

밸브 형식별 유량제어범위 결정에 관한 연구

박종호* · 박한영**†

Study of Flow Control Range according to Valve Type

Park, Jong Ho*, Park, Han Yung**†

Key Words : Butterfly Valve(버터플라이밸브), Ball Valve(볼밸브), Gate Valve(게이트밸브), Loss Coefficient(손실계수), Inherent Flow-Coefficient(고유용량계수), Effective Flow-Coefficient(유효용량계수), Waterhammer(수충격), water transmission pipeline(송수관로), flow Control range(유량제어범위)

ABSTRACT

Flow control range of valve, which is installed on pipeline, varies according to valve type, pipe diameter, pipe length, roughness, and elevation difference of both ends of pipeline. A lot of computation efforts and knowledge are needed to estimate flow control range of valve, considering above many parameters. The table of flow control range of each valve type is presented for convenience of pipeline design engineers who must make decision of valve size and type in this study. Also the reason that butterfly valve is recommended for flow control, and gate valve is forbidden is presented via quantification and figures in this study.

1. 서론

송수관로 등에서 유량을 조정하기 위해 대표적으로 버터플라이밸브, 게이트밸브, 글로브밸브 등을 사용한다. 그러나 실험을 통해 이 밸브들의 고유용량계수 C_v [일정 차압(10m 수두 차이)에서 밸브를 1시간 동안 통과하는 유량]을 쉽게 결정할 수 있다. 그러나 밸브가 관로에 설치되면 관로의 전체 차압, 관로에서 발생하는 손실수두 등에 의해 영향을 받는 유효용량계수를 쉽게 결정할 수 없고 또한 특정 형식의 밸브를 설치할 경우 이 밸브가 적정하게 유량을 제어할 수 있는지 여부를 결정하기 위해 복잡한 계산과정을 수행하여야 한다.

버터플라이밸브와 같은 특정 형식의 밸브에 대한 고유용량계수 및 유량제어범위에 대해서는 상수도시설기준⁽¹⁾ 및 밸브핸드북에 제시되었지만 다른 형식의 밸브의 고유용량계수 및 유효용량계수에 따른 유량제어범위에 대해서는 연구된 바가 없다.

본 연구에서는 국내에서 제작되는 버터플라이밸브, 게이트밸브, 글로브밸브의 각 개도별 손실계수를 측정한 결과를

이용하여 고유용량계수와 유효용량계수를 구하는 방법과 이 밸브들을 송수관로에 설치할 경우 적정 유량제어범위를 쉽게 결정할 수 있도록 표로 제시하여 관로 실무자에게 정보를 제공한다.

2. 송수관로에서 유속의 중요성

물을 수송하는 송수관로에서의 적정 유량범위를 유속으로 제시할 수 있으며, 주 송수관로에서의 유속은 상수도시설기준 또는 미국수도협회에서 발생하는 기준에 의거 공동현상(cavitation), 펌프장 정진 또는 밸브의 급폐쇄에 따른 과도한 수충격현상, 그리고 과도한 손실수두를 방지하기 위해서 관로 내에서 유속을 최대유속 이하로 제한할 것을 권장한다.

또한 유체 저항은 수송 모멘텀 내 플럭스를 포함하고 소류력(tractive force) 유속이 커지면서 강바닥의 토사와 자갈이 이동하는 것을 생성하며 특히 슬러지 형성 및 슬러리 적용 시 2상(액체-고체) 유체 유동에서는 매우 중요하게 된다. 이러한 상황에서 소류력은 설계 속도에 중요한 영향을 갖는다. 속도가 너무 작으면 부유된 침전물을 이송하기에 소류력이 충분하지 않아 침전이 발생한다. 반대로 설계 속도가 너무 크면 큰 소류력은 수로 또는 관로 내에서 침식과 부식을

* 충남대학교 기계공학과

** K-water 수도기술처

† 교신저자, E-mail : hanyung@kwater.or.kr

을 증가시켜 유지관리 및 운영비용을 증가시킨다. 따라서 소류력의 중요성은 자기-청소(self-cleansing) 관로 및 압력 유동시스템 설계와 관련되고 침식 가능한 수로의 경우 안정된 수로 설계와 관련된다. 만일 소류력이 너무 크면 생물막 박리 메카니즘(mechanism of biofilm sloughing) 또는 부식 부산물의 부유를 통해 급수시스템 관로 내에서 수질 문제를 야기시킬 수 있다.

관로 내 고형물들이 침전하지 않도록 부유하기 위한 유속은 최소한 0.61m/sec이고 밸브의 개방 및 폐쇄시 수충격현상을 최소화하기 위해 3.1m/sec를 초과하여서는 안된다.⁽²⁾ 빠른 유속은 관 벽으로의 물질의 질량전달 속도를 증가시킨다. 이것은 용존산소의 전달속도를 증가시켜 부식을 촉진시킨다. 반대로 물이 정체되면 강관의 결절을 촉진시킨다.

송수관로 내 생물막은 공급과정에서 먹는 물의 미생물학적 특성에 중요한 역할을 한다. 이러한 막이나 슬라임은 침전물, 부식 결절, 유속이 느린 정체구역, 막힌 곳, 급수탑과 저수조에 형성되기 때문에 걱정하게 제어하지 않으면 생물막의 온상이 될 수 있다.

펌프장의 흡입관로와 토출관로의 규격 결정시 권장되는 절차는 다음과 같다.⁽³⁾

- 최소 정수두 조건에서 모든 펌프들이 운영할 때 허용할 수 있는 흡입 배관에서 유속은 1.0~1.5m/sec로 선정한다. 운영 펌프 숫자가 감소하면서 각 개별펌프의 토출유량은 증가하므로 흡입배관에서 유속은 기준 유속 1.0~1.5m/sec를 초과할 수 있다.
- 최소 정수두 조건에서 모든 펌프들의 운전시 허용 가능한 펌프 토출 유속은 1.5~2.4m/sec로 선정한다. 상기에서 토론한 것과 같이 펌프 운전 대수가 감소하면 개별 펌프의 토출유량은 증가하게 되어 펌프 토출 관로에서 유속도 기준 유속 1.5~2.4m/sec를 초과할 수 있다.

다음 이유들로 인해 펌프의 운전점은 변화하기 때문에 주어진 펌프시스템에서 유속은 변화할 수 있다는 사실을 유의하여야 한다.

