Best Paper of this month

해양플랜트용 고압·고차압 제어밸브의 성능 평가

김규철^a, 이치우^{b*}

Performance Evaluation of High Pressure and High Pressure Drop Control Valve for Offshore Plants

Kyuchul Kim^a, Chiwoo Lee^{b*}^a Korval R&D Center, 1508-6, Dadae-Dong, Saha-Gu, Busan, Republic of Korea^b Department of Automotive Engineering Gyeongnam National University of Science and Technology, 150 Chilam-dong, Jinju, Gyeongnam, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	15	April	2013
Revised	5	August	2013
Accepted	25	September	2013

Keywords:

High Pressure and High Pressure Drop
Control Valve
Offshore Plants
Flow analysis
Cavitation
Pressure Drop
Flow Rate
Performance Evaluation

ABSTRACT

A high-pressure, high-pressure drop control valve, which transforms the power transfer of a system by reducing the inlet pressure of 345 bar to the outlet pressure of 112 bar, is a fundamental component in an offshore plant process. With the increasingly growing market share of the maritime industry, this valve has been expected to be a high-value-added product. This study not only analyzes the relation between pressure drop and fluid velocity in a trim by using fluid analysis, but also examines the possibility of cavitation in a valve in addition to the plot for the extension of lifespan. Based on the analysis results, the design and production method of the valve are established, and accordingly, performance evaluation is carried out. It is demonstrated that the pressure drop from 345 bar to 112 bar is more feasible in the presence of the trim, which can induce a continuous and diminutive pressure drop in order to prevent cavitation in a high-pressure drop control valve. Furthermore, despite the fluid velocity near a seat ring being found to be over 30 m/s, the lifespan of the valve is determined to be adequate considering the operation condition of a prototype valve of 80%.

1. 서론

고압·고차압 제어밸브는 입구압력 345 bar를 출구압력 112 bar로 감압 제어하여 시스템의 전달력을 변화시키는 해양 플랜트 프로세스의 핵심 부품이다. 해양 산업의 지속적인 성장에 따라 시장 규모가 계속적으로 성장하고 있으며, 21세기를 대표하는 고부가가치 부품으로 급부상하고 있다^[1,2]. 현재 지구상에는 화석연료에 대한

수요가 폭발적으로 증가하고 있는 실정이다. 특히 석유/가스의 대수심 채굴과 해상에서의 직접 가공을 위한 시도 등으로 해양플랜트의 대수심화, 프로세스를 포함한 복합화 경향으로 인해 FPSO, LNG FSRU 등 다양한 형태의 해양플랜트가 건조되고 있다. 특히, 육상의 지하자원보다 해상의 지하자원에 대해서 전 세계가 주목하고 있다.

이에 따라 해양플랜트 프로세스에 적용되는 오일 및 가스 처리장

* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-3643

Fax: +82-55-751-3649

E-mail address: leecw@gntech.ac.kr (Chiwoo Lee).

치 등에 광범위하게 적용되는 고압·고차압 제어밸브의 시장 규모가 계속적으로 성장하고 있다. 국내에서 건조되는 FPSO의 경우 적당 150~200개가 소요되어 경제적 가치가 150~200억 임에도 불구하고, 제어 밸브를 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

해양플랜트용 고압·고차압 밸브는 육상 플랜트, 해상플랜트, 육상 엔지니어링 등 다방면에 널리 적용되고 있다. 또한 이러한 밸브들은 각 해당분야에서 중요한 자리에 위치하며 각종 산업 등에 적용되고 있으나 고압·고차압 등의 영향으로 공동화현상, 플러싱, 부식, 떨림현상 등의 발생으로 인하여 밸브의 수명이 단축되고 진동과 소음 등으로 인하여 배관에 큰 영향을 미치고 있다. 현재 선진외국의 경우 여러 가지 방법으로 트림부를 개발하여 산업현장에 적용되어 왔으나^[3,4] 국내에서는 극히 드물게 일부에서만 적용되며 대중화 되지 못하였다. 대표적인 연구로서 유속감소를 위한 굽은 유로트림에 관한 연구 및 단 압력 감소를 위한 확장 이 트림에 관한 연구가 수행되어 왔으며, 대부분의 밸브 제작사는 굽은 유로, 단 압력감소, 확장유로 단면적과 같은 개념들 중 하나를 사용하거나 또는 조합하여 다양하고 정교한 트림을 개발하여 왔다.

