

버터플라이밸브 손실계수 표현식에 관한 연구

박종호* · 박한영**†

Study of Butterfly Valve Loss Coefficient Equation

Park, Jong Ho*, Park, Han Yung**†

Key Words : Butterfly Valve(버터플라이밸브), Loss Coefficient(손실계수), Inherent Flow-Coefficient(고유유량계수), Effective Flow-Coefficient(유효유량계수), Waterhammer(수충격)

ABSTRACT

Linear curve or hyperbolic curve interpolation equations have been used to represent loss coefficient of butterfly valve according to a certain opening(for example, each 10 degree up to 90 degree) so far, and these equations are not precise and inconvenient to use with computer programming. Method of representing loss coefficient of butterfly valve using experiment data with several equations is presented and It is verified that log equation is most precise and convenient to use with computer programming in this research.

1. 서론

밸브는 관로를 형성하여 유량 제어는 물론 유동방향 전환을 위해 사용되는 핵심 요소 중 하나이지만 밸브의 형식과 개도에 따라 변화하는 밸브의 개구부를 통과하는 유량과 관련된 손실계수를 나타내는 표현식에 대한 체계적인 연구가 수행되지 않았다. 즉, 현재까지 관로상에 설치된 밸브의 개도 조절에 따른 통과 유량과 압력수두를 구하기 위한 수리해석시 밸브의 중간 개도(예 버터플라이밸브 35°)에서의 손실계수를 구하기 위해 실험을 통해 구한 중간 개도보다 큰 개도와 작은 개도(예, 개도 30°와 40°)의 손실계수값을 이용하여 선형보간법으로 구하여 왔다. 따라서 임의의 중간개도에서 손실계수값을 구하기 위해서는 실험을 통해 구한 특정개도에서의 손실계수값을 이용하여 선형보간법으로 반복하여야 하는 불편함이 초래되었다. ^{(1),(2)}

본 연구에서는 관로상에서 유량을 조정하는 목적으로 설치되는 대표적인 유량제어밸브인 버터플라이밸브의 개도별 손실수두를 시험으로 구한 결과를 보다 개선된 하나의 표현식으로 나타내는 기법에 대해 연구하였다.

2. 손실수두 시험

관로에 설치되는 이형관, 엘보, 티 등은 개구부가 고정되어 변함이 없으나 밸브는 개도에 따라 개구부가 다르게 되어 각 개도에 따라 손실계수가 변화하게 된다. 또한 동일한 형식의 버터플라이밸브라 하더라도 제작사의 설계 방법에 따라 개구부 형상이 다르기 때문에 동일한 직경일지라도 제작사마다 밸브의 손실계수가 달라지므로 표준화된 손실계수를 얻을 수 없다.

2.1 시험개요 및 방법

2.1.1 시험개요

본 연구에서는 2009년 한국수자원공사에서 후원한 관로용 밸브 설계기준 수립용역의 일환으로 한양대학교에서 수행한 400mm 버터플라이밸브의 개도별 손실계수를 구하기 위한 시험결과를 인용한다. ⁽³⁾

시험장소 : 한국수자원공사 수자원연구원 유량계동
시험기간 : 2008.12.08(월)~12.23(화) 총 11일
시험밸브 : 버터플라이밸브(싱글, 더블디스크), 볼밸브
밸브직경 : 400mm~600mm

* 충남대학교 기계공학과

** 한국수자원공사 수도기술처

† 교신저자, E-mail : hanyung@kwater.or.kr

2.1.2 밸브 시험 방법

밸브 시험은 최종적으로 얻고자 하는 밸브 용량계수(Cv)와 손실계수(K)에 종속된 측정량을 서로 독립적으로 변수화하고, 각 변수와 관련된 계측기의 측정 불확도로부터 용량계수의 측정 오차에 기여하는 정도 및 오차범위를 정량화하여 확률적 분포를 고찰하고 합성함으로써 수행되었다. 최고 측정능력(BMC, best measurement capabilities)으로 표현되는 상기의 측정 불확도는 ± 1%(95%신뢰수준)의 범위를 확보하면서 밸브 시험에 대한 신뢰성을 확보하여 각 업체별 밸브 유동특성을 나타내기 위하여 측정된 시험 값을 통해 용량계수와 손실계수를 산출하였다.

