

극저온 버터플라이 밸브의 유속에 따른 캐비테이션 발생 예측

김성동* · 김범석** · 최영도*** · 이영호†

(원고접수일 : 2008년 8월 22일, 원고수정일 : 2008년 9월 11일, 심사완료일 : 2008년 9월 16일)

Prediction of Cavitation Occurrence in a Cryogenic Butterfly Valve by Flow Velocity

Seong-Dong Kim* · Beom-Seok Kim** · Young-Do Choi*** and Young-Ho Lee†

Abstract : The butterfly valve is widely used in the industrial field as an on-off or a flow control valve. When the butterfly valve is used as a flow control valve, cavitation sometimes occurs in the range of high flow rate because of the small valve opening. Therefore, the pressure loss and the cavitation characteristics are investigated by use of a commercial CFD code. The results show that the possibility of cavitation occurrence in the cryogenic butterfly valve is very high in the case of valve opening angle below 10 degree and incident velocity over 6m/s. By increasing the inlet velocity at 10 degree of valve opening angle, the value of loss coefficient increased. However, by increasing the inlet velocity at 50 degree of valve opening angle, the value of loss coefficient decreased.

Key words : Cryogenic butterfly valve(극저온 버터플라이 밸브), Cavitation(캐비테이션), Pressure loss coefficient(압력손실계수), Valve opening angle(밸브 개도각), Flow velocity(유속)

기호설명

	v	: 유속 [m/s]
	ρ	: 작동유체 밀도 [kg/m ³]
	Δp	: 밸브 상류측과 하류측의 차압 [Pa]
CH_v	: 액화 메탄 중의 기화된 체적분율 (증기율)	
D	: 배관직경 [mm]	
K	: 압력손실계수	
p	: 정압 [Pa]	
p_s	: 액화 메탄의 포화증기압 [Pa]	
Q	: 유량 [m ³ /s]	
θ	: 버터플라이 밸브의 개도(열림)각도 [degree]	

1. 서 론

원판형 디스크의 회전에 의해 개폐작용을 하는 버터플라이 밸브는 구조가 단순하며 콤팩트한 디자인과 밸브구경이 큰 곳에 적용이 용이한 장점 등으로

† 교신저자(한국해양대학교 기계·정보공학부, E-mail : lyh@hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4293)

* 한국선급 울산지부

** 한국선급 에너지 산업기술센터

*** 한국해양대학교 산학협력단

인하여 선박뿐만 아니라 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 버터플라이밸브의 밸브 디스크 개폐시 양끝단부의 유입유속 및 밸브 전후 압력차의 크기에 따라 디스크 주변 혹은 후류 쪽으로 캐비테이션이 발생하게 된다.

이와 같은 캐비테이션 현상은 임의 유로에서 유속이 증가하여 액체의 압력이 포화증기압까지 저하되어 기포가 발생하는 현상이다. 액체에서 기체로의 상태 변화라는 점에서는 비등과 물리적으로 동일한 현상이지만, 비등은 열에 기인하며, 캐비테이션은 압력에 기인한다는 점이 다르다.

캐비테이션은 유동장내에서 작동유체의 압력이 증기압 이하로 감소되었을 때 발생하며, 생성된 증기 형태의 작동유체는 고압 영역으로 발달함에 따라 붕괴된다. 이러한 캐비테이션에 수반되는 문제는 진동, 소음, 침식, 다량의 기포발생에 의한 유로폐색 등의 문제가 있으며, 버터플라이 밸브의 경우 밸브 디스크면의 손상, 밸브 지지 축의 손상 그리고 배관 벽면 손상 등에 의해 빈번한 밸브모듈의 교체가 문제시되고 있는 실정이다^{[1]-[3]}.

한편, 버터플라이밸브의 유동특성에 대한 연구는 주로 물과 기체를 사용한 유동장에서 밸브의 압력손실계수^[4]를 구하고, 캐비테이션 방지를 위한 밸브 형상의 고찰^{[1]-[3]}과, 적정 액류에이터 선정에 필요한 밸브 토크특성^{[5],[6]} 등에 대해서 이루어져 왔다.

최근에는 LNG운반선용 버터플라이밸브에 대한 연구^{[7]-[9]}도 진행되고 있으나, -162°C 의 극저온상태의 밸브 디스크 주변부에서 발생하는 캐비테이션 발생 가능성에 대해서는 연구실적이 미약하며, 체계적인 검토가 요구되고 있다.

