

# 헬륨 질량 분석법 소개(I)

Introduction to HELIUM Mass Spectrometry(I)



朱 昇 煥\*  
Choo, Seung Hwan

- ..... 헬륨 그리고 누설 검사
- ..... 누설 검출기의 개발
- ..... 누설 검출기의 이용 분야
- ..... 누설 검출기의 유입 또는 누출되는 물질들
- ..... 누설 검출기
- ..... 누설 검출을 위한 분석계
- ..... 헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 구조

## 요약

누설 검출기들 중에서 검출 감도가 가장 민감한 것은 '헬륨 양이온 질량 분석계 누설 검출기(줄인 이름, '헬륨 누설 검출기')'이다. 이 글은 헬륨 누설 검출기의 주요 부분을 이루고 있는 질량 분석계의 측정 원리를 요약하여 소개한 것이다.

누설 검사의 항목들은 검사의 필요에 따라 대개 시험 물체에서 누설의 크기와 시험 방법을 바탕으로 하여 대규모 누설, 총량 누설, 소규모 누설 그리고 미세 누설 등으로 나뉘어지며, 미세 누설들은 누설 검출기의 최소 검출 가능 누출률이  $10^{-8}$  std  $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$  보다 작은 범위에 있는 것들로서, 그들의 누설 시험은 헬륨 누설 검출기를 써서 하게 된다.

따라서, 헬륨 누설 검출기의 심장은 바로 질량 분석계이며, 질량 분석계의 원리를 이해하는 것은 곧, 헬륨 누설 검출기를 다루는 기술의 바탕을 다지는 것이라고 말할 수 있을 것이다.

여기서는 헬륨 질량 분석계의 원리를 쉽게 풀이하고, 그런 검출기를 써서 누설 검사를 하는 데 바탕이 될 모습들을 함께 요약한다.

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



## 누설, 누출 그리고 누설 검사

'누설(leak)'이란 말은 보통 사람들에게는 낯선 낱말이 될 수도 있을 것이다. 그와 비슷한 말로는 우리가 흔히 쓰고 있는 '누수'란 낱말이 있다. 수도관이나 또는 물을 담아놓은 그릇 등에서 물이 새고 있는 것을 뜻한다. '누(漏)'는 물 시계에서 떨어지는 물을 일컫는다. 아무튼, 우리 선조들이 써 온 말들 중에는 '누'와 '물(水)'을 같이 연결하여 쓴 것들이 많은 편이다.

'집에서 새는 바가지가 들에서도 샌다'는 속담을 우리는 자주 듣게 된다. 그 말 마디에는 '누설'의 뜻이 간명하게 표현되어 있다. 비록 그 속담의 뜻은, 어떤 사람의 못 된 버릇이 때와 장소를 가리지 아니하고 나타난다는 의미를 담고 있긴 하지만, 짧은 글귀에서 두 번씩이나 되풀이된 '샌다'는 낱말은 어떤 물건에 구멍이 뚫려 있어 담겨진 물질이 밖으로 빠져 나가고 있는 상태를 말한다. 여기서 바가지에 구멍이 이미 나 있는 상태가 곧 누설(leak)인 것이다. 그리고 '샌다'는 동사는 누설을 꿰뚫고 빠져 나가는 유체(기체나 액체) 흐름의 상태를 나타내는 것이므로 누설과는 달리 '누출(leakage)'이라 정하여 쓰고 있다. 정리하면, '누설'은 물체의 한 결함인 단순한 구멍 또는 약한 부분이 재료 또는 물체에 이미 나 있는 상태이며, 어떤 내외부의 상황(둘러싼 주변의 온도와 압력)에 따라서는 용기에 담긴 또는 담길 물질이 셀 수 있게 된 구조적인 결함이다. 그리고 '누출'은 물질이 어떤 누설들을 빠져나가는 흐름을 뜻한다. 그러므로 '누설률'이란 말은 쓸 수 없을 것이며, '누출률(leakage rate)'이란 용어를 써야 할 것이다.

누설을 시험하고 평가하는 일은 '누설 검사

(leak testing)'이다. 그런 일은 재료 또는 물체를 이루고 있는 재질에 이미 나 있는 결함을 찾아 내어 그것을 시방서에 알맞게 평가하는 기술인 것이다. 누설 검사의 방법들은 누설의 크기에 따라 선택된다.

누설 검사의 항목들은 대체로 물체들이 그들의 누설 크기에 따라 검사 시방서에 정해 놓은 최소의 누출률을 측정할 수 있는 양으로 표시한다. 그런 양은 '최소 검출 가능 누출률(minimum detectable leakage rate)'이다. <표 1>은 누설 검사의 항목들과 최소 검출 가능 누출률을 서로 견주어 보여준다. 표.1에서는 최소 검출 가능 누출률이 가장 낮은 범위가  $1 \times 10^{-8} \text{ std cm}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )이다. 이런 누출률을 측정하려면, '헬륨 질량 분석계 누설 검출기'를 이용해야 할 것이다.

<표 1> 여러 가지 생산품들에 알맞은 누설 내밀성 규정들

Leak testing term	Vessel or part	Minimum detectable leakage rate, std cm <sup>3</sup> /s
Large -----	Truck(gravel)	$1 \times 10^3$
	Hourglass(sand)	$1 \times 10^2$
	Car window(air)	$1 \times 10^{-1}$
Gross -----	Truck(oil)	$1 \times 10^{-2}$
	Bucket(water)	$1 \times 10^{-3}$
	Storage tank(gasoline)	$1 \times 10^{-4}$
Small -----	Pipeling(gas)	$1 \times 10^{-5}$
	Tanker(liquified natural gas)	$1 \times 10^{-6}$
Fine -----	Storage tank(NH <sub>3</sub> )	$1 \times 10^{-8}$
	Heart Pacemaker(gas)	$1 \times 10^{-8}$

이 글에서는, 헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 심장이라 할 수 있는 질량 분석계의 원리를 알아 보게 될 것이다.

