

냉열발전을 위한 극저온 체크밸브의 유동해석 Flow Analysis of Cryogenic Check Valve for LNG

문정현**
Jung-Hyun Moon**

(Received 30 December 2015, Revision received 14 January 2016, Accepted 15 January 2016)

Abstract: Swing check valve is opened when the flow direction is forward, when the flow is reversed, the valve is automatically closed by back pressure. In this study, the internal flow field analysis of the valve was conducted by Fluent. The working fluid used in the study, using liquefied methane $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CH_4) and velocity field, pressure field, pressure drop coefficient were simulated by varying separately the opening divergence into four intervals from 0 to 100%. The approximate research result are as follow : When the opening divergence is smaller, it appears high pressure on the upstream side, this value is relaxed when the opening divergence is large. Flow rate coefficient of the valve shows a larger value as the degree of opening becomes larger, confirming that the check valve used in the study is in the effective flow rate counting range.

Key Words : Cryogenic, LNG, Swing Check Valve, Flow Analysis, Flow Coefficient, Pressure Drop Coefficient

1. 서 론

LNG 천연가스는 화석에너지에 비해 연소 시 발생하는 공해물질이 적게 포함되어 있으므로 세계적으로 사용량이 급증하고 있는 추세이며, 현재 아시아 국가에서도 이러한 LNG 천연가스의 장점 때문에 사용량을 늘리고 있는 추세이다. LNG의 이송 시 효율을 높이기 위해 기체 LNG의 1/600 부피로 액화 및 압축시키며 이 때 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 액화 LNG를 운반하기 위해 초저온 밸브를 필요로 한다. LNG의 액화온도는 극저온 상태이며 그 이송 및 저장을 위해서는 밸브 및 배관장치에서 충분한 기밀유지와 내구성 및 안정성이 요구된다.

체크밸브는 유로 내에 설치되어 유체의 움직임에 의해 자력으로 개폐되는 유일한 밸브이며 간단한 구조 및 사용의 편리성으로 일반 산업현장에서 가장 많이 사용되는 밸브이다. 그러나 국내의 초저온 체크밸브에 관한 연구는 개발단계로 여러 체크밸브에 관해 많은 연구가 이루어져 왔으나¹⁻³⁾ 스윙체크밸브의 내부유동에 관한 연구는 거의 전무한 실정이며 현재 LNG 운반선 등 관련 사업에 소요되는 일부 초저온 밸브는 전량 수입에 의존하고 있다.

따라서 본 연구에서는 극저온 LNG용 스윙체크밸브의 유동해석을 통해 밸브 설계 시 요구되는 유량계수 및 압력강하계수 데이터를 제공하고자 한다.

*† 문정현(교신저자) : 선박해양플랜트연구소 해수플랜트 연구센터

E-mail : moonjh@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5028

*† Jung-Hyun Moon(corresponding author) : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center

E-mail : moonjh@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5028

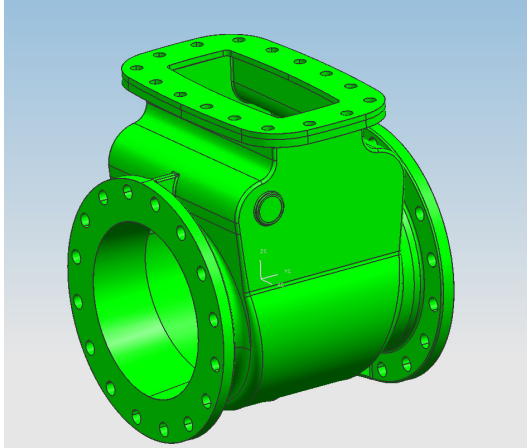


Fig. 1 3D modeling of cryogenic check valve

2. 체크밸브의 모델링

Fig. 1은 본 연구에 이용된 극저온용 스윙체크 밸브의 Body 부분 모델링이다. 연구에 사용된 밸브의 주요 부품으로는 밸브의 외부 형상을 이루는 Body와 Bonnet, 밸브 내부의 유량을 조절하는 Disk와 Disk arm이 있으며 용이한 해석을 위하여 나머지 부품, 볼트 및 핀의 처리는 생략하였다.

밸브의 사이즈는 300A이며 LNG 성분의 거의 대부분을 차지하는 -162°C 의 극저온 액화메탄 (CH_4)을 유체로 사용하기 때문에 밸브의 재질은 Steel 계열의 SUS304를 사용하였다.

