

LNG선용 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구 (제2부 : 극저온에서의 밸브 유동특성)

김상완* · 최영도** · 김범석*** · 이영호****

Flow Characteristics of Cryogenic Butterfly Valve for LNG Carrier

(Part 2 : Flow Characteristics under Cryogenic Condition)

Sang-Wan Kim*, Young-Do Choi**, Bum-Suk Kim***, Young-Ho Lee****

Key Words : Cryogenic butterfly valve(극저온 버터플라이 밸브), hydrodynamic characteristic(유동특성), aerodynamic characteristic(공력특성), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Recently, butterfly valves are used as control valves for industrial process. However, there are not so many reports on cryogenic butterfly valves in spite of broad application in LNG storage station and LNG carriers. Present study is focused on the investigation of the detailed hydrodynamic and aerodynamic characteristics of cryogenic butterfly valves to contribute to the operation during the handling on LNG transportation system, and to the practical utilization in design of butterfly valves and actuators. The results show that large recirculation vortices in the region downstream of the valve are founded and the cavitation flows are intensively generated on the surface of valve disc at the relatively small opening angle. The aerodynamic characteristics, lift, drag and torque, acting on the valve disc are calculated. The pressure distribution and the pressure loss coefficient of the cryogenic butterfly valve show almost similar pattern with those of the butterfly valve which is used on the normal temperature.

1. 서론

LNG의 액화온도는 극저온 상태이므로 이러한 LNG를 이송 및 저장하기 위한 밸브와 배관장치는 충분한 기밀 유지와 내구성을 갖추어야 하며, 특히 화물 이송

작업시 밸브의 효율과 고도의 안정성이 요구되어진다. 따라서 밸브 제작에 고려되는 사항으로 초저온 특성에 적합한 금속의 물리적 성질, 화학성분과 구조강도를 설계에 반영하고 있으며, 관련 연구로서는 Kim⁽¹⁾이 극저온 버터플라이 밸브 설계에 관한 연구를 수행하였고, Gerceker⁽²⁾는 버터플라이밸브의 극저온상태에서 기밀에 대한 연구를 수행하였다. 또한 설⁽³⁾은 극저온 버터플라이 밸브의 개발을 위하여 상용 수치해석프로그램을 적용하여 기본적인 2차원 유동특성과 강도해석을 병행한 연성해석을 수행하였다.

* 하이에어코리아(주)
** 한국해양대학교 산학협력단
*** 한국선급
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부 (교신저자)
E-mail : sangwkim@hiarkorea.co.kr

그러나 상온에서 사용되고 있는 일반적인 산업용 버터플라이 밸브에 비하여 LNG용 버터플라이 밸브의 경우 LNG 이송의 중요성과 안정성을 감안하면 극저온 상태의 버터플라이 밸브 내부유동장에 대한 유체공학적 측면에서의 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이며, 연구수준은 초보 단계에 머물러 있다.

따라서 본 연구에서는 극저온 상태의 버터플라이 밸브 유동장에 대한 유동특성에 대하여 검토하기 위하여 LNG선 화물이송시스템에서 액화메탄 이송에 실제로 사용되고 있는 극저온 버터플라이밸브를 대상으로 하여 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석법

2.1. 극저온 버터플라이밸브 모델 형상

본 연구에 적용된 버터플라이 밸브 형상은 실제 LNG 이송용 버터플라이 밸브로 사용되고 있는 모델을 채택하였으며, Fig. 1에서 밸브 모델의 흐름방향 전면 디스크와 케이싱을 보이고 있다. 수치해석 조건으로서 밸브 디스크의 개도각을 $\theta=10^\circ$ 에서 90° 까지 10° 간격으로 변화시켰으며, 밸브 개도각의 정의는 밸브 디스크가 완전히 닫혔을 때가 0° 이고 완전히 개방되었을 때를 90° 로 하였다. 배관 직경은 $D=400$ mm이며, 밸브 시트 상류측 배관길이는 밸브시트로 유입되는 작동유체의 완전발달 조건을 충분히 만족하는 거리가 되도록 $5D$ 로 설정하였으며, 밸브시트 하류측 배관길이는 밸브 시트를 통과하며 교란된 유동장이 충분히 안정될 수 있도록 $10D$ 를 확보하였다.

