축편심 버터플라이 밸브의 유동특성에 관한 연구

박 송 묵[1], 최 훈 기[2*], 유 근 종[2]

Study on Flow Characteristics for Eccentric Shaft in the Butterfly Valve System

S.M.Park[1] and H.K. Choi[2*] and G.J. Yoo[2]

To improve the performance of the control butterfly valve seals are used to eccentric shaft. In this case, vertical opening gas of the butterfly valve is non-symmetrical, which will change the flow pattern around the valve. In this study, the eccentric drive shaft of the butterfly valve to change flow characteristics are performed numerically. Flow pattern and pressure drop are investigated as the valve opening angle increases for a given mass flow rate. The valve flow coefficient is compared to the without eccentric shaft.

Keywords: 버터플라이 밸브(Butterfly valve), 축편심(Eccentric shaft), 유량계수(Flow coefficient)

1. 서 론

대부분의 산업 공정에는 제품의 생산, 수송 등에 파이프라인이 필요하며 이 파이프 내부에 흐르는 유체를 조절하기 위해서는 다양한 밸브가 사용되고 있다. 그 중 버터플라이 밸브는 원판형의 디스크를 회전시켜 시트와 접촉함으로써 유체의 흐름을 조절한다[1]. 버터플라이 밸브는 다른 밸브와 비교하여 가격이 저렴하고 구조가 간단하며 제어특성이 좋아서 선박용이나 산업용으로 많이 사용되고 있다.

많은 연구가들에 의하여 밸브의 유량 계수, Torque 계수, 압력손실 계수 등 밸브의 성능과 캐비테이션 현상에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며 지금까지 지속적으로 수행되고 있다. 오승환[2]은 수치해석을 통하여 동일한 유속조건 하에서 밸브 타입과 각 밸브의 디스크 개도에 따라 유량 계수를 도출하였다. Huang[3]은 버터플라이 밸브의 비압축성 3차원 유동장의 속도와 압력분포를 구하기 위해 수치해석을 수행하고 디스크의 최적설계를 위해 유량조절, 개폐성능, 캐비테이션 특성에 대해서 고찰하였다. Kimura[4]는 버터플라이 밸브에서 토크특성을 예측하기 위해 자유유선이론과 날개이론으로부터 이론적인 토크 방정식을 도출하고 디스크의 형상이 서로 다른 세개의 밸브를 실험과 비교하였으며, 유도한 토크방정식이 비교적 성공적인 예측결과를 보여주었다. 캐비테이션 현상에 대한 연구는 캐비테이션 현상을 줄이기 위한 밸브형상을 변경한 연구[5-6]와 극저온상에 발생하는 캐비테이션 현상 발생예측 연구[7-8]를 하였다. 또한 이론적인 손실계수를 도출하고, 이를 통해 캐비테이션 단계를 이론적으로 예측하고자 하였다[9].

초기의 버터플라이 밸브는 많은 량의 유량을 제어하는데 주 목적이 있었으나 점진적으로 유량의 미세제어가 이루어지도록 개발되고 있다. 특히 밸브의 개도각이 작은 영역에서의 미세한 유량제어는 버터플라이 밸브의 한계성이 나타나는 부분이기도 하다. 기존의 버터플라이 밸브는 개도각이 작은 영역에서의 미세한 유량제어와 더불어 밸브의 sealing문제가 발생하게 된다. 열림구동축을 밸브의 중심단면으로부터 편심되게 하여 보다 원활한 여·닫힘 구동과 sealing문제를 개선하도록 하고 있다. 이러한 축편심은 밸브의 누수문제, 수명문제 등을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 유량제어용 버터플라이밸브의 미세한 제어를 가능하게 할 수 있다.

