

## 플랜트 및 선박의 액체용 유량제어밸브 설계에 관한 연구(Ⅱ)

최순호\* · 배운영\* · 김태한\* · 한기남\* · 주경인\*

A Study on the Design of Liquid Flow Control Valves for the Plants and Ships(Ⅱ)

S. H. Choi · Y. Y. Bae · T. H. Kim · K. N. Han · K. I. Ju

**Key words** : Critical flow(임계유동), Piping geometry factor(배관형상계수), Pressure recovery factor(압력회복계수), Valve flow coefficient(밸브유량계수), Valve resistance factor(밸브저항계수), Valve reynold number(밸브이놀드수), Vena - contract(최소유동단면부)

**Abstract**

The preceding paper has devoted to the theory of the flow equations, the basic derivative procedure, the meaning of a valve flow coefficient  $C_v$ , the valve Reynolds  $R_{ev}$  and its application for liquid control valves, which applicable under the

condition of a non - critical flow and the case of piping geometry factor  $F_p = 1.0$ .

However there is no information on the effects of fittings, a critical flow and the flow resistance coefficient of a valve equivalent to that of pipe which is conveniently used in the piping design. Since the piping systems of plants or ships generally contain various fittings such as expanders and reducers due to different size between pipes and valves and there may occur a critical flow, that a mass flowrate is maintained to be constant, due to the pressure drop in a piping when a liquid is initially maintained at a saturated temperature or at nearby corresponding to upstream pressure, system designer should have a knowledge of the effect to flow due to fittings and the critical flow phenomenon of a liquid. This study is performed to inform system designers with the critical flow phenomenon of a liquid, a valve resistance coefficient, a valve geometry factor and their applications.

**기호설명**

$A$	: 유동단면적	$inch^2$	$C_v$	: 밸브유량계수	
			$D$	: 유동관로의 직경	$inch$
			$d$	: 밸브의 직경	$inch$

\* 정회원, 한국원자력연구소

$F_F$	: 임계압력비계수	무차원
$F_L$	: 압력회복계수	무차원
$F_p$	: 배관형상계수	무차원
$f$	: 관마찰손실계수	무차원
$G_f$	: 유동액체의 비중	무차원
$g$	: 중력가속도	ft/sec <sup>2</sup>
$H_{loss}$	: 수두손실	ft
$H_{vel}$	: 속도수두	ft
$K$	: 유동저항계수	무차원
$KB$	: 베르누이계수	무차원
$K_{valve}$	: 밸브의 유동저항계수	무차원
$L$	: 관로의 길이	ft
$p$	: 압력	psia
$p_c$	: 임계압력	psia
$p_v$	: 포화증기압	psia
$p_{vc}$	: 최소유동단면부의 압력	psia
$q$	: 체적유량	gpm
$V$	: 유동속도	ft/sec
$\Delta p$	: 차압	psi
$\gamma_w$	: 60°F 물의 비중	lb/ft <sup>3</sup>
하첨자 1	: 입구부	
하첨자 2	: 출구부	

### 1. 서 론

플랜트의 운전조건들이 변화하면 플랜트의 정상적인 가동을 위해서 이 운전조건의 변화에 대응하여 플랜트를 구성하고 있는 여러가지 계통내의 유체유동이 적절하게 제어되어야만 하는데, 전보<sup>1)</sup>에서는 이와 같은 목적으로 밸브를 설계하는 경우 설계실무에서 가장 널리 참조되고 있는 미국계기협회(Instrument of Society of America)에서 발간한 표준규격인 ISA S75.01에 대하여 중점적으로 검토하였다. 즉 ISA S75.01에서 제시하는 액체용 유량제어밸브의 유량방정식, 밸브유량계수(Valve Flow Coefficient), 및 밸브내에서의 유량특성(Flow Characteristic)을 결정하는 밸브레이놀드수(Valve Reynolds Number)와 이 무차원수에 의한 유동영역의 구분에 관하여 상세히 기술하였다. 그러나 전보에서 검토한 것은 밸브의 입출구부에 배관자재들(Fittings)이 설치되지 않은 경우,

