

초저온 볼 밸브 설계 및 특성

김동수[†] · 김명섭^{*}

Design and Characteristics of cryogenic ball valve

Dong-soo Kim, Myoung-sub Kim

Key Words: FEM(유한요소해석), Safety(안전), Design(설계), Cryogenic(초저온), Ball valve (볼 밸브)

Abstract

To acquire the safety along with durability of mechanical machinery products, we should consider the structural mechanics such as stress, deformation and dynamic vibration characteristics and identify those important aspects in the stage of preliminary design engineering. This cryogenic ball valve is used to transfer the liquified natural gas which temperature is -196°C , supplied pressure is 168kg/cm^2 . For the cryogenic ball valve, the assurance of structural integrity and operability are essential to meet not only normal, abnormal loading conditions but also functionality during a seismic event. In this thesis, analytical approach and results using finite element analysis and computational method are herein presented to evaluate the aspects of structural integrity along with operability of cryogenic ball valve. In this study, we designed the high pressure cryogenic ball valve that accomplishes zero leakage by elastic seal at normal temperature and metal seal at high temperature.

기호설명

- σ : 응력
- D : 강성행렬
- ε : 변형률 벡터
- $\bar{\varepsilon}$: 가상 변형률 벡터
- Γ : 경계
- ku : 탄성체 응력벡터
- u_g : 변위 응력벡터
- t_b : 경계 응력벡터

1. 서론

천연가스(NG; Natural Gas)의 생성과정은 석탄과 유사하며, 석유가 생산될 때 함께 섞여서 생산되기도 하나 대부분 별도로 생산된다. 천연가스의 주요 성분은 80~85%가 메탄(CH_4)가스이며 공해물질의 함량이 지극히 적다는 이점 때문에 에너지원으로서 이용가치를 높이 평가받고 있다. 그러나 천연가스는 기체상태 이므로 많은 양을 한 곳에 저장하는 데에는 어려움이 있을 뿐만 아니라 파이프라인을 통한 수송 이외에는 대량으로 운반하는 데에 큰 문제가 따른다. 이에 천연가스 액화 기술이 개발되어 대량저장과 원거리 대량수송이 가능하게 되었다. 이처럼 천연가스를 낮은 온도에서 액화시킨 것을 액화천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)라 하며, 천연가스를 액화시켜 운반 및 저장, 제어하는 설비의 수요는 천연가스 사용 비중의 증가와 더불어 점차적으로

[†] 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부
E-mail : kds671@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7152 FAX : (042)868-7176
^{*} 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

증가하는 추세이다.^{[1],[2]}

고압, 초저온용 볼 밸브의 형식은 대부분 사이드 엔트리 방식이 일반적이며, 이러한 방식은 밸브의 유지 보수 및 수리를 하게 될 경우 보온재 및 배관을 절단하여 수리하여야 하는 문제점이 있다. 그래서 최근에는 탑 엔트리 방식이 채택되어지고 있다.^[3]

탑 엔트리 방식의 고압용 초저온 볼 밸브는 전세계적으로 지진과 같은 자연재해와 화재, 폭발 등의 인재에 대한 안전사고를 완전 방지하기 위하여 안정성이 검증된 밸브만 채택하고 있다. 본 연구에서는 초저온 고압 하에서의 구조적 안전성과 열적 충격에 대한 열응력 분포 및 변형 등을 수치적으로 해석하여 사전에 제품에 대한 안전성 및 신뢰성을 평가하고 이를 바탕으로, 열 변화 속에서도 LNG가 누설되지 않는 최적의 제품을 설계 및 제작하는 데에 목적이 있다.

2. 응력 해석을 통한 최적 설계

2.1 이론식

3차원 하중에 관한 유한요소방정식은 식(2-1)과 같다.^[4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

구성 방정식을 구할 때 응력과 변형률은 식(2-2)와 같으며, 여기서 D 는 강성행렬(Stiffness matrix)이고 ϵ 는 변형률 벡터(Strain vector)이다.

$$\sigma = D \epsilon \quad (2-2)$$

변형률과 변위 관계식은 식(2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

유한요소법을 수치적으로 해석하기 위해서는 변분식으로 유도해야 하는데 식(2-3)을 Weak form으로 만들면 식(2-4)와 같다.

$$\int_{\Omega} \bar{u}^T \nabla \sigma d\Omega = 0 \quad (2-4)$$

$$\text{여기서, } \bar{u}^T = [\bar{u}_x \quad \bar{u}_y \quad \bar{u}_z], \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix},$$

$d\Omega = dx dy dz$ 이다.

