

Control Valve 의 選定法

朴 健 裕*

1. 序 論

自動制御는 모든 産業部門에서 널리 應用되고 있으며 더욱 최근의 computer의 發展과 함께 하나의 主要學問으로 體系化 되어가고 있다. 이와 함께 control loop의 最終 制御手段인 control valve도 그 構造와 特性에서 많은 發展을 보이고 있으며, 특히 流體를 많이 取扱하는 化學工業分野에서는 그 重要性이 한층 더 커지고 있다. 이러한 control valve의 機能을 充分히 발휘하기 위한 要件으로는 材質, 構造 크기등이 있으며, process의 性質에 따라 材質과 構造 그리고 valve의 크기등은 process를 특히 잘 理解하고 있는 現場技術士들에 의해 決定되는 것이 가장 바람직하다고 생각된다. 또 valve의 크기는 最初 工場建設費의 節約과 運轉中 control valve로 因하여 作業이 中斷되는 일이 없도록 신중히 선택하여야 하며 같은 크기의 control valve라고 하더라도 그 構造에 따라 자기 다른 流量特性을 가지고 있으므로 工程에 相應하는 control valve를 선택하여야 할 것이다. 다음에는 이러한 control valve를 선택하는데 다소 도움이 되도록 하기 위하여 構造, 材質 크기의 決定方法과 control valve를 by-pass 등과 함께 配管도중에 實際로 設置한 경우를 고려하여 流量特性和 몇가지 유의사항을 기술하였다.

2. 構造와 材質

가. Actuator

다음에 使用되는 源語는 美國의 ASME(American Society of Mechanical Engineers)와 FCI(Fluid Controls Institute Inc.)에서 制定한 것이나 간혹 慣例等에 따른 用語도 包含되어 있다

調節瓣(Control valve)은 一般的으로 驅動部(Actuator)

를 가지고 있는 動力驅動瓣(Power actuated valve)으로서 이 actuator는 機械, 流體, 熱 또는 電氣의 에너지를 機械적인 變位로 바꾸어 주는 것을 말한다. 이에 대해 손으로 움직이는 valve를 manual actuated valve라고 부른다. Power actuator(Power actuated valve를 가리키는 경우도 많다)는 動力根源에 따라서

Mechanical Actuator
Pneumatic Actuator
Hydraulic Actuator
Electric (or Electronic) Actuator
Thermal Actuator

등으로 分類되고 電動機, 油壓모터, 空氣모터 등의 회전을 利用하는 경우

Electric motor actuator
Hydraulic motor actuator
Pneumatic motor actuator

로 分類되기도 한다. Actuator 자체의 構造上으로는

Spring and diaphragm or piston actuator
Springless diaphragm or piston actuator

로 구분되고 특히 Actuator의 特性上的 相違로 부터

Two-position (or on-off) actuator
Positioning actuator

로 區分하고도 있다. Actuator에 사용되는 에너지 즉 power signal의 發生源이 valve自體에 있는 것을 regulator라고 부르고 操作端으로서 比例位置의 Actuator를 갖는 것을 control valve, 2位置의 actuator를

* 韓國科學技術研究所 高分子室

갖는 것을 powered valve 라고 區別하고 있다. 그러므로 보통 control valve 라고 하면 比例位置의 actuator 를 갖는 調節瓣을 指稱하고 있는 것이다.

나. Valve body

調節瓣中 가장 널리 使用되고 있는 것은 Fig. 1과 같이 diaphragm actuator 를 갖는 diaphragm control valve 로서 다음과 같이 構成되어 있다.

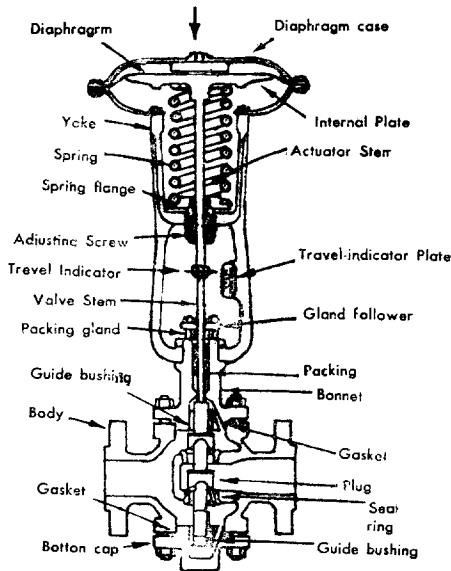
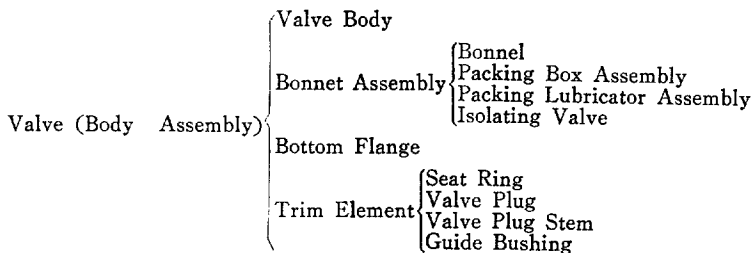
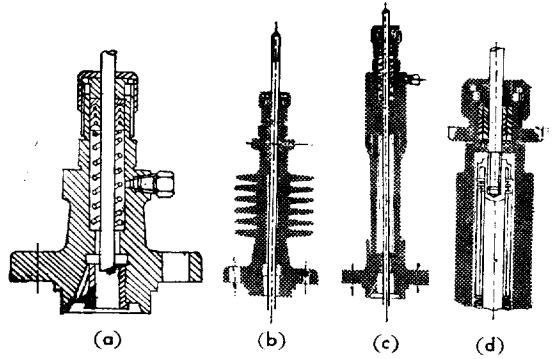


Fig. 1. Diaphragm Control Valve.



Bonnet assembly 에는 Fig. 2 와 같이 標準型, 放熱型 (Radiation Fin Bonnet), 低溫等에 有利한 extension bonnet, 그리고 流體가 valve stem 혹은 packing material 등과 전혀 接觸이 없는 bellows seal 등이 있다. 또 valve plug 에는 Fig. 3 과 같이 여러種類가 있으며 on-off control 인 경우에는 (a)型的 beveled seat valve 를 사용하고 valve stem 이 움직인 거리(stroke)에 대해서 流量등이 比例하는 것이 要求될 때는 (b)(c)(d)



a. Regular type b. Radiation Fin c. Extension d. Bellows seal

Fig. 2. Bonnet Assembly.

