



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

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

● 이 글은 본지의 지난 6월호에 소개되었던 "헬륨 누설 검출 기법과 교정 절차들에 관한 전형적인 사례들 소개 (I)"에 이어지는 내용이며, 누설 검사 현장에서 그 실비를 실제로 쓰는 데 필요한 기본 기법들을 해설하고 있습니다. 이번 글은 헬륨누설검사에 쓰이는 표준누설에 관한 것입니다.



朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

제2부 표준 누설

2.1 표준 누설의 유형들

누설 검사에서 시험받을 한 시스템 또는 부품들에 나 있는 누설들의 누출률을 결정하는 작업은 앞에서 본 것처럼, 표준 누설의 누출률을 써서 서로 견주어 결정하게 된다. '표준 누설 (standard leak)' 이란 말은 때로는 '기준 누설 (reference leak)' 또는 '교정 누설 (calibration leak)' 이라 일컬어지기도 한다.

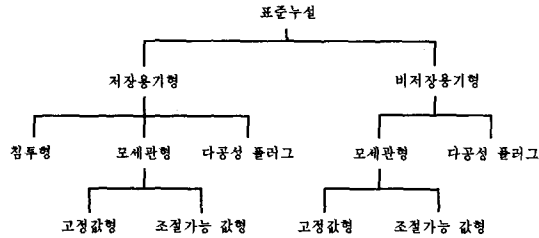
표준 누설들은 크게 두 가지 유형으로 나뉘진다. 그들 중의 하나는 자체에 지정된 추적자 가스가 담겨진 통을 달고 있는 '저장 용기형 표준 누설' 이고, 다른 하나는 저장 용기가 자체에 달려 있지 않은 단순한 '표준 누설' 이다. 앞쪽은 자체에 담겨진 추적자 가스를 표준 누설에 관통시켜 누출률을 표시하는 방식이고, 뒤쪽은 외부에서 지정된 추적자 가스를 표준 누설을 통하여 누출시켜 누출률을 표시하는 방식이다.

〈그림 2.1〉은 사람이 만든 물리적 누설(표준 누설)의 종류들을 계통으로 묶어 놓은 것이다. 왼쪽 갈래는 자체에 지정된 추적자 가스를 담은 저장 용기형 표준 누설들이고, 이들은 다시 기능별로 침투(permeation)형, 모세관(capillary)형 그리고 다공성 플러그(porous plug)형 등으로 나뉘지고, 그들 중에서 모세관형은 다시 고정된 누설 값과 가변 누설 값으로 나뉜다. 오른쪽 갈래는 비저장 용기형 표준 누설이 모세관형과 다공성 플러그형으로 다시 나뉜다. 여기서도 모세관형은 고정된 누설 값과 가변 누설 값을 가진 형이 있다.

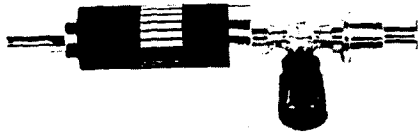
〈그림 2.2〉는 자체 추적자 가스가 담겨진 한 저장 용기형 표준 누설의 사진(a)과 그것의 단면(b)을 보여준다. 그림 2.2(b)에서 가운데 부분(흰색의 길쭉한 부분)은 침투 가능한 막(membrane)으로 된 표준 누설이고, 자체에 담고 있는 헬륨 가스가 그 주위를 일정한 압력으로 둘러싸고 있다. 그런 헬륨 가스의 양 또는 헬륨의 압력이 시간이 지남에 따라 줄어드는 현상 때

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

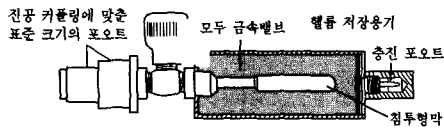
문에 저장 용기형 표준 누설은 주기적으로 교정을 받아야 한다.



