

고진공펌프

4-1) 터보분자펌프(turbomolecular pump)

단순히 터보펌프(turbo pump)라고 부르기도 한다. 1958 년 Becker 에 의해 고안되었고, 많은 진공회사들이 이를 제작하고 있다(Becker 1958). 특징으로는, 우선 가격면에서 같은 용량의 확산펌프에 비해 상당히 비싸다. $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-10}$ Torr 영역에서 사용 가능하며 확산펌프에서처럼 오일을 사용하지 않기 때문에 매우 깨끗하다. 회전축에 있는 베어링(bearing unit)에 약간의 윤활제를 사용하고 있으나 큰 문제는 안 된다. 요즘은 자기부상의 원리 (magnetic levitation)로 마찰력을 줄여 아예 윤활유도 사용하지 않는 경우도 있고 ceramic ball 을 사용하여 기름의 사용을 최소화하는 경우도 있다. 질량이 큰 탄화수소(hydrocarbon)에 대한 압축비(compression ratio)가 크기 때문에 보조펌프(backing pump)로부터 오일이 역류할 확률이 극히 작다. 다른 고진공펌프에 비해 작동의 시작 및 종료의 과정이 단순하고 시간도 적게 걸린다(10 분 이내). 배기속도가 수백 l/sec 로 비교적 용량이 큰데 배기속도는 펌프의 회전속도에 비례하며 이 속도를 조절할 수 있도록 되어 있는 모델도 있다. Sputtering 증착의 경우는 보통 수 mTorr 영역에서 시행이 되는데, 앞에서 얘기했듯이 이 영역에서는 확산펌프의 경우 역류의 가능성이 크다. 이런 경우에 터보펌프를 저속으로 두고 사용하면 좋다. 진동이 약간 있으나 문제가 되면 vibration isolator 를 설치하면 어느 정도 줄일 수 있고 수평 또는 수직 설치가 가능하다.

구조 및 원리

그림 3.29 에서 보듯이 동축의 회전자(rotor)와 고정자(stator)로 구성되어 있는데 작동원리는 그 이름에서 알 수 있듯이 수천 내지 수만 rpm 의 고속으로 회전하는 회전자의 날개들이 그들의 영역으로 들어온 분자를 쳐 그 운동 방향을 펌프의 배출구 쪽으로 향하게 하는 것이다. 따라서 수소나 헬륨처럼 분자 열운동 속도(thermal velocity)가 큰 기체(>1000 m/s)에 대한 배기속도가 떨어진다. 날의 각은 배출구쪽으로 갈수록 더 많이 기우는데 이는 흡입구에서는 진공용기와 압력차가 크지 않고 또한 많은 기체를 받아들일 수 있도록 하기 위함이고 배출구쪽에서는 압력차가 커지기 때문에 이를 유지하기 위함이다. 고정자는 역류를 방지하는 baffle 의 역할과 함께 회전자에서 튀어나온 분자를 아래쪽을 향하도록 각을 유지하고 있다(Hablanian 1995).

