

플랜트 및 선박의 액체용 유량제어밸브 설계에 관한 연구(Ⅰ)

최 순 호* · 박 천 태*

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

S. H. Choi · C. T. Park

Key words : Fluid flow control(유체유동제어), Process design(공정설계), System design(계통설계), Flow control characteristic(유동제어특성), Valve flow coefficient(밸브유량계수), Piping geometry factor(배관형상계수), Valve reynolds number(밸브레이놀드수), Critical flow(임계유동)

Abstract

The fluid flow for a energy transfer is essential for the design and operation of power plants, petrochemical plants and ships including a process. When the operating conditions of a plant are changed or any transitional event ocured, the flow controls of a fluid must be performed to follow the new operating state or mitigate the results of a event. Generally these flow controls to accommodate the new operating state of a plant are made by the use of various valves. Therefore the design of valves and the related techniques are very important to the system and component designs. However the system and component design are not familiar with the practical theory of the valve since the derivative procedures of the flow equations in a valve are difficult and it is not easy to found the theoretical fundamentals and informations about the design of a valve from the present references. In this study the flow equations applicable to a valve for liquid are theoretically derived in detail. And the definition of valve reynolds number and its boundary values between the tubulent and laminar flow is described compared with the values of a circular pipe flow.

1. 서 론

수, 화력 및 원자력발전소, 석유화학, 선박 등과 같은 플랜트의 정상적인 작동을 위해서는 에너지

의 이동을 위한 유체유동(Fluid Flow)이 필요하며, 또한 플랜트의 운전조건(Operating Condition)이 변화하는 경우 이 변화에 대응하는 유체의 유동제어(Flow Control)가 수행되어야 한다. 일

* 정회원, 한국원자력연구소 냉각계통연구실

반적으로 공정시스템의 요구에 따른 유동제어는 거의 밸브들(Valves)에 의해서 수행되어지기 때문에 공정설계(Process Design)의 최상위 설계(Basic Engineering)그룹에 속하는 계통설계자(System Designer)가 특정 목적의 공정설계를 진행하는 경우에는 공정계통에 필요한 기기들(Components)에 대한 상세설계(Detail Engineering)를 수행하는 기기설계자(Component Designer)가 설계대상의 공정에 적합한 유동제어특성(Flow Control Characteristic)을 가지는 밸브들을 설계 및 선정할 수 있도록 공정 전체의 운전범위(Total Operating Range)에 걸친 유동조건들을 상세히 파악하여 모든 운전조건을 수용할 수 있는 대표적인 유동조건과 이 유동조건에 적합한 밸브의 종류를 기기설계자에게 통보하여야 한다.

일반적으로 기기설계자의 밸브 설계 및 선정과정은 우선 계통설계자로부터 통보받은 유동조건과 밸브의 종류를 밸브제작사들(Valve Vendors)에게 제공하고, 밸브제작사들은 기기설계자가 요구하는 유동조건을 만족시킬 수 있는 밸브를 선정하여 이를 재통보한다. 이후 기기설계자는 밸브제작사들이 제공한 밸브자료들로부터 유동제어특성, 경제성 및 보수유지성 등을 검토하여 공정계통에 가장 적합한 밸브를 결정하게 되는데, 이 때 기기설계자는 통상 밸브관련 규격(Standard)을 참조하여 밸브자료의 검토를 수행하며 현재 산업계에서 밸브의 유동제어특성을 검토하기 위하여 가장 많이 참조되고 있는 규격은 미국계기협회(Instr-

