



헬륨 질량 분석법 소개(Ⅱ)

Introduction to Helium Mass Spectrometry(Ⅱ)

목 차	
60° 자기장 구획 질량 분석계 누설 검출기에서 헬륨 양이온들이 움직이는 모습 설명	질량 분석계의 출력 신호 해석 He 누설 시험 기법들의 선택에서 고려할 요소들
이중 자기장 구획 질량 분석계 누설 검출기의 해설	He 누설 검출기의 이용에 대한 기본 방식들
헬륨 양이온 포집기의 구조 해설	맺음 말



朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

이 글은 지난 2월호 본지에 실린 내용중에서 이어진 부분이며, 헬륨 질량 분석계 속에서 이온들의 운동 매커니즘을 주로 다루고 있습니다.

60° 자기장 구획 질량 분석계 누설 검출기에서 헬륨 양이온들이 움직이는 모습 설명

〈그림 7〉(a)는 대표적인 60° 자기장 구획 질량 분석계의 각 기능별 배치도를 그려서, 헬륨 양이온들과 소수의 다른 이온들이 함께 이동하는 경로를 묘사하고 있다. 그림의 왼쪽은 이온 소오스 부분이며, 위쪽으로부터 누설을 빠져나온 추적자인 천연 기체(주로 헬륨 기체)들이 질량 분석관 속으로 주입된다. 주입된 기체들은 반대편에서 약 100 eV(검출기마다 다름)의 운동 에너지를

를 가지고 튀겨나오는 전자들과 곧바로(찰나에) 충돌하면서 헬륨을 포함한 모든 기체 분자들을 다같이 이온화시킨다. 이온화된 기체 분자들에서 튀겨져 나온 전자들은 왼쪽의 높은 플러스극(+)으로 대전되어 있는 한 반사 전극으로 빨려 들어가 모두 거기에서 잡히고 오로지 양이온들만 오른쪽의 자기장 속으로 이동하게 된다.

자기장 속으로 들어갈 문은 양이온들이 어떤 일정한 방향을 가지게 하기 위하여 판으로 막고 일정한 좁은 구멍(object plate slit)으로만 통과시킨다.

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



자기장 속으로 들어온 양이온들은 로렌츠의 힘(〈그림 5〉)과 쿨롱의 힘(〈그림 6〉에서 (-)극으로 휘게 하는 힘)을 함께 받게 된다. 그래서, 양이온들의 이동 경로는 양이온들의 종류에 따라 등식-11의 조건에 맞게 비전하의 역수로 표시되는 양(질량 단위의 차이)에 따라 휘게 된다. 질량 단위가 가벼운 양이온들은 아래쪽으로, 무거운 것들은 위쪽으로 갈라지고, 자기장의 설계 조건에 맞는 양이온들(헬륨 양이온들)만 분석관의 중심선에 따라 이동하게 된다.

검출기에 들어가기 전에 양이온들은 또 한번의 영상판 구멍(image plate slit)을 통과한다. 이 구멍의 역할은 양이온들의 분해능(뒤의 출력 신호에서 설명)을 높이기 위한 것이며, 대체로

헬륨 누설 검출기의 지정된 고유한 크기로 정해진다.

포집기의 판에 닿은 양이온들은 이온의 수효에 따라 비례하여 이온 전류로 전위계에 나타나며, 포집된 이온 전류는 증폭되어 기록기로 표시된다.

