

다공판이 설치된 버터플라이밸브의 캐비테이션 발생 저감에 관한 수치적 연구

조성휘* · 김홍집**† · 송근원***

A Numerical Study for Reducing Cavitation in a Butterfly Valve with a Perforated Plate

Seong Hwi Jo*, Hong Jip Kim**†, Keun Won Song***

Key Words : Cavitation(공동화현상), Butterfly Valve(버터플라이밸브), Perforated Plate(다공판), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

The effectiveness of a perforated plate installed additionally at butterfly valve to reduce cavitation which can cause vibration, noise, erosion, and flow path blockage has been investigated using CFD. Rayleigh-Plesset equation was applied to simulate cavitation phenomena. 3D flow simulations have been performed for 6 cases to consider the occurrence of cavitation at the downstream of the valve. From the present results, the perforated plate was thought to be very effective to suppress the cavitation inside of the pipe.

1. 서 론

유체에서의 공동현상(cavitation)은 액체가 빠른 속도로 가속될 때 액체의 압력이 포화증기압(saturation vapor pressure) 이하로 낮아지면서 액체 내에 증기가 발생하거나 액체 속에 녹아 있던 기체가 나와서 공동을 이루는 현상을 말한다.⁽¹⁾ 구체적으로 설명하면, 액상인 유체의 유동에서 국부적으로 압력이 낮아지면 기포가 성장하게 되고 녹아 있던 기체가 더해지면서 공동이 형성된다. 특히 액체를 작동유체로 하는 펌프, 수차 등의 유체기계의 익면 부근에서 국부적으로 유속이 빨라지면 압력이 낮아져 기포가 성장하여 공동이 형성된다. 역으로 유체의 속도가 빨라짐으로 인해 발생한 기포가 다시 유체의 포화증기압보다 높아질 경우 급격히 액체로 변하게 되는데, 그로 인해 높아진 압력에 의해 배의 프로펠러나 펌프의 임펠러 등에 충격을 주며 소음과 진동 및 침식 등을 야기한다. 이와 같이 유동 중에 정압의 변동에 따른 반복적인 공동의 생성과 소멸은 유체기계의 성능에 부정

적인 영향을 미치게 된다.

일반적으로 공동현상은 원치 않은 일종의 불안정 현상이라고 할 수 있어, 이를 제어하기 위한 유체학적인 노력들이 이뤄지고 있다. 반면에 공동현상을 이용하여 하류(downstream)에서의 압력을 일정한 값으로 유지시켜 유량을 조절하는 기구인 cavitating venturi의 원리로 사용되기도 한다.⁽²⁾ 최근에는 어뢰의 속도를 높여 탐지 기회를 줄이기 위하여, 어뢰의 앞부분에 의도적으로 공동현상을 발생시켜 액체 대신 기체를 어뢰가 진행하도록 하는 초공동(super-cavitating) 어뢰가 개발되고 있다.⁽³⁾

하지만 일반적인 유로 내에서는 원활한 유동 과정을 보장하기 위하여 공동현상은 가능하면 피하는 것이 좋다. 특히 많은 유량이 공급되는 밸브에 대해서는 국소적인 공동현상 발생이 억제되어야 한다. 본 연구의 대상인 버터플라이밸브(butterfly valve)는 원판형 디스크 형태의 밸브가 중심축에 의한 회전 작용으로 개폐 및 유량조절을 한다. 구조가 간단하고 유로의 직경이 큰 곳에 적용이 가능하다는 장점이 있어

* 충남대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

** 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

*** (주)삼진정밀 기술연구소 (Institute of Technology, Samjin Precision Co., Ltd.)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

서 선박 및 발전소 등에 널리 사용되지만, 밸브 개폐시 좁은 개도(opening angle)에 의한 밸브 전후의 유속 변화 및 압력 강하(pressure drop)가 크게 나타남에 따라 밸브 주변 및 후류 쪽에 공동현상이 발생할 수 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 직경이 $D=2800$ mm인 버터플라이밸브에 대하여, 상대적으로 좁은 개도에서의 밸브 주변 및 후류에 발생할 수 있는 공동현상을 확인하고자 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 해석하였다. 또한 밸브의 후류 영역에서 속도가 가속되어 압력이 비정상적으로 낮아지는 영역을 줄이기 위해 설치된 다공판(perforated plate)의 공동현상 발생 저감 효과도 살펴보았다.⁽⁵⁾

