

진공기술(Vacuum Technology)

정 광 화

(한국표준연구소 압력진공 연구실장)

1. 머릿말

진공은 기술상으로 임의 공간내의 구성기체들에 의한 압력이 대기압보다 낮을 때를 의미한다. 임의 용기내 압력은 구성기체들의 절대 갯수와 운동에너지에 비례하여 고진공도의 용기내에는 기체분자들의 수가 아주 적게되며, 이 사실은 진공으로 하여금 몇가지 유용한 특성을 가지게 한다. 우선 압력차에 의한 역학적 힘의 발생, 둘째로 물체의 증발을 쉽게 하며 셋째로 지극히 깨끗한 환경의 제공, 넷째로 분자의 긴 평균자유행로, 다섯째로 에너지 전달의 효과적인 차단 그밖의 많은 특성들이 있다.

진공이 제공하는 이와같은 특성들을 이용하여 식품, 전자, 금속, 광학공업등에 진공이 사용되며 특히 반도체의 공정은 대부분이 고진공하에서 이루어진다. 또한 미래의 첨단 과학기술이라할 신소재개발, 초고온 극저온 등 극한기술의 타분야, 가속기과학, 우주관련연구, 핵융합등의 발전을 위해서는 초고진공의 기술이 전제조건이 된다. 실로 진공기술은 과학기술의 기반이 되는 기술로서 독자적인 진공기술의 확보가 없이는 과학기술 선진국으로의 발전은 불가능하다 하겠다.

진공기술은 발생기술, 측정기술 및 응용기술로 대별할 수 있겠다. 응용기술은 그 범위가 너무 넓고 그 분야에 따라 나름대로의 별도 기술이나 기존기술이 필요하므로 여기서 다루기는 불가능하다. 그러나 어느 응용분야이건 중요한 관건은 진공차이므로 발생기술과 측정기술에 대해서만 간단히 소개한다.

2. 진공의 기초

2. 1. 압력(진공도)의 단위 및 진공의 정도

진공도는 압력으로 표시한다. 압력의 국제공인단위(SI Unit)는 파스칼로써 $Pa = N/m^2$ (N : 뉴우톤)의 관계가 있다. 흔히 사용하는 압력단위들과의 관계는 다음과 같다.

$$1 \text{ atm (기압)} = 760 \text{ torr (mmHg)} = 10132.5 \text{ Pa} \cdots \cdots d$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 745 \text{ torr}$$

진공시스템은 그 응용 및 발생의 편의상 그 정도를 다음과 같이 구분하나 엄격한 것은 아니다.

저진공(low vacuum)	대기압 $\sim 10^{-3}$ torr
고진공(high vacuum)	10^{-3} torr $\sim 10^{-6}$ torr
초고진공(ultra high vacuum)	10^{-6} torr $\sim 10^{-9}$ torr
극고진공	10^{-9} torr 이하

2. 2 기체의 분자운동

용기내에서 기체분자는 사방으로 움직여서 분자끼리 또는 용기 벽과 충돌하여 운동량을 주고 받아 압력을 가하며, 그 결과로 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 전체적인 기체의 흐름이 생긴다. 이 흐름이 진공도가 그다지 높지 않아 주로 분자들끼리의 충돌에 의한 경우에는 점성흐름, 진공도가 충분히 높아 분자들끼리의 충돌은 거의 없고 용기나 관의 벽에 부딪힌 결과일 때는 분자흐름, 그리고 두가지 충돌영향이 비슷한 정도일 때

전환흐름이라고 한다.

압력이 P인 진공시스템의 배기속도 S는 단위시간에 배기구를 통해 빠져나가는 기체의 부피 즉 부피유속으로 표현되며, 배기구를 통해 나가는 유량 Q는 단위시간에 빠지는 기체의 양(PV) 즉 $Q = PS$ 로 표시된다. 만약에 진공 용기에 새로 생성되는 기체가 전혀 없고 펌프로 배기를 끝없이 계속하면 완전진공이 될 것이다. 그러나 실제로는 다음에 설명하게 될 여러가지 원인으로 하여 용기자체가 여러가지 가스를 생성하기 때문에 궁극진공도(ultimate pressure)는 용기자체가 배출하는 잔류가스(residual gas)의 양을 Q_i 라고 하면 다음과 같이 주어진다.

$$P_{uet} = Q_i / S \quad (1)$$

(그림 1)과 같이 두 지역이 임의의 장애물로 갈라져서 기체가 흐를 때는 두 지역의 압력차이는 다음 식을 만족시킨다.

$$Q = C (P_1 - P_2) \quad (2)$$

여기서 C는 장애물의 컨덕턴스로서, Q를 전류, $1/C$ 의 저항 압력을 전압으로 대치하면 전기문제와 대응된다

배기속도 S_0 인 펌프가 진공시스템의 배기구와 직접 연결되어 있지 않고 관, 배플, 트랩등의 요소들과 결합되어 이들 요소들의 전체 컨덕턴스가 C 라면 실제 배기속도 S는 다음과 같다.

$$1/S = 1/S_0 + 1/C \quad (3)$$

따라서 C가 작은 경우 실제 배기속도 S는 줄어들므로 C를 크게 하도록 조심해야 한다.

2.3 잔류기체의 원인들

펌프로 아무리 오래 배기시켜도 완전진공은 도달되지

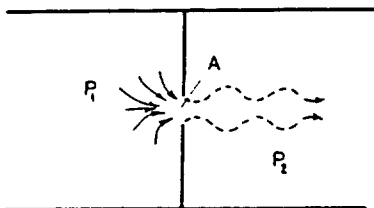


그림1. 기체의 흐름

않고 식(1)에서 주어진 P_{uet} 이하로는 압력이 내려가지 않는다. 그 이유는 잔류가스 때문인데, 이의 원인은 크게 다음과 같다.

a. 누출(leaks)

고진공 용기는 주로 유리나 스테인레스 스틸을 쓰는데 재료 자체에 결함이 있을 수도 있으나 대부분의 경우 용접부위 또는 기타 연결부위가 완전치 못하여 누출이 생긴다.

b. 허 누출(virtual leaks)

나사를 잘못 조이거나 O-ring을 잘못써서 이중 밀봉이 되거나 이중 용접을 하면 공기가 갇히며(trap), 용기 내부를 진공시킴에 따라 이 갇혀 있는 공기가 새어 나온다. 따라서 진공용 용접이나 밀봉은 이중이 되지 않도록 주의하여야 한다. (그림 2)에 용접방법의 몇가지 예를 보인다.