본 연구에서는 고압·고차압 제어 밸브의 지그재그 트림에 대한 유동해석을 수행하여 트림 내부에서의 유속과 압력강하의 관계를 규명하고, 공동현상 발생 유무 및 수명향상 방안을 검토하였고, 이에 따른 밸브의 설계 및 제작 방법 등을 정립하여 성능평가를 수행하였다.

2. 전산 유동해석

2.1 기초방정식

6inch #2,500 글로브 고차압 제어밸브의 내부 유동을 분석하기 위하여 전산유체 해석 프로그램인 ANSYS-CFX를 이용하여 유체 속도, 압력 및 패턴을 분석하였다. 또한 前報^[5]에서는 해양플랜트용 고차압 제어밸브의 구조안정성 평가를 수행하여 수명향상 방향을 제시하였다. 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식에 관한 전산 수치해석을 통해 밸브 내부의 유동상태를 검토하였다. 그 지배 미분방정식인 밀도가 일정한 경우의 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho \tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (2)$$

Fig. 1 Shape of computational domain

Fig. 2 Finite volume mesh for CFD analysis

Table 1 Number of nodes and elements

Number of Nodes	2,641,366
Number of Elements	2,760,651
Tetrahedron	853,514
Hexahedron	1,592,900
Wedge	282,057
Pyramid	29,180

2.2 격자생성

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 유동해석상의 대칭성을 이용한 대칭경계조건(symmetry boundary condition)을 활용하였다. 격자망은 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 유동의 간섭이 심한 벽면 근처에 조밀하게 생성되도록 하였다. Table 1에 유한체적요소소의 총격자수와 총절점수를 나타내었다. 격자수는 약 265만개로 작성되었다.

2.3 경계조건 및 수치해석모델

고차압 트림부품의 설계는 아주 작은 유로 구간 내에서 압력강하를 최대화하기 위해 유동의 박리와 재순환을 유도하는 설계를 하게 되므로 전산유동해석에서 사용되는 난류모델들은 박리로 인한 재순환유동에서 많은 수치해석적 오차가 발생할 수 있다. 이러한 수치해석적 오차를 최소화하기 위한 난류 모델로서 SST (Shear Stress Transport) 모델을 활용하였다. SST모델은 k-ε모델과 k-ω모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는 k-ω모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 k-ε모델이 사용된다. 입구경계조건은 345 bar의 압력을 인가하였고, 작동유체의 온도가 50℃이므로 온도조건은 고려

하지 않았다. 출구경계조건은 일정압력조건 112 bar가 되도록 가정하였다. 그리고 모든 벽면에는 점착조건(no-slip)을 적용하였으며, 유동해석의 중심면을 기준으로 유동혼합이 없는 대칭경계조건을 설정하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 고차압 제어밸브를 운전조건과 밸브가 100% 개방하였을 때에 관하여 대칭경계면(a)에서와 트림부(b)의 X-Y 절단면에 관한 압력분포도 분석결과들을 나타내고 있다. Fig. 3(b)에서 트림의 출구부 쪽으로 가면서 압력이 급격히 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 트림 출구부에서의 압력이 약 95 bar로 감소되어 설계조건 차압인 233 bar보다 다소 큰 약 245 bar가 형성되었다가, 시트링 부근에서 약 101.5 bar로 다시 압력이 상승함을 확인할 수 있다.