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

2. 수치해석법

2.1 극저온 버터플라이 밸브 모델

Fig. 1은 본 연구에 적용한 버터플라이 밸브 형

상을 보이고 있으며, 실제 LNG 이송용 버터플라이 밸브로 사용되고 있는 모델을 채택하였으며^[10], 밸브 모델의 흐름방향 전면 디스크와 케이싱을 보이고 있다. 수치해석 조건으로서 밸브 디스크의 개도각을 캐비테이션 발생 가능성이 비교적 높은 $\theta = 10^{\circ}$ 및 그 보다 상대적으로 큰 개도각을 가지는 $\theta = 50^{\circ}$ 의 2종류에 대해서 검토하였으며, 밸브 개도각의 정의는 밸브 디스크가 완전히 닫혔을 때를 $\theta = 0^{\circ}$ 로 하였다. 배관의 직경은 $D=400\text{mm}$ 이며, 밸브시트 상류측 배관길이의 결정은 밸브시트로 유입되는 작동유체가 충분히 발달한 유동을 가질 수 있는 거리를 기준으로 하였으며, 다양한 상류측 배관거리에 대한 검토결과 $5D$ 로 설정하였다. 밸브시트 하류측 배관길이는 밸브 시트를 통과하며 교란된 유동장이 안정화 될 수 있는 거리를 검토하여 $10D$ 로 결정하였다.

2.2 수치계산법

본 연구에서 극저온 버터플라이 밸브의 성능과 내부유동을 상세히 검토하기 위하여 상용코드인 ANSYS-CFX Ver.11^[11]을 사용하여 계산을 수행하였다.

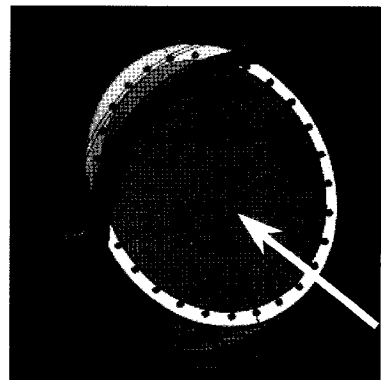
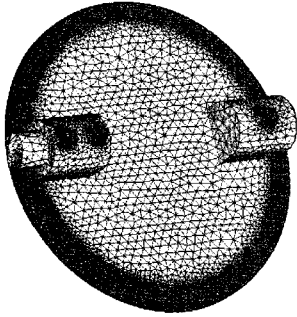


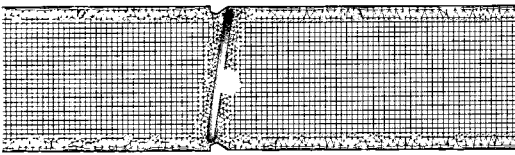
Fig. 1 Configuration of a cryogenic butterfly valve model

Fig. 2에서 본 연구에 적용한 버터플라이 밸브의 계산격자를 보이고 있다. 계산격자의 구성은 밸브 시트와 관로의 2영역으로 구분하여 작성하였으며, 밸브시트 후면의 디스크 지지 축 부분 형상이

상당히 복잡하기 때문에 형상의 제한이 없이 비교적 우수한 격자를 생성할 수 있는 tetra 격자로 구성하였다.



(a) Rear side of valve disc



(b) Cross-sectional view of valve and circular pipe

Fig. 2 Numerical grids for the calculation domain

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 경계층에서 격자의 종횡비와 밀도를 적절하게 적용하여 벽면으로부터의 무차원 거리인 y^+ 의 최고값을 $y^+ < 10$ 로 설정하여 약 40만 노드로 하였다.

본 연구에 적용된 밸브 유입유속은 밸브 개도각 10° 및 50° 에 대하여 각각 2m/s, 4m/s, 4.5m/s, 5m/s, 5.5m/s 그리고, 6m/s 등 6종류의 유속을 적용하였다.

또한, 실제 LNG 이송 배관망 내에 설치된 버터플라이 밸브 하류측 측정 게이지 압력이 420,000Pa 정도로 설정되어 있기 때문에, 계

산의 유출 경계조건으로서 이 압력을 2종류의 개도각에 대하여 정압조건으로 동일하게 적용하였다.

