

유동상사를 이용한 10인치 볼밸브 내부유동 분석

이상문 · 장춘만[†]
한국건설기술연구원

Internal Flow Analysis for a 10 inch Ball Valve using Flow Similarity

SANG-MOON LEE, CHOON-MAN JANG[†]

Environmental & Plant Engineering Research Div., Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
(Daehwa-Dong) 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi, 411-712, Korea

Abstract >> Flow characteristics inside a 10 inch ball valve have been analyzed using three-dimensional numerical analysis and experiments. Continuity and three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations have been used as governing equations for the numerical analysis. The numerical model has been constructed through the grid dependency test and validation with the results of experiments to ensure reliability and numerical effectiveness. The shear stress transport (SST) model has been used as the turbulence closure. The experimental test-rig has been constructed to measure pressure, temperature and flow rate along the pipeline. Some valve opening angles have been tested to evaluate the flow characteristics inside the ball valve and pipeline. The results show that the rapid pressure variations is observed while the valve opening angle decreases, which caused by flow separation at the downstream of the ball valve.

Key words : Ball valve(볼밸브), Three-dimensional numerical model(삼차원 수치모델), Opening angle of a ball valve(볼밸브 개폐각), Flow Similarity(유동상사), Circulation flow(선회유동)

Nomenclature

C_p : pressure coefficient
 P : pressure, Pa
 ρ : density, kg/m^3
 V : velocity, m/s

Subscripts

d : downstream of the valve
 non : non-dimensional
 out : outlet
 u : upstream of the valve

1. 서 론

밸브는 배관을 흐르는 유체의 유량 및 압력의 조절을 위한 기계설비로 다양한 산업공정에서 널리 사용되고 있다. 볼밸브는 몸통 안에 볼(ball)의 회전으로 배관 내의 유동을 개폐하는 목적으로 사용되며,

[†]Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

Received : 2015.07.21 in revised form : 2015.08.25 Accepted : 2015.8.30

Copyright © 2015 KHNES

단순한 형상으로 유지보수 및 제작의 용이성, 탁월한 누설의 차단 등의 장점으로 가스배관 등의 주 밸브로 사용되고 있다.

볼밸브는 TEFLON (PTFE) 시트(seat) 등의 적용으로 내화학성, 내식성, 윤활성 및 온도특성 등이 크게 향상되어 그 사용범위가 단순 가스배관의 차단밸브용에서 극한온도 조건의 대형 가스파이프라인에 이르기까지 다양한 분야에 사용되고 있다.

볼밸브 최적설계를 위해서는 볼의 회전각에 따른 밸브 내의 압력 및 내부유동 특성을 분석, 유동변화에 따른 누설발생 가능성을 미연에 파악할 필요가 있다.

최근 들어 상용 소프트웨어의 유동해석 정확도가 향상됨에 따라 유동해석을 이용한 볼밸브의 내부 유동장을 분석에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. Kim과 Kim¹⁾은 극한지에서 사용하는 볼밸브의 설계를 위하여 구조해석 및 유동해석을 사용하였고, 밸브 내부에 발생하는 압력분포와 유동특성 등을 분석한 바 있다. Ozdamar 등²⁾은 소형 볼밸브를 대상으로 공기압력 시험장치를 이용하여 볼밸브의 압력저하를 실험적으로 고찰하였다. 또한 볼밸브 실험과 함께 CFD (computational fluid dynamics)코드를 이용한 수치평가도 병행하여 실시하였다. 볼밸브에 의한 압력차가 밸브의 폐쇄각에 따라 지수적으로 변화함을 밝혔으며, 수치해석의 타당성을 실험값과 비교하였다. Moujaes와 Jagan³⁾은 1인치 볼밸브의 개도율 및 레이놀즈 수(Reynolds number)의 변화에 따른 내부 유동 특성을 분석, 밸브의 개폐각에 따른 유량계수(flow coefficient)를 제시한 바 있다. Chern 등⁴⁾은 유동가시화 실험을 통해 소형 볼밸브 내부를 지나는 물의 공동현상(cavitation)의 발생 및 압력강하 등의 수력특성을 분석하였다. 볼밸브의 폐쇄각이 커짐에 따라 밸브 후류에서 발생하는 유동박리에 의한 재부착점의 위치가 하류 쪽으로 이동하며 압력계수 역시 지수적으로 증가함을 밝혔다. Chern과 Wang⁵⁾은 관

