

초저온 볼밸브의 열 응력 및 유동해석 Thermal stress and Flow Analysis of a Cryogenic Ball Valve

김동수 · 배상규 · 이원희 · 김현섭

D. S. Kim, S. K. Bae, W. H. Lee and H. S. Kim

Key Words : Top Entry(탑엔트리), Cryogenic(초저온), Ball Valve(볼밸브), Deformation(변형), FEM(유한요소해석), Flow Analysis(유동해석)

Abstract: The high pressure cryogenic ball valve is used to transfer the liquefied natural gas which temperature is -196°C , supplied pressure is 168kgf/cm^2 . In the present work, the temperature distribution and thermal deformation is calculated numerically. The CAE and CFD methods are useful to predict the thermal matter and the inner flow field of high pressure cryogenic ball valve. For this reason, to optimum design of the cryogenic ball valve, the theological behavior of the supplied LNG in a cryogenic valve has been studied. The governing equations are discredited and solved numerically by the finite-volume method and finite-element method. 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.

1. 서 론

화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 이산화탄소 및 기타 여러 가지 대기 오염 성분을 줄이고자 천연가스 및 핵의 사용이 점차 늘고 있다. 특히 천연가스는 연소 시 발생하는 이산화탄소 및 아황산 가스 등을 거의 배출하지 않기 때문에 석유의 대체 에너지로 각광 받고 있다. 그러나 천연가스의 경우 부피가 매우 크고 가스 상태로 운반하거나 저장하기가 어렵기 때문에 천연가스를 액화시켜 운반하거나 저장하는 설비가 점차적으로 증가하고, 천연가스의 사용 비중이 점차적으로 증가하는 추세여서 이를 제어하는 설비 및 운반 설비의 수요가 많아지고 있는 실정이다.^{1~2)}

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.³⁾

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 열응력 분포 및 변형 등을 수치적으로 해석하고 사전에 시뮬레이션으로 유동해석을 수행하여 안전성을 검증하고 제품에 대한 신뢰성을 평가하는데 목적이 있다.

2. 열응력 해석

2.1 해석모델링 및 경계조건

수치해석에는 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

고압 초저온용 볼밸브의 열응력 해석을 위하여 사용된 3차원 유한요소 모델은 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 반 단면의 볼 밸브 모델로 구성하였다.

이러한 유한요소 모델은 열응력 해석 시, 2차원 모델은 피스톤의 강성에 의한 역학적 거동 효과를 고려할 수 없는 단점이 있기 때문에 정확한 해석을 위해서 구성되었다

고압 초저온용 볼 밸브의 누설량 제로인 제품을 개발 하는데 있어서 해석상 중요한 부분인 볼 & 시트 디자인부와 좌열에 안전한 디자인 부분을 실제와

접수일 : 2006년 10월 1일

김동수(책임저자): 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail : kds671@kimm.re.kr, TEL:042-868-7152

배상규, 이원희: 한국기계연구원 정보장비연구센터

김현섭 : ㈜ 썬크루트

같은 형상으로 유한요소 모델링 하였고, 또한 시트, 시트홀더, 시트가이드 등의 볼 밸브의 기하학적 형상과 일치하도록 모델링 하였다. Fig. 1은 하부의 볼 밸브에 가해지는 온도효과가 상부로 전달되는 정도를 예측하기 위하여 기계적 메커니즘 모두를 고려하였으며, 이때 사용한 볼 밸브의 응력해석 시스템은 격자 시스템이다.

사용격자 계는 정렬격자와 비 정렬 격자 모두를 사용하였으며 약 50만개의 노드점을 생성하여 수치 해석 하였다. 특히 열에 의하여 변형이 가해지는 주요부품에 대하여 격자를 더욱 집중하여 생성 하였으며 모델에 적용된 물성치는 Table 1과 같다.

구조 해석 측면에서 런 타임을 줄이고 해석의 편리성을 위하여 모델의 반쪽만 모델링 하였으며, 절단면에 대해서는 Fig. 2와 같이 대칭조건을 적용하였다.