## 질량 분석계의 개발

질량 분석계의 개발 기록은 약 1830년 전, 유럽 물리학자들에게 이미 알려졌던 기체의 방전 현상으로부터 시작된다. 방전 현상은 나중에 '음극선'으로 불리게 되었다. 그 후, 50여 년이 지난 1881년 J.J. 톰슨이 영국 케임브리지 대학 카벤디시 연구소에서 연구를 시작하면서부터, 그는 50여 년 동안 거기에서 오로지 음극선에 매달려 열정을 쏟아 연구를 계속하게 된다. 그는 음극선의 연구를 통해서 세계 최초로 '전자'를 발견하기에 이르지만, 음극선의 성질에 대하여는 그 시대 학자들 사이에는 여전히 많은 논란이 있었던 기록이 남아 있다(Lubkin,1997).

포리(Faure, 1986 P.56)에 의하면,

1886 골드스타인(Goldstein)은 음극선 관(Cathode-ray tube)을 발견하고, 음극선이 그 관을 꿰뚫고 나오는 현상 때문에 "Kanalstrahlen"("음극에서 나와 관을 관통하는 빛"이라는 뜻)으로 이름을 지음. 전자가 발견되기 전에는 음극선관에서 나오는 빛을 음극선(Cathode-ray)이라 불렀다. 1898년 비엔(Wien)같은 학자는 전자의 개념이 확립되지 않았던 시기에 음극선을 양성으로 하전된 입자라고 주장한 적도 있었다.

1910 전자를 발견한 영국의 Cavendish 연구소 J.J.Thomson은 음극선을 전자들의 흐름으로 확인 그 곳에서 "Positive ray apparatus"를 이용하여 양극선을 연구한 결과, 인류사에서 최초로 네온 원자에서  $^{20}\text{Ne}$ 과  $^{22}\text{Ne}$  등의 동위원소가 있다

는 사실을 발견 하였다.

1918~1919 Thomson의 연구를 이어받은 제자인 F.W.Aston(영국)과 A.J. Dempster(미국) 등 세계 최초로 질량 '분광계(mass spectrograph)'를 설계 제작하였다. 그들이 제작한 기구를 이용하여 주기를 표에 있는 대부분의 천연 동위원소들이 발견되었다.

그때의 '질량 분광계'란 이름은 사진의 건판을 이용하여 질량 분석계의 이온들을 측정하였으므로, 광학에서 쓰이던 '분광계'의 이름에서 따온 것이며, 전위계를 써서 이온 전류를 측정하고 나서부터는 '질량 분석계'로 불리게 되었다.

질량 분석계는 제2차 세계 대전 기간 중에 미국이 추진하던 Manhattan Project(핵폭탄 개발 계획)에 한 자리를 차지한다. 인류는 그때만 해도 아직 핵폭탄을 만든 경험이 없었다. 전쟁은 날로 치열해지고, 핵폭탄의 제조는 미국이 사활을 건 막중한 사업이었기에 초를 다투어 도전한 도박 게임이었던 것이다. 전쟁은 수단과 방법을 가리지 않는다. 극비로 추진하던 핵폭탄 제조 정보의 일부가 구 소련과 서방 세계 과학자들에게 이미 누출되기 시작하였으므로 미국은 맨해튼 계획을 다급히 서둘렀다. 우선 먼저 농축 우라늄을 미국의 손에 넣어야 했다. 그때, 이론적으로 동위원소의 분리가 가능했던 방법들은 두 길밖에 없었다. 질량 분석계의 원리를 이용하는 길과 다른 하나는 원자들이 이동할 때, 질량 차이에 따라 동위원소의 분리가 일어나는 확산 원리를 이용하는 길이 전부 였다. 지금은 가장 대표적인 농축 방식인 원심 분리 기술이 개발되어 쉽게 우라늄의 농축이 가능하게 되었지만, '핵확산 금



지조약'이란 족쇄 때문에 국제적으로 허가받은 국가들이 아니면, 우라늄의 농축이나 플루토늄 제조 기술과 같은 것들은 그들에게는 그림의 떡에 지나지 않는다. 전쟁 중이었으므로 미국은 다급한 결정을 내린다. 전쟁을 끝내려면, 가능한 모든 수단을 동원하여 농축 우라늄을 손에 넣어야 했으므로, 효율성이고 경제성이고 하는 문제들은 당시로서는 거치장스러운 장식에 불과했다. 곧바로 원리적으로만 가능했지, 한번도 인류가 시도해 본 적이 없었던 우라늄의 농축 방식을, 앞서 말한 두 갈래로 추진하기에 이른다. 결국은 확산 농축 공정을 성공시켜 대량의 농축 우라늄을 얻게 되었다. 질량 분석계를 써서 우라늄-235를 분리하려던 연구 팀은 순수한 우라늄을 얻는 성과는 있었지만, 이 기술로서는 핵폭탄에 소요되는 충분한 양을 분리시키는 데는 부적합한 것임을 알게 된 것이다. 핵폭탄의 원료로 쓸 수 있는 우라늄-235의 순도는 천연에 있는 우라늄-235(약 0.7% 들어 있음)를 95% 이상으로 농축시킨 것이며, 일정한 양(임계질량) 이상이 한 덩이로 모여야 연쇄반응이란 자발적인 핵분열이 일어나게 된다.