난류모델로서는 비교적 넓은 범위의 무차원 벽면 거리에 대하여 양호한 해석결과를 나타내는 것으로 알려진 $k-\omega$ SST모델을 사용하였으며, 작동유체로는 조성의 99.8%를 차지하는 알래스카산 LNG를 작동유체로 가정하여 온도 -162°C 의 액화메탄(CH_4)에 대하여 정상상태의 계산을 수행하였다. 캐비테이션 해석을 위해서 Rayleigh plesset model을 적용하였으며, Multiphase model (homogeneous)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유속에 따른 압력분포

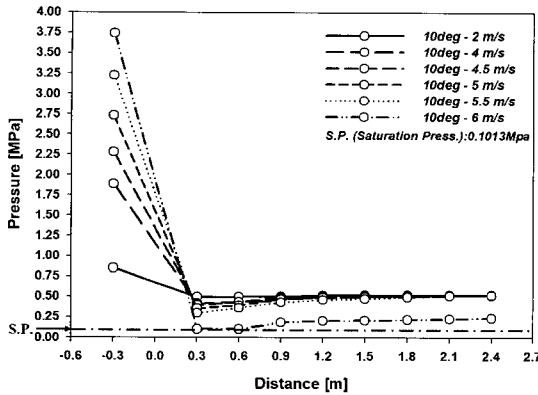
Fig. 3은 밸브 개도각 $\theta = 10^\circ$ 및 50° 에서의 입구유속 변화에 따른 극저온 버터플라이 밸브의 압력분포를 보이고 있으며, 밸브 상류에서 하류까지의 각 위치별로 9개소의 압력을 함께 나타내고 있다. 밸브 상류측의 압력은 밸브 시트 중심(그래프 횡축의 Distance=0.0 지점)으로부터 상류 $0.75D$ (0.3m)의 위치에서 계산된 절대압력이고, 밸브 하류의 압력도 밸브 시트 중심으로부터 $0.75D$ 의 간격으로 계산된 절대압력을 나타낸다.

밸브 전후방의 압력차는 밸브 개도각 $\theta = 10^\circ$ 일 때가 50° 일 때보다 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 밸브 하류측으로 갈수록 압력이 회복됨을 알 수 있다.

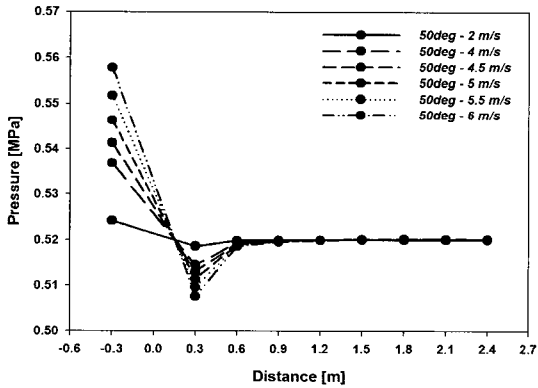
Fig. 3(a)에서 밸브 개도각 $\theta = 10^\circ$ 인 경우, 밸브디스크를 통과한 작동유체는 $0.75D$ (0.3m) 지점에서 급격히 압력이 저하되며 유속이 증가할수록 압력이 더 크게 저하됨을 알 수 있다. 밸브 중심에서 약 1.8m 후방에서는 6m/s 이외의 유속에서 거의 동일한 압력분포를 보이는 것을 알 수 있다.

그러나, 입구유속이 6m/s에서는 밸브 중심에서 후방의 전 위치에서 압력이 상대적으로 크게 저하되어 다른 유속에서의 압력에 비하여 일정한 압력차를 보이면서 서서히 압력이 회복되고 있음을 알

수 있다. 이와 같이 밸브 개도각이 상대적으로 매우 작은 각도에서의 이러한 급격한 압력저하는 밸브 내부에서 캐비테이션을 발생시킬 가능성이 크기 때문에, 액화 메탄의 포화증기압($P_s=101,300\text{Pa}$)^[12]을 Fig. 3(a)에서와 같이 함께 표기하여 캐비테이션의 발생 가능성을 검토하였다.