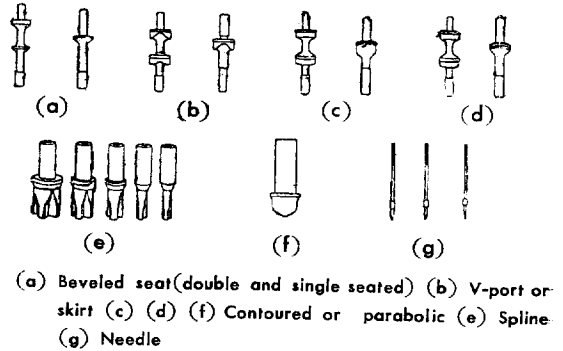


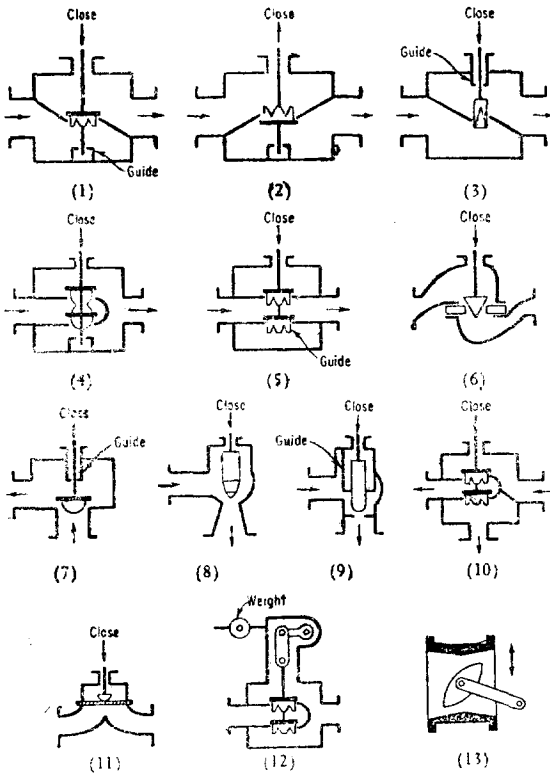
Fig. 3. Valve plugs.

등이 많이 쓰이며 적은 流量調節을 위해서는 (e), (f), (g)型이 널리 쓰인다. 보통 throttling valve 라고 하면 比例調節이 可能한 seat 를 갖는 valve 를 말한다.

또 control valve 를 配管하기 위하여는 連結部에 threaded(screw)와 flange type 이 있고 flange type 에

또 flat face, raised face, large or small tongue and groove, ring joint 등이 있으므로 valve 선택시 크기 및 壓力定格(Pressure ratings)과 함께 유의하지 않으면 안된다.

또 seat 와 plug 에 있어서도 Fig. 4 와 같이 單座型 (single seated)과 複座型(double seated)으로된 여러가지 型이 있으며 用途와 費用을 고려하여 적절히 선택하여야 한다. 複座型의 경우 費用은 많이으나 自體의



- (1) Single seated, direct-acting
- (2) Single seated, reverse-acting
- (3) Single seated, valve plug guiding in head
- (4) Double seated, streamlined plug
- (5) Double seated, skirt guide
- (6) Globe type with split body
- (7) Angle type
- (8) Angle type with venturi outlet
- (9) Angle type, self-balanced
- (10) Double seated, three way
- (11) Diaphragm (Saunders patent)
- (12) Double seated with rotary stem
- (13) Butterfly disk type

Fig. 4. Basic Valve Body Designs.

平衡性으로 正確한 流量調節이 可能하다.

Fig. 1과 같은 valve의 경우 energy signal인 空氣壓이 커지면 valve는 닫힌다. 이러한 valve를 air to close(또는 normally open, fail open이라고도 한다) valve라고 하며 반대로 空氣壓이 커지면 valve가 열리는 型の valve를 air to open(또는 normally close, fail close라고도 한다) valve라고 해서 配管設計時 工程의 內容을 正確히 파악하여 選擇하여야 한다. 예를 들면 反應機의 壓力을 冷却水로 調節할 때 冷却水가 끊어지면 反應機壓力이 上昇하여 危險이 있을 때에는 energy signal이 停電 혹은 其他 要因으로 끊어지는 경우 冷却水는 自動적으로 充分히 供給될 수 있는 "fail open"

型的 valve를 선택하여야 하고 원료및 제품 給送등에 설치된 valve는 "fail close" valve를 선택하여야 한다.

다. 材 質

Control valve assembly 가운데 材質이 가장 중요시 되는 곳은 valve body로서 필요에 따라서는 내부의 valve seat, valve plug 등의 材質도 別途로 指定해 주지 않으면 안된다. 普通 金屬材料를 使用한 valve body는 鍛造(Forging) 또는 鑄造(casting)에 의하여 製作되며 各 製作會社에 따라 다르다. 一例를 들면 보통의 鍛造제품으로는 日本規格으로 SF-45, SF-50 등의 鍛鋼(forged steel), BsBF 등의 黃銅(brass), SUS-24 SUS-27, SUS-32 SUS-43 등의 不銹鋼(stainless steel) 등이 많이 使用되며 鑄造製品으로는 FC-19, FC-23 등의 鑄鐵(cast iron), SC-46, SC-49등의 鑄鋼(cast steel) BC-6 등의 靑銅(bronze), SUS-24, SUS-27, SUS-32, SUS-43 등의 不銹鋼등이 使用되고 있다.

이 외에도 耐熱材料로서는 C-Mo 鋼 5 Cr-1/2 Mo 鋼, -25°C 以下の 溫度에서는 Cr-Cu 鋼등이 쓰이며 耐蝕用으로는 上記 不銹鋼 이외에도 monel, Hastelloy B, C, D 등이 쓰이며 valve plug 와 seat ring 등에는 上記材料 이외에도 stellite 나 colmonoy 등을 사용하기도 한다.

이들 金屬材質로 된 valve 들은 溫度및 壓力에 따라 機械的 強度가 많이 변하므로 control valve 선택시에는 運轉條件을 充分히 고려하여 適當한 pressure-rating 을 갖는 valve를 선택하여야 한다. Fig. 5에 보통 調節辦에 많이 쓰이는 SUS-27(AISI 304)鑄鋼의 壓力-溫度 定格을 例示하였다.

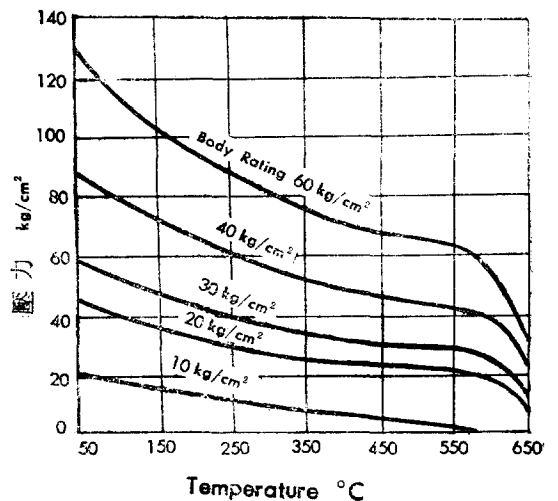


Fig. 5. Pressure and Temperature Rating of SUS 27 Stainless Steel.

