

가스 파이프라인용 30인치 볼 밸브의 누설량 평가

김철규 · 이상문 · 장춘만[†]
한국건설기술연구원

Assessment of Gas Leakage for a 30-inch Ball Valve used for a Gas Pipeline

CHUL-KYU KIM, SANG-MOON LEE, CHOON-MAN JANG[†]

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Build Technology
(Daehwa-Dong) 283, Goyandae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

Abstract >> The purpose of this study is to evaluate the gas leakage for a 30-inch ball valve. The ball valve was designed and manufactured for a natural gas transportation through a long-distance pipeline mainly installed in the permafrost region. The gas leakage assessment is based on the pressure testing criteria of international standards. Pressure conditions of the gas leakage test was employed 70 bar, 100 bar, and 110 bar. The amount of the gas leakage at each pressure condition was small and had a value under the pressure testing criteria, ISO 5208. Gas leakage with respect to the test pressure was predicted by the polynomial curve fitting using the experimental results. It is found that the gas leakage rate according to the pressure is proportion to a second order curve.

Key words : Ball valve(볼 밸브), Permafrost region(극한지), Closure test(밀폐시험), Gas pipeline(가스 파이프라인), Gas leakage(가스 누설량), Gas leakage prediction curve(가스누설 예측곡선)

Nomenclature

P : Pressure, bar
Q : Leakage, mm³/s
DN : Nominal valve size, mm
PN : Nominal pressure, bar

1. 서 론

볼 밸브는 크게 볼(ball), 몸통(body), 스템(stem),

시트(seat) 그리고 제어장치(control unit)로 구성되며, 파이프라인을 통해 수송되는 유체를 차단하거나 제어하기 위한 용도로 사용되는 제어기기로 거의 모든 산업분야에서 이용되고 있는 핵심 요소부품이다. 볼 밸브는 타 형식 밸브에 비해 기밀유지 성능이 우수하고, 완전 개방 시에는 유로 저항이 없는 특성을 갖는다. 또한, 간단한 구조와 보수의 용이성 때문에 오일(oil), LNG(liquid natural gas), 천연가스(natural gas) 수송과 같은 고압의 대규모 유체를 개폐 또는 제어하는데 유리하다. 이러한 이유로 볼 밸브의 유동 특성, 구조 안전성, 밀폐 성능평가 등에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

Ozdamar 등¹⁾은 볼 밸브의 압력강하 특성을 공기

[†]Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

Received : 2016.3.27 in revised form : 2016.4.20 Accepted : 2016.4.30

Copyright © 2016 KHNES

압력장치를 이용하여 실험적으로 고찰하였고, 동시에 CFD를 이용한 수치모델 평가를 수행하여 볼 밸브 개폐각도에 의한 압력차의 지수적 변화를 고찰하였다. Chern 등²⁾은 공동현상(cavitation)의 발생과 압력강하 등의 수력학적 특성을 유동가시화를 통해 분석하였다. 또한 볼 밸브의 개폐각도가 커질수록 밸브 후류에서 나타나는 유동박리(separation)에 의한 재부착점(reattachment point)의 위치가 하류로 이동하는 것을 고찰하였다. Chern과 Wang³⁾은 선형적인 유량 제어 목적으로 밸브 후단에 설치된 V형 포트의 영향을 유동가시화를 통해 연구하였고, V형 포트를 설치한 경우 밸브 개폐각도에 따라 선형적으로 유량을 제어할 수 있음을 밝혔다. Tabrizi 등⁴⁾은 볼 밸브 내부를 통과하는 유동특성을 삼차원 수치시물레이션을 이용하여 평가하였으며, 밸브의 개폐각도가 커질수록 관로 내의 와류강도가 커짐을 고찰하였다. Lee and Jang^{5,6)}은 1인치 볼 밸브 성능시험 결과와 함께 수치해석 모델을 이용하여 내부 유동을 분석하고, 10인치 볼 밸브 모델의 유동상사 연구를 수행하였다. 또한 볼 밸브의 내부에서 발생하는 유동박리를 고찰함으로써 압력 강하 및 밸브 후류의 영향을 고찰하였다.