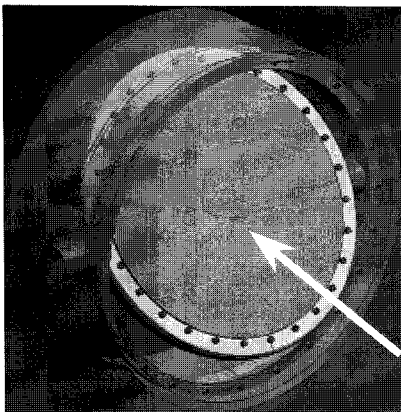
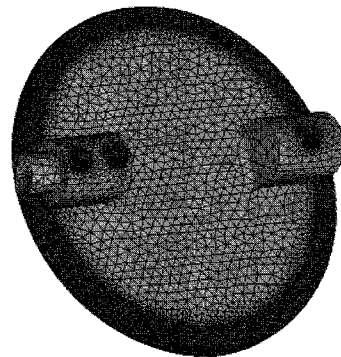


Fig. 1 Configuration of a cryogenic butterfly valve model

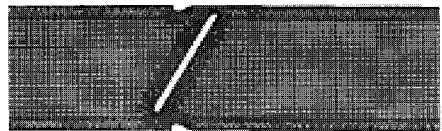
2.2. 계산격자

계산격자의 구성은 밸브 시트와 관로의 2영역으로 구분하여 작성하였으며, 밸브시트는 형상이 복잡하여 완전한 hexa 격자를 생성하는데 상당한 어려움이 있기 때문에 형상의 제한이 없이 비교적 우수한 격자를 생성할 수 있는 tetra 격자로 구성하였다. 또한 sub-layer 영역의 정확한 해석을 위해서 벽면 경계조건이 적용되는 경계면에 다수의 prism 격자를 분포시켰다. 배관 유로 도메인 내부 격자계의 효율적인 구성을 위해서 배관 내부유동장 영역에 대해서 hex-core 격자를 사용하여 계산기의 성능을 고려한 최적격자계를 구성하였다.

계산영역의 전체 격자수는 계산기의 계산능력과 경계층에서의 격자 밀집도(무차원 벽면거리 $y^+ \leq 10$)를 고려하여 약 40만 노드로 하였다. Fig. 2에서 본 연구에 적용한 계산격자를 보이고 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Calculation grids of (a) valve disc and (b) cross sectional view of valve disc and circular pipe

2.3. 계산조건

극저온 버터플라이밸브의 내부유동장의 속도 및 압력에 대한 정량적인 해석을 위하여 유체기계의 내부유동과 성능의 해석에서 비교적 양호한 해석결과를 보이는 것으로 알려진 상용코드 ANSYS CFX⁽⁴⁾를 본 연구

에 적용하였다.

본 연구에 적용된 밸브의 경우 직경 $D=400$ mm의 배관을 통하여 $1,700 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 LNG를 이송하므로 밸브 입구 유속은 밸브 개도가 90° (완전 열림)인 경우 평균 유속이 4 m/s 이다. 따라서 계산유동장의 유입조건으로서는 밸브의 개도에 상관없이 4 m/s 의 균일한 유입속도로 설정하였다. 또한 실제 LNG 이송 배관망 내에 설치된 버티플라이 밸브 하류측 측정 게이지 압력이 $420,000 \text{ Pa}$ 정도로 설정되어 있기 때문에 계산의 유출 경계조건으로서 이 압력을 모든 개도각의 경우에 대하여 정압조건으로 적용하였다. 난류모델로서는 $k-\omega$ SST모델을 사용하였으며, 정상상태의 계산을 수행하였다.

LNG의 조성⁽⁵⁾은 산지별로 다르며 연소특성 및 물리적 성질에 차이가 있다. 일례로 알래스카 산의 경우 메탄 99.8% , 에탄 0.1% , 질소 0.1% 로 구성되기 때문에 본 연구에서도 알래스카산 LNG를 작동유체로 가정하여 조성의 99.8% 를 차지하는 액체메탄(CH_4)을 작동유체로 설정하여 온도 -162° 의 상태에서 계산을 수행하였다.

캐비테이션 해석을 위해서 Rayleigh plesset model을 적용하였으며, Multiphase model (homogeneous)을 사용하였다. 액체 메탄의 포화증기압, P_s 는 $101,300 \text{ Pa}$ 로 설정하였다.

한편, 본 연구에 적용한 수치해석법의 타당성에 대한 검증은 김⁽⁶⁾의 관련 연구를 통하여 검토하였으며, 버티플라이 밸브의 성능 및 내부유동에 대한 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하여 높은 정도의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 밸브 개도각에 따른 내부유동장의 변화

Fig. 3에 밸브 개도에 따른 중앙단면에서의 속도벡터를 보이고 있으며, 밸브 개도각을 10° 에서 90° 까지 10° 씩 변경하여 계산을 수행하여 개도각에 따른 유동의 특성을 잘 표현할 수 있는 30° , 60° , 90° 에서의 속도벡터에 대해서 나타내고 있다.

밸브 개도각이 30° 인 경우(Fig. 3(a)) 배관 내부 좁은 유로를 통과한 흐름은 밸브시트 하단부로부터 가속되어 상단으로 형성되며, 이는 밸브 상하부 유동면적의 차이에 의해 발생하는 현상이며 상대적으로 유동저

항이 적은 밸브시트 하단부로 더 많은 유량이 유입된다. 국부적인 최대 유속은 약 23.8 m/s 에 달한다. 또한 밸브시트 하단에서 좁은 유로를 따라 급격히 방출된 작동유체는 밸브 디스크 후면에서 형성된 와류와 함께 디스크면을 따라 하류로 흐름을 형성한다.

