

공동 현상 방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석

윤준용* · 이승준** · 김은석***

Numerical Analysis of Flows in Butterfly Valves to Prevent Cavitation

Joon-yong Yoon*, Seung-jun Lee**, Eun-suk Kim***

Key Words: Butterfly valve (버터플라이 밸브), Cavitation (공동화), CFD (전산유체공학)

ABSTRACT

A three-dimensional numerical analysis was carried out on incompressible flows in butterfly valves by using commercial FLUENT/UNS code. Characteristics of complex flows including cavitation effect were investigated for different valve disk angles. The butterfly-valves that had different disk angles and different disk shapes were compared with each other in detail. This study focused on the flow analysis in the conventional butterfly valve and the newly designed butterfly valve in order to prevent cavitation. The newly designed valve shows great improvement on performance and endurance.

1. 서론

현재 산업체에서는 유량을 효과적으로 제어하기 위해서 여러 종류의 유량제어 밸브들이 사용되고 있다. 그 중 버터플라이 밸브 (butterfly-type valve)는 원 관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로서 유량을 조절한다⁽¹⁾. 그런데, 이러한 밸브의 개폐시 작은 열림 각도에서 압력 차이가 매우 크게 발생하여 밸브 디스크 가장자리 부근, 즉 유속이 가장 빠르게 나타나는 부근에서 유체의 압력이 액체의 포화 증기압보다 낮아질 수 있다. 이러한 경우 유체는 다수의 기포를 형성하게 되고, 이러한 기포들은 밸브 후단으로 이동하면서 넓어진 유로 형상에 따라 압력을 상승시키고 유속을 급격히

감소시킨다. 액체의 경우 국소 절대압력이 포화증기압 이하로 내려가면 그 곳에서 국부적으로 증발이 일어나 기포가 생긴다. 이러한 현상을 공동현상 (cavitation)이라 한다⁽²⁾. 캐비테이션의 경우 기포의 생성과 소멸 현상이 매우 짧은 시간 동안 지속적으로 반복되는 현상이므로 밸브의 소음과 진동은 물론 기포의 생성, 소멸로 인한 반복된 충격으로 밸브 디스크에 손상을 가져오게 된다. 이와 유사한 현상인 후래싱은 교축 점에서의 낮은 압력이 유체의 증기압 이하로 계속 유지되면서 압력회복이 이루어지지 않고 계속적으로 기포와 유체가 함께 흐르는 현상이다. 많은 기포를 고속으로 관로 면에 충돌시키는 현상이 계속 지속될 경우 관로 두께가 얇아지게 되어 결국 밸브의 부식이나 침식 등의 심각한 손상을 일으키는 원인이 된다.

특히 캐비테이션은 밸브의 운전 신뢰성과 경제수명을 확보하기 위해 반드시 고려해야 할 중요한 인자라 할 수 있다. 이러한 캐비테이션을 효과적으로 예측하고

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 기계공학과 대학원

*** 신진 정공

책임저자 E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr

제어하기 위해서는 정확한 유동장 (flow field) 해석과 이를 바탕으로 한 특별한 설계기술이 요구된다고 하겠다.

지금까지 버터플라이 밸브의 유동특성에 대한 연구는 주로 밸브의 압력손실계수, 토크 특성, 유량제어 특성 등에 대해서 이루어졌다. 1985년 Addy 등⁽³⁾은 압축성 유동의 제어에 사용되는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였다. 그들은 버터플라이 밸브에서 초크 유동의 시작점, 정제압력 손실, 정압의 회복 등에 대하여 연구하였다.

