

헬륨 누설 검출 기법과 교정 절차들에 관한 전형적인 사례들 소개(I)

Some Aspects on the Procedures of the Detection Technique and Calibration in the Helium Leak Testing(I)

● 이 글은 본지의 지난 호에 소개된 헬륨 누설 검출기에 관한 기술을 좀더 실용적인 쪽으로 확대시킨 것이며, 누설 검사 현장에서 그 설비를 실제로 쓰는 데 필요한 기본 기법들을 해설하고 있습니다. 여기에 소개할 기법들의 대부분은 우리가 잘 알고 있는 미국비파괴학회(ASNT) 발간자료¹⁾에서 발췌된 것들입니다. 800쪽을 넘는 그 책의 방대한 내용들 중에서 헬륨 질량 분석계의 검출 실용 기술과 관계된 중요한 요점들을 추려서 독자가 부담 없이 읽고, 그 뜻을 쉽게 파악하는 데 도움을 드리고자 필자 임의로 재구성시켜 본 것입니다.



朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

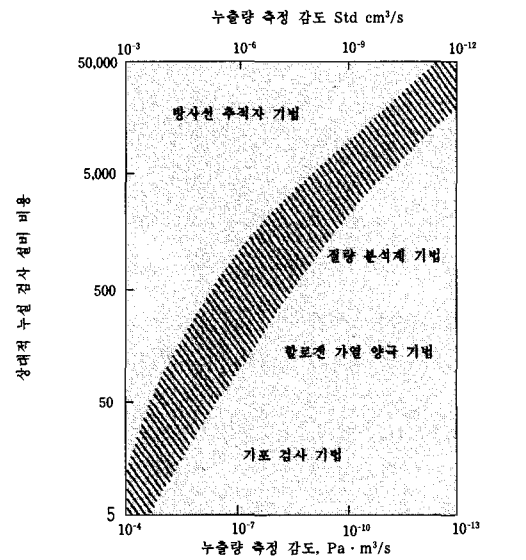
제1부 누설 검사에서 몇 가지 생각할 점들

1.1 누설 검사의 검출기 감도와 관계 설비의 가격 견중

누설 검사에서 먼저 생각할 점은 시방서에 주어진 검사의 검출 감도 범위와 그 감도에 이르게 하는 비용일 것이다. 감도의 범위는 검사하는 방법들이 갖는 고유한 특성이므로 시방서가 규정하는 방법에서 이미 그 범위가 한정되어 있다. 하지만 거기에 소요될 비용은 검사할 물체에서 누설 부분들의 상태 또는 검사할 위치 또는 주어진 검사 환경 등, 여러 가지 요건들에 따라 많은 차이가 날 수 있다. 그러므로 어떤 한 방법을 선택하였을 때, 그 검사에 드는 비용을 대표할 추정된 어떤 값을 먼저 매기는 일은 별 뜻이 없고, 다만 거기에 쓰일 여러 가지 설비들의 구입 비용만을 개략적으로 추정할 수 있을 것이다.

〈그림 1.1〉은 선택할 누설 기법에서 쓰일 설비에 대한 대표적인 비용과 대표적인 측정 감도를

서로 견준 것이다. 〈그림 1.1〉에서 세로축은 특정 누설 검사법에 따르는 상대적인 설비의 비용이며, 가로축은 누출량 측정의 감도를 초마다 파스칼·세제곱(Pa·m³·s⁻¹) 단위로 표시한 것이



〈그림 1.1〉 누설 검출 설비의 비용에 따르는 검출 기준 감도의 효과

*방사선관리기술사, 공학박사(원자력공학), 본회 홍보위원.

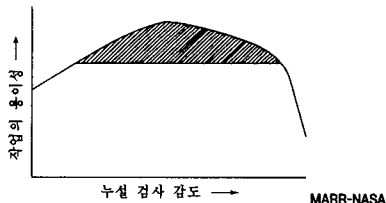
¹⁾ "Nondestructive Testing Handbook Volume 1, Leak Testing, 2nd Edition" (McMaster)



다. 그리고 빗금친 부분은 개략적인 적용 범위이다. 이 그림은 4 가지 검사법들, 즉 '기포 누설 검사', '할로겐 다이오드 검사', '헬륨 질량 분석계 누설 검사' 그리고 '방사선 추적자 누설 검사' 등에 쓰일 설비의 가격과 이들의 감도 범위를 서로 견준 것이다. 그림에서 보면, 기포 검사법의 일상적인 검출 감도 범위와 설비의 가격이 가장 낮고, 다음으로 할로겐 다이오드, 헬륨 질량 분석계 그리고 방사선 추적자 기법 순서로 올라간다. 한편, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 누출량의 측정 감도가 정밀할수록 설비의 값은 지수 함수로 올라감을 알 수 있다.

