

FPSO 연료가스 압축 시스템용 부정류 방지 밸브의 유량 평가 프로그램 개발

Discharge Evaluation Program Development of Anti-surge Valve for FPSO Fuel Gas Compressor System

박형욱¹, 이승민¹, 조종래^{2,✉}

Hyung Wook Park¹, Seung Min Lee¹ and Jong Rae Cho^{2,✉}

¹ 한국해양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime Univ.)

² 한국해양대학교 기계·에너지시스템 공학부 (Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime Univ.)

✉ Corresponding author: cjr@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4298

Manuscript received: 2011.7.26 / Accepted: 2011.9.2

In this study, to avoid surging in the system as a way to ensure the proper discharge requires the design of the valve capacity rating objective is to develop a program. Approximation algorithm for the capacity evaluation is suggested. Loss coefficients obtained by the algorithm is calculated put in the governing equation for the valve flow coefficient and capacity. Calculated values were compared with numerical analysis results for the verifying their validity. The proven formula is created using Excel and it can be easily available the valve design engineers. Creation of analysis models were using a version of Unigraphics NX 4.0, numerical analysis were using a flow analysis commercial program ANSYS CFX 12.0 version. Equations were referenced 'Handbook of Hydraulic Resistance - 3rd Edition'.

Key Words: FPSO (부유식 원유생산-저장 시설), Fuel Gas Compressor System (연료가스 압축 시스템), Anti-Surge Valve (부정류방지 밸브), CFD (전산유체역학)

기호설명

Re = Reynolds number

ω_0 = velocity of orifice outlet

d_0 = cross-section diameter of orifice

ν = kinematic viscosity

λ = coefficient of friction resistance of the segment of length l

\bar{f} = area ratio of a orifice (F_0/F_1)

F_0 = cross-section areas of fluid in contact with the plug

F_1 = cross-section area of total orifice

N = number of orifices

D_m = cross-section diameter of plug

L = length of plug

\bar{l} = ratio of length (L/d_h)

l = length of orifice

d_h = hydraulic diameter

V = velocity

ΔP = overall pressure difference

γ = specific weight

K = loss factor

τ = coefficient of effect of pipe walls

Q = discharge

A = cross-section areas of pipe

1. 서론

FPSO(Floating Production Storage and Offloading)는 해상 천연가스전 근처에 위치하여 생산되는 가스를 처리하여 LNG 로 액화하는 시설과 저장하는 탱크, 그리고 하역하는 설비를 탑재한 해상 구조물이다.¹ 구조는 선체하부에 원유를 저장하는 하부 구조와 원유를 생산하고 처리하는 기능이 설치되는 상부구조로 크게 나눌 수 있으며, 저장 능력에 따라 100 만 배럴 미만의 소형, 100~150 만 배럴의 중형, 150~200 만 배럴의 대형, 200 만 배럴 이상의 초대형으로 구분된다.

FPSO 는 부유식 원유 생산부터 저장, 하역까지 모든 작업을 한 곳에서 만든 설비로써 해양 플랫폼이나 드릴쉽에서 뽑아낸 원유를 정제하고 이를 저장해서 셔틀탱크나 기타 이송 장소에 하역할 수 있는 고가의 특수 선박이지만, 해상에서 생산한 LNG 를 육지까지 운반할 필요 없이 직접 수출할 수 있어 유지비용 절감의 효과가 크므로² 주요 석유업체들의 각광을 받고 있다.

하지만 연·근해 자원의 고갈로 LNG 및 석유 시추를 위해 선박은 점점 심해로 눈길을 돌려 필요 자원을 채취하는 것이 현실이다. 그로 인해 선주들은 선박 및 해양플랜트 건설 시 요구하는 가장 큰 항목이 안전에 대한 만족이며 이를 해결하기 위해 선사들은 일차적으로 위험을 회피하는 설계 기술을, 이차적으로 위험이 발생했을 때 피할 수 있는 기술을 마련하고 있다.

