



역류 방지형 초저온 체크밸브의 유동해석에 관한 연구

A Study on the Flow Analysis of Back Flow Prevention Type Cryogenic Check Valve

김재돌*†
 Jae-Dol Kim*†

(Received 01 August 2018, Revision received 01 October 2018, Accepted 01 October 2018)

Abstract: As part of reducing environmental pollutants by recent fossil energy, use of natural gas is gradually increasing. Since the pollution materials generated during combustion as compared to the fossil energy contains less worldwide, LNG consumption has been increasing rapidly. Cryogenic check valves to be used in the LNG carrier are dependent on imports for the total amount so that it needs domestic production. Back flow prevention check valve is located in the flow of the linear fluid. It is opened when the flow direction is forward. When the flow is reversed, the valve is automatically closed by back pressure. A number of studies relating to the shape and internal flow of the check valves have been conducted since they are used in the general industrial applications. However, there are hardly any fluid engineering studies in internal flow field for the case for cryogenic temperature check valves. Therefore, the purpose of this study is obtain the coefficient of flow meter and pressure drop values to develop a check valve for cryogenic back flow prevention for LNG by analyzing the pressure distribution, velocity distribution, and stream line distribution inside the valve through the flow analysis according to the flow rate of the valve. This study also intends to provide the basic design data of the check valve for the cryogenic temperature check.

Key Words : Back flow prevention, Cryogenic check valves, Flow analysis, LNG, Pressure drop

1. 서 론

초저온, 냉동, 선박 등 다양한 분야에서 사용되고 있는 여러 종류의 체크밸브에 대해 오래 전부터 국내외에서 많은 연구가 진행되어 왔다.¹⁻⁵⁾ 국내의 경우, 김 등⁵⁾은 LNG선용 버터플라이 밸브의 유동특성에 관한 연구를 수행하였고, 개도각에 따

른 유동 특성 연구 및 압력 분포와 압력손실 계수를 측정하였다. 또한 디스크 형상에 의한 양력과 항력을 계산하여 밸브의 공력 특성을 정의하였으며, 작은 개도에 의한 압력손실로 인해 발생하는 캐비테이션 현상에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 선박 등에서는 맥동 등의 이상 압력에 의한 배관 계통의 충격을 완화시키는 역할까지 요구됨

*† 김재돌(교신저자) : 동명대학교 냉동공조공학과
 E-mail : Kjd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682

*† Jae-Dol Kim(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Tongmyong University.
 E-mail : Kjd@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1682

에 따라 역류 방지형 체크밸브가 필요한 실증이다.

조 등⁶⁾은 개폐 각도에 따른 볼 밸브에서의 유동해석에 관한 연구를 수행하였으며, 개폐 각도에 따른 볼밸브의 유동특성과 그에 따른 질량유량에 대한 해석을 수행하였다. 또한 김 등⁷⁾은 LNG 및 LNG-FPSO 선박용 안전밸브의 유동특성 및 유출계수에 관한 연구를 통해 안전밸브의 유출계수식을 세우고, 실험을 통해 시뮬레이션과의 값을 비교하여, 양정과 충격과 간의 관계를 밝혔다.

윤 등⁸⁾은 초저온용 스윙체크밸브의 실제 사용을 위한 구조해석 시뮬레이션을 통해 최적의 구조방안을 선정하였고, 실제 구조 시 발생할 수 있는 구조 결함의 위치를 예측하였다. 그러나 국내에서 생산되는 초저온용 역류 방지형 체크밸브의 경우 그 설계가 내부 유동특성에 대한 정량적 해석과 예측기법이 없는 경험에 의존한 설계가 대부분이다.9-10) 이는 밸브 성능 및 안전에 대한 정확한 기준을 제시할 수 없어 과잉설계나 불안을 야기할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 50 A 용량의 역류 방지형 초저온 체크밸브를 다양한 유속 조건을 대상으로 밸브 내부 유체의 유동특성을 수치해석에 의해 파악하여 밸브 설계에 대한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 유동해석

2.1 해석이론

난류 유동장 내부에서 유체의 유동은 다음에 언급되는 식 (1), (2)와 같이 연속방정식, 운동량방정식, 그리고 난류 모델방정식의 영향을 받는다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

그리고 난류 유동의 수치 해석시 통계학적인 처리를 위해 유속성분과 압력성분을 시간평균성

분과 변동성분으로 구성하고 다음과 같이 상기 식을 변화시킨다.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \tag{3}$$

$$p = \bar{p} + p' \tag{4}$$

여기서, \bar{u}_i 와 \bar{p} 는 시간평균속도와 시간평균 압력을 나타낸다. 이것을 이용하여 식 (3)과 식 (4)를 나타내면 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{5}$$

$$\rho \frac{\partial u'_j}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\rho u'_i u'_j} \tag{6}$$