ument Society of America)에서 발간한 규격(Standard)인 ISA S75.01이다. 그러나 규격집의 특성상 ISA S75.01의 내용은 밸브의 선정이나 설계에 직접 이용하기 편리하도록 유동방정식의 형태와 이들 방정식에 적용해야하는 각종 계수들의 종류와 수치만을 나타내고 있을 뿐 이론적인 해석과정이나 실험에 의한 상관관계식들(Correlations)의 유도과정에 대한 설명이 부족하기 때문에 기기설계자들이 이 규격의 내용을 정성적으로 이해하기 대단히 어렵고, 더구나 현재까지 이에 관한 해설이나 적용방법을 상세히 포함하고 있는 참고문헌들이 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 그러므로 본 논문에서는 위와 같은 입장에서 실제로 플랜트의 열유체 공정설계에 있어서 핵심적이라고 할 수 있는 액체용 유량제어밸브의 설계이론에 관하여 기술할 것이며 현재까지 밸브설계를 위한 참고문헌들과 밸브제작사들이 제공하고 있는 자료 및 상기의 ISA S75.01의 규격들은 SI단위가 아닌 Bt/lb 단위계를 사용하고 있기 때문에 이들 자료들과의 단위계 사용상의 혼란을 피하기 위해서 이 논문 역시 Bt/lb단위계를 사용하였다.

2. 액체용 유량제어밸브의 유동방정식

밸브설계에 설계자가 최우선적으로 검토하여야 하는 것은 밸브유량계수(Valve Flow Coefficient) C_v 이다. 먼저 액체용 유량제어밸브에 관한 참고문헌(1), (2)를 기준으로 하여 액체의 유량제

Table 1. Numerical constants for liquid flow equations

Constant	Units Used in Equations						
	N	w	q	p, Δp	d, D	γ_l	v
N_1	0.0865	-	m ³ /h	kpa	-	-	-
	0.865	-	m ³ /h	bar	-	-	-
	1.00	-	gpm	psia	-	-	-
N_2	0.00214	-	-	-	mm	-	-
	890	-	-	-	inch	-	-
N_3	76000	-	m ³ /h	-	mm	-	centistokes
	17300	-	gpm	-	inch	-	centistokes
N_6	2.73	kg/h	-	kpa	-	kg/m ³	-
	27.3	kg/h	-	bar	-	kg/m ³	-
	63.3	lb/h	-	psia	-	lb/ft ³	-

어밸브를 설계하는 문제를 생각하여 보기로 한다.

ISA S75.01 규격에서 제공하는 밸브의 유동방정식들과 방정식에 포함된 계수들의 수치 및 단위들(Units)을 아래와 Table 1에 나타내었다. 설계상 먼저 주의해야 할 점은 이들 유동방정식은 유동유체가 액체로서, 액온(Liquid Temperature)이 충분히 낮아서 밸브내에서의 감압(Pressure Drop)에 의하여 상변화(Phase Change)현상인 증기화(Vaporization, Flashing)가 일어나지 않는 난류유동(Tubulent Flow)에 대해서만 적용한다는 점이다¹⁴⁾.

밸브에서의 체적유량 q 는 일반적으로 다음식과 같이 표현된다.

$$q = N_1 \cdot F_p \cdot C_v \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{G_f}} \quad (1)$$

위 식으로부터 유량계수 C_v 는,

$$C_v = \frac{q}{N_1 \cdot F_p} \sqrt{\frac{G_f}{p_1 - p_2}} \quad (2)$$

또한 식(1), 식(2)를 질량유량에 대하여 정리하면, 각각 다음과 같다.

$$w = N_6 \cdot F_p \cdot C_v \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \gamma_1} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{w}{N_6 \cdot F_p \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \gamma_1}} \quad (4)$$

상기 식들에서 F_p 는 무차원의 배관형상계수(Piping Geometry Factor)로서, 이는 밸브의 입출구부에 확대관(Expander)이나 축소관(Reducer)과 같은 배관자재(Fitting)가 부착되어 있는 경우 이의 영향을 고려하기 위해서 도입된 계수이다. 이 배관형상계수를 적용하는 경우에는 매우 복잡한 계산을 해야하는데, 본 논문에서는 배관자재가 설치되지 않은 경우 즉 $F_p = 1.0$ 인 경우에 대해서만 기술하기로 한다.

