

석유화학용 Ball Valve 유동 및 강도 수치해석

이 중 섭^{1†}, 정 휘 원, 장 성 철, 남 태 희¹, 박 중 호, 윤 소 남²
 삼원기술(주) 기술연구소¹, 한국기계연구원²

A Numerical Analysis on Flow and Strength of Ball Valve for petrochemistry

Chung Seub Yi^{1†}, Hwi Won Jeong, Sung Cheol Jang, Tae Hee Nam¹,
 Jung Ho Park, So Nam Yun²

¹Samwon Tech co.,LTD, 586-1 Gadongri, Hallimmyeon, Gimhae, Korea

²KIMM, 104 Shinsung-Rho, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

ABSTRACT: This study have goal with reverse engineering for petrochemistry of high pressure ball 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 petrochemistry 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 water(H₂O). The valve inlet and outlet setup a pressure boundary condition. The outlet pressure was fixed by atmospheric pressure and calculated inlet velocity 5m/s. CFD solver used STAR-CCM+ which is commercial code. 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. 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: Petrochemistry(석유화학), Vall valve(볼 밸브), CFD(전산유체역학), FEM(유한요소법)

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.

석유화학 플랜트에서 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 석유화학 플랜트에 적용되는 Control Valve는 Glove Valve를 사용하여 왔으나 점점 Butterfly형이나 Ball Valve가 증가추세에 있다.³⁻⁴⁾ 이러한 Valve는 개폐부가 회전운동으로 작동하는 방식으로서 각도를 90도만 회전시켜도 Valve의 개폐가 가능하며, Glove Valve에 비하여 중량이 적다. 체적이 작아 좁은 공간에서도 사용할 수 있으며 유량 조절범위가 다른 Valve에 비하여 대단히 크다. 또한 유량계수가 일반 Glove Valve에 비하여 약 3배 정도 크기 때문에 경제적

† Corresponding author
 Tel.: +82-55-340-7183; fax: +82-55-342-9038
 E-mail address: cs_yi@hotmail.com

이고, 일반유체는 물론 Crude Oil, Pulp, Slurry, 고형물질이 함유된 유체에 적합한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 적용되는 볼 밸브의 경우 원유를 이송시키는데 사용되며, 유량을 많이 통과시키는데 목적이 있다.⁵⁻⁷⁾

현재 수입에 의존하고 있는 고압 컨트롤 밸브의 국산화를 위해 본 연구에서 기초적인 자료로 활용하기 위해 연구를 시작하였으며, Ball Valve에 관한 개념을 잡기 위한 개념설계를 우선 시행하였고 추가적으로 기존제품에 대한 역설계를 통해 상세 설계시 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 볼 밸브 역설계

역설계하기 위한 Ball Valve를 전부 분해한 후 Micrometer와 Vernier Calipers를 사용하여 측정하여 2D 도면화 시킨 후 CATIA V5를 사용하여 3D 모델링을 수행하여 역설계를 완성하였다.

Fig. 1은 역설계를 위해 분해된 Ball valve의 일부를 나타낸 것이고, Fig. 2는 3D 모델링한 것이며, Fig. 3은 CAD도면을 보여주고 있다. 역설계된 Valve의 규격은 8inch이며, 압력등급은 ANSI 규격 900 Class인 Ball Valve이다.⁸⁻¹⁰⁾ Valve의 총 중량은 약 630kg이며, 플랜지간의 면간거리는 724.5mm이고 플랜지 직경은 470.4mm이며 총 체적은 약 0.078m³로 비교적 대형 Ball Valve에 속한다. 부품은 총 41개로 구성되어 있으며, 부품 수량은 Actuator를 제외하고 총 145개로 구성되어 있었다. Table.1은 Valve 각 부품에 대한 재질을 정리한 것이다.



Fig. 1 Ball Valve parts for reverse engineering.