Huang 과 Kim⁽⁴⁾은 버터플라이 밸브에 대해 디스크 각도 변화에 따른 3차원 유동장에 대한 해석을 상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 수행하였다. 디스크를 기준으로 앞쪽 관 길이와 뒤쪽 관 길이에 따른 최적화된 유동흐름 평가를 실험치와 비교 분석하였다. Eom⁽⁵⁾은 구멍이 뚫린 회전판을 갖는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였고, 밸브 디스크의 직경이 밸브의 유량제어 특성에 미치는 영향에 대해서도 실험을 수행하였다. Morris와 Dutton⁽⁶⁾은 압축성 유동에서 작동하는 버터플라이 밸브의 토크 특성에 대하여 연구하였다. 그들은 밸브 디스크에서의 유동의 박리와 재부착 현상이 밸브의 토크 특성에 큰 영향을 준을 밝혔다. Shim과 Chang⁽⁷⁾은 유한요소 방법을 적용하여 버터플라이 밸브 하류의 3차원 유동특성을 연구한 바 있다.

본 연구는 신진정공에서 제공한 버터플라이 밸브의 공동 현상을 줄일 수 있는 새로운 디스크 형상을 가진 밸브에 대해서 3차원 유동장 해석을 수행하였다. 유동은 기체-액체 이상유동, 정상상태, 삼차원, 비압축성 난류 유동으로 가정하여 상용 프로그램인 미국 Fluent Inc.사의 FLUENT/UNS를 이용하였다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 압력과 속도의 보정을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 기-액 이상유동 계산을 위해 Cavitation 모델을 사용하였다. 격자 생성은 입구부분, 출구부분, 디스크, Symmetry, 관으로 나누어 전체적으로 5개의 영역에 대해 복잡한 형상을 비정렬 격자 (unstructured grid)를 사용하여 격자계를 구성하였다. 기존의 밸브와 새로운 밸브의 디스크 열림 각도를 각각 10도, 15도, 20도, 30도로 변화시키며, 그에 대한 유동 특성과 공동 현상을 고찰하였다.

2. 이론

2.1 유체유동 지배방정식

난류유동장 내의 유체유동은 다음과 같은 연속방정

식, 운동량방정식 그리고 난류모델방정식의 지배를 받는다. 또한, 캐비테이션의 해석을 위하여 캐비테이션 모델을 적용하였다⁽⁸⁾.

연속방정식 (continuity equation):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] & + \rho f_i \end{aligned} \quad (2)$$

Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 방정식인 RANS 방정식은 레이놀즈 응력이라고 하는 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 의 미지항을 추가적으로 포함하게 된다. 이 RANS 방정식을 종결 (closure)시키기 위해 모델링이 필요하다. 본 연구는 공학해석에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 표준 k-ε 난류모델을 사용하였다. 이 모델은 속도와 길이 척도를 추정하기 위하여 난류운동에너지와 소산율의 수송을 지배하는 다음과 같은 k와 ε에 관한 두 개의 미분방정식을 도입한다⁽⁹⁾.

표준 k-ε 난류모델 (standard k-ε turbulence model):

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 와점성 계수 (kinematic eddy viscosity, ν_t)는 다음과 같이 정의되고,

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

이때 사용된 모델링 상수는 다음과 같다.

$$C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\epsilon} = 1.3$$

캐비테이션 모델 (Cavitation Model Theory):

물과 수증기의 부피 방정식 (Volume Fraction Equation):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p u_i) = \frac{1}{\rho_p} \left(\dot{m}_{pv} - \frac{dp}{dt} \right) \quad (6)$$

\dot{m}_{pv} 은 물과 수증기 사이의 이송 질량

주 이동 물질의 부피 (The primary-phase volume fraction) :

$$\alpha_q + \alpha_p = 1 \quad (7)$$

q : Primary phase, p : Secondary phase

혼합과 운동량 방정식 대한 연속방정식에 기초로 한다.

전체 수증기 질량 (Total vapor mass):

$$m_p = \rho_p \frac{4}{3} \pi R^3 n \quad (8)$$

여기서 n 은 단위 부피 당 기포 (bubble)의 수이다.

