



헬륨 누설 검출 기법과 교정 절차 소개(VI)

Introduction to the Procedures of the Detection Technique and Calibration in the Helium Leak Testing(VI)



朱昇煥*
Choo, Seung Hwan

* 방사선관리기술사, 공학박사(원자력공학), 世安技術(주) 연구소장, 본회 홍보위원.

이 글은 본지의 1999년 2월호에 소개되었던 '헬륨 누설 검출 기법과 교정절차 소개(I, II, III, IV, V)'에 이어지는 내용이다.

3.5.4 최소 검출 가능 누출량의 셈

헬륨 질량 분석계 누설 검출기는 시험할 시스템의 누설을 꿰뚫고 빠져 나오는 추적자 가스인 헬륨을 정량한다. 정량한 결과는 누설의 크기를 가늠할 기준이 된다. '최소 검출 가능 누출량 (minimum detectable leakage)'은, 헬륨 질량 분석계가 주어진 시험 시스템의 여러 구성 요소들의 조건들에 알맞게 적용되면서, 누설하는 헬륨을 안정적으로 그리고 재현성 있게 검출할 수 있는 양을 신호로 출력하는 최소 단위이다.(앞에서 설명 1.2 참고) 그러므로 '최소 검출 가능 누출량(minimum detectable leakage)'은 질량 분석계로써 검출 가능한 헬륨의 양에 바탕하고 있다. 헬륨의 정량은 헬륨만을 검출할 수 있도록 특수하게 설계된 헬륨 질량 분석계를 이용한다.

3.5.4.1 누출량의 기본 등식

최소 검출 가능 누출량은 헬륨 질량 분석계가 시험할 시스템의 여러 물리적 조건들인 변수들과

시험에 쓰일 헬륨 자체의 농도를 따져 본 다음에야 저울질할 수 있다. 누출량은 단위 시간으로 표시하면 누출률(Q)이다. 여기에 '최소'라는 조건을 붙여 '최소 검출 가능 누출률'로 일컬어지고, 그것의 셈은 일반 누출률의 기본 공식으로부터 시작된다. 누출률의 기본 꼴은 등식 3.22로 나타낼 수 있다.

누출률,
$$Q = (xKVP)/(tHP_t) \quad \text{식 3.22}$$

등식 3.22의 개별 기호는 다음의 <표 3.2>에 설명되어 있다.

SI 단위계를 쓰는 최소 검출 가능 누출률(Qmin)의 등식:

$$Q_{min} = xKVP/tHP_t \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{식 3.23(a)}$$

혼합 단위계를 쓰는 최소 검출 가능 누출률(Qmin)의 등식:



$$Q_{min} = xKVP/(96.6 tHP_t) \quad (\text{std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

식 3.23(b)

〈표 3.2〉 최소 검출 가능 누출률의 셈에 쓰일 SI 단위계(등식 3.23(a)을 적용시킬 때)와 혼합(영미식) 단위계(등식 3.23(b)를 적용시킬 때)를 서로 견준 단위들.

기호 설명	SI 단위계	혼합 단위계
Q 총 누출률	(Pa · m ³ · s ⁻¹)	(std · cm ³ · s ⁻¹)
x 검출기 눈금	x = 1	1
K 눈금당 압력	K = 1 nPa/눈금	7.72x10 ⁻¹² mmHg/눈금
V 진공된 공간 용적	V = 820 m ³	29,000 ft ³
P 진공된 공간 압력	P = 2.3 Pa	1.7x10 ⁻¹² mmHg
t 추적된 시간	t = 2.75 시간	2.75 시간(9,900 초)
H 헬륨의 몰 분율	H = 5.14x10 ⁻² 몰	.14x10 ⁻² 몰
Pt 검출기 감지요소 압력	Pt = 13 mPa	1 x 10 ⁻⁴ mmHg

3.5.4.2 SI 단위계와 혼합 단위계 셈의 보기들

〈SI 단위계를 써서 셈하는 예〉:

최소 검출 가능 누출률을 셈할 등식 3.23(a)에서 필요한 물리 상수들은 〈표 3.2〉를 써서 다음과 같이 나타낼 수 있다. 앞의 등식 3.23(a)를 다시 쓰면,

$$Q_{min} = xKVP/tHP_t \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

여기서, x는 검출기의 눈금 표시, x = 1를 기준 한다. 교정 계수인 K는 1 nPa/눈금; 시험 체적, V는 820 m³; 진공 압력, P는 2.3 Pa; 시험 시간, t는 2.75 시간 = 9,900 초; 체적 내부 압력의 헬륨 농도, H = 5.14x10⁻² 몰; 누설 검출기 감지기의 압력, Pt = 13 mPa 등을 차례로 위의 등식에 넣어 보면,

$$\begin{aligned} Q_{min} &= \{(1)(10^{-9})(820)(2.3)\}/\{(9900) \\ &\quad (5.14 \times 10^{-2})(13 \times 10^{-3})\} \\ &= 2.8 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

〈혼합 단위계를 써서 셈하는 예〉:

같은 방법으로 〈표 3.2〉의 물리 상수들을 아래 등식에 차례로 넣어 보면,

$$\begin{aligned} Q_{min} &= xKVP/(96.6 tHP_t) \\ &= \{(1)(7.72 \times 10^{-12})(2.9 \times 10^4)(1.7 \times 10^{-2})\}/ \\ &\quad \{(96.6)(2.75)(5.14 \times 10^{-2})(1 \times 10^{-4})\} \\ &= (2.8 \times 10^{-6}) \text{ std} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

앞뒤 셈의 결과들을 서로 견주면, 1 Pa · m³ · s⁻¹ = 10 std · cm³ · s⁻¹의 관계가 됨을 알 수 있다.

