

누설 검사의 이모저모(I)

Leak Testing

朱 昇 煥^{*1}
Choo, Seung Hwan



朱 光 泰^{*2}
Joo, Gwang Tae



이 글은 비파괴 검사의 한 분야인 누설 검사의 원리와 그 실태를 소개한 미국 기스-화학 회사의 앤더슨(G. Anderson)박사의 글을 번역한 것입니다. 우리는 산업 현장에서 비파괴 검사의 중요성을 피부로 느끼고 있습니다.

누설 검사의 구석구석을 길이 있게 소개한 원저자의 글¹⁾은, 최근 누설 검사를 국내 산업 현장에서 이용의 필요성이 급속히 증대하는 시점이기에 비파괴 검사 종사자는 물론이고, 일반 공장 관리자와 경영자들, 그리고 경제적 이득을 주장하는 모든 이들에게 흥미와 유익한 정보로서 많은 도움을 주리라 의심하지 않습니다.

원저의 글을 몇회로 나뉘어 본지에 소개합니다. 원문의 내용은 일반 독자들을 위하여 일기 쉽게 편집되어 있습니다. 하지만, 전문성 때문에 우리 글로 옮김에 많은 어려움이 있었습니다. 역자는 전문 용어들을 독자가 읽기 쉽게 풀어쓰려고 노력하였습니다.(역자)

누설 검사는 비파괴 검사의 한 분야로서, 가압되거나 감압된 부품 또는 시스템으로부터 유체(액체나 기체)가 유출 또는 유입되는 것을 검사하는 방법이다. 유체는 부품이나 조립체 내외부

압력차나 벽체를 통한 침투에 의하여 안에서 바깥으로 바깥에서 안쪽으로 관통할 수 있다. 누설 검사는 다음과 같은 각각의 절차나 복합적인 절차로 수행된다.

*1 방사선관리기술사, 공학박사(원자력공학), 한국자원연구소 자원팀사부 책임연구원, 본회 홍보위원.

*2 비파괴검사기술사, 이학박사, 고려공업검사(주) 전무이사.

1) ASM International, Metals Handbook, Ninth Edition vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality control pp. 57-70. ASM.

- 누설 위치 지정
- 누설 또는 누출 율의 결정
- 누설의 감시

누설 검사의 중요성은 점차 높아지고 있다. 그 이유는 가공품들에 관련된 보증의 가치가 증대되고, 외부의 오염에 대한 부품들과 시스템들의 감도가 끊임없이 높게 올라가기 때문이며, 환경적인 이해 관계인들이 누설 검사와 그것의 지도에 대한 추가적인 요구사항도 그 원인들중에 하나로 작용하고 있기 때문이다.

누설 검사의 대상

비파괴 검사의 다른 분야들처럼, 누설 검사는 어떤 생산품의 안전과 성능에 크게 영향을 미친다. 신뢰할 누설 검사는 재가공된 생산품들, 보증 수리들, 그리고 책임 클레임 등의 수효를 원천적으로 줄여 비용을 절감한다. 한 누설 검사를 수행하기에 알맞은 가장 보편 타당한 이유들은 다음과 같다.

- 비싼 재료들이나 에너지 손실의 방지
- 환경 오염의 방지
- 부품 또는 시스템의 신뢰도 보증

용어

다음의 용어들은 누설 검사분야에서 뜻을 정하여 쓰는 술어들이다.

- **누설(leak)** : 유체가 훑뚫고 흐르거나 또는 침투할 관통 결함 또는 통로; 누설은 단순히 결함의 한 형태를 의미한다.
- **누출(leakage)** : 누설을 훑뚫고 흘러 가고 있는 유체

- **누설 율(Leak rate)** : 주어진 조건 아래서 단위 시간마다 그 누설을 통과할 유체의 양; 적절한 표현은 단위 시간마다 양 또는 질량의 구성 단위
- **최소 검출가능 누설(minimum detectable leak)** : 검출될 수 있는 가장 작은 구멍 또는 띠엄띄엄한 통로
- **최소검출가능누설율(minimum detectable leak rate)** : 가장 적게 검출할 수 있는 유체의 흐름 율

누설 검사의 기구들에는 가장 작은 누출량에 검출 신호를 낼 수 있어야 측정될 수 있다. 이런 양은 보통 그 기구의 감도(sensitivity)를 표시하는데 쓰인다. 기구의 감도는 검사 조건들과는 독립적이긴 하지만, 이러한 기구가 어떤 검사에 쓰일 때, 그 검사의 감도는 그때의 압력, 온도, 그리고 유체 흐름의 조건들에 영향을 받는다.

누출의 측정(Measurement of Leakage)

누설은 주어진 조건 아래서 통과한 유체의 양으로 측정된다. 누출은 통과할 조건들에 따라 변하기 때문에, 누설을 규명하기 위해서는 누설에 영향을 미치는 조건들과 누설 율 양쪽을 언급할 필요가 있다. 기체의 누출은 주어진 온도, 압력 등에 따라 달라지며, 누설된 기체의 양은 그 기체량의 질량에 비례한다. 그러므로 누설 율은 시간 구성 단위마다 압력과 용적의 수치의 곱으로 나타낸다. 예컨대, 초당 토르 리터($\text{torr} \cdot \text{L s}^{-1}$), 초당 마이크로리터(L s^{-1}), 그리고 초당 대기압 세제곱미터($\text{atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$) 등이다.