비록 질량 분석계를 써서 우라늄의 농축을 하려던 계획은 성공하지 못했었지만, 질량 분석계의 원리를 이용한 헬륨 누설 검출기의 개발은 우라늄의 농축설비에서 확산 농축 공정 장치의 설치와 누설 관리를 수행하는 데 큰 역할을 했다. 따라서, 비록 보조적인 측면이긴 하겠지만, 미국이 세계 최초로 우라늄의 농축 공정을 성공시키는 데, 헬륨 누설 검출기의 역할이 컸던 점은 부정할 수 없다.

**1940년대 후반기 :** 전쟁이 끝나고, 전자 공업이 발달하면서 헬륨 누설 검출기의 수요가 급증하였고, 그 시기를 틈타 헬륨 누설 검출기들의 생산 판매가 활기를 띠기 시작하였다.

**1950년대 후반기 :** 우주 탐사 계획을 추진하면서 우주 공간의 아주 높은 진공에서 견딜 우주선과 우주선에 탑재시킬 장비들을 제조할 필요가 있었다. 인공 위성의 추진 연료는 액체수소이므로 액체 연료를 담은 연료통의 누출 검사는 핵폭탄 제조설비에서 개발된 헬륨 누설 검출기를 써서 해결할 수 있었다. 뿐만 아니라, 지상에서 우주 공간과 같은 대규모의 묘사 진공 공간을 만들 때도 헬륨 누설 검출기는 필수적인 도구가 되었다. 그 후로 헬륨 누설 검출기의 새로운 수요처가 생겨나게 되었으며, 그 후 그의 역할은 진공 기술을 새롭게 발전시키는 데 한 몫을 하기에 이른다. 그러면서 검출기 자체의 성능이 많이 개량되었다. 지금 쓰이는 헬륨 누설 검출기의 기초 이론과 실제의 사용 절차들은 대개가 미국 NASA가 우주선 개발을 추진하면서 이룩해 놓은 업적이라는 점은 틀림이 없을 것이다.

**1960년대 후반 :** 특수한 분야에만 이용되던 헬륨 누설 검출기는 일반 산업에서 범용되기 시작하였다.

**1970년대 :** 새로운 기기 모델들이 개발되면서 헬륨 누설 검출기의 설계가 단순화되었다. 지금은 헬륨 누설 검출기에 컴퓨터를 장착하여 자동화된 기기들이 장치산업의 누설 관리에 범용되고 있다.

● **우리의 경우:**

- 반도체 조립 산업에서 처음 이용;

1964년 Motorola Korea, Signetics Korea 등이 설립.

1966년, Control Data Korea, Fairchild Korea 설립.

1970년 아남산업이 Metal Can(반도체) 조립

에 헬륨 검출기 최초 사용.  
 1975년 Kr-85 누설 검출기로 Metal Can 조립품의 품질관리에 이용.  
 1985년 Metal Can 생산 중단으로 폐기.  
 (\*아남산업의 자료에 바탕한 것임.)

- 핵연료 분야:

1976년 12월 '핵연료개발공단' 발족(76. 1. 화학처리 대체사업을 확대)  
 (1978년 10월 핵연료 가공 시설 준공)  
 1979년 12월 동 공단을 '원자력연구소' 기구에 통합  
 1982.11.11. 한국핵연료주식회사 설립(한국원전연료 자료에 의함)  
 1993. 4. 5. 한국원전연료주식회사로 이름 변경(한국원전연료자료에 의함)

**헬륨 검출기의 이용 분야**

헬륨 검출기가 현대 산업에 두루 쓰이면서 검출기 용도의 편의성에 따라 많은 개량이 이루어졌다. 지금 헬륨 누설 검출기가 쓰이는 분야와 검사 대상 품목들 또는 시스템들을 다음 <표 2>에 요약한다.

**누설로부터 유입 또는 누출되는 물질들**

누설의 뜻은 앞에서 설명된 정의에서 알 수 있듯이, 한 재료의 결합이므로 누설의 특성에 비추어 그들 종류가 다양할 수 밖에 없다. 따라서, 누설들은 어떤 지정된 조건(시방서) 아래에서 문제가 된다. <표 3>은 보통 쓰이는 생필품들이나 또는 특수 용도의 생산품들에서 특히 문제가 될 누설 물질들을 요약한다.

<표 2> 개략적으로 살펴본 헬륨 누설 검출기의 이용 분야와 검출 대상 부품들 (자료 : Varian, 1980, P.65)

산업 분야	누설 검사를 요하는 공산품들과 시스템들
반도체, 전자	용접 밀봉 기기들(릴레이, 접속기, 표시기)
항공 우주, 연구개발, 핵 분야	우주환경 묘사용 챔버 석영결정, 리드 스위치 핵연료, 헤드, 벨로우즈, 변환기, 원자로
식품, 의약품	저온성 부품, 박막 진공포장용기, 열교환기, 심장박동기
냉동기, 공기조화	증발기 코일, 응축 코일, 압축기, 제어밸브,
자동차, 포장, 기타	벨로우즈, 조립체와 완성 시스템, 미끄럼 방지기,
잡용기구	관류, 축전지, 음료수통의 마무리, 에어로솔, 배터리 케이스, 박막 포장, 열교환기 등
진공 시스템	제피기(coater), 금속 증착기, 전기로, 표면 분석기, 용접기, 이온 이식기, MBE 시스템, EM, SEM 등.
진공, 압력, 기타	핵발전소, 화학공장, 석유정제탑, 지하배관, 라디오 & TV 케이블, 저온성 부품, 시스템 보존성 등.

