

해양구조물용 고압 컨트롤 밸브 수치해석

이 중 섭[†], 장 성 철, 정 휘 원, 남 태 희

삼원기술(주) 기술연구소

A Numerical Analysis on High Pressure Control Valve for Offshore

Chung Seub Yi[†], Sung Cheol Jang, Hwi won Jeong, Tae Hee Nam

[†] Samwon Tech co.,LTD, Gimhae 586-1, Korea

ABSTRACT: This study have goal with conceptual design for Offshore Structures of high pressure control valve for localization. Ball valve for development accomplished with flow analysis based on provision of ANSI B16.34, ANSI B16.10, ANSI B16.25 In order to localize the Offshore Structures high pressure control valve. Numerical simulation using CFD(Computational Fluid Dynamic) in order to predict a mass flow rate and a flow coefficient form flow dynamic point of view. The working fluid assumed the glycerin(C₃H₈O₃). The valve inlet and outlet setup a pressure boundary condition. The outlet pressure was fixed by atmospheric pressure and calculated until increasing 1bar to 10bar. CFD analysis used STAR-CCM+ which is commercial code and Governing equations were calculated by moving mesh which is rotated 90 degrees when ball valve operated opening and closing in 1 degree interval. The result shows change of mass flow rate according to opening and closing angle of valve. Flow decrease observed open valve that equal percentage flow paten which is general inclination of ball valve. Relation with flow and flow coefficient can not be proportional according to inlet pressure when compare with mass flow rate. Because flow coefficient have influence in flow and pressure difference. Namely, flow can be change even if it has same Cv value. The structural analysis used ANSYS which is a commercial code. Stress analysis result of internal pressure in valve showed lower than yield strength. This is expect to need more detail design and verification for stem and seat structure.

Key words: Offshore(해양구조물), Control valve(제어밸브), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

밸브는 작동유체의 유량 및 압력 제어를 기본 목적으로 사용되는 유체기계의 중요한 부품이다. 밸브 역사만큼이나 밸브의 종류 또한 산업현장에서 폭넓게 이용되고 있다. 밸브를 설계할 때 가장 기본이 되는 입력데이터는 온도와 압력 값이 중요한 변수가 된다. 일반적으로 유체의 화학적 성상에 따라 밸브의 재질은 달라지나 밸브의 크기를 결정함에 있어 우선시 되는 것은 역시 압력과 온도일 것이다. 이와 아울러 누설을 방지하기 위한 패킹이나 가스킷에 의해 발생하는 외부누설이나 시트와 디스크 사이에서 발생하는 내부누설 또한 설계시 아주 중요한 설계변수가 된다.¹⁻²⁾

현재 국내 중화학공업분야(석유화학, 정유플랜

트, 발전설비)등 국가적인 관심에 힘입어 육상용의 경우 눈부신 발전을 이룬 반면 해상용의 경우 선진 선급관련 인증 및 실적선 부재로 인한 개발에 한계를 느끼고 있는 실정이다.

해양구조물(FPSO, Drill Ship, Semi-Rig)의 핵심 부품인 Control Valve는 유체의 유량 및 압력을 제어하여 시스템의 전달력을 변화시키는 유압기기로서, 국내 조선 및 해양 산업의 지속적인 성장에 따라 시장 규모가 계속적으로 성장하고 있으며, 21세기를 대표하는 고부가가치 부품으로 급부상하고 있다.

