

헬륨 누설 검출 기법과 교정 절차 소개(V)

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



朱昇煥*

Choo, Seung Hwan

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

이 글은 본지의 1998년 12월호에 소개되었던 "헬륨 누설 검출 기법과 교정절차 소개(I, II, III 그리고 IV)"에 이어지는 내용이다. 이번 글에서 주된 내용은 동적 누설 검사에 필요한 기초 개념들과 처리 방법 등의 설명이다.

3.4.7 동적 누설 검사의 신호 응답 시간

비록 동적 누설 검출기의 펌프 배기 속도가 평형(등식 3.7에서 누출률은 압력과 배기 속도를 곱한 것과 같은 양이므로 이들이 서로 균형을 이룬 상태)이 유지되는 시스템에서 응답의 크기를 결정할지라도, 몇 가지 다른 요소들은 그 시스템의 응답 시간에 영향을 줄 수 있다. 그들 중에서도 가장 중요한 것은 낮은 압력 경계면과 접한 챔버의 체적이다. 추적자 가스가 누출률, Q로 한 누설을 관통하여 시스템 안으로 유입되면서 시스템 안에 모여 쌓이는(축적되는) 추적자 가스의 부분 압력 비율은 등식 3.9로 나타난다.

추적자 부분 압력 변화율,

$$dP/dt = Q/V \quad \text{식 3.9}$$

여기서,

dP/dt 는 시간에 대한 추적자 가스의 특정한

압력 변화율, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$

Q는 누출률, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

V는 배기된 챔버의 체적, m^3

하지만, 만일 추적자 가스가 더 낮아진 압력

챔버에서 계속적으로 제거되게 펌프로 뽑아진다면, 질량 균형 공식의 결과는 :

질량 평형,

$$V(dP/dt) = Q - PS \quad \text{식 3.10}$$

여기서, S는 펌프의 배기 속도($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), P는 추적자 가스 압력, Pa단위이고, 나머지는 위의 설명과 같다.

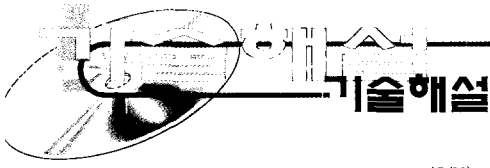
등식 3.10은 미분 방정식의 한 모습이므로, 시험 시스템에서 초기에 추적자 가스 압력이 영(0)이라는 조건을 주고, 등식 3.10을 시간에 대한 수식으로 적분하면, 등식 3.11을 얻을 수 있다.

시험 시간,

$$t = -(V/S) \ln(1 - PS/Q) \quad \text{식 3.11}$$

배기된 챔버 안에 있는 추적자 가스의 일시적인 부분 압력에 대한 관계는 등식 3.12로 바뀌 쓸 수도 있을 것이다.

추적자 가스의 부분 압력,



$$P = (Q/S)(1 - e^{-(S/V)t}) \quad \text{식 3.12}$$

누출 시간(t)을 길게 잡은 한 누출 주기 이후, 등식 3.12의 지수 함수 쪽은 영에 근접하게 되므로 등식 3.12는 간단한 등식 3.13으로 정리된다.

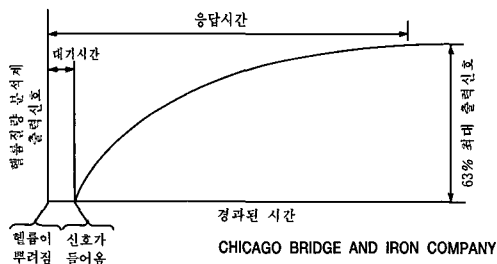
추적자 가스 평형 압력,

$$P = Q/S \quad \text{식 3.13}$$

등식 3.13을 보면, 시험 시스템에서 평형을 이룬 추적자 가스의 압력(P)은 오로지 누출률(Q)로 그의 크기를 표시한 누설의 크기 그리고 시스템의 배기 속도 등, 두 요소들에만 의존한다. 등식 3.13은 앞서 설명된 등식 3.7과도 서로 관계된다.

3.4.8 응답 시간과 세정 시간

배기 또는 진공을 시켜서 하는 누설 시험에서 검출기의 '응답 시간(response time)'과 '세정 시간(cleanup time)'은 매우 중요하다. 헬륨 질량 분석계 누설 검출기는 헬륨의 신호를 출력하기 때문에 특히 동적 누설 검사일 경우, 진공 시스템 속에 남아 있는 헬륨을 제거시키는 데 소요될 시간은 대기 시간과 응답 시간으로 구별된다.



〈그림 3.13〉 헬륨 질량 분석계에서 동적 누설 검사의 대기 시간(waiting time)과 응답 시간(response time: 시간 상수)을 보여주는 한 그래프.

〈그림 3.13〉은 헬륨 질량 분석계의 동적 누설 시험에서 대기 시간과 응답 시간의 경계를 설명

하고 있다. 〈그림 3.13〉에서 세로는 질량 분석계에 나타나는 출력 신호의 세기이고, 가로는 경과된 시간을 나타낸다. 대기 시간은 검출기의 응답 시간에 포함되지만, 검출기 신호의 발생을 저울질할 시간에는 포함시키지 않는다.