Table 2 Control valves practical guides for measurement and control

Service conditions	Velocity (H ₂ O)	
	m/s	ft/s
Continuous service single phase fluids	35	116
Cavitating & multi-phase fluid outlet	30	97

(a) Symmetric plane (x-z plane)

(b) Trim cross-section (x-y plane)

Fig. 3 Distribution of pressure

시제품 설계시 예상한 차압 233 bar 보다 약 10 bar가 더 큰 243 bar 정도의 차압이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3에서와 동일하게 제어밸브를 100% 개방하였을 때의 유체속도를 분석한 결과를 나타낸 것으로 Fig. 4(b)에서 유체속도는 트림의 한 단계의 굴곡 형상마다 약 7.1%씩 유체속도가 감소되는 것으로 분석되었으며, Fig. 4(a)에서 시트링, 즉 출구영역에서 최대 40 m/s의 유체속도가 관찰되었다. 고차압 밸브 트림부의 속도가 높을 경우, 유체 운동에너지가 높아 트림부 재료의 손상을 유발할 수 있으며, ANSI/ISA-S75^[6]에서 제시하는 일반적인 유동조건은 밸브 트림 출구속도가 30 m/s 이하이면 문제점이 거의 발생하지 않고, 어떠한 경우에도 운동에너지가 1,030 kPa를 초과해서는 안 된다고 명시되어 있다. Table 2에 트림부의 유체속도 제한기준을 나타내었다. 그러나 시제품 설계의 경우 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 유체속도가 시트링에서 40 m/s 이상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 밸브 개도가 100%일 때 유체의 운동에너지를 나타낸 것으로 시트링에 손상을 일부 줄 수 있을 것

(a) Symmetric plane (x-z plane)

(b) Trim cross-section (x-y plane)

(c) Volume (above value of 30 m/s)

Fig. 4 Distribution of velocity

Fig. 5 Distribution of streamline

(a) Velocity profile in trim

(b) Pressure profile in trim

Fig. 6 Velocity and pressure profile in trim

으로 분석되었고, 상대적으로 구불구불한 트림부의 영향은 적을 것으로 사료된다. Fig. 4(c)에 유체속도 30 m/s 이상의 영역을 도시하였으며, 트림 내부의 유체흐름이 빠르고 증기기포가 형성되는 공동현상에 의한 영향은 적을 것이라 생각된다.

Fig. 5는 밸브 전체모델의 유선을 나타낸 것이다. 트림 전체에 걸쳐 고르게 유동이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 트림부에서 속도가 급격히 증가하고 압력이 급격히 떨어지는 현상을 볼 수 있으며, 시트링 쪽으로 유동이 흘러가면서 트림 출구보다 유동 압력이 일부 회복되고, 속도가 다소 상승하는 현상을 볼 수 있다. 시트링 출구의 외각 영역에서는 Vortex가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 유체입자가 트림 입구로 들어가 출구로 나오는 전 과정에 관한 속도 프로파일(a)와 압력 프로파일(b)을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 속도 프로파일을 살펴보면 입구로 들어간 유체입자는 트림의 구불구불한 유로를 거치면서 평균속도 38 m/s를 기준으로 진폭이 15 m/s 크기가 진동하며, 출구 쪽으로 흐른 후, 시트링 부근에서 다시 한 번 더 진동하는 현상을 관찰할 수 있다. 시트링 부근에서의 유체속도가 30 m/s 이상으로 나타났으나, 시제품의 작동조건이 80%이므로 사용수명은 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 추후 고차압 밸브의 수명을 향상시키기 위해서는 반드시 시트링 부근에서의 유체속도가 30 m/s 이하가 되도록 설계 되어져야 할 것이다. Fig. 6(b)는 유체의 압력강하 프로파일을 나타낸 것이다. 해석에서 고찰한 바와 같이 고압·고차압 밸브의 특성상 밸브 개도가 100%일때를 80%의 작동조건을 가지는 것으로 정의되므로, 유량계수가 낮으므로 인해 공동현상 발생이 적고, 이에 따른 밸브 수명은 충분하리라 판단된다. 설계의도에서와 같이 고압 345 bar에서 저압 112 bar로의 압력강하가 원활히 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