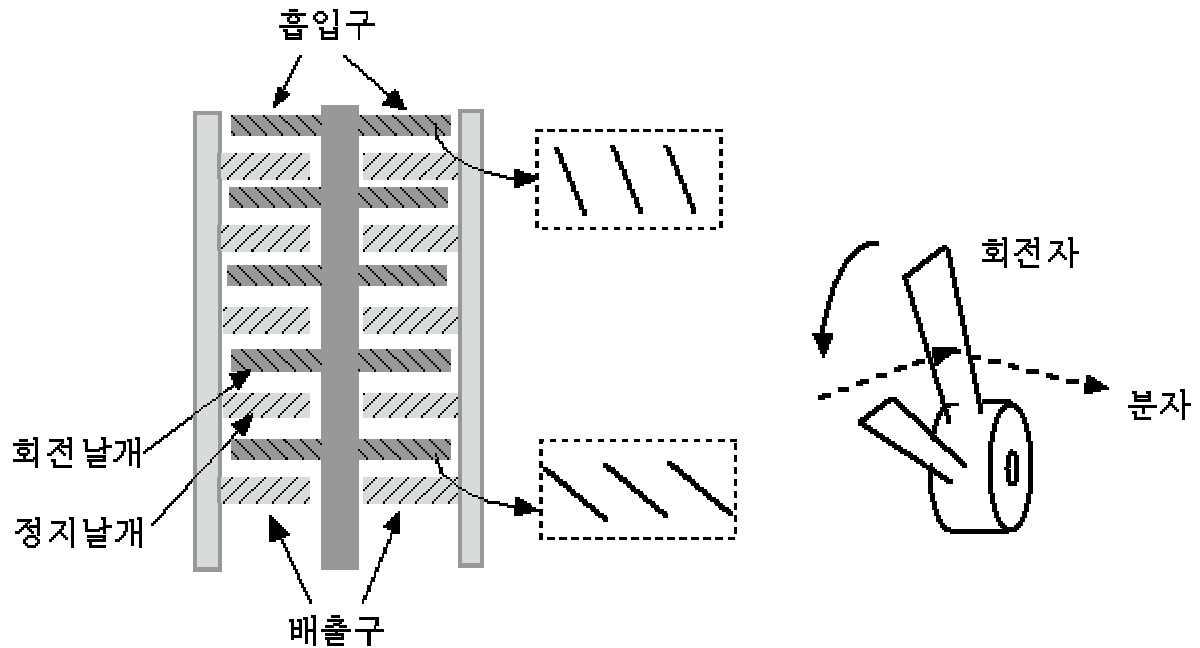


그림 3.29 고정자(stator)와 회전자(rotor)로 구성된 터보분자펌프. 날의 각은 아래쪽으로 갈수록 더 기울어진다. 오른쪽 그림은 분자의 열운동 속도 이상으로 회전하는 날에 부딪혀 분자가 운동량을 받는 모습이다.

터보펌프를 사용하는 시스템의 최저도달압력은 다음 식에서 정의되는 압축비(compression ratio), K 에 의해 결정된다.

$$K = \frac{P_{outlet}}{P_{inlet}} \quad (3-13)$$

회전 날개가 흡입구쪽에 들어온 기체분자들을 압축하여 뒤쪽으로 보내는 정도가 펌프의 성능을 결정하는데 결국은 회전날개의 속도에 대한 기체분자들의 상대 속도에 달려있다. 앞의 이론 부분 식 (2-8)에서 살펴보았듯이 주어진 온도에서 분자의 운동 속도는 결국 분자의 질량에 의존한다. 따라서 분자량 M 인 기체에 대해 압축비는 다음과 같은 관계를 보여 준다.

$$\log(K) \propto \sqrt{M} \quad (3-14)$$

질소와 수소 기체에 대한 압축비는 각각 2×10^6 와 10^3 이며 이 두 기체에 대한 배기속도는 약 4 배의 차를 보인다. 따라서 식 (3-14)를 따르면 일반적으로 분자량이 큰 탄화수소(hydrocarbon, 100 이상)에 대한 압축비는 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서

보조펌프(backing pump)오일로부터 역류에 의한 오염은 거의 무시해도 좋다. 반면 수소 등 가벼운 분자들에 대한 압축비는 떨어지므로 터보펌프를 이용하는 진공시스템 속에 잔존하는 기체는 대부분 수소라 생각해도 된다. 따라서 터보펌프를 장착한 진공시스템의 최저도달압력은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{ult} = \sum_i \frac{Q_i}{S_i} + \sum_i \frac{P_{outlet,i}}{K_i} \quad (3-15)$$

Q_i : 기체 분자 i 의 load(기체방출(outgassing)이나 작은 누출)

S_i : 기체 분자 i 에 대한 배기속도

K_i : 기체 분자 i 에 대한 압축비(compression ratio)

$P_{outlet,i}$: 배출구에서의 기체 분자 i 에 대한 분압

상용적 연결 사용법

진공용기에 연결하는 방법으로는 확산펌프에서와 같이 상용적인 방법을 사용할 수 있고 필요에 따라서는 단순화시킨 방법도 있다. 그림 3.31 에서와 같은 연결 방법은 확산펌프에서도 보았듯이 고진공펌프의 일반적인 연결법이다. 이 경우 사용법은 확산펌프에서보다는 훨씬 간단하다. 일반적으로 유지 및 관리가 쉽기 때문에 자주 사용하는 경우 일년 내내 작동시켜두면 더욱 간편하다.