현재 거의 모든 해양 구조물에 적용되는 Control Valve는 글로브 밸브를 사용하여 왔으나 점점 버터플라이 형이나 볼 밸브가 증가추세에 있다. 이러한 밸브는 개폐부가 회전운동으로 작동하는 방식으로서 각도를 90도만 회전시켜도 밸브의 개폐가 가능하며, 글로브 밸브에 비하여 중량이 적다. 체적이 작아 좁은 공간에서도 사용할 수 있으며 유량 조절범위가 다른 밸브에 비하여 대단히 크다. 또한 유량계수가 일반 글로브

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-340-7183; fax: +82-55-342-9038

E-mail address: cs_yi@hotmailil.com

밸브에 비하여 약 3배 정도 크기 때문에 경제적 이고, 일반 유체는 물론 원유, 펄프, 슬러리, 고형 물질이 함유된 유체에 적합한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 적용되는 볼 밸브의 경우 원유를 이송시키는데 사용되며, 유량을 많이 통과시키는데 목적이 있다.³⁻⁴⁾

현재 수입에 의존하고 있는 고압 컨트롤 밸브의 국산화를 위해 본 연구에서 기초적인 자료로 활용하기 위해 연구를 시작하였으며, 볼 밸브에 관한 개념을 잡기 위한 개념설계를 우선 시행하고자 한다. 따라서 선진제품에 대한 역설계에 앞서 기초적인 형상에 대한 특성을 파악하여 상세 설계시 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 유동해석

2.1 유량계수

밸브규격 결정시에 전 세계적으로 가장 널리 이용되고 있는 계수는 밸브유량계수(Cv)로서 아래의 식(1)과 같이 적용할 수 있으며, 배관에 영향을 고려하지 않았다.⁵⁻⁶⁾

$$C_v = Q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 Q (gpm)는 유량을 나타내며, G_f 는 액체의 비중량, ΔP (psi)는 상류측과 하류측의 압력저하를 나타낸다.

2.2 유동해석방법 및 경계조건

볼 밸브의 개폐각도에 따른 유동특성을 분석하기 위해 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 사용하여 계산을 수행하였으며, 밸브가 완전 열린 상태에서 정상상태로 입구압력과 출구압력을 경계조건으로 두어 계산한 후 볼이 1°씩 회전하여 90°로 까지 계산을 수행하였다. 이 때 액츄에이터에 의해 밸브가 닫히는 시간은 30초로 설정하였다. 볼의 회전방법은 이동격자(moving grid)를 사용하였으며, 그 중에서 ASI(Arbitrary Sliding Interface)기법을 사용하였다.

본 연구대상의 볼 밸브는 해양구조물에서 점도가 높은 원유(crude oil)를 이송하는 배관라인에

설치되기 때문에 작동유체를 글리세린($C_3H_8O_3$)으로 가정하였다. 밸브 입출구는 압력 경계조건을 부여하였으며, 출구압력은 대기압력으로 고정하고 입구압력을 1bar~10bar까지 변화시켜 계산을 수행하였다.

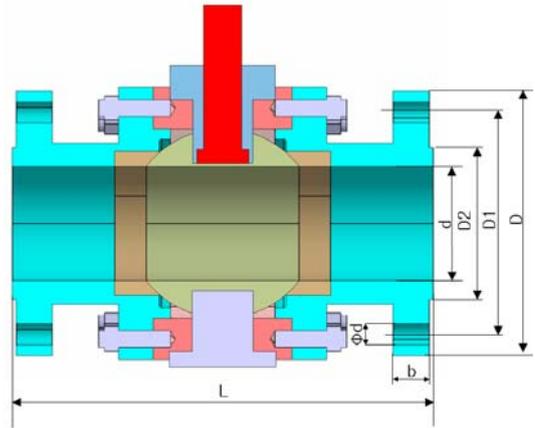


Fig. 1 Dimension of 3-piece high pressure ball valve

Table. 1 Dimension of valve

Mark	Value(mm)
d	203
D	470
D1	397.7
D2	269.9
b	63.5
Ød	38.1
L	740

Fig. 1은 본 연구에서 개발대상으로 삼고 있는 3-piece type 볼 밸브를 모델링한 것이며, Table. 1은 설계된 모델에 대한 기본치수를 나타내고 있다. 여기서 유체가 지나가는 영역만 모델링하여 계산격자를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 계산에 사용된 격자는 다면체(Polyhedral)로 약 20만개 소요되었다. 일반적으로 육면체에 비해 격자가 절반정도 절약되는 장점을 가지고 있다.