압력 시스템에 따라붙는 가장 흔히 쓰는 두 개의 누출 율의 구성 단위는 초당 표준 세제곱센티

미터($\text{std cm}^3 \text{ s}^{-1}$)라는 표현과 그것과 같은 양인 초당 표준 대기 세제곱센티미터($\text{atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$)이다. 진공의 누설 검사에서는 가장 흔히 쓰는 단위로서 초당 토르 리터가 있다. 최근에 채택된 국제 단위계(SI)는 누출의 한 새로운 치수로서, 초당 파스칼 세제곱미터($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)를 쓴다. 다른 새로운 단위는 초당 몰수(mol s^{-1})이며, 그것은 다른 구성 단위에서 적용된 온도를 관련시킨 정보가 자동적으로 이 단위에 포함되는 장점을 갖는다. 이 논문에서 누설 울에 알맞게 쓰인 용어는 초당 표준 대기 세제곱센티미터($\text{atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$)이며, 표준 조건들은 1 기압 = 101.325 kPa과 온도는 273.15 K(0°C)이다. 환산 계수는:

$$\text{std cm}^3 \text{ s}^{-1} = 4.46 \times 10^{-5} \text{ mol s}^{-1} \text{ 이다.}$$

보통 채택된 다른 누설 울 단위는 기체의 흐름률이며, 1 L(0.26 gal)의 어떤 용적에서 1 mm Hg s^{-1} (40 in. Hg s^{-1})의 시간 단위마다 압력 상승을 일으키는 기체의 흐름 울이다. 이것은 루세크(lusec :초당 리터 마이크론) 단위이다. 크러세크(cluse: 초당 센티리터 마이크론) 단위는 0.01 루세크이다. 보일의 법칙($PV = K$, 여기서 P 는 압력, V 는 체적, 그리고 K 는 정수)은 이들 구성 단위를 더욱 의미있는 용적 측정 용어들로 환산할 수 있게 해준다; 이들 환산들은 압력과 체적들에 알맞은 환산에 따라 <표 1>에 나열한다.

누설의 유형(Types of Leaks)

두 개의 기본 누설 유형들이 있다: 참 누설(real leak)과 겉보기(가상) 누설(virtual leak)이다.

참 누설(real leak)은 특별히 위치가 지정된 누설이다. 즉, 유체가 흐를지도 모르는 불연속 통로

<표 1> 누설 검사와 관계된 수량들에 알맞은 환산 계수들

$\text{std cm}^3/\text{s}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ at 0°C (32°F)	$\text{torr} \cdot \text{L}/\text{s}$ at 0°C (32°F)
1	0.1	7.6×10^{-1}
1×10^{-1}	1×10^{-2}	7.6×10^{-2}
5×10^{-2}	5×10^{-3}	3.8×10^{-2}
1×10^{-2}	1×10^{-3}	7.6×10^{-3}
5×10^{-3}	5×10^{-4}	3.8×10^{-3}
1×10^{-3}	1×10^{-4}	7.6×10^{-4}
5×10^{-4}	5×10^{-5}	3.8×10^{-4}
1×10^{-4}	1×10^{-5}	7.6×10^{-5}
5×10^{-5}	5×10^{-6}	3.8×10^{-5}
1×10^{-5}	1×10^{-6}	7.6×10^{-6}
5×10^{-6}	5×10^{-7}	3.8×10^{-6}
1×10^{-6}	1×10^{-7}	7.6×10^{-7}
5×10^{-7}	5×10^{-8}	3.8×10^{-7}
1×10^{-7}	1×10^{-8}	7.6×10^{-8}
1×10^{-8}	1×10^{-9}	7.6×10^{-9}
1×10^{-9}	1×10^{-10}	7.6×10^{-10}
1×10^{-10}	1×10^{-11}	7.6×10^{-11}
1×10^{-11}	1×10^{-12}	7.6×10^{-12}
1×10^{-12}	1×10^{-13}	7.6×10^{-13}
1×10^{-13}	1×10^{-14}	7.6×10^{-14}

(원래, 구명)이다. 그러한 누설은 튜브(tube)형, 갈라진 틈형, 오리피스(orifice)형 또는 비슷한 부류를 이를 것이다. 흐름에서는 모든 누설들이 같은 것은 아니다: 누설들은 시간이 경과함에 따라 커지는 경향이 있으며, 그들은 압력과 온도의 다른 조건에서 누설 경향이 다르게 나타난다. 어떤 시스템도 가끔 확대된 장벽의 침투 때문에 누설할 수 있을지도 모른다; 이런 유형의 참 누설은 분산 누설(distributed leak)이라 불려진다. 어떤 기체

는 한 구멍을 빼뚫고 그 기체의 한 작은 부분을 흐르게 허용하는 것 보다, 더욱 만족할 만큼 더 큰 어떤 구멍들도 갖지 않는, 하나의 고체를 빼뚫고 흐를 수는 있을 것이다. 이런 과정은 그 고체를 빼뚫고 확산(diffusion)이 뒤따를 수도 있고, 그리고 흡착(absorption), 해리(dissociation), 이동(migration), 그리고 기체 분자의 탈착(desorption)과 같은 여러가지 표면 현상들이 뒤따를 수도 있다.