3. 시뮬레이션 방법

3.1 디스크의 개략도 및 격자 생성

격자는 디스크 열림 각도에 따라 복잡한 형상을 비정렬 격자 (unstructured grid)를 사용하여 입구, 출구, 디스크로 나누어 격자를 생성하였다. Fig. 1은 기존밸브와 새로운 밸브의 디스크 개략도이다. 기존밸브는 단순한 원반 모양의 디스크인 반면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 새로운 밸브는 디스크 표면에 삼각형 모양의 홈, 사각형 모양의 홈, 부채꼴 모양의 다양한 홈이 파여져 있다. 이는 유체가 디스크 표면에 부딪힐 때 마찰저항이 커지게 되는데 이때에 속도를 낮추고 압력을 높여서 캐비테이션을 줄이고자 설계되었다. Fig. 3은 해석에 사용된 기존 밸브와 새로운 밸브의 격자를 나타내고 있다. 밸브 디스크의 열림 각도에 따라 a가 10도, 15도, 20도, 30도 열린 경우 두 가지 형상이므로

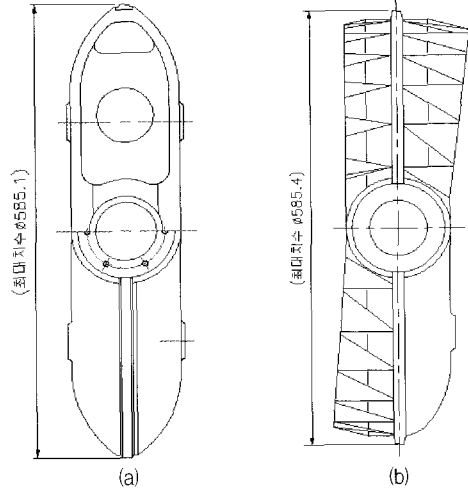


Fig. 1 Schematic diagram of (a) the conventional butterfly valve disk and (b) the newly designed butterfly valve disk

총 8가지의 경우로 나누어 각각 격자를 생성하였다. 이와 같은 8가지 경우에 대해 기존 밸브의 셀 수는 각각 293,490개, 304,332개, 299,061개, 292,486개 새로운 밸브의 셀 수는 각각 406,062개, 406,865개, 412,210개, 410,941개로 생성하였다. 표준 k-ε 난류모델을 사용하였기 때문에 디스크 벽면에서의 첫 격자점이 $y^+ = 50 \sim 800$ 으로 구성하여 격자를 구성하였다. 또한 새로운 밸브는 디스크 형상이 훨씬 복잡하기 때문에 기존 밸브보다 많은 격자를 생성하였다. 밸브 디스크 주위의 유동이 가장 중요하고 변화가 심하기 때문에 이 부분에 격자를 밀집시켰다.

3.2 계산 조건

본 연구에서는 밸브 내부를 흐르는 유체의 유동현상 해석을 위해 유동해석 상용 프로그램인 FLUENT⁽¹⁰⁾를 사용하여 유동장을 해석하였다. 유동이 3차원 정상상태 (steady state)이고, 작동유체가 물로서 비압축성 (incompressible) 유동이라 가정하고 계산을 수행하였다. 입구 부에서는 유입되는 유량이 일정한 것으로 간주하여 유량일정 조건을 경계조건으로 사용하였다. 입구 평균 속도는 1.5 m/s로 수도용 버터플라이 밸브 ø600 관에서 흐를 수 있는 설계 최고 유속을 입구 부 경계조건으로 주었다. 출구 부에서는 대기압을 기준 고정 압력으로 사용하였다. 또한, 밸브의 중심단면에 밸브의 디스크와 관이 서로 대칭이므로 Symmetry Boundary Condition을 적용하였다.

