

## 누설 검사의 이모저모(Ⅱ)

### Leak Testing (Ⅱ)



朱昇煥<sup>\*1</sup>  
Choo, Seung Hwan



朱光泰<sup>\*2</sup>  
Joo, Gwang Tae

이 글은 전호에 이어 누설 검사의 원리와 그 실태를 소개한 미국 가스-화학 회사의 앤더슨(G. Anderson)의 글을 번역한 내용입니다. (역자)

#### 흐름 검출(Flow Detection)

흐름 검출은 검출기의 제목아래 종종 다음 세 가지 방법들로 분류된다.

- 압력 올리기(가압)
- 압력 내리기(감압)
- 흐름

이들의 적합한 감도는 각각 다르며, 셋 중의 어떤 한 방법을 언제나 다른 한 방법으로 대신할 순 없다. 작은 덕트(duct) 외에는 내부적으로 가압된 보다 작은 용기 또는 시스템이 밀봉된 더

큰 용기 속에 둘러막혀 놓여져 있다면, 검사되는 그 작은 용기에서 새는 누출은 결국 더 큰 둘러막힌 용기 속에 압력을 올리게 된다. 그리고 그 기체는 부착된 그 덕트를 통하여 흐를 것이다.

만일 기체의 이동 또는 흐름에 민감한 어떤 기기가 거기에 부착된 덕트에 설치되어 있다면, 일종의 누설 표시기로 활용될 수 있다. 극히 민감한 양변위 유량계(positive-displacement flowmeter) 들은 이런 목적에 알맞게 개발된 것이다.

선택적으로는, 움직이는 피스톤이 달린 원통으로 구성된 용적 변위 미터기(volumetric displacement meter)가 쓰인다. 둘러싸인 용기에서 덕트로 부착되었을 때, 그 피스톤은 둘러싸인 용

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

\*2 비파괴검사기술사, 이학박사, 고려공업검사(주) 전무이사.

기의 압력이 올라갈 때, 움직여서 효과적으로 그 용기의 용적을 크게 하고 거기의 내부 압력을 주위의 대기압(atmospheric pressure)으로 돌려 놓는다.

그 피스톤은 반드시 마찰력(frictional drag)이 거의 없어야 되며, 수평으로 그것의 움직임은 정확해야 한다. 민감한 용적 변위 미터기들은 마이크로 케디트미터기(micrometric cathetmeter)로 장착되어야 한다. 케디트미터기는 그 피스톤의 아주 적은 변위들을 정확히 측정할 수 있다.

어떤 용적 변위 미터기들은 약  $10^{-4}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>를 검출할 수 있다. 이것은 검사 중인 용기의 압력 변화를 직접 측정하기가 불편할 때, 이용하는 아주 간편한 방법이다.

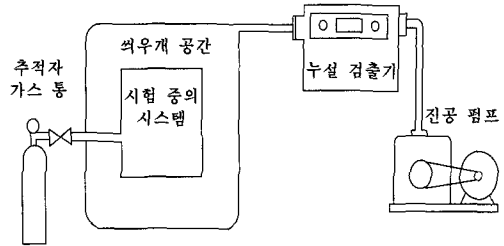
가장 단순한 누설 검출 그리고 측정 방법은 기포 튜브이다. 만일 밖이 둘러싸인 용기로부터 그 덕트의 끝이 액체 욕조로 흘러들면, 식별할 수 있는 누출은 기포를 일으킨다. 아주 작은 누설 율이라도 그 튜브 안에서 액체 메니스커스(liquid meniscus)의 이동으로 간단하게 검출될 수 있다.

### 특수 기체 검출기들을 이용하는 압력 시스템들의 누설 검사

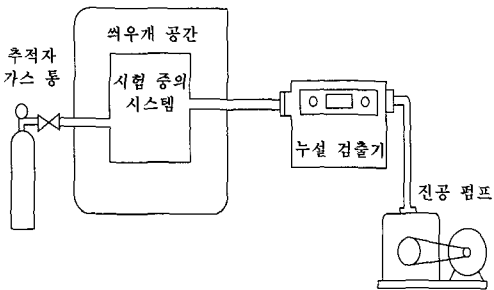
많은 수의 누설 검출기들의 유형들은 특수 기체 아니면, 어떤 지정된 물리적 화학적 성질을 가진 한 그룹의 기체들과 반응한다. 추적자 가스(tracer gas)들의 이용에 따르는 누설 율 측정 기법들은 다음 두 가지로 분류된다.

- 정적 누설 검사(static leak testing)
- 동적 누설 검사(dynamic leak testing)

(a) 작은 부품들의 누설 검사에 알맞는 가압된 시스템 방식



(b) 대규모 용적 시스템의 누설 검사에 알맞는 가압된 씰우개 공간 (envelope) 방식.



<그림 3> 진공 펌핑을 이용한 동적 누설 검사 기법들에 쓰인 누설 측정의 방식들.

정적 누설 검사에서, 추적자 가스가 누설하여 속에서 쌓여지는 챔버는 밀봉되어 있으므로 쌓여진 가스들은 펌핑(pumping)으로 제거할 수 없게 된다(검사 중에는 펌핑하지 아니함). 동적 누설 검사에서는 추적자 가스가 새어 들어갈 챔버는 누설 검출기를 통하여 누설하는 추적자 가스를 계속적으로 또는 간헐적으로 끌어내기 위하여 펌프로 배기된다<그림 3(a)>. 누설 율 측정 절차는 우선 검사 중인 전체 시스템 속 또는 주위<그림 3(b)>에 추적자 가스를 들어 보내고, 그 시스템 경계를 가로질러 압력 차이는 추적자 가스를 써서 압력 경계의 한쪽을 가압하든가 아니면, 다른 쪽을 배기하므로써 완성된다. 압력 경계의 낮은 압력 쪽에 추적자 가스의 농도를 측정하여 그

누설 율을 결정한다.

### 지정-기체 검출 기기들

다음에는 일상적으로 많이 쓰는 기체 검출기들이 설명된다. 이들의 범위는 단순한 감각기관 의 이용에서부터, 질량 분석계나 가스 분석기와 같은 복잡한 기구에 이르기까지 다양하다.