1.2 누설 감도의 정밀도와 작업의 여유(용이도)

누설 검사에서 당연히 미세한 누설일수록 일은 까다로워진다. 이런 관계를 그림으로 표시하면 <그림 1.2>로 나타낼 수 있다. 여기서 세로축은 추정된 작업의 여유(용이도)를 나타내고, 가로축은 누설 검사 감도의 정밀도를 나타낸다. 이 그림에서 가장 적당한 작업 범위는 빗금친 범위가 될 수 있을 것이다. 정밀도가 낮아진다고 하여 작업의 여유가 무한대로 낮아지는 것은 아니다. 이런 현상은 누설 검사의 특수성이다. 그리고 감도가 내려가는 쪽(왼쪽)은 작업의 여유가 비례적으로 내려가지만, 감도의 정밀도가 올라가는 쪽(오른쪽)은 작업의 최적 범위를 벗어나면 작업의 여유가 급경사로 낮아진다. 이것은 누설 검사의



<그림 1.2> 누설 검사 감도에 따르는 시험 작업의 여유(용이성)

감도가 어떤 범위를 넘어서면, 한계점에 이르게 됨을 보여준다. 따라서, 어떤 작업에서나 그러하듯이, 누설 시험 작업의 최적화 조건도 적절한 검사 감도 범위에서 결정된다. 작업의 여유가 많다는 것은 곧 검사의 비용에도 크게 영향을 미친다.

1.3 최소 검출 가능 누출률의 뜻

누설 검사를 하려고 계획을 세울 때나 또는 시방서를 작성할 때, 이용할 누설 검사 방법의 선택에서 가장 먼저 생각할 점은, 작업할 누설들의 크기를 나타낼 누출률의 범위를 미리 결정하는 일이다. 선택할 누설 검사 방법들은 감도의 범위가 각각 정해져 있다. 그리고 측정해야 될 감도 범위 안에서 가장 중요한 부분은 검출기가 일을 할 수 있는 가장 적은 누출량이라 할 수 있다. 이것을 '최소 검출 가능 누출률(minimum detectable leakage rate)'이라 한다. 대체로 누설 검사 시방서는 이것을 지정 해야 한다. 누출률의 단위는 누설들을 관통(누출)하는 유체의 양을 단위 시간으로 나눈 값이다. 따라서 이상 기체(ideal gas)의 법칙에서 알 수 있듯이, 이상 기체의 양은 크기가 이미 고정된 딱딱한 고체의 경우와는 달리, 그 기체를 누르고 있는 주위의 압력에 따라 그의 체적은 신축적인 변화를 한다. 따라서 먼저 압력이 지정되고, 그리고 나서 그 압력에서 나타날 그 기체의 체적을 따져 봐야 한다. 이상 기체일 경우, 기체의 체적은 '보일의 법칙'에 따른다.

이미 300년이 훨씬 지난 1662년 보일은 '온도가 일정한 어떤 기체의 압력과 체적을 서로 곱한 값은 항상 일정한 값'이라는 사실을 발견했다. 누출률은 반드시 단위 시간마다 압력과 체적의 곱으로 나타낸다.

표시할 압력의 단위와 체적의 단위에 따라 누출률의 단위들은 여러 가지로 쓰이게 되나, 대개는 국제 단위계인 매초마다 파스칼 · 세제곱미터

(Pa · cm³ · s⁻¹) 또는 CGS 단위계인 매초마다 표준 공기 제제공센티미터(std cm³ · s⁻¹)가 가장 많이 쓰인다. 지금은 국제 단위계인 앞쪽으로 단 일화되어 가는 경향이 있다. 이 두 단위에서 서로는 뒤쪽이 앞쪽보다는 약 10 배가 작다.

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 10 \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

〈표 1.1〉은 누설 검사의 방법들과 개별 방법의 대표적인 ‘최소 누출률’을 서로 견준 것이다. 그리고 그 표에는 누설 검사에서 참고가 될 간단한 주석을 개별 방법마다 달고 있다. 좀더 설명을 덧붙인다면 다음과 같다. 〈표 1.1〉은 위쪽으로부터 아래쪽으로 내려가면서 최소 누출률이 낮은 방법 순위로 나열되어 있다. 제일 윗부분의 왼쪽에 있는 질량 손실(압력 변화량 검사법)을 이용하는 검사는 정해진 시간 안에 누출률을 지정하기 때문에 검출할 누설의 크기에 제한이 따른다. 따라서 누설의 위치나 크기 등의 사전 정보 없이는 많은 시간이 소요된다. 두 번째인 초음파를 이용하는 검사는 누설 위치만을 지정한다. 최소 누출률은 대체로 0.05(Pa · cm³ · s⁻¹) 범위이다. 이 방법은 다른 것에 견주어 여러가지 장점들을 가지고 있다. 신속하고, 검사할 물체를 특별하게 세정시킬 필요가 없으며, 시험 물체에서 검출기가 좀 떨어진 거리에 놓여져도 누설 검출을 할 수 있다. 다만 분명하게 나타날 비교적 큰 누설 들인 경우에 대해서 가장 이로운 방법이다. 세 번째인 화학 물질 침투 방법은 두 번째인 초음파 방법보다 100배 이상 더 정밀하다. 이용이 간편하고, 누설의 위치 지정만을 할 수 있으며, 작은 크기의 누설들은 시험 중에 침투제인 화학 물질들로 막혀질 수가 있다. 물론 침투제 그 자체가 오염될 염려도 있으므로 시험할 주변을 세정시킬 필요가 있다. 네 번째인 기포 시험은 앞의 화학 물질을 이용하는 방법보다는 그 감도가 10배(10⁻⁵)나 높

〈표 1.1〉 누설 위치 지정에 여러 방식들의 감도 한계

방 법	최소 검출 가능 누출률	주 석
Mass loss (pressure change)	Time limited	Generally limited to sizable leaks. Gives good overall quantitative measure. No information on leak location. Time consuming
Ultrasonics	0.05	Leak location only. Fast. No clean up. Can detect from distance. Useful only for fairly large leaks.
Chemical penetrants	10 ⁻⁴ perhaps smaller	Simple to use. Location only. May plug small leaks. Requires clean up
Bubbles	10 ⁻⁵	For leak location. Fluids may plug small leaks. Requires clean up.
Thermal conductivity	10 ⁻⁶	Simple, compact, portable, inexpensive. Sensitive to a number of different gases. Operates in air.
Halogen	10 ⁻¹⁰	Operates in air. Sensitive (10 ⁻¹² claimed with SF ₆). Portable. Requires clean up. Loses sensitivity with use. Sensitive to ambient halide gases.
Mass spectrometer	10 ⁻¹²	Most accurate for vacuum testing. Expensive. Relatively complex. Not as portable as halogen detectors. Much less sensitive when used in pressure testing.