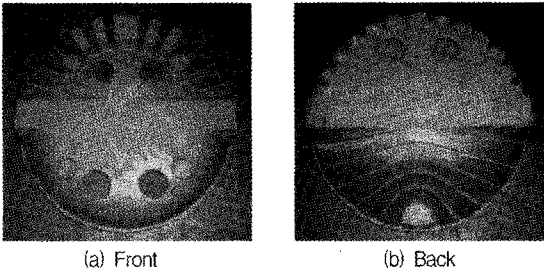


Fig. 2 Photographs of the newly designed butterfly valve disk

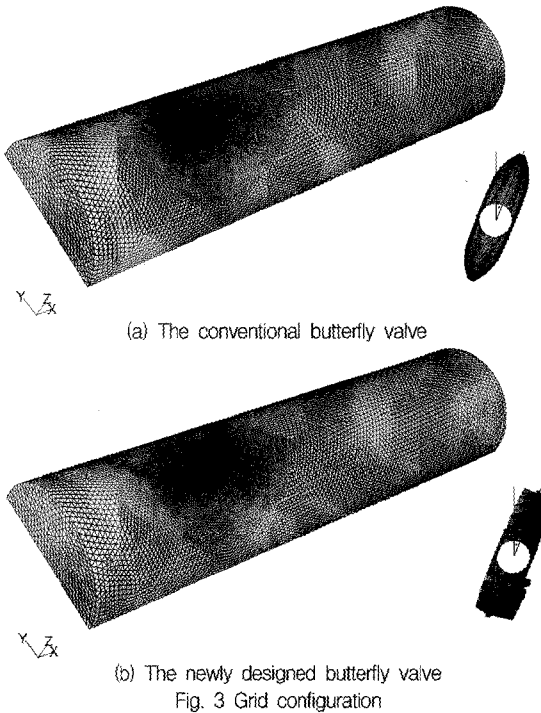


Fig. 3 Grid configuration

수렴 조건은 Residual이 I-방향 즉, 유체의 주 이동 방향 속도의 오차 평균이 1.E-5가 될 때까지 반복 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기존의 밸브와 새로운 밸브의 정압분포

Figs. 4~7은 관 벽을 따라 흐르는 유체의 유동방향으로의 정압분포를 나타낸 것이다. 디스크의 열림 각도가 작을수록 디스크를 통과할 때 전 후단의 압력 차이가 크고 국소 압력 변화도 매우 급격히 일어남을 알 수 있다. 출구조건으로 대기압 조건을 주었기 때문에

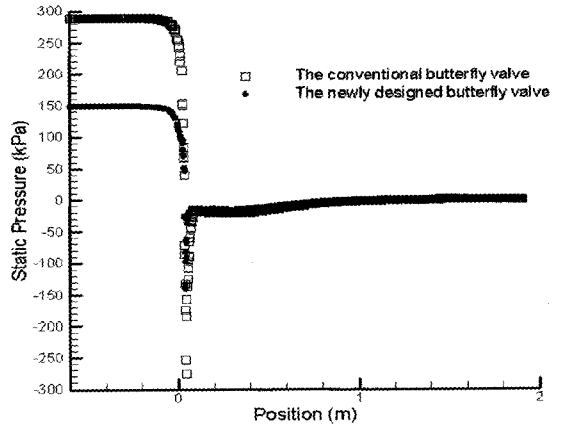


Fig. 4 Variation of static pressure distribution along the pipe wall for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve (10 degree)

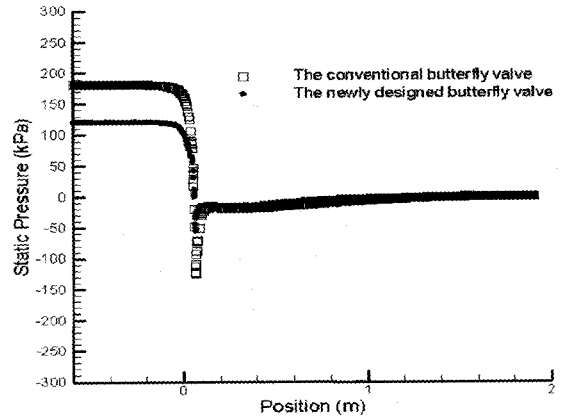


Fig. 5 Variation of static pressure distribution along the pipe wall for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve (15 degree)

