해설논문

(Special issue)

초저온용 파일럿 밸브의 성능평가에 관한 동향 Technical Trend of Performance Analysis of Pilot Valve for Ultralow Temperature

이 정 진

Jung-Jin Lee

· 한국기계연구원 기업지
· 원연구직
· mtb527@daum.net

윤 정 인

Jung-In Yoon

· 부경대학교 교수
· yoonji@pknu.ac.kr

손 창 효

Chang-Hyo Son

· 부경대학교 교수
· sonch@pknu.ac.kr

문 정 현

Jung-Hyun Moon

· 부경대학교 대학원
· 냉동공조공학과
· nuclear1047@naver.com

1. 서 론

우리나라는 조선강국이며 건조실적 1위인 국내 조선업계에서는 LNG선/LPG선과 같은 고부가 가치의 선박을 건조해 오고 있으며, 적극적인 영업망을 구축하여 더 많은 고부가가치의 선박 수주에 총력을 기울이고 있다. 또 청정에너지인 천연가스의 수요가 계속적으로 증가하고 있어 가스 운반선의 건조 수요도 증가하고 있고, 이를 운반한 후 저장하는 가스저장 시설의 요구도 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 초저온 밸브의 수요도 증가하고 있는 추세이다. 초저온 밸브는 고부가 선박인 LNG선 및 LPG선용 저장설비 그리고 육상용 저장탱크에 장착되는 안전밸브로서 탱크의 내부 압력을 설정압력 이하로 유지시켜 주는 기능을 한다. 만약, 저장탱크 내부의 압력이 설정압력 이상으로 상승할 경우, 고압으로 인한 저장탱크의 균열 그리고 이와 관련된 주변 시스템 등에 영향을 주게

되며 최악의 경우 폭발 등으로 인한 인명 피해가 있을 수 있어 제품의 품질이 중요하다.¹⁾

최근 LNG가 갖는 환경적, 경제적인 장점으로 인해 그 수요가 급증하고 있고, 수송은 80%가 LNG 운반선이 담당하고 수송효율을 높이기 위해 기체 부피의 1/600로 액화를 시키는데 이 경우 가스를 -163°C 로 온도로 강하하여 압축시켜 운반한다. 이 액체를 제어하기 위해서는 초저온 밸브를 필요로 한다. LNG 운반선 1척에는 약 500여개의 밸브를 필요로 한다. LNG 운반선에 소요되는 일부품목의 초저온 밸브는 전량수입에 의존하고 있다. 우리나라가 명실상부한 세계 제1위의 조선대국을 유지하기 위해서는 배를 생산하는 조선소뿐만 아니라, 부품을 공급하는 부품 생산업체도 완전하고 독자적인 기술을 가지고 있어야 하는데 초저온의 유량 시스템은 아직 설비를 갖추고 있지 않아 초저온 밸브를 국산화하면서, 국제수준의 평가방법과 제품을 검증할 수 있는 대규모 시험설

비, 투자 등 이 함께 이루어져야 할 것이다.^{2,3)}

본 논문에서는 초저온 밸브 부품의 개발과 유량 시험의 테스트 시스템인 초저온 밸브 성능 시험기를 설계하고 그에 대한 성능 평가 및 해석, 밸브검사에 목적을 두었다.

2. 초저온 밸브의 설계

2.1 초저온 밸브 설계

Fig. 1 Modelling of pilot diaphragm valve

파일럿 작동 안전 밸브(pilot operated relife valve)의 핵심은 스프링의 압력으로 인하여 자동으로 열리고 닫히는 시스템이므로 열릴 때의 스프링 압력을 구조 해석을 통하여 구해 구조물 중량과 유체의 유량을 건딜 수 있는 스프링 강선 및 직경을 선정하고 테프론 시트의 금형설계 및 형상설계를 하여 이를 API규격, ASME규격과 ANSI규격에 맞추어 밸브를 설계한다.

Fig. 1의 모델링 제품은 2차원 도면을 토대로 하여 3차원 모델링(UniGraphic)를 완성한 것이고, Fig. 2의 주조 응고 해석(Z-CAST)과 Table 1의 주조품검사, Table 2의 비파괴검사를 거쳐 주물을 가공하여 밸브를 개발한다.