2. 수치해석

2.1. 수치해석 모델

본 연구에서 적용된 버터플라이밸브는 (주)삼진정밀에서 제공한 BFV 2800A 모델로, Fig. 1와 같이 유로의 직경은 $D=2800$ mm이다. 전체적인 경향을 파악하기 위하여 개도 $\theta=10\sim60^\circ$ 에 대해서 입구 유속 $V=1\sim5$ m/s로 해석을 진행하였고, 특히 개도 $\theta=30^\circ$ 이하의 빠른 유속 조건에서 공동현상이 심각하게 발생하는 것을 확인하였다. 그리하여 본 연구의 해석대상을 개도 $\theta=30^\circ$ 에 대해 입구 유속을

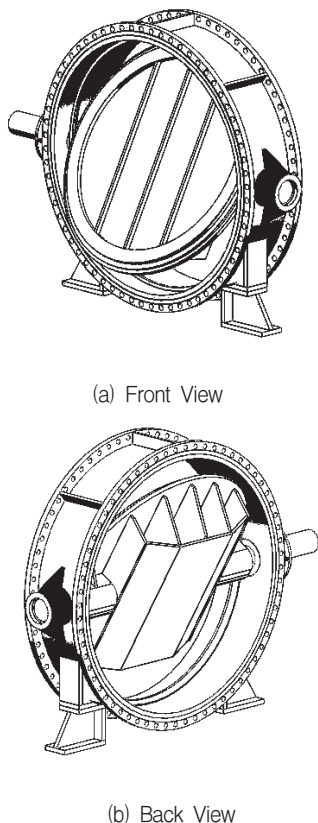


Fig. 1 Geometry of butterfly valve

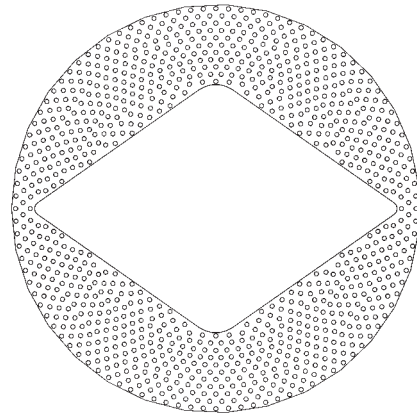


Fig. 2 Geometry of a perforated plate

$V=3\sim5$ m/s까지 변경하였고, 다공판을 설치한 후에도 같은 조건으로 해석을 진행하였다. 밸브 상류측 길이는 $5D$ 로 설정하여 유동이 충분히 발달할 수 있도록 하고, 밸브 하류측 길이는 $10D$ 로 설정하여 밸브와 다공판을 지나며 교란된 유동이 충분히 안정화되도록 설정하였다.⁽⁶⁾ Fig. 2는 공동현상 발생 저감을 위해 설치한 다공판의 모습으로, 직경은 밸브와 같고 두께는 $t=40$ mm, $\phi=3$ mm인 구멍이 약 800개 뚫려있다. 실제 다공판의 위치는 확정된 것이 아니므로, 개연성 확인을 위하여 밸브의 개폐에 간섭하지 않는 유동 후류방향으로 $1D$ 의 위치에 설치되었다고 가정하였다.

2.2. 수치해석 방법

본 연구에서는 터보기계를 포함한 유체기계 해석에 최적화된 CFD 상용코드인 CFX를 사용하였다.⁽⁷⁾ 수치해석에서 사용된 계산격자는 CFX Mesh와 ICEM CFD의 기법을 종합하여 만들어진 Workbench-based Meshing Application을 사용하였으며 Fig. 3에 나타나 있다. 밸브와 다공판의 복잡한 형상 때문에 전체적으로 tetrahedral 격자를 사용했으며, 점성저층(viscous sublayer)영역의 정확한 해석을 위하여 경계조건이 벽면으로 적용되는 부분에 대해서는 prism 격자를 사용하였다. 다공판이 없는 경우(Case 1)에는 생성된 격자수가 154만개, 다공판이 있는 경우(Case 2)에는 1124만개로 다공판에 의해 격자수가 약 7배 이상 증가하였다.

