

## 정밀제어용 버터플라이 밸브의 유동특성에 관한 연구

박 송 목, 최 훈 기,\* 유 근 종

창원대학교 기계공학부

### STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS FOR PRECISION CONTROL BUTTERFLY VALVE

Song Mook Park, Hoon Ki Choi\* and Geun Jong Yoo

Dept. of Mechanical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

*Butterfly valve is a valve that controls fluid flow depending on the size of the opening angle. In general, the size of the opening angle of the valve increases, the fluid flow has also increased sharply. However, sometimes, in a specific piping system, a particular operating condition is needed that the fluctuation of the fluid flow should not have large amount although the size of opening angle of the valve become larger. In butterfly valve, the shape of a typical thin plate, it is impossible to control a minute fluid, but in thick plate type, it is possible. In this study, we got the fluid flow control characteristics and pressure drop through both a numerical method and an experimental method about thick plate type. The numerical result and experimental result of flow coefficient show a similar pattern. In addition, we could find that minute fluid flow control was possible in the area of small size of the opening angle.*

**Key Words :** 버터플라이 밸브(Butterfly Valve); 공동화현상(Cavitation); 압력손실계수(Pressure Loss Coefficient); 유량계수(Flow Coefficient); 전산유체공학(CFD); 두꺼운 디스크(Thick Plate)

### 1. 서 론

대부분의 산업 공정에는 제품의 생산, 수송 등에 파이프라인이 필요하며 이 파이프 내부에 흐르는 유체의 유량을 조절하기 위하여 다양한 밸브가 사용되고 있다. 그 중 제어용 버터플라이 밸브는 원판형의 디스크를 회전시켜 시트와 접촉함으로써 기밀을 유지할 수 있으므로 미세한 유체유량 제어가 가능한 장점이 있다[1]. 또한 액추에이터를 이용하여 밸브의 개도각을 제어함으로써 유량을 자동적으로 제어가 가능한 장점이 있으며, 가격이 저렴하고 구조가 간단하므로 담수플랜트, 선박용이나 기타 산업용으로 많이 사용되고 있다.

밸브의 유동에 관한 연구는 실험과 수치해석에 의하여 지속적으로 수행되어지고 있다. 밸브의 기하학적인 형상변화에 의한 많은 연구가들에 의하여 밸브의 유량 계수, Torque 계수,

압력손실 계수 등 밸브의 성능과 캐비테이션 현상에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며 지금까지 지속적으로 수행되고 있다. Oh et al.[2]은 수치해석을 통하여 동일한 유속조건 하에서 밸브 타입과 각 밸브의 디스크 개도에 따라 유량 계수를 도출하였다. Huang and Kim[3]은 버터플라이 밸브의 비압축성 3차원 유동장의 속도와 압력분포를 구하기 위해 수치해석을 수행하고 디스크의 최적설계를 위해 유량조절, 개폐성능, 캐비테이션 특성에 대해서 고찰하였다. Ogawa and Kimura[4]는 버터플라이 밸브에서 토크특성을 예측하기 위해 자유유선이론과 날개이론으로부터 이론적인 토크 방정식을 도출하고 디스크의 형상이 서로 다른 세 개의 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.

유량의 크기를 정밀하게 제어하는 목적의 밸브는 글로우 밸브가 많이 사용되고 있다. 하지만 글로우 밸브는 단면직경이 큰 배관에서는 사용이 어려운 한계성을 가진다. 보통 이

Received: August 28, 2013, Revised: March 3, 2014,

Accepted: March 3, 2014.

\* Corresponding author, E-mail: hkchoi@changwon.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.1.021>

