘, 길이, 시간

$$kg_{\text{중}}, \text{ m}, \text{ sec} : \text{MKS 단위계}$$

- 각종 미터단위계의 힘의 기본단위와 상호 관계

- 절대 CGS 단위계의 힘의 기본단위는 $1 g_0$ 에 단위가속도(1cm/sec^2)가 작용하는 힘으로 정의되며 dyne의 단위를 사용

$$F = m a = 1g_0 \times 1\text{cm/sec}^2 = 1g_0\text{cm/sec}^2 \equiv 1\text{dyne}$$

- 절대 MKS 단위계인 SI 단위계의 힘의 기본단위는 $1 kg_0$ 에 단위가속도(1m/sec^2)가 작용하는 힘으로 정의되며 Newton(N)의 단위를 사용

$$F = m a = 1kg_0 \times 1\text{m/sec}^2 = 1kg_0 \cdot \text{m/sec}^2 \equiv 1\text{N}$$

- 공학 MKS 단위계의 힘의 기본단위 $kg_{\text{중}}$ 과 절대 CGS 단위계의 힘의 기본단위 dyne 및 절대 MKS 단위계인 SI 단위계의 힘의 기본단위인 N의 관계

$$1kg_{\text{중}} = 1,000g_0 \times 980\text{cm/sec}^2 = 0.98 \times 10^6 g_0\text{cm/sec}^2 = 0.98 \times 10^6 \text{dyne}$$

$$1kg_{\text{중}} = 1kg_0 \times 9.8\text{m/sec}^2 = 9.8kg_0 \cdot \text{m/sec}^2 = 9.8\text{N}$$

예제 1)

① Newton's 2nd Law of Motion

$$\text{Force} = \text{mass} \times \text{acceleration}$$

중력가속도(gravitational acceleration)

$$F = ma = mg$$

$$\text{지구에서는 } g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$\textcircled{2} 1 \text{ Kg}_{\text{重}} = 1 \text{ Kg}_0 \times 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ Kg}_0 \times 1 \text{ m/sec}^2$$

$$= 9.8 \text{ Kg}_0 \text{ m/sec}^2$$

$$= 1 \text{ Kg}_0 \text{ m/sec}^2$$

$$= 9.8 \text{ N (Newton)}$$

$$\text{참고로 } \text{dyne} = g_0 \text{ cm/sec}^2$$

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne}$$

예제 2) SI 주요 단위

$$\text{- 힘} \quad \text{Newton (N)} = \text{Kg}_0 \text{ m/sec}^2$$

$$\text{- 일, 에너지} \quad \text{Joule (J)} = \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{- 일률, 동력} \quad \text{Watt (W)} = \text{J/sec} = \text{N} \cdot \text{m/sec}$$

$$\text{- 압력, 응력} \quad \text{Pascal (Pa)} = \text{N/m}^2$$

예제 3) 단위환산

문제) $500 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 유량을 ft^3/sec 로 환산하라.

$$\begin{aligned} \frac{500 \text{ m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{3.283 \text{ ft}^3}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ sec}} &= 500 * 3.283 \frac{\text{ft}^3}{\text{sec}} \\ &= 294.06 \text{ ft}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

1.5 물의 밀도, 단위중량 및 비중

1) 밀도

- 밀도(density)란 단위체적당 질량
- 어떤 물체의 무게를 W , 질량을 m , 중력가속도를 g 라 하면 $W=mg$ 가 되며 그 체적을 V 라 할 때 밀도는 다음과 같이 산정

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

- 밀도의 ρ 의 차원은 $[MLT]$ 계로 표시할 수 있으며 단위는 g_0/cm^3 , kg_0/m^3 , lb_0/ft^3 또는 Slug/ft^3 ($1\text{Slug}=1\text{lb중}\cdot\text{sec}^2/\text{ft}$)인 절대단위를 가짐
- 표준대기압(1기압)하의 물의 밀도는 $4^\circ\text{C}(3.98^\circ\text{C})$ 에서 최대이며 그 값은 CGS 단위로 $1 \text{ g}_0/\text{cm}^3$ (공학 MKS 단위로 $102.04\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$)