MARR-NASA

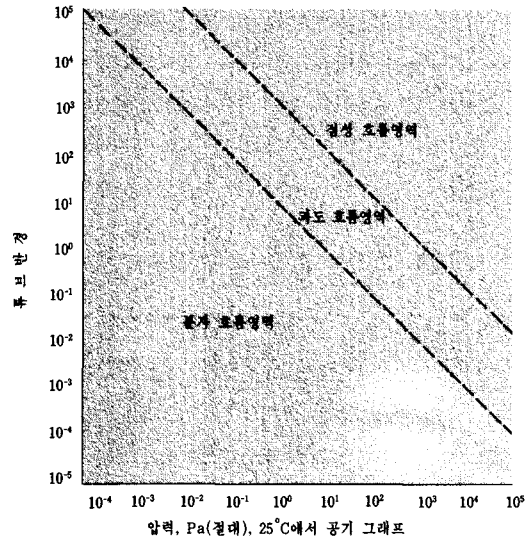
다. 이 방법도 앞의 둘째와 셋째처럼 누설의 위치 지정에 하는 데만 쓰인다. 시험에 쓰이는 기폭제에 의하여 시험 도중에 작은 누설들이 막힐 염려가 있고, 또한 시험에 쓰이는 기폭제가 주위의 물질과 함께 시험 부품들 또는 시스템을 오염시킬 수가 있기 때문에 시험 물체의 주위를 세정할 필요가 있다. 다섯 번째의 열 전도성(thermal conductivity)을 이용하는 시험은 그 감도에서 기포 시험보다 10 배가 높다. 시험 과정이 간편하고, 휴대용 검출기로 제작되며, 검출기의 값도 다



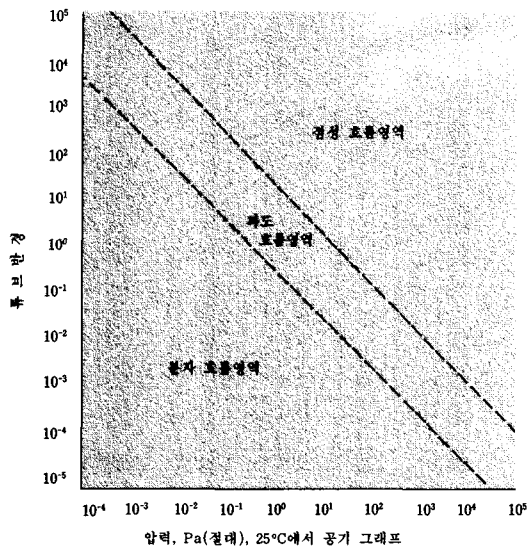
른 것들에 견주어 매우 싸다. 공기 중에서도 작업할 수 있다. 하지만, 누출하는 기체의 종류에 따라 열 전도성에 차이가 나므로 검출기의 감도에 영향을 미친다. 여섯 번째의 할로젠 다이오드 기법은 냉장고의 냉매가 냉매 저장 용기로부터 누출하는 것을 검출하는 데 쓰려고 개발된 것이다. 이 방법은 질량 분석계 기법과 함께 감도에서는 누설 시험들 중에서 가장 높다(다만 SF₆을 검출하는 경우에만 그러한 감도에 이를 수 있고, 대개는 10⁻¹⁰ Pa · cm³ · s⁻¹ 정도임). 공기 중에서도 작업할 수 있고, 휴대용이며, 시험할 물체의 표면을 세정할 필요가 있다. 할로젠 다이오드 검출기의 수명이 한정되어 있으므로 소비된 시간만큼 감도가 줄어든다. 주위의 할로젠화합물 기체들에 민감하게 반응하므로 이용에 주의가 따른다. 마지막으로, 질량 분석계를 이용하는 시험은 그 누설 감도가 누설 검출 방법들 중에서는 가장 정밀하다(10⁻¹² Pa · cm³ · s⁻¹). 시험 물체가 진공일 때, 가장 확실한 누출률을 검출할 수 있다. 단점이라 볼 수 있는 것들은 설비의 비용이 비싸고, 설비의 배치와 작업 기법이 상대적으로 복잡한 점도 포함된다. 그리고 할로젠 다이오드 검출기들처럼 휴대용으로 쓰기에는 부적합하다. 압력 검사용으로 쓰일 경우, 감도가 많이 떨어지는 단점도 있다.