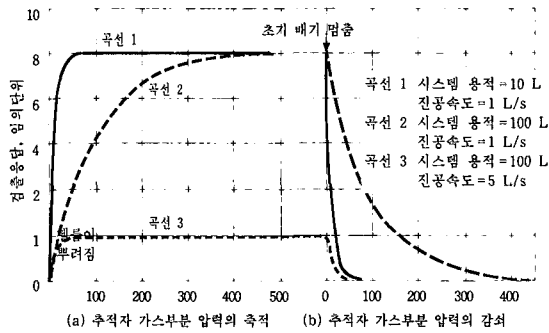
앞의 등식 3.12에서 눈여겨 볼 부분은 시간에 대한 지수 함수의 지수항에 있는 계수(V/S)의 뜻이다. 대체로 방사선, 에너지, 열, 그리고 빛 등의 세기가 시간의 한함수로 줄어들 때, 또는 더 강해질 때, 그들의 세기의 변화는 등식 3.12와 비슷한 지수 함수로 나타낼 수 있다. 우리가 잘 알고 있는 방사선의 감쇠 곡선이나 성장 곡선에서 '붕괴 상수'란 용어를 많이 쓰고 있다. 그의 뜻처럼, 동적 누설 검사에서 등식 3.12의 계수인 V/S는 배기할 용적과 배기 속도의 비율에 불과하지만, 그 시험 시스템의 압력이 줄어드는 '감쇠 상수'로 표현된다. 동적 누설 검사에서 '응답 시간(response time)'은 이 감쇠 상수와 바로 연결된다.

앞의 〈그림 3.13〉에서 응답 시간의 개념이 잘 설명되고 있다. 수량적인 것은 감쇠 계수로 결정한다. 먼저 동적 누설 검사에서 응답 시간의 정의는 '한 시스템에 부착된 질량 분석계가 낼 수 있는 출력 신호 최대 값의 63%에 도달하는 시간'으로 정한다. 대체로 동적 누설 검사에서 이 시간은 5분을 넘지 말아야 한다.

3.4.9 추적자 가스 압력 과도 현상의 그래프 표시

동적 누설 검사에서 압력 평형을 이룰 시간을 생각할 때는 항상 머리 속이 복잡해진다. 예컨대, 한 누설 검출기가 어떤 일정한 배기 속도(S)로 한 체적(V)인 시험 시스템을 배기할 수 있다면, 이 시스템의 검출 응답(detection response)

과 경과 시간의 관계는 앞의 등식 3.11 또는 등식 3.12를 써서 그래프로 나타낼 수 있다. 예컨대, 그런 관계식을 이용하면, 주어진 1 L/초의 배기 속도로 정해진 10 L 체적을 배기하는 한 시스템의 응답 그래프는 <그림 3.14>에서 '곡선 1' 과 같이 나타난다.



<그림 3.14> 동적 누출량 측정 시스템의 과도 응답 (transient response) 특성, 펌프 속도의 효과들을 보여줌.

동적 누설 검사에서 아주 중요한 개념인 '누설 신호 응답 시간 상수(leak signal response time constant)'란 용어가 있다. 이것을 줄여서 쓰면, '응답 시간 상수(response time constant)'이고, 다시 더 줄여서 쓰면, '시간 상수'인 T_c 로 표시한다. T_c 는 한 시스템에서 어떤 일정한 배기 속도(S)로 한 지정된 체적(V)을 배기할 비율, V/S 인 '감쇠 상수'와 같다. 감쇠 상수는 지정된 배기 속도의 펌프를 써서 지정된 체적인 시험 시스템을 배기할 경우는 항상 같은 값이다.

동적 누설 검사에서는 등식 3.11처럼 복잡한 수식 대신에 시간 상수를 많이 이용한다. 즉, 시험 시스템의 동적 검사에서 검출 응답을 따질 때,

'1시간 상수', '2시간 상수'.... 등으로 표현한다. <그림 3.14>에서 '곡선 1'의 '1시간 상수'는 10 초이고, 검출기의 응답은 지속될 누설 신호 진폭(ultimate leak signal amplitude)의 63%에

해당한다. 일반적으로 동적 누설 검사에서 규정된 시험 시스템일 경우, 그 시스템에서 검출기의 출력 신호의 평형이 이뤄지는 시간은 1 분 안에 달성된다. ('5시간 상수'보다는 좀 더 걸린다.)