#### 후감을 거쳐 냄새 검출(Odor Via Olfaction)

냄새를 맡을 수 있는 큰 누설들은 사람의 후각으로 당연히 감지될 것이다. 후각 신경들은 아주 민감하고, 비록 특별하게 누설 위치의 지정에 만능은 아닐지라도, 그들은 강력한 냄새들이 있음을 결정할 수 있다. 하지만, 후각 신경들은 아주 빨리 지치게 되고, 만일 그 누출이 곧바로 확인되지 않는다면, 아마도 검출될 수 없을 것이다.

#### 색 변화(Color Change)

화학적 반응 검사에는 민감한 용액 또는 기체의 수단을 써서 한 용기 내부에서 나오는 기체 누수(seepage)를 검출한다.

#### 암모니아 색 변화 법 (Ammonia color change method)

암모니아 색 변화 법 (Ammonia color change method)은 가장 잘 알려져 있는 방법 중의 하나이다. 이 방법은 용기 표면을 세척한 후 열량계 현상액(calorimetric developer)을 용기의 표면에 칠하여 탄성 피막을 형성하게 되는데 검사 후에는 쉽게 떼어 낼 수 있다.

현상액은 분명히 유체이고 스프레이 건(spray gun)으로 뿌렸을 때, 빠르게 정착되어 금속의 표

면에 잘 달라붙어 연속 피막을 이룬다. 일종의 공기- 암모니아 혼합체(보통 암모니아 1~5% NH<sub>3</sub> 정도)를 건조 용기 속에 집어 넣는다. 갈라진 틈을 거친 기체의 누출은 그 지시계(피막)의 색을 변화시킨다. 이 방법의 감도는 암모니아의 농도, 공기-암모니아 혼합체에 누르는 압력, 그리고 현상 시간 등으로 조절될 수 있다.

#### 지시 테이프(Indicator tape)

지시 테이프(Indicator tape)들은 용접된 부분들의 누설 검사에 쓸만하다. 이런 응용에 알맞게 쓰이는 방법은 다음과 같다. 검사되는 연결부의 표면을 용제로써 세척하고 난 다음, 지시 테이프는 용접이나 고무 용액 또는 플라스틱 필름을 써서 고정시킨다. 1~10% NH<sub>3</sub> 인 일종의 암모니아-공기 혼합체의 검사용 기체는 초과 압력을 이용하여 용기 속으로 들어 보낸다. 만일 마이크로 크기의 갈라진 곳이 있다면, 기체는 밖으로 누설되어 지시기와 화학적으로 반응하여 테이프 뒤에 분명하게 볼 수 있는 색채 반점들을 이루게 된다.

표시 테이프 방식은 다음과 같은 장점을 가지고 있다:

- 원격 조절이 가능하여 작업자들의 안전을 보장한다.
- 보통  $10^{-7}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 까지의 누설들을 검출할 수 있다.
- 테이프 색은 손에 닿아도, 그리고 높은 습도나 오랜 시간 경과에도 영향을 받지 않는다.
- 테이프들은 어떤 때는, 한번 이상 쓸 수도 있다. 만일 암모니아 작용으로 반점들이 생겼다면, 그들은 건조 압축 공기로 그 테이프를 불

어서 제거시키면 된다.

### 암모니아와 염산 반응(Ammonia and Hydrochloric Acid Reaction)

다른 하나의 방법은 암모니아 가스로 용기를 가압하고 나서 용기의 겉표면에 염산의 병을 열고 누설을 찾는 방법이다. 누설된 암모니아가 염산 증기와 접촉할 때, 염화암모니움 침전물인 흰색의 얇은 안개를 일으키게 된다. 염화수소 증기와 암모니아 가스 양쪽의 유독한 성질 때문에 시험체 주위는 반드시 환기가 잘 되어야만 한다.

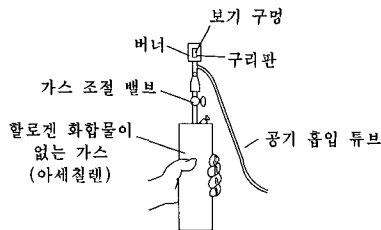
### 암모니아와 이산화황 반응

#### (Ammonia and Sulfur Dioxide Reaction)

암모니아의 화학적 지시 검사의 또 다른 변형은 황화암모니움의 흰 얇은 안개를 이루는 암모니아와 이산화황을 이용하는 방법도 있다. 이산화황은 염화수소처럼 자극 또는 부식을 일으키지는 않지만 여전히 유독한 기체이고, 당연히 잘 환기된 구역에서 이용해야 할 것이다.

### 할로젠 화합물 토치(Halide Torch)

화학반응 검사의 다른 유형으로써 상품인 화합물 토치가 아직도 이용되고 있다. 그것은 한



〈그림 4〉 누설 위치 지정에 쓰이는 할로젠 화합물의 토치(halide torch).

기체 탱크와 동합금판(그림 4)으로 구성되어 있다. 연소 가스는 동합금판을 가열시킨다: 할로젠 가스가 있는 곳에서 불꽃의 색은 할로젠화구리가 생기므로 변한다.(불꽃은 실험실용 튜빙 길이의 프로우브를 통해 기체를 흡입하는데 쓰이기도 한다). 할로젠 화합물 토치는  $10^{-3} \text{ atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$  만큼 작은 누설들을 위치 지정한다.

### 할로젠-다이오우드 검사

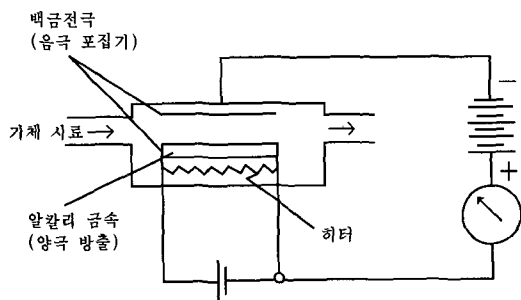
#### (Halogen-Diode Testing)

할로젠-다이오우드 검사에서 일종의 누설 검출기는 염소(Cl), 플루오르(F), 브롬(Br) 또는 요드(I)를 포함하고 있는 대부분의 기체들에 반응하는 것을 쓰고 있다. 그러므로 이들 할로젠 화합물 기체들 중의 한원소가 추적자 가스로 된다. 어떤 용기를 추적자 가스 또는 할로젠 화합물과 공기 또는 질소와 섞인 어떤 혼합체와 같은 것들을 써서 가압했을 때, 누설 검출기의 스톱프 프로우브(sniffing probe)는 누설의 위치를 지정한다.

