◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2016.19.4.039
ISSN (Print): 2287-9706

PFA 라이닝 볼밸브의 헬륨누설 검출 및 비산배출에 관한 연구

이원호* · 김동열** · 이종철***†

Study on the Fugitive Emissions of a PFA Lined Ball Valve through Helium Leak Detection

Won-Ho Lee*, Dong-Yeol Kim**, Jong-Chul Lee***†

Key Words : Helium Leak Detection(헬륨누설 검출), Fugitive Emission(비산배출), Leak Rate(누설률), PFA Lined Ball Valve(PFA 라이닝 볼밸브), Pressurized Vacuum Method(가압진공법)

ABSTRACT

A PFA lined ball valve, which is machined with fluorinated resin PFA to its inner part for improving corrosion resistance, non-stickness, heat-resistance, has been widely used to the chemical/pharmaceutical industries, the semiconductor/LCD manufacturing processes, etc. with the high purity chemicals as working fluid. EPA stated that 60% of all fugitive emissions come from the valve stem packing in a typical petroleum or chemical processing plant. They monitor regulated components for leaks and maintain seal performance at acceptable levels. Korean industrial standards only deals with the bubble test for in-line leakage of valves, which has the detectable leak rate of 10^{-4} [mbar·L·s^{-1}], therefore, it is not sufficient to check fugitive emissions. In this study, we conducted Helium leak detection from a PFA lined ball valve and evaluated fugitive emissions according to ISO 15848-1, which has the detectable leak rate of 10^{-9} [mbar·L·s^{-1}], for manufacturing the high-reliable PFA lined ball valves against fugitive emissions.

1. 서 론

PFA 라이닝 볼밸브(PFA lined ball valve)는 고온(~120 ℃) 및 고압(~10 bar)에서 강한 부식성을 갖는 염산, 황산, 질산 등 화학물질을 이송시킬 수 있도록 내식성, 비점착성, 내열성 향상을 위한 불소계 수지 PFA(Perfluoroalkoxy)가 볼밸브 내부면에 가공되어 있으며, 화학약품 제조공정, 반도체/LCD, 석유화학, 의약품 산업 등에 많이 사용되고 있다.[1]

미극 환경보호단체(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 석유화학 플랜트에서 발생되는 비산배출(fugitive emission, FE)의 대부분인 60 % 정도가 밸브에서 발생된다고 보고하고 있으며, 근래 빈번한 불산 노출사고 내용을 매스컴에서 접할 수 있는 것처럼 PFA 라이닝 밸브가 설치되는 산업현장에서는 미소 누설에도 치명적인 인명피해 사고가 발생하기 때문에 국제규격에 따른 PFA 라이닝 밸브의 기밀누설 (in-line leakage)에 관한 규제 및 관리가 중요하다.[2]

현재 국내 PFA 라이닝 볼밸브 생산업체에서는 생산된 밸브의 기밀누설을 평가하는데 일반적인 산업용 밸브에 적용되는 KS 규격(KS B 2304)에 따라 몸통내압 및 시트누설 검사만을 실시한 후 판매하는 실정이고, 특히 볼밸브 동작 時 스템(stem) 운동에 따른 패킹재 마모 및 탄력성 저항로 발생되는 스템 패킹(packing) 시스템에서의 미소 누설을 확인할 수 있는 방법이 없기 때문에 극한 작동 조건 하에서 강한 부식성을 갖는 화학물질을 이송시켜야 하는 PFA 라이닝 볼밸브의 충분한 안정성이 확보되었다고 할 수 없다.[3]

본 연구에서는 헬륨누설 측정기술을 밸브의 기밀누설 검

* 강릉원주대학교 대학원 자동차공학과(Graduate School of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University)
** (주)케이투앤(K2N Co., Ltd.)
*** 강릉원주대학교 기계자동차공학부(School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University)
† 교신저자, E-mail : jclee01@gwnu.ac.kr

2015 한국유체기계학회 동계 학술대회 발표 논문, 2015년 12월 2-4일, 제주도
The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 19, No. 4, August, 2016, pp.39~42(Received 09 Feb. 2016; accepted for publication 04 Mar. 2016)
한국유체기계학회 논문집: 제19권, 제4호, pp.39~42, 2016(논문접수일자: 2016.02.09, 심사완료일자: 2016.03.04)