㉠ 진공시스템의 모든 valve(foreline valve, roughing valve, high vacuum valve, venting valve)가 잠긴 것을 확인하고 고진공 게이지가 꺼져 있음도 확인한다.

㉡ 저진공 기계식 펌프와 터보펌프에 전원을 넣는다.

㉢ 1~2 분 지나 기계식 펌프 흡입구 쪽의 압력(foreline pressure)이 안정이 되면 foreline valve(V3)를 열어 터보펌프 뒤를 받쳐주는 보조펌프(backing pump)로서의 역할을 담당한다. 5~10 분 정도(터보펌프의 start-up time) 지나면 고진공 배기 준비가 완료된다. 일반적으로 터보펌프가 정상속도에 다다랐는지는 알려주는 게시판이 있다.

㉣ 잠시 foreline valve(V3)를 잠그고 roughing valve(V2)를 연다. 이 때 기계식 펌프의 역할이 보조(backing)에서 초기배기(roughing)로 바뀌어 대기압 상태의 진공용기를 약 50 mTorr 상태로 내린다. 앞에서도 언급했지만 초기배기펌프(roughing pump)로 조금이라도 더 압력을 내리기 위해 시간을 끌 필요는 없다.

㊸ roughing valve(V2)를 잠그고 foreline valve(V3)를 열어 기계식 펌프의 역할을 다시 보조(backing)로 바꾼다.

㊹ 진공용기 내의 압력이 여전히 약 50 mTorr 영역인가를 재확인한 뒤 high vacuum valve(V1)를 열어 터보펌프를 이용한 고진공 배기를 시작한다.

터보펌프가 항상 작동되고 있는 경우에는 ㊸-㊹의 과정만 반복하면 된다. 시스템을 완전 중지시킬 때는 high vacuum valve 를 잠그고 터보펌프의 감속스위치를 누른다. 터보펌프의 속도가 약 50% 정도로 떨어졌을 때 펌프 vent(V4)를 실시하는 것이 좋고 터보펌프의 흡입구쪽에서 하는 것이 좋다. 보조펌프(backing pump) 쪽에서 하면 터보펌프의 흡입구 쪽이 더 고진공 상태이기 때문에 역류가 된다. 이 때 foreline valve 를 잠그든지 보조펌프(backing pump)의 전원을 차단한다. 이 모든 과정이 자동화된 것도 많으니 사용을 고려해 볼 만하다. 가벼운 원소에 대한 압축비(compression ratio)를 더 높이기 위해서는 다음과 같이 작은 용량의 터보펌프를 보조펌프(backing pump)로 연결해 사용할 수도 있다. 이렇게 하면 10^{-11} Torr 까지도 가능하다(Varian 1992). 또한 분자드레그펌프(molecular drag pump)가 같은 축의 뒷부분에 붙어서도 비슷한 성능을 발휘할 수 있다(Tompkins 1991).

