

CFD 해석방법을 이용한 PFA 라이닝 볼밸브의 유량계수 예측

전홍필* · 이원섭** · 김철수** · 이종철**†

Prediction of the Flow Coefficient of a PFA Lined Ball Valve Using the CFD Simulation Method

Hong-Pil Jeon*, Won-Seob Lee**, Chul-Soo Kim**, Jong-Chul Lee**†

Key Words : Ball valve(볼밸브), CFD(전산유체역학), Flow Coefficient(유량계수), PFA Lined Valve(PFA 라이닝 밸브)

ABSTRACT

A PFA lined ball valve, which is machined with fluorinated resin PFA to its inner part for improving corrosion resistance, non-stickness, heat-resistance, has been widely used in semiconductor/LCD manufacturing processes with the high purity chemicals as working fluid. Due to the safety concerns, the experiments for measuring the flow coefficient of a PFA lined ball valve should be conducted with water at room temperature according to IEC standards. However, it is required to know the real flow coefficient with the real working fluid, because the flow coefficient is critical to correctly design valves in piping system. In this study, we calculated the flow coefficient of a PFA lined ball valve 40A with hydrochloric acid (40°C 36% HCl) as the working fluid using a commercial CFD package, ANSYS CFX v15. The computational results had a good agreement with the measured data and showed a little difference between water and hydrochloric acid as the working fluid of a PFA lined ball valve.

1. 서 론

PFA 라이닝 볼밸브(PFA lined ball valve)는 내식성, 비점착성, 내열성 증가를 위해 내면부에 불소계 수지 PFA가 가공되어 있는 볼밸브로 고순도 화학약품의 제조공정 및 고순도 화학약품을 이용한 반도체/LCD 제조 공정에 가장 많이 쓰이고 있으며, 석유화학, 제철, 제약분야에서도 사용되고 있다.⁽¹⁾ PFA 라이닝 볼밸브는 화학약품이 취급되는 산업현장에서 주로 사용되기 때문에 작동유체 종류에 따른 정확한 유량계수를 파악하는 것이 생산원가 절감 및 생산성 증대로 이뤄진다. 하지만 PFA 라이닝 볼밸브의 유량계수 측정시험에서는 위험성 등 때문에 작동 유체로 물을 사용할 수밖에 없다. 따라서 염산 등과 같은 화학물질 등이 사용되는 실제 조건과는 달라 측정된 유량계수가 정확하지 않다.

따라서 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX v15를 이용하여 실제 작동유체로 작동하는 염산(HCl 수용액)을 작동유체로 하여 PFA 라이닝 볼밸브의 유량계수를 예측하였다. 해석결과와 검증을 위하여 유량계수 측정실험 조건과 동일하게 상온의 물을 작동유체로 하여 PFA 라이닝 볼밸브 40A의 유량계수를 계산하였고, 이를 (주)케이투엔에서 제시한 실측 유량계수와 비교하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 모델생성

본 연구에 사용된 모델은 현재 (주)케이투엔에서 생산·판

* 강릉원주대학교대학원 자동차공학과(국립과학수사연구원)(Graduate School of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University(National Forensic Service))

** 강릉원주대학교 기계자동차공학부(School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University)

† 교신저자, E-mail : jcllee01@gwnu.ac.kr

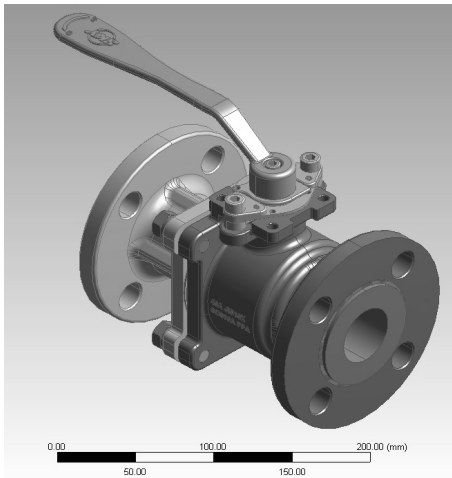


Fig. 1 3D model of a PFA lined ball valve 40A

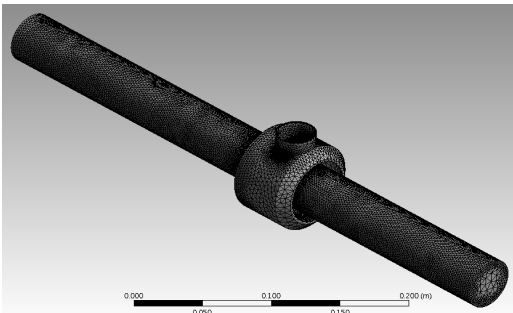


Fig. 2 Computational mesh of a PFA lined ball valve at the fully open position

매 중인 PFA 라이닝 볼밸브 40A 모델($C_v=220$ gpm, $K_v=189$ m^3/h)을 기준으로 작성하였다. 유량계수 예측을 위해 밸브가 모두 열린(open position) 상태 관하여 유동해석을 위한 모델 및 격자를 생성하였다. 해석에 사용된 PFA 라이닝 볼밸브의 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 해석 조건