레이놀즈 응력은 난류유동의 특성을 이해하고, 수치해석을 하는데 있어 매우 중요한 항으로 해석학적으로 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 압력과 평균속도는 구할 수 있으나, 레이놀즈 응력은 구할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 난류모델링을 사용하는데, 일반적으로 사용하고 있는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 주유동장에, $k-\omega$ 난류모델을 벽면 근처의 경계층영역의 해석에 사용하는 SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였다. 그리고 정밀한 수치 값을 얻기 위해서는 경계층 영역의 속도 구배를 충분히 모사할 수 있도록 벽면 근처에 격자를 조밀하게 집중시킬 필요가 있으며 영역별로 격자계를 달리하여 해결하였다. 그리고 여러 형태의 밸브에 대한 손실특성을 비교하기 위해 각 밸브의 유량과 압력강하 사이의 관계식을 이용하여 유량계수를 구하였다. 그리고 계산된 유량계수 값은 무차원수가 아니므로 밸브의 크기에 따라 변화하는 값이며, 다른 밸브에 대한 압력강하 특성을 직접 비교하기는 어렵다. 따라서 밸

브사이의 직접 비교를 위해 일반적으로 무차원수인 압력손실계수를 이용하여 계산하였다.

2.2 해석조건 및 모델링

일반적으로 열교환기, 밸브, 펌프, 해상 구조물 등과 같이 유체 유동해석을 진행하는 과정은 해석 모델 3D 모델링, 유동영역 3D 모델링 생성, 유동영역 격자 생성, 경계조건 설정, 유동해석을 수행 후, 그 결과를 검토하여 결론을 도출하는 과정으로 진행된다. 유체가 차지하는 영역인 유동장의 형상을 분석하여 설계에 있어서 검토를 위해 필요한 결과를 예측하고, 실제 유동장과 조건을 검토하여, 실제의 시스템을 형성하는 경계조건 및 해석조건을 파악한다. 이러한 사전의 검토를 거친 후, 제시된 도면을 기초로 하여 3D 모델링 작업과 격자 생성(grid generation)을 수행하여 실제 해석하고자 하는 모델을 생성하고, 수치연산을 수행하여 결과를 얻으며, 이렇게 얻은 결과는 이론적 검토를 거쳐 추후 필요시 추가적인 모델의 변경이나 경계조건의 변경을 통해 재해석 하는 과정을 거친다.

본 연구에서는 50 A 역류 방지형 체크밸브를 대상으로 유체의 유속에 따른 밸브 내부 유체의 유동장과 유량계수를 분석하였다. 해석은 ANSYS

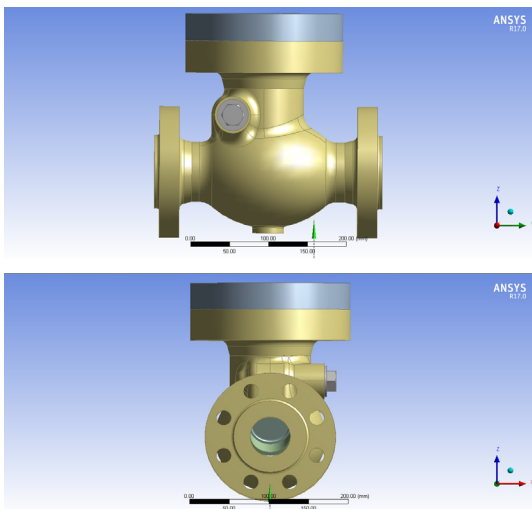


Fig. 1 Front and side view of 3D modeling of 50 A check valve

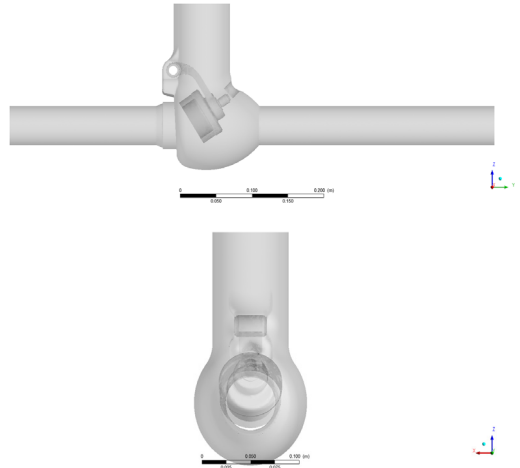


Fig. 2 Front and side view of flow domain of 50A check valve

V12.1을 이용하여 해석을 수행하였으며, 작동유체는 물(water)을 대상으로 하였고, 부하조건(load condition)은 밸브가 완전히 개방된 상태(full open)에서 유속을 2, 4, 8 m/sec를 대상으로 실시하였다.