특히 Fuel gas compressor system(이하 FGCS)과 같은 경우 폭발성 유체인 NG(natural gas) 및 BOG(boiled off gas)등의 가스를 사용하는 시스템으로 시스템의 파괴가 선체 전체의 폭발로 이어질 확률이 높다. 시스템에서 일어날 수 있는 위험 요소들은 종류가 다양하지만 유압장치에서는 수격현상, 부정류 현상 등으로 불리는 부정류의 영향이 크게 작용한다. 부정류가 발생하면 부정류압으로 인해 시스템에 구비된 유압 부품들이 모두 손상되거나 파손될 확률이 높기 때문이다.

이러한 부정류 관련 현상을 해결하기 위해 윤재노(1990)는 펌프 관로계에서 유체의 온도변화로 야기되는 밀도변화의 영향을 고려하여 부정류 현상을 수치실험으로 분석하였으며,³ 노재식(1999) 등은 펌프의 동력공급이 중단되어 발생하는 펌프 관로계의 수격현상을 제어하기 위해 역지밸브와 우회밸브를 해석할 수 있는 특성 선 모델을 개발

하였고,⁴ 한국항공우주연구원(2009)에서는 보관탱크를 개폐하는 밸브를 개방하였을 때 탱크와 연결 배관과의 압력차에 의해 초고압으로 압축된 유체가 순간적으로 팽창하여 개폐밸브와 연결된 이동 배관을 따라 강한 압력으로 시스템에 인가되는 서지압을 해결하기 위한 방안으로 ‘서지 방지 공압 밸브’를 개발하였다.⁵

그 외 ABS(auto braking system)장치에 작용되는 솔레노이드 밸브의 발생 서지를 전제 조건으로 하여 유압 제어 모드를 최적화할 수 있는 제어 측면의 연구⁶ 와 솔레노이드 밸브의 가동자 변환 속도를 제어할 수 있는 고속 PWM 조건을 제시하고 작동 유압에 대한 서지의 영향도 분석한 사례도 있다.⁷

본 연구에서는 부정류 방지를 위해 시스템 내에서 적절한 유량을 확보하기 위한 방안으로 사용되는 유동해석프로그램을 사용하지 않고 설계 시 필요로 하는 밸브의 유량 평가 프로그램을 개발하는 것이 목적이다. 유량 평가를 위해서 근사 알고리즘을 제시하였고 알고리즘으로 구해진 손실계수는 지배방정식에 대입하여 밸브의 유량계수 및 유량을 도출하였다. 산출된 값은 전산수치해석 결과와 비교 검토하여 타당성을 검증하였으며, 검증된 수식은 Excel 을 이용해 만들어 밸브 설계 실무자들이 쉽게 사용할 수 있게 하였다.

해석모델 생성은 Unigraphics NX 4.0 버전을 사용하였으며 전산수치해석은 유동해석 상용 프로그램인 ANSYS CFX 12.0 버전을 이용했다.

2. 이론

2.1 알고리즘

본 연구에서 개발하고자 하는 Excel 프로그램의 유량계수 산출을 위한 알고리즘을 Fig. 1 에 나타내었다. 알고리즘은 다음과 같이 총 6 단계로 구성된다.

1 단계, 오리피스의 직경과 오리피스 출구쪽의 유속을 이용해 레이놀드 넘버(Reynolds number)를 계산한다. 2 단계, 구해진 레이놀드 넘버를 이용해 적용 가능한 수식을 찾아 마찰계수를 산출한다. 3 단계, Fig. 2 에서 적합한 손실계수를 찾는다. 4 단계, 구해진 손실계수를 이용해 유속을 결정하고 이를 유량식에 대입하여 유량을 구한다. 5 단계, 산출된 유량과 전산유체해석을 통해 나타난 결과를 비교 및 검토한다. 6 단계, 타당성이 검증되면 Excel 로

프로그램을 만든다. 각 단계별 수식은 2.2 절 지배 방정식에 나타내었다.