겉보기 누설(virtual leak)들은 표면들로부터 기체들의 점진적인 탈착, 또는 진공 시스템 안에 있는 거의 밀폐된 부품들의 표면들로부터 기체들의 탈출이 부수적으로 뒤따른다. 어떤 진공 시스템이 참 누설들과 겉보기 누설들 양쪽을 동시에 가지는 경우가 흔히 있다.

누설에서 흐름의 유형들

누설들에서 흐름의 유형들은 참과 겉보기 누설의 주된 흐름에 덧붙여 침투(permeation), 분자의 흐름(molecular flow), 전이 흐름(transitional flow), 점성 흐름(viscous flow), 층 흐름(laminar flow), 맴돌이 흐름(turbulent flow), 초우크 흐름(choked flow) 등이 일부 포함된다. 누출의 특수한 예에 해당하는 흐름의 유형은 압력 차, 기체의 유형, 그리고 그 누설의 크기와 꼴과의 어떤 함수이다. 이를 흐름의 유형들(다음 절들에서 설명되고 있는)은 파이프의 연결과 같은 부위들에서 생기며, 누설들과 비슷한 특성들을 가진다.

침 투

침투는 어떤 흐름이 한 고체의 장벽 속으로, 빼뚫고서, 그리고 바깥으로 이어지는 통로이며, 그런 고

체의 장벽은 어떤 한 구멍을 빼뚫고 통과할 전체 누출의 어떤 부분보다 만족할 만큼 더 큰 어떤 구멍들을 가질 수는 없다. 이 과정에는 한 고체를 빼뚫은 확산이 뒤를 잇고, 흡착, 해리, 이동, 그리고 탈착과 같은 다른 현상들이 뒤따를 것이다.

분자 흐름

분자 흐름은 그 기체의 평균 자유 행정(mean free path)이 그 누설의 가장 긴 단면적 치수보다 더 를 때, 일어난다. 평균 자유 행정은 한 분자가 주위의 다른 분자들과 충돌하기 전에 이동하는 평균 거리이다. 그것은 압력의 역선형 함수(inverse linear function)이다. 분자의 흐름에서 누출(흐름)은 압력 차에 비례한다. 분자의 흐름은 진공 검사에서 자주 일어나고 있다.

전이 흐름

전이 흐름은 그 기체의 평균 자유 행정이 그 누설의 단면적 치수와 거의 같을 때 일어난다. 전이 흐름에 알맞은 조건들은 층 흐름과 분자 흐름들에 알맞은 조건들 사이에 있다.(이 논문에서 “한 이상 기체의 상태 방정식”의 논의 참고)

점성 흐름

점성 흐름은 그 기체의 평균 자유 행정이 그 누설의 단면적 치수보다 더 작을 때 일어난다. 점성 흐름에서 누출(흐름)은 압력들(앞과 뒤쪽 각각)의 제곱들을 서로 뺀 차이에 비례한다. 점성 흐름은 검출 프로우빙(detector Probing)의 적용들에서 일어난다. 레이놀즈 수(Reynolds Number: Nre ; 순환 파이프 흐름에는 약 2100)의 임계 값(critical value)을 넘어선 흐름은 불안정하여, 결국 맴돌이 또는 소용돌이 흐름으로 끝난다.

층 흐름과 맴돌이 흐름

총 흐름은 그 통로 또는 오리피스(orifice)의 단면에서 그 유체의 속도 분포가 포물형일 때 일어난다. 총 흐름은 점성 흐름의 두 개의 등급 중, 하나다. 다른 하나는 맴돌이 흐름이다. 맴돌이 흐름에서 알갱이들은 매우 불규칙한 경로를 따르지만, 총 흐름에서 알갱이들은 직선에 따른다. 점성 흐름 부분은 가끔씩 총 흐름을 설명하는데 혼돈하는 경우가 있다.

초우크 흐름, 또는 음파 흐름(sonic flow)

초우크' 흐름(choked flow), 또는 음파 흐름은 어떤 형태와 배열(configuration) 조건과 압력 조건 밑에서 일어난다. 하나의 오리피스 또는 벤투리(venturi)의 꿀에 어떤 통로가 있고, 그리고 그 압력 윗흐름(upstream)이 일정하다고 가정하자. 만일 그 압력 아랫흐름(downstream)이 점차 낮아진다면, 그 목(throat) 또는 오리피스를 끼뚫는 유체의 속도는 소리 속도(음속)에 이를 때까지 올라간다. 오리피스에서 속도가 음속에 도달하는 그 시점에서 아랫흐름 압력을 “임계 압력(critical pressure)”이라 부른다. 만일 아랫흐름 압력이 이 임계 압력보다 낮아진다면, 질량 흐름의 속도가 최대에 도달한 결과로서, 오리피스에서 속도는 더 빨라질 수는 없다.