1.4 유체 흐름의 유형들과 특성

누설 검사에서 소홀하게 다루어지기 쉬운 것이 바로 누설을 관통하여 누출되는 유체의 흐름 유형들이다. 유체의 흐름 유형들은 정밀한 누설 평가에서 매우 중요하게 다뤄야 할 사항이다. 대체로 다음 세 가지 유형들이 누설 평가에 영향을 크게 미친다. 즉, '점성 흐름(viscous flow)', '분자 흐름(molecular flow)' 그리고 '과도 흐름(transitional flow)' 등이다. 기본적으로 이들의



〈그림 1.3〉 누설 채널의 반경 대 파스칼 단위의 기체 압력에 따르는 누설 관통 추적자 가스의 흐름 특성의 유형들



〈그림 1.4〉 절대 기체 압력 대 관형 반경 콘덕턴스로 환산하여 누설을 관통하는 기체들의 점성, 분자 그리고 과도 흐름들의 조건들을 그림으로 나타냄

구별은 압력 조건 - 예컨대 압력의 높낮이의 차이 - 등, 기체의 종류, 그리고 누설의 크기와 풀

등과 연결된 어떤 함수에 따라 구별된다. <그림 1.3>은 압력과 누설 지름의 크기를 바탕으로 하여 이들의 관계를 서로 견준 그림이다. 그 그림에서 세로축은 누설 지름의 크기(mm 단위)이고, 가로축은 누출하는 유체를 누르는 압력의 세기(Pa 단위)이다. 누설을 꿰뚫고 누출하는 기체 흐름 유형들을 구별하는 기준은 대체로 두 요소들인, 흐르는 유체에 가해지는 압력의 세기와 그 압력에 의하여 생긴 기체가 빠져나갈 누설 지름의 크기(틈의 크기)이다. <그림 1.3>에서는 분자 흐름과 점성 흐름 양쪽 사이에 과도 흐름 구역이 자리 잡는다. <그림 1.4>에서도 <그림 1.3>의 흐름 유형들처럼, 절대 기체 압력 대 관형 콘덕턴스(tube type conductance)의 반경에 따라 변하는 흐름의 유형들을 구분한다.

1.4.1 점성 흐름(Viscous flow);

점성 흐름을 요약하면 다음과 같다.

- 기체의 점도에 반비례
- 높은 쪽의 압력과 낮은 쪽의 압력 각각의 제곱 차이에 비례
- 누출률이 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 또는 그 이상일 경우, 그리고 기체의 자유 평균 행로(λ)와 누설의 지름(d)의 비율인 $\lambda a/d$ 값이 < 0.01 인 흐름 조건 아래서 일어남(점성 흐름은 주로 포아즈 이유(Poiseuille) 법칙에 따름)

1.4.2 분자 흐름 (Molecular flow);

- 기체 분자 질량의 제곱근에 반비례
- 유체의 부분 압력에 비례
- 누출률이 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 또는 그 아래일 경우, 그리고 평균 자유 행로와 누설 지름의 비율인 $\lambda a/d > 1.0$ 의 흐름 조건 아래서 일어남 (분자 흐름은 주로 크누첸(Knudsen) 법칙에 따름)

1.4.3 과도 흐름(Transitional flow);

- 점성 흐름과 분자 흐름 중간의 특성

- 누출률은 $1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 사이의 값임
- 평균 자유 행로와 누설 지름의 비율($\lambda a/d$)은 0.01 - 1.0 사이의 흐름 조건 아래서 일어남

1.5 여러 가지 누출률 단위들의 환산 계수들

<표 1.2>는 여러 가지 누출률 단위들을 필요에 따라 서로 환산할 계수들을 수록한 것이다.

앞에서도 설명됐듯이, 누출률은 압력과 그 압력

<표 1.2> 누출률(흐름) 환산 계수들 (McMaster 1982, p. 7)

To Convert From	to	Multiply By
Pascal cubic meters per second ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)	Standard cubic centimeters per second	$9.87 \approx 10$
	Micron liters per second	7.50×10^3
	micron cubic feet per hour	9.54×10^5
	Torr liters per second	7.5
Standard cubic centimeters per second (std cm^3/s)	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	0.10
	Micron liters per second	7.60×10^2
	Micron cubic feet per hour	9.66×10^4
	Torr liters per second	7.60×10^{-1}
Micron liters per second ($\mu\text{l}/\text{s}$)	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	1.33×10^{-4}
	Standard cubic centimeters per second	1.32×10^{-3}
	Micron cubic feet per hour	1.27×10^2
	Torr liters per second	1.00×10^{-3}
Micron cubic feet per hour ($\mu\text{l}/\text{hr}$)	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	1.0×10^{-6}
	Standard cubic centimeters per second	1.04×10^{-5}
	Micron liters per second	7.87×10^{-3}
		7.87×10^{-6}
Torr liters per second (torr L/s)	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	0.133
	Standard cubic centimeters per second	1.32
	Micron liters per second	1.00×10^3
	Micron cubic feet per hour	1.27×10^5

Preferred units of leakage rate or flow rate are $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.