밸브 시험 방법은 ANSI/ISA-75.02¹⁾와 IEC 60534-2-3²⁾에 제시된 방법으로 밸브 시험 개략도는 Fig. 1처럼 밸브 시험 설비를 구성하였으며 용량계수 C_v 를 결정하기 위해서는 다음의 시험 절차가 요구된다.

Fig. 2의 배관 요구 사항에 따라 피팅이 부착되어 있지 않은 시험 표본을 설치한다. 압력은 밸브의 선택된 개도에서 시험부 압력 탭 양단에서 측정되어야 한다. 매우 작은 밸브 용량에 있어서는 비난류가 권고한 차압에서 발생할 수 있다.

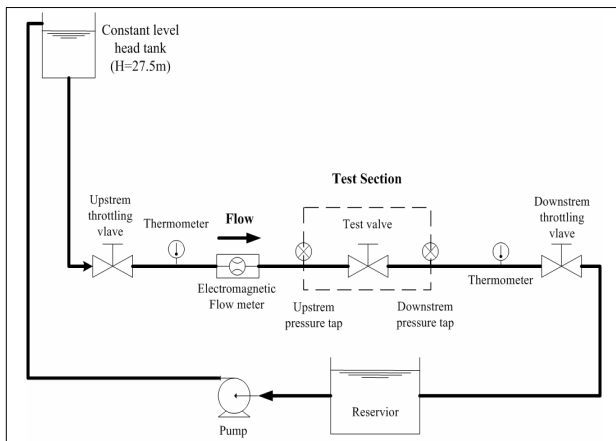


Fig 1. Schematic of Valve Test

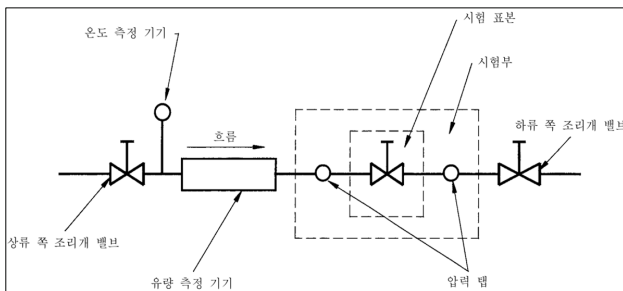


Fig. 2 Flow system for valve test

1) ANSI/ISA-75.02, Control Valve Capacity Test Procedures
 2) IEC 60534-2-3, Industrial-process control valves-Part 2-3 : Flow capacity-Test procedures

이 경우에는 난류를 확보하기 위해서 보다 큰 차압을 사용해야 한다. 밸브의 개도는 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%의 정격 개도를 선택적으로 사용하여 고유 유량 특성을 산출한다.

측정해야 하는 시험 값은 다음과 같다.

- 밸브 개도
- 입구 압력 P1
- 압력 탭 양단의 차압 (P1-P2)
- 유체 입구 온도 T1 (상온 20°C)
- 체적 유량 Q (m³/hr)
- 기압 (대기압)
- 시험 밸브의 물리적 설명(즉 밸브 타입, 호칭 지름, 압력 정격, 유동 방향)
- 용량계수 Cv의 계산

2.1.3 용량계수 C_v 계산

밸브 특정 개도에서 온도 5~40°C인 물이 압력손실(ΔP) 1psi(= 6894.8 Pa)가 발생하였을 때, 밸브를 통과하는 유량(US, gallon/min = 0.227m³/hr)을 다음 식을 통하여 나타낸다.

$$C_v = 1.167 Q \sqrt{\left(\frac{G}{\Delta P}\right)} \quad Q(m^3/hr), \Delta P(kg_f/cm^2) \quad (1)$$

2.1.4 밸브 손실계수 K 계산

관내 유동에서 유체가 밸브를 통과하면서 발생하는 마찰 손실을 속도, 압력으로 다음과 같이 나타내며 밸브의 손실계수 K는 일종의 유량계수로 Table 1처럼 용량계수 C_v 와 호환될 수 있다.⁽⁴⁾

$$\Delta H = K \frac{u^2}{2g} \quad [SI \text{ and } British \text{ unit}] \quad (2)$$

$$\Delta P = K \frac{\gamma u^2}{2g} \quad [SI \text{ unit}]$$

2.2 시험결과

상기와 같은 시험절차로 수행한 결과들 중 A사 400mm 버터플라이밸브의 개도별 손실계수를 구한 수치와 이 수치를 그래프로 표현하면 Table 2 및 Fig. 3과 같다.