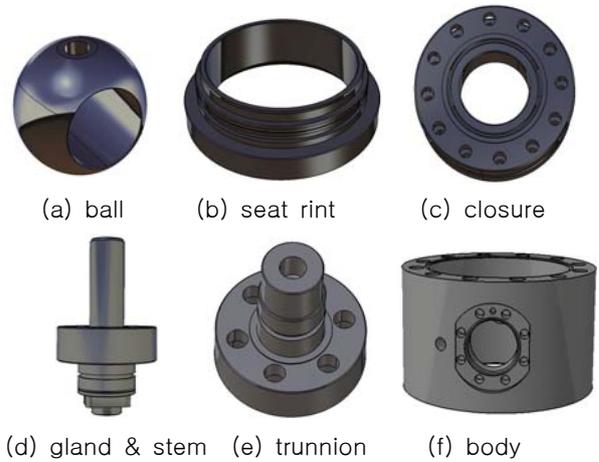


Fig. 2 3D modeling parts of ball Valve by reverse engineering.

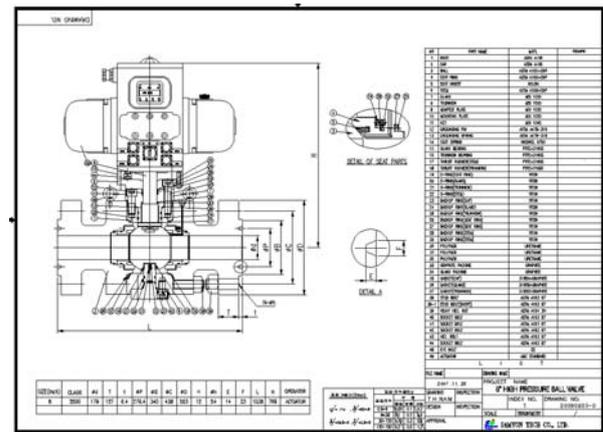


Fig. 3 2D drawing of ball Valve by reverse engineering.

Table. 1 Material of Valve parts

Part name	Material
Body	ASTM A105
Closure	ASTM A105
Ball	ASTM A105+ENP
Seat ring	ASTM A105+ENP
Seat insert	MC-Nylon
Gland	AISA 1020
Trunnion	AISA 1020
Adapter plate	AISI 1045
Mounting plate	AISI 1045
Grounding pin	ASTM A479-316
Grounding spring	ASTM A479-316
Seat spring	Inconel X750
Gland bearing	PTFE+316SS
Trunnion bearing	PTFE+316SS

3. Ball Valve 강도해석

3.1 해석모델 및 경계조건

CATIA V5를 이용하여 모델링된 Ball Valve를 강도수치해석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 모델링과 해석의 편리성을 위해 나사산을 단순하게 처리하였으며 개스킷이나 링 부분은 모델링을 생략하였다. 최적설계를 위하여 Valve의 각각의 단품을 강도해석을 통하여 모델의 타당성을 검증하였다.¹¹⁾ Valve가 닫혔을 경우 가장 높은 응력을 받기 때문에 Ball이 닫혀 있는 경우를 고려하여 해석을 수행하였다. 사용된 유한요소(FEM) 해석모델은 절점 수가 149,841개이고 요소망 수는 560,482개를 사용하여 해석하였다.

Fig. 4는 해석대상 Ball Valve의 경계조건과 유한요소격자 형상을 나타낸 것이다. 압력은 15MPa로 ANSI Class 900에 규정된 압력을 가했으며, 구속조건은 양쪽 플랜지에 완전 구속하였다.

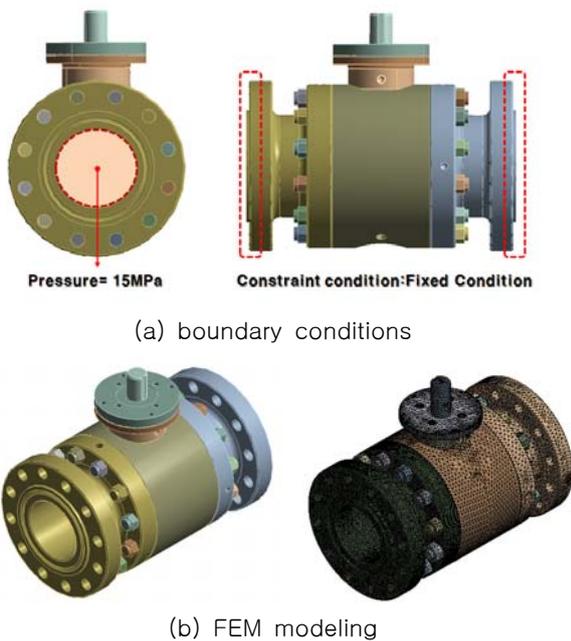


Fig. 4 Boundary condition and FEM modeling.