에서 나타날 부피를 서로 곱한 값으로 나타내어야 한다. 누출률은 두 개 이상의 기본 단위들의 곱으로 나타냄으로 조금은 복잡하다. 압력과 체적을 측정할 때 쓰인 압력의 표시 단위와 체적의 잣대 눈금 단위에 따라 누출률 크기들의 표시가 서로 다르므로 <표 1.2>는 이들의 차이를 어떤

<표 1.3> 누출량의 여러 가지 단위계에서 누출률 견중
(McMaster, 1982. p. 7)

pa·m³/s	std cm³/s	std L/day	Air at 0°C kg/yr
1	10	864	400
0.5	5	432	200
0.2	2	173	80
0.1	1	86.4	40
0.05	0.5	43.2	20
0.02	0.2	17.3	8
0.01	0.1	8.6	4
5×10^{-3}	5×10^{-2}	4.3	2
2×10^{-3}	2×10^{-2}	1.7	0.8
10^{-3}	10^{-2}	0.86	0.4
5×10^{-4}	5×10^{-3}	0.43	0.2
10^{-4}	10^{-3}	86×10^{-3}	4×10^{-2}
5×10^{-5}	5×10^{-4}	43×10^{-3}	2×10^{-2}
10^{-5}	10^{-4}	86×10^{-4}	4×10^{-3}
5×10^{-6}	5×10^{-5}	43×10^{-4}	2×10^{-3}
10^{-6}	10^{-5}	86×10^{-5}	4×10^{-4}
10^{-7}	10^{-6}	86×10^{-6}	4×10^{-5}
10^{-8}	10^{-7}	86×10^{-7}	4×10^{-6}
10^{-9}	10^{-8}	86×10^{-8}	4×10^{-7}
10^{-10}	10^{-9}	86×10^{-9}	4×10^{-8}
10^{-11}	10^{-10}	86×10^{-10}	4×10^{-9}
10^{-12}	10^{-11}	86×10^{-11}	4×10^{-10}
10^{-13}	10^{-12}	86×10^{-12}	4×10^{-11}

일정한 계수로 간편하게 곱하여 다른 단위로 환산할 수 있게 만든 표이다.

<표 1.2>의 왼쪽에 있는 단위를 가운데 있는 단위로 나타내려면, 오른쪽의 배수를 곱해 주면 된다. 예컨대, 왼쪽 칼럼 위쪽에 있는 Pa·cm³·s⁻¹로 표시된 단위를 std cm³·s⁻¹ 단위로 나타내려면, 9.87(실제로는 10 배수로 쓰임)을 곱해 주면 된다. 앞서서도 이들의 관계를 이야기 한 적이 있었다.

<표 1.3>은 <표 1.2>의 환산 배율을 써서, 섹한 누출률의 단위들을 쉽게 찾아보기 편하게 만든 조건표이다.

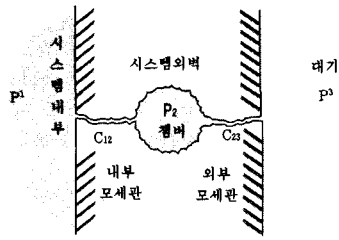
1.6 여러 가지 누설의 모습들

아주 미세한 누설들을 확대하면, 누설들은 대체로 검사할 물체의 벽의 두께에 따라 간단한 모습에서 복잡한 모습으로 나타난다. 벽의 두께가 두꺼울수록 누설들의 모습들은 복잡하다.

누설들은 재료 또는 부품을 만들 때나, 또는 어떤 시스템의 한 구성 요소로 이용될 때, 생길 수 있는 재질의 결함이므로 누설 검사를 시작하기에 앞서 우리가 그들의 모습들을 미리 가늠해 보기란 거의 불가능 하다. 결함을 일으키는 요소들은 아주 다양하므로 마치 인간의 천성처럼, 경험을 통해서만 누설의 모습들을 추정 할 수 있을 뿐이다.

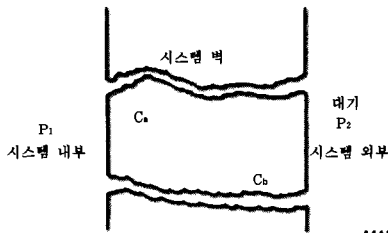
<그림 1.5>, <그림 1.6> 그리고 <그림 1.7> 등은 전문가의 경험들을 바탕으로 누설의 모습들을 추정하여 그린 그림들이다.

<그림 1.5>는 두꺼운 벽 속에 자리 잡은 한 누설인 동공(그림의 가운데)을 그려 놓은 그림이다. 그리고 거기에는 양쪽 벽의 표면들과 모세관으로 서로 연결되고 있다. 양쪽 벽의 표면들은 서로가 압력을 각각 따로 받고 있으므로 압력의 세기도 서로 다르다. <그림 1.5>의 왼쪽은 시스템



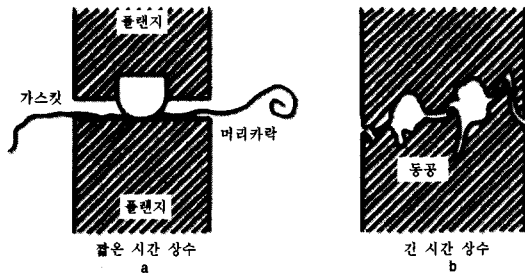
MARR-NASA

〈그림 1.5〉 계열로 연결된 대표적인 누설 경로들의 그림



MARR-NASA

〈그림 1.6〉 두 개이 누설점이 서로 평행으로 연결된 경우



VEECO INSTRUMENT, INC

〈그림 1.7〉 누설량 측정에서 시간 상수에 관한 누설 고유 성질의 효과

속에서 어떤 압력을 받고 있는 압력 경계의 한 단면이며, 거기에서 추적자 가스를 벽 속에 감춰진 누설인 동공으로 흘러 보내려고 압력(P_1)을 주고 있고, 가운데 동공의 압력(P_2)은 오른쪽 벽 표면의 압력 경계가 받고 있는 대기압(P_3)과 모세관으로 연결되고 있어 압력, P_1 과 압력, P_3 사이의 어떤 값을 가진다. 따라서 왼쪽의 벽의 표면에 뿌려진 추적자 가스는 왼쪽으로부터 동공을 향하여 오른쪽으로 밀치는 압력의 세기만큼 이동하여 동공을 가득 채우기는 하겠지만, 외부 벽 표면에서 받고 있는 대기압과 동공의 압력에

서 별 차이가 나지 아닐 때는 대기압을 받고 있는 외부 벽쪽 표면 밖으로 추적자 가스의 흐름은 거의 정지 상태와 다를 바가 없을 것이다.