Table 1 Relationship between C_v and K

Diameter (D) unit	Relationship between Cv & K	
	Cv → K	K → Cv
m	$K=2.138 \times 10^9 \frac{D^4}{C_v^2}$	$C_v=46,240 \frac{D^2}{\sqrt{K}}$
mm	$K=2.138 \times 10^{-3} \frac{D^4}{C_v^2}$	$C_v=46,240 \times 10^{-6} \frac{D^2}{\sqrt{K}}$

Table 2 Loss coefficient of butterfly valve
 0° : full close, 90° : full open

Open (°)	K expressed by real value		K converted in log		error(%)	
	experiment	calculation	experiment	calculation	real value	log value
9	1963.64	1962.92	3.293	3.293	0	0
18	249.52	259.900	2.397	2.415	-4	-1
27	68.6386	34.412	1.837	1.537	50	16
36	28.4344	4.55634	1.454	0.659	84	55
45	12.4168	0.60328	1.094	-0.219	95	120
54	6.4309	0.07988	0.808	-1.098	99	236
63	3.8789	0.01058	0.589	-1.976	100	436
72	2.5608	0.00140	0.408	-2.854	100	799
81	1.6550	0.00018	0.219	-3.732	100	1806
90	1.5455	0.00002	0.189	-4.610	100	2538

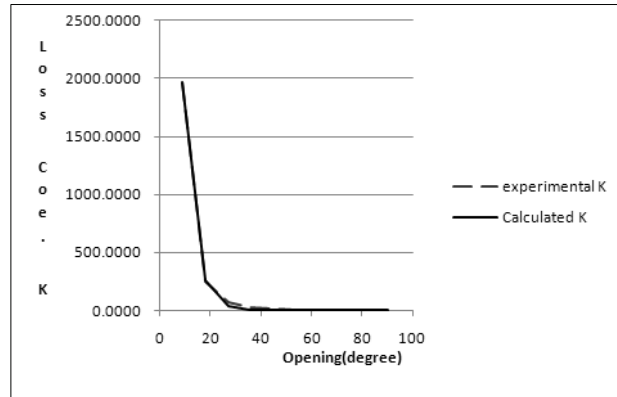


Fig. 3 Test & calculated loss coefficient of butterfly valve

3. 손실계수 표현식 고찰

특정 형식의 밸브의 전체 개도에 걸쳐 변화하는 손실계수를 하나의 식으로 표현하기 위해 많은 시도가 있었다. 그러나 완전 폐쇄시와 완전 개방시의 손실계수 수치의 차이가 상당히 크게 발생하여 하나의 식으로 표현하지 못하였다. 따라서 단순하게 시험으로 구한 개도에서의 수치를 기준으로 중간 개도에서 손실계수는 선형으로 변화하는 것으로 가정하여 정상유동(개도별 통과 유량) 해석 및 수충격해석시 적용하여 부정확함과 불편함을 초래하였다.

3.1 추세를 반영한 전통적인 표현식

Fig. 3을 보면 손실계수 K(시험) 곡선은 초기 개도에서는 손실계수가 급격히 작아지다가 차차 점진적으로 작아지는 형태를 나타낸다. 따라서 이러한 형태의 곡선은 다음 추세공식으로 표현할 수 있다.

$$K = \alpha \beta^\theta \tag{3}$$

상기 공식의 모수 α 와 β 를 구하기 위해 엑셀의 해 찾기(데이터-해 찾기) 기능을 사용한 결과 개도별 손실계수 공식은 다음과 같으며 이를 이용하여 각 개도별 계산한 손실계수 수치는 Table 2의 로그 변환된 K 값으로 나타내었고 그래프는 Fig. 3과 같다.

$$K = 14,825 \times 0.79879^\theta \tag{4}$$

Fig. 3에서는 시험값과 계산값 사이 큰 차이가 발생하지 않는 것처럼 보이지만 Table 2를 보면 개도가 증가할수록 큰 차이가 발생하며 이를 로그 그래프로 표현하면 확연한 차이를 알 수 있다(Fig. 4 참조).