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000 \text{ kg}/\text{m}^3}{9.8 \text{ m}/\text{sec}^2} = 102.04 \text{ kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$$

- 온도의 증가나 감소에 따라 그 값이 감소되며 압력이 증가할 때 그 값이 증가

2) 단위중량

- 단위중량(specific weight)이란 단위체적당 무게

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} \quad \therefore \gamma = \rho g$$

- 단위중량 γ 의 차원은 $[FLT]$ 계로 표시할 수 있으며 단위는 g/cm^3 , kg/m^3 , lb/ft^3 인 공학 단위를 가짐
- 순수한 물일 경우 표준대기압하에서 단위중량은 $1\text{g}/\text{cm}^3(=1\text{kg}/\ell=1,000\text{kg}/\text{m}^3)$ 또는 $62.4\text{lb}/\text{ft}^3$ 이며 온도의 변화에 따라 무게가 다소 변화하므로 공학적으로 취급할 때는 보통 연평균기온을 $15\sim 18^\circ\text{C}$ 로 하여 그 온도에서의 무게를 사용
- 해수는 염분농도에 따라 단위중량이 다르며 평균적으로 $1.025\text{g}/\text{cm}^3(=1025\text{kg}/\text{m}^3)$ 또는 $64.0\text{lb}/\text{ft}^3$

3) 비중

- 비중(specific gravity)이란 4℃에서의 물의 체적과 동일한 체적의 무게비
- 물의 밀도 혹은 단위중량에 대한 어떤 물체의 밀도 혹은 단위중량의 비로 표시

$$S = \frac{W}{W_w} = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w}$$

여기서 첨자 w는 물에 대한 것을 표시, 첨자가 없는 변수는 임의 물체를 표시

- 물의 비중(S_w)은 당연히 1.0이며 수리학에서 자주 쓰이는 수은의 비중(S_m)은 13.6

예제 4) 어떤 용기의 체적은 4 m^3 이고 무게는 200kg이다. 이 용기에 어떤 액체를 채웠더니 무게가 4,200kg이 되었다. 이 액체의 밀도는 ?

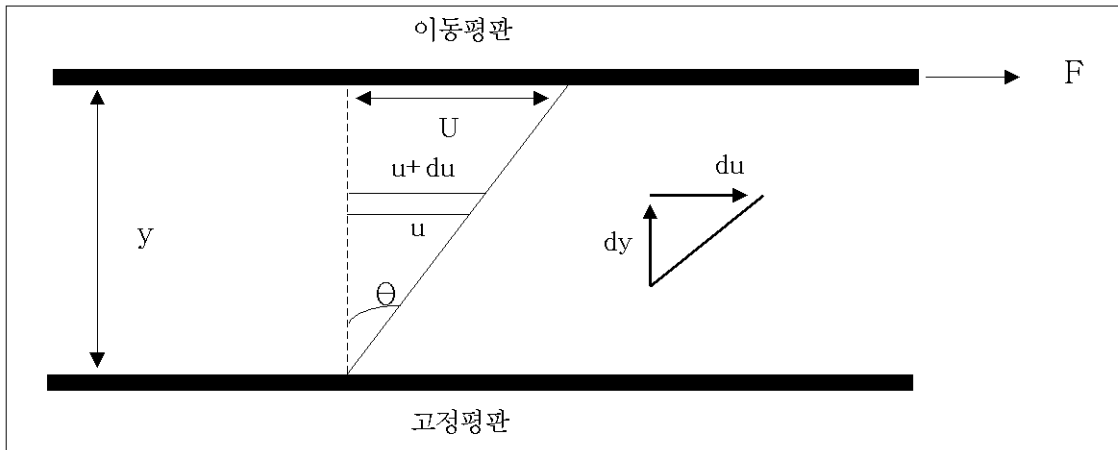
$$\gamma = \frac{4200 - 200}{4} = 1000 \text{ Kg/m}^3 \quad : \text{단위 중량}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000 \text{ Kg/m}^3}{9.8 \text{ m/sec}^2} = 102 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4 \quad : \text{밀도} \quad \text{====> 물}$$