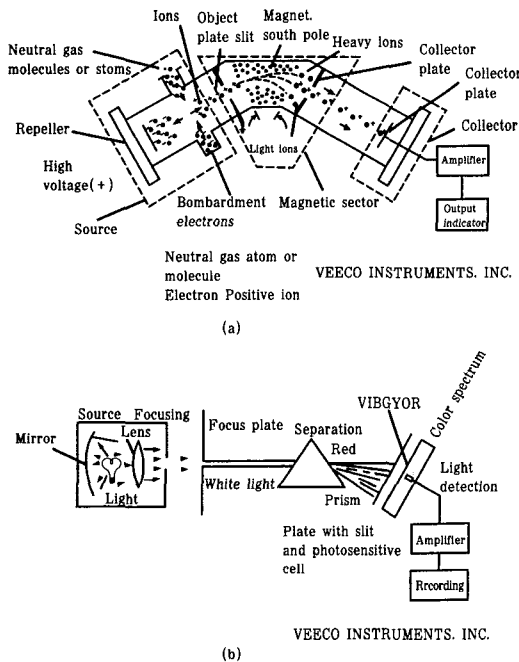
〈그림 7〉(b)는 〈그림 7〉(a)의 각 기능별 특성들을 일반 광학 기기의 특성들과 견준 그림이며, 광원(이온 소오스)에서 프리즘(자기장 구획)을 거쳐 빛이 7 가지 색(빨강, 주황...보라)등으로 나뉘어 저서 분광된 개별 빛이 측정되는 모습을 설명하여 준다.

이중 자기장 구획 질량 분석계 누설 검출기의 해설

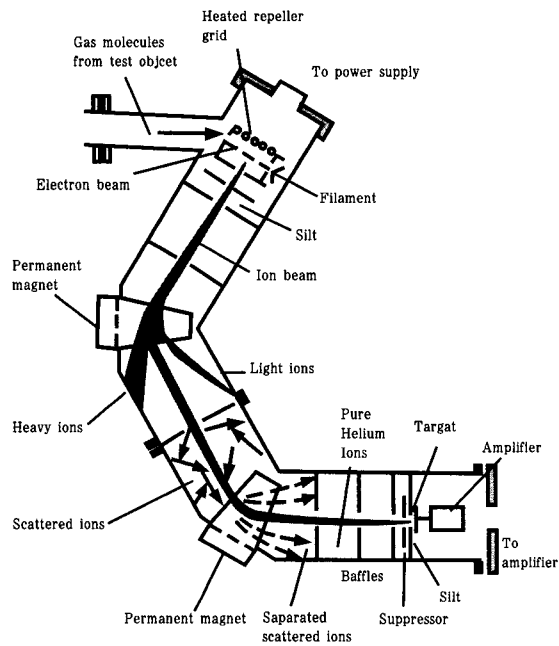
〈그림 8〉(a)와 (b)는 앞서 설명된 헬륨 질량 분석계 누설 검출기의 자기장의 구조를 이중으로 설계하여 헬륨 양이온들의 분해능을 수십배로 높인 것이다. 보다 정밀한 누설 검출률의 측정이 필요한 경우에 쓰인다. 그 구조는 두 개의 자기장을 써서 양이온들의 이동 경로를 1차와 2차로 치밀하게 걸러지게 한다. 원리적으로는 앞서 설명된 경우와 같다. 〈그림 8〉(a)는 이온들이 이동하면서 분리되는 모습을 보여주고, 〈그림 8〉(b)는 검출기의 실제 모습을 찍은 사진이다.

헬륨 양이온 포집기의 구조 해설

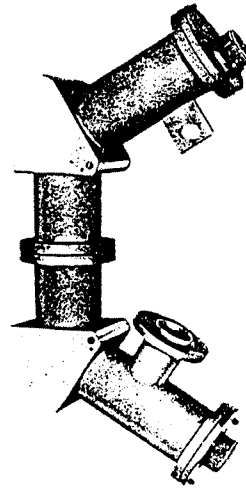
〈그림 9〉는 화학 분석에서 쓰이는 정교한 질량 분석계의 한 포집기의 배치 모습을 보여준다. 양이온들을 포집하는 포집기들은 전리함 모습으로 된 패러데이 컵(Faraday cup)이나 아니면



〈그림 7〉 (a) 60° 구획 질량 분석계의 배열(Veeco, 1980 P.100)과 (b) 광학 기기의 분광 메커니즘(Veeco, 1980 P.96)을 서로 견준



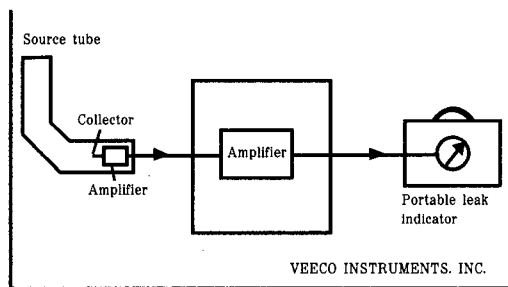
(a) Sketch showing internal components.



