



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

8인치 극저온 글로브 밸브의
유량계수 특성에 관한 연구



부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

냉 동 공 조 공 학 과

김 정 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

8인치 극저온 글로브 밸브의
유량계수 특성에 관한 연구

지도교수 윤 정 인

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

냉동공조공학과

김 정 훈

김정훈의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 2월



위원장 공학박사 손창효 (인)

위원 공학박사 김은필 (인)

위원 공학박사 윤정인 (인)

목 차

Abstract	iii
List of figures	vi
List of tables	vii
List of photo	viii
Nomenclature	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 종래연구	3
제 2 장 극저온 글로브 밸브의 특성	5
2.1 극저온 글로브 밸브의 특징	5
2.2 시료의 사양	8
제 3 장 극저온 밸브 성능 설비	12
3.1 밸브 성능평가 시스템	12
3.2 측정 설비의 적합성	17
3.3 극저온 밸브 시험 방법	21
제 4 장 밸브 유량 계수 시험	23
4.1 극저온 밸브 시험 조건 및 범위	23

4.2 개도에 따른 시험 결과	28
제 5 장 결 론	32
참고문헌	33
감사의글	35



Performance of flow coefficient of 8inch cryogenic globe valve

Jung Hun KIM

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The cryogenic field's used of LNG is increasing in scope gradually yet steadily in order to keep in step with global trends in the energy industry. In this field, greater importance is being placed on environment and safety, as represented by the International Maritime Organization's environmental regulations, heightened interest in environmentally-friendly alternative sources of energy, and nuclear phase-out plans. With growing demands for LNG, the cryogenic equipment market is also anticipated to expand at the same time.

Technologies in the cryogenic field should be researched and developed by utilizing data accumulated from a variety of experiments performed in the cryogenic environment. However, there is plenty of room for improvement in Korea's cryogenic technology development as lack of relevant infrastructure in this field has limited experimental research efforts to carrying out fluid analyses or experiments in

ambient temperature environments with alternative fluids only, rendering research outcomes rather unreliable.

Among various items in the cryogenic field, cryogenic valves are a core component used to shut off and control the flow of a working fluid in extreme environments below $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ to ensure stable operation of cryogenic plants/systems; however, Korea is relying mainly on imports to secure this key equipment. As such, a cryogenic experiment using LNG as the working fluid was carried out in this study in order to understand the main factors as well as the performance characteristics of cryogenic valves.

To perform the experiment in a cryogenic environment, the performance evaluation system used at the LNG and cryogenic equipment test and evaluation center in Gimhae, Gyeongnam Province, was utilized. The evaluation was performed repetitively by changing several conditions of the samples (valve opening rate, flow rate, differential pressure, etc.) in accordance with prescribed, internationally certified specifications. The value of flow coefficient C_v was obtained by adjusting the degree of valve opening per given flow rate, and the resultant value was compared against the design value and outcomes from other studies.

It was confirmed that the C_v value per valve open rate had an error of up to approximately 29% of the design value at a flow rate of 700

m³/h. Comparison with prior research that used water as the working fluid revealed that when the valve open rate increased, the C_v value also increased, linearly. In addition, when the C_v value was measured at the flow rate of 800 m³/h by adjusting the valve open rate, the value increased linearly in sections below 85% of the rate but remained more or less identical above 85% of the rate regardless of rate adjustment. Efficient valve design and fabrication can be expected when such characteristics of cryogenic valves are taken into account.



List of figures

- Fig. 1 Shares of primary energy & LNG demand
- Fig. 2 Cryogenic equipment market size(\$Mn) & Expected growth rate
- Fig. 3 Inner shape of globe valve
- Fig. 4 Inner flow of globe valve
- Fig. 5 Drawing of 8inch test valve
- Fig. 6 LNG and cryogenic technology center
- Fig. 7 Cryogenic valve performance test system
- Fig. 8 International MRA status
- Fig. 9 Distributed Control System
- Fig. 10 Flow rate coefficient test system
- Fig. 11 Standard requirements
- Fig. 12 Installation of test valve
- Fig. 13 Valve opening ratio according to input current
- Fig. 14 Variation of differential pressure according to opening ratio
- Fig. 15 Variation of flow rate according to opening ratio
- Fig. 16 Test results according to flow rate 700 m³/h
- Fig. 17 Test results according to flow rate 800 m³/h
- Fig. 18 Comparison with former study - water
- Fig. 19 Test results according to flow rate 800 m³/h

List of tables

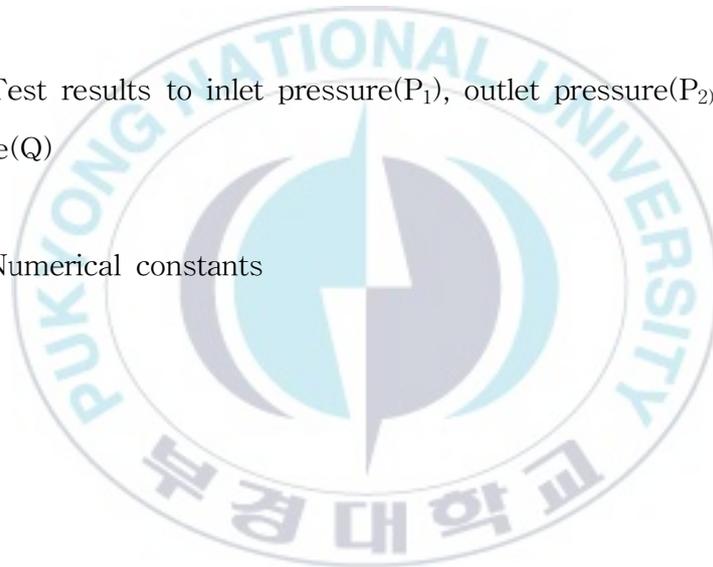
Table. 1 Drawing value of 8inch test valve

Table. 2 Design value of 8inch test valve

Table. 3 Specification for cryogenic valve performance test system

Table. 4 Test results to inlet pressure(P_1), outlet pressure(P_2), flow rate(Q)

Table. 5 Numerical constants



List of photo

Photo. 1 Mass flowmeter calibration results

Photo. 2 Temperature & pressure gauge calibration results



Nomenclature

Symbols

P_1	upstream pressure	[kg/cm ²]
P_2	downstream pressure	[kg/cm ²]
ΔP	pressure drop	[Pa], [kg/cm ²], [1b _f /in ²]
ΔP_{choked}	choked pressure drop	[kg/cm ²]
P_V	vapor pressure	[kg/cm ²]
F_L	liquid pressure-recovery factor	[-]
F_F	liquid critical-pressure-ratio factor	[-]
σ	cavitation index	[-]
Q	flow rate	[m ³ /h], [gallon(U.S)gal/min]
C_v	flow coefficient	[-]
ρ	density	[kg/m ³], [1b/ft ³]
$\frac{\rho_1}{\rho_0}, S_g$	specific gravity	[-]
N_1	numerical constants	[-]

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

국제해사기구(IMO)의 환경규제 및 고유가, 친환경대체에너지, 탈원전 등 환경과 안전을 생각하는 세계적 흐름에 따라 Fig. 1과 같이 Oil 및 Coal의 수요는 점차 줄어들 것이라 예상된다.[1] 반면, 천연가스 시장 및 재생에너지 시장은 점차 수요가 증가하여 연 평균 1.6%의 성장을 보이며 2030년에는 Coal의 수요를 추월하여 제 2의 에너지 시장이 될 것으로 예상된다. 아시아 지역 그 중에서도 중국, 인도는 LNG 수요의 최대 소비자이고 그 외 아시아 지역 전체가 성장 단계에 있어 수요는 점차 확대 될 것으로 예상된다.

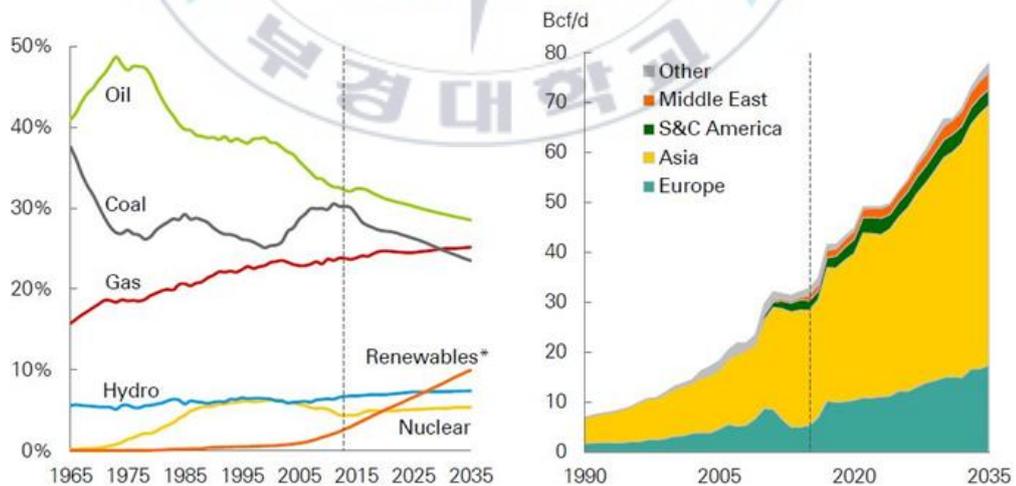


Fig. 1 Shares of primary energy & LNG demand

LNG 수요가 점차 확대됨에 따라 극저온 기자재 시장도 동반성장을 보일 것으로 예상된다. Fig. 2에 따르면 극저온 기자재 시장은 2014년부터 2019년까지 연평균 7.8%의 높은 성장이 기대된다. 극저온 기자재 시장은 탱크분야가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 극저온 밸브 분야도 제 2의 시장으로 2019년까지 143.3%의 성장이 예상된다. 극저온 밸브 시장은 LNG 및 수소와 같은 대체 에너지 분야의 성장과 항공 우주 및 초전도체와 같은 극저온 분야의 발전으로 지속적인 성장이 기대된다.

따라서 본 연구에서는 극저온 기자재 핵심부품인 극저온 밸브를 시료로 선택하여 성능 및 특성을 파악하고 기술력과 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.