© KSCFE 2014

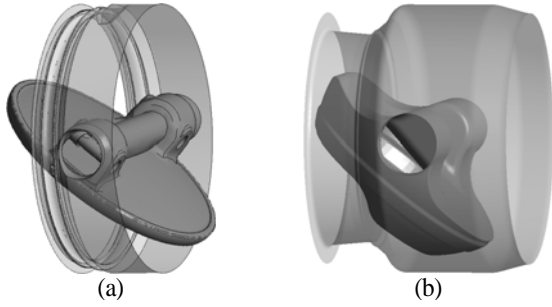


Fig. 1 Schematic diagram of butterfly valve:  
(a) thin type, (b) thick type

경우 버터플라이 밸브로 대응을 하고 있지만 지금까지 산업계에 적용되고 있는 밸브는 Fig. 1(a)와 같이 많은 유량을 흘러 보내기 위하여 디스크의 두께(최대: 12 mm)를 얇게 제작한다. 하지만 이러한 얇은 두께의 밸브는 개도각의 변화에 따라 유로 단면적의 변화가 심하게 변화하므로 유량변동폭이 커지게 되며 이로 인하여 미세한 유량제어가 힘든 실정이다. 따라서 밸브의 개도각이 증가하더라도 유량의 변동폭이 정밀하게 제어되는 새로운 버터플라이 밸브가 필요로 한다. Fig.1 (b)는 디스크 두께(최대: 72 mm)를 기존의 버터플라이 밸브보다 두껍게 하여 개도각이 증가해도 유로단면적의 증가가 완만하여 유량이 급격히 증가하지 않도록 한 것이다.

버터플라이 밸브의 유동특성에 관한 연구는 두께가 얇은 형상의 밸브에 대하여 수행되어져 왔다. 정밀한 유동제어를 위한 두꺼운 단면의 버터플라이 밸브에 대한 구체적인 연구는 아직 수행된 적이 없는 실정이다. 본 연구에서는 두꺼운 단면의 버터플라이 밸브에 대하여 수치해석으로 개도각의 변화에 따른 유동의 특성을 구하고 실험을 수행하여 해석결과의 적합성을 검증하였다.

## 2. 대상 및 조건

### 2.1 수치해석

#### 2.1.1 해석영역

본 연구에서 적용된 두꺼운 디스크 단면의 버터플라이 밸브는 Fig. 1(b)와 같이 디스크의 형상이 일반적으로 사용되고 있는 얇은 형상의 밸브보다 훨씬 두껍게 설계된다. 이렇게 함으로 밸브를 많이 열었을 경우 배관의 유체 유로단면적을 줄여 유량계수의 정밀한 제어가 가능하다. 기존의 얇은 단면에서도 이미 적용하고 있는 디스크와 중심축과의 2차 편심을 만들어 구동토크성능을 향상시키게 하였다.

Fig. 2는 수치해석을 위한 해석영역을 나타낸 그림이다. 배관직경(D)은 300mm이고 유동안정화를 위해 밸브의 상류로 3.5D, 하류로 15D만큼 확장하였다.

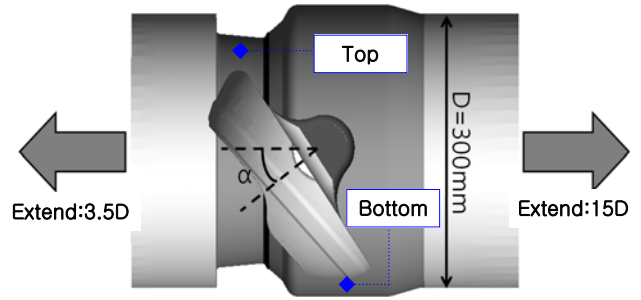


Fig. 2 Definition of numerical domain

#### 2.1.2 지배방정식

##### 1) 연속방정식

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

##### 2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{U_i U_j}) \quad (2)$$

##### 3) 난류모델

배관내부 유동의 Reynolds 수(기준속도는 파이프내부 유동의 평균속도, 기준길이는 파이프직경)는  $7.29 \times 10^5$ 이므로 난류영역이다. 난류모델은 밸브시트 후방으로 발달하는 2차 유동에 대해 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려진  $k-\omega$  SST 모델을 사용하였다[9].

$$\nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] \\ + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega \\ + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $P_k$ 는 점성에 의한 난류생성항이며, 각 난류 상수들은 블렌딩 함수에 의해 구성된다.

#### 2.1.3 경계조건

배관의 상류는 입구, 하류는 출구로 지정하였고 모든 벽면은 열전달이 없는 것으로 가정하였다. 입구에는 일정 유량조건을 주었고 출구에는 Neumann 조건을 주었다. 모든 벽면에는 점착조건을 적용하였다. 해석영역 내부를 흐르는 유체는 25°C의 물을 기준으로 하여 적용하였다. Table 1은 해석영역의 각 경계면에 적용된 물성치 및 경계조건을 정리한 것이다.