계산격자는 파이프와 볼을 각각 모델링하여 격자를 따로 구성하여 동 좌표계에서 Import시켰고, 파이프와 볼 부분은 Interface 시켜 물리량이 전달되도록 설정하였다. 앞서 언급된 ASI는 서로 상대운동을 하는 격자면을 Interface시켜 에너지를 상호 전달하는 Moving Mesh 기법으로 Node를 반드시 일치시킬 필요가 없기 때문에 격자면

형을 최소화 하면서 Time step을 결정함에 있어 보다 편리한 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구의 유동해석에서 관심영역인 밸브 개폐각도에 따른 유량(\dot{m})과 유량계수(C_v) 변화추이를 살펴보고자 한다.

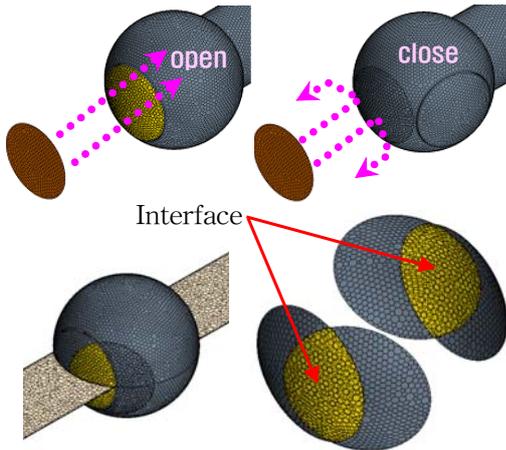


Fig. 2 CFD calculation grid system and region interface

2.3 유동해석결과 및 분석

Fig.3은 입구압력이 4bar일 경우 밸브가 닫힐 때 유동의 입자추적 결과를 나타내고 있다. 밸브 닫힘 각도가 증가할수록 볼 내부의 유동이 복잡하게 발생되고 내부 순환강도가 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한 볼 출구부분 파이프에서 유동재순환 영역이 발생함을 확인할 수 있고, 30°에서 가장 큰 유동재순환이 발생하였다. 이는 본 연구에서 설계된 볼 밸브 특성상 30° 부근이 밸브가 1/2 닫히는 지점이기 때문이다.

Fig. 4는 밸브 개폐각도에 따른 질량유량 변화를 나타내고 있다. 밸브가 열린 상태에서 닫히면서 유량이 감소하는 것을 알 수 있었고, 볼 밸브의 일반적인 특성인 등비(equal percentage)유동 형태를 나타내고 있었다. 또한 입구 압력이 증가할수록 유량은 증가되나 선형적으로 증가되지 못한 것은 출구 압력이 동일하기 때문에 볼 입구에서 압력이 크게 발생하였기 때문으로 사료된다.