Table. 2 Material properties

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

3.2 강도해석 결과 및 분석

Fig. 5는 Valve의 전체적 응력 분포와 변위의 크기를 보여주는 것으로 최대응력은 Seat ring에서 발생하는데 응력은 66.19MPa로 나타났다. 또한 최대변위는 Ball이 압력에 의해 0.0507mm 밀려난 것을 확인할 수 있었다.

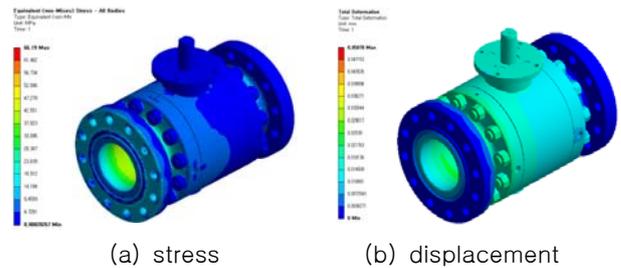


Fig. 5 Stress and displacement results of ball Valve.

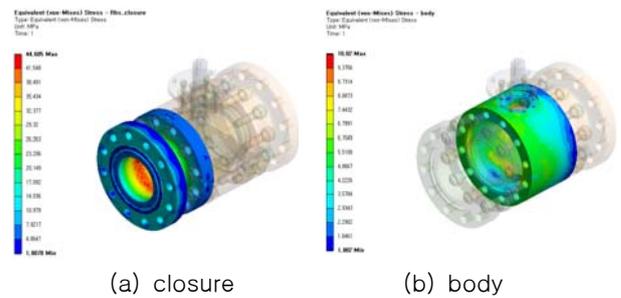


Fig. 6 Stress distributions of closure and body.

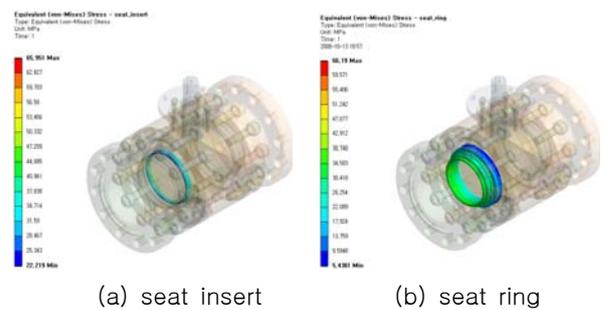


Fig. 7 Stress distributions of seat insert and seat ring.

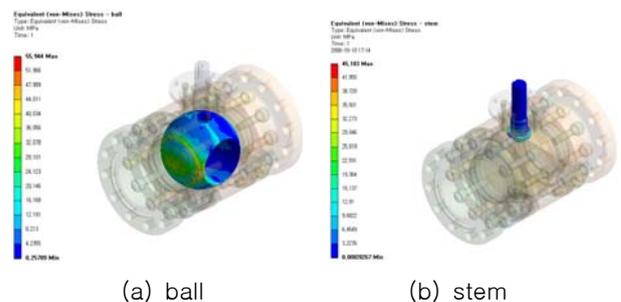


Fig. 7 Stress distributions of ball and stem.

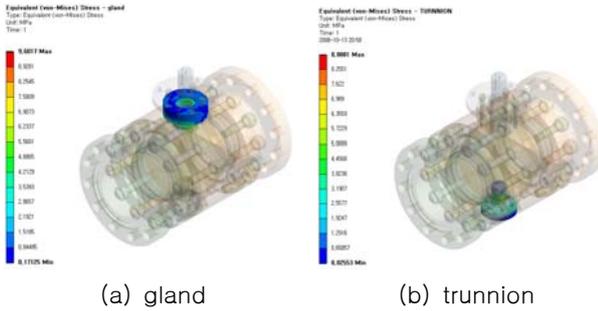


Fig. 9 Stress distributions of gland and trunnion.