3.5.4.3 경제적인 헬륨 추적자의 농도와 감도를 추정하기

등식 3.24(a)와 등식 3.24(b)는, (1)시스템의 압력과 헬륨 농도를 알고 있을 때, 개략적인 시스템 감도를 경제적으로 결정하는 데 쓰이고, (2)시스템 압력과 시스템 감도(최소 검출 가능 누출량)를 알고 있든지 또는 지정이 될 때, 등식 3.24(a)와 3.24(b)를 이용하여 규정된 개략적 헬륨 농도를 결정한다.

$$Q = \{(PV/H) (10^{-8})\} \quad \text{식 3.24(a)}$$

$$H = \{PV/Q\}(10^{-8}) \quad \text{식 3.24(b)}$$

위의 두 등식들의 배수인 10⁻⁸은 어림한 값이다. 식 3.24(a)와 (b)는 등식 3.22와 등식 3.23에서 복잡하게 표현된 수식에 바탕을 두고 간략하게 줄인 것이므로 경우에 따라서는 2~10 사이의 계수가 추가될 수도 있을 것이다.

〈예제〉

액체 수소를 담은 이중 벽의 환(굽은 풀)으로

된 용기, 58,000 ft³에 압력, 10 마이크론 Hg(10 μHg)까지 배기시킨 굵은 꼴의 용기 안쪽 벽에서 5% 헬륨 혼합 기체로써 마지막 누설 시험을 하기로 되어 있다. 경제적으로 이룰 수 있는 개략적인 시스템의 누설 감도는 얼마나 되는가?

〈해설〉

등식 3.24(a)와 등식 3.24(b) 그리고 혼합 단위계의 등식 3.23(b)를 써서:

$$Q = \{(10^{-2})(5.8 \times 10^{-4})(10^{-8})\} / \{(5 \times 10^{-2})\} \\ = 1 \times 10^{-4} \text{ std} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

이 값은 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 와 같다.

경제적인 헬륨 농도(C), 연결할 호스의 길이(l), 그리고 호스의 지름(d) 등과의 상호 관계는 $C = d^3/l$ 이다. 누설 검사에서 경제적인 헬륨의 양은 기구에 연결 될 요소들이 차지한다. 시험 시스템에 헬륨 질량 분석계를 연결할 때, 호스는 가능하면 짧고, 그리고 직경이 12 mm(1/2 in.)보다는 작아야 하며 진공 시스템에서 백그라운드 높을수록 시험 시스템의 감도는 더욱 떨어진다. 시스템의 감도가 떨어지는 것은 백그라운드 신호보다 더 작은 누출량의 출력 신호들이 백그라운드의 신호로 가려지기 때문이다.

3.5.4.4 최소 검출 가능 헬륨 누출률 시험 순서

위에서 알아본 지식들은 앞으로 최소 검출 가능 헬륨 누출률의 측정과 시험 과정에서 부딪치게 될 복잡한 물리 단위들의 셈을 편하게 하려고 미리 알아 본 것들이다. 지금부터는 독자와 함께 시험 순서에 따라 앞의 설명에서 정리된 기초 지식들을 바탕 삼아 헬륨 질량 분석계를 써서, 지정된 시험 시스템이 가진 고유한 최소 검출 가능

누출률을 섬하게 될 것이다. 여기서 설명되는 시험 순서에는 질량 분석계를 쓸 때의 주의와 참고가 될 내용도 부분적으로 포함된다.

누설시험할 진공 시스템의 진공된 벽면들은 깨끗해야 하므로 당연히 부착된 진흙과 녹, 부스러기들 그리고 오일과 그리스와 같은 탄화수소 화합물들을 세정하여 제거시켜야 할 것이다. 질량 분석계의 감도를 떨어뜨리는 것은 유기 물질의 오염이 주된 원인이 될 수 있다. 진공 시스템을 시험 시스템에 장착하기 전에 먼저 주의 깊게 진공 시스템을 세정시켜야 하고, 블랙 라이트(black light)를 써서 오일 또는 그리스의 유무가 확인되는 형광빛 표시들의 여부를 검사해야 한다. 헬륨 누출률 시험을 수행하는 데는 다음 단계들을 반드시 관측해야 한다.