4. 고압·고차압 트림의 설계

4.1 유량계수(C_v)

본 연구에서는 고차압 밸브의 트림이 고차압에서의 유량 특성과 공동현상 체적의 발생 정도를 확인하기 위하여 전산해석을 수행하여, 유량성능과 캐비테이션 체적이 어떻게 변화하는지에 대해 연구를 진행하였다. 이때 밸브를 통과하는 유량(Q)는 다음 식 (3)을 사용하여 구할 수 있다^[7-8].

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \quad (3)$$

여기서, Q 는 체적유량, K_v 는 밸브의 유량계수, ΔP 는 시험밸브에서 생기는 차압(밸브 입구압력과 출구압력의 차이), G 는 유체

의 비중을 나타낸다. 유량계수는 단위계에 따라 C_v 혹은 K_v 로 표시한다. C_v 는 밸브 전후의 압력차를 IPSI (6.86 KPa, 0.07 kgf/cm²)로 하고, Full open 상태에서 비중이 1인 60°F의 맑은 물을 흘렸을 때 통과 될 수 있는 유량을 GPM (US) (1GPM= 3.785 LPM)으로 나타낸 값을 나타내며 주로 미국에서 사용된다^[9].

K_v 는 밸브 전후의 압력차를 1 bar (102 kPa)로 하고, Full open 상태에서 비중이 1인 5°C~30°C의 맑은 물을 흘렸을 때 통과 될 수 있는 유량을 m³/hr로 나타낸 값으로 주로 유럽에서 사용된다. 유량계수는 밸브 등을 흐르는 유량 특성을 표시하는 계수로서 밸브의 유동특성을 파악하는 중요한 지표이다. 상기와 같은 조건으로 밸브의 트림을 구성하려면 압력은 233 bar가 감압되어야 하며, C_v 를 구하면

$$\begin{aligned} C_v &= (1.167 \times Q \times \sqrt{G}) / \sqrt{(P_1 - P_2)} \text{ 이므로} \\ &= 1.167 \times 340 \times \sqrt{1} / \sqrt{(350-50)} \\ &= \text{Abt } 28 \end{aligned}$$

여기서, C_v 는 밸브의 유량계수, Q는 유량, G는 유동온도에서의 비중량, P_1 은 밸브 상류측 압력, P_2 는 밸브 하류 측 압력을 나타낸다. 이에 따른 유량 계수는 Abt 28이 만족되어야 하므로 실험을 통하여 구현하였다.

4.2 트림 형상 설계

Fig. 7과 8은 해양플랜트용 고압·고차압 제어 밸브의 유동해석 결

Fig. 7 Design of drag type stack

Fig. 8 Manufacture of drag type stack and Ass'y

과로 얻어진 디스크의 형상을 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 것과 같이 대부분의 밸브 제작사는 굽은 유로, 단 압력감소, 확장유로 단면적과 같은 개념들 중 하나를 사용하거나 또는 조합하여 다양하고 정교한 트림을 개발하여 왔으나 본 연구에서는 지그재그 타입의 트림을 개발하여 속도변화에 따른 공동현상을 방지하고자 하였다. 공동현상에 대처하는 일반적인 방법은 로커웰 경도가 40이상인 경화재질로 밸브를 제작하는 것이다^[7]. 또한 밸브의 수명을 연장하고 공동현상을 방지하기 위해서는 베나축소부 지점에서 압력이 증기압 이하로 저하되는 것을 방지하는데 있으며, 이러한 압력감소가 이루어지면 증기 기포가 형성되지 않는다. 또한 한번에 큰 압력저하보다는 연속적인 작은 압력저하를 발생시킴으로써 증기압 이하로 저하되는 것을 방지할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위하여 드래그 타입의 스택을 21개 적층하여 유량을 제어하였으며, 밸브의 몸체는 크롬-몰리브덴강이며, 드래그 타입의 스택은 스테인레스 316을 사용하였다.