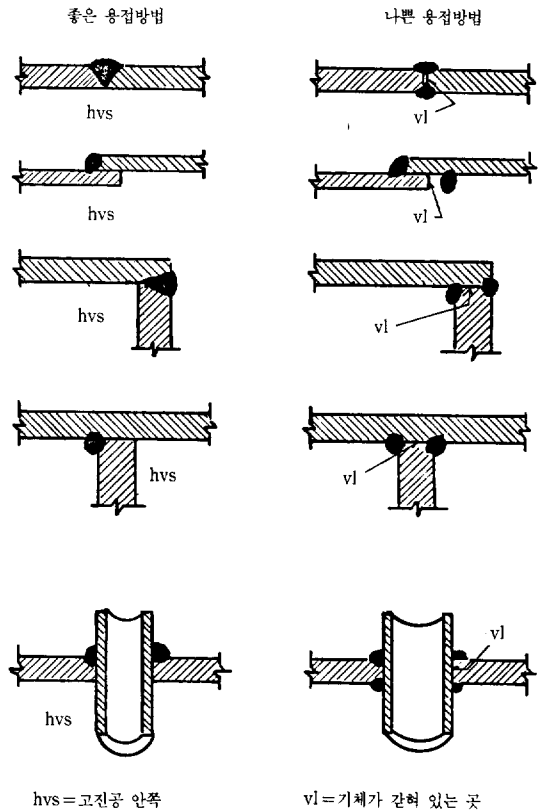


그림2. 고진공 용접방법

c. 탈가스(outgassing)

기체 분자가 용기를 때려 표면의 불순물이 충분한 에너지를 흡수하면 튀어 나온다. 또한 용기의 표면이나 몸체에는 다량의 기체가 함유되어 있는데, 용기 안의 진공도가 높아지면 이 기체가 스며 나온다. 이를 방지하기 위해서는 세척에 신경을 써야 하고 미리 용기를 150℃ 이상, 초고진공의 경우 400℃ 정도까지 구우면서 진공시켜 함유된 가스의 양을 줄여 놓는다. 또한 재료에 기공이 없고 표면이 매끄럽도록 처리해야 한다.

d. 증발(evaporation)

모든 물질은 재료에 따라 증기압을 갖는다. 따라서 진공재료는 증기압이 낮아야 한다. 증기압은 온도가 내려가면 낮아지므로 초고진공을 원할 때 시스템 전체온도를 액체질소등을 사용, 내리는 방법도 가끔 쓰기도 한다.

e. 투과(permeation)

용기의 밖과 안은 1 기압의 차이가 나므로 밖의 가스가 용기재료를 통해 내부로 스며 들어간다. 특히 수소나 헬륨같은 가벼운 기체가 잘 들어가며, 유리, 고무, 합성수지등을 잘 통과 한다.

3. 진공의 발생기술

진공을 발생시키기 위해서는 진공을 담은 용기, 부분 또 필요한 조각기구나 부품들의 연결, 진공 펌프들 그리고 누출의 확인 등이 필요하다.

3.1 진공용기

진공재료들은 2 절에서 설명한 잔류가스를 최대한 줄일 수 있는 것을 골라야하며 이밖에 요구되는 성질들은 충분한 강도, 용접 및 가공이 쉬운 것, 무자성 그리고 화학적 안정성등이다. 스테인레스 스틸이 용기재료로 가장 많이 쓰이며 저진공용으로는 철주조물이나 유리가 쓰이기도 한다. 알루미늄은 제반 성질이 진공재료로서 적합치 않은 것으로 알려져 있으나 열전도도가 좋고 가벼운 장점때문에 일본에서 초고진공 용기재료로 사용가능도록 제조공법을 집중적으로 연구하여 트리스탄 가속기에는 이 개발된 알루미늄을 사용하였다. 우리나라에 설립될 가속기도 이 알루미늄을 쓸 것으로 알려져 있다.

진공 용기 안과 밖은 1 기압의 차이가 나므로 상당히 큰 힘이 작용한다. 따라서 평판형 구조보다 원통형이나 구형구조가 더 견고하다. 용기는 많은 조작부품들과 연결될 수 있도록 충분한 수의 포트(port) 를 가져야 한다.

3. 2 진공 펌프

펌프를 선정할 때 일반적으로 고려해야 할 사항으로는 진공 용기의 크기, 원하는 진공도, 배기되는 기체의 성질과 양, 원하는 진공도까지 내리는 시간, 그리고 배기속도에 미치는 연결관의 효과등이다.

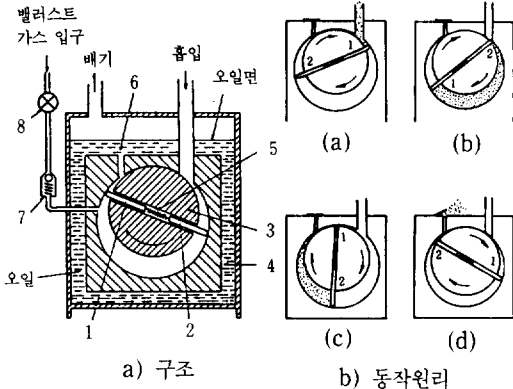
대기압에서부터 초고진공에 이르기까지 모든 영역에 사용할 수 있는 펌프는 아직 개발되어 있지 않으며, 고진공 내지 초고진공용 펌프들은 반드시 저진공용 펌프를 1 차펌프(fore pump) 로 써서 보조받아야 한다.

저진공용 펌프로 가장 많이 쓰이는 것은 로타리 펌프(oilsealed rotary pump)이고 그밖에 루트(roofs) 펌프와 흡수(sorption) 펌프가 있다. 고진공 및 초고진공용 펌프로는 터보분자(turbo molecular) 펌프와 확산(diffusion) 펌프 등이 있고 초고진공용으로는 승화(sublimation) 펌프, 이온(ion) 펌프 그리고 초냉각(cryo) 펌프등이 있다.

저진공이나 고진공펌프들은 대개 모든 기체들에 대하여 배기속도가 같으나 초고진공으로 가면 수소나 헬륨 가스등 가벼운 분자의 배기속도는 상대적으로 낮아지며, 흡착의 성질을 이용하는 흡수, 이온, 승화 및 초냉각펌프들은 기체종류에 따라 배기 속도가 틀려지므로 주의해야 한다. 다음에 몇가지 대표적인 펌프에 대하여 설명한다.

a. 로타리 펌프(oil sealed rotary pump)

로타리 펌프는 가장 널리 사용되는 기계식 펌프로서 진공오일을 사용하여 공기의 유입을 막으면서 회전자가 회전하며 배기되도록 하는 펌프이다. 배기속도는 500ℓ/s 이상 갈 수 있으며 도달 진공도는 10⁻² ~ 10⁻³ torr 정도이다. (그림 3)에 날개 회전식 펌프의 구조와 동작을 보인다. 여러가지 다른 방식이 있으나 동작원리는 비슷하다. (a)에서 흡입된 기체는 (b)에서 갇히고 (c)부터는 압축되기 시작하여 충분히 압축되면 배기 밸브를 열고 기체가 배출된다. 이와 같은 과정을 빠른 속도로 반복함으로써 용기내의 기체