Green의 정리를 이용하면 식(2-5)로 나타낼 수 있는데, $\bar{\epsilon}$ 는 가상 변형률 벡터이고 Γ 는 경계를 의미한다.

$$\int_{\Omega} \bar{\epsilon}^T \sigma d\Omega - \int_{\Gamma} \bar{u}^T t d\Gamma = 0 \quad (2-5)$$

경계조건을 대입하기 위해서 응력벡터를 식(2-6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t = -k(u - u_g) + t_b \quad (2-6)$$

여기서, ku 는 경계에 탄성체가 있는 경우이며 u_g 는 경계에 변위가 주어졌을 때이고 t_b 는 경계에 대한 응력벡터이다.

식(2-6)을 식(2-5)에 대입하여 식(2-7)을 구할 수 있다.

$$\int_{\Omega} \bar{\epsilon}^T D \epsilon d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{u}^T k u d\Gamma = \int_{\Gamma} \bar{u}^T (k u_g + t_b) d\Gamma \quad (2-7)$$

보간함수를 구하기 위하여 등매개요소(isoparametric element)일 때 변위와 geometry를 식(2-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{u}_i, & x &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{x}_i \\
 v &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{v}_i, & y &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{y}_i \\
 w &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{w}_i, & z &= \sum_{i=1}^{20} N_i(\xi, \eta, \zeta) \bar{z}_i
 \end{aligned} \quad (2-8)$$

형상함수 N_i 는 특성좌표계를 사용하면 식(2-9)와 같다.

$$N_i = \frac{1}{8}(1+\xi_o)(1+\eta_o)(1+\zeta_o)(\xi_o + \eta_o + \zeta_o - 2); \quad i = 1, 3, 5, 7, 13, 15, 17, 19$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-\xi^2)(1+\eta_o)(1+\zeta_o); \quad i = 2, 6, 14, 18$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-\eta^2)(1+\xi_o)(1+\zeta_o); \quad i = 4, 8, 16, 20 \quad (2-9)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-\zeta^2)(1+\xi_o)(1+\eta_o); \quad i = 9, 10, 11, 12$$

여기서 $\xi_o = \xi\xi_i$, $\eta_o = \eta\eta_i$, $\zeta_o = \zeta\zeta_i$ 이다.

유한요소 방정식은 식(2-10)과 같으며, 강성행렬 K 와 외력벡터 f 는 각각 식(2-11), 식(2-12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Kd = f \quad (2-10)$$

$$K = \sum_{i=1}^e \left(\int_{\Omega_e} B^T D B d\Omega_e + \int_{\partial\Omega_e \cap \Gamma} N^T K N d\Gamma \right) \quad (2-11)$$

$$f = \sum_{i=1}^e \int_{\Omega_e \cap \Gamma} N^T (t_b + ku_y) d\Gamma \quad (2-12)$$

2.2 전체 모델의 구조해석

2.2.1 모델링 및 경계조건

수치해석에 사용된 프로그램은 ANSYS이며, 고

압 초저온용 볼밸브의 열응력 해석을 위하여 Fig 1과 같이 볼 밸브의 기하학적 형상과 일치하도록 모델링하였다. 정렬격자와 비정렬 격자 모두를 사용하였으며 약 50만개의 노드점을 생성하여 수치해석 하였다. 모델에 적용된 물성치는 Fig 2와 같다. 구조 해석 측면에서 런 타임을 줄이고 해석의 편리성을 위하여 모델의 반쪽만 모델링 하였으며, 절단면에 대해서는 대칭조건(Symmetric Boundary Condition)을 적용하였다.

파이프 연결 부분은 각각 파이프의 연결성을 고려하여 Frictionless Support로 지지 하였다. 내부에 가해진 압력은 $168\text{kgf/cm}^2(16.47\text{Mpa})$ 이며 내부 온도는 초저온 LNG 가스의 온도를 적용하여 -196°C 를 적용하였으며 볼 밸브의 바깥쪽은 화재가 발생하였을 시의 극한의 경우를 고려하여 680°C 를 적용하였다. 반 단면의 절단면 부분에 대한 대칭조건 부분은 열 해석을 위해 100% 단열되는 것으로 가정 하였다.