누설 검출기의 감지 요소(그림 5)는 뜨거운 열판으로부터 한 포집기까지 이온 방출의 원리로 작동된다. 양성 이온 방출은 존재하는 할로젠 화합물 기체들의 농도 증가로 올라간다. 이런 이온 전류는 전기 누설 신호를 주어 증폭된다. 대기압에서 작동하는 할로젠 검출기들의 감도는 약  $10^{-6} \text{ atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$  이지만, 감도는 쓰이고 있는 지정된 가스에 달려있다.

할로젠 누설 검출기들의 몇 가지 다른 유형들은 손쉽게 구입할 수 있다. 각각은 일종의 제어 장치와 프로우브로 구성되며, 공기는 프로우브를 통해 약  $4.9 \times 10^5 \text{ mm}^3 \text{ min}^{-1}$  ( $30 \text{ in. min}^{-1}$ ) 속도로 빠져나간다. 어떤 추적자 가스로 가압된

하나의 둘러막이(enclose)로부터 누설들을 찾을 때, 프로우브 끝은 연결 부위들을 지나 의심나는 누설을 찾아낸다. 프로우브 끝은 움직일 때, 당연히 시험되는 금속 표면에 가볍게 닿게 된다. 강제된 환기로 공기 중에 할로겐 증기를 없애는 환기 장치가 가동되는 장소에서는, 실제 검사를 하는 동안은 환기 장치를 정지시켜야 하고, 또는 섯바람이 그 시험 프로우브에서 이동하는 가스를 흩어지게 하지 못 하도록 반드시 주의를 기울여야 한다. 프로우브가 어떤 누설 위로 또는 접근하여 지날 때, 그 추적자 가스는 공기와 같이 그리고 감지 요소를 통해서 프로우브 속으로 이끌리게 되고, 거기서 검출된다. 누설 신호는 들을 수 있거나 아니면 눈으로 확인된다.



<그림 5> 검출 프로우브(detector probe) 시스템으로 대기압에서 누설 지점에 알맞게 쓰는 열-양극 할로겐 누설 검출기의 감지 요소 모식도. 가열된 알칼리 전극으로부터 양-이온 전류가 냉매 가스와 다른 할로겐화된 탄화수소 추적자가스들에 반응한다.

이런 프로우브 탐사에는 어떤 예방 조치들이 필수적이다. 프로우브가 너무 빠르면 결국 작은 누설들을 놓치게 된다. 이런 실수를 피하기 위하여 그 프로우브가 움직이는 속도는 반드시 최소의 누설 허용 값(minimum leak tolerance)에

비례해야 한다. 일년마다 0.001kg(.004 oz) 정도의 허용 누설에 알맞는 어떤 용기를 검사할 때, 적절한 이동 속도는  $25\sim 50 \text{ mm s}^{-1}$  (1 - 2 in.  $\text{s}^{-1}$ ) 이거나, 더욱 작은 누설들에 알맞는 프로우브 속도는 당연히  $13 \text{ mm s}^{-1}$  (1/2 in.  $\text{s}^{-1}$ ) 로 줄어져야 할 것이다.

### 육플루오르화 검출기들

#### (Sulfur hexafluoride detectors)

육플루오르화 검출기들은 전자 포획 검출기(electron-capture detector)의 원리로 작동된다. 그 원리는 가스 크로마토그래피(gas chromatography)의 분야에서 폭 넓게 쓰인다. 일종의 육플루오르화 검출기의 감지 챔버는 중심에 프로우브를 얹힌 원통형 셀(cell)로 구성된다. 그 셀의 안쪽 벽은 방사성 원소인 트리튬(10 기가배크렐: GBg, 또는 트리튬 300 밀리퀴리: mCi) 피막으로 되어 있다. 트리튬에서 방출된 낮은 에너지의 전자들은 그 프로우브와 셀의 벽체 사이에 유지되는 한쪽 방향으로 작용하는 전압에 의하여 중심 프로우브에 포집된다. 그 결과인 전류는 증폭되고, 편리한 미터기 위에 표시된다. 누설 감도는  $10^{-8} \text{ mL s}^{-1}$  ( $3 \times 10^{-10} \text{ oz s}^{-1}$ ) 이고, 농도의 감도는  $10^{10}$  분의 공기에 1 부분인 육플루오르화이다. 그 설비는 간편한 휴대용이다.

순수 질소(산소 없는)는 검출기를 꿰뚫고 통과하며, 고유 전류는 미터기 눈금 위의 주어진 위치에 영(0)으로 조절하여 고정된다. 육플루오르화과 같은 일종의 전자 포획 화합물이 그 셀로 들어올 때, 전류를 만들 전자들은 육플루오르화에 포획되어 결국 고정 전류의 감소로 끝난다. 그 고정 전류는 미터기의 기움으로 표시된다. 이 미터의 눈금은 그 셀 크기의 개략적인 표시 값

이다. 산소 분자도, 비록 육플루오르화물보다는 낮은 해도, 전자 포획 특성을 가지고 있다. 이런 까닭에 검사 기간 동안 산소 없는 질소로 기구를 청소하기에 알맞은 설비도 필요하다.