Fig. 1, 2는 50 A 밸브의 정면 및 측면의 3D 모델링과 유동장 형태를 나타낸다.

2.3 유동영역 격자 구성 및 경계조건

유동 해석 시 격자는 높은 유속의 난류의 경우 그 형태나 밀집도, 품질이 해석 결과의 신뢰성과 수렴에 영향을 주게 되므로 중요한 요소 중 하나이다. 즉 해석하고자 하는 모델에 따라 매번 수정이 필요하며, 특히 몇 가지 변수에 의한 영향을 분석하고자 하는 연구의 경우, 거의 동일한 품질의 격자를 생성하여야 그 결과 데이터의 비교에 신뢰성을 가지게 된다.

본 연구에서는 밸브의 내부에서 발생하는 내부 유동 현상 및 열전달, 내부 유체간의 충돌로 인해 발생하는 매우 빠르고, 불안정한 양상을 구현하기 위하여, 우수한 품질의 격자를 생성할 수 있는 ICEM-CFD 프로그램을 사용하였다. 그리고 해석의 정확도를 고려하여 특히 빠른 유속과 활발한 유동이 구현되는 영역의 경우, 다른 영역에 비해 조밀한 격자 조건을 부여하였다. 유체와 고체가

접하는 부분에서는 프리즘 격자(prism mesh)를 생성하여 경계층의 형성 및 이탈에 따른 와류동의 생성을 충분히 모사할 수 있도록 한 비정렬(hydro unstructured) 격자 구조를 생성하였다.

본 수치해석은 작동유체가 체크밸브의 복잡한 유로를 통과하면서 발생하는 내부 유체의 압력 및 속도 변화를 확인하기 위한 조건으로서 Fig. 3 과 같이 표면 격자를 구성하고, Table 1과 같은 조건에서 실시하였다.

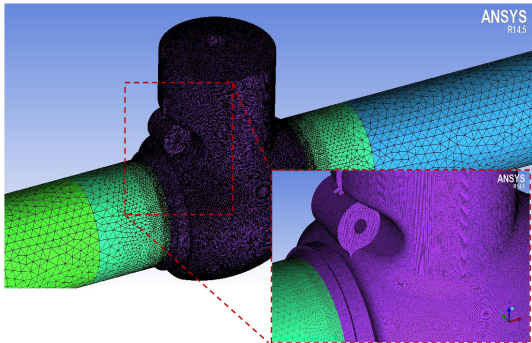


Fig. 3 Surface mesh image of flow domain of 50 A

Table 1 Boundary condition for flow analysis

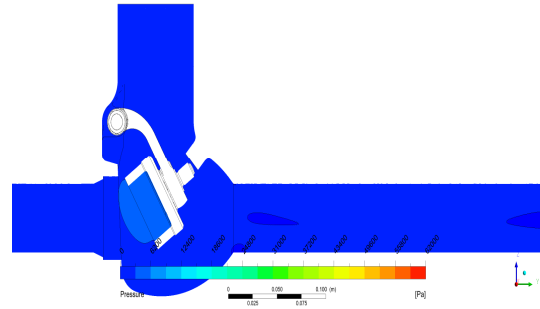
Computational condition	Steady
Turbulent model	SST
Working fluid	Water
Flow rate	2, 4, 8m/s (50A Model)
Outlet condition	0 Pa
Boundary condition	No Slip Condition

3. 해석결과 및 고찰

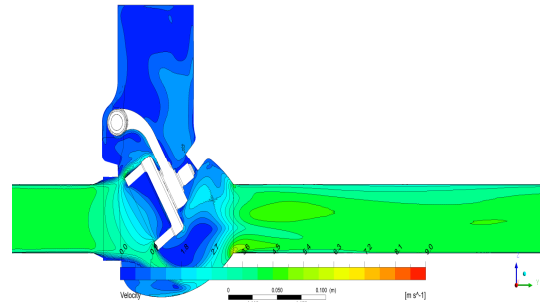
3.1 압력 분포

Fig. 4는 50A 체크밸브의 완전 개방상태에서 유속을 2, 4, 8 m/sec로 변화한 경우, YZ 영역에서의 압력분포를 나타낸 결과이다.