즉 배관형상계수(Piping Geometry Factor)  $F_p = 1.0$ 인 경우와 밸브를 통과하는 유량이 밸브의 입출구부 사이에서 발생하는 압력강하(Pressure Drop)의 제곱근  $\sqrt{\Delta p}$  에 따라서 일정하게 증가하는 가장 단순한 경우에 대한 것으로, 특히 유동설계를 할 경우 편리하게 적용할 수 있는 배관의 유동저항계수(Flow Resistance Coefficient)와 같은 의미를 가지는 밸브의 유동저항계수를 산정하는 방법에 관해서는 언급하지 않았다. 또한 실제로 유동설계를 수행하면서 배관경과 밸브의 크기가 달라 확대관과 축소관을 밸브와 직렬로 연결해야 하는 경우에는 밸브를 통과하는 유량은 배관자재에 의한 증가된 유동저항 때문에 유량이 감소되는 영향을 받는다. 그리고 유동액체의 온도가 밸브의 상류측 또는 입구부에서의 압력에 대응하는 포화온도에 가까운 경우 액체가 밸브내를 통과하면서 발생하는 압력강하에 의한 상변화때문에 밸브내의 유동이 이상류(Two Phase Flow)가 되어 밸브의 하류측의 압력을 감소시켜도 유동액체의 유량이 더 이상 증가되지 않는 소위 임계유동(Critical Flow)이 발생되는 수도 있다. 이는 기체유동시 일정단면의 유동관로의 끝단이나 배관내의 배관내의 최소유동단면부에서의 압력이 상류측 압력의 약 0.5배까지 감소되는 경우 배관의 끝단이나 최소유동단면부에서의 유동속도가 음속에 도달하여 하류측의 압력을 더욱 감소시켜도 이 압력감소가 상류측으로 전달되지 않아 기체의 질량유량이 더 이상 증가하지 않고 어떤 최대값을 일정하게 유지하는 임계유동과 유사한 현상이다<sup>12,13)</sup>. 따라서 설계자가 이와 같은 상황들을 고려하지 않고 단순히 작성한 밸브의 설계요건을 밸브제작자에게 제공하여 밸브가 설계, 제작, 구매, 설치되면 밸브의 성능이 저하되어 요구되는 작동특성으로 부터 심하게 이탈하여 밸브가 설치되는 계통자체의 성능을 보장하지 못하는 수도 있다.

본 논문에서는 액체유동에 관하여 배관계통의 설계자가 쉽게 이해하고 이용할 수 있도록 액체유동의 임계유동현상과 밸브형상계수, 밸브저항계수 및 그 적용방법에 관해서 상세히 연구 검토하였다. 그리고 사용 단위계는 현재 밸브설계를 위한 대부분의 참고문헌과 밸브제작자에 제공되는 대

부분의 자료 및 각종 규격들이 SI단위가 아닌  $ft-lb$  단위를 사용하고 있는 점을 감안하여 이들 자료들과의 일관성 유지를 위해  $ft-lb$  단위를 사용하였다.

## 2. 밸브저항계수

계통설계자(System Designer)가 어떤 계통에 대한 설계를 수행하는 경우 최우선적으로 고려하여야 할 것은 계통의 정상적인 작동을 위해 필요한 특정한 종류의 유체가 요구되어지는 어떤 온도, 압력을 유지하면서 설정된 유량으로 흐를 수 있도록 배관계통을 구성하는 것이며, 이를 위해서 계통설계자는 배관계통내에서 유체유동에 의해 발생하는 압력강하에 대해서 명확히 파악할 수 있어야 한다. 일반적으로 유체유동시 배관계통내에서 발생하는 압력강하를 계산하는 경우에는 유동저항계수  $K$ 를 사용한다.

유동액체에 대한 에너지보존법칙인 베르누이방정식으로 부터 속도수두는 다음과 같이 정의된다.

$$H_{vel} = \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

그리고 유동액체에 대한 질량보존법칙인 연속방정식에 의하면 체적유량은 다음과 같다.

$$q = AV \quad (2)$$

유동관로가 원형단면인 경우 상식을 유동속도에 관해서 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{q}{A} = \frac{q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3)$$

$gpm$ 을  $ft^3/sec$ 의 단위로 표현하면  $1gpm = 0.00223ft^3/sec$ , 그리고  $inch^2$ 을  $ft^2$ 의 단위로 표현하면  $1inch^2 = 0.00694ft^2$ 이므로 이들을 식(3)에 대입하고 그 결과를 식(1)에 대입하면 속도수두는  $ft$ 단위로 다음과 같이 유량과 유동관로의 직경으로 표현할 수 있다.

$$H_{vel} = 0.00259 \frac{q^2}{D^4} \quad (4)$$

달시-와이스바방정식에 의하면 액체가 원형단면의 유동관로내를 흐를 때 발생하는 수두손실은 속도수두에 비례하며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$H_{loss} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