### 연소-기체 검출기 (Combustible-gas detector)

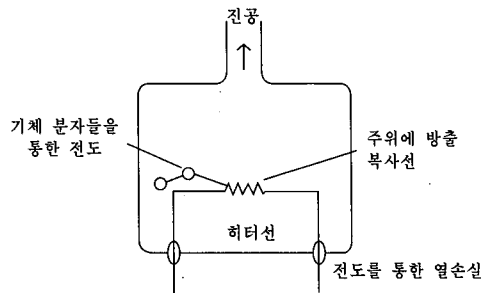
연소-기체 검출기는 종종 가연성 연무들이 건물 바닥에서 쌓이기 쉬운 장소에 감지거나 또는 누설 지시기로 쓰이고 있다. 이런 기구들은 위험 농도 수준의 훨씬 아래에서 가연성 기체의 혼합체를 측정할 수 있기 때문에 잠재적인 위험 조건들을 경고한다. 촉매적 가연성 기체 기구들은 폭발 한도의 낮은 백분비(폭발 한계에 훨씬 못 미친)로서 기체 농도를 측정한다. 가열된 촉매 요소들의 온도는 가연성 기체의 존재로 올라간다. 한 촉매 비이드(catalytic bead)의 최소 감도는 약 500 ppm 이며, 누설 율로서는 보통  $10^{-3} \text{ atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$  이다. 그러므로, 누설 지시기들처럼, 촉매 요소들은 만족할 만큼 민감하지 않다. 어떤 가연성 기체를 지정하기 위하여 반도체 소자 또는 불꽃 이온화 검출기가 당연히 이용될 것이다. 이들 감지기들은  $10^{-5} \text{ atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$  인 누설을 검출할 수 있다.

### 열전도율 게이지(Thermal-Conductivity Gage)들

기체의 열 전도율은 열-선 브리지법으로 측정될 수 있다(그림 6). 보통 얇은 선 또는 필라멘트인 일종의 저항 요소는 전기로 가열되어 그 기체에 노출된다. 전선의 저항 때문에 그 온도는, 만일 전원의 입력이 일정하게 유지된다면, 둘러싼 기체의 열 전도율에 좌우된다. 선택적으로 그 선의 온도(그리고 저항)는 일정한 값에서

유지될 수 있고, 필요한 전원의 입력은 직접적이 아니면, 간접적으로 가해진 전압 또는 전류의 지시로 측정된다. 많은 유형들인 열 전도율 검출기들은 상용으로 구입할 수 있다.

시차 검출기(differential detector)들은 단순 피라니-형 게이지(simple Pirani-type detector)들, 수소 피라니 게이지(hydrogen Pirani gage)들, 활성탄 피라니 게이지(charcoal Pirani gage)들, 그리고 열전대 게이지(thermocouple gage)들이 있다.



〈그림 6〉 한 피라니-형 검출기(Pirani-type detector)를 이용한 어떤 열전도율 게이지의 모식도. 전류로 가열된 저항 전선으로부터 오는 열의 손실들은 기체 분자들 가까이에서 열전도율에 의하여 변한다. 열 손실들은 가스 압력이 낮아지므로써 줄어든다.

### 피라니-형 검출기들

피라니-형 검출기들이 쓰일 때, 탐색할 기체는 당연히 낮은 밀도, 낮은 점성, 그리고 낮은 분자 무게를 지녀야 할 것이다. 중요한 점은 그 기체의 열 전도율은 당연히 공기의 열 전도율보다는 뚜렷이 차이가 있어 할 것이다.

시험될 부품 또는 구조는 압력이 높아지도록 추적자 가스로 채운다. 이 가스는 가장 작은 누설이라도 꿰뚫고 계속적으로 달아날 것이다. 바람직한 물리적인 특성들은 위에서 말한 대로이다.

달아나는 기체는 작은 흡입 펌프를 써서 누설 검출기의 좁은 구멍인 프로브 안으로 끌어들이는다. 그 시료는 전기로 가열된 필라멘트인 감지 헤드(head) 안으로 퍼지게 한다. 동시에 순수 공기의 한 시료는 같은 펌프에 의하여 또 하나의 동일한 챔버 안으로 이끌리고 그 챔버 안에는 가열된 필라멘트가 있다. 두 필라멘트들은 편리한 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge) 회로의 두 축을 이루며, 초기에는 양쪽 축들이 동시에 공기에 노출되는 동안 외부의 가변 저항으로 균형을 잡는다. 한 축이 헬륨 기체와 같은 추적자 가스의 흔적을 담은 시료를 받아 들일 때, 공기보다는 헬륨의 열 전도율이 실제로는 아주 크므로 큰 비율로 열이 추출된다. 이것은 그 필라멘트의 저항에 동일한 변화를 주게 되며, 그래서 휘스톤 브리지 회로의 균형을 깨뜨린다. 이것은 영점 보정 밀리암미터기(centerzero milliammeter) 위에 한 적절한 기울림(de-flection)으로 나타난다; 동시에 음향 경보 회로(audio alarm circuit)가 열리게 된다.

#### 적외선 기체 분석기(Infrared gas analyzer)

적외선 기체 분석기(Infrared gas analyzer)들은 적외선 스펙트럼(spectrum) 영역에서 일종의 선명한 흡수 띠(absorption band)를 갖는 한 기체 혼합체를 동일 기체인 순수 표준 시료의 흡수 특성과 견주어 검출할 수가 있다. 쓰이는 추적자 가스는 반드시 적외선 영역에서 어떤 강력한 흡수 특성을 가지고 있어야 한다. 아산화질소(nitrous oxide)는 이런 특성이 뚜렷하다. 알려진 특성은 한 열원이 견주려는 기체들을 담고 있는 두 개의 흡수관을 꿰뚫고 방출되게 허용하여 측정할 수 있는 응답으로 환산된다. 이런

튜브들은 옆쪽에 금속판으로 짜여진 전기 콘덴서를 이룬 얇은 금속제 격막으로 분리되고 있다. 만일 그 시스템이 균형을 이루면(즉, 같은 기체가 각 튜브 안에 있다면), 열 효과는 같고, 격막 위에 아무런 압력 차이가 일어나지 않는다. 하지만, 만일 한 튜브가 공기와 혼합된 아산화질소를 담고 있다면, 열의 흡수는 순수한 공기를 담고 있는 튜브와는 달리 아주 크게 일어날 것이다. 이것은 온도가 올라간 결과로서, 그 격막의 한쪽에 더욱 높은 압력을 일으킬 것이며, 설치된 판과의 관계로 미약하기는 하겠지만, 그 판을 움직이게 할 것이다. 그 콘덴서의 결과적인 용량 변화는 전기적으로 증폭되어 출력 미터기 위에서 식별할 수 있게 된다.