Fig. 2 Cryogenic equipment market size(\$Mn) & Expected growth rate

1.2 종래연구

극저온 환경에서의 성능 평가는 고가의 실험비용 및 인프라 부족 등으로 국내·외 논문 혹은 저널에 등록 된 종래의 연구를 찾기가 어려웠다. 극저온 밸브는 특수 산업분야이며, 기업의 노하우로 제품을 설계하기 때문에 시제품의 특성이나 성능이 노출되어 기술 및 신뢰도에 영향을 줄 가능성이 있기 때문에 논문이나 발표를 통해 관련 내용을 공개하지 않는 것으로 추정된다. 그래서 작동유체를 LNG로 사용하는 시험뿐만 아니라 물을 사용한 모든 종류의 밸브 성능에 관한 종래 연구를 찾아보았고, 극저온 분야 선도국인 미국, 일본, 유럽뿐만 아니라 국내 대학 및 기업에서도 많은 관심과 연구가 이루어지고 있음을 확인 할 수 있었다.

Davis와 Stewart는 CFD를 이용하여 밸브개도에 따른 글로브 제어 밸브의 유동해석을 수행하였다.[2] 또한 실험을 통해서 밸브 내부의 유체의 흐름을 시각화 하였고 해석의 유효성을 검증하였다.[3] Bae 등은 15A, 20A 글로브 밸브 시제품을 KS규격에 따른 유량 측정 장치를 이용하여 물로 실험한 데이터와 유동해석 전용프로그램 CFX10.0을 SST를 사용하여 수치 해석한 데이터를 비교하였고, 유량 계수의 오차가 15%이내의 정확도를 가지는 것을 분석하였다.[4] Koo는 글로브 밸브의 최적 설계를 위해 3차원 Digital Mockup을 시료로 제작하여 IEC 60534를 바탕으로 구축된 시험 장치에서 측정된 유량계수와 유동해석을 통해 계산된 유량계수를 비교하여 타당성을 검증하였다.[5] Moon은 CATIA를 이용하여 체크밸브를 3D 모델링하여 ANSYS Fluent를 이용해 유동해석을 하였다. 각각의 개도마다 속도장, 압력장, 유선의 모양을 통해 유동특성을 분석한 결과 스윙체크밸브는 같은 사이즈 밸브의 유효 유량계수 범위 내에 있지만 밸브의 개도에 따라 유량계수의 증가폭이 커져 유량의 조절 목적에는 부합하지 않으며 유로의

개폐 목적에 더 적합함을 알 수 있었다.[6] Kang 등은 8, 10, 12, 14인치의 글로브 제어 밸브를 시료로 선택하여 한국표준과학연구원의 고압 기체 유량 표준시스템으로 압력을 측정 유량계수를 구하는 실험을 수행하였고, 제어 밸브의 유량 특성을 예측하는 방법을 제안하였다.[7]

그리고 Chern 등은 particle tracking flow visualization method(PTFV)를 사용하여 2인치 볼 밸브의 개도에 따른 유체 흐름 패턴과 캐비테이션 현상을 시각적으로 나타내었고 밸브 개도 및 유속에 따른 유량계수 값을 측정하였다.[8] 또한 CFD 해석을 통해서 글로브 밸브의 케이지 형상 및 타입에 따른 유량계수 특성 변화에 대한 연구를 수행하였다.[9] 또한 Yang 등은 스톱 밸브의 모델링과 시뮬레이션을 통한 내부 유체 흐름에 대한 수치적 조사하여 밸브의 목 부분에서 주 압력 강하가 발생하는 것을 발견하였고, 밸브 내부 형상 수정으로 낮은 흐름 저항 및 압력 진동으로 밸브 성능을 향상시키는 연구를 하였다.[10] 그리고 Alimonti는 2인치 글로브와 게이트 밸브의 내부에서 발생하는 현상을 이해하고 모델을 개선하여 2상 유동 조건에서 압력 강하를 계산하였고, 최적의 모델을 선정하여 압력 강하를 예측하였을 때 평균 오차는 0에 가깝고 $\pm 10\%$ 미만임을 확인하였다.[11] Asim 등은 에너지 계통에서 사용되는 제어밸브의 트림의 형상에 따른 유동 특성 시험을 수행하였다. 특히 유로를 분리하여 미세 유량 조절에 대한 연구를 수행하였다.[12]

이와 같은 많은 연구에서도 해석 및 작동유체를 물로 시험한 결과들로 극저온 밸브의 성능을 예상 할뿐 실제 사용 환경인 극저온 시험 성능 테스트의 결과는 찾아 볼 수 없었다. 그래서 본 연구에서는 메이커마다 다른 성능을 보이는 특성 및 주요 인자 등을 파악하기 위해 8인치 극저온 글로브 밸브를 시료로 선택하여 극저온 환경에서 성능평가 시험을 수행하였다.

제 2 장 극저온 글로브 밸브의 특성

2.1 글로브 밸브 특징

극저온 밸브는 극한 환경에서 작동 유체의 흐름을 차단/제어하고 시스템의 압력 및 유량을 조절하는 역할을 하여 극저온 플랜트/시스템을 유지시키는 핵심 부품이다.

글로브 밸브는 설계의 단순성, 다양한 용도, 유지보수의 용이성, 광범위한 압력 및 온도 특성을 가지고 있기 때문에 모든 극저온 밸브들 중 가장 많이 사용된다. 보편적으로 글로브 밸브는 낮은 압력등급(ANSI CLASS 600)의 밸브 규격은 0.5 ~ 42인치, 중간 압력등급(ANSI CLASS 900~2500)의 밸브 규격은 1 ~ 24인치, 높은 압력등급(ANSI CLASS 4500)의 밸브 규격은 1 ~ 24인치를 사용한다.

글로브 밸브는 Fig. 3과 같이 모서리나 날카로운 부분 없이 매끄럽고 둥근 유동 통로로 설계되므로 비정상적인 난류 또는 소음이 발생되지 않는다. 또한 유동 통로의 일정한 단면적은 추가 압력손실 및 높은 유속의 발생을 방지한다.

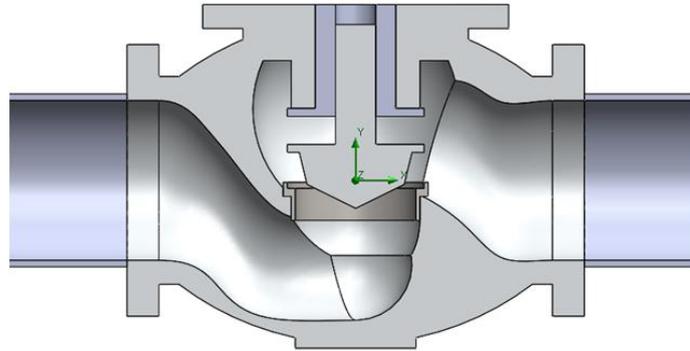


Fig. 3 Inner shape of globe valve

글로브 밸브의 장점은 다용도로 광범위하게 사용될 수 있고 단순한 선형 동작 설계는 다른 형식의 밸브보다 광범위한 조정이 가능하다.[13] 선형 동작 때문에 조작기에 의해 발생한 힘은 조정 요소에 직접적으로 전달되므로 조정 요소에서 발생하는 에너지 손실은 최소가 된다. 또한 수백 kg/cm²에 달하는 차압을 처리하면서 과도하게 높은 압력저하에서도 동작할 수 있도록 설계된다. 몸체의 두께를 증가시키고 고압용 플랜지, 볼트, 내부 부품들을 사용하여 높은 압력에도 사용할 수 있고, 프로세스 온도로부터 멀리 위치하도록 본넷 또는 몸체를 변형시켜 극한 온도에서도 사용될 수 있다. 고유유동특성만을 갖는 버터플라이밸브와는 달리 트립 또는 조정 요소로 유동특성을 변경하며 설계할 수 있다. 단일 시트를 갖는 대부분의 글로브 밸브의 트립(플러그, 시트, 케이징)은 밸브 상부를 통해 설치되므로 트립의 유지보수 시 본넷 플랜지, 본넷 플랜지 볼트, 상부 조립품, 본넷, 플러그가 하나의 조립품으로 구성되어 있어 제거하기 용이하고 수리가 간편하다. 따라서 회전밸브와 달리 글로브밸브는 내부 유지보수 시에도 배관에 연결된 상태로 유지할 수 있다.

글로브밸브의 단점은 회전밸브와 비교하여 규격이 크고 무거우며 고가

인 점이다. 또한 글로브밸브의 높이가 상당히 높아서 지진 또는 프로세스 진동으로 인해 상부 조립품이 몸체 조립품 또는 배관에 응력을 주어 문제를 발생 시킬 수도 있다. 교축 시 요구되는 상당한 스템 힘에 의해 제한을 받으므로 압축공기 조작기를 이용하는 글로브밸브의 경우 크기가 24인치 (DN 600), 수압 또는 전기수압 조작기를 이용하는 경우 크기는 36인치(DN 900) 이하로 제한된다. 그래서 특정한 경우에는 글로브밸브 대신 버터플라이 또는 편심 디스크 회전밸브를 사용하도록 한다.

글로브 밸브는 Fig. 4와 같이 내부 구조가 복잡하여 극저온 작동유체를 사용할 때 기화, 플래싱, Cavitation 등 다양한 유동 현상이 발생하므로 해석으로 성능 및 특성을 파악하기 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 8인치 극저온 글로브 제어밸브를 시료로 선택하여 극저온 시험의 결과를 통해 특성을 파악하였다.