유체 동력학의 원리들

누출은 보통 유체 동력학의 분야에 속한다. 하지만, 대부분의 누설 검사 실무 규격들에서는 오로지 유체 동력학의 기본 원리들만 필수적인 것이다. 수학적 모델들은 기체 시스템을 검사하는 데 크게 도움이 되며, 다음의 논의는 그러한 시스템

들과 주로 연결된다.

일종의 이상 기체 상태 방정식(The equation of the state of an ideal gas: 즉, 완전 탄력 접 입자들로 된 기체)은:

여기서

- P는 그 기체의 절대 압력 (absolute pressure),
- V는 그 기체를 담고 있는 용기의 체적
- T는 그 기체의 절대 온도
- N는 기체의 몰수 (number of moles), 그리고
- R는 만유 기체의 상수 (universal gas constant)

상수, R은 모든(이상) 기체들에서는 일정하다;
 R의 숫자로 된 값은 P, V, 그리고 T가 결정된 구
 성 단위계의 단위들에 달려있다.

기체의 몰수, N , 는 그 기체 그램-몰의 무게로
나눈 그램 단위로 표시된 그 기체의 질량과 같다.
그램 분자 무게는 단순히 그 기체 분자 무게와 숫자로는 같은 그램 수이다. 분자의 무게와 관계없이
한 기체의 1 몰 수는 항상 $6,022 \times 10^{23}$ (아보가드로수) 개의 분자들을 담고 있다.

누설 검사에서 압력들은 대기압으로 측정된다. 국제협약에 의하여 표준 대기의 압력은 1 013 250 다인/제곱센티미터(dyne cm⁻²)이다. 이것은 대기의 공기가 980,665 cm s⁻² (32,1740 ft s⁻²)의 표준 중력 가속도 아래, 0 °C 에서, 수온주 760 mm(30 in.) 높이에서 아래로 놀리는 압력과 같다. 특히 진공 기술에서 보통 쓰는 압력의 또 다른 단위는 토르(torr)이며, 수온주의 1 mm(0.04 in.)에 해당하

는 표준 대기의 1/760 이다.(환산 계수들은 <표 1>에 나타낸다)

구성 단위의 두 가지 유용한 세트인 그 기체 상수, R의 숫자 값은:

$$R = 0.0820 \text{ atm} \cdot \text{L} / \text{mol} \cdot \text{K}$$
$$= 62.3 \text{ torr} \cdot \text{L} / \text{mol} \cdot \text{K} \dots\dots\dots(\text{식 } 2)$$

상태 방정식은 압력, 용적, 그리고 온도의 치수들과 함께 어떤 달혀있는 시스템 안에서 기체의 전체 양을 결정하는데 쓰인다. 어떤 주어진 조성인 기체 양은 분자들의 전체 수효, 기체의 전체 질량, 또는 이들에 비례하는 어떤 양의 특수한 이름(항목)으로 표현될 수 있다. 예컨대, 체적 V_1 의 한 압력 용기가 온도 T_1 에서 일정 기간 유지되며, P_1 (대기압보다 더 큰)의 압력을 준다고 가정하자. 이 기간의 끝날 쯤에서 그 압력은 P_2 로 줄어진 것을 알게 될 것이다. 만일 그 시스템의 온도가 바뀌지 않고, 그 용기 속에 담긴 그 기체의 용적도 바뀌지 아니하였다면, 줄었던 압력은 기체 손실의 결과임이 틀림이 없고, 그래서, 어떤 누설이 있다는 가정을 하게 될 것이다. 하지만, 만일 온도 T_2 가 T_1 보다 낮다면, 압력 감소는 온도가 내려간 결과임으로 그 기체의 용적에 원인이 있게 될 것이다. 만일 그 기체의 압력(P_2)이 바뀌지 않았다면, P_1 , V_1 , T_1 , V_2 , 와 T_2 가 그 관계를 만족하는 식 1에 따른다. 즉,

$$(P_1 V_1) / T_1 = (P_2 V_2) / T_2 \dots\dots(\text{식 } 3)$$

만일 $V_1 = V_2$ 라 가정하면(전 후의 용적 변화 없음), 다음 관계가 성립한다.

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2 \dots\dots\dots(\text{식 } 4)$$

따라서, P_2 가 온도 내림에 비례하여 줄어든다면, 그 시스템은 압력계와 그 시스템을 감시하기 위하여 쓰는 온도계로 인식할 수 있는 어떤 비율에서 누설이 없다는 사실을 예상할 수 있다. 만약 이들 기구의 정확도와 편차를 알고 있다면, 아무런 누설이 없음을 표시하는 고유한 최대 누설 율을 셈 할 수 있다.