〈그림 2.1〉 보통 “기준”, “교정” 또는 “표준” 누설이라 일컬어지는 사람이 만든 물리 누설들의 종류



(a) 표준 헬륨 누설의 사진



(b) 표준 누설 사진(a)의 단면 보기

〈그림 2.2〉 자체 저장 용기를 가진 헬륨 침투 누설

〈표 2.1〉 상품으로 판매되는 교정 누설 유형

회 사 명	유 형	추적자가스 자체공급	가 스	누출량 범위	
				Pa · m3/s	std cm3/s
Du Pont Instruments Monrovia, CA	Permeation	Self-contained	Helium	$10^7 \sim 10^{11}$	$10^6 \sim 10^{10}$
	Capillary-glass	Self-contained	Argon	$10^7 \sim 10^8$	$10^6 \sim 10^7$
	Capillary-glass	Self-contained	Neon	$10^7 \sim 10^8$	$10^6 \sim 10^7$
Edwards High Vacuum, Inc., Grand Island, NY	Capillary-glass	Self-contained	Hydrogen	$10^6 \sim 10^7$	$10^5 \sim 10^6$
General Electric Co., Vacuum Products Bus. Sect, Schenectady, NY	Capillary-glass	Independent	Air	$10^7 \sim 10^8$	$10^6 \sim 10^7$
General Electric Co., Instrument Dept. West Lynn, MA	Capillary-glass	Self-contained or independent	Helium, halogenated hydrocarbons	$10^3 \sim 10^6$	$10^2 \sim 10^7$
Heraeus-Engelhard Vacuum, Inc., Monroeville, PA	Capillary Permeation	Self-contained Self-contained	Argon-helium Helium	$10^7 \sim 10^9$ 10^9	$10^6 \sim 10^8$ 10^6
Veeco Instruments, Inc., Plainview, Long Island, NY	Permeation Capillary-metal	Self-contained Independent	Helium Air	10^{10} $10^4 \sim 10^6$	10^9 $10^2 \sim 10^5$
Vacuum Instruments Corp., Huntington Station, NY	Permeation	Self-contained	Helium	10^{10}	10^9
Hastings-Raydist, Inc., Hampton, VA	Permeation	Self-contained	Helium	$10^7 \sim 10^{11}$	$10^6 \sim 10^{10}$
	Capillary-glass	Self-contained	Specified by purchaser	$10^3 \sim 10^8$	$10^2 \sim 10^7$

〈표 2.1〉은 상품으로 판매되는 교정 누설들의 제조 회사, 유형, 사용하는 추적자 가스 그리고 누출량 범위를 보여준다.

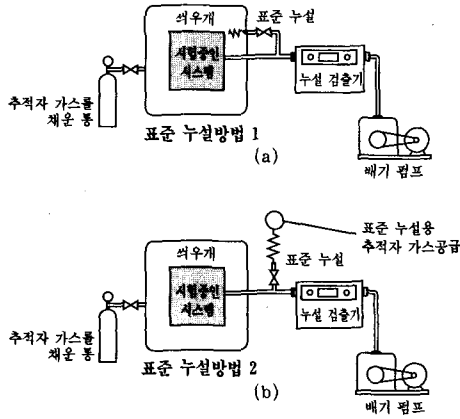
2.2 표준 누설을 시험 시스템에 연결하는 방법

작은 규모인 시험할 시스템 또는 부품들을 누설 검사할 때, 〈그림 2.3〉은 시험할 후드 또는 챔버에 표준 누설을 연결하는 대표적인 두 가지 방법들을 보여준다. 〈그림 2.3〉에서는 그림 (a)와 (b)가 따로 그려져 있다. 앞쪽은 다른 것과 쉽게 구별하려고 ‘표준 누설 방법 1’이란 이름을 적당히 붙인 것이고, 뒤쪽도 같은 편의를 위하여 ‘표준 누설 방법 2’로 이름을 지었다.

방법 1은 추적자 가스가 담겨진 자체 저장 용기를 갖지 아니한 한 표준 누설의 배치 방식이다. 그림에서 표준 누설의 위치는 둘러막이 속에 지그재그로 표시된 부분이고, 둘러막이 밖으로 연결된 라인에서 한 밸브로 막혀져 검출기와 시험할 시스템에 T자로 연결되어 있다. 방법 2는 저장 용기형 표준 누설의 연결 모습이다. 둘러막이



와는 곧바로 연결되지 아니하고, 한 밸브로 막혀져 검출기와 T자로 연결되어 있다.



〈그림 2.3〉 (a)시험중인 배기된 시스템을 켜진 후드 또는 둘러막이로부터 추적자 가스의 누출률을 규정할 표준 누설이 달린 누설 검사 배치(짜붙임). (b)자체 추적자 가스 공급으로 누출을 규정할 표준 누설이 달린 누설 검사 배치.