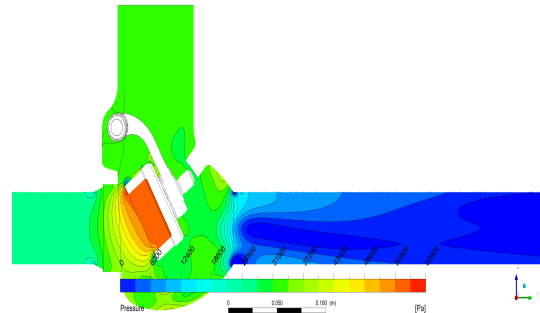
해석 결과에서와 같이 밸브가 완전 개방된 상태에서는 입구 유속이 증가함에 따라 밸브 내부



(2 m/sec)



(4 m/sec)



(8 m/sec)

Fig. 4 Distribution of pressure in YZ plane

체크 디스크에 미치는 압력이 급격히 증가함을 알 수 있다. 해석 결과 값으로 유속이 2, 4, 8 m/sec의 경우 입·출구 영역에서의 압력강하는 대략 1,839, 6,554, 24,910 Pa로 유속이 증가함에 따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 속도 분포

Fig. 5는 50 A 체크밸브의 완전 개방상태에서 유속을 2, 4, 8 m/sec로 한 경우, YZ 영역에서의

속도분포를 나타낸 결과이다. 해석 결과에서와 같이 속도분포 또한 압력분포에서와 같이 유속이 증가함에 따라 밸브 입출구에서 높게 나타나고 있으며, 체크 디스크를 통과하는 과정에서는 유속에 관계없이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

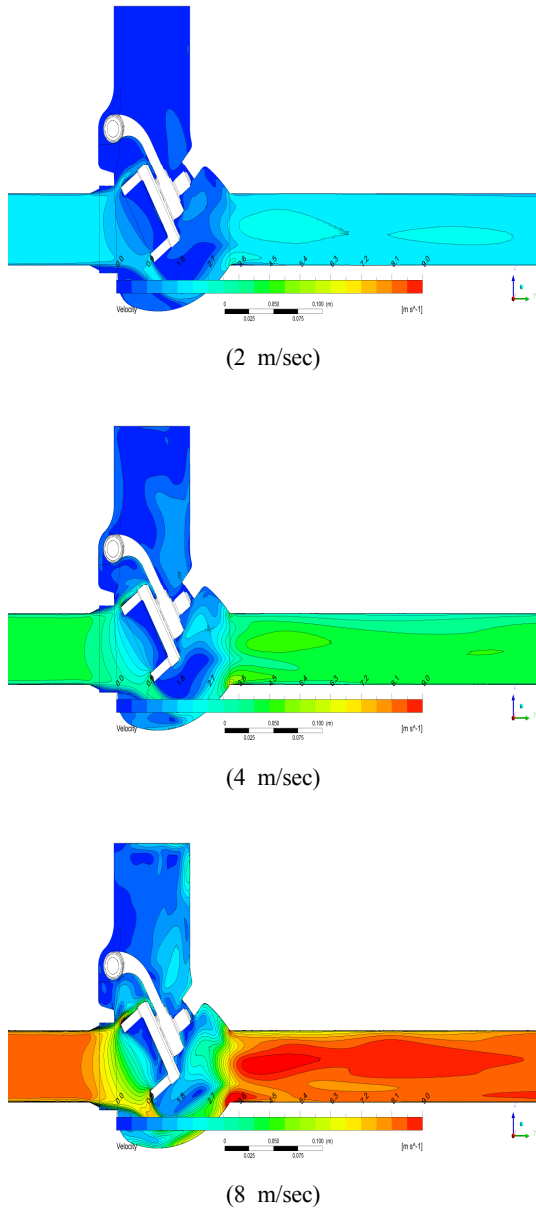


Fig. 5 Distribution of velocity in YZ plane

3.3 유선 분포

Fig. 6은 동일한 조건에서 유속을 2, 4, 8 m/sec로 한 경우, YZ 영역에서의 유선을 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 상기 압력 분포나 속도 분포에서와 같이 관내 유속이 증가함에 따라 유선의 흐름은 강하게 발달되고, 체크 디스크부분에서는 아랫부분에 강하게 발달되고 있음을 알 수 있다.

