2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Globe밸브의 개도에 따른 밸브 구조물의 응력해석

Stress Analysis with Open Rate of Globe Valve

양상민[1], 김동진[2], 박종학[3], 허태영[1], 김봉호[1], 송동섭[1], 김찬용[1]

[1](주)한빛파워서비스
대전광역시 서구 만년동 386
[2]한국기계연구원
대전광역시 유성구 장동 171
[3]한국가스공사 연구개발원
인천광역시 연수구 동춘동 973

요 약

배관 시스템에서 유체의 개폐, 교축, 역지, 과입방지로 사용되는 Globe밸브의 안전성을 평가하기 위해 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 해석에 사용되는 유체의 내압을 찾기 위해 실험과 3차원 유동해석을 수행하였으며 밸브 내부의 개도율 변화에 따른 최대 압력은 0.0021 kg/mm^2부터 0.0127 kg/mm^2까지 발생됨을 알 수 있었다. 계산된 결과를 밸브의 body부에 적용하여 밸브의 body에 작용하는 응력을 분석하였으며 응력이 집중되는 부분을 찾을 수 있었다. 밸브몸체의 최대응력은 유체의 운동방향이 변화되는 부분에서 발생되며 개도율 변화에 따라 11.7 MPa부터 3.6 Mpa까지 최대응력이 발생된다. 밸브몸체의 최대응력은 재료의 항복강도의 3.4 % 내에 존재하므로 강도상 안정적임을 알 수 있다.

Abstract

Finite element method is employed to evaluate the safety of globe valve which plays a important role to control flow rate, flow direction and high pressure drop in piping system. To find out the pressure acting on the inner surface of globe valve, numerical analysis for fluid flows is carried out with opening rate of valve using commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) code. According to fluid flow analysis, the maximum pressure varied with opening rate of valve. The results from the numerical analysis for fluid flows is available to make the boundary conditions for FEM analysis. Maximum stress appears on the inlet channel of valve

where inlet flow runs against. Because the maximum stress between 11.7 MPa to 3.6 MPa is within 3.4% of yield stress, the structural safety of valve is considered to be very sound.

1. 서 론

배관 시스템의 중요한 요소인 밸브는 유체의 유량, 압력, 방향 등을 제어하는 역할을 하며, 개폐(on-off), 교축, 역지(non-return), 과압방지(overpressure protection)등의 주요 기능을 수행한다.[1] 원자력 발전설비에 사용되는 밸브는 일반적으로 Globe 밸브와 Gate 밸브가 널리 사용된다. 특히 Globe 밸브는 고차압 제어용 밸브로서 활용도가 증가하고 있다. 고차압 밸브의 특징은 밸브 전·후단에서 발생되는 압력차이가 크므로 유체의 포화증기압보다 낮아지게 되며 기포발생을 유발한다. 이러한 기포발생에 의해 공동현상(cavitation)과 후래싱(flashing) 현상이 발생된다.[2] 원자력 발전소의 배관 시스템에 사용되는 밸브는 모터 및 공압 실린더 등에 의해 작동되며, 원격조정이 가능하도록 설치되어 있다. 밸브시스템이 부적합한 설계는 작동상의 문제점, 고장 및 파손을 유발할 수 있으므로 운전조건에 적합하게 설계 되어야 된다. 본 연구에서는 Globe 밸브내부의 유체유동에 따른 압력분포를 상용 프로그램(Fluent)을 이용하여 3차원 유동장 해석을 하였으며, 실험을 통해 밸브의 전후압력을 측정하였다. 밸브내부에 작용하는 압력 값을 Fluent로부터 계산하고 계산된 압력결과를 ANSYS를 이용하여 밸브 구조물에 적용하였다. 밸브의 개폐량은 완전히 닫혀진 상태(0%)와 완전히 열려진 상태(100%)를 기준으로 0 % 25 %, 50 %, 75 %, 100%의 개도율에 따른 밸브 몸체의 응력분포를 해석하였다. 본 연구에서는 유체의 압력과 실린더의 작동하중에 의한 공기구동밸브의 응력을 평가하였으며, 재료의 항복강도와 비교하여 안전성을 판단하였다. 최근 연구에서 수치적 방법과 CFD-ACEA코드를 이용하여 밸브 개도율에 따른 공동현상 유무 및 밸브 유량계수 산출을 연구하였으나 밸브구조물의 안전성을 평가하는 연구가 거의 논의 되지 않았다[3]. 버터플라이 밸브의 디스크 각도 변화에 따른 3차원 유동장 해석에 관한 연구가 진행되었으나 실험이나 3차원 유동장 해석결과는 보고된 바가 없다[4]. 본 연구의 목적은 3차원 유동장 해석으로부터 얻은 표면 압력분포를 밸브 구조물에 적용하여 밸브 구조물의 응력분포를 분석하기 위한 것이다.