(a) $\theta=10^\circ$



(b) $\theta=50^\circ$

Fig. 3 Pressure distributions by flow velocity at each valve opening angle

Fig. 3(a)에서 액화 메탄의 압력선도와 포화증기압을 비교해볼 경우 유속이 6m/s에서는 포화증기압 이하 압력이 밸브 중심 후방 0.75D(0.3m) 지점에서 확인되고 있으며, 밸브후방에서 일정한 거리까지 도달하여도 다른 유속에서의 결과와 비교하여 압력회복이 잘 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 계산결과로부터 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$, 유입유속 6m/s에서 캐비테이션이 발생할 가

능성이 매우 높다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 3(b)에서와 같이 밸브 개도각 $\theta=50^\circ$ 인 경우에는 개도각 $\theta=10^\circ$ 일 때와 마찬가지로 밸브디스크를 통과한 작동유체는 밸브 후방 0.75D(0.3m) 지점에서 급격히 압력이 저하되었으며, 유속이 증가할수록 압력이 더 크게 감소하였고, 밸브 하류측으로 갈수록 압력이 회복되어 약 1.2m 후방에서는 유속에 상관없이 거의 동일한 압력분포를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 일 때와는 달리 밸브 유동장의 전 영역에서 포화증기압보다 상당히 높은 압력분포를 보이기 때문에 캐비테이션 발생 가능성은 희박하다고 판단된다.

3.2 압력손실계수

밸브의 압력손실계수 K 는 밸브의 압력손실 계산 이외에도 압력과 유량의 관계 및 효율을 검토하기 위해서도 사용되기 때문에 밸브의 성능 및 유동특성을 나타내는 가장 기본적인 계수이다.

Fig. 4는 밸브의 개도각에 따른 압력분포에서의 상류 및 하류측 압력값과 그때의 유량으로부터 다음의 식(1)을 이용하여 압력손실계수를 구하였다.

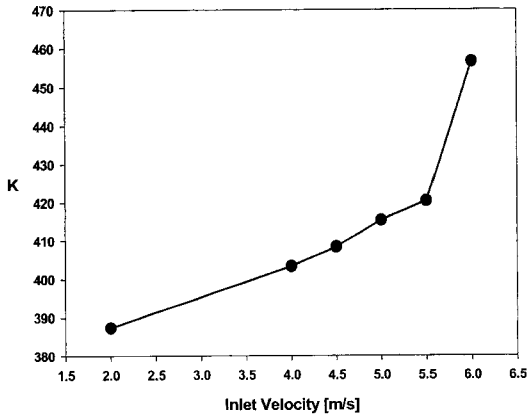
$$K = \frac{\Delta P}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (1)$$

여기서, ΔP 는 버터플라이 밸브의 상류측 0.75D, 하류측 6.0D사이의 압력강하, V 는 평균유입속도, ρ 는 작동유체의 밀도이다.

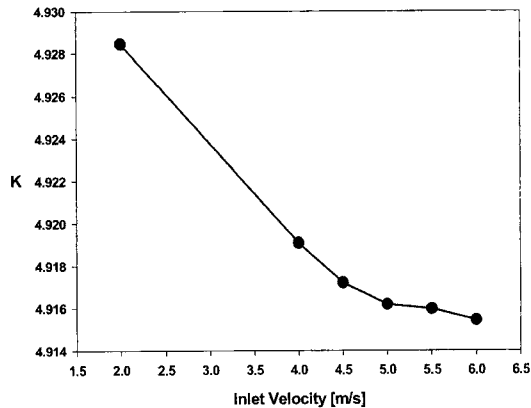
Fig. 4(a)의 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 에서는 유속이 상대적으로 낮은 2m/s에서 압력손실계수가 작고, 6m/s에서 상대적으로 매우 큰 압력손실계수를 보이고 있다. 즉, 전체적으로 유속이 빨라질수록 증가하다가 5.5m/s에서 급격히 증가하여 6m/s에서 최대값이 $K=456.56$ 에 달하게 된다. 이와 같은 압력손실계수의 증가는 유속이 빨라질수록 밸브시트와 밸브 관로사이의 좁은 단면적을 통과하는 유체의 압력이 크게 저하하기 때문이며, 밸브 개도각이 비교적 작은 $\theta=10^\circ$ 에서는 속도증가에 의한 동압의 증가보다는 압력강하에 의한 정압의 영향이 더

크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

그러나, Fig. 4(b)의 밸브 개도각 $\theta=50^\circ$ 에서는 유속의 변화에 대한 압력손실계수의 변화가 개도각 $\theta=10^\circ$ 와는 거의 정반대로 나타나고 있다. 유속이 상대적으로 작은 2m/s에서는 상대적으로 매우 큰 압력손실계수를 보이고 있으며, 전체적으로 유속이 증가할수록 압력손실계수는 감소하고 있다. 이와 같은 결과의 원인으로서는 밸브 개도각이 비교적 클 경우 유속이 크게 증가하여도 압력강하는 Fig. 3(b)에서와 같이 상대적으로 작게 일어나기 때문에 식(1)의 동압과 정압의 비율에 의하여 압력손실계수가 감소하는 경향을 나타내게 된다.