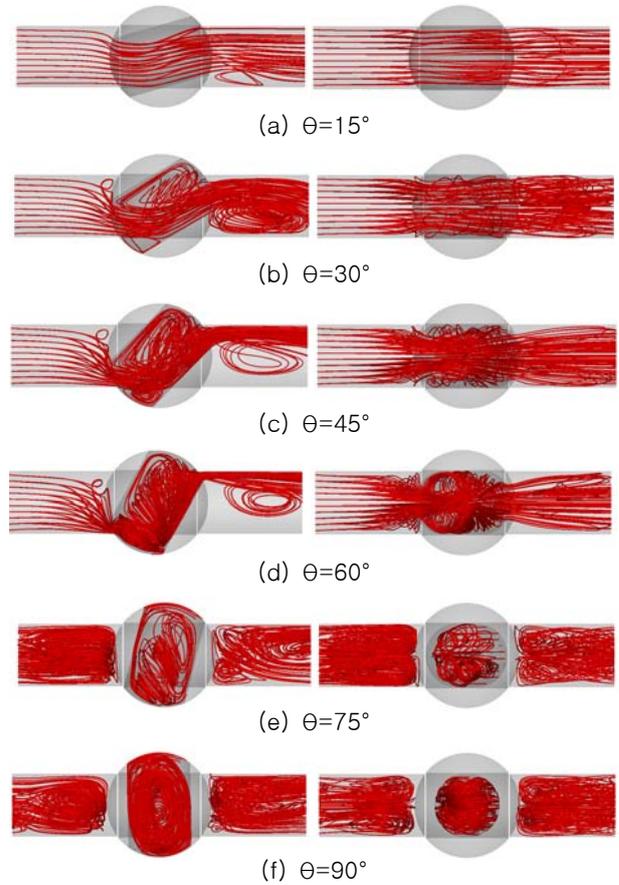


Fig. 3 Particle tracking distribution analysis results according to angles at Pin=4bar

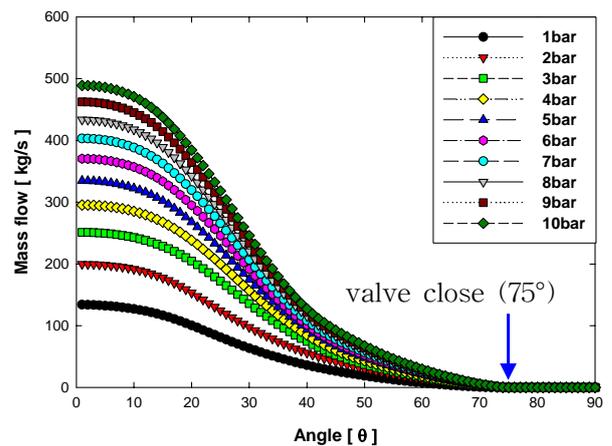


Fig. 4 Mass flow distribution by various input pressure

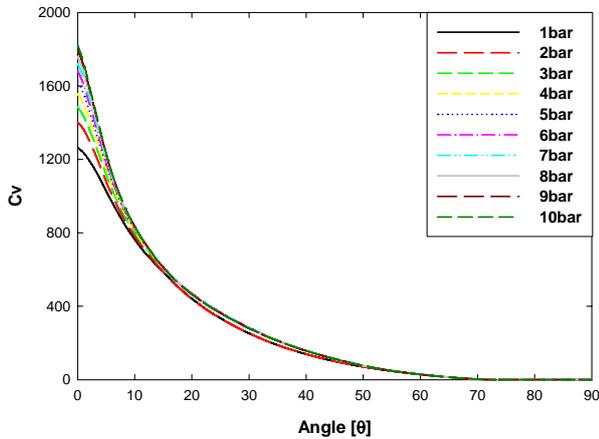


Fig. 5 Flow Coefficient(Cv) distribution by various input pressure

Fig. 5는 유량계수를 나타낸 것으로 유량과 압력차에 영향을 받기 때문에 Fig. 4의 질량유량과 비교해 보면 입구압력에 따라 유량과 유량계수와의 관계가 비례적일 수 없음을 확인할 수 있었다. 즉, 동일 Cv값을 갖더라도 유량은 달라질 수 있음을 의미하고 있다.