3.2 로그변환 추세공식

개도별 손실계수를 정확하게 표현하는 하나의 공식을 얻기 위해서 Table 2의 시험결과를 로그로 취하고 엑셀을 이용하여 추세공식을 지수로 표현하면 식 (5) 및 Fig. 5와 같다.

$$K_1 = 4.9448e^{-0.036\theta} \tag{5}$$

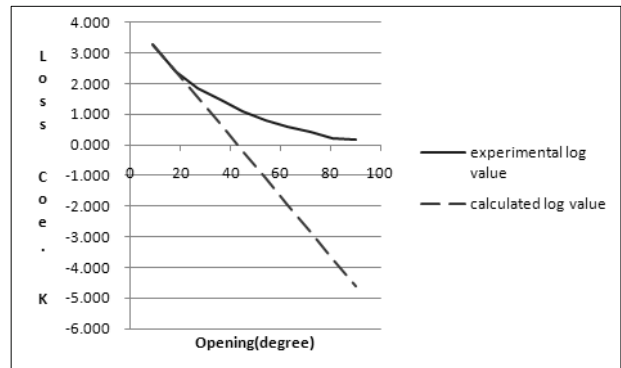


Fig. 4. Log converted test & calculated loss coefficient of butterfly valve

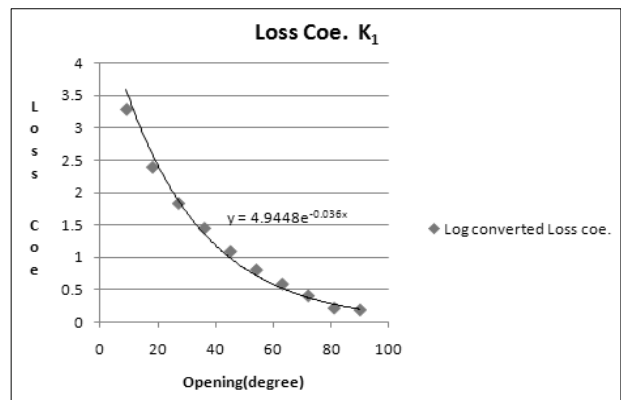


Fig. 5 Log converted experimental loss coefficient K & trend

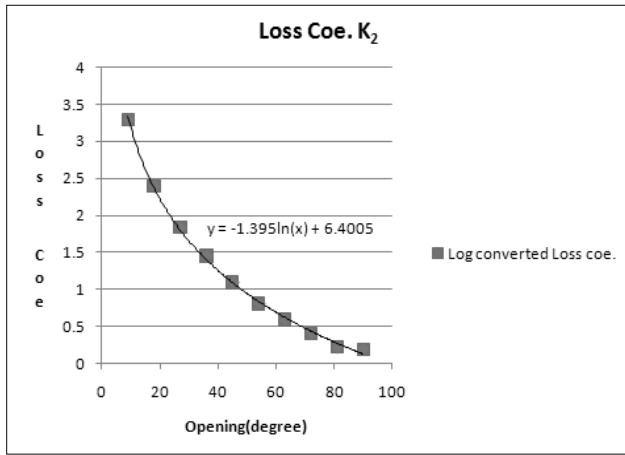


Fig. 6 Log converted experimental loss coefficient K & trend

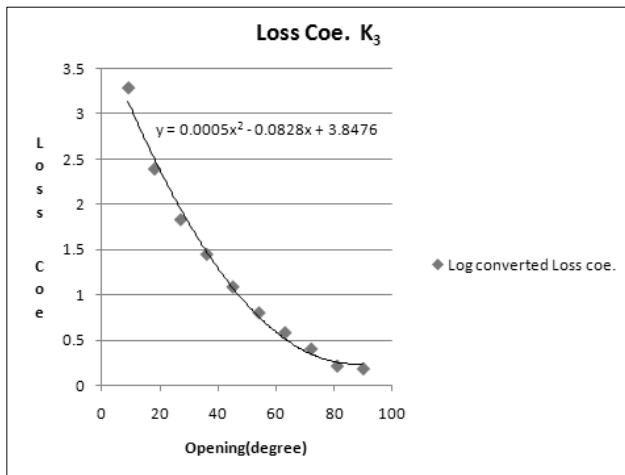


Fig. 7 Log converted experimental loss coefficient K & trend

동일한 방법으로 추세공식을 로그로 표현하면 식 (6) 및 Fig. 6과 같다.

$$K_2 = -1.395 \log(\theta) + 6.4005 \quad (6)$$

동일한 방법으로 추세공식을 다항식으로 표현하면 식 (7) 및 Fig. 7과 같다.

