

LNG 선박용 배관에 사용되는 Butterfly Valve의 구조 안정성 평가에 관한 해석 기법

박영철*, 박한석**, 김시범#

Analysis method on Structural Safety Evaluation of Butterfly Valve of Piping for LNG carrier

Young-Chul Park*, Han-Seok Park**, Si-Pom Kim#

ABSTRACT

A cryogenic butterfly valve is used to transfer the liquefied natural gas (LNG) which temperature is -162°C . This valve is core part in the piping system using LNG. This paper performed coupling analysis using FEM to evaluate safety of cryogenic butterfly valve. Flow analysis is calculated numerically the CAE and CFD methods are useful to predict the thermal matter and the inner flow field of the valve. Thermal analysis and structural analysis used ANSYS Workbench.

Key Words : Cryogenic(극저온), Thermal analysis(열해석), Butterfly valve(버터플라이밸브), Flow analysis(유동해석), Structural analysis(구조해석), Coupling analysis(연성해석)

1. 서 론

천연가스 (Natural Gas)는 일반적으로 천연에서 산출되는 가연성 가스로, 탄화 수소류를 주성분으로 하는 가스를 말한다. 천연가스의 주요 성분인 메탄(CH₄)가스는 석유의 연소 시 발생하는 이산화탄소 및 아황산가스등과 같은 공해물질의 함량이 적기 때문에 석유의 대체에너지로 각광 받고 있다. 그러나 천연가스는 기체상태 이므로 많은 양을 한 곳에 저장하는 데에는 어려움이 있고, 또한 수송 문제에 있어

서도 파이프라인을 통한 원거리 운반법에는 대량수송에의 한계가 있다. 최근에는 이런 단점들을 극복하기 위한 천연가스 액화 기술이 도입되어 대량저장과 원거리 대량수송 두 가지 문제를 동시에 해결해 주고 있다. 이처럼 천연가스를 극저온에서 액화시킨 액화 천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)의 운반, 저장 및 제어하는 설비의 수요도 비약적으로 증가하게 되었다. 이에 따라 많은 새로운 설비에 대한 기술개발 문제가 많이 요구되고 있고, 특히 그중 운반대상인 LNG가 요구하는 극저온 환경에서의 구조물에 대한 안정성평가 문제가 가장 중요한 문제로 대두되고 있다.^[1]

그 중 본 논문에서는 LNG 선박용 배관 핵심 기구체인 초저온 버터플라이 밸브 (Cryogenic Butterfly Valve)의 초저온환경에서의 구조적 안전성과 열응력

* 동아대학교 기계공학과

교신저자 : 동아대학교 기계공학과

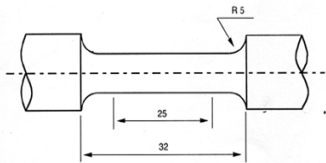
E-mail : spkim@dau.ac.kr

** 동아대학교 대학원 기계공학과

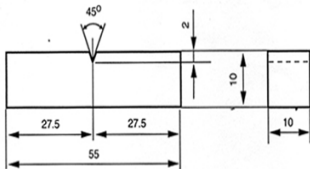
분포 및 변형 등을 수치적으로 해석하여 제품에 대한 안전성 및 신뢰성평가의 자료로 제시하고자 한다.

2. 소재검토

LNG 선박용 초저온 버터플라이 밸브는 유체의 특수성과 저온, 고압의 상태에서 사용되어지므로 이런 환경에서 파괴나 누설이 일어나지 않고 안정적으로 작동될 수 있도록 하는 것이 무엇보다 중요하다.^[2] 이러한 조건을 만족하기 위해 밸브의 주요부품은 고강도의 안정된 물성을 가져야 한다. 따라서 밸브의 안정성 검토에 앞서 재료에 대한 검토를 수행하였다. 재료검토를 위해 상온과 -196°C 에서 재료에 대한 인장시험 및 충격시험을 수행하였다. 본 연구에서는 재료를 CF-8M으로 정하여 시험을 수행한 후 목표치와 비교하여 소재에 대한 검토를 하였다. 인장 및 충격 시험의 시험편을 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 각 시험의 시험결과를 목표치와 비교하여 Table 1에 나타내었다.