3. 밸브유량계수

액체가 밸브를 통해서 유동하는 경우, 액체의 유동속도(Flow Velocity)는 밸브의 디스크(Disc)와 시트(Seat)의 개도(Opening)에 의해서 형성되는

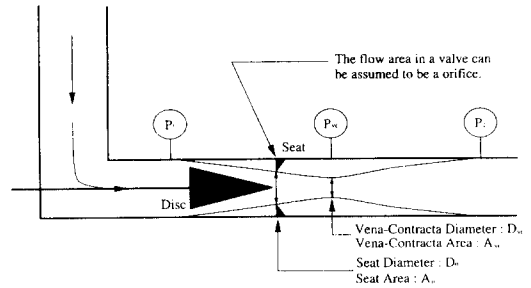


Fig. 1 Schematic diagram of the flow in a valve

최소유동단면부(Vena-Contracta)에서 하류쪽으로 조금 떨어진 곳에서 유동속도가 최대일 것으로 Fig. 1과 같이 밸브내의 유동을 오리피스(Orifice)를 통한 유동으로 근사화하여 해석을 수행할 수 있다¹⁴⁾.

유동관로내에서 발생하는 마찰손실(Friction Loss)과 위치에너지(Potential Energy)의 차를 무시하고 베르누이방정식(Bernoulli's Equation)을 Fig. 1의 밸브 입구부와 최소유동단면부에 적용하면 다음과 같다.

이하의 식에서 하첨자 1은 밸브의 입구부, 하첨자 2는 밸브의 출구부 그리고 하첨자 vc 는 최소유동단면부에서의 상태를 각각 나타낸다. 유체는 비압축성유체(Incompressible Fluid)인 액체이므로 밀도(Density)의 변화는 고려할 필요가 없다. 따라서 연속방정식(Continuity Equation)으로부터 밸브의 입구측 속도 V_1 은 다음과 같이 된다.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_{vc}}{\gamma} + \frac{V_{vc}^2}{2g} \quad (5)$$

$$q = A_1 \cdot V_1 = A_{vc} \cdot V_{vc}$$

$$V_1 = \frac{A_{vc}}{A_1} V_{vc}$$

이를 식(5)에 대입하면,

$$V_{vc}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{A_{vc}}{A_1} \right)^2 \right\} = \frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_{vc})$$

$$V_{vc} = \frac{\sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_{vc})}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_{vc}}{A_1} \right)^2}} \quad (6)$$

위식을 다시 연속방정식에 대입하면 체적유량은 다음과 같이 정리된다.

$$q = A_{vc} \cdot V_{vc} = A_{vc} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_{vc})} \sqrt{1 - \left(\frac{A_{vc}}{A_1}\right)^2} \quad (7)$$

식(7)은 앞에서 가정한 유동조건하에서 계산에 의해서 구할 수 있는 이론적인 유량방정식(Theoretical Flowrate Equation)이지만, 밸브내에서의 실제의 최소유동단면적 A_{vc} 를 구하기는 대단히 어렵다. 따라서 A_{vc} 는 일반적으로 밸브시트부의 유동면적 A_0 를 기준으로 하여 표현한다. $A_{vc} < A_0$ 이고, 수축계수(Contraction Coefficient) C_c 를 도입하면, $A_{vc} = C_c \cdot A_0$ 이므로 식(7)은 다음과 같이 표현된다¹¹⁾.

$$q = C_c \cdot A_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_{vc})} \sqrt{1 - C_c^2 \cdot \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2} \quad (8)$$

식(8)의 분모항을 $\frac{1}{\sqrt{1 - C_c^2 \cdot \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} = C_{vel}$ 이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$q = C_c \cdot C_{vel} \cdot A_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_{vc})} \quad (9)$$

밸브와 같은 유동제어장치(Flow Control Device)를 통해 흐름이 형성되는 경우 최소유동단면부가 밸브의 시트부로 부터 어느 정도의 거리에 위치할 것인가를 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 최소유동단면부의 정압(Static Pressure) p_{vc} 를 측정하는 것도 역시 거의 불가능하다. 이와 같은 이유로 식(9)는 밸브제작자로부터 제공되는 압력회복계수(Pressure Recovery Factor), $F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}}$ 을 도입하여 다음과 같이 표현한다.