1. 시험에 알맞게 배기될 전체 시험 경계 면에서 용접뿔, 기름, 흙 그리고 수분 등을 모두 제거시킬 것. 잔류 액체 침투제, 그리고 광명당(red lead)과 염화아연과 같은 페인트들도 제거할 대상이다.
2. 시험에 알맞게 배기될 압력 경계에서 모든 열린 부분들을 차단시킬 것.
3. 헬륨 질량 분석계를 배치하고 시험될 경계 쪽의 배기된 공간에서 주기적으로 시료를 취할 수 있게 배치할 것. 질량 분석계의 감지 원소가 받게 될 필요한 압력에 이르게 하기 위하여 진공 펌프 시스템을 질량 분석계에 연결할 때, 가능하면 짧고, 지름을 크게 하는 것이 빠르게 진공을 시키는 데 이롭다. 배기 할 두 경계사이와의 연결은 밸브를 쓸 것.
4. 지정된 압력까지 시험 할 경계부를 배기할 것. 부품들이 규정된 예비 검사에서 모두가 합격 되었음을 가정, 시험할 부품들은 어떤 큰 누출도 없어야 하므로 그것을 확인하기 위하여 압력 올리기(진공 유지) 시험을 실시할 것.



5. 시험 기구의 감도가 그의 최적 또는 최고 수준에 있게 하기 위하여 헬륨 질량 분석계를 교정시킬 것.

6. 시험 시스템에 헬륨 질량 분석계를 연결할 것. 기구의 드로틀(throttle) 또는 축적 밸브 중에 한쪽을 이용하여 어떤 지정 수준까지 기구의 감지 요소가 받는 압력을 조절할 것.

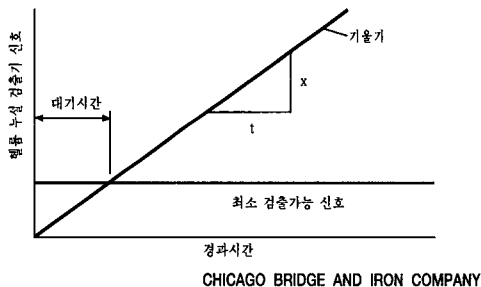
7. 질량 분석계에 표준 누설의 접속은 가능하면 멀리 떨어진 위치에 연결할 것. 다공형 표준 헬륨 누설은 당연히 시험 경계면에서 실제의 누출률과 개략적으로 비슷한 것을 쓸 것.

8. 시스템의 감도를 결정하기 위하여 다음과 같이 표준 헬륨 누설을 써서 시험 시스템을 교정할 것:

a. 100% 헬륨으로 부풀려진 밸룬을 다공성 튜브 표준 누설 유입구에 놓든지, 또는 헬륨 침투형 표준 누설을 쓸 것.

b. 질량 분석계로써 배기된 시험 시스템을 샘플링할 표준 누설 방향에 밸브를 열 것.

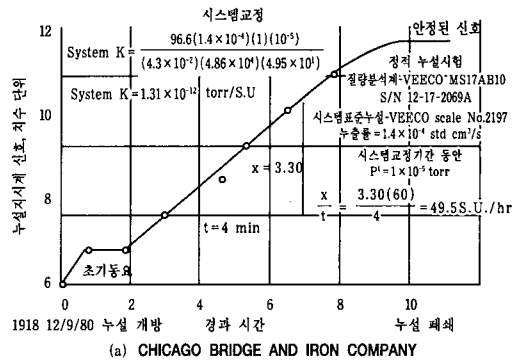
c. <그림 3.19>에서 보인 것처럼, (x/t) 선의 기울기가 분명히 결정될 때까지, 보통 모눈종이 위에 기구의 누출 표시 신호의 눈금(x) 대 소요 시간(t)을 기록하여 그림을 그리고, 밸브가 열린 그 상태 그대로 지시 눈금을 읽는다. 기구의 오염과 기체 방출 또는 온도가 올라감으로써



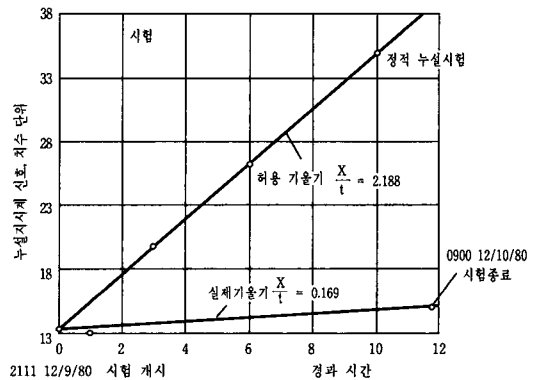
<그림 3.19> 압력-올리기 정적 누설 시험 중에 경과 시간(t)의 함수로서 헬륨 누설 표시기의 신호(x)와의 그래프.

압력이 변화하면, 평균 압력을 이용할 것.

d. <그림 3.20>(a)는 최대 허용 가능한 누출률인 한 표준 헬륨 누설을 써서 얻어진 (x/t)의 그래프이다. 이 표준 헬륨 누설을 시험 시스템과 질량 분석계에 달고 실험하여 측정된 기울기는 매시간 마다 누출률인 280 눈금/시간으로 나타날 것이다. 이것은 표준 누설이 가진 x/t 값이다. 따라서, 수용할 수 있는 시험 용기는 그 용기에서 측정된 x/t 기울기가 280 눈금/시간과 견주어서 이것 보다는 훨씬 작아야 한다.