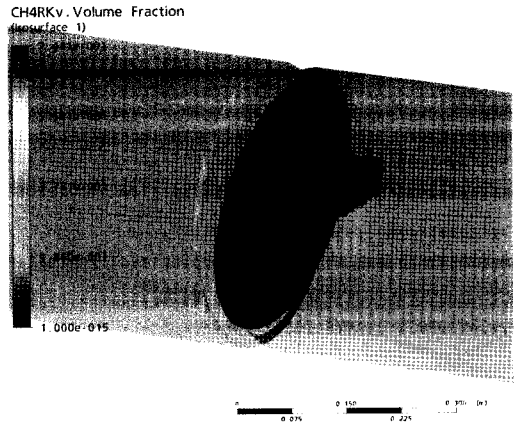


(a) $\theta=10^\circ$

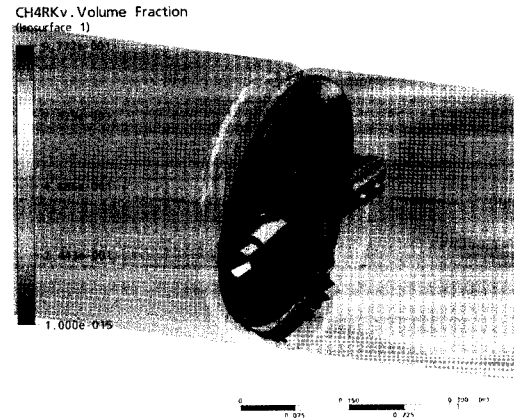


(b) $\theta=50^\circ$

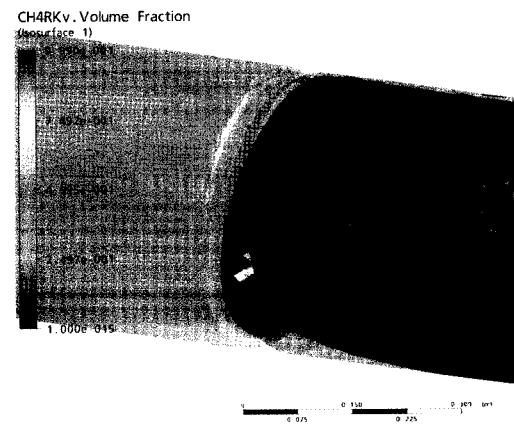
Fig. 4 Valve loss coefficient by flow velocity at each valve opening angle