내를 흐르는 물의 유량을 선형적으로 조절하기 위하여 볼밸브 후단에 설치한 V형 포트를 설치, 관 내부 유동 영향분석을 위한 수치해석 및 유동가시화 실험을 수행하였다. V형 포트를 설치하지 않은 경우 볼밸브의 각도 변화에 따른 유량변화가 지수적으로 증가하는데 비하여, 30 및 60도 V형 포트를 설치할 경우 각도 변화에 따라 유량변화가 선형적으로 나타남을 밝혔다. Tabrizi 등⁶⁾은 삼차원 수치해석 모델을 바탕으로 볼밸브 내부를 흐르는 물의 유동특성을 분석하였다. 볼밸브의 폐쇄각이 커짐에 따라 관내부 와류강도가 커짐을 확인하였으며 이로 인하여 관내부의 압력강하가 지수적으로 증가함을 밝혔다.

본 연구에서는 10인치 볼밸브 내부유동 특성을 분석하기 위하여, 유동상사(flow similarity)모델인 1인치 볼밸브에 대한 성능실험 및 수치분석을 통해 수치해석에 대한 신뢰도를 확보한 수치모델을 구축하였다. 또한, 10인치 볼밸브에 수치모델에 적용하여, 10인치 볼밸브의 개폐각 변화에 따른 볼밸브 내부의 유동특성을 비교, 분석하였다.

2. 볼 밸브 성능평가

2.1 1인치 볼밸브

2.1.1 성능평가실험

볼밸브 내부의 유동특성 분석을 위한 수치모델의 신뢰도 분석을 위하여 Fig. 1과 같이 1인치 볼밸브 성능실험장치를 구축하였다. 볼밸브 성능실험장치는 공압 레귤레이터(①), 압력측정계(②), 1인치 시험용 볼밸브(③), 온도센서(④), 유량조절밸브(⑤) 및 유량계(⑥)로 구성되며 그림의 좌측에 최대 10 bar인 압력탱크(미도시)가 연결되어 실험장치로 공기를 불어주게 되어있다. 성능평가장치로부터 측정된 압력, 온도 및 유량값은 NI사의 DAQ시스템 구축을 통해 컴퓨터로 저장하였다. 실험의 신뢰성을 위하여 실험전

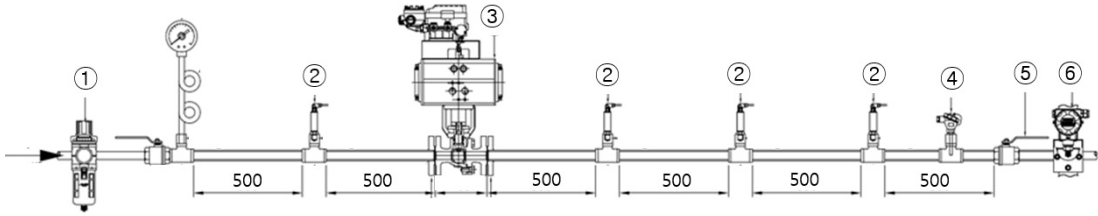


Fig. 1 Schematic diagram of a performance test device for 1 inch ball valve

의 계측시스템의 영점(scale setting) 및 Calibration을 실시하였으며, 각각 3회 이상의 반복측정을 통해 실험데이터를 구축하였다.

2.1.2 수치모델의 신뢰도 평가

Fig. 1의 1인치 볼밸브 성능평가장치를 기반으로 1인치 볼밸브 수치모델을 구축하였다. 효율성과 신뢰도가 높은 수치모델 구축을 위해 실험조건과 동일한 경계조건인 입구압력 4 bar, 출구질량유량 0.058 kg/s를 부여하였다. 작동유체는 공기 이상유체를 사용하였다. 격자계의 효율성을 위해 격자 의존성 시험을 수행하였다. 또한 1인치 볼밸브 수치해석 결과를 실험값과 비교, 분석함으로써 수치모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