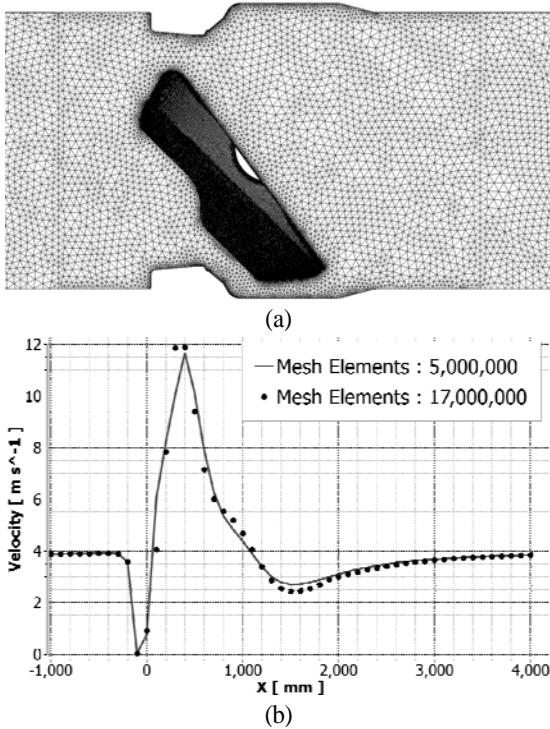


Fig. 3 Grid system configuration: (a) grid system, (b) grid quality test

2.1.4 해석방법

수치해석의 격자계는 Fig. 3(a)와 같이 주로 Tetra 격자를 사용하였고 바디 전후로 1D 이상에서는 격자 형태를 유지하면서 연장하는 방식으로 격자를 생성하였다. 격자수는 510~550만개로 구성하였다. Fig. 3(b)는 500만개의 격자와 1700만개의 격자인 경우 동일한 개도각에서 배관을 따라 배관중심부분의 유속을 비교한 그래프이다. 유속분포가 동일하게 나타남을 볼 수 있듯이 500만개 격자수의 설정이 타당함을 보여주고 있다.

버터플라이 밸브의 내부유동장에 대한 정량적인 해석을 위하여 유체기계의 내부유동과 성능의 해석에 많이 적용되고 있는 상용프로그램인 ANSYS CFX[10]을 이용하였다. 모든 지배방정식의 잔차(Residual)가 10<sup>-4</sup> 이하가 될 때까지 반복계산을 수행하였다.

2.2 실험장치 및 조건

수치해석의 검증을 위하여 실험을 수행하였으며 Fig. 4는

Table 1 Boundary conditions

Section	Boundary Conditions
Inlet	constant mass flow rate
Outlet	Neumann
Rigid body walls	No-slip

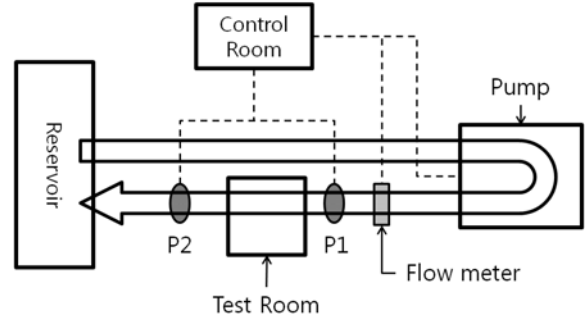


Fig. 4 Flow diagram of experimental system

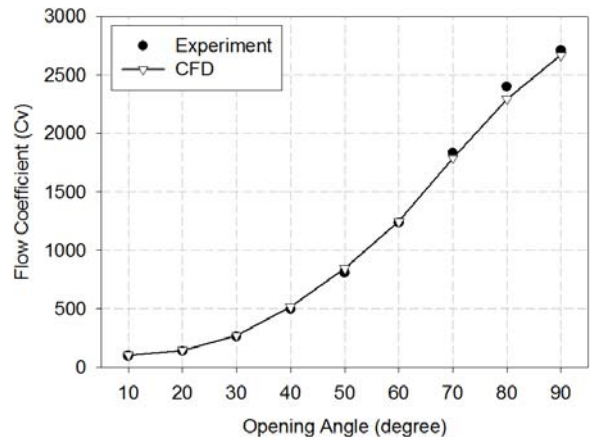


Fig. 5 Comparison of numerical and experimental results

실험장치에 대한 흐름도를 나타낸 그림이다. 유체는 저수조에 서 공급되고 펌프를 사용해 유량을 변경할 수 있게 구성하였으며, 압력계를 사용해 밸브 전후 압력차를 측정하게 된다. 실험에서의 압력측정은 수치해석과 동일한 위치에서 측정하였다. 제어실은 밸브의 개도각과 유량을 변경할 수 있고 전후 압력과 유량을 측정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유량계수 비교