여기서 우리는 누설의 한 중요한 특성을 발견할 수 있을 것이다. 즉, 고체에 생겨 난 누설의 크기는 일정하다고 가정해도, 양쪽 표면들의 압력 경계에서 받고 있는 압력 차에 따라서는 추적자 가스가 전혀 그 누설을 관통할 수 없는 경우가 생길 수 있다는 점이다. 높은 압력 또는 진공에 쓰이는 시스템 또는 부품들인 경우, 거기에 생겨난 대수롭지 아니한 미세한 누설들이라 할지라도, 쓰일 용도에 따라서는 크게 문제를 일으킬 수 있을 것이다. 〈그림 1.6〉은 〈그림 1.5〉의 동공이 있었던 경우와는 달리 양쪽 벽의 표면들 사이를 두 누설들이 서로 평행으로 나 있는 경우를 보여준다. 이런 누설들의 누설 위치 지정 기법은 상대적으로 아주 까다롭다. 〈그림 1.7〉은 두 가지의 누설들을 그려 놓은 것이다. 왼쪽은 시스템의 양쪽을 연결하는 두 플랜지들 사이에 머리카락과 같은 미세한 물질이 틈에 끼여 있는 한 누설을 보여준다. 그리고 오른쪽은 검사할 물체에 난 동공들이 계열로 연결되어 벽의 양쪽 표면으로 관통된 경우를 보여준다. (〈그림 1.5〉의 또다른 모습임) 이런 경우, 누설 검사에 많은 시간이 소요된다.

1.7 참 누설과 겉보기 누설의 특징들

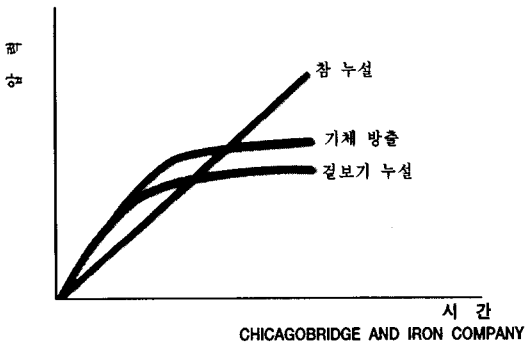
누설 검출기에 잡히는 신호들은 모두가 누설을 대표하는 '참 누설(real leak)'만은 아니다. 그것들 중에는 누설과는 전혀 관계없는 '겉보기 또는 가상누설(virtual leak)'들과 '기체 방출(out-gassing)'이 검출 신호처럼 참 누설과 아주 흡사하게 나타날 수도 있다.

〈그림 1.8〉은 한 배기된 시스템 속에서 추적자 가스의 압력이 경과된 시간에 따라 올라가는 경우를 보여 준다. 이들 특성 곡선들과 직선은 이



론에 바탕을 둔 것이며, 실제와는 다소 차이가 날 수 있을 것이다. 이들은 경과된 시간에 따라 시스템 속의 압력을 변화시키는 특성 곡선 또는 직선을 보여준다. 그림에서 세로는 압력의 크기이고, 가로는 경과된 시간이다.

직선으로 나타난 참 누설의 경우, 주어진 조건에서 누출률은 고유한 값이기 때문에 경과된 시간에 맞설 압력의 변화(추적자 가스의 누출량)는 대각선을 따른 직선으로 올라간다. 즉 '압력과 경과된 시간의 직선 함수'로 표시된다. 밑으로 처진 곡선인 겉보기 누설은 기체 방출의 경우처럼, 일정한 경과 시간이 지나면서 맞설 압력의 상승은 멈추고, 그 이상 올라가지 못하면서 계속적으로 같은 크기의 압력을 유지하는 것으로 생각할 수 있다. 그리고 기체 방출의 특성도 겉보기 누설의 것과 비슷하다. 다만 겉보기 누설보다는 경과된 시간에 맞설 압력의 변화는 좀 더 크게 나타난다. 대체로 기체 방출은 시험할 물체의 표면 위에 오염된 물질과 추적자 가스가 섞여져 있다가 누설 검출기에 어떤 신호로 표시되는 것이므로 시험 물체의 표면을 깨끗이 세정하지 아니했을 경우에 흔히 나타나는 현상이다. 뿐만 아니라 지정된 가스킷 대신 보통의 고무나 재질을 썼을 경우에도 기체 방출의 영향을 크게 받는다.