**헬륨의 특성**

헬륨의 특성을 요약하면 다음과 같다:

1868년 Lockyer, 헬륨 원소(He) 발견(태양 주변을 둘러싼 증기에서).

화학적으로:



〈표 3〉 일반 공산품들과 누출의 대상 물질들  
(자료:Varian,1980 P.4)

밀봉 포장 식품	산소, 수증기, 박테리아
반도체 포장	산소, 수증기
약제류	박테리아
심장 박동 이식	부식성, 신체의 유체
화학 공정 시스템	산소, 수증기
진공 관류	공기(진공 저하)
진공 기구	공기, 산소, 기타 기체류
시계	물, 증기, 액체
밀폐 온도계, 압력계	공기
저온성 저장 용기, 유닛들	공기

- 불활성 기체(금속 재료들을 부식 또는 손상시키지 아니함)
- 무색, 무취, 무미
- 독성이 전혀 없음
- 인화성이 아님

물리적으로:

- 대기 중, 농도: 4ppm(4  $\mu\text{L/L}$ ). (공기 10 mPa( $10^{-4}$  Torr)에서 최소 검출 가능, 검출기 감도의 10~100배의 양).
- 원자 질량 단위 : 4 amu (1 amu= $1.660 \times 10^{-27}$  kg)원자의 질량은 원자의 핵(양성자와 중성자)에 집중됨.
- 누설 통과 속도는 모든 추적자 기체들 가운데서 가장 빠름(〈표 4〉 참고)
- 누출률은 헬륨의 부분압력으로 표시(예:  $\text{Pa}\cdot\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$  또는  $\text{atm cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

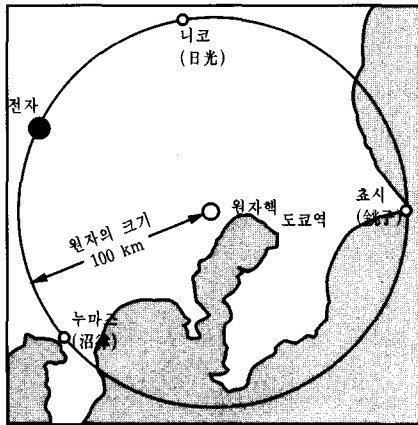
헬륨 질량분석계는 헬륨의 '원자 질량'을 바탕으로 하여 헬륨을 검출해 내는 기구이다. 잘

알고 있는 것처럼, 원자는 물질을 이루는 가장 작은 단위이고, 원자의 핵과 궤도전자들로 이루어진다. 그의 무게는 우리 생활에 쓰고 있는 킬로그램(kg)으로 나타내기란 불편하기 짝이 없으므로, '원자 질량'이란 새로운 단위를 정해 놓았다. 원자 질량은 원자를 이루고 있는 원자의 핵에 집중되어 있다. 〈그림 1〉은 원자의 모습을 알기 쉽게 그림으로 그린 한 원자의 모형이다. 일본 도쿄역에 지름 1m의 원을 그려 놓고, 그것을 한 원자의 핵이라고 가상할 때, 원자의 크기는 100 km 떨어진 거리를 두고 궤도 전자들이 원자의 핵과 일정한 거리를 유지하면서 빛의 속도로 돌고 있다. 그런 궤도 전자들의 회전 구획안이 바로 원자의 크기다. 따라서 원자는 텅빈 공간에 불과하다. 원자의 핵(전기적으로 플러스)과 궤도 전자들(전기적으로 마이너스)은 그들 사이인 텅빈 공간에서 서로 끌어당기는 쿨롱의 힘으로 균형을 유지시키면서 계속되어 원자를 이룬다. 그런 쿨롱의 힘을 이겨낼 수 있는 방사선들은 원자의 속을 마음대로 쉽게 관통할 수 있다.

원자의 모습은 궤도 전자들이 양파의 껍질처럼 겹을 이루면서 원자의 핵을 감싸고 회전하고 있다. 이미 잘 알고 있듯이, 궤도 전자의 껍질의 이름은 K,L,M...등으로 불리며, K 껍질에는 전자 2 개만 들어 갈 공간이 있다.

헬륨의 궤도 전자들은 2 개이므로 전자들이 더 들어 갈 자리없이 K 껍질이 꽉찬 모습을 한다. 이런 모습의 원자들은 화학적으로는 매우 안정되어 있다. 따라서 헬륨은 활성이 전혀 없는 불활성 원자들 그룹에 속한다. 활성이 없으므로 냄새가 날 이유가 없고, 색이나 맛을 내지도 않는다. 그리고 헬륨이 누설 검사에서 추적자 가스

로 쓰일 때, 안전 사고에 아주 중요한 성질로 지목되는 인화성 물질이 아닐 뿐만 아니라 독성도 없으므로 취급하기 편하다. 이런 성질들은 모두 헬륨이 불활성 기체 그룹에 속하기 때문이다.



〈그림 1〉 원자와 원자핵의 크기를 서로 견중  
(임승원 역, 1996 P.63).