5. 실험 방법 및 평가

해양플랜트용 고압·고차압 제어밸브의 성능실험을 수행하기 위하여 작동유체는 Fresh water를 사용하였고, 유량계에서 나오는 압력을 LAB VIEW를 통하여 실험을 수행하였으며, 실험조건은 Table 3과 같다. 압력 변화는 1차측의 압력을 증가하여 2차측에서 나오는 압력게이지를 통하여 확인하였으며 Fig. 9와 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

Fig. 10은 Fig. 9의 조건에서 실험을 수행한 사진을 나타낸 것이다. 압력 및 유량 실험시 상온과 비슷한 조건이 될 수 있도록 15°C

Table 3 Experimental condition

Contents	Condition	CV test
Equipment	Flow test M/C	
Test fluid	Fresh water	
Pressure	345±0.5 kg/cm ²	3.0±0.3 kg/cm ²
Temp.	Room temp.	
Diff. Pressure	233 kg/cm ²	1.0±0.1 kg/cm ²
Rated UMP	160 L/min	

Fig. 9 Measurement of pressure and flow rate

(a) Pressure test

(b) Flow rate test

(c) Temperature setup 15°C

Fig. 10 Experimental setup

로 셋팅하였다. Table 3과 같이 고압·고차압 제어밸브 1차측의 압력은 345 bar의 압력을 형성하였고, 밸브는 Full open 상태에서 서서히 압력을 올려 원하는 압력이 되었을 때 2차측의 압력 게이지를 통하여 계측하였다. 1차측의 압력을 $3.0 \pm 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 로 주고 차압의 변화를 $1.0 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ 로 주어 이에 따른 유량의 변화를 C_v 로 환산하여 테스트하였으며, 정확한 유량계측을 위하여 실험하기전 검교정을 수행하였다. Fig. 10의 실험에 적용되는 프로그램은 Labview를 사용하였고 이에 따른 결과는 Fig. 11과 같다.

밸브의 압력 테스트는 해석을 통하여 도출되고 설계되어진 밸브를 장착하여, 압력 게이지를 통하여 1차측 345 bar에서 2차측 52 bar로 감압되게 함으로서 실험을 마무리 하였다.

Fig. 11의 실험결과에서 알 수 있는 것과 같이 액체를 매체로 하는 제어밸브의 설계에 있어서, 압력증가 및 감소에 따른 제품의 압력강하를 확인하였고 이에 따른 적정제어를 위한 검토를 수행하여 다단조절밸브의 설계방법을 정립하고 트림부의 유동을 코어형상으로 구성하여, 설계조건 및 환경 등을 고려하여 고차압 밸브의 설계 및 제작 기술을 정립하였다.

TRAVEL	P3	PB	DP	Q3	Cv	%
OPEN 10%	3.00	1.81	1.19	1.02	1.09	3.8%
OPEN 20%	3.00	1.95	1.04	3.63	4.15	14.5%
OPEN 30%	2.99	1.97	1.02	6.19	7.15	25.0%
OPEN 40%	2.99	1.93	1.06	9.24	10.47	36.6%
OPEN 50%	2.98	1.96	1.02	11.38	13.14	45.9%
OPEN 60%	2.98	1.95	1.03	14.61	16.78	58.6%
OPEN 70%	2.99	1.97	1.02	16.76	19.41	67.8%
OPEN 80%	2.98	1.97	1.01	19.14	22.17	77.5%
OPEN 90%	2.97	1.96	1.01	21.64	25.08	87.6%
OPEN 100%	2.97	1.97	1.00	24.55	28.62	100.0%