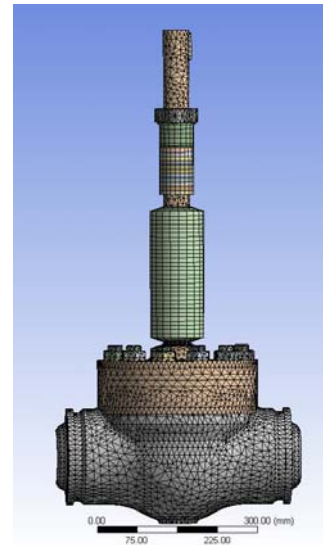


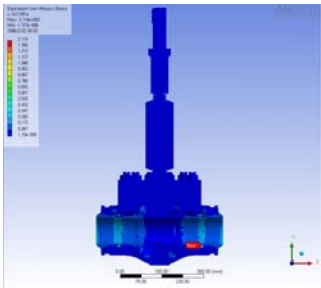
Fig 1. 3D model & Grid system of ball valve

Structural		Add/Remove Properties
Young's Modulus	1.93e+005 MPa	[icon]
Poisson's Ratio	0.31	[icon]
Density	7.75e-006 kg/mm³	[icon]
Thermal Expansion	1.7e-005 1/°C	[icon]
Thermal		Add/Remove Properties
Thermal Conductivity	1.51e-002 W/mm·°C	[icon]
Specific Heat	480. J/kg·°C	[icon]

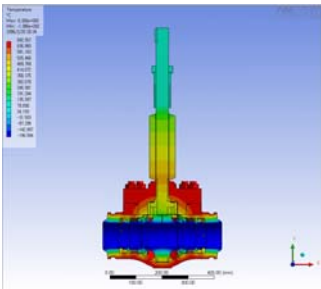
Fig 2. Structural and thermal properties of valve

2.2.2 해석 결과

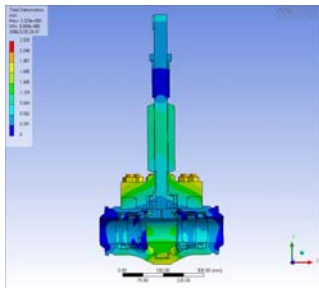
최대 응력(Maximum Von-Misses Stress)을 참조로 하고 해석 결과를 분석한 결과, 초저온 상태인 내부와 초고온 상태인 외부의 열이 서로 교차하는 볼 및 시트 설계부분의 구조적 환경이 가장 취약한 스프링가이드에서 최대응력 2,114Mpa이 발생 하였다. Fig 3은 최대 응력과 온도 분포, 변위를 나타낸 것이다.



(a) Von-Misses stress distributions



(b) Temperature distributions



(c) Total deformations

Fig 3. FEM Analysis result of ball valve

2.3 Bonnet의 해석 및 설계

Bonnet은 Valve의 중심축 상에 위치하여 Handle과 Ball을 연결하는 부분으로서 하부의 초저온으로 말미암아 상부 packing부에 icing이 발생할 경우 내부 유체가 누설될 수 있기 때문에 icing을 줄이기 위한 방안 필요하며, 밸브 내부의 온도가

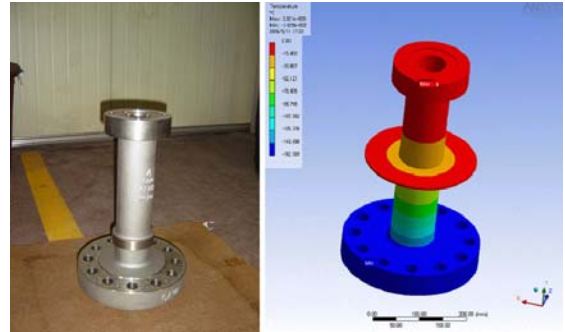


Fig 4. Temperature distributions of Bonnet

packing부까지 전달되지 않도록 설계하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 icing을 줄이기 위해 방열판을 사용했으며 해석을 통해 적절한 길이의 Bonnet을 설계하였다.

Fig 4는 Bonnet의 외형형상과 Bonnet 부위의 온도 분포를 보여준다. packing부가 2.58℃~-15℃정도로 변형으로 인한 누설을 발생 시키는 온도가 아니며, 이러한 온도 분포로 보아 상부의 Actuator에는 온도 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

일반적으로, 초저온용 Top Entry방식의 Ball Valve의 경우 Bonnet이 상부로 분리되는 구조라고 하더라도 내부의 부품을 분리하기가 어려운 구조로 설계되며, 부품 교체 시 누설의 정도를 파악하기가 힘들다. 그래서 본 연구에서는 조립 전에 Seat의 건전성을 확인할 수 있는 구조로 개발하였으며, 이러한 부품의 교체 또한 용이하도록 Bonnet을 설계 제작하였다.