Fig. 6은 Ball Valve 입구인 Closure는 Ball과 함께 직접적인 압력을 받는 부위로 규정압력에 대해 충분한 강도를 갖추기 위해 단조품으로 제작되어 항복강도가 크다. Closure의 최대응력은 44.61MPa로 항복강도 최소치인 250MPa 보다 훨씬 낮은 수치를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 Body의 경우 최대응력은 Ball과 Body의 접촉에 의해 아래 부분에서 10.02MPa로 나타나고 있다.

Fig. 7은 Seat insert의 해석결과로서 65.95MPa로 Ball과 Seat insert가 압력에 의해 접촉되면서 응력이 나타남을 확인할 수 있었고, Seat ring의 경우 최대응력이 Seat ring과 Seat insert가 결합하는 접촉부분에서 66.19MPa로 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 8은 Ball과 stem에 대한 해석결과를 나타내고 있다. Ball의 최대응력은 Seat insert와 Ball의 접촉에 의한 응력으로 55.94MPa로 나타났으며 Ball의 회전을 지지하는 Stem의 경우 최대응력이 45.18MPa로 나타났다.

Fig. 9는 Stem에서의 누설을 방지하기 위한 Packing이 있는 Gland의 경우 최대응력이 9.60MPa로 나타내었으며, Ball의 하부를 지지하는 Trunnion의 경우 8.89MPa로 Ball과 Body의

Table. 3 Maximum stress of each parts.

Part description	Maximum stress[MPa]
Ball	72.75
Body	21.17
Closure	48.69
Seating	89.54
Stem	68.18
Seat insert	105.73
Gland	9.60
Trunnion	8.89

경계에서 압력에 의해 접촉되면서 응력이 발생하는 것으로 나타났다. Table 3은 부품별 최대응력을 각 부품별 정리 한 것이며, 전체적으로 재질을 ASTM A105를 기준으로 정했을 때 항복강도 250MPa 보다 낮은 분포를 보이고 있다. 따라서 본 연구에 적용된 Ball Valve의 경우 강도적으로 충분한 것으로 판단된다.

4. Ball Valve 유동해석

4.1 유동해석방법 및 경계조건

Ball Valve의 개폐각도에 따른 유동특성을 분석하기 위해 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 사용하여 계산을 수행하였으며, Ball Valve의 작동유체는 H₂O로 가정하였다. 그 이유는 밸브 개발시 기본적으로 액체일 경우 H₂O를 가정하여 기본적인 특성을 파악하기 때문이다. 또한 밸브 Closure를 기준으로 입구측은 밸브 배관 직경의 약 5배인 750mm를 Extrude Layer Mesh를 생성시켜 입구면에 유속을 5m/s로 일정하게 유입되는 것으로 가정하였다. 또한 출구의 경우 배관직경의 약 10배인 1500mm Extrude Layer Mesh를 생성시켰고, 유입유량이 100% 유출되는 조건으로 설정하였다. 본 계산에 사용된 계산에 사용된 격자는 Polyhedral로 구성하였으며 약 90만개로 Fig. 10과 같다.

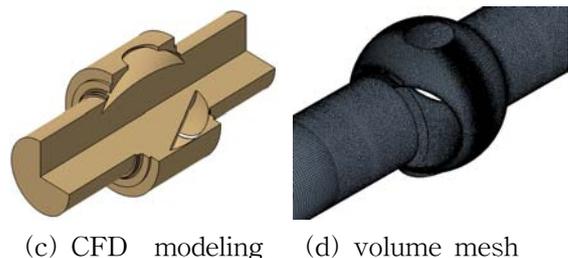
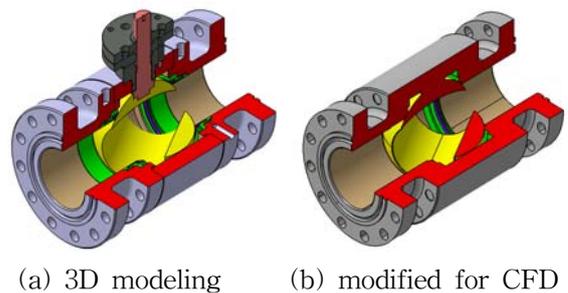


Fig. 10 CFD Modeling and mesh for ball Valve.