본 연구의 수치해석방법의 신뢰성을 확보하기 위하여 Fig. 4와 같이 구성된 시스템으로 실험을 수행하였다. 밸브의 크기와 배관계를 결정하는 중요한 인자인 유량계수(Cv)를 이용하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 밸브 유량계수는 미국 측정 협회(ANSI/ISA 표준 S75.01)[11]가 정의한 수식을 국제단위(SI)로 변환하면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Cv = 11.6 \frac{Q}{\sqrt{\Delta P / G}} \tag{5}$$

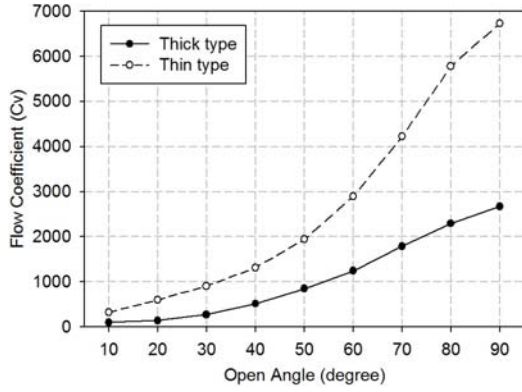


Fig. 6 Comparison of thick type Cv and thin type Cv.

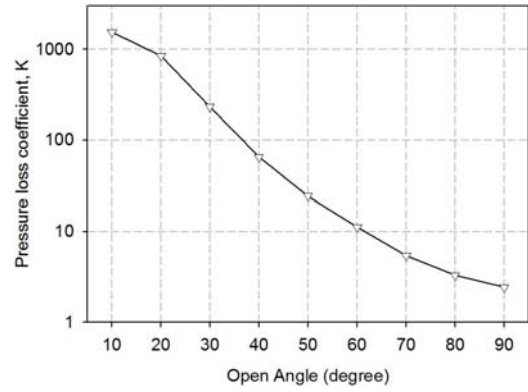


Fig. 7 Plots of the coefficient of pressure drop

여기서, Q는 유량, G는 비중,  $\Delta P$ 는 밸브의 직경(D)의 2배인 상단지점과 밸브의 직경의 6배인 하단지점에서의 압력차이다.

Fig. 5는 수치해석과 실험에서 밸브의 개도각을 증가시키며 이에 따른 유량계수 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 유량계수의 정성적, 정량적인 결과는 아주 유사한 크기의 분포를 하였다. 실험결과에 대한 해석결과의 신뢰성이 충분히 있음을 보여주고 있다. 밸브 개도각 크기가 작은 범위에서는 유로통로가 좁아져 압력강하량은 증가하고 흐르는 유량은 적으므로 유량계수의 크기는 작다. 밸브의 개도각이 점점 증가함에 따라 유량계수의 크기는 선형적인 증가보다 그 증가율이 큼을 볼 수 있다. 밸브 개도각이 50°~80° 구간에서는 유량계수 증가율이 선형에 가까운 분포를 하고 있다.

밸브 단면두께의 영향을 알기 위하여 얇은 경우와 두꺼운 경우의 밸브에 대하여 유량계수를 구하였다. 밸브 단면두께가 얇아지면 밸브를 열었을 경우 유로 단면적이 증가하므로 마찰저항이 줄어든다. 마찰저항이 감소하기 때문에 밸브의 유량계수는 커지게 된다. Fig. 6은 밸브의 단면이 두꺼운 경우와 얇은 경우에 대하여 유량계수의 크기를 비교한 그림이다. 밸브 개도각이 작은 영역에서는 밸브 단면 두께가 얇은 경우와 두꺼운 경우 모두 유동통로는 밸브 끝단부에서 형성되므로 유량계수는 밸브 두께의 영향을 거의 받지 않는다. 개도각이 점점 증가하면 밸브 단면 두께가 두꺼운 경우가 얇은 경우보다 유동통로가 좁아지게 되므로 유동저항이 증가한다. 따라서 개도각이 증가함에 따라 유량계수의 크기는 밸브단면이 얇은 경우 급격히 증가하지만 두꺼운 경우는 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 밸브를 열고 닫는 빈도가 많고 개도각의 크기에 따라 유량의 편차가 크지 않게 제어하는 배관계에서는 오히려 밸브 단면의 두께가 두꺼운 밸브가 유리함을 알 수 있다.

