

# 고압, 초저온 볼 밸브 열응력 및 유동특성 해석

\*김동수<sup>1</sup>, 배상규<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> 한국기계연구원 정보장비연구센터

## Analysis of thermal stress and flow characteristics on the high pressure cryogenic ball valve

\*D. S. Kim<sup>1</sup>, S. K. Bae<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> IT Machinery Research Center, KIMM

Key words : Top entry , Cryogenic, Ball valve, Deformation, FEM, Flow Analysis

### 1. 서론

화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 이산화 탄소 및 기타 여러 가지 대기 오염 성분을 줄이고자 천연가스 및 액의 사용이 점차 늘고 있다. 특히 천연 가스의 경우 연소 시 발생하는 이산화 탄소 및 아황산 가스등을 거의 배출하지 않기 때문에 석유의 대체 에너지로 각광 받고 있다. 그러나 천연 가스의 경우 부피가 매우 크고 가스 상태로 운반하거나 저장하기가 어렵기 때문에 천연가스를 액화시켜 운반 및 저장하는 설비가 점차적으로 증가하고, 천연가스의 사용 비중이 점차적으로 증가하는 추세여서 이를 제어하는 설비 및 운반설비의 수요가 많아지고 있는 실정이다.<sup>1),2)</sup>

고압용 초저온 볼 밸브의 형식은 대부분 사이드 엔트리 방식의 볼 밸브 사용이 일반적이며, 이러한 방식은 밸브의 유지 보수 및 수리를 하게 될 경우 보온재 및 배관을 절단하여 수리하여야 하는 문제점이 있다. 그래서 최근에는 탑 엔트리 방식의 고압용 볼 밸브 방식이 채택되어지고 있다.<sup>3)</sup>

탑 엔트리 방식의 고압용 초저온 볼 밸브는 전 세계적으로 지진환경, 쓰나미 환경 등의 자연재해와 화재 폭발 등의 인재에 대한 안전사고를 완전 방지하기 위하여 안정성이 검증된 밸브만 채택하고 있으며 본 연구에서는 열적 충격에 대한 열 응력 분포 및 변형 등을 수치적으로 해석하고 유동해석을 하여 사전에 시뮬레이션을 통한 안전성을 검증하고 제품에 대한 신뢰성을 평가하는데 목적이 있다.

### 2. 열 응력 해석

수치해석에 사용된 상용 프로그램은 ANSYS를 사용하여 해석을 수행하였다.

고압 초저온용 볼밸브의 열응력 해석을 위하여 사용된 3차원 유한요소 모델은 보여지는 것과 같이 반단면의 볼 밸브 모델로 구성하였다. 사용격자 계는 정렬격자와 비 정렬 격자 모두를 사용하였으며 약50만개의 노드점을 생성하여 수치해석 하였다. 파이프 연결 부분은 각각 파이프의 연결성을 고려 하여 Frictionless Support로 지지 하였다. 내부에 가해진 압력은  $168\text{kgf/cm}^2$  (16.47 Mpa)이며 내부 온도는 초저온 LNG 가스의 온도를 적용하여  $-196^\circ\text{C}$ 를 적용하였으며 볼밸브의 바깥쪽은 화재가 발생하였을 시의 극한의 경우를 고려하여  $680^\circ\text{C}$ 를 적용하였다. 반 단면의 절단면 부분에 대한 대칭조건 부분은 열 해석을 위해 100% 단열 되는 것으로 가정 하였다.

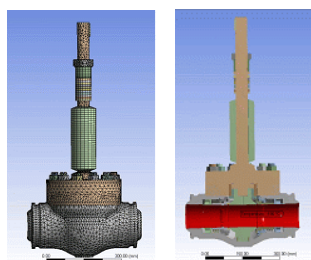
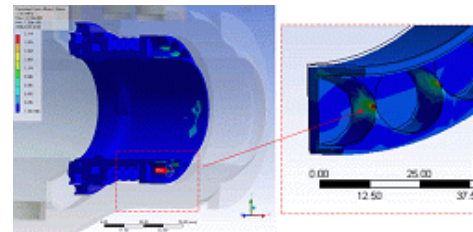


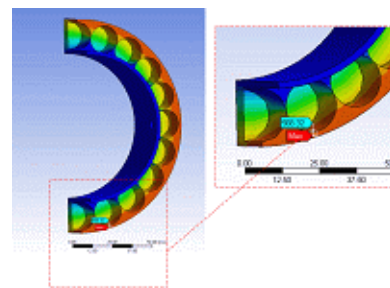
Fig. 1 Grid system and boundary condition of ball valve

고온 초저온용 볼 밸브의 열 변형 해석의 주요 검토 대상중 하나인 응력 결과 분석에서 고온 고압에 의한 응력 해석 결과 변화를 평가하기 위하여 최대 응력을 참조로 하고 해석결과를 분석하였다.

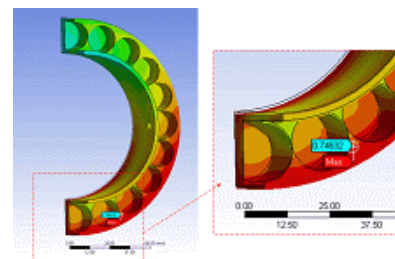
열 팽창과 볼 밸브 내부의 고압 조건에 의한 중요 몸통부, 볼 및 시트 설계부분의 열응력과 변형량 그리고 온도 분포를 조사하였다. 해석 결과 최대 응력은 스프링 가이드에서 발생 하였다. 초저온 상태인 내부와 초고온 상태인 외부의 열이 서로 교차하는 볼 및 시트 설계부분에서 구조적 환경이 가장 취약한 스프링가이드에서 최대응력 2,114 Mpa이 발생 하였다. Fig. 2는 스프링 홀더의 응력분포와 온도분포, 그리고 최대변형을 나타낸 것이다. 스프링 홀더의 경우에는 최대 응력은 약 2,114Mpa이며 최대 온도는  $568^\circ\text{C}$ , 그리고 최대 변위는 0.746mm로 나타났다. 볼 밸브의 각 부품들의 열응력, 변형량, 온도분포를 정리하면 Table. 1과 같다.