、 터보펌프 + 작은 터보펌프 + mechanical 펌프

、 터보펌프 (+ 분자드레그펌프) + mechanical 펌프

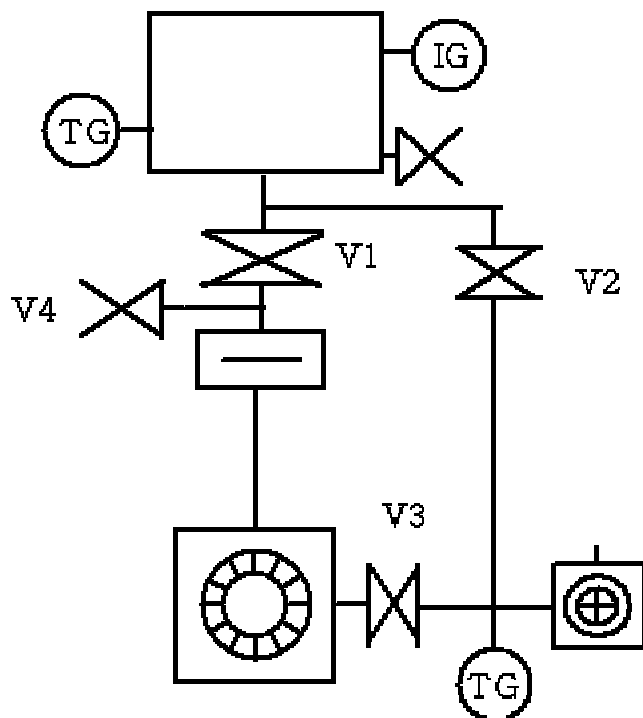


그림 3.31 터보펌프를 장착한 시스템. TG: thermocouple 게이지, IG: 이온게이지

단순연결 사용법

그림 3.32 에서와 같이 초기배기를 위한 roughing line 이 따로 없고 터보펌프를 직통하여 초기배기를 시키는 방법인데 가장 적은 양의 진공부품으로 설치가 가능하며 상용적인 방법에 비해 사용방법이 간단하다. 터보펌프가 작동되고 있지 않을 때 그것을 통하여 초기배기를 실시하고 이 과정이 끝날 무렵에 터보펌프를 작동시키는 방법을 취하는데 진공시스템을 자주 작동시키지 않는 실험실에서 종종 사용하는 것을 봤다.

- ㉠ Foreline valve 와 high vacuum valve 가 닫혀 있는지를 확인한다.(진공용기는 대기압 상태라 가정하자)
 - ㉡ 터보펌프는 작동하지 않는 상태에서 보조펌프인 기계식 펌프를 먼저 작동시켜 안정된 압력에 도달시킨다.
 - ㉢ Foreline valve 와 high vacuum valve 를 차례로 연다. 이 때 터보펌프는 작동하고 있지 않기 때문에 그냥 일정한 전도를 가진 튜브에 지나지 않으며 이를 통한 초기배기(roughing)를 하고 있는 셈이 된다.
 - ㉣ 진공용기의 압력이 약 50 mTorr 정도가 되면 터보펌프를 가동시키면 된다. 이 때 기계식 펌프의 역할은 자동적으로 초기배기(roughing)에서 보조(backing)로 전환된다.
- 단, 선행작업에서 진공용기를 venting 하지 않아 현재 진공용기의 기압이 mTorr 이하일 경우는 이미 venting 이 된 상황이므로 ㉠과 ㉡의 과정을 거친 뒤
- ㉤ 터보펌프를 가동시키고 foreline valve 를 연다.
 - ㉥ 터보펌프의 속도가 안정이 되면 진공용기 내의 압력이 약 50 mTorr 정도 또는 그 이하임을 다시 한번 확인한 뒤 high vacuum valve 를 연다.

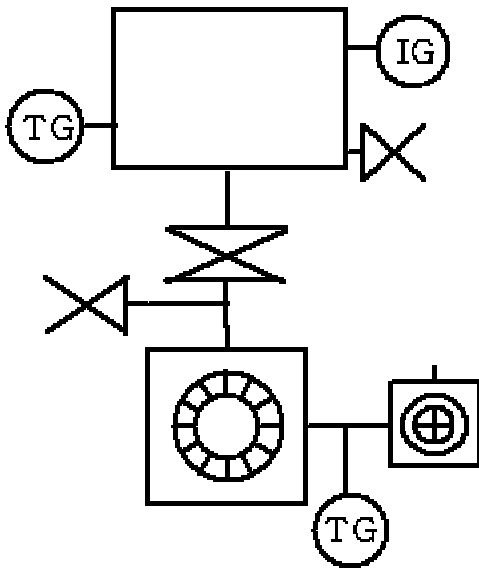


그림 3.32 정지해 있는 터보펌프를 통해 초기배기를 하도록 연결된 모습(roughing line 이 없음)