3. 調節弁크기의 決定方法

가. 流量係數 C_v 計算法

流體가 調節弁을 통해서 흐를때 valve 兩端의 壓力降下와 流量 그리고 流體의 比重등은 가장 適當한 調節弁을 選擇하는데 重要な 要素들이며 流體가 氣體 혹은 液體의 區分과 液體의 粘度등도 valve 의 크기를 決定하는데 影響을 준다. Valve의 크기를 決定하는데 사용되는 記號 C_v 는 流量係數(Flow coefficient)라고 말하며 valve 의 製作會社에서는 自己 製品에 대하여 實驗的으로 測定된 C_v 값을 알려 주고 있다.

流量係數 C_v 는 調節弁을 완전히 열어놓은 狀態로 60° F 에서 물을 通過시켜 valve 兩端間의 壓力降下가 1 psi 가 되도록 했을 때 1 分間에 通過하는 물의 量을 U. S. gallon 단위로 表示한 것을 定義로 하고 있다. 이것은 15° C 에서 壓力降下를 0.0049 kg/cm² 로 했을때 通過하는 물의 量을 分當 liter 數로 表示한 것과 同一하다.

液體의 흐름에 대해서 가장 基本的이고 잘 알려진 式은

$$Q = kA \left(\frac{P_1 - P_2}{G} \right)^{0.5} \quad (1)$$

이다.

여기서 Q ; Flow rate, gpm

P_1 and P_2 ; Pressures measured across the valve, psi

G ; Specific gravity referred to water

k ; Constant

A ; Port area of valve sq. in.

물에 대하여 $G=1$ 이므로 (1)式은

$$Q = kA(P_1 - P_2)^{0.5} \quad (2)$$

으로 된다. 여기서 $P_1 - P_2$ 를 1 psi 라고 하면

$$Q = kA \quad (3)$$

와 같이 簡單히 表示되어 이것은 valve 의 port area 가 A 이고 valve 兩端間의 壓力降下가 1 psi. 일때 물의 流量을 表示한 것으로 바로 流量係數 C_v 의 定義가 된다. 그러므로 (3)식의 kA 를 C_v 로 置換하고 (1)식에 다시 代入하므로써

$$Q = C_v \left(\frac{P_1 - P_2}{G} \right)^{0.5} \quad (4)$$

을 구할 수 있다.

예를 들면 1 in. double seated control valve 의 C_v 가 9 라고 하고 pressure drop 이 64 psi 일때 比重 1.44 인 液體의 流量은

$$Q = 9 \left(\frac{64}{1.44} \right)^{0.5} = 60 \text{ gpm}$$

이 된다.

Valve 크기에 따른 C_v 의 값은 流量이 valve 의 斷面積에 比例하므로 1 in. valve 의 C_v 가 10 程度라는 것을 記憶하면 2 in. valve 는 약 40, 4 in. valve 는 약 160 정도라고 推測할 수 있다.

즉

$$\begin{aligned} C_v &\approx 10 d^2 (d: \text{in.}) \\ &\approx 1.55 d^2 (d: \text{cm}) \end{aligned} \quad (5)$$

그러나 같은 크기의 valve 라도 製造會社와 valve 의 固有特性에 따라 다르며 Table. 1 에는 valve 크기에 따른 流量係數 C_v 의 大略의 값의 범위를 表示하고 있으며 Table. 2 에는 1 in. 에서 10 in. 까지의 steel pipe 各種에 대해서 5 ft/sec 로 물이 흘러간다고 보았을 때 流量을 gpm 單位로 表示하였고 Table. 3 에는 많이 쓰이는 調節弁의 各種 規格에 대하여 valve 兩端間의 壓力降下를 10 psi, 20 psi 로 했을때 流量과 C_v 값과의 關係를 表示하고 있다. 實用的인 配管에서 流速이 5 ft/sec 내지 10 ft/sec 이고 조절弁 양단간의 압력도 10 psi 내지 20 psi 로 설계되는 경우가 많으므로 위의 표들은 調節弁의 크기를 대략 정하는데 도움이 될 수 있으리라고 생각한다.

Table 1. Comparative C_v Ratings

Control valve nominal pipe size, in.	Internal Trim size, in.	Port area sq. in.	C_v rating, fully open
1	1/2	0.21	4.4~5.2
	3/4	0.44	9.6~11.1
	1	0.88	17.4~19.5
1 1/2	1	0.90	15.4~20.9
	1 1/2	1.85	33.1~34.4
2	1 1/4	1.70	32.4~37.6
	2	3.60	59.5~67.0
3	2	3.30	75.2~89.0
	3	6.60	59.5~67.0
4	3	5.70	105~114
	4	11.50	210~220
6	4	12.40	233~248
	6	26.00	505~520

Table 2. Flow Rates of Water at Velocity of Approximately 5 fps in Steel Pipe

Nominal pipe size, in.	Steel pipe schedule	ID. in.	Flow rate gpm
1	40	1.049	13
	80	0.957	11
	XX	0.599	5
1 1/4	40	1.380	23
	80	1.278	20
	XX	0.896	10
1 1/2	40	1.610	32
	80	1.500	28
	XX	1.100	15
2	40	2.067	53
	80	1.939	47
	XX	1.503	28
2 1/2	40	2.469	75
	80	2.323	68
	XX	1.771	38
3	40	3.068	115
	80	2.90	98
	XX	2.30	70
4	40	4.026	200
	80	3.826	180
	XX	3.152	125
6	40	6.065	450
	80	5.761	405
	XX	4.897	290
8	40	7.981	775
	80	7.625	725
	XX	6.871	540
10	80-std.	10.02	1250
	80-ex.	9.750	1150
	strong		

實際로 C_v 값을 구하는 實用的인 方法이 valve 제작 회사별로 作成되어 使用되어 왔으나 最近 美國 FCI 의 計算方法을 大部分 標準으로 採擇하고 있으며 MKS 單位 및 FPS 單位로 表示된 C_v 값 計算方法은 "Table 4"와 같다. 단 MKS 單位는

Q : Flow rate of liquid or gas	m^3/h
W : Flow rate of steam	kg/h
P_1 : Upstream pressure	kg/cm^2A
P_2 : Down stream pressure	kg/cm^2A

Table 3. Flow Rates through Control Valves at Pressure Drops of 10 and 20 psi.

Nominal pipe size of control valve in.	10 psi		20 psi	
	Flow gpm	C_v	Flow gpm	C_v
1/2	7.2	2.3	10	2.2
3/4	15.2	4.8	25	5.6
1	28	8.9	40	9
1 1/2	63	20	88	20
2	117	37	160	36
2 1/2	178	57	250	56
3	260	82	360	81
4	430	136	650	145
6	1030	328	1450	324
8	1800	570	2600	580
10	2800	885	4000	895

ΔP : Pressure difference kg/cm^2

G : Specific gravity referred to water for liquids and to air for gases

T : Flowing temperature $^{\circ}C$

T_{SH} : Superheated degree $^{\circ}C$

이고 FPS 단위에서는

Q : GA/min. for liquids and ft^3/h for gases

W : lb/h

P_1, P_2 : PSIA

ΔP : PSI

G : Specific gravity (ditto)

T, T_{SH} : $^{\circ}F$

이다.