1, 2, 날개; 3, 회전자; 4, 고정자; 5, 스프링; 6, 평판밸브; 7, 8, 밸브 날개회전식펌프

그림3. 날개회전식펌프

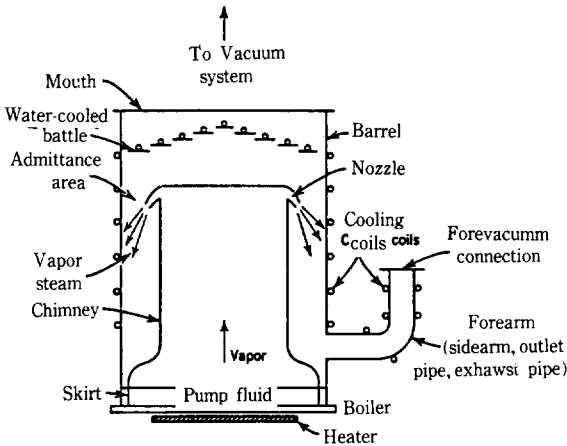


그림 4. 확산펌프의 구조

를 밖으로 배출시킨다.

b. 확산 펌프(diffusion pump)

(그림 4)에 1 단계(single-stage) 확산펌프를 보인다. 일반적으로는 한단계 이상의 노즐을 가지고 있다. 펌프용액을 히터로 가열하면 발생한 증기는노즐을 통해 음속에 가까운 빠른 속도로 분사되며 주위의 기체가 증기와 부딪쳐 운동량을 전달받아 아래로 빨려들어 가게된다. 벽에는 냉각수를 흘려 부딪히는 용액을 다시 회수한다. 요즘에는 증기압이 낮은 기름이 많이 개발되어, 좋은 기름과 잘 디자인된 배플을 쓰면 초고진공에 도달할 수 있다. 배기속도가 크고 가격이 싸고 유지가 쉬우므로 많이 쓰인다. 그러나 기름이 용기내로 확산되어 들어가는 되흐름(back stream)을 완전히 막을 수 없으므로 기름이 불순물로서 용납

되지 않는 시스템에서는 사용할 수 없다.

c. 터보 분자 펌프(turbo molecular pump)

16000 rpm 이상으로 고속 회전하는 터보에 기체 분자가 부딪히면 회전 방향과 날의 각도에 따라 일정 방향으로 운동량을 받는다. 고속회전하는 회전자(rotator)와 고정자(stator)를 잘 배치하여 배기구의 기체를 일정방향으로 흐르게 하여 배기시킨다. 빨리 움직이는 물체에 의하여 운동량을 전달받는 원리는 확산 펌프와 비슷하다 하겠다. 원리는 오래전부터 알려져 있었으나 최근에 와서야 기계공업의 발달과 더불어 상품화되었다.

터보펌프는 초고진공(10^{-10} torr)을 얻을 수 있으며, 기름을 쓰지 않고 배기속도가 높으며 수소나 헬륨기체에 대해서도 다른 펌프에 비하여 배기속도가 높고 사용이 간편한 까닭에 반도체산업의 성장과 함께 근래에 급속히 그 용도를 넓혀가고 있다. 이 펌프를 사용시에는 특별히 청결에 유의하고 냉각수가 끓이지 않도록 하고 공기에 노출시킬 때에는 회전자의 속도를 완전히 줄인 다음 해야한다.

d. 게터펌프(getter pump), 스파터 이온 펌프(sputter ion pump)

게터펌프는 화학 활성이 커서 화학적 결합을 통하여 기체를 흡수하는 게터(getter) 물질을 증발시켜 넓은 면에 게터의 박막을 형성시키며, 박막의 흡수능력이 떨어지면 다시 증발시켜 게터의 표면을 새로 형성 시킴으로써 이루어진다. 게터는 Ba, Ca, Sr, Mg, Ti, Zr, Ta 기타 많은 화학활성이 큰 물질들이 사용되는데 Ti가 주로 많이 쓰이며 Ti승화펌프라고 불린다.

이온 펌프는 양극과 음극의 두 전극 사이에 고전압이 걸리면 방전이 일어나 전자가 가속되고 이 가속된 전자가 기체를 이온화시키고 다시 이 기체이온은 음극쪽으로 가속되어 음극과 부딪쳐서 고체 속에 묻히는 현상을 이용한다. 이 때 음극을 게터물질로 만들면 튕겨 나온 게터가 양극에 도포되어 승화펌프의 기능을 수행하여 배기 기능을 상승시킨다. 이 두가지 현상을 더 효과적으로 수행케 하기 위해 음극은 넓은 판(대개 Ti를 쓴다)을 사용하고 양극은 구리로 속이 빈 원통형 cell 모양으로 만들어 표면을 넓게한다. 또한 펌프에 자장을 주어 전자의 경로를 구부려 기체 분자와 더 효과적으로 부딪치게 한다.

e. 흡착펌프(Sorption pump), 초냉각펌프(Cryo pump)

물리적인 흡착효과를 이용하여 기체를 배기시키는 펌프가 흡착펌프이다. 액체질소로 냉각시킨 활성숯, 지올라이트(jeolite), 활성알루미나등이 주로 사용되는 흡기체이다. 화학적 흡착에 의한 게터펌프와는 달리 흡기능력이 떨어지면 온도를 올려 흡착된 기체를 제거함으로써 흡기체는 흡기능력을 되찾는다. 만들기도 간단하며 깨끗한 저진공을 얻을 수 있고 배기시간도 짧으므로 액체질소가 있을 때는 많이 사용된다.

초냉각펌프는 극저온으로 가면 대부분의 물체가 응결되고 증기압도 매우 낮음을 이용한다. 냉각표면에 응결층이 두터워지면 냉각효과가 줄어들므로 미리 진공도를 어느정도 이룩한후 냉각제를 사용한다. 대부분의 기체들은 액체헬륨을 사용하면 잘 응결되나 헬륨이나 수소원자들은 잘 배기되지 않으므로 활성숯이나 지올라이트를 같이 사용한다. 예전에는 액체 헬륨이 고가이므로 많이 활용되지 못했으나 현재는 효과적인 냉동시스템이 개발되어 초냉각펌프에 부착되어 나오므로 많이 사용되며, 깨끗한 초고진공을 도달할 수 있어 반도체장비, 가속기등에 많이 사용되고 있다.

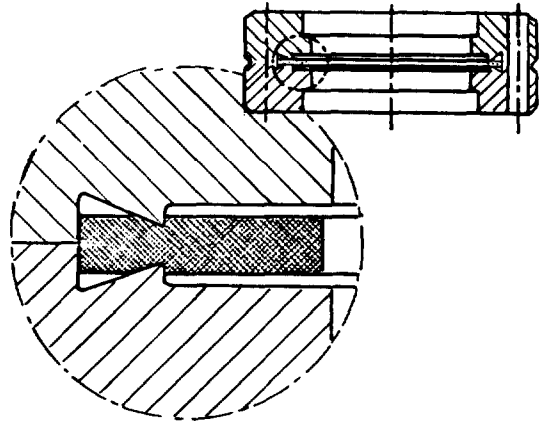


그림 5. 콘플레이트 플랜지 밀폐방식

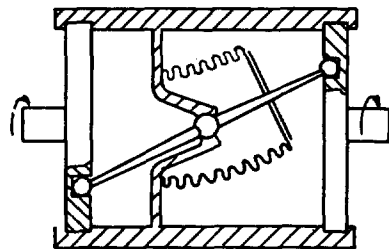


그림 6. 벨로우즈를 이용한 역학 신호전달장치

3.3 진공부품(Parts)

펌프나, 게이지 그리고 진공용기 이외에도 진공시스템을 원활하게 이용하기 위해서는 여러종류의 부품들이 필요하다. 다음에 대표적인 부품들 몇가지를 소개한다.

a. 플랜지(flange)와 가스켓(gasket)

일반적으로 많이 쓰이는 가스켓은 고무나 합성고무 등 탄성이 좋은 재료의 오-링(O-ring) 형태이다. 플랜지는 변형이 잘 생기지 않는 재료로 적당한 홈을 가지고 있다. 양 플랜지 사이에 가스켓을 끼우고 압축시키면 플랜지 사이에 기체가 지날 수 있는 틈을 골고루 메꾸어 주게 되어 진공누출을 막게 된다. 천연고무는 고온에 견디지 못하므로 바이톤 A 과 같은 합성고무나 폴리이미드 계열 재료의 가스켓도 개발되었다.