다공판의 경우, 유동 해석의 편의를 위하여 일정한 압력 강하를 발생시키는 다공성 매질(porous media)로 모사하여 해석할 수 있다.⁽⁸⁾ 하지만 이런 방법을 채택할 경우, 다공판에서 걸리는 압력 강하량을 대상 매질의 porosity로 조절하는 시행착오법(trial-and-error)을 적용해야 하는 불편함이 있다. 더욱이 다공판 전후에서의 압력 강하량에 대한 실험적인 데이터가 없기 때문에 본 연구에서는 이러한 방법을 채택하지 않았다.

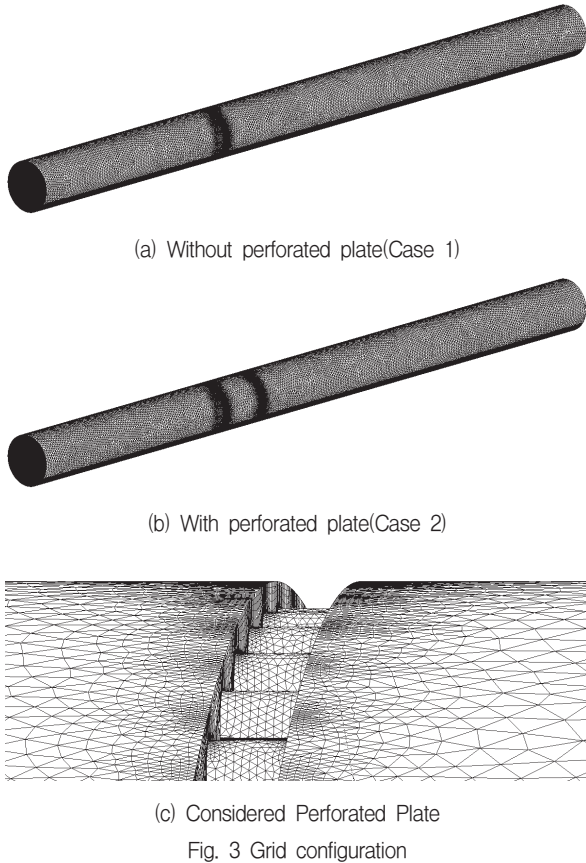


Fig. 3 Grid configuration

우선 유동 해석의 편의를 위한 개연성 있는 방안으로, 다공판을 간단한 형상으로 수정하여 경향성을 파악하였다. 많은 구멍들은 격자수를 급격하게 증가시켜 장시간의 해석이 필요하기 때문에 구멍들을 모두 생략하여 해석한 결과, 생략한 구멍만큼 유로의 단면적이 크게 줄어들어 따라 공동현상을 과하게 예측하는 경향을 보였다. 그리하여 본 연구에서는 실제 다공판을 직접 고려하는 방법을 채택하기로 하였다.

Table 1은 해석영역의 경계조건을 정리한 것이다. 난류 모사를 위하여 SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였으며, 공동현상 해석을 위해서 multiphase 및 캐비테이션 모델로는 Rayleigh-Plesset equation을 사용하였다.⁽⁹⁾ 작동유체는 20 °C의 물(water)로, saturation pressure는 2.338 kPa이다. 작동 유체인 물이 밀도가 크고 밸브의 직경이 매우 크기 때문에 자중을 무시할 수 없으므로 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 의 중력가속도를 적용하였다.

Table 1 Boundary Conditions

Boundary Conditions		Value		
Inlet	Velocity Inlet	3 m/s	4 m/s	5 m/s
Outlet	Pressure Outlet	1 atm		
Wall	No Slip	-		