파이프 연결 부분은 각각 파이프의 연결성을 고려하여 마찰력이 없는 서포트로 지지 하였다. 밸브내부에 가해진 압력은 $168\text{kgf/cm}^2(16.47\text{ Mpa})$ 이며

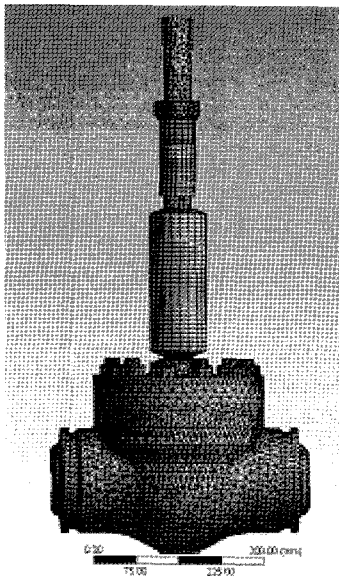
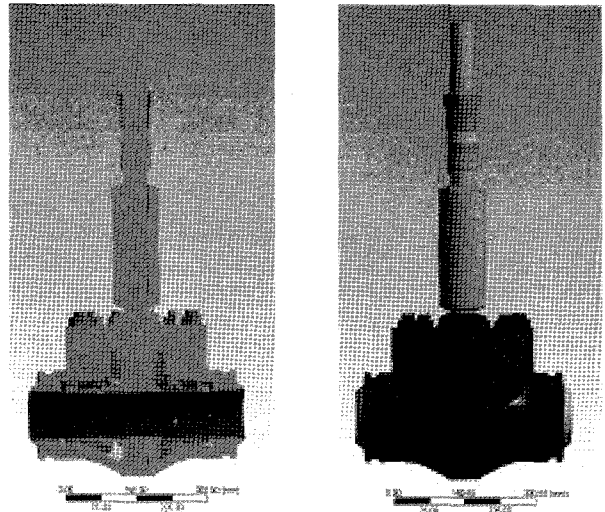


Fig. 1 Grid system of ball valve

Table 1 Properties of valve

Structural		Add/Remove Properties
P: Young's Modulus	1.93e+005 MPa	↕
P: Poisson's Ratio	0.31	↕
P: Density	7.75e-006 kg/mm ³	↕
P: Thermal Expansion	1.7e-005 1/°C	↕
Thermal		Add/Remove Properties
P: Thermal Conductivity	1.51e-000 W/mm°C	↕
P: Specific Heat	480 J/kg°C	↕



(a) inner temperature (-196°C) (b) out temperature (680°C)

Fig. 2 Boundary conditions of ball valve

내부 온도는 초저온 LNG 가스의 온도를 적용하여 -196°C를 적용하였으며 볼밸브의 바깥쪽은 화재가 발생하였을 시의 극한의 경우를 고려하여 680°C를 적용하였다. 반 단면의 절단면 부분에 대한 대칭조건 부분은 열 해석을 위해 100% 단열 되는 것으로 가정 하였다.

2.2 해석 결과

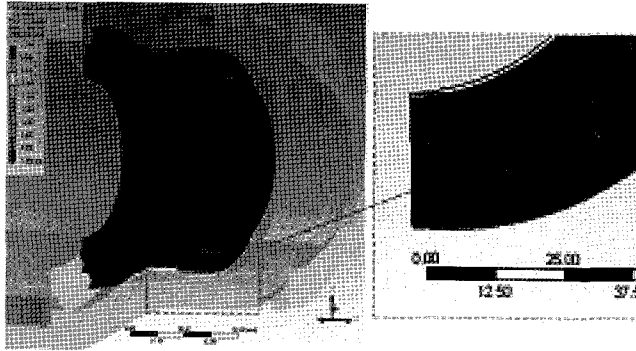
고압 초저온용 볼 밸브의 열 변형 해석의 주요 검토 대상중 하나인 응력 결과 분석에서 고온 고압에 의한 응력 해석 결과 변화를 평가하기 위하여 최대 응력(Maximum Von-Misses Stress)을 참조로 하고 해석결과를 분석하였다.

열팽창과 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.