1 학생회원, 창원대학교 대학원 기계설계공학과
2 정회원, 창원대학교 기계설계공학과
* Corresponding author E-mail: hkchoi@changwon.ac.kr

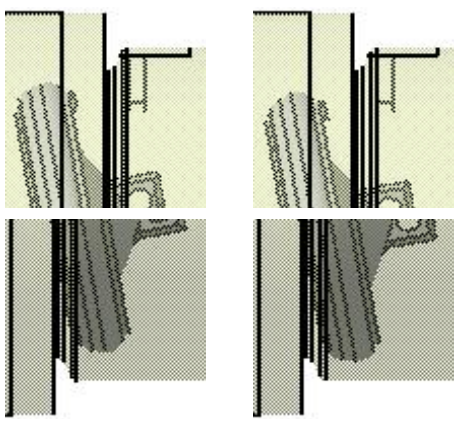
본 연구는 버터플라이 밸브에서 중요한 설계인자인 구동축의 편심에 따른 밸브의 유동특성을 도출하기 위하여 여러 가지 개도각도에 대하여 수치해석을 수행하였다.

2. 해석 조건

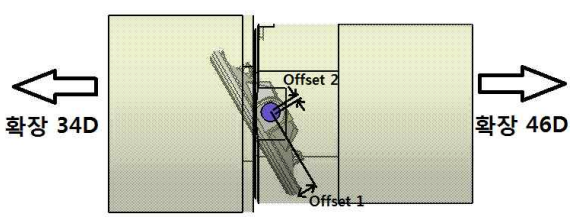
2.1 해석대상

버터플라이 밸브는 디스크, 스템(디스크의 회전축), 밸브몸체, 시트로 구성되어 있으며, 디스크 스템의 중심축이 이중으로 편심이 된 (double eccentric type : offset) 밸브이다.

3차원 형상으로 구현한 밸브의 모양은 Fig. 1과 같다. 디스크와 밸브몸체, 시트간의 간섭을 확인하기 위해 CATIA 3차원 모델링 소프트웨어를 이용하였다. 해석의 정확도를 높이기 위하여 밸브의 입·출구간의 거리가 디스크의 직경보다 짧기 때문에 밸브 상류와 하류배관의 해석영역을 밸브의 직경대비 확장하여 영역을 설정하였다. Kimura 등[9]의 실험방법을 참조하여 밸브몸체 전후방에서 . 밸브 상류쪽으로는 직경의 34배(34D)의 배관을 구성하여 입구에서의 일정한 유속조건으로 인한 밸브영역에서의 부정확한 해석을 방지하였다. 또한, 하류측 배관의 유동안정화를 고려하여 46배(46D)까지 확장하여 유동의 안정성을 확보하였다.

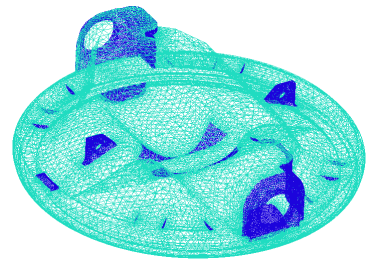


(a) Without offset and with offset

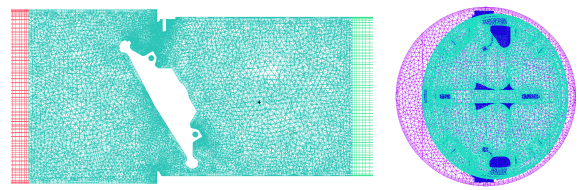


(b) Definition of numerical domain

Fig. 1 Geometrical and flow parameters for butterfly valve



(a) Valve disk part



(b) Cross section

Fig. 2 Grid system configuration

본 연구에 적용된 디스크의 개도각(α)은 10°에서 80°까지 10°단위로 증가시켜 해석형상을 모델링하였다.

해석 격자계는 비정렬격자로 개도각의 크기에 따라 구성하였다. 이때, 디스크와 시트, 몸체부분의 형상이 복잡하고 일부 접촉되는 부분 때문에 격자구성이 힘들어 Tetra 격자를 이용하였다. 점성저층(viscous sublayer) 영역을 안정적으로 처리하기 위해 벽면 경계조건이 적용되는 경계면에 Prism 격자를 분포시켰다. 해석격자 Node는 대략 86만여 개에서 91만여 개 셀로 구성되었다. Fig. 2는 디스크의 개도각 30°일 때의 격자계를 나타낸 것이다.

