

제어밸브 유량특성에 레이놀즈 수가 미치는 영향

정태규*†

Effect of Reynolds Number on the Flow Characteristics of a Control Valve

Taekyu Jung*†

ABSTRACT

The factors affecting the flow coefficient of a control valve were identified and analyzed. The flow coefficient of a control valve are affected by not only Reynolds Number but also the figure and the roughness of the inlet/outlet pipes. Therefore, the flow coefficient is not a constant value. For the purpose of use in the system such as LRE, requiring the exact flow-coefficient of a control valve, the flow-coefficient should be measured under similar Reynolds Number using the inlet and outlet pipes which have the same figure and roughness with a real system.

초 록

제어밸브의 유량계수에 영향을 미치는 인자들을 파악하고 그 영향을 분석하였다. 제어밸브의 유량계수는 레이놀즈 수, 연결 배관의 형상과 표면 조도 등에 영향을 받는다. 따라서 유량계수를 상수로 취급할 수 없다. 그러므로 로켓엔진과 같이 정확한 유량계수를 요구하는 시스템에서 사용할 목적으로 제어밸브의 유량계수를 측정할 때는 실제 사용 환경과 유사한 레이놀즈 수 영역에서, 동일한 조도 및 형상을 가지는 입출구 배관을 사용하여 측정해야 한다.

Key Words: Control Valve(제어밸브), LRE(액체로켓엔진), Flow Coefficient(유량계수)

1. 서 론

제어밸브는 여러 산업분야에서 유체의 유량 및 압력 제어를 위해 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 제어밸브를 포함한 모든 밸브는 식 (1)과 같이 유량계수(K_v)로 밸브의 특성을 나타낸다[1,2]. 특히 제어밸브는 밸브 개도별로 유량

계수를 측정한다.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (1)$$

상기 식에서 Q는 유량(m^3/h), G는 유체의 비중, ΔP 는 밸브의 입출구 압력차(bar)이다.

유량계수는 밸브의 고유한 값으로서 상수로 취급하지만 엄밀하게 말하자면 레이놀즈 수에 영향을 받는다. 일반적으로 밸브의 유량계수는

* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: tkjung@kari.re.kr

레이놀즈 수가 10^4 보다 클 경우에 상수로 취급할 수 있다고 알려져 있다[3].

본 논문에서는 한국형발사체 7톤 및 75톤 로켓엔진에 사용되는 유량제어밸브의 유량계수와 레이놀즈 수의 관계를 연구하였다. 또한 입출구 배관 형상 및 배관의 표면 조도가 유량계수에 미치는 영향도 분석하였다.

2. 제어밸브 유량계수에 영향을 미치는 인자들

2.1 레이놀즈 수

서론에서 언급한 바와 같이 밸브의 유량계수는 레이놀즈 수가 10^4 보다 클 경우에 상수로 취급할 수 있다고 알려져 있지만 이는 일반적으로 그렇다는 것이지 모든 밸브에 해당한다고 볼 수는 없다. 특히 로켓엔진의 경우, 제어밸브 개도를 조절하여 엔진 성능을 조절하고, 시험 후 엔진 성능을 밸브 개도에 따른 유량계수를 사용하여 평가하기 때문에 정확한 제어밸브의 유량계수 확보가 필요하다.



Fig. 1 레이놀즈 수 영향 확인 시험

레이놀즈 수의 영향을 알아보기 위해 Fig.1과 같이 물을 이용하여 75톤 엔진 가스발생기 연료 유량제어밸브의 유량계수를 밸브 개도별로 레이놀즈 수를 변경하여 측정하였다. 배관 형상에 의한 영향을 배제하기 위해 입출구 배관으로 직관을 사용하였다. Table 1은 시험결과이다. $K_v(1)$, (2),(3)의 레이놀즈 수는 각각 2.7×10^5 , 3.9×10^5 , 4.8×10^5 이다. 그리고 K_v ratio는 식(2)와 같이 정의하였다. 밸브 개도가 커질수록, 레이놀즈 수가