1.6 물의 점성

- 점성(viscosity) : 물 분자가 운동을 할 때 물 분자간, 혹은 물분자와 고체 경계면 사이의 마찰력을 유발시키는 물의 성질
- 점성은 물분자의 응집력 및 물분자간의 상호작용으로 인해 생기며, 이로 인해 유체 내부에는 전단응력이 발생하게 된다.
- 운동하고 있는 물의 내부에 속도의 차이가 있는 상대적 운동이 발생하면 물 입자들이 이 상대속도에 저항하여 물의 흐름을 균일한 속도로 만들려는 내부 조절 작용을 일으키게 되는 이와 같은 작용을 생기게 하는 성질
- 점성은 물이 흐르고 있을 경우 어느 한 단면에서의 유속은 지점별로 차이가 발생하며 유속이 빠른 부분은 느린 부분을 전방으로 잡아당기는 작용을 하며, 유속이 느린 부분은 빠른 부분을 후방으로 잡아당기는 작용을 하게 되며 이와 같은 작용은 그 면을 따라서 내부마찰(internal friction) 저항 즉, 전단응력(shear stress)이 생기기 때문에 발생
- 물의 점성은 상대적인 운동에 의해 발생하는 것이므로 정지하고 있는 경우나 일정한 운동을 하고 있는 물의 내부에는 발생하지 않으며 이 경우에는 점성에 대한 고려가 불필요

- 상대적 운동을 발생시키기 위하여 간격 y 인 평행한 두 개의 평판 사이에 물을 채우고 하부 평판을 고정시킨 채 상부 평판에 일정한 힘(전단력) F 를 가하여 일정한 속도 U 로 움직인다고 가정하면, 상부 평판에 접해 있는 물의 속도는 평판의 이동속도 U 와 동일하고 고정된 하부 평판에서의 속도는 영이므로 유속은 직선분포



- 전단력 F 에 저항하는 물의 마찰력의 크기는 F 와 같고 방향은 반대가 되며 상부 평판의 면적을 A 라 하면 평판의 단위면적당 마찰력(F/A) 즉, 전단응력(shear stress) τ 는 물의 속도 경사에 비례

$$\tau = \frac{F}{A} \propto \frac{du}{dy}$$

- 상기 식의 전단응력과 속도경사간의 비례상수를 μ (mu)를 도입하면 다음과 같이 표시되며 이 식은 Newton의 마찰법칙(law of friction) 또는 점성법칙

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\mu : \text{점성 계수, dynamic viscosity})$$

- 상기 식의 μ 는 점성계수(viscosity)이며 전단응력 τ 와 속도경사 du/dy 관계는 원점을 지나는 직선관계가 성립함을 알 수 있으며 이 관계에 따르는 유체를 뉴턴 유체(Newtonian fluid)라 하고 그렇지 못한 유체는 비뉴턴 유체로 구분

- 점성계수 μ 의 차원은 다음과 같이 표시

$$[\mu] = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{[FL^{-2}]}{[T^{-1}]} = [FTL^{-2}] = [ML^{-1}T^{-1}]$$

- 점성계수 μ 의 단위로서 포아즈(poise) 혹은 센티 포아즈(centipoise)를 사용하기도 하는데 $\tau = 1 \text{ dyne/cm}^2$, $du/dy = 1 \text{ sec}^{-1}$ 때의 μ 로서 다음과 같이 표시

$$\begin{aligned} 1 \text{ poise} &= 1 \text{ dyne} \cdot \text{sec/cm}^2 = 0.00102 \text{ g} \cdot \text{sec/cm}^2 \\ &= 0.0102 \text{ kg} \cdot \text{sec/m}^2 = 1 \text{ g}_0/\text{sec} \cdot \text{cm} = 100 \text{ centipoise} \end{aligned}$$

- 공학의 적용에서는 점성계수 μ 대신 동점성계수(kinematic viscosity) ν 를 사용

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

- ν 의 단위로는 스토크(stoke) 혹은 센티 스토크(centistoke)를 사용

$$1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{sec} = 100^{-4} \text{ m}^2/\text{sec} = 100 \text{ centistoke}$$