2. AOV 시스템 구성 및 실험

본 연구에 사용된 실험장치는 물 저장탱크로부터 일정한 유량의 유체를 배관시스템에 연속적으로 유동시킬수 있도록 구성하였으며, 배관에 제어밸브인 글로브(globe)밸브를 장착하였고 공기구동부에 의해 작동된다. 공기구동부에 의해 트림(trim)의 상하 운동이 제어되고 일정한 하중으로 플러그(plug)에 하중을 부여할 수 있도록 구성되었다. 밸브가 완

전히 잠겨있을 경우, 플러그는 밸브 내부에 장착된 시트(seat)와 접촉되며, 유체흐름을 차단하고 플러그의 높이 변화에 따라 개도율이 달라진다. 그림 1은 글로브밸브가 장착된 배관시스템의 개요를 보여 주고 있다. 배관 시스템의 유량과 압력은 펌프의 성능에 의해 결정되며, 글로브밸브 전단에 유량게이지를 장착하여 유체 유량을 실시간으로 측정하고, 밸브의 전단부와 후단부에 압력게이지를 장착하여 유체압력을 측정하여 밸브의 차압을 계산하였다. 유량게이지와 두개의 압력게이지의 출력은 1~4V의 전압 신호이며 DAQ Board를 이용하여 얻은 신호는 실시간으로 데이터를 분석하였다. 데이터 취득 및 처리 프로그램은 C base인 Lab-Windows 프로그램을 이용하여 개발하였다.