만일 지정된 속도인, 1 L/s의 펌프 속도로 배기될 챔버가 배기시킬 100 L 크기의 지정된 체적이라면, 응답 시간은 아주 느리다. 그림 3.14의 '곡선 2'에서 보이듯이, 10 초에 단지 약 10%의 총응답 만이 관측된다. 평형 압력은 오로지 10 분 후에, 또는 '5시간 상수' 이후에야 이뤄진다. 이런 긴 응답 시간은 누출 측정에서 대개는 허용될 수 없을 것이며, 누설 위치 지정에도 쓸모가 없다. 시스템의 펌프 배기 속도를 높임으로써 응답 시간을 줄일 수는 있다. <그림 3.14>의 '곡선 3'에서는 지정된 100 L 체적을 1 L/초의 배기 속도가 아닌 5 L/초의 속도로 높여서 얻어진 그래프이다. 하지만, 이 그래프가 보여주는 누출 신호의 크기(세로)는 <그림 3.14>의 '곡선 1'과 '곡선 2'에서 나타난 크기의 20% 밖에 잡을 수가 없다. 이런 특수한 예들에서 알게 되는 사실은 초기 응답 비율들이 <그림 3.14>의 '곡선 2'와 '곡선 3'(시간이 0 점에 가까운 곡선들의 기울기) 양쪽이 서로 비슷하다는 점이다. 따라서 <그림 3.14>의 곡선들 중에서 시험 시스템의 가장 이상적인 짜붙임은 '곡선 1'을 얻는 그 시스템의 조건들이다. 그러한 좋은 조건들은 초기의 응답 비율인 기울기가 판단 기준이 될 수 있다.

3.4.10 낮은 압력 챔버의 펌프 정지 기간 압력 감소의 과도 현상

<그림 3.12>의 동적 누설 검사 의 짜붙임 절차에서 추가 보조 펌프를 써서 전체 시스템의 배기 작업에 도움이 될 수 있게 배기 속도를 높여야 할 필요성은 낮은 압력 챔버를 진공시켜야 할 경

우이다. (뒤에서 보조 펌프의 필요성을 셈으로 증명 함) 추적자 가스가 누설의 고압 쪽에서 낮은 쪽으로 누설을 꿰뚫고 이동할 때. 그렇게 할 필요가 있다. 누출이 정지될 때. 낮은 챔버에서 추적자 가스 부분 압력의 감소는 등식 3.14로 표시된다. 그리고 그 압력은 시스템의 배기 속도 (S)와 추적자 가스 압력(P) 양쪽에 비례한다.

추적자 가스 배출률,

$$dP/dt = PS/V \quad \text{식 3.14}$$

등식 3.14를 펌프 배기 시간(t)으로 적분할 때, 등식 3.15의 새로운 관계가 성립된다.

배출 펌프 배기 시간,

$$t = (V/S) \ln (P_t/P_0) \quad \text{식 3.15}$$

여기서

t는 배출 펌프의 배기 시간, 초

P₀는 t=0 에서 추적자 가스 초기의 부분 압력, Pa

P_t는 시간 t 이후, 추적자 가스의 부분 압력, Pa

배기를 시작한 펌프가 정지되기 이전과, 시간 t가 경과된 이후, 초기 추적자 가스의 부분 압력에 대한 분압(부분 압력)의 비율은 등식 3.16으로 표시된다.

펌프의 배기 시작 이후에 압력 비율,

$$P_t/P_0 = e^{-(S/V)t} \quad \text{식 3.16}$$

3.4.11 누설 검사 시스템의 응답 시간과 세정 시간의 정의

동적 누설 검사 시스템의 성능을 표현하는 또 다른 방식은 시스템의 응답 시간과 시스템의 세정

시간(cleanup time)을 표현하는 용어이다. 이들의 값들은 등식 3.11과 등식 3.12에서 설명된 시스템의 시간 상수(Tc)와 일치한다. 응답 시간은 누설 검출기가 마지막, 최대, 또는 평형 누설 신호 크기의 63.2%인 출력 누출 신호를 검출하는 데 소요되는 시간으로 정의된 적이 있었다. 세정 시간은 추적자 가스가 낮은 압력의 챔버 안으로 흐름이 정지될 때, 그 시스템에서 추적자 가스 초기 신호의 36.8%로 떨어지는데 걸리는 시간이다. <그림 3.14>에서 왼쪽 곡선들은 지정된 시험 시스템의 응답 시간에 도달하는 특성 곡선들이고, 오른쪽의 곡선들은 그 시스템 속에 이미 그 시스템의 응답 시

<표 3.1> 시간 상수, T_c = V/S 의 단위인 운전 시간 함수로서, 검출기의 응답 과도 현상과 검출기 세정 과도 현상의 여러 값들

시간상수의 분율	검출기 응답 지속 신호의 분율	검출기 세정시간 신호의 분율
0.001	0.0009	0.999
0.002	0.0019	0.998
0.003	0.0029	0.997
0.004	0.0039	0.996
0.005	0.0049	0.995
0.006	0.0059	0.994
0.007	0.0069	0.993
0.008	0.0079	0.992
0.01	0.0099	0.990
0.02	0.0198	0.980
0.03	0.0296	0.970
0.04	0.0392	0.961
0.05	0.0488	0.951
0.06	0.0582	0.942
0.07	0.0676	0.932
0.08	0.0769	0.923
0.09	0.0861	0.914
0.1	0.095	0.905
0.2	0.181	0.819
0.3	0.259	0.741
0.4	0.329	0.670
0.5	0.393	0.607
0.6	0.451	0.549
0.7	0.503	0.496
0.8	0.550	0.449
0.9	0.593	0.407
1	0.6321	0.3679
2	0.8647	0.1353
3	0.9502	0.0498
4	0.9816	0.0183
5	0.9932	0.0067
6	0.9975	0.0025
7	0.9991	0.0009
8	0.9997	0.0003
9	0.9999	0.0001
10	1.0000	<10 ⁻⁵

간에 도달된 추적자 가스의 높아진 농도를 다음 시험을 위하여 그 시스템으로부터 다시 제거시킬 세정 시간과 관계된다. 이들 신호들의 수준은 등식 3.11과 3.12에서 신호를 내는 데 걸리는 시간, $t = T_c$ 일 때, 또는 '1시간 상수'일 때 도달된다. (이들 등식들에서 $e = 2.718$, 자연 대수의 밑수, $e^{-1} = 0.368$, $(1 - e^{-1}) = 0.632$ 이다.)