(a) CHICAGO BRIDGE AND IRON COMPANY



(b) CHICAGO BRIDGE AND IRON COMPANY

<그림 3.20> 표준 누설의 열림(곡선의 낮은 부분)과 그 다음에 표준 누설의 잠금(곡선의 수평 부분)에서 실시된 시험 그래프의 예. (주: 시험 주기의 기간 동안, 환상형 공간의 압력은 17 μmmHg (1.7×10^{-2} torr)에서 일정하였다.) (a) 누설 시험 시스템 교정. (b) 용기의 실제 누설 시험 사례의 그래프.

9. 시험 물체에서 x/t 기울기의 허용 가능 누출률을 샘플하여 모눈종이 위에 그릴 것. 다음 등

식 3.25로 표현되는 정적 누출 시험 등식을 이용하여 누출률(누출 수효/시간)을 셈할 것. 개별 기호의 설명은 등식 3.23(b)와 등식 3.24(b)에서 정의된 바와 같다.

$$x/t = 96.6 (QHP_t)/(KPV) \quad \text{식 3.25}$$

10. 만일 시스템 교정이 배기된 시스템 안의 과잉 헬륨 백그라운드에서 이뤄진 것이라면, 부분적으로 시스템의 배기 밸브를 열고 백그라운드의 신호를 낮추기 위하여 배기를 다시 시킬 것.

11. 배기된 시험 경계가 흠벽의 구조라면, 선정된 시험 부분들 또는 지정된 경우, 폴리에틸렌 시트로 시험 경계의 표면을 치밀하게 씌울 것. 하지만, 배기된 시험 경계가 액화 천연 기체, 액화 산소 또는 액화 질소용으로 쓰일 이중벽 저온성 진공 용기의 내부는 폴리에틸렌 시트를 써서 씌우기를 할 필요는 없다.

12. 헬륨을 써서 폴리에틸렌 백을 부풀리게 하든지, 아니면 이중 벽의 저온성 용기에 공기 또는 질소와 같은 불활성 기체로써 필요한 또는 지정된 헬륨의 농도로 혼합하여 가압할 것.

[주의]: 샘플링되는 시스템 쪽에 처음은 적은 양의 헬륨을 쓸 것. 만일 순간적으로 갑자기 큰 신호가 나타나지 않는다면, 그 다음부터 헬륨을 계속 주입시킬 것. 검사의 초기에 큰 규모의 누설들이 쉽게 발견되므로 비싼 헬륨의 낭비를 줄일 수도 있을 것이다.

13. 주기적으로 헬륨 누설 검출기으로써 정해진 구간(정규 간격)에 배기된 시스템에서 x/t의 견본을 뽑아 볼 것. 같은 방법으로 모눈종이 위에 측정된 x 와 t를 그려보고 판단해 볼 것. 만일 시험 기간 중에 온도가 올라간다면, 셈할 때 그의 평균 온도를 쓸 것. 주기적으로 얻어진 x/t의 기울기가 단계 9에서 얻어낸 결과보다 작은 값이

면, 그 용기는 만족스럽고, 만일 그 값을 넘는다 면, 허용 누출률을 초과하는 것이다. 그런 경우는 반드시 새는 부분 또는 누설들을 수리한 후에 다시 그 시스템을 시험해야 한다.

실제의 총 누출률, Q는 등식 3.22를 셈으로 풀어서 얻어진다. 단계 8에서 결정된 누설 검사 시스템의 누출 교정 계수와 등식 3.25인 누설 검사 시스템 검사로 결정된 실제의 기울기(x/t)를 문제 풀이에 이용할 것. 등식 3.25는 등식 3.23(b)와 같다.

<그림 3.20>(b)는 헬륨으로 채워진 폐쇄된 용기의 실제 시험 기간 동안 작성된 한 그래프이며, 그 용기에는 표준 누설을 연결하지 아니하였다. 그 그림의 처음 기울기, x/t를 셈한 값은 5.34 누출/시간이다. 그 값은 최대 허용 가능 누출률인 280 (누출/시간)보다는 훨씬 적다. 이 용기는 헬륨 누설 시험의 바탕에서 수용 가능한 것임이 입증된다.

3.6 헬륨 질량 분석계 누설 검사 현장에서 실용적인 일부 기법들

3.6.1 헬륨 누설 시험의 감도에 영향을 주는 변수 요소들

앞의 문제 풀이에서 다루진 대부분의 변수들은 다음의 요소들을 포함하고 있다. 이들은 헬륨 누설 검사 작업에 크게 영향을 미친다.