C_v 값 계산에 있어서 gas 및 steam 의 경우 $P_2 < \frac{P_1}{2}$ 이면 $\sqrt{\Delta P(P_1 + P_2)} = 0.87 P_1$ 으로 簡略히 使用할 수 있으며 또 gas 의 경우 溫度 $0 \sim 60^{\circ}C (30 \sim 140^{\circ}F)$ 범위 내에서는 溫度補正을 하지 않아도 무방하다.

實際로 control valve 를 선택할 때에는 計算된 값보다 크고 가장 가까운 값을 같은 valve 를 택하게 되며 계산치의 1.2~2 배 정도로 C_v 가 큰 값을 擇하게 되는 것이 普通이다.

나. 粘度補正

流量係數 C_v 는 Reynolds Number 가 큰 경우에는 비교적 잘 成立하나 Reynolds Number 가 적은 경우 流体는 層流에 가까워지고 이 때에는 計算된 C_v 보다 큰

Table 4. Calculation of Flow Coefficient C_v

	Liquid	Gas	Saturated Steam	Superheated Steam
MKS	$\frac{1.167 Q\sqrt{G}}{\sqrt{\Delta P}}$	$\frac{Q\sqrt{G(492+\frac{9}{5}T)}}{388\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$ or $\frac{Q\sqrt{G}}{17.0\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$	$\frac{W}{13.5\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$	$\frac{(1+0.00126 T_{SH})W}{13.5\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$
FPS	$\frac{Q\sqrt{G}}{\sqrt{\Delta P}}$	$\frac{Q\sqrt{G(T+460)}}{963\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$ or $\frac{Q\sqrt{G}}{42.2\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$	$\frac{W}{2.1\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$	$\frac{(1+0.0007 T_{SH})W}{2.1\sqrt{\Delta P(P_1+P_2)}}$

容량의 valve 가必要하게 된다. 따라서 粘度가 크고 Reynolds Number 가 적은 경우에는 補正이 必要하다. 만일 valve 의 口徑을 d cm 平均流速을 w cm/sec 流體의 動粘度를 ν centistokes라고 하면 Reynolds Number R 은

$$R = \frac{wd}{\nu} \quad (6)$$

流量을 Q_L m³/h 라고 하면 式은

$$R = \frac{4}{\pi} \frac{V}{d\nu} \quad (7)$$

로 된다. C_v 와 d 와의 관계가 (5)식과 같이

$$d = \sqrt{\frac{C_v}{1.55}} \quad (8)$$

라고 하고 代入하여 MSK 단위로 계산하면

$$R = 44000 \frac{Q_L}{\nu\sqrt{C_v}} \quad (8)$$

로 된다. 따라서 Reynolds Number R 에 대한 補正係數 K 를 實驗的으로 求하면 補正된 C_v corr.는

$$C_v \text{ corr.} = C_v \cdot K \quad (9)$$

로 된다.

이와 같이 사용된 Reynolds Number는 보통 粘性指數(Viscosity Index)라고 불리우며 Fig. 6은 粘性指數 R 과 補正係數 K 와의 관계를 나타낸 그림이다. 만일

粘度가 SSU(Saybolt Seconds Universal)단위로 測定된 경우에는 (8)式은

$$R = 205000 \frac{Q_L}{\text{SSU} \cdot \sqrt{C_v}} \quad (10)$$

과 같이 된다.

일반 作業溫度 범위에는 粘度가 100 SSU 또는 20 centistokes 이하인 경우에는 粘度의 影響은 무시할 수 있다.

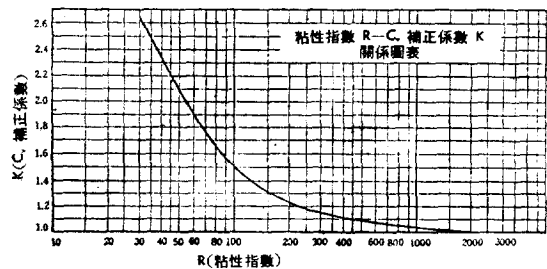


Fig. 6. C_v Correction Factor K vs. Viscosity Index R .

다. 蒸發液體(Flashing Liquids)

물이나 혹은 거의 포화된 수증기는 熱力學上 valve 등을 통해서 壓力降下가 일어나면 valve의 出口 쪽에서는 물과 수증기의 混合物이 나오게 된다. 이러한 경우에는 앞서의 C_v 값 計算方法으로는 正確한 C_v 算定이 어려워진다. 이때의 C_v 값 計算方法으로는 flashing percentage로 부터 구한 氣體와 液體의 C_v 값을 加算하는 방법 이외에도 限界壓力比(Critical pressure ratio)를 利用하는 Fisher Governor社의 Brockett法, Honeywell法, Ziegler 및 Conoflow Corp.法등 많은 방법이 제시되어 있다. 이들 방법에 의한 C_v 計算은

比較的 複雜하고 圖式들이 많이 必要하므로 여기서는
加算法과 Fisher Governor 方法만을 簡略히 說明하기
로 한다.

(1) 加算法

H_1 을 valve 入口쪽 液溫에서의 enthalpy, Kcal/kg

H_2 를 出口쪽 壓力에 대한 飽和溫度에서의 enthalpy
Kcal/kg

ρ 를 出口쪽 溫度에서의 蒸發潛熱 Kcal/kg

X 를 氣化되어 있는 重量比率 kg/kg

이라고 하면

$$X = \frac{H_1 - H_2}{\rho}$$

따라서 流量을 W kg/h 라고하면 氣體는 XW kg/h,
液體는 $(1-X)W$ kg/h 이므로 各各의 密度로부터 $C_{v, gas}$,
 $C_{v, liq}$ 를 구하고

$$C_v = C_{v, gas} + C_{v, liq} \quad (11)$$

을 求하여 C_v 의 概略的인 값으로 使用한다.

(2) Fisher Governor 法

限界壓力比率를 使用하는 方法으로 물-水蒸氣系에서
는 valve 入口측 壓力에 대해서 壓力降下가 1/2 以下이
면, Table 4의 一般公式로 計算하고 1/2 以上인 경우
에는 Fig. 7 과 같이 實驗的으로 얻어진 限界壓力降下
比(Critical pressure drop ratio)를 그림으로부터 읽어
계산한다. 그림에서 ΔT 는 valve 入口에서의 壓力 P_1
에 대한 飽和溫度에서 實際溫度를 뺀값이며 이때의 壓
力降下는 實測值 ΔP 대신 $K_L P_1$ 값을 使用한다.

$$C_v = \frac{Q \sqrt{G}}{\sqrt{K_L \cdot P_1}} \quad (12)$$

여기서 Q 는 gpm, ΔT 는 °F 그리고 P_1 은 psia 이다.