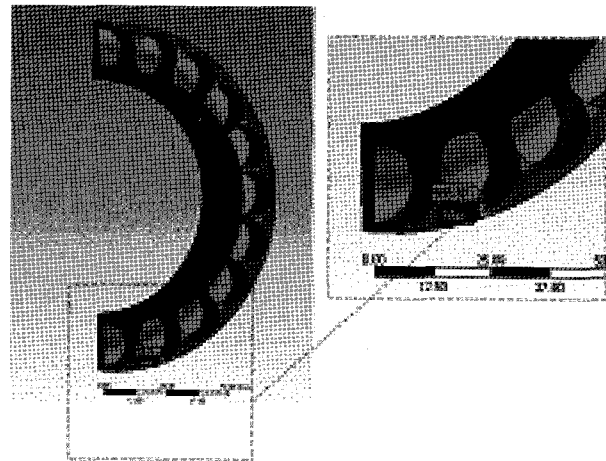
Fig. 3은 스프링 홀더의 응력분포와 온도분포, 그리고 최대변형을 나타낸 것이다. 스프링 홀더의 경우에는 최대 응력은 약 2,114Mpa이며 최대 온도는 568°C, 그리고 최대 변위는 0.746mm로 나타났다.

Fig. 4는 볼밸브 내부의 ball과 중심축상의 패키징 된 곳에서의 응력분포와 온도분포, 그리고 최대변위를 나타낸 것이다. 최대응력은 99.8Mpa로 예측

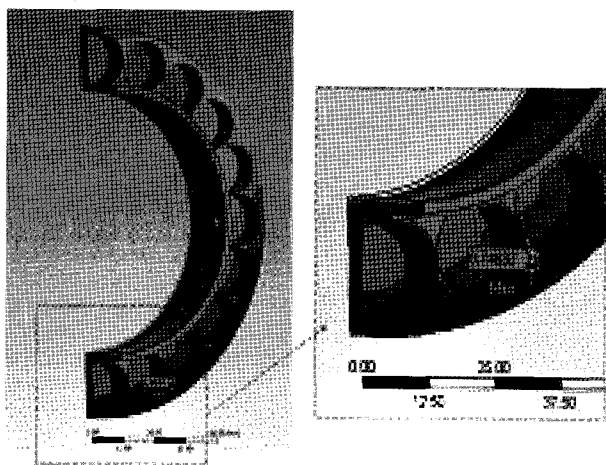
되었으며 중심축 상부까지 전달되는 온도는 약 90°C, 최고 온도는 551.5°C로 예측되었다. 또한 최대 변위는 볼 하단에서 발생하였으며 1.57mm로 예측되었다.