### 3.2 압력손실계수 비교

배관계에서 펌프의 사양선정에서 압력손실은 매우 중요한 인자이다. 버터플라이 밸브가 설치된 배관은 밸브에서 압력강

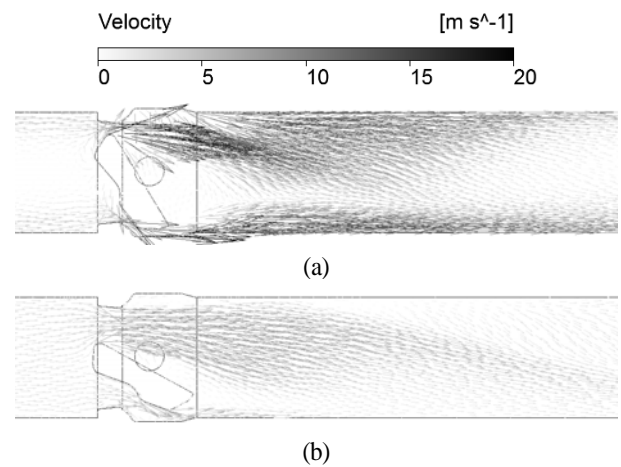


Fig. 8 Flow velocity vector: (a)  $\alpha = 40$ , (b)  $\alpha = 70$

하가 많이 발생되고 특히 밸브의 개도각이 작은 경우가 특히 심하게 나타난다. 압력강하의 정도를 나타내는 물리량은 식 (6)과 같은 압력손실계수(K)로 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\Delta P}{\rho U^2 / 2} \tag{6}$$

여기서,  $\Delta P$ 는 밸브 상단지점과 하단지점 사이의 압력강하량,  $U$ 는 배관단면에서 유체의 평균속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

Fig. 7은 두꺼운 단면 밸브의 유동해석에서 밸브 개도각에 따른 압력손실계수를 나타낸 그림이다. 밸브 개도각이 커짐에 따라 유로 단면적은 점점 넓어지므로 유체와 밸브표면의 마찰에 의한 압력강하가 감소함을 볼 수 있다.

### 3.3 유동패턴 분석

Fig. 8은 두꺼운 단면의 밸브디스크 주변을 흐르는 유체의



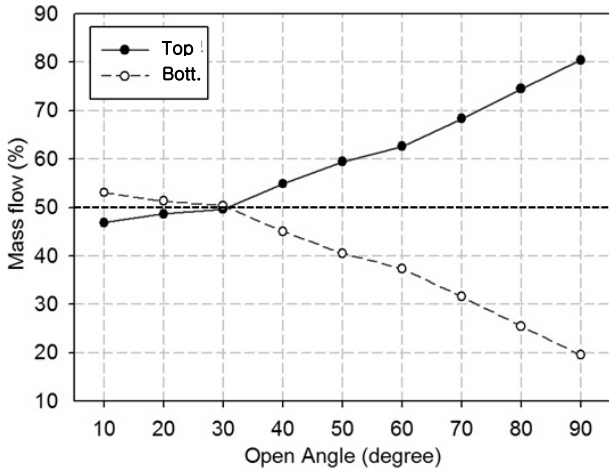


Fig. 9 Plots of the mass flow rate

속도벡터를 나타낸 그림이다. 개도각이 40°에서는 밸브 디스크 상단부 및 하단부와 배관의 밸브시트 사이의 유로 단면적이 좁아 유속이 빠르게 흐른다. 밸브의 후방부에서는 배관 단면적이 급격히 넓어지게 되어 와류가 형성된다. 개도각 70°에서는 디스크 상단부와 배관의 밸브시트 사이 유로통로 단면적이 하단부보다는 훨씬 넓어지므로 유체의 대부분이 상부 단면으로 유동됨을 볼 수 있다.