- 흡입 및 토출 저수지에서 수위가 변화하면서 발생하는 정수두의 변화할 수 있다.
- 시간이 경과되면서 관로의 조도가 증가함에 따라 마찰 계수가 증가하여 Fig. 1과 같이 손실수두가 증가한다.⁽⁴⁾
- 가동시간 증가에 따라 임펠러가 마모되어 성능이 저하하여 Fig. 2와 같이 펌프의 Q-H 곡선이 변화한다.⁽⁵⁾
- Fig. 3에서 펌프가 한 대 운전될 때 운전점은 Capacity 60이 되지만 두 대가 운전될 때 운전점은 Capacity 50에서 운전될 수 있다.⁽⁵⁾

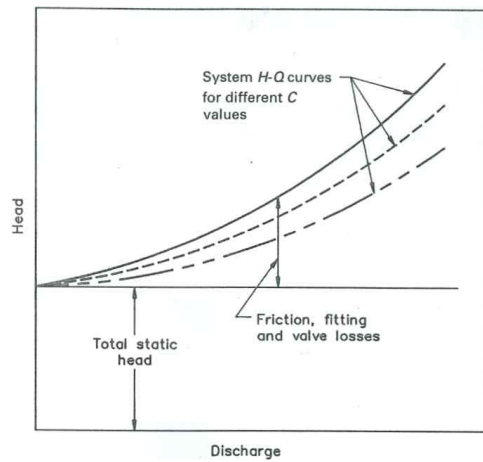


Fig. 1 Typical system head-capacity curves

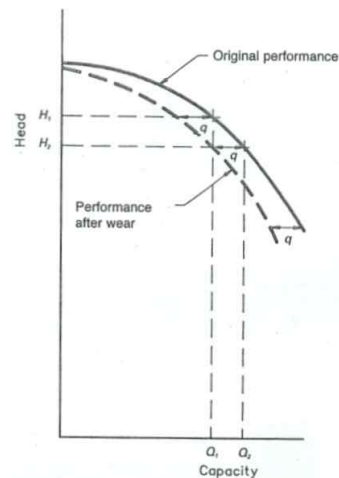


Fig. 2 Effect of impeller wear

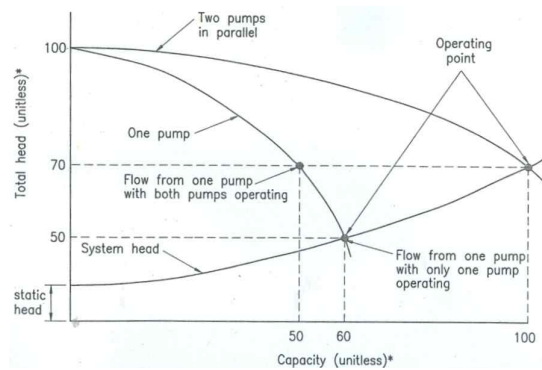


Fig. 3 Pumps operating in parallel

3. 밸브의 유량제어범위 결정

밸브를 부분 개도로 운영하여 밸브 상류측과 하류측 사이 차압과 수두손실을 발생시켜 유량 또는 압력을 조정하기 위해 특별한 제어밸브들을 사용한다. 일부 제어밸브들은 수동으로 운전된다(예를 들어 중요한 작동기 내 유체의 유동을 제

어하기 위해 사용된 니들밸브). 일부 밸브는 프로그램된 제어기를 사용하여 제어밸브들을 동력으로 작동시킨다. 이 밸브들은 송수 및 급수시스템 내 감압, 압력유지, 유량제어, 압력 완화목적으로 광범위하게 사용되는 특별한 제어밸브들이다.

수력시스템의 요구조건에 기초하여 제어밸브들을 선정한다. 설계자는 밸브가 제어하여야 할 유량범위를 조심스럽게 평가하여 제어밸브의 형식 및 규격 선정시 상당한 주의를 기울여야 한다. 만일 너무 큰 밸브를 선정하면 밸브가 적당하게 기능하기에 밸브를 통한 수두손실이 충분하지 않을 수 있다. 반면 너무 작은 밸브를 선정하면 밸브를 통해 과도한 차압이 발생하여 소음, 진동, 밸브 디스크의 플러터링, 그리고 밸브 시트의 과도한 마모를 야기 시키는 공동화현상을 초래할 수 있다. 일부 밸브들은 밸브 상류측 관로에서 최대 6.1m/s 유속을 유지할 수 있으나 통상적으로 유속 2.4~3.74m/s를 유지하도록 설계한다. 만일 설계자가 하나의 밸브와 하나의 규격으로 처리하기에 유량범위가 너무 크면 규격이 다른 두 개 이상의 밸브를 조합하여 설치한다. 이러한 형식의 설치에서 작은 밸브는 적은 유량에서 운영되도록, 그리고 큰 밸브는 유량이 큰 주기 동안 운영되도록 설계한다.

본 절에서는 밸브설계시 고려하여야 할 수력적 성능인 용량계수에 대해 기술한다. 수력성능은 밸브형식과 설치조건에 따라 특정밸브가 유량을 조정할 수 있는 범위가 결정되는 매우 중요한 인자이다. 관로가 긴 경우 유량조정범위가 밸브의 개도 5~10%로 제한되며 특히 게이트밸브를 사용할 경우 밸브의 유량조정 범위가 더욱 제한되는 현상이 현장에서 실제로 발생한다. 이러한 현상은 밸브의 각 개도별 손실계수와 관로의 손실계수의 향으로 설명할 수 있다.

또한 밸브의 교축시 높은 유속으로 인해 국부 압력이 포화 증기압 이하로 저하하여 공동현상이 발생하여 밸브의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 밸브 설계시 용량계수는 물론 공동화현상의 발생여부도 검토하여 밸브의 수명을 연장시킬 수 있도록 세심한 주의를 기울여야 한다. 제어용 밸브의 선정은 아래에 나타낸 순서에 따라서 실시한다.