$$q = \frac{C_c \cdot C_{vel} \cdot A_0}{F_L} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \quad (10)$$

q : q gpm(gal/min)

p : p psi(lb/inch²)

A : A inch²

g : 32.2ft/sec²

γ : 62.4 · G_f lb/ft³

62.4 lb/ft³은 60°F 상태에서의 물의 비중량(Specific Weight)

식(10)을 실제의 설계를 위하여 간략화시키면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} q &= \frac{C_c \cdot C_{vel}}{F_L} A_0 \text{ inch}^2 \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 32.2 \text{ ft/sec}^2 \times (p_1 - p_2) \text{ lb/inch}^2}{62.4 \cdot G_f \text{ lb/ft}^3}} \\ &= 5.01 \frac{C_c \cdot C_{vel}}{F_L} A_0 \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}} (\text{ft}^3 / \text{min}) \\ &= 38 \frac{C_c \cdot C_{vel}}{F_L} \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}} (\text{gpm}) \end{aligned} \quad (11)$$

1 gallon = 231 inch³ = 0.1337 ft³이므로, $C_c = 38 \frac{C_c \cdot C_{vel}}{F_L}$ 이라고 하면, 식(11)은 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$q = C_v \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}} (\text{gpm}) \quad (12)$$

$$C_v = \frac{q}{\sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}}} (\text{gpm}) \quad (13)$$

식(13)으로 부터 밸브유량계수, C_v 는 밸브의 양단에 단위 압력차 1 psi가 유지되는 경우 밸브를 통하여 흐르는 유동액체의 체적유량(Volumetric Flowrate)이라는 사실을 알 수 있다. 식(12)는 밸브를 통한 체적유량을 나타내는 식이며, 이를 질량유량(Mass Flowrate)으로서 표현하면 $w = \rho \cdot q$, 그리고 $\gamma = G_f \cdot 62.4 \text{ lb/ft}^3$ 이므로,

$$\begin{aligned} w &= \gamma \text{ lb/ft}^3 \times C_v \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}} (\text{gpm}) \\ &= \frac{231}{12^2} \cdot \left\{ 62.4 \cdot G_f \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right\} \cdot \left\{ C_v \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{G_f}} \frac{\text{ft}^2}{\text{min}} \right\} \\ &= 0.1337 \times 60 \times \sqrt{62.4} C_v \sqrt{(p_1 - p_2) \gamma} (\text{lb/hr}) \\ w &= 63.3 C_v \sqrt{(p_1 - p_2) \gamma} (\text{lb/hr}) \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)는 2장의 Table 1에 수록된 $N_6 = 63.5$, $F_p = 1.0$ 인 경우의 밸브내를 흐르는 질량유량을 나타내는 방정식이다.

4. 액체용 유량제어밸브의 레이놀드수

지금까지 기술한 내용은 비압축성의 난류유동에 만 적용할 수 있는 방정식에 관한 것이었다. 그러나 선박에서 연료유로 사용하는 중유를 주기관의 연료펌프까지 이송하는 경우와 같은 유동액체의 점성이 매우 높은 경우나, 공정계통내의 흐름이 층류(Laminar Flow)상태를 유지해야만 하는 특수한 화학공정의 경우에는 기본방정식인 식(1)과 식(3)을 적용할 수 없다. 즉 중요변수인 밸브유량계수가 기본적으로 60°F의 물을 사용한 난류유동조건하에서 수행한 실험결과에 의해서 구해진 것이기 때문이다. 물보다 훨씬 점도가 높은 유체를 제어하기 위해 사용되는 경우 밸브내에서의 유동은 난류가 아닐 수도 있으며, 이와 같은 경우에는 유동유체를 물이라고 상정하고 설계되어진 밸브는 실제로 부적절한 작동특성(Operating Characteristic)을 나타낼 것이다. 따라서 밸브의 성능에 대한 점성의 보정은 매우 중요한 사항이 아닐 수 없다.