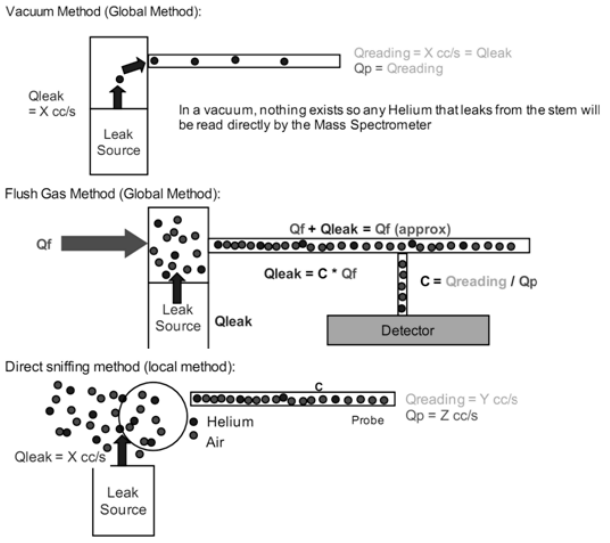
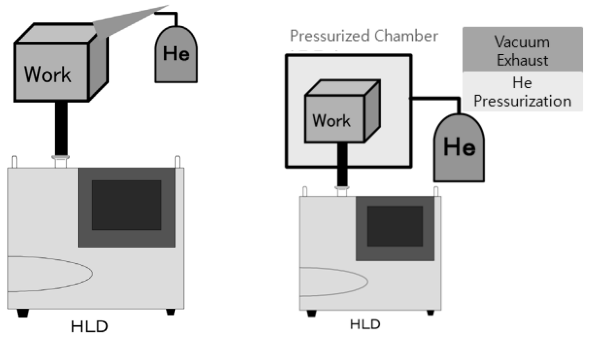


Fig. 1 Measurement methods of fugitive emissions indicated in ISO15848-1



(a) Vacuum spray method (b) Pressurized vacuum method

Fig. 2 Vacuum spray method and pressurized vacuum method

사에 적용함으로써 PFA 라이닝 볼밸브에서 발생되는 10^{-9} [mbar · L · s^{-1}] 차원의 누설률(leak rate)을 검출하였고, ISO 규격에 따른 비산배출에 관한 신뢰성을 평가하였다.

2. 실험적 방법

현재 산업현장에서 적용되고 있는 누설 검출 방법에는 음향적 방법(acoustic method), 기포 테스트(bubble test), 압력손실 방법(pressure decay method), 할로겐누설 방법(Halogen leak detection method), 헬륨누설 검출 방법(Helium leak detection method), 수소 방법(Hydrogen method) 등이 있다. 이중 헬륨누설 검출 방법이 산업용 밸브의 비산배출 측정시험을 위한 방법으로 국제규격인 ISO 15848-1에 제시되어 있다.[4]

헬륨누설 검출 방법은 10^{-9} [mbar · L · s^{-1}] 차원의 누설률(leak rate)까지 측정할 수 있기 때문에 미소 누설이 발생하더라도 대형사고로 연결될 수 있는 PFA 라이닝 볼밸브가 적

Table 1 Measured leak rate and volumetric leak rate

Measured leak rate, Lv	Volumetric leak rate
10^{-4} mbar · L · s^{-1}	1 cc/hour
10^{-5} mbar · L · s^{-1}	1 cc/day
10^{-6} mbar · L · s^{-1}	1 cc/week
5×10^{-7} mbar · L · s^{-1}	1 cc/month
10^{-8} mbar · L · s^{-1}	1 cc/3year
10^{-9} mbar · L · s^{-1}	3 cc/100year

Table 2 Tightness classes for stem (or shaft) seals indicated in ISO 15848-1

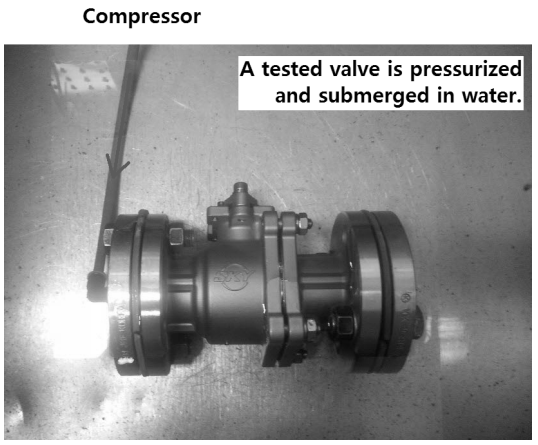
Level	Leak rate	Note
A	$\leq 10^{-6}$ [mg · s^{-1} · m^{-1}]	Typically achieved with bellow seals or equivalent stem sealing system for quarter turn valves
B	$\leq 10^{-4}$ [mg · s^{-1} · m^{-1}]	Typically achieved with PTFE based packings or elastomeric seals
C	$\leq 10^{-2}$ [mg · s^{-1} · m^{-1}]	Typically achieved with flexible graphite based packings