3. 결과 및 고찰

3.1. 유속에 따른 압력분포

Fig. 4는 각 입구유속 조건에서의 배관 중심의 압력분포를 보여주며, 실선이 다공판이 설치되지 않은 경우(Case 1)이고 점선이 다공판이 설치된 경우(Case 2)이다. 거리가 0 m(0D)인 지점이 밸브의 중심이고 -14 m(5D)인 지점이 입구, 28 m(10D)인 지점이 출구이다. 밸브를 지나며 압력이 급격하게 강해지는 모습을 보여주며, 압력 강하는 유속이 빠를수록 크게 일어난다. 표시된 압력은 모두 절대압력을 나타내며, 다공판이 없는 경우에는 밸브 근처에서 대기압(100 kPa)이하로 낮아지는 모습을 볼 수 있다. 이로 인해 국부적으로 포화증기압(2.338 kPa) 이하로 압력이 낮아져 밸브 근처에서 공동현상이 발생하리라는 예측이 가능하다. 반면에 다공판이 설치된 경우에는 밸브를 지난 후에 압력 강하가 발생긴 하지만, 다공판이 없는 경우보다는 상대적으로 높은 압력을 유지한다. 즉 공동현상이 감소하리라는 예측이 가능하고, 최대 압력 강하 지점이 밸브(0D)가 아닌 다공판이 설치된 밸브 후단(1D)이기 때문에 상대적으로 밸브에 대한 직접적인 피해가 감소할 것이라는 예측이 가능하다. 그 이후로는 대기압으로 서서히 압력을 회복하며 출구까지 유지되는 경향을 보여준다.

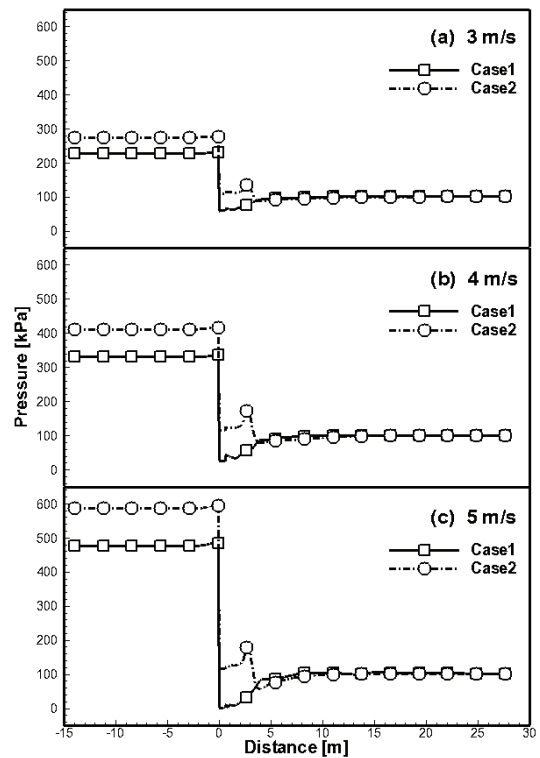


Fig. 4 Pressure distribution along the centerline

3.2. 압력손실계수

압력 강하의 정도를 나타내는 압력손실계수, K 는 밸브를 포함하여 유체계의 설계에 매우 중요한 파라미터로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이는 공동현상의 발생은 액체의 절대압력이 포화증기압까지 낮아지지 않더라도 급격한 압력 강하에 의해 국부적으로 발생할 수 있기 때문이다.

$$K = \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \quad (1)$$

여기서, V 는 평균 유입 속도, ρ 는 물의 밀도이며, ΔP 는 밸브의 상류측으로 밸브 직경의 2배($2D$)인 지점과 하류측으로 밸브 직경의 6배($6D$)인 지점 사이의 압력 강하량으로 설정하였다.⁽¹⁰⁾

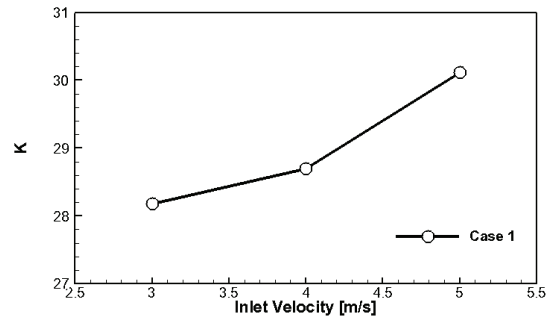
Fig. 5는 유속에 따른 압력손실계수의 변화를 보여주는데, 유속이 증가함에 따라 압력손실계수 또한 증가하는 모습을 보여준다. Fig. 5(b)에서 다공판을 설치했을 경우 Fig. 5(a)에 비해 압력손실계수가 더 높다. 이는 다공판에 의해 밸브에서의 속도증가량이 감소하여 그만큼 압력이 상승했고, 상대적으로 상승한 압력만큼 압력 강하량이 증가했기 때문이다. 한편 단면적이 일정한 배관에서 유속의 증가는 결국 유량이 증가하는 것과 같기 때문에, 유량이 증가함에 따라 압력손실계수가 증가하고 공동현상이 발생하기 쉬운 특징을 보여준다.