적외선 흡광(infrared absorption)은 또한 메탄과 같은 탄화수소들의 작은 농도를 측정하는데 아주 민감한 방식이다. 적외선 레이저들은 독성과 불타기 쉬운 기체들의 변화에 알맞는 감시기로 흔하게 쓰이고 있다. 아마도 어떤 화합물들에서, 적외선 레이저 분광학(infrared laser spectroscopy)은 1 조 분의 1 부분인 기체를 검출할 수 있을 것이다.

#### 질량 분석계 검사(Mass Spectrometer Testing)

질량 분석계는 기본적으로 전하를 가진 입자들을 선별하기에 알맞는 하나의 장치다. 시료 기체는 분석관으로 들어가 그 곳에서 그 기체 분자들이 필라멘트에서 튀겨 나오는 전자들의 흐름과 충돌하게 된다. 충돌한 분자들은 그들의 일부 전자들을 잃고, 플러스 이온들이 되며, 그들은 분석관 속에 장치된 정전압(차등전압)에 의하여 가속을 받아 속도가 높아진다. 분석관은 자력장(magnetic field)에서 이온의 경로와는 수

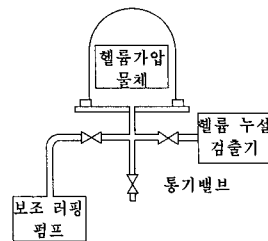
적으로 놓이고, 이온들은 그들의 질량에 따라 곡선 경로를 따라 엄격하게 이동한다. 이들 경로들의 반경은 이온의 질량, 초기 가속도의 크기, 그리고 자력장의 강도로 정해진다. 정해진 자력장으로 같은 질량인 어떤 그룹 이온들이 이온 포집기를 때리기에 필요한 지정된 어떤 반경을 이동하게 할 수 있다. 그 이온들의 플러스 하전들은 조건이 충족되면, 표적, 또는 포집기에 전해지게 되며, 그 결과인 전류는 특정 질량인 이온들의 양에 비례한다.

지정된 질량 분석계들은 잔류 가스 분석기들, 부분 압력 분석기들, 그리고 헬륨 질량 분석계들처럼 구입이 가능하며, 어떤 범위인 원자 질량 단위에서만 반응하도록 고정시켜 놓았다. 헬륨 질량 분석계는 특수하게 제작된 것이므로 주사(scan)할 수는 없고, 오직 헬륨 위치에 고정되어 헬륨만 검출된다. 그 검출기를 통과하는 모든 다른 종류의 분자들은 헬륨과는 질량 그리고 운동량이 서로 다르기 때문에 표적 물질 또는 포집기를 벗어나 버린다.

헬륨 질량 분석계의 이론적인 감도는 약  $10^{-12}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 이다. 잔류 가스 분석계의 감도는 약 열 배나 작다. 일반분석용 질량 분석계들은 이보다는 낮은 감도이며, 그 기구가 설계된 원자 질량 단위의 범위에 따라 좌우된다. 하지만, 헬륨 질량 분석계는 대규모 시스템에서 대개  $10^{-8}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 보다 더 작은 누설들을 검출해 내지는 못 할 것이다. 백그라운드, 선별된 기체들의 방출, 잡음, 침투, 그리고 또 다른 요인들 때문에 최소 검출 감도는  $10^{-8} - 10^{-9}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 범위이다.

질량 분석계들은 어떤 진공계 안에서 동작되기 때문에 그들은 진공 시스템들의 누설 검사에

적합한 이상형이다. 그들도 검출 프로우브나 아니면, 질량 분석계로 감시하는 동안 누출을 포집하기 위한 둘러막이를 이용하여, 어떤 추적자 가스로 가압된 검사 시스템과 보조를 맞추게 될 수 있다. 어떤 압력 시스템을 검사하는데 쓰일 때, 질량 분석계는 더욱 낮은 감도이며, 최소 검출 가능 누설 율은 대개  $10^{-4}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 정도이다. 검출 프로우브와 기구의 매니폴드 흡입구(manifold inlet) 사이에 놓인 한 펌프와 침투 격막(permeation membrane)을 갖는 특수한 조립체들은 응답 시간을 올리면서 압력 시스템들의 검출기 프로우브에 알맞는 감도를  $10^{-6}$  atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 까지 올릴 수 있다. 밀봉된 전자 부품들 또는 핵연료 체(nuclear fuel element)들과 같은 작은 유닛들(units)은 가끔 추적자 가스로 내부에 가압된다: 누출은 배기된 종꼴 용기(bell jar)에 이들 유닛들을 놓고 질량 분석계로 기체의 방출을 감시하여 검출된다(그림 7). 일반적으로, 질량 분석계 누설 검사에 쓰이는 기초 방법은 검출 프로브(스니퍼) 검사, 둘러싸기 검사(encapsulation), 추적자 프로우브 검사(tracer probe testing), 후드 검사(hood testing), 종꼴 용기 검사(bell jar testing), 모아



<그림 7> 한 종형 용기(bell jar) 안에 헬륨 추적자 가스를 써서 내부적으로 가압 밀봉된 부품들의 누설 검사 모식도.



쌓음 검사(accumulation), 압력 진공 검사 (pressure vacuum testing), 그리고 시차 흡수 (differential sorption) 검사를 일부 포함시킨다.

**방사성동위원소(Radioisotope) 검사**

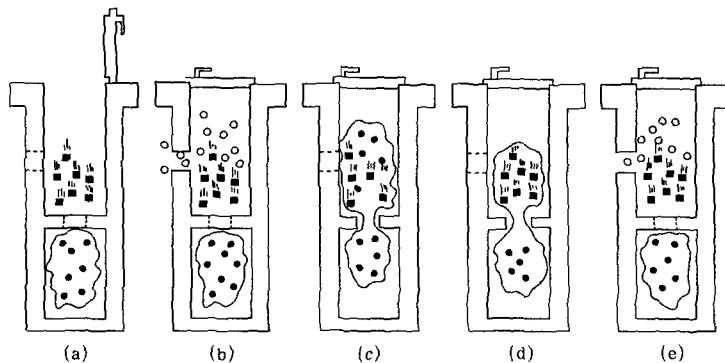
많은 누설 검사 기법들 중에서는 방사성 추적자들을 담고 있는 용액을 일부 포함시킨 기법들이 개발된 적이 있다. 비록 탄화수소들이 석유 산업들에서 집중적으로 쓰이고 있음에도 불구하고, 물은 이런 시험들에서 가장 보편적으로 쓰이는 액체이다. 방사성동위원소들을 담고 있는 가용성 염(soluble salt)들과 화합물들이 액체에 첨가된다. 물에 탈 수 있는 가장 적절한 동위원소들 중의 하나는 나트륨-24(<sup>24</sup>Na)이다. 그 방사성동위원소의 이용은 누설들의 검출에 요구되는 농도가 음용수 허용 값(drinking tolerance)보다 낮기 때문에 안전하다. 더욱이 이 방사성동위원소는 짧은 수명(반감기 15 시간)이고, 방사능 붕괴로 그의 농도가 아주 낮아질 때까지 검사 용기 속에 담아 놓을 수 있다.