〈그림 2.3〉의 상태는 먼저 표준 누설을 그림 (a)와 (b)처럼 달고 나서, 시험할 시스템을 배기시킨 다음, 추적자 가스를 규정된 압력만큼 둘러막이 속에 채운 모습이다.

〈그림 2.3〉처럼 시험할 시스템을 구성하였을 때, 그 시스템 또는 부품들의 누출률을 실제로 측정하는 절차들은 누설 검사의 기본 바탕이라 할 수 있다. 여기에 관한 절차는 뒤에서 보다 자세하게 설명될 것이다.

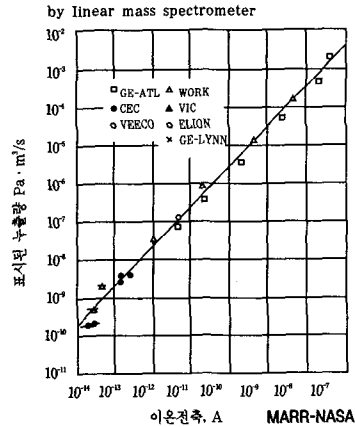
2.3 표준 누설의 기준

누설 검사에서 상품으로 판매되는 표준 누설을 써서 이뤄지는 검출기의 측정값들은 곧바로 시험 물체의 누출률과 연결된다. 누설 검사에서 한 표준 누설을 쓸 때, 표준 누설 자체가 아닌 시험 절차에서 일어날 부정확성의 근원이 될 요소들은:

1. 누설을 교정하는 데 있을 부정확성

2. 누설 검출 기구들의 비선형성
3. 누설에 적용된 차압에서 변동(variation)
4. 누설에 이용된 기체의 불순물
5. 검출기에 와 닿는 기체의 변동(variation)

1980년 이전까지는 어느 공인 기관도 누설 검사의 기준으로 견줄 만한 일차 표준 누설을 지정한 적이 없었다. 따라서 그 전까지의 '교정 누설'들은 모두가 그 표준 누설을 제조한 회사가 자체에서 개발한 교정 시스템을 써서 교정한 누설을 표준으로 하여 누설 검사를 할 수밖에 없는 다른 길이 없었다. 그러므로 제조 회사들은 그들 자신들이 표준 누설 기준을 정해놓아야만 했었다. 그들은 기존의 압력, 용적 그리고 시간 치수들의 표준에 맞춰 교정 누설들을 제조하여 이용하였다.



〈그림 2.4〉 다양한 제조 회사들이 공급하는 누설들을 '선형 질량 분석계가 측정된 누출 값들의 견증'

〈그림 2.4〉는 초선형 질량 분석계를 써서 여러 제조 회사들이 제조하여 판매하는 표준 누설들을 시험하여 얻은 결과이다. 세로는 개별 제조 회사가 표준 누설에 표시한 누출률이고, 가로는 실험에 쓰인 질량 분석계에 잡힌 이온 전류의 세기(암페어)이다. 질량 분석계로 측정된 값은 질량 분석계의 이온 전류의 세기(암페어)이지 직접 누

출률을 측정된 값은 아니다. 하지만, <그림 2.4>에서 나타나듯이, 제조 회사가 표시한 표준 누설들의 누출량과 질량 분석계의 이온 전류 사이에는 상관 관계의 직선이 나타난다.

어떤 회사 제품인 표준 누설의 경우, 회사의 표시 값은 시험한 어떤 평균값의 $\pm 50\%$ 이상의 차이가 나타나기도 한다. 그렇긴 하지만, <그림 2.4>를 이용하면, 초선형 질량 분석계의 이온 전류의 응답으로 교정 누출률을 그림에서 직접 읽을 수 있으므로 <그림 2.4>는 하나의 교정 직선으로 쓸 수 있을 것이다.