Kim 등⁷⁾은 ANSYS Workbench를 이용하여 고압용 초저온 볼 밸브의 안정성을 검토하기 위해 구조해석을 수행하였고, 초저온 조건에서의 밸브의 열응력 및 변형량 등을 보고하였다. Song 등⁸⁾은 구조해석을 이용하여 세그먼트 볼 밸브에 대해 직교배열법을 이용한 최적화를 수행하였다. Regula⁹⁾은 볼 밸브 시트의 파괴가 누설에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였고, 헬륨 누설 시험을 이용하여 볼 밸브의 밀폐 성능을 평가하였다. Kim과 Yoon¹⁰⁾은 산업용 표준의 압력시험 기준을 근거로 하여 고압용 리테이너형 볼 밸브의 구조해석을 수행하였고, 내압 시험 및 밀폐시험의 조건으로 변형량, 변형률, 등가응력과 안전계수를 통해 구조의 안전성을 평가하였다.

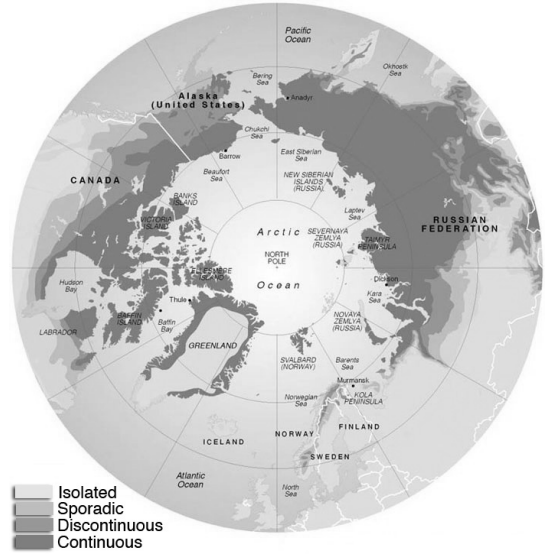


Fig. 1 Permafrost region spectrum of the northern arctic¹¹⁾

최근 저유가 상황에도 미국, 러시아, 캐나다 등의 강대국은 에너지자원 확보가 꾸준히 전개하고 있다. 미국, 캐나다, 러시아 모두 환경오염우려에도 불구하고 새로운 자원을 개발하기 위하여 해저 자원 및 극한지 자원탐사가 활발히 전개되고 있다¹²⁾. 특히 극한지에는 아직 개발되지 않은 가스 및 원유가 현재 전체 매장량의 약 22%정도 매장되어 있는 것으로 파악되는 에너지 개발의 미개척지이다. 따라서 국내에서도 이러한 극한지의 에너지개발시장에 진입하기 위한 기반구조물 설계 및 평가기술 연구¹²⁾가 수행되고 있다.

일반적으로 극한지는 심해저, 사막, 극지 그리고 우주공간 등을 말하고, 공학적 의미로는 17.8℃까지를 한지, -30℃까지를 혹한지, -30℃이하를 극한지로 분류한다. 이러한 극한지는 통상 2년 이상 지중의 온도가 영하를 유지하는 영구동토지역(permafrost region) (Fig. 1 참조)을 대상으로 한다. 따라서 극한지 자원 이송망을 위한 볼 밸브는 기존의 볼 밸브 보다 더 낮은 온도의 환경에서 보다 향상된 밀폐성능을 요구한다.

본 연구에서는 극한지 자원이송을 위한 30인치 볼

밸브 시제품을 개발하여 산업용 표준 압력시험 방법을 근거로 하여 누설량 실험평가를 수행하였다. 이러한 실험을 통해 30인치 볼 밸브의 압력변동에 따른 누설량을 예측하였다. 누설량 예측은 다항함수 커브 피팅(polynomial curve fitting) 방법을 이용하였으며, 이차함수의 형태의 실험식을 얻을 수 있었다.