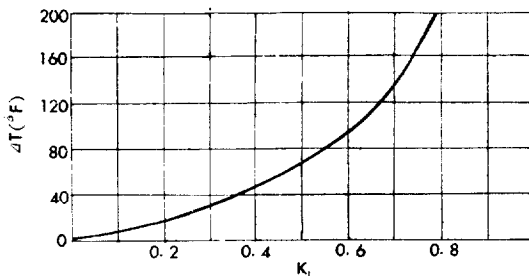


Fig. 7. Critical Pressure Drop Ratio.

4. 調節弁의 流量特性

調節弁의 stem 이 움직이는 거리를 lift 혹은 stroke 라
고 하며 stroke 가 0에서 100 %까지 변할때 valve 를
通過하는 流量은 valve plug 形狀에 따라 크게 다르며
이러한 valve 特性을 流量特性(Flow characteristics)이라
고 말한다. Valve 兩端에서의 壓力 降下가 일정 할때의
valve 特性을 固有流量特性(Inherent Flow characteris-
tics)이라고 하고 valve 兩端의 壓力 降下가 valve가 設置
되어 있는 系의 條件에 따라 변화할때의 valve 特性을

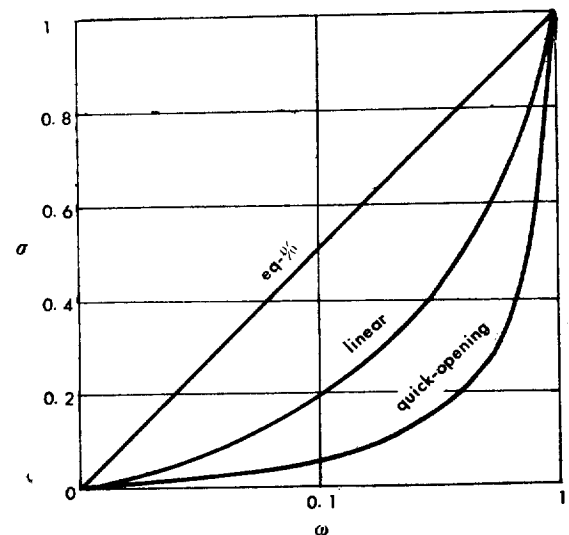
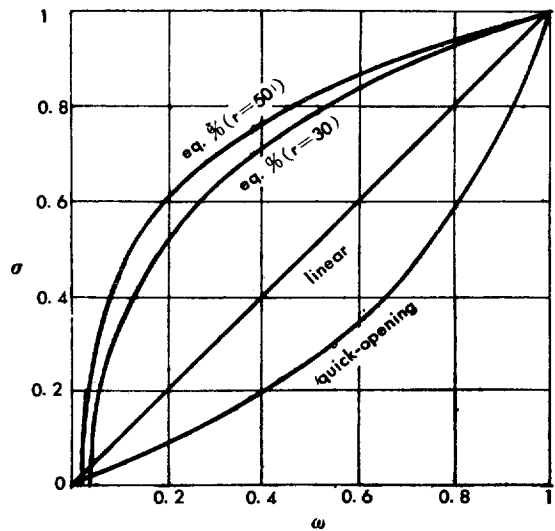


Fig. 8. Flow Characteristics of Control Valve.

有效流量特性(Effective flow characteristics)이라고 구분하고 있다. 固有流量特性은 다음 세가지로 分類된다.

- Linear flow characteristics
- Equal percentage flow characteristics
- Quick opening flow characteristics

Fig. 8 에는 이들의 流量特性曲線을 表示하였으며 이 중 linear 와 equal percentage 특성이 重要하고 quick-opening 은 이중에 포함시킬 수 있으므로 이들에 대한 流量特性을 몇가지 경우로 나누어 例示하고자 한다.

가. 固有流量特性

調節辨을 전부 닫았을때와 열었을 때의 流量係數를 각각 $C_{v \min}$, $C_{v \max}$, 任意的 순간에 있어서의 流量係數를 C_v 라고하고 $\omega = C_v / C_{v \max}$ 로 한다. 또 調節辨의 全 stroke 를 S_{\max} , 任意的 stroke 를 S 라고 하고 $\sigma = S / S_{\max}$ 로 하는 한편 rangeability 를 r 을 $r = \frac{C_{v \max}}{C_{v \min}}$ 이라고 하면

linear 特性은

$$C_v - C_{v \min} = k S (k: \text{constant})$$

$$C_{v \max} - C_{v \min} = k S_{\max}$$

위 두식을 정리하면

$$\omega = \left(1 - \frac{1}{r}\right)\sigma + \frac{1}{r} \quad (13)$$

r 이 충분히 큰 경우에는 $\omega = \sigma$ 가 된다.

한편 equal percentage 特性은

$$\frac{dC_v}{dS} = k C_v \text{ 로 부터}$$

$$\omega = r^{(\sigma-1)} \quad (14)$$

을 구할 수 있고 Fig. 8 과 同一한 曲線을 얻게 된다. 또 數式에서도 볼 수 있듯이 stroke 가 0 % 인 경우에도 조절弁은 流量이 있는 경우가 많다.

여기서 rangeability 는 流量調節범위 내에서 valve 를 통과하는 最大流量의 最小流量에 대한 比로 定義된다.

즉

$$\begin{aligned} r &= \frac{C_{v \max}}{C_{v \min}} = \frac{Q_{\max} \sqrt{\Delta P_{\max}}}{Q_{\min} \sqrt{\Delta P_{\min}}} \\ &= \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \end{aligned} \quad (15)$$

이 rangeability 는 V-port 에서는 50 : 1, parabolic plug 에서는 30 : 1, Butterfly valve 에서는 15 : 1 정도 된다.

實際 運轉시의 流量特性은 linear valve 인 경우에도 stroke 의 位置에 따라 stroke 변화에 따른 流量변화가 다르며 單位感度(unit sensitivity)로서 表示되는데 그 定義는 다음과 같다.

$$S_v = \frac{\frac{d\omega}{d\sigma}}{\omega} \quad (16)$$

S_v : Unit sensitivity

Linear 特性은 $S_v = \left(1 - \frac{1}{r}\right) / \omega$ 이고 equal percentage 에서는 $S_v = \ln r$ 로 表示된다.

이러한 valve 의 感度는 制御系의 靜特性 및 動特性을 解析하는데 有用하게 사용된다.

