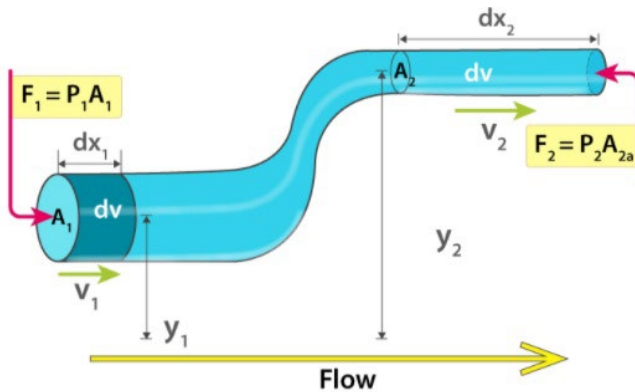


주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

1. 밸브와 오리피스

(1) 베르누이(Bernoulli)방정식의 이해

유체역학에 있어 베르누이 방정식의 이해는 유체의 흐름을 이해하는데 중요한 사항이다. 비압축성 유체가 파이프를 통하여 흐를 때, 유체 흐름은 다음 그림 1 과 같이 파이프의 유체 흐름 단면적, 흐름속도, 파이프의 위치 수두 등의 관계를 다음과 같이 표현한다.



여기에서 흐르는 유체는 에너지 보존의 법칙이 적용되고, 상의 변화가 없다고 가정하면, 흐르는 유체가 만든 힘은  $dW = (P_1 - P_2)dV$  가 되고, 유체 흐름에 따르는 운동에너지는  $dK = \frac{1}{2}(m_2v_2^2 - m_1v_1^2)$

그림 1. 파이프에서의 유체의 흐름

잠재적인 에너지인 위치에너지는  $dU = mg(y_2 - y_1) = \rho dVg(y_2 - y_1)$  가 되므로 전체 에너지 방정식은  $dW = dK + dU$  이므로

$$(P_1 - P_2)dV = \frac{1}{2}\rho dV(v_2^2 - v_1^2) + \rho dVg(y_2 - y_1)$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(y_2 - y_1)$$

이를 정리하면

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

이것이 베르누이 공식이다. 이를 연속 흐름으로 보아 정리하면  $\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$  가

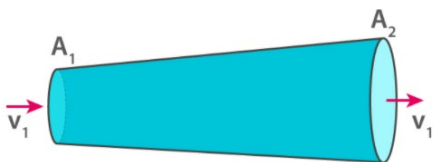


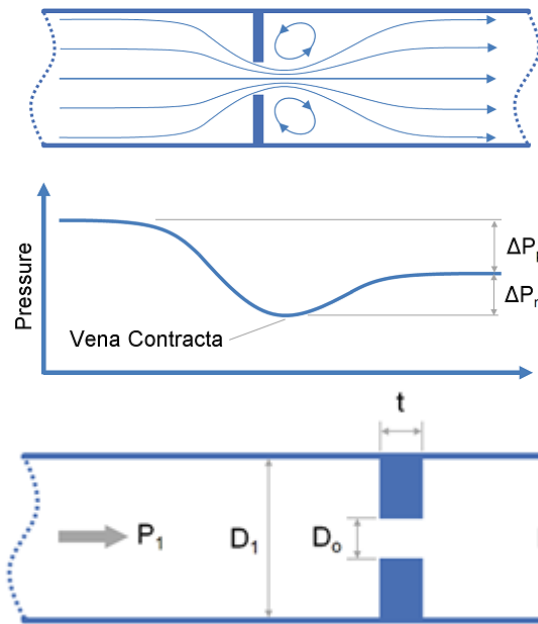
그림 2. 유체의 연속흐름

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

(2) 오리피스 이론

일반적으로 유체가 오리피스를 통하여 흐를 때는 교축된 오리피스 단면적 만큼 오리피스 출구에서의 유속이 빨라지고, 곧 이어 최대 유속이 되었다가 다시 유속이 정상화되는 과정을 거친다. 오리피스를 지나 가장 낮은 압력이 생기는 부분을 베나 콘트랙타(Vena Contracta)라고 하고, 이 부분의 압력이 포화 증기압보다 낮게 되면 캐비테이션이 발생한다. 원형 단면의 오리피스를 통과하는 유량은 아래와 같이 ISO 5167-1(2003)에서 정의된 공식은 다음과 같다.

$$q_m = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot y \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2 \cdot \sqrt{2\Delta P \cdot \rho_1} ; Q = C_d A_o y \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(1-\beta^4)}}$$



파이프 직경 대비 오리피스의 비율 :  $\beta$

그림 3. 오리피스 설명도

여기에서  $q_m, Q$  = 오리피스를 통과하는 질량유량(kg/s)

$C_d$  = 오리피스의 토출계수로써, 통상 0.6~0.85 사이에 있음.