3.4 상하단면 유량편차 분석

현재 상용화되고 있는 버터플라이 밸브는 구동 시 토오크를 줄이기 위하여 회전축이 밸브단면 중심부에 위치하지 않고 단면에 대하여 2중으로 편심을 시킨다. 이렇게 하면 밸브의 개도각이 점차 증가하면 Fig. 2에서 나타낸 상부(top)의 유로의 단면적이 하부(bottom)의 유로의 단면적보다 커지게 된다. 또한 본 해석에 적용된 두꺼운 단면의 밸브는 상단부보다는 하단부가 더 두꺼우므로 얇은 단면의 밸브보다 상단부와 하단부의 유로단면적 차이는 더 커진다. 상부와 하부 유로 단면적의 편차는 한쪽으로는 유동 쏠림 현상이 발생하고 유속이 빠른 영역에서는 압력강하가 증가할 뿐만 아니라 케비테이션까지 발생될 수 있다. 특히 밸브의 개도각이 작은 경우 상부 유로면과 하부유로면의 편차가 크면 이러한 문제점이 많이 나타날 수 있다. Fig. 9는 밸브 개도각의 크기가 변화함에 따른 두꺼운 단면의 밸브 상부 유로면과 하부유로면에서의 유량편차 크기를 나타낸 그림이다. 개도각이 작은 경우 ( $\alpha < 30^\circ$ )에서는 2차편심축의 영향과 단면두께의 영향이 적게 나타나 상부 및 하부 유로단면에서의 유량편차가 크지 않음을 볼 수 있다. 밸브 개도각이 증가하면 회전축 하부단면이 상부 단면보다 훨씬 두껍고 2차편심 영향으로 상부유로로 유체가 더 많이 흘러감을 알 수 있다. 개도각의 크기가 증가함

에 따라 그 편차는 더욱 확대됨을 볼 수 있다. 밸브가 완전히 열린 상태( $\alpha = 90^\circ$ )에서는 80% 정도의 대부분은 상부 단면으로 흐르고 하부단면으로는 일부인 20% 정도만 흐름을 볼 수 있다.

4. 결 론

정밀제어를 위해 개발된 버터플라이 밸브에 대한 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단면이 두꺼운 밸브의 유량계수는 유동해석과 실험값은 비슷한 값과 경향을 보이고 있어 해석의 정확성을 신뢰할 수 있음을 볼 수 있다. 단면이 두꺼운 밸브는 유로의 단면적을 좁게 하여 미세 유량제어를 하는 장점을 가지고 있다.
- (2) 압력손실계수는 밸브 개도각이 증가함에 따라 마찰 손실이 줄어들어 압력강하량이 줄어든다.
- (3) 개도각이 증가할수록 디스크의 상단부와 하단부를 흐르는 유량의 편차는 증가한다.

후 기

본 연구는 “창원대학교 2013-2014년 연구비 지원사업”에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] 2007, Go, K.C., *Control Valve Handbook*, Hongreung Science Books.
- [2] 2006, Oh, S.H., Lee, Y.H., Kang, H.G., Song, X.G., Kang, J.H. and Park, Y.C., "A Study on Relationship of Flow Coefficient and Valve Type for Design of Butterfly Valve," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol.30, No.2, pp.373-377.
- [3] 1996, Huang, C. and Kim, R.H., "Three-Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.118, No.3, pp.562-568.
- [4] 1995, Ogawa, K. and T. Kimura, "Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve-Prediction of Torque Characteristics," *ISA transactions : Publication of Instrument Society of America*, Vol.34, No.4, pp.327-333.
- [5] 2004, Yoon, J.Y., Lee, S.J. and Kim, E.S., "Numerical Analysis of Flows in Butterfly Valves to Prevent Cavitation," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.7, No.1,

- pp.9-16.
- [6] 2007, Ogawa, K., "Cavitation Noise Reduction Around a Butterfly Valve by Semicircular Fins," *ASME Journal of Fluids Engineering*, pp.397-402.
- [7] 2008, Kim, S.W., Kim, S.W., Choi, Y.D., Kim, B.S., Kim, Y.H., "Flow Characteristics of Cryogenic Butterfly Valve for LNG," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.11, No.2, pp.20-28.
- [8] 2008, Kim, S.D. Kim, B.S., Choi, Y.D., and Lee, Y.H., "Prediction of Cavitation Occurrence in a Cryogenic Butterfly Valve by Flow Velocity," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.32, No.6, pp.923-930.
- [9] 2007, Kim, S.W., "A Study on the Flow Characteristics of Cryogenic Butterfly Valve for LNG Carrier," *Department of Mechanical Engineering Graduate School, Korea Maritime University*.
- [10] 2007, ANSYS Inc, CFX-Solver 13.0
- [11] 1985, Instrument Society of America ANSI/ISA S75.01 "Flow Equation for Sizing Control Valves", Instrument Society of America, *Research Triangle Park*, North Carolina, USA.