〈표 3.1〉은 검출 응답 과도 현상 그리고 검출기의 세정 시간을 시간 상수, T_c 단위인 운전 시간의 함수로서 표시한 수치들이다. 〈표 3.1〉의 오른쪽은 시간 상수의 분율, 가운데는 지속 신호의 분율인 검출기 응답, 그리고 오른쪽은 시작 신호의 분율인 검출기 세정 등이다. 이 표는 이들의 관계를 쉽게 찾아 볼 수 있게 만든 조건표이다.

3.4.12 누설 검사의 편의에 영향을 줄 시스템 응답 시간과 세정 시간

만일 누설 검사에서 시험 시스템의 짧은 응답 시간과 세정 시간에 관한 기준에 적합하지 않다면, 누설 검사는 지연되고, 때로는 일이 확대되면서, 견뎌낼 수 없을 지경에 빠지고 만다. 예컨대, 용접한 한 단면적의 길이에 따라 일정한 속도로 주사(scanning)를 하면서 누설을 프로우브하고 있다고 가정하자. 〈그림 3.14〉에서 '곡선 1'과 '곡선 3'은 빠른 응답 시간과 빠른 세정 시간에 해당한다. 그 이유는 프로우브가 누설들의 옆을 한 번 지나쳐 버릴 때, 추적자 가스는 누설 검출기 시스템으로부터 신속하게 펌프로 배기되어 버리기 때문이다. 하지만 '곡선 2'에서 추적자 가스는 상당 기간 동안 검출기 시스템 안에 남는다. 누설 검출기에서 이런 느린 응답의 단점은, 작업자가 프로우브를 누설 지점으로부터 지나쳐 버리고 난 다음에야 나중에 그 누설 시험 기구가 이를 표시한다. 그 다음에 작업자는 둘째 번의 신

호가 잡힐 때까지 다시 프로우브를 뒤돌려서 천천히 추적하지 않으면 안된다. 하지만, 두 번째의 누설 지시는 첫 번의 누설 지시를 했던 추적자 가스가 누설 검출기 시스템에서 완전히 소멸해 버리기 전까지는 분명하게 구분되어 관찰될 수 없기 때문에 그 시스템은 당연히 세정을 끝내야 한다. 그러므로 누설 검출 시스템에 알맞은 세정 시간은 바로 누출이 첫 번째 마주칠 그 때의 응답 시간 만큼이나 중요한 것이다.

누설 검사의 실무에서 마주치는 누설의 크기들은 그 변화 폭이 매우 넓다. 〈그림 3.14〉에서 알 수 있듯이, 시간의 한 함수인 압력 곡선들은 그들의 모습들에 기본적인 변화는 없다. 과도 현상들인 이들의 응답 곡선들 모습 또는 기간을 결정함에 있어 중요한 요소는 펌프로 배기되는 체적과 배기 속도와의 비율, S/V 가 좌우한다. 이 비율의 역수는 동적 누설 시험 시스템의 시간 상수로도 쓰인다.

동적 누설 시험 시스템 시간 상수,

$$T_c = \frac{V}{S} \quad \text{식 3.17}$$

시간 상수인, T_c 가 지정 누설 검출 시스템에서 측정된 바 있고, 평형 응답(긴 노출 시간 후에 안정된 정상 상태의 누출 신호)을 알게 된다면, 과도 현상의 셈은 가능하고, 그리고 지정된 시험 시스템의 고유한 시험 곡선(〈그림 3.14〉의 곡선들과 비슷한)을 얻을 수 있다.

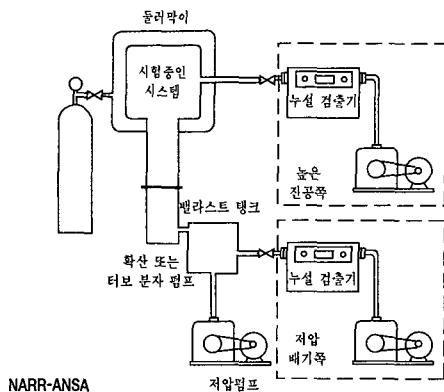
더욱 큰 누설 검사 시간 상수들은 더욱 느린 과도 현상들로 이어진다(〈그림 3.14〉에서 '곡선 2'와 같음). 만일 프로우빙이 느리고 또는 연장된다면, 더 긴 시간 상수들은 프로우브가 한 누설 쪽 위에 정지하고 있는 동안, 결국 추적자 가스 부분 압력들의 지시를 연속적으로 변화시키면서 끝난다. 한편, 시스템의 보다 더 짧은 시간 상

수는 지정된 누설의 프로우빙 완료 때, 보조 역할인 초급속 펌프가 누설 검출기 시스템 안에 있는 추적자 가스를 신속히 배기하는 동안 스캐닝(scanning)을 다시 계속할 수 있다.