(a) Geometry of tensile test specimen



(b) Geometry of impact test specimen

Fig. 1 Geometry of specimens

Table 1에서 보는바와 같이 상온과 저온에서 이루어진 인장 및 충격시험 결과 모두 목표치를 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서 CF-8M 소재를 이용하여 밸브 주요부품의 안정성 평가를 수행 하였다.

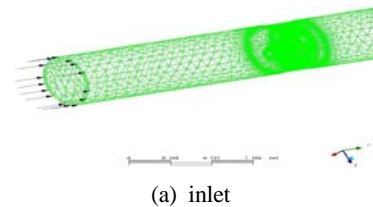
Table 1 Result of experiment

	Normal Temperature(25°)			
	Y.S (Mpa)	T.S (Mpa)	Elon Gation (%)	Charpy (J)
Target	205	485	30	45
Result	331	587.1	61	266
	-162°			
	Y.S (Mpa)	T.S (Mpa)	Elon Gation (%)	Charpy (J)
Target	205	485	30	45
Result	627	1388	66	182

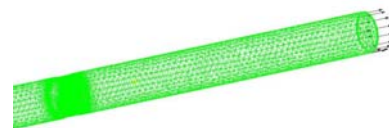
3. 해석 방법

3.1 유동해석

LNG 선박용 버터플라이밸브 (Butterfly Valve)의 유동해석을 위해서 상용해석프로그램인 Ansys CFX 10.0을 이용하였다^[3]. 해석 모델은 밸브의 입구쪽을 디스크(Disc) 직경의 5 배, 출구쪽을 디스크 직경의 10 배로 설정하여 유동영역을 모델링 하였다. 이때 출구쪽을 보다 길게 설정한 이유는 유체가 디스크를 지나 교축현상에 의해 비정상 유동특성을 보이므로 정상유동을 하기까지의 긴 유동영역을 확보 한 것이 라 할 수 있다.^[4]



(a) inlet



(b) outlet

Fig. 2 Boundary condition of flow analysis

Fig. 2는 밸브의 유동해석을 위한 유동장과 경계조건을 나타낸 것이다. 해석모델의 내부온도는 사용유체 LNG의 온도인 -162°C 를 설정하였다. 경계조건을 살펴보면 입구조건으로 유체의 유입속도 3 m/s 를 설정하고, 출구조건으로 압력 0 kgf/cm^2 를 설정하였다. 또한 유체가 흐를 때 난류 거동을 하므로 난류옵션을 설정하여 해석을 수행하였다.

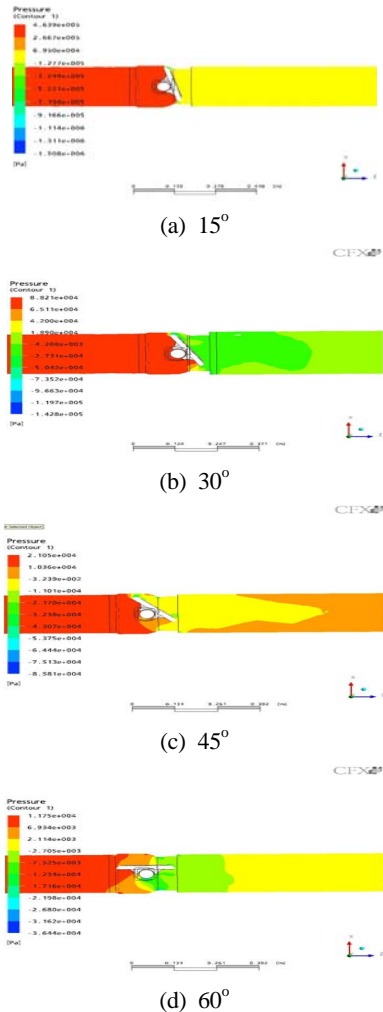


Fig. 3 Pressure distributions

Fig. 3에 Disc의 개폐각도에 따른 압력분포 결과를 나타내었고, Fig. 4는 개폐각도에 따른 속도분포 결과

를 나타낸 것이다. 그리고 그 결과를 Table 2에 수치로써 정리하여 나타내었다.