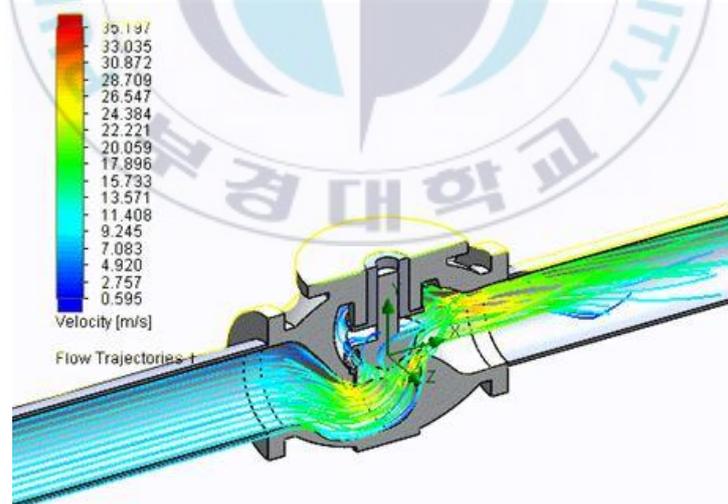


Fig. 4 Inner Flow of globe valve

2.2 시료의 사양

Fig. 5는 시료로 선정된 8인치 글로브 제어밸브의 도면과 실물 사진이고, 시료는 Table. 1과 같은 사양을 가지고 있으며, ANSI B16.34, ANSI B31.3 및 BS6364의 규정에 따라 ASTM A-351 Gr.CF8으로 제작되었다.

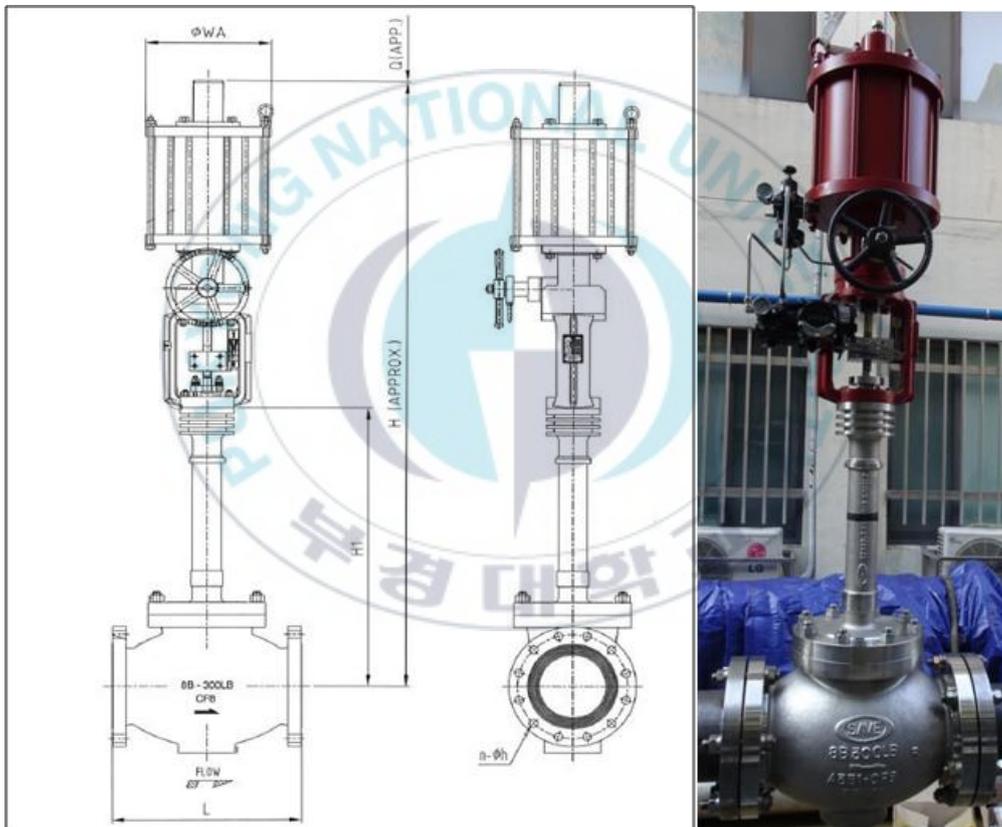


Fig. 5 Drawing of 8inch test valve

Table. 1 Drawing value of 8inch test valve

Spec	Size	H1 (mm)	H (mm)	L (mm)	ØWA (mm)	n-Øh (mm)	ØD (mm)	Ød (mm)
Value	8“(200A)	875	1900	568	376	12-25	381	203.2

Table. 2 Design value of 8inch test valve

Description : 200A (8inch), CL 300, A-351 Gr.CF8, Flanged Per ANSI B16.5			
Service conditions	Variable	Units	Maximum
Liquid-LNG			
Volumetric Flow Rate	Q	m ³ /h	1000.00
Inlet Pressure	P1	kg/cm ²	11.23
Outlet Pressure	P2	kg/cm ²	9.70
Inlet Temperature	T1	°C	-163.00
Specific Gravity	S_g	-	0.46
Kinematic Viscosity	ν	centistokes	1.00
Vapor Pressure	P_V	kg/cm ²	1.27
Critical Pressure	P_C	kg/cm ²	225.35
Cv calculations			
Liquid Pressure Recovery Factor	F_L	-	0.90
Liquid Critical Pressure Ratio	F_F	-	0.94
Liquid Choked Flow Factor	F_y	-	1.00
Valve Reynolds Number	Re_V	-	1824511106.22
Reynolds Number Factor	F_R	-	1.00
Piping Geometry Factor			1.00
Valve Sizing Coefficient	C_v	-	637.51
Valve velocity calculations			
Body Inlet/Outlet Diameter	d1_d2	mm	203.20
Inlet Velocity, Liquid		m/s	8.56
Outlet Velocity, Liquid		m/s	8.56

Table. 2는 시료의 설계 값으로 메이커의 자체 기술력으로 구해진 값이다. Table. 2의 설계 값을 이용하여 식 (1), (2)에서 실제 압력저하 ΔP , 질식유동 압력저하 ΔP_{choked} 는 다음과 같다.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 11.23 - 9.7 = 1.53 \quad (1)$$

$$\Delta P_{choked} = F_L^2(P_1 - F_F P_V) = 0.9^2(11.23 - 0.94 \times 1.27) = 8.13 \quad (2)$$

여기서

ΔP : 실제 압력저하[kg/cm²]

P_1 : 밸브 전단 압력[kg/cm²]

P_2 : 밸브 후단 압력[kg/cm²]

ΔP_{choked} : 질식유동 압력저하[kg/cm²]

F_L : 액체 압력회복계수[-]

F_F : 액체 임계압력비 계수[-]

P_V : 액체 증기압력[kg/cm²]

질식유동 압력저하 ΔP_{choked} 가 실제 압력저하 ΔP 보다 큰 값을 가지므로 C_v 공식을 사용할 때는 실제 압력저하 ΔP 수치를 사용하였다.

공동화 지표 σ 의 일반적인 개념은 공동화를 촉진하는 힘과 공동화에 대항하는 힘의 비로서 식 (3)와 같다.

$$\sigma = \frac{P_2 - P_V}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

여기서

σ : 공동화 지표[-]

P_1 : 밸브 전단 압력[kg/cm²]

P_2 : 밸브 후단 압력[kg/cm²]

P_V : 액체 온도에서의 액체 증기압력[kg/cm²]

Table. 2을 이용하여 식 (3)으로부터 시료의 σ 수치는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{P_2 - P_V}{P_1 - P_2} = \frac{9.70 - 1.27}{11.23 - 9.70} = 5.509804$$

σ 가 클수록 밸브 내에서 공동화 손상이 발생할 확률이 적다. 역으로 σ 가 작을수록 밸브 내에서 공동화 손상이 발생할 확률이 크다. σ 가 0 또는 음의 수가 되면 플래싱이 발생한다. σ 는 두 가지 형태로 표현되며 초기 σ 는 공동화의 시작 시기를 알 수 있는 수치이고, 질식 σ 는 질식유동 또는 완전 공동화가 발생하는 시점을 나타내는 수치이다.[13]

식 (3)을 통해 도출된 시료의 σ 값은 일반적인 글로브밸브의 σ 수치인 초기 σ 0.93, 질식 σ 0.56에 비해 큰 값을 가지므로 공동화 손상이 발생할 확률이 적게 설계되었음을 알 수 있다. 하지만 설계 값들은 메이커의 노하우 및 기술력에 따라 차이를 보이므로 신뢰성 확보에 어려움이 있다.

그래서 본 연구에서는 극저온 환경에서 8인치 글로브 제어밸브의 성능 시험을 수행하였고, 글로브 밸브의 성능 및 특성을 파악하여 설계 값의 신뢰성을 검증하였다.

제 3 장 극저온 밸브 성능 측정 설비

3.1 밸브 성능평가 시스템

한국기계연구원이 조선·해양플랜트 산업의 육성과 극저온 기자재 개발 증대를 위해 경남 김해에 극저온 기자재 성능평가 시스템을 구축하였다. Fig. 6는 LNG극저온기계기술 시험인증센터에 있는 극저온 기자재 성능평가 시스템의 전경을 나타내고 있다. 기자재 성능평가 시스템은 LNG 및 LN₂ 저장탱크, 극저온 펌프 성능평가 시스템, 극저온 밸브 성능평가 시스템, 유틸리티 등으로 구축되어있다.



Fig. 6 LNG and cryogenic technology center

밸브 성능평가 시스템은 작동유체 LN₂, LNG를 사용하여 극저온 환경에서의 시험을 수행할 수 있도록 구축되어 있다. Fig. 7은 밸브 성능평가 시스템의 개략도이고 시스템에 사용되는 Pump 및 Drum의 사양을 나타낸다. 밸브 성능평가 시스템은 LNG 및 LN₂ 저장탱크에서 공급되는 작동유체를 Separator Drum에 저장한 후 Submerged Pump를 이용하여 밸브 테스트 라인으로 공급하고 측정 시험 후 다시 Separator Drum으로 회수, 공급되는 순환 구조를 가지고 있다. 또한 밸브 성능평가 시스템은 4인치(1 ~ 5인치), 8인치(5 ~ 9인치), 12인치(10 ~ 14인치)의 3개의 라인으로 구축되어 있으며 각 라인 별로 온도, 유량, 전·후단 압력을 동시 또는 개별로 측정할 수 있다.