밸브 개도각이 60° 인 경우(Fig. 3(b))에는 상단부의 유로를 빠져나온 흐름이 밸브 후방의 상단부 관로면을 따라서 강한 흐름을 보이고 있으며, 밸브 하단부 유로의 흐름은 일반적인 확대관에서와 같이 밸브 디스크 후방 시트면과 밸브 하단부 관로면을 유로로 하는 확대유 흐름을 형성하고 있다. 하단부 유로를 빠져나온 흐름은 밸브 시트면과 관로 하단부 관로면 사이의 중앙에서 가장 높은 유속을 나타내고 있으며, 밸브 디스크 후방 시트면에서는 재부착 흐름도 발생하고 있다. 국부적인 최대 유속은 약 8.3 m/s 에 달한다.

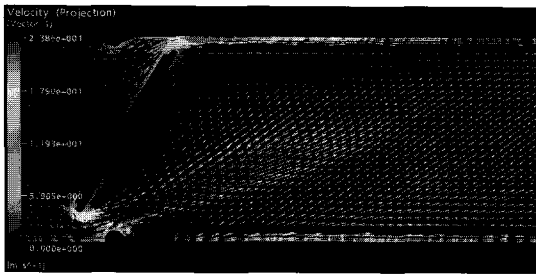
밸브 개도각이 90° 인 경우(Fig. 3(c))에는 밸브 시트 주위에서 발생한 재부착 흐름을 포함하는 재순환 영역은 거의 사라졌으나, 밸브시트와 배관의 완벽한 밀폐를 위해 관벽에 설치된 돌출 형태의 환상의 시트 구조물에 의한 영향으로 관벽을 따라 국부적인 재순환 영역은 여전히 존재한다. 밸브가 완전히 열렸을 때(개도각 90°)의 국부 최대 유속은 약 6.4 m/s 로서 개도각이 10° 일 때 74.32 m/s 에 비하여 약 12 배 감소하였다.

이상의 관로 중앙단면에서의 계산 결과로부터 작동유체를 액체메탄으로 사용하는 극저온 버티플라이밸브의 내부유동은 김 등⁽⁶⁾이 관련 연구에서 물을 작동유체로 한 상온에서의 내부유동 패턴과 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

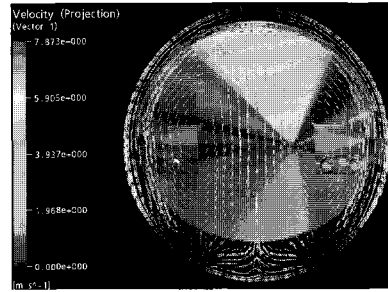
한편 Fig. 4에서는 밸브 후류에서 발생하는 복잡한 유동장에 대하여 밸브 개도에 따른 유동 패턴을 더욱 체계적으로 검토하기 위하여 밸브 후류 횡단면 속도벡터에 대해서 살펴보았다. 후류 횡단면은 밸브 디스크의 중심축에서 $0.75D$ 및 $4.5D$ 의 후방에 위치한다.

먼저, 밸브 디스크와 배관 벽면사이의 유로를 통과한 직후의 유동장인 밸브 디스크 중심축에서 $0.75D$ 후방의 횡단면을 살펴보면, 밸브 개도각이 30° 인 경우(Fig. 4(a))에 밸브 하단부 유로를 통한 흐름이 비교적 강하게 흘러나와서 시트면을 따라서 상단부로 흘러가지만 전체적으로는 밸브 디스크 중심축에 대하여 비교적 대칭적인 유동장을 형성하고 있다.

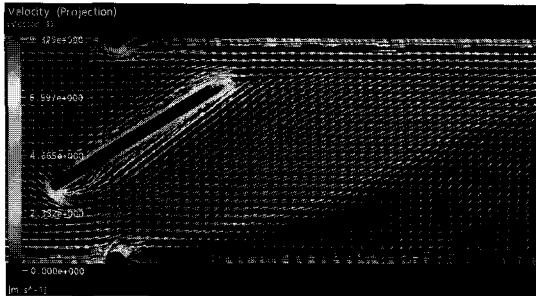
밸브 개도각이 60° 인 경우(Fig. 4(b))에는 디스크 중심축을 기준으로 거의 좌우 대칭 형태의 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다.