3.4.13 동적 누출 측정에서 달리 선택할 수 있는 누설 검출기의 위치들

앞서 되풀이 인용된 바 있지만, <그림 3.11>과 <그림 3.12>는 동적 누출 측정에 쓰이는 펌프들에 누설 검출기를 연결한 대표적인 짜붙임의 한 예이다. 하지만 <그림 3.15>는 그들과는 달리 두 갈래로 선택할 수 있는 검출기의 위치들을 보여 준다. <그림 3.15>의 위쪽 점선 사각형 <그림 3.11>(b)의 짜붙임과 비슷한 펌프의 연결 방식이며 검사 챔버와 기계식 러핑 펌프 사이에도 누설 검출기를 연결한 경우이다. 아래쪽은 누설 검출기가 확산 펌프를 통하여 앞단 펌프 사이에 연결된다.

세정된 검사 시스템에서 최종 누설 검사 감도는 추적자 가스의 부분 압력에 대한 누설 검출기의 감도에 의하여 제한될 수 있다. 이 경우, 낮은 압력쪽(<그림 3.15>에서 아래쪽) 위에 걸리는 압력의 크기는 결국 감도의 이득과 연결된다. 하지



<그림 3.15> 배기된 시험 물체들 또는 시험 시스템들에 알맞는 누설 검출기들의 선택적 배치들.

만, 어떤 오염된 누설 검사 시스템에서, 또는 큰 누설들이 있는 곳에서 극도로 작은 누설들을 탐색할 때, 누설 시험 감도는 종종 검출기의 분해능(leak detection resolution)에 의하여 제한을 받게 된다. 이 경우, '분해능'이란 용어는 검사 시스템과 누설 검출기 시스템 속에 들어 있는 다른 기체 성분들의 백그라운드에서 지정된 추적자 가스의 부분 압력을 누설 검출기가 구별할 수 있는 능력을 뜻한다. 예컨대, 헬륨 추적자 가스를 쓰는 헬륨 질량 분석계는 지상의 일반 공기 속에 들어 있는 헬륨의 적은 양에도 반응할 수 있다. 추가로, 질량 분석계는 반드시 함께 섞인 수소 동위원소(3 u: 질량 단위 3)와 이중으로 이온화된 탄소 알갱이(6 u)등에서 질량 단위가 4(4 u)인 헬륨 이온들을 그것들로부터 분리시켜야 한다.

오염과 백그라운드 효과로 제한 받는 감도인, 앞단 압력(forepressure) 누설 검출은 추적자 가스의 신호와 백그라운드(잡음) 신호 양쪽을 증폭하게 된다.

앞단 펌프가 배치법(Batch method)으로 누설 검사 시스템에서 가스를 배기하므로 기계식 로타리 펌프의 흡입구 쪽의 압력은 유동적이다. 만일 누설 검출기가 확산 펌프의 앞단 펌프 쪽에 연결된다면, 이들 흡입구의 맥동(pulsating) 압력과 흐름량 조건들은 기계식 펌프에 곧바로 연결된 민감한 누설 검출의 잡음에 바로 연결될 수 있다. 두 개의 확산 펌프들 사이에 밸리스 탱크(ballast tank)를 설치하므로써 펌프의 유동 효과를 많이 줄어든게 할 수 있다.

3.5 헬륨 누설 검사 시스템의 운영에서 복잡한 누출률 셈의 사례들

3.5.1 헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 적절한 배치

독자는 앞의 <그림 3.15>에서 동적 누설 시험 시스템에 검출기를 짜 붙이는 두 갈래의 방식들을 살펴 본 적이 있다. <그림 3.15>에서 점선으로 표시된 펌프 배치의 선택을 적절하게 해야 할 필요가 있다.

<그림 3.16>은 크기를 잴 수 있는 체적에서 진공 누설 시험을 하기 위한 펌프의 배치를 보여준다. 검출기의 연결 위치는 <그림 3.16>(a)와 <그림 3.16>(b)의 두 갈래로 선택할 수 있다.

<그림 3.16>(a)에서 검출기는 체적, 24 m^3 인 시험 챔버에 곧바로 연결되고, 배기 속도, 10 L/s 인 한 기계식 펌프에 한 개의 밸브를 부착시켜 배기 통로를 여닫이 할 수 있게 연결되어 있다. 한편, 보조 펌프의 역할도 겸할 수 있는, 신속 배기의 기능($S = 1,000 \text{ L/s}$)을 가진 확산 펌프는 별도의 기계식 보조 펌프($S = 2.3 \text{ L/s}$)와 같이 검출기와는 다른 갈래로 그 시험 시스템을 배기할 수 있게, 밸브를 부착시켜 연결되어 있다.