1. 시험 시간
2. 진공 시스템의 용적
3. 시험 경계를 둘러싼 헬륨 추적자 가스의 물-백분을
4. 진공 시스템 쪽의 압력
5. 누설 검출기 감지 요소 쪽의 압력
6. 진공 시스템과 누설 검출기 사이의 연결 위치, 길이 그리고 크기



7. 진공 시스템 내부의 헬륨 백그라운드
(특히 기체 방출: outgassing)
8. 진공 시스템에 노출된 시험 경계의 세정 라인, 표면적, 표면 마무리, 그리고 재료의 조성
9. 누설 검출기에 공급되는 전력의 안정성
10. 시험 물체의 온도

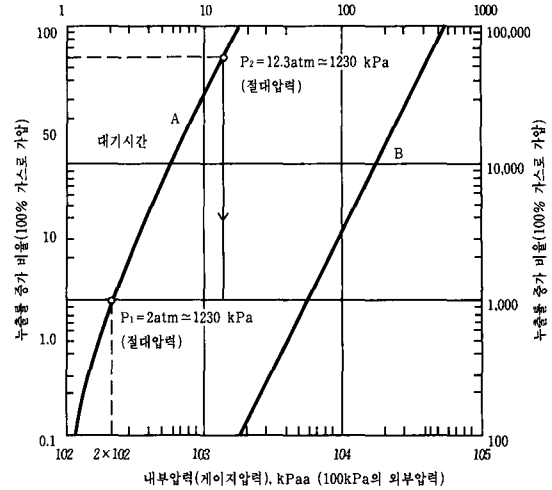
3.6.2 밀폐된 부품들의 압력 진공 헬륨 누설 검사에서 헬륨 농도의 특성

3.6.2.1 종결 누설 검사법에서 가압 효과

헬륨으로 가압된 밀폐 부품들의 누설 검사는 대체로 압력과 진공이 조합된 상태 아래에서 이뤄진다. 순수한 헬륨 또는 헬륨이 다른 기체와 일정한 비율로 섞인 혼합 기체를 써서 용접 밀폐된 부품들을 가압시키고, 배기된 종결 용기 또는 다른 둘러막이 장치들 속에 놓인 가압된 그것들에 연결된 질량 분석계의 누설 검출기를 써서 쉽게 누설 시험을 할 수 있다.

종결 용기 시험은 압력 시험처럼, 시험할 부품들의 내부에 가압으로 채워진 헬륨량을 높여서 시험 감도를 높인다. 시험 감도는 가압 기체에 포함된 헬륨의 농도와 함께 직접 변할 것이다. <그림 3.21>은 종결 용기 시험에서 기체의 흐름 특성을 이용하여 얻어질 이런 절차의 장점을 나타내 보여준다.

<그림 3.21>은 시험 부품들의 누설이 갖는 콘덕턴스에 의하여 나타나는 기체의 점성 흐름 특성을 이용하여 작성된 그래프이다. 누설을 관통한 누출 흐름의 끝쪽(저압단)은 대기압인 시험 부품의 내부 압력과 누출률의 상승(검출기의 감도에 바로 연결) 관계를 나타낸 것이다. <그림 3.21>에서 그려진 것처럼, 대기로 향한 한 누설의 가압 쪽에 압력을 더 높이 올려 줌으로써 일어날 누출률의 변화는 누출 흐름이 점성 조건 아래서



DUPONT INSTRUMENTS

<그림 3.21> 대기와 달은 누설 시스템의 내부 압력 여하에 따라 변하는 점성 누출 흐름률. 곡선 A는 왼쪽의 세로 치수를 읽고, 곡선 B는 오른쪽 세로 치수를 읽을 것.

의 누설 시험에는 큰 이득이 될 수 있다.

예컨대, <그림 3.21>의 점 P1은 누출률이 1 기압인 내부 게이지 압력(게이지가 공기 중에서 이미 1 기압(100 kPa)의 대기압을 받고 있기 때문에 1 기압으로 표시된 게이지 압력의 절대 압력은 대기압을 더한 2 기압(200 kPa)과 같음)인 한 시스템으로부터 기준 점의 절대 압력을 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 라고 가정하자. 누출률(검출기의 감도와 비례)을 50 배 또는 $5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 로 높이려고 하는 데, 더 가압할 새로운 내부압력, P2의 결정을 하려고 한다. 그림 3.21의 세로 줄의 치수에서 50인 점, P2는 높이려는 검출기의 감도이고, 그 점의 가로 줄의 치수는 가압할 새로운 요구 압력이다. 검출 감도를 50 배 높이려면, 절대 내부 압력을 230 kPa 또는 12.3 기압으로 올려줘야 됨을 확인할 수 있다.

위의 예는 <그림 3.21>의 기본적인 틀을 설명한 것에 불과하다. 이 그림을 실용에 적용하려면, 좀 더 설명이 필요하다. 흐름의 특성은 압력을 높일

때 나타난다. 압력이 높아지면, 흐름의 특성은 점성 흐름으로 바뀐다. 흐름의 종류에 따라 적용되는 기본 원리는 낮은 압력에서 분자 흐름이 주류를 이루고, 이런 경우, “크누젠” 법칙이 적용되고, 높은 압력에서 흐름의 주류는 점성 흐름인 “포아즈 이유”의 법칙이 적용된다. 이들 법칙의 기본적인 차이는 기체의 농도 변화와 압력 변화 등에서 나타나는 효과들이 서로 다르다는 사실이다. 이와 같은 바탕에서 가압할 기체의 압력을 비싼 100% 헬륨 가스 대신, 값싼 다른 기체와 적당히 혼합된 혼합 기체를 써서 가압하면, 적은 양의 헬륨으로서도 그림 3.21에서 나타난 것처럼, 가압된 압력 효과로 누출률이 높아져서 원하는 높은 검출기의 감도를 낼 수 있다. 그림에서 왼쪽 줄의 치수는 왼쪽의 곡선에 해당되고, 오른쪽의 치수는 오른쪽의 치수로 읽는다.