해석적으로 구한 방정식을 어떤 범위에서 적용할 수 없는 경우에는 적용 가능한 구간과 적용불가능의 구간에서 수행한 실험에 의해 구해진 각각의 변수들을 서로 연관시키는 방법을 일반적으로 사용한다. 이를 위해 유동분야에서는 레이놀드수를 사용하고 있으며, ISA S75.01에서도 층류와 난류에 의한 밸브유량에 대한 영향을 평가하기 위해 체적 및 질량유량에 관하여 레이놀드수를 고려한 다음과 같이 수정된 방정식들을 제시하고 있다.

$$q = N_1 \cdot F_R \cdot C_v \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{G_f}} \quad (15)$$

$$C_v = \frac{q}{N_1 \cdot F_R} \sqrt{\frac{G_f}{p_1 - p_2}} \quad (16)$$

$$w = N_6 \cdot F_R \cdot C_v \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \gamma_1} \quad (17)$$

$$C_v = \frac{w}{N_6 \cdot F_R \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \gamma_1}} \quad (18)$$

식(15)와 식(16)에 표현된 F_R 은 무차원의 레이놀드보정계수(Reynolds Number Factor)로서 밸브의 레이놀드수에 따라서 변화하며, 난류유동의 경우에는 $F_R=1.0$, 그리고 층류유동인 경우에는 $F_R < 1.0$ 의 값을 가진다. 이 절에서는 실제의 밸브

유량계수와 실험에 의해서 측정되어진 밸브유량계수의 상관관계를 나타내는 레이놀드보정계수, F_R 을 유도한다. 그리고 밸브의 레이놀드수를 구하기 위한 특성길이(Characteristic Length)를 제외한 다른 인자들은 모두 실제의 유동조건들로부터 취한다. 특성길이이라 함은 60°F의 물의 경우, 난류상태에서 최대유량으로 밸브내를 통해 유동을 형성시킬 때 밸브내에 형성되는 최소유동단면부의 직경을 의미한다.

일반적으로 레이놀드수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{em} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (19)$$

- ρ : 밀도
- V : 유동속도
- D : 특성길이
- μ : 점성계수

$$v = \frac{\mu}{\rho} \text{ 이므로, } R_{er} = \frac{V \cdot D}{v} \quad (20)$$

밸브의 경우 최대유동속도는 밸브내의 어떤 부분에서 형성되는 최소유동단면부에서 발생할 것이며, 이 최소유동단면부는 일반적으로 밸브의 시트와 디스크에 의해서 만들어지는 유로의 후단부에 위치한다. 따라서 이 최대유동속도와 원형이라고 가정한 최소유동단면부의 직경을 사용하여 밸브에 적용할 수 있는 레이놀드수를 정의할 수 있다.

밸브의 입구부에서부터 최소유동단면부까지의 수두손실을 무시할 수 있다고 가정하면, 최소유동단면부에서의 유동속도는 밸브의 입출구부 사이에서 발생하는 압력손실과 밸브의 압력회복계수를 사용하여 계산할 수 있으며 최소유동단면적은 밸브의 유량계수 C_v 와 압력회복계수 F_L 로부터 계산할 수 있다. 그러나 밸브의 입구부에서부터 최소유동단면적까지 압력손실이 없다는 가정은 실제로는 있을 수 없으며, 압력회복계수가 유동특성과 어떤 특정한 함수관계를 가진다는 사실 역시의 심스러운 사항이므로 밸브에 적용할 수 있는 새로운 레이놀드수를 정의할 필요가 있다.