용되는 플랜트에 적합한 방법이라 판단된다. Fig. 1과 같이 ISO 158548-1에 제시되어 있는 헬륨누설 검출 방법은 진공법(vacuum method), 플러쉬법(flush gas method), 스니퍼법(sniffing method) 등이다. 진공법은 배출원을 밀폐된 챔버에 담아두고 헬륨 누설 검출기에 연결하여 측정하는 방법이고, 플러쉬법은 플러쉬 챔버에 배출원을 두고 플러쉬 가스를 통과시켜 혼합가스의 농도를 측정하는 방법이며, 스니핑법은 검출기를 이용하여 국소적 배출량을 측정하는 방법이다.[5]

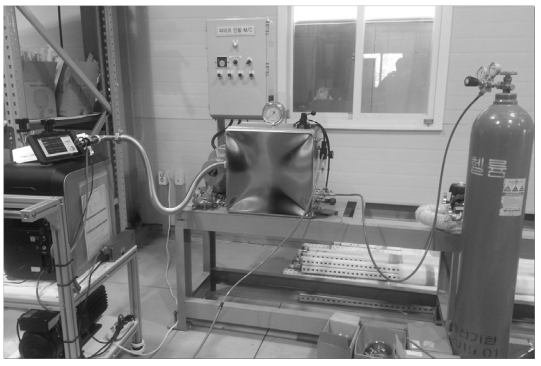
누설 검출 時 헬륨을 검출기체(probe gas)로 사용하는 주된 이유는 대기 중 함유량이 미량이기 때문에 백그라운드 영향이 적고, 질량수 4인 이온으로 식별이 용이하고, 흡착 에너지가 적고, 분자 직경이 작고, 안전하게 취급이 용이한 특성 및 이점 때문이다.[6] 본 연구에서는 헬륨누설 검출기로 ULVAC社 HELiOT 900을 사용하였으며, Fig. 2에 나타낸 진공분무식법과 가압진공법 등 두 가지 진공법을 이용하여 PFA 라이닝 볼밸브의 헬륨 누설률을 측정하였다. 헬륨누설 검출기로 측정된 누설률 Lv의 단위는 [mbar · L · s^{-1}]이며, 이를 체적 누설량으로 환산하면 Table 1과 같다.[7-9]

ISO 15848-1에서 제시하고 있는 스템 실링부에 대한 기밀도 등급을 Table 2에 나타내었다.[4] PFA 라이닝 볼밸브의 스템 패킹을 위하여 PTFE 패킹이 적용되기 때문에 B등급 측정 누설률인 10^{-4} [mg · s^{-1} · m^{-1}] 이하를 만족해야 한다.

본 연구에 사용된 PFA 라이닝 볼밸브 40A의 스템 직경은 17 mm이며, ISO 15848-1 부속서를 이용하여 측정된 누설률로 환산하면 3.52×10^{-5} [mbar · L · s^{-1}]이 된다(스템 직경을 20 mm로 산정). 하지만 PFA 라이닝 볼밸브는 일반 산업용 밸브보다 기밀누설에 대해서 엄격한 적용이 필요하기 때문에 기밀도 A등급을 목표로 개발되어야 한다고 판단된다. 따



(a) 기포 테스트



(b) 헬륨누설 측정 (가압진공법)