만일 압력의 감소가 온도 감소의 유일한 요인인 될 수가 없다면(즉, 만일 식 4가 만족되지 않는다), 하나 또는 여러 누설들의 존재가 예상될 수 있고, 누설 율은 기체의 손실량을 셈하여 결정될 수 있다. 식 1에 적용하여 나타난 기체의 손실(물수로 나타낸)은:

$$\Delta N = N_2 - N_1$$
$$= [(P_2 / T_2) - (P_1 / T_1)](V/R) \quad (\text{식 } 5)$$

여기에서, V 는 추정된 상수이다.

만일 원한다면, ΔN 은 그 기체의 평균 그램 분자 무게로 곱하여 질량으로 환산될 수 있다. ΔN 값에다 측정들 사이 간격의 시간으로 나누어주면, 평균 누설 율이 된다. 아마도 대부분의 시스템들에서는 그 시스템의 용적이 일정하다고 가정될 것이다. 하지만, 모든 압력 용기들은 그들이 가압될 때, 얼마 정도의 체적이 늘어난다. 더욱이 그들의 용적은 열팽창 또는 열수축으로 변할 수도 있을 것이다. 누설 율의 초정밀 측정 시에는 이를 효과들을 명확히 보정하여야 한다.

어떤 주어진 누설은 압력 기울기(pressure gradient), 온도, 그리고 유체 성분에 달려있는 흐름의 여러 가지 유형들을 보일 수 있다. 그러므로 이를 변수들을 변화시킬 효과를 예상하기 위하여

존재하는 흐름의 그 유형을 확인하는 것은 아주 중요하다. 반대로, 일정한 온도, 일정한 압력, 그리고 일정한 유체 성분을 가진 그 누설의 형태와 배열(configuration)은 흐름의 유형을 결정한다. 그 누설은 갈라진 금, 어떤 구멍, 침투, 또는 이들의 조합일 수도 있을 것이므로 종종 이의 형태와 배열을 확인하기는 불가능하나, 기체들에 알맞은 흐름의 유형을 확인할 수 있는 일반 검사 지침서들이 확립되어 있다. 일반적으로 누설 율이:

10^{-6} atm $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 보다 낮으면, 분자 흐름
 $10^{-4} - 10^{-6}$ atm $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 이면, 전이 흐름
 $10^{-2} - 10^{-6}$ atm $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 이면, 충 흐름, 그리고
 10^{-2} atm $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 보다 더욱 크면, 맴돌이 흐름이다.

기체 흐름의 이들 유형들은 더욱 정확하게는 크누첸 수(Knudsen Number)로 설명된다:

여기서

N_K 는 크누첸 수

λ 는 그 기체의 평균 자유 행정

d 는 그 누설의 지름이다.

N_K 와 흐름 영역 사이 상호 관계는:

$$N_K < 0.01 \quad (\text{총 흐름, 또는 높은 영역})$$

$$0.01 \leq N_K \leq 1.00 \text{ (전이 흐름)}$$

$N_K > 1.00$ (분자 흐름)

평균 자유 행정(Mean Free Path)

여러 가지 기체들에 알맞은 평균 자유 행정 값들과 압력들은 <표 2>에 나열되어 있으며 어떤 진공 시스템에서는 평균 자유 행정이 1 인치에서 수 피트까지 변하고 있다: 평균 자유 행정이 아주 길 때, 챔버(chamber)의 표면들과의 충돌들은 분자

〈표 2〉 평균자유행정거리와 여러 가지 진공압력들

Gas	Mean free path length at indicated absolute pressure													
	1 μPa (7.5×10^{-9} torr)	1 mPa (7.5×10^{-6} torr)	1 Pa (7.5×10^{-3} torr)	1 kPa (7.5 torr)	100 kPa (750 torr) (a)	km	ft $\times 10^4$	m	ft	mm	in.	μm	μin.	nm(b)
Air	6.8	2.2	6.8	22	6.8	0.27	6.8	272		68		680		
Argon	7.2	2.4	7.2	24	7.2	0.28	7.2	290		72		720		
Carbon dioxide	4.5	1.5	4.5	15	4.5	0.18	4.5	180		45		450		
Hydrogen	12.5	4.10	12.5	41.0	12.5	0.492	12.5	500		125		1250		
Water	4.2	1.4	4.2	14	4.2	0.16	4.2	170		42		420		
Helium	19.6	6.43	19.6	64.3	19.6	0.772	19.6	784		196		1960		
Nitrogen	6.7	2.2	6.7	22	6.7	0.26	6.7	268		67		670		
Neon	14.0	4.59	14.0	45.9	14.0	0.55	14.0	560		140		1400		
Oxygen	7.2	2.4	7.2	24	7.2	0.28	7.2	290		72		720		

들끼리의 충돌보다 더욱 잣아진다. 이것은 부분적으로 어떤 기체이거나 누출이거나, 신속한 속도인 한 진공 시스템에서 구석구석까지 확산되지 않는다는 이유이다. 어떤 진공에서 기체들의 흐름은 일종의 전기 시스템에서 전류의 흐름과 비슷하다. 그 시스템에서 각 배풀(baffle) 또는 제한은 기체 확산을 막는다. 결과적으로, 만일 분자들을 반사 또는 흡착하는 그 누설과 누설 검출기 사이에 많은 임피던스(impedance)들이 걸린다면, 그 누설 검출기로 그 기체의 이동은 이론적인 확산률에 따르지 않는다. 그 대신, 그 진공 시스템의 형태와 배열에 크게 좌우된다.