정압의 수치는 게이지 압력을 나타낸다. 또한 Position 0의 위치는 디스크의 중심이 위치한 곳이다. 디스크의 열림 각도 10도에서 보면 기존밸브는 최저압력이 -276 kPa까지 내려가는 반면에 새로운 밸브의 최저압력은 -140 kPa까지 내려가는 것으로 예측되었다. 결국 새로운 밸브가 기존 밸브의 최저압력대비 51%정도로 압력 peak 값을 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 디스크의 열림 각도 15도에서도 마찬가지로 기존밸브는 -125 kPa, 새 밸브는 -55 kPa까지 내려가 peak값의 44%를 낮출 수 있다. 또한, 각도 20도에서 기존밸브는 -34 kPa 새 밸브는 -12 kPa까지 내려가 peak 값이 35%로 줄어들을 예측할 수 있다. 이를 통해서 새로운 밸브의 최저 압력 peak값이 기존 밸브보다 최대 51% 정도로 나

공동 현상 방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석

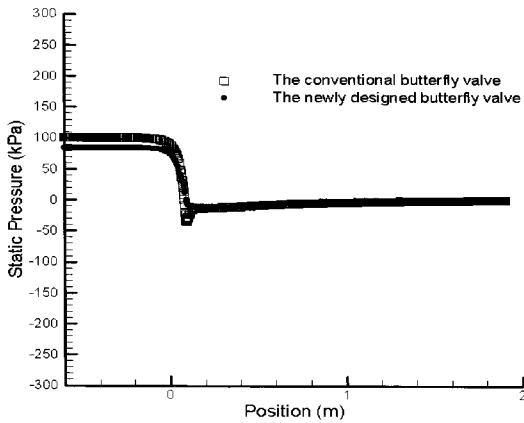


Fig. 6 Variation of static pressure distribution along the pipe wall for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve (20 degree)

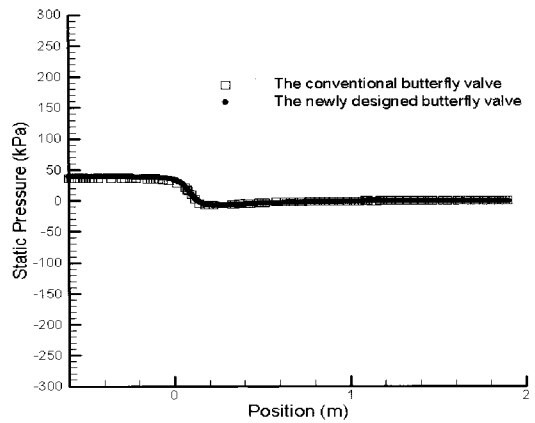
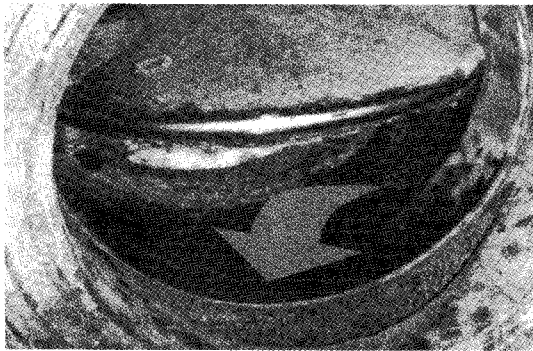
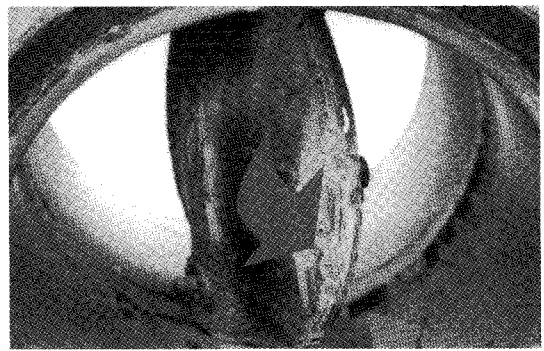


Fig. 7 Variation of static pressure distribution along the pipe wall for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve (30 degree)



(a)



(b)

Fig. 8 Damaged disk surfaces for the conventional butterfly valve (Photographing by Shin jin precision industrial)