상식을 유동저항계수  $K = f \frac{L}{D}$ 를 사용하여 표현하면,

$$H_{loss} = K \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

따라서 밸브의 유동저항계수를  $K_{valve}$ , 그리고 밸브 본체의 크기(Valve Body Size)에 의해서 분류되는 밸브의 직경을  $d$ 라고 하면 밸브의 입출구부 사이에서 발생하는 수두손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_{loss} = K_{valve} \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

식(4)를 식(7)에 대입하면,

$$H_{loss} = 0.00259 K_{valve} \frac{q^2}{d^4} \quad (8)$$

따라서 압력강하는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta p = G_f \gamma_w H_{loss} \quad (9)$$

식(9)에 식(8)을 대입하고 단위환산을 하면,

$$\Delta p = K_{valve} \left( \frac{1}{890} \frac{G_f q^2}{d^4} \right) \quad (10)$$

액체용 유량제어밸브의 유량방정식은,<sup>1)</sup>

$$q = C_v \sqrt{\frac{\Delta p}{G_f}} \quad (11)$$

식(11)의 양변을 제곱하고 이를 식(10)에 대입하고  $K_{valve}$ 에 대입하면,

$$K_{valve} = \frac{890 d^4}{C_v^2} \quad (12)$$

식(12)에 사용된 직경  $d$ 는 밸브가 설치되어진 배관의 직경을 나타내는 것이 아니고 밸브 본체의 크기에 의해서 분류되는 밸브의 직경이라는 사실에 주의하여야 한다. 그리고 식(12)로부터 다음과 같은 두가지의 사실을 알 수 있다. 먼저 액체유동을 위한 배관계통을 설계하는 경우 밸브 제작자로부터 제공되는 밸브유량계수와 밸브가 설치되는 배관의 크기만으로 밸브의 유동저항계수를 쉽게 구할 수 있으며, 액체용 유량제어밸브가 어떤 계통에 설치되어 사용되는 경우 밸브가 일정한 개도를 유지한채 사용되는 경우가 거의 없이 시스템의 운전 조건에 따라서 밸브의 개도가 연계되어 변화하기 때문에 밸브의 유동저항계수 역시 밸브의 개도에 따라서 변화한다는 점이다. 따라서 밸브가 부분적으로 개방되는 경우에는 개도가 작아질수록 밸브 유량계수  $C_v$ 는 밸브의 시트와 디스크의 형태에 의해서 결정되는 유량특성(Flow Characteristic)에 따라서 감소하므로 밸브의 유동저항계수  $K_{valve}$ 는 감소되어진  $C_v$ 의 제곱에 비례하여 증가한다.

Fig. 1은 밸브의 시트와 디스크의 형태에 따라서 일반적으로 분류되고 있는 밸브의 유량특성, 즉 밸브유량계수  $C_v$ 의 변화특성을 보이는 그림이다. 그러나 밸브제작자가 설계자나 밸브구매자에게 제

공하는 유량특성곡선은 횡축은 밸브시스템의 이동 거리를 종축은 밸브유량계수  $C_v$ 의 값을 나타내는 형식을 일반적으로 취한다<sup>5)</sup>.

### 3. 배관형상계수

밸브가 배관상에 실제로 설치되는 경우 이미 서론에서 언급한 바와 같이 배관과 밸브의 크기가 달라서 축소관과 확대관과 같은 배관자재가 배관과 밸브의 입출구부 사이에 직렬로 연결되는 수가 많다. 그러나 밸브제작자에 의해서 제공되는 밸브유량계수는 밸브제작자가 ISA S75.01에서 요구하는 규격에 맞게 제작한 자사의 실험장치에 밸브만을 설치하여 수행한 유량시험을 통해서 작성한 유동특성곡선이기 때문에 배관자재가 설치된 밸브를 통과하는 유량은 동일한 압력강하에 대해서 밸브만이 설치되었을 때의 유량 즉 밸브유량계수  $C_v$ 와 차이를 보일 것이다<sup>6)</sup>. 따라서 배관자재가 배관과 밸브의 입출구부 사이에 취부되는 경우 이에 의한 유량변화를 보정하기 위해서는 어떤 계수, 즉 배관형상계수  $F_p$ 를 구하는 방법에 대해서 상세히 검토한다.