2. 밸브의 압력시험 기준

Fig. 2는 극한지 지원이송망용 30인치 볼 밸브의 시제품을 나타낸다. 이러한 지원이송망용 볼 밸브는 주로 트러니언 타입(trunnion type)을 사용하며, 이러한 트러니언 타입에는 탑 엔트리 타입(top-entry type)과 쓰리 피스 타입(three-piece type)으로 구분되며, 본 연구에서는 쓰리 피스 타입 볼 밸브를 선정하여 제작하였다. 볼 밸브의 주요 구성품은 볼, 몸통, 스템, 시트이며, Fig. 3은 각 구성품의 제작사진을 나타낸다. 볼 밸브의 재료는 저온특성을 고려하여, 볼 및 본체는 A182-F304 및 A352-LCC로 하였다.

볼 밸브의 압력시험(pressure testing) 방법은 크게 두 가지로 내압 시험(shell test)과 밀폐 시험(closure test)으로 나눌 수 있다.^{10,13)} 내압 시험은 밸브 몸통의 안전성을 평가하기 위한 시험이고, 최대 허용압력의 1.5배의 압력을 5분 동안 유지되어야 한다. 그리고



Fig. 2 Prototype of a 30 inch ball valve

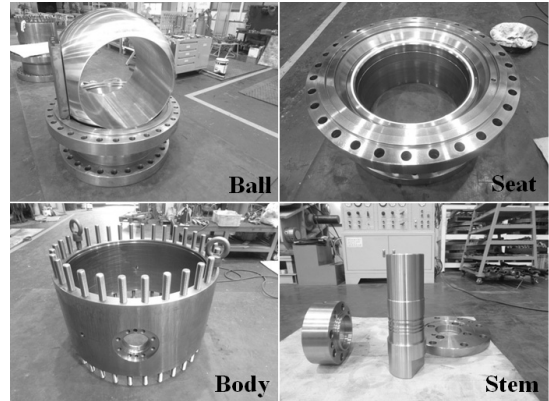


Fig. 3 Components of a 30-inch ball valve

Table 1 Pressure testing criteria and method¹⁵⁾

Test	Nominal Valve Size, DN	Nominal Pressure, PN	Test Method
Shell test	ALL	ALL	1.5 times of maximum allowable working pressure
Closure test	≤ DN80	ALL	Selecting one of the follows 1) Using a liquid under pressure such as 1.1 times the maximum allowable working pressure at 20°C 2) Using a gas at pressure of 600±100 kPa
	≥ DN100 ≤ DN200	≤ PN50	
	≥ DN250	ALL	≤ PN110 Using a liquid under pressure such as 1.1 times the maximum allowable working pressure at 20 °C

밀폐 시험은 밸브가 완전 밀폐된 상태에서 최대 허용압력의 1.1배 압력을 가압하여 5분 동안의 누설량을 측정하는 시험이다. 이러한 밸브의 압력시험 방법에 대해서는 국제규격 API 6D¹⁴⁾와 ISO 5208¹⁵⁾에 규정되어 있다.

Table 1은 국제 표준 ISO 5208에 규정되어 있는 밸브 압력시험 기준을 나타내며, Table 2는 API 6D 규정으로, 호칭 지름에 따른 압력 유지 시간의 기준을 나타낸다. 본 연구는 이러한 산업용 국제 표준을 기준으로 하여 밀폐시험을 수행하였고, 압력유지에 따른 누설량을 측정하였다.

Table 2 Test duration criteria¹⁴⁾

Valve Size		Test Duration, min
DN, mm	NPS, inch	
15 to 100	1/2 to 4	2
≥ 150	≥ 6	5

3. 밀폐시험 조건 및 방법

본 연구에서 개발한 볼 밸브 시제품은 ASME/ANSI 600 Class를 기준으로 설계되었으며, 이러한 기준에 설계 밸브의 최대 허용압력은 100 bar (10 MPa)이다. 따라서 내압시험은 최대 허용압력의 1.5배인 150 bar (15 MPa)이고 밀폐시험은 최대 허용압력의 1.1배인 110 bar (11 MPa)에서 수행된다. 본 연구에서의 밀폐 시험은 110 bar를 기준으로 시험을 수행하였다. 시험 압력에 따른 누설량을 측정하기 위해서 자원이송망의 사용압력인 70 bar (7 MPa), 최대 허용압력인 100 bar (10 MPa), 밀폐시험 기준인 110 bar (11 MPa)을 적용하여 각각 시험을 수행하였다. 본 연구에서 실시한 밀폐시험 조건은 Table 3에 나타낸다.