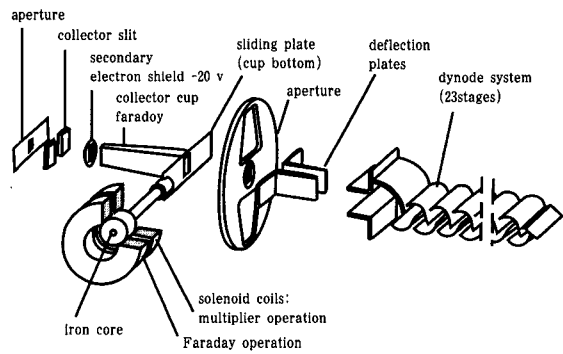
VEECO INSTRUMENTS, INC.

(b) External appearance.

<그림 8> 두 개의 구획 자기장 질량 분석계를 이용하여 기체 이온들의 스펙트럼 잡음들을 줄이고 최소 측정 가능 누출률과 분해능을 높이는 질량 분석계 누출 검출기의 모식도(McMaster, 1982 P.525)



VEECO INSTRUMENTS, INC.



<그림 9> 양이온 포집기의 배치도

왼쪽은 포집기의 체계 그림이고((Varian MAT), 오른쪽은 포집기(Collector)의 구조설명.



이온을 증폭시키는 증배관(SEM)을 이용한다. 보통 쓰이는 포집기는 패러데이 컵이 주로 쓰이지만, 아주 적은 수효의 양이온을 검출할 경우나, 또는 앞의 이중 자기장 구획으로 된 정밀한 누설 검출기의 경우는 이온 증배관을 써서 양이온들을 포집한다. 화학 분석에 흔히 이용되는 대부분의 질량 분석계들은 양쪽을 선택적으로 쓸 수 있게 <그림 9>와 비슷한 구조로 설계된다.

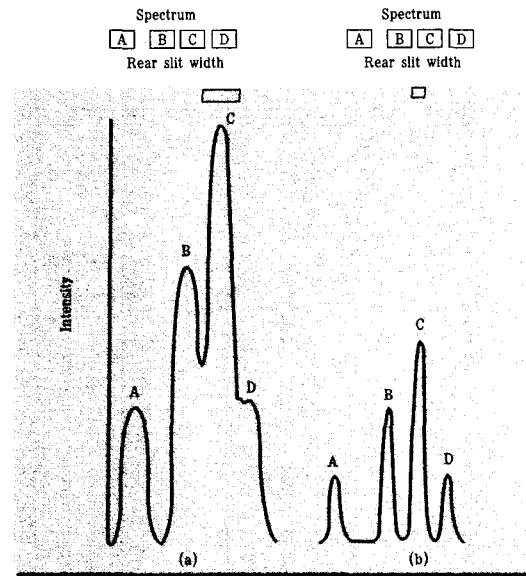
패러데이 컵과 이온 증배관 양쪽에서 한쪽을 선택하려면, 사용자 스스로가 쉽게 조작할 수 있게 솔레노이드 코일로 된 스위치로써 원격 조작으로 선택한다.

질량 분석계의 출력 신호 해설

<그림 10>은 질량 분석계의 분석관을 통과한 이온들이 이온 포집기에 닿아 전달하는 이온 전류를 앞단 증폭기와 주 증폭기로 증폭시켜 증폭된 전류를 전위계로 기록한 그림이다. 포집기에 처음 잡히게 될 이온 전류들의 세기는 나노암페어(10^{-10} A) 정도로 아주 미약하다. <그림 10>처럼 전위계의 출력으로 기록하려면, 포집기에 닿는 이온 전류가 아주 낮기 때문에 10^{10} 배수의 증폭을 시켜야만 가능하다. 이런 기술은 앞단에 설치하는 앞단 증폭기 속의 높은 저항 값(대개 10^{10} 옴)과 앞단 증폭기가 증폭한 것을 다시 더 증폭시킬 주 증폭기의 증폭회로로 결정된다.