3. 구조해석

3.1 3D 모델링 개념설계

해양구조물용 고압 제어밸브를 국산화하기 위해 ANSI B16.34, ANSI B16.10, ANSI B16.25의 규정을 근거로 개발대상 볼 밸브를 Fig.6과 같이 모델링하여 구조해석을 수행하였다.⁷⁻¹⁰⁾

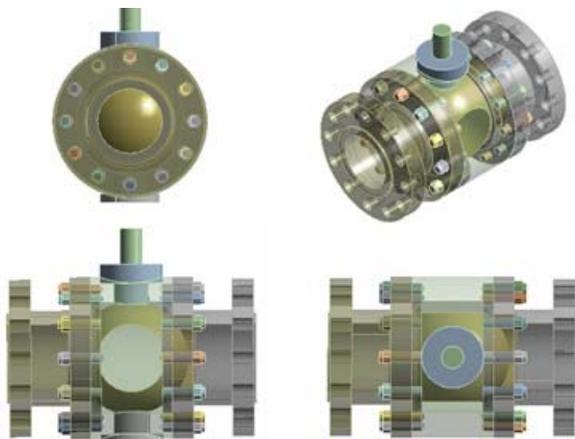


Fig. 6 3D modeling of ball valve

본 연구에서는 해석 대상의 형상 모델링 CATIA V5를 이용하여 개념설계를 하였으며, 수치 해석에 사용된 상용 프로그램은 ANSYS를 사용하여 해석을 수행하였다. 모델링과 해석의 편리성을 위해 나사산을 단순하게 처리하였으며 개스킷이나 링 부분은 모델링을 생략하였다.

3.2 유한요소모델링 및 경계조건

볼 밸브가 닫힌 경우의 압력조건을 사용하여 해석을 수행하였다. 또한, 볼을 제외한 바디(body)와 클로저(closure)의 압력을 적용하여 보았다. 밸브가 닫힌 경우는 압력이 바디에는 직접적으로 작용하지 않기 때문에 볼을 제외한 나머지 부분에 대하여 직접적으로 압력을 적용하여 바디와 클로저의 강도를 알아보려고 하였다. 볼 밸브의 응력 해석의 모델로는 3차원 유한요소모델(FEM)이며, Fig. 7은 볼 밸브의 계산격자를 보여주는 것으로 element 수는 100528개, node 수는 338904가 소요되었다.

구속조건은 파이프 연결 부분을 Fixed condition으로 가정하였다. 하중조건은 ANSI 1500 class로 가정하여 내압 150bar를 바디와 시트링, 볼에 적용하였다. Table. 2와 Table. 3은 각 파트의 재질과 물성치를 나타낸 것이다.

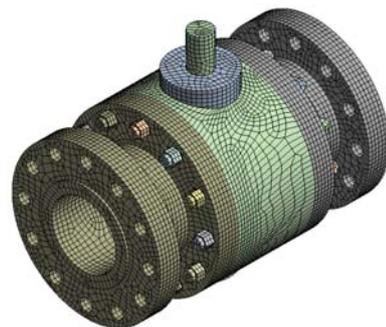


Fig. 7 CAE calculation grid system

Table. 2 Material of part

Part	Stainless Steel
Body	ASTM A182 F316
Seat	
Stem	
Trunnion	
Low Trunnion	
Ball	

Table. 3 Material properties

Properties	Value
Tensile Strength	515[MPa]
Yield Strength	310[MPa]
Young's Modulus	20.6E4[MPa]
Poisson's Ratio	0.3

3.3 구조해석결과

해석에서 사용한 물성치는 앞서 말한 Table. 3을 이용하여 해석을 수행하였다. 사용재질이 소성항복조건에 만족한다고 가정하고, Von-Mises 응력 값을 기준으로 평가하였다.

하중조건은 볼 밸브가 닫힌 경우 내압 150bar를 가했을 때의 응력분포를 Fig. 8에 나타낸 것이다. 최대응력은 밸브의 시트링에서 87.92MPa로 나타나고 있다.

Fig. 9는 최대변위를 나타내고 있으며, 최대변위 값은 0.036766mm로 압력에 의한 변형은 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 볼의 최대응력은 58.36MPa로 Fig. 10에 볼의 응력 분포를 나타내었다. Fig.11과 Fig.12는 플랜지, 시트에서의 응력 분포로서 최대응력은 47.51 MPa, 87.92MPa로 나타났다.