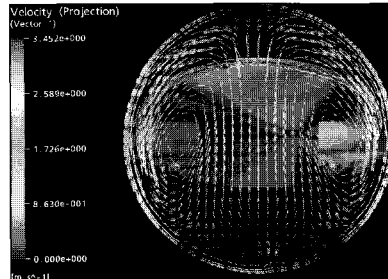
(a)



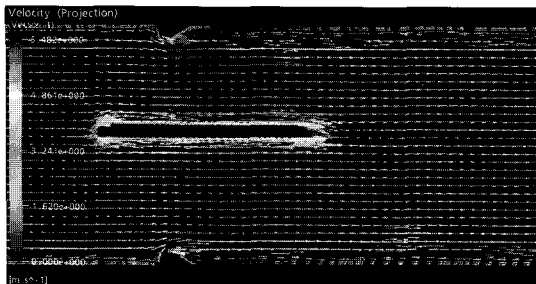
(a)



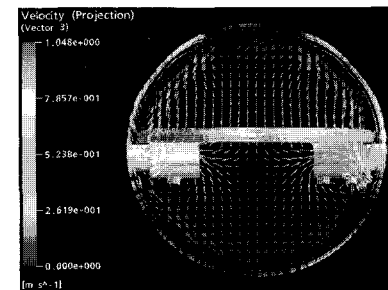
(b)



(b)



(c)



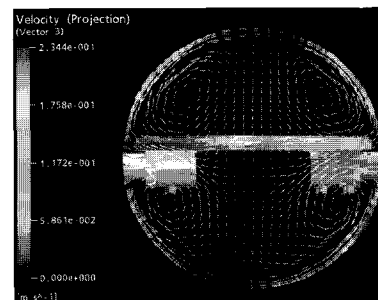
(c)

Fig. 3 Velocity vectors at the mid section of the valve : opening angles of (a) $\alpha = 30^\circ$, (b) $\alpha = 60^\circ$ and (c) $\alpha = 90^\circ$

밸브 개도각이 90° 의 경우(Fig. 4(c)) 밸브 중심축을 기준으로 배관 상부 벽면에 좌우 대칭으로 와류가 형성되어 있으며, 밸브 중심부의 디스크 하부에서도 좌우 대칭형 와류가 존재하고 있다.

더욱이, 밸브 개도각 90° 에서 발생한 이와 같은 4개의 와류는 밸브 디스크의 중심축에서 $4.5D$ 후방의 횡단면인 Fig. 4(d)에서와 같이 밸브의 후류로 갈수록 점점 크기가 동일해지고 위치도 상하 및 좌우 대칭형 와류로 발달함을 확인할 수 있다.

이러한 2차원 횡단면상에서 와류의 형성은 밸브 디



(d)

Fig. 4 Velocity vectors on the cross section : opening angles of (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 60^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ at $0.75D$ downstream and (d) $\theta = 90^\circ$ at $4.5D$ downstream of the valve

스크 개폐각도의 변화에 따라 서로 다른 형태로 나타나며, 특히 개도각이 90°의 경우 하류에서 거의 완전한 상·하 좌·우의 대칭형 와류가 발생한다는 점에서 큰 차이를 보인다. 와류의 중심이 밸브 디스크 하단부로 이동하다가 다시 밸브 디스크 중심부로 이동하는 현상은 밸브 디스크 개폐각도에 의한 영향으로 흐름이 디스크 하단부로 치우쳐 형성되었지만 디스크를 통과한 흐름이 출구측으로 이동하면서 점차 압력이 회복되어 안정화되면서 와류의 중심이 밸브 디스크 중심부로 이동하게 되기 때문으로 판단된다.

이상에서 확인된 바와 같이 3차원성이 매우 강한 와류를 포함하는 밸브 후류의 유동장에 대한 검토결과는 밸브의 형상과 성능에 관련된 설계시에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것이다.

3.2. 밸브 개도에 따른 압력분포 및 압력손실계수

밸브로 유입되는 흐름은 밸브 시트의 압력면에 높은 정압을 발생시키며 밸브시트를 통과하면서 좁은 유동면적을 통과하는 흐름은 가속되어 동압이 증가하기 때문에 부압면에서의 압력이 크게 저하하게 된다. 이와 같은 압력의 변화는 밸브의 상류와 하류의 관로 수위가 동일하기 때문에 다음의 Bernoulli의 식(1)로부터 설명될 수 있다.

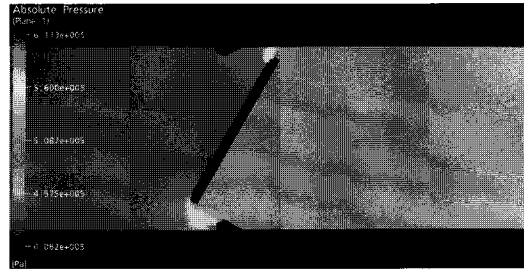
$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (1)$$

여기서, p , V , ρ 는 각각 정압, 평균유속 그리고 작동유체의 밀도를 나타내며, 하첨자 1과 2는 각각 밸브의 상류와 하류의 입의 위치를 나타낸다.