3.3. 공동현상 비교

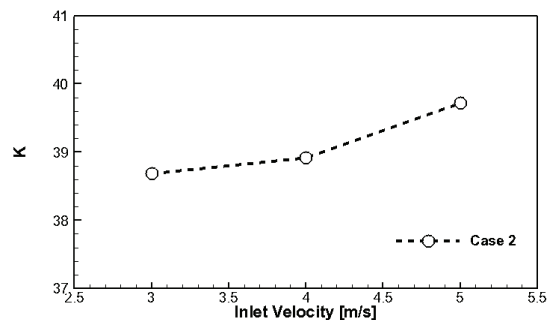
수증기의 체적분율(vapor volume fraction)은 공동현상의 발생을 나타내는 지수라고 할 수 있다. 즉, 물이 좁은 개도의 밸브를 지나면서 유속이 급격히 빨라지게 되고, 포화증기압 이하로 낮아진 영역에서 수증기의 체적분율이 1이 되게 된다. 공동현상이 발생한 영역을 확인하기 위해 수증기의 체적분율에 대하여 10^{-5} 에서 1까지의 범위를 체적으로 도시하였다.

Fig. 6은 $V = 3 \text{ m/s}$ 의 유입 속도에서 다공판의 유무에 따른 공동현상의 발생을 고찰한 것이다. 단면적이 좁아지는 밸브 상단의 아주 좁은 영역에서 공동현상이 발생하는 것을 Fig. 6(a)로부터 알 수 있다. Fig. 6(b)는 (a)와 동일한 입구 유속 조건에서의 유동이 다공판의 영향으로 인해 최대 압력 강하 지점이 밸브가 아닌 다공판이 설치된 위치로 이동하여, 밸브 상단에 보였던 공동현상이 약간 저감되었고 다공판에 소량 발생한 모습을 보여준다.

Fig. 7(a)는 $V = 4 \text{ m/s}$ 의 유입 속도에서의 유동특성을 보여주는 그림이며, 단면적이 좁아지는 밸브 상단뿐만 아니라 밸브 중심의 회전축 부근에도 공동현상이 보인다. Fig. 7(b)는 (a)와 동일한 입구 유속 조건에서의 유동이 다공판의

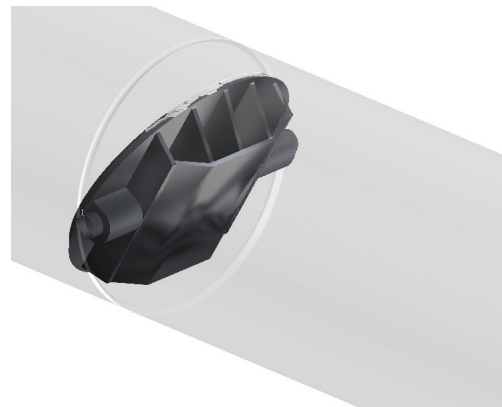


(a) Case 1(without plate)

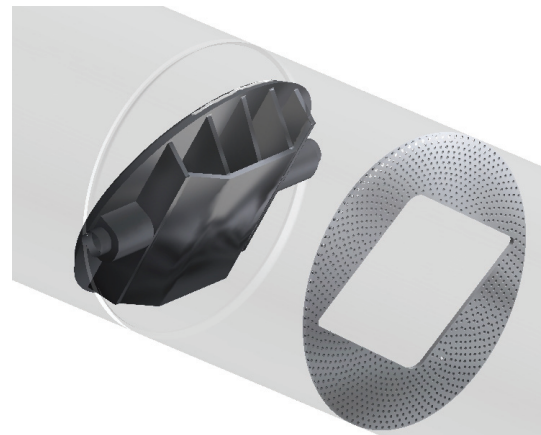


(b) Case 2(with plate)