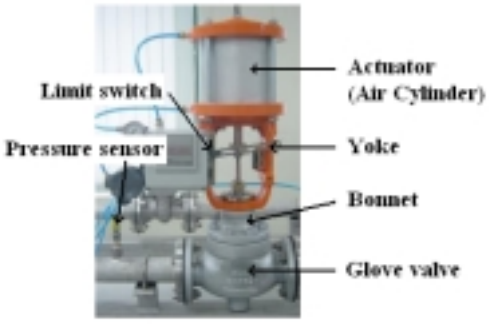


그림 1 Globe 밸브의 구성

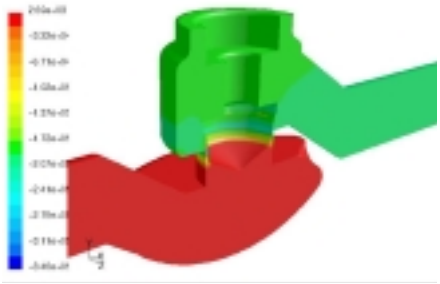
3 개도율 변화에 따른 밸브 유체부의 응력해석

글로브밸브의 유체부(body)는 내부에 유체의 유량을 제어하기 위한 플러그(plug)와 시트(seat)가 삽입되어 있으며, 밸브 내부의 곡면형상에 의해 유체가 "S"자형으로 유동된다. 플러그의 높이변화는 유량의 크기를 조정하는 역할을 한다. 흐르는 유체에 의해 밸브내부의 표면은 압력이 작용한다. 또한 밸브의 상단부분에 플러그의 작동을 위한 본넷, 요크, 실린더가 조립되어 있다. 밸브의 유체부는 내부의 수압과 외부의 하중을 받는 구조물이다. 밸브의 측면은 플랜지가 장착되어 있으며, 4개의 볼트에 의해 파이프가 장착되어 있다. 본 연구에서는 플러그의 다양한 높이변화에 따른 밸브 유체부의 응력상태를 분석하였다. 플러그의 높이는 완전히 차단된 0 %와 완전히 개방된 100 %를 기준으로 5단계(0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %)나누어 계산하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 사용하였으며, 대칭조건으로 해석하였다. 밸브 유체부의 유한요소모델 형성에 사용된 요소의 수는 22163개 이며, 절점수는 5557개이다. 표 1은 Fluent해석으로부터 얻어진 압력결과이며, 4종류의 개폐정도에 따른 최대압력과 최소압력을 나타낸다. 그림 2는 개도율을 25 %, 50 %, 75 % 100 %일 때의 유체 압력분포를 나타낸다. 개도율이 50 %이하는 플러그 통과 전·후의 압력차가 크게 발생된다. 그러나 75 % 이상에서는 유동관의 직경이

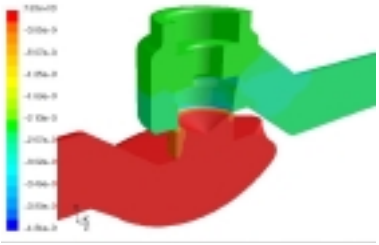
증가되어 플러그 전·후의 압력차이가 크게 발생되지 않으며 원활한 유동특성을 나타낸다. 유체해석으로부터 얻은 압력 값을 밸브몸체의 내부 유동부분에 표면압력으로 적용하였다.

표 1 밸브의 개도율에 따른 최대압력과 최소압력

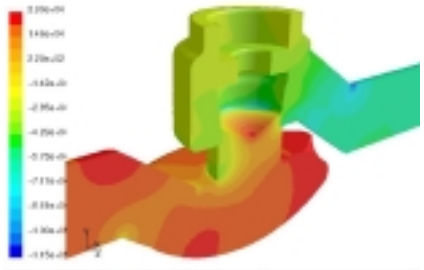
Open rate (%)	25	50	75	100
Max. pressure (kg/mm^2)	0.0021	0.0276	0.0152	0.0127
Min. Pressure (kg/mm^2)	-0.0335	-0.0174	0.0003	0.0003



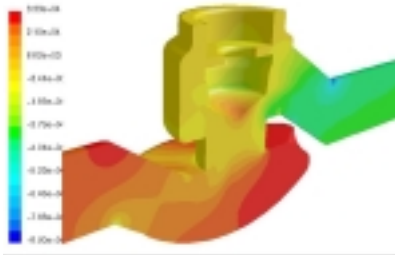
(a) 개도율 : 25 %



(b) 개도율 : 50 %



(c) 개도율 : 75 %



(d) 개도율 : 100 %

그림 2. 개도율 변화에 따른 압력분포

그림 3은 밸브 유체부의 유한요소형상을 나타내며, 압력이 작용된 면을 나타내다. 플랜지 부분은 배관 시스템의 파이프와 완전고정된 것으로 가정하여 6자유도를 완전 구속하였으며 밸브 유체부의 상단부분은 실린더의 무게(25 kg), 요크의 무게(5.7 kg) 그리고 본넷의 무게(4.4 kg)에 작용되는 압력으로 밸브 유체부의 상단부분에 부여하였다. 그림 4는 개도율 변화에 따른 내부압력의 변화를 고려하여 해석한 밸브 유체부의 Von-mises 응력선도를 나타낸다. 밸브 유체부는 주물구조물이며, 탄성계수 205 GPa과 항복강도 385

MPa 밀도 7850 kg/mm^3 의 물성을 갖고 있다. 내부의 압력과 상단부분의 하중작용에 의한 밸브 유체부의 응력은 표 2와 같이 항복강도의 0.93 % 부터 3.24 % 이내에 발생되므로 강도상 안정적임을 알 수 있다. 밸브 유체부의 유체 유동면에서 상대적으로 높은 응력이 발생되었으며 특히 전단부의 유체흐름이 변화되는 부분에서 최대응력이 나타났다.