- ① 밸브가 제어하는 최대유량과 구경을 산정하고 유속을 구한다.
- ② 유속이 밸브의 한계유속(버터플라이밸브의 경우 6m/sec) 이하인지를 확인한다.
- ③ 최대유량 및 최소유량시 밸브 상하류의 각종 손실수두 및 최고, 최저압력을 산출한다.
- ④ 요구되는 밸브 최대, 최소용량계수를 계산하고 밸브의 유량특성도로부터 최대 개도와 최소개도를 읽어 이 개도가 제어 가능한 범위에 포함되는지를 확인한다.
- ⑤ 공동현상 발생 유무를 검토한다.
- ⑥ 상기 계산과정에서 ②, ④, ⑤의 조건이 만족되지 않을 경우에는 밸브의 구경 또는 종류를 변경하고 계산을 다시 수행하여 상기 조건이 만족되는 밸브의 종류와 직경

을 선정한다.

3.1 밸브형식별 고유용량계수

본 연구에서는 2009년 8월 K-water가 발주한 관로용 밸브 설계기준 수립용역 최종보고서에 수록된 각 밸브 형식에 따른 개도별 손실수두자료를 이용하여 고유용량계수를 유도한다.⁽⁶⁾

상기 용역에서는 밸브 시트 형식에 따라 6개 형식 버터플라이밸브(400mm, 600mm), 금속 시트형 볼밸브(500mm)에 대해 각 개도별 손실계수를 측정하였고, 게이트밸브는 유량제어 용으로는 거의 사용하지 않지만 관로의 정상유동 해석 상용 프로그램인 EPANET 또는 PIPE2010에서 기본값으로 사용되고 있는 다음 Table 1과 같은 각 개도별 손실계수 수치를 이용하여 밸브형식별 용량계수 결과들을 비교하기로 한다.

밸브의 고유용량계수는 다음 식으로 정의할 수 있다.⁽⁷⁾

$$C_{vi} = 12,511D^2 \sqrt{\frac{H}{K}} \frac{m^3}{hr} \quad (1)$$

여기서 H : 밸브 전후단에서 발생하는 차압($H=10m$)

K : 밸브 각 개도별 손실계수

D : 밸브 직경(m)

즉, 밸브 고유용량계수는 밸브 전후단의 차압 $H=10m$ 를 유지할 때 시간당 밸브 각 개도별 통과하는 유량으로 표현할 수 있으며 이를 C_{vi} 로 표기하여 유효용량계수 C_{ve} 와 구분한다.

동일한 형식일지라도 밸브 직경마다 손실계수가 다를 수 있으므로 실험으로 구한 정확한 손실계수수치를 사용하여야 하지만 실험의 제한 등으로 인해 밸브 직경이 달라도 동일한 손실계수수치를 사용하는 것이 현실이다.

직경 400mm 관로와 밸브를 사용할 경우 Table 1과 식 (1)

Table 1 Loss coefficient according to valve type

Opening (°) or (%)	Loss coefficient K		
	Butter	Gate	Ball
0(°, %)	5.00E+10	12000	4000
5(°)	14,299		
10(°, %)	800	18.57	54.08
20(°, %)	120	4.69	7.75
30(°, %)	35	2.12	2.42
40(°, %)	15.5	1.22	1.07
50(°, %)	5.1	0.81	0.57
60(°, %)	1.7	0.59	0.35
70(°, %)	0.68	0.46	0.23
80(°, %)	0.34	0.37	0.17
90(°, %)	0.17	0.33	0.13
100(%)		0.3	0.1

을 사용하여 계산한 밸브 형식별 고유용량계수 및 유속은 Table 2~4와 같다.

Table 2 Loss & inherent flow coefficient of butterfly valve(400mm)

Opening(°)	K	$C_{viButter}$	$C_{viButter}$	$V_{Butter}(m/sec)$
90	0.17	15,353	1.000	33.95
80	0.34	10,856	0.707	24.01
70	0.68	7,677	0.500	16.98
60	1.7	4,855	0.316	10.74
50	5.1	2,803	0.183	6.20
40	15.5	1,608	0.105	3.56
30	35	1,070	0.070	2.37
20	120	578	0.038	1.28
10	800	224	0.015	0.49
5	14299	53	0.003	0.12
0	5.00E+10	0	0.000	0.00

Table 3 Loss & inherent flow coefficient of ball valve(400mm)

Opening(%)	K	C_{viBall}	C_{viBall}	$V_{Ball}(m/sec)$
100	0.1	20,018	1.000	44.27
90	0.125569	17,864	0.892	39.51
80	0.165509	15,560	0.777	34.41
70	0.231107	13,168	0.658	29.12
60	0.346649	10,752	0.537	23.78
50	0.570147	8,384	0.419	18.54
40	1.066571	6,130	0.306	13.56
30	2.424265	4,066	0.203	8.99
20	7.748959	2,274	0.114	5.03
10	54.08329	861	0.043	1.90
0	4.00E+10		0.000	0.00

Table 4 Loss & inherent flow coefficient of gate valve(400mm)

Opening(%)	K	C_{viGate}	C_{viGate}	$V_{Gate}(m/sec)$
100	0.3	11,557	1.000	25.56
90	0.323765	11,125	0.963	24.60
80	0.373768	10,354	0.896	22.90
70	0.45511	9,383	0.812	20.75
60	0.586498	8,266	0.715	18.28
50	0.808885	7,038	0.609	15.57
40	1.222388	5,726	0.495	12.66
30	2.119745	4,348	0.376	9.62
20	4.690548	2,923	0.253	6.46
10	18.57078	1,469	0.127	3.25
0	4.00E+10		0.000	0.00

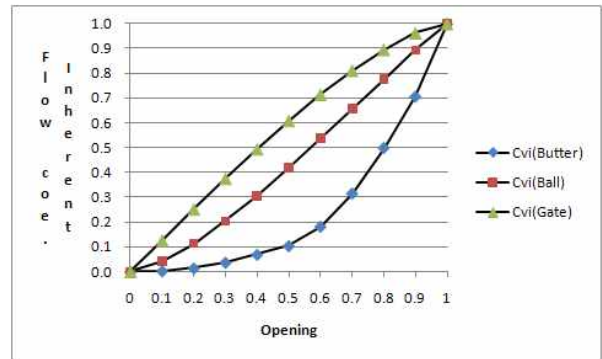


Fig. 4 Normalized inherent flow coefficient according to valve type

Fig. 4는 Table 2~4의 최대 수치가 1인 normalization된 개도별 고유용량계수를 나타낸 것으로 밸브 형식별로 동일한 개도에서 통과하는 유량을 비교하기 위해 작성된 것이다. 또한 밸브가 완전 개방된 상태에서 유속은 앞에서 권장하는 관로 내 최대유속 6m/sec를 벗어난 것으로 이 수치들은 단순히 고유용량계수를 구하기 위한 일시적인 유속이다.