3. 유동해석

3.1 유동장 모델링 및 경계조건

체크밸브의 유동해석은 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUNT를 사용하였다. Fig. 2는 밸브 디스크 개도율을 25~100%까지 4개의 단계에 따라 변화시켰을 때의 형상을 나타낸 것이다. 밸브의 성능해석을 위해서는 개도율에 따른 유량계수에 대한 평가가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 디스크가 완전히 닫혔을 때의 개도각을 0° 로 하고 개도각이 모두 열렸을 때를 56° 로 하여

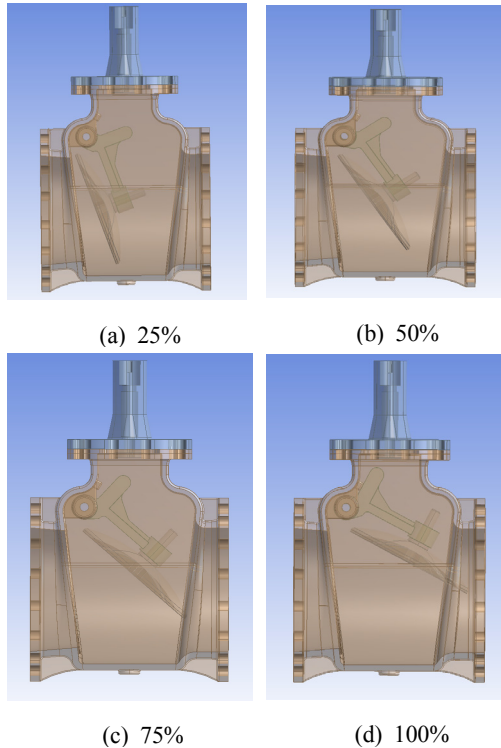


Fig. 2 Feature of the valve following opening divergence

각 개도각에 따른 연구를 수행하여 유량계수 및 압력강하계수를 계산하였다.

Table 1 Flow analysis condition of check valve

| Variable | Value |
|---|-------|
| Working Fluid | CH4 |
| Inlet Temperature($^{\circ}\text{C}$) | -162 |
| Inlet Velocity(m/s) | 4 |
| Flow rate(m ³ /hr) | 1,000 |

Table 1은 연구에 사용된 조건 값이다. 본 연구의 경우 직경 300mm의 배관으로 약 1,000m³/hr의 액화메탄을 이송하기 때문에 완전 개방 시 밸브 내부의 유속은 4m/s가 되어야 한다. 따라서 개도에 상관없이 계산을 위한 유속은 4m/s로 설정하였고 배관 내부 압력은 실제 사용을 고려하여 1,000kPa로 설정하였다.

3.2 격자생성

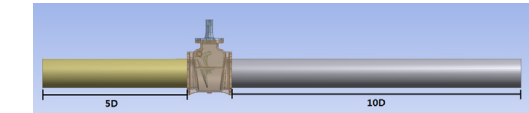
Fig. 3의 (a)에는 밸브의 Body 부분 및 배관을 나타내었다. 밸브 시트의 상류에서 밸브 내부로 들어오는 유체의 안정된 완전 발달 조건을 만족하도록 5D(=1.5m)의 배관길이를 설정하였다. 마찬가지로 밸브 디스크를 지난 이후 순환유동이나 역류 등에 의해 생성된 교란된 유동장이 충분히 안정될 수 있도록 밸브 시트의 하류에는 10D(=3m)의 배관길이를 설정하였다. 유동해석을 위해서는 밸브 내부의 유로부만을 추출하여 모델링 하여야 하며 Fig. 3의 (b)는 밸브시트 상하류의 배관 및 밸브 내부의 모습이다. Fig. 3의 (c)에는 개도가 14°일 때의 계산격자를 나타내었으며 계산격자는 밸브 및 배관에 대하여 작성하였다. 계산격자를 작성할 때 밸브부의 형상이 복잡한 관계로 HEXA 격자를 생성하는데 어려움이 발생하여 형상의 제한 없이 격자를 생성할 수 있는 TETRA 격자로 구성하였다. Node와 Cell의 개수는 개도율에 따라 약간의 상이하나 초기 유량을 동일하게 두었기 때문에 전체 격자의 수는 크게 차이 나지 않으며 각 개도율에 따라 약 58만개의 Node와 300만개 정도의 Cell로 구성이 되어 있다.