<그림 3.16>(b)에서 검출기는 확산 펌프의 앞단 기계식 펌프(배기 속도 : 2.3 L/s)와 검출기 자체에 달린 기계식 펌프(배기 속도 : 10 L/s) 등으로, 두 갈래의 통로에 한 밸브를 써서 서로 병렬로 연결되어 있다.

이런 배치에서, 두 가지 중에서, 어떤 배치가 누설 검사에 적절한 것인지를 한 번 생각해 보자.

가. 먼저 그림 3.16(a)에서 추적자 가스의 신호 응답 시간은 등식 3.17을 이용한다.

$$T_c = V/S = 24,000/10 = 2,400 \text{ (초)},$$

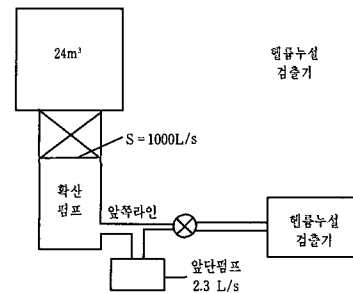
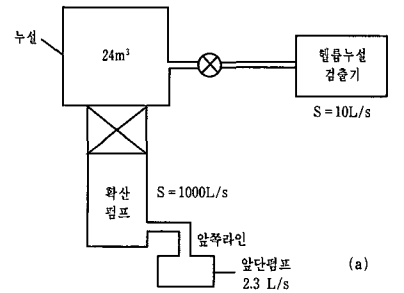
$$2,400/60 = 40 \text{ (분)}$$

동적 누설법에서 허용되는 보통의 응답 시간은 5 분을 넘지 말아야 한다.

다음으로 <그림 3.16>(a)에서 추적자 가스의 분율 효과는 확산 펌프 쪽의 배기 속도($1,000 \text{ L/}$

초) 대 검출기 쪽 배기 속도(10 L/초)이므로, 확산 펌프 쪽의 밸브가 닫힐 경우, 검출기 쪽으로 헬륨의 100% 유입될 것이지만, 동시에 열릴 경우, 확산 펌프 쪽으로 99%의 헬륨이, 그리고 검출기 쪽은 1 %의 헬륨이 이동될 것이다.

따라서 <그림 3.16>(a) 방식으로 연결된다면, 검출기의 감도는 100분지 1로 떨어지고, 응답 시간은 40 분이 걸릴 것이다.



DUPONT INSTRUMENTS (b)
<그림 3.16> 크기를 잴 수 있는 용적의 진공 누설 검사에 알맞은 펌핑 배치들. (a) 올바른 배치. (b) 올바른 배치.

나. <그림 3.16>(b)에서 추적자 가스의 신호 응답 시간은:

$$T_c = V/S = 24,000/1,000 = 24 \text{ 초}$$

추적자 가스의 흐름 분율은:

$$\text{헬륨 누설 검출기 쪽}$$

$$10/(10+2.3) = 81 \%$$

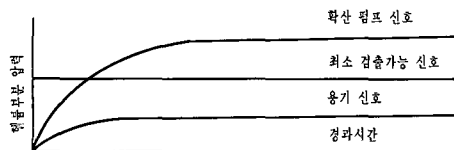
$$\text{확산 펌프의 앞단 펌프 쪽}$$

$$2.3/(10+2.3) = 19 \%$$

위의 셈으로부터 종합된 판단은 동적 누설법의 시험 시스템으로 짜붙임할 때, 검출기는 <그림 3.16>(b)처럼 배치하는 것이 올바른 선택이다.

<그림 3.16>에서 본 것처럼, 누설 시험 시스템에 검출기를 연결하는 방식에 따라 누설을 관통하여 흐르는 추적자 가스를 검출기 쪽으로 더 많이 유도시킬 수 있다.

<그림 3.17>은 확산 펌프 쪽으로 누출하는 추적자 가스를 잡아 끌 때(<그림 3.16>(b)처럼 짜붙임한 경우일 때)와 <그림 3.16>(a)처럼, 용기에 곧바로 검출기를 연결할 때, 검출기에 잡힐 헬륨의 부분 압력의 세기에 나타날 효과를 견준 그래프이다.



CHICAGO BRIDGE AND IRON COMPANY

<그림 3.17> 질량 분석계 누설 검출기를 확산 펌프의 앞단 라인에 연결하기의 효과. 확산 펌프의 앞단(위 곡선)에서 헬륨 부분 압력은 기구의 최소 검출 가능 압력(가운데 곡선)을 훨씬 초과한다.

<그림 3.16>(a)와 같이 연결한 곡선은 그림에서 용기 신호로 나타난다.

<그림 3.17>에서 세로 축은 검출기에 잡힐 헬륨의 부분 압력이고, 가로 축은 시험에서 경과된 시간이다. 가로 축과 나란히 줄쳐진 가운데 직선은 검출기의 최소 검출 가능 신호 크기의 기준선이다. 아래쪽의 선은 검출기를 용기에 곧바로 연결한 방식으로 얻을 수 있는 신호의 크기로서 최소 검출 가능 신호에 훨씬 미달한다. 위는 확산 펌프를 <그림 3.16>(b)처럼 검출기와 짜붙임으로 검출기가 잡을 수 있는 신호의 크기로서 검출기의 최소 검출 가능 기준보다 훨씬 높다.