밸브내에 형성되는 최소유동단면부가 원형이라고 가정하면, $q=A \cdot V$ 이고, $A = \frac{\pi}{4} D^2$ 이므로

$$R_{cr} = \frac{4}{\pi} \frac{q}{D \cdot v} \quad (21)$$

위식으로 부터 유체의 유동속도가 주어지지 않는다 할지라도 밸브의 최소유동단면적의 직경과 유량만 주어지면 밸브에 적용할 수 있는 레이놀드수를 구할 수 있다는 사실을 쉽게 알 수 있다. 위식의 단위를 살펴보면 q 는 gpm , D 는 $inch$, v 는 $centistokes$ 이므로 구체적인 레이놀드수는 다음과 같이 된다.

$$R_{cr} = 3170 \frac{q}{D \cdot v} \quad (22)$$

밸브가 실제로 현장에 설치되어 사용되는 경우, 유량과 유동액체의 점성은 이미 알려져 있거나 주어지기 때문에 밸브내에서 형성되는 최소유동단면의 직경만을 결정하면 밸브에 적용할 수 있는 레이놀드수를 구할 수 있다. 밸브내에서 형성되는 최소유동단면부의 직경은 밸브의 유량계수와 압력회복계수에 의해서 구해질 수 있다는 것은 매우 중요한 사실이다. 이들 밸브변수들은 60°F의 물을 사용하여 임계유동(Critical Flow)이 일어나지 않는 난류유동조건하에서 구한 값들이기 때문에 최소유동단면부의 직경은 실험조건에서 구해지는 직경일 것이다.

60°F의 물을 사용하여 표준실험조건하에서 구한 밸브변수들로부터 최소유동단면부의 직경을 구하는 것이 부적절하다고 생각될 수도 있지만, 이와 같은 의문은 난류유동의 조건하에서 오리피스를 통한 유동의 수축계수는 거의 일정하게 유지되므로 오리피스의 최소유동단면부의 직경을 알 수 있다면 오리피스의 직경은 수축계수를 사용하여 쉽게 계산된다는 사실로부터 해소될 수 있다. 즉 밸브내에서 형성되는 최소유동단면의 직경은 밸브를 통한 유동조건과는 전혀 관계없는 기계적인 치수에 불과하다. 따라서 밸브에 적용할 수 있는 레이놀드수는 이하에서 기술하는 바와 같이 밸브내에서 형성되는 최소유동단면부의 직경을 계산하여 이로부터 구할 수 있다.

연속방정식으로 부터

$$A_{vc} = \frac{q}{V_{vc}} = \frac{\pi}{4} D_{vc}^2$$

식(12)로부터

$$q = C_v \sqrt{\frac{\Delta p_{obs}}{G_f}}$$

위식에서 $\Delta p_{obs} = p_1 - p_2$ 는 밸브의 입출구단에서 측정되어진 압력차를 나타내는 것이며, 밸브 입구부에서의 유입속도를 무시하면 식(5)로부터,

$$\begin{aligned} \frac{V_{vc}^2}{2g} &= \frac{1}{\gamma} (p_1 - p_{vc}) = \frac{\Delta p_{vc}}{\gamma} = \Delta h_{vc} \\ V_{vc} &= \sqrt{2g \cdot \Delta h_{vc}} = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p_{vc}}{\gamma}} \end{aligned} \quad (23)$$

밸브의 압력회복계수는 정의에 의해서, $F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{obs}}{\Delta p_{vc}}}$ 이므로 유량 q 와 최소유동단면부에서의 유동속도 V_{vc} 로부터 최소유동단면부의 면적을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{vc} &= \frac{C_v \sqrt{\frac{\Delta p_{obs}}{G_f}}}{\sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p_{vc}}{\gamma}}} = C_v \sqrt{\frac{\gamma}{2g \cdot G_f}} \sqrt{\frac{\Delta p_{obs}}{\Delta p_{vc}}} \\ &= C_v \cdot F_L \sqrt{\frac{\gamma}{2g \cdot G_f}} \end{aligned} \quad (24)$$

$$A_{vc} = \frac{\pi}{4} D_{vc}^2 \text{이므로,}$$

$$D_{vc}^2 = \frac{4}{\pi} C_v \cdot F_L \sqrt{\frac{\gamma}{2g \cdot G_f}}$$

$$D_{vc} = \left(\frac{4}{\pi} C_v \cdot F_L \sqrt{\frac{\gamma}{2g \cdot G_f}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