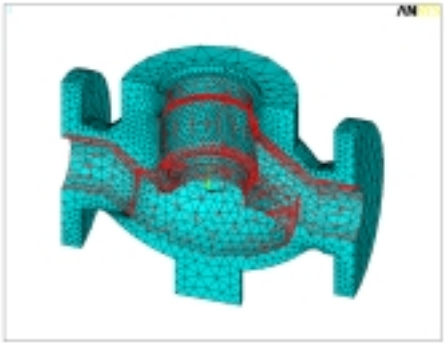
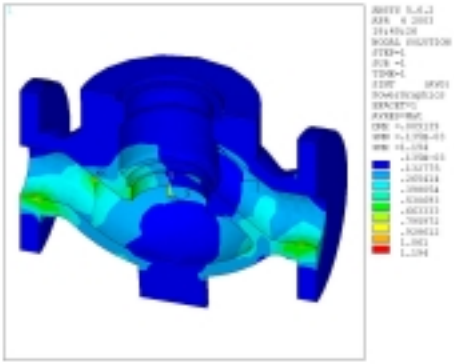
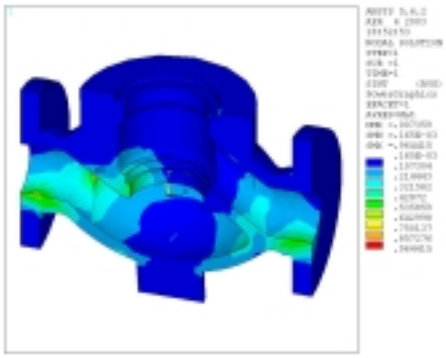


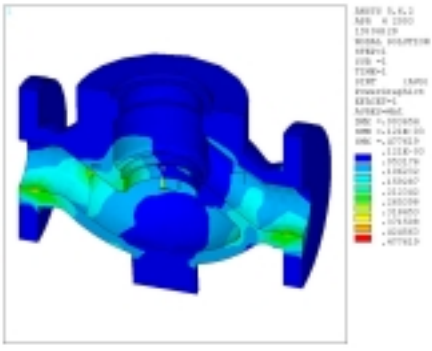
그림 3 유체부의 유한요소형상
및 내압작용면



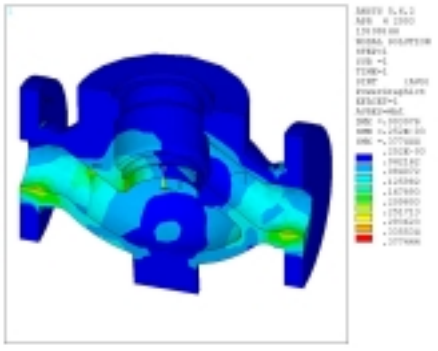
(a) 개도율 : 25 %



(b) 개도율 : 50 %



(c) 개도율 : 75 %



(d) 개도율 : 100 %

그림 4 개도율 변화에 따른 밸브 유체부의 Von-mises 응력선도

그림 5는 다양한 개도율 변화에 따른 밸브 유체부의 최대응력을 나타낸 것이다. 플러그

의 개도율이 높으면 높을수록 유량이 증가되며 내부압력이 감소된다. 내부압력 감소에 의해 밸브 유체부의 표면에 작용하는 최대응력이 감소됨을 알 수 있다.