$$K_3 = 0.0005\theta^2 - 0.0828\theta + 3.8476 \quad (7)$$

식 (5)~(7)을 이용하여 밸브 개도별 손실계수를 계산한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Butterfly valve's loss coefficient using trend equation
0° : full close, 90° : full open

Open(°)	Loss coe. K	Loss coe. K_1	Loss coe. K_2	Loss coe. K_3
9	3.293	3.576	3.335	3.143
18	2.397	2.587	2.368	2.519
27	1.837	1.871	1.803	1.977
36	1.454	1.353	1.401	1.515
45	1.094	0.979	1.090	1.134
54	0.808	0.708	0.836	0.834
63	0.589	0.512	0.621	0.616
72	0.408	0.370	0.435	0.478
81	0.219	0.268	0.270	0.421
90	0.189	0.194	0.123	0.446

3.3 로그변환 추세공식의 정확도 검토

지수공식, 로그공식, 그리고 2차 추세공식을 사용하여 밸브 개도 전체 구간에 걸쳐 손실계수를 계산할 결과는 Table 4~Table 6과 같다.

Table 4 Precision of trend equation(Test vs Exponential equation)

Open	Loss coe K	Loss coe. K_1	e	$ e $	e^2	$\left(\frac{K-K_1}{K}\right) \times 100$	$\left \frac{K-K_1}{K}\right \times 100$
9	3.2931	3.576	-0.2833	0.2833	0.0802	-8.6019	8.6019
18	2.3971	2.587	-0.1895	0.1895	0.0359	-7.9039	7.9039
27	1.8366	1.871	-0.0342	0.0342	0.0012	-1.8609	1.8609
36	1.4538	1.353	0.1008	0.1008	0.0102	6.9352	6.9352
45	1.0940	0.979	0.1154	0.1154	0.0133	10.5522	10.5522
54	0.8083	0.708	0.1005	0.1005	0.0101	12.4368	12.4368
63	0.5887	0.512	0.0768	0.0768	0.0059	13.0509	13.0509
72	0.4084	0.370	0.0382	0.0382	0.0015	9.3446	9.3446
81	0.2188	0.268	-0.0490	0.0490	0.0024	-22.3712	22.3712
90	0.1891	0.194	-0.0046	0.0046	0.0000	-2.4272	2.4272
계			-0.1287	0.9922	0.1607	9.1546	95.4848
$ME = -0.0129$			$SDE = 0.1336$		$RMS = 0.01607$		
$MAE = 0.09922$			$MPE = 0.91545$				
$MSE = 0.01606$			$MAPE = 9.54848$				

Table 5 Precision of trend equation(Test vs Log equation)

Open	Loss coe. K_1	Loss coe. K_2	e	$ e $	e^2	$\left(\frac{K-K_2}{K}\right)$ $\times 100$	$\left \frac{K-K_2}{K}\right $ $\times 100$
9	3.2931	3.335	-0.0423	0.0423	0.0018	-1.2848	1.2848
18	2.3971	2.368	0.0287	0.0287	0.0008	1.1965	1.1965
27	1.8366	1.803	0.0338	0.0338	0.0011	1.8383	1.8383
36	1.4538	1.401	0.0524	0.0524	0.0027	3.6010	3.6010
45	1.0940	1.090	0.0038	0.0038	0.0000	0.3478	0.3478
54	0.8083	0.836	-0.0276	0.0276	0.0008	-3.4139	3.4139
63	0.5887	0.621	-0.0321	0.0321	0.0010	-5.4549	5.4549
72	0.4084	0.435	-0.0262	0.0262	0.0007	-6.4086	6.4086
81	0.2188	0.270	-0.0514	0.0514	0.0026	-23.5061	23.5061
90	0.1891	0.123	0.0658	0.0658	0.0043	34.8038	34.8038
계			0.0048	0.3640	0.0160	1.7192	81.8556
$ME=$ 0.0005			$SDE=$ 0.0421			$RMS=$ 0.0160	
$MAE=$ 0.03640			$MPE=$ 0.171915				
$MSE=$ 0.00159			$MAPE=$ 8.185564				

Table 6 Precision of trend equation(Test vs quadratic equation)