(a) Von-Mises Stress



(b) Max. temperature



(c) Max. Deformation

Fig. 2 Von-Mises stress, temperature, deformation distributions of spring holder

Table. 1 Stress, temperature, deformation of part

Name of Parts	Von-Misses (Mpa)	Temp. (°C)	Deformation (mm)
Bellows	124.5	54.2	0.77
Bellows holder	348.9	447.4	0.59
Seatriring holder	410.9	274.0	0.60
Gasket & Seat ring	120.4	-74.3	0.44

기타 볼 및 벨로우즈 홀더, 시트링 홀더의 고온, 고압에 대한 영향으로 열변화량의 증가와 함께 항복강도 이상의 응력 집중 현상을 보여 구조적으로 취약한 상태이며, 벨로우즈와 가스켓 그리고 시트 링 등의 부품들은 상대적으로 온도의 증가가 적어 열응력의 집중 현상이 떨어져 비교적 안전한 상태로 보이며, 최대변위가 발생한 벨로우즈는 스프링 역할을 하는 구조물 특성상 변화량의 크기는 안전한 것으로 판단된다.

### 3. 유동해석

볼밸브의 유동해석은 상용 CFD코드인 FLUENT 프로그램을 사용하였으며, 해석 모델은 직경을 기준으로 상류방향으로 직경의 5배, 하류 방향으로 직경의 10배를 해석 영역으로 설정하여 모델링 하였다. Fig. 3은 유동해석을 위한 유동장 해석영역을 나타낸 것이며, Fig. 4는 수치해석을 위하여 사용한 격자 시스템을 나타낸 것이다. 수치해석에 사용된 격자는 약 60만개의 노드 점을 생성하여 해석에 적용하였다. 해석모델의 입구조건으로는 Pressure inlet 조건으로 168kg/cm<sup>2</sup>, 80kg/cm<sup>2</sup>을 설정하였으며 출구조건으로는 Pressure outlet 조건으로 대기압을 설정하고, 내부의 온도는 초저온 LNG gas의 온도인 -196°C를 설정하였다.

Fig. 5와 Fig.6은 유동 입자가 그리는 Pathline과 속도벡터 분포를 나타낸다. 유동입자의 Pathline은 비교적 균일한 속도 분포를 보이고 있으며 속도 벡터로 확인 할 수 있으며, 유속은 밸브를 지나면서 가속됨을 알 수 있다. Fig. 7은 완전개방상태에서 임의의 단면에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. 각 단면을 살펴보면, 유동은 전체적으로 각 단면에서 균일한 형태를 띄고 있으며 중앙부로 갈수록 가속되고 있음을 알 수 있다.



Fig. 3 Computational area of CFD



Fig. 4 Computational grid system of Ball valve

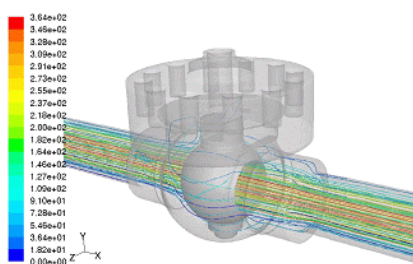


Fig. 5 Pathlines of fully opened state

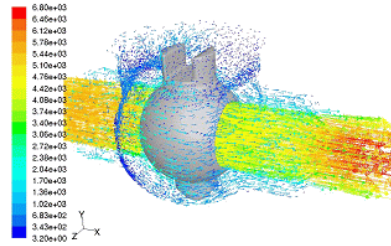


Fig. 6 Velocity vector distributions

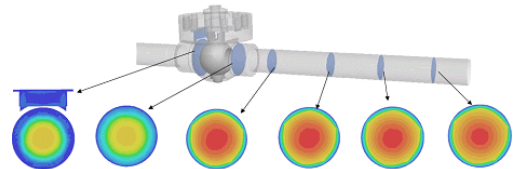


Fig. 7 Velocity distributions of cross sectional area

### 4. 결론

고압, 초저온 상태의 볼 밸브 각 부품의 성능 특성을 파악하기 위하여 해석이론을 통한 열 충격 수치해석 및 유체유동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고압, 초저온용 볼 밸브를 실제와 같은 기하학적 형상과 일치하도록 유한요소 모델링을 하였다.
2. 볼 밸브 외부 온도는 690°C, 내부온도는 -190°C로 하여 화재 발생에 대한 안전성을 고려하고 입, 출구 압력은 168kg/cm<sup>2</sup>, 80kg/cm<sup>2</sup>으로 열응력 및 유동 특성 해석을 하였다.
3. 응력해석 결과를 평가하기 위하여 최대응력을 참조하여 해석결과를 분석한 결과 스프링 홀더에서 최대응력 2,114MPa이 발생되었다.
4. 열팽창과 볼 밸브 내부의 고압조건에 의한 중요 몸통부, 볼, 시트 부분의 온도분포 및 변형량을 파악하여 특성을 예측할 수 있었다.
5. 볼밸브의 개폐각도에 따른 유체의 속도 분포 및 와류현상 등에 대한 유체 특성을 파악 할 수 있었다.
6. 본 연구를 통하여 상온에서의 Elastic seal과 고온에서의 Metal seal에 의한 Zero Leakage를 구현하는 고압, 초저온 볼 밸브를 설계하였다.

### 후기

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

### 참고문헌

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