2.2 지배방정식

지배방정식은 Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition 을 참조하였다. 일반적인 관내 유동에서의 레이놀드 수는 식(1)과 같이 계산된다.

$$Re = \frac{w_0 d_0}{\nu} \tag{1}$$

식 (1)에서 구한 레이놀드 넘버를 이용해 마찰 계수를 구하는 식을 선정한다. 여기에선 $Re \geq 10^5$ 으로 산출되었으며 난류모델에 적합한 수식은 다음과 같다.^{8,9}

$$\lambda = \frac{1}{(1.8 \log Re - 1.64)^2} \tag{2}$$

식 (2)에서 계산된 마찰계수는 0.02 인데 Fig. 2 에 나타난 그림이 마찰계수에 적용되는 손실계수의 값이다. 손실계수는 식 (3) ~ 식 (5) 및 식 (6) ~ 식 (7)을 이용해 구할 수 있다. Fig. 2 에서 가로 항은 식 (3)의 값, 세로 항은 식 (6)의 값을 나타낸다.¹⁰

$$\bar{f} = \frac{F_0}{F_1} \tag{3}$$

$$F_0 = N \times \pi d_0 l \tag{4}$$

$$F_1 = \pi D_m L \tag{5}$$

$$\bar{l} = \frac{l}{d_h} \tag{6}$$

$$d_h = \frac{4f_0}{\pi d_0} \tag{7}$$

유속을 구하기 위해 식 (3)과 식 (6)을 이용해 찾은 손실계수를 식 (8)에 대입하면 유속이 계산된다.

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2g}{\gamma \cdot K}} \tag{8}$$

끝으로 식 (8)에서 계산한 유속을 식 (9)에 대입하면 유량을 얻을 수 있다.

$$Q = A \cdot V \tag{9}$$

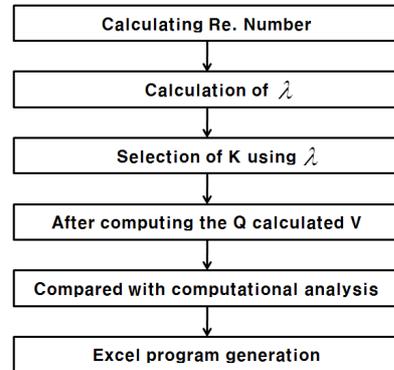


Fig. 1 Calculation algorithm for discharge

Values of λ = 0.02

$\bar{l} = \frac{l}{d_h}$	τ	\bar{f}								
		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.25	
0	1.35	6915	1676	716	394	244	99.5	51.4	30.0	
0.2	1.22	6613	1602	684	976	233	95.0	49.0	28.6	
0.4	1.10	6227	1533	655	360	223	91.0	47.0	27.4	
0.6	0.84	5708	1382	591	324	201	81.9	42.3	24.6	
0.8	0.42	4695	1137	486	266	165	67.2	34.6	20.2	
1.0	0.24	4268	1033	441	242	150	61.0	31.4	18.3	
1.4	0.10	3948	956	408	224	139	56.4	29.1	17.0	
2.0	0.02	3783	916	391	215	133	54.1	27.9	16.3	

Fig. 2 Values of K at λ (=0.02)

3. 수치해석

3.1 해석모델

밸브의 유동해석에 있어서 난류 모델은 자유유동으로 가정하여 사용하는 $k-\epsilon$ 모델이 많이 사용되고 있다. 최근에는 Menter(1994)¹¹ 에 의해 개발된 $k-\omega$ SST(shear stress transport) 모델을 많이 사용하고 있는데, $k-\omega$ SST 모델은 경계층 내부에서 발생하는 난류유동에 정확한 $k-\omega$ 모델과 자유유동에 정확한 $k-\epsilon$ 모델을 혼합한 모델이다.

윤준용(2001)¹²(2004)¹³ 등은 ‘고차압 제어용 글로브 밸브 트림 내부의 3 차원 유동장 해석’과 ‘공동 현상 방지를 위해 버터플라이 밸브의 유동장 해석’에서 유체와 직접 접촉하여 유체를 제어하는 요소인 트림을 장착한 글로브 밸브에 대한 유동장 해석과 버터플라이 밸브에서 공동 현상을 줄일 수

있는 새로운 디스크 형상을 개발하는데 난류모델인 $k-\varepsilon$ 모델 사용해 해석을 수행하였고, 안영준(2008)¹⁴ 등은 ‘해상용 LNG 컨트롤 밸브의 개선 설계를 위한 3 차원 수치 해석’에서 $k-\varepsilon$ 모델을 이용하였다.