Open	Loss coe. K_1	Loss coe. K_3	e	$ e $	e^2	$\left(\frac{K-K_3}{K}\right)$ $\times 100$	$\left \frac{K-K_3}{K}\right $ $\times 100$
9	3.2931	3.143	0.1502	0.1502	0.0225	4.5600	4.5600
18	2.3971	2.519	-0.1221	0.1221	0.0149	-5.0931	5.0931
27	1.8366	1.977	-0.1399	0.1399	0.0196	-7.6192	7.6192
36	1.4538	1.515	-0.0610	0.0610	0.0037	-4.1928	4.1928
45	1.0940	1.134	-0.0401	0.0401	0.0016	-3.6644	3.6644
54	0.8083	0.834	-0.0261	0.0261	0.0007	-3.2324	3.2324
63	0.5887	0.616	-0.0270	0.0270	0.0007	-4.5840	4.5840
72	0.4084	0.478	-0.0696	0.0696	0.0048	-17.0480	17.0480
81	0.2188	0.421	-0.2025	0.2025	0.0410	-92.5417	92.5417
90	0.1891	0.446	-0.2565	0.2565	0.0658	-135.6817	135.6817
계			-0.7947	1.0950	0.1754	-269.0972	278.2171
$ME=$ -0.079			$SDE=$ 0.1396			$RMS=$ 0.01754	
$MAE=$ 0.1094			$MPE=$ -26.90				
$MSE=$ 0.0175			$MAPE=$ 27.82				

상기 Table들에서 잔차 또는 예측오차 e 로써 예측방법의 정확도를 측정하는 방법을 사용하였는데 이 방법들은 다음과 같이 정의된다.⁽⁵⁾

$$\text{Root Mean Square Error } RMS = \sqrt{\frac{\sum e_t^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{Mean Error } ME = \frac{\sum e_t}{n} \quad (9)$$

$$\text{Mean Absolute Error } MAE = \frac{\sum |e_t|}{n} \quad (10)$$

$$\text{Mean Squared Error } MSE = \frac{\sum e_t^2}{n} \quad (11)$$

$$\text{Standard Deviation of Error } SDE = \sqrt{\frac{\sum e_t^2}{(n-1)}} \quad (12)$$

$$\text{Mean Percentage Error } MPE = \frac{K - K_i}{n} \times 100 \quad (13)$$

Mean Absolute Percentage Error

$$MAPE = \frac{\left| \frac{K - K_i}{K} \right|}{n} \times 100 \quad (14)$$

여기서 소개한 정확도를 구하는 방법들 중 어느 방법이 가장 좋은지를 판단할 수는 없다. 다만 여러 가지 다른 예측 방법으로 예측값들을 얻었을 경우, 그 예측 방법들에 대한 여러 가지 정확도를 구하여 대체적인 비교를 함으로써 주어진 시험자료에 대해서는 어느 예측 방법이 더 타당하다는 것을 알 수 있을 뿐이다. 물론 두 가지 예측 방법을 비교할 때 정확도를 기준으로 판단하려면 계산된 정확도의 값들이 보다 작은 것이 보다 바람직한 예측 방법이라고 할 수 있다. 따라서 Table 4~Table 6에 계산된 정확도 수치를 볼 때 Table 5의 로그 표현식이 가장 정확한 것으로 판단할 수 있다. 또한 각 표현식에 밸브 개도별로 정확도 계산의 가장 기본이 되는 잔차 e 를 나타내면 Table 7 및 Fig. 8과 같다.

Table 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 버터플라이밸브의 개도별 손실계수 K 를 표현함에 있어 지수공식을 사용할 경우 손실계수 K_1 은 개도가 적은 구간(폐쇄구간)에서 잔차가 가장 큰-수치를 나타내고, 중간 개도에서는 잔차가 가장 큰 +수치, 그리고 완전 개방된 구간에서는 잔차가 가장 작은-수치를 보여준다. 로그공식을 사용할 경우 손실계수 K_2 는 개도가 적은 구간(0도 부근)에서 잔차가 가장 작은-수치를 나

Table 7 Comparison of trend equation's residual e
(K_1 : exponential, K_2 : Log, K_3 : Quadratic)

Open(°)	$e(K_1)$	$e(K_2)$	$e(K_3)$
9	-0.2833	-0.0423	0.1502
18	-0.1895	0.0287	-0.1221
27	-0.0342	0.0338	-0.1399
36	0.1008	0.0524	-0.0610
45	0.1154	0.0038	-0.0401
54	0.1005	-0.0276	-0.0261
63	0.0768	-0.0321	-0.0270
72	0.0382	-0.0262	-0.0696
81	-0.0490	-0.0514	-0.2025
90	-0.0046	0.0658	-0.2565
합계	-0.1287	0.0048	-0.7947