밸브를 통하여 흐르는 유동유체를 이미 설계자가 알고 있으므로 밸브의 유량계수 C_v 와 압력회복계수 F_L 이 주어지면 밸브의 레이놀드수는 위식으로 부터 쉽게 구할 수 있으며, 구체적인 단위환산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{vc} &= 0.0153 \sqrt{C_v \cdot F_L} \text{ (ft)} \\ &= 0.1832 \sqrt{C_v \cdot F_L} \text{ (inch)} \end{aligned} \quad (26)$$

위식에 의하여 구해지는 밸브내에 형성되는 최소유동단면의 직경을 식(22)의 R_{cr} 의 식에 대입하면,

$$R_{cv} = 17300 \frac{q}{v \sqrt{C_v \cdot F_L}} \quad (27)$$

위식을 실제로 설계에 적용할 경우, 레이놀즈수가 밸브 입구부에서의 유입속도를 무시한 경우의 값이라는 사실에 주목하여야 한다. 유입속도를 고려한 경우의 밸브의 레이놀즈수는 지금까지의 유도과정과 동일한 방법을 사용함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$D_{vc} = \left\{ \frac{1}{D_1^4} + \frac{890}{(C_v \cdot F_L)^2} \right\}^{-\frac{1}{4}} \text{ (inch)} \quad (28)$$

위와 동일한 방법으로 식(22)에 대입하여 단위를 정리하면 최종적으로 다음식이 얻어진다.

$$R_{cv} = 17300 \frac{q}{v \sqrt{(C_v \cdot F_L)}} \sqrt[4]{\frac{(C_v \cdot F_L)^2}{890 D_1^4} + 1} \quad (29)$$

5. 레이놀드보정계수

제4장에 기술한 식(27)와 식(29)에서 밸브에 의하여 레이놀드수를 구하는 이유는 식(15)와 식(17)에 포함된 레이놀드보정계수 F_R 을 구하기 위해서이다. 일반적으로 밸브내를 유동하는 액체의 점성에 따라 변화하는 유량의 영향은 60°F의 물로서 완전한 난류유동을 형성시켜 밸브가 절식(Choking)되지 않는 범위내에서 측정된 밸브유량계수 $C_{v \text{ test}}$ 와 60°F의 물과는 다른 점성을 가지는 액체를 유동시켜 측정된 밸브유량계수 $C_{v \text{ actual}}$ 과의 비(Ratio)를 밸브의 레이놀드수에 따라 변화하는 그

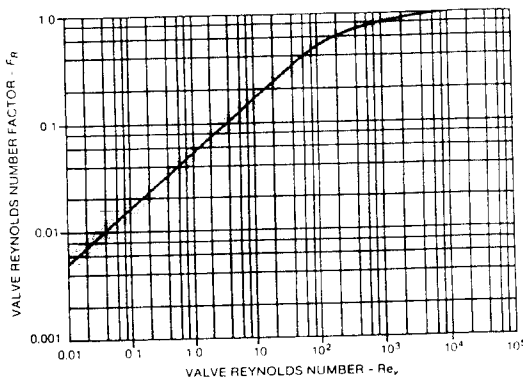


Fig. 2 Reynolds number factor, F_R

래프의 형식으로 표현하며, Fig. 2는 이와 같은 목적으로 ISA S75.01에서 제공하고 있는 $R_{cv} - F_R$ 의 그래프이다. 따라서 60°F의 물과는 다른 점성을 가지는 액체가 유동하는 경우, 이 액체에 대한 밸브유량계수를 구하기 위해서는 밸브의 레이놀드수를 구하여 그림 2에서 $F_R = \frac{C_{v \text{ actual}}}{C_{v \text{ test}}}$ 을 구하고, 이를 밸브제작자에 의해 제공되어진 밸브유량계수에 곱해주면 된다.