<그림 10>(a)는 <그림 8>(a)의 오른쪽 끝에 가까이 놓인 슬릿(slit) 구멍의 폭을 크게 할 때, 대개 전위계에 나타날 수 있는 이온들이 갖는 전류의 한 모습이다. <그림 10>(b)는 슬릿의 폭을 좁혔을 때, 개별 이온들이 확실하게 분리되는 것을 보여준다. 기기의 분해능은 바로 이러한 기

기의 고유한 이온 분리 능력을 말한다. 그리고 같은 세기의 이온 전류들을 측정할지라도, 전위계에 나타날 이온 출력 신호의 세기들(<그림 10>에서 바른쪽)은 상대적으로 좁은 슬릿을 통하여 들어오게 되므로 줄어든 모습을 보여준다.



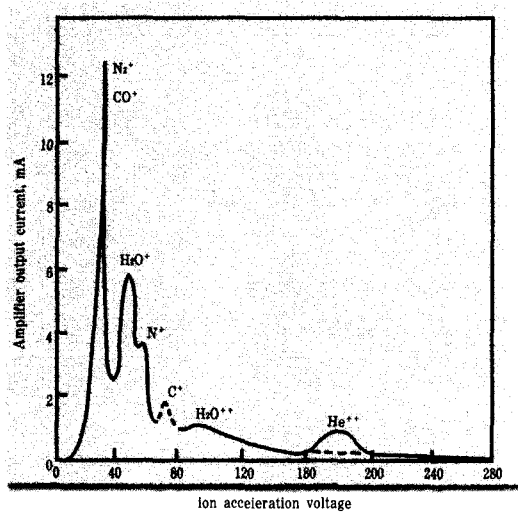
(a) Scan with wide slit. (b) Scan with narrow slit.

Note: This example is for a small radius mass spectrometer, such as is used on leak detectors. Large radius mass spectrometers have much improved characteristics

<그림 10> 표준 슬릿과 실제 슬릿을 써서 양이온들의 스펙트럼들을 주사시켜 전위계에 기록된 양이온들의 분해능과 이온 전류의 세기 (Veeco, 1980 P.98)

<그림 11>은 잔류 기체 분석기의 측정 자료를 전위계로 기록한 것이다. 양이온들은 질량 분석관에서 가속 전압을 올려주면, 이동하는 이온들의 속도가 가속되고, 가속시킨 전압에 따라 이온들의 종류(원자 질량이 서로 다름)별로 이동하는 반경이 달라지면서, 고정된 포집기 속으로 들어오는 이온들의 수효를 읽고, 가속시킨 전압과 이온들의 세기를 X-Y 좌표로 나타낸 것이며,

이런 모습으로 된 그림은 이온들의 질량 스펙트럼 이라 불러진다.



MARR-NASA HANDBOOK

〈그림 11〉 질량 분석계 누설 검출기(잔류 기체 분석기)를 써서 얻어진 대표적인 질량 스펙트럼들의 모습(McMaster, P.534)

He 누설 시험 기법들의 선택에서 고려할 요소들

다음 항목들은 헬륨 누설 검출기를 현장에서 시험에 이용하려고 할 때, 한 번쯤은 미리 고려할 요건들이다:

- 시험 대상 물체의 크기, 형태 그리고 시험할 위치
- 시험 조건들에 알맞은 압력, 진공 또는 (압력-진공)모두 양쪽 선택
- 허용 또는 지정된 최대 누출률
- 필요한 자동 누설 검사의 운전 가능성

- 시험될 부품들의 수효 또는 시스템의 복잡성

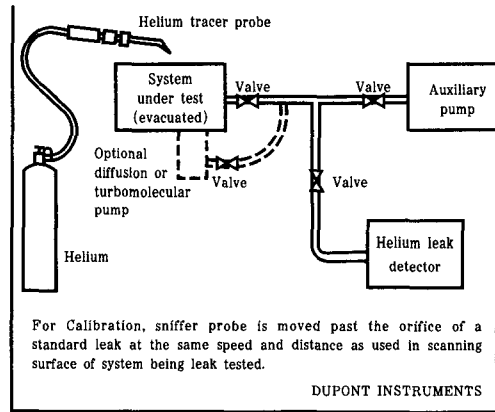
He 누설 검출기의 이용에 대한 기본 방식들

헬륨 누설 검출기의 이용 방식들은 대체로 6 가지 방법들로 나뉘질 수 있다:

- 추적자 프로우브법(Tracer Probe Methode)
- 검출기 프로우브법(Detector Probe Methode)
- 후드법(Hood Methode)
- 종골 용기법(Bell Jar Methode)
- 축적법(Accumulation Methode)
- 동적 방법(Dynamic Methode).

1. 추적자 프로우브법

〈그림 12〉는 추적자 프로우브법을 설명하여 준다. 시험할 물체를 밀폐시키고 나서, 헬륨 누설 검출기와 진공 밸브로 연결하여 둔다.



〈그림 12〉 추적자 프로우브를 써서 배기된 용기 또는 시스템에 대한 헬륨 누설 검사법의 배치도 (McMaster, 1982 P.441)

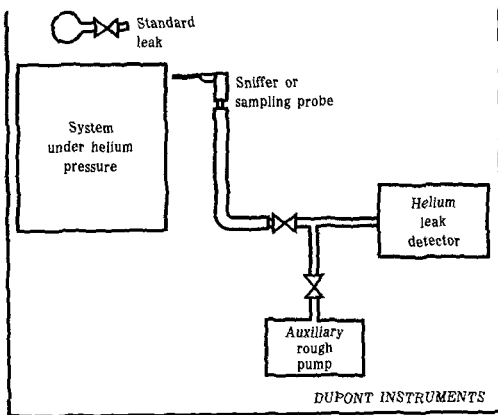


보조 펌프를 써서, 시험 물체를 둘러막이 한 안쪽의 공기를 배기 시킨다. 시험할 물체를 둘러막이 한 안쪽에 있는 공기의 상태를 지정된 진공 수준으로 배기시킨 후, 헬륨 누설 검출기의 밸브를 열고, 곧바로 헬륨을 그림처럼 둘러막이 걸면에 따라 뿌리면서 누설의 위치를 찾는다.

2. 검출기 포로우브법

〈그림 13〉은 검출기 포로우브법을 설명하고 있다. 〈그림 12〉와 다른 점은 헬륨을 둘러막이 걸면에 뿌리지 않고, 그 대신 둘러막이 속을 헬륨 기체로 채운 후, 약하게 압력을 주면서 검출기를 둘러막이 걸면에 따라 움직인다. 시험체 둘러막이에서 누설을 꿰뚫고 빠져나오는 헬륨을 추적한다.

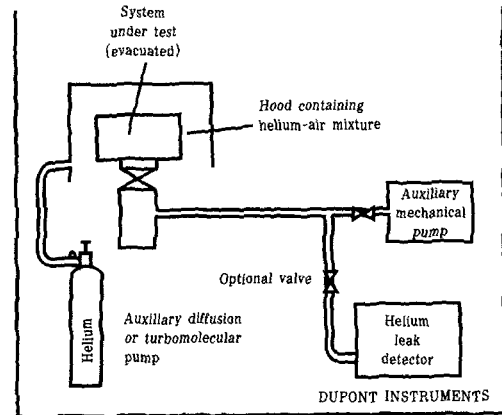
〈그림 13〉 왼쪽 위에 그려 놓은 표준 누설 (standard leak)은 시험 중인 시험 물체의 누설들에서 빠져 나오는 헬륨의 양을 정량적으로 측정해야 될 경우, 헬륨 누설 검출기의 측정 감도를 교정할 표준으로 쓰인다.