진공의 수준은 항상 실제 절대 압력 표시로 설명된다. 하지만, 분자들의 평균 자유 행정 또는 그 농도는 점성도(viscosity), 열전도도(thermal conductivity), 그리고 절연 내력(dielectric strength)과 같은 진공 특성들을 규제한다. 더욱 이 몇 안되는 진공 게이지들은 실제로 압력을 측정하기는 하겠지만, 그 대신 대체로 분자들의 농도들을 측정하는 것이다. 그러므로 진공 시스템의 내용물에서 압력 용어는, 비록 쓰이고는 있다할지라도, 크게 보면 부정확한 것이다.

conductance), 그리고 절연 내력(dielectric strength)과 같은 진공 특성들을 규제한다. 더욱 이 몇 안되는 진공 게이지들은 실제로 압력을 측정하기는 하겠지만, 그 대신 대체로 분자들의 농도들을 측정하는 것이다. 그러므로 진공 시스템의 내용물에서 압력 용어는, 비록 쓰이고는 있다할지라도, 크게 보면 부정확한 것이다.

추적자 가스를 쓰지 않는 압력 시스템들의 누설 검사

누설 검사 방법들은 그 시스템에서 압력과 유체(기체 또는 액체)에 따라 나뉠 수 있다. 다음 제목들은 <표 3>에서 보여주는 일반적인 순서에 따라 보통 유체-시스템 누설 검사 방법들을 해설 한다. <표 3>은 용적 시스템들(이 논문에서 제목

<표 4> 누설검사법들의 감도 범위들

Gas systems at pressure		
Direct sensing		
Acoustic methods		
Bubble testing		
Flow detection		
Gas detection		
Smell		
Chemical reaction		
Halogen gas		
Sulfur hexafluoride		
Combustible gas		
Thermal-conductivity gages		
Infrared gas analyzers		
Mass spectrometry		
Radioisotope count		
Ionization gages		
Gas chromatography		
Quantity-loss determination		
Weighing		
Gaging differential pressure		
Liquid systems at pressure		
Unaided visual methods		
Aided visual methods		
Surface wetting		
Weight loss		
Water-soluble paper with aluminum foil		
Vacuum systems		
Manometers		
Halogen gas		
Mass spectrometry		
Ionization gages		
Thermal-conductivity gages		
Gas chromatography		

Method	Sensitivity range, cm ³ /s	
	Pressure	Vacuum
Mass spectrometer	10 ⁻³ to 10 ⁻⁵	10 ⁻³ to 10 ⁻¹⁰
Electron capture	10 ⁻⁶ to 10 ⁻¹¹	...
Colorimetric developer	1 to 10 ⁻⁸	...
Bubble test-liquid film	10 ⁻¹ to 10 ⁻⁵	10 ⁻¹ to 10 ⁻⁵
Bubble test-immersion	1 to 10 ⁻⁶	...
Hydrostatic test	1 to 10 ⁻²	...
Pressure increase	1 to 10 ⁻⁴	1 to 10 ⁻⁴
Pressure decrease/flow	1 to 10 ⁻³	...
Liquid tracer	1 to 10 ⁻⁴	1 to 10 ⁻⁴
High voltage	...	1 to 10 ⁻⁴
Halogen (heated anode)	10 ⁻¹ to 10 ⁻⁶	10 ⁻¹ to 10 ⁻⁵
Thermal conductivity(He)	1 to 10 ⁻⁵	...
Gage
Radioactive tracer	10 ⁻¹³	...
Infrared	1 to 10 ⁻⁵	...
Acoustic	1 to 10 ⁻²	1 to 10 ⁻²
Smoke tracer	1 to 10 ⁻²	...

Source : Ref 2

을 붙여 놓은)에서 쓰고 있는 방법들이 나열되어 있다. <표 4>는 누설 검사 방법의 감도들을 서로 맞견주고 있다.

내부 유체의 압력 변화를 감시하는 누설 검출은 가끔, 누설 검출 설비를 바로 손쉽게 구해 쓸 수 없을 때, 이용된다. 대개는, 그 시스템에 이미 설치된 설비들을 써서 검출할 수 있다.