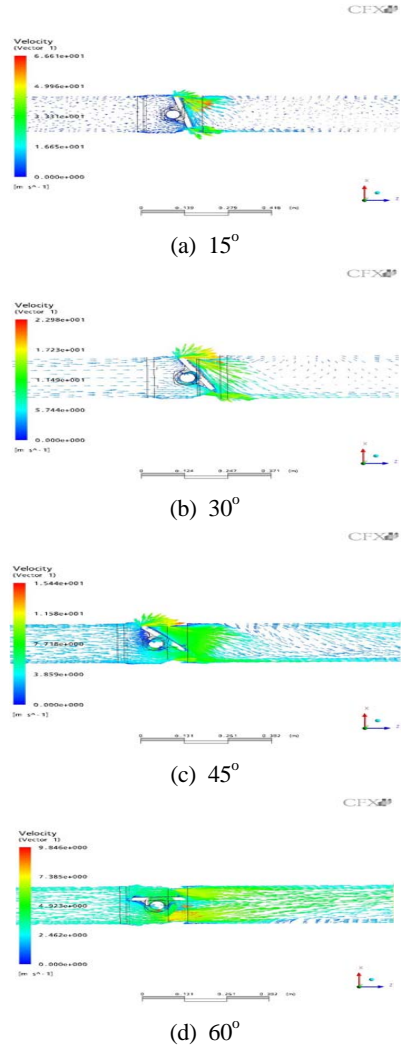


Fig. 4 Velocity vector distributions

Table 2에서 보듯이 Disc의 열림 각도가 15° 일 때 최대압력이 작용하고, 열림 각도가 커질수록 압력이 낮게 나타난다. 이는 Disc의 열림 각도가 작을수록 교축현상과 급 확산류 등의 비정상 유동 현상이 많이 발생하기 때문이다.^[5] 또한 유동해석의 결과를 통해 Disc가 개폐되어 유량이 많이 흘러가는 Disc의 윗부분에서 낮은 압력이 발생함을 알 수 있다.

Table 2 Result of flow analysis

Open value	Max. Pressure (MPa)	Max. Velocity (m/s)
15 °	0.464	66.61
30 °	0.088	22.98
45 °	0.021	15.44
90 °	0.012	9.85

3.2 열응력 해석

LNG 선박용 버터플라이 밸브는 초저온의 유체와 상온인 밸브 외부와의 온도차에 의해 열응력이 발생하게 된다. 이러한 열응력은 밸브에 큰 영향을 미치므로 LNG 선박용 버터플라이 밸브의 구조안정성 평가를 위해 반드시 수행 되어야 한다. 열응력 해석을 수행하기 위하여, 밸브가 닫혔을 경우와 열렸을 경우 각각의 개폐각도마다 모델링을 실시한 후, 각각의 환경에 따른 경계조건을 적용 하였다.

Fig. 5는 열응력 해석에 필요한 밸브 내·외부의 경계조건을 나타낸 것이다. 밸브의 외부에는 45℃ 대류 열전달 조건을 적용하였고 내부에는 밸브가 닫힌 경우와 열린 경우로 구분해서 설정하였다. 밸브가 닫힌 경우, 유체가 흐르는 앞쪽은 -162℃의 LNG 가스가 대류 열전달 되는 조건을 적용하고, 디스크의 뒤는 45℃의 대기조건을 적용하였다. 밸브가 열렸을 경우는, 밸브 내부에 사용유체 LNG의 온도 -162℃를 적용하였다.