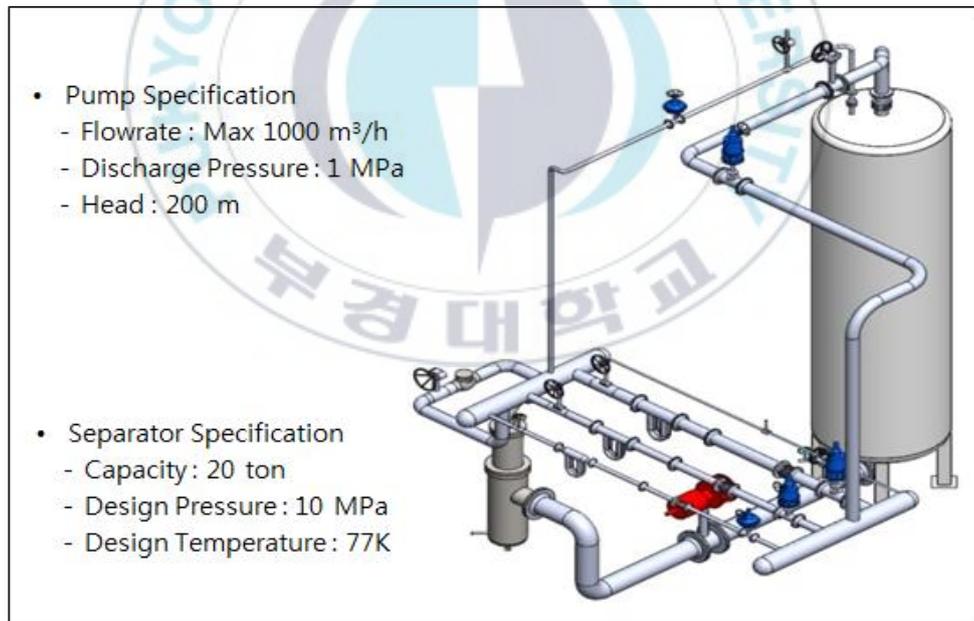


Fig. 7 Cryogenic valve performance test system

Table. 3 Specification for cryogenic valve performance test system

Item	Specification
Test scope	1. Flow rate : 0 ~ 1,000 m ³ /h 2. Valve Diameter : 1 ~ 14 inch 3. Pressure : 1.1 MPa (Design : Max 3.0 MPa) 4. Temperature : -196 °C
Test item	Flow coefficient, Pneumatic pressure, Leakage, Reliability test, and etc.
Standards	ANSI/ISA-75.02.01-2008(Control Valve Capacity Test Procedures)

Table. 3은 밸브 성능평가 시스템의 시험 사양 및 규격으로 측정 가능한 밸브크기는 1 ~ 14 인치이며 최대 유량은 1,000 m³/h, 최대압력은 1.1 MPa, 시험의 작동 유체로 LNG 및 LN₂를 사용할 수 있으며 시험 가능 온도는 LN₂ 온도인 -196 °C 까지 시험이 가능하다. 정해진 규격에 따라 유량 계수 및 공기압, 헬륨을 이용한 누설 등을 측정 할 수 있다. 그 결과 값은 KOLAS 인증을 받은 성적서로 발행된다.

LNG극저온센터의 밸브 성능평가 시스템은 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme)에 의해 2017년 10월 국제공인시험기관 인정을 획득하였다. KOLAS란 시험기관의 품질 시스템과 시험능력을 공식적으로 인정해주는 규격으로 인정시험기관의 시험결과는 국제적 효력을 가지며 기관의 신뢰성을 인증해주는 제도이다. Fig. 8은 적합성평가 국제기구의 MRA 현황이며 15년 기준 ILAC(가입국 85, 가입기구 89) APLAC(가입국 23, 가입기구 37) 그 외 IAAC, EA, SADCA의 기관으로 이루어져있다.

본 연구의 시료인 8인치 글로브 밸브를 KOLAS 인정시험기관인 LNG극저온센터 밸브 성능평가 시스템을 이용하여 ANSI/ISA 75.02.01-2008 규격에 따라 누설 및 유량계수 측정 시험을 수행하였기에 시험 결과는 국제적인 적합성을 가진다.

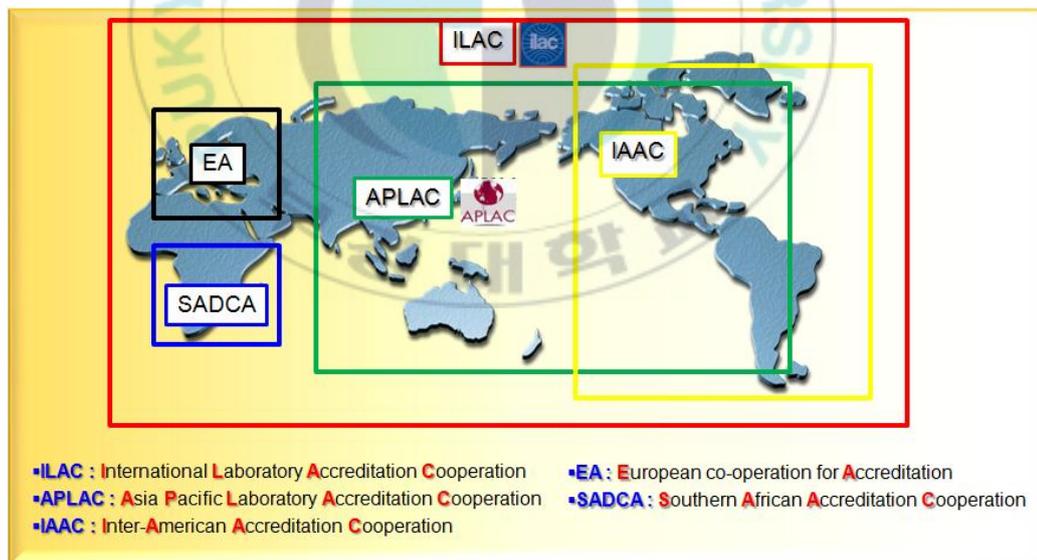


Fig. 8 International MRA status

밸브 성능평가 시스템은 LNG극저온센터 제어동 건물 내 제어실에서 시스템의 압력 및 유량을 원격으로 조작하여 시험을 수행할 수 있다. Fig. 9은 분산제어 시스템 DCS(Distributed Control System)으로 I/O Module, 아날로그 연산제어, 전원 공급 장치(UPS 포함), 로직 시퀀스 제어 등의 장비로 구축되어있다. 밸브 성능평가 시험 중 발생할 수 있는 화재 및 가스 누출에 대한 위험 상황에 대처하기 위해 불꽃 감지기 및 가스 누출 경보기가 설치되어 있으며 ITV 감시카메라 시스템을 통해 실시간으로 현장 상황을 파악할 수 있다. 이러한 비상상황이 발생하게 되면 DCS 시스템에서 LNG 차단 및 이송을 통하여 문제를 해결할 수 있다. 또한 시험 중 일어나는 모든 Event는 I/O Module에서 1 msec 단위로 기록하고 있으며 시험 종료 후 저장된 데이터를 통해 시험 분석이 이루어진다.

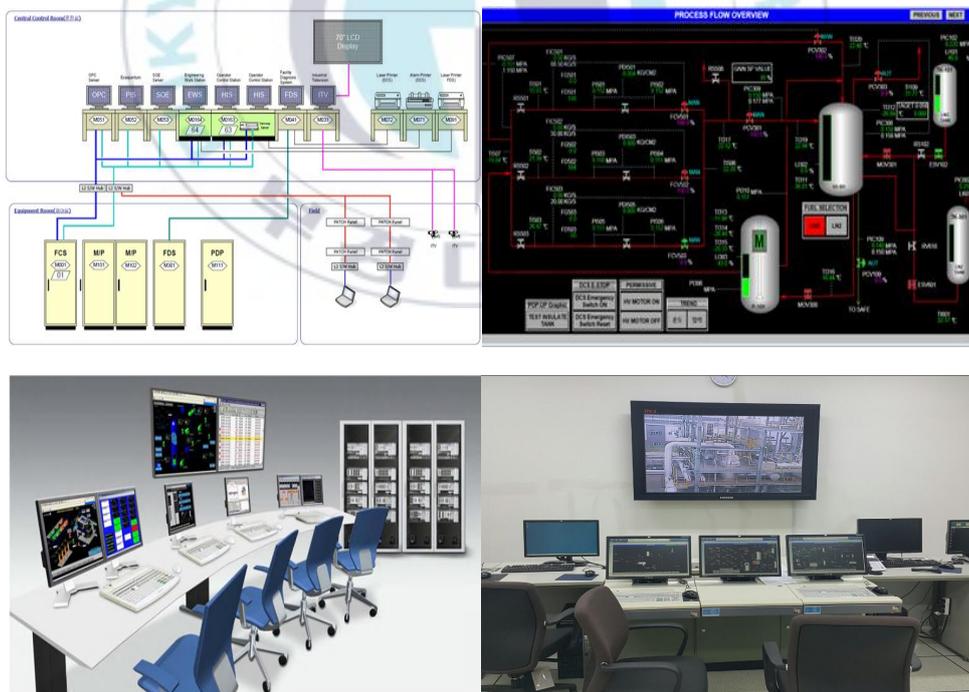
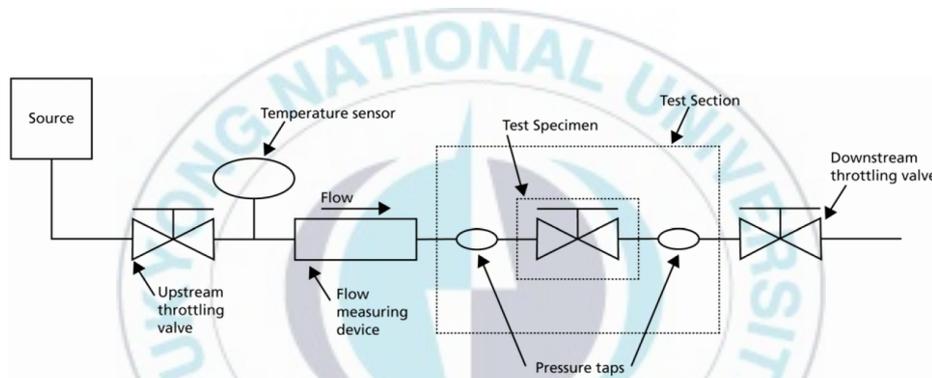


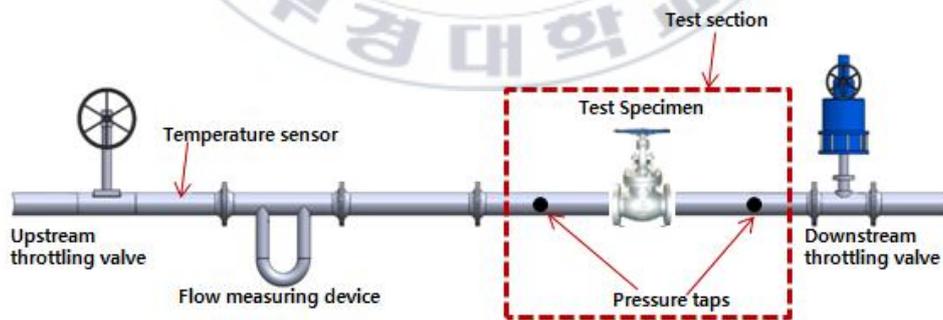
Fig. 9 Distributed Control System

3.2 측정 설비의 적합성

Fig. 10-(a)는 ANSI/ISA 75.02.01-2008 규격에서 요구하는 밸브 성능 시험 장치 구축 조건이고 Fig. 10-(b)는 규격에 따라 구축 되어진 LNG극저온센터 밸브 성능평가 시스템 시험 장치의 개략도를 나타낸다.[14] 4인치, 8인치, 12인치 각 테스트라인은 전단밸브 - 온도 센서 - 유량계 - 밸브 테스트 섹션(프레스 탭, 테스트 밸브) - 후단밸브의 구조로 되어있다.