Fig. 2는 배관과 밸브사이에 축소관과 확대관이 설치된 것을 보이는 그림이며, 이와 같은 경우 압력공의 설치위치는 밸브 상류측의 경우는 배관공

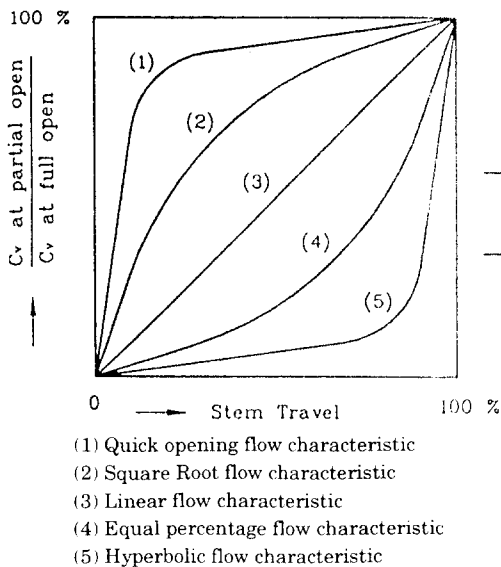


Fig. 1 Flow Characteristic of Valves

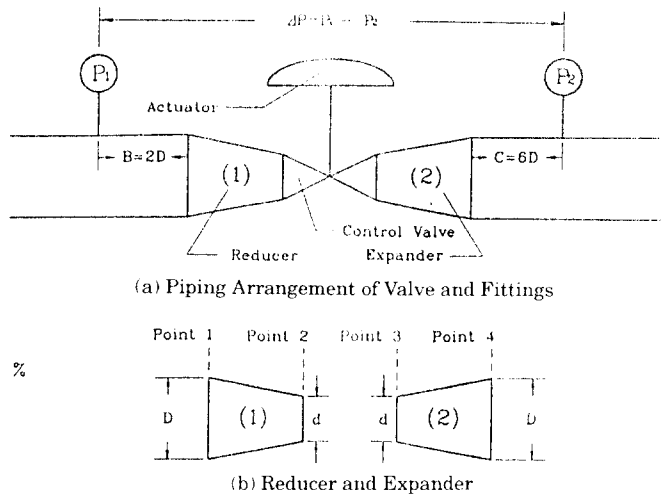


Fig.2 Schematic Diagram of Valve Installation with Fittings

칭직경(Nominal Pipe Size, NPS)의 2배, 그리고 밸브 하류측의 경우는 6배 위치이다<sup>31,5)</sup>. Fig. 2의 (a)와 같은 배관에서 발생하는 압력강하  $\Delta p$ 를 구하기 위해서는 입구부에 설치된 축소관에서의 압력강하  $\Delta p_{in}$ , 밸브에서의 압력강하  $\Delta p_{valve}$  그리고 출구부에 설치된 확대관에서의 압력강하  $\Delta p_{out}$ 와 같이 구간별로 구해서 이를 합산하는 것이 편리하다.

우선 입구부에 설치된 축소관에서의 압력강하  $\Delta p_{in}$ 을 구하기 위해서 Fig. 2 (b)의 좌측 그림에 대해서 생각해보자. Point 1과 Point 2 사이에 마찰손실이 없다고 가정하면 축소관에서 발생하는 정압의 감소 즉  $\Delta p_{in}$ 은 유동관로의 축소에 의해서 증가되어진 속도수두에 의한 압력과 동일할 것이다. 속도수두를 압력으로 표현하면 다음과 같다.

$$p_{vel} = G_f \gamma_w H_{vel} \quad (13)$$

식(13)에  $\gamma_w = 62.4 \text{ lb/ft}^3$ 와 식(4)를 대입하고 단위환산을 하면,

$$p_{vel} = \frac{G_f q^2}{890 D^4}$$

$$\text{따라서 } \Delta p_{in\ vel} = p_{vel\ 2} - p_{vel\ 1} = \frac{G_f q^2}{890 d^4} - \frac{G_f q^2}{890 D^4}$$

$$\Delta p_{in\ vel} = \frac{G_f q^2}{890 d^4} \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad (14)$$

식(14)의 우변 괄호의 항은 베르누이 계수라고 하며, 일반적으로  $K_B$ 로 표현한다.  $K_{B1} = \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right)$ 이라고 하면,

$$\Delta p_{in\ vel} = K_{B1} \left( \frac{G_f q^2}{890 d^4} \right) \quad (15)$$