커질수록 K_v ratio가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 시험 결과로부터 유량계수는 같은 밸브 개도에서 레이놀즈 수가 커질수록 증가하며, 밸브 개도가 커질수록 레이놀즈 수 증가에 따른 유량계수 증가량이 커지는 것을 알 수 있다.

$$K_v \text{ ratio } N = \frac{K_v(N+1) - K_v(1)}{K_v(1)} \times 100 \quad (2)$$

Table 1. 레이놀즈 수와 K_v 의 관계

밸브 개도 (°)	K_v (1)	K_v (2)	K_v (3)	K_v ratio 1 (%)	K_v ratio 2 (%)
15	4.91	4.93	*	0.41	-
55	5.48	5.5	*	0.37	-
85	6.22	6.25	*	0.48	-
120	7.55	7.57	7.56	0.27	0.13
165	10.73	10.75	10.76	0.19	0.28
195	13.72	13.84	13.76	0.88	0.29
220	15.75	15.89	15.94	0.89	1.21
250	17.44	17.59	17.66	0.86	1.26
280	18.38	18.52	18.65	0.77	1.47

* : 차압센서 범위를 초과하여 데이터 없음

2.2 배관 표면 조도

배관 유로의 표면 조도가 유량계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig.2와 같이 2.1장의 시험 조건에서 출구배관만 다른 배관으로 변경하였다. 2.2장의 시험에서 사용한 출구배관은 2.1장의 시험에서 사용한 배관에 비해 표면 조도가 좋은 매끄러운 배관이다. 단, 본 시험에서 사용된 출구 배관은 실제 엔진에 사용되는 배관과 동일한 형상으로, 압력 측정 포트 앞에 45도 곡관이 있다.

일반적으로 배관의 표면 조도가 같을 경우, Fig.2와 같이 출구 배관이 곡관으로 되어 있으면 곡관에서의 압력 손실 때문에 제어밸브의 유량계수는 직관을 사용할 때보다 작아야 한다. 그러나 본 시험결과는 Table 2와 같이 완전히 다른 결과를 보이고 있다. 참고로 $K_v(1),(2),(3)$ 의 레이

놀즈 수는 각각 2.4×10^5 , 3.8×10^5 , 4.7×10^5 로 2.1장의 시험 환경과 거의 같다.



Fig. 2 배관 표면 조도 영향 확인 시험

Table 2. 배관 표면 조도와 K_v 의 관계

밸브 개도 (°)	K_v (1)	K_v (2)	K_v (3)	K_v ratio 1 (%)	K_v ratio 2 (%)
15	4.97	5.04	5.04	1.41	1.41
55	5.56	5.62	5.64	1.08	1.44
85	6.34	6.41	6.43	1.10	1.42
120	7.74	7.83	7.89	1.16	1.94
165	11.23	11.4	11.7	1.51	4.19
195	15	15.18	15.43	1.20	2.87
220	17.78	18.1	18.31	1.80	2.98
250	20.2	20.54	20.73	1.68	2.62
280	21.6	22.03	22.24	1.99	2.96

Table 2의 시험 결과만 보자면, 2.1장 시험결과와 마찬가지로 유량계수는 같은 밸브 개도에서 레이놀즈 수가 커질수록 증가하며, 밸브 개도가 커질수록 레이놀즈 수 증가에 따른 유량계수 증가량이 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 2.1장 시험결과와 같은 레이놀즈 수를 기준으로 비교하면 Fig.3과 같이 직관 배관의 경우보다 오히려 45도 곡관을 사용한 경우의 유량계수가 큰 것을 알 수 있다. 상기와 같이 예상과 다른 결과는 시험에 사용된 출구 배관의 표면 조도 차이에 기인한다. 직관은 파이프로 제작하였고 곡관은 튜브로 제작하였는데, 파이프로 제작된 출구 배관