Bardian(1997)¹⁵ 등은 ‘Turbulanc Modeling Validation’이라는 연구에서 경계층과 기타 영역의 분리된 난류 유동을 하는 것에 착안하여 $k-\omega$ SST 모델을 적용하였고, Menter(2001)¹⁶ 등은 역압력구배로 인한 유동박리 현상을 예측하는데 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였으며, 최지용(2006)¹⁷ 등은 캐스캐이드 내에서 발생하는 박리구역 내 난류 유동해석의 정확성을 높이는데 $k-\omega$ SST 모델을 사용하고 있다. 또한 배기화(2008)¹⁸ 등은 글로벌 밸브에 대한 유량 계수 및 기하학적인 형상에 따른 유동 특성을 연구하기 위해 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 플러그 내의 내부 유동해석의 정확도를 높이기 위해 난류유동장 내의 유체운동은 연속방정식과 Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) 운동량방정식을 사용하였고 난류모델방정식은 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. 작동유체의 조건은 비압축성 유체로 가정하였고, 유동 조건은 3 차원 정상상태로 가정하였으며, 수치해석을 위해 전산유동해석 전용 프로그램인 ANSYS CFX 12.0 을 사용하였다.

ANSYS CFX 12.0 은 유한체적법으로 이산화하여 수치 계산을 수행하고 압력항과 속도항을 완전연동(fully coupling)하며 대류항의 처리를 위해서 고해상도 기법을 사용하는 프로그램이다.

3.2 유동방정식

난류유동장 내의 유체유동은 아래와 같은 연속방정식, 운동량방정식 그리고 난류모델방정식의 지배를 받는다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j) = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \rho f_i \tag{11}$$

식 (10)은 연속운동방정식이며, 식 (11)은 운동량방정식이다. Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 방정식인 RANS 방정식은 레이놀드 응력이라고 하는 $\rho f_i (= -\rho \overline{u_i u_j})$ 의 미지항을 추가적으로 포함하게 된다. 이 RANS 방정식을 종결시키기 위해 모델링이 필요한데 식 (12)에 나타낸 비례식을 사용하여 종결하였다.

$$\Phi \propto \Phi_1 + \Phi_2 \tag{12}$$

Φ 는 $k-\omega$ SST 모델이고, Φ_1 은 $k-\varepsilon$ 모델이며 Φ_2 는 $k-\omega$ 모델이다. 식 (13)은 혼성함수 (F_1)를 이용하여 $k-\varepsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델을 조합한 형태로 $k-\omega$ 모델에 F_1 을 곱하고 $k-\varepsilon$ 모델에 $(1-F_1)$ 을 곱하면 식 (13)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \tag{13}$$

식 (13)은 벽면 근처에서는 혼성함수가 0 이 되어 $k-\omega$ 난류모델로 사용되고, 자유유동에서는 혼성함수가 1 이 되어 $k-\varepsilon$ 난류모델로 된다.

3.3 격자생성

정밀도를 높이기 위해서는 유동 영역의 속도구배를 충분히 모사하도록 벽면 및 주변 격자를 조밀하게 만드는 동시에 격자밀도(grid density)도 파악해야 된다.

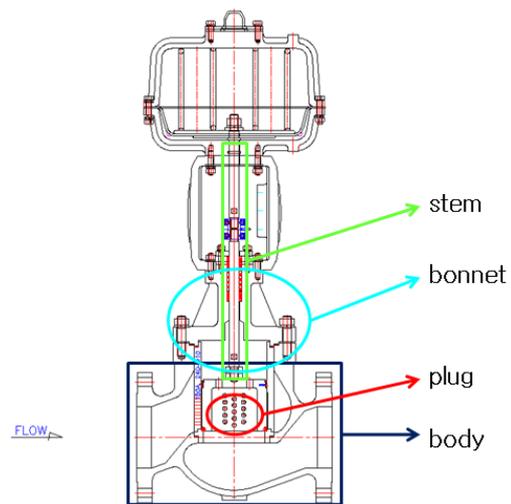


Fig. 3 Schematic diagram of anti-surge valve

Fig. 3 에는 부정류 방지 밸브를 대표하는 내부 구조인 본체(body), 본넷(bonnet), 스템(stem), 플러그(plug)를 나타냈으며 플러그에는 압력을 떨어뜨리기 위해 다수의 오리피스(orifice)가 생성되어 있다.