표 2 밸브의 개도율 변화에 따른 최대응력과 항복강도의 비교

Open rate (%)	0	25	50	75	100
Max. Stress (MPa)	12.6	11.7	9.45	4.68	3.6
Yield Stress (MPa)	385	385	385	385	385
Remark (%)	3.27	3.04	2.45	1.21	0.93

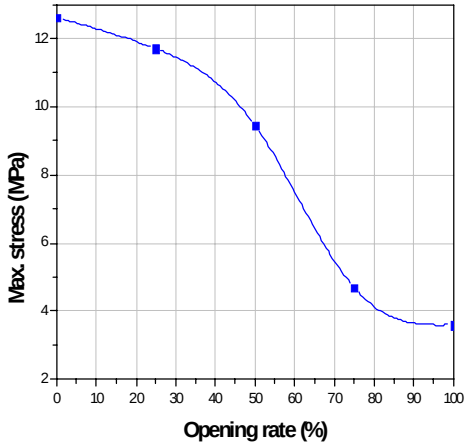


그림 5 개도율 변화에 따른 유체부의 최대응력

그림 6 Yoke의 유한요소모델링 형상

4.3 밸브 부속구조물의 응력해석

4.3.1 요크구조물 응력해석

요크 구조물은 밸브의 유체부와 구동부 사이에 연결되며 상단부분은 구동부가 장착되고, 하단부분은 본넷을 통해 밸브의 유체부와 연결된다. 측면에 I/P positioner와 리밋 스위치(limit switch)가 장착되어 있어 구동부에 유입되는 공기량을 조절하고 밸브의 Open/Close를 감시할 수 있다. 그림 6은 요크의 유한요소모델 형상을 나타낸다. 요크의 유한요소모델 형성에 121010개의 요소와 25799개의 절점이 사용되었으며 ansys 5.6에서 제공되는 solid 72요소를 사용하였다. 해석에 사용된 solid72 요소는 1개의 요소에 4개의 절점으로 구성되며, 각각의 요소는 6자유도를 갖는다. Soild72 요소는 복잡한 3차원 구조물의 선형해석에 추천되는 요소이다. 요크의 상단부분은 실린더의 무게(25 kg)가 접촉면

적(8419.5 mm^2)에 균일하게 하중이 작용하는 것으로 고려하여 균일압력을 부여하였다. 요크의 하단부분은 본넷의 상단부분과 나사 체결되므로 완전고정으로 가정하여 해석하였다. 요크 구조물은 주물가공으로 제작되었으며 103 GPa의 탄성계수와 17 MPa의 항복강도를 갖는다. 해석에 고려된 밀도는 7250 kg/m^3이 사용되었다. 그림 7과 그림 8은 요크 구조물의 해석결과를 Von-mises 선도로 나타낸 것이다. 응력해석 결과 최대응력이 1.82 MPa이다. 요크재료의 항복강도 17MPa의 10.7 %이므로 안정적임을 알 수 있다.