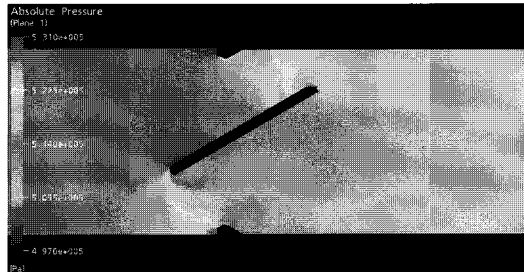
식(1)에 의하면 좌변과 우변 각 항의 정압과 동압은 위치에 따라서 변할 수 있지만, 그 합은 전압을 나타내며 일정하다.

따라서, 밸브 입구로부터 유입되는 전압에서 유로가 좁아짐에 따라서 동압이 작아지고 상대적으로 정압이 커지게 된다. 또한, 밸브의 좁은 유로를 지나면서 유로의 정압은 작아지고 동압이 커지게 된다.

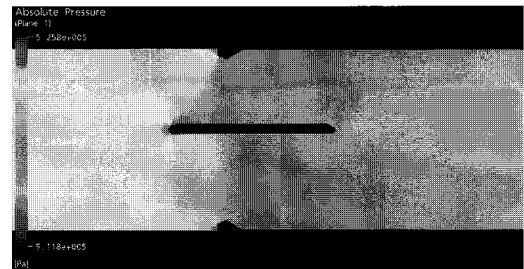
Fig. 5에 밸브 개도별 중앙단면에서의 절대압력 분포를 나타내었다. 밸브 개도각이 30°인 경우 밸브 시트에 의해 폐색된 유로의 단면적이 크기 때문에 밸브 압력면에 작용하는 정압의 크기가 상대적으로 높게 나타난다. 밸브 시트를 통과하는 흐름에 의해 형성되는



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Pressure contours at the mid section of the valve : opening angles of (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 60^\circ$ and (c) $\theta = 90^\circ$

압력은 밸브 전방에서 약 0.6 MPa 정도이고, 후방에서 약 0.4 MPa 정도의 압력이 형성되어 밸브 전후방의 압력차는 약 0.2 MPa 정도로 되어 상대적으로 큰 압력차를 나타낸다. 밸브 개도각이 증가함에 따라서 밸브 전후방의 압력차가 점점 감소하며 밸브 시트가 완전 개방되는 90°에 이르러서는 밸브 전후방의 압력차가 약 20 Pa 정도로 거의 평형상태를 유지한다.

한편, Fig. 6은 밸브 개도각이 30°, 60°, 그리고 90°인 경우의 밸브 디스크 중앙단면에서의 압력분포를 나타내고 있다. 압력분포의 좌측이 밸브 디스크 상류측 끝단, 우측이 하류측 끝단을 나타낸다.

밸브 개도각이 30°인 경우, 밸브의 압력면에 큰 압력이 작용하고 있음을 알 수 있으며, 흐름이 좁은 유동단면을 통과하면서 발생하는 낮은 압력이 대부분 밸브 끝단에서 형성되고 있음을 알 수 있다.

개도각이 60°인 경우, 상류측 디스크 면에 큰 압력이 작용하고 있으나, 밸브 디스크 단면을 따라 하류측으로 갈수록 압력이 점차 감소하는 특징을 보인다. 이러한 현상은 밸브 시트 표면을 따라 진행되는 흐름이 가속됨에 따라 발생하는 것으로 파악되며, 밸브 디스크 후면의 하류측 위치에서 가장 낮은 압력이 형성되고 있다. 이것은 밸브 디스크를 통과하는 흐름이 디스크 상류측 부압면 끝단에서 박리되어 디스크 후면(부압면) 근처의 국부영역에서 재순환 영역을 형성하기 때문이다.

개도각이 90°인 경우, 밸브 선단에서 가장 높은 압력이 발생하며, 이는 밸브 상류측에서 유입되는 흐름의 동압이 정압으로 변환되는 정체점과 일치한다. 밸브 디스크 표면을 따라 형성되는 흐름은 밸브 끝단으로부터 박리되어 국부적인 재순환 영역을 형성하는데, 이 영역에서 가장 낮은 압력분포가 나타나고 있다.

Fig. 7은 밸브 개도에 따른 압력분포를 밸브 상류측에서 하류까지의 각 위치별로 나타내고 있다. 밸브 상류측의 압력은 밸브 시트 중심으로부터 상류 0.75D (0.3 m)의 위치에서 계산된 결과이고, 밸브 하류의 압력은 밸브 시트 중심으로부터 0.75D의 간격으로 모두 9개소에서 면적평균 절대압력을 계산한 값이다. 개도각이 10°와 20°에서 밸브 전후방의 압력차가 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 밸브 하류측으로 갈수록 압력이 회복되어 거의 비슷한 압력분포를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서 밸브의 개도각에 따른 압력분포에서의 상류 및 하류측 압력값과 그때의 유량으로부터 다음의 식(2)을 이용하여 압력손실계수를 구하였다.

$$Kv = \frac{\Delta P}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (2)$$

ΔP 는 밸브의 상류측 0.75D, 하류측 6.75D사이의 압력강하, V 는 평균유입속도, ρ 는 물의 밀도이다.