원자의 핵 속은 '핵자'라는 물질들로 채워져 있지만, 현대 과학은 아직 핵자들이 어떻게 서로 뒤엉켜져 있는지를 밝혀 내지 못하였다. 그 대부분은 양성자들과 중성자들로 이뤄진다. 양성자 그리고 중성자의 원자 단위의 무게는 가장 가까운 무게의 정수로 표시된다.

그러한 정수가 바로 원자 질량 단위이다. 예컨대, 양성자 한 개의 원자 질량 단위는 1.007825 이고, 중성자는 1.008665 이지만, 각각의 원자 질량 단위를 가장 가까운 1 이란 정수로 표시한다. 헬륨 원자는 원자 번호가 2 이므로 궤도 전자의 수는 원자 번호와 같은 2 개이고, 양성자가 전자의 수효만큼 있어야 전기적으로 중성을 이루므로 양성자의 수효도 2 개이다. 천연에 있는 대부분의 헬륨 원자는 2 개의 양성자 이외에도 중성자가 2 개나 더 들어있다. 이것들을 더하

면, 즉,  $2 \times 1.007825 + 2 \times 1.008665 = 4.03298$  로 셈이 되지만, 헬륨의 원자 질량 단위는 가장 가까운 정수인 4로 쓴다. 그리고 원자 질량 단위를 그램(g)으로 나타 내려면( $1 \text{ amu} = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ), 원자 질량 단위를 아보가드로의 수 ( $6.022 \times 10^{23}$ )로 나누어 주면 된다.

헬륨 원자는 누설을 빠져 나갈 속도가 가장 빠른 추적자로 알려진다. 〈표 4〉는 누설 검사에서 추적자 가스로서 쓸 수 있는 많은 물질들을 표로 만든 것이며, 그들의 물리적 성질도 함께 나타난다. 그들 중에서 헬륨(He)의 확산 계수(초마다  $\text{m}^2$ )는  $6.97 \times 10^{-5}$  이며, 수소의  $6.71 \times 10^{-5}$  보다는 약간 크다.

### 누설 검출용 질량 분석계

누설 검출에 쓰이는 질량 분석계는 '헬륨 질량 분석계 누설 검출기'와 '잔류 기체 분석기'로 나뉜다. 앞쪽은 앞서 설명처럼, 줄여서 '헬륨 누설 검출기'로 불리기도 한다.

누설을 확인하는 데 쓰이는 추적자로서 헬륨 가스를 선택하는 것은 바로 앞서 지적한 헬륨 가스의 여러 가지 이로운 특성을 활용하기 위한 것이다. 아주 적은 양의 헬륨을 검출하는데 가장 효과적인 측정 수단은 질량 분석계이다. 헬륨의 또다른 장점은 공기 속에 적은 양이 항상 일정한 비율(4 ppm)로 들어있다는 점이다.

잔류 기체 분석기는 대개 화학 성분의 분석용으로 쓰이는 경우가 많다. 잔류 기체 분석기가 누설 검사에 쓰이는 목적은 누출 기체의 종류 〈그림 11 참고〉를 알 수 있기 때문이고, 오로지 헬륨 원자만을 측정할 대상으로 삼는 헬륨 누설 검출기와는 다른 점이다. 그리고 잔류 기체 분석



〈표 4〉 표준 상태인 0°C 그리고 압력 101.3 Pa인 공기에서 여러 추적자 기체들의 확산도(McMaster, 1982 P. 64)

Gas	Chemical Formula	Molecular Weight, M	ft <sup>2</sup> /hr	Diffusion Coefficient(2) m <sup>2</sup> /s	mm <sup>2</sup>
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.0	0.55	1.42 × 10 <sup>-5</sup>	14.2
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0	0.66	1.70 × 10 <sup>-5</sup>	17.0
Argon	A	39.9	0.61	1.47 × 10 <sup>-5</sup>	14.7
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.1	0.30	0.77 × 10 <sup>-5</sup>	7.7
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1	0.33	0.85 × 10 <sup>-5</sup>	8.5
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.0	0.52	1.34 × 10 <sup>-5</sup>	13.4
Carbon disulfide	CS <sub>2</sub>	76.1	0.36	0.93 × 10 <sup>-5</sup>	9.3
Carbon monoxide	CO	28.0	0.67	1.73 × 10 <sup>-5</sup>	17.3
Carbon tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	154.	0.28	0.72 × 10 <sup>-5</sup>	7.2
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.1	0.49	1.26 × 10 <sup>-5</sup>	12.6
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.1	0.38	0.98 × 10 <sup>-5</sup>	9.8
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.0	0.52	1.34 × 10 <sup>-5</sup>	13.4
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R-11	CCl <sub>3</sub> F	137.0	0.30	0.77 × 10 <sup>-5</sup>	7.7
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	121.0	0.32	0.83 × 10 <sup>-5</sup>	8.3
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R-21	CHCl <sub>2</sub> F	103.	0.33	0.85 × 10 <sup>-5</sup>	8.5
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R-22	CHClF <sub>2</sub>	86.5	0.37	0.95 × 10 <sup>-5</sup>	9.5
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R112	CCl <sub>2</sub> F-CCl <sub>2</sub> F	204.0	0.25	0.65 × 10 <sup>-5</sup>	6.5
Halogenated hydrocarbon refrigerant gas R-114	CClF <sub>2</sub> -CClF <sub>2</sub>	171.0	0.28	0.72 × 10 <sup>-5</sup>	7.2
Helium	He	4.00	2.7	6.97 × 10 <sup>-5</sup>	69.7
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.02	2.6	6.71 × 10 <sup>-5</sup>	67.1
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	24.1	0.53	1.37 × 10 <sup>-5</sup>	13.7
Krypton	Kr	83.8	0.51	1.32 × 10 <sup>-5</sup>	13.2
Methane	CH <sub>4</sub>	16.0	0.72	1.86 × 10 <sup>-5</sup>	18.6
Neon	Ne	20.2	1.1	2.84 × 10 <sup>-5</sup>	28.4
Nitric oxide	NO	30.0	0.70	1.81 × 10 <sup>-5</sup>	18.1
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0	0.68	1.75 × 10 <sup>-5</sup>	17.5
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	44.0	0.52	1.34 × 10 <sup>-5</sup>	13.4
Oxygen	O <sub>2</sub>	32.0	0.68	1.75 × 10 <sup>-5</sup>	17.5
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.1	0.39	1.00 × 10 <sup>-5</sup>	10.0
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.1	0.42	1.08 × 10 <sup>-5</sup>	10.8
Water	H <sub>2</sub> O	18.0	0.85	2.19 × 10 <sup>-5</sup>	21.9
Xenon	Xe	131.0	0.42	1.08 × 10 <sup>-5</sup>	10.8