2.2 수치해석방법

버터플라이 밸브의 내부유동장에 대한 정량적인 해석을 위하여 유체기계의 내부유동과 성능의 해석에 많이 적용되고 있는 상용프로그램인 ANSYS CFX[10]을 이용하였다.

밸브제작사에서는 배관내부의 유속을 대개 2~3m/s 로 하고 있으므로 본 연구에서는 입구유속을 2.16m/s로 하였다. 이 경우의 Reynolds 수는 863,000이므로 난류영역이다. 난류모델로서는 밸브시트 후방으로 발달하는 2차 유동에 대한 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려진 k-ω SST 모델을 사용하였다[11].

캐비테이션 해석을 위해서 Rayleigh plesset model을 사용하였다. 모든 지배방정식의 잔차(residual)가 10^{-4}이하가 될 때까지 반복계산을 수행하였다.

2.3 지배방정식

1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \tag{1}$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_i u_j}) \tag{2}$$

3) k-ω SST 모델[10]

k-ω SST 모델은 경계층 내부에서는 k-ω 모델이 정확하고, 자유류에서는 k-ε 모델이 정확하다는 점에 착안하여, 블랜딩 함수(blending function) F_1을 이용 두 난류 모델을 조합한 형태이다. k-ω 난류모델에 F_1을 곱하고, k-ε 난류모델에는 (1-F_1)을 곱하여 k-ω 난류모델 형태로 다시 정리한 후 적용하였다. 즉 난류모델의 계산 시 벽면근처에서는 k-ω 난류모델이 되고, 자유류에서는 k-ε 난류모델 계산으로 해를 구한다.

4) 캐비테이션 모델 (Cavitation Model Theory)

Volume of Fluid (VOF) Rayleigh Plesset Model을 사용하며 VOF 모델은 다음과 같다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2}\left(\frac{dR_B}{dt}\right)^2 + \frac{2\delta}{\rho_f R_B} = \frac{P_V - P}{\rho_f} \tag{3}$$

여기서, R_B는 버블 반경, P_V는 포화증기압, ρ_f는 액체밀도 그리고 δ는 기체와 액체사이의 표면장력이다.

2.4 경계조건

미소제어체적으로 구성된 해석영역에서 지배방정식을 풀이하기 위해서는 해석영역 내부 혹은 외부를 둘러싸는 경계에 대한 조건이 정해져야 한다. 따라서 해석영역을 둘러싸고 있는 면들 중 배관의 상류와 하류의 끝은 각각 입구와 출구로 지정하고, 배관부분과 밸브의 몸체, 스템부분은 열전달이 없는 벽면으로 가정하였다. 입구에는 2.16m/s의 일정유속을 적용하였다. 출구에는 대기압을 기준 고정 압력으로 사용하였다. 그리고 벽면부분에는 벽면과 유체의 마찰에 의한 영향을 고려하여 점착조건을 적용하였다. 해석영역 내부를 흐르는 유체는 25℃의 물을 기준으로 하여 적용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 해석 모델 타당성 검토

본 연구에서 해석방법의 신뢰성을 확보하기 위해 밸브의 크기와 배관 조직을 결정하는 중요한 요소인 유량 계수(Cv)를 이용하여 본 연구의 밸브와는 크기가 다르지만 A사 적용제품의 실제유량계수와 동일사양의 본 연구의 해석결과 값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 밸브유량계수는 미국 측정 협회(ANSI/ISA 표준 S75.01)[12]에 의한 정의에 따라 식 (4)와 같은 식으로 표현된다.

$$Cv = 1.17\frac{Q}{\sqrt{\triangle P / G}} \tag{4}$$

여기서, Q는 유량(m^3/hr), G는 비중비, $\triangle P$는 밸브의 상류측으로 디스크 직경의 2배(L=-2D)인 곳과 밸브 하류측으로 디스크 직경의 6배(L=6D)인 곳에서의 압력차(bar)이다. 여기서 L은 밸브시트에서 축방향의 거리를 나타낸다.