2.4 Ball의 해석 및 설계

볼 밸브의 경우 내부의 유체를 차단하는 목적이 있기 때문에 open시 내부의 유체가 밸브의 부품에 의한 마찰 손실을 최소화 하여야 한다. 그래서 API나 ANSI의 경우 내부 Port에 대한 크기를 규정하고 있으며, System조건에 따라 Full Port와 Reducing Port로 구분하고 있다. 실제 Reducing Port의 경우 Full Port로 제작이 가능한 구조에서는 적용이 용이하기 때문에 본 연구과제에서 Full Port 구조로만 제작하였다.

Fig 5는 내부 Ball의 외형 사진과 Ball의 열 변형을 나타내는 그림이다. 여기서 보면 온도 변화에 의한 Ball의 변형 정도가 일정한 분포를 가지는 것을 볼 수 있다.

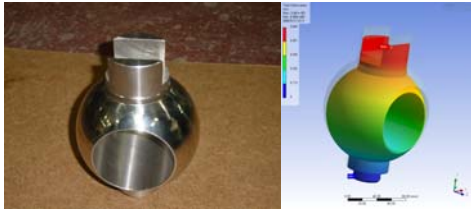


Fig 5. Thermal deformations of Ball

3. Seat의 설계 및 제작

3.1 서론

Top Entry 방식의 초저온용 Ball Valve의 경우 가장 중요한 부품이 Seat부이며, Seat구조에 대한 설계 및 제작 방법이 매우 어렵다. 그러므로 대부분의 Ball Valve 제작업체의 경우 Seat구조에 대해 특허나 실용실안 획득으로 Ball Valve 제작 회사의 기술을 보호하고 있다.

본 연구에서는 시중에 판매중인 Top Entry 방식의 초저온 볼 밸브의 Seat구조로 밸브를 제작하여 상온 및 초저온 시험을 수행하고, 이러한 Seat구조의 장·단점을 파악한 후 최적의 Seat구조를 설계하고자 한다.

3.2 U-Cup Seal 사용 구조

대부분의 Ball Valve제작사에서 선택하고 있는 Seat구조이며, 고온이나 초저온용으로는 적절하지 않은 구조이다. 일부 초저온 밸브를 제작하고 있는 업체에서도 이러한 구조로 제작하고 있으며, BS 6364의 기준정도만을 만족하는 수준이다. 그러므로 이러한 Seat구조로 제작 하였을 때 어느 정도의 Seat Leakage가 발생하는지와 가스공사의 Seat Leakage 기준에는 얼마나 못 미치는지에 대해 확인할 필요가 있다.

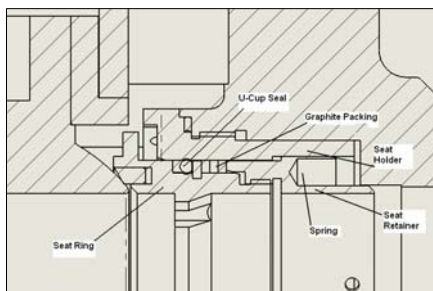


Fig 6. Structure of U-Cup Seal Seat

Fig 6은 U-Cup Seal Seat의 구조를 보여주고 있다. 이 구조에 대해 초저온 상태에서 시험한 결과가 Table 1에 나타나 있다. U-Cup Seal 및 Graphite의 수축률이 Stainless보다 크기 때문에 -196°C 이하로 떨어지면 Sealing 역할을 수행하지 못하고 Seal부분으로 누설이 발생한다. 이 때 발생하는 누설량은 BS 6364의 기준은 만족하지만, 가스공사의 기준이나 LNG선박용 기준을 만족하지 못함을 알 수 있다.

Table 1. Result of Leakage test

Valve Size	Test Result	Standard		
		BS 6364	KOGAS	LNG선박
2"	200 cc/min	300 cc/min	10 cc/min	20 cc/min
4"	580 cc/min	600 cc/min	20 cc/min	40 cc/min

3.3 Bellows Seal 사용 구조

U-Cup Seal을 적용한 Seat구조의 누설은 Code기준은 만족하지만, 가스공사 및 LNG선박용에서 요구하는 누설 조건을 만족할 수 없었다. 그래서 Seal구조를 Bellows로 변경하여 제작하는 방안을 모색하였다. Fig 7은 Bellows Seal Type Seat의 구조를, Fig 8은 구조와 함께 외형을 보여주고 있다.