초고진공 시스템에서는 인듐, 알루미늄, 금등의 무른 금속을 O-링 모양으로 만든 뒤 평평한 표면의 플랜지 사이에 끼워 눌러 밀폐시킨다. 조금 더 단단한 금속의 평평한 가스켓을 칼날 모양의 플랜지가 파고 들어가는 형태도 여러가지 개발되었다. 주로 무산소

동(OFHC)을 쓰며, 산소분위기에는 온도극한 구리를 가스켓 재료로 쓴다. (그림 5)에 가장 보편적으로 사용되는 콘플레이트(conflat) 플랜지식 밀폐방식을 보인다.

b. 역학신호 연결장치 및 유동밀폐장치

10^{-6} torr 정도까지의 진공영역에서 저속용 기기에 는 O-ring으로 밀폐를 유지하면서 운동을 전달시키거나 구리스 등 윤활유를 이용하기도 한다. 바이톤A 링에 흑연을 윤활제로 쓴 것은 약간 높은 온도에 견딜 수 있는 연결장치이다. 진공시스템이 고진공인 경우나 높은 온도에서 견딜 필요가 있는 경우에는 벨로우즈(bellows)를 이용한 밀폐기구가 많이 쓰인다. 벨로우즈로는 직선운동뿐 아니라 (그림 6)처럼 회전운동 전달 기구로도 이용할 수 있다.

고속운동인 경우에는 전장(electric field) 나 자장을 이용하여 봉합되어 있는 진공용기안의 움직임을 전달받거나 전달시킨다. 직접 동력축을 진공시스템안으로 통과시켜야 할 필요가 생겼을 때는 P. T. F. E. 재료의 부싱을 이용하여 밀폐시키기도 하고 최근에

나온 방법은 자성성분의 입자가 콜로이드 형태로 유활유속에 녹아있는 자성유체(ferrofluid)를 사용하는 것이다. 이 액체는 평소에는 원활유처럼 작용하지만 일정한 방향으로 자장이 걸리면 자석처럼 작용하여 밀폐작용을 한다.

c. 진공밸브(Valve)

밸브의 종류는 다양해서 기능에 따라 분류해 보면 단순 개폐용 밸브부터 미세유량조절 밸브까지 나눌 수 있고, 작동원리에 따라 분류해 보면 원판형(disk) 밸브, 게이트(gate) 밸브, 격막형(diaphragm) 밸브, 바늘형(needle) 밸브, 구형(ball) 밸브등으로 나누어진다. 또 밀폐방식에 따라 O-링형, 금속형, 바늘형 등으로 나눌 수 있다. (그림 7)에 밸브의 일부를 보인다.

대부분의 밸브는 개폐방식이 나사로 되어 있어 손이나 모터 등으로 돌려 밀어 넣어 닫거나 빼서 열 수 있게 되어 있다. 개폐시간을 단축해야 할 필요가 있을 때는 슬라이딩(sliding) 방식이나 회전식을 쓰기도 하며 이런 경우 스프링과 압축공기의 힘을 빌어 순간적으로 작동시키는 밸브들이 많다.

d. 전기신호 연결장치(lead through) 및 투시창(window)

전기신호 연결장치는 금속재료인 진공용기와 전극부분을 절연시키면서 밀폐함이 가장 중요한 문제이다. 특히 고온 열처리와 큰 전류가 흘러야 하는 경우 온

도에 따른 전극용량 등을 계산하여 설계하여야 한다.

절연체로는 세라믹이나 유리가 많이 쓰이는데, 이들은 금속과 접촉시킴이 중요한 기술이다. 이를 위하여 열팽창계수가 유리나 세라믹과 비슷한 특수금속들이 개발되어 있고, 반대로 금속과 비슷한 특수유리도 개발되어 이들을 접촉시킨다. 또는 금속과 절연체의 중간매개 금속 합금을 넣고 붙이는 방법도 있다. 투시창의 재질로는 석영이나 사파이어가 좋으나 고가이므로 특수유리로 쓰기도 한다. 이들 투시창을 붙이기 위해서는 O-링, 진공용 에폭시를 이용하거나 금속밀폐방식을 쓰기도 한다.

e. 배플(baffle) 과 트랩(trap)

배플은 펌프의 기름이 진공용기 쪽으로 들어가 내부를 오염시키지 않도록 설치하는 일종의 가로막이다. (그림 8)에 여러 종류의 배플을 보였다. 배플은 열전도도가 좋은 재질로 제작되어야 하며, 수냉방식이 많이 쓰인다.

트랩은 기체에 섞여 있는 기름증기나 수증기 등을 제거하기 위한 것이다. 드라이 아이스, 프레온, 액체 질소등을 사용하여 증기들을 응축시켜 버리기도 하고, 흡기체를 사용하기도 한다.

배플이나 트랩을 사용하게 되면 기체흐름의 방해요인이 커지므로 콘다턴스가 줄어든다. 따라서 펌프의 용량을 선택할 때는 배플과 트랩에 의한 배기속도의 감소를 고려하여 큰 용량의 것을 선택해야 한다.

3.4 누출탐지(leak detection)

진공시스템에서 누출장소를 찾아내는 일은 매우 힘들다. 허누출, 증발, 탈가스, 투과현상등은 재료의 선택, 용접, 가스켓의 선택 및 연결방법등을 알맞게 하여 줄여야 하며 여기서 다루는 누출 탐지는 용기의 결합에 의한 누출을 말한다.