소리 방법(음향법: acoustic methods)들

어떤 누설을 훠뚫는 가압된 기체의 맴돌이 흐름은 음파나 초음파 주파수들의 소리를 낸다.(그림 1) 만일 그 누설이 크다면, 아마도 귀로도 검출이 될 수 있다. 이것은 큰 누설들을 발견하는 손쉽고 빠른 한 방법이다. 음파의 방출들은 청진기나 마이크로폰과 같은 기구들로 검출된다. 그런 기구들은 한 누설의 개략적인 크기를 추산할 뿐, 위치 지정을 하기에는 기능의 한계가 있다. 그러나 전기 변환기(electric transducer)들은 검출 감도를 높여준다. 실제의 누설에서 나는 소리가 100 kHz를 넘어서는 범위일지라도, 작은 누설들은 35 - 40 kHz 범위에서 작동하는 초음파 플로우브(ultrasonic probe)들을 써서 확인할 수 있다. 초

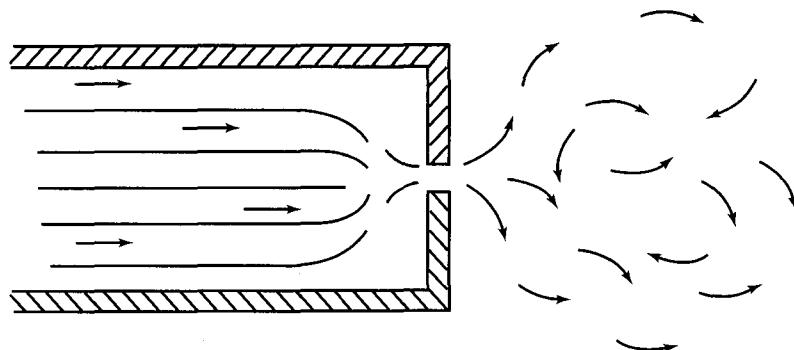
음파 검출기들은 기체 누설들을 검출해 내기에 알맞은 음파 검출기들보다는 아주 높은 감도를 가지며, 15 m(50 ft) 거리에서 35 kPa(5 psi) 압력인 0.25 mm(0.010 in.) 지름의 구멍을 훠뚫는 공기의 누설을 검출할 기능을 가지고 있다.

검출 거리, 오리피스 지름, 그리고 내부의 공기 압력 등의 기능인 초음파 누설 검출의 성능은 <그림 2>에 나타나 있다. 발생된 소리의 정도는 누설하는 기체 분자 무게의 역할수이다. 그러므로 헬륨과 같은 기체의 주어진 흐름 속도는 질소, 공기, 또는 이산화탄소와 같이 헬륨보다 더욱 무거운 기체가 같은 속도에서도 음파 에너지를 더 많이 만들어 낼 것이다.

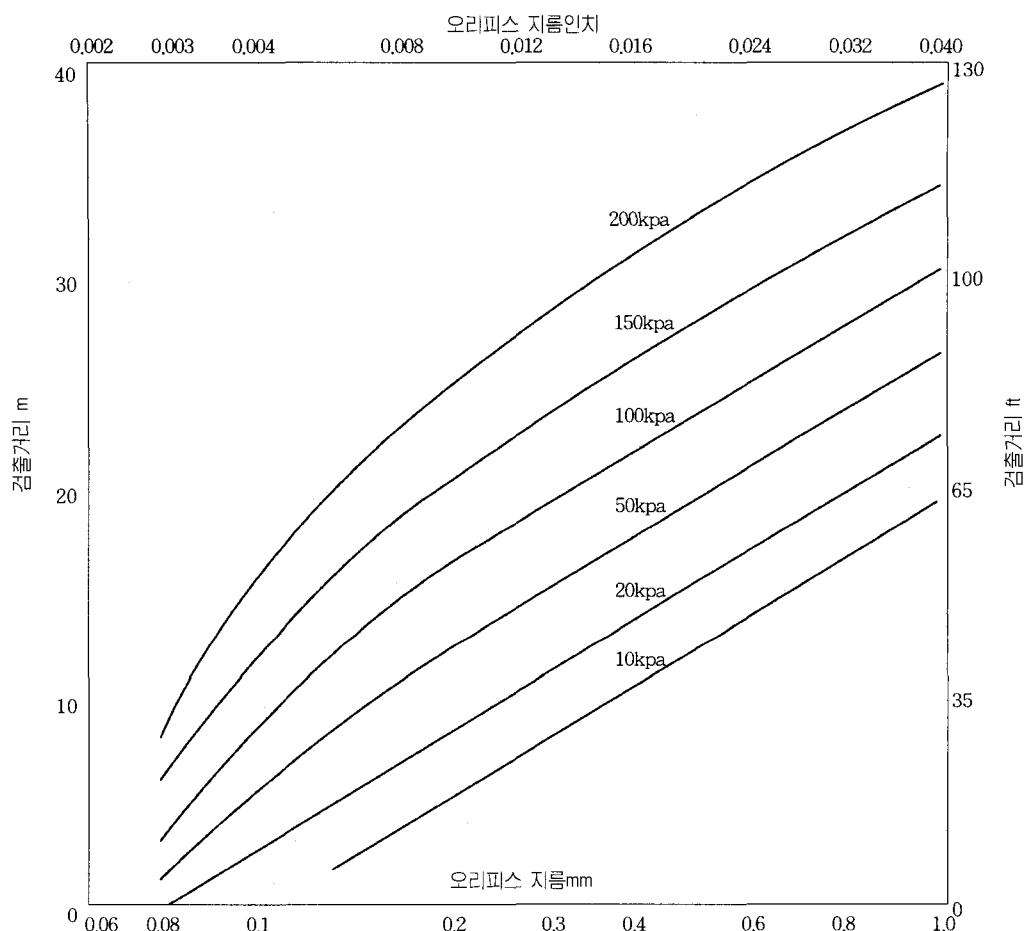
만일 백그라운드 잡음이 낮다면, 초음파 검출기들은 10^{-2} atm $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 정도의 맴돌이 기체 누설을 검출해 낼 수 있다. 한때, 검사될 그 시스템이 가압될 수 없었을 때, 초음파 발진기(ultrasonic sound generator)들을 갖춘 초음파 누설 검출기들을 잘 활용했던 적이 있다.