Values calculated from empirical equation of J.C. Slattery and R. B. Bird.(AIChE Journal, 4(2), 137, 1958) and converted. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

기의 독특한 장점은 배기된 시스템 속에서 배기되지 않고 남아 있는 기체의 종류를 확인하려고 할 때, 그의 진가를 알게 된다. 그래서 '잔류 기체'란 이름이 따라 붙는다.

### 헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 구조

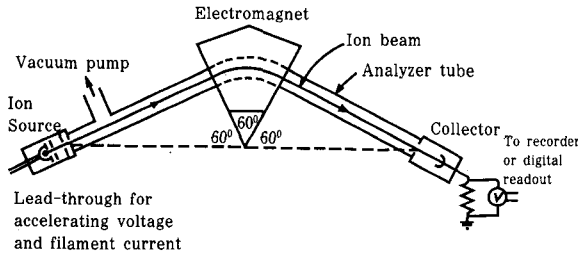
우선 질량 분석계의 일반적인 모습과 원리를 먼저 알아보고, 그리고, 헬륨 누설 검출기를 알아본다.



1. 질량 분석계의 기능별 구분(〈그림 2〉참고):

- 이온 소오스 (ion source)
- 분석관(analyzer tube)
- 마그네틱 섹터(magnetic sector: 60°, 90°, 120° 그리고 180° 등)
- 이온 검출기(ion detector: 전리함, 파라데이 컵, 이온 증배관 등)
- 고진공 시스템(이온의 평균 자유 행로를 최대한으로 하기 위하여).

위의 기능별 구분은 〈그림 2〉에 그들의 위치가 표시되어 있다. 그리고 각각의 기능에 대한 설명은 다음과 같다:



〈그림 2〉 이온 소오스, 자기장 구획 그리고 이온 포집기 등이 배열된 60° 구획 질량 분석계의 모식도 (Faure, 1986 P.59)

- 이온 소오스 : 〈그림 2〉의 왼쪽에 '이온 소오스' 기능이 자리한다. 이온 소오스는 특수한 금속(주로 텅스텐)에 열을 줄 수 있게 특수한 설계로 만들어져 있는 한 세트이다. 특수 금속은 전구에서 필라멘트처럼 전류가 흐를 때, 높은 열이 생기며, 그 열은 텅스텐 원자의 궤도 전자들을 튕겨 나게 하여 전자들의 흐름을 유도해 낸다. 자유롭게 움직일 전자들의 운동 에너지는 약 100 eV 정도이다. 이들은 분석관 속으로 주입되는 헬륨과 같은 기체 분자들과 충돌한다. 주입된 원자들은 필라멘트에서 튕겨난 전자들과 충돌

하면서 그들 원자에서 들고 있는 궤도 전자(〈그림 1〉참고)들을 잃게 되고, 헬륨 양이온(He<sup>+</sup>)으로 이온화된다.

- 분석관 : 〈그림 2〉의 왼쪽에서 오른쪽까지 길게 휘어져 있는 부분이다. 높은 진공에 견딜만큼 누설이 거의없게 스테인레스강으로 만들어진다. 휘어지는 각도는 위에서 설명할 양이온이 분석관 속에서 원운동하는 반경과 관계된다.

- 마그네틱 섹터 : 〈그림 2〉의 중앙에 자리잡고, 영구자석이나 전자석으로서 자석 바로 밑의 분석관 속에다 필요한 자기장을 만드는 구실을 한다. 제조회사에 따라 자석의 모습은 60°, 90°, 120° 그리고 180°의 각도를 가진다. 그런 각도는 이온 운동의 반경과 깊은 관계가 있다.

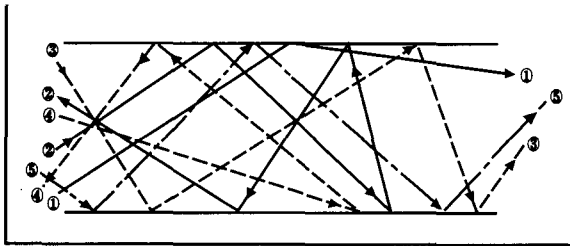
- 이온 검출기 : 분석관을 따라 이온들이 이동하는 양을 검출한다. 전리함, 패러데이컵, 이온 증배관 등이 쓰인다.