여러가지 누출탐지방 방법이 개발되었다. 일반적으로 쓰이는 방법은 외부에서 의심나는 영역에 아는 가스를 주입하고 이를 적당한 방법으로 감지하는 것이다. 알콜이나 아세톤 그리고 에테르 등과 같은 휘발성이 강한 액체를 누출부위에 뿌리면 내부의 압력이 올라간다. 이 압력의 변화를 저진공영역에서는 피라니 게이지등을, 고진공 영역에서는 열이온 게이지등 고진공용 게이지들을 사용하여 감지한다. 초고진공 영역에서는 헬륨기체를 주

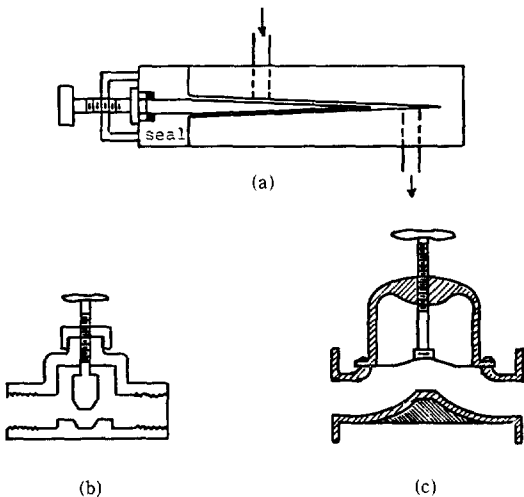


그림 7. 바늘형밸브(a,b)와 격막형밸브(c)

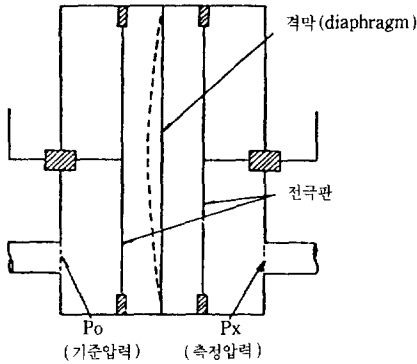
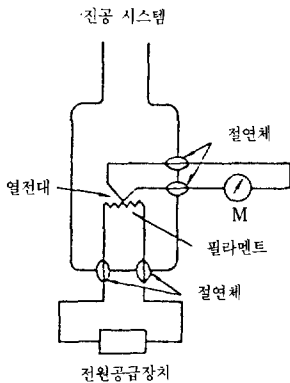
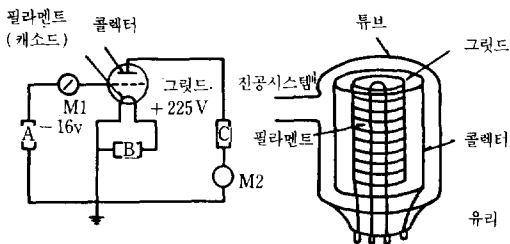


그림 8. a) 전기용량 격막식 압력계



b) 열전도 계지의 구조



c) 3극진공관식 열이온 전리진공계

입시킴고 이온계지로 압력의 증가를 감지하거나 더 나은 방법으로는 잔류기체측정기(RGA)로 헬륨의 부분 압 증가를 감지한다. 이와같은 방법은 시스템에 이미 부착된 기기들로서만 행해지 수 있으므로 무척 편리하다. 이들 방법은 이미 시스템에 부착되어 있는 기기들로 행하는 것이므로 무척 편리하다.

고진공에서 초고진공에 이르기까지의 누출을 간단하고 효과적으로 수행하는 기기로서 각광을 받고 있는 것이 헬륨누출탐지기(helium leak detection)이다. 이 기

기는 헬륨을 탐지할 수 있게 조절해 놓은 사중극 질량 분석기(quadrupole mass spectrometer)와 고진공 펌프로 구성된 기기로서, 진공시스템의 기체를 계속 빨아들이면서 누출부위에 헬륨을 쏘면 그 부위를 통해 들어간 헬륨의 부분압 증가를 질량분석기로 감지한다.

고진공영역의 누출탐지를 값싸고 간단히 수행하는 방법으로는 할로겐화물이 양이온을 생성시키기 쉬운 성질을 이용한 할로겐누출탐지기가 있다. 이 밖에 저진공영역에서는 용기내부에 고압을 주고 의심부위에 비눗물을 발라 거품이 생김을 보는 방법도 있으며, 용기가 유리로 만들어져 있을 때는 스파크 코일을 사용하여 누출부위로 들어가는 탐지기체나 증기에 의해 생기는 방전색깔의 변화를 관찰하는 방법도 있다.

4. 진공의 측정

진공시스템의 진공도는 시스템속의 기체압력으로 나타나며 이 압력을 측정하는 계기를 진공계라고 한다. 진공을 아무리 잘 뽑아도 그 진공도를 측정할 수 없으면 그의 응용이나 그 기술은 더이상 발전할 수가 없다. 실제로 1950년경 Bayard와 Alpert가 10^{-5} Pa 이하의 압력을 측정할 수 있는 계지를 개발하기 전까지는 초고진공기술연구는 전혀 진행되지 못했다.

대기압으로부터 초고진공에 이르기까지 압력의 범위가 대단히 크므로 한개의 진공계로 모든 압력을 측정할 수는 없으며 영역에 따라 측정원리 및 진공계의 종류도 달라진다. 다음에 흔히 쓰이는 대표적인 진공계를 설명한다.

4.1 저진공의 측정

a. 전기용량격막식 압력계(Capacitance Diaphragm Gauge)

(그림8 a)에 전기용량격막식 압력계(CDG)의 원리를 보인다. 압력에 의해 유연한 격막이 휘어지면 이 변위를 전기용량의 변화로 감지한다. 10^{-3} torr까지의 측정도 가능하며, 정밀도와 안정성이 지극히 좋아 2차표준기(transfer standards)로도 사용되며, 격막으로 되어있어 유독가스의 차단역할도 수행하므로 그 사용이 격증되고 있다.

b. 열전도 진공계(thermal conductivity gage)

이 게이지는 진공속에서 가열된 필라멘트의 열손실이 기체분자의 열전달작용에 의한 것으로서 압력에 비례한다는 사실을 이용한 것이다. 피라니 게이지는 필라멘트의 온도변화를 전기저항의 변화로 측정하며 열전대게이지는 열전대를 사용하여 감지한다. (그림 8b)에 열전대 진공계의 구조를 보인다.

4.2 고진공의 측정

a. 열이온전리진공계(hot cathod ion gage)

가열된 필라멘트에서 방출된 전자가 기체와 충돌하면 기체는 전리되어 양이온이 된다. 이 양이온을 수집기(collector)에 모으면 양이온에 의한 전류가 흐르는데 이 전류는 전자의 전류(emission current)와 기체의 압력에 비례한다. 이 관계를 이용하여 열이온전리진공계를 만든다. (그림 8c)에 3극 진공관식 열이온전리진공계를 보인다. 이 게이지로는 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ torr까지의 진공도 측정이 가능하다.

b. Spinning Rotor 진공계

이 진공계는 최근에 개발된 것으로서 안정도와 재현도가 좋으며 정밀도가 높기 때문에 고진공영역의 2차표준기로서 쓰인다. (그림 8d)에 이 진공계의 원리도를 보였다.

직경 4.5mm의 강철구를 진공용기와 연결된 비자성 튜브속에 넣고 이 튜브 밖에서 자석을 써서 공을 튜브 중앙에 띄운 다음 자력을 이용하여 이 공을 약 400 Hz로 회전시킨다. 이 회전속도가 기체분자와 부딪쳐 감속하는 정도를 감지하여 압력을 측정한다. 최소 측정 압력은 공의 와전류 영향에 의한 offset 값에 따라 달라지지만, 이 offset의 값을 잘 측정하면 10^{-7} torr까지의 측정도 가능하다.