밸브 개도가 상대적으로 작은 10°에서는 상대적으로 매우 큰 압력손실계수를 보이고 있으며, 전체적으로 밸브 개도가 60°까지는 완만하게 감소하다가 그 이

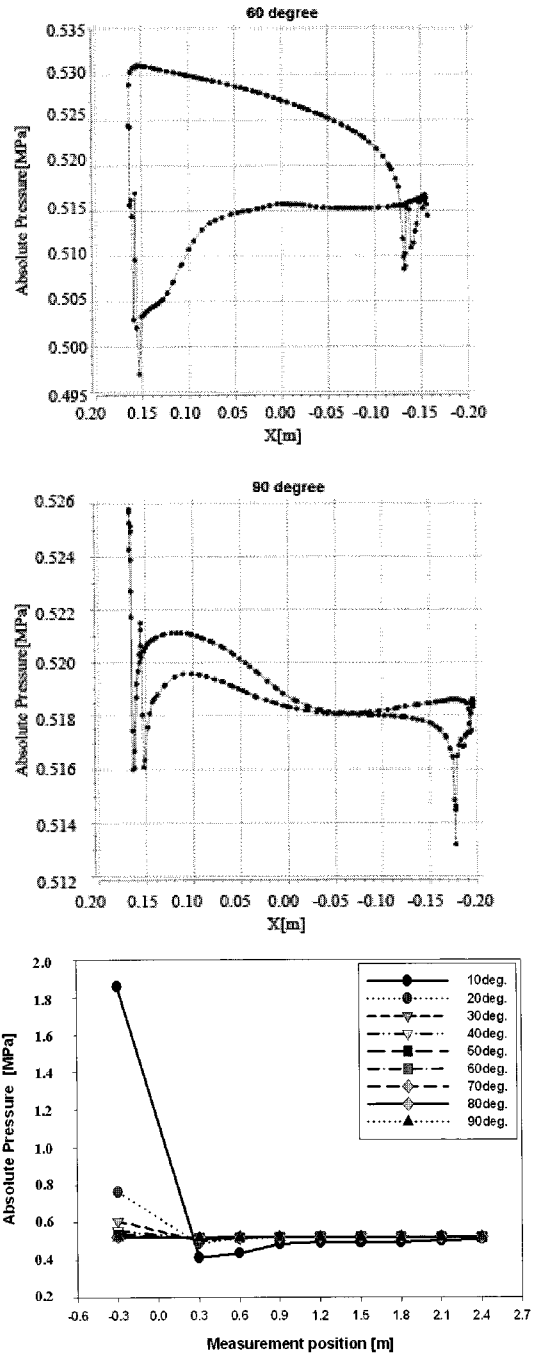


Fig. 7 Pressure distribution by various opening angles valve opening angles of $\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$ and $\theta=90^\circ$

상의 개도각에서는 거의 0에 가까운 값을 보이고 있다. 이와 같은 압력손실계수의 변화는 밸브 시트에 의해

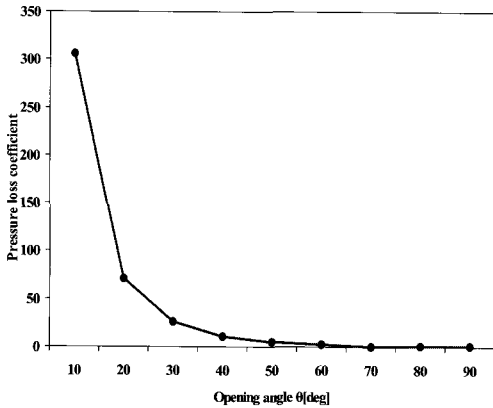


Fig. 8 Valve loss coefficient by various opening angles

폐색된 유동면적의 변화와 직접적인 관련이 있는 것으로 판단되며, 김 등⁽⁶⁾과 Eom⁽⁷⁾의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

3.3. 밸브 개도에 따른 공력특성

Fig. 7에서 모든 밸브 개도각 범위에서의 압력강하 형태는 밸브 전방 $0.75D$ ($0.3m$) 위치에서의 상대적으로 높은 압력이 밸브 후방 $0.75D$ 의 사이에서 급격하게 강하하며, 더욱 하류로 내려갈수록 밸브에서 $2.25D$ ($0.9m$)의 위치까지 압력이 점차 회복되어 거의 변화 없이 평형을 이루는 형태를 나타내고 있다. 이러한 압력의 변화는 밸브에 작용하는 항력과 양력의 발생에 큰 영향을 미치게 되며 이러한 양력과 항력의 변화는 결국 밸브 디스크면에 작용하는 토크를 유발한다.