타나므로 캐비테이션 발생 가능성이 현저히 줄어들게 됨을 예측할 수 있다. 디스크의 열림 각도가 10도, 15도, 20도 까지는 최저 압력 peak값이 수은 20℃에서 포화수증기압인 2.3 kPa 아래로 모두 급격하게 떨어지지만, 30도에서는 최저 압력 peak값이 포화수증기압 아래로 떨어지는 부분이 20도 보다는 아주 미미하다. 따라서 20도까지에서 캐비테이션의 발생 가능성이 많다. 또한, 30도에서는 최저 압력 peak값의 차가 거의 없으므로 개선된 밸브와 기존의 밸브는 캐비테이션의 발생 가능성은 거의 같다. 산업 현장에서는 대체로 디스크 열림 각도 20도 미만에서 공동 현상이 발생하는 것으로 알려지고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 공동 현상은 급격한 압력강하와 밸브 후단에서의 압력 회복으로 인해 생겨나는 현상으로 이러한 과정에서 발생하는 기포의 생성, 소

멸로 인한 충격은 밸브의 소음과 진동은 물론 디스크 표면에 심각한 손상을 가져 올 수 있다. Fig. 8의 사진은 기존밸브의 디스크 부근에서 공동 현상으로 인해 손상된 표면을 나타내고 있다. 이는 신진정공에서 기존의 버터플라이 밸브를 사진 촬영한 것이다.

따라서 본 연구에서는 디스크 표면에 복잡한 형상을 만들어 기존 밸브보다 유체에 마찰저항을 부가하게 된다. 결과적으로 최고 유속이 발생하는 지점에서 유속을 감소시키고 그 결과 빠른 압력회복을 얻음으로써 최저압력의 peak값을 현저히 줄이는 방법으로 새로운 형상을 고안하였다. 물론 실제 운전 중에는 시뮬레이션에서 사용한 일정 유량조건외의 가정보다 달리 새로운 밸브의 복잡한 디스크 형상에 기인하여 유동 저항이 증가할 수도 있고, 반면에 공동현상의 축소로 인하여 유동 저항이 감소할 수도 있어 통과 유량이 변하고 최

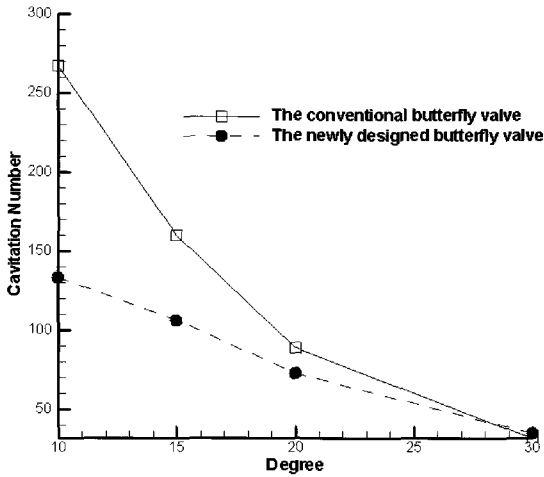


Fig. 9 Variation of the cavitation number according to the change of disk angle for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve

저 압력의 peak값 또한 변할 수 있다. 그러나 전반적인 경향은 일치할 것으로 판단되어지고 또한, 현장 실험 결과도 공동 현상에 의한 디스크 손상이 현저히 줄어들어 확인되었다. 디스크 표면의 복잡한 3차원 형상은 유동저항을 줄이면서 최저 압력의 회복을 증가시키는 방향으로 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4.2 기존밸브와 새로운 밸브의 캐비테이션수의 비교

압력계수에서 분자의 압력을 유체의 포화증기압 P_v 와의 차로 대치한 무차원수 $N_{ca} = \frac{p - p_v}{\rho V^2 / 2}$ 로 정의되는 캐비테이션수는 유체기계 (펌프, 수차, 밸브)의 운전, 프로펠러 주위의 유동, 기체-액체 이상유동 등의 상사율에서 매우 중요한 파라미터가 된다. 유체의 절대 압력의 크기는 그 압력이 국소 포화증기압 이하로 떨어지지 않는 한 별 의미가 없다. 공동현상이 발생되면 기체-액체 이상유체가 되어 유동장내의 밀도 차가 급변하게 되어 운동방정식의 수정이 요구된다. 공동현상의 정량적 비교를 위하여 기존의 밸브와 새로운 밸브의 캐비테이션수를 비교하였다.