3.6.2.2 추적자 가스 농도 변화 영향의 셸

가압 시스템의 누설 시험을 할 때, 앞의 지적처럼, 대체로 마주칠 점성 흐름 조건 아래서는 압력 차이(차압)를 더 높여서, 그 결과로 흐름률이 높아져 추적자 가스를 절약할 수 있다. 헬륨과 질소가 혼합된 기체는 점성 흐름으로 누설을 관통할 때, 두 기체의 농도에는 아무런 변화가 나타나지 않는다. 그래서, 만일 10% 추적자 가스와 90% 운반 기체 혼합물이 쓰인다면, 시험 감도는 100% 추적자 가스를 같은 작업 압력에서 쓸 감도의 10%에 이를 것이다. 시험 감도를 누출률 100%에 되돌려 놓기 위하여 그에 알맞게 가압쪽의 압력을 높여서 시험 감도를 10 배로 올려놓는다면, 검출기의 감도는 그대로 이고, 헬륨량의 소비는 10%일 것이다.

예컨대, 한 탱크가 반드시 압력 1,500 psia(10,000 kPa)으로 가압되어 헬륨으로 누설 시험이 이뤄진

다고 가정하자. 검사 비용을 절약하기 위하여 바람직한 것은 (1) 적정한 시험 감도를 나타낼 가장 적은 헬륨량을 이용하기, 그리고 (2) 질소를 써서 나머지의 양으로 가압하기 등이다. 최소 검출 가능 누출량은 당연히 1 기압차에서 적어도 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 가 되어야 할 것이다.

10,000kPa(1,500 psia)까지 가압한 후에 당연히 쓰일 헬륨의 농도를 셸하는 것이 문제이다.

$1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 인 지정된 최소 검출 가능 누출률은 누설 시험 감도가 ‘표준’ 또는, 만일 압력 차 1 기압에서 100% 추적자 가스가 쓰인 때와 같은 규정된 값이라야 한다. 그림 3.21에서 10,000 kPa (약 100 기압)의 압력은 누출률이 3,300임을 알 수 있다. 그렇기 때문에 가압한 후에 헬륨의 농도는 당연히 100/3,300 또는 3%일 것이다. 헬륨의 농도를 낮추는 대신 시험 부품의 내부 압력을 높여 시험하는 것이 경제적인 이득을 보게 된다. 이런 간단한 셸의 경우에서 알 수 있듯이, 3%의 헬륨으로서 같은 시험 감도를 낼 수 있다.

3.6.2.3 프로우빙 시험의 감도

여러 종류 용기들의 누설 시험은 대체로 시험할 물체를 진공보다는 압력을 높여 이뤄진다. 시험할 용기에 추적자 가스 또는 질소와 같은 다른 기체로 추적자 가스를 혼합하여 대기압보다는 높게 가압하고, 시험 물체로부터 누출하는 추적자 가스의 검출기 신호로 누설을 확인할 수 있다. 추적자 가스의 누출량은 누설의 크기에 달려있다. 누출량의 검출은 스니핑 또는 추적자 기술로서 이뤄진다.

앞 절에서 보았던 <그림 3.2>처럼, 스니핑은 지정된 호스에 연결되고, 시험 물체의 표면을 따라 위에서 아래로 내려오면서 누출하는 추적자 가스를 주사하게 된다. 스니핑은 대체로 용기들의 누

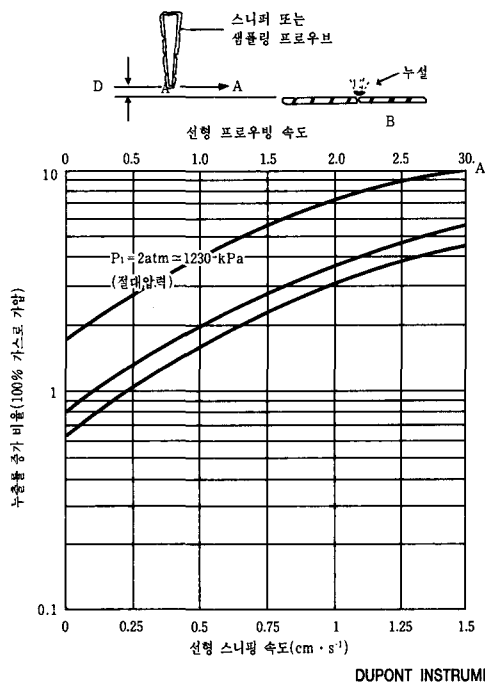


설 검사를 할 경우에 적용되며, 정상 운전 중인 용기들을 시험할 수 있다.