3.2 밸브형식별 유효용량계수

앞에서는 밸브 전후단의 수두차 $H=10m$ 를 유지하여 밸브를 통과하는 시간당 유량을 나타내는 고유용량계수를 다루었다. 하지만 송수관로를 포함한 모든 관로설비는 긴 배관으로 구성되므로 배관에서 발생하는 손실수두를 반드시 고려하여야 한다.

특히 K-water와 같이 광역상수도를 공급하는 경우 관로 길이는 수백 km에 이르는 경우가 대부분이다. 이 경우 밸브를 통과하는 유량을 유효용량계수라 하며 다음 식을 표현할 수 있다.

$$C_{ve} = 12,511D^2 \sqrt{\frac{H}{K_1 + K_2 + \dots + f \frac{L}{D}}} \quad (2)$$

상기 식에서 $K_1, K_2,$ 등은 관로를 구성하고 있는 밸브, 엘보 등의 미소손실계수이다. fL/D 는 관의 마찰손실을 나타낸다. 따라서 상기 식을 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$C_{ve} = 12,511D^2 \sqrt{\frac{H}{K_{minor} + K_{friction}}} \quad (3)$$

여기서 H : 밸브가 설치된 관로의 유입부와 유출부의 고도 차이

K_{minor} : 밸브 등의 미소손실

$K_{friction}$: 관 마찰손실

상기 식에서 유효용량계수 C_{ve} 는 관 및 밸브의 직경 $D,$ 고도 차이 $H,$ 미소손실 $K_{minor},$ 그리고 관 마찰손실 $K_{friction}$ 에

따라 결정된다.

본 연구에서는 밸브 형식별로 $H=10m$ 로 유지하고 $K_{friction} = 0, 50, 100, 200$ 으로 가정하였을 때 각 밸브 형식별 유효용량계수는 Table 5, 8, 11과 같다. 각 개도별 고유용량계수를 밸브가 완전 개방된 상태에서의 고유용량계수로 나누어 normalization한 유효용량계수는 Table 6, 9, 12와 같다. 밸브 형식 및 개도별 관로 내 유속을 계산한 결과는 Table 7, 10, 13과 같다. 그리고 Fig. 5~7는 밸브 형식별 고유용량계수와 $K_{friction}$ 수치를 변경시킬 때 유효용량계수가 어떻게 변화하는지를 보여준다. 이 Table들에서 괄호안 수치, 예를 들어 $C_{ve_Butt(200)}$ 는 $K_{friction} = 200$ 인 버터플라이밸브의 고유용량계수를 의미한다.

Table 5 Effect flow coefficient of butterfly valve(D=400mm)

Opening(°)	C_{vi_Butt}	$C_{ve_Butt(50)}$	$C_{ve_Butt(100)}$	$C_{ve_Butt(200)}$
90	15,353	894	632	447
80	10,856	892	632	447
70	7,677	889	631	447
60	4,855	880	628	446
50	2,803	853	617	442
40	1,608	782	589	431
30	1,070	687	545	413
20	578	486	427	354
10	224	217	211	200
5	53	53	53	53
0	0	0	0	0

Table 6 Effect flow coefficient of butterfly valve(normalized)

Opening(°)	C_{vi_Butt}	$C_{ve_Butt(50)}$	$C_{ve_Butt(100)}$	$C_{ve_Butt(200)}$
90	1.000	1.000	1.000	1.000
80	0.707	0.998	0.999	1.000
70	0.500	0.995	0.997	0.999
60	0.316	0.985	0.992	0.996
50	0.183	0.954	0.976	0.988
40	0.105	0.875	0.931	0.964
30	0.070	0.768	0.861	0.923
20	0.038	0.543	0.675	0.791
10	0.015	0.243	0.334	0.447
5	0.003	0.059	0.083	0.117
0	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 7 Velocity in pipeline(m/sec)

Opening(°)	$V_{Butt(0)}$	$V_{Butt(50)}$	$V_{Butt(100)}$	$V_{Butt(200)}$
90	33.95	1.98	1.40	0.99
80	24.01	1.97	1.40	0.99
70	16.98	1.97	1.40	0.99
60	10.74	1.95	1.39	0.99
50	6.20	1.89	1.37	0.98
40	3.56	1.73	1.30	0.95
30	2.37	1.52	1.20	0.91
20	1.28	1.07	0.94	0.78
10	0.49	0.48	0.47	0.44
5	0.12	0.12	0.12	0.12
0	0.00	0.00	0.00	0.00

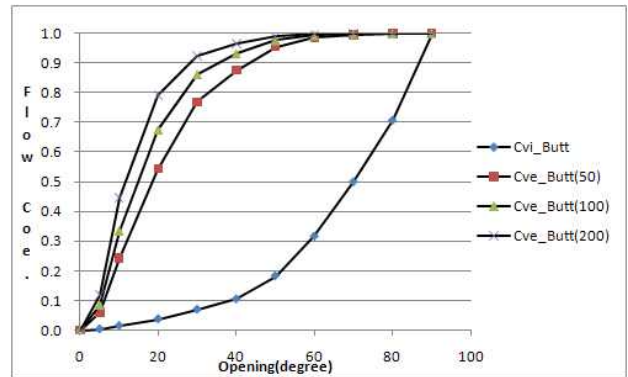


Fig. 5 Effect flow coefficient of butterfly valve(D=400mm)

Table 8 Effect flow coefficient of ball valve(D=400mm)

Opening(%)	C_{vi_Ball}	$C_{ve_Ball(50)}$	$C_{ve_Ball(100)}$	$C_{ve_Ball(200)}$
100	20018	894	633	448
90	17864	894	633	447
80	15560	894	633	447
70	13168	893	632	447
60	10752	892	632	447
50	8384	890	631	447
40	6130	886	630	446
30	4066	874	625	445
20	2274	833	610	439
10	861	620	510	397
0	1	1	1	1

Table 9 Effect flow coefficient of ball valve(normalization)

Opening(%)	C_{vi_Ball}	$C_{ve_Ball(50)}$	$C_{ve_Ball(100)}$	$C_{ve_Ball(200)}$
100	1.000	1.000	1.000	1.000
90	0.892	1.000	1.000	1.000
80	0.777	0.999	1.000	1.000
70	0.658	0.999	0.999	1.000
60	0.537	0.998	0.999	0.999
50	0.419	0.995	0.998	0.999
40	0.306	0.990	0.995	0.998
30	0.203	0.978	0.989	0.994
20	0.114	0.931	0.964	0.981
10	0.043	0.694	0.806	0.887
0	0.000	0.001	0.002	0.002