나. 管路抵抗의 影響

配管設備中 調節辨以外的 抵抗이 流量의 自乘에 比例한다고 가정하고 管路의 全 壓力降下를 ΔP_t , 調節辨의 全開時流量을 f_{\max} , 壓力降下를 ΔP_{\min} , 또 조절弁의 任意的 開度에 있어서 流量을 f , 壓力降下를 ΔP 라고 하면

$$\begin{aligned} f_{\max} &= C_{v \max} \sqrt{\Delta P_{\min}} \\ f &= C_v \sqrt{\Delta P} \\ \frac{f_{\max}^2}{\Delta P_t - \Delta P_{\min}} &= \frac{f^2}{\Delta P_t - \Delta P} \end{aligned}$$

위의 세식으로 부터 $\phi = f / f_{\max}$ 라고 하면,

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{\frac{\phi}{\omega^2} + 1 - \phi}} \quad (17)$$

로 된다. 여기서 $\phi = \Delta P_{\min} / \Delta P_t$ 이다.

(17)式에 固有流量特性 $\omega = \sigma$, $\omega = r^{(\sigma-1)}$ 을 代入하여 ϕ 의 변화에 대한 valve 의 有效流量 特性을 보면 Fig. 9(a), (b) 같다. 단 Fig. 9(b)는 rangeability $r=50$ 인 경우이다.

管路의 全 壓力降下 ΔP_t 에 대해서 調節辨의 壓力降下 ΔP 의 비율 ϕ 를 1/3 이상으로 되도록 配管設計를 하는 것은 有效流量特性이 固有流量特性으로부터 변화하는것을 막기 위한 것이다. Fig. 10 에서는 管路抵抗과 調節辨流量特性 關係를 보여주고 있다. 여기서도 管路

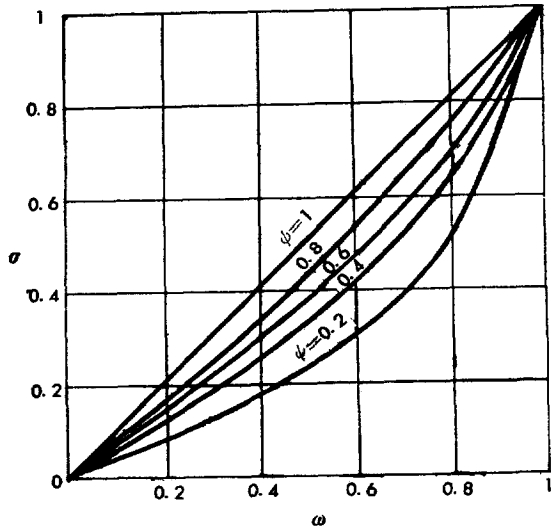


Fig. 9(a). Linear Characteristics.

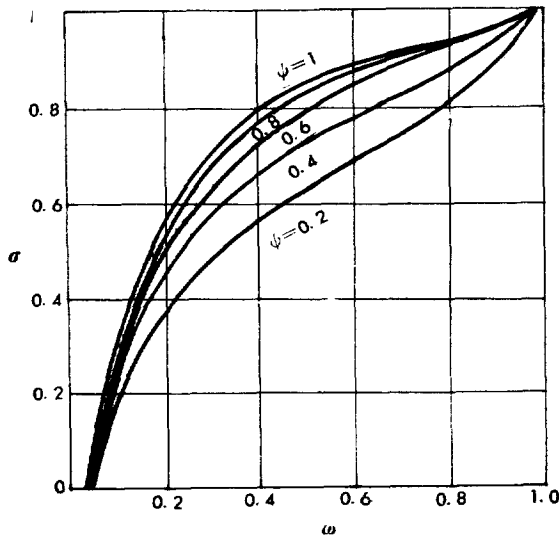


Fig. 9(b). Equal Percentage Characteristics.

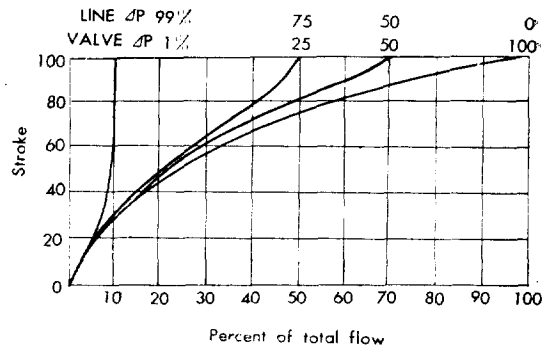
抵抗이 너무크면 조절변에서의 유량조절이 어렵다는 것을 알 수 있다.

다. By-pass 管路의 影響

一般으로 調節弁에는 by-pass 管路를 붙여서 調節弁 保守時 혹은 調節弁容量不足時 手動弁을 一定하게 열어둠으로서 容量을 크게하는 경우가 있다.

지금 by-pass 管路의 等價流量係數를 C_b , 또 $\omega_b = \frac{C_b}{C_{v \max}}$ 調節弁과 by-pass 管路의 總流量을 F , 最大流量을 F_{\max} 라고 하고 $\phi = F/F_{\max}$ 라고 하면 管路 抵抗의 影響이 없는 경우

$$\phi = \frac{(C_v + C_b) \sqrt{\Delta P}}{(C_{v \max} + C_b) \sqrt{\Delta P}} = \frac{\omega + \omega_b}{1 + \omega_b} \quad (18)$$

Fig. 10. Flow Control Dependence on ΔP in Valve.

여기서 ω_b 는 一定하므로 調節弁의 流量 特性은 本質的으로 是 變화도 없다. 그러나 管路 抵抗의 影響이 있는 경우에는

$$\phi = \frac{F}{F_{\max}} = \frac{(C_v + C_b) \sqrt{\Delta P}}{(C_{v \max} + C_b) \sqrt{\Delta P_{\min}}}$$

$$\frac{F_{\max}^2}{\Delta P_t - \Delta P_{\min}} = \frac{F^2}{\Delta P_t - \Delta P}$$

위 두식으로부터

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{\frac{(1+\omega)^2 \psi}{(\omega + \omega_b)^2} + (1-\psi)}} \quad (19)$$

로 된다.

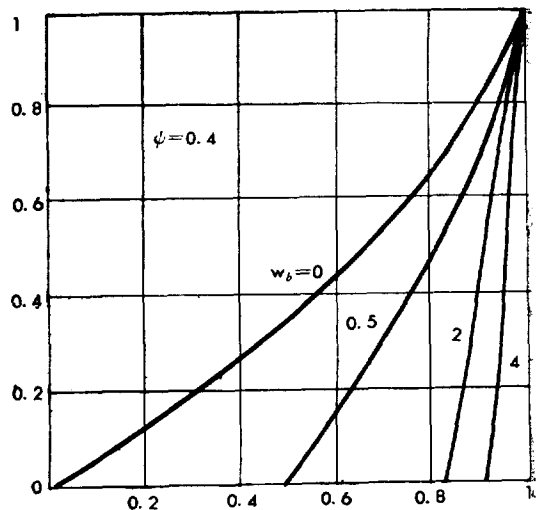


Fig. 11(a). Linear Flow Characteristics with by-pass.