볼밸브가 모두 열린 상태에서부터 15° 간격으로 45° 까지 형상을 변경하여 유동영역을 추출하였으며, 정확한 해석을 위하여 밸브 입구와 출구 쪽에 각각 3D(D: 밸브 직경), 4D만큼의 유로를 추가하여 모델링을 하였다. 수치해석에 사용된 격자형상은 Fig. 2와 같다. 유량계수 시험표준인 IEC 60534-2-3에 따른 실제 유량계수 측정 조건과 일치시키도록 입구측과 출구측 사이의 압력차가 1 bar인 압력조건을 적용하였다. 또한 밸브 내부 유동은 레이놀즈수가 4,000을 넘는 난류 유동이기 때문에 난류모델링을 위한 k- ϵ 모델을 적용하였으며(난류강도 5%), 벽면에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다.⁽²⁻³⁾

해석에 사용된 3종류 작동유체에 관한 해석을 수행하였으

Table 1 Material properties of each working fluid

20°C Water	Density	0.997 [kg/L]
	Viscosity	1.000 [mPa·s]
40°C Water	Density	0.992 [kg/L]
	Viscosity	0.656 [mPa·s]
40°C 36% HCl	Density	1.179 [kg/L]
	Viscosity	1.990 [mPa·s]

며, 유량계수 측정에 사용되는 상온의 물, PFA 라이닝 볼밸브의 실제 작동유체 중 하나인 40°C의 36% HCL수용액 그리고 40°C의 물이다. Table 1에 사용된 유체의 물성치를 나타내었다.⁽⁴⁻⁵⁾

2.3 유량계수 산출법

밸브 유량계수란 기준 상태의 유체가 밸브의 개구부를 통해 단위 차압에서 흐르는 유량이다. 관로에 설치된 밸브를 통하여 유체가 통과할 때 밸브의 저항에 의해 발생하는 회복할 수 없는 유체의 압력손실과 유량과의 일정한 관계를 나타내기 때문에 밸브의 크기와 배관 조직을 결정하는데 중요한 요소이다.

유량계수에 관한 국제시험표준인 IEC 60534-3-2에 제시되어 있는 유량계수 계산법을 이용하여 구하는 것이 합리적이며, 이에 관한 상관식은 아래와 같다.⁽⁶⁾

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta p}} \quad [\text{gpm}] \quad (1)$$

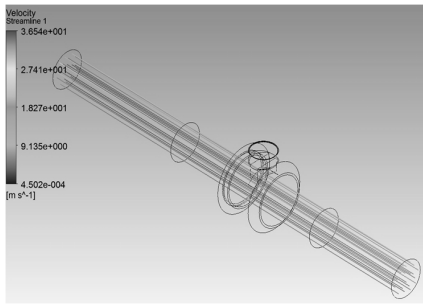
$$K_v = \frac{Q}{N_2} \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta p}} \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (2)$$

여기서, Q는 유량 [m^3/hr], Δp 는 압력차 [kPa], ρ 는 밀도 [kg/m^3], ρ_0 는 15.5°C일 때의 물의 밀도 [kg/m^3], 상수값 N_1 , N_2 는 0.0865, 0.1 이다.

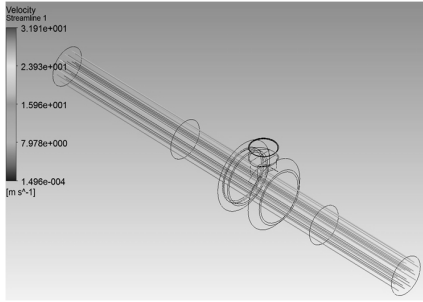
3. 수치해석 결과

3.1 유동 특성

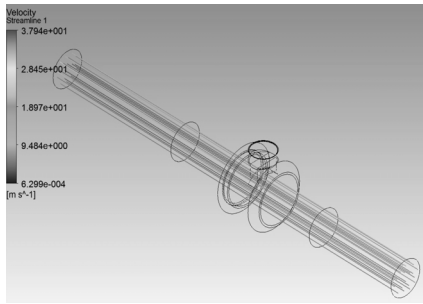
본 연구에서는 상용프로그램인 ANSYS CFX v15를 사용하여 PFA 라이닝 볼밸브 내부유동을 해석하였다.⁽⁷⁻⁸⁾ 3종류 작동유체(20°C 물, 40°C 36% HCl수용액, 40°C 물)별 유동 패턴과 압력분포를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었으며, 작동유체별 밀도와 점도를 제외한 변수가 없기 때문에 해석 결과의 차이점은 거의 없음을 알 수 있다.