(a) Basic test system of flow rate coefficient

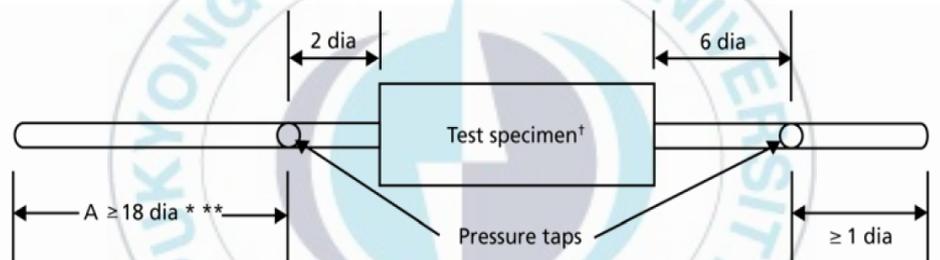


(b) Schematic diagram of test system

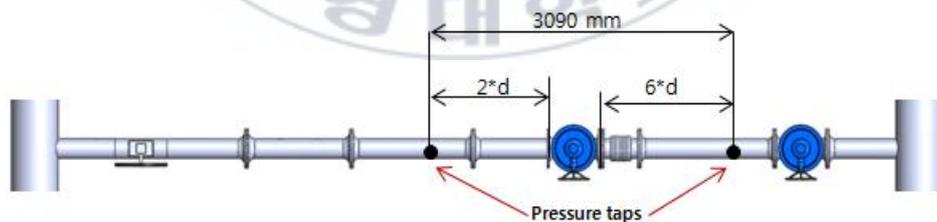
Fig. 10 Flow rate coefficient test system

본 연구에서는 203.2 mm(8인치) 배관을 사용하였고, 시료로 사용되는 8 인치 글로브 제어 밸브의 길이는 568 mm이다. Fig. 11-(a)와 같이 규격에서 요구하는 Pressure taps과 시료와의 필요 직관길이는 전단 $203.2 \times 2 = 406.4$ mm, 후단 $203.2 \times 6 = 1219.2$ mm이고 시료를 포함한 총 직관 길이는 2,194 mm 이상이 필요하다.[14]

Fig. 11-(b)는 본 연구에서 시험 수행에 사용 된 밸브 성능평가 시스템의 측정 조건이 전단 직관길이 878 mm + 시료의 길이 568 mm + 후단 직관길이 1644 mm가 약 3,090 mm로 규격에 적합함을 나타낸다.



(a) Piping requirements, standard test section



(b) Actual installation of pressure tap

Fig. 11 Standard requirements

규격에서 요구하는 유량계의 조건 중 장비의 정확도 등급은 실제 출력 판독 값의 $\pm 2\%$ 이내, 반복 측정값은 $\pm 0.5\%$ 이다. Photo. 1은 LNG극저온센터가 보유한 유량계의 교정결과 사진으로 교정에 사용되는 기준 기기와 실제 측정 비교 값은 $0.04 \sim 0.09\%$, 반복 측정값은 $0.03 \sim 0\%$ 를 나타내어 규격을 만족함을 확인하였다.

교 정 결 과 Calibration Results		심적서 번호 : EGC-0209-17031 페이지 : (2) / 총 (2)				
<ul style="list-style-type: none"> ○ 기기명(Description) : 액체용 질량 유량계 ○ 제작회사 및 형식(Manufacturer & Model) : Micromotion Inc. & CMFHC3M811N4BIEZZX(Tr.:2700R12BBIEZCZ) ○ 기기번호(Serial No.) : 12129398(Tr:3346750) 						
기준기		피교정기	측정편차	평균	A형상대표준	측정
유동율 (kg/min)	적산량 X (kg)	적산량 Y (kg)	$[(Y/X-1)*100]$ (%)	측정편차 (%)	불확도(u_A) (%)	불확도(U) (%)
14 896.7	61 574.9	61 636	0.10	0.09	0.005	0.19
15 151.9	62 630.3	62 681	0.08			
14 838.9	61 335.5	61 392	0.09			
11 463.2	9 744.4	9 752	0.08	0.07	0.007	0.19
11 599.2	9 861.7	9 867	0.05			
11 580.0	9 844.2	9 851	0.07			
8 284.5	9 942.4	9 949	0.07	0.07	0.001	0.19
8 406.5	10 088.9	10 096	0.07			
8 307.8	9 970.1	9 977	0.07			
5 099.6	10 199.4	10 206	0.06	0.08	0.009	0.19
5 126.2	10 253.0	10 260	0.07			
4 999.8	9 999.8	10 009	0.09			
1 782.1	9 712.6	9 716	0.04	0.04	0.002	0.19
1 780.2	9 702.5	9 706	0.04			
1 837.0	10 011.7	10 016	0.04			
		최대	최소	단위		
교정유량범위		15 151.9	1 780.2	kg/min		
평균측정편차		0.10	0.04	%		
측정불확도		0.19	0.19	%		

Photo. 1 Mass flowmeter Calibration Results

KOLAS 인증기관이 되기 위해서는 유량뿐만 아니라 온도와 압력 등 시험에 필요한 모든 데이터를 측정하는 계측기의 정확도를 만족해야 한다. 온도의 경우 판독 값의 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$) 정도의 정확도를 가지고, 시험 작동 중에 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{F}$) 내에서 일정하게 유지 되어야 한다. Photo. 2는 온도 및 압력계 교정 결과를 나타내는 사진으로 판독 값은 $-0.09 \sim -0.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 정확도를 가지며 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$) 이내로 온도를 유지하는 결과를 확인하였다. 또한 전·후단 압력계 및 차압계도 Photo. 2와 같이 교정을 실시하였고, 모든 계측기의 정확도가 규격의 요구사항에 만족하는 것을 확인 하였다.

교 정 결 과					교 정 결 과						
(주) 큐 엔 큐		정격서 번호 : Q1705480-204-006				(주) 큐 엔 큐		정격서 번호 : Q1705480-204-006			
부산광역시 사하구 제석로 89 (당리동) Tel : 051-292-0395, Fax : 051-292-0397		페이지 (2) / (총 2)				부산광역시 사하구 제석로 89 (당리동) Tel : 051-292-0395, Fax : 051-292-0397		페이지 (2) / (총 2)			
* 제작 회사 : Rose Mount						* 제작 회사 : Rose Mount					
* 형 식 : (0 ~ 2) MPa						* 형 식 : (0 ~ 2) MPa					
* 기기번호 : PT-503						* 기기번호 : PT-504					
1. 교정 결과					1. 교정 결과						
측정점 번호	표준기 압력값		지시값 평균	보정값	측정불확도 (신뢰수준 약 95 %, k = 2)	측정점 번호	표준기 압력값		지시값 평균	보정값	측정불확도 (신뢰수준 약 95 %, k = 2)
	MPa	MPa					MPa	MPa			
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 6	1	0.000	0.000	0.000	0.000 6	0.000 6
2	0.400	0.400	0.400	0.000	0.000 6	2	0.400	0.400	0.400	0.000 6	0.000 6
3	0.800	0.800	0.800	0.000	0.000 6	3	0.800	0.800	0.800	0.000 6	0.000 6
4	1.200	1.199	0.001	0.000 6	0.000 6	4	1.200	1.199	0.001	0.000 6	0.000 6
5	1.600	1.599	0.001	0.000 6	0.000 6	5	1.600	1.599	0.001	0.000 6	0.000 6
6	2.000	1.999	0.001	0.000 6	0.000 6	6	2.000	1.999	0.001	0.000 6	0.000 6

교 정 결 과					교 정 결 과						
(주) 큐 엔 큐		정격서 번호 : Q1705480-204-011				(주) 큐 엔 큐		정격서 번호 : Q1705480-501-021			
부산광역시 사하구 제석로 89 (당리동) Tel : 051-292-0395, Fax : 051-292-0397		페이지 (2) / (총 2)				부산광역시 사하구 제석로 89 (당리동) Tel : 051-292-0395, Fax : 051-292-0397		페이지 (2) / (총 2)			
* 제작 회사 : YOKOGAWA						* 제작 회사 : WISE					
* 형 식 : (0 ~ 19.61) kPa						* 형 식 : Pt 100 Ω					
* 기기번호 : FDT-503						* 기기 번호 : TE-502					
1. 교정 결과					1. 온도 교정결과						
측정점 번호	표준기 압력값		지시값 평균	보정값	측정불확도 (신뢰수준 약 95 %, k = 2)	표준값 (°C)		지시값 (°C)	보정값 (°C)	측정불확도 (°C) (신뢰수준 약 95 %, k = 2)	
	kPa	kPa				kPa	kPa				
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.085	-196.000	-195.91	-0.09	0.26		
2	3.92	4.02	7.94	-0.10	0.085	-101.000	-100.87	-0.13	0.26		
3	7.85	7.94	7.94	-0.10	0.085	0.000	-0.38	0.38	0.09		
4	11.77	11.87	11.87	-0.10	0.085						
5	15.69	15.79	15.79	-0.10	0.085						
6	19.61	19.71	19.71	-0.10	0.085						

Photo. 2 Temperature & Pressure gauge Calibration Results

3.3 극저온 밸브 시험 방법

본 연구에서는 LNG를 작동유체로 8인치 극저온 글로브 제어밸브의 유량계수 성능시험을 수행하였다. 시료를 LNG극저온센터 밸브 성능평가 시스템의 8인치 라인에 Fig. 12과 같이 장착한 후 차가운 질소가스를 이용하여 시스템을 천천히 예비 냉각하였다.