4.3 초고진공의 측정

열이온전리진공계를 사용하면 10^{-7} torr 이하의 압력을 측정할 수가 없다. 그 주된 이유는 필라멘트에서 방출된 전자가 그것들은 쳐서 x-ray를 방출하는데 다시 이 x-ray는 수집기에 부딪쳐 광전효과를 일으켜서 전자를 방출시키는데, 이 결과 생기는 전류가 전리기체에 의한 전류와 비슷한 수준이기 때문이다. 그 밖에 초고진공하에서는 여러 구성 요소들로부터 불순물이 튀어

나오기도 하고 화학작용도 일어나고 스파터(Sputter) 현상이 나타나기도 하며 이온펌프의 기능도 약간 생긴다. 이들 효과를 일부 또는 전부 억제하도록 디자인을 개선하여 초고진공용 진공계들이 개발되었다.

가장 대표적인 것으로는 Bayard-Alpert 게이지(BA 게이지)로서 기존 전리진공계의 수집기를 가는 선으로 대치 유리관 중앙에 설치하므로써 x-ray를 받는 절대 면적을 줄였다. 이 게이지로는 $10^{-4} \sim 10^{-10}$ torr 정도까지의 진공도를 측정한다. 한걸음 더 나아가서 조절자(modulator)를 사용하여 x-ray 효과를 측정하여 빼줌으로써 측정영역을 넓힌 것도 있으며(modulated ion gage), 아예 수집기를 필라멘트와 그리드로부터 Shield를 사용 격리시킨 방법(extractor gage), 또 광전효과로 수집기로부터 방출되는 전자를 억제기(Suppressor)로 유전압을 부과하여 도로 수집기로 돌아가게 하는 방법등도 사용된다.

열이온전리진공계와 달리 냉음극전리진공계도 개발되었는데 페닝(penning) 게이지 또는 필립스(Phillips) 게이지라고도 불린다. 원리는 열이온의 경우와 같으나 전자의 생성이 큰 전압차에 의한 방전으로 된다는 점이 다르다. x-ray limit가 없어서 10^{-12} torr까지의 측정도 가능하다. 높은 펄핑효과와 불안정한 교정곡선등이 흠이다. (그림 9)에 각종 대표적인 초고진공 진공계의 원리도를 보인다.

전리현상은 기체의 분자종류에 따라 그 정도가 달라진다. 따라서 전리진공 측정기기들은 전부 기체에 따라서 그 강도가 달라진다. 일반적으로는 질소가스를 표준으로 택하여 다른기체들에 대해서는 질소대비 감도를 준다.

4.4 부분압의 측정(Partial pressure measurement)

반도체의 제조, 박막의 조성조절등을 위해 부분압을 측정해야할 필요성이 생긴다. 표면연구의 경우엔 활성기체가 소량만 존재해도 지장을 주며 가속기의 경우 무거운 원소의 존재는 치명적일 수 있다. 초고진공으로 내려가면 대개의 펌프들은 기체의 종류에 따라 배기속도가 달라지며 용기에서 탈가스되는 기체들의 조성이 중요해진다. 진공상태인 용기내의 분자의 종류 및 그 밀도들을 정확히 모르고는 복잡한 진공장치들을 효율적으

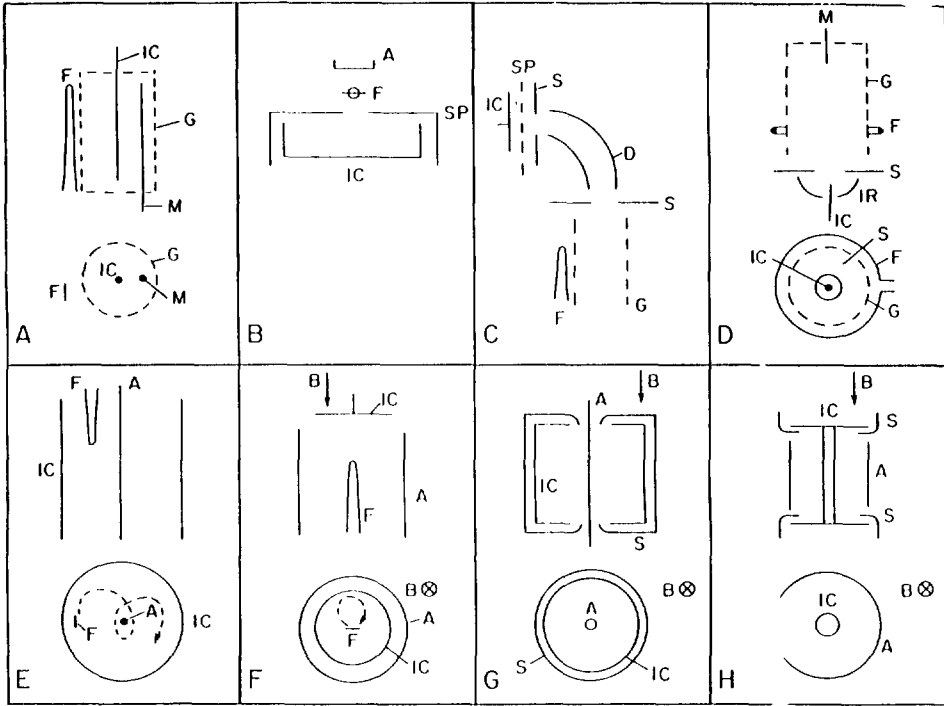


그림 9. 초고진공 계기

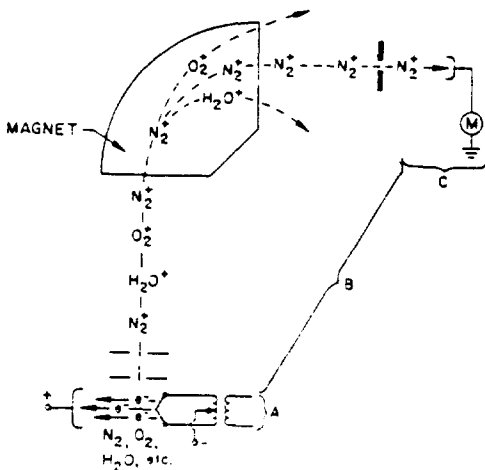


그림 10. 부분압 측정의 세단계 : (A) 이온화, (B) 질량분류, (C) 검출

로 운영한다는 것은 불가능하다.

부분압 측정기들은 일반적으로 잔류가스를 검사하기 위해 디자인된 질량분석기이며 잔류기체분석기(Residual Gas Analyser)라고 불리기도 한다. RGA의 구조는 이온생성기(ion source), 질량분류기(mass analyser)

그리고 검출기(detector) 등을 갖추고 있다.

(그림10)에 RGA의 구조도를 보인다. 이온생성기는 필라멘트를 가열하여 방출된 전자를 가속시켜 기체를 전리시켜 이온을 만들며, 적당한 전장배치(electro optics)를 이용 이온빔(ion beam)을 형성시킨다. 질량의 분류기는 이온질량 m 의 전자에 대한 비 m/e 를 분류해 내는 것인데 자장질량분류(Magnetic Sector Analyser) 방법이 있고 사중극질량분석기(Quadrupole Mass Spectrometer)를 쓰는 방법이 있으며, 기타 다른 방법들도 많이 연구개발 되었으나 상기 2종이 현재 질량분석기의 대종을 이루며 RGA 용으로는 거의 대부분 사중극방법을 사용한다. 검출기의 경우 단순히 분류된 이온을 수집하는 파라데이컵(Faraday cup)을 사용하는 수도 있고 감도를 더 높이기 위해 전자증폭기(electron multiplier)를 사용하기도 한다. 이 경우 10^{-11} torr까지의 부분압 측정이 가능하다.