수치해석은 상용소프트웨어인 ANSYS-CFX 14.0⁷⁾을 사용하였으며 지배방정식으로 연속방정식(continuity equation)과 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)을 사용하였다. 계산영역을 크게 볼밸브 상부, 볼밸브 및 볼밸브 하부관으로 구분하고, 형상이 간단한 볼밸브 상, 하부관에서는 정렬 육면체 격자를, 형상이 복잡한 볼밸브 영역에서는 비정렬 사면체 격자 및 경계층 격자를 위한 오면체 격자를 사용하였다. 경계층 유동의 해석을 위해 전단응력수송 난류모델(SST model)⁸⁾을 사용하였다. 경계층 영역의 효과적인 계산을 위하여 y+를 100이하가 되도록 하였다. SST model 및 automatic wall treatment를 적용할 경우 y+가 2이하인 영역에서는 저 레이놀즈 수 난류모델(low-Raynolds

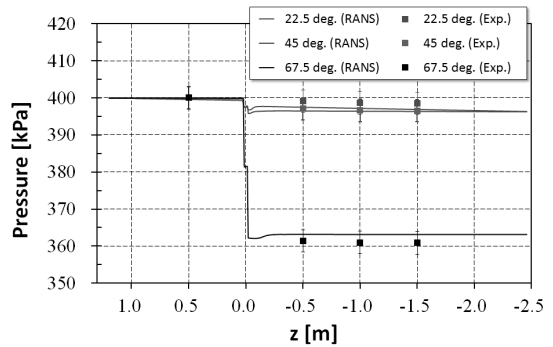


Fig. 2 Result of validation⁹⁾

number model), 그 이상인 경우 벽법칙(wall function)을 사용하여 경계층 내부의 유동장을 계산하게 된다⁷⁾.

Fig. 2⁹⁾에 1인치 볼밸브 실험 및 수치해석 결과를 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 수치해석을 통해 도출된 볼밸브 전후 압력분포가 실험값과 비교하여 실험오차범위 내에 존재하기에 본 수치모델이 충분한 신뢰도를 가짐을 확인할 수 있다.

2.2 10인치 볼밸브

Fig. 3은 Fig. 1의 1인치 볼밸브의 유동상사 모델인 10인치 볼밸브 시제품을 나타낸다.

10인치 볼밸브의 수치해석은 1인치 볼밸브에서 구축한 수치모델을 적용하였으며, 수치해석 영역은 Fig. 4에 나타낸다. 본 수치해석에 사용한 수치해석 조건은 1인치 볼밸브 수치모델의 구축과정을 따랐다. 1인치 볼밸브와는 달리 연결부의 캐비티 및 볼과 덕트 사이의 간격 등을 단순화하여 유동장을 모델링

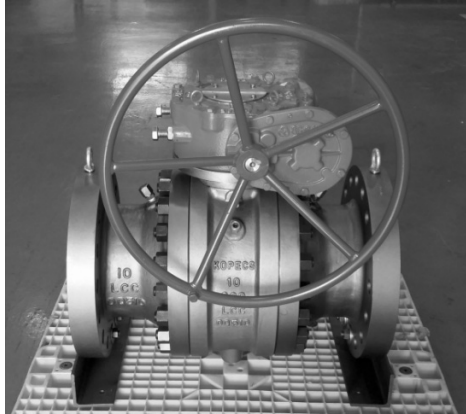


Fig. 3 10 inch ball valve

3. 결과 및 고찰

Fig. 5에 수치해석을 통해 도출된 1인치 볼밸브 및 10인치 볼밸브의 내부 유동분포를 각각 나타낸다. 두 경우 모두 전체적으로 유동 단면적의 급축소 구간인 볼밸브 입구부와 급확대 구간인 볼밸브 출구부에 선회유동(circulation flow)이 나타남을 알 수 있다. 선회유영역은 개폐각이 커짐에 따라 넓어지며, 주유동의 유동 단면적 축소를 야기하여 압력강하에 주요한 영향을 미친다. 볼밸브 출구부를 지난 유동은 볼밸브 후류에서 선회류를 형성하며, 하류측으로 점차 회복되어 안정된 유동을 보이게 된다. 한편, 1인치 볼밸브의 수치모델에 존재하는 캐비티로 인하여 볼의 내부 주유동 외의 영역에서 일부 차이를 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 6에 1인치 및 10인치 볼밸브의 내부 압력계수 분포를 나타낸다. C_p 는 식(1)과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \tag{1}$$

하였다. 계산영역의 길이는 실험조건을 고려하여 6 m로 설정하였다. 경계조건은 실제 배관망의 압력 및 유속 조건을 참고하여 입구에 전압 6.864 MPa, 출구에 유속 8 m/s를 각각 설정하였다.