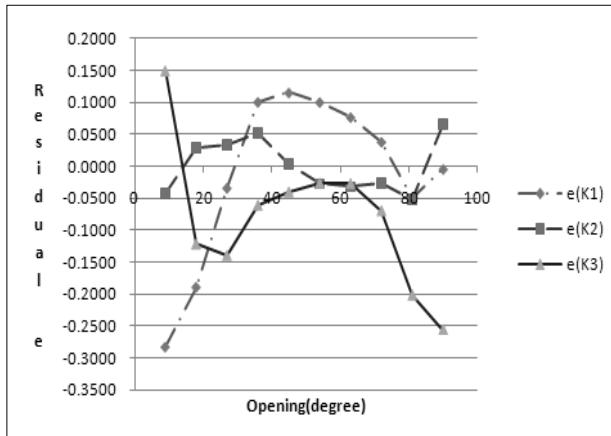


Fig 8 Comparison of trend equation's residual e (K_1 : exponential, K_2 : Log, K_3 : Quadratic)

타내고, 중간 개도에서는 잔차가 가장 작은 + 및-수치, 그리고 완전 개방된 구간에서는 잔차가 중간인 + 수치를 보여준다. 2차공식을 사용할 경우 손실계수 K_3 는 개도가 적은 구간에서 잔차가 중간 정도의 + 수치를 나타내고, 중간 개도에서는 전반적으로-수치, 그리고 완전 개방된 구간에서는 잔차가 가장 큰-수치를 보여준다.

여기서 유의하여야 할 점은 관로에 설치되어 유량조절용으로 사용되는 밸브의 경우 밸브의 고유유량계수가 아닌 유효유량계수 C_v 가 유량을 지배하며 이를 다음 식으로 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

$$C_v = C \sqrt{\frac{\Delta H}{K + f \frac{L}{D}}} m^3/hr \quad (15)$$

여기서 C : 밸브 상류 배관의 단면적과 중력가속도의 곱으로 표현되는 상수 ($A/2g$)

ΔH : 밸브(또는 관로)의 상류와 하류 말단부에 작용하는 수두 차이

K : 밸브손실계수

f : 관마찰계수

L : 관로 길이

D : 관로 직경

식 (15)에서 관로가 길어지면 f 와 L 이 증가하여 밸브손실계수 K 가 C_v 에 미치는 영향이 상대적으로 작게 되므로 관로가 길수록 밸브의 개도를 더욱 폐쇄하여야 한다. 다시 말해 관로가 길수록 유량을 조절하기 위해서는 밸브 개도를 더욱 폐쇄하여야 하므로 유량조절용으로 관로에 설치되는 밸브는 개도가 적은 구간($\rightarrow 0$)에서 손실계수의 정확성은 더욱 중요하다.

3.4 표현식의 타당성 검증

본 연구에서는 버터플라이밸브의 개도별 손실계수 K 를 나타내기 위한 표현식을 로그형식으로 결정하고 이 표현식의 타당성을 검증하기로 한다. 밸브 개도별 손실계수의 시험값 K 와 로그 표현식을 사용한 계산값 K_2 와 이들의 오차들을 요약하면 Table 8과 같고 이 결과를 그래프로 나타낸 것은 Fig. 9 및 10과 같다.

Table 8 Comparison of K (test value) and K_2 (calculated value using log expression)

Open	Real value		Log value		error(%)	
	experiment K	calculation K_2	experimen K	calculation K_2	real value	log value
9	1963.643	2164.570	3.293	3.335	-10	-1
18	249.5246	233.578	2.397	2.368	6	1
27	68.6386	63.505	1.837	1.803	7	2
36	28.4344	25.205	1.454	1.401	11	4
45	12.4168	12.309	1.094	1.090	1	0
54	6.4309	6.853	0.808	0.836	-7	-3
63	3.8789	4.177	0.589	0.621	-8	-5
72	2.5608	2.720	0.408	0.435	-6	-6
81	1.6550	1.863	0.219	0.270	-13	-24
90	1.5455	1.328	0.189	0.123	14	35