이 방법의 이용에서 검사 용기는 방사성 중탄산염나트륨 용액(sodium bicarbonate solution)으로 채워 규격 입증 시험(code proof test)에

서 요구되는 수준으로 가압된다. 그 용기는 짧은 기간 압력을 유지시킨 후에, 배수하여 신선한 물로 깨끗이 씻어낸다. 감마선 검출기를 이용하여 그 용기 속에서 누설 주변에 쌓여 있는 방사성 중탄산염나트륨으로부터 방출되는 감마선의 존재로 누설들이 검출된다.

또 다른 방법에서는 작은 부품들이 한 챔버 속에 놓고, 크립톤-85(<sup>85</sup>Kr)으로 뒤채운(back-filled) 다음 크립톤-85로 가압한다<그림 8>. 만일 부품에 누설이 있다면, 가스는 그 속으로 들어가서 채워진다. 뒤채우기(backfilling)가 끝난 후에 그 부품들은 공기로 세척하고, 누출은 방사선 계측기로 측정된다. 주의 깊게 조절된 조건 밑에서, 방사선 계측기의 감도는 약 10<sup>-12</sup> atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이다. 방사선 계측기는 자동으로 작동하고 그리고 빠르며, 마이크로 집적회로들과 같은 작은 부품들의 민감한 대량의 검사를 가능케 한다.

이 방법의 한 가지 단점이란, 그 부품들에 칠해진 유기물 피막들은 크립톤-85를 흡수할 수도 있어 잘못된 누설 표시가 될 수도 있다는 점이다. 이 방법의 첫째가는 단점은 부수적인 건강 장애이다. 하지만, 파이프라인과 같은 어떤 가압된 시스템의 누설들의 검사에 도움이 된다.



<그림 8> 용접으로 밀봉된 전자 부품들의 <sup>85</sup>Kr 추적자 가스 포격에서 비탕 단계의 모식도

### 이온화 게이지 검사(Ionization Gage Testing)

필립스 진공 게이지는 어떤 자력장 안에서 어떤 기체 방출의 세기로서 기체 압력을 측정하는데 쓴다. 하지만, 이런 꼴의 기체 방출은 기체 압력이 거의  $0.13 \text{ Pa}(10^{-3} \text{ 토르})$  압력으로 줄어들 때 멈춘다. 그러므로 필립스 게이지는 낮은 압력을 측정하는데 쓸 수는 없다.

### 페닝 게이지(Penning Gage)

필립스 게이지와 같은 원리에 바탕을 두긴 하였지만, 페닝 게이지는 더욱 낮은 압력에서 쓸만한 게이지이다. 그의 구조는 하나의 원통 유리 재킷 안에 둘러막힌 두 개의 평행 원형 금속 디스크들(음극과 양극으로서 작용하는)로 된 한 시스템을 그 전극 시스템으로 바꾼 것이다. 그 유리 튜브를 감싼 영구 자석의 극 집전 장치들(pole shoes) 사이에 거리를 가능하면 짧게 유지하려고, 그 튜브는 짧아진 그 점에서 죄어졌다. 이 개량된 기구를 페닝 게이지라 부르고, 그의 감도는 원래의 필립스 게이지 보다 약 10 배 이상이나 크다. 페닝 게이지는  $13 \sim 0.13 \text{ mPa}(10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ 토르})$  압력 범위를 측정할 수 있으며, 아마도  $13 \mu\text{Pa}(10^{-7} \text{ 토르})$  압력에도 알맞게 쓰일 수 있다.

어떤 페닝 설비에서 진공 게이지도 누설들을 검출 지정하는데 쓸 수 있다. 이것은 그 장치의 각 부분에 추적자 가스로 대기의 공기를 대체함으로써 할 수 있다. 누설이 있을 때 추적자 가스는 안으로 흐르고 그 게이지는 보통 어떤 변화 압력에 대항하여 저항한다.

### 기타의 이온화 검출기(Ionization Detector)들

필립스와 페닝 게이지들에 덧붙여 포함되는

다른 이온화 검출기들은 산소 누설 검출기(oxygen-leak detector), 열 필라멘트 이온화 검출기(hot-filament ionization gage), 헬륨 이온화 누설 검출기(helium-ionization leak detector), 측광 누설 검출기(photometric leak detector), 그리고 팔라듐 방벽 검출기(palladium-barrier leak detector) 등이다.

### 가스 크로마토 그래프(Gas chromatograph)

가스 크로마토 그래프들은 가끔 누설 검출에 알맞게 쓰인다. 가스 크로마토 그래프에서 운반 가스는 흡착 원형 기둥을 통해 흐르게 되어 있다. 그 다음에 추적자 가스는 흡착 원형 기둥의 머리에 운반 가스로 주입된다. 다음에 가스 시료는 그 속에서 분별(분리되어 갈라짐)된다. 그 성분들은 그들이 흡착 원형 기둥을 떠날 때 검출된다. 보통 열 전도성 기구들을 써서 검출되지만, 그들은 적외선 분석기나 증기 밀도 저울로도 검출할 수 있다. 가스 크로마토 그래프의 장점은 질량 분석계와는 달리 적절한 보정으로 개별 분자들보다는 오히려 일종의 화합물과 같은 추적자 가스를 식별해 낸다. 만일 그 시스템에 몇 가지의 가스들이 들어 있다면, 가스 크로마토 그래프가 유리 할 수 있다. 그들의 식별은 종종 누설의 근원을 지정하는데 도움이 된다. 잔류 가스 분석기들과 부분 압력 분석기들은 같은 방식으로 이용된다.