- 높은 진공도 유지 : 분석관 속에 높은 진공도를 유지하기 위하여 진공 펌프들이 쓰인다. 높은 진공(10<sup>-6</sup> torr 이하)을 해야 하는 이유는 분석관 속에서 분석할 이온들이 전혀 다른 이온들과의 충돌없이 검출기까지 쉽게 이동할 수 있게 필요없는 다른 이온들을 없애기 위한 것이다. 기체 분자들의 '평균 자유 행로 (Mean Free Path: MFD)'와 깊은 관계가 있다.

〈그림 3〉은 기체 분자들의 평균 자유 행로를 설명하고 있다. 어떤 한 질량 분석관 속에 여러 종류의 기체 분자들이 불규칙 운동을 하고 있을 때, 분석관 속의 온도와 압력이 일정하게 유지되고 있을지라도, 개별 분자들의 이동 거리는 모두가 서로 다를 수 밖에 없을 것이다. 그 이유는 개별 분자들의 무게 차이에 따라 그 분자의 운동하는 거리가 서로 다르기 때문이다. 〈그림 3〉



에서 개별 번호는 각각의 분자를 대표하고, 화살표는 분자의 진로를 나타낸다. 분자들은 불규칙한 운동으로 분석관 벽에 충돌한 후, 뒤로 방향을 바꾸는 것들도 있다. <그림 3>에서는 5 종류의 분자들이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면서 3 종류만 오른쪽으로 빠져 나간다. 이런 불규칙한 분자들이 분자들끼리 충돌없이 이동할 수 있는 거리를 평균한 것이 MFD이다. 공기 분자들의 MFD는 상온과 대기압에서  $9.5 \times 10^{-3}$  mPa이다(Pa는 파스칼).



<그림 3> 튜브의 지름보다 큰 평균 자유행로의 알갱이들이 튜브 속에서 분자들의 불규칙한 운동 모습들(McMaster, 1982 P.319)

<표 5>는 지표 위에서 고도에 따라 달라지는 공기 분자들의 평균 자유 행로를 서로 견준 것이다. 고도에 따라 기압은 해수면에서 101,325 Pa이지만, 400 km 고도에서는  $10^{-6}$  Pa로 줄어들기 때문에, 공기 이온들의 평균 자유 행로(mean free path)는 93 nm(나노미터)에서 100억 배나 길어진 9.3 km 이나 된다.

높은 진공도를 이루는데 쓰일 펌프들과 그들을 써서 최대로 진공시킬 수 있는 '최대 진공도' 영역들은 <그림 4>에서 서로 견주어진다. 질량 분석계에서 필요한 진공도에 이르게 하는 절차들은 당연히 이용할 펌프들을 <그림 4>에서처럼, 진공도가 낮은 기계식 펌프로부터 시작하

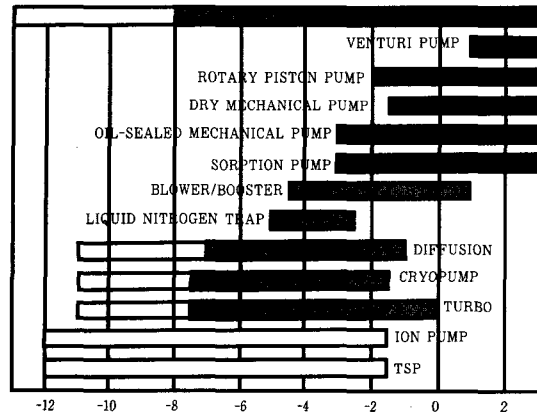
여, 높은 진공 영역(high vacuum)에 쓰이는 확산 펌프(diffusion: <그림 4>의 중앙)를 이용하게 된다. 필요에 따라서는 확산 펌프 아래로 이어지는 펌프들을 선택적으로 이용해야 할 것이다.

<표 5> 해수면과 높은 고도에서 대기의 성질들 (McMaster, 1982 P.318)

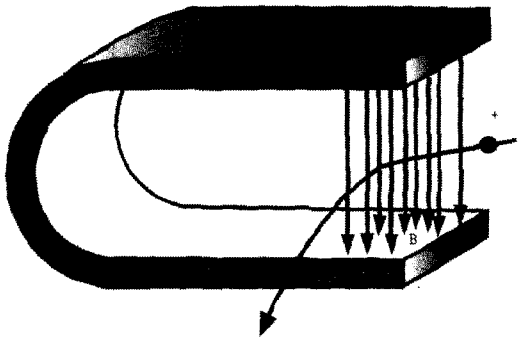
Condition	At Sea Level	At 400 km Altitude
	Pressure	101,325 Pa or 101,325 kPa or 760 torr or 29.92 in. Hg
Number of molecules in 1 cm <sup>3</sup>	$2.7 \times 10^{19}$	$3 \times 10^8$
Mean free path	93 nm	9.3 km
Time to form a monolayer of adsorbed gas on a clean surface	less than $10^{-8}$ s	2 min
Average speed of nitrogen molecule at room temperature(20°C)	1600 km/hr	1600 km/hr

Note : Though a pressure of  $10^{-6}$  Pa is considered an excellent vacuum, there are still 300,000,000 molecules/cm<sup>3</sup>

PRESSURE RANGES OF VARIOUS PUMPS  
ULTRAHIGH VACUUM HIGH VACUUM ROUGH VACUUM



<그림 4> 여러 종류의 진공 펌프들과 그들의 진공 범위(Varian, 1980 P.41)



〈그림 5〉 이온화된 양이온이 자기장 안에서 로렌츠의 힘을 받아 자기장에 수직인 평면을 따라 진로가 굽는 모습(임승원 역, 1996 P.45)

## 2. 자기장 속에서 이온의 운동 메커니즘

분석관 속을 지나는 양이온들의 운동에 관한 등식들을 수식으로 유도해 보는 것은 질량 분석계를 이해하는 데 도움이 될 것이다. 수식의 유도를 하기 위하여 기호들과 단위들을 먼저 정리한다.