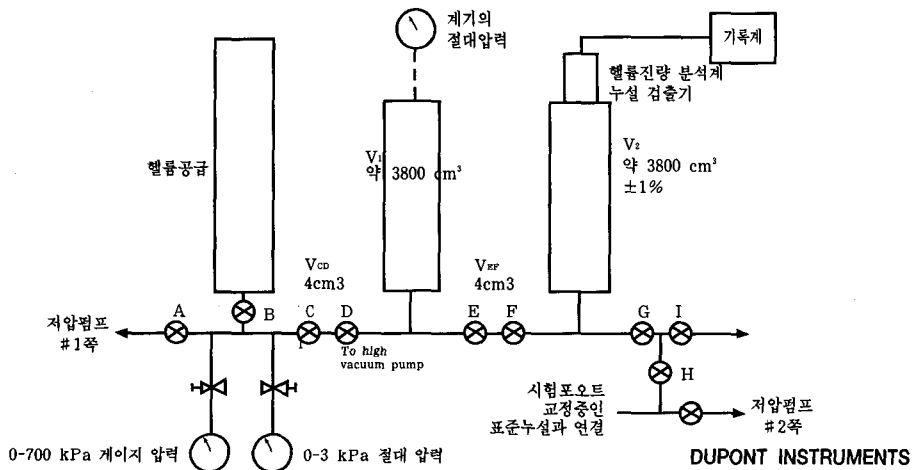
2.4 표준 누설의 교정 장치

<그림 2.5>는 표준 누설의 하나인 실리카 막 헬륨 누설을 교정하기 위한 장치를 설명하는 그림이다. 알고 있는 용적 안에 어떤 기체를 축적시켜 절대 누출량을 직접 읽을 수 있게 만든 금속으로 된 교정 시험용 장치이다. 헬륨의 누출률 범위 $2 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 까지 교정이 가능하다. 알고 있는 용적 안에 헬륨을 축적시켜, 올라가는 압력과 경과 시간을 관찰하여 결정된다. 재현성은 보통 $\pm 5\%$ 정도이고, 정확도는 모든 시스템의

오차와 헬륨 장애(hang-up) 등의 영향들을 포함해서 $\pm 10\%$ 라고 믿어진다. 헬륨의 부분 압력 상승 부분은 질량 분석계를 써서 측정한다.

<그림 2.5>의 교정 시스템을 이용하여 교정하는 절차는 표준 누설을 교정하는 전형적인 방법이 될 수 있으므로 좀더 설명이 필요할 것이다. 이 장치의 주된 기능을 한 말로 표현하자면, 단순한 기체의 용적을 정확하게 샘플링하여 질량 분석계 누설 검출기 속으로 유도시키는 장치라고 볼 수 있다.

우선 <그림 2.5>에 표시된 장치의 제원들은, 왼쪽은 헬륨 통의 통로가 밸브, B로 막혀져 있다. 밸브, C와 D 사이의 용적, V_{CD} 는 정밀한 부피로 만들어진 4 cm^3 크기이다. 그 다음 밸브, D와 E로 막혀진 용적, V_1 의 크기는 약 $3,800 \text{ cm}^3$ 이고, 거기에 걸리는 절대 압력은 $0 \sim 1.5 \text{ kPa}$ 로 변할 수 있게 장치와 연결된다. 밸브, E와 F 사이의 용적, V_{EF} 이며, V_{CD} 와 같이 정밀하게 만들어진 크기이다. 밸브, F와 G로 막혀진 용적, V_2 는 V_1 과는 달리 정밀하게 측정된 $3,800 \pm 10\% \text{ cm}^3$ 용적이다. 그리고 거기에 헬륨 질량 분석계 검출기가 부착되어 있다. 밸브, G, H 그리고 I



<그림 2.5> 진공 시스템과 규산질 막 표준 헬륨 누설들의 교정용 밸브 달린 챔버 기구들의 계통 그림



사이에는 단순한 시스템의 연결 라인으로써 진공 장치와 연결되어 배기의 기능을 돕는다. 이 시스템의 진공 상태를 규제할 부착된 압력계들은 압력 크기의 범위만 다른 두 개가 밸브, A와 C 사이에 놓여져 있다.

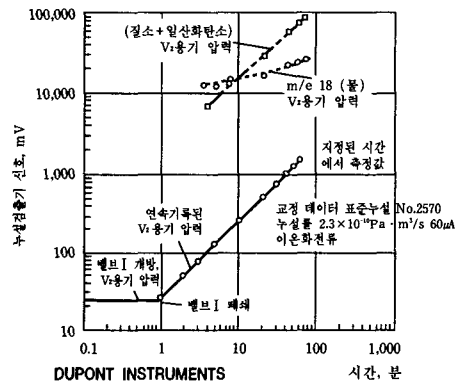
만일 시험 장치의 전체 용적과 개별 부분 용적과의 비율을 알 수 있다면, <그림 2.5>의 장치와 연결된 질량 분석계의 교정 절차는 다음과 같이 진행된다.