Fig. 2 Casting solidification analysis of valve

Table 1 Casting inspection of valve

Process	Product application	Inspection item	Inspection method	Application standard
Model	All	Thickness	Measuring instrument	Drawing
Melting	All	Chemical composition	Spectrometer	ASTM/ASME etc Material standard
Heat treatment	All	Temperature and time	Heat treatment record	
		Mechanical property (Tensile strength, Yield point, Elongation percentage, Contraction ratio)	Universal material test machine	
	Low temperature	Low temperature impact test	Charpy impact tester	
	NACE	Hardness	Hardness Tester	NACE TM01
Integrity of casting	All	Appearance	Visual identification	MSS-SP-55
		Wall Thickness	Measuring instrument	Drawing
	Order Spec.	Non-destructive inspection	RT (Radiographic Test)	ASTM B16.34/E186, E446
			PT (Penetrant Test)	ASME B16.34/ASTM E165
			MT (Magnetic-Particle Test)	ASME B16.34/ASTM E165

Table 2 Non-destructive inspection of valve

Process	Product application	Inspection item	Inspection method
Integrity of casting	Order Spec. (Non-destructive inspection)	RT (Radiographic Test)	Wall Thickness - below 2.5inch, γ 선(Ir-192)
			Wall Thickness - above 2.5inch, Co-60
		PT (Penetrant Test)	Linear indication Material Thickness below 0.5inch - 0.3inch length - Width 3 times
			Circle indication Material Thickness below 0.5inch - 0.3inch diameter
		MT (Magnetic-Particle Test)	Linear indication Material Thickness below 0.5inch - 0.3inch length - Width 3 times
			Circle indication Material Thickness below 0.5inch - 0.3inch diameter

Fig. 3 Diaphragm valve registering in Fukui

비파괴시험이란 제품에 전혀 손상을 주지 않고 제품의 외부에 직접 시험기를 설치하여 외부에 제품 내부의 결함 등을 조사하는 것으로, 표면 혹은 표면 근처, 또는 불연속부를 검출해 내는데 쓰이고 있다. 이 방법을 표면시험법이라고 한다. 표면 안의 내부에 포함되어 있는 결함을 두께방향으로 관통하여 검출해 내는 방법을 체적 시험이라고 한다. 표면시험으로는 자분탐상 시험(MT), 침투탐상 검사(PT)가 있고 체적시험으로는 방사선투과 시험(RT), 초음파탐상시험 (UT), 와전류탐상검사(ECT)가 있다.

개발품은 성능 테스트와 검사를 거쳐 내온도성 -196°C , 인장강도 630 MPa, 충격치 41 J을 갖는 밸브를 제작한다.

2.2 초저온 밸브의 가공품 검사

Table 3 Inpection Processed goods of Manufacture valve

Process	Application part	Kind of inspection	Kind of inspection item	Inspection method	Application standard
Manufacture	Important parts	Self - reliant	Dimensional and Visual	Measuring instrument	Drawing
Receipt	Manufacture parts	Sample			
	Welding parts	Sample	PT (Liquid Penetrant Test)	reagent	ASME B16.34/ASTM E165
Welding	Overlay	All			
	Seal welding	option			

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 4 Testiong device of diaphragm valve drawing

밸브를 개발하여 밸브의 성능시험을 하기 위해 액체 질소를 흘려보내면서 밸브의 시트면이 -196°C 로 온도가 내려가고 초저온 챔버 벽면 온도도 내려간다. 이 때 밸브의 시트 누설 테스트를 시작하기 위해 동일한 관에서 헬륨을 방출하면서 헬륨 질량유량계(mass flowmeter)를 사용하여 헬륨의 누설량을 측정하고, 메스실린더(mass cylinder)에서 보다 정확하게 측정한다. 측정규격은 API527의 누설량에 따라 10cc 보다 적게 나오면 합격이고, 10cc 이상 나오면 불합격이다.