(a) Flow rate Cv Test

(b) Lab view Program

Fig. 11 Experimental results

또한 고압·고차압 밸브의 압력과 유속의 조건들을 감안하면 1차측의 압력이 2차측의 압력변화로 100 Bar이상의 고차압이 형성되더라도 각 단의 조건(폭, 깊이)등을 고려하여 유량 변환만 면밀하게 설계하면 충분히 트림의 국산화 설계가 가능하며, 대용량의 제어밸브 설계도 가능하다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 국내의 해양플랜트, 육상플랜트, 화학플랜트 등 다양한 분야에 적용되는 고차압 밸브를 국내의 기술로 충분히 적용가능하며, 산업설비의 안전성 확보 및 중소기업의 기술력 확보에도 한걸음 나아가는 중요한 밑거름이 되리라 생각한다.

6. 결 론

본 연구에서는 고압·고차압 제어 밸브의 유동해석을 수행하여 트림 내부에서의 유속과 압력강하의 관계를 규명하고, 공동현상 발생 유무 및 수명향상 방안을 검토하였고, 이에 따른 밸브의 설계 및

제작 방법 등을 정립하여 성능평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고차압 밸브의 공동현상을 방지하기 위해서 베나축소부 지점에서 압력이 증기압 이하로 저하되는 것을 회피하기 위해서 한번에 큰 압력저하 보다는 연속적인 작은 압력저하를 발생시키는 트림을 설계 및 제작하여 고압 345 bar에서 저압 112 bar로의 압력강하가 원활함을 알 수 있었다.
- (2) 밸브 트림 내부의 유체는 구불구불한 유로를 거치면서 평균속도 38 m/s를 기준으로 진폭이 15 m/s 크기가 진동하며, 시트링 부근에서의 유체속도가 30 m/s 이상으로 나타났으나, 시제품의 작동조건이 80%이므로 사용수명은 큰 문제가 없을 것으로 분석되었다.
- (3) 고차압을 형성시키는 트림의 단에 따른 압력변화를 확인함에 따라 단의 수를 가감하여 고차압이 적용 가능하며, 압력강하의 범위는 디스크의 형상과 단의 깊이와 폭, 수량 등을 조절하면 다양한 압력 변화에도 적용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Lee, C. W., Jang, S. C., 2010, A Fundamental Study on Offshore Structures of High Pressure Control Valves, Journal of KSMTE, 19:6 883-888.
- [2] Seo J. H., Moon, Y. j., Shin, B. R., 2008, Prediction of Cavitating Flow Noise by Direct Numerical Simulation, J. Comput. Phys., 227:13 6511-6631.
- [3] Rameyer, W. J., Miller, H. L., Sherikar, S. V., 1995, Avitation Testing Result for a Tortuous Path Control Valve in Cavitation and Multiphase Flow, American Society of Mechanical Engineers, 210 62-66.
- [4] Kim, D. K., Shon, C. H., 2010, A Numerical Study on Anti-Cavitation of Globe-Valve Trim with High Pressure Drop, Journal of KSME, 3000-3003.
- [5] Kim, J. W., 2011, Safety Estimation of High Pressure Drop Control Valve for Offshore Structures, Journal of KSMTE, 20:5 553-558.
- [6] ANSI/ISA-S75, 2004, ASME BOILER and PRESSURE VESSEL CODE Part D, ANSI/ISA.
- [7] Les Driskell, 2005, CONTROL VALVE SELECTION AND SIZING. Mc Graw-Hill
- [8] Philip, L., Skousen, 2006, Valve Handbook, Valtek International
- [9] ISA, 2007, Recommended and Technical-ISA, Std,s. ISA Control Valves.
- [10] Philp, L., Skousen., 2005, VALVE HANDBOOK, Mc Graw-Hill
- [11] EPRI, 2011, Guide for the Application & Use of Valves inch Power Plant, NP-6516(PN2233-5).