Fig. 9는 기존의 밸브와 새로운 밸브의 디스크 열림 각도에 따라서 캐비테이션수의 변화를 도시한 것이다. 밸브 열림 각도가 20도 이하에서 매우 급격한 변화가 있음을 알 수 있어 이 구간이 밸브의 수두 손실에 지대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있고, 이 구간에서

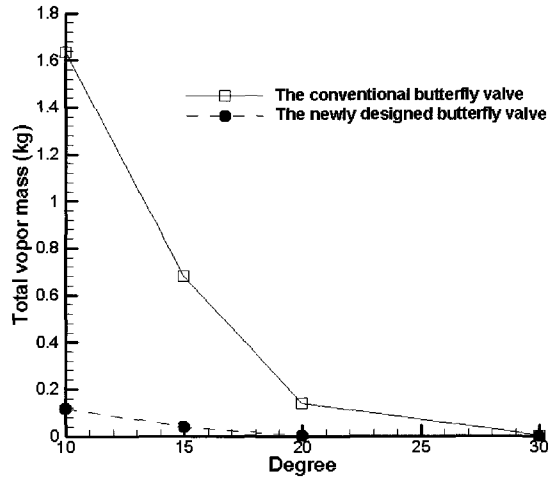


Fig. 10 Variation of the total vapor mass according to the change of disk angle for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve

공동현상이 쉽게 발생할 수 있음을 보여준다. 새로운 밸브에서는 기존의 밸브보다 10도에서는 49.63%, 15도에서는 32.5%, 20도에서는 16.7%만큼 줄어든다. 그러나, 20도를 넘어가면서 캐비테이션수가 변화 없음을 알 수 있다. 따라서, 디스크의 열림 각도가 20도 이후부터는 기존의 밸브나 새로운 밸브에서 공동현상이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

4.3 기존밸브와 새로운 밸브의 전체 수증기 질량의 비교

밸브의 전체 수증기량은 식 (8)에 의해서 구해진다. 수증기량을 구하는 목적은 공동현상이 발생할 때 수증기량이 많을수록 공동현상이 잘 발생한다는 것을 보여주기 위함이다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 밸브의 열림 각도 10도에서 기존의 밸브는 수증기량이 1.63kg인데 반해서 개선된 밸브의 수증기량은 0.11kg이다. 약 93.26%만큼의 수증기가 감소하였다. 또한 15도에서 기존밸브의 수증기량은 0.68kg 개선된 밸브의 수증기량은 0.04kg이다. 이 개도에서도 93.12%만큼의 수증기량이 감소하였다. 밸브의 열림 각도 20도 이하에서는 기존의 밸브와 새로운 밸브의 수증기량의 차이가 거의 없다. 이를 통해서 새로운 밸브의 공동현상이 훨씬 줄어들음을 알 수 있다. 두 가지 밸브 모두 디스크의 열림 각도가 20도 이후부터는 수증기량의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

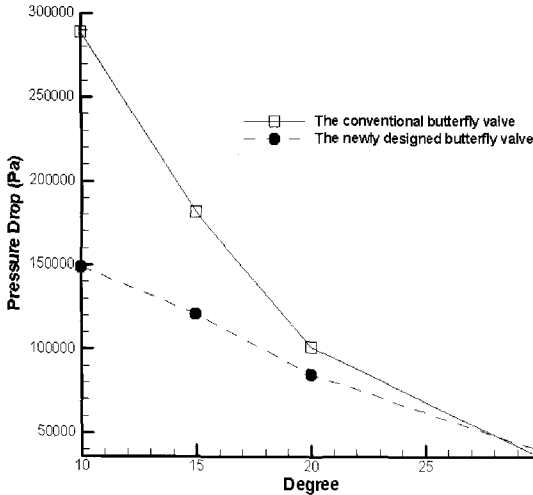


Fig. 11 Variation of the pressure drop according to the change of disk angle for the conventional butterfly valve and for the newly designed butterfly valve