3.2 실험 방법

BS6364 규격에 의해서 시험 장치를 준비 한다. 패키징(packaging) 부분은 장치외부에 노출되어 덮개(bonnet) 내부에서 기화한 기체가 접촉하고, 액체 질소를 밸브에 흘려보내기 전에 밸브 내부에는 헬륨가스(He gas)를 채우고 이 때 헬륨가스의 공급압력은 최대 시트 테스트 압력(seat test pressure)⁴⁾이 되어야 한다. 이때의 침전높이는 최소 몸체(body) 연결부위까지는 침전되어야 하고 시험 중 밸브 내부는 항상 헬륨 가스에 의해 충만해 있어야 한다. 냉각되는 동안 밸브의 몸체와 덮개의 온도를 측정할 수 있어야 하며 밸브의 온도가 -196°C 가 될 때까지 지속한다. 밸브는 20회 이상 열림과 닫힘 작동을 하고 최소한 처음 작동시와 마지막 작동시의

Fig. 5 Testngion device of diaphragm valve

작동 하중을 측정한다. 밸브는 완전히 닫힌 상태에서 최대 시트 테스트 압력을 가압한 상태에서 밸브를 완전히 잠그고 15분간 유지하여 몸체, 덮개, 체결부 등의 누설을 검사하여 누설이 없어야 한다. 초저온 실험이 끝난 후 상온에서 재시험하여 초저온 하에서의 시험결과를 만족해야 한다.

3.2.1 밸브의 유량 실험

3차원 모델링을 근간으로 플루언트(fluent)를 이용, 기본적인 난류 모델(k- ϵ)을 적용하여 내부유동해석을 수행한다. 적용 난류모델은 박리(separation)에 의한 2차 유동(secondary flow)의 정확한 모사와 저 레이놀즈 영역인 벽면 경계층에 의한 영향을 정확히 모사하기 위해 1994년 Menter에 의해 제안된 k- ω SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하고, 표준 k- ϵ 모델을 도입하고 국부 난류 레이놀즈(reynolds)수가 작아서 k- ϵ 모델이 잘 적용되기 어려운 벽 주변 유동장의 처리에는 벽 함수를 사용한다.^{5,6)} 유체는 비압축성, 점성흐름으로 모델링 한다. 유체의 지배방정식인 네이비어 스톱스(navier-stokes)방정식을 이용하여 난류 유동의 지배방정식으로 정한다. 공간상의 이산화방법으로는 유한요소법을 채택한다. 특히 높은 난류 유속에서 생길 수 있는 해의 불안정성을 방지하기 위해 유한요소법을 도입한다. Fluent의 해석결과를 바탕으로 구

조적으로 취약한 부분에 대한 보강 작업으로 3차원 모델링을 수정한다. 밸브 내부의 수압은 설계 압력의 1.5배를 건디는 유동과 각 부위에서의 압력을 측정한다.

3.2.2 밸브의 CFD 해석

수정된 3차원 모델링과 Ansys를 이용하여 1차 구조해석을 수행한다. 유동해석의 결과를 이용하여 가장 압력이 크게 작용하는 시트의 높이를 결정하여 구조해석을 실시한다. 격자는 주요 관심 영역인 밸브 내부에 대해서 조밀하게 그리고 원형 관에서는 균일한 크기를 가지도록 메쉬(mesh)를 나누었다. 생성된 격자 계에 대해서 유동의 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식 등으로부터 유동장의 데이터를 수치적으로 계산한다.

Fig. 6 Flow analysis achievement formality

Navier-Stokes 방정식은 비선형 편미분 방정식으로 정상상태인 경우 적절한 경계 조건이 주어져야 한다. Fluent에서는 경계 조건을 속도, 유량, 압력으로 설정할 수 있고, 이 해석에서는 경계 조건으로 압력을 이용하였다. 이러한 조건을 사용할 경우 주어진 해석 영역에 대해서 양 끝단간의 압력차를 적용할 수 있기 때문이다. 밸브 내의 유동은 복잡한 난류 유동을 수반함으로 적절한 난류 모델

이 사용될 필요가 있다. 따라서 공학적으로 신뢰할 만한 결과를 제시하는 것으로 알려진 standard k-ε 모델을 적용하였다. 전산 유체 해석을 위해 Fluent에서 적용된 조건은 다음과 같다.