- 일반적으로 유체의 점성계수는 온도에 따라 크게 변화하며 액체의 경우 점성은 액체 분자간의 응집력에 의한 것이므로 온도가 상승하면 응집력이 약해지므로 점성이 떨어져 점성계수가 작아지는 반면 기체의 경우 점성은 분자간의 충돌에 의한 충격력에 의한 것이므로 온도가 상승하면 분자간의 충돌이 더욱 활발해지므로 점성이 높아져서 점성계수가 커짐

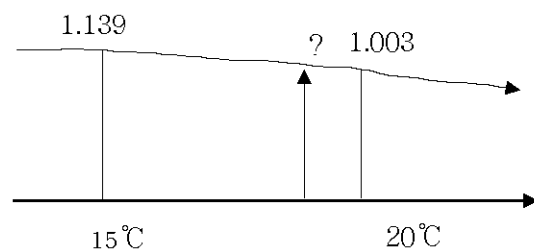
예제 5) 수온이 19℃일 때의 동점성 계수를 구하고 이를 stoke 단위로 환산하라. 이때, 동점성계수는 15℃일 때 1.139, 20℃일 때 1.003이다.

$$\nu = [1.139 + \frac{4}{5}(1.003 - 1.139)] \times 10^{-6}$$

$$= 1.030 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}} \cdot \frac{100^2 \text{ cm}^2}{\text{m}^2}$$

$$= 1.030 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$= 1.030 \times 10^{-2} \text{ stoke} = 1.030 \text{ centistoke}$$



1.7 물의 표면장력과 모세관 현상

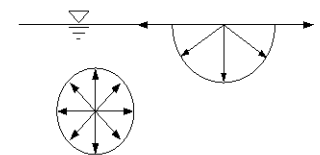
- 어떤 액체내에 서로 인접하고 있는 분자들은 서로 잡아당겨 엉키려는 힘을 가지고 있는데 이를 응집력(cohesion)이라 하며 액체가 고체표면에 부착하고 있는 경우와 같이 다른 종류의 분자들 사이에 작용하는 힘을 부착력(adhesion)

- 액체 내부의 경우 분자 사이에 모든 방향으로 동일한 인력인 응집력이 작용하여 평형상태를 유지하나, 기체와 접하고 있는 액체 표면의 경우 액체 내부의 분자간 인력에 비해 공기분자와의 인력이 너무 작아서 인력의 평형을 이루지 못하게 되므로 액체 표면에 있는 분자는

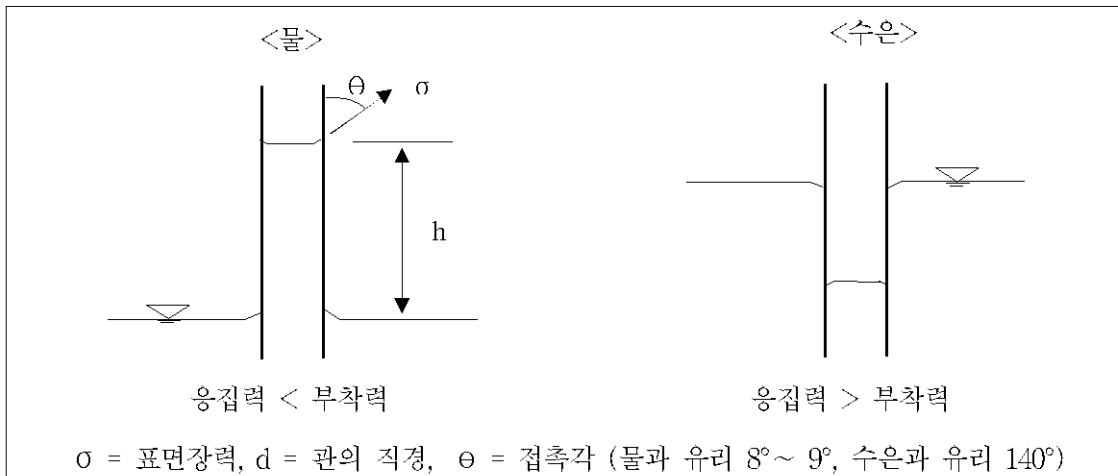
분자간의 인력 이외에 표면을 접선 방향으로 팽창시키려는 인장력과 더불어 평형을 유지