사중극 질량분석기는(그림11)에 표시한 바와 같이 쌍곡선 형태의 네개의 막대에 적당한 DC 전압과 교류전기를 적당히 가해주면 사중극 내부에서의 이온운동이 일정 m/e 값을 가진 이온만이 막대에 부딪치지 않고

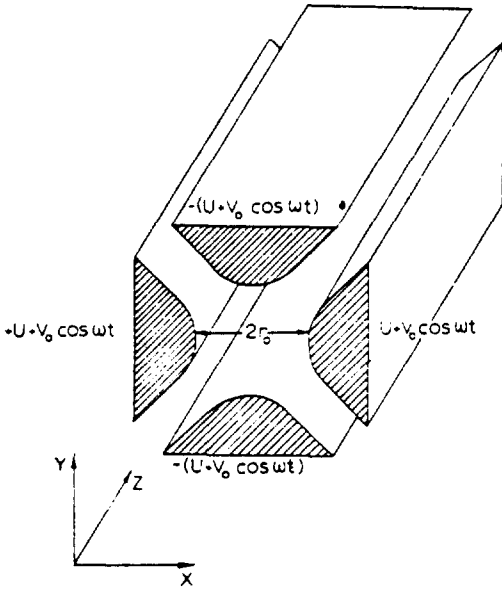


그림11. RF 사중극

빠져나올 수 있게 조절할 수 있음을 이용한 것이다. 실제의 경우 쌍극선형은 만들기 힘들므로 적당한 반경의 원통으로 대체하며, 분해능 및 질량범위는 검출기의 성능, 사중극의 길이 및 형태, U/V 그리고 교류전기의 주파수등에 의해 좌우된다. RGA를 사용하는 경우 분석을 원하는 질량범위, 분해능, 감도등에 따라 가격차이가 많이 나므로 이들을 잘 고려하여 선택해야 한다.

5. 진공도 측정표준

진공도의 측정방법은 필요에 따라 여러가지의 진공계가 개발되어왔다. 그러나 이들 진공계들은 그 사용에 따라 감도가 자주 변하므로 정확도에 있어서 상당히 떨어진 수준이며, 따라서 수시로 정확한 진공계와 비교 교정해 주어야 한다. 표준이나 하면 고정밀도만이 아니라 기초원리로부터 유도되는 높은 정확도가 요구된다. 아직까지 초고진공을 위한 표준기의 개발은 선진국에서도 이루어지지 않았다. 한국의 경우 한국표준연구소에서 10^{-7} torr 까지의 표준기 개발이 이루어졌다.

5.1 저진공의 표준

저진공영역의 표준은 통상 U관 압력계로 알려져 있는 액주형 압력계를 사용한다. 이는 수은을 사용하여

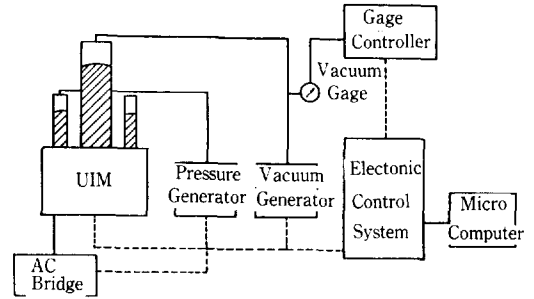


그림12. UIM

대기압의 존재를 처음으로 증명한 유명한 토리첼리 실험의 원리를 그대로 이용한 것으로서 두 관의 액주높이 차이로 압력차이를 측정한다. 이 원리는 현재에 이르러서도 그대로 사용되며 다만 액주높이 측정의 정확도를 높이는 데 각국 표준기관의 노력이 경주되었다. 한국 표준연구소에서는(그림12)에서 보이는 바와 같은 액주형 압력계를 개발하고 있는 중이다.

이 압력계는 기울어진 관에 의한 높이 측정의 부정확을 줄이기 위해 3관식으로 하였고, 수은주의 높이를 관바닥에 부착된 초음파 발진기에서 방사되는 10MHz 정도의 초음파가 수은면에서 반사되어 발진기에 다시 감지되기까지의 시간과 위상변화를 검출하여 구한다.

중대한 오차원인으로는 수은과 유리면의 불순물, 정전, 표면장력등에 의한 상호작용, 진동, 온도, 수은밀도, 수은내의 음속, 전기소음등이 있다. 이들을 제거하기 위하여 구경 72.9mm의 넓은 관을 썼으며 관내부를 Ni-Cr 증착시키고 거대한 알루미늄 블록위에 3관을 설치하였으며, 3개의 관을 알루미늄으로 싸고 내부를 진공시키고 외부를 단열재로 싸므로써 온도 변화 및 구배를 줄이고 밀도 및 음속을 수 ppm의 정확도로 측정하도록 연구하고 있다.

5.2 고진공의 표준

고진공의 표준은 1절에서 기술한 분자흐름에서의 유체흐름의 기본원리를 사용한다. (그림13)은 한국표준연구소에서 개발된 고진공표준기의 개략도를 나타낸다. 이 표준기는 상하 두 챔버로 구성되어있고 두 챔버사이에는 직경 1cm 정도의 구멍이 뚫린 오리피스 판이 놓여 있다. 전 시스템은 10^{-9} torr 이하의 초고 진공으로 내린 뒤 윗 챔버에 부착된 가변누출밸브(variable leak

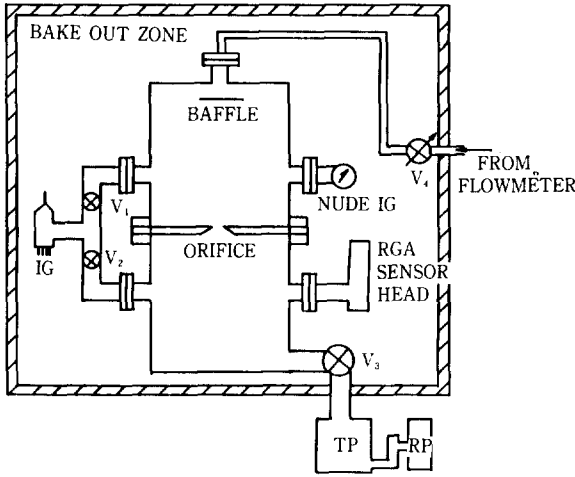


그림 13. 동적 교정 시스템

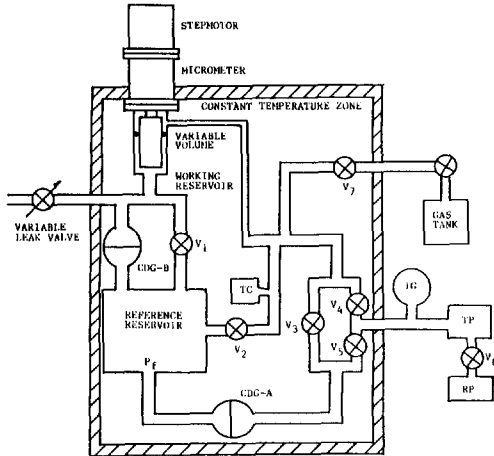


그림 14. 유량계

valve)를 통해 일정유량 Q_u 를 흘리며 계속 배기시키면 윗챔버의 압력 P_u 와 아랫챔버의 압력 P_L 사이에는 다음 식이 성립한다.