1. 알고 있는 압력에서 헬륨의 시료량은 작은 용적, V_{CD} 에서 일차로 그 체적이 결정된다. 그 다음에 취해진 일정량의 헬륨은 큰 용적, V_1 속으로 유입되면, 단위 용적 안에 든 헬륨의 알갱이들의 수효는 1/1,000로 희석된다.

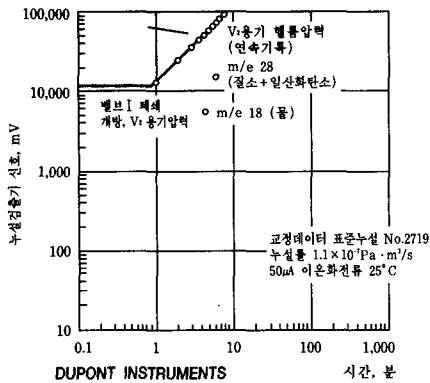
2. 용적, V_1 에서 희석된 헬륨은 다시 표준 용적, V_{EF} 로 옮겨지고, 다시 용적, V_2 로 옮겨지면, 또다시 단위 용적 속에 헬륨의 알갱이 수효는 1,000 배로 줄어든다. 이렇게 줄인 정밀한 양의 헬륨 알갱이들은 질량 분석계로 들어가면, 질량 분석계는 이것들의 수효를 셴한다. 출력 신호의 이온 전류를 <그림 2.3>의 방법처럼, 준비된 교정 직선에 헬륨량과 상관을 시킨다면, 질량 분석계 이온 전류의 세기는 바로 헬륨량으로 표시될 수 있을 것이다. 헬륨의 알갱이 수효를 처음 수준보다 1/백만으로 희석시켜야 했던 사정은 질량 분석계 쪽의 압력이 거의 진공 상태처럼 낮기 때문에 마지막 단계인 용적, V_2 안의 압력을 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (10^{-3} torr)보다 정량적으로 낮게 유지시키기 위한 번거로운 한 절차에 불과하다. 용적, V_2 에 연결된 질량 분석계는 시스템이 취한 단위 용적당 일정량의 헬륨 알갱이들을 검출할 수 있다.

위의 설명은 <그림 2.5>의 기능을 설명한 부분이다. 실제로 <그림 2.5>를 써서 표준 누설을 교정하는 절차는 다음과 같다(시험할 시스템 또는

부품들도 이장치를 써서 정밀한 누설 평가를 할 수 있다). 먼저 밸브, F는 닫혀져야 하고, 제조된 교정할 표준 누설은 오른쪽의 아래쪽, 왼편 접속구에 연결한다. 그 후에 밸브, G와 H를 열고, 기계식 펌프를 써서 적당히 배기시킨 다음, 기계식 펌프로 연결된 밸브(그림에서는 밸브 이름이 표시되지 않았음)를 막고, 밸브, I를 열어 높은 진공 펌프로써 V_2 를 포함한 그것과 연결된 라인을 배기시킨다. 질량 분석계의 출력 신호는 <그림 2.6> 그리고 <그림 2.7>과 같이 나타난다. <그림 2.6>에서 출력 신호가 점점 내려 가다가 어떤 수준에서 일정한 값을 유지하면(<그림 2.6>의 아래쪽에 있는 가로축과 평행선 참고), 그때, 밸브, I를 막고 나면, 표준 누설에서 누출되는 모든 헬륨은 용적, V_2 로 이동하여 거기에 축적되고, 질량 분석계의 출력 신호는 밸브, I를 막고 난 이후부터 경과된 시간만큼 비례로 헬륨의 압력이 올라가면서 따라 올라가는 것이 기록계에 연속적으로 기록된다(<그림 2.5>의 아래쪽에 기울기가 있는 직선의 함수로 나타남). 기록계가 기록한 출력 신호는 <그림 2.6> 그리고 <그림 2.7>로 나타난다.