Fig. 13은 볼을 제외한 부분인 바디와 클로저에 압력을 적용한 응력을 나타낸 것으로 터니언과 바디의 접촉 부위에서 최대응력이 163MPa로 나타났다.

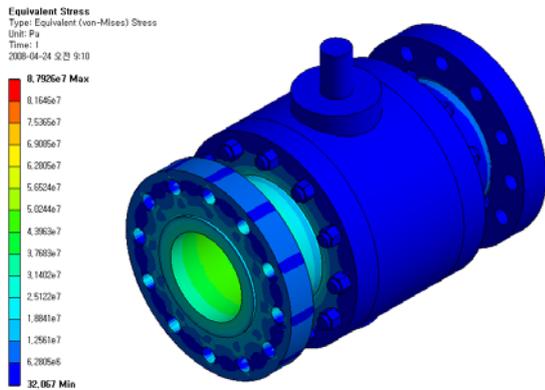


Fig. 8 Stress distribution for valve

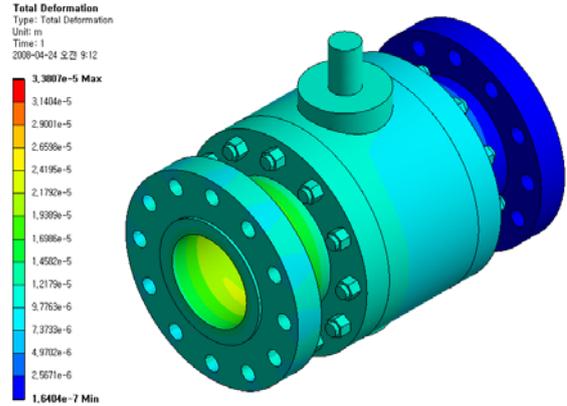


Fig. 9 Displacement distribution for valve

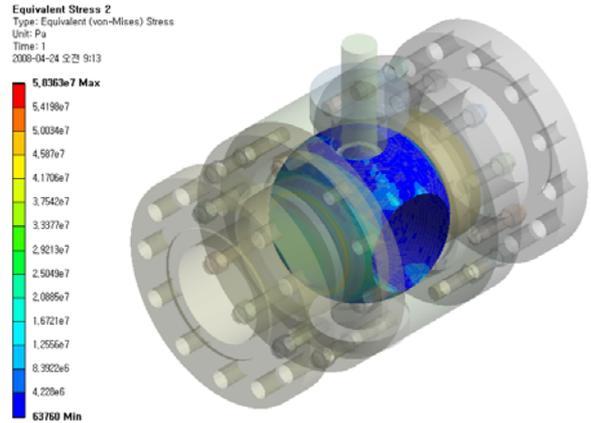


Fig. 10 Stress distribution for ball

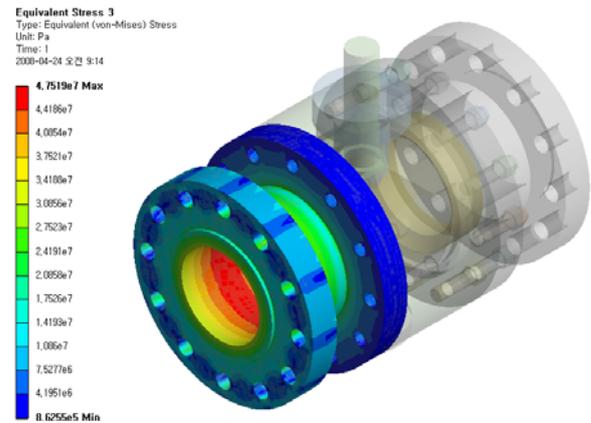


Fig. 11 Stress distribution for flange

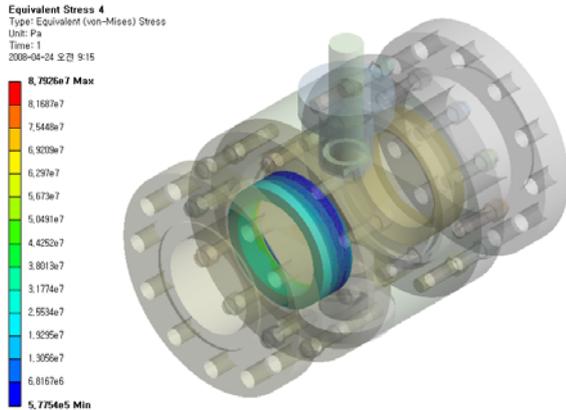


Fig. 12 Stress distribution for seat

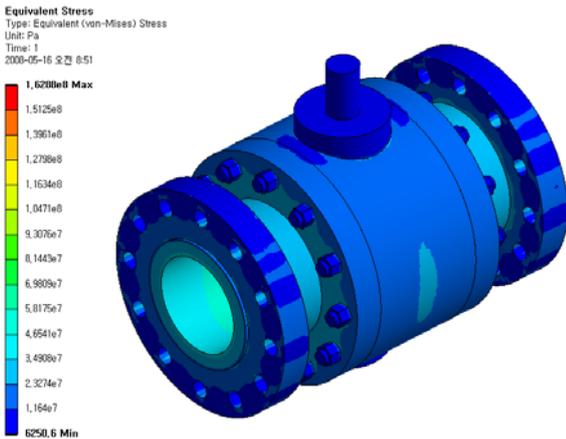


Fig. 13 Only body stress distribution except ball

4. 결 론

해양구조물용 고압 제어밸브를 국산화하기 위해 ANSI 규정에 맞는 볼 밸브를 설계하여 유동 특성과 구조강도에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과 유동특성의 경우 등비유동 형태를 나타내고 있었고, 닫힘각도 15° 이후에서는 유량계수가 유사하여 유량과 비례적인 관계가 성립되지 않음을 확인하였다.

구조해석의 경우 밸브에 작용하는 내압에 대한 응력 해석결과 항복 강도 보다 낮게 발생하고 있음을 알 수 있었으며, 앞으로 세밀한 설계로 스템과 시트구조 설계와 검증이 이루어져야 될 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 2007년 중소기업청 구매조건부신제

품개발사업(S1034793)에 의해 연구가 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Yoonchul Kim, 2004, Analysis and development of top entry type ball valve”, Chung-Ang University, Thesis for the Degree of Doctor, pp. 31-49