3.5.2 누설 검출기 속으로 흐르는 기체의 질량 흐름률을 결정하기

앞의 <그림 3.16>(b)에서 누설을 관통한 추적자 가스의 대부분이 검출기를 통하여 단위 시간마다 흘러갈 기체(추적자)의 순배출량을 저울질할 필요가 있다. 이것을 우리는 검출기의 단면에서 '기체 흐름률(throughput 또는 the rate of flow of gas)'이란 용어를 쓴다. 이 용어는 설비 분야에서 많이 쓰인다. 그 용어의 일반적인 뜻은 '지정된 온도에서, 진공 시스템의 한 개방 단면을 관통하는 기체의 양, 또는 분자들의 총수효의 치수'이다.(McMaster, p.320) 누출률도 이와 비슷한 치수로서 때에 따라 '기체 질량 흐름률(ratio of the mass flow of gas)'로 일컬어지기도 한다. 지정된 온도에서 단위 시간마다 한 누설을 관통하는 분자 질량의 총수효는 유체 흐름의 한 단면으로 볼 수 있으므로, 따라서, 이것은 누설 시험 시스템의 감도이다.

보통 쓰이는 기체 흐름률의 기호는 Q이며, 단위 시간에 대한 기체의 흐름량이다. 기체 흐름률, Q의 기본 식은 다음 등식 3.19로 표현된다.

기체 흐름률,

$$Q = PV/t \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad \text{식 3.19}$$

앞에서 살펴 본 등식 3.17은 기호를 달리해서 나타내면

$$S = \frac{V}{t} \quad \text{3.18}$$

이다.

등식 3.18에서 $t = T_c$, 배기 속도는 $S = V/t$ 이므로 등식 3.19를 다시 쓰면,

$$Q = PS \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad \text{식 3.20}$$

등식 3.20에 바탕을 두고, 단위 시간에 검출기를 관통할 추적자 가스 분자들의 질량 수효, 즉, 시험 시스템 감도는 지정된 시험 시스템을 짜붙임하여 실험으로 측정할 수 있다. 관계식은 다음과 같다.

$$Q_s = Q_m(Q/Q_i) = Q_m(P/S/P_i S_i) \quad \text{식 3.21}$$

여기서

- Q_s 는 시스템의 감도, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_m 는 누설 검출기의 감도, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Q 는 시험 시스템의 질량 흐름률, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Q_i 는 누설 검출기의 질량 흐름률, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- P 는 시스템 압력, Pa
- P_i 는 누설 검출기의 감지 원소가 받는 압력, Pa
- S_i 는 누설 검출기 유효 배기 속도, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

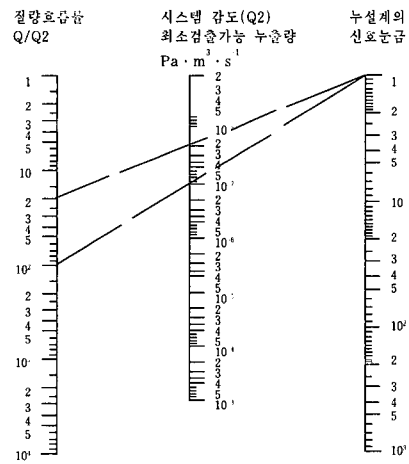
3.5.3 시험 시스템에서 헬륨 누출률의 감도를 그래프로 결정하기

<그림 3.18> 기체 질량 흐름률(O/O1)과 잣대 눈금인 헬륨 질량 분석계 출력 신호 등으로 부터 누설 검사 시스템의 감도(O_s)를 추정하는 데 쓰이는 셈그래프.

기구의 감도는 $2 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($2 \times 10^{10} \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)이다. 헬륨 추적자 가스의 농도는 100%라고 가정한다.

<그림 3.18>은 등식 3.21과 관계 있는 셈 그래프이다. 시험 시스템의 감도(최소 검출 가능 누출량) 또는 헬륨 질량 분석계의 누설 출력 신호 표시를 등식 3.21을 대신하여 해결하는 데 쓰일 수 있다. 등식 3.21을 적용하기 위하여 반드시 지정해야 할 시스템의 압력(P), 유효 배기 속도(S), 그리고 검출기 감지 원소 압력(P_i) 등은 알고 있던지 또는 추정될 수 있어야 한다. 그림

3.18은 기구의 감도를 기구의 한 눈금마다 $2 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($2 \times 10^{10} \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 그리고 100% 헬륨 추적자 가스의 농도에 바탕을 두고 있다. 이 셈 그래프로부터 얻어진 기구의 출력 신호들은 당연히 추정된 기구 감도의 다른 값들 또는 추적자 가스의 다른 농도들에 비례적으로 보정이 돼야 할 것이다.