터보펌프 사용시 주의 사항

- 이물질 유입
- 충격
- 냉각수 흐름이 중단
- 오일 및 bearing 의 마모 확인

4-3) 분자드레그펌프(molecular drag pump)

지금으로부터 80 여년 전에 Gaede 가 처음으로 원리를 제시했는데 그의 특허 출원에 사용된 디자인은 그림 3.33 과 같다. 그리고 그림 3.34 는 또다른 초기 디자인을 보여 주고 있다. 제 2 장의 이론 부분에서 다루었듯이 분자들은 표면에 흡착되면 짧은 시간 표면에 머물다가 다시 증발하게 된다. 이 때 표면을 다시 떠나는 분자의 방향은 압력이 낮은 상태에서는 난반사를 하므로 방향성이 없다. 하지만 움직이는 표면에 흡착된 분자가 다시 표면을 떠날 때는 표면의 운동 방향으로의 운동량을 지니게 되어 분자를 한 쪽으로 몰게 되어 배기가 이루어지게 된다(Roth 1990). 10^{-6} Torr 에서 10^{-8} Torr 영역에서 작동하기 때문에 점성유동영역과 분자유동영역에서 동시에 작업을 해야하는 경우에 유리하다. 그림 3.36 처럼 터보펌프와 합쳐진 복합형 모델의 경우 흡입구 및 배출구의 압력이 수

Torr 에서도 작동이 가능하며 배기량 또한 같은 크기의 터보펌프에 비해 수십 배가 되며
최저도달압력(ultimate pressure)도 10^{-11} Torr 에 달하는 것도 있다(Tompkins 1991).

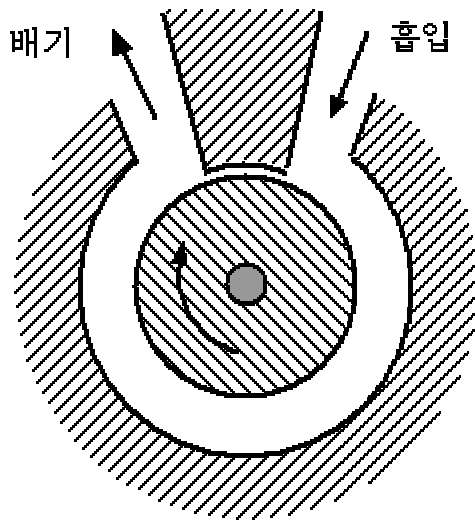


그림 3.33 Gaede 가 1909 년 특허를 신청하였을 당시 분자드레그 펌프의 디자인(Gaede 1909)

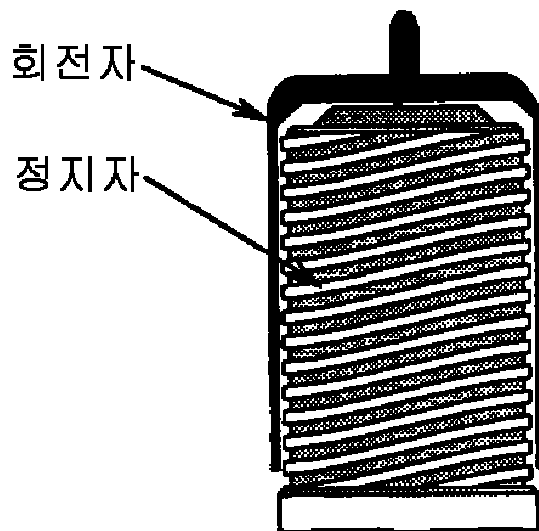


그림 3.35 현대적 디자인의 드레그펌프에서 정지자와 회전자

4-2) 크라이오펌프(cryogenic pump)