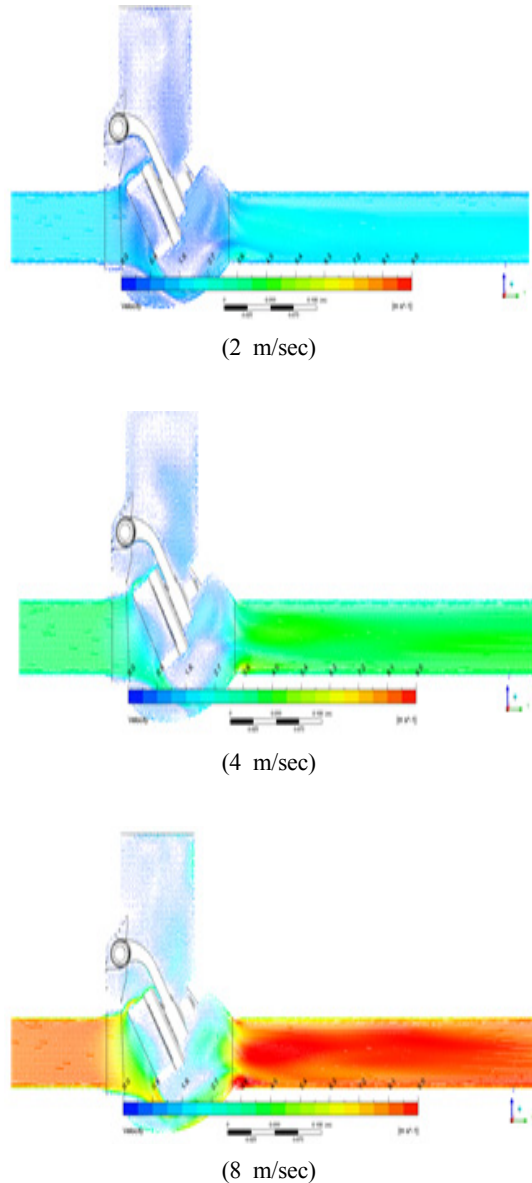


Fig. 6 Distribution of stream line in YZ plane

4. 결 론

역류 방지형 초저온 체크밸브 설계를 위한 유동해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 밸브를 완전 개방한 상태에서 유속이 증가함에 따라 체크 디스크 전후의 압력차가 크게 발생되고, 속도 및 유선 분포가 강하게 발생되었다.

2) 내부 유동해석을 통해 유속변화에 따른 체크 밸브의 입·출구 유체의 차압과 유량을 확보할 수 있는 설계 및 형상의 변경 값을 얻을 수 있었다. 이때, 가장 기본적인 완전 개방상태에서 작동유체를 물론 한 경우, 대략적인 밸브의 유량계수 값을 얻을 수 있었다.

3) 본 해석의 결과는 밸브의 용량계수 시험방법 (KS B 2101)에 의거하여 시험 설비를 구성하는 밸브와 기타 배관의 배치를 통하여, 시험을 수행한 뒤 본 해석 결과와 비교 분석을 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 추가적인 구조해석을 통하여 구조 안전성을 평가하기 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2017년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2017A020).

References

1. J. G. Eleftherakis, 1991, "Determining Valve Contaminant Sensitivity Effect Using Two Contaminants", SAE TP 910960, pp. 459-464.
2. G. A. Thompson, 1986, "Air Leak Detection Through Ball Plug Valves by Vibration Monitoring", Noise & Vibration Control Worldwide, Vol. 17, pp. 140-143.
3. G. S. Choi, 2005 "Growth and Challenges of

Shipbuilding Industry on Korea", Korea Shipbuilding Association.

4. ANSYS Inc., 2004, "ANSYS Fluent Documentation," Ver. 15, Waterloo, Ontario, Canada.
5. S. Y. Kim and Y. D. Choi, 2008, "A Study on the Flow Characteristics of Butterfly Valve for LNG Ship", Journal of the Korean Society of Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 2, pp. 20-28.
6. J. E. Cho and M. S. Han, 2011, "A Study on the Flow Analysis of Ball Valve according to Opening and Closing Angles", Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 46-51.
7. S. J. Kim, S. Y. Jung, D. J. Kim and C. Kim, 2011, "Study on Flow Characteristics and Flow Coefficient of Safety Valves for LNG / LNG-FPSO Ship", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 5, pp. 487-494.
8. J. I. Yoon, J. H. Moon and H. C. Soon, 2015, "Characteristics of Solidification Analysis of Backflow Prevention Check Valve", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 69-74.
9. C. H. Hong, H. S. Choi, J. U. Park and J. W. Kim, 2008, "Study on the Internal Flow Analysis of Cryogenic Valve for LNG Carrier", Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 330-336.
10. S. Y. Jeon, C. G. Kim, T. K. Oh and J. Y. Yoon, 2011, "Performance Evaluation of Upper Insertion Type Ball Valve by Flow Analysis and Structural Analysis", Journal of Fluid Machinery Research, pp. 1-2.