3.3 속도장분포

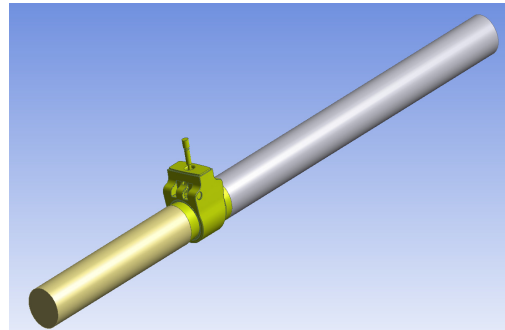
위의 해석조건을 바탕으로 각 개도조건에 대한 유동해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 4는 개도가 14°일 때의 유동장 형태이다. 유체는 밸브 상류측에서 발달하여 디스크를 통과하며 밸브 내부 상하 유동면적 차에 의해 디스크 아래쪽에서 가속되어 하류측 배관의 상단으로 유동이 형성된다. 상대적으로 유동저항이 적고 면적이 큰 디스크의 하단부로 더 많은 유체가 유입되며 이때의 국부적인 최고속도는 22.81m/s에 달한다. 이후 밸브 디스크의 좁은 유로를 통과한 유체는 디스크 상단의 유동박리 된 유체와 와류를 형성하며 하류로 흐르게 된다.

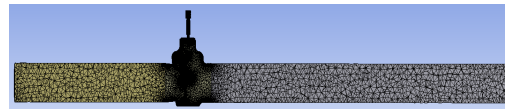
개도가 커짐에 따라 디스크 하부의 면적이 커져 유입 유체가 많아지며 개도가 28°일 때 및 42°일 때 각각 14.02m/s와 10.38m/s로 국부적 최고속도는 줄어드나 전체적인 흐름의 경향은 유사하다.



(a) Feature of check valve and piping



(b) Computational area



(c) Calculation grid of the valve and circular pipe

Fig. 3 Feature of the valve and pipe for calculation

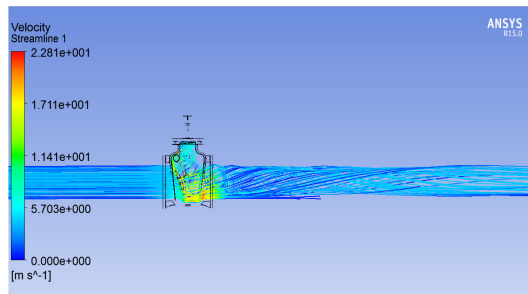


Fig. 4 Flow field following disk divergence 14°

개도가 56°일 때 밸브가 100% 완전히 열린 유동을 하며 밸브 디스크의 상, 하류에 거의 일정한 유속분포를 보이며 국부적 최고속도는 7.86m/s로 나타났다.

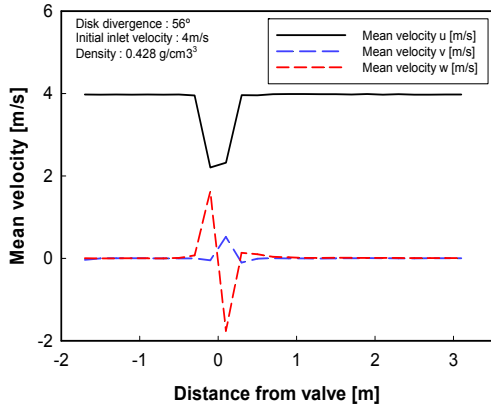


Fig. 5 Mean velocity of cross section for disk divergence 56°

Fig. 5는 개도각이 56°일 때 밸브의 위치를 0으로 보았을 때 상류 및 하류의 성분별 횡단면의 평균 유속분포를 나타낸 평균유속 그래프이다.

밸브 시트로 유체가 유입되며 흐름방향인 x축의 전체유속은 크게 감소하며 밸브 디스크를 지난 이후 다시 속력을 회복하는 모습을 보인다. 유체가 밸브로 유입될 때 밸브의 Body에서 y 및 z축 성분의 급격한 발생 및 변화를 볼 수 있는데 이는 디스크로 유입되며 유체가 복잡한 형상을 지나가며 와유동이 발생함을 나타낸다. 이러한 와유동은 유체가 관성력으로 인해 박리를 일으켜 만드는 재순환 영역에 의해 발생하는 것이다.

성분별 횡단면 평균 유속 또한 개도에 따라 유사한 경향을 나타내나 개도율이 커질수록 y 및 z축의 유동이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 개도가 커지며 디스크의 상단부로 유입되는 유량이 많아지며 나타나는 모습으로 보인다.