Fig. 9는 밸브 개도에 따라서 밸브 디스크에 작용하는 양력과 항력의 변화와 토크값은 수치해석에 모듈화되어 자동 계산되는 결과로 수치해석 해석을 통해 얻은 값을 바로 사용하였다.

항력과 토크의 경우 항상 양의 방향으로 작용하고 있으며 양의 방향은 흐름방향을 의미한다.

양력의 경우 밸브 개도각이 90° 일 때를 제외한 각도 범위에서는 음의 부호를 갖는데, 이것은 밸브 디스크 면에 작용하는 양력의 방향이 디스크 하부로 작용함을 의미한다. 개도각이 90° 에 가까울수록 거의 0의 값을 나타내지만 수치해석결과에 의하면 개도각이 90° 에서 약 $100N$ 의 힘이 양의 방향성분을 갖는데, 이것은 밸브 디스크가 유동방향에 평행한 상태로 유지되는 상황에서 양력의 발생 방향이 밸브 디스크 상부로 작

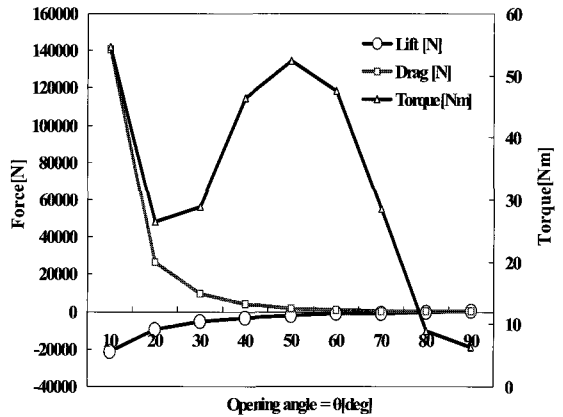


Fig. 9 Lift, drag and torque distributions acting on the valve disc by various opening angles

용함을 의미하며, 밸브 디스크 후면의 편심축 부분의 형상과 관련이 있을 것으로 판단된다.

밸브 개도각이 10° 에서 40° 까지는 양력이 항력보다 작은 절대값을 나타내고 있으나, 밸브 디스크 개도각이 40° 이상에서는 밸브 디스크에서 양력이 항력보다 높게 작용하고 있음을 알 수 있다.

한편, 버티플라이밸브에 작용하는 토크의 경우 일반적으로 개도각이 커짐에 따라 유동저항이 감소하기 때문에 점점 감소하는 특징을 나타낸다. 그러나 Fig. 9의 밸브 개도각 변화에 따른 토크 변화는 개도각 10° 에서 최대값인 $54.6Nm$ 이 작용하며, 20° 와 30° 에서 감소하고, 50° 에서 최대값에 가까운 범위까지 증가하다가 60° 이상에서 다시 감소하여 90° 에서는 최소값 $6.3Nm$ 이 작용한다. 이러한 결과는 본 연구에서 적용한 버티플라이밸브의 형상과 관련이 있으며, 밸브의 개도각에 따른 디스크의 각 위치에 작용하는 양력과 항력의 비율에 따라서 나타나는 결과로 판단된다. 또한, Kalsi 등⁽⁸⁾의 관련연구에서도 본 연구에서의 토크 값 분포와 유사한 결과가 나타남을 확인할 수 있으며, 손실계수를 고려한 이론 토크곡선과 비교하면 보정된 곡선을 나타낸다.

3.4. 캐비테이션의 발생 예측

본 연구에서는 작동유체로써 액화메탄을 사용하였으며, 액화메탄은 알라스카산 LNG 성분의 99%를 차지하는 조성이기 때문에 LNG의 실제 물리적 성분을

반영한 작동유체라 생각할 수 있다. 버터플라이밸브는 배관내부에 설치되어 유량조절용으로 사용되는 장치이기 때문에, 밸브 디스크 개폐시 양끝단부의 유입유속 및 밸브 전후 압력차의 크기에 따라 디스크 주변 혹은 후류 쪽으로 캐비테이션이 발생할 우려가 있다. 밸브 디스크 주변부에서 발생하는 캐비테이션 기포의 붕괴로 인한 충격 때문에 밸브 디스크면의 손상 및 밸브 지지 축의 손상, 배관 벽면 손상 등의 문제가 발생하게 된다.

본 연구에서 적용한 LNG 수송용 버터플라이 밸브의 경우 실제 측정 게이지 압력이 420,000 Pa로 비교적 높게 유지되기 때문에 캐비테이션이 발생할 우려는 거의 없다고 판단되나, 밸브 개도각이 10°인 경우에서 유동면적의 급격한 감소로 인한 밸브 전후에서 압력손실이 크게 발생하기 때문에 밸브 디스크 주변부에서 캐비테이션 발생 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 모든 개도각의 범위에 따라 밸브 캐비테이션 해석 및 다상 유동해석을 수행하여 검토한 결과, 개도각 10°에서 캐비테이션이 발생함을 확인하였다. 본 연구에 적용한 캐비테이션 수치해석법에서는 캐비테이션 발생여부를 VOF (Volume of Fraction)값으로 판단 할 수 있으며, 수치해석 결과에서 VOF율이 1인 경우는 완전한 메탄가스를 나타내고 0인 경우 완전한 액화메탄을 의미한다.