Fig. 4는 밀폐시험 수행 모습이다. 밀폐시험을 수행하기 전에 도면과 볼 밸브의 상태가 동일한지 육안으로 외관검사를 수행한다. 다음으로 볼 밸브를 완전 밀폐가 되게 볼을 90도로 회전한다. 그리고 밸브



Fig. 4 Prepare work of the closure test

Table 3 Pressure condition and leakage criteria^{14,15)}

Pressure condition, bar	Test duration, min	Leakage criteria, mm ³ /s×DN	Remark
70	5	0.3	Working pressure
100			Maximum allowable working pressure
110			1.1 times of maximum allowable working pressure

의 양단 플랜지를 설치한다. 양단 중 한쪽에 질소 가스를 주입하여 시험압력을 조절하고, 다른 한쪽에서는 누설가스 측정장비(leakage gas measurement unit)를 이용하여 누설량을 측정한다. 시험 압력은 70 bar, 100 bar, 110 bar로 설정하고, 각각의 시험 시험은 5분으로 한다. 5분간 초당 누설량을 측정하여, 평균을 취한다. 누설량 측정은 국제표준 ISO 5208에서 제시하는 Rate B¹⁵⁾를 기준으로 한다. 밀폐시험의 장비 및 인원은 동아대학교 산학협력단 고기능성밸브 기술지원단의 기술지원을 받아 수행하였다.

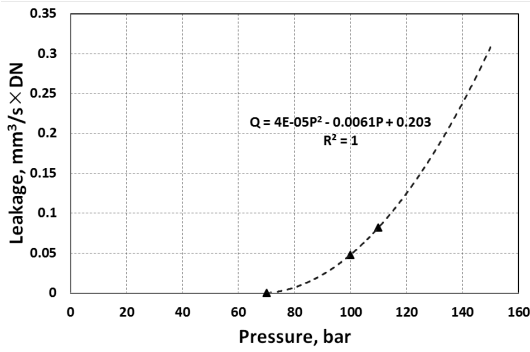
4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 42인치 볼 밸브 설계를 위한 선행 연구로 30인치 볼 밸브를 설계하고, 시제품을 제작하였다. 제작된 30인치 볼 밸브 시제품은 국제표준 ISO 5208에 근거하여 밀폐시험을 수행하였다. 이 때 허용 누설량은 Rate B의 기준인 0.3 mm³/s×DN 이하로 하였다. 시험유체는 질소로, 볼 밸브를 완전밀폐 상태에서 가압하여 반대편 플랜지 측에서 누설 가스 측정장비를 이용하여 가스 누설량을 측정하였다.

Table 4는 밀폐시험 결과로 각각의 압력 조건에 따른 누설량 결과를 나타낸다. 압력 조건 70 bar에서는 누설이 발생하지 않았지만, 압력 조건 100 bar에서는 0.048 mm³/s×DN의 누설량이 발생하였다. 또한, 압력 조건 110 bar에서는 0.082 mm³/s×DN으로 70.8% 누설량이 증가하였다. 밀폐시험의 국제 기준과

Table 4 Leakage results of closure test

Pressure condition, bar	Test duration, min	Closure test criteria, mm ³ /s×DN	Leakage result, mm ³ /s
70	5	0.3	Not detected
100			0.048
110			0.082

**Fig. 6** Leakage prediction curve using measuring data

비교했을 때, 누설량 기준 대비 각각 16%와 27%에 불과하였다. 따라서 30인치 볼 밸브 시제품은 ISO 5208의 Rate B 기준에 만족함을 보였다.

Fig. 6은 압력 조건에 따른 누설량 결과와 압력 증가에 따른 누설량 예측곡선을 나타낸다. 누설량 예측곡선은 밀폐시험의 누설량 결과를 이용하여 다항함수 커브 피팅(polynomial curve fitting) 방법으로 도출하였으며, 예측 곡선의 함수는 이차함수식으로 나타났다. 또한 이 누설량 예측곡선을 사용하여 누설량 기준에 도달하는 압력조건을 예측한 결과, 압력 150 bar일 때 약 0.3 mm³/s×DN의 누설량을 갖음을 알 수 있다. 정확한 누설량 예측을 위해 보다 많은 볼 밸브 밀폐시험을 수행할 예정이다.