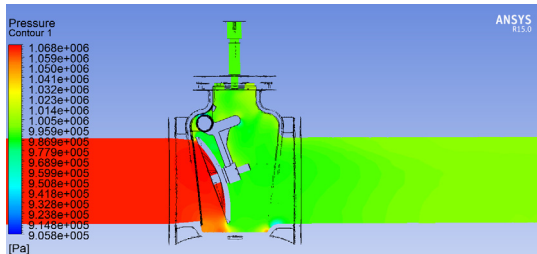


Fig. 6 Pressure field following disk divergence 14°

3.4 압력장분포

속도장 분포에 관한 분석 이후 압력장 분포에 대한 분석을 수행하였다. 스윙체크밸브는 디스크를 지나기 전 그 형상에 의해 유체의 blockage가 발생하게 되어 동압은 작아지고 상대적으로 정압이 커지게 된다. 또한 디스크를 통과하며 유로가 좁아져 동압은 커지며 정압은 작아지게 된다. 즉, 디스크 통과 전 압력은 높으며 디스크를 지나며 압력은 낮아지고 속력은 증가하게 된다.

Fig. 6에는 밸브 디스크 전, 후의 압력분포를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯 개도가 작을 때 밸브 디스크에 의해 폐색된 유로의 단면적이 크기 때문에 디스크 상류측의 압력이 높게 나타난다. 디스크를 지나며 좁아진 유로로 인해 유속이 급격히 증가하며 디스크 하단부의 압력강하가 크게 나타난다.

개도율이 커지며 디스크 전단의 정압이 감소하는 경향을 보이는데 이는 폐색된 단면적의 크기가 감소하며 유로가 확장되어 나타나는 현상이다.

Fig. 7은 개도율에 따른 밸브 전, 후 배관에서 압력분포를 나타낸 그래프이다. 앞서 설명한 바와 같이 개도율이 낮을 때 디스크 상류측의 정압이 높게 걸리며 디스크를 지날 때 압력강하의 크기도 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

개도가 14°일 때 밸브에서의 압력강하량은 약 80kPa이며 개도가 28°, 42°, 56°일 때 압력강하량은 각각 25kPa, 12kPa, 1kPa로 개도가 커질수록

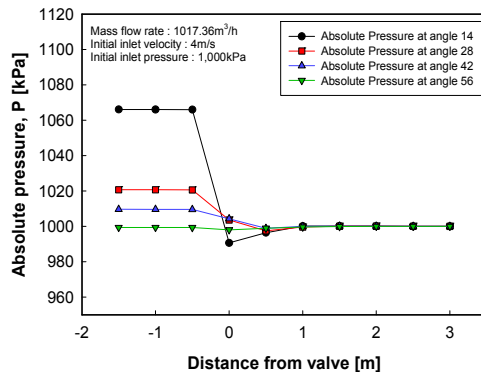


Fig. 7 Absolute pressure distribution by various opening angles

작은 압력강하량을 보였으며, 4개의 개도율 모두 유로의 하류측에서는 1,000kPa의 압력을 회복하는 모습을 보였다.

3.5 유량계수

스윙체크밸브의 경우 밸브 선정에 영향을 주는 주요 수치적 특성은 밸브에 의해 일어나는 압력강하량이다. 체크밸브에서의 압력강하량을 줄여야만 다른 계통에서의 에너지가 보존되기 때문에 밸브에서의 압력강하를 줄이는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 여러 가지 같은 지름의 밸브 간 손실 특성을 비교하기 위하여 다음과 같은 식을 통해 밸브의 유량과 압력강하 사이의 관계식인 유량계수를 정의하였다.⁴⁾

$$C_v = 1.167Q\sqrt{\frac{1}{\Delta P}} \quad (1)$$

이 때 상수 1.167은 영국단위계의 유량계수를 국제단위로 변환하며 생성된 값이다. 계산 시 ΔP 는 안정적인 값을 얻기 위해 밸브의 상류 0.75D(=0.225m) 및 밸브 하류 6.75D(=2.025m) 지점의 압력차를 사용하였다.

유량계수의 값은 디스크가 완전히 열릴 때 까지 서서히 변화하며 개도율이 커질수록 유량계수의 값 또한 커지는 경향을 보인다.