Fig. 3 Bubble test and Helium leak detection

(a) Background leak rate

(b) Measured leak rate

Fig. 4 Helium leak rate before and after the gas supply

라서 본 연구에서 사용된 PFA 라이닝 볼밸브의 한계 누설률을 3.52×10^{-7} [mbar·L·s^{-1}]로 하여 기밀성 만족 여부를 판단하기로 한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 구축한 헬륨누설 검출 방법의 정밀도를 검증하기 위하여 밸브 좌측 플랜지면에 머리카락 두께의 미소 흡집을 낸 PFA 라이닝 볼밸브(밸브시료(1))를 제작하였고, 이에 관한 기밀성을 Fig. 3과 같이 기포 테스트와 헬륨누설 검출 방법으로 각각 수행하였다. 기포 테스트로는 10^{-4} [mbar·L·s^{-1}]보다 작은 기밀누설을 검출할 수 없기 때문에 Fig. 3(a)와 같이 물속에 잠겨 있는 PFA 라이닝 볼밸브의 플랜지면 미소 누설에 의한 기포방울을 관측할 수 없었다.[9]

동일한 밸브 시료에 대하여 Fig. 3(b)와 같은 헬륨누설 검출 방법(가압진공법)으로 기밀누설을 측정하였으며, 이에 관한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 밸브시료(1)가 장착되는 가압챔버에 헬륨을 주입하지 않은 상태에서 누설률을 측정하여 헬륨의 백그라운드 누설률(L0)을 확인하였으며, 이후 헬륨을 주입하여 챔버 내부를 3 mbar로 가압한 후 밸브시료(1)로부터의 누설률(Lv)을 측정하였다. 누설률 측정은 5회를 실시하여 평균값을 실제 누설률로 판단하였다. 누설률은 변화량이므로 측정 누설률 Lv에서 백그라운드 누설률 L0를 뺀 값이 정미 누설률이며, 이 값은 3.59×10^{-9} [Pa·m3·s^{-1}]이다. 이를 ISO 15848-1에서 제시하는 기밀도 등급과 비교하기 위하여 측정이 실시된 상온(20 ℃)에서의 헬륨 밀도(ρ=0.17841 [kg/m^3])를 고려하여 단위 환산하면 3.59×10^{-8} [mbar·L·s^{-1}]이 된다. 측정 누설률을 체적 누설량으로 환산하면 약 1 cc/year이며, 기포 테스트로는 검출할 수 없는 미소 누설이다. 따라서 헬륨누설 검출 방법이 기포 테스트보다 매우 높은 정밀도를 가진 누설검출이 가능함을 확인하였다.

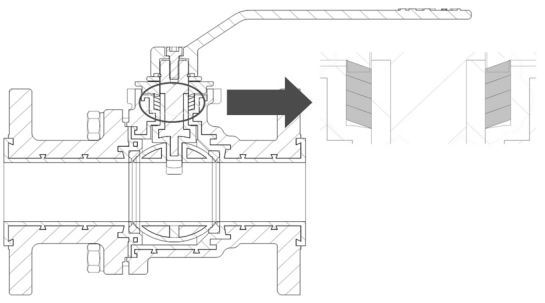


Fig. 5 The cross-section of a PFA lined ball valve and a V-shape stem packing

Table 3 Measured leak rate of two modeled valves

	Measured leak rate [mbar · L · s^{-1}]	Volumetric leak rate	Level
Normal valve	-	-	A
Valve sample (2)	1.42×10^{-6}	1 cc/week	B