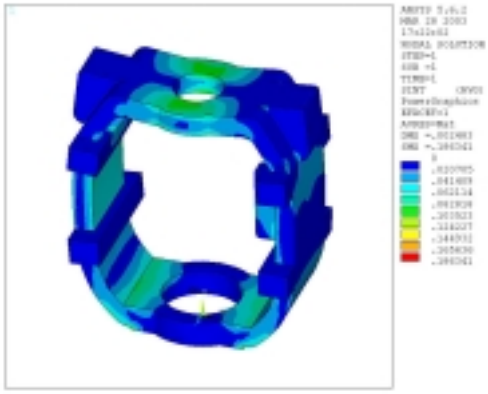


그림 7 요크구조물의 Von-Mises 응력분포

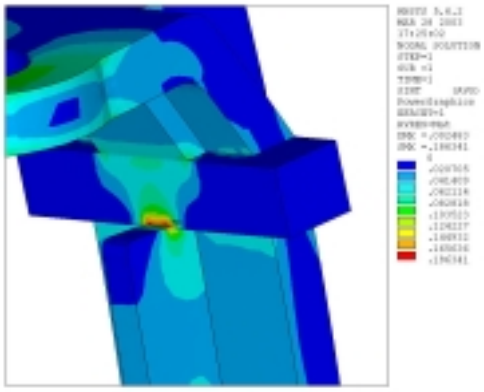


그림 8 보강부분의 최대응력형상

4.3.2 본넷 구조물의 응력해석

본넷 구조물은 밸브의 유체부와 요크를 연결하는 요소로서 요크의 하단부분은 유수를 막기 위한 실링구조물이 삽입되어 있으며 밸브몸체의 상단부분과 6개의 볼트로 완전 고정되어 있다. 상단부분은 요크와 나사 체결되어 실린더와 요크의 무게를 지지한다. 유한요소해석에서 밸브의 유체부와 결합되는 하단부분은 6자유도로 완전 구속하였으며, 상단부분의 나사체결부에 요크의 무게(5.7 kg)와 구동부의 무게(25 kg)를 수직방향으로 고려하였다. 그림 9는 축대칭으로 표현된 본넷의 유한요소형상을 나타낸다. 본넷의 해석에 사용된 요소수는 16571이며, 절점수는 3928개이다. 요소의 종류는 요크해석과 동일한 solid 72요소를 사용하였다. 그림 5는 축 방향으로 하중이 작용하는 본넷의 응력상태를 나타낸다. 본넷의 해석에 사용된 물성은 밸브몸체와 동일한 주물 구조물이며 탄성계수는 205 GPa을 사용하였으며 밀도는 7850kg/m^3을 고려하였다. 요크 구조물의 항복강도는 385 MPa이며 해석결과 최대응력은 나사부분에서 6.78 MPa이 발생된다. 즉, 항복강도의 1.76%응력이 존재하므로 안정된 구조임을 알 수 있다. 그림 10은 본넷 구조물의 Von-mises 응력분포를 나타낸다. 최대응력은 요크 구조물과 나사 체결되는 부분에서 발생된다.

그림 9 Bonnet의 유한요소모델

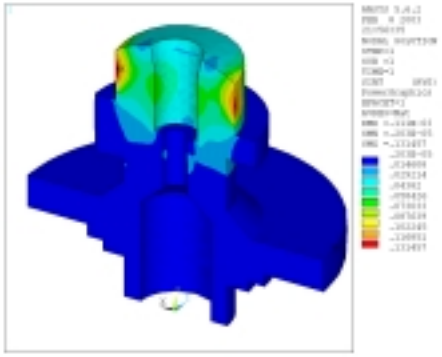


그림 10 Bonnet의 Von-Mises 응력분포

4.3.3. 플러그와 시트의 접촉응력해석

플러그는 트림과 연결되어 있으며 구동부에 의해 상하로 작동된다. 밸브가 차단된 경우 플러그가 시트와 접촉되며 유체의 흐름을 차단한다. 구동부의 작동 힘이 플러그의 상단에 작용되며, 플러그의 외면과 시트의 내면이 접촉된다. 플러그와 시트의 유한요소모델을 구성하였으며 접촉되는 부분에 접촉요소를 사용하여 접촉조건을 만족시켰고 접촉부의 마찰은 작용하지 않는 것으로 가정하였다. 유한요소모델에 98950개의 요소를 사용하였으며 19889개의 절점을 사용하였다. 밸브 유체부의 해석에 상용된 solid72요소를 사용하였다. 시트와 플러그는 스테인레스 강으로 제작되었으며, 200 GPa의 탄성계수와 206 MPa의 항복강도를 갖는다.