4. 2 유동해석 결과 및 분석

Fig. 11은 입자추적 결과를 나타내고 있다. 0°일 경우 유동의 저항을 받은 부분이 없기 때문에 일정하게 유동이 흐르게 된다. 반면 Valve가 닫히는 경우 Ball의 저항에 의해 유선이 틀어지게 되고 Valve를 통과한 후 각도에 의해 유동 재순환이 발생하게 된다. 이는 각도가 커질수록 유동 재순환이 커지고 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유동이 Ball을 따라 배출되는 것이 주류인 반면 Valve body 내부로 유입되는 유동이 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 단면에 대한 속도크기를 나타낸 결과이다. Ball이 0°일 경우 전반적으로 입구 경계 조건이 5m/s 부근의 속도를 유지하고 있지만, 볼이 닫히면서 축소부에서 속도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 Ball의 토출되는 각도의 벽면을 따라 토출되기 때문에 반대편 벽면에 비해 속도가 비교적 빠르게 된다. 따라서 속도 기울기가 발생하게 되어 자연스럽게 유동 재순환 구간이 발생함을 확인할 수 있었다. Ball 내부의 경우도 마찬가지로 유동이 흐름에 따라 내부 유동 재순환이 발생하고 되고 이는 유동이 빠른 배출이 불리하게 됨을 확인할 수 있었다. 각도가 커질수록 볼 내부의 유동 재순환이 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 13는 단면에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 0°일 경우 유동저항을 받은 부분이 없기 때문에 관 마찰에 의한 압력강하만 발생되며, 밸브가 닫히면서 입구측 Ball에서 압력이 가장 높게 나타나고 출구 Vena Contracta를 빠져나가면서 압력이

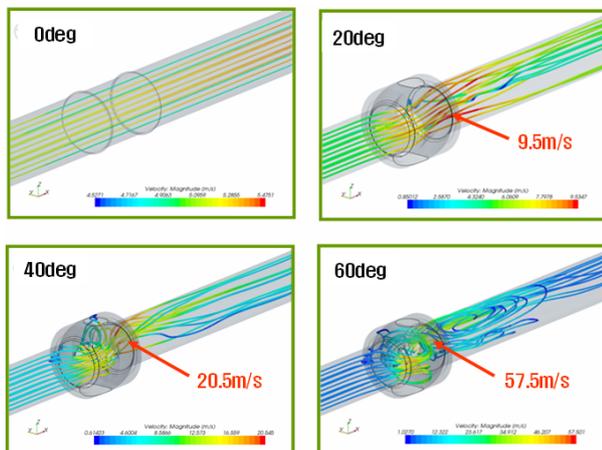


Fig. 11 Results of particle tracking

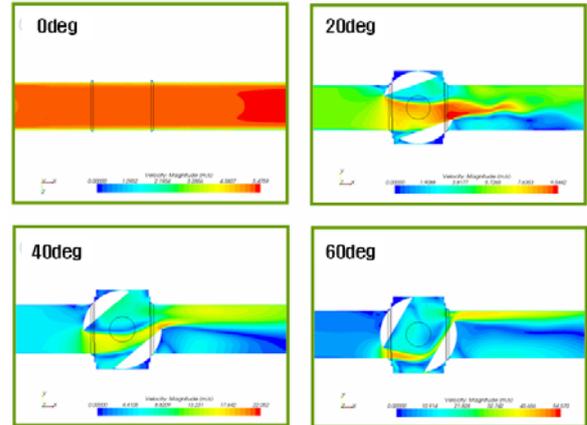


Fig. 12 Results of velocity magnitude.