의 내부 표면 조도가 튜브로 제작된 배관에 비해 매우 거친 것을 확인하였다. 문헌[4]에 있는 튜브와 파이프의 내부 표면 거칠기(e)는 각각 0.0015, 0.046 mm이다. 출구 배관의 시작 면에서 압력 포트 위치까지의 길이는 두 배관 모두 175mm이다. 출구 배관의 마찰에 의한 손실계수(K)는 moody 선도[4]와 식(3)을 이용하여 계산하면 Table 3과 같다.

$$K = f \times \frac{L}{D} \quad (3)$$

식(3)에서 f 는 마찰계수, L 는 배관길이, D 는 배관내경이다.

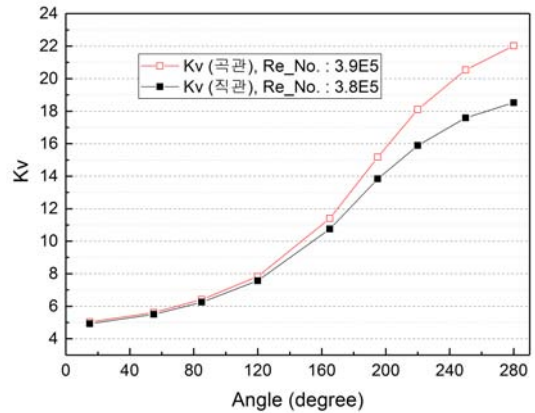


Fig. 3 배관 표면 조도에 따른 K_v 변화

Table 3. 출구 배관의 손실 계수(K) 계산

	D (mm)	L (mm)	e (mm)	f	K	Re_No.
곡관	25	175	0.0015	0.014	0.098	3.8×10^5
직관			0.046	0.024	0.168	

배관의 손실계수가 제어밸브의 유량계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 유량계수와 손실계수의 변환식이 필요하다. 압력 강하와 손실 계수와 관계는 식(4)와 같다. 식(1),(4)를 이용하여 식(5)를 얻을 수 있다(ρ_w 는 물의 밀도, v 는 유체 유속). 식(5)를 이용하여 제어밸브 개도 280도에서의 유량계수를 손실계수로 환산하여 출구배관의

손실계수를 제외한 제어밸브의 손실계수를 계산하면 Table 4와 같다. 이론상 출구 배관만 다르기 때문에 제어밸브 손실계수에서 출구배관 손실계수를 뺀 값이 두 경우에 일치하여야 하지만 서로 다르다. 이는 문헌에서 참고한 배관의 마찰계수가 실제와 다르기 때문으로 판단된다. 그러나 이와 같은 차이는 배관의 마찰 손실 영향만으로는 설명하기 어려우며 배관 용접 비드의 유무, 곡관에 의한 영향 등이 종합적으로 포함된 결과로 판단된다. 그럼에도 불구하고 배관의 조도가 제어밸브의 유량계수에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

$$\Delta P = K \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

$$K_v^2 = 1.598876 \times 10^{12} \frac{D^4}{\rho_w K} \quad (5)$$

Table 4. 출구 배관을 제외한 제어밸브 손실 계수(K)

	제어밸브 유량계수	제어밸브 손실계수	출구배관 손실계수	제어밸브-출구배관 손실계수
곡관	22.03	1.287	0.098	1.189
직관	18.52	1.821	0.168	1.653

2.3 배관 형상

배관 형상이 유량계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 튜브로 제작된 직관 및 곡관 출구배관을 이용하여 유량계수를 측정하였다. 시험에 사용된 유량제어밸브는 7톤 엔진 가스발생기 산화제 유량제어밸브이다.

시험결과, Fig.5에서와 같이 직관일 경우의 유량계수가 곡관일 때보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 같은 개도에서 레이놀즈 수가 클수록 유량계수가 크며, 개도가 커질수록 배관 형상이 유량계수에 미치는 영향이 커지는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 제어밸브의 유량계수에 영향을

미치는 인자들을 실험을 통하여 파악하고 각 인자들의 영향력을 정성적, 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

제어밸브 유량계수에 영향을 미치는 인자들은 레이놀즈 수, 배관의 표면 조도, 배관의 형상 등이다.