Fig. 3에서 수치해석을 통해 계산한 밸브유량계수는 A사의 성능데이터와 거의 유사하게 나타나고 있으므로 본 연구의 해석방법은 타당성이 있다고 판단된다.

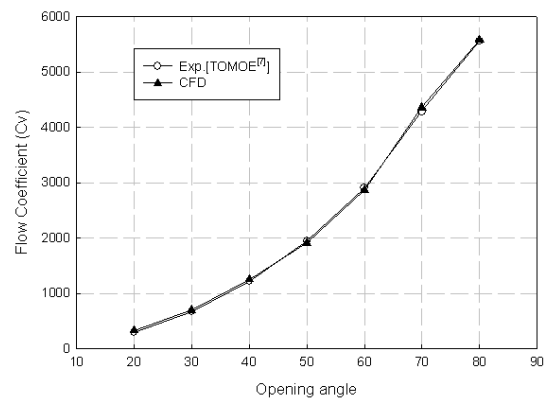


Fig.3 Validation of numerical method

3.2 유동특성비교

Fig. 4는 축편심이 된 경우와 축편심이 없는 경우에 대하여 밸브 전/후방에서의 path line의 분포를 나타낸 그림이다. 개도각이 작은 경우에서는 밸브디스크와 배관사이 간극이 좁아 유체유동 속도가 매우 빨라진다. 이로 인하여 압력강하가 발생하고 어떤 경우에서는 포화증기압보다 더 낮아져 케비테이션이 생성되기도 한다. 배관의 단면에서 유체 속도크기를 비교하기 위하여 각 단면별로 평균유속을 Fig.5와 같이 나타내어 보았다. 밸브의 개도각이 작은 경우(α=10°)에서는 축편심이 되면 밸브시트와 디스크 사이의 틈새가 줄어들어 평균유속이 증가함을 알 수 있다.

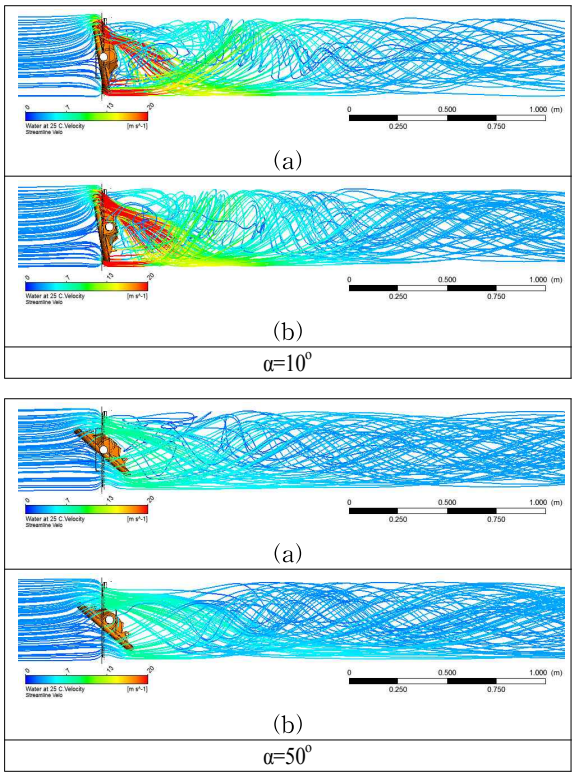


Fig.4 Comparison of velocity distributions :(a) without offset, (b)with offset.