그리고 액체가 Point 1과 Point 2 사이를 흐를 때 관마찰에 의한 수두손실이 발생하므로 이것도 함께 고려하여야 한다. 식(6)을 참조하면,

$$\Delta p_{in\ loss} = K_{11} \left( \frac{G_f q^2}{890 d^4} \right) \quad (16)$$

식(16)의 우변에 포함된  $K_{11}$ 은 밸브의 입구측에 설치된 축소관의 유동저항계수로서 이는 실험에

의해서 구하거나 혹은 배관소재의 유동저항계수에 관한 자료들을 포함하고 있는 참고문헌들로부터 쉽게 구할 수 있다<sup>10,11)</sup>. 만일 이들 자료들을 이용할 수 없다면 다음의 값을 사용하여도 공학적으로 큰 오차를 발생시키지 않는다<sup>2)</sup>.

$$K_{11} = 0.5 \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \quad (17)$$

$\Delta p_{in} = \Delta p_{in\ vel} + \Delta p_{in\ loss}$ 이므로 식(15)와 식(16)으로부터,

$$\Delta p_{in} = (K_{11} + K_{B1}) \frac{G_f q^2}{890 d^4} \quad (18)$$

액체가 밸브를 통과하면서 발생하는 압력강하는 식(10)에 의해 계산된다.

$$\Delta p_{valve} = K_{valve} \left( \frac{1}{890} \frac{G_f q^2}{d^4} \right) \quad (19)$$

밸브의 입구측에 설치된 축소관에서의 압력강하를 구하는 것과 동일한 방법으로 출구측 확대관에서 발생하는 압력강하를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta p_{out} = (K_{12} - K_{B2}) \frac{G_f q^2}{890 d^4} \quad (20)$$

참고문헌 (1)에서는 유동저항계수  $K_{12}$ 에 대해서 다음의 값을 제공하고 있다.

$$K_{12} = 1.0 \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \quad (21)$$

식(20)에서  $K_{B2}$ 의 부호가 음으로 주어진 이유는 확대관의 경우에는 속도수두가 감소하면서 감소되어진 수두만큼 정압이 증가되어 실제로는 압력강하를 회복시키기 때문이다. 따라서 Fig. 2에 보인 것과 같은 배관에서 발생하는 전 압력강하는 식(18), 식(19), 식(20)을 사용하면 다음과 같다.

$$\Delta p = \Delta p_{in} + \Delta p_{valve} + \Delta p_{out}$$

$$\Delta p = \frac{G_f q^2}{890 d^4} (K_{11} + K_{B1} + K_{valve} + K_{12} - K_{B2}) \quad (22)$$

밸브의 입출구부에 설치되는 축소관과 확대관은 일반적으로 같은 크기이므로  $K_{B1} = K_{B2}$ 이다. 따라서 이들 항은 식(22)의 우변 괄호안에서 서로 상쇄되므로,

$$\Delta p = \frac{G_f q^2}{890 d^4} (K_{(1)} + K_{(2)} + K_{valve}) \quad (23)$$

밸브의 유량방정식에 배관형상계수를 도입하면 다음과 같다<sup>1)</sup>.

$$q = F_p C_v \sqrt{\frac{\Delta p}{G_f}} \quad (24)$$

식(24)의 양변을 제곱하고 압력강하  $\Delta p$ 에 식(23)을 대입하여  $F_p$ 에 대해 정리하면,

$$F_p^2 = \frac{890 d^4}{C_v^2 (K_{(1)} + K_{(2)} + K_{valve})} \quad (25)$$

식(25)의  $K_{valve}$ 에 식(12)를 대입하면,

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_v^2 \Sigma K}{890 d^4}}} \quad (26)$$

식(26)에 나타난 바와 같이  $\Sigma K = K_{(1)} + K_{(2)}$ 이며, 밸브의 입출구부에 배관자재가 설치되는 경우 배관형상계수  $F_p$ 는 식(26)으로 부터 쉽게 구할 수 있다. 그리고 배관자재가 설치되지 않은 경우에는  $\Sigma K = 0$ 이 되므로  $F_p = 1.0$ 이 되어 식(24)는 식(11)과 같아짐을 알 수 있다. 물론 밸브가 현장에서는 Fig. 2에 보인 것과 다른 형태로 배관 자재가 다수 취부될 수도 있으며, 이와 같은 경우라 할지라도  $\Sigma K = K_{(1)} + K_{(2)} + K_{(3)} + \dots + K_{(n)}$ 의 값을 정확히 계산할 수 있다면 밸브를 통과하는 유량은 정확히 예측할 수 있으며,  $\Sigma K$ 의 값을 계산하는 것은 배관자재의 유동저항계수에 관한 자료들을 수록하고 있는 참고문헌들로부터 별 어려움없이 구할 수 있다<sup>10), 11), 15)</sup>.