여기서, P 는 압력을 나타내며 ρ , V 는 각각 공기밀도 및 유속을 나타낸다. 볼밸브의 개폐각이 커짐에 따라 볼밸브의 전후 압력강하가 크게 나타남을 알 수 있

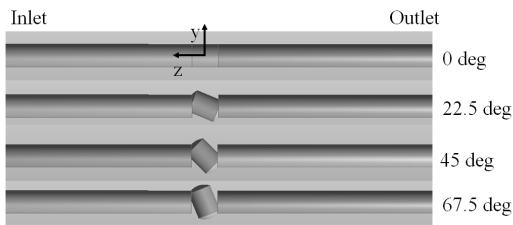


Fig. 4 Computational domain for the 10 inch ball valve

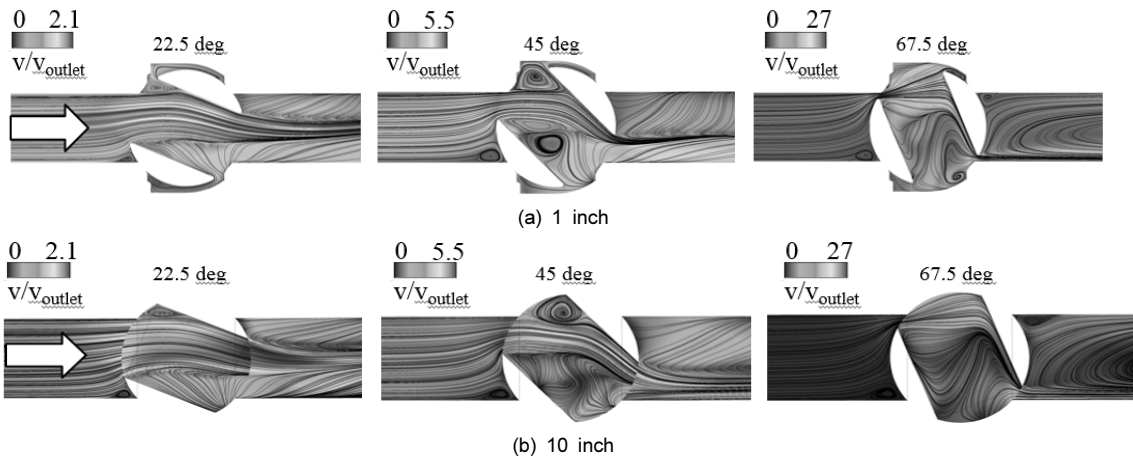


Fig. 5 Velocity contours and streamlines for 1 & 10 inch valve

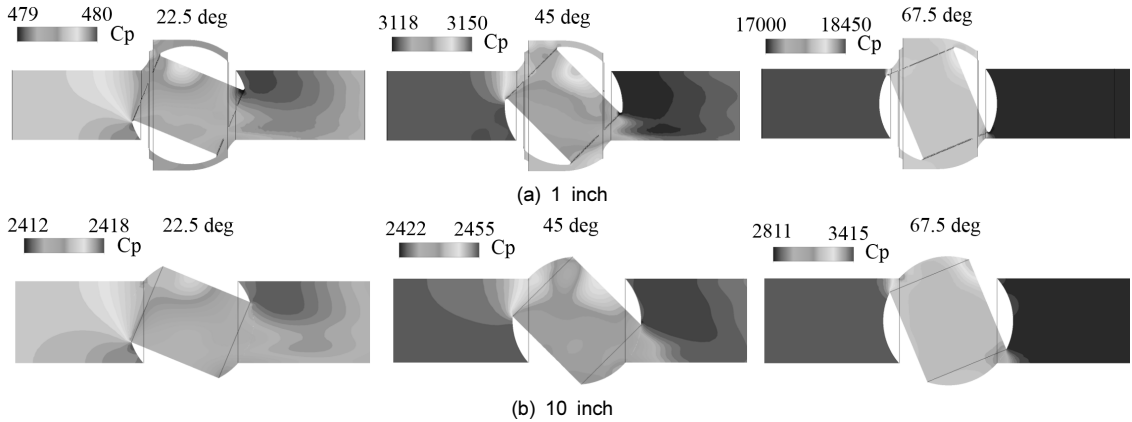


Fig. 6 Cp contours for 1 & 10 inch valves

다. 한편, Fig. 5와 마찬가지로 1인치 및 10인치 볼밸브의 내부 압력분포의 유사성을 확인할 수 있다.

개도율은 밸브가 완전히 열렸을 때를 기준으로 배관과 밸브의 전후 단면적의 비로 정의되며, 그 관계는 Fig. 7과 같다. 개도율은 밸브의 개폐각 증가에 따라 선형적으로 감소하여 80도 지점에서 완전 차단된다.

Fig. 8에 1인치 및 10인치 볼밸브의 손실계수(loss coefficient)를 비교하여 나타낸다. 