- (1) 정상 상태(steady state)
- (2) 작동유체 : 물(water),
액체 질소(liquid nitrogen)
- (3) 압력차 : 1 psi

위의 조건하에서 디스크와 시트의 열리는 간격에 따라 10 mm, 20 mm, 30 mm 등의 변화에 따라 초저온 밸브안의 유량 시험을 각각의 경우에 대해서 CFD해석을 수행한다.⁷⁾

Fig. 7 Disk to achieve flow analysis

3.3 밸브의 실험 결과

Table 4 Performance test standard of valve

Valuation items		Unit	Standard
1. Use temperature		℃	-196~+50
2. Diaphragm thickness		%	100
3. reopened pressure		%	± 10
4. Seat leakage Amount	Normal temperature	cc/min/inch	10
	-50℃	cc/min/inch	10
	-196℃	cc/min/inch	10

먼저 물로 유량 시험을 하여 액체 질소를 사용하였을때와 얼마나 차이가 나는지 챔버 안에서의 유량 시험과 성능 테스트를 하여 최종적으로 밸브와 초저온 시험 장비의 성능테스트와 안정화 테스트

장치를 개발하려고 한다. 성능 테스트를 하면서 밸브는 150class에서는 정압 10kg/cm²으로 압축기에서 맞추어 액체질소를 계속 공급하면서, 헬륨을 첨가하여 시트 누설 시험하여 최적의 시험 조건을 도출한 초저온용 파일릿 밸브의 성능 평가를 하여 선급 등의 인증 평가와 성능 평가, 검사할 때 자료로 사용할 것이다.

4. 새로운 초저온 방법의 제안

일반적으로 널리 이용되는 BS6364의 시스템 개략도를 아래의 저온 시험 요령으로 붙이고, 제품과 각 부품을 탱크의 질소 가스에 담구어 SUB-ZERO 처리를 하여 밸브부품과 제품의 고품질화에 기여 할 것으로 사료된다.

Fig. 8 Valve spindle gland position above tank top level.

5. 결 론

본 논문에서는 초저온용 파일릿 밸브의 성능평가에 관한 동향을 알아보았으며 그 주요 결과는 다음과 같다.

1. 밸브의 검사 규정의 내용을 바탕으로 일반적으로 알려져 있는 BS6364의 질소가스로 사용하는 것을 초저온이라고 하고, 조선에서 드릴쉽등을 만들려면 재료의 고품질화가 이루어져야 한다.
2. 초저온밸브를 생산하는 업체들은 대부분 셀정유사에서 테스트를 만족해야 납품이 가능하다.

(셸테스트는 온도 범위가 두개로 이루어져 있음
첫번째 - 50℃ ~ 350℃, 두번째는 - 196℃ ~ 350℃)로 설정되어 있다.

3. 가공여유가 너무 타이트하게 2/100으로 하여
제품의 균일성 재현이 조금 떨어짐. 재현성이 제
일 좋은 가공여유는 1/10 이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥
원의 지역특화산업육성사업으로 수행된 연구결과
입니다.

참고문헌

1. M. W. Benjamin and J. G. Miller, Oct. 1942, "The Flow of a Flashing Mixture of Water and Steam through Pipes", ASME Transactions, pp. 657-669
2. R. F. Barron, 1985, "Cryogenic System", 2nd Ed., Oxford Univ. Press, New York
3. Technology Application Inc., 1997, "Storage Tank Self Pressurization", Cryogenic Engineering Summer Session Short Course, July 14-17,
4. T. M. Flynn, 1997, "Cryogenic Engineering", Marcel Dekker, Inc.
5. Randall Barron, 1966, "Cryogenic Systems", McGraw-Hill, Inc.
6. G. S. Lee, et al., 1995, Thermodynamic Analysis of the Extraction Process and the Cold Energy Utilization of LNG, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 7, No. 1 pp. 120-131
7. J. I. Yoon., 2001, Trends of Research and Development for LNG Cold, Journal of the KSPSE, Vol. 5, No. 4. pp. 5-10.