#### 4. 임계압력비 계수

전보<sup>1)</sup>에서는 유동액체의 온도가 유동관로내의 압력분포에 대응하는 포화온도보다 충분히 낮아

서 밸브나 유동관로내에서의 압력강하에 의해 상변화가 일어나지 않는 경우에 대한 것이었다. 그러나 서론에서 이미 언급한 바와 같이 유동액체의 온도가 밸브입구부에서의 압력에 대응하는 포화온도에 가까운 경우에는 액체가 밸브내를 통과하면서 발생하는 압력강하에 의해서 증기가 발생하여 밸브내의 유동은 이상유동이 되어, 임계유동이 발생된다. Fig. 3은 일반적인 밸브의 압력강하에 따른 유량의 변화를 보이는 것으로서 밸브를 통과하는 유량의 어떤 범위내에서는  $\sqrt{\Delta p}$ 의 증가에 따라서 유량도 함께 증가하지만 어떤 한계치 이상이 되면 압력강하에 관계없이 유량이 일정하게 됨을 알 수 있으며, 이와 같은 특성은 어떤 종류의 밸브라 할지라도 모두 가지고 있다. 그림의 Section 4에 보이는 직선부분은 임계유동이 발생하기 전의 영역으로서 밸브를 통과하는 유량은 식(11)을 사용하여 구할 수 있는 부분이며, Section 5의  $q_{max}$ 는 임계유동에 의해서 제한되는 밸브의 최대유량을 나타내는 것이다.

일반의 산업현장에서 이와 같은 임계유동현상을 고려해야 하는 경우는 매우 드문 현상이나 발전소의 증기터빈 발전계통에서 급수가열기와 복수기를 연결하는 배수관에 설치된 밸브내에서 액체의 임계유동이 발생할 가능성이 매우 높다. 만일 계통설계자가 급수가열기의 배수관을 설계하면서 이와 같은 임계유동을 고려하지 않고 밸브를 설계하거나 선정한다면 부적절한 밸브 성능에 의해서 요구되는 유량을 복수기로 이송시키지 못하며, 이로 인해 급수가열기의 가열효과가 저하되고 온도가 낮은 급수가 보일러나 증기발생기로 유입되어

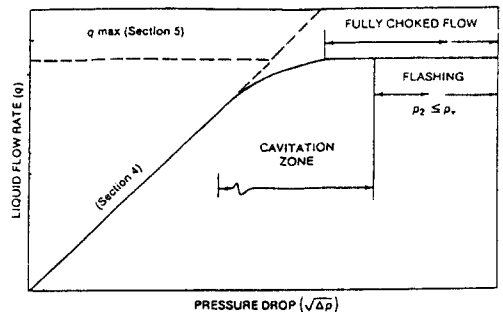


Fig.3 Liquid Flowrate versus Pressure Drop for a Typical Valve

전체 계통의 효율을 저하시키는 중요원인이 된다.

이와 같이 밸브내에서 임계유동이 발생하는 경우에는 밸브유량계수  $C_v$ 와 밸브출구단에서의 압력  $p_2$ 는 더 이상 밸브의 유량을 결정하는 인자로서 작용을 하지 못하므로 식(11)을 사용하여 밸브의 유량을 구할 수 없다. 따라서 밸브의 출구측에서의 압력  $p_2$ 를 사용하지 않고 유량을 예측할 수 있는 새로운 방법을 모색해야만 하며, 이는 밸브제작자가 제공하는 자료인 압력회복계수(Pressure Recovery Factor)  $F_L$ 를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}} \quad (27)$$

식(27)을 사용하면 밸브의 유량방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = F_L C_v \sqrt{\frac{p_1 - p_{vc}}{G_f}} \quad (28)$$

임계압력비계수  $F_F = \frac{p_{vc}}{p_c}$ 를 도입하면  $p_{vc} = F_F p_c$ 이므로,

$$q = F_L C_v \sqrt{\frac{p_1 - F_F p_c}{G_f}} \quad (29)$$

식(29)의  $p_c$ 는 밸브 입구부에서의 액체의 온도에 대응하는 포화증기압이며, 임계압력비계수  $F_F$ 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$F_F = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{p_c}{p_1}} \quad (30)$$

식(30)의 임계압력비계수  $F_F$ 는 유동액체의 온도에 대응하는 포화증기압  $p_c$ 와 밸브의 최소유동단면부에서의 압력  $p_{vc}$ 와의 상관관계를 나타내는 식이다. 이 식은 W.F. Allen에 의하여 에너지방정식, 운동량방정식 및 연속방정식을 이용하여 이론적인 해석방법으로 계산을 수행하여 Fig. 4와 같이 나타내었는데, 이의 타당성은 그 당시에 가동되고 있던 화력발전소들의 증기터빈계통의 급수가열기 배수관들로 부터 취득한 현장자료들과 비교하여 입증되었다<sup>6)</sup>.