Fig. 4 는 사면체(tetrahedral) 격자를 기본으로 관의 벽면과 본체, 플러그와 오리피스 등 유체가 지나가는 곳에 그리드를 생성한 모습이다.

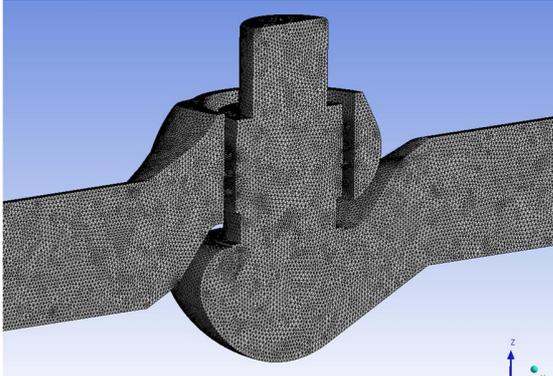


Fig. 4 Grid generation for analysis

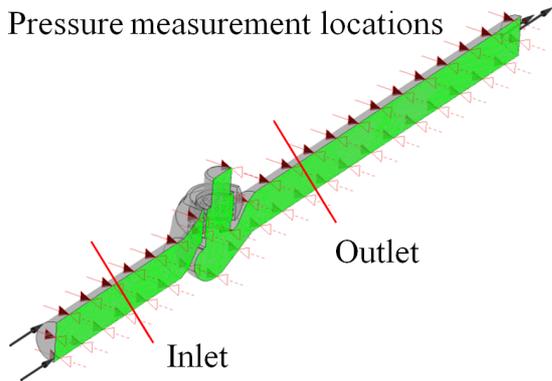


Fig. 5 Symmetry and boundary condition

Table 1 Grid density check for analysis

Grid density (million)	Inlet (MPa)	Outlet (MPa)	ΔP (MPa)	Q (m^3/s)
Calculated	3.18	1.51	1.67	8.97
0.85	3.18	1.43	1.75	7.58
1.70	3.19	1.42	1.77	8.23
2.50	3.19	1.41	1.78	8.34
4.00	3.20	1.41	1.79	8.34

Table 1 에서는 Fig. 4 의 격자를 기준으로 수렴성을 파악하기 위해 격자밀도를 체크한 것이다. 격자의 밀도가 85 만개와 120 만개일 때는 출구압과 압력변화 그리고 유량의 차이가 나타나지만 170 만개에서 400 만개 사이에서의 그 값들은 점점 수렴하였다. 따라서 본 연구에서의 격자밀도는 200 만개~220 만개 정도로 제약하였다.

3.4 경계조건

알고리즘과 수치해석에서 사용된 밸브는 총 3 가지이며 그 종류는 ANSI 의 규격을 기준으로 300-150A, 600-100A 그리고 900-100A 의 세가지로 분류된다.

작동유체는 실제 시스템 내에서 사용되는 NG 나 BOG 를 사용하지 않고 해석의 효율성 및 수렴성, 수식과의 경향 파악을 위해 ANSYS Material library 에 있는 메탄가스(CH_4)로 가정하였다. 메탄 가스는 실제로 압축성 유체이지만 비압축성 유체로 가정하였으며 실제 현상과 유사하게 모사하기 위해 각 밸브의 온도에 대한 압력조건에 따라 값을 다르게 대입하였다.

300-150A 밸브는 $40^\circ C$ 에서 1.56MPa 의 입구 압이 작용하고, 600-100A 밸브는 3.18MPa 의 압이 작용하며 900-100A 밸브는 6.05MPa 의 압이 작용한다. 수치적 오차를 감소시키기 위해서 출구압은 대기압으로 가정하며, 일반적으로 정압 차에 의한 유동을 고려하기 위해 많이 사용된다. 그리고 벽면은 슬립이 없는 부드러운 벽면으로 가정하였다.