2. EMERSON, 2005, "Control valve handbook" fourth edition
3. T.Kimura and T. Tanaka, 1995, "Hydro-dynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of pressure loss characteristic", ISA Transactions 34, pp .319-326
4. K. Ogawa, T. Kimura, 1995, "Hydrodynamic of Butterfly valve-prediction of torque characteristics", ISA Transactions 34, pp. 327-333
5. Jinsoo Pyo, Choonsoo Jang, Kwangsuk Choi, Younjea Kim, 2007, "Operating Characteristics of the Flow Control Valve for the Radiant Heating System", Proceeding of the SAREK, Winter Conference, pp.552-557
6. Seunggyu Kim, Jungho Kang, Xueguan Song, Youngchul Park, 2007, "Relationship of Flow coefficient and Accuracy of opening Bellows Seal Valve", Proceedings of the KSMPE Autumn Conference, pp. 205-208
7. Smith, P., Zappe, R. W., 2004, "Valve selection handbook, Fifth edition".
8. ANSI/ASME B16.5, 1996, "Pipe flanges and flanged fittings", NPS 1/2 through NPS 24
9. ANSI/ASME B16.10, 2000, "Face-to-face and End-to-end dimensions of valves"
10. ASTM A194-01a, 2001, "Standard specification for carbon and alloy-steel nuts for bolts for high pressure or high-temperature service or both"