Fig. 12 Installation of test valve

차가운 질소 가스를 이용한 예비 냉각 후 시험 유체인 LNG를 공급하여 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각 시킨다. 온도 안정화를 위해 LNG를 지속적으로 공급하여 일정 시간 동안 전체 시스템의 온도가 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 유지하는 환경을 조성하였다. 차가운 질소 가스로 서서히 진행 된 예비 냉각 및 Submerged Pump의 안전을 위해 LNG에 담겨 있어야하는 최소 2시간 이상 등의 조건으로 전체 시스템이 안정화가 되기까지 약 8시간 정도가 필요하였다.

Pump를 기동하여 작동 유체인 LNG가 전체 시스템을 순환하는 안정된 상태를 확인 후 공급 유량을 일정하게 700 m³/h 유지시키며 Fig. 13과 같이 전류 공급 장치를 이용하여 20 mA, 16 mA, 12 mA를 Actuator에 공급한다. 시료의 개폐율이 100%, 75%, 50%로 조절되고 각 단계별로 5분정도를 유지하며 압력, 유량 변화를 측정하였다. 공급 유량 800 m³/h에서도 같은 방법으로 개도율을 변경하며 반복 시험을 수행하였다.

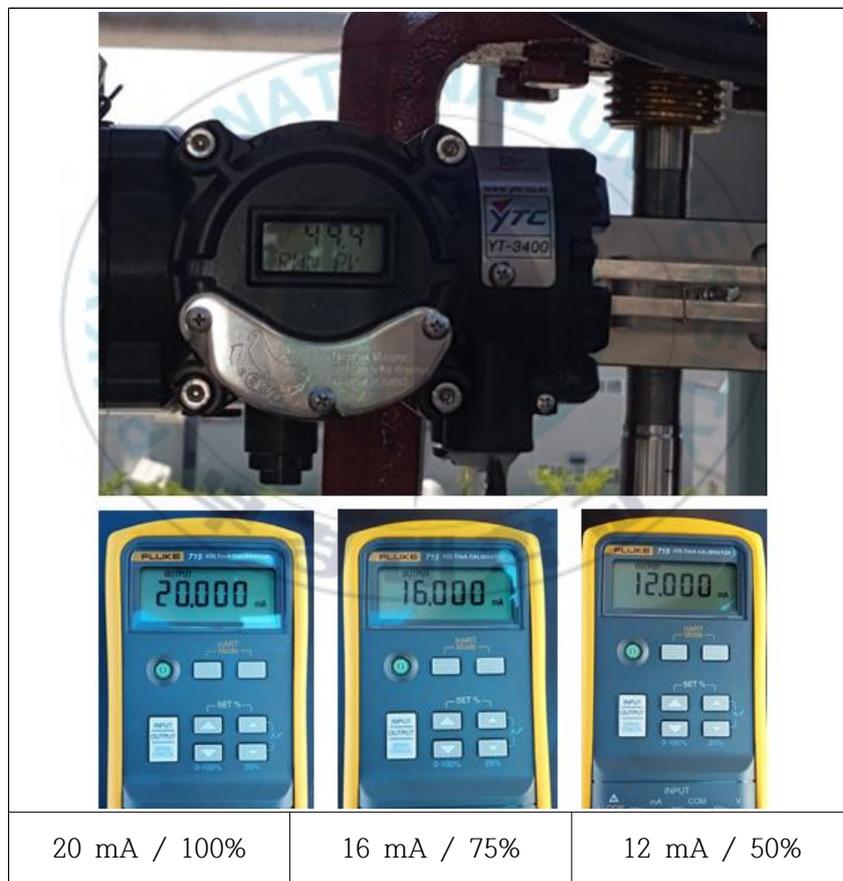


Fig. 13 Valve opening ratio according to input current

제 4 장 밸브 유량 계수 시험

4.1 극저온 밸브 시험 조건 및 범위

유량계수 C_v 의 정의에 따라 밸브의 개도를 조절 시 동일한 차압 ΔP 에서의 유량을 측정하기 위한 시험을 수행하였다. Fig. 14는 밸브의 개도를 100%, 75%, 50%일 때 전·후단 압력의 나타내고 있고, 이 때 발생하는 차압 ΔP 값을 알 수 있다. 개도를 100%에서 공급 유량 등의 조건을 변경하여 차압 ΔP 를 0.1 MPa로 시험을 수행하였고, 개도를 조절하며 각 단계별로 동일한 차압 ΔP 를 유지하려 여러 조건을 변경하는 등의 다양한 시도를 하였다. 그러나 밸브의 구조 특성으로 인해 개도를 조절에 따라 차압 ΔP 를 동일하게 유지할 수 없음을 확인하였다.

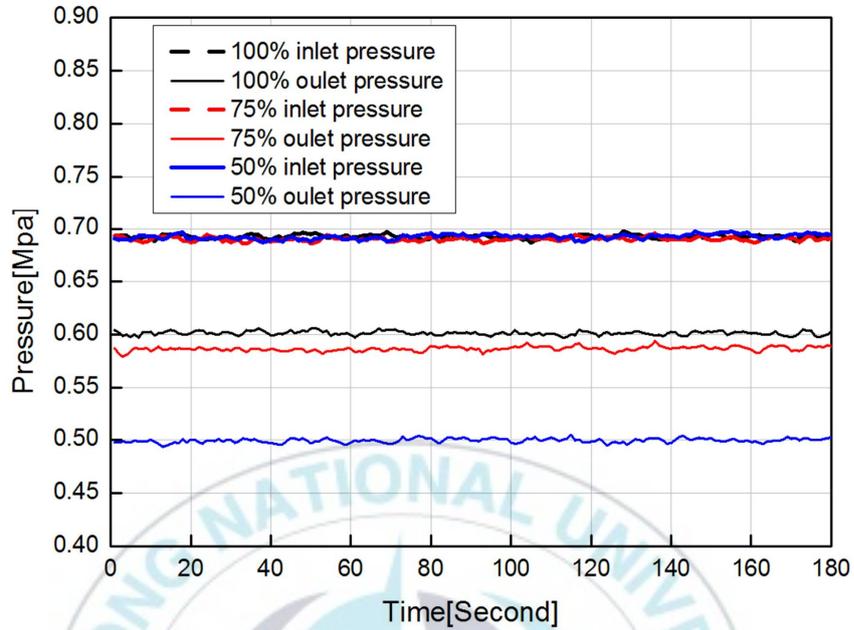


Fig. 14 Variation of differential pressure according to opening ratio

유량계수 C_v 는 식 (5)에 의해 유량 Q 와 차압 ΔP 로 그 값이 결정된다. 앞선 시험을 통해 실제 시험 수행 시 차압 ΔP 를 일정하게 유지할 수 없음을 알게 되었다. 그래서 유량 Q 를 일정하게 유지하며 차압 ΔP 의 변화에 따른 유량계수 값을 구하는 방식을 시도하였다. Fig. 15는 밸브의 개도 조절에 따른 유량 Q 의 변화를 나타내고 있다. 이와 같이 이번 연구에서는 밸브의 개도 조절 시 발생하는 유량 Q 의 변화를 여러 조건 등의 변경으로 의도적으로 일정하게 유지하며 시험을 수행하였고, 차압 ΔP 값을 측정하여 유량 계수 C_v 값을 정해진 식으로 도출하였다.

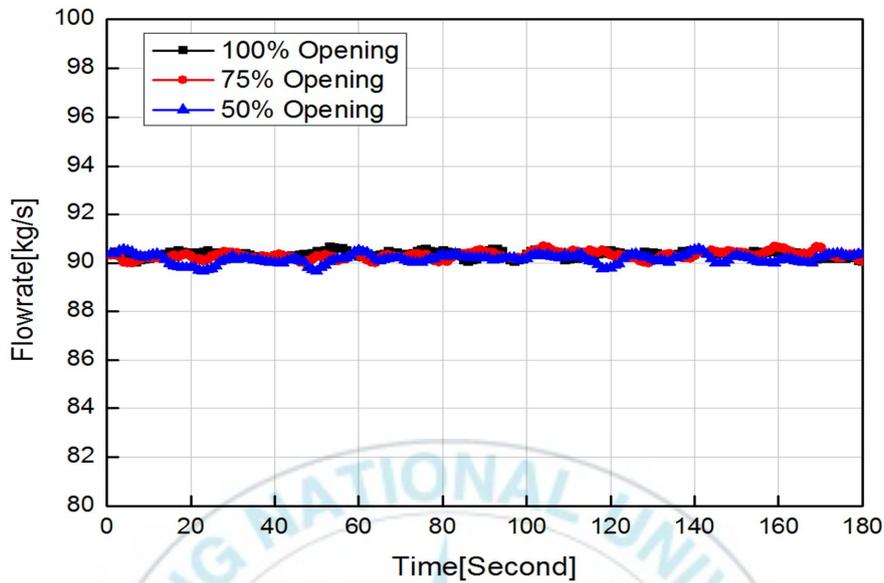


Fig. 15 Variation of flow rate according to opening ratio

Table. 4 Test results to Inlet pressure(P_1), Outlet pressure(P_2), Flow rate(Q)