〈그림 13〉 샘플링 포로우브(또는 스니퍼)를 써서 가압된 용기 또는 시스템에 대한 헬륨 누설 검사법의 배치도(McMaster, 1982 P.442)

3. 후드법

〈그림 14〉는 후드법을 이용할 때, 검출기의 배치 방식을 설명해 준다. 다른 방식들과 다른 점은 시험할 물체를 정해진 후드 속에 놓아두고, 공기와 섞인 헬륨을 써서 물체에 있는 누설들을 시험할 수 있다는 점이다. 후드 속을 공기가 일부 섞인 헬륨 분위기로 만들어 주고, 그래서 배기된 시험 물체의 누설을 꿰뚫고 그 물체 속으로 들어오는 공기와 섞인 헬륨을 헬륨 누설 검출기로 측정한다. 편리하면서도 비용이 적게 드는 것은 시험할 물체를 완전하게 밀봉하지 않고서 누설들을 검출할 수 있기 때문이다. 뒤에서 알게 될 동적 방법의 기법을 일부 이용한다.

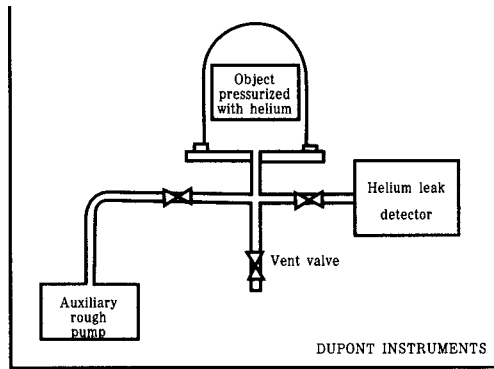


〈그림 14〉 후드 또는 헬륨 분위기의 둘러막이 안에 배기된 검사 부품들을 놓고, 누설 검사하는 후드법의 배치도(McMaster, 1982 P.442)

4. 종꿀 용기법

〈그림 15〉는 종꿀 용기법의 배치를 보여준다. 다른 방식과 다른 점은 둘러막이 방법에서 시험할 물체에 종꿀로 된 덮개를 써서 시험할 물체를 씌워, 진공을 얻는 방법이 다를 뿐이다. 종꿀 용기 밑바닥에 O-링과 같은 방식으로 종꿀의 용

기와 접속하면, 외부의 공기를 쉽게 차단할 수 있다.



〈그림 15〉 종끝 용기로 둘러막이 하여 헬륨 추적자 가스를 써서 내부가 가압 밀폐된 부품들의 누설 검사법에 관한 배치도(McMaster, 1982 P.442)

5. 축적법

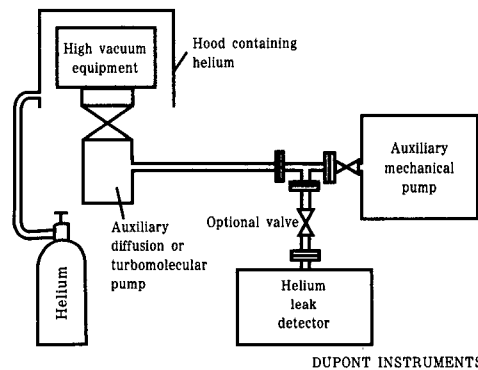
〈그림 16〉은 축적법의 한 배치도를 그려 놓은 것이다. 이것은 〈그림 14〉의 후드법과 검출기의 배치가 서로 비슷하다.

다른 점은 검출기의 사용 절차에서 차이가 난다. 축적법은 다른 이름으로 **정적 방법**(static method)이라 불리기도 한다. 절차에서 서로의 차이 점은 펌프를 써서 시험할 물체를 지정된 진공도에 이르기까지 배기시킨 다음, 배기시키는 펌프와 연결된 밸브를 닫게 하면, 미세한 누설을 꿰뚫고 새어드는 헬륨의 누출량은 일정한 기간동안 시험 물체 속에 모이게 되고, 그때, 헬륨 누설 검출기 쪽으로 통하는 밸브를 열게 되면, 미세하게 새어들어 쌓여진 헬륨 양이 측정된다. 따라서 배기하던 펌프를 일정 기간 정지시켜 시험한다는 뜻으로 정적 방법이라 불리기도 한다.