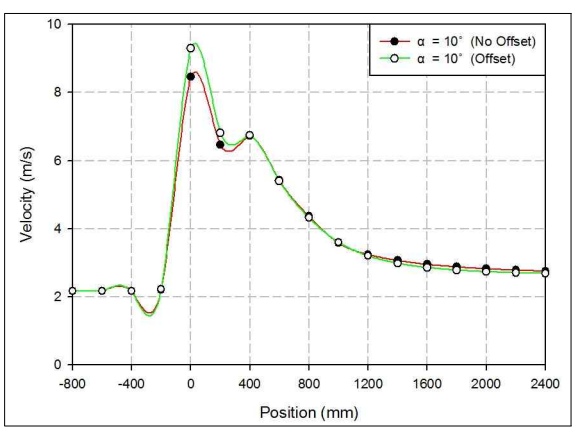
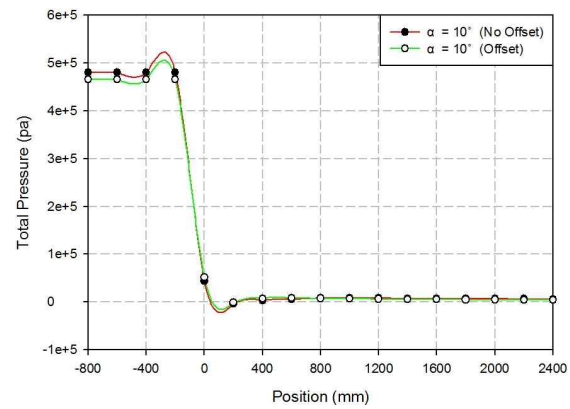


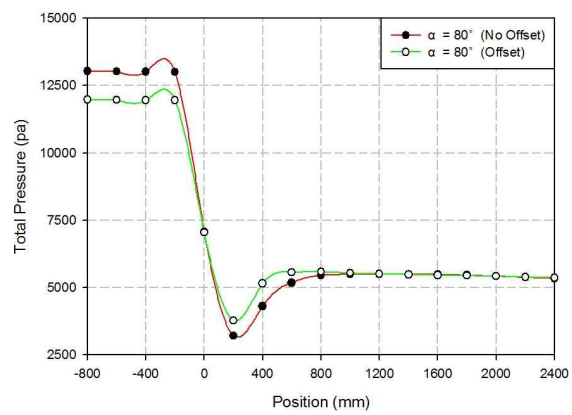
Fig.5 Plots of the averaged velocity at cross section for α=10°.

밸브의 직경과 같은 거리, L=D의 범위에서는 밸브 시트와 디스크 틈새부근에서는 평균속도 크기가 차이가 나타나지만 그 이외의 영역에서는 속도크기의 차이는 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 다만 D<L<6D인 영역에서 offset인 경우와 offset이 없는 경우에서 평균유속 크기가 조금 차이가 나는 이유는 밸브 틈새에서 빠르게 흐르는 유체가 배관하부로 이동하고 그 영역에서 유속이 상대적으로 빨라지므로 나타나는 현상이다. 유동이 안정화 되는 L>6D인 영역에서는 차이가 거의 나타나지 않을 것으로 판단된다.

Fig.6은 밸브시트 단면에서 -2D≤L≤6D까지에서의 전압력 분포를 나타낸 그림이다. 개도각의 크기가 작은 경우 축편심이 된 밸브와 되지 않은 밸브에서의 압력강하량의 상대적인 값은 아주 작다. 하지만 개도각이 증가하면 축편심이 되지 않은 밸브에서의 압력강하량이 축편심이 된 경우보다 증가하게 됨을 볼 수 있다. 특히 -D≤L≤D인 영역에서의 상대적인 압력 변화량이 축편심이 되지 않은 밸브에서 크게 나타남을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig.6 Plots of the pressure distributions at cross section :(a) α=10°, (b)α=80°

3.3 유량계수

밸브유량계수는 미국 측정 협회에 의한 규정에 따라 식

(4)와 같이 정의하였다. 입구에서 유속이 2.16m/sec로 일정하게 유입되어지고 단면이 일정하므로 압력강하량을 측정하는 L=-2D와 L=6D에서의 체적유량은 동일한 값이 된다. 따라서 유량계수는 압력강하량의 크기에 따라 변화된다. 압력강하량은 -2D≤L≤6D에서 정의되어지므로 Fig.6에서 나타난 바와 같이 개도각이 작으면 압력강하량($\Delta P=P_{-2D} - P_{6D}$)은 증가하므로 유량계수는 감소한다. 유량계수가 보통 500이하정도가 되어야 정밀한 유량을 제어할 수 있는데 본 연구의 밸브(D=400mm)에서는 직경이 커서 정밀유량제어가 어려울 것으로 판단된다. 개도각이 증가하면 압력강하량이 감소하여 유량계수는 증가한다. 편심축밸브에 대하여 편심되지 않은 밸브축의 유량계수의 크기는 개도각이 40^o이상에서 상대적으로 줄어든다. 따라서 편심축 밸브는 밸브시트부의 sealing 뿐만 아니라 개도각이 큰 경우에 대하여 유량계수의 성능이 더 향상됨을 알 수 있다.