Fig. 5 는 해석시간 절약을 위해 해석모델을 대칭(symmetry) 형상으로 만든 것이며 밸브 하부에서 발생하는 순환유동 및 출구 쪽에서 발생할 수 있는 역류현상(back flow)을 방지하기 위해 관의 길이를 충분히 길게 하였다. 관에서 밸브 입구 쪽까지 길이는 관지름의 5 배로 생성하였고 밸브의 출구 쪽에서 대기까지는 관지름의 10 배로 생성하였다.

4. 결과

2 장에서 언급한 것처럼 설계자가 쉽게 사용할 수 있는 프로그램을 만들기 위해 제시한 근사 알고리즘을 이용한 수식과 수치해석을 통해 산출된 결과를 Table 2 에서 Table 5 까지 비교하여 나타내었다. 그리고 FPSO 에 설치될 FGCS 시스템의 완성품 형태 및 각 밸브의 장착 위치를 Fig. 6 에 나타내었다.

Table 2 에서는 밸브가 100% 열렸을 때의 유량 차이를 비교한 것으로 세 가지 밸브 모두 10% 미만의 오차를 나타냈고, 오차를 평균한 평균 오차는 6.0%정도임을 알 수 있다.

Table 3 에서는 개도율이 75%일 때의 유량 차이를 나타내는데 평균 오차가 100% 열렸을 때 보다 적은 4.3%로 나타났다. 유량이 개도율 100%일 때와 비슷한 이유는 밸브가 열려도 플러그 상단에서 오리피스가 생성된 곳까지 일정한 높이가 생성되어 있어 실제로 오리피스를 통해 빠져나가는 유량은 미소하기 때문이다.

Table 2 Discharge results of 100% opening [m³/s]

Opening rate (%)		ANSI valve type		
		300	600	900
100	Theses	9.77	8.71	16.55
	Analysis	8.90	8.11	16.15
Error rate (%)		9	7	2

Table 3 Discharge results of 75% opening [m³/s]

Opening rate (%)		ANSI valve type		
		300	600	900
75	Theses	8.21	8.76	16.55
	Analysis	8.38	8.07	16.25
Error rate (%)		2	9	2

Table 4 Discharge results of 50% opening [m³/s]

Opening rate (%)		ANSI valve type		
		300	600	900
50	Theses	5.15	4.80	10.36
	Analysis	6.04	5.78	12.64
Error rate (%)		15	17	18

Table 5 Discharge results of 25% opening [m³/s]

Opening rate (%)		ANSI valve type		
		300	600	900
25	Theses	1.79	2.31	4.43
	Analysis	2.45	3.01	6.45
Error rate (%)		27	23	27

Table 4 는 밸브가 50% 열렸을 때의 오차를 나타냈는데 평균 오차는 16.7%로 나왔다. Table 5 는 개도율이 25%일 때의 수식과 전산해석에서 유량을 산출한 결과이며 평균 오차는 25.7%로 산출되어 비교적 높게 나타났다.

계산식을 이용한 결과와 전산해석 결과와의 오차를 놓고 개도율에 따라 살펴보면 100%일 때보다 75%일 때가 잘 일치했으며, 개도율이 50% 및 25%일 때는 전산해석 결과가 계산식보다 조금 높게 나타남을 알 수 있으나, 모든 계산 결과에서 개도율에 따른 밸브의 오차는 일정한 관계를 보이며 증가함을 알 수 있다.

따라서 수식을 이용한 유량 계산시 개도율 별 보정계수를 적용한다면 설계자가 간단하게 유량을 계산해 볼 수 있을 것으로 사료된다. 예를 들어 ANSI 600 밸브의 개도율 25%에서 밸브의 유량을 산출할 때 계산된 유량에 보정계수 1.26 을 곱하면 2.91 로 전산해석 결과와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 전산유체 해석 결과로 산출된 유체의 속도와 유동 압력을 보여주는 그림이며, 세 가지 종류의 밸브 중에서 600-100A 모델만 나타냈고 나머지 밸브의 그림은 생략하였다. 그리고 Fig. 9 는 계산식과 전산해석 결과와의 검증을 통해 타당성을 확보한 후 설계자가 쉽게 사용할 수 있도록 Excel 로 만든 프로그램을 나타낸 것이다.