6. 동적 방법

이 방법의 검출기 배치도는 축적법의 검출기 배치도와 비슷하다.〈그림 16〉 다른 점은 앞의 축적법처럼, 바로 검사하는 절차에 있다. 축적법에서는 배기하는 펌프를 검사 기간 중에 일시 중단시켜, 미세 누출을 일정한 기간 모아서 측정하지만, 동적 방법은 누설 검출기의 배치도에 연결된 배기 펌프를 계속하여 돌리면서 누출되는 헬륨을 누설 검출기로 잡아 당겨 검출하는 검사 기법이다. 누설의 규모가 보다 크다든지 또는 시험할 물체가 아주 클 경우에 이용된다. 한국원전연료(주)에 설치된 일부의 헬륨 누설 검출기는 이런 방식을 이용한 것으로 짐작된다.

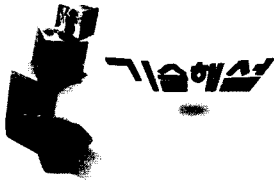
동적 방법은 기체의 운동 특성을 이용하므로 이 논문에서 설명되지 않았다. 검출기에 연결된 밸브의 적절한 조작으로 누출되는 헬륨의 흐름을 검출기 쪽으로 유도할 수 있다.



〈그림 16〉 동적 방법의 펌프 배치도(McMaster, 1982 P.442)

맺음 말

헬륨 누설 검출기의 심장인 질량 분석계의 원



리를 쉽게 이해하는 것은 헬륨 누설 검출기를 현장에서 이용할 때, 기기의 효율적인 운용에서 많은 이득을 보게 될 것이다. 헬륨 누설 검출기의 사용자가 현장에서 누설 검사를 할 때, 꼭 이해하고 있어야 할 점은 헬륨 누설 검출기에 높은 진공도를 잘 유지시켜 주어야만, 헬륨 누설 검출기의 적정 효능이 발휘된다는 점일 것이다. 많은 정밀 기구들에서도 그렇듯이, 그들의 성능을 효율적으로 이용하기 위해서는 사용자가 그들 기기의 원리적인 배경을 당연히 확실하게 이해하는 것이 바람직하다. 특히 이온들의 이동 경로에 대한 메커니즘과 진공에서 이온 분자들의 평균 자유 행로에 대한 개념들은 검출기의 측정

결과를 해석하는 데 필수적인 지식이다. 뿐만 아니라 헬륨 누설 검출기를 현장에서 사용할 때, 기기의 정상 기능을 유지시켜 주려면, 높은 진공도를 유지시킬 기술을 익혀야 한다. 대개 값비싼 많은 헬륨 질량 분석계를 현장에서 성공적으로 사용할 수 없는 것은 헬륨 누설 검출기의 진공 관리가 소홀한 점도 포함된다.

이 글에서는 헬륨 누설 검출기를 써서 누설 검사의 용도에 맞는 규정된 사용 절차들이 다루어지지 않았다. 기기의 운용 기술과 측정 자료의 평가 기술들은 다음 기회에 소개할 것이다.

(원고접수일 1997. 12. 13)

참고문헌

- 임승원, 1996, "질량의 기원" (원저자 히로시 다치시게). 과학전파사.
- ANDERSON G., 1989, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", Metal Handbook Ninth Edition Vol.17, ASM International.
- CHOPPIN G.R. and Rydber J., 1980, "Nuclear Chemistry: Theory and Applications", P.15, Pergamon Press.
- FAURE G., 1986, "Principles of Isotope Geology", 2nd ed. P.59, John Wiley and Sons.
- LUBKIN G.B., 1997, "The Ubiquitous Electron", Physics Today, October, P.25.
- MCMASTER R.C., 1982, "Leak Testing: Nondestructive Testing Handbook" 2nd ed., Vol.1, ASN.
- Varian, 1980, "Introduction to Helium Mass Spectrometer", Varian Association, Inc. Palo Alto, California.
- Varian, 1989 "Basic Vacuum Practice", Varian Association, Inc. Palo Alto, California.
- Varian MAT, "Operation Manual Mass Spectrometer TH-5", 300 100, P.1-12, Varian MAT, GMBH, Bremen, Germany.
- Veeco, 1980, "Introduction to Vacuum and Leak Testing", Veeco Instruments, Inc. Plainview, L.I., N.Y.