가로축은 밸브의 개도율(valve open rate)을 나타내고 세로축은 밸브의 손실계수로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_{p_{loss}} = \frac{P_u - P_d}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2)$$

여기서, P_u 및 P_d 는 각각 밸브 상류 및 하류측 압력을 나타내며 ρ , V 는 각각 공기밀도 및 유속을 나타낸다. 전반적으로 10인치 볼밸브의 경우 밸브 내부의 상대 유속의 증가로 인해 1인치 볼밸브 보다 높은 손실계수를 보인다.

한편, Fig. 5-8에서와 같이 10인치 볼밸브의 수치 해석 결과는 1인치 볼밸브의 유동장, 압력장 및 손실계수와 매우 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다. 즉, 서로 다른 크기를 갖는 볼밸브가 서로 유동학적으로

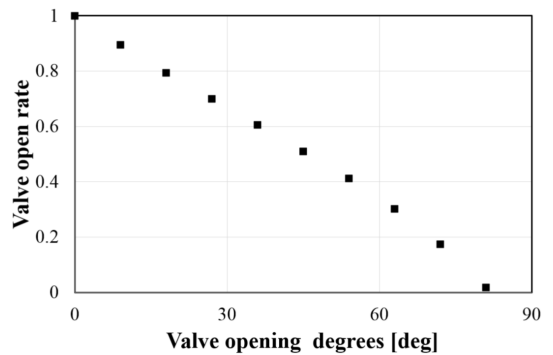


Fig. 7 Valve open rate vs. opening degrees

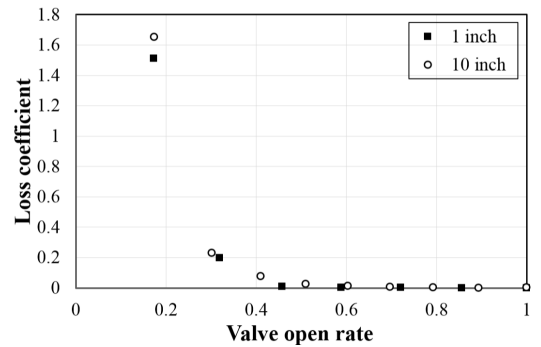


Fig. 8 Loss coefficient vs. valve open rates

상사관계를 가짐을 확인할 수 있고, 10인치 볼밸브의 경우에도 1인치에 적용한 수치모델을 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 9에 1인치 및 10인치 볼밸브의 개도율에 따른