(a) Von-Misses Stress

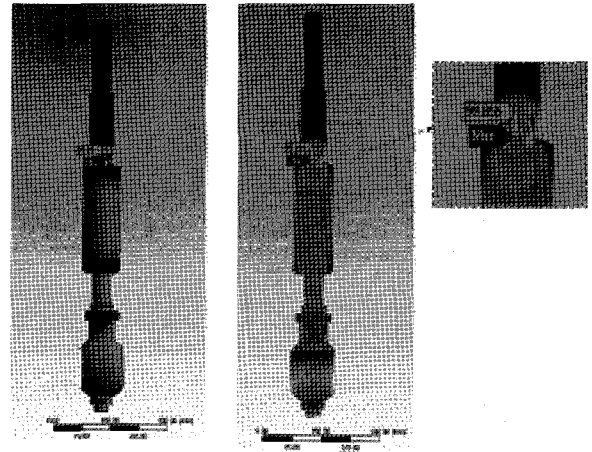


(b) Max. temperature

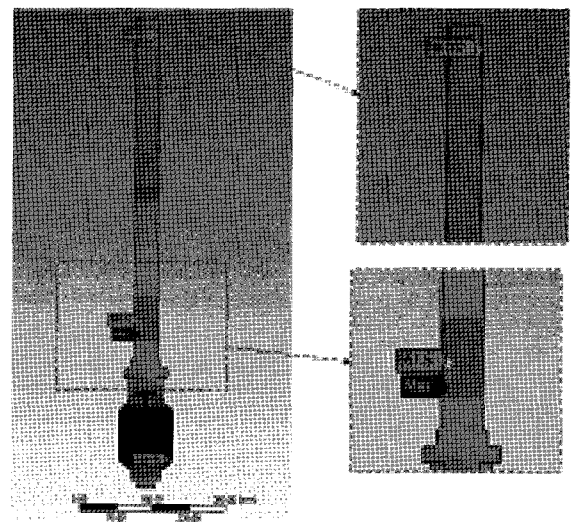


(c) Max. deformation

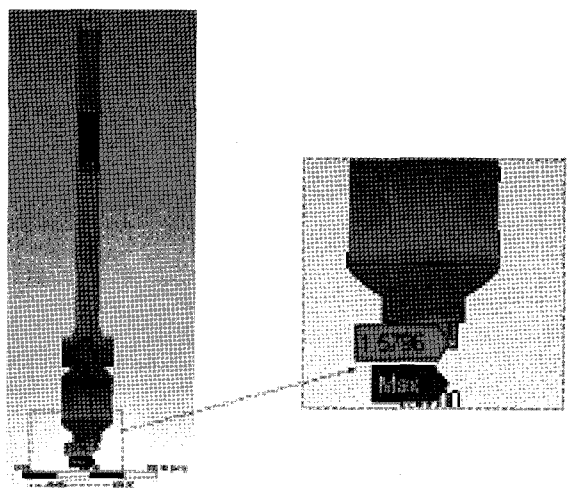
Fig. 3 Von-Misses stress, temperature and deformation distributions of spring holder



(a) Maximum Von-Misses Stress



(b) Temperature distributions



(c) Total deformation

Fig. 4 Von-Misses stress, temperature and deformation distributions of ball and central axis area

볼 밸브의 입구, 출구 쪽에 위치한 각 부품들의 열 응력, 변형량, 온도분포를 정리하면 Table 2, Table 3과 같다.

입구 쪽에서 최대 변위는 벨로우즈에서 발생하였으며 그 크기는 약 0.77mm 정도였다. 최대응력은 시트링 홀더에서 발생하였으며 크기는 410.9 Mpa이었다. 또한 최대 온도는 벨로우즈 홀더에서 447°C로 나타났다.

Table 2 Max. stress, temperature, deformation of part at the inlet

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
Seatring holder	410.9	274.0	0.60
Gasket & Seat ring	120.4	-74.3	0.44

Table 3 Max. stress, temperature, deformation of part at the outlet

Name of Parts	Von-Misses (Mpa)	Temp. (°C)	Deformation (mm)
Bellows	117.4	59	0.88
Bellow holder	100.4	480.3	0.85
Seatring holder	320.4	128.5	0.76
Gasket & Seat ring	62.9	-68.2	0.62

출구 쪽에서의 최대응력 역시 시트 링 홀더에서 발생하고 있으며 그 크기는 320.4Mpa 이다. 최대온도도 벨로우즈 홀더에서 480.3°C, 최대 변형량은 벨로우즈에서 발생하였으며 0.88mm로 예측되었다. 입구측과 출구측의 최대 응력 차이는 입구측이 1.3배 정도 크며, 최대온도 및 최대 변형량은 출구측이 1.1 배 정도 크게 나타났다. 일반적으로 스테인레스 스틸의 항복강도 210~240MPa, 파괴강도 510~530MPa를 기준으로 볼 때, 스프링 가이드 홀더는 구조적으로 불안정하다고 볼 수 있다. 따라서 스프링 가이드가 응력집중이 되지 않도록 설계하여야 한다. 기타 볼 및 벨로우즈 홀더, 시트링 홀더의 고온, 고압에

대한 영향으로 열 변화량의 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. 유동 해석

3.1 해석 모델링 및 경계조건

볼밸브의 유동해석에는 상용 프로그램인 FLUENT 프로그램을 사용하였으며, 해석 모델은 직경을 기준으로 상류방향으로 직경의 5배, 하류 방향으로 직경의 10배를 해석 영역으로 설정하여 모델링 하였다. Fig. 5는 유동해석을 위한 유동장 해석영역을 나타낸 것이며, Fig. 6은 수치해석을 위하여 사용한 격자 시스템을 나타낸 것이다. 격자시스템은 비 정렬 격자와 정렬격자를 혼용한 하이브리드 격자를 사용하였으며 벽면 경계층을 적절히 예측하기 위하여 벽면에는 경계층격자를 집중시켜 격자를 생성하였다. 유동이 유입되고 유출되는 부분의 와류현상 등을 예측하기 위하여 이 부분에 격자를 좀 더 집중하였다.