Seat 누설을 확인하기 위하여 Seat만 조립한 후 내부 누설을 확인하였으며, Bellows Seal을 적용한 Seat구조에서는 Seat부 누설은 거의 없었다.

Bellows의 경우 얇은 판으로 성형하여 제작되기 때문에 압력에 대한 구조적 강도 및 피로 수명 예측이 매우 중요한 요소이다. 그리고 Bellows를 Seat부에 조립하여 Bellows와 Seat 연결부의 건전성을 검증하기 위하여 Seat부만 별도로 내압 시험을 수행하여 제작하여야 한다.

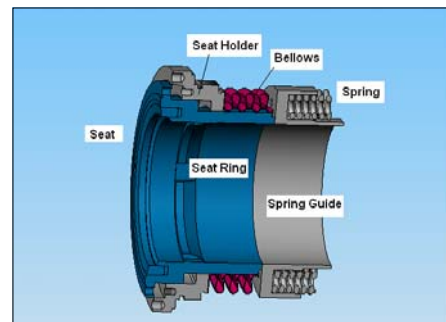


Fig 7. Structure of Bellows Seal Type Seat



Fig 8. Structure and external form of Bellows Seal Type Seat

그리고 Bellows 부분의 건전성 확보에 있어, Seat부의 누설이 먼저 검사되어야 Bellows 연결부의 누설을 확인할 수 있기 때문에 부품 상태에서 Seat 누설을 검사할 수 있는 구조이어야 한다.

Bellows Seal Type Seat의 경우 Bellows의 유효면적만큼의 압력이 Seat부로 작용하기 때문에 압력이 증가할수록 Seat의 면압력이 증가하는 구조이다. 그리고 저압에서는 Bellows의 Spring력이 매우 작기 때문에 Seat 누설을 방지하기 힘들다. 따라서 저압에서 Seat 누설이 발생하지 않도록 Seat를 밀착시켜 면압을 유지할 수 있는 Spring이 필요하다. 저압인 경우 압력에 기인하는 Seating Force가 작기 때문에 별도의 Spring을 넣어 저압에서의 누설을 방지할 수 있는 Seating Force를 유지하는 것이 중요하다. **Table 2**는 Spring의 설계 데이터이다.

Table 2. Design data of Spring

항목	값
유효경	14.1 mm
유효권수	5
Spring상수	10.71 kgf/mm
자유장	33 mm
Setting 높이	28 mm
수량	20 ea
Setting Force	1,071 kgf

4. 결 론

고압, 초저온 상태의 볼 밸브 각 부품의 성능 특성을 파악하기 위하여 해석이론을 통한 강도해석 및 열적 충격에 대한 수치해석을 수행하고, Seat구조에 대한 시험 및 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응력해석 결과를 평가하기 위하여 최대응력을 참조하여 해석결과를 분석한 결과 스프링 홀더에서 최대응력 2,114MPa이 발생되었다.
2. Bonnet의 해석을 통하여 내부 유체가 누설되지 않고 Seat의 건전성을 조립 전 확인할 수 있는 구조로 개발하였으며, 부품의 교체 또한 용이하도록 Bonnet을 설계 제작하였다.
3. 일반적인 Top Entry 방식의 초저온 볼 밸브의 Seat구조로 밸브를 제작하여 상온 및 초저온 시험을 수행하여 이러한 Seat구조의 장·단점을 파악한 후 단점을 보완할 수 있는 최적의 Seat구조를 설계하였다.
5. 본 연구를 통하여 상온에서의 Elastic seal과 고온에서의 Metal seal에 의한 Zero Leakage를 구현하는 고압, 초저온 볼 밸브를 설계하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 부품소재 기술과제인 “Top entry 방식의 고압용 초저온 볼밸브 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- [1] Eleftherakis, John G. 1991, "Determining valve contaminant sensitivity effect using two contaminants", SAE TP 910960, pp459 ~ 464.
- [2] Thompson G, Askari, A.R. 1986, "Air leak detection through ball plug valves by vibration monitoring", Noise & Vibration control worldwide, V17, pp140-143.
- [3] Rouss, Gino James Janna, William S. 2003, "Determination of discharge coefficient for ball valves with calibrated inserts", 2003 ASME Mechanical engineering congress, pp 1~10.
- [4] Merati, P., Macelt, M.J, 2001, "Flow investigate around a v-sector ball valve", 2001 ASME Fluids engineering, vol.123, no.3, pp662~671.