Fig. 5 Coefficient of pressure loss

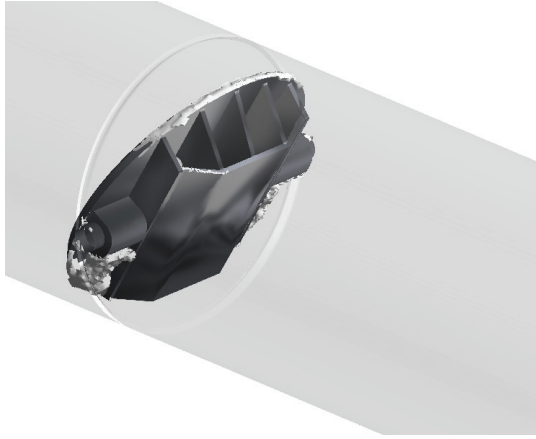


(a) Case 1(without plate)



(b) Case 2(with plate)

Fig. 6 Occurrence of cavitation at inlet velocity of $V = 3 \text{ m/s}$



(a) Case 1(without plate)

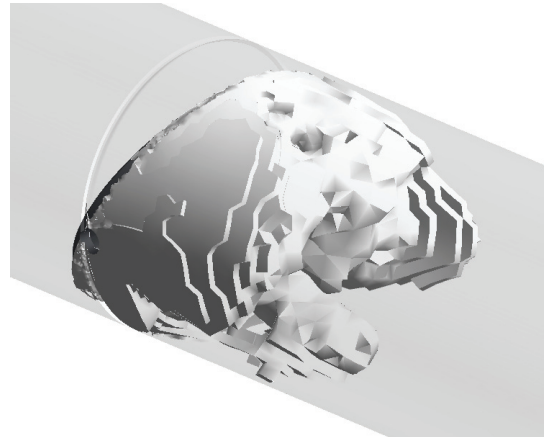


(b) Case 2(with plate)

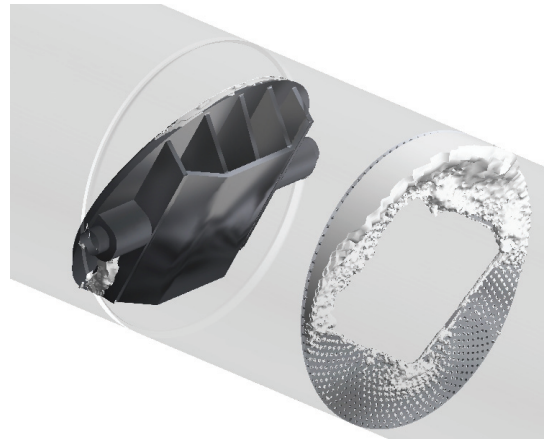
Fig. 7 Occurrence of cavitation at inlet velocity of $V=4$ m/s

영향으로 인해 최대 압력 강하 지점이 밸브가 아닌 다공판이 설치된 위치로 이동하여, 밸브 근처에 보였던 공동현상이 눈에 띄게 저감된 모습이다. 반면에 다공판 상단의 다수의 구멍에 국소적인 과도한 압력 강하로 인하여 공동현상이 발생함을 알 수 있으며, 이로 인해 유로 막힘 현상이 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 8(a)는 $V=5$ m/s의 유입 속도에서의 유동특성을 보여주는 그림이며, 밸브 후단의 전역에서 공동현상이 예측된다. 광범위한 공동현상으로 인해서 유로 막힘 현상이 매우 심하게 발생할 것으로 예상된다. Fig. 8(b)는 (a)와 동일한 입구 유속 조건에서의 유동이 다공판의 영향으로 인해, 최대 압력 강하 지점이 밸브가 아닌 다공판이 설치된 위치로 이동하여 밸브 후단의 전역에 보였던 공동현상이 확연하게 저감된 모습이다. 반면에 다공판 상단의 전역에 공동현상이 발생함을 알 수 있으며, 마찬가지로 유로 막힘 현상이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 개도 $\theta=30^\circ$ 에 대해서는 유속 $V=5$ m/s 이상에서 운용하면 다공판의 내구성이 크게 줄어들 것으로 판단된다.



(a) Case 1(without plate)



(b) Case 2(with plate)

Fig. 8 Occurrence of cavitation at inlet velocity of $V=5$ m/s

Table 2는 앞에 도시된 체적을 정량적으로 환산한 값들이다. 유속 $V=3$ m/s의 경우 다공판의 영향으로 공동현상이 발생하는 영역이 약 21.5%가 저감하였다. 유속 $V=4$ m/s에 대해서는 85.3%, 유속 $V=5$ m/s에 대해서는 94.0%의 저감 효과를 보여준다. 다공판의 설치로 인하여 충분히 공동현상을 저감할 수 있다고 판단된다.