Table 11 Effect flow coefficient of gate valve(D=400mm)

Opening(%)	C_{vi_Gate}	$C_{ve_Gate(50)}$	$C_{ve_Gate(100)}$	$C_{ve_Gate(200)}$
100	11557	893	632	447
90	11125	892	632	447
80	10354	892	632	447
70	9383	891	632	447
60	8266	890	631	447
50	7038	888	630	447
40	5726	884	629	446
30	4348	877	626	445
20	2923	856	619	442
10	1469	764	581	428
0	1	1	1	1

Table 10 Velocity in pipeline(m/sec)

Opening(%)	$V_{Ball(0)}$	$V_{Ball(50)}$	$V_{Ball(100)}$	$V_{Ball(200)}$
100	44.27	1.98	1.40	0.99
90	39.51	1.98	1.40	0.99
80	34.41	1.98	1.40	0.99
70	29.12	1.98	1.40	0.99
60	23.78	1.97	1.40	0.99
50	18.54	1.97	1.40	0.99
40	13.56	1.96	1.39	0.99
30	8.99	1.93	1.38	0.98
20	5.03	1.84	1.35	0.97
10	1.90	1.37	1.13	0.88
0	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 12 Effect flow coefficient of gate valve(normalized)

Opening(%)	C_{vi_Gate}	$C_{ve_Gate(50)}$	$C_{ve_Gate(100)}$	$C_{ve_Gate(200)}$
100	1.000	1.000	1.000	1.000
90	0.963	1.000	1.000	1.000
80	0.896	0.999	1.000	1.000
70	0.812	0.998	0.999	1.000
60	0.715	0.997	0.999	0.999
50	0.609	0.995	0.997	0.999
40	0.495	0.991	0.995	0.998
30	0.376	0.982	0.991	0.995
20	0.253	0.959	0.979	0.989
10	0.127	0.856	0.920	0.957
0	0.000	0.001	0.001	0.001

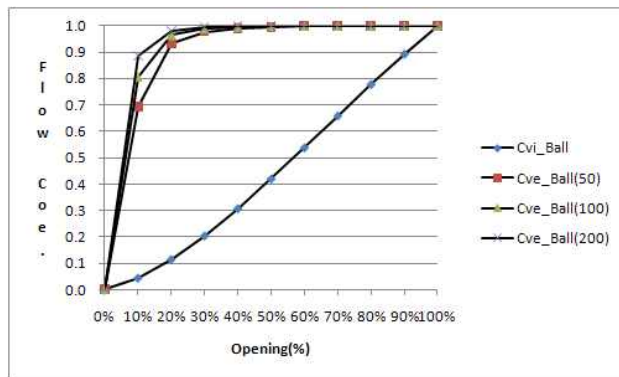


Fig. 6 Effect flow coefficient of ball valve(D=400mm)

Table 13 Velocity in pipeline(m/sec)

Opening(%)	$V_{Gate(0)}$	$V_{Gate(50)}$	$V_{Gate(100)}$	$V_{Gate(200)}$
100	25.560	1.974	1.398	0.989
90	24.604	1.974	1.398	0.989
80	22.900	1.973	1.397	0.989
70	20.752	1.971	1.397	0.989
60	18.281	1.968	1.396	0.989
50	15.566	1.964	1.394	0.988
40	12.663	1.956	1.392	0.987
30	9.616	1.939	1.385	0.985
20	6.464	1.893	1.368	0.979
10	3.249	1.691	1.286	0.947
0	0.001	0.001	0.001	0.001

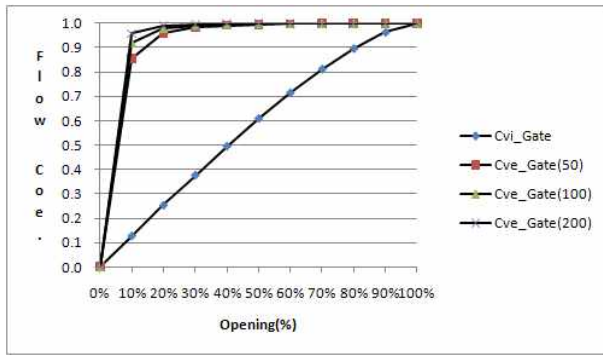


Fig. 7 Effect flow coefficient of gate valve(D=400mm)

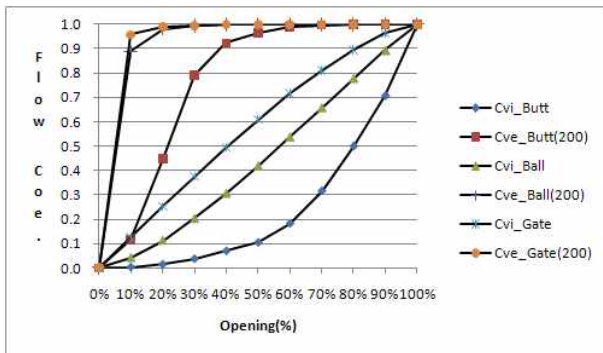


Fig. 8 Inherent & effect flow coefficients according to valve type(D=400mm)

3.3 밸브 유량제어범위 결정

Table 7, 10, 그리고 13으로부터 관로에서 발생하는 손실 수두 $K_{friction}$ 을 고려하면 관로 내 유속이 급속하게 감소하여 최대유속에 도달하지 못하는 것은 물론 최소유속을 만족시키기 위해서 거의 완전 폐쇄된 개도에서 밸브를 조작하여야 한다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 5~7로부터 버터플라이, 볼, 게이트밸브의 고유용량계수는 등비, 선형, 급개방특성을 갖는 것으로 나타나지만 $K_{friction}$ 가 클수록 좌측 상단으로 이동하므로 유량을 조정하기 위해서 최종 폐쇄개도에서 밸브를 조작하여야 한다는 사실을 알 수 있다.