Time Stamps	Tag	PI503	PI504	FIC502
	기호	P_1	P_2	Q
	단위	MPa	MPa	kg/s
2017-07-27 13:50:43	No.1	0.693	0.605	90.34
2017-07-27 13:50:44	No.2	0.694	0.602	90.45
2017-07-27 13:50:45	No.3	0.693	0.599	90.35
2017-07-27 13:50:46	No.4	0.694	0.600	90.27
2017-07-27 13:50:47	No.5	0.691	0.598	90.22
2017-07-27 13:50:48	No.6	0.692	0.600	90.07
2017-07-27 13:50:49	No.7	0.691	0.597	90.04
2017-07-27 13:50:50	No.8	0.692	0.602	90.12
2017-07-27 13:50:51	No.9	0.693	0.602	90.16
2017-07-27 13:50:52	No.10	0.692	0.603	90.20
2017-07-27 13:50:53	No.11	0.688	0.599	90.33

유량 700 m³/h 및 800 m³/h 일 때 Table. 4와 같이 시료가 장착 된 밸브 테스트라인의 전·후단 압력, 공급 유량 등 약 180개의 데이터를 수집한 뒤 평균값을 도출하였고, 밸브의 유량계수 C_v 를 도출하기 위해 시험 규격인 ANSI/ISA-75.02.01-2008에 규정된 식 (4)을 사용하였다.

$$C_v = Q \times \sqrt{\frac{\rho_1}{\frac{\rho_0}{\Delta P}}} \quad (4)$$

여기서

Q : 유량[gallon(U.S)gal/min]

ΔP : 압력차[$1b_f/in^2$]

ρ_1 : 유체밀도[$1b/ft^3$]

$\frac{\rho_1}{\rho_0}$: 비중[-]

유량계수 C_v 는 밸브의 특정 개도에서 온도 60 °F물이 압력손실 1 $1b_f/in^2$ 이 발생 시 통과하는 유량 gallon(U.S)/min을 나타낸다. C_v 는 다음 식 (4)을 이용하여 계산되어지나 시험 설비의 계측 단위들은 SI 단위로 표현된다.

Table. 4 Numerical constants

Constant	Flow Coefficient C		Formulae Units					
	K_v	C_v	$Q^{(1)}$	P, ΔP , $P_v^{(2)}$	$\rho^{(3)}$	T	d, D	$v^{(4)}$
N ₁	1.00×10^{-1}	8.65×10^{-2}	m ³ /h	kPa	kg/m ³	—	—	—
	1.00	8.65×10^{-1}	m ³ /h gpm	bar psia	kg/m ³ lbm/ft ³	— —	— —	— —
N ₂	1.60×10^{-3}	2.14×10^{-3} 8.90×10^{-2}	—	—	—	—	mm in	—
N ₄	7.07×10^{-2}	7.60×10^{-2} 1.73×10^4	m ³ /h gpm	— —	— —	— —	— —	m ² /s cS

식 (4)를 SI 단위로 변환하기 위해 Table. 5의 비례상수 N_1 을 적용하여 식 (5)을 도출하였다.

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \times \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{1}{\Delta P}} \quad (5)$$

여기서

C_v : 유량계수[-]

Q : 유량[m³/h]

N_1 : 비례상수(0.0865)[-]

ρ_1 : 유체밀도[kg/m³]

$\frac{\rho_1}{\rho_0}$: 비중[-]

ΔP : 압력차[Pa]

본 연구에서는 식 (5)에 따라 각 유량 및 개도 조절에 따른 유량계수 C_v 를 결정하였다.

4.2 개도 조절에 따른 결과

Fig. 16, Fig. 17은 공급 유량 $700 \text{ m}^3/\text{h}$ 및 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서 밸브의 개도 조절 시 유량 계수 값을 그래프로 표현하였고, 설계 값과 차이를 비교하였다. 비교 결과 유량 $700 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때 개도를 100%에서 약 29%의 오차를 75%는 0.8%의 오차를 50%는 13%의 오차를 확인하였고, 유량 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서도 유사한 차이를 확인하였다. 실제 시험에서는 밸브 내부 형상에 따라 전·후단 압력 및 작동 유체의 밀도 차이 등 여러 변수가 존재하지만 설계 값은 메이커 자체 설계 프로그램으로 도출 된 값으로 신뢰성의 문제로 유량계수 값의 검증에 어려움이 있다. 또한 시료의 내부 상세 구조의 정보 부족으로 유동 해석을 통한 흐름 및 현상 파악을 진행할 수 없었다. 그래서 글로브 밸브를 시험한 종래 연구의 결과 값과 비교하였다.

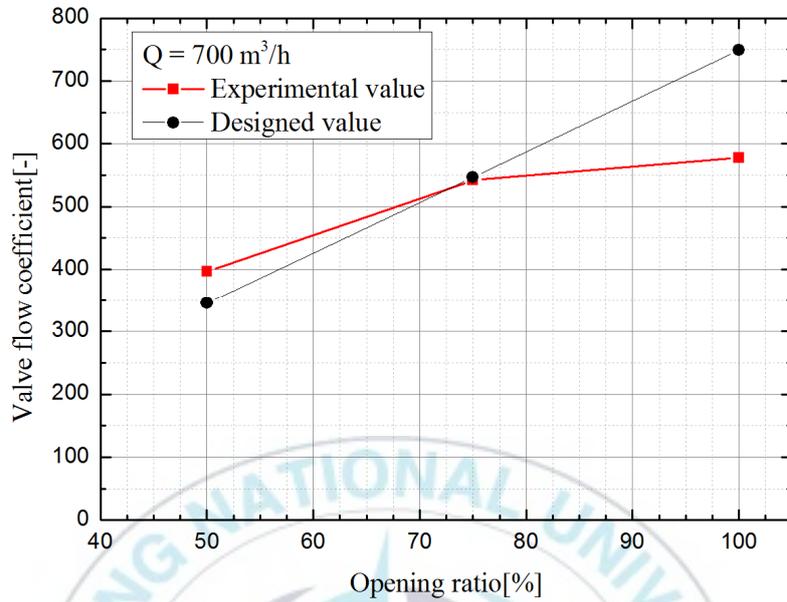


Fig. 17 Test results according to flow rate 700 m³/h

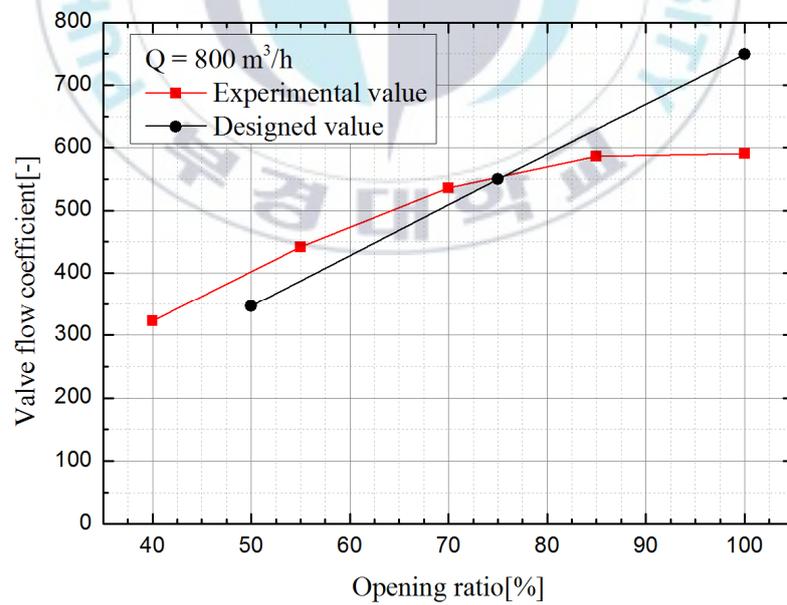


Fig. 18 Test results according to flow rate 800 m³/h

작동유체를 LNG로 시험한 종래 연구는 찾을 수 없었고, 작동유체를 물로 시험을 수행한 결과 값과 그 경향성을 Fig. 18과 같이 비교하였다. Fig. 18은 작동유체를 물로 선택하여 8인치, 10인치 글로브 밸브의 유량 계수 시험결과를 나타낸다. 밸브의 성능 및 특성은 메이커, 직경, 방식이나 형태마다 다른 값을 가지므로 차이를 비교하기는 어려움이 있다. 다만 유량 계수 성능 곡선의 경향성을 비교하였을 때, 밸브의 개도가 증가함에 따라 유량 계수 값도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

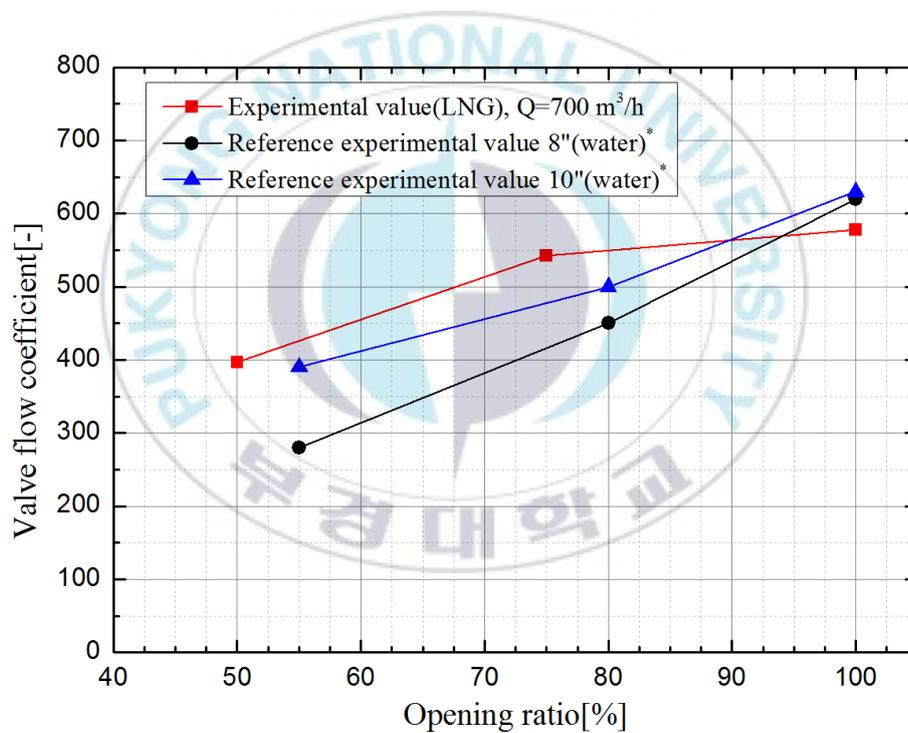


Fig. 19 Comparison with former study - water

Fig. 19은 유량 800 m³/h 일 때 밸브 개도 조절에 따른 유량 계수 측정의 결과표이다. 밸브의 개도를 조절하며 시험 한 결과 85% 이상에서는 밸브 개도 조절과는 상관없이 유사한 유량 계수 값을 가지는 특성을 가지고 85% 이하 구간에서는 밸브의 개도에 따라 선형적으로 변화하는 특성을 보였다.