연결 호스들은 규격폼이 쓰이며, 금속 또는 비닐 튜빙 등으로서 지름은 크게, 길이는 짧게한다. 특수한 재질을 쓰는 경우를 빼고는 그 길이가 2 m(6 ft)를 넘지 말아야 한다. 시험 용기로부터 누출하는 추적자 가스를 흡입하기 위하여 스니퍼의 내부 압력은 대체로 약 25 mPa를 유지시킨다.

스니퍼 시험의 프로우빙 절차에서 시험 감도에 영향을 미칠 중요한 요소들은 다음 세 가지로 요약할 수 있을 것이다.

1. 프로우빙의 속도
2. 스니퍼 끝과 시험 물체 사이의 거리
3. 용기의 내부 압력



<그림 3.22> 스니퍼 또는 샘플링 프로우브의 주사 속도 여하에 따라 변하는 상대적인 헬륨 누설 검사 감도.

<그림 3.22>는 스니퍼와 시험 물체의 표면 사

이 거리(D)를 일정하게 유지시킬 때, 프로우빙 속도에 영향을 받을 검출기의 상대적인 감도를 나타낸 것이다. <그림 3.22>에 표시된 치수는 하나의 표준에 불과하다. 예컨대 프로우빙의 속도가 초마다 1 cm·s⁻¹(2 ft·s⁻¹) 이고 프로우브 끝에 닿을 시험 물체 표면과의 거리, D = 3 mm(1/8 in.)에서 주사하게 된다면, 그때의 최소 검출 감도는 아마도 10⁻⁸ Pa·m³·s⁻¹(10⁻⁷ std·cm³·s⁻¹) 정도일 것이다. 이런 값에 이르게 되려면, 스니퍼의 프로우빙 조건이 모두 이상적으로 갖춰진 경우라야 할 것이다. 그리고 샘플링 프로우빙의 압력 검사일 경우는 진공 검사일 경우보다는 약 1/100 정도로 그 값이 떨어진다.

위의 세 가지 요소들 외의 다른 요소들은 계기의 상태, 운전자의 기교, 유연성인 호스의 지름과 길이, 누설에 닿는 시험 경계의 양쪽 압력, 시험 물체 내부의 헬륨 농도, 검출기 감지기 속의 압력, 시험 용기 주변에서 누출과는 관계없는 추적자 가스가 검출기에 유입될 가능성(백그라운드 신호), 그리고 시험 현장의 기후 조건들(주로 바람 부는 방향과 바람의 세기 등의 이유 때문에 스니퍼 기법은 절대 누출률을 측정하는 방법이라기 보다는 정밀한 검사를 실시하기 이전에 하나의 예비적인 누설 시험을 하는데 더 많이 이용된다.

앞에서 세 가지로 지적한 스니퍼 누설 시험의 감도에 영향을 주는 요소들에 대한 생각을 좀더 해보자면:

- 헬륨의 농도나 헬륨의 부분 압력(분압)을 알고 있을 때나 또는 지정된 경우, 헬륨의 농도나 헬륨의 분압을 결정하려면 다음 등식을 이용한다:

$$\% C_p = 100 P_h / P \quad \text{식 3.26}$$

$$P = \% C_p P / 100 \quad \text{식 3.27}$$

여기서

% C_p 는 용적 백분 비율인 헬륨의 농도

P_h 는 헬륨의 분압(kPaa 또는 psia: 첨자 a가 더 붙은 것은 계기 표시인 절대 압력)

P 는 절대 총 시험 압력(kPaa 또는 psia)

<예제 1>

누설시험할 용기에 대한 시방서는 게이지 압력 300 kPa(50 psig) 헬륨 스니퍼 시험에 알맞는 10% 헬륨 용적 농도를 규정한다. 이 규정된 헬륨 농도에 도달하기 위하여 얼마의 헬륨 분압이 필요한가?

<해설>

등식 3.27을 이용하고 그리고 대기압은 절대 압력 100 kPa(14.7 psia)이라고 가정하여

그 다음에 헬륨의 분압은

$$(SI) \quad P_h = (10)(300 + 100)/100 = 40 \text{ kPa}$$

$$(영미식 단위계) P_h = (10)(50 + 14.7)/100 = 6.5 \text{ psig}$$

- 헬륨 농도와 시험 경계의 용적을 알고 있든지 또는 지정된 경우에 규정된 헬륨의 양을 결정하려면, 등식 3.28을 이용할 것.

$$V_h = [\%C_p V / 100] P / P_a \quad \text{식 3.28}$$

여기서

V_h 는 헬륨의 용적, m³ 또는 ft³

V 는 시험 경계의 용적, m³ 또는 ft³

P_a는 대기의 압력, kPaa

P는 시험 기체의 절대 압력, kPaa

%C_p 는 용적 비율인 헬륨의 농도, %

<예제 2>

게이지 압력 200 kPa(30 psig)에서 500 m³ (20,000 ft³) 용기를 헬륨 스니퍼 시험하는 데 추적자 가스의 용적 비율이 5%에 이르게 하는 데 필요한 헬륨량은 얼마인가?