PFA 라이닝 볼밸브 스템 패킹에 대한 기밀누설을 검토하기 위하여 Fig. 5와 같은 정상밸브 및 4개로 이루어진 스템 패킹에서 2개를 제거한 밸브시료(2)를 제작하여 각각 헬륨누설 검출실험을 수행하였다. Table 3에 헬륨누설 측정결과를 정리하였으며, 정상밸브에서는 헬륨가스 노출에 따른 헬륨누설 검출기에서 감지되는 누설률 증가가 나타나지 않았다. 하지만 스템 패킹 2개를 제거한 밸브시료(2)에서는 정미 누설률 1.42×10^{-7} [Pa·m3·s^{-1}]이 발생하였고, 이를 ISO 15848-1에서 제시하는 기밀도 등급과 비교하기 위하여 측정이 실시된 상온(20 ℃)에서의 헬륨 밀도(ρ=0.17841 [kg/m^3])를 고려하여 단위환산하면 1.42×10^{-6} [mbar · L · s^{-1}]이 된다. 측정 누설률을 체적 누설량으로 환산하면 약 1 cc/week로 기포 테스트로는 검출할 수 없는 미소누설이지만, ISO 15848-1에서 제시하고 있는 기밀도 등급은 Class B를 나타내는 값이다. 따라서 PFA 라이닝 볼밸브 설계 時 스템부 운동 부위의 스템 패킹을 보다 안전하게 설계해야만 극한 작동유체를 다루는 PFA 라이닝 볼밸브의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 지속적인 연구를 통하여 고신뢰도를 갖는 PFA 라이닝 볼밸브를 위한 스템 패킹 개발이 이루어질 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 헬륨누설 측정기술을 밸브의 기밀누설 검사에 적용함으로써 PFA 라이닝 볼밸브에서 발생되는 10^{-9} [mbar · L · s^{-1}] 차원의 누설률 (leak rate)을 검출하였고, ISO 규격 (ISO 15848-1)에 따른 비산배출에 관한 신뢰성을 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 밸브 좌측 플랜지면에 머리카락 두께의 미소 흡집을 낸 밸브시료(1)에 관하여 10^{-4} [mbar · L · s^{-1}] 차원의 정밀도를 갖는 기포 테스트로는 기밀누설을 검출하지 못했으나, 헬륨누설 측정으로는 3.59×10^{-8} [mbar · L · s^{-1}]의 누설률을 검출함으로써 헬륨누설 검출 방법이 기포 테스트보다 매우 높은 정밀도를 가진 누설검출이 가능함을 확인하였다.
2) 4개로 이루어진 PFA 라이닝 볼밸브 스템 패킹에서 2개를 제거한 밸브시료(2)에 관하여 헬륨누설 검출을 수행한 결과 1.42×10^{-6} [mbar · L · s^{-1}]의 누설률을 검출하였고, 체적 누설량으로 환산하면 약 1 cc/week로 기포 테스트로는 검출할 수 없는 미소 누설이지만 ISO 15848-1에서 제시하고 있는 기밀도 등급은 Class B를 나타내는 값임을 확인하였다.
3) 기밀누설 측정을 위한 헬륨누설 검출방법은 기존 사용되던 기포 테스트보다 훨씬 높은 정밀도를 갖기 때문에 제품 품질 관리뿐만 아니라 설계 時 이용한다면 기밀누설이 없는 스템 패킹 시스템 설계가 가능하고, 이것은 고신뢰도를 갖는 PFA 라이닝 볼밸브 개발로 이루어질 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력 기술개발사업(No. C0248942) 및 교육과학기술부의 출연금으로 수행한 강릉원주대학교 산학협력선도대학(LINC)육성사업의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 이 논문은 2014년도 강릉원주대학교 교수연구년연구 지원에 의하여 수행되었음.

References

(1) Hayes, W. C., 2012, “Fluoropolymer Lined Ball Valve Design Breakthrough,” ACHEMA Congress, Germany, June pp. 18~22.
(2) Bathen, D., Hummelt, C., Meisel, J., and Hofmann, S., 2000, “Emission of High-quality Pipework Flange Gaskets,” Chemical Eng. Tech., Vol. 23, No. 11, pp. 997~999.
(3) Korean Agency for Technology and Standards, 2001, KS B 2304 : General rules for inspection of valves.
(4) DIN EN ISO 15848-1 : Industrial Valves - Measuring, Testing and Qualification Procedures for Escaping Emissions - Part 1 : A Classification System and Qualification Procedures for the Testing the Design of Valves, Beuth- Verlag, Berlin, 2006.
(5) Riedl, A., 2007, “Emission Measurements of Industrial Valves according to TA Luft and EN ISO 15848-1,” Valve World, pp. 51~55.
(6) Rhea, U. S., Gilchrist, J. E., Peeler, J. T., and Shah, D. B., 1984, “Comparison of helium leak test and vacuum leak test using canned foods: collaborative study,” J. Assoc. Off. Anal. Chem., Vol. 67, No. 5, pp. 942~945.
(7) Choi, M. H., Kim, H. J., and Choi, W. C., 1993, “Helium Leak Test for the PLS Storage Ring Chamber,” Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 13, No. 3, pp. 31~38.
(8) Kim, S. H., Park S. Y., Kim, O. K., and Cho, W. K., 2015, “A Study on the Leak Testing Method during the Assembling Process of a Liquid Rocket Engine,” Proceedings of the 2015 KSPE Spring conference, pp. 792~795.
(9) In, S. R., 2007, “Consideration on the helium leak detection in a large vacuum chamber,” Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 16, No. 4, pp. 235~243.