### 지정 가스 검출기의 응용들

#### (Specific-Gas Detector Applications)

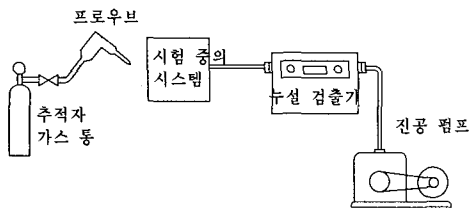
어떤 지정된 가스 검출기를 이용하기에 알맞는 적절한 방법은 누설 검출기의 기능, 누설하고

있는 유체, 그리고 검사되고 있는 용기의 유형에 바탕을 두고 있다. 누설 검출기들을 이용하는 가장 좋은 방법을 결정함에 있어, 더욱 중요한 고려 점들은 다음에 논의한다.

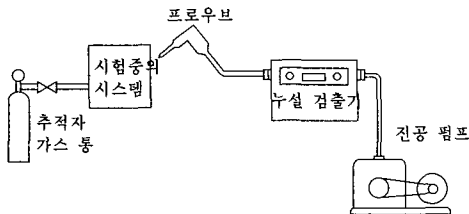
**프로우빙(Probing)**

가스들의 어떤 수효에 반응할 검출 프로우브들은 두 개의 방식들 중에서 하나가 이용될 수 있다. 첫째는 주사 방식(scanning mode)이고, 둘째는 가압된 부품 주위에 놓인 한 둘러막이(enclosure)에 대한 감시이다.<그림 9>

(a) 추적자 프로우브



(b) 검출기 프로우브



<그림 9> 민감한 전자 기구들을 가지고 누설들의 위치를 지정하는데 쓰는 추적자-가스 검출 기법들.

**검출 프로우브 기법 (Detector Probe Technique)**

검출 프로우브 방식에서 가압된 용기의 외부 표면은 달린 짧은 프로우브인 휴대용 검출기나 아니면, 고정 누설 검출기에 유연성 튜빙으로 연결된 긴 프로우브를 이용하여 주사된다 <그림 10>.

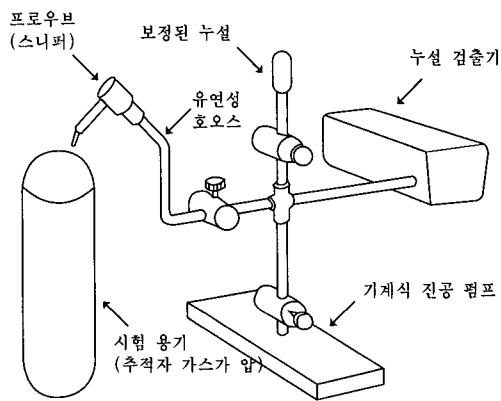
일반적으로 자리잡힌 검출기에 한 긴 프로우브의 연결은 감도를 떨어뜨리게 하는데, 그 이유

는 프로우브 튜빙에서 흡수된 가스들의 낮은 방출 때문이고, 결국 일종의 높은 백그라운드 읽기로 끝난다. 그 가스가 감지 요소까지 흐르게 하기 위하여 조화되게 긴 시간이 요구되기 때문에 그 노출의 지점을 정확하게 지적하기는 어렵다. 또한 추적자 가스의 긴 프로우브 시스템을 세정하는데 요구되는 긴 시간의 소비는 바람직하지 않다. 세정은 오히려 더 큰 누설에 부딪혀서 그 프로우브 튜빙이 추적자 가스의 높은 농도로 채워질 때 일어난다. 누설 검출기는 일본 또는 더 많은 시간 동안, 감지 요소로부터 추적자 가스를 세정하기 위하여 알맞은 펌프질이 요구될 지도 모른다. 이것은 주사 속도를 줄이기로써 해결된다. 긴 프로우브 방법의 어떤 단점을 차감할 하나의 수단이 있다. 일종의 헬륨 질량 분석계가 이용될 때, 이산화탄소는 끝에 가까운 프로우브 라인 속으로 유입된다. 그 이산화탄소는 헬륨의 운반 유체로서 활동하며, 튜브의 벽체들, 그리고 높은 용량 펌프와 연결되고, 헬륨 추적자 가스를 누설 검출기로 아주 빠르게 운반한다. 그 이산화탄소는 그 다음에 헬륨을 남긴 채 선택적으로 액체 질소에 트랩(trap)된다. 이런 형식의 한 프로우브는 보통의 프로우브들 보다 수배나 더 빠르게 쌓여져 있는 백그라운드를 줄인다.

백그라운드의 축적과 감도에 차질이 일어날 때, 누설률의 정확한 측정을 달성하기는 어렵다. 하지만, 누설 율 측정은 그 누설-검출기-튜브-프로우브 시스템을 보정하는 일종의 보정 누설기를 그 프로우브 끝의 위에 놓음으로써 가능하다. 그 누출은 그때에 그 프로우브 위에다 한 흡입 컵(suction cup)을 올려 놓고, 그것을 그 누설 부위에 대고서 측정할 수 있다.

다른, 더 최근의, 긴 프로우브 방법의 단점을

줄이기의 수단은 그 프로우브와 질량 분석계 매니폴드(manifold) 분출구 사이에 한 조립체의 이용이며, 그 조립체는 고정 격막과 펌프가 달려 있다. 그 펌프는 응답 시간을 줄이며, 고정 격막은 질량 분석계 속에 압력이 떨어짐을 줄여, 들어오는 추적자를 모이게 하기도 하며, 그래서 감도를 올린다.



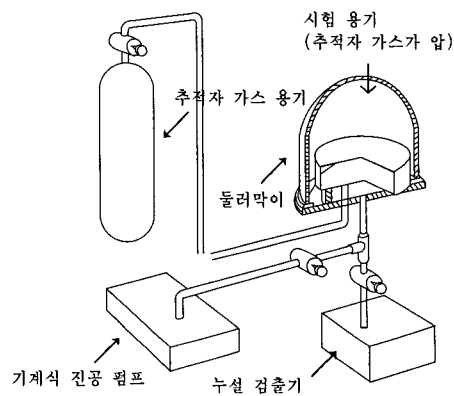
〈그림 10〉 한 가압된 용기의 외부 표면을 주사하기에 알맞는 어떤 자리잡은 누설 검출기에 한 유연성 호오스로 연결시킨 한 긴 검출기 프로우브를 보여주는 모식도.