4.4 기존밸브와 새로운 밸브의 Δp 비교

만일, 공동현상이 없는 비 압축성 유체를 해석한다면 디스크 형상이 복잡한 새로운 밸브에서 일정한 유량이 흐르는 조건을 만들기 위해서 기존의 밸브보다 전 후단의 압력차가 클 것으로 기대된다. 그러나 새로운 밸브가 공동현상을 줄인다면 오히려 유동저항의 감소로 밸브 전 후단의 압력 차가 줄어들게 된다.

Fig. 11은 기존의 밸브와 새로운 밸브 전 후단의 압력차 Δp 의 값을 나타내고 있다. 동일한 유량이 흐른다는 가정 하에 새로운 밸브가 기존 밸브보다 모든 디스크 열림 각도에서 압력 차가 작음을 알 수 있다. 이는 새로운 밸브가 결과적으로 유동저항이 작다는 것을 의미하므로 매우 흥미로운 결과로 여겨진다. 이는 새로운 밸브의 복잡한 형상이 유동저항을 증가시킬 것으로 기대되지만 공동현상의 현저한 감소로 인하여 유동저항이 오히려 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

밸브의 열림 각도가 커질수록 이 압력차는 점점 작아져 30도에서는 거의 같아지고 있다. 결국 새로운 밸브가 디스크 열림 각도 20도 이하에서 공동현상을 감소시키고 손실수두 역시 감소한다. 공동현상이 거의 일어나지 않는 디스크 열림 각도 20도 이후에서는 기존 밸브와 유사한 손실 수두를 갖는 것으로 예측된다. 따라서, 새로운 밸브가 성능이 우수하고 공동 현상의 최소화에 기인하여 내구성도 우수할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 기존의 밸브와 새로운 버터플라이 밸브 내부의 유동을 상용프로그램인 FLUENT INC.사의 FLUENT/UNS를 이용하여 해석하였으며, 3차원 유동 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디스크 열림 각도가 작을 때 디스크 부분에서 새로운 밸브가 기존 밸브보다 공동 현상을 현저히 줄일 수 있고, 최저 압력의 peak 값을 기존 밸브보다 최소한 51%이상을 감소시켰다.
- 2) 캐비테이션수와 전체 수증기 질량의 정량적 비교 결과 새로운 밸브가 기존의 밸브보다 밸브의 열림 각도 10도에서 1/15 정도 수증기량이 줄어드는 것으로 예측되었다.
- 3) 밸브 전후 단의 압력 차를 비교한 결과, 새로운 밸브의 복잡한 형상에 기인한 유동저항의 증가에도 불구하고 현저한 공동현상의 감소로 전체적인 유동저항이 획기적으로 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, 기존 밸브보다 성능이 우수하고 내구성이 우수한 밸브로 판단된다.

참고문헌

- (1) 오하시 히데오, 1994, 유체기계, 선중당, pp. 168~179.
- (2) Young, F.R., 1989, Cavitation, McGraw-Hill, London, pp. 187~310.
- (3) Addy, A.L., Morris, M.J. and Dutton, J.C., 1985, "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valve," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, Dec., pp. 512~517.
- (4) Kim, R. H., and Huang, C., 1996, "Three-Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, Sep., pp. 562~568.
- (5) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16~19.
- (6) Morris, M.J. and Dutton, J.C., 1989, "Aerodynamics Torque Characteristics of Butterfly Valves in Compressible Flow," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 111, pp. 92~399.

- (7) Shim, E.B and Chang, K.S., 1994, "Three-Dimensional Vortex Flow Past a Tilting Disc Valve Using a Segregated Finite Element scheme," Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 3, pp. 205~222.
- (8) Hinze, J.O., 1975, Turbulence, McGraw-Hill, Inc.
- (9) 윤준용외 5인 공역, 1999, 유체역학, 淸文閣.
- (10) FLUENT, 1998, User's Guide, Fluent Inc.