기포 검사(bubble testing)

누설 검사를 할 작은 용기가 어떤 기체로 가압



<그림 1> 한 오리피스(orifice)를 훠뚫은 유체 흐름이 원인이 된 맴돌이(turbulence)



(그림 2) 여러가지의 내부 공기 압력에 알맞은 초음파 누설 검출기로 하는 검출 거리에 대한 오리피스(orifice) 지름의 상호 관계.

된 경우, 간단한 한 방법은 어떤 액체에 용기를 잡기게 하여 생기는 기포들을 관찰하는 방법이다. 만일 검사 용기가 대기압으로 밀폐되어 있다면, 그 액체 위의 공기를 펌프로 배기하여 부분 진공으로, 또는 그 액체를 가열하여 압력 차 (pressure differential)를 생기게 할 수 있다. 이 검사의 감도는 그 액체 위에 작용하는 압력 줄이기, 그 액체의 밀도, 그 액체에 잠긴 깊이, 그리고 그 액체의 표면 장력(surface tension)에 의하여 압력 차는 더 벌어진다.

액침 검사(immersion testing)

기름들은 보통의 물보다 더욱 예민한 매질이다. 그러므로 뜨거운 과플루오르화탄소(perfluorocarbon)의 유효 속에서 전기 부품들을 검사하는 것이 보통이다. 그 액체 위의 공기 압력을 줄여 검사할 때, 특히, 줄인 압력이 그 액체를 그의 끓는 점으로 접근시킨다. 반드시 준수되어야 될 몇 가지 예방 조치들이 있다. 만일 그 액체가 끓기 시작한다면, 잘못 된 누설 표시가 나타나게 될 것이다. 그 검사 용기는 반드시 구석구석까지 세척되어 표면 젖

음(surface wetting)을 높여야 하고, 그것의 표면에 기포의 밀착을 방지해야 하며, 그리고 그 유체가 오염되는 것을 방지해야 한다. 만일 물을 이용한다면, 반드시 종류 또는 탈염수되어야 하며, 당연히 최소 한도의 출렁거림으로 취급해서 흡착할 기체의 양을 줄여야 할 것이다. 관습적으로 적은 양의 젖음 시약(습윤제)을 물에 타서 표면 장력을 줄인다. 적정한 습윤제(wetting agent)가 들어간 물은 기름보다 더욱 민감할 수도 있다. 물-바탕 계면 활성제 용액(water-base surfactant solution)은 10^{-6} atm $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 만큼이나 작은 누설들을 검출하는데 쓸 수 있다.

액침 검사는 그 검사 액체로 손상 받지 않을 어린 내부적으로 가압된 품목 검사에 쓰일 수 있다. 비록 이 검사는 상대적으로 민감하긴 해도, 앞에서 밝힌 바와 같이 액침 검사는 큰 누설들을 검출하기 위한 한 예비 시험으로 더 자주 쓰인다. 이 방법은 값싸고, 낮은 감도 검사에도 기술이 거의 필요가 없으며, 한 검사자가 어떤 누설을 정확하

게 위치 지정을 할 수 있게 한다.

기포 용액(bubble solution)

어떤 가압된 용기가 너무 크다든지 또는 넓게 잡기 게 할 수 없는 표면에 적용될 수 있다. 하지만, 아무런 기포도 그 과정 자체에서 생겨나서는 안된다. 기포 용액을 표면에 뿌리지 말고 표면 위에 발라야 할 것이다. 주의한다면, 감도를 약 10^{-5} atm $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 까지는 가능하고, 숙련되지 않은 작업자에게는 그 감도가 10^{-3} atm $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$, 또는 비누나 물이 쓰인다면, 10^{-2} atm $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 로 떨어질 수도 있을 것이다.

액침 검사처럼, 기포 용액들을 사용하는 것은 값싸며, 검사자의 집중 훈련도 할 필요가 없다. 그 검사는 작업자가 한 누설의 크기를 규칙적으로 정확하게 결정하지 못하는 것이 단점이기도 하다. (다음호에 계속)

본 원고를 세심하게 검토해 주신 한국원자력안전기술원 강석철 박사님께 감사를 드립니다.

(원고 접수일 1997. 5. 6)