5. 결 론

본 연구는 42인치 볼 밸브 설계를 위한 기초연구로 30인치 볼 밸브 시제품의 밀폐시험을 국제표준에 근거하여 압력조건 70 bar, 100 bar, 110 bar에서 각

각 수행하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 극한지 자원이송망의 실제 적용압력인 70 bar에서는 누설이 발생하지 않았으며, 최대 허용 압력인 100 bar에서는 누설량 0.048 mm³/s×DN를, 밀폐시험 조건인 최대허용압력의 1.1배인 110 bar에서는 누설량 0.082 mm³/s×DN이 발생함을 알 수 있었다.
- 2) 압력조건에 따른 누설량 결과를 이용하여, 30인치 볼 밸브의 누설량 예측곡선을 도출하였으며, 예측곡선은 이차함수의 형태로 나타냄을 알 수 있었다.
- 3) 누설량 예측곡선을 이용한 기준 누설량 발생 압력은 150 bar임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비 지원(13TFTP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

References

1. A. Ozdamar, K. T. Grusel, Y. Pekbey and B. Celikag, "An Experimental and Numerical Study on Pressure Drop Coefficient of Ball Valves", *International Energy Journal*, Vol. 8, Issue 4, 2007, pp. 1-7.
2. M. J. Chern, C. C. Wang, and C. H. Ma, "Performance test and flow visualization of ball valve", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, 2007, pp. 502-512.
3. M. J. Chern and C. C. Wang, "Control of Volumetric Flow-Rate of Ball Valve Using V-Port", *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 126, 2004, pp. 471-481.
4. A. S. Tabrizi, M. Asadi, G. Xie, G. Lorenzini, and C. Boserni, "Computational Fluid Dynamics Based Analysis of a Ball Valve Performance in

- the Presence of Cavitation”, *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 23, No. 1, 2014, pp. 27-38.
5. S. M. Lee and C. M. Jang, “Development of Numerical Model and Experimental Apparatus for Analyzing the Performance of a Ball Valve used for Gas Pipeline in Permafrost Area”, *Trans. of the Korean hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 5, 2014, pp. 550-559.
 6. S. M. Lee and C. M. Jang, “Internal Flow Analysis for a 10 inch Ball Valve using Flow Similarity”, *Trans. of the Korean hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 4, 2015, pp. 386-392.
 7. D. S. Kim, S. K. Bea, W. H. Lee, and H. S. Kim, “Thermal Stress and Flow Analysis of a Cryogenic Ball Valve”, *Journal of Drive and Control*, Vol. 3, No. 4, 2006, pp. 8-13.
 8. X. G. Song, S. G. Kim, S. H. Baek, and Y. C. Park, “Structural optimization for ball valve made of CF8M stainless steel”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, 2009, pp. s528-s561.
 9. J. Regula, “The Influence of Seat Fatigue Test on the Leakage in Ball Valve”, *Procedia Engineering*, Vol. 39, 2012, pp. 91-97.
 10. C. K. Kim and J. Y. Yoon, “A Study on Structural Analysis of High-Pressure Pipeline Retainer-Type Ball Valve by Pressure Testing of the Industrial Standard”, *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 18, No. 5, 2015, pp. 13-18.
 11. <https://www.wunderground.com/climate/permafrost.asp>
 12. KICT 2015-088, “Design and Evaluation Technology of Infrastructure with Pipeline in Permafrost Area (Second-year Report)”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 2015, pp. 1-3.
 13. M. S. Shin, J. Y. Yoon, I. W. Park, S. H. Lee, H. Y. Park, and S. H. Jung, “A Study on Structural Analysis of Butterfly Valve Components by Pressure Testing of the Industrial Standard”, *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 3, 2010, pp. 5-9.
 14. API 6D, “Specification for Pipeline Valves”, American Petroleum Institute, USA, 2008.
 15. ISO 5208, “Industrial valves-Pressure testing of metallic valves”, International Organization for Standardization, Switzerland, 2008.