- 이와 같이 액체 표면의 수축경향에 대응하여 발생하는 인장력을 표면장력(surface tension)이라 하며 결국 액체의 표면은 완전히 탄성적인 막과 같은 성질을 가지게 되며, 가느다란 관내로 액체가 올라가거나 내려가는 현상 등은 이 표면장력 때문에 발생

- 일반적인 압력은 힘을 면적으로 나눈 F/A 이나 표면장력의 크기는 단위길이당 힘 F/L (dyne/cm)으로 표시하며 액체의 종류와 온도에 따라 변화하며 온도가 상승하면 분자간의 인력이 작아지므로 표면장력이 감소



- 응집력 vs. 부착력



- 가느다란 상부가 개방된 세관을 물에 세우면 물은 세관속 위로 올라가고 수은은 세관 아래로 내려가게 되며 이와 같은 현상을 모세관현상(capillary action)이라 하고 모세관현상은 액체와 고체벽 사이의 부착력과 액체간의 응집력의 상대적인 크기에 영향을 받음
- 모세관현상은 측정의 오차를 방지하기 위해서 통상 직경 1cm 이하의 가는 관을 사용

표면장력의 합 = 상승(하강)한 액체의 무게

$$(\sigma \pi d) \cdot \cos \theta = \left(\frac{\pi d^2}{4} h \right) \gamma$$

$$\therefore h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\gamma d}$$

여기서 σ 는 액체의 표면장력, γ 는 액체의 단위중량, θ 는 접촉각으로 물과 유리는 8~9°, 물과 깨끗한 유리 0°, 수은과 유리일 경우 140°, h 는 모세관 상승고 또는 하강고

예제 6) $d = 5\text{mm}$, 깨끗한 유리관 ($\theta = 0^\circ$) , 수온 20°C, 모세관 상승고 h 를 구하라

$$\Rightarrow \sigma_{20} = 71.32 \text{ dyne/cm}$$

$$\gamma_{20} = 0.998 \text{ g/cm}^3$$

$$1 \text{ g} = 980 \text{ g}_0 \text{ cm/sec}^2 = 980 \text{ dyne} \text{ 이므로}$$

$$\sigma_{20} = 71.32 \text{ dyne/cm} = 71.32 \text{ dyne/cm} \cdot \frac{\text{g}}{980 \text{ dyne}} = 0.0728 \text{ g/cm}$$

$$\therefore h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\gamma d} = \frac{4(0.0728)(\cos 0^\circ)}{0.998 \times 0.5} = 0.584 \text{ cm}$$

1.8 물의 압축성과 탄성

- 모든 유체는 압축하면 체적이 감소하며 에너지가 완전히 보존된다면 탄성에너지로 축적되어 있다가 압력을 제거하면 최초의 체적으로 팽창하게 되며 이와 같은 물의 성질을 탄성(elasticity)
- 정상적인 조건하에서는 물의 압축성은 대단히 작으므로 물을 비압축성유체로 가정하여 해석하나 수압관(penstock)과 같은 관수로내에서의 수격작용(water hammer)의 경우에는 압축성의 고려가 필요
- 유체의 압력과 체적변화율간의 관계를 표시하기 위해 체적탄성계수(bulk modulus of elasticity)를 사용

$$\Delta p = -E_b \frac{\Delta V}{V}$$

여기서 Δp 는 압력의 변화량, E_b 는 체적탄성계수, ΔV 는 체적의 변화량, V 는 초기체적

예제 7) 어떤 액체에 7 bar의 압력을 가했더니 체적이 0.035% 감소되었다. 이 액체의 체적 탄성계수를 구하라.

$$\Rightarrow 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\begin{aligned} 7 \text{ bar} &= 7 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 7 \times 10^5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{9.8 \text{ N}} \\ &= 7.14 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$E_b = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{-7.14 \times 10^4}{-0.035 \times 10^{-2}} = 204 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$$