5. 결 론

ISA S75.01의 내용은 결코 밸브유량계수, 밸브의 레이놀드수 그리고 레이놀드보정계수에 국한되어 있는 것은 아니며, 밸브의 입출구에서의 압력이 계속 증가하여도 밸브를 통한 유량이 증가하지 않는 임계유동, 밸브의 입출구부에 설치된 배관소재에 의한 영향, 밸브유량계수와 밸브의 저항계수(Resistance Coefficient)와의 관계, 그리고 유동유체가 증기(Vapor)나 기체(Gas)인 경우에 관한 사항도 포함하고 있지만 이 논문에서는 실제로 밸브를 선정하거나 설계하는 경우 설계자가 반드시 숙독하여야 할 우선적인 사항인 밸브유량계수 및 레이놀드보정계수의 산정법을 기술하였다.

밸브의 레이놀드수를 구하기 위한 식(27)과 식(29)을 이용하여 직접 계산을 수행하면 밸브의 입구부에서의 유입속도를 무시한 경우와 이를 고려한 경우와의 차이가 없음을 확인할 수 있는데, 이는 유입속도를 고려한 식(29)에 포함된 4승근의 값이 C_v, F_L 및 D_1 의 값에 관계없이 거의 1.0을 유지하기 때문이다. 따라서 밸브의 레이놀드수를 구하기 위하여 계산과정이 복잡한 식(29)을 구태여 사용할 필요가 없다는 사실을 알 수 있다.

그리고 Fig. 2로 부터 $R_{cv} > 33000$ 인 영역부터는 $F_R = 1.0$ 으로서 거의 수평의 직선상태를 유지하는데, 이 영역부터는 완전한 난류유동상태임을 의미하며 밸브를 통과하는 유량은 $\sqrt{\Delta p}$ 에 비례하여 증가함을 의미한다. $R_{cv} < 100$ 인 영역에서 F_R 은 직선형태로 증가하는데, 이 영역까지는 완전한 층류유동상태임을 의미하며 밸브를 통과하는 유량은 Δp 에 비례하여 증가한다. 그리고 $100 < R_{cv} < 33000$ 인 영역에서는 F_R 이 곡선형태로 증가하는데, 이 영역

은 층류유동상태에서 난류유동상태로 변화하는 전이영역(Transition Area)임을 의미한다. 그러므로 밸브의 레이놀드수는 단면이 원형인 배관내의 층류유동과 난류유동을 구분하는 레이놀드수와는 다른 경계값을 가진다는 사실을 알 수 있다⁹⁾.

참고문헌

- 1) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.01, Flow Equations for Sizing Control Valves", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina(1985).
- 2) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.02, Control Valve Capacity Test Procedure", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina(1981)
- 3) Instrument Society of America, "ANSI/ISA S75.03, Control Valve Terminology", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina(1983)
- 4) Instrument Society of America, "ISA Handbook of Control Valves 2d Edition", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina(1976)
- 5) International Electrotechnical Commission, "IEC Standard 534 - 1, Industrial - Process Control Valves, Part 1 : Control Valve Terminology and General Considerations", International Electrotechnical Commission, Geneva, Swiss(1987)
- 6) International Electrotechnical Commission, "IEC Standard 534 - 2, Industrial - Process Control Valves, Part : 2 : Flow Capacity, Section 1, Sizing Equations for Incompressible Fluid Flow under Installed Condition", International Electrotechnical Commission, Geneva, Swiss(1978)
- 7) International Electrotechnical Commission, "IEC Standard 534 - 2 - 3, Industrial - Process Control Valves, Part : 2 : Flow Capacity, Section 3, Test Procedure", International Electrotechnical Commission, Geneva, Swiss(1983)
- 8) E. B. McCutcheon, "A Reynoldss Number for Control Valves", Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol I, Part 3, Instrument Society of America, Pittsburgh, Pennsylvania(1974)
- 9) Philip M. Gerhart, Richart J. Gross, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison - Wesley Publishing Company(1985)
- 10) 김경근, 김춘식, 손경호, 송강섭, "수리학 및 유체역학 연습", 태화출판사(1986)
- 11) 이택식, "유체역학", 동명사(1986)