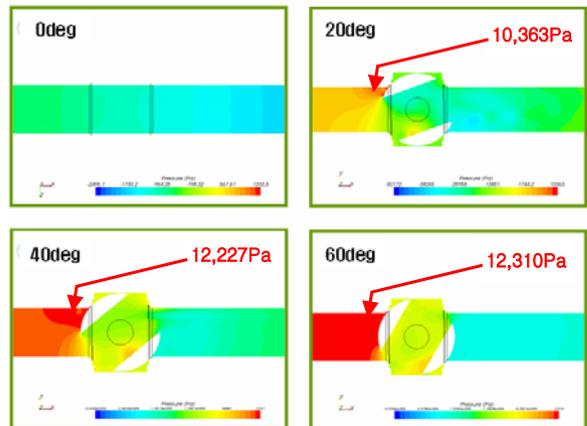


Fig. 13 Results of static pressure.

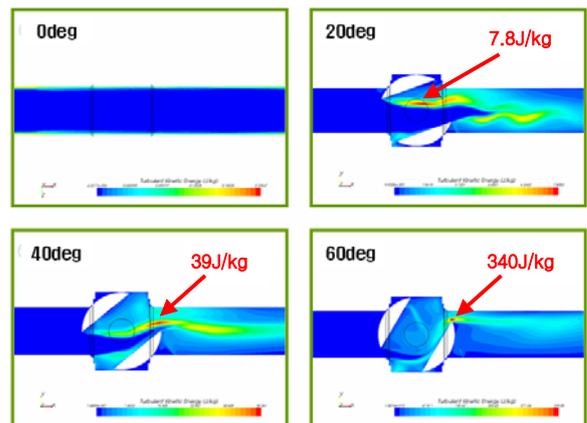


Fig. 14 Results of turbulent kinetic energy.

하강함을 확인할 수 있었다. 또한 토출구 쪽으로 진행할수록 압력회복이 진행됨을 알 수 있었다.

Fig. 14는 난류운동에너지를 나타내고 있다. 밸브가 닫히면서 Ball 내부에서 유동 재순환이 발생함에 따라 유동이 복잡해지고 이로 인해 난류

운동에너지가 증가함을 알 수 있었다. Ball 내부의 경우 축소부를 지나 볼로 유입되어 배출되는 주류와 유동 재순환 영역의 경계지점에서 난류운동에너지가 증가하였고, 토출측도 마찬가지로 유동의 주류와 유동 재순환 영역의 경계지점에서 난류운동에너지가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이는 추후 배관진동과 소음에 관련된 인자로서 이를 저감시켜주는 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

석유화학용 고압 Control Valve를 설계하기 위해 기존 제품에 대한 역설계를 수행하여 제작에 필요한 도면을 완성할 수 있었고, 이를 3D 모델링을 수행하여 역설계된 도면에 대한 검증과 오차검사 및 간섭검사를 통해 최종 도면검사를 수행할 수 있었다.

Ball Valve 구조에 대한 강도평가를 위한 수치 해석결과 최대응력은 Seat ring에서 66.19MPa 응력이 발생하였고, 최대변위는 Ball이 압력에 의해 0.0507mm 밀려난 것을 확인할 수 있었다. 이는 Seat ring에 설치된 Spring과 Trunnion에 설치된 Spring에 의해 충분히 기밀을 유지할 수 있다.

전체적으로 구조해석의 경우 밸브에 작용하는 내압에 대한 응력 해석결과 항복강도 보다 낮게 발생하여 구조적으로 안정적임을 확인할 수 있었다.

유동해석 결과에서는 출구측 Vena Contracta를 통과할 때 유속이 크게 증가하였고 Valve가 닫힐수록 배관에서 속도기울기가 크게 발생하여 유동 재순환영역이 발생하였다. 이는 결국 Valve에 의한 진동이 발생할 것으로 판단되며 추후 유동 재순환 영역을 억제할 수 있는 구조적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2007년 중소기업청 구매조건부신제품개발사업(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"
11. Chung Seub Yi, Sung Cheol Jang, Hwi won Jeong, Tae Hee Nam, 2007, "A Numerical Analysis on High Pressure Control Valve for Offshore" Proceeding of the SAREK, Summer Conference, pp. 1195-1200