밸브를 통해 액체가 흐를 때 액체의 온도는 일반

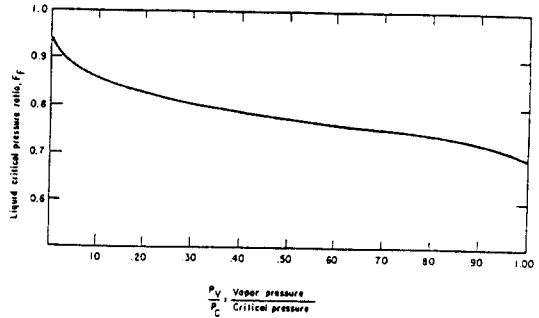


Fig. 4 Liquid Critical Pressure Ratio

적으로 설계자가 알고 있으므로 이 온도에 대응하는 포화증기압  $p_v$ 와 임계압력  $p_c$ 는 쉽게 구해진다. 따라서 일정한 온도를 유지하고 있는 어떤 액체가 압력회복계수  $F_L$ 를 가지는 밸브를 통해서 흐를 때 그 특정밸브에서의 최대유량은 식(29)와 식(30)을 이용하여 쉽게 구할 수 있으며, 이는 밸브내에서 액체의 임계유동이 발생하는 경우를 고려하여 배관계통을 설계해야 하는 설계자에게 유용한 수단을 제공한다.

물론 설계의 초기단계에서 압력회복계수  $F_L$ 의 값을 밸브제작자로부터 입수할 수 없는 경우도 있을 수 있으며, 이런 경우라 할지라도 배관의 크기와 기존의 설계경험 및 유사한 밸브자료들로 부터 밸브내에서 형성되는 최소유동단면부의 유동면적을 적절히 가정하여 최소유동단면부에서의 압력  $p_{vc}$ 를 계산함으로써 압력회복계수  $F_L$ 을 구하여 유량을 산정할 수도 있다.

## 5. 결 론

밸브를 설계하는 경우 유동유체의 종류와 유동유체의 물성치에 따라서 밸브 설계의 난이도가 결정된다. 유량제어밸브는 유동유체의 종류에 따라서 크게 기체용 밸브와 액체용 밸브로 분류되는데, 기체용 밸브의 경우 유동유체가 압력변화에 따라서 체적의 변화가 극심하므로 유량을 체적유량으로 표현하지 않고 질량유량으로 나타낸다는 점과 팽창계수를 사용해야 한다는 점에서 조금 어려울 뿐 근본적 해석방법은 액체용 밸브와 거의 유사하다.

본 논문에서는 액체용 유량제어밸브가 포함되

는 배관계통의 설계시에 설계자가 유동에 의해 계통내에서 발생하는 압력강하를 평가하고자 할 때 편리하게 사용할 수 있는 밸브의 유동저항계수와 밸브의 입출구부에 설치된 각종 배관자재에 의한 유량의 변화를 평가할 수 있는 배관형상계수, 그리고 밸브 양단의 압력차를 증가시킴에 따라서 밸브의 유량도 비례해서 증가하다가 어떤 한계 이상에서는 유량이 일정하게 유지되는 액체의 임계유동현상에 대해서 자세히 검토하였으며, 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다. 밸브의 유동저항계수  $K_{valve}$ 를 구하는 식(12)를 사용하여 밸브개도의 변화에 따른 밸브의 유동저항계수의 증가량  $K_{valve}$ 를 구해본 결과 밸브가 완전히 개방된 경우와 부분적으로 개방된 경우의 밸브유량계수를 각각  $C_{v, max}$  및  $C_v$ 라고 할 때 식(31)과 같이 표현됨을 알았다.

$$\Delta K_{valve} = 890 d^4 \left( \frac{1}{C_{v, max}} + \frac{1}{C_v} \right) \left( \frac{1}{C_{v, max}} - \frac{1}{C_v} \right) \quad (31)$$