$\beta$  = 파이프 직경 대비 오리피스의 비율 :  $\beta = D_o/D_1$

$D_o$  = 오리피스 내경, m

$\Delta P = P_1 - P_2$ , Pa

$y$  = 팽창계수(Expansibility factor),  $y = \frac{C_{d,c}}{C_{d,i}}$ , 첨자  $c$  = 압축성,  $i$  = 비압축성

팽창계수의 경우, 비압축성인 경우에는 1 이 되지만, 가스의 경우에는

AGA 3.1 기준  $y = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{kP_{s,1}}$ ,  $k = \frac{C_p}{C_v}$ , 비열비(isentropic exponent)

ISO 5167-2 기준  $y = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8)(1 - (\frac{P_{s,2}}{P_{s,1}})^{1/k})$ , 여기서 첨자 s 는 정압임

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

밸브의 경우, 밸브 포트는 밸브 입구보다 작은 사이즈로 설계되는데, 이는 밸브가 유체 흐름의 제어에 최종제어요소로서 역할을 하기 때문이다. 즉, 밸브는 하나의 가변형 오리피스 장치로 볼 수 있기에 뒤에 언급하고 있는 밸브의 유량계수, 유량계수와 유체 저항의 관계 및 토출계수와 유량계수-그리고 저항계수와와의 관계에까지 오리피스 이론은 밸브의 기본적인 이론으로 볼 수 있다.

**(3) 밸브 유량계수  $C_v$**

밸브는 배관 시스템에서 하나의 오리피스 기구로 볼 수 있다. 밸브 포트(Port)는 일반적으로 연결된 배관의 내경보다 작게 설계되는게 일반적이고, 밸브가 배관 시스템에 있어서 하나의 최종적 제어요소이기 때문에 포트를 통하여 일정량의 압력 손실과 유체 흐름의 에너지를 조절할 수 있다. 1940년대 미국의 Masoneilan 사는 밸브 포트에서의 유체저항의 정도에 대하여 밸브 유량계수  $C_v$ 를 도입하였다. 그 이론적 배경은 다음과 같다.

앞서 베르누이 공식에서 위치수두를 제외하면,

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

유체 흐름의 저항(난류로 인한)계수를  $k$  로 하고 압력변화에 따른 운동에너지를 구하면,

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} k \rho \left(\frac{Q}{A}\right)^2, \quad Q = \text{유량}, \quad A = \text{유로 단면적}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} k \rho \frac{Q^2}{A^2}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{Q^2} = \frac{k \rho}{2A^2}$$

$$\frac{\sqrt{P_1 - P_2}}{Q} = \sqrt{\frac{k \rho}{2A^2}}$$

유체 흐름의 저항을  $R$  로 표시하고, 비중을  $G_f$  로 하고 물을 기준으로 하면,

$$R = \frac{\sqrt{P_1 - P_2}}{Q} = \sqrt{\frac{k \rho}{2A^2}}$$

$$G_f = \frac{\rho}{\rho_{\text{water}}}$$

$$\rho_{\text{water}} G_f = \rho$$

이를 전개하면

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

여기에서 포트의 크기와 저항계수의 관계로 하나의 상수로 다음과 같이

$$C_v = \sqrt{\frac{2A^2}{k\rho_{water}}}$$

밸브의 유량계수  $C_v$ 로 정의하였다. 밸브의 유량  $Q$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G_f}}$$

여기서  $C_v$ 의 단위는 미국식이며, 밸브 간의 차압이  $\Delta P = 1psi$ 일 때 흐르는 유량을 *Gallon/min(GPM)*으로 표시한 값이다.

$$Q = K_v \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G_f}}$$

$K_v$ 는 국제(SI) 단위이며, 차압이 1bar 일 때 흐르는 유량을  $m^3/hour$ 로 표시한다.