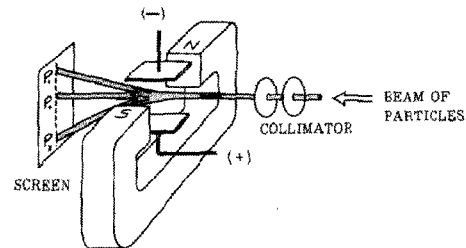
〈단위〉

양이온의 질량, $m$	: kg
( $M$ : 원자 질량 단위 = 1 amu = $1.660 \times 10^{-27}$ kg)	
양이온의 속도, $v$	: 미터/초 (m/s)
양이온의 전하량, $q$	: 쿨롱 (단위 전하 = $1.6 \times 10^{-16}$ 쿨롱)
원운동의 반경, $r$	: 미터 (m)
자력선 밀도, $B$	: 테슬러 (weber/m <sup>2</sup> )
가속 전압, $V$	: 볼트

〈운동 과정〉:

- 이온 소오스 속에서:  
분석관에 들어온 헬륨은 이온화가 일어남(이온들은 직선 운동)  
이온의 적당한 빔 (beam) 을 이룸 (반사, 집속, 가속).

- 자기장에서:  
로렌츠의 힘(〈그림 5〉 참고)으로 양이온의 동 경로가 자력선의 평면에 직각 방향으로 (구심력).
- 전기장에서:  
양이온들은 음극(-)으로 끌리는 쿨롱의 힘을 받고, 원심력이 생김(〈그림 6〉 에서  $P_1$  점).
- 물질(이온)의 직선 운동은 원심력과 구심력이 평형을 이룸(〈그림 6〉 에서 로렌츠힘과 쿨롱힘 양쪽을 조절하여 이온의 운동을 조절,  $P_0$  점):



〈그림 6〉 전장과 자기장 안에서 양이온들이 움직이는 모습들의 모식도(Choppin & Rydber, 1980 P.15)

원심력( $F_1$ ):  

$$= mv^2/r \dots\dots\dots (1)$$

구심력( $F_2$ ):  

$$= Bvq \dots\dots\dots (2)$$

지정된 경로(〈그림 6〉 에서, 왼편 스크린 위의  $P_0$  점)로 운동하는 경우,

원심력( $F_1$ ) = 구심력( $F_2$ ):  

$$mv^2/r = Bvq \dots\dots\dots (3)$$

등식 (3)을 비전하( $q/m$ )로 표시되게 다음과 같이 변형:



$$r = (mv)/(Bq) \text{ (미터)} \dots\dots\dots (4)$$

$$q/m = v/(rB) \text{ (비전하)} \dots\dots\dots (5)$$

- 분석관 속에서 양이온의 운동 속도는 등식 (9)로 표시됨:

전기장 속에서 전하의 운동 에너지(단위 전하 일 경우는 eV)

쿨롱의 힘(F<sub>3</sub>)을 받는 에너지;

$$= Vq \dots\dots\dots (6)$$

양이온의 운동 에너지(F<sub>4</sub>):

$$= 1/2mv^2 \dots\dots\dots (7)$$

이온화된 하나의 헬륨 양이온이 분석관 속에서 쿨롱의 힘을 받아 운동하는 에너지를 고려한 것이므로,

$$F_3 = F_4;$$

$$Vq = 1/2mv^2 \dots\dots\dots (8)$$

등식 (8)을 변형하여, 등식 (9)를 얻는다:

$$v = (2Vq/m)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

- 등식 (4) 와 (9)로부터,

$$r = (2/q)^{1/2}(mV)^{1/2}/B \dots\dots\dots (10)$$

등식 (10)의 양쪽을 제곱하여 등식 (5)를 다시 정리하면,

$$m/q = r^2B^2/(2V) \dots\dots\dots (11)$$

질량 분석계의 설계에서 양이온들의 운동을 좌우하는 중심 요소들은 원형 운동의 반경(r), 자력선 밀도(B) 그리고 가속 전압(V) 등이다. 헬륨 누설 검출기의 구조에서는 대체로 가속 전압만을 변수로 하고, 다른 요소들은 고정 상수로 하여 제작된다.

헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 설계에서 원형 운동의 반경(r)인 r<sub>0</sub> 의 일정수, 자기장의 자력선 밀도를 일정수, 그리고, kg의 이온 질량을 원자 질량 단위(M)로 환산하는 상수 등을 포함하는 상수, K<sub>ms</sub> 를 도입한 다음의 등식 (12)에서 비전하의 역수(M/e)는 가속 전압(V)의 일차 함수로 나타난다.

$$M/e = K_{ms} V \dots\dots\dots (12)$$

<예제> 헬륨 누설 검출기에서 K<sub>ms</sub> 상수가 1,200 이고, 가속 전압(V)이 300 볼트일 때, 검출되는 이온들은?

<해답> 문제의 조건들을 써서 등식(12)로 셈하면, 헬륨의 원자 질량 단위임을 알 수 있다.

$$M/e = 1200/300 = 4 \text{ (4는 헬륨의 원자 질량 단위)}$$

(다음호에 계속)

(원고접수일 1997. 12. 13)