'Cryopump'라고도 부르는데, 터보펌프나 로타리펌프에서와 같이 기계적인 운동을 이용하지 않기 때문에 그에 따른 여러 가지 이점이 있다. 우선 오일을 전혀 사용하지 않아 오염의 염려가 전혀 없어 고진공뿐만 아니라 어느 면에서는 초고진공용으로도 사용이 가능하다. Compressor 작동으로 인한 소음이 좀 있긴 해도 펌프와는 떨어져 있기 때문에 냉온펌프 그 자체는 움직이는 부분이 전혀 없다. 운영에 있어 터보펌프보다는 까다롭기는 하지만 오염이 염려되는 진공작업에 적합하다. 하지만 원리 그 자체가 말해 주듯이 일종의 포획펌프(capture pump)이기 때문에 작동 중에는 대기중으로 배기를 하지 않아 기체 사용량이 매우 많은 작업에는 사용하기가 힘들다. 배기속도가 상당히 크고 이론적으로는 $10^6 \sim 10^7$ l/s 도 가능하여 핵융합로등에 사용이 가능하다(Roth 1976, O'Hanlon 1989, Hands 1982)

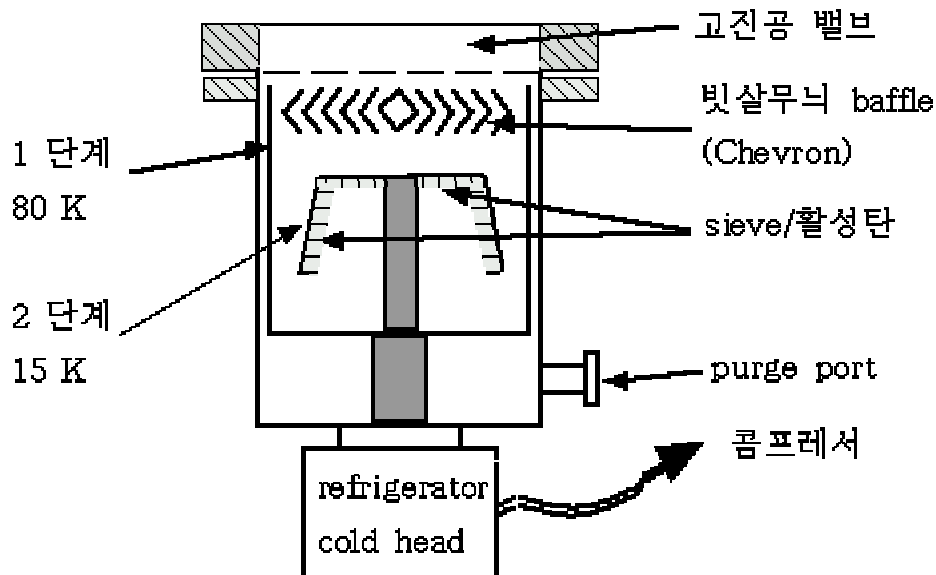
구조 및 원리

그림 3.37 냉온펌프의 구조

㉠ compressor 가 헬륨기체를 압축시키면서 발생하는 열은 외부로 방출하게 되는데 냉각은 공냉식 또는 수냉식 방법을 사용한다. 냉장고 뒷면이나 창문형 에어컨의 바깥부분에서 더운 열기를 느끼는 것도 이와 같은 현상 때문이다.

㉡ 압축된 헬륨이 진공용기 내부의 expander 에서 팽창하면서 주변의 부품들을 식히게 되는데 cold head(15K), baffle(80K)등을 냉각한다.