<해설>

등식 3.28을 이용하고 공기의 압력을 100 kPa(절대 압력 14.7 psia)이라고 가정할 경우,

$$(SI) \quad V_h = (5)(500)(200 + 100)/100 = 75$$

$$(영미식 단위계) V_h = [(5)(20,000)/100] [(30 + 14.7)]/14.7 = 3,040 \text{ ft}^3$$

- 헬륨 분압, P_h, 시험 경계의 용적, V 그리고 대기압, P_a 등을 알고 있든지 또는 지정되는 경우 필요한 헬륨량을 결정하기 위하여 등식 3.29를 이용한다:

$$V_h = (P_h/P_a)V \quad \text{식 3.29}$$

<예제 3>

300 m³(10,000 ft³)인 용적을 70 kPa 게이지 (10 psig)로 가압하는 데 필요한 헬륨량은 얼마인가?

<해석>

등식 3.29를 이용하고 대기의 압력을 100 kPa(14.7 psia)라고 가정하는 경우, 헬륨의 용적은

$$(SI) \quad V_h = (70)(300)/100 = 210 \text{ m}^3 \text{ He}$$

$$(영미식 단위) V_h = (10/14.7)(10,000) = 6,800 \text{ ft}^3 \text{ He}$$

[주]:

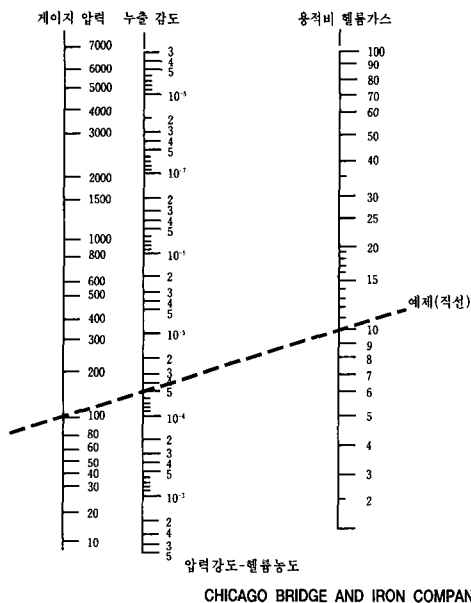
대기압이 100 kPa이므로 100의 공기 중에 헬



륨의 분압을 백분율인 %라고 생각할 수 있다. 헬륨의 양을 70%로 본다면, (SI) 셈처럼 $300 \text{ m}^3 \times 70/100 = 210 \text{ m}^3$ 이다.

스니퍼 기법을 현장에서 운용할 때, 가압에 쓰일 추적자 가스와 다른 기체와의 혼합 비율, 그리고 시험 용기의 내부 압력과 상호 관계를 저울질하는 것은 값이 비싼 헬륨을 절약할 수 있어 경제적으로 이득을 챙길 수 있는 부분이다. 따라서 위의 예제에서 다른 보기들은 그들의 관계를 저울질하는 데 기초가 될 것이다.

<그림 3.23>은 셈그래프이며, 스니퍼의 속도와 용기 내부 압력의 게이지 표시 압력으로서 누출률의 감도를 추정할 수 있다. <그림 3.23>의 셈그래프를 이용할 <예제 4>를 끝으로 이 글을 마무리 하려고 한다.



<그림 3.23> 점성 누출에만 해당되는 헬륨 누설 검출 감도를 헬륨 추적자 가스의 농도와 시험 압력에 관계시킨 셈그래프.

<예제 4>

<그림 3.23>를 이용하여 체적 비율 100%인 헬륨 추적자 가스를 이용하는 100 kPa 게이지(15 psig) 시험에 알맞는 개략적인 또는 추정되는 최소 헬륨 검출 감도는 얼마나 되는가? 주어진 조건들은:

선형 스캐닝 속도는 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3 \text{ ft} \cdot \text{min}^{-1}$)
스니퍼 길이와 지름 등은 각각 2 m (6 ft)와 2.7 mm ($1/2 \text{ in.}$)

감지 원소의 압력은 드로틀 밸브의 적절한 조절로 10 mPa (10^{-4} torr)를 계속 유지한다.

<해설>

<그림 3.22>에서 주사 속도 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 밀착 거리, $D = 6 \text{ mm}$ 인 상대적 시험 감도 계수는 10 이다. 그리고 <그림 3.23>에서 문제가 된 100 kPa 게이지 압력(<그림 3.23>에서 왼쪽의 치수)과 오른쪽의 치수인 10과 연결하면, 가운데 있는 치수가 곧 검출기의 감도이다. 즉,

$$\text{감도} = 5 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (5 \times 10^4 \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

여기서 헬륨의 분압은 100%를 쓰고 있으므로, 상대적인 감도는 1 이다. 따라서 시험 감도는

$$\begin{aligned} \text{시험 감도} &= (1)(5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \\ &= 5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (5 \times 10^{-2} \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \end{aligned}$$

마지막 예와 관련된 응용 문제들은 이 글의 바탕을 이룬 누설 검사 핸드북(McMaster)에 계속 된다.

(원고 접수일 1999. 3. 16)