동일한 규격의 밸브와 관로 손실계수 $K_{friction} = 200$ 인 경우를 고려할 때 밸브 형식별 유효용량계수는 다음 Fig. 8과 같이 변화하며, 버터플라이밸브의 유량조정범위는 최종개도에서 약 40%가 되는 반면 게이트밸브의 유량조정범위는 개도 10%가 된다. 따라서 정상적인 밸브 조작시에도 게이트밸브의 경우 유량변화는 최종 개도 10%에서 발생하므로 수충격현상이 발생할 확률이 매우 높으며 또한 유량조정범위도 가장 적기 때문에 유량제어밸브로 사용되지 않으며 버터플라이밸브가 가장 많이 사용되는 이유를 알 수 있다.

3.3.1 최대유속 결정

관로를 구성하고 있는 제반요소들인 엘보와 같은 피팅(fitting)류에서 발생하는 미소손실, 관로의 마찰에 의해 발생하는 마찰손실 그리고 밸브의 각 개도에서 발생하는 밸브손실을 고려하여 최대유속 $V_{max} = 3.0m/sec$ 을 결정하여야 한다. 이때 최대유속 $V_{max} = 3.0m/sec$ 은 밸브가 완전 개방된 상태에서 형성된다. 물론 여러 개의 밸브가 관로에 설치될 수 있으면 이 경우 이 밸브들의 개도를 고려하여 밸브손실을 계산하여야 한다.

3.3.2 최소유속 결정

최소유속 $V_{min} = 0.6m/sec$ 은 밸브의 개도를 교축하여 얻을 수 있다. 이때 밸브를 특정 개도이하로 교축할 경우 fluttering 현상, 밸브의 아주 적은 개방면적에서 상당한 유속으로 인한 밸브 시트의 마모 등이 발생하여 밸브의 수명을 단축시키므로 밸브 형식별 특정 개도 이상으로 유지할 것을 권장하고 있다.

본 연구에서는 식 (4)에 따라 다음 조건으로 밸브 형식과 개도별 관로 내 유속을 계산한 결과를 Table 14~16으로 작성하여 유량제어범위를 제시하였다.

- 수두차이 : $H = 30 \sim 150m$
- 관 마찰계수 : $K_{friction} = 50, 100, 150, 200, 250, 300$

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{K_{minor} + K_{friction}}} \quad (4)$$

4. 결 론

Table 14~16로부터 동일한 조건에서 유량조정범위는 버터플라이밸브, 볼밸브, 그리고 게이트밸브 순으로 넓은 것을 알 수 있다. 즉, 고유용량계수특성을 보여주는 Fig. 8로부터 관로에서 발생하는 손실수두의 영향을 받는 경우 등비특성, 선형특성, 그리고 급개방특성을 보여주는 밸브형식 순서로 유량제어범위가 넓은 것을 알 수 있다. 특히 게이트밸브는 Table 16과 Fig. 7로부터 최종 개도 10%, 심한 경우 5% 범위에서 유속변화가 발생하므로 완전 개방에서 완전 폐쇄시 충분한 시간 동안(예를 들어 전동구동기 180초) 개폐되는 경우에도 유속은 18초, 심한 경우 9초 동안 변화하므로 관로 길이가 10km인 경우 밸브 급폐쇄의 판단 기준인 $t_c = 2L/a$ 보다 짧게 되므로 수충격현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 밸브의 유효용량계수 식을 사용하여 관로 상하류 말단부에 작용하는 수두 H , 관로에서 발생하는 손실계수 $K_{friction}$ 수치 그리고 밸브 개도별 손실계수 K 에 따라 밸브 밸브형식(버터플라이밸브, 볼밸브, 그리고 게이트밸브)별 유량제어범위를 계산하는 절차를 제시하였다. 또한 특정 조건에서 유효용량계수들을 계산하고 그 결과를 Table로 작성·

제시하여 기술자들이 밸브 형식 및 규격 결정시 쉽게 의사를 결정할 수 있도록 정보를 제공하였다.

또한 본 연구를 통해 그 동안 문헌⁽⁸⁾에서 유량제어용도로 버터플라이밸브의 사용을 권장하고, 게이트밸브를 사용할 경우 빈번하게 수충격현상이 발생하는 근거를 이론적으로 계량화하여 제시하였다.

Table 14 Flow control range of butterfly valve

		Velocity V=m/sec						
Opening(degree)		60	50	40	30	20	10	5
H=30m	$V_{Butt(50)}$	3.37	3.27	3.00	2.63	1.86	0.83	0.20
H=40m	$V_{Butt(50)}$	3.89	3.77	3.46	3.04	2.15	0.96	0.23
H=50m	$V_{Butt(50)}$	4.35	4.22	3.87	3.40	2.40	1.07	0.26
	$V_{Butt(100)}$	3.10	3.05	2.91	2.69	2.11	1.04	0.26
H=60m	$V_{Butt(50)}$	4.77	4.62	4.24	3.72	2.63	1.18	0.29
	$V_{Butt(100)}$	3.40	3.35	3.19	2.95	2.31	1.14	0.29
H=70m	$V_{Butt(50)}$	5.15	4.99	4.58	4.02	2.84	1.27	0.31
	$V_{Butt(100)}$	3.67	3.61	3.45	3.19	2.50	1.23	0.31
	$V_{Butt(150)}$	3.01	2.97	2.88	2.72	2.25	1.20	0.31
H=80m	$V_{Butt(50)}$	5.51	5.33	4.89	4.30	3.04	1.36	0.33
	$V_{Butt(100)}$	3.93	3.86	3.68	3.41	2.67	1.32	0.33
H=90m	$V_{Butt(150)}$	3.21	3.18	3.08	2.91	2.41	1.28	0.33
	$V_{Butt(50)}$	5.84	5.66	5.19	4.56	3.22	1.44	0.35
	$V_{Butt(100)}$	4.16	4.10	3.91	3.61	2.83	1.40	0.35
H=100m	$V_{Butt(150)}$	3.41	3.37	3.26	3.09	2.56	1.36	0.35
	$V_{Butt(50)}$	6.16	5.96	5.47	4.80	3.40	1.52	0.37
	$V_{Butt(100)}$	4.39	4.32	4.12	3.81	2.98	1.48	0.37
	$V_{Butt(150)}$	3.59	3.55	3.44	3.25	2.69	1.44	0.37
H=110m	$V_{Butt(200)}$	3.12	3.09	3.02	2.89	2.47	1.40	0.37
	$V_{Butt(50)}$	6.16	5.96	5.47	4.80	3.40	1.52	0.37
	$V_{Butt(100)}$	4.39	4.32	4.12	3.81	2.98	1.48	0.37
	$V_{Butt(150)}$	3.59	3.55	3.44	3.25	2.69	1.44	0.37
H=120m	$V_{Butt(200)}$	3.12	3.09	3.02	2.89	2.47	1.40	0.37
	$V_{Butt(50)}$	6.74	6.53	5.99	5.26	3.72	1.66	0.40
	$V_{Butt(100)}$	4.81	4.73	4.51	4.17	3.27	1.62	0.40
	$V_{Butt(150)}$	3.94	3.89	3.77	3.57	2.95	1.57	0.40
	$V_{Butt(200)}$	3.41	3.39	3.30	3.16	2.71	1.53	0.40
H=130m	$V_{Butt(250)}$	3.06	3.04	2.98	2.87	2.52	1.50	0.40
	$V_{Butt(50)}$	7.02	6.80	6.24	5.48	3.87	1.73	0.42
	$V_{Butt(100)}$	5.01	4.92	4.70	4.34	3.40	1.68	0.42
	$V_{Butt(150)}$	4.10	4.05	3.92	3.71	3.07	1.64	0.42
	$V_{Butt(200)}$	3.55	3.52	3.44	3.29	2.82	1.60	0.42
	$V_{Butt(250)}$	3.18	3.16	3.10	2.99	2.62	1.56	0.42