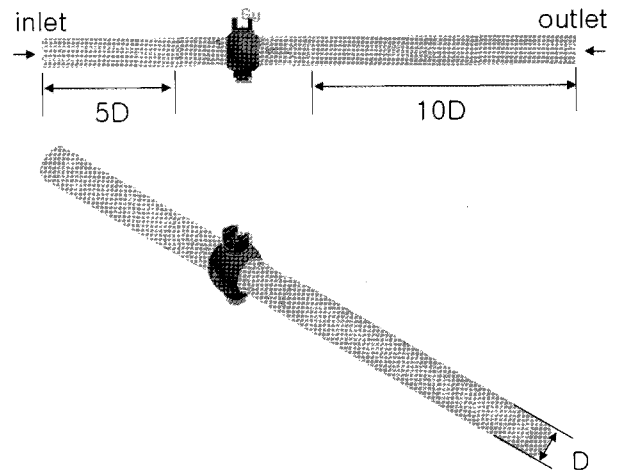


Fig. 5 Computational area of CFD

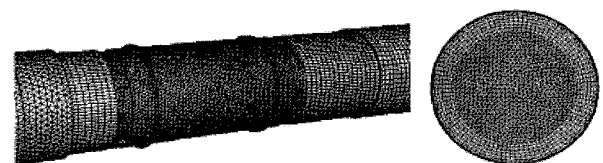


Fig. 6 Computational grid system of ball valve

Table 4 Properties of methane

Properties	Valve
Molecular Weight	16
Specific Gravity	0.55(Air: 1.0)
Boiling Point	-161.5℃
Critical Temperature	-82.1℃
Critical Pressure	45.8atm
Explosibility Range	5~15%(Air)
Ignition Point	550℃
Melting Point	-182.4℃

수치해석에 사용된 격자는 약 60만개의 노드점을 생성하여 해석에 적용하였다.

해석모델의 입구압력은 168kgf/cm², 80kgf/cm²으로 설정하였으며 출구압력은 대기압으로 설정하였다. 내부 온도는 초저온 LNG 가스의 온도인 -196℃로 설정하였다.

작동유체는 LNG 가스의 99%를 차지하는 메탄(알라스카 산)으로 설정하였다. Table 4는 메탄의 물성치를 나타낸 것이다.

3.2 해석 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 유동 입자가 그리는 패스라인과 속도벡터 분포를 나타낸다. 유동입자의 패스라인은 비교적 균일한 속도 분포를 보이고 있으며 속도 벡터로 확인 할 수 있으며, 유속은 밸브를 지나면서 가속됨을 알 수 있다.