㉔ 냉각된 표면이 기체분자를 붙잡는데 있어서 냉온응축(cryo-condensation)과 냉온흡착(cryo-sorption)의 원리를 이용하는데 냉온응축의 경우는 증기를 차갑게 하여 액화시킨 다음 얼리는 방법을 말하는데 80K 단계에서 증기압이 낮은 물분자가 먼저 제거되고 다음이 N_2 , O_2 , Ar 등이다. 다음 단계는 냉온흡착을 이용하는데 15K 영역에서 담당하며 He, H_2 , Ne 등 저온에서도 증기압이 높은 기체들의 운동에너지를 빼앗아 표면에서 움직이지 못하게 하는 것이다. 그림에서처럼 안쪽 표면에 activated charcoal(활성탄)이 발려 있음을 보는데, 이는 물분자와 같이 1 단계에서 포획될 수 있는 기체들이 15K 영역에 달라붙게 되면 냉온흡착을 할 수 있는 표면적이 줄어들기 때문에 이를 방지하기 위한 목적이다.

사용 방법

㉕ 냉온펌프 내부를 로타리펌프로 초기배기(roughing)시킨다. 이 때 좋은 트랩(trap)이 두 펌프사이에 설치되어 로타리펌프 오일의 역류를 막아 주어야 오일을 사용하지 않는 냉온펌프의 장점을 살리게 된다. 또한 포획펌프이기 때문에 다른 고진공펌프와는 달리 보조펌프(backing pump)의 개념이 없다. 로타리펌프는 진공용기 및 냉온펌프 자체를 초기배기(roughing)하는데 사용되게 된다.

㉖ 냉온펌프의 roughing valve 를 잠근다.

㉗ Compressor 를 켜다. 온도를 초기 작동온도(약 20K)까지 내린다.

㉘ 진공용기를 초기배기(roughing)한다. 보통 고진공펌프로의 전환압력은 비교적 높은 약 0.5 Torr 이하에서 하는데 초기배기시 로타리펌프로부터의 오일분자의 역류를 막기 위해서는 어느 정도 초기배기가 되면 곧바로 냉온펌프로 전환하는 것이 좋다.

㉙ 진공용기의 roughing valve 를 잠근다(여기도 좋은 트랩을 사용한다.)

㉚ 주 밸브(main valve)를 열고 냉온펌프로 배기를 시작한다.

냉온펌프가 포획펌프(작동 중 배출이 없다)이므로 일정 사용시간이 지나면 펌프가 차게되어 배기속도가 심하게 떨어진다. 이 때가 되면 배기능력을 회복하여야 하는데 이 과정을 앞의 흡착펌프(sorption pump)에서 소개했듯이 '재생(regeneration)'이라 부르고 그 과정도 비슷하다.

재생과정

㉛ 주 밸브(high vacuum valve)를 잠그고 compressor 작동을 중지한다.

㉠ 건조질소(dry N₂ gas)를 집어넣어 펌프를 청소한다(purge). 또는 데워진 질소 개스를 사용할 수도 있다(약 120℃까지). 실온 또는 데워진 질소가 차가운 펌프 내부를 데움에 따라 표면으로부터 떨어져 나오는 각종 기체는 질소에 섞여 pressure relief valve(안전 valve)를 통하여 바깥으로 배기된다. 이 때 배출은 fumehood 등을 사용하여 유독가스 등에 조심하도록 하며 또한 이온 게이지(ion gauge)등이 켜져 있으면 갑자기 방출되는 많은 가스를 폭발시킬 염려가 있으니 조심해야 한다(예, 수소와 산소의 혼합기체).

㉡ 동시에 각종 트랩도 heating 을 통하여 재생을 시킨다.

㉢ 냉온펌프 내부 온도가 거의 실온으로 상승한 뒤 냉온펌프를 로타리펌프로 배기하면 재사용의 준비가 완료된다.

재생주기

표 3.4 냉온펌프의 기체에 따른 배기속도의 예

기체명	상대적 배기속도	배기속도(l/s)	총배기용량
			(Torr liters)
질소/산소	1	2500	2×10^6
수증기	2.6~4.0	8000	1×10^6
수소	1.1~1.4	3000	5×10^3
아르곤	0.7~0.9	2000	2×10^6
헬륨	0.3~0.6	1500	8×10^2

출처: 한양대학교 대학원 물리학과 안일신교수 2000년도 강의록