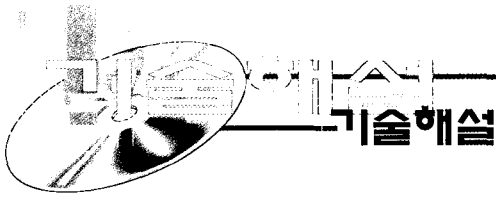


CHICAGO BRIDGE AND IRON COMPANY

<그림 3.18> 기체 질량 흐름률(O/O1)과 잣대 눈금인 헬륨 질량 분석계 출력 신호 등으로 부터 누설 검사 시스템의 감도(O_s)를 추정하는 데 쓰이는 셈 그래프. 기구의 감도는 $2 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($2 \times 10^{10} \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)이다. 헬륨 추적자 가스의 농도는 100%라고 가정한다.

진공 시스템의 유효 배기 속도(S)와 지속 압력(P) 등을 알고 있던지 또는 지정된다든지 그리고 꼭 알아야 할 시험 시스템 감도(Q_s)가 적절하게 추정될 때, 질량 흐름률(Q)은 등식 3.21을 이용하여 셈할 수 있다.

<그림 3.18>은 헬륨 질량 분석계의 누설 표시의 계기 위에 검출 가능 출력 신호를 낼 최소 누출량(시스템 감도)를 추정하기 위하여 그 이후에 쓰인다. 응답 시간은 등식 3.18을 써서 추정된다. 추정되고 규정된 시스템 감도와 응답 시간에 대한 비교 값들은 타당성 시험을 해서



확정된다.

예제 1

700 m³ (24,500 ft³)의 구형 면으로 된 진공 챔버는 시험 중에 유효 배기 속도, 20 m³·s⁻¹ (20,000 L/s)인 펌프가 달려서 그 시스템을 반드시 0.1 mPa (1 x 10⁻⁶ torr)까지 배기를 시켜야 한다. 기구의 감지 원소를 누를 압력이 약 10 mPa (1 x 10⁻⁴ torr) 이고, 추정 유효 배기 속도가 10⁻² m³·s⁻¹ (10 L/s)라고 가정할 때, 100 % 농도의 헬륨에 바탕한 이 시스템의 이론적인 감도는 얼마인가? 그 진공 펌프 시스템은 합리적인 응답 시간으로서 적절한가? 시스템 질량 흐름률, Q = (20)(10⁻⁴) = 2 x 10⁻³ Pa·m³·s⁻¹ (2 x 10⁻² std cm³·s⁻¹). 누설 검출기의 질량 흐름률, Q₁ = (10⁻²)(10⁻²) = 1 x 10⁻⁴ Pa·m³·s⁻¹ (1 x 10⁻³ std cm³·s⁻¹) 등을 이용할 것.

<해설>

등식 3.21을 써서 추정 질량 흐름률은:

$$Q/Q_1 = (2 \times 10^{-3}) / (1 \times 10^{-4}) = 20$$

최소 검출 가능 헬륨 질량 분석계의 신호를 1 눈금으로 가정할 것. 그림 3.18로부터 왼쪽 칸의 수와 오른쪽 칸의 수를 서로 직선으로 연결하여 가운데 칸의 숫자를 읽어낸다.

100 % 헬륨 농도에 바탕을 둔 시스템 감도:

$$Q_s = 2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (2 \times 10^{-7} \text{ std cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}).$$

등식 3.17로부터:

응답 시간, T_c = V/S = 700/20 = 35초 (적절 함).

유효 배기 속도와 시스템 감도를 알고 있다든지 또는 지정되어 있다든지 그리고 지정된 시스

템의 감도에 도달할 규정된 시스템 압력이 반드시 추정되어야 할 때, <그림 17>에 바탕한 시스템의 짜붙임을 하고 나서 그 시험 시스템의 질량 흐름률을 결정할 것. 그 다음에 등식 3.21 또는 <그림 3.18>을 이용하여 규정된 시스템의 압력을 추정할 것.

예제 2

300 m³ (10,500 ft³) 진공 용기는 허용할 누출률이 1 x 10⁻⁷ Pa·m³·s⁻¹ (1 x 10⁻⁶ std cm³·s⁻¹)이다. 직경이 23 cm (10 in.)인 확산 펌프의 배기 속도, 2 m³·s⁻¹로 배플없이 누설 검사에 이용되고 있다. 100% 헬륨을 이용하여 규정된 시스템의 감도를 꼭 달성해야 할 개략적인 이론 압력은 얼마인가? 이 확산 펌프는 응답 시간의 관점에서 적절한 것인가? 최소 검출 가능 헬륨 질량 분석계 신호가 검출기의 눈금 1이라고 가정할 것.

<해설>

질량 흐름률, Q/Q₁ = 100

기구의 감지 원소를 누르는 압력, P₁ = 10⁻² Pa 이고, 추정된 유효 배기 속도, S = 10⁻² m³·s⁻¹ 이다. 등식 3.21을 써서:

규정된 시스템 압력,

$$\begin{aligned} P &= (Q/Q_1)(P_1 S_1 / S) \\ &= (100)(10^{-2})(10^{-2}) / 2 \\ &= 0.005 = 5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \end{aligned}$$

등식 3.21을 써서:

응답 시간,

$$T = V/S = 300/2 = 150 \text{ 초} \quad (2.5 \text{ 분이므로 적절함})$$

(원고 접수일 1998. 9. 10)