Fig. 6은 밸브가 닫혔을 때 열응력 해석에 의한 온도분포와 응력분포를 나타낸 것이다. 최대온도는 36.93℃로 밸브 전체 모델에서 Bonnet의 상단에 나타난다. 최저 온도는 -158.5℃이고, Stem에 유체가 닿는 상단부에 위치하는 것을 알 수 있다. 최대 응력은 243.6 MPa이고, Body와 Stem이 접하는 Body의 보강부에 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 밸브가 15° 열렸을 때 열응력 해석에 의한 온도분포와 응력분포를 나타내었다. 온도분포는 닫혔을 때와 차이가 없었다. 최대응력은 167.96 MPa이고, Body의 Bolt hole 부분에 집중되었다.

Table 3에 개폐각도에 따른 온도분포와 응력분포를 나타내었다. 밸브의 온도분포를 비교해보면 개폐각도와 상관없이 비슷한 온도분포를 가지는 것을 알 수 있다. 밸브의 응력분포를 살펴보면 밸브가 닫혔을 때 가장 높은 값의 응력이 나타나며 밸브가 열렸을 경우

에는 개폐각도와 상관없이 비슷한 값의 열응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

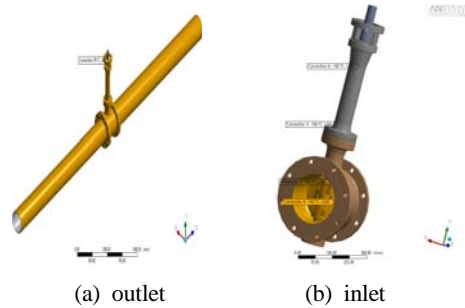


Fig. 5 Boundary condition

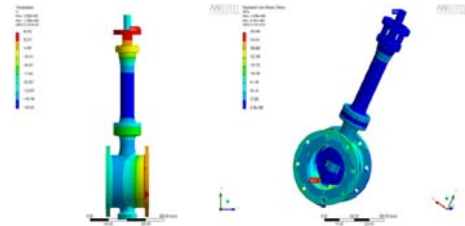


Fig. 6 Thermal distributions and thermal stress when valve closed

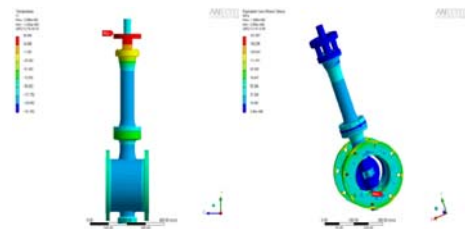


Fig. 7 Thermal distributions and thermal stress when valve 15° open

Table 3 Result of thermal-stress analysis

Open value	Max. Stress (MPa)	Thermal(°C)	
		Min.	Max
closed	243.598	-158.5	36.932
15 °	167.957	-161.962	36.948
30 °	175.760	-161.963	36.964
45 °	175.83	-161.96	36.964
90 °	159.327	-161.963	36.964

3.3 연성해석

유동해석과 열응력해석의 결과를 바탕으로 열-유동-구조 연성해석을 수행하였다. 열응력에 의해 변위가 생길 것을 고려해서 밸브 직경의 10배 길이의 파이프를 모델링하여 Body의 양 끝단에 결합시켜 Fig.8 처럼 유체가 흐르는 입구 쪽의 파이프 끝에 완전 구속을 적용하였다. 이는 실제 사용 환경과 같이 밸브의 변형에 영향을 주지 않는 구속조건을 의미한다.

Fig. 9는 밸브의 하중 조건을 나타내었다. 밸브가 닫혔을 경우에는 Disc전면과 Disc앞 밸브 Body내부에 10 bar의 정압을 적용하였다. 밸브가 열렸을 경우에는 유체가 흐르는 밸브 내부의 모든 면에 유동해석으로 구한 압력 값을 적용하였다. 이 경우에는 개폐각도만 다를 뿐 동일한 경계조건과 하중조건이 적용된다. 열-유동-구조 연성해석에 의해 발생한 최대응력과 변형량을 Table 4에 정리하여 나타 내었다.