밸브 개도각이 10°인 경우, 협소한 유동면적에 의한 영향으로 작동유체가 밸브디스크를 통과하면서 급격한 압력강하를 초래하기 때문에 밸브 디스크 주변부에서 대체로 VOF율이 낮은 캐비테이션이 발생하고 있음을 확인 할 수 있었다. 이때 국부적으로 발생하는 최대 VOF율은 0.97이다. 반면, 밸브 개도각이 10°보다 커지게 되면 압력 강하율은 10°의 결과에 비해 상대적으로 낮게 유지되기 때문에 대부분의 배관 내부 영역에서 액화메탄의 포화증기압 이하로는 저하되지 않는다. 따라서 개도각 20° 이상의 결과에서는 배관내 모든 영역에서 캐비테이션 현상이 발생하지 않았다.

4. 결론

LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 내부유동특성을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

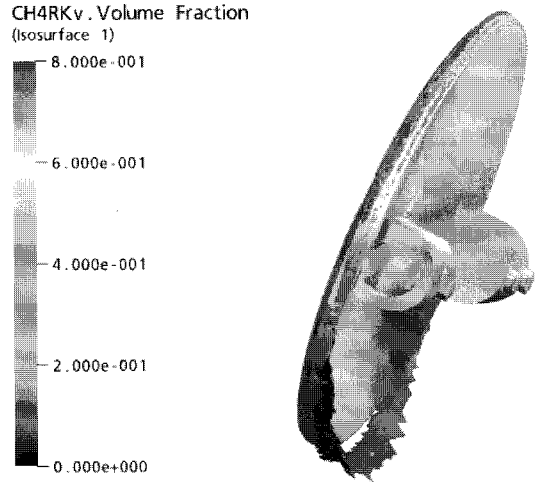


Fig. 10 Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle of $\theta = 10^\circ$

- 1) 메탄을 작동유체로 하는 LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 내부유동은 밸브의 개도각에 따라서 밸브 후방에서 강한 3차원 유동이 발생하며, 특히 밸브 후방에서는 개도각에 따라서 상하 또는 상하 좌우 대칭형 와류가 발생함을 확인하였다.
- 2) 밸브의 개도각에 따른 극저온 버터플라이밸브 상하류의 압력차는 개도각이 작을수록 상대적으로 매우 큰 값을 나타내며, 압력손실계수는 밸브 개도각이 60°까지는 완만하게 감소하다가 그 이상에서는 거의 0에 가까운 값을 보인다.
- 3) 밸브 디스크면에 작용하는 양력과 항력의 크기는 개도각이 작은 값에서 커질수록 항력이 양력보다 크지만, 그 이상이 되면 양력이 항력보다 높게 작용한다. 본 연구에서는 개도각 40°가 그 기준으로 나타났다. 또한, 디스크축에 작용하는 토크는 개도각에 의해 디스크에 작용하는 양력과 항력의 비율에 따라서 결정되며, 손실계수를 고려한 이론 토크곡선과 비교하면 보정된 곡선을 나타낸다.
- 4) 본 연구에 적용한 극저온 버터플라이밸브에서는 밸브 개도각이 10°인 경우, 협소한 유동면적에 의한 영향으로 작동유체인 액체 메탄이 밸브디스크를 통과하면서 급격한 압력강하를 초래하여 밸브 디스크 주변부에서 캐비테이션 현상이 발생함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Y. C. Kim, 1993, "A Study on the Design for Cryogenic Butterfly Valve," Graduate School of Hanyang University.
- (2) M. M. Gerceker, 2003, "Tight at Cryogenic Temperatures : High Performance Butterfly Valve for Pipelines with Cryogenic Liquids," Linde Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 40~42.
- (3) 설창호, 2006, "Cryogenic Butterfly Valve 개발 및 실험," 한국유체공학회 학술대회 논문집, pp. 75~78.
- (4) ANSYS Inc., 2004, "ANSYS CFX Documentation," Ver. 5.7.1, Waterloo, Ontario, Canada.
- (5) 한진해운, 2002, "LNG선 현안 실무 자료"
- (6) 김상완, 2007, "LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원 박사학위논문.
- (7) K. Eom, 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16~19.
- (8) M. S. Kalsi, B. Eldiwany, Vinod Sharma, A. Richie, 2004, "Effect of Butterfly Valve Disc Shape Variation on Torque Requirements For Power Plant Applications," Proc. 8th NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing, Washington, D.C., pp. 1~25.