$C_v$ 와  $K_v$ 의 관계는,  $C_v = 1.156 K_v$ ;  $K_v = 0.865 C_v$ 의 관계를 갖는다.

(4) 유량계수( $C_v$ )와 밸브의 유체흐름 저항계수 ( $K$ )의 관계

배관 시스템에 있어서 올바른 유체역학적 계산은 시스템의 효율적인 설계는 물론 안정적인 운전과 코스트 절감에 이르기까지 매우 중요한 과제 중 하나이다. 특히 유체의 흐름에 있어서 필수적으로 생길 수밖에 없는 각 시스템 구성 요소의 유체 저항을 표시하는 저항계수는 밸브의 유량계수와 함께 중요한 시스템 설계 파라미터가 된다. 이들 계수들의 관계는 유량계수가 유체 흐름의 저항체들이 허용하는 범위에서 얼마나 많이 유량을 보낼 수 있는가 와, 저항계수는 유체 흐름을 방해하는 저항체들이 얼마만큼의 흐름을 방해하고 있는가에 대한 것이다.

저항계수  $K$ 는 무차원이며 다음식으로 정의한다.

$$K = f \frac{L}{D}, \quad \text{여기서 } f = \text{Darcy 마찰계수}^1$$

$L$  = 파이프 길이(ft) ;  $D$  = 파이프 내경(ft)

유체가 흐를 때, 파이프내의 마찰로 인하여 생기는 수력학적 에너지 손실(ft)은,

$$h_L = K \frac{v^2}{2g}$$

여기서  $v$  = 평균 유체흐름 속도(ft/sec),  $g = 32.2ft/sec^2$

<sup>1</sup> 달시-바이스바하 방정식(Darcy-Weisbach Equation) : 일정한 길이의 파이프에서 유체 흐름에 따르는 마찰에 의한 수두손실( $h$ )과 유체 흐름의 평균 속도를 관련시키는 방정식  $h_L = f_D \frac{v^2 L}{2g d}$ 로, 패닝의 법칙 (Fanning's Law)의 경우  $h_L = f_F \frac{2v^2 L}{g d}$ 로 Darcy-Weisbach의 식 대비 4 배이다.

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

또한 수두손실을 압력단위(psi)로 변경하자면,

$$h_L = K \frac{v^2}{2g} \text{ 이고, 아울러 } h_L = \frac{144\Delta P}{\rho} \text{ 로 표시된다. 여기서 } \rho = \text{유체의 밀도} \left(\frac{lb}{ft^3}\right)$$

따라서  $K = \left(\frac{2g}{v^2}\right) h_L = (2g)(144) \left(\frac{\Delta P}{\rho v^2}\right)$  의 관계가 된다.

유량계수는

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\left(\frac{\rho_{fluid}}{\rho_{water}}\right)}}} \text{ 로 표시되므로}$$

유로의 단면적을  $ft^2$ 로 하면, 유량은

$$Q \frac{gal}{min} = \left(\frac{7.4805gal}{ft^3}\right) \left(\frac{60sec}{min}\right) (A ft^2) \left(v \frac{ft}{sec}\right) = 448.8Av \frac{gal}{min} \text{ 의 관계가 되며,}$$

$C_v$ 와 유량과의 관계에서

$$C_v^2 = \left[\frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\left(\frac{\rho_{fluid}}{\rho_{water}}\right)}}}\right]^2 = \left[\frac{(448.8Av)^2}{\Delta P}\right] \left(\frac{\rho_{fluid}}{\rho_{water}}\right) = \left[\frac{(448.8A)^2}{\rho_{water}}\right] \left(\frac{\rho v^2}{\Delta P}\right)$$

$C_v^2 \rightarrow (constant) \left(\frac{\text{Kinetic Energy of the Fluid}}{\text{Change in Hydraulic Energy of the Fluid}}\right)$  의 관계이다.