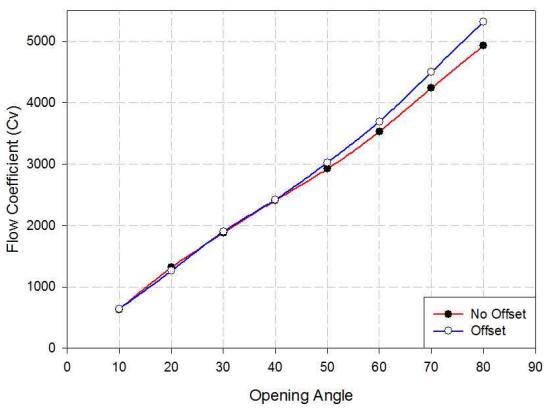


Fig.6 Plots of the flow coefficient(Cv) for a various opening angle

5. 결 론

버터플라이 밸브의 축편심이 내부유동특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 개도각 변화에 따른 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 밸브 개도각이 아주 작은 경우 축편심이 있는 경우 밸브디스크와 시트사이의 평균유속의 변화량이 증가한다.
2. 밸브시트에서의 -2D≤L≤6D영역에서 개도각이 증가할수록 축편심 밸브의 상대적인 압력강하량이 감소한다.
3. 개도각이 작은 범위에서는 축편심이 있는 밸브와 없는 밸브의 유량계수 크기는 차이가 없지만 개도각이 증가할수록 축편심이 있는 경우가 더 큰 유량계수를 가진다.

후 기

본 연구는 “2010-2011년도 BK사업단 및 창원대학교 연구비” 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 2007, 고기창, Contrlo Valve Handbook, 흥릉과학출판사

[2] 2006, 오승환, 이영훈, 공형걸, 송학관, 강정호, 박영철, “Butterfly Valve 설계를 위한 Valve Type과 유량 계수의 관계에 대한 연구,” 한국항해항만회, 제30권, 제2호, pp.373-377.

[3] 1996, C. Huang, R. H. Kim, "Three-Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows," *Journal of fluids engineering*, Vol.118, no.3, pp.562-568.

[4] 1995, K. Ogawa, T. Kimura, "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of torque characteristics," *ISA transations : a publication of instrument Society of America* , Vol.34, No.4, pp.327~333

[5] 2004, 윤준용, 이승준, 김은석, "공동 현상 방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석", *유체기계저널*, 제7권, 1호 pp.9-16.

[6] 2007, K. Ogawa, "Cavition Noise Reduction Around a butterfly Valve by Semicircular fins," *ASME Journal of Fluids Engineering*, pp.397-402.

[7] 2008, 김상완, 외3인, “LNG선용 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구," *유체기계저널*, 제11권, 제2호, pp.20-28.

[8] 2008, 김성동, 김범석, 최영도, 이영호, “극저온 버터플라이 밸브의 유속에 따른 캐비테이션 발생 예측," *한국마린엔지니어링학회지*, 제32권, 제6호, pp.923-930.

[9] 1995, T. Kimura, T. Tanaka, "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of pressure loss characteristics," *ISA transations : a publication of instrument Society of America* , Vol.34, No.4, pp.319~326

[10] 2009, ANSYS Inc, CFX-Solver 12.0

[11] 2007, 김상완, “LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원 박사학위논문

[12] 1985, Instrument Society of America ANSI/ISA S75.01 "Flow Equation for Sizing Control Valves, Instrument Society of America", Research Triangle Park, North Carolina