H=140m	$V_{Butt(50)}$	7.29	7.06	6.47	5.68	4.02	1.80	0.44
	$V_{Butt(100)}$	5.19	5.11	4.87	4.51	3.53	1.75	0.44
	$V_{Butt(150)}$	4.25	4.21	4.07	3.85	3.19	1.70	0.44
	$V_{Butt(200)}$	3.69	3.66	3.57	3.42	2.93	1.66	0.44
	$V_{Butt(250)}$	3.30	3.28	3.21	3.10	2.72	1.62	0.43
	$V_{Butt(300)}$	3.02	3.00	2.95	2.86	2.56	1.58	0.43
H=150m	$V_{Butt(50)}$	7.54	7.30	6.70	5.88	4.16	1.86	0.45
	$V_{Butt(100)}$	5.38	5.29	5.05	4.67	3.66	1.81	0.45
	$V_{Butt(150)}$	4.40	4.35	4.21	3.99	3.30	1.76	0.45
	$V_{Butt(200)}$	3.82	3.79	3.69	3.54	3.03	1.71	0.45
	$V_{Butt(250)}$	3.42	3.39	3.33	3.21	2.82	1.67	0.45
	$V_{Butt(300)}$	3.12	3.10	3.05	2.96	2.65	1.63	0.45

Table 15 Flow control range of ball valve

		Velocity V=m/sec						
Opening(%)		60	50	40	30	20	10	0
H=30m	$V_{Ball(50)}$	3.42	3.41	3.39	3.35	3.19	2.38	0.00
H=40m	$V_{Ball(50)}$	3.95	3.94	3.92	3.87	3.68	2.74	0.00
H=50m	$V_{Ball(50)}$	4.41	4.40	4.38	4.32	4.12	3.07	0.00
	$V_{Ball(100)}$	3.13	3.12	3.11	3.09	3.02	2.52	0.00
H=60m	$V_{Ball(50)}$	4.83	4.82	4.80	4.74	4.51	3.36	0.00
	$V_{Ball(100)}$	3.42	3.42	3.41	3.39	3.30	2.76	0.00
H=70m	$V_{Ball(50)}$	5.22	5.21	5.18	5.12	4.87	3.63	0.00
	$V_{Ball(100)}$	3.70	3.69	3.68	3.66	3.57	2.98	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.02	3.02	3.01	3.00	2.95	2.59	0.00
H=80m	$V_{Ball(50)}$	5.58	5.57	5.54	5.47	5.21	3.88	0.00
	$V_{Ball(100)}$	3.95	3.95	3.94	3.91	3.81	3.19	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.23	3.23	3.22	3.21	3.15	2.77	0.00
H=90m	$V_{Ball(50)}$	5.92	5.91	5.88	5.80	5.53	4.12	0.00
	$V_{Ball(100)}$	4.19	4.19	4.18	4.15	4.05	3.38	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.43	3.42	3.42	3.40	3.34	2.94	0.00
H=100m	$V_{Ball(50)}$	6.24	6.23	6.20	6.11	5.83	4.34	0.00
	$V_{Ball(100)}$	4.42	4.41	4.40	4.37	4.27	3.57	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.61	3.61	3.60	3.59	3.52	3.10	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.13	3.13	3.12	3.11	3.07	2.78	0.00
H=110m	$V_{Ball(50)}$	6.54	6.53	6.50	6.41	6.11	4.55	0.00
	$V_{Ball(100)}$	4.64	4.63	4.62	4.59	4.47	3.74	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.79	3.78	3.78	3.76	3.70	3.25	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.28	3.28	3.27	3.26	3.22	2.91	0.00
H=120m	$V_{Ball(50)}$	6.83	6.82	6.79	6.70	6.38	4.75	0.00
	$V_{Ball(100)}$	4.84	4.84	4.82	4.79	4.67	3.91	0.00
	$V_{Ball(150)}$	3.96	3.95	3.95	3.93	3.86	3.39	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.43	3.42	3.42	3.41	3.36	3.04	0.00
	$V_{Ball(250)}$	3.07	3.06	3.06	3.05	3.02	2.78	0.00

H=130m	$V_{Ball(50)}$	7.11	7.10	7.06	6.97	6.64	4.95	0.00
	$V_{Ball(100)}$	5.04	5.03	5.02	4.99	4.86	4.07	0.00
	$V_{Ball(150)}$	4.12	4.11	4.11	4.09	4.02	3.53	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.57	3.56	3.56	3.55	3.50	3.17	0.00
	$V_{Ball(250)}$	3.19	3.19	3.19	3.18	3.14	2.89	0.00
H=140m	$V_{Ball(50)}$	7.38	7.37	7.33	7.23	6.89	5.13	0.00
	$V_{Ball(100)}$	5.23	5.22	5.21	5.18	5.05	4.22	0.00
	$V_{Ball(150)}$	4.27	4.27	4.26	4.24	4.17	3.67	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.70	3.70	3.69	3.68	3.63	3.29	0.00
	$V_{Ball(250)}$	3.31	3.31	3.31	3.30	3.26	3.00	0.00
	$V_{Ball(300)}$	3.02	3.02	3.02	3.01	2.99	2.78	0.00
H=150m	$V_{Ball(50)}$	7.64	7.62	7.59	7.49	7.14	5.31	0.00
	$V_{Ball(100)}$	5.41	5.41	5.39	5.36	5.22	4.37	0.00
	$V_{Ball(150)}$	4.42	4.42	4.41	4.39	4.32	3.80	0.00
	$V_{Ball(200)}$	3.83	3.83	3.82	3.81	3.76	3.40	0.00
	$V_{Ball(250)}$	3.43	3.43	3.42	3.41	3.38	3.11	0.00
	$V_{Ball(300)}$	3.13	3.13	3.12	3.12	3.09	2.88	0.00