$$K = (2g)(144) \left(\frac{\Delta P}{\rho v^2}\right) \text{ 이므로}$$

$$\Delta P = \frac{K\rho v^2}{(2g)(144)}, \text{ 앞서의 } C_v \text{ 관계에서 } \Delta P = \left[\frac{(448.8A)^2}{\rho_{water}}\right] \left(\frac{\rho v^2}{C_v^2}\right) \text{ 이므로}$$

$$K = \frac{(2g)(144)(448.8)^2 A^2}{(62.37)C_v^2} \text{ 가 된다.}$$

유로 단면적  $A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{12}\right)^2$ ,  $d = \text{배관내경}(inch)$ 이므로

$$K = \frac{(2)(32.2)(144)(448.8)^2 \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{12}\right)^2\right]^2}{(62.37)C_v^2} = 890.9 \frac{d^4}{C_v^2} \text{ 의 관계이다.}$$

(5) 유량계수( $C_v$ )와 밸브의 토출계수( $C_d$ )의 관계

일반적으로 유량계수는 밸브의 수력학적 성능과 관계되는 계수이지만, 같은 오리피스 개념의 안전-릴리프밸브에 적용하는 토출계수도 수력학적 성능을 특징 지우는 중요한 계수이다.

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

유량계수와 토출계수는 수치적으로 같지는 않지만, 통상적으로 토출계수는 0.61~0.65사이이고, 보수적으로 0.6을 일반적으로 사용하고 있기에, 이들 두 계수의 관계를 알게 되면, 일반 밸브의 개략적인 유량계수를 밸브 포트의 유로 단면적, 즉 포트 직경으로 얼마만큼의 유량계수인지를 가늠해 볼 수 있다.

이들의 관계는 ISA-75.01 “Flow Equations for Sizing Control Valves(IEC 60534-2-1 equivalent)” 와 API Standard 520 Part 1, “Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries” 에서 유량계수( $C_v$ )와 밸브 토출계수( $C_d$ ) 가 어떤 관계에 있는가를 고찰해 본다.

ISA-75.01 에서 쇼크드 난류 흐름이 아닐 경우, 유량계수  $C_v$  는

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{dP}} \quad ; \quad C_v = Q \sqrt{\frac{SG}{dP}}$$

여기에서

Q = 체적유량(gpm, m<sup>3</sup>/hr, or lpm)

dP = 밸브 입출구간 차압(psi, kPa, or bar)

$\rho_1$  = 유체의 밀도 (lb/ft<sup>3</sup> or kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_0$  = 물의 밀도(lb/ft<sup>3</sup> or kg/m<sup>3</sup>)

SG =  $\rho_1 / \rho_0$  = 유체의 비중량(dimensionless)

$N_1$  = 차원 상수(for Q & dP)( $N_1 = 1.0$  for units of gpm & psi)

API 520 Standard, Equation 28 에서 안전-릴리프 밸브의 요구되는 유효 오리피스(포트) 단면적은

$$A = \frac{Q}{38K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{SG}{P_1 - P_2}}$$

여기에서

A = 필요 유효 오리피스 단면적(in<sup>2</sup>)

Q = 체적 유량(gpm)

SG = 유체의 비중량(dimensionless)

$P_1$  = 입구 릴리프 압력(psig)

$P_2$  = 릴리프 배압 (psig)

$K_d$  = 기준 토출계수(dimensionless) =  $C_d$  = (실제유량) / (이론 유량)

$K_w$  = 배압 교정계수(대기 방출이거나 입구압력보다 배압이 50%이하인 경우는 1)

$K_c$  = 립쳐 디스크가 설치된 경우, 교정계수 (설치 안된 경우 1)

$K_v$  = 점성에 따른 교정계수 (  $Re > 10^5$  인 경우 1)

38 = 차원에 따른 상수

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

립쳐 디스크가 없고, 배압이 입구 압력보다 50% 미만인 경우,  $K_d = C_d$  이므로 식은

$$A = \frac{Q}{38C_d} \sqrt{\frac{SG}{dP}} \quad ; \quad 38AC_d = Q \sqrt{\frac{SG}{dP}}$$

따라서  $Q \sqrt{\frac{SG}{dP}} = C_v$  이므로,  $C_v = 38AC_d$  가 된다.

같은 방법으로 압축성 가스(비열비가 ~1.4 내외)에 대하여 ISA-75.01.01(식 11)과 API 520 part 1 의 식 3 의 관계에서  $C_v = 27.66AC_d$  가 된다.