(a) 20°C Water

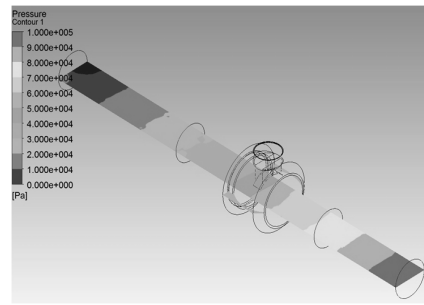


(b) 40°C 36% HCl

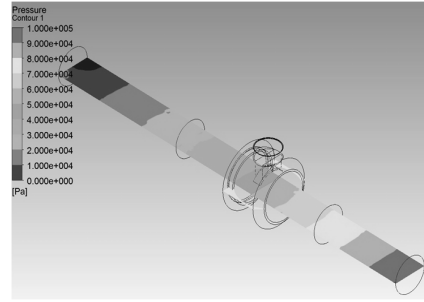


(c) 40°C Water

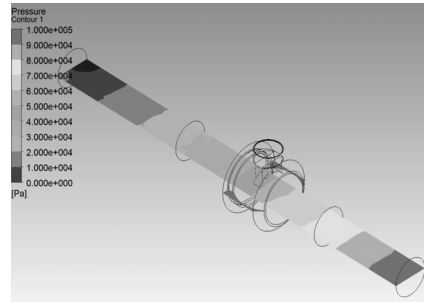
Fig. 3 Streamline and velocity magnitude at the fully open position according to each working fluid



(a) 20°C Water



(b) 40°C 36% HCl



(c) 40°C Water

Fig. 4 Pressure distribution at the fully open position according to each working fluid

3.2 각 유체별 압력-유량 곡선

Fig. 5에는 3종류 작동유체의 압력-유량 곡선을 나타내었다. 해석모델의 입구와 출구로부터 각각 1D, 1.5D 떨어진 지점에서의 작동유체별 압력차와 유량을 비교한 결과, 최고 유량은 압력차가 약 0.6 bar일 때 도달함을 확인하였다. 점도가 가장 큰 40°C 36% HCl일 때 가장 작은 유량을 나타냄을 확인하였고, 이는 유량계수 산출에 영향을 미칠 것인데 정량적 비교는 이후에 설명하기로 한다.

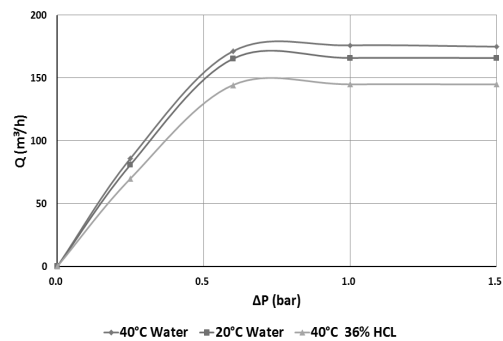


Fig. 5 P-Q curves according to each working fluid

3.3 유량계수

PFA 라이닝 볼밸브의 작동유체인 화학물질에 관한 직접적인 유량계수 측정시험은 안전성 등의 문제 때문에 수행하기 어렵기에 대부분 상온의 물을 이용하여 유량계수 측정시험을 실시한다. 해석모델인 (주)케이투엔 PFA 라이닝 볼밸브

브 40A의 측정된 유량계수(C_v)는 220 [gpm]이다.

본 유동해석으로부터 구한 유량과 압력차 및 식 (1)을 사용하여 유량계수를 산출하였다. 압력차를 산출한 입구 및 출구 부근에서의 위치는 각각 볼 구간 전후로 2D(D: 밸브 직경), 2.5D 만큼 떨어진 곳이며, 이는 유입구 및 유출구에서

Table 2 Computed flow coefficients according to each working fluid

Working fluid	Q [m ³ /h]	Δp [kPa]	C _v [gpm]
20°C Water	165.3	59.6	228.9
40°C Water	171.3	66.4	224.7
40°C 36% HCl	144.4	60.5	198.4

의 유동 안정화를 고려한 위치 지정이다.