Table 2 Volume of cavitation

Velocity	3 m/s	4 m/s	5 m/s
V_{cav} [ℓ] (Case 1)	2.78	104	6734
V_{cav} [ℓ] (Case 2)	2.18	15	406
Reduction Ratio	21.5 %	85.3 %	94.0 %

4. 결 론

본 연구는 CFD 상용코드인 CFX를 이용하여 직경이 $D=2800$ mm인 초대형 버터플라이밸브에 대하여 개도 $\theta=30^\circ$ 에 대하여 내부 유동의 특성을 확인하고자 입구 유입 속도, 다공판의 설치 유무에 따른 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개도 $\theta=30^\circ$ 의 경우 좁은 유동면적으로 인해 밸브 주변에 공동현상이 발생한다. $V=5$ m/s의 경우에는 밸브 후단 전역에서 공동현상이 발생하여 유로 막힘 현상을 초래할 우려가 있기 때문에 밸브의 작동조건에서 제외시켜야 한다.
- 2) 유입 속도가 증가함에 따라 압력손실계수 K 가 증가하는데, 이는 유입 속도의 증가로 상승한 동압에 비해 압력 강하량 증가가 더 크기 때문이다. 다공판을 설치한 경우 K 는 다공판이 없을 때보다 높게 나타나는데, 이것은 다공판에 의해 밸브에서의 속도증가량이 감소하여 그만큼 압력이 상승했고, 상대적으로 상승한 압력만큼 압력 강하량이 증가했기 때문이다. 실제로 밸브 ($0D$)에서의 절대압력은 다공판을 설치했을 경우에 더 높게 나타나며, 공동현상이 감소한다.
- 3) 공동현상 발생이 비교적 적었던 유속 $V=3$ m/s는 다공판에 의한 저감 효과가 21.5% 정도로 나타났지만, 유속 $V=4$ m/s에서는 무려 85.3%의 저감 효과가 나타났고, 심지어 $V=5$ m/s의 경우에는 94.0%의 저감 효과가 있었다. 공동현상 발생을 저감하기 위하여 설치한 다공판의 효과가 매우 뛰어남을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(No. NRF-2012H1B8A2026181)과 충남대학교 학술연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- (1) Young, F. R., 1989, Cavitation, McGraw-Hill, London, pp. 187~310.
- (2) Yazici, B., 2007, "Numerical & Experimental Investigation of Flow Through a Cavitation Venturi," Recent Advances in Space Technologies, pp. 236~241.
- (3) Choi, J. H., Penmesta, R. C., and Grandhi, R. V., 2005, "Shape Optimization of the Cavitator for a supercavitating torpedo," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 29, No. 2, pp. 159~167.
- (4) Yoon, J. Y., Lee, S. J., and Kim, E. S., 2004, "Numerical Analysis of Flow in Butterfly Valves to Prevent Cavitation," Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 9~16.
- (5) Lee, J. H., Back, S. H., Park, J. H., Park, S. I., and Park, Y. C., 2013, "Experimental and Numerical Investigation for Reducing Cavitation of Butterfly Valve with Perforated plate," 2013 KSME Spring Conference, pp. 176~177.
- (6) Kim, S. D., Kim, B. S., Choi Y. D., and Lee, Y. H., 2008, "Prediction of Cavitation Occurrence in a Cryogenic Butterfly Valve by Flow Velocity," Journal of the Korea Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 923~930.
- (7) ANSYS CFX-Solver 11.0, Solver Theory, Ansys Inc., 2006.
- (8) Bear, J., 1988, Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, New York.
- (9) Alehossein, H., and Qin, Z., 2007, "Numerical Analysis of Rayleigh-Plesset Equation for Cavitating Water Jets," International Journal for Numeical Methods in Engineering, Vol. 72, No. 7, pp. 780~807.
- (10) Lee, J. W., Choi, H. K., and Yoo, G. J., 2010, "Characteristic of Butterfly Valve Flow with Different Design Factors," Journal of Computational Fluid Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 64~70.