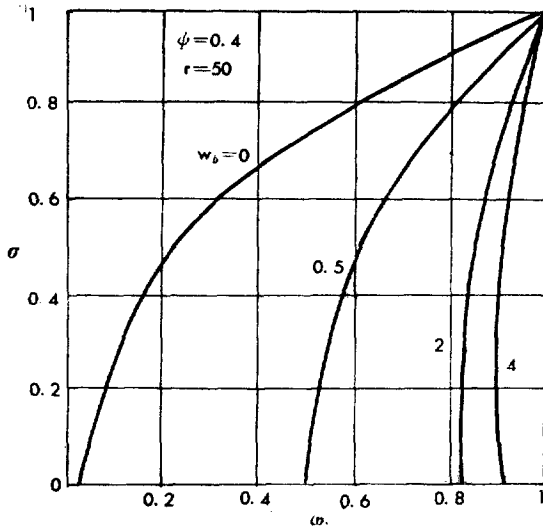


Fig. 11(b). Equal Percentage Flow Characteristics with by-pass.

$\phi = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P_t} = 0.4$ 로 하고 $\omega_b = \frac{C_b}{C_{v\max}}$ 가 변할때의 流量特性은 Fig. 11(a), (b)와 같다. 또 調節辨단의 特性을 알기 위하여

$$\phi = \frac{F - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}}$$

으로 놓고 ϕ 와 σ 의 관계를 보면 Fig. 12(a), (b)와 같아지며 그림으로 부터 by-pass 管路에 流體一部를 흘려 보내는 것도 利用價值가 있음을 알 수 있다. 단

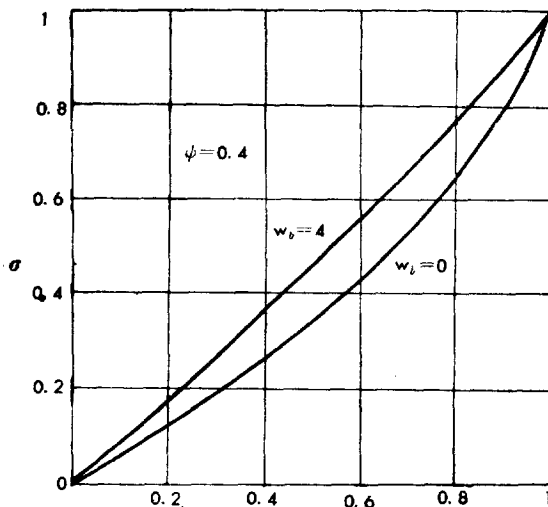


Fig. 12(a). Linear Flow Characteristics with by-pass.

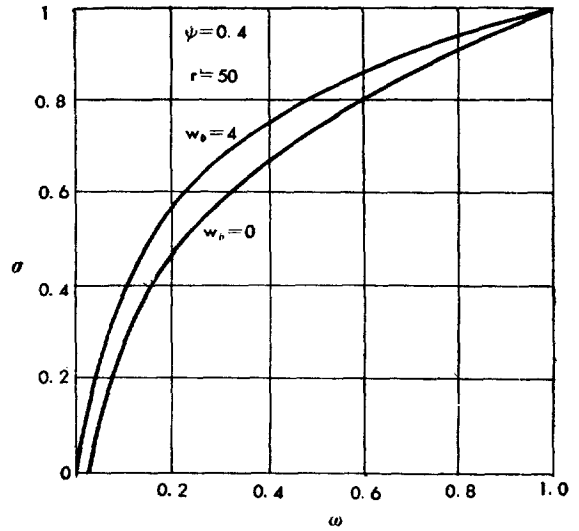


Fig. 12(b). Equal Percentage Flow Characteristics with by-pass.

이 경우 rangeability는 $\omega_b=4$ $\psi=0.4$ 인 경우 조절변의 $r=50$ 이라고 가정해서 全體的인 有效 rangeability는 1.9 정도로 최대유량시에 調節辨은 20 % 流量을 處理할 수 있도록 設計하여도 조절이 가능한 것은 10 % 以下로 떨어지게 된다.

라. 調節辨 特性의 選定

Butterfly valve 나 Saunders diaphragm valve 등의 固有流量特性은 構造上 변할수 없지만 glove 型은 linear, equal percentage, quick opening 등이 있으므로 工程에 맞도록 特性있는 valve를 選擇하여야 한다.

一般的으로 外亂이 적고 設定點의 변화도 크지 않은 경우에는 流量特性이 큰 문제가 되지 않으나 外亂이 클 때, 設定點이 자주 변화할 때, 또는 programming control, proportional control, cascade control 등의 경우에는 plant의 特性변화를 valve 特性으로 補完해 줄 필요가 있다. 이 때의 valve 特性選定方法은 plant의 靜特性, 動特性, 負荷변화의 크기, 驅動部의 特性등이

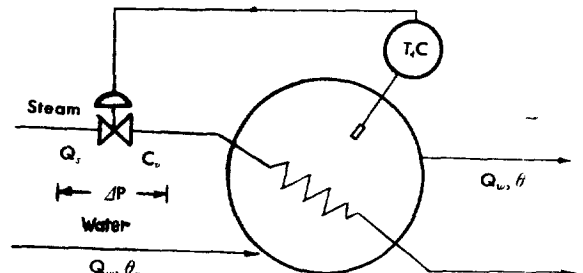


Fig. 13. Temperature control.

관련되어 있고 이들 文獻도 많이 發表되어 있으나 여기서는 靜인 경우에 대한 選定例를 들어 본다.

(1) 溫度制御

Fig. 13 과 같은 물 加熱裝置에서 入口와 出口에서의 물의 溫度를 θ_w 및 θ , 물의 비열은 1 이라하고 수증기 潛熱을 ρ 라고 하면,

$$\rho Q_s = Q_w (\theta - \theta_w) \quad (a)$$

$$Q_s = k C_v \sqrt{\Delta P} \quad (b)$$

(k : constant)

그러므로

$$\theta = k' \frac{C_v \sqrt{\Delta P}}{Q_w} + \theta_w \quad (c)$$

(k' : constant)

valve의 stroke를 S 라고 하면,

$$\Delta\theta = \frac{\partial\theta}{\partial C_v} \cdot \frac{dC_v}{ds} \cdot ds + \frac{\partial\theta}{\partial \Delta P} \cdot d(\Delta P) + \frac{\partial\theta}{\partial \theta_w} \cdot d\theta_w \quad (d)$$

外亂에 의해 系의 狀況이 變化할때 調節計의 比例帶를 設定하여 즉시 安定시키기 위해서는 위의 ΔS 의 계수 $\frac{\partial\theta}{\partial C_v} \frac{dC_v}{dS}$ 를 一定하게 하면 좋다. (c)式으로 부터

$$K \frac{\sqrt{\Delta P}}{Q_w} \frac{dC_v}{dS} = \text{constant} \quad (e)$$

外亂이 θ_w 의 變化만일때는 (e)로 부터

$$\frac{dC_v}{dS} = \text{const.}$$

즉 linear 特性을 가진 valve가 좋다

外亂이 ΔP 의 變化만일때는 (e)로부터

$$\sqrt{\Delta P} \frac{dC_v}{dS} = \frac{Q_s}{k C_v} \frac{dC_v}{dS} = \text{const.}$$

$$\text{즉 } \frac{1}{C_v} \frac{dC_v}{dS} = \text{const.}$$

따라서 equal percentage 特性의 valve가 좋다.