그리고 완전 개방시와 부분 개방시의 밸브의 유동저항계수비를 구해보면 식(32)와 같이 간단하게 표현됨을 알 수 있다.

$$\frac{K_{valve \text{ at full open}}}{K_{valve \text{ at partial open}}} = \left( \frac{C_v}{C_{v, max}} \right)^2 \quad (32)$$

유동저항계수비를 구한 결과인 식(32)의 우변이 Fig. 1의 종축값의 제곱으로 나타난 것은 대단히 흥미로운 사실로서, 밸브의 유동저항계수비는 Fig. 1의 유량특성곡선을 나타내는 함수의 제곱으로 표현된다는 것을 의미한다. 즉 Fig. 1의 선형유량특성 나타내는 (3)의 경우 100% 개방된 경우와 50% 개방된 경우를 비교하면  $K_{part. open}/K_{full open} = 4.0$ 이므로, 이는 2 inch의  $C_{v, max} = 100$ 인 액체용 제어밸브에 대해서 식(12)를 적용하여 구해도 4.0의 결과를 얻는다. 따라서 밸브개방도에 따른 유동저항계수비는 유량특성곡선을 최소자승법과 같은 근사방법을 사용하여 적절한 함수형태로 표현함으로써 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있다. 임계압력비계수를 구하기 위한 식(30)으로부터는 액체의 포화증기압이 증가하면, 즉 액체의 온도가 높으면  $F_F$ 의 값이 커지고 따라서 임계유동시 유량을 평가

하기 위한 식(29)로부터 유량이 감소함을 알 수 있다. 밸브의 최소유동단면부에서의 압력  $p_{cr}$ 는 물리적으로 액체의 포화증기압  $p_v$  이하로 감소될 수 없으므로  $F_F = 1.0$ 인 경우, 즉  $p_{cr} = p_v$ 가 임계유동의 경계조건이라는 사실을 알 수 있으며, 이 경우 식(29)는 식(11)과 같게 된다. 따라서 액체용 유량제어밸브의 유량을 평가하는 경우 임계압력비계수의 값이  $F_F > 1.0$ 이면 밸브내에서 임계유동이 발생하지 않으며, 밸브를 통과하는 유량은 식(11)로부터 구하고 만일 임계압력비계수의 값이  $F_F < 1.0$ 이면 밸브내에서 임계유동이 발생하며 밸브를 통과하는 유량은 식(29)로부터 구해야 한다는 사실을 알 수 있다.

그리고 현재까지의 현장경험에 의하면 임계유동시의 유량평가를 위한 식(29)에 의한 계산결과  $F_F < 0.7$ 의 범위까지는 실제로 측정된 유량과 비교적 잘 일치하지만  $0.7 < F_F < 1.0$ 의 범위에서는 실제유량보다 크게 평가되므로 이 범위에서는 보수적으로  $F_F = 0.7$ 의 값을 사용함이 타당함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 최순호, 박천태, "플랜트 및 선박의 액체용 유량제어밸브 설계에 관한 연구(1)", 한국박용기관학회 논문집, Vol. 19, No. 1, pp. 28~35 (1995)
- 2) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.01, Flow Equations for Sizing Control Valves", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1985)
- 3) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.02, Control Valve Capacity Test Procedure", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1981)
- 4) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.03, Control Valve Terminology", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1983)
- 5) Instrument Society of America, "ISA Handbook of Control Valves 2nd Edition", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1976)



- Water and Steam through Pipes and Valves", Journal of Basic Engineering (1951)
- 7) J. G. Burnell, "Flow of Boiling Water through Nozzles, Orifices and Pipes", Engineering (1947)
- 8) H. D. Baumann, "The introduction of a Critical Flow Factor for Valve Sizing", ISA Transaction, Vol.2 (1963)
- 9) Les Driskell, "Control Valve Selection and Sizing", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1983)
- 10) The Engineering Division of Crane Co., "Flow of Fluid through Valves, Fittings and Pipes", Crane Company, Park Avenue, New York (1985)
- 11) Philip M. Gerhart, Richard J. Gross, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison - Wesley Publishing Company (1985)
- 12) 김경근외, "수리학 및 유체역학 연습", 태화출판사 (1986)
- 13) 김경근, "기액이상류", 태화출판사 (1986)
- 14) 홍영표, "열역학", 태화출판사 (1979)
- 15) 이택식, "유체역학", 동명사 (1986)