긴 프로우브 방법의 또 다른 단점은 검사자가 일반적으로 누설 검출기를 관찰할 수 없다는 점이다. 이것은 이어폰들, 식별 표식들, 그리고 빛들로 우회해서 할 수는 있겠으나, 그 같은 기기들은 바라는 누설 크기에 일치하지 않을 수도 있을 어떤 검출기 응답의 문턱 수준에서 꼭 작동된다. 다른 사람이 누설 검출기를 읽어 감시하는 동안 한 사람은 그 프로우브를 운전할 수 있겠으나, 이상적인 작업조건이라면, 한 사람이 양쪽 일을 동시에 수행할 수 있어야 함은 당연하다.

#### 검출 프로우브 집적 기법

#### (Detector Probe Accumulation)

두 번째의 검출 프로우빙 방법은 어떤 추적자 가스 누설 검출기를 이용하여 누출을 집적한 둘러막이(enclosure)를 감시하는 방법이다 〈그림 11〉. 이 방법은 그 누설의 위치 지정의 수단은 아니지만, 누출 측정과 어떤 누설의 존재를 검출



〈그림 11〉 추적자 가스로 가압된 한 용기 주위에 놓인 한 둘러막이를 감시하기로써 누설들을 검출하는 배열 모식도.

하기 위하여 여러 응용분야에서 쓰인다.

대규모 유닛은 하나의 플라스틱 백 안에 그것을 둘러막이로 막아서 시험될 수 있다. 그 백 속에 추적자 가스의 집적은 짧은 프로우브 또는 파이프로 그 백과 연결된 어떤 누설 검출기로 감시된다. 누출 측정은 그 둘러막이 속으로 교정된 누설계를 끼워 넣어서 그 교정된 누설 울과 검사 누설 울을 견주게 구성되어 있다. 이 방법에 뒤따른 문제점들 중의 하나는 누설이 없고 그리고 추적자 가스에 대항하여 낮은 침투성을 가지는 한 백의 구조인 것이다.

작은 유닛은 어떤 밀폐된 종골 용기와 같은 일종의 둘러막이 안에 프로우브를 놓아 검사될

수 있다. 종꼴 용기는 추적자 가스의 집적에 알맞게 감시된다. 쓰인 누설 검사 기구의 모습에 따라 그 둘러막이는 어떤 진공 중에 놓이게 할 수 있다. 만일 상대적으로 큰 누설들이 예상된다면, 검사 유닛의 내부 추적자 가스의 농도와 그 누설을 가로질러 압력 강하가 일정하다는 사실을 보증하기 위하여 추적자 가스의 공급기는 반드시 검사 유닛에 연결되어야 한다.

**배압하기(Back Pressuring)**

배압하기는 압력 검사의 한 방법이며, 보통은 집적회로들, 릴레이들, 그리고 트랜지스터들과 같은 작은 부품들의 검사에 쓰인다. 이 방법에서는 그 시험 유닛이 한 추적자 가스로 채워진 가압된 용기 안에 놓여, 거기에 있을 지도 모르는 어떤 누설들을 꿰뚫고, 그 추적자 가스가 그 유닛 속에 흐르게 내버려둘 어떤 시간 동안 유지시킨다.

배압하기를 이용함에 있어, 누설하는 부품들이 추적자 가스를 담고 있다는 사실을 반드시 주의하여 확인 해야한다. 그러므로 배압하기와 누설 검사 사이에 그 시간이 적절하게 조절되는 것은 중요하다. 예컨대, 트랜지스터들에 알맞는 한 검사 시방서에서 그 트랜지스터들은 16 시간 동안 690 kPa(100 psi)의 헬륨 압력을 받게 되고, 4 분 동안 공기로 씻어 낸 그 다음에, 누설은 3 시간 안에 검사받게 되어 있었다. 만일 누설 검사 전에 3 시간이 이미 경과해 버렸다면, 그 트랜지스터들은 다시 가압되어야 했을 것이다. 만일 얼마나 많은 추적자 가스가 배압 중에 그 부품 속으로 흘러간 것인지 알고 싶다면, 다음의 수식으로 추산할 수 있다:

$$P_i = \frac{(1 - e^{-AT})}{V} \dots\dots\dots(\text{식 7})$$

여기서

$P_i$ 은 부품(공기에서) 안쪽에 추적자 가스의 부분 압력

$P_0$ 은 부품(공기에서)을 둘러싼 추적자 가스의 압력

A는 1기압의 압력 차이로 된 그 누설의 전도율(atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

V는 그 부품의 내부 자유 용적(세제곱 미터) 그리고

T 는  $P_0$  압력이 적용된 그 시간(초)이다.

누설들은 일반적으로 아주 작기 때문에, 반드시 매우 민감한 추적자-검출기의 여러 조합들을 이용해야 한다. 보통으로 이용되는 추적자 가스는 헬륨 또는 <sup>85</sup>Kr이고, 검출은 각각에 대응하는 헬륨 질량 분석계 또는 핵 방사선 검출기를 쓴다. 그 누설의 절대 크기 값은 가끔 배압하기(back pressuring)로 측정하기는 어렵다. 그 이유는:

- 추적자 가스의 부착과 흡착
- 다른 누설 방향들에 알맞은 다른 검출기 응답 시간들

복합적인 시스템들을 검사할 때, 다른 한 추적자 가스로서 각각의 밀폐 부품을 가압할 수 있다. 일종의 잔류 가스 분석기를 가지고 하는 누설 검출은 누출과, 아마도 누설하고 있는 부품들의 어떤 선별, 양쪽을 검출해 낸다. (다음호에 계속)

본 원고를 세심하게 검토해 주신 한국원자력안전기술원 강석철 박사님과 한국자원연구소 이강인 박사님 두 분께 감사를 드립니다.

(원고 접수일 1997. 6. 23)