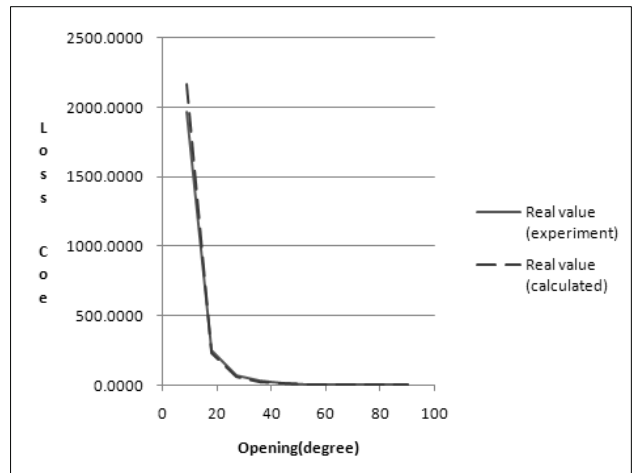


Fig. 9 Butterfly valve's loss coefficient using test data & log equation

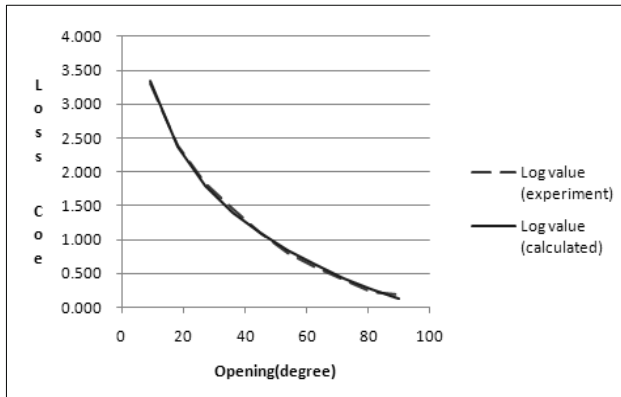


Fig. 10 Comparison of butterfly valve's test data and log equation using log conversion

4. 결 론

유량조정 목적으로 관로에 설치할 밸브의 유량제어범위를 검토하기 위해서는 반드시 밸브의 전체 개도구간에 걸친 손실계수를 구하여야 한다. 버터플라이밸브의 경우 손실계수를 구하기 위해 통상적으로 개도 0°(완전폐쇄)~90°(완전개방) 사이 여러 개도에서 시험을 하여 손실계수를 구하고 이를 하나의 곡선으로 나타낸다.

그러나 관망의 정상유동해석 및 부정류해석시 밸브의 시험점들의 중간 개도에서의 손실계수를 구하기 위해서는 통상적으로 시험으로 구한 점들 사이 선형관계로 구하였다. 또한 밸브 전체 개도구간에 걸친 곡선을 하나의 식으로 표현하는 것은 매우 어려우며 전형적인 추세식으로 표현한다 해도 실수로 표현할 경우 약 100% 오차, 로그로 표현할 경우 약

2500%의 큰 오차가 발생하였다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 버터플라이밸브의 전체 개도구간에서 시험으로 구한 손실계수 수치들을 로그로 변환하여 그래프로 나타내고, 엑셀에서 제공하는 추세선 도구를 사용하여 로그표현식으로 사용한 결과 실수로 표현할 경우 완전 개방된 개도에서 오차 +14% 및 거의 폐쇄된 상태인 개도 9°에서 -10%가 발생하였다. 그리고 로그로 표현할 경우 완전 개방된 개도에서 오차 +35% 및 거의 폐쇄된 상태인 개도 9°에서 -1%가 발생하였다. 따라서 밸브를 교축하여 유량을 제어하거나 또는 수충격현상이 발생하는 개도가 적은 구간에서의 정확도를 상당히 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- (1) 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. 380~385.
- (2) 박한영, 박진훈, 노선민, 신동기, 2008, "전산기로 푸는 수충격해석 입문," 홍릉과학출판사, 서울특별시, pp. 188~194.
- (3) 윤준용, 2009, "관로용 밸브 설계기준 수립용역보고서," pp. 93~98.
- (4) 한국상하수도협회, 2010, "상수도시설기준," 도설출판 건설도서, 서울특별시, p. 893.
- (5) 이원우, 2009, "시계열 자료분석 예측을 위한 통계적 기법," 자유아카데미, 경기도 파주시, pp. 9~10.
- (6) Philip L. Skousen., 2004, "Valve Handbook," McGraw-Hill, New York., pp. 280~282.