유량계수의 값을 계산하여 보았을 때 개도가 14°일 때 146.33, 56°일 때 1153.17의 값을 나타내

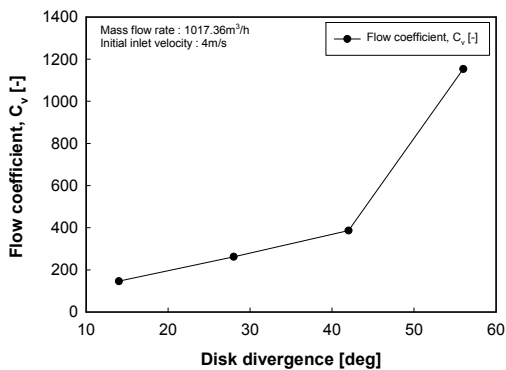


Fig. 8 Flow coefficient of swing check valve following disk divergence

며 일반적인 밸브의 유량계수 범위 내에 들어 있는 것을 확인하였으나 개도가 42° 이상이 되며 유량계수의 증가폭이 커짐을 볼 수 있다. 이는 밸브의 개도율로 유량을 조절하는 것에 어려움이 있다는 것을 나타내며 따라서 본 연구의 스윙체크밸브의 경우 유량제어의 목적보다 유로 개폐의 목적에 더 적합함을 알 수 있다.

3.6 압력강하계수

유량계수 값은 무차원 수가 아니므로 같은 밸브가 같은 지름의 크기가 아닐 시 직접적으로 압력강하 특성을 비교하기는 어렵다. 따라서 무차원수인 압력손실계수를 다음과 같은 식으로 정의하여 사용하였다.

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

밸브 내부에서 속도 V는 입구에서의 속력을 사용하였다.

Fig. 9에 개도에 따른 압력 손실계수의 값을 그래프로 나타내었다. 밸브의 개도가 14°일 때 약 4,900의 큰 값을 나타내며 점차적으로 줄어 28°에서 약 1,500, 42°에서 약 700 정도의 값을 보이다가 개도가 완전히 열린 56°에서는 80 정도로 매우 작은 값을 나타낸다.

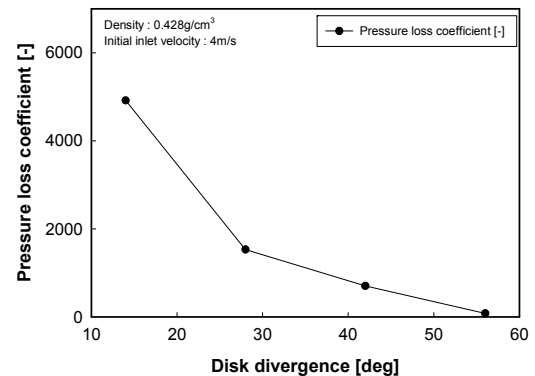


Fig. 9 Pressure loss coefficient of swing check valve following disk divergence

4. 결 론

본 논문에서는 개도율에 따른 극저온 액화 LNG용 스윙체크밸브의 유동해석을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 개도에 상관없이 밸브를 지난 유체는 디스크 끝단부에서 좁아진 유로에 의해 매우 빠르게 빠져나가며 개도가 14°일 때 국부적인 최고유속은 22.81m/s로 나타남

(2) 개도각이 작을수록 디스크 상류측에 높은 정압이 걸리며 개도가 열릴수록 상, 하류측 압력 차이가 줄어듦

(3) 밸브의 유량계수는 개도율이 커질수록 점차 큰 값을 나타내며 42° 이상에서는 증가폭이 커져 유량조절의 목적보다 유로 개폐의 목적에 더 적합함을 확인

(4) 압력손실계수는 개도율이 작을 때 매우 큰 값을 나타내었으나 개도가 증가하며 밸브 상, 하류측 압력차이가 줄어들며 매우 작은 값을 나타내어 LNG용 밸브로 사용이 적합함을 확인

(5) 본 연구 결과는 냉열온도차발전의 기초자료로 사용될 예정

후 기

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 “해수-미활용열 이용 온도차발전 및 담수화

기초성능평가 기반구축” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

1. C. H. Hong, H. S. Jo, J. W. Park and J. W. Kim, 2008, “A Study on the Inner Flow Analysis for Cryogenic Globe Valve in LNG Ships”, The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 330-336.
2. S. W. Kim, Y. D. Choi, B. S. Kim and Y. H. Lee, 2008, “Flow Characteristics of Cryogenic Butterfly Valve for LNG Carrier (Part 2 : Flow Characteristics under Cryogenic Condition)”, KOREAN SOCIETY FOR FLUID MACHINERY, Vol. 11, No. 2, pp. 20-28.
3. J. U. Cho and M. S. Han, 2011, “A Study on Flow Analysis at Ball Valve according to Opening and Shutting Angle”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 46-51.
4. S. Y. Jeon, C. K. Kim, K. T. Oh and J. Y. Yoon, 2011, “Performance Evaluation of Top Entry Ball Valves using Numerical Analysis”, KOREAN SOCIETY FOR FLUID MACHINERY, pp.1-2.