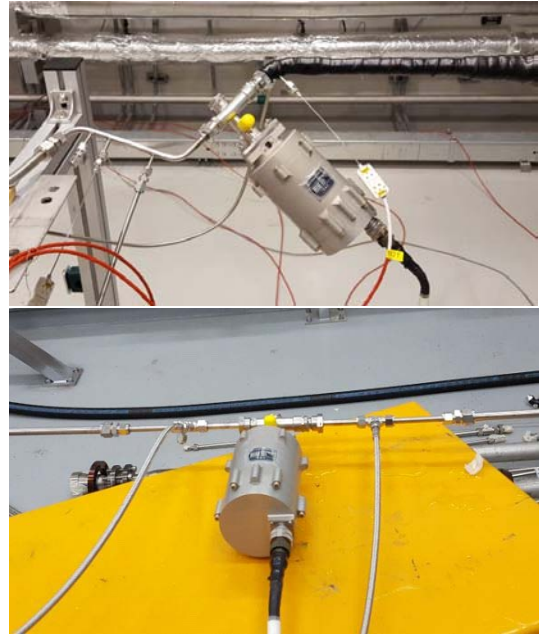


Fig. 4 배관 형상 영향 확인 시험

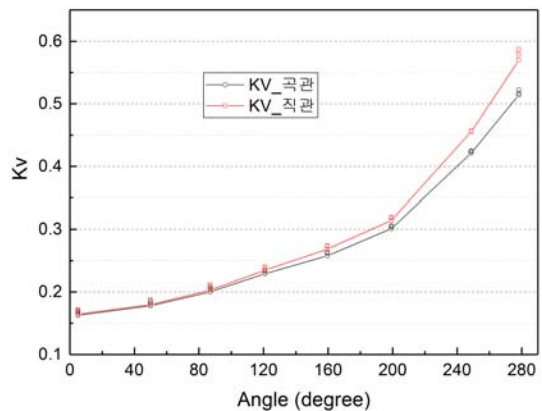


Fig. 5 배관 형상에 따른 Kv 변화

레이놀즈 수가 클수록 제어밸브의 유량계수는

증가한다. 이는 레이놀즈 수가 증가할수록 유로에서의 마찰 손실이 감소하기 때문이다. 제어밸브의 모든 사용 환경에서 레이놀즈 수가 비슷하다면 유량계수를 상수로 취급할 수 있으나 레이놀즈 수의 차이가 크면 유량계수를 상수로 취급할 수 없다.

제어밸브의 입출구에 연결된 배관의 표면 조도가 클수록 제어밸브의 유량계수는 작아진다. 특히 개도가 커질수록 표면 조도에 의한 유량계수 변화 폭이 커지게 된다.

제어밸브의 입출구에 연결된 배관의 형상에 따라 유량계수가 영향을 받는다. 배관의 조도가 같다면, 직관의 경우가 곡관의 경우보다 유량계수가 크며 레이놀즈 수가 클수록 그 차이가 커진다.

일반적으로 제어밸브를 비롯한 모든 밸브의 유량계수는 공학적으로는 상수로 취급하고 있으

나 사용 환경이 다르면 상수로 취급할 수 없다. 따라서 유량계수의 정확한 값이 필요한 경우에는 실제 사용 환경과 유사한 레이놀즈 수와 동일한 형상 및 조도를 가지는 입출구 배관을 이용하여 유량계수를 측정해야 한다.

참 고 문 헌

1. Driskell, L., Control-valve Selection and sizing, ISA, 1983.
2. Skousen, P. L., Valve Handbook, McGraw-Hill, 1997.
3. Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, Begell House.
4. White, F. M., Fluid Mechanics, 2nd Edition, McGRAW-HILL, 1986.