$$P_u = Q_u R_p / C (R_p - 1) \quad (4)$$

여기서 C 는 오리피스의 콘덕턴스로서 오리피스의 생김 형상과 분자운동법칙으로부터 계산해낼 수 있다. R_p 는 P_L / P_u 로서 분자흐름의 영역에서는 펌프의 배기속도만 일정하면 높은 압력에서나 낮은 압력에서나 일정하므로 압력측정이 쉬운 곳에서 측정해준다. 따라서 Q_u 만 정확하게 알면 P_u 를 알 수 있다. 실제 Q_L 를 발생하는 유량계(flowmeter)는 여러 방법이 있으나 한국 표준연구소에서는(그림14)에 보이는 바와 같은 유량계

를 제작하였다.

이 유량계는 working reservoir (WR)와 reference reservoir (RR)가 밸브 V_1 으로 구분되어 있으며 WR은 가변누출밸브로 본진공시스템과 연결되어있다. 밸브 V_1 을 열어둔 채로 펌프와 다른 밸브들을 적당히 여닫고 두개의 압력계 CDG-A와 CDG-B를 사용하여 WR과 RR이 적당한 압력에 같이 이르도록 한다. V_1 을 닫아 WR을 RR로부터 분리시키고 가변누출밸브를 열어 WR로부터 진공시스템으로 기체가 흘러들어가게 하면 WR내의 압력이 감소함을 CDG-B로 감지할 수 있다. 이 때 피스톤을 밀어 넣어 WR내의 압력이 계속 RR과 같아지도록 조정한다. 그러면 시간 t 초후에 피스톤이 l 만큼 전진하였다면 이 시간동안의 유량 Q_L 는 피스톤의 단면적을 A 라 할 때 다음과 같다.

$$Q_L = Al / t \quad (5)$$

유량을 윗 챔버에 흘리는 대신에 아랫챔버에 흘러 넣고 윗챔버가 원래의 압력 P_L 에 도달하도록 하면 이 때의 Q_L 은 원래의 Q_L 보다 더 큰 양이 된다. 이 비를 $R_F = Q_L / Q_L$ 라 놓으면 식(4)는 다음과 같이 바뀐다.

$$P_u = Q_L R_p / R_F C (R_p - 1) \quad (6)$$

따라서 같은 양의 유량을 흘려도 교정영역을 넓힐 수 있다. 그러나 이 때 오차는 더 커진다. 펌프의 배기속도가 일정하면 R_p 와 R_F 는 압력이 변해도 일정하며 R_F 는 R_p 와 거의 같은 값을 가지게 된다.

현재 한국표준연구소에서 개발한 고진공 교정시스템은 10^{-5} torr까지는 2.5%, 10^{-7} torr영역에서는 10%의 오차한계를 가진다. 이 오차의 대부분은 유량계의 오차로서, 이 유량계를 개선하기 위한 연구를 진행중이며, 동시에 아랫챔버에 유량을 흘려 넣는 방법으로 진공도의 영역을 확장시키려는 연구를 하고 있다.

6. 맺음말

이제까지 주로 진공의 발생과 측정 그리고 표준에 대하여 기술하였다. 진공기술은 1930년경부터 계속적으로 발전되어 왔으며, 기계적 재료적 극한 상황을 다루는 기술이므로 기술축적에 있어 비약이 없고 각 단계단계의 발전이 연속적이고 지속적이라야 하는 특징이 있다. 따라서 그 범위와 노우하우가 무척 다양하기 때문에 여

기서 기술된 것들은 극히 원리적인 면만 다룬 것으로서 빙산의 일각에도 미치지 못하는 것이다.

현재 선진국들은 분자 및 원자의 구조에 관한 지식을 탐구하고 이 지식을 이용 원자 및 분자의 배열 자체를 설계하여 신소재를 개발하려 하고 있다. 이와 같은 연구는 가장 깨끗한 환경 즉 초고진공을 요구한다. 또 우주 인공위성을 쏘아 올리고 우주 스테이션을 만들 계획을 세우고 있는데 이를 위해서는 우주 환경 즉 극고진공 환경에서의 물체의 물리 화학 기체 재료적 성질을 규명해야 한다. 또한 고에너지 가속기들을 제작하여 물질의 근본 및 상호작용에 대한 기본이해를 얻고자 노력하고 있는데, 이와같은 가속기는 10^{-12} torr 정도의 거대구조의 극고진공용기이다.

우리나라는 현재 벨트타입 로타리 펌프와 확산펌프가 생산되고 있고 10^{-6} torr 정도까지는 도달할 수 있다. 반도체 산업의 부상과 반도체관련 연구 활성화로 인해 고진공제품의 수입이 격증하였으며, 수입대리상과 소규모의 진공제품 주문제작업체가 지난 수년 사이에 많이 생겨났다. 그러나 오랜 기술축적이 필요하고 투자가 많이 요구되면서도 대량생산품목이라기 보다는 소량 다품종이라는 특성때문에, 연구개발에 대한 과감한 투자는 이루어지지 않고 있다.

앞으로의 기초과학의 발전을 위해서는 고진공 및 극고진공 기술에 대한 수요가 늘어날 것이며, 고진공기술은 첨단 산업 및 기술의 기반기술이 되므로 현재처럼

수입에만 의존하면 다른 나라에서 개발된 기술을 뒤쫓아 가는 데만 우리의 수준이 머무를 것이다. 독자적인 과학기술국이 되기 위해서는 독자적인 진공기술의 확보가 전제조건이라 하겠다.

참 고 문 헌

- 1) A Berman, "Total Pressure Measurements in Vacuum Technology", Academic Press, Inc., New York, 1985.
- 2) A. Roth, "Vacuum Technology", North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1976.
- 3) ISO/DIS 3570/1 "Standard Methods for Calibration Part 1 : Pressure Reduction by Continuous Flow in the Pressure Range of 10^{-3} torr to 10^{-7} torr", 1975.
- 4) G. F. Weston, "Ultrahigh Vacuum Practice", Butterworths, London, 1985.
- 5) Sharrill D. Wood and Charles R. Tilford, NBS Internal Report, "The National Bureau of Standards. High Vacuum Standard and Its Use". 1987.
- 6) C. R. Tilford, K. E. McCulloh and S. W. Han. J. Vac. Sci. Technol., 20(4), 1140(1982)
- 7) C. R. Tilford, J. Vac. Sci. Technol., A1(2), 152 (1983).