그림 11 접촉된 플러그와 시트의 유한요소형상

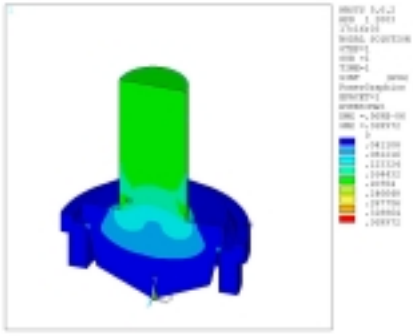


그림 12 플러그와 시트의 Von-Mises 응력분포

그림 11은 대칭으로 제작된 유한요소형상을 나타낸다. 플러그의 상단은 실린더의 최대하중 792 N이 작용하는 것으로 고려하였으며, 유체와 접촉되는 하단부분의 밸브 유체부의 내부에 작용하는 압력 360 KPa을 적용하였다. 시트가 밸브 유체부와 결합되는 부분은 완

전 고정된 것으로 가정하여 6자유도로 구속하였다. 그림 12는 밸브가 완전히 차단된 경우의 응력을 나타낸다. 해석 결과 실린더의 하중을 받는 플러그의 봉 부분에서 다소 높은 응력이 균일하게 나타났으며 시트와 접촉되는 면에서 최대응력이 발생되었다. 해석결과 최대응력은 3.6 MPa이 발생되었으며, 재료의 항복강도 206 MPa의 1.7 %정도 이므로 안정적인 구조물임을 알 수 있다.

5. 결 론

배관시스템에서 유체의 유량 및 압력 제어에 사용되는 공기구동밸브(AOV)는 밸브 구동부인 실린더 또는 다이어프램이 밸브의 상단에 장착되며 요크와 본넷에 의해 밸브의 하단부인 유체부와 연결되어 있다. 밸브의 내부는 유체의 유동 압력과 밸브 전후단의 차압이 밸브 구조물에 작용된다. 본 연구에서는 Globe 밸브에서 유체의 압력과 외부 하중에 의한 밸브 구조물의 구조적 안전성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 밸브의 개도율이 25 %부터 100 %까지 증가될수록 밸브 내부에 작용하는 최대압력은 0.0021 kg/mm^2에서 0.0127 kg/mm^2까지 증가 되었다.

(2) 밸브의 개도율이 25 %부터 100 %까지 증가될수록 밸브 유체부의 내부에 작용하는 최대응력은 11.7 MPa부터 3.6 MPa 까지 감소되었고 밸브 재료의 항복강도(385 MPa) 보다 극히 작은 범위에서 분포하므로 안전하다.

(3) 밸브의 부속 구조물인 요크와 본넷은 각각의 항복강도에 10.7 %와 1.76 %가 발생되므로 안정적인 구조물이다.

(4) 요크 구조물의 최대응력은 보강재의 연결부분에서 발생되며, 본넷의 최대 응력은 요크와 연결되는 나사부분에서 발생되었다.

(5) 플러그와 시트는 실린더의 하중과 밸브내부의 압력에 의해 상대하중이 작용된다. 실린더의 하중 792 N이 내부압력 360 KPa과 동시에 작용될 때 플러그와 시트는 완전한 접촉이 이루어지며, 접촉면의 응력은 3.6 MPa이 나타난다.

(6) 캐비테이션 및 후래싱 현상에 의한 주기적인 진동을 고려한 구조물의 고유진동해석에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

REFERENCE

(1) 배윤영, 1993, 유체 계통의 성능 최적화를 위한 펌프와 밸브의 선정, 한국원자력연구소 기술현황 분석 보고서, KAERI/AR-371/93

(2)l. Driskell, 1983, Control-valve selection and sizing, Instrument Society of America.

(3) 윤준용, 변성준, 양재모, 이도형, 2001, “고차압 제어용 글로브 밸브 트림 내부의 3차원 유동장 해석”, 유체기계저널, 제4권, 제3호, pp.14-20

(4)Chendong Huang, Rhyn H. Kim, 1996, "Three-dimensional analysis of partially open butterfly valve flows', Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol.118, pp.562~568.
(5) D. Peckner and I. M. Bernstein, "Handbook of stainless steels", McGraw Hill, 1997