<그림 2.6> 그림 2.5에서 보여준 기구를 써서 얻어진 누출률 $2.3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 인 헬륨막 표준 누설의 교정 곡선. 위 점선들은 수증기(M=18)과 질소(M=28)의 교정 곡선들이다(M=질량 단위인 몰랄 질량).



〈그림 2.7〉 그림 2.5에서 보여준 기구를 써서 얻어진 누출률 $1.1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-10}$ 인 헬륨막 누설의 교정 곡선. 아래에 나타난 것은 수증기 (M=18)와 질소 + 일산화탄소(M=28)의 점들이다.

〈그림 2.5〉에서 용적, V_2 에 들어 있던 기체 분자들은 헬륨을 제외하면, 주로 물, 질소, 탄화수소의 산화물들이 섞여져 있다. 이들 분자들은 그들 화합물의 분자량이 각각 $m/e = 18$ 과 28 이므로 헬륨 4와는 구분된다. 잔류 기체 질량 분석계를 별도로 써서 그들의 신호를 잡을 수가 있을 것이다(하지만, 이들의 신호들은 헬륨 질량 분석계로서는 잡을 수가 없다). 그것들의 신호들은 두 개의 직선과 하나의 점선을 보여준다.

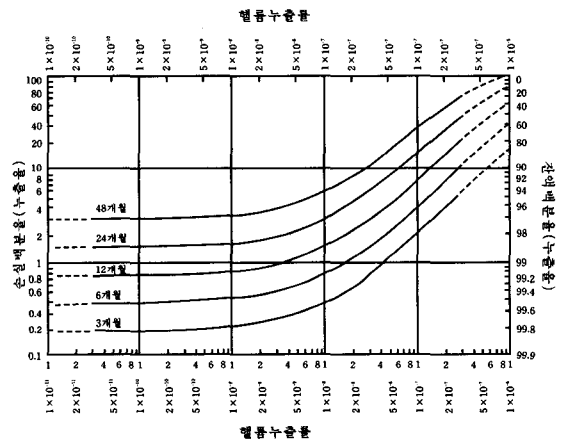
앞에서 설명한 것처럼, 〈그림 2.5〉에 있는 위의 직선과 점선은 잔류 기체 질량 분석계에 잡힌 질소와 탄화수소 산화물들의 개별 신호이고, 아래쪽의 긴 직선은 표준 누설에서 누출되는 헬륨의 신호가 된다. 이 그림에서 표준 누설의 교정 누출률은 $2.3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 이다.

〈그림 2.7〉은 〈그림 2.4〉의 장치를 써서 시험한 헬륨 막 표준 누설에 관한 교정 결과를 보여준다. 시험 절차들은 〈그림 2.6〉의 것과 같다. 〈그림 2.7〉에서는 물과 질소 분자들이 미세한 막을 통과하는 데 어려움이 있고, 〈그림 2.6〉처럼 그들의 양이 많지는 아니하므로, 백그라운드 정도의 출력

신호에 불과하다. 따라서, 〈그림 2.7〉에서 나타나는 것처럼 헬륨의 출력 신호는 경과 시간에 따라 직선으로 상승하지만, 그들의 신호들은 백그라운드 수준에서 머문다. 한 헬륨 막 표준 누설의 교정된 결과는, 시험으로 얻은 〈그림 2.7〉의 해석 결과, $1.1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 이다.

2.5 표준 헬륨 막 누설의 노화 현상

표준 누설들은 시간이 지나면 그 기능이 떨어진다. 그러므로 정기적으로 교정을 받아야 한다. 〈그림 2.8〉은 특정한 헬륨 막 표준 누설이 노화되어 누출률이 경과 시간에 따라 성능이 떨어지는 특성 곡선들을 보여준다. 그림에서 세로는 떨어지는 누출률이고, 가로는 표준 헬륨 누설의 교정된 값을 나타낸다. 그림에서 가운데 그려진 그래프에 적어 둔 월수는 마지막 교정을 하고 난 이후의 경과된 월수이고, 경과된 주기가 오렐수록 떨어질 감도의 차가 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.



〈그림 2.8〉 헬륨 막 누설의 노화로 누출률이 줄어든 그래프 표시(이 지정된 자료들은 Du Pont 기구 No.25643 표준 헬륨 누설들에 만 적용됨)

다음호에 계속해서 연재
(원고 접수일 1998. 5. 2)