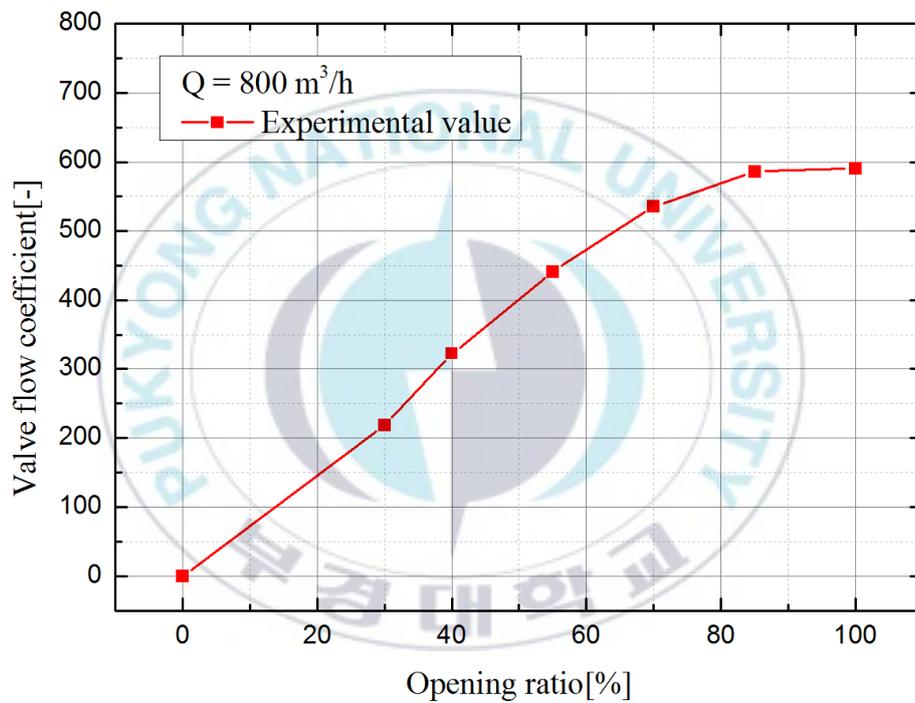


Fig. 20 Test results according to Flow rate 800 m³/h

제 5 장 결 론

시험 규격 ANSI/ISA 75.02.01-2008에 의거하여 시스템을 구축하여 유량 계수 시험을 실시하였고 설계 데이터와 실제 시험 데이터를 비교하였다. 설계 데이터와 비교 시 유량 700 m³/h일 때 개도율 100%에서 약 29%, 75%는 0.8%, 50%는 13%의 오차를 확인하였다. 설계 값은 메이커 자체 설계 프로그램으로 도출된 값이므로 신뢰성의 문제로 유량 계수 값의 검증에 어려움이 있었다. 그래서 글로브 밸브를 작동 유체 물로 시험한 종래 연구와 비교를 수행하였고, 유량계수는 밸브 개도가 증가함에 따라 선형적으로 상승하는 경향성의 유사함을 확인하였다.

유량 800 m³/h으로 밸브의 개도를 조절하며 측정 시험을 수행하였고 그 결과 밸브 개도 상승에 따라 유량계수도 선형적으로 증가하고 밸브 개도 85 ~ 100% 구간에서는 유사한 유량계수 값이 도출되는 것을 확인하였다.

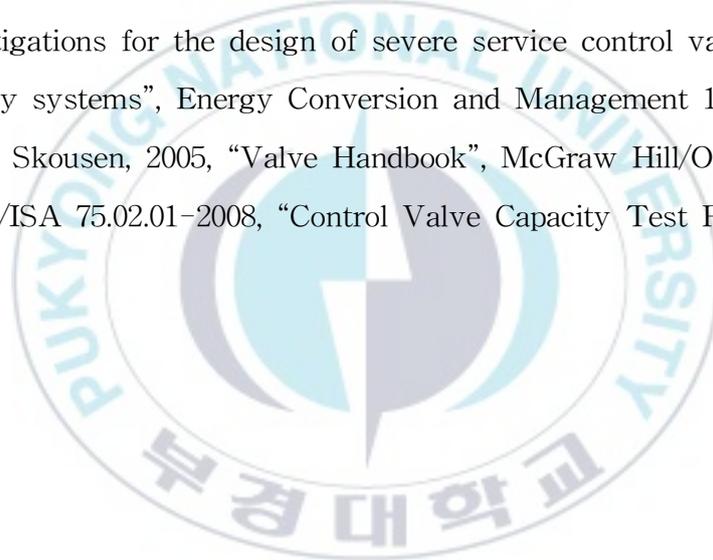
본 연구에서 시험을 통하여 파악한 밸브 개도 85 ~ 100% 구간에서 유사한 유량계수 값을 가지고 85%이하 구간에서는 유량계수가 선형적으로 변화하는 특성을 고려한다면 극저온 밸브의 설계 및 제작에 효율적인 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

메이커의 노하우 및 기술력인 시료에 관한 상세 정보를 획득할 수 없어 유동에서 일어나는 여러 가지 현상들, 성능에 영향을 끼치는 주요 인자를 파악하는 등의 중요하고 필요한 결과를 도출하지 못하였지만, 극저온 밸브의 기술력 및 신뢰성 향상을 위해서 앞으로도 활발한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] BP p.l.c, 2017, "Energy Outlook". 14page, 54page.
- [2] James A. Davis, Mike Stewart, 2002, "Predicting Globe Control Valve Performance-Part 1 CFD Modeling", Journal of Fluids Engineering Vol. 124
- [3] James A. Davis, Mike Stewart, 2002, "Predicting Globe Control Valve Performance-Part 2 Experimental Verification", Journal of Fluids Engineering Vol. 124.
- [4] K. H. Bae, J. H. Park, S. M. Kang, 2008, "A Study on the Flow Characteristics inside a Globe Valve for Ships", Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 32
- [5] Y. H. Koo, 2012, "A Study on development of cryogenic globe control valve", Pusan National University.
- [6] J. H. Moon, 2016, "Heat Flow Analysis of Cryogenic Swing Check Valve for LNG", Pukyong National University.
- [7] W. Kang, K. A. Park, S. H. Lee, K. K. Kim, Y. H. Lee, Y. J. Woo, 2015, "Flow Capacity Test of Cryogenic·High Pressure·Large Flow Control Valve for Off-shore Plant", Korean Society for Fluid Machinery.
- [8] M. J. Chern, C. C. Wang, C. H. Ma, 2007, "Performance test and flow visualization of ball valve" Experimental Thermal and Fluid Science 31.
- [9] M. J. Chern, C. H. Wang, G. T. Lu, P. Y. Tseng, Y. J. Cheng, C.

- A. Lin, and C. M. Hu, 2014, "Design of cases on globe valve", Journal of Mechanical Engineering Science.
- [10] Q. Yang, Z. Zhang, M. Liu, J. Hu, 2011, "Numerical Simulation of Fluid Flow inside the Valve", Procedia Engineering 23.
- [11] Claudio Alimonti, 2014, "Experimental characterization of globe and gate valves in vertical gas - liquid flows", Experimental Thermal and Fluid Science 54.
- [12] Taimoor Asim, Matthew Charlton, Rakesh Mishra, 2017, "CFD based investigations for the design of severe service control valves used in energy systems", Energy Conversion and Management 153.
- [13] Philip Skousen, 2005, "Valve Handbook", McGraw Hill/Osborne.
- [14] ANSI/ISA 75.02.01-2008, "Control Valve Capacity Test Procedures"



감사의 글

직장 생활을 하며 학문에 대한 부족함을 깨닫고 그저 배우고 싶다는 생각으로 부경대학교 냉동공조공학과 산업대학원을 입학하였고, 어느덧 2년이 지나 졸업논문을 제출로 석사과정을 마치려합니다. 2년동안 많은 일이 있었지만, 따듯한 관심과 격려의 말씀으로 부족했던 저를 일깨워주신 지도 교수님이신 윤정인 교수님께 진심으로 감사드립니다. 학부전공이 달라서 적응에 힘들어하던 저에게 바쁜 시간에도 열정적인 강의와 진심어린 조언을 해주신 김종수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님, 손창호 교수님 감사드립니다. 항상 긴급하게 민폐만 끼친 권용하 조교님 감사합니다. 짧은 시간이었지만 교수님들께 단순한 학문이 아닌 인생의 가르침을 얻었습니다.

해준 것 없이 도움만 받았던 에너지시스템 연구실의 설성훈, 강인호, 박준봉, 한형민, 이광석, 노승주 선·후배님들 감사합니다. 앞으로도 사회에서 인연을 이어나가며 보답하도록 하겠습니다.

다들 바쁜 개인 일정에도 한 곳에 모여 열심히 배우고, 여러 정보도 주고받으며 같이 성장한 산업대학원 동기 분들에게도 많은 도움을 받았습니다. 감사합니다.

학교와 업무를 동시에 진행하기에 힘든 점이 많았지만 바쁜 업무에도 본인 일처럼 신경써주고 도움주신 한국기계연구원 LNG극저온기계기술 시험인증센터 고득용 박사님, 김기덕 선임님, 이근태 선임님, 최성웅 박사님, 서

광범 선임님, 이상윤 선임님, 김상권 소장님, 정종철 과장님, 정봉권 과장님, 권호용 반장님, 윤기홍 반장님, 임정순 반장님 진심으로 감사드립니다.

산업대학원 석사 과정을 무사히 마칠 수 있게 도움주신 많은 분들에게 다시 한 번 감사드립니다.