정리하면, 미국의 **Lbs-inch** 시스템인 경우,

비압축성 유체인 액체의 경우,  $C_v = 38AC_d$ , in  $A = inch^2$ , 또는  $C_v = 1550 \cdot 38 \cdot AC_d$ , in  $A = m^2$

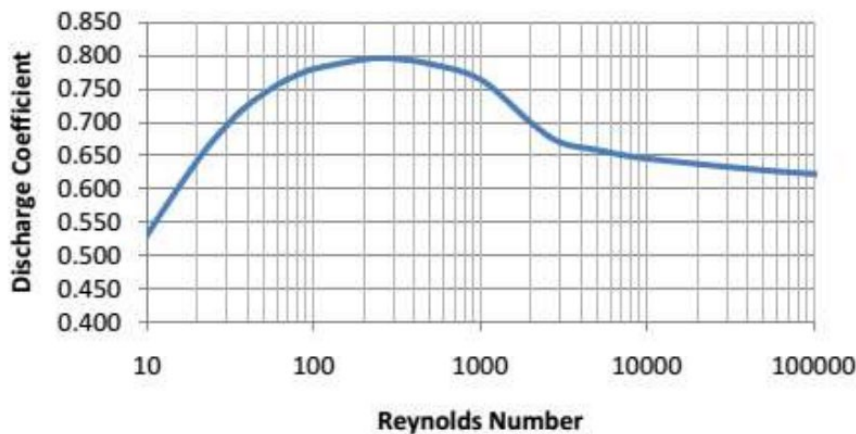
압축성 유체인 가스의 경우,  $C_v = 27.66AC_d$ , in  $d = inch$

여기서 A 는  $inch^2$  이므로 mm 로 환산하게 되면, 국제기준인 **MKS** 시스템인 경우,

비압축성 유체인 액체의 경우,  $C_v = 0.0589AC_d$ , in  $d = mm$

압축성 유체인 가스의 경우,  $C_v = 0.0429AC_d$ , in  $d = mm$

일반 글로브밸브와 같이 일정 직경의 오리피스 포트를 가지는 경우, 토출계수  $C_d$  값은 개략적으로 0.6 으로 한다. 아래는 레이놀즈 수에 따르는 단판(Single Plate) 오리피스의 토출계수를 보여준다.

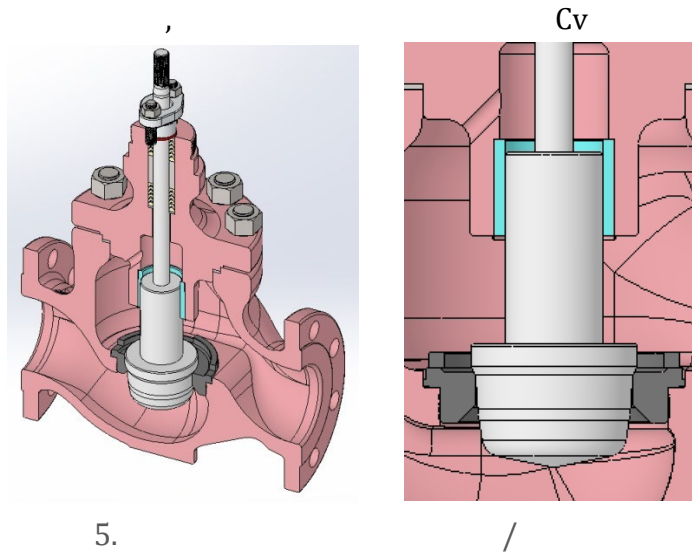


4. Relation of the Reynolds Number with discharge coefficient for orifice plates

<sup>2</sup> ) Daugherty, R. L. and Franzini, J. B. 1977. A text book of "Fluid Mechanics with Engineering Application". McGraw- Hill publication. pp. 395-396

주 제 : 밸브의 유량계수 간이 산출 방법 소개

2. (Cv) 가 ( )  
가 . , Cd=0.6  
Cd=0.95



Cd Cv

$$\frac{1}{Cv_{total}^2} = \frac{1}{Cv_{body}^2} + \frac{1}{Cv_{port}^2}$$

$$Cv_{body} = \left(\frac{Body\ Size, mm}{1000}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 38 \cdot Cd \cdot 1550, \quad Cd = 0.6 \cdot$$

$$Cv_{port} = \left(\frac{Port\ Size, mm}{1000}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 38 \cdot Cd \cdot 1550, \quad Cd = 1.0 \cdot$$