Table 2에 작동유체에 따른 계산된 유량계수를 나타내었다. 작동유체가 20°C 물일 때 계산된 유량계수(C_v)는 228.9 [gpm]으로 측정된 유량계수를 잘 예측하고 있음을 확인하였다. 유동해석으로부터 산출된 유량계수가 측정치보다 약간 큰 것은 유동해석에서 계산된 압력손실이 작다는 것을 의미하고, 이것은 수치해석에서 실제보다 유동저항을 작게 예측한 것이므로 당연한 결과로 판단된다.

작동유체가 40°C 36% HCl일 때 계산된 유량계수 (C_v)는 198.4 [gpm]으로 20°C 물인 경우와 비교하여 10% 이상 작은 것을 확인하였다. 40°C 36% HCl의 점도가 20°C 물보다 크기 때문에 유동 시 유동저항에 의한 압력강하가 더 크게 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 PFA 라이닝 볼밸브가 포함되는 플랜트 배관 설계에서는 실제 작동유체인 화학약품에 관한 유량계수를 산출하고 이것을 고려한 전체적인 설계를 해야만 과잉설계나 불안을 야기할 수 있는 인자들을 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 각 유체별 개폐각도에 따른 유량계수

Fig. 6에는 3종류 작동유체별 개폐각도에 따른 유량계수를 나타내었다. PFA 라이닝 볼밸브는 정밀 유량제어용 밸브가 아니기 때문에 완전 열림상태에서 밸브 개도가 조금만 닫히더라도 급격한 유량변화가 발생함을 확인할 수 있었으며, 3종류 작동유체에서 모두 동일한 패턴을 나타냄을 파악하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석적 방법으로 화학약품 등의 위험물질이 작동유체로 사용되는 PFA 라이닝 볼밸브의 유량계수를 산출하였다. 수치해석적 방법으로 산출된 유량계수는 측정된 유량계수(작동유체: 20°C 물)와 비교하여 5% 이내의 정밀도를 나타내었다. PFA 라이닝 볼밸브의 실제 작동유체인 40°C 36% HCl일 때 유량계수는 20°C 물인 경우와 비교하여 10% 이상 작은 것을 확인하였으며, 이는 40°C 36% HCl의 점도가 20°C 물보다 크기 때문에 유동 시 유동저항에 의한 압력강하가 더 크게 발생하기 때문이다. 밸브 선정 시 유량계수 측정에 사용되는 작동유체와 실제 PFA 라이닝 밸브가 이송해야할 작

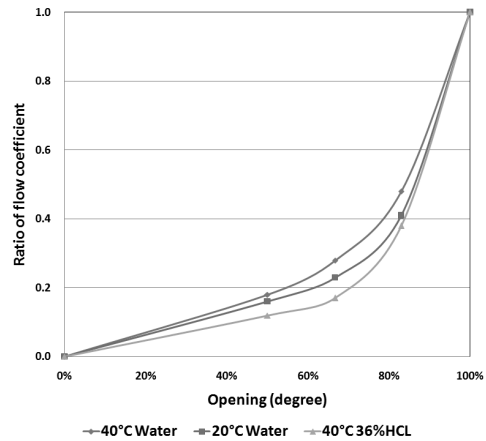


Fig. 6 Ratio of flow coefficient according to opening degree with three different working fluid

동유체가 다르다는 점을 반영해야만 과잉설계나 불안을 야기할 수 있는 인자들을 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 출연금으로 수행한 강릉원주대학교 산학협력선도대학(LINC)육성사업 및 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력 기술개발사업(No. C0248942)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 이 논문은 2014년도 강릉원주대학교 교수연구년연구 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- (1) Hayes, W. C., 2012, "Fluoropolymer Lined Ball Valve Design Breakthrough," ACHEMA Congress, Germany, June, pp. 18~22.
- (2) An, T. W., Han, G. J., Han, D. S., and Lee, S. W., 2007, "A study on the characteristics of flow in the metal touch ball valve according to the opening degree," KSME 2007 annual spring conference, No. 5 pp. 593~596.
- (3) Chern, M. J., Wang, C. C., and Ma, C. H., 2007, "Performance test and flow visualization of ball valve," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 31, No. 6, pp. 505~512.
- (4) Perry, R., Green, D., and Maloney, J., 2007, "Perry's chemical engineers handbook, 7th edition," McGraw-Hill Book Company, USA.
- (5) Aspen Technology, 2002, "Aspen properties calculations binary mixtures modeling software," Akzo Nobel Engineering, Netherlands.
- (6) IEC 60534-2-3, Industrial-Process Control Valves (Part 2-3: Flow capacity - Test Procedure), 1997, IEC.
- (7) ANSYS CFX-pre User's Guide, 2014, ANSYS, Inc.
- (8) ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2014, ANSYS, Inc.