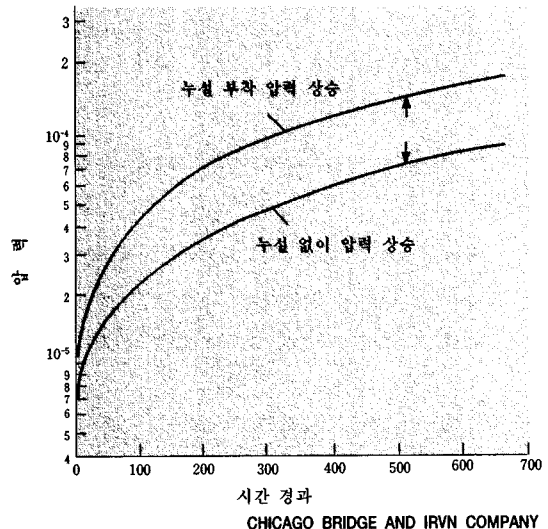


〈그림 1.8〉 배기된 시험 시스템에서 추적자 가스의 압력 상승, 참 누설에 대한 응답, 오염 표면으로부터 기체 방출, 그리고 겉보기 누설에 대한 응답을 보여줌

1.8 표준 누설을 꿰뚫는 추적자 기체의 누출량

누설의 크기는 대체로 추적자 가스의 누출률을 측정하여 결정한다. 그리고 누출률은 지정된 추적자 가스를 지정된 표준 누설에 통과시켜 결정한다. 추적자 가스를 표준 누설에 통과시키는 시험은 시험 시스템 주위의 압력, 온도 그리고 시스템의 정확한 용적 등을 확실하게 알고 있어야 함은 물론이고, 추적자 가스의 물리적 화학적 특성도 추적자 기체로서의 기능에 합당해야 한다. 대체로 한 추적자 가스가 어떤 지정된 표준 누설(누출률을 알고 있는 누설)을 관통할 때, 시험 시스템이 배기된 경우라면, 시스템 속의 압력은 표준 누설을 꿰뚫는 추적자 가스의 양이 서서히 시스템 속에 쌓이므로, 경과된 시간만큼 비례적으로 올라갈 것이다.

〈그림 1.9〉는 표준 누설을 교정하는 방법들 중에서 한 '압력 올리기 기법'을 예로 들면서, 시험 시간의 경과 길이에 따라 압력이 올라가는 현상을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 세로는 올라간 압력을 토르(torr) 단위로 표시한 분량이

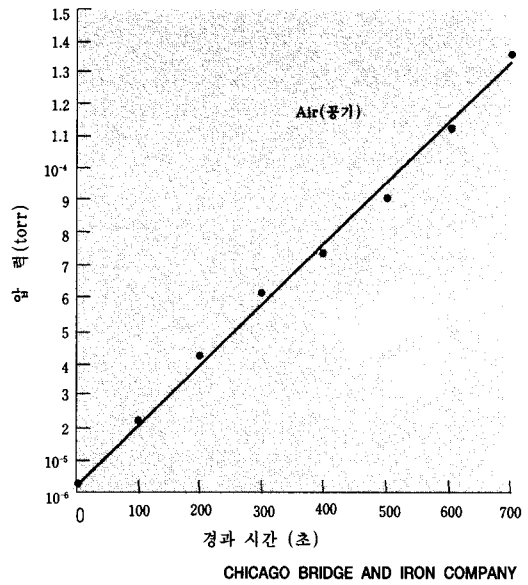


〈그림 1.9〉 물리적 표준 누설의 교정 중에 시험 챔버를 배기한 후에 경과된 시간에 따라 변하는 상승 압력

고, 가로는 추적자 가스가 알고 있는 배기된 용적 속에 누설을 꿰뚫고 쌓임으로써 시스템 속에서 압력이 올라가는 것을 여러 개의 시간 구간을 정하여 측정된 값을 표시 한 것이다. 이 그림에서는 두 개의 곡선들을 보여준다. 그들 중에서 아래쪽은 표준 누설을 부착하지 않았을 때, 그 시험 시스템에서 시험 경과 시간에 따라 압력이 올라가는 모습을 보여준다. 그리고, 위쪽은 표준 누설을 부착했을 때, 표준 누설을 꿰뚫고 누출하여 쌓여지는 기체의 양 때문에 시스템의 압력이 시험 시간 경과에 따라 그 차이만큼 더 많이 올라가는 모습을 보여준다. 이 교정 기법에서 주된 어려움은 압력의 측정 부분에서 일어난다.

대개, 배기된 시스템 안의 압력은 실제로 일정한 값을 유지하기는 아주 어렵고, 시간의 경과에 따라 시스템의 내부 벽의 표면에서 일어나는 기체 방출(outgassing) 때문에 점진적으로 압력이 올라가는 경향이 나타난다. 두 번째의 어려움은 이 기법에서 다루야 할 압력 범위에 적용할 적합한 압력 측정 게이지가 개발되지 않았다는 점이다. 이 기법을 적용하는 높은 쪽의 압력 상한 값은 대개 $1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($10 \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 정도나 되고, 낮은 쪽의 하한 값은 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 범위이다. 앞쪽의 상한 값인 압력은 맥로드(McLeod) 게이지로 측정할 수 있을지는 모르겠지만, 뒤쪽의 하한 값은 이 게이지로서는 측정하기가 부적합하다. <그림 1.9>에서 두 곡선들이 나타낸 세로 축의 압력차(위 곡선의 압력 값인 높이에서 아래 곡선의 높이를 뺀 압력)는 누출률 때문에 생긴 이론적인 상승 압력을 나타낸다.