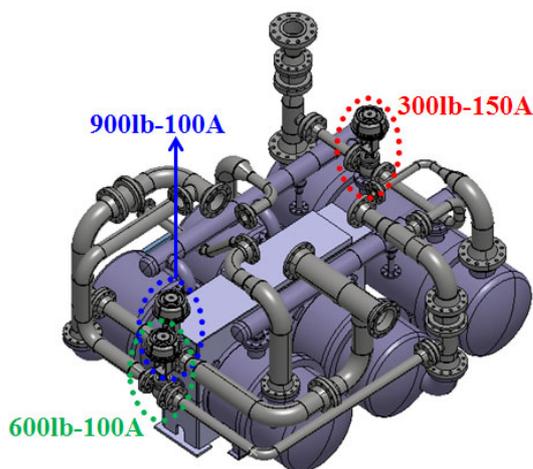


Fig. 6 Construction of FGCS package

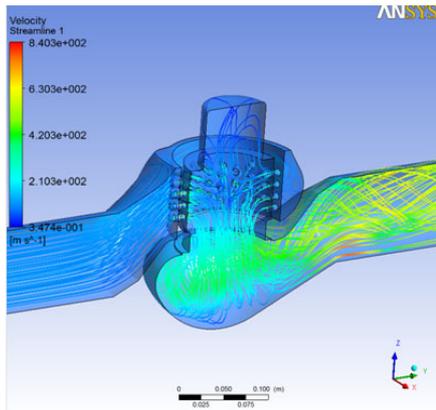


Fig. 7 Velocity analysis result of anti-surge valve

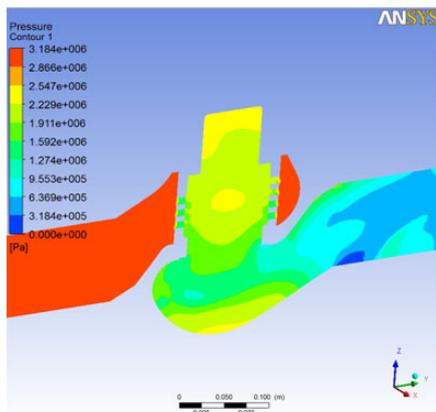


Fig. 8 Pressure analysis result of anti-surge valve

100%

X방향	원주율	안축직경	바깥직경	수면높이	홀갯수	홀반경
F1	26100.35	3.141593	112	136	67	84
F0	4222.301					
F=fo/f1	0.161772					
Y방향	Seat두께	원주율0	홀직경			
	12	25.132741	8			
Dh	8					
L/Dh	1.5					
밸브 손실계수	56					
		중력=1				
	dP	G	r=밀도*중	손실계수1	손실계수2	원주율
	1.67	9.8	2215	56	4.1	3.141592654
V2 유속^2	2508.986					
V 유속	50.08978					
Q 체적유량	0.393404					
Q 질량유량	8.713903					
Cv	99.34692					

Fig. 9 Excel program for design engineer

5. 결론

FPSO 연료가스 압축 시스템용 부정류 방지 밸

브의 유량 평가 프로그램 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유량 평가를 위한 근사 알고리즘을 제시하여 계산식과 전산해석의 결과를 비교 검토하였다.
- (2) 밸브의 개도율에서 개도율이 100%일 때는 ANSI 밸브의 종류(300, 600, 900) 순서대로 0.87 m³/s, 0.6 m³/s, 0.4 m³/s 로 유량이 산출 되었으며, 개도율이 75%일 때는 -0.17 m³/s, 0.69 m³/s, 0.3 m³/s 로 산출되어 계산식을 이용한 값이 전산해석 결과보다 대부분 높게 계산되었고, 개도율이 50%와 25%에서는 각각 -0.89 m³/s, -0.98 m³/s, -2.28 m³/s 및 -0.66 m³/s, -0.7 m³/s, -2.02 m³/s 로 유량이 산출되어 계산식을 이용한 값이 전산해석 결과보다 낮게 계산되었다.
- (3) 개도율이 100%일 때와 75%일 때는 계산 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으나, 밸브의 개도율이 비교적 낮은 50%와 25%에서는 오차율이 비교적 크게 나타남을 확인하였다.
- (4) 하지만, 개도율 50%일 때와 25%일 때의 결과에서 평균오차와의 편차(50%일 때 순서대로 1.7%, -0.3%, -1.3% // 25%일 때 -1.3%, 2.7%, -1.3%)가 적었고, 경향 또한 비슷하게 산출되었으므로 개도율이 낮은 50%와 25%에서 보정계수를 도입하여 계산한다면 밸브 설계자들이 유량을 평가하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