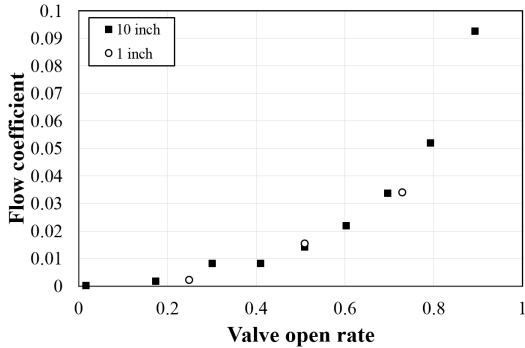


Fig. 9 Flow coefficient for the 1 & 10 inch ball valve

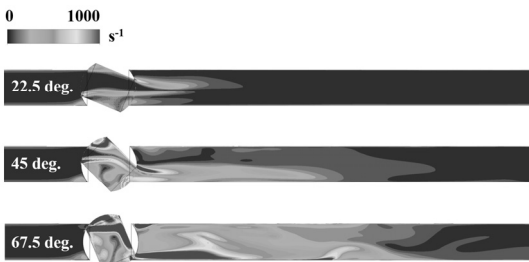


Fig. 10 Vorticity with respect to valve opening degrees

유량계수를 나타낸다. 유량계수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$Av = Q \sqrt{\frac{\rho}{P_u - P_d}} \quad (3)$$

여기서, Q 는 밸브를 지나는 유량을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 볼밸브는 등비유동특성을 가지며 밸브행정에 따라 유량이 서서히 증가하다가 행정 종료부에서 유량이 상대적으로 크게 증가하는 특성을 갖는다. 본 밸브의 등비유동특성의 수학적식을 식 (4)에 나타낸다.

$$Q = 0.0003e^{7.08L} \quad (4)$$

여기서, L 은 밸브의 개도율을 나타낸다. 한편, 1인치 볼밸브의 경우에도 10인치의 경우와 유사한 유량계

수를 나타냄을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에 볼밸브 개폐각에 따른 내부의 와도(vorticity) 분포를 나타낸다. 볼밸브 내부의 와류는 국부적인 동압상승에 의한 압력강하에 큰 영향을 미친다. 세 경우 모두 볼밸브 내부에서 와류가 발생함을 확인할 수 있으며, 후류로 갈수록 와류가 사라짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 10인치 볼밸브의 내부유동장 분석을 위해 유동상사 모델인 1인치 볼밸브에 대한 수치 모델을 10인치 볼밸브에 적용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 1인치 볼밸브의 실험결과를 바탕으로 구축한 수치 모델을 기반으로 10인치 볼밸브의 수치해석에 적용하였다.
- 2) 1인치 및 10인치 볼밸브의 유동상사성을 비교하기 위하여 압력계수, 속도분포, 압력계수 및 유량계수를 평가, 유동장의 유사성을 확인하였다.
- 3) 볼밸브 개폐각의 변화에 따른 유량계수는 등비유동특성을 나타냄을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비 지원(13TFTP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

References

1. D. S. Kim and M. S. Kim, "Analysis and Design of Cryogenic Ball valve", Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, September 15-18, 2008, P1-26.
2. A. Ozdamar, K. T. Gursel, Y. Pekbey, and B. Celikag,

- “An Experimental and Numerical Study on Pressure Drop Coefficient of Ball Valves”, *International Energy Journal*, Vol. 8, Issue 4, 2007, pp. 1-7.
3. S. F. Moujaes and R. Jagan, “3D CFD Predictions and Experimental Comparisons of Pressure Drop in a Ball Valve at Different Partial Openings in Turbulent Flow”, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 134, 2008, pp. 24-28.
 4. M. J. Chern, C. C. Wang, and C. H. Ma, “Performance test and flow visualization of ball valve”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, 2007, pp. 505-512.
 5. M. J. Chern and C. C. Wang, “Control of Volumetric Flow-Rate of Ball Valve Using V-Port”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, 2004, pp. 471-481.
 6. A. S. Tabrizi, M. Asadi, G. Xie, G. Lorenzini, and C. Biserni, “Computational Fluid-Dynamics-Based Analysis of a Ball Valve Performance in the Presence of Cavitation”, *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 23, No. 1, 2014, pp. 27-38.
 7. ANSYS, *ANSYS CFX-14.0 Solver Theory*, 2012, Ansys Inc.
 8. F. R. Menter, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, *AIAA Journal*, Vol. 32, 1994, pp. 1598-1605.
 9. S. M. Lee and C. M. Jang, “Development of Numerical Model and Experimental Apparatus for Analyzing the Performance of a Ball Valve used for Gas Pipeline in Permafrost Area”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 5, 2014, pp. 550-559.