· 外亂이 θ_w 의 變化만일때는

$$\frac{1}{Q_w} \frac{dC_v}{dS} = \frac{(\theta - \theta_w)}{\rho k \sqrt{\Delta P}} \frac{1}{C_v} \frac{dC_v}{dS} = \text{const.}$$

따라서 equal percentage 特性의 valve가 좋다.

(2) 流量制御

Fig. 14 에서 orifice 및 valve에서의 유량계수를 C_o , C_v 라고 하면,

$$Q = C_v \sqrt{\Delta P} = C_o \sqrt{\Delta P_o}$$

$$\Delta P_o = \frac{C_v^2}{C_o^2} \Delta P$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_o}{\partial C_v} \cdot \frac{dC_v}{dS} &= \frac{2C_v}{C_o^2} \Delta P \frac{dC_v}{dS} \\ &= 2 \left(\frac{Q}{C_o} \right)^2 \frac{1}{C_v} \frac{dC_v}{dS} = \text{const.} \end{aligned}$$

따라서 equal percentage 特性의 valve가 좋다.

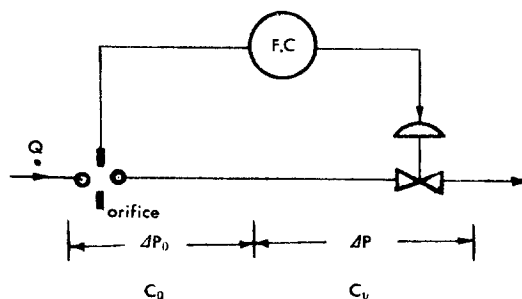


Fig. 14. Flow Control.

(3) 壓力制御

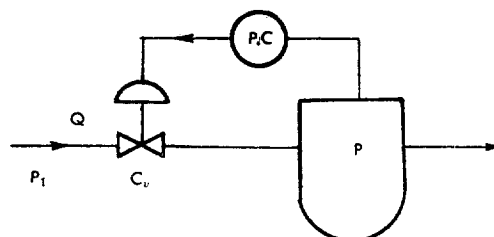


Fig. 15. Pressure Control

Fig. 15에서

$$Q = k C_v \sqrt{P_1 - P} \quad \therefore P = P_1 - \frac{Q^2}{k^2 C_v^2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial C_v} \frac{dC_v}{dS} = \left(\frac{2Q^2}{k^2} \right) \frac{1}{C_v^3} \frac{dC_v}{dS}$$

外亂 P_1 에 대해서

$$\frac{1}{C_v^3} \frac{dC_v}{dS} = \text{const.} \text{의 valve가 적당하다.}$$

이 식에서 볼때 stroke가 적은 곳에서는 C_v 의 變化가 적고 stroke가 크게되면 C_v 가 크게 變하는 것이 좋으므로 equal percentage 特性의 valve를 선택하는 것이 좋다.

實際의 面에서는 다음에 基準하여 valve를 선택하는 것이 便利하다.

Linear 特性

- ① Valve 前後의 ΔP 가 거의 일정한 경우(이때에는 固有流量 特性에 가까운 有効特性이 된다.)
- ② ΔP 가 클때(相對적으로 ΔP 의 변화는 적을때)
- ③ 流體의 固形浮遊物이 있을때(plug의 形態가 단순하다.)

Equal percentage 特性

- ① 配管系의 마찰손실이 큰 경우 또는 valve 前後의 ΔP 가 크게 변화하는 경우
- ② 常用 流量에 比해서 적은 流量取扱도 많이 예상되는 경우(linear 特性은 單位感度が 높아서 不安定하기 쉽다.)

이상에서 보면 實用的으로 equal percentage의 流量 特性을 갖는 control valve가 훨씬 편리한 것을 알 수 있다.

後 記

Control valve를 배우고 처음 다루어 보는 過程에서 이글을 쓴 것은 다소 무리한 일이었다. 그러나 앞으로 利用범위가 급격히 넓어질 것이 예상되므로 이 方面에 종사하게 될 現場技士들에게 다소 도움이 되었으면 한다. 이 글을 쓰는데 많은 資料를 모아주신 韓國科學技術研究所 安泳玉 博士와 서울 不二貿易에 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

- (1) W. H. Kidd and G. A. Philbrick.; The Control Valve in Operation, Instruments, Vol 24, No. 12 136~144 (1951).
- (2) C. S. Beard; Valve capacity and C_v , Instruments and Automation Vol 29, No. 2 282~284(1956).
- (3) G. F. Brockett; Correlation of valve-sizing method, Instruments Vol 25 No. 6 752~756 (1952).
- (4) C. S. Beard; Valve Sizing, Instruments and Automation Vol. 29 No. 11, 2220~2223 (1956).
- (5) G. F. Brockett and C. F. King; Sizing Control Valves, Handling Flashing Liquids, Instruments, Vol. 26, No. 7 1017~1019, 1041~1044(1953).
- (6) W. G. Holzbock; Control Valve size, Chem. Eng., Vol. 66, No. 8 171 (1959).
- (7) J. A. Masek; Flow through Control Valve Manifolds, Heating, Piping and Air Conditioning. 131(1968).
- (8) E. R. Forman; Fundamentals of Process Control (Part 2) Chem. Eng., Vol. 72, No. 12 127 (1965).
- (9) D. M. Considine; Process Instruments and Controls. Handbook, Mc Graw-Hill N. Y 10~79 (1957).
- (10) W. G. Holzbock; How Control Valves Behave, Chem. Eng., Vol. 66, No. 5 137~140 (1959).
- (11) B. G. Liptack; How to Size Control Valves for High Viscosities, Chem. Eng., Vol. 69, No. 25, 95(1962).
- (12) H. P. Kallen; Handbook of Instrumentation and Controls, McGraw-Hill N. Y (1961).
- (13) S. M. Elonka; Standard Instrumentation, Questions and Answers Vol. 2. McGraw-Hill N. Y (1962).
- (14) 工業計測技術大系編集委員會編; 指示 計錄, 調節 日刊工業新聞社 東京 (1964).
- (15) Motoyama, Ltd. ed; Motoyama Control Valve Catalog No. 2D
- (16) Yokogawa, Ltd. ed; Yokogawa Control Valves Catalog
- (17) J. P. Perry; Chem. Eng. Handbook. 4th ed. McGraw-Hill N. Y (1963).
- (18) D. P. Eckman; Automatic Process Control, John Wiley & Sons N. Y (1967).