밸브 설계자들이 본 논문을 참조하여 유사한 밸브의 유량을 평가하는 프로그램 개발에 적용한다면 보다 손쉽게 유사한 밸브의 유량 평가 프로그램을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2009 년 및 2010 년 동남광역경제권 선도산업 육성사업과 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. K20702001648-10E0100-07010).

참고문헌

1. Kim, H. C., "Ship of Korea," Jinsungsa, 2006.
2. Beak, S. W., Jeong, S. K. and Kim, S. Y., "Investigation on Efficiency Improvement of the Nitrogen Expander Cycle : Natural Gas Liquefaction

- Process for LNF-FPSO,” *Journal of Conditioning and Refrigeration*, Vol. 22, No. 7, pp. 442-447, 2010.
3. Yoon, J. N., “A Study on the Fluid Transient Analysis of Piping System with Nonuniform Fluid Density,” Thesis for Master of Engineering, Hanyang Univ., pp. 1-27, 1990.
 4. Noh, J. S., Park, N. S., Kim, S. H., Cha, Y. K. and Lee, S. O., “Control of Surge Phenomena in Pump-Pipe System Using Check Valve and Bypass Valve,” *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 2-4, pp. 447-484, 1999.
 5. Kim, K. H., Choi, M. J. and Lee, K. W., “A Study on the Reduction in Pressure Ripples for a Bent-axis Piston Pump by a Phase Interference,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 103-110, 2004.
 6. Kim, B. Y., “Study on the Characteristics of Surge Pressure by High Frequency PWM Control in Braking System,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 109-114, 2008.
 7. Korea Aerospace Research Institute, “Pneumatic Valve for Anti-surgings,” Korea Patent, Pub. No. 10-2009-0068718, 2009.
 8. Altshul, A. D., “Hydraulic Resistance,” Nedra Press, Moscow, p. 224, 1982.
 9. Han, L. S., “Hydrodynamic Entrance Lengths for Incompressible Laminar Flow in Rectangular Ducts,” *Journal of Appl. Mech. Trans, ASME, Ser. E, E-27*, pp. 403-409, 1960.
 10. Idelchik, I. E., “Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition,” JAICO Pub. House, pp. 503-586, 2008.
 11. Menter, F. R., “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
 12. Yoon, J. Y., Lee, S. J., Yang, J. M. and Lee, D. H., “Numerical Analysis of the 3-D Flow Field in a Globe Valve Trim under High Pressure Drop,” *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 4, No. 3, pp. 14-20, 2001.
 13. Yoon, J. Y., Lee, S. J. and Kim, E. S., “Numerical Analysis of Flows in Butterfly Valves to Prevent Cavitation,” *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 1, pp. 9-16, 2004.
 14. An, Y. J., Kim, B. J. and Shin, B. R., “Numerical analysis of 3-D flow through LNG marine control valves for their advanced design,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 10, pp. 1998-2005, 2008.
 15. Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., “Turbulenc Modeling Validiation,” AIAA, Paper No. 97-2121, 1997.
 16. Menter, F. R. and Esch, T., “Elements of Industrial Heat Transfer Predictions,” 16th Bazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2001.
 17. Choi, J. Y., Cho, A. T. and Kim, K. Y., “Experimental and Numerical Analysis of Flow Field in a Bypass Valve,” *Proceedings of the 4th National Congress on Fluids Engineering*, pp. 527-530, 2006.
 18. Bae, K. H., Park, J. H. and Kang, S. M., “A Study of the Flow Characteristics inside a Globe Valve for Ships,” *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 110-118, 2008.