<그림 1.10>은 이론적인 압력 차와 시험 시간 동안에 공기가 표준 누설을 관통하면서 알고 있는 일정한 용적인 한 챔버 안에 올려진 압력을 서로 견주어 직선 그래프에 접근시킨 교정 곡선이다



CHICAGO BRIDGE AND IRON COMPANY
 <그림 1.10> 표준 누설을 관통하는 누출에서 오는 압력 차이

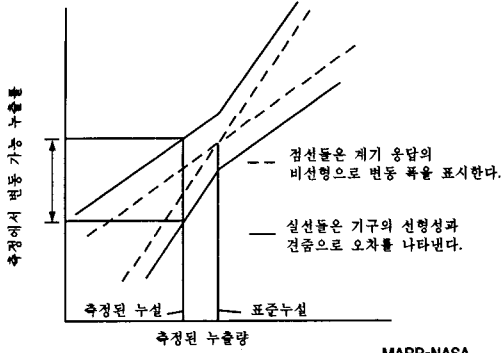
1.9 누출률을 측정할 때, 일어날 오차 범위의 개념

<그림 1.11>은 누설 시험에서 일어날 전형적인 오차의 한계를 개략적으로 그린 그림이다. 시험에 쓰인 표준 누설의 누출률(그림에서 중앙)을 기준으로 삼아 생길 수 있을 측정된 누출률의 변동(variation)들의 한계를 그림으로 보여준다. 그림에서 세로는 누설 검출기를 써서 측정된 실제의 누출률을 대표할 누출량의 분량이고, 가로는 측정된 누출량의 분량이다. 그 그림에서 아래위로 꺾여진 직선들은 측정된 누출률의 분량에서 변동할 수 있는 변수들의 범위를 그린 것이다. 그리고 이들의 범위 안에 들어 있는 두 점선들은 실험 기구의 응답이 불규칙적으로 변할 수 있는 범위를 표시하고 있다. 두 점선들이 교차하는 지점은 교정된 누출률 값이다.

이 그림이 담고 있는 중요한 요점은 정밀한 누설 검사를 기획할 때, 쓰일 표준 누설은 측정된 누설 크기에 가장 가까운 누출률의 표준 누설을



졌을 때가 시험 오차를 최소로 줄일 수 있음을 보여준다. 측정된 누출률의 범위가 쓰인 표준 누설의 누출률에서 아래 또는 위로 멀리 벗어날수록 오차의 범위는 넓어진다.

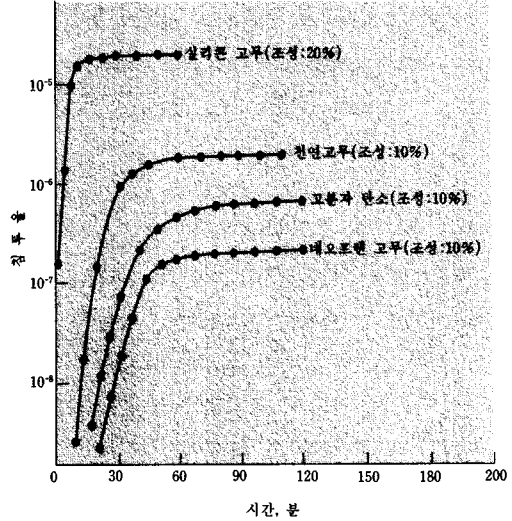


〈그림 1.11〉 검출기로서 실제의 누출 측정에서 오차 발생의 대표적인 범위. 누출 분량의 변동 (variation)은 표준 누설을 써서 측정된 누출률 교정에 어려움을 가중시킨다.

1.10 몇 종류 가스킷 재질들에 대한 헬륨 가스의 침투율

누설 시험에서 보통 하는 일은 시스템의 압력을 높인다던가 또는 진공을 만들어야 하는 것이 대부분이다. 시험할 시스템 또는 부품들을 진공시켜야 되는 대표적인 예가 바로 헬륨을 추적자 가스로 쓰는 헬륨 누설 검사이다. 시험할 시스템이나 또는 부품들을 둘러막아 진공을 만들 때, 배기 시스템의 연결에 쓰이는 호스의 가스킷 재질들은 그들의 물성에 따라서 헬륨의 침투율이 달라진다.

〈그림 1.12〉는 가스킷의 종류에 따라 헬륨의 침투율이 달라지는 모습을 실험으로 얻어 낸, 몇 가지 가스킷들의 헬륨 침투의 특성을 보여준다. 그 그림에서 세로는 침투율, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 의 단위이고, 가로는 그 시험에서 경과된 시간을 분



MARR-NASA
〈그림 1.12〉 100 kPa(17기압) 차압과 25°C에서, 길이 25 mm(1 in.) 마다, 4mm × 4mm의 단면인 고무 재질 가스킷들을 꿰는 매초마다 파스칼 세제곱미터(왼쪽 세로줄 치수)와 매초마다 토르-리터(오른쪽 세로줄 치수) 단위인 헬륨의 침투율.

으로 나타낸 것이다.

그 그림에서 위쪽부터 아래쪽으로 실리콘(조성:20%), 천연 고무(조성:10%), 탄화수소(조성:10%) 그리고 네오프렌(neoprene; 조성:10%) 등의 헬륨 침투율을 보여준다. 가스킷 재질의 규격은 단면, 4×4 mm, 길이, 25 mm, 그리고 실험할 때의 주위 온도는 25°C이다. 아래쪽에 놓인 재질일수록 헬륨의 침투율이 낮아짐을 알 수 있다. 그리고, 헬륨의 침투율이 낮은 재질의 경우는 침투율이 안정되는 시간이 더 길어짐을 알 수 있다.

진공 시스템에서 가스킷의 헬륨 침투의 성질은 특히 헬륨 누설 검출기를 이용할 때, 기체 방출의 원인 제공자이므로 특히 주의를 해야 될 부분이다. (원고 접수일 1998. 5. 2)