Table 16 Flow control range of gate valve

		Velocity V=m/sec						
Opening(%)		60	50	40	30	20	10	0
H=30m	$V_{Gate(50)}$	3.41	3.40	3.39	3.36	3.28	2.93	0.00
H=40m	$V_{Gate(50)}$	3.94	3.93	3.91	3.88	3.79	3.38	0.00
H=50m	$V_{Gate(50)}$	4.40	4.39	4.37	4.34	4.23	3.78	0.00
	$V_{Gate(100)}$	3.12	3.12	3.11	3.10	3.06	2.87	0.00
H=60m	$V_{Gate(50)}$	4.82	4.81	4.79	4.75	4.64	4.14	0.00
	$V_{Gate(100)}$	3.42	3.42	3.41	3.39	3.35	3.15	0.00
H=70m	$V_{Gate(50)}$	5.21	5.20	5.18	5.13	5.01	4.47	0.00
	$V_{Gate(100)}$	3.69	3.69	3.68	3.67	3.62	3.40	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.02	3.02	3.01	3.00	2.98	2.85	0.00
H=80m	$V_{Gate(50)}$	5.57	5.56	5.53	5.48	5.35	4.78	0.00
	$V_{Gate(100)}$	3.95	3.94	3.94	3.92	3.87	3.64	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.23	3.22	3.22	3.21	3.18	3.05	0.00
H=90m	$V_{Gate(50)}$	5.91	5.89	5.87	5.82	5.68	5.07	0.00
	$V_{Gate(100)}$	4.19	4.18	4.17	4.16	4.10	3.86	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.42	3.42	3.42	3.41	3.38	3.23	0.00
H=100m	$V_{Gate(50)}$	6.22	6.21	6.19	6.13	5.99	5.35	0.00
	$V_{Gate(100)}$	4.41	4.41	4.40	4.38	4.33	4.07	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.61	3.61	3.60	3.59	3.56	3.41	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.13	3.12	3.12	3.11	3.09	2.99	0.00
H=110m	$V_{Gate(50)}$	6.53	6.51	6.49	6.43	6.28	5.61	0.00
	$V_{Gate(100)}$	4.63	4.62	4.62	4.59	4.54	4.26	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.78	3.78	3.78	3.76	3.73	3.58	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.28	3.28	3.27	3.27	3.25	3.14	0.00

H=120m	$V_{Gate(50)}$	6.82	6.80	6.78	6.72	6.56	5.86	0.00
	$V_{Gate(100)}$	4.84	4.83	4.82	4.80	4.74	4.45	0.00
	$V_{Gate(150)}$	3.95	3.95	3.94	3.93	3.90	3.74	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.42	3.42	3.42	3.41	3.39	3.28	0.00
	$V_{Gate(250)}$	3.06	3.06	3.06	3.05	3.04	2.96	0.00
H=130m	$V_{Gate(50)}$	7.10	7.08	7.05	6.99	6.83	6.10	0.00
	$V_{Gate(100)}$	5.03	5.03	5.02	5.00	4.93	4.64	0.00
	$V_{Gate(150)}$	4.11	4.11	4.10	4.09	4.06	3.89	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.56	3.56	3.56	3.55	3.53	3.41	0.00
	$V_{Gate(250)}$	3.19	3.19	3.18	3.18	3.16	3.08	0.00
H=140m	$V_{Gate(50)}$	7.37	7.35	7.32	7.26	7.08	6.33	0.00
	$V_{Gate(100)}$	5.22	5.22	5.21	5.18	5.12	4.81	0.00
	$V_{Gate(150)}$	4.27	4.27	4.26	4.25	4.21	4.03	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.70	3.70	3.69	3.68	3.66	3.54	0.00
	$V_{Gate(250)}$	3.31	3.31	3.30	3.30	3.28	3.20	0.00
	$V_{Gate(300)}$	3.02	3.02	3.02	3.01	3.00	2.93	0.00
H=150m	$V_{Gate(50)}$	7.62	7.61	7.58	7.51	7.33	6.55	0.00
	$V_{Gate(100)}$	5.41	5.40	5.39	5.37	5.30	4.98	0.00
	$V_{Gate(150)}$	4.42	4.42	4.41	4.40	4.36	4.18	0.00
	$V_{Gate(200)}$	3.83	3.83	3.82	3.81	3.79	3.67	0.00
	$V_{Gate(250)}$	3.43	3.42	3.42	3.41	3.40	3.31	0.00
	$V_{Gate(300)}$	3.13	3.13	3.12	3.12	3.11	3.04	0.00

참고문헌

- (1) 한국상하수도협회, 2010, “상수도시설기준,” 도서출판 건설도서, pp. 890~896.
- (2) Larry W. Mays, 2000, “Water Distribution System Handbook,” McGraw Hills, New York, pp. 8.8~8.9.
- (3) Larry W. Mays, 2000, “Water Distribution System Handbook,” McGraw Hills, New York., pp. 5.32~5.33.
- (4) Larry W. Mays, 2000, “Water Distribution System Handbook,” McGraw Hills, New York, pp. 5.10.
- (5) Larry W. Mays, 2000, “Water Distribution System Handbook,” McGraw Hills, New York, pp. 5.15.
- (6) 윤준용, 2009, “관로용 밸브 설계기준 수립용역보고서,” pp. 93~98.
- (7) 박한영, 정태희, 2005, “밸브핸드북,” 홍릉과학출판사, pp. 276~285.
- (8) Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson and Gary Z. Watters, 2000, “Hydraulics of Pipeline Systems,” CRC, Boca Raton London New York Washington, D.C., pp. 385~386.