(a) 2m/s

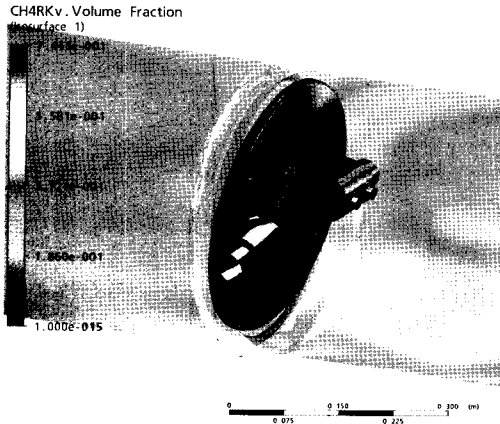


(b) 4m/s

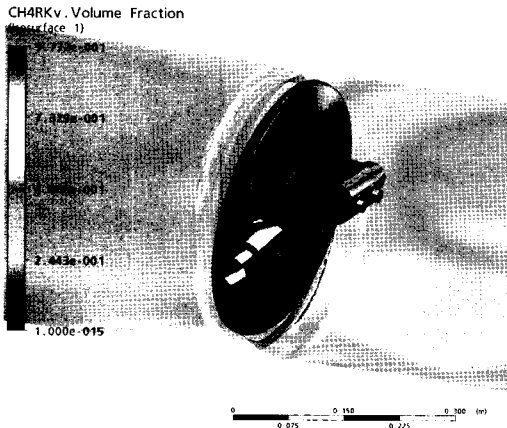


(c) 6m/s

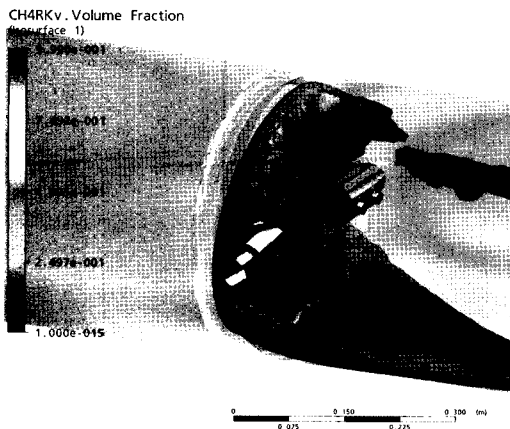
Fig. 5 Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle of $\theta=10^\circ$ ($CH_v=10\%$)



(a) 2m/s



(b) 4m/s



(c) 6m/s

Fig. 6 Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle of $\theta=10^\circ$ ($CH_v=90\%$)

3.3 캐비테이션의 발생 예측

본 연구에서 적용한 LNG 수송용 버터플라이 밸브의 경우 측정 게이지 압력이 4.2 bar로 비교적 높게 유지되기 때문에^[10], 밸브 개도각이 클 경우에는 극저온 액화 메탄의 이송 운전시에 캐비테이션이 발생할 우려가 거의 없다고 판단된다.

그러나, 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 인 경우에는 유동면적의 급격한 감소로 인한 유속의 증가에 의하여 밸브 전·후 압력손실이 크게 발생하게 되며, Fig. 3(a)에서와 같이 유속이 6m/s일 경우 밸브 후방 $0.75D(0.3m)$ 지점에서 압력이 포화증기압보다 낮아지게 되어 캐비테이션이 발생할 가능성이 높아지게 된다.

따라서, 이와 같은 결과에 대하여 캐비테이션모델을 사용한 버터플라이 밸브 내부의 3차원 유동해석을 통하여 유속에 따른 캐비테이션의 발생 현상에 대해서 상세하게 검토하였다.

Fig. 5에서는 밸브 주변부 캐비테이션 발생 결과를 예측하기 위하여 체적분율(Volume of Fraction)상 증기율 10%(액화 메탄 중에 기화된 체적 비율이 10%일 경우)의 메탄을 이용하여 캐비테이션 발생여부를 예측하였으며, 유속이 2m/s에서는 밸브디스크 후면 지지축 하단부의 밸브시트 가장자리에서 매우 좁은 부분에서 증기율 10% 영역이 존재함을 알 수 있으며, 유속이 증가할수록 증기율 10%의 영역이 더욱 증가하여, 유속이 6m/s에서는 밸브시트 후방의 관 벽면 전체에서 증기율 10% 영역을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서는 증기율 90%의 메탄 영역을 이용하여 캐비테이션 발생여부를 검토하였으며, 유속이 2m/s에서는 증기율 90% 영역이 거의 나타나지 않고 있지만, 유속이 4m/s에서는 밸브디스크 하단부에 매우 얇은 띠 모양의 증기율 90% 영역이 발생하고, 유속이 6m/s에서는 밸브시트 후방의 상단부 및 하단부에서 매우 넓은 증기율 90% 영역을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 증기율 10% 영역은 액화 메탄 중에 10%의 체적이 기화된 상태이기 때문에, 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 에서는 유속이 2m/s 부근에서 캐비테이션의 초생점이 존재할 가능성이 매우 높으

며, 유속이 6m/s에서는 증기율 90% 영역이 밸브 후방에서 매우 넓게 분포하기 때문에 충분히 발달한 캐비테이션이 발생할 가능성이 매우 높다고 판단된다.