그리고 Table 5에 밸브의 각 주요 부품에 발생하는 최대응력과 재료의 항복강도 대비 안전율 (Safety Factor)을 나타 내었다.

밸브가 닫혔을 경우에 밸브의 주요 부품에 최대응력이 발생하였다. 이는 열응력 해석 시 발생하는 최대 응력과 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 LNG 선박용 초저온 버터플라이 밸브의 구조 안정성에 영향을 주는 요인은 유체의 유동에 의한 압력보다는 온도 차이에 의하여 발생하는 열응력의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

또한 열-유동-구조 연성해석 결과 밸브소재 CF-8M의 항복강도 627Mpa 을 기준으로 2.5정도의 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 열응력을 가지는 초저온 밸브의 설계시 안전율 3.0±0.5을 안전성 평가의 기준으로 볼 때, 충분한 안전성을 가지는 것을 알 수 있다. 다만 Table 5를 통해 Disc는 과다설계된 것으로 생각되는바 최적설계를 통한 경량화가 필요할 것으로 판단된다.



Fig. 8 Boundary condition

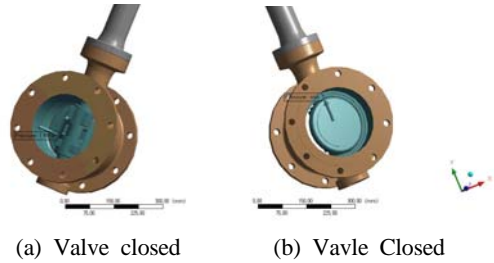


Fig. 9 Loading condition

Table 4 Comparison of stress and Deformation

Open value	Max Stress (MPa)	Deformation (mm)
closed	247.946	6.485
15 °	209.003	6.189
30 °	191.339	7.644
45 °	190.973	6.333
90 °	190.703	6.250

Table 5 Structural safety factor evaluation

	Max Stress (MPa)	yield strenth (MPa)	S/F
Body	247.95	627	2.53
Disc	107.83	627	5.81
Stem	211.09	627	2.97
Bonnet	231.07	627	2.71

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 선박용 버터플라이밸브의 초저온환경에서의 안전성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상온과 저온에서 이루어진 CF-8M의 인장 및 충격시험 결과 항복강도 및 인장강도 등의 기계적 성질이 목표치보다 우수한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 CF-8M 소재를 이용하여 밸브 주요부품의 안정성 평가를 수행 하였다.

2. 유동해석 결과 Disc의 열림 각도가 15° 일 때 최대압력이 작용하고, 열림 각도가 커질수록 압력이 낮

게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 Disc의 열림 각도가 작을수록 교축현상과 급 확산류 등의 비정상 유동 현상이 많이 발생하기 때문인 것으로 판단되었다.

3. 열-유동-구조 연성해석의 결과 LNG 선박용 초저온 버터플라이 밸브의 구조 안정성에 영향을 주는 요인은 유체의 유동에 의한 압력보다는 온도 차이에 의하여 발생하는 열응력의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

4. LNG 선박용 배관에 사용되는 버터플라이 밸브의 안정성을 평가 한 결과 2.5의 안전율을 가지는 것으로 나타났으며 충분한 안전성을 가지는 것으로 판단되었다. 다만 Disc는 과잉설계된 것으로 판단되어 추후 최적설계를 통한 경량화가 필요한 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 2006학년도 동아대학교 학술연구지원재단의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Thompson G, Askari, A.R., "Air leak detection through ball plug valves by vibration monitoring," Noise & Vibration control worldwide, Vol17, pp140-143, 1986.
2. James H Kane, Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics, Prentice Hall, pp. 296-297, 1994.
3. ANSYS CFX-Solver, Release 10.0 : Theory, AN ST Inc., 2005.
4. No, B. J., MODERN Fluid Mechanics, Dongmyunsa, pp. 303-309, 2002.
5. Lacor, C. and Hirsch, C. "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow around a Butterfly Valves," ASME Fluids Eng. Div. Publ. FED. Vol.69, Flows in Non-Rotating Turbomachinery Components, 1988.