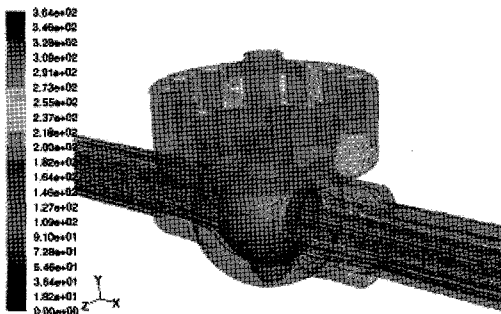


Fig. 7 Pathlines of fully opened state

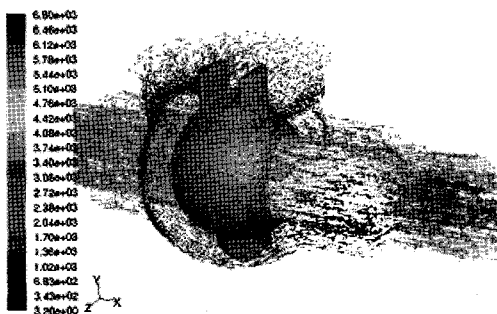


Fig. 8 Velocity vector distributions

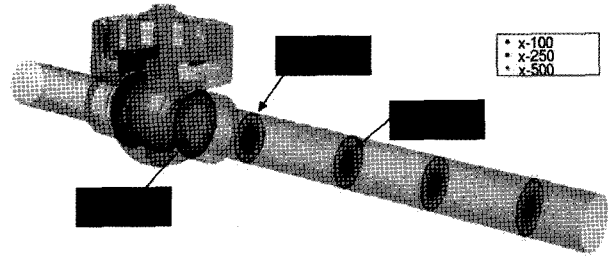
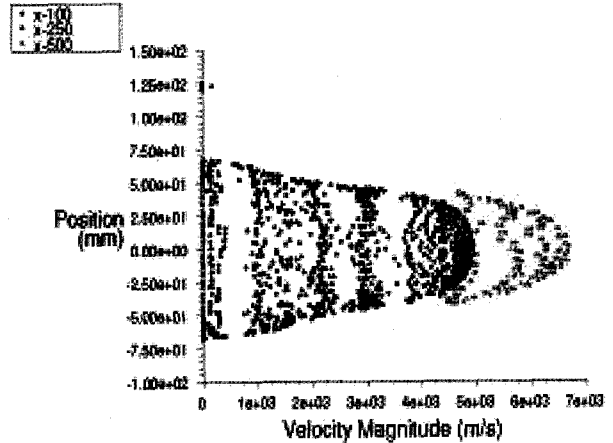
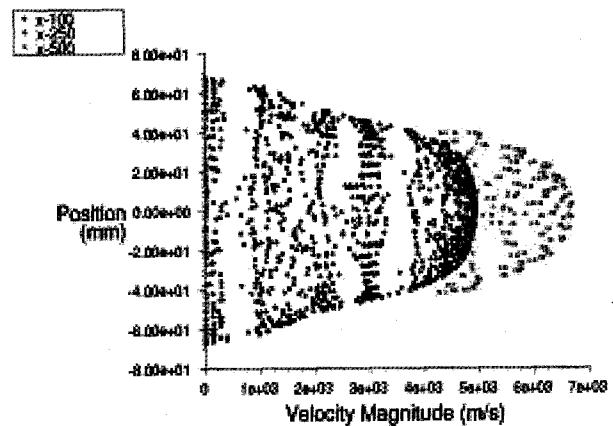


Fig. 9 Velocity distributions in cross-sectional area



(a) y-direction



(b) z-direction

Fig. 10 Velocity distribution graphs

Fig. 9는 완전개방상태에서 임의단면에서의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 각 단면을 살펴보면, 전체적 유동은 각 단면에서 균일한 형태를 띄고 있으며 중앙부로 갈수록 가속되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 볼 밸브 이후부터 하류 방향으로의 거리가 100, 250, 500인 위치에서의 속도의 분포를 그래프로 나타낸 그림이다. 그래프로부터 다시 확인 할 수 있듯이, 볼 전후의 속도 분포는 균일하게 분포하고 있으며 하류방향으로 갈수록 속도의 크기가 증가

하고 있다. 또한 속도 프로파일은 전형적인 유속분포인 포물선 형태를 잘 유지하고 있다.

4. 결 론

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

1. 고압, 초저온용 볼밸브를 실제와 같은 기하학적 형상과 일치하도록 유한요소 모델링을 하였다.
2. 볼 밸브 외부 온도는 690℃, 내부온도는 -190℃로 하여 화재발생에 대한 안전성을 고려하고 입구압력은 168kgf/cm², 80kgf/cm²으로, 출구압력은 대기압으로 설정하여 유동특성을 해석하였다.
3. 응력해석 결과를 평가하기 위하여 최대응력을 참조하여 해석결과를 분석한 결과 스프링 홀더 에서 최대응력 2,114MPa이 발생되었다.
4. 열팽창과 볼 밸브 내부의 고압조건에 의한 중요 몸통 부, 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 탄성봉인과 고 온에서의 금속 봉인에 의한 제로 누설량을 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.

참고 문헌

- 1) J. G. Eleftherakis, "Determining valve contaminant sensitivity effect using two contaminants", SAE TP 910960, pp. 459~464, 1991.
- 2) G. Thompson and A. R. Askari, "Air leak detection through ball plug valves by vibration monitoring", Noise & Vibration control worldwide, Vol. 17, pp. 140~143, 1986.
- 3) Rouss, J. J. Gino and S. William, "Determination of discharge coefficient for ball valves with calibrated inserts", 2003 ASME Mechanical engineering congress, pp. 1~10, 2003.
- 4) P. Merati and M. J. Macelt, "Flow investigate around a v-sector ball valve", 2001 ASME Fluids engineering, Vol. 123, No. 3, pp. 662~671, 2001.