4. 결 론

LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 내부유동특성을 파악하기 위하여 유입유속 변화에 따른 정상상태의 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에 적용한 극저온 버터플라이밸브에서는 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 인 경우, 협소한 유동면적에 의한 영향으로 작동유체인 액화 메탄이 밸브디스크를 통과하면서 급격한 압력강하를 초래하여 밸브 디스크 주변부에서 캐비테이션 현상이 발생하게 되며, 특히, 입구유속이 6m/s인 경우, 밸브 후방에서 작동유체인 극저온 액화 메탄의 압력이 포화증기압 $P_s=101,300\text{Pa}$ 이하까지 내려가게 되어 캐비테이션이 발생하게 되고, 밸브 후방의 일정거리까지 흘러가더라도 캐비테이션의 영향으로 압력회복이 매우 지연되게 된다.

2. 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 에서 유입유속이 2m/s 부근에서 극저온 액화 메탄의 체적분율상 증기율 10% 영역이 미소영역에서 발생되었기 때문에 캐비테이션의 초생점이 존재할 가능성이 매우 높으며, 유속이 6m/s에서는 증기율 90% 영역이 밸브 후방에서 매우 넓게 분포하기 때문에 충분히 발달한 캐비테이션이 발생할 가능성이 매우 높다.

3. 밸브 개도각 $\theta=10^\circ$ 에서는 유속이 증가할수록 압력손실계수가 증가하고, 밸브 개도각 $\theta=50^\circ$ 에서는 유속이 증가할수록 압력손실계수가 감소하게 된다. 이러한 반대의 결과는 유입속도에 따라서 임의 밸브 개도각에서 압력손실계수에 영향을 미치는 정압과 동압의 비율이 변화하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 윤준용, 이승준, 김은석, “공동현상방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석”, 유체기계 저널, 제7권, 제1호, pp. 9-16, 2004.
- [2] 谷 清人, 平田 泰茂, 大場 利三郎, “バタフライ弁まわりの壊食性渦キャビテーションによる振動およびノイズの挙動”, ターボ機械, 第22巻, 第8号, pp. 479-484, 1994.
- [3] 大場 利三郎, 祖山 均, 谷 清人, 武田 涉, 樋口 二郎, 平田 泰茂, “偏心形バタフライ弁まわりのキャビテーション振動の挙動”, ターボ機械, 第24巻, 第4号, pp. 193-199, 1996.
- [4] K. Eom, “Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16-19, 1988.
- [5] Kazuhiko Ogawa, Takeoshi Kimura, “Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of torque characteristics”, ISA Transaction, Vol. 34, pp. 327-333, 1995.
- [6] C. Sollic, F. Danbon, “Aerodynamic Torque Acting on a Butterfly Valve Comparison and Choice of a Torque Coefficient”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 121, pp. 914-917, 1999.
- [7] M. M. Gerceker, “Tight at Cryogenic Temperatures : High Performance Butterfly Valve for Pipelines with Cryogenic Liquids”, Linde Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 40-42, 2003.
- [8] 설창호, “Cryogenic Butterfly Valve 개발 및 실험”, 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 75-78, 2006.
- [9] 김상완, “LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, 2007.
- [10] 한진해운, “LNG선 현안 실무 자료”, 2002
- [11] ANSYS Inc., “ANSYS CFX Documentation”, Ver. 11, <http://www.ansys.com>, 2007.
- [12] 日本機械學會, “技術資料 流体の熱物性値集”, 1983.
- [1] 윤준용, 이승준, 김은석, “공동현상방지를 위

저 자 소 개



김성동(金聖東)

1964년 3월생, 1986년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1999년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 1999년 한국해양대학교 대학원 박사과정 입학, 1988년~1994년 현대중공업 대리, 1994년~현재 한국선급 재직



김범석(金範錫)

1975년 11월생, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국선급 에너지·산업기술센터 근무



최영도(崔永都)

1970년 6월생, 1996년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2003년 요코하마국립대학 대학원 박사과정수료(공학박사), 1996년~1998년 대우중공업(주) 항공사업본부 사원, 2003년~2006년 요코하마국립대학 대학원 공학연구원 조수, 2006년~현재 한국해양대학교 산학협력단 연구원, 관심분야 : 소수력발전, 해양에너지, 신·재생에너지, 유체기계, PIV, CFD.



이영호(李英浩)

1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986-1989년 일본 동경대학 기계공학과(공학박사), 1980년~현재 한국해양대학교 근무 (기계·정보공학부 교수), 2001.12~2003.6 (재)한국조선기자재연구원 원장(초대), 관심분야 : PIV, 신·재생에너지, 유체기계, CFD, FSI, 수중램제트.